

# 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

科学技術庁 科学技術政策研究所

第4調査研究グループ

瀬谷 道夫

桑原 輝隆

情報分析課

田村 泰一

本調査資料は、科学技術政策研究所が平成9年度から実施している、「加速器科学を対象とする先端科学技術動向調査」の一環として実施した「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」(平成10年11月～平成11年1月)の結果を紹介するものである。なお、この調査結果は、本年度別途とりまとめられる先端科学技術動向調査(加速器科学)報告書にも収録される予定である。

Survey Results  
of  
Development Forecast Survey  
on  
Compact Accelerators and Compact Synchrotron Radiation Generation Systems  
Based on Breakthrough Technologies

May 1999

Michio Seya  
Terutaka Kuwahara  
4th Policy-oriented Research Group

Ysukazu Tamura  
Information Analysis Division

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)  
Science and Technology Agency

## 目 次

はじめに .....	i ~ iii
調査結果	
F 1. 所属・年齢 .....	1 ~ 3
F 2. 卒業時の専門 .....	4
F 3. 従事する加速器関係研究分野 .....	5
Q 1. 加速器の将来像 .....	7 ~ 27
素粒子（高エネルギー）物理学研究分野 .....	7 ~ 9
原子核物理学研究分野 .....	10
エネルギー利用研究分野 .....	11 ~ 12
物質・材料科学分野 .....	13 ~ 15
生命科学・医療利用研究分野 .....	16 ~ 22
産業利用分野 .....	22 ~ 24
その他（新しい分野・加速器全般等） .....	25 ~ 27
Q 2. 高周波加速小型電子加速器の実用化等 .....	29 ~ 39
Q 3. 高周波加速小型陽子・重イオン加速器の実用化等 .....	41 ~ 47
Q 4. 非高周波加速小型電子加速器の実用化等 .....	49 ~ 62
Q 5. その他の電子加速法による小型化 .....	63 ~ 67
Q 6. 非高周波加速小型陽子・重イオン加速器の実用化等 .....	69 ~ 78
Q 7. その他の陽子・重イオン加速法による小型化 .....	79 ~ 81
Q 8. レーザーアンジュレータ放射光発生装置の実用化等 .....	83 ~ 91
Q 9. 小型化が有望な放射光発生方法 .....	93 ~ 98
Q 10. 加速器開発に関する意見 .....	99 ~ 110
自由記述 .....	111 ~ 116
参考. 他の予測結果との比較 .....	117 ~ 118

添付 1. 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票

添付 2. 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（試案）

## はじめに

科学技術政策研究所（以下、「当研究所」という。）では、加速器科学を対象とする先端科学技術動向調査を実施中であり、その一環として、既存の技術をブレークスルーし加速器等を大幅に小型化するような将来技術に関し、基礎的研究段階のものも含めて調査・検討している。この調査・検討においては、一般的なRF加速器とは異なる加速原理に基づいた小型加速器等に関する具体的な提案を広く調査するとともに、その中から、いくつかのものについては具体化を進展させ、一つの試案として、具体的な提案（別添2. 非高周波高勾配加速技術による小型加速器等の提案のまとめ（試案）参照）としてまとめるとともに、それら小型加速器等の各提案及びブレークスルー高周波加速技術（高周波加速で、かつ、現在達成されている最高加速勾配を1～2桁上回る）による小型加速器について、加速器研究者（約450名）を対象とする実用化に関する予測調査（別添1. 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票参照）を実施した（平成10年11月～平成11年1月実施、有効回答率約20%）。また、この調査においては、20～30年後の加速器の将来像や、今後の加速器開発等に関する意見等も伺っている。

本調査資料は、上記の「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」の結果を紹介するものである。なお、この調査結果は、別途とりまとめられる先端科学技術動向調査（加速器科学）報告書にも収録される予定である。

この調査において、「小型加速器等」とは以下の目安のものとし、

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

開発予測時期を問う小型加速器等は次のものとした。

- i 高周波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
- 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）
- v 放射光発生装置
  - v-A レーザーアンジュレーター放射光発生装置（研究開発段階Ⅲ）

ここで、iii～vの小型加速器等については、電子リング加速器のように、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、それらを区別するため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

なお、上記の「加速器科学を対象とする先端科学技術動向調査」は、当研究所に設置した先端科学技術動向調査委員会（加速器科学）の指導の下に実施している。以下に、そのメンバーを示す。

#### 先端科学技術動向調査委員会（加速器科学）委員一覧

- 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)
- 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 助教授  
" 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  
(平成10年9月末まで 文部省 高エネルギー加速器研究機構 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 サイクロトロン研究室  
R I ビームファクトリー計画推進室長 (主任研究員)

## 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	加速器同好会及びビーム物理研究会会員等
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%)

謝辞：今般の調査票は非常に長いもので、回答に相当の時間を要するにも拘わらず、上記のように多くの方々から回答を寄せていただきました。ここに、回答を寄せていただいた方々に深く感謝いたします。

## 調査結果

## F1. 回答者所属・年齢

### (回答者所属)

#### 1. 大学等教員（文部省大学共同利用研究機関を含む）等

所属機関	回答者数
高エネルギー加速器研究機構	13
大阪大学	6
京都大学	3
宇都宮大学	3
広島大学	2
筑波大学	2
その他（10大学）	10
小計	39

#### 2. 国立研究所研究官

所属機関	回答者数
放射線医学総合研究所	1
電子技術総合研究所	1
小計	2

#### 3. 特殊法人研究員

所属機関	回答者数
日本原子力研究所	12
理化学研究所	3
核燃料サイクル開発機構	1
小計	16

#### 4. 民間企業研究員・技術顧問・役員

所属機関	回答者数
東芝	3
住友重機械工業・住友加速器サービス	3
三菱電機	3
日本高周波	2
日新電機	2
その他（10企業）	10
小計	23

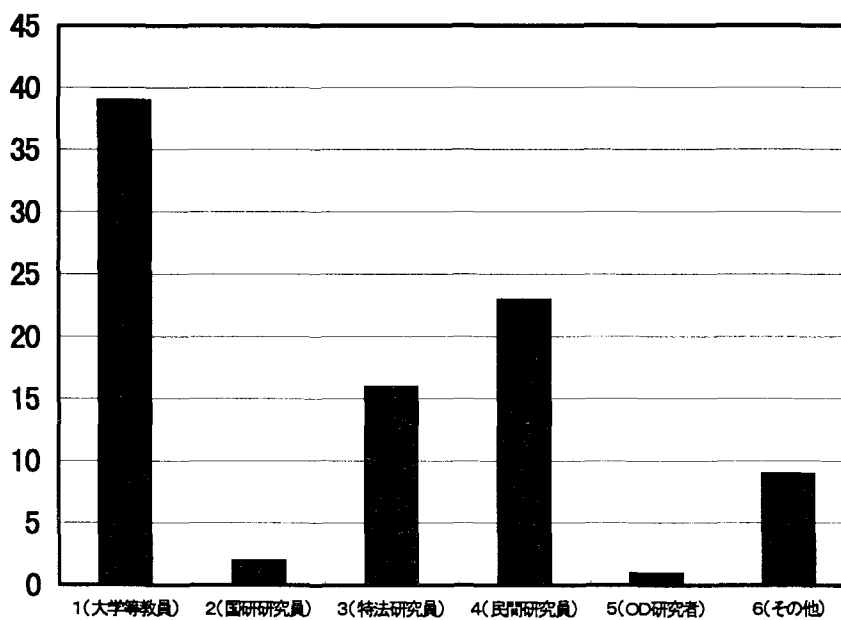


5. 博士課程修了研究者（OD）・その他

所属機関	回答者数
博士課程修了研究者（OD）	1
そ 高輝度光科学研究センター	3
の その他財団法人	1
他 博士課程在学	3
退官教授他	2
小 計	10

図一1. 回答者所属別分布

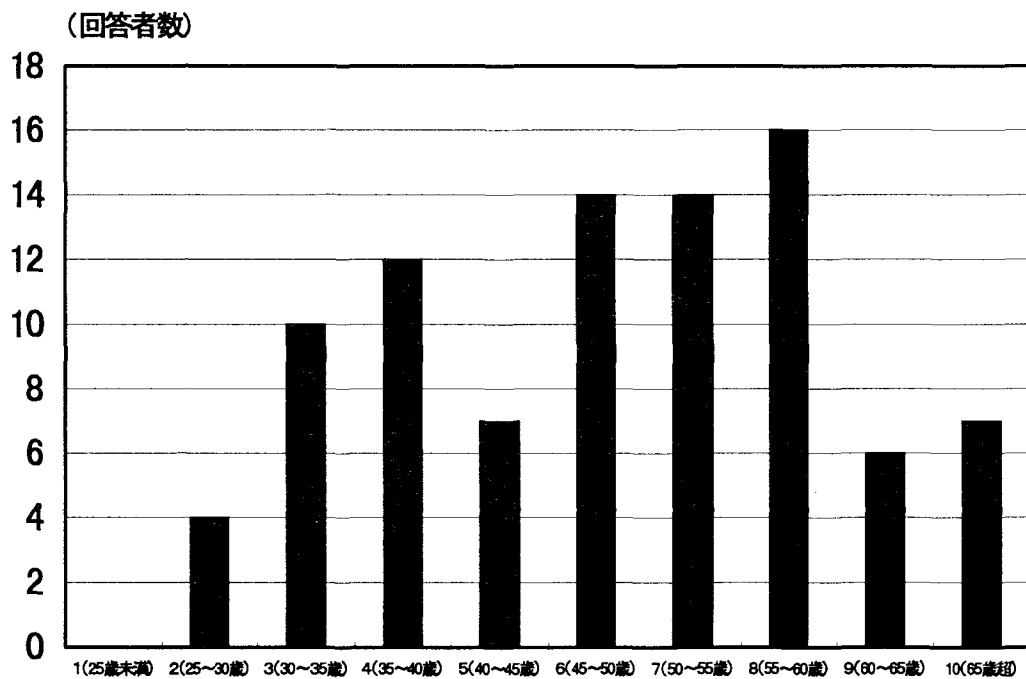
(回答者数)



(回答者年齢)

回答者年齢帯	回答者数
1. 25歳未満	0
2. 25～30歳	4
3. 30～35歳	10
4. 35～40歳	12
5. 40～45歳	7
6. 45～50歳	14
7. 50～55歳	14
8. 55～60歳	16
9. 60～65歳	6
10. 65歳超	7
合 計	90

図-2. 回答者年齢別分布

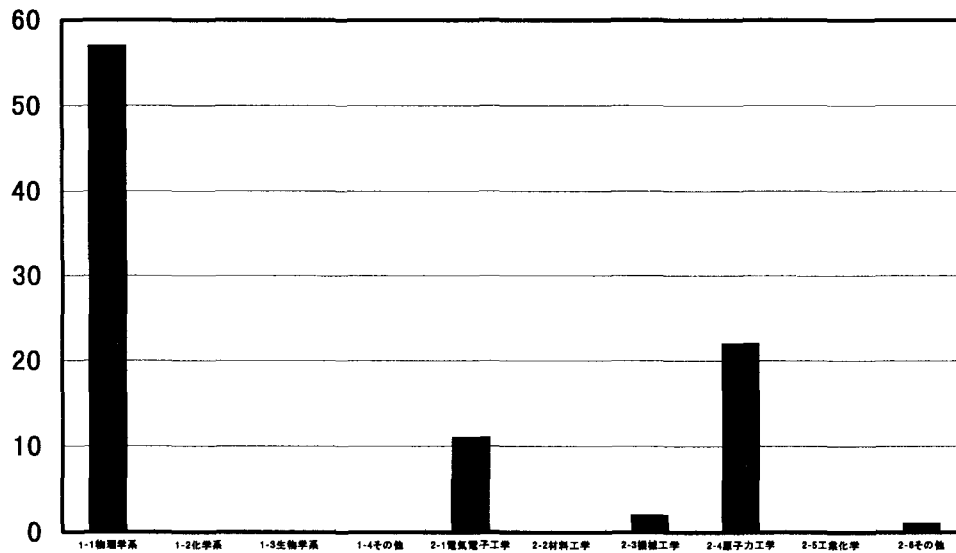


## F2. 回答者の卒業時の専門

卒業時の専門	回答者数
理学系	57
1-1. 物理学系	57
1-2. 化学系	0
1-3. 生物学系	0
1-4. その他	0
工学系	36
2-1. 電気電子工学	11
2-2. 材料工学	0
2-3. 機械工学	2
2-4. 原子力工学	22
2-5. 工業化学	0
2-6. その他	1
その他	0

図-3. 回答者の卒業時の専門

(回答者数)



### F3. 従事する加速器関係研究分野等

#### (加速器関係研究分野)

加速器関係研究分野	回答者数 (複数回答可)
1. イオン源 (電子銃を含む)	15
2. 高周波発生装置 (電源を含む)	18
3. 電子・電気回路及び制御系	7
4. 加速空洞・電磁解析	20
5. 加速器電磁石 (電源も含む)	16
6. 真空技術	5
7. ビーム技術 (診断・計測・制御)	24
8. ビーム物理 (放射線物理を含む)・工学	38
9. 加速器全般	43
10. 放射線防護・遮蔽	7
11. その他	8

#### (研究対象加速器)

研究対象加速器	回答者数 (複数回答可)
線形加速器	63
1-1. 電子線形加速器	35
1-2. 陽子線形加速器	21
1-3. 重イオン線形加速器	7
サイクロトロン	21
2-1. (小型) サイクロトロン	3
2-2. AVFサイクロトロン	11
2-3. リングサイクロトロン	7
シンクロトロン	48
3-1. 電子シンクロトロン	19
3-2. 陽子シンクロトロン	17
3-3. 重イオンシンクロトロン	12
4. 放射光発生用電子蓄積リング	26
5. その他	21
静電型加速器 (タンデム型含む)	4
レーザー・プラズマ加速器	10

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : 素粒子(高エネルギー)物理学研究

(有効回答数 : 24)

1

電子、ミューオン、陽子、重イオン  
数TeV(電子)~数10 TeV(陽子)~数100 TeV(重イオン)  
規模は数km 以下

2

中間子ビームコライダー

3

高エネルギー加速器は現在大型化の方向に進んでいるが、国家負担では維持しがたくなりつつある。国際協力も難しく、加速技術の innovation がなければ死滅するであろう。

4

- ・電子・陽電子衝突型加速器(線型) 1TeV × 1TeV (高い加速電場で)
- ・陽子・陽子衝突型加速器(リング) 100TeV × 100TeV
- ・ $\mu^+ \mu^-$ 衝突型加速器(リング)

5

Two-Beam RF 加速器の開発は CERN において30GHz が進められており、試験装置ですでに95MeV/m が実現されている。98から99年にかけてユニット数をふやす。一方 SLAC では20GHzの基本設計が進められている。10から30GHz の周波数の高周波を利用した加速器が来世紀前半で活躍するものと考えています。

6

ミューオンや光子の高エネルギー衝突型加速器が建設されているであろう。但し、加速原理そのものに関するブレイクスルーについては、望み薄である。

7

Laser linac

8

反粒子生成のための大強度加速器  
 $\mu^+ \mu^-$  collider

9

TeV 以上の装置の小型化

10

物理実験用としては高強度加速器、リニアコライダーが高エネルギーフロンティア実験の佳境かあるいはもう使命を終えているか。

11

重イオンシンクロトン

エネルギーフロンティア的な使い方だけではなく、ごく普通の核物理、素粒子物理(物性物理)に広く利用される。このために、長時間の安定したビームが得られるような安定したシステムが確立されるだろう。

12

現状の技術のままでは、加速器の到達可能なエネルギーはかなり、限界に近づいてきているので、本調査にあるようなブレークスルーの実現を待ちつつ、当面は従来扱われてこなかった不安定な粒子ビームの加速ないしは複数のビームを組み合わせることにより従来の方法では得られなかった情報を引き出そうとする努力が続けられると考える。

13

電子陽電子リニアコライダー

エネルギー ; 10TeV( $5 \times 5$ TeV)

サイズ ; 1km

ルミノシティ ;  $10^{35}/\text{cm}^2/\text{s}^1$

14

PeVレプトンコライダーの開発

高エネルギー大電流イオン加速器の開発

15

もともと加速器は、この分野の研究の道具として発展してきたが、今後は巨大な加速器がこの分野の研究の為に建設されることは難しいと考える。具体的にはリニア・コライダー(500GeV の電子・陽電子衝突型加速器)が最後ではないだろうか。この後は、exotic な粒子(ミューオンなど)を用いた加速器が作られている。

16

リニアコライダー

17

Xバンドリニアックによるリニアコライダーが現実化

18

KEK-トリスタンの1/10の大きさを100GeV以上のシンクロトン

19

数kmでリニアコライダーの物理が可能。又は、数十mで核破砕が可能。

※海上利用(人工島)が興味ある。人工島の安定度とビーム安定度は？(ゆっくりした振動に安定な加速器は可能です。)

20

リニアコライダー(電子-陽電子)が実用化されている。かなり小型のもの(周波数の高いもの)で超電導のものが主になると思う。

21

電子・陽電子加速器については、高いエネルギーの加速器は現在計画中のリニアコライダー(1TeV×1TeV)以降はそれほど進んでいないだろう。大強度(大電流)の加速器を用いた研究については、どのくらいのテーマを見つけられるかによるが、いずれにせよ、日本一国で行うのではなく国際協力の形態になっているだろう。

陽子(反陽子)加速器については、高エネルギーの加速器は以前のSSCぐらいのエネルギーの加速器を国際協力で実現できるかが問題となろう。それによってLHC以上の加速器が実現するかどうかが決まると思われる。

大強度(大電流)の加速器については特にメンテナンスのための放射線の問題が大きくなると思われるので、種々の技術(ビーム制御の技術、遮蔽の技術)の充実が不可欠となる。それらの技術は地味なものだからなかなか関心呼びにくく、進歩するには時間がかかると思われる。

22

重イオンビームに関しては、R.Geller が提案している ECR + Linace 直結型またはその変種の実用化が可能になり、長さ数 m 以内で1~2GeV/u の加速器が可能になると予測している。

23

この分野だけに限らないが、重厚長大な加速器には限界があることは言うをまたない。新しい発想の加速器を検討しなければならないが、その場合、

1. プラズマ波の強力な波動場
2. 原子間の相互作用の電場(格子加速器)
3. 原子内の原子核・電子相互作用エネルギー
4. 原子核内の核子・核子相互作用エネルギー

の利用が候補にあがるものと思われる。そして、4. 3. 2. 1の順に実用化は困難と思われる。20年~30年後に実用化されるとしたら、1. であろうが、その頃には2. も射程内にはいっていることと思う。

24

現在の Energy 上限~TeV を超えるエネルギーが要求されるが、従来方式でもそれなりの工夫が少しずつはなされていくであろう。抜本的解決は、まだ20~30年ではなされないかもしれない。

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : 原子核物理学研究

(有効回答数 : 5)

1

核偏極重イオンビーム発生

2

核エネルギー開発に関連した応用核物理的データ(断面積等)の研究のため、コンパクトで安価で一般研究室に設置できるサイズの電子、陽子、重イオン加速器(0.1~200MeV)が研究人口を増すのに有用

3

数 MV、5A 程度の電子ビームを用いたビーム冷却を駆使して、原子核の精密研究に適した10GeV程度の衝突エネルギーのイオン・電子衝突型加速器が実現

4

重イオンシンクロトロン

エネルギーフロンティア的な使い方だけではなく、ごく普通の核物理、素粒子物理(物性物理)に広く利用される。このために、長時間の安定したビームが得られるような安定したシステムが確立されるだろう。

5

RIビーム:数MeV/u~100MeV/u、数nA が利用できるようになる。

物質科学研究にも使用される。



Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : エネルギー利用研究(放射性核種消滅処理研究を含む)  
(有効回答数 : 19)

1

大型加速器を用いた工業的な利用が進み、核燃料の創生や発電により加速器の電力以上のエネルギーを発生する。

2

ビームの高エネルギー化、大出力化に伴って、効率を改善し電力消費に代表される低コスト化、コンパクト化が求められる。

3

原子力の分野において、加速器によるエネルギー増幅、消滅処理などの展開が期待される。(未臨界炉で安全)

4

放射性廃棄物の消滅処理  
(大電流で高いエネルギー変換効率の加速器)

5

プラズマ核融合に加速器の概念が取り入れられ、小型核融合装置が実現する。

6

大型でかつ高効率の加速器の実用化に目処がたっている。  
最も可能性が高いのはMW内外の陽子加速器、MW以上重イオン  
(慣性核融合用等はさらに数10年先)

7

10MW を超えるビームエネルギーの大強度陽子加速器として、超伝導線型加速器に加えて、FFAG とリングサイクロトロンの中間的な特性を有する加速器が実現する。

8

テーブルトップ核融合発電装置が実用になる。

9

消滅処理技術→(陽子等によって半減期のみじかい核種へ変換)→大電流でかつ小型の陽子加速器

10

超ウラン元素 消滅処理の実現

11

大強度陽子加速器(メガワット級)による中性子科学研究センターが実現。また、核消滅処理技術が  
進歩。

12

原子力廃棄物の処理

13

原発の核廃棄物を消滅する技術が必要である。  
あるいは、なんとかして効率よい太陽電池材料を作る方法を生み出す。(よくわからないが)

14

mA 級、数 GeV 陽子加速

15

陽子ビーム 1~2GeV、10~100MW のリニアックの建設が始まる。長寿命核廃棄物消滅処理の研  
究、ハイブリットリアクターの研究が可能となる。

16

未臨界原子炉駆動用陽子加速器

17

陽子リニアックと核破砕ターゲットを用いたものが実用化ないしは実用開始くらいまでにはなると思う。  
最も有力なのは超電導空洞使用のものである。

18

長寿命放射線源の短寿命化  
放射性物質の安全性確保のため汎用性、経済性に優れた装置

19

未臨界原子炉と組み合わせたハイブリッド利用が検討され始めていることが期待される。大強度の  
陽子線型加速器 1~1.5GeV、10~40mA のものが必要である。

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : 物質・材料科学研究

(有効回答数 : 24)

1

資源・材料

有害物質の塩素などを用いず、有機化合物(プラスチック)の改善を行うための、電子ビームやイオンビームの産業界での需要が大きくなる。また、これらの廃棄物処理にも使用される。

2

(原子・分子物理、材料物性、等)

極度に冷却された多種多様なイオン、分子などの応用が各所で行われているであろう。

3

(核エネルギー開発に関連した応用核物理的データ(断面積等)の研究のため、コンパクトで安価で一般研究室に設置できるサイズの電子、陽子、重イオン加速器(0.1~200MeV)が研究人口を増すのに有用。)

上記加速器は表面分析等でも有用。

4

compact proton spectroscopy driven by laser

compact electron and X-ray spectroscopy driven by laser

5

中性子散乱を利用した科学が発展する。SRによる分析法と相補的それ以上に分析法があると思われる。但し、大出力の陽子加速器ができることが前提となる。

6

PIXEその他のビーム利用分析(マイクロビーム技術の開発)

7

レーザーと電子ビームの相互作用を利用して、小型X線レーザーが実現する。

8

小型の分析用の加速器が発達する。陽子では特性X線を見るもの。

9

電子では放射光、コンパクト中性子源用の加速器も期待される。

10

数百MeVの加速器は、実験室の一角に設置できる程度のサイズであることが望ましい。パルス幅はps以下。

電子に限らず、重粒子や多価イオンビームもほしい。

11

表面処理、及び分析

12

SRの小型化

13

大強度化

マイクロビーム化

製造ラインへの組み込み

14

ビームエネルギー 100MeV以下

電子ビームパルス フェムト秒～アト秒

パルス幅、ジッターともフェムト秒

X線パルス 10keV以下

フェムト秒パルス幅、ジッターもフェムト秒

15

現在の卓上型X線装置なみの放射光装置

16

超小型X線発生用電子加速器の開発

17

テーブルトップ放射光装置が全国の主な大学研究機関、病院に導入されて物質科学、生物化学、医療の中心となる。

18

微小領域における半導体加工技術→サブミクロン径の軽・重イオン電子加速器

19

ポジトロン照射用加速器

100keV～1MeV、10 $\mu$ A

20

物質材料研究、産業応用(精密加工、材料分析)

・電子線形加速器を用いた超小型X線発生装置

電子エネルギー 10~100MeV  
放射光エネルギー 2~20keV  
平均電子電流 0.1~1ミリアンペア  
サイズ 3m×1m×1m

- 微細加工技術によりシリコンウエハー上に構成された、極小型 ON-CHIP 電子加速器  
電子エネルギー 1~10MeV  
サイズ 0.1×0.3×0.002 + 真空容器 + 電源部

21

物性

半導体素子製造、センサー素子製造等、物性関係

低エネルギーから高エネルギーまでのエネルギー可変、イオンビーム量  $\mu A$   
各種イオン種発生可能、装置サイズ室内設定可

22

超伝導方式の加速器による TeV 領域の新たな科学の創成

23

従来この分野は物理・工学系が主であったが、今後は他の分野への応用が拡大する。特に地球環境科学研究を専門とする加速器施設が日本国内に皆無であり、この視点が多くの加速器研究者の視点から欠けているように思われる。

これを進める為には、マイクロビームが必要であり、小型でビーム強度が高く、エネルギー分解能の良いビームが得られる加速器の開発が望まれる。

24

テーブルトップフェムト秒テラワットレーザーを用いたプラズマカソード方式によるテーブルトップ電子・X線・イオン源に近い将来移行すると予測される。

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : 生命科学・医療利用研究

(有効回答数 : 41)

1

電子(血管造影)、陽子(治療、生命科学用マイクロビーム)  
数GeV(電子)、数10MeV(陽子)  
規模はいずれも数 m 程度

2

コンパクト重イオン加速器による治療等

3

放射光の医学利用  
小型化が必要  
放射光ロスを考えるとロングパルスの小型高エネルギーの線型加速器が望ましい。

4

大量の薬物投与を必要としないX線を用いたガン治療装置(内部は電子線加速器)が、現在の点数制度の見直しによって急速に普及し、益々小型高性能ライナックの需要が高まる。

5

中～小型の医療用加速器技術がすすみ、(それまでに治療成績が評価されるのが前提だが)加速器による治療が特殊なものでなくなる。

6

現在、陽子や重イオンを直接用いた癌治療の研究がすすめられているが、効果が実証されれば、各地域に癌治療用加速器を持った病院ができるだろう。実際に使用されるものは信頼性など実績のある装置が必要なので、現在のシンクロトロンやサイクロトロンを改良し、低コストで小型なものが実際に使われると思われる。

7

fiber optics electron accelerators interior of body  
compact laser accelerators for ions(protons)  
compact laser X-ray sources

8

大病院には、粒子線治療などを現在より簡単に行えるような、小型ライナックやマイクロトロンなどが設置されるようになるのではないかと?

9

生命科学は分子中の水素の存在箇所の同定が基本であり、これには中性子がもつとも、いやこれしかない。

10

癌治療

P-235MeV が、大変小型の加速器にて出射し、利用の拡がりが見られる。

11

診断、治療の能率をあげて、費用が安くなるようにすること

12

直径1m以下の電子加速器を用いたテーブルトップX線発生装置によるアンジオグラフィ  
全長20cm の電子ライナックを用いたX線ガン治療装置

13

小型の陽子加速器によるガンの治療が一般化する。(軽イオン)

14

現在のライナック照射装置に代わって、同程度以下の装置規模で加速器部は陽子或いは重イオン用になる。

SR 装置は、テーブルトップ型で様々な分野に普及している。

15

小型医療(治療)用加速器が相当数増えているであろう。

16

粒子線ガン治療装置としての加速器の普及に伴い、低廉化と小型化が促進され、医療装置としての位置づけが実現する。

17

ガン治療

- ・ハンディタイプのX線、電子線治療器
- ・デスクトップタイプの粒子線治療器
- ・FEL、SRによる治療
- ・大強度放射線治療(呼吸周期より2桁以上早い時間で照射終了)

18

イオン(陽子線)治療用加速器

粒子エネルギー: 300MeV、 サイズ: システム全体が5~10m四方の一室に設置できる

X線診断用放射光源

光子エネルギー: 数10keV 以上、 フラックス:  $10^{15} \text{s}^{-1}$  以上

19

現在の電子加速器なみのサイズの陽子または炭素ビーム加速器

20

超小型X線発生用電子加速器の開発  
ガン治療用超小型イオン加速器の開発

21

ガン治療用の陽子加速器は各都道府県に1機ずつ配備されるのではないだろうか。そのためには、陽子ビーム照射がガン治療に対して非常に有効であると証明されること。その他のビームも医療に応用できる可能性はある。

22

テーブルトップ放射光装置が全国の主な大学研究機関、病院に導入されて物質科学、生物化学、医療の中心となる。

23

悪性腫瘍の局所照射による消失→小型でかつエネルギー付与の大きな重イオン加速器など

24

小型陽子加速器の技術的成熟と普及

25

ガン治療用としてX線に加えて陽子線治療が普及

26

ガン治療用としてX線に加えて陽子線治療が普及

27

ガン治療用のライナックもより小型低コストの光加速器にかわるものとする。  
エネルギーが低くてすむ遠赤外 FEL の需要は、今後ますます増加する。その時は現在、最も問題になっている加速器のコスト、大きさを、レーザーのコストの低下による低コスト小型光加速器を用いた小型 FEL が遠赤外 FEL を実用化するものとする。

28

加工用、治療用としての応用に期待したい。

29

テーブルトップ型←X線発生装置

30

ガンの有効的な治療法を生み出す必要がある。  
RIビームを利用した診断/治療が有効と思われる。



大強度重イオンビーム(1  $\mu$  A、100MeV/u)。サイズは今の半分。

31

別紙-1

32

超小型加速器(胃カメラサイズ)による患部への直接照射など

33

別紙-2

34

イオン加速器:粒子線ガン治療、中性子捕捉療法

35

診断用、治療用共、現在の MRI 装置の2~3倍程度のサイズ、コストになれば大きく普及するだろう。

36

放射光利用 : コンパクトリングが沢山作られ多方面で使用される。基礎研究はもとより産業、医療で実用化されている。

37

現在のX線機器並の制御性、コンパクト性、汎用性を確保。中性子治療を含む各種重イオン照射が可能であること。

38

粒子線がん治療用加速器にまじってBNCT治療用の加速器が開発されている。  
大電流、低エネルギー(20~30mA、2~4MeV)の陽子加速器が必要である。

39

研究室規模の小型加速器による加速器治療の実現

40

ビーム; 電子  
性能; 電子 20MeV  
電流(パルスピーク); 電子 数100mA  
サイズ; 加速器本体 数10cm  
電源; 机サイズ  
その他; 放射線の漏洩が少ない

41

超短パルスビーム源(フェムト秒)が実用化されている。

## 別紙-1

予算のかさむ加速器の施設にとり、医学・生物学への応用は一般への利益の還元をアピールする絶好の応用分野である。医学・生物学における加速器の役割は重要で、1950年代から長い応用の歴史がある。古くから粒子線治療や核医学のためのRI製造等に加速器が用いられ、先端の研究や実際の診療に役立ってきた。しかし特に粒子線治療に用いられる加速器は、膨大な設備費、光熱費ばかりか、高度の知識技術を持つスタッフを要し、一部の大学のみでそれを行うことが可能であった。医学研究のあり方としてはそのような研究所が我が国に1~2施設あっても良いと思うが、「要した経費に対する社会への利益の還元」という視点にたてば疑問を感じざるを得ず、また実際に得られた医学的成果に関しても十分とは言えなかったのではなかろうか。新しい原理の高エネルギー重荷電粒子加速器が開発され、設備費、光熱費共に大幅に軽減されるとすればその局面は変わってこよう。しかし電子線加速器とは異なり、大幅な経費削減は期待できそうもなく、実際の開発には解決を要する多くの問題点があると思われる。また粒子線治療を行うことは、経費のみに問題があるのではなく、治療計画に関して物理学のスタッフも必要であり、大幅な普及は望めない。

一方PET(陽電子核医学)のための医療用小型サイクロトロンの開発は加速器の医学利用の流れを180度変えた。小型で扱いやすく、大きな施設も要しない加速器の開発により、PETは急速に普及し、いまや日本のサイクロトロン80%以上がPETのために建設されている。もう一つの大きな流れは分析である。従来から行われてきたCPAA(荷電粒子放射化分析)、AMS(加速器質量分析)、RBS(ラザフォード後方散乱分析)等に加え、近年PIXE(重荷電粒子励起特性X線分析)が盛んになり医学・生物学研究には不可欠な地位を築きつつある。我々の施設では医療用小型サイクロトロンをPIXEにも応用することに成功し、PETとPIXEの両者を全国協同利用に解放しているが、特にPIXEにおいては、各分野、特に医学・生物学において多くの成果が上がり、世界の注目を集めている。それにはPIXEの「全元素短時間高感度分析」、「1mg以下の微量試料で定量分析が可能」、「試料に手を加えず分析が可能」等の長所が大いに生かされている。そのPIXEを含めた「分析」が20~30年後にはますます盛んになり、加速器と社会を結びつけるキーワードとなることは間違いない。つまり社会が加速器に求めているものは高エネルギー化ではない。これからの加速器の医学利用は、加速器が他の医療機器と同様に扱えるように操作、メンテを行いやすくすること、言い換えれば完成度が重要なポイントとなるであろう。例えば患者さんを目の前にしてイオン源のフィラメント交換に2時間も要するようでは、医療機器として役に立たない。大いに改良の余地はある。

一方、医療と医学を分けて考えた場合、医学研究という観点からはビームエミッタンスを向上させることも重要である。高崎原研等で開発中のサブマイクロPIXEは、マイクロ以下の分解能での各元素のマッピングを可能にするものでこれにより単細胞内の各元素のマッピングが可能となり、このためのイオンビーム技術、照射、測定の為の方法論が確定すれば、医学研究に革命をもたらすであろうと期待されている。このような医学の新しい応用分野の開拓により、加速器の需要は益々増大すると思われる。しかしこのような高性能を、安価で簡単な加速器に求めることは賢明ではなく、医療や一般の分析用に普及させるマシンと高度な医学研究に要求される高性能マシンとは分けて開発されるべきだと考える。

さらに本調査のテーマでもある、全く新しい原理の加速器の開発がそれぞれの分野における研究の自由度を広げ新しい応用分野を切り拓く可能性があり、その点には大いに期待するものである。しかしその前に加速器が社会の中で必要不可欠な地位をまず確立し、その有益性を万人に認めさせることが必要ではないか。そのためには低エネルギー加速器の完成度を向上させ、また消費電力を通常の医療機器並に減少させる開発こそ優先されるべきであり、それが加速器の生き残る条件となると思う。PETや分析は、(現在でも徐々にそうなっているが)間違いなく20年後の加速器の主目的となるのであるから。

## 別紙-2

### 医療用(放射線治療用を中心にした)加速装置について

#### 1. 加速器本体について

##### 1.1 小型化が促進される

現在Sバンドの周波数の直線加速装置が約半世紀の間使用されてきたが小型化を進めるためにはXバンド以上周波数の直線加速装置に移行しなければならない。過去の技術上のネックは安定した商用の高周波源となる管球が得られなかったことである。医療用では小型化をこれ以上進める必要性は少ないと考えられてきた。しかし可能な限り小型化することは必要であり将来は人体の内部に入って直接患部を照射することも可能にしたい。

##### 1.2 ビーム出力がCo-60 $\gamma$ 線に同等な安定性が得られる

ビームの立ち上がりや立ち下がり時の安定性を強化するために発振源の周波数の安定性、パルス出力の安定性を数倍向上させる必要がある。これらは発振源が固体化された超電導化されてパルス源から連続源に移行する必要性が考えられる。

##### 1.3 エネルギー選択が自由に選択できる

直線加速装置の弱点であるエネルギー選択が自由に選択できて簡単に瞬時安定した切り替えが可能になる。加速器の中の構造や調整器の改良を含む制御機能が開発される。さらにエネルギー安定性も現在の数パーセントから0. 数パーセントに向上させる。

##### 1.4 ビーム出力の増加と高精度な制御

小型化に反して出力は逆に増加しなければならない。これは人体の活動に合わせた照射(ダイナミック治療)が必須条件となりこれには高出力が要求される。このため電子銃からの入射ビームが無駄なく加速させるビーム加速構造が開発される。

##### 1.5 漏洩放射線の低減化が進められる

加速装置が特殊な遮蔽され部屋の中で使用されるのではなく自己遮蔽した構造で加速装置はより正確な直線線形のビーム状で加速させて可能な限り外にそれない加速が可能になる。

##### 1.6 照射高エネルギー放射線と画像低エネルギー放射線を同じ位置から発生させる

ビーム発生機構(ターゲット)に高低両エネルギーを衝突させて使い分けが可能になる。これにより患者の位置の確認と同時に照射位置の一致が確認できる。リモート診断で装置の監視を可能にする。

#### 2. 制御系について

##### 2.1 コンピュータ支援による制御と管理

コンピュータのパワー向上により上記の内容を可能にする制御方法が向上する。短時間で制御し情報をモニターし表示させる。これは安全性の確立とリアルタイムの制御とQAを可能にする。

##### 2.2 人体の動きに合わせたビームの制御

照射位置をリアルタイムでモニターしてロボティックに追跡して照射するダイナミック位置制御を可能にする。しかも実行されている照射の位置をリアルタイムでモニターする画像構成機能が備わって照合が高精度で行われる。

### 2.3照射野の形状と放射線分布を治療標的に合わせながら照射する

原体照射とよばれる方法で過去の実績にふまえて更に高精度の制御を要求される。標的寸法に患部の運動に正確に合わせた照射野形状をを作成しながらその標的体積内の分布を最適化させるように形状内の放射線の分布強度を変調させる治療方法 (IMRT: Intensity Modulated Radio-Therapy)が更に進められて標的線量の向上と治癒率の向上につながる効果がある。

### 2.4生物学的効果や薬学的放射線効果を顧慮した治療計画と照射の統合化

生物学と薬学分野での研究に合わせた治療効果を配慮した治療計画と治療照射が可能になる。これは標的線量の効果と危険部位への放射線被曝の排除を考慮した治療となり治癒率の向上につながる。

### 2.5逆方向計算アルゴリズムの開発で治療計画の精度と計算時間の向上が図られる

従来の前方向計算 (Forward) アルゴリズムに代わって逆方向 (Inverse)アルゴリズムが開発されよりふくざつなIMRTに対応させた計算が短時間に実行可能になる。計算アルゴリズムはMonte Carloに基づく高速演算化が進む。

## 3. 総合化

医療費の増加に伴う政治的配慮から効果的治療の向上が益々社会的課題となる。このため医療施設の統合化とセンター化が進みこれに合わせた総合的な治療体型が組立られていく。第一に院内のネットワーク化による経費低減省力化と治療の専門化が進められる。ここで高速ネットワークの構築とデータベースの一元化が進む。第二に周辺関連病院間のサテライト化で資源の共用化が進められる。これにはWWWやインターネットなどの機能が充実されこれに伴った機能と組織が構築される。患者の診療も放射線治療の患者は大部分が外来患者になる。

直接加速器技術との関わりは少ないが社会現象の中で必要技術も対応が要求されていくのであえて述べてみた。

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : 産業利用

(有効回答数 : 11)

1

産業(プロセッシング、殺菌)

300keV~10MeV の電子加速器の小型化が進む。但し、本質的には電場勾配を利用した加速器である。

2

数10eV~数 MeV の重イオンを~mA のオーダーで加速できる加速管を1m くらいの長さで実現させたい。

3

大電力(ビーム電力)、高効率の加速器の開発がこの分野での加速器利用において必須であると考ええる。プラント的利用も考えれば特に小型化の必要はない。

4

Transmutation

5

直径1m程度の100kW 級の照射用電子加速器

6

工場の一角に設置できる程度のサイズであることが望ましい。安定して長時間動くこと。

7

マイクロプロセスでペイする装置

8

超ウラン元素 消滅処理の実現

9

1m×2m(電源除く)のサイズに収まるチューナブル光源としての FEL

10

半導体加工、精密加工、化学

・放射光用小型電子蓄積リング

電子エネルギー ~1GeV

蓄積電子ビーム電流 2アンペア以上

放射光エネルギー 10eV~5keV

サイズ 5m×5m×2m

精密加工、材料分析

- ・電子線形加速器を用いた超小型X線発生装置

電子エネルギー 10~100MeV

放射光エネルギー 2~20keV

平均電子電流 0.1~1ミリアンペア

サイズ 3m×1m×1m

- ・微細加工技術によりシリコンウエハー上に構成された、極小型 ON-CHIP 電子加速器

電子エネルギー 1~10MeV

サイズ 0.1×0.3×0.002 + 真空容器 + 電源部

11

電子線照射用電子加速器： インライン機器

イオン加速器： イオンインプラント、改質、低速陽電子発生

放射光リング： リソグラフィ、光反応

Q1. (加速器の将来像) 20~30年後の加速器の将来像(発生させるビームの種類や性質あるいは加速器の性能、サイズ等の観点から)について、ご意見がございましたらお聞かせください。

加速器科学分野 : その他(新しい分野・加速器全般等)

(有効回答数 : 15)

1

放射光施設: 現在Spring-8などの新世代加速器が稼働している。次世代については、加速器側では様々なideaがあるが、肝心のuser側では光さえあれば良いという意識が強い。良いuserを獲得する必要がある。

2

環境

ダイオキシン等をはじめとする有害、微量物質の高感度検出、分析用の電子ビーム、またはイオンビームの需要が大きくなる。

3

加速器全般

全世界的に加速器研究をする人間が減りつつあり、実用的なものは多くなるであろうがブレークスルーはますます少なくなると思われる。特にソ連の崩壊が大きい。

4

高エネルギーイオンマイクロビーム技術

ターゲット位置におけるビームの空間分解能としてナノメートルレベルを達成するために、加速器から引き出されるビームは、そのエネルギー安定度及び輝度において現在の静電加速器のそれらの少なくとも2オーダーの向上が必要になる。

5

原子力、基礎科学

ビームの高エネルギー化、大出力化に伴って、効率を改善し電力消費に代表される低コスト化、コンパクト化が求められる。

6

放射光利用

高密度電子バンチを低エミッタンスで発生できる貯蓄リングやライナックなど、現在の自発放射の利用ではなく、より時間的にコヒーレントな誘導放射を可能とする加速器が出来るのではないかと思う。サイズは大型。

7

地球科学

鉱石分析(岩石)

8

超大型加速器は別として、ここでの小型加速器( $E_e = 1\text{GeV}$ ,  $\sim 200\text{MeV}$ /核子)は、加速ビーム種、エネルギー等の性能が数個のボタンで可変であり、誰でもが簡単に運転出来、即ビームが利用できるシステムを作り出すことが、広範囲な加速器利用につながると思う。

9

・電子蓄積リング: 放射光用としてはさらに広い範囲にわたり普及が進む。さらに、放射光を媒介として、 $e^+$ 、 $n$ 源としての利用が拡大されているだろう。レーザー電子光利用が、核物理、素粒子物理の精密測定的な手段になるだろう。

・重イオンシンクロトロン: エネルギーフロンティア的な使い方だけではなく、ごく普通の核物理、素粒子物理(物性物理)に広く利用される。このため、長時間安定したビームが得られるような、安定したシステムに確立されるであろう。

10

#### 殺菌、滅菌

加速器の小型化、高効率化、運転コストの低減  
現状よりいずれも一桁以上改善

11

#### 加速器技術全般

例)シンクロトロンに関して、加速器の各要素技術が向上し偏向Q-magnet 等の磁場のダイナミックレンジを大きく取れるようになったり、RFに関しては周波数のワイドバンド化に成功し、加速器がコンパクトになる。

12

食料の量産: 大強度ビームを用い、人工的に生産効率のよい農作物をなんとかして生み出す必要がある。例えば塩水に強い米など。ビームはランダムに多様な変異体を作れるので有効である。(重イオンビーム、 $1\text{pA}$ 、 $100\text{MeV/u}$ ) そのあとの安定性も組織的に評価する機構をつくる。

13

#### 環境科学

今後の我が国、いや世界で最も重要な問題は環境問題であろう。我々の生活を守るためには、毒性のある物質が生体に与える影響を基礎医学的に調べ、実際の過去や現在の汚染の影響を疫学的に調査し、かつ多くの観測点で大気や水質の汚染をモニターする必要がある。そのいずれの目的にも加速器を用いた元素分析法は適しており、特にPIXEは大気中エアロゾルの分析などにおいては最も適した分析法である。我々の施設においても秋田県環境技術センターが秋田県内数カ所において採取した1000を超えるエアロゾル試料の分析が行われ、特に核元素濃度の経時変化のデータは学会からの注目を集めた。しかし既存の施設でこなせるのは研究の初期の段階までで、本当に大気汚染をモニターするためには多数の地点での定常的なサンプリングが必要であり、その膨大な量の試料測定には少なくとも各県に一台ずつの専用加速器が必要になると思われる。我々はさらに横浜市、秋田県、環境庁との協同で、大気汚染が生体に与える影響の調査にも着手している。その場合、大気エアロゾル分析に加え、実験動物の各臓器、被毛、排泄物などの分析を系統的に行う必要がある、その目的にもPIXEは最適なものである。さらに岩手山噴火の監視のために、湧き水中鉍物



濃度の時間変化の調査も開始しているが、飲料水、農業用水、海水などの水質分析に対しても、最も簡単に高感度で全元素分析が可能なのがPIXEである。環境モニタリングが20～30年後の加速器利用の中心となると予測する理由がこれらの点にある。

そうなるところでも最大の問題はコストである。エアロゾル試料の測定は3～4分で可能だが、数千枚の試料をさばくためには一試料当たりの分析コストを一切こみで数百万円までさげなければ実用が難しい。現在私が技術指導を行っている民間企業で、PIXE専用超小型サイクロトロンを製作し、PIXE分析を有料でおこなう予定の企業があるが、そのサイクロトロンの電力は10kWを超える程度である。分析の目的には陽子3MeV程度で十分であるし、ビーム電流も100nA出ればよい。従ってエネルギー効率を高めれば、さらに省電力の加速器が開発可能であると思われる。原理的にはホットプレート程度、つまり一般家庭で用いる家電なみの消費電力も達成可能なのではないか？ そうなれば加速器に対する一般の方の考え方も変わってくるだろう。(そうすると放射線管理の問題がネックになるが、PIXE実験中には測定可能な放射線は一切出てこずもちろんRIもできない。1MeVを超えれば放射線発生装置になり、管理区域を設定し許可申請を行わなければならないと言う障害予防法の適用に対し、柔軟な解釈をぜひお願いしたいと思います。)

今後加速器が全人類共通のテーマである環境問題に貢献するためには、医学利用以上の省力化、設備の縮小化が必要であり(例えば加速器、電源、バッテリー等をトラックの荷台に一式設置し、試料分析を現場で行えるようになれば益々利用度が増すだろう。)、その線に沿った開発が進めば加速器の需要は飛躍的に増大するものと期待される。

#### 地球科学

鉱物、地質、気象、惑星、鉱山、資源などの地球科学の分野も加速器応用の大きな市場だと思われる。一昨年「地球惑星科学における合同大会」に特別講演の機会があり出席したが、これは地球科学関連の10を超える学会の合同学会であり、その活気に圧倒されたというのが印象であった。ここでも主役は分析技術であり、マイクロビームでのスパッタリングとAMSを組み合わせた、加速器による原子質量分布マッピングをミクロンオーダーの解像力で行い、鉱物学試料に応用した報告がなされた。またPIXEに関して、諸外国でもっとも多く応用されているのが地球科学の分野でありやはりイオンビーム工学の先端技術を駆使したマイクロビームを用いたマイクロビームPIXEが、鉱物・地質学研究に不動の地位を築いていることがよく分かった。鉱山・資源学は我が国でこそ一頃ほど注目されなくなってきたが、開発途上国にとっては国の発展をかけた重要な分野である。我々もパプアニューギニアの熱水鉱床の分析等で開発途上国の各国とも協力した研究を行っているが、これからはますます需要が増すことであろう。これらの分野への加速器の応用には(共通の問題であるコストの面は別にして)ビームの絞り込み、ハンドリング、エネルギーや加速粒子変換の容易さ、等が要求される。現在オーストラリアやカナダでは、地球学試料専門のPIXE施設が世界中の研究者からの依頼を受け分析を行っているが、日本にはそのような施設がない。目的に合わせたハード、ソフトの開発を本気で考えれば、加速器の需要が20から30年にわたり伸び続ける分野だと思う。

14

#### 学校教育

・微細加工技術によりシリコンウエハー上に構成された、極小型 ON-CHIP 電子加速器  
電子エネルギー：1～10MeV、サイズ：0.1×0.3×0.002 + 真空容器 + 電源部

15

#### 自由電子レーザー装置

数  $\mu\text{m}$ ～数100  $\mu\text{m}$ 用の小型装置が普及する。大きさは数m長×3m幅以下。

## Q2. 高周波加速小型電子加速器の実用化等について

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

小型電子加速器の目安	
加速器等の大きさ	: おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 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10ton程度
電子エネルギー	: 1GeV程度

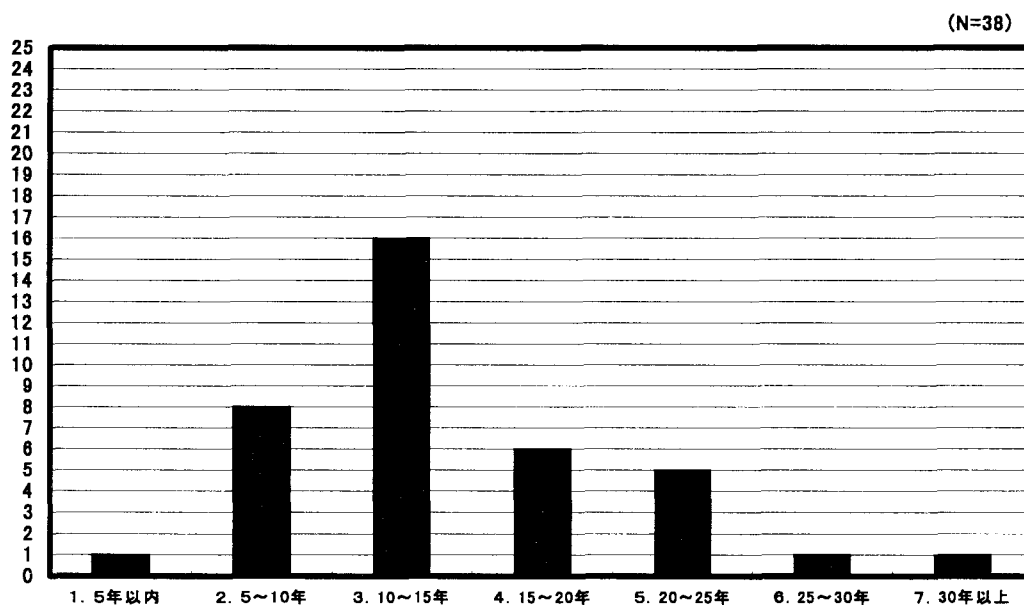
### SQ2-1. 実用化の可否に関する加速器研究者の意見等

全回答者数	回答者数 (%)	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

SQ2-2. 実用化時期予測

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	1
2. 5～10年	8
3. 10～15年	16
4. 15～20年	6
5. 20～25年	5
6. 25～30年	1
7. 30年以上	1

図－4. 高周波加速小型電子加速器の実用化予測時期分布



(中間点による)実用化予測時期 : 2012 年頃

### SQ2-3. (高周波加速小型電子加速器) 実用化のための技術課題、実用化後の利用、加速技術の発展性について

#### 実用化のための技術課題

(有効回答数 : 40)

1

超精密多チャンネル RF マイクロモジュール、ビームダイナミクス、大電力 RF 源、制振技術

2

大電力の安定した高周波源の開発が必要

3

大量生産による cost 削減の方法

4

RF パワーソースがない。

波長が数mm以下になると加速空洞の耐圧がもたない。→電圧かけられない。

5

電源の低価格化

冷却の問題

6

Wバンドクライストロンの完成

7

周波数を上げると加速管の構造が小さくなる。これを精度良く加工する技術、投入マイクロ波による発熱の処理、小さいビームホールに電子ビームを通す技術。

8

周辺技術の小型化

9

10GHz RF 加速器は5年以内、20~30GHz Two-Beam RF 加速器は10~15年、レーザープラズマは30年以上。

ここでは電子線形加速器に限定する。

1. ここで言う実用化は、加速器にユーザーがついて連続運転が可能な状態を言う。

すなわち、RAM (Reliability, Availability, Maintenanceability) が実現するということである。レコードとして一度データが得られたというものではない。

2. RF 加速器の将来は、高電界加速を実現するために高い周波数に移行する。11GHz 付近の開発

が10年前から進められているが、この周波数領域で、75MeV/mが5年以内に実用化され、建設可能となる。

3. 30GHz付近での加速器は従来型のKlystron等のRF源と加速管から構成されるユニットを数多く直列に接続した現在の線形加速器とは基本的に異なるものとなる。加速勾配の自乗で単位面積当たりの供給パワーが増えるが、周波数が高くなるとRF源が出力できる最大パワーが周波数の二乗に反比例して小さくなる。そのためにRF源を設置しなければならず、放射線発生装置室の加速管は小型化されても、周辺のRF源、電源が巨大化して、全体としてのサイズが巨大化する。

4. 30GHz以上では、Two-Beam加速器が有望である。これはCERNで開発が約10年前からすすめられている。大電流のマルチバンチビームを加速管と同じ構造を持つTransfer Structure内を通過させ、RFを発生させ、同様の加速管に供給される。RF源のビーム源は最上流に一ヶ所で済むこと。大電流低エネルギーのビームからトランスフォーマーである。この場合は追加加速分は大電流であるので高電界が必要とされない。従って、低周波数、ロングパルスで低出力で済むために、RF源や電源の数が少なくて済む。これは10年以内に実用化できるであろう。

5. 一方、Two-Beam加速器の低周波数化として、20GHzで、追加速3GHzのコンベンショナルなS-Band加速器を用いるものが提案されていて、これの開発に集中すれば7~8年以内に実用化されるであろう。

6. レーザーやプラズマを用いた加速器は原理的には大変興味あるものであるが、高電界が実現できても加速領域が大変短いために、ユーザーがつくような加速器として実用化はできないであろう。加速原理の物理は大変興味深いものがあるが、加速器工学から見ると、周辺機器のサイズが大きくなり、小型化には貢献しないであろう。

10

微細表面加工、RF

11

高周波源の開発

12

- ①electron injection
- ②multistage control

13

電子ビームをいかに安定に加速するか。質のよい電子ビームを加速できるか。

14

新しい加速、集束原理を用いた加速器の開発。現状のサイズを小さくするだけでは熱の問題でWバンドは無理と考える。

15

大電力出力電源、大電力輸送導波管 RF 窓、空洞共振器等の開発

16

放電を抑えるための表面処理の技術、高効率高周波源

17

低電気抵抗真空複合機能材料、構造に関する研究加速空洞の加速安定性

18

高周波源の大電力化(大電力のマイクロ波源)と信頼性  
加速電場の制限(絶縁破壊)

19

空洞製作技術

20

コンパクトで高精度な電磁石、安定で均質な密度のビーム

21

線型加速器を想定して、Wバンド等での高周波損失を画期的に低減して連続運転に耐える性能を実現すること。

22

高周波の採用に伴う小型化によって生じる表面処理や放電限界の問題をひとつひとつ解明してゆくことが必要と考える。

従来高電場勾配を実現する加速管のためのパワーソースは膨大なものとなっていた。パワーソースの小型化も不可欠。

23

加速管の方式、製造技術  
周波数、パルス幅とのパラメータ選択

24

精密加工、アライメント技術、表面加工技術

25

高加速勾配(1GV/m)というのが、技術的に難しい。現在の高周波加速の加速勾配の限界は放電により100MV/m程度に制限されている。小型の加速空洞ではより放電の問題が厳しくなる。

26

大パワーCWクライストロンの開発、高精度光共振器ミラー製作技術の開発

27

加速空洞の製作、開発、マイクロ波源の開発

28

高周波技術(マイクロ波技術)ビームハンドリング

29

1. 小型加速空洞の加工技術
2. 高電界により誘起される空洞表面ブレークダウンの回避  
(1.と表面処理技術の開発)

30

WバンドハイパワーRFソースの開発  
空洞の開発

31

高周波電界に耐える材料、加工  
ビームの質の向上  
ビーム強度

32

加速構造 : 小型空洞を極精密に製作できるか。  
電子銃 : 小型空洞に対応出来るほど低エミッタンス化できるか。  
高周波 : 超高周波を大電力で発生できるか、及び損失無く電送できるか。

33

高周波源の入手、超電導材料、高精度加工

34

高密度ビームの解析技術  
電源、加速管の製造技術(原理的には可能と考えるが、コストとのバランスが問題)

35

エミッタンスを向上させること、エネルギースペクトルの向上

36

高電界印加及び耐電圧技術

37

放電の問題  
周波数をあげることで楽になるが逆に空洞のサイズが小さくなるため製作上の精度の問題がある。

38

現在のSバンドと同等の高出力RF源の開発が必要

39

個々の技術課題よりも継続的研究環境(研究施設)と、大規模予算投入があれば確実に進展する。

40

加速管中でのウェークフィールドによるビーム不安定性  
高出力・安定・長寿命高周波源

## 実用化後の利用

(有効回答数 : 28)

1

素粒子研究、RF 電力源

2

医療用としては重要  
すべての加速器技術にとって大きな break through となる。

3

利用範囲は大変広い。

4

癌治療、非破壊検査

5

Two-Beam RF 加速器は、開発に集中すれば10年後に放射光 FEL に利用されるまでに発展する。

6

素粒子研究用、自由電子レーザー

7

electron sources  
spectroscopy(物質科学)  
医学応用  
高エネルギー加速  
天体現象シミュレーター

8

X線ガン治療装置、電子蓄積リングの入射器



9

電子蓄積リングの入射器  
X線発生装置  
小型陽電子発生装置

10

高エネルギー加速器、分析用(極短パルス)の発生、産業用

11

二次粒子生成とその利用

12

加速器の小型化

13

入射器

14

超短パルス電子ビームが小型で実現できれば、時間分解化学反応解析等に広範に使用されると思われる。

15

Q1の分野(ガン治療、殺菌、滅菌、物質・材料)での利用拡大

16

超高エネルギー電子陽電子リニアコライダー  
医療用小型電子加速器

17

精細・時間分解型X線撮像によるガン診断の高度化、高輝度遠赤外線によるガン治療、X線回折によるタンパク質の構造解析と新薬の開発、高輝度遠赤外線による石油化学工業プロセスの革新

18

放射線利用、放射光利用、二次ビーム利用、産業応用

19

医用

20

現状の加速器の置き換え(但し、コストが安くなった場合のみ)

21

JLC等の素粒子実験・SR用小型入射器

医療応用

22

高エネルギー物理学研究。  
それ以外はあまり必要と認められない。(強度と質による。)

23

放射光電子蓄積リング入射器、超小型X線源、リニアコライダー非破壊検査

24

医学応用

25

現在Sバンドで行っているあらゆる分野に利用可能(コストが安ければ)

26

医療用の小型高勾配加速器として普及できると思われる。

27

強力X線発生装置とX線照射加工分野

28

物質・材料科学研究、生命科学研究、医療(研究)利用、産業利用

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 22)

1

ビーム強度の改善

2

重点的予算配分によって急速に進歩し得る。日本が優位性を保てる。

3

基礎的研究が必要

4

もし、大量の需要があれば、製造技術の向上、コストダウン

5

過渡的な電界モードでの加速で上記(X線ガン治療装置、電子蓄積リングの入射器)が達成出来ればなおいっそうの性能向上が期待できる。

6

短波長化と共に発展する

7

小型化が出来ればX線装置なみに一般に普及することが期待される。安全性の観点から低電流のものが用いられる

8

超小型加速器への適用

9

もし、数 GeV/m の加速電場が実現するなら、超伝導技術(高温超伝導)と合わせて、これらが加速器技術の基盤となりうる。(高温超伝導技術の発展)

10

通信やエネルギー輸送?

11

安定したプラズマ制御技術を得て、さらに大強度化できれば、単独の加速器として応用分野は広がる。

12

いったん実用化されて数量が出るようになると高周波の開発が進むことにより加速勾配がより向上する等の発展が期待できる。

13

素粒子物理実験

14

1GV/m 程度までの電場は発生できるが、それ以上は困難

15

シンクロトロン of のさらなる小型化

16

RF 加速ではこれ以上の加速勾配は難しいと考えられる。

17

さらに高い周波数でのRF加速

18

更に進めば、赤外レーザーを高周波源にし、加速構造を微細加工技術によりシリコンウエハー上に製作して、極小型電子加速器が実現できるかも知れない。

19

医学応用分野は累積技術の積み重ね

20

基本的には現在のSバンドの延長線を出ることはないのでは。  
小型であることを活かし、低温(liq N2)動作で性能upが可能かも？

21

コンパクトな産業用加速器の製作

22

プラズマ技術との融合  
微細加工技術との融合

### Q3. 高周波加速小型陽子・重イオン加速器の実用化等について

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

小型陽子・重イオン加速器の目安	
加速器等の大きさ	: おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 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10ton 程度
陽子・重イオンエネルギー	: 200MeV/n 程度

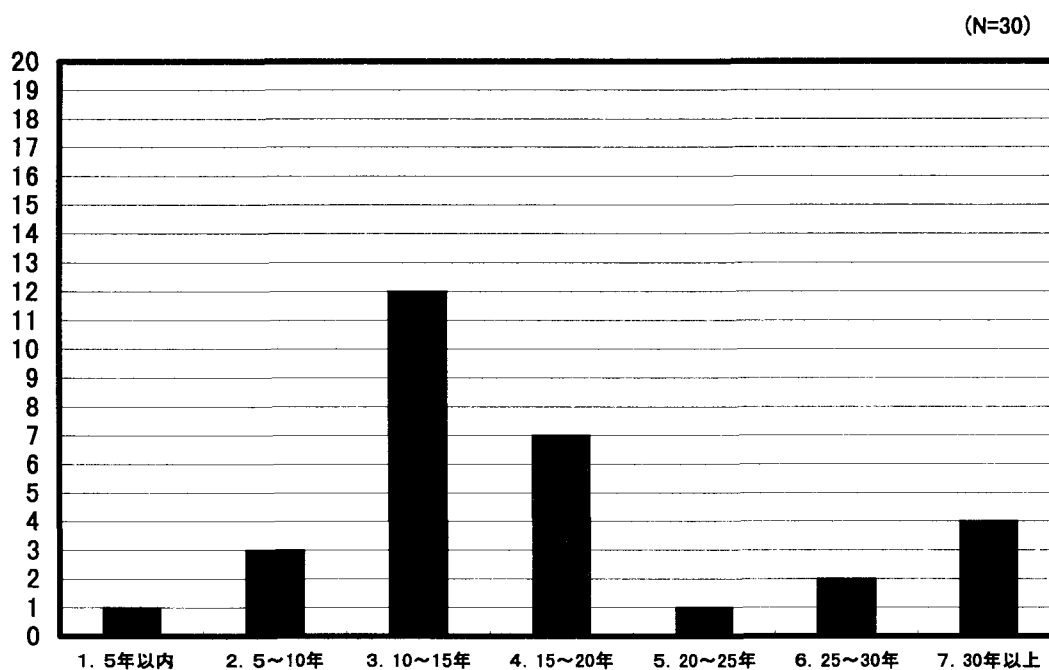
#### SQ3-1. 実用化の可否に関する加速器研究者の意見等

全回答者数	回答者数 (%)	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

### SQ3-2. 実用化時期予測

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	1
2. 5～10年	3
3. 10～15年	12
4. 15～20年	7
5. 20～25年	1
6. 25～30年	2
7. 30年以上	4

図-5. 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



(中間点による)実用化予測時期 : 2013 年頃

### SQ3-3. (高周波加速小型陽子・重イオン加速器)実用化のための技術課題、実用化後の利用、加速技術の発展性について

#### 実用化のための技術課題

(有効回答数 : 27)

1

RF空洞の高周波化または超伝導 RF 空洞、コストベネフィットの問題

2

大電流の加速

3

RFパワーソースがない。

波長が数 mm 以下になると加速空洞の耐圧がもたない。→電圧かけられない。

4

電流量を大きくすること

価格を下げること(これが一番重要)

最初に定義しておかないと経済効果を生まず、従って技術的にも産業的にも発展しない。

5

ビームロスによる放射化の抑制と対策

6

ソースの性能、初期加速

7

表面加工、コンパクト化

8

加速原理の実証

ビーム量、加速エネルギー、エミッタンスの実現可能値の把握

9

① compact good-quality ion source

② phase velocity control

10

入射、出射を狭い範囲で行う技術

11

新しい加速、集束原理を用いた加速器の開発

12

重イオン加速に適した加速空洞の開発

13

小型化、可搬性等に対する技術

14

高周波源の大電力化(大電力のマイクロ波源)と信頼性  
加速電場の制限(絶縁破壊)

15

(シンクロトロンを想定して) 超伝導の小型電磁石及び可変周波数の加速空洞を実現すること

16

加速方式の改善  
非相対論領域の加速効率改善、高周波数化

17

真空、冷却の小型化にともなう困難を解決する必要がある。

18

ビーム電流を得るための方法

19

加速空洞の開発

20

高周波電源、例えば窓の開発、遮蔽、放射化

21

加速効果の向上(リサーキュレーションによる再加速など)  
大出力 RF ソースの開発

22

比較的low周波で高電界を実現する技術  
ビームの質と強度を確保するのが大変困難。

23

安定で使い易い高磁場の発生技術  
コンパクトな磁石ができれば直接小型化につながる。

24

加速構造を小型にできても、消費電力が大きいと冷却が必要になり、かつRF電源も大きくなるという



付随的な問題点が残っている。

25

高電界印加技術及び耐電圧技術  
重イオン(加速器の)集束技術

26

RF 電源の安定化

27

高電界加速に対するビームハローの取り扱い  
小型化するための高周波源の開発

### 実用化後の利用

(有効回答数 : 20)

1

医療、工業(イオンインプラネーションなど)、RI 生産

2

医療用、原子、原子核物理、原子力、核融合など

3

イオン注入による半導体デバイスの製造及び物質改善  
ガン治療

4

小型のガン治療用加速器

5

諸粒子研究用

6

核反応データ測定、材料表面分析

7

医学、生物、物質科学応用

8

医療分野

9

粒子線治療装置

10

小型ガン治療用イオン加速器

11

PIXIE、Prompt  $\gamma$ -ray 分析、放射線治療等、電子加速器がカバーできない様々な分野がある。

12

プラズマ物理、核融合

13

ガン治療、イオンビーム加工

14

大電流には向かないかもしれないので主として医療用か。

15

分析機器としての利用、医用

16

医療  
素粒子・原子核実験

17

核子あたり100MeV~200MeV以上は必要ない。(強度と質による。)

18

加速構造、RF源ともに小型化できれば医療用に急速に普及可能となるであろう。

19

物性、医療用等多分野

20

治療、診断、エネルギー利用、物質の創生

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 12)

1

高温超伝導体 RF 空洞

2

break throughを必要とする

3

十分ある

4

可能

5

成熟・ブレークスルーの繰り返し

6

高効率化、小型化は経済性の向上は大いに期待できる

7

通信やエネルギー輸送？

8

イオン工学

9

高エネルギー化

電流値向上

10

実用化を要求する根拠がない。

11

コンパクトな産業用、重イオン加速器

12

高周波加速による実用化の後は非高周波加速による方面へと発展してゆくと思われる。

#### Q4. 非高周波高勾配加速技術による小型電子加速器の実用化等について

- ・ビーム励起型プラズマ加速器(研究開発段階Ⅲ)
- ・レーザー励起型プラズマ加速器(研究開発段階Ⅲ)
- ・逆チェレンコフレーザー加速器(研究開発段階Ⅲ)
- ・直交場加速器(研究開発段階Ⅱ)

小型電子加速器の目安	
加速器等の大きさ	: おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 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10ton 程度
電子エネルギー	: 1GeV 程度

#### SQ4-1. 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等

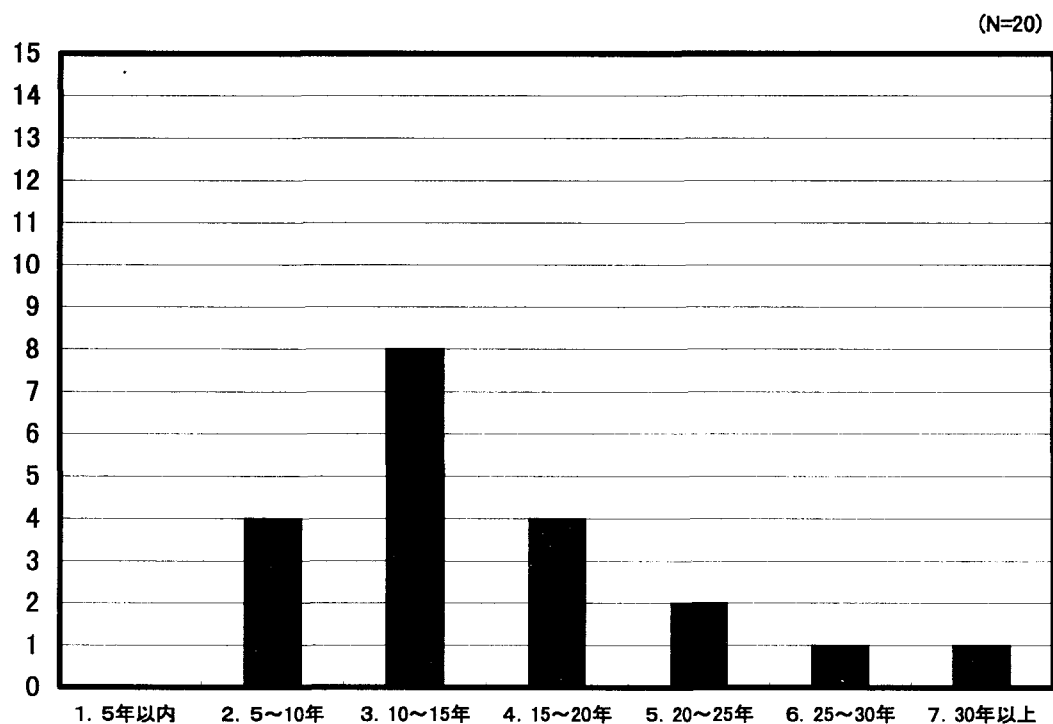
全回答者数	回答者数(%)	調査票上の選択意見(最も近い意見を一つ選ぶ)
79	6 (8%)	1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化するものがある。
	26 (33%)	2. 実用化されると思われるものがあるが、そのためには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。
	29 (37%)	3. いずれについても現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。
	10 (13%)	4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない(実用化の可能性は低い)。
	1 (1%)	5. いずれも実用化はしない。
	6 (8%)	6. わからない
	1 (1%)	7. その他

## SQ4-2. 実用化時期予測

### I-A. ビーム励起型プラズマ加速器(小型電子加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	4
3. 10～15年	8
4. 15～20年	4
5. 20～25年	2
6. 25～30年	1
7. 30年以上	1

図-6. ビーム励起型プラズマ加速器の実用化予測時期分布

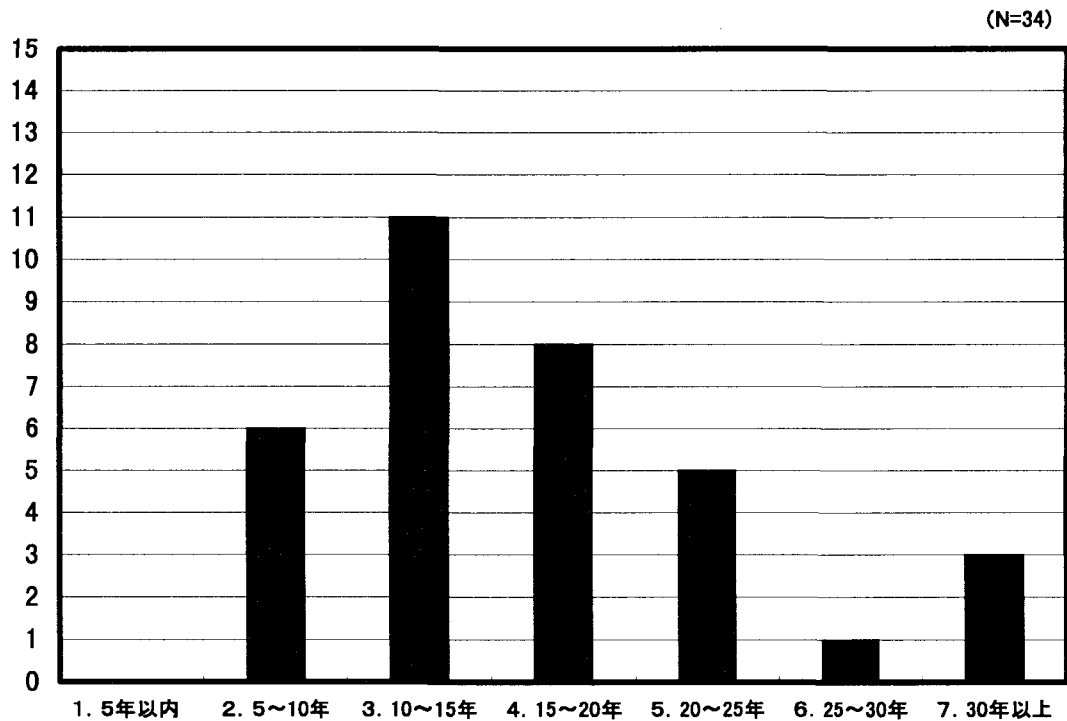


(中間点による)実用化予測時期 : 2013 年頃

I-B. レーザー励起型プラズマ加速器(小型電子加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	6
3. 10～15年	11
4. 15～20年	8
5. 20～25年	5
6. 25～30年	1
7. 30年以上	3

図-7. レーザー励起型プラズマ加速器の実用化予測時期分布

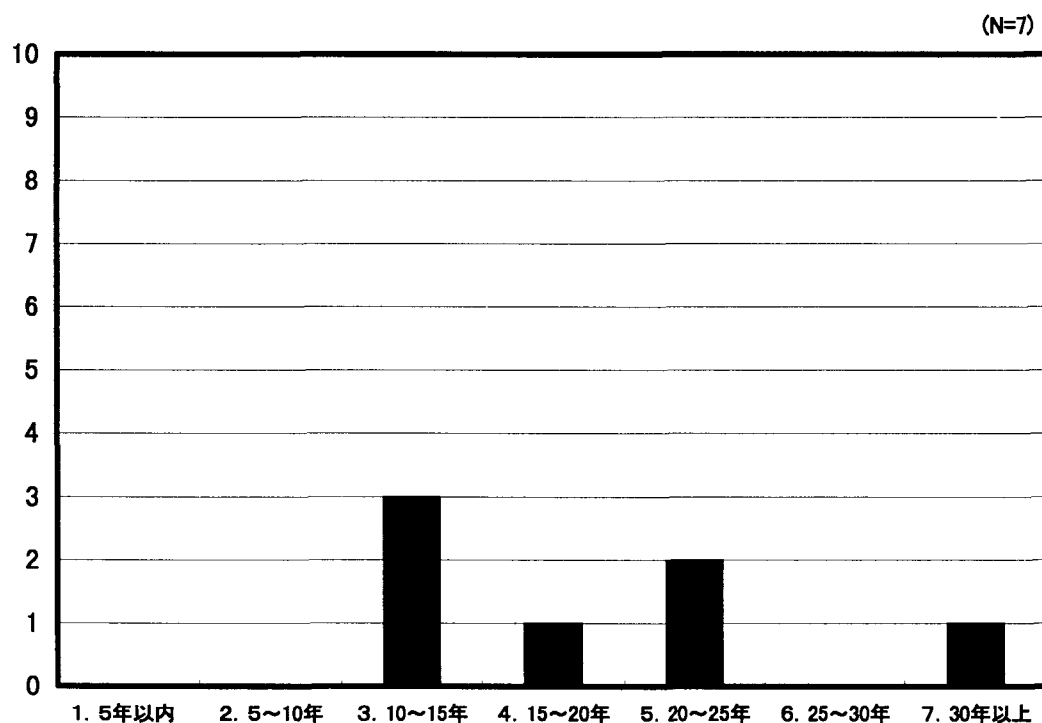


(中間点による)実用化予測時期 : 2014 年頃

I-C. 逆チェレンコフレーザー加速器(小型電子加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	0
3. 10～15年	3
4. 15～20年	1
5. 20～25年	2
6. 25～30年	0
7. 30年以上	1

図-8. レーザー逆チェレンコフ加速器の実用化予測時期分布

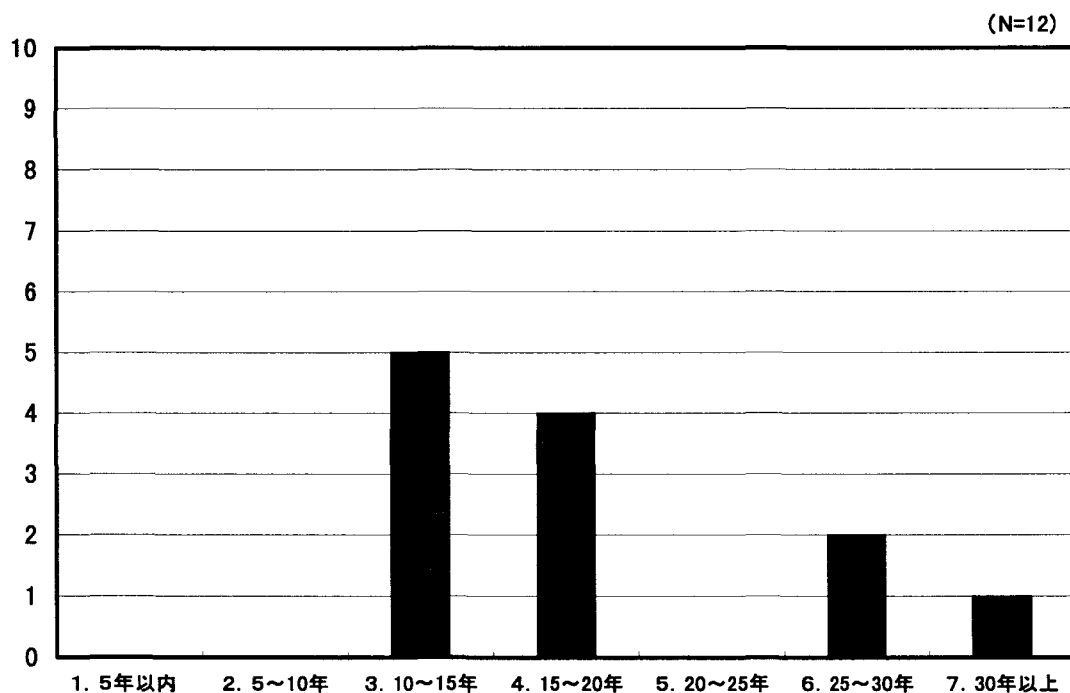


(中間点による)実用化予測時期 : サンプル数過小で算定不能

I-D. 直交場加速器(小型電子加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	0
3. 10～15年	5
4. 15～20年	4
5. 20～25年	0
6. 25～30年	2
7. 30年以上	1

図-9. 直交場加速器(小型電子加速器)の実用化予測時期分布



(中間点による)実用化予測時期 : サンプル数過小で算定不能



**SQ4-3. (非高周波加速小型電子加速器) 実用化のための技術課題、実用化後の利用、加速技術の発展性について**

**I-A ビーム励起型プラズマ加速器 (小型電子加速器)**

**実用化のための技術課題**

(有効回答数 : 11)

1

原理実証 (ビーム量  $> \mu A$ 、エネルギー  $\sim GeV$ )

2

- ①electron injection
- ②noise control
- ③multistage control

3

参考資料と同意見

4

ビームの質の向上がかなり困難

5

プラズマが関係する方式は、いずれもプラズマ物理の一層の理解が必要。まだおもちゃの段階に近い。

6

大電流励起ビームの生成、エネルギー変換効率の高度化

7

トランス比の改善のための研究

8

プラズマ密度の向上  
ビームの安定性

9

プラズマ生成、安定化そして制御

10

加速エネルギーの単色化(現在は加速エネルギーがブロードである。)  
ドライブビーム率が低い。(→応用制限)  
2台の加速器が必要でコストが高い。

11

2個の電子ビームをつくることに問題がある。

### 実用化後の利用

(有効回答数 : 5)

1

電子加速・放射光

2

高エネルギー加速器用

3

高エネルギー電子または陽子加速器

4

高エネルギー物理用加速器(リニアコライダー)

5

大型にならざるを得ないので、高エネルギー分野での基礎研究用にしか使えないのではないか？

### 加速技術の発展性

(有効回答数 : 4)

1

not so compact

2

効率の点から産業用に普及するのは困難

3

励起ビームの加速に高周波加速を使うことになり、著しい小型化は困難

4

プラズマ次第

## I-B レーザー励起型プラズマ加速器（小型電子加速器）

### 実用化のための技術課題

（有効回答数：25）

1

レーザー出力、ビームダイナミクス、加速のステージング、ビーム強度

2

beamの集束・制御

大電流化

3

原理実証（ビーム量 $> \mu A$ 、エネルギー $\sim GeV$ ）

4

①electron injection

②jitter and noise control of laser

③optical (laser)guiding

④multistage control

5

参考資料と同意見

6

電子ビームの安定性確保（加速性のみでは実用化不可）

7

ビーム量と質の向上が課題

8

レーザー効率の向上

短バンチ長の被加速ビームの開発

9

ビーム制御

10

プラズマが関係する方式は、いずれもプラズマ物理の一層の理解が必要。まだおもちゃの段階に近い。

11

広帯域波長可変極短パルスレーザーの開発（高出力、高安定化、速いくりかえし）

プラズマの生成とその制御

12

高性能電子源との結合

13

大パワーレーザーの長時間安定化  
十分な加速長を再現性良く実現するための手法の確立

14

光導波の開発  
電子源  
プラズマ制御

15

高強度レーザーパルスの高距離伝播  
レーザーとビームの超高速同期  
プラズマの非線形不安定性  
高繰り返し高強度レーザーの開発

16

レーザーと電子ビームの同期技術  
安定した航跡場の発生

17

wall-plug効率の改善  
光導波の開発研究  
荷電粒子の入射方法

18

レーザー出力の向上

19

効率の高いレーザー

20

加速エネルギーの単色化(現在は加速エネルギーがブロードである。)  
ドライブビーム率が低い。(→応用制限)  
とくにTWレーザーの高繰り返し化にかかっている。  
50fs以下の高いQEのホトカソードの開発

21

効率の向上

安定性の向上  
電流値の向上

22

極短パルス電子源、極短パルスレーザー、プラズマ導波路

23

量子媒体(レーザー、プラズマ、粒子ビーム)と加速量子との相互作用に基づく加速器では1個あるいは $10^6$ あるいは $10^8$ の粒子は加速できたとしても、実用レベルの電流を得るのは難しい。容器内に量子媒体が充満した真空の問題及び小さい体積にエネルギーが集中することにより発生する実際の問題の解決は困難と思われる。

24

高出力フェムト秒レーザーのビームスプリット  
複数高出力レーザーの位置合わせ  
プラズマカソード数値解析

25

加速距離の増大

## 実用化後の利用

(有効回答数 : 6)

1

電子加速・放射光

2

医療、工業

3

小型化による汎用装置とリニアコライダーの小型化

4

新分野開拓が必要

5

超小型レーザーライナック、レーザーリニアコライダー

6

素粒子実験  
SR入射器

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 18)

1

素粒子研究、硬X線源、工業利用

2

おびただしい可能性がある。  
高エネルギー物理の救世主となる。

3

electron sources  
spectroscopy(物質科学)  
医学応用  
高エネルギー加速  
天体現象シミュレーター

4

短バンチ長、高バンチ周波数特性を活かした放射光発生など

5

高エネルギー科学、JLC 医療、産業

6

高エネルギー加速器

7

非常に大

8

逆コンプトン散乱による $\gamma$ 線発生とその利用(核物質)  
陽電子源、二次粒子源

9

大

10

小型の医療用診断機器の一つの応用や表面解析への利用

11

放射線化学

12

発展性が望める。

13

電子コライダー

14

小型高エネルギー物理用加速器、放射光源用

15

100Hz、1pC/bunchでは応用が限られる。(FEL、コヒーレント、SR逆コンプトン散乱によるX線、 $\gamma$ 線発生)

16

ビームの質の向上

17

大きい

18

物質・材料科学研究、生命科学、医療(研究)利用、産業利用

## I-C レーザー逆チェレンコフ加速器 (小型電子加速器)

### 実用化のための技術課題

(有効回答数 : 3)

1

プラズマが関係する方式は、いずれもプラズマ物理の一層の理解が必要。まだおもちゃの段階に近い。

2

レーザーとビームの超高速同期、マイクロバンチング、加速の長距離化

3

実用的な縦電場の生成に問題がありそう。

## 実用化後の利用

(有効回答数 : 1)

1

超小型レーザーライナック、レーザーリニアコライダー

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 1)

1

ガスのブレイクダウンにより加速勾配は1GeV/m 程度

## I-D 直交場加速器 (小型電子加速器)

### 実用化のための技術課題

(有効回答数 : 7)

1

原理実証

2

小型強磁場発生装置の開発  
レーザー効率の向上

3

プラズマが関係する方式は、いずれもプラズマ物理の一層の理解が必要。まだおもちゃの段階に近い。

4

レーザー出力の向上

5

軸対線でエミッタンスの良いビームを得るための工夫が必要と思われる。

6

電場が強くなるのに見合う磁場の生成



**実用化後の利用**  
(有効回答数 : 0)

**加速技術の発展性**  
(有効回答数 : 0)

## Q5. その他の電子加速法による小型化について

### I-E-1 真空中での航跡場加速

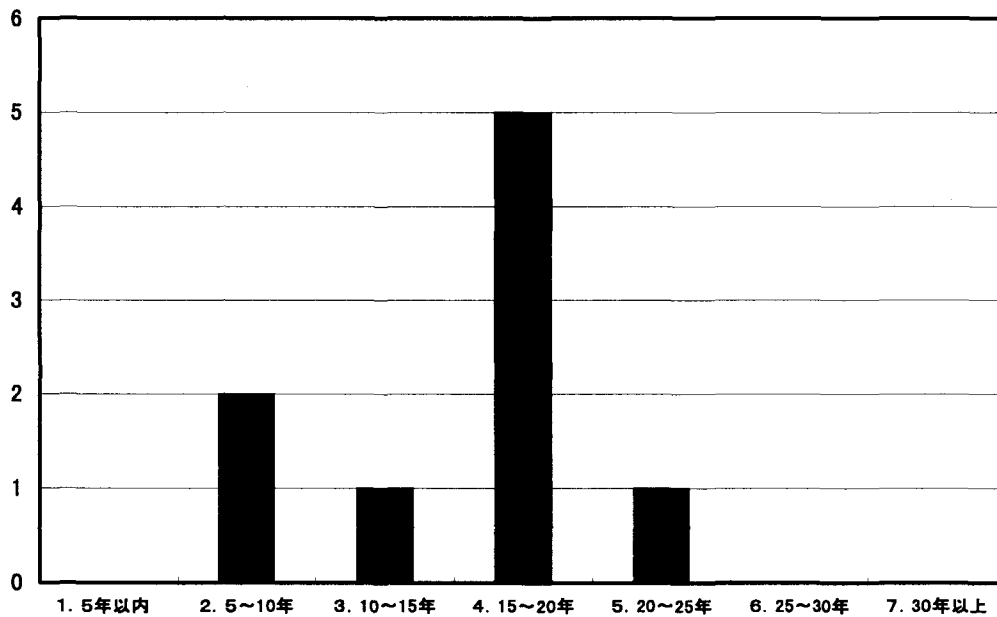
小型化有望性あり：回答数 8

#### 達成可能電場

達成可能電場	回答数
10~100 MV/m	1
300 MV/m	1
1 GV/m	1
10 GV/m	1
100 GV/m	1

図-10. (真空中航跡場加速) 実用化時期・達成可能電場達成時期

(N = 9)



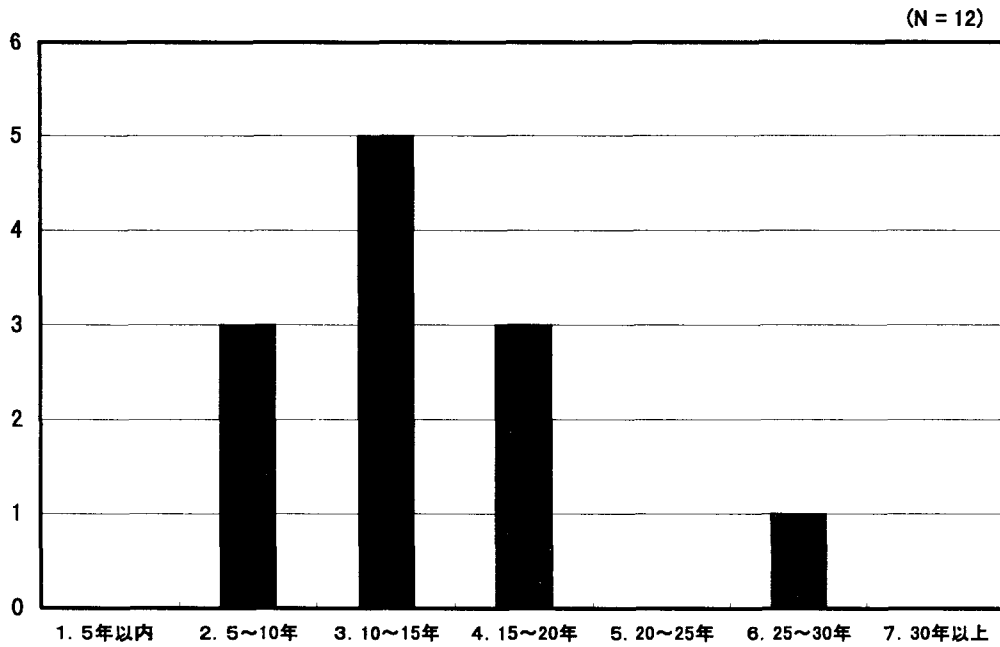
## I-E-2 2ビーム加速器

小型化有望性あり：回答数 11

達成可能電場

達成可能電場	回答数
～100 MV/m	2
～200 MV/m	2
500 MV/m	1
～ 1 GV/m	2

図-11. 2ビーム加速器実用化時期・達成可能電場達成時期



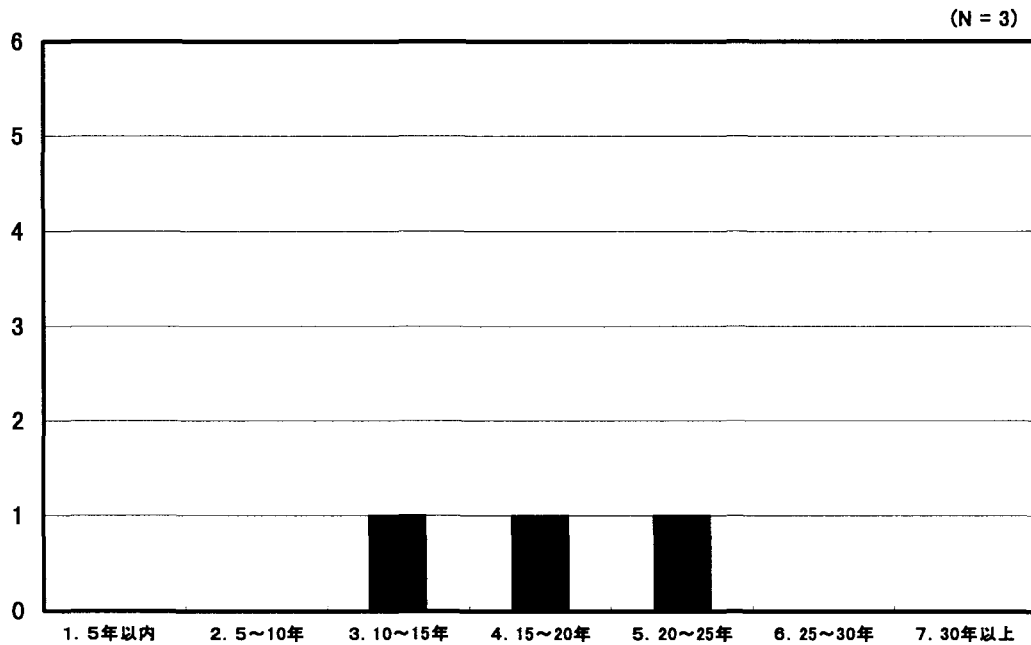
### I-E-3 逆スミス・パーセル加速

小型化有望性あり：回答数 3

#### 達成可能電場

達成可能電場	回答数
～100 MV/m	1

図-12. 逆スミス・パーセル加速実用化時期・達成可能電場達成時期

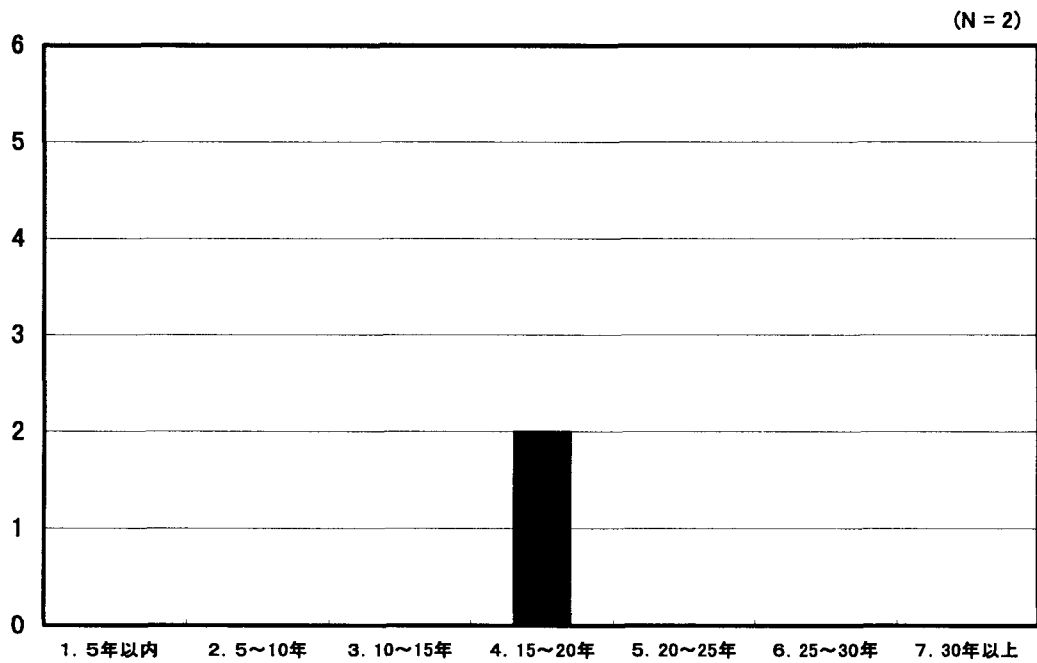


### I-E-4 自動共鳴加速 I

小型化有望性あり：回答数 2

達成可能電場：回答 なし

図-13. 自動共鳴加速 I 実用化時期



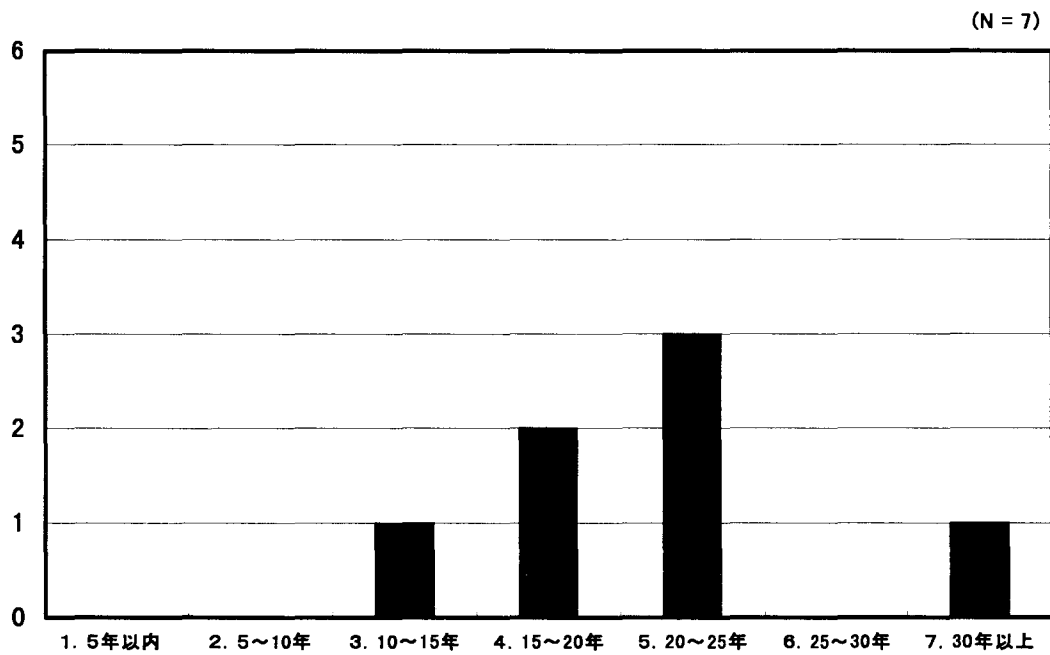
### I-E-5 逆自由電子レーザー加速

小型化有望性あり：回答数 7

#### 達成可能電場

達成可能電場	回答数
～ GV/m	1

図-14. 逆自由電子レーザー加速実用化時期・達成可能電場達成時期



Q6. 非高周波高勾配加速技術による小型陽子・重イオン加速器の実用化等について

- ・電子リング加速器(研究開発段階Ⅳ)
- ・レーザー励起型プラズマ加速器(研究開発段階Ⅰ)
- ・レーザー衝撃波加速器(研究開発段階Ⅰ)
- ・直交場加速器(研究開発段階Ⅰ)

小型陽子・重イオン加速器の目安	
加速器等の大きさ	: おおよそ縦5m×横5m×高さ3mの区域内に 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10ton 程度
陽子・重イオンエネルギー	: 200MeV/n 程度

SQ6-1. 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等

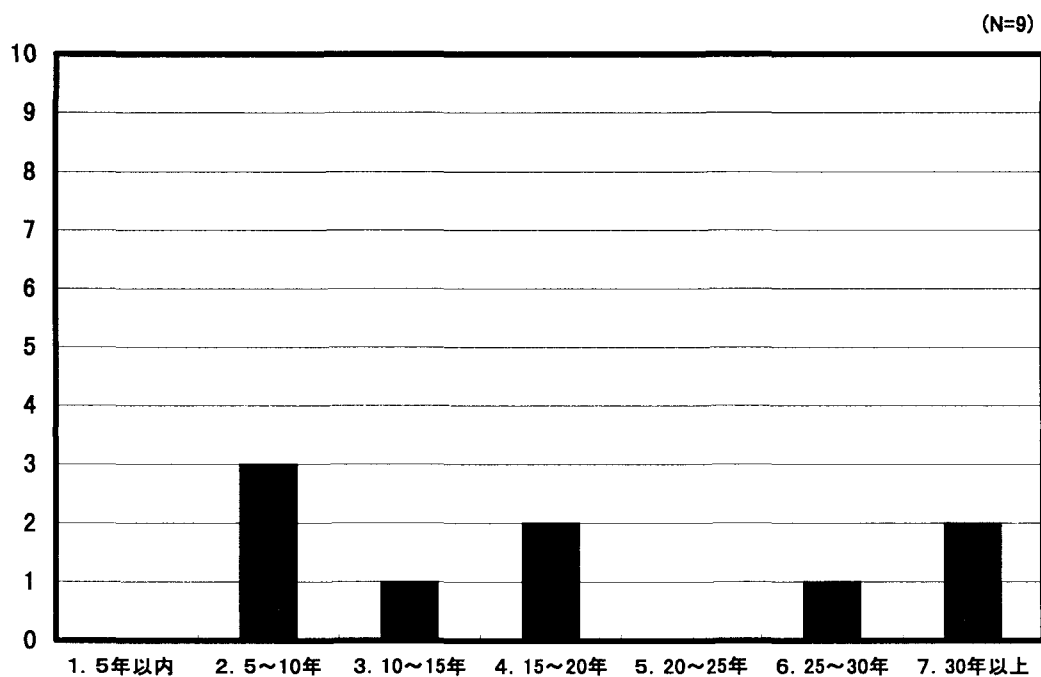
全回答者数	回答者数(%)	調査票上の選択意見 (最も近い意見を一つ選ぶ)
78	4 ( 5%)	1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化するものがある。
	12 (15%)	2. 実用化されると思われるものがあるが、そのためには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。
	39 (50%)	3. いずれについても現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。
	15 (19%)	4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない (実用化の可能性は低い)。
	2 ( 3%)	5. いずれも実用化はしない。
	6 ( 8%)	6. わからない
	0 ( 0%)	7. その他

## SQ6-2. 実用化時期予測

### Ⅱ-A. 電子リング加速器(小型陽子・重イオン加速器)

実用化予測時期	回答者数
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	2

図-15. 電子リング加速器の実用化予測時期分布



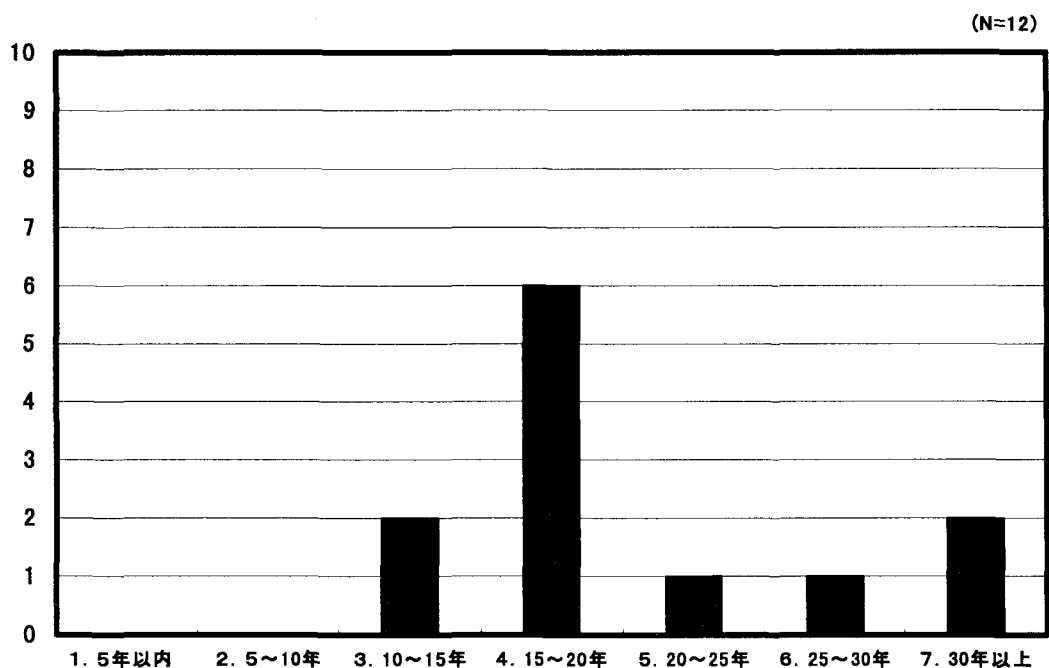
(中間点による)実用化予測時期: サンプル数過小で算定不能



II-B. レーザー励起型プラズマ加速器(小型陽子加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	0
3. 10～15年	2
4. 15～20年	6
5. 20～25年	1
6. 25～30年	1
7. 30年以上	2

図-16. レーザー励起型プラズマ加速器の実用化予測時期分布

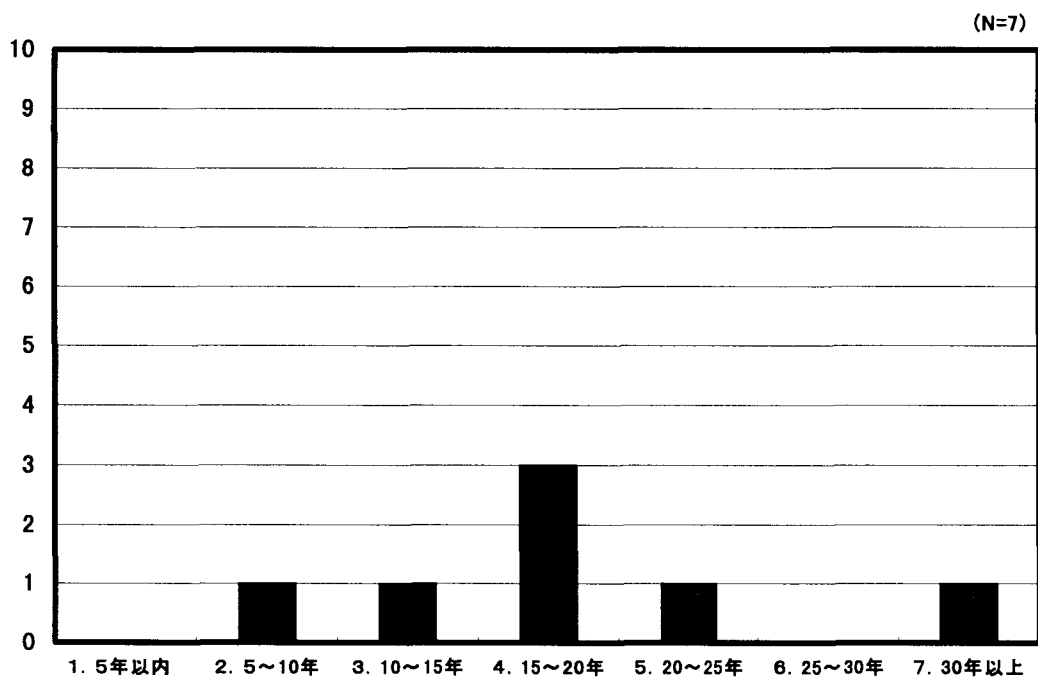


(中間点による)実用化予測時期: サンプル数過小で算定不能

Ⅱ-C. レーザー衝撃波加速器(小型陽子・重イオン加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	1
3. 10～15年	1
4. 15～20年	3
5. 20～25年	1
6. 25～30年	0
7. 30年以上	1

図-17. レーザー衝撃波加速器の実用化予測時期分布

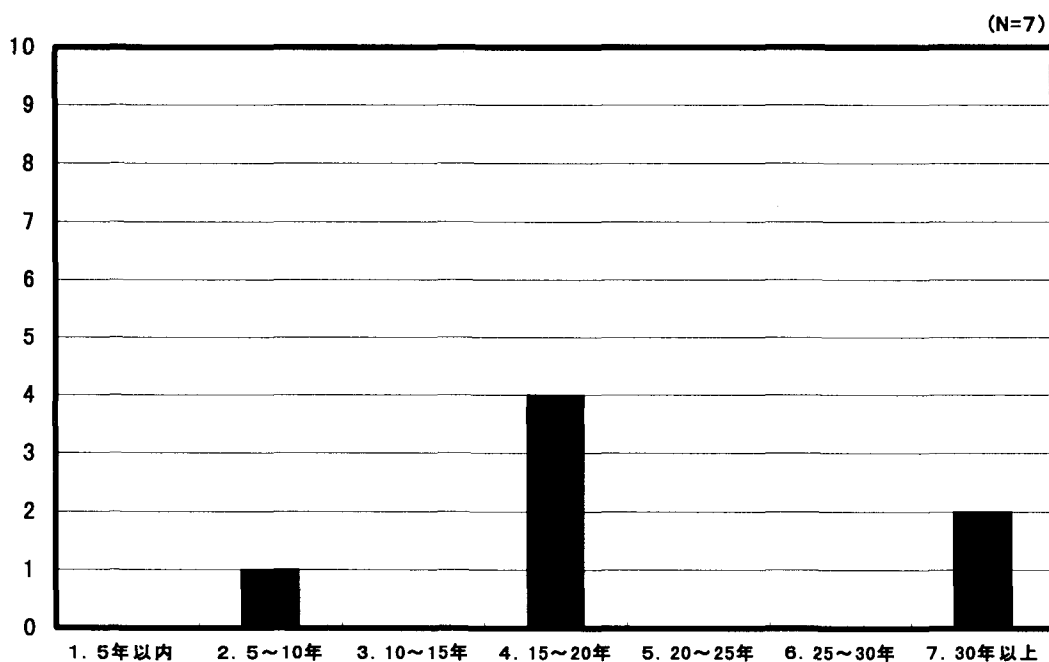


(中間点による)実用化予測時期: サンプル数過小で算定不能

II-D. 直交場加速器(小型陽子・重イオン加速器)

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	0
2. 5～10年	1
3. 10～15年	0
4. 15～20年	4
5. 20～25年	0
6. 25～30年	0
7. 30年以上	2

図-18. 直交場加速器の実用化時期予測時期分布



(中間点による)実用化予測時期: サンプル数過小で算定不能

**SQ6-3. (非高周波加速小型陽子・重イオン加速器) 実用化のための技術課題、実用化後の利用、加速技術の発展性について**

**II-A 電子リング加速器 (小型陽子・重イオン加速器)**

**実用化のための技術課題**

(有効回答数 : 5)

1

～200MeV/u の達成、エミッタンス向上

2

ビームの質と効率の向上

3

特に見あたらない

4

実用化のレベルによるが、産業利用などをめざす意味での実用化にははるかに距離がある。まず研究的興味にてもむことが必要。

5

イオンの入射方法、サイズ低減、リング加速技術

**実用化後の利用**

(有効回答数 : 4)

1

応用核物理

2

簡易分析用

3

医療

4

医療用途、材料、物性分野

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 1)

1

ビームの大電流化

## II-B レーザー励起型プラズマ加速器 (小型陽子加速器)

### 実用化のための技術課題

(有効回答数 : 8)

1

pick up

phase velocity control

2

ビームの質と効率の向上

3

ビーム制御

4

広帯域波長可変極短パルスレーザーの開発(高出力、高安定化、速いくりかえし)

プラズマの生成とその制御

5

課題抽出

プラズマ制御

6

効率向上

安定性向上

7

電子加速管の実用化でほぼ解決される。

8

位相速度の遅い高電場波の励起

## 実用化後の利用

(有効回答数 : 5)

1

簡易分析用

2

医療・工業

3

核物理や二次粒子生成と材料開発

4

ガン治療

5

医療

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 4)

1

発展性あり

2

レーザー開発は、一般的にレーザーを使用した加速器の発展につながる。

3

イオン工学

宇宙医学

4

ビームの質の向上

## Ⅱ-C レーザー衝撃波加速器（小型陽子・重イオン加速器）

### 実用化のための技術課題

（有効回答数：3）

1

pick up

phase velocity control

flux

2

イオン源生成方法

3

固体ターゲット材質の形状、レーザーパラメータの最適化

### 実用化後の利用

（有効回答数：3）

1

医学、生物、物質科学

2

重イオン加速器の小型化

3

ガン治療の化学メカニズムの解明

材料放射線照射メカニズムの解明

### 加速技術の発展性

（有効回答数：3）

1

ある

2

大

3

イオンビーム加速器のレーザー加速ペースの超小型化革命が起きる。

## Ⅱ-D 直交場加速器（小型陽子・重イオン加速器）

### 実用化のための技術課題

（有効回答数： 2）

1

課題抽出

プラズマ制御

多段化(サイクル加速)

2

位相速度の遅い高電場波の励起

### 実用化後の利用

（有効回答数： 1）

1

ガン治療

### 加速技術の発展性

（有効回答数： 1）

1

イオン工学

宇宙医学



Q7. その他の陽子・重イオン加速法による小型化について

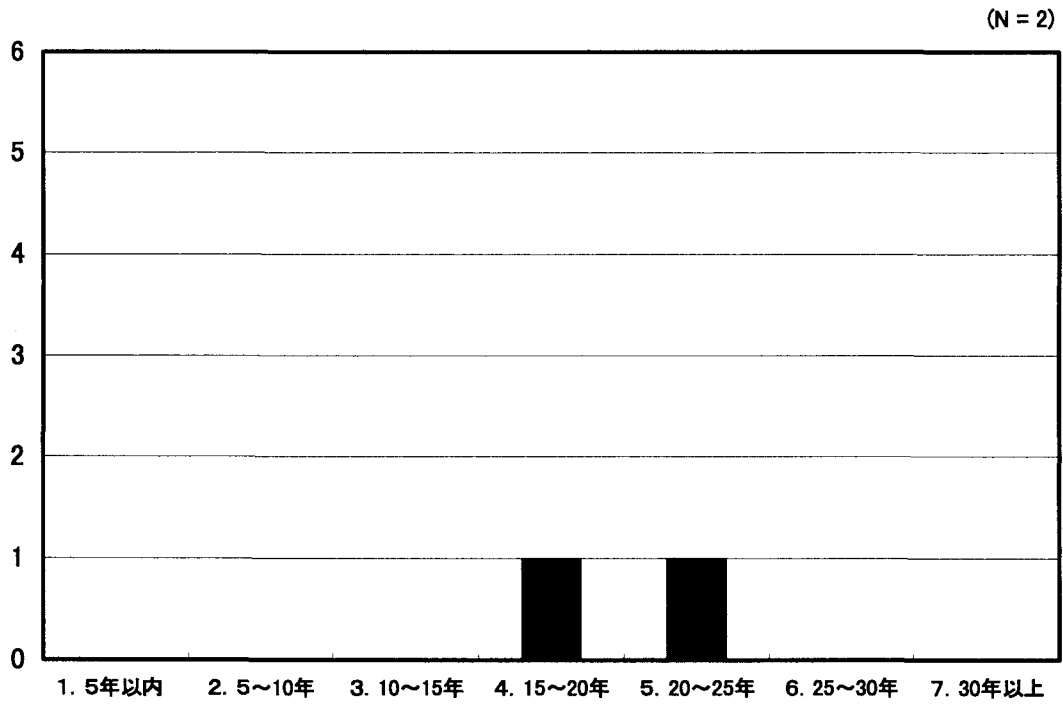
II-E-1 自動共鳴加速 II

小型化有望性あり：回答数 2

達成可能電場

達成可能電場	回答数
10 MV/m	1

図-19. 自動共鳴加速 II 実用化時期・達成可能電場達成時期

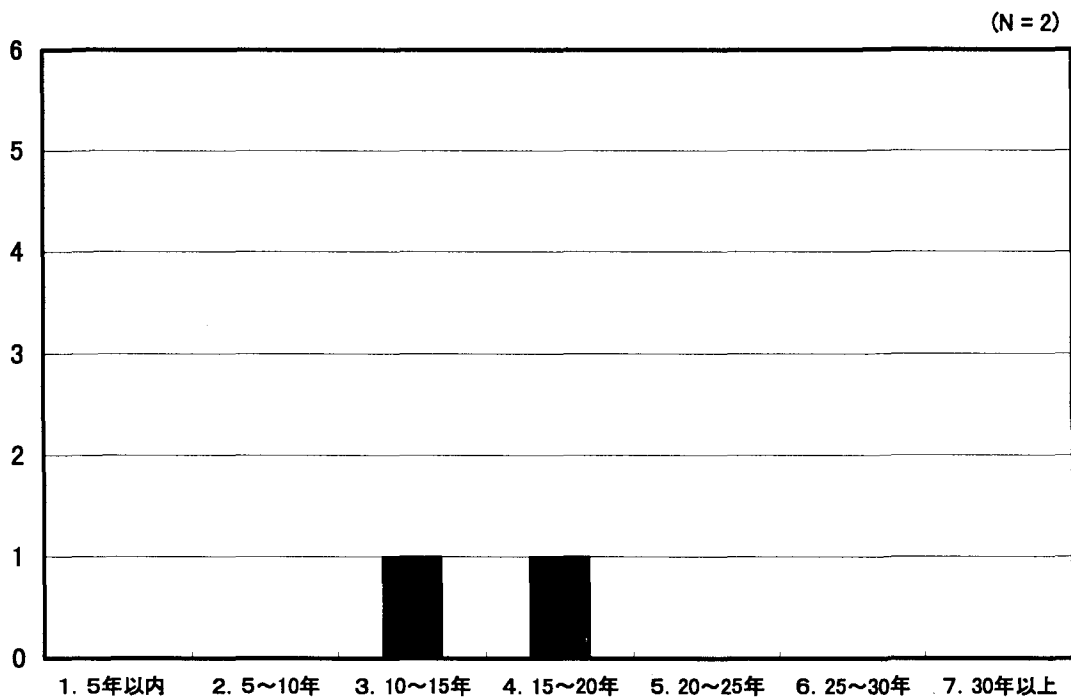


## II-E-2 Converging Guide Acceleration

小型化有望性あり：回答数 2

達成可能電場：回答 なし

図-20. Converging Guide Acceleration 実用化時期



Q7. その他の陽子・重イオン加速法による小型化について  
(回答者から寄せられたその他の陽子・重イオン加速法)

ECRIPAC

R.Geller の提案しているもので、ECR 原理によりイオンを生成し、これを強磁界内でパルス変調磁界を相乗させることにより非高周波直線加速を達成する。

小型化有望性あり：回答数 1

達成可能電場：回答 なし

達成時期：15～20 年後

## Q8. レーザーアンジュレータ放射光発生装置の実用化等について

レーザーの強い磁場を使い電子ビームにアンジュレーションを起こし、放射光を発生させる

小型放射光発生装置の目安	
装置の大きさ	: 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
装置の全重量	: おおよそ10ton 程度
放射光子エネルギー	: 30～100keV 程度

### SQ8-1. 実用化の可否に関する加速器研究者の意見等

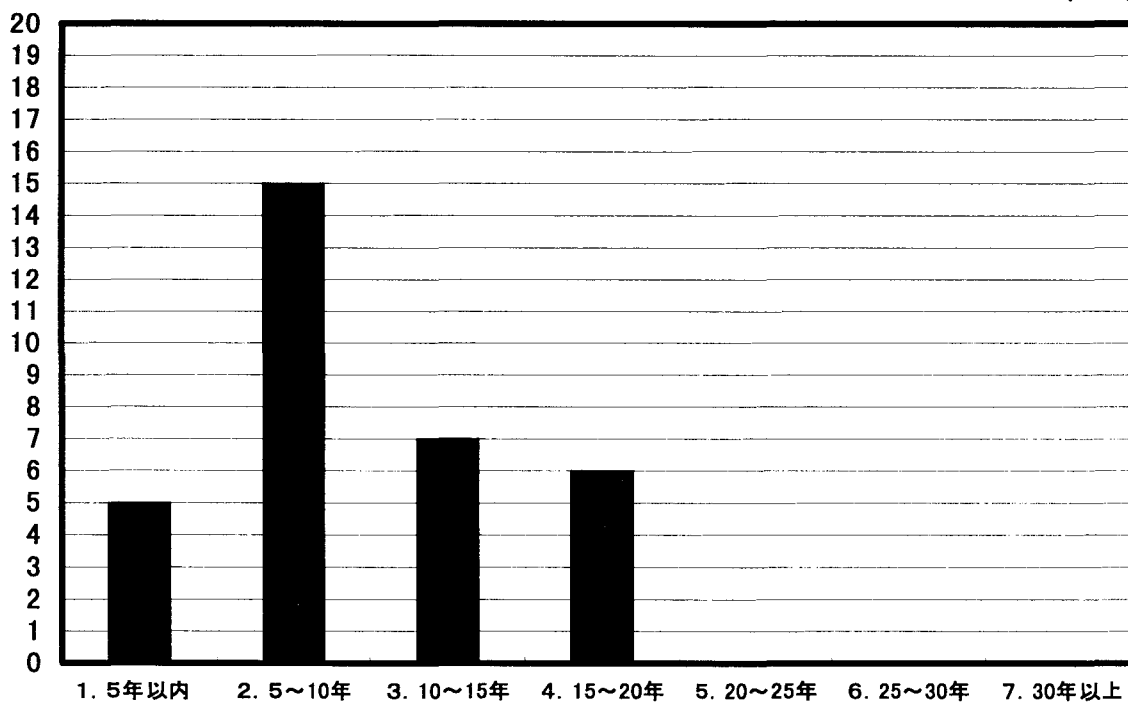
全回答者数	回答者数 (%)	調査票上の選択意見 (最も近い意見を一つ選ぶ)
75	16 (21%)	1. 継続した研究を実施すれば、それほどの困難はなく実用化する。
	17 (23%)	2. 実用化するには大きな課題を解決する研究開発を重ねる必要がある。
	22 (29%)	3. 現時点では実用化するか否かは判断できない。それを判断する研究が必要である。
	8 (11%)	4. 現時点で予見できない何らかの技術進歩がない限り実用化はしない (実用化の可能性は低い)。
	0 (0%)	5. 実用化はしない。
	11 (15%)	6. わからない
	1 (1%)	7. その他

SQ8-2. 実用化時期予測

実用化予測時期	回答者数
1. 5年以内	5
2. 5～10年	15
3. 10～15年	7
4. 15～20年	6
5. 20～25年	0
6. 25～30年	0
7. 30年以上	0

図-21. 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

(N=33)



(中間点による)実用化予測時期 : 2008年頃

**SQ8-3. (レーザーアンジュレーター放射光発生装置) 実用化のための技術課題、実用化後の利用、加速技術の発展性について**

**実用化のための技術課題**

(有効回答数 : 28)

1

大出力レーザー、放射光の高輝度化

2

電子ビーム及びレーザービームの空間変動をなくする。  
レーザー波長スタビライザー、電子エネルギーのスタビライズ

3

投入レーザー光に対する、高エネルギー放射光への変換効率を高めるために、大強度電子ビームが必要、これの発生と、コントロール技術

4

安定性

5

不要な光による除熱  
ビームの長時間安定性  
省エネルギー化

6

- ①laser jitter
- ②synchronization
- ③mirrors
- ④laser

7

参考資料と同意見

8

高反射率共振器ミラーの開発、レーザの小型化

9

光学系の開発と高効率化

10

超高強度電磁場中でのビームの安定性とレーザー場への反作用の解明  
電子ビーム発生部の小型化とビームの高品質化

11

高周波発生機構の開発  
電子ビーム、コリメーション(エネルギー巾)の開発  
高反射ミラーの開発

12

レーザーの高輝度化  
スループット向上

13

レーザーと電子ビームの散乱過程で双方のビーム特性が劣化すると思われるがこれを克服し、レーザーはミラーによる反射で、電子ビームは周囲により再利用を行うことが何回継続可能か、が鍵となる。

14

衝突部のビーム、レーザー制御  
スーパーキャビティの開発  
ミラー開発

15

レーザーとビームの相互作用の高輝度化  
レーザーの高輝度高繰り返し化

16

レーザーと電子ビームの同期、衝突のアライメント  
optical storage ring の実現

17

高効率化  
高品質電子ビームの生成  
高エネルギー、高繰り返しのレーザーの開発  
レーザーと電子ビームの相互作用の基礎研究

18

レーザービームの出力向上  
放射光取り出しの工夫

19

ビームの質の向上  
レーザーパワーの向上とレーザー径の拡大

20

線形加速器:短パルス、低エネルギー分散、低エミッタンス、大電流の電子ビームを何処に作るか?

21

極短パルスレーザ、レーザ・ビーム同期回路など

22

放射光は電子をまわすと勝手にでてくれる。一方、電子とレーザーの相互作用に基づくものとしてFELがあるが、話題性のわりにはうまくいっていない。  
量子と量子の相互作用の実用化はまだまだ先と思う。

23

電子ビームサイズ、質のコントロール

24

小型装置で超微細ビームを制御する技術の開発

25

最も問題点が少ない。

26

電子ビームレーザービームの安定供給

27

スーパーキャビティ用の超低ロス・ミラーができるかどうか。またその寿命が長いかどうか。現状ではうまくいって $10^{10}$  photons/sec。(電子技術総合研究所彙報 42 巻、1.2 号、96~104 頁、1978年、「高エネルギー電子による単色光子発生」参照)

28

スーパーミラー光共振器

## 実用化後の利用

(有効回答数 : 26)

1

医療診断、物性研究、科学研究、分析

2

X線レーザーとして使える。

3

もし、実用化されれば、物質科学での応用は広いと思われる。

4

現在の大型SRと同じでただ小型化



5

数十MeVの光が得られれば、核変換が可能

6

医学、生物、物質科学

7

アンジオグラフィ

8

アンジオグラフィ

9

コンパクト高強度X線源

10

干渉性、指向性が向上すれば、医療、産業、宇宙検査

11

スーパーキャビティ内での逆コンプトン散乱( $\gamma$ 線を利用した核物理)  
(放射性廃棄物の消滅処理等)

12

アンジオ等のイメージング、SRのおきかえ

13

当面目標とする心臓冠状動脈の血管造影(アンジオグラフィ)に利用されるであろうが、電子ビームのエネルギーを掃引するなどにより放射光の波長をスイープさせることにより、その他の分析にも使用する可能性が拓けると考えられる。

14

アンジオグラフィ(Hospital base)  
ガン治療

15

単色、指向性、短パルスを利用したX線医療診断・治療、材料科学、産業応用

16

高性能X線源として幅広く利用される。

17

医療、物性実験

18

動脈硬化等の循環器系の疾病の診断

19

物理、生物、医療など多数

20

微細加工(半導体、LIGA)等の産業応用、物質科学分析用光源

21

極短波長光の利用(診断、リソグラフィなど)

22

医療等

23

医療用、物性分野などに利用が考えられる。

24

病院設置型の小型加速器として最適である。

25

生物物理学

26

医療用アンジオグラフィ

## 加速技術の発展性

(有効回答数 : 19)

1

レーザー波長変化によりX線波長が可変になる。

2

X線シードレーザーの増幅

3

加速器複合体からの新体系へのブレイクスルー

4

ある。

5

自由電子レーザー化の可能性

6

ある。

7

干渉性の向上

8

プラズマ・アンジュレータ等への次の展開

9

SRの小型化の先に可能性あり。

10

近年、レーザーパワーは飛躍的に発展しつつあるので、この方法が実用化された後では更に急速に進歩すると考えられるので、発生放射光強度等に一層の向上が期待できると思われる。

11

物性物理  
ライフサイエンス

12

加速器技術としては完成されている。レーザー技術の進歩がともなえば発展する。

13

非常に応用範囲が広がるとされる。

14

強度を稼いで集光(硬X線)技術の向上に利用する。

15

小型化、パワー増大

16

大きい

17

現在大型リングが行っていることを各研究所、機関で可能になり、発展性大

18

さらにX線領域へのレーザー光の可能性が開ける。

大型SRよりは小さいが、超小型とは言えない。従ってどの程度広く普及するかは不透明。

**Q9. 小型化が有望な放射光発生方法について**

(有効回答数 :20)

1

**方法名称**

Two-Beam RF Accelerator

**説明**

Undulator

**実用化すると考えている時期**

10～15年

2

**方法名称**

プラズマアンジュレータ

**説明**

レーザーで励起するプラズマ波に伴う横方向の電場で電子ビームを蛇行させ、軟X線を発生させる。

**実用化すると考えている時期**

10～15年

3

**方法名称**

光蓄積リング

**説明**

小型蓄積リングの真空壁内面を鏡面として、360度に出てきた放射光を反射し、再び電子ビームと干渉させてレーザー発振を行うもの。立命館大学で実験中。

**実用化すると考えている時期**

10～15年

4

**方法名称**

プラズマアンジュレータ

**説明**

プラズマに密度のリップルをつけ、それに電子ビームを通す方法

**実用化すると考えている時期**

5～10年

5

**方法名称**

レーザ・ベータトロン

**説明**

FFAG のベータトロンにステラレータ磁場を追加し、強い集束作用を持たせた大電流の電子ビームを加速する。Z.HUANG らが提案するレーザアンジュレータと同様な原理を用いて大強度の光子を発生させる。

**実用化すると考えている時期**

5～10年

6

**方法名称**

プラズマ硬X線源

**説明**

放射光ではないが、高温高密度プラズマ中での再結合等の放射を利用

**実用化すると考えている時期**

5～10年

7

**方法名称**

X線レーザー

**説明**

放射光ではないが、高温高密度プラズマ中での反転分布を利用。あまり高エネルギーは難しい。(keV 以下か?)

**実用化すると考えている時期**

5～10年

8

**方法名称**  
遷移放射光

**説明**

誘電率の異なる物質の境界面を通過する際に発生する放射光

**実用化すると考えている時期**

15～20年

9

**方法名称**  
結晶又は誘電体を用いた放射光発生

**説明**

Q4. で挙げられた小型の高効率電子加速器が実現した場合は、結晶からのパラメトリックX線放射、ないしは誘電体からの遷移放射を放射光源として利用できる可能性が開けると考えられる。

**実用化すると考えている時期**

10～15年

10

**方法名称**  
電子ビームと結晶場／電子ビームとレーザー(コンプトン後方散乱)など

**説明**

アンジュレータとは別の考え方によるX線発生で小型化ができないか。

**実用化すると考えている時期**

11

**方法名称**  
パルス超強磁場ウイグラー

**説明**

小型蓄積リング(1GeV 以下)にパルス超強磁場ウイグラー(20T程度)を設置できれば、小型でも硬X線(30keV程度)が取り出せ、時間分解的な画像取得等が可能になる。

**実用化すると考えている時期**

5～10年

12

**方法名称**

光蓄積リング

**説明**

電子蓄積リング型制動放射装置

**実用化すると考えている時期**

5年以内

13

**方法名称**

遷移放射光

**説明**

相対論的電子ビームが誘電体を横断する際に発生する電磁波

**実用化すると考えている時期**

15～20年

14

**方法名称**

団体アンジュレータ

**説明**

1GeV 程度のエネルギー入射で固体内チャンネルリング放射により、X線や $\gamma$ 線を発生させる。

**実用化すると考えている時期**

30年以上

15

**方法名称**

共鳴遷移放射光源

**説明**

中重元素の薄膜と軽元素の薄膜を交互に積層した多層薄膜標的に、10 から 100MeV 程度の電子



ビームを照射すると、ビーム進行方向に集中したX線が放射される。電子1個あたりの放射強度はシンクロトン放射よりも数桁強く、また標的を傾けることで波長を容易に変化できるため、小型可変波長X線源として利用できる。本放射は比較的古くから知られていたものであるが、従来は標的製作が困難であったため、良い結果が得られなかった。近年、多層薄膜標的が製作可能となり理論値どおりの実験結果が出つつある。これまでは 2keV から 20keV の実験が多いが、30keV 以上の光子も電子エネルギーを 100MeV 程度にすれば容易に発生できる。

**実用化すると考えている時期**

10～15 年

16

**方法名称**

プラズマアンジュレータ光源

**説明**

レーザー等でプラズマ密度の周期性をつくり、そこに電子ビームを通過させ、通常アンジュレータ放射あるいは共鳴遷移放射を発生させる。

**実用化すると考えている時期**

10～15 年

17

**方法名称**

レーザー電子X線源

**説明**

P43. 44に説明されている。

**実用化すると考えている時期**

5～10 年

18

**方法名称**

共鳴遷移放射光源

**説明**

**実用化すると考えている時期**

10～15 年

19

**方法名称**

レーザープラズマX線源

**説明**

12TW以上のフェムト秒レーザーを気体中に打ち込み、生成プラズマ中の電子とレーザーとのトムソン散乱によってX線を発生させる。

**実用化すると考えている時期**

5年以内

20

**方法名称**

キャピラリプラズマX線源

**説明**

ソレノイド磁場中に放電プラズマを生成し、そこからのX線を活用する方式で、装置1m程度で極めてコンパクトである。

**実用化すると考えている時期**

5年以内

Q10. (加速器開発について) 21世紀の初頭(20~30年後)の加速器科学を睨んだ加速器開発について、あなたのご意見をお聞かせください。

(Q10.有効回答数 : 73)

1

小型加速器に限れば、波長数 mm の高周波技術、レーザーやプラズマなどの比較的新しい技術が重要になり、これらの分野の研究成果を合わせて考察する必要がある。新しい加速方法のアイデアが出されてからかなりの時日を経ているが、加速器の進歩はもっと地道で RF の周波数を実用化された段階から徐々に高い周波数に向けて開発がなされているのが実情である。次のステップはWバンドへ近づく方向で実用化が進むものと思われるが、レーザーやプラズマはこれを飛び越えて彼方から超技術に挑むようである。素粒子研究用加速器はビーム強度やエネルギーが研究の要求を満たすまでに熟成された段階に達して始めて建設されるので問題は少ない。しかし、新しい加速技術については実用レベルの技術をかち得るまでには多くの研究開発投資が必要である。

2

巨大科学として発展してきた加速器科学がデスクトップ加速器に変貌するのも近いのは楽しみです。

3

1) 研究者がいれば、本報告書に有するすべての新方式加速器に必要なだけの予算と人員をつける。但し、開発の責任者(研究機関ではない)を明確にし、かつ研究成果を厳密に評価する必要がある。  
理由 :ここに挙げられた新型加速器提案の大部分は20年以上前に聞いたと思う。それなのに未だ実用化していないのは、十分な研究が行われていなかったためだと推測する。そろそろ決着をつける必要がある。開発を進めた結果仮に実用化しなかった場合でも、まじめに研究を行えば必ず新しい知見が得られるはずである。さらに研究過程において優秀な人材が出てくることが期待される。

2) 従来の加速原理(高周波、又は静電界等利用)に基づいた、安価、安定且つ使いやすい産業、医療用の加速器を開発する。

理由 :加速器の産業利用は滅菌、プロセッシング、非破壊検査等たくさんあるが安くて使い易い加速器がない。

4

高エネルギー加速器の開発に伴って提案された idea の中から実用可能性の高いものを重点的に推進し、同時に小型の医療用、産業用の加速器に応用していくことが重要。このアンケートで議論されている諸 idea は次々世代のものに対応する。

この観点から、例えば KEK の新竹氏を中心に開発の進んでいるC-band 加速について言及がないのはおかしい。

次々世代加速器の開発のためには、大研究所と共に、各大学における開発研究を推進することが重要である。その際「加速技術」だけでなく、加速されたビームの安定性についての配慮が必要であり、ビーム物理全体の発展を同時にはからなければならない。

5

これらの開発にはまだまだブレイクスルーが必要。大型の加速器プロジェクトに対して、個々の研究はそれほどコストがかからないので、継続的な予算処置がとられてほしい。(これらの案の研究をしている人たちに十分な予算がいつているとはとても思えない。)

6

素粒子実験の為には従来の加速器技術でも安価に達成する努力が社会に計画承認される唯一の道である。もちろん新技術、新加速方式でより安価に建設出来ればよい。高エネルギー加速器実現の為にはどの方法にしる、安価が最も重要である。

7

高周波による加速技術がビームの安定性、エネルギー効率等の点で他のものに比べて優位である。もちろん、非高周波加速技術も学術的に有意義ではあるが、現在、広く世界を眺めるとき、環境汚染、エネルギー問題、医療(薬づけ)、廃棄物の不法処理などなど、日本の急激な経済発展の”つけ”を21世紀に支払う必要があることは明白であり、加速器技術がこの問題の解消に少しでも役に立つように(あまりおもしろくはないかもしれないが)完成された高周波加速技術をうまく使ってゆく研究の方に投資する必要がある。

8

加速器の大型化、高信頼性の運転と言った考え方が進むであろう。しかし、これはコストと相反する要因であり、建設へのコンセンサスを得るのが難しくなるだろう。

小型の高エネルギー加速原理は現時点で実用化の判断は難しい。実験的な検証を進めることも大切だが、ビームとレーザー等の相互作用といった基本的な現象や理論に対するサポートも欠かせてはいけない。

テーブルトップで実用的、しかもリーズナブルな値段という加速器ができることを期待している。

9

加速器科学研究のための施設が減りつつあり、それと共に優秀な若い研究者がこの分野に入ってこない。米国、ロシアが凋落傾向にある現在、何か新しい動機付けがない限り、特に大きな進歩は期待できない。日本がもっと冒険が出来るようになれば別であろうが。

10

Two-Beam RF 加速器の開発は CERN において30GHz が進められており、試験装置ですでに95MeV/m が実現されている。98から99年にかけてユニット数をふやす。一方 SLAC では20GHz の基本設計が進められている。10から30GHz の周波数の高周波を利用した加速器が来世紀前半で活躍するものと考えています。

11

加速器を無理に小型化するよりも、現在の技術をより高度なものにし、最適の大きさで最大の効率を求めるべきであると考えます。何よりも、大電力化、高効率化が必要であると考えます。

12

加速器を他の分野で実際に使う場合、サイズ以上にも運転・保守のしやすさや過去の実績なども考慮しなければならない。このため技術的に完成された現在の加速器を小型化、低コスト化の研究を進め、使い易い加速器にしていくことが必要であろう。

新型加速器は大きな可能性を持っていると考えられるが、まだ開発途上であり、今後も継続して研究開発を行っていく必要があると考えられる。装置全体として見た場合、実際に利用されて改良が加えられ使い易い加速器になっていくので、普及するまでにはさらに時間が必要だと思われる。

既存の加速器の大出力化や小型化、低コスト化の研究もまだまだ必要であり、その一部として新型加速器の研究も進められるべきものと思う。

13

現在の(特に日本の)加速器科学業界が抱えている最大の問題は、”目先の成果に捕らわれた、単純な技術開発にのみ力が注がれている”と言う点ではないかと思う。このような状況では、加速器はこれまでと同様、間違いなく肥大化の一途をたどるであろう。日本には、ブレイクスルーとなる基本的なアイデアを生み出すのに必要な研究環境が決定的に欠如している。また同時に、一部の例外を除き、我が国における加速器研究の多くは KEK などの”大型のプロジェクト”を抱えた研究所でのみ行われている感があるのも問題である。(実際、日本の大学には、加速器を”研究する”グループはほとんど存在しない。)大研究所ではプロジェクトを成功させるのが最優先課題であり、数十年先を見越した新しいアイデアの実証研究などは到底容認してもらえない。このように、日本のほとんどの加速器研究所の研究対象は刹那的なものである。プロジェクトリーダー格の人間に先見の明がないのかもしれない。

これからの加速器は高度に高品質化されたビームを供給できるものでなければならず、従って、粒子ビームの物理的性質を熟知する事が必要不可欠であらう。ビーム物性の研究を怠っては、加速管の穴の大きさ一つ決められなくなる恐れがある。しかしながら、現状ではこのような”粒子ビームに関する基礎研究”を奨励している機関は皆無であると言っても良い。これでは、日本におけるビーム科学、ひいては加速器科学の将来は無きに等しい。欧米で提案されたアイデアや新しい技術を盗むばかりではなく、我が国から多くの新しいアイデアが発信されるよう、基礎ビーム科学研究の基盤を築いていかなければならないと思う。

14

加速器が巨大化し、現状技術では地球サイズの加速器でも限界が見えてきている。しかし、宇宙をみるとそれこそ桁違いのエネルギーの荷電粒子が加速されている。線形加速器等新しい加速原理により発展が見込まれるものがあるが、動機付けは、素粒子研究等、利用分野からの使いやすさとか、安さが重要なものになるのではないか。

15

現時点では、高周波加速小型電子加速器とレーザーアンジュレーター放射光発生装置については、原理的には、実用化の可能性があるとされる。ただし、原理検証実験だけでなく、実用化に至るためには、その開発のモチベーションをある程度の期間にわたって維持する仕組みが必要と思う。放射光はニーズが強いのでそれが可能かも知れないが、高周波加速小型電子加速器はその点が難しいと思う。

他の方式についても、ブレイクスルーが起こる可能性はあるので、原理検証実験を続けることは重要と考える。

16

素粒子物理が追いつける超大型加速器の路線は、経済(予算)面での破たんがはっきりしている。また、大集団による協力研究は、人間の個性を弱め、独創的研究を難しくする。本アンケートにある、小型、高エネルギー、安価な加速器の実現は、ぜひとも果たしてほしいものである。しかし、ねばり強い基礎研究がまだ必要と思われる。

17

レーザの進歩が著しいので、これを使いこなした技術が登場する。レーザーの chip 化、レーザー加速器(等)の chip 化、高電場に耐える fibre の開発などがある。

18

我が国の加速器に関する予算は、一説によれば核融合研究の予算より多いと言われる。しかし核融合予算は純然たる研究予算であるのに対し、加速器は確立された加速法にもとづき加速器を建設・運転・維持するためにその予算を使っているにすぎない。

加速器になんらかのブレークスルーを期待するなら、資金面・人材面で加速器の基礎研究を優遇することが必要である。

19

1. まず目的意識を持つこと
2. それにむけた戦術を構築すること
3. 実行すること

20

ここ 30 年間をみると、加速技術は高周波加速に頼っており、これから 30 年間も、性能向上はあっても、高周波加速の延長になるのではないかと思う。丁度、プラズマ核融合が実験レベルでブレークイブンは達成したが、発電には程遠いように、プラズマ加速などの技術も、実験レベルではデータがでて、30 年で高周波加速にとってかわるのは難しい印象がある。

21

21 世紀の加速器科学は、その”大出力”化をにらんで進めるべきと考える。従来の高エネルギー化とは違い、大出力化による工業、産業、医療方面への応用が開けると思う。又、小型加速器は 21 世紀の加速器科学をドラスティックに進展させる可能性がある(今、実用化されているものの原理はすべて 40 年前から言われているものであり、技術的發展のみである)ので大いに進めるべきであろう。

22

加速器科学の発展はそれに携わる人のみでなくその関連分野の発展も促進します。人類に必要欠くことの出来ない科学と思います。益々、発展させていかなければならないと考えています。

23

加速器の利用は今後ますます多方面で盛になり実用化が現実のものとなると思われるので加速器科学の一層の開発と振興を期待したい。

24

20 世紀に巨額の費用をかけて大規模な装置を建設してきたが、それに対する社会への貢献度は低い様に感じる。21 世紀には社会に直接的に貢献する加速器開発にシフトするべきと考える。医療・環境・エネルギー研究のための加速器開発に資源を投入する必要があると考える。

25

レーザーやプラズマを用いた加速器では加速エネルギーの均一度等が得られるか疑問、その前に mm

波を用いた加速器などが研究されてもよいのではないかと。

26

加速器の今後の発展のポイントは開発の目的を明確に絞り込むことにあると思われる。ビーム出力(高強度、高効率)、コンパクト性、高精度(エネルギー、パルス条件)などのそれぞれの要求に応じて開発の方向が異なる。また、他の分野(機械工作、レーザー、エレクトロニクス、マイクロ波源、超伝導、表面処理、品質管理)との連携が一層重要となる。

27

独創的研究、基礎的要素研究に対して支援奨励体制などを整えて欲しい。

28

従来の高周波加速以外の技術開発・導入が必要と思われる。

29

応用によっては、ビームエネルギーは必ずしも、単色的である必要はないので、技術的に簡単なものから段階を踏んで発展させたらよい。

30

二次粒子生成、核融合でのマイクロ波加熱、炉壁材料、放射性廃棄物の消滅処理技術等々、また物性研究を含めた加速器科学大電流化とその集束技術が重要なまた、中心的課題である。

31

JLCに代表されるフラッグシップ的R&Dを強力に実施しながら、医学、産業利用に向けた小型線源、光源の研究プロジェクトを複数実施していくべき。

32

従来の高周波加速器は三つの原理(高周波共鳴加速、ベータトロン振動、シンクロトロン振動)に加えて強集束原理という、現在となってはきわめて簡単な理解されやすい指導原理に基づいて、特に巨大化への道を歩んできた。原理が簡単であればあるほど、巨大化も容易であったとも言える。今後はこれらの原理に基づいて、小型化や高性能化や低廉化を促進し、加速器ビームの応用がさらに促進されるであろう。

33

電荷ビームの性能上、主加速器は巨大にならざるを得ないと思う。しかし、その主加速器の入射システムには小型化技術を入れる事は可能である。また、基礎物理学的な高性能なビームを要求しない場合には、小型化技術を入れた加速器のビーム性能でも実用上問題なく使用できるものもでてくる。加速器技術が向上し、安定性、容易性が向上し、広い分野に応用されているように思う。

34

過去数十年にわたる加速器の歴史は真空中の電磁場を用いた荷電粒子の加速を扱うものであった。今後もこの線の加速器利用は継続はすると考えるが、本調査で主として調べられた高加速勾配を実現するためには、レーザーで誘起するか他の方法を用いるかは別として、プラズマを誘起しその中に実現す

る高電場を用いることになるように思われる。つまり21世紀の加速器科学は真空中の電磁場から媒質の存在する場での電磁場を用いる研究へと展開してゆくと考えられる。

35

1. 性能、サイズ、費用(建設、運転)が現在より一桁良くなれば利用分野は大きく拡大すると思う。
2. エネルギーばかりか、ビーム強度(効率)を重要視する分野がある。
3. 一握りの研究者ではなく、ターゲットを絞り、システムティックな課題解決プロジェクトを推進すれば、可能性が明確に早くなると思う。
4. 加速部のサイズは小さくなくても、ビーム源を含む周辺器機がおおきくなる。この辺の開発も重要である。

36

原子核や素粒子研究用と異なり、民生用となってくれば安定に働く事が重要になってくる。ある意味では単にハードを小型化、大型化ということを考えるだけではなく新しい構成要素(部品)の研究が必要である。

37

放射光蓄積リングの需要はまだ増えると考えられる。

38

加速器科学は決して簡単な学問でなく、物理学および工学の最先端の知識を必要としています。このため加速器科学の発展には様々な学問的背景をもつ優れた人材を必要とし、また常識に捕らわれない自由な発想による研究活動が不可欠です。これまで加速器科学は主として素粒子物理学からのニーズにより発展してきましたが、ここにきてニーズに対処するにはきわめて多くの資源を必要とするにいたっています。今や従来型の RF 加速だけでなく、他の加速原理による加速を研究するべき時にきていると考えられます。しかしながら他の加速原理を研究している研究者の数はきわめて少なく、今後の加速器科学の発展を考えた場合良い状況とは思えません。今後大学および国立研究所、特殊法人研究所等において多くの研究者により非 RF 加速の研究をより進めていく必要があります。

39

加速器は基礎学問(おもに物理学)、医療、工学利用と非常に応用範囲の広い、魅力的なものであるが、その建設・維持コストは膨大である。加速器の小型化は、安価な加速器のためには必要不可欠であるが、実用化にとられるあまり、保守的になるのは良くないと思う。新しい加速方法のための地道な基礎研究を継続的に行っていくのが重要であると考え。

40

加速器の開発には大きな予算が必要であると共にスタッフが必要です。小生は私立大学でこれを行っているわけですが、幸いにして科学技術振興事業団と文部省の援助で本体の完成をみました。しかしながら、提供される資金はいつでも請求額よりも低く、やりくりに追われます。また、助手も助教授もいない状況でこれを続けることは大変困難な状況です。本施設は、すでに光発生直前に来ております。ぜひ本施設を COE にしていただき、恒常的な資金援助と利用技術の開発を援助いただきたいと思います。



41

小型化、高輝度化(大電流)パルス特性の向上。安定化による多方面の利用が期待される。

42

放射線防護を最大限考慮した小型の加速器を開発する必要がある。コストよりも安定、安全性重視。

43

加速器にプラズマを利用する G. Budker の1956年の提案依頼多くの研究にも拘わらずこのような加速器はまだ実現されていない。しかしながら高電場が存在していることは確かめられているので、まず電子加速のそれぞれの方式に対して開発グループを組織し、比較的小規模の実証装置を作って優劣を比較し、次の段階に進むことが望ましい。

なお、高周波を利用した加速器の技術的完成度も十分高いとはいえ、その高電場化、小型化の地道な開発が必要と思われる。

44

中性子科学・核消滅処理を目指すメガワット級陽子加速器の開発  
リニアコライダー(ただしXバンドリニアックによる)及びX線レーザーの開発  
陽子線ガン治療用加速器の普及  
光子エネルギー10~30keV 領域の小型放射光装置の実用化

45

物理実験用のリニヤコライダー(TeV 領域)は完成している。  
プラズマ加速器のどれかが実用化している。  
レーザー加速器もほぼ開発が終わっている。  
小型放射光発生装置も開発の目途がついている。

46

50年以上にわたる RF 加速技術を超える技術を確立するのは容易なことではないと思います。それは今まで、新しい加速技術の基礎研究を一部の人のみにまかして、単にスケールアップによる高エネルギー化のみに進んできた加速器科学界全体のつげが回ってきたのだと思います。

今後は、実際に社会に役立つ加速器を作るという目的のために産学の研究者・技術者が協力して基礎研究の段階から関わっていくことが、ブレークスルーを生む上で非常に重要であると思います。

47

現在の電子線利用技術の延長線上においては、小型で移動可能な電子加速器が必要となり、開発されると思う。又X線についても、選択的に1MeV 程度のエネルギーをもつ大出力なX線発生装置が必要となり、開発されると考える。

48

基礎科学分野において、理論が追求するエネルギー領域と加速器が提供できるエネルギー領域の差が大きく開いている現在、本アンケートにあるような高加速効率を持つ新型加速器の探索は重要な研究領域であるが、決め手に欠けることも事実であり、様々な手法をトライすべき時期と考える。

一方で、加速器の研究開発は、その多くを国立研究機関に依存しておりその成果を広く一般に還元す

る努力も必要な時期であるが、その応用分野についてもブレークスルーが重要と考えている。

49

RF 周波数: S→C→X→Wバンドへ移行

大出力パルス RF 源の登場

超伝導加速管による高効率加速トリサキュレーション

以上によるCW大出力電子ビーム加速器の登場

以上によるテーブルトップ電子ビーム加速器の登場

50

加速器、特に実用的な加速器は安定性(ビーム質と強度も含めて)が極めて大切で、その実現のためには、原理実証以上の努力が必要である。そのための技術開発を軽視すべきでない。

51

加速器が色々な分野で応用されることは間違いないと思われる。そのためには小型化が不可欠であるとは思いますが少し開発を行ってみた感じで言うと、一挙に性能がアップすることは余りなく、むしろ常に限界の少し上(20%)を目指すような、継続的な研究姿勢が重要ではないかと思われる。少しステップアップするたびにまわりの景色が変わり、そのたびに必要なものが見えてくるような気がする。常に継続すれば30年で $(1.2)^{15} = 15$ 倍である。(2年で1ステップとする)。

急速なステップアップを目指すなら、プラズマのように機械部品でない、マイクロな材料にかけるべきだと思う。これには少し興味があり、実現するかもしれない気がする。

52

Q1で述べたように、今社会が加速器に求めているものは高エネルギー化ではない。米国の SSC 開発の挫折とともに、高エネルギー化時代は終結したのではないか。なぜなら、高エネルギー化が進むほど、加速器の目的とする方向が社会の望むものから離れていくからである。それよりも質問にあるように、今後の開発は加速器科学というものをまず考えなければならない。50年来サイクロトロンへの応用の歴史が加速器科学という一大分野を育て上げたのであり、これはまぎれもなく加速器開発の一番の業績であろう。現在、加速器を中心とした多目的共同利用施設は、他では与えられていない学際的な情報交換の場を提供する唯一とも言える施設となっており、その意味からも科学全体への貢献は極めて大きい。今後の加速器の開発は、その加速器科学、すなわち加速器の応用分野の需要に応えるための開発でなければならない、決して開発自体が目的ではないと思う。そのためには我々加速器のまわりにいる人間が、一般の方に加速器を用いた応用手段を提供出来るプロバイダーになる必要がある。さらに場合によっては各分野の研究者にこちらから積極的に働きかけ協力することにより、加速器ならではの優れた研究成果をあげ、世界に示す必要がある。そうすれば関連分野の優れた研究者が続々と加速器周辺に集まってくれると思う。そうなればしめたもので、後はユーザーが加速器施設を育ててくれる。今後の加速器開発は、ユーザーの希望をかなえるために行うべきであり、加速器開発者がその気持ちを持ち続ければ、20~30年後の加速器の未来は約束されていると確信する。

53

まず産業用や医療用の加速器には、コストパフォーマンスと安定性が必須である。従って、既存の高周波加速技術の延長とも言えるXバンドやWバンド加速器などの研究開発を進め、その成果を産業、医療用加速器に適用していくのが良いと考えている。

また素粒子研究用超高エネルギー加速器に関しては、既存の技術では限界に近いことは認めざるを得ない。しかしながら本調査にて紹介されている各種新加速方式は、相互作用領域が長くとれないものが多いため、たとえ低エネルギー加速実験が出来たとしても、超高エネルギー化には更に多くのブレイクスルーが必要であろう。現在はこれら新技術が実用化可能か否かを判断するための研究を行う段階であろう。

54

装置の大型化、チャンピオンデータ競争だけでなく、小型化、省コスト化など、真に加速器が民生品として我々の生活に役立つ(特に、医療応用など)ような技術開発を進めるべき。

55

これはすべてのユーザーが希望していると思われるが、放射光を除いて全ての加速器の安定性、信頼性が第1優先して考えるべき事と思う。この調査では主に小型化を問うているので、的外れかもしれないが、このことが最も加速器開発において念頭に置かれるものと思う。現状では、加速器はすぐにトラブルもの、安定したビーム供給はないものと認識せざるを得ない。

安定性、信頼性なくして、将来の加速器開発は考えられないのではないか。

56

現段階では実用化を考える時期ではなく、もっばらいろいろなアイデアの研究を続けるべきである。20～30年後には何らかの有望な方式が実用化に向けて発展するであろう。

57

日本も不況になりお金がありません。これからは SPring-8 ほどの大規模のプロジェクトは難しいのではないのでしょうか。しかしながら加速器の果たす役割はこれから増していくと思われます。我々研究者も、自己の探究心をその原点としていたとしても、その研究成果は十分に社会へ還元される必要があると思ひます。

具体的には、産業や医療分野への貢献ということになると思いますが、そのためには(あたかも家電製品の進歩のように)先ず、小型化、簡易化低価格化が加速器開発のテーマとしてあがります。本調査で取り上げられたような加速原理はまさにそれを可能にしうるものと思われ、重要と思ひます。

58

産業利用の面よりみると大電流化に向けた開発が現実的に重要と思ひます。専門の人には、大電流化に伴う諸問題の解決(不安定性、ビームハローなど)のためのビーム物理を立ち上げていただきたい。

59

開発のスピードは、市場規模に関係すると思われる。やはり、加速器のコストを下げたて多くの市場に参入できるようにならないと、いずれ開発のスピードは落ちていくのでは？

数十年前から、加速器の産業応用には無限の可能性があると云われながら、現実はなかなか進んでいない。(X線リングがよい例)

最先端の高性能加速器の研究も必要だが、そのようなマシンはやはりコスト高で操作も困難であろう。低コスト化、簡単な操作という方面にも目を向けていくべきと思ひます。

60

最近の20～30年間を振り返ってみると、この間の加速器の発展は、加速方式としては全てそれ以前に見いだされていたものである。今日の加速器はこれらの方式に新たな開発・改善を行い発展させてきたものである。この間の新加速方式に関する提案は、今回の資料にみられるようにいろいろあったが、いずれも実用化されず、現段階でもその見通しはない。今後10年くらいはおそらく大きな発展はないと思うが、10年後20年後となると、画期的な方式が進展していないとは言えない。むしろそれを期待したい。

現状では従って、基礎的な研究を幅広く支援することが重要と考える。

61

Q1で高周波加速の加速器のみについての展望を述べた。このタイプによる加速器というのは実現するのに多くの人々が一つの目標に向かって進むことで実現するようなイメージがある。将来の若い人々がそういうイメージの加速器の開発に関心を持つかというのは残念ながら少し疑問に思わざるを得ない面がある。

時間不足とこちらの勉強不足で別冊の試案を余り検付できていないが様々な小型加速器が将来の若い人々の関心を誘い、発展し続けることを期待したい。(もちろん私自身もまだまだ若い人の部類と思っているが。)

62

現在、本アンケートの趣旨に沿ったような小型高勾配加速器開発については予算や研究の体制が貧弱で、大型加速器の建設の陰に追いやられていると感じている。

国の加速器科学政策の重点事項として位置づけ、専念できる人員と必要な予算を配慮すれば、今までより急速に開発が進められるのではないか。

大型の加速器計画に投下する予算の5～7%程度をこのような分野に当てて継続研究を保障すれば、10年後には加速器開発の情勢は大変よくなるのではないか。

63

各種加速器の利用は拡大されつつあり、この傾向は続くと思われる。

加速器開発は用途(ニーズ)との相互関係が重要と思う。

加速器開発に関係する若手技術者(学生を含む)の層が薄くなりつつあり、この対策(大学教育を含む)が必要と思う。

加速器開発は電磁気学、真空、材料、制御等の総合技術の積み重ねであるためこれら基礎技術開発も合わせて振興させる必要がある。

64

桁違いのサイズを実験するためには超伝導技術では不可能で、現時点ではレーザーを応用したものが最も適している。

65

実用化を目指した加速器開発と先端科学を追求する加速器開発とはその規模や開発課題など大きな差があるものと認識しています。どちらか一方に偏ることなくバランスの良い開発が望まれるところです。本アンケート調査の背景とは意見を異にするかもしれませんが、人類に大きな夢を与えるような加速器プロジェクトの創出がほしいと考えています。

66

陽子加速→核破碎中性子源→生命科学のドラスティックな進展。

67

加速器用最適高周波波長(または周波数)の選択、クライストロン、加速管の最適形状等それぞれについて。

実用フォトカソードの長寿命化、現状では10日位の寿命。

実用電流量を出して半年以上使えるもの。

10<sup>-12</sup>paの真空技術の向上 低デューティーで長寿命というのでは意味がない。

在来レーザー技術の向上 日本のレベル向上

低損失、長寿命のミラー開発、レーザーアブレーション敷居値向上。

68

研究・開発に関して常に問題になるのが自由な発想をいかに育てるかということである。たとえば悪いが、原子爆弾開発における Oppenheimer のような超一流の学者ではなくて、頭脳である。具体的に言えば、理論家と実験家の緊密な連携プレーを重視し、基礎実験を大事にする研究体制が必要である。さらに具体的に言えば、拠点大学を設定し、COE を立ち上げ、将来的には研究所を作るべきであろう。研究が長期となるため、その目的に沿った研究所が必要であると考え

69

1. 加速器を分析器の一部として使用する観点からビームのエネルギーを高くする努力よりも、加速器の小型化、消費電力を下げる事、建設コストを下げることに重点を置いた開発研究を行うべきである。
2. 20～30年後、加速器は物理や工学以外の研究(者)の利用が益々増えると予想されるので、安くて、小型で操作が簡単で、しかも一定範囲で動作性能が保証され、誰が運転しても性能が変わらないものでなければならない。

70

医療、産業小型加速器としては、加速勾配～100MeV/m 程度(エネルギー～20MeV)でパルスピーク数100mA、平均～100μA で、ビーム出力方向以外の放射線漏洩が極力小さいものが要求されると考えられます。しかもコストが安いことが必要です。したがって高エネルギー、低平均ビーム電流の研究用とは異なる開発方向が必要と思われれます。

71

小型加速器に対する社会的ニーズの強さが、最強力な支援と思われる。その為に、社会的ニーズを喚起する宣伝が必要であるが、宣伝だけで、ニーズが増えるとも考えにくいので難しい。

地道な、継続的研究(ある程度の資金確保の上)が肝要であろう。

72

超小型、コンパクト化、ミニチュア化、マイクロ化が推進されると考える。高周波型では、Kバンド、Wバンドが興味深い。一方、高周波技術の発展に比べてテーブルトップ高出力フェムト秒レーザー技術の進展のスピードは目覚ましい。レーザーフォトカソード高周波電子銃、レーザープラズマ加速、プラズマカソードなどレーザー技術が超小型加速器技術を牽引すると考えられる。

いずれのアイデアも重要と思われるが、日本の研究者層の薄さ(人口が少ない)ことが問題である。恐らく、米国やヨーロッパが先に実用化に近いところへ持って行くのではないか。研究者層を厚くする方策、あるいはアピールが足りない。