

NISTEP REPORT No.67

加速器技術に関する先端動向調査

(先端研究・先進医療を担う小型加速器開発の推進をめざして)

平成 13 年 6 月

文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

瀬 谷 道 夫
桑 原 輝 隆

Research on Frontier of Accelerator Technologies

- For Development of Compact Accelerators
for Advanced Studies and Medical Uses -

June 2001

Michio Seya, Terutaka Kuwahara

Science and Technology Foresight Center
National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

目次

| | | |
|------|------------------------------------|----|
| I | 調査の目的・概要およびまとめ | 3 |
| I-1 | 調査の背景、目的 | 3 |
| I-2 | 調査の概要 | 9 |
| 1 | 加速器科学各分野での研究開発の動向と加速器に求められる要件 | 9 |
| 2 | 加速器専門家人材育成状況と先進小型加速器の研究開発 | 12 |
| 3 | 加速器科学でのビーム使用状況、将来的なビームニーズ | 14 |
| 4 | 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界 | 16 |
| 5 | 先進加速技術等の抽出および先進小型加速器等の具体案の抽出 | 19 |
| 6 | 先進加速器技術等の研究・開発段階分類 | 21 |
| 7 | 先進小型加速器の実現予測 | 22 |
| 8 | 先進小型加速器等へのニーズ | 23 |
| 9 | 先進小型加速器等の実用化がもたらすマクロレベルでのメリット | 26 |
| 10 | 先進加速技術等の研究開発に関する米国、欧州および日本の取り組み、課題 | 27 |
| I-3 | 先進加速技術等の研究開発方策についての提言 | 29 |
| II | 加速器科学の動向と加速器 | 35 |
| II-1 | 各分野での動向および加速器に求められる要件 | 35 |
| 1 | 高エネルギー物理学 | 35 |
| (1) | 研究の動向 | 35 |
| 1) | 標準理論の形成と検証課題 | 35 |
| 2) | 力（相互作用）の大統一と超対称理論 | 39 |
| 3) | C P 不変性の破れの検証 | 40 |
| 4) | 現在進行中あるいは今後の高エネルギー物理学実験 | 41 |
| ① | ニュートリノ質量の有無の検証 | 41 |
| ② | クォークとレプトン間相互作用の精密調査 | 42 |
| ③ | C P 不変性の破れ（C P 非保存）の精密検証 | 42 |
| ④ | 「クォークの閉じ込め」の破れの検証 | 43 |
| ⑤ | 質量の起源を説明する基本的な粒子、ヒッグス粒子の探索 | 44 |
| ⑥ | 超対称粒子の探索 | 45 |
| A | 陽子・反陽子衝突実験 | 45 |
| B | 電子・陽電子衝突実験 | 46 |
| C | μ 粒子・反 μ 粒子衝突実験 | 46 |
| (2) | 高エネルギー物理学研究加速器に求められる要件 | 47 |
| 2 | 原子核（素粒子・原子核）物理学 | 50 |
| (1) | 研究の動向 | 50 |
| 1) | 低エネルギー核物理研究 | 50 |

| | |
|--|----|
| 2) 中間エネルギー原子核物理研究 | 51 |
| ① 不安定原子核研究 (超重元素研究を含む) | 52 |
| ② 原子核内部構造および原子核内の核力研究 | 53 |
| ③ 中性子反応研究 (中性子核物理学) | 54 |
| ④ 中間子反応研究 (中間子核物理学) | 54 |
| [π 中間子および μ 粒子利用] | 55 |
| 3) QCD 原子核物理 (素粒子・原子核物理) 研究 | 56 |
| ① 核力および核子構造研究 | 56 |
| ② クォーク原子核物理研究 | 57 |
| A 高エネルギービームによる原子核衝撃研究 | 57 |
| B ハイパー核研究 (K 中間子利用) | 58 |
| ③ 核物質研究 | 58 |
| (2) 原子核物理学研究加速器に求められる要件 | 60 |
| 3 エネルギー科学 | 62 |
| (1) 研究の動向 | 62 |
| 1) 放射性元素の消滅処理研究 | 62 |
| 2) ミューオン触媒核融合研究 | 66 |
| 3) 重イオン慣性核融合研究 | 68 |
| (2) エネルギー科学研究用加速器の要件 | 71 |
| 4 物質・材料科学 | 73 |
| (1) 研究の動向 | 73 |
| 1) 物質・材料科学で使用する各種ビームと加速器 | 74 |
| ① 電子ビームとその二次ビーム | 74 |
| A 制動放射 | 74 |
| B 中性子ビーム | 75 |
| C 陽電子ビーム | 75 |
| D シンクロトロン放射光 (放射光) | 76 |
| E 自由電子レーザー | 78 |
| ② 陽子、重イオンビームとその二次ビーム | 80 |
| A 不安定核ビーム | 80 |
| B 中性子ビーム | 81 |
| C π 中間子ビーム / μ 粒子ビーム | 82 |
| D 陽電子ビーム | 82 |
| 2) 物質・材料科学分野での動向 | 83 |
| ① 物質・材料の構造解析 (静的および実時間挙動解析) 研究 | 84 |
| A 静的原子配列などの探索 | 84 |
| B 動的な原子配列などの変化の探索: 「その場観察 (実時間挙動解析)」 ... | 86 |
| ② 表面・界面構造および薄膜構造の解析 | 87 |
| A 静的原子配列などの探索 | 87 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| B 動的な原子配列などの変化の探索：「その場観察（実時間挙動解析）」… | 88 |
| ③ 物質・材料の電子状態の解析（電子物性解析）… | 88 |
| ④ 極限条件下での物質・材料の解析… | 89 |
| ⑤ 極微量分析… | 89 |
| ⑥ 物質・材料の創製・加工… | 89 |
| (2) 物質・材料科学用加速器に求められる要件… | 91 |
| 5 生命科学… | 93 |
| (1) 研究の動向… | 93 |
| 1) 放射線生物学… | 93 |
| 2) 細胞生理・生体組織機能解明研究… | 94 |
| 3) 構造生物学… | 95 |
| (2) 生命科学研究加速器の要件… | 97 |
| 6 医療利用… | 99 |
| (1) 医療利用の動向… | 99 |
| 1) (腫瘍などの) 治療利用… | 99 |
| 2) 診断医学（核医学）用 R I 製造… | 105 |
| 3) シンクロトロン放射（X線）による診断利用研究… | 106 |
| (2) 医療利用加速器に求められる要件… | 108 |
| 1) 放射線（ビーム）治療用加速器… | 108 |
| 2) 核医学用の R I 標識製造用加速器… | 109 |
| 3) 診断映像撮影用放射光源… | 109 |
| II-2 各分野での加速器の要件のまとめ… | 111 |
| II-3 各分野での加速器研究者の人材養成について… | 118 |
| III 加速器ビーム利用の現状とニーズ… | 123 |
| III-1 加速器ビーム利用調査の概要など… | 123 |
| III-2 加速器ビーム利用の現状および将来ニーズの概要… | 126 |
| III-3 加速器ビーム毎の利用の現状および将来ニーズ… | 133 |
| 1 電子ビーム… | 133 |
| 2 陽子ビーム… | 137 |
| 3 重イオンビーム… | 141 |
| 4 陽電子ビーム… | 144 |
| 5 放射光… | 147 |
| 6 コヒーレント光子ビーム（自由電子レーザー、コヒーレント放射光など）… | 150 |
| 7 中性子ビーム… | 153 |
| 8 μ 粒子ビーム… | 156 |
| 9 中間子（ π 中間子、K 中間子）ビーム… | 157 |
| 10 反陽子ビーム… | 158 |
| 11 不安定原子核ビーム… | 159 |

| | | |
|-----|---|-----|
| Ⅲ－４ | 加速器ビームニーズのまとめ | 162 |
| Ⅳ | 高周波加速器およびビーム冷却に関する研究開発状況 | 167 |
| Ⅳ－１ | 高周波加速器に関する研究開発状況 | 167 |
| １ | シンクロトロン | 169 |
| （１） | 電子シンクロトロン | 170 |
| １） | エネルギーフロンティア電子・陽電子（シンクロトロン）衝突器 | 170 |
| ２） | 高エネルギー電子シンクロトロン | 172 |
| ３） | 放射光電子蓄積リング／中間・高エネルギー電子シンクロトロン | 172 |
| ４） | 電子シンクロトロン技術での硬X線放射光源小型化の限界 | 178 |
| （２） | 陽子シンクロトロン | 179 |
| １） | エネルギーフロンティア陽子・（反）陽子（シンクロトロン）衝突器 | 179 |
| ２） | 高エネルギー陽子シンクロトロン | 181 |
| ３） | 中間エネルギー陽子シンクロトロン | 182 |
| ① | 医療用陽子シンクロトロン | 182 |
| ② | 中性子駆動用陽子蓄積リング | 183 |
| ４） | 陽子シンクロトロン技術での 200MeV 級シンクロトロン小型化の限界 ... | 184 |
| （３） | 重イオンシンクロトロン | 185 |
| １） | 高エネルギー重イオン・重イオンシンクロトロンおよび衝突器 | 185 |
| ２） | 中間エネルギー重イオンシンクロトロン | 186 |
| ３） | 重イオンシンクロトロン技術での 200MeV/n 級シンクロトロン小型化の限界 | 187 |
| ２ | サイクロトロン | 188 |
| （１） | 電子サイクロトロン（マイクロトロン） | 189 |
| １） | 電子サイクロトロン技術による 1GeV 級電子加速器小型化の限界 | 189 |
| （２） | 陽子・重イオンサイクロトロン | 189 |
| １） | 大型サイクロトロン（リング（セクター分離型）サイクロトロンなど） ... | 189 |
| ２） | 中型サイクロトロン | 193 |
| ３） | 小型サイクロトロン | 194 |
| ４） | 陽子・重イオンサイクロトロン技術での 200MeV/n 級サイクロトロン小型化の限界 | 194 |
| ３ | 線形加速器 | 195 |
| （１） | 電子線形加速器 | 195 |
| １） | エネルギーフロンティア電子・陽電子 線形衝突器（リニアコライダー） | 195 |
| ２） | 高エネルギー電子線形加速器 | 200 |
| ３） | 中間・低エネルギー電子線形加速器 | 200 |
| ４） | 電子線形加速器技術による 1GeV 級電子線形加速器小型化の限界 | 201 |
| （２） | 陽子・重イオン線形加速器 | 202 |
| １） | 中間エネルギー陽子線形加速器 | 202 |
| ２） | 低エネルギー陽子・重イオン線形加速器 | 204 |

| | |
|--|-----|
| 3) 陽子・重イオン線形加速器技術による 200MeV/n 級線形加速器小型化の限界 | 204 |
| IV-2 ビーム冷却に関する研究開発状況 | 205 |
| 1 放射冷却 | 205 |
| 2 ストカスティック（確率）冷却 | 206 |
| 3 電子ビーム冷却 | 207 |
| 4 レーザー冷却 | 208 |
| 5 エネルギー損失（アイオニゼーション）冷却 | 209 |
| V 先進加速技術等の研究開発状況 | 217 |
| V-1 先進加速技術等の定義とその研究開発の意義 | 217 |
| V-2 先進加速技術等による小型加速器等研究開発状況 | 224 |
| 1 高周波極限加速技術による小型加速器研究開発状況 | 224 |
| （1）電子の高周波極限（Wバンド（ミリ波））加速技術 | 224 |
| （2）陽子（重イオン）シンクロトロン的小型化極限技術 | 225 |
| 2 非高周波高勾配加速技術、小型放射光源技術による 小型加速器等の研究開発状況 | 227 |
| （1）非高周波高勾配加速技術による電子加速 | 227 |
| 1) ビーム励起型プラズマ加速 | 229 |
| 2) レーザー励起型プラズマ加速 | 231 |
| ① レーザー励起プラズマ航跡場加速 | 231 |
| ② レーザービート波励起プラズマ波加速 | 234 |
| ③ 自己変調レーザー励起プラズマ波加速 | 236 |
| 3) 逆チェレンコフレーザー加速 | 239 |
| 4) 直交場加速 | 242 |
| ① レーザー（横波型）直交場加速 | 242 |
| ② プラズマ（縦波型）直交場加速 | 244 |
| 5) その他 | 247 |
| ① 真空中での航跡場（ビーム航跡場／レーザー航跡場）加速 | 247 |
| ② 2ビーム加速（Two Beam Acceleration ; TBA） | 249 |
| ③ 逆スミス・パーセル加速 | 250 |
| ④ 自動共鳴加速 I（Autoresonance Acceleration I） | 250 |
| ⑤ 逆自由電子レーザー加速 | 251 |
| （2）非高周波高勾配加速技術による陽子・重イオン加速 | 252 |
| 1) 電子リング加速 | 253 |
| 2) レーザー励起型プラズマ加速 | 255 |
| 3) レーザー衝撃波加速 | 257 |
| 4) 直交場加速 | 260 |
| ① レーザー（横波型）直交場加速 | 260 |

| | |
|---|-----|
| ② プラズマ（縦波型）直交場加速 | 263 |
| 5) その他 | 265 |
| ① 自動共鳴加速Ⅱ（Autoresonance Acceleration Ⅱ） | 265 |
| ② Converging Guide Acceleration (CGA または Space-Charge Wave Acceleration) | 266 |
| (3) 小型（硬X線）放射光発生技術 | 267 |
| 1) レーザーアンジュレータ放射光発生 | 268 |
| VI 先進小型加速器等の実用化予測および実用化後の想定される使用 | 275 |
| VI-1 先進小型加速器等の開発予測調査およびその結果 | 275 |
| 1 小型加速器等の実用化の可否および実用化予測時期結果 | 277 |
| (1) 高周波加速小型電子加速器 | 278 |
| 1) 実用化の可否に関する加速器研究者の意見など | 278 |
| 2) 実用化時期予測結果 | 278 |
| (2) 高周波加速小型陽子・重イオン加速器 | 279 |
| 1) 実用化の可否に関する加速器研究者の意見など | 279 |
| 2) 実用化時期予測結果 | 279 |
| (3) 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 | 280 |
| 1) 実用化の可否に関する加速器研究者の意見など | 280 |
| 2) 実用化時期予測結果 | 280 |
| (4) 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 | 282 |
| 1) 実用化の可否に関する加速器研究者の意見など | 282 |
| 2) 実用化時期予測結果 | 282 |
| (5) 小型放射光発生装置 | 284 |
| 1) 実用化の可否に関する加速器研究者の意見など | 284 |
| 2) 実用化時期予測結果 | 284 |
| 2 実用化予測時期の総括および研究開発段階 | 285 |
| 3 他の予測調査結果との比較 | 286 |
| VI-2 先進小型加速器等へのニーズと実用化後に想定される使用、種々の利点 | 289 |
| 1 先進小型加速器等へのニーズ | 289 |
| 2 先進小型加速器等の想定される使用 | 293 |
| (1) 高周波極限（Wバンド）加速小型電子加速器 | 293 |
| (2) 超小型陽子・重イオンシンクロトロン (高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器) | 294 |
| (3) 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 | 297 |
| (4) 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 | 297 |
| (5) レーザーアンジュレーター（硬X線）放射光発生装置 | 298 |
| 3 先進小型加速器等の想定される複合的な使用 | 301 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| VII 先進加速技術の研究開発方策についての具体的提言など | 307 |
| VII-1 加速器科学における先進加速技術等開発の意義および必要性 | 307 |
| VII-2 先進加速技術等の研究開発に関する米・欧および日本の取り組みなど | 309 |
| 1 米国および欧州における取り組み | 309 |
| (1) 米国 | 309 |
| (2) 欧州 | 312 |
| 2 日本における取り組みと課題 | 313 |
| VII-3 先進加速技術等の研究開発方策を考える上での要件のまとめ | 314 |
| VII-4 実証機開発・普及をめざした研究開発体制の検討 | 316 |
| 1 研究開発体制案 | 316 |
| [体制案 1 : 多研究機関参加・研究開発委員会主導方式] | 316 |
| [体制案 2 : 分散型研究所方式] | 317 |
| [体制案 3 : 多研究機関参加・政府組織主導方式] | 318 |
| 2 研究開発体制案の比較評価 | 319 |
| VII-5 先進小型加速器技術等の研究開発方策についての具体的提言 | 321 |

添付資料 I-1 先端科学技術動向調査委員会（加速器科学）委員および活動

添付資料 I-2 日本の加速器科学関係予算調査

添付資料 II 高エネルギー物理学、原子核物理学関係研究機関略語・加速器など

参考資料 1 加速器の原理（物理学辞典（改訂版；培風館）より）

参考資料 2 加速器の原理と技術の発達史の展望

参考資料 3 加速器科学関連用語集

I 調査の目的・概要およびまとめ

I 調査の概要

I-1 調査の背景、目的

科学技術政策研究所（以後、「当研究所」ともいう）の先端科学技術動向調査は、国の科学技術政策策定に資するため、科学技術の各分野における最先端の研究状況や今後の発展の方向性などを調査し、必要に応じて具体的な提言を行うことを目的としている。今般の先端科学技術動向調査においては、加速器科学の共通基盤となっている加速器技術を対象とした。加速器科学とは、加速器（あるいは加速器で発生させる各種ビーム）を用いた研究分野の全体を総称するものであり、また、加速器とは、荷電粒子を電磁氣的力により加速する装置をさすものである。

本調査（加速器科学に関する先端動向調査）においては、加速器ビーム利用が進展している物質・材料科学、生命科学、医療利用分野で要望される高性能な小型加速器の研究・開発を意識し、**加速器の大幅な小型化に寄与するキーテクノロジー（先進加速技術）の抽出を行うとともに、その技術の研究開発状況を把握し、研究開発の支援策を探ることを目的**とした。その結果、これまでの大型加速器の基盤技術である高周波加速技術における（研究・開発段階にある）極限的な技術、高周波加速とは異なる新たな粒子加速原理に基づく非高周波高勾配加速技術や、レーザー・逆コンプトン散乱による放射光発生技術が抽出された。（これらを総称して先進加速技術（定義については5頁参照）と呼ぶ。）また、先進加速技術研究者が極めて少ないこと、米国に比べて組織的な取り組みが遅れていることなどを踏まえて、先進加速技術研究者の属する多数の研究機関が運営母体機関の下に参画する共同研究開発方式の体制で、開発段階にある先進小型加速器（小型放射光源含む）の実証機開発を提言した。なお、本調査は、当研究所に設置した専門家で構成される「先端科学技術動向調査委員会」の指導の下に行ったものであり、その構成メンバーおよび活動について添付資料-1に示す。

現在の科学技術において、加速器科学に包含される分野として、高エネルギー物理学（または素粒子物理学）、原子核物理学、エネルギー科学、物質・材料科学、生命科学、医療利用（あるいは医学利用）などが挙げられ、学術基礎研究、工学研究・利用あるいは医療利用など民生利用も含む大きな分野を形成してきていることがわかる（表-I-1-1参照）。また、添付資料I-2に示すように、本調査の一環として、加速器科学に関する予算のうち加速器設備建設や維持費などの大まかな額を把握する調査も実施したが、国の年間予算は700億円を上回る規模になっている。**これらの加速器科学に包含される広範な分野では、共通装置である加速器の発展が、直接的に研究や技術の進展に影響することとなる。加速器科学のこの特徴を考えると、共通装置である加速器あるいは共通基盤技術である加速器技術の研究開発状況を把握し、特に、物質・材料科学、生命科学、医療利用などでの研究利用、産業利用あるいは民生利用に大きな発展をもたらすキーテクノロジーを抽出するとともに、その研究・開発支援のあり方を探ることは非常に重要な課題である。**

これまで、**各種ビームを供給する加速器は、高エネルギー物理学あるいは原子核物理学研究の必要性から開発されてきたサイクロトロン、シンクロトロンや線形加速器のような高周波（RF：Radio Frequency：通常「マイクロ波」と呼ばれている）加速器が主であり、現在の先端的研究の多くは、ある程度高いエネルギーのビームが使用され、それを供給できるものは高周波加速器の大型のものである（なお、静電加速器なども含めて、加速器の原理を参考資料1.に示す）。我が**

表－I－1－1 加速器科学が包含する研究分野と研究内容

| 加速器科学分野 | 小項目 |
|-----------------------|--|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | 1. 質量起源粒子（ヒッグス粒子）の探索 2. CP不変性の破れの検証（Bファクトリー） 3. ニュートリノ質量検証 4. クォーク・レプトン間相互作用の精密探査 5. クォーク閉じ込めの破れの検証 6. 超対称粒子の探索、他 |
| 原子核物理学 | 1. 低エネルギー核物理研究 ①原子核（励起）構造研究 ②原子核反応研究（素粒子核反応研究含まず） 2. 中間エネルギー原子核物理研究 ①不安定原子核（中性子過剰核、陽子過剰核、超重元素など）研究 ②原子核内部構造および原子核内での核力研究 ③中性子反応研究（中性子核物理学） ④中間子反応研究（中間子核物理学） 3. QCD原子核物理研究 ①核力および核子構造研究 ②クォーク原子核物理研究、他 |
| エネルギー科学 | 1. 放射性元素の消滅処理研究 2. 重イオン慣性核融合研究 3. ミューオン核融合研究 4. その他（プラズマ理工学研究など） |
| 物質・材料科学 | 1. 物質構造解析（結晶、非晶質などの原子配列構造解析） 2. 物性研究（超伝導、磁性など）・電子状態解析（原子物理を含む） 3. 物質表面（界面）研究 4. 物質材料内の欠陥診断・極微量不純物分析 5. 極限環境下の物質構造・物性研究 6. ビーム物質相互作用研究・照射による改質研究 7. 新材料開発 ①機能性材料創製 ②核融合炉材料開発 ③原子炉用耐放射線材料開発 ④耐宇宙環境材料・半導体などの開発 8. ビームによる微細加工（リソグラフィなど）研究 9. RI核種製造・核化学研究・放射化学研究、他 |
| 生命科学 | 1. 放射線生物学 ①遺伝学研究（DNA損傷研究など） ②変異種研究 2. 細胞生理・生体組織機能解明研究（PETを用いる） 3. 構造（分子）生物学 ①蛋白質構造解析 ②生体高分子（核酸、脂質、高分子糖など）構造解析、他 |
| 医療利用 | 1. がん治療（電子線、X線、陽子線、重粒子線） 2. 医療用RI製造 3. 画像診断研究 ①心臓冠状動脈造影（コロナリーアンジオグラフィ） ②単色X線CT、他 |
| その他 | 1. ビーム制御・ビーム物理研究 2. その他（自由電子レーザー発振、加速器研究など） |

国における高エネルギー物理学や原子核物理学用の大型加速器は、新しい法則・原理の発見、未知の現象の予測・発見などを世界的な（競争的）共同作業として行うネットワークに組み込まれて、世界水準の研究成果を生み出しており、人類の知的資産の拡充に貢献してきている。今後も、相応な国際的な分担・協力が求められるとともに、我が国がリーダーシップをとる大型加速器施設も建設され、知的資産の拡充に貢献するものと考えられる。

一方、近年、加速器ビームの利用は、物質のナノメーター以下の原子配列を探る微細構造解析など物質・材料科学や、ポストゲノム研究の中心の一つである蛋白質やその他の生体高分子の構造解析（構造生物学または分子生物学）など生命科学、あるいはがん治療や医療診断への利用拡大が進んできているが、これは、これまでに発展してきた学術研究用のものか、あるいはそれと基本的には同じ構造の大型加速器を拠点としているものである。物質・材料科学や生命科学は、産業面あるいは民生利用面における科学技術の基盤となっている分野であり、加速器ビームがこれらの分野において、物質の構造やその性質・機能などを探る極めて有効なプローブとして利用されている。また、逆に言えば、放射光などの加速器ビームの利用拡大が無ければ、これらの先端的研究の進展は期待できない。医療利用においては、陽子や重イオンビームを使ったがん治療が、身体的な負担が少なくＱＯＬの観点から優れた治療法であることが認識されつつある。また、現段階では大型放射光施設でしか研究できていない、ヨウ素静脈注射後の硬Ｘ線を用いるエネルギー差分法による心臓の冠状動脈造影（コロナリーアンジオグラフィー）は、医療診断あるいは心臓疾病予防の面で画期的な効果を発揮するものと考えられており、一般病院への設置が将来的な目標とされている。このエネルギー差分法による血管造影は、心臓のみならず脳血管系や全身の血管系の診断にも使え、高齢化社会の疾病予防にも威力を発揮するものと考えられている。

加速器ビームの利用については、上のように今後の普及が期待されているが、物質・材料科学や生命科学あるいは医療利用分野においては、その分野で使用する他の分析機器や診断・治療機器類と比較すると、加速器が極めて規模の大きなものとなっている。物質・材料科学や生命科学研究の更なる発展のためには、その研究領域の広さからすると、いくつかの少ない拠点（センター）ばかりではなく、日本全国の関連するあらゆる研究機関の参加を可能とすることが肝要である。特に、医療面では、優れた治療・診断を全国のあらゆる地域で受けられることが最終的な目標となる。この観点からすると、現在の大型加速器に近いビーム性能（発生するビームエネルギーがある程度高い）を、非常に小さな規模で実現する、新しい加速器技術の開発・実用化が重要な課題となっている。

なお、上の加速器利用の他、低いビームエネルギー領域においては、一般病院での電子線治療や、工業生産におけるイオン照射やイオン注入による機能性材料の製造などでの利用が普及している。これらは既に広く普及しているものであり、本調査ではこれらの利用については扱っていない。

本調査においては、上に挙げた課題などを踏まえて、最初に掲げた目的とし、以下のような手順で実施した。

まず、加速器科学が包含する全分野での動向、加速器ビームの利用状況、将来的なビームのニーズおよび現在の主流加速器である高周波加速器に関する研究開発状況を把握する。この際、加

速器科学各分野での加速器自体の研究開発を行う専門家人材の状況についても把握するとともに、これまで大型加速器の開発が中心で、高性能な小型加速器が開発されてこなかった背景についても調べる。(1～4)

| | |
|--|--|
| 1 加速器科学の研究開発の動向と加速器の要件 (Ⅱ章) | 加速器科学の全分野における研究開発の動向はどのよう になっており、各分野で加速器に求められる要件の違い は如何なるものか |
| 2 加速器専門家人材育成状況と先進小型加速器の研究開発 (Ⅱ章、Ⅳ章) | 加速器科学各分野での加速器自体の研究開発を行う専門 家人材の育成状況と加速器開発の動向との関連はどのよ うになっているか |
| 3 加速器科学でのビーム使用状況、将来的なビームニーズ (Ⅲ章) | 加速器科学の全分野で各種加速器ビームがどのように使 用され、また、将来的なビームニーズは何か |
| 4 高周波加速器研究開発の現状および小型化に関する技術の限界 (Ⅳ章) | 高周波加速器に関する現状の研究開発課題は何か、また 加速器の小型化に関する技術の限界はどのようになっ ているか(高周波加速技術で先進小型加速器は可能か) |

上の点の把握においては、求める小型加速器(先進小型加速器；定義を次頁に示す)の規模および性能として、以下の目安のものを念頭においた。

| 大型高周波加速器に近い性能をもつ新しい小型加速器の目安 | |
|--|--|
| <div> <div> <div>加速器等の大きさ</div> <div>加速器等の全重量</div> <div>ビームエネルギー</div> <div>電子エネルギー</div> <div>陽子・重イオンエネルギー</div> <div>放射光子エネルギー</div> </div> <div> <div>:</div> <div>:</div> <div>:</div> <div>:</div> <div>:</div> <div>:</div> </div> <div> <div> <div>おおよそ縦5 m×横5 m×高さ3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの</div> <div>おおよそ 10 ton 程度</div> <div>1 GeV 程度</div> <div>200 MeV/n 程度</div> <div>30～100 keV 程度 (硬X線)</div> </div> </div> </div> | |

この目安は、医療利用については、全国いたるところの一般病院への設置を可能とさせる規模、大学やその他の研究機関あるいは企業では、ごく普通の実験室に（必要に応じて研究室単位あるいは部門単位で）設置できる規模のものである。なお、当研究所で実施した第5回（1991年）および第6回（1996年）技術予測調査においては、「エネルギー200MeV で直径5 m以内の超小型医療用加速器が実用化される [実用化予測時期 2004 年（第5回）、2009 年（第6回）]」という課題があり、目安としてはほぼ同じものである。

なお、上の1～4の事項の把握において明らかになるが、この目安は、示されている中間エネルギーのビームを供給できる従来型の高周波加速器に比べて、大きさ、重量ともに数分の1～1/10以下のものとなっている。ちなみに、現在の高周波加速器の場合、電子で1 GeV 程度のエネルギーを達成するには、Sバンド線形加速器では100m 前後の長さのものが、シンクロトロンでは直径10m 以上、重量数10 トン程度（東京大学の電子シンクロトロン（既に閉鎖）並み）が必要となる。また、陽子で200 MeV 程度のエネルギーを達成するためには、サイクロトロンでは医療用に開発された最軽量のもので約200 トン程度のもの（通常2,000 トン程度の大型のもの）が、線形加速

器では数 10m のものが、シンクロトロンでは周長 20m～30m 程度のものが必要とされる。また、30～100 keV 程度の光子エネルギーをもつ放射光については、現在、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の Photon Factory（PF）や PF-AR あるいは（財）高輝度光科学研究センターの SPring-8 のような大型放射光施設でのみ発生させることが可能である（V 章、213 頁参照）。また、IV 章に示すように、現在一般的に使われている大型高周波加速器を構成する確立された高周波技術については、上記の目安までのドラスティックな小型化は概して困難であり、高周波加速技術のうちこれまであまり研究されていない高勾配のものなども含めて、新たな加速技術の研究開発が必要となることがわかる。

本調査報告においては、高周波技術で小型化に大きく寄与する新しい加速技術および新たな加速原理に基づく高勾配の加速技術を「先進加速技術」といい、その技術による小型加速器を「先進小型加速器」という。また、「先進加速技術」に、従来のシンクロトロン放射光子と同程度のエネルギーをもつ放射光を異なる原理で装置を格段に小型化して発生させる放射光源技術を合わせて「先進加速技術等」と呼び、「先進小型加速器」と上記の放射光源技術による小型放射光源を合わせて、「先進小型加速器等」と呼ぶこととする。

次に、本調査における主題である、加速器の大幅な縮小に寄与する技術の抽出およびその技術による小型加速器等（先進小型加速器等）の提案の抽出を行う。

| | |
|---|--|
| 5 先進加速技術等の抽出および先進小型加速器等の具体案の抽出 (IV、V 章) | ・現在の大型加速器に近い性能をもつ、4 頁の目安規模の、（高性能の）小型加速器を構成する加速技術（先進加速技術）にはどのようなものがあるか ・抽出された先進加速技術に基づく小型加速器（先進小型加速器）の具体的な提案はどのようなものになるか |
|---|--|

また、抽出された先進加速技術に基づく小型加速器の具体案について、研究開発段階を整理するとともに、その実現予測時期を把握する。このことにより開発の重点投資対象や開発期間の目安に関する有用な情報が得られる。

| | |
|--------------------------------------|---|
| 6 先進小型加速器等の研究開発段階分類 (VI 章) | 各先進小型加速器の研究開発段階（研究段階か、実証機開発段階に進めるか）の分類はどのようになるか |
| 7 先進小型加速器等の実現予測 (VI 章) | 各先進小型加速器が実現する時期はいつ頃になると予測されるか |

更に、先進小型加速器等に関する現在の加速器ビームユーザーの期待（ニーズ）や具体的利用の方法を明らかにし、それらを考察することで、日本全体のマクロレベルでのメリットも把握する。

| | |
|---|--|
| 8 先進小型加速器等へのニーズ (VI 章) | 現在の加速器ビームユーザーの、先進小型加速器に対する期待（ニーズ）の大きさはどの程度か、また、そのメリットはどのようなものか |
| 9 先進小型加速器実用化がもたらすマクロレベルでのメリット (VII 章) | 先進小型加速器の実用化がもたらす、日本全体としてのメリットは何か |

同時に、先進加速技術の研究開発に対する日本、米国および欧州の取り組みを比較することで、有効な具体的提言を行う上での示唆を得る。

| | |
|---|---|
| 10 先進加速技術の研究開発に関する日本、米国、欧州の取り組み (Ⅶ章) | 先進加速技術の研究開発に関して、日本、米国および欧州の研究費、研究開発体制などを比較するとどのようになるか |
|---|---|

以上の項目について調査した結果を基に、先進加速技術等の研究開発方策について、具体的な提言を行う（先進加速技術等の研究開発方策についての提言（Ⅶ章））。

I－2に、上記の1～10に関する結果の概要を、また、それに基づく先進加速技術の研究開発に関する具体的提言についてはI－3にまとめる。

なお、本調査においては、加速器科学各分野において、ビームエネルギーの高低やビーム強度について統一された定義がされないまま使われている現状を踏まえ、ビームのエネルギーの高低およびビーム強度を示すものとして、表－I－1－2および表－I－1－3のような仮の定義を与えている。加速器科学全般を捉える際には統一的な用語の定義が強く望まれるものであり、表－I－1－2および表－I－1－3の見直しも含めて今後の議論を期待したい。

表－I－1－2 ビームエネルギーの高低についての仮定義

| | 電子・陽子 | 重イオン |
|---------|----------------|------------------------|
| 低エネルギー | ～ 140MeV | ～ 数 10MeV/n |
| 中間エネルギー | 140MeV ～ 数 GeV | 数 10MeV/n ～ 数 100MeV/n |
| 高エネルギー | 数 GeV ～ | 数 100MeV/n ～ |

（なお、表中 MeV/n は、核子あたりのエネルギーを表す）

表－I－1－3 ビーム強度の大小についての仮定義

| | 電流値 (多数のパルスを含む平均値) |
|------|-----------------------|
| 極小強度 | ～ 1 nA |
| 小強度 | 1 nA ～ 1 μA |
| 中強度 | 1 μA ～ 1 mA |
| 大強度 | 1 mA ～ 1 A |
| 極大強度 | 1 A ～ |

I-2 調査結果の概要

1 加速器科学各分野での研究開発の動向と加速器に求められる要件（II章）

本調査においては、まず、加速器科学が包含する高エネルギー物理学、原子核物理学、エネルギー科学、物質・材料科学、生命科学、医療利用の各分野における先端研究などの動向およびその分野で加速器に求められる要件を調査、整理した（II章）。なお、II章でのまとめについては、加速器専門家人材育成状況の観点でも行った。

その結果として、上の各々について、次のようにまとめられる。

表-I-2-1 加速器科学の研究開発動向と加速器に求められる要件

| | |
|-----------------------|--|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | 研究・利用目的： 物質の究極的構造、自然界を支配する法則(力)の解明 高エネルギー（フロンティアエネルギー）の粒子ビームなどを用いて、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）の解明をめざす |
| | ビームへの要求： 基本粒子が主、フロンティアエネルギー、大強度、高品質 ①電子、陽子などの基本粒子や構造が簡単な粒子ビームあるいは光子ビームで、フロンティアエネルギーでの実験や特定の素粒子反応に関する実験ができるエネルギーをもつこと ②粒子（あるいは光子）ビームどうしの衝突で目的とする現象（反応断面積が小さい現象）が高い頻度で発生する衝突特性（大きなルミノシティ：大きなビーム強度および小さいエミッタンス）をもつこと |
| | 加速器の要件： 実績の積まれた加速技術をベースとする大規模なもの A. 上記②により、ビームの精密な制御のため、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要がある B. これまで十分実績の積まれた加速技術をベースとして、上記①のように非常に高いエネルギーをめざすため、加速器は大規模なものとなる |
| 原子核物理学 | 研究・利用目的： 原子核(核子多体系)の構造や性質の解明 低エネルギーから中高エネルギーの粒子ビームなどを用いて、強い相互作用で結びつく核子多体系としての原子核の構造や性質およびそれらが発現するメカニズムの解明や原子核に様々な粒子を衝突させた際に起こる反応（核反応）現象の解明をめざす。また、原子核その際に生じる中間子などの二次粒子を用いて、様々な物理現象の解明をめざす。（より、本質的には、原子核の原子核の構造や性質を素粒子物理学が解明する、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）との関連での理解をめざす。） |
| | ビームへの要求： 多種類の粒子・光子、エネルギー、強度、品質とも多様 ①様々な重イオンや陽子、中性子あるいは電子ビームなどで、低エネルギーから高エネルギーまでの幅の広い領域のエネルギーが使用できること（反応断面積の小さい現象を捉える場合は） ②ある程度大きなビーム強度を有すること ③長時間（数時間から数日）にわたり安定的にビームを供給できること |
| | 加速器の要件： 実績の積まれた加速技術をベースとするやや大型のもの A. 原子番号の大きな（非常に重い）重イオンを加速する場合や高エネルギーの陽子ビームを用いる場合は、高エネルギー（素粒子）物理学研究と同様に、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要があり、加速器は大型のものとなる B. 上記のように非常にバラエティーに富んだビームを使うことより、様々な加速器が使える |

（次頁に続く）

表一 I - 2 - 1 加速器科学の研究開発動向と加速器に求められる要件

| | |
|----------------|--|
| エネルギー科学 | <p>研究・利用目的：核エネルギーの利用研究 加速器で発生させる中間エネルギーの（主として大強度の）粒子ビームを用いて、原子核の変換（核破砕、核分裂、核融合など）を起こし、発生するエネルギーなどの利用をめざす。この研究には、放射性原子核の安定原子核などへの変換（消滅処理研究）も含まれる。</p> <p>ビームへの要求：陽子、重イオンが主、中間エネルギー、超大強度、高品質 ①陽子あるいは軽重イオンのビームで比較的高いエネルギー（中間エネルギー）で、格段に大きなビーム強度を有すること ②非常に長時間（数ヶ月程度）にわたり安定的にビームを供給できること</p> <p>加速器の要件：実績の積まれた加速技術をベースとするやや大型のもの A. 上記の①および漏れビームによる放射化を抑えることなどのためビームの精密な制御が必要であり、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要がある B. これまで十分実績の積まれた加速技術をベースとして、軽重イオンや陽子などで中高エネルギーのものが必要であるため、加速器は大型のものとなる</p> |
| 物質・材料科学 | <p>研究・利用目的：物質・材料の構造、性質などの解明、新たな物質の創成 加速器で発生させる粒子ビームや光子ビームを用いて、主に固体物質などを中心とする物質・材料の静的な構造や動的な構造やその変化などの解明および物質・材料のもつ性質が発現するメカニズムの解明をめざす。また、独特な性質を有する新たな物質・材料を創成することなどをめざす。</p> <p>ビームへの要求：ビームの種類、エネルギー、強度、品質とも非常に多様 今後は、動的解析用の超短パルスビームの需要増大 ①ビームの種類は目的に応じて、電子、光子（放射光）、陽電子、中性子、陽子、重イオンなど多様なものが使用できること ②ビームエネルギーについても、目的に応じて、低エネルギーから中間エネルギーまでのものが使用できること ③ビーム強度についても、目的に応じて、小さい強度から大きな強度までのものが使用できること ④ビーム時間構造（連続、パルス、極短パルスなど）についても、目的に応じた様々なものを選択できること</p> <p>加速器の要件：できるだけコンパクトで、多種類、多様なビーム供給が可能 A. 物質・材料科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎず、できるだけコンパクトなものが良い B. 上記のように非常にバラエティーに富んだビームを使えること C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい（物質・材料科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさの変わらない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる）</p> |
| 生命科学 | <p>研究・利用目的：生命体の遺伝現象、病理、変異現象などの解明 加速器で発生させる粒子ビームや光子ビームを用いて、生命体（自己再生化学反応系の進化した姿）に関する最も基本的な遺伝現象、生命再生現象あるいは生命体の様々な病理、変異現象を解明することをめざす。この分野は、大別すると、放射線生物学、細胞生理・生体組織機能解明研究および構造生物学（または分子生物学）に分けられる</p> |

表－I－2－1 加速器科学の研究開発動向と加速器に求められる要件

| | |
|-------------|---|
| <p>生命科学</p> | <p>ビームへの要求：ビームの種類、エネルギー、強度、品質とも非常に多様 今後は、動的解析用の超短パルスビームの需要増大</p> <p>①様々な重イオンや陽子、中性子、放射光などで、比較的高いエネルギー（中間エネルギー）までの幅の広い領域のエネルギーが選択できること</p> <p>②ビーム強度については、目的に応じて、小さい強度から大きな強度までのものが使用できること</p> <p>③ビーム時間構造（連続、パルス、短パルスなど）については、目的に応じた様々なものを選択できること</p> <p>加速器の要件：できるだけコンパクトで、多種類、多様なビーム供給が可能</p> <p>A. 生命科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎず、できるだけコンパクトなものが良い</p> <p>B. 上記のように非常にバラエティーに富んだビームを使えること</p> <p>C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい（生命科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさの変わらない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる）</p> |
| <p>医療利用</p> | <p>研究・利用目的：がんなどの治療、病変や疾病の撮影画像診断</p> <p>加速器で発生させる主に中高エネルギーの粒子ビームや光子ビームを用いて、・体への負担の少ない腫瘍（がん）などの治療、・非侵襲的で精度の高い病変や疾病の撮影画像診断などを行う</p> <p>ビームへの要求：電子、陽子、軽重イオン、放射光、エネルギー範囲は比較的狭い、小強度</p> <p>放射線（ビーム）治療用加速器</p> <p>①ビームのエネルギー領域（治療用エネルギー領域）は、電子で～30MeV程度、陽子で70～250MeV、重イオンで数10MeV/n～数100MeV/nである</p> <p>②ビームの強度については、数10nA程度</p> <p>③ビームのエネルギー分解能は0.1%程度以下</p> <p>核医学用R I 標識製造用加速器</p> <p>①（主に陽子）ビームのエネルギー領域は、30MeV程度まで</p> <p>②ビームの強度については、数100μA～1mA程度</p> <p>診断映像撮影用放射光源</p> <p>血管造影（アンジオグラフィー）用</p> <p>①硬X線領域（数10keV程度（ヨウ素K-edgeを使用するものでは33keV）の光子エネルギーを有すること</p> <p>②必要な強度で発生できること</p> <p>単色X線CT用</p> <p>①硬X線領域（数10keV～100keV程度）の光子エネルギーを有すること</p> <p>②必要な強度で発生できること</p> <p>加速器の要件：できるだけコンパクトで、所定の種類、エネルギーのビーム供給が可能</p> <p>A. 上記の要件を満たすビーム発生が可能であること</p> <p>B. できる限り小型であること （建設コストができる限り低い（治療費を低く抑えられる）こと） （各地の総合病院に容易に導入が可能なこと）</p> <p>C. 立ち上げ、立ち下げが容易にできること</p> <p>D. 安定したビームが取り出せること</p> <p>E. 故障が少ないこと</p> <p>核医学用のR I 標識製造用加速器</p> <p>F. （望ましくは）治療用の加速器で代用ができること</p> |

各分野における加速器への要件を概観すると、これまで学術研究の必要性から様々な加速器を開発してきた高エネルギー物理学および原子核物理学研究分野における主たるインセンティブは、高エネルギー化やあらゆる種類の粒子ビームによる学術研究の更なる進展であり、使用する加速器は成熟した加速器技術が基礎となるものであり、大規模な高周波加速器でしか現実な対応はとれないと考えられている。エネルギー科学研究分野の加速器については、ビームの超大強度化に伴う種々の技術的問題の解決を追求することが現状の課題である。一方、物質・材料科学や生命科学、医療利用研究などに利用される各種のビームを供給する加速器については、ビームに要求されるエネルギーや強度などが非常に多様であり、従来の大型高周波加速器の利用ばかりではなく、その分野のニーズにマッチした専用加速器が望まれている。

2 加速器専門家人材育成状況と先進小型加速器の研究開発（Ⅱ章）

加速器自体の研究開発については、これまで学術研究分野（高エネルギー物理学および原子核物理学）が主として担ってきており、その他の分野には、それぞれの分野のニーズを踏まえて加速器の研究開発を行う研究者がほとんどいない状況である（表－Ⅰ－２－２参照）。加速器自体の研究開発を行う研究者のうち多くを抱える高エネルギー物理学や原子核物理学分野では、1に述べたように加速器開発が極めて重要な課題になっている。高エネルギー物理学や原子核物理学分野では研究の国際競争が激しく、加速器自体の小型化を追求することで学術研究の先端性を失わせることが危惧されることとなり、加速器自体の小型化を追求する優先順位は高くない。また、超（極）大強度化をめざすエネルギー科学研究分野の加速器についても、上と同様に成熟した加速器技術が基礎となるものであり、加速器自体の小型化を追求できる段階には至っていない。

このような事情により、これまで先進小型加速器の研究開発があまり進んでいないものと考えられる。また、確立した高周波加速器技術では、ここで目標とする性能を実現することが概して困難であることも、その理由の一つであると考えられる。なお、日本では、大学の講座で加速器工学を置いているところは数大学で（その設置もごく近年で規模も小さく）、加速器専門家（開発者）を十分供給できる体制にはなっていない。

表－Ⅰ－２－２ 加速器科学の各分野での加速器専門家(研究者)人材養成

| | |
|-----------------------|--|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | <p>加速器専門家の自給体制</p> <p>大規模な加速器を建設する必要がある、自ら加速器専門家を養成するとともに加速器の設計などを行っている。高エネルギー物理学研究用の加速器は、共同利用施設となっており、加速器専門家(研究者)は、共同利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題にも対処する。</p> |
| 原子核物理学 | <p>加速器専門家の自給体制</p> <p>大型の加速器を建設する必要がある、高エネルギー物理学と同様に、自ら加速器専門家を養成するとともに加速器の設計などを行っている。原子核物理学研究用の加速器は、共同利用施設となっており、加速器専門家(研究者)は、共同利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題にも対処する。但し、高エネルギー物理学分野ほどには加速器の専門家は少ない。</p> |
| エネルギー科学 | <p>加速器専門家の一部自給、主として高エネルギー分野、原子核物理学での養成にたよる</p> <p>これまでのところ、原子核物理学用の加速器を使っている場合が多い。加速器の専門家はそれほど多くない。近未来的には、大強度陽子加速器の建設のため、加速器専門家不足になると予想される。</p> |
| 物質・材料科学 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野</p> <p>大型の共同利用加速器施設を利用する場合が多い。ユーザーは加速器については共同利用施設側の加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、高エネルギー物理学や原子核物理学分野などで養成される場合が多く、共同利用施設では利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題に対処する。</p> <p>小規模の加速器施設においては、加速器研究者は少なく、物質・材料科学専用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |
| 生命科学 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野</p> <p>大型の共同利用加速器施設を利用する場合が多い。ユーザーは加速器については共同利用施設側の加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、高エネルギー物理学や原子核物理学分野などで養成される場合が多く、共同利用施設では利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題に対処する。</p> <p>小規模の加速器施設においては、加速器研究者は少なく、生命科学専用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |
| 医療利用 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野(一部組織的な養成開始)</p> <p>最近医療専用の加速器施設ができてきているが、大型の共同利用加速器施設を利用する場合も多い。ユーザー(医師)は加速器については、全くの加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、高エネルギー物理学、原子核物理学分野あるいは民間企業で養成される。一部で組織的な養成が行われている。加速器専門家は、その施設での医療利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題に対処している。</p> <p>医療用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |

3 加速器科学でのビーム使用状況、将来的なビームニーズ（Ⅲ章）

次に、現状での加速器ビーム使用の状況および将来のビームに対するニーズを把握するため、調査票による「加速器ビームニーズ等に関する調査（平成 11 年 9 月下旬～平成 12 年 1 月中旬実施、調査対象者：主として加速器ユーザー3,076 名、回答者 553 名）」（以後、「ビームニーズ等調査」ともいう）を実施した。その結果の概要をⅢ章にまとめたが（詳細については、当研究所 調査資料-76「加速器ビームニーズ等に関する調査結果（2001 年 6 月）」参照）、以下のように要約される。

（加速器ユーザー：広い分野に拡大）

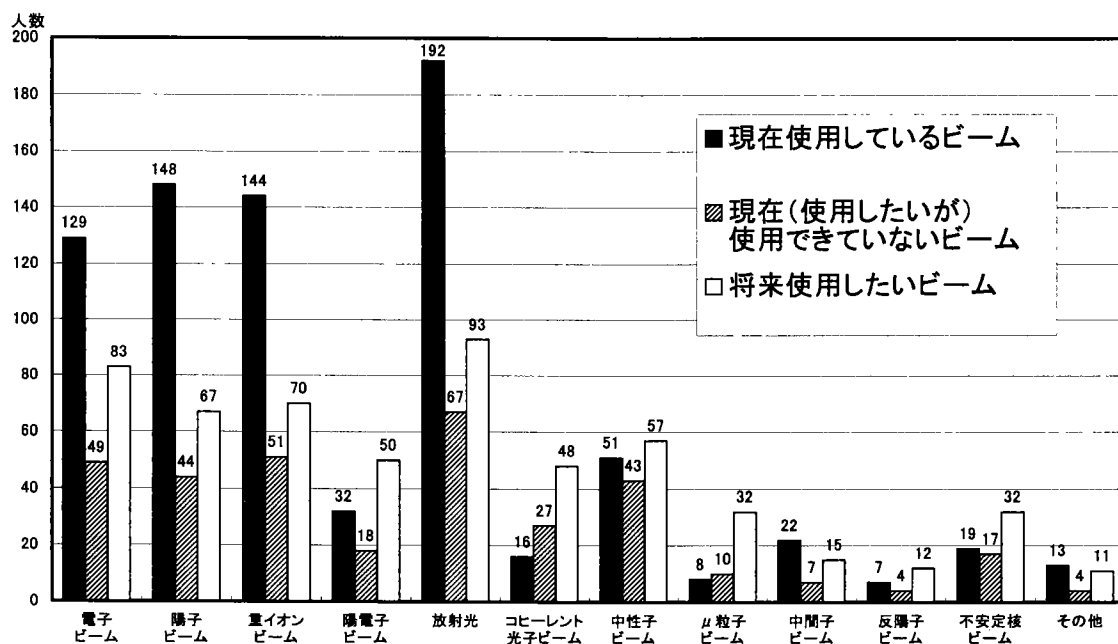
加速器ビームのユーザーについては、調査対象者を大学、研究機関のホームページなどで収集し、約 3,000 名の対象者を選び出したが、その研究分野より推定される分野別分類は以下のように、物質・材料科学が最も多くなっており、また、生命科学・医療利用分野も素粒子・原子核物理学分野に対して相当な割合になっており、加速器科学が広い分野に拡大していることがわかる。

表-I-2-3 加速器ビームニーズ等調査対象者(推定)研究分野別分類

| 研究分野 | 対象者数 | 割合 |
|----------------------------------|-------|--------|
| 素粒子物理学/原子核物理学 | 571 | 18.6% |
| エネルギー科学 (原子核物理学、物質・材料科学も一部込み) | 115 | 3.7% |
| 物質・材料科学 | 1,218 | 39.6% |
| 生命科学/医療利用 | 428 | 13.9% |
| その他 (ビーム制御、ビーム物理研究、加速器研究など) | 744 | 24.2% |
| 総 計 | 3,076 | 100.0% |

（ビーム使用の現状：使用される加速器ビームの多様化、現在の利用状況に必ずしも満足せず）

現在使用中の加速器ビーム、現在（使用したいが）使用できていない加速器ビーム、および今後使用したい加速器ビームについては図-I-2-1 のとおり。現在使用中の加速器ビームについては、一次ビーム（陽子ビーム、重イオンビーム、電子ビーム）ばかりではなく、二次ビーム（放射光（放射光は一次ビームを凌ぐ）、中性子ビーム、陽電子ビームなど）も多く使用されている。将来使用したいビームについてもほぼ同様である。ここで、現在使用している人数に対して、現在（使用したいが）使用できていない人数は約 3 割にもなっており、現在加速器ビームを使用している研究者も、他の種類のビーム利用などで、満足しているわけではないことがわかる。また、現在使用できていない理由については、身近に利用可能なセットアップされた施設がない / 実験測定装置が未整備、装置の持ち込みができない / 自分の研究に合致した専用のビームラインが確保できないなど、の理由の他、ビームタイムの不足などが挙げられている（表-Ⅲ-2-2 参照）。



図－I－2－1 加速器ビーム毎の現在の利用者数および将来利用希望者数

(要望されるビーム仕様：多様化、高度化(高品質化))

加速器科学のすべての分野において、研究や利用の多様化、高度化を反映して、加速器ビームに求められる仕様（ビームのエネルギー、エネルギー分解能、径、強度、時間構造など）は、非常に多様で、かつ、より高品質や時間分解解析が可能な短パルス化をめざすものとなっている（以下の例）。

表－I－2－4 要望されるビーム仕様の多様化、高度化(高品質化)の例

| | |
|-----------------------|--|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | ・フロンティアエネルギーエネルギーでの粒子・反粒子衝突実験のため、非常に高いエネルギーで、径を絞り込んだ、強度の高いビームが要求される |
| 原子核物理学 | ・多様な（不安定な）二次粒子（不安定原子核、μ粒子、K中間子、反陽子など）をより多く生成させるため、高エネルギーで、強度の高い陽子、重イオンビームが要求される |
| 物質・材料科学 | ・極めて短時間（ピコ(10^{-12})秒、フェムト(10^{-15})秒)に起こる反応を調べるため、超短パルス（パルス幅はピコ(10^{-12})秒、フェムト(10^{-15})秒程度)のビーム（放射光や電子ビーム）が要求される ・極めて小さな試料や極小領域への照射を行うため、極めて細いビーム（マイクロビーム）が要求される |
| 生命科学 | ・細胞あるいは遺伝子部への照射のため、極めて細いビーム（マイクロビーム）が要求される ・細胞内での蛋白質などや薬物の機能、効果を調べる動的観察のため、パルスビーム（パルス放射光など）が要求される |
| 医療利用 | ・治療照射をオンラインで監視しつつ行うための、PET核種を含んだ重粒子ビームが要求される ・画像診断用の放射光として、エネルギーの揃った（単色性の高い）硬X線が要求される。 |

4 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界 (IV章)

IV章では、現在の加速器の主流である、高周波加速器を構成する高周波加速技術の現状の研究開発課題や高周波加速技術による小型化の限界について調査した。

これまでに確立されている高周波加速技術を用いた場合、現在は大型加速器でしか得られないビームを、4頁の目安規模まで小型化された加速器で実現することは現実的には困難であることが認識された。なお、研究・開発中の高周波加速技術においては、これまでの高周波加速器の限界を超える可能性のあるものとして、Wバンド電子加速技術および超小型陽子（重イオン）シンクロトロン加速技術が挙げられた。

高周波加速器毎のまとめは、以下のとおりである。

表－I－2－5 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界

| 高周波加速器 | 研究開発の現状、小型化に関する技術の限界 |
|---|---|
| シンクロトロン | |
| (1)電子シンクロトロン エネルギーフロンティア衝突リング (数 10GeV～100GeV) 高エネルギーシンクロトロン (数 GeV～数 10GeV) 中間・高エネルギーシンクロトロン (数 100MeV～数 GeV) | <p>超大型。開発は一段落。放射光による損失のため、CERNの LEP が現実的な限界。</p> <p>大型のもので開発は一段落。かつて電子衝突リングとして利用されたものが多く、放射光リングへの入射器として使われているものもある。</p> <p>やや大型のもので開発は一段落。放射光リングとして活用されているものがほとんどである。数 GeV 級のリングは硬 X 線領域までをカバーする高輝度放射光源として使われている。</p> <p>硬X線電子シンクロトロン放射光源の小型化の限界 電子シンクロトロンで偏向電磁石あるいはアンジュレータによる放射光発生で硬 X 線を得るためには数 GeV 級の電子ビームを蓄積することが必要。数 GeV 級の電子を無理に小さい曲率半径で曲げると、放射光損失が大きくなる技術的困難をかかえる。従って、硬 X 線（同 10 ～ 100keV）発生には、新たな、レーザー逆コンプトン散乱（レーザーアンジュレータ）方式などが必要である。</p> |
| (2)陽子シンクロトロン エネルギーフロンティア衝突リング (数 100GeV～数 TeV) 高エネルギーシンクロトロン (数 GeV～数 10GeV) | <p>（超）大型。現在の最高エネルギーはFNALの Tevatron（シンクロトロンの規模としては、CERNのSPS、DESYのHERAとほぼ同じ）。CERNの LEP のトンネルを利用する LHC が次のエネルギーフロンティア衝突リングとなる。磁場強度の大きな超伝導電磁石の開発など必要。</p> <p>大型のもので開発は一段落。かつて陽子衝突リングとして利用されたものが多く、エネルギーフロンティア衝突リングの前段加速器となっている場合が多い。QCD原子核物理学関連の研究に使われている。</p> |

(次頁に続く)

表一 I - 2 - 5 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界

| 高周波加速器 | 研究開発の現状、小型化に関する技術の限界 |
|---|---|
| (2)陽子シンクロトロン(続き) 中間エネルギーシンクロトロン (数 100MeV～数 GeV) | 医療用の 250MeV クラスでは周長約 20m 程度 (小型化はある程度進んでいる)。大強度陽子蓄積リング (500MeV～1GeV) に用いられるものは周長数 10m～数 100m 200MeV 級陽子シンクロトロンの小型化の限界 電磁石の磁場強度 (電流値) の増大、周長が短いことによる電流の短パルス化、陽子速度の変化に対応する加速空洞における高周波の周波数変調幅の拡大により、更なる小型化の余地がある (ただし、いずれも限界に挑戦する必要あり)。 |
| (3)重イオンシンクロトロン 高エネルギーシンクロトロン (数 100MeV/n～100GeV/n) 中間エネルギーシンクロトロン (～数 100MeV/n) | 大型のもので、大型の陽子シンクロトロンと同様に開発は一段落段階にある。 やや大型のもので、医療用に使われているものは、周長約 100m～200m 程度) 200MeV/n 級重イオンシンクロトロンの小型化の限界 (200MeV 級陽子シンクロトロンの小型化の場合と同様) 電磁石の磁場強度 (電流値) の増大、周長が短いことによる電流の短パルス化、陽子速度の変化に対応する加速空洞における高周波の周波数変調幅の拡大により、小型化の余地がある (ただし、いずれも限界に挑戦する必要あり)。 |
| サイクロトロン | |
| (1)電子サイクロトロン (マイクロトロン) | 主に低いエネルギー (数 10MeV 程度) の電子ビーム発生用に使われており、基本的な開発は終了。最近では、放射光リングへの入射器 (150MeV 程度の電子ビーム源) として使われる場合もある。 1GeV 級電子サイクロトロン小型化の限界 現在のマイクロトロンの電子エネルギーの最大値は約 150MeV で、その大きさは (2～3)m×(2～3)m の面積に収まる程度である。マイクロトロンでこれより大きなエネルギーを持つものはなく、1GeV の電子ビームを発生させるものを構成できるか否かについて検討することが必要であるが、可能であったとしても規模としてはかなり大きくなるものと想定される。 |
| (2)陽子・重イオンサイクロトロン 大型サイクロトロン (～数 100MeV/n) 中型サイクロトロン (～数 10MeV/n) | ビームの発散を抑えつつ加速する AVF サイクロトロン (強集束型: 磁石を分割させるなど)。常伝導電磁石を用いる場合は、磁石重量が 1,000 トンを超える大型のもの。超伝導電磁石を用いる場合は、磁石重量そのものは小さくなるが、付帯装置としての液体ヘリウム冷却系が必要。基本的開発課題は終了。 大型サイクロトロンと同様の AVF サイクロトロンで常伝導電磁石を用い、数 100 トン程度の重量。基本的開発は終了。 |

表－Ⅰ－２－５ 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界

| 高周波加速器 | 研究開発の現状、小型化に関する技術の限界 |
|--|---|
| (2)陽子・重イオンサイクロtron (続き) 小型サイクロtron (～数 MeV/n) | <p>初期のサイクロtronで、単純なディー構造磁石を用いる。基本的開発は終了。</p> <p>200MeV 級陽子サイクロtronの小型化の限界 200MeV 級陽子を加速できるサイクロtronは中型のものとなり、現在の最軽量クラスでも 200 トン。目安規模までの小型化は困難。液体ヘリウム装置を使う超伝導化については、医療設備としては負担になる可能性あり。</p> <p>200MeV/n 級重イオンサイクロtronの小型化の限界 200MeV/n 級重イオンを加速できるサイクロtronは大型のものとなり、目安規模までの小型化は困難。</p> |
| 線形加速器 | |
| (1)電子線形加速器 エネルギーフロンティア 線形衝突器 (100GeV～) | <p>超大型。できるだけ規模を小さくするためより高勾配 (数 10MeV/m～100MeV/m) の加速方式 (XバンドあるいはKバンド高周波利用) のものを開発中</p> |
| 高エネルギー線形加速器 (数 GeV～50GeV 程度) | <p>大型。Sバンド高周波 (加速勾配 max20MeV/m 程度) 利用のものについては開発終了。</p> |
| 中間・低エネルギー 線形加速器 (数 10MeV～ 数 100MeV 程度) | <p>中型 (数 m～数 10m) のもの。基本的にはLバンドあるいはSバンド高周波利用で開発終了。自由電子レーザー発振用の高効率、大電流加速のために、超伝導加速管の開発中。</p> <p>1GeV 級電子線形加速器の小型化の限界 線形加速器で電子を 1GeV 級まで加速する場合、開発済みのSバンド高周波加速では約 50m、開発中のXバンド高周波加速の目標値でも約 20m を必要とし、1GeV 級電子線形加速器の目安規模までの小型化は、現在開発中の技術では困難。より周波数の高いWバンドを使うことなどが必要。</p> |
| (2)陽子・重イオン線形加速器 中間エネルギー線形加速器 (～数 GeV 陽子) | <p>大型。数 MeV までの初期加速 (RFQ加速器)、100-200MeV の前段加速 (ドリフトチューブ型加速器)、最終エネルギーまでの主加速 (結合空洞型) の段階に分けて、加速管形式が異なるものを組み合わせる。基本的な開発は終了。加速管の超電伝導化などにより、加速の効率化を図っている。</p> |
| 低エネルギー線形加速器 (数 MeV～100MeV 程度) | <p>RFQ加速器およびドリフトチューブ型加速器。基本的な開発は終了。陽子 100MeV 級ドリフトチューブ型加速器の長さは約 100m。</p> |

表－Ⅰ－2－5 高周波加速器研究開発の現状および加速器小型化に関する技術の限界

| | |
|-------------------------|--|
| 高周波加速器 | 研究開発の現状、小型化に関する技術の限界 |
| (2)陽子・重イオン線形加速器 (続き) | 200MeV/n 級陽子・重イオン線形加速器の小型化の限界 陽子の場合の加速勾配は数 MeV/m 程度であり、重イオンの場合の加速勾配は陽子の場合より更に低く、200MeV/n 級陽子・重イオンを加速する場合は数 10m 以上の長さが必要。目安規模までの小型化は困難。 |

5 先進加速技術等の抽出および先進小型加速器等の具体案の抽出 (Ⅳ、Ⅴ章)

Ⅳ章において、まだ実用化されていない研究・開発中の高周波加速技術で、これまでの高周波加速器の限界を超える可能性を有するものとして、以下のものが挙げられた。

表－Ⅰ－2－6 先進加速技術等の抽出および先進小型加速器等の具体案の抽出結果(1)

| 高周波極限加速技術 |
|---|
| i 高周波極限電子加速(Wバンド電子加速) これまでの高周波 (Sバンド (3GHz 程度) など) に比べて非常に短い波長の高周波 (Wバンド (90GHz 程度)) により極限的に大きな加速電場を得て、高加速勾配を実現しようとする技術で、極めて細い加速管製作や加速管材料中の不純物の管理がポイント。具体案については、図－Ⅴ－2－1 参照。 |
| ii 超小型陽子(重イオン)シンクロトロン技術 陽子 (重イオン) シンクロトロンにおいて高周波変調幅の拡大や偏向 (常伝導) 電磁石の磁場の大強度化を極限まで追求める技術。具体案については、図－Ⅴ－2－2 参照。 |

次に、本調査の主題であるところの、新たな加速原理に基づく先進加速技術研究の状況およびその技術に基づく小型加速器の提案について幅広く調査した。これらの先進加速技術は、これまでの高周波加速技術とは異なる原理に基づくもので、高加速勾配が得られるとされるもの (非高周波高勾配加速技術) であり、加速技術研究においては、これまでのところ、あまり研究されていないものである。(が、この調査研究を実施した過去3年間に、iii-C レーザー衝撃波加速 (重イオン) については (世界的に) 急速な進展が見られ、短パルス大強度レーザーの薄膜衝撃により数 10MeV のエネルギーのイオンが発生することが明らかになってきており、これらの技術の進展には目が離せない。) 同時に、放射光源として、これまでのように偏向電磁石あるいはウィグラーやアンジュレータの交代磁場で電子ビームの進行方向を曲げて発生させる方法ではなく、レーザー光の強い磁場で電子ビームを曲げるレーザーアンジュレータ方式 (レーザー逆コンプトン散乱方式) の放射光源も挙げられた。

以上をまとめると、次のようになる。

表－Ⅰ－２－６ 先進加速技術の抽出および先進小型加速器の具体案の抽出結果(2)

| 非高周波高勾配加速技術 | |
|---|--|
| iii 非高周波高勾配加速技術による電子加速 | |
| iii-A ビーム励起型プラズマ加速 | |
| プラズマに電子ビームを当て、励起させたプラズマ波の強電場により電子を短距離で加速する。加速電場は、Sバンド高周波加速に比べて～1000 倍程度（～数 10GV/m）。具体案については、図－Ⅴ－２－４ 参照。 | |
| iii-B レーザー励起型プラズマ加速 | |
| プラズマにレーザービームを当て、励起させたプラズマ波の強電場により電子を短距離で加速する。レーザーによるプラズマ波の励起の仕方はいくつかある。加速電場は、Sバンド高周波加速に比べて～1000 倍程度（～数 10GV/m）。以下の種類がある。 | |
| ①レーザー励起プラズマ航跡場加速： 具体案については、図－Ⅴ－２－６ 参照 | |
| ②レーザービート波励起プラズマ波加速： 具体案については、図－Ⅴ－２－参照 | |
| ③自己レーザー励起プラズマ波加速： 具体案については、図－Ⅴ－２－10 参照 | |
| iii-C 逆チェレンコフレーザー加速 | |
| ガス内で、電子ビームとレーザーをチェレンコフ角で交叉させることにより電子ビームを加速する。加速電場は、数 GV/m 程度。具体案については、図－Ⅴ－２－12 参照。 | |
| iii-D 直交場加速 | |
| ①レーザー直交場加速 | |
| レーザーの磁場成分と同方向に定常磁場をかけ、磁場中性点に電子を捕獲し加速する。加速電場は、電子が磁場中性点に捕獲される時間による。具体案については、図－Ⅴ－２－14 参照。 | |
| ②プラズマ直交場加速 | |
| プラズマ波の進行方向と垂直に定常磁場をかけ、プラズマ波への捕捉を長時間行い、電子を加速する。加速電場は数 10～100GV/m。具体案については、図－Ⅴ－２－16 参照。 | |
| iv 非高周波高勾配加速技術による陽子・重イオン加速 | |
| iv-A 電子リング加速(陽子・重イオン) | |
| 磁場に捉えられたリング状の電子群内にイオン（陽子や重イオン）を捕獲し、電子リングを磁場で加速することにより、イオンを加速する。加速電場は数 10MV/m（陽子線形加速器の数 10 倍）。具体案については、図－Ⅴ－２－22 参照。 | |
| iv-B レーザー励起型プラズマ加速(陽子) | |
| プラズマに（プラズマ波より長い波長の）レーザービームを当て、レーザー光のラマン散乱で発生する速度の遅いプラズマ波の強電場により陽子を短距離で加速する。加速電場は 100GV/m であるが加速距離は数 mm で、陽子では 150MeV 程度が限界か。具体案については、図－Ⅴ－２－25 参照。 | |
| iv-C レーザー衝撃波加速(重イオン) | |
| レーザーを薄膜に当てて、磁場中にプラズマを飛び出させると、発生するアルベン衝撃波にイオンが捕獲され、加速される。加速電場は、かける磁場が数 Tesla の場合、数 100GV/m 程度。具体案については、図－Ⅴ－２－27 参照。 | |
| iv-D 直交場加速(陽子・重イオン) | |
| ①レーザー直交場加速 | |
| レーザーの磁場成分と同じ方向に定常磁場をかけ、磁場中性点に電子を捕獲し加速する。加速電場は、イオンが磁場中性点に捕獲される時間による（数 10MeV 程度）。具体案については、図－Ⅴ－２－29 参照。 | |
| ②プラズマ直交場加速 | |
| プラズマ波の進行方向と垂直に定常磁場をかけ、プラズマ波への捕捉を長時間行い、イオンを加速する。加速電場はプラズマ幅による。具体案については、図－Ⅴ－２－31 参照。 | |

(次頁に続く)

表一 I-2-6 先進加速技術等の抽出および先進小型加速器等の具体案の抽出結果(2)

| 小型放射光発生技術 | |
|---|--|
| v 小型放射光発生技術 | |
| レーザーアンジュレータ放射光発生技術 | |
| レーザー光の強い磁場で電子ビームを曲げ放射光を発生させる（レーザーアンジュレータ方式（レーザー逆コンプトン散乱方式））放射光源。低い電子エネルギーで高い光子エネルギーの放射光の発生が可能。具体案については、図-V-2-35 参照。 | |

なお、v 小型放射光発生装置の電子ビーム源として、Xバンド（11GHz 程度）電子加速が挙げられた。Xバンド電子加速器については研究開発が行われており、今後実証機レベルの開発へ移行してゆく段階にあり、その実用機は、小型放射光発生装置用の電子ビーム源として使われることが予想される。

以上挙げられた先進加速技術等で実現される小型加速器等の全体装置および実現のための技術課題を調査し、非高周波高勾配加速技術および小型放射光源技術による小型加速器および小型放射光源に関する提案を試案としてまとめた。

6 先進加速器技術等の研究・開発段階分類

今回の調査において抽出した先進加速技術に基づく小型加速器等について、現時点での研究開発状況から、研究段階にあるものと、実証機をめざす開発段階に進めるものを分類すると以下のようになる。

表一 I-2-7 先進小型加速器等の研究・開発段階分類

| 先進小型加速器等 | 段階分類 |
|---|---|
| i 高周波加速小型電子加速器 (高周波極限電子加速 (Wバンド電子加速) 技術による) | 研究段階 ・ 原理実証がなされていないため、原理実証をめざす基礎的な研究が必要 |
| ii 高周波加速小型陽子・重イオン加速器 (超小型陽子 (重イオン) シンクロトロン技術による) | 開発段階 ・ 基本的には、シンクロトロン技術について限界に挑戦するもので、外挿が可能 (ロシアの研究所では、実際にモデル機を製作した) |
| iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 iii-A ビーム励起型プラズマ加速器 iii-B レーザー励起型プラズマ加速器 iii-C 逆チェレンコフレーザー加速器 iii-D 直交場加速器 | 研究段階(左記全て) ・ 開発に進むための原理実証データが不十分であり、原理実証をめざす基礎的な研究が更に必要。(ただし、プラズマにレーザーを当て、電子を飛び出させるレーザー・プラズマカソードについては開発段階。) |
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 iv-A 電子リング加速器(陽子・重イオン) iv-B レーザー励起型プラズマ加速器 (陽子) iv-C レーザー衝撃波加速器 (重イオン) iv-D 直交場加速器 (陽子・重イオン) (iv の欄続く) | 研究段階にあるもの iv-B レーザー励起型プラズマ加速器 iv-D 直交場加速器 については研究段階 ・ 原理実証がなされていないため、原理実証をめざす基礎的な研究が必要 |

表－Ⅰ－２－７ 先進小型加速器等の研究・開発段階分類

| | |
|---|---|
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 iv-A 電子リング加速器(陽子・重イオン) iv-B レーザー励起型プラズマ加速器(陽子) iv-C レーザー衝撃波加速器(重イオン) iv-D 直交場加速器(陽子・重イオン) (続き) | 開発段階にあるもの iv-A 電子リング加速器 iv-C レーザー衝撃波加速器(但しイオン源としての利用) については開発段階 ・電子リング加速器については、ロシアでの実績あり ・レーザー衝撃によるイオン飛び出しについては、昨年、世界の3研究機関で実証された |
| v 小型放射光発生装置 レーザーアンジュレタ放射光発生装置 | 開発段階 ・構成する機器は、大きくわけて低エネルギー電子ビーム源とレーザー装置になるが、電子ビーム源、レーザー装置ともに、ビームの絞込みの限界に挑戦しつつ実現をめざす |

7 先進小型加速器の実現予測 (Ⅵ章)

抽出された先進小型加速器の実現予測調査(「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査(平成10年11月初旬から平成11年1月中旬実施、調査対象者:加速器研究者452名、回答者90名)」)を実施した。この調査では、先進小型加速器等の具体案およびその実現のための技術課題を加速器研究者に提示しつつ、その実用化時期を質問し、その結果をⅥ章にまとめた(詳細については、当研究所 調査資料-61「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査結果(1999年5月)」参照)。結果概要を以下に示す。なお、実用化時期については、調査時点(1999年)より5年刻みで30年後までのいずれの期間で実用化するかを求め、回答分布の中央値とした。この予測調査の概要は以下(表－Ⅰ－２－８を含む)のとおりである(Ⅵ章参照)。

i および ii のものは、高周波加速技術に属する技術であるが、これまでにほとんど研究・開発されてきていない技術を極限的に追求するもので、加速器研究者においては比較的取り組みやすいものであり、2012～2013年頃の実用化が予測されている。また、1990年代に入りレーザー技術の急速な進展とともに注目されてきているレーザー励起プラズマ電子加速技術については2014年頃の、硬X線を発生させることのできるレーザーアンジュレタ放射光装置については2008年頃の実用化が予測されている。なお、ivの非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器については、加速器研究者においてもなじみの薄いものであり予測時期を得られた回答数が少なく、実用化時期の算定はできていない。これらの技術については、研究者そのものがあまりに少なく原理実証を行う必要があるものと考えられる。が、急速な進展が見られるものもあり機動的に研究に対処する必要がある。

表－Ⅰ－２－８ 先進小型加速器等に関する実用化予測調査結果

| 先進小型加速器等 | 実用化予測時期 |
|--|---------|
| i 高周波加速小型電子加速器 (高周波極限電子加速(Wバンド電子加速)技術による) | 2012年頃 |

(次頁に続く)

表－I－2－8 先進小型加速器等に関する実用化予測調査結果

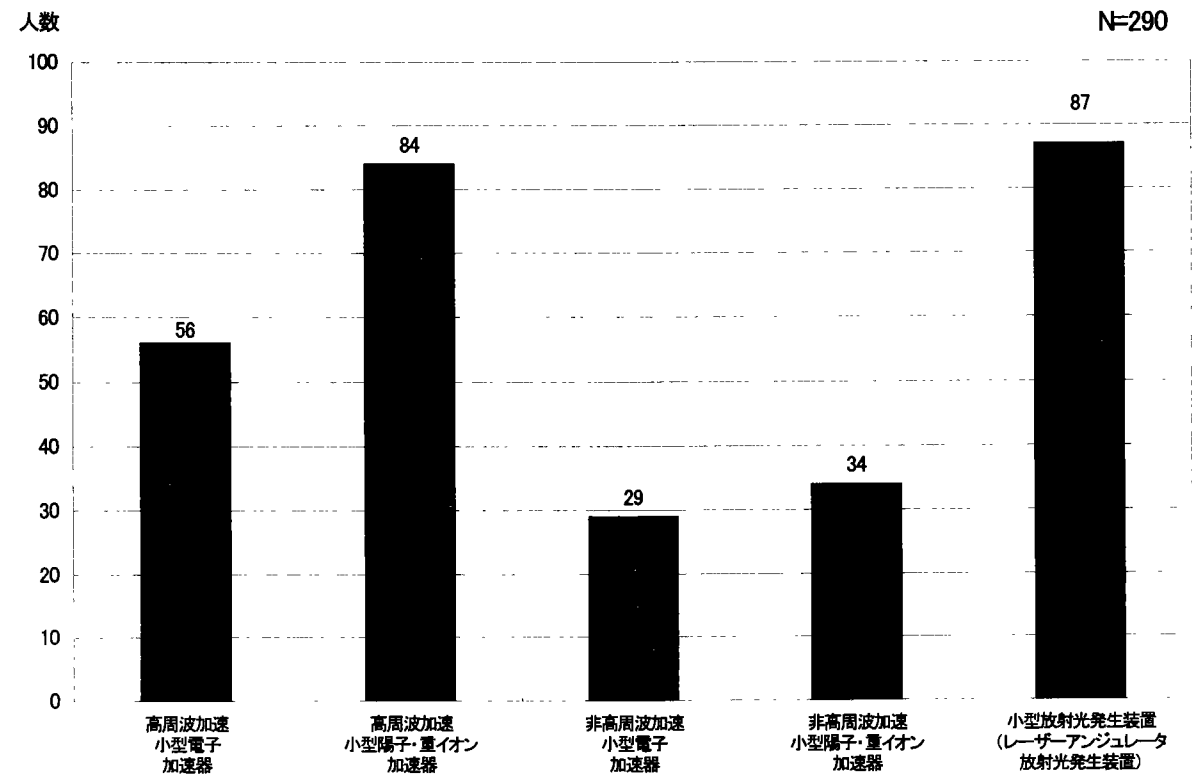
| 先進小型加速器等 | 実用化予測時期 |
|---|----------------------------|
| ii 高周波加速小型陽子・重イオン加速器 (超小型陽子(重イオン)シンクロトロン技術による) | 2013年頃 |
| iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 iii-A ビーム励起型プラズマ加速器 iii-B レーザー励起型プラズマ加速器 iii-C 逆チェレンコフレーザー加速器 iii-D 直交場加速器 | 2013年頃 2014年頃 — — |
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 iv-A 電子リング加速器(陽子・重イオン) iv-B レーザー励起型プラズマ加速器(陽子) iv-C レーザー衝撃波加速器(重イオン) iv-D 直交場加速器(陽子・重イオン) | — — — — |
| v 小型放射光発生装置 v-A レーザーアンジュレータ放射光発生装置 | 2008年頃 |

(実用化予測時期の－は、サンプル数過小のため算定できなかったことを示す。)

8 先進小型加速器等へのニーズ (VI章)

抽出された先進加速技術による具体的な小型加速器等の提案について、ビームニーズ等調査の際に、ユーザーにその開発メリットを質問した。その結果をVI章に示すが、概要は以下のとおり。

先進小型加速器等の各々に対して、回答者が自身の研究用の装置として、メリットを感じるか否かを質問したところ、その結果は、以下の図－I－2－2に示すとおりであった。



図－I－2－2 先進小型加速器等へのニーズ(自身の研究にメリットを感じる研究者数)

また、具体的なメリットは表－I－2－9のとおりであった。先進小型加速器等に自身の研究上メリットを感じると回答した者（205名：重複回答のため図－I－2－2では290名）は、全回答者（553名）のうち約37%に当たっている。この結果は、先進小型加速器等の開発が直接的に利益をもたらさない高エネルギー物理学、原子核物理学あるいはエネルギー科学研究者を含めてのことと考えると、開発ニーズが相応に高いものであることを示しているといえる。特に、小型放射光装置（レーザーアンジュレータ放射光装置）、小型陽子・重イオン加速器への開発ニーズが高い。前者は生命科学、物質・材料科学での利用、後者は医療利用を意識したものと考えられる（表－I－2－9参照）。

表－I－2－9 先進小型加速器等の実用化によるメリット

| | |
|---|--|
| i 高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器(高周波加速小型電子加速器) | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 小型の電子、陽子加速器、放射光発生装置が実用化できれば企業の研究所レベルで多様な研究が可能となるばかりではなく、工場や病院等で産業レベルの利用が可能となり、社会的貢献度が大きい。 ・ 小型ならば省スペースが可能であり、各研究者の独特の発想を生かした周辺設備の構築が可能となる。 ・ 複合ビームを利用した研究においては、限られたスペースに多くの複合ビーム源を置くことが重要であり、小型加速器のメリットは大きい。 ・ 小型化による加速器建屋建設コスト、放射線遮蔽コストが低減する。 ・ 各地方大学や民間研究所等、小規模な大学・研究機関に導入でき、多様なビーム利用が展開できる。 ・ 加速器ビーム物理、ビーム加速の研究対象として研究意欲を起こさせるメリットがある。 ・ これらの開発は、同時に素粒子物理学研究用大型超高エネルギー加速器開発へのブレークスルーをもたらす。 | |
| 他 | |
| ii 超小型陽子シンクロトロン(高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器) | |
| <p>(上の高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器(高周波加速小型電子加速器)でのメリットの他)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 陽子・重粒子加速器を小型にできるならば、治療・診断ビーム発生器として現実的な規模となり、病院併設がより容易になる。 ・ 陽子や重粒子による治療費の大幅低減に寄与する。 ・ 超小型陽子加速器により固体ターゲット照射が可能になり、病院施設等においても固体ターゲットによりラジオアイソトープの製造が可能となる。 ・ 陽子加速器の小型化により、国内10ヶ所以上にミュオンビームを発生できる施設できれば、ミュオンの利用が広がることが期待できる。(ただし、パイ中間子、ミュオンが十分な量発生できるようにビームエネルギーは500MeV程度、陽子ビーム強度は100μA程度あることが望ましい) ・ 生物実験専用として使えれば研究効率が大幅に上昇すると考えられる。 | |
| 他 | |
| iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 | |
| 高周波極限（Wバンド）加速小型電子加速器（高周波加速小型電子加速器）に同じ | |
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 | |
| 超小型陽子シンクロトロン（高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器）に同じ | |

(次頁に続く)

表－１－２－９ 先進小型加速器等の実用化によるメリット

| |
|---|
| <p>ⅴレーザーアンジュレータ放射光発生装置</p> <ul style="list-style-type: none">・小型放射光の場合、現状では10keV以上の高エネルギーX線を得ることが不可能である。もし、ハードX線が小型放射光装置で実現できれば大きなブレイクスルーを生む。・蛋白構造解析で必要だが通常使用できない実験が出来る。35keV付近に吸収端を持つキセノンを加圧して結晶中に入れ多波長異常分散法で構造を分析したい（ビームラインに制限があつて、今まで出来ていない）。・研究室レベルで第三世代放射光より輝度も強度も高いビームを得られれば、蛋白質等生体高分子集合体の研究に多大な恩恵をもたらすであろう。・一般の実験室で良質のX線吸収スペクトルが測定できるようになり、汎用の構造解析手段としての利用・応用や研究が飛躍的に広がる。・通常の放射光施設の共同利用を前提とする運用形態とは全く別の実験室感覚の利用が可能であり、そのため行おうとする測定の内容やその質を変える可能性が考えられる。特に材料研究のように試料作成とのフィードバックを頻繁に必要とする分野では効果は大きい。・放射光実験施設が多く設置されるようになれば地理および時間的な要因による試料の劣化が防げるようになると考えられる。・強度が強く、時分割、その場観察が高いレベルで可能となる。・現在放射光は共用性が高いが小型化することにより単独の目的に放射光をシステムの一部として利用することができる。それにより放射光を組み込んだ高度のシステムを作ることができる。・全国に多数配置されることになれば放射光の利用者も増え、量の拡大は質の変化をもたらすと考ええる。・精密加工（X線リソグラフィー）において超高密度集積回路、メモリーに新しい最先端テクノロジーとなる。・日本の各地で小型放射光装置のニーズが高まっている。特にX線発生可能な小型装置が開発されれば非常に大きなimpactがあると考ええる。 <p>他</p> |
|---|

これらの先進小型加速器等実用化の一次的、派生的なメリットとして以下のものが、挙げられた。

表－１－２－１０ 先進小型加速器等実用化の一次的、派生的メリット

| |
|--|
| <p>(一次的)</p> <ul style="list-style-type: none">・小型化により加速器等自体の値段および運転経費が安くなる・収納する施設が小型化され、放射線遮蔽区域も小さくなる・幾種類かの小型加速器等の導入が容易になる |
| <p>(派生的)</p> <ul style="list-style-type: none">・病院などにおける医療（診断、治療）利用が進展する・物質・材料科学での高度利用や産業利用（半導体加工など）が進展する・生命科学関係での高度利用が進展する・民間研究所や各地方大学（場合によっては研究室単位で）での導入が進展する・数種類の小型加速器等による複合ビーム利用研究が進展する・大学の実験室にて学生の授業あるいは大学院生の研究に使われ、授業や研究のレベルの向上に役立つ |

9 先進小型加速器等の実用化がもたらすマクロレベルでのメリット（Ⅶ章）

上に挙げられたメリットは個別的なものであるが、日本全体としてみると、次のようなマクロレベルでの効果が期待できる（Ⅶ章）。

○ 加速器偏在の解消による先端研究機会均等化および地域での研究水準の向上

現在、大型加速器は地域的に偏在しており、現在大型加速器を用いてしか研究できない先端研究の実施面での実質的機会不均等が生じている。（利用機会については平等であるものの遠隔地からの出張利用には、研究実施への躊躇をもたらす。）この機会不均等を是正する上で、大型加速器に近い性能を持つ先進小型加速器等の実用化は、大きな役割を果たすこととなる。先進小型加速器等の身近な場所への設置は、先端研究への参加を容易にし、これまで大型加速器がなかった地域での研究水準の向上に寄与し、結果として日本全体の先端研究水準の向上にもつながる。

○ 日本の物質・材料科学や生命科学研究水準のトップランナー化への寄与

物質・材料科学や生命科学はその研究対象数が膨大である。例えば、ポストゲノム研究の中心となる構造生物学が扱うべき蛋白質や生命体高分子の数は極めて多い。これら膨大な数の対象を扱う場合、日本のあらゆる地域の参加可能な研究機関を動員した研究実施体制が必要となる。先進小型加速器等の実用化は、このような日本全体で実施すべき研究の基礎的ツールとなるものであり、今後、日本がより積極的に取り組む物質・材料科学、生命科学分野で世界のトップランナー化に寄与するものとなる。この場合、大型加速器施設は、センターとしての機能を果たすことは言うまでもない。

○ 高度先進医療の全国的な普及による活力ある高齢化社会達成への寄与

今後急速に進む高齢化社会においては、高齢者が健康で活力ある生活を行えるようにすることが重要であり、そのための疾病予防や体への負担の少ない高度先進医療を普及させて行くことが大切である。先進小型加速器等の実用化は、心臓のみならず脳や腹部の血管系の診断を身体的負担が少なく行えるアンジオグラフィーや、同様に、外科手術に比べて身体的負担の少ない重粒子線治療を日本のあらゆる地域で普及させることに大きく寄与する。

10 先進加速技術等の研究開発に関する米国、欧州および日本の取り組み、課題（Ⅶ章）

現在の日本では、極めて少ない予算で個別単発的に先進加速技術等の研究が行われているのが実状であり、その発展性を考えるとこれらの先進加速技術等をまとめて研究開発してゆくことが必要である。米国においては、既に 15 年にわたりこれらの先進加速技術研究をエネルギー省のプロジェクトとしてまとめて推進してきており、その知識の蓄積には大きな差が出てきている。しかし、米国においては、先進加速技術等の研究開発を、高エネルギー物理学研究用の加速器の規模をこれ以上増大させずにエネルギーフロンティアをめざせる技術の開発として実施しており、これらの技術の物質・材料科学や生命科学あるいは医療利用などへの適用については、あまり意図されていない。（Ⅶ章）。

表－Ⅰ－2－11 先進小型加速器等の研究開発に関する日・米・欧の取り組み

| | 日本 | 米国 | 欧州 |
|------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 研究費 | 年間 1 億円程度 | 年間\$12.5M(1999) エネルギー省が担当（但し、高エネルギー加速器の規模を変えずに性能を上げる技術に特化） | |
| 研究体制 | 研究者個人の興味の範囲内での研究が主 | 1985 年よりエネルギー省の主導で、傘下の国立研究所に分担させて実施 | 研究者個人の興味の範囲内での研究が主 英国、フランス、ロシアなど |
| 定期的な研究発表の場 | 公的なものはない （研究者は、右の米国のワークショップを利用） | “Workshop on Advanced Accelerator Concept” （エネルギー省（High Energy Physics Division の Advanced Technology R&D Group）がスポンサー；2000 年で 9 回となる） 発表論文数 6 th 1994 ・・72 7 th 1996 ・・87 8 th 1998 ・101 | （研究者は、左の米国のワークショップを利用） |
| 概略 | 少ない予算で個別離散的 国内での議論の場もない | まとまった額で組織的 | 個別離散的 |

この事情を考慮すると、日本がこの分野における知識の蓄積水準を高めるとともに、先進加速技術等の研究開発を物質・材料科学や生命科学あるいは医療利用などへの適用を目的とし、世界的にリーダーシップを取って行くためには、

- ・個別独立的な進め方ではなく、知識の相乗効果が期待できる、研究者をネットワーク化した研究開発体制を構築すること
- ・先進加速技術等研究開発費の絶対額を大きく増加させること
（米国では、電子に関する先進加速技術のみで約\$12.5M＝約 14 億円/年）

- ・ **実証機の開発が可能であるものへの重点的投資**

が急務である。最初の事項は、日本における先進加速技術等の研究者が極めて少ない（数 10 名程度でリーダーシップをとれる研究者数はごくわずかである）ことから必要条件となる。

I-3 先進加速技術等の研究開発方策についての提言

以上の調査のまとめとして、先進加速技術等の研究開発方策に関する提言は以下のようになる（Ⅶ章）。

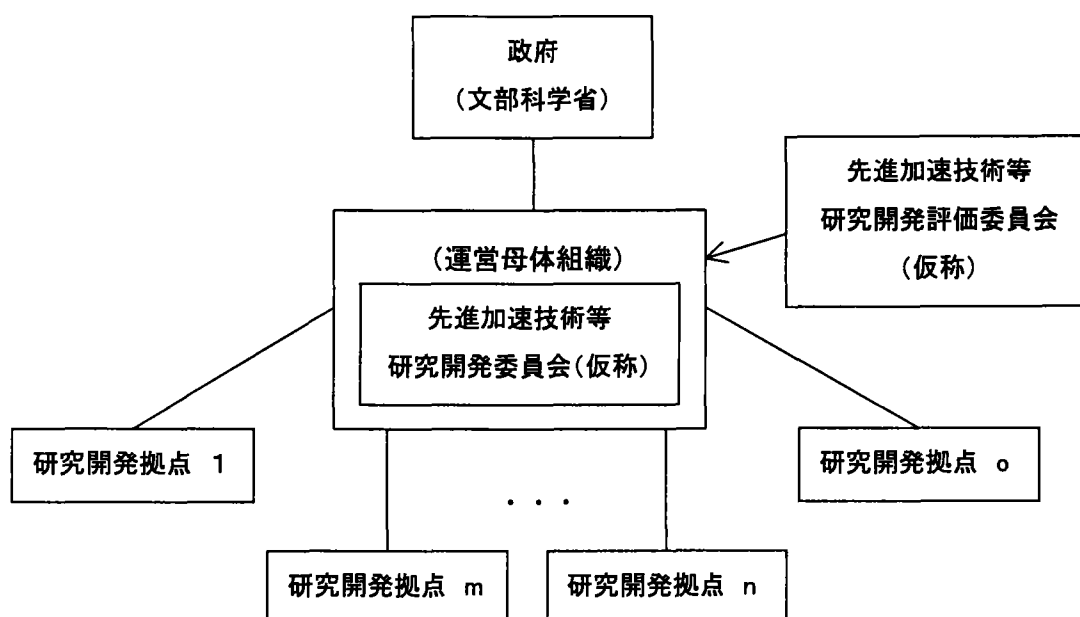
重点的実証機研究開発

・以下の技術による小型実証機開発に重点的に投資すること（Ⅶ章、315～319 頁参照）

- ・超小型陽子・重イオンシンクロトン技術
- ・レーザー衝撃加速（但し、イオン源としての利用）
- ・レーザーアンジュレータ放射光発生技術

実証機研究開発体制

・運営母体となる組織を軸に、主導的研究者の所属する多数の研究機関が柔軟に参加でき、必要とされる（最先端のものを含めたあらゆる）知見や技術を生かすことができる体制（以下の、[多研究機関参加・研究開発委員会主導方式]など）で進めること



[多研究機関参加・研究開発委員会主導方式]

先進加速技術研究者の属するいくつかの研究機関（独立行政法人、特殊法人、大学など）に開発に参画してもらい、先進小型加速器の使用目的に沿った全体系総合技術調整および研究開発に関する諸々の事務を特定の公的非常営利組織（独立行政法人、特殊法人あるいは財団法人などで、先進加速技術研究者を有し、目的に適する組織；以下、「運営母体組織」という）が一括して行うものである。この際、運営母体組織に設置される「先進加速技術等研究開発委員会（仮称）」（以後、「研究開発委員会」という）が横断的な技術的検討、運営母体および各研究機関で分担される具体的個別研究計画の作成、予算要求原案作成および進捗管理などを行い主導して進めてゆくも

のである（上図参照）。この研究開発委員会のメンバーは、運営母体組織の研究者、参加する各研究機関の研究責任者、各研究開発拠点の責任者および関連専門研究者から構成される。

開発する先進加速技術に精通した研究者の提案などを基に、放射線管理などの安全関連業務サービスなどを受けることのできる研究開発拠点を決める。この際、各研究開発拠点施設を有する研究機関は、研究開発委員会への協賛機関として（あるいは当該組織との何らかの協定、契約により）施設の利用などへの協力を行うものとする。各研究開発拠点の責任者は、その研究開発拠点施設を所有する機関以外の者でも可とする。これは、先進加速技術等の専門家が少なく、適当な施設があるものの適当な責任者がいない場合が一般的であると考えられるからである。この際、必要に応じて、研究機関どうしの協力協定を結ぶものとする。

先進加速技術等研究開発に関する計画については、当該組織に独立して設けられる「先進加速技術等研究開発評価委員会（仮称）」の意見を反映させた上で、研究開発委員会において決定し、当該組織がそれに基づく予算要求および実行（契約関連諸事務手続き；必要があれば任期付き博士研究員の採用手続きも含めて）を行う。研究開発委員会は、定期的に研究開発に関する技術的な問題点を中心に実務的な会合を持ち、各研究開発拠点の状況を把握しつつ、責任者あるいは研究開発グループ間の意見交換を実施し、必要があれば研究開発計画の変更を行う。

なお、各研究開発拠点では、若手研究者（大学院生、任期付き博士研究員、大学の助手クラスあるいは独立行政法人、特殊法人などの若手研究員）および海外招聘研究者の受け入れに協力する。

基礎研究との連携

・以下の先進加速技術などの基礎研究を連携して進めること

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">・高周波極限加速技術 高周波極限（Wバンドなどによる）電子加速・非高周波高勾配加速技術による電子加速 ビーム励起型プラズマ加速 レーザー励起型プラズマ加速 逆チェレンコフレーザー加速 直交場加速・非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速 レーザー励起型プラズマ加速（陽子） 直交場加速（陽子・重イオン） |
|--|

研究開発予算

・先進加速技術研究開発予算を年間 10 数億円程度（米国並み）に増額してゆくこと

なお、上の具体的提言にあたり、考慮した点は、

- A. 先進加速技術等の研究者数が限られ、かつ、分散している
- B. 米国よりもスタートが遅れており、研究開発投資の効率化が必要

C. 比較的高いエネルギーのビームを扱うため、必要な放射線遮蔽対策が取られること

であり、このことから研究開発方策を考える上での要件として、**10**（25～26 頁）に述べたものの他、次のものが挙げられる。

- ・普及をめざした必要な人材（先進加速技術等の専門家）の育成
- ・世界の最先端研究者との意見交換、世界的な視野での定期報告会およびレビュー
- ・既存施設などの有効利用（研究開発費の有効投資）

Ⅱ 加速器科学の動向と加速器

Ⅱ 加速器科学の動向と加速器

Ⅱ-1 各分野での動向および加速器に求められる要件

1 高エネルギー物理学

(1) 研究の動向

(参考文献[Ⅱ1a]、[Ⅱ1b]、[Ⅱ1c]、[Ⅱ1d]、[Ⅱ1e]、[Ⅱ1f]、[Ⅱ1g]、[Ⅱ1h]、[Ⅱ1i]によりまとめる)

高エネルギー物理学は、素粒子理論と連携しつつ、高エネルギーの粒子ビームを用いた実験により、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）の解明をめざすものである。以下、簡単に素粒子理論と現在の高エネルギー物理学の課題に触れる。なお、高エネルギー物理学関係研究機関略語および高エネルギー加速器については、添付資料Ⅱに説明する。

1) 標準理論の形成と検証課題

これまでに世界の研究機関により行われた高エネルギー電子（陽電子）あるいは陽子（反陽子）を用いた種々の実験により、ゲージ理論に基づく標準理論（Standard Model）が成功を収めてきており、それを非常に簡略化して述べると、以下のようまとめられる。

標準理論は、電磁相互作用と弱い相互作用が統一された形で記述される電弱理論（Electroweak Theory）と、強い相互作用を記述する量子色力学（QCD：Quantum Chromodynamics）とで構成される。標準理論における基本粒子（素粒子）は、6種類のレプトンと6種類のクォークであり、これらのレプトンおよびクォークは各々3世代に分類される（表Ⅱ-1-1参照）。それらの基本粒子間の相互作用を媒介するものがゲージ粒子（ゲージボソン）といわれるもので、光子、3種のウィークボソン（ W^\pm ボソン、 Z^0 ボソン）（電弱理論でのもの）及び8種類のグルーオン（QCDでのもの）がある（表Ⅱ-1-2参照）。

表Ⅱ-1-1 標準理論における基本粒子

| 基本粒子 | 電荷 (単位 e) | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 |
|------|--------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| レプトン | -1 | e (電子) | μ (ミューオン) | τ (タウ) |
| | 0 | ν_e (電子ニュートリノ) | ν_μ (μ ニュートリノ) | ν_τ (τ ニュートリノ) |
| クォーク | 2/3 | u (アップ) | c (チャーム) | t (トップ) |
| | -1/3 | d (ダウン) | s (ストレンジ) | b (ボトム) |

電弱理論は、電荷間に働く力（電磁相互作用）及び β 崩壊などを引き起こす弱い相互作用とを統一的に記述するものであり、ゲージ対称性の自発的破れ（ヒッグス機構）を伴うゲージ理論に基づいている。この理論では、基本粒子間の電磁相互作用は質量をもたない光子が交換されることにより、また、弱い相互作用は3種のウィークボソン（ W^\pm ボソン、 Z^0 ボソン）が交換されることにより生じると理解されている。また、3種のウィークボソンは、対称性の破れ（ヒッグス機構）により質量をもつとされ、これまでの実験結果から W^\pm ボソンで約 $80\text{GeV}/c^2$ 、 Z^0 ボソンで

表Ⅱ-1-2 標準理論における対象相互作用とゲージ粒子

| 力 (相互作用) | 力の種類 | 関係する 基本粒子 | 相互作用を媒介する ゲージ粒子 |
|-----------------|-------|--------------|--------------------------------|
| 電磁力 (電磁相互作用) | 遠隔力 | 電荷をもつもの | 光子 |
| 弱い力 (弱い相互作用) | 極短距離力 | レプトン、クォーク | ウィークボソン (W^\pm 、 Z^0) |
| 強い力 (強い相互作用) | 短距離力 | クォーク | グルーオン (g : 8種類) |

約 $91\text{GeV}/c^2$ の質量をもっていることが明らかにされた。ゲージ粒子の大きな質量が弱い相互作用を極短距離力 (10^{-18}m 程度の範囲で作用する) にしている。

QCDは、クォークの複合粒子とされるハドロン間の強い相互作用を記述するものであり、色の自由度によるゲージ理論 (ゲージ対称性の自発的破れ (ヒッグス機構) を伴う) に基づいている。ハドロンとは、中間子 (メソン) および陽子、中性子などの重粒子 (バリオン) の総称であり、中間子はクォークと反クォークの対 ($q\bar{q}$) で、また重粒子は3つのクォーク (qqq) で構成される。また、6種類のクォークは、各々が3つの (便宜上、赤、青、緑の3色で表す) 自由度をもつとされる。この理論では、6種類のクォーク間の強い相互作用は、8種類の質量をもたないグルーオン (ゲージ粒子) を交換することにより生ずると理解されている。クォーク間力は、遠距離で強く近距離で弱いという漸近的自由性をもつとされており、これが、「クォークは、ハドロン内部には存在するが単独では取り出せない」とする「クォークの閉じ込め」の性質に関係があると考えられている。この漸近的自由性により、強い相互作用 (いわゆる核力) は短距離力 (10^{-15}m 程度の範囲で作用する) になっていると理解されている。

標準理論が形成されるにあたり、高エネルギー加速器が関与してきた過程を表Ⅱ-1-3に簡単にまとめる。これらの高エネルギー実験は、電子・陽電子衝突、電子・陽子衝突および陽子・反陽子衝突によるものである。これらの高エネルギーの衝突実験を行う大型のシンクロトロンあるいは大型の線形加速器を衝突器 (Collider) と呼んでいる。

標準理論はこれまでの高エネルギー実験の結果と矛盾しないものであるが、現在、高エネルギー物理学が直面する課題の一つに、この理論が記述するゲージ対称性の自発的破れ (ヒッグス機構) に基づくクォーク、レプトンおよびゲージ粒子の質量発生機構の検証がある。標準理論では、真空の対称性の破れにともない真空中に凝縮したヒッグスボソン (ヒッグス粒子) は、弱い相互作用を媒介するウィークボソンとは弱い相互作用をし、その結果ウィークボソンは質量を獲得し、また、クォーク、レプトンとも湯川型の未知の力 (この力は標準理論の枠内では決められない) で相互作用し、同様にクォーク、レプトンは質量を獲得する、としている。すなわち、ヒッグスボソンは質量の起源を説明する基本的な粒子と考えられており、その実験的検証が質量の起源を解明することであり、標準理論の検証に残された最も大きな課題となっている。しかし、ヒッグスボソンの質量はヒッグスボソン同士に働くヒッグス相互作用の結合定数により決まるため、標準理論ではヒッグスボソンの質量を予言することはできないとされている。また、ニュートリノが有限の質量を持つかどうかについても決められず、その他にも決められないパラメーターが多くあるため、標準理論を包含する理論が必要であるとされている。

表－Ⅱ－１－３ 標準理論の成立の過程とその実験的立証の歴史

| 年 | 発 表 内 容 な ど |
|-----------|---|
| 1964 | <p>・Murray Gell-Mann (C I T (カリフォルニア工科大学)) と George Zweig (C I T、CERN (欧州合同原子核研究機関)) が、各々、8重項を成すバリオン (重粒子) およびメソン (中間子) が (u、d、s) の3つの基本粒子 (クォーク) で説明できるとするアイデアを提出。</p> <p>・Sheldon Glashow と James Bjorken (S L A C (スタンフォード線形加速器センター)) が、レプトンとの類似性により4番目のクォーク、チャーム (c) の存在を示唆。</p> |
| 1965 | <p>・O.W. Greenberg, M.Y. Han と南部陽一郎が色電荷の理論を提出。</p> |
| 1967 | <p>・Steven Weinberg (L B L (ローレンス・バークレイ国立研究所)、M I T (マサチューセッツ工科大学)) と Abdus Salam (Imperial Colledge, London) が、別個に、電磁相互作用と弱い相互作用を統一する電弱相互作用の理論 (電弱理論: Weinberg-Salam 理論) を提案。</p> |
| 1968-1969 | <p>・James Bjorken と Richard Feynman (C I T) がスタンフォード線形加速器による電子・陽子散乱実験の結果を解析し、陽子を構成するクォークの存在の証拠を発見。</p> |
| 1973 | <p>・Donald Perkins がCERNの古いデータを解析し、荷電交換を伴わない弱相互作用の証拠を発見。</p> <p>・強い相互作用の場の量子論が定式化され、量子色力学 (Murray Gell-Mann ら命名) と呼ばれる。</p> <p>・小林誠、益川敏英は、中性K中間子の崩壊に見られるCPの破れを Weinberg-Salam 理論に基づいて説明するには、クォークが少なくとも6種あり、世代混合と呼ばれる特定の相互関係が必要であるとの理論を提唱。(小林・益川の6元クォーク模型→ボトムクォーク (b)、トップクォーク (t) の提唱)</p> |
| 1974 | <p>・John Iliopoulos が初めて標準理論の物理的描像を発表。</p> <p>・Burton Richter (S L A C) が電子シンクロトロン・蓄積リング (SPEAR) を用いた電子・陽電子衝突実験で、また、Samuel Ting (M I T) がBNL (ブルックヘブン国立研究所) の陽子シンクロトロン (AGS) での陽子を固定標的に当てた実験で、それぞれ独立に J/ψ 粒子 (チャームクォーク・反チャームクォークの複合粒子) の発見を同時に発表。</p> |
| 1976 | <p>・Gerson Goldhaber と Francois Pierre がD0メソン (反アップクォーク・チャームクォークの複合粒子) を発見。</p> <p>・Martin Perl (S L A C) は、SPEAR での電子・陽電子衝突実験で最初の第3世代のレプトン、タウ (τ) 粒子を発見。</p> |
| 1977 | <p>・Leon Lederman (F N A L (フェルミ国立加速器研究所)) は、陽子シンクロトロンでの陽子・固定標的衝突実験でボトムクォーク (b) を発見。</p> |
| 1978 | <p>・Charles Prescott (Yale 大学) と Richard Taylor (S L A C) は、S L A C の線形加速器からの偏極電子の重水素による散乱実験で、標準理論が予言するZボゾンが媒介する弱相互作用を観測。</p> |

(次頁に続く)

表Ⅱ-1-3 標準理論の成立の過程とその実験的立証の歴史

| 年 | 発表内容など |
|-------|--|
| 1979 | ・ DESY (ドイツ電子シンクロトロン研究所) の電子・陽電子衝突器 (PETRA) での実験でクォークによって放射されるグルーオンの存在の強い根拠を発見。 |
| 1983 | ・ CERN の Carlo Rubbia と Simon Van der Meer によって開発された反陽子ビーム冷却技術を使った陽子・反陽子衝突型シンクロトロン (SPS) の 2 つの実験で電弱理論が要求する W ボソンおよび Z ボソンが発見される。 |
| 1986～ | ・ 高エネルギー物理学研究所 (KEK) の電子・陽電子衝突器 (TRISTAN) での実験が開始され、Z ボソンの質量の決定や基本粒子の世代数 (3) の決定などに寄与するデータを出す。(重心系エネルギーは最高で 65GeV) |
| 1989～ | ・ SLAC の電子・陽電子衝突器 (SLC) での実験 (SLD 実験; 重心系エネルギー 90GeV) および CERN の電子・陽電子衝突器 (LEP) での実験 (OPAL など 4 つの実験 (重心系エネルギー 110GeV)) は、基本粒子は 3 世代しか存在しないことを強く示唆する。これらの実験により Z ボソンの質量 ($91.1\text{GeV}/c^2$) が、また、FNAL の陽子・反陽子衝突型シンクロトロン (Tevatron) での詳細な実験により W ボソンの質量 ($80.0\text{GeV}/c^2$) が明らかになった。 |
| 1995 | ・ FNAL の Tevatron での実験で CDF と D0 グループがトップクォーク (t) を発見、その質量が $175\text{GeV}/c^2$ であることを明らかにした。 |
| 1998 | ・ 東京大学宇宙線研究所のスーパーカミオカンデ (5 万トン水チェレンコフ検出器) での観測で、大気ニュートリノを用いて、地球を通過する際のニュートリノ振動 (μ ニュートリノから τ ニュートリノへの変換) の強い証拠を見いだした。 |
| 1999 | ・ KEK と東京大学との共同で、12GeV 陽子シンクロトロンを用いたニュートリノ振動実験が開始された。 ・ (高エネルギー加速器研究機構) KEK の TRISTAN のトンネル内に設置された電子・陽電子衝突器での B ファクトリー実験が開始された。 ・ SLAC の電子・陽電子衝突器 PEP II において、B ファクトリー実験が開始された。 ・ K2K (KEK・神岡間) 長基線ニュートリノ振動実験が開始され、スーパーカミオカンデにおいてニュートリノ事象の観測がスタートした。 |
| 2000 | ・ BNL の RHIC において、高エネルギー重イオン同士の衝突実験が開始された。 ・ CERN の電子・陽電子衝突器 (LEP II) での実験 ((重心系エネルギー 200GeV) でヒッグス粒子らしき粒子が観察された (未確認))。 |

(日本の貢献については、CERN の LEP、LEP II では OPAL 実験に東京大学 (素粒子物理国際研究センター)、神戸大学が、また、LHC では ATLAS 実験に KEK、東京大学、神戸大学、広島大学、東京都立大学他の 12 研究機関が、SLAC の SLC では SLD 実験に、名古屋大学、東北大学などが、FNAL の Tevatron では CDF 実験に、筑波大学、大阪市立大学、早稲田大学、岡山大学他の 6 研究機関が参加している。)

標準理論では決められないニュートリノ質量の有無を確認することや、同様に、クォークとレプトン間の相互作用をより精密に調べる（この過程において、レプトンである電子内部構造についても調べる）ことについては、標準理論の検証のみならず、大統一理論など、標準理論を包含する理論への基礎となる検証課題である。

また、QCDでは、グルーオンが媒介するクォーク間力は漸近的自由性をもつとされ、「クォークの閉じ込め」の性質が出現しているとされる。しかし、クォークとグルーオン系の温度が極めて高い状態（数兆度以上）やクォークの密度が極めて高い状態（普通の原子核の10倍以上）では、「クォークの閉じ込め」の性質は破れ、クォークとグルーオンが入り混じって存在するプラズマ状態（これを、「クォーク・グルーオンプラズマ」という）になると予測されている。これを検証することは、標準理論の検証のみならず宇宙創生直後の状況を調べることで考えられており、現在の高エネルギー物理学の重要な課題の一つになっている。

2) 力(相互作用)の大統一と超対称理論

標準理論においては、自身では決めることのできない多数のパラメータを含んでいる。これらをより少ない定数から導出するとともに、自然界を支配する力を統一的に説明する理論が追求されている。なお、標準理論はこれまでの実験結果を良く説明するものであることから、追求されている理論は、標準理論を包含するとともに、究極的には自然界を支配する4つの力を統一的に説明できるものと期待されている。

標準理論を包含する理論として、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用を、唯一の相互作用定数をもつ（非可換）ゲージ理論として統一して記述する大統一理論（Grand Unified Theory）が提唱されている。（なお、数学的な記述の仕方はいくつか提案されている。）この理論においても、標準理論と同様に、ゲージ対称性の自発的破れ（ヒッグス機構）を持つとされており、バリオン数を保存しない相互作用を媒介するゲージ粒子（ $10^{15}\text{GeV}/c^2$ ）およびウィークボソン（ $80\sim 90\text{GeV}/c^2$ ）が導かれる。この $10^{15}\text{GeV}/c^2$ の質量をもつゲージ粒子は、安定な粒子と考えられている陽子の崩壊現象を起こす相互作用を媒介するものであり、大統一理論においては陽子の崩壊現象が起こることを示唆するものであるが、ゲージ粒子の質量が極めて大きいことから、この現象が極めて少ない確率で発生するものと考えられている。陽子崩壊現象を観測する実験は、岐阜県神岡町の神岡鉱山跡に設置されたスーパーカミオカンデ（東京大学宇宙線研究所の5万トン水チェレンコフ検出器）などで進行中であるが、現在まで確認されていない。

一方、大統一理論において、くりこみ群の理論による3つの力の有効相互作用の強さはエネルギースケールとともに変化し、エネルギーが非常に大きく（ 10^{15}GeV 程度）なると一致する（力の大統一が起こる）のではないかと考えられていたが、欧州合同原子核研究機関（CERN）におけるLEP IIなどでの電子・陽電子衝突実験データにより詳細な計算を行うと、これらが一致しないことが示された。また、この大統一理論においても、ヒッグスボソンの質量を決定することはできていない。

これらの点を救うものとして、フェルミオン-ボソン間の新たな対称性（超対称性）を導入した超対称理論（Supersymmetric Theory）が提唱されている。この理論によると、 10^{16}GeV 程度のエネルギースケールにおいて力の大統一が起こることが示されている。また、超対称理論では、

ヒッグスボソンの質量は比較的軽い ($150\text{GeV}/c^2$ 以下) ことが予想されている。

素粒子世界には、半整数スピンをもつフェルミオン (クォーク、レプトンなど) および整数スピンをもつボソン (ゲージボソン、ヒッグスボソンなど) が存在するが、このフェルミオン-ボソン間の変換に対して相互作用が不変であることを要求する理論が、超対称理論である。標準理論を構成するゲージ対称性は、ゲージ変換に対して相互作用が不変であることを要求するもののフェルミオン-ボソン間の変換は要求せず、フェルミオン (ボソン) はフェルミオン (ボソン) のままである。超対称理論においては、フェルミオンとボソンが対 (例えば、電子 (スピン $1/2$ 、フェルミオン) にはスカラー電子 (スピン 0 、ボソン) など) になっており、超対称粒子の発見が今後の大きな課題の一つである。また、上記のフェルミオン-ボソン間の変換は時空の対称性と密接に結びついており、超対称理論は、時空の幾何学である重力理論 (一般相対性理論) と自然に一体となり、重力をも統一する超対称大統一理論 (Supersymmetric Grand Unified Theory) へ導くものと考えられている。

超対称理論は、質量、電荷の等しい対の粒子 (超対称粒子) の存在を要求しているが、例えば、電子と同じ質量、電荷を持ち、スピンが 0 のスカラー電子がこれまでに見つかっていないことなど、現実の世界においては「超対称性は破れている」と考えられている。超対称性の破れに関しては、重力を含む超対称理論 (超重力理論) がこれまでの観測結果に対してごく自然な説明を与えるものと考えられている。これによると、クォークやレプトンの超対称パートナー粒子は、かなり重いことが示唆されている。また、超対称理論において電弱理論の対称性の破れを実現するには、トップクォークの質量が陽子の 100 倍程度あることが必要であると考えられていたが、 1995 年にフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) での実験により発見されたトップクォークの質量は $175\text{GeV}/c^2$ であり、超対称理論を支持するものであった。なお、超対称粒子の質量は、対応する通常粒子に比べて重い、理論の自然さから $1\text{TeV}/c^2$ 程度以下であるものと考えられている。

超対称理論は、大統一理論に基づく陽子崩壊現象について崩壊メカニズムの変更を必要とするが、スーパーカミオカンデでの実験により確認できる程度の崩壊確率を持つことを示唆しているとされている。

3) CP不変性の破れの検証

素粒子の相互作用の対称性に関する概念として、荷電共役変換 (C : 電荷の符号を変える変換 : 粒子-反粒子変換) と空間反転 (P : 空間座標の符号を変える変換) を同時に行う CP 変換がある。この変換に対して相互作用が不変の時は、CP 不変性が保たれているといわれ、粒子-反粒子間の対称性が保たれることを意味している。強い相互作用、電磁相互作用は CP 不変性が保たれており、弱い相互作用も多くの場合は CP 不変性が保たれている。 1964 年に中性 K 中間子の崩壊の中に CP 不変性が破れる現象が発見され、 1973 年に、小林誠、益川敏英はこの現象を説明するものとして、クォーク世代混合の概念を含む「クォーク 6 元模型」(小林・益川模型) を提案した。この CP 不変性の破れの起源については、小林・益川模型により説明できるとされているものの、未解決の課題である。なお、現在の宇宙が大部分粒子で構成され反粒子が少ないのは、CP 不変性の破れに起因しているものと考えられている。CP 不変性の破れに関しては、K 中間子を用いた実験が CERN (NA48 実験) や FNAL (KTeV 実験) で行われてきている。

現在の高エネルギー物理学の重要な課題の一つが、 CP 不変性の破れる現象の精密な検証である。これまで中性 K 中間子の崩壊において CP 不変性の破れが見つかったが、ボトムクォーク (b) を含む中間子である B 中間子は、その崩壊過程において大きな CP 不変性の破れが発現するものと予想されている。このため、電子・陽電子衝突により B 中間子を大量に発生させる B ファクトリー計画が進められてきており、日本（高エネルギー加速器研究機構 (KEK)）や米国（スタンフォード線形加速器センター (SLAC) およびコーネル大学 (CU)）において、精密な実験的検証が開始され、検証のためのデータが蓄積されつつある。

また、 K 中間子を用いて精度の良い検証を行うためには、 K 中間子を大量に発生させることができるよう、陽子ビームのエネルギーおよび強度が十分に高いことが要求される。この検証については、KEKで計画されている 50GeV 陽子シンクロトロンなどから構成されるハドロン研究用大型加速器が必要とされている（大型ハドロン計画）。なお、大型ハドロン計画は、日本原子力研究所の中性子科学研究用大型加速器計画と統合されて「大強度陽子加速器施設計画」となった。

4)現在進行中あるいは今後の高エネルギー物理学実験

以上述べた素粒子理論研究を更に進展させめるために、検証が必要とされている大きな課題を挙げると、以下のようにまとめられる。

- ①ニュートリノ質量の有無の検証
- ②クォークとレプトン間相互作用の精密調査
- ③ CP 不変性の破れ (CP 非保存) の精密検証
- ④クォーク・グルーオンプラズマ中での「クォークの閉じ込め」の破れの検証
- ⑤質量の起源を説明する基本的な粒子、ヒッグスボソンの探索
- ⑥超対称粒子の探索

など。

①ニュートリノ質量の有無の検証

ニュートリノは、表Ⅱ-1-1に示すように標準理論においては基本粒子レプトンであり、弱い相互作用に関連している。その存在は 40 年ほど前に確認され、質量が非常に小さいことが知られているが、反応率が極めて低いいためその性質は良くわかっていない。先に述べたように、標準理論ではニュートリノの質量は決められない。現代の素粒子理論においては、基本粒子の質量は、ゲージ対称性の自発的破れにともない発生するゲージ粒子との相互作用の結果として発現するものとされており、ニュートリノ質量の有無の確認は、その根元的な課題であるとされる。

電子ニュートリノ、 μ ニュートリノおよび τ ニュートリノが各々異なる質量を持つとすると、質量の固有状態は、各々これらの異なるニュートリノに対応するものとなる。一方、弱い相互作用の固有状態は、質量の固有状態とは異なり、質量の異なる固有状態（異なるニュートリノを表現する状態）の重ね合わせにより表現されるとしている。これは、弱い相互作用による崩壊現象で発生したニュートリノが、走行中にその種類が変化することを意味するものであり、「ニュートリノ振動」と呼ばれている。

スーパーカミオカンデでの観測で、大気中での一次宇宙線の反応でつくられる π 中間子、 K 中

間子の崩壊生成物である大気ニュートリノを用いて、地球を通過する際のニュートリノ振動 (μ ニュートリノから τ ニュートリノへの変換) の強い証拠を見いだしている (1998 年 6 月) [II1j]。これは、ニュートリノには質量が有ることを示唆する初めての信頼性のある証拠であり、陽子加速器を使った更なる精密確証実験が、日本 (KEK) および米国 (FNL) で開始 (あるいは準備) されている (表-II-1-4 参照)。これらの実験では、陽子ビームを標的に当てて発生させた π 中間子の崩壊で発生するニュートリノを非常に長い距離を走らせ、ニュートリノの減少を精密に測定しようとするものである。

表-II-1-4 ニュートリノ振動の精密検証実験

| 研究機関 | 計画および加速器 | 実験開始年 |
|--|--|------------|
| 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) (茨城県つくば市) 東京大学宇宙線研究所 (岐阜県神岡町) | 長基線ニュートリノ振動実験 (K2K) ; 陽子シンクロトロン KEKPS (12GeV) の陽子ビームを使いニュートリノを発生させ、約 250km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデで、ニュートリノ振動現象を測定する | 1999 年 6 月 |
| フェルミ国立加速器研究所 (FNL) (Illinois 州 Batavia) | NuMI Project ; Tevatron 用の Main Injector {120GeV 陽子シンクロトロン (1999 年完成)} の陽子ビームを使いニュートリノを発生させ、約 730km 離れた地点 (Minnesota 州 Soudan) で、ニュートリノ振動現象を測定する | 実験施設建設中 |

②クォークとレプトン間相互作用の精密調査

QCD の成立過程においては、高エネルギーの電子・陽子衝突実験でクォークやグルーオンの存在の証拠が観察され、ハドロンがクォークの複合粒子である考え方が確立したと考えられている。しかし、クォークとレプトン間の相互作用については、1980 年代からの数多い電子・陽電子衝突実験および陽子・反陽子衝突実験においては、十分に探られてきているとは言えない状況であったが、ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) では、西欧 6 カ国と共同で大型の電子・陽子 (シンクロトロン) 衝突器 HERA (30GeV 電子 + 820GeV 陽子) が建設され、1992 年より実験が開始された (この実験については、日本 (KEK など) も参加している)。この電子・陽子衝突から得られる情報は、陽子の内部構造に関するものばかりではなく、クォークや電子に内部構造があるとするとその情報も含むものとなっていると考えられ、クォークの構造あるいは電子の構造までを探れるものと考えられている。なお、陽子構造については、これまでに豊富な実験データが得られている。

標準理論においては、電子、 μ 粒子、 τ 粒子は基本粒子のレプトンであり、内部構造を持たないとされている。レプトンの内部構造を探る研究は、標準理論の検証のみならず、標準理論を包含する新しい理論体系を模索する上で、重要な課題であると認識されている。

③CP不変性の破れ(CP非保存)の精密検証

CP 非保存の検証については、従来から K 中間子を使うものがあるが、より精密な実験として、

電子・陽電子衝突により T 粒子 ($10.6\text{GeV}/c^2$) を発生させ、その崩壊による B 中間子を大量に発生させる計画 (B ファクトリー計画など) が進められてきており、現在、以下の高エネルギー加速器施設で実験が開始されている (表-Ⅱ-1-5 参照)。この実験では、B 中間子の寿命の短さからくる観測上の難しさがあり、それをカバーするため、B 中間子を速い速度で運動させ (相対論的效果により) その寿命を伸ばせるよう、電子、陽電子のエネルギーを非対称にする方法も取られている。

なお、K 中間子を使う CP 非保存の検証は QCD 原子核物理 (素粒子・原子核物理) 研究にも関連するものであり、今後の加速器整備とともに研究が進展するものと考えられている (原子核物理学研究分野参照)。

表-Ⅱ-1-5 CP不変性の破れの検証実験

| 研究機関 | 加速器 | 実験開始年 |
|-------------------------|--|--------|
| 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) | KEKB ; TRISTAN に使用したリング内に設置された電子 (8.0GeV)・陽電子 (3.5GeV) 非対称エネルギー衝突器 | 1999 年 |
| スタンフォード線形加速器センター (SLAC) | PEP II ; PEP のトンネル内に設置した電子 (9.0GeV)・陽電子 (3.1GeV) 非対称エネルギー衝突器 | 1999 年 |
| コーネル大学 (CU) | CESR PhaseIII ; CESR を用いた電子 (5.3GeV)・陽電子 (5.3GeV) 対称エネルギー衝突器 | |

④クォーク・グルーオンプラズマ中での「クォークの閉じ込め」の破れの検証

クォーク・グルーオンプラズマは、多数のクォークやグルーオンが存在する系 (重元素の原子核) に大きなエネルギーを与え、系の温度を極めて高く、かつ、密度を通常の原子核の 10 倍程度まで上げるときに出現するものと考えられている。このような状態では、原子核を構成する核子 (陽子および中性子) がバラバラになるものと予想されており、これを実現するためには、高い加速エネルギー ($100\text{GeV}/n$ 程度) をもつ重イオンどおしを衝突させることが必要である。

CERN おいては、SPS を用いて重イオン・重イオン衝突実験が続けられてきており、最近クォーク・グルーオンプラズマの存在が確認されたと報告されている。

米国のブルックヘブン国立研究所 (BNL) で建設が終了した新しい加速器 RHIC において、重イオン・重イオン衝突実験が開始されている。また、将来的には、CERN で建設中の陽子・反陽子衝突型シンクロトロン LHC (Large Hadron Collider) においても、より高エネルギーの重イオン・重イオン衝突実験が計画されている。

⑤質量の起源を説明する基本的な粒子、ヒッグス粒子(ヒッグスボソン)の探索

標準理論においてクォーク、レプトンおよびゲージ粒子の質量発生を担うヒッグス粒子(ヒッグスボソン)の探索は、標準理論の検証の上での大きな課題となっている。標準理論を包含する超対称理論では、ヒッグス粒子の質量を $150\text{GeV}/c^2$ 以下と予言しており、このエネルギー領域(重心系で $150\text{GeV}\sim$ 数 100GeV)での探索が必要であると考えられている。先にも述べたように、ヒッグス粒子の発見は、標準理論の検証のみならず超対称理論への足がかりになるものと考えられており、その探索は非常に重要な課題であると認識されている。

この課題のために必要とされるエネルギー領域は重心系で $150\text{GeV}\sim$ 数 100GeV とされているが、これには、内部構造を持たないとされる電子とその反粒子(陽電子)の衝突実験が望ましいとされている。これは、加速された電子、陽電子のエネルギーがすべて新粒子の生成反応に使われ、また、反応そのものが単純であることによるものである。が、電子(陽電子)については、このエネルギー領域まで加速するには、シンクロトロンでは電子(陽電子)が周回中に起こすエネルギー損失(シンクロトロン放射)により非効率であるため、直線状の大規模な線形加速器が必要と考えられており、世界の主要国でその計画が検討されている。(最近、世界最大のシンクロトロンである CERN の LEP II において、ヒッグス粒子存在の兆候が観測されたとの報道があった(事実関係については、[II 1k]参照)が、LEP II から LHC への移行作業により観測が停止されるとされている。)一方、電子に比べて約 2,000 倍の質量を有する陽子および反陽子を加速粒子とすると、シンクロトロンでも放射光によるエネルギー損失が小さく効率的に加速され、シンクロトロンによる限界の問題はない。しかし、陽子、反陽子は内部構造を持っており衝突の全エネルギーの数の 1 が新粒子の生成反応に使われるのみであり、電子・陽電子衝突の場合に比べて数倍の加速エネルギーが必要とされる。

ヒッグス粒子の探索においては、エネルギーフロンティアでの電子・陽電子衝突(レプトン衝突)実験あるいは陽子・反陽子衝突(ハドロン衝突)実験が必要とされるが、これらの衝突実験は、(これまでの高エネルギー物理学実験でもそうであったように)互いに相補的なものと考えられている。陽子・反陽子衝突実験は、以下に述べるように、現存する大型衝突リングでまだエネルギーを高められる余地があるが、その衝突反応の複雑さや実質的に新粒子生成に使われる効率の低さから、新しい事象の発見という役割には適しているものの、精密な検証には向かないとされている。一方、電子・陽電子衝突では、衝突エネルギーのすべてが新粒子生成反応に効率よく使われ、かつ、反応が比較的単純であることより、精密な検証に向いているとされるが、上で述べたように、直線状の大規模な線形加速器が必要と考えられ技術面での難しさがある。

なお、レプトン衝突実験として、第2世代のレプトンで電子の約 200 倍の質量を有するミューオン(μ 粒子)およびその反粒子を加速粒子とすると、シンクロトロンでも放射光によるエネルギー損失が小さく、これまで電子・陽電子衝突実験に用いたシンクロトロンで、電子に比べて数十倍のエネルギーまで加速できるものと考えられている。また、 μ 粒子・反 μ 粒子衝突では、電子・陽電子衝突に比べて、ヒッグス粒子の生成される確率がかなり高いと予想されている。しかし、その(静止)寿命が短いため、実際に加速粒子として使うには関連する技術の研究開発が必要とされている。

⑥超対称粒子の探索

超対称理論においてはクォークやレプトンあるいはゲージボソンなどと対を成す超対称粒子が仮定され、その質量は対応する通常粒子に比べて重いものの、理論の自然さから 1 TeV/c² 程度以下であるものと考えられている。この超対称粒子の存在を検証することは、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）の解明を更に進めることとなり、極めて重要な課題であると認識されている。この検証においては、重心系で 1TeV～数 TeV のエネルギー領域での探索が必要であると考えられている。このエネルギー領域は、③におけるヒッグス粒子の探索に必要とされるエネルギーより数倍高いものであるが、それらの粒子・（反）粒子衝突実験の延長線上にあるものとされている。

以上⑤および⑥の検証を行ってゆくには、以下の表Ⅱ－１－６に整理されるような粒子ビームを用いた衝突実験が必要とされている。いずれも、非常に大型の衝突器を必要とするものである。

表Ⅱ－１－６ 素粒子物理学エネルギーフロンティア研究に要求される粒子とエネルギー

| 加速衝突粒子 | 既に達成された 粒子エネルギー（重心系） | 必要とされる 粒子エネルギー（重心系） |
|-------------|--------------------------------|------------------------|
| 陽子・（反）陽子 | 約 1.8 TeV (0.9TeV + 0.9TeV) | 数 TeV 以上 |
| 電子・陽電子 | 約 200 GeV (100GeV + 100GeV) | 250GeV～約 1.5 TeV |
| μ 粒子・反 μ 粒子 | — | ～数 TeV |

A 陽子・（反）陽子衝突実験

上表の中で、技術的、資金的に最も容易なものは、陽子・（反）陽子衝突実験である。陽子・反陽子衝突実験によるこれまでに達成されたエネルギーは、重心系で約 1.8TeV（F N A L の Tevatron）であるが、C E R N では、電子・陽電子での衝突実験を終了した LEP II のトンネルを用いた、陽子・陽子衝突器 LHC（重心系エネルギーで 14TeV（7TeV + 7TeV））の建設が開始されている。日本や米国もこの加速器建設に協力しており、大規模な国際共同プロジェクトとなっている。また、F N A L の Tevatron においても、更なる性能の向上がなされている。

米国 S S C 研究所（S S C L）においては、陽子・陽子衝突器 SSC（重心系エネルギーで 40TeV（20TeV + 20TeV））の建設を 1989 年に開始したが 1993 年に中止された。なお、米国の F N A L を中心とする研究者においては、LHC 以後を念頭にした超大型陽子・陽子衝突器 VLHC（周長約 100km 以上：重心系エネルギーで 100TeV）のものも考えられている。

B 電子・陽電子衝突実験

標準理論では基本粒子となっている電子（あるいは陽電子）を加速し衝突させるものが検証実験には最も望ましいとされる。電子・陽電子衝突実験によるこれまでに達成されたエネルギーは、重心系で約 209GeV[Ⅱ 1k]であるが、これより高いエネルギーを有する電子あるいは陽電子を加速するには、線形加速器が有効であるとされている。しかし、現代の素粒子理論が予言する粒子を検証するエネルギーまで電子、陽電子を（できるだけ高い加速勾配で）加速し、求める現象を高い頻度で発生させるためには、研究開発が必要であり日本（KEK）、ドイツ（DESY）、米国（SLAC）などにおいて研究開発がなされている。次世代の（250GeV + 250GeV）大型線形衝突器計画に関する概要を表Ⅱ－1－7に示す[Ⅱ 1l][Ⅱ 1m]。

表Ⅱ－1－7 次世代大型電子・陽電子リニアコライダー（線形衝突器）計画
（250GeV + 250GeV）

| 加速器名称 | TESLA | JLC | | NLC | CLIC | VLEPP |
|------------------------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| 研究機関 （国・地域） | DESY （ドイツ） | KEK （日本） | | SLAC （米国） | CERN （欧州） | B INP （ロシア） |
| 加速周波数（GHz） （バンド名称） | 1.3 （L） | 5.7 （C） | 11.4 （X） | 11.4 （X） | 30 （K） | 14 （K） |
| ビーム繰返し（Hz） | 5 | 100 | 150 | 180 | 511 | 15 |
| ルミノシティ（(nbs) ⁻¹ ） | 3.7 | 5.02 | 5.18 | 3.5 | 4.4 | 12 |
| 加速勾配（MeV/m） | 25 | 33 | 58.2 | 37 | 100 | 96 |
| 全長（km） | 30 | 18.8 | 10.5 | 15.6 | 7.3 | 6.4 |

C μ 粒子・反 μ 粒子衝突実験

これまでに建設された大規模シンクロトロンにより、電子と同じく基本粒子である第2世代のμ粒子（あるいは反μ粒子）を加速して実験を行うことも考えられている。μ粒子の質量が電子の約 200 倍であり、周回中のシンクロトロン放射によるエネルギー損失が小さく効率的に加速できるが、μ粒子、反μ粒子の発生装置（陽子ビームを標的に当てて発生させたπ中間子の崩壊で得られるμ粒子、反μ粒子を効率的に集める装置）が必要であること、およびμ粒子の（静止）寿命が 2.2μs と短いことから、衝突現象の頻度を高めるためのビーム冷却において、時間のかかるストカスティック冷却ではなく、短時間で行えるアイオニゼーション冷却を用いることなど、種々の研究開発が必要であり、電子・陽電子線形衝突器よりは将来の加速器であると考えられている。

(2)高エネルギー物理学研究加速器の要件

上に述べたように、高エネルギー物理学の目的は、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）の解明をめざすことである。より具体的には、標準理論の検証、標準理論を超えた大統一理論や超対称理論などの可能性を、高エネルギーの実験を通して追求してゆくことである。

高エネルギー物理学の研究目的により、この分野の研究に使われる加速器の要件は、以下のようによまとめられよう。

- ①エネルギーフロンティアでの実験が可能なエネルギーをもつ粒子ビームを発生させられること
- ②粒子ビームどおしの衝突で目的とする現象が高い頻度で発生するビーム衝突特性（大きなルミノシティ；大きなビーム強度、小さなエミッタンス）を有すること

高エネルギー物理学研究の特徴の一つは、世界の主要国が国の威信をかけて競い、数多くのノーベル賞研究を生み出してきていることである。世界の主要国の高エネルギー物理学研究者は、より確実に、より速くフロンティアを切り開いてゆくことが求められてきた（あるいは、それを求めてきた）。このことが高エネルギー加速器の発展方向に影響を及ぼしてきたとも考えられる。

この分野における加速器は、まず①の要件のため大規模なものとなる。後にも述べるように、高エネルギー加速器は高周波（マイクロ波あるいはR F（Radio Frequency）波）加速によるシンクロトロンや線形加速器（ライナック）である。

エネルギーフロンティアをめざすシンクロトロンは、粒子（電子、陽子など）を多数の電磁石により軌道を曲げて周回させ、途中に設置した高周波加速空洞を粒子が通過する度に少しずつ加速し（参考資料1（各種加速器の説明）参照）、最終的に非常に高いエネルギーまで加速する装置である。高エネルギーシンクロトロンの周回軌道の大きさが、周長で数 km から数 10km の非常に大きな規模になるのは、陽子については（反陽子についても同様）、高エネルギー陽子の質量が相対論的效果により非常に重くなり、電磁石で曲げられる度合いが小さく、曲率半径が大きくなるためである。また、電子については（陽電子についても同様）、元々の質量が小さいため電磁石により曲げる度合いを大きくし、軌道を小さくすることは陽子に比べると容易ではあるが、曲げる度合いを大きく（曲率半径を小さく）すると周回時のシンクロトロン放射が大きくなり電子の加速効率が悪くなることから、結果的に大きな周回軌道が必要となることによる。電子、陽子（陽電子、反陽子も同様）とも、シンクロトロンで加速する場合は、エネルギーが高くなればなるほど曲率半径の大きい周回軌道が必要となる。前述したように、電子については、CERNの大型電子シンクロトロン LEP II（周長約 27km）を超えるエネルギーを達成するためには、シンクロトロン放射のない大型の線形加速器が必要であると考えられている。

線形加速器（ライナック）は、円筒状の加速空洞ユニットを直線上に並べ粒子を加速するものである。各ユニットの空洞にクライストロンで発生させたマイクロ波（電子の場合は通常Sバンドといわれる波長が 10cm 程度（約 3GHz 程度）のもの）を入力させ、空洞内に発生する進行波電場により粒子を加速してゆく（参考資料1（各種加速器の説明）参照）。この加速空洞における電子加速勾配は使う高周波にもよるが数 10 MeV/m 程度であり、仮に数 100GeV の電子ビームを得る場合は、数 km～数 10km の長さの線形加速器が必要となるとされている。これまで、エネルギー

フロンティアの実験に使われてきた線形加速器は、SLACのSLC (50GeV 電子・陽電子衝突器＝線形加速部 (長さ 3,050m : Sバンド使用) と衝突用アーク部 (周長約 2km) から構成される) のものだけである。表Ⅱ-1-7に示したように、次世代の大型電子・陽電子線形衝突器については、CバンドやXバンドあるいはKバンドでの高周波加速が計画されている。Cバンド加速技術の開発は終了しているが、Xバンド加速は現在開発中の技術であり、CERNにおけるKバンド加速はⅣ章で説明する2ビーム加速で、Xバンド加速よりは将来の技術であると見られている。

大型の加速器は非常に多くの装置より構成され、個々の装置の信頼性はもとより、装置と装置間の連携が正しく行われないと粒子加速はできないため、極めて精密な制御が要求される巨大精密装置であるといえる。このため、主要構成装置である高周波加速部や電磁石などに大きな変更があると、大規模加速器の全体系に大きな変更を迫ることとなる。②の要件を満たしつつ、より確実に、より速くフロンティアを切り開いてゆくためには、(漸進的な改善変更はされるが) 構成装置に大きな変更を迫る必要のない確実な方法、すなわち、加速器規模の拡大による高エネルギー化がとられてきた。規模が拡大すると、資金的にも大きなものが必要とされ、より確実に求める事象が捕まえられるよう、技術的にはより確実なもの (よく理解されている技術) を使って全体系を構築してゆくこととなる。高エネルギー加速器においては、特定のバンドの高周波技術あるいは関連する電磁石技術などにおいて、非常に深化した技術が確立されてきている。

一方、現在の素粒子物理学の要求するフロンティアエネルギーは非常に高いものであり、加速器の規模の大きさとエネルギーフロンティアをめざすのが資金的な面から次第に難しくなりつつある。米国といえども、SSC の中止が示すように、一国で素粒子物理学の要求するフロンティアレベルのエネルギーを実現できる規模の大きい加速器を建設することは、資金的に困難な状況になってきており、今後のエネルギーフロンティア加速器の建設には国際協力あるいは国際的分担化による研究投資の効率化が重要になってくる。

参考文献 (高エネルギー物理学)

- [II 1a] U. S. Department of Energy (Office of Energy Research), "The Ultimate Structure of Matter (The High Energy Physics Program from the 1950s through 1980s)", DOE/ER-0435, (February 1990).
- [II 1b] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994 年 4 月 20 日) 「素粒子、素粒子の相互作用」1165, 「素粒子の反応」1166, 「素粒子の分類」1167, 「素粒子の対称性」1181, 「大統一理論」1187, 「超対称理論」1305.
- [II 1c] 東京大学理学部附属素粒子物理国際センター, 「LEP II 計画 (世界最高エネルギーの e^+e^- 衝突装置による素粒子の研究)」, (1991 年 6 月).
東京大学素粒子物理国際センター, 「LEP2 (世界最高エネルギーの電子・陽電子コライダーによる素粒子の研究)」, (1997 年 8 月).
- [II 1d] 学術審議会, 「加速器科学研究の推進について (報告)」, (平成 5 (1993) 年 7 月 28 日).
- [II 1e] 学術審議会 特別研究領域推進分科会 加速器科学部会, 「高エネルギー加速器研究機構における加速器科学研究について (報告)」, (1997 年 6 月 30 日).
- [II 1f] 文部省・高エネルギー加速器研究機構, 「物質の根源、宇宙創成の瞬間に迫る電子・陽電子リニアコライダー計画 (JLC Project)」.
- [II 1g] 中島一久 (高エネルギー加速器研究機構), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会 (加速器科学) 資料, (1998 年 2 月).
- [II 1h] 久野良孝 (高エネルギー加速器研究機構), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会 (加速器科学) 資料, (1998 年 9 月) (招聘参加).
- [II 1i] 坂井典佑 (東京工業大学), 「超対称理論でのヒッグス粒子」, 別冊・数理科学 場の理論, (1999 年 4 月) 38-45.
- [II 1j] 東京大学宇宙線研究所 (http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/news/k2k_1st_j.html).
- [II 1k] 東京大学素粒子物理国際研究センター (<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>), 「ヒッグス粒子観測」のニュースについて (2000. 09. 08)、「世界最高エネルギー 208. 7GeV に到達! (2000. 04. 29)」.
- [II 1l] J. Ellis, E. Keil, G. Rolandi, "Options for Future Colliders at CERN", CERN-EP/98-03, CERN-SL 98-004 (AP), CERN-TH/98-33, (January 23, 1998) 7.
- [II 1m] (社) 日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第 2 章 1. (高エネルギー加速器: 素粒子研究用), NSA/COMMENTARIES: No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998 年 6 月) 30-44.

2 原子核(素粒子・原子核)物理学

(1) 研究の動向

原子核物理学は、強い相互作用で結びつく核子（陽子と中性子の総称）の少数多体系としての原子核の構造・性質やそれらが発現するメカニズムの解明および原子核と様々な粒子との反応（核反応）現象あるいはそのメカニズムの解明などをめざすものである。

この研究分野は、大きく分けると、低エネルギー原子核物理研究、中間エネルギー原子核物理研究およびQCD原子核物理（素粒子原子核物理）研究に分けられる。低エネルギー核物理研究とは、（一つの区分の仕方として） π 中間子が発生するエネルギー（約 140MeV）以下の低いエネルギー領域での粒子ビームを使い、主に原子核の励起構造などを解明する研究をさすものである。中間エネルギー原子核物理研究とは、 π 中間子が発生する以上のエネルギーで数 100MeV～数 GeV 程度の粒子ビームを使った研究で、原子核内部の構造を探る研究や入射ビームによる核破碎反応などから様々な不安定原子核を生成しその性質や挙動を調べる研究、あるいは中性子、 π 中間子、 μ 粒子などを発生させ、それらを用いる各種の研究をさしている。QCD原子核物理（素粒子原子核物理）研究とは、QCDに基づき原子核あるいは核物質の性質の解明をめざすものであり、数 GeV 程度以上のエネルギーのビームを用いる。

なお、高エネルギー物理学においては、これまで素粒子理論の形成が先にあり、それを実験的に検証するような形で研究が進展してきているのに対し、原子核物理学については、中心的な存在（例えば、太陽系における太陽のように他を圧倒した中心的な存在）のない核子少数多体系の理論的取り扱いが難しいことから、実験的研究が先行する形で進んできている。

原子核物理学関係の研究機関の略語および加速器については、添付資料Ⅱに説明する。

1) 低エネルギー核物理研究

（参考文献[Ⅱ2a][Ⅱ2b]によりまとめる）

1932年のJ. Chadwickによる中性子の発見後すぐに原子核は陽子と中性子から構成されるとの考え方が提唱され、また、1934年の湯川秀樹による核力理論（核子（陽子と中性子）間では、中間子が交換されることにより力が働くとする理論（中間子論））が出された。この中間子（ π 中間子）が1947年に発見され、原子核は陽子と中性子から構成されるとの考え方が確立した。

原子核物理研究の中心は、最近まで安定な原子核の基底状態や低い励起構造、低いエネルギーの軽い粒子（陽子、中性子、重陽子、 ^3He 核、 α 粒子など）と原子核の反応の研究（これは重イオン核物理研究とも呼ばれている）であった。これらの研究においては、約 140MeV 以下の比較的低いエネルギー領域での粒子ビームを扱ってきており、低エネルギー核物理学と称されることは、上に述べたとおりである。このエネルギー領域では、核子は内部構造を考慮せずに済み原子核の構成単位と見なせる。

安定な原子核（の基底状態）は、加速された陽子ビームや電子ビームなどによる散乱実験により、その半径（核半径）が調べられ、原子核の体積がほぼそれを構成する核子数に比例する（原子核内の核子密度がいずれの原子核でもほとんど一定である）という飽和性をもつことが知られている。また、原子の希ガス（電子の数がある殻を全部占める場合、閉殻）に対応するように、陽子数、中性子数が特定の数（これを「魔法数（マジックナンバー）」といい、その核を「閉殻核」

という)の時、高い安定性が見られ、原子核においても一体ポテンシャル中を核子が独立に運動するような模型で良く説明される(独立粒子模型、殻模型)。これは、核子間に働く核力が、長距離部分では引力であるが短距離部分では強い斥力になっている性質(核力の芯)および核子がパウリ原理によりお互いを排斥し合いほかの核子から受ける影響が適当に平均化されることから説明されている。その一方、軽い原子核の励起構造の一部の説明においては、原子核内で局所的に強く相関し合っている核子の部分的な小集団をクラスター(代表例は、 α 粒子をクラスターとする α クラスター)と見なし、原子核をクラスターの集合体として取り扱う模型(クラスター模型)が有効であるとされている。

また、魔法数から離れた質量数の原子核においては、例えば、低い励起状態に変形した原子核が全体として回転していることを示す励起準位が見出される。これは原子核内の多数の核子が集団としてそろって一定の向きに回転する運動と理解されており、核子の個別の運動である一粒子運動と区別して集団回転運動といわれている。また、平衡状態のまわりの振動と見なせるような集団振動運動も見いだされる。更に、基底状態にある原子核を電子ビームなどで励起させると、原子核全体が関与する特徴的な巨大共鳴が起こることが知られている。

安定な原子核については、以上のように、(一体ポテンシャル中で)核子が単一粒子として運動する単一粒子構造、(いくつかの核子からなる)クラスターが原子核内であたかも一種の粒子のように振る舞うクラスター構造あるいは核子全体が集団的に運動するような構造など、一見矛盾するような性質をもつことが明らかにされており、それに対応する殻模型、クラスター模型あるいは集団模型などにより理解が進んできている。しかし、これらの模型をより高いレベルから包括する理論は未だ創られていない。

これらの低エネルギー核物理研究は、日本においては、東京大学(旧原子核研究所:現、原子核科学研究センター)のSFサイクロトロン、京都大学、東京工業大学、九州大学などの静電加速器、大阪大学核物理研究センター(RCNP; Research Center of Nuclear Physics)のAVFサイクロトロンや東北大学の電子線形加速器などを用いて行われてきている。

2) 中間エネルギー原子核物理研究

標的(原子核)に粒子ビームを当て様々な反応を生じさせて行う研究については、使う粒子(電子、陽子、軽重イオン)ビームのエネルギーが高くなってくると、標的の原子核が励起され核子が飛び散る原子核破砕反応が起こり、中性子が発生したり、中性子過剰核あるいは陽子過剰核などの不安定な原子核(不安定核)が生成される。また、原子核破砕反応の他に、標的原子核の構成核子とビーム重イオンの構成核子の間で交換が生じたり、一部の核子群の一方より他方への移動などの様々な反応(核子移行反応や核融合反応も含む)を起こし、発生する確率は低いものの自然界には存在しない重い元素(超重元素)を生ずる現象も起こるようになる。これらの不安定な原子核研究は、原子核物理学研究の一つの柱になってきている。

一方、比較的強い陽子ビームを使うと、中性子や π 中間子、 μ 粒子などが大量に発生するため、これらの加速器施設は中性子あるいは π 中間子ファクトリーと呼ばれている(中間子工場はメソンファクトリーとも呼ばれる)。これらの中性子や π 中間子を使った核物理研究も原子核物理学研究の重要な部分を担っている。

これらの反応現象は、数 100MeV～数 GeV 程度のエネルギーの粒子ビームにより起こされるものであり、中間エネルギー原子核物理研究と呼ばれている。

以下では、中間エネルギー原子核物理研究を、不安定原子核研究、原子核内部構造研究、原子核内での核力研究、中性子反応研究（中性子核物理学）、中間子反応研究（中間子核物理学）という観点で整理する（なお、この分類については、本調査をまとめるにあたり暫定的に用いるものであり、学術的な議論が必要であると考えられる）。

①不安定原子核研究(超重元素研究を含む)

(参考文献[Ⅱ2c][Ⅱ2d]によりまとめる)

自然界には約 270 種類の安定な原子核が存在する。これ以外に、一定の寿命で崩壊する不安定核が存在する。原子核は不安定核も含めると 6,000 から 8,000 種のもの（これらはほとんどのものが不安定核である）の存在が予想されているものの、まだ、2,500 種が知られ（あるいは生成され）ているのみである。まだ、知られていない（あるいは生成されていない）原子核は、中性子過剰核や陽子過剰核である不安定核であると考えられている（中性子過剰核の方が多い）。また、陽子数 114 あるいは 126、中性子数 184（陽子数、中性子数とも魔法数）の準安定な超重元素の存在も予想されている。これらの不安定核については、重イオンビームを固定標的に当てた際に生成される様々なフラグメントの中から、選択的に取り出されて、その性質などが調べられている。

軽い中性子過剰核については、理化学研究所などにおいて、原子核内の中性子分布が調べられ、周りに皮のような中性子だけの層をもつ中性子スキン核 (^6He 、 ^8He 、 ^{22}Na) や周りに薄霧のように中性子が広がっている中性子ハロー核 (^{11}Li 、 ^{14}Be 、 ^{16}Be) が見いだされている。中性子過剰核における中性子だけからなる層を調べることは、宇宙物理学における研究テーマの一つである中性子星の仕組みを研究することにつながるものとして、今後の研究の進展が期待されている。また、中性子過剰核の中には、通常の原子核には見られない様々な大きな変形があり得ると予想されている。例えば、長軸と短軸の比が 2 : 1（超変形核）あるいは 3 : 1（極超変形核）、逆に長軸と短軸の比が 1 : 2（パンケーキ型超変形核）などのものである。変形状態の原子核は、回転対称性の要求からスピン（回転）状態にあり、変形が大きいほど高いスピン状態を持っていると考えられている。この高スピン状態の研究は、核子有限多体系の原子核の多様性を理解してゆく上で非常に興味深いものと考えられている。更に、陽子の数を固定した際に、どの程度の中性子過剰核までが不安定核として存在し得るか（中性子過剰の限界）を、陽子数を変化させてつないだものは中性子ドリップライン、また中性子と陽子を入れ替えて同様に求めたものを陽子ドリップラインと呼ばれているが、これらのドリップラインな探索は原子核理論を構築してゆく上での基礎となる研究であると考えられている。また同時に、特に、中性子ドリップライン付近の中性子過剰核は、超新星爆発時の r-過程（rapid process）に関与しているものと考えられており、宇宙における元素の起源の解明に寄与するものと期待されている。

以上のような、安定核と大きく異なる性質をもつ不安定核（極限状態にあるという意味で、「エキゾチック原子核」ともいわれる）に関する研究は、原子核研究の重要な部分を占めるものとなっているが、その対象とする原子核が極めて多数あることから、今後、専用の加速器が整備されると様々な研究が進展する分野であると考えられている。

これらの研究は、世界的には、米国の(カリフォルニア大学)ローレンス・バークレイ研究所(LBL)のBevalac(1992年閉鎖)や88”サイクロトロン、ロシア(デュブナ)の合同原子核研究所(JINR)のシンクロファゾトロンや超伝導シンクロトロン(ニュークロトロン)、ドイツの重イオン科学研究所(GSI)の重イオン加速器群などを用いて行われてきている。なお、LBLの複合系Bevalacは1992年に停止されたが、ドイツのGSIにおいて、より高度に整備された複合加速器群(重イオンライナック UNILAC、重イオンシンクロトロン SIS、重イオン蓄積・冷却リング(ESR)など)が1990年に稼働している。また、日本では東京大学(旧原子核研究所)のSFサイクロトロンをベースにした短寿命核加速実験装置、理化学研究所およびRCNPのリングサイクロトロン、日本原子力研究所の大型タンデムブースター(タンデム型静電加速器+超伝導リニアック)を用いて行われてきている。理化学研究所においては、現在のリングサイクロトロンの後段として、超伝導リングサイクロトロンなどの建設が開始されており、様々な不安定核(RI)をビームとして利用する計画(RIビームファクトリー計画[II2e])が進展している。この計画では、後述の蓄積、冷却技術により、重イオン反応で生成される不安定原子核ビームを蓄積・冷却し、不安定核ビームによる核物理研究などを主とする研究を目指している。また、KEKと日本原子力研究所が実施する「大強度陽子加速器施設計画」([II2g][II2h][II2i])においても不安定核研究がなされることとなっている。

②原子核内部構造及び原子核内の核力研究

原子核においては、核子が他の核子との相互作用により束縛されている。浅い束縛状態にある核子状態を調べるには、エネルギーの低い粒子の散乱実験により行えるが、深く束縛された核子状態の研究には、中間エネルギー粒子による散乱実験が必要となる。

原子核を理解する上で基本となる自由な核子間に働く核力(10^{-15}m 程度の範囲で作用する短距離力)については、その長距離部分については、中間子論(湯川理論)に基づき 1π 中間子(パイオン)交換力として理解されている。また、この中間子論からは核子のまわりを π 中間子が雲のように取り巻く、 π 中間子雲模型で核子の性質のある部分は説明できるとされている。他方、核力の短距離部分において斥力の芯が発現するメカニズムについては、中間子論の立場からは π 中間子ばかりではなくより重い中間子を交換する模型が出されている[II2a]。(標準理論のQCDに基づくクォーク間の相互作用を用いて説明するものもある。)

中間子論の立場からすると、原子核は陽子や中性子が高密度で詰まった中を核力の担い手である中間子が生成消滅をくり返している世界とされる。この環境では、陽子、中性子や中間子自身の性質が変化しているものと考えられている。原子核に中間エネルギー領域(200MeV~400MeV程度)の陽子ビームを当てると、原子核内の核子と散乱し、弾性散乱、非弾性散乱、核子のノックアウト反応、核子移行反応などが起こる。これらの反応について、特に、偏極した陽子を入射させた場合を詳細に調べることなどにより、原子核内部における核子・核子相互作用(核力)の性質が解明できることとなる[II2f]。

これらの詳細な研究は、日本においては、RCNPのリングサイクロトロンなどを用いて行われてきている。また、原子核深部構造研究においては、後に述べるようなパウリの排他律を受けないハイペロンを原子核に導入するハイパー核実験も使われる。

③中性子反応研究(中性子核物理学)

電子ビームや陽子ビームを標的原子核に当てると、ビームのエネルギーを受け、標的原子核に束縛されていた陽子や中性子が解放され飛び出す（いわゆる核破碎）反応が生じる。陽子ビームについては、陽子エネルギーが数 100MeV という中間エネルギーになると、1 個の入射陽子による核破碎反応で発生する中性子の数かなりのものとなり、強い強度の中性子を得ることができる。これを、中性子ファクトリー（表Ⅱ－1－8 参照）と呼んでいる。なお、これは、次に示す中間子ファクトリー（メソンファクトリー）とも同一の加速器施設である。

原子力開発の初期においては、中性子の比較的低いエネルギー領域における核反応断面積を求めることなど、核物理的研究が精力的になされてきたが、現在の中性子ファクトリーにおける研究の中心は、後にも述べるように物質・材料科学あるいは生命科学にあり、これらは原子核物理学研究も含めて中性子科学とも呼ばれるようになっている。日本原子力研究所においては、中性子科学研究用の原子炉（JRR-3M、JRR-4 など）を有しているが、これらの原子炉の老朽化による閉鎖で将来不足する中性子ビームニーズに対応するため、中性子科学研究用の大型陽子線形加速器を計画（中性子科学研究計画）していたが、KEKの大型ハドロン計画と統合され、「大強度陽子加速器施設計画」となった[Ⅱ2g][Ⅱ2h][Ⅱ2i]。

④中間子反応研究(中間子核物理学)

1970 年代から 1980 年代にかけて、数 100MeV～1 GeV 程度のエネルギーをもつ陽子ビームを標的に当て、 π 中間子を大量に発生させる π 中間子ファクトリー（ π メソンファクトリー）が建設され（表Ⅱ－1－8 参照）、 π 中間子と原子核の相互作用や π 中間子の崩壊により生ずる μ 粒子を用いる研究が進展してきている。

表Ⅱ－1－8 世界の主な中間子・中性子ファクトリー

| 研究機関 (国名) | 加速器 略称 | 加速器種類 規 模 | エネルギー (MeV) | ビーム強度 (p/sec) | 建設終了 |
|---------------------------------|-----------|--------------------------|----------------|----------------------|------|
| ロサンゼルス国立研究所 LANL (米国) | LAMPF | 陽子線形加速器 全長：800m | 800 | 4×10^{15} | 1972 |
| ラザフォード・アップルトン研究所 RAL (イギリス) | ISIS | 陽子シンクロトロン 平均直径：52m | 800 | 1.2×10^{15} | 1984 |
| 3 大学連合中間子ファクトリー TRIUMF (カナダ) | | 陽子リングサイクロトロン 平均直径：17m | 520 | 6×10^{14} | 1974 |
| ポール・シェー研究所 PSI (スイス) | | 陽子リングサイクロトロン | 595 | 6×10^{14} | 1974 |
| 科学アカデミー原子核研究所 INR-RAS (ロシア) | MMF | 陽子線形加速器 全長：450m | 600 | 1.0 mA | |
| 高エネルギー加速器研究機構 KEK (日本) | BSF | 陽子シンクロトロン 平均直径：約 12m | 500 | 4×10^{13} | 1980 |

なお、中間子ファクトリーにおいては、以下に示すような原子核物理研究の他、物質科学、生命科学、医学研究なども行われており、これらは原子核物理学研究も含めて中間子科学とも呼ばれるようになっている。

〔 π 中間子および μ 粒子利用〕

(参考文献〔Ⅱ2j〕、〔Ⅱ2k〕によりまとめる)

π 中間子には、 π^+ (質量 $139.57\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $2.60 \times 10^{-8}\text{sec}$)、 π^0 (質量 $134.97\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $0.84 \times 10^{-16}\text{sec}$)、 π^- (質量 $139.57\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $2.60 \times 10^{-8}\text{sec}$) があるが、 π^0 は寿命が短く利用されることはない。 π 中間子生成の素過程は、次の二つの反応である。

- ・ $p + p \rightarrow \pi^+ + n + p$
- ・ $p + n \rightarrow \pi^- + p + p$ または $\pi^+ + n + n$

この反応を発生させるためには、 π 中間子の質量の 2 倍 (280MeV) 以上の入射エネルギーが必要で、一般的には 500MeV 以上の陽子加速器が使用される。上記の過程が、原子核内の陽子や中性子を標的とする場合には、それらが束縛されていることによる補正が加わる。

π 中間子ファクトリーにおいては、数 $100\text{MeV} \sim 1\text{GeV}$ 程度のエネルギーで $100\mu\text{A}$ 程度の強度をもつ陽子ビームを炭素などの原子核 (標的) に当てて発生させる。QCD においては、 π 中間子はクォーク 2 個が強い相互作用で結合してできている複合粒子とされており、 π 中間子の内部構造を調べることは、陽子や中性子などクォーク 3 個から構成されるとされる複合粒子の内部構造を調べることに密接に関係している。このため、QCD 原子核物理研究の一環として、 π 中間子に電子ビームなどを衝突させてその内部構造を調べる研究が行われている。

また、 π 中間子はその崩壊により μ 粒子 (ミューオン) を発生させることから、 μ 粒子源としても利用されている。この崩壊様式は、以下のとおりである。通常、発生した π 中間子を強い磁

- ・ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- ・ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$

場を持つ超伝導ソレノイドを使って閉じ込めながら飛行させ、効率よく μ 粒子を得る方法が用いられている。 μ 粒子は第 2 世代のレプトンで、 μ^+ (質量 $105.66\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $2.2 \times 10^{-6}\text{sec}$)、 μ^- (質量 $105.66\text{MeV}/c^2$ 、寿命 $2.2 \times 10^{-6}\text{sec}$) は内部構造を持たない素粒子とされている。

μ 粒子を用いる研究の中心は、ミューオンを触媒とする核融合に関する研究である。 μ^- は非常に重い電子のように振る舞い、重水素 (D_2) と三重水素 (T_2) の混合系に入射すると、 dt_μ のような分子を形成し、その分子運動により $d + t \rightarrow \alpha + n$ という核融合反応を起こさせる (ミューオン触媒核融合)。自身は、その寿命が有る限り、更に次の核融合を起こすように作用する (エネルギー科学参照)。また、高エネルギー物理研究分野において述べたように、大統一理論ではレプトン数非保存現象も予言されており、($\mu^- \rightarrow$ 電子) 変換現象の探索にも使用される。更に、ニュートリノビームを発生させるために、加速された $\mu^+ \rightarrow$ 陽電子 $+ \nu_\mu + \nu_e$ の崩壊反応を使うことが考えられている。

μ 粒子を利用する (核物理) 研究は、表-Ⅱ-1-8 に示す中間子ファクトリーおよび米国 BNL などにおいて行われている。なお、理化学研究所はイギリスのラザフォード・アップルトン研究所 (RAL) との間で、ISIS を用いた「ミューオン科学研究」を共同研究として行っている (第 1 期 (1990-2000)、現在は第 2 期実施中) [Ⅱ2l]。

3) QCD原子核物理研究

素粒子物理学における標準理論の登場以後においては、原子核を理解しようとするごく自然なアプローチは、強い相互作用を記述するQCDから理解しようとするものである。QCDにおいては、核子（陽子および中性子）を基本粒子クォークとそれらを結びつけるグルーオンの相互作用で記述するものであり、このアプローチは、原子核や核子などから構成される核物質を、その中でのクォークなどの行動に焦点を当てつつ理解しようとするものである。

以下では、QCD原子核物理研究（素粒子原子核物理研究）を、強い相互作用（核力）および核子構造研究、クォーク原子核物理研究、核物質研究の観点で整理する。

①核力および核子構造研究

核力については中間子論的な説明の他、標準理論のQCDに基づくクォーク間の相互作用を用いて説明するものがあり、QCD原子核物理は後者の立場により原子核の性質などを理解しようとするものである。QCDにおいては、原子核を構成する核子（陽子や中性子）は、3つのクォークがグルーオンにより媒介される強い相互作用で結合してできている複合粒子とされる。

この立場では、クォークは $(2/3)$ もしくは $(-1/3)$ の電荷を持つものに対して、陽子は電荷1、中性子は電荷0を持つことから、核子内部でのクォークの運動に関連する「核子内部の電荷分布」を詳細に調べることが必要とされる。また、核子はスピン $(1/2)$ の粒子でスピン軸という方向を持っており、他方、クォークはスピン $(1/2)$ をもつ基本粒子で、これらが絡み合ってスピン $(1/2)$ の陽子や中性子を形成しているものとされるが、3つのクォークが陽子や中性子を構成する時のクォークのスピンおよびクォークの運動による軌道角運動量に関する角運動量保存の仕組みは明らかにされておらず、「核子のスピン構造」を解明する研究が必要であるとされている。これらの点の解明については、核子内部におけるクォークの運動に関する詳細な実験的検証が必要であると考えられている。

核子内部の電荷分布の探査については、電子あるいは光子は強い相互作用をしないことから、高エネルギーの電子ビームや γ 線を用いた探査が有効であり、数 GeV 程度の電子ビームあるいは高エネルギー電子ビームとレーザー光の（逆）コンプトン散乱で発生する γ 線（逆コンプトン散乱 γ 線：これは、「レーザー電子光」とも呼ばれている）により核子の内部構造を探る研究が行われている。これらの研究に関しては、米国のトーマス・ジェファークソン国立加速器研究所（T J N A F または C E B A F）の 4 GeV 電子加速器を用いて精力的に行われており、また、後者のレーザー電子光による研究については、（財）高輝度光科学研究センターの SPring-8 での研究も開始されている。このレーザー電子光による研究は、大阪大学 R C N P レーザー電子光グループ（いくつかの大学の共同研究グループ）、日本原子力研究所および（財）高輝度光科学研究センターとの共同研究である〔Ⅱ2m〕。

核子のスピン構造を探る研究においては、陽子のスピン軸のそろった偏極陽子ビームを用いる実験が行われてきている。米国 B N L の RHIC では、偏極陽子衝突試験が予定されており、日本からのメンバーも参加している〔Ⅱ2n〕〔Ⅱ2o〕。

その他、電子ビームや陽子ビームを標的に当てた際の反応フラグメント中のハイペロン（「ハイペロン」については、次頁参照）に注目し、例えば陽子との散乱現象などを調べることによりハ

イペロンと核子の相互作用を解明する研究や、ハイペロン2つが結合した粒子、Hダイバリオンを対象とする強い相互作用の研究なども行われている。

なお、高エネルギー物理学研究分野でも述べたように、核子の深部構造研究については、ドイツDESYのHERAでの電子・陽子衝突実験において詳細に調べられている。

これらの研究は、「強い相互作用」が宇宙創世期に果たしていた役割を解明する研究などとも関連し、原子核の性質を標準理論から理解する上で重要な課題であると認識されている。

②クォーク原子核物理研究

原子核は、(3つのクォークの複合粒子とされる)陽子や中性子が集合したものであり、QCDの観点からは、原子核はクォークから構成されるものと理解される。この観点にたった場合、原子核内におけるクォークの運動に関心が向かうものとなる。核子が原子核内に束縛される場合は、その核子中のクォークの運動は、核子単独で存在する場合と異なるものになっていると考えられている。

原子核内のクォークの運動を探る場合、原子核の内部に入り込める高エネルギーの粒子が必要となる。高エネルギーのビームを原子核に当てると、ビームが原子核内部のクォークに散乱される現象や、ビームのエネルギーが原子核内部のクォークに与えられ、結果として、中間子や核子などのハドロンが原子核から飛び出してくる現象が起こる。後者は、「クォークの閉じ込め」の性質によるものである(原子核に高エネルギーを与えてクォークを飛び出させようとしても、閉じこめの性質より原子核から出てくる粒子は、中間子や核子などのハドロンである)。

これらのことから、原子核内におけるクォークの運動を探る方法のひとつとして、

A. 高エネルギー粒子などを原子核に衝突させた際の散乱や、クォークの運動情報を担って発生する中間子や核子などを調べる

ことが挙げられる。

また、陽子、中性子を構成するクォークは第1世代のuクォーク、dクォークであるが、第2世代のストレンジ(s)クォークを含む核子(これを「ハイペロン」という)は陽子、中性子とは異なるフェルミオンであるため、パウリの排他律の影響を受けずに陽子、中性子が原子核内で束縛されるいかなる状態へも入り込める性質を持っている。そのため、原子核の深部構造を探る(これを通じてクォークの運動を探る)方法として、

B. ハイペロンを含む原子核(ハイパー核)をつくり、その性質を調べる

ことが挙げられる。

A 高エネルギービームによる原子核衝撃研究

(参考文献[II2p]によりまとめる)

原子核に高エネルギーのビームを当て内部のクォークの運動を探る場合に、望ましいと考えられるビームは、強い相互作用をしない電子ビーム、 μ 粒子ビームや光子ビーム(γ 線)である。数 GeV 程度の電子、 μ 粒子あるいは γ 線は、原子核の内部まで入り込むことができる。内部に入

り込んだ電子、 μ 粒子あるいは γ 線はクォークにより散乱されるか、あるいは、そのエネルギーをクォークに与え、内部でのクォーク状態の情報を持ったハドロン（中間子や核子など）を原子核の外に飛び出させる。これらの現象を詳細に調べることで、原子核内でのクォークの運動を探ることが可能となる。

1980 年代始めには、高エネルギーの μ 粒子ビームを用いた、重水素および鉄を標的とする散乱実験により原子核構造関数が調べられ（EMC : European Muon Collaboration）、運動量移行の大きな領域では、原子核の構造関数は核子の構造関数の単なる重ね合わせではないこと（EMC 効果）が示された。これは原子核中のクォーク分布が、核子のものとは異なっていることを示すものであり、核子が原子核中に束縛されることによる運動学的効果、原子核中の中間子の効果、原子核内での核子内部構造の変化など、種々の説が出されているが未だ定説と言えるものはないとされている。

1994 年からは、米国 T J N A F の 4 GeV 電子加速器を用いて、高エネルギー電子ビームおよびレーザー電子光による原子核内のクォーク状態に関する研究が精力的に行われている。日本においても、SPring-8 を用いたレーザー電子光によるクォーク核物理研究が開始されている[2m]。

B ハイパー核研究(K中間子利用)

(参考文献[II2p]、[II2q]、[II2r]、[II2h]、[II2i]によりまとめる)

数 GeV を超える電子ビームや陽子ビームを標的に当てると、二次粒子中に K 中間子を含むようになる。この K 中間子を入射粒子として原子核に当てると、ストレンジネスを持った（構成クォークにストレンジクォークを含む）バリオン（これをハイペロンという）を含むハイパー核を発生させるができる。ハイパー核においては、ハイペロンはパウリの排他律に影響を受けないため、深く束縛された状態が観測しやすい状態で作られるため、ハイパー核研究は深く束縛された核子の状態（あるいは原子核深部構造）の解明に寄与している。また、ハイペロンを 2 つ含んだ原子核であるダブルハイパー核の研究や、ストレンジネスを更に多く含んだ原子核の探索実験も行なわれている。なお、高エネルギー物理学研究分野において述べたように、K 中間子は、C P 不変性の破れにも関係しており、この点に関する研究にも使われている。

ハイパー核研究は、日本においては K E K の 12GeV 陽子シンクロトロン（KEK-PS）を用いて、また、世界においては、米国 B N L の 30GeV 陽子シンクロトロン（AGS）や C E R N の 26GeV 陽子シンクロトロン（CPS）などを用いて研究が行われている。K E K においては、計画中の 50GeV 陽子シンクロトロン（大強度陽子加速器施設計画のなかの高エネルギー陽子シンクロトロン）を用いることが検討されている。

③核物質研究

(参考文献[II2p][II2d]によりまとめる)

重い原子核の中心部にある、密度がだいたい一定の値 $\rho_0 \approx 0.17 \text{fm}^{-3}$ である領域は一様密度の核子からなる物質と見なすことができ、これを（狭義の）核物質と呼んでいる。（ $N \sim Z$ である核物質を標準核物質といい、また、密度が $3 \rho_0$ を超える場合は他のバリオンや中間子も共存するハドロン物質となるが、広義には、これも核物質と呼んでいる。）原子核どおしを高速で衝突させた場

合は、瞬間的に $N \sim Z$ の高密度、高温の核物質となる。(厳密には、運動量分布が異なるため上記の核物質とは同一視できないが、近似としては成立する。)

クォークが質量を持つメカニズムは「対称性の自発的破れ」により説明され、クォークを真空中から原子核内あるいは核物質中にもって行くと質量が変わると予想されている。中間子は、クォーク2つから構成されるものであるため、中間子の原子核内あるいは核物質内での質量にも変化が現れるものと考えられており、これを検証する研究が進められている。

また、大きな重い原子核どおしを非常に大きなエネルギーで衝突させると、核子がバラバラになってクォーク・グルオンプラズマ相になると予想されている。このクォーク・グルオンプラズマ相については、高エネルギー物理学においても触れたように、QCDにおける「クォークの閉じ込め」の破れの検証の他、核物質中でのクォークなどの基本粒子の振る舞いの研究など、素粒子・原子核物理研究における重要な研究対象と考えられており、高エネルギー重イオン衝突実験用の加速器が整備されるとともに、興味ある課題が研究されることとなる。高エネルギー物理学分野でも述べたように、米国BNLに建設された新しい加速器RHICにおいて、重イオン・重イオン衝突実験が開始されている。RHICにおける実験は世界的な共同研究として行われており、日本の文部省（高エネルギー加速器研究機構）および科学技術庁（理化学研究所）がDOEと協定を結び、その協定の下に東京大学、京都大学、筑波大学、広島大学、早稲田大学、長崎総合科学大学および放射線医学総合研究所のメンバーがPHENIX実験に参加している[2n]。

以上述べた、標準理論を基礎とし、核子や原子核の構造・性質を理解しようとするQCD原子核物理（素粒子原子核物理）研究は近年進展が著しいが、原子核は種々の量子数を選べる孤立系であり、標準理論の最も精密な実験検証やその限界を知る上での良い対象である。これらの研究は、強い相互作用が宇宙創世期に果たしていた役割を解明する研究なども含め、今後、極めて多彩な研究課題を有する大きな研究分野を形成してゆくものと考えられており、これらの研究を進めてゆくには、エネルギーフロンティア加速器ほどの高エネルギー粒子ビームを必要とするものではないが、数GeV～数10GeV程度の陽子ビームや電子ビームあるいは数10GeV/nの重イオンビームが必要とされている。

(2)原子核物理学研究加速器の要件

原子核物理学研究の目的とするところは、強い相互作用をする有限多体系としての原子核（安定核、不安定核）の構造や性質が出現するメカニズムの解明をめざすことである。原子核物理研究においては、エネルギーの低い粒子ビームによる安定核の構造研究（数 MeV）から核物質の物性物理研究やQCD理論の原子核内での検証などの幅の広い研究が含まれる。原子核物理学研究加速器の要件としては、以下のようにまとめられよう。

- ①比較的高い（中間）エネルギーまでの様々な重イオンビームを加速できること
- ②反応断面積の小さい現象が捉えられるような大きなビーム強度を有すること
- ③上記ビームを長時間（数時間から数日）にわたり安定に供給できること

原子核物理学研究においては、上記の要件のように、バラエティにとんだ重イオンを比較的高いエネルギーまで大きなビーム強度を保持しつつ加速でき、かつ、それを長時間維持できる加速器が必要となる。現在の加速器技術では、大型のリングサイクロトロンやエネルギーフロンティアマシンよりは小型ではあるが、やはり、大型のシンクロトロンが上記の要件を満たせる加速器である。後にも述べるように重イオン加速技術については、高周波加速以外にはほとんど研究がなされていないのが現状であり、高勾配をめざす加速器先端技術による小型加速器の予測時期からいえるように、上記①、②および③の要件を満たす加速器としては、今後もしばらくは、改良はされるであろうと考えられるものの、大型のリングサイクロトロンや大型のシンクロトロンであろうと考えられる。

参考文献 (原子核物理学)

- [II 2a] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994 年 4 月 20 日) 「原子核」599, 「原子核物理学」600, 「飽和性」2011, 「独立粒子模型」1475, 「殻模型」327, 「クラスター模型」537, 「集団模型」895, 「集団励起」896, 「中間子論」1271.
- [II 2b] 谷畑勇夫 (理化学研究所), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会 (加速器科学) 資料, (1998 年 5 月).
- [II 2c] (社) 日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第 4 章 3-2 エキゾチックな原子核の研究), NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998 年 6 月) 165-170.
- [II 2d] 谷畑勇夫 (理化学研究所), 「重イオン・R I ビームの科学」, 学術月報 (日本学術振興会) 第 50 巻第 10 号 通巻第 635 号 (特集: 加速器科学—その学際化と国際化), (1997 年 10 月) 1015.
- [II 2e] 理化学研究所, 「理研 RI ビームファクトリー計画 (21 世紀の重イオン科学フロンティアをめざして)」, (1996 年 9 月).
理化学研究所, 「RI ビームファクトリー建設計画」, (1996 年 9 月).
- [II 2f] 大阪大学核物理研究センター要覧, (1995 年 12 月).
- [II 2g] 高エネルギー加速器研究機構・日本原子力研究所共同加速器計画, 「大強度陽子加速器研究施設の建設」, (1999 年 7 月).
- [II 2h] 大強度陽子加速器計画 (<http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/>).
- [II 2i] 高エネルギー加速器研究機構大型ハドロン計画推進室, 「大型ハドロン計画提案書」, (1997 年 5 月 14 日).
東京大学原子核研究所 (紹介), (1996 年).
- [II 2j] (社) 日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第 2 章 3-4 ミュオンの発生), NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998 年 6 月) 98-101.
- [II 2k] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994 年 4 月 20 日) 「ミューオン触媒核融合」2088.
- [II 2l] 理化学研究所ミュオン科学研究室 (理研 R A L 支所), 「理研—R A L 第 2 期計画 (2000—2009)」, (1999 年 6 月).
- [II 2m] 日本原子力研究所 (<http://www.jaeri.go.jp/genken/index.html>), 「大型放射光 SPring-8 施設で世界最高エネルギーの逆コンプトン線ビームの発生に成功」(1999 年 7 月 16 日).
- [II 2n] Brookhaven National Laboratory RHIC PHENIX (<http://www.rhic.bnl.gov/phenix/>).
- [II 2o] 京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理学研究室
(<http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/BUTU2-shoukai/NH/dai2-nh.html>).
- [II 2p] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994 年 4 月 20 日) 「EMC 効果」56, 「クォーク・グルオンプラズマ」521, 「ハイパー核」1592.
- [II 2q] 学術審議会特別研究領域推進分科会 加速器科学部会, 「高エネルギー加速器研究機構における加速器科学研究について (報告)」, (1997 年 6 月 30 日).
- [II 2r] 文部省・高エネルギー加速器研究機構要覧 (1997 年度).

3 エネルギー科学

(1)研究の動向

加速器科学に属するエネルギー科学とは、加速器ビームを用いた放射性元素の消滅処理研究、エネルギー増幅装置研究、ミューオン触媒核融合研究および重イオン慣性核融合研究などの核エネルギーの利用研究をさすものである。

以下では、放射性元素の消滅処理研究、ミューオン触媒核融合研究および重イオン慣性核融合研究の観点で整理する。

1)放射性元素の消滅処理研究

(参考文献[Ⅱ3a]によりまとめる)

原子炉で発生する使用済み燃料中には、原子炉内での中性子捕獲により生成する Np、Am、Cm などのマイナーアクチノイド (MA ; Minor Actinide) や核分裂生成物中の ⁹⁹Tc、¹²⁹I などの長半減期核分裂生成物 (LLFP ; Long Life Fission Product) が含まれる (表－Ⅱ－1－9、10 参照)。

表－Ⅱ－1－9 1000MWe 原子炉使用済み燃料中のマイナーアクチノイド

| 核種 | PWR (燃焼度 33,000MWD/MT) | | LMFBR (燃焼度 150,000MWD/MT) |
|------------------------|---------------------------|---------|------------------------------|
| | 冷却 3 yr | 冷却 5 yr | 冷却 3 yr |
| Np-237 | 57.9 % | 41.3 % | 9.45% |
| Am-241 | 27.4 % | 48.8 % | 54.9 % |
| Am-242m | － | － | 1.38% |
| Am-243 | 11.9 % | 8.33% | 25.4 % |
| Cm-243 | 0.03% | 0.02% | 0.29% |
| Cm-244 | 2.67% | 1.44% | 7.73% |
| Cm-246 | 0.15% | 0.10% | 0.89% |
| MA 発生量合計 (kg/Gwe/y) | 20.9 | 29.8 | 28.8 |

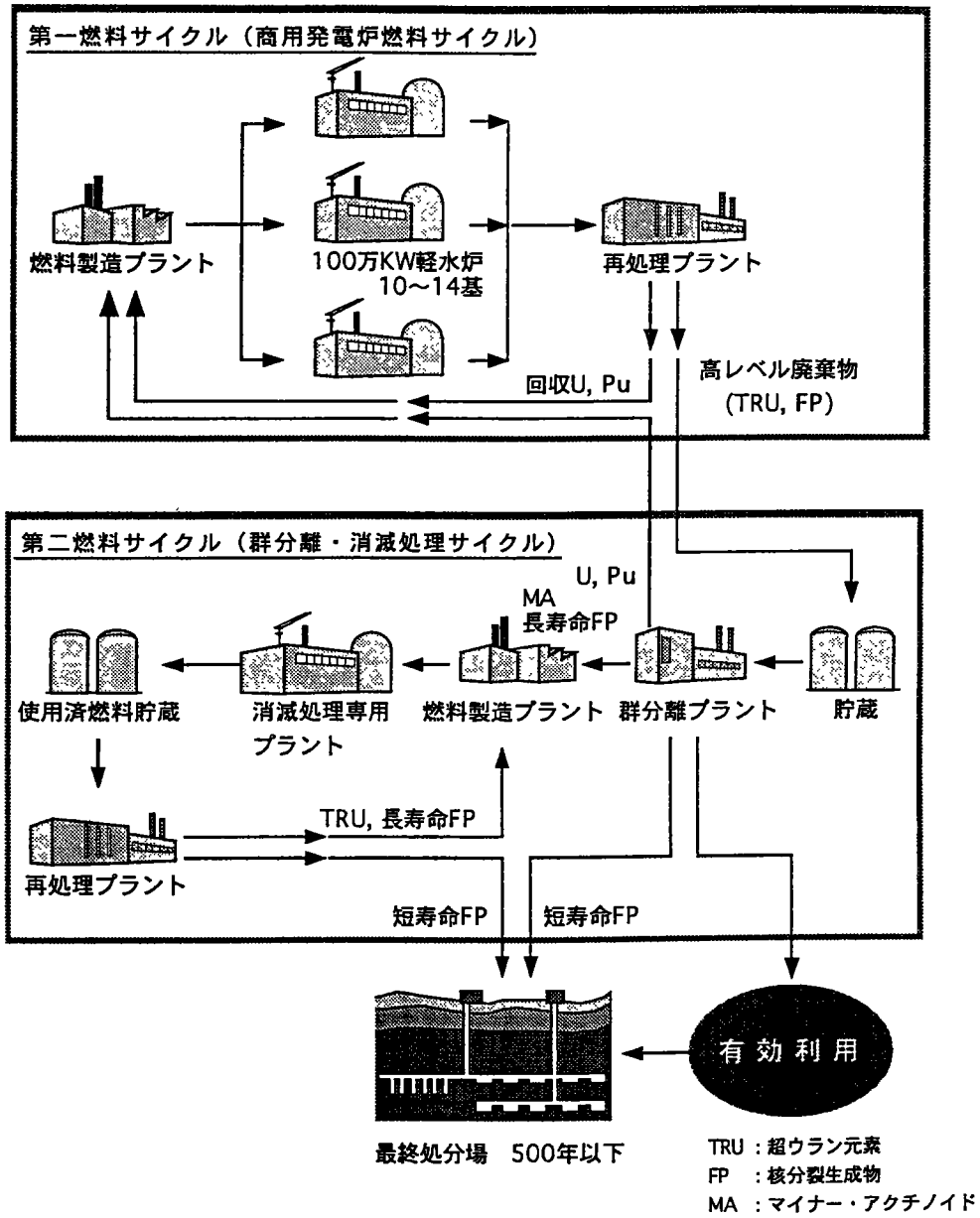
表－Ⅱ－1－10 1000MwePWR使用済み燃料中の核分裂生成物

| 半減期 | 核 種 | 生成割合 | |
|---|--|--------|--------|
| | | (%) | (g/MT) |
| < 1yr | | 4.8 % | 1,650 |
| 1yr - 10yr | Ru-106, Sb-125, Pm-127, Cs-134, Eu-154, Eu155 | 1.3 % | 451 |
| 10yr - 30yr | Kr-85(11yr), Sr-90(29yr), Cs-137(30yr) | 5.3 % | 1,830 |
| 30yr - 100yr | Sm-151 | 0.03% | 13 |
| 100yr - 10 ⁴ yr | None | 0.0 % | 0 |
| 10 ⁴ yr - 5×10 ⁹ yr | Se-79, Zr-93, Tc-99(2.1×10 ⁵ yr), Pd-107 I-129(1.6×10 ⁷ yr), Cs-135(2.3×10 ⁵ yr) | 6.6 % | 2,270 |
| 5×10 ⁹ yr < | Rb-87, In-115, Ce-142, Nd-144, Sm-147, Sm-148 Sm-149 | 7.6 % | 2,620 |
| 安定 | | 75.1 % | 25,800 |
| 合計 | | 100 % | 34,300 |

(燃焼度：33,000MWD/MT、冷却時間：150 日)

これらのものは放射性毒性が大きく、短半減期の核種や安定な核種に変換することが望ましい。この核種変換により放射性毒性を消滅させることを放射性元素の消滅処理と呼んでいる。消滅処理を行うためには、使用済み燃料を再処理する際の溶液中の消滅させるべき元素群を取り出す群分離処理が必要であり、消滅処理は群分離処理と一体的に行われることが必要である。群分離により取り出されたマイナーアクチノイドについては、高速中性子による核分裂により、また、長半減期核分裂生成物については、中性子捕獲反応により核種変換を行うことが考えられている。

核燃料サイクルの一つの選択肢として、群分離・消滅処理を導入した階層核燃料サイクルが提案されており、その概念を図－Ⅱ－１－１に示す。



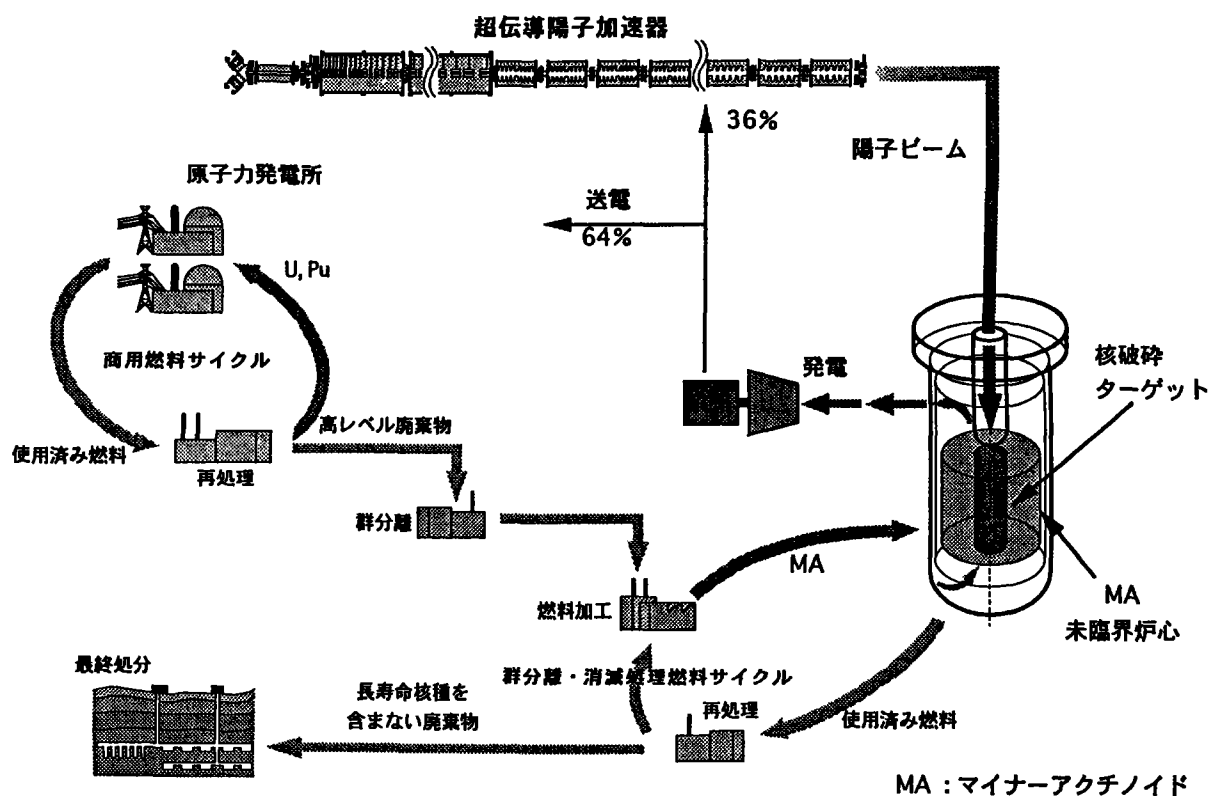
図－Ⅱ－１－１ 階層核燃料サイクルの概念

上記の階層核燃料サイクルの第一サイクルは、通常の燃料サイクルであり、このサイクルで発生する高レベル放射性廃棄物を第二サイクルにおいて群分離・消滅処理する。この結果、階層核燃料サイクルを経て出てくる廃棄物は、短寿命の核分裂生成物が主となり、最終処分となる地層処分の簡素化、処分場の小規模化に寄与する。

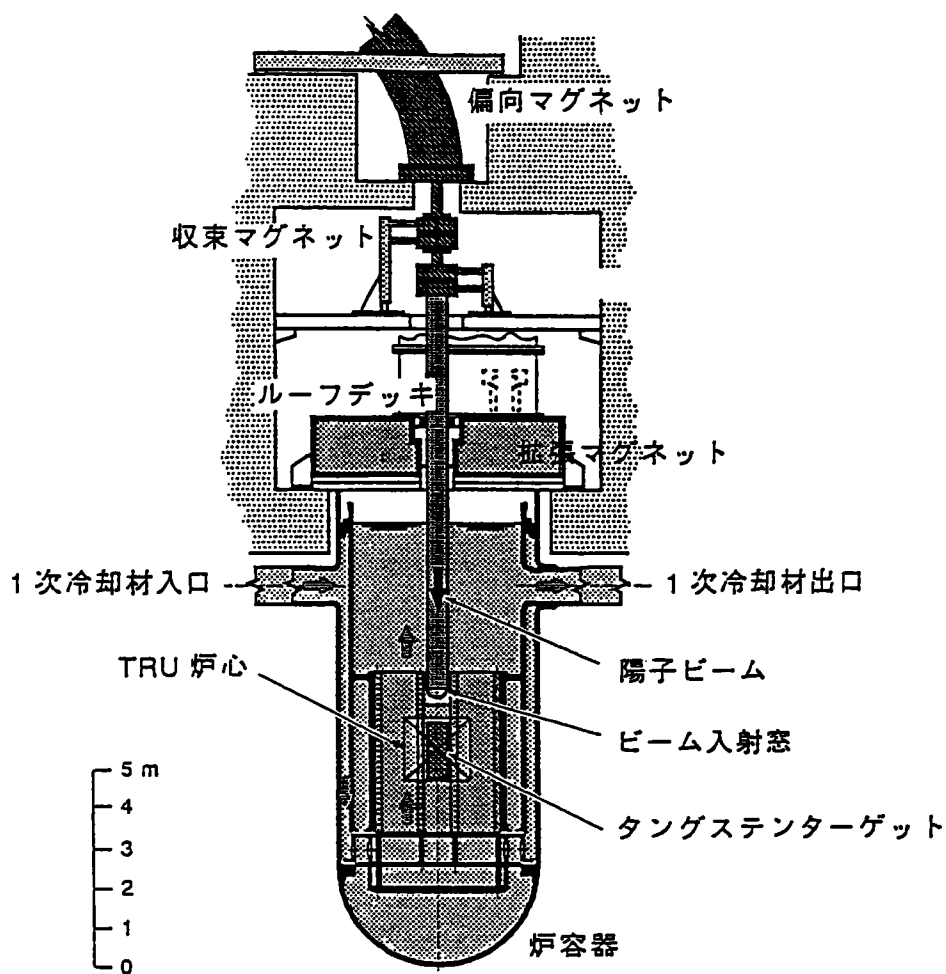
階層核燃料サイクルの第二サイクルにおける消滅処理専用プラントとしては、専焼炉および加速器駆動炉がある。消滅処理専用プラントでは、新たなマイナーアクチノイドの発生を避けるため U-238 を用いないシステムであることが必要であり、また、そのため、中性子エネルギー・スペクトルが硬く、実行遅発中性子割合が小さくなり原子炉の制御が難しくなる。これを補償するためには、高濃縮ウランが必要となり、核拡散上の問題が生ずる。一方、加速器駆動炉は基本的に未臨界体系であり、外部中性子源による制御を行い、以下のようなメリットを有しており、消滅処理専用プラントに最適であると考えられている。

- ・設計の自由度が大きい
- ・臨界事故に対する余裕度が大きい
- ・実効遅発中性子割合は小さくてもよい
- ・燃料組成の自由度が大きい

この消滅処理には、1GeV 程度のエネルギーの大電流（数 10mA）陽子ビームにより、鉛などの重元素からなる固定ターゲットを衝撃した際の核破砕反応で発生させた中性子を用いて行うことが最も現実的なものと考えられており、日本原子力研究所においては、加速器駆動未臨界消滅処理炉の設計研究が進められている。その概念を図－Ⅱ－1－2 に、また、固体タングステンターゲットを用いた加速器駆動固体システムを図－Ⅱ－1－3 および表－Ⅱ－1－11 に示す。



図－Ⅱ－1－2 加速器駆動消滅処理炉の概念



図－Ⅱ－1－3 加速器駆動固体システムの概念

表－Ⅱ－1－11 加速器駆動固体システムの主要緒元

| | |
|--------------|--------------------------|
| 燃料 | TRU窒化物 |
| ターゲット | 固体タングステン |
| 一次冷却材 | 液体ナトリウム |
| TRUインベントリ | 3,160kg |
| 中性子増倍係数 | 0.93 |
| 核破砕中性子数 | 36n/p |
| 陽子ビーム | 1.5GeV・40mA |
| 熱出力 | 820MW |
| 消滅率 | 250kg/yr (8.0%/yr) |
| 出力密度 (最大/平均) | 930/400MW/m ³ |
| 温度 (炉心入口/出口) | 330/430℃ |
| 冷却材速度 (最大) | 8m/s |

放射性元素の消滅処理研究について世界的に見ると、日本は最も積極的に研究している国である。日本における群分離・消滅処理は、1988年オメガ計画の発足とともに開始され、大強度陽子加速器施設においては、加速器駆動消滅処理に関する要素研究が行われる計画である〔Ⅱ3b〕〔Ⅱ3c〕。

フランスにおいては、1991年末に成立した「放射性廃棄物管理法」（群分離・消滅処理研究が取り上げられている）を背景にして、高レベル・長半減期放射性廃棄物管理に関する研究の一環として、群分離・消滅処理研究が実施されている。高速増殖炉スーパーフェニックスの廃棄決定後、加速器駆動消滅処理システムを用いた階層核燃料サイクル概念に近いものが検討されている。米国においては、ロス・アラモス国立研究所で大強度陽子加速器を用いた研究が行われているが、消滅処理研究はあまり積極的に行われているわけではない。韓国においては、廃棄物処分場決定が困難であることを受け、群分離・消滅処理に活路を見いだすべく、加速器駆動システムの研究が実施されている。

なお、近年、トリウム中に消滅すべき放射性廃棄物を混ぜたものを燃料とし、加速器からの陽子ビームが起こすカスケード核反応により核分裂性物質を増殖しつつ廃棄物を消滅させる、「エネルギー増幅器（EA；Energy Amplifier）」がCERNのC. Rubbiaらにより提案され、検討がなされている。これは、加速器駆動型（未臨界）消滅処理炉の一種である。

2) ミューオン触媒核融合研究

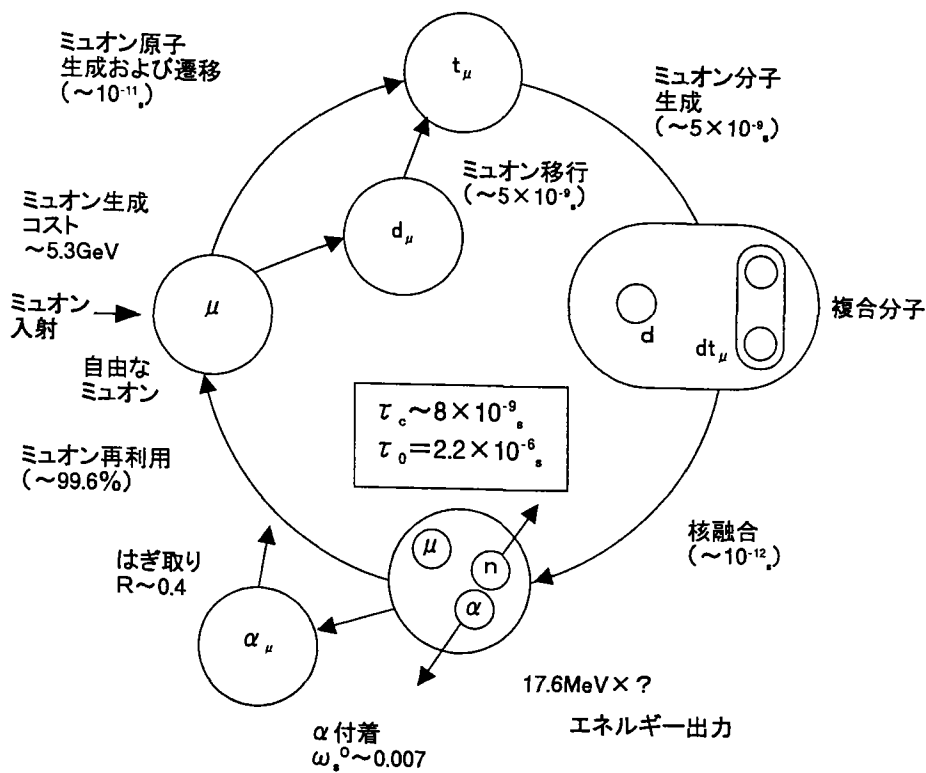
（参考文献〔Ⅱ3d〕、〔Ⅱ3e〕、〔Ⅱ3f〕、〔Ⅱ3g〕、〔Ⅱ3h〕、〔Ⅱ3i〕によりまとめる）

ミューオン（ μ 粒子；静止寿命 $2.2\mu\text{s}$ ）触媒核融合とは、負ミューオン（ μ^- ；物質中では重い電子として振る舞う）を、 D_2 、 $\text{D}_2\text{-H}_2$ 、 $\text{D}_2\text{-T}_2$ （重水素と三重水素の混合系）などに入れたときに、 μ^- が触媒として働くことにより連鎖的に起こる核融合現象である。なお、 μ^- は、陽子ビームを標的に当てて発生させる π 中間子の崩壊で生成する。

以下、 $\text{D}_2\text{-T}_2$ の系におけるミューオン触媒核融合について説明する（図－Ⅱ－1－4参照）。

$\text{D}_2\text{-T}_2$ に入射した μ^- は、減速されD原子、T原子の電子と置き換わり、 d_μ 原子、 t_μ 原子が生成される。 d_μ 原子の基底状態は t_μ 原子の基底状態よりエネルギーが高く、 $d_\mu + t \rightarrow t_\mu + d$ の反応が進み、 d_μ 原子は t_μ 原子に変わってゆく。 t_μ 原子は電氣的に中性であり、 D_2 分子の電子雲をくぐり抜け一方のdと結合し、ミューオン分子 $d t_\mu$ が形成される。このミューオン分子 $d t_\mu$ では、分子振動により核融合反応 $d + t \rightarrow \alpha + n$ が急速に起こり、0.3～0.5%の割合で μ^- が α に付着（ α 付着率）して失われるものの、残りの99.5～99.7%の μ^- は解放され、新たな核融合反応を引き起こす。この連鎖的反応は μ^- の寿命の間起こり続けるため、エネルギーが生産されることとなる。何らかの方法により α 付着率を下げられれば、ミューオン生成コスト（科学上のブレークイーブン；1個の μ^- が約300回の連鎖核融合を起こす）や経済上のブレークイーブン（エネルギー生産システムとして経済的に成立する点；1個の μ^- が約900回の連鎖核融合を起こす）を達成することも可能になるものと考えられている。

ミューオン触媒核融合の最初の実験的検証は、1957年L.W. Alvarezらが加速器からのミューオンビームを用いて、その飛程から捉えたものが最初である。1970年にはE.A. Vesman、L.I. Ponomarevらのソ連の理論家がミューオン分子の生成がD-T系で大きな速さで共鳴的に起こる



図一Ⅱ-1-4 d - tミュオン触媒核融合サイクル

(参考文献[Ⅱ3e][Ⅱ3f]より)

可能性を提唱し、ドubナ（ソ連）のJ I N Rで先駆的な実験が行われた。1980年代になってメソソフアクトリーで強力な μ^- ビームを得ることができるようになったことなどから、大きな前進が見られている。現在、世界的にはカナダのT R I U M F、米国のL A N L、スイスのP S I、ロシアのJ I N Rおよび英国のR A Lなどで研究されている。

日本におけるミュオン触媒核融合研究は、K E Kの中間子施設や理化学研究所のリングサイクロトロンを用いた研究が行われる一方、理化学研究所が英国R A Lとの共同研究としてR A LのI S I Sのビームラインを使って行っている。将来的には、K E Kと日本原子力研究所の大強度陽子加速器施設でも行うことが検討されている。

3)重イオン慣性核融合研究

(参考文献[Ⅱ3j]によりまとめる)

慣性閉じ込め核融合 (ICF; Inertial Confinement Fusion) には、レーザー光あるいは粒子ビームを燃料ペレットに照射して、ペレット内に含まれる燃料 (例えば、重水素 (D) と三重水素 (T)) の核融合を起こさせるものである。重イオン慣性核融合とは、慣性閉じ込め核融合のうちドライバーとして重イオンビームを使うものであり、核融合燃料を内部に詰めたペレット (標的) に、重イオンビームをいくつかの方向から当て、核融合燃料を星の内部に相応するほどの高密度プラズマ状態に爆縮させ、このプラズマが慣性でとどまっている間に核融合反応を完了させてしまうものである。現在、実験炉の計画検討段階にある磁場閉じ込め核融合 (MCF; Magnetic Confinement Fusion) とローソン条件 (プラズマ密度×閉じ込め時間 $\geq 10^{15}$) の満たし方を比較したのが、表-Ⅱ-1-12 である。慣性閉じ込め核融合は磁場閉じ込め核融合に比べて、短時間で反応が終了する。

表-Ⅱ-1-12 プラズマ温度と閉じ込め時間(ローソン条件)

| | プラズマ密度 n (/cm ³) | 閉じ込め時間 τ (sec) | プラズマ密度×閉じ込め時間 $n \tau$ (sec/cm ³) |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------|--|
| 磁場閉じ込め (MCF) | 10^{14} | 10 | 10^{15} |
| 慣性閉じ込め (ICF) | 10^{25} | 10^{-10} | 10^{15} |

現段階においては、ICFのうち、レーザー光を用いるレーザー核融合研究が最も進んでおり、大阪大学レーザー核融合研究センター (ILE; Institute of Laser Engineering) では、ガラスレーザーを用いた「激光XⅡ号」(1983年～、レーザー出力25kJ、ピークパワー55TW、12本のレーザービーム) による燃料ターゲット照射で核融合反応を起こす(1986年に 1×10^{13} 個の核融合中性子を観測) とともに、爆縮過程の詳細を解明する研究が進んでいる[Ⅱ3k][Ⅱ3l]。また、米国のローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) では、核融合研究装置 Nova (1984～1999年まで稼働、レーザー出力30kJ、ピークパワー120TW、10本のレーザービーム照射[Ⅱ3m]、既に解体中)の次の192本のレーザービーム照射による核融合研究装置 NIF(National Ignition Facility、レーザー出力1800kJ (1.8MJ)、ピークパワー500TW) の建設が始まっており(2002年建設終了予定)、自己点火をめざすこととなっている[Ⅱ3n]。なお、上記のILEおよびLLNLは、レーザー核融合研究施設の世界の2大拠点である。

しかし、レーザーが、最終的に電力施設において核融合エネルギー発生ドライバーとなるためには、レーザー発生の際の電力効率および繰り返しの遅さを克服しなければならないとされている。このような観点から、重イオンビームをドライバーとする重イオン慣性核融合の研究が行われている。

重イオン慣性核融合の燃料ペレット (直径数 mm の球形) の構造として、燃料を圧縮する方式から直接駆動方式のものと間接駆動方式のものに分けられる。それらの構造の違いを説明したもの

が表Ⅱ-1-13である。直接駆動方式では、燃料層は重イオンビームのエネルギーを吸収したプッシャー層が燃料層を直接的に圧縮する。この方式では、圧縮効率は良いが、ペレット表面上へのエネルギー付与の一樣性が強く求められ、照射重イオンビーム本数は6から～12本が必要とされている。一方、間接駆動方式では、重イオンのエネルギーをコンバーターでX線に換え、X線によりアブレーターをプラズマ化しそれにより燃料を圧縮する方式で、圧縮性の一樣性が良く、重イオンビーム輸送系、炉構成の複雑さを大きく低減できるとされている。一方で、イオンビームエネルギーをX線に変換する効率を高くするためには、直接駆動と比較して重イオンビームのパワーを上げ、また、ビームスポットを小さくするなど、加速器自身の性能にはより厳しい条件が求められるとされている。

表Ⅱ-1-13 重イオンICF燃料ペレットカプセル(球形)構造比較

| | 直接駆動方式 | | 間接駆動方式 | |
|-----|----------|--|---------------------------------|--|
| | 層名 | 役割 | 層名 | 役割 |
| 外層 | タンパー (鉛) | 燃料ペレット全体の被覆およびプッシャー層が外側に膨張することを防ぐ(原子番号が大きく重いので、プッシャー層を内側へ圧縮させる効果をもつ) | ケースティング | 燃料ペレット全体の被覆およびコンバーター部で発生したX線の閉じ込めを行う (ケースティング内は、コンバーター部以外は空洞) |
| | アブソーバー | 入射重イオンビームのエネルギー吸収 | コンバーター部(ケースティングに接続、互いに向かい合う2カ所) | 二本の相対する入射重イオンビームのエネルギーをX線に変換する |
| 圧縮層 | プッシャー | 重イオンビームの最終端での大きなエネルギー放出を受け、燃料の圧縮を行う | アブレーター | ケースティング内に充満したX線によりプラズマ化し、燃料を圧縮する |
| 燃料層 | 燃料層 (DT) | プッシャー層からの圧縮により内側のボイドで、核融合反応を起こす | 燃料層 (DT) | アブレーターで発生したプラズマの圧縮により内側のボイドで、核融合反応を起こす |
| 内層 | ボイド | 燃料が圧縮され、反応するスペース | ボイド | 燃料が圧縮され、反応するスペース |

重イオン慣性核融合炉に関する概念検討も実施されており、1980年代の始めには名古屋大学プラズマ研究所、大阪大学レーザー核融合研究センター、東京工業大学、東京大学原子核研究所などの研究者が共同でまとめた HIBLIC (Heavy Ion Beam and Lithium Curtain) 計画[Ⅱ30]がある。現在は、ドライバースに関する基礎研究が、東京大学(理学系研究科)原子核科学研究センター、東京工業大学や理化学研究所で行われている。また、将来的には、理化学研究所に建設が進めら

れている R I ビームファクトリーで研究が行われる予定である[Ⅱ3p]。

ドライバーとしての加速に要求される性能の一例（直接駆動方式のもの）を表Ⅱ-1-14に示す。

表Ⅱ-1-14 ドライバーとしての加速器に要求されるパラメータ(例)

| 項 目 | 値など |
|------------|----------------------------|
| イオン種 | 質量数 200 程度の 一価あるいは二価イオン |
| ビームエネルギー | 4 MJ |
| イオン運動エネルギー | 15 GeV (75MeV/核子) |
| 粒子数 | 1.7×10^{15} 個 |
| ビームパワー | 160 TW |
| パルス幅 | 25 ns |
| ピーク電流 | 10.7kA |
| 標的上のビーム半径 | 3.2mm |
| 繰り返し | 10 Hz |
| 標的利得 | 100 |

ここで最も鍵となる点は、パルス幅が短かく (25ns)、ピーク電流値の高い (10.7kA) 重イオンビームを生成する方法であり、これらを達成しようとする、現段階においては、非常に大規模な線形加速器群と圧縮・蓄積リングが必要となる (HIBLIC 計画では、数 km×数 km の面積が必要とされている)。

重イオン慣性核融合の研究に関しては、世界的にみると、米国ではローレンス・バークレー研究所 (LBL) を中心に、ヨーロッパではドイツの重イオン科学研究所 (GSI) を中心に進められている。LBL では大電流加速に適した誘導線形加速器 (インダクションライナック) を用いた方式が研究されており、GSI では重イオンシンクロトロン+蓄積リング (SIS/ECR) を用いたドライバーに関する課題に取り組んでいる。

(2)エネルギー科学研究用加速器の要件

エネルギー科学研究は、加速器ビームを用いた核エネルギーの利用を研究するものであり、ビームへの要求は以下のようにまとめられる。

- ①やや高いエネルギーをもつ陽子や重イオンビームを加速できること
- ②非常に大きなビーム強度を有すること
- ③（②の理由により）ビームの漏れによる加速器装置部の放射化が少ないこと
- ④③上記ビームを長時間（数日から数ヶ月）にわたり安定に供給できること

エネルギー科学研究においては、上記の要件のように、陽子や重イオンをやや高いエネルギーまで大きなビーム強度を保持しつつ加速でき、かつ、それを長時間維持できる加速器が必要となる。現在の加速器技術では、発生するエネルギーや核種変換により消滅処理される放射性同位元素の量が実用的なレベルにまで到達できるほどのビーム強度を達成させる加速器はまだ実現されていない。この分野においては、大きなビーム強度の達成そのものが一つの目標である。また、大ビーム強度の達成が要求されるが故に、漏れビームによる加速器装置部の放射化をなるべく小さく押さえることも同等に重要な目標となっている。

現在の加速器技術からすると、大強度の陽子や重イオンの加速器の主流になると考えられているものは、ビームを曲げずにすむ線形加速器である。後にも述べるように、陽子や重イオンの線形加速の場合、加速勾配が小さいため必要なエネルギーを達成するためには、加速器そのものは大型のものになる。

後に示す高勾配をめざす加速器先端技術による小型加速器の予測時期からいえるように、今後しばらくの間は、上記①、②、③および④の要件を満たすエネルギー科学研究用加速器は、改良はされるものの、大型の線形加速器などであろうと考えられる。

参考文献 (エネルギー科学)

- [II 3a]水本元治 (日本原子力研究所), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会 (加速器科学) 資料, (1998 年 9 月).
- [II 3b]高エネルギー加速器研究機構・日本原子力研究所共同加速器計画, 「大強度陽子加速器研究施設の建設」, (1999 年 7 月).
- [II 3c]大強度陽子加速器施設 (<http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/>).
- [II 3d]培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994 年 4 月 20 日) 「ミューオン触媒核融合」 2088.
- [II 3e]理化学研究所ミュオン科学研究室 (理研 R A L 支所), 「素粒子ミュオンの社会的貢献」, (1999 年).
- [II 3f](社) 日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」 (第 4 章 5-2.
ミューオン触媒核融合), NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998 年 6 月) 181-184.
- [II 3g]理化学研究所ミュオン科学研究室 (理研 R A L 支所), 「理研-R A L 第 2 期計画 (2000-2009)」, (1999 年 6 月).
- [II 3h]高エネルギー加速器研究機構大型ハドロン計画推進室, 「大型ハドロン計画提案書」, (1997 年 5 月 14 日).
- [II 3i]理化学研究所加速器研究室, 理研リングサイクロトロン 10 周年記念誌「世界の COE 確立へ (“国際重イオン科学センター” を建設)」, (1996 年 11 月 30 日).
- [II 3j]片山武司 (東京大学原子核研究所), 「重イオン慣性核融合と加速器」, プラズマ・核融合学会誌 第 70 巻第 4 号, (1994 年 4 月) 323.
- [II 3k]大阪大学レーザー核融合研究センター, 「輝く星のエネルギーを地上へ (レーザー核融合研究)」, (1997 年 11 月).
- [II 3l]大阪大学レーザー核融合研究センター
(<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/world/icf/index.html>).
- [II 3m]Lawrence Livermore National Laboratory
(<http://lasers.llnl.gov/lasers/target/novaops/nop.html> (July 16, 1996)).
- [II 3n]Lawrence Livermore National Laboratory
(<http://www.llnl.gov/nif/index.html> (December 1, 2000)).
- [II 3o]Proc. of 1984 INS International Symposium on Heavy Ion Accelerators and their Applications to Inertial Fusion, INS, Univ. of Tokyo.
- [II 3p]理化学研究所, 「理研 RI ビームファクトリー計画 (21 世紀の重イオン科学フロンティアをめざして)」, (1996 年 9 月).

4 物質・材料科学

(1)研究の動向

加速器科学としての物質・材料科学は、加速器から得られる各種ビームと物質・材料を構成する原子や電子あるいは原子核との相互作用を利用して物質・材料の構造や性質などの解明をめざす研究あるいはその成果を応用した開発をおこなう科学分野である。この分野においては、加速器からのビームを利用し、物質・材料の構造解析（静的および実時間挙動解析）、表面・界面構造および薄膜構造の解析、物質・材料の電子状態の解析、物質・材料の創製・加工研究、極限環境下での物質・材料の解析、極微量分析などに分類される研究や開発が行なわれている。

この分野においては、小規模な加速器から大型（放射光用）加速器まで多様な加速器により電子、陽子あるいは重イオンビーム（これらを一次ビームという）を発生させ、それを直接的に利用する他、電子ビームからの二次（高次）ビームである制動放射、シンクロトン放射光、自由電子レーザー、陽電子ビーム、中性子ビーム、また、陽子ビームからの二次（高次）ビームである中性子ビーム、 μ 粒子ビーム、陽電子ビーム、あるいは重イオンビームからの二次ビームである不安定核ビーム、中性子ビームなどが用いられている（表－Ⅱ－1－15 参照）。

表－Ⅱ－1－15 物質・材料科学分野で用いられる加速器ビームの種類

| 一次ビーム | 二次（高次）ビーム | | 発生方法概要 |
|-------|-------------|-------------------|--|
| 電子ビーム | 光子ビーム | 制動放射（ γ 線） | 電子ビームを重金属の標的に当てる （電子エネルギー：～数 10MeV） |
| | | シンクロトン放射光 | 電子ビームを偏向電磁石で曲げる （電子エネルギー：数 100MeV～数 GeV） |
| | | 自由電子レーザー | ほぼ光速の電子ビームを交代磁場で蛇行運動させる （電子エネルギー：～数 100MeV） |
| | 陽電子ビーム | | 制動放射の場合と同様（制動輻射中の γ 線による対生成（ $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ ）） （電子エネルギー：～数 100MeV） |
| | 中性子ビーム | | 制動放射の場合と同様（制動輻射中の γ 線による光核反応（（ γ, n ）反応：巨大共鳴領域）） （電子エネルギー：～数 10MeV（35MeV で飽和）） |
| 陽子ビーム | 陽電子ビーム | | 陽子を特定の原子核（ ^{27}Al 、 ^{18}O など）に照射し、 β^+ 崩壊核種を生成し陽電子を得る （陽子エネルギー：～数 10MeV 程度） |
| | 不安定核ビーム | | 陽子ビームを標的に当てる（標的原子核の陽子ビームによる核破砕反応） （陽子エネルギー：～数 100MeV） |
| | 中性子ビーム | | 陽子ビームを標的に当てる（標的原子核の陽子ビームによる核破砕反応） （陽子エネルギー：数 100MeV～1GeV） |
| | μ 粒子ビーム | | 陽子ビームを標的に当てた際に発生する π 中間子を集め、それを自然崩壊させる （陽子エネルギー：数 100MeV～1GeV） |

（次頁に続く）

表Ⅱ-1-15 物質・材料科学分野で用いられる加速器ビームの種類

| 一次ビーム | 二次（高次）ビーム | 発生方法概要 |
|---------|-----------|---|
| 重イオンビーム | 不安定核ビーム | 重イオンビームを重金属の標的に当てる（入射原子核あるいは標的原子核の重イオンビームによる核破砕反応など） （重イオンエネルギー：数 10MeV/n） |
| | 中性子ビーム | 重陽子ビームをトリチウムあるいはリチウム標的に当てる（前者は核融合反応、後者は中性子ストリッピング反応） （重陽子エネルギー：数 100keV、35MeV） |

以下では、まず、物質・材料研究のプローブとしての各種ビームを発生させる方法や加速器などを概観し、次に、それらを用いた物質・材料研究の動向について触れる。

1) 物質・材料科学で使用される各種ビームと加速器

①電子ビームとその二次ビーム

（参考文献[Ⅱ4a]、[Ⅱ4b]、[Ⅱ4c]、[Ⅱ4d]によりまとめる）

物質・材料科学における電子ビームの利用については、それを直接利用するものより、二次ビームを発生させる一次ビームとして利用する場合の方が一般的である。電子ビームの直接利用の場合、電子ビームをド・ブロイ波（電子波）として使う結晶の電子線回折などにおいては、電子エネルギーが数 100keV 程度のものであり、本調査の対象外とする。また、数 MeV 程度のエネルギーの電子ビームは、産業利用において電子線照射用としてごく一般的に使われている。ここでは、主に 10MeV 程度～数 GeV の低エネルギーあるいは中間エネルギーの電子ビームとその二次ビームについて述べる。10MeV を超える電子ビームを発生させる加速器は、線形加速器およびシンクロトロンが主である。なお、日本の低・中間エネルギー電子線形加速器については表Ⅳ-1-20 を、中間・高エネルギー電子シンクロトロンについては表Ⅳ-1-4 を参照。

電子ビームより二次ビームを発生させる方法を大別すると、電子ビームを固定標的に当てること、および電子ビームの進行方向を磁場で曲げること、の2つになる。

まず電子ビームを固定標的に当てることにより発生させる二次ビームについて述べる。

A 制動放射

電子ビームを標的に当てると、標的の構成原子と衝突して、その原子を励起したり電離したりしてエネルギーを失う非弾性散乱の他に、電磁放射線の放出、すなわち制動放射と呼ばれる現象が発生する。この現象は、荷電粒子の速度の急激な変化〔大きな加速度〕に伴って引き起こされる。制動放射と非弾性衝突の比は、電子のエネルギーが高くなるほど、標的の原子番号が大きくなるほど大きい。例えばタングステン (W) やタンタル (Ta) を標的にすると、約 10MeV で二つの現象は同程度に起こり、10MeV 以上のエネルギーでは、制動放射の割合が急速に増大する。放射される光子のエネルギーはゼロから最高は電子のエネルギーの間で連続分布しており、その強度は電子のエネルギー (E) にほぼ反比例 ($1/E$) している。制動放射は、現在では数 MeV 付近の γ

線源として使用されているが、放射光が普及する以前は、X線源や γ 線源として広く使われていた。

一方、重粒子の場合は、質量が大きく衝突による速度の変化が小さいので、TeV レベルのエネルギー範囲になれば制動放射は問題にならない。

B 中性子ビーム

電子ビームを標的に当てた時の制動放射で発生する γ 線光子のエネルギーが約 10MeV を超すと、原子核と γ 線の衝突によって中性子を発生する (γ , n) 反応が生ずるようになる。これは光核反応の一つであり、概ね 10 数 MeV から数 10MeV の間に、標的の元素によって固有の共鳴エネルギーがある。 γ 線のエネルギーが共鳴エネルギーに一致するとき、大きな反応確率をもつ。制動放射のエネルギー分布 (I/E) を考慮して、電子ビームは 30MeV より若干大きなエネルギーのものが使われる。発生する中性子のエネルギーは連続スペクトルをもつ。なお、電子のエネルギーが約 35MeV 付近になると、ビーム出力あたりの中性子収率が飽和傾向を示すので、これ以上のエネルギーの電子ビームは、光核反応による中性子発生には使われることが少ない。

電子加速器の出力ビームがパルス構造をもつ場合、中性子ビームも似たようなパルス構造をもつ。このことは、時間変化する現象を捉える場合に有用である。発生したエネルギーの高い中性子（高速中性子）を減速し、常温の気体と同等のエネルギーをもつ熱中性子に（熱中性子化）すると、中性子は波としての性質が顕著になる。この中性子波（ド・ブロイ波）の波長は、結晶の格子間隔程度であるため、中性子回折など物性値の測定に利用される。なお、電子ビームによって発生する出力あたりの中性子ビームの強度は約 $2 \times 10^{15} \text{n/s/MW}$ である。

日本において、中性子発生が可能な電子加速器施設は以下のとおりである。

表－Ⅱ－１－１６ 日本の中性子発生電子加速器

| 研究機関 | 加速器名称 | 加速器概要(稼働年) | 中性子発生率 (n/s) | ビーム出力 (kW) | 標的 エネルギー |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
| 北海道大学 工学部 | 45MeV Electron Linac | 電子線形加速器(1974) (長さ約 23m, 45MeV) | 1.0×10^{13} | 2 | W 35MeV |
| 東北大学 核理研 | Tohoku 300MeV Electron Linac | 電子線形加速器(1967) (長さ約 52m, 300MeV) | 1.4×10^{13} | 7 | W 250MeV |
| 京都大学 原子炉実験所 | KURRI-LINAC | 電子線形加速器(1967) (長さ約 5m, 46MeV) | | | Ta、W 46MeV |
| 核燃料サイク ル開発機構 | 10MeV Electron Linac | 電子線形加速器(1996) (長さ約 18m, -35MeV) | 4.7×10^{13} | 12.3 | Pb 35MeV |

(核燃料サイクル機構の電子加速器については、検討のみ)

C 陽電子ビーム

陽電子は、数 10MeV を超えるエネルギーの電子または γ 線と原子核との衝突に際する電子・陽電子対生成によって得ることができる。 γ 線と原子核の衝突過程の方が反応断面積（反応確率）が一桁以上高いので、陽電子の発生には、上記のエネルギー領域の電子から効率よく変換された γ 線を用いることが多い。この γ 線は、タンタル (Ta)、タングステン (W) など原子番号の大き

な材料でできた標的に、電子ビームを当てて制動放射により発生させている。なお、陽電子発生に使われる電子ビームのエネルギーは、数 10～100MeV 程度のものである。

陽電子は、物質中または表面近傍の電子の振る舞いを非破壊的に知ることができるため、物質・材料研究にとり有用なビームである。固体などの物質中を通る高速陽電子の消滅確率は小さく、ほとんどすべての場合、高速陽電子は原子核との散乱で運動エネルギーを失い、周囲とほぼ熱平衡に達してから対消滅する。物質・材料研究には低速陽電子（エネルギーが eV 程度）と呼ばれるエネルギーのそろった陽電子が使われることが多い。低速陽電子は、100MeV 位の電子ビームを Ta などの標的に入射して、幅の広いエネルギーをもつ高速陽電子（keV～MeV）を得た後に、W 箔などの減速材（モデレータ）の中で減速・熱化し、減速材から自発的に放出されるものを電界で引き出して使う。このようにして得た低速陽電子のパルス幅は減速過程でマイクロ秒まで広がる。物質・材料研究のために有用な短パルス低速陽電子は、陽電子を蓄積し、切り出した後、パルス圧縮を行うことで得られる。

日本における陽電子利用機関あるいは陽電子利用を検討している機関を、表－Ⅱ－1－17 に示す。

表－Ⅱ－1－17 日本の陽電子発生用電子加速器

| 研究機関 | 加速器名称 | 加速器概要(稼働年) | 陽電子発生率 (e ⁺ /s) | 電子エネルギー 備考 |
|-------------------|-------------------------|------------------------------------|--|------------------------|
| 京都大学 原子炉実験所 | KURRI-LINAC | 電子線形加速器(1967) (長さ約 5m, 46MeV) | | |
| 電子技術 総合研究所 | TELL | 電子線形加速器(1981) (長さ約 80m, 500MeV) | 10 ⁷ ～10 ⁸ パルス幅 100ps | 60-70MeV |
| 大阪大学 産業科学研究所 | ISIR S-Band Linac | 電子線形加速器(1989) (長さ約 10m, 150MeV) | | (検討中) |
| 高輝度光科学 研究センター | SPring-8 入射器 | 電子線形加速器(1997) (長さ約 140m, 1GeV) | | (検討中) |
| 核燃料サイクル開 発機構 | 10MeV Electron Linac | 電子線形加速器(1996) (長さ約 18m, -35MeV) | ～10 ⁷ | 35MeV (W 標的) (検討のみ) |
| 日本原子力研究所 高崎研究所 | Positron Factory | 電子線形加速器 (100MeV) | | (加速器検討中) |

次に、電子ビームの進行方向を磁場で曲げることにより発生させる光子ビームについて述べる。

D シンクロトン放射光(放射光)

シンクロトン放射光（単に、放射光ともいう）は、中間エネルギー～高エネルギーの電子ビームの軌道を偏向磁石などで曲げる際に電子ビームの接線方向に放出される輝度の高い光（エネルギーは連続分布）である。この現象は加速度を持って運動する荷電粒子が電磁波を出す現象として理論的に古くから知られていたが、1947 年電子シンクロトンから初めて観察され、その発見の経緯より電子シンクロトンからの放射光は、シンクロトン放射光と呼ばれている。放射光は最近では物質・材料科学あるいは生命科学研究などで広く使われるようになってきているが、これは基礎物理学研究用の加速器の進展がもたらした大きな副産物といえる。シンクロトン放

射光の発生においては、通常、数 100MeV～数 GeV のエネルギーを持った電子ビームが使われている。また、同様な原理により、短いパルス電子ビームを直線状に配置させた交代磁場で蛇行（アンジュレーション）を与えると、ビームが磁場で曲げられる（蛇行する）度にシンクロトロン放射光に相当する光（エネルギーは連続分布）が位相のそろった状態で放射される。これをシンクロトロン放射光の蓄積リングに設けた直線部で行なうと、偏向電磁石の場合に比べてより高輝度の放射光が得られる。

当初のシンクロトロン放射光の利用は、素粒子や原子核研究用の電子シンクロトロンに寄生する（あるいは共生する）形で行われてきた（このような施設を、「第 1 世代放射光施設」という）。1970 年代後半から世界の各地で放射光発生用の専用電子蓄積リングをもつ放射光専用施設（これを、「第 2 世代の放射光施設」という）が建設され、放射光の幅広い利用が進展した。更に、1990 年代に入り、電子の周回軌道中の直線部にウィグラーや交代磁場を持ったアンジュレータ（これらは、挿入光源と呼ばれる）を設けるとともに、周回する電子ビームのエミッタンスを極めて低くし（運動量のばらつきを極めて小さくし）、輝度および指向性の格段に高い放射光を発生させる放射光専用施設（これを、「第 3 世代放射光施設」という）が建設され、高度な放射光の利用が進展してきている。シンクロトロン放射光の特徴としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・ 広い波長領域（赤外線（0.1eV, 10⁴nm）から硬 X 線（100keV, 0.01nm））にわたる連続したスペクトルをもつ
- ・ 輝度が高い光源である（明るく強い光である）
- ・ 指向性が良い（非常にシャープな光である）
- ・ 様々な偏向特性を持たせることができる（光源の仕組みにより直線偏光、楕円偏向、左右円偏向などの偏向状態を持たせることができる）
- ・ パルス特性をもつ
- ・ 光源特性が計算でき標準光源として使える
- ・ 清浄な光源である

これらは、光源としての優れた特性であり、物質・材料科学のみならず生命科学、医療利用などの幅広い分野において、世界的に利用が進展してきている要因となっている。

なお、後にも述べるように、通常、放射光リング内では加速用 RF 波の波長毎に電子のバンチを入れた状態で周回させるため、各電子バンチからのパルス放射光が短い間隔であたかも連続するかのように発生する。この場合、パルス間隔が短すぎて（連続ビームと同じで）、動的な変化を捉えるには不適當である。これを単バンチの電子ビームを周回させることで、パルス間隔の長いパルス放射光を発生させることができ、これによって、反応中間体の構造を反応前、反応後と分離して調べることができることとなり、動的な変化を捉えることができるようになる（パルスラジオリシスまたはポンプ＆プローブ）。KEK の PF-AR では単バンチの電子ビームによるパルス放射光を発生させている。

表一Ⅳ－1－5 に日本の放射光専用加速器を、また、表一Ⅳ－1－6 に世界の第 3 世代放射光専用加速器を示す。

E 自由電子レーザー

自由電子レーザーは、シンクロトロン放射光に、レーザーの特徴であるコヒーレンス（可干渉性）とハイパワーを付加したものである。真空中をほぼ光速で走るエネルギーの高い電子を、アンジュレータと呼ばれる周期磁場発生装置で蛇行させると、電子が方向を変えると同時にシンクロトロン放射光の場合と同様の原理により、光を前方に放射する。このとき、電子は次第に集群（バンチ）され、個々の電子からの放射は干渉によって強調され、位相がそろった強力な光を得ることができる。自由電子レーザーは、電子バンチを生成する線形加速器、高輝度な光を生成し増幅する挿入光源（アンジュレータ）、光を閉じ込め、電子ビームと繰り返し相互作用させ、フィードバックをかけて光増幅率を高める光共振器で構成される。アンジュレータから放出される光は幅の広いスペクトルをもっているが、1対以上の反射鏡で構成される光共振器を用いて繰り返し相互作用させることにより、特定の波長の光だけを効率良く取り出すことができる。X線領域での発振や大出力化をめざした自由電子レーザー発生の場合では、共振器を用いずに、非常に長いアンジュレータを使った SASE（Self Amplified Spontaneous Emission：自己増幅自発放射）法が用いられる。

通常のレーザーが、ある種の原子や分子などのエネルギー準位差を利用しているのに対し、自由電子レーザーでは電子の運動を制御することにより任意の波長のレーザーを作ることができるという特徴がある。

自由電子レーザーの研究は、スタンフォード大学で 1977 年に赤外域での発振に成功してから、世界各地の研究機関で高効率化と短波長化をめざした研究が行われている。日本においては取り組みが 10 年程度遅れ、電子技術総合研究所で 1991 年に成功したものが最初の発振であったが、その応用に関する研究の進展は速く、1994 年からは（株）自由電子レーザー研究所において、物質・材料科学、医療利用などに発振されたレーザーが供されている。現在の自由電子レーザー利用施設としては、表Ⅱ-1-18 のものを挙げることができる。

表Ⅱ-1-18 世界の自由電子レーザー利用施設

| 研究機関 | 加速器概要 | 初 発振 | 波長域 (μm) | ピーク出力 (平均出力) | 利用研究 分野 |
|---|-------------------------------|---------|----------------------------------|------------------------|-----------------|
| Stanford Univ. (USA) | 超伝導電子線形加速器 (66MeV ; 5.6A) | 1977 | 3 - 15 20 - 60 | 1.2MW (1W) | 物性物理 生物・医学 |
| UCSB(U.C at Santa Barbara) (USA) | バンデグラーフ型加速器 (6MeV) | 1985 | 350 -2500 60 - 350 30 - 90 | ($\sim 10\text{kW}$) | 半導体物性 |
| Duke Univ. (MarkIII) (USA) | 常伝導電子線形加速器 (45MeV ; 40A) | 1986 | 1.8- 9.5 | 2 MW (3W) | 物性物理 |
| Vanderbilt Univ. MFEL (MarkIII) (USA) | 常伝導電子線形加速器 (45MeV ; 40A) | 1991 | 2 - 8 | 3 MW (6W) | 物性物理 生物・医学 |
| FOM FELIX (オランダ) | 常伝導電子線形加速器 (45MeV ; 70A) | 1991 | 5 - 30 16 - 110 | 5 MW (0.5W) | 原子分子物理 生物・医学 |
| LURE CLIO (France) | 常伝導電子線形加速器 (70MeV ; 75A) | 1992 | 1.8- 17.5 | 10 MW (9W) | 物性物理 |

(次頁に続く)

(前頁より続く)

表－Ⅱ－1－18 世界の自由電子レーザー利用施設

| 研究機関 | 加速器概要 | 初 発振 | 波長域 (μm) | ピーク出力 (平均出力) | 利用研究 分野 |
|---------------------|--|---------|--------------------------|-----------------|------------|
| LANL AFEL (USA) | 常伝導電子線形加速器 (15MeV ; 100A) | 1993 | 4 - 6 | 10 MW (1.5W) | 医療応用 |
| (株) 自由電子 レーザー研究所 | 常伝導電子線形加速器 (長さ 46m、165MeV) (33MeV ; 42A) | 1994 | 5 - 22 | 10MW(1 W) | 半導体物性 |
| | (75MeV ; 50A) | 1995 | 1 - 6 | 5MW(0.5W) | 同位体分離 |
| | (165MeV ; 60A) | 1995 | 0.23- 1.2 | 5MW(0.5W) | 医療応用 |
| | (30MeV ; 40A) | 1996 | 20 - 80 | 5MW(1 W) | 生物学 |
| | (20MeV ; 40A) | 1997 | 50 - 100 | 2MW(1 W) | 新素材 |

(参考文献[2b], 10 頁, 表 1 を引用)

なお、姫路工業大学高度産業科学技術研究所の放射光施設（ニュースバル）においては、リングの直線部に設置した光クライストロンで、波長 0.2 - 12 μm の自由電子レーザーが発振可能でその利用が開始されている[Ⅱ4e]。

自由電子レーザー発振に用いられている加速器は、主に線形加速器であり、数 10～数 100MeV 程度の電子エネルギー領域が使用されている。発振波長域によっては、電子蓄積リングと組み合わせて使用される。現在のところ赤外からサブミリ波領域（波長 1 μm ～数 100 μm ）のものの発振に成功しているが、波長が 10 μm ～0.1 μm （近赤外から可視光）領域は通常のレーザーの活躍領域であり、自由電子レーザーの戦略的な優位性のある領域としてはサブミリ波から遠赤外領域（将来的に自由電子レーザーの短波長化が進めば、極端紫外から軟X線領域も）であると考えられている。なお、レーザー出力（平均出力）をみると、通常のレーザー発振の場合、炭酸ガスレーザーやYAGレーザーのように既にkW級の平均出力を出せるのに対し、自由電子レーザー発振の平均出力は数W程度のものしかなかった。これは、高出力の発振を行おうとする場合高い電流値の電子ビームが必要となるが、通常の電子線形加速器では常伝導加速空洞を用いているため空洞部で発生する熱が大きすぎて間欠的にしか運転できなく、（平均の）電流値を上げられないことによるものである。しかし、近年、日本原子力研究所や米国トーマス・ジェファークソン国立研究所での超伝導電子線形加速器を用いた高出力（数kW）の遠赤外レーザーの発振が可能になってきている。国内における自由電子レーザー研究機関を表－Ⅱ－1－19に示す。

表－Ⅱ－1－19 日本の自由電子レーザー研究施設

| 研究機関 | 加速器概要 | 初発振 | 波長域 (μm) | 平均出力 (ピーク出力) |
|-----------|---|------|--------------------------|-----------------|
| 電子技術総合研究所 | 常伝導電子線形加速器＋ 電子蓄積リング（TERAS） | 1991 | 0.6 | |
| | 常伝導電子線形加速器＋ 電子蓄積リング（NIJI-IV） (300MeV) | 1992 | 0.59 (現在は 0.21 まで) | |

(次頁に続く)

表Ⅱ-1-19 日本の自由電子レーザー研究施設

| 研究機関 | 加速器概要 | 初発振 | 波長域 (μm) | 平均出力 (ピーク出力) |
|--------------------------------|--|--------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 | 常伝導電子線形加速器＋ 電子蓄積リング (UVSOR) | 1992 | 紫色 | |
| 大阪大学 産業科学研究所 | 常伝導電子線形加速器 ISIR L-Band Linac (長さ約 3m, 38MeV) | 1994 | 30-40 | (推定 1MW 超) |
| 日本原子力研究所 | 超伝導電子線形加速器 SCARLET(長さ 25m, max23MeV) (17MeV ; 100-200A (6mA)) | 1998 2000 | 7-30 | 0.1 kW (1MW) 2.34kW (800MW) |
| (参考) CEBAF (TJNAF) (USA) | 超伝導電子線形加速器 (長さ 49m×幅 6m) (40-50MeV ; A (1-5mA)) | 1998 1999 | 5 3 | 0.3kW (10MW) 1.7kW (40MW) |

なお、上表以外に川崎重工業(株)では 1993 年に、住友電気工業(株)播磨研究所では 1997 年に発振に成功している。また、日本大学(原子力研究所)や東京理科大学などでも自由電子レーザー研究が開始されている。

②陽子、重イオンビームとその二次ビーム

物質・材料科学分野における陽子あるいは重イオンビームの利用については、ビームを直接使用する場合が主であり、数～数 100MeV/n 程度までの加速エネルギーをもつビームが使用されており、低いエネルギー領域(20～30 MeV/n 程度)では静電加速器や小型サイクロトロンが、それ以上のエネルギー領域では、AVFサイクロトロンやリングサイクロトロンが主に用いられ、近年では重イオンシンクロトロンも用いられ始めている。なお、陽子や重イオンビーム用加速器については、素粒子物理学あるいは原子核物理学研究用と共用されている場合も多い。陽子あるいは重イオンビームからの二次ビームとしてこれまで最も多く利用されて来ているものは、中性子ビームであり、核破砕反応により二次的に発生させたビームを用いて研究が行われている。また、特に磁性に注目する研究においては、 μ 粒子を使う研究も行われている。更に、核破砕反応により発生する不安定核をビームとして取り出し、利用する研究が今後進展していくものと考えられる。

A 不安定核ビーム

不安定核ビーム(RIビーム；放射性同位体ビーム)は、入射核破砕反応および標的核破砕反応の二つの方法で発生させることが行われている。前者は、数 10MeV/n のエネルギーをもつ重イオンビームを入射核とし、標的核との衝突により入射核の破砕反応を起こし、不安定核ビームを発生させるものである。後者は陽子あるいは軽重イオンを入射核とし、厚い標的物質(標的核)を照射・破砕し標的物質内に種々の不安定核を発生させ、表面まで熱拡散させた後イオン化・初期加速して、精密な質量分離器で不安定核を分離し再加速するものである。下表に、この二つの

方式による不安定核生成についてまとめる。なお、入射するビームはいずれも大きな強度を要する。

| | 入射核破碎方式 | 標的核破碎・再加速方式 (ISOL:Isotope Separator On-Line) |
|---------|---|--|
| 入射核 | (質量数の多い) 重イオン | 陽子あるいは軽重イオン |
| 標的物質 | 薄い標的物質 | 厚い標的物質 |
| 不安定核の分離 | 標的に当てて生成した不安定核ビーム中には種々の核種が混じっており、これを2段階に分けて分離する(第1段階では同じ A/Z のビームを取り出し、エネルギー減衰板を通した後、第2段階で核種を分離する) | 標的物質中の表面まで到達した不安定核種を表面電離、プラズマ放電でイオン化し、あるいはガス流に取り込み電子サイクロトロン共鳴型イオン源に移送してイオン化し、高電圧で初期加速した後、高分解能の質量分離器で核種を分離する |
| 再加速 | なし | あり |
| 特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ・寿命の短い不安定核ビームも得ることができ、得られる核種は多い ・エネルギーの広がり、指向性とも右より悪い(品質は良くない) | <ul style="list-style-type: none"> ・寿命の短い不安定核ビームを得ることは困難である ・エネルギーの広がりの小さい指向性の良い(品質の良い不安定核ビーム)不安定核ビームが得られる |
| 実施研究機関 | 第1世代 L B L (Bevalac) (米国) 第2世代 理化学研究所 (RIPS) (日本) N S C L (A1200) (米国) G S I (FRS) (ドイツ) G A N I L (LISE3) (フランス) | K E K 田無分室他、世界の陽子・軽重イオン加速器施設に多数設置 |

B 中性子ビーム

100MeV 程度を超える陽子ビームを固定標的(原子核)に当てると、原子核に束縛されていた陽子や中性子が解放され飛び出す核破碎反応が生じる。原子核物理研究において述べた中性子ファクトリー(表Ⅱ-1-8 参照)は、この核破碎反応を利用した中性子を大量に供給する施設である。核破碎反応による中性子のエネルギースペクトルは、核分裂に近いエネルギースペクトルを有しているため、核破碎反応を利用する加速器ベースの中性子ファクトリー(パルス中性子発生施設)が、老朽化により閉鎖される原子炉に代わり、今後の主たる中性子源になるものと考えられている。日本においては、計画中的の大強度陽子加速器が建設されれば、より強度の大きい中性子ビームが得られ、物質・材料科学への中性子利用が飛躍的に進展するものと考えられている。

一方、重イオンビームを用いた中性子源として、重陽子(d)ビームを用いる D-T 中性子源および D-Li 中性子源などがある。

D-T 中性子源は、核融合反応 $t(d, n)^4\text{He}$ により中性子を得る方法であり、重陽子の加速エネルギーは、高々数 100keV 程度であり、静電加速器が用いられている。この反応により得られる中性子は、14MeV の単色のスペクトルをもつ。日本原子力研究所の核融合中性子源(FNS)が世界最強のものである。

また、D-Li 中性子源は、重陽子を Li に入射させた際の重陽子からの中性子のはぎ取り(スト

リップリング) 反応を利用するものである。重陽子軽原子核に当たった際の重陽子からの中性子ストリップリング反応の断面積は非常に大きく、上の中性子源はこの反応を利用するものである。この反応では、前方で高い中性子強度が得られ、かつ、中性子のエネルギーは、重陽子入射エネルギーの半分程度の値にピークをもつ単色性のスペクトルをもつ。特に、重陽子のエネルギーを 35MeV とすると、中性子エネルギーのピークは 14MeV となるので、これを核融合材料照射に用いることも考えられている。

表－Ⅱ－１－20 に、加速器を利用する中性子源についてまとめる。

表－Ⅱ－１－20 各種の加速器中性子源で得られる中性子強度など

| 加速器中性子源 (利用するビーム) | 中性子発生量 (ビーム出力あたり) (n/s/MW) | 備 考 |
|-----------------------|---|----------------------------------|
| 光核反応中性子源 (電子ビーム) | 2 ×10 ¹⁵ (Pb ターゲット) 4 ×10 ¹⁵ (U ターゲット) | 白色蒸発型スペクトル (電子エネルギー35MeV で飽和) |
| 核破碎中性子源 (陽子ビーム) | 1.3×10 ¹⁷ (1.5GeV 陽子、Pb ターゲット) | 1MeV 付近に最大値をもつ蒸発型スペクトル |
| D－T 中性子源 (重陽子ビーム) | 7 ×10 ¹⁴ (FNS 350keV, 20mA) | 14MeV の鋭い単色 |
| D－Li 中性子源 (重陽子ビーム) | < 1 ×10 ¹⁶ (重陽子エネルギー 35MeV) | ピークエネルギー約 14MeV の準単色 |

なお、この他、がん治療におけるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT ; Boron Neutron Capture Therapy) 用の中性子源として、⁷Li (p, n) ⁷Be 反応や ⁹Be (p, n) ⁹B によるものが考えられている。これらの反応に用いられる陽子ビームのエネルギーは各々、2.5MeV、4MeV であり、必要とされる電流値は 10mA とされている。

C π 中間子ビーム / μ 粒子ビーム

π 中間子ビームおよびμ 粒子ビームの発生については、原子核物理学の中間子反応研究 (中間子核物理学) [π 中間子およびμ 粒子利用] (55 頁参照)。

D 陽電子ビーム

20MeV 程度に加速した陽子をアルミニウムターゲットあるいは水 (H₂¹⁸O) に照射し、²⁷Al (p, n) ²⁷Si あるいは ¹⁸O (p, n) ¹⁸F で発生した β⁺崩壊核種 ²⁷Si、¹⁸F からの陽電子をビームとして利用する。

2)物質・材料科学分野での動向

(参考文献[Ⅱ4f]での研究項目分類に従い、[Ⅱ4d]、[Ⅱ4g]、[Ⅱ4h]、[Ⅱ4i]、[Ⅱ4j]、[Ⅱ4k]、[Ⅱ4l]、[Ⅱ4m]、[Ⅱ4n]、[Ⅱ4o]によりまとめる)

以下では、物質・材料科学分野での加速器からのビームを利用した研究について、その動向を次の研究項目分類により簡単に総括する。

- ① 物質・材料の構造解析（静的および実時間挙動解析）研究
- ② 表面・界面構造および薄膜構造の解析
- ③ 物質・材料の電子状態の解析
- ④ 極限条件下での物質・材料の解析
- ⑤ 極微量分析
- ⑥ 物質・材料の創製・加工

なお、各研究項目で主に使用される加速器ビームをまとめると、下表のとおりとなる。

表－Ⅱ-1-21 物質・材料科学分野の研究項目分類と使用される加速器ビームの種類

| 研究項目分類 | 主に使用される 加速器ビーム | 使用される方法など | 主たる使用目的 |
|---|-------------------|--|------------------------------------|
| 物質・材料の構造解析 （静的および実時間 挙動解析） 表面・界面構造および 薄膜構造の解析 （なお、実時間挙動解 析では、短いパルスビ ームが使われる） | 電子ビーム | 電子線回折 | 基本原子配列探査 |
| | 放射光 | X線回折 微小角X線回折 | 基本原子配列探査 物質表面・薄膜原子配列 探査 |
| | | X線ラマン散乱 | 不純物元素 |
| | | X線吸収微細構造 (XAFS)分析 | 結晶微細構造探査 不純物元素 |
| | | 回折吸収微細構造 (DAFS)分析 | 特定結晶構造中の特定元 素の化学結合状態探査 |
| | | CTR散乱 | 界面原子配列探査 |
| | 中性子ビーム | 中性子回折 （中性子散乱） | 基本原子配列探査（水素 原子の位置、挙動） 磁性構造探査 |
| | 陽電子ビーム | 陽電子消滅分光法(PAS) | 高精度格子欠陥探査 |
| | | 陽電子消滅励起オー ジェ電子分光法(PAES) | 表面近傍の欠陥、不純物 探査 |
| | | 反射高速陽電子線回折 (RHEPD) | 表面第1層の構造 |
| | | 陽電子チャンネルング | 格子間原子の位置、格子 不整 |
| | 陽子ビーム | シングルイオンヒット損傷 | 宇宙線による半導体損傷 |
| | 重イオンビーム | イオンチャンネルング 後方散乱(RBS) 重イオンエネルギー測定 反跳粒子検出(ERDA) | 不純物元素探査 特定元素分布 |

(次頁に続く)

表Ⅱ-1-21 物質・材料科学分野の研究項目分類と使用される加速器ビームの種類

| 研究項目分類 | 主に使用される 加速器ビーム | 使用される方法など | 主たる使用目的 |
|---------------------|-------------------|---|-------------------------|
| 物質・材料の 電子状態の解析 | 放射光 | 高分解能光電子スペクトル測定法 | 電子状態の解析 (エネルギーバンド構造) |
| | | 磁気コンプトン散乱運動量分布測定 磁気円二色性測定 | 磁性電子状態 |
| | 陽電子ビーム | 陽電子消滅分光法(PAS) | 電子状態の解析 |
| | μ 粒子ビーム | μ 粒子スピン回転法(μ SR) | 磁性電子状態 |
| | 中性子ビーム | 偏極中性子散乱法 | |
| 極限環境下での 物質・材料の解析 | 放射光 | X線回折など | 基本原子配列探査など |
| 極微量分析 | 放射光 | 蛍光X線分析など | 不純物元素など |
| | 中性子ビーム | 放射化分析 | |
| | 陽電子ビーム | 陽電子消滅分光法(PAS) | |
| | 重イオンビーム | イオンチャネリング 後方散乱(RBS) 重イオンメサウアー測定 反跳粒子検出(ERDA) | |
| 物質・材料の 創製・加工 | 重イオンビーム | ビーム照射、注入など | 照射改質、多孔膜形成、 微細加工など |
| | 放射光 | | |
| | 陽電子ビーム | | |
| | 中性子ビーム | | |

①物質・材料の構造解析(静的および実時間挙動解析)研究

物質・材料科学においては、原子の配列や不純物の位置などの構造を調べることが、物質・材料の性質などを理解する基礎となっている。研究対象となる物質・材料は、単純な結晶構造を持つ金属やセラミックス材料、超伝導材料、多数の原子からなる巨大分子など複雑な結晶構造をもつ物質、非周期系あるいは結晶質でない物質・材料など非常に多様なものとなっている。

物質・材料の構造を調べる際にプローブとして使われるビームは、主にX線波長領域の光、電子ビーム、陽電子ビームあるいは中性子ビームであるが、重イオンビームも使われるようになってきている。

A 静的原子配列などの探索

X線を用いた物質の構造解析では、X線回折法が古くから使われてきた。これはX線が強く散乱される方向が結晶中に周期的に並んだ原子の間隔と関係があることを応用したものであり、その光源には、X線管などからの特性X線や気体発光線、制動放射、シンクロトロン放射光などが使われている。最近では、シンクロトロン放射光の利用が一般的になってきている。高輝度の第3世代放射光源の普及につれて、X線吸収微細構造(XAFS: X-ray Absorption Fine Structure)分析による特定原子近傍の構造解析のような、より高度な分析技術が育ってきている。また、X

線回折とX線吸収微細構造分析を組み合わせた回折吸収微細構造（DAFS：Diffraction Absorption Fine Structure）分析により、特定の結晶構造を持つ特定の元素の化学結合状態を調べる研究も進展してきている。XAFS分析やX線ラマン散乱は不純物の分布の測定に、また、DAFS分析は結晶欠陥の構造解析にも用いられている。これらの分析技術は、シンクロトロン放射光のもつ特性（広い波長域、高輝度、指向性、偏光性、パルス特性、高信頼性、清浄）によるところが多い。

酸化物高温超伝導材料は、1986年に発見されて以来、工業的にも学術的にも極めて重要な材料である。酸化物高温超伝導材料の超伝導発現機構解明のためには、高輝度シンクロトロン放射光を用いた、精密な構造解析が不可欠である。また、磁気スピンとの相互作用が弱いX線は、磁性構造を探るためのプローブとしては不適当であるとされていたが、高輝度放射光源の登場によりそのような従来の常識を覆しつつある。シンクロトロン放射光は連続スペクトルをもち輝度が高いので、波長（エネルギー）を掃引して測定することにより、複雑な結晶構造をもつ物質や非晶質などのように明確な回折ピークが得られない物質でも、構造解析が可能となる。このように優れた特性を有するシンクロトロン放射光の利用は、物質・材料科学のみならず生命科学、医療利用などの幅広い分野で世界的に広まってきている。

電子線も構造解析に利用されることが多い。電子波の回折現象を利用する電子線回折では、そのド・ブローイ波長が物質内における原子間距離程度のものを、その他の分析のためには物質を構成する原子のエネルギー準位程度のエネルギーの電子が利用され、そのエネルギー範囲は数10～数100keVのものである。この程度のエネルギーの電子は、加速器を用いなくとも発生させることが可能である。

中性子は、その質量が水素（陽子）とほぼ同じであり水素による散乱断面積が非常に大きいので、物質中の水素の挙動を調べるために有用であり、中性子散乱（中性子回折）法として応用されている。特に、水素を多く含んだり、水素の動きが重要な役割を果たす、有機高分子材料や燃料電池材料などの研究には、中性子ビームは不可欠になりつつある。また、中性子は磁気モーメントをもっているので、磁気モーメントをもつ原子などと衝突するとき、磁氣的相互作用を受け、散乱される中性子は物質中の磁気モーメントに関する情報をもっている。このため、中性子は、磁性体の原子磁気モーメントの配列など、磁気構造を調べるための有効なプローブとなっている。中性子ビームは、液体や非晶質のように、規則正しい構造をもたない物質の解析にも用いることができる。なお、中性子回折などに用いる中性子は、そのド・ブローイ波長が物質内における原子間距離程度のものとなるエネルギー領域（数10meV）の熱中性子である。熱中性子としては、原子炉からの熱中性子が主に使われてきているが、原子炉の老朽化による廃止のため、今後は、加速器を利用した中性子源が主要なものになると考えられている。また、不純物の分析においては、中性子照射により放射化された元素からの放射線を利用して微量元素の種類や量を測定する、放射化分析も一般的である。

陽電子は、電子と同じ質量で正電荷をもつために、物質中では原子核に捉えられることがなく、散乱されつつ運動エネルギーを失い熱平衡に達する。陽電子が電子と遭遇すると対消滅を起こし2方向に γ 線を放出するが、対消滅は、陽電子のエネルギーが低い方が起こり易い。従って、陽電子が物質中に進入して電子と遭遇して対消滅に γ 線を発生させるまでの時間や2方向に放出さ

れる γ 線の角度相関の計測などを行うことによって、物質中の電子の振る舞いを直接的に非破壊で知ることができる。陽電子消滅分光法（PAS：Positron Annihilation Spectroscopy）や陽電子消滅励起オージェ電子分光法（PAES：Positron Annihilation induced Auger Electron Spectroscopy）など物質中や表面近傍、最表面の欠陥、不純物などを極めて高感度で測定できるようになってきている。

重イオンビームについては、イオンチャネルリング法および後方散乱法（RBS：Rutherford Backward Scattering）などにより金属や固体中の不純物原子の状態を調べたり、不純物と空孔との相互作用などに関する挙動解析手段として使われている他、固体結晶に重イオンビームを照射し特定の核反応を起こすことにより、結晶内に放射性核種を創出し、放射性核種の崩壊後の励起原子核からの γ 線を線源とするメスバウアー測定により、元素組成の変化による結晶格子の歪みを与える影響の精密な解析が行われている。その他、入射ビームにより前方に反跳された粒子を測定する反跳粒子検出法（ERDA：Elastic Recoil Detection Assay）により、固体中の特定元素の分布状況測定が行われている。更に、宇宙で使用される半導体デバイスが重粒子線に曝され電子と正孔の大量発生によりデバイスが破損したりするシングリイベント現象の解明においても、陽子あるいは重イオンビームが用いられており、水素原子と核反応を起こしやすい特定のイオンビームを用いた水素検出とチャネルリング効果を組み合わせた方法により精度の良い水素原子の格子中の存在位置確定を行う研究も開始されている。

B 動的な原子配列などの変化の探索：「その場観察(実時間挙動解析)」

極めて短時間内におこる物質内の原子配列の動的な変化や化学反応の進行などを「その場観察」で捉えること（実時間挙動解析）は、現代の物質科学研究において必要不可欠なものとなっている。「その場観察」によって、物質の構造変化や物質内での反応の進行などの動的な変化と、温度、圧力、濃度、磁場、電場などの環境との関連を明らかにすることが可能となる。このことによって、物性の解明や極めて短時間のうちに進む反応の制御などを行うことが可能となる。

時間変化を観察するにあたり、プローブビームのパルス幅が長い場合には、検出器側に時間分解機能を持たせる必要があり、しかもこの場合には検出感度を高める必要があるので、一般的に高時間分解能を得ることは難しい。そのため、高時間分解で効率良く観測するためには、プローブビームに高強度かつ短パルスのもを使用し、現象のスナップショット（駒撮り）や照射後の物質の応答を測定する必要がある。このように短パルスビームを使うことにより、速い時間的な変化を瞬時に捉える技術をポンプ&プローブ分析という。

「その場観察」は、今後の物質・材料科学研究においてより広範に普及してゆくものと考えられるが、それには、変化や反応が起こっている最中に短パルスビームを使った観察が必要となるため、将来的には物質科学研究専用の加速器を、他に必要な実験装置と同じスペースに入れることが望ましいものと考えられる。

パルス特性を有する高輝度放射光は、その場観察に適しており、今後の更なる発展が期待されている。また、短パルス電子ビームを用いた化学反応などの実時間挙動解析などがこれまでも行われてきているが、ピコ秒より短いフェムト秒領域のパルス電子ビームにより時間分解能の格段に優れた実時間挙動解析ができるものと期待される。更に、適当なパルスにした重イオンビーム

により結晶内に創出される放射性核種を用いたメスバウアー測定によるその場測定（インビームメスバウアー分光）などの発展も期待される。

中性子については、これまで原子炉からのものが主に使われてきているが、短いパルス特性をもつ中性子ビームは、先にも述べたように、数 GeV 級陽子ビームによる核破砕反応から得られるものである。核破砕中性子は強度も大きなものとするのが可能であり、今後の物質科学の発展を担う中性子源になるものと考えられている。

②表面・界面構造および薄膜構造の解析

物質科学における研究対象として、物質の表面あるいは界面は、構造解析全般とは切り離して、特に注目されるものとなっている。これは、表面・界面が固体バルクにはない物性を発現させるという観点から重要であるのと同時に、表面・界面は物理・化学的に興味深い現象が数多くあることによるものである。

A 静的原子配列などの探索

結晶の最表面の原子配列解析、表面付近の原子配列垂直方向変化の解析や表面・界面の不純物状態の分析などは、材料の表面・界面が介在する特性を理解し、また、それを様々に応用したり、新たな特性を有する表面・界面を持った物質を創成する上での基礎的なデータを提供するものとなっている。これらの表面・界面研究においては、放射光、中性子ビーム、陽電子ビームおよび重イオンビームなど多様な加速器ビームがプローブとして使用されている。これらのビームをプローブとして、表面・界面付近の構造を調べる際には、表面・界面でのビームの散乱（あるいは反射）現象が利用され、その散乱（反射）角依存性などのデータを基に、表面・界面付近の原子配列などが調べられている。

一般に表面・界面での散乱はそれに寄与する原子の数が少なく、高輝度放射光はその測定を短時間で行うのに適している。また、微小角散乱は表面付近の配列探索に有効である。半導体などの結晶表面の三次元的な原子配列や欠陥構造の解析においては、放射光X線を用いたCTR（Crystal Truncation Rod）散乱や微小角X線回折などの方法が用いられている。

ド・ブロイ波長が物質内における原子間距離程度の熱中性子も表面・界面研究においては一般的に使われているプローブである。この際にも、中性子散乱が使われており、その角度依存性から表面近傍の原子配列などを調べる研究が行われている。

陽電子は正電荷を持ち、固体表面で反発を受けるため、回折などにより最表層の状態を観測するのに適したプローブになるものと期待されている。反射高速陽電子線回折（RHEPD：Reflection High Energy Positron Diffraction）においては、表面第1層の観察が可能である。また、機能性薄膜や多層膜の形成は、反射高速電子線回折（RHEED：Reflection High Energy Electron Diffraction）などにより構造不整がないことを確かめながら行われているが、電子を陽電子に置き換えることでより完全性の高い材料創製が可能になるものと期待されている。これらは、陽電子源の開発とともに進展してゆくものと考えられている。なお、陽電子の固体表面での反発を利用して、低速陽電子により最表層の原子を選択的にイオン化させることも可能であり、これを利用した陽電子消滅励起オージェ電子分光法による表面不純物高精度分析や、表面・界面

に不純物を付着させている電子を消滅させ、不純物を取り除くことも行われている。

重イオンビームによる後方散乱法やチャンネリング法を用いた、半導体基盤上の薄膜と基盤との界面の構造解析、歪み解析あるいは結晶最表面の原子種類の確定分析なども行われてきており発展が期待されている。

B 動的な原子配列などの変化の探索 : 「その場観察(実時間挙動解析)」

表面・界面の動的変化についても、同様に重要な研究テーマとなっており、例えば、半導体のエピタキシャル成長過程や人工格子のMBE (モレキュラービームエピタキシー; Molecular Beam Epitaxy) 成長過程など表面結晶成長の動的過程を調べるものがある。また、化学反応における触媒については、触媒物質の表面構造が果たす役割が大きく表面構造研究の重要な対象となっているが、その触媒作用は実際の化学反応を起こしながら観察することが必要であり、時間的挙動を「その場観察」で明らかにする研究も発展してゆくものと考えられている。

現在は一般的ではないが、低速の μ 粒子ビームを用いた μ 粒子スピン回転(ミューエスアール: μ SR (Muon Spin Rotation)) 法でのその場観察による、人工格子のMBE (モレキュラービームエピタキシー) 成長過程でのマイクロ磁性の表面・界面における振る舞いの解明なども、強度の大きな μ 粒子ビーム源の開発とともに進展してゆくものと考えられている。

③物質・材料の電子状態の解析(電子物性解析)

固体物質に金属(導体)、半導体あるいは絶縁体の性質が出現するメカニズムあるいは磁性が発現するメカニズムは、その電子状態に大きく依存する。これらの電子状態が大きく関与する物性は電子物性と呼ばれ、電子状態に関する解析は構造解析と並び、物質科学における重要課題である。

1986年に発見された酸化物高温超伝導材料の起こす超伝導は、それまでの極低温の金属が起こす超伝導とは、異なるメカニズムによるものと考えられているが、まだ、解明されていない。この機構解明のために精密な構造解析とともに、エネルギーバンド構造など電子状態の解明が不可欠であり、真空紫外から軟X線領域の、高いエネルギー分解能をもつ、高輝度放射光を用いた光電子スペクトル測定によりバンド構造の解明がなされてきている。なお、高エネルギーのX線によるコンプトン散乱を利用すると物質内部での電子の運動量分布を調べることができる。また、電子運動状態の探査においては、陽電子が電子と対消滅を起こし発生させる消滅 γ 線も有効である。このときの消滅 γ 線は、消滅前の電子・陽電子対の運動量およびエネルギーを正確に保存しているため、これを計測することにより電子の運動状態がわかる。この方法(陽電子消滅分光)は、超伝導の仕組みを探る有力な方法の一つとなっている。

磁性材料は、産業分野で広く使われている材料であるが、磁性の発現するメカニズムの詳細な研究においても電子状態の解明が不可欠である。磁性体の磁性を担う電子(磁性電子)の磁気コンプトン散乱による運動量分布測定や、また、右回り円偏光と左回り円偏光の吸収の違いにより生じる磁気円二色性測定による電子状態の研究には、高輝度放射光の円偏光X線が用いられている。また、先にも述べたように、中性子も磁気モーメントを有し磁性電子と磁気相互作用を行うため、偏極中性子散乱法により電子状態の研究に一般的に用いられている。同様に、磁性につい

ては、磁気モーメントを有する μ 粒子も用いても調べられている。酸化物高温超伝導材料のもつ磁気的な性質については、 μ 粒子スピン回転法を用いた電子状態の探求が行われている。

その他、重イオンビームを利用した電子状態の研究については、原子の電子準位の精密な測定がある。薄膜を通過した重イオンは高電離した状態であり、特定の遷移スペクトル線の薄膜通過後の時間的变化を調べることで、電子の遷移確率を得ることができる。これは、原子の準位エネルギーと遷移に関する厳密な基礎データを与えることとなり、レーザーの開発やプラズマの研究などに使われており、データ需要の高い研究である。

構造解析と同様に、電子状態の解析においても変化の過程を動的に測定することは、今後の物質・材料科学における重要なテーマになってゆくものと考えられている。光、電子、イオンなど外部からの擾動による電子状態の変化の探求においては、短パルスの各種ビームを用いた「その場観察」が重要な手段となってゆくものと考えられる。

④極限条件下での物質・材料の解析

物質・材料の性質を明らかにし、新しい材料を創製するには、圧力や温度などによる構造変化を研究することが重要となる。新機能を持つ無機物質合成の先進的な手法の一つに高圧合成法があり、この合成時に高圧状態に置かれた微小な試料セル中の物質の測定にはX線回折が利用されているが、この場合には高輝度放射光による動的な構造解析も含めた展開が期待される。

⑤極微量分析

金属材料においては、より高度な耐食性、耐熱性や加工性などの特性を有した高付加価値の材料開発が非常に重要になっている。この開発のためには、他種類の微量元素を効果的に添加することが必要であり、微量元素（極低濃度）の分析は不可欠であり、より高精度な分析が求められてきている。

従来、蛍光X線分析は非破壊で定量性の良い微量元素分析法として知られているが、高輝度放射光の利用により微量分析の検出限界が著しく向上してきている。pptレベルの超低濃度不純物分光分析の開発利用は今後進展してゆくものと考えられている。

微量不純物の分析においては、中性子照射により放射化された元素からの放射線を利用して微量元素の種類や量を測定する放射化分析も一般的である。また、固体結晶中のイオンビームの散乱・反跳を利用した不純物分析も進展してきており、イオンチャンネリング法および後方散乱法（RBS）や反跳粒子検出法（ERDA）による固体中特定元素の微量分析の進展も期待される。

また、非常に少量のサンプルを用いて行う分析も進展してゆくものと思われる。少量のサンプルの場合、ビームをミクロン以下の径の微小な領域に絞って当てるマイクロビーム技術が必須のものであり、この技術の研究開発が重要である。

⑥物質・材料の創製・加工

加速器ビームは、高分子の架橋による強度の増加などの改質、化学反応や熔融などのみを用いる従来の材料製造法では不可能な、機能性材料の創成に用いられている。また、ビームを利用したLSI製造に関する極微細加工（リソグラフィ）研究にも用いられている。

機能性材料創製においては、ビームの特徴を生かし、エッチング処理や固体表面のみの性質を変えたり（表面改質）、薄膜の改質や物質中の異種層の創成などが行われている。表面改質においては、高輝度放射光を用いるものの他、固体結晶の表面のみを非晶質化したりする際には比較的低エネルギーの重イオンビームの照射が用いられている。また、陽電子を用いた表面の不純物除去なども研究されている。なお、あまり一般的ではないが、中性子ビームを用いた表面の改質研究もなされている。膜に関するものとして、薄膜に重イオンを照射することにより原子・分子レベルでの孔をあけ、化学エッチング処理などを施す多孔性膜の作製や、高輝度放射光の励起効果を利用した化学気相成長による薄膜形成などが行われている。更に、固体結晶中に異種物質の薄い層を生成させるもの（結晶性異種物質相の形成）として、イオンビームを用いたイオン注入法があり、結晶中にイオンを特定のエネルギーで打ち込み薄い層をつくることなどが発展・普及してきている。

なお、フェムト秒レーザー分光に始まる短パルスビームによるポンプ&プローブ分析は、これまで高速光化学反応やビーム誘起反応の分析のみに活用されてきた。しかし、近年フェムト秒レーザーを用いた発光ガラスの製造など、短パルスビームを使用した新物質の創成の研究が始まり出している。時間差が精密に制御された2つの短パルスを使用すれば、創成される新物質の種類は大きく広がるものと考えられている。分子サッカーボールやナノチューブなどのフラーレン創成に応用される可能性も高い。このような新しい発想によるポンプ&プローブ新物質創成も興味ある応用分野の一つである。

ビームを利用した極微細加工（リソグラフィー）には、LSI製造時におけるX線（あるいは極端紫外線）による極微細加工（X線リソグラフィー）が研究されているが、よりエネルギーの高い高輝度放射光を用いるとより微細な加工が可能となり、この方面での利用が期待されている。このような加速器ビームの高度利用を進展させるためには、マイクロビームの開発・利用も重要な課題となっている。

(2)物質・材料科学用加速器の要件

物質・材料科学に使用される加速器ビームへの要求をまとめると、次のようになる。

- ①ビームの種類は目的に応じて、電子、光子（放射光）、陽電子、中性子、陽子、重イオンなど多様なものが使用できること
- ②ビームエネルギーについても、目的に応じて、低エネルギーから中間エネルギーまでのものが使用できること
- ③ビーム強度についても、目的に応じて、小さい強度から大きな強度までのものが使用できること
- ④ビーム時間構造（連続、パルス、極短パルスなど）についても、目的に応じた様々なものを選択できること

これらのことから、加速器の要件は、以下のようになる。

- A. 物質・材料科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎない場合が多く、できるだけコンパクトなものが良い
- B. 上記のように非常にバラエティーに富んだビームを使えること
- C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい

物質・材料科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさが変わらない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる。この点から、確立された大型加速器ばかりではなく、新しい加速技術による小型加速器が要望されている。

参考文献 (物質・材料科学)

- [Ⅱ4a] (社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第2章2-3 (自由電子レーザー), 3. (2次ビーム発生技術)) NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998年6月) 64-70, 89-104.
- [Ⅱ4b] 東京大学V S X高輝度光源利用者懇談会;尾嶋正治 (東大工), 太田俊明 (東大理), 神谷幸秀 (東大物性研) 編, 「高輝度放射光がめざす戦略的応用研究 -Technology Vision SR 2010- (平成10年3月6-7日 シンポジウム報告)」(2.2 自由電子レーザーと利用研究 (富増多喜夫 (株) 自由電子レーザ研究所)), (有) WORDS Publishing House, (平成10年3月) 7-24.
- [Ⅱ4c] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994年4月20日) 「制動X線、制動放射」1075, 「シンクロトロン放射」975, 「光中性子」1702.
- [Ⅱ4d] 原子力委員会 放射線利用推進専門部会, 「加速器利用研究の推進について (資料編含む)」, (1996年6月).
- [Ⅱ4e] 姫路工業大学 (<http://www.lasti.himeji-tech.ac.jp/NS/Index-J.html>) (高度産業科学技術研究所).
- [Ⅱ4f] 航空・電子等技術審議会, 「“放射光施設の利用による先端的な物質・材料系研究開発に関する総合的な推進方策について”(諮問第23号) に対する答申」, (1996年7月11日).
- [Ⅱ4g] 放射光利用研究促進機構 (財) 高輝度光科学研究センター, 「SPRING-8」, (1997年11月).
- [Ⅱ4h] 理化学研究所, 「リングサイクロトロン (重イオン科学用加速器)」, (1996年3月).
- [Ⅱ4i] 理化学研究所ミュオン科学研究室 理研RAL支所, 「理研-RAL 第2期計画(2000-2009)」, (1999年6月).
- [Ⅱ4j] 小山和義 (電子技術総合研究所), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会 (加速器科学) 資料, (1998年2月).
- [Ⅱ4k] (社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第3章1. (放射光利用), 2. (イオンビーム利用), 第4章2. (高強度中性子ビームの利用), 3. (RIビームの利用), 4. (ポジトロンビームの利用) 5. (中間子・ミュオンの利用), NSA / COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998年6月) 106-137, 158-186.
- [Ⅱ4l] 東京大学物性研究所 (<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/neutron/index-j.shtml>) (中性子散乱研究施設).
- [Ⅱ4m] 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設, 「電子ツインラナックシステム」, (2000年1月).
- [Ⅱ4n] 日本原子力研究所 (<http://www.jaeri.go.jp/genken/index.html>) (高崎研究所 放射線高度利用センター).
- [Ⅱ4o] 姫路工業大学 高度産業科学技術研究所, 「ニュースバル (新世代放射光源)」, (1996年10月).

5 生命科学

(1) 研究の動向

生命科学のめざすところは、生命体（自己再生化学反応系の進化した姿）に関する最も基本的な遺伝現象、生命再生現象あるいは生命体の様々な病理、変異現象の解明である。生命科学においては、生命現象に関するあらゆる対象を物理化学的手法で研究しており、組織や器官を扱うマクロレベルから生命体を構成する高分子を扱うミクロレベルまでの極めて多彩な研究が展開されている。生命現象の解明は、医療技術の高度化や薬品の開発などに大きく寄与するものであり、世界的に急速に発展してきており、日本においても今後力点が置かれ、更なる発展が期待されている分野である。

加速器からのビームを使う（加速器科学としての）生命科学分野は、主としてミクロレベルの研究分野であり、大別すると、放射線生物学、細胞生理・生体組織機能解明研究および構造生物学（または、分子生物学）に分けられる。

1) 放射線生物学

（参考文献〔Ⅱ5a〕、〔Ⅱ5b〕、〔Ⅱ5c〕、〔Ⅱ5d〕、〔Ⅱ5e〕、〔Ⅱ5f〕によりまとめる）

放射線生物学とは、X線、 γ 線、電子線、中性子線、陽子ビーム、重イオンビーム（重粒子線）などの（電離）放射線が生体に与える影響または効果（生体放射線効果、生物学的放射線効果）を研究することを目的としている。20世紀に人類が放射線を扱うのに伴い放射線生物学が発展し、現在の生命科学研究において一つの領域を形成している。

上の（電離）放射線は、生体に対して変異原性をもつ環境因子である。これらの放射線は、物質（生体）に与える線エネルギー付与（LET；Linear Energy Transfer）の大きさにより、低LET放射線（X線、 γ 線）および高LET放射線（中性子線、陽子ビーム、重イオンビーム）に分けられている。放射線生物学は、放射線による生物個体の生死、特定部分の細胞の生死、生体機能変化などを対象に研究し、当初はマクロレベルの現象研究が主であったが、生物の発生に関わる遺伝子研究の進展とともに、分子レベルの研究が進展してきている。

現在の放射線生物学においては、主に加速器ビームを用いた研究が行われている。加速器ビームを含む放射線による細胞死や突然変異誘発など、放射線の生物学的な影響を表す指標として、生物学的効果比（RBE；Relative Biological Effect）がある。RBEは、ある放射線について、基準放射線で吸収線量 D_0 を与えたときに起きる生物学的な影響（例えば、細胞死の割合など）と同じ影響を発現させる線量を D としたとき、 D_0/D で与えられるものである（この値は、着目する生物学的影響によっても異なる）。これらの研究により、放射線のRBEは、LETが高い線種で率が高いなどのLET依存性が解明されてきている。また、放射線の生体への影響に関して、放射線により生体内で生成される活性酸素やフリーラジカルの生体構成物質との反応性の研究が展開されている。更に、陽子線や重粒子線によるがん治療の有効性が認識され、少しずつ拡がり始めており、これらの粒子線を用いた治療を最適化してゆくための粒子線の生物効果に関する機序の解明と定量的解析、粒子線による腫瘍治療効果、正常組織障害の評価、線質と細胞損傷に関する研究などの研究が進展してきている。

放射線生物学のうち、特に遺伝子の一部欠損や損傷が引き起こす変異や病理現象を解明する研

究は放射線遺伝学と呼ばれている。放射線遺伝学においては、電離放射線によるDNAなどの生体高分子損傷 → 染色体レベルで観察される異常 → 突然変異や細胞がん化など細胞レベルで見られる変化 → 個体として発現される影響、など時間的なスケールの違い、影響を検出する生物学的ポイントの多様性を踏まえて、そのメカニズムを解明することをめざしている。放射線遺伝学で従来から行われているのは、加速器ビーム照射による突然変異種の研究であり、主に植物に照射をすることにより様々な種類の変異種を作り出している（これは遺伝子資源拡大とされている）。近年では、放射線照射による突然変異をDNAレベルで検出・解析する放射線突然変異の検出・解析技術の開発などが進展し、放射線によるDNA損傷の修復に関わる遺伝子や放射線生体応答に関与する複数の新規遺伝子が解明されている。放射線による発がん機構の解明に関する研究については、DNA損傷修復不全マウスや発がん感受性の異なる系統のマウスを用いた検証研究が実施されており、DNA損傷修復遺伝子の発がんにおける役割の解明や発がんに関係する遺伝子の探索などが行われている。これらのDNAレベルの研究は、ゲノムダイナミクス解明の一環としての面も有している。

以上の加速器ビームを利用した放射線生物学研究は、放射線医学総合研究所、理化学研究所、日本原子力研究所（高崎研究所）などで行われており、重イオンビームなどが用いられている。なお、原子炉からの放射線を利用した同様な研究は、京都大学（原子炉実験所）などで実施されている。

2)細胞生理・生体組織機能解明研究

（参考文献[Ⅱ5a]、[Ⅱ5b]、[Ⅱ5c]、[Ⅱ5d]、[Ⅱ5f]によりまとめる）

生体中の微量（無機）元素（必須元素としては15種類）は、一般に蛋白質や酵素の補助因子として生体活動に不可欠な存在であり、これらの無機元素の分布変動などを詳細に調べることで、生理現象の解明に寄与できるものとされている。細胞内の代謝や生化学反応機能などを調べる手段として、重荷電粒子励起特性X線（PIXE；Particle Induced X-ray Emission）分析、単光子放出断層撮影（SPECT；Single Photon Emission Computed Tomography）、陽電子放出断層撮影（PET；Positron Emission Tomography）などが用いられている。

PIXEは、その分析限界値が極めて小さく（かつ、コスト的にも妥当なものであり）、生体試料中の微量元素分析において、一般的になりつつある。PIXEでは、イオンビームにより励起された原子核からの特性X線を測定することにより、生体中の微量元素を解析するものである。これは、マイクロビームを利用し細胞マッピングなどに利用され始めている。通常使用されるイオンビームは陽子で、その入射エネルギーは数MeVでありバン・デ・グラーフ型加速器や小型サイクロトロンからの陽子ビームなどを用いる。

SPECTは、EC（電子捕獲）あるいは β^+ 崩壊をする不安定核（RI）を生体内に取り込ませ、壊変後に放出する γ 線を検出し、計算機処理することにより生体内の分布を画像化する方法である。この方法で使われる核種は、 ^{67}Ga 、 ^{123}I 、 ^{201}Tl などである。この方法では、実時間で分布を観察することが可能であるが、解像力および定量性の面で次に示すPETにやや劣るものとなっている。

PETは、生体構成元素あるいはそれに準ずる元素の β^+ 崩壊を起こす不安定核（RI）を標識

化合物として生体内に取り込ませ、その標識化合物中の不安定原子核より放出された陽電子が付近の電子と対消滅を起こす際に発生する二本の γ 線を測定器により検出し、計算機処理することにより対消滅が生じた場所を特定し、標識化合物の分布を捉えるものである。生命体が吸収する種々の物質の代謝を生きたまま（例えば、脳機能の解明や心臓の血流量把握などにおいては、PETなどのリアルタイムイメージング手法により）、実時間で観察することが可能であり、生命科学においては（同様に医療利用においても）非常に有力な手段になりつつある。PETに用いられる β^+ 崩壊核種は、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F などで生体構成元素あるいはそれに準ずるもので、生体内の生化学的機能の検査に多くの利点を持っている。

SPECTあるいはPETに用いられる核種の生成は、小型AVFサイクロトロンからの30MeV程度の陽子ビームなどをターゲットに当てて行われている。

3) 構造生物学

（参考文献[II5g]、[II5h]、[II5i]、[II5j]、[II5k]、[II5l]によりまとめる）

生命現象の根元は、らせん構造を持つDNA上の遺伝情報であるが、その遺伝情報に基づき生命体を形づくるものは蛋白質分子であり、蛋白質は生命の基礎物質と理解されている。生命体を形づくる蛋白質は、遺伝情報によって定まるアミノ酸配列により決定される複雑な立体構造をとることにより、その機能が発揮されるものと理解されている。この場合、分子量が同じであるにしても、その立体的な構造が異なれば性質も異なるとされており、その立体的構造を明らかにすることが基本となる。蛋白質の他、生命現象には核酸、高分子の糖、脂質などの生体高分子が更に集まって作る複合構造体も関与しており、これらの生体物質の複雑な立体構造を明らかにすることも同様に重要である。このように生体高分子の構造を解明する領域は、構造生物学（または、分子生物学）と呼ばれており、生命科学研究における一つの重要領域を形成している。構造生物学では、明らかになった蛋白質などの生体高分子の立体的な構造とその機能や物性との関連を解明し、それをもとに種々の局面における生理的に重要な現象の詳細を理解してゆくことが基本となっている。

物質・材料科学分野でも述べたように、一般に分子の構造を調べるには、原子間距離程度の波長をもつ波（光（X線）や中性子波など）が用いられている。蛋白質を含む生体物質の立体構造を解明するにあたり、X線が大きな役割を果たしている。これまでに構造が決定された蛋白質の約8割はX線結晶構造解析によるものである。使用されるX線として、放射光X線は、強度が強かつ連続スペクトルを有していることから、X線構造解析に使われることが一般的になってきている。構造生物学において用いられている放射光の光子エネルギーは数keV～数10keVであり、現段階では数GeV程度のエネルギーの電子シンクロトロンリング（すなわち、大型放射光施設）でしか得られない。放射光X線を用いた蛋白質結晶の構造解析は、日本では、KEKのフォトンファクトリー（PF）で行われてきているが、1997年より運用が開始されたSPring-8においても、放射光X線を用いた構造生物学研究が一つの柱となってきている。PFやSPring-8では、いくつかのビームラインを使用して、放射光X線による散乱、回折による蛋白質、核酸、脂質などの生体高分子の構造解析を実施している。放射光を用いた構造生物学研究においては、結晶化された

高分子の他、非晶質高分子についても行われている。後者においては、連続スペクトルをもつ放射光の特徴を利用し、X線の波長（エネルギー）を変えて散乱や回折を行うことにより実施されている。

また、構造生物学分野で、現段階ではあまり一般的ではないが、中性子ビームの使用が注目されてきている。これは、X線構造解析では観測が難しい水素原子が良く見えることによるものである。このためには強度の強い中性子ビームが必要である。現在、中性子ビームは原子炉から得られているものがほとんどであるが、今後予定されているこれらの原子炉の廃炉に伴い、それを代替する強度の大きい中性子源が望まれている。建設が開始されつつある大強度陽子加速器は、従来の原子炉に代わる中性子源となることが期待されている。

また、これまでの生体高分子の構造解析は結晶化したものの分析であるが、E Uの放射光施設 ESRF などでは細胞中での生体高分子の構造や機能を探る研究が指向されている。

以上述べた加速器科学としての生命科学において使用される加速器ビームの種類などをまとめると、以下の表－Ⅱ－1－22 のとおりとなる。

表－Ⅱ－1－22 生命科学分野で用いられる加速器ビームの種類など

| 生命科学領域 | 使用されるビーム | 分析法など | 使用される加速器 |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------|--|
| 放射線生物学 (放射線遺伝学) | X線 | | 放射光施設 |
| | 陽子・重イオンビーム | | AVFサイクロトロン 重イオンシンクロトロン |
| | 中性子ビーム | | 陽子シンクロトロンからの陽子ビームによる核破砕中性子 |
| 細胞生理・ 生体組織機能解明研究 | 陽子ビーム (数 MeV) | P I X E | バン・デ・グラーフ型加速器 小型サイクロトロン |
| | 不安定核（ビームではなく放射性核種として） | S P E C T P E T | 小型サイクロトロン（加速器ビームそのものは不安定核を製造するのに使用される） |
| 構造生物学 | シンクロトロン放射光 (X線:数 keV～ 数 10keV) | X線回折など | 大型放射光施設 K E K-PF (AR)、SPring-8 |
| | 中性子ビーム | | 陽子シンクロトロンからの陽子ビームによる核破砕中性子 |

(2) 生命科学研究加速器の要件

生命科学に使用される加速器ビームへの要求をまとめると、次のようになる。

- ①様々な重イオンや陽子、中性子、放射光などで、比較的高いエネルギー（中間エネルギー）までの幅の広い領域のエネルギーが選択できること
- ②蛋白質やその他の生命体高分子の構造解析を行う構造生物学に使用する放射光については、主に硬いX線領域のエネルギーが必要
- ③ビーム強度については、目的に応じて小さい強度から大きな強度までのものが使用できること
- ④ビーム時間構造（連続、パルス、極短パルスなど）については、目的に応じた様々なものを選択できること

これらのことから、加速器の要件は、以下のようになる。

- A. 生命科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎない場合が多く、できるだけコンパクトなものが良い
- B. 上記のように非常にバラエティーに富んだビームを使えること
- C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい

生命科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさが変わらない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる。この点から、確立された従来加速技術ばかりではなく、新しい加速技術による小型加速器も要望されている。

参考文献 (生命科学)

- [Ⅱ5a](社)日本アイソトープ協会,「イオンビーム利用の基礎と現状」(4. ライフサイエンスへの利用), (1996年5月) 189-211.
- [Ⅱ5b](社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会,「加速器の現状と将来」(第2章2. イオンビーム利用 (2-5 生物学研究への応用)), NSA/COMMENTARIES:No.6 原子力と先端技術 [V], (1998年6月) 128-131.
- [Ⅱ5c]原子力委員会 放射線利用推進専門部会,「加速器利用研究の推進について(資料編含む)」, (1996年6月).
- [Ⅱ5d]放射線医学総合研究所,「放射線医学総合研究所年報(平成10年度)」.
- [Ⅱ5e]理化学研究所,「理研リングサイクロトロン10周年記念誌(世界のCOE確立へ“国際重イオン科学センター”を建設)」(1996年11月30日)
- [Ⅱ5f]日本原子力研究所 (<http://www.jaeri.go.jp/genken/index.html>) (高崎研究所 放射線高度利用センター).
- [Ⅱ5g]航空・電子等技術審議会,「“構造生物学に関する総合的な研究開発の推進方策について”(諮問第22号)に対する答申」, (1996年7月11日)
- [Ⅱ5h]東京大学V S X高輝度光源利用者懇談会;尾嶋正治(東大工), 太田俊明(東大理), 神谷幸秀(東大物性研) 編,「高輝度放射光がめざす戦略的応用研究 —Technology Vision SR 2010— (平成10年3月6-7日 シンポジウム報告)」(3.10 構造生物学とタンパク質X線構造解析(三木邦夫(京都大学)), (有) WORDS Publishing House, (平成10年3月) 178-187.
- [Ⅱ5i]高エネルギー加速器研究機構 (<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>) (物質構造科学研究所 放射光研究施設).
- [Ⅱ5j]SPring-8 (http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/general_info/overview/) (SPring-8の概要).
- [Ⅱ5k]放射光利用研究促進機構(財)高輝度光科学研究センター,「SPring-8」, (1997年11月).
- [Ⅱ5l]野田章(京都大学), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会(加速器科学) 資料, (1998年2月).

6 医療利用

(1)医療利用の動向

加速器ビームの医療利用（研究）については、以下のように大別できる。

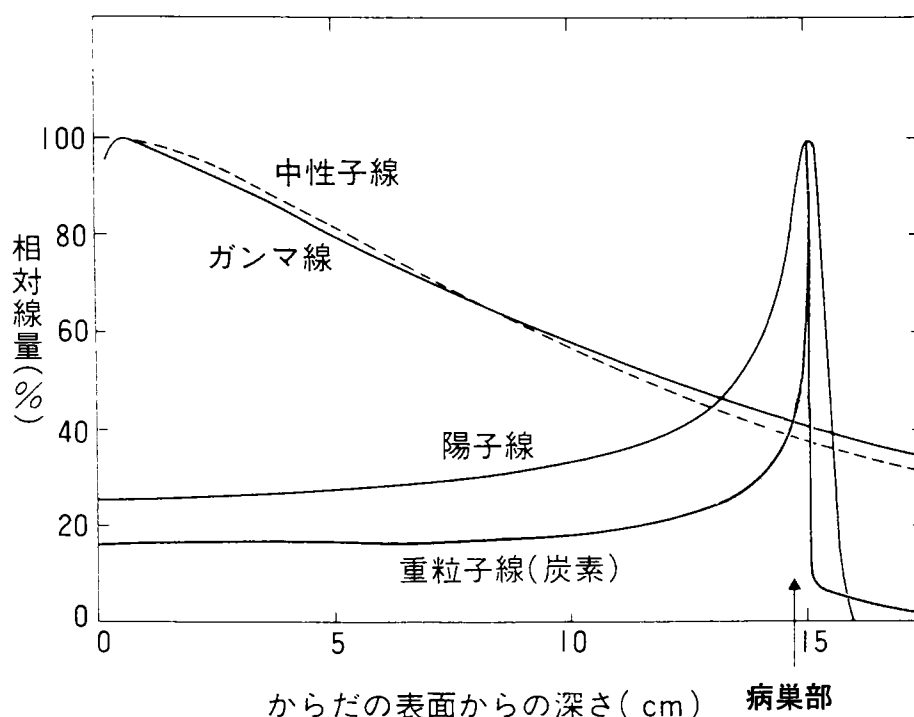
- ・（腫瘍などの）治療利用
- ・診断医学（核医学）用放射性同位元素生成
- ・（X線などによる）診断利用

1)（腫瘍などの）治療利用

（参考文献[Ⅱ6a]、[Ⅱ6b]、[Ⅱ6c]、[Ⅱ6d]、[Ⅱ6e]によりまとめる）

治療に利用されるビーム（光子線、粒子線）は、X線、 γ （ガンマ）線、電子線、中性子線、陽子線、重粒子（重イオン）線、負パイ（ π^- ）中間子線であり、主な治療対象疾病は腫瘍である。

図－Ⅱ－1－5は、治療に利用されるビームと組織の受ける相対線量（各々の最大値を100%とする）を示すものである。ガンマ線、中性子線の場合は、浅い部分にピークを持つと同時にやや深い部分まで比較的大きな相対線量をもち、照射の影響がやや広範囲（深部）に及ぶこととなる（X線、電子線についても同様）。これに対して、陽子線・重粒子線については、比較的深い部分にピーク（ブラッグピーク）を持つがそれを超える深さでは急激に線量が低下し、照射による影響をある深さのところまで抑えることが可能となる。なお、 π^- 中間子線は陽子に比べて質量が軽く、人体における多重散乱効果によるビームの拡がりが大きくなり、陽子線あるいは重粒子線に比べて照射の影響が患部以外の部分に及ぶ割合が高くなる。



図－Ⅱ－1－5 各種放射線により組織の受ける相対線量

(X線・電子線治療)

X線および電子線による腫瘍などの治療においては、腫瘍を抑えながら隣接する正常組織の過照射による影響を避けることは難しいが、腫瘍を抑えることを優先させる妥協の上で治療が行われている。X線および電子線による治療については、1950年代前半の医療用電子ライナックの登場により、X線と電子線を組み合わせた治療が可能となり、現在では乳がんなどの治療用に世界的に普及している。全世界の医療用小型電子加速器の設置台数は3,000台を超え、日本では1997年度で600台を超える規模になっている。医療用（小型）電子ライナックでの電子エネルギーは数MeVから25MeV程度であり、加速に使用される高周波はSバンド（約3GHz）である。

(陽子線、重粒子線治療)

陽子線や重粒子線が体内を通過すると、組織は電離や励起を受け、それによって細胞内に生成される化学的に活性なラジカルが細胞核にある遺伝子情報をつかさどるDNAに作用してこれを傷つける。細胞にはこのような損傷に対する修復力があるが、ある限度を越える損傷を細胞に与えると細胞は増殖できずに死んでゆく。このメカニズムを利用する治療が、陽子線あるいは重粒子線によるがん（腫瘍）治療である。陽子線および重粒子線においては、その飛程の最後の狭い範囲でブラッグピークを持ち、このピークの後ろでは線量が急激に低下し、照射の影響を及ぼさない。また、ブラッグピークの手前のプラトー領域では、線量が少なく照射の影響は比較的小さい。この性質を利用して、あるステップでエネルギーの異なる陽子線・重粒子線を重畳させ、患部に合わせた幅の広いブラッグピークを形成することができる。

実際の治療においては、正常細胞の修復能ががん細胞のそれを上回るように線量を分割して照射することで、正常細胞への損傷を最小限にしてがん細胞を死滅させることが行われている。陽子線や重粒子線治療では分割照射が日常的に行われ、筑波大学陽子線医学利用研究センターでの陽子線治療の場合には20回前後の分割照射が、また、放射線医学総合研究所での重粒子（炭素）線治療の場合にはより少ない回数の分割照射が採用されている。

陽子線治療においては、治療部の深さに応じて70～250MeVのエネルギー範囲の陽子が、また、重粒子線治療においては、70～数百MeV/nのエネルギー範囲の重粒子が使われている。これらの粒子線を供給する加速器は、ライナック（線形加速器）、サイクロトロン（シンクロサイクロトロンあるいはアイソクロナスサイクロトロン）およびシンクロトロンである。

世界で、加速器からの陽子線・重粒子線を用いて治療を行っている主要施設を表Ⅱ-1-23（[Ⅱ6f]）に、また、日本における医療用陽子・重粒子加速器施設を表Ⅱ-1-24に示す[Ⅱ6g][Ⅱ6h][Ⅱ6i][Ⅱ6j][Ⅱ6k]。

陽子線治療については、1954年に米国のローレンスバークレー国立研究所（LBL）で開始され、また、重粒子線による治療は同研究所で1957年にBevatron（シンクロサイクロトロン）からのHeイオンを用いて開始された。米国における重粒子線による治療は、LBLのみで行われてきたが1992年に停止され、現在米国においては、陽子線治療のみが実施されている。また、スウェーデンのUppsala Universityでは、米国のLBLに続き1957年より陽子線治療を開始した。また、ロシアでは、DubnaのJINRで1967年より陽子線治療を開始し、1969年にはITEPがモスクワの病院と連携した本格的な陽子線治療を開始した。

表Ⅱ-1-23 世界の主要陽子・重イオン治療施設

| 国名 | 機関 | 治療 開始 | 治療 患者数 | 主加速器 | Max エネルギー (MeV) | 加速 粒子 |
|------------|--|-----------------|--------------------------------|---|--------------------------------|------------|
| 米国 | Lawrence Berkeley National Laboratory | 1954 (-1957) | 30 | 184"サイクロトロン | | 陽子 |
| | | 1957 (-1992) | 2,487 (2,054;He+ 433;HI) | Bevatron / Bevalac (Bevatron +SuperHILAC) | | He 重イオン |
| | Northeast Proton Therapy Center | 1961 | 8,558 (-2000. Jul) | ハーバード大学サイクロ トロン研究所 (HCL) シンクロサイクロトロン | 160 | 陽子 |
| | (at Massachusetts General Hospital) | 1998 | | サイクロトロン (4sect., 磁石重量約 200 トン, 235MeV(p)) | 235 | 陽子 |
| | Loma Linda University Medical Center | 1990 | 5,563 (-2000. Oct) | 陽子シンクロトロン (周長約 23m) | 250 | 陽子 |
| | Midwest Proton Radiation Institute (MPRI) (Indiana University Cyclotron Facility) | 1993 | 34 (-1999. Dec) | サイクロトロン (4sect., 磁石重量約 2,000 トン, 205MeV(p)) | 210 | 陽子 |
| | UCSF-UCD;CNL (Crocker Nuclear Laboratory) | 1994 | 284 (-2000. Jun) | サイクロトロン (3sect.) | 68 | 陽子 |
| スウェー デン | Uppsala University The Svedberg Laboratory | 1957 (-1976) | 73 | サイクロトロン (3sect., 磁石重量約 600 ト ン, K=192) | 180 | 陽子 |
| | | 1989 | 236 (-2000. Jun) | | | |
| ロシア | Joint Institute for Nuclear Research (Dubna Medical Center) | 1967 (-1975) | 84 | ファゾトロン | | 陽子 |
| | Institute of Theoretical and Experimental Physics (Moscow Medical Center) | 1969 | 3,268 (-2000. Jun) | シンクロトロン | 200 | 陽子 |
| | Institute of Nuclear Physics (St. Petersburg Medical Center) | 1975 | 1,029 (-1998. Jun) | | | 陽子 |
| 日本 | 放射線医学総合研究所 | 1979 | 133 (-1999. Dec) | サイクロトロン | 90 | 陽子 |
| | | 1994 | | HIMAC (重イオンシンクロ トロン; 直径約 42m) | 230 | |
| | | 1994 | 745 (-1999. Dec) | HIMAC (重イオンシンクロ トロン; 直径約 42m) | 800MeV/n (治療では 430MeV/n) | 重イオン |
| | 筑波大学 陽子線医学利用研究センター | 1983 (-2000) | 700 | KEK-BSF (陽子シンクロ トロン; 直径約 12m) | 250 | 陽子 |
| | | 2001 予定 | | 陽子シンクロトロン (周長約 23m) | 250 | 陽子 |
| | 国立がんセンター東病院 | 1998 | 35 (-2000. Jun) | サイクロトロン (4sect., 磁石重量約 200 トン, 235MeV(p)) | 235 | 陽子 |

(次頁に続く)

(前頁より続く)

表－Ⅱ－１－２３ 世界の主要陽子・重イオン治療施設

| 国名 | 機関 | 治療 開始 | 治療 患者数 | 主加速器 | Max エネルギー (MeV) | 加速 粒子 |
|-----------|---|----------|-----------------------|---|--------------------|----------|
| スイス | Paul Scherrer Institute Proton Therapy Facility | 1984 | 3,014 (-1999. Dec) | サイクロトロン(4sect., 磁石重量約 470 トン, 72MeV(p)) | 70 | 陽子 |
| | | 1996 | 41 (-1999. Dec) | リングサイクロトロン(4sect., 磁石重量約 1,960 トン, K=590) | 200 | 陽子 |
| 英国 | Clatterbridge Center for Oncology | 1989 | 999 (-2000. Jun) | (現在 upgrade 中) (線形加速器) | (62) | 陽子 |
| フランス | Centre de Protontherapie d'Orsay (Paris-Sud University) | 1991 | 1,527 (-1999. Dec) | シンクロサイクロトロン | 200 | 陽子 |
| | FNCLCC(*) (Centre Antoine LACASSAGNE) | 1991 | 1,590 (-2000. Jun) | サイクロトロン(4sect.) | 65 | 陽子 |
| 南 アフリカ | National Accelerator Center Hadron Therapy Facility | 1993 | 380 (-2000. Oct) | サイクロトロン(4sect., 磁石重量約 1,400 トン, K=220) | 200 | 陽子 |
| カナダ | Proton Treatment Facility at TRIUMF | 1995 | 57 (-2000. Jun) | リングサイクロトロン(4sect., 磁石重量約 4,000 トン, K=520) | 70 | 陽子 |
| ドイツ | Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) | 1997 | 72 (-2000. Jun) | SIS(重イオンシンクロトロン; 直径約 60m) | 430MeV/n | 重イオン |
| | Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH | 1998 | 105 (-1999. Dec) | | | 陽子 |

(*) La Federation Nationale des Centres de Lutte Contre le Cancer

表－Ⅱ－１－２４ 日本の医療用陽子・重イオン加速器施設

| 機関 | 加速器 名称等 | 稼働 開始 | 主加速器 | エネルギー (MeV) | 加速粒子 |
|---------------------------|------------|-------------------|--|-----------------------|-------------|
| 筑波大学 陽子線医学利用 研究センター | KEK-BSF | 1983 (2000 終了) | 陽子シンクロトロン (平均直径約 12m) 500MeV | ～250 | 陽子 |
| | シンクロトロン | 2001 | 陽子シンクロトロン (周長約 23m) | ～250 | 陽子 |
| 放射線医学 総合研究所 | HIMAC | 1994 | 重イオンシンクロトロン (直径約 42m) max800MeV/n (HI) | ～430MeV/n | 重イオン |
| | | | | ～230 | 陽子 |
| 国立がんセンター 東病院 | サイクロトロン | 1998 | サイクロトロン(医療専用) (直径約 2m, 総重量約 200 トン) | ～235 | 陽子 |
| 若狭湾エネルギー 研究センター | シンクロトロン | 2000 | 重イオンシンクロトロン(多目的利用) (周長約 33m) | ～200 | 陽子 He, C |
| 兵庫県立粒子線 治療センター(仮称) | HARIMAC | 建設中 | 重イオンシンクロトロン (周長約 90m) | 70～230 70～320MeV/n | 陽子 炭素 |
| 静岡県がんセンター | シンクロトロン | 建設中 | 陽子シンクロトロン (周長約 20m) | 235 | 陽子 |

病院での治療については、米国においては、1961年からボストンのマサチューセッツ総合病院（MGH；Massachusetts General Hospital）がハーバード大学サイクロトロン研究所（HCL；Harvard Cyclotron Laboratory）の160MeVシンクロサイクロトロンを利用して陽子線治療を行っており、2000年7月までに8,500人を超える患者を治療している。また、カリフォルニアのロマリダ大学医療センター（LLUMC；Loma Linda University Medical Center）では、小型のシンクロトロンを用いた陽子線治療を1990年より開始し、これまでに5,500人を超える患者を治療している。

日本においては、放射線医学総合研究所がAVFサイクロトロン（陽子90MeV）を用いた陽子線治療を1979年より開始し、続いて1983年から筑波大学陽子線医学利用研究センターがKEKの12GeV陽子シンクロトロンの入射器であるブースターシンクロトロン（陽子500MeV）を用いた陽子線治療を開始した。同センターでは、2000年度に250MeV小型陽子シンクロトロンが完成し、KEKの陽子シンクロトロンの利用については終了した。これまでに約700の症例を治療した（表－Ⅱ－1－25 参照[Ⅱ6g]）。また、放射線医学総合研究所では、1994年より重イオンシンクロトロン HIMAC（Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba）での重粒子線治療が開始され、これまでに800症例を超える治療を行っている（表－Ⅱ－1－26（2000年2月まで）参照[Ⅱ6h]）。

重粒子（重イオン）による治療については、日本の放射線医学総合研究所に続いてドイツのGSIで、重イオンシンクロトロンSISからの重粒子（炭素）ビームを用いた治療を1997年より開始した。日本においては、現在、兵庫県立粒子線治療センター（仮称）において、放射線医学総合研究所のHIMACより少し小さい規模の重粒子治療用のシンクロトロンが建設中である。

陽子線や重粒子線を用いたがん治療は、これまでのX線、電子線治療などに比べ、深部の病巣を治療する際にその前後の正常な組織に与えるダメージが少なく、より優れた治療法である。日本においても、陽子線・重粒子線治療実績が評価されてきており、少しずつ陽子線・重粒子線治療が拡がりつつある。一般に、陽子線や重粒子線によるがん治療は、体への負担が比較的少ない治療法であり、特に、高齢者に適していると考えられている。陽子線・重粒子線治療は、その治癒率が他の治療法と同じ程度であれば、近い将来の高齢化社会においては体への負担が少ない治療法として普及することになるものと考えられている。

陽子は重粒子（陽子より重い原子核）に比べると質量が小さく、加速器の小型化が重粒子に対して先行している。このため、世界的には陽子線治療の方が一般的である。一方、放射線医学総合研究所での6年間の実績により、重粒子線の陽子線に対するメリットとして、次のような点が挙げられている。

○重粒子線（炭素線）の以下の性質などにより、X線、陽子線では治癒が見込めない放射線抵抗性の悪性腫瘍や、照射困難な部位でも、良好な局所制御率、低障害率が示されている

- ・多重散乱による transverse の広がり的小ささ
- ・飛程末端の高LETが与える高生物効果比と低酸素増感比
- ・照射野のオンライン観測（autoactivationによる）

○照射の分割回数もX線、陽子線の20回程度に対して、炭素線では最も少ない場合では4回照射でも良好な実績が示されている。

なお、放医研では、重粒子線を使う治療において、ポジトロンを放出する不安定原子核（¹¹C など）を用いることにより、その照射領域をPETでのイメージングにより確認しながら治療を行う方法が開発されている。この方法が完成すると、生命維持に直接的に関係する重要な臓器へ隣接した病巣へのサブmmの精度での治療照射が可能となる。

重粒子線治療の普及については、重粒子線加速器の小型化の実現が、その普及の鍵をにぎっていると考えられている。

表－Ⅱ－1－25 筑波大学陽子線医学利用研究センター疾患別陽子線治療患者数(1983.4 - 2000.7)

| 疾患 | 治療患者数 | 割合 |
|--------|----------------------------------|--------|
| 肝臓 | 238 | 34.0% |
| 食道 | 60 | 8.6% |
| 肺 | 58 | 8.3% |
| 頭蓋内腫瘍 | 44 (神経膠腫 26、髄膜腫 12、その他 6) | 6.3% |
| 頭頸部 | 42 | 6.0% |
| 膀胱 | 38 | 5.4% |
| 血管奇形など | 38 | 5.4% |
| 転移性腫瘍 | 36 (肝臓 12、肺 11、リンパ節 3、骨 2、その他 8) | 5.1% |
| 子宮 | 29 | 4.1% |
| 前立腺 | 27 | 3.8% |
| 小児 | 18 | 2.6% |
| 皮膚 | 16 (悪性黒色腫 9、その他 7) | 2.3% |
| 頭蓋底腫瘍 | 14 (脊索腫 13、軟骨肉腫 1) | 2.0% |
| 下垂体腺腫 | 13 | 1.8% |
| 胃 | 6 | 0.9% |
| 腎臓 | 6 | 0.9% |
| 直腸 | 4 | 0.6% |
| 骨 | 4 | 0.6% |
| その他 | 9 | 1.3% |
| 合計 | 700 | 100.0% |

(〔Ⅱ6h〕より)

表－Ⅱ－1－26 放射線医学総合研究所疾患別重粒子線治療患者数(1994.6 - 2000.2)

| プロトコール | 症例数 | プロトコール | 症例数 |
|------------|-----|----------|-----|
| 頭頸部-I # | 17 | 前立腺-I # | 35 |
| 頭頸部-II # | 19 | 前立腺-II # | 61 |
| 頭頸部-III # | 90 | 子宮-I # | 30 |
| 中枢神経： | | 子宮-II # | 14 |
| 星状細胞腫 | 10 | 子宮腺癌 | 8 |
| 悪性神経膠腫 | 29 | 骨・軟部 | 57 |
| 転移性腫瘍 | 4 | 食道（術前） | 7 |
| 頭蓋底腫瘍 | 12 | 食道（根治） | 14 |
| 肺-I # I 期 | 47 | 総合プロトコール | |
| 肺-II # I 期 | 34 | 全例 | 115 |
| 肝臓-I # | 24 | 頭頸部 | 17 |
| 肝臓-II | 61 | 肺 | 38 |

#登録を終了したプロトコール (〔Ⅱ6g〕より)

(中性子線治療)

中性子線による（直接照射）治療については、X線や電子線よりも大きなLETをもつので、早く（1938年）から治療に用いられてきており、南アフリカ連邦国立加速器センターでは、サイクロトロンからの66MeV陽子ビームをBeターゲットに当てて発生させた中性子線を用いて治療を行っている（米国のFNLでも同様な方法で実施されている）。しかし、現在では、中性子線による治療はごくわずかの放射線抵抗性腫瘍に効果があるものと考えられている。

一方、中性子線の間接的な利用による治療については、1950年代に米国のブルックヘブン国立研究所（BNL）で開始されたホウ素中性子捕捉治療（BNCT；Boron Neutron Capture Therapy）があり、これは手術のできない深部脳腫瘍に対して提案された治療法である。米国では、マサチューセッツ工科大学（MIT；Massachusetts Institute of Technology）でも行われ（～1961年）、一時中断されたが、BNL、MITにおいて1994年より再開された。この治療法は、ホウ素をあらかじめ特異的に腫瘍細胞に取り込ませておき、中性子照射により、ホウ素が熱中性子を吸収して起こす $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ という核反応により放出される α 粒子と ^7Li 原子核で腫瘍細胞を選択的に破壊することを利用するものである。この治療法は小型原子炉を用いて行われ、日本においては1968年より続けられている。日本で治療に用いられた（用いられている）小型炉は、日立炉（HTR）、京都大学のKUR、武蔵工業大学のMuITR、日本原子力研究所のJRR-2, 3, 4である〔II 61〕。

なお、小型原子炉を利用したこの治療法は、利便性に欠けることから低エネルギー大強度（2.5MeV, 20mA）陽子加速器からのビームを利用し、 $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 反応の2.3～2.5MeV共鳴を利用して効率的に中性子を発生させ、ホウ素中性子捕捉治療に用いることが考えられている。この低エネルギー大強度陽子加速器の開発が、ホウ素中性子捕捉治療の普及の鍵となっている。

(負パイ(π^-)中間子線治療)

π^- 中間子線による治療は、腫瘍に到達し π^- 中間子が腫瘍の原子に捕捉され、不安定になった原子核が核分裂し、陽子、重陽子、軽イオンなどからなるパイオンスターにより腫瘍が破壊されることを利用するものである。 π^- 中間子は、加速した陽子を炭素やベリリウムのターゲットを衝撃することにより発生させることができるが、発生にはエネルギーの比較的高い大強度陽子ビームが必要とされ、実際に治療が行われるようになったのは、中間子工場と呼ばれる陽子ビーム強度数100 μA 、エネルギー500～1,000MeVの加速器が利用できるようになった1970年代からである。この方法で治療を行った機関は、米国のロスアラモス国立研究所（LANL）、カナダのTRIUMFおよびスイスのPSIである。 π^- 中間子は、質量が陽子の約7分の1であるため、人体内部での多重散乱の効果でビームが広がってしまうことや、加速器装置が大がかりになることなどから、1994年までですべて中止されている。

2) 診断医学(核医学)用RI製造

(参考文献〔II 6a〕、〔II 6c〕、〔II 6d〕によりまとめる)

診断を中心とする医療用のRI（放射性同位元素）の製造においては、原子炉あるいはサイクロトロン（小型AVFサイクロトロン）が利用されている。原子炉RIは、原子炉で簡単に大量

に造れるが、一般に中性子吸収過程で生成される中性子過剰R Iのため、 β^- 崩壊核種となる。これに対して、サイクロトロンからの陽子・重イオンビームで生成されるR Iは、原子核内に陽子・重イオンビームが打ち込まれるため、陽電子を放出する中性子欠損核種（ β^+ 崩壊核種）が多い。原子炉R Iから放出される β^- （電子）線は、単に、人体の被曝を増加させるだけであるが、サイクロトロンR Iから放出される陽電子は、電子との対消滅で生成する γ 線が画像診断上有用である。このため、医療診断用R Iとしては、原子炉R IよりサイクロトロンR Iの方が優れているとされている。

医学診断として、これまで最も一般的に実施されてきたのは、ECあるいは β^+ 崩壊核種を放射性薬剤として用いるSPECTである。医療診断の需要の多い腫瘍（がん）部、心臓、脳の診断に使われている方法で、生命科学でも述べたように、 ^{67}Ga 、 ^{123}I 、 ^{201}Tl などの核種が崩壊後放出する γ 線を検出し、計算機処理することにより診断部位の画像を得る方法である。これらのR Iは小型AVFサイクロトロンからの30MeV程度の大強度の陽子ビームなどを用いて、商業的に製造されている。

また、生命科学でも触れたように、近年では、陽電子を発生させる生体構成元素あるいはそれに準ずる元素の不安定原子核 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O および ^{18}F （放射性同位元素）などを含む標識化合物の分布を測定し、脳や心臓の血流量や代謝量などを調べ、痴呆症やがんの早期発見などに大きく貢献し始めているものに、PETがある。この方法は、上記の標識化合物中の不安定原子核より放出された陽電子が付近の電子と対消滅を起こす際に発生する二本のガンマ線を検出して、計算機処理することにより標識化合物の分布を捉えるものである。この診断法は、より一般的なSPECTに比べて、解像度および定量性の面で優れている。この診断に使われる不安定原子核は、医用専用の小型サイクロトロンからの20MeV以下の陽子ビームを用いて造られている。日本では現在、20基を超えるPET用の専用小型サイクロトロンが稼働している。

3)シンクロトロン放射(X線)による診断利用研究

（参考文献[II 6a]、[II 6m]によりまとめる）

医学診断においては、X線領域のシンクロトロン放射（放射光）を用いた心臓の環状動脈のアンジオグラフィーおよび脳や頸に対するX線断層撮影（CT；Computed Tomography）などの研究がされている。

（冠状動脈撮影(コ罗纳リーアンジオグラフィー)）

心臓の冠状動脈撮影（コ罗纳リーアンジオグラフィー）においては、ヨウ素の静脈注射後にヨウ素のK-edgeに相当するエネルギー（約33keV）を挟む2種類の硬X線により心臓部を撮影し、その差分をとる「エネルギー差分造影」が先端医療診断法として研究されている。この方法は、従来のカテーテルを使う方法に比べて、身体的な負担が極めて小さく、かつ、鮮明な画像が得られる。また、十分な強度のX線があれば短時間の照射により映像が得られ、必要に応じて連続した映像を撮り、心臓の動きとの関連も把握できることとなる。この方法は、冠状動脈撮影だけではなく、腹部血管撮影、脳血管撮影などにも適用が可能である。高齢化社会においては、加齢などにより血管系疾患が増加するものと予想されており、医療費増大を抑える予防医療が重要性を

増すものと考えられている。身体的負担が少なく血管系のみを鮮明に映し出すこの診断法は、質の高い予防医療手段として注目されている。

この方法は、米国のスタンフォード大学で提案され、同大学の放射光施設SSRLやブルックヘブン国立研究所のNSLSやドイツのDESY・HASYLABのDORISあるいはフランスのESRFで研究が行われている。このエネルギーのX線（硬X線）は、現在のところ数GeVのエネルギーを持つ大型放射光施設で得られるものが実際に使用できるものであり、日本においては、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設PF-ARで筑波大学との共同研究により先駆的な研究（1996年～）が行われている[II 6n]。また、SPring-8での研究も開始されつつある[II 6o]。

（X線断層撮影(X線CT)）

現在、日常臨床の場でのX線による断層撮影（CT；Computed Tomography）（X線CT）の普及は目ざましく、不可欠な装置となっている。現在のX線CTの利用は、主に、臓器の異常やがんなどの病変の形状を把握することを目的としているが、X線CT導入当初は、各画素の線減弱係数から組織病変を検出することが期待されていた。これは、使用するX線のスペクトルが広いため、エネルギーの低いX線は急激に減衰するものの、エネルギーの高いX線はそれほど減衰せずに（結果として、透過X線が硬く（エネルギーが高く）なる；これを硬化作用という）、正確な線減弱係数が得られないことによる。

シンクロトロンリングでの放射光を利用すると単色性の高いX線が得られ、硬化作用を回避することができるため、正確な線減弱係数が得られる。また、使うX線のエネルギーを変化させて撮影し画像処理操作を施すことにより、病変の早期発見に寄与できるのではないかと考えられている。

この方法は、米国ブルックヘブン国立研究所のNSLS、フランスのESRFで研究が行われている。日本においては、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設PF-ARで筑波大学、山形大学との共同研究で行われている[II 6n]。

(2)医療利用加速器に求められる要件

医療用に使用される加速器ビーム（放射光も含む）に対する要求は、目的別に以下のようにまとめられる。

(放射線(ビーム)治療用加速器)

- ①ビームのエネルギー領域(治療用エネルギー領域)は、電子で $\sim 30\text{MeV}$ 程度、陽子で $70\sim 250\text{MeV}$ 、重イオンで数 $10\text{MeV/n}\sim$ 数 100MeV/n である
- ②ビームの強度については、陽子、重イオンについては数 10nA 程度
- ③ビームのエネルギー分解能は 0.1% 程度以下

(核医学用のRI標識製造用加速器)

- ①(主に陽子)ビームのエネルギー領域は、 30MeV 程度まで
- ②ビームの強度については、数 $100\mu\text{A}\sim 1\text{mA}$ 程度

(診断映像撮影用放射光源)

血管造影(アンジオグラフィー)用

- ①硬X線領域(数 10keV 程度(ヨウ素 K-edge を使用するものでは 33keV)の光子エネルギーを有すること
- ②必要な強度で発生できること

単色X線CT用

- ①硬X線領域(数 $10\text{keV}\sim 100\text{keV}$ 程度)の光子エネルギーを有すること
- ②必要な強度で発生できること

加速器の要件は、以下のようにまとめられる。

1)放射線(ビーム)治療用加速器

高齢化社会における体への負担が少ない治療法として、陽子線や重粒子線(ビーム)治療を普及することをめざす場合、治療にかかるコストを下げるのが最も望まれるところであり、今後のビーム治療用陽子・重イオン加速器に求められる要件は、以下のようにまとめられよう。

- A. 上記の要求を満たすビーム発生が可能であること(治療用エネルギー領域、強度、分解能などをカバーできること)
- B. できる限り小型であること
 - (建設コストができる限り低い(治療費を低く抑えられる)こと)
 - (各地の総合病院にスペース的にも容易に導入が可能なこと)
- C. 立ち上げ、立ち下げが容易にできること
- D. 安定したビームが取り出せること
- E. 故障が少ないこと

2)核医学用のRI標識製造用加速器

核医学用のR I 標識製造用に用いられる加速器は、20～30MeV 程度の低エネルギーで比較的大強度の陽子ビームを発生させることのできる加速器で、これら専用の小型サイクロロンが普及している。望ましくは、以下の件が挙げられる。

F. (望ましくは) 治療用の加速器で代用ができること

3)診断映像撮影用放射光源

硬X線領域の放射光を利用した画像診断は、疾病の発見や治療に役立つばかりではなく、疾病の予防にも使えるものである。日本では、既に少子化、高齢化が進行しており、近い将来に、世界のどの国も経験したことのない少子・高齢化社会が到来すると予想されている。このような状況において、国民の疾病を早い段階から予防し（特に高齢者の）健康を維持してゆくことは、少子化社会の日本の活力を支える原点になるものと考えられている。

このような点を考慮するとき、診断映像撮影用放射光源に求められる要件は、1)放射線（ビーム）治療用加速器の場合と同様である。

参考文献 (医療利用)

- [II 6a] (社)日本アイソトープ協会, 「イオンビーム利用の基礎と現状」(5. 医学利用), (1996 年 5 月) 212-229.
- [II 6b] 辻井博彦 (放射線医学総合研究所), 「加速器の医学利用ー放射線治療」, 学術月報 (日本学術振興会) 第 50 巻第 10 号 通巻第 635 号 (特集: 加速器科学ーその学際化と国際化), (1997 年 10 月) 1031.
- [II 6c] 遠藤有聲 (高エネルギー加速器研究機構), 「医療用加速器の技術と変遷」, 放射線医学物理 第 19 巻 第 1 号, (1999) .
- [II 6d] (社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第 2 章 2. イオンビーム利用 (2-4 医学研究への応用)), NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998 年 6 月) 124-128.
- [II 6e] 原子力委員会 放射線利用推進専門部会, 「加速器利用研究の推進について (資料編含む)」, (1996 年 6 月).
- [II 6f] Janet Sisterson (Northeast Proton Therapy Center), Particle NewsLetter #26 (<http://neurosurgery.mgh.harvard.edu/hcl/ptles26.htm>), (July 2000).
- [II 6g] 筑波大学陽子線医学利用センター (<http://www-medical.kek.jp>).
- [II 6h] 放射線医学総合研究所 (http://www.nirs.go.jp/newinfo/press/2000/09jyu_s01.htm).
- [II 6i] 兵庫県立粒子線治療センター (仮称) (<http://web.pref.hyogo.jp/ryusi/index.htm>).
- [II 6j] 静岡県ガンセンター (仮称) (<http://www.pref.shizuoka.jp/kenhuku/kf-15/>).
- [II 6k] (財)若狭湾エネルギー研究センター (<http://www.werc.or.jp/>).
- [II 6l] (財)医用原子力技術研究振興財団, 平成 11 年度「中性子捕捉療法の現状と課題及び今後の展開に関する調査」報告書 (科学技術庁放射線利用技術・原子力基盤技術移転事業等委託), (平成 12 年 3 月) 105.
- [II 6m] M. Ando (高エネルギー加速器研究機構), C. Uyama (国立循環器病センター) (Eds.), “Medical Applications of Synchrotron Radiation”, Springer-Verlag, (1998).
(International Workshop on Medical Applications of Synchrotron Radiation (HAGA '97))
- [II 6n] 高エネルギー加速器研究機構 (<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>) (物質構造科学研究所放射光研究施設).
- [II 6o] SPring-8 (http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/general_info/overview/) (SPring-8 の概要).

Ⅱ－２ 各分野での加速器の要件のまとめ

加速器科学の各分野の動向と加速器ビームに求められる要求および加速器の要件を調べてきたが、それらを一覧にしたものが、表－Ⅱ－２－１である。

表Ⅱ-2-1 加速器科学各分野でのビームへの要求と加速器の要件(1)

| | 各分野での研究・利用目的 | 各分野でのビームへの要求 | 各分野での加速器の要件 |
|-----------------------|---|---|---|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | 高エネルギーの粒子ビームなどを用いて、 物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）の解明をめざす | ①電子、陽子などの基本粒子や構造が簡単な粒子ビームあるいは光子ビームで、エネルギーフロンティアでの実験や特定の素粒子反応に関する実験ができるエネルギーをもつこと ②粒子（あるいは光子）ビームどうしの衝突で目的とする現象（反応断面積が小さい現象）が高い頻度で発生する衝突特性（大きなミノシティ：大きなビーム強度および小さいエミッタンス）をもつこと | A. 左記②により、ビームの精密な制御のため、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要がある B. これまで十分実績の積まれた加速技術をベースとして、左記①のように非常に高いエネルギーをめざすため、加速器は大規模なものとなる |
| 原子核物理学 | 低エネルギーから中高エネルギーの粒子ビームなどを用いて、 強い相互作用で結びつく核子多体系としての原子核の構造や性質およびそれらが発現するメカニズムの解明や原子核に様々な粒子を衝突させた際に起こる反応（核反応）現象の解明をめざす。また、原子核その際に生じる中間子などの二次粒子を用いて、様々な物理現象の解明をめざす。（より、本質的には、原子核の構造や性質を素粒子物理学が解明する、物質の究極的構造、自然界を支配する法則（力）との関連での理解をめざす。） | ①様々な重イオンや陽子、中性子あるいは電子ビームなどで、低エネルギーから高エネルギーまでの幅の広い領域のエネルギーが使用できること （反応断面積の小さい現象を捉える場合は） ②ある程度大きなビーム強度を有すること ③長時間（数時間から数日）にわたり安定的にビームを供給できること | A. 原子番号の大きな（非常に重い）重イオンを加速する場合や高エネルギーの陽子ビームを用いる場合は、高エネルギー（素粒子）物理学研究と同様に、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要があり、加速器は大型のものとなる B. 左記のように非常にバラエティーに富んだビームを使うことより、様々な加速器が使える（十分な実績のある従来加速技術ばかりではなく、新しい加速器が使える余地がある） |
| エネルギー科学 | 加速器で発生させる中間エネルギーの（主として大強度の）粒子ビームを用いて 原子核の変換（核破砕、核分裂、核融合など）を起こし、発生するエネルギーなどの利用をめざすとともに、放射性原子核の安定原子核などへの変換への利用もめざす。 | ①陽子あるいは軽重イオンのビームで比較的高いエネルギー（中間エネルギー）で、格段に大きなビーム強度を有すること ②非常に長時間（数ヶ月程度）にわたり安定的にビームを供給できること | A. 左記の①および漏れビームによる放射化を抑えることなどのためビームの精密な制御が必要であり、技術的な経験が十分有りビーム特性が良く理解されている加速技術に基づく必要がある B. これまで十分実績の積まれた加速技術をベースとして、軽重イオンや陽子などで中高エネルギーのものが必要であるため、加速器は大型のものとなる |
| 物質・材料科学 | 加速器で発生させる粒子ビームや光子ビームを用いて、 主に固体物質などを中心とする物質・材料の静的な構造や動的な構造変化などの解明および物質・材料のもつ性質が発現するメカニズムの解明をめざす。また、独特な性質を有する新たな物質・材料を創成することなどをめざす。 | ①ビームの種類は目的に応じて、電子、光子（放射光）、陽電子、中性子、陽子、重イオンなど多様なものが使用できること ②ビームエネルギーについても、目的に応じて、低エネルギーから中間エネルギーまでのものが使用できること ③ビーム強度についても、目的に応じて、小さい強度から大きな強度までのものが使用できること ④ビーム時間構造（連続、パルス、極短パルスなど）についても、目的に応じた様々なものを選択できること | A. 物質・材料科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎない場合が多く、できるだけコンパクトなものが良い B. 左記のように非常にバラエティーに富んだビームが使えること C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい （物質・材料科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさの変わらない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる。また、十分な実績のある従来加速技術ばかりではなく、新しい加速器が使える余地がある。） |

表－Ⅱ－2－1 加速器科学各分野でのビームへの要求と加速器の要件(2)

| | 各分野での研究・利用目的 | 各分野でのビームへの要求 | 各分野での加速器の要件 |
|------|---|---|---|
| 生命科学 | <p>加速器で発生させる粒子ビームや光子ビームを用いて、</p> <p>生命科学のめざすところは、生命体（自己再生化学反応系の進化した姿）に関する最も基本的な遺伝現象、生命再生現象あるいは生命体の様々な病理、変異現象の解明である。生命科学においては、生命現象に関するあらゆる対象を物理化学的手法で研究しており、組織や器官を扱うマクロレベルから生命体を構成する高分子を扱うミクロレベルまでの極めて多彩な研究が展開されている。生命現象の解明は、医療技術の高度化や薬品の開発などに大きく寄与するものであり、世界的に急速に発展してきており、日本においても今後力点が置かれ、更なる発展が期待されている分野である。</p> <p>加速器からのビームを使う（加速器科学としての）生命科学分野は、主としてミクロレベルの研究分野であり、大別すると、放射線生物学、細胞生理・生体組織機能解明研究および構造生物学（または、分子生物学）に分けられる。</p> | <p>①様々な重イオンや陽子、中性子、放射光などで、比較的高いエネルギー（中間エネルギー）までの幅の広い領域のエネルギーが選択できること</p> <p>②蛋白質やその他の生命体高分子の構造解析を行う構造生物学に使用する放射光については、主に硬X線領域のエネルギーが必要</p> <p>③ビーム強度については、目的に応じて、小さい強度から大きな強度までのものが使用できること</p> <p>④ビーム時間構造（連続、パルス、極短パルスなど）については、目的に応じた様々なものを選択できること</p> | <p>A. 生命科学研究における加速器は、同時並行的に使用される多くの実験・分析装置の一つにすぎない場合が多く、できるだけコンパクトなものが良い</p> <p>B. 左記のように非常にバラエティーに富んだビームを使えること</p> <p>C. 同一の実験ステーションで複数のビームが供給できるものが望ましい</p> <p>（生命科学研究用の加速器は、他の研究装置とさほど大きさの違うない小型加速器で、様々なビームの複合的利用が可能なものが理想的と考えられる。十分な実績のある従来加速技術ばかりではなく、新しい加速器が使える余地がある。）</p> |
| 医療利用 | <p>加速器で発生させる主に中高エネルギーの粒子ビームや光子ビームを用いて、</p> <ul style="list-style-type: none">・体への負担の少ない腫瘍などの治療・非侵襲的で精度の高い病変や疾病の撮影画像診断 <p>などを行う。</p> | <p>（放射線(ビーム)治療用加速器)</p> <p>①ビームのエネルギー領域（治療用エネルギー領域）は、電子で～30MeV 程度、陽子で 70～250MeV、重イオンで数 10MeV/u～数 100MeV/u である</p> <p>②ビームの強度については、それほど大きなものは要求されず、陽子、重イオンについては数 10 nA 程度</p> <p>③ビームのエネルギー分解能は0.1%程度以下</p> <p>（核医学用のRI標識製造用加速器)</p> <p>①（主に陽子）ビームのエネルギー領域は、30MeV 程度まで</p> <p>②ビームの強度については、数 100 μ A～1 mA 程度</p> <p>（診断映像撮影用放射光源)</p> <p>血管造影(アンジオグラフィー)用</p> <p>①硬X線領域（数 10keV 程度（ヨウ素 K-edge を使用するものでは 33keV）の光子エネルギーを有すること</p> <p>②必要な強度で発生できること</p> <p>単色X線CT用</p> <p>①硬X線領域（数 10keV～100keV 程度）の光子エネルギーを有すること</p> <p>②必要な強度で発生できること</p> | <p>（放射線(ビーム)治療用加速器)</p> <p>A. 左記の要件を満たすビーム発生が可能であること（治療用エネルギー領域、強度、分解能などをカバーできること）</p> <p>B. できる限り小型であること （建設コストができる限り低い（治療費を低く抑えられる）こと） （各地の総合病院にスペース的にも容易に導入が可能なこと）</p> <p>C. 立ち上げ、立ち下げが容易にできること</p> <p>D. 安定したビームが取り出せること</p> <p>E. 故障が少ないこと</p> <p>（核医学用のRI標識製造用加速器)</p> <p>A. 左記の要件を満たすビーム発生が可能であること</p> <p>B. できる限り小型であること（既にかなり小型になっている）</p> <p>C. 立ち上げ、立ち下げが容易にできること</p> <p>D. 安定したビームが取り出せること</p> <p>E. 故障が少ないこと</p> <p>F. （望ましくは）治療用の加速器で代用ができること</p> <p>（診断映像撮影用放射光源)</p> <p>A. 左記の要件を満たすビーム発生が可能であること</p> <p>B. できる限り小型であること （建設コストができる限り低い（診断費を低く抑えられる）こと） （各地の総合病院に容易に導入が可能なこと）</p> <p>C. 立ち上げ、立ち下げが容易にできること</p> <p>D. 安定したX線が取り出せること</p> <p>E. 故障が少ないこと</p> |

表－Ⅱ－3－1 加速器科学の各分野での加速器専門家(研究者)人材養成

| | |
|------|---|
| 生命科学 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野あるいは民間企業</p> <p>大型の共同利用加速器施設を利用するが多い。ユーザーは加速器については共同利用施設側の加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、高エネルギー物理学や原子核物理学分野あるいは民間企業で養成される場合が多く、共同利用施設では技術的な問題に対処する。</p> <p>小規模の加速器施設においては、加速器研究者は少なく、生命科学専用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |
| 医療利用 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野あるいは民間企業（一部組織的な養成開始）</p> <p>最近医療専用の加速器施設ができてきているが、大型の共同利用加速器施設を利用する場合も多い。ユーザー（医師）は加速器については、全くの加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、高エネルギー物理学、原子核物理学分野あるいは民間企業で養成される。一部で組織的な養成が行われている。加速器専門家は、その施設での医療利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題に対処している。</p> <p>医療用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |

Ⅱ－３ 各分野での加速器研究者の人材養成について

加速器自体の研究開発については、これまで学術研究分野（高エネルギー物理学および原子核物理学）が主として担ってきた。上でみてきたように、特に、高エネルギー物理学分野ではビームに対する要求が厳しく、その要求を満たす（高周波）加速器開発が極めて重要な課題になっている。このため、高エネルギー物理学および原子核物理学では多くの加速器専門家（加速器研究者）を必要とし、自ら人材の養成を行っている。超大強度化をめざすエネルギー科学研究分野についても、事情は同様であり、自ら人材の養成を行うか、あるいは原子核物理学分野との共同での開発で人材の共有化を行っている。

一方、その他の分野には、それぞれの分野のニーズを踏まえて加速器の研究開発を行う研究者がほとんどいない状況である。これまで物質・材料科学、生命科学あるいは医療利用分野では、高エネルギー物理学あるいは原子核物理学分野で使われてきた大型加速器そのものを利用するか、あるいはそれらと基本的に同じ大型の加速器により研究がなされてきている。

なお、日本では、大学の講座で加速器工学を置いているところは数大学で、その設置もごく近年で規模も小さく、加速器開発者を十分供給できる体制にはなっていない。

加速器科学各分野での加速器専門家の養成に関する事情をまとめたものが、表－Ⅱ－３－１である。

表－Ⅱ－３－１ 加速器科学の各分野での加速器専門家(研究者)人材養成

| | |
|-----------------------|---|
| 高エネルギー物理学 (素粒子物理学) | <p>加速器専門家の自給体制</p> <p>大規模な加速器を建設する必要がある、自ら加速器専門家を養成するとともに加速器の設計などを行っている。高エネルギー物理学研究用の加速器は、共同利用施設となっており、加速器専門家（研究者）は、共同利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題にも対処する。</p> |
| 原子核物理学 | <p>加速器専門家の自給体制</p> <p>大型の加速器を建設する必要がある、高エネルギー物理学と同様に、自ら加速器専門家を養成するとともに加速器の設計などを行っている。原子核物理学研究用の加速器は、共同利用施設となっており、加速器専門家（研究者）は、共同利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題にも対処する。但し、高エネルギー物理学分野ほどには加速器の専門家はいない。</p> |
| エネルギー科学 | <p>加速器専門家の一部自給、主として高エネルギー分野、原子核物理学での養成にたよる</p> <p>これまでのところ、原子核物理学用の加速器を使っている場合が多い。加速器の専門家はそれほど多くない。近未来的には、大強度陽子加速器の建設のため、加速器専門家不足になると予想される。</p> |
| 物質・材料科学 | <p>加速器専門家の養成は、主として高エネルギー物理学、原子核物理学分野あるいは民間企業</p> <p>大型の共同利用加速器施設を利用する場合が多い。ユーザーは加速器については共同利用施設側の加速器専門家に任せきり。加速器専門家は、共同利用がスムーズに行くよう加速器の様々な技術的な問題に対処する。</p> <p>小規模の加速器施設においては、加速器研究者は少なく、物質・材料科学専用の先進小型加速器を研究する余裕はほとんどない。</p> |

(次頁に続く)

Ⅲ 加速器ビーム利用の現状とニーズ

Ⅲ 加速器ビーム利用の現状とニーズ

Ⅲ－１ 加速器ビーム利用調査の概要など

加速器科学は多様な分野に広がっており、加速器ビームに求められるニーズ（ビームニーズ）も多様な広がりを見せている。そこで本調査の一環として、加速器科学の全分野において

- ①現在使われているビームの仕様
- ②現在既に実現されている仕様のビームで、使いたいビームがあるものの使えていない状況
- ③現在はまだ実現されていないビーム仕様で、将来実現されれば使いたいもの

を把握することを目的とした「加速器ビームニーズ等に関する調査」を実施（平成 11 年 9 月末～平成 12 年 1 月中旬）した。ここでは、この調査結果（詳細については、調査資料－76「加速器ビームニーズ等に関する調査結果（2001 年 6 月、科学技術政策研究所）」参照）に基づき、加速器ビーム利用の現状と将来のビームに関するニーズをまとめる。

上記の調査は、大学、大学共同利用施設、国立研究所、特殊法人、財団法人、あるいは民間企業において、現在加速器ビームを利用して研究を行っている研究者を主たる対象としたものであり、以下の加速器ビームについて上の①、②および③（以後、Ⅲ章においては①、②および③は上記のものを表すものとする）を調査した。なお、国立病院やその他の総合病院などにおいて、ごく一般的に使用されている医療用電子線形加速器（電子エネルギー25MeV 程度まで）のユーザーについては、この調査の対象としていない。

- | | | |
|---------|---------------|----------------|
| 電子ビーム、 | 陽子ビーム、 | 重イオンビーム |
| 陽電子ビーム、 | 放射光、 | コヒーレント光子ビーム(*) |
| 中性子ビーム、 | μ 粒子ビーム、 | 中間子ビーム |
| 反陽子ビーム、 | 不安定核（R I）ビーム、 | その他ビーム |

（*：コヒーレント光子ビームとは、自由電子レーザーやコヒーレント放射光などの可干渉性の高い光子ビームをいう。）

調査票の有効発送数は 3,076 であり、有効回答者数は 553 名で有効回答率は 18.0%であった（表－Ⅲ－１－１）。また、本調査で有効対象者（3,076 名）の研究分野別分類は表－Ⅲ－１－２のとおりであった。なお、所属別、年齢別および研究分野別の回答率はほぼ均一（調査資料－76 参照）であり、回答者の代表性は良いものと考えられる。

表－Ⅲ－１－１ 加速器ビームニーズ等に関する調査概要

| | | |
|------|------------|-----------------------------------|
| 1. | 調査時期 | 平成 11 年 9 月 27 日～平成 12 年 1 月 11 日 |
| 2. | 調査対象者 | 加速器ユーザーなど |
| 3. | 調査票発送 | |
| 3-1. | 総発送数 | 3,235 |
| 3-2. | 回答辞退等での返却数 | 159 |
| 3-3. | 有効発送数 | 3,076 |
| 4. | 有効回答 | 553（有効回答率：18.0%） |

表－Ⅲ－１－２ ビームニーズ等調査対象者研究分野別分類および回答率

| 研究分野 | 有効対象者数 | 回答者数 | 回答率 |
|----------------------------------|--------|------|-------|
| 素粒子物理学/原子核物理学 | 571 | 112 | 19.6% |
| エネルギー科学 (原子核物理学、物質・材料科学も一部込み) | 115 | 24 | 20.9% |
| 物質・材料科学 | 1,218 | 215 | 17.7% |
| 生命科学/医療利用 | 428 | 106 | 24.8% |
| その他 (ビーム制御、ビーム物理研究、加速器研究など) | 744 | 96 | 12.9% |
| 総 計 | 3,076 | 553 | 18.0% |

なお、上記の研究分野別分類については、本人の所属およびホームページなどの研究内容の記述により判断した。この際、素粒子物理学および原子核物理学ならびに生命科学および医療利用については、本人の研究内容記述からでは区分が曖昧な場合が多く、上記分類ではこれらについては、各々１つとした。また、エネルギー科学については、一部原子核物理や物質・材料科学も兼ねる記述があった。調査対象者選定においては、素粒子物理学および原子核物理学分野に比べて、物質・材料科学、生命科学および医療利用分野での選定が粗いものとなっており、回答者比率が必ずしも加速器科学分野の研究者比率にはなっていないことに留意されたい。

素粒子物理学、原子核物理学は、基本的には大学研究者が実施しており、対象者への選定割合が他の分野より高いと考えられるにも拘わらず、物質・材料科学分野のユーザーの数が増えている。また、生命科学あるいは医療利用については、ホームページの整備状況（特に病院での個人の研究の紹介）が悪く、対象者への選定割合がかなり低いと思われる（従って、今般の調査対象者内での生命科学、医療利用分野のユーザーの比率は、実際のものにくらべてかなり小さめになっていると考えられる）ものの、ユーザーの数はかなり多くなった。これは、加速器科学が、加速器の発祥分野の素粒子物理学、原子核物理学分野のユーザー規模を大きく超える規模で他の分野に広がっている現状を示すものと言える。

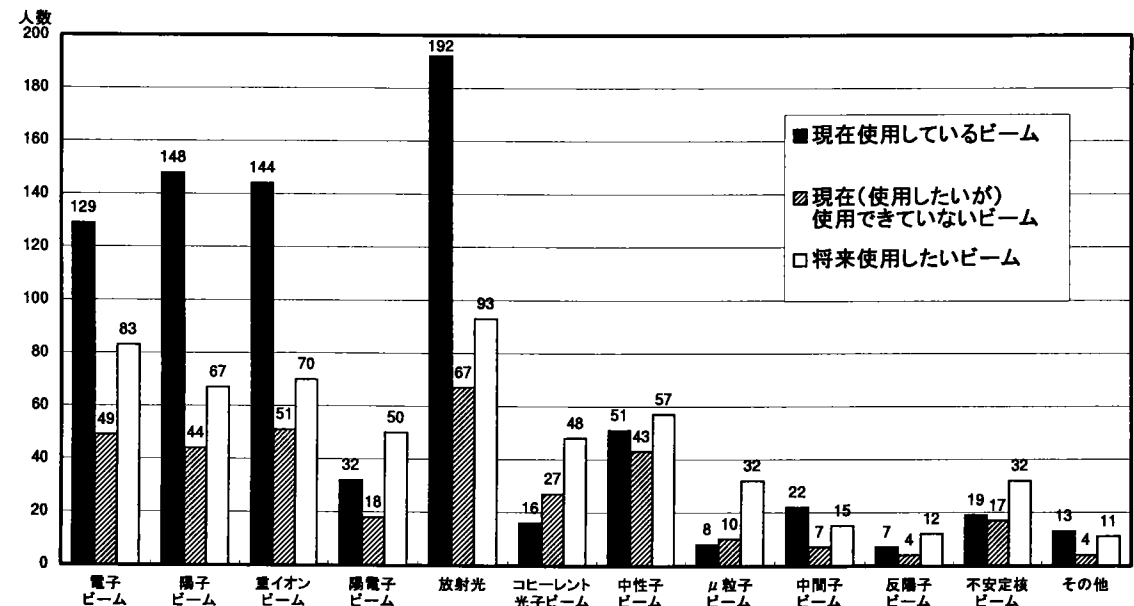
加速器科学分野については、以下の表（表－Ⅲ－１－３）のような小項目を含むものとして分類した。

表Ⅲ-1-3 加速器科学研究分野分類

| 加速器科学分野 | 小項目 |
|-----------------|---|
| 素粒子物理学 | 1. 新粒子（ヒッグス粒子など）の探索 2. 精密素粒子理論検証（CP非保存精密実験など）、他 |
| 原子核物理学 | 1. 原子核（励起）構造・原子核反応研究（素粒子核反応研究含まず） 2. 不安定原子核（中性子過剰核、陽子過剰核、超重元素など）研究 3. 中間エネルギー核反応（素粒子核反応）研究 4. 核物質・核物性研究、他 |
| エネルギー科学 | 1. プラズマ理工学研究 2. 放射性元素の消滅処理研究 3. 重イオン慣性核融合研究 4. ミューオン核融合研究、他 |
| 物質・材料科学 | 1. 物質構造解析（結晶、非晶質などの静的・動的構造解析（パルスラジオリシスを含む） 2. 物性研究（超伝導、磁性など）・電子状態解析（原子物理を含む） 3. 物質表面（界面）研究 4. 物質材料内の欠陥診断・極微量不純物分析 5. 極限環境下の物質構造・物性研究 6. ビーム物質相互作用研究・照射による改質研究 7. 新材料開発（機能性材料創製など） |
| 物質・材料科学 （続き） | 8. ビームによる微細加工（リソグラフィなど）研究 9-1. RI核種製造・核化学研究・放射化学研究 9-2. 核融合炉材料開発 10. 原子炉用耐放射線材料開発 11. 耐宇宙環境材料・半導体などの開発、他 |
| 生命科学 | 1. 放射線遺伝学研究（DNA損傷研究など）、変異種研究 2. 生体組織機能・機構解析 3. 細胞生理学研究 4. 分子（構造）生物学研究（生体高分子構造解析など）、他 |
| 医療利用 | 1. 画像診断研究 2. 治療研究 3. 医療用RI製造、他 |
| その他 | 1. ビーム制御・ビーム物理研究 2. その他（自由電子レーザー発振、加速器研究など） |

Ⅲ-2 加速器ビーム利用の現状および将来ニーズの概要

まず、上記に示した加速器ビーム利用の現状および将来ニーズについて見てみると加速器ビーム毎の、現在の利用者人数、現在使用したいが使えていない人数および将来使用したい人数（いずれも同一人の重複回答有）は、図－Ⅲ－2－1のようになっている。なお、回答者（553名）のうち約83%にあたる460名は、現在いずれかの加速器ビームを使用するユーザーである。



図－Ⅲ－2－1 加速器ビーム毎の現在の利用者数および将来利用希望者数

また、ビーム毎の研究分野別使用者（あるいは使用希望者）人数（同一人の重複回答有）は、表－Ⅲ－2－1のとおりとなっている。なお、調査票では、現在実現できていないビーム仕様で将来実現できたら使用したいビームについての回答を求めたが、実際の回答においては、現在実現できているビーム仕様のものに関しても要望として出されてきているので、両者を含むものとなっている。

図－Ⅲ－2－1あるいは表－Ⅲ－2－1より、現状のビーム利用においては放射光、陽子ビーム、重イオンビーム、電子ビームの利用者が多い。将来的に使用したいビームについては、放射光、陽子ビーム、重イオンビーム、電子ビームへの要望も多いが、中性子ビーム、陽電子ビーム、μ粒子ビームや不安定核ビームあるいは放射光のうち可干渉性の高いコヒーレント光子ビームへの要望が相対的に高くなってきている。また、現在の放射光、陽子ビーム、重イオンビーム、電子ビームのユーザーにおいて、何らかの理由で現在使えていないビームがある割合は、約1/3になっている。（本ビームニーズ等調査は、加速器ビームユーザーを主として対象者としているため、加速器ビームを使いたいと考えている研究者数は相当なものになると考えられる。）

また、表－Ⅲ－2－1において、加速器科学の各分野において、どの種類のビームを要望しているかを図に示したものが、図－Ⅲ－2－2～図－Ⅲ－2－7である。

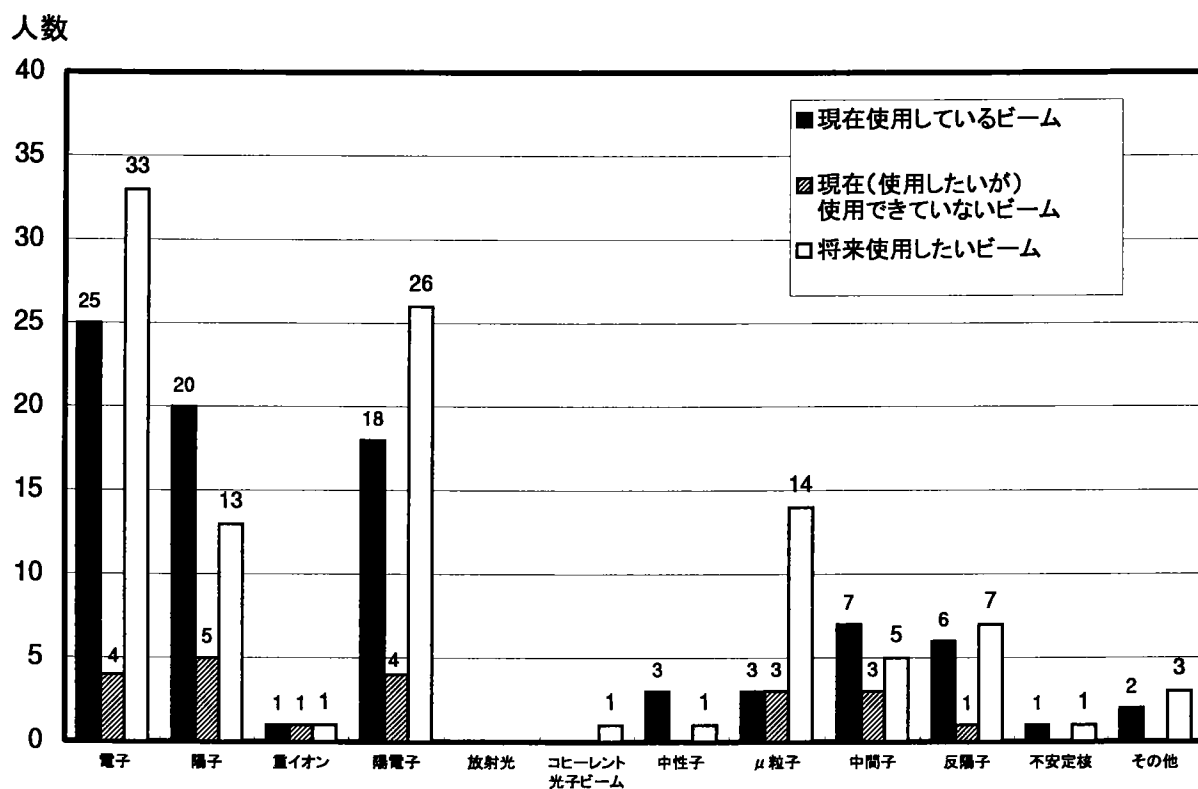
表－Ⅲ－２－１ ビーム毎の研究分野別使用者(あるいは使用希望者)人数

| | | 素粒子物理学 | 原子核物理学 | エネルギー科学 | 物質・材料科学 | 生命科学 | 医療利用 | その他 |
|----------|---|--------|--------|---------|---------|------|------|-----|
| 電子 | ① | 25 | 15 | 0 | 47 | 8 | 8 | 29 |
| | ② | 4 | 9 | 1 | 17 | 5 | 7 | 14 |
| | ③ | 33 | 6 | 2 | 12 | 3 | 2 | 11 |
| 陽子 | ① | 20 | 35 | 4 | 50 | 7 | 22 | 18 |
| | ② | 5 | 8 | 0 | 13 | 3 | 6 | 9 |
| | ③ | 13 | 8 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 |
| 重イオン | ① | 1 | 36 | 3 | 59 | 23 | 16 | 13 |
| | ② | 1 | 15 | 2 | 19 | 8 | 4 | 6 |
| | ③ | 1 | 12 | 4 | 10 | 4 | 3 | 5 |
| 陽電子 | ① | 18 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 3 |
| | ② | 4 | 0 | 0 | 13 | 0 | 1 | 3 |
| | ③ | 26 | 1 | 0 | 9 | 1 | 0 | 1 |
| 放射光 | ① | 0 | 2 | 1 | 132 | 41 | 7 | 16 |
| | ② | 0 | 1 | 0 | 44 | 14 | 8 | 4 |
| | ③ | 0 | 2 | 0 | 49 | 7 | 4 | 7 |
| X線光子 | ① | 0 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 9 |
| | ② | 0 | 1 | 2 | 10 | 1 | 2 | 4 |
| | ③ | 1 | 2 | 1 | 22 | 3 | 1 | 5 |
| 中性子 | ① | 3 | 7 | 5 | 23 | 8 | 3 | 12 |
| | ② | 0 | 9 | 4 | 12 | 10 | 2 | 5 |
| | ③ | 1 | 5 | 4 | 19 | 6 | 2 | 7 |
| μ 粒子 | ① | 3 | 1 | 6 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| | ② | 3 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 |
| | ③ | 14 | 3 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 |
| 中間子 | ① | 7 | 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | ② | 3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | ③ | 5 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 反陽子 | ① | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ② | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ③ | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 不安定核 | ① | 1 | 17 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| | ② | 0 | 8 | 0 | 9 | 0 | 1 | 1 |
| | ③ | 1 | 14 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| その他 | ① | 2 | 4 | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 |
| | ② | 0 | 0 | 1 | 5 | 1 | 0 | 1 |
| | ③ | 3 | 1 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 |

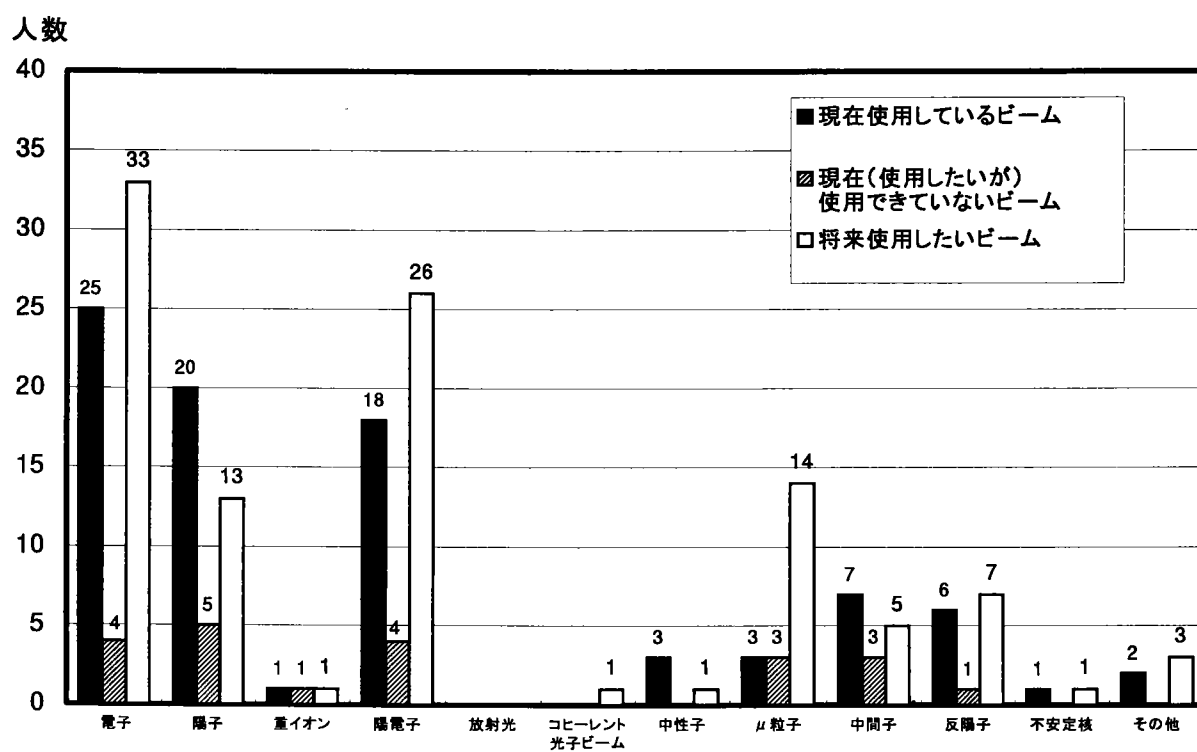
①現在使用中のビーム

②現在（使用したいが）使用できていないビーム

③将来使用したいビーム

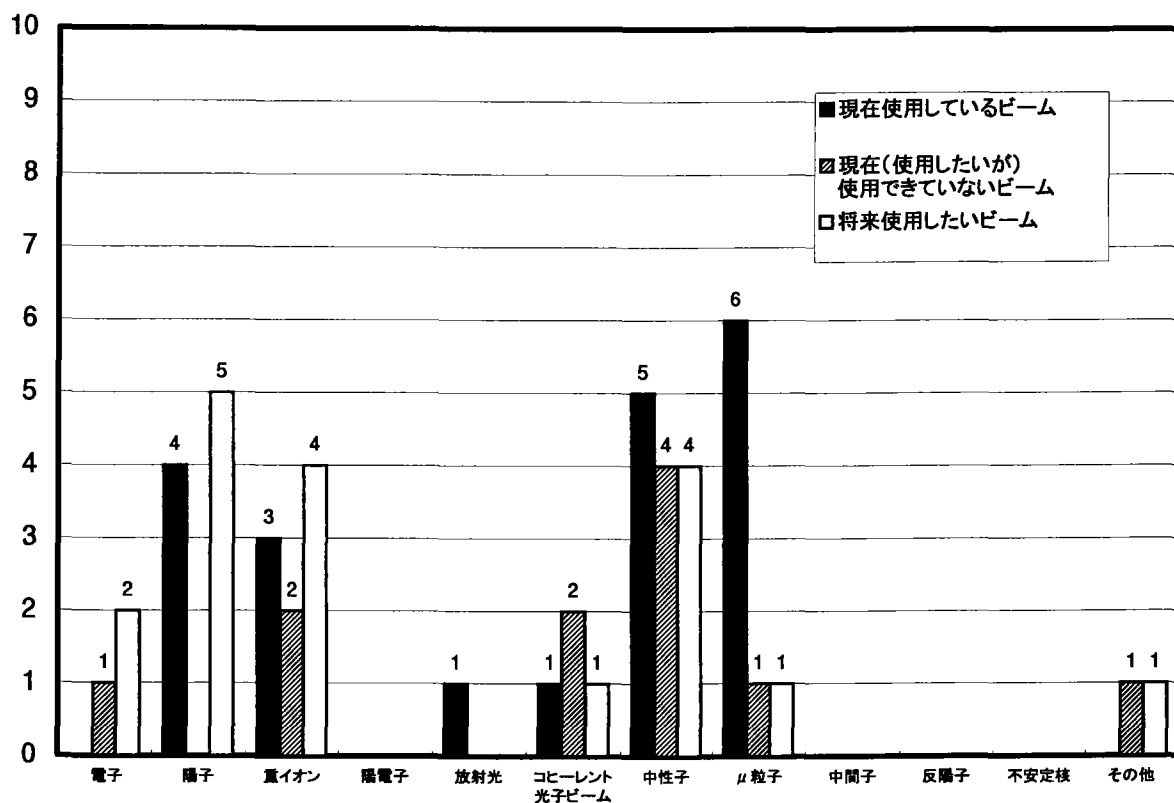


図－Ⅲ－２－２ 素粒子物理学分野の使用者(あるいは使用希望者)人数



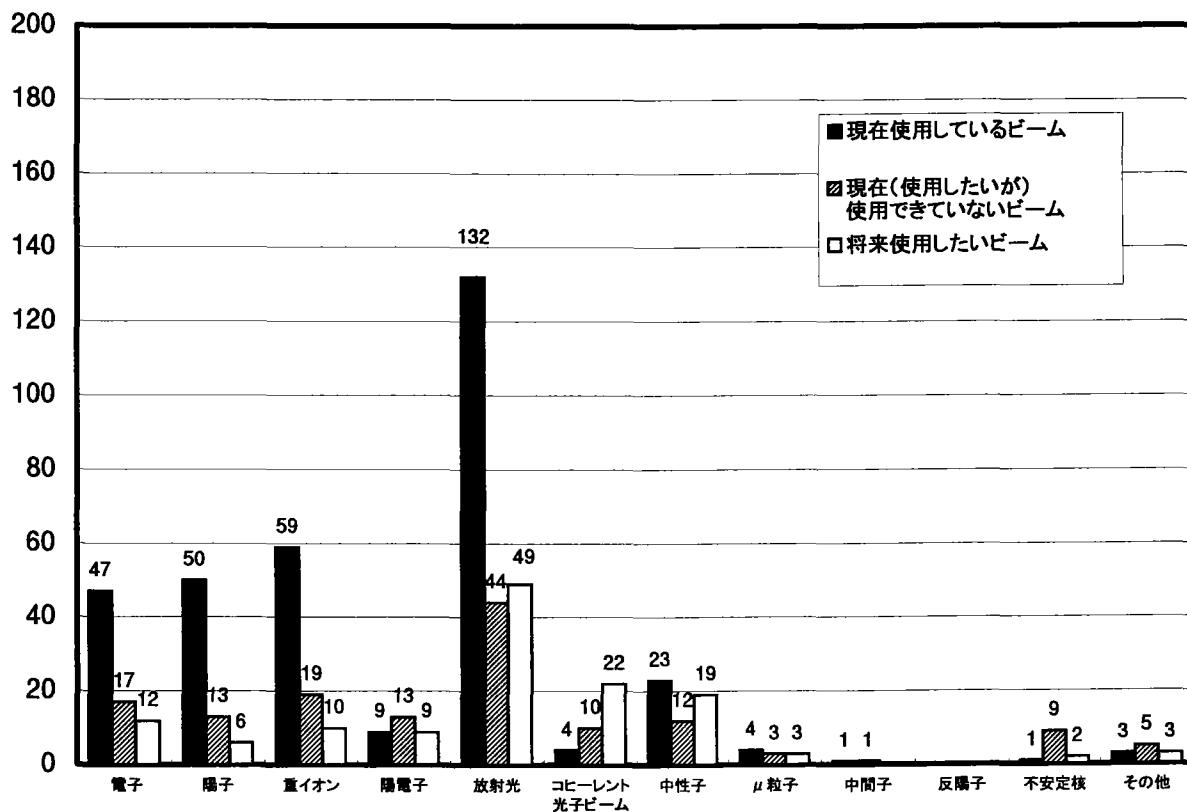
図－Ⅲ－２－３ 原子核物理学分野の使用者(あるいは使用希望者)人数

人数

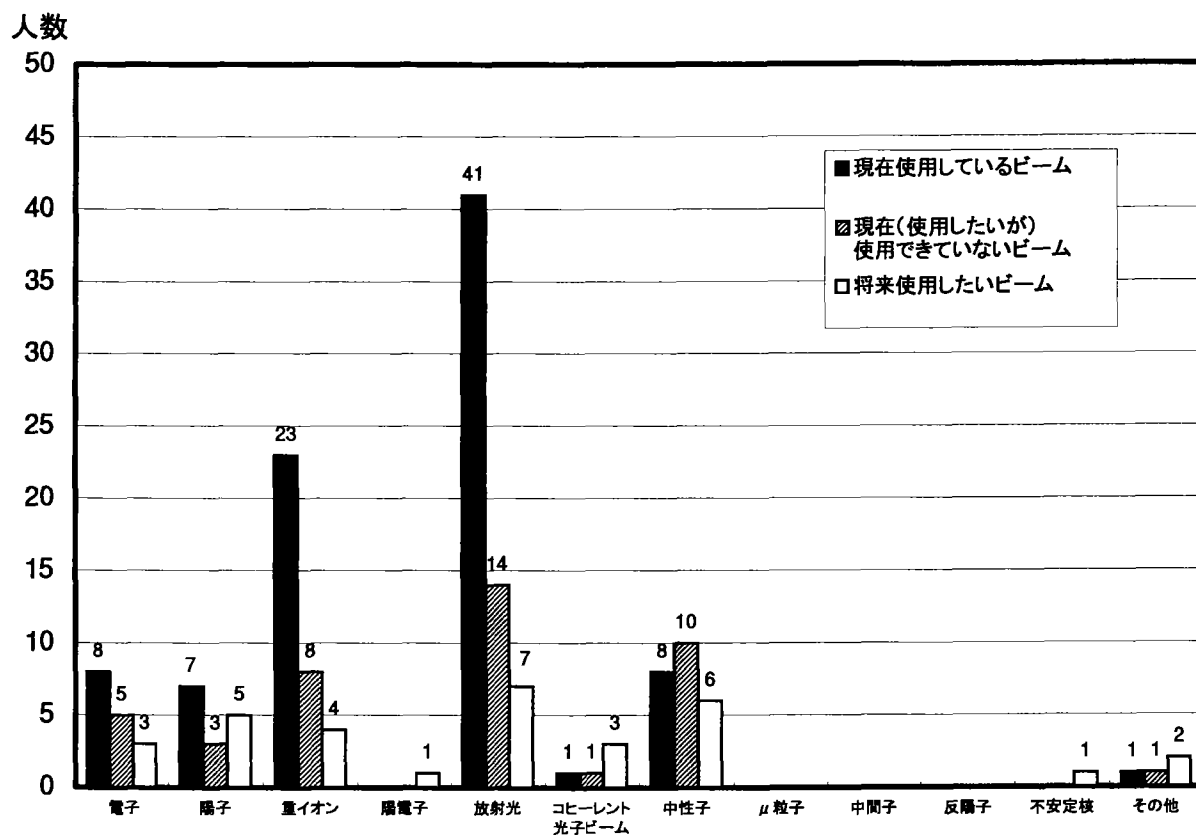


図一Ⅲ-2-4 エネルギー科学分野の使用者(あるいは使用希望者)人数

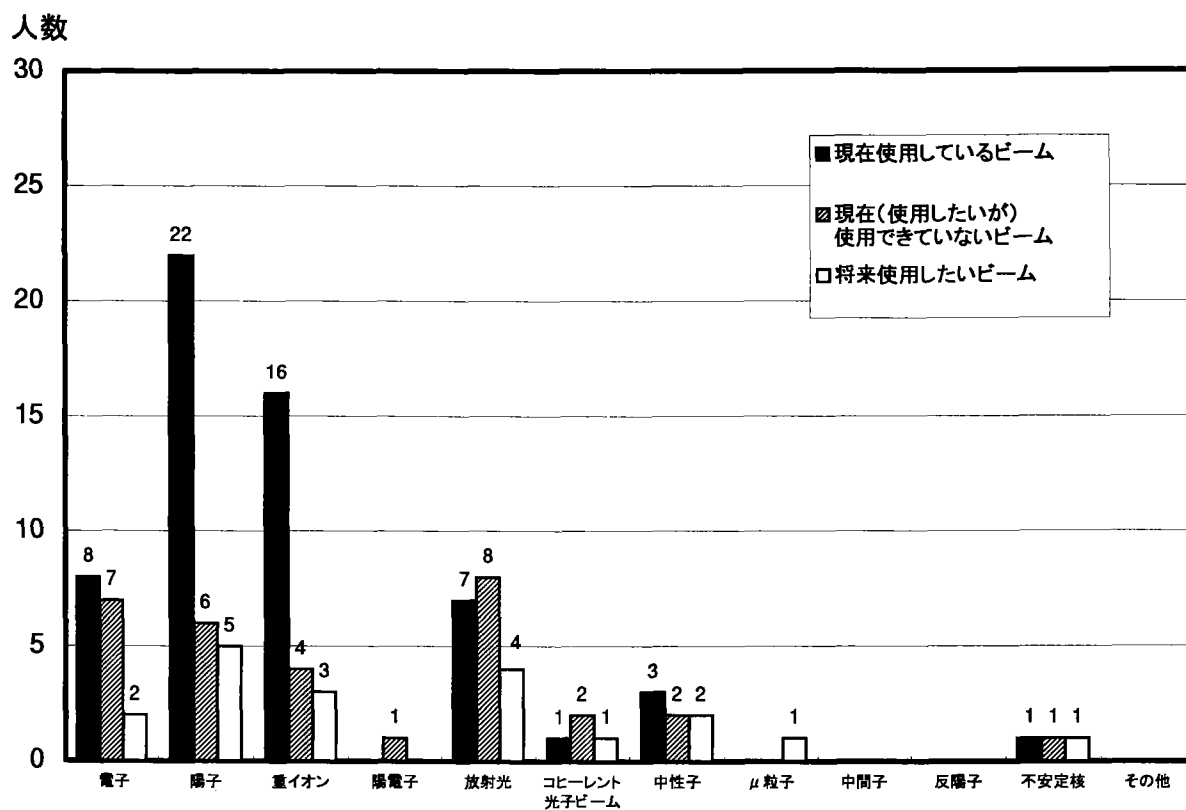
人数



図一Ⅲ-2-5 物質・材料科学分野の使用者(あるいは使用希望者)人数



図－Ⅲ－２－６ 生命科学分野の使用者(あるいは使用希望者)人数



図－Ⅲ－２－７ 医療利用分野の使用者(あるいは使用希望者)人数

加速器科学各分野についてまとめると以下のようになる。

（高エネルギー物理学（素粒子物理学））

現状では、電子、陽電子ビーム（KEKでのBファクトリーを反映）および陽子ビームの使用が多い。将来的には、リニアコライダーへの要望を反映し、現状と同様に電子、陽電子ビームのニーズが高くなっている。また、第2世代のレプトンである μ 粒子へのニーズも高くなっている。

（原子核物理学）

現状では、重イオンビーム、陽子ビーム、不安定核ビームなどの使用が多い。将来的には、不安定核ビーム、重イオンビームのニーズが多くなっている。これは、理化学研究所のRIビームファクトリーやKEKおよび日本原子力研究所の大強度陽子加速器研究施設への要望を反映しているものと考えられる。その他、陽子ビーム、中間子ビームの要望が見える。

（エネルギー科学）

現状においては、 μ 粒子ビーム、中性子ビーム、陽子ビームなどが使用されている。将来的には、陽子ビーム、中性子ビーム、重イオンビームへのニーズがある。（なお、回答数が多くなく、明確には言えない状況である。）

（物質・材料科学）

現状においては、放射光が圧倒的に多い使用状況であり、続いて重イオンビーム、陽子ビーム、などが多く使用されている。将来的には、放射光および自由電子レーザーなどのコヒーレント光子ビームおよび中性子ビームのニーズがある。

（生命科学）

現状においては、放射光が圧倒的に多い使用状況であり、続いて重イオンビーム、中性子ビームが使用されている。将来的には、放射光、中性子ビームのニーズが高く、陽子ビーム、重イオンビームのニーズもある。

（医療利用）

現状においては、陽子ビーム、重イオンビームなどの使用が多い。これは、PETやがん治療への利用を反映している。（なお、既に一般病院に普及している電子ビーム（ $\sim 30\text{MeV}$ ）の使用者は除かれている。）また、放射光の利用も見えている。将来的なニーズとしては、（回答数が多くないため明確ではないが）現状と同様な傾向のニーズが見える。

なお、現在使えていないビームがある研究者について、その理由の回答を求めたところ、以下の表（表－Ⅲ－２－２）に示すとおりであり、自分の研究に容易に使用できる加速器が近くになり、あるいはビームの割り当て時間が十分ではない、などの理由が挙げられている。

表－Ⅲ－２－２ 現在（使用したいビームが）使えない理由

| 現在（使用したいビームが）使えない理由 | 件 数 |
|---|-----|
| 身近に利用可能なセットアップされた施設がない 実験・測定装置が未整備、装置の持ち込みができない 自分の研究に合致した専用のビームラインが確保できない、など | 28 |
| ビームタイム、マシンタイムの不足 | 12 |
| 技術的理由 考えている仕様での設備がない（あるいは技術開発中） ビームのモードが不足 エネルギーが適当でない 強度が不足している、など | 16 |
| 利用コストが高い | 3 |
| 予算が獲得できない | 11 |
| 研究時間が足りない マンパワーが足りない | 20 |
| 実験準備中 | 11 |
| 加速器施設が建設中 修理・改造中 コミッショニング中 | 6 |
| （日本に）使用できる施設がない | 11 |
| 加速器そのものが実現されていない（検討中） ビーム仕様が実現されていない | 11 |
| その他 | 8 |

Ⅲ-3 加速器ビーム毎の利用の現状および将来ニーズ

以下では、各ビーム毎に、①現在使用中のもの、②現在（使用したいが）使用できていないもの、③将来使用したいもの、についてまとめる。

ビームニーズ等調査においては、各加速器ビーム種の①、②および③のものについて、研究分野、（差し支えない場合には）研究課題名の回答を求めるとともに、

ビームエネルギー、 エネルギー分解能、 ビーム長短径、
平均ビーム強度、 規格化エミッタンス、 ビーム時間構造の型、
ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅（長）、パルス強度、
パルス内バンチ数、バンチ幅）

に関して、調査票で値の領域を指定しつつ回答を求めた（調査資料-76；ビームニーズ等調査調査票参照）。

1 電子ビーム

電子ビーム使用者の研究分野別分類は表Ⅲ-3-1のとおりであり、研究分野としては、素粒子物理学および物質・材料科学が主たるものとなっている。なお、先にも述べたように、総合病院などにおいて腫瘍治療にごく一般的に使用されている電子線形加速器（エネルギー～25MeV程度、導入数；数百以上）については調査対象としていないので、医療利用分野の使用者数は実体に比べてかなり少なくなっている。

表Ⅲ-3-1 電子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 （重複回答有） | | ビーム使用形態（件数） | |
|--------------------------|------|------------------------|----|-------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の電子ビーム | 132 | 素粒子物理学 | 25 | 25 | 2 |
| | | 原子核物理学 | 15 | 17 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 47 | 64 | 7 |
| | | 生命科学 | 8 | 7 | 0 |
| | | 医療利用 | 8 | 10 | 0 |
| | | その他 | 29 | 25 | 2 |
| ②現在（使用したいが）使用できていない電子ビーム | 65 | 素粒子物理学 | 4 | 3 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 9 | 7 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 17 | 15 | 6 |
| | | 生命科学 | 5 | 5 | 0 |
| | | 医療利用 | 7 | 8 | 0 |
| | | その他 | 14 | 10 | 3 |
| ③将来使用したい電子ビーム | 69 | 素粒子物理学 | 33 | 28 | 5 |
| | | 原子核物理学 | 6 | 2 | 2 |
| | | エネルギー科学 | 2 | 1 | 1 |
| | | 物質・材料科学 | 12 | 7 | 6 |
| | | 生命科学 | 3 | 3 | 0 |
| | | 医療利用 | 2 | 2 | 0 |
| | | その他 | 11 | 5 | 4 |

②および③においては、複合ビーム利用の（単独ビーム利用に対する）相対的な割合が多くなっており、今後の加速器ビームの利用ではビームの高度な利用が進展するものと考えられる。

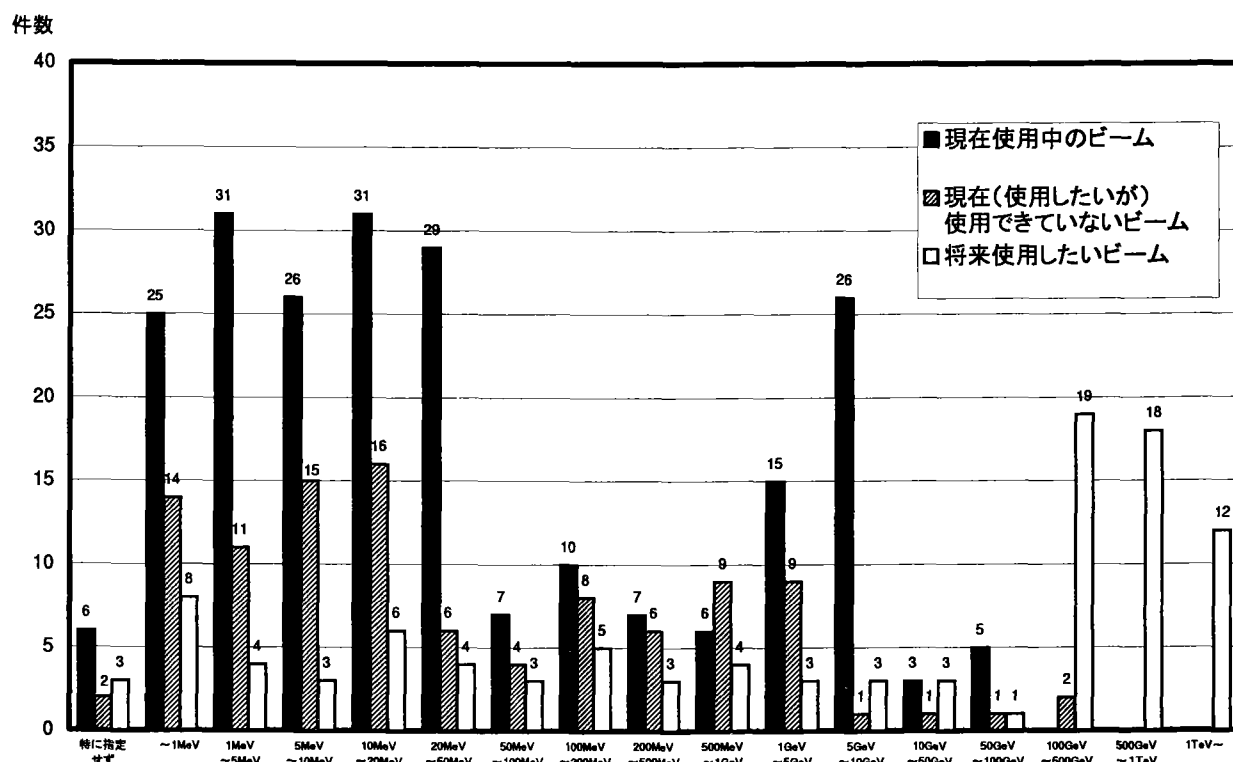
(1)エネルギー

電子ビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表－Ⅲ－３－２）の結果が得られている。

表－Ⅲ－３－２ 電子ビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|---------------|--------|---|----|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 1 |
| ～ 1MeV | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 20 | 10 | 4 |
| 1MeV～ 5MeV | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 6 | 3 |
| 5MeV～ 10MeV | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 4 | 1 |
| 10MeV～ 20MeV | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 10 | 3 |
| 20MeV～ 50MeV | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 1 | 2 |
| 50MeV～100MeV | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 100MeV～200MeV | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 200MeV～500MeV | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 500MeV～ 1GeV | 1 | 1 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1GeV～ 5GeV | 4 | 1 | 0 | 3 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5GeV～ 10GeV | 16 | 0 | 0 | 6 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10GeV～ 50GeV | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50GeV～100GeV | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100GeV～500GeV | 0 | 2 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500GeV～ 1TeV | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1TeV～ | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 6 | 2 | 3 |
| ～ 1MeV | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 25 | 14 | 8 |
| 1MeV～ 5MeV | 3 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 | 4 | 2 | 0 | 31 | 11 | 4 |
| 5MeV～ 10MeV | 3 | 1 | 0 | 6 | 6 | 1 | 5 | 3 | 0 | 26 | 15 | 3 |
| 10MeV～ 20MeV | 1 | 0 | 0 | 5 | 2 | 0 | 9 | 2 | 2 | 31 | 16 | 6 |
| 20MeV～ 50MeV | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 7 | 4 | 1 | 29 | 6 | 4 |
| 50MeV～100MeV | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 7 | 4 | 3 |
| 100MeV～200MeV | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 | 1 | 10 | 8 | 5 |
| 200MeV～500MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 7 | 6 | 3 |
| 500MeV～ 1GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 4 | 3 | 6 | 9 | 4 |
| 1GeV～ 5GeV | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 5 | 3 | 2 | 15 | 9 | 3 |
| 5GeV～ 10GeV | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 26 | 1 | 3 |
| 10GeV～ 50GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 50GeV～100GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 1 |
| 100GeV～500GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 19 |
| 500GeV～ 1TeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| 1TeV～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |

なお、表Ⅲ-3-2の合計件数を図示すると、図Ⅲ-3-1のとおりである。



図Ⅲ-3-1 電子ビームエネルギー領域毎の回答件数

加速器科学全分野で使われる電子ビームのエネルギーは、1MeV より低いものから 100GeV を超えるものまで広範囲のものとなっている。低エネルギー領域（140MeV 程度より低いエネルギー領域）の電子ビームは、物質・材料科学分野において一般的に使用されており、高エネルギー領域（数 GeV を超える領域）あるいはエネルギーフロンティアでは素粒子物理学で使用されており、現在の研究では、KEKでのB-ファクトリーやCERNのLEPⅡでの電子・陽電子衝突実験がこれに相当する。また、将来においては、JLC による電子・陽電子衝突実験を挙げる研究者が相当数回答している。原子核物理学においては、低エネルギー、中間エネルギー（140MeV 程～数 GeV）、高エネルギー領域の幅広いエネルギー領域で電子ビームの使用が行われている。なお、医療利用においては、浅部腫瘍治療用の電子線形加速器（～30MeV）については、調査していないので、使用状況の実体よりは極めて少ないものとなっているものと推定される。

この調査結果ではあまり見えないものの、電子ビームは、その直接的利用の他、制動放射発生（～数 10MeV）、自由電子レーザー発生（数 10～数 100MeV）、中性子発生（数 10～数 100MeV）、陽電子発生（数 10～数 100MeV）およびシンクロトロン放射光発生（数 100MeV～数 GeV）などにも用いられている。

(2) エネルギー分解能

①、②および③のものいずれについても 0.1%前後が多い。

（調査資料-76；図Q2-2、図Q2-11、図Q2-20 参照）

(3) ビーム長短径

①および②のものについては、ビーム断面の長径、短径とも1 mm～1 cm の範囲が多い。これは通常の電子ビームの断面径に相当している。なお、①および③において、極めて小さい1～10 nm のビーム径が挙げられているが、これはエネルギーフロンティア領域での電子・陽電子衝突実験に使用するビームの衝突確率を上げるために極めて絞り込んだビームが要求されていることによる。

(調査資料-76；図Q 2-3, 4、図Q 2-12, 13、図Q 2-21, 22 参照)

(4) 平均ビーム強度

素粒子物理学においては μA 程度以上、原子核物理学においては pA 程度以上、物質・材料科学においては数10 nA 程度以上の平均ビーム強度が使用され、あるいは要望されている。素粒子物理学においては、エネルギーの高いビームほど反応断面積が小さくなるため、高エネルギー電子ビームを使った衝突実験等では高いビーム強度が要求される。現在、KEKで進行中のBファクトリーにおける電子・陽電子衝突実験では、衝突断面積の極めて小さな反応を観測するため電子ビームをリングに蓄積したのち衝突させている。①において、高い平均ビーム強度が挙げられているのはこの理由によるものである。一方、物質・材料科学においては、数10 nA 程度からA 級の幅広い強度領域の電子ビームが使われている。

(調査資料-76；図Q 2-5、図Q 2-14、図Q 2-23 参照)

(5) 規格化エミッタンス

(規格化) エミッタンスは、ビーム内粒子の運動量および位置のバラツキを示すものであり、これが小さいほどバラツキが小さいことを意味している。特に、電子・陽電子衝突実験においては、衝突の確率を上げるため、エミッタンスを非常に小さくすることが要求される。③において、 $10^{-2} \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下の小さい値のエミッタンスをもつビームが求められるのは、上記の理由によるものである。なお、物質・材料科学や生命科学分野の加速器ビームユーザーにはあまりなじみのない物理量であり、回答数は多くない。

(調査資料-76；図Q 2-6、図Q 2-15、図Q 2-24 参照)

(6) ビーム時間構造の型

①、②および③のものから、将来における電子ビームの時間構造の型については、パルスビームへのニーズが高くなっている。これは、パルス電子ビームを用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものである。

(調査資料-76；図Q 2-7、図Q 2-16、図Q 2-25 参照)

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バンチ数、バンチ幅(長)）については、調査資料-76（図Q 2-8, 38 頁、図Q 2-17, 45 頁、図Q 2-26, 52 頁）に示す。

2 陽子ビーム

陽子ビーム使用者の研究分野別分類は表Ⅲ-3-3のとおりであり、①においては、物質・材料科学、原子核物理学、医療利用、素粒子物理学など幅広い分野での利用が行われている。

表Ⅲ-3-3 陽子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|----------------------------|------|------------------------|----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の陽子ビーム | 156 | 素粒子物理学 | 20 | 24 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 35 | 42 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 4 | 5 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 50 | 62 | 4 |
| | | 生命科学 | 7 | 7 | 0 |
| | | 医療利用 | 22 | 21 | 0 |
| | | その他 | 18 | 17 | 0 |
| ②現在 (使用したいが) 使用できていない陽子ビーム | 44 | 素粒子物理学 | 5 | 3 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 8 | 8 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 13 | 16 | 0 |
| | | 生命科学 | 3 | 2 | 0 |
| | | 医療利用 | 6 | 5 | 0 |
| | | その他 | 9 | 7 | 0 |
| ③将来使用したい陽子ビーム | 48 | 素粒子物理学 | 13 | 14 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 8 | 6 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 5 | 5 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 6 | 7 | 0 |
| | | 生命科学 | 5 | 4 | 0 |
| | | 医療利用 | 5 | 4 | 0 |
| | | その他 | 6 | 4 | 2 |

(1) エネルギー

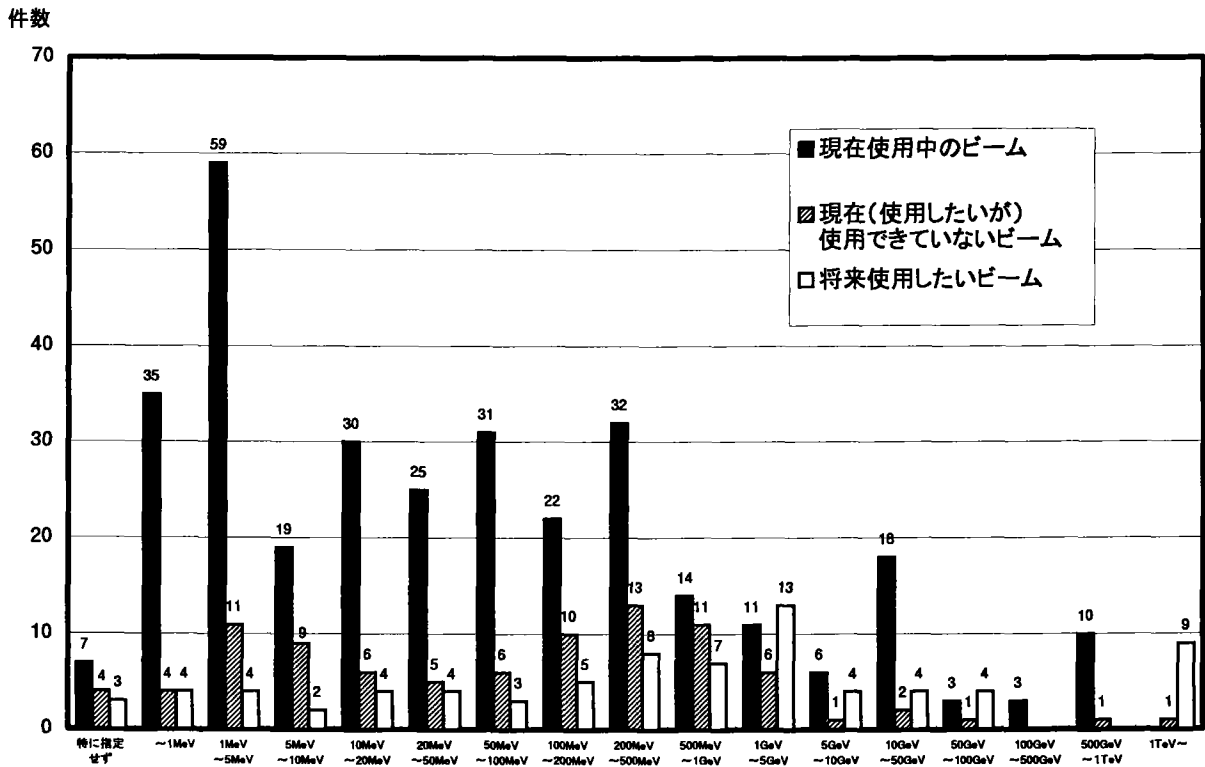
陽子ビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表 (表Ⅲ-3-4) の結果が得られている。なお、表Ⅲ-3-4の合計件数を図示したものが図Ⅲ-3-2である。

加速器科学全分野で使われる①の陽子ビームについては、エネルギーは1MeVより低いものから1TeV程度までの広範囲のものとなっている。低エネルギー領域 (140MeV程度より低いエネルギー領域) および中間エネルギーの数100MeV程度までの陽子ビームは、原子核物理学、物質・材料科学、医療利用分野 (医療利用分野でのがん治療については、数10MeV～250MeVの陽子ビームが使われている) において一般的に使用されている。中間エネルギー領域の陽子ビームは主に原子核物理学分野で使用されており、高エネルギー領域 (数GeVを超える領域) ではQCD原子核物理学あるいは素粒子物理学で使用され、500GeVを超えるエネルギーフロンティアでは素粒子物理学で使用されている。なお、素粒子物理学分野で③の陽子ビームについて1TeVを超えるエネルギー領域にニーズが出ているのは、CERNのLHCへの期待と考えられる。

表－Ⅲ－3－4 陽子ビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|---------------|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 2 | 0 |
| ～ 1MeV | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 | 3 | 0 |
| 1MeV～ 5MeV | 1 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 36 | 5 | 1 |
| 5MeV～ 10MeV | 1 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 3 | 1 |
| 10MeV～ 20MeV | 1 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 4 | 2 |
| 20MeV～ 50MeV | 1 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 6 | 4 | 1 |
| 50MeV～100MeV | 1 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 6 | 3 | 0 |
| 100MeV～200MeV | 1 | 0 | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 |
| 200MeV～500MeV | 1 | 1 | 0 | 13 | 4 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| 500MeV～ 1GeV | 1 | 1 | 0 | 8 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 1GeV～ 5GeV | 1 | 1 | 0 | 5 | 1 | 5 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 5GeV～ 10GeV | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10GeV～ 50GeV | 11 | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 50GeV～100GeV | 1 | 1 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100GeV～500GeV | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500GeV～ 1TeV | 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1TeV～ | 0 | 1 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 7 | 4 | 3 |
| ～ 1MeV | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 2 | 35 | 4 | 4 |
| 1MeV～ 5MeV | 2 | 2 | 0 | 3 | 2 | 2 | 9 | 2 | 1 | 59 | 11 | 4 |
| 5MeV～ 10MeV | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | 19 | 9 | 2 |
| 10MeV～ 20MeV | 1 | 1 | 1 | 5 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 30 | 6 | 4 |
| 20MeV～ 50MeV | 1 | 1 | 2 | 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 25 | 5 | 4 |
| 50MeV～100MeV | 2 | 1 | 2 | 6 | 1 | 0 | 6 | 1 | 1 | 31 | 6 | 3 |
| 100MeV～200MeV | 2 | 1 | 2 | 6 | 2 | 1 | 6 | 1 | 1 | 22 | 10 | 5 |
| 200MeV～500MeV | 2 | 0 | 0 | 7 | 1 | 2 | 6 | 3 | 2 | 32 | 13 | 8 |
| 500MeV～ 1GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4 | 2 | 14 | 11 | 7 |
| 1GeV～ 5GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 11 | 6 | 13 |
| 5GeV～ 10GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 6 | 1 | 4 |
| 10GeV～ 50GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 18 | 2 | 4 |
| 50GeV～100GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 |
| 100GeV～500GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 500GeV～ 1TeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 1 | 0 |
| 1TeV～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 9 |

陽子ビームを間接利用する研究などについては、二次（高次）ビームとして中間子ビームや中性子ビーム、 μ 粒子ビームあるいは反陽子ビームなどを発生させることに使われており、数100MeV～数10 GeVのエネルギー領域の陽子ビームが使用されている（ π 中間子発生（数100MeV～1GeV程度）、 μ 粒子発生（数100MeV～数GeV程度）、ニュートリノ発生（数100MeV～数GeV程度）、中性子発生（数100MeV～1GeV程度）、K中間子発生（数GeV～数10 GeV程度）、反陽子発生（数GeV～数10 GeV程度））。



図一Ⅲ-3-2 陽子ビームエネルギー領域毎の回答件数

(2)エネルギー分解能

①、②および③のものいずれについても、広範囲のエネルギー分解能のものが使用（あるいは要望）されている。

（調査資料-76；図Q 2-29、図Q 2-38、図Q 2-47 参照）

(3)ビーム長短径

①、②および③のものいずれについても、ビーム断面の長径、短径とも1mm～1cmの範囲が多い。これは通常の陽子ビームの断面径である。なお、③において、1μm以下のビーム径が相対的に高く挙げられているが、これはマイクロビームへの要望である。

（調査資料-76；図Q 2-30、31、図Q 2-39、40、図Q 2-48、49 参照）

(4)平均ビーム強度

①および②のものについては、10nA～10μAの範囲のビームが多く使用（あるいは要望）されている。なお、物質・材料科学分野においては、宇宙線による半導体の損傷（シングスイベント損傷）研究など、極めてビーム強度の低いビーム（極限的には1個の陽子など）を使用する研究分野もある。

（調査資料-76；図Q 2-32、図Q 2-41、図Q 2-50 参照）

(5)規格化エミッタンス

①、②および③のものいずれについても、1 から $10\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ のエミッタンスをもつ陽子ビームが使用され（あるいは求められ）ている。なお、素粒子物理学においては、陽子・反陽子衝突実験において、衝突確率を高めるためエミッタンスを非常に小さくすることが要求されるのは、電子の場合と同様である。

（調査資料－76；図Q 2－33、図Q 2－42、図Q 2－51 参照）

(6)ビーム時間構造の型

①、②および③のものから、陽子ビームの時間構造の型に関する将来ニーズについては、パルスビームへのニーズが高くなっている。これは、パルス陽子ビームを用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものである。

（調査資料－76；図Q 2－34、図Q 2－43、図Q 2－52 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バンチ数、バンチ幅(長)）については、調査資料－76（図Q 2－35, 65 頁、図Q 2－44, 72 頁、図Q 2－53, 79 頁）に示す。

3 重イオンビーム

重イオンビーム使用者の研究分野別分類は表Ⅲ-3-5のとおりであり、物質・材料科学、原子核物理学、生命科学、医療利用など幅広い分野での利用が行われている。特に物質・材料科学においては、②および③のもので、複合ビーム利用の（単独ビーム利用に対する）相対的な割合が多くなっており、今後の重イオンビームの利用では、ビームの高度な利用が進展するものと考えられる。

表Ⅲ-3-5 重イオンビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|--------------------------------|------|------------------------|----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の重イオンビーム | 151 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 36 | 51 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 3 | 5 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 59 | 76 | 6 |
| | | 生命科学 | 23 | 31 | 1 |
| | | 医療利用 | 16 | 18 | 0 |
| | | その他 | 13 | 13 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない重イオンビーム | 55 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 15 | 16 | 2 |
| | | エネルギー科学 | 2 | 2 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 19 | 21 | 10 |
| | | 生命科学 | 8 | 11 | 0 |
| | | 医療利用 | 4 | 3 | 0 |
| | | その他 | 6 | 6 | 0 |
| ③将来使用したい重イオンビーム | 39 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 12 | 13 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 4 | 4 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 10 | 5 | 5 |
| | | 生命科学 | 4 | 4 | 0 |
| | | 医療利用 | 3 | 3 | 0 |
| | | その他 | 5 | 3 | 1 |

(1) エネルギー

重イオンビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表Ⅲ-3-6、次頁）の結果が得られている。なお、表Ⅲ-3-6の合計件数を図示したものが図Ⅲ-3-3である。

原子核物理学では、低エネルギー領域（数 10MeV/n 程度まで）、中間エネルギー領域（数 10MeV/n ～数 100MeV/n 程度）、高エネルギー領域（数 100MeV/n 程度より高い）まで広いエネルギー領域の重イオンビームが使用（あるいは要望）されている。物質・材料科学、生命科学においては、低エネルギー領域あるいは中間エネルギー領域のものが使用（あるいは要望）されている。がん治療などの医療利用においては、主に中間エネルギー領域の重イオンビームが使用（あるいは要望）されている。

(2) エネルギー分解能

①、②においては、0.1%より分解能のわるいものが使用（あるいは要望）されているが、③に

においては、0.1%より分解能の良い（エネルギーのそろった）重イオンビームへのニーズが高くなっている。

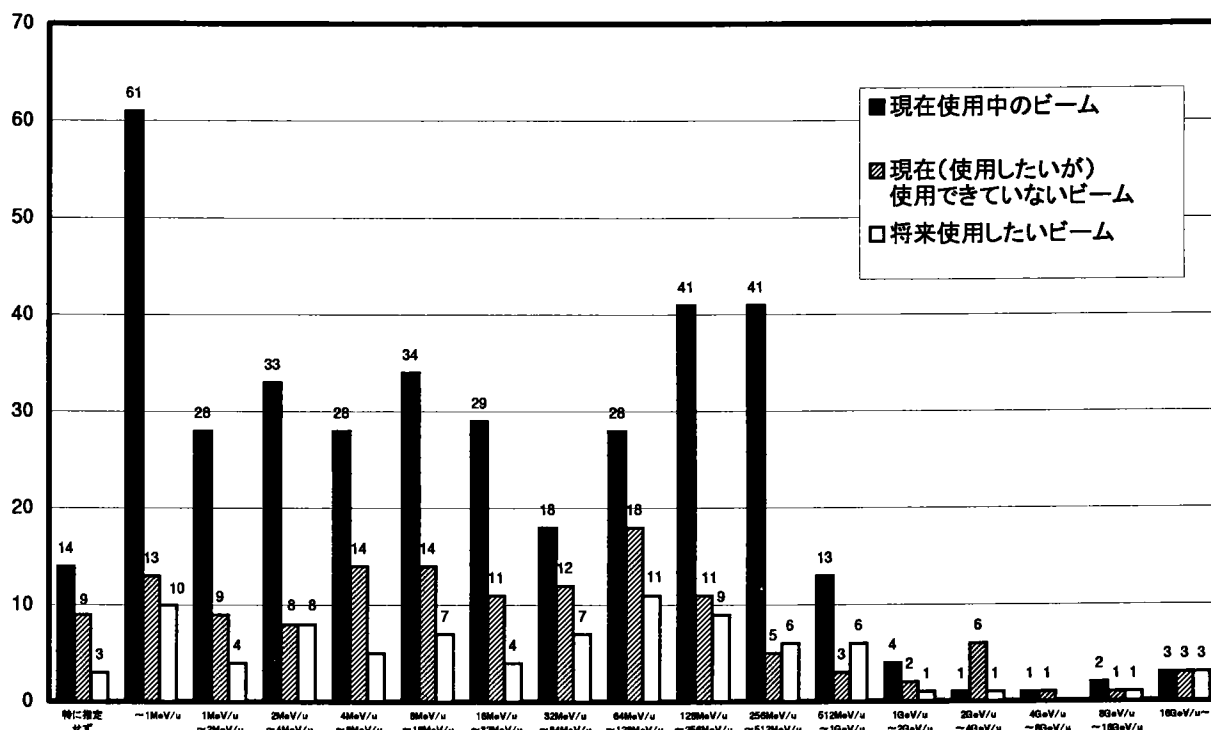
（調査資料－76；図Q2－56、図Q2－65、図Q2－74 参照）

表－Ⅲ－3－6 重イオンビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|-----------------|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 9 | 6 | 1 |
| (*) ～ 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 44 | 12 | 6 |
| (*) 1～ 2 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 20 | 4 | 2 |
| (*) 2～ 4 | 1 | 0 | 0 | 8 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 20 | 4 | 3 |
| (*) 4～ 8 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 8 | 3 | 2 |
| (*) 8～ 16 | 0 | 0 | 0 | 11 | 4 | 3 | 0 | 1 | 0 | 10 | 4 | 1 |
| (*) 16～ 32 | 0 | 0 | 0 | 6 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 3 | 0 |
| (*) 32～ 64 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 6 | 5 | 0 |
| (*) 64～ 128 | 0 | 1 | 1 | 13 | 5 | 3 | 0 | 0 | 2 | 4 | 3 | 1 |
| (*) 128～ 256 | 0 | 1 | 1 | 11 | 4 | 4 | 2 | 0 | 1 | 8 | 0 | 0 |
| (*) 256～ 512 | 0 | 0 | 0 | 6 | 2 | 5 | 2 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| (*) 512～ 1GeV/n | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1GeV/n～ 2GeV/n | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2GeV/n～ 4GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 4GeV/n～ 8GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8GeV/n～16GeV/n | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16GeV/n～ | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 14 | 9 | 3 |
| (*) ～ 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 3 | 0 | 1 | 61 | 13 | 10 |
| (*) 1～ 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 28 | 9 | 4 |
| (*) 2～ 4 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 33 | 8 | 8 |
| (*) 4～ 8 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 28 | 14 | 5 |
| (*) 8～ 16 | 10 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 34 | 14 | 7 |
| (*) 16～ 32 | 10 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 | 29 | 11 | 4 |
| (*) 32～ 64 | 6 | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 18 | 12 | 7 |
| (*) 64～ 128 | 5 | 7 | 2 | 3 | 1 | 0 | 3 | 1 | 2 | 28 | 18 | 11 |
| (*) 128～ 256 | 10 | 2 | 1 | 7 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 41 | 11 | 9 |
| (*) 256～ 512 | 10 | 2 | 0 | 14 | 0 | 0 | 4 | 1 | 1 | 41 | 5 | 6 |
| (*) 512～ 1GeV/n | 2 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 13 | 3 | 6 |
| 1GeV/n～ 2GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4 | 2 | 1 |
| 2GeV/n～ 4GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 6 | 1 |
| 4GeV/n～ 8GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 8GeV/n～16GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| 16GeV/n～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 |

* 単位のない数値の単位は MeV/n

件数



図一Ⅲ-3-3 重イオンビームエネルギー領域毎の回答件数

(3)ビーム長短径

①、②および③のいずれについても、ビーム断面の長径、短径とも1mm~1cmの範囲が多い。これは通常の重イオンビームの断面径である。なお、マイクロビームへのニーズが高い分野は、物質・材料科学および生命科学分野であり、③においては1μm以下のビーム径が相対的に高く挙げられているが、これはマイクロビームへのニーズが将来的により高くなってゆくことを示している。(調査資料-76；図Q2-57, 58、図Q2-66, 67、図Q2-75, 76 参照)

(4)平均ビーム強度

①、②および③のいずれについても、 6.2×10^{12} ions/sec 以下（各イオンを1価の電荷をもつとすると、1μA以下）の平均ビーム強度の小さいビームが使用（要望）されている。①においては、物質・材料科学、生命科学では特に更に数桁程度低いビーム強度が使用されている。③の結果からは見えないが、今後、物質・材料科学や生命科学においては微細領域を扱う研究が主となることより、極めて低い強度の重イオンビームへのニーズは高くなるものと考えられる。

(調査資料-76；図Q2-59、図Q2-68、図Q2-77 参照)

(5)規格化エミッタンス

①、②および③のものいずれについても、0.1から10πmm・mradのエミッタンスをもつ重イオンビームが使用され（あるいは求められ）ている。

(調査資料-76；図Q2-60、図Q2-69、図Q2-78 参照)

(6)ビーム時間構造の型

①、②および③のものから、重イオンビームの時間構造の型に関する将来ニーズについては、パルスビームへのニーズが高くなっている。これは、パルスビームを用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものと考えられる。

（調査資料－76；図Q 2－61、図Q 2－70、図Q 2－79 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内パンチ数、パンチ幅(長)）については、調査資料－76（図Q 2－62，91 頁、図Q 2－71，98 頁、図Q 2－80，105 頁）に示す。

4 陽電子ビーム

陽電子ビーム使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－7のとおりであり、①、②および③のいずれでも素粒子物理学および物質・材料科学分野で使用（あるいは要望）されている。

表－Ⅲ－3－7 陽電子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|-------------------------------|------|------------------------|----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の陽電子ビーム | 30 | 素粒子物理学 | 18 | 17 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 9 | 11 | 1 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 3 | 4 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない陽電子ビーム | 21 | 素粒子物理学 | 4 | 3 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 13 | 14 | 1 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 0 |
| | | その他 | 3 | 2 | 0 |
| ③将来使用したい陽電子ビーム | 38 | 素粒子物理学 | 26 | 16 | 2 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 9 | 10 | 3 |
| | | 生命科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 1 | 0 | 0 |

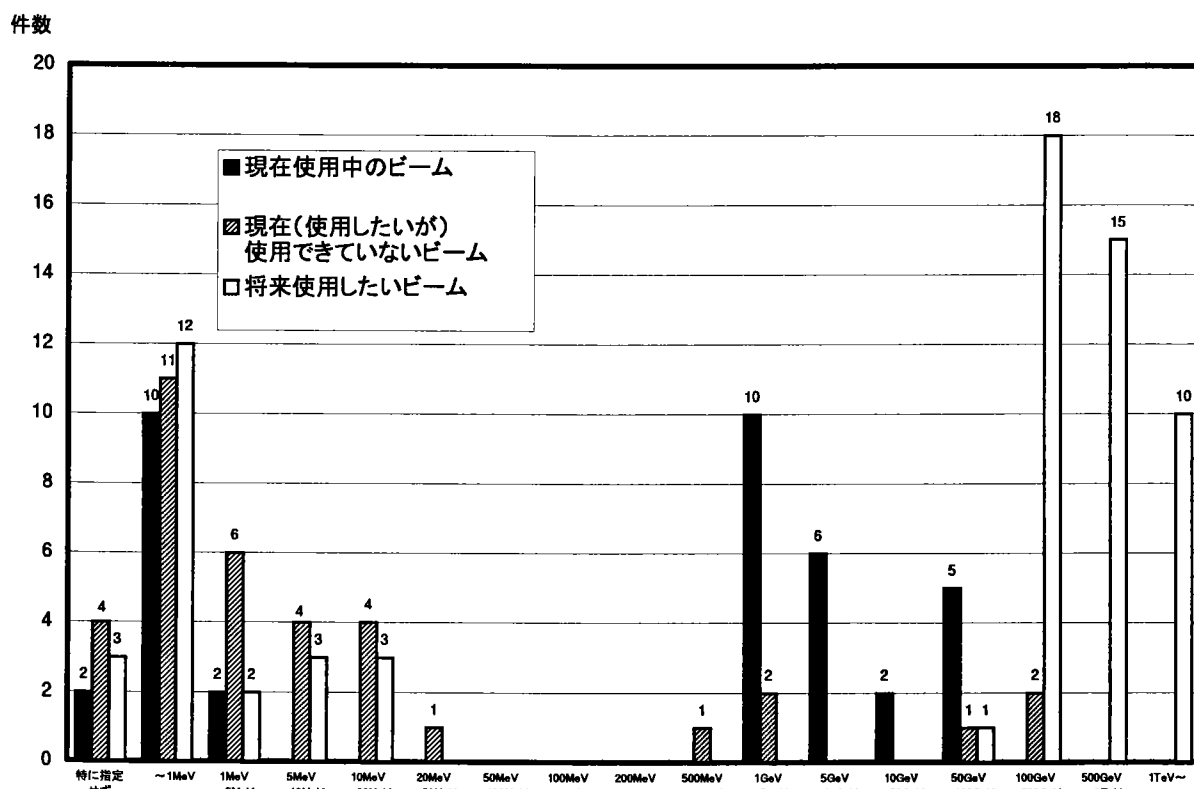
(1)エネルギー

陽電子ビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表－Ⅲ－3－8）の結果が得られている。なお、表－Ⅲ－3－8の合計件数を図示したものが図－Ⅲ－3－4である。

これらの表あるいは図に示されるように、陽電子ビームの使用エネルギー領域は、低いエネルギー（数 10MeV 以下）および高いエネルギー（1GeV 以上）に 2 分割されるものとなっている。低いエネルギー領域は物質・材料科学での材料欠陥分析などにおいて、また、高いエネルギー領域は素粒子物理学での電子・陽電子衝突実験などにおいて使用（要望）されている。

表－Ⅲ－3－8 陽電子ビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|---------------|--------|---|----|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 2 |
| ～ 1MeV | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 11 |
| 1MeV～ 5MeV | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | 0 |
| 5MeV～ 10MeV | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 10MeV～ 20MeV | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 20MeV～ 50MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 50MeV～100MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100MeV～200MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 200MeV～500MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500MeV～ 1GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1GeV～ 5GeV | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5GeV～ 10GeV | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10GeV～ 50GeV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50GeV～100GeV | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100GeV～500GeV | 0 | 2 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500GeV～ 1TeV | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1TeV～ | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 |
| ～ 1MeV | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 10 | 11 | 12 |
| 1MeV～ 5MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 6 | 2 |
| 5MeV～ 10MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| 10MeV～ 20MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| 20MeV～ 50MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 50MeV～100MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100MeV～200MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 200MeV～500MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500MeV～ 1GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1GeV～ 5GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 10 | 2 | 0 |
| 5GeV～ 10GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 10GeV～ 50GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 50GeV～100GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 1 |
| 100GeV～500GeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 18 |
| 500GeV～ 1TeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 1TeV～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |



図Ⅲ-3-4 陽電子ビームエネルギー領域毎の回答件数

(2)エネルギー分解能

電子ビームにおいても述べたように、素粒子物理学（エネルギーフロンティア）研究での電子・陽電子衝突において使われる（電子）陽電子ビームは、衝突確率を高めるため運動量を良く揃えた（すなわち、エネルギーのそろった分解能の良い）ビームが使用される。具体的な数値としては、0.1%より分解能の良いものが使用（あるいは要望）されている。

（調査資料-76；図Q 2-83、図Q 2-92、図Q 2-101 参照）

(3)ビーム長短径

①については、ビーム断面の長径では $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 、短径では $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ の範囲が多い。これはBファクトリーにおける電子・陽電子衝突実験に使われているものである。③においては、長径では $10\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 、短径では $1\text{nm}\sim 10\text{nm}$ の範囲が要望されており、これはエネルギーフロンティア領域での電子・陽電子衝突実験に使用するビームの衝突確率を上げるために極めて絞り込んだビームが要求されていることによる。

（調査資料-76；図Q 2-84、85、図Q 2-93、94、図Q 2-102、103 参照）

(4)平均ビーム強度

平均ビーム強度においても、低いビーム強度を使用する物質・材料科学と高いビーム強度を使用する素粒子物理学での使用（要望）に2分割されるものとなっている。

（調査資料-76；図Q 2-86、図Q 2-95、図Q 2-104 参照）

(5)規格化エミッタンス

電子ビームと同様な理由により、 $10^{-1} \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下の小さい値のエミッタンスをもつビームが使用（要望）されている。（調査資料－76；図Q 2－87、図Q 2－96、図Q 2－105 参照）

(6)ビーム時間構造の型

①、②および③のものから、将来における陽電子ビームの時間構造の型については、パルスビームへのニーズが高くなっている。これは、陽電子ビームを用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものである。

（調査資料－76；図Q 2－88、図Q 2－97、図Q 2－106 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バンチ数、バンチ幅(長)）については、調査資料－76（図Q 2－89，117 頁、図Q 2－98，124 頁、図Q 2－107，131 頁）に示す。

5 放射光

放射光使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－9のとおりであり、①、②および③のいずれでも物質・材料科学、生命科学あるいは医療利用で使用（あるいは要望）されている。

表－Ⅲ－3－9 放射光使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|--------------------------------|------|------------------------|-----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の放射光 | 199 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 2 | 2 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 132 | 188 | 1 |
| | | 生命科学 | 41 | 42 | 1 |
| | | 医療利用 | 7 | 9 | 0 |
| | | その他 | 16 | 17 | 1 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない 放射光 | 71 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 44 | 44 | 8 |
| | | 生命科学 | 14 | 15 | 1 |
| | | 医療利用 | 8 | 9 | 0 |
| | | その他 | 4 | 3 | 0 |
| ③将来使用したい 放射光 | 69 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 2 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 49 | 43 | 11 |
| | | 生命科学 | 7 | 7 | 2 |
| | | 医療利用 | 4 | 5 | 0 |
| | | その他 | 7 | 6 | 0 |

(1)光子エネルギー

放射光子エネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表Ⅲ-3-10）の結果が得られている。なお、表Ⅲ-3-10の合計件数を図示したものが図Ⅲ-3-5である。

これらの表あるいは図に示されるように、放射光の使用（要望）エネルギー領域は、10eV～10keVの真空紫外線あるいは軟X線（100eV～10keV）および10keV～100keVの硬X線領域である。これは、物質・材料科学および生命科学とも共通である。

表Ⅲ-3-10 放射光子エネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|---------------|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 2 |
| ～0.1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 |
| 0.1eV ～ 1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 4 |
| 1eV ～ 10eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 5 | 8 |
| 10eV ～100eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57 | 19 | 20 |
| 100eV ～ 1keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76 | 28 | 23 |
| 1keV ～ 10keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 83 | 28 | 25 |
| 10keV ～100keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 83 | 26 | 25 |
| 100keV ～ 1MeV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 4 |
| 1MeV ～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 7 | 1 | 4 |
| ～0.1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | 2 | 2 |
| 0.1eV ～ 1eV | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 4 |
| 1eV ～ 10eV | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 24 | 5 | 10 |
| 10eV ～100eV | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 64 | 21 | 21 |
| 100eV ～ 1keV | 6 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 84 | 35 | 24 |
| 1keV ～ 10keV | 24 | 8 | 3 | 1 | 3 | 1 | 8 | 0 | 1 | 117 | 39 | 30 |
| 10keV ～100keV | 24 | 6 | 1 | 6 | 6 | 5 | 6 | 2 | 2 | 120 | 40 | 33 |
| 100keV ～ 1MeV | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 10 | 3 | 7 |
| 1MeV ～ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 2 |

(2)エネルギー分解能

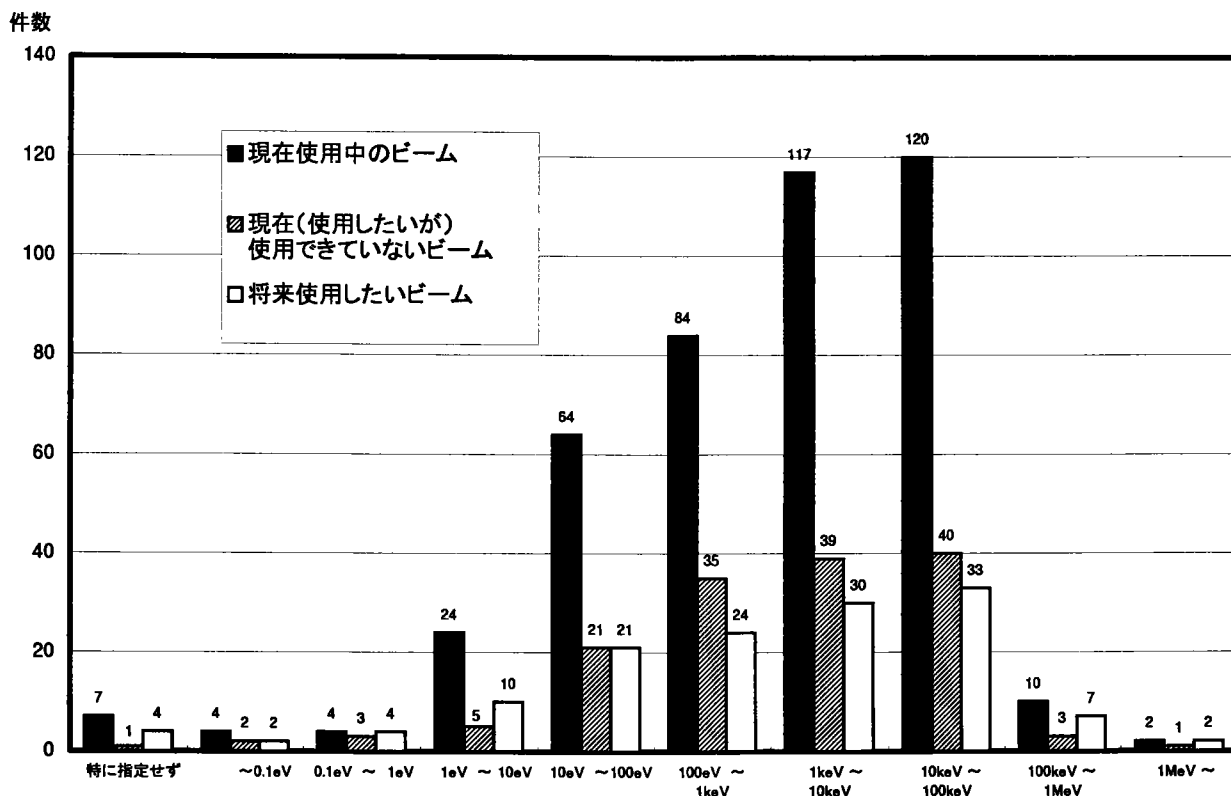
使用される放射光のエネルギー分解能は、0.001%～0.1%のものが圧倒的に多いが、更に数桁小さい分解能をもつ放射光も使用されている。今後（③）においては、0.001%（10⁻⁵）より小さい分解能をもつ放射光ビームのニーズが相対的に高くなっている。

（調査資料-76；図Q2-110、図Q2-122、図Q2-134 参照）

(3)ビーム長短径

①、②および③のいずれにおいても、10μm～1mmのビーム径が最も多く使用（要望）されている。なお、③においては10μm以下の細い放射光ビームへのニーズが高くなっている。

（調査資料-76；図Q2-111～114、図Q2-123～126、図Q2-135～138 参照）



図－Ⅲ－3－5 放射光子エネルギー領域毎の回答件数

(4) 平均ビーム強度

1) 光束

放射光のビーム強度を表す光束 (photons/sec/0.1%b. w.) について見てみると、①および②においては $10^{11} \sim 10^{13}$ が多くなっているが、③においてはより高い光束 $10^{14} \sim 10^{15}$ のものへのニーズが高くなっている。(調査資料－76；図Q 2－115、図Q 2－127、図Q 2－139 参照)

2) 輝度

同様に放射光の(指向性)強度を表す輝度 (photons/sec/mm²/mrad²/0.1%b. w.) については、①および②においては、 $10^{16} \sim 10^{20}$ にややピークを有するものの低輝度から高輝度までのバラエティに富んだ放射光が使用(要望)されている。③においてはより高い輝度 (10^{20} 以上) のものへのニーズが相対的に高くなっている。

(調査資料－76；図Q 2－117、図Q 2－129、図Q 2－141 参照)

(5) 偏光状態

偏光状態については、無偏光、直線水平偏光、直線垂直偏光、円偏光、楕円偏光を挙げて回答を求めた。①、②および③のいずれにおいても、多い方から直線水平偏光、直線垂直偏光、円偏光の順で挙げられている。(調査資料－76；145 頁、154 頁、163 頁参照)

(6)ビーム時間構造の型

③においては、パルスビームへのニーズが相対的に高くなっている。これは、パルス放射光を用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものと考えられる。

（調査資料－76；図Q 2－118、図Q 2－130、図Q 2－142 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅（長）、パルス内バンチ数、バンチ幅（長））については、調査資料－76（図Q 2－119、145 頁、図Q 2－131、154 頁、図Q 2－143、163 頁）に示す。

6 コヒーレント光子ビーム（自由電子レーザー、コヒーレント放射光など）

コヒーレント光子ビーム（自由電子レーザー、コヒーレント放射光など）使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－11 のとおりであり、①、②および③のいずれでも物質・材料科学での使用（要望）がほとんどである。また、同表よりわかるように、今後のビーム需要が期待される。

表－Ⅲ－3－11 コヒーレント光子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 （重複回答有） | | ビーム使用形態（件数） | |
|--------------------------------|------|------------------------|----|-------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中のコヒーレント光子ビーム | 17 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 1 |
| | | 物質・材料科学 | 4 | 3 | 1 |
| | | 生命科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 0 | 0 |
| | | その他 | 9 | 5 | 2 |
| ②現在（使用したいが）使用できていないコヒーレント光子ビーム | 20 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 2 | 2 | 1 |
| | | 物質・材料科学 | 10 | 9 | 4 |
| | | 生命科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 医療利用 | 2 | 2 | 0 |
| | | その他 | 4 | 2 | 1 |
| ③将来使用したいコヒーレント光子ビーム | 35 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 2 | 2 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 1 |
| | | 物質・材料科学 | 22 | 20 | 4 |
| | | 生命科学 | 3 | 3 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 0 |
| | | その他 | 5 | 3 | 0 |

(1)光子エネルギー

コヒーレント光子ビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表－Ⅲ－3－12）の結果が得られている。なお、表－Ⅲ－3－12 の合計件数を図示したものが図－Ⅲ－3－6 であ

る。

①においては、1eV～10eV（ほぼ可視光領域）のものが多く使われている。また、②および③においては、より高いエネルギー（あるいはより波長の短い）真空紫外線、軟X線、硬X線領域のものの需要が高くなっている。

表Ⅲ-3-12 コヒーレント光子ビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|--|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|---|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| ～10 ⁻³ eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 ⁻³ eV ～10 ⁻² eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 ⁻² eV ～ 0.1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1eV ～ 1 eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 1 eV ～ 10 eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 6 | 10 |
| 10 eV ～100 eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 10 |
| 100 eV ～ 1keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 9 |
| 1keV ～ 10keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 5 |
| 10keV ～100keV | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 5 |
| ～10 ⁻³ eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| 10 ⁻³ eV ～10 ⁻² eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 10 ⁻² eV ～ 0.1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| 0.1eV ～ 1 eV | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 |
| 1 eV ～ 10 eV | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 7 | 8 | 12 |
| 10 eV ～100 eV | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 13 |
| 100 eV ～ 1keV | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 11 |
| 1keV ～ 10keV | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 |
| 10keV ～100keV | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 9 |

(2)エネルギー分解能

①および②においては、コヒーレント光子ビームのエネルギー分解能は、0.01%～0.1%のものが多。今後（③）においては、0.01%（10⁻⁴）より小さい分解能をもつコヒーレント光子ビームのニーズが圧倒的に高くなっている。

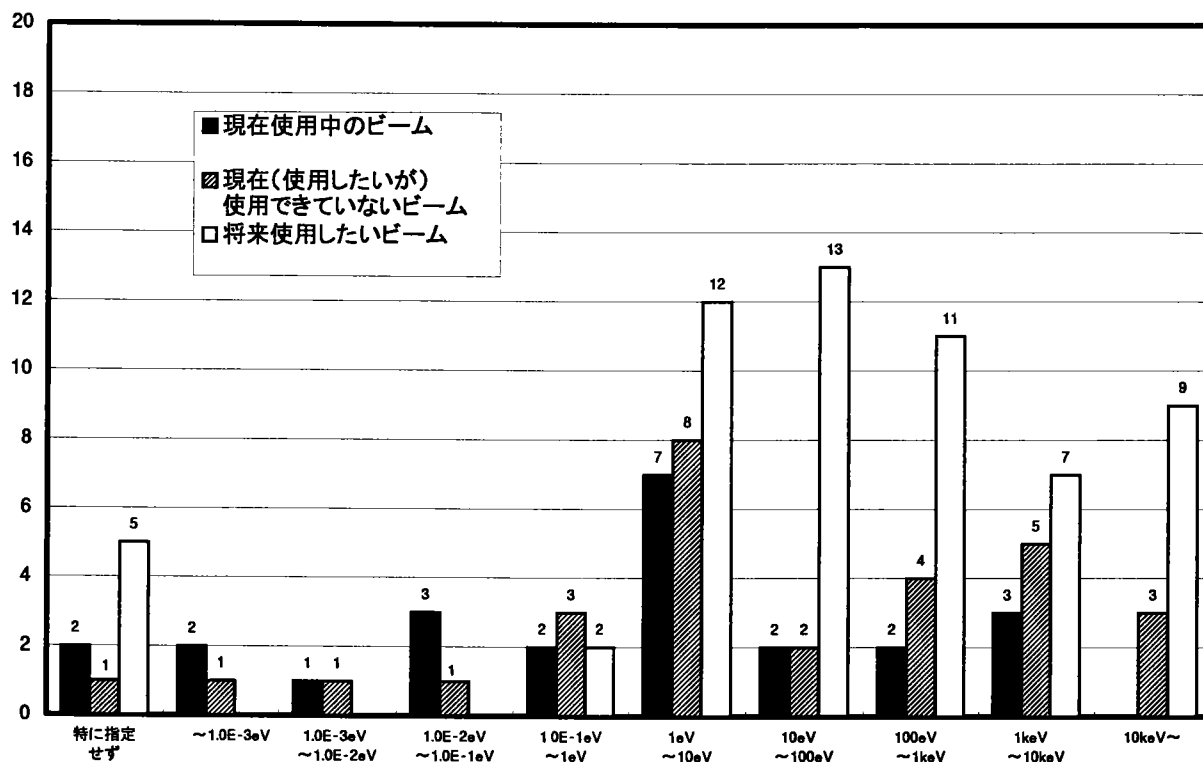
（調査資料-76；図Q2-146、図Q2-159、図Q2-172 参照）

(3)ビーム長短径

①、②においては、100μm～1cm のビーム径が多く使用（要望）されている。③においては、10μm以下の細いコヒーレント光子ビームへのニーズが高くなっている。

（調査資料-76；図Q2-147～150、図Q2-160～163、図Q2-173～176 参照）

件数



図一Ⅲ-3-6 コヒーレント光子ビームエネルギー領域毎の回答件数

(4)平均ビーム強度

1)光束

コヒーレント光子ビーム強度を表す光束 (photons/sec/0.1%b. w.) について見てみると、①および②においてはあまり明確に見えていないが、③においてはより 10^{14} 以上のものへのニーズが高くなっている。(調査資料-76；図Q 2-151、図Q 2-164、図Q 2-177 参照)

2)輝度

同様にコヒーレント光子ビームの(指向性)強度を表す輝度 (photons/sec/mm²/mrad²/0.1%b. w.) については、①および②においてはあまり明確に見えていないが、③においては低輝度から高輝度までのバラエティに富んだものが要望されている。

(調査資料-76；図Q 2-153、図Q 2-166、図Q 2-179 参照)

(5)偏光状態

偏光状態については、無偏光、直線水平偏光、直線垂直偏光、円偏光、楕円偏光を挙げて回答を求めた。①、②および③において、直線水平偏光、直線垂直偏光、円偏光の頻度が高く挙げられている。(調査資料-76；177 頁、186 頁、195 頁参照)

(6)ビーム時間構造の型

③においては、パルスビームへのニーズが相対的に高くなっている。これは、パルスコヒーレント光子ビームを用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものと考えられる。（調査資料－76；図Q 2－155、図Q 2－168、図Q 2－181 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間）については、調査資料－76（図Q 2－156、図Q 2－169、図Q 2－182）に示す。

7 中性子ビーム

中性子ビーム使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－13 のとおりであり、①、②および③のいずれでも物質・材料科学で最も多いものの、生命科学、エネルギー科学、原子核物理学、医療利用など幅の広い使用（あるいは要望）がなされている。

表－Ⅲ－3－13 中性子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態（件数） | |
|-------------------------------|------|------------------------|----|-------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の中性子ビーム | 61 | 素粒子物理学 | 3 | 4 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 7 | 4 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 5 | 6 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 23 | 31 | 0 |
| | | 生命科学 | 8 | 7 | 0 |
| | | 医療利用 | 3 | 3 | 0 |
| | | その他 | 12 | 16 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない中性子ビーム | 42 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 9 | 8 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 4 | 4 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 12 | 11 | 0 |
| | | 生命科学 | 10 | 12 | 0 |
| | | 医療利用 | 2 | 2 | 0 |
| | | その他 | 5 | 4 | 0 |
| ③将来使用したい中性子ビーム | 44 | 素粒子物理学 | 1 | 2 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 5 | 3 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 4 | 3 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 19 | 21 | 3 |
| | | 生命科学 | 6 | 6 | 0 |
| | | 医療利用 | 2 | 2 | 0 |
| | | その他 | 7 | 6 | 4 |

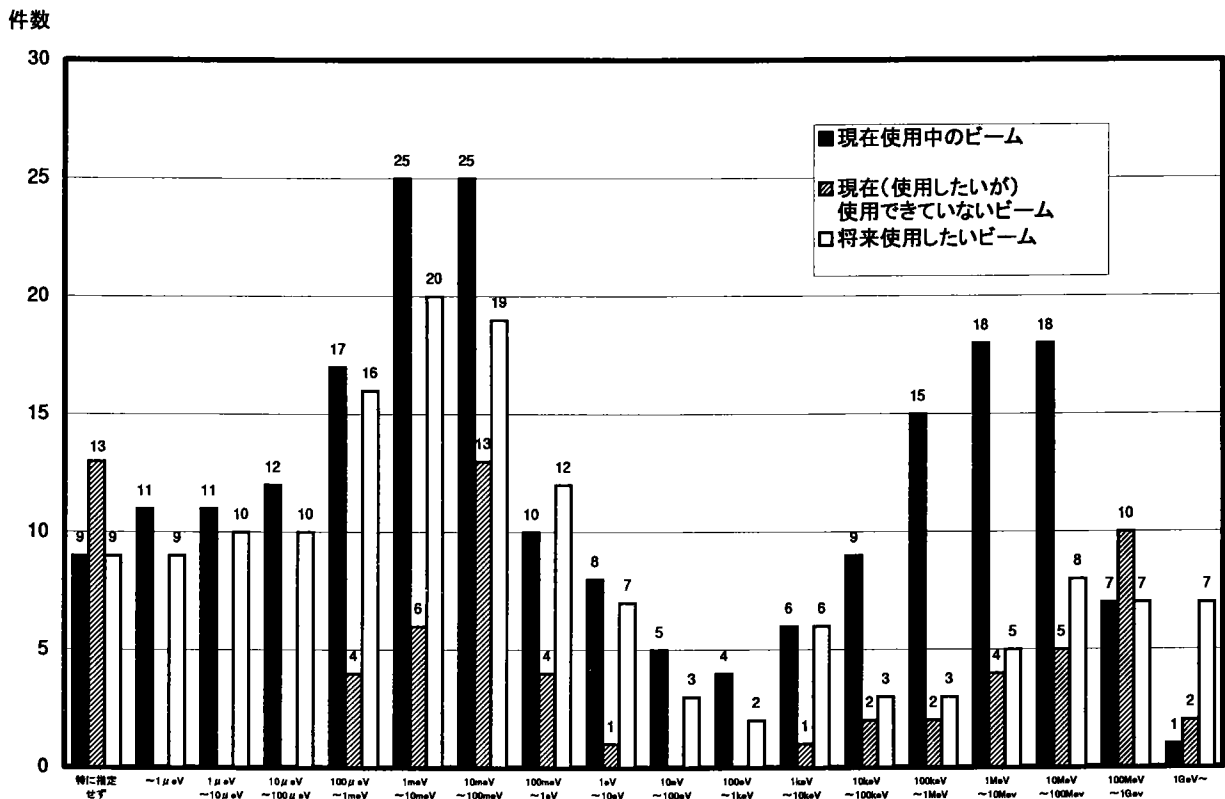
(1)エネルギー

中性子エネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表－Ⅲ－3－14）の結果が得られている。なお、表－Ⅲ－3－14 の合計件数を図示したものが図－Ⅲ－3－7である。

①、②および③のいずれにおいても、極めて低いエネルギーの中性子（冷中性子）から GeV 領域エネルギーの中性子までが使用（要望）されている。数 10meV 程度の熱中性子（通常は原子炉からの中性子を減速させて得られる）領域は、物質・材料科学分野が中心に、また、MeV を超える領域の中性子は原子核物理学やエネルギー科学、物質・材料科学、生命科学など広い分野で使用（要望）されている。

表一Ⅲ-3-14 中性子エネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|--------------------------|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|----|----|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 3 | 1 | 5 | 2 | 3 |
| ～ 1 μ eV | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 3 |
| 1 μ eV～10 μ eV | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 10 μ eV～100 μ eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 6 |
| 100 μ eV～1meV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 4 | 13 |
| 1meV～10meV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 4 | 16 |
| 10meV～100meV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 8 | 15 |
| 100meV～1eV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 2 | 10 |
| 1eV～10eV | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 |
| 10eV～100eV | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 100eV～1keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1keV～10keV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 10keV～100keV | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 100keV～1MeV | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1MeV～10MeV | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 5 | 1 | 1 |
| 10MeV～100MeV | 2 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 4 | 0 | 1 | 2 | 1 | 4 |
| 100MeV～1GeV | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 0 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 1GeV～ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 4 | 9 | 13 | 9 |
| ～ 1 μ eV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 4 | 11 | 0 | 9 |
| 1 μ eV～10 μ eV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 4 | 11 | 0 | 10 |
| 10 μ eV～100 μ eV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 4 | 12 | 0 | 10 |
| 100 μ eV～1meV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 3 | 17 | 4 | 16 |
| 1meV～10meV | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 3 | 25 | 6 | 20 |
| 10meV～100meV | 2 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 3 | 25 | 13 | 19 |
| 100meV～1eV | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 10 | 4 | 12 |
| 1eV～10eV | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 8 | 1 | 7 |
| 10eV～100eV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 | 0 | 3 |
| 100eV～1keV | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 | 0 | 2 |
| 1keV～10keV | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6 | 1 | 6 |
| 10keV～100keV | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 9 | 2 | 3 |
| 100keV～1MeV | 8 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 2 | 3 |
| 1MeV～10MeV | 5 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 18 | 4 | 5 |
| 10MeV～100MeV | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 | 2 | 18 | 5 | 8 |
| 100MeV～1GeV | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 7 | 10 | 7 |
| 1GeV～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 7 |



図－Ⅲ－3－7 中性子エネルギー領域毎の回答件数

(2)エネルギー分解能

①、②および③のいずれにおいても、0.05%～10%程度までのエネルギー分解能をもつ中性子が使用（要望）されているが、0.2%以下のものを使用（要望）する割合がやや高い。

（調査資料－76；図Q 2－185、図Q 2－193、図Q 2－201 参照）

(3)ビーム長短径

①、②および③のいずれにおいても、1mm～10cm のビーム径が最も多く使用（要望）されている。（調査資料－76；図Q 2－186、187、図Q 2－194、195、図Q 2－202、203 参照）

(4)平均ビーム強度(フラックス)

中性子ビームの強度を表すフラックス (neutrons/cm²/sec) について見てみると、①においては10⁸以下のものが多く使用されているが、③においては10⁸～10¹⁵のより高いフラックスのものへのニーズが高くなっている。

（調査資料－76；図Q 2－188、図Q 2－196、図Q 2－204 参照）

(5)ビーム時間構造の型

①に対して③においては、パルスビームへのニーズが相対的に高くなっている。これは、パルス中性子を用いた時間分解分析（動的解析）へのニーズが高くなっていることを示すものと考えられる。（調査資料－76；図Q 2－189、図Q 2－197、図Q 2－205 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バンチ数、バンチ幅(長)）については、調査資料－76（図Q 2－190，207 頁、図Q 2－198，214 頁、図Q 2－206，221 頁）に示す。

8 μ 粒子ビーム

μ 粒子ビーム使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－15 のとおりであり、①および②においては、エネルギー科学、素粒子物理学および物質・材料科学での使用（要望）が多い。③においては、素粒子物理学での要望が多い。これは、今後のエネルギーフロンティア研究におけるμ 粒子・反μ 粒子衝突実験への要望を示している。

表－Ⅲ－3－15 μ 粒子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態（件数） | |
|--------------------------------|------|------------------------|----|-------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中のμ 粒子ビーム | 14 | 素粒子物理学 | 3 | 3 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 6 | 6 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 4 | 4 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていないμ 粒子ビーム | 8 | 素粒子物理学 | 3 | 4 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 3 | 3 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 1 | 1 | 0 |
| ③将来使用したいμ 粒子ビーム | 23 | 素粒子物理学 | 14 | 17 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 3 | 2 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 3 | 4 | 1 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 0 |
| | | その他 | 1 | 1 | 0 |

(1)エネルギー

エネルギー科学や物質・材料科学において使用されているμ 粒子のエネルギーは、数 MeV～数 10MeV の低い範囲にある。また、将来に要望されるμ 粒子のエネルギーは、低いエネルギー領域から 100GeV を超える高いエネルギーまで幅広い領域に広がっている。

（調査資料－76；図Q 2－図Q 2－208、図Q 2－217、図Q 2－226 参照）

なお、エネルギー分解能、ビーム長短径、平均ビーム強度、規格化エミッタンス、ビーム時間構造の型およびビーム時間構造の詳細(ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バン

チ数、パンチ幅(長))については、調査資料－76（図Q 2－209～215, 231 頁、図Q 2－218～224, 238 頁、図Q 2－227～233, 245 頁）に示す。

9 中間子(π 中間子、K中間子)ビーム

中間子ビーム使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－16 のとおりであり、①、②および③のいずれでも素粒子物理学、原子核物理学での利用（要望）がほとんどである。将来的には中間子を要望する研究者は増加してゆくものと考えられる。

表－Ⅲ－3－16 中間子使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|-------------------------------|------|------------------------|----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の中間子ビーム | 18 | 素粒子物理学 | 7 | 6 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 10 | 14 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない中間子ビーム | 6 | 素粒子物理学 | 3 | 4 | 1 |
| | | 原子核物理学 | 2 | 2 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |
| ③将来使用したい中間子ビーム | 12 | 素粒子物理学 | 5 | 7 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 7 | 10 | 1 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |

(1)エネルギー

中間子エネルギーについては、①および②については、数 100MeV～数 GeV のものが使用（要望）されているが、③については、数 GeV 程度より高いものが要望されている。

（調査資料－76；図Q 2－235、図Q 2－243、 図Q 2－251 参照）

なお、エネルギー分解能、ビーム長短径、平均ビーム強度、規格化エミッタンス、ビーム時間構造の型およびビーム時間構造の詳細(ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内パンチ数、パンチ幅(長))については、調査資料－76（図Q 2－236～241, 255 頁、図Q 2－244～249, 262 頁、図Q 2－252～257, 269 頁）に示す。

10 反陽子ビーム

反陽子ビーム使用者の研究分野別分類は表Ⅲ-3-17のとおりであり、①、②および③のいずれでも素粒子物理学、原子核物理学での利用（要望）のみである。このビームは中間エネルギー領域の陽子ビームをターゲットに当てて生成させるものであり、現在の使用者は陽子・反陽子衝突実験に関わっているものがほとんどである。将来的には要望する研究者は増加してゆくものと考えられる。

表Ⅲ-3-17 反陽子ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態（件数） | |
|-------------------------------|------|------------------------|---|-------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の反陽子ビーム | 6 | 素粒子物理学 | 6 | 7 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない反陽子ビーム | 2 | 素粒子物理学 | 1 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |
| ③将来使用したい反陽子ビーム | 10 | 素粒子物理学 | 7 | 6 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 3 | 2 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 0 | 0 | 0 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |

(1) エネルギー

反陽子エネルギーについては、①においては、数 100GeV 程度を超える高エネルギーのものであるが、③については、数 10MeV から TeV 程度の高いものまで幅広い要望されている。

（調査資料-76；図 Q 2-259、図 Q 2-268、図 Q 2-277）

なお、エネルギー分解能、ビーム長短径、平均ビーム強度、規格化エミッタンス、ビーム時間構造の型およびビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅（長）、パルス内バンチ数、バンチ幅（長））については、調査資料-76（図 Q 2-260～266、279 頁、図 Q 2-269～275、286 頁、図 Q 2-278～284、293 頁）に示す。

11 不安定原子核ビーム

不安定原子核ビーム使用者の研究分野別分類は表－Ⅲ－3－18 のとおりであり、①、②および③のいずれでも原子核物理学での使用（要望）が多い。また、②においては、物質・材料科学で（使いたい）使えていない状況が見える。

表－Ⅲ－3－18 不安定原子核ビーム使用の研究分野別分類および使用形態

| | 回答者数 | 回答者の研究分野別人数 (重複回答有) | | ビーム使用形態 (件数) | |
|--------------------------------------|------|------------------------|----|--------------|----|
| | | | | 単独 | 複合 |
| ①現在使用中の不安定 原子核ビーム | 21 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 17 | 20 | 2 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 0 |
| | | その他 | 1 | 1 | 0 |
| ②現在（使用したいが） 使用できていない不安 定原子核ビーム | 19 | 素粒子物理学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 8 | 10 | 0 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 9 | 7 | 1 |
| | | 生命科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 0 |
| | | その他 | 1 | 1 | 0 |
| ③将来使用したい不安 定原子核ビーム | 19 | 素粒子物理学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 原子核物理学 | 14 | 15 | 3 |
| | | エネルギー科学 | 0 | 0 | 0 |
| | | 物質・材料科学 | 2 | 1 | 1 |
| | | 生命科学 | 1 | 1 | 0 |
| | | 医療利用 | 1 | 1 | 1 |
| | | その他 | 0 | 0 | 0 |

(1)エネルギー

不安定原子核ビームエネルギーの領域毎の回答件数に関しては、下表（表－Ⅲ－3－19）の結果が得られている。なお、表－Ⅲ－3－19 の合計件数を図示したものが図－Ⅲ－3－8である。

原子核物理学においては、低エネルギー領域（数 10MeV/u 程度まで）から中間エネルギー領域（数 10MeV/u～数 100MeV 程度）まで使用が主となされている。また、現時点で使用したい要望の出ている物質・材料科学分野では、主に低エネルギー領域のビーム使用が要望されている。

(2)エネルギー分解能

①においては、使用される不安定原子核ビームのエネルギー分解能は、1%前後のものが多く、②および③においては、0.1%より小さいエネルギー分解能をもつエネルギーのそろった不安定原子核ビームのニーズが相対的に高くなっている。

（調査資料－76；図Q 2－287、図Q 2－296、図Q 2－305 参照）

表Ⅲ-3-19 不安定原子核ビームエネルギー領域毎の研究分野別回答件数

| エネルギー範囲 | 素粒子物理学 | | | 原子核物理学 | | | エネルギー科学 | | | 物質・材料科学 | | |
|-----------------|--------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|---|---|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| (*) ~ 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| (*) 1~ 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| (*) 2~ 4 | 1 | 0 | 1 | 3 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| (*) 4~ 8 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| (*) 8~ 16 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| (*) 16~ 32 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| (*) 32~ 64 | 0 | 0 | 0 | 10 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| (*) 64~ 128 | 0 | 0 | 0 | 9 | 3 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (*) 128~ 256 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (*) 256~ 512 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (*) 512~ 1GeV/n | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1GeV/n~ 2GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2GeV/n~ 4GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4GeV/n~ 8GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8GeV/n~16GeV/n | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16GeV/n~ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー範囲 | 生命科学 | | | 医療利用 | | | その他 | | | 合計 | | |
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 特に指定せず | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| (*) ~ 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 4 | 4 |
| (*) 1~ 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 5 | 3 |
| (*) 2~ 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 6 | 5 |
| (*) 4~ 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 6 | 9 |
| (*) 8~ 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 7 | 5 |
| (*) 16~ 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 4 | 5 |
| (*) 32~ 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 3 | 3 |
| (*) 64~ 128 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 4 | 6 |
| (*) 128~ 256 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 8 |
| (*) 256~ 512 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 8 |
| (*) 512~ 1GeV/n | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 8 |
| 1GeV/n~ 2GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 2GeV/n~ 4GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4GeV/n~ 8GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8GeV/n~16GeV/n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 16GeV/n~ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

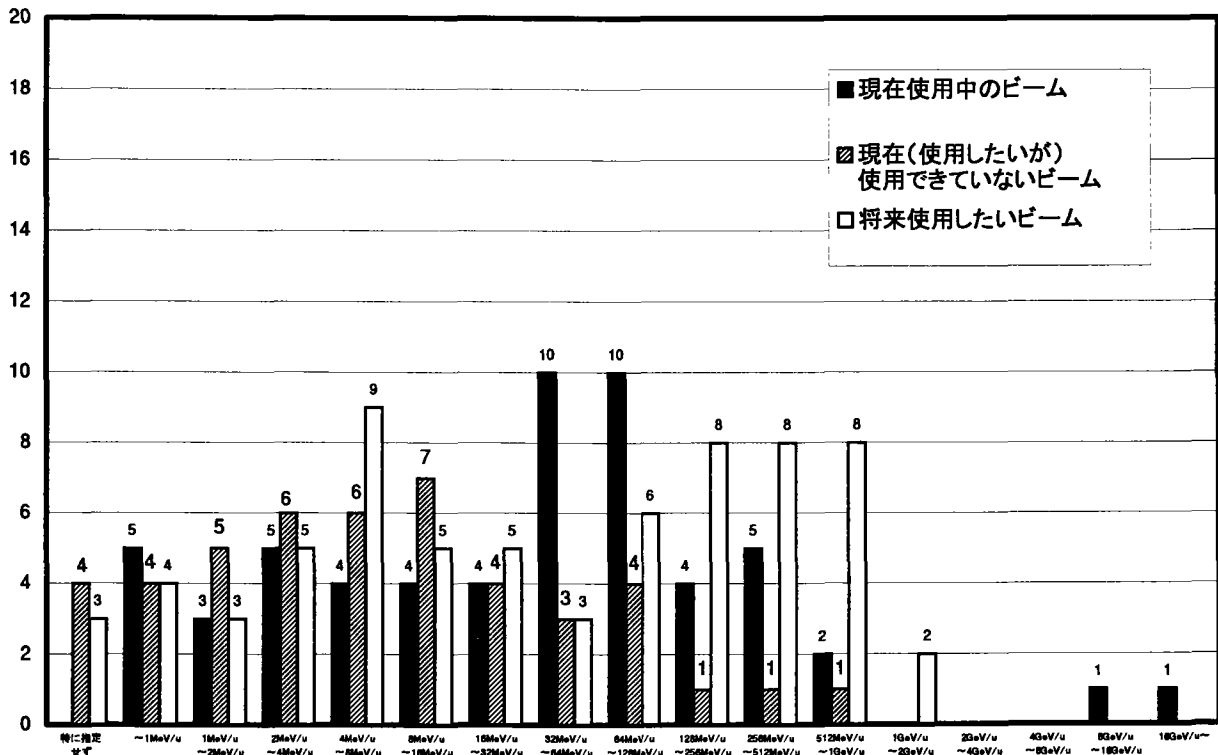
* 単位のない数値の単位は MeV/n

(3) ビーム長短径

①、②および③のいずれにおいても、1mm~1cm のビーム径が最も多く使用（要望）されている。

（調査資料-76；図Q2-288，289、図Q2-297，298、図Q2-306，307 参照）

件数



図Ⅲ-3-8 不安定原子核ビームエネルギー領域毎の回答件数

(4)平均ビーム強度

①における不安定原子核ビームの強度は、 6.2×10^6 ions/sec 以下（各イオンを1価の電荷をもつとすると、1 pA 以下）の平均ビーム強度の小さいビームが使用されている。これは不安定核の生成断面積が小さいことによるものである。②および③においては 6.2×10^{12} ions/sec（各イオンを1価の電荷をもつとすると1 μ A）程度までのより大きな平均ビーム強度が要望されている。（調査資料-76；図Q 2-290、図Q 2-299、図Q 2-308 参照）

(5)規格化エミッタンス

①においては、1 ~1000 π mm \cdot mrad の範囲のものが使用されているが、②および③においては 1 π mm \cdot mrad より値小さい、（運動量や空間密度の高く）質の良い不安定原子核ビームのニーズが高くなっている。（調査資料-76；図Q 2-291、図Q 2-300、図Q 2-309 参照）

(6)ビーム時間構造の型

他のビームと同様に、パルスビームのニーズが高くなっている。

（調査資料-76；図Q 2-292、図Q 2-301、図Q 2-310 参照）

なお、ビーム時間構造の詳細（ビーム継続時間、パルス繰り返し、パルス幅(長)、パルス内バンチ数、バンチ幅(長)）については、調査資料-76（図Q 2-293, 305 頁、図Q 2-302, 312 頁、図Q 2-311, 319 頁）に示す。

Ⅲ-4 加速器ビームニーズのまとめ

加速器科学分野は、加速器を誕生・発展させてきた原子核物理学、素粒子物理学（高エネルギー物理学）分野から、物質・材料科学、生命科学、医療利用などの分野に大きく拡大しており、ビームユーザーの絶対数として、物質・材料科学、生命科学、医療利用の分野のユーザーは原子核物理学、素粒子物理学（高エネルギー物理学）でのユーザーを大きく超えている。このような状況において、今後の加速器科学がビームに求めるものは、以下のようにまとめられる。

1 要望されるビームの種類の違い

加速器ビーム使用の現状においては、放射光、陽子ビーム、重イオンビーム、電子ビームの利用者が多いが、将来的には、中性子ビーム、（自由電子レーザーなど）コヒーレント光子ビーム、不安定核ビーム、 γ 粒子ビームなどへそのニーズが広がりを見せている。また、あまり明確には出ていないが、ビームの複合的な利用へのニーズもあるものと考えられる。

2 要望されるビーム仕様の多様化、高度化（高品質化）

加速器科学のすべての分野において、研究や利用の多様化、高度化を反映して、加速器ビームに求められる仕様（ビームのエネルギー、エネルギー分解能、径、強度、時間構造など）は、非常に多様で、かつ、より高品質をめざすものとなっている（以下の例）。

（高エネルギー物理学）

- ・フロンティアエネルギーエネルギーでの粒子・反粒子衝突実験のため、非常に高いエネルギーで、径を絞り込んだ、強度の高いビームが要求される

（原子核物理学）

- ・多様な（不安定な）二次粒子（不安定原子核、 γ 粒子、K中間子、反陽子など）をより多く生成させるため、高エネルギーで、強度の高い陽子、重イオンビームが要求される

（物質・材料科学）

- ・極めて短時間（ピコ(10^{-12})秒、フェムト(10^{-15})秒)に起こる反応を調べるため、超短パルス（パルス幅はピコ(10^{-12})秒、フェムト(10^{-15})秒程度)のビーム（放射光や電子ビーム）が要求される
- ・極めて小さな試料や極小領域への照射を行うため、極めて細いビーム（マイクロビーム）が要求される

（生命科学）

- ・細胞あるいは遺伝子部への照射のため、極めて細いビーム（マイクロビーム）が要求される
- ・細胞内での蛋白質などや薬物の機能、効果を調べる動的観察のため、パルスビーム（パルス放射光など）が要求される

(医療利用)

- ・治療照射をオンラインで監視しつつ行うための、PET核種を含んだ重粒子ビームが要求される
- ・画像診断用の放射光として、エネルギーの揃った（単色性の高い）硬X線が要求される。

IV 高周波加速器及びビーム冷却に関する 研究開発状況

IV 高周波加速器およびビーム冷却に関する研究開発状況

IV-1 高周波加速器に関する研究開発状況

低エネルギー領域においては静電加速器なども一般的に使われているが、中間エネルギーおよび高エネルギー領域で使用される加速器は、高周波（RF：マイクロ波）加速器が主たるものである。

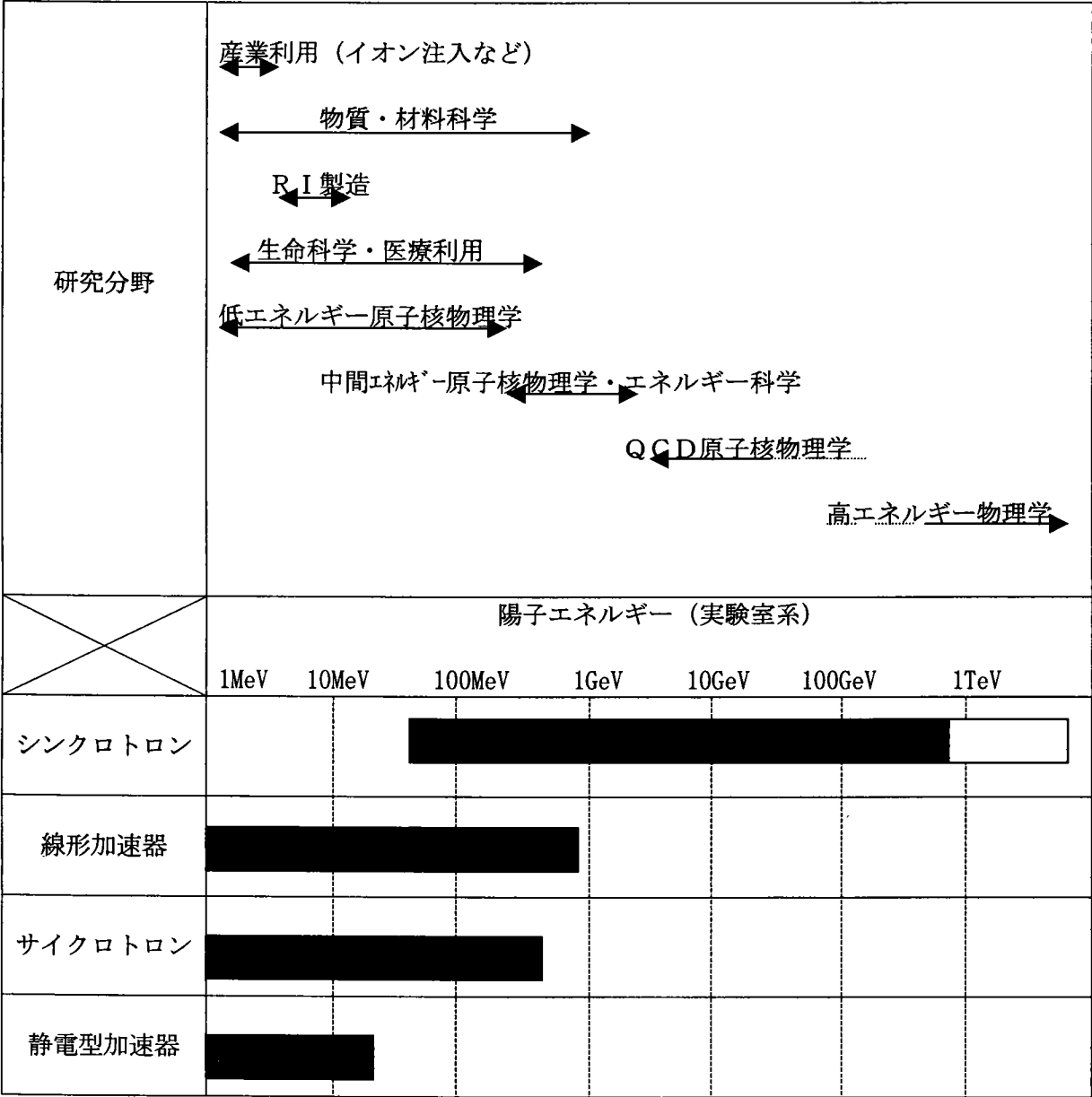
中間および高エネルギーを実現する高周波加速器は、シンクロトロン、線形加速器、サイクロトロンに大別できる。電子および陽子について、高周波加速器の種類毎に加速できるエネルギーの範囲および加速器科学の各分野での研究において主に使われるエネルギー領域との関係を大まかに示すと表-IV-1-1（電子）および表-IV-1-2（陽子）のようになる。

表-IV-1-1 電子エネルギー領域と研究分野および使用する加速器

| | | | | | | | |
|---------------------|---------------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| 研究分野 | 産業利用 | | | | | | |
| | 生命科学・医療利用 | | | | | | |
| | 物質・材料科学 | | | | | | |
| | 低エネルギー原子核物理学 | | | | | | |
| | 中間エネルギー原子核物理学 | | | | | | |
| | QCD原子核物理学 | | | | | | |
| | 高エネルギー物理学 | | | | | | |
| | 電子エネルギー（実験室系） | | | | | | |
| | 1MeV | 10MeV | 100MeV | 1GeV | 10GeV | 100GeV | 1TeV |
| | シンクロトロン | | | | | | |
| 線形加速器 | | | | | | | |
| サイクロトロン (マイクロトン) | | | | | | | |

(*) 上記（電子）で、シンクロトロンでは（実験室系で）約 100GeV 程度が現実的な限界とされており、それ以上のエネルギーまでの加速については線形加速器による衝突器（リニアコライダー）で実現されるものと考えられている。

表－Ⅳ－１－２ 陽子エネルギー領域と研究分野および使用する加速器



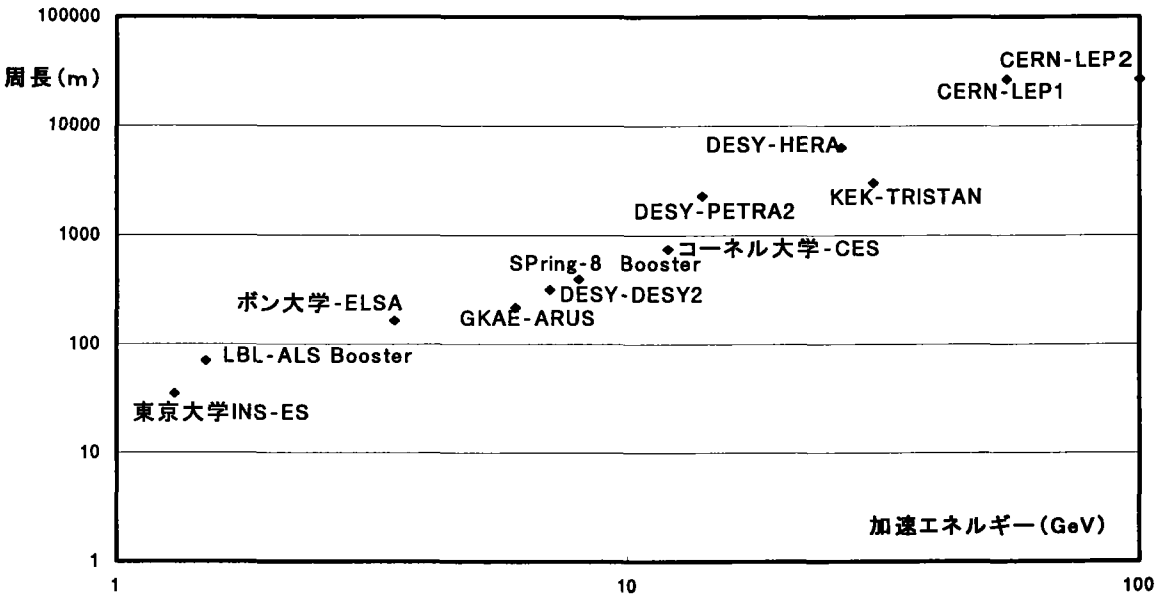
表－Ⅳ－１－１（電子）において、電子サイクロトロンはマイクロトロンと呼ばれるものである。また、電子についての、物質・材料科学における数 100MeV～数 GeV のエネルギー領域での利用は、直接的な利用ではなく放射光源としての利用が主である。

以下では、シンクロトロン、サイクロトロン、線形加速器について、現在の状況、技術課題および各加速技術の限界などを概観する。

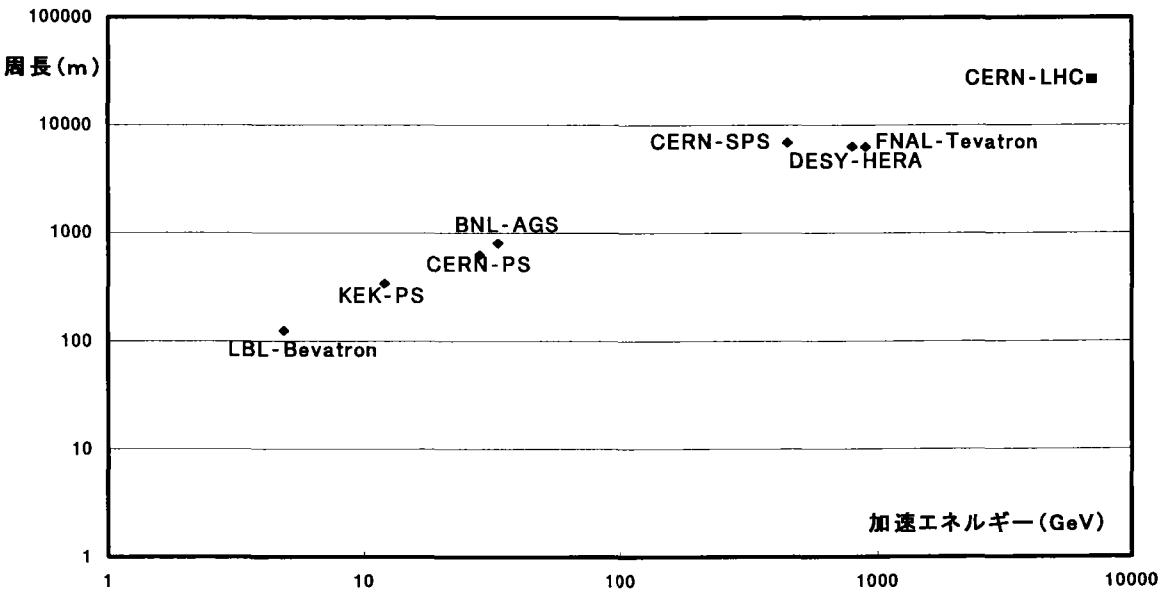
なお、本章で出てくる加速器の主たるものについては、中間エネルギーおよび高エネルギーのシンクロトロンについては参考文献[Ⅳ 1]、サイクロトロンについては参考文献[Ⅳ 2]、線形加速器については参考文献[Ⅳ 3]によっている。また、参考文献[Ⅳ 4]も使用している。

1 シンクロトロン

シンクロトロンは、荷電粒子（電子、陽子、重イオンなど）を周回軌道に保って加速するもので、偏向電磁石を軌道部分にのみリング状に配置し、軌道の一部におかれた高周波空洞で、周回する荷電粒子を高エネルギーまで加速してゆくものである。この加速方法では、荷電粒子の運動



図－Ⅳ－１－１ 電子シンクロトロンの大きさと加速エネルギー



図－Ⅳ－１－２ 陽子シンクロトロンの大きさと加速エネルギー

量増大に合わせて磁場を強くして周回半径を一定に留め、また、加速粒子の速度増加に合わせて加速空洞での高周波周波数を変調して荷電粒子を加速してゆく（参考資料1 参照）。この加速器の場合、

原理的にはエネルギーの上限はないが、高エネルギーになるほど周回軌道の大きさが大きくなる（図－IV－1－1 および図－IV－1－2 参照）。

シンクロトロンは、シンクロサイクロトロンより発展してきたもので、その電磁石系は、強集束原理に基づき、集束（F）電磁石と発散（D）電磁石が交互に配列され、画期的に小型化されたものである。なお、強集束原理とは、「集束電磁場と発散電磁場が配列されている場合、その合成系は荷電粒子に対して集束系となっている」という原理である。収束、発散電磁石および偏向（B）電磁石の配列はラティスと呼ばれている。

シンクロトロンは電子用のシンクロトロンと陽子およびイオンのような重い粒子の加速用のシンクロトロンに大別され、主な相違点は高周波加速機構である。前者では、入射エネルギーで電子速度がほぼ光速であるため、電子の回転周波数は加速とともにほとんど変わらないが、後者では粒子が重いので、入射エネルギーでは速度が遅く回転周波数が加速とともに変化するため、高周波電場の周波数を変調する必要がある。また電子シンクロトロンでは放射損失によりエネルギーを失うので、電子のエネルギー増大以外にこの損失を補う加速電圧が必要となる。この放射損失はエネルギーの4乗に比例して増加するので、高エネルギーの電子シンクロトロンでは大きな高周波電力が必要となる。

以下では、高エネルギー物理学、QCD原子核物理学、中間エネルギー原子核物理学や医療利用の分野で使用されているシンクロトロンについて簡単にまとめるとともにその技術課題などについて述べる。

（1）電子シンクロトロン

ここでは、電子シンクロトロンについては、高エネルギー物理学分野での衝突実験に用いられるものを「エネルギーフロンティア電子・陽電子（シンクロトロン）衝突器」、QCD原子核物理学や数 GeV の放射光リングの前段加速で用いられるものを「高エネルギー電子シンクロトロン」、放射光発生用の電子蓄積リングを「放射光電子蓄積リング/中間・高エネルギー電子シンクロトロン」と呼ぶこととする。

1) エネルギーフロンティア電子・陽電子(シンクロトロン)衝突器

これまでに電子・陽電子衝突実験において最高エネルギーを達成したものはCERNのLEP II（周長約 27km）であり、達成エネルギーは約 200GeV（重心系； 100GeV（実験室系）+ 100GeV（実験室系））である。しかし、重心系で 200GeV を大きく超える数 100GeV 程度のエネルギーフロンティア領域では、シンクロトロンについては、電子の質量が小さいことにより周回中に大きなシンクロトロン放射が発生し加速効率が悪くなる。シンクロトロン放射を少なくしようとすると、曲率半径を大きくする必要があり極めて大規模なものになってしまう。このため、更なるエネルギーフロンティアは、直線状の線形衝突器によりめざす方が合理的であると考えられている。これらのことから、衝突型電子シンクロトロンについては、高エネルギー化のための開発は一段落したものとされている。表－IV－1－3 には、世界最高エネルギーを保持するCERNのLEP IIおよび 1986 年～1989 年において世界最高エネルギーを保持した高エネルギー物理学研究所（現、高エネルギー加速器研究機構；KEK）のTRISTANの加速器群構成を示す[IV 1]。この表からわかるように、高エネルギーを達成するために多段化（カスケード方式）がとられている。一般に、

表-IV-1-3 エネルギーフロンティア電子・陽電子衝突器の構成(例)

| | TRISTAN (KEK) (電子 (32GeV)・陽電子 (32GeV)) | LEP II (CERN) (電子 (100GeV)・陽電子 (100GeV)) |
|------|---|---|
| イオン源 | 電子銃 (200keV) | 電子銃 (80keV) |
| 初期加速 | (Injector : 43MeV) KEK Photon Factory 2.5GeV Linac : 線形加速器、長さ約 415m、高周波 2,856MHz (Sバンド) (2.5GeV、50 μ A) | (Injector : 4MeV) LEP Injector Linac (LIL) : 線形加速器、長さ 101m、高周波 2,998.6MHz (Sバンド) (0.5GeV、60mA) Electron Positron Accumulator : (0.65GeV、25mA) |
| 前段加速 | TRISTAN Accumulation Ring : シンクロトロン、直径約 120m、高周波 508.58MHz (8.0GeV、25mA；陽電子も貯蔵) | CPS (CERN Proton Synchrotron) : シンクロトロン、直径約 200m、高周波 2.8 ~9.55MHz (114-200MHz) (3.5GeV) SPS (Super Proton Synchrotron) : シンクロトロン、直径約 2,200m、高周波 199.4~200.4MHz (20GeV) |
| 主加速 | TRISTAN Main Ring : シンクロトロン、直径約 960m、高周波 508.58MHz (32GeV、7mA) 筑波実験室など4カ所の測定点 | LEP II (Large Electron Positron Collider phase II) : シンクロトロン、直径約 8,490m、高周波 352.309MHz (100GeV、3mA) OPAL など4カ所の測定点 |

高エネルギー化をめざす場合、カスケード方式加速器群構成をとっている。なお、TRISTAN 開発においては、比較的小さい軌道半径の制約上、効率的な加速を行うための高周波加速空洞の一部超伝導化、シンクロトロン放射による大きなエネルギー損失を補うための高い高周波電場をもつ加速空洞の多数配置によるビームの不安定性などの困難があったが、これらはいずれも克服された。

これまでに建設された衝突型電子シンクロトロンの今後の利用の一つとしては、高エネルギー電子・陽電子衝突による様々な現象の精密実験がある。一般に高エネルギーでの衝突現象は衝突確率が極めて小さいことから、求める衝突現象を高い頻度で発生させるため、衝突型シンクロトロンではビームの蓄積を行う(図-IV-1-3 参照)。注目する現象の発生確率が非常に低い場合には、大きな電流値の電子ビーム蓄積を行う必要があり、大電流のビーム蓄積にともなう技術課題が発生する。この課題の一つとして、前の電子バンチが引き起こす電磁場により続くバンチの振動が大きくなることが連鎖する結合バンチ不安定性を抑え、蓄積する電子ビーム強度をできる限り増大させることがある。また、ビーム形状を制御し、低い発生頻度の現象も精度良く検証できるようにすることが挙げられる。

TRISTAN での実験は 1995 年に終了し、現在、TRISTAN に用いられたトンネル内には B ファクトリー (KEK-B) の電子 (8GeV)、陽電子 (3.5GeV) 用のリングが並行して置かれ、大強度(放射光電子蓄積リング電子で 1 A、陽電子で 2.9 A) で、細く扁平な(高さ 3 μ m×幅 300 μ m) ルミノシテ

イの高いビームによる電子・陽電子衝突実験が行われ、B中間子の生成・崩壊によるCP非保存現象の探索が行われている。

2)高エネルギー電子シンクロトロン

数 GeV～数 10 GeV 程度の電子エネルギーを有する高エネルギー電子シンクロトロン（表－Ⅳ－1－4 参照）は、主としてQCD原子核物理研究に用いられているが、シンクロトロンの基本技術は確立されたものと考えられている。このエネルギーの電子ビームを発生させる高エネルギー電子シンクロトロンは、エネルギーフロンティア用カスケード方式加速器群の途中段階に相当するが、規模は大きなものとなっている。

なお、標準理論のQCDに基づき原子核を理解しようとするQCD原子核物理研究は、今後大きく発展する学術研究分野と考えられており、この分野では、原子核内あるいは核子内のクォークの運動を探れるエネルギー（数 GeV～数 10 GeV 程度）をもつ各種ビームが必要となる。

表－Ⅳ－1－4 世界の高エネルギー電子シンクロトロン(一部中間エネルギー含む)

| 加速器 | 研究機関 | 最大エネルギー (GeV) | 規模 | ビーム強度 (e ⁻ /sec) | 備 考 |
|---------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------|
| CESR Booster | C U (コネクト大学) | 4.5～6 | 平均直径： 240m | 2 ×10 ¹² | 放射光リング への入射 |
| ALS Booster | L B L | 1.5 | 周 長： 70m | 2 ×10 ¹² | 放射光リング への入射 |
| INS-ES | 東京大学 | 1.3 | 平均直径： 11m | 2 ×10 ¹² | 終了 |
| TRISTAN AR | K E K | 8 | 平均直径： 120m | 2 ×10 ¹¹ (0.5 min) | |
| SPring-8 Booster | 高輝度光科学研究 センター (JASRI) | 8 | 周 長： 396m | | 放射光リング への入射 |
| ELSA | ボン大学 物理研究所 | 2～3.5 | 平均直径： 52.3m | | |
| DESY II | D E S Y | 7 | 平均直径： 101m | 2.5×10 ¹⁰ | PETRA II への入射 |
| PETRA II | | 14 | 平均直径： 733m | 2 ×10 ¹¹ (5 min) | HERA への入射 |
| HERA | | 30 | 平均直径：2017m | | e ⁻ + p 衝突実験用 |
| ARUS | G K A E エレバン物理研究所 | 6 | 平均直径： 69m | 5 ×10 ¹² | |

3)放射光電子蓄積リング／中間・高エネルギー電子シンクロトロン

放射光電子蓄積リングは、電子をリング内で周回させ偏向の際に放射光を発生させるもので、数 100mA 程度の大きな電流値の電子ビームを蓄積させるものである。なお、放射による電子のエネルギーは、リングの一部におかれた高周波空洞で補う。電子エネルギーは数 100MeV～数 GeV のものである。放射光電子蓄積リングについても、電子シンクロトロンと同様に基本的技術は確立

されたものであると考えられている。

シンクロトロン放射光は、加速度を持って運動する荷電粒子が電磁波を出す現象として理論的に古くから知られていたが、1947年電子シンクロトロンから初めて観察され、その発見の経緯より電子シンクロトロンからの放射光は、「シンクロトロン放射光」と呼ばれている（通常は単に、「放射光」とも呼ばれる）。放射光は最近では物質・材料科学や生命科学研究などで広く使われるようになってきているが、これは基礎物理学研究用の電子シンクロトロンの進展がもたらした大きな副産物といえる。

当初のシンクロトロン放射光の利用は、素粒子や原子核研究用の電子シンクロトロンに寄生する（あるいは共生する）形で行われてきた（このような施設を、第1世代放射光施設という）。1970年代後半から世界の各地で放射光発生用の専用電子蓄積リングをもつ放射光専用施設（これを第2世代の放射光施設という）が建設され、放射光の幅広い利用が進展した。更に、1990年代に入り、電子の周回軌道中の直線部に交代磁場を持ったウィグラーやアンジュレータ（これらは、挿入光源と呼ばれる）を設けるとともに、周回する電子ビームのエミッタンスを極めて低くし（運動量のばらつきを極めて小さくし）、輝度および指向性の格段に高い放射光を発生させる放射光専用施設（これを、第3世代放射光施設という）が建設され、高度な放射光の利用が進展してきている。

放射光リングに関する基本的技術は確立されたものであると考えられているが、大型放射光施設のように非常に多数のユーザーが多様な研究を行っている場合、安定したビーム供給を行うことはそれらの多様な研究を進展、促進させる意味で非常に重要な課題であり、安定運転のための様々な技術開発、改良が続けられる必要がある。

表-IV-1-5および表-IV-1-6に、日本および世界の主要な放射光施設をまとめる[IV5]～[IV26][IV53]。また、衝突型電子（陽電子）蓄積リングおよび放射光電子蓄積リングの電子エネルギーと蓄積電流の関係を図-IV-1-3に、更に、日本国内の放射光電子蓄積リングのエネルギーと大きさの関係を図-IV-1-4に示す。

シンクロトロン放射により放出される光子のエネルギーは、電子のエネルギーが高いほど、また、電子を偏向させる曲率半径が小さいほど高い。電子エネルギーおよび偏向曲率半径が定められた場合、その放射光（連続スペクトル光）で最も強度の大きい部分の光子のエネルギーに関係するものとして臨界光子エネルギーがある。臨界光子エネルギーは蓄積リングから放射される光子群を代表するエネルギーと見なせる。日本における放射光施設について、臨界光子エネルギーと放射光電子蓄積リングの大きさ（周長）の関係を示したのが図-IV-1-5である。

軟X線領域（数keVより小さいエネルギーの光子）の放射光リングについては、立命館大学（1996年）および広島大学（1998年）に設置されたものは、マイクロトロンを入射器として用いる方式のもので、偏向電磁石の磁場を強くしており、それまでのものに比べて格段に小型化されたものである。特に、立命館大学の放射光電子蓄積リングは、超伝導偏向電磁石を用いて磁場強度を高めることによりそれまでのものよりも非常に小型のものである。

数keVよりエネルギーの高い光子（硬X線）を発生させるものについては、シンクロトロン放射光リングで大規模のものが必要である。（178頁に続く）

表Ⅳ-1-5 日本の放射光加速器施設

| 研究機関 | 加速器 名称 | 稼働 開始年 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | 蓄積 ビーム電流 (mA) | 臨界光子 エネルギー (keV) (*) | ビーム エミッタース-H (nmrad) | ビームライン | 備 考 |
|---------------------------|----------------------------|----------------|--|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 東京大学 物性研究所 | SOR-RING | 1975 | 線形加速器(15MeV) +シンクロトロン INS-ES(周長 35m, 0.3GeV) +蓄積リング(周長約 17m, 0.4GeV) | 0.4 | 120 | (0.13) | ~300 | 5 | 1997 年 停止 |
| | 高輝度光源 計画 | | +蓄積リング(周長 250m, 1.6GeV) | 1.0-1.6 | | 2.973 (1.6GeV) | 0.76-5.62 | 挿入光源 | 計画中 |
| 電子技術 総合研究所 | TERAS | 1981 | 線形加速器(長さ約 80m, 0.5GeV) +蓄積リング(0.75GeV) | 0.75 | 500 | (0.32) | 400 | | |
| 高エネルギー加速器 研究機構 | PF (Photon Factory) | 1982 (1997) | 線形加速器(長さ約 400m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長 187m, 2.5GeV) | 2.5 0.7-3.0 | 400 | (4.0) | 36 | 21 (挿入光源 6) | 1997 年 性能向上 終了 |
| | PF-AR (Advance Ring) | 1989 (1997) | 線形加速器(長さ約 400m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長 377m, 6.5GeV) | 6.5 | 40 | 26.1 | 293 | 4 (挿入光源 2) | |
| 岡崎国立共同 研究機構 分子科学研究所 | UVSOR | 1984 | 線形加速器(15MeV) +シンクロトロン(周長約 26.6m, 0.6GeV) +蓄積リング(周長 53.2m, 0.75GeV) | 0.75 | 50-200 | 0.425 | 115 | 20+1 (挿入光源 3) | |
| 立命館大学 SR センター | | 1996 | マイクロトロン(150MeV) +蓄積リング(周長約 3m, 0.6GeV) | 0.575 | 300 | 0.82 | | 14 | 超伝導電 磁石使用 |
| 高輝度光科学 研究センター | SPring-8 | 1997 | 線形加速器(長さ約 140m, 1GeV) +ブースターシンクロトロン(周長 396m, 8GeV) +蓄積リング(周長 1,436m, 8GeV) | 8.0 | 100 | 28.9 | 4.8 | max61+1 (挿入光源 (max38)) | |
| 広島大学 放射 光科学研究センター | | 1998 | マイクロトロン(150MeV) +蓄積リング(周長約 22m, 0.7GeV) | 0.7 | 200 | 0.87 | | 13 (挿入光源 2) | |
| 姫路工業大学 | ニュースパル | 1998 | 線形加速器(長さ約 140m, 1GeV) (Spring-8 の入射線形加速器) +蓄積リング(周長 119m, 1.5GeV) | 0.5-1.5 | (目)500 | 2.33 | | 8 (max13) (挿入光源 4) | |
| 東北大学 原子核理学 研究施設 | | (1998) | 線形加速器(長さ約 52m, 0.2GeV) +ブースターリング(周長 49.8m, 1.2 GeV) {+蓄積リング(1.5GeV)未} | 1.5 | | | | | ブースターリ ング 1998 年完成 |

(次頁に続く)

(前頁より続く)

表－Ⅳ－１－５ 日本の放射光加速器施設

| 研究機関 | 加速器 名称 | 稼働 開始年 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | 蓄積 ビーム電流 (mA) | 臨界光子 エネルギー (keV) (*) | ビーム エミッタンス-H (nmrad) | ビームライン | 備 考 |
|------------------------|-----------|-----------|--|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|-----|
| 京都大学 化学研究所 | KSR | 2000 | 線形加速器(長さ約 10m, 100MeV) + 蓄積リング(周長約 26m, 0.3GeV) | 0.3 | 60 (設計値 100) | 0.07 | | | |
| 佐賀県シンクロtron 光応用研究施設 | | | 線形加速器(250MeV) + 蓄積リング(周長約 70m, 1.4GeV) | 1.0-1.4 | 300 | | 10-12 | 16 (挿入光源 6) | 計画中 |

(*) 臨界光子エネルギーのうち、() で示されているものについては、参考文献[IV d]による

表－Ⅳ－１－６ 世界の放射光加速器施設

| 研究機関 | 加速器 名称 | 稼働 開始年 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | 蓄積 ビーム電流 (mA) | 臨界光子 エネルギー (keV) (*) | ビーム エミッタンス-H (nmrad) | ビームライン | 備 考 |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|--|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|
| スタンフォード線形加 速器センター(SLAC) (USA) | SPEAR/SSRL | 1972 | 線形加速器 + プラスターシンクロtron(3GeV) + 蓄積リング(直径約 80m, 3GeV) | 3 | 100 | | 130-450 | 25 ports (挿入光源有) | |
| コーネル大学 (USA) | CHESS | 1980 (1989) | 線形加速器(長さ約 30m, ~0.3 GeV) + シンクロtron(周長 768m- α , 5.3GeV) + 蓄積リング(周長 768m, 5.3GeV) | 5.3 | 200 | | 50-100 | 6 | CESR を 使った放 射光施設 |
| ダラムハリー研究所 (イギリス) | SRS | 1980 | 線形加速器 + プラスターシンクロtron(0.6GeV) + 蓄積リング(周長 96m, 2GeV) | 2.0 | 350-500 | 3.2 | 104-258 | 16 ports + 挿入光源 3 | |
| ウインソコンシン大学 (USA) | Aladdin | 1982 | マイクロtron(109MeV) + 蓄積リング(周長 89m, 1.0GeV) | 1.0 | 190 | 1.069 | 108 | | |
| ブルックヘブン国立 研究所(BNL) (USA) | NSLS VUV- RING | 1982 | 線形加速器(120MeV) + プラスターシンクロtron (周長 28.35m, 0.75GeV) + 蓄積リング(周長 51m, 0.8GeV) | 0.8 | 850 | 0.622 | 162 | | |
| | NSLS X-RAY RING | 1985 | 線形加速器(120MeV) + プラスターシンクロtron (周長 28.35m, 0.75GeV) + 蓄積リング(周長 170m, 2.5GeV) | 2.5 | 300 | 5.6 | 100 | | |

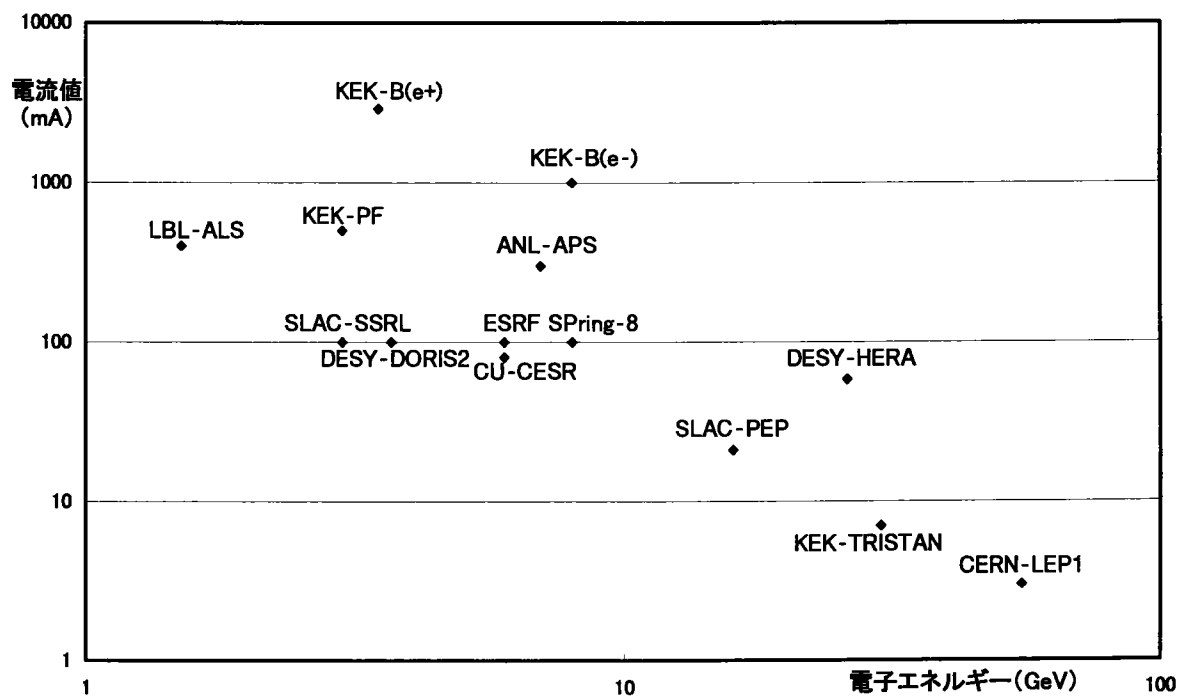
(次頁に続く)

(前頁より続く)

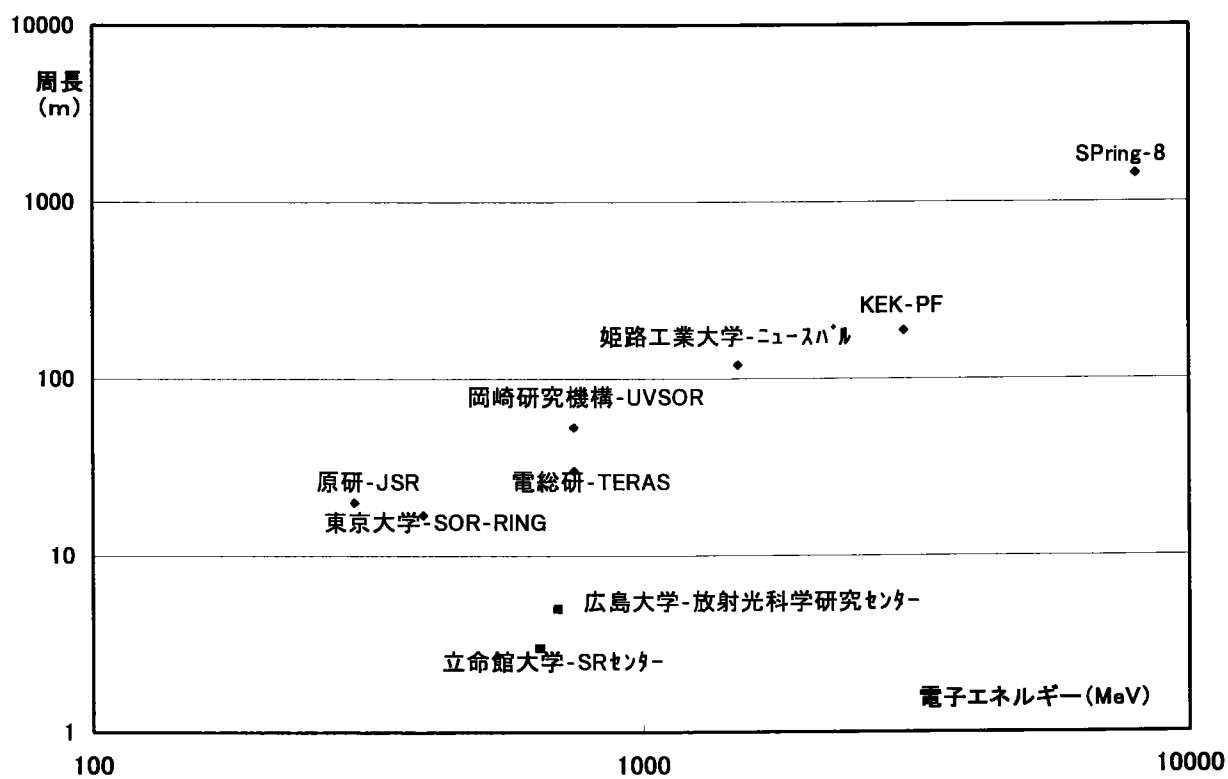
表-IV-1-6 世界の放射光加速器施設

| 研究機関 | 加速器 名称 | 稼働 開始年 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | 蓄積 ビーム電流 (mA) | 臨界光子 エネルギー (keV) (*) | ビーム エミッタンス-H (nmrad) | ビームライン | 備 考 |
|---|-----------|-----------|---|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-----|
| LURE (フランス) | Super-ACO | 1987 | 線形加速器(長さ約 130m, 1GeV) +蓄積リング(周長 72m, 0.8GeV) | 0.8 | 200-400 | 0.67 | 35 | | |
| | DCI | | 線形加速器(長さ約 130m, 1GeV) +蓄積リング(周長 94.6m, 1.85GeV) | 1.85 | 300 | 3.7 | 1,600 | | |
| BSRL (中国) | BSRF | 1991 | 線形加速器(長さ約 202m, -1.8GeV) +蓄積リング(1.6-2.8GeV) | 1.6-2.2 | 20-100 | 2.28 (2.2GeV) | 76 | 7 (挿入光源予定) | |
| ドイツ電子シンクロ トロン研究所(DESY/ HASYLAB) (ドイツ) | DORIS III | 1991 | 線形加速器(200MeV(e-), 400MeV(e+)) +DESY II (直径 101m, 4.45GeV) +蓄積リング(周長 289.2m, 4.5GeV) | 4.45 | 120 | 16.04 | 404 | 22 (挿入光源 3) | |
| SRRC (台湾) | TLS | 1993 | 線形加速器(50MeV) +ブースターシンクロトロン(72m, 1.3GeV) +蓄積リング(周長 120m, 1.5GeV) | 1.5 | 240 | 2.14 | 19 | (40 計画) | |
| ローレンス・バークレイ 国立研究所(LBL) (USA) | ALS | 1993 | 線形加速器(長さ約 5m, 50MeV) +ブースターシンクロトロン(周長 70m, 1.5GeV) +蓄積リング(周長約 197m, -1.9GeV) | 1.5 1.9 | 400 | (3.11) | 4 6 | 27(→80) (挿入光源 10) | |
| POSTECH (韓国) | PLS | 1994 | 線形加速器(150m, 2GeV) +蓄積リング(周長 280.56m, 2-2.5GeV) | 2.0 (2.5) | 400 (250) | (2.79) | 13 | (32 計画) | |
| E U (フランス) | ESRF | 1994 | 線形加速器(200MeV) +ブースターシンクロトロン(6GeV) +蓄積リング(周長 844m, 6GeV) | 6.0 | 100 | (19.0) | 6.3 | 44+2 (挿入光源 29) | |
| アルゴン国立研究 所(ANL) (USA) | APS | 1996 | 線形加速器(0.2GeV) +ブースターシンクロトロン(周長 368m, 7GeV) +蓄積リング(周長 1,104m, 7GeV) | 7.0 | 100 | 19.51 | 8.1 | 32+9 (挿入光源 20) | |

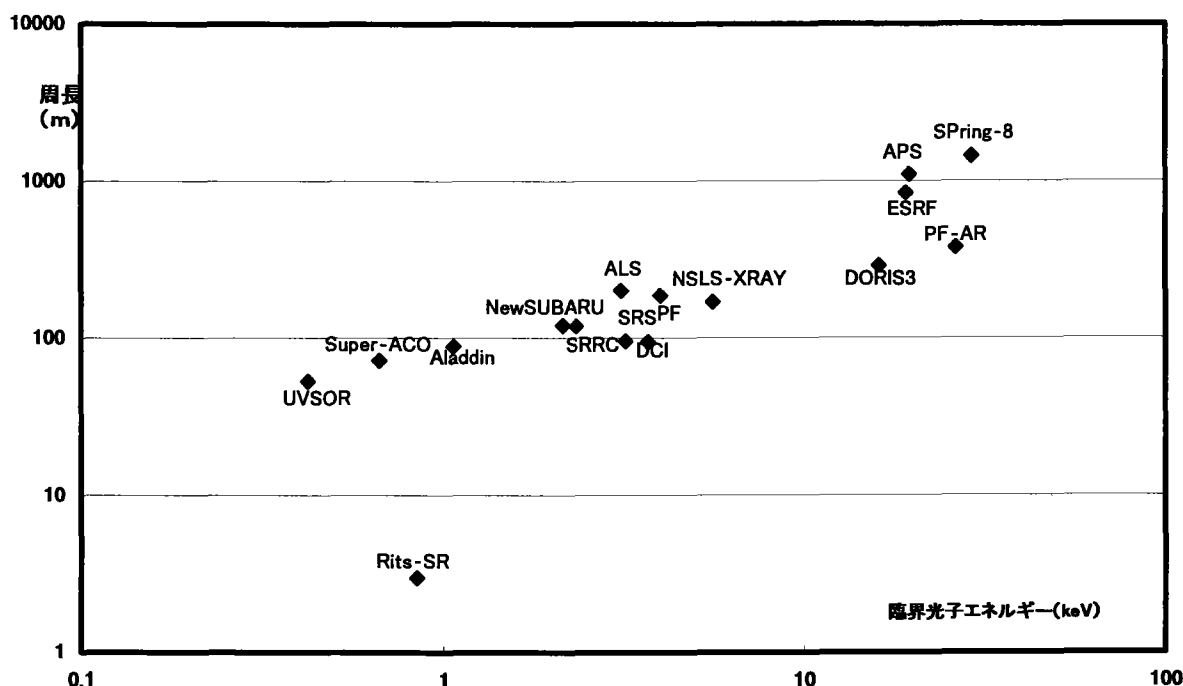
(*)臨界光子エネルギーのうち、() で示されているものについては、参考文献[IV d]による



図－Ⅳ－１－３ 電子蓄積リングの電子エネルギーと蓄積電流



図－Ⅳ－１－４ 国内の放射光電子蓄積リングの電子エネルギーと大きさ



図－Ⅳ－１－５ 臨界光子エネルギーとシンクロトロンリング周長

近年、生命科学への放射光利用が進展してきており、特に、非常に多様な蛋白質の構造解析などへ普及が広がってきている。蛋白質の構造解析においては、数 keV～数 10keV のエネルギーを有した放射光（硬 X 線）が主に用いられており、現在のところは、高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリー（KEK-PF）や SPring-8 など限られた施設でのみ利用が可能である。生命科学は、今後大きく発展すると考えられている研究分野であり、その研究ツールとしての放射光発生装置についてもそれに対応した、小型のものが日本各地に普及展開が可能なのが求められている。

4) 電子シンクロトロン技術での硬 X 線放射光源小型化の限界

6 頁に示した新しい小型加速器の目安として、放射光については、光子エネルギーとして 30～100keV の、硬 X 線を発生できるものとした。このような硬 X 線を発生させる電子シンクロトロンリングの規模は、常伝導電磁石を用いる場合は周長 100m を超えるものとなる。この他に入射器（線形加速器など）が必要となり、目安の規模の数倍程度のかかなり大規模のものとなる。一方、立命館大学で採用された超伝導電磁石を用いる蓄積リングは、600MeV (0.6GeV) の電子ビームを周長 3m という小型のもので達成している。超伝導電磁石の場合は、電子エネルギーを数 GeV に上げると、周長は数 10m 程度に収まるものと考えられるが、超伝導電磁石冷却系などもあり、その規模は目安の 2～3 倍以上になるものと思われる。このようなことから、確立された電子シンクロトロン技術では、目安規模の放射光源を構成することは、事実上困難である。

放射光装置の小型化については、低いエネルギーの電子ビームとレーザー光との逆コンプトン散乱（逆トムソン散乱）を用いる方法などが考えられており、これらについては後に述べる。

(2)陽子シンクロトロン

1)エネルギーフロンティア陽子・(反)陽子(シンクロトロン)衝突器

今後のエネルギーフロンティア衝突器としてのシンクロトロンは、電子・陽電子加速については非効率的であると考えられているが、陽子・(反)陽子加速についてはシンクロトロン放射の問題はなく、エネルギーフロンティア領域では、陽子・(反)陽子(シンクロトロン)衝突器が不可欠であると考えられている。CERNにおいては、周長約27kmの電子・陽電子衝突器LEPⅡ用のトンネル内に、陽子加速シンクロトロン衝突器(LHC)が建設される予定である。

シンクロトロン放射の少ない陽子に対しては、数10TeVを超える領域まで加速できるものと考えられているがその規模は非常に大きなものとなる。高エネルギー物理学でのエネルギーフロンティアを目指す衝突器に求められる要件は、以下のようにまとめられた。

- a. エネルギーフロンティアでの実験が可能なエネルギーをもつ粒子ビームを発生させられること
- b. 粒子ビームどおしの衝突で目的とする現象が高い頻度で発生するビーム衝突特性(大きなルミノシティ; 大きなビーム強度、小さなエミッタンス)を有すること

エネルギーフロンティア陽子・(反)陽子衝突型シンクロトロンを成立させるためには、a.の要件を満たしつつ規模を現実的な範囲に収めるための方策や技術開発、また、b.の要件を満足させるための技術開発が求められる。これらを以下に述べる。

・高エネルギー化のための多段化(カスケード方式)

エネルギーフロンティアをめざす陽子・(反)陽子衝突器は、主加速器としてのシンクロトロン(貯蔵リングを兼ねる)の前段にいくつかの加速器を伴う構成になっており、全体として加速器群を構成している。これはカスケード方式と呼ばれるもので、主加速器のシンクロトロンにビームを入射させる前に、初期加速後のビームをシンクロトロンなどで何段かに分けて、カスケード的に加速するものである。この方式は、ビーム強度を大きくできること、加速途中でのビームを他の研究に利用できること、また、それまでに建設された加速器を有効に使いつつ高いエネルギーを目指せることなど、の利点から必然的に採用されているものである。表Ⅳ-1-7においては、FNALのTevatronおよびCERNのLHCに関する加速器群の構成を示している[Ⅳ-1]。この表よりわかるように、いずれも、イオン源から始まり、初期加速として2段、前段加速を2～3段行った後に、主加速シンクロトロンへ入射させ衝突させる構成となっている。

現在の(および近い将来における)技術においては、実験室系で1TeV～数TeVのエネルギー領域の陽子ビームを得るフロンティアマシーンについては、上に述べたような高周波加速によるシンクロトロンを連結させたカスケード方式の加速器群を用いる方法以外にはないと考えられている。

表－Ⅳ－１－７ エネルギーフロンティア陽子・（反）陽子衝突器の構成

| | Tevatron (FNAL) (陽子 (900GeV)・反陽子 (900GeV)) | LHC (CERN) (*) (陽子 (8 TeV)・陽子 (8 TeV)) |
|----------------|--|--|
| イオン源 | Magnetron H ⁺ Source (18keV、60mA) | Duoplasmatron (400mA) |
| 初期加速 | コッククロフト・ワルトン型加速器 (750keV、60-70mA) | RFQ 型加速器 (750keV、165mA) |
| | Fermilab 200MeV Proton Linac ：線形加速器、長さ約 145m (200MeV、35mA) | CERN 50MeV Proton Linac ：線形加速器、長さ約 34m、高周波 202.56MHz (50MeV、140mA) |
| 前段加速 | Fermilab Booster ：シンクロトロン、直径約 151m、高周波 30.3 ～52.8MHz (8 GeV、 2.5×10^{12} protons/pulse × 15 pulses/sec) | CPSB (CERN Proton Synchrotron Booster)：シンクロトロン、直径約 50m、高 周波 2.95/5.90～8.4/16.8MHz (1 GeV、 3×10^{13} protons/pulse × 1.25 pulses/sec) |
| | Antiproton Accumulator ：シンクロトロン、直径約 477m、高周波 52.812～52.822MHz (8 GeV、0.002mA) | |
| | Fermilab Main Ring (終了) ：シンクロトロン、直径約 2,000m、高周波 52.8～53.1MHz (150GeV) (下の Main Injector に代わる) Main Injector (2000 年稼働開始) ：シンクロトロン、周長約 3,320m、高周波 52.8～53.1MHz (120-150GeV、 3×10^{13} protons) | CPS (CERN Proton Synchrotron) ：シンクロトロン、直径約 200m、高周波 2.8 ～9.55MHz (26GeV、 2×10^{13} protons/pulse × 0.5 pulses/sec、) SPS (Super Proton Synchrotron) ：シンクロトロン、直径約 2,200m、高周波 199.4～200.4MHz (450GeV、 3.3×10^{13} protons/pulse ×0.1 pulses/sec) |
| 主加速 (貯蔵リング) | Tevatron ：シンクロトロン (超伝導電磁石)、直径約 2,000m、高周波 53.1MHz (900GeV) | LHC (Large Hadron Collider) ：シンクロトロン (超伝導電磁石)、直径約 8,490m、高周波 400.8MHz (8,000GeV、865mA) |

(*)LHC (CERN) については、現在は、陽子 (7 TeV)・陽子 (7 TeV) の衝突器計画となっている。

・偏向磁場強度の増強(電磁石の超伝導化など)

これらのシンクロトロンは、偏向電磁石を用いて陽子の方向を曲げ、周回させながら高周波加速空洞を通過する度に少しずつ加速してゆくものである。なお、高周波加速空洞で使われる高周波の周波数領域は、数 MHz から数 100MHz である。同じ曲率半径を持つ軌道でより高エネルギーまで粒子を加速するには、偏向電磁石の磁場強度をできる限り大きくすることが求められ、フロンティアマシンの主加速シンクロトロンリングにおいては、偏向電磁石に超伝導コイルを用いた超伝導偏向電磁石 (Tevatron で偏向磁場 max 4.40T、LHC で同 max 10T の予定) が使われている。今後のエネルギーフロンティア陽子シンクロトロンにおいては、その規模が現実的な範囲に収ま

るよう超伝導電磁石を用いることなどで偏向磁場強度を大きくすることが課題の一つになっている。

・加速空洞における加速効率の向上(加速空洞の超伝導化)

シンクロトロンリングに設置される加速空洞での加速効率の向上についても、規模を現実的な範囲に収めるための技術開発課題として重要なものとなっており、加速空洞の超伝導化が採用されている。加速空洞の超伝導化は、加速電場を数倍に高めるとともに必要電力の節約にもなっており、高エネルギー物理学研究所の TRISTAN で採用されたのを始めとして、その後の大規模加速器では一般的になってきている。

・ビームの集束制御

反応断面積が非常に小さくなるエネルギーフロンティア領域で、ビームどうしを衝突させめざす反応現象を発生させるためには、フロンティアエネルギーまで加速する課題の他、衝突時点におけるビームの強度を高くし、衝突反応が起きやすいよう細く絞られたビーム形状が要求され、ビームの制御の点からも難しさが加わるものとなる。最終衝突時点において細く絞り込めるようにするには、加速中にビームが広がらないよう、ビーム内粒子の運動量ばらつきの少ないビームを入射させることが必要である。運動量ばらつきの少ないビームは、ビーム粒子と同じ速度で走る系から見るとビーム内粒子の動きの少ない、「冷却された」状態でのビームである。このようにビームの運動量ばらつきを少なくすることを「ビーム冷却」と呼んでおり、陽子ビームについては、「ストカスティック冷却」(206～207 頁参照)が用いられている。エネルギーフロンティア陽子シンクロトロンに関する研究開発課題の一つは、最終衝突時点まで如何に強度を大きく保ち、かつ、如何にビーム形状を制御するかという点にある。

以上述べた方策や技術課題は、加速機構やビーム特性などについて十分な理解がなされた上に成立するものである。また、衝突現象を正確に捉える観測器の開発も同様に重要な課題である。

2) 高エネルギー陽子シンクロトロン

高エネルギー電子シンクロトロンでも述べたように、QCD 原子核物理研究は、今後大きく発展する学術研究分野と考えられており、この研究のためには、原子核内あるいは核子内のクォークの運動を探れるエネルギー(数 GeV～数 10GeV 程度)をもつビームが必要となる。このエネルギーを有する陽子ビームを発生させる加速器はシンクロトロンであり、それらは、エネルギーフロンティア用カスケード方式加速器群の途中段階に相当するものである。このシンクロトロン技術は基本的に確立されたものである。表-IV-1-8 に世界の QCD 原子核物理研究用に用いられる陽子シンクロトロンを示す。これらの陽子シンクロトロンは、その前段にいくつかの加速器をもっていることはエネルギーフロンティア加速器と同様である。

我が国においては、KEK の陽子シンクロトロン(KEK-PS: 12GeV)が、この研究分野を担っているが、K 中間子やハイパー核研究などを行うには十分なものとはいえず、50GeV 陽子シンクロトロンを主加速器とする大強度陽子加速器計画[IV27]が進められている。

表－Ⅳ－１－８ 世界の高エネルギー陽子シンクロトロン

| 加速器 | 研究機関 | 最大エネルギー (GeV) | 規模 | ビーム強度 (protons/sec) | 備考 |
|---------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----|
| CPS | CERN | 28 | 平均直径：200m | 1×10^{13} | |
| Tevatron Booster | FNAL | 8 | 平均直径：151m | 3.8×10^{13} | |
| AGS | BNL | 33 | 平均直径：257m | 1.3×10^{13} | |
| KEK-PS | KEK (JAERI) | 12 | 平均直径：108m | 2×10^{12} | |
| HIPAF(*) (JHF) | | 50 | 平均直径：500m 程度 | 1×10^{14} | 計画中 |
| DESYⅢ | DESY | 7.5 | 平均直径：101m | 2.8×10^{11} | |
| PETRAⅡ | | 40 | 平均直径：733m | 7×10^{12} (5 min) | |
| PS | IHEP | 76 | 平均直径：472m | 2×10^{12} | |

(*)High Intensity Proton Accelerator Facility[IV27]

3) 中間エネルギー陽子シンクロトロン

140MeV～数 GeV の中間エネルギーの陽子ビームについては、中間エネルギー原子核物理、エネルギー科学（消滅処理など）、物質・材料科学、生命科学、医療利用など非常に多様な利用が行われている。中間エネルギー陽子ビームの利用の一つとして、中性子などの二次ビームを発生させるための駆動用として用いられる場合がある。特に、中性子については、原子炉の老朽化に伴う閉鎖のため利用できる中性子源が世界的に不足してきており、それを代替するものとして、陽子ビームを利用する核破碎中性子源が注目されてきている。なお、このエネルギー領域では、シンクロトロン以外にも（強集束）サイクロトロンや線形加速器が使われている。

このエネルギー領域においては、がん治療などの医療利用ではそれほど大きなビーム強度を要求されるものではないが、今後の普及を考えると加速器そのものの小型化が課題となる。一方、中性子源を駆動させるための陽子ビームには大きな強度が求められ、陽子ビームを蓄積するリングにおいては、それに伴う種々の技術課題を克服することが求められる。以下、医療用陽子シンクロトロンと中性子駆動用陽子蓄積リングに分けて述べる。

①医療用陽子シンクロトロン

がん治療において、陽子ビームに求められるエネルギーは数 10MeV～250MeV 程度である。シンクロトロンのみならず、がん治療を主とする医療用の陽子加速器については、小型化が技術課題となっている。医療用陽子シンクロトロン小型化の主たる技術課題は、以下のものである。なお、世界の医療用シンクロトロンを表－Ⅳ－１－９に挙げる[IV28]～[IV33]。

・高周波の変調範囲の拡大と偏向電磁石磁場強度の増大

上記のエネルギーのビームを発生させる医療用陽子シンクロトロンの場合、加速中の陽子速度

の変化幅（光速の数%～60%程度）が大きいため、加速に使用する高周波周波数の変調範囲を大きくする必要がある。高エネルギー領域での加速では、ほぼ光速で陽子が運動するため使用する高周波の変調幅は小さく、この点に関してはより困難なものが要求される。また、シンクロトロンの大きさ（径）をできる限り小さくするためには、偏向電磁石の磁場強度を強める必要があるが、これまでは超伝導電磁石の場合は冷却系（液体ヘリウム供給系）が必要となり、冷却系が保守・運転の面などで制約となってしまうため、常伝導電磁石を用いることが適当であると考えられてきている。

米国のロマ・リンダ大学医療センターでは、病院における陽子線治療が、1990 年より世界最小級の陽子シンクロトロンを用いて行われている。筑波大学陽子線医学利用研究センターにおいては、1983 年より KEK の 12GeVPS のブースターシンクロトロンを利用した陽子線治療を実施してきており、2000 年度に新しい世界最小級の医療用のシンクロトロンが完成した。日本においては、その他、静岡県がんセンターで医療用陽子シンクロトロンが建設中であり、放射線医学総合研究所、若狭湾エネルギー研究センターの重イオンシンクロトロンにおいても、（あまり多くはないが）陽子ビーム医療利用が行われている。また、兵庫県立粒子線治療センター（仮称）で建設中の重イオンシンクロトロンにおいても陽子線治療が行われる予定である。

表－Ⅳ－1－9 世界の医療用陽子(重イオン)シンクロトロン

| 機関 | 稼働開始 | 主加速器 | エネルギー (MeV) | 加速粒子 |
|--|-------------------|---|-----------------------|--------------|
| 筑波大学 陽子線医学利用研究センター | 1983 (2000 終了) | 陽子シンクロトロン (KEK-PS Booster) (平均直径約 12m) | (500) 減速して利用 | 陽子 |
| | 2000 | 陽子シンクロトロン (周長約 23m) | 250 | 陽子 |
| Loma Linda University Medical Center (米国) | 1990 | 陽子シンクロトロン (周長約 23m) | 250 | 陽子 |
| 静岡県がんセンター | 建設中 | 陽子シンクロトロン (周長約 20m) | 235 | 陽子 |
| 放射線医学 総合研究所 | 1994 | 重イオンシンクロトロン (HIMAC) (直径約 42m) | ～230 (～800MeV/n) | 陽子 (重イオン) |
| 若狭湾エネルギー研究センター | 2000 | 重イオンシンクロトロン (多目的利用) (周長約 33m) | 200 | 陽子 He, C |
| 兵庫県立粒子線治療センター (仮称) | 建設中 | 重イオンシンクロトロン (HARIMAC) (周長約 90m) | 70～230 (～320MeV/n) | 陽子 (炭素) |

②中性子駆動用陽子蓄積リング

陽子ビームを貯蔵し、大強度陽子ビームにより中性子を大きな強度で発生させる中性子駆動用陽子リングについては、リング内に貯蔵する陽子ビームの強度をできる限り大きくすることが技術的な課題である。

世界の中性子源用の陽子蓄積リングを表－Ⅳ－1－10 に示す[Ⅳ 1][Ⅳ27][Ⅳ34]～[Ⅳ38]。表に示すように、陽子蓄積リングは、線形加速器の後に配置されているが、蓄積リングで更に加速するもの（いわゆる陽子シンクロトロン）と、線形加速器でのエネルギーを保つものに分けられる。蓄積リングにおいて更に加速する場合、入射エネルギーが数 10MeV の場合では特に、陽子が他の陽子から受ける空間電荷効果により拡がりやすく、リングのアーパチャーを大きくし、加速

の繰り返し頻度を高くするなどが必要である。リングにおいて加速をしない場合には、線形加速器からの入射エネルギーが高く、空間電荷効果が弱く、一度に多くのビームを蓄積できる。

日本においては、高エネルギー加速器研究機構および日本原子力研究所の統合計画として、大強度陽子加速器施設計画が進行しつつある。

表Ⅳ－１－１０ 世界の中性子駆動用陽子蓄積リング

| 国名 | 研究機関 | 加速器 | 完成年 | 最大エネルギー (MeV) | ビーム強度 (μ A) |
|----|---|--|------|------------------|---------------------|
| 日本 | 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) | KEK-PS Booster シンクロトロン(直径 12m, 500MeV) | 1974 | 500 | 6 |
| | 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 日本原子力研究所 (JAERI) | 大強度陽子加速器施設計画 線形加速器(長さ約 360m, 600 MeV) + 3GeV シンクロトロン(直径約 100m, 3GeV) + 50GeV シンクロトロン(直径約 500m, 50GeV) | 計画中 | 3,000 | 333 |
| 米国 | Argonne National Laboratory (ANL) | IPNS (Intense Pulsed Neutron Source) 線形加速器(長さ約 34m, 50 MeV, 10mA) + シンクロトロン(周長約 43m, 500MeV) | 1981 | 500 | 15 |
| | Los Alamos National Laboratory (LANL) | PSR (Proton Storage Ring) 線形加速器(長さ約 800m, 800 MeV) + シンクロトロン(直径 30m, 800MeV) | 1986 | 800 | 80 |
| | Oak Ridge National Laboratory (ORNL) | SNS (Spallation Neutron Source) 線形加速器(長さ 300m, 1GeV) + 蓄積リング(周長 248m, 1GeV) | 建設中 | 1,000 | 2,000 |
| 英国 | Rutherford Appleton Laboratory (RAL) | 線形加速器(長さ約 44m, 70 MeV, 14mA) + ISIS シンクロトロン(直径 52m, 800MeV) | 1986 | 800 | 200 |
| EU | RAL/KFA (イギリス・スイス) | | 計画中 | 1,300 | 5MW |

4) 陽子シンクロトロン技術での 200MeV 級陽子シンクロトロン小型化の限界

6 頁に示した新しい小型加速器の目安として、陽子ビームについては、エネルギーとして 200MeV 程度のものを発生できるものとした。このような陽子ビームを発生させる陽子シンクロトロンリングの規模は、これまでに確立されたものでみると、米国のロマ・リンダ大学医療センターあるいは筑波大学陽子線医学利用研究センターに設置された医療用陽子シンクロトロンの規模が最小で周長 22～23m である。これに入射器が加わるが、目安の規模の 1.5～2 倍程度でのものとなっている。

一方、ロシアのブドゥカー原子核研究所 (BINP) では、パルス超強磁場を発生させるとともに高周波の変調幅を限界まで拡げて超小型の陽子シンクロトロンを構成する技術の研究を行っており、陽子シンクロトロンについては、もう一段の小型化が可能と考えられている。実際、今回の調査においても、陽子シンクロトロンの限界に挑む提案が出されている。

(3)重イオンシンクロトロン

低・中間エネルギーの重イオン加速は、主としてタンデム型バンデグラフ、アルバレ型ライナック、アイソクロナス・サイクロトロンなどで行われているが、より高エネルギーの重イオン加速にはシンクロトロンが必要である。重イオンシンクロトロンは、基本的には陽子シンクロトロンと同じものであり、1970年代には、陽子シンクロトロンの使命を終えたコスモトロン（BNL）や Bevatron（LBL）で重イオンの加速が行われ始めた。特に、後者は重イオンライナック（Super-HILAC）を入射器とする Bevalac と呼ばれる複合系に改造されて、ウランに至る重イオンを GeV/核子の高エネルギー領域まで加速して核物理の新分野を切り開いた。より高エネルギーの加速は、BNLでは AGS を用いて Au イオンを 10GeV/n まで、CERNでは SPS を用いて S イオンを 200GeV/n まで加速し、現在BNLの相対論的イオン衝突器（RHIC、100GeV/n×2）への足掛りを作った。

以下では、高エネルギー重イオンシンクロトロンおよび高エネルギー重イオン・重イオン衝突器ならびに中間エネルギー重イオンシンクロトロンについて述べる。

1)高エネルギー重イオン・重イオンシンクロトロンおよび衝突器

高エネルギー物理学研究の大きな課題の一つに、クォーク・グルーオンプラズマ中での「クォークの閉じ込め」の破れの検証がある。高エネルギーに加速された重イオンどうしの衝突実験によりクォーク・グルーオンプラズマが発生するものと考えられている。CERNでは SPS（直径約 2,200m）を用いた重イオン・重イオン衝突実験が行われてきており、また、BNLにおいては RHIC を用いた衝突実験が開始されている（2000年6月）。

表－IV－1－11 に、高エネルギー重イオン・重イオン衝突器の構成（例）として、BNLの RHIC の加速器群を示す[IV 1]。

表－IV－1－11 高エネルギー重イオン・重イオン衝突器の構成(例)

| | RHIC Complex (BNL) (100GeV/n + 100GeV/n) | |
|---------|---|--|
| イオン源 | (偏極) 陽子 | 重イオン |
| | Magnetron H ⁺ | スパッタイオン源 |
| 初期加速 | (偏極) 陽子 | 重イオン |
| | RFQ 型加速器(750keV) + 陽子ライナック :長さ 144m、高周波 201.25MHz (200MeV) | タンデム型静電加速器 (>1MeV/n) (29MeV(p)–385MeV(U)) |
| ブースター加速 | Booster Synchrotron :シンクロトロン、周長 202m、高周波 0.06～0.84MHz (1GeV–proton、5(Q/A)GeV/n) | |
| | AGS (Alternating Gradient Synchrotron) :シンクロトロン、直径約 257m、高周波 0.5～4.46MHz (10.8GeV/n) | |
| 主加速 | RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) :シンクロトロン、周長 3,833m、高周波 26.7/160MHz (100GeV/n) | |

高エネルギー重イオンシンクロトロンは、様々な不安定核研究にも使われてきており、表－IV－1－12 に世界の高(・中間)エネルギー重イオンシンクロトロンを示す[IV 1][IV 2][IV39]～[IV 41]。

2) 中間エネルギー重イオンシンクロトロン

数 10MeV/n～数 100MeV/n の中間エネルギーの重イオンビームについては、中間エネルギー原子核物理、物質・材料科学、生命科学、医療利用など非常に多様な利用が行われている。この領域では、シンクロトロン以外にもサイクロトロン (AVF サイクロトロンやリングサイクロトロン) が加速器として一般的に使われている。

粒子ビームによるがん治療においては、炭素などの重イオン (重粒子) ビームは、正常組織に与えるダメージをより少なくでき、また、病巣部の致死効果が高いものとして注目されてきている。がん治療において重イオンビームを用いる場合は、深部治療においては 400MeV/核子を超える加速エネルギーが必要とされている。このエネルギー領域のシンクロトロンでの重イオン加速は、入射時の重イオンの速度が光速に比べてかなり小さく、かつ、エネルギーの増加とともに速度が大きく変わるため高周波の変調範囲が大きく通常は何段階に分けた加速を行うカスケード方式が一般的であり、加速施設が大きくなることが医療利用への難点となっていた。

・高周波変調範囲の拡大による加速性能向上

医療専用の重イオンシンクロトロンについては施設規模を小さくしてゆくことが課題であり、最終エネルギーまで加速する主加速シンクロトロンに入射するエネルギーをなるべく低くし、入射器部分を小型化する必要がある。

放射線医学総合研究所の重イオン (重粒子) 治療用加速器施設 (HIMAC ; Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) のシンクロトロン (直径 42m、周長約 130m ; 6MeV/核子 → 800MeV/核子) は、非常に変調範囲の大きい高周波装置を用いたものであり、軽重イオンで 800MeV/核子のエネルギーを出す重イオンシンクロトロンでは、最も小型化されたものである。

なお、表－IV－1－12 に世界の高・中間エネルギー重イオンシンクロトロンを示す。

表Ⅳ-1-12 世界の高・中間エネルギー重イオンシンクロトロン

| 国名 | 研究機関 | シンクロトロン | 稼働開始 | エネルギー (GeV/n) |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 米国 | L B L | Bevatron(*) (直径約 40m) | 1954 (1992 閉鎖) | 2.1 (Ne) - 0.96 (U) |
| | B N L | AGS (直径約 257m) | 1960 | 10.8 |
| ロシア | J I N R | Synchrophasotron(*) (直径約 70m) | 1957 | 4.5 |
| | | Nuclotron (直径約 80m) 超伝導加速空洞を使用 | 1993 | 6 |
| フランス | SATUNE National Laboratory | SATUNE (直径約 34m) | 1978 | 1.15 (Ne) - 0.7 (Kr) |
| ドイツ | G S I | SIS (直径約 69m) | 1990 | 2 (Ne) - 0.9 (U) |
| | | ESR (周長約 108m) | 1990 | 0.83 (Ne) - 0.56 (U) |
| 日本 | 東京大学原子核研究所 | TARN II (周長約 78m) | 1987 (2000 解体) | 0.37 (He) - 0.2 |
| | 放射線医学総合研究所 | HIMAC (直径約 42m) | 1994 | ~0.8 |
| | 若狭湾エネルギー研究センター | シンクロトロン (周長約 33m) | 2000 | 数 10MeV/n |
| | 兵庫県立粒子線治療 センター (仮称) | シンクロトロン (周長約 90m) | 建設中 | ~320MeV/n (C) |
| | 理化学研究所 | BSR (周長約 135m) | 計画中 | 1.45 (Ne) - 0.8 (U) |

(*) Bevatron および Synchrophasotron は、シンクロサイクロトロンである。

3) 重イオンシンクロトロン技術での 200MeV/n 級重イオンシンクロトロン小型化の限界

6 頁に示した新しい小型加速器の目安として、重イオンビームについては、エネルギーとして 200MeV/n 程度のものを発生できるものとした。このような重イオンビームを発生させる重イオンシンクロトロンリングの規模は、これまでに確立されたものでみると、兵庫県立粒子線治療センター (仮称) に建設中の周長約 90m のもの (エネルギー; 炭素ビームで 350MeV) が最小である。これに入射器が加わり、目安の規模の 5~6 倍程度となり、規模としてはかなり大きくなる。

一方、陽子シンクロトロンと同様に、パルス超強磁場を発生させるとともに高周波の変調幅を限界まで拡げて超小型の重イオンシンクロトロンを構成する技術により、もう一段の小型化が可能と考えられる。陽子シンクロトロンでの更なる小型化の追求は、重イオンについても適用できる。

2. サイクロトロン

サイクロトロンは、荷電粒子を直流磁場中で回転運動させ、それに同期した高周波で加速する装置である。一様な磁束密度の直流磁場中では、荷電粒子は磁場に垂直な面内では粒子の速度によらない振動数（サイクロトロン振動数）で円運動をする。そこで、磁場中にD形のディー電極を入れて、これにサイクロトロン振動数またはサイクロトロン振動数と適当な整数関係の周波数の（同期した）高周波を加え、粒子が電極間を通るごとに繰り返し加速すると、高いエネルギーまで荷電粒子を加速できる。サイクロトロン内での磁場の中心付近にイオン源で生成した荷電粒子を入射させると、加速されるにしたがって軌道の曲率半径が大きくなり、最後に電極の周辺近くにある高電圧をかけた引出し用電極により磁場の外に加速粒子（ビーム）が取り出される。

普通型（古典的）サイクロトロンでは、粒子速度の増加に伴う相対論的質量増加により、粒子は加速位相から徐々に遅れていき、減速位相に入るとそれ以上の加速はできなくなる。加速の上限は、陽子で 20MeV 程度である。

普通型サイクロトロンの限界を超えるには、加速高周波の周波数を変調して粒子の運動に同期させる（→シンクロサイクロトロン）か、高周波は変調せずに周回方向の集束を粒子が発散・集束の磁場を交互に通過することで行わせ（強集束）、しかも半径の増加に伴って平均磁場を増加させて粒子の周回運動を一定とする（→Isochronous（アイソクロナス）・サイクロトロン）方法がある。前者は、サイクロトロンとしてではなくシンクロトロンへと発展していった。現在世界中で稼働しているサイクロトロンのほとんどは、後者のものである。

アイソクロナス・サイクロトロンは、平坦な磁極面に扇型磁極を付加し、磁場の強度を荷電粒子の軌道方向に変化を持たせることによりビームの発散を防ぎ（強集束；付加された扇型磁極の縁に斜入射・斜出射する粒子は、その都度集束・発散の力を受け、（その大きさは斜入・出射角や磁場変化比に依るが）合成された作用は常に集束となる（強集束の原理）、同時に半径方向には相対論的質量増加に合せて磁場を強くして等時性を保たせるものである。このため、アイソクロナス・サイクロトロンは、「Sector Focus (S F) サイクロトロン」あるいは「Azimuthally Varing Field (A V F) サイクロトロン」とも呼ばれている。なお、集束性を大きくするために扇型の形状をスパイラル状にしたり、扇型磁場を分割してリング状に配列した（リング（セクター分離型）サイクロトロン）りする。現在世界中には、（陽子エネルギーで）10MeV 小型サイクロトロンから 590MeV の大型リングサイクロトロンまで 100 台以上が稼働しているが、大多数は A V F サイクロトロンである。陽子の加速エネルギーについては、中間エネルギー領域に属する加速器である。

なお、サイクロトロンは以下のような利点を有しているので、核物理研究の中心として中間子ファクトリーなどで活躍しており、医用や放射性同位体の製造などにも広く使われている。

- ・大強度のビームを発生させることができる
- ・エネルギーを可変とすることができる
- ・多様なイオン種を加速できる

(1)電子サイクロトロン(マイクロトロン)

平坦な円形磁場の外周近くに設置した加速空洞で、電子がその加速空洞を通過する度に電子の静止エネルギーに等しい加速を受ければ、電子の加速周波数は一定に保たれ（位相安定性）、加速空洞を通過する度に軌道半径は一定のピッチで大きくなってゆく。この加速原理を使うものがマイクロトロンである（参考資料1）。20～30MeV程度の低いエネルギーまでは、単純な構造でCW加速により大電流が期待でき、CWの電子ライナックより低コストと考えられることから、近年になり注目され医療目的のものは市販されている。

150MeV程度までの電子ビームを加速するマイクロトロンは、小型放射光リングなどの入射器として使用されている。また、米国のトーマス・ジェファークソン国立加速器研究所（TJNAF）では、超伝導ライナックと周回磁場を組み合わせたレーストラック型マイクロトロン系が構成されている。表Ⅳ-1-13にマイクロトロンが使われている加速器などをまとめる。

表Ⅳ-1-13 マイクロトロンが使われている加速器など

| 国名 | 研究機関 | 用途 | 稼働開始 | エネルギー |
|----|---|--------------------------------------|------|----------------------|
| 日本 | 立命館大学 SRセンター | 電子蓄積リングへの入射器 | 1996 | 150MeV |
| | 広島大学 放射光科学研究センター | 電子蓄積リングへの入射器 | 1998 | 150MeV |
| | 日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター | レーザー加速試験用 電子ビーム源 | | 150MeV |
| 米国 | Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF) | 超伝導ライナックと組み合わせた 周回磁場での電子加速（CEBAF） | 1995 | ～数 GeV の電子 を周回させる |

1)電子サイクロトロン技術による 1GeV 級電子加速器小型化の限界

6頁に示した新しい小型加速器の目安として、電子ビームについては、エネルギーとして1GeV程度のものを発生できるものとした。現在のマイクロトロンは、電子エネルギーの最大値は約150MeVで、その大きさは(2～3)m×(2～3)mの面積に収まる程度である。マイクロトロンでこれより大きなエネルギーを持つものではなく（米国TJNAFでは線形加速器で加速されたGeV級電子ビームを曲げるためにマイクロトロンと同様の磁場を用いているが加速はしていない）、1GeVの電子ビームを発生させるものを構成できるか否かについて検討することが必要であるが、可能であったとしても規模としてはかなり大きくなるものと想定される。

(2)陽子・重イオンサイクロトロン

（参考文献[IV41]などによりまとめる）

以下では、比較的大型のAVFサイクロトロンおよびリングサイクロトロンについて述べる

1)大型サイクロトロン（リング(セクター分離型)サイクロトロンなど）

周回粒子の軌道方向の磁場強度を適当に変化させビームを集束させるAVFサイクロトロンについては、集束性を大きくするために扇型の形状をスパイラル状にしたり、扇型磁石を分割してリング状に配列したりする。後者のものは、リング（セクター分離型）サイクロトロンと呼ばれ

ている。先にも述べたように、現在世界中で稼働しているサイクロトロンの大多数はAVFサイクロトロンである。

サイクロトロンでは、加速エネルギーを $K \times q^2/A$ MeVと表記して、 K 値 (Bending Limit で磁石の半径 r (m) と磁場強度 B (T) で一義的に決まる ; $K = 48.2(rB)^2$) でそのエネルギー性能を表している。陽子では K MeV、重イオンについては質量数 A 、電荷数 q によって上式で計算される値までの加速エネルギーが得られる。

世界で稼働中の大型サイクロトロンを表Ⅳ-1-14に示す[Ⅳ 2]。スイスのポールシェラー研究所 (P S I) の $K = 590$ 、カナダ三大学中間子施設 (T R I U M F) の $K = 520$ などが 1970 年代より稼働している。我が国では、理化学研究所の $K = 540$ 、大阪大学核物理研究センターの $K = 400$ が世界的な大型サイクロトロンとして活躍している。

表Ⅳ-1-14 世界の大型サイクロトロン

| 加速器 名称 | 研究機関 | サイクロトロンの磁石規模など | 加速エネルギー K (MeV/u) | ビーム強度 (pμA) |
|---|-------------------------------|--|---|------------------------|
| TRIUMF Cyclotron (1974) | T R I U M F (カナダ) | セクター数 : 6 (常伝導) 磁石直径 17.17m 入射半径 0.25m 引出半径 5.80 - 7.80m 磁石重量 4,170tons 磁場強度 0.46T(max, avr.) | $520 q^2/A^2$ 陽子 : 180 -520MeV | 180 |
| PSI-590MeV Ring Cyclotron (1974) | P S I (スイス) | セクター数 : 8 (常伝導) 磁石直径 入射半径 2.10m 引出半径 4.45m 磁石重量 1,988tons 磁場強度 0.87T(max, avr.) | $590 q^2/A^2$ 陽子 : 590MeV | 1,300 |
| RIKEN Ring Cyclotron (1986) | 理化学研究所 (日本) | セクター数 : 4 (常伝導) 磁石直径 入射半径 0.89m 引出半径 3.56m 磁石重量 2,116tons 磁場強度 0.97T(max, avr.) | $540 q^2/A^2$ 陽子 : 210MeV d~Ne : 135MeV/u ^{40}Ar : 95MeV/u | 0.3 0.2-0.5 0.06 |
| RCNP Ring Cyclotron (1991) | 大阪大学 核物理研究 センター (日本) | セクター数 : 6 (常伝導) 磁石直径 入射半径 2.00m 引出半径 4.00m 磁石重量 2,232tons 磁場強度 0.76T(max, avr.) | $400 q^2/A^2$ 陽子 : 400MeV $^3\text{He}^{2+}$: 150MeV/u $^{14}\text{N}^{7+}$: 70MeV/u | 0.5 0.4 0.02 |
| SSC1&SSC2 (1982) | G A N I L (フランス) | セクター数 : 4 (常伝導) 磁石直径 入射半径 0.814m(SSC1), 0.012m(SSC2) 引出半径 3.00m 磁石重量 1,714tons 磁場強度 0.95T(max, avr.) | $380 q^2/A^2$ Ne $^{10+}$: 95MeV/u U $^{58+}$: 25MeV/u | 1.2E+12 1.0E+9 |

(表中の単位 MeV/u (単位質量数あたりのエネルギー) は、MeV/n にほぼ等しい) (次頁に続く)

表Ⅳ-1-14 世界の大型サイクロトロン

| 加速器 名称 | 研究機関 | サイクロトロンの磁石規模など | 加速性能 (MeV/u) | ビーム強度 (pμA) |
|--|--|--|--|--------------------------------------|
| U-400M (1991) | J I N R (ロシア) | セクター数: 4 (常伝導) 磁石直径 4.00m 入射半径 引出半径 1.75m 磁石重量 2,215tons 磁場強度 1.93T(max, avr.) | 400-540 q ² /A ² ⁶ Li ²⁺ : 50MeV/u ¹⁴ N ⁵⁺ : 60MeV/u | 0.7 0.13 |
| NAC Seperated -Sector Cyclotron (1991) | N A C (National Accelerator Centre) (南アフリカ) | セクター数: 4 (常伝導) 磁石直径 入射半径 1.01m 引出半径 4.43m 磁石重量 1,406tons 磁場強度 0.24T(max, avr.) | 220 q ² /A ² 陽子: 27- 220MeV d : 35- 40MeV ⁴⁰ Ar ⁸⁺ : 7MeV/u | 200 2 40nA |
| Texas A&M K500 Cyclotron (1988) | Texas A&M University (アメリカ) | セクター数: 3 (超伝導) 磁石直径 1.42m 入射半径 0.008m 引出半径 0.67m 磁石重量 100tons 磁場強度 4.9 T(max, avr.) | 520 q ² /A ² d ⁺ : 65MeV/u ⁴⁰ Ar ¹⁴⁺ : 40MeV/u | 0.015 0.00025 |
| K500 (1988) | N S C L (National Super-conduc ting Cyclotron Laboratory/ Michigan State University) (アメリカ) | セクター数: 3 (超伝導) 磁石直径 1.42m 入射半径 0.01m 引出半径 0.67m 磁石重量 108USons 磁場強度 4.95T(max, avr.) | 520 q ² /A ² ¹⁶ O ⁴⁺ : 15MeV/u ¹²⁹ Xe ²²⁺ : 10MeV/u | 2 |
| K1200 (1988) | Michigan State University) (アメリカ) | セクター数: 3 (超伝導) 磁石直径 2.20m 入射半径 0.01m 引出半径 1.03m 磁石重量 287USons 磁場強度 5.3 T(max, avr.) | 1,200 q ² /A ² ¹⁶ O ⁸⁺ : 200MeV/u ²⁰ Ne ⁹⁺ : 125MeV/u ¹²⁹ Xe ³¹⁺ : 65MeV/u ²³⁸ U ³⁹⁺ : 25MeV/u | 1.3E-4 7.0E-4 1.8E-6 4.4E-7 |

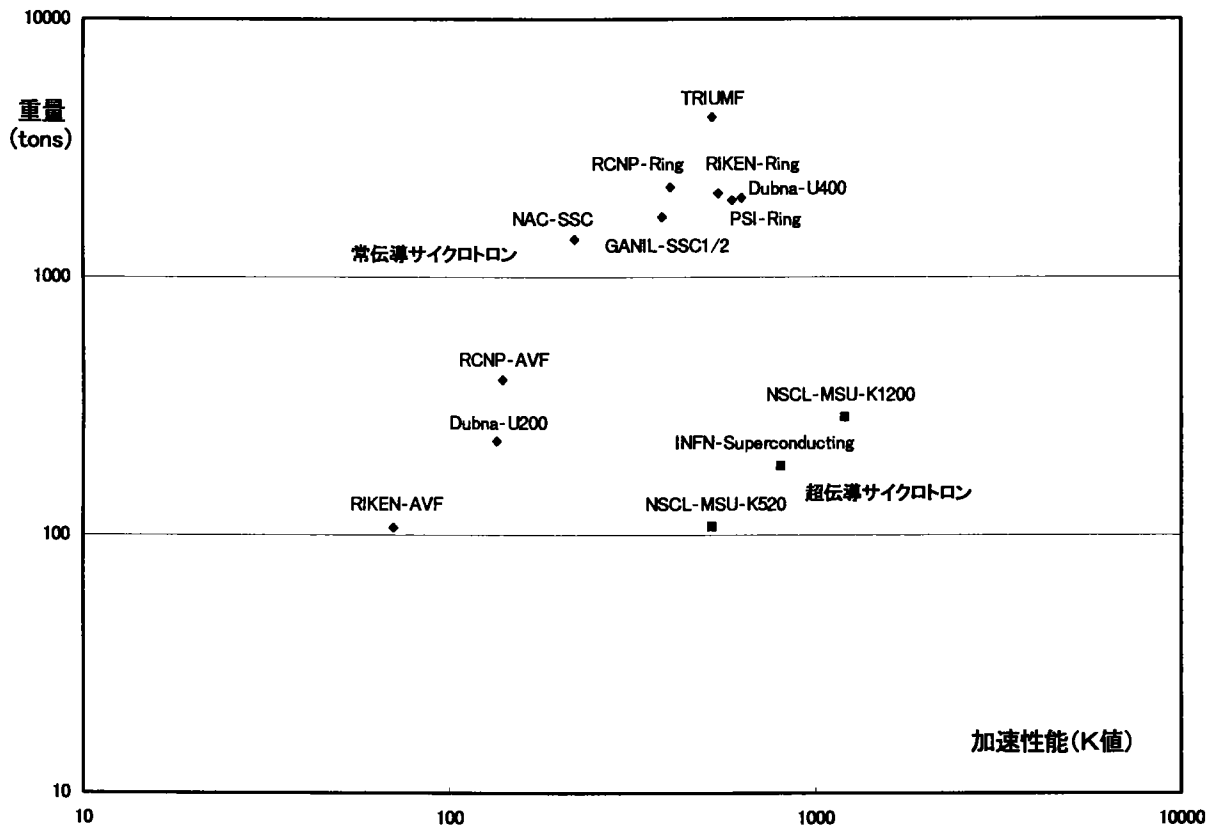
大型のサイクロトロンは、1970年代には中間子ファクトリーを駆動する大きなビーム強度を有する陽子加速器として注目を浴びたが、1980年代からは非常に種類の多い不安定原子核を生成させるための重イオン加速器としての使用が中心となってきた。多様な重イオンの加速についてはサイクロトロンが有効な加速器と考えられており、大型のサイクロトロンによる重イオン加速において、加速できるエネルギーを高めるため以下の方策が取られている。

・電磁石の超伝導化による加速性能向上

大型のサイクロトロンの電磁石部重量は2,000トン程度の大きなものとなっており、その軽量化は重要な課題である。このため、単一の超伝導電磁石を用いたサイクロトロンが幾つか建設されており、その主なものはミシガン州立大学国立超伝導サイクロトロン研究所(N S C L)のK=1200、K=520などである。これらは、液体ヘリウム冷却系を必要とするものの電磁石部の重量

については、大幅な低減（同じ K 値であれば重量が約1/20以下；図－IV－1－6参照）がなされている。

超伝導電磁石による大きな K 値をもつ大型サイクロトロンは、多種類の不安定原子核を発生させる加速器として、今後の不安定原子核研究における主力加速器のひとつとして発展してゆくものと考えられている。



図－IV－1－6 サイクロトロンの加速性能と重量

・カスケード方式あるいは多段加速方式による高エネルギー化

非常に重い原子核の加速については、いくつかの大型サイクロトロンを組み合わせることで核子あたりの加速エネルギーを高めることが行われている。これは、シンクロトロンでも述べたようにカスケード方式（あるいは多段加速方式）と呼ばれている。

表－IV－1－15には、理化学研究所と大阪大学核物理センターの2段加速サイクロトロン構成を示している[IV 2][IV42]。なお、理化学研究所においては、2段の常伝導リングサイクロトロンの後段に2基の超伝導リングサイクロトロンが設置される計画が進められている（R I ビームファクトリー計画[IV43]）。この後段の加速により、重イオンの加速エネルギーとして0.2 GeV/核子（重イオン）～0.4 GeV/核子（軽重イオン）程度まで、更に、最後段ではシンクロトロンを用いて1 GeV/核子程度までの加速が検討されている。

なお、大型サイクロトロン施設は多数のビームユーザーを抱える共同利用施設となっており、

安定したビーム供給は多数の研究を進展させる上で非常に重要な課題であり、安定運転やビームの品質を高めるのための研究開発が今後も必要である。

表Ⅳ-1-15 多段加速サイクロトン構成(例)

| | 理化学研究所 | | 大阪大学核物理研究センター |
|-------|---|--|---|
| イオン源 | E C R型イオン源 偏極イオン源 | E C R型イオン源 | E C R型イオン源 |
| 第1段加速 | A V Fサイクロトン ($K = 70$; 常伝導) p ; -16MeV He ; -16MeV/u C ; -12MeV/u | 線形加速器 (ワットレ型 $\text{タケ} \times 6$) 軽重イオン ; 4MeV/u 重イオン (鉛など) ; 1MeV/u | A V Fサイクロトン ($K = 140$; 常伝導) p ; max80MeV ^3He ; max53MeV/u alpha ; max35MeV/u $^{14}\text{N}^{5+}$; max15MeV/u |
| 第2段加速 | リングサイクロトン(RIKEN RC) ($K = 540$; 常伝導) p ; 210MeV d~Ne ; 135MeV/u ^{40}Ar ; 95MeV/u ^{136}Xe ; 26MeV/u | | リングサイクロトン(RCNP RC) ($K = 400$; 常伝導) p・偏極 p ; 400MeV $^3\text{He}^{2+}$; 150MeV/u $^4\text{He}^{2+}$; 100MeV/u $^{14}\text{N}^{7+}$; 70MeV/u |

2) 中型サイクロトン

陽子エネルギーで 100MeV 程度までの低エネルギーイオンビームの供給については、中型のサイクロトン (S F (または A V F) サイクロトン) が使われる。これは、通常大型のサイクロトンの前段の加速器 (入射器) としても使われている場合が多い。このエネルギー領域は、原子核物理研究以外にも、物質・材料研究、生命科学研究などの幅広い研究での多目的なビーム利用が展開されている。我が国においては、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター (旧原子核研究所) の S F サイクロトン (常伝導、陽子 45MeV 加速可能、1974 年[IV44])、放射線医学総合研究所の A V F サイクロトン (常伝導、陽子 90MeV 加速可能、1973 年[IV 2] ; 1979 年より陽子線治療に使われる) および日本原子力研究所高崎研究所の T I A R A (Takasaki Ion Accelerator for Advanced Radiation Application) の A V F サイクロトン ($K = 110$; 常伝導、陽子で 90MeV までの加速が可能、1991 年[IV45]) などがある。T I A R A は、イオンビームの多目的利用施設として整備されたものであり、A V F サイクロトン以外にも多様な加速器を備えている。なお、上記の理化学研究所や大阪大学核物理研究センターの A V F サイクロトンもリングサイクロトンへの入射器として用いられていない場合は、幅広い分野での多目的な利用が行われている。また、これらより、若干加速エネルギーの低く、規模の少し小さい A V F サイクロトンがいくつか運転されている。

(医療用サイクロトン)

- ・常伝導磁石磁場強度の向上による軽量化

大型のサイクロトロンは、原子核物理などの学術研究以外にもがん治療などの医療利用にも用いられてきている。陽子をがん治療に用いる場合に、陽子ビームに求められるエネルギーは数 10 ～250MeV 程度である。このエネルギーを供給できる性能を有するサイクロトロンは $K = 250$ 程度のものであるが、相当するものを挙げると以下の表（表－Ⅳ－1－16）のようになる[Ⅳ 2]。

表－Ⅳ－1－16 医療用サイクロトロン

| 国名 | 病院など | K = 値 または 陽子エネルギー | サイクロトロンの 磁石重量 (tons) | 平均 最大磁場 (T) | 完成年 |
|-----------|---|---------------------------|----------------------------|-------------------|------|
| カナダ | Proton Treatment Facility (at TRIUMF) | $K = 520$ | 4, 000 | 0. 46 | 1974 |
| 米国 | Midwest Proton Radiation Institute (MPRI) (Indiana University Cyclotron Facility) | $K = 215$ (205MeV (p)) | 2, 000 | 0. 64 | 1975 |
| 南 アフリカ | National Accelerator Center | $K = 220$ | 1, 400 | 1. 27 | 1985 |
| スイス | Paul Scherrer Institute Proton Therapy Facility | $K = 135$ (72MeV (p)) | 470 | 1. 65 | 1974 |
| 米国 | Northeast Proton Therapy Center (at Massachusetts General Hospital) | 235MeV (p) | 200 | 2. 8 | 1998 |
| 日本 | 国立がんセンター東病院 | 235MeV (p) | 200 | 2. 8 | 1998 |

サイクロトロンの軽量化については、加速性能を向上させた（磁場強度を大きくした）軽い電磁石を用いることが必要である。この場合、電磁石の超伝導化が最も有力な方法であるが、超伝導電磁石を使用する場合は液体ヘリウム冷却系を必要とする。このため医療用については、保守や運転の容易さから、液体ヘリウム冷却系を必要としない常伝導電磁石を用い、その磁場強度を最大限強めることなどにより軽量化を図っている。現時点におけるがん治療用の最軽量サイクロトロンは、国立がんセンター東病院に設置されている陽子最大加速エネルギー235MeV のもので重量は約 200 トンである。

3) 小型サイクロトロン

生物の物質代謝などを調べるトレーサーとしてあるいは医療診断における PET などでは放射性同位元素が使われるが、これらの放射性同位元素の製造については、低エネルギー（～30MeV）の陽子ビームを標的の原子核に当てることにより製造されている。この陽子ビームを供給する加速器として小型のサイクロトロンが用いられている。近年、PET 用放射性同位元素の需要が大きく増加し小型サイクロトロンを病院内に設置するケースが多くなり、非常にコンパクトな（重量で数トン程度の）ものが商業生産されている。

4) 陽子・重イオンサイクロトロン技術による 200MeV/n 級サイクロトロン小型化の限界

6 頁に示した新しい小型加速器の目安として、陽子ビーム、重イオンビームについては、エネルギーとして 200MeV/n 程度のものを発生できるものとした。

まず、陽子ビームの場合についてみると、200MeV の陽子ビームを発生させることのできる最小

のサイクロトロンは、大きさは目安に合致するものの重量で約 200 トンのものであり（表－Ⅳ－1－16 参照）、更なる重量低減が必要と考えられる。

重イオンビームの場合についてみると、200MeV/n の重イオンビームを発生させることのできる常伝導サイクロトロンは大型のリングサイクロトロン（2,000 トン規模のもの）となる。この場合も、更なる重量低減が必要と考えられる。

陽子、重イオンのどちらについても、磁石重量の低減が必要であるが、重量低減については超伝導電磁石を使うことが有効であるものの、医療用として使う場合は冷却系が新たな負担となる可能性がある。

3. 線形加速器

高周波電場により荷電粒子をまっすぐに加速する装置であり、リニアック（ライナック）とも呼ばれている。単一もしくは複数の共振空洞からなる加速管（加速空洞）で、ビーム進行方向の電場を使うが、加速粒子の速度が光速に比べて小さいかほぼ等しいかにより、各々最適の加速方式があり、速度の遅い陽子、重イオンと、直ちに光速度近くに達する電子について各々独自の加速方式が確立された。

以下では、電子線形加速器と陽子（重イオン）線形加速器について、各々まとめる。

（1）電子線形加速器

電子はその質量が小さいため、80keV のエネルギーで光速の 50%に、約 3MeV で 99%に達することから、加速開始後まもなく速度は一定となり加速空洞の構造は一定となる。戦後 10 cm前後の短波長のマイクロ波（Sバンド）を発生させるクライストロンの技術が進み、その大出力化が可能となった。電子線形加速器では、大出力のマイクロ波を円筒状加速管に入力させ、円筒状の軸上に電場の集中した TM_{010} モードという基本モード（進行波）を利用するものである。基本空洞の長さは、高周波の 1 周期にビームが進む距離の 1/3 くらい、長くても 1/2 以下にとり、この基本空洞が多数連結されて加速管が形成されている。その代表的な例が穴あき円盤（ディスク）が配列されたディスクローデッド型加速管で、ほとんどの電子線形加速器はこの型である。この型ではマイクロ波は加速管の一端から入力し、他端で取出しダミーロードに吸収させる。管内では周期的に装荷されている円盤の穴を介してマイクロ波は伝播していくが、その位相速度はビーム速度に等しくなるようにされている。電磁波の管内波長を 3 空洞分にするのが標準的で、 $2\pi/3$ モード進行波型加速管という（参考資料 1 参照）。

電子線形加速器については、高エネルギー物理学研究用の「エネルギーフロンティア電子・陽電子線形衝突型加速器（リニアコライダー）」、素粒子・原子核研究用の「高エネルギー電子線形加速器」および様々な用途で使われる「中間・低エネルギー電子線形加速器」に分けて述べる。

1) エネルギーフロンティア電子・陽電子線形衝突器(リニアコライダー)

先にも述べたように、今後のエネルギーフロンティア衝突器としてのシンクロトロンは、電子・陽電子加速については非効率的であると考えられており、フロンティアマシンとしての電子・陽電子衝突器としては、ビームを曲げない線形加速器であるとされる。

電子線形加速器は、直線上に並べた円筒状の加速空洞ユニットにクライストロンで発生させたマイクロ波を入力させ、空洞内に発生する進行波電場により粒子を加速してゆくものである。線形加速器を用いる衝突器（リニアコライダー）は、シンクロトロンの場合と同様、いくつかの加速器群から構成されるものであり、表－Ⅳ－１－１７にＳＬＡＣのＳＬＣ（Stanford Linear Collider）[Ⅳ 1][Ⅳ46]およびＫＥＫで計画中のＪＬＣ（Japan Linear Collider）[Ⅳ47]の構成を載せる。

表－Ⅳ－１－１７ エネルギーフロンティア電子・陽電子線形衝突器の構成

| | SLC (S L A C) (電子 (50GeV)・陽電子 (50GeV)) | | JLC (K E K) (電子 (250GeV)・陽電子 (250GeV)) | |
|----------|--|---|---|--|
| | 電子 | 陽電子 | 電子 | 陽電子 |
| 電子・陽電子源 | 電子銃 | 電子銃 | 電子銃 | 電子銃 |
| | | 陽電子生成用標的入射(主加速部の電子ビーム(30GeV)を抜き取り、標的に当てて陽電子を生成) 生成した陽電子はダンピングリングまで戻す | | 陽電子生成用標的入射用リニアック(10GeV) |
| 初期加速 | 3km 線形加速器の一部 | | ダンピングリング入射用リニアック(1.98GeV) | 前段ダンピングリング入射用リニアック(1.98GeV) 前段ダンピングリング(1.98GeV) |
| ダンピングリング | ダンピングリング×2 (電子、陽電子用各1：周長約35m) (1.15-1.21GeV) | | ダンピングリング×2 (電子、陽電子用各1) (1.98GeV) | |
| 前段加速 | SLAC Three-Kilometer-Long Linear Accelerator ：線形加速器×2列 (電子、陽電子用各1、長さ各3,050m、高周波2.856GHz (Sバンド)) (56GeV) | | バンチコンプレッサ部(1)×2 (電子、陽電子用各1) 前段リニアック×2 (電子、陽電子用各1) (8GeV) | |
| 主加速 | | | バンチコンプレッサ部(2)×2 (電子、陽電子用各1) 主リニアック ：線形加速器×2 (電子、陽電子用各1、長さ数～11km、高周波5.712GHz (Cバンド)または、11.4GHz (Xバンド)) (250GeV) | |
| 衝突部 | Arcs ：長さ約1,000m×2 (電子、陽電子用各1) 最終収束(Final Focus) ：全体長約300m、衝突地点にSLD(Stanford Large Detector)があり、衝突現象を測定 | | 最終収束(Final Focus) ：長さ約4km、2つの衝突点(衝突点1(e+e-)および衝突点2(γγ))があり、衝突現象を測定 | |

以下では、エネルギーフロンティアをめざす電子・陽電子リニアコライダーのための技術開発

課題を簡単に触れる。

・高勾配加速技術開発

エネルギーフロンティアをめざす電子線形加速器については、一般的に使われているSバンドマイクロ波（加速勾配20MeV/m（SLACでの実績値））を使用すると、めざす電子エネルギーを得る場合、加速距離は大きなものとなる。例えば、250GeVの電子エネルギー（実験室系）を得ようとする、加速距離として12.5kmが必要となり、電子・陽電子リニアコライダーの場合は、最終集束（Final Focus）部および衝突部を除いても25kmの長さとなる。このため、大型電子・陽電子リニアコライダーの研究開発に関する重要な課題として、加速空洞における加速勾配を高め、できる限り規模を小さくすることがあり、世界的には表－Ⅳ－1－18のような取り組みが行われている[Ⅳ47][Ⅳ48]。

これまで一般的に使用されてきているLバンドやSバンドマイクロ波の場合には、クライストロンの出力を限度近くまで上げ、加速空洞に入射させるマイクロ波の出力を限界近くまで高めることで、ある程度まで加速勾配を高くすることは可能である（表－Ⅳ－1－19のDESYのLバンド、KEKのSバンド参照。なお、DESYの場合は超伝導加速管を用いている）。しかし、限度を超えると加速管内で放電崩壊が発生し、加速管としての役割を果たせなくなる。

表－Ⅳ－1－18 大型電子・陽電子リニアコライダーの加速勾配を高める研究開発

| 研究機関 | 研究開発内容 | | 備考 |
|---------------|---|-----------|-------|
| | 加速技術 | 目標加速勾配 | |
| DESY (ドイツ) | Lバンドを用い、超伝導加速空洞により加速勾配を上げる | 25 MeV/m | |
| KEK (日本) | 1. Sバンドの加速勾配を上げる KEK (ATF : Accelerator Test Facility) での実証試験 | 30 MeV/m | (終了) |
| | 2. Cバンド加速技術開発 KEK－CERN共同開発 | 33 MeV/m | (終了) |
| | 3. Xバンド加速技術開発 KEK－SLAC共同開発 KEK－ロシア共同開発 | 58.2MeV/m | (開発中) |
| SLAC (米国) | Xバンド加速技術開発 SLAC (NLCTA : Next Linear Collider Test Accelerator) での実証試験 | 37 MeV/m | (開発中) |
| CERN (欧州) | 2ビーム加速によるKバンド加速技術開発 | 100 MeV/m | (開発中) |

一般に、加速に使うマイクロ波の周波数が高くなるほど、より強い電場を加速管内に誘起し、効率よくビームを加速することができるとされている。このため、より高い加速勾配を得る目的の研究開発では、Sバンドより高い周波数のマイクロ波を使う研究開発が主流となっている。こ

れまでの研究開発により、KEKにおいてはCバンドのクライストロンの開発が終了しており、また、XバンドのクライストロンについてもSLACとの共同開発が進んでいる。CERNでは、大電力のマイクロ波を得るために、駆動用3GHzライナックの電子ビームのもつエネルギーを30GHzのマイクロ波に変換し、ビーム加速用主ライナックに供給する2ビーム方式の研究開発を行っている。近い将来において、Xバンド加速技術は開発が終了するものと考えられており、また、その後については、CERNの2ビーム方式のKバンド加速技術が実用化するものと考えられている。

一方、表Ⅳ-1-19に電子線形加速器に使われるマイクロ波に関する特徴を挙げているが、加速管の太さは、使用するマイクロ波の波長と同程度のものであることから、高い周波数のマイクロ波を使うほど加速管の太さが小さくなってゆく。また、同様にして、マイクロ波発生装置であるクライストロンもそのサイズが小さくなってゆく。高い加速勾配を得るために、高い周波数のマイクロ波を使う時の技術課題は、小さなサイズのクライストロンでどれだけ高い出力が達成できるか、また、小さなサイズの加速管にどれだけ高い出力でマイクロ波を入力できるかにある。SLACでは、将来の線形加速技術として、ミリ波であるWバンド加速技術の開発も行われているが、エネルギーフロンティアの電子・陽電子リニアコライダーに採用できる技術であるかどうかは、将来の研究の進展を待たなければわからないと考えられている。

表Ⅳ-1-19 電子線形加速器に使用されるマイクロ波

| バンド名 [*] | | 周波数帯 代表的な周波数 (GHz) | 波長 (cm) | 最大加速勾配 (MeV/m) |
|-------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------|
| Lバンド | | ～ 2.0 (1.3) | 23 | |
| Sバンド | | 2.0 ～ 4.0 (2.856) | 10.50 | 30 |
| Cバンド | | 4.0 ～ 8.0 (5.712) | 5.25 | 33 |
| Xバンド | | 8.0 ～ 12.4 (11.424) | 2.62 | (推定) 数 10～100 |
| Kバンド | Kバンド | 12.4 ～ 18 | | |
| | K | 18 ～ 26.5 | | |
| | Ka + Q | 26.5 ～ 46 (30) | | (推定) 300 [IV50] |
| Vバンド | | 46 ～ 56 | | |
| Wバンド | | 56 ～100 (90) | | |

^{*} バンド名については、物理学事典（培風館）[IV49]による。

表Ⅳ-1-18に示したように、世界の高エネルギー加速器を研究している機関においては、Xバンド、KバンドやWバンドを用いた加速技術の研究開発が行われている。Xバンドについては、実用化に向けた開発が行われており、まもなく一般的に使用されることになるものと考えら

れている。Xバンド、Kバンドに関するこれらの研究開発は、次世代のエネルギーフロンティア加速器や高エネルギー加速器への利用をめざしている。Wバンドでの研究はまだ基礎的な段階であり、その後の利用が念頭に置かれているものである。エネルギーフロンティア加速器や高エネルギー加速器の場合は、その目的が未知の高エネルギー現象を確実に捕まえることであり、そこで使われる加速器技術には十分なる確実性が要求される。このため、加速技術の開発は、Sバンド → Cバンド → Xバンド → Kバンド → Wバンドというように順に進めてゆくのが適当であると考えられている。

一方、数 100MeV から数 GeV 程度の間エネルギー電子ビームの利用においては、多数のユニットをつないでゆく必要はなく、必ずしも、Xバンド → Kバンド → Wバンドというように順を追って開発してゆく必要はない。開発目的を、「中間エネルギーの電子ビームをできるだけコンパクトな装置で達成すること」と考えれば、可能な限り高勾配の加速技術を優先的に研究すればよいこととなり、Wバンドでの電子加速技術研究も大きな意義をもつこととなる。

例えば、仮に、数 GeV の電子ビームが数 m 程度の電子加速器で発生させることが可能となれば、QCD原子核物理学や、この電子ビームとレーザー光との散乱による質の良いγ線を利用した各種の研究がより身近なものとなり、各地の大学や研究機関における研究水準の向上に大きく寄与するものと考えられる。

・ビームの収束技術開発

エネルギーフロンティアマシンとして、電子・陽電子衝突器のようなレプトンを衝突させるレプトンコライダーは、反応現象を精密に測定する役割を担っている。この役割を果たすためには、エネルギーフロンティア領域において、電子・陽電子の衝突反応を高い頻度で発生させることが必要となる。一般に、粒子エネルギーが高くなればなるほど反応（衝突）断面積が小さくなり、それをカバーして高い頻度で衝突反応を起こさせるためには、ビームの強度を大きくするとともに、衝突時点においてはビームの断面を非常に小さく絞り込む必要がある。ちなみに、KEKで検討されている JLC（電子（250GeV）・陽電子（250GeV））の場合、衝突直前の電子、陽電子ビームの断面形状は水平方向に数 100nm、垂直方向に数 nm という極めて細いものが要求されている[IV47]。最終衝突時点において細く絞り込めるようにするには、加速中にビームが広がらないよう、ビーム内粒子の運動量ばらつきを少なくすること（ビーム冷却）が必要である。電子ビームの冷却については、シンクロトロンにおいては、シンクロトロン放射と加速の繰り返しによりビームの運動量がそろそろ放射冷却（205～206 頁参照）が必然的に起こり、ビームの品質が良くなってゆくが、線形加速器の場合にはシンクロトロン放射が発生しないため、線形加速器での主加速を行う前に、ビームの品質を良くして入射させることが必要である。線形衝突器において設けられるダンピングリング（表Ⅳ-1-17 参照）は、放射冷却によりビームの品質を高めることを主たる目的としている。

また、大きなビーム強度が要求されることは、パルス内のバンチ間隔が短いものとなり、すぐ前を走るバンチ内の電子群が引き起こす航跡場の影響が無視できなくなり、結果として、電子ビームの加速や集束に大きな影響を与えることとなる。これを防ぐための工夫も要求される。

以上のビーム集束に関する研究開発は、KEK、SLACなどで進められている。

2) 高エネルギー電子線形加速器

数 GeV 程度の高エネルギー電子ビームを発生させる電子線形加速器は、上に述べたエネルギーフロンティア線形衝突器と基本的には同じものであり、一般的なLバンドやSバンド加速のものについては技術的に確立されている。表－Ⅳ－1－20 に（高・中間エネルギーの）GeV 級の電子線形加速器を挙げる[Ⅳ 1][Ⅳ51]。

米国のトーマス・ジェファークソン国立加速器研究所（T J N A F）での 4GeV 線形加速器（5 回通過させて 4GeV を得る；現段階では 5.5GeV、将来的には 12GeV まで上げる計画）では、超伝導加速空洞が用いられている。また、K E K の ATF Linac は、S バンド加速での加速勾配を高める研究開発を行っているものであり、約 30MeV/m の加速勾配が実証されている。

表－Ⅳ－1－20 世界の GeV 級電子線形加速器

| 研究機関 | 加速器名称 | 加速器概要(稼働年) | 電子ビームの主たる利用 |
|---|------------------------|---|-----------------------|
| C N R S－L U R E (フランス) | Orsay Linac | 長さ約 290m, 2.3GeV, RF(S-band ; 2.9986GHz) (1968) | 各種物理研究 |
| M I T (米国) | MIT-Linac | 長さ約 150m, 1GeV, RF(S-band; 2.856GHz) (1971) | 放射光リング入射 |
| K E K (日本) | 電子・陽電子線形加速器 | 長さ約 415m, -8.0GeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1982) | 電子蓄積リング入射 |
| | ATF Linac | 長さ約 88m, 2.0GeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1995) | 加速器開発、Damping Ring 入射 |
| S I N C R O T R O N E Trieste (イタリア) | ELETTRA INJECTOR LINAC | 長さ約 67m, 1.2GeV, RF(S-band; 2.998GHz) (1993) | 放射光リング入射 |
| T J N A F (米国) | CEBAF 4GeV Linac | 長さ約 160m×2 (並行して置かれマイクロンで連結)、一回の通過で各々 400MeV の利得、5 回の加速で 4GeV を得る ; RF(L-band ; 1.497GHz) (1994) | 原子核物理研究 |
| P A L (韓国) | PLS 2-GeV Linac | 長さ約 150m, 2.3GeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1994) | 放射光リング入射 |
| J A S R I (日本) | SPring-8 入射器 | 長さ約 140m, 1.15GeV, RF(S-band; 2.856GHz) (1996) | 放射光リング入射 |

3) 中間・低エネルギー電子線形加速器

中間エネルギーあるいはそれよりエネルギーの低い電子ビームを発生させる電子線形加速器は、一般的に用いられているものであり、LバンドやSバンド加速のものについては技術的に確立されている。以下の表（表－Ⅳ－1－21）においては、日本国内の中間・低エネルギーの電子線形加速器を示す[Ⅳ 1][Ⅳ54]。

表－Ⅳ－1－21 日本の低・中間エネルギー電子線形加速器

| 研究機関 | 加速器名称 | 加速器概要(稼働年) | 電子ビームの主たる利用 |
|------------------|------------------------------|--|---------------------|
| 東北大学 原子核理学研究所 | Tohoku 300MeV Electron Linac | 長さ約 52m, 300MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1967) | 原子核物理研究 放射光リング入射 |

(次頁に続く)

表-Ⅳ-1-21 日本の低・中間エネルギー電子線形加速器

| 研究機関 | 加速器名称 | 加速器概要(稼働年) | 電子ビームの 主たる利用 |
|------------------------------------|------------------------------|--|-------------------|
| 京都大学 原子炉実験所 | KURRI-LINAC | 長さ約 5m, 46MeV, RF(L-band ; 1.3GHz) (1967) | 中性子発生他 |
| 北海道大学 工学部 | 45 MeV Electron Linac | 長さ約 23m, 45MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1974) | |
| 東京大学 原子力工学研究施設 | Subpicosecond Twin Linac | 長さ約 10m, 35MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1977) | |
| 大阪大学 産業科学研究所 | ISIR L-Band Linac | 長さ約 3m, 38MeV, RF(L-band ; 1.3GHz) (1978) | |
| | ISIR S-Band Linac | 長さ約 10m, 150MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1989) | |
| 電子技術 総合研究所 | TELL | 長さ約 76m, 500MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1981) | 放射光リング入 射陽電子発生 |
| 日本原子力研究所 東海研究所 | SCARLET | 長さ約 25m, 23MeV, RF(L-band ; 0.4998GHz), 超伝導 RF 空洞(1993) | FEL 発振研究 |
| 住友電気(株) | NIJI-Ⅲ入射器 線形加速器 | 長さ約 10m, 120MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1993) | FEL 発振研究 |
| (株)自由電子 レーザー研究所 | FELI | 長さ約 46m, 165MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1994) | FEL 発振 |
| 京都大学 化学研究所 | ICR 100MeV Electron LINAC | 長さ約 10.5m, 100MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1995) | |
| 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター | JNC LINAC | 長さ約 18m, 10MeV, RF(L-band ; 1.249GHz) (1996) | 消滅処理基礎 研究 |
| 日本大学原子力研究所 電子線利用研究施設 (LEBRA) | | 長さ約 13m, 125MeV, RF(S-band ; 2.856GHz) (1998) | FEL 発振研究 他 |

これらの中間・低エネルギーの電子線形加速器における平均的な加速勾配は、数 MeV/m～10 数 MeV/m である。

4) 電子線形加速器技術による 1GeV 級電子線形加速器小型化の限界

6 頁に示した新しい小型加速器の目安として、電子ビームについてはエネルギー 1GeV 程度のものを発生できるものとした。

確立している S バンド加速の場合、通常 20MeV/m 程度の加速勾配であり、これで 1GeV まで加速するためには約 50m の距離が必要となる。また、現在開発中の X バンド加速の場合、50MeV/m 程度の加速勾配が得られるものと考えられており、この場合は 1GeV まで加速に約 20m の距離が必要となる。したがって、X バンド加速が実用化するとしても、目安規模には届かないものとなる。

K バンド加速についてはまだ研究が開始されたばかりであり、より周波数の高い W バンド加速も同様である。その意味では、W バンド加速での限界を調べる研究を行った方が小型化追求という観点では合理的であると考えられる。

(2)陽子・重イオン線形加速器

(参考文献[IV34]などによりまとめる)

陽子線形加速器としては、1946年にL. Alvarez らがつくった空洞共振器の定在波を用いたドリフトチューブ (DT:Drift Tube) 型加速器 (開発者の名前をとり「アルバレ型」とも呼ばれる) が有名で、光速度の～50%程度 (陽子エネルギーで～150MeV) までのビームの加速にもっぱら使用される。また、最近では低エネルギー部で質の良いビームを供給できる、高周波4極型 (RFQ:Radio-Frequency Qaudrupole) 加速器 (1970年提案) をドリフトチューブ型加速器の入射器とするのが一般的になりつつある。この型の加速器は、高周波による加速と集束をともに行うものである。

陽子や重イオンについては、電子に比べて質量が大きいため、高周波線形加速による加速効率が悪い (通常、数 MeV/m 以下)。このため、線形加速器で陽子や重イオンを高エネルギーまで加速するには、非常に長い距離を要することとなり、高エネルギーやエネルギーフロンティアの陽子、重イオンビームを得る主加速器としての線形加速器は建設されていない。

中間エネルギー原子核物理学研究における中間子ファクトリーでの陽子ビームの発生やエネルギーフロンティア陽子シンクロトロンの入射器としては、線形加速器が用いられているものもある。また、原子炉に替わる大強度の中性子源として、あるいは放射性物質の消滅処理を行う加速器駆動未臨界炉における大強度の中性子源として、核破碎を起こす大強度の陽子ビームを用いる場合などでは、漏れビームの制御のしやすさなどから陽子線形加速器を基本として検討が行われている。この場合の陽子エネルギーは数 100MeV～2GeV 程度の中間エネルギーであり、ビームの強度は極めて大きく、数 mA～100mA 程度のものとなる。

1)中間エネルギー陽子線形加速器

中間エネルギーの陽子線形加速器については、エネルギー科学など大電流の陽子ビームの利用をめざすものが主で、現在は計画中のものが多いが、これらの陽子線形加速器は以下のような構成の線形加速器が連結されてできているのが典型的なものである。

表－Ⅳ－1－22 中間エネルギー陽子線形加速器の典型的な構成

| 段 階 | エネルギー領域 | 加速器構成 |
|------|-----------------------|-------------------------------------|
| イオン源 | 50-100keV まで | 各種 |
| 初期加速 | 数 MeV まで | 高周波4極型 RFQ型 linac |
| 前段加速 | 100-200MeV まで | ドリフトチューブ型 DTL (Drift Tube Linac) |
| 主加速 | 1-2GeV の最終 エネルギーまで | 結合空洞型 CCL (Coupled Cavity Linac) |

・大電流化に向けた開発

陽子ビームの大電流化に関しては、漏れビームによる加速器装置類の放射化の極小化と加速効率の向上が基本的な課題である。

漏れビームを極小化するにはビームの集束性を向上させることが必要であり、これには低エネルギーの初期加速から質の良いビームを供給してゆくことが、まず求められる。上の表で初期加速に使われているRFQ型線形加速器は、比較的新しく（1970年に）提案されたもので、ビームの集束性およびビームのバンチ形成に優れた能力を持ち、大電流で質の良いビームを得るためには不可欠なものとなっている。

前段加速で使われるドリフトチューブ型線形加速器は、空洞共振器の高周波定在波を利用するもので、1946年に開発され、これまでに多くのものが建設されて技術的には確立している。しかし、工学利用を目的とした大電流の陽子線形加速器においては、ビームの集束性を可能なかぎり向上させることが必要とされており、ドリフトチューブ内に組み込まれている集束用の磁石をチューブ外に設置し、集束制御性を向上させることなどが研究されている。このことにより加速管の大きさが小さくなり、加速効率の向上も期待されている。

主加速に用いられる結合空洞型線形加速器は、電子の線形加速に使われるディスクローデッド型加速管などと同様に、光速より遅い位相速度の高周波進行波を用いるものである。結合空洞型線形加速器の加速管の内部は、軸上に加速空洞が設けられるとともに、遅波構造を持たせた複雑な形状をしており、米国のロスアラモス国立研究所（LANL）のLANSCE（；Los Alamos Neutron Science Center）Linac、フェルミ国立加速器研究所（FNAL）Tevatron 入射器で実用化されている側結合型空洞（Side Coupled Cavity）、ロシアの科学アカデミー原子核研究所（INR）モスクワメソンファクトリーのMMFL（；Moscow Meson Factory Linac）で実用化されたDAW（Disk and Washer）型空洞、日本のKEKで技術開発が行われた環状結合型空洞（Annular Coupled Cavity）などがある。最近の計算機の発達とともに電場分布予測の精度が向上してきており、今後より効率的な加速をめざした、新たな提案がなされる可能性がある。

加速空洞を超伝導化させた超伝導線形加速器は、高周波電力のロスが小さく主加速における加速効率を飛躍的に向上させることから、電子の線形加速器などでは定常的に使用されるようになってきている。陽子の中間エネルギーまでの加速については、陽子のエネルギーに応じて加速空洞の構造を変化させる必要があり、これまで実用化されていない。この陽子線形加速器の加速空洞の超伝導化については、日本原子力研究所や米国のロスアラモス国立研究所、トーマス・ジェファソン国立加速器研究所などで開発が行われている。米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）に建設されるSNSの線形加速器や、日本の大強度陽子加速器施設の線形加速器には、超伝導加速空洞が用いられることとなっている。

なお、表－IV－1－23に中間エネルギーの陽子線形加速器（主として計画中のもの）を示す。

表-Ⅳ-1-23 中間エネルギー陽子線形加速器

| 加速器 | 研究機関 | 加速器概要 | ビーム強度 | 主たる利用 | 備考 |
|--------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-----|
| LANSCE Linac | LANL (米国) | 長さ約 800m、800MeV | | 中間子 ファクトリー | 稼働中 |
| APT/ATW | | 超伝導リニアック 1.3GeV/1.7GeV | | トリチウム生産 消滅処理 | 計画中 |
| Fermilab Proton Linac | FNAL (米国) | 長さ約 145m、400MeV | | Tevatron への入射他 | 稼働中 |
| MMFL | 科学アカデミー原子 核研究所(ロシア) | 長さ約 430m、600MeV | | 中間子 ファクトリー | 稼働中 |
| SNS 入射器 | ORNL (米国) | 超伝導リニアック 長さ約 300m、1GeV | 当初 1MW 漸次増強 4MW | 中性子源 | 建設中 |
| 大強度陽子 線形加速器 | JAERI/KEK (日本) | 一部超伝導リニアック 長さ約 360 m、600MeV | | 消滅処理 中性子源 | 計画中 |
| TRISPAL | (フランス) | 超伝導リニアック 600MeV | | トリチウム生産 | 計画中 |
| KOMAC | KAERI (韓国) | 超伝導リニアック 1GeV | | 消滅処理 | 計画中 |
| ESS | RAL/KFA (イギリス・スイス) | 1.3GeV | 5MW | 中性子源 | 計画中 |

2) 低エネルギー陽子・重イオン線形加速器

イオン源で発生した数 10keV～100keV 程度のイオンを、そのままドリフトチューブ型線形加速器に入射させるのは困難であり、これを数 100keV 以上のエネルギーまで加速する必要がある。このため、以前はコッククロフト・ワルトン型静電加速器で加速し、ドリフトチューブ型加速器に入射させていたが、RFQ型の開発が行われ、現在では陽子・重イオン線形加速器のイオン源とドリフトチューブ型加速器部の間にRFQ型加速器を配置するのが、一般的になっている。

RFQ型線形加速器の加速空洞内では、2対の向い合った（波形の頂端部をもつ）ベーンが、隣合ったベーンは逆位相になるように取り付けられており、この構造により励起される4重極電場は、ビームの進行方向の加速とビームをバンチさせる両方の役割を担うものとなる。このことから、RFQ型線形加速器（長さ数m）では質の良い入射ビーム（陽子エネルギーで数～10MeV）が得られる。CERNのLHC、BNLのRHIC、放射線医学総合研究所のHIMACなどの入射部には、既にRFQ加速器が使われている。

陽子で140MeVまでの低エネルギービームを得る線形加速器は、ドリフトチューブ型の加速器である。重イオンについてはウィドレー型加速器となる。いずれも加速勾配は大きくなく、低エネルギー領域でもかなり大型のものとなる。

3) 陽子・重イオン線形加速器技術による200MeV/n級線形加速器小型化の限界

6頁に示した新しい小型加速器の目安として、陽子ビーム、重イオンビームについては、エネルギーとして200MeV/n程度のものを発生できるものとした。

まず、陽子ビームの場合についてみると、加速勾配は数 MeV/m 程度であることより、200MeVの

陽子ビームを発生させることのできる最小の線形加速器は長さ数 10m 程度のものとなる。また、重イオンビームの場合は、加速勾配は陽子の場合より小さく、200MeV/n の重イオンビームを発生させることのできる線形加速器は、かなり大規模なものとなる。

陽子、重イオン加速については、従来型の線形加速器技術では目安規模までの小型化は困難であると考えられる。

IV-2. ビーム冷却に関する研究開発状況

(参考文献[IV52]によりまとめる)

加速された粒子群（ビーム）内の粒子個々の運動量はばらついており、加速したビームをそのまま使える場合は少なく、一般的には運動量のばらつきを少なくすること（ビームの高品質化）が要求される。例えば、高エネルギー物理学研究における衝突実験では、反対方向に運動する粒子同士を効率よく衝突させるため、衝突させるビームを細く絞り込みビームの粒子密度を高くすること（高輝度にすること）が求められる。

このビームの高品質化は、ビーム内での個々の粒子の運動量を揃えてゆくことであり、ビームと同じ速度で動く系で見ると、粒子相互間の速度を小さくすること、すなわち、気体を冷却することと同じ現象である。このため、ビーム内の粒子の運動量を揃えること（高品質化）を「ビーム冷却」と呼んでいる。

一般的に述べると、加速器で加速された粒子群は、水平、垂直および進行方向の3つの運動の自由度に対する6次元位相空間（位置の自由度3、運動量の自由度3）においてある体積を占めて運動する。ビーム冷却とは、この6次元位相空間内での代表点密度を高めることであり、別な言い方をすれば、ビームを失うことなく粒子の運動量ばらつきおよび位置のばらつきを小さくすること（位相空間体積を減少させること）である。先の例の、高エネルギー物理学研究における衝突実験においてビームに求められるものは、粒子群の粒子位置のばらつきおよび運動量ばらつきがともに小さいことである。

ビーム冷却法として現在までに確立しているものは、

- ・放射冷却
- ・ストカスティック冷却
- ・電子ビーム冷却
- ・レーザー冷却

の4種類である。その他、エネルギー損失（アイオニゼーション）冷却が最近精力的に研究されている。これらの冷却法の概要を以下にまとめる。

1. 放射冷却

荷電粒子が磁場により曲げられる際にシンクロトロン放射が生じる。このシンクロトロン放射で発生する光子は、荷電粒子のもつ運動量の一部を持ち去るため、荷電粒子の運動量は磁場により曲げられる前に比べて小さくなっている（磁場に垂直な面のどの方向の運動量も小さくなる）。この後、荷電粒子を加速すると、加速される方向のみの運動量が増加する。この磁場による荷電

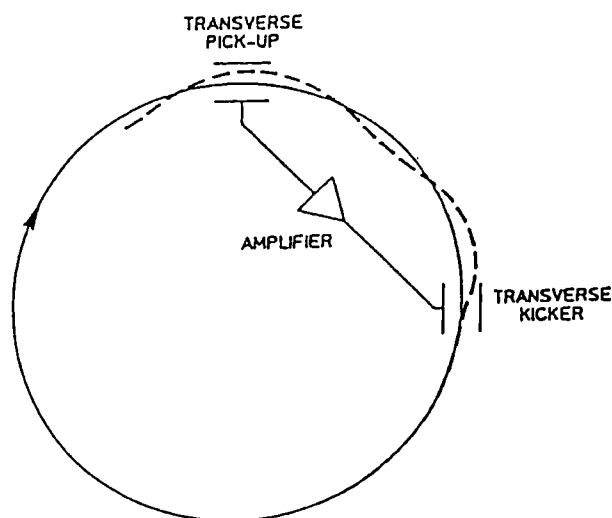
粒子のシンクロトロン放射とその後の加速を繰り返し行くと、結果として、加速方向と直交する方向の運動量が小さくなり、また、シンクロトロン放射のエネルギー依存性により加速方向の運動量の拡がりも縮減するので、ビームの運動量がそろふこととなる。このビーム冷却法を放射冷却と呼んでいる。

放射冷却は、質量の小さい電子あるいは陽電子に有効である。電子や陽電子の蓄積リングでは、電子あるいは陽電子はリングを1回りする間に、偏向電磁石部および高周波加速空洞を通過する。この電子および陽電子の周回は、偏向部でのシンクロトロン放射によるエネルギー損失（進行方向および直交する方向とも減速される）と高周波加速空洞での加速（進行方向のみ加速される）を交互に繰り返すこととなり、結果として、電子や陽電子の運動量のばらつきが減少してビームが冷却される。この冷却に要する時間は、自らの運動エネルギーを放射光エネルギーとして失う時間で、1GeVの電子では数10ミリ秒である。

この冷却は、例えば、電子・陽電子（シンクロトロン）衝突リング（Colliding Ring）においては、ビーム衝突の前の加速で必然的に起こっている。また、電子・陽電子リニアコライダーでは、初期加速のあとダンピングリングを設けている（表Ⅳ-1-17参照）が、これは放射冷却を利用したビームの高品質化を行う装置である。

2. ストカスティック(確率)冷却

蓄積リング周回中のビームのある点での運動量のずれ（あるいはベータトロン振動）を検知し、それを下流の補正器において補正することを繰り返すことにより、運動量のずれ（あるいはベータトロン振動）を小さくしてゆくビーム冷却（図Ⅳ-2-1参照）である。この冷却に要する時間は長く、衝突器については時間オーダーのものとなる。



図Ⅳ-2-1 横方向ストカスティック冷却の原理

ストカスティック冷却の原理は、1968年 S. van der Meer により提起され、1975年 CERN の陽子衝突器（ISR）で実験的に確証された。1977～1983 年にかけては、CERN、FNAL および東京大学（原子核研究所）などで基礎的な研究が行われ、CERN の陽子・反陽子衝突器（SPPS）、FNAL の陽子・反陽子衝突器（Tevatron）で採用された。なお、CERN の陽子・反陽子衝突器（SPPS）でのウィークボゾンの発見により、S. van der Meer らがノーベル賞を受賞した（1984

年)。

この冷却法は、次の電子ビーム冷却と併用されて、低エネルギーの軽イオンや重イオン冷却リングに効果的に用いられている。ストカスティック冷却が用いられているあるいは検討されているプロジェクトをまとめると、表Ⅳ-2-1のようになる。

表Ⅳ-2-1 ストカスティック冷却が採用(検討)されている加速器

| | Tevatron (F N A L) | RHIC (B N L) | LEAR (C E R N) | ESR (G S I) | MUSES (理研) |
|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| T(GeV/n) | 1000 | 100 | 0.006-1.4 | 0.5 | 0.1-0.4 |
| ビーム | 陽子・ 反陽子 | Au ⁷⁹⁺ | 反陽子 | Fragments (不安定核) | Fragments (不安定核) |
| W(GHz) | 4-8 | 4-8 | 0.01-1 | 0.9-1.8 | 1.0-2.0 |
| N(10 ⁹) | 120/40 | 1 | 0.1-50 | ~0.1 | ~0.01 |
| τ(sec) | 18/50 (h) | 16 (h) | 100-500 | ~1 | ~0.1 |
| Δp/p(%) | 0.014 | 0.1 | 0.3 | 0.35 | 0.15 |
| 目 的 | 高ルミノシティ | 高ルミノシティ | 低エミッタンス | Pre-cooling | Pre-cooling |

このほか、ドイツ Forschungszentrum Jurich (ユリッチ研究センター) の COoler SYnchrotron COSY においても 1 - 2.5GeV 陽子の冷却にストカスティック冷却が採用されている。

3. 電子ビーム冷却

蓄積リング内のある部分でイオンビームと電子ビームを等速度で同じ方向に走らせる場合を考える(図Ⅳ-2-2 参照)。この状態をビームの重心系で考えると、仮に、電子ビームの温度が低い(運動量が揃っている)とすれば、温度の高いイオンビームのエネルギーはクーロン相互作用により、電子ビームに遷移し、結果としてイオンビームの温度が下がる。この場合、イオンの質量が大きいほど、電子ビーム遷移するエネルギーが大きく冷却効率が高い。

電子ビーム冷却法は、1966 年 G. I. Budker によって提案され、1974 年に B I N P (ロシア、ノボシビルスク) で 65MeV の陽子ビームを用いて実験された。この冷却法は、当初は陽子・陽子および陽子・反陽子衝突器のルミノシティを増大させるために提起され、1974~1986 年まで B I N P、C E R N、F N A L で反陽子ビームの冷却をめざして基礎研究が行われた。しかし、この目的のためには、上で述べたストカスティック冷却の方が有効性が高いと判断され、実用化には至らなかった。

1990 年代に入り、低エネルギーの軽イオン冷却リング、重イオンの冷却リングが精密核物理および原子・分子物理学にとって有効であることがわかり、これらの冷却リングで電子ビーム冷却が用いられるようになった。表Ⅳ-2-2 に、電子ビーム冷却法が採用(検討)されている軽・重イオンリングを示す。

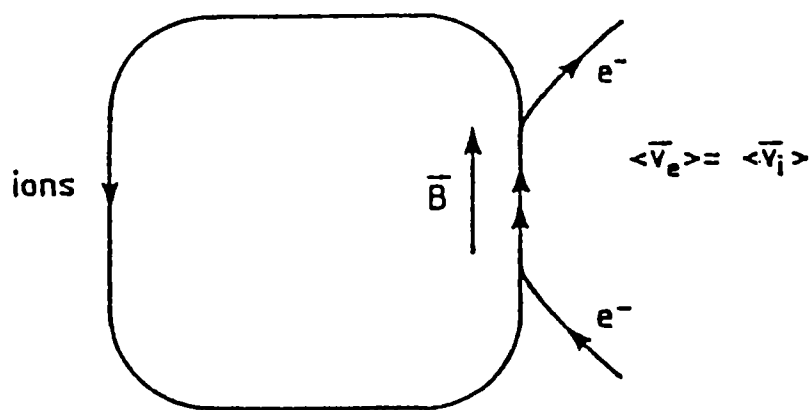


図-IV-2-2 電子ビーム冷却の原理

表-IV-2-2 電子ビーム冷却が採用(検討)されている軽・重イオンリング

| 重イオン冷却リング (所在国、研究機関) | イオン種 | イオンエネルギー (MeV/n) | 電子エネルギー (keV) | 電流 (A) |
|---|-----------|---------------------|------------------|-----------|
| LEAR (1981/1996 終了) (スイス CERN) | Pb | 4.2 | 35 | 3.0 |
| IUCR (1987) (米国 Indiana University Cyclotron Facility) | Proton | 500 | 270 | 4.8 |
| TSR | $A < 127$ | 30 | 20 | 1 |
| TARN II (1987/2000 解体) (日本 KEK 田無 (旧東京大学)) | $A < 20$ | 20 | 130 | 5 |
| ASTRID (デンマーク Aarhus University) | $A < 20$ | 50 | 27 | 3 |
| ESR (1990) (ドイツ GSI) | $A < 238$ | 560 | 320 | 5 |
| CELSIUS (1988) (スウェーデン Uppsala University, The Svedberg Laboratory (TSL)) | $A < 40$ | 340 | 300 | 2.8 |
| CRYRING (スウェーデン マンシー・ハーン研究所) | $A < 40$ | 24 | 20 | 3 |
| COSY-Julich (1993) (ドイツ、Forschungszentrum Julich, ユリッヒ研究センター) | Proton | 2500 | 100 | 3 |
| MUSES (計画中) (日本 理化学研究所) | $A < 238$ | 400 | 500 | 5 |

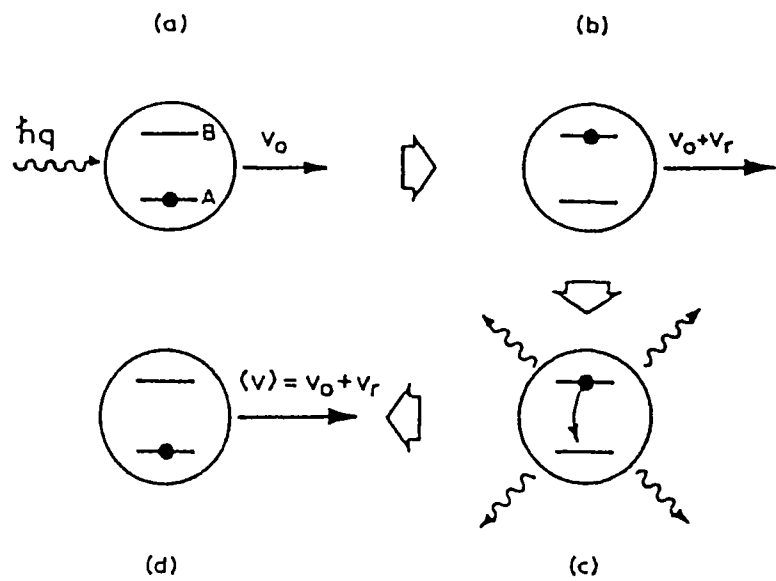
4. レーザー冷却

特徴的な電子共鳴状態をもつイオン（現段階では、表-IV-2-3に示すもの）について、リングで周回中に共鳴状態間の遷移エネルギーをもつ光子ビーム（レーザー）を照射して電子を励起させる（このとき光子の運動量がイオンの運動量に加わる）と、その後の自発的光子放出によりイオンの運動量が等方的に減少し、結果としてレーザー光子の運動量分だけ平均として加速あ

るいは減速される（図－Ⅳ－２－３ 参照）。これを利用する冷却法が、レーザー冷却法である。

表－Ⅳ－２－３ レーザー冷却が可能なイオンと特徴

| | ${}^6,7\text{Li}^+$ | ${}^9\text{Be}^+$ | ${}^{24}\text{Mg}^+$ |
|---|---------------------|-------------------|----------------------|
| Lower level | $2s^3S_1$ | $2s^2S_{1/2}$ | $3s^2S_{1/2}$ |
| Upper level | $2p^3P_2$ | $2p^2P_{3/2}$ | $3p^2P_{3/2}$ |
| Lifetime of lower level | $\sim 50\text{s}$ | 基底状態 | 基底状態 |
| Lifetime of upper level | 43ns | 8.2ns | 3.5ns |
| Transition wavelength 遷移光子波長 (励起レーザー波長) | 548nm | 313nm | 280nm |



図－Ⅳ－２－３ レーザー冷却の原理

レーザー冷却については、その原理提案以来多くの実験が行われ、特にトラップされたイオンについては、既に数 $10\mu\text{K}$ という温度が達成され、超精密レーザー分光の手段として確立されている。この方法を貯蔵リング内の高速イオンビームに適用してビーム冷却を行い（ビーム温度を下げ）、ビームの結晶化を行うなどの試みが始まっている。

5. エネルギー損失(アイオニゼーション)冷却

粒子群が物質中を通過すると、物質中電子のイオン化により粒子の（進行方向およびそれに垂直な方向のいずれでも）運動量が減少する。物質を通過後、粒子群の進行方向に加速を行うと、物質を通過前に比べて、粒子群の運動量が揃うこととなる。このビーム冷却方法は、エネルギー

損失（アイオニゼーション）冷却（図-IV-2-4 参照）と呼ばれている。

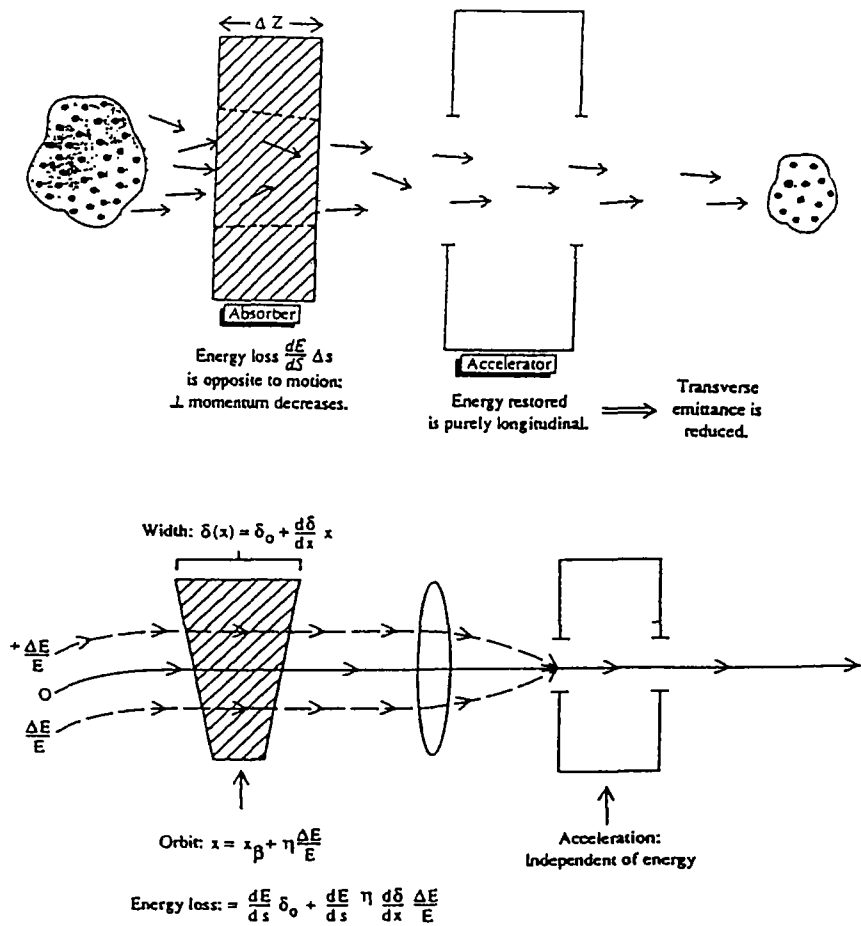


図-IV-2-4 アイオニゼーション冷却の原理

高エネルギー物理学分野での（第1世代のレプトンである）電子・陽電子の衝突において、シンクロトロン衝突リングではシンクロトロン放射光によるエネルギー損失のため、エネルギーをこれ（LEP IIで達成された 100GeV（実験室系））以上に上げることは実質的に限界といわれているが、同じ衝突リングで第2世代のレプトンであるμ粒子・反μ粒子（質量は電子の約 200 倍）を衝突させる場合は、シンクロトロン放射光によるエネルギー損失は問題にならず、更なるエネルギーフロンティアに挑戦できるものとなる。この場合、問題になる点は、μ粒子の寿命が（静止系で） $2.2 \times 10^{-6} \text{sec}$ （1GeV の運動エネルギーを持つ場合は約 $20 \times 10^{-6} \text{sec}$ ）と短いため、この寿命内に加速衝突までを行う必要があることである。

μ粒子、反μ粒子は、陽子ビームを標的に当てて生成される二次粒子のπ中間子の崩壊により生成するが、π中間子のエネルギーや運動量の揺らぎをそのまま引き継ぐため、ビームとしての質は悪い。この質の悪いμ粒子、反μ粒子ビームを高エネルギーまで加速し、衝突させるにはビーム冷却が必須となる。μ粒子あるいは反μ粒子については、その寿命が短いことより、時間のかかるストカスティック冷却は使えない。そのため、適用できるビーム冷却法としては、エネルギー損失（アイオニゼーション）冷却が考えられている。

以上、現在までに確立されている放射冷却、ストカスティック冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却および研究が行われているエネルギー損失（アイオニゼーション）冷却を述べたが、それらのビーム冷却法の特徴を下表（表－Ⅳ－２－４）にまとめる。

表－Ⅳ－２－４ ビーム冷却法の特徴のまとめ

| | 放射冷却 | ストカスティック冷却 | 電子ビーム冷却 | レーザー冷却 | アイオニゼーション冷却 |
|----------------|------------------|------------------------|--|--------------------------|--------------------------|
| 適用可能な粒子種類 | 電子 陽電子 | 全ての粒子 | イオン（重イオン程冷却効率大） | いくつかの限られたイオン種 | μ 粒子 反 μ 粒子 |
| ビームエネルギー | 高い程効果的 | 任意 | 中間 ($0.01 < \beta < 0.1$) 低い程効果的 | 任意 | 0.3GeV 以上 |
| ビーム強度 | 任意 | 小 | 任意 | 任意 | 任意 |
| 冷却時間 | $\sim 10^{-3}$ 秒 | 粒子数 $\times 10^{-8}$ 秒 | $1 \sim 10^{-2}$ 秒 | $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 秒 | $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 秒 |
| 効果的冷却のためのビーム温度 | 任意 | 高 | 低 | 低 | 任意 |

参考文献 (IV章)

- [IV 1] S. Kurokawa, "CATALOGUE OF HIGH ENERGY ACCELERATORS", (1989). (XIVth International Conference on High Energy Accelerators, Tukuba, Japan (August 22-26, 1989))
- [IV 2] J. C. Cornell, "CYCLOTRONS AND THEIR APPLICATIONS", World Scientific Publishing, (1995). (Proceedings of the 14th International Conference, Cape Town, South Africa, (8-13 October, 1996))
- [IV 3] J. Clendenin, L. Rinolfi, K. Takata, D. J. Warner, "Compendium of Scientific Linacs", CERN/PS 96-32(DI), (1996). (XVIII International Linac Conference, Geneva, Switzerland (26-30 August, 1996))
- [IV 4] 培風館, 物理学辞典 (改訂版) (1994年4月20日) 付録 2417-2419.
- [IV 5] 東京大学物性研究所 (軌道放射物性研究施設)
(<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/>), (高輝度光源計画).
- [IV 6] 電子技術総合研究所 (<http://www.etl.go.jp/jp/contents.html>), 組織 (量子放射部).
- [IV 7] 高エネルギー加速器研究機構 (物質構造科学研究所 放射光研究施設)
(<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>).
- [IV 8] 岡崎国立共同研究機構 (分子科学研究所) (<http://www.ims.ac.jp/indexj.html>), (極端紫外光実験施設 (UVSOR)).
- [IV 9] 立命館大学 SR センター (<http://www.ritsumeit.ac.jp/se/d11/index-j.html>).
- [IV10] SPring-8 (http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/general_info/overview/) (SPring-8 の概要).
- [IV11] 広島大学放射光科学研究センター (<http://www.hsrl.hiroshima-u.ac.jp/>).
- [IV12] 姫路工業大学 (高度産業科学技術研究所)
(<http://www.lasti.himeji-tech.ac.jp/NS/Index-J.html>).
- [IV13] 東北大学 (原子核理学研究施設) (http://www.lns.tohoku.ac.jp/index_j2.html).
- [IV14] Stanford Linear Accelerator Center (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL)) (<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/beamlines/>).
- [IV15] Cornell University (Cornell High Energy Synchrotron Source (CHESS))
(http://www.chess.cornell.edu/Facility/Stations_n_Facilities/Stations.htm).
- [IV16] Daresbury Laboratory (Synchrotron Radiation Source (SRS))
(<http://srs.dl.ac.uk/index.htm>).
- [IV17] University of Wisconsin - Madison (Synchrotron Radiation Center (SRC)) (Aladdin)
(<http://www.src.wisc.edu/facilities/default.html>)
- [IV18] Brookhaven National Laboratory (National Synchrotron Light Source (NSLS))
(<http://nslsweb.nsls.bnl.gov>).
- [IV19] Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnetique (LURE)
(<http://www.lure.u-psud.fr/DPTS/Anneaux/general/CARAC.HTM>).

- [IV20]Beijing Synchrotron Radiation Laboratory (BSRL) (Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF))
(<http://www.friends-partners.org/china/ins/IHREP/bsrf/bsrf.html>).
- [IV21]Hamburger Synchrotronstrahlungslabor (HASYLAB)
(<http://www-hasylib.desy.de/facility/index.html>).
- [IV22]Synchrotron Radiation Research Center (SRRC) (Taiwan Light Source(TLS))
(<http://www.srrc.gov.tw/en/general/facility.html>).
- [IV23]Lawrence Berkeley National Laboratory (Advanced Light Source (ALS))
(http://www-als.lbl.gov/als/als_users/bl/bl_table.html).
- [IV24]University of Science and Technology (POSTECH) (Pohang Light Source (PLS))
(<http://palcom03.postech.ac.kr/~jinnaml/english/frame.htm>).
- [IV25]European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)
(http://www.esrf.fr/exp_facilities/BLHB.html).
- [IV26]Argonne National Laboratory (Advance Photon Source (APS))
(<http://www.aps.anl.gov/aps.php>).
- [IV27]大強度陽子加速器計画 (<http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/>).
- [IV28]筑波大学陽子線医学利用センター (<http://www-medical.kek.jp/marul.html>).
- [IV29]Loma Linda University Medical Center (<http://proton.llu.edu>) (Proton Treatment Center)
- [IV30]静岡県ガンセンター (仮称) (<http://www.pref.shizuoka.jp/kenhuku/kf-15/>).
- [IV31]放射線医学総合研究所 (http://www.nirs.go.jp/newinfo/press/2000/09jyu_s01.htm).
- [IV32](財)若狭湾エネルギー研究センター (<http://www.werc.or.jp/>).
- [IV33]兵庫県立粒子線治療センター (仮称) (<http://web.pref.hyogo.jp/ryusi/index.htm>).
- [IV34](社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会,「加速器の現状と将来」(第2章 2-5. シンクロトロン, NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術[V], (1998年6月)81-88.
- [IV35]Argonne National Laboratory (Intense Pulsed Neutron Source)
(<http://www.pns.anl.gov/>).
- [IV36]Los Aalamos National Laboratory (Los Aalamos Neutron Science Center)
(http://lansce.lanl.gov/index_ext.htm).
- [IV37]Oak Ridge National Laboratory (http://www.ornl.gov/ornlhome/neutron_sciences.htm).
- [IV38]Rutherford Appleton Laboratory (<http://www.isis.rl.ac.uk/>).
- [IV39]Joint Institute for Nuclear Research (<http://www.jinr.dubna.su/>).
- [IV40]Gesellschaft für Schwerionenforschung (<http://www.gsi.de/gsi.html>) (acclerator)).
- [IV41](社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会,「加速器の現状と将来」(第2章 2-4. サイクロトロン), NSA COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998年6月) 71-80.
- [IV42]理化学研究所,「リングサイクロトロン (重イオン科学用加速器)」, (1996年3月).
- [IV43]理化学研究所,「RI ビームファクトリー建設計画」, (1996年9月).
- [IV44]東京大学大学院理学系研究科,「附属原子核科学研究センター」, (1997年5月).

- [IV45] 日本原子力研究所 (<http://www.jaeri.go.jp/genken/index.html>) (高崎研究所、放射線高度利用センター).
- [IV46] Stanfor Linear Accelerator Center, "A BRIEF HISTORY OF SLAC (ESTABLISHED 1962)", (July 1998).
- [IV47] 文部省・高エネルギー加速器研究機構, 「物質の根源、宇宙創成の瞬間に迫る電子・陽電子リニアコライダー計画(JLC Project)」.
- [IV48] (社)日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会, 「加速器の現状と将来」(第2章 1-2. 高エネルギー加速器の分類), NSA/COMMENTARIES:No. 6 原子力と先端技術 [V], (1998年6月) 34.
- [IV49] 培風館, 物理学辞典(改訂版)(1994年4月20日), 「周波数帯」898.
- [IV50] 竹田誠之, 「新しい概念の加速器」, 月刊フィジクス 12-1984 (通巻43号), (1984年12月) 788.
- [IV51] 高エネルギー加速器研究機構 (8GeV 電子 Linac),
(<http://www-linac.kek.jp/index-j.html>)
- [IV52] 片山武司(東京大学), 科学技術政策研究所 先端科学技術動向調査委員会(加速器科学)資料, (1998年6月).
- [IV53] 佐賀県シンクロトロン光応用研究施設,
(http://www.infosaga.or.jp/synchrotron/gaiyou.htm#outline_SL)
- [IV54] 日本大学 原子力研究所(電子線利用研究施設(LEBRA))
(<http://www.lebra.nihon-u.ac.jp/>)

V 先進加速技術等の研究開発状況

V 先進加速技術等の研究開発状況

V-1 先進加速技術等の定義とその研究開発の意義

物質・材料科学、生命科学などの分野においては、使われる装置機器類で加速器のみが巨大なものとなっている。IV-1（高周波加速器に関する研究開発状況）でみてきたように、高エネルギー物理学および原子核物理学における要求から開発されてきた加速器は、いずれも大型のものとなっている。高エネルギー物理学および原子核物理学研究分野における主たるインセンティブは、加速する粒子の高エネルギー化やあらゆる種類の粒子ビームの追求による学術研究の更なる進展であり、成熟した加速器技術が基礎となり、加速器自体のドラスティックな小型化追求の優先順位は高いものではない。また、エネルギー科学研究分野の加速器については、ビームの大強度化を追求することが現時点での最大の課題であり、同様に、成熟した加速器技術が基礎となり、加速器の大幅な小型化追求の段階には至っていない。

加速器自体の研究開発については、これまで学術研究分野（高エネルギー物理学および原子核物理学）が主として担ってきており、規模の大きい放射光装置や医療用加速器など、用途は異なるものが建設されてきてはいるが、加速器自体は学術研究用のものと基本的に同じで、確立された加速技術を用いている。また、今後の建設が予定されている中性子科学研究や消滅処理研究用にも用いられる大強度陽子加速器についても、同様に、加速器自体は学術研究用のものと基本的には同じである。

近年、加速器科学の物質・材料科学、生命科学や医療利用分野などへの拡がりが進展しているが、これらの科学分野では加速器以外にも様々な装置類が同時的に使われているのが一般的であり、他の装置類との併設使用の観点から加速器や放射光源のドラスティックな小型化の必要性が高くなってきている。また、これらの分野における加速器ビーム利用は、学術基礎研究、応用利用研究あるいは実用利用のいずれにおいても重要性を増し、その更なる発展・普及にとって、加速器や放射光源の小型化はニーズが高く、避けられない課題である。実際、III章で述べた「加速器ビームニーズ等に関する調査」においては、この章でまとめる（先進）小型加速器等の提案について加速器ビームユーザーにそのメリットを質問し、その結果約 40%の回答者からのメリットがあるとの回答を得ており、その開発ニーズが高いことが示されている（VI-2 参照）。この結果と併せて、加速器ビームユーザーが実用化後に想定している使い方などについては、次節VI-2で述べる。

本章では、加速器あるいは放射光施設のドラスティックな小型化につながる技術およびその研究開発状況を調べることとする。

まず、小型加速器等（小型加速器および小型放射光源を合わせて「小型加速器等」という）の規模としては、以下の規模のものを想定する。

| 小型加速器等の目安 | | |
|-----------|---|---|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |

現在の高周波加速器で、上の規模の加速器で得られるビームエネルギーは、おおよそ以下のようである。

| 現在の高周波小型加速器等で供給できるビームエネルギー | | |
|----------------------------|---|------------|
| 電子エネルギー | : | 数 10MeV 程度 |
| 陽子・重イオンエネルギー | : | 20MeV/n 程度 |
| 放射光子エネルギー | : | 数 keV 程度 |

いま、仮に以下のようなビームエネルギーが上の規模の小型加速器等で供給できるものと考え、各地の（民間企業も含む）研究機関の実験室において可能となる研究領域が飛躍的に高まるとともに、医療利用ではがん治療などの普及に役立つものと考えられる。

| 小型加速器等で供給するビームエネルギー（仮定） | | |
|-------------------------|---|---------------|
| 電子エネルギー | : | 1 GeV 程度 |
| 陽子・重イオンエネルギー | : | 200 MeV/n 程度 |
| 放射光子エネルギー | : | 30～100 keV 程度 |

上記のビームエネルギーは、電子および陽子・重イオンについては中間エネルギー領域に属するものであり、放射光子については硬X線領域に属するものである。これらのビームを供給できる日本国内の加速器施設あるいは放射光施設（計画中のものも含む）を挙げると、次の表のようになる。これらの表に示すように、計画中の加速器施設を含めたとしても、上記のエネルギーのビームを供給できる施設の数に限られており、かつ、中規模あるいは大規模なものである上に、地域的にも偏在している。

表－V－1－1 1GeV 以上の電子が利用できる加速器施設

| 研究機関 | | 加速器 名称等 | 稼働 開始 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | |
|-------------------|------------|----------------------------|----------------|--|----------------------|-------------------|
| 東京大学 | 原子核 研究所 | INS-ES | 1961 | 線形加速器(15MeV) +シンクロトロン(周長 35m, 1.3GeV) | 1.3 | 終了 |
| | 物性研究所 | 高輝度光源 計画 | | +蓄積リング(周長 250m, 1.6GeV) | 1.0-1.6 | 計画中 |
| 高エネルギー加速器 研究機構 | | PF(Photon Factory) | 1982 (1997) | 線形加速器(長さ約 415m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長 187m, 2.5GeV) | 2.5 0.7-3.0 | 1997 年性能 向上終了 |
| | | PF-AR (Advance Ring) | 1989 (1997) | 線形加速器(長さ約 415m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長 377m, 6.5GeV) | 5.8-6.5 | TRISTAN AR を改造 |
| 高輝度光科学 研究センター | | SPring-8 | 1997 | 線形加速器(長さ約 140m, 1GeV) +ブースターシンクロトロン(周長 396m, 8GeV) +蓄積リング(周長 1,436m, 8GeV) | 8.0 | |

(次頁に続く)

(前頁より続く)

表－V－1－1 1GeV以上の電子が利用できる加速器施設

| | | | | | |
|-----------------------|---------|------|--|---------|---------------------|
| 姫路工業大学 | ニュースパール | 1998 | 線形加速器(長さ約140m, 1GeV) (SPring-8の入射線形加速器) +蓄積リング(周長119m, 1.5GeV) | 0.5-1.5 | |
| 東北大学 原子核理学 研究施設 | | | 線形加速器(長さ約52m, 0.2GeV) +ブースターリング(周長49.8m, 1.2GeV) {+蓄積リング(1.5GeV)未} | 1.5 | ブースターリング 1998年完成 |

表－V－1－2 200MeV/n以上の陽子・重イオンが発生できる加速器施設

| 研究機関 | 加速器 名称等 | 稼働 開始 | 加速器構成 | エネルギー (MeV) | 加速粒子 |
|---------------------------|-----------------|----------|--------------------------------------|---|-------------|
| 高エネルギー加速器 研究機構 | BSF | 1974 | 陽子シンクロトロン (平均直径約12m) | 500 | 陽子 |
| | KEK-PS | 1976 | 陽子シンクロトロン (平均直径約108m) | 12GeV | 陽子 |
| | TARN II (解体) | 1987 | イオン蓄積リング (周長約78m) | 1.1GeV 200MeV/n(HI) | 陽子 重イオン |
| 理化学研究所 | リングサイクロトロン | 1986 | リングサイクロトロン (直径約12.6m, 総重量2,100トン) | 210 540Q ² /A ² (HI) | 陽子 重イオン |
| 大阪大学 核物理研究センター | リングサイクロトロン | 1991 | リングサイクロトロン (直径約13m, 総重量2,200トン) | 400 400Q ² /A ² (HI) | 陽子 重イオン |
| 放射線医学 総合研究所 | HIMAC | 1994 | 重イオンシンクロトロン(医療利用が主) (直径約42m) | 800MeV/n(HI) | 重イオン |
| 国立がんセンター 東病院 | サイクロトロン | 1998 | サイクロトロン(医療専用) (直径約2m, 総重量約200トン) | 235 | 陽子 |
| 若狭湾エネルギー 研究センター | | 2000 | 重イオンシンクロトロン(多目的利用) (周長約33m) | 200 | 陽子 He, C |
| 筑波大学 陽子線医学利用 研究センター | | 2001 | 陽子シンクロトロン(医療利用が主) (周長約23m) | 250 | 陽子 |
| 兵庫県立粒子線 治療センター(仮称) | HARIMAC | 建設 中 | 重イオンシンクロトロン(医療利用が主) (周長約90m) | 70~230 70~320MeV/n | 陽子 炭素 |
| 静岡県がんセン ター | | 建設 中 | 陽子シンクロトロン(医療利用が主) (周長約20m) | 235 | 陽子 |

表－V－1－3 30~100keVの放射光(硬X線)が利用できる施設

| 研究機関 | 加速器 名称等 | 稼働 開始 | 加速器構成 | 電子 エネルギー (GeV) | 備考 |
|-------------------|------------|----------------|---|----------------------|-------------------|
| 高エネルギー加速器 研究機構 | PF | 1982 (1997) | 線形加速器(長さ約415m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長187m, 2.5GeV) | 2.5 0.7-3.0 | 1997年性能向上終了 |
| | PF-AR | 1989 (1997) | 線形加速器(長さ約415m, 2.5GeV) +蓄積リング(周長377m, 6.5GeV) | 5.8-6.5 | TRISTAN AR を改造 |
| 高輝度光科学 研究センター | SPring-8 | 1997 | 線形加速器(長さ約140m, 1GeV) +ブースターシンクロトロン(周長396m, 8GeV) +蓄積リング(周長1,436m, 8GeV) | 8.0 | |
| 姫路工業大学 | ニュースパール | 1998 | 線形加速器(長さ約140m, 1GeV) (SPring-8の入射線形加速器) +蓄積リング(周長119m, 1.5GeV) | 0.5-1.5 | |

大型あるいは中型加速器の数は多くない上、その利用の現状は、いくつかの大型加速器で物質・材料科学、生命科学あるいは医療利用などの様々なユーザーがビームタイムの割り当てを受け、ビームの利用が行われている。この状況は 20 年ほど前の大型計算機の利用状況に良く似たものとなっている。計算機については、小型の計算機（パーソナルコンピュータ）の処理能力向上とともに新たなニーズを拓き、現在では社会のあらゆる分野でパーソナルコンピュータが利用されている。加速器についても同様な状況が想定され、比較的高いビームエネルギーを供給でき、実験室規模までの小型化を可能とする加速技術は、将来の加速器科学の多様な発展のキーテクノロジーであると考えられる。

このキーテクノロジーと考えられるものとして、以下のものが挙げられる。

- a. 高周波加速技術において極限的に小型化を追求するもの（高周波極限加速技術）
- b. 高周波加速とは異なる原理で非常に強い加速電場を用いる加速技術（非高周波高勾配加速技術）あるいは電子シンクロトロンからの放射光発生とは異なるコンパクトな放射光源技術

次節 V-2（先進加速技術等による小型加速器等研究開発状況）の 1（高周波極限加速技術による小型加速器研究開発状況）では、a. の高周波極限加速技術についてより詳しく触れることとするが、以下の 2 つがそれに相当する。

- i 高周波極限（Wバンド）電子加速
- ii 超小型陽子シンクロトロン技術

また、次節 V-2 の 2（非高周波高勾配加速技術、小型放射光源技術による小型加速器等の研究開発状況）では b. の技術について触れるが、これまでの高周波加速と異なる原理に基づく高勾配の加速技術あるいは電子シンクロトロンからの放射光発生とは異なるコンパクトな放射光源技術が提案されてきており、これら（以下のもの）について整理して述べることにする。

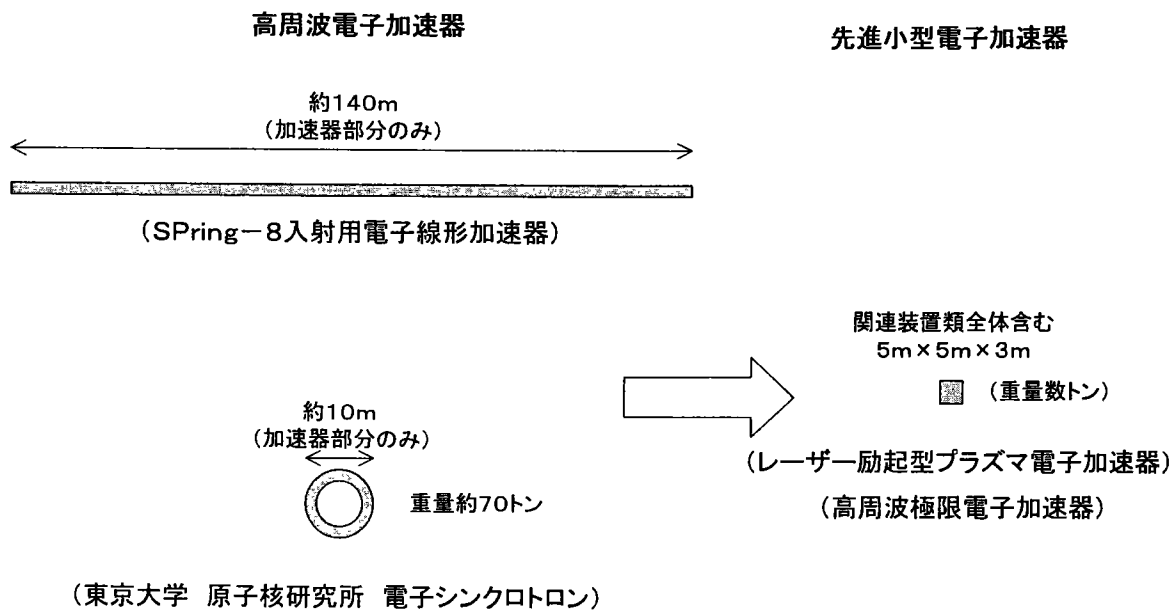
- iii 電子の非高周波高勾配加速技術
 - iii-A ビーム励起型プラズマ加速
 - iii-B レーザー励起型プラズマ加速
 - iii-C 逆チェレンコフレーザー加速
 - iii-D 直交場加速
 - iii-E その他の高勾配加速技術
- iv 陽子・重イオンの非高周波高勾配加速技術
 - iv-A 電子リング加速（陽子・重イオン）
 - iv-B レーザー励起型プラズマ加速（陽子）
 - iv-C レーザー衝撃波加速（重イオン）
 - iv-D 直交場加速（陽子・重イオン）
 - iv-E その他の高勾配加速技術
- v コンパクトな放射光発生（小型放射光源）技術
 - v-A レーザーアンジュレーター放射光発生

なお、V-2の1および2では、それらの技術に基づく小型加速器や小型放射光源の具体的な提案もあわせてまとめる。これらの技術はこれまでに実用化されているものはないものの、上で述べたように実用化後のメリットが高い上、理論面での解明もこれからであり学問的な意味でも非常に興味のある技術であり、十分に研究する必要がある。

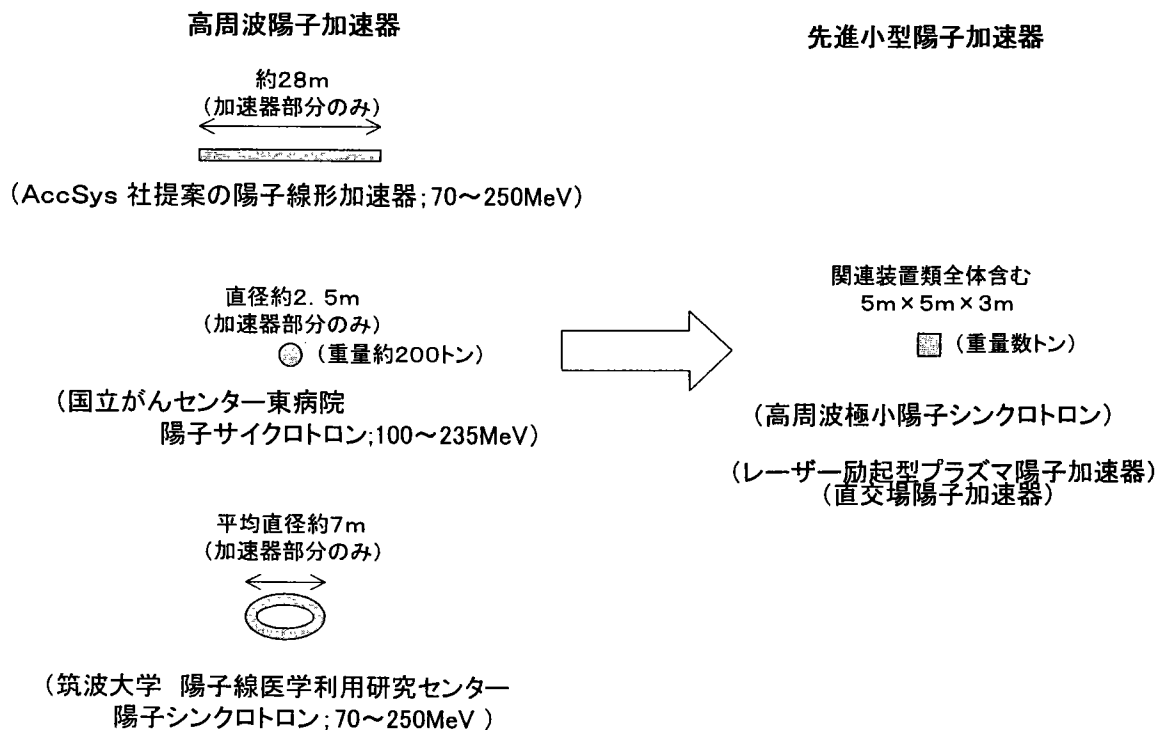
これ以後、V-2の1に述べる高周波極限加速技術とV-2の2に述べる非高周波高勾配加速技術および小型放射光源技術を合わせて**先進加速技術等**と称することとする。また、先進加速技術等による小型加速器および小型放射光源を**先進小型加速器等**と称し、以下の規模、性能を有するものとする。

| 先進小型加速器等の目安 | |
|--------------|--|
| 加速器等の大きさ | ： おおよそ縦5 m×横5 m×高さ3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | ： おおよそ 10 ton 程度 |
| ビームエネルギー | |
| 電子エネルギー | ： 1 GeV 程度 |
| 陽子・重イオンエネルギー | ： 200 MeV/n 程度 |
| 放射光子エネルギー | ： 30～100 keV 程度 |

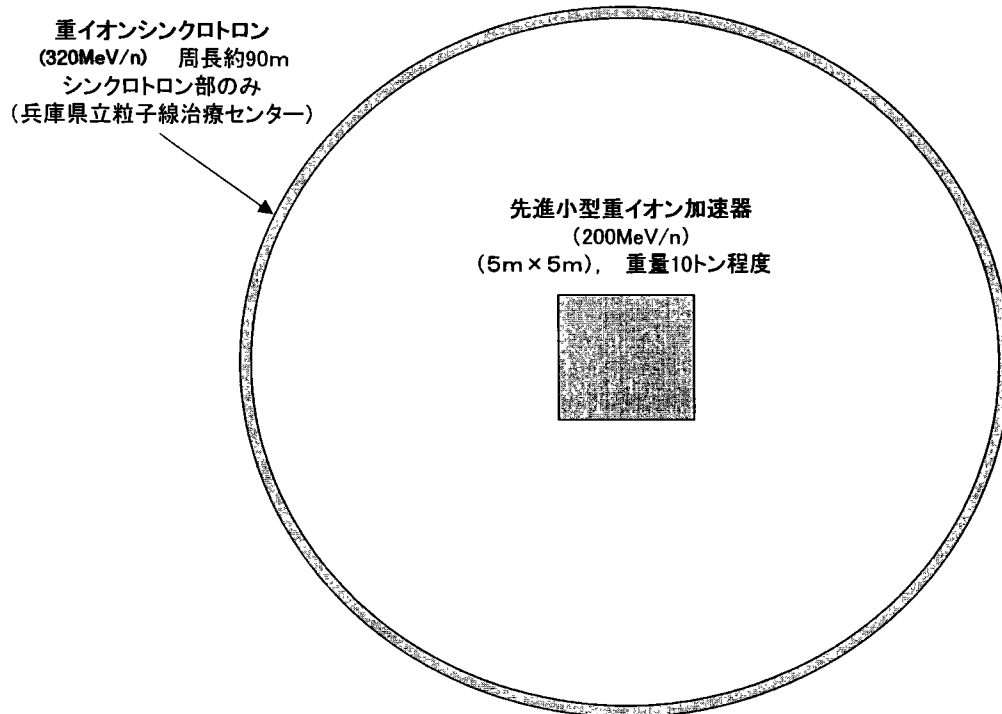
ちなみに、これらの先進小型加速器等の大きさを、現状の高周波加速器で上記のビームエネルギーを達成できる最も小型のものと比較すると、図-V-1-1～図-V-1-3のようになる。



図－V－1－1 1GeVのエネルギーを発生させる電子加速器の大きさ



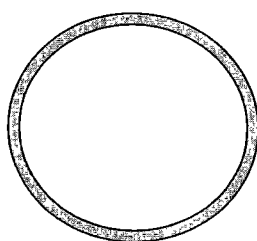
図－V－1－2 200MeVのエネルギーを発生させる陽子加速器の大きさ



図－V－1－3 200MeV/nのエネルギーを発生させる重イオン加速器の大きさ

高周波シンクロトロン放射光リング

平均直径約60m程度
周長187m



(KEK Photon Factory)

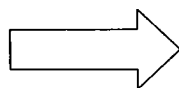
先進小型放射光装置

関連装置類全体含む
5m × 5m × 3m



(重量十数トン)

(レーザーアンジュレーター放射光装置)



(参考)

SPring-8
平均直径約450m程度
周長1436m

図－V－1－4 30～100keVのエネルギーの光子を発生させる放射光発生装置の大きさ

V-2 先進加速技術等による小型加速器等研究開発状況

以下では、従来から精力的に開発されてきた高周波加速技術の延長線上にある技術で、加速器の大幅な小型化に寄与すると考えられるものを、電子および陽子・重イオンに分けて述べる。

1 高周波極限加速技術による小型加速器研究開発状況

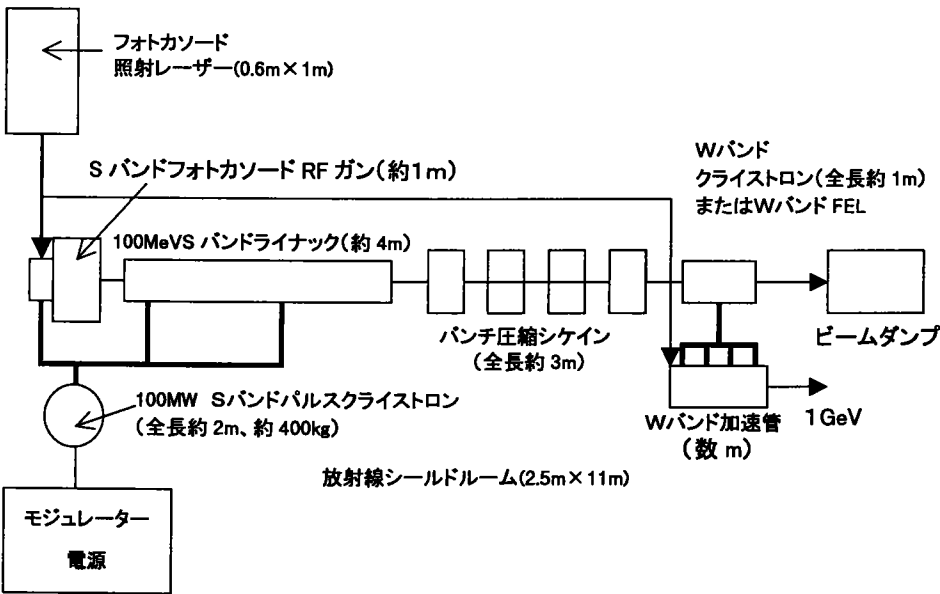
(1) 電子の高周波極限(Wバンド(ミリ波))加速技術

電子の加速に関わる高周波加速技術のなかで、加速器のドラスティックな小型化に関わるものとしては、線形加速器で加速に使う高周波を、波長がこれまでのもの（Sバンド）の 1/数 10 程度であるWバンドのものを使用することが挙げられる。

電子は質量が小さく（ $0.51\text{MeV}/c^2$ ）、少しの加速で光速に近い速度で運動することから、高周波を使う加速が容易である。高周波による電子の線形加速の場合、ある加速エネルギーを達成するための加速距離は、加速管内で達成される（有効）加速電場の大きさにより決まる。表-IV-1-18に電子線形加速の場合における高周波バンドと得られる加速電場を示したが、従来、一般的に電子線形加速器で使用される高周波はSバンドが主であり、この場合の加速電場は通常 10～20MV/m 程度（放電限界は 100MV/m 程度）である。加速管内で実現される加速電場の大きさは、加速管材料の品質およびその加工精度にもよるが、使用する高周波の周波数とともに大きくなる（周波数の 0.5 乗に比例する）とされており、現在は基礎研究段階にあるWバンドを使用すると数 100MV/m 程度の加速電場が可能であると考えられている。仮に、1GeV の電子ビームを発生させるとすると、Sバンドでは 50～100m 程度の加速距離を必要とするが、Xバンドでは 20m 程度で、更に、極限的なWバンドでは数 m 程度で済むこととなり電子加速器の小型化に大きく寄与することとなる。

Wバンド加速技術による小型電子加速器の提案

Wバンド加速による小型電子加速器の提案については、以下の例が挙げられる。



(中島 一久・浦川 順治 (高エネルギー加速器研究機構) 案)

図-V-2-2-1 Wバンド加速小型電子加速器全体構成

技術課題

高周波加速においては、周波数が高くなるとともに加速管の大きさは反比例して小さくなり、Wバンド加速の場合加速管の太さは数ミリメートルであり、加工精度などの問題が発生してくる。小型の加速器を実現させようとする場合は、以下の研究開発が必要となる。

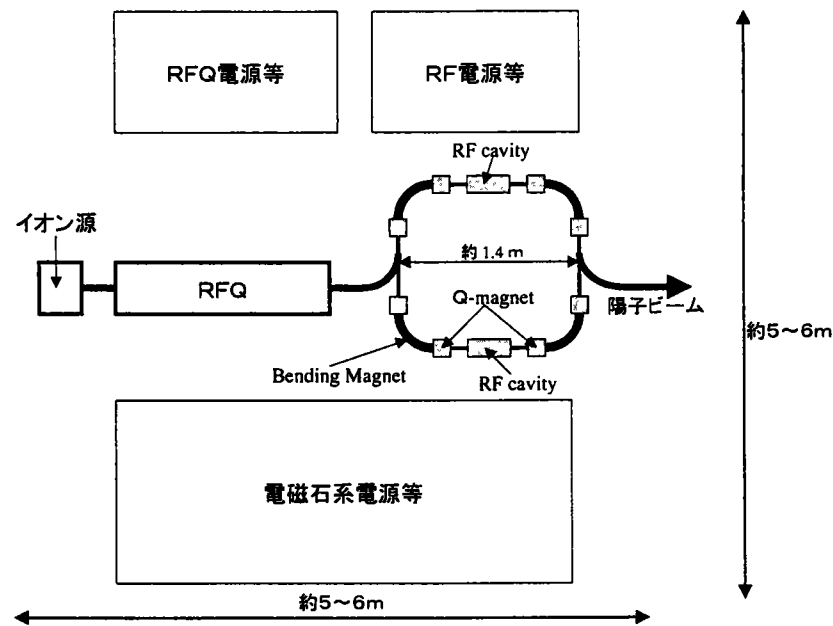
- ・ 高周波発生装置（電源を含む）の小型化
- ・ 加速管材料の品質向上
- ・ 加速管の加工精度の確保

(2)陽子(重イオン)シンクロトロンの小型化極限技術

200MeV/n のエネルギーをもつ陽子、重イオンビームを発生させる小型のシンクロトロンを考えると、主に高エネルギー領域で使われてきているシンクロトロンの極限までの小型化追求が現実的であると考えられている。小さい曲率半径で陽子、重イオンビームを偏向させるための電磁石の磁場強度（電流値）の増大、周長が短いことによる電流の短パルス化、加速につれて陽子、重イオン速度が大きく変化することに対応する加速高周波の周波数変調幅の拡大などにより、更なる小型化の余地がある（ただし、いずれも限界に挑戦する必要あり）。

超小型陽子シンクロトロンの提案

超小型の陽子シンクロトロンの提案については、以下の例が挙げられる。



(シンクロトロン本体の重量は数トン程度)

(遠藤 有聲氏 (高エネルギー加速器研究機構) 提供)

図－V－2－2 超小型陽子シンクロトロン全体構成

技術課題

大型のシンクロトロン加速原理は既に確立されたものになっているが、このような超小型の場合には、構成要素すべてにおいて小型化の極限をめざす必要がある。

特に、開発の中心的な技術課題は

- ・変調幅の大きな高周波加速機構
 - ・できる限り軽量の強い磁場をもつ偏向電磁石の開発
- である。

2 非高周波高勾配加速技術、小型放射光源技術による小型加速器等の研究開発状況

前項1においては、高周波技術によりその極限に挑む技術に触れたが、これまでの高周波加速と異なる原理に基づく高勾配の加速技術（非高周波高勾配加速技術）がいくつか提案されてきている。これらは高周波加速技術の代替となる可能性は高いと考えられているものの、十分には研究されておらず、これまでに実用化されているものはない。

調査した範囲内で体系化分類を行うと、以下のように、電子および陽子・重イオンに関する非高周波高勾配加速技術ならびに小型放射光源技術にまとめられる。

提案されている小型加速器等には、比較的早い時期から研究されていて原理実験やあるいは実規模装置での実験が行われたものから、最近のレーザー技術の急速な進展を受け原理提案がなされたばかりのものまで、研究開発段階は多様なものが混在しているので、以下の研究開発段階分けを各提案に行った。

研究開発段階Ⅰ：原理提案のみ

研究開発段階Ⅱ：原理実験中

研究開発段階Ⅲ：原理実験で確認済み（実規模（実証）装置考案中）

研究開発段階Ⅳ：実規模（実証）装置での実験中

ここでまとめた小型加速器等の具体的提案については、Ⅵ章において説明する小型加速器等の実用化時期を調べるための調査（ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査）の参考資料「非高周波高勾配加速技術等による小型加速器等の提案のまとめ」（平成10年11月）としても使用した。（なお、ここで取り上げている技術は加速器の小型化をめざす技術の最先端をゆくもので、進展が著しいため、平成10（1998）年11月時点でのまとめは、現時点においては既に変更を必要とするものもあることに留意されたい。）

以下、各々の加速技術および放射光源技術について、その原理、研究開発状況および提案される小型加速器等を簡単にまとめることとする。

（1）非高周波高勾配加速技術による電子加速

上に挙げられた電子の非高周波加速技術の主なものは、プラズマ波及びレーザーの強い電場を利用するものであり、最近のレーザー技術の急速な進歩を背景に研究が進んできているものである。レーザーの位相速度は（真空中では）光速であり、また、プラズマ波も光速に近い位相速度をもっている。粒子を加速する場合は、加速に利用する波の位相速度に合わせて粒子を入射させる必要があるが、電子は質量が小さく（ $0.511\text{MeV}/c^2$ ）、光速近くに加速するのは比較的容易である。このため電子については、陽子や重イオンに比べて、プラズマ波及びレーザーの強い電場を加速に利用することが容易であると考えられている。

プラズマに外部より何らかの揺動を与えると、質量の小さい電子がプラズマ中で集団として運動し、プラズマ波を発生させる。このプラズマ波は非常に強い電場（プラズマ密度が $10^{18}/\text{cm}^3$ の時、数 $10\text{GV}/\text{m}$ 程度）をもっており、このプラズマ波電場を電子加速に利用すると、短い距離で大きな加速エネルギーを得ることができる。外部からの揺動によりプラズマ波を発生させる方法として、強度の強い電子ビームを当てる場合と非常に大きなパルス強度をもつレーザー（いわゆる

T³レーザーなど)を当てるものがある。ビーム励起型プラズマ加速は前者のものであり、レーザー励起型プラズマ加速は後者である。

また、大きなパルス強度をもつレーザーの非常に強い電場を加速に利用する方法も提案されている。逆チェレンコフレーザー加速やレーザーと強磁場を組み合わせた直交場加速はこれに相当する。なお、直交場加速にはプラズマ波と強磁場を組み合わせたものもある。

1) ビーム励起型プラズマ加速

加速原理

図-V-2-3に示す様に、先行する大電流電子ビームにより加速管（プラズマ容器）内のプラズマに航跡場（プラズマ波）を励起させ、このプラズマ波の電場で後行する電子ビームを加速する。この加速方法の原理的加速電場は、プラズマ密度を $10^{18}/\text{cm}^3$ とすれば、数 10GV/m である。

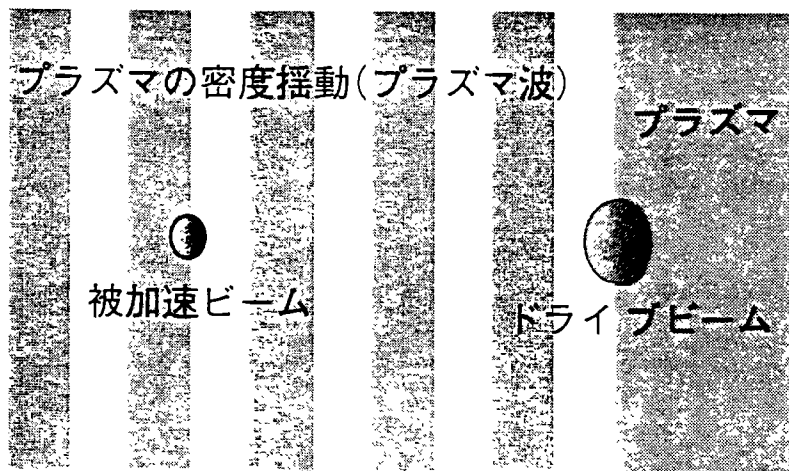


図-V-2-3 ビーム励起型プラズマ加速の原理

提案論文

P. Chen et al., Physical Review Letters, 54 (1985) 693.

研究機関

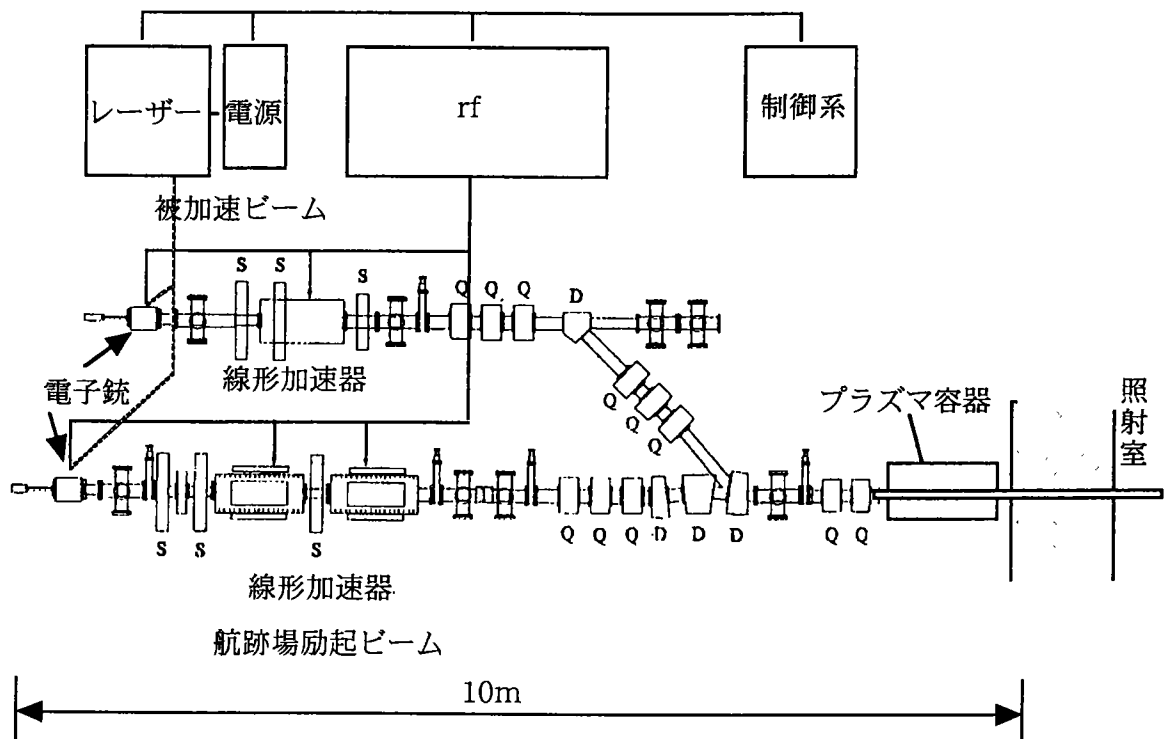
- Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) / University of California at Los Angeles (UCLA) / University of Southern California (USC)
- Argonne National Laboratory (ANL) / UCLA
- Budker Institute for Nuclear Physics (BINP)
- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) / 日本原子力研究所 / 東京大学 (原子力工学研究施設) (既に中止)

これまでの実験結果

- 加速勾配: 20MeV/m 、ビーム強度: $\sim 10^9$ electrons/sec (A. Ogata et al., AIP Conference Proceedings, 279 (1992) 420.)
- 加速勾配: 0.5GeV/m 、(SLAC 1999)

ビーム励起型プラズマ加速小型電子加速器の提案（研究開発段階Ⅲ）

提案されている小型加速器の全体構成を以下に示す。



(W. Gai et al., Proceedings of 18th International Linear Accelerator Conference, August 1996, Geneva, p. 39. の装置をベースに若干の修正)

図－V－2－4 ビーム励起型プラズマ加速小型電子加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ ビームエネルギー 1GeV
- ・ ビーム強度 1nC/bunch, 1bunch/drive bunch
- ・ バンチ周波数 10¹⁰～10¹²/sec (ただし非線形プラズマ波を使用すれば単バンチ)
- ・ ドライブビーム率 $f = 100\text{Hz}$
- ・ エミッタンス 1 mm・mrad

実現のための技術課題

- ・ 進行方向に前後対象なドライブバンチでは、トランス比 {被加速バンチのエネルギー利得／ドライブバンチのエネルギー} < 2 という制限がある。この制限を越えるには、a. プラズマ密度より高い電子密度を持つビームで非線形プラズマ波をつくる、b. ドライブバンチ内進行方向電子分布を操作する、c. ドライブビームをマルチバンチ化する、の3つの方法があり、これらを確立する必要がある
- ・ 大電流小エミッタンスを持つドライブビームの開発

2)レーザー励起型プラズマ加速

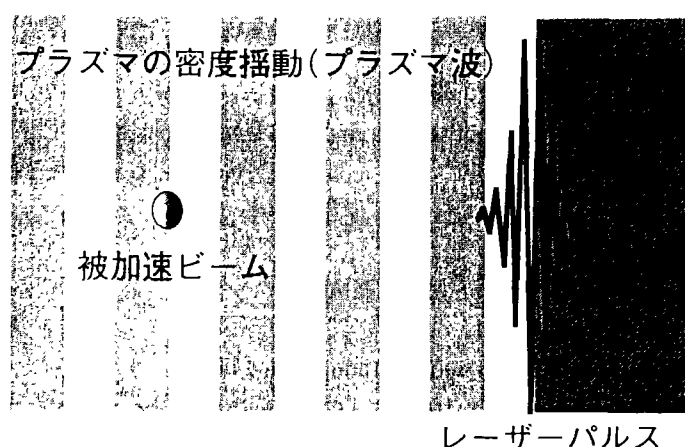
この加速方法は、以下の様に分類することができるが、いずれもレーザーにより励起させるプラズマ波を利用して電子の加速を行うものであり、原理的加速電場は、プラズマ密度を $10^{18}/\text{cm}^3$ とすれば、数 10GV/m である。

- ① 単一のレーザーパルスで励起させるプラズマ波（プラズマ航跡場）を利用するもの（レーザー励起プラズマ航跡場加速）
- ② プラズマ周波数に等しい周波数差をもつ2本のレーザーによる共鳴波（ビート波）で励起させるプラズマ波を利用するもの（レーザービート波励起プラズマ波加速）
- ③ 大パワー長パルスレーザーとプラズマとの相互作用（プラズマ振動数によるレーザーの自己変調）により励起されるプラズマ波を利用するもの（自己変調レーザー励起プラズマ波加速）

①レーザー励起プラズマ航跡場加速

加速原理

図－V－2－5に示すように、プラズマ波長程度のパルス幅を持つ先行レーザーにより加速管（プラズマ容器）内のプラズマに航跡場（プラズマ波）を励起させ、このプラズマ波の電場で後行する電子ビームを加速する。（なお、被加速ビーム生成には、それを外部から入射する方法の他に、補助レーザーを用いプラズマ電子をビーム化する方法がある。）



図－V－2－5 レーザー励起プラズマ航跡場加速の原理

提案論文

T. Tajima and J.M. Dawson, Physical Review Letters, 43 (1979) 267.

研究機関

- ・Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
- ・Ecole Polytechnique
- ・高エネルギー加速器研究機構／日本原子力研究所／東京大学（原子力工学研究施設）
- ・大阪大学レーザー核融合研究センター

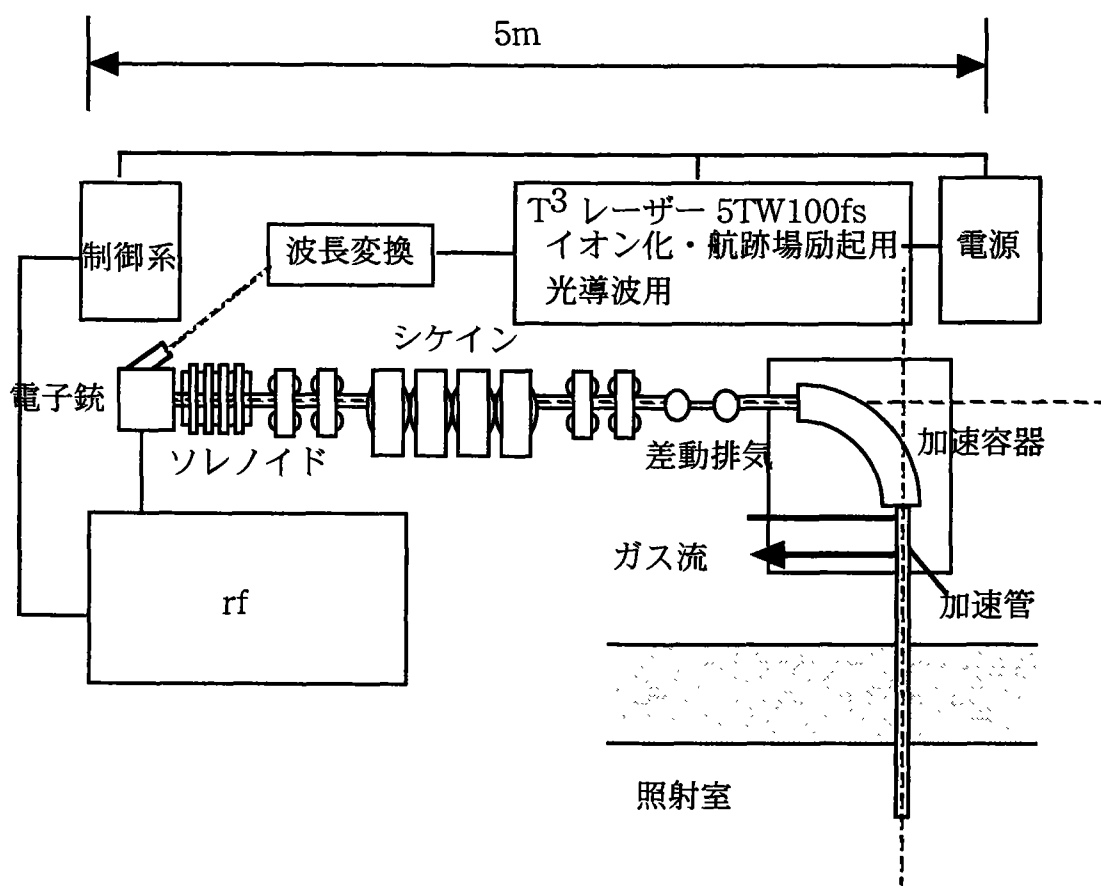
これまでの実験結果

- ・ K. Nakajima et al., Phys. Scripta T52 (1994) 61.
- ・ 10^{12} electrons を 300MeV まで加速 (加速距離約 20mm : 加速勾配 = 15GeV/m)
(H.Dewa et al., Nucl. Instr. and Meth. 410 (1998) 357.)

レーザー励起プラズマ航跡場加速小型電子加速器の提案 (研究開発段階Ⅲ)

電子源として、レーザーカソードと呼ばれるものを想定した第1案 (図-V-2-6 (a)) と、プラズマカソード (補助レーザーを用い、プラズマ中の電子を集めてビーム化する方法) を想定した第2案 (図-V-2-6 (b)) の2つを提示した。

(第1案 : 電子源としてレーザーカソードを想定)

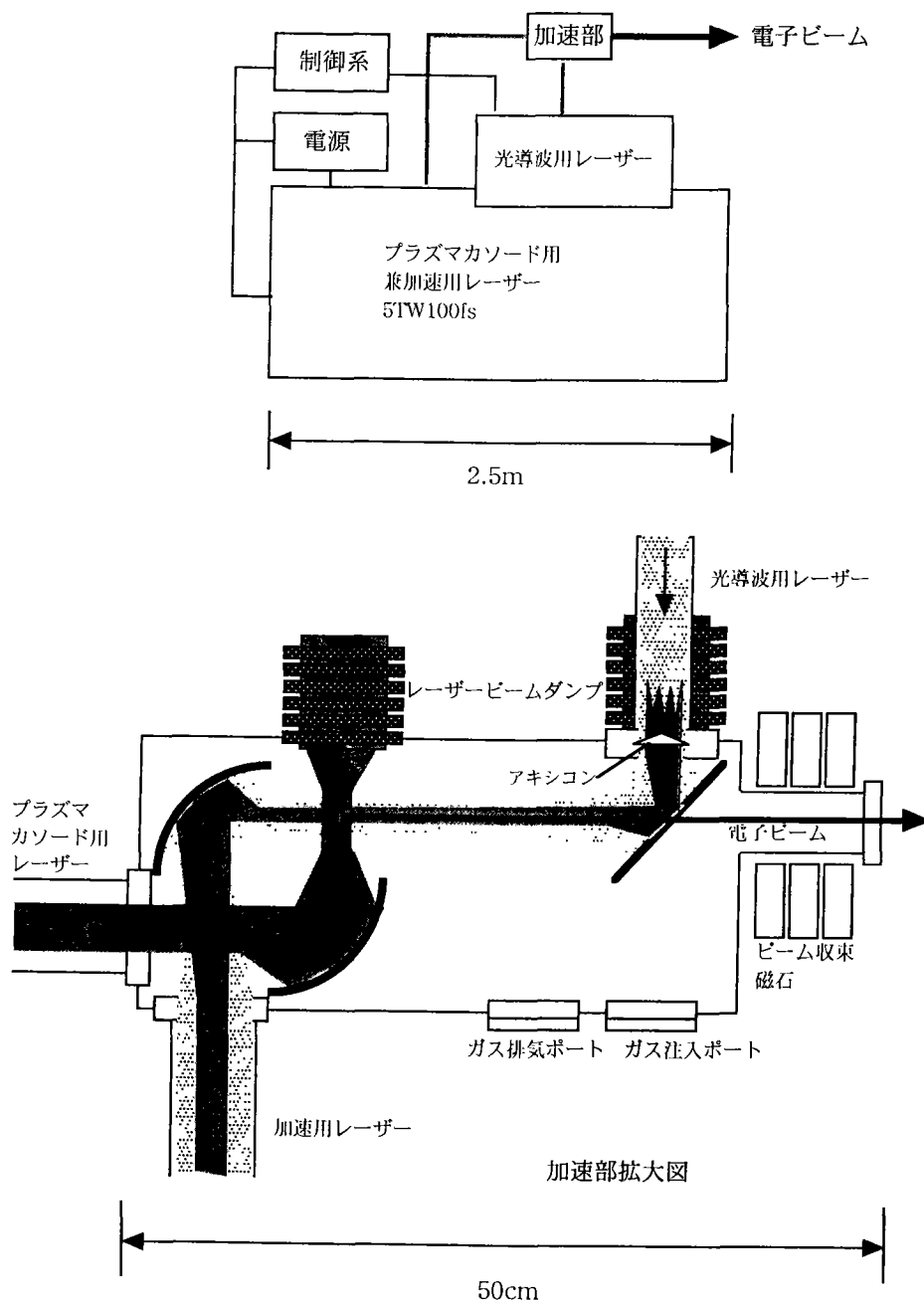


電子銃はRFレーザーカソードと呼ばれるものを想定した。ここで発生した数 MeV の電子ビームをシケインで短バンチ化する。差動排気により加速容器と電子銃部を真真空的に分離する。

(小方 厚 (広島大学) 案)

図-V-2-6(a) レーザー励起プラズマ航跡場加速小型電子加速器の全体構成

(第2案：電子源としてプラズマカソードを想定)



電子源はプラズマカソード（補助レーザーを用い、プラズマ中の電子を集めてビーム化する方法）を想定した。上側の図は全体のシステムで、下側の図は加速部の詳細である。加速用とプラズマカソード用に2本のレーザーが必要であるが、これには同一のレーザーを分岐させることで対応する。レーザー発生装置と加速部をつなぐレーザー導波路については、ある程度フレキシブルな（必要に応じて加速部が移動できる）構造とすることが可能である。

(小方 厚 (広島大学) 案)

図-V-2-6(b) レーザー励起プラズマ航跡場加速小型電子加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

(第1案)

- ・ビームエネルギー 1GeV
- ・ビーム強度 1pC/bunch, 10bunch/laser pulse
- ・バンチ周波数 $f = 10^{13}\text{Hz}$
- ・レーザーパルス率 $f = 100\text{Hz}$
- ・エミッタンス 1 mm · mrad

実現のための技術課題

- ・レーザー効率の向上
- ・光導波（レーザーの発散を抑え、レイリー長を大きく越える加速長を得る方法）の開発
- ・第1案では、プラズマ波長に比べて十分短いバンチ長を持つ被加速ビームの開発
- ・第2案では、プラズマカソード法（補助レーザーを用い、プラズマ中の電子を集めてビーム化する方法）の確立

②レーザービート波励起プラズマ波加速

加速原理

図-V-2-7に示すように、周波数差がプラズマ周波数に等しい2本のレーザーでつくられる共鳴波（ビート波）により、加速管（プラズマ容器）内のプラズマに励起させたプラズマ波の電場で後行する電子ビームを加速する。

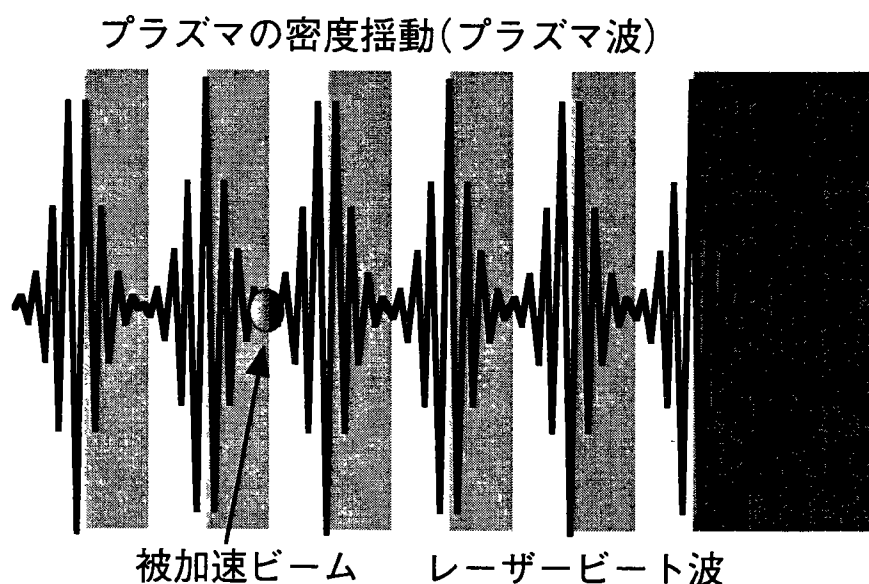


図-V-2-7 レーザービート波励起プラズマ波加速の原理

提案論文

T. Tajima and J.M. Dawson, Physical Review Letters, 43 (1979) 267.

研究機関

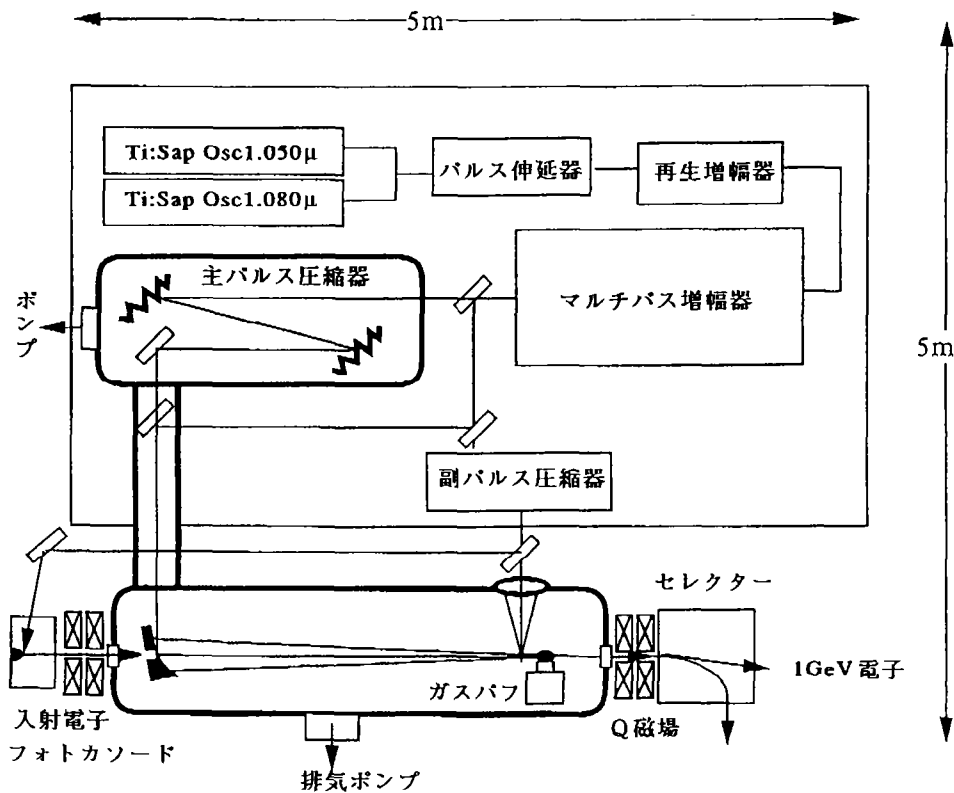
- ・ U C L A
- ・ 大阪大学レーザー核融合研究センター
- ・ Chalk River Laboratory (中止)
- ・ Ecole Polytechnique (中止)

これまでの実験結果

- ・ 10^3 electrons を 10MeV まで加速 (加速距離 3~7mm : 加速勾配 ~2GeV/m)
(Y. Kitagawa et al., Physical Review Letters, 68 (1992) 48.)
- ・ 10^4 electrons を 28MeV まで加速 (加速距離 10mm : 加速勾配 ~3GeV/m)
(C. Clayton et al., Physical Review Letters, 70 (1993) 37.)

レーザービート波励起プラズマ波加速小型電子加速器の提案 (研究開発段階Ⅲ)

| レーザー/プラズマ・パラメーター | | | |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ・ レーザー波長 | : $\lambda_1 = 1.050 \mu\text{m}$ | $\lambda_2 = 1.080 \mu\text{m}$ | |
| ・ プラズマ共鳴密度 | : $10^{18}/\text{cm}^3$ | ・ プラズマ波長 | : $30 \mu\text{m}$ |
| ・ レーザー強度 | : 25TW | ・ レーザーエネルギー | : 10J |
| ・ パルス幅 | : 0.4 ps | ・ 集光強度 | : $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ |
| ・ プラズマ波加速電場 | : 70GV/m | ・ 最大加速長 | : 1.4cm |



(北川 米喜 (大阪大学レーザー核融合研究センター) 案)

図-V-2-8 レーザービート波励起プラズマ波加速小型電子加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ビームエネルギー 1GeV
- ・ビーム強度 1pC/bunch, 10bunch/laser pulse
- ・バンチ周波数 $f = 10^{13}\text{Hz}$
- ・ドライブビーム率 $f = 100\text{Hz}$
- ・エミッタンス 1 mm · mrad

実現のための技術課題（詳細については、北川米喜「ビート波加速の基礎」 プラズマ核融合学会誌 Vol. 73 (1997) 1087 等参照）

- ・レーザー効率の向上
- ・光導波（レーザーの発散を抑え、レイリー長を大きく越える加速長を得る方法）の開発
- ・プラズマ波長に比べて十分短いバンチ長を持つ被加速ビームの開発
- ・プラズマ密度の精密な制御法の確立

③自己変調レーザー励起プラズマ波加速

加速原理

図-V-2-9に示すように、大パワー長パルスレーザーのプラズマ中での相対論的横振動がトリガーとなって、レーザー波形がプラズマ振動数で変調され、同時にプラズマ波が励起される。この励起されたプラズマ波の電場で後行する電子ビームを加速する。（なお、被加速ビーム生成には、それを外部から入射する方法の他に、補助レーザーを用いプラズマ電子をビーム化する方法がある。）

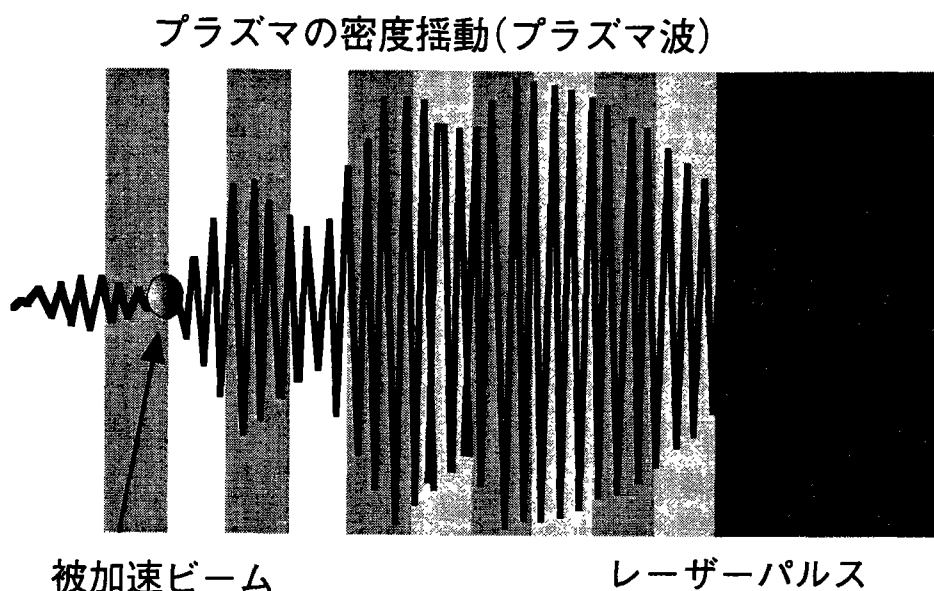


図-V-2-9 自己変調レーザー励起プラズマ波加速の原理

提案論文

N. E. Andreev et al., JETP Letters, 55 (1992) 571.

Krall et al., Physical Review, E 48 (1993) 2157.

研究機関

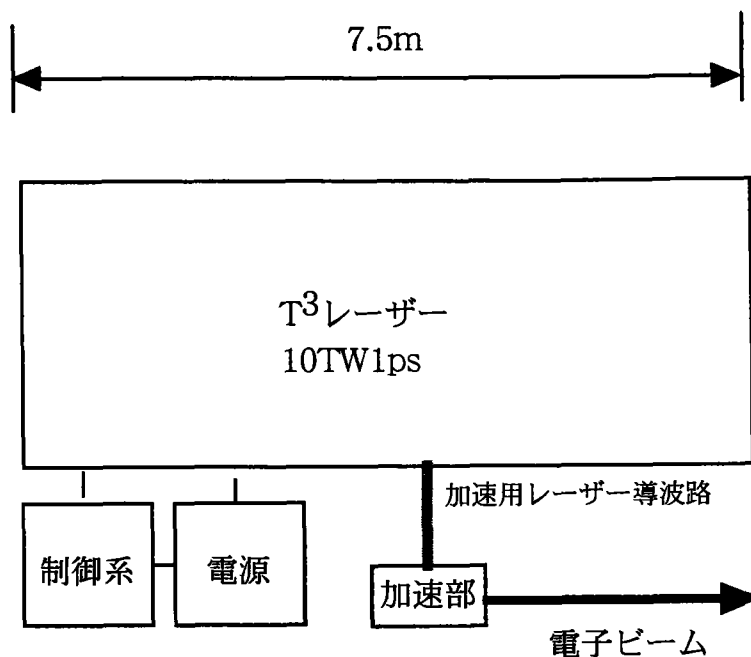
- ・ 高エネルギー加速器研究機構／大阪大学レーザー核融合研究センター／宇都宮大学／名古屋大学プラズマ研究所（中止）
- ・ Rutherford Appleton Laboratory (R A L)／U C L A／Ecole Polytechnique／Imperial College
- ・ Naval Research Laboratory (N R L)
- ・ University of Michigan

これまでの実験結果

- ・ 10^2 electrons を 18MeV まで加速（加速距離 0.6mm：加速勾配 $\sim 30\text{GeV/m}$ ）
（K. Nakajima et al., Physical Review Letters, 74 (1995) 4428.）
- ・ 44MeV まで加速（加速距離 0.3mm：加速勾配 $\sim 150\text{GeV/m}$ ）、エミッタンス $5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
（A. Modena et al., Nature 377 (1995) 806.）

自己変調レーザー励起プラズマ波加速小型電子加速器の提案（研究開発段階Ⅲ）

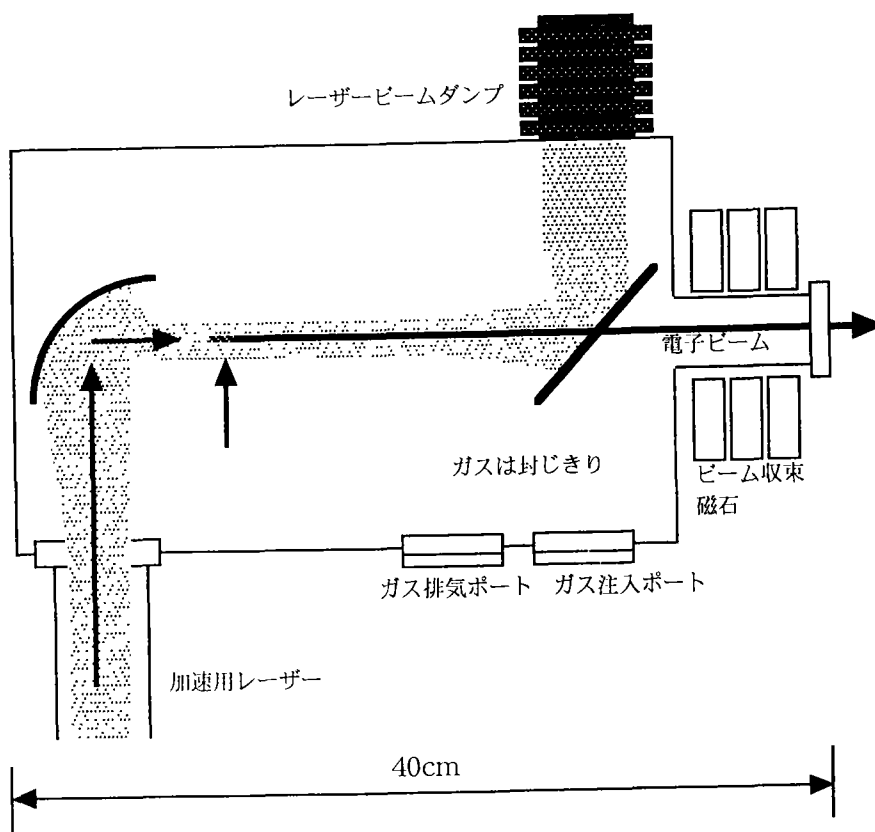
提案されている小型加速器の全体構成を以下に示す。



（小方 厚（広島大学）案）

図－V－2－10(a) 自己変調レーザー励起プラズマ波加速小型電子加速器の全体構成

(加速部詳細図)



(小方 厚 (広島大学) 案)

図-V-2-10(b) 自己変調レーザー励起プラズマ波加速小型電子加速器の加速部詳細

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ビームエネルギー 0.5GeV
- ・ビーム強度 10pC/bunch, 10bunch/laser pulse
- ・バンチ周波数 $f = 10^{14}\text{Hz}$
- ・レーザーパルス率 $f = 10\text{Hz}$
- ・エミッタンス 10 mm · mrad

実現のための技術課題

- ・レーザー効率の向上
- ・光導波（レーザーの発散を抑え、レイリー長を大きく越える加速長を得る方法）の開発
- ・プラズマ波長に比べて十分短いバンチ長を持つ被加速ビームの開発
- ・ビームの質的量的信頼性（再現性）の確立（不安定性と独立なビームトリガー技術の開発）

3)逆チェレンコフレーザー加速

加速原理

図-V-2-11. に示すように、数気圧のガスを充填した加速管内で、レーザーと（被加速）電子ビームをチェレンコフ角（ $\Theta_c = \cos^{-1}(1/n\beta)$ ； $\beta = v/c$, n は屈折率）で交差させることにより、電子ビームを加速する。この方法の原理的な加速電場は数 GV/m 程度である。

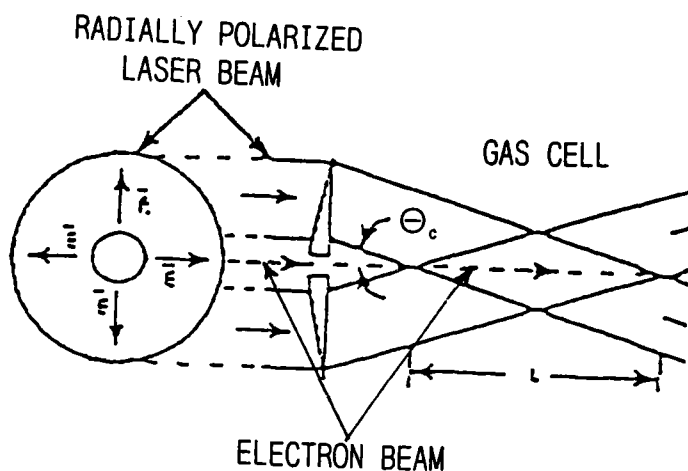


図-V-2-11 逆チェレンコフレーザー加速の原理

提案論文

K. Shimoda, "Proposal for an Electron Accelerator using an Optical Maser", APPLIED OPTICS, Vol.1, (1962) pp.33-35.

R.D. Romea, W.D. Kimura and L.C. Steinhauer, AIP Conference Proceedings 335 of Advanced Accelerator Concept, Fontana, WI 1994, pp.390-404

研究機関

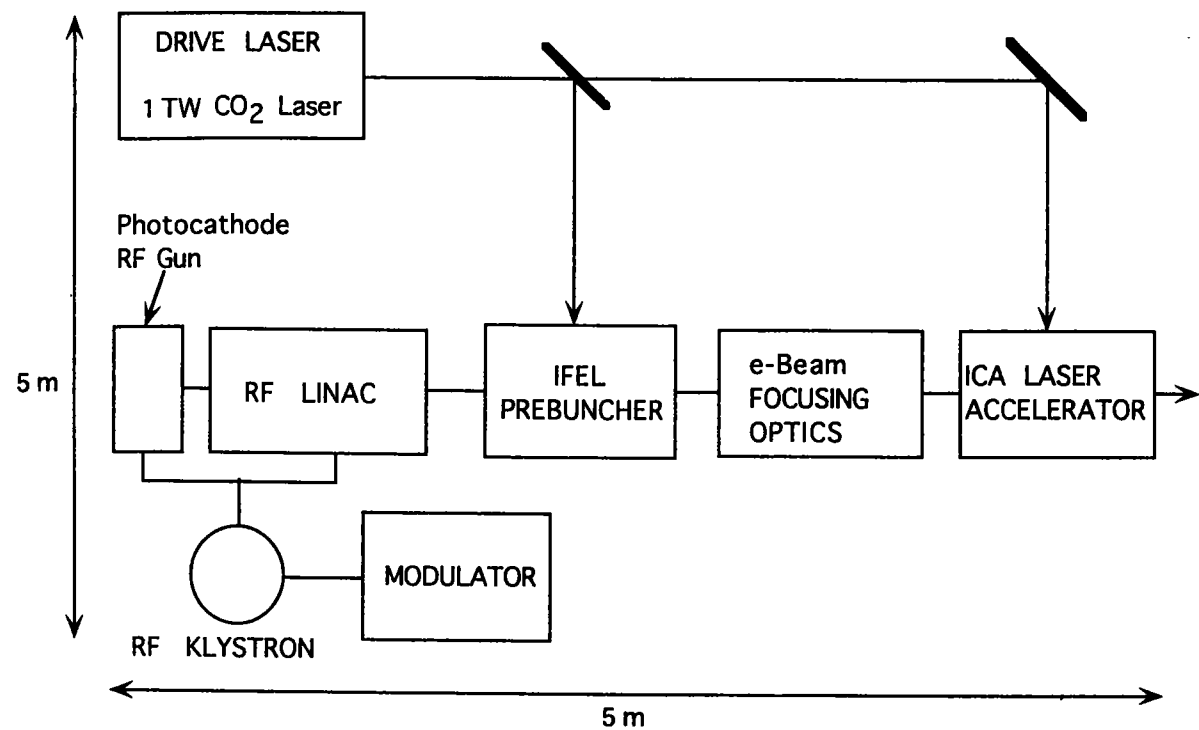
・Brookhaven National Laboratory (BNL)

これまでの実験結果

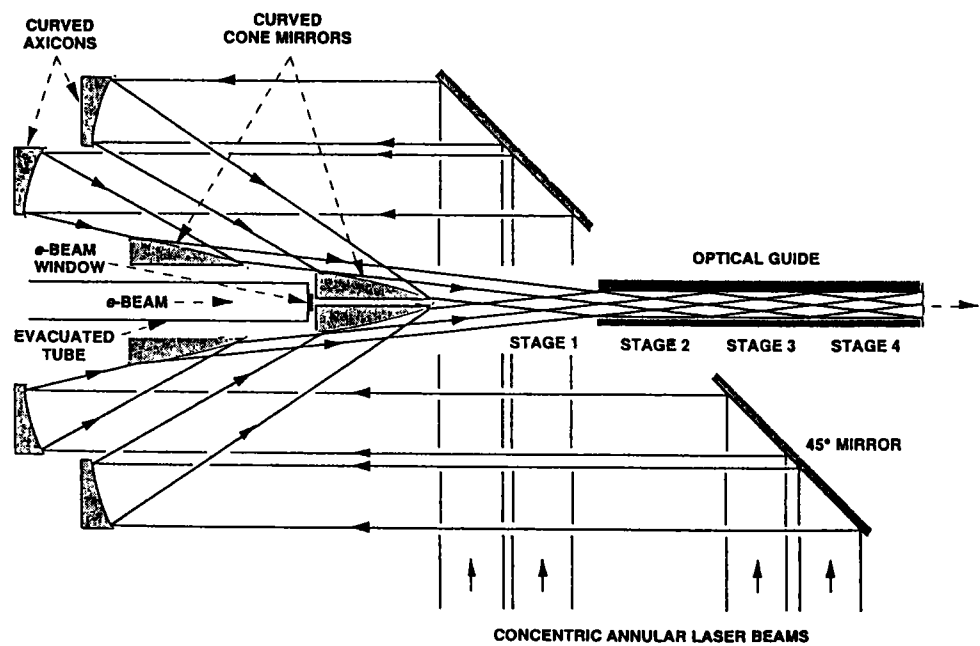
・加速勾配：3.7MeV/0.12m=31MeV/m (W.D. Kimura et al., Physical Review Letters, 74 (1995) 546.)

逆チレンコフレーザー加速小型電子加速器の提案（研究開発段階Ⅲ）

提案されている小型加速器の全体構成を以下に示す。



(Multi-stage ICA Laser Accelerator の詳細図)



(R. D. Romea, W. D. Kimura and L. C. Steinhauer, AIP Conference Proceedings 335 of Advanced Accelerator Concept, Fontana, WI 1994, pp. 390-404 を参照)

図－V－2－12. 逆チレンコフレーザー加速小型電子加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ビームエネルギー 1GeV
- ・ビーム強度 $\sim 100\text{pC/pulse}$
- ・エネルギーの拡がり $< 1\%$
- ・エミッタンス $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$

実現のための技術課題

- ・レーザーパワーの使用効率（アキシコンは低効率）を上げる等
- ・レーザー波長に捕捉されるほどに短いバンチ長の入射ビームの生成と同期

4)直交場加速

この加速方法は、電子を捕捉した電場の波（横波、縦波のいずれでも良い）の進行方向に直交するように定常磁場をかけると、電子は波面を波乗りするように走行しながら、効率よく加速されることを利用するものである。電場の波としては、電磁波（レーザー等）（横波）やプラズマ波（縦波）があり、以下の二つに大別できる。

- ① 電子を捕捉する電場として、レーザー光の電場を利用するもの（横波型直交場加速）
- ② 電子を捕捉する電場として、レーザーパルスなどで励起させるプラズマ波を利用するもの（縦波型直交場加速）

この加速方法の特徴は、a. 波の電場の最大値付近に粒子がバンチされ安定に加速を受ける、b. a. の理由（ビームが加速中にバンチされること）により、ビームエネルギーの拡がり小さくなる、c. 空間的に2次元加速であるため、同じエネルギーを得るのに他のレーザー・プラズマ加速方式より幾分小型になる、などが揚げられる。

①レーザー（横波型）直交場加速

加速原理

図-V-2-13に示すように、低密度のプラズマ（このプラズマはビームの空間拡がりを抑制する役割を果たす）中で、レーザー光の磁場成分方向に定常磁場をかけ、磁場中性点に電子を捕獲させると、レーザー光の電場と磁場の相互作用により、捕獲された電子は磁場にもレーザー光の進行方向とも直交する方向に加速される。原理的加速電場は磁場中性点（ $10\mu\text{m}$ 程度）では1TV/m以上のものとなるが、電子が得るエネルギーは、電子がこの磁場中性点に拘束される時間による。

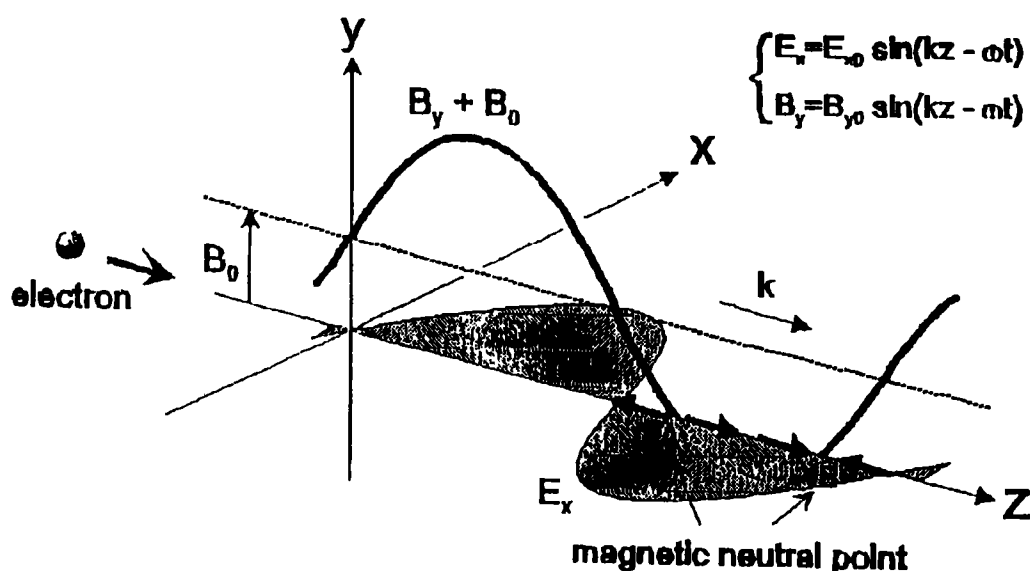


図-V-2-13 レーザー（横波型）直交場加速の原理

提案論文

S. Takeuchi et al. IEEE Trans. Plasma Science, PS-15 (1987) 251.
N. Yugami, K. Kikuta and Y. Nishida, Physical Review Letters, 76 (1996) 1635.
N. Kirihera, T. Senba, N. Yugami, and Y. Nishida, Nuclear Instr. And Methods in Physics Research, A (1998) 410.

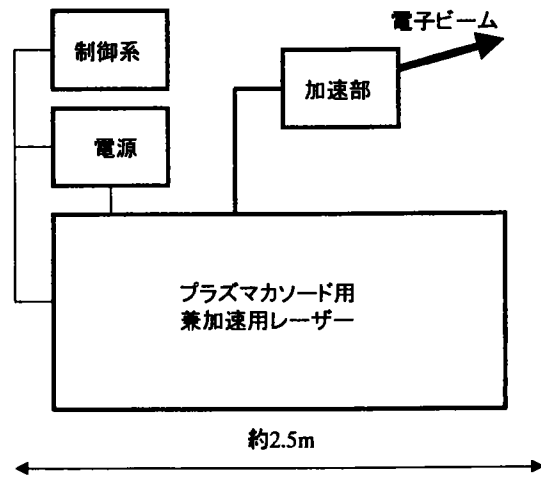
研究機関

・宇都宮大学

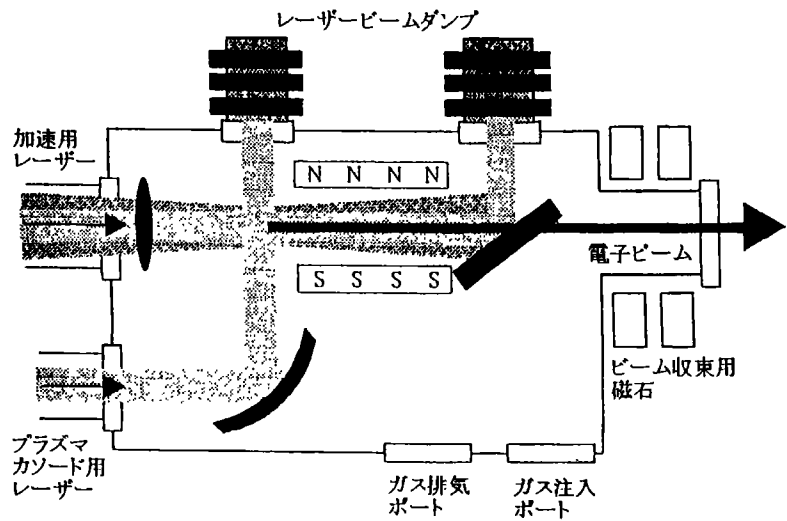
これまでの実験結果

・最大加速勾配：30keV/m ($f = 2.45\text{GHz}$, 10kW の電磁波を使用)

レーザー(横波型)直交場加速小型電子加速器の提案 (研究開発段階Ⅱ)
(平面的に見た図)



(加速部詳細: 立面的に見た図)



(西田 靖 (宇都宮大学) 案)

図－V－2－14 レーザー(横波型)直交場加速小型電子加速器の全体装置構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ビームエネルギー $> 1\text{GeV}$
- ・ビーム強度 $1\text{--}5\text{pC/bunch/laser pulse}$
- ・バンチ周波数 $f = 10^{13}\text{Hz}$
- ・レーザーパルス率 $f = 100\text{Hz}$
- ・エミッタンス $1\text{--}5\text{ mm} \cdot \text{mrad}$

実現のための技術課題

- ・コンパクトな強磁場 ($> 1\text{ Tesla}$) 発生装置の開発
- ・レーザーの効率向上
- ・安定な光導波（直径 1mm 程度、 10 数 cm に亘る直線上の導波）の実現
- ・安定な電子源：プラズマ波長程度あるいはそれ以下の長さのビームバンチの発生（これには、プラズマカソードで対応可能と考えられる）

②プラズマ(縦波型)直交場加速

加速原理

図-V-2-15 に示すように、電子を捕捉したプラズマ波（縦波）の進行方向に直交するように定常磁場をかけると、電子はプラズマ波面を波乗りするように走行し、磁場をかけない時よりも効率よく加速される。より具体的には、ビーム励起プラズマ波あるいはレーザー励起プラズマ波を用いる加速の際に、プラズマ波の進行方向に垂直に磁場を加え、電子加速を効率的に行うことができる。原理的加速電場は、プラズマ密度にも依存するが数 $10\sim 100\text{GV/m}$ である。

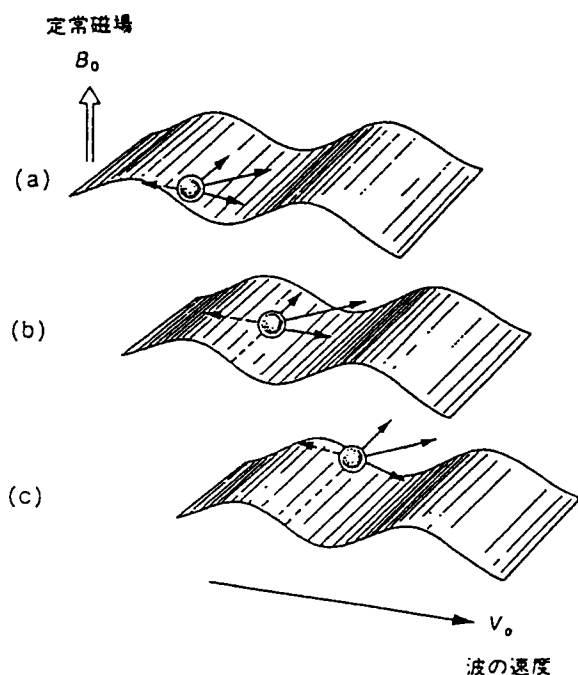


図-V-2-15 プラズマ(縦波型)直交場加速の原理

提案論文

R. Sugihara and Y. Midzuno, Journal of Physical Society of Japan, 47 (1979) 1290.
T. Katsouleas and J.M. Dawson, Physical Review Letters, 51 (1983) 392.
Y. Nishida, Y. Yoshizumi and R. Sugihara, Physics Letters, 105A (1984) 300.

研究機関

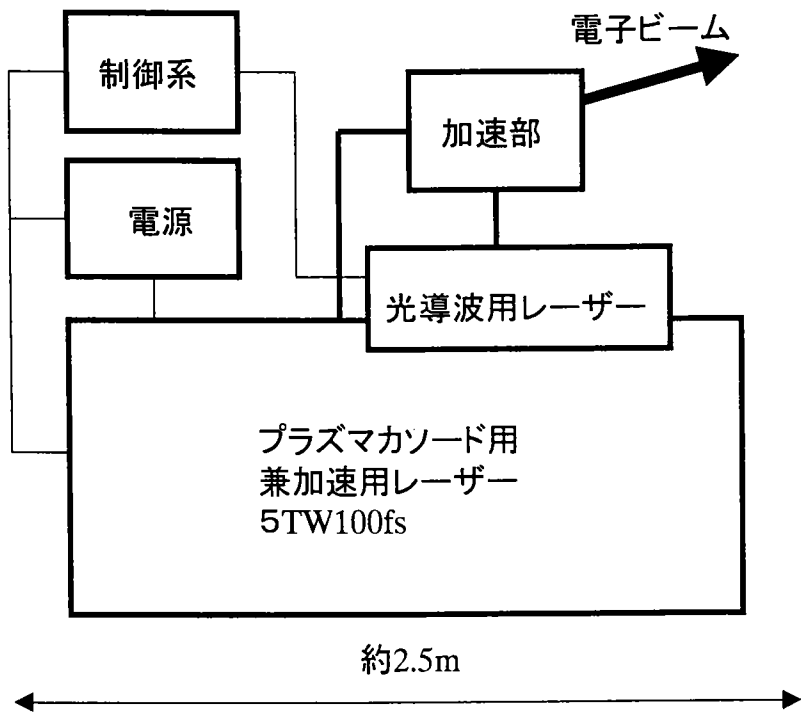
- ・UCLA
- ・宇都宮大学

これまでの実験結果

- ・ $f = 2.45\text{GHz}$, 10kW の電磁波により、 60keV の入射電子を 63keV まで加速 (加速勾配: 26keV/m)

プラズマ(縦波型)直交場加速小型電子加速器の提案 (研究開発段階Ⅱ)

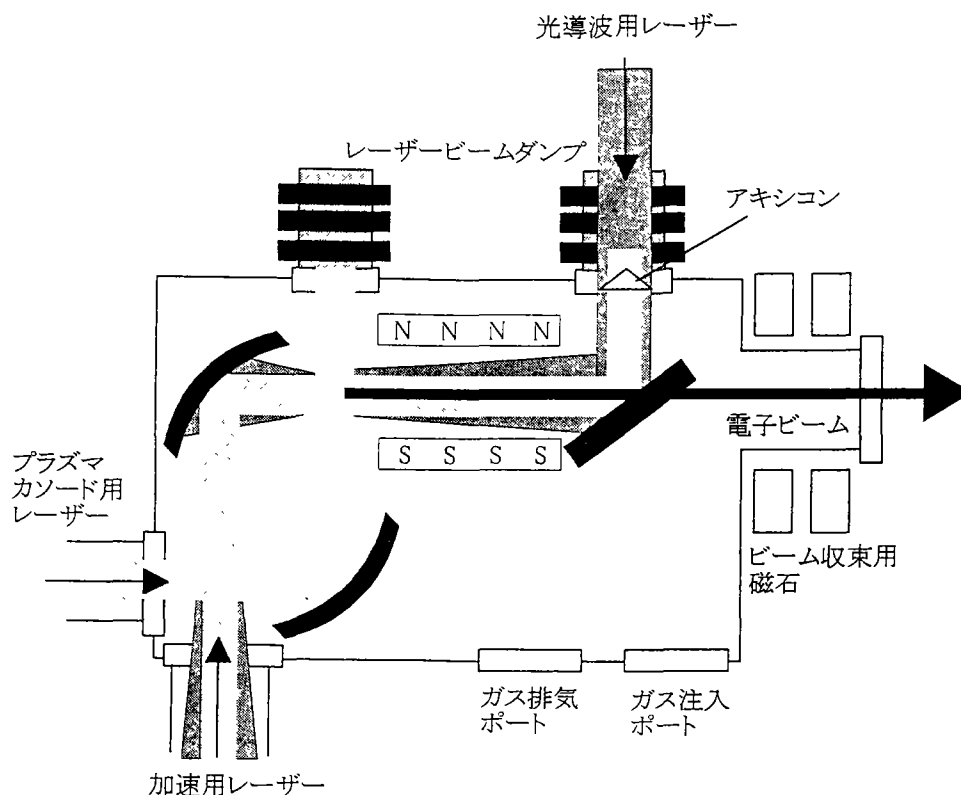
ここでは、2) レーザー励起型プラズマ加速、①レーザー励起プラズマ航跡場加速器の第2案に直交磁場を印加したものを示す。



(西田 靖 (宇都宮大学)・小方 厚 (広島大学) 案)

図－V－2－16(a) プラズマ(縦波型)直交場加速小型電子加速器の全体構成

(加速部詳細図) (加速部を立面的に見た図)



(西田 靖案 (宇都宮大学)・小方 厚 (広島大学) 案)

図-V-2-16(b). プラズマ(縦波型)直交場加速小型電子加速器の加速部詳細

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ ビームエネルギー 1GeV
- ・ ビーム強度 1-5pC/bunch/laser pulse
- ・ バンチ周波数 $f = 10^{13}\text{Hz}$
- ・ レーザーパルス率 $f = 100\text{Hz}$
- ・ エミッタンス 1-5 mm · mrad

実現のための技術課題

- ・ コンパクトな強磁場 (>1 Tesla) 発生装置の開発
- ・ レーザーの効率向上
- ・ 安定な光導波 (直径 0.1mm 程度、数 10cm に亘る直線上の導波) の実現
- ・ 安定な電子源: プラズマ波長程度あるいはそれ以下の長さのビームバンチの発生 (これには、プラズマカソードで対応可能と考えられる)

5)その他

以上の提案の他に、一般的なRF加速とは異なる加速原理に基づく加速方法をいくつかまとめる。

①真空中での航跡場(ビーム航跡場/レーザー航跡場)加速

加速原理

A. リング状断面を持つ先行電子ビームがつくる航跡場をリングの軸に集中させ、この軸上を後行する電子ビームを加速する (図-V-2-17 (a))。

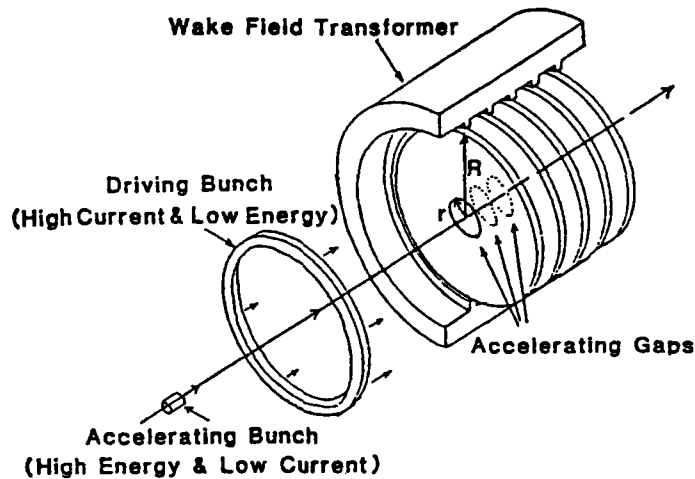


図-V-2-17(a) ビーム航跡場加速

B. 内壁に誘電体を内貼りした金属管 (図-V-2-17 (b)) あるいはディスクロード構造を持った金属管 (図-V-2-17 (c)) (いずれも遅波構造を持っている) 内に、電子ビームにより航跡場を励起し、後行する電子ビームを加速する。なお、レーザー波長域で損失のない誘電体を使えば (例えば CO_2 レーザーと Si、Ge の組み合わせ) レーザー励起も可能である。この場合、100kW 台のレーザー電力で GeV/m 台の加速勾配が可能との計算がある。

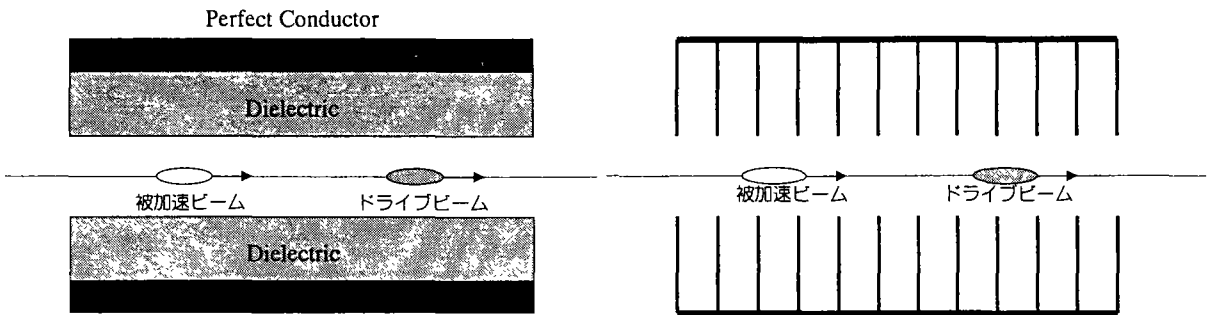


図-V-2-17(b) ビーム航跡場加速

図-V-2-17(c) ビーム航跡場加速

提案論文

A. について

G. A. Voss and T. Weiland, DESY M-82-10, April 1982.

B. について

誘電体あるいはディスクロード構造で電磁波の位相速度を光速以下にするという古典的なアイディアの変形

研究機関

A. について

- ・Stiftung Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) (中止)
- ・Centre Europeen pour la Recherche Nucleaire (CERN) (European Laboratory for Particle Physics) (中止)

B. について

- ・ANL

これまでの実験結果

A. について

- ・ $50\text{keV}/2\text{cm} = 2\text{MeV/m}$ (W. Bialowons et al., CERN 87-11 (1987) 298.)

B. について

- ・誘電体内貼り： $100\text{keV}/0.5\text{m} = 200\text{keV/m}$
(W. Gai et al., Physical Review Letters, 61 (1988) 2756.)
- ・ディスクロード構造： $180\text{--}300\text{keV}/0.3\text{m} = 0.6\text{--}1\text{MeV/m}$
(H. Higueroa et al., Physical Review Letters, 60 (1988) 2144.)

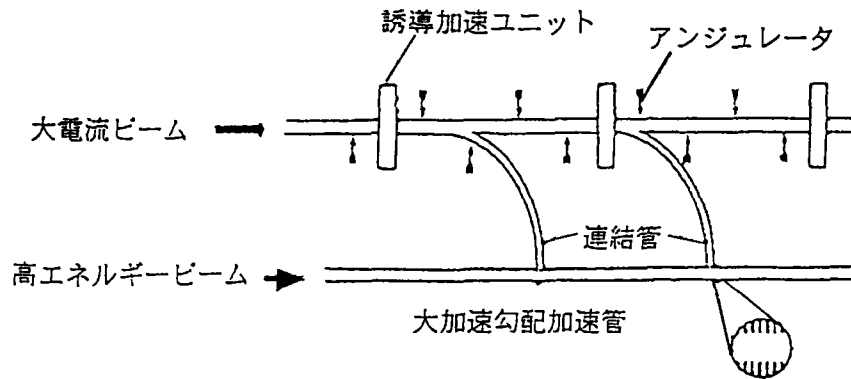
技術課題

- ・B. のものについては、トランス比（エネルギー利得はドライブビームの2倍以下）の制限があるが、1) ビーム励起型プラズマ加速の解決策と同じ手段が使える。なお、A. のものについては、このトランス比の制限はない。
- ・ GeV/m 程度を超える加速勾配を得ようとするとき加速管が破壊する。(使い捨て加速管とすることは可能である。)

②2ビーム加速(Two Beam Acceleration ; TBA)

加速原理

大電流電子ビームのアンジュレーションにより発生させた電磁波（自由電子レーザー）をもう一つの加速管に導き、電子を加速する（図－V－2－18）。



図－V－2－18 2ビーム加速の原理

提案論文

A. M. Sessler, AIP Conference Proceedings, 91 (1982) 154.

研究機関

- ・ CERN (R. Corsini, AIP Conf. Proc. 398 (1997) 126. ではこの方法で 100MV/m の加速勾配を得るものとして CLIC (Compact Linear Collider) を設計している。)
- ・ Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)
- ・ 高エネルギー加速器研究機構 (中止)

これまでの実験結果

- ・ CERN における、大電流バンチビームから発生する電磁波を 30GHz 用の加速空洞に供給し加速する実験では、90MV/m まで成功している。

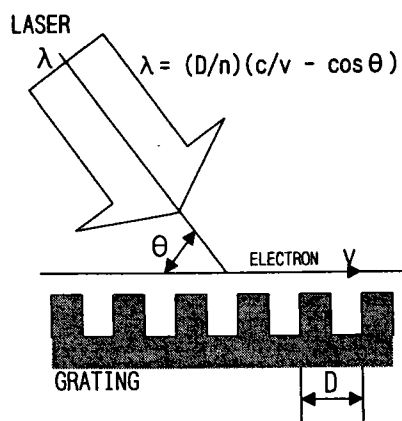
技術課題

- ・ 自由電子レーザー関連の諸課題

③逆スミス・パーセル加速

加速原理

回折格子をレーザーによりスミス・パーセル角で照射し、格子に励起された電界で、格子表面近くを格子に垂直に進む電子を加速する（図－V－2－19）。



図－V－2－19 逆スミス・パーセル加速の原理

提案論文

K. Mizuno et al., Nature 253 (1975) 184.

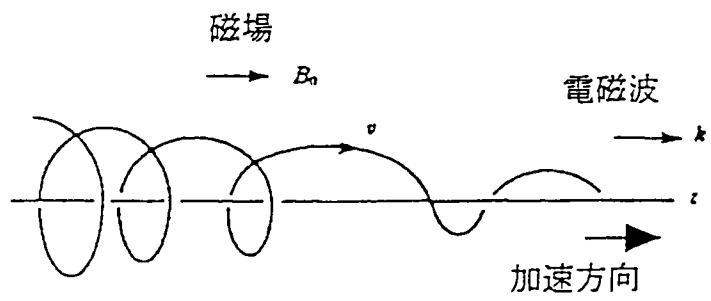
研究機関

・東北大学電気通信研究所

④自動共鳴加速 I (Autoresonance Acceleration I)

加速原理

$\omega - k v_z = \Omega / \gamma$ ($\omega = k c$ は電磁波の周波数、 v_z は電子の速度、 $\Omega = e B / m c$ 、 B は加速方向の磁場の強さ、 γ は相対論因子) を満たす様に電磁波の周波数及び磁場の強さを選び、磁場及び電磁波を加速方向にかけた状態で（被加速）電子ビームを入射すると、サイクロトロン運動をしつつ電子ビームが加速される（図－V－2－20）。



図－V－2－20 自動共鳴加速 I の原理

提案論文

V. Ya. Davidovskii, Sov. Phys. JETP, 16 (1963) 629.

研究機関

・Yale University (理論)

これまでの実験結果

・ $150\text{keV}/1.5\text{m} = 100\text{keV/m}$ (S. Shpitalnik et al., Journal of Applied Physics, 70 (1991) 1101.)

技術課題

- ・放射損失
- ・最近の現実的な条件を想定した計算では、1段あたりのエネルギーゲインは 2MeV 程度であり、多段化が必要であるといわれている (C. Wang and J.L. Hirshfield, Bull. APS, 42 (1997) 1937.)。

⑤逆自由電子レーザー加速

加速原理

自由電子レーザー発振の場合と同様な装置配位で、(被加速) 電子ビームをウィグラーにより蛇行運動させ、かつ、蛇行運動の中心線上にレーザー光を電子が加速される位相で走らせることにより電子ビームを加速する (図-V-2-21)。なお、このとき、ウィグラー長は進行方向に順次長くしてゆく。

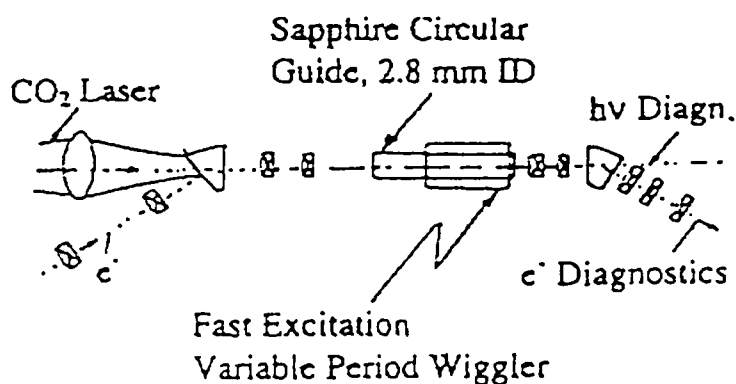


図-V-2-21 逆自由電子レーザー加速の原理

研究機関

・BNL

これまでの実験結果

・ $1\text{MeV}/0.47\text{m} = 2\text{MeV/m}$ (A. van Steenbergen et al., AIP Conf. Proc., 398 (1997) 591.)

(2) 非高周波高勾配加速技術による陽子・重イオン加速

陽子や重イオンの加速については、その質量が大きいため、光速近くに加速する初期加速部が、電子加速器に比べてかなり大がかりな装置が必要とされる。この調査において注目している陽子あるいは重イオンビームのエネルギーは 200MeV/核子程度であり、初期加速領域のエネルギーに相当するものである。

高周波加速以外の加速原理として、加速しやすい（負電荷の）電子集団の中に（正電荷）の陽子や重イオンを束縛し、電子集団を加速することにより電子とのクーロン相互作用で束縛された陽子や重イオンを加速する電子リング加速などの「集団加速」が早くから提案されている。

また、近年の大強度レーザー技術の進展を背景として、これらの技術を使う加速方法が提案されている。レーザー（後方ラマン散乱）励起型プラズマ加速（陽子）、レーザー衝撃波加速（重イオン）あるいは直交場加速（陽子・重イオン）がこれに相当する。なお、直交場の意味は電子の場合と同様である。

1) 電子リング加速

加速原理

図-V-2-22 に示すように、リング状の電子群がリング内につくるポテンシャルに陽子・イオンを置き、電子リングを加速することにより、リング内のポテンシャルに捉えられた陽子・イオンを加速する。この方法では数 10MV/m の加速電場が得られる。

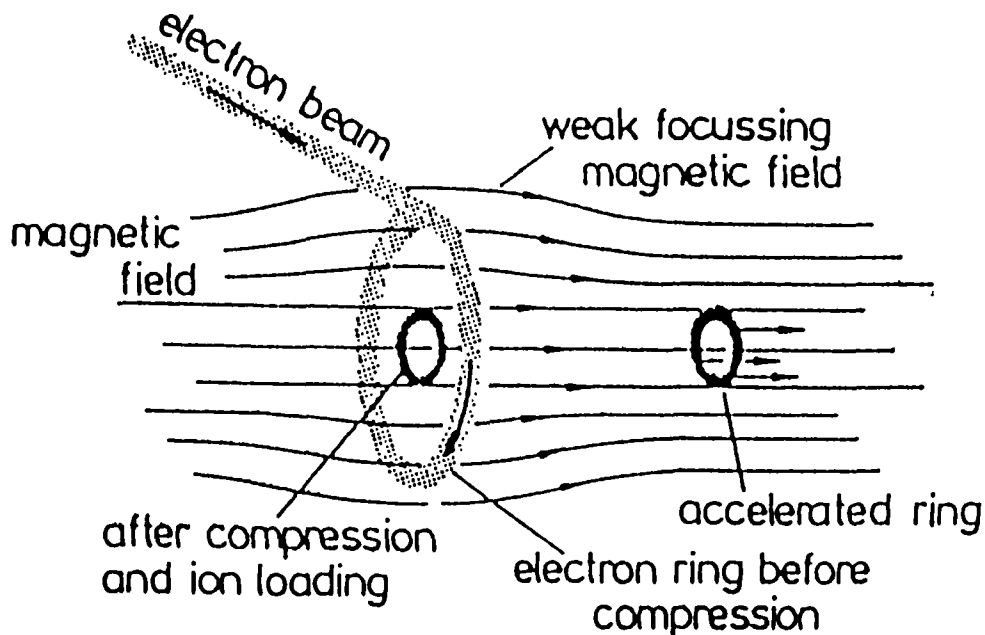


図-V-2-22 電子リング加速の原理

提案論文

V.I. Veksler, Proceedings of the CERN Symposium on High-Energy Accelerators and Pion Physics, Geneva, 1956, Vol.1, p.80.

G.I. Budker, Proceedings of the CERN Symposium on High-Energy Accelerators and Pion Physics, Geneva, 1956, Vol.1, p.68.

研究機関

- BINP
- LBNL
- University of Maryland
- 名古屋大学プラズマ研究所
- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching

現在は、いずれの研究機関においても研究を中止している。

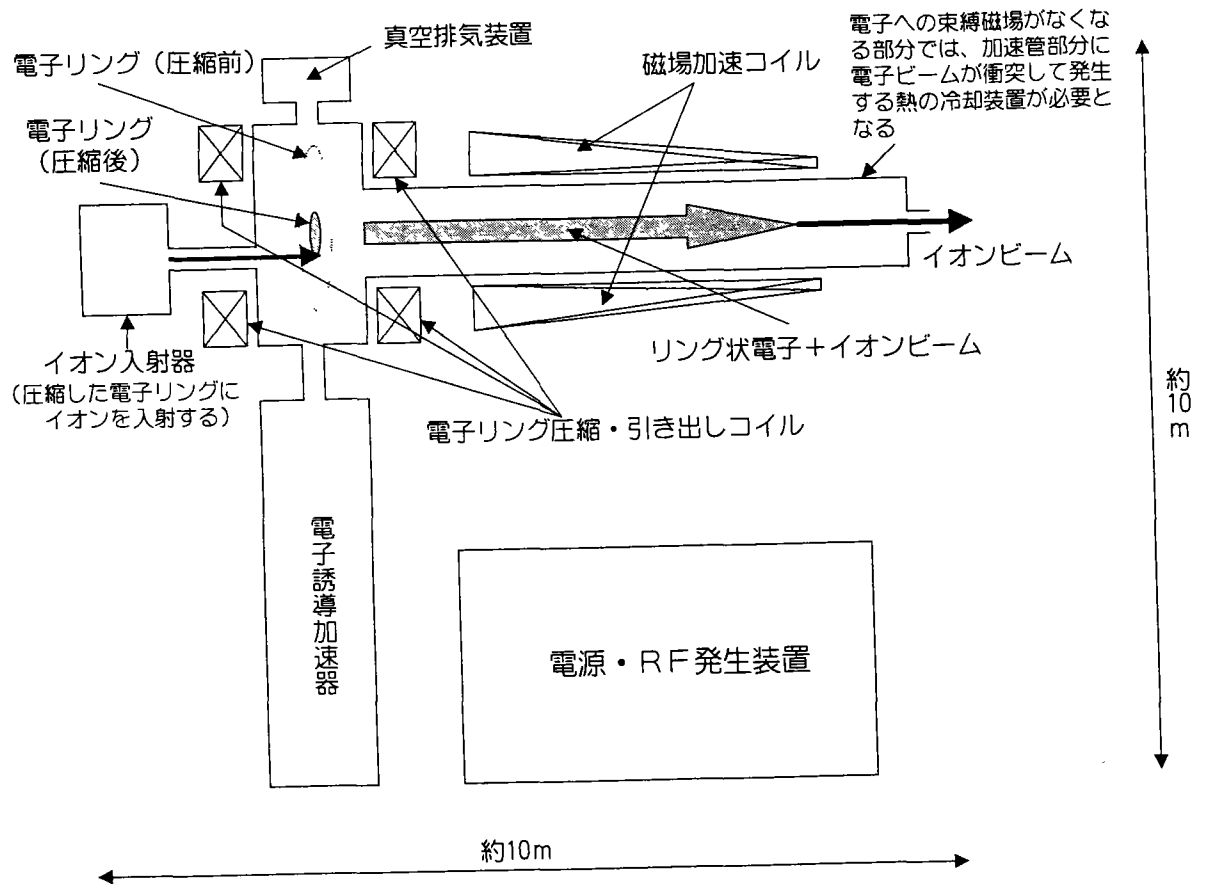
これまでの実験結果

- N^{14} 5×10^{11} ions を 4MeV/nucleon まで加速 (加速距離 : 0.5m、加速勾配 : 8MeV/m)

(V.P. Sarantsev and I.N. Ivanov, High Power Beams 81, H.J. Doucet and J.M. Buzzi, ed Ecole Polytechnique Report, (Palaiseau, France) p691.)

電子リング小型重イオン加速器の提案（研究開発段階Ⅳ）

提案されている小型加速器全体構成を以下に示す。



(川崎 温 (埼玉大学) 案)

図-V-2-23 電子リング小型重イオン加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

- ・ ビームエネルギー 200MeV/n
- ・ ビーム強度 10^{11} ions/pulse
- ・ ビームパルス長 psec オーダー
- ・ ビームの大きさ かなり広がる

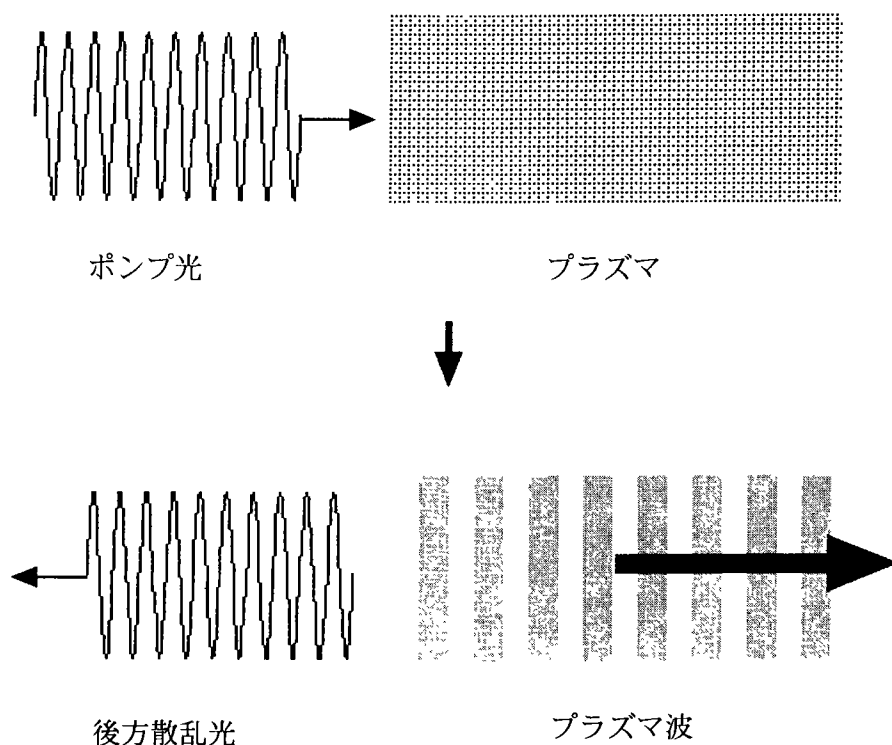
実現のための技術課題

- ・ 各種不安定性 (resistive-wall, negative mass, ion resonance instabilities) への対処

2)レーザー励起型プラズマ加速

加速原理

図－V－2－24に示すように、プラズマにレーザー光を入射すると、レーザー光が後方に散乱されるとともにプラズマ波が生ずる現象（後方ラマン散乱）を利用するものである。この現象で発生するプラズマ波の位相速度は、プラズマ密度の増加関数である。陽子ビームの軸に沿って密度が増加するプラズマ（陽子ビームの入射地点でのプラズマ波位相速度と陽子ビームの速度を合わせるように、入射地点でのプラズマ密度をとる）中にレーザーを入射し、位相速度が次第に増加するプラズマ波をつくり、このプラズマ波のポテンシャルにより陽子ビームを加速する。この方法では、種々の理由により、陽子では約150MeV程度のエネルギーを得るのが限界と考えられる。加速電場は、理論上は100GV/mを超えるが、実質的に加速できる距離はmmのオーダーである。



図－V－2－24 レーザー励起型プラズマ加速の原理

提案論文

- ・ A. Ogata and T. Katsouleas, "Proton Acceleration in Plasma Waves Produced by Backward Raman Scattering", 8th Workshop on Advanced Accelerator Concepts, Baltimore, Maryland, 1998, AIP Conf. Proc. 472 (1999) 551-562.

研究機関

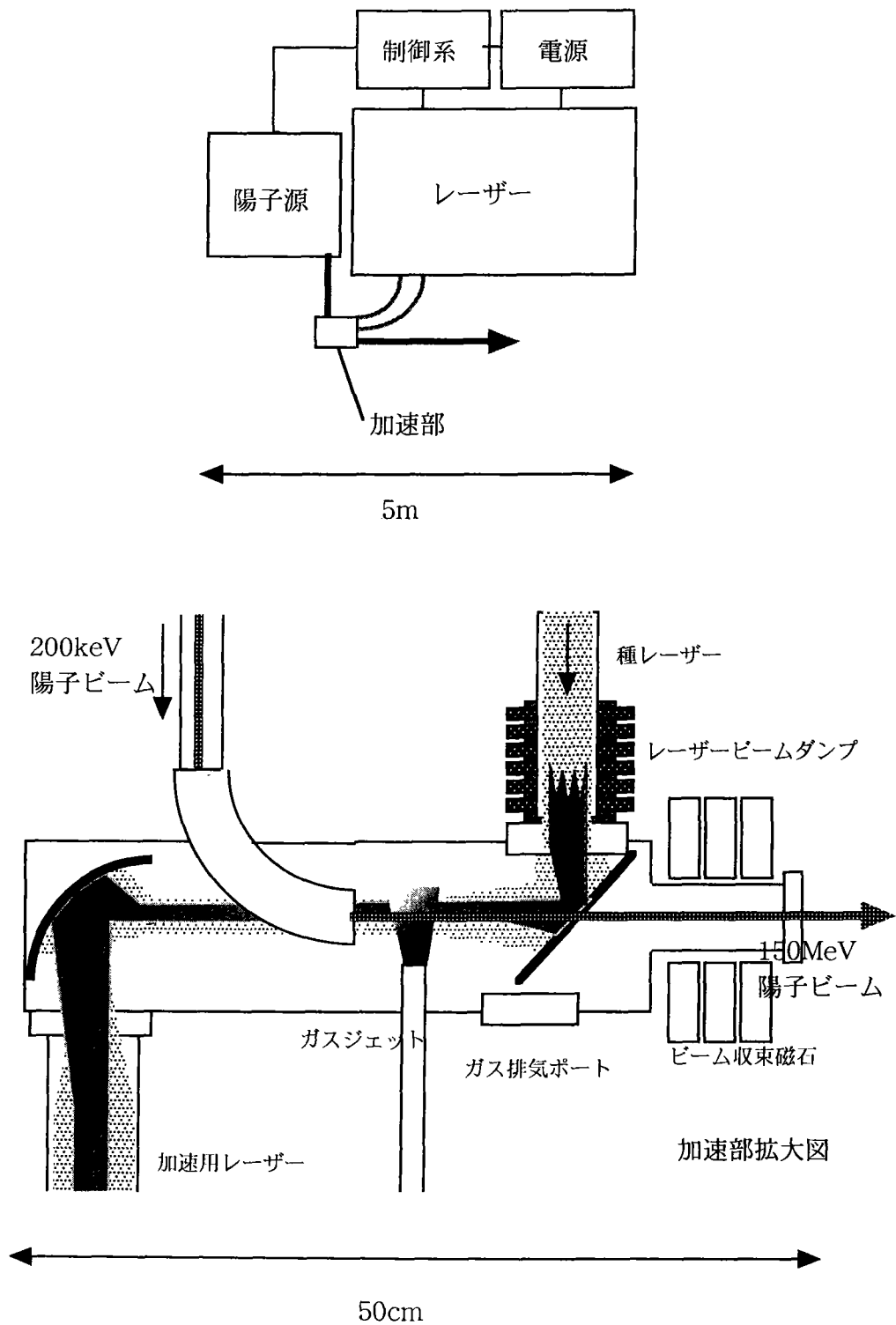
- ・ 広島大学

これまでの実験結果

なし

レーザー励起型プラズマ加速小型陽子加速器の提案（研究開発段階Ⅰ）

提案されている小型加速器の全体構成を以下に示す。



(小方 厚 (広島大学) 案)

図－Ⅴ－2－25 レーザー励起型プラズマ加速小型陽子加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー等

- ・ ビームエネルギー 150MeV (陽子)
- ・ ビーム強度 1pC/pulse
- ・ ビームパルス率 $f = 10\text{Hz}$

実現のための技術課題

- ・ シミュレーションコードの開発 (プラズマ波の電場強度やプラズマ波の減衰の推定)
- ・ 再現性良くラマン不安定性を引き起こす手法 (補助レーザーの使用等) の検討
- ・ 所定の密度勾配を安定的に実現させる方法の開発
- ・ 発生させる密度勾配と陽子速度を同期させる方法の開発

3)レーザー衝撃波加速

加速原理

図-V-2-26 に示すように、短いパルスレーザーを (プラスチック等の) 薄膜に照射すると、レーザーの持つ運動量が薄膜のイオン化したプラズマの運動量に衝撃波 (超音速音波) の形で変換される。薄膜の裏側から吹き出したプラズマは、クーラン解で特徴づけられる希釈解 (密度が段々に下がる) を持つが、このプラズマに垂直方向に磁場を加えることにより衝撃波を磁気音波 (アルベン) 衝撃波に変換する。このアルベン衝撃波の速度は、プラズマの密度が小さくなるにしたがい増大することから、これによりイオンを加速することができる。加速するイオンについては、アルベン衝撃波が薄膜より吹き出したプラズマ中のイオンを自発的に拘束するものを使うか、あるいは、発生したアルベン衝撃波の位置に合わせて外部より入射させる方法が考えられる。なお、原理的な加速電場は、加える磁場の大きさに依存し、数 Tesla の磁場を加えるものとなれば、数 100MV/m 程度となる。

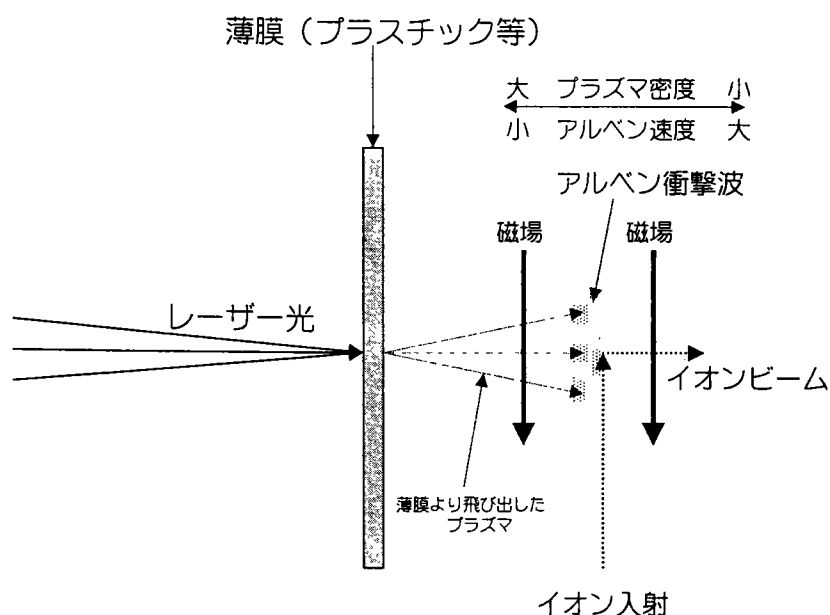


図-V-2-26 レーザー衝撃波加速の原理

提案論文

- B. Rau and T. Tajima, "Strongly Nonlinear Magnetosonic Waves and Ion Acceleration", Phys. Plasmas 5 (1998) 3575-3580.

研究機関

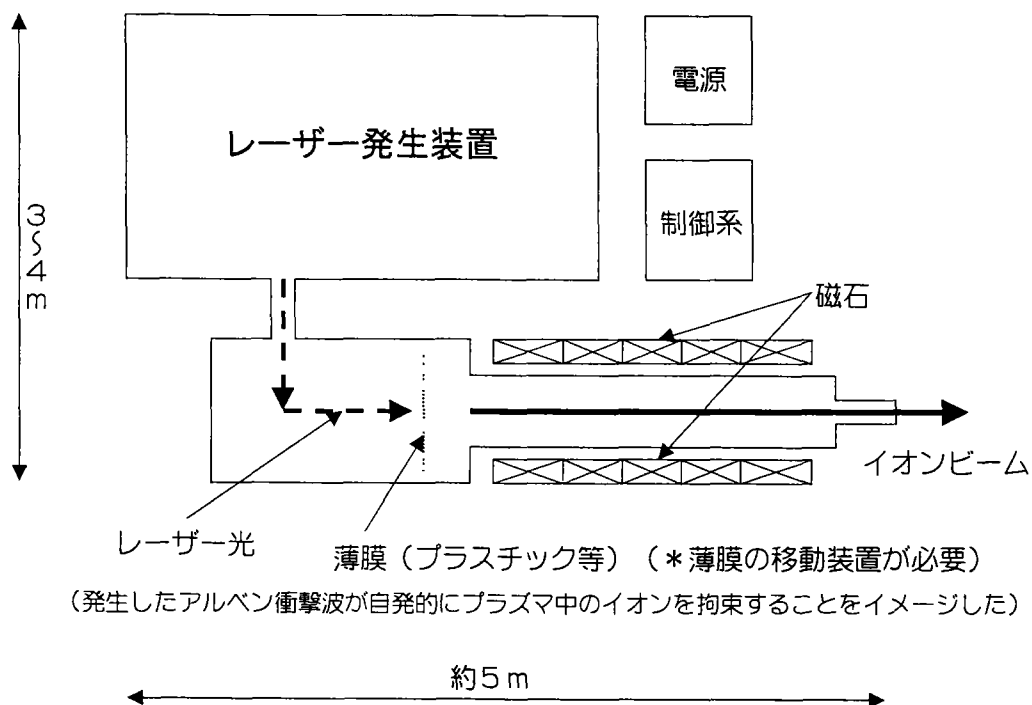
- University of Texas at Austin
- University of Michigan
- R A L
- L L N L

これまでの実験結果

- 1.5MeV protons (U. Michigan, 4J400fs10TW laser, A. Maksimchuk et al., Phys. Rev. Lett. 84(2000)4108.)
- 30MeV protons (RAL, 50TW laser, K. Krushelnick et al., Phys. Plasmas 7(2000)2055.)
- 55MeV protons (LLNL, PW laser, S. P. Hatchett et al., Phys. Plasmas 7(2000)2076.)

レーザー衝撃波加速小型重イオン加速器の提案（研究開発段階Ⅰ）

（この提案は 1998 年 10 月時点（最も早い時点）での提案であり、その後の実験的な研究の進展によりいろいろな提案が検討されているものと思われる。）



田島 俊樹（テキサス大学 オースティン校）案

図－V－2－27 レーザー衝撃波加速小型重イオン加速器の全体構成

目標とするビームエネルギー、ビーム強度

イオン源として

- ・ ビームエネルギー 数 MeV/n
- ・ ビーム強度 $10^{10} \sim 10^{11}$ ions/pulse

イオン加速器として

- ・ ビームエネルギー $\sim 200 \text{ MeV/n}$
- ・ ビーム強度 10^8 ions/pulse

実現のための技術課題

- ・ 原理実験による確認
- ・ イオン捕捉の拙攻の吟味
- ・ 加速構造（アルベン衝撃波）とイオンの位相安定性の確認
- ・ アルベン衝撃波の位相速度の増加の制御と安定性
- ・ 加速の上限、エミッタンス、粒子数等のビームパラメータの決定
- ・ レーザー、薄膜材料、吹き出しプラズマ等のパラメータの最適化

4) 直交場加速

電子の場合と同様に、陽子・重イオンを捕捉した電場の波（横波、縦波のいずれでも良い）の進行方向に直交するように定常磁場をかけると、陽子・重イオンは波面を波乗りするように走行しながら、効率よく加速されることを利用するものである。電場の波としては、電磁波（レーザー等）（横波）やプラズマ波（縦波）があり、以下の二つに大別できる。

- ① 陽子・重イオンを捕捉する電場として、レーザー光の電場を利用するもの（横波型直交場加速）
- ② 陽子・重イオンを捕捉する電場として、レーザーパルスなどで励起させるプラズマ波を利用するもの（縦波型直交場加速）

①レーザー（横波型）直交場加速

加速原理

電子の場合と同様な加速原理（図-V-2-13 参照）に基づくものである。原理的加速電場は、電子の場合と同様に、スポット的には 1 TV/m 以上のものとなるが、加速距離は短く（ $10 \mu\text{m}$ 程度）一段あたりでのエネルギー利得は数 10 MeV であり、それ以上のエネルギーを得るには多段化が必要となる。図-V-2-28 に示すように、TEモードレーザービームを、いくつかの鏡を用いてイオンビームとの交点に多段的に焦点を絞り、その焦点領域に電場と直交する定常磁場を印加すると、図に示す軌道に沿ってイオンが加速される。

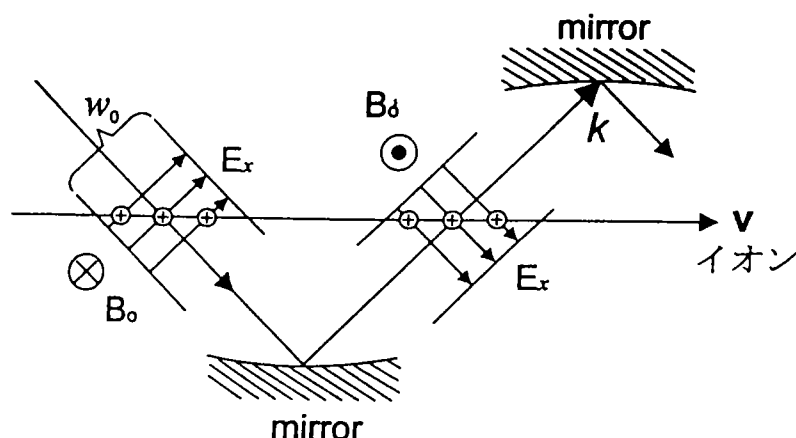


図-V-2-28 レーザー（横波型）直交場加速の原理

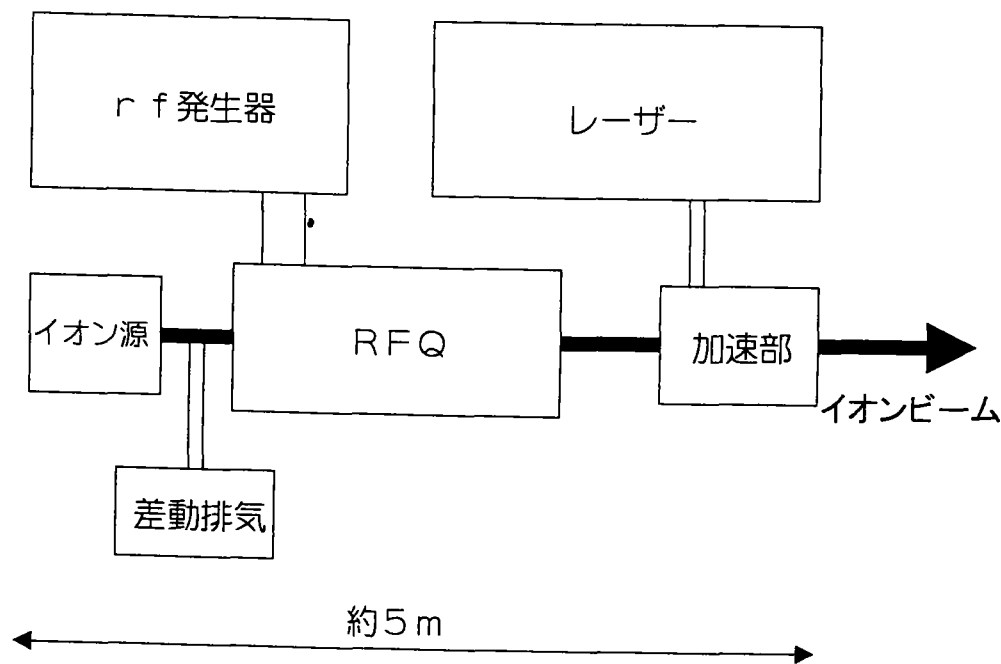
提案論文

- ・ S. Takeuchi, K. Sakai, M. Matsumoto and R. Sugihara, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-15 (1987) 251.
- ・ K. Otuka, Y. Nishida and N. Yagami, Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1994) 5933.
- ・ Y. Nishida, 弥生研究会 東京大学 1998 年 3 月 19-20 日

研究機関
・宇都宮大学

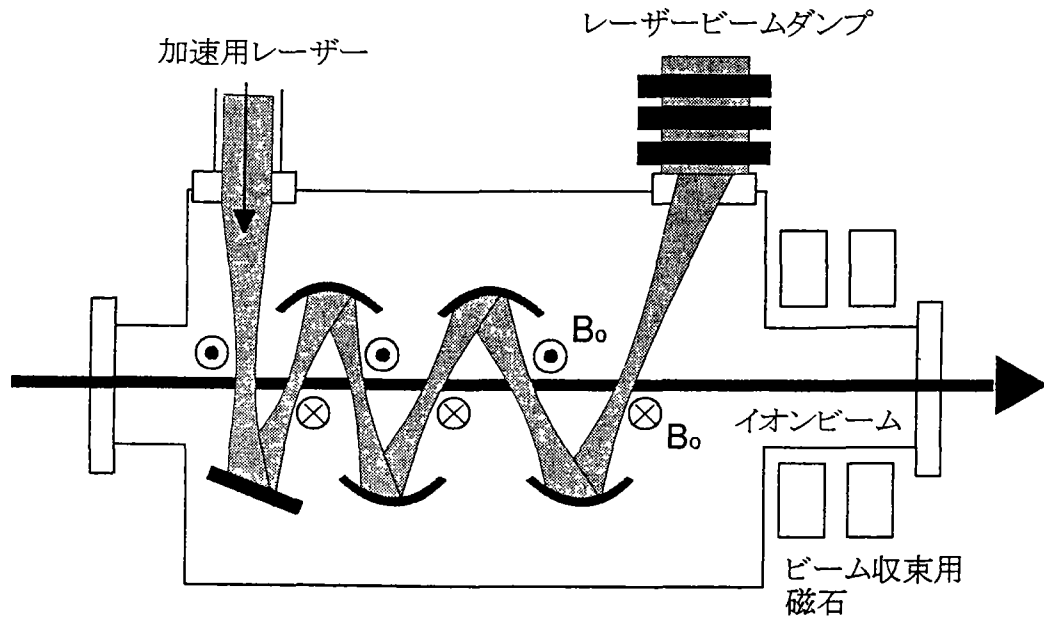
これまでの実験結果
なし

レーザー(横波型)直交場加速小型重イオン加速器の提案（研究開発段階Ⅰ）
提案されている小型加速器全体構成を以下に示す。



(西田 靖 (宇都宮大学) 案)
図－V－2－29(a) レーザー(横波型)直交場加速小型重イオン加速器の全体構成

(加速部詳細図)



(西田 靖 (宇都宮大学) 案)

図-V-2-29(b) レーザー(横波型)直交場加速小型重イオン加速器の加速部詳細

目標とするビームエネルギー、ビーム強度等

第1段階

- ・ビームエネルギー 200MeV
- ・ビーム強度 1mA
- ・エミッタンス 10mm・mrad
- ・ビームパルス率 $f = 100 \text{ Hz}$

実現のための技術課題

- ・コンパクトな強磁場 ($>1 \text{ Tesla}$) 発生装置の開発
- ・レーザーの効率向上
- ・RFQ (イオン源) とレーザー光の同期
- ・安定なイオン源: プラズマ波長程度あるいはそれ以下の長さのビームバンチの発生

②プラズマ(縦波型)直交場加速

加速原理

(2) 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速、2) レーザー励起型プラズマ加速器において、(プラズマの密度勾配をなくして) プラズマ密度を、(レーザーの後方ラマン散乱で発生する) プラズマ波の位相速度が入射陽子ビームの速度と等しくなるように選ぶ。このプラズマに、入射ビームの方向と直交する定常磁場をかけた状態で、レーザーを入射させ(後方ラマン散乱による) プラズマ波を励起し、引き続いて陽子ビームを入射させ陽子をプラズマ波に捕捉し、プラズマ波とも磁場とも直交する方向に加速する。理論上の加速電場は 1GV/m を超えるものとなるが、陽子の得るエネルギーは、プラズマの幅に規定されるものとなる。

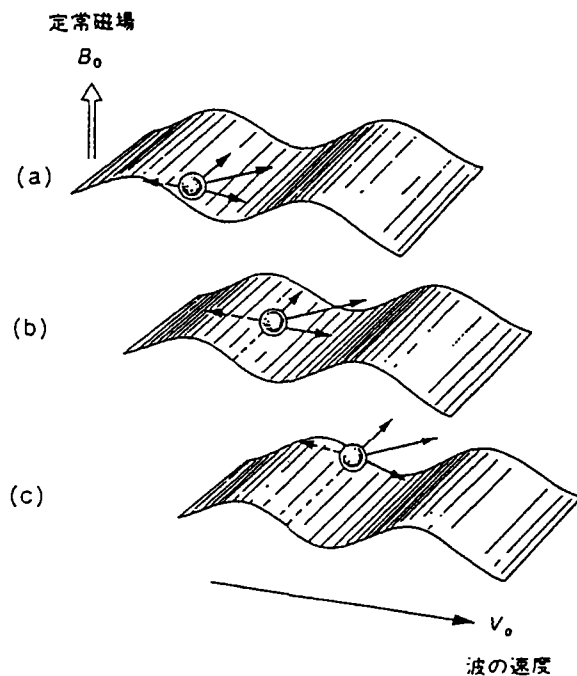


図-V-2-30 プラズマ(縦波型)直交場加速の原理

提案論文

A. Ogata and T. Katsouleas, Proc. 1998 AAC, to be published in AIP Conf. Proc..

研究機関

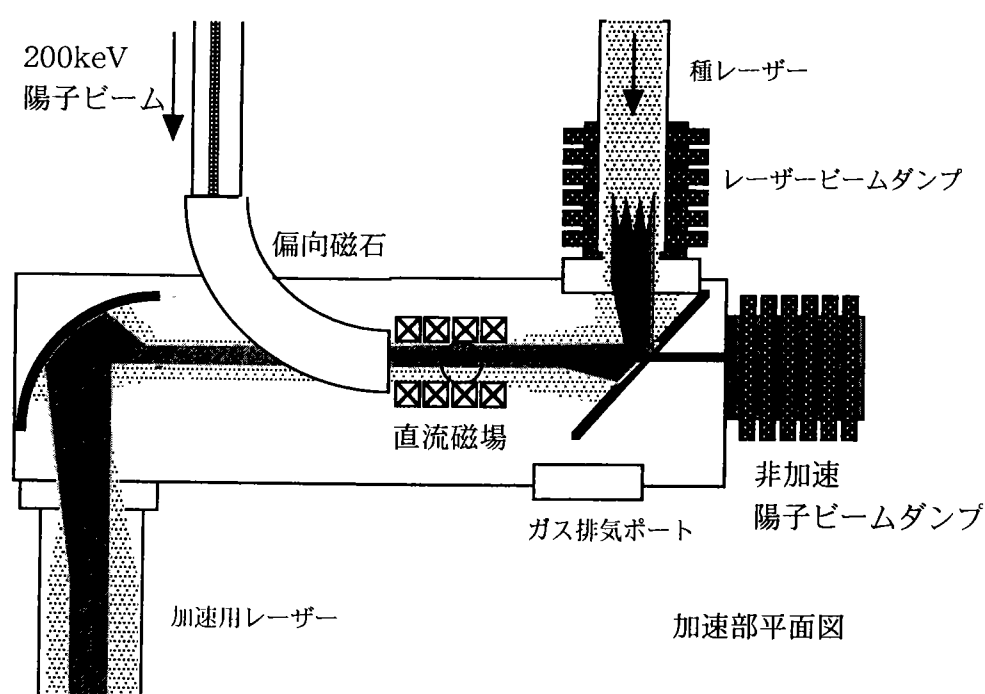
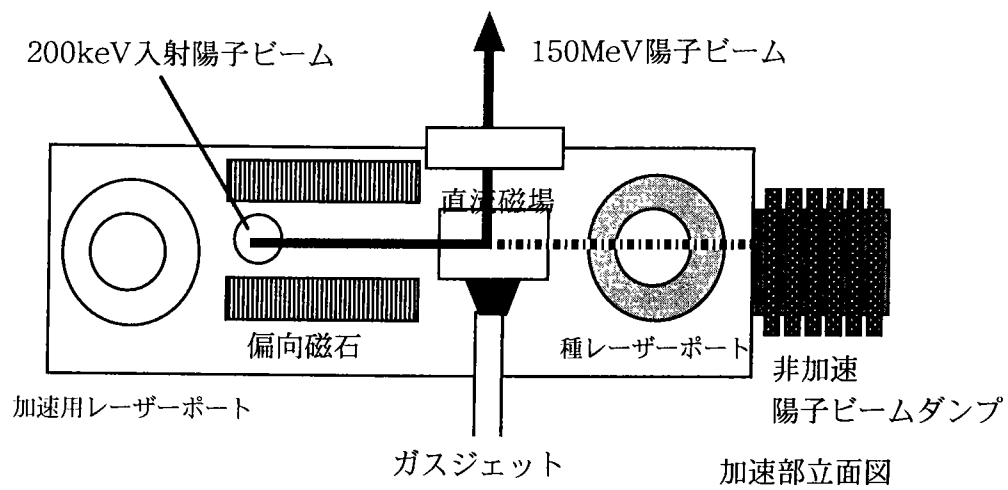
・広島大学

これまでの実験結果

なし

プラズマ(縦波型)直交場加速小型陽子加速器の提案 (研究開発段階Ⅰ)

全体構成図は、図-V-2-25 に同じ。加速部詳細は下のようになる。



150cm

(小方 厚 (広島大学) 案)

図-V-2-31 プラズマ(縦波型)直交場加速小型陽子加速器の加速部詳細

目標とするビームエネルギー等

- ・ビームエネルギー 150MeV (陽子)
- ・ビーム強度 1pC/pulse
- ・ビームパルス率 $f = 10\text{Hz}$

実現のための技術課題

- ・シミュレーションコードの開発 (プラズマ波の電場強度やプラズマ波の減衰の推定)
- ・再現性良くラマン不安定性を引き起こす手法 (補助レーザーの使用等) の検討
- ・幅の広いレーザービーム作成方法の開発

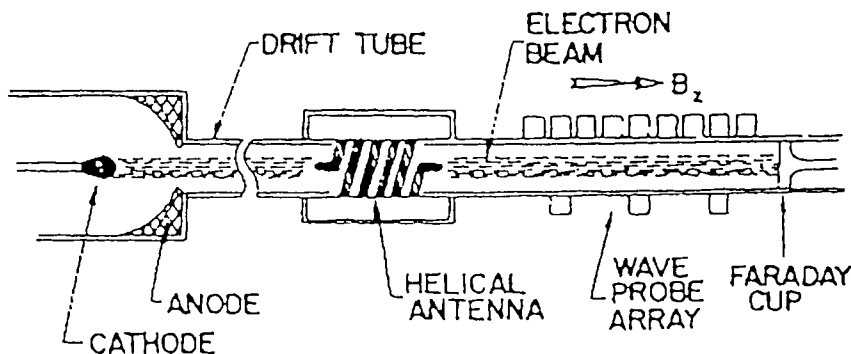
5)その他

以上の提案の他に、一般的なRF加速とは異なる加速原理に基づく加速方法をいくつかまとめる。

①自動共鳴加速Ⅱ (Autoresonance Acceleration Ⅱ)

加速原理

軸方向 (加速方向) に磁場をかけた状態で電子ビームを入射させ、電磁波により電子ビームにサイクロトロン波 (lower-hybrid Doppler-shifted cyclotron mode) を立て、この波に陽子・イオンを乗せて加速する (図-V-2-32)。このサイクロトロン波の位相速度 (v_p) は、 $v_p = v_z / [1 + eB / (\gamma m c \omega)]$ (v_z は電子の速度、 ω はサイクロトロン波を立てる電磁波の周波数、 $eB / \gamma m c$ はサイクロトロン周波数) で表される。軸方向にかける磁場の強さ B は、陽子・イオンの加速にあわせて変化させる。



図は波を立てるための基礎実験を示すもので、陽子(イオン)源はない。

図-V-2-32 自動共鳴加速Ⅱの加速原理

提案論文

W.E. Drummond and M.L. Sloan, Physical Review Letters, 31 (1973) 1234.

研究機関

- ・Austin Research Associate (実験)

これまでの実験結果

- ・サイクロトロン波を観察し、加速勾配は 10 MeV/m と算出した。(E. Cornet et al., Physical Review Letters, 46 (1981) 181.) (陽子加速には成功しないまま終了)

②Converging Guide Acceleration (CGA または Space-Charge Wave Acceleration)

加速原理

周波数 ω をもつ電磁波のもとで、速度 v_z の電子ビームに伴う slow space-charge wave に陽子、イオンを乗せて加速する (図-V-2-33)。この space-charge wave の位相速度 (v_p) は、 $v_p = v_z / [1 + F(\omega_p/\omega)]$ 、(ω_p はプラズマ周波数、 F は形状因子) で表される。図のようなテーパ付き加速管で F を加速距離に伴い減少させ、陽子・イオンの加速とともに位相速度を増加させる。

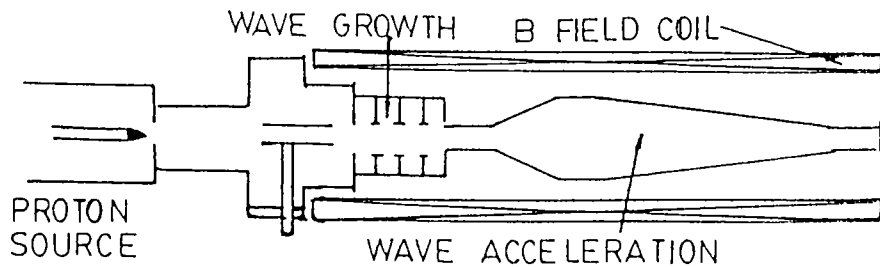


図-V-2-33 Converging Guide Acceleration の加速原理

研究機関

- ・NRL (理論)
- ・Cornell University (実験)

これまでの実験結果

- ・space-charge wave の位相速度として 0.1 c (光速の 1/10) を計測 (その後中止)

技術課題

- ・ $v_p < 0.1 c$ とすること (陽子・イオンを加速するためには space-charge wave の位相速度を十分遅くする必要がある)

(3)小型(硬X線)放射光発生技術

放射光は、一般的には電子シンクロトロンにおける偏向部から放射される指向性の強い光（赤外線～ γ 線までの非常に広いエネルギー領域の電磁波）を指しているが、これは電子ビームと磁場との相互作用により放出される光子ビームである。シンクロトロンの周回軌道上に直線部を設け、ここにウィグラーやアンジュレータなどの交代磁場を挿入（挿入光源）すると、単なるシンクロトロン放射に比べてより高輝度の放射光が得られることは、Ⅱ-1.（4. 物質・材料科学分野の77頁）に示したとおりである。

エネルギーのやや高い（硬X線）光子ビームを得る場合には、

- A. 電子ビームのエネルギーを（数 GeV 程度に）高くする
- B. 非常に強い（交代）磁場を用いて電子ビームにアンジュレーションを起こす
- C. A. および B. の両方を使う

ことが考えられる。電子ビームのエネルギーを高くするには現状では大型の電子シンクロトロンが必要となり、全体装置の小型化には寄与しない。このため、電子ビームエネルギーは低いものを使うが、レーザーの強い磁場成分をアンジュレータとして用いる方法が提案されている。この方法はマイクロレベルで見ると、レーザーと電子ビームの逆コンプトン散乱である。

1)レーザーアンジュレータ放射光発生

放射光発生原理

図-V-2-34に示すように、電子ビームの進行方向と逆方向にレーザーパルスを当て、レーザー光の強い磁場により電子ビームにアンジュレーションを起こし(微視的にみると、レーザー・コンプトン散乱あるいはレーザー・トムソン散乱)、エネルギーの高い放射光を発生させる。

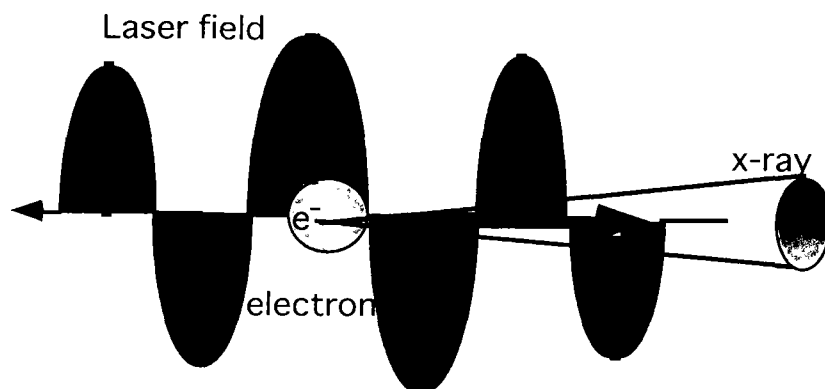


図-V-2-34 レーザーアンジュレータ放射光発生原理

提案論文

- R. H. Milburn, Physical Review Letters, 10 (1963) 75
- R. R. Arutyunian and V. A. Tumanian, Physical Review Letters, 4 (1963) 176
- E. Esarey, P. Sprageland and A. Ting, Nucl. Inst. Methods, A331 (1993) 545
- Z. Huang and R. D. Ruth, "Laser-Electron Storage Ring", Physical Review Letters, 80 (1998) 976
- K. Nakajima, H. Nakanishi, A. Ogata, Z. F-Qing and M. Kumada, "Proposal of compact high brightness laser synchrotron light source for medical use" to be published in EPAC98, Stockholm, Sweden, 1998
- K. Kumada, K. Nakajima, H. Nakanishi, A. Ogata and Z. F-Qing, "Conceptional Design of Medical Laser SR", submitted to 6th Int. Conf. On X-ray Lasers, Kyoto, 1998

研究機関

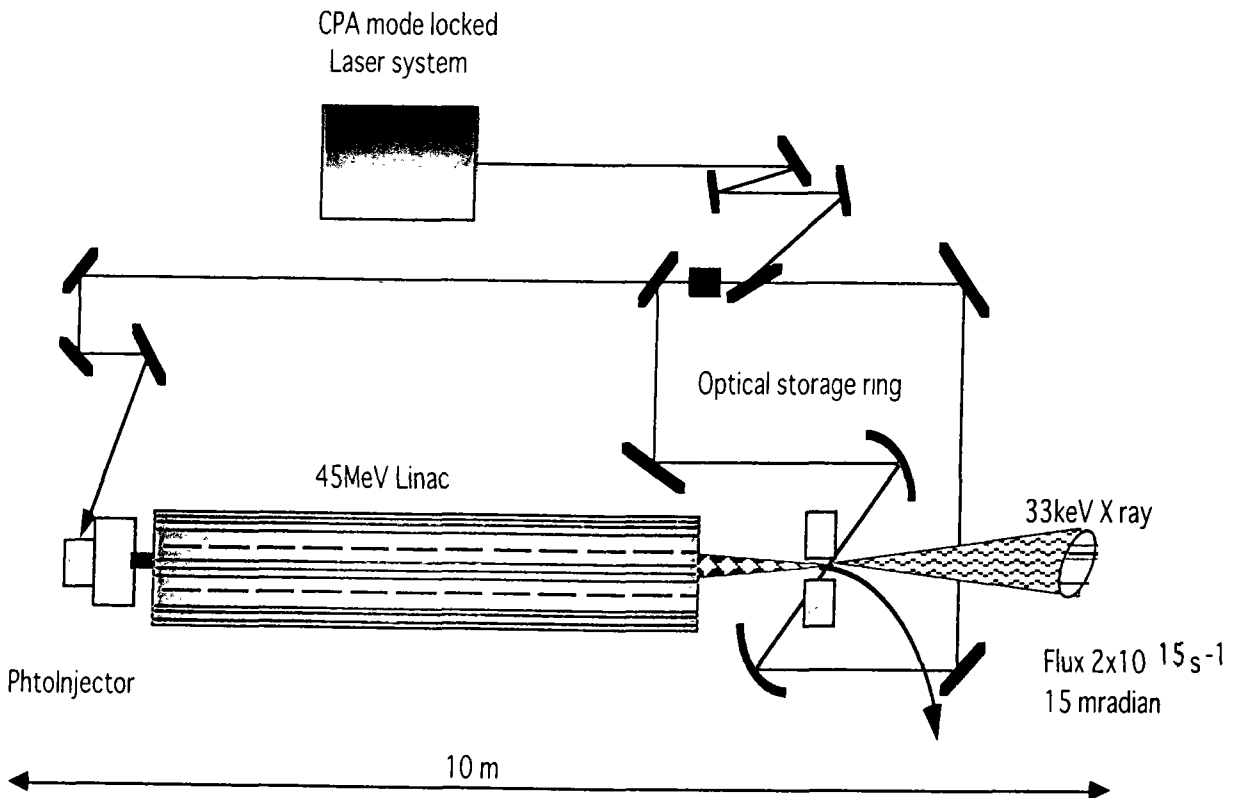
- ・放射線医学総合研究所／高エネルギー加速器研究機構
- ・BNL
- ・SLAC
- ・LBNL

これまでの実験結果(原理実証実験)

- ・SLAC (V. Balakinet et al., Physical Review Letters, 74 (1995) 2479)
- ・LBNL (R. W. Schoenlein et al., Science 274, (1996) 236)
- ・電子技術総合研究所 (<http://www.etl.go.jp/etl/linac/j/members/ohgaki/lcp.htm>)
- ・A. Moon, 藤田雅之 et al., JJAP 36 (1997) 1446

レーザーアンジュレータ小型放射光発生装置の提案（研究開発段階Ⅲ）

（第1案：Single-Pass Laser 放射光源）



| 電子加速器諸元 | | レーザーパラメーター | |
|------------|----------------------------------|------------|--------------------|
| ビームエネルギー | : 46.2MeV | 波長 | : $1 \mu\text{m}$ |
| ビームエネルギー幅 | : 0.1% | パルスエネルギー | : 2J/pulse |
| ビーム強度 | : 1.6nC/bunch | パルス幅ピークパワー | : 1TW |
| ビームパルス長 | : 2ps | スポット径 | : $10 \mu\text{m}$ |
| バンチ数 | : 160 | | |
| 繰り返し周波数 | : 100Hz | | |
| 規格化エミッタンス | : $1\text{mm} \cdot \text{mrad}$ | | |
| 衝突部でのビーム半径 | : $10 \mu\text{m}$ | | |

（熊田 雅之（放射線医学総合研究所）案）

図－V－2－35(a) レーザーアンジュレータ(Single-Pass Laser)放射光源の全体構成

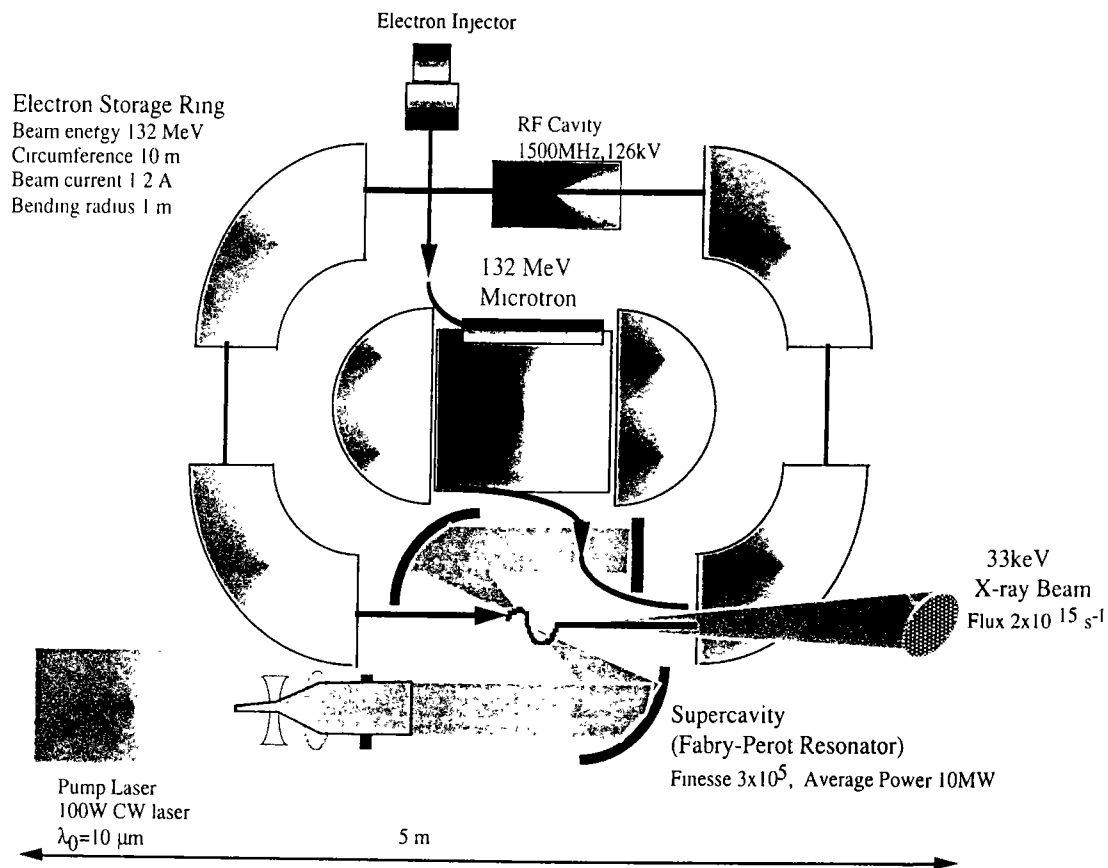
目標とする光子エネルギー、光子ビーム強度

- ・光子エネルギー 33keV（X線）
- ・光子数スペクトル幅 0.2%
- ・光子ビーム強度 $2 \times 10^{15} \text{ photons/sec/15mradian}$

実現のための技術課題

- ・電子ビーム・レーザー衝突部のパラメーター設定

(第2案：Intracavity Laser 放射光源)：この案の場合、総重量 10 ton 以下とすることは困難



| 電子ビーム・貯蔵リング等諸元 | | レーザーパラメーター |
|--------------------|---|---------------------------|
| 加速器からの電子ビーム | エネルギー幅 : 0.2% | 波長 : $10 \mu\text{m}$ |
| ビームエネルギー : 132 MeV | 量子寿命 : 1 時間 | パルスエネルギー : 2 J/pulse |
| ビーム強度 : 1.2 A | 規格化 | ピークパワー : 1 GW |
| ビームパルス長 : 2 ps | エミッタンス : $0.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ | 平均パワー : 10 MW |
| バンチ数 : 50 | 繰り返し周波数 : 100 Hz | スポット径 : $100 \mu\text{m}$ |
| 貯蔵リング関係 | 衝突部での ビーム半径 : $30 \mu\text{m}$ | |
| 周長 : 10 m | RF Cavity | |
| 偏向電磁石曲率 : 1 m | RF 周波数 : 1500 MHz | |
| エネルギー損失 : 28.5 eV | RF 電圧 : 126 kV | |
| ダンピングタイム : 155 ms | | |

(熊田 雅之 (放射線医学総合研究所) 案)

図-V-2-35(b) レーザーアンジュレータ(Intracavity Laser)放射光源の全体構成

目標とする光子エネルギー、光子ビーム強度等

- 光子エネルギー 33 keV (最大磁場では 330 keV) (X線)
- 光子ビーム強度 2×10^{15} photons/sec
- 光子数スペクトル幅 0.4%

実現のための技術課題

- ・貯蔵リングの径が小さい（偏向電磁石の曲率半径が小さい）ことによる非線形効果とその取り扱い
- ・電子ビーム・レーザー衝突部のパラメーター設定
- ・100 MW 級スーパーキャビティの開発（実証試験）
- ・波長 $10\text{ }\mu\text{m}$ のレーザー用のミラーの開発
- ・スーパーキャビティの安定性の確保

VI 先進小型加速器等の実用化予測及び 実用化後の想定される使用

VI 先進小型加速器等の実用化予測および実用化後の想定される使用

V章において整理した先進加速技術等は、加速器や放射光装置のドラスティブな縮小化可能性を有し、実用化されるとすると大きなメリットをもたらすと考えられるが、これらの研究開発の大まかなタイムスパンを考える上では、その実用化時期を何らかの方法で予測することが必要となる。

ある技術の実現時期を予測する最も一般的な方法として、その技術の専門家に対して技術の目標値を示したもの（技術課題）を提示し、その実現時期を問うデルファイ法がある。デルファイ法では、同一の技術課題の実現時期を複数回質問する（通常2回実施、2回目は1回目の結果を示しつつ質問する）。科学技術庁および当研究所では、調査時点から30年後までを想定し科学技術の全分野を対象としたデルファイ法による技術予測調査を、1971年より約5年毎に過去6回実施してきている。（現在第7回を実施中）。この技術予測調査では、第1回（1971年実施）調査時の技術課題およびその予測結果について、第5回調査時（1996年）に評価を実施し、第1回（1971年実施）調査時に使用した技術課題のうち約1/3が実現され、約1/3が一部実現という結果を得ている。なお、技術予測調査の技術課題は、対象とする技術の専門家（技術予測調査委員会の各分科会委員）がその時点での分野の状況を踏まえつつ今後30年後までを想定して作成したものである。上記の評価結果からすると、この種の技術予測はある程度の信頼性があり、研究開発の大まかなスパンを考える上では十分参考になるものと考えられる。

本調査においては、V章において整理した先進加速技術等に関して、その具体的な提案の中身を示しつつその実現予測時期などを問うこととした（「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査」）。なお、この調査においては、詳細な技術内容を図などで示す（通常のデルファイでは文章表現の技術課題のみ）こと、および過去のデルファイ法による調査での1回目の回答と2回目の回答であまり大きな差がでないことから、1回のみの回答とした。この結果をVI-1に示す。

また、研究開発を実施する上では、技術の実現時期の大まかな想定その他、その技術に対するユーザー側のニーズを把握することやその技術が実現した場合にどのような使われ方が想定され、どのような影響が考えられるかを事前に評価しておくことも重要である。Ⅲ章で述べた「加速器ビームニーズ等に関する調査」（「ビームニーズ等調査」）においては、現在のビーム使用状況および将来のビームニーズなどを問う他、VI-1で紹介する先進小型加速器等に関する実現予測時期などの結果を照会しつつ、先進小型加速器等へのニーズを各研究者の研究へのメリットとして質問をした。なお、「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査」（以後、「小型加速器等開発予測調査」ともいう）においては、加速器研究者に対して、20～30年後の加速器の状況および加速器開発方策に対する意見も聴取した。VI-2においては、加速器ビームユーザーの先進加速器等へのニーズや、先進加速器等が実用化されたとした場合に想定される使い方や影響などを示す。

なお、V章で示した先進小型加速器等については、今後の研究開発投資により実現時期が予測時期より早まるものもあると考えられる。

VI-1 先進小型加速器等の開発予測調査およびその結果

V章において整理した先進小型加速器等は以下のものであった。

○高周波極限加速技術によるもの

- i 高周波加速小型電子加速器（高周波極限（Wバンド）加速小型電子加速器）
- ii 高周波加速小型陽子・重イオン加速器

（* V章においては、これらの2つ小型加速器について具体的な提案を示しているが、これは、「小型加速器等開発予測調査」実施後に寄せられたものであり、この調査時点では具体的な提案としてはまとめていない。）

○非高周波高勾配加速技術

- iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器
 - iii-A ビーム励起型プラズマ加速器（研究開発段階Ⅲ）
 - iii-B レーザー励起型プラズマ加速器（研究開発段階Ⅲ）
 - iii-C 逆チェレンコフレーザー加速器（研究開発段階Ⅲ）
 - iii-D 直交場加速器（研究開発段階Ⅱ）
- iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器
 - iv-A 電子リング加速器（陽子・重イオン）（研究開発段階Ⅳ）
 - iv-B レーザー励起型プラズマ加速器（陽子）（研究開発段階Ⅰ）
 - iv-C レーザー衝撃波加速器（重イオン）（研究開発段階Ⅰ）
 - iv-D 直交場加速器（陽子・重イオン）（研究開発段階Ⅰ）

○放射光源の大幅な小型化技術によるもの

- v 放射光発生装置
 - v-A レーザーアンジュレータ放射光発生装置（研究開発段階Ⅲ）

実用化時期の予測はアンケートによる調査（「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査」；平成 10 年 11 月～平成 11 年 1 月実施）とし、加速器研究者（約 450 名）を対象として意見を聴取した。この調査では、これらの先進小型加速器等の具体的な提案を紹介しつつ、「その実用化の可否」、「実用化時期」のほか、「20～30 年後の加速器の将来像」、「加速器の開発方策」についての意見も聴取した。なお、繰り返しとなるが、小型加速器等の目安としては、以下の規模、重量、性能のものとした。

| 小型加速器等の目安 | |
|--------------|---|
| 加速器等の大きさ | ： おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | ： おおよそ 10 ton 程度 |
| ビームエネルギー | |
| 電子エネルギー | ： 1 GeV 程度 |
| 陽子・重イオンエネルギー | ： 200 MeV/n 程度 |
| 放射光子エネルギー | ： 30～100 keV 程度 |

上記のアンケート調査の発送、回答の状況は以下のとおりであった。

ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査

1. 調査時期 平成 10 年 11 月 9 日～平成 11 年 1 月 16 日
2. 調査対象者 加速器同好会およびビーム物理研究会会員など
3. 調査票発送
 - 3-1. 総発送数 465
 - 3-2. 宛先人不在等での返却数 13
 - 3-3. 有効発送数 452
4. 回答
 - 4-1. 総回答数 102(総回答率 :22.6%)
 - 4-2. 有効回答数 90(有効回答率 :19.9%)

以下、調査結果の概要を示す（詳細については、調査資料-61「ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査結果（1999年5月、科学技術政策研究所）」参照）。

1 小型加速器等の実用化の可否および実用化予測時期結果

上記の開発予測調査における小型加速器等の実用化の可否及び実用化予測時期に関する問いは、以下のとおりである。

(小型加速器等 i ~ v の実用化等について)

Q X. 小型加速器等 i ~ v についてお聞きします。

(実用化の可否等)

SQX-1. 小型加速器等 i ~ v の実用化について、あなたのご意見にもっとも近いものを一つを丸で
囲んでください。なお、7. その他につきましては、具体的に記入してください。

1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化する（または、「実用化するものがある」）。
2. 実用化するには（または、「実用化と思われるものがあるが、そのためには」）大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。
3. 現時点では（または、「いずれについても現時点では」）実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。
4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない（実用化の可能性は低い）。
5. 実用化はしない（「または、いずれも実用化はしない」）。
6. わからない
7. その他（ ）

(前問S QX-1. で実用化する (1. あるいは2.) と回答された方以外は、Q (X+1).へ)
(実用化時期)

SQX-2. 実用化する時期はどれくらいと考えられるでしょうか。該当するものの番号を丸で囲んでください。

1. 5年以内 2. 5~10年 3. 10~15年 4. 15~20年 5. 20~25年
6. 25~30年 7. 30年以上

(1)高周波加速小型電子加速器(Q2.)

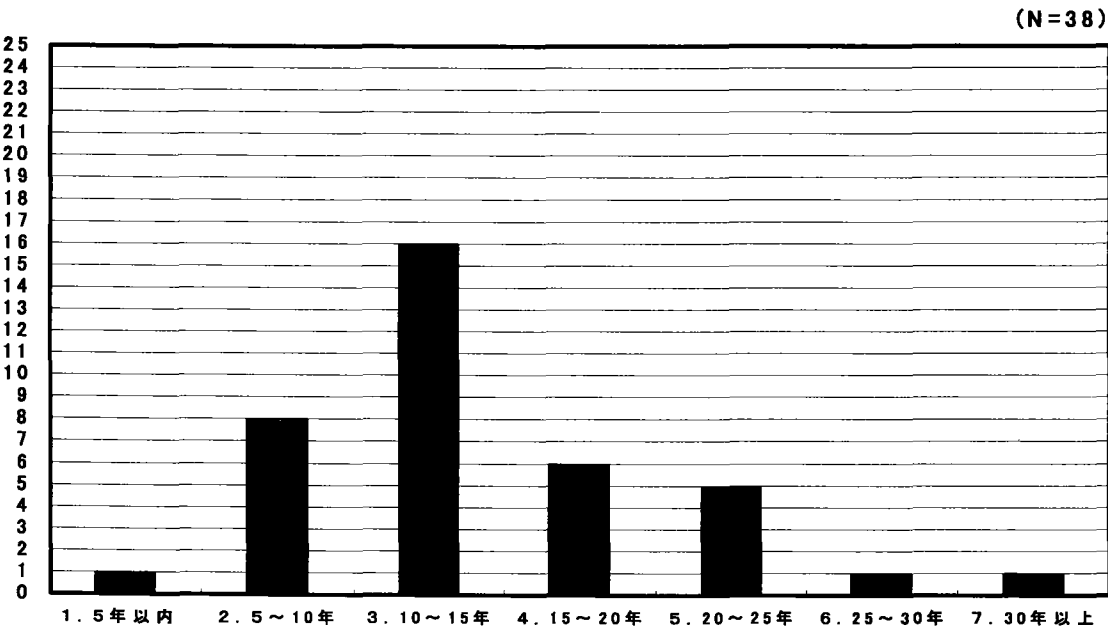
| | |
|--------------------------------------|---|
| Wバンド等の高周波を使用し、1GV/m程度の加速電場をもつ小型電子加速器 | |
| 加速器の目安 | |
| 加速器等の大きさ | : おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : おおよそ 10 ton 程度 |
| 電子エネルギー | : 1 GeV 程度 |

1)実用化の可否に関する加速器研究者の意見など

表－Ⅵ－1－1 高周波加速小型電子加速器実用化の可否に関する意見など

| 全回答数 | 回答数 (%) | 調査票上の選択意見 (最も近い意見を一つ選ぶ) |
|------|----------|---|
| 85 | 9 (11%) | 1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化する。 |
| | 25 (29%) | 2. 実用化するには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。 |
| | 28 (33%) | 3. 現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。 |
| | 11 (13%) | 4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない (実用化の可能性は低い)。 |
| | 0 (0%) | 5. 実用化はしない。 |
| | 10 (12%) | 6. わからない |
| | 2 (2%) | 7. その他 |

2)実用化時期予測結果：(中間点による)実用化予測時期:2012年頃



図－Ⅵ－1－1 高周波加速小型電子加速器の実用化予測時期分布

(2)高周波加速小型陽子・重イオン加速器(Q3.)

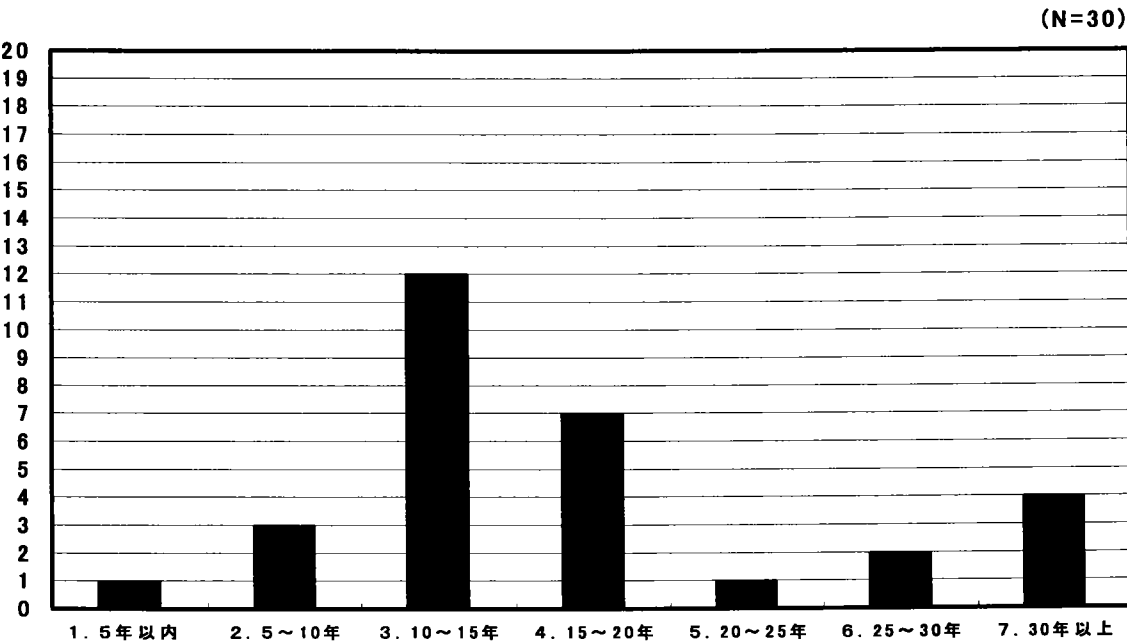
| | | | |
|--------------------------------------|---|--|--|
| これまでよりも1桁程度高い電場を用いる高周波加速小型陽子・重イオン加速器 | | | |
| | | 加速器の目安 | |
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦5 m×横5 m×高さ3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの | |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 | |
| 陽子・重イオンエネルギー | : | 200 MeV/n 程度 | |

1)実用化の可否に関する加速器研究者の意見など

表－Ⅵ－1－2 高周波加速小型陽子・重イオン加速器実用化の可否に関する意見など

| 全回答数 | 回答数 (%) | 調査票上の選択意見 (最も近い意見を一つ選ぶ) |
|------|----------|---|
| 83 | 2 (2%) | 1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化する。 |
| | 25 (30%) | 2. 実用化するには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。 |
| | 27 (33%) | 3. 現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。 |
| | 16 (19%) | 4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない (実用化の可能性は低い)。 |
| | 2 (2%) | 5. 実用化はしない。 |
| | 11 (13%) | 6. わからない |
| | 0 (0%) | 7. その他 |

2)実用化時期予測結果：(中間点による)実用化予測時期:2013 年頃



図－Ⅵ－1－2 高周波加速小型陽子・重イオン加速器の実用化予測時期分布

(3)非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器(Q4.)

| | | | | |
|-------|-------------------------|-----|---------|-----|
| iii-A | ビーム励起型プラズマ加速器（研究開発段階Ⅲ） | ・・・ | 229～230 | 頁参照 |
| iii-B | レーザー励起型プラズマ加速器（研究開発段階Ⅲ） | ・・・ | 231～238 | 頁参照 |
| iii-C | 逆チェレンコフレーザー加速器（研究開発段階Ⅲ） | ・・・ | 239～241 | 頁参照 |
| iii-D | 直交場加速器（研究開発段階Ⅱ） | ・・・ | 242～246 | 頁参照 |

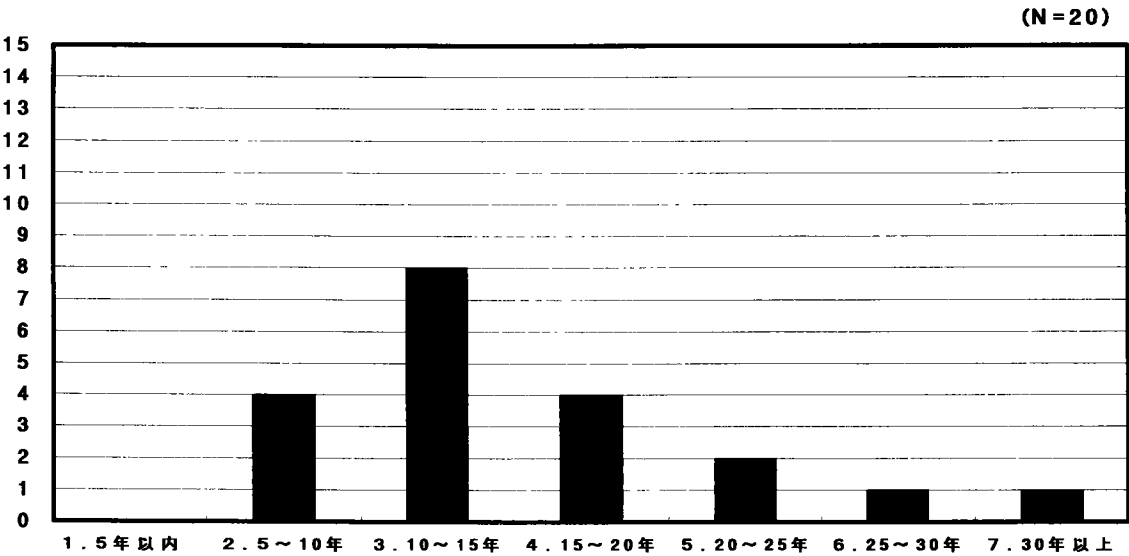
1)上記4種類の小型加速器実用化の可否に関する加速器研究者の意見など

表－Ⅵ－1－3 上記4種類の小型加速器実用化の可否に関する意見など

| 全回答数 | 回答数 (%) | 調査票上の選択意見（最も近い意見を一つ選ぶ） |
|------|----------|--|
| 79 | 6 (8%) | 1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化するものがある。 |
| | 26 (33%) | 2. 実用化すると思われるものがあるが、そのためには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。 |
| | 29 (37%) | 3. いずれについても現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。 |
| | 10 (13%) | 4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない（実用化の可能性は低い）。 |
| | 1 (1%) | 5. いずれも実用化はしない。 |
| | 6 (8%) | 6. わからない |
| | 1 (1%) | 7. その他 |

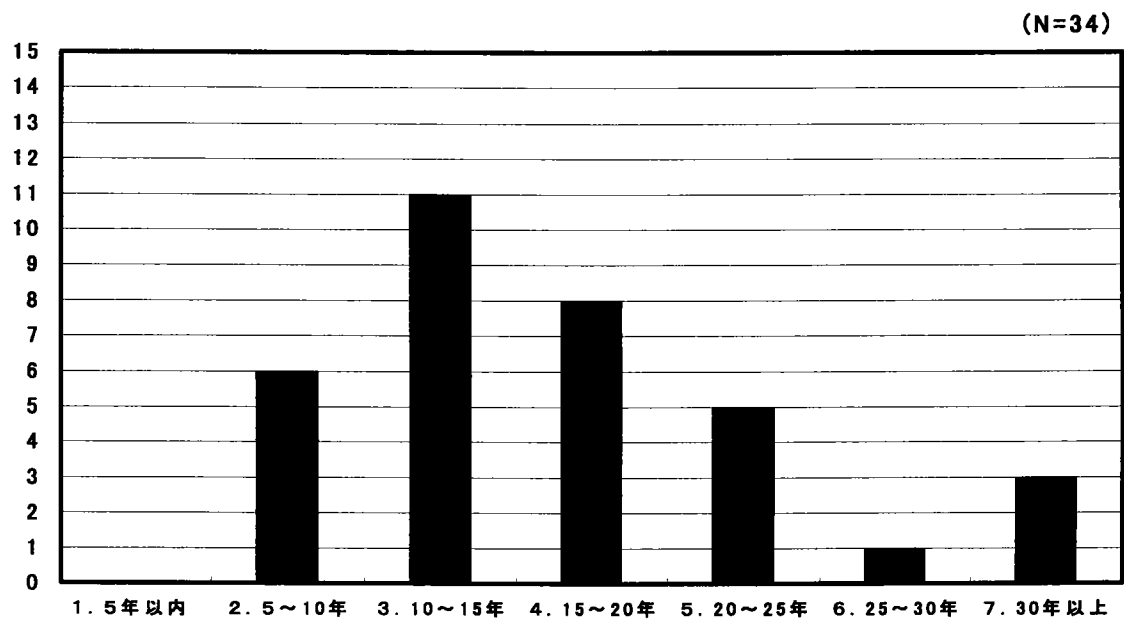
2)実用化時期予測結果

①ビーム励起型プラズマ加速器（中間点による）実用化予測時期:2013 年頃



図－Ⅵ－1－3 ビーム励起型プラズマ加速器(小型電子加速器)の実用化予測時期分布

②レーザー励起型プラズマ加速器（中間点による）実用化予測時期：2014 年頃



図－Ⅵ－1－4 レーザー励起型プラズマ加速器(小型電子加速器)の実用化予測時期分布

③逆チェレンコフレーザー加速器(小型電子加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－4 逆チェレンコフレーザー加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 7 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 0 | 2. 5～10年 |
| | 3 | 3. 10～15年 |
| | 1 | 4. 15～20年 |
| | 2 | 5. 20～25年 |
| | 0 | 6. 25～30年 |
| | 1 | 7. 30年以上 |

④直交場加速器(小型電子加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－5 直交場加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 12 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 0 | 2. 5～10年 |
| | 5 | 3. 10～15年 |
| | 4 | 4. 15～20年 |
| | 0 | 5. 20～25年 |
| | 2 | 6. 25～30年 |
| | 1 | 7. 30年以上 |

(4)非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器(Q6.)

| | | | |
|------|-----------------------------|-----|-------------|
| iv-A | 電子リング加速器（陽子・重イオン）（研究開発段階Ⅲ） | ・・・ | 253～254 頁参照 |
| iv-B | レーザー励起型プラズマ加速器（陽子）（研究開発段階Ⅰ） | ・・・ | 255～257 頁参照 |
| iv-C | レーザー衝撃波加速器（重イオン）（研究開発段階Ⅰ） | ・・・ | 257～259 頁参照 |
| iv-D | 直交場加速器（陽子・重イオン）（研究開発段階Ⅰ） | ・・・ | 260～265 頁参照 |

1) 上記4種類の小型加速器実用化の可否に関する加速器研究者の意見など

表－Ⅵ－1－6 上記4種類の小型加速器実用化の可否に関する意見など

| 全回答数 | 回答数 (%) | 調査票上の選択意見（最も近い意見を一つ選ぶ） |
|------|----------|--|
| 78 | 4 (5%) | 1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化するものがある。 |
| | 12 (15%) | 2. 実用化すると思われるものがあるが、そのためには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。 |
| | 39 (50%) | 3. いずれについても現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。 |
| | 15 (19%) | 4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない（実用化の可能性は低い）。 |
| | 2 (3%) | 5. いずれも実用化はしない。 |
| | 6 (8%) | 6. わからない |
| | 0 (0%) | 7. その他 |

2)実用化時期予測結果

①電子リング加速器(小型陽子・重イオン加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－7 電子リング加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 9 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 3 | 2. 5～10年 |
| | 1 | 3. 10～15年 |
| | 2 | 4. 15～20年 |
| | 0 | 5. 20～25年 |
| | 1 | 6. 25～30年 |
| | 2 | 7. 30年以上 |

②レーザー励起型プラズマ加速器(小型陽子加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－8 レーザー励起型プラズマ加速器加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 12 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 0 | 2. 5～10年 |
| | 2 | 3. 10～15年 |
| | 6 | 4. 15～20年 |
| | 1 | 5. 20～25年 |
| | 1 | 6. 25～30年 |
| | 2 | 7. 30年以上 |

③レーザー衝撃波加速器(小型陽子・重イオン加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－9 レーザー衝撃波加速器加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 7 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 1 | 2. 5～10年 |
| | 1 | 3. 10～15年 |
| | 3 | 4. 15～20年 |
| | 1 | 5. 20～25年 |
| | 0 | 6. 25～30年 |
| | 1 | 7. 30年以上 |

④直交場加速器(小型陽子・重イオン加速器)

サンプル数過小で実用化予測時期算定不能

表－Ⅵ－1－10 直交場加速器加速器加速器実用化予測時期分布

| 全回答数 | 回答数 | 実用化予測時期 |
|------|-----|-----------|
| 7 | 0 | 1. 5年以内 |
| | 1 | 2. 5～10年 |
| | 0 | 3. 10～15年 |
| | 4 | 4. 15～20年 |
| | 0 | 5. 20～25年 |
| | 0 | 6. 25～30年 |
| | 2 | 7. 30年以上 |

(5)小型放射光発生装置(Q8.)

v-A レーザーアンジュレータ放射光発生装置(研究開発段階Ⅲ)・・・268～271 頁参照

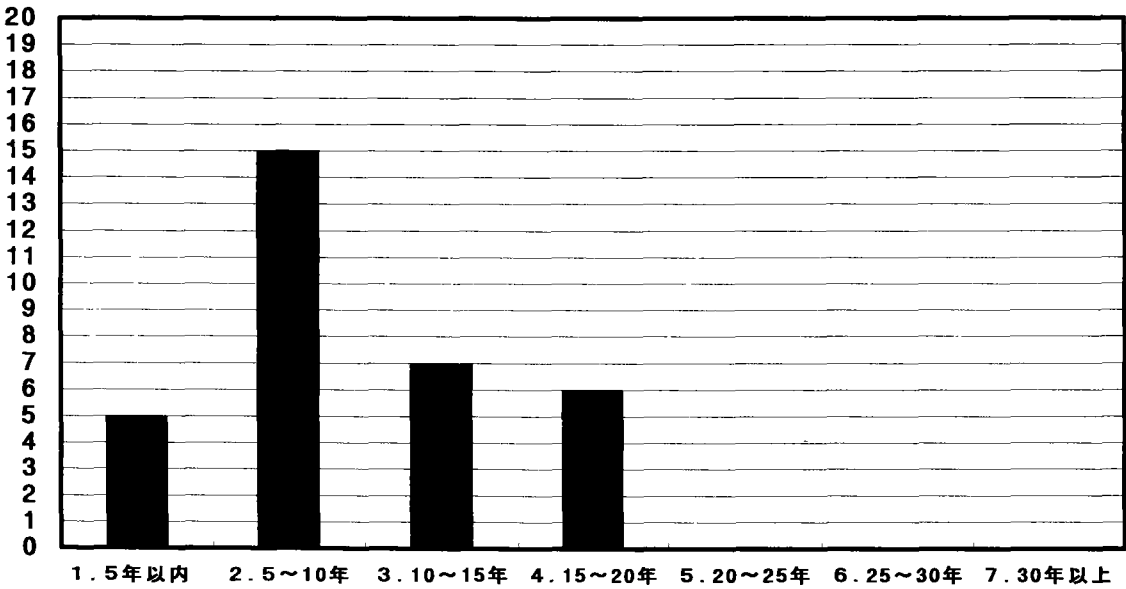
1)実用化の可否に関する加速器研究者の意見など

表－Ⅵ－1－11 レーザーアンジュレータ放射光発生装置実用化の可否に関する意見など

| 全回答数 | 回答数 (%) | 調査票上の選択意見 (最も近い意見を一つ選ぶ) |
|------|----------|---|
| 75 | 16 (21%) | 1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化する。 |
| | 17 (23%) | 2. 実用化するには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。 |
| | 22 (29%) | 3. 現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。 |
| | 8 (11%) | 4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない (実用化の可能性は低い)。 |
| | 0 (0%) | 5. 実用化はしない。 |
| | 11 (15%) | 6. わからない |
| | 1 (1%) | 7. その他 |

2)実用化時期予測結果：(中間点による)実用化予測時期:2008 年頃

(N=33)



図－Ⅵ－1－5 レーザーアンジュレータ放射光発生装置の実用化予測時期分布

2 実用化予測時期の総括および研究開発の段階

以上の予測時期の結果をまとめると、下表のとおりとなる。

表－Ⅵ－1－12 ブレークスルー技術による小型加速器等の実用化予測時期

| 小型加速器等 | 実用化予測時期 |
|---|--------------------------------------|
| i 高周波加速小型電子加速器 | 2012 年頃 |
| ii 高周波加速小型陽子・重イオン加速器 | 2013 年頃 |
| iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 iii-A ビーム励起型プラズマ加速器 iii-B レーザー励起型プラズマ加速器 iii-C 逆チェレンコフレーザー加速器 iii-D 直交場加速器 | 2013 年頃 2014 年頃 回答数不足 回答数不足 |
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 iv-A 電子リング加速器（陽子・重イオン） iv-B レーザー励起型プラズマ加速器（陽子） iv-C レーザー衝撃波加速器（重イオン） iv-D 直交場加速器（陽子・重イオン） | 回答数不足 回答数不足 回答数不足 回答数不足 |
| v 放射光発生装置 v-A レーザーアンジュレータ放射光発生装置 | 2008 年頃 |

また、この結果を総括すると、以下のようにまとめられる。

- ブレークスルー加速技術を用いて提案されている小型加速器が実用化すると予測される時期は（予測時期が算定できるほど回答のあったもので）2010 年代始め頃である。
- レーザーアンジュレータ放射光装置については、実用化予測時期は、2008 年頃で比較的早い実現時期となっている。
- 陽子・重イオンの新しい加速技術については、（回答者そのものが少ないことから）あまり研究が行われていないものと考えられ、可能性を追求する研究開発が必要である。

次に、抽出した先進加速技術に基づく小型加速器等について、現時点での研究開発状況から、研究段階にあるものと、実証機をめざす開発段階に進めるものを分類すると以下ようになった。

表－VI－1－13 先進小型加速器等に研究・開発段階分類

| 先進小型加速器等 | 段階分類 |
|---|---|
| i 高周波加速小型電子加速器 (高周波極限電子加速(Wバンド電子加速)技術による) | 研究段階 ・原理実証がなされていないため、原理実証をめざす基礎的な研究が必要 |
| ii 高周波加速小型陽子・重イオン加速器 (高周波極小陽子(重イオン)シンクロトロン技術などによる) | 開発段階 ・基本的には、シンクロトロン技術について限界に挑戦するもので、外挿が可能(ロシアの研究所では、実際にモデル機を製作した) |
| iii 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器 iii-A ビーム励起型プラズマ加速器 iii-B レーザー励起型プラズマ加速器 iii-C 逆チェレンコフレーザー加速器 iii-D 直交場加速器 | 研究段階(左記全て) ・開発に進むための原理実証データが不十分であり、原理実証をめざす基礎的な研究が更に必要。 |
| iv 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器 iv-A 電子リング加速器(陽子・重イオン) iv-B レーザー励起型プラズマ加速器(陽子) iv-C レーザー衝撃波加速器(重イオン) iv-D 直交場加速器(陽子・重イオン) | 研究段階にあるもの iv-B レーザー励起型プラズマ加速器 iv-D 直交場加速器 については研究段階 ・原理実証がなされていないため、原理実証をめざす基礎的な研究が必要 開発段階にあるもの iv-A 電子リング加速器 iv-C レーザー衝撃波加速器(但しイオン源としての利用) については開発段階 ・電子リング加速器については、ロシアでの実績あり ・レーザー衝撃によるイオン飛び出しについては、昨年、世界の3研究機関で実証された |
| v 小型放射光発生装置 レーザーアンジュータ放射光発生装置 | 開発段階 ・構成する機器そのものについては、良く理解されているもので、その延長線上で限界に挑みつつ実現をめざす |

3 他の予測調査結果との比較

当研究所においては、科学技術の発展動向を長期的な視点から把握するため、科学技術の全分野に関する技術課題について、5年毎に予測調査を実施してきているが、その中で小型加速器に関する課題も取り上げている。

第5回技術予測調査(1991年時点:NISTEP REPORT No. 25(1992年11月))および最近の第6回技術予測調査(1996年時点:NISTEP REPORT No. 52(1997年6月))の中から関連する技術課題を抜き出し、今般の予測調査結果と比較すると以下のようにまとめられる。

高周波加速(小型電子加速器)について

表－Ⅵ－1－14 高周波加速(小型電子加速器)の実用化予測時期比較

| 予 測 調 査 お よ び 予 測 課 題 | 実用化予測時期 |
|---|---------|
| 第5回技術予測調査 (1991年時点) ○1GV/m程度の高周波加速が実用化される | 2010年頃 |
| 第6回技術予測調査 (1996年時点) (該当課題なし) | — |
| 今般の予測加速器等開発予測調査 (1999年時点) ○1GV/m程度の加速勾配の高周波加速による小型電子加速器の実用化時期 <u>小型加速器等の目安</u> 加速器等の大きさ : おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 全体の構成装置が納まるもの 加速器等の全重量 : おおよそ10 ton 程度 電子エネルギー : 1 GeV 程度 | 2012年頃 |

プラズマ加速器について

表－Ⅵ－1－15 プラズマ加速器の実用化予測時期比較

| 予 測 調 査 お よ び 予 測 課 題 | 実用化予測時期 |
|--|-------------|
| 第5回技術予測調査 (1991年時点) ○プラズマ波を利用した超小型加速器が実用化される | 2012年頃 |
| 第6回技術予測調査 (1996年時点) (該当課題なし) | — |
| 今般の予測加速器等開発予測調査 (1999年時点) ○ビーム励起型・レーザー励起型プラズマ加速器 (小型電子加速器)の実用化時期 <u>小型加速器等の目安</u> 加速器等の大きさ : おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 全体の構成装置が納まるもの 加速器等の全重量 : おおよそ10 ton 程度 電子エネルギー : 1 GeV 程度 | 2013～2014年頃 |

小型陽子・重イオン加速器について

表－Ⅵ－１－１６ 小型陽子・重イオン加速器の実用化予測時期比較

| 予 測 調 査 お よ び 予 測 課 題 | 実用化予測時期 |
|--|------------------------|
| 第 5 回技術予測調査 (1991 年時点) ○深部がん治療及び診断用の超小型陽子及び重イオン加速器が普及する ○エネルギー200MeV で直径 5 m 以内の超小型医療用加速器が実用化される | 2003 年頃 2004 年頃 |
| 第 6 回技術予測調査 (1996 年時点) ○エネルギー200MeV で直径 5 m 以内の超小型医療用加速器が実用化される | 2009 年頃 |
| 今般の予測加速器等開発予測調査 (1999 年時点) ○高周波加速による小型陽子・重イオン加速器の実用化時期 <u>小型加速器等の目安</u> 加速器等の大きさ : おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 m の区域内に 全体の構成装置が納まるもの 加速器等の全重量 : おおよそ 10 ton 程度 陽子・重イオン エネルギー : 200MeV/n 程度 | 2013 年頃 |

以上の結果を見ると、電子の高周波加速による高勾配加速（あるいは小型電子加速器）およびプラズマ加速器については、1991 年時点での予測結果と 1～2 年程度の差であるのに対して、（高周波加速による）小型陽子・重イオン加速器については約 10 年の遅れが見える。

すなわち、医療用の高周波加速小型陽子・重イオン加速器の実用化時期については、いくつかの予測結果を見ると調査する度に遅れていることから、あまり研究が進んではいないものと考えられる。

VI-2 先進小型加速器等へのニーズと実用化後に想定される使用、種々の利点

ここでは、V-2で述べた先進小型加速器等に対する（主として）加速器ビームユーザーからのニーズ、それらが実用化された場合に想定される使用とそれがもたらす種々の利点について、ビームニーズ等調査により得られた結果などを基に整理する。

なお、ビームニーズ等調査結果の詳細については、「調査資料-76 ビームニーズ等に関する調査結果 2000 年 12 月、科学技術政策研究所」に示している。

1 先進小型加速器等へのニーズ

ビームニーズ等調査（Q 4）においては、先進小型加速器等の各々に対して、回答者が自身の研究にメリットを感じるか否かを質問したが、その結果は、以下の図-VI-2-1 に示すとおりであった。

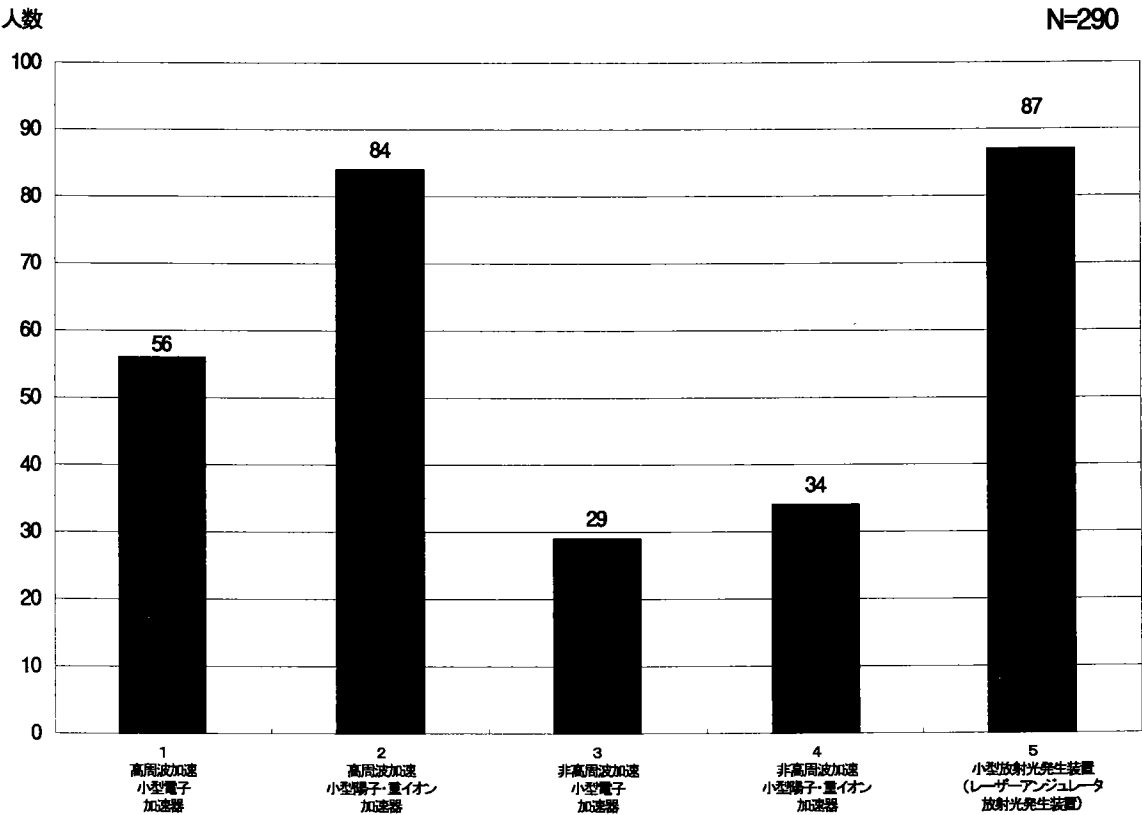


図-VI-2-1 先進小型加速器等へのニーズ(自身の研究にメリットを感じる研究者数)

すなわち、先進小型加速器等に自身の研究上メリットを感じると回答した者（205 名：上図では重複のため 290 名）は、全回答者（553 名）のうち約 37%に当たっている。Ⅲ章において述べたように、ビームニーズ等調査の回答者の所属組織別分布は、ほとんど偏りのないものであり、日本全体の加速器ビームユーザーの意見を代表しているものと考えられることより、この結果は、先進小型加速器等に関する開発ニーズが極めて高いものであることを示しているといえる。

具体的なメリットを整理して挙げてみると、表-VI-2-1 に示すものとなっている（詳細については、科学技術政策研究所 調査資料-76 参照）。

表－Ⅵ－２－１ 先進小型加速器等の実用化によるメリット

| メリット |
|---|
| <p>高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器(高周波加速小型電子加速器)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小型化による加速器建屋建設コスト、放射線遮蔽コストが低減する。 ・各地方大学や民間研究所等、小規模な大学・研究機関に導入でき、多様なビーム利用が展開できる。 ・学生の教育、特に学部３年生～４年生の間に加速器を使用した実験をでき、将来の研究者を育てることにつながる。 ・個人や１研究室レベルで加速器を維持・管理でき、実験室レベルでの使用が可能となり、研究の機動性が増す ・小型ならば省スペースが可能であり、各研究者の独特の発想を生かした周辺設備の構築が可能となる。 ・複合ビームを利用した研究においては、限られたスペースに多くの複合ビーム源を置くことが重要であり、小型加速器のメリットは大きい。 ・直接的には、ビームテスト、耐放射線テストなどが気軽に行え測定器等の設計に役立つ。 ・小型の電子、陽子加速器、放射光発生装置が実用化できれば企業の研究所レベルで多様な研究が可能となるばかりではなく、工場や病院等で産業レベルの利用が可能となり、社会的貢献度が大きい。 ・小型で安価なHigh Energy加速器ができれば産業応用等も拡大できると思われる。 ・加速器ビーム物理、ビーム加速の研究対象として研究意欲を起こさせるメリットがある。 ・これらの開発は、同時に素粒子物理学研究用大型超高エネルギー加速器開発へのブレークスルーをもたらす。 |
| <p>超小型陽子シンクロトロン(高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器) (上の高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器(高周波加速小型電子加速器)でのメリットの他)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小、中規模の不安定核ビーム利用(医学・工学)を広げられる(ビーム強度をせめて10～100 μAにする必要があるが)。 ・陽子加速器の小型化により、国内10ヶ所以上にミュオンビームを発生できる施設できれば、ミュオンの利用が広がるのが期待できる。(ただし、パイ中間子、ミュオンが十分な量発生できるようにビームエネルギーは500MeV程度、陽子ビーム強度は100 μA程度あることが望ましい) ・現在の陽子加速器において標準である前段の線型加速器を小型化することにより全体のコストを下げるができる。 ・生物実験専用として使えば研究効率が大幅に上昇すると考えられる。 ・陽子・重粒子加速器を小型にできるならば、治療・診断ビーム発生器として現実的な規模となり、病院併設がより容易になる。 ・陽子や重粒子による治療費の大幅低減に寄与する。 ・超小型陽子加速器により固体ターゲット照射が可能になり、病院施設等においても固体ターゲットによりラジオアイソトープの製造が可能となる。 ・ターゲットのモックアップ、ビーム物理の測定等大型加速器開発への一助ともなる。 |
| <p>非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器</p> <p>(高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器(高周波加速小型電子加速器)に同じ)</p> |

(次頁に続く)

表－Ⅵ－２－１ 先進小型加速器等の実用化によるメリット

| メリット |
|--|
| <p>非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器</p> <p>(超小型陽子シンクロトロン (高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器) に同じ)</p> |
| <p>レーザーアンジュレータ放射光発生装置</p> <ul style="list-style-type: none"> ・運営が楽になれば各大学で所有できる。特に真空紫外、軟X線の利用の多くは、単に光源としての利用であるため簡単に利用できれば、利用価値も高くなる。 ・小型放射光の場合、現状では10keV以上の高エネルギーX線を得ることが不可能である。もし、ハードX線が小型放射光装置で実現できれば大きなブレイクスルーを生む。 ・現在短時間しか使用できない放射光が実験室に近い形で利用できれば、ビームタイムが多く必要な実験が可能となる。 ・安くなれば、今まで敬遠していた人も含め、広く使われるようになる。元々、巨大な施設のため尻込みをしている方が多い。 ・現在放射光は共用性が高いが小型化することにより単独の目的に放射光をシステムの一部として利用することができる。それにより放射光を組み込んだ高度のシステムを作ることができる。 ・全国に多数配置されることになれば放射光の利用者も増え、量の拡大は質の変化をもたらすと考ええる。 ・産業用としてより使いやすい。 ・放射光の強度が上がれば現在不可能な現象や詳細な研究及び非線形現象など新たな研究が可能になる。 ・現在、放射光の利用は申請により行い実験計画がたてにくい。この点、小型放射光発生装置が各機関に設置されると研究をスムーズに進めることができる。 ・蛋白構造解析で必要だが通常使用できない実験が出来る35keV付近に吸収端を持つキセノンを加圧して結晶中に入れ多波長異常分散法で構造を分析したい (ビームラインに制限があつて、今まで出来ていない)。 ・強度が強く、時分割、その場観察が高いレベルで可能となる。 ・研究室レベルで第三世代放射光より輝度も強度も高いビームを得られれば、蛋白質等生体高分子集合体の研究に多大な恩恵をもたらすであろう。 ・大規模施設に行き、隔離された感じにならなくても、実験できるようになる (光の性質は、所詮現行方式にはかなわないが)。 ・一般の実験室で良質のX線吸収スペクトルが測定できるようになり、汎用の構造解析手段としての利用・応用や研究が飛躍的に広がる。 ・全国の大学・研究所に配置が可能であり、現状の大型装置共同利用体制のデメリット (出張、マシンタイム制、fineは研究できない等々) を解消できる。 ・放射光利用の一般化 (日常化) をもたらす ・精密加工において超高密度集積回路、メモリーに新しい最先端テクノロジーとなる。 ・X線領域コヒーレント光発生 of 技術として用いることができる。 ・工夫によりコンパクトなX線リソグラフィ装置が実現できる。 ・通常の放射光施設の共同利用を前提とする運用形態とは全く別の実験室感覚の利用が可能であり、そのため行おうとする測定の内容やその質を変える可能性が考えられる。特に材料研究のように試料作成とのフィードバックを頻繁に必要とする分野では効果は大きい。 ・放射光実験施設が多く設置されるようになれば地理および時間的な要因による試料の劣化が防げるようになると考えられる。 |

(次頁に続く)

表Ⅵ-2-1 先進小型加速器等の実用化によるメリット

| メリット |
|--|
| <p>レーザーアンジュレータ放射光発生装置(続き)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・放射光はすでにX線と同程度に研究のための重要な武器となっている。それを身近に利用するためには光源装置の各機関への普及が不可欠である。 ・日本の各地で小型放射光装置のニーズが高まっている。特にX線発生可能な小型装置が開発されれば非常に大きなimpactがあると思える。 ・大学内の研究室or研究施設に電子顕微鏡なみの意識で設置できると、その汎用性からこれまで想像もできなかった新しいサイエンスが生まれてくると思われる。 ・我々物性研究者にとって、大型施設を使わないで身近で入念な実験が行える環境は重要である。小型化されれば研究の底辺が広がる。そこでの成果に基づき、大型施設を利用する経路が大切である。 ・長時間にわたるビームラインの占有を安いコストで可能にするのであれば大きなメリットとなる。 |

これらの先進小型加速器等の実用化からの一次的なメリットとしては、

- ・小型化により加速器等自体の値段および運転経費が安くなる
- ・収納する施設が小型化され、放射線遮蔽区域も小さくなる
- ・幾種類かの小型加速器等の導入が容易になる

などの加速器等の導入・利用コストの低減が挙げられている。このことより、

- ・病院などにおける医療(診断、治療)利用が進展する
- ・物質・材料科学での高度利用や産業利用(半導体加工など)が進展する
- ・生命科学関係での高度利用が進展する
- ・民間研究所や各地方大学(場合によっては研究室単位で)での導入が進展する
- ・数種類の小型加速器等による複合ビーム利用研究が進展する
- ・大学の実験室にて学生の授業あるいは大学院生の研究に使われ、授業や研究のレベルの向上に役立つ

などの派生的メリットが考えられている。これらのメリットは個別的なものであるが、日本全体としてみるとマクロレベルでの効果が考えられる。これについては、Ⅶ章で述べることとする。

なお、アンケート調査に寄せられた意見の中でも多数の方が触れられていたように、今後の研究の積み重ねにより将来的にはこれらの先進加速技術等は高エネルギー加速器の小型化にも寄与するものであると期待されている。

2 先進小型加速器等の想定される使用

上記のメリットの質問と同時に、先進小型加速器等が実用化した後の想定される使用についても質問したが、その結果の概要は、以下のとおりであった。（その一覧を表にしたものが、表－VI－2－2である。）

(1)高周波極限(Wバンド)加速小型電子加速器

Wバンドの高周波を使用し、数 100MV/m～1GV/m 程度の加速電場をもつ小型電子加速器

| | | |
|----------|---|--|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |
| 電子エネルギー | : | 1 GeV 程度 |
| ビームパルス | : | ビームパルスは、波長の短いWバンドを使うこ とより、従来の電子ビームに比べて短パルスな ものとなる。 |

想定される使用

[原子核物理学]

- ・中間エネルギー(QCD)原子核物理学研究(ただし、電子エネルギーがもう少し高い(1.3～1.8GeV)必要がある)用の電子ビーム

現在の原子核物理学分野においては、原子核を陽子あるいは中性子を構成するクォークから構成されるものとして理解しようとするQCD原子核物理学が最も活発に研究が行われている（例えば、米国のトーマス・ジェファークソン国立加速器研究所における中間エネルギーの電子ビームを使う原子核研究）。中間エネルギー電子ビームを用いるQCD原子核物理学研究は今後も展開されてゆくものと考えられる。小型で 1GeV 程度のエネルギーの電子を供給するこの電子加速器は、QCD原子核物理研究を実験室規模で実現するものとして期待される。

[物質・材料科学、生命科学関係用各種ビーム源用電子ビーム]

- ・レーザー・コンプトン散乱現象を使用した硬X線～ガンマ線領域の放射光(この放射光を「レーザー電子光」ともいう)源用電子源(レーザーアンジュレータ放射光源用小型電子源)
- ・小型の自由電子レーザー用電子源

物質・材料科学、生命科学においては、放射光（あるいは自由電子レーザー）や中性子あるいはそれらのビームと他のビームとの複合利用へのニーズが高い。1GeV 程度のエネルギーの短パルス電子ビームは、レーザーとの散乱により硬X線～ガンマ線領域のコヒーレンス性の高い（可干渉性を有する）レーザー電子光（放射光）を発生させることが可能であり、高度な利用が展開できるものと期待される。また、1GeV 程度のエネルギーの短パルス電子ビームをアンジュレーターの交互磁場を通過させると極端紫外～軟X線領域の自由電子レーザーを発生させることができる。

この小型電子加速器は、レーザー電子光や自由電子レーザーを小規模な実験室でも使えるものとするもので、各地の研究機関における研究の水準、機動性を向上させるものになると期待される。

・極短パルス電子ビーム利用のポンプ&プローブによる超高速反応の解明

化学反応では非常に短い時間内に反応が急激に進むことが一般的である。短時間で急激に進む反応の解明には、短パルスの（電子）ビームを用いたポンプ&プローブなどが有効であり、この種の利用の進展が期待されている。

・複合ビーム利用(中間エネルギー電子、重イオン、放射光など; 小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる)

物質・材料科学などでは、数種類のビームを利用した（複合ビーム利用）研究が盛んになってきている。何種類かのビームを使う場合、加速器システムは必然的に大型のものになってしまうが、この小型電子加速器はその面で非常に有利である。

[その他]

・大学、大学院教育・研究用

大学における教育用あるいは大学院での研究用に加速器が不可欠な場合がある。この小型電子加速器は設置スペースとして小さな面積で十分である。教育研究用としては非常に魅力あるものであり、大学、大学院での教育、研究水準を大きく向上させるものと考えられる。

・測定器などの設計(ビームテスト、耐放射線テストなど)

各種の加速器ビーム実験関連の測定器などを設計するに当たり、実際のビームで種々の試験を行うことが不可欠であり、この小型電子加速器はこれらの試験に最適である。

(2) 超小型陽子・重イオンシンクロトロン(高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器)

| | | |
|-----------|---|---|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |
| 陽子エネルギー | : | 200MeV 程度 |
| 重イオンエネルギー | : | 200MeV/n 程度 |
| ビーム強度 | : | 10nA 程度 |

想定される使用

[原子核物理学]

・二次粒子(中間子など)発生用小型加速器(もう少し高いエネルギー500MeV および強度 100 μ A が必要)

140MeV を超えるエネルギーの粒子ビームを原子核に当てると、 π 中間子が発生するようになる。この π 中間子はやがて崩壊して μ 粒子に変化する。このことから、上の小型陽子シンクロトロンは、 π 中間子や μ 粒子を用いた原子核物理学研究に使用されることが期待される。ただし、エネルギーを更に高めることやできる限り小型の陽子蓄積リングの研究開発が必要である。

[物質・材料科学、生命科学]

・材料の改質用

イオンビームなどの打ち込みなどにより、材料の性質を変化させることに利用される。

・小型(核破碎)中性子源用陽子源

数 100MeV 程度の陽子を重い原子核に当てると、原子核が破碎され主に中性子が飛び出す現象が知られており、200MeV 程度のエネルギーでもかなりの発生が期待できる。この小型加速器は、非常に小型の(核破碎)中性子源用の陽子源として使える。ただし、強度をある程度高くするため、できる限りの小型の(陽子)蓄積リングを開発する必要がある。

・イオンビームを利用した分析(PIXE、RBS、ERDA)

陽子やイオンビームを材料に照射した場合のイオンビームと構成原子あるいは原子核との反応を利用した微量不純物の分析が可能となる。この小型加速器は、これまでの小型の加速器では到達し得ないエネルギー領域もカバーしており、実験室規模での先端研究を可能とする。

・放射線生物学(遺伝子損傷、変異)研究

陽子や重イオンを細胞などに照射し、遺伝子の損傷や変異種の発生などの研究が行われているが、これまでの小型加速器に比べて格段に高いエネルギー領域までをカバーしており、実験室規模でより範囲の広い研究が可能となる。

・複合ビーム利用(中間エネルギー電子、重イオン、放射光など;小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる)

物質・材料科学などでは、数種類のビームを利用した(複合ビーム利用)研究が盛んになってきている。何種類かのビームを使う場合、加速器システムは必然的に大型のものになってしまうが、この小型加速器はその面で非常に有利である。

[医療利用]

・医療(がん治療)

陽子線や重イオン(重粒子線)を用いるがん治療は、優れたがん治療法であることが実証されてきているが、治療側、患者側が治療法としてより選択しやすくするためには、治療にかかるコストを下げるのが現段階での大きな課題である。この小型加速器は、治療コストの大きな部分を占める加速器および収納する施設の小型化に大きく寄与するものと期待される。

・医療(PETなど)用の不安定核(RI)生成用陽子源(ビーム強度を 10~100 μ A にする必要有り)

医療診断においてPETの普及が進展してきているが、上記のがん治療用の加速器は、そのまま医療（PETなど）用のRI製造用小型加速器としても使えるものであり、医療施設内での多目的化を可能にするものである。ただし、強度をある程度高くするため、できる限りの小型の（陽子）蓄積リングを開発する必要がある。

・陽子線透視画像解析

組織の陽子線吸収率の相違を透視画像としてみるもの、および従来のX線CTに匹敵する分解能で断層撮影するもの（陽子断層撮影法）がある。診断法として研究されているのは後者で、これはX線に比べて、患者の受ける放射線量を大幅に減少できるものと期待されている。

〔産業利用〕

・工業利用の放射性同位元素(RI)生成用陽子源(ビーム強度を10～100 μ Aにする必要有り)

この小型加速器は、工業的に利用が普及している放射性同位元素（RI）製造用にそのまま使えるものである。供給できるエネルギーがこれまでのものに比べて高く、製造できるRIの種類が格段に増加する。ただし、強度をある程度高くするため、できる限りの小型の（陽子）蓄積リングを開発する必要がある。

〔その他〕

・大学、大学院教育・研究用

大学における教育用あるいは大学院での研究用に加速器が不可欠な場合がある。この小型電子加速器は設置スペースとして小さな面積で十分である。教育研究用としては非常に魅力あるものであり、大学、大学院での教育、研究水準を大きく向上させるものと考えられる。

・測定器などの設計(ビームテスト、耐放射線テストなど)

各種の加速器ビーム実験関連の測定器などを設計するに当たり、実際のビームで種々の試験を行うことが不可欠であり、この小型加速器はこの試験に適していると考えられる。

・ターゲットのモックアップテスト用陽子源

大強度の核破砕反応用のターゲットを設計製作するにあたり、そのモックアップテストが不可欠であるが、そのモックアップテスト用の陽子源として使用することが考えられる。

(3)非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器
(ビーム励起型プラズマ加速器、レーザー励起型プラズマ加速器、逆チェレンコフレーザー加速器、直交場加速器)

| | | |
|----------|---|--|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦5 m×横5 m×高さ3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |
| 電子エネルギー | : | 1 GeV 程度 |
| ビームパルス | : | ビームパルスは、従来の電子ビームに比べて 短パルスなものとなる。 |

これらの小型電子加速器の想定される使用の方法は、高周波極限（Wバンド）加速小型電子加速器の場合と基本的に同じである。

(4)非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器
(電子リング加速器(陽子・重イオン)、レーザー励起型プラズマ加速器(陽子)、レーザー衝撃波加速器(陽子・重イオン)、直交場加速器(陽子・重イオン))

| | | |
|-----------|---|--|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦5 m×横5 m×高さ3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |
| 陽子エネルギー | : | 200MeV 程度 |
| 重イオンエネルギー | : | 200MeV/n 程度 |

これらの小型陽子・重イオン加速器の想定される使用の方法は、超小型陽子シンクロトロン（高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器）の場合と基本的に同じである。

なお、レーザー励起型プラズマ加速器（陽子）、直交場加速器（陽子・重イオン）については、主加速部の大きさが数 10cm×数 10cm×数 10cm であり、放射線遮蔽領域が極めて小さくなることから、

- ・ 治療用ビームを照射するガントリー部と加速部の一体化したがん治療装置

などへの使用が想定され、医療用加速器施設の小型化に大きく寄与するものと考えられる。

また、レーザー衝撃波加速器については、

・シングルイベント試験用イオン源

・ややエネルギーの高いイオン源(加速器入射用)

としての使用が想定される。現在、シングルイベント試験用のビームは通常の加速器より得ているが、レーザーの1ショットを薄膜に当てること(レーザー衝撃波加速)で必要な量の粒子数が得られ、これまでの装置の大幅な縮小化が可能になるものと考えられている。また、最近のペタワットレーザー衝撃波加速試験では、数 10MeV の陽子も飛び出すことが報告されており、これまでの初期加速を兼ね備えた、加速器への入射用イオン源としての使い方も想定される。

(5)レーザーアンジュレータ(硬X線)放射光発生装置

| | | |
|-----------|---|---|
| 加速器等の大きさ | : | おおよそ縦 5 m×横 5 m×高さ 3 mの区域内に 加速器全体の構成装置が納まるもの |
| 加速器等の全重量 | : | おおよそ 10 ton 程度 |
| 放射光子エネルギー | : | 30～100keV 程度 |

[物質・材料科学]

・結晶構造の構造解析

結晶の構造解析は、放射光利用の最も典型的なものであるが、これまでの大型放射光施設でしか得られないエネルギーの光子(硬X線)を供給できるこの小型放射光装置は、設置面積、費用の面で大きな利点を持っており、全国各地での利用展開が可能になると考えられる。

・新材料開発(原子を識別しながら加工)

・短パルス放射光利用のポンプ&プローブによる超高速反応の解明やその場観察

化学反応では非常に短い時間内に反応が急激に進むことが一般的である。短時間で急激に進む反応の解明には、短パルスの放射光を用いたポンプ&プローブが有効であり、この種の利用が期待される。

・複合ビーム利用(中間エネルギー電子、重イオン、放射光など;小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる)

物質・材料科学などでは、数種類のビームを利用した(複合ビーム利用)研究が盛んになってきている。何種類かのビームを使う場合、加速器システムは必然的に大型のものになってしまうが、この小型放射光装置はその面で非常に有利である。

[生命科学]

・蛋白質構造解析、生命高分子構造解析

遺伝子の解析後には、遺伝子が介在して作り出す非常に多種類の蛋白質の構造解析という膨大

な作業が予想されているが、蛋白質の構造解析には放射光が最も威力を発揮する。この小型放射光装置は小規模な機関でも設置が可能であると考えられ、膨大な蛋白質構造解析作業に非常に多数の機関の参加を可能にするものである。これは小さな企業でも参加を可能にすることを意味し、この分野でのベンチャービジネスを支援する装置となる可能性がある。また、蛋白質のみならず、生体高分子の構造解析に使用できる。

〔医療利用〕

・冠状動脈(心臓)造影撮影診断(コロナリー・アンジオグラフィー)

心臓の冠状動脈の状態を詳細に把握する医療診断法として、動脈へのヨウ素注射後、ヨウ素 K-edge を挟む 2 種類の X 線影像を比較することで冠状動脈部分のみを映し出す造影法(コロナリー・アンジオグラフィー)が研究されているが、この小型(硬 X 線)放射光装置は小型である利点から、コロナリー・アンジオグラフィーの普及に大きな寄与をするものと考えられている。今後 20~30 年は、日本の人口構成の高齢化が急激に進む時期であり、心臓病を罹患する人口についても急激な増加が予想されており、予防医学の観点からもこの診断法が期待されている。

〔産業利用〕

・超高密度集積回路の加工(X線リソグラフィー)

この小型放射光装置は、硬 X 線領域までの放射光を発生させることができ、超高密度集積回路の加工(リソグラフィー)に使用することが可能である。小型であり、放射光装置の低コスト化につながるものと期待されている。実用化とともに、すぐ普及してゆくものと思われる。

〔その他〕

・大学、大学院教育研究用

放射光は、関連する学問分野が非常に広範囲におよび大学における教育用あるいは大学院での研究用に放射光装置は不可欠であると考えられる。この小型放射光装置は設置スペースとして小さな面積で十分である。教育研究用としては非常に魅力あるものであり、大学、大学院での教育、研究水準を大きく向上させるものと考えられる。

以上整理したように、先進小型加速器等は実用化されればすぐにでも利用が展開される状況になっていることがわかる。それをまとめると表 VI-2-2 のようになる。

表－Ⅵ－２－２ 先進小型加速器等の実用化後に想定される使用方法

| 先進小型加速器等 | 研究者などが想定する使用方法 |
|--|--|
| <p>高周波極限（Wバンド）加速 小型電子加速器</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 中間エネルギー（QCD）原子核物理学研究（ただし、電子エネルギーがもう少し高い（1.3～1.8GeV）必要がある） ・ レーザー・コンプトン散乱現象を使用した硬X線～ガンマ線領域の放射光（この放射光を「レーザー電子光」ともいう）源用電子源（レーザーアンジュレータ放射光源用小型電子源） ・ 小型の自由電子レーザー用電子源 ・ 極短パルス電子ビーム利用のポンプ＆プローブによる超高速反応の解明 ・ 複合ビーム利用（中間エネルギー電子、重イオン、放射光など；小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる） ・ 大学、大学院教育・研究用 ・ 測定器などの設計（ビームテスト、耐放射線テストなど） |
| <p>超小型陽子・重イオンシンクロトロン （高周波極限加速 小型陽子・重イオン加速器）</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 二次粒子（中間子など）発生用小型加速器（もう少し高いエネルギー（500MeV）および強度（100μA）が必要） ・ 材料の改質用 ・ 小型（核破砕）中性子源用陽子源 ・ イオンビームを利用した分析（PIXE、RBS、ERDA） ・ 陽子線透視画像解析 ・ 放射線生物学（遺伝子損傷、変異）研究 ・ 医療（がん治療） ・ 医学（PETなど）用、工業利用の不安定核（RI）生成用陽子源（ビーム強度を10～100μAにする必要有り） ・ 複合ビーム利用（中間エネルギー電子、重イオン、放射光など；小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる） ・ 大学、大学院教育・研究用 ・ 測定器などの設計（ビームテスト、耐放射線テストなど） ・ ターゲットのモックアップテスト用陽子源 |
| <p>非高周波高勾配加速技術による 小型電子加速器</p> <p>ビーム励起型プラズマ加速器 レーザー励起型プラズマ加速器 逆チェレンコフレーザー加速器 直交場加速器</p> | <p>高周波極限（Wバンド）加速小型電子加速器に同じ</p> |
| <p>非高周波高勾配加速技術による 小型陽子・重イオン加速器</p> <p>電子リング加速器（陽子・重イオン） レーザー励起型プラズマ加速器（陽子） レーザー衝撃波加速器（陽子・重イオン） 直交場加速器（陽子・重イオン）</p> | <p>超小型陽子・重イオンシンクロトロン（高周波極限加速小型陽子・重イオン加速器）に同じ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ レーザー衝撃波加速の場合には、ややエネルギーの高いイオン源 |

（次頁に続く）

表－Ⅵ－2－2 先進小型加速器等の実用化後に想定される使用方法

| 先進小型加速器等 | 研究者などが想定する使用方法 |
|------------------------|--|
| レーザーアンジュレータ 放射光発生装置 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 結晶構造の構造解析 ・ 新材料開発（原子を識別しながら加工） ・ 複合ビーム利用（中間エネルギー電子、重イオン、放射光など；小型のため小さな面積に何種類かのビーム源加速器を設置できる） ・ 短パルス放射光利用のポンプ＆プローブによる超高速反応の解明やその場観察 ・ 蛋白質構造解析、生命高分子構造解析 ・ 冠状動脈（心臓）造影撮影診断（コロナリー・アンジオグラフィー） ・ 超高密度集積回路の加工（X線リソグラフィー） ・ 大学、大学院教育研究用 |

3 先進小型加速器等の想定される複合的な使用

2においては、先進小型加速器等の各々が実用化された後の想定される使用について触れたが、「ビームニーズ等調査」結果においても示されているように、将来的には、多種種類のビームを組合わせて使う研究が増加してゆくものと考えられる。例えば、物質・材料科学および生命科学分野においては、構造解析用の放射光（軟X線、硬X線）と中性子ビームを同じ実験ステーションで使うニーズは高いものと考えられるが、現在の施設や計画中のものでは、これらが同じ加速器施設でユーザーに提供できるものはない。

これらの複合的なビーム利用への対応としては、先進小型加速器等の実用化後はそれらを組み合わせて加速器等の複合システムを作り、同一の実験ステーションに、現在は大規模な共同利用加速器でしか利用できないビームを、多種類、供給できるようにすることが考えられる。（これを、以後「**小規模高性能複合ビーム加速器施設**」と呼ぶこととする。）これは先進小型加速器等をいくつか組み合わせて作ることより、従来の大型加速器に比べて、建設費も格段に少ないものと考えられる。この複合ビーム加速器施設は、同一の実験ステーションに多種種類のビームを供給できることから、各種のビームを使った研究を有機的に関連させることが可能となり、研究効率を大幅に向上させるものと期待される。また、このような施設は各地域での中核施設になり、日本全体の科学技術水準の更なる向上に大きく寄与するものと考えられる。

表－Ⅵ－2－3には、小規模高性能複合ビーム加速器施設の例として、原子核物理学研究用、物質・材料科学研究用、生命科学研究用および医療利用のものについて、先進小型加速器等の組み合わせの例を挙げている。

表－VI－2－3 先進小型加速器等による小規模高性能複合ビーム加速器施設

| 小規模高性能 複合ビーム加速器施設 | 使用するビーム | ビームを供給する先進小型加速器等 |
|---|---------------------------|---|
| 原子核物理学研究用 (QCD原子核物理) (中間・低エネルギー 原子核物理) | 電子ビーム(～1GeV) | ：Wバンド加速小型電子加速器あるいはレーザー 励起型プラズマ加速小型電子加速器 |
| | γ線(数100MeV) | ：Wバンド加速小型電子加速器あるいはレーザー 励起型プラズマ加速小型電子加速器からの 電子ビームとレーザーとの逆コンプトン散乱 |
| | 陽子・重イオンビーム | ：超小型陽子(重イオン)シンクロトロンある いはレーザー励起型プラズマ加速小型陽子加 速器、レーザー衝撃波加速器、直交場加速器 |
| | 中性子ビーム | ：超小型陽子シンクロトロンからの陽子ビーム による核破砕 (この他、電子ビーム(数100MeV)とレーザー との逆コンプトン散乱をスーパーキャビティ内 で起こして高品質γ線を発生させ、そのγ線 を用いた標的核巨大共鳴からの光核反応中性子 を利用するもの) |
| 物質・材料科学研究用 | 放射光(～100keV) | ：レーザーアンジュレータ放射光源 |
| | 中性子ビーム | ：超小型陽子シンクロトロンからの陽子ビーム による核破砕 (この他、電子ビーム(数100MeV)とレーザー との逆コンプトン散乱をスーパーキャビティ内 で起こして高品質γ線を発生させ、そのγ線 を用いた標的核巨大共鳴からの光核反応中性子 を利用するもの) |
| | 陽電子ビーム | ：Wバンド加速小型電子加速器あるいはレーザー 励起型プラズマ加速小型電子加速器からの 電子ビームによる重元素標的照射 (この他、Xバンド線形加速器からの電子ビー ムの重元素標的照射がある) |
| | 陽子・重イオンビーム (通常) | ：超小型陽子(重イオン)シンクロトロンある いはレーザー励起型プラズマ加速小型陽子加 速器、レーザー衝撃波加速器、直交場加速器 |
| | 陽子・重イオンビーム (シングルイベント用) | ：レーザー衝撃型陽子・重イオン源(シングル イベント用の粒子ビーム) |

(次頁に続く)

表Ⅵ-2-3 先進小型加速器等による小規模高性能複合ビーム加速器施設

| 小規模高性能 複合ビーム加速器施設 | 使用するビーム | ビームを供給する先進小型加速器等 |
|------------------------------|--------------------------------|--|
| 生命科学研究用 (構造生物学研究用) | 放射光(～100keV) | : レーザーアンジュレータ放射光源 |
| | 中性子ビーム | : 超小型陽子シンクロトロンからの陽子ビームによる核破砕 (この他、電子ビーム(数100MeV)とレーザーとの逆コンプトン散乱をスーパーキャビティ内で起こして高品質γ線を発生させ、そのγ線を用いた標的核巨大共鳴からの光核反応中性子を利用するもの) |
| | (遺伝子研究用) 陽子・重イオンビーム | : 超小型陽子(重イオン)シンクロトロンあるいはレーザー励起型プラズマ加速小型陽子加速器、レーザー衝撃波加速器、直交場加速器 |
| 医療診断・治療用 (冠状動脈造影) | 放射光(33keV) | : レーザーアンジュレータ放射光源 |
| | (単色X線CT) 放射光(数10keV) | : レーザーアンジュレータ放射光源 |
| | (がん治療) 陽子ビーム (70～200MeV) | : 超小型陽子シンクロトロンあるいはレーザー励起型プラズマ加速小型陽子加速器、レーザー衝撃波加速器、直交場加速器 |
| | 重イオン | : 超小型重イオンシンクロトロンあるいはレーザー衝撃波加速器、直交場加速器 |

これらのビームのどのものを選択するかは、どの分野の研究を主とするかに依存する。また、同じ先進小型加速器等を使用していくつもの分野の研究も可能となることから、ここに挙げたすべての研究分野もカバーすることが可能である。

これらの先進加速技術等は、現在まだ実現されていない世界最先端の水準をめざすものであり、ひとたび実現されれば、物質・材料科学、生命科学、医療利用などをはじめ、非常に広い分野での応用利用が実現すると考えられるとともに、研究者の居住地域による加速器科学研究設備上の不利益をある程度解消させるのみ役立つとともに、共同利用大規模加速器施設と組み合わせると、有機的な研究プログラムの達成が可能になるものと考えられている。

Ⅶ 先進加速技術の研究開発方策に関する 具体的提言

Ⅶ 先進加速技術の研究開発方策についての具体的提言など

Ⅶ-1 加速器科学における先進加速技術等研究開発の意義および必要性

V章およびVI章では、先進加速技術等の研究開発状況および実用化予測あるいは実用化後のメリットや想定される使用を調べてきたが、ここでそれらの意義および必要性をまとめることとする。

V章においては、現在の大型加速器でしか得られない中間エネルギーの粒子ビームおよび硬X線領域の放射光を、ドラスティックに小型化した加速器あるいは装置で発生させることのできる加速器技術や放射光源技術を調査し、以下のものを挙げた。

○高周波加速技術において極限的に小型化を追求するもの（高周波極限加速技術）

- i 高周波極限（Wバンド）電子加速
- ii 超小型陽子（重イオン）シンクロトロン技術

○高周波加速とは異なる原理で非常に強い加速電場を用いる加速技術（非高周波高勾配加速技術）あるいは電子シンクロトロンからの放射光発生とは異なるコンパクトな放射光源技術

- iii 電子の非高周波高勾配加速技術
 - iii-A ビーム励起型プラズマ加速
 - iii-B レーザー励起型プラズマ加速
 - iii-C 逆チェレンコフレーザー加速
 - iii-D 直交場加速
- iv 陽子・重イオンの非高周波高勾配加速技術
 - iv-A 電子リング加速（陽子・重イオン）
 - iv-B レーザー励起型プラズマ加速（陽子）
 - iv-C レーザー衝撃波加速（陽子・重イオン）
 - iv-D 直交場加速（陽子・重イオン）
- v コンパクトな放射光発生（小型放射光源）技術
 - v-A レーザーアンジュレータ放射光発生

これらの技術による先進小型加速器等は、まだ実用化に至っていないものであるが、その実用化時期は2008年～2010年代前半と考えられている。

先進小型加速器等は、中間エネルギーの粒子ビームや硬X線領域の放射光を発生させることができ規模の小さな実験室に設置できるまでに小型化された高性能のものであることより、加速器ビームユーザーからは、以下のような直接的、間接的（あるいは派生的）メリットが挙げられている（ビームニーズ等調査の結果）。

先進加速器等の実用化による直接的メリット

- ・ 小型化により加速器等自体の値段および運転経費が安くなる
- ・ 収納する施設が小型化され、放射線遮蔽区域も小さくなる
- ・ 幾種類かの小型加速器等の導入が容易になる

先進加速器等の実用化による間接的(派生的)メリット

- ・病院などにおける医療（診断、治療）利用が進展する
- ・物質・材料科学での高度利用や産業利用（半導体加工など）が進展する
- ・生命科学関係での高度利用が進展する
- ・民間研究所や各地方大学（場合によっては研究室単位で）での導入が進展する
- ・数種類の小型加速器等による複合ビーム利用研究が進展する
- ・大学の実験室にて学生の授業あるいは大学院生の研究に使われ、授業や研究レベルの向上に役立つ

これらのメリットは個別的なものであるが、日本全体としてみると、いくつかのマクロレベルでの効果が期待できる。

① 加速器偏在の解消による先端研究機会均等化および地域での研究水準の向上

現在、日本における加速器施設は、大規模あるいは中規模の加速器を共同利用する施設（共同利用施設）および中規模あるいは小規模加速器を所有機関が主に専用利用する施設（専用利用施設）に大きく分けることができる。共同利用施設の加速器は、ビームのエネルギーが高く、強度も大きいなど、性能面で他の施設ではほとんど利用できない加速器ビームの供給が可能な施設であり、概して規模が大きい（建設費が高い）施設である。これらの共同利用施設は、加速器科学センターとしての役割を果たすものであるが、地域的には偏在している。このため、現在大型加速器を用いてしかできない先端研究の実施面での実質的機会不均等が生じている。（利用機会については平等であるものの遠隔地からの出張利用には、研究実施への躊躇をもたらす。）この調査において、焦点を当てている中間エネルギー領域の粒子ビーム（すなわち、電子エネルギー1 GeV程度、陽子・重イオンエネルギー200 MeV/n程度）および硬X線領域の放射光（光子エネルギー30～100 keV程度）は、現在は大型加速器施設でしか利用できないものであるが、先進小型加速器等はこれらのビームが供給できることより、先進小型加速器等の実用化は、大型加速器の地域的な偏在を解消する上で有効であると考えられる。先進小型加速器等の身近な場所への設置は、先端研究への参加を容易にし、これまで大型加速器がなかった地域での研究水準の向上に寄与し、結果として日本全体の先端研究水準の向上にもつながる。

② 日本の物質・材料科学や生命科学研究水準のトップランナー化への寄与

物質・材料科学や生命科学はその研究対象数が膨大である。例えば、ポストゲノム研究の中心の一つである構造生物学が扱うべき蛋白質や生命体高分子の数は極めて多い。これら膨大な数の対象を扱う場合、日本のあらゆる地域の参加可能な研究機関を動員した研究実施体制が必要となる。先進小型加速器等の実用化は、このような日本全体で実施すべき研究の基礎的ツールとなるものであり、今後、日本がより積極的に取り組む物質・材料科学、生命科学分野で世界のトップランナー化に寄与するものとなる。このような観点から、比較的高いビームエネルギーを供給でき、身近な実験室に設置できる規模までの小型化を可能とする先進加速技術等は、将来の物質・材料科学や生命科学発展のキーテクノロジーであると考えられる。この場合、大型加速器施設は加速器科学センターとしての機能を果たすことは言うまでもない。

③ 高度先進医療の全国的な普及による活力ある高齢化社会達成への寄与

今後急速に進む高齢化社会においては、高齢者が健康で活力ある生活を行えるようにすることが重要であり、そのための疾病予防や体への負担の少ない高度先進医療を普及させて行くことが大切である。先進小型加速器等の実用化は、心臓のみならず脳や腹部の血管系の診断を身体的負担が少なく行えるアンジオグラフィーや、同様に、外科手術に比べて身体的負担の少ない重粒子線治療を日本のあらゆる地域で普及させることに大きく寄与する。

以上、その実用化の意義を述べてきている先進加速技術等は加速器規模や放射光源規模のドラスティックな縮小（すなわち、「超」小型加速器など）を可能にするもので、物質・材料科学、生命科学あるいは医療利用などへの加速器ビーム利用を飛躍的に普及させ、これらの分野での最先端研究を大きく進展させるキーテクノロジーであると考えられる。先進加速技術等は、現在の段階ではまだ実用化されていない世界最先端水準の技術であり、理論的にも実験的にも未解明の部分が多く、その研究開発自身も非常に魅力に富むものである。更に、ひとたび実用化されれば物質・材料科学、生命科学、医療利用など、非常に広い分野での応用利用が即座に展開されるものと考えられ、その発展・普及の可能性を考えると、先進加速技術等の研究開発は日本として積極的に取り組むべきものである。

Ⅶ-2 先進加速技術等の研究開発に関する米・欧および日本の取り組みなど

次に先進加速技術等の研究開発の関する世界的な取り組みと日本の状況や課題についてまとめる。

1 米国および欧州における取り組み

(1) 米国

米国における加速器科学は、主としてエネルギー省（DOE：Department of Energy）のプログラムに含まれて実施されている。この他に、米国科学財団（NSF：National Science Foundation）および国防省（DOD：Department of Defense）のプログラムによるものもある。NSF予算（加速科学関係は\$数 10M）のエネルギー省予算に対する比率は数パーセントであり、かつ、先進加速技術研究は実施していないため、ここでは、エネルギー省の取り組みについて述べる。

加速器科学に直接的に関連するプログラムは、エネルギー省の Office of Science が実施しているプログラムであり、具体的には以下のものである。

- ・ High Energy Physics（高エネルギー物理学）
- ・ Nuclear Physics（原子核物理学）
- ・ Basic Energy Science(BES)（基礎エネルギー科学）

エネルギー省の Office of Science で、上記のものに関連する部門は、下表のとおりである。

Basic Energy Science は、物質研究、化学研究、地球科学、生物科学などの分野を含んだもの

| | | |
|-------------------|---|--------------------------------------|
| Office of Science | Office of High Energy Physics And Nuclear Physics | High Energy Physics Division |
| | | Nuclear Physics Division |
| | Office of Basic Energy Sciences | Material Sciences Division |
| | | Chemical Science Division |
| | | Engineering and Geosciences Division |
| | | Energy Biosciences Division |

となっているが、この中ではシンクロトン放射光施設や核破砕中性子源などを使って行う物質研究が主に加速器科学に該当するものとなっている（物質研究の全てが加速器科学に相当するものではない）。近年のこれら分野の研究費を表Ⅶ－２－１にまとめる。

表Ⅶ－２－１ 米国における加速器科学予算(エネルギー省分のみ;エネルギー省予算書より)

(単位：million dollars)

| | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 |
|---------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| High Energy Physics | \$656.4 | \$658.1 | \$668.6 | \$680.7 | \$697.7 |
| Nuclear Physics | \$299.9 | \$310.0 | \$314.7 | \$327.2 | \$347.7 |
| Basic Energy Science(BES) (内物質研究分) | 97でBES項 目組み替え | \$642.7 (\$368.5) | \$651.8 (\$381.8) | \$783.2 (\$404.9) | \$771.6 (\$397.2) |

米国における加速器科学は、エネルギー省（DOE：Department of Energy）傘下の国立研究所（National Laboratories）で実施されており、表Ⅶ－２－１よりわかるように、High Energy Physics および Nuclear Physics が主となっている。

米国における High Energy Physics や Nuclear Physics 用の加速器を有する国立研究所などでは、過去の膨大な投資を基礎として運営されており、比較的少ない額で新しい大規模加速器を過去に建設された加速器を組み入れた複合加速器として建設し、（例えば、BNLのRHIC ComplexやFNLのTevatron 関連加速器群など）として運転している。非常に効率よく施設への投資が行われているものの、それでも膨大な投資が要求されてきており、更に効率よく粒子を加速できる新しい加速技術が切望されている。これらの新しい加速技術である先進加速技術については、エネルギー省内Office of Scienceの下部組織Office of High Energy Physics and Nuclear Physics、High Energy Physics DivisionのAdvanced Technology R&D Groupが統括している。エネルギー省傘下の国立研究所および大学で実施されている先進加速技術に関する研究開発は表Ⅶ－２－２のようにまとめられる。

エネルギー省の担当官によると、1999年度のHigh Energy Physics研究費におけるレーザー励起プラズマ加速などの先進加速技術研究開発費は、\$12.5M（電子に関するもののみ）が当てられているとのことであった。また、先進加速技術研究開発については、1985年から予算化されこれまで15年以上続いてきているとのことであった。Advanced Technology R&D Groupに属するスタッフ（5名程度）は皆Scientistであり、毎年各研究機関に出向いて技術的進捗の詳細を把握するレビューを行っているとのことであった。

表一Ⅶ-2-2 米国における先進加速技術研究

| 研究機関 | 先進加速技術研究項目 | 研究場所 |
|---|--|---|
| ANL (Argonne National Laboratory) | ビーム励起プラズマ加速 (電子) | ANL |
| BNL (Brookhaven National Laboratory) | 逆自由電子レーザー加速 (電子) | Accelerator Test Facility |
| LBL (Lawrence Berkeley Laboratory) | レーザー励起プラズマ加速 (電子) 他、(理論研究) | LBL |
| NRL (Naval Research Laboratory) | レーザー励起プラズマ加速 (電子) (理論研究) | NRL |
| SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) | Wバンド (高周波) 加速 (電子) ビーム励起プラズマ加速 (電子) (UCLAとの共同研究) | Next Linear Collider Test Accelerator 3km Linear Accelerator |
| UCLA (University of California Los Angeles) | ビーム励起プラズマ加速 (電子) (SLACとの共同研究) レーザー励起プラズマ加速 (電子) | 3km Linear Accelerator UCLA |

最近の研究では、SLACにおいて30GeVの電子ビームを1.5mのリチウムプラズマに入射させてプラズマ波を励起し(ビーム励起プラズマ加速)、0.5GeV/m以上の加速勾配が実証された実験が注目される。

これらの研究はHigh Energy Physicsのプロジェクトの一環として、将来の高エネルギー物理研究用の加速器を現実的な範囲に収めるための研究開発として実施されており、その研究開発成果については、1年おきに開催されるワークショップ“Workshop on Advanced Accelerator Concept”(エネルギー省(High Energy Physics DivisionのAdvanced Technology R&D Group)がスポンサー;2000年で第9回となる)で発表され、他の研究者からの評価も受けている。ちなみに、上記ワークショップの過去3回の先進加速器研究発表論文数は以下のとおりである。

| Workshop on Advanced Accelerator Concept | 先進加速器研究 発表論文数 |
|---|------------------|
| 6 th 1994 Fontana, WI | 72 |
| 7 th 1996 Lake Tahoe, CA | 87 |
| 8 th 1998 Baltimore, Maryland | 101 |

なお、この他LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)では、レーザー(慣性閉じ込め)核融合実験施設Novaのレーザービームラインの一部を使ったペタワットレーザー装置による陽子や重イオンの飛び出しに関する実験が行われた。

| 研究機関 | 先進加速技術研究項目 | 研究場所 |
|--|----------------|-------------------------------------|
| Lawrence Livermore National Laboratory | レーザー衝撃(陽子・イオン) | Petawatt Laser (Nova) (1999年で終了) |

この実験では、強力なパルスレーザーを薄膜に当てると、数 10MeV の陽子の飛び出しが観測されている。これはレーザーのもつ運動量が (いくつかの過程を経て) 薄膜中の原子核に寄与され、イオン化した原子核が薄膜から飛び出してくるものと考えられており、このメカニズムは、通常の陽子加速器における陽子源での陽子発生とその後の初期加速を同時に行っていることとなる。この研究は、今後世界的に広がってゆくものと考えられる。

(2) 欧州

欧州における先進加速技術等の研究開発は、個別単発的に行われており、組織だった取り組みはまだ行われていない。個別国毎には以下のようになっている。

(イギリス)

| 研究機関 | 先進加速技術研究項目 | 研究場所 |
|------------------|-----------------|--|
| Imperial College | レーザー衝撃 (陽子・イオン) | Rutherford Appleton Laboratory 50TW レーザー |

(フランス)

| 研究機関 | 先進加速技術研究項目 | 研究場所 |
|---|-------------------|---------------------|
| Laboratoire Utilisation des Lasers Intenses | レーザー励起プラズマ加速 (電子) | LULI |
| Ecole Polytechnique | レーザー励起プラズマ加速 (電子) | Ecole Polytechnique |

(ロシア)

| 研究機関 | 先進加速技術研究項目 | 研究場所 |
|-------------------------------------|---------------------------|------|
| Budker Institute of Nuclear Physics | ビーム励起プラズマ加速 (電子) (計画中) | BINP |

2 日本における取り組みと課題

これまでに述べてきている先進加速技術等は、日本として積極的に研究開発に取り組むべき最先端技術と考えられるものであるが、先進加速技術等に関する取り組みは研究者の興味の域をほとんど出していないのが現状である。

日本の加速器科学予算は、平成9年度において約730億円を超えるものとなっているが、これらのほとんどすべては、従来型の加速器の建設費、運転・保守経費であり、加速器の改良・開発に関するものは極めてわずかである。そのなかでの先進加速技術等研究費は、更に少ない額である。先進加速技術等研究開発は、文部省の科学研究費から研究者が単発的に得ているもの（把握できた範囲では、年間数千万円程度）か、あるいは日本原子力研究所関西研究所（光量子科学研究センター）におけるレーザープラズマ加速研究費のみであり、両者を合わせてもせいぜい年間1億円程度である。

現在の日本では、極めて少ない予算で個別単発的に先進加速技術等の研究が行われているのが実状であり、その発展性を考えるとこれらの先進加速技術等をまとめて研究・開発してゆくことが必要である。米国においては、既に15年にわたりこれらの先進加速技術研究をエネルギー省のプロジェクトとしてまとめて推進してきており、その知識の蓄積には大きな差が出てきている。

従って、この分野における知識の蓄積水準を高めるとともに、世界的にリーダーシップを取って行くためには、

- ・個別独立的な進め方ではなく、知識の相乗効果が期待できる、研究者をネットワーク化した研究開発体制を構築すること
- ・先進加速技術等研究開発費の絶対額を大きく増加させること
(米国では、電子に関する先進加速技術のみで約\$12.5M＝約14億円/年)

が急務である。前者は、日本における先進加速技術等の研究者が極めて少ない（数10名程度でリーダーシップをとれる研究者数はごくわずか）ことから必要条件となる。

なお、米国においては、先進加速技術等の研究開発を、高エネルギー物理学研究用の加速器の規模をこれ以上増大させずにエネルギーフロンティアをめざせる技術の開発として実施しており、これらの技術の物質・材料科学や生命科学あるいは医療利用などへの適用については、あまり意図されていない。

この事情を考慮すると、日本においては、先進加速技術等の研究開発を物質・材料科学や生命科学あるいは医療利用などへの適用を目的とし、

- ・実証機の開発が可能であるものへの重点的投資

が有効であるものと考えられる。

Ⅶ-3 先進加速技術等の研究開発方策を考える上での要件のまとめ

これまで述べたように、先進加速技術等の研究開発を進め先進小型加速器等を早期に実現させることは、物質・材料科学、生命科学、医療利用などでの世界のトップランナー化に寄与し、日本全体の科学技術水準を向上させることになると考えられるが、その取り組みは米国に比べて予算面でも、研究開発体制面でも遅れたものとなっている。先進加速技術等の研究開発方策を考える上では、先進加速技術等に関する以下の点を考慮する必要がある。

- A. 先進加速技術等の研究者数が限られ、かつ、分散している
- B. 米国よりもスタートが遅れており、研究開発投資の効率化が必要
- C. 比較的高いエネルギーのビームを扱うため、必要な放射線遮蔽対策が取られること

このことから研究開発方策を考える上での要件として、次のものが挙げられる。

要件1 研究者間の有効なネットワーク形成

この条件下で先進加速器技術等の研究開発を実施するためには、数少ない研究者間を有効にネットワーク化し、技術上の意見交換などが適時に容易に行えるようにする必要がある。また、自身のテーマの他、他のテーマの研究開発状況を熟知するとともに、互いに建設的な示唆ができるような状況とすることが望まれる。なお、先進加速技術等に関する理論的な解明も今後の大きな課題となっており、実験研究者と同時に理論研究者も研究開発のネットワークに参画することが必要である。

要件2 必要な人材(先進加速技術等の専門家)の育成

先進小型加速器等を開発・普及させるためには、先進加速技術等の専門家が相当数必要となる。先進小型加速器等の実用化時期までの、今後10年程度は先進加速技術等の研究開発期間であるとともに、専門家を育成する期間であるとも考えられる。現在の数少ない研究者を中核として、特に若手研究者（大学院生、任期付き博士研究者、大学の助手クラスあるいは国立研究機関、特殊法人および民間企業の若手研究員など）を研究テーマ毎に配置し、研究開発を担うとともに専門家として育成することが必要であろう。これら若手研究者についても、いくつかのテーマに参加し研究状況を熟知することが必要である。

要件3 世界の最先端研究者との意見交換、世界的な視野での定期報告会およびレビュー

先進加速技術等の研究開発の実施については、当初より世界の最先端研究者との情報交換を行いながら実施することが重要である。また、日本国内においては、その技術的な内容を熟知する専門家が少なく、かつ、それらの専門家の多くは研究開発の主体者となる必要があるため、研究開発のレビューについては、国外の専門家のメンバーを加えることが必要となろう。このため、世界に開かれた定期報告会などの場でのレビューが有効である。

要件4 実証機開発段階のものへの重点的投資

先進小型加速等については、その実用化予測時期が示されてはいるものの、今後の研究開発投資がその実用化時期を早めるものもあるものと考えられる。また、研究開発の進展とともに、そ

の実現の容易度（困難度）がより鮮明になるものと考えられる。現時点においては、実証機レベルに近い技術（以下のもの）に対して、開発・普及をめざし重点的に投資することが重要である。

- ・ 超小型陽子・重イオンシンクロトロン技術
- ・ レーザー衝撃加速（但し、イオン源としての利用）
- ・ レーザーアンジュレータ放射光発生技術

要件5 基礎研究との連携

先進小型加速技術のなかには、今後の研究開発の積み重ねにより、現在の高エネルギー加速器の大幅な小型化に寄与する可能性をもつと考えられているものもある。特に、規模の限界に近づいてきている高エネルギー物理学研究用加速器については、今後 20 年程度の間には、現在の加速方式を代替し、それまでに建設された施設の規模を拡大せずに（望ましくは規模を縮小したうえで）、より高エネルギー化を達成できる新たな効率的加速方式が求められると予想される。このため、研究の進展状況に合わせて新たに重点的な投資ができるような機動的な研究開発体制が求められる。現在研究段階にある先進加速技術等（以下のものなど）についても、何らかの基礎研究

高周波極限加速技術

- ・ 高周波極限（Wバンドなどによる）電子加速

非高周波高勾配加速技術による電子加速

- ・ ビーム励起型プラズマ加速
- ・ レーザー励起型プラズマ加速
- ・ 逆チェレンコフレーザー加速
- ・ 直交場加速

非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速

- ・ レーザー励起型プラズマ加速（陽子）
- ・ 直交場加速（陽子・重イオン）

予算の枠内で研究を進め、その進展如何で物質・材料科学、生命科学などへの適用を念頭にした開発・普及に取り込めるような連携した研究開発体制が必要である。開発・普及段階に進むことにより、技術が更に進展し高エネルギー加速器への適用可能時期も早まるものと考えられる。

要件6 既存施設などの有効利用（研究開発費の有効投資）

中間エネルギーの粒子ビームを発生させる先進小型加速器の開発においては、遮蔽対策に留意する必要があるが、研究開発の初期から建物などを造ってゆくのは研究開発費の有効投資という観点からは好ましくない。そのため、原子力分野までも含めて、各地の研究機関において活用できる施設、設備があればそれらを使ってゆくのが望ましい。当然、一カ所を研究開発の拠点とすることは困難であろうと考えられることより、研究開発の初期段階より分散型研究開発拠点方式となるものと考えられる。

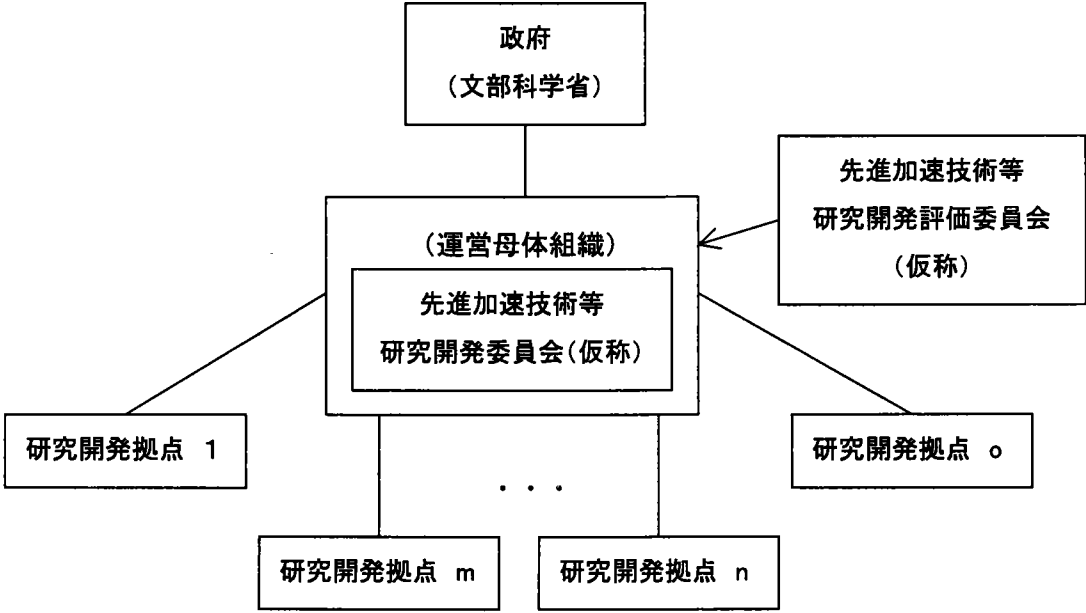
Ⅶ－４ 実証機開発・普及をめざした研究開発体制の検討

１ 研究開発体制案

上に挙げた重点投資対象の先進加速技術に基づく実証機開発および普及をめざした研究開発体制については、以下のような選択肢が考えられる。

〔体制案１：多研究機関参加・研究開発委員会主導方式〕

この方式は、先進加速技術研究者の属するいくつかの研究機関（独立行政法人、特殊法人、大学など）に開発に参画してもらい、先進小型加速器の使用目的に沿った全体系総合技術調整および研究開発に関する諸々の事務を特定の公的非常営利組織（独立行政法人、特殊法人あるいは財団法人などで、先進加速技術研究者を有し、目的に適する組織；以下、「運営母体組織」という）が一括して行うものである。この際、運営母体組織に設置される「先進加速技術等研究開発委員会（仮称）」（以後、「研究開発委員会」という）が横断的な技術的検討、運営母体および各研究機関で分担される具体的個別研究計画の作成、予算要求原案作成および進捗管理などを行い主導して進めてゆくものである（図－Ⅶ－４－１参照）。この研究開発委員会のメンバーは、運営母体組織の研究者、参加する各研究機関の研究責任者、各研究開発拠点の責任者および関連専門研究者から構成される。



図－Ⅶ－４－１ 多研究機関参加・研究開発委員会主導方式

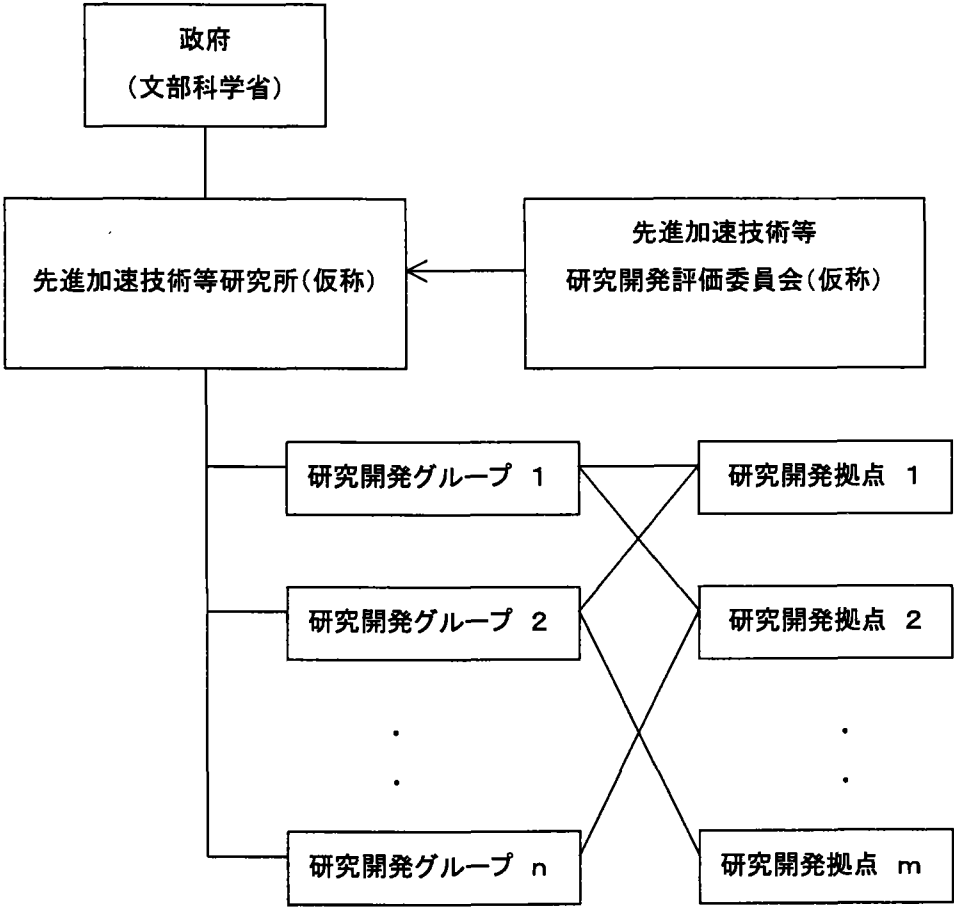
開発する先進加速技術に精通した研究者の提案などを基に、放射線管理などの安全関連業務サービスなどを受けることのできる研究開発拠点を決める。この際、各研究開発拠点施設を有する研究機関は、研究開発委員会への協賛機関として（あるいは当該組織との何らかの協定、契約により）施設の利用などへの協力を行うものとする。各研究開発拠点の責任者は、その研究開発拠点施設を所有する機関以外の者でも可とする。これは、先進加速技術等の専門家が少なく、適当な施設があるものの適当な責任者がいない場合が一般的であると考えられるからである。この際、必要に応じて、研究機関どうしの協力協定を結ぶものとする。

先進加速技術等研究開発に関する計画については、当該組織に独立して設けられる「先進加速技術等研究開発評価委員会（仮称）」の意見を反映させた上で、研究開発委員会において決定し、当該組織がそれに基づく予算要求および実行（契約関連諸事務手続き；必要があれば任期付き博士研究員の採用手続きも含めて）を行う。研究開発委員会は、定期的に研究開発に関する技術的な問題点を中心に実務的な会合を持ち、各研究開発拠点の状況を把握しつつ、責任者あるいは研究開発グループ間の意見交換を実施し、必要があれば研究開発計画の変更を行う。

なお、各研究開発拠点では、若手研究者（大学院生、任期付き博士研究員、大学の助手クラスあるいは独立行政法人、特殊法人などの若手研究員）および海外招聘研究者の受け入れに協力する。

[体制案2：分散型研究所方式]

この方式は、新たに先進加速技術等の研究開発を目的として設置する「先進加速技術等研究所（仮称）」（以後、「研究所」ともいう）が研究計画の作成、進捗管理および横断的な技術的検討などを行い、研究開発を進めてゆくものである（図－Ⅶ－４－２参照）。



図－Ⅶ－４－２ 分散型研究所方式

当該研究所は、研究開発に関する諸々の事務を一括して行うが、他の研究機関との契約あるいは協力で使用できる研究開発拠点に分散した組織であり、その構成員は、大学、独立行政法人、

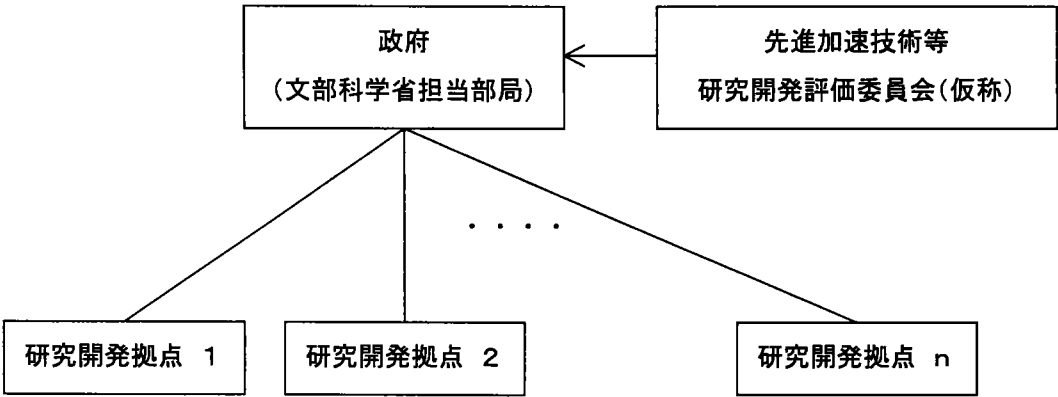
特殊法人あるいは財団法人など各研究機関からの併任研究員、客員研究員あるいは出向研究者などである。なお、各研究拠点では当該研究所との契約あるいは共同研究協定により、放射線遮蔽などの安全関連業務サービスなどを受けることができるものとする。

先進加速技術等研究開発は、通常の組織形態で実施してゆくもので、テーマ毎にグループを構成し責任者を配置する。研究開発計画については、研究所に独立して設けられる評価委員会の意見を反映させた上で決定し、研究所がそれに基づく予算要求および実行（契約関連諸事務手続き；必要があれば任期付き博士研究員の採用手続きも含めて）を行う。また、必要があれば研究開発計画の変更を行う。

なお、各研究開発拠点では若手研究者（大学院生、任期付き博士研究員、大学の助手クラスあるいは独立行政法人、特殊法人などの若手研究員）および海外招聘研究者の受け入れに協力する。

【体制案3：多研究機関参加・政府組織主導方式】

この方式は、研究開発者の属するいくつかの研究機関（独立行政法人、特殊法人、大学など）に開発に参画してもらい、政府（文部科学省）の組織の一部（担当部局；先進加速技術研究開発者を専門家として採用し、担当官とする）が研究開発計画の作成、進捗管理および横断的な技術的検討などを行い、研究開発に関する一部の事務を実施するとともに、研究開発を主導して進めてゆくものである（図－Ⅶ－４－３参照）。



図－Ⅶ－４－３ 多研究機関参加・政府組織主導方式

この方式は、日本のこれまでの進め方からするとなじまない方式であるが、米国エネルギー省（DOE）においては、先進加速技術の研究開発をこの方式かこれに近い方式で行っている。

まず、テーマ、責任者および研究開発拠点施設を決める。この場合、責任者は研究開発拠点施設を所有する機関の者となり、放射線遮蔽などの安全関連業務サービスはその機関で行い、特段の契約や協力は必要としない。

先進加速技術等研究開発計画は、担当部局が各責任者から計画案を提出させ、必要に応じてヒアリングを行い決定し、それに基づき担当部局が予算要求や予算の配分を行う。担当部局は、各年度の研究計画の作成にあたり研究の進捗状況、直面する技術課題、技術的な見通しなどについて現地での詳細なレビューを行う。また、特定の学会などの協賛より設けた（評価委員会の役割

を果たす) 研究会やワークショップで、各責任者などから研究開発テーマに関する報告をさせ、技術的な観点からの意見を広く求め、研究開発計画に反映させる。

なお、各研究拠点では、若手研究者(大学院生、任期付き博士研究員、大学の助手クラスあるいは独立行政法人、特殊法人などの若手研究員)の受け入れに対応する。

2 研究開発体制案の比較評価

以上挙げた研究開発体制案について、組織の難易度、開発管理上の観点および研究開発方策を考える上での要件との関連で比較評価したものを表Ⅶ-4-1に示すが、関連する専門家が参加しやすく柔軟な多研究機関参加・研究開発委員会主導方式が現実的と考えられる。

表－Ⅶ－４－１ 研究開発体制案の評価

| | | 体制案1 多研究機関参加・ 研究開発委員会主導方式 | 体制案2 分散型研究所方式 | 体制案3 多研究機関参加・ 政府組織主導方式 |
|----------|------------------------------|--|---|---|
| 組織化の難易度 | | 容易： 専門研究者の所属する研究機関と運営母体組織との協定、契約により、必要な人材（専門研究者）を集めることが可能 | 困難： 新たな研究所を設置する必要があり、関連研究機関との幅広い調整が必要、また、専門研究者を研究所員として何らかの形で採用する必要が有る | やや困難：専門研究者の所属する研究機関と政府組織との協定、契約により、必要な人材を集めることが可能で有るが、政府組織にも専門家を雇い入れることが必要である |
| 開発管理上の観点 | | ○： 研究開発委員会が管理を行うが、契約上研究開発委員会の指導権を明確にする必要がある | ◎： 研究所組織として、開発を実施するため、開発責任が明確である | ○： 政府組織自らが管理を行うが、契約上政府組織の指導権を明確にする必要がある |
| 留意点との適合 | 要件1 研究者間の有効なネットワーク形成 | ○： 研究開発委員会が必要と認める専門研究者を所属する研究機関との協定、契約を通じて容易に参加させることが可能である | △： 必要と認められる専門研究者を研究所の所員として採用する必要がある（あまり容易ではない） | ○： 政府組織が必要と認める専門研究者を所属する研究機関との協定、契約を通じて容易に参加させることが可能である。 |
| | 要件2 必要な人材（先進加速技術等の専門家）の育成 | ○： 参加する研究機関において、任期付き博士研究員や若手研究員の開発参加による育成が容易 | ○： 研究所において、任期付き博士研究員や若手研究員の開発参加による育成が容易 | ○： 参加する研究機関において、任期付き博士研究員や若手研究員の開発参加による育成が容易 |
| | 要件3 世界の最先端研究者との交流 | 特に問題はない | 特に問題はない | 特に問題はない |
| | 要件4 実証機開発段階のものへの重点的投資 | 特に問題はない | 特に問題はない | 特に問題はない |
| | 要件5 基礎研究との連携 | 特に問題はない | 特に問題はない | 特に問題はない |
| | 要件6 既存施設などの有効利用 | ○： 参加する研究機関との協定、契約にあらかじめ既存施設の利用の件について規定しておけば、容易である | △： 研究所が既存施設の利用に関して当該施設所有者との契約あるいは協定が必要である | ○： 参加する研究機関との協定、契約にあらかじめ既存施設の利用の件について規定しておけば、容易である |
| 総合評価 | | ○ | △ | △ |

Ⅶ－５ 先進小型加速器技術等の研究開発方策についての具体的提言

調査のまとめとして、先進加速技術等の研究開発方策に関する提言は以下のようなになる。

重点的実証機研究開発

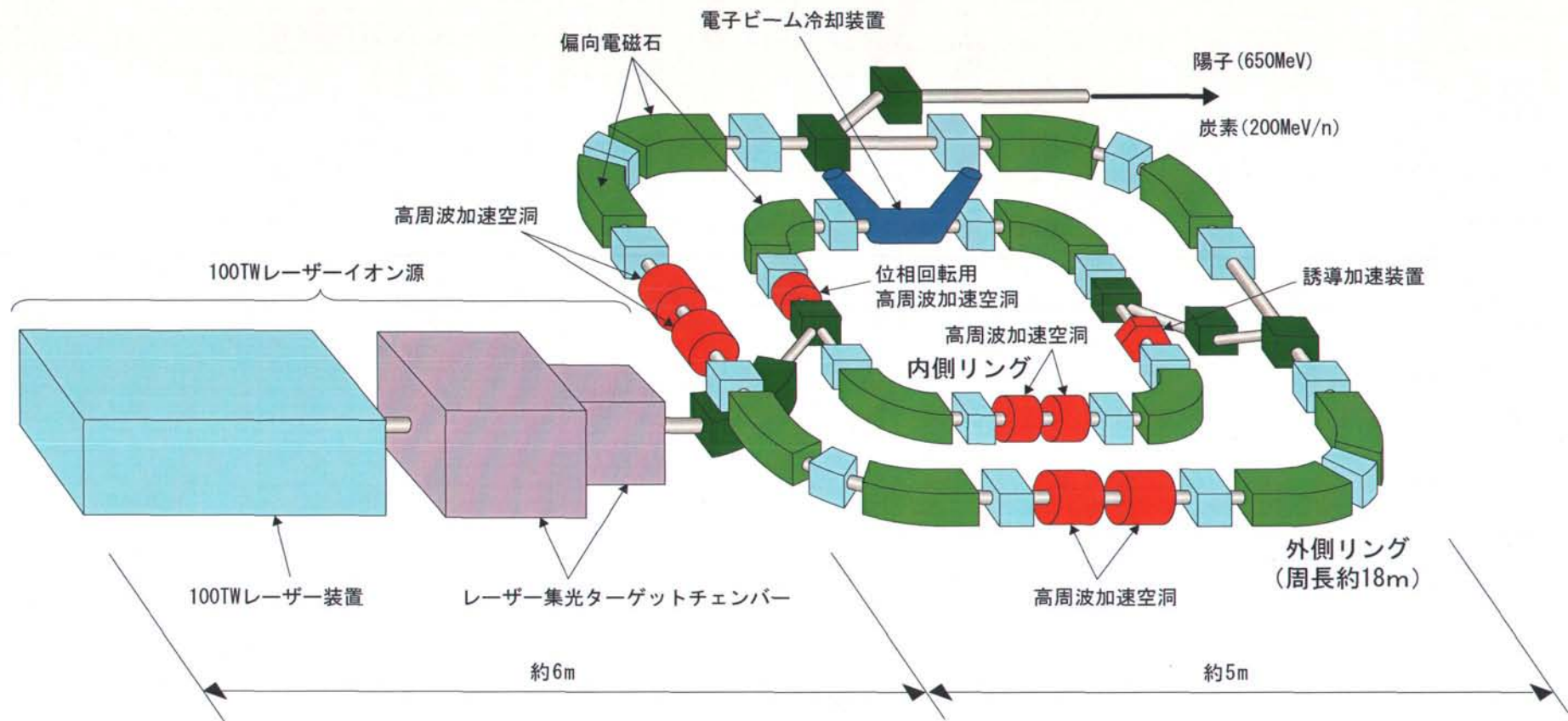
・以下の技術による小型実証機開発に重点的に投資すること

- 超小型陽子・重イオンシンクロトロン技術
- レーザー衝撃加速（但し、イオン源としての利用）
- レーザーアンジュレータ放射光発生技術

これらの小型実証機を現段階で想定すると、次のような例が考えられる。いずれも今後の研究開発により、この概要例と異なる姿になってゆく可能性があることに留意されたい。

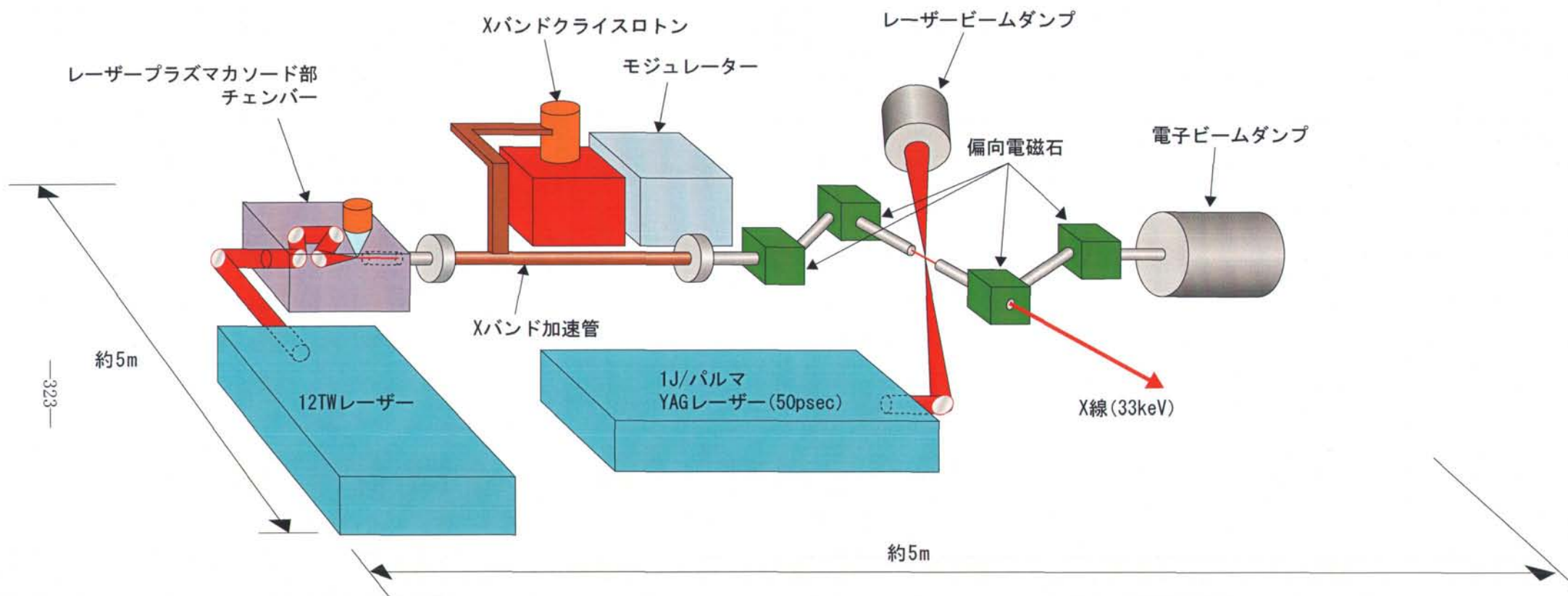
表－Ⅶ－５－１ 先進小型加速器等実証機の概要例

| 先進小型加速器等実証機の概要（例） | | 概略説明 |
|---|---------------------------------------|---|
| I | 小型陽子・重イオンシンクロトロン （図－Ⅶ－５－１ 参照） | 「レーザー衝撃加速」をイオン源（これを「レーザーイオン源」と呼ぶ）構成に利用し、主加速シンクロトロン（外側リング）に「超小型陽子・重イオンシンクロトロン技術」を用いる。なお、イオン源からのビームをいったん蓄積し、質を高める内側リングが必要と考えられ、この内側リングには電子ビーム冷却装置などが設けられる。 |
| II 小型 硬 X 線 放 射 光 源 | II A 大強度短パルス（硬X線）放射光源 （図－Ⅶ－５－２ 参照） | 電子源として、レーザープラズマカソード（レーザー電子源）を、電子の加速にXバンド線形加速器を用いて、数 10MeV の電子ビームを極めて短い距離で加速する。この電子ビームにYAGレーザーを当て、逆コンプトン散乱反応により数 10keV（図－Ⅶ－５－２では、コロナリーアンジオグラフィー用の 33keV となっている）の光子エネルギーをもつ硬X線を生成させる。電子ビームおよびレーザーとも十分に細く絞り込み、輝度の高い、極めて短パルスの放射光を発生させる。 |
| | II B 高フラックス（硬X線）放射光源 （図－Ⅶ－５－３ 参照） | （Sバンド）電子加速器などからの電子ビームを小さい電子リングに（約 100MeV 程度のエネルギーで）蓄積し、レーザーを蓄積させたスーパーキャビティ内でレーザー逆コンプトン散乱反応により、フラックスの高い、数 10keV の光子エネルギーをもつ硬X線を生成させる。 |



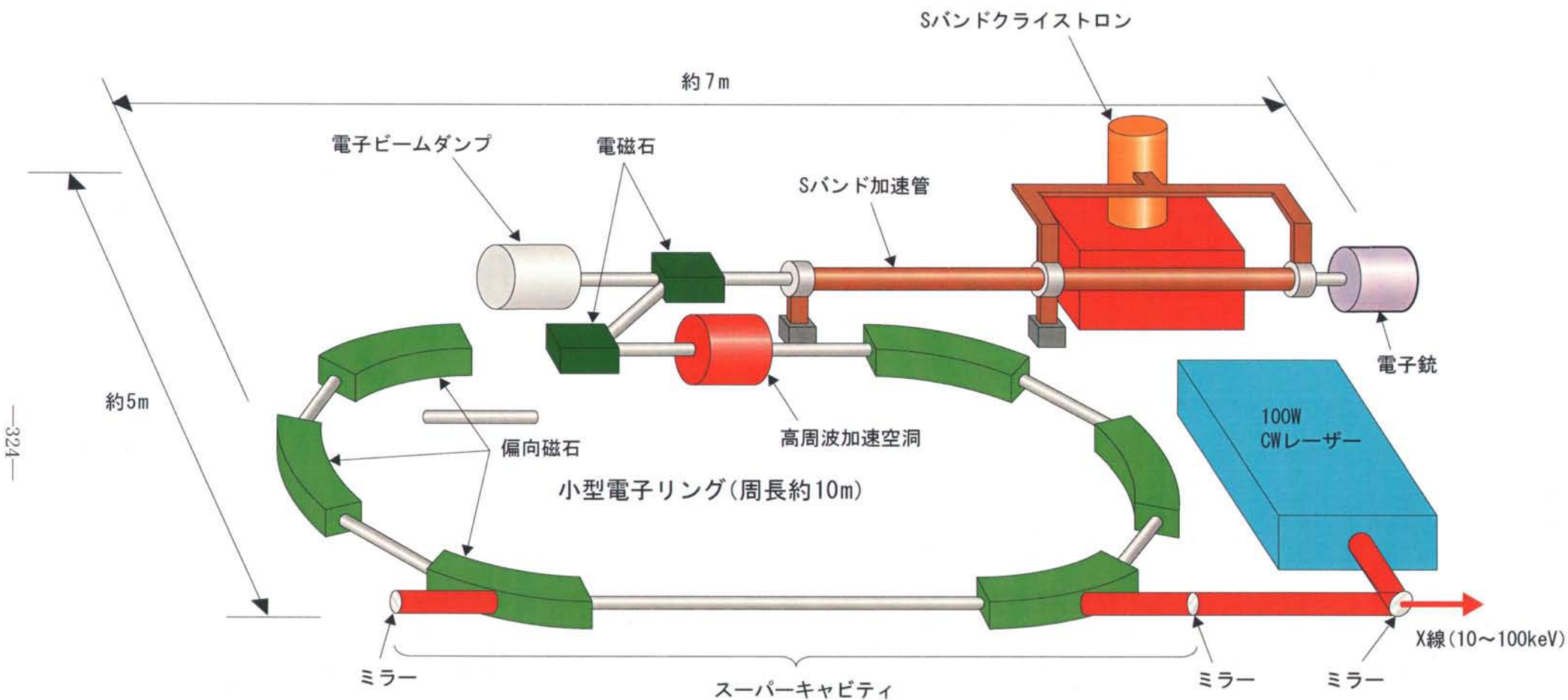
図—Ⅶ—5—1 小型陽子・重イオンシンクロトロン

[加藤 義章(日本原子力研究所)、野田 章(京都大学)、遠藤 有聲(高エネルギー加速器研究機構)提案]



図—Ⅶ—5—2 大強度短パルス(硬X線)放射光源

[上坂 充(東京大学)、浦川 順治(高エネルギー加速器研究機構)提案]

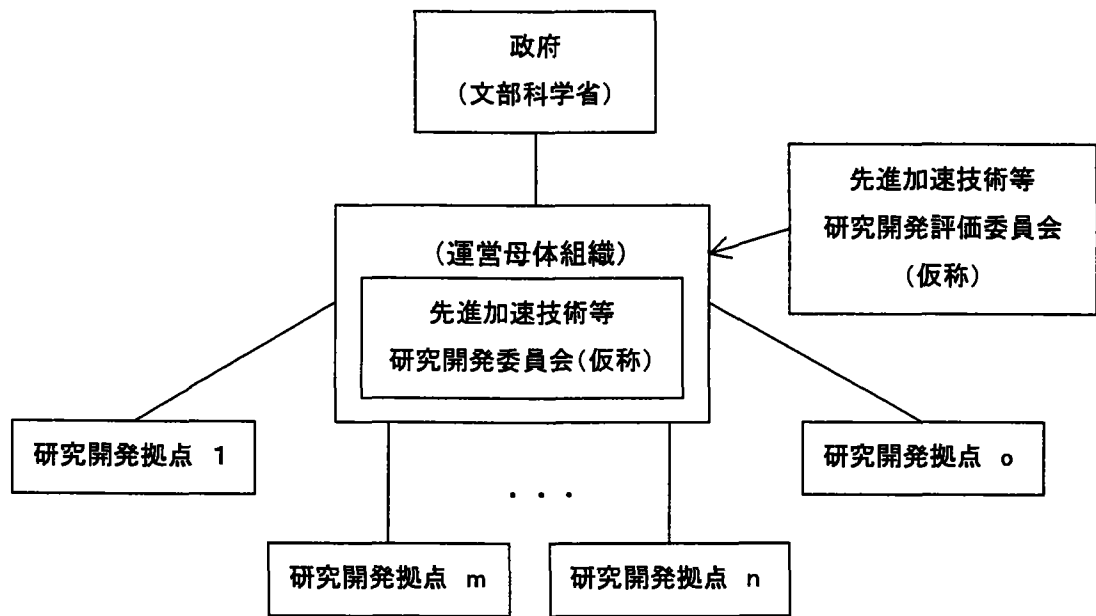


図—Ⅶ—5—3 高フラックス(硬X線)放射光源

[上坂 充(東京大学)、浦川 順治(高エネルギー加速器研究機構)提案]

実証機研究開発体制

・運営母体となる組織を軸に、主導的研究者の所属する多数の研究機関が柔軟に参加でき、必要とされる(最先端のものを含めたあらゆる)知見や技術を生かすことができる体制（以下の、[多研究機関参加・研究開発委員会主導方式]など）で進めること



基礎研究との連携

・以下の先進加速技術などの基礎研究を連携して進めること

- 高周波極限加速技術
高周波極限（Wバンドなどによる）電子加速
- 非高周波高勾配加速技術による電子加速
ビーム励起型プラズマ加速
レーザー励起型プラズマ加速
逆チェレンコフレーザー加速
直交場加速
- 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速
レーザー励起型プラズマ加速（陽子）
直交場加速（陽子・重イオン）

研究開発予算

・先進加速技術研究開発予算を年間 10 数億円程度(米国並み)に増額してゆくこと

謝 辞

本調査の実施にあたっては、その方針の検討、加速器科学各分野の先端状況の把握、関連する調査票の作成、調査結果の分析等につき、ご審議をいただいた動向調査委員会の委員を始めとして、600 名を超える加速器ユーザーや加速器研究者の方々のご協力をいただきました。ここにこれらの方々に厚くお礼申し上げます。

添付資料 I

先端科学技術動向調査委員会(加速器科学)委員および活動

1 構成員

本委員会の構成員は以下のとおりである。

委員長 平尾 泰男 放射線医学総合研究所 顧問

(以下、委員については50音順；肩書については平成12年5月時点)

委 員 上坂 充 東京大学 大学院工学系研究科 原子力工学研究施設 教授

〃 遠藤 一太 広島大学 大学院先端物質科学研究科 教授

〃 小方 厚 広島大学 大学院先端物質科学研究科 教授

〃 片山 武司 東京大学 大学院理学系研究科 原子核科学研究センター 教授

〃 北川 米喜 大阪大学 レーザー核融合研究センター 助教授

〃 熊谷 教孝 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門長

〃 熊田 雅之 放射線医学総合研究所 主任研究官

〃 小山 和義 工業技術院 電子技術総合研究所 主任研究官

〃 佐藤 勇 日本大学 原子力研究所 教授

〃 佐藤 健次 大阪大学 核物理研究センター 教授

〃 竹田 誠之 文部省 高エネルギー加速器研究機構 助教授

〃 中島 一久 文部省 高エネルギー加速器研究機構 助教授

〃 中村 一隆 東京工業大学 応用セラミックス研究所 助教授

〃 西田 靖 宇都宮大学 大学院工学研究科 教授

〃 野田 章 京都大学 化学研究所 原子核科学研究施設 教授

〃 水本 元治 日本原子力研究所 東海研究所 中性子科学研究センター
陽子加速器研究室長 (主任研究員)

〃 矢野 安重 理化学研究所 加速器基盤研究部長

2 委員会活動

本委員会は平成10年1月に当研究所に設置され、加速器科学の先端動向調査に関して9回の委員会での検討を実施した。その活動を以下に紹介する。

第1回 平成10年1月31日

- ・先端科学技術動向調査の目的、スケジュール等について

先端科学技術動向調査(加速器科学)報告書骨子(案)

日本全体としての加速器科学(政府)予算把握調査

先進小型加速器の実現時期予測調査

加速器科学分野別動向報告を各委員に分担

(素粒子物理学、原子核物理学、エネルギー科学、物質科学、生命科学、医療利用、産業利用)
先進型加速器の研究開発動向および技術開発課題関連の報告を各委員に依頼

第2回 平成 10 年2月 24 日

- ・ 加速器科学の研究分野毎の動向と課題
 - 素粒子物理学
 - 物質・材料科学
 - 生命科学、医療利用
- ・ 高周波加速器に関する研究開発状況
 - 電子線形加速器
 - 大強度加速器（陽子、電子）
- ・ 先進型加速器の研究開発動向および技術開発課題
 - 新しい粒子加速原理と研究進捗状況
(レーザー・プラズマ電子加速、電子リング（陽子・重イオン）加速等)

加速器科学の政府関連予算の概略把握調査(個別機関への要請)(平成 10 年4月～5月)
→ 年間約 730 億円(平成9年度)

第3回 平成 10 年6月5日

- ・ 先進型加速器の研究開発動向および技術開発課題
 - 電子リング加速器の研究状況（川崎温埼玉大学教授講演）
- ・ 高周波加速器に関する研究開発状況
 - 常伝導サイクロトロン加速器の開発課題
- ・ ビーム冷却（効率良くビームをターゲットに当てるために必要なビームの高品質化）
 - 放射冷却、確率（ストカスティック）冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却（実証化済み）
 - エネルギー損失（アイオニゼーション）冷却（研究中）

第4回 平成 10 年7月 24 日

- ・ 加速器科学の研究分野毎の研究動向と課題
 - 物質・材料科学
 - 原子核物理学（谷畑勇夫理化学研究所主任研究員招聘報告）
- ・ 先進小型加速器等の研究開発動向及び技術開発課題
 - 直交場加速器、レーザー・プラズマ陽子加速器、レーザーアンジュレータ小型放射光装置
- ・ 小型加速器等の開発予測調査（調査票の審議；小型加速器のサイズ、性能の目安を決める）
- ・ 加速器ビームに関するニーズ等調査（計画の概要紹介）

第5回 平成 10 年 9 月 18 日

- ・ 加速器科学の研究分野毎の研究動向と課題
素粒子物理学の展望と将来の高エネルギー加速器
(久野良孝 K E K素粒子原子核研究所 助教授招聘報告)
エネルギー科学 (消滅処理及び Rubbia のエネルギー増幅装置)
- ・ 小型加速器等開発予測調査 (調査票案の審議)

下記調査票の別添(水色資料参照)
非高周波高勾配加速器技術等による小型加速器等の提案のまとめ(試案)(平成 10 年 11 月)

ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査
(平成 10 年 11 月上旬～平成 11 年1月中旬)
(小型加速器等の開発時期等を加速器研究所に問う)

ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査(海外(主に米国))
(平成 11 年1月下旬～平成 11 年2月下旬)

第6回 平成 11 年3月9日

- ・ ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査結果
- ・ 加速器ビームに関するニーズ等調査について (調査票設計方針審議)
- ・ アメリカにおける加速器科学の萌芽的研究推進 (DOE の方式) について

海外調査(平成 11 年3月 21 日～平成 11 年3月 31 日)(当研究所員(瀬谷)のみ)

- ・ 米国の加速器施設の訪問と先進加速技術研究者との意見交換
- ・ 米国 DOE、NSF での加速器科学予算と先進加速技術研究予算のヒアリング調査

－ 調査資料の発行 －
調査資料－61 ブレークスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査結果(1999 年5月)
(小型加速器等の開発予測時期等)

第7回 平成 11 年8月 26 日

- ・ 加速器ビームニーズ等に関する調査 (調査票最終案) 審議
- ・ 高周波加速小型陽子加速器の最先端
招聘報告 1. ・ 小型陽子サイクロトロンについて
(住友重機 (株)、機械事業本部 量子機器事業センター 技術部長 斎藤 肇氏)

招聘報告 2. ・小型陽子シンクロトロン

(高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授 遠藤 有聲氏)

- ・ブレイクスルー技術による小型加速器等に関する開発予測調査結果
- ・日本における萌芽的加速器研究運営への参考情報（上坂委員から）
- アメリカにおけるNational Partnership, Virtual Lab. -

加速器ビームニーズ等に関する調査（平成 11 年9月下旬～平成 12 年1月中旬）
（加速器ビームユーザーに利用の現状及び提案されている小型加速器へのニーズ等を問う）

第8回 平成 12 年2月 28 日

- ・加速器ビームニーズ等に関する調査結果（第 1 次とりまとめ；提案されている小型加速器のニーズ高い）
- ・先端科学技術動向調査（加速器科学）報告書案
- ・核燃料サイクル開発機構大洗工学センター 量子工学試験施設（電子加速器施設）の紹介
- ・平成 13 年度概算要求のための先進加速技術等研究・開発計画案の作成依頼

第9回 平成 12 年5月 25 日(最終回)

- ・先端科学技術動向調査（加速器科学）報告書案（加速器ビームニーズ等に関する調査結果含む）
- ・先進小型加速器の開発計画について（報告）

日本の加速器科学関係予算調査

１ 調査方法、時期など

この調査は、日本の加速器科学予算を大まかに把握するため、国立大学、共同利用研究機関、特殊法人および国立研究所で加速器を有する機関を対象とし、昭和 63 年度から平成 9 年度までの期間について、調査票を用いて行ったものである。調査を実施した時期は、平成 10 年 4 月～平成 10 年 5 月である。

調査票では、加速器関連予算として

- ①加速器施設・設備建設費
- ②補修費
- ③運転経費
- ④加速器利用経常研究費
- ⑤加速器研究者人件費
- ⑥その他

の項目を提示して回答を求めたが、①加速器施設・設備建設費、②補修費および③運転経費については分離が困難であるとの回答や加速器研究者の範囲も明確にすることが難しいなどの回答があった。これは、各研究機関において加速器科学研究に関する調査は過去に例がほとんどなく、加速器関連予算としてどのような項目をどこまで計上するかについて、調査実施側として統一された基準などを示すことが困難であったことなどによるものである。また、加速器を有する公立大学、私立大学、民間企業あるいは病院などについては、今般の調査の対象にしていないことから、この結果は、大まかな額を示しているものと考えられたい。

より詳細で正確な把握をするためには、対象範囲を拡大するとともに、各研究機関での項目計上に関しての統一基準について十分検討することが必要である。

２ 調査結果

(1)加速器関連予算総額推移

表－１～５に、各々調査した範囲の全体計、科学技術庁、文部省、通産省の関連機関（回答があった機関のみ）での推移および加速器施設・設備建設費、補修費、運転経費推移を示す。

表－１ 加速器関連予算合計推移

(単位：億円)

| | 昭和 63 年 | 平成 1 年 | 平成 2 年 | 平成 3 年 | 平成 4 年 | 平成 5 年 | 平成 6 年 | 平成 7 年 | 平成 8 年 | 平成 9 年 |
|--------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 科学技術庁計 | 99.55 | 150.78 | 173.80 | 202.00 | 256.99 | 335.54 | 216.07 | 407.15 | 291.75 | 314.19 |
| 文部省計 | 390.4 | 413.01 | 401.62 | 377.36 | 374.74 | 377.51 | 365.52 | 444.67 | 428.41 | 415.59 |
| 通産省計 | 1.55 | 1.66 | 1.68 | 1.59 | 1.59 | 1.93 | 1.63 | 1.55 | 2.46 | 1.43 |
| 合計 | 491.50 | 565.45 | 577.10 | 580.95 | 633.32 | 714.98 | 583.22 | 853.37 | 722.62 | 731.21 |

表－2 科学技術庁関係加速器関連予算推移

(単位：億円)

| | 昭和 63 年 | 平成 1 年 | 平成 2 年 | 平成 3 年 | 平成 4 年 | 平成 5 年 | 平成 6 年 | 平成 7 年 | 平成 8 年 | 平成 9 年 |
|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S P r i n g - 8 | 6.39 | 19.74 | 29.04 | 50.35 | 102.97 | 175.56 | 112.19 | 298.87 | 193.13 | 197.39 |
| 日本原子力研究所 | 39.04 | 66.54 | 65.87 | 66.48 | 54.41 | 38.61 | 34.31 | 28.61 | 28.97 | 46.05 |
| 理化学研究所 | 35.51 | 22.98 | 18.89 | 17.67 | 17.01 | 20.72 | 16.92 | 21.32 | 17.75 | 19.98 |
| 放射線医学総合 研究所 | 18.23 | 41.13 | 57.72 | 63.47 | 77.05 | 91.28 | 42.95 | 42.81 | 43.53 | 45.41 |
| 核燃料サイクル 開発機構 | 0 | 0 | 1.89 | 3.64 | 5.06 | 8.24 | 8.15 | 13.88 | 6.30 | 3.50 |
| 金属材料技術 研究所 | 0.38 | 0.39 | 0.39 | 0.39 | 0.49 | 1.13 | 1.55 | 1.66 | 2.07 | 1.86 |
| 科学技術庁計 | 99.55 | 150.78 | 173.80 | 202.00 | 256.99 | 335.54 | 216.07 | 407.15 | 291.75 | 314.19 |

表－3 文部省関係加速器関連予算推移

(単位：億円)

| | 昭和 63 年 | 平成 1 年 | 平成 2 年 | 平成 3 年 | 平成 4 年 | 平成 5 年 | 平成 6 年 | 平成 7 年 | 平成 8 年 | 平成 9 年 |
|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 北海道大学 | 0.30 | 0.30 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.12 | 0.13 | 0 | 0 | 0 |
| 東北大学 | 6.87 | 7.01 | 6.98 | 7.27 | 7.21 | 7.32 | 7.39 | 10.73 | 9.66 | 7.32 |
| 筑波大学 | 1.32 | 1.31 | 1.31 | 1.68 | 1.94 | 1.74 | 1.33 | 1.35 | 1.28 | 1.31 |
| 群馬大学 | 0.72 | 0.72 | 0.70 | 0.74 | 0.73 | 0.55 | 0.37 | 0.37 | 4.25 | 0.52 |
| 東京大学 | 23.95 | 25.93 | 25.59 | 25.48 | 27.02 | 28.27 | 28.88 | 28.71 | 27.03 | 7.66 |
| 名古屋大学 | 0.68 | 0.69 | 0.75 | 0.76 | 0.78 | 0.79 | 0.74 | 0.75 | 0.76 | 0.81 |
| 京都大学 | 6.59 | 6.37 | 4.28 | 4.32 | 4.56 | 5.36 | 5.23 | 5.42 | 5.42 | 5.41 |
| 大阪大学 | 20.52 | 35.28 | 33.89 | 19.41 | 19.04 | 19.37 | 20.59 | 22.56 | 19.32 | 19.43 |
| 広島大学 | 0.05 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 19.70 | 9.74 |
| 九州大学 | 1.38 | 1.37 | 1.63 | 1.45 | 2.15 | 2.82 | 1.52 | 1.56 | 1.76 | 1.73 |
| 高エネルギー 加速器研究機構 | 318.31 | 324.86 | 316.76 | 307.16 | 302.17 | 302.27 | 290.39 | 364.28 | 330.36 | 352.81 |
| 岡崎国立共同 研究機構 | 9.71 | 9.11 | 9.48 | 8.82 | 8.87 | 8.83 | 8.90 | 8.90 | 8.87 | 8.85 |
| 文部省計 | 390.40 | 413.01 | 401.62 | 377.36 | 374.74 | 377.51 | 365.52 | 444.67 | 428.41 | 415.59 |

表－４ 通産省関係加速器関連予算推移

(単位：億円)

| | 昭和 63 年 | 平成 1 年 | 平成 2 年 | 平成 3 年 | 平成 4 年 | 平成 5 年 | 平成 6 年 | 平成 7 年 | 平成 8 年 | 平成 9 年 |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 電子技術総合 研究所 | 1.55 | 1.66 | 1.68 | 1.59 | 1.59 | 1.93 | 1.63 | 1.55 | 2.46 | 1.43 |
| 通産省計 | 1.55 | 1.66 | 1.68 | 1.59 | 1.59 | 1.93 | 1.63 | 1.55 | 2.46 | 1.43 |

表－５ 加速器施設・設備建設費、補修費、運転経費推移

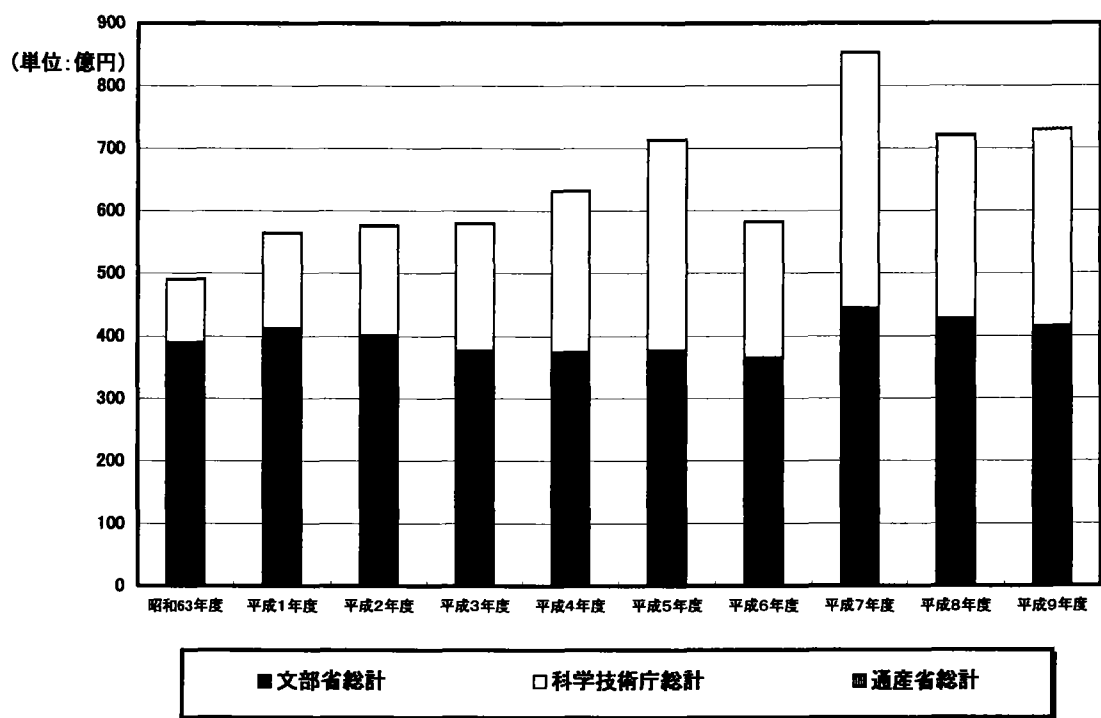
(単位：億円)

| | 昭和 63 年 | 平成 1 年 | 平成 2 年 | 平成 3 年 | 平成 4 年 | 平成 5 年 | 平成 6 年 | 平成 7 年 | 平成 8 年 | 平成 9 年 |
|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 文部省建設 ・運転計 | 249.81 | 256.16 | 243.38 | 240.33 | 231.61 | 235.16 | 206.10 | 265.47 | 237.99 | 215.67 |
| 科学技術庁建設 ・運転計 | 83.77 | 129.23 | 150.71 | 178.06 | 229.00 | 306.81 | 179.71 | 371.92 | 256.79 | 264.39 |
| 通産省建設 ・運転計 | 0.45 | 0.46 | 0.45 | 0.45 | 0.43 | 0.69 | 0.37 | 0.37 | 1.32 | 0.37 |
| 全体建設・運転計 | 334.03 | 385.85 | 394.54 | 418.84 | 461.04 | 542.66 | 386.18 | 637.76 | 496.10 | 480.43 |
| 加速器関連全体計 | 491.50 | 565.45 | 577.10 | 580.95 | 633.32 | 714.98 | 583.22 | 853.37 | 722.62 | 731.21 |
| 建設・運転の割合 | 0.6796 | 0.6824 | 0.6837 | 0.7210 | 0.7280 | 0.7590 | 0.6643 | 0.7473 | 0.6865 | 0.6570 |

３ 日本の加速器科学の予算規模

我が国の加速器科学を年間の研究開発予算規模で見してみる。昭和 63 年度から平成 9 年度までの 10 年間の日本の国立大学、国立研究機関及び特殊法人の加速器関連予算を調べると、図－１に示すように、昭和 63 年度において約 490 億円であったものが、平成 9 年度で約 730 億円の規模となっている（年平均伸び率 4.0％）。なお、この調査は、加速器科学の全体予算規模を大まかなに把握するためのものであり、公立大学、私立大学、民間の企業あるいは小型電子加速器が設置されている病院については調べていないため、実際にはこれ以上の額となっている。平成 9 年度において国の一般会計から支出される科学技術予算では、核融合研究（同約 375 億円）の約 2 倍の規模で、かつ、海洋科学（同約 757 億円）と同程度になっている。ちなみに一般会計での原子力関係予算は加速器関連予算も含めて同約 2,033 億円であり、宇宙開発予算は同約 2,180 億円である（表－６参照）。

加速器関連予算を省庁別に見てみると図－２に示すように、文部省関係は調査期間の 10 年間ほぼ 400 億円程度であるのに対して、科学技術庁関係は昭和 63 年度では約 100 億円であったものが、SPRING-8 の建設とともに伸びてきて平成 9 年度では約 314 億円となっている。通産省関係は当該期間の 10 年間ほぼ 1.5 億円程度である。また、図－３に示す様に、加速器科学予算のうち



図一 加速器関連予算額推移(日本全体)

表一 科学技術関係経費(平成9年度)

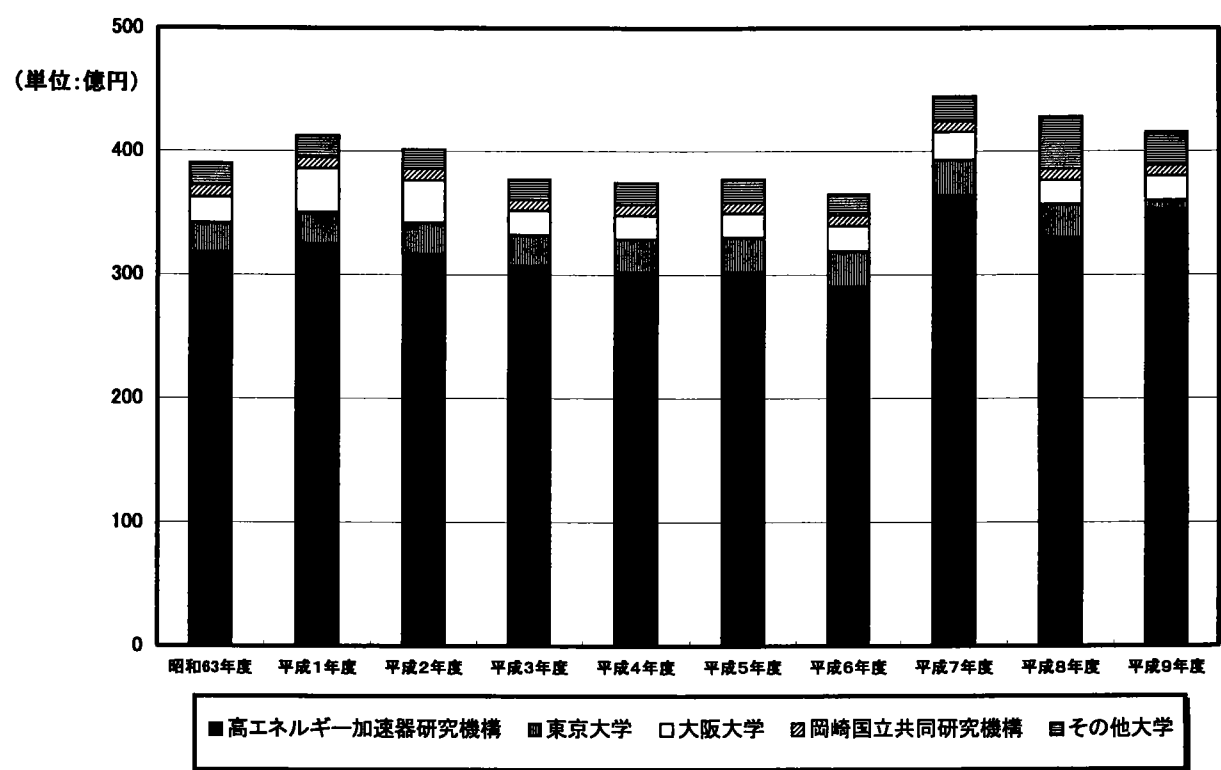
(単位：億円)

| | 政府総計 | 科学技術庁 | 文部省 |
|--------|------------------------|------------------------|---------|
| 宇宙開発関係 | 2,180 | 1,806 | 175 |
| 原子力関係 | (特会含む計 4,907) 2,033 | (特会含む計 3,547) 1,953 | (特会 35) |
| 核融合科学 | 374 | 193 | 181 |
| 地球科学 | | | |
| 地震調査研究 | 214 | 104 | 27 |
| 海洋科学 | 756 | 248 | 5 |
| 生命科学 | 1,681 | 331 | 248 |
| 加速器科学 | 731 | 314 | 416 |

加速器本体の建設・運転・保守にかかる費用は約 70 %を占めており、加速器科学予算のうち主要な部分は、加速器の建設・運転である。

加速器科学研究が特徴としてもつところは、純粋基礎研究から実利用までが密接に連携する研

究領域の広さである。もともと、加速器科学は素粒子物理学や原子核物理学（純粋基礎研究）と一体となり発展してきたものであり、そこから生み出される新たな知見や技術は、エネルギー、物質・材料科学、医療利用等、様々な分野で利用され発展してきている。素粒子物理学や原子核物理学の最先端研究における基礎理論の検証や高輝度で光子エネルギーフロンティアを目指す放射光発生に使われる加速器は一般的に非常に大型のものとなっており、加速器科学予算の大きな部分が加速器の建設などに使われている。



図－2(a)文部省関係加速器関連予算推移

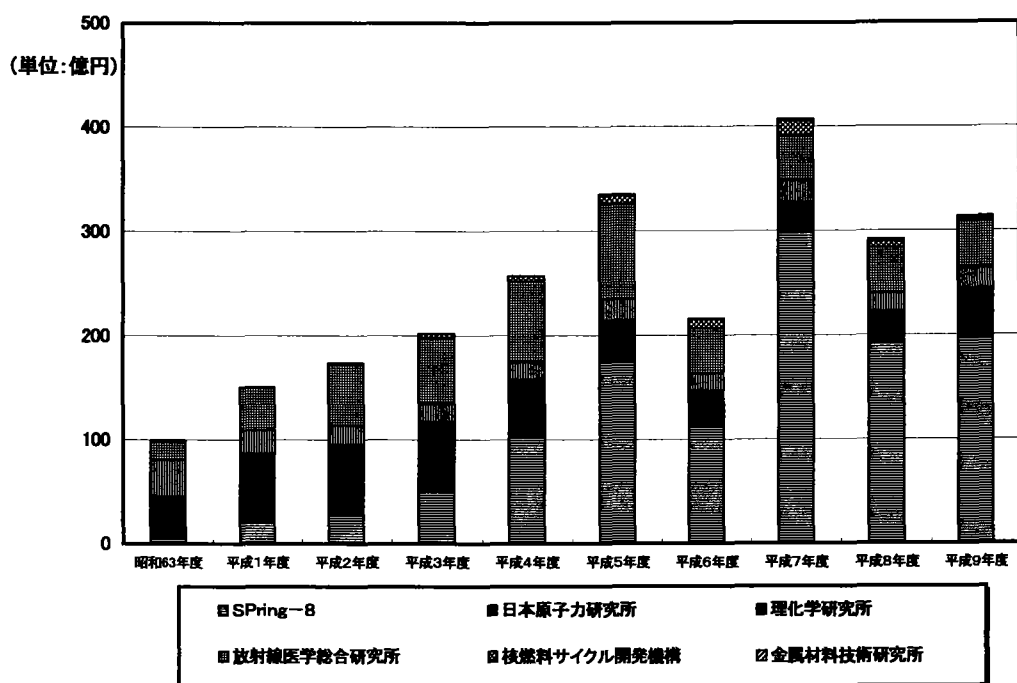


図-2(b) 科学技術庁関係加速器関連予算推移

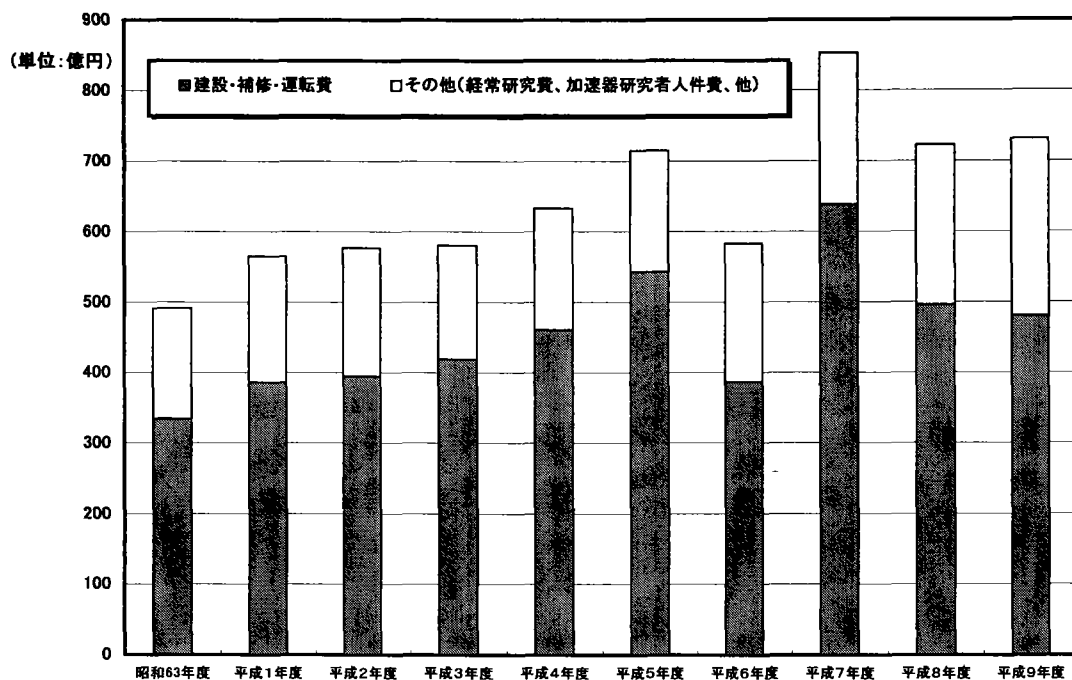


図-3. 加速器予算における建設・補修・運転費

添付資料 II

高エネルギー物理学、原子核物理学関係研究機関略語・加速器など

研究機関略語

CERN (欧州合同原子核研究機関) : Centre Europeen pour la Recherche Nucleaire (スイス)
BNL (ブルックヘブン国立研究所) : Brookhaven National Laboratory (米国)
CU (コーネル大学) : Cornell University (米国)
FNAL (フェルミ国立加速器研究所) : Fermi National Accelerator Laboratory = Fermilab (米国)
LBL (ローレンス・バークレイ研究所) : Lawrence Berkeley national Laboratory (米国)
LANL (ロスアラモス国立研究所) : Los Alamos National Laboratory (米国)
ORNL (オークリッジ国立研究所) : Oak Ridge National Laboratory (米国)
SLAC (スタンフォード線形加速器センター) : Stanford Linear Accelerator Center (米国)
SSCL (SSC研究所) : Superconducting Super Collider Laboratory (米国)
TJNAF (トーマス・ジェファークソン国立加速器研究所) : Thomas Jefferson National Accelerator Facility (CEBAF : Continuous Electron Beam Accelerator Facility) (米国)
BINP (ブドカー原子核物理研究所) : Budker Institute for Nuclear Physics (ロシア)
IHEP : Institute for High Energy Physics (ロシア)
ITEP : Institute of Theoretical and Experimental Physics (ロシア)
JINR (ロシア合同原子核研究所) : Joint Institute for Nuclear Research (ロシア)
GANIL (国立重イオン加速器研究所) : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (フランス)
LURE : Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (フランス)
DESY (ドイツ電子シンクロトロン研究所) : stiftung Deutsches Elektronen-Synchrotron (ドイツ)
GSI (重イオン科学研究所) : Gesellschaft für Schwerionenforschung (ドイツ)
RAL (ラザフォード・アップルトン研究所) : Rutherford Appleton Laboratory (イギリス)
TRIUMF (3大学連合中間子施設) : TRI-University Meson Facility (カナダ)
PSI (ポール・シェラー研究所) : Paul Sherrer Institute (スイス)

研究機関と加速器

.....CERN(欧州合同原子核研究機関;スイス).....

CPS : CERN Proton Synchrotron

平均直径約 200m の陽子シンクロトロン（世界で最初の強集束シンクロトロン）で、1959 年より稼働。陽子を 28GeV まで加速することができ、SPS の入射器としても使われる。

SPS : Super Proton Synchrotron

平均直径約 2,200m、周長約 6.9km の陽子シンクロトロンで、陽子を 450GeV まで加速することができる。この陽子シンクロトロンは、陽子・反陽子衝突器としても使え（この場合の名称は SPPS）、1983 年（ビーム冷却技術を使った）陽子・反陽子衝突型実験で電弱理論が要求する W ボソンおよび Z ボソンを発見する。なお、衝突型シンクロトロンにおいては、1 つのリング内を粒子・反粒子が正反対方向に走らせるものとなっており、衝突をさせる時点で各々のビームの軌道を修正し、測定器内に導いて衝突させるものが一般的である。

LEP : Large Electron Positron collider

電子・陽電子（シンクロトロン）衝突器（平均直径約 8,490m、周長約 27km；大きさ世界一、1989 年運転開始）で、重心系で約 110GeV (55GeV + 55GeV) の衝突エネルギーを達成。

LEP II : Large Electron Positron collider phase II

衝突エネルギーを更に高くできるよう LEP を改造した（1995 年運転開始）もので、重心系で約 200GeV (100GeV + 100GeV) の衝突エネルギーを達成。W ボソン、Z ボソンファクトリーとして、精密な実験データを取得。（最近、ヒッグス粒子らしき粒子を観測したとの伝聞あり。）

LHC : Large Hadron Collider

LEP II のトンネル内に建設中の陽子・陽子（シンクロトロン）衝突器で、重心系エネルギーで 14TeV (7TeV + 7TeV) の衝突実験をめざす（2005 年完成予定）。重イオン・重イオン衝突実験も行われる予定。

CLIC : Compact Linear Collider

検討中の、重心系で 500GeV を超える大型電子・陽電子衝突型線形加速器。加速勾配を高めるため、2 ビーム加速による K バンド加速の採用を検討している。

.....SLAC(スタンフォード線形加速器センター;米国).....

スタンフォード線形加速器 (SLA : Stanford Linear Accelerator)

長さ 3,050m の大型線形加速器で、1966 年に運転開始、1967 年 20GeV を達成。この加速器による電子・陽子散乱実験の結果が解析され（1968 年～1969 年）、陽子を構成するクォークの存在の

証拠が発見される。

SPEAR : Stanford Positron Electron Asymmetric Ring)

直径約 80m の電子・陽電子衝突型リングで、重心系で 8GeV (4GeV + 4GeV) の衝突実験が可能。1974 年には、 ψ 粒子 (チャームクォーク・反チャームクォークの複合粒子) を発見 (BNL の陽子シンクロトロン (AGS) での実験と同時に発表)。また、1975 年には、最初の第 3 世代のレプトン、タウ (τ) 粒子を発見。

PEP : Positron Electron colliding beam storage ring Project

大型線形加速器 (SLA) を入射器とする周長約 2,200m の電子・陽電子衝突型リングで、重心系で約 30GeV (15GeV + 15GeV) の衝突エネルギーを達成 (1980 年)。

SLC : Stanford Linear Collider

大型線形加速器 (SLA) の加速性能を向上させたものと衝突用アーク部 (周長約 2km) から構成される電子・陽電子衝突型加速器で、重心系で約 90GeV (45GeV + 45GeV) の衝突エネルギーを達成 (1989 年)

PEP II : Positron Electron colliding beam storage ring Project phase II

PEP のトンネル内に設置された電子 (9.0GeV)・陽電子 (3.1GeV) 非対称エネルギー衝突型加速器で、B 中間子を大量に発生させる B ファクトリー (1999 年運転開始)。

NLC : Next Linear Collider

計画中の、重心系で 500GeV を超える大型電子・陽電子衝突型線形加速器。高い加速勾配をめざすため、Xバンドを加速高周波に使用することを検討している。

.....FNAL(フェルミ国立加速器研究所;米国).....

Main Ring (陽子シンクロトロン)

平均直径約 2,000m、周長約 6.3km の陽子シンクロトロンで、1971 年に運転が開始され、1972 年に 400GeV の陽子加速を達成。1977 年に陽子・固定標的衝突実験でボトムクォークを発見。1983 年からは、下の Tevatron の入射器として使われた。1997 年運転終了。

Tevatron

上記の Main Ring (平均直径約 2,000m、周長約 6.3km) の直下に超伝導電磁石を用いたシンクロトロンを付加した加速器 (1983 年運転開始)。重心系で約 1.8TeV (900GeV + 900GeV) の衝突エネルギーを達成 (1986 年)。1995 年トップクォークを発見。

Main Injector

Tevatron 用の新しい入射器となる陽子シンクロトロン（周長 3,320m）で、最大 150GeV（通常は 120GeV）までの加速が可能。1999 年完成。ビーム強度をこれまでの 10 倍に高めている。

NuMI (Neutrinos at the Main Injector) Project

Tevatron 用の Main Injector の陽子ビームを使いニュートリノを発生させ、約 730km 離れた地点（Minnesota 州 Soudan）で、ニュートリノ振動現象を測定するプロジェクト（現在、建設中）。

VLHC : Very Large Hadron Collider

CERN の LHC 後のエネルギーフロンティア加速器として、構想が検討されている超大型陽子・陽子（シンクロトロン）衝突器（重心系エネルギー 100TeV、周長 100km 以上）。

.....BNL(ブルックヘブン国立研究所;米国).....

AGS : Alternating Gradient Synchrotron

陽子シンクロトロン（平均直径 257m）で、陽子を 30GeV まで加速できる。1974 年、陽子・固定標的衝突実験により、J/ψ 粒子（チャームクォーク・反チャームクォークの複合粒子）を発見（SLAC の SPREAR での実験と同時に発表）。

RHIC : Relativistic Heavy Ion Collider

重イオン・重イオン衝突型シンクロトロン（平均直径 1,220m、周長約 3.8km）で、100GeV/amu 程度の加速エネルギーで重イオンどうしを衝突させクォーク・グルオンプラズマを研究することを主目的としている。既に実験を開始している（2000 年開始）。

.....Cornell University(コーネル大学;米国).....

CESR III : Cornell Electron-positron Storage Ring Phase III

電子・陽電子貯蔵リング CESR（周長 768m）を用いた電子（5.3GeV）・陽電子（5.3GeV）対称エネルギー衝突により、B 中間子を発生させる。

.....SSCL(SSC研究所;米国).....

SSC : Superconducting Super Collider

米国の陽子・陽子（シンクロトロン）衝突器（平均直径約 27.6km、周長約 87km）計画で、重心系エネルギーで 40TeV（20TeV + 20TeV）の実験をめざすものとして、1989 年に建設を開始したが 1993 年に中止された。

.....KEK(高エネルギー加速器研究機構).....

KEK-PS : KEK Proton Synchrotron

平均直径約 108m の陽子シンクロトロンで、陽子を 12GeV まで加速できる。1976 年より稼働。なお、この陽子シンクロトロンの前段にあるブースターシンクロトロン（直径約 10m、500MeV）は、中間子や中性子ファクトリーあるいは筑波大学陽子線医学利用研究センターでの治療に使われてきている。

電子・陽電子線形加速器

長さ 415m の電子線形加速器で、当初 TRISTAN および PF Storage Ring 用の 2.5GeV 電子ビームを供給する入射器として建設された（1982 年稼働開始）。その後、KEKB へ電子・陽電子ビームを供給するため、グレードアップされ、エネルギー 8.0GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を B ファクトリ (KEKB) リング加速器に入射し、エネルギー 2.5GeV の電子をフォトンファクトリ (PF および PF-AR) に入射している。

TRISTAN : Transposable Ring Intersecting Storage Accelerator in Nippon

高エネルギー物理学研究所（1997 年、高エネルギー加速器研究機構に改組）の電子・陽電子（シンクロトロン）衝突器（平均直径約 960m；周長 3,018m：1986 年運転開始、1995 年終了）で、重心系で約 65GeV (32.5GeV + 32.5GeV) の衝突エネルギーを達成（1987 年）

PF-AR : Photon Factory - Advanced Ring

当初、TRISTAN のブースターシンクロトロン（TRISTAN AR : Accumulator Ring、周長 377m）として建設されたが、TRISTAN の終了にともないシンクロトロン放射光施設として利用されている。エネルギー 2.5GeV の電子を線形加速器より入射させ、6.5GeV まで加速し蓄積する。

KEKB (B ファクトリー)

TRISTAN に使用したリング内に設置された電子 (8.0GeV) ・陽電子 (3.5GeV) 非対称エネルギー衝突器で、B 中間子を大量に発生させる B ファクトリー（1999 年運転開始）。

長基線ニュートリノ振動実験 (K2K)

陽子シンクロトロン KEK-PS (12GeV) の陽子ビームを使いニュートリノを発生させ、約 250km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデで、ニュートリノ振動現象を測定する（1999 年開始）。

大型ハドロン計画 (JHP : Japan Hadron Project)

東京大学原子核研究所を中心に構想され、高エネルギー加速器研究機構に引き継がれた加速器計画で、3 GeV 陽子シンクロトロンおよび 50GeV 陽子シンクロトロンなどから構成されるハドロン研究用の大強度の陽子加速器を建設して、原子核物理を含む広範な学際領域の研究を推進しようとするもの。研究の主な柱は 4 つのアレナ（K、N、E、M：アレナはギリシャ語の闘技場の意味）から成立っている。

- Kアレナ KはK中間子。K中間子を用いて、ハイパー核や稀崩壊の研究を行う。
- Nアレナ Nは中性子。強力なパルス中性子により、広範囲の物質・生命科学の研究を行う。
- Eアレナ Eはエキゾチック核。自然には存在しない不安定核種を生成し、これを研究する。
- Mアレナ Mはミュー粒子とメソン（中間子）。これらの粒子を用いて核物理、物性物理などを研究する。

なお、この加速器計画は、日本原子力研究所の中性子科学研究用の大強度陽子線形加速器計画と統合され、「大強度陽子加速器施設計画」と呼ばれている。

JLC : Japan Linear Collider

検討中の、重心系で 500GeV を超える大型電子・陽電子衝突型線形加速器。高い加速勾配をめざすため、Xバンドを加速高周波に使用することが検討されている。

.....DESY(ドイツ電子シンクロトロン研究所;ドイツ).....

DESY II : Deutsche Elektronen-Synchrotron II

周長 293m の電子・陽電子シンクロトロンで、1987 年運転開始。電子、陽電子を 8GeV まで加速でき、下の DORIS III および PETRA II への入射器として使用されている。DESY II が収容されるトンネルは、下の DESY III と共用されている。

DESY III : Deutsche Elektronen-Synchrotron III

周長 317m の陽子シンクロトロンで、1988 年運転開始。陽子を 7.5GeV まで加速し、下の PETRA II への入射器として使用されている。

DORIS : Doppel-Ring-Speichers : Double Ring Storage facility (phase II、phase III を DORIS II、III という)

周長 289m の電子・陽電子蓄積シンクロトロンリングで、DESY で加速された電子、陽電子を各々別のリング (Double Ring の所以) で周回・蓄積させる。1974 年運転開始で重心系で 10GeV (5GeV+5GeV) での衝突実験が可能。高エネルギー実験は 1980 年終了。その後改造 (1980-1981 年 single ring に改造 (放射光用、phase II)、1990-1991 年更に挿入光源による高輝度化改造 (phase III)) され、現在はシンクロトロン放射光源として利用されている。

PETRA : Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage : Positron-Electron Tandem Ring Accelerator (phase II を PETRA II という)

直径約 730m (周長 2,304m) の電子・陽電子衝突型シンクロトロンで、1978 年運転開始 (入射器は DESY)。重心系で 28GeV (14GeV+14GeV) の電子・陽電子衝突が可能で、1979 年には、衝突において放射されるグルーオンの強い証拠を発見。1986 年に高エネルギー実験は終了。その後陽子も加速できるように改造 (1990 年 (phase II)) され、下の HERA の入射器として使われている。陽子については、40GeV までの加速が可能。

HERA : Hadron-Elektron-Ring-Anlage : Hadron Electron Ring Accelerator

DESYにおいて、西欧6カ国と共同で建設された(1992年より実験開始)電子(陽電子)・陽子衝突型シンクロトロン(直径約2km、周長約6.3km)で、30GeV電子(陽電子)+820GeV陽子の衝突実験を進めている。なお、HERAの前段加速器システムは以下のとおり。

電子(陽電子):線形加速器(200MeV) → DESY II (8GeV) → PETRA II (12GeV) → HERA (40GeV)

陽子:線形加速器(RFQ+Alvares×3)(50MeV) → DESY III (7.5GeV) → PETRA II (30GeV) → HERA (820GeV)

TESLA : Tera electron volt Energy Superconducting Linear Accelerator

DESYにおいて検討中の、重心系で500GeVを超える大型電子・陽電子衝突型線形加速器。総延長30kmで、超伝導加速空洞(Lバンド)を用いる線形加速器2基から成る。

.....LBL(ローレンス・バークレイ研究所;米国).....

Bevatron (Bevalac)

平均直径約40mの陽子・重イオン弱集束シンクロトロンで1954年より稼働し、陽子からウランに至るイオンを1GeV/n程度以上のエネルギーまで加速することができ、多数の新元素を発見するなど、原子核物理学研究をリードしてきたが、1992年閉鎖された。入射系として、重イオン線形加速器 Super-HILAC が組み合わされた(1972年)ものを Bevalac とよんでいる。

88" cyclotron

1961年より稼働しているSF (Sector-Focused ; 強集束)サイクロトロンで、陽子からウランまでのイオンを加速することができる。陽子からネオン原子核については、32MeV/核子のエネルギーまで加速できる。ローレンス・バークレイ研究所における原子核研究用重イオン加速器として Bevalac とともに活躍してきたが、Bevalac が1992年閉鎖された後は、同研究所において唯一の重イオン加速器である。

.....TJNAF(トーマス・ジェファソン国立加速器研究所;米国).....

CEBAF : Continuous Electron Beam Accelerator Facility

超伝導加速空洞を持った2つの並行する線形加速器(各々長さ約160m)がその端部を周回軌道(Arc)によりつなわれ、一方の線形加速器で加速した電子(一回の通過で400MeVのエネルギーを得る)を周回軌道により他方の線形加速器に入射させ、更に加速してゆくことを5回繰り返すことにより最終的に4GeVのエネルギーまで高めてゆく加速器システムであり、1994年に運転を開始した。共同利用研究施設であり、中間エネルギーの電子ビームが連続的に供給されQCD原子核物理研究に主として使われている。世界各国の原子核物理研究者が利用している。現在の最大加速エネルギーは5.5GeVで、数年後には12GeVまでのグレードアップが検討されている。

.....理化学研究所(RIKEN).....

リングサイクロトロン (Ring Cyclotron: AVF サイクロトロン的一种) (RRC=RIKEN RC)

4 基のセクターマグネット、2 基の加速用高周波共振器からなる強集束サイクロトロン (入射半径 0.89m、引き出し半径 3.56m、概略直径 12.6m、高さ 6m、総重量 2,100 トン) で、陽子を 210MeV (軽い重イオンを $540 \cdot Q^2/A$ MeV) まで加速できる。1986 年運転開始。入射器として、重イオン線形加速器 (1980 年完成) と AVF サイクロトロン (磁極径 1.7m、総重量 100 トンの強集束サイクロトロンで、 $k = 70\text{MeV}$ 、1989 年完成) がある。

R I ビームファクトリー計画

上記のリングサイクロトロンの後段に、2 基の超伝導リングサイクロトロン (SRC-4、SRC-6)、R I ビーム発生装置 (Big RIPS)、蓄積・冷却リング (ACR)、ブースターシンクロトロン (BSR) および二重蓄積リング (DSR) などを付加し、全元素にわたる R I ビーム (軽い重イオンで $1.4\text{GeV}/n$ 、ウランで $0.8\text{GeV}/n$ 程度の加速エネルギー) を利用した様々な実験を行う計画。

.....大阪大学核物理研究センター(RCNP).....

AVF サイクロトロン

磁極直径 2.3m、単一 180 度タイプのディー、総重量 400 トンの強集束サイクロトロンで、陽子を 85MeV (軽い重イオンを $140 \cdot Q^2/A$ MeV) まで加速できる。1974 年運転開始。下のリングサイクロトロンの入射器にもなっている。

リングサイクロトロン

6 基のセクターマグネット、3 基の主加速用高周波共振器と 1 基のフラットトップ用共振器からなる強集束サイクロトロン (入射半径 2m、引き出し半径 4m、総重量 2,200 トン) で、陽子を 400MeV (軽い重イオンを $400 \cdot Q^2/A$ MeV) まで加速できる。1991 年運転開始。

.....日本原子力研究所(JAERI).....

タンデムブースター

タンデム加速器で得られた重イオンのエネルギーを 2.5 倍から 4 倍に高めることができる超伝導線型加速装置。これにより核反応の範囲を鉄(Fe) (質量数 ~ 60) 周辺からビスマス(Bi) (質量数 ~ 210) 周辺まで拡大できる。

大強度陽子加速器施設 (High Intensity Proton Accelerators Facility) 計画

大強度の陽子ビームを 600MeV まで加速する大強度陽子線形加速器、更に 3 GeV まで加速する陽子シンクロトロンおよび 50GeV まで加速する陽子シンクロトロンから構成される。

(大強度陽子線形加速器)

長さ約 360m の線形加速器で、400MeV までは常伝導加速管、400-600MeV 間は超伝導加速管を用

いる。400MeV 陽子は 3 GeV 陽子シンクロトロンに入射され、600MeV の陽子は核種変換研究に用いられる。

(3 GeV 陽子シンクロトロン)

周長 313.5m のシンクロトロンで、400MeV で入射された陽子を 3 GeV まで加速する。平均ビーム電流は $333 \mu\text{A}$ 。

(50GeV 陽子シンクロトロン)

周長 1567.5m のシンクロトロンで、3 GeV で入射された陽子を 50GeV まで加速する。平均ビーム電流は $15 \mu\text{A}$ 。

この計画は、日本原子力研究所の大強度陽子加速器による核破砕中性子を用いた、放射性核種の消滅処理研究をはじめとする中性子科学研究を行う施設施設と、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の大型ハドロン施設計画とが統合されたもの。

……RAL(ラザフォード・アップルトン研究所;イギリス)……

ISIS :

平均直径約 52m の陽子シンクロトロンで、最大 800MeV まで加速でき、主に中性子・ミューオン発生用に使われている。1986 年稼働開始。この陽子シンクロトロンへの入射器は、長さ約 44m の線形加速器で、陽子を 70MeV まで加速する。理化学研究所との間で、ミューオン科学に関する共同研究が進行中である。[ISIS = 付近を流れるテムズ川の名前、またエジプトで死者を蘇生させる神の名前で、ラザフォード研究所の古い陽子シンクロトロン NIMROD を解体して、新しく建設した陽子シンクロトロンであることから命名した。]

……TRIUMF(3大学連合中間子施設;カナダ)……

リングサイクロトロン

6 基のセクターマグネット、4 基の加速用高周波共振器からなる強集束サイクロトロン (入射半径 25cm、引き出し半径 580-780cm (可変)、総重量 4,000 トン) で、H を入射させ 520MeV まで加速したのち炭素薄膜を通過させて電子を取り除き、陽子ビームを取り出す。1974 年運転開始。

……PSI(ポール・シェラー研究所;スイス)……

リングサイクロトロン

8 基のセクターマグネット、4 基の主加速用高周波共振器と 1 基のフラットトップ用共振器からなる強集束サイクロトロン (入射半径 2.1m、引き出し半径 4.5m、概略直径 9.2m、総重量 2,000 トン) で、陽子を 590MeV まで加速できる。1974 年運転開始。

.....LANL(ロスアラモス国立研究所;米国).....

LAMPF : Los Alamos Meson Physics Facility

全長 800m の陽子線形加速器で、陽子を 800MeV まで加速できる。1972 年より稼働。加速管の型として、100MeV までの加速は Drift Tube 型、100 - 800MeV 領域の加速は Side-coupled 型を採用。

.....GSI(重イオン科学研究所;ドイツ).....

UNILAC : Universal Linear Accelerator

3つの部分から構成される長さ 100m を超える重イオンライナックで、1976 年稼働開始。U で最大 15MeV/n まで加速できる。SIS の入射器にもなっている。

SIS : Schwerionen-Synchrotron (Synchrotron for Heavy Ions))

周長 216m の重イオンシンクロトロンで、1990 年に稼働開始。U で最大 1,000MeV/n まで、Ne で最大 2,000MeV/n まで加速できる。

ESR : Experimentier-Speicherring (Experimental Storage Ring)

周長 108m のレーストラック型重イオン蓄積リングで、1990 年に稼働開始。U で最大 560MeV/n まで、Ne で最大 830MeV/n までの蓄積ができる。電子ビーム冷却装置を有し、エミッタンスの小さい重イオンビームを供給できる。

参考資料 1

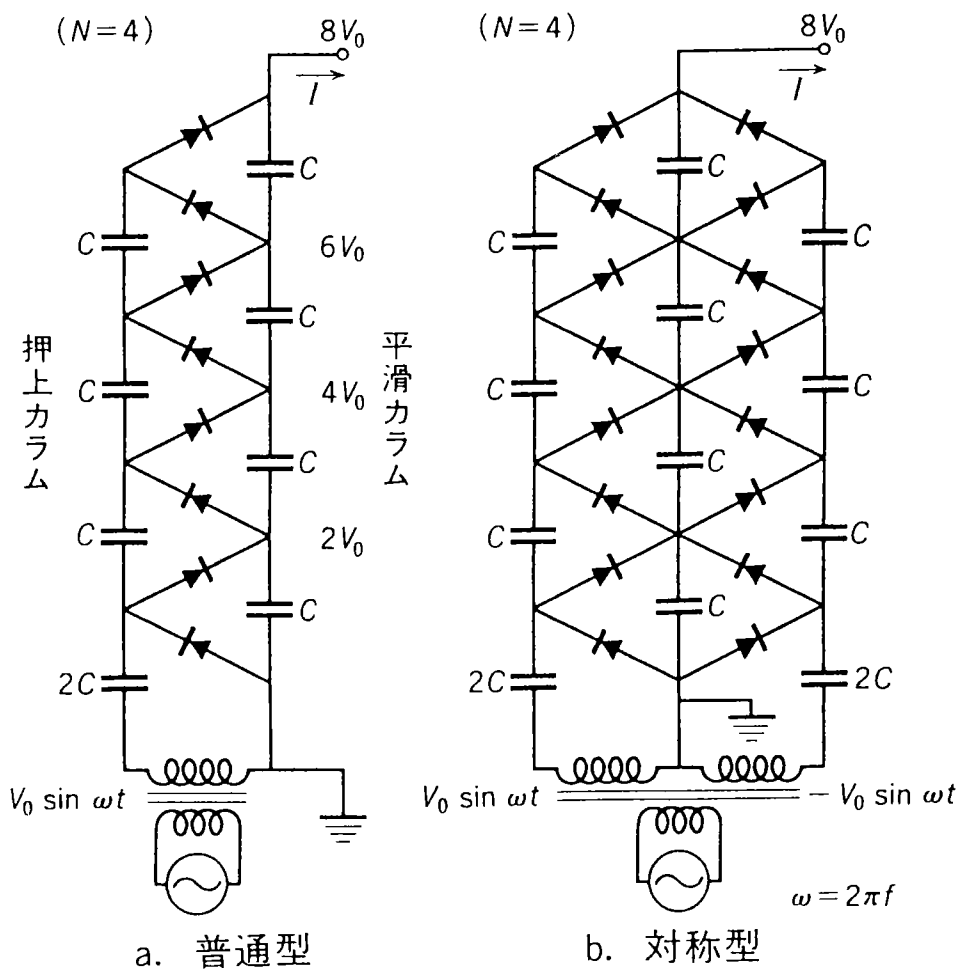
参考資料 1.

加速器の原理（物理学辞典（改訂版；培風館）より）

| | |
|------------------------|------|
| コッククロフトーワルトン型加速器 | 1 頁 |
| サイクロトロン | 2 頁 |
| シンクロトロン | 5 頁 |
| 線形加速器 | 6 頁 |
| バン・デ・グラーフ型加速器 | 11 頁 |
| ベータトロン | 12 頁 |
| マイクロトロン | 13 頁 |
| 誘導線形加速器 | 13 頁 |

コッククロフトーワルトン型加速器 (Cock-croft-Walton accelerator)

整流器とコンデンサーを組合せた倍電圧整流回路により交流電圧から直流高電圧を発生させ荷電粒子を加速する装置で、発明者の J. D. Cockcroft と E. T. S. Walton の名前にちなんで、こうよばれる。彼らは 1932 年、この装置を用いて 600kV の直流高電圧で陽子を加速して Li の標的にあてたとき、2 個の α 粒子が発生することを発見した。コッククロフトーワルトン型高電圧発生装置で、コンデンサー 2 個、整流器 2 個からなる倍電圧回路を N 段重ねた場合、変圧器の出力電圧を $V_0 \sin \omega t$ とすると理想的な出力電圧は $2NV_0$ となる (図 a)。出力電流をとれば、コンデンサー



の充放電によるリップル電圧が発生するとともに、 $2NV_0$ からの電圧降下が生じる。これらは押上カラムをもうひとつ追加して対象型 (図 b) とすることにより、表のように低減することができる。さらにパルスビーム負荷による瞬間的な電圧の低下を補償し、加速電圧を一定に保つため、パルス高電圧を付加的に印加するバウンサーとよばれる装置が用いられる。現在 500~800kV

| | 普通型 | 対称型 |
|----------------|---|---|
| 電圧降下 | $\frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{3} (2N^2 + 1)$ | $\frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{3} \left(\frac{N^2}{2} + 1 \right)$ |
| リップル (ピーク値) | $\frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{2} (N + 1)$ | $\frac{I}{fC} \cdot \frac{N}{2}$ |

I : 負荷電流, f : 交流の周波数, N : 段数

の Cockcroft-Walton 型加速器が、陽子やイオン線形加速器の前段加速器として使用されている。また Cockcroft-Walton 高電圧発生装置は比較的低い電圧での倍電圧整流から耐圧試験用の 2.5MV、200mA、加圧型ではイオン加速用の 4MV、5mA のものまで広く使用されている。

サイクロトロン (cyclotron)

荷電粒子を直流磁場中で回転運動させ、それに同期した高周波で加速する装置、原子核の性質を明らかにするために、陽子などを核のクーロン場を超えて核内に到達するエネルギーまで加速する要求が高まっていた 1931 年に、E. O. Lawrence と M. S. Livingston が発表した。磁束密度 B の一様な直流磁場中では質量 m 、荷電 eZ の粒子は磁場に垂直な面内では $\omega = eZB/m$ のサイクロトロン振動数で円運動をする。そこで、この ω が粒子の速度にはよらないことを利用し、磁場中に D 形のディー電極を入れて、これに ω または ω と適当な整数関係の周波数の高周波を加え、粒子が電極間を通るごとに繰り返し加速して、直流高压の 1 回加速では到達困難な高いエネルギーまで荷電粒子を加速することができる (図 1)。磁場の中心のイオン源で生成した荷電粒子は、加速されるにしたがって軌道の曲率半径が大きくなり、最後に電極の周辺近くにある高電圧をかけた引出し用電極により磁場の外に取り出されて標的まで導かれる。

磁場は電磁石で発生させる。陽子では $B = 1.5\text{T}$ のとき $f = \omega/2\pi = 22.8\text{MHz}$ となる。ディー電圧は数十～200kV、電力は～100kW で、これを発生させるにはディーを含む Q 値の高い分布定数共振回路による自励発振方式と、水晶発振器を用いた増幅器方式がある。磁束密度 B 、半径 R の磁極では

$$BR = \frac{mv}{eZ} = \frac{(2Tm_0c^2 + T^2)^{1/2}}{ceZ}$$

のエネルギーまで加速される。ここで e は電気素量で $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ 、 Z は荷電数である。運動エネルギー T と静止エネルギー m_0c^2 を MeV 単位で表せば、

$$BR(T, m) = \frac{(2Tm_0c^2 + T^2)^{1/2}}{300Z}$$

となる。普通型 (古典的) サイクロトロンでは、粒子速度の増加に伴う相対論的質量増加 $m = m_0\gamma = m_0/[1-(v/c)^2]^{1/2}$ により、粒子は加速位相から徐々に遅れていき、減速位相に入るとそれ以上の加速はできなくなる。加速の上限は、陽子で 20MeV 程度である。周辺部に近いほど磁場を

強くしておけば粒子の円運動の周期を一定に保つことは可能ではあるが、粒子を軸方向に集束させるために、逆に磁場は k を定数として $B = k/r^n (n > 0)$ のように半径の増加にしたがって減少させる必要がある (図 2)。

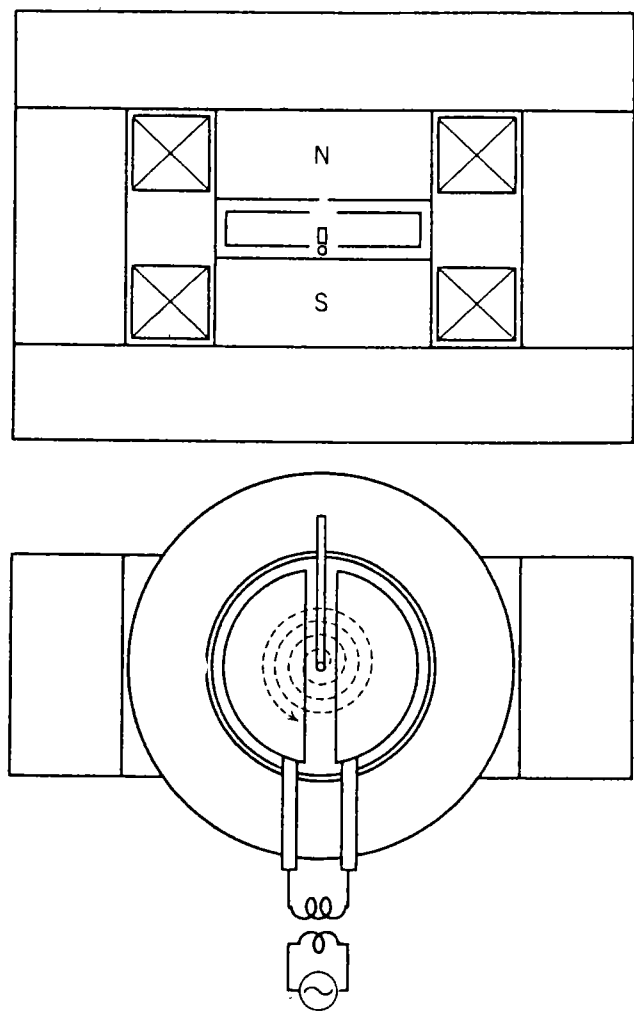


図 1

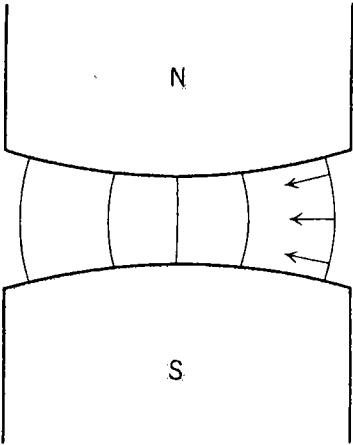
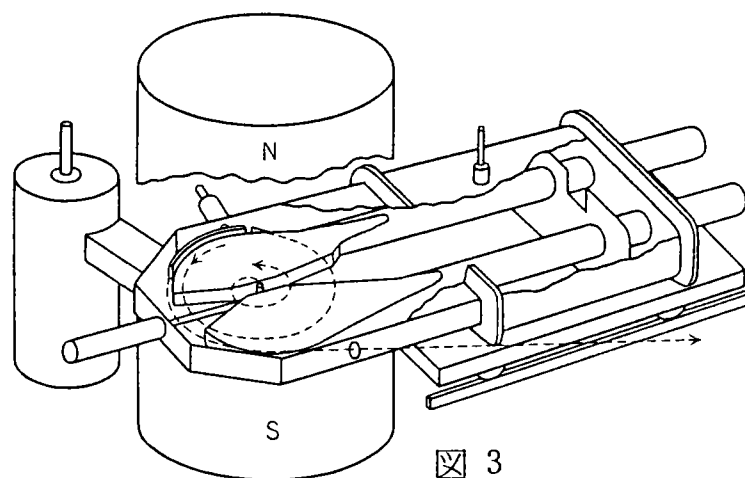


図 2

中央のイオン源から出たイオンは、レッヘル線形共振器に接続したディー間で加速され、デフレクターにより磁場の外に放出される。イオン源からのガスを排気するため $\sim 10^4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ の油拡散ポンプとフロンバッフルの組合せ（左端の円柱）が用いられる（図3）。

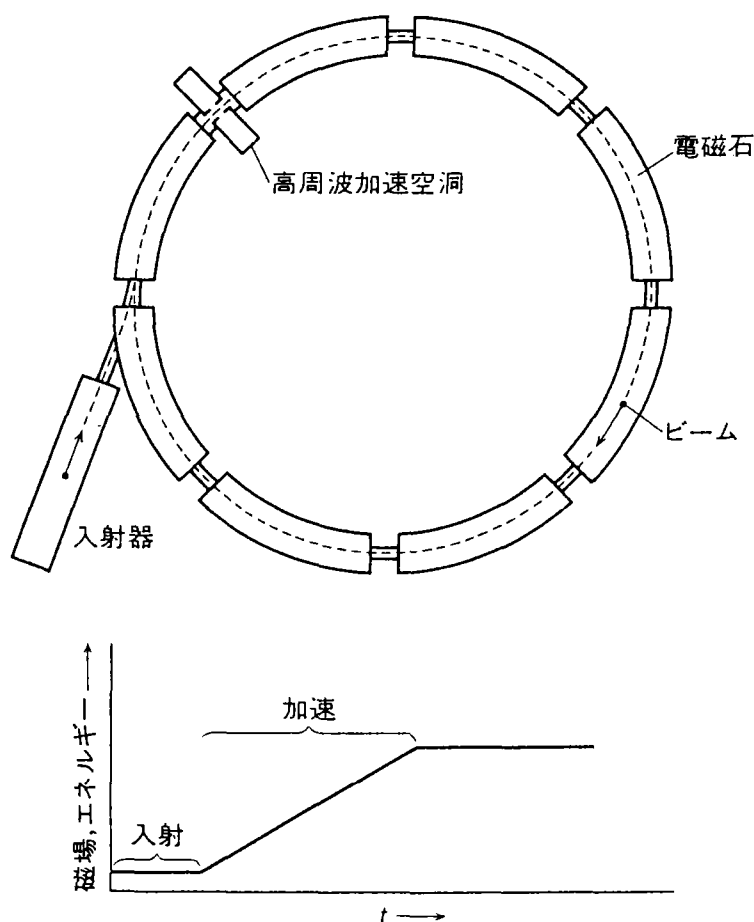


このような普通型サイクロトロンを超えのには、加速高周波を周波数変調して粒子の運動に同期させる（→シンクロサイクロトロン）か、高周波は変調せずに軸方向の集束を粒子が強・弱の磁場を交互に通過することで行わせ、しかも半径の増加に伴って平均磁場を増加させて粒子の周回運動を一定とする（→AVFサイクロトロン）。後者をイソクロナスサイクロトロンとよぶこともある。

現在世界中には10MeVの小型サイクロトロンから590MeVの大型リングサイクロトロンまで100台以上が稼動しているが、大多数はAVFサイクロトロンである。これらは陽子だけでなく、重陽子、 α 粒子、重イオンを加速する。 H^- イオンを加速して炭素などの薄膜を通過させ、陽子に変換して取出し効率の向上をはかるものもある。イオン源には熱陰極のコーン型やフード型、冷陰極・熱陰極のPIGなどがあるが、いずれもイオンは磁場中のアーク放電により生成される。 H^- イオン源や偏極陽子・重イオン源は磁場の中心には収容できないので外におく。サイクロトロンは、原子核研究のほか、放射性同位体の製造、 π 中間子をつくり出す中間子ファクトリー、医用などに広く使われている。

シンクロトロン (synchrotron)

円形加速器の一方式で、電子、陽子、原子核イオンなどを円形軌道に保って加速する (図参照)。



電磁石を軌道部分にのみリング状に配置し、軌道の一部におかれた高周波空洞が位相安定性の原理により荷電粒子を高エネルギーまで加速し、原理的にはエネルギーの上限はない。

運動量 p 、荷電 q の粒子は磁束密度 B の磁場の中で、曲率半径 ρ の円形軌道を描き、ローレンツ力と遠心力のつり合いから $p = qB\rho$ となる。粒子が加速され運動量 (またはエネルギー) の増大につれ磁束密度を高くし、粒子を一定の軌道に保つ。加速には高周波の電場を用い、加速周波数を軌道周波数の整数倍に選び、高周波と粒子の位相関係を制御すれば、少し異なった運動量をもつ粒子も失われることなくバンチを形成して加速される。いわゆる位相安定性の原理に基づくシンクロトロン加速が基礎になっている。また平衡軌道を回るような理想的な粒子の入射位置および角度からずれた粒子も失われずに加速するために、電磁石に集束性をもたせ安定なベータトロン振動をさせることが必要である。そのためには水平方向、鉛直方向ともに一種類の電磁石で集束させる弱集束の原理に基づいたものと、光学系で凸レンズと凹レンズとを組合せて集束性を得るように、水平方向では集束、鉛直方向では発散する性質を持つ電磁石と、その逆の性質をもつ電磁石とを組合せて集束を得るという強集束の原理に基づいたものがある。電磁石の集束作用は、粒子の運動量に比例して弱くなるので、光学系でいう色収差のような効果がでる。これは普通クロマティシティという量で表され、その補正には六極電磁石が用いられる。電磁石の可能な高精度の最小磁場には限度があるので、シンクロトロンのビーム入射には、線形加速器な

ど入射器とよばれる加速器で粒子をある程度加速しておく必要がある。

シンクロトロンは電子用の電子シンクロトロンと陽子およびイオンのような重い粒子の加速用の陽子シンクロトロンに大別され主な相違点は高周波加速である。前者では、入射エネルギーで粒子速度がほぼ光速であるため、粒子の回転周波数は加速とともにほとんど変わらないが、後者では粒子が重いので、入射エネルギーでは速度は遅く回転周波数が加速とともに変化するため、高周波電場の周波数を変調する必要がある。また電子シンクロトロンでは放射損失によりエネルギーを失うので、電子のエネルギー増大以外にこの損失を補う加速電圧が必要となる。この放射損失はエネルギーの四乗に比例して増加するので、大型の電子シンクロトロンでは莫大な高周波電力が必要となる。

シンクロトロンは衝突型加速器や貯蔵リングとしての利用も含め、高エネルギーの素粒子や原子核反応の研究、放射光や二次粒子による物理、化学、生物、医学などの研究に広く使われている。現在、世界最高エネルギーのシンクロトロンはフェルミ研究所（アメリカ）の超伝導電磁石を用いた 900GeV 陽子シンクロトロンであり、電子ではヨーロッパ連合原子核研究機関（CERN、スイス）の 50GeV 電子・陽電子衝突型加速器 LEP である。またわが国では、高エネルギー物理学研究所の 32GeV 電子・陽電子衝突型加速器 TRISTAN が最大である。

線形加速器（linear accelerator）

高周波電場により荷電粒子をまっすぐに加速する装置。リニアックともいう。円形加速器においても加速は同様に高周波を使って直線軌道で行うので、装置の原理は同じである。単一もしくは複数個の共振空洞からなる加速管（加速空洞）で、ビーム進行方向の電場を使うが、加速粒子の速度が光速に比べて小さいかほぼ等しいかにより、各々最適の加速方式がある。高周波を何サイクル分も加速に使う考えは、1924 年 G. Ising によって発表されたが、1928 年に R. Wideroe が重イオンの加速に初めて応用し、また 1931 年には D. H. Sloan と E. D. Lawrence が 30 個の電極を使って水銀イオンを 1.26MeV まで加速することに成功した。しかし研究が本格化したのは高周波技術が発展を遂げた第二次大戦後であって、速度の遅い陽子、重イオンと、直ちに光速近くに達する電子について各々独自の加速方式が確立された。

陽子線形加速器としては 1955 年に L. Alvarez らがつくったドリフトチューブ型加速器が有名で、光速の 10～50% くらいのビームの加速にもっぱら使用される（図 1）。

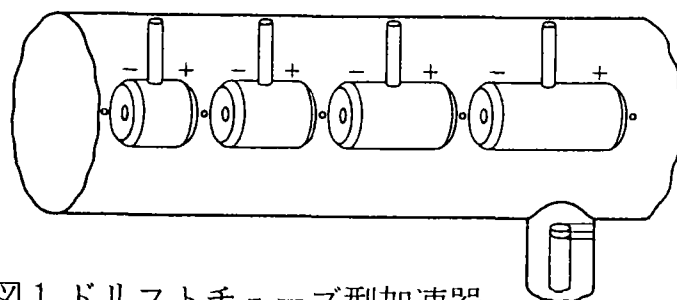


図 1 ドリフトチューブ型加速器

さらに遅い重イオンなどの加速に使われるウィデレー方式は図2に示すようにレッヘル線共振器にビーム速度に合わせた間隔で加速電極を設けたものである。

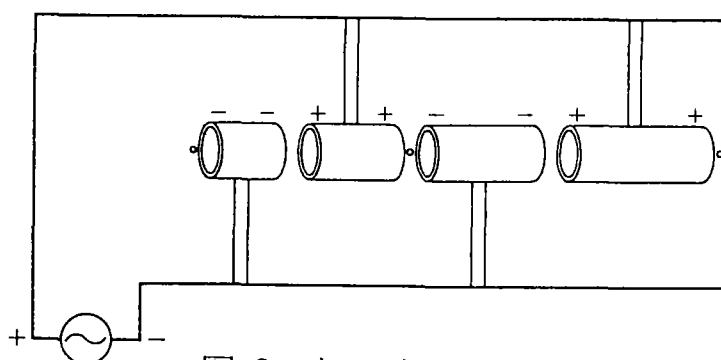


図2 ウィデレー型空洞

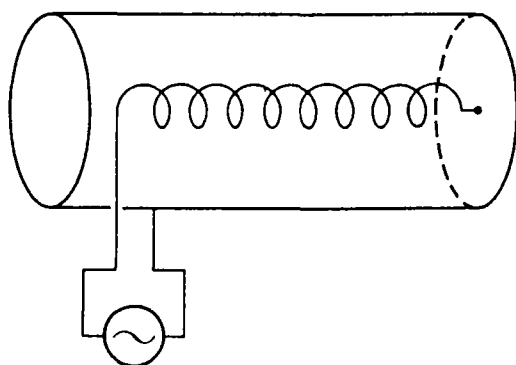


図3 ヘリックス型加速管

また図3に示すような、進行波管と同じヘリックス（ら線）を使う方法もある（ヘリックス型加速器）。特に最近では高周波による加速器と集束をともに実現するRFQ（高周波四極型空洞）の開発が盛んで、陽子線形加速器ではドリフトチューブ型加速器の入射器として使われてきたコッククロフト・ワルトン型加速器にとって代わろうとしている。以上のような比較的遅い粒子の加速器では、数十MHzから200MHzくらいの長波長の電波が使用される。どの方式においても波長に比べて大変短いピッチで加速電極が並べられ、ビーム軌道上では電場の強弱がつけられている。この空間的变化と、高周波自身の時間的变化が相乗することによって、ビームと同速度で進む電場成分が生まれ、多サイクルにわたる高周波加速が可能となる。

電子についてはわずかに80keVのエネルギーで光速の半分に達するので、10cm前後の短波長を使ったより能率のよい加速方式が發展してきた。それは、R.H.VarianとS.F.Varianの発明になるクライストロンの技術が進み、大出力のマイクロ波発生が可能になったことと密接に結びついている。加速空洞としては円筒状のものが基本となり、軸上に電場の集中した TM_{00} モードという基本モードで共振させる。基本空洞の長さは、高周波の1周期にビームが進む距離の1/3くらい、

長くても 1/2 以下にとり、この基本空洞が多数連結して加速管を形成している。

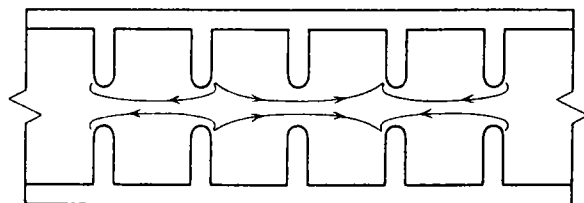


図 4 $2\pi/3$ モードのディスク - ローデッド型加速管

その代表的な例が図 4 で示したディスクローデッド型加速管で、ほとんどの電子線形加速器はこの型である。この型ではマイクロ波は加速管の一端から入力し、他端で取出しダミーロードに吸収させる。管内では周期的に装荷されている円盤（ディスク）の穴を介してマイクロ波は伝播していくが、その位相速度はビーム速度に等しくなっている。電波の管内波長を図のように 3 空洞分にするのが標準的で、 $2\pi/3$ モード進行波型加速管という。

一般に加速能率を上げるために加速管軸上にできるだけ電場を集中させることが図られるが、その目安としてビームが受ける加速電圧のピーク値 V と、空洞壁で表皮電流により生じる高周波電力損失 P_w とで次のように定義されるシャントインピーダンス R を考える：

$$R = V^2 / P_w [\Omega]$$

特に加速管長 L が大きいときには単位長さ当たりの平均的加速電圧 V/L と損失 P_w/L を使って得られる、単位長さ当りのシャントインピーダンス r ($= R/L$ [Ω/m]) がしばしば使われる。さらにインピーダンスは空洞の無負荷の Q 値 Q_0 を使って、 r/Q_0 と Q_0 の積として表されるが、前者は加速電場の集中度を表す空洞形状因子であり、後者は形状一定の空洞について壁損失に反比例する量である。相似形の加速管であれば、加速周波数を ω として $r/Q_0 \propto \omega$ 、 $Q_0 \propto \omega^{-1/2}$ であるので、 $r \propto \sqrt{\omega}$ となって、加速管寸法が小さくなりすぎず、クライストロン出力も許せば、できるだけ短波長のマイクロ波が使用されることになる。

このように基本空洞が連結した構造の加速管は進行波型加速管として使われる。なぜなら定在波は互いに逆行する 2 つの進行波の和であるが、一方はビームと同期しないので加速に役立たないからである。また共振空洞にステップ状の入力があると過渡的に反射電力が生じるが、通常パルス的に運転される電子線形加速器では反射電力によってクライストロンを壊す恐れなどもあるからである。しかし、陽子や重イオンの線形加速器のように比較的長い高周波パルスを使うことが多い場合や、電子についても貯蔵リングの場合のように連続加速が必要とされると、過渡特性は無視できるので、定在波型加速管が使用される。上述した円筒状の基本空洞を単独で使うのがその最も単純な場合で、あまり高い加速電圧が必要でないシンクロトロンなどによく利用される。この型の空洞はその形状からピルボックス型と総称される。

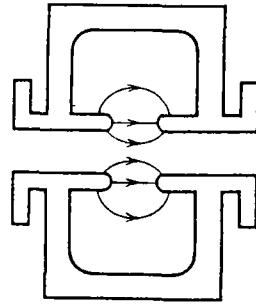


図5 リエントラント型空洞

多くの場合、ビーム通路に電場をより集中させてシャントインピーダンスを高めるために、図5のような円筒構造のものを内部へ突出させる。そのためこれをリエントラント空洞という。リエントラント構造は大きな容量をつくり出すので、空洞の外径寸法がかなり小さくできるという特長もある。

ドリフトチューブ型加速管やウィデレー型空洞などの低速ビーム用加速管はもともと定在波で動作しているが、光速に近いビームのための結合空洞型の加速管でも定在波動作に利点が生じる。もし隣合う空洞ごとに電場の向きが反転する π モードを使うと、ビームと進行する波も逆行する波も平等に加速に寄与するため、シャントインピーダンスがほぼ $\sqrt{2}$ 倍得をするからである。さらに加速はビームの向きによらないので、電子・陽電子の衝突型貯蔵リングでは π モードの定在波型加速管が使われる。このモードでは基本空洞の長さは、高周波のちょうど半周期でビームが進む距離に等しい。しかし π モードでは通常群速度が0となるので、基本空洞間の電磁エネルギーのやり取りが大変小さい。そこでビーム負荷や空洞寸法誤差が多少存在すると理想的な π モードを維持することが大変困難である。したがって連結空洞数は通常5個止まりである。この難点を解決しより長い定在波型空洞を可能にしたのが、APS型加速管(図6)、サイドカップル型加速管(図7)、ディスクアンドワッシャー型空洞(図8)などである。これらはいずれも基本加速空洞間に結合空洞とよばれる部分をもつ、いわゆる2重周期構造であって、 π モードでも群速度が0ではない値を可能としている。

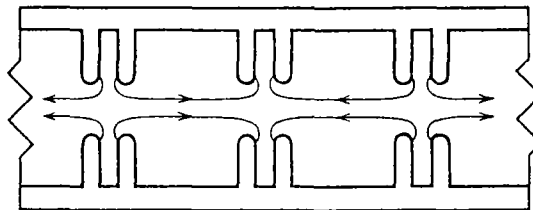


図6 APS型加速管

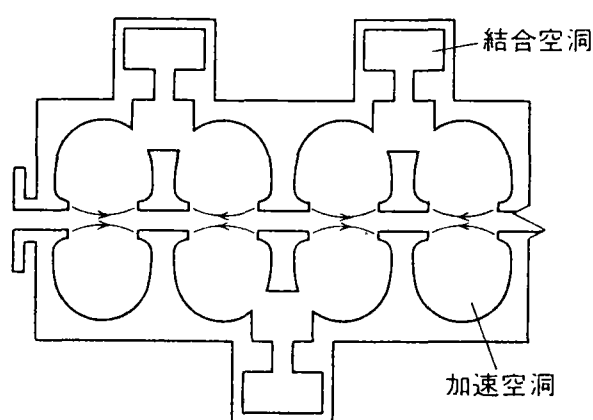


図 7 サイドカップル型空洞

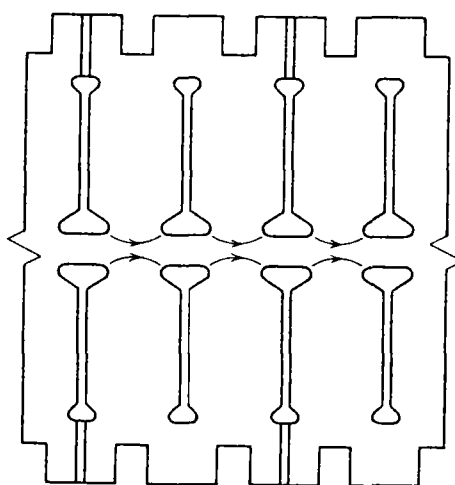
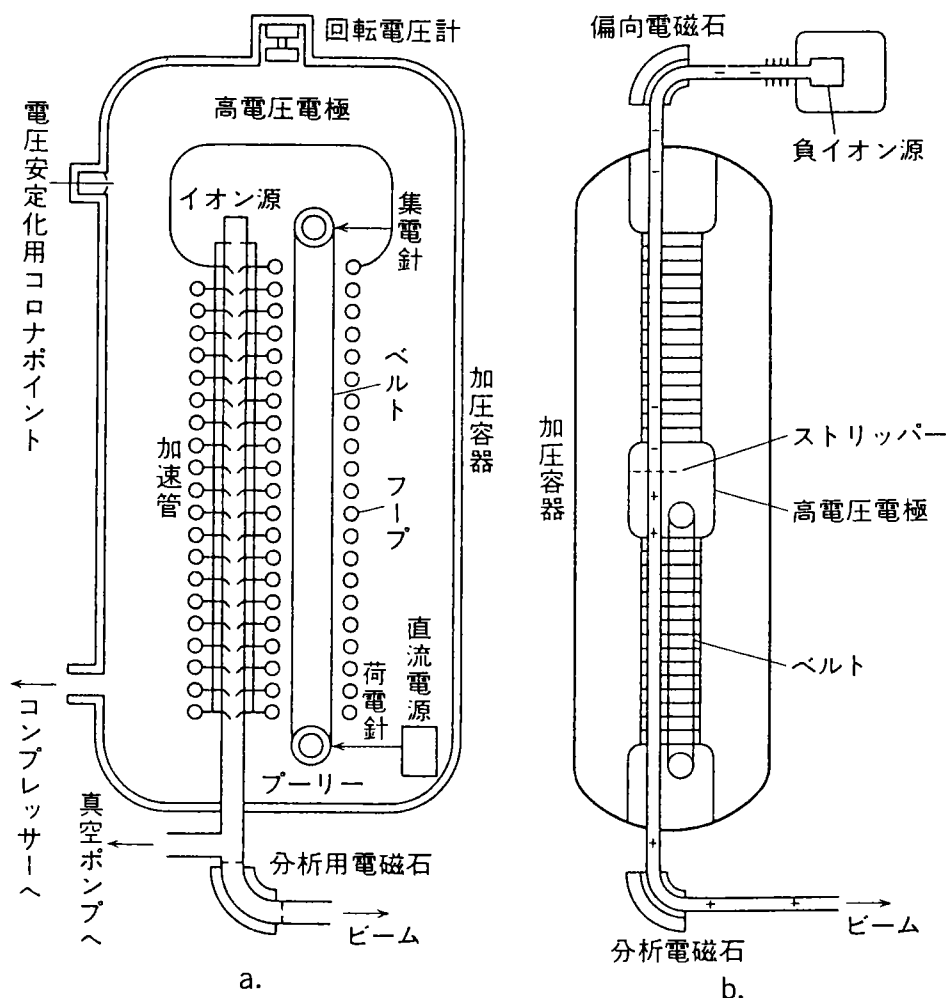


図 8 ディスクワッシャー型空洞

一方、ビーム自身がつくる電磁場も線形加速器の動作にさまざまな影響を及ぼす。それが加速モードの場合はビーム負荷として取扱われる。それ以外のすべての共振モードは一括して高調波モードとよばれるが、そのうちビームの進行方向に直角の力を及ぼすものが、長い線形加速器にとって危険である。先行するバンチが軸からはずれて走ると、そういうモードが誘起され、後続バンチは偏向されるが、最悪の場合には加速管壁に当たってビームが消滅することもある。これをビームブレイクアップ効果という。加速モードの 1.5 倍くらい高い周波数の TM_{11} モードが最も強い相互作用をするので、基本空洞の寸法を少しずつ変えてこのモードが伝播しにくくしたり、その Q 値を大変小さくしてただちに減衰させる工夫が必要となる。円形加速器用の加速管でもビームを安定に回すために、高調波モードの十分な減衰が課題となる。特に単一の大電流バンチを加速する場合問題となるのは、個々の高調波モードよりも、ローレンツ短縮されたバンチのクーロン場がたとえばディスクで回折されて発生するウエイク場である。バンチの前半がつくるウエイク場が後半に影響を与えるため、前後半で粒子エネルギーに差をつけたり、シャントインピーダンスを犠牲にしてもディスクのビーム穴の径を大きくして、安定加速を図ることがある。

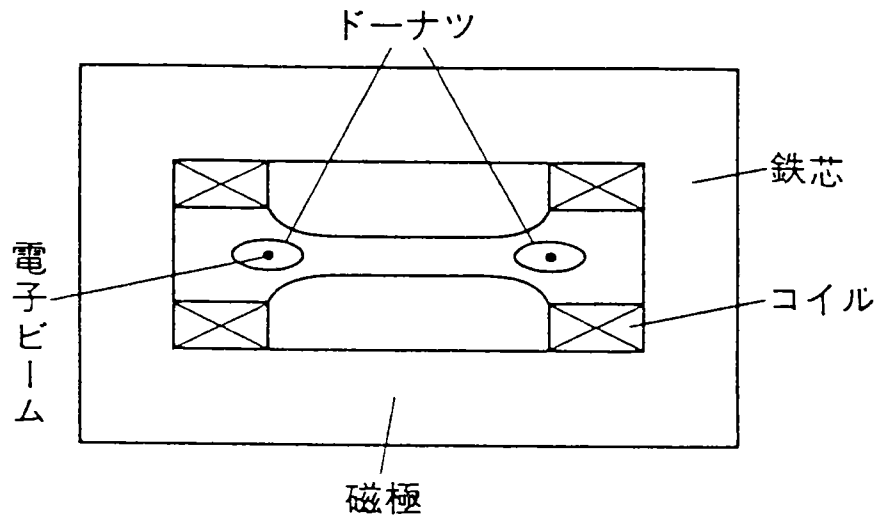
バン・デ・グラーフ型加速器 (Van de Graaff accelerator)

1931年にR. J. Van de Graaffによって、ベルト起電機による高電圧を利用してつくられた加速器で、おもに陽子、重イオンビームなどの加速に用いられる。球殻かそれに近い形の高電圧電極の内部と接地部にそれぞれプーリーを取り付け、それらの間に、絹、ゴムあるいは多数の金属球を絶縁ひもでつないだベルト（ペレットチェーン）をかけ、接地側のプーリー部で、数kV～数十kVのコロナ放電により電荷をベルトにのせ高電圧電極に送り込むことにより、数MV～10MVの高電圧を発生できる（図a）。実用機では電極やベルト、加速管での放電を防ぐため、加速器本体を高圧容器に収めて数気圧の N_2 や SF_6 をつめ、また電場をより一様にするための多数の金属フープをベルトと加速管のまわりに配置している。高電圧を得るために、高電圧電極と圧力容器との間にいくつかの中間電極シェルを入れたものもある。実用的な電圧限界は10MV程度、最大ビーム電流は数百 μA 程度である。一方、この高電圧電極にさらにもう1本加速管をとりつけ、負イオン源を大地側に置いて負イオンを高電圧まで加速し、電極の中でガスあるいは炭素薄膜などで正イオンに変換した後、再び大地側に向かって加速する装置をタンデム型バン・デ・グラーフ加速器という（図b）。高電圧電極の電圧をVとすると、陽子は2eV、Z価の重イオンでは $(1+Z)eV$ のエネルギーが得られる。電圧は最大25MVのものまで市販されている。



ベータトロン (betatron)

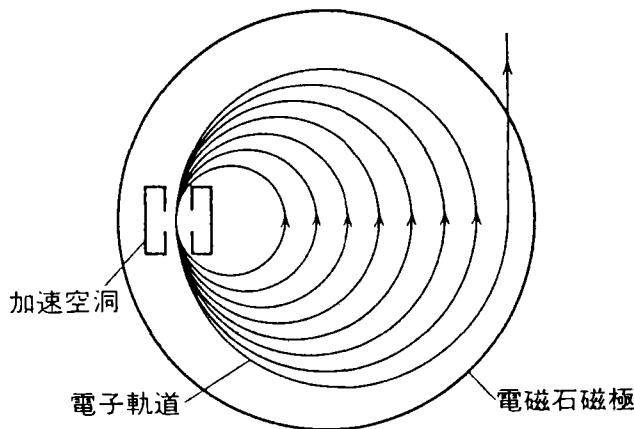
交流電磁石の磁束の時間変化によって誘導される電場で電子を加速し、同時に磁場で電子を一定の円軌道に保つ加速器（図はその断面図）。R. Wideroe により提案され、D. W. Kerst により 1940



年に運転に成功した。電子銃から打ちこまれた電子は電磁石の磁場が増加しても加速とつり合っ
て軌道半径が常に一定である条件を満足させるため、軌道上の磁束密度を B 、軌道半径を r 、軌
道内の全磁束を ϕ としたとき、 $2\pi r^2 B = \phi$ のいわゆる 2:1 の規則を満足する必要がある。さらに
電子が軌道から多少ずれても失われずに、軌道と直角に振動（ベータトロン振動）しながら軌道
を回る集束の条件を満足する必要がある。そのために電磁石は、磁場指数 $n = -(\rho/B) \cdot (dB/dx)$
（ B は軌道の磁束密度、 ρ は軌道の曲率半径、 x は軌道に垂直な水平方向の座標）が $0 < n < 1$
の条件を満たすように磁極を設計する。加速された電子は金属標的にあてて γ 線や X 線を発生さ
せる。初期は γ 線による原子核実験に用いられたが、最近は医療や金属の非破壊検査の X 線源と
して使用される。

マイクロトロン (microtron)

加速器の一種で電子を直流磁場の中で円運動をさせながら軌道の一部の高周波空洞で加速する。電子が加速されるごとに軌道半径はステップ状に増大するが、軌道の一部は常に高周波空洞を通過する。電子の回転周期は加速とともに長くなるが、加速周波数は一定で、加速空洞に到達するごとに高周波が常に正しい位相になるように設計されている。位相安定性により加速が続けられ、20～30MeV までの加速が行われる。加速ビームの引出しが容易で、電子シンクロトロンの入射器などに用いられる。



誘導線形加速器 (induction linac)

変圧器と同じ磁気誘導を利用して、加速間隙にパルス状の高電圧を発生し、荷電粒子を加速する加速器。図 1 に示すように環状鉄芯に 1 ターンの一次コイルを巻き、電圧 V のパルス電圧を印加すると、磁気誘導により二次コイルに設けた間隙 $a - a'$ 間に同じ電圧 V を発生する。この電圧により荷電粒子を加速する。実際にはコイルは図 2 に示すように鉄芯全体を覆う構造となっていて、漏れ磁束を減らすよう工夫されている。

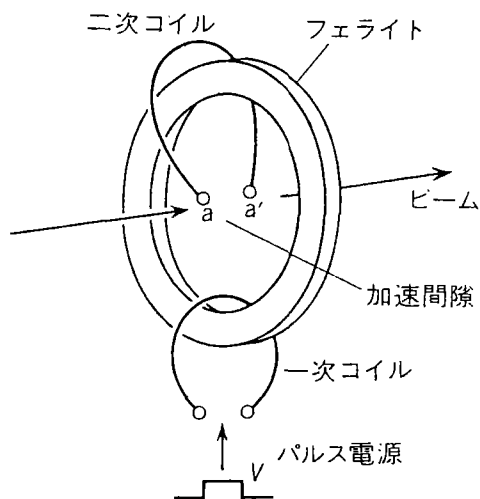


図 1 誘導加速器の原理

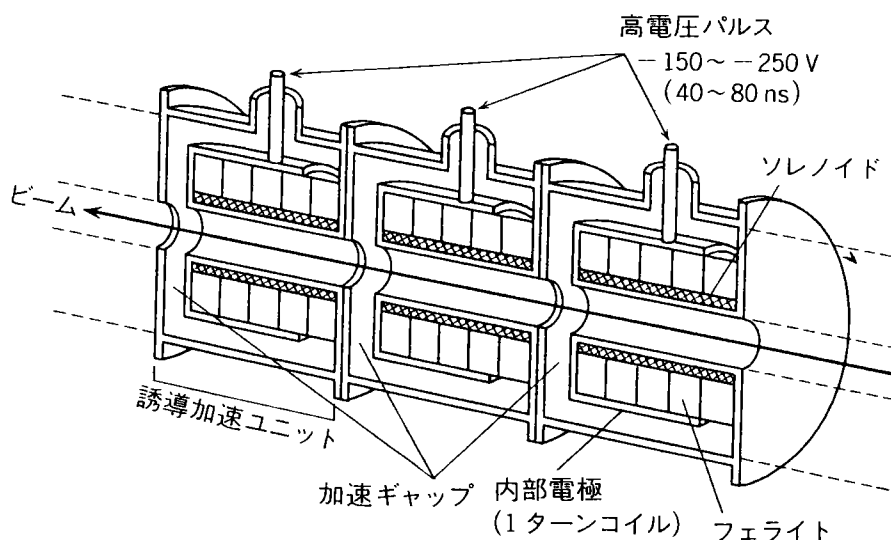


図 2 誘導線形加速器

コイルに印加される電圧、すなわち加速電圧を大きさ V 、時間幅 Δt の矩形波パルスとすると、鉄芯中の平均磁束密度の変化 ΔB は $V\Delta t = S\Delta B$ で与えられ、鉄芯が磁気飽和しない範囲になければならない。 S は鉄芯の断面積である。 $V\Delta t$ は Vt 積とよばれ、鉄芯の材質、大きさを決める際の目安となる量である。鉄芯には透磁率の大きいフェライト、 $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度の薄いケイ素鋼板またはアモルファス合金板を層間絶縁を施して積層した巻鉄芯が用いられる。利用できる ΔB をできるだけ大きくするために、鉄芯の磁性体は直流的に逆バイアスされ、逆方向に磁化された状態から、ヒステリシス曲線に沿って動作させるのが普通である。この場合 ΔB の最大はほぼ $2B_s$ となり、 (B_s は飽和磁束密度)、パルスの電圧、時間幅を決めると必要な鉄芯材の断面積が決まる。 B_s はフェライトで約 0.5T 、アモルファス金属で約 1.5T 程度であるので、加速電圧 $10 \sim 20\text{kV}$ ではパルス幅 $1 \sim 2 \mu\text{s}$ 、 200kV 以上のものでは 100ns 以下が実用的な範囲である。高周波加速空洞と違って、共振性ではなく一般にインピーダンスが非常に低いので、 10kA 以上の大電流電子ビームの加速に適している。加速ユニット自体の静電的な電位はゼロであるので、図 2 のように複数個のユニットを直列に接続することができる。ユニット数を増すことで加速エネルギーを増大することができ、プラズマ加熱や自由電子レーザーの駆動などに用いられる。数 MeV 以下のものが多いが、最大のものはローレンス・リバモア研究所にある 50MeV 、ピーク電流 10kA の装置である。

参考資料 2

参考資料 2.

加速器の原理と技術の発達史の展望

(平尾 泰男)

I 創成期

加速器の草分けは、1800 年代後半、陰極線の研究に端を発している。1860 年 Plucker と Hittorf はガラス職人 Geissler の協力により 10^{-3} Torr の真空を実現するや直ちに陰極線を発見し、その後 1886 年に H. Hertz はそれがアルミ薄膜を透過することを見出し、その助手 P. Lenard はその陰極線すなわち電子^{*1}を真空の外に取り出して空気中の飛程を観測した。その後彼は 1895 年には種々の気体による電子散乱を観測して、その圧力や加速電圧に対する依存性を研究した。彼は散乱断面積が電子速度とともに急速に減少することに着目し、原子は直径が 10^{-11} cm 以下の構成要素をもち、他は空虚な構造であると考えた。これらの研究が電子を人工的に 100 keV 以上に加速して行った最初の実験研究であった。

ちょうど同じ頃、1895 年 11 月、W. Rontgen は陰極線の実験中に、透過力の強い新しい放射線、X 線を発見した。Lenard の実験が一次電子線の散乱実験であり、Rontgen の実験は二次放射線の実験であった。加速器発達の歴史の中で深い関わりをもった医学利用は、早くも X 線発見直後から始まった。1896 年始めには欧米の各地で癌治療に試用され、同年 2 月 15 日号のアメリカ医学会誌に早すぎる臨床応用に警告文が出る程であった。100 年前の情報伝達（無線電信 1897 年）を考えると将に驚くべきことであった。

一方、X 線の発見に触発されて、ウランの放射能、放射性元素ポロニウム、ラジウム等の発見が相次ぎ、近代物理学を拓く端緒となったことは周知のことである。新たに発見された放射線は X 線とは異なる放射線、 α 線、 β 線、 γ 線であったが、この天然の α 線^{*2}を用いて散乱実験を続けていた E. Rutherford は、原子の中心に正電荷の小さい核が存在することを立証し、さらに 1919 年には窒素原子核が α 粒子との衝突によって破壊されることを実証した。これが最初の原子核破壊実験であったことはいままでのないが、この実験によって原子核の人工破壊のエネルギーに目安が与えられ、人工的に荷電粒子を加速する装置すなわち加速器の開発研究がにわかに活発となった。やがて 1928 年には G. Gamow が波動力学によれば荷電粒子は原子核の障壁をたかだか 500 keV のエネルギーで通り抜けられること（トンネル効果）を示唆した。これがますます加速器開発に拍車をかけることとなり、1930 年頃には現在活躍している各種の加速器の原型はほとんど出揃うまでに進展した。

これらの加速器は、核物理学という新しい研究分野を開拓することを目的とした。したがって加速器は核反応を起こすに足るエネルギーを荷電粒子に与える必要があった。世界各地の研究所で原子核破壊の先陣争いが展開されたが、1932 年にキャベンディッシュ研究所の J. Cockcroft と E. Walton が最初の栄誉を多段整流器型高電圧発生装置による核反応実験の成功で受けとることとなった。しかし、達成された 800 kV（実験は陽子 400 keV）という高電圧は、すでに発明されていた他の加速器すなわち R. Van de Graaff の静電高圧発生装置や E. Lawrence のサイクロト

^{*1} 陰極線が負電荷の微粒子すなわち電子の流れであることを確認したのは J. J. Thomson、1897 年である。

^{*2} α 粒子がヘリウム原子核であることを実証したのも Rutherford、1908 年であった。

ロンよりむしろ低い値であった。この成功に刺激されて、これらの加速器はいつせいに核反応実験に参加し、核物理研究は多彩に展開されていった。欧米での研究に遅れることなく、わが国でも仁科芳雄、菊池正士達によって加速器建設と核物理研究、および応用研究が先駆的に開始されたことも注目すべき事であった。

II 各種加速器の原理とその発展

1930 年頃に出揃った各種の加速器は、その後さまざまに分化・発展して今日に至っている。以下にその進歩の跡を追ってみることとするが、それぞれの加速器の原理や要素技術の源が意外に古いこと、優れた加速器開発者たちが実に多彩な足跡を残していること等がわかる。

それらの加速器は静電加速器と高周波加速器に大別される。

1 静電加速器

1920 年代までの多くの研究室で用いられていた静電高圧発生器の主なものは誘導型高圧発生器であった。1865 年 A. Toepler によって発明され、その後 Wimshurst 達によって完成されて 250kV 1mA 程度の出力が得られるようになっていた。先にふれた 1895 年の P. Lenard の電子散乱の実験に続いて、1913 年、J. Franck と G. Hertz は加速電子照射で原子軌道電子の励起と光子放出の実験に成功しているが、これらの実験に用いられていた高電圧はこの種の装置で発生されていた。200kV 程度で原子物理学研究に留っていたが、核物理研究で現在も行われている手法、すなわち荷電粒子の散乱、標的のエネルギー準位の励起、二次放射線の生成とその利用、等々が既に 1900 年前後に行われていたことは興味深い。

(1) バンデグラフ (ベルト型高電圧発生装置)

1931 年プリンストン研究所で 1.5MV の高電圧を発生させた R. J. Van de Graaff の名が冠せられた装置で、周回する絶縁ベルトにコロナ放電で電荷を乗せて球形の高電圧電極に運ぶ型式のものであるが、同様のものはすでに 1893 年 R. Busch によって作成されていたし、後年絶縁ベルトに換って採用されたペレットチェーンにしても既に 1876 年 A. Righi によって金属と絶縁物を交互に接続したものが作成されていた。要素技術としては新しいものではなかった。

Van de Graaff の高電圧発生の成功を知ったカーネギー研究所の M. Tuve 達がこの型式を用いた最初の核物理実験を 600keV 陽子で行ったのは 1933 年であった。また Van de Graaff 自身も 1935 年になって 2.75MeV まで加速し、数多くの核物理実験がこれを用いて行われた。わが国でも同様の装置が 1932 年に仁科芳雄達により理化学研究所で製作されたが、湿度のせいであまり安定に働かなかった。この型式を現在のように高圧タンクの中に封入して大気中の条件と無関係に放電を抑制するように改良したのは、1935 年 H. Herb、D. Kerst 達の仕事であった。しかしこの着想も、実は 1885 年 Hempel によって見付けられており、彼は誘導型高電圧発生器を 6 気圧の乾燥空気を詰めた容器に入れてその動作を研究し、出力電流や絶縁特性の改善を実証していた。

静電高圧装置が現在も重要な加速器の一つとして生き残っているのはタンデム加速の原理の発明によるといえる。この原理は小型の 1MV 級のものから 20~35MV 級の超大型のものまでに採用され、核物理、原子物理等の基礎研究から種々の応用研究や産業利用にまで用いられている。その原理は、接地側から負イオンを正の高電圧端子へ加速し、そこで正イオンに変換して接地側に向けて再加速する、というもので、当時の科学雑誌で swindletron (いかさま加速器?) の名称の記事で紹介されていた。この原理は 1951 年 L. Alvarez が提唱して初めて実現したが、着想はす

でに 1937 年 W. Bennett によって特許出願されていたし、類似の着想は 1932 年 C. Gehrtsen によって実験されていた。彼の研究は、加速された陽子が負の円筒電極に入り、その中で中性化されて正の円筒電極に向かって減速されることなく走り、その中で再び電離して陽子となって再加速されるというもので、彼の大学院生 O. Peter は 1936 年にこの方法を 5 回繰り返して 60kV の電圧で 300keV、数 nA の陽子ビームを得ている。また、これより早く 1932 年、A. Dempster も同様の小型装置を作っていたし、H. Kallman は多価イオンの電荷を変化させて再加速させていた（彼は 1949 年、軍事研究で開発されていた光電子増倍管を核物理実験に導入した人物でもあった）。

このように見てくると、タンデム加速の原理の発見者は誰なのか良く判らなくなるが、最も効果的に提唱し、タンデム型加速器の今日の地位を築かせたのは Alvarez の功績というべきであろう。この方式の加速器は核物理研究、特に核分光学の分野では長年に亘って主役の座を占めて、サイクロトロンに譲らなかった。さらに、原理的に重イオン加速に有利であるから、広い応用を含めた重イオン科学の発展に大きな貢献を果たした。

なお、近年ベルトに換って金属ペレット・チェーンが用いられているが、かつてヴィスコンシン大学に研究留学した磯矢彰は、Herb の研究室で大きなステーブルをベルトに埋めているのを見て、直ちに金属ペレットチェーンを想起してその開発に取り組んだ。九州大学において、実用器にそれを活用したのは彼が最初であった。その他にも彼は静電加速器に関してさまざまな工夫を重ねてその開発に大きな貢献を果たした。

（２） コッククロフト・ウォルトン装置（多段倍電圧整流器）

先に触れたコッククロフト型と呼ばれる多段倍電圧整流器による Cockcroft と Walton の最初の原子核人工破壊の成功は 1932 年のことであるが、この整流器と静電容量を組み合わせた回路自身は 1921 年 H. Greinacher によって発明されており、一般的にも鉱石検波受信機で知られているもので、Cockcroft と Walton の賞されるべきは、既に作り出されていた他の加速器の高電圧より低い値でいち早く加速管を付加して核反応実験を試みた点にある。わが国でも 1933 年、仁科芳雄が理化学研究所で、菊池正士が大阪大学で同様の装置を建設し、D-D 中性子による核物理研究をはじめた。E. Fermi がはじめたラジウム・ベリリウム中性子源による核物理研究を凌駕するべく、実に早い研究開始であった。

この原理の装置は、最近まで線型加速器の入射器として重要な位置を占めていたが、近年この高電圧入射を不要とする線型加速器 RFQ 型（高周波四重極：Radio・Frequency・Quadrupole）の出現により、ようやくその地位を失った。なお一次交流電源の周波数を高周波化することにより静電容量を小さい浮遊静電容量で置き換えて小型化し、高圧ガス中に封入したタンデム加速器が小型で便利な装置として応用研究に多数利用されている。

以上のほか、特殊なものとして、1932 年 A. Brasch と F. Lange は強力なマルクス発生器を用いて、電子を 2.4MeV まで、 10μ 秒 1000A のパルス大電流で発生させた。このようなパルス大電流発生装置は特殊な開発研究に今も活用されている（電子集団の作るポテンシャルを利用した加速等）。もっと珍奇な発想で（あるいは当時はもっと自然な発想だったかもしれないが）彼らは雷を利用した高電圧発生実験を 1930 年に Monte Generoso のピークに張った大アンテナで試みているが、不幸にして感電事故により 1933 年に中断してしまった。しかし、彼らがその実験で開発した加速管は、金属孔空き円板とセラミックの積層構造で、今日でも広く用いられている加速管の元祖となった。

(3) ベータトロン (磁気誘導加速器)

高周波加速器に入る前に、ベータトロンに触れておく。これは磁場によって周回運動をしている電子が、その軌道内部の磁束の時間変化によって軌道に沿って発生する電場で加速されるという原理の加速器である。二次巻線の巻数の非常に多い昇圧トランスと原理的に同様であって、電磁気学の基本法則の一つであるファラデーの電磁誘導の法則そのままの加速器である。この型の加速器も多くの加速器研究者達によって手掛けられた。1922 年 S. Slepian の原理的特許取得に始まるが、本格的にこの原理を理解したのは弱冠 21 歳のアーヘン大学学生 R. Wideroe、1923 年のことであった。彼は加速中の電子軌道を一定に保つためには、軌道の磁場は常にその軌道内部磁場の平均値の $1/2$ でなければならないという条件を導き、さらに 2 年後には、電子が安定に集束されるためには半径方向の磁場減衰指数 (n 値 $=dB/B \cdot r/dr$) が 0 と 1 のあいだになければならないという弱集束の原理(後に発見された強集束の原理との対比で弱集束と呼ぶ)までも導いた。また 100MeV 加速器の緒元も示した。しかしながら、彼の加速実験は成功しなかった。1935 年になり、M. Steenbeck が同様の弱集束条件を導いた上で非常に微弱なビーム加速に成功している。本格的な加速の成功は、1940 年になって D. Kerst によってもたらされた。そして R. Serber とともに完全な理論が作り上げられた。集束磁場中を周回する粒子の安定な振動をベータトロン振動、その振動数をベータトロン振動数と呼ぶのは彼等の論文に因んでいる。電子ビームを最初に引きだしたのは 1947 年、K. Gund、シーメンス社の医療用 6MeV の装置であった。Wideroe も R. Kollath や B. Touschek とともに再度製作し、1944 年に 15MeV の電子を加速して実用に供した。

このようにベータトロンは早くから多くの研究者によって手掛けられながら、初期の進歩は遅々とした歩みであったが、その後の進歩は急速で、1950 年には 200MeV に達していた。一方早くより電子の周回に伴う電磁波の放出(放射光)が加速エネルギーの限界を与えることにも気付かれていた。電子の加速は間もなく線型加速器やシンクロトロンに取って換られて、現在ベータトロンは姿を消してしまった。

2 高周波加速器

(1) 線型加速器

高周波電場を用いる共鳴型加速器の源は 1924 年に出された G. Ising の論文「高電圧陽極線発生のある方式の原理」である。彼は原理の提案のみで実験を行った形跡はない。この原理を実現させたのは 1928 年、先に述べた Wideroe のアーヘン大学における学位論文の仕事であった。直線上に並べた中空円筒(ドリフトチューブ)を交互に高周波電源の両極に接続し、その長さをイオンの速度に比例して長くとり、円筒内の通過時間を常に高周波の半周期となるように設計すれば、イオンは円筒間隙を通過する度に加速され続けるというもので、実際に二つの間隙を用いて Na と K のイオンを加速した。さらにもっと重いイオン Cs を 2MeV に加速する装置の設計例をも示した。この論文は高周波電場で共鳴加速する線形加速器(ライナック)の成功を報告したのみならず、これに磁場を加えて周回運動させることにより同一電極を何回も通過させる共鳴加速器すなわちサイクロトロンの着想を偶然ながら E. Lawrence に示唆することとなった。事実 Wideroe は当時そのことを電気工学の Flegler 教授と論じ、磁場による集束性が 10mA のビーム電流の空間電荷効果で打消されて不安定となると解答した。電気工学の通念では mA は微少電流で、 μA でも核物理学では大いに役立つとは考えなかった。かくして Wideroe はサイクロトロンの発明という栄誉を Lawrence に譲ることとなった。

Lawrence は後に述べるサイクロトロンと併せて、彼の学生 D. Sloan を協力者として Wideroe の線型加速器を発展させ、1932 年には Hg イオンを 1.26MeV まで加速して $0.1\mu\text{A}$ の出力を得る成功を収めた。しかしながら、このエネルギーは核物理の端緒を拓くには低過ぎた。高周波大電力技術の限界のために、この方向の発展は第 2 次大戦末期の RADAR 工学の画期的進歩を待たねばならなかった。ナチスの誘導弾 V2 号からロンドンの空を守るために、連合軍が強力に推進した軍事研究に参加した W. Hansen 達は、戦後直ちに線型加速器の開発にそれを発展させた。空洞共振器の定在波を用いたアルバレ型ライナックが L. Alvarez によって 1946 年に完成され、進行波管の進行波を用いた電子ライナックが Hansen によって 1948 年に完成され、それ以後次々と高エネルギーの装置へ発展していった。陽子ライナックは高エネルギー陽子シンクロトロンの入射器として 100MeV 以上のものが多数建設されたが、最大のはロスアラモス国立研究所 (LANL) の中間子工場 (LAMPF: Los-Alamos Meson Physics Facility) と呼ばれる 800MeV、1mA のものである (近く稼働停止が予定されている)。現在、核物理学や中性子科学等の将来計画として、1GeV 以上数十 mA の大強度装置の建設も計画されている。なお、ヴィデレー型は低速領域の重イオン加速に適した構造であり、重イオン研究機構 (GSI) の重イオンライナック (UNILAC) の前段に採用され、唯一の大型器として現存しているが、後に述べる RFQ 型の出現により早晚消え去る運命にある。UNILAC 本体はアルバレ型と多段単一空胴型で構成される重イオンライナックで、ウランに至る重イオンを 20MeV/核子に加速できる大型のものであり、現在も後に述べる重イオンシンクロトロンの入射器として重要な役割を担っている。電子ライナックとしては、数 MeV の小型医療用装置は数千台が医療施設に普及し、数百 MeV~数 GeV のものは電子シンクロトロンや放射光装置の入射器として多数建設されているが、最大のはスタンフォード・リニアアクセレータセンター (SLAC) の 2 マイルライナックの 50GeV、そして将来計画としては直線衝突器の加速器としてより高いエネルギーのものが計画されている。これらの開発には、スタンフォード大学で Varian 兄弟によって発明されたクライストロンが年々大電力化されていったことが大きな貢献を果たした。また超伝導空洞の開発も大きな寄与を果しつつある。

ここで、電子の直線加速の特殊性についてふれておく。それは電子の静止質量が電子に比べて約 2000 分の 1 の重さであることによっている。特殊相対論の教えるところによると、電子はわずか 80keV で光速の 50%、約 3MeV で 99% となる。陽子の場合は 145MeV で 50%、99% になるのは約 6GeV という高エネルギーになる。したがって、電子は加速開始後間もなく速度は一定となり、加速空洞の構造は一定となる。また、同じく特殊相対論からの帰結で、加速されている電子から見たライナックの長さは著しく短縮されており、たとえば全長 400m の 2.5GeV ライナックは、電子から見るとわずか 0.7m に過ぎない。したがって、加速前段は速度増加に応じた構造とソレノイド等集束磁場が用いられるが、以後はほとんどこれらの構成は不要となる。

一般的に、加速管は孔空き円板が配列された円筒型導波管の構造をもっている。1946 年 Sloan が提案したもので、この円板の配列が導波管内の高周波の位相速度を調整する働きをする。1 波長中に 3 または 4 枚の円板が入っている。この円筒導波管の末端で高周波電力が消費されて無反射としたものが進行波加速管である。一方、両端末で全反射させた場合、加速方向に進む波と反対方向へ進む波が共存し、定在波加速管となる。後で述べる電子・陽電子衝突リングのように両方向への加速をする空洞は定在波型でなければならないが、線形加速器の場合、電子と反対方向の波は加速にほとんど影響がないから、進行波型、定在波型のどちらも可能となる。定在波型で

1 波長中に 4 枚の円板が配列されたものは、一つ置きに空胴の電場はほぼ 0 となり、電子はこの空胴では加速を受けない。高周波を伝送する働きのみをしているこの部分を短く設計したり、また加速管軸外にはずす（サイドカップル）設計が可能となる。後者の構造は、電子ライナックではないが、前に触れた陽子ライナック 800MeV (LAMPF) の高速部に採用されている。なお、加速管を一度しか通過しない線型加速器では、高周波電力とその熱除去の観点から、0.1~1%の作動率のパルス運転が一般的である。ビームパルス幅が数 μ 秒の電子ライナックでは、定在波型でなく進行波型加速管が用いられている。

イオン加速用ライナックの特徴にも触れる。電子ライナックの高周波の周波数が L バンド (1200~1300MHz)、S バンド (~3000MHz)、X バンド (9000~10000MHz) のクライストロン、マグネトロンの周波数から選択され、そのほとんどは S バンドであるのに対して、イオン加速の周波数は 70~400MHz と比較的低い周波数が選択される。それに共振する定在波円筒空胴の軸上に中空円筒のドリフトチューブが配列される。ドリフトチューブ中を走るイオンは減速電場から遮へいされ、ドリフトチューブ間隙加速電場を感じるようにチューブの長さが設計されている。この構造が後に述べる加速位相安定性を保つためには、加速間隙透過時の高周波位相は電場上昇位相になければならない。このことはビームが発散力を受けることとなり、その力を上回る集束力を別の手段で与えなければならない。通常これをドリフトチューブ内に組込んだ四重極磁場で実現させているが、それが発散電場に打勝つためには、入射イオンは既に一定以上の速度をもたねばならない。そのため入射用高電圧は数百 kV 以上を必要とし、イオンが重くなるほどこの値は厳しくなる。

このアルバレー型ドリフトチューブ・ライナックに対して、異なる構造の線型加速器として近年登場して加速器界にフィーバーを起した高周波四重極 (RFQ: Radio-Frequency-Quadrupole) 型に触れる。

1969 年 I. Kapchinskii と V. Teplyakov が RFQ 方式の加速・集束法を発表し、セルプコフの高エネルギー物理学研究所 (IHEP) の 76GeV 陽子シンクロトロン用入射器 (URAL 30) の初段に実用化したのは 1977 年であったが、当時のソ連の情報事情のため、欧米諸国ではこの新しい加速器の原理を全く知らないまま 10 年が経過した。たまたまカナダ経由の移民技術者 Manca が LANL で伝えたのが始まりで大論争が起り、その原理を実証するための試作器 (POP: Proof Of Principle) が陽子加速に成功したのは 1980 年、この原理が重イオン加速に有利なことに注目した筆者達が東京大学原子核研究所 (INS) の重イオン加速用試作器 (LITL: Lithium Ion Test Linac) の加速に成功したのは 1982 年であった。以後この RFQ 型の特徴が注目を浴びて、世界各地に爆発的な勢いで普及した。

RFQ 型の原理は次のとおりである。ビーム軸を取り囲んで対称に配列された 4 本の平行な丸棒を想定する。これに正負の正弦波が交互に印加された場合、ビーム軸に沿って進行する荷電粒子は四重極電場による集束と発散を交互に受ける。この丸棒の太さを軸に沿って周期的に変化させると進行方向にも電場成分が発生するので、強集束性をもった加速電場を形成する可能性がある。加速されている粒子集団の速度に同期した周期性を丸棒にもたせる数値解を求めることができ、直流的に入射された粒子のほとんどすべてを加速しながら加速位相に集めて、強集束・加速を同時に実行する理想的な加速を設計することができる。上に触れた POP や LITL はそれを検証すると同時に、実用的な構造例を提示した。その構造は上記の説明に用いた 4 本の丸棒構造よりも優れた機械的・高周波的性能をもつ円筒共振空胴型で、中心軸の回りを 4 象限に分割する 4 翼構造で

ある。その翼の中心軸辺が周期波形に加工されている。また、低電荷重イオンの低速領域の加速のために、より低い周波数の共振を可能とする分割同軸型と呼ばれる特殊な共振構造も開発された。従来よりはるかに低速度で入射された陽子や重イオンが、高周波電場のみで強集束と加速を受けて MeV 領域まで効率良く加速されるという特長が注目を浴び、数多くのイオン加速器の初段にはこの RFQ 型が採用され、従来の数百 kV 級コッククロフト型高電圧入射器が全てこの方式に取って換えられるまでに進展することとなった。

ここで線型加速器の将来の開発方向に触れよう。核融合炉材料開発用大強度中性子源のための重陽子ライナック、核燃料増殖・放射性廃棄物変換のための陽子ライナック等連続ビーム数十～数百 mA 級の加速器、慣性核融合点火のためのパルス重イオン 10n 秒、数十 kA 級の加速器等は、技術的に多くの課題はあるが、すでに確立した技術の延長線上にある。電子加速で確立している超伝導空洞のイオン加速への拡張も当然の流れである。一方、あくまで高エネルギー加速を目差す素粒子物理学要請に対しては、技術の延長線上にある課題のほか、新しい加速概念の開発に期待するところも大きい。GW 級のマイクロ波源の開発、TW 級の極短パルスレーザーとプラズマの相互作用で発生する航跡場（ウェーク）の超強電場加速、極短パルス大電流電子とプラズマの相互作用で発生するウェークによる電子加速、先行ビームの励起するウェークによる後行ビームの加速等々数多くの研究課題がある。以前に注目された電子リング加速（ERA：パルス大電流電子の小さい環がつくるポテンシャルに捕捉された正イオンが電子環の加速に伴われて高速度に加速されるという発想）も重イオンの加速には魅力あるもので、現在の技術水準から見れば未だ死んだものとは思えない。これらの開発が超小型の加速器を応用分野に提供する可能性もある。

（２） マイクロトロン（電子サイクロトロン）

次項で述べるサイクロトロンがイオン加速用のライナックを磁場で巻き上げたものと考えられると同様に、マイクロトロンは電子ライナックを磁場で巻き上げともものと見做すことができる。

マイクロトロン加速の原理も幾人かの研究者によって独立に見出された。1944 年に V. Veksler が位相安定性の原理を見出した際に、シンクロトロン加速と関連して提案した。しかし、1946 年には L. Schiff が、そして 1947 年には大阪大学の伊藤順吉、小林大二郎が、また J. Schwinger がそれぞれ独立に原理を見出している。

平坦な円形磁場の外周近くに加速空洞を置き、電子がそれを通過する度に電子の静止エネルギーに等しい加速を受ければ、その質量は静止質量の整数倍、したがってその角速度は低エネルギー電子の角速度の整数分の 1 となる。低エネルギー電子の角速度に対応する高周波を加速空洞に与えれば、電子の加速位相は一定に保たれ、加速空洞を通過する度に軌道半径は一定のピッチで大きくなっていく。この位相安定性の成り立つ範囲は加速電場の降下側にあって $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ と比較的狭い領域であり、適切な磁場は他の周回加速器に比して低く 1～2kG である。したがって、そのままの形では高エネルギーまで加速するには不適當であり、また磁場についても集束条件を満たす工夫が必要である。

この原理の加速器は cw 加速で大電流が期待でき、cw の電子ライナックより低コストと思われるので、近年になって注目されはじめ、医療目的のものは市販されている。核物理研究分野では近年、数 GeV の大電流電子ビームが重要なプローブの一つとして要請され、その具体化案として超伝導電子ライナックと周回磁場を組み合わせたレーストラック型マイクロトロン系が提案された。これが実現したのは 1995 年、トーマス・ジェファークソン国立研究所（CEBAF：Continuous

Electron Beam Accelerator Facility) における 4GeV、cw200 μ A (2 台の超伝導ライナック・0.4GeV \times 2 を 5 周回させる) である。現在活発に核物理実験研究が行われているが、加速エネルギー向上も試みられており、現在 6GeV、2000 年には 10GeV への向上が目標となっている。この計画を推進している H. Gruner は、かつてローレンス・バークレ国立研究所 (LBNL) でウランに至る重イオンを高エネルギーに加速して高エネルギー重イオン核物理の端緒を拓き、また重イオン癌治療の試行を可能にした人物であることも興味深い。

(3) サイクロトロンからシンクロトロンへ

1929 年のある夕刻、カリフォルニア大学の図書館で新着雑誌に目を通していた E. Lawrence は先に述べた R. Wideroe の論文の啓示に打たれた。彼は論文のドイツ語は理解しなかったが挿絵を見て (日本人にもよく有るタイプだが)、無限に続く中空加速円筒がどこまでも高エネルギーに粒子を加速する姿を想起し、もし磁場をつかえばこの円筒電極を一つにまとめることができると考えた。その夜彼は、平坦磁場を周回する荷電粒子の速度は半径に比例する ($v=qBr/m$)、周長も半径に比例する、と考えている間にふと周回周期から半径 r が消えると気付いた。すなわち、「平坦磁場中を周回運動している荷電粒子の周期はそのエネルギーに依らず一定」という等時性の原理を見出して、線型加速器に必要な無数の円筒電極を、周回軌道を覆って一定周波数で励振される 1 つの電極にまとめることができると気付いた。ただちに彼は学生 N. Edlefsen に研究開始を指示し (同時に学生 D. Sloan にはヴィデレー型ライナックの研究を行わせたことは前述のとおり)、その後大学院生 M. Livingston に研究を引き継がせた。彼は Lawrence と Edlefsen が原理を立証したと発表した実験が、実は残留ガスイオンが周回せずに検出器に達していたことを実証するとともに、1kV の電極電圧で 80keV 陽子加速の試作 1 号器を作って、最初のサイクロトロン共鳴を観測して学位論文とした。そして 1932 年には初めてサイクロトロンと名付けた試作 2 号器で 1.2MeV のビーム加速に成功した。その夏ケンブリッジを訪ねた Lawrence は、Gamow にけしかけられた Cockcroft 達がわずか 500keV の陽子で原子核の人工破壊に成功したことを知り、即刻長距離電話で核実験の開始を命じた。かくして新しい高エネルギー加速器サイクロトロンは核物理研究の新時代の幕開けの立役者として登場することとなった。

彼のサイクロトロン発明の裏には、いくつかの僥倖が重なっていた。彼の発見した等時性とビーム集束性の両立する条件がはからずしも自然に成立していたのであるが、実験成功の後でこれらの完全な理論的解析が行われた。用いた磁場は既に 7 年前 Wideroe によって見出されていた弱集束の条件を満たしていた。しかし、この条件に制約されている限り、彼の予想に反して加速エネルギーには限界があった。1937 年には H. Bethe が弱集束磁場の中で加速されている陽子は、相対論的質量増加によってやがて等時性を失って、たかだか 40MeV が限界となるであろうと指摘し、1938 年 M. Rose も同様の論文を書いている。カリフォルニア大学の大学院生 R. Wilson (後のフェルミ国立加速器研究所・FNAL の初代所長) は電極間の静電集束も考慮した集束条件で加速限界を論じた論文を書いている。これらの研究は、どこまでも高エネルギーに加速できると期待していた Lawrence を喜ばせなかったが、弟子の E. McMillan によって、8 年後シンクロサイクロトロンが発明され等時性の破れが解決された。Lawrence の偉大さは、むしろ驚くべきエネルギーで次々と大型のサイクロトロン建設に挑戦して行った牽引力にある。彼は常に極めて優秀な協同研究者達によって取り巻かれていた。のちに定在波空洞を用いたアルバレ型陽子ライナックを開発し、タンデム加速の原理を提唱した Alvarez も、彼の弟子であった。理論物理学者 Bethe による

「 ^1H は安定、 ^3He は不安定同位元素」という定説を、彼が 2 台のサイクロトロンを駆使して覆したことはあまり知られていない。

さて、ここで日本におけるサイクロトロン建設の歴史に触れる。コッククロフト装置で発生させた中性子を用いて先駆的に核物理研究を開始していた理化学研究所の仁科芳雄達、大阪大学の菊池正士達は、1935 年サイクロトロン建設を計画し、前者は 1937 年 3MeV 重陽子ビーム、後者は 1938 年 5MeV の重陽子ビームを出した。大阪大学ではこのビームを用いて生成した放射性同位元素のベータ崩壊の精密実験を中心とする核物理研究が行われたが、理化学研究所では核物理研究の他、植物の同化作用、光合成、蚕の遺伝、白血病等々、生物医学への応用研究が極めて先駆的に行われた。仁科芳雄自身はむしろ大型のサイクロトロン建設に情熱を傾けた。同じ頃、Lawrence も同様の大型サイクロトロン建設を計画していたので、大型電磁石を 2 台アメリカで製作し、1 台は LRL (当時の名称は Lawrence Radiation Lab. 後に Lawrence Berkeley National Lab.) へ、他の 1 台は石川島造船所を経て駒込の理化学研究所へ搬入された。LRL では順調に建設が進み、1939 年には 16MeV の重陽子ビームを出し、核物理研究のみならず発生速中性子による 120 例の癌治療も行われた (彼の建設予算要求は癌治療目的となっていた)。一方理化学研究所では加速電圧の不足で十分なビームが出ず、原因調査のために LRL を訪ねて驚いた。高周波共振系の構造が全く異なっていた。小型サイクロトロンで用いた加速電極静電容量とコイルインダクタンスの集中定数共振回路をそのまま大型に拡張した仁科達の設計と異なって、LRL では分布定数の立体共振空洞構造であった。LRL 側の好意で、全ての青図面を受取って改造を開始した。(時あたかも日米開戦の前夜であった。科学技術は国際情勢を越えて、いかに友好的であったかを物語っている。) このサイクロトロンが 9MeV の陽子ビームを出したのは 1944 年、第 2 次大戦の末期に近づいていた。1945 年には、占領軍が理化学研究所の 2 台、大阪大学の 1 台、京都大学で建設中の 1 台を全て破壊し、東京湾と大阪湾に沈めてしまって、以後 1950 年代に入るまで空白時代が続いた。その間に、アメリカでは加速器開発と核物理研究の両面で著しい成果が展開された。日本としては非常に残念な空白時代であった。

さて、先に触れたようにサイクロトロンの等時性の破れは、シンクロサイクロトロン、シンクロトロンが解決するのだが、それより先に、1938 年 L. Thomas が理論的な解答の一つを提示していた。彼の論文はサイクロトロンの等時性と集束性を厳密に取り扱い、加速限界を超えるためには、磁場を周回軌道方向に沿って変化させることを提案した。現在稼働している多数のサイクロトロンは全てこの Thomas の論文に端を発するアイソクロナス・サイクロトロン (Sector Focus : SF, Azimuthally Varing Field : AVF, Isochronous : IC 等様々の名称がある) であるが、論文発表当時は全く注目されなかった。後で述べる強集束の原理が 1952 年に出るに及んで、ようやく Thomas の論文も再認識されて、20 年の歳月を経て実現の運びとなった。実はその間、アメリカでは極秘軍事研究として実験が行われていたが、公開されなかった。

平坦な磁極面に付加した扇型磁極の縁に斜入射・斜出射する粒子は、その都度集束・発散の力を受ける。その大きさは斜入・出射角や磁場変化比に依るが、合成された作用は常に集束となるのは強集束の原理の教えるところである。したがって、半径方向には相対論的質量増加に合せて磁場を強く (η 値 < 0) して等時性を保たせても、集束性を失わない。集束性を大きくするために扇型の形状をスパイラル状にしたり、扇型磁場を分割してリング状に配列したりする。デルフトで 13MeV の SF サイクロトロンが 1957 年に完成し、続いて 1960 年にはカリフォルニア大学ロス

アンゼルス校 (UCLA) で J. Richardson (後の TRIUMF 所長) が従来型の加速限界を大きく超える 50MeV 陽子の加速に成功するに及んで、世界各地でこの型のサイクロトロンが建設されていった。そして、従来の古典的サイクロトロンは全く姿を消してしまった。この型のサイクロトロンは大強度、エネルギー可変性、多様な加速イオン種等の利点を有しているので、タンデム型バンデグラフと並んで核物理研究の中心となつて活躍し、近年では応用研究にも広く用いられるようになった。加速エネルギーを $K \times q^2 / A \text{ MeV}$ と表記して、 K 値でそのエネルギー性能を表しているが、陽子では $K \text{ MeV}$ 、重イオンは質量数 A 、電荷数 q によって上式で計算される。大型のものはスイス原子核研究所 (SIN、現在はポールシェラー研究所 PSI) の 590MeV 陽子、負水素加速を行っているカナダ三大学中間子施設 (TRIUMF) の 520MeV 陽子、日本では大阪大学核物理研究センター (RCNP) の 400MeV 陽子等である。また、重イオン加速用の大型サイクロトロンとしては、フランス国立大型重イオン加速器研究所 (GANIL) の $K=400$ 2 台連結、理化学研究所 (IPCR) の $K=540$ 、蘭州近代物理研究所 (IMP) の $K=450$ 等である。これらのほとんどは分離扇型磁場のリング状配列で構成されている。一方、単一の超伝導電磁石を用いたサイクロトロンも重イオン加速用に幾つか建設されており、その主なものは、H. Blosser によって精力的に開発されたミシガン州立大学国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL) の $K=1200$ 、 $K=540$ 等である。これらの大型重イオン加速器の多くは、最近注目を集めている生成不安定原子核ビーム施設への発展を目指している。

さて、サイクロトロン加速における等時性の破れは、扇型集束型で乗り越えることができるのは上述のとおりであるが、それが実証されるより先に別の方式が発見された。その原理は、磁場や周波数の時間変化が断熱的であれば、周回運動と加速高周波の同期は自動的に保たれて原理的にどこまでも高いエネルギーに加速できる、というもので位相安定性の原理と言う。1944 年に V. Veksler が、そして 1945 年には E. McMillan がこの原理を独立に発見し、面白いことに 1946 年に R. Wideroe もこの原理について独立に特許をとっている。この原理にもとづく加速器としては、二つの方法が提案された。質量の相対論的增加に合せて加速周波数を変調するシンクロサイクロトロンがその一つであり、周回半径はサイクロトロン同様エネルギーとともに増大する。他の一つは運動量増大に合せて磁場を強くして周回半径を一定に留め、加速粒子の速度増加に合せて加速周波数も変調するシンクロトロンである。

先づ、従来のサイクロトロンに類似の構造のシンクロサイクロトロンが建設され、古典的サイクロトロンのエネルギー限界 (約 20MeV) を楽々と越えてゆき、1946 年に完成した LRL の 184" シンクロサイクロトロンは π 中間子の人工生成を実証し、その陽子エネルギーはやがて 760MeV に達した。しかしながら、このような大型シンクロサイクロトロンは磁極直径が 5m にもなり、重量も 4000t に達し、工作技術的にも経済的にも早くも限界に近くなっていた。(旧ソ連のみは例外で、レニングラードで陽子 1GeV、7800t が 1967 年完成、ドブナで大強度陽子 700MeV、7000t のファゾトロンが 1984 年完成。極めて先進的な加速器原理の発明と驚くべき大艦巨砲が共存していた。)

ここに登場したのが周回軌道上に電磁石を配列するシンクロトロンで、最初周波数固定の電子加速用のものが Wilson (200MeV)、McMillan (300MeV) 達によって建設され、 π 中間子生成の研究で核子の 3-3 共鳴の発見の端緒をつくった。一方、1952 年にはブルックヘブン国立研究所 (BNL) に陽子 3GeV のものが建設され、宇宙線による高エネルギー物理研究に取って換ろうという意欲を表してコスモトロンと名付けられ、 K 中間子生成を実証した。続いて LRL で、反陽子生成を意図して陽子 6GeV のベバトロンが 1954 年に建設され、実際にその目的を果たした。しかしながら、1957

年に建設されたドブナ連合原子核研究所 (JINR) のシンクロファゾトロンは 36000t の重量に達し、またしても大きさの限界を感じさせることとなった。

この段階で救世主のように登場してきたのは強集束の原理であった。その原理は 1952 年、E. Courant、M. Livingston、H. Snyder 達によって発見されたが、実はすでに 1949 年、加速器に何ら経験を持たないギリシャの技術者 N. Christofilos によって特許出願がされていたことが後になって判明した。すでに幾度か述べた弱集束は、周回軌道に沿って一様な磁場を周回する粒子の軌道に垂直な面内の二つの直交する方向（半径方向と軸方向）に対する集束性を同時に成り立たしめるための妥協の産物として $0 < \eta < 1$ の条件を与えた。この制約の中での集束力は弱く、粒子は数周回して元の位相にもどる振動解をとり、その振動幅は大きくなり、電磁石を小型化することは不可能であった。強集束とは、光学系で凸レンズと凹レンズが距離をへだてて配置されている場合の合成レンズ系は必ず凸レンズであるという周知の事実と同様に、集束電磁場と発散電磁場が配列されている場合、その合成系は荷電粒子に対して集束系となっているという原理である。

（なお、光学レンズと異なり、電磁場レンズは一般的には一方向集束であればその垂直の方向発散となっている。）この原理でシンクロトロン電磁石系を設計すれば、強力な集束力が得られるので、電磁石は画期的に小型化することが可能となる。（この原理が 1938 年の Thomas の論文を再認識させたことは前述の通り。）

その頃、新たに設立されたジュネーブの欧州合同原子核研究所 (CERN) で設計を完了していた 10GeV 陽子シンクロトロンが急きょ設計方針を変更して強集束型を採用し、同じ予算で 28GeV の陽子シンクロトロン (CPS) となって 1959 年に完成した。すぐ引続いて、BNL でも 1960 年に、33GeV の強集束型陽子シンクロトロン (AGS) が完成した。これら陽子シンクロトロンよりやや早く、電子シンクロトロンも強集束型となり、Wilson によって最初の強集束シンクロトロン (1.2GeV) がコーネル大学で、そしてボン大学でも稼働した。日本でも将来の陽子シンクロトロン建設の前段階として、強集束電子シンクロトロンが東京大学原子核研究所 (INS) で建設され、1961 年に稼働した。

以上の強集束シンクロトロンの構造は、周回磁場を分割して、正負の磁場勾配 ($n < 0$ と $n > 0$: $B = B_0 e^{i\pi s}$) の磁場を交互に配列したもので、半周分は発散磁場であるが、強い発散と強い集束の合成系は強い集束系 (Alternating Gradient Focus) となって、1 周する間に数回元の位相にもどる振動解となり、振動幅を非常に小さくすることができる。Courant たちは同じ論文の中で、四重極磁場は良い円筒レンズで、交互に異なる極性の四重極電磁石を配列すれば、良い長距離ビーム輸送系が構成できると付記している。

ここで、Courant 達の論文にわずか数週間遅れて出された東北大学北垣敏男の特筆すべき論文にふれておく。周回軌道を構成する二重極の n 値を正負交互に配列して集束系とする機能結合 (Combined Function) 型に換って、周回軌道の二重極の n 値を零とし、直線部に極性の異なる四重極を配列して集束作用をもたせる機能分離 (Separated Function) 型を提唱し、100GeV 陽子シンクロトロンの設計例も併せて提示した。この提案は集束作用を周回磁場と独立に調整できるので、前者より遥かに自由度のある設計であった。彼はまた、より高エネルギーの加速器設計は、1 段より 2 段のシンクロトロン加速が合理的であることも提唱している。20 年近く経った 1971 年、幾度も触れた Wilson が FNAL において 500GeV 陽子シンクロトロンを完成して初めて実現した。また CERN でも同様の構成で、CPS を入射器としてスーパー陽子シンクロトロン (SPS)、陽子 450GeV が

1976年に稼働した。今日では、機能分離型や2段シンクロトロン設計はもはや常識となっていることを考えると、その先見性が理解される。

さて、低・中エネルギーの重イオン加速は主としてタンデム型バンデグラフ、アルバレ型ライナック、アイソクロナス・サイクロトロン等で行われたが、シンクロトロン加速を初めて行ったのは1970年代、陽子シンクロトロンの使命を終えたコスモトロン (BNL) やベバトロン (LBL) であった。特に後者は重イオンライナック (Super-HILAC) を入射器としてベバラック (BEVALAC) と呼ばれる複合系に改造されて、ウランに至る重イオンを GeV/核子の高エネルギー領域まで加速して核物理の新分野を切り開いた。この加速器系は1992年に停止したが、GSIにおいて、より高度に整備された複合施設、重イオンライナック (UNILAC)、重イオンシンクロトロン (SIS)、重イオン蓄積・冷却リング (ESR) の複合系が1990年に稼働している。後述の蓄積、冷却等の開発により、近年重イオン反応で生成される不安定原子核ビームの蓄積・冷却加速等が可能となって、不安定核ビームによる核物理研究のための複合加速器が幾つか計画されている。より高エネルギーの加速は、BNLではAGSを用いてAuイオンを10GeV/核子まで、CERNではSPSを用いてSイオンを200GeV/核子まで加速し、現在BNLで建設中の相対論的イオン衝突器 (RHIC、100GeV/核子×2) への足掛りを作っている。

近年、小型陽子シンクロトロンが癌治療用として注目されている。陽子の人体組織中での吸収線量分布が飛程末端で急峻なピーク (Bragg Peak) を持つことを癌治療に利用する発想であるが、最初に提唱したのは1946年のWilsonの論文であった。彼は1940年頃、J. Lawrence (Lawrenceの弟、医師) の速中性子線治療の不成功を見、また荷電粒子の飛程とエネルギーの関係を精密に研究していたので、その発想は自然の流れであったと思われる。その論文の末尾に、将来高エネルギー重イオンが利用できるようになれば更に有効であろうとまで述べている。この論文は当時計画されていたハーバード大学のシンクロサイクロトロン実現の応援のために書かれたものらしいが、事実この160MeV陽子は1967年から今日まで数多くの臨床実績 (260例/年) をあげて、陽子線治療の有効性を実証した。そして現在、250MeV (体内飛程30cm) 程度の小型シンクロトロンが医療専用加速器として普及し始めている (一部はアイソクロナス・サイクロトロンを加速器として採用)。重イオンについては、上に述べたベバラックのNeビームを用いて1980年頃から臨床試験が行われ、その後本格的な医療用施設 (HIMAC、800MeV/核子) が筆者達によって放射線医学総合研究所 (NIRS) に建設され、1994年からCビームを用いて臨床試験に入っている (現在までに約750例)。GSIでも上に述べたSISのCビームを用いて、1997年末から臨床試験を開始した。

(4) ビーム蓄積、ビーム衝突、軌道放射、そしてビーム冷却

加速器発達の最も華やかな面は素粒子物理学のために加速器をより高エネルギー化することであった。そして π 中間子、K中間子、反陽子、(J/ψ) 粒子等の生成が次々と実証されていったが、新しい素粒子の発見にはその生成反応に有効な高い重心系エネルギーを必要とした。そのために、静止標的の実験室系ではもっと高いエネルギーを用意しなければならなくなった。素粒子研究のための高エネルギー領域では、静止標的に衝突させた場合の重心系全エネルギーは入射エネルギーの平方根にしか比例しない。例えば500GeV陽子を水素標的に衝突させれば31GeV、これを1000GeVに上げて43GeVのエネルギーしか有効でない。これと同様の実験は15.5GeVの陽子どうし、21.5GeVの陽子どうしの正面衝突で実現できる。勿論、ビームどうしを正面衝突させるのは容易でなく、有効に正面衝突させるには長時間衝突リングの中に大量の鋭いビームを蓄積して

おくことが重要課題であった。

ビーム蓄積リングの研究は、1956 年アメリカの MURA グループで、バンデグラフやベータトロンの項で述べた D. Kerst 達によって始められた。同年、G. O'Neil は電子の衝突型加速器計画を提唱し、B. Richter 達とともに 1961 年にスタンフォード大学で互いに接する二つの電子-電子衝突リングを建設した。また、Wideroe とともにベータトロンを製作した B. Touschek は電子-陽電子衝突の重要性を唱え、一つのリングで実現できる技術的提案を行って、1960 年にはフラスカティ国立研究所で ADA と名付けたリングにかなりの長時間電子を蓄積することに成功した。驚くべきことに、あのアイディアマンの Wideroe 自身はすでに 1943 年に衝突型加速器についても特許を取っていた。Touschek 達とベータatron 開発を行っていた頃に！である。ADA の電子蓄積成功の後、フラスカティ研究所では 1969 年 ADONE、オルセー原子核研究所では 1970 年 DCI と、一つのリングの中を互いに反対方向に走る電子-陽電子衝突リングが次々と建設された。核子衝突については、1971 年 CERN の CPS の 28GeV 陽子を入射して陽子-陽子衝突をさせる交差型蓄積リング (ISR) が完成し、10 年余り唯一の核子-核子衝突リングとして稼働した。ここでは陽子を大量に蓄積するために、かつて MURA グループによって研究された高周波蓄積法が活用された。この蓄積法は後に 1979 年 INS において筆者達が完成した重イオン蓄積リング (TARN) のビーム入射・蓄積にも用いられ、イオンの大強化のための多重入射法と高周波蓄積法の複合方式が確立された。

さて、電子-陽電子衝突については次々と高エネルギーの装置が建設され、ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) の PETRA (17GeV \times 2)、SLAC の PEP (11GeV \times 2)、コーネル大学の CESR (5GeV \times 2) が稼働し、その後これらは性能向上によりいずれもエネルギーを上昇させた。そしてさらに高エネルギー衝突を目指して、我が国では高エネルギー物理学研究所 (KEK) に TRISTAN (30GeV \times 2) が 1986 年に完成したが、その後 1989 年には CERN の LEP (55GeV \times 2) が稼働して世界最高の電子-陽電子衝突リング (Z ウィークボゾン工場) となった。周回する光速に近い電子は放射光と呼ばれる電磁波を電子軌道の接線方向に放出することが早くから知られている。この放射エネルギーは電子エネルギーの 4 乗に比例するので、これが電子リングの高エネルギー化に限界を与えている。そのため、より高エネルギーの電子-陽電子衝突を目指すには、加速は線形加速器によらねばならず、衝突も直線上を 1 回で行わせねばならない。TeV 領域のエネルギー、nm サイズのビームの 1 回衝突を目指して、その前段階の線形衝突器 (SLAC Linear Collider : SLC, 50GeV \times 2) が建設された。そして現在、この方向の開発研究が各国で行われている。

周回電子からのエネルギー放出の問題は、古くは J. Larmor が 1890 年代に解いているが、1945 年になって J. Blewett 達は GE 社の 100MeV ベータトロンの電子エネルギーの研究から放射損失が無視できないとの結論を出した。光として実際に観測されたのは 1947 年、GE 社の 70MeV シンクロトロンからの光であった。電子加速にとっては邪魔者であった放射光も、その精密観測は基礎的には特殊相対論の検証につながるものであり、応用的には極めて良好な光学特性をもち、波長領域も今までにない広域を覆っているので、その積極的利用研究が約 30 年以前から開始された。わが国でも INS 電子シンクロトロン (1.3GeV) を利用して研究が先駆的に進められ、やがて専用の小型蓄積リングも世界で最初に建設された。放射光は発生の由来からシンクロトロン放射光 (SR) と呼ばれ、1960 年代は殆どの研究が素粒子研究用の電子シンクロトロン (のちには電子蓄積リング) に寄生していたが、その特長を活かした大小様々の専用放射光源の建設、利用法の開発が年を追って活発になった。最近に建設された高輝度光源の主なもの、グーノープル欧州共

同 SR 施設 (ESRF : 6GeV、1994 年)、アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の SR 光源 (APS : 7GeV、1996 年)、わが国のスーパー光リング (SPring-8 : 8GeV、1997 年) である。これらの最新施設は周回軌道からの SR に加えて、軌道直線部に配置した挿入光源と呼ばれる装置が主要な高輝度光源を構成している。これらの挿入光源装置は、強磁場で電子を蛇行させて短波長大強度を実現させる多極ウィグラーや、蛇行の周期性による干渉効果で高輝度を実現させるアンジュレータ等で、これらの開発と併せて電子ビーム自身を大強度化、高安定化、低エミッタンス化する様々の開発が行われている。SR 光源を用いる研究は物質・材料から生物・医学に亙る基礎・応用研究、さらには産業界に革新的技術をもたらす可能性も秘めており、その期待は留まるところを知らない。

ここでアンジュレータから発展した自由電子レーザー開発に触れる。1950 年代クライストロンや電子ライナック開発を進めていたスタンフォード大学にオクスフォード大学から移った H. Motz は、1951 年電子を周期的に蛇行させてミリ波を発生させるアンジュレータを提案し、1959 年電子ライナックを用いてミリ波から可視光の発生とその理論解析を行った。これは上に述べた単色光 SR として、その後挿入光源へ発展したが、これらの研究を基盤として J. Madey 達は同大学で開発された 43MeV 超伝導ライナックの良質の電子ビーム (エネルギー幅 0.05%) と超伝導ヘリカルアンジュレータをはさんだ合わせ鏡の光共振器 (光クライストロン) を組み合わせて、自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) と名付けて開発し、1977 年に最初の発振に成功した。

従来のレーザーがルビーや炭酸ガス等の原子・分子の励起準位から出る波長・位相の揃った光であり、波長も変え難く出力も媒質で制限されているのに対して、FEL はレーザーのコヒーレント単色光の特長に加えて、波長可変・大出力可能という魅力をもっていた。この夢のレーザーに対してアメリカは戦略防衛構想 (SDI) の中核として取り上げ、先に述べた RFQ (中性ビーム兵器として) とともに強力に推進した。これらの研究は軍事研究としての成果は実らなかったが、ともに加速器科学の中では一定の成果があった。そしてアメリカではスタンフォード大学、LANL 等 5 か所、欧州でも 2 か所に FEL 利用研究施設が稼働している。わが国では SR 挿入光源の開発に力が注がれたが、FEL に関しては SDI に批判的であったためか開発には 10 年の遅れがあった。その後、電子技術総合研究所、分子科学研究所等々で研究が行われ、現在自由電子レーザー研究所が $0.278\mu\text{m}$ の世界最短波長記録を出している。そして世界で 8 番目の FEL 利用研究施設として、半導体物性、同位体分離、新素材、生物・医学応用等の研究に供されている。

ここで、加速器物理学上の重要な話題を述べよう。先に述べたように、電子や陽電子の蓄積リングでは、運動量のばらつきはエネルギーの 4 乗に比例する SR により放射減衰が起るが、陽子や反陽子ではこの現象がほとんどないため、特に素粒子反応で生成される反陽子の蓄積にはビーム冷却法の開発が不可欠の課題であった。周回リングを走行する粒子集団の重心とともに走行する位相空間座標系では、ある温度の気体分子集団と同様の、位置と運動量の拡がりをもっている。この拡がりを減少させることは気体温度を冷却することと類似しているため、ビーム冷却の名がある。現在、二つの方法が確立している。その一つは、1966 年ノボシビルスクで G. Budker によって発明された電子ビーム冷却法で、蓄積リング内の陽子ビームとほぼ同じ速度で走る冷たい (エネルギーや方向の拡がりが小さい) 電子ビームとをリング直線部で並走させて、相互に運動量のやりとりをさせ、常に新しい冷たい多数の電子を流し続けて、陽子ビームのエネルギーや方向の拡がりを減少させる。他の一つは 1972 年 CERN で S. Van der Meer によって発明された確率冷却法である。熱い反陽子集団のばらつきを観測し修正する“マクスウェルの悪魔”を用いる。周回

する集団の中の個々の粒子を観測、修正する悪魔はいないが、部分小集団から得た観測情報で、リング下流の適当な場所の高周波電場をちょうどその小集団が周回してくる時点に合わせて制御し、全集団の平均値からのばらつきが小さくなるように補正する。この操作を多数回繰り返すことにより、全集団のばらつき（エントロピー）を減少させる方式である。この確率冷却法を確立した CERN は SPS (400GeV 陽子シンクロトロン) を衝突リングとして用いて、陽子-反陽子衝突 (270GeV $\times 2$) を実現させ、1983 年に弱い相互作用の媒介粒子 W^\pm 、 Z^0 (ゲージボソン) の存在を検証した。また、FNAL でも先に述べた 500GeV シンクロトロンを超伝導化してエネルギー倍増し、冷却リングを組み合わせて TEVATRON (1TeV $\times 2$) が完成され、最近第六番目のクォークであるトップクォークの検証を果たした。一方、蓄積された反陽子を減速した上で冷却する低エネルギー反陽子リング (LEAR) が 1983 年に同じく CERN に完成し、原子核物理学の研究に提供された (現在、重イオン冷却リングに転用されている)。低速領域の確率冷却については、INS において筆者達が建設した前述の重イオン蓄積リング (TARN) を用いて成功し、その後建設した冷却シンクロトロン (TARN-2) を用いて電子ビーム冷却にも成功する等、核物理・原子物理の領域でにわかに注目を集め、各地で冷却リングの建設が行われるようになった。この他、イオン励起準位に共鳴するレーザーを用いるレーザー冷却も実現しており、またミューオン冷却に用いるエネルギー損失冷却も研究されている。

なお、CERN では先に述べた LEP (電子-陽電子衝突リング) のトンネルを利用した LHC (陽子-衝突シング: 8TeV $\times 2$) が建設中であり、これが当面世界最高エネルギー衝突計画である。重イオン衝突については、先に触れたように、BNL において中断されたイザベル計画のトンネルを活用した相対論的重イオン衝突器 RHIC (100GeV/核子 $\times 2$) が建設中である。非対称衝突としては、電子-陽子衝突器 HERA (電子 30GeV \times 陽子 820GeV) が DESY で稼働中、また電子-陽電子の非対称エネルギー衝突器は KEK (8GeV \times 3.5GeV) や SLAC (9GeV \times 3.1GeV) で建設中である。

III おわりに

以上に各種加速器についての原理と発展を、それぞれ年代を追って記述した。これらの各種加速器は単独の完成された市販機器となって応用研究、産業に広く活用されているが、一方大型の装置ではそれぞれの特長を活かした複合装置を構成することが多い。加速、減速、蓄積、冷却等を自在に取り扱って、超低エネルギーから超高エネルギーまで、顕微鏡的なビームから大強度ビームまで、f 秒のパルスから連続ビームまで電子、陽子、重イオン、偏極粒子、二次粒子として中性子、反粒子、中間子、不安定核そして放射光等々多様なビームを提供している。加速器が出現して以来今日までの 60 年間に、エネルギーで 10 桁、強度で 10 桁、そして多様な加速ビーム種に広がる三次元空間に加速器を用いる研究、応用の領域は拡張され続けている。(図 1 参照)

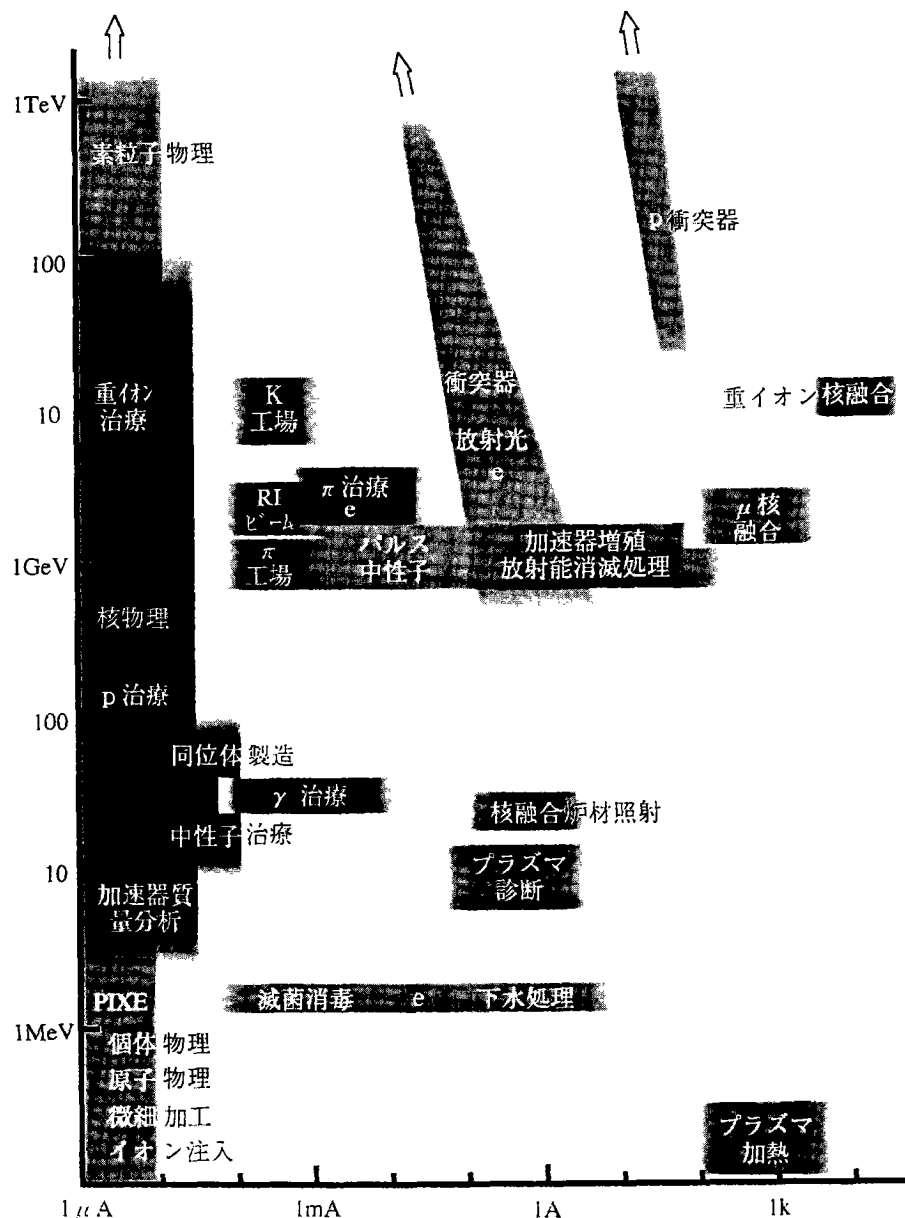


図1 粒子ビーム応用のエネルギー・強度分布図。横軸は電流値、縦軸はエネルギーを示す。イオンの質量別は示されていない。電子の応用についてはeまたはγが付記されている。

原理的な面で重要な発明・発見は、1929年 Lawrence のサイクロトロン の等時性原理、1944年 Veksler 達の位相安定性の原理、1952年 Courant 達の強集束の原理、1956年 O'Neil 達の衝突型の提唱、そして1966年 Budker、1972年 Van der Meer のビーム冷却法の発明をあげることができよう。これらの発明・発見は高エネルギー化とともに大型化する加速器をその都度小型化し、あるいは不可能を可能にする役割りを果たしてきた。

一方、光学的、技術的に見ると、第2次大戦末期のレーダー技術の進歩がもたらした大電力高周波技術、強集束原理によって小型化された電磁石が多数配列された巨大な精密機器となった加速器の設計を極めて高精度で実行することを可能としたコンピュータの急速な進歩、等が加速器

の進化に果たした貢献は顕著である。また超伝導技術、超高真空技術の寄与も大きい。もっと一般的に、産業界が提供する素材、部品の高品質化、技術の高度化なしには、加速器物理学が期待する進歩は実現しなかったであろう。(図2参照)

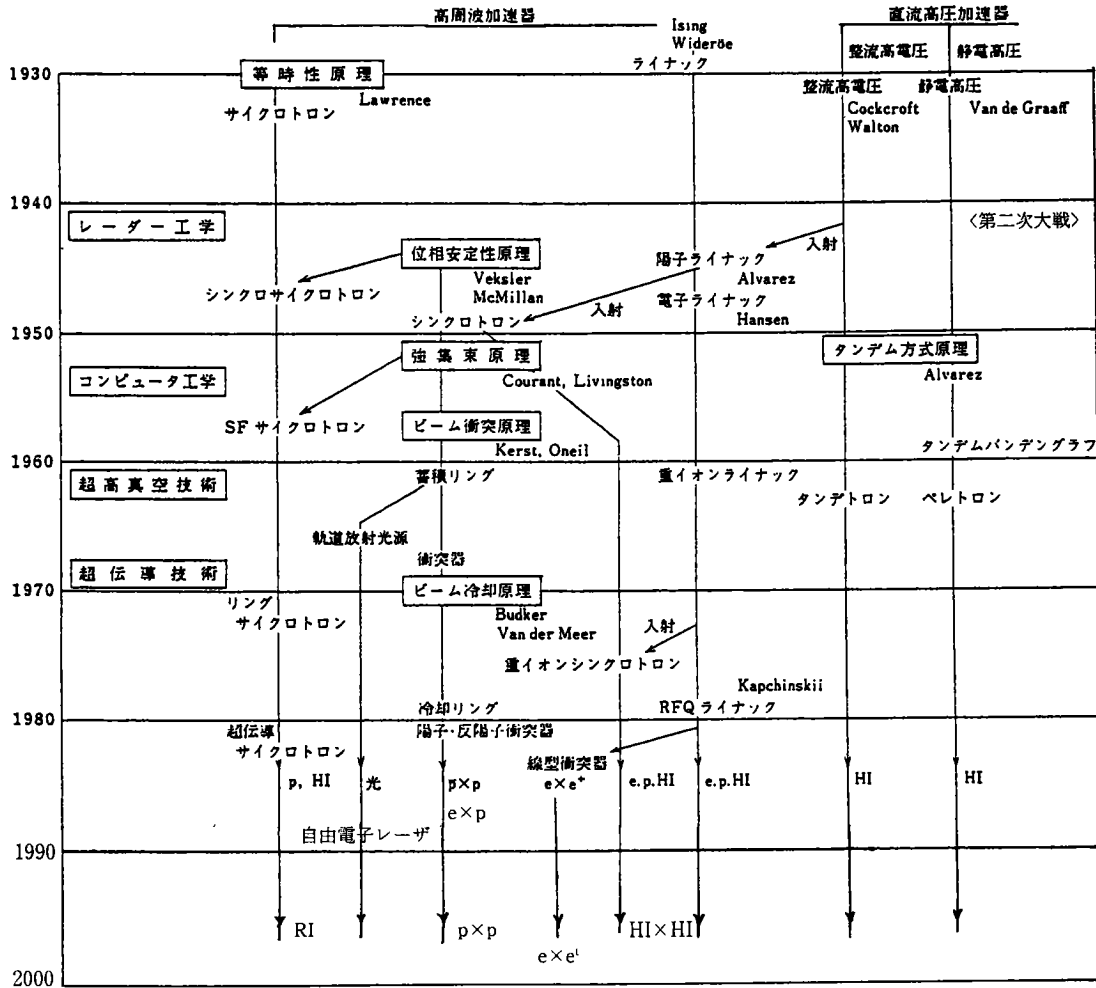


図2 加速器開発の歴史とその背景

今世紀、進化し続けた加速器は、物理学の根幹にかかわる重要な概念や知識に計り知れない貢献を果たしてきた。もし加速器が存在しなかったとすれば、人類の自然に対する理解は現在とかなり異なるものとなっていたと思われる。一方、推進の原動力であった原子核・素粒子の研究に留まらず、先駆的にそれを利用し続けた医学分野はもとより、物性・化学・生物学・工学等の広範な基礎・応用の分野で、さらに産業界でも加速器が盛んに利用されるようになってきた。しかもこれらの分野で加速器の秘める能力に対する期待は留まるところを知らず、今なお発展の一途をたどっている。基礎科学の研究所で、医療施設や生産工場で、また公害処理やエネルギー開発にまで、机上に乗せられるような小型の加速器から街を取り巻くような超大型の規模まで、多様な加速器群が重要な役割りを果たしつつある。

参考資料 3

参考資料 3.

加速器科学関連用語集

・イオン注入

固体内に不純物を導入する手段の一つで、目的とする不純物をイオン化して加速（数十 keV 以上）し、固体内に打ち込む方法。

・ECR（electron cyclotron resonance）イオン源

電子サイクロトロン共鳴を利用するイオン源のこと。磁場中に閉じ込められた電子にそのサイクロトロン周波数に等しい高周波を印加すると、高周波のエネルギーが共鳴的に電子に吸収されて高エネルギー電子が生成する。高エネルギー電子は原子の束縛を離れるため、効率良く多価イオンが生成できる。

・ウィグラー

超伝導磁石のような強い磁場によって電子ビームの軌道を急激に強く曲げることにより、きわめて波長が短く、輝度の高い連続スペクトルを持つ放射光を発生する装置。

・エキゾチック原子核（exotic nuclei）

陽子数に対する中性子数が極端に多い中性子過剰核（中性子ハロー核など）や、逆の場合の中性子欠損核（陽子ハロー核など）、核の変形（ラグビーボール型）が大きい超変形核、バナナ型原子核など極限状態原子核の総称。

・SLD実験（SLDはStanford Large Detector の略）

米国スタンフォード線形加速器センターにある電子・陽電子衝突型加速器SLC (Stanford Linear Collider)を用いる実験。1990 年実験開始。日本チームも参加。

・X線構造解析

物質中の原子の並び方を主にX線の解析現象を利用して解析する方法の総称。単結晶構造解析や粉末X線回折法がその代表的なものである。

・X線吸収微細構造（XAFS：X-ray Absorption Fine Structure）

物質を構成する原子のX線吸収スペクトルはその吸収端から高エネルギー側へ数十 eV の範囲にスペクトル線が何本かに分かれる微細構造を示し、さらにその先、数百 eV での領域では吸収係数が周期的に変化する微細構造を示す。後者は広域X線吸収微細構造と呼ばれ、その原子の周囲の局所的な構造についての情報を与える。

・X線吸収微細構造（XAFS）分析

元素にX線を照射すると上のように、特有の波長のX線を吸収する。そのスペクトルを用いた

解析法。X線吸収ピークの近傍の微細構造を測定して、特定の元素の周囲の原子配置や電子状態を調べる。

- ・ X線小角散乱

単色X線の物質による散乱で、3度位までの小さい散乱角で生じるもの。蛋白質のような大きな面間隔の格子面が存在するときに起こる小角の回折の場合もある。結晶欠陥など物質内の密度の異なる領域が多数ある時、これらが散乱体となって生じることが多い。

- ・ X線ラマン散乱

原子内に強く束縛された電子（内殻電子）の励起を伴うX線の散乱現象。散乱されたX線は電子の励起分だけ散乱前よりエネルギーを失っており、散乱エネルギースペクトルからXAFS分析と同様の解析ができる。軽元素のXAFS分析は通常真空中で測定しなければならないが、X線ラマン散乱は硬X線を用いるため大気中での測定ができる。

- ・ エネルギー可変陽電子消滅

単色陽電子ビーム（別項）を物質に入射する際、ビームのエネルギーを調節することにより、陽電子が対消滅する深さを制御することができる。エネルギーを調節したビームを用いて、陽電子の入射から消滅までの時間や2本の消滅ガンマ線のなす角度を測定することにより、欠陥の種類や大きさとその深さ分布、任意の深さでの電子の運動状態などを非破壊的に知ることができる。

- ・ エネルギーの単位

$1\text{ eV} = 1\text{ 電子ボルト} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ ジュール}$ 、陽子や電子が1ボルトの電圧で加速されたときに得るエネルギー。室温（絶対温度 300°K ）の気体原子の持つ運動エネルギーは約 $1/40\text{ eV}$ である。 1 eV は 12000°K の気体原子の運動エネルギーに相当する。

（ $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$ 、 $1\text{ GeV} = 10^9\text{ eV}$ 、 $1\text{ TeV} = 10^{12}\text{ eV}$ ）

- ・ エネルギー・フロンティア（energy frontier）

（現段階において）最も高いエネルギー領域のこと。加速器の発展とともにより高いエネルギーへと移ってゆく。

- ・ 円偏光

光の波の性質の一つ。光は振動して伝播するが、その振動面が一平面内に限られているものを直線偏光という。振動が回転しながらつたわるものを円偏光といい、その回転方向により右円偏光、左円偏光がある。

- ・ オージェ電子

励起状態にある原子が基底状態に遷移するとき、光子を放出するかわりに原子内の電子にエネルギーを与えて電子を放出する。この放出電子をオージェ電子と呼ぶ。オージェ電子のエネルギー

一を分光することにより原子の電子状態の解析・原子の種類の同定などができる。

- ・架橋

“橋かけ”ともいう。放射線照射などによって、分子間（特に高分子）に新たな結合を生じ、分子量の大きな分子になる反応をいう。架橋の結果、高分子材料では強度の増加、耐熱性の増大などが起こるので、材料の改質に利用される。

- ・カスケード方式 (cascade type)

シンクロトロンの主リングにビームを入射するとき、小型のシンクロトロン（ブースターという）を用いる加速器の型式。KEKの陽子シンクロトロンは、フェルミ研究所のテバトロンとともに、カスケード方式を世界で最初に実現した加速器である。カスケード方式は主リングのビーム強度を大きくできる点、ブースターで加速されたビームを利用できる点で有利とされており、その後、建設された大型シンクロトロンは、この方式を採用しており、それまでに建設されたシンクロトロンもブースターを追加増強したものもある。

- ・加速器駆動末臨界発電炉

加速器を用いた高エネルギー粒子の反応によって得られた中性子を、末臨界状態の炉心に供給することにより核反応を持続させ、発電を行う原子炉のこと。加速器で炉心を駆動するため、中性子バランスを制御でき、安全性を向上できる。

- ・冠状動脈造影（コ罗纳リーアンジオグラフィー）

ヨードなどの造影剤を血管内に注入し、X線の連続撮影などによって、冠状動脈の血管走行の画像を得るための方法。冠状動脈は、心臓の筋肉に栄養と酸素を補給する血管であり、この動脈がつまると心筋梗塞や狭心症になる。

- ・極限条件（物性研究）

極低温、超高温、超高压などの環境条件をいう。超高压下では水素が伝導を示すなど通常的环境とは全く異なった物理挙動を示すことが知られている。極限条件での物性研究から物質の本質を知ることができる期待されている。

- ・クォーク (quark)

陽子、中性子、 π 中間子など、強い相互作用をする素粒子（ハドロン）を構成する基本粒子。アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s)、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) の6種類のクォークの存在が確認されている。全てのクォークは、スピン 1/2 を持つ。電荷については、u、c、t は $(+2/3)e$ 、d、s、b は $(-1/3)e$ の電荷をもつ。

- ・クォーク・グルーオン・プラズマ (quark gluon plasma)

クォーク・matterと呼ばれることもある。素粒子を構成する際、クォークはグルーオンによっ

て結び付けられており、クォークやグルーオンはこの結合状態でしか存在しないと考えられている。しかし、最近の理論計算によれば、数兆度以上の高温や、普通の原子核の 10 倍以上の高密度では、クォーク・グルーオンの結合状態が破れクォークとグルーオンが入り混じって存在するプラズマ状態になると予測されている。クォーク・グルーオン・プラズマは、宇宙創生直後の高温期には実現していたと考えられている。

- ・ 空孔型欠陥

原子が、格子状に配列した結晶から、原子が抜けた型の欠陥。原子が 1 個抜けたものを単空孔、2 個以上抜けたものを複空孔という。陽電子はこの型の欠陥に敏感で、欠陥の濃度や大きさについての情報を与える。

- ・ グルーオン・グルーオン相互作用 (gluon-gluon interaction)

グルーオンとグルーオンが相互に作用すること。クォークとクォークの間に働く強い力を媒介する粒子（ゲージ粒子）をグルーオンという。グルーオンがクォークと相互作用するのは当然であるが、グルーオンどうしても相互作用することが予想されていた。電磁相互作用を媒介する光子には無い性質であり、TRISTAN の実験がそれを実証した。

- ・ 蛍光 X 線

X 線またはガンマ（ γ ）線で物質を照射すると、その物質中の元素の特性 X 線がでる。この X 線を蛍光 X 線と呼ぶ。

- ・ K 中間子 (K-meson)

質量が π 中間子の約 3 倍の中間子で、s クォークと u クォークが結合してできる荷電 K 中間子 ($K^+ = u\bar{s}$ 、 $K^- = \bar{u}s$) と、s クォークと d クォークが結合してできる中性 K 中間子 ($K^0 = d\bar{s}$ 、 $\bar{K}^0 = \bar{d}s$) がある。質量は以下のとおり。

$$K^\pm : 493\text{MeV}/c^2 \text{ (電子の約 950 倍)}$$

$$K^0 : 498\text{MeV}/c^2$$

K^\pm は 10^{-8} 秒程度の寿命で、 $\mu^\pm\nu$ 、 $\pi^\pm\pi^0$ 、 $\pi^+\pi^+\pi^-$ などに崩壊する。また、 K^0 は、寿命の短い (10^{-10} 秒) K_s^0 と寿命の長い K_L^0 (10^{-8} 秒) の混合状態と考えられており、 K_s^0 は 2 個の π 中間子に、 K_L^0 は 3 個の π 中間子に崩壊する。 K^\pm 、 K^\pm とともに、稀に C P の破れを示す崩壊を起こすことが知られている。

- ・ ゲージ粒子 (gauge particle)

ゲージ場に伴う粒子のこと。ゲージ場は時空の各点における位相変換に対して不変の場で、自然界の 4 種の力の場はすべてゲージ場である。したがって、グルーオン、光子、ウィークボソンなどはすべてゲージ場の粒子である。万有引力の場はゲージ場であることは認識されているが、重力子の存在は明らかでない。

- ・高輝度放射光 (high brilliance SR)

通常の電磁石ではなくて、ウィグラーやアンジュレーターのような挿入光源によって発生する放射光。通常の場合に比べて、輝度が 1000 倍程度大きくなる。

- ・光電子分光

物質が光やX線を吸収し、その結果、物質から放出された電子のエネルギーや角度分布の測定より、物質を構成する原子の結合状態などの物理状態を観測する方法の総称。

- ・航跡場

プラズマ中にはプラズマ振動と呼ばれる固有な振動が存在し、このプラズマ振動の周期に相当する程度のパルス幅の極短パルスレーザーをプラズマ中に打ち込むと、大振幅のプラズマ波が励起される。これは、ちょうど船が水面を進むときにできる航跡に似ているため、航跡場と呼ばれる。この航跡場が作る強い電場を用いて荷電粒子を加速する方法を航跡場加速という。

- ・高周波加速空洞 (radio-frequency acceleration cavity)

高周波の電磁波によって荷電粒子を加速するための装置の一部で、電磁波発生源からの電磁波を受けて、加速電場を形成するための空洞。

- ・固定標的 (fixed target)

粒子を衝突させて実験を行うために固定してある標的。素粒子の実験では水素を用いることが多いが、標的密度を大きくするため液体水素が使われる。原子核実験では金属箔が使われることが多いが、気体や液体の場合もある。

- ・小林・益川の6元クォーク模型 (Kobayashi-Masukawa six-quark model)

素粒子を構成する基本粒子に関する模型。これによると、素粒子は6種類のクォーク、u、d、s、c、t、bで構成される。最初(1963年)、Gell-Mannによって導入されたのはu、d、s、の3種であるが、1973年、小林・益川は、中性K中間子の崩壊に見られるCPの破れをワインバーグ・サラム論に基づいて説明するには、クォークが少なくとも6種あり、世代混合と呼ばれる特定の相互関係が必要であるとの理論を提唱した。その後、c(1974年)、b(1977年)、t(1995年)が発見された。

- ・コンプトン散乱X線

自由電子と高エネルギーの光子(X線あるいはγ線)との散乱をコンプトン散乱といい、散乱されたX線のうち、その波長が入射X線より長い方にずれたもの。

- ・紫外線 (ultraviolet) 真空紫外線 (vacuum ultraviolet = VUV)

紫外線は波長が400nmから数10nm($\text{nm} = 10^{-9} \text{m}$)までの光の総称で、波長がそれより短い光をX線という。波長が0.2nm～約200nmの範囲の光をとくに真空紫外線という。この領域の光は空気

によって強く吸収されるので、光路を真空にしなければならないことから、この名称がある。

- ・ C T R 散乱 (Crystal Truncation Rod 散乱)

結晶表面・界面に特有の散乱現象である。結晶の三次元周期が表面で途絶えることによる二次元的構造を反映した散乱で、これを測定することにより表面・界面近傍の結晶構造を解析することができる。

- ・ C D F 実験 (CDF は Colliding Detector Facility の略)

米国フェルミ研究所の世界最高エネルギーの陽子・反陽子衝突型加速器を用いる実験で、1986 年実験開始。米国、イタリア、日本の国際共同実験。1995 年トップ・クォークを発見した。

- ・ C P 不変性の破れ (C P violation)

C と P の両方を行う変換 (C P 変換) を行うと相互作用 (ハミルトニアン) が変わるとき、C P 不変性が破れているという。強い力、電磁気力は C P 不変であり、弱い力も多くの場合 C P 不変である。1950 年代に弱い力では P 不変が成り立たないことが示され (パリティ非保存)、C、P に対する不変性が重要な課題になった。1964 年、Fitch と Cronin が中性 K 中間子の崩壊の中に C P が破れている現象を発見した。現在のところ、K 中間子の崩壊以外に C P が破れている現象は確認されてはいないが、B 中間子の崩壊で大きな C P の破れが予想されており、B ファクトリーでの実験が精力的に進められている。C P の破れの起源は未解決の課題である。現在の宇宙が大部分粒子で構成され、反粒子が少ないのは C P の破れに起因していると考えられる。

- ・ 生物学的効果比 (RBE : relative biological effect)

放射線による生物学的効果の程度は吸収エネルギーに依存するが、放射線の種類が異なれば同じ吸収線量でも効果が異なる。このことから、X 線またはガンマ (γ) 線による生物学的効果を基準とした、対象となる放射線による生物学的効果の比を生物学的効果比という。

- ・ 精密 (素粒子) 物理

エネルギー・フロンティアの探索的物理に対比して、素粒子の性質や崩壊現象などを精密に調べることによって、新しい粒子や法則などを見いだそうとする物理。

- ・ 線エネルギー付与 (LET : linear energy transfer)

荷電粒子が物質中を通過する際、その行程の物質に単位長さ当たり局部的に与えるエネルギー。この値が高いと密にイオン化が起こる (中性子線など)。

- ・ 蓄積リング (storage ring)

加速器で加速された荷電粒子やそれによって作られる二次粒子を長期間 (数分~数十時間) にわたって蓄積しておくシンクロトロンのこと。粒子は、蓄積リング内で、軌道を曲げられるたびに放射光を発生する。放射光を出すたびに、粒子はエネルギーを失うので、そのエネルギーを一

定に保つための装置。

- ・中性子過剰核 (neutron-rich nuclei)

同じ原子番号を持つ安定同位体と比較して、中性子数の多い同位体を中性子過剰核という。

- ・中性子散乱 (neutron scattering)

一般に、中性子が物質にあたって散乱されることをいう。ここではエネルギーの低い中性子を用いて物質構造を研究することを指す。中性子は電荷を持たないが、原子核によって散乱されるので、物質内における原子核の位置を決定することができる。また、中性子は磁気モーメントを持つので、原子の電磁氣的性質を調べることができる。

- ・超重元素

一般にウランより重い元素をいう。

- ・長寿命放射性廃棄物

安定な核種に崩壊するのに長い時間を要する核種（長寿命放射性核種）を含む廃棄物のこと。長寿命放射性核種としては、マイナーアクチノイド核種（ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)など)、核分裂生成物などがある。

- ・超伝導加速空洞

超伝導体が低温になると電気抵抗が極めて低くなることを利用した加速空洞。電力の消費が極めて少なく、高い加速電場を持つ加速器を作ることができる。

- ・超対称性理論 (supersymmetric theory)

自然界にある粒子は、粒子のスピン（自転）によってボゾンとフェルミオンの2種に大別される。ボゾンはスピンが0または整数で、フェルミオンは半整数である。元来、ボゾンとフェルミオンは全く別種の粒子と考えられていたが、ボゾンとフェルミオンの間には対称性があり、ボゾンとフェルミオンが同数種だけ存在し、それぞれ一対一に対応するということを超対称性という。

- ・超対称大統一理論 (supersymmetric grand unified theory)

電磁気力、弱い力、強い力を統一的に記述する理論を大統一理論（GUT）という。大統一理論を構築するときに、超対称性の必要性が予想されており、超対称大統一理論といわれている。この3つの力に加えて、万有引力をも統一的に記述しようとする、超対称性は不可欠であると考えられている。

- ・D - T 中性子源

重水素 (D) - 三重水素 (T) の核融合反応、 $T(d, n)He$ により高速中性子 (n ; 14MeV) を発生させる方法。

- ・ D - Li 中性子源

リチウム(Li)をターゲットとし、これに 35MeV の重陽子 (D) ビームを照射するとストリッピング反応により、前方向にエネルギー分布が 14MeV 付近にピークを持つ中性子が得られる。重陽子のエネルギーによって中性子のエネルギーが可変できる。

- ・ 電弱理論 (electroweak theory)

電磁気力 (電磁相互作用) と弱い力 (弱い相互作用) を統一した理論。この理論は、1967 年 Weinberg、Salam、Glashow などによって提出され、中性カレントの存在やウィークボゾンの発見 (1983 年) で実験的に確かめられた。この理論を構築するときに、数学的手法としてヒッグス機構が用いられた。

- ・ トムソン散乱

自由電子と低エネルギーの光子の散乱をいい、コンプトン散乱の低エネルギーの極限に相当する。

- ・ 軟X線 (soft X-ray)

波長が数百 Å (Å ; オングストローム = 10^{-10} m) から 0.01 Å 程度の間の電磁波のことをX線といい、このうち大体 2 Å より波長が長いものを軟X線という。これに対して、2 Å より波長が短いものを硬X線という。硬X線は軟X線より透過力が強く、透過力の強い線を硬いX線、吸収されやすい線を軟らかいX線とした呼び名がそのまま伝統的に残ったものである。

- ・ 二次粒子

一次放射線と物質との相互作用によって放出される粒子。

- ・ 熱中性子 (thermal neutron)

中性子が原子核と衝突を繰り返して減速し、媒質中の分子の熱運動と平衡に達した中性子。

- ・ ハイパー核 (hypernucleus)

奇妙さを持つ重粒子 (s クォークを持つ Λ 粒子や Σ 粒子など) を含む原子核。 Λ や Σ は性質が、陽子や中性子と似ているので、 Λ や Σ を含む原子核を生成することが可能である。ハイパー核の寿命は約 10^{-10} 秒である。

- ・ π 中間子 (π -meson)

核力を媒介する粒子として、湯川によって予言 (1935 年) された最初の中間子。質量は約 $140\text{MeV}/c^2$ で、電子の約 280 倍。u クォークと d クォークで構成され、 π^+ 、 π^- 、 π^0 の 3 種がある。 π^\pm 中間子は 10^{-8} 秒で崩壊して、 μ 粒子を生ずる ($\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu$)。 π^0 中間子は 10^{-16} 秒で 2γ 崩壊する。

- ・パートナー粒子（超対称性の）（partner particle）

超対称性理論によれば、現在知られているクォーク、レプトン、ゲージ粒子などには、必ずそれに対応する粒子が存在することになる。これらの対応する粒子をパートナー粒子と呼んでおり、パートナー粒子全部をまとめてSUSY粒子という。例えば、クォークのパートナーはスクォーク、フォトンのパートナーはフォティーノなどと名付けられている。

- ・パルス中性子源（pulsed neutron source）

周期的に一定の間隔において中性子を発生する装置。一番最初のもは、1962年にソ連で建設されたパルス原子炉であった。その後、加速器を用いたパルス中性子源が建設された。世界の主なパルス中性子源は、英国ラザフォード研究所のISIS、米国ロスアラモス研究所、KEKの12GeV PSのブースター利用施設などである。

- ・パルスラジオリシス（ポンプ&プローブ）

非常に短いパルス状（現在では、パルス幅がフェムト秒）の放射線を照射し、その後に起こる現象を光学手段を用いて観察し、放射線反応の初期の基礎過程を解析する方法。ポンプ&プローブは、それを放射線反応以外にも広めたもの。

- ・反射高速陽電子線回折（reflection high energy positron diffraction）

高速（数keV～10keV程度）の陽電子をごく浅い角度で固体表面に入射し、反射する陽電子の回折パターンにより、表面の原子配列を知ることができる。陽電子は、電子の場合と異なり表面ポテンシャルの反発を受けるので内部まで入り込まず、表面近傍層の状態を知ることが可能である。

- ・バンド構造

結晶内の電子が取りうるエネルギー帯（バンド）の構造。各電子が、周期的に配列したイオンのポテンシャルと他の電子が作る平均場を受けて運動すると考えると、結晶内の電子は量子化されたエネルギー帯を形成する。

- ・ヒッグス機構（Higgs mechanism）、ヒッグス場（Higgs field）

ヒッグス機構は、1964年 Higgs によって提案されたゲージ対称性（ゲージ変換に対して不変なこと）の破れを説明する理論的手法をいう。このような性質を持つ場のことをヒッグス場といい、それに伴う粒子がヒッグス粒子である。ヒッグス機構は電弱理論を導くときに用いられており、電弱力が実証された現在、ヒッグス粒子の発見が重要な課題となっている。ヒッグス粒子は素粒子の質量を決定する役目を持っている粒子である。

- ・光核反応

原子核に数 MeV 以上のエネルギーを有する光（ガンマ（ γ ）線）を入射すると、巨大双極子共鳴状態の励起や、原子核中の重陽子による吸収、あるいは（ γ 、 π ）反応などの反応が起こる。これらを総称して光核反応と呼ぶ。

- ・ B 中間子 (B-meson)

ボトム・クォーク b とアップ・クォーク u またはダウン・クォーク d で構成される中間子。 b と u が結合してできる荷電 B 中間子 ($B^+ = u\bar{b}$ 、 $B^- = \bar{u}b$) と、 b と d が結合してできる中性 B 中間子 ($B^0 = d\bar{b}$ 、 $\bar{B}^0 = \bar{d}b$) がある。質量は以下のとおり。

$$B^+ : 5,278\text{MeV}/c^2 \text{ (電子の約 } 10000 \text{ 倍)}$$

$$B^0 : 5,279\text{MeV}/c^2$$

崩壊の過程で大きな CP の破れを示すことが予想されており、 b クォークが c クォークに変わる (香りの変化) 可能性がある。

- ・ ビーム冷却

加速ビームは、エネルギーや運動量などに広がりを持っている。この広がりにはビームが持つ温度のようなものである。この広がりを小さくする技術をビーム冷却という。エネルギーのそろった電子を用いる方法 (電子ビーム冷却) や確率的な方法 (ストカスティック冷却) などがある。

- ・ B 物理 (B-physics)

B 中間子、とくにその崩壊現象について研究する物理。

- ・ 標準模型 (standard model) (標準理論)

強い相互作用を量子色力学 (QCD) で、弱い相互作用と電磁相互作用を電弱理論で記述する模型。この模型は 18 個のパラメーターを持ち、これらを決定する原理は分かっていない。

- ・ 不安定核種 (unstable nuclei)

不安定な原子核 (放射性同位元素) のこと。

- ・ ベータトロン振動

シンクロトロンなどの円形加速器内のビームが、ビームの進行方向と垂直な面内で起こす振動のこと。

- ・ 偏極ビーム (polarized beam)

ここの粒子のスピン (自転) の向きが揃った粒子ビーム。

- ・ ポジトロニウム

陽電子 (ポジトロン) と電子がクーロン力によって結びつき、水素原子 (陽子と電子の結合状態) のような一種の原子状態を形成したもの。

- ・ ミューオンスピンの回転緩和共鳴 (μ SR)

ミューオンは π 中間子の崩壊によって生成する際に、進行方向にスピンの揃うという性質を持つ。この性質を利用し、スピンの揃ったミューオンを物質に打ち込み、物質に働く磁場やその磁

場ゆらぎを観測する方法を μ SR法という。この方法は、回転・緩和・共鳴の3つの方法からなる。

- ・メソン・ファクトリー (meson factory)

中間子工場のこと。大強度の陽子加速器を用いて多量の π 中間子を発生し、 π 中間子やその崩壊で生ずる μ 粒子を用いて広い学際領域の研究を行う施設を云う。世界の主なメソン・ファクトリーは、米国のロスアラモス研究所 (LANL)、カナダのトライアンフ (TRIUMF)、スイスのポール・シェラー研究所 (PSI) である。

- ・陽電子消滅誘起オージェ電子分光 (positron annihilation induced Auger electron spectroscopy)

陽電子が原子の内殻の電子と対消滅し、原子が励起状態から基底状態に遷移するとき、準位間のエネルギー差に等しいエネルギーを外側の軌道の電子が受け取り、放出される (オージェ電子)。このオージェ電子のエネルギーを測定すると原子の同定ができる。電子入射による通常のオージェ電子分光に比べ、二次電子にはバックグラウンド信号のないスペクトルが得られ、表面感度の極めて高い測定が可能である。

- ・4種の力 (four kinds of forces)

自然界に存在することが知られている4種類の力、すなわち、万有引力 (重力)、電磁気力、強い力、弱い力のこと。これらの力は粒子間で相互に作用するので、相互作用ともいわれる。

| 力 | 力の強さ | 力の作用範囲 | 例 |
|------|------------------|---------------------------|------------|
| 万有引力 | 10^{-39} | 無限大 | 天体 |
| 電磁気力 | 1 (電磁気力を1とした) | 無限大 | 原子、分子、化学反応 |
| 強い力 | 10^2 | 短い (10^{-15}m) | 核分裂、核融合 |
| 弱い力 | 10^{-10} | 短い (10^{-15}m) | ベータ崩壊 |

- ・量子色力学 (quantum chromodynamics)

クォークとその間に働く強い力を取り扱う理論、略称QCDといわれている。色力学という名前の由来は、クォークの持つ3つの自由度を色の3原色で表現したことによる。

- ・ルミノシティ (luminosity)

加速器のビームの強度を表す量。固定標的の場合には、毎秒、標的に入射する粒子数であり、衝突型加速器の場合には両方のビームに含まれる粒子が、毎秒、交差する粒子数を表す。

- ・冷中性子 (cold neutron)

低エネルギーの中性子のうち、エネルギーが 0.5eV 以下のものを熱中性子と呼び、一般に媒質

との多重散乱による熱平衡によって得られる。この時媒質が液体ヘリウム温度程度まで冷却されて、そのエネルギーが 0.002eV 以下の場合には冷中性子と呼ばれる。

