

調査資料-315

専門家が注目する科学技術に関するアンケート調査
(NISTEP 注目科学技術 2020)

2021 年 10 月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所
科学技術予測・政策基盤調査研究センター

【調査研究体制】

黒木 優太郎 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 研究官

[アンケート調査設計・実施、データ整理・集計・分析、報告書全体とりまとめ及び執筆(1・2・4・6章)、担当分野の調査及び報告書執筆(3章:都市・建築・土木・交通分野)]

伊藤 裕子 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 動向分析・予測研究グループ長

[報告書全体とりまとめ、担当分野の調査及び報告書執筆(3章:農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)]

浦島 邦子 科学技術予測・政策基盤調査研究センター フェロー

[担当分野の調査及び報告書執筆(3章:環境・資源・エネルギー分野)]

重茂 浩美 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 上席研究官

[担当分野の調査及び報告書執筆(3章:健康・医療・生命科学分野)]

鎌田 久美 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 研究員

[担当分野の調査及び報告書執筆(3章:ICT・アナリティクス・サービス分野)]

蒲生 秀典 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 特別研究員

[担当分野の調査及び報告書執筆(3章:マテリアル・デバイス・プロセス分野)]

横尾 淑子 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 専門職

[アンケート調査設計・実施、担当分野の調査及び報告書執筆(3章:宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)、調査全体の調整]

岡村 麻子 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 主任研究官(2020年12月より)

[担当分野の調査及び報告書執筆(5章)]

【Contributors】

KUROGI Yutaro Research Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

ITO Yuko Group Leader, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

URASHIMA Kuniko Senior Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

OMOE Hiromi Senior Research Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

KAMADA Kumi Research Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

GAMO Hidenori Visiting Researcher, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

YOKOO Yoshiko Research Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

OKAMURA Asako Senior Research Fellow, Center for S&T Foresight and Indicators, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

本報告書の引用を行う際には、以下を参考に出典を明記願います。

Please specify reference as the following example when citing this NISTEP RESEARCH MATERIAL.

科学技術予測・政策基盤調査研究センター、「専門家が注目する科学技術に関するアンケート調査（NISTEP 注目科学技術 2020）」, *NISTEP RESEARCH MATERIAL*, No.315, 文部科学省科学技術・学術政策研究所.

DOI: <https://doi.org/10.15108/rm315>

Center for S&T Foresight and Indicators, “A survey of science and technology that experts are focusing on 2020” *NISTEP RESEARCH MATERIAL*, No.315, National Institute of Science and Technology Policy, Tokyo.

DOI: <https://doi.org/10.15108/rm315>

専門家が注目する科学技術に関するアンケート調査(NISTEP 注目科学技術2020)

文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測・政策基盤調査研究センター
動向分析・予測研究グループ

要旨

本調査では、次期科学技術予測調査における科学技術トピック検討に資する基礎情報を随時得るため、専門家ネットワークに対し現在注目される科学技術についてのアンケートを行い、得られた情報を分野別に蓄積・更新する。これらの情報は、次回科学技術予測調査時にトピック検討の基礎情報として分野別に整理したうえで提供する。

アンケートでは延べ984件の注目科学技術についての回答が得られた。また同時に、注目科学技術が前提とする社会像や解決すべき社会課題、経済社会へもたらす便益や懸念、実現にあたって解決が必要な社会・制度的課題、基盤となる人間や社会の在り方等、様々な観点からのコメントが寄せられた。なお本調査は、専門家が注目する科学技術を「注目科学技術」とし、専門家の最新の知見を毎年幅広く収集・蓄積し、得られた結果を精査・分析して公表するものである。

Title

A survey of science and technology that experts are focusing on 2020

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

Center for S&T Foresight and Indicators

ABSTRACT

In this survey, to obtain basic information that will contribute to the examination of science and technology topics in the next science and technology foresight survey, we conducted a questionnaire on science and technology that experts are focusing on. This information will be provided after organizing it by field as basic information for S&T topic examination at the next science and technology foresight survey.

In the questionnaire, 984 responses were obtained. At the same time, there were various comments for social issues, such as S&T benefits and concerns that bring to the economy and society, social and institutional issues that need to be resolved to realize the S&T.

目次

<概要>

1.	背景と目的	i
2.	方法	ii
3.	分野別結果	iii
3.1.	健康・医療・生命科学分野	iii
3.2.	農林水産・食品・バイオテクノロジー分野	iv
3.3.	環境・資源・エネルギー分野	v
3.4.	ICT・アナリティクス・サービス分野	vi
3.5.	マテリアル・デバイス・プロセス分野	vii
3.6.	都市・建築・土木・交通分野	viii
3.7.	宇宙・海洋・地球・科学基盤分野	ix
	科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携	x

<本編>

1.	背景と目的	1
1.1.	調査の背景	1
1.2.	本調査の目的	3
2.	方法	4
2.1.	専門家ネットワークアンケート調査	4
2.2.	第11回科学技術予測調査における分野分類への割り振り	6
3.	結果①：分野別調査結果	7
3.1.	全体概要	7
3.1.1.	第11回科学技術予測調査における該当分野分類	7
3.1.2.	第11回調査分野別の回答者年齢・性別・専門分野との比較	7
3.1.3.	第11回予測調査の分野別ワードクラウドによる全体傾向の概観	9
3.1.4.	第11回調査とアンケート結果の実現時期比較	11
3.2.	健康・医療・生命科学分野	12
3.2.1.	要約	12
3.2.2.	アンケート結果	12
3.3.	農林水産・食品・バイオテクノロジー分野	14
3.3.1.	要約	14
3.3.2.	アンケート結果	14
3.4.	環境・資源・エネルギー分野	18
3.4.1.	要約	18
3.4.2.	アンケート結果	18
3.5.	ICT・アナリティクス・サービス分野	21
3.5.1.	要約	21
3.5.2.	アンケート結果	21

3.6.	マテリアル・デバイス・プロセス分野分野	24
3.6.1.	要約	24
3.6.2.	アンケート結果	24
3.7.	都市・建築・土木・交通分野	27
3.7.1.	要約	27
3.7.2.	アンケート結果	27
3.8.	宇宙・海洋・地球・科学基盤分野	30
3.8.1.	要約	30
4.	結果②：引き続き注視すべき科学技術事例	35
4.1.	トピックと類似する提案が多く得られた事例(量子コンピュータ・AI)	35
4.2.	トピックと類似する提案が複数得られた事例	37
5.	結果③：科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携	40
6.	まとめと考察	42
6.1.	全体概要	42
6.2.	分野別結果	43
6.3.	引き続き注視すべき科学技術及び 科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携	45
付録1	分野別アンケート結果一覧(健康・医療・生命科学)	48
付録2	分野別アンケート結果一覧(農林水産・食品・バイオテクノロジー)	88
付録3	分野別アンケート結果一覧(環境・資源・エネルギー)	97
付録4	分野別アンケート結果一覧(ICT・アナリティクス・サービス)	114
付録5	分野別アンケート結果一覧(マテリアル・デバイス・プロセス)	132
付録6	分野別アンケート結果一覧(都市・建築・土木・交通)	167
付録7	分野別アンケート結果一覧(宇宙・海洋・地球・科学基盤)	174
付録8	回答協力者名簿	184

図表目次

図表 1.1-1 第 11 回科学技術予測調査構成の概要	1
図表 2.1-1 アンケート調査概要	4
図表 2.1-2 専門家ネットワークの年代・性別・所属・専門分野内訳	5
図表 3.1.1-1 専門家ネットワーク回答結果と第 11 回科学技術予測調査での分野分類	7
図表 3.1.2-1 第 11 回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(年代)	7
図表 3.1.2-2 第 11 回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(性別)	8
図表 3.1.2-3 第 11 回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(所属)	8
図表 3.1.2-4 第 11 回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(専門分野)	9
図表 3.1.3-1 各分野におけるアンケート結果のワードクラウド	10
図表 3.1.4-1 アンケート結果の実現時期集計	11
図表 3.1.4-2 第 11 回調査とアンケート結果の実現時期比較	11
図表 3.2.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(健康・医療・生命科学分野)	12
図表 3.2.2-2 アンケート結果のワードクラウド(健康・医療・生命科学分野)	13
図表 3.3.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)	15
図表 3.3.2-2 アンケート結果のワードクラウド(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)	16
図表 3.4.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(環境・資源・エネルギー分野)	18
図表 3.4.2-2 アンケート結果のワードクラウド(環境・資源・エネルギー分野)	19
図表 3.5.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(ICT・アナリティクス・サービス分野)	21
図表 3.5.2-2 アンケート結果のワードクラウド(ICT・アナリティクス・サービス分野)	22
図表 3.6.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(マテリアル・デバイス・プロセス分野)	25
図表 3.7.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(都市・建築・土木・交通分野)	27
図表 3.7.2-2 アンケート結果のワードクラウド(都市・建築・土木・交通分野)	28
図表 3.8.1-1 今回調査の科学技術キーワード等(宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)	30
図表 3.8.1-2 アンケート結果のワードクラウド(宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)	31
図表 4.1-1 第 11 回調査 トピックと類似する提案が多く得られた事例(量子コンピュータ)	35
図表 4.1-2 第 11 回調査トピックと類似する提案が多く得られた事例(AI)	36
図表 4.2-1 第 11 回調査トピックと類似する提案が複数得られた事例	38

概要

1. 背景と目的

科学技術・学術政策研究所では、1971年から約5年毎に科学技術予測調査を実施しており、科学技術基本計画が策定されるようになって以降、その策定スケジュールに合わせて調査を実施してきた。第11回科学技術予測調査(以降、第11回調査)では、第6期科学技術・イノベーション基本計画を始めとする科学技術イノベーション政策・戦略の検討に資する基礎的な情報を提供することを目的として、科学技術発展と社会の未来について検討を行った。

第11回調査のうち「科学技術の未来像」検討のパートにおいては、対象分野として7分野を設定し、2050年までを見通して実現が期待される研究開発課題を「科学技術トピック(以下、トピック)」として各分野約100件ずつ、計702件設定した。

検討の際、科学技術トピック候補の抽出に当たっては、「ホライズン・スキャニング」で得られた細目別情報を参照した。情報の種類は以下の通りである。

ホライズン・スキャニング(HS)により収集した細目別情報

情報種類	HS分類*	項目	情報源
研究情報	—	科学技術トピック	「第10回科学技術予測調査分野別科学技術予測」の科学技術トピック計932件から抽出(関連度の高い10件)
	将来見通し/動向	注目研究領域	「サイエンスマップ2016」から関連領域を抽出(細目単位ではなく分野単位で抽出)
			「研究開発の俯瞰報告書2017年度版」(科学技術振興機構)から抽出(関連度の高い10件)
	兆し/動向	研究テーマ	クローリングにより収集した大学等研究機関のプレスリリースから抽出(関連度の高い10件)
科学研究費助成事業データベース KAKEN から抽出(関連度の高い100件)			
将来見通し/目標		トップダウン型の競争的資金(文部科学省、JSPS、JST、NEDO等)に関する情報(関連度の高い件数、金額、件名例)	
政策情報	将来見通し/目標		クローリングにより収集した政府審議会等の議事録から抽出(関連度の高い10件)

(注)*ホライズン・スキャニングにおいては、認知度及び方向性の観点から情報を特徴づけた。認知度については、「将来見通し(専門家・有識者間あるいは社会一般の中で一定程度の共通認識)」と「兆し(個人的あるいは一部の見解)」に分類。方向性については、「動向(価値観や願望を含まない客観的な方向性)」と「目標(目指すべき規範的な方向性)」に分類。

これらの提供情報について、第11回調査の分野別分科会における科学技術のトピック設定においては、先述したとおりホライズン・スキャニングで得られた研究情報として、「第10回科学技術予測調査分野別科学技術予測」「サイエンスマップ2016」「研究開発の俯瞰報告書2017年度版」を提供していた。これらの情報はそれぞれが膨大な調査結果であり質の高い情報である一方で、参照に時間がかかり、科学技術予測調査の実施時期にあわせているわけではないためにタイムラグが存在していた。

また、タイムラグの無い情報として、クローリングにより収集した大学等研究機関のプレスリリース、科学研究費助成事業データベース KAKEN、その他競争的資金(文部科学省、JSPS、JST、NEDO等)に関する情報(関連度の高い件数、金額、件名例)などの情報を提供してい

た。これらの情報については、タイムラグは無いものの情報量が膨大で参照に時間がかかり、また、機械的な手法であるために専門家の視点が必要であった。

そこで本調査では、次期科学技術予測調査における科学技術トピック検討に資する基礎情報を随時得るために、現在注目される科学技術をアンケートで収集し、科学技術キーワードを抽出整理する。また、今後も毎年同様の調査によって注目科学技術及びキーワードを蓄積する。これらの情報は、次回科学技術予測調査時に、タイムラグの少ない専門家の視点として情報提供する。また、次の予測調査の目的に限らず、科学技術の動向調査としても活用する。なお、本調査は専門家が注目する科学技術を「注目科学技術」とし、専門家の最新の知見を毎年幅広く収集・蓄積し、得られた結果を精査・分析して公表するものである。

2. 方法

科学技術・学術政策研究所が保有する専門家ネットワークの専門調査員に対し、①現在注目している科学技術の有無と、注目している科学技術が有る場合には続けて②当該科学技術の概要、③当該科学技術の実現予測時期(10年未満/10年以上)、④当該科学技術の実現に向けて必要となるブレイクスルーの4項目を尋ねるアンケートを実施した。アンケート調査の概要を概要図表1に示す。

概要図表1 アンケート調査概要

調査時期	2020年12月21日～2021年1月8日
質問項目	Q1. あなたが現在注目している科学技術はありますか(単一選択) 選択肢(二択):ある・ない (一人につき最大3回まで「ある」と回答可能。「ない」と答えた時点で回答終了。) Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください(自由記述・最大1000字) Q3. その注目科学技術について、いつ頃の実現が想定されますか(単一選択) 選択肢(二択):10年未満に実現・10年以上に実現 Q4. その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください(自由記述・最大1000字)
形式	オンライン(専用ウェブサイト開設)
回答者	NISTEP 専門家ネットワークの専門調査員 1914名
回答状況	1017名(回答率53%)
回答数*	984件

(注)*注目科学技術に関する回答数の合計。一人で複数回答した場合や「ない」とだけ答えた場合もあるため、回答者数と回答件数は一致していない。

その後、アンケートで得られた注目科学技術について、第11回科学技術予測調査の分野分類と対応付けた。紐付けは機械的なものと人間による評価を組み合わせたハイブリッド方式を採用した。

まず、自由記述に記載された技術の概要(以下、単に自由記述という)に対し、デルファイ調査における7分野702トピックを類似度ベースで機械的に複数紐付けた。次に、それらの結果を候補として、人間が確認し、妥当と思われる分野に割り付けた。ここで、自由記述と702トピックの間に単語そのものが重複するケースは多くない。そこで類似度の算出には分散表現と呼ばれる技術をもちい、単純な単語一致よりも柔軟な算出を行った。なお、具体的な手法や分散表現辞書は過去の文献¹のものを適用した。さらに、割り振られた各注目科学技術についても同様にハイブリット方式によって科学技術キーワードを抽出した。

¹ 小柴 等, 森川 想:議事録を用いた我が国における議会・行政の関係性分析手法, 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 5, p. E-J47_1-10 (2019)

3. 分野別結果

3.1. 健康・医療・生命科学分野

概要図表 2 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。アンケートでは、新型コロナウイルス感染症を含めた新興感染症対策関連、再生・細胞医療関連、遺伝子治療関連、イメージング関連、合成生物学関連の科学技術が多く見られた。特に、世界的なコロナ禍への対処として、現在研究開発が進んでいるワクチンや治療薬を含めて多くの科学技術が出された。

概要図表 2 今回調査の科学技術キーワード等(健康・医療・生命科学分野)

	細目	今回のキーワード	(参考) 11 回でとりあげたキーワード
1	医薬品(再生・細胞医療製品、遺伝子治療製品を含む)	再生医療、細胞治療、遺伝子治療、抗ウイルス薬、幹細胞、iPS-ES 細胞、オルガノイド、リプログラミング、人型モデル動物による薬剤評価技術	再生医療、細胞医療、遺伝子治療、抗ウイルス薬、タンパク質間相互作用、核酸医薬、細胞内、DDS (Drug Delivery System)、幹細胞、iPS-ES 細胞、初期化、細胞プリンティング、同種移植、自己免疫疾患、ゲノム編集、人工臓器、オルガノイド、人工知能・シミュレーション技術
2	医療機器開発	光イメージング技術、超音響イメージング技術、リアルタイムイメージング(リアルタイムマイクロ波イメージング等)、ロボット技術(手術支援・介護ケア)、ニューロフィードバック技術(ニューロリハビリ機器)、人工知能による画像識別技術	介護機器、非侵襲診断機器、統合的医療ソフトウェア、がん細胞孤立化治療材料、微小血管吻合支援機器、ウェアラブル透析装置、超分散ホスピタル、モニター機器、外科医の熟練手技、ナノテク医療、在宅医療機器、排泄補助機器、ニューロリハビリ機器
3	老化及び非感染性疾患	細胞老化(senolytic 治療)、生殖細胞、生殖医療、人工子宮	非感染性疾患(NCD)、早期診断、予防、非侵襲、免疫、アレルギー、生活習慣、がん、疲労、オミックス、老化、生殖細胞、臓器連関、メタゲノム、栄養、運動
4	脳科学(精神・神経疾患、認知・行動科学を含む)	ブレインテック、ニューロフィードバック技術、ニューロモジュレーション、全脳シミュレーション、オプトジェネティクス	神経回路、ニューロン-グリア相互作用、記憶・学習、認知・情動、意識、社会性、神経変性疾患、認知症、統合失調症、抗精神薬、うつ病、双極性障害、気分安定薬、依存症、自閉スペクトラム症、深部脳刺激療法、神経筋疾患、睡眠障害
5	健康危機管理(感染症、救急医療、災害医療を含む)	新興・再興感染症、病原微生物、ワクチン、サーベイランス、モニタリング、消毒、抗体医薬品、中和抗体、アジュバント、感染症検査技術、安全保障	新興・再興感染症、病原微生物、薬剤耐性菌、ワクチン、サーベイランス、消毒、抗体医薬品、災害医療、救急医療、血液代替物、集中治療、トリアージ、多臓器不全、マスクギャザリング、病院前救急診療、航空医学
6	情報と健康、社会医学	ウェアラブルセンサー、スマートデバイス、診療情報、個人情報、人工知能活用、社会疫学、健康の科学、ELSI(倫理的・法的・社会的課題)	ウェアラブルセンサー、スマートデバイス、電子カルテ、診療情報、ゲノム情報、医療用人工知能、遺伝-環境相互作用、地域保健、環境医学、社会疫学、DOHaD (Developmental Origins of Health and Disease)、医療安全、健康格差、気候変動、ELSI(倫理的・法的・社会的課題)
7	生命科学基盤技術(計測技術、データ標準化等を含む)	デザイナー細胞、 <i>in vitro</i> 個体発生技術、1 細胞解析、微細領域イメージング	計算生物学、人工細胞、動的ネットワークバイオマーカー、脳機能イメージング、1 細胞解析、生体分子相互作用、蛋白質の動的構造解析、ゲノム情報データベース、非コード領域の機能解析、実験環境、量子計測

3.2. 農林水産・食品・バイオテクノロジー分野

概要図表 3 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。今回調査の科学技術はすべて、第 11 回調査で用いた細目のいずれかに当てはまる。また、第 11 回調査と同一のキーワードとして、「昆虫資源」・「環境 DNA」・「エピゲノム制御」が示された。しかし、その他のキーワードにおいても、類似の表現やワードが多く見られた。

一方、今回調査で挙げられた「葉面微生物の活用」、「クローン繁殖(ギンブナ)の人為的再現」、「寄生植物の自殺発芽剤」に関しては、第 11 回調査の科学技術トピックに類似するものはなかった。

概要図表 3 今回調査の科学技術キーワード等(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	生産エコシステム	土壌微生物の活用、葉面微生物の活用、ゲノム編集による育種短縮化、スマート農業(AI・IoT・ロボット等利用)、環境負荷低減の生産、高付加価値農林水産物生産、土を使わない農業生産	野生種の栽培作物化、機能的な高分子等生産技術、閉鎖型陸上循環養殖、環境負荷低減飼料、伐採等自動化技術、生育予測・診断システム、自動化・無人化循環型植物工場、育種の超高速化、生態調和型農業生産システム、農業ロボット
2	フードエコシステム	電磁場による保蔵技術、窒素ロス低減、昆虫資源利用、培養肉製造、	データ駆動型食糧生産、食品加工 CPS、デジタルマーケティング、人工タンパク質、調理ロボット、トレーサビリティ、美味しさの設計、フードミクス、フードロス、新保蔵技術、昆虫資源、フード 3D プリンター、食の EC 化、フードエコシステム
3	資源エコシステム	環境 DNA 利用調査、自然エネルギーと水産業の共生、サンゴ礁再生	魚類生殖細胞バンク、高度ライフタイムロギング、革新的獣害防止技術、病害虫対策技術、災害防止の森林管理技術、ICT 養殖管理、森林地質自動把握技術、海洋プラスチックゴミ、環境 DNA、環境生態インパクト評価
4	システム基盤	人工衛星による高分解能モニタリング、生物多様性のための新規モニタリング手法、画像処理応用による小型生物調査、水中生物のモニタリング技術、遠隔データの自動取得	農林水産資源広域モニタリングシステム、地球規模センサーネットワーク利用、全球グリッドデータベース化、資源変動予測・管理技術、高空間・高時間解像度気象予測、ICT 漁場管理、ICT 森林管理技術、微生物リアルタイムモニタリング
5	次世代バイオテクノロジー	生殖細胞分化技術、クローン繁殖再現技術、エピゲノム制御、遺伝子工学操作の効率化、植物応答の可視化、寄生植物の自殺発芽、害虫行動管理	生殖細胞作出技術、生育シミュレーション、ゲノム改変技術、窒素固定能付与、異種移植、昆虫の行動制御・監視技術、植物機能の包括的可視化、萌芽更新促進技術、CO2 大量・大規模固定、エピゲノム制御、高精度作物モデリング、生物記憶解読
6	バイオマス	木質バイオマスによるゼロエミッション化、藻類バイオエネルギー、非可食バイオマスからの化学品合成	植物性繊維分解利用技術、耕畜連携生産システム、中高層木造構築物、高耐久木材、高効率低コスト発電・熱利用技術、生分解性・光分解性素材、化石資源由来製品代替化、副産物の付加価値化
7	安全・安心・健康	微生物による土壌浄化、高齢社会のための機能性食品	人獣共通感染症病原体排除技術、フードディフェンスシステム、食・健康医療のためのビッグデータと AI 技術、防除資材開発システム、重金属・放射性物質、無病化処理技術、トレーサビリティ
8	コミュニティ	アニマルウェルフェアの普及、コミュニティ再生	家族農業、ネットワーク、バイオエコノミー、森林療法、食料需給予測、水産資源管理、伝統的な調理法、水産物のトレーサビリティ、コミュニティの見える化、ブロックチェーン、SDGs、多世代共創

3.3. 環境・資源・エネルギー分野

概要図表 4 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。カーボンゼロやカーボンフリーといった低炭素社会実現に向けて、気候変動や再生可能エネルギーに関連する技術が多く見られた。

エネルギーに関しては、現在、オリンピックを契機に水素技術の普及が進展しているが、これまでの調査ですでに取り上げられている水素の貯蔵、製造の効率化など、水素関連技術が出された。その他、CO₂ 排出低減、低炭素社会を実現するためのエネルギー効率化や、蓄電、核融合といったこれまですでに取り上げられている技術があげられた。第 11 回科学技術予測調査では、本分野で担当しなかった材料やフロンティア分野に関する意見も出された。

概要図表 4 今回調査の科学技術キーワード等(環境・資源・エネルギー分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	エネルギー変換	イオン交換膜による水素製造、水電解による大規模水素製造、余剰電力による燃料合成(e-Fuel)、再生可能エネルギーによる水素・アンモニア合成、アップコンバージョン技術、アンモニア直接燃焼・混焼技術、小型原子炉、宇宙エネルギー伝送、各種発電(核融合、宇宙太陽光、地熱、洋上風力、海洋温度差、海流・潮流、波力)	エネルギー生産、エネルギー消費、エネルギー輸送、CO ₂ 回収・低減、炭化水素合成、再生可能エネルギー、センシング・モニタリング、ヒートポンプ・熱変換、法整備・経済性
2	エネルギーシステム	水素運搬・貯蔵、水素貯蔵タンクの先進材料、(マイクロ波等による)無線電力伝送、超伝導直流送電、非接触給配電、家庭用小規模発電・蓄電、高密度エネルギー電池、全固体電池、燃料電池、潜熱蓄熱エネルギー貯蔵、	再生可能エネルギー、余剰電力利用、送電、電力貯蔵、水素等の長距離輸送、水素等の大規模貯蔵、電力取引、電力需給制御、未利用熱
3	資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R)	CO ₂ 回収・利用、窒素固定・資源化、レアメタル(リチウム等)の回収、海底鉱物資源活用、プラスチック分解・油化・ガス化、海洋由来ポリマー・疑似プラスチック形成、バイオマス資源を用いた資源型処理技術	金属資源・非金属資源、石油資源、地熱資源、環境、シェアリング・サービサイジング、省力化・自動化、資源効率、廃棄物のエネルギーとしての活用、リサイクル、サーキュラーエコノミー
4	水	井戸水のフッ素・窒素化合物除去技術、廃水中の窒素化合物資源化、海水・雨水の飲料水化、4次元水循環解析、	地下水マップ、連続モニタリング、ゲリラ豪雨、水管理技術、下水処理技術、浄水技術、汚染水浄化再利用技術、水質指標、水圏マイクロプラスチック、環境科学技術
5	地球温暖化	CO ₂ 直接回収技術、低コスト・低エネルギー CO ₂ 固定、沿岸生態系(藻場、湿地等)による二酸化炭素隔離(ブルーカーボン)、高精度気候変動予測、気象コントロール技術、気候変動対策の評価技術、気候変動・生物多様性の統合的評価	温室効果ガス、化石燃料、気候変動、異常気象、将来予測、大気、海洋、生態系、氷床、水、食糧
6	環境保全(解析・予測・評価、修復・再生、計画)	小型・高精度大気汚染物質計測装置、大気中の複合汚染物質除去、放電プラズマによる環境浄化技術、汚染物質の選択的吸着、微生物による土壌浄化	土壌修復技術、除染技術、病原微生物検知システム、外来種の移動拡散、越境大気汚染、遺伝的多様性、環境負荷管理、生物多様性、植生維持管理
7	リスクマネジメント	海域環境リスク評価、雷放電のトリガー解明、LSI の破壊・誤動作を防ぐ環境電磁工学技術	生物多様性、環境リスク、レジリエンス、安全規制、ナノ粒子、化学物質、放射線、自然災害

3.4. ICT・アナリティクス・サービス分野

概要図表 5 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。今回の調査を細目別に見ると、コンピュータシステム、データサイエンス・AI に関する回答が多く見られた。最も多く回答が見られた科学技術は「量子コンピューティング」であり、次いで「AI」「データ」であった。AI・ビッグデータを解析する次世代コンピュータとして、量子コンピューティングの技術開発への期待が伺える。

概要図表 5 今回調査の科学技術キーワード等(ICT・アナリティクス・サービス分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	IoT・ロボティクス	ソフトロボティクス、テレプレゼンスロボット、介護用ロボット、高度な遠隔操作を可能とする高精度ロボット制御技術、身体動作を拡張するテクノロジー技術、知能ロボット技術	ロボット点検化技術、パーソナルロボット、テレプレゼンスロボット、交通管制システム、無人農業、IoT を利用した精密農業、デジタルデバイスの全通信の無線通信、高齢者や軽度障害者支援するロボット機器、無人工場・無人店舗・無人物流倉庫・無人宅配搬送
2	インタラクション	ジェスチャインタフェース、スマートスピーカー、視線インタフェース、触覚再現、バーチャルリアリティ	身体共有技術、小型装着型デバイス、ポータブル会話装置、対話的なバーチャルエージェント(受付や案内)、バーチャルエンボディメント
3	コンピュータシステム	量子コンピュータ、量子アニーリング、誤り耐性量子コンピュータ、半導体量子ビット技術、低消費電力な情報処理、スーパーコンピュータ、ドメイン特化型コンピューティング技術、ブレイン・マシン・インターフェース、リザーブコンピューティング、光アクセラレータ、ニューロモルフィックコンピュータ	スーパーコンピュータ(並列化による大規模計算機システム)、ゲート型量子コンピュータ(量子回路)、量子ニューラルネットワーク
4	セキュリティ、プライバシー	証明可能安全性を備えたプライバシー保護技術、暗号認証方式、秘密計算(データを秘匿したまま計算処理できる技術)、量子暗号通信	個人認証システム、IoTセキュリティ技術、プライバシー管理技術、量子技術等に基づく新たな安全性のフレームワーク
5	データサイエンス・AI	統計的 AI と記号的 AI を統合した融合 AI 技術、敵対的生成ネットワーク(GAN)、ニューロモルフィックコンピューティング、説明可能な AI、データ駆動科学、デジタルトランスフォーメーション、ビッグデータ、自律的な思考が可能な人工知能、深層学習(ディープラーニング)、AI による構造最適設計	所望の情報を抽出できる自然言語処理技術、ヒトと違和感なくコミュニケーションが取れる対話技術、自然環境においてヒト以上の性能を持つ音声音響認識・話者識別技術、自然画像から所望の情報を抽出できる画像処理技術
6	ネットワーク・インフラ	テラヘルツ波デバイス技術、量子インターネット、量子テレポーテーションによる通信、ソフトウェア無線(SDR)、IOWN 構想	消費電力を飛躍的に削減する通信ネットワーク、大容量通信・端末間通信を実現する移動通信技術、大容量かつ高密度収容可能な光通信技術、量子通信、光通信技術
7	未来社会デザイン	完璧な言語翻訳機、AI と CG 技術の融合、VR 技術による会議システム、サイバーフィジカルシステム、遠隔人間支援技術、市民によるデータのクラウドソーシング	全ての経済取引を電子化する技術、映画音声のリアルタイム自動翻訳、AI による予算執行、秘書業務代替システム、ネット上の個人認証技術

3.5. マテリアル・デバイス・プロセス分野

概要図表 6 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。量子コンピュータ・量子ビット、量子センサ・センシング、水素製造・貯蔵・利用に関する科学技術の提案が最も多かった。次に、マテリアルズ・インフォマティクス(AI 含む)、全固体電池、光センシング・イメージングが多く、続いて、パワーエレクトロニクス・パワー半導体、二次元材料、次世代蓄電池(全固体電池以外)が多く挙げられている。これらは、当分野における科学技術のトレンドキーワードとして捉えることができる。

概要図表 6 今回調査の科学技術キーワード等(マテリアル・デバイス・プロセス分野)

細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1 物質・材料	ワイドバンドギャップ半導体(パワエレ)、二次元材料、量子材料(マヨラナ準粒子、量子相関制御など)、セルロースナノファイバー、トポロジカル物質、ダイヤモンド、常温超電導、メタマテリアル、分子デバイス、分子ロボット、熱電材料、有機エレクトロニクス、自己修復材料、自己組織化材料	可塑性無機材料、ハイブリッド材料、リサイクル架橋性樹脂、導電性高分子材料、炭素系構造材料、パワー半導体、室温量子材料、熱電素子、電磁波吸収体、リサイクル成形材料、圧電素子
2 プロセス・マニファクチャリング	3D,4D プリンティング、デジタルマニファクチャリング、ラボオートメーション、レーザー加工、半導体微細加工、異種接合、自己組織化テンプレート、エアロゾルデポジション	マスカスタマイゼーション、4D プリンティング・4D マテリアル、半導体ファブシステム、オンデマンド生産、付加製造技術(3D プリンティング)、暗黙知のアーカイブ化、マルチマテリアル加工、形状・材料同時加工、ニアネットシェイプ技術、メタマテリアル加工、低環境負荷精錬技術、超精密プロセス技術
3 計算科学・データ科学	マテリアルズ・インフォマティクス(AI 含む)、AI 材料設計・合成、シミュレーション(量子)、AI&ロボット材料探索・合成	マルチスケールシミュレーション、プロセスシミュレーション、逆問題、マルチフィジックスシミュレーション、スーパーコンピュータ、特性・機能・劣化予測、複合材料・高次構造、マテリアルズ・インフォマティクス、データ同化、人工知能、特性データベース、プロセスデータ
4 先端計測・解析手法	散乱光イメージング、室温高感度磁気センサ、X線自由電子レーザー、光音響イメージング、レーザー応用、計測 X データ科学、デジタルツイン、トライボロジー計測、表面増強ラマン散乱、表面温度計測	時空分解解析、リアルタイム三次元可視化、固体欠陥解析、オペランド(実働環境)解析、触媒反応素過程解析、実時間解析、磁気構造解析、ナノ計測、界面計測、マルチスケール解析、データ駆動型計測、マイクロ・ナノマシン
5 応用デバイス・システム(ICT・ナノエレ分野)	量子技術(量子コンピュータ・量子ビット、量子センサ、室温量子材料、量子インターネット・量子暗号)、テラヘルツ技術、光・エレクトロニクス融合、スピントロ・フォトニクス融合、新材料(ダイヤモンド、GaO)トランジスタ、ペイントブルエレクトロニクス、有機半導体レーザー、トリリオンセンサ、ウェアラブルデバイス	超小型ヒューマン・マシン・インターフェイスデバイス、フレキシブルトランジスタ、大容量・高速不揮発メモリ、単一スピン情報素子、単一光子、モノリシック三次元集積 AI チップ、量子コンピュータ・シミュレータ、量子イメージング、量子通信素子、量子センサ・メモリ、高度 VR システム、微細アンテナ・微小通信機
6 応用デバイス・システム(環境エネルギー分野)	水素製造・貯蔵・利用・燃料電池・電極触媒、全固体電池、人工光合成、アンモニア利用・合成、アップコンバージョン材料、太陽電池、熱電・熱発電素子、磁性熱電効果、プラスチック分解、蓄電技術、エネルギーハーベスティング、CO2 資源化、リチウム金属電池、高電圧水系電池、原子力電池、環境浄化技術、プラズマ触媒、メタン直接還元、排熱回収、資源循環	太陽電池、高容量高出力電池、燃料電池、エネルギーハーベスト、水素社会、再生可能エネルギー、スマートグリッド、CO2 再資源化、光還元触媒・人工光合成、膜分離技術、有害元素除去
7 応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野)	宇宙エレベータ素材、自己修復材料、ナノ表面防食、高強度ポリマー、CO2 からの燃料合成、核融合技術、超電導コイル・モーター	簡便接合技術、金属・非金属ハイブリッド構造材料、超長寿命耐食材料、リアルタイムモニタリング、構造物健全性評価、自己修復機能材料、3D プリンター製造用素材、水素キャリア、自動運転、高速道路送電網、非接触受給電
8 応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野)	光センシング・イメージング、生体適合材料・バイオマテリアル、量子センシング、ウェアラブルデバイス、生分解性高分子、3D 培養・細胞シート、身体拡張技術、自己修復材料、ナノロボティクス、生体模倣、タンパク質大量生産	人工食材・フードプリンタ、ソフトマターロボティクス、バイオメティクス・ナノマシン、ウェアラブルデバイス、インプラントデバイス、バイオマテリアル、3D バイオプリンティング、バイオファブリケーション、バイオイメージング、光・量子計測・センシング、バイオデグラブル、生体内センサ

3.6. 都市・建築・土木・交通分野

概要図表 7 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。i-Construction 等の建築現場における AI 技術の活用、再生可能エネルギーやグリーンインフラ等の環境問題の対応、防災・減災等が挙げられた。また、自動運転やロジスティクスの自動化については比較的多く回答があった。

概要図表 7 今回調査の科学技術キーワード等(都市・建築・土木・交通分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	国土利用・保全	ドローン等による画像による写真測量 (SfM)・レーザ測量 (LiDAR)、衛星リモートセンシングによる潮流・潮位の計測と変動の予測、地理的な犯罪予測	環境、エネルギー、水資源、治水、観光、海洋・海岸、地下、土砂、モニタリング
2	建築	建設分野におけるデジタルツイン、建築現場への 3D プリンタの導入、木質系材料のマテリアルサイクル	安全、健康、利便、快適、建築、スマート、ワークスペース、住宅、室内環境、海洋 & 宇宙、新木造 & 新素材、省・創・蓄エネ
3	社会基盤施設	光センシングによる構造物のヘルスマニタリング技術、光ファイバを用いた巨大構造物の形状モニタリングシステム	設計、施工、維持管理、制御、新材料、新構造、環境、情報技術、ロボティクス、保守、インフラセンシング、点検・診断、修復・再生
4	都市・環境	ゼロエミッション・シティ、機械学習等を元いた観測データの自動解析による環境変化アセスメント、都市下水中に含まれる微量物質をリアルタイムに計量する超高感度センサー	環境アセスメント、都市計画、地理情報、合意形成、人口減少、住宅地、上下水道、スマートシティ、コンパクトシティ、グリーンインフラ
5	建設生産システム	i-Construction、BIM/CIM	生産性革命、i-Construction、BIM/CIM、設計・施工・管理一貫データ、ロボット、ドローン、センサー、電子地図、AI、プレキャスト、自律施工
6	交通システム	MaaS (Mobility as a Service)、超伝導直流送電、ソリッドステート LiDAR、MR 技術を活用した屋内ナビゲーションシステム	道路、公共交通、ロジスティクス、交通情報、自動運転、移動支援、交通マネジメント、インターモーダル、ダイナミックマップ、道路利用料金、ドローン
7	車・鉄道・船舶・航空	自動運転、ロジスティクスの完全自動化、様々な機器や構造物の自律化、自律配送ロボット、レジリエントでサプライチェーン指向の輸送システムの形成	自動車交通、鉄道交通、船舶輸送、航空輸送、安全技術、自動化・無人化、低公害化・省エネルギー化、低コスト化、効率化・高速化、輸送システム
8	防災・減災技術	グリーンインフラ、生態系を活用した防災・減災 (Ecosystem-based disaster risk reduction ; Eco-DRR)、災害状況の正確な把握や予測に関する科学技術、斜面崩壊・地すべり高リスクエリアの数値化	流域管理技術、地震被害リアルタイム判定技術、洪水予測、応答制御、アクティブ制御、構造設計、洪水対策、干ばつ対策、液状化対策
9	防災・減災情報	森林火災防止のための高精度シミュレーション技術、災害状況の正確な把握や予測に関する科学技術、住民に情報を迅速・的確に伝え行動を促す技術、災害救助技術 (コンクリートの破壊技術)	防災情報システム、災害予測、センサー、被害把握、リアルタイム、防災行動、避難、SNS、IoT、情報分析、シミュレーション

3.7. 宇宙・海洋・地球・科学基盤分野

概要図表 8 に、アンケート回答から抽出したキーワード及び第 11 回調査でとりあげたキーワードを示す。宇宙、地震、観測、計測、データ、X 線、光が頻出ワードとなっており、類似する事項が散見される。比較的多く挙げたのは、月・火星探査、宇宙エレベータ、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙太陽光発電、海底資源、環境 DNA、DAS、気候変動モデル、社会シミュレーション、高強度・超高速レーザー、軟 X 線分光、光格子時計等である。

概要図表 8 今回調査の科学技術キーワード等(宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1	宇宙	宇宙探査(月、火星)、宇宙利用、宇宙用エレクトロニクス、有人探査、太陽系外惑星、宇宙環境計測、宇宙エレベータ、宇宙用核分裂発電、宇宙エネルギー伝送、宇宙太陽光発電、水資源探査、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)、宇宙線ミュオン	再使用型輸送系、地球外天体における有人拠点、太陽系探査、国土の高精度監視、測位、デブリ除去、月資源、恒星系、銀河系、重力波、宇宙線※、宇宙物理※、量子重力※、宇宙の反物質※、ダークマター※、ダークエネルギー※、インフレーション※、元素合成※ ※素粒子・原子核、加速器にも関連
2	海洋	海底・海洋資源、海洋深層、アルゴフロート、海洋底質環境、生分解性海洋性プラスチック、洋上大容量高速通信、環境 DNA	海洋環境、温暖化、海洋生態系、生物多様性、生物生産、海洋調査/深海探査、海洋/海底資源、極域
3	地球	地震電磁気観測、DAS(Distributed Acoustic Sensing)、地震予測・即時津波予測統合	地殻変動、地震、津波、火山、水・土砂災害、地すべり、地球深部
4	観測・予測	データ同化、数理モデリング、高解像度気候モデル、水循環解析、データ取得・転送、地球環境・資源・自然災害・農作モニタリング、海面高度計測、潮流・潮位計測・予測、リモートセンシング、市民観測	陸域、植生、大気、海況、気象、モデリング
5	計算・数理・情報科学	数理モデリング、シミュレーション、因果構造推定、多様性解析、気候変動シミュレーション、社会シミュレーション(集合行動・政策効果予測等)計算代数位相幾何学、ベイズ推定	シミュレーション、アルゴリズム、気象・気候変動予測、防災・減災解析、ものづくり設計、社会現象予測等
6	素粒子・原子核、加速器	高勾配電子加速器、レプトン加速器(ILC)(宇宙科学関連は、細目「宇宙」に統合)	素粒子、原子核、宇宙線※、宇宙物理※、加速器、量子重力※、宇宙の反物質※、マヨラナニュートリノ、ダークマター※、ダークエネルギー※、インフレーション※、元素合成※ ※宇宙にも関連
7	量子ビーム：放射光	超高速・超高強度光科学、高輝度軟 X 線、軟 X 線分光(RIXS、発光)、X 線自由電子レーザー(XFEL)、ランダムレーザー光源、イベント駆動型イメージセンサ、非晶性物質回折イメージング、分子軌道対称性判別、メソスケール高分子材料構造評価	高分解能軟 X 線分光(吸収、発光)、オペランド計測、省コスト超高輝度放射光源、高速高解像度 X 線 CT 顕微鏡、コヒーレント回折イメージング、分光イメージング、高時間分解タンパク質構造解析、タンパク質 1 分子 X 線構造解析、時空間階層構造解析、高速・高感度 2 次元 X 線検出器、ナノ結晶構造解析、高分解能非弾性散乱
8	量子ビーム：中性子・ミュオン・荷電粒子等	核変換技術、遺伝子融合	偏極中性子局所磁気構造・励起測定技術、3 次元応力・ひずみ・磁場分布観測、ナノ深さ磁気状態解明、偏極陽電子表面構造・磁気状態観測、複数量子ビーム利用解析・加工技術、放射性同位元素大量・安定製造技術、量子ビーム突然変異獲得技術、微細構造 3 次元可視化計測技術、未踏領域の核データ取得技術、ミュオン顕微鏡、ミュオンイメージング技術、ストロボスコピック測定技術、オペランド測定技術

9	光・量子技術	光格子時計、デュアルコム分光、ランダムレーザー、光音響イメージング、オールフォトニクス・ネットワーク、光渦、高強度・超高速レーザー、量子コンピュータ、量子センサ、NVセンター、量子ビット、コヒーレンス、量子暗号、光量子コンピュータ	量子情報科学、量子コンピュータ、量子暗号、超高精度光量子計測、レーザー光源開発(大出力、広帯域、短パルス等)、次世代レーザー加工、光積層造形、超高速大容量光通信、超高解像度顕微鏡光変調技術、超高感度光検出技術、光測距技術、レーザー医療技術
---	--------	---	---

科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携

本アンケートでは、科学技術の経済社会的側面についての記載は明示して求めていなかったため、注目科学技術が前提とする社会像や解決すべき社会課題、経済社会へもたらす便益や懸念、実現にあたって解決が必要な社会・制度的課題、基盤となる人間や社会の在り方等、様々な観点からのコメントが寄せられた。それらの内容を技術横断的に整理すると下記のように大まかにはまとめられるが、これらの多くは、人文・社会科学との連携・融合により対応していく必要がある事項である。

① 目指すべき社会像や解決すべき社会的課題

Society 5.0、IoT 社会、カーボンニュートラル（/フリー）な社会、持続可能な社会、資源循環社会、水素社会、低炭素社会、幸せを実現する社会等、目指すべき社会像を想定した上で、それに貢献する注目科学技術を提案している。

解決すべき社会課題や到達すべきゴールとしてはSDGsが多く言及されたが、この他、少子高齢化、働き方改革等も言及されている。

② 期待される経済社会的インパクト

社会像や社会的課題と裏腹ではあるが、注目科学技術がもたらす幅広い経済社会インパクトも言及されている。

- 経済的インパクト：経済、雇用、産業化等
 - 社会的インパクト：幸福、健康、暮らし、安全・安心、防災・減災、外交・安全保障等
- 科学技術がもたらしうる負のインパクトについても、社会分断や格差などの言及があった。

③ 社会実装にあたっての社会・制度的な課題

主には注目科学技術の実現に必要なブレイクスルーとして、技術的課題以外の社会・制度的な課題についても多く言及されている。

- 産業化・事業化・社会実装にあたっての制度的要因
- 倫理的・法的・社会的課題（ELSI: Ethical, Legal and Social Issues）
- 社会受容性
- 政策：人材、レギュラトリーサイエンス、政策の科学

④ 基盤となる人間や社会の在り方、技術発展の在り方

- オープネス：オープンアクセス、オープンデータ、オープンサイエンス等に言及し、知識や技術の共有を促進することが科学技術への市民参加につながる点が言及された
- 精神性・哲学・ヒューマニティ：AI等の発展による人間と機械の共生を前提として、トランスヒューマニズムなど、精神的・物理的両面から、人の可能性や機能とは何かを問うていくことの重要性が言及された
- ジェンダー：ジェンダードイノベーションなど、技術発展やイノベーションの在り方に関してジェンダーの観点を入れていくことの重要性が言及された

⑤ 科学コミュニケーション

特定の注目科学技術の実現には、社会におけるリテラシー、社会理解、社会受容が必要といった啓発的観点のものから、双方向のコミュニケーションを前提とした、科学コミュニケーション、リスクコミュニケーション、エンゲージメントが必要といった言及もあった。

⑥ 人文・社会科学との連携・融合

注目科学技術の進展において人文・社会科学的知見との連携が重要である領域も複数提案された。

- 人間と機械の共生：人間とは何か、AIにはできない仕事は何か？科学技術の問題を科学者、研究者、技術者だけに任せるのではなく、人文・社会科学の学者、研究者とも議論が必要
- 政策効果の予測

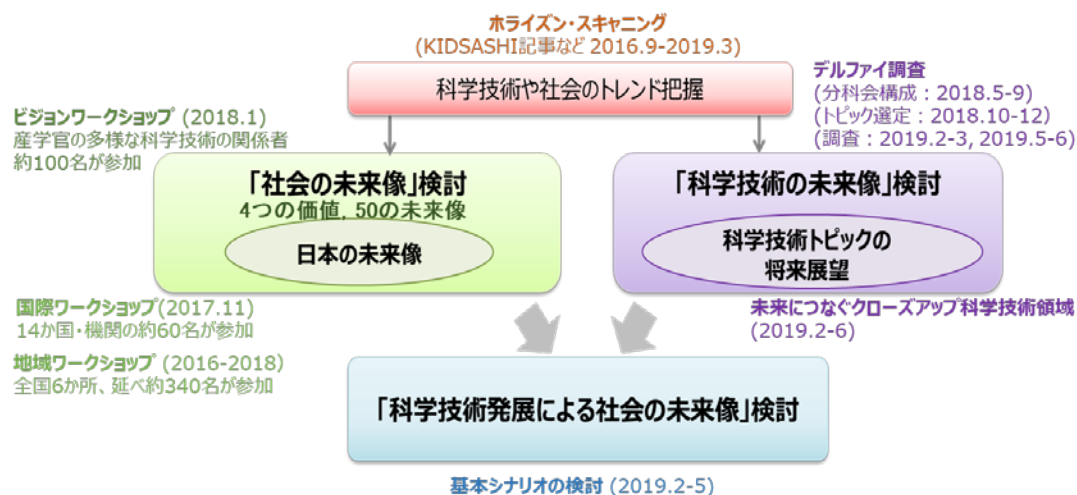
以上のように、本調査によって、各分野の注目科学技術が得られたと共に、次期科学技術予測調査への重要な示唆が得られた。今後、質問項目等の調査設計を適宜改良しながら、本調査は毎年続ける予定にしており、継続的に調査し、次期科学技術予測調査へと繋げていく。

本編

1. 背景と目的

1.1. 調査の背景

科学技術・学術政策研究所では、1971年から約5年毎に科学技術予測調査を実施しており、科学技術基本計画が策定されるようになって以降、その策定スケジュールに合わせて調査を実施してきた。第11回科学技術予測調査(以降、第11回調査)では、第6期科学技術・イノベーション基本計画を始めとする科学技術イノベーション政策・戦略の検討に資する基礎的な情報を提供することを目的として、科学技術発展と社会の未来について検討を行った。調査の構成を図表 1.1-1 に示す。



図表 1.1-1 第11回科学技術予測調査構成の概要

第11回調査のうち「科学技術の未来像」検討のパートにおいては、対象分野として7分野を設定し、2050年までを見通して実現が期待される研究開発課題を「科学技術トピック(以下、トピック)」として各分野約100件ずつ、計702件設定した。その検討手順を以下に記す。

(1) 設定の基本方針

- ・ 将来の社会変化に対応する、科学技術イノベーションを創出する、共通基盤的技術である、科学技術進展に寄与する等、様々な観点から重要と考えられる科学技術を抽出する。
- ・ 科学技術の進展と関連の深い社会制度・システム、市民の意識、社会変化等、科学技術以外の事項も、必要に応じ設定可とする。
- ・ 俯瞰性を担保しつつ、今後特に注目すべき事項を入れ込む。
- ・ 2050年までを展望しつつ、ターゲットイヤーである2040年頃の(前倒し)実現も意識する。

(2) 検討手順

- ① 各分野10程度の細目を設定した。設定に当たっては、前回第10回調査の細目を踏まえつつ、

今後の科学技術発展及び社会変化の可能性を考慮し、細目が今後 30 年を見越して重要と考えられる科学技術の枠組みを示すものであることを意識した。あわせて、アンケート調査であることから回答者にとってのわかりやすさにも配慮した。したがって、本調査における細目は、大きさや性格などを整えて俯瞰性を担保した分野分類とは本質的に異なり、また細目として設定することがメッセージを持つ場合もある。

- ② 細目ごとに科学技術トピック候補を抽出した。抽出に当たっては、「ホライズン・スキャニング²⁾」(パート1)で得られた細目別情報を参照した。情報の種類は以下の通りである。

ホライズン・スキャニング(HS)により収集した細目別情報

情報種類	HS 分類*	項目	情報源
研究情報	—	科学技術トピック	「第 10 回科学技術予測調査分野別科学技術予測」の科学技術トピック計 932 件から抽出(関連度の高い 10 件)
	将来見通し/動向	注目研究領域	「サイエンスマップ 2016」から関連領域を抽出(細目単位ではなく分野単位で抽出)
			「研究開発の俯瞰報告書 2017 年度版」(科学技術振興機構)から抽出(関連度の高い 10 件)
	兆し/動向	研究テーマ	クローリングにより収集した大学等研究機関のプレスリリースから抽出(関連度の高い 10 件)
科学研究費助成事業データベース KAKEN から抽出(関連度の高い 100 件)			
	将来見通し/目標		トップダウン型の競争的資金(文部科学省、JSPS、JST、NEDO 等)に関する情報(関連度の高い件数、金額、件名例)
政策情報	将来見通し/目標		クローリングにより収集した政府審議会等の議事録から抽出(関連度の高い 10 件)

(注)*ホライズン・スキャニングにおいては、認知度及び方向性の観点から情報を特徴づけた。認知度については、「将来見通し(専門家・有識者間あるいは社会一般の中で一定程度の共通認識)」と「兆し(個人的あるいは一部の見解)」に分類。方向性については、「動向(価値観や願望を含まない客観的な方向性)」と「目標(目指すべき規範的な方向性)」に分類。

- ③ 科学技術トピック候補のうち、他分野との関わりが深いと考えられるトピックを抽出し、分野間で相互参照を行った。この目的は、重要な科学技術が分野の狭間に落ちてしまっていないかを確認すること、及び、同一内容の科学技術トピックを避けること(類似性の高い科学技術トピックについては、最も適切な分野に集約する、視点の違いを明確にするなどの対応をとる)である。
- ④ 他分野の設定状況も参照しつつ当該分野の科学技術トピック候補を検討し、各細目 10 件程度、分野計 100 件程度を最終的に設定した。

2 ホライズン・スキャニングについては、OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development)によって「新しい技術とその技術の現在の課題に対する効果に重きを置いて、潜在的な脅威や機会を体系的に調査することにより、潜在的に重要な天恵の早期的な兆しを検出する手法である」と定義されており、各国・機関の定義において多少のニュアンスは異なるが、共通して「早期の兆しをとらえる」ことが示されているホライズン・スキャニングについての詳細は以下を参照。科学技術予測センター、「兆しを捉えるための新手法～NISTEP のホライズン・スキャニング“KIDSASHI”～」, NISTEP Policy Study, No.16, 文部科学省科学技術・学術政策研究所。DOI: <http://doi.org/10.15108/ps016>

1.2. 本調査の目的

本調査は、上記の検討過程を補強し質と精度を向上するために実施するものであり、次期科学技術予測調査の実施に向けたホライズン・スキャニング（科学技術や社会などの早期の兆しをとらえる）調査の一環である。

これまでのトピック設定における問題として、以下のような問題が挙げられる。

第11回調査の分野別分科会における科学技術のトピック設定においては、先述したとおりホライズン・スキャニングで得られた研究情報として、「第10回科学技術予測調査分野別科学技術予測」「サイエンスマップ2016」「研究開発の俯瞰報告書2017年度版」を提供していた。これらの情報はそれぞれが膨大な調査結果であり質の高い情報である一方で、参照に時間がかかり、科学技術予測調査の実施時期にあわせているわけではないためにタイムラグが存在していた。

また、タイムラグの無い情報として、クローリングにより収集した大学等研究機関のプレスリリースから抽出（関連度の高い10件）、科学研究費助成事業データベース KAKEN から抽出（関連度の高い100件）、トップダウン型の競争的資金（文部科学省、JSPS、JST、NEDO等）に関する情報（関連度の高い件数、金額、件名例）などの情報を提供していた。これらの情報については、タイムラグは無いものの情報量が膨大で参照に時間がかかり、また、機械的な手法であるために専門家の視点が必要であった。

そこで本調査では、次期科学技術予測調査における科学技術トピック検討に資する基礎情報を随時得るために、現在注目される科学技術をアンケートで収集し、科学技術キーワードを抽出整理する。また、今後も毎年同様の調査によって注目科学技術及びキーワードを蓄積する。これらの情報は、次回科学技術予測調査時に、タイムラグの少ない専門家の視点として情報提供する。また、次回の予測調査の目的に限らず、科学技術の動向調査としても活用する。なお、本調査は専門家が注目する科学技術を「注目科学技術」とし、専門家の最新の知見を毎年幅広く収集・蓄積し、得られた結果を精査・分析して公表するものである。

2. 方法

本調査は、(1)専門家ネットワークアンケート調査、(2)第11回調査への分類と比較及び特徴的技術事例の概説からなる。また、2020年度は第11回調査で設定した7科学技術分野を対象として注目科学技術の抽出を行ったが、次回以降、対象の分野等を追加することも検討していく。またこれ以降、本文中あるいは図表中で第11回調査の分野名表記について以下の略称を用いる場合がある。

分野名	略称
健康・医療・生命科学	健康医療
農林水産・食品・バイオテクノロジー	農水バイオ
環境・資源・エネルギー	環境エネ
ICT・アナリティクス・サービス	ICT
マテリアル・デバイス・プロセス	マテリアル
都市・建築・土木・交通	社会基盤
宇宙・海洋・地球・科学基盤	宇宙海洋地球

2.1. 専門家ネットワークアンケート調査

科学技術・学術政策研究所が保有する専門家ネットワークの専門調査員に対し、①現在注目している科学技術の有無と、注目している科学技術が有る場合には続けて②当該科学技術の概要、③当該科学技術の実現予測時期(10年未満/10年以降)、④当該科学技術の実現に向けて必要となるブレイクスルーの4項目を尋ねるアンケートを実施した。アンケート調査の概要を図表 2.1-1 に示す。

図表 2.1-1 アンケート調査概要

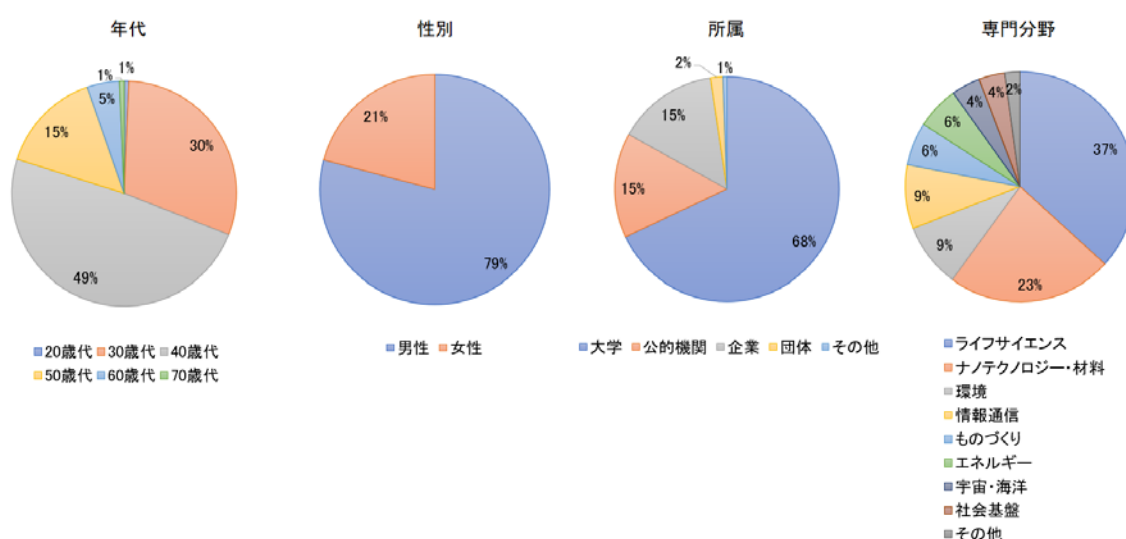
調査時期	2020年12月21日～2021年1月8日
質問項目	Q1. あなたが現在注目している科学技術はありますか(単一選択) 選択肢(二択): ある・ない (一人につき最大3回まで「ある」と回答可能。「ない」と答えた時点で回答終了。) Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください(自由記述・最大1000字) Q3. その注目科学技術について、いつ頃の実現が想定されますか(単一選択) 選択肢(二択): 10年未満に実現・10年以降に実現 Q4. その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください(自由記述・最大1000字)
形式	オンライン(専用ウェブサイト開設)
回答者	NISTEP 専門家ネットワークの専門調査員 1914名
回答状況	1017名(回答率53%)
回答数*	984件

(注)*注目科学技術に関する回答数の合計。一人で複数回答した場合や「ない」とだけ答えた場合もあるため、回答者数と回答件数は一致していない。

上記アンケートにおける専門家ネットワークとは、専門家の互選により構成されたネットワークで、所属機関・性別・年代・専門分野等の属性に配慮しつつ運営されているネットワークである。当研究所より科学技術イノベーション政策研究に関する情報を随時提供し、また関連するアンケート調査等に協力いただいているため、専門性と併せて政策に関わる知見も持つと想定される集団である。図表 2.1-2 に、調査時点での専門家ネットワークの年代・性別・所属・専門分野の内訳を示す。年代については40代が約5割ともっと多く、30代・40代・50代を併せると9割を超える。性別は男性が約8割、所属については大学が約7割と最も多い。専門分野についてはライフサイエンスが約4割、ナノテクノロジー・材料が約3割である。

図表 2.1-2 専門家ネットワークの年代・性別・所属・専門分野内訳

(A) 割合



(B) 実数

	エネルギー	その他	ナノテクノロジー・材料	ものづくり	ライフサイエンス	宇宙・海洋	環境	社会基盤	情報通信	総計
20歳代	1	0	2	2	2	1	1	0	4	13
30歳代	30	10	154	34	210	22	55	26	39	580
40歳代	58	24	211	53	365	39	85	28	73	936
50歳代	19	5	64	17	97	13	20	9	38	282
60歳代	7	2	12	10	25	2	12	4	15	89
70歳代	0	0	2	0	5	1	0	2	3	13
総計	115	41	445	116	704	78	173	69	172	1913
大学	71	31	303	81	500	35	111	53	116	1301
公的機関	21	6	70	5	89	33	47	6	12	289
企業	18	2	68	27	99	5	11	9	40	279
団体	5	2	2	1	12	4	4	0	4	34
その他	0	0	2	2	4	1	0	2	0	11
総計	115	41	445	116	704	78	173	70	172	1914

2.2. 第11回科学技術予測調査における分野分類への割り振り

その後、アンケートで得られた注目科学技術について、第11回科学技術予測調査の分野分類と対応付けた。紐付けは機械的なものと人間による評価を組み合わせたハイブリッド方式を採用した。

まず、自由記述に記載された技術の概要（以下、単に自由記述という）に対し、デルファイ調査における7分野702トピックを類似度ベースで機械的に複数紐付けた。次に、それらの結果を候補として、人間が確認し、妥当と思われる分野に割り付けた。ここで、自由記述と702トピックの間に単語そのものが重複するケースは多くない。そこで類似度の算出には分散表現と呼ばれる技術をもちい、単純な単語一致よりも柔軟な算出を行った。なお、具体的な手法や分散表現辞書は過去の文献³のものを適用した。

また、人間による検討においては適宜客員研究官等からの助言を得た。なお、最終的な割り振りについてはあくまで各分野共に第11回調査の細目の範囲内に該当するか否かで割り振った。そのため、この割り振りについては学術分野ではなく、あくまで第11回調査の調査対象範囲である点に留意されたい。

その後、第11回調査の分野別に割り振られた専門家ネットワークアンケート結果を、第11回調査結果や専門家ネットワークの回答者属性と比較した。さらに「Q2：注目科学技術の概要：」及び「Q3：実現に向けたブレイクスルー」に記述された名詞句を抽出し、頻出単語のワードクラウドを作成し大まかな全体像を把握した。さらに、分野の割り振りの際と同様に機械的手法とのハイブリッド方式によって、「注目科学技術の概要」から科学技術キーワードを抽出した。次に、今回提案内容と第11回調査のトピックとの比較を行った。実現時期の比較においては、第11回調査は具体的な実現年を算出しているため、2030年以前を「10年未満」、2031年以降を「10年以降」と換算してアンケート結果と比較した。

その後、アンケート結果に、論文や競争的資金応募テーマ等の分析、学会等からの情報収集、文献調査等の情報を必要に応じ適宜加えた上で、特に注目される科学技術テーマを抽出・整理した。

³ 小柴 等, 森川 想:議事録を用いた我が国における議会・行政の関係性分析手法, 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 5, p. E-J47_1-10 (2019)

3. 結果①：分野別調査結果

3.1. 全体概要

3.1.1. 第11回科学技術予測調査における該当分野分類

図表 3.1.1-1 に、アンケート結果を第11回調査分野に割り振った結果を示す。全体のうち、健康・医療・生命科学分野が28.3%、マテリアル・デバイス・プロセス分野が26.6%であり、これらの合計で全体の5割を超える。最も割合が少ないのは都市・建築・土木・交通分野で全体の3.8%であった。これらの割合は、図表 2.1-2 に示した専門家ネットワーク専門調査員の専門分野の偏りによるところが大きいと考えられる。

図表 3.1.1-1 専門家ネットワーク回答結果と第11回科学技術予測調査での分野分類

分野	健康・医療・生命科学	農林水産・食品・バイオテクノロジー	環境・資源・エネルギー	ICT・アナリティクス・サービス	マテリアル・デバイス・プロセス	都市・建築・土木・交通	宇宙・海洋・地球・科学基盤
健康・医療・生命科学	286						
農林水産・食品・バイオテクノロジー	2	66					
環境・資源・エネルギー	0	1	110				
ICT・アナリティクス・サービス	0	0	0	138			
マテリアル・デバイス・プロセス	5	1	8	0	268		
都市・建築・土木・交通	0	1	1	0	1	39	
宇宙・海洋・地球・科学基盤	0	3	0	0	2	1	63
合計	293	72	119	138	271	40	63

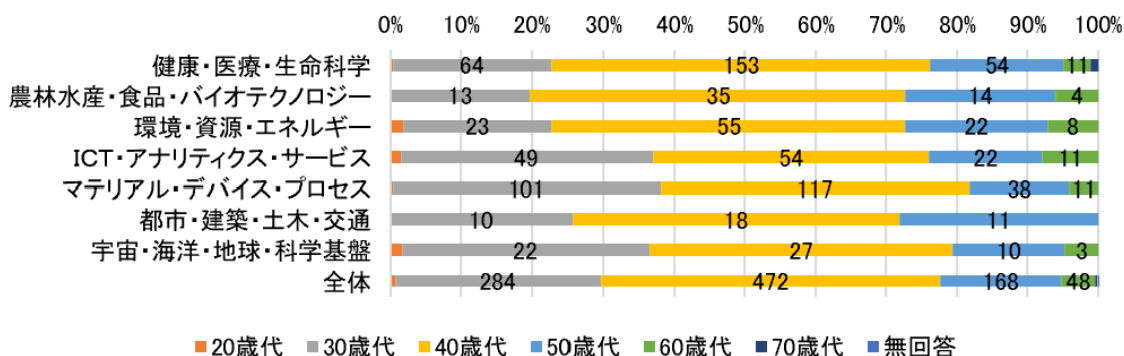
(注) 複数分野に該当する場合は重複してカウントした。

3.1.2. 第11回調査分野別の回答者年齢・性別・専門分野との比較

図表 3.1.2-1 に、分野別の回答と回答者の年代を比較した結果を示す。全体では最も多いのは40代で48%、次に多いのが30代で29%、次に多いのが50代で17%であった。30代、40代、50代の合計で94%と大多数をしめており、これは図表 2.1-2 に示した専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。

分野別に傾向をみると、全体傾向に比べて30代の割合が高いのは、ICT・アナリティクス・サービス分野(36%)、マテリアル・デバイス・プロセス分野(38%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤分野(35%)であった。

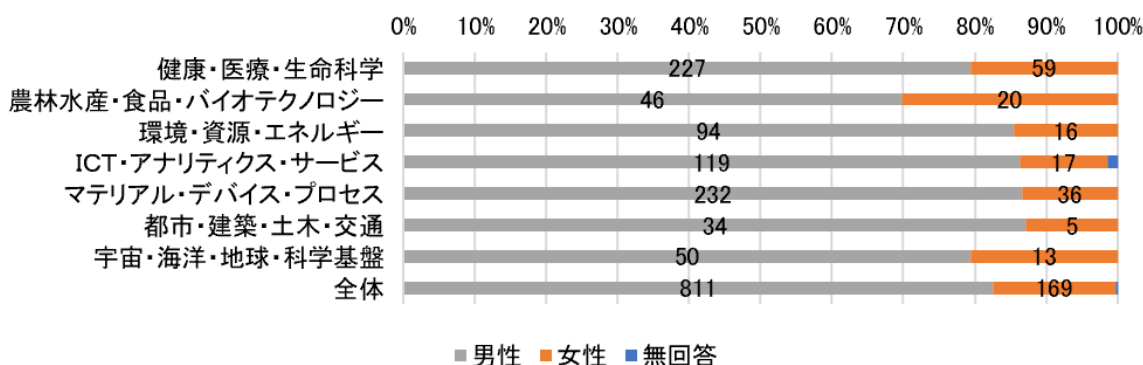
図表 3.1.2-1 第11回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(年代)



図表 3.1.2-2 に、分野別の回答と回答者の性別を比較した結果を示す。全体では最も多いのは男性の83%であり、これは図表 2.1-2 に示した専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。

分野別にみると、全体傾向に比べて女性の割合が多いのは、農林水産・食品・バイオテクノロジー(30%)、健康・医療・生命科学(20%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤(21%)であった。

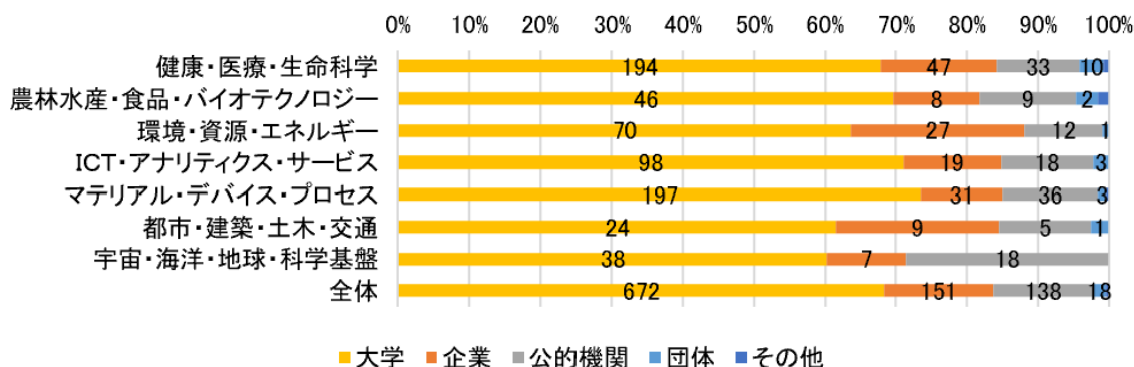
図表 3.1.2-2 第11回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(性別)



図表 3.1.2-3 に、分野別の回答と回答者の所属を比較した結果を示す。全体では最も多いのは大学の68%、次は企業と公的研究機関が企業15%、公的研究機関14%でほぼ同等であった。これは図表 2.1-2 に示した専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。

分野別に傾向をみると、全体傾向に比べて企業の割合が高いのは健康・医療・生命科学分野(16%)、環境・資源・エネルギー分野(25%)、都市・建築・土木・交通分野(23%)であった。

図表 3.1.2-3 第11回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(所属)



図表 3.1.2-4 に、分野別の回答と回答者の専門分野を比較した結果を示す。全体ではライフサイエンスが35%、ナノテクノロジー・材料が27%と多く、この二分野の合計で全体の5割を超える。これは図表 2.1-2 に示した専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。

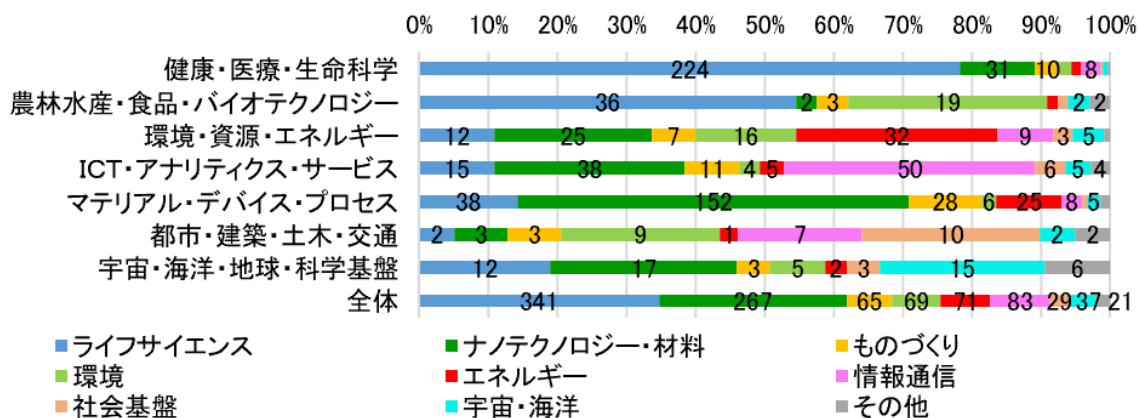
分野別に傾向をみると、各分野共に基本的に第11回調査分野に近い専門分野を持つ回答者が最も多い。特に健康・医療・生命科学はライフサイエンスの割合が78%と高い。回答者の専門分野側から見ると、ライフサイエンスは第11回調査分野のうち複数分野で50%を超えており、健康・医療・生命科学(78%)、農林水産・食品・バイオテクノロジー(55%)であった。

ナノテクノロジーは複数分野で20%を超えており、環境・資源・エネルギー(23%)、ICT・アナリティクス・サービス(28%)、マテリアル・デバイス・プロセス(57%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤(27%)であった。同様に、

環境は複数分野で20%を超えており、農林水産・食品・バイオテクノロジー(29%)、都市・建築・土木・交通(23%)であった。同様に、情報通信は複数分野で15%を超えており、ICT・アナリティクス・サービス(36%)、都市・建築・土木・交通(18%)であった。

ライフサイエンス、ナノテクノロジー、情報通信については、第11回調査の分野割りにおいても複数分野に横断する分野であると考えられる。

図表 3.1.2-4 第11回調査分野別：各回答と回答者属性の比較(専門分野)



3.1.3. 第11回予測調査の分野別ワードクラウドによる全体傾向の概観

図表 3.1.3-1 に、各分野に割り振られたアンケート結果のうち、「Q2：注目科学技術の概要：」及び「Q3：実現に向けたブレイクスルー」に記述された名詞句を抽出し、頻出単語のワードクラウドを作成した結果を示す。ここでは、それぞれの分野の特徴の大きな傾向を概観する。

それぞれの出現頻度に基づいたワードクラウドを概観すると、「注目科学技術の概要」には、たとえば農林水産・食品・バイオテクノロジー分野では「環境 DNA」、ICT・アナリティクス・サービス分野では「AI」「量子」、マテリアル・デバイス・プロセス分野では「光」等、いくつかの特徴的な名詞句が散見され、これらの名詞句は今回調査における特徴的な科学技術を示している可能性が考えられた。

また、必要なブレイクスルーについては、「コスト」「効率」について、都市・建築・土木・交通分野や環境・資源・エネルギー分野で比較的大きく確認される。「データ」は、健康・医療・生命科学分野、農林水産・食品・バイオテクノロジー分野、ICT・アナリティクス・サービス分野、都市・建築・土木・交通分野、宇宙・海洋・地球・科学基盤分野で比較的大きく確認される。これらの違いは、それぞれの分野において必要とされる技術や政策等の違いを反映している可能性が考えられる。

各分野の詳細については、分野別パートにて後述する。

図表 3.1.3-1 各分野におけるアンケート結果のワードクラウド



3.1.4. 第11回調査とアンケート結果の実現時期比較

図表 3.1.4-1 にアンケート結果を実現時期(10年未満/以降)別に集計した結果を、図表 3.1.4-2 には、それらの実現時期を第11回調査における社会的実現予測時期(実現された技術が製品やサービス等として利用可能な状況となる時期)と比較した結果を示す。

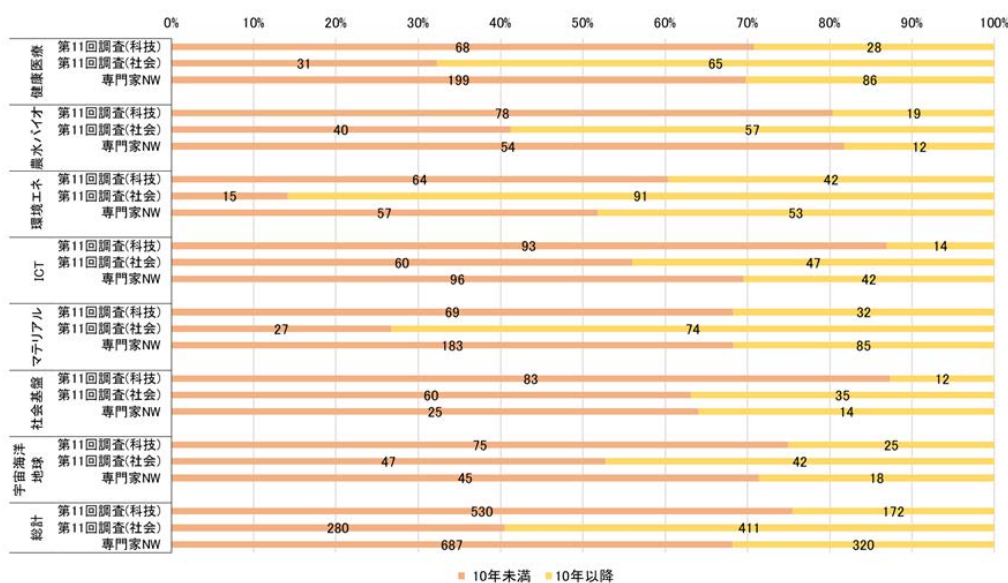
まずアンケート結果については、全体の約7割が10年未満に実現するとされた。次に、第11回調査とこれらの割合を比較すると、全体として第11回調査では10年未満に実現するとされたトピックは、科学技術的実現では約7割、社会的実現では約4割であった。アンケート結果における実現時期は、第11回調査における科学技術的実現と近く、比較的科学的技術の実現を想定した回答が多いことが想定される。

図表 3.1.4-1 アンケート結果の実現時期集計

11回科学技術予測調査における 該当分野	実現時期(割合)		総計(割合)
	10年未満	10年以降	
健康・医療・生命科学	199 (69.8%)	86 (30.2%)	285 (100%)
農林水産・食品・バイオテクノロジー	54 (81.8%)	12 (18.2%)	66 (100%)
環境・資源・エネルギー	57 (51.8%)	53 (48.2%)	110 (100%)
ICT・アナリティクス・サービス	96 (69.6%)	42 (30.4%)	138 (100%)
マテリアル・デバイス・プロセス	183 (68.3%)	85 (31.7%)	268 (100%)
都市・建築・土木・交通	25 (64.1%)	14 (35.9%)	39 (100%)
宇宙・海洋・地球・科学基盤	45 (71.4%)	18 (28.6%)	63 (100%)
その他複合分野等	28 (73.7%)	10 (26.3%)	38 (100%)
合計	687 (68.2%)	320 (31.8%)	1007 (100%)

(注) 複数分野に該当する場合は重複してカウント

図表 3.1.4-2 第11回調査とアンケート結果の実現時期比較



(注) 数値は、第11回調査は第11回科学技術予測における該当トピック数を示し、専門家NWは専門家ネットワークアンケートの該当提案数を示す。括弧内の「科技」は科学技術的実現時期、「社会」は社会的実現時期を示す。

3.2. 健康・医療・生命科学分野

3.2.1. 要約

11 回デルファイ調査と比較して、新型コロナウイルス感染症を含めた新興感染症対策関連、再生・細胞医療関連、遺伝子治療関連、イメージング関連、合成生物学関連の科学技術について多くの意見が寄せられた。これら専門家からの意見の中で、健康・医療・生命科学分野において今後トレンドとなり得る科学技術の例として、プラズマ医療と冬眠研究が考えられた。

3.2.2. アンケート結果

新型コロナウイルス感染症を含めた新興感染症対策関連、再生・細胞医療関連、遺伝子治療関連、イメージング関連、合成生物学関連の科学技術が多く見られた。特に、世界的なコロナ禍への対処として、現在研究開発が進んでいるワクチンや治療薬を含めて多くの科学技術が出された。それら科学技術を基にキーワードを抽出した結果を図表 3.2.2-1 に示す。また、図表 3.2.2-2 にはワードクラウドの結果を示す。

図表 3.2.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(健康・医療・生命科学分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	医薬品(再生・細胞医療製品、遺伝子治療製品を含む)	再生医療、細胞治療、遺伝子治療、抗ウイルス薬、幹細胞、iPS-ES 細胞、オルガノイド、リプログラミング、人型モデル動物による薬剤評価技術	再生医療、細胞医療、遺伝子治療、抗ウイルス薬、タンパク質間相互作用、核酸医薬、細胞内、DDS (Drug Delivery System)、幹細胞、iPS-ES 細胞、初期化、細胞プリンティング、同種移植、自己免疫疾患、ゲノム編集、人工臓器、オルガノイド、人工知能・シミュレーション技術
2	医療機器開発	光イメージング技術、超音響イメージング技術、リアルタイムイメージング(リアルタイムマイクロ波イメージング等)、ロボット技術(手術支援・介護ケア)、ニューロフィードバック技術(ニューロリハビリ機器)、人工知能による画像識別技術	介護機器、非侵襲診断機器、統合的医療ソフトウェア、がん細胞孤立化治療材料、微小血管吻合支援機器、ウェアラブル透析装置、超分散ホスピタル、モニター機器、外科医の熟練手技、ナノテク医療、在宅医療機器、排泄補助機器、ニューロリハビリ機器
3	老化及び非感染性疾患	細胞老化(senolytic 治療)、生殖細胞、生殖医療、人工子宮	非感染性疾患(NCD)、早期診断、予防、非侵襲、免疫、アレルギー、生活習慣、がん、疲労、オミックス、老化、生殖細胞、臓器連関、メタゲノム、栄養、運動
4	脳科学(精神・神経疾患、認知・行動科学を含む)	ブレインテック、ニューロフィードバック技術、ニューロモジュレーション、全脳シミュレーション、オプトジェネティクス	神経回路、ニューロン-グリア相互作用、記憶・学習、認知・情動、意識、社会性、神経変性疾患、認知症、統合失調症、抗精神薬、うつ病、双極性障害、気分安定薬、依存症、自閉スペクトラム症、深部脳刺激療法、神経筋疾患、睡眠障害
5	健康危機管理(感染症、救急医療、災害医療を含む)	新興・再興感染症、病原微生物、ワクチン、サーベイランス、モニタリング、消毒、抗体医薬品、中和抗体、アジュバント、感染症検査技術、安全保障	新興・再興感染症、病原微生物、薬剤耐性菌、ワクチン、サーベイランス、消毒、抗体医薬品、災害医療、救急医療、血液代替物、集中治療、トリアージ、多臓器不全、マスキング、病院前救急診療、航空医学
6	情報と健康、社会医学	ウェアラブルセンサー、スマートデバイス、診療情報、個人情報、人工知能活用、社会疫学、健康の科学、ELSI(倫理的・法的・社会的課題)	ウェアラブルセンサー、スマートデバイス、電子カルテ、診療情報、ゲノム情報、医療用人工知能、遺伝-環境相互作用、地域保健、環境医学、社会疫学、DOHaD (Developmental Origins of Health and Disease)、医療安全、健康格差、気候変動、ELSI(倫理的・法的・社会的課題)
7	生命科学基盤技術(計測技術、データ標準化等を含む)	デザイナー細胞、 <i>in vitro</i> 個体発生技術、1 細胞解析、微細領域イメージング	計算生物学、人工細胞、動的ネットワークバイオマーカー、脳機能イメージング、1 細胞解析、生体分子相互作用、蛋白質の動的構造解析、ゲノム情報データベース、非コード領域の機能解析、実験環境、量子計測

図表 3.2.2-2 アンケート結果のワードクラウド(健康・医療・生命科学分野)

(A) 現在注目する科学技術



(B) 必要なブレイクスルー



コラム: 今回調査の特徴的科学技术

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技术の例を挙げる。

① プラズマ医療

2021年現在、プラズマには創傷治癒効果、殺菌効果、止血効果、癌治療効果、細胞への遺伝子導入効果、免疫治療効果など様々な活性が存在していることが分かりつつあり、それらを利用した基礎研究のための解析技術や治療法が開発される可能性がある。

新領域であるため、今後の課題としては基盤技術、例えば効果的なプラズマ発生装置の開発(超偏極技術他)、核偏極技術のMRIへの応用などの周辺技術の開発が必要となる

② 冬眠研究

これまで、マウスの脳(視床下部)の一部に存在する神経細胞群を興奮させると、マウスの体温・代謝が数日間にわたって著しく低下することが明らかになっており、この神経細胞群はQ神経(Quiescence-inducing neurons: 休眠誘導神経)、Q神経を刺激することにより生じる低代謝はQIHと名付けられている。Q神経の研究を進めることにより、人間においても人工的に冬眠様の現象を誘導することが可能となり、将来の医療応用が期待される。

3.3. 農林水産・食品・バイオテクノロジー分野

3.3.1. 要約

今回の調査で挙げられた本分野の注目科学技術 65 件は、概ね、第 11 回科学技術予測調査の科学技術トピックに関連する科学技術であることが示された。特に、「環境 DNA」や「培養肉」に関する科学技術を挙げる回答が多く示された。また、注目科学技術の実現に必要なブレイクスルーについては、情報・環境・効率・培養・解析・データ・システムなどのワードが多く挙げられ、本分野にはデジタルトランスフォーメーション(DX)が必要であることが示唆された。

3.3.2. アンケート結果

本分野では 65 件の注目科学技術が挙げられた。そのうち 62 件(95.4%)は、第 11 回科学技術予測調査における当該分野の科学技術トピックと、程度の差はあるが、類似する科学技術であった。また、65 件のうち、10 年未満に実現と回答された科学技術は 53 件(81.5%)で、10 年以降に実現と回答された科学技術(12 件)を大きく上回った。なお、両者の科学技術の内容に特徴は見られなかった。さらに、注目科学技術として回答件数をもっとも多い科学技術は「環境 DNA」であった。次いで「培養肉」であり、「スマート農業」や「ゲノム編集」も回答が多いことが示された。

図表 3.3.2-1 に、今回調査で出された科学技術のキーワードを第 11 回調査の科学技術トピックのキーワードや細目等と比較して示した。その結果、今回調査の科学技術はすべて、第 11 回調査で用いた細目のいずれかに当てはまることがわかった。また、第 11 回調査と同一のキーワードとして、「昆虫資源」・「環境 DNA」・「エピゲノム制御」が示された。しかし、その他のキーワードにおいても、類似の表現やワードが多数見られた。

一方、今回調査で挙げられた「葉面微生物の活用」、「クローン繁殖(ギンブナ)の人為的再現」、「寄生植物の自殺発芽剤」に関しては、第 11 回調査の科学技術トピックに類似するものはなかった。

図表 3.3.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1	生産エコシステム	土壌微生物の活用、葉面微生物の活用、ゲノム編集による育種短縮化、スマート農業(AI・IoT・ロボット等利用)、環境負荷低減の生産、高付加価値農林水産物生産、土を使わない農業生産	野生種の栽培作物化、機能性高分子等生産技術、閉鎖型陸上循環養殖、環境負荷低減飼料、伐採等自動化技術、生育予測・診断システム、自動化・無人化循環型植物工場、育種の超高速化、生態調和型農業生産システム、農業ロボット
2	フードエコシステム	電磁場による保蔵技術、窒素ロス低減、昆虫資源利用、培養肉製造、	データ駆動型食糧生産、食品加工 CPS、デジタルマーケティング、人工タンパク質、調理ロボット、トレーサビリティ、美味しさの設計、フードミクス、フードロス、新保蔵技術、昆虫資源、フード3D プリンター、食の EC 化、フードエコシステム
3	資源エコシステム	環境 DNA 利用調査、自然エネルギーと水産業の共生、サンゴ礁再生	魚類生殖細胞バンク、高度ライフタイムロギング、革新的獣害防止技術、病害虫対策技術、災害防止の森林管理技術、ICT 養殖管理、森林地質自動把握技術、海洋プラスチックゴミ、環境 DNA、環境生態インパクト評価
4	システム基盤	人工衛星による高分解能モニタリング、生物多様性のための新規モニタリング手法、画像処理応用による小型生物調査、水中生物のモニタリング技術、遠隔データの自動取得	農林水産資源広域モニタリングシステム、地球規模センサーネットワーク利用、全球グリッドデータベース化、資源変動予測・管理技術、高空間・高時間解像度気象予測、ICT 漁場管理、ICT 森林管理技術、微生物リアルタイムモニタリング
5	次世代バイオテクノロジー	生殖細胞分化技術、クローン繁殖再現技術、エピゲノム制御、遺伝子工学操作の効率化、植物応答の可視化、寄生植物の自殺発芽、害虫行動管理	生殖細胞作出技術、生育シミュレーション、ゲノム改変技術、窒素固定能付与、異種移植、昆虫の行動制御・監視技術、植物機能の包括的可視化、萌芽更新促進技術、CO2 大量・大規模固定、エピゲノム制御、高精度作物モデリング、生物記憶解読
6	バイオマス	木質バイオマスによるゼロエミッション化、藻類バイオエネルギー、非可食バイオマスからの化学品合成	植物性繊維分解利用技術、耕畜連携生産システム、中高層木造構築物、高耐久木材、高効率低コスト発電・熱利用技術、生分解性・光分解性素材、化石資源由来製品代替化、副産物の付加価値化
7	安全・安心・健康	微生物による土壌浄化、高齢社会のための機能性食品	人獣共通感染症病原体排除技術、フードディフェンスシステム、食・健康医療のためのビッグデータと AI 技術、防除資材開発システム、重金属・放射性物質、無病化処理技術、トレーサビリティ
8	コミュニティ	アニマルウェルフェアの普及、コミュニティ再生	家族農業、ネットワーク、バイオエコノミー、森林療法、食料需給予測、水産資源管理、伝統的な調理法、水産物のトレーサビリティ、コミュニティの見える化、ブロックチェーン、SDGs、多世代共創

今回調査における本分野全体の注目科学技術の特徴として以下のことが示された。図 2A「現在、注目する科学技術」のワードクラウドより、生物・植物・生産・環境・農業などのワードが多く回答されたことが示された。このことは、本分野の注目科学技術は、生物や植物の生産という農業に関する科学技術において、環境という軸(環境適応、環境保全、環境負荷軽減など)が重要となっていることを示唆する

と考えられる。

また、図表 3.3.2-2「必要なブレイクスルー」のワードクラウドより、情報・環境・効率・培養・解析・データ・システムなどのワードが多く回答されたことが示された。このことは、本分野の注目科学技術の実現には、ICT の活用を通じた変革、いわゆるデジタルトランスフォーメーション(DX)が必要であることを示唆すると考えられる。

図表 3.3.2-2 アンケート結果のワードクラウド(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野)

(A) 現在注目する科学技術



(B) 必要なブレイクスルー



コラム: 今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 環境 DNA

環境 DNA は、生物多様性の解明や評価を目的とした、生態系の観測や管理のための生物モニタリング技術や生物調査手法として期待されている。現在、主に水域の調査に利用されているが、今後は水域だけでなく、幅広い環境に対して応用可能な技術開発が求められている。技術の実現に必要なブレイクスルーとしては、あらゆる生物種の DNA データベースの整備、調査技術の高度化のためのセンサーや高速解析技術などが回答者から示された。

本分野の環境 DNA に関する研究者として、JST さきがけ研究領域「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出 (2015-2019 年度)」のさきがけ研究者の潮 雅之氏(京都大学 白眉センター・特定准教授)が挙げられる。潮氏は、圃場(ほじょう)生態系に関連する生物群集(微生物から脊椎動物まで)を環境 DNA 技術を用いてモニタリングし、Empirical Dynamic Modeling(非線形時系列解析)により圃場(ほじょう)作物に影響を及ぼす生物を抽出し、作物の成長や病害といった動態の制御を可能にする研究を行っている⁴。

② 培養肉

培養肉は、食肉生産による環境負荷低減、アニマルウェルフェアに対する倫理的解決策、及び世界

4 潮 雅之, 「野外の生物群集ネットワークを利用した植物の動態予測」, さきがけ, JST <https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112075/16814030.html>

人口増加による食肉供給不足への対応を目的とした、代替タンパク質製造技術である。植物肉の次の市場として期待されている。技術の実現に必要なブレイクスルーとして、培養コストの削減、食感や食味の向上、規制(食品としての認可)、細胞を肉として成形する技術が回答者から挙げられた。

また、培養肉は、その生産において再生医療の要素技術が使える可能性が高く、逆に、培養肉の生産技術の展開が再生医療に寄与することも考えられるといった、他分野に波及効果の高い科学技術と考えられる。しかし、培養肉生産の現状では、細胞培養の際のクリーンルーム等の施設利用(エネルギー負荷)や滅菌のための使い捨ての大量のプラスチック類(海洋プラスチック問題)などがあり、環境負荷は少なくない。今後は環境負荷の軽減を意識した科学技術の開発が必須となると考えられる。

③ 寄生植物の自殺発芽剤

自殺発芽剤とは、寄生植物の栄養源である宿主がいらないところで強制的に発芽させて寄生植物を枯死させる技術の概念であり、まだ社会的な実用化には至っていない。アフリカの食糧問題の原因の一つとして、トウモロコシなどのイネ科の穀物に寄生して宿主を枯らす寄生植物ストライガがある。農作物をストライガから守るために、ストライガのみに対する自殺発芽剤の研究開発を名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所の土屋らが実施している⁵。ケミカルスクリーニングにより、ストライガの発芽に関する受容体に選択的に結合する化合物を抽出し、構造改変により実験室レベルで非常に効果がみられた自殺発芽剤を世界で初めて特定して、2018年に Science 誌に論文を発表した^{5,6}。現在、ケニアの研究機関との共同研究で試験圃場での実証試験を進めている⁵という。

5 土屋 雄一朗, 「アフリカで猛威をふるう寄生植物ストライガの撲滅を目指してフェムトモルで作用する自殺発芽剤の開発」, Kagaku to Seibutsu 58(3): 136-137, 2020.

6 Uraguchi, D., Kuwata, K., Hijikata, Y., Yamaguchi, R., Imaizumi, H., Am, S., Rakers, C., Mori, N., Akiyama, K., Irle, S., McCourt, P., Kinoshita, T., Ooi, T., Tsuchiya, Y., A femtomolar-range suicide germination stimulant for the parasitic plant *Striga hermonthica*, Science, vol.362(6420):1301-1305, 2018.

3.4. 環境・資源・エネルギー分野

3.4.1. 要約

全体的に、第11回デルファイ調査で取り上げたトピックスとほぼ同様な意見が多くみられた。特にCO₂低減技術や気候変動に関連する意見が多かった。

特徴的トピックスとして、環境分野では、CO₂固定化技術、プラスチック分解、水や大気浄化技術、エネルギー分野では、電池、水素、再生可能エネルギー利用促進、資源分野では、CO₂削減に関するリサイクル技術や、廃熱を無駄にしない技術などが出された。

3.4.2. アンケート結果

カーボンゼロやカーボンフリーといった低炭素社会実現に向けて、気候変動や再生可能エネルギーに関連する技術のコメントが多く寄せられた。

エネルギーに関しては、現在、オリンピックを契機に水素技術の普及が進展しているが、これまでの調査ですでに取り上げられている水素の貯蔵、製造の効率化など、水素関連技術が出された。その他、CO₂排出低減、低炭素社会を実現するためのエネルギー効率化や、蓄電、核融合といったこれまでですでに取り上げられている技術があげられた。第11回科学技術予測調査では、本分野で担当しなかった材料やフロンティア分野に関する意見も出された。

それら科学技術を基にキーワードを抽出し、図表3.4.2-1にて、第11回調査でとりあげたキーワードと以下に比較する。また、図表3.4.2-2にはワードクラウドの結果を示す。

図表 3.4.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(環境・資源・エネルギー分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1	エネルギー変換	イオン交換膜による水素製造、水電解による大規模水素製造、余剰電力による燃料合成(e-Fuel)、再生可能エネルギーによる水素・アンモニア合成、アップコンバージョン技術、アンモニア直接燃焼・混焼技術、小型原子炉、宇宙エネルギー伝送、各種発電(核融合、宇宙太陽光、地熱、洋上風力、海洋温度差、海流・潮流、波力)	エネルギー生産、エネルギー消費、エネルギー輸送、CO ₂ 回収・低減、炭化水素合成、再生可能エネルギー、センシング・モニタリング、ヒートポンプ・熱変換、法整備・経済性
2	エネルギーシステム	水素運搬・貯蔵、水素貯蔵タンクの先進材料、(マイクロ波等による)無線電力伝送、超伝導直流送電、非接触給配電、家庭用小規模発電・蓄電、高密度エネルギー電池、全固体電池、燃料電池、潜熱蓄熱エネルギー貯蔵、	再生可能エネルギー、余剰電力利用、送電、電力貯蔵、水素等の長距離輸送、水素等の大規模貯蔵、電力取引、電力需給制御、未利用熱
3	資源開発・リデュース・リユース・リサイクル(3R)	CO ₂ 回収・利用、窒素固定・資源化、レアメタル(リチウム等)の回収、海底鉱物資源活用、プラスチック分解・油化・ガス化、海洋由来ポリマー・疑似プラスチック形成、バイオマス資源を用いた資源型処理技術	金属資源・非金属資源、石油資源、地熱資源、環境、シェアリング・サービサイジング、省力化・自動化、資源効率、廃棄物のエネルギーとしての活用、リサイクル、サーキュラーエコノミー
4	水	井戸水のフッ素・窒素化合物除去技術、廃水中の窒素化合物資源化、海水・雨水の飲料水化、4次元水循環解析、	地下水マップ、連続モニタリング、ゲリラ豪雨、水管理技術、下水処理技術、浄水技術、汚染水浄化再利用技術、水質指標、水圏マイクロプラスチック、環境科学技術

5	地球温暖化	CO2 直接回収技術、低コスト・低エネルギーCO2 固定、沿岸生態系(藻場、湿地等)による二酸化炭素隔離(ブルーカーボン)、高精度気候変動予測、気象コントロール技術、気候変動対策の評価技術、気候変動・生物多様性の統合的評価	温室効果ガス、化石燃料、気候変動、異常気象、将来予測、大気、海洋、生態系、氷床、水、食糧
6	環境保全(解析・予測・評価、修復・再生、計画)	小型・高精度大気汚染物質計測装置、大気中の複合汚染物質除去、放電プラズマによる環境浄化技術、汚染物質の選択的吸着、微生物による土壌浄化	土壌修復技術、除染技術、病原微生物検知システム、外来種の移動拡散、越境大気汚染、遺伝的多様性、環境負荷管理、生物多様性、植生維持管理
7	リスクマネジメント	海域環境リスク評価、雷放電のトリガー解明、LSI の破壊・誤動作を防ぐ環境電磁工学技術	生物多様性、環境リスク、レジリエンス、安全規制、ナノ粒子、化学物質、放射線、自然災害

図表 3.4.2-2 アンケート結果のワードクラウド(環境・資源・エネルギー分野)

(A) 現在注目する科学技術



(B) 必要なブレイクスルー



コラム：今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 放電プラズマを利用した環境浄化とその応用研究

プラズマ技術は、ナノテクノロジー、水質浄化、植物の育成や殺菌、滅菌、医療分野など幅広い応用が期待されており、研究が進められている。例えば、本技術は一般的には空気清浄機として実用化されているが、産業としては、工場や火力発電所、火山などから出る煙・水蒸気などに含まれる窒素酸化物(NOx)や硫黄酸化物(SOx)の除去装置である電気集塵機、水処理に広く利用されているオゾンナイザー、農業への応用も実用化に近い。植物の生育には本技術が有効に働くことが証明され、実用化直前である。その他、プラズマ技術をベースとした新技術としては、世界的にはがん治療や殺菌といった医療への応用研究が進み、ヨーロッパでは実用化を踏まえて法律などの検討も開始されている。プラズマ技術は日本初の技術が多くあり、例えば医療では文部科学省新学術領域に採択されチームを組んで多方面から取り組んでいるが、実用化に関しては世界から一歩遅れを取っている感がある。

② 雷の謎の解明と雷影響の対策技術

雷研究は、世界において日本がリードし続けており、近年になり、雷に付随して発生する光

核反応の存在が明らかになってきた。これは現在科学の最大の謎の一つである、雷放電のトリガーがなにかを解明するための足がかりになると考えられる。気候変動によって、雷の発生が増え、雷によって停電や通信障害、インフラへのダメージなどが起こり得る可能性が高まっている。現在情報分野で検討されている低電圧駆動 LSI を用いた IoT、ICT、AI 等に必須な、電磁雑音環境下においても LSI の過電圧破壊や誤動作を起こさない技術は、環境電磁工学といわれるが、雷研究と深いつながりがある。日本が推進しているデジタル社会の進展には、雷研究が欠かせない。特に冬に北陸地域を中心に発生する雷は、冬季雷と呼ばれ、世界でも珍しい現象であることから、多くの研究者が注目しており、論文の引用も多い。本研究が進むことによって、雷放電の理解が深まり、雷予知や避雷のための知見の向上につながる。安心安全な社会の構築には欠かせない研究である。

3.5. ICT・アナリティクス・サービス分野

3.5.1. 要約

今回の調査で挙げられた本分野の注目科学技術 138 件は、第 11 回科学技術予測調査の細目で見ると、コンピュータシステム、データサイエンス・AI に関連する科学技術が多く、特に「量子コンピューティング」「AI」に関する科学技術を挙げる回答が多く示された。一方、第 11 回科学技術予測調査において挙げられた細目別に政策・制度設計支援技術、産業・ビジネス・経営応用、社会実装などについては、今回の調査では回答されていなかった。

3.5.2. アンケート結果

本分野では 138 件の注目科学技術が挙げられた。今回の調査を細目別に見ると、コンピュータシステムが 39 件、データサイエンス・AI が 45 件と多く見られた。一方、11 回調査で設定した細目、産業・ビジネス・経営応用、政策・制度設計支援、社会実装については、今回は関連する回答がなかった。また、138 件のうち、10 年未満に実現と回答された科学技術は 97 件 (70.3%) で、10 年以降に実現と回答された科学技術 41 件 (29.7%) を大きく上回った。

さらに、注目科学技術として回答件数が多い科学技術は「量子コンピューティング」であった。次いで、「AI」「データ」であった。AI・ビッグデータを解析する次世代コンピュータとして、量子コンピューティングの技術開発への期待が伺える。

図表 3.5.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(ICT・アナリティクス・サービス分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	IoT・ロボティクス	ソフトロボティクス、テレプレゼンスロボット、介護用ロボット、高度な遠隔操作を可能とする高精度ロボット制御技術、身体動作を拡張するテクノロジー技術、知能ロボット技術	ロボット点検化技術、パーソナルロボット、テレプレゼンスロボット、交通管制システム、無人農業、IoT を利用した精密農業、デジタルデバイスの全通信の無線通信、高齢者や軽度障害者支援するロボット機器、無人工場・無人店舗・無人物流倉庫・無人宅配搬送
2	インタラクション	ジェスチャインタフェース、スマートスピーカー、視線インタフェース、触覚再現、バーチャルリアリティ	身体共有技術、小型装着型デバイス、ポータブル会話装置、対話的なバーチャルエージェント(受付や案内)、バーチャルエンボディメント
3	コンピュータシステム	量子コンピュータ、量子アニーリング、誤り耐性量子コンピュータ、半導体量子ビット技術、低消費電力な情報処理、スーパーコンピュータ、ドメイン特化型コンピューティング技術、ブレイン・マシン・インターフェース、リザバールコンピューティング、光アクセラレータ、ニューロモルフィックコンピュータ	スーパーコンピュータ(並列化による大規模計算機システム)、ゲート型量子コンピュータ(量子回路)、量子ニューラルネットワーク
4	セキュリティ、プライバシー	証明可能安全性を備えたプライバシー保護技術、暗号認証方式、秘密計算(データを秘匿したまま計算処理できる技術)、量子暗号通信	個人認証システム、IoT セキュリティ技術、プライバシー管理技術、量子技術等に基づく新たな安全性のフレームワーク
5	データサイエンス・AI	統計的 AI と記号的 AI を統合した融合 AI 技術、敵対的生成ネットワーク(GAN)、ニューロモルフィックコンピューティング、説明可能な AI、データ駆動科学、デジタルトランスフォーメーション、	所望の情報を抽出できる自然言語処理技術、ヒトと違和感なくコミュニケーションが取れる対話技術、自然環境においてヒト以上の性能を持つ音声響認識・話者識別技

		ビッグデータ、自律的な思考が可能な人工知能、深層学習(ディープラーニング)、AI による構造最適設計	術、自然画像から所望の情報を抽出できる画像処理技術
6	ネットワーク・インフラ	テラヘルツ波デバイス技術、量子インターネット、量子テレポーテーションによる通信、ソフトウェア無線(SDR)、IOWN 構想	消費電力を飛躍的に削減する通信ネットワーク、大容量通信・端末間通信を実現する移動通信技術、大容量かつ高密度収容可能な光通信技術、量子通信、光通信技術
7	未来社会デザイン	完璧な言語翻訳機、AI と CG 技術の融合、VR 技術による会議システム、サイバーフィジカルシステム、遠隔人間支援技術、市民によるデータのクラウドソーシング	全ての経済取引を電子化する技術、映画音声のリアルタイム自動翻訳、AI による予算執行、秘書業務代替システム、ネット上の個人認証技術

本分野全体の注目科学技術の特徴として以下のことが示された。図表 3.5.2-1(A)「現在注目する科学技術」のワードクラウドより、量子・AI・計算・コンピュータなどのワードが多く回答されたことが示された。このことは、本分野の注目科学技術は、ICT分野に関する科学技術において、量子コンピューティング、AI が重要となっていることを示唆すると考えられる。

また、図表 3.5.2-1(B)「必要なブレイクスルー」のワードクラウドより、量子・データ・AI などのワードが多く回答されたことが示された。このことは、注目する科学技術と同様に量子コンピューティング、AI が重要となっていることが考えられる。

図表 3.5.2-2 アンケート結果のワードクラウド(ICT・アナリティクス・サービス分野)

(A) 現在注目する科学技術



(B) 必要なブレイクスルー



コラム：今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 量子コンピューティング

量子コンピューティングは、「量子ゲート型」といわれているものと「イジング(アニーリング、量子アニーラ)型」というものに大別できる。量子ゲートは、現在の汎用コンピュータの未来発展的な位置づけで、IBM やインテル、グーグルなどにより開発が進められており、万能な計算機と考えられているが、現時点では商用機は存在していない。量子アニーラは、東京工業大学の西森秀稔教授のグループで着想され、2011年にカナダの D-Wave Systems 社から商用機が販売され、NASA や LockheedMartin が導入

したことから、量子コンピュータが現実のものになったと考えられている。量子アニーラは、「組合せ最適化問題」を解くことに特化したコンピュータで、従来の汎用コンピュータの苦手とする計算領域のひとつを補完することができる。日本でも NEC のグループで開発が進められており、数年後に商用機をリリースすることが予定されている。他では、量子アニーラに着想を得てデジタル回路などで「組合せ最適化問題」に特化した計算機が、各社から提案されている。例えば、日立や富士通は CMOS デジタル回路にその機能を実装し、NTT と NII のグループは光パラメトリクス方式でその機能を実現し、東芝は今春突然この領域に参入した。このように「量子アニーラ」を中心に新しい計算機市場の覇権をかけ、国内の多くの企業が参入を開始している。

このようなコンピュータが、どのように役に立つのか、現在では未知数だが、例えば D-Wave のマシンは TEM-CT の画像構築に適用し、従来より少ないデータを基に 3D 画像構築を行っている。また、富士通は創薬分野への適用(分子構造の類似性検索)などへの適用を報告しており、日立は画像内のノイズを除去して鮮明な画像の構築に適用している。

② 人工知能(AI)

低消費電力で、高い演算能力を持つ人工知能を実現するための技術は、脳科学、デバイス、材料、プロセス・製造技術、回路、アーキテクチャ、ソフトウェア、センシングなどの多岐に渡る分野を融合することが必須である。既存のデバイス(GPU, DRAM 等)と専用のアーキテクチャ、ソフトウェア技術を用いて既に AI が実用化されているが、消費電力効率が悪く、今後 AI の応用を広げる上で深刻な課題となっている。また、現在の人工知能技術は、脳が持つ高い情報処理能力のごく一部を模倣できているにすぎず、より高い情報処理能力獲得に向けて研究の余地は大きい。

人工知能技術開発の日本の現状は、米国の GAFA や中国の Alibaba 等の企業、大学などにこの分野で大きく先行されている。AI 向けの低消費電力化、高い演算処理能力を実現するための研究開発の強化、対応できる人材の育成が国の喫緊の課題と考える。

③ データ

複数の計測手法で得られたデータ、さまざまな試料について得られたデータを一括して解析することで、従来の計測手法を活用するだけでは得られなかった情報を引き出す手法の開発。また、高度な計測手法による計測結果は、そこから十分に情報が引き出されていない場合が多く、再測定するよりも、既存の測定データを解析することで、これまでわからなかった情報が得られる可能性がある。

3.6. マテリアル・デバイス・プロセス分野

3.6.1. 要約

専門家ネットワークアンケートで提案された注目科学技術 983 件中、約 37%にあたる 362 件が第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査で設けたマテリアル・デバイス・プロセス分野に関連する科学技術であった。アンケートの「注目科学技術」の記述における頻出ワードでは、「材料」「光」「分子」「エネルギー」「利用」が多く、一方「ブレイクスルー」の記述における頻出ワードは、「材料」「光」「ブレイクスルー」「分子」「制御」「量子」「利用」「合成」「デバイス」「課題」が多かった。

「注目科学技術」の記述の頻出ワードである、「光」は分光(材料解析)、フォトニクス、光量子、光合成、光センシング・イメージングに関わるワードとして多く現れている。「分子」については、高分子、低分子、生体分子、単一分子など、「エネルギー」は、エネルギー消費及び省エネルギーと関わりが強い。「量子」では、量子コンピュータ・量子ビット、量子センシングに関わる記述が多かった。一方、「ブレイクスルー」の記述の頻出ワードでは、材料の構造あるいは物性の「制御」、材料の「合成」方法やそのコスト、「デバイス」化の課題に関する記述が多く、科学技術実現のためのブレイクスルーの示唆が得られた。

図表 3.6.1-□アンケート結果のワードクラウド(マテリアル・デバイス・プロセス分野)

(A) 現在注目する科学技術



(B) 必要なブレイクスルー



3.6.2. アンケート結果

「注目科学技術」の記述を読みキーワードを付与し分類・整理した結果、量子コンピュータ・量子ビット、量子センサ・センシング、水素製造・貯蔵・利用に関する科学技術の提案が最も多かった。次に、マテリアルズ・インフォマティクス(AI 含む)、全固体電池、光センシング・イメージングが多く、続いて、パワーエレクトロニクス・パワー半導体、二次元材料、次世代蓄電池(全固体電池以外)が多く挙げられている。これらは、当分野における科学技術のトレンドキーワードとして捉えることができる。第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査の当該分野のキーワードと比較し、特に基礎細目である物質・材料や先端計測・解析手法では前回調査で取り上げられなかったキーワードも多く、次期調査のトピック設定の際の検討対象の科学技術として、参考になると考えられる。

図表 3.6.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(マテリアル・デバイス・プロセス分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1	物質・材料	ワイドバンドギャップ半導体(パワエレ)、二次元材料、量子材料(マヨラナ準粒子、量子相関制御など)、セルロースナノファイバー、トポロジカル物質、ダイヤモンド、常温超電導、メタマテリアル、分子デバイス・分子ロボット、熱電材料、有機エレクトロニクス、自己修復材料、自己組織化材料	可塑性無機材料、ハイブリッド材料、リサイクル架橋性樹脂、導電性高分子材料、炭素系構造材料、パワー半導体、室温量子材料、熱電素子、電磁波吸収体、リサイクル成形材料、圧電素子
2	プロセス・マニュファクチャリング	3D,4D プリンティング、デジタルマニュファクチャリング、ラボオートメーション、レーザー加工、半導体微細加工、異種接合、自己組織化テンプレート、エアロゾルデポジション	マスカスタマイゼーション、4D プリンティング・4D マテリアル、半導体ファブシステム、オンデマンド生産、付加製造技術(3D プリンティング)、暗黙知のアーカイブ化、マルチマテリアル加工、形状・材料同時加工、ニアネットシェイプ技術、メタマテリアル加工、低環境負荷精錬技術、超精密プロセス技術
3	計算科学・データ科学	マテリアルズ・インフォマティクス(AI含む)、AI材料設計・合成、シミュレーション(量子)、AI&ロボット材料探索・合成	マルチスケールシミュレーション、プロセスシミュレーション、逆問題、マルチフィジックスシミュレーション、スーパーコンピュータ、特性・機能・劣化予測、複合材料・高次構造、マテリアルズ・インフォマティクス、データ同化、人工知能、特性データベース、プロセスデータ
4	先端計測・解析手法	散乱光イメージング、室温高感度磁気センサ、X線自由電子レーザー、光音響イメージング、レーザー応用、計測 X データ科学、デジタルツイン、トライブロギー計測、表面増強ラマン散乱、表面温度計測	時空分解解析、リアルタイム三次元可視化、固体欠陥解析、オペランド(実働環境)解析、触媒反応素過程解析、実時間解析、磁気構造解析、ナノ計測、界面計測、マルチスケール解析、データ駆動型計測、マイクロ・ナノマシン
5	応用デバイス・システム(ICT・ナノエレクトロニクス分野)	量子技術(量子コンピュータ・量子ビット、量子センサ、室温量子材料、量子インターネット・量子暗号)、テラヘルツ技術、光・エレクトロニクス融合、スピントロ・フォトニクス融合、新材料(ダイヤモンド、GaO)トランジスタ、ペインタブルエレクトロニクス、有機半導体レーザー、トリリオンセンサ、ウェアラブルデバイス	超小型ヒューマン・マシン・インターフェイスデバイス、フレキシブルトランジスタ、大容量・高速不揮発メモリ、単一スピン情報素子、単一光子、モノシク三次元集積 AI チップ、量子コンピュータ・シミュレータ、量子イメージング、量子通信素子、量子センサ・メモリ、高度 VR システム、微細アンテナ・微小通信機
6	応用デバイス・システム(環境エネルギー分野)	水素製造・貯蔵・利用・燃料電池・電極触媒、全固体電池、人工光合成、アンモニア利用・合成、アップコンバージョン材料、太陽電池、熱電・熱発電素子、磁性熱電効果、プラスチック分解、蓄電技術、エネルギーハーベスティング、CO2 資源化、リチウム金属電池、高電圧水系電池、原子力電池、環境浄化技術、プラズマ触媒、メタン直接還元、排熱回収、資源循環	太陽電池、大容量高出力電池、燃料電池、エネルギーハーベスト、水素社会、再生可能エネルギー、スマートグリッド、CO2 再資源化、光還元触媒・人工光合成、膜分離技術、有害元素除去
7	応用デバイス・システム(インフラ・モビリティ分野)	宇宙エレベータ素材、自己修復材料、ナノ表面防食、高強度ポリマー、CO2 からの燃料合成、核融合技術、超電導コイル・モーター	簡便接合技術、金属・非金属ハイブリッド構造材料、超長寿命耐食材料、リアルタイムモニタリング、構造物健全性評価、自己修復機能材料、3D プリンター製造用素材、水素キャリア、自動運転、高速道路送電網、非接触受給電
8	応用デバイス・システム(ライフ・バイオ分野)	光センシング・イメージング、生体適合材料・バイオマテリアル、量子センシング、ウェアラブルデバイス、生分解性高分子、3D 培養・細胞シート、身体拡張技術、自己修復材料、ナノロボティクス、生体模倣、タンパク質大量生産	人工食材・フードプリンタ、ソフトマターロボティクス、バイオミメティクス・ナノマシン、ウェアラブルデバイス、インプラントラブルデバイス、バイオマテリアル、3D バイオプリンティング、バイオファブリケーション、バイオイメージング、光・量子計測・センシング、バイオデグラダブル、生体内センサ

コラム: 今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 量子ビット、量子センサ

当分野において最も多く挙げられた注目科学技術が、量子情報・量子生命などの量子科学技術で 33 件あり、中でも量子ビット、量子センサに関する科学技術が 18 件と多かった。ゲート方式(万能、誤り耐性)量子コンピュータ向けの量子ビットを生成する量子デバイスでは、主にジョセフソン接合を利用した超伝導素子や半導体(Si)素子の研究開発が進んでいる。量子コンピュータの実用化には、100 万量子ビット超が必要とされそのためのデバイス集積技術や、また量子状態を発現・保持するために極低温環境が必要であり、極低温デバイス実装技術が重要となる。さらに、極低温を必要としない室温動作素子材料(温度や光の影響を受けない材料)としてダイヤモンド NV(窒素-空孔)センタの開発や、光通信とのコンパチブルが実現でき効率の向上が期待できる光量子ビットの開発が挙げられた。量子センサでは、ダイヤモンド NV センタを利用した、高感度で小型化・室温動作可能なセンシングデバイスによって、超高感度 NMR, MRI の実現が可能となる。さらに量子センサのアプリケーションとして、人間の脳の動きをモニタリングできる携帯型スキャナや、生物の細胞や神経信号レベルの挙動をリアルタイムかつ低侵襲での計測が挙げられた。また、多機能センシングとして、光・熱・磁性などの多様な量子情報を高感度・高分解能にセンシング、情報処理し、アウトプットできるデバイスを、既存の集積回路技術に混載することで、省電力・小型・高速・多機能な知覚デバイス実現が期待できる。

② マテリアルズ・ロボティクス

米国のマテリアルゲノムを起点に、世界で様々な材料を統合するデータベースを構築・利用するマテリアルズ・インフォマティクス(MI)が注目されている。アンケートでは MI に関して 7 件、一方 AI による材料の自動合成に関するものが 5 件あり、全世界的なデータ収集の構築とそれによる新触媒開発や、AI を適用した有機材料の分子探索と自動合成への技術の発展の方向性が示されている。また更なる方向性として、ロボットとAIが協調して実験を繰り返し、新材料を見つけるシステム「マテリアルズ・ロボティクス」が挙げられている。

③ 3D,4D プリンティング

一般的に 3D プリンティングとして知られるアディティブマニュファクチャリング(付加製造)が、工業製品や研究開発ツールあるいはパーソナルファブ리케이션として普及している。3D デジタルデータを基に 3D プリンターにより立体物を造形する付加製造技術を適用したデジタルファブ리케이션は、デザインとプロセスの融合による新規構造・形態の創出、そして形状・プロセスデータをオープンソースとしてインターネット上で共有できるなど新たな価値創造が期待されている。近年このデジタルファブ리케이션の新たな展開として、知能材料(スマートマテリアル)を用いて、3D プリンターによって造形することで作製後に外部刺激により自発的に形状を変化することができる 4D プリンティングが注目されており、アンケートでも複数の意見が寄せられた。材料・製造分野のデジタルトランスフォーメーション(DX)を加速する高いポテンシャルを有するデジタルファブ리케이션・4D プリンティングは、マテリアルと製造技術のデジタル統合に寄与する基幹科学技術として注目される。

3.7. 都市・建築・土木・交通分野

3.7.1. 要約

今回の調査で挙げられた本分野の注目科学技術の件数は39件であり、他分野に比較すると比較的少ない結果となった。ただし、専門家ネットワーク自体の元々の専門分野として本分野に対応する専門調査員は比較的少ないことを考慮すると、次期科学技術予測調査への示唆を得る上では十分数であると考えられる。

3.7.2. アンケート結果

本分野では39件の注目科学技術が挙げられた。第11回科学技術予測調査と今回調査を比較すると、i-Construction等の建築現場におけるAI技術の活用、再生可能エネルギーやグリーンインフラ等の環境問題の対応、防災・減災等が挙げられた。また、自動運転やロジスティクスの自動化については比較的多く提案があった。

図表 3.7.2-1 今回調査の科学技術キーワード等(都市・建築・土木・交通分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11回でとりあげたキーワード
1	国土利用・保全	ドローン等による画像による写真測量(SM)・レーザ測量(LiDAR)、衛星リモートセンシングによる潮流・潮位の計測と変動の予測、地理的な犯罪予測	環境、エネルギー、水資源、治水、観光、海洋・海岸、地下、土砂、モニタリング
2	建築	建設分野におけるデジタルツイン、建築現場への3Dプリンタの導入、木質系材料のマテリアルサイクル	安全、健康、利便、快適、建築、スマート、ワークスペース、住宅、室内環境、海洋&宇宙、新木造&新素材、省・創・蓄エネ
3	社会基盤施設	光センシングによる構造物のヘルスマニタリング技術、光ファイバを用いた巨大構造物の形状モニタリングシステム	設計、施工、維持管理、制御、新材料、新構造、環境、情報技術、ロボティクス、保守、インフラセンシング、点検・診断、修復・再生
4	都市・環境	ゼロエミッション・シティ、機械学習等を元いた観測データの自動解析による環境変化アセスメント、都市下水中に含まれる微量物質をリアルタイムに計量する超高感度センサー	環境アセスメント、都市計画、地理情報、合意形成、人口減少、住宅地、上下水道、スマートシティ、コンパクトシティ、グリーンインフラ
5	建設生産システム	i-Construction、BIM/CIM	生産性革命、i-Construction、BIM/CIM、設計・施工・管理一貫データ、ロボット、ドローン、センサー、電子地図、AI、プレキャスト、自律施工
6	交通システム	MaaS (Mobility as a Service)、超伝導直流送電、ソリッドステート LiDAR、MR 技術を活用した屋内ナビゲーションシステム	道路、公共交通、ロジスティクス、交通情報、自動運転、移動支援、交通マネジメント、インターモーダル、ダイナミックマップ、道路利用料金、ドローン
7	車・鉄道・船舶・航空	自動運転、ロジスティクスの完全自動化、様々な機器や構造物の自律化、自律配送ロボット、レジリエントでサプライチェーン指向の輸送システムの形成	自動車交通、鉄道交通、船舶輸送、航空輸送、安全技術、自動化・無人化、低公害化・省エネルギー化、低コスト化、効率化・高速化、輸送システム
8	防災・減災技術	グリーンインフラ、生態系を活用した防災・減災(Ecosystem-based disaster risk reduction; Eco-DRR)、災害状況の正確な把握や予測に関する科学技術、斜面	流域管理技術、地震被害リアルタイム判定技術、洪水予測、応答制御、アクティブ制御、構造設計、洪水対策、干ばつ対策、液状化対策

		崩壊・地すべり高リスクエリアの数値化	
9	防災・減災情報	森林火災防止のための高精度シミュレーション技術、災害状況の正確な把握や予測に関する科学技術、住民に情報を迅速・的確に伝え行動を促す技術、災害救助技術(コンクリートの破壊技術)	防災情報システム、災害予測、センサー、被害把握、リアルタイム、防災行動、避難、SNS、IoT、情報分析、シミュレーション

本分野全体の注目科学技術の特徴として以下のことが示された。図表 3.7.2-1 (A)「現在注目する科学技術」のワードクラウドより、自動運転や予測などのワードが多く回答されたことが示された。上述の

①～③に示したように、インフラ分野のDXが加速している事が伺える。また、(B)「必要なブレイクスルー」を見ると、コストのワードが目立つ。他の分野に比べてもコストについては特に目立ち、喫緊の課題であることが伺える。

図表 3.7.2-2 アンケート結果のワードクラウド(都市・建築・土木・交通分野)



コラム: 今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 自動化及び AI やデジタルツインの活用

コロナ禍への対応もあり、デジタル社会への移行がすでに実社会で進行している。今回調査ではそれに関連した技術についての回答が多く見られた。

具体的には、AI、デジタルツイン、BIM/CIM、3D プリンター、MR (Mixed reality; 複合現実)、MaaS (Mobility as a Service)、自動運転、ロジスティクスの完全自動化、自動車以外にも自律化、自律配送ロボット、5G、空間情報を活用したインフラ制御、巨大構造物モニタリング、第一次産業の効率化、都市下水による健康モニタリングなどが挙げられる。

② 環境問題・地球温暖化等への対応

今回調査では、省エネルギー・再生可能エネルギー等の環境に配慮した技術についての回答が多く見られた。地球温暖化抑制については、技術開発促進の観点も含めて政府の方針として提示されたこ

ともあろうが、近年の豪雨災害の頻発化・激甚化も回答者に現実的な課題として認識されている可能性が考えられた。

具体的には、省エネルギー、再生可能エネルギー、ゼロエミッションシティ、木質系材料のマテリアルサイクル、デジタルアーカイブや機械学習等を元いた観測データの自動解析による環境変化アセスメント、衛星リモートセンシング、気候変動予測、災害シミュレーション、生態系を活用した防災・減災技術、森林火災防止のための高精度シミュレーション技術などが挙げられる。

③ 豪災害や巨大地震への対応

豪雨災害や巨大地震対応技術についても複数の提案が見られた。毎年の豪雨災害や、大地震発生時等、災害を契機として再認識されている可能性がある。また、直接的に災害を軽減する技術の他、災害による社会への影響を最小とする技術についても着目されている。

具体的には、災害状況の即時把握や予測、住民に情報を迅速・的確に伝え行動を促す技術、高リスクエリアの数値化、リスクの共有化、災害救助技術(コンクリートの破壊技術)、レジリエントな物流輸送ネットワークやサプライチェーンなどが挙げられる。

なお、これらの課題や技術は、個別に対応するものではなく相互に関連している。例えばデジタル技術を活用した地球温暖化制御や、それによる防災・減災等。技術ツールであるデジタル技術と、解決すべき課題としての地球温暖化や災害という面もあり、異なる軸ともいえる。

これらを含めた最新の動向等については、例えば社会資本整備審議会・交通政策審議会 技術部会・第24回技術部会⁷や、国土交通技術行政の基本政策懇談会⁸において、幅広く議論されている。

デジタル革命の加速については、国土交通省内に、技監をトップとする「国土交通省インフラ分野のDX推進本部」⁹が設置され、3回本部会議での議論を経て施策一覧をとりまとめられる¹⁰。

カーボンニュートラル実現に向けた動きについては、グリーン社会の実現に向けた国土交通省環境行動計画等の改定に向けて、社会資本整備審議会環境部会・交通政策審議会交通体系分科会環境部会において、議論が行われている¹¹。第36回合同会議において、当該資料1-2で国交省における地球温暖化緩和策の取組概要、資料1-2で国交省における気候変動適応策等の取組概要が紹介されている。また、社会資本整備審議会・交通政策審議会 技術部会にグリーン社会ワーキンググループが設置され、今後の技術政策の方向性の議論が開始されたところである¹²。

7 資料3のP3で最近の変化、P4で検討の視点例の記載がある。

https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kanbo08_sg_000240.html

8 https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s204_kokudokotsugijutsugyousei01.html

9 https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000073.html

10 <https://www.mlit.go.jp/common/001385990.pdf>

11 https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/sogo10_sg_000146.html

12 https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s204_greenwg.html

3.8. 宇宙・海洋・地球・科学基盤分野

3.8.1. 要約

専門家アンケートで挙げられたキーワード例を図表 3.8.1-1 及び図表 3.8.1-2 に示す宇宙、地震、観測、計測、データ、X 線、光が頻出ワードとなっており、スケールや捉え方の違いはあるが、第 11 回調査に類似する事項が散見される。比較的多く挙げた事項は、月・火星探査、宇宙エレベータ、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙太陽光発電、海底資源、環境 DNA、DAS、気候変動モデル、社会シミュレーション、高強度・超高速レーザー、軟 X 線分光、光格子時計等である。

本分野は、長期的視点で継続的に取り組む基盤的分野であること、国の資金が投入される大型プロジェクトを多く含むこと等から、計画途上あるいは実施途上にある研究開発が多く挙げられており、新規性や斬新性は比較的低い。継続的に取り組むことにより着実な進展が得られるテーマを中心としつつも、その中で不確実性の高い挑戦的なテーマをどのような形でどの程度取り込んでいくかの工夫が求められる。

図表 3.8.1-1 今回調査の科学技術キーワード等(宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)

	細目	今回のキーワード	(参考)11 回でとりあげたキーワード
1	宇宙	宇宙探査(月、火星)、宇宙利用、宇宙用エレクトロニクス、有人探査、太陽系外惑星、宇宙環境計測、宇宙エレベータ、宇宙用核分裂発電、宇宙エネルギー伝送、宇宙太陽光発電、水資源探査、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)、宇宙線ミュオン	再使用型輸送系、地球外天体における有人拠点、太陽系探査、国土の高精度監視、測位、デブリ除去、月資源、恒星系、銀河系、重力波、宇宙線※、宇宙物理※、量子重力※、宇宙の反物質※、ダークマター※、ダークエネルギー※、インフレーション※、元素合成※ ※素粒子・原子核、加速器にも関連
2	海洋	海底・海洋資源、海洋深層、アルゴフロート、海洋底質環境、生分解性海洋性プラスチック、洋上大容量高速通信、環境 DNA	海洋環境、温暖化、海洋生態系、生物多様性、生物生産、海洋調査/深海探査、海洋/海底資源、極域
3	地球	地震電磁気観測、DAS (Distributed Acoustic Sensing)、地震予測・即時津波予測統合	地殻変動、地震、津波、火山、水・土砂災害、地すべり、地球深部
4	観測・予測	データ同化、数理モデリング、高解像度気候モデル、水循環解析、データ取得・転送、地球環境・資源・自然災害・農作モニタリング、海面高度計測、潮流・潮位計測・予測、リモートセンシング、市民観測	陸域、植生、大気、海況、気象、モデリング
5	計算・数理・情報科学	数理モデリング、シミュレーション、因果構造推定、多様性解析、気候変動シミュレーション、社会シミュレーション(集合行動・政策効果等)、計算代数位相幾何学、ベイズ推定	シミュレーション、アルゴリズム、気象・気候変動予測、防災・減災解析、ものづくり設計、社会現象予測
6	素粒子・原子核、加速器	高勾配電子加速器、レプトン加速器 (ILC) (宇宙科学関連は、細目「宇宙」に統合)	素粒子、原子核、宇宙線※、宇宙物理※、加速器、量子重力※、宇宙の反物質※、マヨラナニュートリノ、ダークマター※、ダークエネルギー※、インフレーション※、元素合成※ ※宇宙にも関連
7	量子ビーム：放射光	超高速・超高強度光科学、高輝度軟 X 線、軟 X 線分光 (RIXS、発光)、X 線自由電子レーザー (XFEL)、ランダムレーザー光源、イベント駆動型イメージセンサ、非晶性物質回折イメージング、分子軌道対称性判別、メゾスケール高分子材料構造評価	高分解能軟 X 線分光(吸収、発光)、オペランド計測、省コスト超高輝度放射光源、高速高解像度 X 線 CT 顕微鏡、コヒーレント回折イメージング、分光イメージング、高時間分解タンパク質構造解析、タンパク質 1 分子 X 線構造解析、時空間階層構造解析、高速・高感度 2 次元 X 線検出器、ナノ結晶構造解析、高分解能非弾性散乱

8	量子ビーム: 中性子・ミュ オン・荷電粒 子等	核変換技術、遺伝子融合	偏極中性子局所磁気構造・励起測定技術、3 次元応力・ひずみ・磁場分布観測、ナノ深さ磁気状態解明、偏極陽電子表面構造・磁気状態観測、複数量子ビーム利用解析・加工技術、放射性同位元素大量・安定製造技術、量子ビーム突然変異獲得技術、微細構造 3 次元可視化計測技術、未踏領域の核データ取得技術、ミュオン顕微鏡、ミュオンイメージング技術、ストロボスコピック測定技術、オペランド測定技術
9	光・量子技術	光格子時計、デュアルコム分光、ランダムレーザー、光音響イメージング、オールフォトニクス・ネットワーク、光渦、高強度・超高速レーザー、量子コンピュータ、量子センサ、NV センター、量子ビット、コヒーレンス、量子暗号、光量子コンピュータ	量子情報科学、量子コンピュータ、量子暗号、超高精度光量子計測、レーザー光源開発(大出力、広帯域、短パルス等)、次世代レーザー加工、光積層造形、超高速大容量光通信、超高解像度顕微鏡光変調技術、超高感度光検出技術、光測距技術、レーザー医療技術

図表 3.8.1-2 アンケート結果のワードクラウド(宇宙・海洋・地球・科学基盤分野)



以降では、前述の分野特性を踏まえた上で、細目ごとの状況を概説する。ただし、細目「光量子技術」については、マテリアル・デバイス・プロセス分野において「量子」が頻出ワードとなっていることから、ここでは省略する。また、細目「観測・予測」については、その対象や手段に応じて、宇宙、海洋、地球の各細目の中で記述する。

(1) 宇宙

宇宙関連では、システム系技術としては、「月・火星探査」、「再使用型輸送」、「衛星コンステレーション」、「地球低軌道活動」、及び「地球観測衛星データ活用」が、個別技術としては、「電力・電源系技術」及び「3D プリンティング」が注目される。

月探査については、アルテミス計画や国際科学月ステーションの中露協力合意などが進み、火星探査については、各国が無人探査機を送り込んでいる。月面探査に向け、輸送システム、着陸技術、探査ローバ、生命維持装置、遠隔医療等の技術開発が進行している。

再使用型輸送系については、将来の完全再使用型への移行を目指して、1 段ロケットの再使用化を実現した米国 SpaceX 社を始めとする各企業が開発を行っている。帰還技術、再整備技術、エアブリーディングエンジン、耐熱・熱制御などの技術開発が進行中である。

衛星については、多数の衛星を中低軌道の上に配置するメガコンステレーションの動きが活発で、併せ

て、打ち上げのためのロケット開発やデブリ対策技術開発が進められている。

地球低軌道活動については、ISS 利用が民間に移行し、宇宙旅行、教育、エンターテインメント、実験などのサービス展開が予想される。輸送技術、拠点技術、環境制御等滞在技術、運用技術等の要素技術開発と合わせて、ビジネスモデルの構築が必要となる。

気象変動予測については、観測センサの高性能化、雲やエアロゾルの全球観測の研究開発が進行中であり、解析・シミュレーション技術の進展と合わせ、予測精度向上が期待される。また、一般へのリアルタイムデータ提供サービスにむけた検討も進んでいる。

個別技術のうち、電力・電源系については、軽量化が重要であり、薄膜太陽電池セルを用いた超軽量太陽電池パドル、小型燃料電池、原子力電池が注目される。3D プリンティング(金属積層造形技術)については、エンジン用部品、ロケット全体への適用、月面基地建設に向けた検討が進められており、将来的には、月や火星において現場の資源を利用した製造の可能性も考えられる。

(2) 海洋

全体的には、大型プロジェクトの今後の方向性を示す内容が多い。海洋と環境を結び付けて考える時代になっており、社会的影響が大きいテーマが注目される。今回提案された中で新規性の観点から注目されるテーマとしては、「光ファイバケーブルを活用した地震・海洋観測」が挙げられる。

新規性はないが注目されるテーマとして、「洋上通信網の整備」がある。自動観測の拡大や船舶運航制御・管理など応用範囲が広く、ブレイクスルーをもたらす可能性がある。例えば、観測精度向上により情報量が増大しても、それを陸上まで送る通信網がなければ使えない。また、陸上と同様に海上でも無人運転を目指すとなれば、通信網が鍵となる。そのほか、「環境 DNA」についても進展が注目される。DNA チップが小さくなって応用が広がり、アルゴフロートにセンサをつけることも提案されている。

(3) 地球

地震観測の新しい方法がいくつか挙げられている。前項「海洋」で取り上げた、光ファイバケーブルを活用した地震観測は、欧米で盛んに研究されており、有望な技術と言える。人工衛星を使った観測は、地震の前に電離層に変化があるという前提の下に電離層の変化の情報を得ようとするものであるが、メカニズム解明に至っていない。ミュオンを用いた観測については、現状の利用とはスケールが異なるため不明な点が多い。対象物より深い所での観測が必要となるため、活断層の下で観測できるかどうかは課題である。南海トラフ地震の発生予測と即時津波予測を統合したシステム開発については、観測システムを作るだけでなく、避難に結び付けることが重要であり、人流や交通との連携が求められる。

最近の研究開発の成果報告も踏まえ、注目されるテーマとしては、「地震発生履歴把握に基づく地震発生可能性評価の高度化」が挙げられる。

(4) 計算・数理・情報科学

全体的に範囲を絞った内容が多いが、シミュレーション、AI、観測・計測、実験等の融合、計算基盤技術と応用技術との相互作用など、関連する領域の発展が相互にプラスに働いて全体として発展することが大きな注目点である。

具体的な応用例としては、タンパク質の動的シミュレーションによる予測を創薬・抗体作成に結び付けたパーソナルメディスン、人間の代謝のシミュレーション、第一原理計算・AI・ビッグデータを使った計算の統合、デジタルツイン、災害シミュレーションとデータ同化を合わせた解析と避難指示などが挙げられる。萌芽的な領域としては、社会経済現象のシミュレーションが注目される。一方、基盤となる計算の高速化も注目される。高速化がゲームチェンジャーになり、イノベーションを起こす。

社会シミュレーションも一部関係するが、今後 10 年、20 年にわたるグランドチャレンジとして、広義の感染症学が注目される。

(5) 量子ビーム

全体的に、第 11 回調査ですでに取り上げたもの、取組が開始されている内容が多い。新規性には欠けるが、それぞれ注目されるテーマである。

注目されるテーマとして、一つは、実験と計算科学による生体高分子の構造をベースとした基礎研究があり、ハードと計算科学の融合により原子レベルでの理解が深まることが期待される。二つ目は、イベント駆動型イメージセンサである。イベント駆動型とはインテリジェントなディテクタであり、データ量を大幅に増やすことなくマルチスケールの計測を実現するための要素技術として今後の発展の余地が大きい。三つ目は、非晶性物質の回折イメージングである。進行中であるが、引き続いての発展が期待される。

注目される今後の方向性として、情報計測(計測と情報科学)とオペランド計測が挙げられる。

コラム: 今回調査の特徴的科学技術

専門家からの意見の中で、本分野における特徴的科学技術の例を挙げる。

① 衛星メガコンステレーション

衛星メガコンステレーションとは、多数の小型衛星を中低軌道に配置し、通信、インターネットサービス、地球観測などを実現させるものである。

現在、One web 社や SpaceX 社 Star Link を始め数社の計画が進行中である。併せて小型衛星打ち上げ需要拡大に伴う民間のロケット開発も盛んになり、1 回に数十機の衛星が打ち上げられている。一方、多数の衛星を打ち上げることによりデブリ問題が浮上するため、商用デブリ除去サービスも計画・開発中である。

今後、衛星メガコンステレーションによる各種サービスが運用段階に入り、どこでも便利なサービスを受けられるようになると予測される。実現に向けた課題は、運用や通信のインフラ整備である。どのような形でサービスを提供していくのか、ビジネスモデル構築が求められる。

② 光ファイバケーブルを活用した地震・海洋観測

道路下や海底に敷設された光ファイバケーブルを用いて振動を計測する技術で、分散型音響計測(DAS: Distributed Acoustic Sensing)と呼ばれる。

未利用ケーブル(ダークファイバ)を用いた地震動の計測や、海底ケーブルを用いて海底の地震動を計測する研究が進められている。通常の地震計では点で振動を捉えるのに対し、面的に情報を得られるという特徴がある。将来的には、地震計の代替となるかもしれない。

海洋音響や水温など、海洋観測応用に向けた研究も進められている。光ファイバで供給可能なレベルの消費電力のセンサが開発されれば、海流計測など係留系を代替できる可能性がある。海洋音響の研究は緒に就いた段階だが、ケーブル敷設箇所近傍を通る船舶や生物が分別できる可能性がある。AI と組み合わせることにより振動から生物種が特定されれば、生態系変化のモニタリングも可能となる。海峡にケーブルを敷設すれば、海峡を通過する生物や船舶の輻輳などのモニタリングが可能となる。

③ 地理・地質・化学・海洋ボーリングの統合データを基にした過去の地震発生履歴把握による地震発生可能性の長期評価の高度化

現在の地震発生可能性の長期評価は活動履歴に基づいているため、過去の大地震発生履歴を正確に知ることができれば、長期評価の高度化に直結する。古文書のほか、大地震の発生域での大深度ボーリングによる沈み込み帯の震源断層調査や、過去のプレート境界における大地震により隆起した海岸段丘の地理・地質・化学的調査を行うことにより、古文書より古い活動履歴や、古文書に記載のない活動履歴も把握することができる。近年、津波堆積物の化学的解析が第三のアプローチとして注目されている。ただし、地形変化など他の情報と合わせて地震による津波なのか台風の大潮による津波なのかを判断が必要である。

このように、様々なアプローチを組み合わせることにより、大地震発生履歴の詳細な把握が可能となる。今後の課題としては、技術の汎用化、適用事例の拡大、大深度掘削コスト削減などが挙げられる。

④ 学際領域としての感染症学

医学、情報科学、社会科学などを含む、総合的・学際的な領域としての感染症学が注目される。なぜ感染症が起こるのか、どのような過程で感染するのかなど、判明していないことも多い。富岳による飛沫飛散シミュレーションは取り掛かりの一つである。

今後は、シミュレーションと実験を組み合わせ、感染のメカニズムを定量的に明らかにし、モデルやパラメータを設定して予測を行うことが想定される。それは、より早いワクチン開発や薬の開発にも繋がる。

⑤ オペランド計測と情報計測

計測の方向性として、オペランド計測と情報計測が注目される。いずれもすでにプロジェクト化されており新規性はないが、引き続き注力することが求められる。

オペランド計測とは、実環境で動作中の計測を行うものである。時間分解能や空間分解能を高めることを目指す先端計測と合わせ、測定される対象と測定装置とをマッチさせ、何を計測したいのかに焦点を合わせて最適化した装置を組むことも重要な観点である。

情報計測とは、「情報×計測」の造語である。計測対象の特徴量解析やデータ同化など、計測に情報科学を持ち込んで融合させ、様々な分野への応用を目指すものである。

4. 結果②：引き続き注視すべき科学技術事例

前章では、アンケート結果から得られた新規キーワードの抽出を行うとともに特徴的科学技術を概説した。また、第11回調査トピックと類似するキーワードも多く見られたが、第11回調査との類似が見られたか否かに関わらず、全ての提案が今後の動向調査について貴重な示唆である。

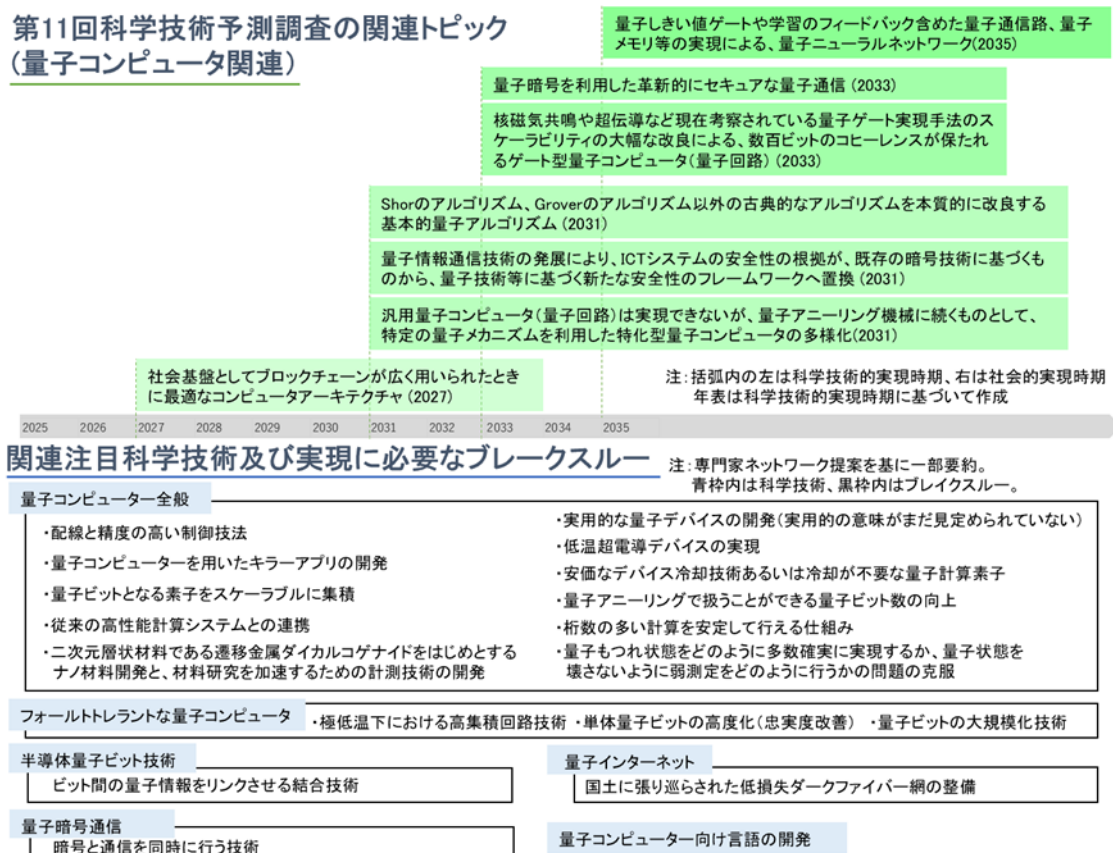
他方でこれらの類似キーワードは、第11回調査でも取り上げられていることから、次回調査に向けて引き続き注視すべき科学技術であることを示していると考えられる。そこで本章では、比較的多くの類似回答が見られた事例を取り上げ、その発展の方向性やブレイクスルーの要件を整理する。このような第11回調査トピックとの類似が見られた事例は、次回科学技術予測調査において、第11回調査トピックを再度調査対象とすべきか否か、内容を修正すべきか否か等の検討に示唆を与えるものと考えられる。

4.1. トピックと類似する提案が多く得られた事例(量子コンピュータ・AI)

本節では、高い注目度から第11回調査において多くのトピックが設定され、今回のアンケート調査においても特に多くの類似回答が見られた量子コンピュータ及びAIについて取り上げる。

図表 4.1-1 に、量子コンピュータ関連技術について、上段に関連するトピックの年表(科学技術実現時期)、下段に専門家ネットワークによる注目科学技術及びその実現に必要なブレイクスルーを示す。

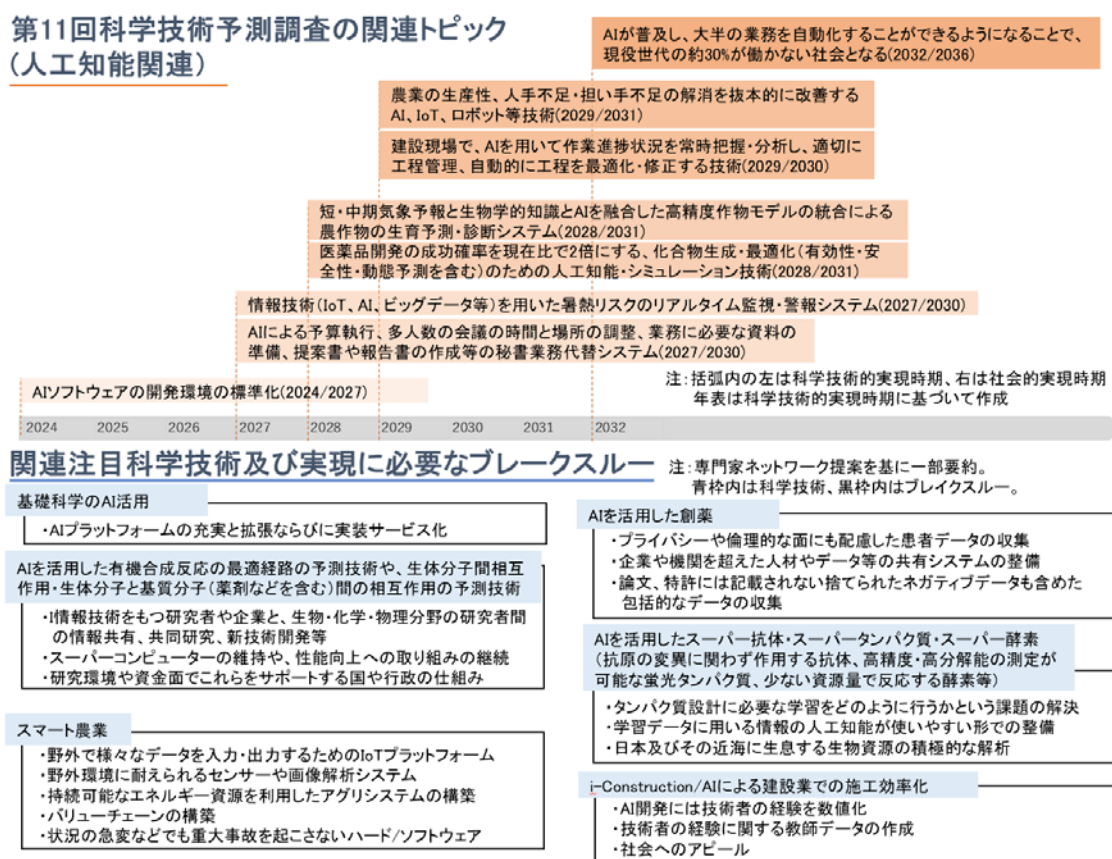
図表 4.1-1 第11回調査トピックと類似する提案が多く得られた事例(量子コンピュータ)



量子コンピュータ及びその関連トピックは第 11 回調査においても複数のトピックで取り上げていた。第 11 回調査の結果では、基本的量子アルゴリズムの科学技術的実現が 2031 年であり、量子ニューラルネットワークが 2035 年に実現するとされている。専門家ネットワークアンケートにおいても量子コンピュータは幅広く提案され、量子暗号技術、量子インターネット、量子コンピュータ向け言語の開発などが挙げられた。これらの提案は第一に現在の注目トレンドとして重要であるのに加えて、次期科学技術予測調査への示唆として、今後のトレンド把握として「実現に向けたブレイクスルー」も特に重要な意味を有する。量子コンピュータにおける低温超電導デバイスの実現や、量子インターネットにおける低損失データファイバー網の整備等の重要な示唆が多数得られた。

次に、図表 4.1-2 に、人工知能(AI)関連技術について、上段に関連するトピックの年表(科学技術実現時期)、下段に専門家ネットワークによる注目科学技術及びその実現に必要なブレイクスルーを示す。

図表 4.1-2 第 11 回調査トピックと類似する提案が多く得られた事例(AI)



AI 関連トピックは第 11 回調査においても複数のトピックで取り上げていた。第 11 回調査の結果では、AI ソフトウェアの開発環境の標準化が 2024 年であり、農業の人出不足等を解消する AI・IoT・ロボット技術が 2029 年に実現するとされている。専門家ネットワークアンケートにおいても AI 関連技術は幅広く提案され、基礎科学の AI 活用だけでなく、AI を活用した創薬やスマート農業などが挙げられた。これらの提案は第一に現在の注目トレンドとして重要であるのに加えて、次期科学技術予測調査への示唆として、今後のトレンド把握として「実現に向けたブレイクスルー」も特に重要な意味を有する。スマート農業におけるバリューチェーンの構築や、AI を活用した創薬におけるネガティブデータを含む包括的データ収集等、今後のさらなるホライズン・スキャニングへの重要な示唆が多数得られた。

4.2. トピックと類似する提案が複数得られた事例

今回調査では、量子コンピュータ、AI 以外にも、第 11 回調査トピックと類似する提案が複数得られた事例があった。それらの結果を図表 4.2-1 に示す。これらについても、注目トレンドとしてだけでなく、その実現に向けたブレイクスルーは今後のホライズン・スキャンニングにおける重要な示唆である。

例えば、タンパク質立体構造の推定における AI が学習したものから逸脱した立体構造をいかにして予測するか、人工細胞における増殖能力を持つ細胞など、第 11 回調査で取り上げたトピックについて今後注視すべき動向が多数得られた。それらのトピック一覧を以下に示す。括弧内はそれぞれ、左は科学技術的実現時期、右は社会的実現時期を示す。

-
- ・タンパク質の一次配列情報およびそのタンパク質に作用する物質の立体構造情報から、活性状態のタンパク質の動的立体構造を推定する技術(2029/2033)
 - ・レベル 5 の自動運転(場所の限定なくシステムが全てを操作する)(2034/2034)
 - ・環境 DNA を利用した生態系の理解と解析を援用した希少種の保存・管理技術(2028/2029)
 - ・光をほとんどあてずに測定する被写体(生体)にダメージを全く与えない、量子もつれを利用したイメージング技術(2035/2038)
 - ・細胞の位置情報を保持した上での 1 細胞オミックス解析技術する技術(2028/2030)
 - ・多数で多種類の生体分子が協働して生命システムを作り上げる作動原理を理解した上での人工細胞(2034/2039)
 - ・動物の胚とヒト幹細胞由来細胞のキメラ胚(動物性集合胚)から作出されるヒト移植用臓器(2031/2035)
 - ・統合失調症の脳病態解明に基づく、社会復帰を可能にする新規治療薬(2035/2039)
 - ・細胞の位置情報を保持した上での 1 細胞オミックス解析技術する技術(2028/2030)
 - ・高齢社会を意識したフードミックスの考え方に基づく多様な機能性食品(2027/2029)
 - ・作物の可食部・カイコ・ウシやヤギの乳に、医薬や機能性高分子を効率的に産生させる技術(2027/2030)
 - ・世界の様々な環境に適応した野生種のゲノム編集による栽培作物化(ネオドメスティケーション)(2027/2032)
 - ・生殖細胞劣化予防による不妊回避(2032/2035)
-

図表 4.2-1 第 11 回調査トピックと類似する提案が複数得られた事例

(A)

<p>タンパク質の一次配列情報およびそのタンパク質に作用する物質の立体構造情報から、活性状態のタンパク質の動的立体構造を推定する技術(2029/2033)</p> <p>タンパク質三次構造予測エンジンの構築</p> <ul style="list-style-type: none"> タンパク質三次構造、各社製薬メーカーが保有している薬剤ライブラリーのオープンデータベース化 <p>タンパク質立体構造の予測技術(Deep Mind社AlphaFold2等)</p> <ul style="list-style-type: none"> AIが学習したのから逸脱した立体構造についてどう予測するか 技術の詳細の情報公開と、誰もが簡単に使えるようにするソフトウェア・プラットフォームの構築 正しい主鎖構造をベースとした、側鎖予測、タンパク質の動的構造予測、低分子によって引き起こされる誘導適合問題 エントロピーや疎水性などの物理化学的性状のフォールディングに対する寄与の解明 	<p>環境DNAを利用した生態系の理解と解析を援用した希少種の保存・管理技術(2028/2029)</p> <p>環境DNAによる生物調査・モニタリング技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 生物の遺伝情報の効率的な蓄積と微量DNAの解析技術の進展 PCR等遺伝子試薬の低価格化 日本産生物種のバーコードリファレンスデータベースの充実 ありとあらゆる生物種のDNAデータベースの整備 生態学者や生物学者と医学関係研究者との交流促進 環境DNAのセンサー、高速解析技術 完全自動による調査技術機器とするためのバッテリーや通信、自動運転・自動航行などの工学的技術開発 低廉に多くのデータを取得できる調査機器の開発 資源動態の把握や不在証明
<p>レベル5の自動運転(場所の限定なくシステムが全てを操作する)(2034/2034)</p> <p>ロジスティクスの完全自動化</p> <ul style="list-style-type: none"> 関連法の整備 予測できない歩行者の動きに合わせた運転 横断歩道に立っている人がわたる意思があるのかのAIで判断 鏡に映った人をどう判断するのか 自動運転技術に関連する半導体素子の演算性能の向上、各種検出器の感度向上、低コスト化、低消費電力化など 	<p>光をほとんどあてずに測定する被写体(生体)にダメージを全く与えない、量子もつれを利用したイメージング技術(2035/2038)</p> <p>光を用いた量子計測・センシング技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 一気に、大規模な量子状態を生成できるような革新的な量子光源 量子状態を直接検出できるような(例えば、量子もつれ合い状態の直接的な識別が可能)量子的な検出器の実現 <p>光イメージングによる生命現象の精密な観察</p> <ul style="list-style-type: none"> 化学を中心とした化合物や化学反応の開発と、物理を中心とした機器開発の双璧を成した発展 生物を中心とした病態モデル動物の開発

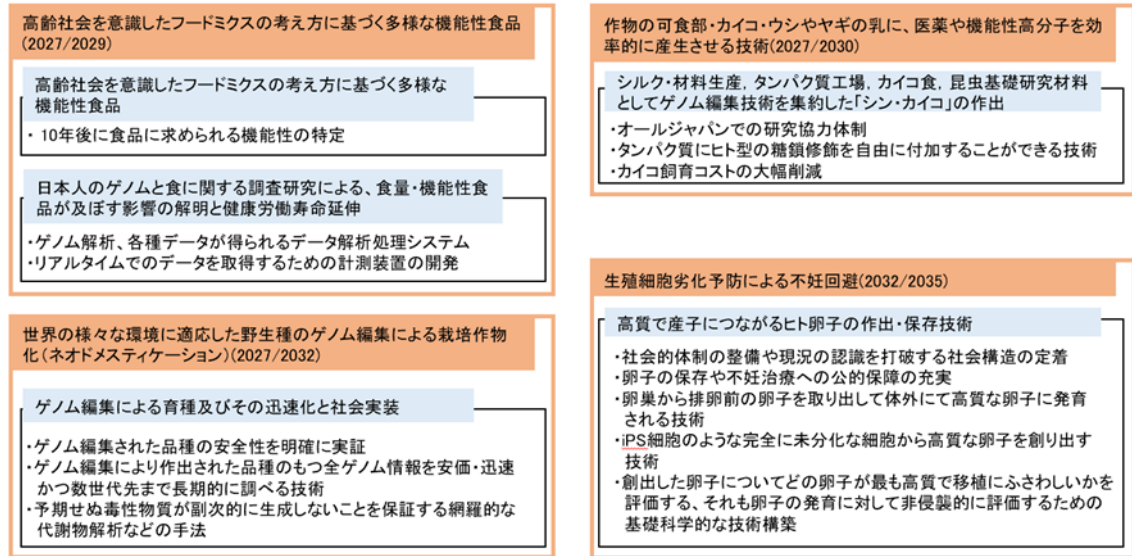
注:括弧内の左は科学技術の実現時期、右は社会的実現時期。年表は科学技術の実現時期に基づいて作成
青枠内は科学技術、黒枠内はブレクスルー。専門家ネットワーク提案を基に一部要約。

(B)

<p>細胞の位置情報を保持した上での1細胞オミクス解析技術する技術(2028/2030)</p> <p>1細胞解析技術による細胞アッセイシステムや診断システム</p> <ul style="list-style-type: none"> 1細胞をダメージなく、正確に、分離、解析、回収、さらには培養などのアッセイまでの一連の捜査作業を可能にする技術 <p>空間オミクス技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 低価格でハイスループットな解析 検出感度、精度の向上 <p>組織内での位置を保持しながらの一細胞レベルの解析技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 特定の配列を持つDNAなどを貼り付けた1~数μmレベルの粒子を、数μm間隔で整列配置する技術。その際に、粒子に貼り付けられたDNA配列情報と、配置された場所が記録されている必要がある。 数μm厚さの組織切片をさらに数μm間隔で切断し、それぞれを位置情報を維持しながら別々に回収する技術 <p>一細胞レベルの違いを機能的に解析する実験系と概念の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> プラナリアなどの個体レベルの一細胞解析と再構築技術はできているため、そのスケールアップ 	<p>多数で多種類の生体分子が協働して生命システムを作り上げる作動原理を理解した上での人工細胞(2034/2039)</p> <p>人工細胞</p> <ul style="list-style-type: none"> 「増殖する能力」をもつ人工細胞 DNA複製・転写・翻訳・膜合成・代謝といった細胞内機能を再生産する能力をもつ人工細胞 <p>各種医療に用いることが可能な人工細胞</p> <ul style="list-style-type: none"> 細胞のデザインに加え、「組織微小環境」のデザイン <p>生体システムを人工的に再現する科学技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 細胞や組織など、生きた試料を対象として、局所空間に存在する生体分子のリアルタイムかつその場計測技術
<p>動物の胚とヒト幹細胞由来細胞のキメラ胚(動物性集合胚)から作出されるヒト移植用臓器(2031/2035)</p> <p>臓器移植可能な多能性幹細胞由来のドナー臓器を動物の体内で作る技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 目的の臓器だけの動物体内での作成 ヒトと同じタイプの多能性幹細胞(サル、ブタ、ウサギなど)をブタの体内で効率よくキメラとして寄与させるような技術 	<p>統合失調症の脳病態解明に基づく、社会復帰を可能にする新規治療薬(2035/2039)</p> <p>統合失調症等の精神疾患の原因解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ヒトGWAS研究を取り入れたモデル動物による研究とドラッグスクリーニング <p>脳・神経機能障害の病態解明に基づく、病状コントロールを可能とする医薬品開発</p> <ul style="list-style-type: none"> X線自由電子レーザー(XFEL)をはじめとした解析技術の開発推進 医薬品開発における人工知能(AI)の利用 製薬へのAI利用の実現化に向けた、企業や機関を超えた人材やデータ等の共有システムの整備

注:括弧内の左は科学技術の実現時期、右は社会的実現時期。年表は科学技術の実現時期に基づいて作成
青枠内は科学技術、黒枠内はブレクスルー。専門家ネットワーク提案を基に一部要約。

(C)



注:括弧内の左は科学技術的実現時期、右は社会的実現時期。年表は科学技術的実現時期に基づいて作成
青枠内は科学技術、黒枠内はブレイクスルー。専門家ネットワーク提案を基に一部要約。

5. 結果③：科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携

注目科学技術や必要なブレイクスルーの回答にあたり、科学技術の経済社会的側面や、必要な政策、さらには人文・社会科学との連携の必要性など、科学と社会に関係する幅広い観点からの言及が多くあった。

これらの観点は、政策的にも重要視されている。人間や社会の在り方と科学技術・イノベーションとの関係が密接不可分となっていることを踏まえ、科学技術基本法は「科学技術・イノベーション基本法」に変更され（令和3年4月施行）、「人文科学のみに係る科学技術」及び「イノベーションの創出を振興の対象に加えられた。令和4年4月より開始されている第6期科学技術・イノベーション基本計画においても、様々な社会的課題を解決するためには、自然科学のみならず人文・社会科学も含めた多様な「知」の創造と、「総合知」による現存の社会全体の再設計が必要であると記載されている。

なお、今般アンケートでは、科学技術の経済社会的側面についての記載は明示して求めているなかったため、注目科学技術が前提とする社会像や解決すべき社会課題、経済社会へもたらす便益や懸念、実現にあたって解決が必要な社会・制度的課題、基盤となる人間や社会の在り方等、様々な観点からのコメントが寄せられた。それらの内容を技術横断的に整理すると下記のように大まかにはまとめられるが、これらの多くは、人文・社会科学との連携・融合により対応していく必要がある事項である。

① 目指すべき社会像や解決すべき社会的課題

Society 5.0、IoT社会、カーボンニュートラル（/フリー）な社会、持続可能な社会、資源循環社会、水素社会、低炭素社会、幸せを実現する社会等、目指すべき社会像を想定した上で、それに貢献する注目科学技術を提案している。

解決すべき社会課題や到達すべきゴールとしてはSDGsが多く言及されたが、この他、少子高齢化、働き方改革等も言及されている。

② 期待される経済社会的インパクト

社会像や社会的課題と裏腹ではあるが、注目科学技術がもたらす幅広い経済社会インパクトも言及されている。

- 経済的インパクト：経済、雇用、産業化等
 - 社会的インパクト：幸福、健康、暮らし、安全・安心、防災・減災、外交・安全保障等
- 科学技術がもたらしうる負のインパクトについても、社会分断や格差などの言及があった。

③ 社会実装にあたっての社会・制度的な課題

主には注目科学技術の実現に必要なブレイクスルーとして、技術的課題以外の社会・制度的な課題についても多く言及されている。

- 産業化・事業化・社会実装にあたっての制度的要因
- 倫理的・法的・社会的課題（ELSI: Ethical, Legal and Social Issues)
- 社会受容性
- 政策：人材、レギュラトリーサイエンス、政策の科学

④ 基盤となる人間や社会の在り方、技術発展の在り方

- オープネス：オープンアクセス、オープンデータ、オープンサイエンス等に言及し、知識や技術の共有を促進することが科学技術への市民参加につながる点が言及された
- 精神性・哲学・ヒューマニティ：AI等の発展による人間と機械の共生を前提として、トランスヒューマニズム¹³など、精神的・物理的両面から、人の可能性や機能とは何かを問うていくことの重要性が言及された
- ジェンダー：ジェンダードイノベーション¹⁴など、技術発展やイノベーションの在り方に関してジェンダーの観点を入れていくことの重要性が言及された

⑤ 科学コミュニケーション

特定の注目科学技術の実現には、社会におけるリテラシー、社会理解、社会受容が必要といった啓発的観点のものから、双方向のコミュニケーションを前提とした、科学コミュニケーション、リスクコミュニケーション、エンゲージメントが必要といった言及もあった。

⑥ 人文・社会科学との連携・融合

また、注目科学技術の進展において人文・社会科学的知見との連携が重要である領域も複数提案された。

- 人間と機械の共生：人間とは何か、AIにはできない仕事は何か？科学技術の問題を科学者、研究者、技術者だけに任せるのではなく、人文・社会科学の学者、研究者とも議論が必要
- 政策効果の予測

尚、上記のような観点については、第11回科学技術予測調査では、「必要な政策手段」として、ELSIや法的整備についての設問を設けており、特に遺伝子治療・再生医療やAIは、ELSIや法的課題の解決が求められるという結果であった。他方、科学コミュニケーションやジェンダードイノベーション等、分野割を前提としたこれまでの予測調査ではカバーすることが難しかった内容も今回のアンケート結果には含まれる。これらの横断的な課題について、次回以降の予測調査においてどのようにカバーするか、調査設計における検討が必要である。

¹³ 定義は「トランスヒューマニズムは、生命を促進する原則と価値に基づき、科学技術により現在の人間の形態や限界を超越した知的生命への進化の継続と加速を追求する生命哲学の一潮流である」(日本トランスヒューマニスト協会)とされる。

¹⁴ 研究開発において性差に着目することで、より良いイノベーションをめざそうという概念。スタンフォード大学教授のロンダ・シービンガーらが提唱した。Tannenbaum, C., Ellis, R.P., Eyssel, F. et al. Sex and gender analysis improves science and engineering. *Nature* 575, 137-146 (2019).

6. まとめと考察

本調査の目的は次期科学技術予測調査の実施に向けたホライズン・スキャンニングである。次期科学技術予測調査のうち、主に「科学技術の未来像」検討における科学技術トピック検討に資する基礎情報得るため、専門家ネットワークへのアンケートを実施した。以下に、本調査の結果と考察について示す。

6.1. 全体概要

- ①科学技術・学術政策研究所が保有する専門家ネットワークの専門調査員に対し、1) 現在注目している科学技術の有無と、注目している科学技術が有る場合には続けて、2) 当該科学技術の概要、3) 当該科学技術の実現予測時期(10年未満/10年以降)、4) 当該科学技術の実現に向けて必要となるブレイクスルーの4項目を尋ねるアンケートを実施した。その結果、1016名の回答があり、注目科学技術として983件の回答が得られた。
- ②アンケート結果を第11回調査分野に割り振った結果、全体のうち健康・医療・生命科学分野が28.3%、マテリアル・デバイス・プロセス分野が26.6%であり、これらの合計で全体の5割を超える。最も割合が少ないのは都市・建築・土木・交通分野で全体の3.8%であった。これらの割合専門家ネットワーク専門調査員の専門分野の偏りによるところが大きいと考えられる。
- ③分野別の回答と回答者の年代を比較した結果、全体では最も多いのは40代で48%、次に多いのが30代で29%、次に多いのが50代で17%であった。30代、40代、50代の合計で94%と大多数をしめており、専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。
分野別に傾向をみると、全体傾向に比べて30代の割合が高いのは、ICT・アナリティクス・サービス分野(36%)、マテリアル・デバイス・プロセス分野(38%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤分野(35%)であった。
- ④分野別の回答と回答者の性別を比較した結果を示す。全体では最も多いのは男性の83%であり、これは図表2.12に示した専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。
分野別にみると、全体傾向に比べて女性の割合が多いのは、農林水産・食品・バイオテクノロジー(30%)、健康・医療・生命科学(20%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤(21%)であった。
- ⑤分野別の回答と回答者の所属を比較した結果、全体では最も多いのは大学の68%、次は企業と公的研究機関が企業15%、公的研究機関14%でほぼ同等であった。これは専門家ネットワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。
分野別に傾向をみると、全体傾向に比べて企業の割合が高いのは健康・医療・生命科学分野(16%)、環境・資源・エネルギー分野(25%)、都市・建築・土木・交通分野(23%)であった。
- ⑥分野別の回答と回答者の専門分野を比較した結果、全体ではライフサイエンスが35%、ナノテクノロジー・材料が27%と多く、この二分野の合計で全体の5割を超える。これは専門家ネッ

トワーク全体の年代内訳とほぼ変わらない。

分野別に傾向をみると、各分野共に基本的に第 11 回調査分野に近い専門分野を持つ回答者が最も多い。特に健康・医療・生命科学はライフサイエンスの割合が 78%と高い。回答者の専門分野側から見ると、ライフサイエンスは第 11 回調査分野のうち複数分野で 50%を越えており、健康・医療・生命科学(78%)、農林水産・食品・バイオテクノロジー(55%)であった。

ナノテクノロジーは複数分野で 20%を越えており、環境・資源・エネルギー(23%)、ICT・アナリティクス・サービス(28%)、マテリアル・デバイス・プロセス(57%)、宇宙・海洋・地球・科学基盤(27%)であった。同様に、環境は複数分野で 20%を越えており、農林水産・食品・バイオテクノロジー(29%)、都市・建築・土木・交通(23%)であった。同様に、情報通信は複数分野で 15%を越えており、ICT・アナリティクス・サービス(36%)、都市・建築・土木・交通(18%)であった。

ライフサイエンス、ナノテクノロジー、情報通信については、第 11 回調査の分野割りにおいても複数分野に横断する分野であると考えられる。

- ⑥各分野に割り振られたアンケート結果の頻出単語のワードクラウドを作成した結果、「注目科学技術の概要」には、農林水産・食品・バイオテクノロジー分野では「環境 DNA」、ICT・アナリティクス・サービス分野では「AI」「量子」、マテリアル・デバイス・プロセス分野では「光」等、いくつかの特徴的な名詞句が散見され、これらの名詞句は今回調査における特徴的な科学技術を示している可能性が考えられた。

必要なブレイクスルーについては、「コスト」「効率」について、都市・建築・土木・交通分野や環境・資源・エネルギー分野で比較的大きく確認される。「データ」は、健康・医療・生命科学分野、農林水産・食品・バイオテクノロジー分野、ICT・アナリティクス・サービス分野、都市・建築・土木・交通分野、宇宙・海洋・地球・科学基盤分野で比較的大きく確認される。これらの違いは、それぞれの分野において必要とされる技術や政策等の違いを反映している可能性が考えられる。

6.2. 分野別結果

それぞれの分野担当において、全体傾向及び特徴等について整理した。それぞれの分野の特徴を以下に示す。全回答の詳細は付録を参照のこと。

健康・医療・生命科学分野

11 回デルファイ調査と比較して、新型コロナウイルス感染症を含めた新興感染症対策関連、再生・細胞医療関連、遺伝子治療関連、イメージング関連、合成生物学関連の科学技術について多くの意見が寄せられた。これら専門家からの意見の中で、健康・医療・生命科学分野における特徴的な科学技術の例として、プラズマ医療と冬眠研究が考えられた。

専門家の全体的な意見として、新型コロナウイルス感染症を含めた新興感染症対策関連、再生・細胞医療関連、遺伝子治療関連、イメージング関連、合成生物学関連の科学技術にまとめられた。特に、世界的なコロナ禍への対処として、現在研究開発が進んでいるワクチンや治療薬を含めて多くの科学技術が出された。

農林水産・食品・バイオテクノロジー分野

今回の調査で挙げられた本分野の注目科学技術 65 件は、概ね、第 11 回科学技術予測調査の科学技術トピックに関連する科学技術であることが示された。特に、「環境 DNA」や「培養肉」に関する科学技術を挙げる回答が多く示された。また、注目科学技術の実現に必要なブレイクスルーについては、情報・環境・効率・培養・解析・データ・システムなどのワードが多く挙げられ、本分野にはデジタルトランスフォーメーション(DX)が必要であることが示唆された。

環境・資源・エネルギー分野

全体的に、第 11 回デルファイ調査で取り上げたトピックスとほぼ同様な意見が多くみられた。特に CO2 低減技術や気候変動に関連する意見が多かった。

特徴的トピックスとして、環境分野では、CO2 固定化技術、プラスチック分解、水や大気浄化技術、エネルギー分野では、電池、水素、再生可能エネルギー利用促進、資源分野では、CO2 削減に関するリサイクル技術や、廃熱を無駄にしない技術などが出された。

ICT・アナリティクス・サービス分野

今回の調査で挙げられた本分野の注目科学技術 138 件は、第 11 回科学技術予測調査の細目で見ると、コンピュータシステム、データサイエンス・AI に関連する科学技術が多く、特に「量子コンピューティング」「AI」に関する科学技術を挙げる回答が多く示された。一方、第 11 回科学技術予測調査において挙げられた細目別に政策・制度設計支援技術、産業・ビジネス・経営応用、社会実装などについては、今回の調査では回答されていなかった。

マテリアル・デバイス・プロセス分野

専門家ネットワークアンケートで提案された注目科学技術 983 件中、約 37%にあたる 362 件が第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査で設けたマテリアル・デバイス・プロセス分野に関連する科学技術であった。アンケートの「注目科学技術」の記述における頻出ワードでは、「材料」「光」「分子」「エネルギー」「利用」「量子」が多く、一方「ブレイクスルー」の記述における頻出ワードは、「材料」「光」「ブレイクスルー」「分子」「制御」「量子」「利用」「合成」「デバイス」「課題」が多かった。

「注目科学技術」の記述の頻出ワードである、「光」は分光（材料解析）、フォトニクス、光量子、光合成、光センシング・イメージングに関わるワードとして多く現れている。「分子」については、高分子、低分子、生体分子、単一分子など、「エネルギー」は、エネルギー消費及び省エネルギーと関わりが強い。「量子」では、量子コンピュータ・量子ビット、量子センシングに関わる記述が多かった。一方、「ブレイクスルー」の記述の頻出ワードでは、材料の構造あるいは物性の「制御」、材料の「合成」方法やそのコスト、「デバイス」化の課題に関する記述が多く、科学技術実現のためのブレイクスルーの示唆が得られた。

都市・建築・土木・交通分野

本分野では他の分野に比べて比較的回答数が少ないものの、第 11 回科学技術予測調査と今回調査を比較すると、i-Construction 等の建築現場における AI 技術の活用、再生可能エネルギーやグリーンインフラ等の環境問題の対応、防災・減災等が挙げられた。また、自動運転やロジスティクスの自動化について比較的多く提案があった。

宇宙・海洋・地球・科学基盤分野

本分野では宇宙、地震、観測、計測、データ、X線、光等が頻出ワードとなっており、スケールや捉え方の違いはあるが第11回調査に類似する内容が散見される。また、比較的多く挙げられた事項は、月・火星探査、宇宙エレベータ、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙太陽光発電、海底資源、環境DNA、DAS、気候変動モデル、社会シミュレーション、高強度・超高速レーザー、軟X線分光、光格子時計等である。

6.3. 引き続き注視すべき科学技術及び 科学技術の経済社会的側面、人文・社会科学との連携

①引き続き注視すべき科学技術として量子コンピュータ関連科学技術が挙げられた。

具体的には、量子暗号技術、量子インターネット、量子コンピュータ向け言語の開発などが挙げられた。これらの提案は第一に現在の注目トレンドとして重要であるのに加えて、次期科学技術予測調査への示唆として、今後のトレンド把握として「実現に向けたブレイクスルー」も特に重要な意味を有する。量子コンピュータにおける低温超電導デバイスの実現や、量子インターネットにおける低損失ダークファイバー網の整備等、今後のさらなるホライズン・スキヤニングへの重要な示唆が多数得られた。

②引き続き注視すべき科学技術として人工知能(AI)連科学技術が挙げられた。

具体的には、基礎科学のAI活用だけでなく、AIを活用した創薬やスマート農業などが挙げられた。これらの提案は第一に現在の注目トレンドとして重要であるのに加えて、次期科学技術予測調査への示唆として、今後のトレンド把握として「実現に向けたブレイクスルー」も特に重要な意味を有する。スマート農業におけるバリューチェーンの構築や、AIを活用した創薬におけるネガティブデータを含む包括的データ収集等、今後のさらなるホライズン・スキヤニングへの重要な示唆が多数得られた。

③その他の引き続き注視すべき科学技術として、例えば、タンパク質立体構造の推定におけるAIが学習したのから逸脱した立体構造をいかにして予測するか、人工細胞における増殖能力を持つ細胞など、第11回調査で取り上げたトピックについて今後注視すべき動向が多数得られた。

④目指すべき社会像や解決すべき社会的課題

Society 5.0、IoT社会、カーボンニュートラル（/フリー）な社会、持続可能な社会、資源循環社会、水素社会、低炭素社会、幸せを実現する社会等、目指すべき社会像を想定した上で、それに貢献する注目科学技術を提案している。

解決すべき社会課題や到達すべきゴールとしてはSDGsが多く言及されたが、この他、少子高齢化、働き方改革等も言及されている。

⑤期待される経済社会的インパクト

社会像や社会的課題と裏腹ではあるが、注目科学技術がもたらす幅広い経済社会インパクトも言及されている。

- 経済的インパクト：経済、雇用、産業化等
 - 社会的インパクト：幸福、健康、暮らし、安全・安心、防災・減災、外交・安全保障等
- 科学技術がもたらしうる負のインパクトについても、社会分断や格差などの言及があった。

⑥社会実装にあたっての社会・制度的な課題

主には注目科学技術の実現に必要なブレイクスルーとして、技術的課題以外の社会・制度的な課題についても多く言及されている。

- 産業化・事業化・社会実装にあたっての制度的要因
- 倫理的・法的・社会的課題（ELSI: Ethical, Legal and Social Issues）
- 社会受容性
- 政策：人材、レギュラトリーサイエンス、政策の科学

⑦基盤となる人間や社会の在り方、技術発展の在り方

- オープネス：オープンアクセス、オープンデータ、オープンサイエンス等に言及し、知識や技術の共有を促進することが科学技術への市民参加につながる点が言及された
- 精神性・哲学・ヒューマニティ：AI等の発展による人間と機械の共生を前提として、トランスヒューマニズムなど、精神的・物理的両面から、人の可能性や機能とは何かを問うていくことの重要性が言及された
- ジェンダー：ジェンダードイノベーションなど、技術発展やイノベーションの在り方に関してジェンダーの観点を入れていくことの重要性が言及された

⑧科学コミュニケーション

特定の注目科学技術の実現には、社会におけるリテラシー、社会理解、社会受容が必要といった啓発的観点のものから、双方向のコミュニケーションを前提とした、科学コミュニケーション、リスクコミュニケーション、エンゲージメントが必要といった言及もあった。

⑨人文・社会科学との連携・融合

注目科学技術の進展において人文・社会科学的知見との連携が重要である領域も複数提案された。

- 人間と機械の共生：人間とは何か、AIにはできない仕事は何か？科学技術の問題を科学者、研究者、技術者だけに任せるのではなく、人文・社会科学の学者、研究者とも議論が必要
- 政策効果の予測

以上のように、本調査によって、各分野の注目科学技術が得られたと共に、次期科学技術予測調査への重要な示唆が得られた。今後、今後も、質問項目等の調査設計を適宜改良しながら、本調査は毎年続ける予定にしており、継続的に調査し、次期科学技術予測調査へと繋げていく。

付録

付録1 分野別アンケート結果一覧(健康・医療・生命科学)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術=「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー=「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
L-1	10年以降	注目科学技術	モノとモノ、細胞と細胞、器官と器官、ヒトとヒトなどの、円環的な相互作用、すなわち、 直線的な因果関係ではなく円環的な因果関係から形成されるシステムを理解し、利用する技術 。サイバネティクスから続く、システム理論、生物学、心理学の大きなテーマで、難攻不落のゴールであるが、テクノロジーの進歩と共に、理解・利用が夢ではなくなってきた。きつある。
		ブレイクスルー	大規模、パラレルなセンシング。 大規模・精緻な分子解析(オミクスや単一細胞解析など) 大規模な機械学習(AI)
L-2	10年未満	注目科学技術	3Dプリンタを用いた3次元放射線線量計の開発 。放射線治療には事前に治療計画が必須であり、現在、コンピュータによる計算やファントムと1次元線量計を用いたシミュレーションが治療毎に行われている。しかしながら、既存手法による1次元線量計では完全な線量分布を把握する事が困難であり、患者の体格や臓器の形状の違いによる誤差が発生する。そこで、注目する研究では、3Dプリンタを用いて患者毎の形状のファントムを放射線に有感な材料で構築する取り組みが行われている。同材料はラジオクロミックと呼ばれる性質を持ち、放射線によりその色が変わる。この色の変化から被ばく線量値を見積もる事が可能であり、3次元的にスキャンを行う事により連続的な被ばく線量分布の計測が可能となる。上記研究は、産業技術総合研究所 藤原健 氏を中心として行われている。
		ブレイクスルー	現行ラジオクロミック材料では放射線による感度が十分に高いとは言いがたい。その為、放射線に対する感度の向上ブレイクスルーが必要であると考えられる。
L-3	10年未満	注目科学技術	高速の電子顕微鏡を用いて病気の組織の3次元解析を行い、病態の違いを網羅的に解析する 。現在低速の電子顕微鏡を用いて、部分的に病気の組織の解析が行われている。また、AIを用いた電子顕微鏡の自動的な画像解析も試みられている。網羅的に微細構造を解析することにより、病態をより詳細に理解できるようになると期待されている。
		ブレイクスルー	・電子顕微鏡用試料の自動作製技術の高度化。 ・電子顕微鏡撮影の高速化 ・AIを用いた電子顕微鏡画像解析の高度化・電子顕微鏡を用いた病態画像の3次元的なデータベース構築
L-4	10年未満	注目科学技術	生分解性構文その機能化
		ブレイクスルー	新しい分子設計が必要と考えている。必要な時に分解せず、不要となったら環境変化に応じて分解が速やかに起こるような分子構造が望まれる。
L-5	10年未満	注目科学技術	3次元的に再構成された人工臓器(オルガノイド) は、単なる細胞の集合体ではなく、機能的解剖学的な構造を有する。発生学的な過程を研究するモデルや、疾患毎の薬剤への応答性などを見ることに既に用いられている。また、個人の組織より作成可能であることより、オーダーメイド的な投薬や移植医療への実用化も考えられる。
		ブレイクスルー	実験レベルでは近年、非常に発展があった技術である。ブレイクスルーを要する点は、当該オルガノイドが自己組織化により形成される物であり、いかに人工的に操作・誘導(必要な臓器へと導く)を可能にするかの点であるとする。
L-6	10年以降	注目科学技術	in vivo conversion という技術で、体内の自分の細胞を、iPS細胞を経ずに、体内でそのまま別の種類の必要な細胞に変化させる技術のことで、病気を治すために応用できる。例えば、重篤な神経変性疾患(正常に働く神経細胞が失われる)の場合、周りのグリア細胞を神経細胞に変化させることで、脳内で失われた神経細胞の機能を取り戻すことができる。このような技術の効果は、動物モデルで報告されている(Wu et al., Nature communications 2020)。
		ブレイクスルー	この技術の弱点は、遺伝子の変異によって病気が引き起こされていた場合、変化させた細胞もまた、病的な特徴を示す可能性があることである。そのため、ゲノム編集技術のような遺伝子情報の書き換え技術を併用する必要がある。また、実際に人の治療に応用する場合には、他の遺伝子に変異が入らないようにしたり、他の細胞や臓器に影響が出ないように、安全性を高くする改良が必要である。

L-7	10年未満	注目科学技術	iPS細胞からの完全な卵形成と卵成熟 に注目しています。
		ブレイクスルー	現在はマウスを中心に iPS 細胞からの卵の作製を目指した研究が九州大学の林グループを中心に行われている。しかし、卵形成の過程などはマウスの卵巣から取り出した組織(細胞)との共培養が必要となっている。生体細胞を必要としない完全な in vitro の系の確立ができれば、不妊治療などに貢献できる有望な技術となると思います。
L-8	10年以降	注目科学技術	organs on a chip, human on a chip. 微小流路上でヒト臓器を再現して、創薬試験に利用する研究。 iPS 細胞を用いることで、病変モデルやヒト臓器を再現できる。 実験動物を使用せず、創薬開発が可能になる。
		ブレイクスルー	iPS 細胞の安定的な分化制御が必要。 デバイスへのセンサの組み込みが未発展であり、今後の発展に期待がかかる。
L-9	10年未満	注目科学技術	RNAを修飾する核酸や小分子による創薬
		ブレイクスルー	上市品が少しではあるが創出されるようになったが、希少疾患ばかりで一般的な疾患への適用がない。RNA を介した生体機能の解明が進んでいないからだと思われるため、RNA の生体機能解明が進めば大きく進展する可能性があると考えている。
L-10	10年未満	注目科学技術	RNA 制御低分子による医薬品開発
		ブレイクスルー	近年 RNA に結合してその機能を制御することができる化合物が注目されている。これまでは偶然見つかることが多かったが、RNA の構造解析技術の向上や低分子との相互作用を予測することが可能になりつつあり、理論的な設計による医薬品開発が現実になってきている。二次元配列から三次元構造を自動的に構築し、さらに結合しうる化合物のデザインも行えるような分子シミュレーション技術基盤構築や、人工知能による設計を志向した多数の三次元データ取得が望まれる
L-11	10年未満	注目科学技術	アデノ随伴ウイルスによる遺伝子治療
		ブレイクスルー	場所依存的な導入効率の差をなくす技術
L-12	10年未満	注目科学技術	アミノ酸のうち、5-アミノレブリン酸(5-ALA)に、新型コロナウイルスの増殖の抑制効果があるそうで、治療薬の開発につながる可能性があるらしいこと。 たまたま静岡県(勤務先所在地)の製薬会社が研究しており、ニュースが目にとまった。
		ブレイクスルー	薬学の専門家ではないため、そこまでは分からない。
L-13	10年未満	注目科学技術	ウイルスカプシドのアセンブリー阻害剤の開発 が注目される。ウイルスを包むカプシドの集合は必須であり、その阻害剤は様々なウイルスの増殖の抑制が可能となる。HIV 感染治療の臨床試験では lenacapavir が進んでおり、First-in-Class の薬剤として承認が期待されている。
		ブレイクスルー	様々なウイルスのカプシドに応用ができる分子設計の技術やカプシド形成の様子を詳細に観察できる技術にブレイクスルーが必要である。
L-14	10年未満	注目科学技術	オーム解析で見出された病原体特異的な因子を標的とした医薬品開発 、特に癌領域などですでに医薬品として臨床応用されているキナーゼに対する阻害剤開発と臨床応用に注目している。また、哺乳類は有していない多くの機能未知遺伝子に関する網羅的な解析検討は、生物学的な新たな機能タンパク質を発見すると共に、感染症分野における新たな創薬標的となると期待される。
		ブレイクスルー	網羅的解析で見出された多くのキナーゼや機能未知遺伝子の解析が進んでいない。オーム解析までで研究がストップしてしまっているため、その後の詳細な機能解析を行うための人手と予算が足りない。
L-15	10年未満	注目科学技術	オルガノイドを創出する技術 再生医療に必要な幹細胞から機能を持つ臓器へと分化させる過程において、正確な分化のメカニズムと制御機構を解析する分野
		ブレイクスルー	実際の臓器のように機能的にも形態的にも多様な細胞群をバランス良く生成させる方法
L-16	10年未満	注目科学技術	カイコでワクチン抗原を作出し、それを餌として食べさせることで、家畜用ワクチンとすること。
		ブレイクスルー	消化性や耐熱性を獲得することができれば、汎用性と実現性が高くなる。

L-17	10年未満	注目科学技術	<p>がん組織の挙動を体外で再現できる基板を開発し、新たな創薬研究への貢献が期待できる技術。</p> <p>本研究では、培養がん細胞が生体内と同様に、悪性新生物となって動き回る様子を観察できる基板を開発しました。特に、悪性度の高い膵がん細胞が腫瘍組織を形成、浸潤し、かつ免疫系から逃れる様子を再現する事に成功しました。がんの形成や進行の新メカニズム解明のほか、動物実験に頼らない新薬開発に貢献できるものと考えます。北海道大学大学院医学研究院の宮武由甲子助教、同高等教育推進機構の繁富(栗林)香織特任准教授らの研究グループでは、培養がん細胞が自ら微小ながん腫瘍組織を形成、成長しながら動き回る様子を観察できるマイクロナ基板を開発しました。本研究により、がん腫瘍組織があたかも一つの飢えた生き物のように餌を求めて這いずり回ることが明らかとなり、がん腫瘍組織の攻撃的かつ戦略的といえる挙動を世界で初めて動画で捉えることに成功しました。</p> <p>これまでがんに関する研究では、平面の培養皿(ディッシュ)上に培養された細胞を用いることが多く、そこで得られるデータは必ずしも実験動物や臨床検体を用いた実験結果とは一致しないことが問題とされてきました。これは、ディッシュ上の培養がん「細胞」は、生体に生じるがん「組織」そのものとは形状や性質がかけ離れていることが一因と考えられます。また三次元細胞培養技術により得られる模倣的ながん組織でも、がんの浸潤の様子から推測される挙動を再現できていないことから、培養細胞と実験動物の間をつなげる実験系が求められていました。</p> <p>本研究で開発したマイクロナ基板上で膵がん細胞を培養したところ、単なるがん細胞の塊ではない、生体に存在するものにより近い膵がん腫瘍組織を再現できることがわかりました。この膵がん腫瘍組織は組織そのものが成熟してダイナミックに動き回り、さらに死んだ細胞の目印を表面にまとうことで、免疫系からの攻撃を逃れていることも明らかになりました。この実験系を用いれば、治療の障壁となっているがんの難治性の仕組みが明らかになるとともに、新しい抗がん剤の開発においても、動物試験を減らしながら、多くの化合物をテストする上で有用なツールとなることが期待されます。</p>
		ブレイクスルー	<p>フィルム化による低コスト化の実現。現在はフォトリソグラフィー法による手作業で製作しており、時間がかかり高コストであるため、研究推進のボトルネックとなっています。フィルム化により様々なパターンでの3D構造を構築することが可能となることで、微小癌自己組織化に最も適した構造の探索が可能となります。またこれらの知見は、細胞培養面の物理的な構造のみによって、細胞から組織への分化を誘導させることができるといふ新規現象の細胞生物学的なメカニズム解明にも役立ちます。</p>
L-18	10年未満	注目科学技術	<p>バイオリジクス分野(バイオ医薬、遺伝子治療薬、再生医療等製品)の製品の開発・製造のIT化(データ driven とメカニスティック driven のハイブリッド型)による申請の簡便化。アメリカ FDA はこれを推進している。</p>
		ブレイクスルー	<p>PMDA の理解と協力(これが最大の課題)。及びそれを実行する組織(カネとヒト)。FDA のように PMDA に直属の研究所を作るのが一番いいが、これが難しいのであれば、国衛研だけでなく、国内の大学のラボと連携組織を作り、PMDA が主体となり研究させる体制も必要。そうしないと、PMDA が主体的にかかわる意識が育たない。</p>
L-19	10年未満	注目科学技術	<p>ユビキチン-プロテアソーム系を転用して、疾患の発症や増悪に関わる異常蛋白質にE3リガーゼを近づけてユビキチン化、人為的に異常蛋白質の分解を誘導する薬剤: 標的蛋白質分解誘導薬</p> <p>標的蛋白質を阻害(ないしは作動)していた従来の低分子薬とは異なり、標的蛋白質分解誘導薬は、標的蛋白質を分解してしまう新しい低分子薬である。つまり、転写因子やスプライシング因子のように、タンパク-タンパク相互作用に関与する蛋白質を狙ったり、酵素阻害薬に対して耐性を示す酵素を狙ったりすることが可能になる。</p>
		ブレイクスルー	<p>ユビキチン-プロテアソーム系に関与するユビキチン化酵素や、そのリガンドは数が少ないため、新たな酵素やリガンドの探索を行うことが重要。</p>
L-20	10年未満	注目科学技術	<p>ワクチンの中和抗体クロナタイプを同定する技術</p>
		ブレイクスルー	<p>単一抗原であれば、ある程度は実現可能であるが、複雑なワクチンであればその同定技術はかなり困難であるといわざるを得ない。少なくとも BCR seq や HLA タイピングの情報と MS を統合的に利用するアプローチが不可欠であると考え。</p>
L-21	10年以降	注目科学技術	<p>安価に提供できる画期的新薬創製のための手法の開発。既存の高度医療、遺伝子治療、再生医療などは概ね高価であり、医療経済を圧迫するとともに、富裕層しかアクセスできないケースも存在する。医療経済を圧迫せず、かつ開発・製造する製薬企業も利益が得られるような新技術が望まれる。</p>

		ブレイクスルー	細胞医薬や生物学的製剤など、生物の力を利用して生産される医薬品製造の劇的なコストダウン。例えば化学合成を可能にすること。または、化学合成可能な手法で再生医療や遺伝子治療を可能とする技術。
L-22	10年未満	注目科学技術	遺伝子治療
		ブレイクスルー	遺伝子導入の方法論の臨床技術との関連付け
L-23	10年未満	注目科学技術	遺伝子治療 ワクチン
		ブレイクスルー	COVID19 に対するワクチンの成功
L-24	10年以降	注目科学技術	遺伝子変異による先天性の疾患に対して、全身の細胞の遺伝子配列を編集するのは、理論的にも難しいが、何よりもヒトで遺伝子操作することは倫理的に難しく、効果的な治療法の開発が求められている。その中で、 インビボで、遺伝子の修飾状況を変化させるエピゲノム編集を行って治療する方法 が考案されている。エピゲノム編集であれば、遺伝子配列自体は書き換えられないため、面白い手法であると感心している。
		ブレイクスルー	細胞レベルでは既に成功しているし、マウス等のモデル動物を用いた実験も世界的に進行中である。しかしながら、マウスにおいても困難が多く、ヒトに応用されるまでには、まだまだ時間を要するものと思われる。敢えてブレイクスルーをが必要であるとすれば、科学技術よりも、倫理的な問題のように思う。遺伝子組換え大豆が受け入れられなかった世間で、遺伝子配列を変化させないとはいえ、エピゲノム編集が受け入れられるのか。まずは、世間の知識と理解を向上させることこそが、ブレイクスルーになるのかもしれない。
L-25	10年未満	注目科学技術	核酸医薬開発
		ブレイクスルー	遺伝性疾患や難治性疾患に対する新しい潮流は、「遺伝性疾患は遺伝する」という当事者・家族の足かせをはずす大きなアプローチになる。企業との連携も容易であり、より一層の発展を望む。一方で、科学技術の発展に加え、平行して ELSI(Ethical Legal and Social Issues) や法規制のあり方についても議論・展開が必須である。
L-26	10年未満	注目科学技術	完全ヒト抗体産生マウス
		ブレイクスルー	抗体センターの設立による、大規模な抗体探索研究機関の設置。
L-27	10年未満	注目科学技術	幹細胞からの臓器・オルガノイド構築
		ブレイクスルー	自動化、高速化
L-28	10年未満	注目科学技術	既に使われていた核酸医薬品の観点から、 RNA および DNA を用いたワクチン開発 に注目していたが、COVID-19 の感染拡大、ワクチン開発で両者のワクチンがあったという間に登場し、承認を受けることになったことに驚いた。既に注目技術ではないのかもしれないが、このスピードで開発された技術として挙げたいと考え、敢えて、挙げさせていただきます。
		ブレイクスルー	特に RNA に関して、現段階でも各製薬会社での安全性の評価はできているものだと考えているが、より安定した RNA 合成方法(特に長鎖 RNA 化学合成方法)の発展があれば、より安全性も担保して進めることができると考える。
L-29	10年未満	注目科学技術	香月先生(鳥取大学)の技術で、 ヒト由来の組織・臓器をマウスやラットで作る ことができ、抗体や薬剤の効果を直接確かめることができる。
		ブレイクスルー	既にブレイクスルーがあり、応用特許の確保が重要と思われる。
L-30	10年以降	注目科学技術	再生医学 : 病気、事故、老化によって損失を受けた、あるいは機能の低下が進んだ身体の部分の再生。難病や原因不明の疾病の解明を待つことができない状況の打破、健康寿命の延長。
		ブレイクスルー	研究の具体的実施のためには、還元策の研究の同時進行が必須。
L-31	10年以降	注目科学技術	再生医学に基づく、人工器官の構築 iPS 細胞の樹立をはじめ、再生医学は発展をとげているものの、一方で iPS 細胞による組織構築は比較的簡単な組織の構築にとどまっている。今後、iPS 細胞をはじめとした技術により、自己由来の細胞による器官の構築手法が開発されることが待たれる。

		ブレイクスルー	上記技術の実現のため、発生生物学、基礎医学、生物物理学的な研究で得られた知見を統合する必要がある。生体内では様々な細胞による相互作用、液性因子などの影響をうける。そのため、スパコンを用いたシミュレーション解析なども基にした解析も有用と思われる。
L-32	10年未満	注目科学技術	再生医療
		ブレイクスルー	実用化に際しては細胞培養を行う人材の育成が必要。 細胞培養士のような国家資格があれば、教育現場も人材育成の道を組み立てやすい。
L-33	10年未満	注目科学技術	再生医療
		ブレイクスルー	iPS 等を含めた再生医療に関わる基礎研究及び臨床試験できる環境がより整備されること
L-34	10年以降	注目科学技術	再生医療 iPS 細胞や組織幹細胞を生体外で大量培養し、それを疾患患者に移植し、臓器の再生および治癒を期待する医療。または、生体外でミニ臓器を作製することで疾患を再現し、それを使って創薬スクリーニングを行う基礎研究。
		ブレイクスルー	生体外での細胞の大量培養方法の確立。 ハイスループットによる創薬化合物スクリーニング。
L-35	10年未満	注目科学技術	再生医療: 病気やけがなどで機能を失った組織や臓器を修復、再生する治療。患者自身、または他者の細胞 (iPS や ES 細胞等) などを用いて特定の組織や細胞をつくり、それを移植することで失われた組織や臓器を再生することが可能という考え方に基づいている。新しい医療・治療の選択肢の一つとして実用化に期待。
		ブレイクスルー	細胞加工技術の発展と、規制当局の理解・スピード感が重要。
L-36	10年以降	注目科学技術	再生医療 の実現
		ブレイクスルー	足場材料の素材、足場構築技術に関するブレイクスルーが必要。
L-37	10年未満	注目科学技術	再生医療 を真に実現するために必要なバイオものづくり技術 (大量に、安価に、安全に作るための工学技術)
		ブレイクスルー	プロセス全体を俯瞰視した、バックキャスト的 (ムーンショット的な?) な考え方による、不足技術・領域の充足。
L-38	10年未満	注目科学技術	細胞集積および細胞シート形成技術を活用した立体組織形成: 近年、細胞塊を集積あるいは細胞シートを重層し、培養細胞を用いて人工的に立体的な組織を形成する技術が急速に発達しつつある。将来的には、iPS 技術と併用した再生医療用置換臓器の形成、安定供給可能な人工培養肉の製造技術の確立などに結びつく。前者については、すでに単純な組織置換による治療や実験動物への組織移植 (担がんマウス作製) などに応用されており、良好な治療成績あるいは研究実績を有している。機能性の組織である臓器を人工的に形成するに至るまでにはなお一層の技術的進展が必要と考えられるものの、この技術が確立されれば医療の在り方が大きく変わり、一般公衆における更なる健康促進、寿命延長が期待される。一方、後者は前者よりも技術的なハードルは低く、食料の安定供給、安心安全な食肉の確保などにつながる。気候変動や社会情勢変化に影響されることがないため、安全保障の観点からも有用な技術と言える。
		ブレイクスルー	細胞塊の集積、細胞シートの形成など単純な組織形成については、すでに技術的に確立していると言っても過言ではない。機能性の臓器を形成するには複雑な立体構造をいかに実現するか、iPS 技術との併用においては、いかに目的の組織に必要とされる細胞へ分化させて効率よく大量培養するか、不必要な分化やがん化をいかに抑制するかなど、様々な課題を解決して行く必要がある。また、疾患の治療の観点から遺伝子編集技術との併用も考えられる。再生医療のみならず人工培養肉の作製においても、倫理的あるいは感情的な理由により社会から忌避的な反応を受ける可能性を否定できない。本技術に限らず、革新的な科学技術の導入、社会実装に際しては、学校教育などにおける正しい科学的な知識に基づくリテラシーの醸成 (適切に理解、解釈、分析して自分の知識として記述可能とするレベル) についても十分な注意を払われたい。

L-39	10年未満	注目科学技術	細胞膜透過能を有する抗体医薬/核酸アプタマー創薬 の開発。 現在、標的に対して高い特異性と親和性を有する抗体医薬や、世界の医薬品売上の半分以上を占めており、今後も医療現場ではさらなる需要が期待されている。一方、抗体医薬やアプタマー創薬の標的は細胞膜外に制限されており、多くの疾患原因タンパク質が存在する細胞内に作用する抗体医薬は未だ開発されていない。そのため、膜透過性ペプチドを中心とした膜透過性ツールの開発が精力的に行われており、今後の展開が期待される。
		ブレイクスルー	細胞毒性の少ない膜透過性分子ツール、ならびに細胞内を標的可能な抗体医薬/核酸アプタマー創薬の開発
L-40	10年未満	注目科学技術	次世代の分子標的治療薬(抗体医薬)として利用できる「 立体構造特異的モノクローナル抗体 」に注目している。その理由は、生体内の標的抗原はそれぞれ独自の2次構造、3次構造を有しており、その高次構造を特異的に認識する抗体は、治療薬として理に適っている。現在の抗体医薬の殆どすべては、生体内の標的抗原の1次構造を認識する特徴がある。その認識部位でも、ある一定の効果は期待できるが、高次構造認識抗体はその特異性および親和性において、従来の抗体医薬と比べて極めて高いことが予測され、格段の治療効果が期待できる。
		ブレイクスルー	「立体構造特異的モノクローナル抗体」の作製には、免疫動物の免疫系を利用したハイブリドーマテクノロジーが最も優れていると思われる。その目的のためには、3つのポイントが考えられる。 1. DNA免疫法などを用いて、立体構造を保持した状態で標的抗原を免疫動物内で発現させ、免疫系に認識させる必要がある。それによって、標的抗原によって感作された立体構造特異的抗体産生B細胞が活性化される。 2. 感作された目的のB細胞の数が少ないため、標的抗原によって予め選択する必要がある。そのため、立体構造を保持した標的抗原発現ミエローマ細胞の利用が考えられる。B細胞表面上の受容体(抗体)を利用した抗原抗体反応に基づき、目的の立体構造特異抗体産生B細胞を選択、濃縮することができる。 3. 最後に目的のB細胞-ミエローマ細胞複合体を電気パルスによって融合し、目的の立体構造特異的モノクローナル抗体産生ハイブリドーマを得ることができる。
L-41	10年以降	注目科学技術	重水素化された医薬品を用いた医療 の提供(2017年に米国FDAではじめて重水素化医薬品が認可された。今後国内外での拡大が見込まれる。)
		ブレイクスルー	重水素化医薬品の設計指針の確立、経済的で環境に負荷をかけない医薬品の重水素化法の開発、医薬品の重水素化による薬理活性や薬物動態、安全性などの評価と予測
L-42	10年未満	注目科学技術	新型SARSコロナウイルスのメインプロテアーゼ(Mpro または 3CLpro)阻害剤 の研究開発。SARS-CoV-1の際に中断された開発が新型コロナウイルス感染拡大の世界的な問題解決に向けて再び動きだしている。既にSARS-CoV-2のメインプロテアーゼに対して酵素阻害は強く、抗ウイルス活性を示すものが報告されつつあるが、臨床試験へ進んだ化合物はまだない。
		ブレイクスルー	システインプロテアーゼを標的とする阻害剤であることから、酵素選択性の点での安全性や血中での安定性のブレイクスルーが必要である。
L-43	10年以降	注目科学技術	新型コロナウイルスに対するワクチン開発でも明白なように、鼻から接種するワクチン(経鼻ワクチン)は新たなワクチン技術として必須であるものの、抗原蛋白質単独で投与しても十分なワクチン効果を発揮できない。そのため、アジュバントとの併用が必要不可欠であるものの、安全性の観点から、経鼻アジュバントの開発は遅々として進んでいない。そのため、 アジュバントを用いない経鼻ワクチンの開発 が期待される。
		ブレイクスルー	問2(注目科学技術)にまとめて記載済み。
L-44	10年未満	注目科学技術	新型コロナウイルスのワクチンが承認され注目を集めている。その実体はRNA(核酸)である。また、遺伝性の疾患を対象としてセントラルドグマを制御する人工核酸からなる核酸医薬も次々と承認されている。この実績を受けて、 核酸分子からなるワクチンや医薬品開発 に注目が集まると思われる。
		ブレイクスルー	核酸の化学合成の低価格化が必要である。これに対しては、1つ目として簡便に合成できる人工核酸の開発がもたらされる。二つ目として、需要を高めることが必要である。と考える。(DNA合成が迅速低下価格で実現できている例より、需要があれば低価格化につながる)
L-45	10年未満	注目科学技術	新型コロナ用ワクチンの実用化技術 の確立。理由:これまでの生活に戻るためには是非とも早期の接種プロセスの確立が必要である。
		ブレイクスルー	技術立国と云われる日本企業製薬会社のワクチン開発はどうなっているのか?政府がもっと人・モノ・金の提供を通じて進めるべきだ!他国に頼るような状態に何故なるのであろうか?大いに反省するべきである。

L-46	10年未満	注目科学技術	人工知能 (AI) を活用した創薬 が注目される。孤発性アルツハイマー病など、環境因子に左右される疾患の病態解明や治療薬開発にも AI は威力を発揮すると考えられる。
		ブレイクスルー	患者様のデータの収集が問題となる。プライバシーや倫理的な面にも配慮しながら、多くのデータを収集する必要がある。
L-47	10年以降	注目科学技術	人工的な細胞をデザインして作成し、各種医療に用いる 。従来のデザイナー細胞の問題点であるコスト・安全面を解決した技術になる。
		ブレイクスルー	細胞のデザインに加えて「組織微小環境」のデザインが可能となれば、さらに効率よく病態を制御・治療可能になるものと期待できる。
L-48	10年以降	注目科学技術	人工的に設計した遺伝子を微生物や藻類などに発現させ、新薬の創造・製造やバイオ燃料製造の高効率化などを実現する技術 。新しい化学物質の開発が飛躍的に進歩する可能性がある。
		ブレイクスルー	演算が早いコンピュータによるシミュレーションによって、開発スピードは長足の進歩を遂げると予測される。
L-49	10年未満	注目科学技術	組織、細胞の再構築 。人工的に細胞や組織を再構築し、診断・治療に使用するほか、薬物の治療効果・毒性のスクリーニングに役立つ。
		ブレイクスルー	再構築した細胞や組織の機能をどうやって長期間維持させるか？細胞であれば、エネルギー産生、組織であれば、エネルギーの供給を維持させる方法の確立が必要である。
L-50	10年未満	注目科学技術	創薬研究実験のリモート化 。現状は工程ごとの部分自動化にとどまり、また研究者の指示に従って実験を行うのみで、応用性・展開性に欠けるため、大きなインパクトになっていない。今なお治療方法のない／不十分な病気が多い中で、画期的な新薬が求められているが、成功率の低さに伴う投資対効果が非常に厳しい。本技術は、研究生産性の劇的向上による持続的な医療貢献度の高い新薬創製に貢献できる。
		ブレイクスルー	有機化学実験、生物合成実験、たんぱく質や細胞・ヒトあるいは動物組織・動物を用いる生物評価実験などの多様な実験における、専門研究員の多様な手技のデータ化、プログラム化、それを実現するプログラム、実験経過および結果に基づいて判断や応用ができる AI の開発。
L-51	10年未満	注目科学技術	臓器・組織移植のための再生医療およびその周辺技術 臓器や組織を再生する技術はこの10年でもかなり進んできており、可能性のある組織や臓器がいくつか明らかになりつつある。しかし一方で、大量生産技術などの課題がある。そのためには細胞スケールから組織臓器スケールへのスケールアップ技術が不可欠である。大量培養技術や大量生産技術、オートメーション化、作成した組織の長期保存技術などが再生医療の実用化に向けて重要となってくる。
		ブレイクスルー	オルガノイドの作成技術は格段に進歩している。オルガノイドの大量生産技術やそのオートメーション化、組織の組み合わせ、接合、移植技術の進展が期待出来る。長期保存技術については、冷凍や冷蔵などの低温技術の発展が重要である。臓器レベルの大きさになると、凍結保存技術にもう一段階のブレイクスルーが必要となる。保護物質の開発、組織臓器への浸潤、氷晶の形成抑制技術などの進展が期待される。
L-52	10年以降	注目科学技術	臓器移植可能な多能性幹細胞由来のドナー臓器を動物の体内で作る技術 。
		ブレイクスルー	目的の臓器だけを動物体内で作ること。
L-53	10年以降	注目科学技術	体外培養による配偶子形成
		ブレイクスルー	培養技術の改良が必要
L-54	10年以降	注目科学技術	胎生動物胚の完全試験管内培養、人工子宮
		ブレイクスルー	試験管内における着床の再現 人工胎盤
L-55	10年以降	注目科学技術	脱細胞化技術と移植の分野：組織の生細胞を除去した後に残るマトリックス骨格に新たに細胞などを埋め込み、移植へ活かそうとする試み
		ブレイクスルー	(1) 脱細胞化技術が各臓器によって異なると思うので技術 (2) 細胞を分化させて生着する技術 工学と医学の連携が必須

L-56	10年以降	注目科学技術	注射型ワクチンにおいて、Th1 や Th17 など、目的とする T 細胞応答を自由自在に誘導することが困難な状態にある。アジュバントの種類により、誘導される T 細胞応答が異なるため、アジュバントを使い分けることで、ある程度は達成できるものの十分とは言えない。そのため、 抗原を改変することで、T 細胞応答を制御し得る方法論の確立 が望まれる。
		ブレイクスルー	問 2(注目科学技術)にまとめて記載済み。
L-57	10年未満	注目科学技術	超音波薬物デリバリー
		ブレイクスルー	安全な超音波照射条件や補助となるマイクロバブルの投与量設定
L-58	10年以降	注目科学技術	低分子化合物・ペプチド・抗体・核酸に次ぐ新規機能分子の医薬
		ブレイクスルー	各種基礎研究への支援
L-59	10年以降	注目科学技術	任意のタンパク質についての迅速な発現精製法の確立。
		ブレイクスルー	大規模データベースの整備と機械学習によるアプローチにより可能かもしれないが、技術的なハードルはきわめて高いと考えられる。
L-60	10年未満	注目科学技術	免疫学を下地にしたワクチンアジュバントの開発に関する研究開発
		ブレイクスルー	現在のアジュバントにおいて、Risk & Benefit の観点から、直視されていないアジュバント自体の毒性について、単回接種での議論だけでなく、今次パンデミックのように新興感染症に対するワクチン等、複数種類のワクチン接種の可能性を考慮した Risk 評価、それにより、効果(効能)と材料の両観点からの低リスク、高ベネフィットの両立
L-61	10年未満	注目科学技術	網膜再生技術 ;iPS 細胞から再生させた網膜の臨床移植手術が行われたが、より正常な網膜の再生が実現化するのではないかと考えている。
		ブレイクスルー	網膜再生をシミュレーションできる数理モデルの確立と臨床・再生技術への応用を目的とした連携
L-62	10年以降	注目科学技術	量子コンピューターの創薬研究への実装
		ブレイクスルー	量子コンピューターの産業界での利用が進むかどうか、またその計算力を生かすためのソフトウェア開発が必須だと考える。現状ではあくまでスナップショットを基にナノ秒の計算をするのにも時間がかかり、論理的な薬のデザインが進んでいない。またタンパクや RNA 等の生体分子の立体構造を推測する技術もまだ満足のいくレベルではないと思うため、より正確な生体分子の動的構造解析がシミュレーションできるようになれば、創薬研究に大きなインパクトがあると考える。
L-63	10年未満	注目科学技術	プラズマ医療
		ブレイクスルー	プラズマ発生機の量産化
L-64	10年未満	注目科学技術	ラジオアイソトープ (RI)特にアルファ線の積極的医療応用。 欧米に比較して、核医学の進展は著しく遅れている。特に、RI の取り扱いの法令規制のため、また、他分野の研究者の精神的障壁のため、他の分野からの研究者の参画を阻んでいる。現在、国内、複数の研究施設においてサイクロトロン などの設置が進んでおり、医療応用のためにも基礎研究の点からも推進すべき課題である。
		ブレイクスルー	人材育成。 啓蒙。
L-65	10年未満	注目科学技術	ロボット支援手術と AI 技術の融合
		ブレイクスルー	ロボット支援手術は、現代の手術の一つのモデルになっているが、今後はさらに進化するであろう。現在のロボット支援手術自体は、術者の技量の上達が非常に重要になると考えられるが、今後はロボット支援手術で使う部品の進化やその技術や多くの術者の手術経過のデータ化が進み、さらにそれらの big data の統合されることが、この科学技術のブレイクスルーには、必須である。この統合化が進むと、AI が、ロボット手術を支援するようなプログラム化ができると確信する。
L-66	10年	注目科学技術	近年、 迷走神経刺激やレーザーなどを利用したニューロモジュレーションの研究 が開始されている。てんかんなどへの応用がはじまっているが、今後ますますの適応拡大や非侵襲への改良、IT技術との融合が期待でき、動向に注目している。

	未 満	ブレイク スルー	非侵襲への改良、IT技術との融合、薬とは異なるポジショニングの提案
L-67	10 年 未 満	注目科 学技術	光超音波
		ブレイク スルー	実用化に向けての基礎評価・臨床評価への投資
L-68	10 年 未 満	注目科 学技術	光免疫療法
		ブレイク スルー	すでに、臨床試験が始まっているが、光源の最適な選択など、バイオと光化学の融合により適用範囲が拡張される期待がある。
L-69	10 年 未 満	注目科 学技術	衝撃波・超音波の医療応用技術 ・結石破碎用衝撃波の10分の1程度の強度の衝撃波には、人体に照射すると血管新生を促進する効果があることが見いだされ、虚血性心疾患の治療に応用されている。 ・診断用の超音波にも同様の効果があることが見いだされ、現在東北大学を中心として虚血性心疾患に対する治験が実施されている。 ・同じく診断用の超音波を脳に照射すると、認知症の予防効果があることが見いだされ、現在東北大学循環器内科において治験が実施されている。
		ブレイク スルー	・衝撃波・超音波の血管新生作用はその作用機序が解明されてきているが、超音波の認知症予防効果のメカニズムについては不明点が多いため、さらなる基礎的研究が必要な状況にある。
L-70	10 年 未 満	注目科 学技術	新型コロナウイルスの感染拡大に伴って、 公共空間で非接触な殺菌用途としての紫外線 が注目されている。特に、波長が200-230 nm程度の紫外光はFar-UVCと呼ばれ、人の皮膚や目に損傷を与えることなく、ウイルスの不活性化ができる。現在、この波長域はエキシマランプを用いて実現されているが、環境負荷が高い有毒ガスの使用、短寿命、高コストといった多くの欠点を有している。これを窒化物半導体を用いた固体光源(LED)に置き換えることができれば、多くの欠点が改善されるため、白色LEDと同様に多くの場所に設置可能な殺菌デバイスが実現できると考えられる。
		ブレイク スルー	Far-UVC領域のLEDはp型層のアクセプタの活性化エネルギーが高く、十分な正孔の供給が原理的に困難であるため、発光効率は1%以下と低く、発光効率を大幅に向上するブレイクスルーが必要である。正孔の高密度化、電子線励起法等の他の励起手法の導入、トンネル接合や変調ドーピングなどのデバイス構造の開拓、などの研究推進によりこの問題の解決が期待される。
L-71	10 年 未 満	注目科 学技術	診断と治療を両立する医療材料技術開発
		ブレイク スルー	医工連携体制の強化
L-72	10 年 未 満	注目科 学技術	大気圧状況下において、非熱平衡状態のプラズマを用いた医療活用。
		ブレイク スルー	プラズマ生成の安定化
L-73	10 年 以 降	注目科 学技術	超偏極化技術によるMRI高度化の臨床利用 である。MRI画像診断技術を画期的に高度化できる技術である。水素のシグナルが中心であったMRIの画像化に関して、炭素や窒素などの原子のシグナルを使えるようにする技術であり、代謝物質などをこれらで標識することで診断、治療に活かす
		ブレイク スルー	超偏極化技術は低温超偏極化技術が中心であったが、最近では室温で超偏極化できる技術ができつつある。今後、臨床に持っていくにはさらなる研究が必要とされている。
L-74	10 年 未 満	注目科 学技術	未利用天然資源を活用した抗菌技術 。コロナウイルスの影響で、抗菌・除菌に関する製品が数多く市場に出ています。人間にやさしい自然素材を使用した抗菌・除菌が注目されています。
		ブレイク スルー	自然素材を利用した場合、材料の確保のしやすさがコストに反映されます。食品工場などで大量に廃棄されるものから、抗菌性のあるものを見つけるなどのブレイクスルーが起きれば、普及につながると考えています。
L-75	10 年 未 満	注目科 学技術	コロナウイルスなど疫学調査を用いた感染予測技術。
		ブレイク スルー	政府の感染伝播のビッグデータの開示。アプリ情報を含む。
L-76	10 年	注目科 学技術	ヘルスケアデータを活用し、体調不良を予測・マネジメントすることが可能なAIシステム

	未 満	ブレイク スルー	・適切な同意取得のものとデータ活用(2次利用)の促進 ・ウェアラブルデバイスを活用した健康状態の予測モデル開発
L-77	10 年 以 降	注目科 学技術	遠隔医療 遠隔の持続的健康管理、バーチャル診断・治療技術の開発
		ブレイク スルー	国策としての研究支援(研究費、研究体制、人材)
L-78	10 年 未 満	注目科 学技術	公衆衛生, 新型コロナウイルス関連の感染症に関する研究
		ブレイク スルー	膨大なデータを効率的に解析する, 確実な実証試験
L-79	10 年 未 満	注目科 学技術	新規感染症予防技術
		ブレイク スルー	個人的見解を示すにも複数あり悩んでおります。
L-80	10 年 以 降	注目科 学技術	新興感染症の原因ウイルス等の出現や細胞の癌化を含め、ゲノム情報の変異として生物の進化の理解が進みつつあるが、ノイズ・レベルの一過的な変異の出現(後に集団としては淘汰される結果に終わる)と、環境への適応を通じてゲノム上に固定化され、結果的に進化の一つとして選択されるものとの、体系的な理解の研究は試行錯誤の段階にある。現在、入手可能なゲノム情報は、生命を記述する唯一のデジタル情報であり、全ての生物が有する固有の本質的な情報、例えば、個人(個体)の識別(双子であっても免疫系などの後天的な獲得因子により)も可能な情報である。このゲノム情報の特性は、これまで生物学的な機能解析(遺伝子など)による分類や理解が主体であった。それは、ヒトでは30億塩基という膨大なゲノム情報を遺伝子単位で比較解析するのが現実的であったからに他ならないが、スーパーコンピューターやAIに代表される情報解析の進展により、ゲノム情報をデジタル情報そのものとして比較解析することが可能となってきた。実際には、日本の人口1億人の全てのゲノム情報(30億塩基 x 1億人)を一度に比較解析を行うことは、未だに非現実的ではあるが、近い将来に必要とされる個別ゲノム医療には必須となる課題である。現時点で可能なレベルとしては、ウイルスを含む微生物など、ヒトに比べゲノム情報が格段に少ない生物でのゲノム情報のスーパーコンピューターとAIを活用した比較解析に留まっているが、それでも進化における新奇のゲノムデザインの法則性が発見され、その検証が進められている。こうした データ駆動型サイエンスによる生命の理解に関わる科学技術 が注目に値すると思われる。
		ブレイク スルー	現在のスーパーコンピューターとAIを活用しても、実際に解析可能なゲノム情報はヒトに比べゲノム情報が格段に少ない生物種に限定せざるを得ないのが実情である。そのブレイクスルーには、既存のコンピューター理論とは異なる量子コンピューティングの理論の活用が必要になるように思われる。現時点での量子コンピューティングは、現在のスーパーコンピューターやAIとの比較は困難であるが、両分野の研究者が協力して将来的な課題解決を模索していくべき研究分野であると考えられる。
L-81	10 年 未 満	注目科 学技術	新型コロナウイルスなど未知の感染症によるパンデミック発生を未然に防止するPCRや抗体・抗原検査とは異なる検査機器 の開発。
		ブレイク スルー	現在の要素技術の集合体で開発可能。
L-82	10 年 未 満	注目科 学技術	非侵襲的かつ高精度の診断技術 。現在の人間ドックや健康診断で行われる診断範囲は限定され、精度も不十分である。COVID-19のような感染症でも同様である。スクリーニングで抽出されなければ精密検査も行われず、精密検査の多くは侵襲性が高いか高価である。。早期発見すれば治療可能な疾患が、網羅的、非侵襲的かつ高精度で広く抽出される技術開発が望まれる。
		ブレイク スルー	バイオマーカーデータの網羅的収集とデータ化。因果関係仮説の抽出と検証。さらに治療方法と予後データとの相関データを収集、解析しフィードバック。それらを可能とするグローバルな情報収集体制の構築。
L-83	10 年 未 満	注目科 学技術	臨床材料を用いたメタゲノム解析による感染症および疾病の網羅的スクリーニング技術 に注目しています。現在のゲノム診断では、感染症および疾病と関連のある標的遺伝子を増幅して検出する方法が採用されていますが、この場合、標的遺伝子以外の情報が得られないという限界があります。臨床材料に含まれるゲノムDNAを高い精度で網羅的に解読できる技術が開発されれば、前述の限界を克服することが可能になります。例えば、結核が疑われる患者の診断において、結核菌DNAだけでなく他の病原体の核酸を幅広く探索することで、起因菌の探索が用意になることが期待されます。

		ブレイクスルー	臨床検体に含まれる DNA や RNA 分子を増幅することなく、一分子単位で直接解読することが望めます。現在、最も近いのは、英国のオックスフォードナノポアテクノロジー社が開発している MinION シークエンス技術です。一塩基当たりの正確性が 97%程度ですので未だ不十分です。99.9%程度の正確性が求められるため、シークエンス技術のブレイクスルーが必要です。
L-84	10年未満	注目科学技術	2019年より癌遺伝子パネル検査が保険適用となり、ゲノム医療なども身近なものになりつつある。しかし、ドライバー遺伝子の変異が見つかっていても実際の患者に合った治療薬が見つかる割合はそれほど高くない。そのため、より多くの癌患者から遺伝子変異情報を蓄積・解析する必要がある。また、新規ドライバー遺伝子の発見だけでなく、それらに対する分子標的薬の迅速な開発も急務となっている。 その問題点を解決のため、<u>癌患者の大規模な全ゲノム解析プロジェクト</u>や<u>希少癌のための個別科学治療薬の開発</u>の成功が期待される。
		ブレイクスルー	網羅的な癌患者遺伝子解析の実施による新規ドライバー遺伝子の探索と AI による膨大なデータ解析と創薬への応用が重要なブレイクスルーとなる。
L-85	10年未満	注目科学技術	スマートフォンを活用した医学的観点からの個人情報収集技術 。ネットから得られるビッグデータは一部の企業が商業目的に活用しているが、医療の観点からも有用なデータを収集できるはず。
		ブレイクスルー	心拍数、体温、血圧などの生理パラメータから脳波などある程度高度なものまで、非侵襲的にリアルタイムに計測して蓄積する技術。個人情報を匿名化データとして収集し、安全に管理、解析できる技術。
L-86	10年未満	注目科学技術	テイラーメイド医療
		ブレイクスルー	個人情報保護法の抜本的な改正(緩めるという意味で)
L-87	10年未満	注目科学技術	ロングリードシーケンサーにより取得された個人のゲノム情報に基づき、医療や保険などに関して個人ごとに最適化されたサービス が提供される。 構造多型などを的確に検出できるロングリードシーケンサーは、取得配列の正確性がショートリードシーケンサーに劣ると言われてきた。しかし、その正確性の低さ(エラーの多さ)を補正するための、機械学習を含めた機能を持つソフトウェア(解析技術)が進展している。この進展により、むしろショートリードで得られていたものより品質の高いゲノム情報が取得できるようになった。ロングリードにより判明する染色体の構造的な変化は、遺伝子機能の変化に結びつきやすいことからヒトの健康や疾患の発症に影響する可能性が高く、これらの情報を活用した個別化医療の進展や、保険商品の開発・販売が行われるものと推定される。
		ブレイクスルー	これに限らないが、個人のゲノム情報が誰に帰属するのか(その個人なのか、解析した企業なのか、それ以外の第三者なのか)についての社会的理解や制度の整備などが早急に必要であると感じる。
L-88	10年以降	注目科学技術	医原病発見のための AI・機械学習アルゴリズム
		ブレイクスルー	医療情報の匿名公開
L-89	10年以降	注目科学技術	我が国の予算に占める医療費の増加が止まらない。特に腎疾患による人工透析は莫大な費用がかかり、その大部分を国が賄っている。臓器移植はドナーが見つかるまでに10年以上かかることも多く、 多能性幹細胞から臓器まるごとを動物の体内で作製するような研究 が求められている。
		ブレイクスルー	ヒトと同じタイプの多能性幹細胞(サル、ブタ、ウサギなど)をブタの体内で効率よくキメラとして寄与させるような技術開発が必須であり、それさえ克服できればヒトの多能性幹細胞でも可能と考えられる。
L-90	10年以降	注目科学技術	高次元オミクスデータを用いた個別化医療 の実現。全患者もしくは全健常者がオミクスデータを取得し、解析を行い、適切な解釈を病院の医師又は個人が行うことが出来る環境やプラットフォームを整備する事で、個別化医療ないし個別化予防医療を実現する。
		ブレイクスルー	安価で患者がオミクスデータを取得できる測定サービス、そして測定したオミクスデータを蓄積し、患者自身や病院が効率よくアクセスすることが出来るオミクスデータのプラットフォーム形成が必要。
L-91	10年未満	注目科学技術	地域包括ケアシステムを中心として、特に介護分野への ICT、AI、ロボットなどの科学技術の応用と社会実装
		ブレイクスルー	個人情報保護条例と行政個人情報保護法などの改正による、当該科学技術領域における開発競争の活性化が必要

L-92	10年以降	注目科学技術	日本が得意とする醗酵産業にかかわる研究 。コロナ禍で注目された納豆や乳酸菌による免疫向上に関するもの。分子生物学の発達から免疫を活性化する微生物の創生や化合物の精製など研究の余地が多く残されていると考えられる。さらには多様性のある腸内細菌をコントロールする研究が大事かと考えられる。健康は古来からの課題であり、近年特に注目されていると考えられる。
		ブレイクスルー	多様性を解析するためのツール構築がブレイクスルーと考えられる。
L-93	10年以降	注目科学技術	日本では、人口全体の高齢化に伴って、高齢者の老化関連疾患に対する治療費の負担が増大している。そのため、医療のみならず、経済にとっても老化関連疾患を減らすことは喫緊の課題となっている。最近、山中伸弥博士の見出したリプログラミング因子を用いて、 老人の細胞のエピジェネティクスを若返らせることで、老化関連疾患が根本的に解消できる可能性 が浮上している。この科学技術が真実であれば、人の健康寿命は延長され、健康面・経済面ともに、現在の状況を改善できる可能性がある。
		ブレイクスルー	現在は、この科学技術はマウスでのみ実証されているので、人でも同様の効果があることを確認する必要がある。また、この技術では、リプログラミング因子を全身の細胞で発現させる必要があるが、現在は、それを実現する方法がないので、その方法の樹立がブレイクスルーになる。
L-94	10年未満	注目科学技術	尿の分析による健康診断技術
		ブレイクスルー	分析に必要なステップの簡略化とハイスループット化
L-95	10年未満	注目科学技術	歩くだけで疾患診断。マーカーレスモーションキャプチャーや表情を画像解析する事により神経精神疾患等を診断。
		ブレイクスルー	現状技術の応用とデータ蓄積により多くは実現可能か。高精度化の為には他の診断法(新規開発含む)との融合・連携が必要。
L-96	10年未満	注目科学技術	慢性症状の予測と制御 慢性病のようなものについての現状の状態チェックから今後の予測を自動的に予測するシステムの構築
		ブレイクスルー	医学研究者、数学研究者と情報系の研究者の共同研究が必要である。
L-97	10年未満	注目科学技術	タンパク質の構造変化が原因で発症するプロテインパチーは、アルツハイマー病、パーキンソン病、プリオン病などの神経性のものに加え、リウマチ、糖尿病、ALSなど全身性のものも多く知られている。これまでに、プロテインパチー発症に関わる様々なタンパク質が明らかにされてきたが、それらが生体内でどのように構造変化(変性)し、病気の発症に関与しているのか不明な点が多かった。近年、様々な蛍光プローブが開発され、プロテインパチーの原因となる変性タンパク質の凝集や沈着を生体環境下でイメージングすることが可能となり、生体内における変性や凝集・沈着メカニズムの解明、それを生体内で抑制する物質の探索なども可能となりつつある。 高齢化社会の進行に伴う認知症の増加をはじめとして、タンパク質変性を要因とするプロテインパチーは世界的な平均寿命の延伸に伴って大きな社会問題となりつつある。例えば、認知症だけでも世界の社会的コストは2018年に1兆ドル程度であり、2030年には2兆ドルを超えると試算されている。 バイオイメージング技術を活用したプロテインパチーの解明、およびその予防、治療法の開発 は有用であり、一分子バイオイメージング先進国である我が国が世界に先駆けて喫緊に取り組むべき課題である。
		ブレイクスルー	様々なプローブを用いたタンパク質の蛍光イメージングは既に様々な分野で確立されている。これをプロテインパチーに応用するためには、いかに生体環境下に近い条件を構築できるかにかかっている。近年の、相分離生物学の概念によれば、変性タンパク質の凝集や沈着は周辺の環境に大きく影響を受ける。すなわち、様々なタンパク質、脂質、塩などが高濃度で存在する中での変性や凝集の経時的な解析が必要になる。これらの、多種多様ないわゆる混ざり物が存在する中での変性、凝集、沈着やその抑制などを正確に解析する技術の開発、すなわち生体内環境の再現とその条件下での精度の高いイメージング技術の開発がまず最初のブレイクスルーとして必要である。次に、生体内の深層部位での in vivo イメージング技術の開発が進めば、生体内での様々な検証も進展するであろう。
L-98	10年以降	注目科学技術	1細胞解析技術による細胞アッセイシステムや診断システムの創出
		ブレイクスルー	1細胞をダメージなく、正確に、分離、解析、回収、さらには培養などのアッセイまでの一連の捜査作業ができれば、新しい細胞診断システムなどになりうると考えるが、それぞれの要素技術が未だ完璧でかつ簡単な操作になっていない。

L-99	10年以降	注目科学技術	AIによる栄養シグナル伝達経路の解明。 ある食品を摂取した時に、身体がどう応答するか、その人が、今、食べるべきものは何か、など、年齢、性別、体調などを入力すると、摂取したらよい食べ物を提案してくれるようなシステム。
		ブレイクスルー	一つ一つの栄養素の細胞内シグナルマップの作成、および生体応答マップの作成は、相当な時間と労力を要する。栄養素が単なる栄養の役割以外に、シグナル伝達分子として作用することを、どこまで明確に正確に解明できるか、が困難であると考えられる。
L-100	10年未満	注目科学技術	AIやディープラーニングとライフサイエンスとの融合。 すでにAIやディープラーニングはライフサイエンスには欠かせないことは理解しているが、さらにより身近にこれらが融合することで、研究の質や効率を一変させる可能性を秘めている。特にライフサイエンス分野における再現性や統計処理には未だに多くの恣意性を含んでいる。これらは、これまで研究者の責任の下、処理されていた。しかし、すでに研究者がデータに対して全ての知見を網羅し、データ解釈の責任を負うのは不可能だと考える。莫大な過去の知見を整理し、これらを効率的に排除するため、過去のデータベースから客観的に最適なデータを抽出することがコンピュータ技術で必要である。
		ブレイクスルー	情報処理能力の高いスーパーコンピュータの普及とそれを扱える人材。
L-101	10年未満	注目科学技術	AIを駆使した医療提供体制の拡充 (診断・治療・予防・疫学の全てにおいて)
		ブレイクスルー	ビッグデータの基盤構築と活用方法
L-102	10年未満	注目科学技術	In vitro 個体発生技術。 近年、京都大学や九州大学の研究グループによって体細胞初期化による生殖細胞の試験管内分化研究が、マウスから非ヒト霊長類モデルへと移行して精力的に進められている。今後は、分化させた配偶子(精子と卵子)を受精させ、人工的に作製した子宮で着床・発生させることで母体を介すことなく個体発生できる日が近い将来訪れると予想される。 この技術は、ヒトでは倫理問題が大きなハードルになるが、家畜ではすぐに実用化できる可能性が高い。家畜で実現すれば、鳥インフルなどの家畜伝染病のリスク減、飼育に係るコスト減、さらには頭数削減によって牛のメタンガス排出問題などの環境問題の改善にも一定の貢献が期待できる。
		ブレイクスルー	最大の課題は、着床・個体発生に必要な人工子宮の開発である。特に、家畜であればそれだけ大規模な装置になることから、理学・医学・農学などの生命科学者だけでなく材料工学や生体医工学などを専門とする研究者との強力な連携が必要になってくる。
L-103	10年未満	注目科学技術	MRI, CT, X-ray に代わるヒトの精密計測技術が光イメージングでできそうになっている。 光イメージングは1細胞すら可視化できる技術であるが、発光甲虫の遺伝子組換えが必要であり、ヒトへの利用に制限があった。しかし、最近、遺伝子組み換えをしていないマウス肝臓で、人工標識材料が発光することがわかり、発光に関わるマウス生体内物質の特定作業が進んでいる。これが確認されれば、 ヒトで1細胞イメージング ができる。
		ブレイクスルー	この研究に対しても、研究費は不足しており、政府系の助成は100万程度である。とても生命科学の助成とは思えない額であり、日本の生命科学技術が材料技術を軽視している状況が見て取れる。このままではまた米国に技術を取られ、日本は米国から技術を買って、生命科学の研究をすることになる。それでは、米国を生命科学技術で抜くことはできず、自国の技術で自国民を守れない現状が続くであろう。
L-104	10年未満	注目科学技術	オプトジェネティクス
		ブレイクスルー	ヒトへの適用には倫理的問題の解決が必要。
L-105	10年未満	注目科学技術	これまでに蓄積されている薬剤ライブラリーと、タンパク質三次構造ライブラリーを教師にして学習させた人工知能によるタンパク質三次構造予測エンジンの構築。さらに、これを利用した新規薬剤開発候補の提案。
		ブレイクスルー	タンパク質三次構造、各社製薬メーカーが保有している薬剤ライブラリーのオープンデータベース化が必須。
L-106	10年未満	注目科学技術	タンパク質発現の網羅的解析技法
		ブレイクスルー	質量分析を用いずに、新しい概念での解析法の開発
L-107	10年以降	注目科学技術	タンパク質分解誘導キメラ分子の研究開発。 細胞内の標的タンパク質に結合する小分子とユビキチン化関連タンパク質に結合する小分子をつないだ分子により、標的タンパク質をプロテアソーム分解へ誘導する。ガン治療薬としての臨床試験が進んでおり、実

			用化が大きく期待されている。細胞内のタンパク質であれば様々な治療薬へ応用が可能である。
		ブレイクスルー	タンパク質分解誘導キメラ分子の設計法における連結部位の一般化技術や標的細胞送達の技術にブレイクスルーが必要である。
L-108	10年未満	注目科学技術	ディーブラーニングによる細胞解析を用いた診断
		ブレイクスルー	教師データの高速取得システム・ビッグデータストア・教師データ無しで動くディーブラーニング
L-109	10年未満	注目科学技術	バイオ分野における単一細胞レベルでのエピゲノム解析
		ブレイクスルー	人間の体を構成する 30 兆を超える細胞のリアルタイムでの挙動を解析出来るコンピューター
L-110	10年未満	注目科学技術	レーザーと超音波を組み合わせた光音響イメージングによるバイオ及び医用診断イメージング技術 の実現。既存の光学イメージングでは観察することができない深部を非侵襲で 3 次元イメージングが可能である。超音波イメージングでも非侵襲深部イメージングが可能だが、二桁以上高い空間分解能を実現することができる。
		ブレイクスルー	現在は光学的にも音響学的にも線形効果しか用いていないが、光学的非線形性(多光子吸収等)や熱弾性的非線形性(Greunisen relaxation effect 等)を用いることができれば、現在実現している光音響イメージングより計測深さにおいても空間分解能においてもそれぞれ一桁以上の性能向上が見込まれる。
L-111	10年未満	注目科学技術	遺伝子改変技術を用いたヒト疾患モデル細胞・組織の作成 : Crisper-Cas9 を含む
		ブレイクスルー	ヒト細胞においては、遺伝子改変技術により疾患を模した細胞が樹立されつつある。これからは、それら細胞による疾患組織・臓器を用いたヒト疾患のメカニズムの解析が注目される。生命科学においては、近い将来、動物実験を含む倫理的問題に焦点が当たるため(EU における化粧品業界における動物実験の禁止等を含む)、人工的なヒト疾患モデルは非常に重要な技術となる可能性が高い。
L-112	10年未満	注目科学技術	医学・生命科学分野では 一細胞マルチオミクス解析技術 が注目されている。多細胞生物の機能は、多様な機能を有する細胞が相互作用することで実現される。各細胞の機能的多様性は DNA、mRNA、タンパク質、代謝物といった多階層の分子ネットワークにより実現される。一細胞マルチオミクス解析は、一細胞のクロマチン構造、mRNA 発現、タンパク質発現・修飾、代謝物を網羅的かつ多数の細胞で同時に解析し、複数のデータを関連づける解析である。一細胞の mRNA 発現を調べるトランスクリプトーム解析(single cell RNA sequencing)、一細胞のクロマチン構造を調べるエピゲノム解析(single cell ATAC sequencing)はすでに実現し、既存の知識によらずに細胞種を分類・解析する画期的な技術として注目されている。従来はこれらの解析を別々に実施していたが、近年両者を同じ細胞で実現する手法も開発された(PMID 33098772)。この技術により、細胞の機能変化に伴うクロマチン構造と mRNA 発現の経時的変化の関係を精度よく推定することも可能になった。一細胞レベルのタンパク質や代謝物の網羅的解析が実現すれば、一細胞で DNA、mRNA、タンパク質、代謝物の全階層にわたる分子ネットワークを可視化することが可能になる。
		ブレイクスルー	一細胞レベルのタンパク質や代謝物の網羅的解析は発展途上である。核酸でラベルした抗体を single cell sequencing 解析で検出する Cellular Indexing of Transcriptomes and Epitopes by Sequencing (CITE-seq)の導入で、一細胞レベルのタンパク質の解析を single cell RNA sequencing や single cell ATAC sequencing と組み合わせることはすでに可能である。抗体などの種類を増やしてタンパク質検出の網羅性を高めることは理論的には不可能ではない。産官学が連携して一細胞解析に使用できる抗体やタンパク質検出法の種類を増やす地道な取り組みが必要である。一方、一細胞レベルの代謝物の網羅的解析は実現には遠い。既存の方法の検出感度では一細胞の代謝物を検出するのが難しいことが主な理由であり、代謝物の検出技術の感度上昇が求められている。
L-113	10年以降	注目科学技術	医学分野における 組織構築技術
		ブレイクスルー	iPS 細胞をきっかけにリプログラミング法が様々な組織で行われており、一部の組織では臨床応用されているが、まだまだ発展途上の分野である。iPS 細胞では腫瘍を形成してしまうなどの課題も残されており、体細胞からの直接的臓器修復法が実現できれば、再生医学分野においてブレイクスルーになることが予想される。

L-114	10年未満	注目科学技術	一般的に、物体表面の温度を高精度・高確度・高速に計測することは難しいとされている。 高速・高精度・高確度な表面温度計測が可能となり、人体の皮膚表面温度計測 へ応用したならば、温度だけでなく皮下の血流状態など様々な生体特性を推定できる。その情報から人体の健康状態のモニタリングが可能となり、新型コロナウイルスの感染拡大予防の一助となり得る。
		ブレイクスルー	・熱流体工学に基づく表面温度と健康状態の関係の解明 ・大規模な臨床研究によるビッグデータの取得と解析 ・デバイスの小型化, 省電力化, 工業化
L-115	10年未満	注目科学技術	解剖学・形態学的分野において、画像解析の対象となる情報を得る方法として、 組織の透明化技法、また、特定の細胞や細胞小器官を光顕および電顕で可視化する遺伝子改変技術の開発・安定化、さらにそれらにより、組織・臓器内における望む特定の細胞がラベルでき、組織毎観察できる方法 の開発が期待されます。
		ブレイクスルー	透明化についてはすでにさまざまな方法が考案されており、組織・臓器等の対象毎に効果的な手法が試されている。また、遺伝子編集技術の確立により特定の細胞種のラベリングも可能であるといえます。それらを統合し、大容量の画像データの解析が可能な組織が求められます。
L-116	10年未満	注目科学技術	各種患者検体バイオバンクのデータ統合プラットフォーム オミックス解析のデータバンク、解析データの統合プラットフォーム
		ブレイクスルー	データ管理システムの統一のための技術革新、国際基準にあわせて
L-117	10年未満	注目科学技術	空間オミックス技術
		ブレイクスルー	低価格でハイスループットな解析
L-118	10年以降	注目科学技術	光が届かない生体内深部まで届く外部刺激(音やX線)を用いた治療
		ブレイクスルー	音やX線に対して狙い通りの応答を示す分子システムの構築。音の場合、キャビテーション(生体組織を傷つける)が起こらない程度の音圧で応答する必要があるが、そのような分子設計ガイドラインは現状存在しない。X線の場合、エネルギーが高すぎて励起ではなく電離を伴うこと、周囲の媒体でも電離が起こるので何が起っているのかを解析するのが難しい。
L-119	10年以降	注目科学技術	高齢化社会の真の解決に向けた、細胞・組織・個体レベルの機能回復技術 日本における高齢化の問題が叫ばれて久しい。年を取っても健康を保ち、身体機能、脳機能も維持することが誰しも願うことであるが、依然その実現には程遠いのが現状である。老化にともなう機能低下について、その分子機構の解明にむけ、様々な研究がなされているが、老化に根本的に立ち向かうためには、細胞・組織・個体レベル多階層に基いた研究が必要不可欠である。
		ブレイクスルー	上記概要に向け、老化に立ち向かうために、現在までの手法、技術をさらに高める必要があると思います。例えば細胞レベルの老化を改善するため、ゲノム編集技術、1細胞 RNA-seq 技術などを駆使する必要がある。また個体レベルで老化に立ち向かうために、各器官の機能を多階層で解明するとともに、得られた知見をもとに「アンチエイジング・ドラッグ」の開発が待たれていると思います。
L-120	10年以降	注目科学技術	生体内における単一神経細胞レベルでの活動のライブイメージング
		ブレイクスルー	透過性の悪い生体組織内への光照射、検出法の確立
L-121	10年以降	注目科学技術	生物では、非生命分子が多階層に構築することで、生命独自の機能が創発される。たとえば脳の神経ネットワークが生み出す自我や、単独では感受性の低い嗅覚受容体が、嗅覚器へと組織化されることで、イヌの鼻のような超高感度化学センサーが実現される。このように ゲノム情報を超えて、分子、複合体、細胞内小器官、細胞、組織、器官へと、分子の階層化がどのように機能創発へ結びつくのか 、ポストゲノムにおいてその解明は重要な研究分野である。
		ブレイクスルー	原子より小さなレベルでタンパク質を理解する、量子化学技術。
L-122	10年未満	注目科学技術	多次元パラメーターを測定可能なライブイメージング Cellomics 装置
		ブレイクスルー	ラマン、蛍光、SHG やりん光などのマルチモーダルイメージングを可能とするチーム統合型研究グラントの公募

L-123	10年未満	注目科学技術	多数の神経細胞の活動を記録すると同時に、行動の計測も行う技術。 これにより、神経といったメカニズムと行動というマクロな現象をつなげることが可能になる。
		ブレイクスルー	自由行動中の神経活動を誤差なく測定するブレイクスルーが必要。
L-124	10年以降	注目科学技術	体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス
		ブレイクスルー	人材確保、研究開発費拡充、研究基盤整備、国内国際連携、標準化、法規制整備、等
L-125	10年未満	注目科学技術	第二高調波発生イメージングによる画像診断
		ブレイクスルー	装置開発研究所と検診センターのようなスループットの高い組織との連携
L-126	10年未満	注目科学技術	非侵襲、かつ高精度で疾患診断可能な技術の確立。 例えばこれまで電子顕微鏡でなければ診断できなかった様なものを新規技術により高速で診断。
		ブレイクスルー	マルチモーダルなイメージング法の融合。画像再構築の高速化やイメージング新規技術の開発。
L-127	10年未満	注目科学技術	分子シミュレーションによって蛋白質と薬等の結合活性を高精度に予測する技術。
		ブレイクスルー	計算機の高高速化。
L-128	10年未満	注目科学技術	網羅的解析(sequencing、メタボローム、プロテオーム)、ホルモンの網羅的唾液検体測定 の医療応用(personalized medicine)
		ブレイクスルー	人手と研究経費の投資
L-129	10年以降	注目科学技術	・加齢や障害等から生活様式を高める技術開発(機械化された義肢等) ・コンピューターと脳を接続する試み
		ブレイクスルー	問2については、印象のみであって、具体的な技術開発については、専門外のために分かりません。 ところで、重点化を目指したアンケートに対して、はなはだ申し訳ないのですが、どこに芽が出るのか分からないのが研究や科学技術です。そのためにも幅広い分野に研究費を「ばら撒く」ことが大切かと思えます。 重点化とは、受験生が試験に出るところだけを勉強する、という山をかけるような要素が多いものであり、選択と集中とは、間違った時に大きな損失を伴います。幅広い分野への手当および重点化とは、相反する言葉ではなく、芽が出るようにすることと、出て来た芽を大切にすること、という順番を表すものかと思われまます。 さらに、若手研究者が平凡で幸せな家庭を築くことが出来るように定年性の雇用を確保することをお願いいたします。倉庫が満ち衣食が足り、人並みの生活ができれば、研究という仕事は出来ません。優秀な人材確保のためには、個人のささやかな幸福に寄り添った福祉の視点が必要かと思われまます。
L-130	10年以降	注目科学技術	ヒト脳神経細胞の機能同定
		ブレイクスルー	ヒト脳神経細胞のマッピングとfMRI等のイメージング技術の改良
L-131	10年未満	注目科学技術	我々が日々感じていることは、実は脳内で勝手に構築されていることであることが事実である。したがって、これを理工学的に取り入れることのできる研究(クロスモーダル、錯視、マルチモーダルなど)が今後は必要とされていくと考える。
		ブレイクスルー	どのように、人が感じることが関連性をお互いに持っているかについての知見がほとんどない状況なので、これを探求することがまずは必要である。次に、この知見に基づいて、以下に人を騙していくかという技術の創出が必要となると考える。
L-132	10年以降	注目科学技術	感性情報取得技術、感性情報解析技術
		ブレイクスルー	介護福祉、医療等の分野での人手不足を補うための技術であり、意思表示やコミュニケーションが困難な人の思いを伝えることで、同分野従事者の精神的なストレスを軽減できる。

L-133	10年未満	注目科学技術	機能的核磁気画像法(fMRI)または脳波解析技術を用いたニューロフィードバック技術 近年、fMRI や脳波の解析技術が進歩し、被験者の精神状態を逐次予測することが可能になってきた。この被験者の状態をオンラインで解析し、フィードバックとなる刺激を適切に被験者に与えることで被験者の精神状態に影響を与えることが可能になってきている。これを用いることにより、例えばうつ病患者の抑うつ状態をfMRI 解析もしくは脳波解析によってモニタリングし、適切なフィードバックを適切なタイミングで患者に与えることが可能になり、精神状態を改善できるようになる。
		ブレイクスルー	・脳機能測定技術の進歩 fMRI の課題は、施設間や実験者間における測定の際のばらつきであり、再現性よくデータを取得するのが難しい。また fMRI を有する医療機関に限られていることも課題である。より簡便にだれでも使用が可能な脳機能測定技術が生まれれば、本技術の実現が加速する。 ・脳機能解析技術の進歩 脳活動は極めて複雑であり解析の難易度が高く、被験者の精神状態を正確に予測することは課題である。この解析技術が向上すれば、より正確なフィードバックが可能となる。
L-134	10年以降	注目科学技術	人間の脳における言語処理機能の解明に向けた、全脳シミュレーション技術と、それを利用した人間の効果的な言語教育手法および言語リハビリテーション手法の研究開発
		ブレイクスルー	一部は、現在の深層学習の延長線上で達成できるが、本質的な解明には量子コンピュータの実用化が不可欠である。
L-135	10年以降	注目科学技術	筑波大学の桜井先生らのグループが、マウスの脳(視床下部)の一部に存在する神経細胞群を興奮させると、マウスの体温・代謝が数日間にわたって著しく低下することを発見し、この神経細胞群を Q 神経(Quiescence-inducing neurons: 休眠誘導神経) と名付け、この Q 神経を刺激することにより生じる低代謝を QIH と名付けている。Q 神経の研究を進めることにより、人間においても人工的に冬眠様の現象を誘導し、医療に応用できる可能性がある。
		ブレイクスルー	Q 神経を医学的に刺激するための受容体や内因性リガンド、種差に関する情報
L-136	10年未満	注目科学技術	特定の脳内記憶を強制的に読み込む or 書き換える技術
		ブレイクスルー	非特異的な記憶読み込みの活性化や記憶力の向上はある程度実現の見込みはあるようだが、特定の記憶のみを読み込んだり、記憶したり消去したりすることができるには何らかのブレイクスルーが必要であろう。化合物のデリバリー技術だけでは限界があると思われ、空間解像能の高い光・電気を使った侵襲性の低い対外からの照射方法との組み合わせが必要であろう。
L-137	10年以降	注目科学技術	難治性疾患等によるヒト脳神経系の機能喪失に対する神経補綴技術 。特に、脳神経回路の精密な人工的駆動技術を用いた直接的脳神経インターフェイス技術は、超高齢化社会における失明や失聴および重度の体性感覚障害を軽減し、将来的な介護崩壊を緩和するものとして注目している。
		ブレイクスルー	ヒトが持つ本来の脳神経機能を模擬する生体神経模倣型の小型情報処理装置の開発と、その装置と神経組織とをつなぐ、高い生体親和性と超微細構造を持つ、人工神経線維の開発
L-138	10年以降	注目科学技術	脳・神経系のネットワークの解明とその異常に基づく疾患の治療 近年の神経活動操作技術、モニタリング技術、1 細胞の遺伝子発現情報取得技術の進展により、個々の神経細胞がどのようにして他の細胞とつながって、行動に関与しているのかが理解されるようになってきている。
		ブレイクスルー	モデル動物としての実証にとどまっているが、さらにヒトに近い高次機能を有するモデルでの実証が必要となるのではないかと。また、さらなる技術開発も望まれる。
L-139	10年以降	注目科学技術	脳のグリア細胞の役割の解明 : 脳はニューロンのネットワークで種々の活動をしていると考えられてきたが、最近ではニューロン以外の脳の構成部位であるグリアの役割に注目が集まっている。これは単にニューロンの活動を補佐しているだけでなく、各種の脳神経疾患や思考や記憶にも関与しているという研究もある。まだ不明な点が多いが、脳の機能の解明に新たな光阿を投げかけられるものとする。
		ブレイクスルー	実状態における脳内の活動状況の計測技術: 光や電磁波などを用いた手法による非接触・非侵入での生体での脳の活動状況の計測が、グリアの活動状況とその意味解明には必要であると考えられる。

L-140	10年未満	注目科学技術	脳の記憶と学習のメカニズムの理解とその応用。 各脳部位で起こる神経細胞の接合部位であるシナプスの形態および機能の変化に応じて、記憶や学習が起こる。動物実験では人為的に神経細胞を活性化させて経験していないはずの記憶を埋め込んだり、シナプス人為的に破壊することで記憶を消去することが可能になった。睡眠中の記憶や学習の固定化メカニズムの理解も進み、睡眠中の脳活動を操作することでの記憶固定化の強化なども報告されている。また、従来はシナプスの変化は即ち学習の結果と考えられてきたが、シナプスは神経活動が無くても自発的に変化していることが明らかになり、この自発的形態変化が学習と対になって働く記憶の保持・忘却機構であることが指摘された。理論的にはAIの発展とシナプスのモデル化が相互に脳機能の理解を深めている。全容解明には時間がかかるが、実験と理論の協力により段階的な応用が視野に入っている。
		ブレイクスルー	脳とロボットとを接合するサイボーグ技術。ロボットの発展は目覚ましくシンプルなルールのもとでは脳を凌駕している。一方で、センサーの感度、適応性能、ルールが定かでない複雑な環境下では脳が優れた機能を示す。脳とロボットを融合することで、より優れたサイボーグをつくるだけでなく、このような試みを通して、脳の高次機能や社会性も明らかになると期待される。科学と倫理が一体となってサイボーグ技術を推進すれば、脳科学・ロボット工学の両分野へのブレイクスルーをもたらすと予想される。
L-141	10年未満	注目科学技術	脳や臓腑など、薬剤が届きにくい臓器を対象としたドラッグデリバリーシステム、細胞内の標的を対象としたドラッグデリバリーシステム。
		ブレイクスルー	実現のためには、創薬科学だけではなく、ナノサイエンスとの連携が不可欠と思われる。協業によってはじめて技術的なブレイクスルーが生まれ得るのではないかと。必要なのは、異分野融合や研究者の自由な交流が奨励される研究者コミュニティの分化やダイバーシティを尊重する研究者の基本的な態度だと思う。お金を投じるなら、ダイバーシティ推進、研究者コミュニティの意識改革へ。
L-142	10年以降	注目科学技術	脳型デバイス に注目している。いわゆる従来のノイマン型計算ではなく、リザーバー計算などの非ノイマン型の計算手法を行うもので、生体内で行われている計算手法に近く、省エネで多様な解が得られると期待している。素子をネットワーク化するなどして構築される。
		ブレイクスルー	ゲートが必要な従来の半導体デバイスのネットワーク化すると、デバイス自体が巨大化するため、現実的ではなくなる。生体と同じようにイオン伝導を利用したソフトマテリアルで計算を行うようなブレイクスルーが必要と考える。
L-143	10年以降	注目科学技術	脳情報からこころの状態を抽出してリアルタイムに運用する技術。
		ブレイクスルー	頭皮上脳波、頭蓋内脳波、脳磁図等の欠点こそ相互に補い合われた計測デバイスがない。
L-144	10年未満	注目科学技術	脳神経の回路網を高速電子顕微鏡を使って網羅的に解析することにより脳の動作メカニズムを解明し、これに基づいた人工知能を開発する。 現在、米国にてショウジョウバエの全データ取得が完了し、今後10年程度でマウスやヒトのデータ取得が実現されると期待されている。AIを用いた電子顕微鏡画像の解析技術も、積極的に開発されつつある。
		ブレイクスルー	・電子顕微鏡用試料の自動的な作製技術の高度化。 ・電子顕微鏡撮影の高速化。 ・AIを用いた電子顕微鏡画像解析の高度化。 ・解析した脳神経回路から脳の動作をシミュレーションする技術の開発。
L-145	10年以降	注目科学技術	脳内の1個の神経細胞の活動状態を体外から非侵襲的に計測する技術
		ブレイクスルー	神経細胞の活動を反映した、透過性の高い電磁波信号を検出する高感度センサー
L-146	10年未満	注目科学技術	脳波などの脳活動に基づいて、リアルタイムで脳を刺激するニューロフィードバック技術。 学習やスポーツでのパフォーマンスが向上することが分かりつつあり、神経・精神疾患などの治療法にもつながると期待される。
		ブレイクスルー	現在は、脳活動に基づいてデコーディングを行っているが、ウェアラブル端末などの末梢データに基づいてデコーディングする技術にブレイクスルーが必要。さらには、現在はリアルタイムに脳を刺激しているが、末梢から刺激する技術もブレイクスルーも必要と考えられる。
L-147	10年	注目科学技術	シンプルなモデル生物を用いたヒトの疾患研究

	未 満	ブ レ イ ク ス ル ー	他に比ベゲノム中の重複遺伝子が少ない、安価で飼育できる(愛護活動者からの批判が少ない)、遺伝解析サイクルが早い、神経回路レベルや行動レベルでの解析が可能、という意味で今後ハエ等を用いた研究は進むであろう。一方で、基礎研究として実施すべき事項でもあり、応用研究以外の枠としての財源確保も検討いただきたい。
L-148	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	褐色脂肪細胞(brown adipocyte; BA)は加齢・肥満・糖尿病で減少する熱産生脂肪で、世界的に増加している肥満や糖尿病の病態に関わっていることが知られている。 褐色脂肪細胞を活性化 することが出来れば、肥満人口を減らすことが出来、肥満関連疾患を減らすことが出来る。
		ブ レ イ ク ス ル ー	アカデミアにおいて、継続的に研究を進められる体制が必要と思う。分野運営費の削減など、研究と教育の両立が厳しくなっているように思う。
L-149	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	細胞医薬品(細胞治療): 自分や他人の細胞を、薬のように用いて病気を治療する方法。iPS細胞やES細胞を用いた再生医療だけでなく、投与された細胞の働きで疾患を治療する細胞治療もある。例えばガンの治療法として、患者のT細胞にCAR(キメラ抗原受容体)を発現するように改変し、ガン細胞を認識・攻撃させる技術が実用化されている(CAR-T細胞療法)。より広範な疾患に対して、細胞医薬品が開発されると期待している。
		ブ レ イ ク ス ル ー	現状では、時間と手間・コストがかかる(患者から採取、遺伝子操作で細胞改変、増幅して投与)。他の科学技術(生体高分子科学・材料科学)の利点を取り入れて、迅速化・汎用化・低コストへのブレイクスルーが必要と感じる。
L-150	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	細胞競合 がん細胞など、正常とは異なる細胞が免疫細胞ではない同種の細胞と競合する現象の制御
		ブ レ イ ク ス ル ー	様々な細胞競合のパターンが知られているが、それらを一貫して理解できる共通したシステムの解明
L-151	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	次世代を担う子供たちの健康な成長に影響を与える母体の生活習慣に関する科学的情報の精査。 具体的には、近年、子供の健康を脅かす様々な疾病の罹患率が増加の一途を辿っているが、この一因が母体内での環境にあることがわかってきている。つまり、母体内環境を制御することで、子供の健康な成長を担保できる社会を構築することが可能となる。少子高齢社会に突入している我が国において、次世代の健康を守ることは必要不可欠であろう。
		ブ レ イ ク ス ル ー	子供にとって母体内環境が重要であることの周知徹底。
L-152	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	疾患のもととなる異常細胞が出現した際にそれらを免疫システムを介さずに速やかに除去する、新たな疾患予防技術: これまでに成体組織に出現した異常細胞が“がん”など多様な成人疾患の原因となることが知られていた。また、近年の次世代シーケンサー(NGS)解析及び細胞系譜解析の技術革新によって、ヒトの胚発生過程で体細胞変異や染色体異常を持つ異常細胞が頻繁に生じることや、それらの異常細胞が増殖してモザイクを形成することで“てんかん”やアルツハイマー病、自閉症などの発祥に寄与する可能性が示された。したがって、体内に突発的に出現する異常細胞を速やかに排除することは疾患予防につながる。ごく最近になって、免疫システムを介さない異常細胞感知除去機構として細胞競合が俄に注目を集めつつある。細胞競合は異常細胞の出現を隣接正常細胞が感知しこれらを組織から排除する現象であり、胚発生における細胞品質管理や発がん予防に関わる可能性が見出されつつある。今後、細胞競合の理解が進めば、新たな疾患予防技術につながっていくと期待できる。
		ブ レ イ ク ス ル ー	細胞競合の特異的制御因子の同定と、それをコントロールする技術の開発
L-153	10 年 以 降	注 目 科 学 技 術	少子高齢化は我が国のみならず先進国の多くが抱える大きな問題となっている。生産性が下がればその国としての存続さえ困難になる。その原因の一つとして、女性の社会進出による出産数の減少があげられる。女性の社会進出は好ましいことである反面、出産年齢の高齢化が避けられず、我が国は不妊治療の保険適用に踏み切った。しかしながら、高齢出産は卵子や胚に影響を及ぼすため、いかに不妊治療を保険適用にしようとも根本的な問題は解決しない。今こそ 高齢の女性でも安全で高効率な出産を実現するような研究 が求められている。
		ブ レ イ ク ス ル ー	高齢出産ではなぜ出生数が減少するのかを解明しそれを改善するような研究
L-154	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	食事習慣に基づいた予防医学。 特に栄養が豊富な野菜、海産物に含まれる栄養素がどの身体部位にどのような作用をもたらすかを解明することで、生活習慣病や老年病に対して予防医学的なアプローチを試みる。
		ブ レ イ ク ス ル ー	様々な食品が有する有益な効果が多くの研究で報告されているが、これらのデータを蓄積、解釈する技術が必要である。

L-155	10年未満	注目科学技術	心不全は予後不良の心疾患の終末像であるが、最近、 心拍数のみを純粋に減少させる治療法の予後改善効果 が注目されている。従来、β受容体遮断薬の心不全改善効果は広く認められているところであるが、心拍数だけではなく、心臓の収縮性にも負の影響を与えてしまうことから、問題があった。
	ブレイクスルー	β遮断薬は心不全症例には必須の薬剤であり、β遮断薬を処方しない治療は倫理的に許されにくい、その点をクリアできれば、心不全の新しい治療薬が加わり、また有効な治療薬が存在しない拡張不全にも、心拍数減少による拡張期延長によって効果が見込まれる。	
L-156	10年未満	注目科学技術	人間機能を越えた人工身体の実現：近年の高性能な義手・義足などは、限定的な範囲であれば人間の身体と同様の機能を果たす。また、義足のランナーの通常のスポーツ種目への参加資格の有無が問題になったことがあるが、限定的な範囲では義足などに通常の人間以上の能力を付与することは現在でも容易である。 元の生物学的な人間以上の、あるいは人間にはない能力を持つ人工身体の開発や普及 も近い将来確実と思われる。
	ブレイクスルー	特別な技術的ブレイクスルーは必要ないのではないかと考えている。ただ、いわゆる「障がい者」が容易に「健常者」以上の能力を獲得できるようになれば、一種のパラダイムシフトを迫られるかも知れない。	
L-157	10年以降	注目科学技術	人工筋肉の実現。 電気刺激などの弱い外部刺激によって伸縮する繊維を化学的な方法によって安価に合成できるようになる。この繊維を適当に束ねて使用することで任意の強さの伸縮力を備えたデバイスが実現可能である。ただし、このデバイスがどの程度伸縮するか、どの程度のパワーが出るか、等の駆動特性については製造時点で明らかでない。そこでこのデバイスの両端に位置センサーを取り付け、さらに反復学習用のAI素子を取り付ける。そして、様々なパターンの外部刺激を与えた時の駆動特性を、位置センサーで検出し、AI素子に学習させる。デバイスの駆動特性を学習したAI素子を介してこのデバイスを制御することにより、このデバイスは人間の意志によって制御可能な人工筋肉となる。
	ブレイクスルー	・弱い外部刺激によって伸縮する安価な繊維質およびその製造法の確立 ・現代のロボット技術における主要な駆動力であるモーターに対して、人工筋肉が優位となる使い方の発掘	
L-158	10年未満	注目科学技術	人工知能による病理診断 に注目しています。悪性腫瘍に対する薬物療法の進歩は目覚ましく、近年、殺細胞性抗腫瘍薬のみならず、有効な分子標的薬や免疫チェックポイント阻害剤なども、臨床において多数用いられてきている。それに伴い、必要とされる病理診断数も膨大となり、限られた労働力で高精度な診断を遂行するためには人工知能による補助的診断も必要とされている。
	ブレイクスルー	人工知能による病理診断において、盛んに研究が行われているものの、実用化が難しい背景には、①電子カルテからの病理画像の取り出し、セキュリティ(個人情報保護)などに際しての作業効率の問題(データ量が大きく、その処理に時間を要する、大きなデータ量を保存するサーバーが必要で費用がかかる)や、②診断の責任の所在、③これまでにない方法で人工知能による病変の検出が試されている反面、従来の診断の補助となるような人工知能のコンセプトが少ないのではないかと(新規性を求める一方で、既存の膨大な病理診断の負担を軽減できるようなツールが考慮されているケースは多くないのではないかと)といった事柄が考えられる。 ①②③を考慮することはブレイクスルーにつながるのではないかと考える。	
L-159	10年未満	注目科学技術	人体における食品の消化・吸収過程を模擬し食品の体内動態を評価する技術 に注目しています。「人生100年時代」においては、幼少期、青年期、中年期、前・後期高齢期といったライフステージにおける人体機能の変化に対応して「おいしく、機能的な」食品の設計が求められています。世界的に動物実験の実施が制限される方向に向かう中、人工的環境下で食品の動態を分析評価し、これを基礎とした食品開発につながる技術は今後その重要性を増すものと考えます。
	ブレイクスルー	食品の機能性に関する知見の蓄積は目を見張るスピードで進んでいます。一方で、摂食後の食品が体内でどのように消化・吸収されるかという過程の解析によく用いられる動物実験を廃止・縮小する流れは世界的に広まっています。これまでに得られている知見を実際の食品開発・製造に活かすためには、非動物実験的な食品機能の評価方法の確立、評価装置の開発、評価規格の標準化が必要であり、国際的なレベルでこれらに取り組むことが技術的なブレイクスルーにつながると考えます。 また、上記分野、特に物理的・化学的な食品の特性をふまえた食品製造プロセスに関わる研究開発に従事できる食品工学分野の研究者の育成も必要です。大学等の高等教育機関において「食品」を冠する学科・専攻・講座等の組織が減少する中、当該分野の発展に貢献しうる人材の確保は急務です。ただし、必ずしも「食品を専門とする研究者」というかたちである必要はなく、多様な専門性を持つ研究者が参入し、学際研究分野として食品研究が活発になることが望ましいと考えます。	

L-160	10年未満	注目科学技術	全遺伝子転写産物・全タンパク質・全代謝産物量などについて、組織内での位置を保持しながら一細胞レベルで検出する技術。
		ブレイクスルー	・特定の配列を持つ DNA などを貼り付けた 1~数 μm レベルの粒子を、数 μm 間隔で整列配置する技術。その際に、粒子に貼り付けられた DNA 配列情報と、配置された場所が記録されている必要がある。 ・数 μm 厚さの組織切片をさらに数 μm 間隔で切断し、それぞれを位置情報を維持しながら別々に回収する技術。
L-161	10年未満	注目科学技術	腸内細菌叢と健康・疾病の関連性の解明
		ブレイクスルー	個人レベルでの腸内細菌叢代謝物の網羅的解析技術の向上とそのモニタリングシステムの開発
L-162	10年以降	注目科学技術	統合失調症等の精神疾患の原因解明
		ブレイクスルー	ヒト GWAS 研究を取り入れたモデル動物による研究とドラッグスクリーニング
L-163	10年未満	注目科学技術	乳がんの遺伝子発現パターンを解析 することで、薬物治療の選択の助けとする
		ブレイクスルー	現状でも乳がんの遺伝子パターン解析は行われているがどのようなパターンがどのような薬物治療に対応しているかが解明されていない。現在、少しずつ薬物治療との関係が明らかになってきており、新規の作用機序の薬物に対しても遺伝子パターンとの関係が明らかになってくればテーラーメイド医療につながる
L-164	10年以降	注目科学技術	分子生物学的診断
		ブレイクスルー	分子生物学的診断は将来の医学研究領域として大変有望な分野です。インスリン抵抗性の動脈硬化による血管内皮酸化ストレスや炎症への治療介入における新規分子画像評価法の開発も海外では進んでいます。この技術は肺高血圧を来した肺動脈、腎動脈、膠原病に関連した血管炎の評価にも応用できます。
L-165	10年未満	注目科学技術	老化と疾患の研究、アンチエイジング創薬 がん、心臓病、認知症など、さまざまな疾患が老化を遅らせることで治療できる可能性がある。
		ブレイクスルー	がん、自己免疫疾患のみならず、多様な加齢性疾患と免疫系との関連が示唆されており、慢性炎症、免疫代謝、免疫老化、マイクロバイオーーム等の研究分野においてブレイクスルーが期待される。
L-166	10年未満	注目科学技術	老化に関する研究。 老化の本質や加齢にともなう肉体の退行の解明。特に、免疫による退行の促進と抑制およびその調節技術の開発。
		ブレイクスルー	老化の個人差を踏まえた予測精度を向上させる技術。
L-167	10年未満	注目科学技術	嚥下関連筋活動から嚥下関連器官の動きの推定
		ブレイクスルー	精度の高い解析、行動予測ソフトの開発
L-168	10年未満	注目科学技術	「人工知能によるデザインを利用した現存する抗体・タンパク質・酵素を超える性能を持つスーパー抗体・スーパータンパク質・スーパー酵素の開発」 現在、人工知能が様々な分野で利用されて始めている。抗体、タンパク質、酵素などの生体分子の設計においても、その利用が始まっている。その中でも、現存する抗体、タンパク質や酵素の性能を遙かに超えるスーパー抗体、スーパータンパク質、スーパー酵素の開発は、例えば、抗体については抗原に多少の変異に関わらない作用、広く使われているタンパク質の代表例である蛍光タンパク質については高精度・高分解能の測定、酵素についてはより少ない資源量での反応等の可能性を持ち、SDGs を実現するために役に立つことが期待される。
		ブレイクスルー	人工知能の学習には、機械学習、深層学習(ディープラーニング)が用いられるが、学習データを越える性能を持つスーパー抗体、スーパータンパク質、スーパー酵素を設計するために必要な学習をどのように行うかという課題がある。また、学習データに用いる抗体、タンパク質、酵素などの情報を人工知能が使いやすい形で整備する必要がある。さらに、より多くの学習データを収集するために日本及びその近海に生息する生物資源を積極的に解析することが必要である。

L-169	10年以降	注目科学技術	「 うつ病・双極性障害・統合失調症・アルツハイマー病等の脳・神経機能障害の病態解明に基づく、病状コントロールを可能とする医薬品開発 」に注目している。 脳は人間の臓器の中で最も重要な臓器の一つであり、高次精神機能を担う。認知症やアルツハイマー病、うつ病、統合失調症、自閉スペクトラム症などの疾患は、患者が多く社会的にも大きな問題である。こうした精神・神経疾患は脳の病であるが、その原因は未だ十分に解明されていないことから、治療法が確立されているとは言い難い。しかし近年、例えば、X線自由電子レーザー(XFEL)をはじめとした技術により、脳・神経に存在するドパミンD2受容体をはじめとする神経伝達物質の受容体や蛋白質の構造が解明されつつある。脳・神経疾患の原因と関連する受容体構造の解明は、有効性が高く副作用の少ない治療薬の開発につながると考えられる。さらに、こうした受容体・蛋白質等の構造情報を蓄積し、人工知能(AI)に利用することにより、治療に有効な薬物構造を予測・最適化することができ、迅速な治療薬の開発につながることが期待される。
		ブレイクスルー	疾患と関連する、脳・神経の受容体や蛋白質の構造解析を推し進めることのできる、X線自由電子レーザー(XFEL)をはじめとした解析技術がさらに開発されることが望まれる。また、医薬品開発における人工知能(AI)の利用は、未だ限定的であり、製薬へのAI利用の実現化には企業や機関を超えた人材やデータ等の共有システムの整備が必要と考える。
L-170	10年未満	注目科学技術	「 人工知能(AI)・シミュレーション技術を活用した医薬品開発 」に着目している。 医薬品開発では、新薬の候補化合物の探索にはじまり、非臨床試験や臨床試験といった膨大な実験計画と実験、さらにデータの構築・選定を繰り返す必要がある。膨大なデータ群であるビッグデータとAIを活用することで、医薬品開発の効率化と生産性の向上が期待される。
		ブレイクスルー	医薬品開発における人工知能(AI)の利用は、未だ限定的であり、製薬へのAI利用の実現化には企業や機関を超えた人材やデータ等の共有システムの整備が必要と考える。
L-171	10年未満	注目科学技術	AIを活用した有機合成反応の最適経路の予測技術や、生体分子間相互作用・生体分子と基質分子(薬剤などを含む)間の相互作用の予測技術。
		ブレイクスルー	IT等、情報技術をもつ研究者や企業と、生物・化学・物理分野の研究者の間での情報共有、共同研究、新技術開発等。スーパーコンピューターの維持や、性能向上への取り組みは継続する必要がある。また、研究環境や資金面でこれらをサポートする国や行政の仕組み。
L-172	10年未満	注目科学技術	AI創薬 は現時点でも盛んに研究されているが、今後かなり急速に創薬の研究を変えていく可能性がある。創薬研究では、①これまでに膨大な化合物の構造と生物学的な活性の相関に関する研究が行われており、かなりのビッグデータが蓄積されている、②リガンド-生体分子の相互作用は物理的なルールに基づいておりそれらを駆使したパラメーターを設定できる、等の理由によりAIとの相性がよい。今後、標的分子に対し、AIを利用してより効率よくリガンドを設計することが可能になると思われる。
		ブレイクスルー	ビッグデータは豊富に存在するが、論文などで発表されているものは、かなりの量のネガティブデータが捨てられており、バイアスがかかっている。通常、論文、特許には記載されない捨てられたネガティブデータも含めた包括的なデータの収集を行う必要がある。
L-173	10年未満	注目科学技術	タンパク質の分解機構を利用した標的タンパク質分解誘導薬(Targeted Protein Degradation; TPD) 。具体的には、標的タンパク質に結合する低分子リガンドとタンパク質の分解を誘導するE3リガーゼ等を認識する分子をリンカーで繋ぎ、細胞内で標的タンパク質を選択的に分解する技術である。利用するタンパク質分解誘導系がことなる、PROTAC、SNIPER、LysoTACなどが開発されている。これまで、細胞レベルの実験などではタンパク質のノックダウン法としてRNA干渉(RNAi)が利用されてきたが、RNAを標的部位の細胞内に導入するのが難しく、医療的な応用は限られていた。TPDは低分子化合物を用いるため比較的細胞内へのデリバリーが容易であり臨床応用に向けて急速に技術が発展している。
		ブレイクスルー	RNAiでは、標的遺伝子のDNA配列情報からノックダウンに必要なRNAを容易に設計できたが、TPDでは、標的タンパク質に結合するリガンドを見つける必要がある。タンパク質に結合する分子を設計するのは未だに容易ではなく、また、このリガンド自体が標的タンパク質の阻害剤やアゴニスト、アンタゴニストなどで、その機能を制御する化合物であることも多いのが課題である。
L-174	10年以降	注目科学技術	感音難聴治療薬の開発
		ブレイクスルー	遺伝性難聴についてはiPS細胞を用いた薬物スクリーニングにより早晚治療薬の開発が期待できるが、老人性難聴や騒音性難聴という高齢化やスマートホン普及により急速に増加するであろう後天性難聴については、単一ではなく少なくとも数個以上は存在すると予測される重要原因遺伝子の同定がブレイクスルーをもたらすのではないかと。

L-175	10年未満	注目科学技術	<p>高質で産子につながるヒト卵子の作出・保存技術に注目している。近年、日本の人口の減少は急激であり、新型コロナの影響による2020年の急激な低下を見てわかるように、感染症の蔓延や経済の困窮など、出生率は困難に対して下振れしやすく、好材料がないと穏やかな下降は今後も進むかと思われる。すでに諸外国に比べても後手に回っている少子化対策は我が国のためにも今すぐに何らかの手を打つ必要があると考えられる。</p> <p>そもそも、近年の先進国における出生率の低下は高齢化の進行速度を越えて加速し、不妊症と認定されるカップルは6組に1組以上に達している。これは、国民全体のQOLの確保を考えると早急に改善を考慮すべき状況と推察される。現在の少子化の根源にあるのは、女性の年齢が35歳ごろになると現れる“卵の質の低下”という生物学的現象と、女性の進出を推進してきた近年の社会構造の変化との軋轢が主要因と思われる。女性の社会進出も支持しつつ、より可変的に出産時期をコントロールしたらしめ、ひいては人生全体のQOLの向上へと結びつけるには、原因となる生物学限界を回避あるいは打破する新しいブレイクスルーが必要だと考えている。そのための重要な技術の一つが、卵子が老化する前に凍結保存する技術である。代理母出産の事例などから、着床するための子宮は50歳前後まで胎児を保育する力が衰えにくいとされていることから、若いうちに高い質の卵子を凍結しておくのは上記の解決策の一つになりえる。一方で、病気等で卵巣や子宮に問題を抱え不妊に至った場合や、すでに現在卵子が加齢問題を呈している患者の場合には、高質な卵子の作出を補助する手法が必要になると思われる。幸いなことに、この問題について最も科学的進展をもたらしているのは日本人研究者である。iPS細胞からの哺乳類卵子作出に成功したのは日本人研究者(九州大・林教授ら)であり、同じグループからさらにiPSから卵子様の細胞を作出するための決定的遺伝子も同定され、上記のブレイクスルーを絵空事でなくしたと感じている。今こそ、これらの国産技術の進展を助長し、先進国の中でも日本が先駆けて生殖補助医療大国になることで、恒久的な少子化対策の礎になるように思われる。</p>
		ブレイクスルー	<p>晩婚化と少子化の相関問題と女性の自己実現を同時に解決するには、社会的体制の整備や現況の認識を打破する社会構造の定着、さらには卵子の保存や不妊治療への公的保障の充実といった政治的先導も必要であるのは間違いない。現在、社会としてこの実現に沿った動きが増えつつあるのはよいが、その変化と定着には長い年月がかかる点と、緩やかに考え方を浸透させていく場合、帰結する着地点が出生率の高い社会かも不明だという点を懸念している。すなわち、本件はレギュラトリーサイエンスとしての視点を忘れてはならず、今後進展させるひとつのブレイクスルーは、国として本件の情報を明らかにし、議論を経て早期に方針を決めることと思われる。</p> <p>次に、科学技術的課題については、現在卵子の凍結保存技術はすでに高い水準にあり、受精卵から産子を得る確率についても、凍結前の発生率に対してそれほど大きく落ち込まずに済むようになっている。あとはこれを知らしめる啓蒙活動や、現在は特に女性の自己実現のためにこれを用いることについて議論されつつしているのに対して、議論を含めた社会体制の整備などが大きな課題になると認識している。</p> <p>一方、上述したように不妊と思しき症状をすでに呈している場合には、排卵した卵子を得ることが技術的に難しい。これも日本人研究者らが活躍して明らかにしたこととして、加齢による卵子の質の変調については、排卵される前の減数分裂期ですでに生じているとするのが近年支持される考え方である。よって、必要とされるブレイクスルー技術として、卵巣から排卵前の卵子を取り出して体外にて高質な卵子に发育される技術、あるいはiPS細胞のような完全に未分化な細胞から高質な卵子を創り出す技術が重要と思われる。さらに述べると、これらの技術によって創出した卵子は、産子に至るには母体に着床させることが必要であり、1人の母体に着床させられる機会は実質的には非常に少ないことに留意することが重要である。すなわち、得られた卵子についてどの卵子が最も高質で移植にふさわしいかを評価する、それも卵子の发育に対して非侵襲的に評価するための基礎科学的な技術構築がブレイクスルーにおいて絶対な要素だと思われる。これらの技術は相乗的な効果が期待でき、かつ現在の最先端技術が我が国にそろっていることを考えると、より注目に値すると考える。</p>
L-176	10年以降	注目科学技術	<p>再生医療における三次元培養技術(3D培養技術)。これまで立体的な足場に細胞を播種して三次元組織を形成する方法があったが、軟骨などの比較的低密度の組織は形成できても、消化器官、臓器などの高密度の組織、異種細胞の層構造を再現することは困難である。生体に近い組織や臓器を人工的に作製する技術が求められている。</p>
		ブレイクスルー	<p>細胞を集積して立体組織を造形する3Dプリンターなどを使ったボトムアップ型の手法が採用されたが、高速化・精密化で限界がある。おそらく機械的な細胞制御・構築は限界があり、細胞にとって、生体で行われているような、組織または臓器形成が可能となる場の誘導・形成といった技術を人工的に再現できるかがブレイクスルーするポイントであると予測する。</p>
L-177	10年未満	注目科学技術	<p>再生医療における免疫の制御方法の開発。組織、器官の移植時に起こる免疫反応を再現するモデル動物が開発されつつある。研究が成功裏に進めば、免疫反応を制御する因子、パラメータを特定することができて、近い将来、免疫の制御方法が実現するものと予測される。</p>

		ブレイクスルー	免疫抑制剤を使って免疫を制御する方法が知られているが、必ずしもすべての患者に対して効果があるわけではない。また、白血球型を同じ型に合わせることで拒絶される場合がある。免疫細胞の一種である T 細胞または抗体などの他の因子をシステム論的に解析することでこれがブレイクスルーとなって、医療現場での拒絶反応の制御が可能になるものと予測される。
L-178	10年以降	注目科学技術	細胞や組織など、生体システムを人工的に再現するための科学技術 は、生体機能の理解に貢献できる。人工生体システムの高機能化やその制御技術を確立することで、緻密に設計された生体システムを超越することができ、そのような科学技術革新は、再生医療や難治性疾患における革新的な治療法の開発に発展しうるものとして期待される。
		ブレイクスルー	生体機能計測法の技術開発がブレイクスルーになるものと餡が得られる。ナノバイオテクノロジーの発展により、計測技術が飛躍的に発展してきたが、細胞や組織など、“生きた試料”を対象として、局所空間に存在する生体分子の“リアルタイム”かつ“その場”計測技術は未成熟である。この技術革新により、生体機能や人工生体システムの創成に大きく貢献しうる。
L-179	10年以降	注目科学技術	細胞治療・遺伝子治療の研究開発から得られた知見を活かした新しくて安価な医薬品・医療技術
		ブレイクスルー	再生医療や遺伝子治療の研究開発が進み、いくつかの製品がすでに上梓している一方で治療の高額化、製造ならびに臨床現場での品質管理の課題から、抗体医薬品のように多くの人が享受できるソリューションとなる日はなかなか遠い。MOA ベースで同等の効果を持ったより安価で安全な医薬品の開発は科学的には可能だと思われるため、このようなアプローチに真摯に取り組む PI や技術への投資促進が必要と考える
L-180	10年以降	注目科学技術	細胞小器官(オルガネラ)の異常は、リソソーム病などの単一オルガネラ疾患に加えて、ミトコンドリア代謝異常による老化や神経変性など、広い疾患の基礎となる。近年、オルガネラの形態や分類から機能に至るまで、これまでの教科書をくつがえす発見が相次いでおり、今後 10～15 年でオルガネラバイオロジーが大きく変革することが期待される。教科書の書き換えなど基礎科学の発展に加えて、10 年後くらいから オルガネラ関連疾患の治療法の開発 も飛躍的に進展することが期待される。
		ブレイクスルー	まずは教科書的な記載をぬりかえるという基礎的な研究を推進させ、10 年後をめどに創薬や医学応用などとの橋渡し研究を推進するのがよいと思う。また、オルガネラバイオロジーの発展には、顕微鏡技術の進展が欠かせない。
L-181	10年未満	注目科学技術	私自身の医薬品の研究開発のターゲットは再生医療の領域になります。これまで細胞そのもの、特に間葉系幹細胞を活用した治療法の開発を主に行っておりますが、動物では薬効が見えても、ヒトでの評価の際に薬効をしっかりと示すことが難しいケースが多いことを実感しております。その中で近年着目されている細胞に必要な機能を付加し、それを新たなモダリティとして活用する「 デザイナー細胞 」と言われる領域の研究開発が着目されており、実際研究開発戦略センターからプロポーザルが提出されています。既に本モダリティの一つとして CAR-T が本邦において承認され、有効性を示していることから今後遺伝子治療と並ぶ新たな治療法として研究開発が進むことが想定される。
		ブレイクスルー	現在本モダリティにおいては、自家細胞を使うことがほとんどであるが今後は同種細胞を用いた領域での研究開発が活発になると想定される。その際には品質の担保された同種細胞の製造と細胞に機能を付加するための技術、例えば各種ウイルスなどの技術が必要になると考えられる。現状、いずれも本邦においては十分に技術開発が進んでおらず、コスト削減や製造の効率化などが要求されると思われる。
L-182	10年未満	注目科学技術	視細胞の機能を人工物で代替する人工網膜技術 とそれに関連するテーマ
		ブレイクスルー	技術としては実現しているが、構造が複雑で植込みの方法が難しいこと、電極の小型化が難しいため分解能が悪いこと、広い面積の網膜を刺激することができず視野が狭いこと、などが問題だと思われる。
L-183	10年以降	注目科学技術	新興感染症ワクチン
		ブレイクスルー	これも国がもっと予算を出さないと厳しい
L-184	10年未満	注目科学技術	新型コロナウイルスに関する薬やワクチン開発など
		ブレイクスルー	専門でないので、ブレイクスルーの具体的な内容はコメントできません。どれだけ人員を確保できるか、また、時間を確保できるかが重要なかと思います。
L-185	10年	注目科学技術	新型コロナウイルスワクチン

	未 満	ブレ イク スルー	国がもっと予算を出さない国内開発の実現は難しいだろう 少なすぎる、遅すぎる
L-186	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	微生物由来の低分子化合物は、20世紀創薬化学の中心化合物であり主要な創薬資源であった。しかし、近年のバイオテクノロジー技術の革新によりその主役の座は抗体医薬などのバイオ医薬にパラダイムシフトしている。ただし、バイオ医薬には弱点もあり、コストが非常に高い、タンパク質であるため経口投与ができない、など技術的な課題は今なお存在する。さらに、高分子であることから基本的に細胞内に入らないため、バイオ医薬の標的は細胞表面の受容体などに限定され、治療可能な疾患も限定的である。こうした現状を打ち破る新たな手法として、現在、「 中分子ペプチド 」が注目されている。
		ブレ イク スルー	中分子医薬の最大の課題は「低い細胞膜透過性」である。また、バイオ医薬品ほどでないが、製造コストの問題も実用化への障壁となっている。これら二つの重要な課題を解決するためには、微生物培養で得られる低コストな天然中分子ペプチドを網羅的に細胞膜透過性を改善する革新的な方法を確立する必要がある。抗体医薬に出遅れた日本において、中分子ペプチドを基盤とした創薬モダリティを世界に先駆けて開拓すべきである。
L-187	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	精密医療技術 。医療において、個別化医療は必須であるが、個別化医療を実現するための技術として、精密医療技術 (Precision Medicine)がある。ゲノム情報、その他のオミクス情報、患者さん自身の情報を医療の現場で活用して、患者さんに合った医療を提供することが大事である。そのための精密医療技術に注目している。 また、それを患者さんが自主的に判断して、理解するための
		ブレ イク スルー	次世代シーケンサ(ゲノムの読み取り技術)の大幅なコスト低下があった。半導体技術を使い、イルミナ社やオックスフォードナノポア社により、遺伝子情報の読み取りに、ムーアの法則の6倍のスピードで変化があった。
L-188	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	哺乳類の子宮内胎児のライブイメージング
		ブレ イク スルー	技術的には日本において既に実現可能なレベルにあるが、分野の垣根が障害となっているように思う。 異分野融合が起こることで、今まで踏み込まれてこなかった哺乳類の発生超早期段階に関する理解が爆発的に進む可能性が秘められている。
L-189	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	COVID-19 後遺症の治療法開発
		ブレ イク スルー	後遺症の認識・精査、COVID-19に限らない組織障害疾患の炎症収束後の組織回復に着目した研究の展開
L-190	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	異常型プリオン感染症の対策 既存の滅菌システムでは全く菌が立たない異常型プリオンタンパク質は、血液感染のリスクもあり、一たび感染すると治療法がなく死に至る。 現状、大きな問題にはなっていないが、今のうちに異常型プリオンを確実に不活化する技術やシステムを開発しておく必要がある。
		ブレ イク スルー	医療器具にアタック性が少ない簡便な不活化法の開発
L-191	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	新型コロナウイルスの感染の恐れのないクリーンな操作端末技術 。たとえば、空中に形成された映像に対して物理的な接触なしにタッチパネルのような操作が可能になる端末技術。
		ブレ イク スルー	・公共空間での利用のためにプライバシーを守った上でユーザーのジェスチャーを認識する技術。・ヒトやプラスチック素材に影響を与えることなく殺菌のできる技術。
L-192	10 年 未 満	注 目 科 学 技 術	薬剤耐性菌 (AMR) によるパンデミック対策 抗生物質使用状況の調査、排水濃度調査、耐性菌分布調査からの今後のパンデミック予測からの対策管理
		ブレ イク スルー	耐性菌の簡易測定・分析技術のブレイクスルー、ナノ～マイクロスケールの好感度・簡易分析ツール
L-193	10 年 以 降	注 目 科 学 技 術	データサイエンスで 自身の医療・非医療ヘルスレコード(全ゲノム情報含む)を継続的かつ包括的に管理でき、診療や予防に使えるシステムの実現
		ブレ イク スルー	データの横断的なリンケージを可能とするシステム、コンパクトにデータを保持・維持するシステム、次世代医療情報基盤法の先にある法的なシステム、日本国民の「データ教育」
L-194	10 年	注 目 科 学 技 術	1細胞レベルの空間プロテオミクス解析 ： 10X社の Visium のような空間的遺伝子発現解析は既に実現し商業化されているが、その次のレベルの科学技術として期待されている。

	未 満	ブレイク スルー	月並みだが検出感度、精度の向上
L-195	10 年 未 満	注目科 学技術	RNAの生細胞可視化技術
		ブレイク スルー	RNA分子を配列特異的に一分子レベルで継続的に生細胞観察をするためには、プローブと顕微鏡の両方の性能の向上が必要であるため。
L-196	10 年 未 満	注目科 学技術	医療のとくに外科領域において医師不足が問題となっており、短期間で手術のスキルを習得させ、安全な手術を行えるようにすることが望まれている。 そこで、 習熟した医師が見ているランドマークや重要組織の情報提示を行う研究 がなされている。近年のDeep Learningの発展により、人にしかできなかった組織等の認識がコンピュータでも行えるようになってきており、技術的な実現性が見えてきている。
		ブレイク スルー	手術シーンや組織をDeep Learningで認識させるために、膨大な手術動画が必要である。個人情報匿名化により、手術動画の利用も可能となったが、現状では、情報を集めて教師データ化する体制は十分に整っていない。 また、薬事申請段階で品質保証を考える必要があるが、その方法論が確立していないことが課題である。方法論によっては、これまで作成してきたデータ自体も見直す必要が出てくる可能性もある。ガイドラインとしては出されているが、具体的な内容に落とし指針が必要になると考えている。
L-197	10 年 以 降	注目科 学技術	一細胞解析が主流になりつつあるが、実際一細胞の描写以上の成果を出せていない。これまでいくつもの Subpopulation が明らかになってはいるものの、その機能をつまびらかにする技術開発がほぼ無い状況にある。 一細胞レベルの違いを機能的に解析する実験系と概念の確立 が急務であり、その報告に向けた研究開発が世界的にトレンドになりつつある。 これは、iPSCなどの幹細胞生物学にも波及しつつある概念で、単純に分化マーカーだけを一致させた細胞を誘導しても実際の機能と一致しないような事象を指す。例えば軟骨では体内の各部位によって軟骨細胞の機能を異なる。よって分化マーカーに加えて空間的な情報を与える必要がある。このような細胞レベルでのアドレスの解析は今後の再生生物学にとって中心的存在になるだろう
		ブレイク スルー	プラナリアなどの個体レベルの一細胞解析と再構築技術ができたことは大きい。これをどんどんスケールアップさせることが今後の課題であろう
L-198	10 年 未 満	注目科 学技術	光イメージングによる生命現象の精密な観察 である。MRI、CT、蛍光顕微鏡など、生体内を観察する測定技術はいくつか存在するものの、現行の測定感度ではまだまだ不十分な点も多い。特に、感染症や再生医療分野など、生きたままの生命現象を観察する技術の需要はさらに増している。生体内でウイルスがどれだけ増減しているか、あるいはiPS細胞などの再生された細胞や臓器がどれくらい成長しているのか、経時的に好感度に観察する必要がある。このような根幹となる技術があれば、例えば新薬の効果や副作用も正確に観察できる。基盤となる技術の精度が高くなっていくほど、その周辺の技術の精度も引き釣られるように高度化していく。つまり、基礎研究レベルで高い感度の測定技術を早急に創り上げることで、人への応用技術、すなわち臨床技術の精度も向上していく。
		ブレイク スルー	現行の原理の中で、最も感度が高いものは光イメージングである。原理上、1つの光子(フォトン)を追跡することになるため、これを測定できるような高い技術を用いければ、1つのウイルスや細胞を観察することも可能である。つまり、高い効率と強さで光を発する化合物や化学反応を開発するのは必須であるが、同時にそれを測定する機器の開発も必須である。少なくとも、化学を中心とした化合物や化学反応の開発と、物理を中心とした機器の開発が双璧を成すように発展させる必要がある。また、生物を中心とした病態モデル動物の開発も必要である。肝心の観察対象となる現象を確立できなければ、データを集めることもできない。化学、物理、生物の3分野が融合することで達成される技術である。10年未満に実現『する』というよりは、『しなければならない』と考えている。昨今の世界的な感染症拡大のような自然現象に対して、我々人類が対抗し、立ち向かうために、科学技術を使うべきである。ウイルスが変異していくように、人類の科学技術もどんどん変化させ、向上させていくべきである。
L-199	10 年 未 満	注目科 学技術	人工知能技術を活用した画像診断の「汎用化」技術 。画像診断は、様々な現場において、ヒトが判断している。ここで言う画像診断とは、医療などの分野をさすのではなく、工業、農業などの多くの産業を対象とする。資本力の高い分野であれば、既に人工知能を導入して自動化が進んでいるが、圧倒的多数の分野においては着手できていない。例えば、ノートパソコンと内蔵カメラだけの簡単なデバイスと、ユーザーの知識で完結できる方法により「汎用化」がなされれば大きく貢献する。潜在的なニーズ、そして知的財産のシーズはたくさんある。
		ブレイク スルー	人工知能の活用は、専門的な知識を要するのが現状であり、例えば、必要な初期情報の入力など、簡単にアシストできる技術があれば、実現可能かと思われる。
L-200	10 年	注目科 学技術	大量シーケンサーによるゲノム解析、各種オミックス解析の進展

	未 満	ブレイク スルー	価格の低下、技術の普及
L-201	10 年 未 満	注目科 学技術	単分子やウイルス等の無標識高感度微量検出技術 。特に多孔質炭素ナノワイヤーアレイとその単分子・微量ウイルス検出技術。光と物質との相互作用の結果として発生するラマン散乱光は物質固有のスペクトルをもちラマン分光法を生み出したが、レーザ散乱と比べ信号強度が6~7桁も低いことが課題であった。その後、1973年にSERS(表面粗さを持った金属基板に物質を付着させることで、金属粒子と物質分子間の共鳴が生じラマン信号が増幅)が発見され信号強度の課題は解決された。しかし基板が金属のため酸化による再現性の低下や、ホットスポット(特定の部位にラマン増強が局在化する)、また熱の発生や生体親和性が低いという課題があった。一方で多孔質ナノワイヤーアレイを基板にもちいることで、50年来の課題であったこれらの問題が解決される見通しが立った。特に今の時代においてウイルスの無標識検出への適用が期待される。
		ブレイク スルー	現象が確認されて間もないので、多孔質炭素ナノワイヤー中での電荷移動の理論的解析とその現象の把握、そしてそれを基にして安定的に作成するためのプロセス開発を行うことが必要であり、実用化のためのブレイクスルーである。
L-202	10 年 以 降	注目科 学技術	自閉症、統合失調症、失読症などの精神疾患は、神経発生・発達過程のどこかが障害されることにより発症すると考えられているが、そのメカニズムの多くが不明であるため、治療の手がかりがない。 神経発生・発達研究 は、個体・組織・オルガノイドなどを用いて急速に発展しているため、この流れを推進すれば、神経発生・発達機構の全容解明につながることを期待される。
		ブレイク スルー	神経発生・発達研究はやや閉鎖的であるため、発生生物学をベースにして、神経科学、分子細胞生物学、組織解剖学、小児医学などと融合させることが必要
L-203	10 年 以 降	注目科 学技術	脳波と身体との関係の理解とその利活用 。たとえば、我々が何か新しいことを学ぶとき、どのように末端の感覚等神経の反応を使って、脳でのネットワークが形成されていくのか、また、ベテランと素人との違いの理解、その違いを効率的に小さくする方法の提案、など。
		ブレイク スルー	(1) 身体の高高度なモーションセンシング (2) 全身の感覚神経の正確な発火情報の取得 (3) 脳波取得と上記(1)(2)との相関発見技術
L-204	10 年 未 満	注目科 学技術	米国を中心に研究開発が進められている ブレインテックの実用化 に注目。ブレインテックを構成する技術領域としては、①脳活動データの取得とその分析(汎用的脳活動測定装置の開発)、②ニューロフィードバック(パフォーマンス向上)、③脳とコンピュータの接続インターフェース(BCI)、の3つに大別。脳内へのチップの埋め込みによる脳とコンピュータの直接アクセスが可能になる世界が10年後には現実化。
		ブレイク スルー	脳活動をリアルタイムで解析できるセンサーの開発、感情魔訶ニズム(心)と脳の関係の把握(文理融合研究)、脳とコンピュータをつなぐBCI技術の進展、倫理的課題の克服、など。
L-205	10 年 以 降	注目科 学技術	「放射光単色 X 線を利用した新規がん治療技術の開発」 ナノ粒子にガドリニウムやヨウ素を担持した薬剤をがん細胞に取り込ませて放射光単色 X 線を照射することにより、正常細胞へのダメージを抑制し、がん細胞のみを効率よく殺傷する技術が開発されている。 従来の放射線治療に用いられている白色 X 線を人体に照射した場合、体の表面に近い部分で低エネルギー X 線が吸収されるため、体内の患部に届く放射線エネルギーが減衰する、および、皮膚にやけど状の傷が残るといった問題がある。加えて、白色 X 線の細胞殺傷能力は正常細胞とがん細胞を比べた場合、がん細胞のそれがわずかに大きいだけである。がん細胞を完全に殺傷するためには高線量の白色 X 線を照射する必要があり、ここでも正常細胞へのダメージが大きい。現在は照射方法を工夫することで、正常細胞へのダメージ低減を行っている。 今回紹介するがん殺傷技術は、がん細胞殺傷能力が高いエネルギーの X 線のみを用いるため、正常細胞へのダメージを押さえることができる。本技術のポイントの一つはガドリニウムなどの原子番号の大きい元素(高 Z 元素)を担持したナノ粒子を、がん細胞に取り込ませる技術である。細胞に取り込まれた高 Z 元素に、元素の K 吸収端直上のエネルギーの単色 X 線を照射すると、オージェ電子などの二次放射線が発生する。この二次放射線が効率的にがん細胞を殺傷することが報告されている。上記薬剤はがん細胞周辺に集積する特性があり、正常細胞には蓄積されないため、正常細胞へのダメージが抑制される。 以上の様に、今回紹介するがん殺傷技術は副作用が少なく、患者への負担が小さい新しいがん治療方法の確立につながることを期待されている。

		ブレイクスルー	開発中のがん殺傷技術は、現在は in vitro で効果が確かめられている段階である。今後は in vivo、さらに臨床実験と研究を進めていく必要がある。また、開発中のナノ粒子薬剤の安全性や人体への影響を慎重に調べる必要がある。 がんは遺伝的なもの、突発的なものがあり、予防接種を接種すれば防げる病気ではないことから、治療する患者の体質や、がんの種類などをもとに、よりよい治療方法を選択する必要がある。そのためにも、他の放射線治療と比較した際の利点や問題点などの調査も重要である。
L-206	10年未満	注目科学技術	1. <u>iPS 由来細胞を用いた細胞移植による神経系疾患(脊髄損傷、パーキンソン病)の治療。</u> 2. <u>iPS 由来血球系細胞(赤血球、血小板)の輸血(血液確保)</u>
		ブレイクスルー	1については、生産コストの低下。 2については、常時大量生産できる仕組みの開発や欲する時に欲する型の血液を迅速に供給できる生産技術とシステムの開発。
L-207	10年未満	注目科学技術	<u>アルツハイマー型認知症、ALS 等の神経変性疾患の治療法開発</u>
		ブレイクスルー	十分量のタンパク質を血液脳関門を通過させる技術
L-208	10年未満	注目科学技術	<u>エクソソームを用いた治療、DDS</u>
		ブレイクスルー	機能やサイズが安定したものを大量生産できる技術
L-209	10年未満	注目科学技術	<u>キラルアミノ酸分析による生命進化の解明や制御メカニズムの解明及び健康指標としての活用。</u> ヒトでは活用されていないと言われていた D-アミノ酸が記憶や生殖に不可欠であることなど徐々に解明されつつあるが、なぜ高等生物は L-アミノ酸を選択したのか、キラル体に格差をつけることで何を得ているのか。はやぶさ2が持ち帰ったりゆうぐう試料の分析も含めて注目している。
		ブレイクスルー	・はやぶさ2が持ち帰ったりゆうぐう試料の分析 ・D,L アミノ酸の絶対量分析技術 ・キラルアミノ酸の厳密な濃度調整機構と疾病との関連
L-210	10年未満	注目科学技術	<u>ヒトの宿主環境を高度にミミックする動物モデルを利用した感染症治療薬の探索</u>
		ブレイクスルー	抗菌活性がない、あるいは低い化合物から、治療効果が高い化合物を選別する技術の確立
L-211	10年以降	注目科学技術	<u>脂質や糖鎖の機能解明と関連疾患への応用。</u>
		ブレイクスルー	脂質や糖鎖は従来の技術では解析が困難である。定量、構造決定、局所的な機能抑制などの技術革新がブレイクスルーを生み出すと思われる。
L-212	10年未満	注目科学技術	<u>次世代のゲノム編集技術</u>
		ブレイクスルー	CRISPR によるゲノム編集は 2020 年ノーベル賞に選出されたように近年の生命科学の最大のブレイクスルーである。一方で、これまでは「効率よく」ゲノムを改変する技術に留まっていた。2019 年以降、完全なコントロール下でゲノムを改変する可能性のある技術が開発された。これにより臨床応用をはじめ、新たな次元のゲノム編集が実現する可能性が高まっている。これは従来のゲノム編集を完全に駆逐する破壊的イノベーションになる可能性が高い。

L-213	10年以降	注目科学技術	腸管微生物叢の最適化とその手法: 人類をはじめすべての動物は腸管微生物叢と共生しながら進化発達を遂げてきたと想定される。特に腸管の微生物叢は体内でもっとも大きな微生物集団である。生体との相互作用はエネルギーの大部分を微生物に依存する動物種から限定されたヒトまで動物に応じて多様である。これまでヒトと腸内微生物叢との関わりは動物モデルを使ってその無菌動物を開発し、研究されてきたが、ヒトでは動物と異なり人工菌叢を作製することが実験上困難でその理解は進んで来なかった。しかし、近年、DNA技術の発展で微生物叢のプロファイルがDNAレベルで解析可能となり、病態やメンタルとの関係が指摘され解析されつつある。特に近年、ヨーロッパなどでの炎症性腸疾患における健康者の糞便移植による病態改善効果は腸管微生物叢の最適化の意義を示唆したのものとして注目された。しかしながら、日本を含め微生物叢療法は一般的な処方とはなっていない。また既にプロバイオティクスやプレバイオティクスとして多くの微生物やその増殖促進因子が提案されているが、まだまだ研究途上であるように思われる。そこには宿主側因子や食事因子等の多様性に起因する問題があり、微生物との相互作用は極めて複雑なものになっていると推測される。したがって、このような多様性を克服して、将来、ヒトの健康維持、病気の予防に寄与する腸管微生物叢を最適化する手法の開発が望まれる。
		ブレイクスルー	ヒト腸管微生物叢の最適化というコンセプトを評価するためにはさらなる多くの基礎研究が必要と思われるが、この分野の研究で一番感じることはマウスを中心にした動物モデル系での成果と実際のヒトでのギャップである。近年の技術革新によってヒトでの解析も著しく進展したが、やはり上記のコンセプトを評価し、さらにそのための手法と技術を評価するためには研究成果が蓄積している動物(マウス)モデルとヒトをつなぐ実験システム、新たなモデルの構築が必要のように思われる。微生物叢の影響は広範囲、さらに累積的で長時間に及ぶため医薬品開発以上に適当な実験システムが必要かもしれない。
L-214	10年以降	注目科学技術	不老不死の研究。細胞レベルでの老化のメカニズムを解明し、それに対処する方法(遺伝子操作、薬など)を実現する。
		ブレイクスルー	科学的、技術的なハードルも高いが、人類の寿命が延びたとき、社会的にそれを受け入れ、どのような制度を設計するか議論が必要のように思われます。
L-215	10年未満	注目科学技術	老化による臓器・組織機能低下を抑制する技術
		ブレイクスルー	老化により増加する、酸化物質や AGE、炎症性物質などの体内の不要物を除去するシステムの開発
L-216	10年以降	注目科学技術	培養槽における物理(流体)シミュレーションと生物シミュレーションの連成 動物細胞による医薬品生産のラボから工業生産へのスケールアップにとって重要。従来型の微生物による物質生産でも有益。
		ブレイクスルー	生物現象を記述するための因子の更なる解明、計算機能力の向上、流体シミュレーション技術の向上
L-217	10年未満	注目科学技術	凝集タンパク質の選択的分解剤
		ブレイクスルー	プロテアソームあるいはリソソームでの分解を促進する化合物の開発
L-218	10年未満	注目科学技術	病原微生物の分布・動態を明らかにするための環境 DNA 分析技術
		ブレイクスルー	国家間利害関係を排除した研究プラットフォームの構築
L-219	10年未満	注目科学技術	「タンパク質立体構造の予測技術とその展開」 AIによって、アミノ酸配列からタンパク質の構造予測が現実のものになりつつある。タンパク質フォールディング研究の歴史は Anfinsen らによる 1950 年代に遡ることができるが、これまで生命科学の未解決課題として残されてきた。2020 年 11 月末に、海外研究グループにより AlphaFold 2 が発表され、コンピュータのみでの予測が X 線結晶構造解析のような実験技術に匹敵する精度にようやく到達した。実際は、実用面からもまだ改良が要すると思われるが、今後ますますの展開が予想される。この技術革新に伴い、分子シミュレーション研究の飛躍的な進歩も期待され、計算化学分野における解析技術にも AI の導入が積極的になると思われる。
		ブレイクスルー	例えば、AI が学習したのから逸脱した立体構造についてどう予測するかが課題になると思われる。その打開策の1つとして、これまで報告されていなかった構造モチーフを実験的に提案することが要求されるかもしれない。また、計算機シミュレーションの発展という観点からは、タンパク質立体構造と機能の結びつきを AI で解析する方法論の提案が課題となってくる。

L-220	10年未満	注目科学技術	<p>1. ゲノム合成(ゲノムスケールで DNA を合成できるようになる):10 年後には 100 分の 1 程度のコストが実現可能になりそう</p> <p>2. 高精度タンパク質構造予測 (AlphaFold):タンパク質配列から立体構造がディープラーニングでほぼほぼ予測できる</p> <p>3. surface-coating technique を使用した超高速シーケンシング技術 (https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.12.10.418962v1.full):新技術により飛躍的にコストが軽減され、得られるデータ量が増大する</p>
		ブレイクスルー	上記技術により、高い制度のデータが高スピードで得られることが期待される。一方で得られる膨大なデータに解釈を与えるための解析をどうするかに対するブレイクスルーが必須となる(AI/ディープラーニングなどの活用?)。
L-221	10年以降	注目科学技術	<p>2. 人工タンパク質の設計・合成技術 生体機能は多種多様である。タンパク質には種々の機能分子が埋め込まれており、機能発現に重要であるが、分子物性を最適化しているのはむしろ結合サイトを提供するタンパク質の方である。よって、生体を模倣するような多機能性分子を創出するに当たり、任意に設計したタンパク質の合成技術が不可欠となる。しかし、現在のところ4次元構造まで含めたタンパク質の設計・合成技術は確立されていない。生体機能の反応機構の理解といった基礎的な面だけでなく、創薬や医療、有機デバイス開発など、様々な分野に波及していく可能性を秘めている。</p>
		ブレイクスルー	2. 人工タンパク質の設計・合成技術 タンパク質の4次元構造が予測可能な理論および計算ツール、合成した構造を効率良く解析・確認するためのハイスループット分析技術
L-222	10年未満	注目科学技術	<p>2つの標的分子を連結したキメラ化合物による強制的シグナル伝達制御と創薬。 例えば、女性ホルモン受容体であるエストロゲン受容体の異常(過剰)活性化による乳がんに対して、エストロゲン受容体リガンドとタンパク分解にかかわるユビキチンのリガンドを連結した分子を使用すると、エストロゲン受容体を強制的にユビキチン化して分解させることができることから、がんの新たな化学療法として盛んに研究されている。また、リン酸化カスケードにおけるリガンド同士もしくは、標的タンパクのリガンドとリン酸化酵素のリガンドを連結することで、目的の分子のみを強制的にリン酸化することができる。リン酸化を主としたシグナル伝達を制御することができるので、リン酸化が関与した革新的医薬品の創製につながる。キメラ化合物は低分子医薬品創製における革新的な方法であり、創薬における大きなブレイクスルーにつながる。</p>
		ブレイクスルー	強制的にタンパク分解やリン酸化を誘導するため、ホメオスタシスにより誘導されるタンパク分解やリン酸化にかかわる分子が一時的な欠乏を起こす可能性が高い。
L-223	10年未満	注目科学技術	CRISPR-Cas9 を筆頭に、種々のゲノム編集ツールが確立されてきたが、これを本来の目的(=ゲノム切断)以外の用途で利用する試みが近年進められている。配列を書き換えることなく転写の ON/OFF を切り替える転写調節技術や、エピジェネティック修飾を改変するエピゲノム編集技術、特定の染色体領域を可視化する技術など多種多様な応用が進んでいるが、各要素技術の進歩に伴い、これらのゲノム編集派生技術の開発が、一つの研究分野を形成しつつある。最近のトピックスとしては、 in vitro で微量核酸を検出する技術 を、昨今の新型コロナウイルスの安価かつ迅速な診断に応用する試みなども進められており、時勢とも一致して動向が注目される領域となっている。
		ブレイクスルー	スケーラビリティの劇的な向上がブレイクスルーとなり得る。エピゲノム編集を例にとれば、現状の技術では特定のゲノム領域のエピジェネティック修飾をピンポイントで操作することを主眼として技術開発が行われているが、ゲノム全合成の時代に向けて、合成した全ゲノムに対してエピゲノム操作を加える“エピゲノム合成”が可能となれば、全ゲノムスケールでの合成的機能アノテーションが可能となり、革新的技術となる。

L-224	10年以降	注目科学技術	DNA シーケンシング技術や遺伝子改変技術の目覚ましい進歩により、多様な機能を有した人工微生物を自在に創出することが可能になりつつあり、化学品やエネルギー生産に利用されている。一方、自然界においては単一微生物が単独で存在することはなく、多種多様な微生物が相互作用しながら細菌叢を形成し、単一の微生物では成し得ない高次の機能を有することがある。例えばメタン発酵技術は、複合基質からなる有機廃棄物からメタンガスを産生する技術であり、廃棄物処理技術として重要である。また、腸内細菌叢は宿主の健康に対して、重要な働きをする。しかしながら、これらの菌叢を構成する微生物の種類を自在に変化させたり、菌叢中の特定微生物の遺伝子を改変する技術が不在であるため、微生物菌叢を人為的かつ自在に制御する技術は不在である。そこで、このような目的を達成しうる メタゲノム編集技術 が今後重要な科学技術となると予測される。菌叢微生物が有するゲノムの集まり=メタゲノムを一つの巨大ゲノムと見据え、これらの特定領域を切断したり、書き換えたりすることが可能となれば、特定の微生物を死滅させたり、特定の微生物の遺伝子のみを書き換えることが可能となり、微生物菌叢の人為的制御が可能となるであろう。
		ブレイクスルー	メタゲノム編集技術の実現には菌叢中の特定微生物のみの遺伝子を編集する技術の開発が必要である。現在の試みとしては、高宿主域の接合伝達プラスミド(あるいはプラスミド群)を有する供与菌を菌叢と混合し、多様な微生物にプラスミドを伝搬させる手法などが開発されている。プラスミド中に特定微生物の特定遺伝子を標的する sgRNA とゲノム編集酵素を挿入することで、特定微生物のみの遺伝子を改変できると期待されている。類似した手法として、ファージを利用して、ゲノム編集酵素遺伝子を挿入した遺伝子を菌叢微生物へと導入する手法も検討されている。しかしながら、いずれの技術も多様な微生物に高効率に遺伝子を導入することは困難である。従って、多様な微生物に高効率にゲノム編集酵素を導入できる技術が開発されれば、ゲノム編集酵素の高い特異性を持って、目的微生物の遺伝子のみを改変することが可能になるであろう。
L-225	10年以降	注目科学技術	DNA ナノテクノロジー等を基盤とする分子ロボティクス、分子サイバネティクス に注目しています。分子レベルの部品を精密に組み立てるだけでなく、それらを統合してシステムと機能させることを目標としています。細胞のように振る舞う人工物を一からボトムアップで作ろう、という野心的な科学技術分野であり、科研費でも 2012-2017 年度の新学術領域「分子ロボティクス」や、2020 年に発足した学術変革領域 (A)「分子サイバネティクス」などのプロジェクトが走っています。2016 年にノーベル賞を受賞した分子機械の分野をさらに発展させようという試みであり、例えば DNA のような分子をネジのような材料として使うナノテクノロジーと言えます。将来的には、投薬制御や生体内計測、遺伝子診断、ケミカル AI などへの応用が期待されています。コロナウィルスのワクチンとして期待されている RNA や DNA などの核酸医薬なども相性が良いです。
		ブレイクスルー	ゲノム合成プロジェクトにより、オリゴプールを代表とする DNA 分子を超大量に合成する技術が普及しつつあります。さらにロボットによる実験の自動化などにより、システムの再現性、頑健性、スケラビリティが向上してきています。しかしながら、これらの製品や設備は海外のメーカーにより発表されているものが多く、最新の情報を入手するのに遅れが生じます。また、価格も高いため、日本の一研究者が気軽に参画できる状況にはありません。今後は、産総研が開発したロボット実験設備「まほろ」などをフルに活用し、研究活動の自動化を推し進め、スケールを超えることを目指す研究を支援するべきです。自動化するのは実験にとどまらず、AI を活用して、論文執筆や、投稿、査読プロセスなどもどんどん加速する枠組みを構築することを目指すことを勧めます。 また、論文の発表にあたって、研究者は現在出版社から不当な扱いを受けていると強く主張したいです。不誠実な料金体系により、金銭的にも搾取を受けており、多くの研究費が税金により賄われていることや、ほとんどの出版社は海外に本拠地があることを考えると、即急な対策が必要であると言えます。例えば論文を投稿して出版するには、カラーチャージをはじめとする料金をとられ、さらに誰もが無料で論文を読めるようにするためのオープンアクセスにするには、論文一本あたり 10 万円から 50 万円の追加料金がかかります。さらにオープンアクセスでない論文を読むために、日本の大学などは総額で年間数 100 億円以上にも上る購読料を出版社に支払っています。また、論文の査読には多大な労力が必要にもかかわらず、出版社に依頼された場合、研究者はボランティアで査読を行います。さらに査読自体は業績として認められることはまれです。出版社により金銭的・労力的に研究者が搾取されている構造上の問題があり、回りまわって研究への支障が出ていると言えます。一研究者や大学レベルでは、権利の乱用を行っている出版社の経済活動を是正を行えないため、ぜひ対策に乗り出してもらいたいです。
L-226	10年未満	注目科学技術	DNA 修復を阻害および促進する技術 。阻害する技術は新しいメカニズムによる抗がん剤創出につながり、促進する技術は老化防止に繋がる。
		ブレイクスルー	DNA 修復機構において、どの機構をターゲットにするか。また阻害および促進する素材の開発。

L-227	10年未満	注目科学技術	DNA 折り紙 DNA を用いてナノレベルの構造体を作製する技術 ライフサイエンス分野での研究レベルでの活用は進んでいるが、他の分野へも波及が進むと考えられる。
		ブレイクスルー	私自身も興味はあるが、細かいノウハウが普及していないために手を出しにくい。
L-228	10年未満	注目科学技術	DNA 折り紙 を用いた微細構造を意のままにつくる技術。この微細構造を利用した応用研究は今後花開いていくものと考えている。
		ブレイクスルー	微細構造をつくることによる応用先を思いつくこと。様々な分野の人にこのような技術が存在することを知られるべきであり、それによって応用先が拓けると考えられる。
L-229	10年未満	注目科学技術	MPS あるいは Organs on a chip と呼ばれるデバイス等を用いるインビトロの人体模倣システム 。動物実験などを行わずに人の体内での働きを評価するためのツールで、創薬はもちろんのこと機能性食品、化粧品あるいは毒性評価に用いる場合には農業や様々な化学製品に適用できる。世界的に動物実験は禁止・制限されており、動物実験の代替、さらにはヒトの生体機能を正確に評価するツールが広く求められている
		ブレイクスルー	様々なデバイス等を用いるシステムが提唱されており、部分的には実用化され、特に海外のメガファーマ等では取り入れられているものもある。ただ、生体内の機能は複雑であり、一方でインビトロの細胞の機能は生体に近いレベルに到達しているものは少ない。生体の機能は複数の臓器の働きが係わって動くものも多くあり、他種類のそれぞれが高い機能を持つ臓器を連結して評価するシステムが求められる。このための細胞・組織形成およびそれを用いるシステム設計の技術が必要である
L-230	10年以降	注目科学技術	RNA 編集 Cas13 を用いたゲノム DNA に傷を付けない新たな遺伝子治療の手法として、注目しています。
		ブレイクスルー	RNA 編集に利用可能な cas13 との融合タンパク質の簡便性の追求
L-231	10年未満	注目科学技術	オートファジー
		ブレイクスルー	産業化に向けたメカニズムの解明や知的財産戦略
L-232	10年以降	注目科学技術	ゲノム塩基配列の機械学習・深層学習 生物のデザインは、ゲノムに刻まれているはずである。したがって、原理的には、ゲノムの塩基配列を読めば、どのような形態、行動、生活史をもっているかは予想可能なはずである。しかし、これまではごく一部の生物のゲノムしかわかっていなかったため、困難であった。現在、数千種の生物のゲノム解読が進みつつあり、こうした予測が可能になりつつあると考える。
		ブレイクスルー	1. 多くの生物種でのゲノム解読 2. 大規模な塩基配列データをあつかう計算技術の開発 3. 塩基配列をあつかう機械学習・深層学習の技術開発 4. 教師データとして利用する表現型データの集積
L-233	10年未満	注目科学技術	ゲノム解析技術(遺伝子の網羅的解析技術)やゲノム編集技術
		ブレイクスルー	ボトルネックとなっている遺伝子解析(生化学的解析や遺伝学的解析)をハイスループットに行う技術。AIなどを組み合わせることが大事
L-234	10年未満	注目科学技術	ゲノム編集技術
		ブレイクスルー	すでにブレイクしている技術ではあるが、今後、ゲノム編集を用いた研究成果が社会実装されてもっと身近になることで、ごく一般的な技術となる。
L-235	10年未満	注目科学技術	これまで微生物は環境中のおよそ1%しか研究室で培養できないと言われており、残りの99%については未知である。その限界を突破するには 新たな微生物培養技術の創生 が必要である。これらを培養できるようになることにより、膨大な未利用資源にアクセスできるようになる。
		ブレイクスルー	微生物の培養は古典的には非常に単純な系で行っている。今度は、工学分野の研究者等の参画により、これまででない培養器のデザイン等求められる。
L-236	10年未満	注目科学技術	シングル DNA シークエンス DNA を1本ずつを小さいポア(穴)に通過させながら、電気的な検出などを通じて DNA シークエンスを行う手法
		ブレイクスルー	分野外なので技術的問題点わかりませんが、いくつか基礎的な論文がすでに出ていますが、実用化レベルではないようです。

L-237	10年未満	注目科学技術	タンパク質のアミノ酸配列から AI を利用して立体構造を予測する技術 (DeepMind)
		ブレイクスルー	特になし。
L-238	10年未満	注目科学技術	タンパク質の立体構造の形成メカニズムはいまだ不明な点が多く、アミノ酸配列情報だけから、三次元構造を正確に予測することは一つの問題となっていた。近年フォールディングの予測コンテストである CASP において、 深層学習を用いた AlphaFold が主鎖の構造についてはかなりの精度で予測できるようになったとの報告があった。 (https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2012/01/news053.html) など
		ブレイクスルー	タンパク質のフォールディングは深層学習を用いることでかなりの精度に達したと言える。一方で側鎖の予測等についてはまだ触れられていない。つまりブレイクスルーとしては、正しそうな主鎖構造をベースとした、側鎖予測、タンパク質の動的構造予測、低分子によって引き起こされる誘導適合問題などがあげられる。また依然としてエントロピーや疎水性などの物理化学的性状のフォールディングに対する寄与の解明も依然として残っているだろう。
L-239	10年以降	注目科学技術	タンパク質をはじめとする生体分子を、穏やかな条件で化学修飾する手法 に関して、基礎から応用まで国内外で活発に研究されている。特に最近、抗体-薬物複合体の開発などへの高い注目を背景として、多彩な機能性分子開発に役立つ基盤的な手法として「 クリック化学 」と呼ばれる分子連結法の発展が著しい。こういった科学の進歩により、従来は困難であった、高度に機能化した生体分子を利用した研究が大きく加速し、医薬品の創製や生命現象解明に役立つプローブ分子の開発に関する研究が著しい発展を遂げていくと期待される。
		ブレイクスルー	多彩な機能性分子開発に役立つ基盤的な手法として「クリック化学」という概念が提唱されてから 20 年程度の間に、様々な形式のクリック反応が開発されてきた。しかし、その間の研究によって明らかになった、困難な課題も山積しており、幅広い条件下で利用できる新しいクリック化学に関するブレイクスルーが必要である。
L-240	10年以降	注目科学技術	タンパク質結晶構造に基づいた構造・機能相関解析の深化 に期待しています。X 線や NMR、電顕などによりこれまでに多数のタンパク質の立体構造が解かれましたが、立体構造が終点ではなく、立体構造を出発点として、様々な手法を用いて構造機能相関の解析を進めていく必要があると考えています。溶液中のタンパク質の機能を理解するためには、X 線結晶構造よりもさらに分解能の高い実験的手法が必要であり、そのアプローチの1つとして振動分光があると考えます。
		ブレイクスルー	振動分光学そのものは歴史的には古くからあり、スペクトルの帰属などデータはたくさんあるが、タンパク質の複雑系の分子に対しては必ずしも十分にそろっているわけではなく、しかもスペクトル解釈もはっきりしていないことが多い。したがって、機械学習 (AI) を活用してデータの蓄積とスペクトル解析の進歩が進めば、これまで以上に振動分光学が活用されるようになるであろう。逆に言えば、AI を活用できるくらい様々な基礎データを充実して方法論が確立していれば、タンパク質構造機能解析法の主要なアプローチとして認知されるに違いない。
L-241	10年未満	注目科学技術	タンパク質-核酸の液液相分離の制御技術 。タンパク質-核酸の液液相分離の解明が進み、細胞の恒常性の維持に重要である一方で、その異常は ALS などの難病における原因となることが分かってきました。液液相分離の制御技術は、これまで治療法がなかった疾患に適応できる可能性が高いと考えられます。
		ブレイクスルー	多くの研究者が注目しており、核酸構造を中心に、ブレイクスルーとなる多くの成果が上がってくると考えています。
L-242	10年以降	注目科学技術	ディープラーニングによる生体内シグナル伝達ネットワークの完全理解 、すなわち、ある入力(化合物、温度、光など)を受けた時に、どのような受容体が活性化され、どのようなシグナルが伝わり、どのような応答が誘導されるのかを、分子レベルのネットワークの挙動として理解する。
		ブレイクスルー	おそらく、ある程度早い段階で、入力を与えられた際に、精度良く出力を導く機械学習モデルは達成されると思うが、プロセスまで正しく記述するには、その方法論の開発が必要と考える。
L-243	10年未満	注目科学技術	液液相分離に着目した遺伝子発現制御
		ブレイクスルー	液液相分離を制御する薬剤の開発・探索
L-244	10年	注目科学技術	技術に該当しないかもしれないが、 運動分子生物学 と呼ばれる新たな学問に注目している。

	未 満	ブレイク スルー	運動をすると健康を獲得できる。その分子メカニズムを解明することができれば、新たな創薬、栄養や運動プログラムの開発への貢献が期待できる。「科学技術」とは呼べないかもしれないが、学問として注目している。
L-245	10 年 以 降	注目科 学技 術	近年、 <u>人工的に細胞の機能を再構成する研究(いわゆる人工細胞研究)</u> は、次世代のバイオテクノロジーとして大きな注目を集めており、欧米で次々に大型プロジェクトが立ち上がっている(欧州 BaSyC, ドイツ NSF など)。現在、合成生物学分野では天然の生物や細胞を人間の役に立つような改変が行われているが、この改変の究極の形が人工的にすべてをデザインした人工細胞である。天然の生物は人間の都合よくできていないため、改変できるのはごく一部であるし、ブラックボックスが未だ多く、思ったように改変できないことも多い。それに対し、人工細胞技術では、機械を設計するように完全に制御できる形で細胞機能を再構成することを目指す。これにより、生物のもつ能力を制御可能な形で取り出すことができる。
		ブレイク スルー	現状の人工細胞研究は、細胞の機能の一部(DNA 複製や翻訳、エネルギー生産など)を切り取ってそのまま、あるいは劣化した形で試験管内で再構成をするだけにとどまっている。この傾向は日本に限らず世界でも同様である。今後、天然の細胞にまねできないような新しい価値を構築できなければ、人工細胞研究にブレイクスルーはない。最も大きなボトルネックは「増殖する能力」をもつ人工細胞ができていないことである。この能力がなければ人工細胞はただの高級なおもちゃで終わってしまう。そしてこの機能を達成するには、そのコアとなる DNA 複製・転写・翻訳・膜合成・代謝といった細胞内機能を再生産する能力をもつ人工細胞の開発が必要である。
L-246	10 年 以 降	注目科 学技 術	近年 DNA の化学合成の技術の進歩がめざましく、長鎖 DNA の合成が安価になってきた。この技術を応用して、 <u>人工染色体の化学合成</u> が可能になると予想される。人工的な染色体の合成が可能になれば、生物の進化を再現する様々な研究が可能になると予想される。
		ブレイク スルー	染色体 DNA の化学合成とともに、DNA のメチル化やヒストンのメチル化などのエピジェネティックな化学修飾を自在に操る技術のブレイクスルーが必要になる。
L-247	10 年 未 満	注目科 学技 術	<u>計算科学によるタンパク質フォールディング予測およびタンパク質デザイン</u>
		ブレイク スルー	今年 Deep Mind 社から発表された Alphafold2 は高精度のタンパク質構造予測が可能だが、その詳細は公開されていない。技術の詳細の情報公開と、誰もが簡単に使えるようにするソフトウェア・プラットフォームの構築が、技術の発展に不可欠。
L-248	10 年 未 満	注目科 学技 術	<u>現在、組織切片での transcriptome 等技術まで開発されつつあるので、時空間的(3D での) transcriptome 技術</u> の開発も近いと考えています。一方で、ヒト以外のゲノム情報は不備が多く、各種解析を困難としているので、ヒト以外のモデル生物でのゲノム情報が整備されることで、基礎生物学研究が発展されるであろうと期待しています。
		ブレイク スルー	一番は、人的資源の流出を抑えることです。バイオインフォマティクスの技術は、当然、海外や企業でも引く手あまたであり、基盤となる基礎科学を遂行している大学や研究所の優秀な科学者のほとんどが、海外や企業へ流出しており、人材不足が申告です。優秀な人材が日本の科学の発展の礎となるような基盤研究を行えるような環境の整備が必要かと思えます。
L-249	10 年 未 満	注目科 学技 術	<u>光(レーザー光)を応用した有機低分子・タンパク質などの結晶化技術</u>
		ブレイク スルー	いくつかの物質に関しては既に成功した技術である。技術展開を考えると、多種多様の物質に対して適用可能な物理的現象の証明と、物質によってどのような光を使い分けるかの取り扱いのグループ分けなどが必要となる。
L-250	10 年 以 降	注目科 学技 術	<u>光、音、磁気、電気、熱といった刺激を用いた細胞機能の制御法の拡張。</u>
		ブレイク スルー	特に研究の進展が遅れている、磁気や電気を利用した生体内反応の活性制御法の確立。
L-251	10 年 以 降	注目科 学技 術	<u>光により任意の化学反応や細胞内外での物質輸送を制御する技術。</u>
		ブレイク スルー	自然界からの新規有用タンパク質の効率的な探索法や、タンパク質の反応中間体構造を網羅的に原子分解能で実験的に決定する技術。
L-252	10 年 未 満	注目科 学技 術	<u>光や電磁波を用いて生命を操作する技術。</u> 光を用いて機械的な力を発生させ、生細胞内の力を制御する光ピンセットにノーベル賞が授与され、光を用いて神経細胞を操作するオプトジェネティクスへのノーベル賞授与が予想されるなど、光を用いて生命を操作する技術に注目が集まっている。イオンチャネル操作だけしか主に行うことができない従来のオプトジェネティクスを拡張し、細胞の様々な機能を光によって操作できるようになれば、生命科学を革新することができる。さらに、新規光応答性分子の開発とドラッグデリバリー技術を組み合わせることで、遺伝子組換えなしのオプトジェネティクスが開発できれば、ヒト疾病などの医学にも応用できると考えられる。

		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> 多様な波長の光・電磁波に応答して様々な機能を発揮するタンパク質の開発。 低毒性、かつ多様な波長の光・電磁波に応答して様々な機能を発揮する光応答性分子の開発。 光応答性分子を特定の組織・細胞に届けるドラッグデリバリー技術の開発。 生体深部に光を集光させる技術の開発。
L-253	10年未満	注目科学技術	合成シグナル伝達経路を利用した合成生物の作製
		ブレイクスルー	倫理的問題のクリアー
L-254	10年以降	注目科学技術	合成生物学 : 人工生命、人工細胞の開発と共に、人工的に生体機能分子を設計したり、多細胞システムを人工的に設計したりすることにより、生命の設計原理を理解したり、人為的にその働きを制御することを可能にする技術。
		ブレイクスルー	任意の生体高分子の量を定量的かつ精密に制御することを可能とする技術。多くの生体高分子の産生を並列的に制御することを可能とする技術。細胞や分子の配置を精密に制御することを可能にする技術。
L-255	10年以降	注目科学技術	合成生物学による哺乳類レベルの完全人工生命体の構築
		ブレイクスルー	ゲノム生物学の加速度的な発達により生物の状態を分子レベルで詳細に解明出来る様になってきている。また、機械学習によって以上の解析が吐き出す big data をもとに各種生命現象の法則性が明らかとなる可能性が高い。生命体の構築には人工配列の機能を生体で評価する実験(試行)が数多くを必要であるが、これを哺乳類などの高次な動物種で実現する手法が開発されれば、高次な人工生命体が誕生するかもしれない。
L-256	10年未満	注目科学技術	合成生物学を駆使した物質生産
		ブレイクスルー	合成生物学を駆使した物質生産は、生産の効率化を図ると同時に、より、機能性の高い遺伝子の選択が重要となってくる。各種環境に存在する遺伝資源を有効に使うことができれば、可能になると考えられる。
L-257	10年未満	注目科学技術	合成生物学的アプローチを活用した、高度な物質生産細胞の創製技術
		ブレイクスルー	基本的な技術は構築されつつあると思われる。安価な遺伝子合成技術や自動で細胞を構築・スクリーニングできるロボット、細胞構築に必要なビッグデータの構築が更に必要か。
L-258	10年未満	注目科学技術	細菌などの微生物を用いたバイオミネラル組織の再現と人体応用
		ブレイクスルー	物質の準安定形結晶は、人工で作分けかつ安定性を高めることが難しいが、その結晶構造ゆえにこれまでに無い材料となり得る。微生物が生きる過程でたまたま形成する場において、物質の準安定形(常温常圧下では不安定な結晶形)が安定して作られることがある。このような環境を理解し、応用することで、従来の無機的環境では作り分けが困難な準安定形結晶の材料応用を実現できるかもしれない。
L-259	10年未満	注目科学技術	細胞で相分離により形成される液滴は、転写・翻訳反応やタンパク質会合反応を制御し、疾患細胞ではアミロイド形成に関わり、重要な役割をもつ。つまり、 細胞内の相分離を制御 できれば、細胞内の生命現象を制御できる可能性がある。相分離現象は Nature 誌や Science 誌において Breakthrough として選出され、創薬、材料化学等の広い分野から世界的に注目されている。
		ブレイクスルー	相分離を作り出すタンパク質と相互作用する合成高分子や核酸などによって、相分離現象を人為的に制御できる技術の開発。しかし、未だ相分離現象の詳細なメカニズムは不明な点がおおいため、メカニズム解明のための基礎研究が重要である。
L-260	10年未満	注目科学技術	細胞の電気回転 。複数の電極に位相をずらした交流電圧を印加して回転電場を形成する。形成された電場中におかれた細胞にはトルクが発生するため細胞は回転する。その回転速度は細胞の特性(膜容量、細胞質導電率、細胞質誘電率)に依存する。よって、電気回転速度から細胞の分化、化学物質の影響等を評価できるシステムとなりうる。細胞を蛍光染色する必要がないことに利点を有する。
		ブレイクスルー	複数個の細胞の回転数(回転/秒)を自動で解析できる画像処理システムの開発。

L-261	10年未満	注目科学技術	細胞内の液液相分離現象とその制御 :細胞内には多種多様な生体分子が極めて高濃度に存在する。このような環境で、酵素反応や情報伝達などが正確に行われている。現状では、細胞内の複雑な環境について正面から検討する例は少ない。ましてや、その中で化学反応がどのようにして進行するかは実際には明らかではない。その中で、ここ数年、細胞内のタンパク質やRNAが相分離をしており、その相内で反応が精度高く進行することが明らかにされつつある。この機序を解明し、さらにそれを利用した医薬品開発が注目をされるようになって考えられる。
		ブレイクスルー	細胞内の相分離を可視化する技術、相分離に含まれる生体分子を網羅的に解析する技術、相分離能に着目した医薬品などのリード化合物のハイスループットスクリーニング技術等。
L-262	10年未満	注目科学技術	細胞内液液相分離の理解のための分析技術の確立 。液体と液体が混ざり合わずに分離する現象は液液相分離と呼ばれる。細胞内ではタンパク質や核酸のような柔軟な生体高分子が液液相分離し、生じた液滴の内部に様々な生体分子が区画化され、多様な生物学的な機能が制御されていることが徐々に明らかになりつつある。細胞内液液相分離は、発生や老化のほか、様々な疾患とも関連しており、この現象の理解と制御法の確立は基礎研究から医学まで広く重要である。しかし、細胞内液液相分離に特化した分析方法・技術はまだ十分に整備されておらず、体系的な理解、ひいては医療への応用にはまだほど遠い段階にある。
		ブレイクスルー	タンパク質や核酸のどのような因子が細胞内液液相分離に関与しているのか、また、細胞内で液液相分離がどのように発生し、機能しているのかを調べるための分析方法・技術の開発にブレイクスルーが必要と思われる。例えば、分子プローブ開発、光遺伝学、超解像度ライブイメージング技術、濃厚溶液の分光学的解析技術、理論的記述、液滴を定量的に評価するための指標の確立など、物理・化学の分野からの参入による液-液相分離の新規分析技術の確立により、難治性疾患の解明や治療法の確立が期待される。
L-263	10年未満	注目科学技術	細胞内標的をターゲットとする中分子モダリティ設計技術 。強固な標的阻害・特異性を示すことが期待できる中分子モダリティに対し、現在課題となっている細胞膜透過能を自在に持たせられる設計技術および計算技術。
		ブレイクスルー	AIやシミュレーションを駆使した計算技術の革新、産業界も含めたリアルデータの蓄積および公開。
L-264	10年未満	注目科学技術	細胞内分子(特に細胞骨格や構造タンパク質)の弾性の度合いや張力を計測する手法の開発 。原子間力顕微鏡や磁気ピンセット等の利用。
		ブレイクスルー	計算機科学も含めたモデルの構築が必要。
L-265	10年未満	注目科学技術	細胞分化、培養、製造の完全自動化
		ブレイクスルー	リアルタイムの細胞観測、培養条件のリアルタイム最適化、培養全自動化
L-266	10年未満	注目科学技術	試験管内無細胞進化実験による進化の理解 。特に東京大学の市橋先生の研究グループが行っている試験管内無細胞進化実験を用いた環境要因依存的な進化の変化の観察。
		ブレイクスルー	試験管内無細胞進化実験は最近確立された技術であるが、この技術を薬剤の存在の有無や癌原遺伝子の有無による進化実験で医療への応用があり得ると期待できる。
L-267	10年未満	注目科学技術	自律的に創成する人工細胞モデル 。この研究により、有効なたんぱく質や様々な物質の合成が、自然環境に優しい条件でできるようになる。
		ブレイクスルー	我が国が世界をリードしている研究があるので、その流れを大きく発展させることには大きな意味がある。

L-268	10年未満	注目科学技術	<p>手前味噌で申し訳ありませんが、当グループで開発中の遺伝子合成技術です。この方法は、これまでの合成生物学の最大のボトルネックである遺伝子合成時間を飛躍的に短縮する可能性が期待される。従来の PCR を基盤とする合成法は、わずか数百 bp でも増幅できない配列や、長鎖に挿入されるエラー頻度、エラーの修正にかかる時間などの問題があり、これらが、DNA 合成に要する時間を長くし、DBTL (design-build-test-learn) サイクルの機動性を制限していました。我々の方法は、リガーゼを基盤とするオリゴヌクレオチド伸長法であり、従来の問題点を解決しました。また、PCR で増幅できない配列 (スリッページをおこして、部分領域が削除される配列) の合成も成功しています。</p> <p>昨年 10 月 5 日号の Nature Biotechnology の News (Nat Biotechnol. 38, 1113&#8211;1115, 2020)によると、現時点で、遺伝子合成の問題は長いオリゴヌクレオチド合成により解決できると考えられており、2013 年から注目されてきた Terminal Deoxynucleotidyl Transferase (TdT) による合成法が現在 300-mer 程度まで可能となったと、期待感を高めており、一方、多くの企業が TdT 法をテストしているが、いくつかの顕著なバイアスがあることが指摘されはじめていることにも言及しています。</p> <p>一方、我々は、昨年よりオリゴヌクレオチドをリガーゼで伸長する方法を検討しており、このたび、60-mer の合成オリゴ5本から 300 bp の合成を達成し、その合成時間は1日かかりません。更に、合成した 300bp の 1 本鎖 DNA を 4 本繋いで、1.2kbp の合成にも成功しました。</p> <p>アメリカでは、昨年 7 月、この分野に 5000 万ドルの投資が行われるほどの注目産業であると書かれていました。よって、この方法は、停滞していた合成生物学の進展を促すだけでなく、ゲノム情報の「rewrite」により、スマートセル等の開発に貢献し、日本が世界の合成生物学を牽引する技術になり得るかもしれないと考えています。</p>
		ブレイクスルー	<p>現在、適当に合成したい配列を 60-mer ずつに分けて、オリゴ DNA をオーダーしていますが、シールするオリゴの Tm 値の計算や、長鎖の 1 本鎖 DNA の立体構造予測など、長鎖になればなるほど、未だ直面していない問題があると考えており、計算科学のサポートが必須と思います。</p>
L-269	10年未満	注目科学技術	深層学習分野で、タンパク質の分子構造のような構造のある表現を扱うことができる GCN や AlphaFold (DeepMind)
		ブレイクスルー	<p>創薬などに応用された場合、フィードバックは最終的に治験や個人個人で異なる薬効や反応となるのでそれをどのように把握(症例を集めたり、データ化したり)したりモデルで扱っていくかについては、依然として大きな課題となっていると思います。</p>
L-270	10年未満	注目科学技術	<p>人工細胞を創出・応用する技術に注目している。</p> <p>生命には多数のブラックボックスが残されており、我々の知識は極めて断片的でもある。例えば、大腸菌ですら全遺伝子の 20&#8211;30%が機能未知である。また、生命の核となる多くのシステムの全貌はいまだ解明されていない。</p> <p>断片的知識を統合してブラックボックスをなくすためには、生命システムを再構成するアプローチ、特に人工細胞の創出・理解・応用が重要になる。</p>
		ブレイクスルー	<p>自己複製する人工細胞の構築がブレイクスルーになると期待される。</p> <p>自己複製する人工細胞が構築できれば、生命システムのデザイン・進化が極めて簡便になり、生命のボトムアップ理解に大きく貢献すると考えられる。</p>
L-271	10年未満	注目科学技術	<p>生合成工学 生物が行っている既存の生合成では一定の生合成酵素が連続して分子変換することで必要とする分子が生み出されている。この際にどのような分子変換が起きているかについては一定の理解があるものの、それらが実際にどのような仕組みで変換しているか、どのようにして連続的にその作用を担っているか、についてのミクロな視点からの研究がまだまだ不足している。遺伝子工学などにより既存のものを一部組み替えるなどして新規化学物質を生合成させるといった取り組みもあるが、既存のものから近いものしか作れていない。また物質生産をさせようとした場合にもまだスケールが小さいためどうすれば工業化さえ可能になるかなど興味を持たれる。今後自在に生合成を組み換えたり新規作成したりして、設計とスケールアップを実現できれば医薬品合成などには大きなブレイクスルーがありうる。</p>
		ブレイクスルー	<p>現在生合成酵素についてどのような作用を実際に担っているかということをミクロの視点からきっちりと調べ、それらの根本原理を知る必要がある。どのようにして基質を酵素間で受け渡しているかも興味を持たれる。原理をもとに新しい生合成機関を生物の仕組みに 100%頼ったものでなく、人工的な視点から作成する取り組みが一定の進歩を見れば新しい人工的な生合成が実現できる。これが可能であると確認できればブレイクスルーが待っている。</p>
L-272	10年未満	注目科学技術	<p>生命現象を物理的および化学的な観点から再構成してコンピュータ内に再現し、診断、予防、治療、投薬などのシミュレーションを精度良く行い、病変に対して精度の高い治療方法を確立する技術に注目している。幾つかの臓器・組織や疾患で実現可能性がある。その中の1つとして、血栓症については、コロナウイルス関連分野を含む医学的重要性が極めて高く、最近数10年で多くの研究成果が得られており、今後10年での研究の加速とその社会実装が大きく進む可能性が高いと考えている。</p>

		ブレイクスルー	たとえば抗血栓薬の薬効を精度良く捉える意味では、薬効の分子機構から全身スケールでの振る舞いを首尾良く捉える必要がある。この点で、時空間の各階層毎の物理的・化学的モデリングを統合的に扱うことが必要であり、これはコンピュータシミュレーションにおいて計算負荷が非常に大きくなる。この点を、精度を損なうことなく実現する必要があり、たとえば、ハードウェア(量子コンピューターなど)とソフトウェア(各種モデリングや高速計算方法など)の両面のブレイクスルーによって解決する必要がある。
L-273	10年未満	注目科学技術	相分離生物学に対する分析技術
		ブレイクスルー	有望な研究者、および周辺組織への研究補助
L-274	10年未満	注目科学技術	蛋白質フォールディング
		ブレイクスルー	四次構造蛋白質のフォールディング促進技術開発にブレイクスルーが必要である。
L-275	10年未満	注目科学技術	糖鎖解析技術の進展～自動化 のぞむらくは、複合糖質から糖鎖を切り出すことなく、解析する技術の開拓。糖鎖はリニアではなく、単にこのことによって構造解析のストラテジーが別次元になる。一方、無限に思える糖鎖構造(異性体含む)は現実的には有限で、それは酵素の特異性やそれを発現する環境(TPO)によってかなり厳密に規定されている。深層学習 AI 機能の登場がこれを可能にする、そういう時代がようやく訪れつつある。
		ブレイクスルー	AI の進展
L-276	10年未満	注目科学技術	内在性レトロウイルスと生命の進化: 内在性レトロウイルス(ERV)は、進化の過程で宿主に感染したレトロウイルス由来の配列が、宿主ゲノムの一部として子孫に伝わってきたものである。これらの配列は、種に特有の生理機能を担う一方、発現異常などによって様々な疾病を引き起こすことが知られている。これらの ERV の網羅的同定と機能の解明は、医学的に重要な情報だけでなく、生命の進化に関わる重要な知見をもたらすことが予想される。
		ブレイクスルー	内在性レトロウイルスと現存するウイルスとの関連についてはいくつか研究例があるが、高等生物のゲノムとの関係はまだ十分にはなされていない。この原因は、高等生物ゲノムの情報量の多さと複雑さが原因と思われる。より多くの研究資金と人材の投入が必要と思われる。
L-277	10年以降	注目科学技術	難培養(未培養)微生物の培養と網羅的微生物叢の挙動の解析。 腸内細菌や環境微生物など、微生物叢自体は極めて多様であることが分かっているもののその大半が培養できない微生物で構成されている。各微生物が環境においてどのような作用を及ぼすか知ることは、例えば腸内菌叢であれば宿主動物の健康への影響を解析する上で重要であるし、環境微生物であれば土壌や植生などその土地の環境に対する影響を評価する上でも重要である。現在は大規模シーケンサーによるメタゲノム解析などで菌叢の群集構造の解析は可能となっているが、菌叢構造の解析以降の検討はまだまだ少ない。近年、培養しない状態で生育速度を解析する技術(GRiD や iRep)や難培養微生物を培養するための技術(微細なウェルにおける個別培養など)が提案されており、この分野の発展に期待している(微生物ダークマターに有用な微生物資源が眠っている可能性もあることから、難培養微生物の解析技術は今後重要性を増していくと感じている)。
		ブレイクスルー	・難培養微生物の培養技術。 ・難培養状態における機能解析技術。 ・微生物間コミュニケーション解析技術。
L-278	10年未満	注目科学技術	微生物の活動を多変量の時系列データ(センサーデータ)を活用してマネジメントする AI 制御技術
		ブレイクスルー	・より多変量のデータ取得を可能にするセンサーの開発 ・独立した研究機関で取得されているデータ、解析プログラムを共有可能にするデータ連携基盤の整備
L-279	10年未満	注目科学技術	標本から採取した DNA の解析。 これまで博物館などに保存された標本を DNA 解析サンプルとして用いることは難しかったが、解析プロトコルの成熟、DNA 解析手法の発展により、可能となってきている。過去に採取された貴重な膨大な標本を解析することにより、すでに失われた種や集団の理解を助ける。
		ブレイクスルー	博物館など標本の管理に関わる機関への資金、人員の補填。またこうした基礎研究の発展を目指した交付金の充実による研究界隈全体のボトムアップ。

L-280	10年未満	注目科学技術	物質共生学(マテリアル・シンバイオシス) 。生体内では、腸内細菌叢など「非自己」との共生形態が成立し、生命維持の基盤となっている。一方でバイオ医薬品や生体適合材料など様々な機能性分子が開発されているが、これら「非自己物質(マテリアル)」と生体との共生は真の意味で達成されていない。この様な課題を解決するため、生体とマテリアルとの共生形態を「マテリアル・シンバイオシス(物質共生)」と定義し、マテリアル-生体分子間に示される弱い相互作用に基づく協同性作用の解明とその時空間的な解析により、物質共生とは何かを解明する学問分野を創成しようとしている(令和2年度文部科学省科研費・学術変革領域(A)に採択)
		ブレイクスルー	従来型のマテリアルの分子設計は、生体に打ち勝ち、生体機能を凌駕することを目指したものが大半であった。また、マテリアルに対する免疫応答に着目すると、既報の多くは抗体やサイトカインの産生に代表される、いわば最終応答を解析することのみに終始していた。すなわち、「なぜそのマテリアルが免疫原性を持つのか?」ということには、これまで殆ど目が向けられていなかった。我々はその作用機序に着目し「物質共生とは何か?」を世界にさきがけて解明し定義することを目指す。本領域の研究成果により、様々な最先端医薬品や機能性材料に対して認められる課題(免疫原性、悪性腫瘍誘発など)の解決が期待される。
L-281	10年未満	注目科学技術	分子と遺伝子を組み合わせて生きた細胞を再構築する人工細胞研究
		ブレイクスルー	自己複製する人工細胞の実現。特に細胞膜の成長と分裂の再現化。
L-282	10年以降	注目科学技術	分子ロボット 。有機分子、タンパク質、DNAなどの分子機械を部品として組み立てるマイクロスケールのロボット。
		ブレイクスルー	特にブレイクスルーを必要としていないが、高度な薬物送達システムや環境モニタリングの応用のためには、基礎的な技術開発が必要。
L-283	10年未満	注目科学技術	分子ロボティクス :分子の自己集合や自己組織化により構築した分子デバイスを、システムとして統合することで、ナノ~マイクロスケールのロボットの創出を目指す技術あるいは学問分野。知能化ドラッグデリバリーや細胞内医療などへ応用が期待される。
		ブレイクスルー	人工的に設計・構築した分子からナノ~メゾスケールの分子デバイスを構築する技術は成熟してきているが、作製した個々のデバイス機能を自在に組み合わせて「システム」を創出する方法論は未だ開発途上にある。
L-284	10年未満	注目科学技術	網羅的な代謝物の細胞内局在濃度解析 AIを用いた実験シミュレーションやNGS解析
		ブレイクスルー	AIを用いた実験シミュレーションやNGS解析においては、相応のコンピューター能力が重要であるとともに、特定の目的に特化した演算装置やたとえば量子コンピュータのような特化した技術が必要。一方で、網羅的な代謝物の細胞内局在濃度解析にあたっては、これまでの技術に基づいた広い分野における着実な研究継続が、地味ではあるが結果的にはブレイクスルーに繋がると考える。
L-285	10年以降	注目科学技術	哺乳動物の発生工学分野において、遺伝子組み換え動物の作製や体細胞クローン技術など、大きな技術革新があった。今後は、以下の2つの技術が注目されると考える。一つは、 DNAの配列情報だけで生命を作り出す技術 である。体細胞クローンにより生命の誕生に必ずしも精子や卵子のゲノムが必要ではないことが分かった。一方で、in vitroでのゲノム合成技術が飛躍的に進んでいる。これらを合わせると、いずれはin silicoでデザインしたゲノム配列をもとにin vitroでゲノムを合成し、そこから動物を作製する時代が来るかもしれない。もう一つは 人工子宮技術 である。すでに海外ではある程度の進捗を見せているが、成功すれば生殖医療や家畜繁殖分野で革新的な技術となる可能性がある。
		ブレイクスルー	全ゲノムをin vitroで合成するにはまだまだ10年以上の時間が必要であると思われる。さらに、それを1 unitのみ取り出して卵子等に注入するのも困難が予想される。それらが達成されても、そこから生命誕生をさせるには、様々なエピジェネティックな修飾が必要とされることは想像に難くない。よって、10年以上の時間は必要である。人工子宮に関しては、上述の通り途中段階なら進捗があるようである。しかし、今後は技術の安全性、再現性をもとめて10年以上の技術開発は必要になると考える。

L-286	10年未満	注目科学技術	<p>質量スペクトロメリーイメージング技術(MS imaging)。</p> <p>このは、細胞や組織内の構成成分である多様な分子(タンパク質・ペプチド・脂質・内因性代謝物など)の分布や構成、および生体へ投与した薬剤の分布や代謝などを非標識で直接的な解析を可能とする。</p> <p>原理的に複雑な微量成分を同時に精密に同定しながら定量解析することができることから、細胞・組織内内の分子、および分子間相互作用の動態などの網羅的な解析を通して、細胞や組織の状態を特徴づけるような要素を明らかにすることが可能になると期待される。これによって、たとえば癌や他の疾病を早期に検出するためのバイオマーカーの同定が容易になる。また、迅速なデータ取得によるオンサイト解析が可能であることから、より信頼性の高く、医療現場で有用な診断技術の開発につながると考えられる。</p>
		ブレイクスルー	異なる分子種の同時解析技術・高分解能化・膨大なデータの自動解析技術・小型化技術など。

付録2 分野別アンケート結果一覧(農林水産・食品・バイオテクノロジー)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術=「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー=「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
A-1	10年未満	注目科学技術	サンゴ礁再生 ;受精卵からの人工育成, サンゴの断片移植によるクローニングなど, サンゴを増殖する技術。現時点では, 海の環境再生という位置付けであるが, 今後は, エネルギー不要の二酸化炭素固定化技術として重要になるとと思われる。
		ブレイクスルー	季節に依存しない高効率なサンゴ増殖法の開発。ポリブを起点としたサンゴ増殖など。
A-2	10年未満	注目科学技術	地上および人工衛星により地球環境・資源・自然災害・農作などの状況を複合的に高分解能でモニタリング・評価する技術
		ブレイクスルー	高分解能および複合的に評価やモニタリングするためには, たとえば農作であれば作付け時期, 収穫量など現場のデータなどと組み合わせるなどが必要
A-3	10年未満	注目科学技術	遠隔での自動データ取得と大容量のデータ転送, 人が常駐して継続的に観測できないような遠隔地, 狭い地域, ミクロな領域, 危険地帯, 上空, 深海などに生息する動物等の行動データや生理データを, 生息環境の気象などの環境データを取得するような技術。
		ブレイクスルー	データの保存と転送は, 計測器や計算機(コンピュータ)および計算アルゴリズムの技術と情報機器の改良・開発で発展し続け大容量化は実現可能だと思うが, それを支える電源を小さく, 大容量にするのが律速になっているようである。電源を小型化するか, 超省電力で動作する計測機器や計算機の開発が必須だと考える。
A-4	10年未満	注目科学技術	量子ビーム(線質の異なるイオンビームやガンマ線などのこと)を用いて既存の遺伝子を融合させ, 新奇有用遺伝子を生み出す技術 について調査すべきである。近年, 一つ一つの遺伝子を狙って壊せるゲノム編集技術が台頭してきた。ゲノム解読技術, オートログ遺伝子解析技術とゲノム編集技術を組み合わせることで, 既存の遺伝子を壊した変異体を効率良く作出することができるようになるかと予測される。しかし, 複数個の遺伝子が同時に切断され, 末端結合修復によって元とは異なる組み合わせで再結合したような, 融合遺伝子を生み出す(見つける)ことは量子ビームにしかできない芸当である。この技術が実用化されれば, 生物の進化を遺伝子のレベルから論じることが可能となるばかりか, 地球上のどの生物も持たないスーパー遺伝子資源の創成まで可能になる。なお, この基盤的技術開発研究は, 生物用の量子ビーム照射装置群を有し, 量子ビーム変異誘発研究を推進してきた量研・高崎研で行うことで, インプットの最小化とアウトプットの最大化が図れる。
		ブレイクスルー	一般に, 量子ビームによって植物に生じた突然変異は, 照射個体ではなく, 照射個体を自殖して得られた次世代以降の個体で調べられる。その理由の一つは, 照射個体では変異細胞と正常細胞がキメラ状に存在するのに対し, すべての細胞が変異細胞であるような次世代以降の個体を用いることで, 遺伝子解析が容易になるためである。しかし, 生殖過程において, 遺伝子融合を起こすような大規模変異を有する細胞は減数分裂組換えが異常になるため, 次世代に伝わりにくい。この技術開発研究をスムーズに実施するための肝は, 遺伝子融合を照射個体で調べることである。ここでは, 照射個体に変異細胞と正常細胞が共存するという問題を解決する, ブレイクスルーの一例を示す。モデル植物シロイヌナズナで葉や種皮の色を支配するTT対立遺伝子座の片方が壊れた幼苗に量子ビームを照射する。育成後の植物体から, 正常なTT対立遺伝子座も壊れて葉の色が変化したセクターを探す。このセクターは照射の時点で一つだった細胞がクローナルに増殖した細胞集団であるので, このセクターを切り取って全ゲノムシーケンズ解析することで, 照射個体における遺伝子融合を効率的に調べることができる。
A-5	10年以降	注目科学技術	微生物による土壌浄化
		ブレイクスルー	ラボスケールで成功したものが実用レベルで成功するとは限らない。一方でスクリーニングに基づくものなので, 企業とのマッチングが難しい。大規模な実験を, 研究段階で実施できる環境が必要。

A-6	10年未満	注目科学技術	<u>カイコでワクチン抗原を作出し、それを餌として食べさせることで、家畜用ワクチンとすること。</u>
		ブレイクスルー	消化性や耐熱性を獲得することができれば、汎用性と実現性が高くなる。
A-7	10年未満	注目科学技術	<u>細胞集積および細胞シート形成技術を活用した立体組織形成</u> :近年、細胞塊を集積あるいは細胞シートを重層し、培養細胞を用いて人工的に立体的な組織を形成する技術が急速に発達しつつある。将来的には、iPS 技術と併用した再生医療用置換臓器の形成、安定供給可能な人工培養肉の製造技術の確立などに結びつく。前者については、すでに単純な組織置換による治療や実験動物への組織移植(担がんマウス作製)などに応用されており、良好な治療成績あるいは研究実績を有している。機能性の組織である臓器を人工的に形成するに至るまでにはなお一層の技術的進展が必要と考えられるものの、この技術が確立されれば医療の在り方が大きく変わり、一般公衆における更なる健康促進、寿命延長が期待される。一方、後者は前者よりも技術的なハードルは低く、食料の安定供給、安心安全な食肉の確保などにつながる。気候変動や社会情勢変化に影響されることがないため、安全保障の観点からも有用な技術と言える。
		ブレイクスルー	細胞塊の集積、細胞シートの形成など単純な組織形成については、すでに技術的に確立していると言っても過言ではない。機能性の臓器を形成するには複雑な立体構造をいかに実現するか、iPS 技術との併用においては、いかに目的の組織に必要とされる細胞へ分化させて効率よく大量培養するか、不必要な分化やがん化をいかに抑制するかなど、様々な課題を解決して行く必要がある。また、疾患の治療の観点から遺伝子編集技術との併用も考えられる。再生医療のみならず人工培養肉の作製においても、倫理的あるいは感情的な理由により社会から忌避的な反応を受ける可能性を否定できない。本技術に限らず、革新的な科学技術の導入、社会実装に際しては、学校教育などにおける正しい科学的な知識に基づくリテラシーの醸成(適切に理解、解釈、分析して自分の知識として記述可能とするレベル)についても十分な注意を払われたい。
A-8	10年未満	注目科学技術	我が国における木質バイオマス発電事業は、従来から、国、地方自治体、企業等が連携しながら積極的に取り組んできており、再生可能エネルギー固定買取制度(FIT)もあって更に事業の拡大が計画されているところである。産廃処理には多額の費用がかかっていること、高純度の木質バイオマスが資源化されていない現状から、コスト(産廃費用)や環境面から <u>バイオマス利用によるゼロエミッション化</u> が喫緊の課題となっている。
		ブレイクスルー	木質バイオマス発電事業で発生する、高純度、高アルカリ、大量発生する燃焼灰について、その燃焼灰の有効利用方策を本格的に研究している機関がほとんどないことから、燃焼灰を効率的かつ有効的な利用方策を検討して、今後の我が国のバイオマス施策の推進に寄与することを目的として、循環型社会構築に向けた木質バイオマス資源のゼロエミッションを目指すものである。
A-9	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<u>藻類を用いたバイオエネルギー生産や植物バイオマスを用いたエネルギー生産に関する技術</u> 藻類の強光への最適化と採算が合う培養設備システムの開発
A-10	10年未満	注目科学技術	<u>非可食バイオマスから基幹化学品を合成するルート開拓に関する研究開発</u> です。化石資源から再生可能資源へのパラダイムシフトが叫ばれているが、それを社会実装した例は殆どない。真の意味で化石資源への依存を減らして二酸化炭素排出量を削減したいのであれば、生産量の少ないファインケミカルや医薬品を製造ターゲットにするのではなく、生産規模の大きな基幹化学品(例えば汎用樹脂など)の製造プロセスを開発すべきである。過去のこれまでの基礎研究によって、どのようなものが合成できるか?どのようなバイオマス化学品が石化品を代替できるか?、が明確化されつつあるが、それらを効率よく製造するプロセス開発は進んでいない。その最大の理由は反応効率を支配する“触媒”を含む反応系の開発が遅れているからである。
		ブレイクスルー	課題解決型プロジェクトを基本としたバイオマス変換用触媒およびその反応プロセスの開発を誘起する必要がある。化石資源を活用した化学産業、おもに石油化学プロセスはガス化した炭化水素を強烈な温度・圧力条件下にて迅速かつ効率的に目的物質へと変換するプロセスが数多く開発されており、特に石油・天然ガスなどを一次原料となるベンゼン類や短鎖オレフィン(エチレン、プロピレン、ブタジエンなど)へと変換するプロセスの効率・環境負荷の少なさは群を抜いている。バイオマス変換反応では、酸素含有率が多くガス化することができない炭水化物を取り扱う液相プロセスになるため、これまでの石油化学工業プロセスで培った基礎技術をそのまま適用することはできず、バイオマス資源から一次原料を製造する過程が極めて未熟である。一方、一次原料へと誘導された後の下流プロセスは洗練された反応例が数多く報告されつつある。よってバイオマス資源を一次原料へと誘導する高効率かつ大規模反応プロセスの設計、それを可能にする“新しい触媒”の開発が進められるべきである。それを踏まえて

			下流プロセスの効率アップを図ることができれば、再生可能炭素資源を利用した新しい環境調和型産業が社会実装されるであろう。
A-11	10年未満	注目科学技術	IoTを活用したスマート農業技術開発 に注目しています。農作物管理や農作業の効率化などを新技術で実現する点に注目しています。
		ブレイクスルー	すでに企業等でも研究開発がすすめられている段階であると思われるが、必要なブレイクスルーは不明です。
A-12	10年未満	注目科学技術	SDG'sに絡む食料確保ならびに取引方法の確立 : 昆虫を利用した廃棄食品や未利用物質の有効利用物質への変換方法確立
		ブレイクスルー	社会的な寛容さと安全性に関する担保をどのように確保するかに議論
A-13	10年未満	注目科学技術	スマート農業とコミュニティ再生に関する研究
		ブレイクスルー	技術があっても使う側のリテラシーがなければうまくいかない。技術教育というものが必須になると思われる。
A-14	10年未満	注目科学技術	スマート農業 に注目しています。 スマート農業とは、IoT技術やAIを活用する農業のことです。農業機械の自動化、作物の生育状況の確認、病害虫予測等、生産から販売にいたる「農業」現場の様々な問題の解消が期待されています。
		ブレイクスルー	野外で様々なデータを入力・出力するための大小様々なデータIoTプラットフォームが必要である。また、野外環境に耐えられるセンサーや画像解析システムの開発も望まれる。
A-15	10年未満	注目科学技術	フードテック : 最新のテクノロジーを駆使することによって、まったく新しい形態の食品を開発したり、調理法を開発する技術。代替肉や代替植物を作成することで、自然維持・食糧問題を解決する方法として、期待されている。
		ブレイクスルー	まずは一般人の認識を高めることが最優先と考えています。次にインフラ整備。
A-16	10年未満	注目科学技術	現在注目している科学技術は、 スマート農業技術 である。ロボット、AI、IoTなどの先端技術を活用することで、超省力・高品質生産を実現する新たな農業技術の確立を目指している。本技術は、農業従事者の高齢化や後継者不足に陥っている日本の農業の救世主となる可能性を秘めている。現在、農林水産省が中心となり、スマート農業実証プロジェクトが実施されている。
		ブレイクスルー	農薬の90%以上は揮発、光分解、流出などにより無駄になっていて、ターゲットの植物病原菌に到達するのは0.1%以下と言われている。したがって、スマート農業の実現に向けてブレイクスルーとして期待されるのは、AI機能を搭載したドローンを活用した農薬散布技術と農薬のターゲットへの選択的送達を可能とするナノ農薬である。
A-17	10年未満	注目科学技術	高齢社会を意識したフードミックスの考え方に基づく多様な機能性食品
		ブレイクスルー	10年後に食品に求められる機能性
A-18	10年未満	注目科学技術	昆虫資源を含む新規たん白質の製造加工技術
		ブレイクスルー	食肉を食べているときと同じ色、味、香り、食感をどのようにして実現するか。 昆虫のイメージ緩和
A-19	10年未満	注目科学技術	細胞農業、いわゆる培養肉 。植物肉の次の市場として代替タンパク質を製造する技術である。
		ブレイクスルー	コスト削減、製造設備、レギュレーションが大きな課題である。
A-20	10年未満	注目科学技術	人工肉(植物からの製造)
		ブレイクスルー	EGS投資をきっかけとして食品・外食産業が肉を一切使わないと選択すること。
A-21	10年未満	注目科学技術	世界人口増加による食肉供給不足への対応や環境保全といった側面から、 培養肉 に注目している。培養肉は人工的に屋内生産が可能であることから環境負荷が小さく、気候変動の影響を受けにくい。
		ブレイクスルー	培養肉生産の技術課題は生産時に用いられる材料(培養液等)および量産化方法である。近年、ベンチャー企業だけではなく、大手企業も取り組みを始めている。
A-22	10年	注目科学技術	日本人のゲノムと食に関する調査研究 で、食量・機能性食品が及ぼす影響の結果から、健康労働寿命延伸を図る取り組み。

	未 満	ブレイク スルー	ゲノム解析、各種データが得られることで、データ解析処理システムが必要。並びにリアルタイムでのデータを取得するための計測装置の開発。
A-23	10 年 未 満	注目科 学技術	農業分野の温室効果ガス排出削減のための堆肥等有機物の土壌施用
		ブレイク スルー	土壌有機物、炭素、窒素等の物質収支の精密測定技術
A-24	10 年 未 満	注目科 学技術	農作業の自動化のための空間および形態把握の技術
		ブレイク スルー	薄利の産業分野である場合、装置やシステムの廉価化が必須であり、そのための技術開発等が必要。
A-25	10 年 以 降	注目科 学技術	培養食肉技術 細胞培養による食肉生産のための基礎技術である。現在は基礎技術の開発段階であり、環境負荷が低くできるかや大量生産への課題は多くあるが、将来の食糧問題に対応するにあたり、必要な技術になる可能性が高い。
		ブレイク スルー	連続細胞培養技術 線維形成の効率技術 抗生物質を利用しない培養技術
A-26	10 年 未 満	注目科 学技術	培養肉による食肉生産技術 。培養肉とは動物由来の細胞を、培養技術により動物の体外で増殖させ、食用肉の代用品にすることである。人口増加による食糧増産需要への対応、食肉生産にかかるメタンガス・飼料・水等による環境汚染対策、安全性、屠殺やアニマルウェルフェアに対する倫理的解決策等が、培養肉コンセプトの従来畜産に対する優位性として期待されている要素である。培養に伴う莫大なコストが構造的な課題であるが、近年急激に生産性が向上し、参入するベンチャー企業も数多存在するようになった。
		ブレイク スルー	培養時のコストを大幅に下げること、食感や食味を向上させること、などが主な課題と認識している。再生医療研究との親和性も高いことから、3次元的な組織形成技術を安価に実現するための技術革新が必要と思われる。
A-27	10 年 未 満	注目科 学技術	培養肉の製造技術
		ブレイク スルー	培養コスト、規制(食品としての認可)、細胞を肉として成型する技術
A-28	10 年 未 満	注目科 学技術	野菜などの生鮮食品を低温ではなく、電磁場などで保蔵する技術
		ブレイク スルー	各植物種での最適条件設定が困難
A-29	10 年 未 満	注目科 学技術	「環境への窒素ロスを低減するサプライチェーンの開発」 :食料やエネルギー消費に伴う環境への窒素ロスは地球温暖化、大気・水質汚染、生物多様性の損失等を通じて人間社会への脅威となっている。一方で、養分としての窒素の利用効率を高め、環境への負荷を低減することに成功すれば、限られた資源の有効利用を通じて人類社会の持続性に寄与することが出来る。従来の科学技術はその個別項目のプロセス理解や対応技術の開発に寄与してきたものの、食料や物資のサプライチェーン全体を通じた窒素利用やリサイクル、環境ロス低減に向けた統合的な知見とそれを活かした技術開発は十分では無い。また、それに関わる多様なステークホルダーの行動変容のドライバーを考慮に入れた技術設計に向けた課題が多く、超学際的アプローチによる科学技術開発の取り組みが急務である。
		ブレイク スルー	食料の生産、加工、流通、消費までのサプライチェーンにおける窒素利用効率を高め、その過程での環境への窒素ロス(窒素フットプリント)を定量化するシステムを開発し、生産者、加工・流通業者、消費者それぞれのレベルにおける行動変容が環境への窒素ロスを低減し、その便益がフィードバックされるような科学技術が必要となる。目に見えない環境負荷の問題を、経済やエネルギーの循環にどのようにリンクさせるのか、社会意識・社会行動と科学技術の双方向的な取り組みを推進することがブレイクスルーにつながると期待される。また、そのことが国連の持続的開発目標(SDGs)の実現に向けて重要な科学的な貢献になり得るであろう。
A-30	10 年 以 降	注目科 学技術	●注目する科学技術:土壌-根圏生物の生態系を活用した農業技術 ●技術の概要: 作物栽培において、土壌動物および土壌微生物の働きによる有機物の無機化に関連する生態系(共生微生物含む)を最大限に活用することで、無化学肥料・無農薬により慣行農法同等以上の生産性を実現する。このような生態系活用の栽培法を実現している農家がいる一方で、システムが複雑なために科学的な検証が困難な状況にある。
		ブレイク スルー	土壌-根圏-植物の複雑な関係の指標の開発、また同関係を調査・分析・解析する手法の開発が必要である。

A-31	10年以降	注目科学技術	海水・淡水から検出される環境 DNA による生物多様性評価。 即ち、水サンプルから微量に検出される生物 DNA を検出し、在・不在を評価する。しかし、定量的な評価には至っていない。今後、生物量を定量的に推定する技術開発が求められる。これによって、水産生物の持続的利用を考えるため、水産生物の資源動向を把握することができる。
		ブレイクスルー	環境 DNA の技術開発にのみ依存することなく、漁業情報の集約と共に、漁業に依存しない生物採集モニタリングを強化すべきである。漁業情報、環境 DNA、さらに生物採集の情報を統合的に集約することで、定量評価への道が開けると考えられる。
A-32	10年未満	注目科学技術	環境DNA 水中の微量DNAを解析することにより、直接生体の確認をしなくとも、生物の分布を確認することができる。希少種や外来種の分布調査などを非破壊的に効率的に行うことができる。現在、様々な種についての研究が蓄積されつつある。
		ブレイクスルー	生物の遺伝情報の効率的な蓄積と微量DNAの解析技術の進展
A-33	10年以降	注目科学技術	環境 DNA による生物モニタリング技術
		ブレイクスルー	PCR 等遺伝子試薬の低価格化が必要である。また、業者委託が簡単にできるようになるといい。
A-34	10年未満	注目科学技術	環境 DNA やメタバーコーディング を使った生物多様性の解明
		ブレイクスルー	日本産生物種のバーコードリファレンスデータベースが充実すればより詳細に生物多様性の実態が把握できる。網羅的にバーコード情報を収集する機関や大型プロジェクトがあれば飛躍的に進むと思われるが、現状では国内では大学や研究機関の研究者が科研費やその他の競争的資金を獲得して細々と収集・公開しているのが現状である。
A-35	10年未満	注目科学技術	環境 DNA を利用した生物調査手法
		ブレイクスルー	ありとあらゆる生物種の DNA データベースの整備
A-36	10年未満	注目科学技術	環境 DNA 生物評価技術 は数年で一般的技術に発展してきている。その発展の過程で、環境 RNA 生物評価技術が着目されている。環境 RNA はその生態環境に生息もしくは生育する生物の生理的発現状況を探查することが可能となる。
		ブレイクスルー	現在は、環境 RNA 探查及び評価技術は、生態学者や生物学者が中心となって、研究を行っている。従来から技術の進んでいる医学関係との交流を促進する仕組みが必要である。また、ウイルス研究における技術とも融合可能であり。新型コロナ探索、防除技術との連携を意識した連携も重要である。
A-37	10年未満	注目科学技術	寄生植物の自殺発芽剤。 アフリカの食料問題の根源の一つは作物に寄生して枯らせてしまう寄生植物ストライガによって引き起こされていることが知られているが、本来は宿主が近くにいないと発芽しないストライガ種子を薬剤で強制的に発芽させ枯死させる技術。アフリカの食料問題の解決に貢献することが期待される。
		ブレイクスルー	アフリカ諸国との円滑な国際共同研究の基盤構築が必須と思われるが、現時点では十分とはいえないようである。
A-38	10年未満	注目科学技術	生態系観測と管理への環境 DNA の活用
		ブレイクスルー	環境 DNA のセンサー、高速解析技術
A-39	10年以降	注目科学技術	生物多様性の減少懸念にもとづいた新規モニタリング手法および予測首相に関する技術開発
		ブレイクスルー	衛星技術、リモートセンシング技術、自動撮影技術などの向上と、それらを情報を統合的に集約する情報科学技術と画像解析技術の発展が必要だと思われる。
A-40	10年未満	注目科学技術	エピゲノム制御による生物の形質改良・品種開発。 ゲノム上の遺伝子配列等の改変ではなく、それらを制御するエピジェネティック制御機構を改変することにより、植物の特性を改変することが可能であり、ゲノム配列を改変しないために、遺伝子組み替えやゲノム編集とも異なる品種改良が可能となると期待できる
		ブレイクスルー	エピゲノム改変による形質改変はすでに可能であるが、形質の安定性や遺伝的な安定性に課題が残る。

A-41	10年未満	注目科学技術	カイコ (Bombyx mori) は絹糸(シルク)生産のために家畜化され、現在も蚕糸業をはじめタンパク生産の昆虫工場としてや基礎研究のモデル昆虫として日本を中心に世界中で利用されている。近年ではゲノム編集技術により遺伝子改変されたカイコが続々と作出されており、 <u>ネオ・ドメスティケーション</u> として、 <u>カイコをより高度に家畜化する基盤</u> が整いつつある。これらの背景をもとに、 <u>シルク・材料生産、タンパク質工場、カイコ食、昆虫基礎研究材料として「カイコ」のさらなる利用を目指して、ゲノム編集技術を集約した「シン・カイコ」の作出</u> が今後可能となる。
		ブレイクスルー	オールジャパンでの研究協力体制
A-42	10年未満	注目科学技術	<u>カイコを用いて有用タンパク質を作出する技術</u> に注目しています。遺伝子組換えカイコを用いる方法と組換えバキュロウイルスをカイコに感染させる方法があります。技術自体はいずれも確立しており、診断薬や化粧品の原料、動物の医薬品などについては、小規模ながらすでに販売されています。しかし、一般的な技術とし、低コスト化を実現するにはいくつかクリアすべき課題が残っています。ワクチンや抗体医薬品を作ることでも可能で、新規感染症や医療費高騰の問題に対処するために研究が進められていますが、実用までには至っていません。
		ブレイクスルー	タンパク質にヒト型の糖鎖修飾を自由に付加することができる技術が望まれます。また、カイコを飼育するときにかかるコストを大幅に削減することが実用化につながるための課題だと思えます。
A-43	10年以降	注目科学技術	<u>ギンブナのように天然にクローンとして繁殖する生殖様式を人為的に再現する技術</u> 。本技術が動物種に応用可能になれば、有用な個体を大量に生産することが可能となる。
		ブレイクスルー	通常では減数分裂を経て、体細胞の DNA 量が半減した配偶子が形成されるが、クローン繁殖では体細胞と同じ DNA 量をもつクローンの配偶子が形成される(非還元配偶子形成)。この非還元配偶子形成を人為的に起こすことが必要となる。さらに、クローンでは片親のゲノムのみで発生する必要があるため(単為発生)、単為発生のメカニズムを明らかにする必要がある。現段階では現象は知られているが、その分子メカニズムは不明である。
A-44	10年未満	注目科学技術	<u>ゲノム編集による育種</u>
		ブレイクスルー	食料問題の解決につながる
A-45	10年未満	注目科学技術	<u>ゲノム編集による育種の迅速化と社会実装</u> トマトにおいては既にゲノム編集された高 GABA 品種が市場で販売されることとなった。同様にゲノム編集を用いた遺伝子改変を育種に活用する動きが畜産、養殖漁業、農作物に拡大している。ゲノム編集は従来の遺伝子組換えによる分子育種が内包する様々な障害をクリアし、安心と安全が担保された新品種が市場に供給されることが期待される。
		ブレイクスルー	ゲノム編集された品種の安全性を明確に実証するとともに、消費者が食品に対して持つ「安心」をも満たさなければならない。そのためには、ゲノム編集により作出された品種のもつ全ゲノム情報を安価・迅速かつ数世代先まで長期的に調べる技術が必要になると思われる。また予期せぬ毒性物質が副次的に生成しないことを保証する網羅的な代謝物解析などの手法も必要になると思われる。
A-46	10年未満	注目科学技術	<u>ゲノム編集食品</u> について注目しています。 どのように進展していくのかというよりは、国内で解禁されたことで、その一般普及がどのように進み、その結果として、農業産業自体が大きな変革を迎えることが予想されているので。
		ブレイクスルー	ゲノム編集技術の革新も必要とは思いますが、それ以上に、その安全性を一般の人々にどう伝え、理解して貰うのか、どちらかという科学コミュニケーションの進展がブレイクスルーを生み出すと期待しています。
A-47	10年未満	注目科学技術	<u>サイバー空間での育種研究</u> 。通常の交配実験から何十年もかけて新品種(期待される機能を有する品種)を開発するのではなく、生物種を超えたゲノム情報をフル活用し、形質を見ることなく育種選抜を行う。現在の精度では未だ果樹などの育種年を短くすることができていないのが現状である。更には、日本固有の品種であることを証明するためのタグ情報を明確にし(ゲノム情報に埋め込むバーコード情報)、日本の農林水産業を守る。
		ブレイクスルー	高度なゲノム編集技術と、ゲノムの変異情報と形質情報の関連付け。
A-48	10年未満	注目科学技術	<u>画像処理を応用した小型生物調査</u>
		ブレイクスルー	画像データの収集

A-49	10年未満	注目科学技術	計測工学・精密工学のバイオ・医学応用によるライフサイエンス・農林水産分野の遺伝子工学操作の精緻・効率化と疾病の診断・治療の革新 ダビンチに代表されるロボット手術は、精密機械技術が医学に応用され、基幹病院に多く導入されている。今後、このような精密工学と様々な3次元計測法の進歩が著しい計測工学が、微小操作が必要なライフサイエンス・農林水産分野の遺伝子工学操作や、疾病の診断・治療の革新に応用され、マンパワーに過度に依存していた状況を激変させる可能性がある。
		ブレイクスルー	分野の異なる科学者・技術者の自由な発想に基づくシーズの醸成と、その相乗効果を発揮させるための基盤環境の整備。
A-50	10年以上以降	注目科学技術	前成的に生殖質により生殖細胞が誘導される動物種において、生殖細胞を誘導し、in vitro で配偶子まで分化する技術。 本技術が実現可能となれば、遺伝資源の保存や育種、種苗生産などにおけるこれまでの既成概念が大きく変わる。
		ブレイクスルー	生殖質に含まれる因子の特定し、遺伝子導入を経ることなく体細胞に導入、あるいは体細胞を誘導すること。
A-51	10年未満	注目科学技術	天然物化学と生態学および、インフォマティクスや数理モデリングをはじめとする数理科学の融合による、植物間コミュニケーションを可視化する技術が今後注目に値する科学技術 であろうと思える。逆に、ここで出遅れると諸外国に植物生産に重要な天然物同定および人工的合成技術について特許、知財を奪われる可能性がある。植物が水溶性化合物および、揮発性化合物を介してコミュニケーションをとり、周囲の生物的環境に対して応答することが近年次々に明らかにされてきた。植物はただ静的に物理環境に反応するだけでなく、生物環境に対しても応答し、時に共生相手に協力し、時に騙す。このような振る舞いは単に基礎生物学上興味深いだけでなくさまざまな応用先が考えられる。植物の根の肥大化、もしくはその抑制のシグナルとなりうる、化合物の同定(混合物の場合その組成)が明らかになれば現代農業のあり方が変化する。植物工場でも一層の生産性向上が期待できる。また植物が菌類を騙して資源を搾取する行動が明らかにされてきたが、このことは裏を返すと、菌類の騙し方が理解されれば生きた植物としか関係性を築かない、マツタケやホンシメジのような有用品種の栽培に大きな期待がもてる事を意味する。食物資源の安定化、品質の向上はこれまで植物および共生生物との格闘の歴史であり、除草剤や化学肥料など無機化合物を介した機械的制御が行われてきたが、将来の持続可能性を考えた際に、天然物化学による植物の制御法の確立は大きな期待が寄せられる。
		ブレイクスルー	天然化合物の同定および網羅的記載、機能の解析には、ハイスループットな分析技術の確立、およびインフォマティクスと機械学習の融合による選定作業が必要となる。これと同時に、植物と、菌類をはじめとする共生生物の飼育法の確立や網羅的フィールドサンプリング法の確立にはブレイクスルーが必要である。これまでの野外調査は専門の調査員(分類学者や生態学者)が地道にサンプリングを行ってきたが、機械学習等の予測技術を通してエキスパートに変わるシステムを開発し、トップの専門家でなくとも、サンプリングを行い、ハイスループットな分析にかけるまでのパイプラインが構築できれば、この分野の技術開発が一気に進む。国内には森林をはじめとする野外生態系の網羅的観測システムおよび分析までのパイプラインが存在しないので、システム構築と分析装置、ソフトコンピューティングのすべてのインフラを整え、諸外国に先んじて天然物の網羅的記載をすすめることが求められる。
A-52	10年未満	注目科学技術	ロボット技術やICT等の先端技術を活用した超省力化や高品質生産等を可能にする スマート農業技術(ビッグデータの解析による効率的な栽培管理方法やAIを利用した形質評価方法など) 。
		ブレイクスルー	SDGsの取り組みにもなる持続可能なエネルギー資源を利用したアグリシステムの構築が必要と考えます。合わせてバリューチェーンの構築も重要と考えます。
A-53	10年未満	注目科学技術	海洋の自然エネルギーと水産業の共生
		ブレイクスルー	風力、潮流等で発電されたエネルギーの貯蔵(蓄電技術の向上)
A-54	10年未満	注目科学技術	害虫とその天敵の行動操作による害虫管理技術 に注目しています。害虫管理においては、合成殺虫剤が効かない害虫は出てきたため、合成殺虫剤以外の方法で害虫被害を防ぐ必要があります。害虫が大発生する問題点は、生態系が単純化することがあげられます。そこで、害虫を忌避させたり誘引させたりする植物を作物と一緒に栽培して害虫を管理する方法が生まれました。害虫を食べる天敵昆虫も畑に誘引することができれば害虫管理に貢献できます。このように、植物を使用して害虫や天敵の行動を操作し害虫管理する技術が研究されてきています。また、人工合成した植物の香りやLEDを用いて光による天敵の誘引なども研究されています。植物だけでなく、香りや光を用いて害虫を管理できれば、合成殺虫剤の使用頻度も抑えられ、持続可能な農業生産に貢献できます。また、植物間では香りを介してコミュニケーションをとることが分かっているため、作物外の植物を栽培することにより、作物の生産能力を向上させる効果なども期待できます。つまり、植物-昆虫(ダニも含む)間の相互作用を応用すること

			で害虫管理技術を植物間の相互作用を応用することで生産向上技術を創出できると考えています。
		ブレイク スルー	害虫発生を低下させる成果は出てきているため、技術利用する生産者の収益向上を可能にすることが一番重要と考えます。
A-55	10 年 以 降	注目科 学技 術	計量魚群探知機および音響観測による水中生物のモニタリング技術
		ブレイク スルー	計量魚探およびソフトウェアの低価格化が必須であり、いずれの調査船にも広帯域魚群探知機が搭載できるようになるとよい。
A-56	10 年 未 満	注目科 学技 術	次世代の環境負荷低減社会を構築するための物質生産技術や高付加価値農林水産物の生産技術 など。
		ブレイク スルー	新たな生物インタラクションによる化学物質のライブラリー制作などによって新規機能性物質の生産や新規素材生産
A-57	10 年 未 満	注目科 学技 術	芝が輪状に周囲より繁茂あるいは枯死した後にキノコが発生する現象を「 フェアリーリング 」といいます。これまでにこの現象の原因物質(AHX, ICA, AOH)を発見か発見されました。その後、これら3物質(フェアリー化合物, fairy chemicals と総称, FCs と略称)の植物における内生が判明し、さらに圃場試験において農作物の増収効果を示されました。本研究は、農業への実用化を目指すのみならず、FCsが新しい植物ホルモンであること可能性を示唆しています。
		ブレイク スルー	農業への利用が、コスト的にも実現可能か否かとその実際の効果の検証が必要です。
A-58	10 年 未 満	注目科 学技 術	植物バイオテクノロジーの社会実装例として、ゲノム編集食品(トマト)の商品化 に着目している。さらに、基盤となる基礎的植物科学と応用を志向した発展研究を行うことにより、より社会の課題へ解決策を提案できる植物科学になると考えています。
		ブレイク スルー	資金。特に広く浅くくぼる資金が不足していると思います。特定の研究分野へ資金が集まりすぎていると感じます。日本は世界に類をみない温暖湿潤な気候を持つので、植物科学や水産学など日本独自の学術推進策があってもよいと考えます。せっかく気候から恵をいただいているのですから。エネルギーや発電の方法も変わり、健康、食品科学、環境保全などの社会のニーズが時代とともに変わっているにもかかわらず、資金配分の大元がかわっていないことに不安を感じます。また、
A-59	10 年 未 満	注目科 学技 術	土を一切使わない農業生産技術
		ブレイク スルー	地球温暖化の主要因を一般人にわかりやすい化石燃料利用技術(発電・移動・製鉄)だけに限定しないこと。CH ₄ ,N ₂ Oの大量放出の源である農業部門も早急な法規制を導入すること。
A-60	10 年 以 降	注目科 学技 術	葉面微生物の散布による作物増収技術。 植物葉面には植物に対する生長促進効果をもつ微生物が棲息しており、植物と葉面微生物の間には種間特異性があることが知られている。野菜や穀類の増収効果をもたらす葉面微生物を微生物製剤として葉面に散布する、安価で簡便な作物増収技術の開発が期待されている。特に、葉面の優占種であるメタノール資化性細菌はその有力な候補となっている。
		ブレイク スルー	種間特異性があることから、作物毎に最適な菌株を選抜する必要があるため、多様な組合せで増収効果を検証する必要があるが、栽培期間や栽培面積が限られているため、大規模な検討を行うことが難しい。トランスクリプトーム解析など、植物細胞のレベルで増収効果を迅速に評価する方法が確立できれば、より多様な組合せを検討することができる。
A-61	10 年 以 降	注目科 学技 術	「植物性生理活性物質の土壌微生物代謝の研究および開発」 植物性食品は、古来より美味だけでなく健康に良いという理由でも人類が選抜して、今日での摂取に至っている。植物性食品中には、ヒトに対して生理活性作用を示す様々な低分子化合物成分が含まれている。生理活性物質は栽培植物中で生合成されるが、葉などの組織が地面に落ちた時に、そこに含まれる生理活性物質は土壌中に残ることは無く、土壌微生物で代謝されると考えられるが、それらの生理活性物質の土壌微生物による代謝はほとんど分かっていない。代謝のみならず、代謝に関わる個々の酵素や代謝産物群もほとんど未同定である。個々の代謝産物が栽培植物の根や根圏微生物にいかに関与しているかも未解明である。植物にとって病原性を示す微生物に対する阻害作用や、植物にとって有益な微生物に対して良い生理活性作用を示すかどうかさえ分かっていない。世界に先駆けて、植物性食品中の生理活性物質の土壌微生物代謝に関する研究を支援すべきと考える。
		ブレイク スルー	JST ERATO 野村プロジェクトや、科学研究費補助金 新学術領域研究「超地球生命体を解き明かすポストコッホ機能生態学」などの大型プロジェクトとして、中長期的な支援が必要。

A-62	10年未満	注目科学技術	細胞培養技術を活用したフードテックの実用化。 人工培養肉製造技術により畜産等により排出される窒素化合物や二酸化炭素削減への貢献、高たんぱく食の自給自足促進につながる技術。
		ブレイクスルー	革新的細胞培養技術の構築による低コスト化の実現。
A-63	10年未満	注目科学技術	環境 DNA 本技術は、2010 年代中頃から学術的に技術開発が開始され、2020 年に入り環境分析手法としては確立したとも言える科学技術である。しかし、社会実装という面では今後さらなる研究・技術開発が必要であるとともに、水中生物のみならず DNA や RNA を持つすべての生物やウイルスを対象とした調査手法へ展開されることを期待している。 2020 年の新型コロナ感染症は、一躍「PCR 検査」という手法を世界中に知らしめたが、環境 DNA の原理は全く同じである。水中に浮遊する生物由来の DNA の破片を採水により収集しこれを濃縮、PCR 検査器にて DNA 配列を増幅させ既知の生物の DNA 配列(プライマー)と同定することにより、対象としている生物の有無を評価する調査手法である。一見簡単そうに見えるが、調査対象とする生物毎に、その生息環境の場に応じた調査手法や分析結果の評価技術も構築しなければならない。河川や湖沼の環境 DNA 調査で希少種の存在を確認できたとしても、いつどこにいたのかを把握することはできないし、それがどの程度の数生息していたのかもわからない。こういった生物の生息情報を検討できるレベルにまで調査手法を高度化していく必要がある。現在、環境省や国交省などがこの調査手法を実務に取り入れるための研究開発を開始しているし、環境 DNA 学会が設立され産官民での技術情報の共有も行われている。しかしながら、生物やウイルスの生態を扱うことから生物研究者の補強も必須である。、PCR 分析技術の高度化を担う工学的技術者との分野連携により環境 DNA 技術の高度化を図る必要がある。 そのため、河川・湖沼・海域を対象とした生物資源管理や畜産・農産物の感染症対策、人の健康被害を防止するための感染症対策などへの活用を視野にした、IoT、ICT 技術と生態調査技術を融合させた環境 DNA 調査技術を開発することが重要である。特に、気候変動の影響によると考えられている海水温や海流の変化は日本近海のさんまを初めとする回遊魚の漁獲高の不安定化や、鳥インフルエンザや豚コレラなどの家畜感染症対策とされる一斉殺処分がもたらす畜産事業の甚大な損害などは、近々の課題である。こういった事態に対し、科学的な調査データに基づいた対策を講じることで、結果、日本の生産性を向上させることに貢献できるはずである。
		ブレイクスルー	環境 DNA 調査技術の高度化に対する必要性は十分条件として満たしているはずである。10 年後、いや 5 年後に社会実装し、この技術を活用して生態系の管理・モニタリングを行うことによる経済効果をどのようにとらえるのか、といったことだけであろう。技術開発としてのブレイクスルーとしては、環境 DNA 自動分析器といった完全自動による調査技術機器とするためのバッテリーや通信、自動運転・自動航行などの工学的技術開発が同時に成立していく必要がある。つまり、できるだけ低廉に多くのデータを取得できる調査機器を開発することが必要状況となる。そして、こういった工学技術は自動車やドローンなどの自動運転技術の高度化により同時に実現していくであろう。ブレイクスルーに必要なものは、従来、低生産性と認識されてきた一次産業のポテンシャル、つまり日本の持つ資源のポテンシャルを再認識し、その高付加価値化(高次産業化)のための政策として技術開発投資を日本の政策に位置付けることである。
A-64	10年以降	注目科学技術	環境 DNA ; 現在は川や海の水を採取し、そこに含まれる DNA を分析することによってその場所にいる生物相を把握する手法として試行されているが、水域だけではなく幅広い環境において応用が可能なものである。
		ブレイクスルー	資源動態の把握や不在証明が困難であるため、これらを少しでも解決できるような改良が必要である。また、水域では比較的多くの研究が蓄積されつつあるが、これ以外の環境中残存 DNA についてはまだ試行がほとんど行われていない状況にある。
A-65	10年未満	注目科学技術	アニマルウェルフェア技術開発及び普及と SDGs 達成への連関
		ブレイクスルー	畜産学、環境学、ビジネス学等の異分野融合による包括的研究体制の拡大拡充
A-66	10年未満	注目科学技術	遺伝子編集を用いた高効率の水産養殖魚の開発
		ブレイクスルー	技術的に可能であるが、遺伝子編集で生まれた魚を受け入れる法的・心理的障壁を取り除くブレイクスルーが必要。遺伝子組み換えとは全く異なるが、一般の人には違いが伝わりにくい

付録3 分野別アンケート結果一覧(環境・資源・エネルギー)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術＝「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー＝「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
E-1	10年以降	注目科学技術	トリウム熔融塩炉による発電および水素発生 現在の電力供給はいずれ破綻するのは間違いなく、次なる施策を早急に打ち出さなければならない。「水素社会」の到来と声だかに叫ぶ流れがある一方で、水素を生み出すための石油燃料はもろろんのこと、現在の核燃料による方法に限界と危険性があるのは全世界の認識であろうと思われる。太陽光や地熱、水力、風力などグリーンエネルギーの普及が進まない今、あらゆる方法を探るべきである。少なくとも200年後までのエネルギー供給源として注目している。
		ブレイクスルー	人工光合成による水素発生などは研究だけにとどまっており、現実には水を高温加熱分解して水素を創り出す方法が最も単純である。ブレイクスルーは世間の認知と承認だけである。誰もが不安を抱いている中、経済界や国が明確な方針と説得力ある施策を打ち出さない限り何も起こらないことを危惧している。
E-2	10年未満	注目科学技術	Carbon Capture and Utilization (CCU) 二酸化炭素の資源化に関する科学技術
		ブレイクスルー	CO2還元反応触媒やCO2吸着材料がキーマテリアルだと考えられる。ラポレブルなら近未来のうちに開発されると思うが、実用化には長期的な研究が必要であろう。
E-3	10年以降	注目科学技術	CO2を始めとする地球温暖化ガスの回収・利用・貯留に関する研究 。特に大気からのCO2回収は、きわめて困難な条件での分離回収となるが、それに関するクリアテクノロジーやコンセプトがない。一方、植物は非常に温和な条件で、大気からCO2を回収し、それを炭素源とする、炭素循環をすでに確立している。それらを手本にすれば、人工的にも可能と考えられるが、いまだ人類が到達されていない技術である。ムーンショットプロジェクトでも本課題は取り上げられているが、社会実装を狙いすぎている感があり、もっと基礎学理を確立しなければ、厳しい状況かと思われる。
		ブレイクスルー	大気に関してしまっ、きわめて希薄になってしまったCO2を、以下に温和条件下で回収するか、これについては大きなブレイクスルーが必要である。特に植物のように、それ自身が動くことなく、極低濃度のCO2を、(ポンプなどで吸引することなく)葉から回収していることを踏まえると、技術的には不可能ではなく、原理原則を踏まえれば、実現可能だと思われる。これを例にとり、単純なバイオメディックというだけでなく、それからのエッセンスを抽出したシステムが構築できるはずである。これを支えるバイオから化学系の基礎学理が大きなブレイクスルーの役割を果たすのではないかと考えられる。
E-4	10年未満	注目科学技術	FCHVなどへ利用される水素貯蔵タンクの材料、構造
		ブレイクスルー	高い安全性と低コスト、耐久性能、耐熱性、大容量化が可能になれば、燃料電池を電力熱源とする様々な機器が普及する
E-5	10年未満	注目科学技術	イオン交換膜 を用いることにより、水の電気分解だけで、高圧の水素を生成させる。高価な設備を必要とすることなく、 高圧水素の貯蔵運搬 ができるようになることを期待できる。
		ブレイクスルー	高圧下でも水素の透過が起きないイオン交換膜、および安価な触媒
E-6	10年以降	注目科学技術	エネルギーキャリアを製造するための反応システム
		ブレイクスルー	水素製造や電解還元のための電極触媒の開発、効率的な電解合成のための反応器の開発
E-7	10年未満	注目科学技術	エネルギーハーベスト、振動、熱勾配、熱変動、電磁波から電気エネルギーを得る技術
		ブレイクスルー	効果的に電気エネルギーを取り出す素子の開発が必要である。
E-8	10年	注目科学技術	エネルギーを使わずに大気中二酸化炭素を固定化する技術

	未 満	ブレイク スルー	二酸化炭素を固定化するためのアルカリ溶液を安価・低エネルギーで作成する技術
E-9	10 年 以 降	注目科学 技術	エネルギー消費の少ない機械システムを構築する技術 は、持続可能な社会の実現に必須な科学技術である。機械システムの駆動のためには、動力を要するが、これをシステムとして極限まで低減することで、ポータブル電源の使用が可能となり、いままでにないポータブルな機械システムの設計が可能となる。
		ブレイク スルー	機械駆動時に発生する摩擦をゼロにする材料と流体システムの確立。
E-10	10 年 未 満	注目科学 技術	エネルギー問題が重要だと思います。 宇宙太陽光発電 は有望だと思います。
		ブレイク スルー	宇宙への建造物の輸送コストの削減
E-11	10 年 未 満	注目科学 技術	マイクロ波を使った無線電力伝送
		ブレイク スルー	RF-DC 変換効率の向上
E-12	10 年 未 満	注目科学 技術	ワイヤレス電力伝送技術。無線ネットワーク経由で電力を供給する技術。
		ブレイク スルー	数 km 以上の距離にまで伝送できること。
E-13	10 年 以 降	注目科学 技術	安全な高密度エネルギー蓄積方法。LIB を機能を凌駕ししかも安全な新電池作成技術。
		ブレイク スルー	エネルギーが高密度で存在することと、安全であることの矛盾をどう解決するか？
E-14	10 年 以 降	注目科学 技術	宇宙エネルギー伝送
		ブレイク スルー	宇宙ロジスティクス 自動化 廃熱技術
E-15	10 年 以 降	注目科学 技術	宇宙太陽光発電システム であり、地球環境を考える上では有用かつ安定したエネルギー供給源であると考えます。燃料源となるエネルギー価格や運搬などの運用に関わるリスクを低減でき、発電時、発電後に発生する処理物も殆どない。
		ブレイク スルー	運用が終わった後の宇宙構造物の廃棄・回収や、マイクロ波・レーザーによる人体への影響や航空、電子機器などへの影響回避、維持・管理に関する費用など、技術的検討事項があるものと思われる。
E-16	10 年 未 満	注目科学 技術	温海水と冷海水の温度差から発電を行う海洋温度差発電 。海水淡水化装置と併せて設置することにより、ヒトの生活に必須となるエネルギーと水を同時に生成することができる。
		ブレイク スルー	発電と淡水化の基本的な技術は確立されている。蓄電技術の向上が必要である。
E-17	10 年 未 満	注目科学 技術	家庭用、小規模発電と蓄電システムの構築
		ブレイク スルー	主要都市や電力機関との間で電力のやり取りができない、北海道や東北地域では、東京などの首都地域では独立した、電力の仕組みが必要である。これから大きなダムを造って大きな電力をつくる方法ではなく、地域ごとの消費電力と作成電力の兼ね合いを予測した、地方自治体に権限を与える仕組みであると考えている。北海道、全国の電力と、主要都市から外れた、地方とは、まったく別の観点で考えることであろう。
E-18	10 年 未 満	注目科学 技術	我が国の最終エネルギー消費量の内、その約4割は熱利用です。工場、自動車などでしようしている熱の約65%以上は未使用であり、特に工場からの廃熱温度は100-150℃が多く占めています。今後のエネルギー利用の高効率化に伴い、ますます100℃程度の低温度廃熱が増加することが予想されます。しかしながら、現在の熱交換器では、その低温度廃熱エネルギーを効率的にエネルギー変換することが困難であり、 熱交換器の高性能化 が急務であります。
		ブレイク スルー	熱交換器における作動流体の蒸発・凝縮伝達の効率を向上させることが、この技術のブレイクスルーになります。作動流体の最適化や熱交換器の伝熱面の改善が急務であります。
E-19	10 年 未 満	注目科学 技術	海流あるいは潮流を用いて発電する海流・潮流発電技術
		ブレイク スルー	炭素繊維など先進複合材料によるブレードの大型化による効率の向上、モニタリング技術による発電システムの信頼性向上が必要である。

E-20	10年以降	注目科学技術	<p>核融合技術 (理由)</p> <p>自動車の電動化を推進するには、安価で大量の電力が必要である。日本におけるエネルギー消費の約25%を占める運輸部門(殆どが自動車)の大半を電動化するには、総発電量の増大が必須である。既販売のガソリン車の耐久寿命とガソリンスタンドの減少による利便性の低下は、早晩全ての自動車の電動化が達成される。ガソリンスタンドの減少による利便性の低下とマインドの変化は、冬期の暖房のエネルギー源を灯油から電力(エアコン)へ急激にシフトさせる。この分の電力消費量増加も加味すると、25~30%の電力供給量の増加が必要である。電動化の目的を脱化石燃料に求めるならば、火力発電所の増産や稼働率の向上による電力供給は許されない。むしろ、火力発電所の閉鎖自体も求められることになる。これに対し、工業国である日本では、大型風力発電所やメガソーラー発電所の増加では、絶対量として全く足りない。これらの自然エネルギー発電が2割程度を超えるとエネルギー需給バランス制御が困難となり、大停電のリスクを抱えることにもなる。対応できるのは、現時点では原子力発電(核分裂炉)のみであるが、ウラン資源量にも限りがあり、プルサーマル計画の強力な推進がなければ近い将来エネルギー資源不足となる。原子力発電所の増産も求められる。しかし、科学技術的安全性とは別に、いずれの計画も世論として受け入れられにくい状況である。放射性廃棄物の問題も大きい。更に、大量の原子力発電所は、テロや他国からの侵略のターゲットとしての危険性も高い。</p> <p>これに対し、エネルギー資源供給の安定性、安全性、および高レベル放射性廃棄物や廃棄汚染物質を出さないクリーンさを有し、かつ発電量の高い安定性によるエネルギーマネジメントの容易さと経済性の全てを兼ね備える可能性があり、世界の基幹エネルギー源となりうるのが核融合発電である。</p>
		ブレイクスルー	核融合炉の実現は、材料工学、機械工学、プラズマ工学等、ほぼ全ての工学分野の高度場融合が必要であり、一つのブレイクスルーを取り上げることは難しい。直近ではJT-60SAやITER計画などのプロジェクト研究を遅滞なく進めるための、予算と人的リソースの供給が必要である。
E-21	10年以降	注目科学技術	核融合発電 。世界のエネルギー市場を一変させる可能性がある。
		ブレイクスルー	詳細は把握しきれていない部分もあるが、核融合プラズマを長時間閉じ込める技術や炉として必要な条件(耐温度特性、プラズマに暴露されても強度を保てること等)を満たした材料の開発などが必要。また、全体として低コスト化も重要な課題となるだろう。
E-22	10年未満	注目科学技術	環境電磁工学技術 (将来の低電圧駆動LSIを用いたIoT、ICT、AI等に必須な、電磁雑音環境下においてもLSIの過電圧破壊や誤動作を起こさない技術)
		ブレイクスルー	シグナルインテグリティ技術の向上
E-23	10年以降	注目科学技術	近年、 洋上風力発電や海底都市の建設など深海領域に構造物を構築 する動きがみられ始めるようになった。これは、日本のように海に囲まれた国土を有する国においては領海の新しい活用方法として非常に注目を集めており、現在その実現性に向けた試みが行われ始めている。深海領域では、多種のイオンを含む海水の化学的侵食と高水圧に常時曝される環境となる。したがって、深海領域に構造物を構築する際には、これらの環境に長期間耐えることのできる材料であることが前提となり、セメント系材料が着目されている。
		ブレイクスルー	深海領域において要求されるセメント系材料の性能としては、海水による化学的侵食と高水圧に対する安定性である。現状の課題としては、低温高圧環境下における化学的侵食のメカニズムが未解明な点、高水圧下における水中のセメント系材料の力学挙動が未解明な点、さらにこれらが同時に作用したときの構造耐久性能を評価する手法がない点、が挙げられる。これらの現状の課題を解決することになる。

E-24	10年以降	注目科学技術	<p>現在、電力・産業応用関連で「超電導技術」は注目すべき技術の一つであると考えられる。</p> <p>超電導技術は現在、JR 東海が進めている超電導リニアや医療機関で使用されるMRI に導入されている。この技術に関して言い方を変えたと「強力な磁石」を作る技術であるといえる。よってこの技術をモータ・発電機のコイル等に導入すると、電流密度が高く、強力な磁界を発生するので、モータ・発電機の高出力密度化(出力を維持しつつ従来機よりも軽量となる)が可能となる。</p> <p>現在、この技術は航空旅客機の電動化と関連が出てきている。すなわち航空機の推進システムの一部をガスタービンエンジンから電気モータに置き換えて温室効果ガスの排出を抑えた高効率なシステムの実現を目指している(航空機版のプリウスやリーフ)中で、重量制限が厳しいため、このような高出力密度な超電導モータ・発電機を適用できる可能性が議論されている。また、超電導モータの冷却に液体水素を使用することが出来れば、超電導体の冷却(抜熱)に用いてガス化した一部の水素をそのままガスタービンエンジン燃料に用いることで、冷却コストに関しても抑えることが可能となる。</p> <p>また、超電導体の「電気抵抗ゼロ」という特徴を生かして直流送電ケーブルに使用するという研究もおこなわれており、今後の送電電力の高効率化にも貢献する可能性を秘めている。</p>
		ブレイクスルー	<p>超電導体を電力機器(モータ、発電機、変圧器、etc. ...)に用いる場合、直流抵抗がゼロではあるが、交流電流・磁界(時間変化する電磁界)に関しては、損失が発生する。これは超電導体が磁性体であり、「ヒステリシス特性」を持つためである。一般的に交流電流・磁界を超電導体に与えた場合に起こる損失を「交流損失」と呼称する。この交流損失の発生が超電導体の電力機器の実用化を妨げている原因の大きな要因一つである。本損失を抑えるために、超電導材料でワイヤを作る際に、超電導体表面に切り込みを入れて磁束密度が印加される表面積を小さくして損失を抑えたり、ワイヤの母材に電気抵抗が比較的高い金属を用いるなどの工夫を行い、交流損失を抑えるための研究が活発に行われてきており、今後これらの研究が進んで超電導体の交流損失を低減するための技術ノウハウの蓄積が出来れば、超電導モータ等の実用化も視野に入ってくると考えられる。</p>
E-25	10年以降	注目科学技術	光エネルギーの活用技術
		ブレイクスルー	光通信インフラを活用した、微弱光による給電技術。宇宙空間などを対象とした光無線による通信・給電技術。
E-26	10年以降	注目科学技術	光触媒による太陽エネルギーの利用
		ブレイクスルー	現在の活性を落とさずに、低コストかつ大面積で可能な製造方法の確立
E-27	10年未満	注目科学技術	効率的な水素製造方法の確立
		ブレイクスルー	水素をどのようにして製造するかという共通認識を作る必要がある。現在水素製造方法の可能性を探索しているフェーズであるが、そろそろどれかに注力してブレイクスルー技術がどれなのかを絞り込んだほうが良い
E-28	10年未満	注目科学技術	<p>高温度域における潜熱蓄熱によるエネルギー貯蔵技術</p> <p>再生可能エネルギーの導入拡大が日本はもとより世界で必須となってきている。脱炭素化をさらに深化させる上で、エネルギー貯蔵のもつ大きな可能性と決定的重要性が浮き彫りとなっている。その一つの選択肢が蓄熱技術である。特に、金属の融解・凝固の物理変化を利用した金属PCM潜熱蓄熱は、低コスト・高信頼性(再現性)・高蓄熱密度・高伝熱性の観点から有力なエネルギー貯蔵技術として注目している。これにより、変動電源である再エネ電力(power)-to-heat-to-安定電力(power)型の利用が可能となる。このエネルギー貯蔵技術は、再エネの問題である短周期・長周期変動を吸収し、安定電力として使用する道を開く科学技術である。蓄熱は、蓄電池と比べて低コストで大規模化が容易である点でも優れている。発電効率の観点から、低温度域の熱よりも、高温度域の熱貯蔵が有効と考えられる。</p>
		ブレイクスルー	<p>潜熱蓄熱システムに熱を貯蔵するには、熱を運ぶ媒体が必要となる。これまでの研究では、600℃を超える高温度域の熱媒体として、塩化物系熔融塩、高温空気、熔融金属(特に原発で使用されている金属ナトリウム)が検討されてきたが、高温腐食性・低熱輸送効率・危険性などから決定的な熱輸送媒体は見つかっていない。高エネルギー密度・安全性が高い・低コスト・低腐食性を満たす新規の熱輸送媒体の開発研究が必要となる。</p>
E-29	10年	注目科学技術	再生可能エネルギーから安価に水素を製造する技術

	未 満	ブレイク スルー	蓄エネ技術や水素製造技術の価格破壊に加えて、それらを適切に組み合わせるシステム化技術およびリアルタイムでの運用技術がカギとなる。
E-30	10 年 未 満	注目科学 技術	再生可能エネルギーから生成されるアンモニアの直接燃焼利用
		ブレイク スルー	(1) アンモニアを酸素富化なしで燃焼させる技術 (2) アンモニア燃焼時に発生するNO _x の低減技術
E-31	10 年 未 満	注目科学 技術	再生可能エネルギーの「地中熱」
		ブレイク スルー	地中熱を高効率で利用可能な地域の探究(地下水の高い透水性と十分な量)。低コストで地中熱を取り出すことが可能な技術の開発。
E-32	10 年 未 満	注目科学 技術	再生可能エネルギーの技術革新による一般家庭への普及
		ブレイク スルー	エネルギー効率を抜本的に上昇させる技術が確立する必要があり、様々な産業に応用され、家庭での一般普及が必要
E-33	10 年 未 満	注目科学 技術	再生可能エネルギーの余剰電力と二酸化炭素から燃料合成(eFuel) 。 eFuelを軽油やガソリンに混合することで、既存の乗用車を活用して二酸化炭素の排出量を削減できる。 さらに、合成する燃料を最適化すれば、従来の内燃機関の熱効率を改善できる可能性がある。
		ブレイク スルー	(1) 再生可能エネルギーの余剰電力と二酸化炭素から燃料を合成するシステムの効率を改善する必要がある。 (2) 合成する燃料種の選定をすすめる必要がある。 燃焼の希薄限界の改善しつつ、ノッキングを抑制できる燃料組成の検討
E-34	10 年 未 満	注目科学 技術	再生可能エネルギー拡大のために発電量を増やしても送電線の空き容量不足に直面し、出力抑制も生じている。この課題を解決する科学技術として、少ない送電ロスで大電力を送電できる「 超伝導直流送電 」(SCDC)に注目している。 ●再生可能エネルギーの拡大と安定化を同時解決 超伝導直流送電(SCDC)は日本が諸外国に先駆けて開発してきた技術であり、SCDC全国網ができれば、再生可能エネルギーの拡大と安定化を同時に実現できる。エリア内の出力抑制がなくなり、再生可能エネルギーの発電適地と電力大消費地がつながる。通常送電に比べて、送電ロスが少なく、超長距離送電が可能で、省エネルギー・省スペース・低コストである。 自然エネルギーの不安定性も地域ごとの蓄電対応でなく、全国の過不足を慣らして対応できる。SCDCには液体窒素循環系が必要だが、世界最長の1000m送電に成功しており、このデータをもとに循環ユニットを長距離化(~100km)できる目処も示された。送電損失も交流送電に比べ1/10にできる。 ●高速道路の利用によるSCDC全国網 一方、送電ルートの確保について、2019年度に「エネルギーインフラネットワークと高速道路の高度化に関する研究会」(一般財団法人国土技術センター(JICE)、株式会社国土ガスハイウェイ)で有識者による検討結果が公開されている (http://www.jice.or.jp/reports/autonomy/roads/detail.03)。技術的には、高速道路の空間活用が可能で、効率的な電気・ガス輸送を広域的に行える直接効果と、再生エネ活用による温暖化ガス削減、地域創生等の間接効果もあることが示されている。 ●海外の追い上げ 我が国のSCDC研究が世界最高性能を示したことから(石狩プロジェクト)、各国(ロシア、中国、韓国、アメリカなど)が日本の方式を研究しており、さらに長距離の建設を始めた国も見られる。一方、我が国ではその後の研究開発を支援しておらず、太陽電池のように我が国の技術をもとに、他国が席卷する恐れが現実化している。

		ブレイクスルー	<p>①「高速道路の高度化」が勧められており、自動運転などの車に搭載する技術への対応とともに、SA, PA での給電、移動中の給電をはじめ、太陽電池を含む様々な技術と連携して開発されている。SCDC はこれらと相性が良いので、その特徴を十分に発揮できる活用について研究開発する必要がある。「高速道路利用の高度化」(前出の JICE 報告書)の中で SCDC 導入が検討されている。</p> <p>②SCDC は、低電圧で長距離の大電力送電が可能なので、特高変電所が不要となる。その社会実装のための要素技術として、SCDC の大型化(1 千万 kW 送電)、交直変換器・限流機・遮断機等のパワーエレクトロニクス機器の開発と実地試験、冷却の高効率化、超電導送電線の低コスト化などの要素技術開発、超電導発電機と超電導ポンプによる高効率化等のための戦略的な要素技術開発研究などがある。</p> <p>③法制度を含めた対策の研究開発 これまでに高速道路を活用する場合の制度・機器管理上の課題として、整備空間に関する制度の必要性、起案インフラ整備に関する現行法制度、道路関連法に位置付ける5つのケースが検討されており、事業実施の観点からこの5つを比較している(前出の JICE 報告書)。現行の法令の下で基幹エネルギーインフラ施設を整備しようとすると、いずれの法令を適用しようとしても課題がある。そこで、現行法の運用の緩和、現行法の改正、新たな法律制定の3つの方向から検討されている。今後、研究開発を進めて早期に高速道路への敷設実現を目指す必要がある。現行法の改正、または新たな法律制定が進められる可能性がある。</p>
E-35	10年以降	注目科学技術	磁場閉じ込め核融合による発電
		ブレイクスルー	定常運転に向けた炉壁への熱輸送制御技術の開発が必須。
E-36	10年以降	注目科学技術	<p>自然エネルギーの有効利用及び蓄電技術。 これからの時代は安定したエネルギーをどのように確保するかが非常に重要となる。エネルギーなしには、科学だけでなく、文明、文化、経済の発展は望めない。自然エネルギーと呼べるものはたくさんある。台風や勢力を増しつつある暴風雨時の風や波のエネルギー、地震のエネルギー、夏の太陽光もそうかもしれない。しかし、そのエネルギーは瞬間的でいくら大きなエネルギーが襲ってきても、それを有効的に使うことはできない。仮に有効的に電気エネルギーに変換することも、一時的な大きなエネルギーは無駄になる。そのため蓄電技術は非常に重要になってくる。これまでの充電技術だけでなく、有効に自然エネルギーを蓄え、必要な時に使用することができる蓄電技術が重要となってくると考えられる。また、地面と大気との電位差を利用する技術も重要となるかもしれない。ただし環境影響は評価しなければならないが、さらに、安価で有効なバイオ燃料製造技術も必要である。世界的に電気自動車の流れがきているが、飛行機、船舶、農業機械の電気化は難しいと思われる。その為、石油に代わる安価な液体燃料の製造法が必要である。</p>
		ブレイクスルー	<p>軽量、大容量の蓄電技術、または新たな蓄エネルギー技術の開発が必要ではないだろうか。</p> <p>バイオ燃料は、10年以内には有効な技術が確立されるものと予想している。バイオディーゼルは熱帯地域で有望である。ブレイクスルーは、樹木の油を利用するため、有効成分と燃料成分の効果的な分別合成法の確立が重要であると思われる。バイオエタノールは効果的な繊維からの発酵技術が必要であり、エタノール生成は酵母が行うとしても、低濃度から高濃度にする技術、酵母が利用できる状態にする技術、の開発が必要である。</p>
E-37	10年未満	注目科学技術	<p>小型原子炉(SMR)に注目している。米国 NuScale 社の SMR は既に米国 NRC から設計の安全性に関する認可を受けており、次の建設段階に入ろうとしている。高い安全性とスケラビリティ(小規模から大規模)があり、日本においても導入のメリットは高い。日本は風力発電の拡大に舵を切ったが、その電力供給の安定性には大きな疑問が残る。その風力のバックアップとして SMR を利用すれば、電力の安定供給に繋がる。また洋上 SMR となれば、更に耐震性が高くなり、耐津波性も克服できる。米国の SMR を輸入しても良いが、できれば日本の原子力技術を継承しつつ、国産 SMR の開発に繋げて欲しい。</p>
		ブレイクスルー	<p>米国では10年以内に SMR が実現しそうだが、日本では当然無理である。第1に規制体系が整備されていない。日本では活断層の上に原子炉を設置できないが、SMR であれば活断層の上でも安全性を保証できる可能性がある。また強固な地盤への固定が義務付けられているため、洋上 SMR は今の日本では有り得ない。まずはこれらの規制を緩和する必要がある。第2に国産技術の欠落である。日本では SMR の実績がほとんど無いので、多くの技術開発が求められるが、まずは安全性の観点から冷却機能と材料耐久性の確立が重要となる。NuScale の SMR はメンテナンスフリーを謳っており、詳細は不明であるが、決められた耐用年数で点検せずに使用できる安全</p>

			性があることになる。その場合には材料の劣化(疲労と腐食)を評価する技術の高度化も求められる。
E-38	10年未満	注目科学技術	新型太陽光発電技術
		ブレイクスルー	研究環境の充実。官民一体となった実証試験の取り組み。
E-39	10年以降	注目科学技術	水を水素源としたアンモニアの電気化学合成 。再生可能エネルギーを電力として用いることによって、エネルギーをアンモニアとして貯めることができる技術であり、完成できれば水素社会を実現に大きく近づくものと考えられる。
		ブレイクスルー	水を水素源としたときの水素発生が著しく起こってしまうため、選択性の向上が必須となっている。原理的に水素発生の方が起こりやすいため、これを解決するための材料やシステムの開発がブレイクスルーとなりえる。
E-40	10年未満	注目科学技術	水素・アンモニアの製造・利用に関連する諸技術 製造技術、触媒、燃焼技術、燃料電池、アンモニアの直接合成技術、等
		ブレイクスルー	コスト低減のためには、製造プロセスのブレイクスルーが必要 現状のアプローチでのスケールアップによるコスト減では目標達成は難しく、特に触媒技術が重要と考える。
E-41	10年未満	注目科学技術	水素エネルギーを利用するための技術 コスト低減を含む、水素製造、貯蔵、輸送、燃料電池技術、電池技術(全固体電池など) ・太陽光発電による水電気分解や、天然ガスからの水素抽出など、低炭素で水素を製造する技術 ・製造した水素を貯蔵、輸送する技術 ・水素から発電する技術 ・発電した電気を一度蓄積するための、電池技術
		ブレイクスルー	各要素技術の研究開発、実用化が始まっているが、水素スタンド、燃料電池にしても高コストが普及を阻んでおり、原価低減技術開発が必要 また、全固体電池に関しては、車両にも使えるようにするための大容量電池製造技術も必要。
E-42	10年未満	注目科学技術	水素エネルギー関連全般の技術(製造、貯蔵、輸送、利用)
		ブレイクスルー	各装置の低コスト化、水素の低コスト製造技術、再生可能エネルギーとの融合のための諸技術
E-43	10年未満	注目科学技術	水素からの液体燃料(炭化水素)作成
		ブレイクスルー	
E-44	10年未満	注目科学技術	水素による発電システム
		ブレイクスルー	容易に持ち運ぶための物質と手法
E-45	10年以降	注目科学技術	水素製造・利用技術
		ブレイクスルー	日本周辺には海水を含め水が豊富にあるので、エネルギー問題解決のために、集中して進めるべきではないかと考えている。電気自動車や原子力等に入力するよりも先に水素製造、利用技術を進め、エネルギー大国への変貌をはかったほうがよいと考える。新規材料開発等でのブレイクスルーが必要だと考える。専門外だが、ペロブスカイト型の酸化物や有機物がブレイクスルーを起こすのではないかと考えている。
E-46	10年未満	注目科学技術	水電解によるグリーン水素製造技術
		ブレイクスルー	膜の耐久性向上 部分負荷での劣化抑制 SOEC などによる効率向上

E-47	10年以降	注目科学技術	<p>水電解方式による大規模な水素製造技術に注目している。</p> <p>低炭素化の流れの中で水素は重要な物資であるが、従来型の炭化水素から水素を製造する場合は結局はCO2を排出してしまう。そのため水電解に注目が集まっているが、一方で燃料電池と異なり、需要がこれまで多くなかったため、技術的に成熟しているとはいいがたい。一方、欧州ではMWクラスの水電解装置の導入検討が進んでいる。</p> <p>水に電気を与えて水素を得る方法は中学校の教科書にも載っている話であり、簡単なものと思われがちであるが、実際には安定して水素を得るためにはガスハンドリング、ならびに電気制御技術など、様々な要素技術をインテグレートしてなる技術であり、その動向に注目している。</p>
		ブレイクスルー	<p>材料面では、効率向上、コスト低減に資する電極触媒に関する材料技術、電解質に関する材料技術によるブレイクスルーが必要と考える。また、大型化のためには膜面積の増大が必要であり、流体ハンドリング技術においても、解析面でのブレイクスルーが必要と思われる。</p>
E-48	10年以降	注目科学技術	石油の精製原理の解明と人工製造
		ブレイクスルー	分野外なので良くわかりませんが、メカニズムが解明されていないと聞いています。原理が解明されれば、太陽エネルギーで製造すればエネルギー問題が解決するはずです。
E-49	10年未満	注目科学技術	<p>太陽光エネルギーのより効率的な利用法の開発である。太陽電池や人工光合成は再生可能エネルギーの最も有力な手段として世界中で盛んに研究がおこなわれているが、利用可能な光の波長やエネルギーに由来する理論的限界が存在することも知られている。この理論限界を超えるための手段として、バンドギャップ以下の光を利用可能なバンドギャップ以上の光へと変換するアップコンバージョンや、一つの光子から二つの電子を取り出すことが出来るフィッション(もしくは多励起子生成)の利用が期待されている。</p>
		ブレイクスルー	<p>高効率なアップコンバージョンやフィッションを達成するための材料開発がブレイクスルーには必要であると考えられている。マテリアルズインフォマティクスやAI、自動合成技術との融合により、効率よく優れた材料を見出すことが重要であろう。</p>
E-50	10年未満	注目科学技術	<p>題目：電極の負荷平準化に向けた電力貯蔵複合システム</p> <p>カーボンニュートラルに向けて電力貯蔵においても様々な技術が開発されている。代表的な例としては二次電池が挙げられる。しかし二次電池はコストが高い・充放電の制御が必要など課題が多くある。他方、水素発生/燃料電池やフライホイールなど電力貯蔵方法としては他にも幾つかの手段がある。</p> <p>多様な自然エネルギーを活用するためには、その電力貯蔵方法としても多様に対応する必要がある。しかし、現状では1系統、多くても3系統程度で対応している場合が殆どである。そこで、AIを活用して全てのシステムのビックデータを活用し、エネルギー効率だけでなく、出力やコストも考慮した複合的なシステムがあれば、様々な局面での電力変動負荷に対応でき、自然エネルギー導入を加速できる。</p>
		ブレイクスルー	<p>各々の電力貯蔵システムは個別で議論がなされている。AIを活用して、全てを網羅して比較検証できるシステムの構築がブレイクスルーへと繋がる。</p>
E-51	10年未満	注目科学技術	蓄電技術
		ブレイクスルー	<p>必要なブレイクスルーは非希少材料利用による低価格化である。いたるところにおける再生エネルギーによる発電を行ったのち、蓄電を行うことにより最エネの利用効率が上昇する。産業用もちろん、家庭用でも必須になる。現在は10kwhクラスの蓄電池が100万ほどかかるため、これを1/10程度に下げなければ、多くの世帯への普及は難しいと思う。Liイオン電池に代わる低価格材料による蓄電技術の開発が重要である。</p>
E-52	10年未満	注目科学技術	<p>注目する科学技術は、アンモニア直接燃焼技術、アンモニア混焼技術である。</p> <p>二酸化炭素排出抑制、ゼロカーボンに対する意識の高まりから、脱炭化水素燃料への舵取りが求められている。一方で、一次エネルギーの8割以上を担っている化石燃料を一斉に取りやめることは現実的ではない。分子構造に炭素を含まない水素やアンモニアの燃焼技術に対する期待は大きく、研究開発の促進を図るべきであると考えられる。</p> <p>日本では、再生可能エネルギーの生産地からエネルギー消費地に、エネルギーを化学物質として輸送するエネルギーキャリアコンセプトは、2019年まで行われた第1期SIPのプログラムとして組み込まれており、アンモニア直接燃焼、混焼技術はその根幹技術の一つとして世界に先駆けて研究、開発が行われている。</p>
		ブレイクスルー	<p>・窒素含有化合物と炭化水素燃料の混焼技術の基礎特性に対する研究支援</p>

E-53	10年以降	注目科学技術	超臨界地熱発電 です。従来の地熱発電において対象とされている熱水より、より深部に存在する超臨界地熱水を利用して発電する方法です。
	ブレイクスルー		高濃度の腐食性ガスである硫化水素を超臨界地熱水は含んでいる可能性が有り、その対処方法に関する技術研究開発が必要です。
E-54	10年以降	注目科学技術	内燃機関(ガスタービンおよび往復動式内燃機関)における水素および水素キャリアとしてのアンモニアの直接利用(燃焼による利用)に関する技術。
	ブレイクスルー		反応速度の遅いアンモニアを如何に効率よく化学反応(燃焼)させることができるかが一番の問題となると思います。また、未反応で排出されるアンモニアを大気環境に放出しないようにするための後処理技術の小型・簡素化が問題になりそうです。
E-55	10年以降	注目科学技術	二酸化炭素を排出しないエネルギー源(例えば、アンモニアなど)を使用した火力発電やエンジンの開発
	ブレイクスルー		燃焼速度が遅いことや難燃性という問題が考えられる。発電では問題が無いと思われるが、エンジンなどへの適用には、燃焼速度を上げる工夫が必要になる。
E-56	10年以降	注目科学技術	二酸化炭素排出制限の技術解決策
	ブレイクスルー		産業の在り方を変える動きなので、学術もキャッチアップすべきと考える。イノベーションは先行することも大事だが、後から追いかけても独自解決策を生み出せる可能性があるがあるので、推進すべきと考える。
E-57	10年未満	注目科学技術	波力発電 波の力を使って発電する技術。
	ブレイクスルー		専門外なので詳しいことがわかりませんが、装置の腐食等による劣化や航行する船舶との関係が難しい点であると思う。
E-58	10年未満	注目科学技術	非接触で給電・送電する技術。 無線技術の進展やIoT化や自動化がすすむことでセンサやアクチュエータをワイヤレスで接続し制御することが可能となっているが、電源供給のための配線(もしくはバッテリーでの対応)が現状は必要となっている。
	ブレイクスルー		大容量の電力を損失なく伝送することが難しい。
E-59	10年以降	注目科学技術	浮体式洋上風力発電装置と直流送電を用いた直列方式の洋上風力発電システム に注目している。日本の再生可能エネルギーを支える柱として現在主流となっている太陽光発電に加え、洋上風力発電は必要不可欠なエネルギー源となる。しかしながら日本に適しているシステムとしては浮体式のシステムが重要となり、この分野で日本はトップランナーになるべきであると考え。また洋上風力発電は近年直流送電により送電する方式が多く取られつつあるが、次世代の風力発電システムとして直列(直並列)接続方式のシステムが数多く研究開発されている。また、スイッチング素子も大きく変化を遂げており、次世代の半導体素子を用いた直流送電システムの登場により送電の概念が今後大きく変わっていくと思われる。
		ブレイクスルー	洋上における高電圧の取り扱いにおいて重要となるものが絶縁であると考え。
E-60	10年以降	注目科学技術	約100年後に枯渇する化石燃料・原子力燃料に取って代わる基幹エネルギー源である 核融合発電 に注目している。
		ブレイクスルー	トカマク型核融合炉の第一壁の中性子損傷、および下側ダイバータの高熱負荷に耐えられる材料の開発である。 我が国初のIAEAの論文誌 Nuclear Fusion のボードの元議長であった菊池満博士が、下側ダイバータの高熱負荷を低減する為に、現在採用されている正の三角形度の磁場配位を負の三角形度に変えることが重要であると提案し、世界の著名な実験家達によってその配位の有用性が確認されている。
E-61	10年未満	注目科学技術	様々なエネルギーを持った光を有効利用するという観点で、SDGsに向けて光を有効利用することは重要である。そこで、特に 低エネルギー光を高エネルギー光に変換できるアップコンバージョンの技術 に注目している。これは分子や希土類などの特殊な発光体を利用して達成できる技術で、別々に光を吸収した二つ以上の高エネルギー状態を融合させ、さらなる高エネルギーの励起状態を生成することで吸収された光よりも高エネルギーの光を生成するものである。
		ブレイクスルー	効率が実用に耐えるレベルになく、さらなる効率化は必須である。また、様々な系が網羅的に検討されているが、メカニズムがわかっていないことも課題である。微視的な原理を解明し、メカニズムに則った最適化を行う必要がある。
E-62	10年以降	注目科学技術	洋上風力発電
		ブレイクスルー	正直なところ専門外なので素人意見です。自身が北海道に住んでおり冬季は温暖化対策どこ吹く風的に化石燃料由来の電力が湯水のように利用されています。クリーンエネルギーとしての原子力発電は社会的受容が得られない時代となってきた現在、政府が主導して大きく舵を切るのが良いのではと感じます。

E-63	10年以降	注目科学技術	雷とそれに付随する高エネルギー現象と雷放電のトリガーの解明。 近年になり、雷に付随して発生する光核反応の存在が明らかになってきた。これは現在科学の最大の謎の一つである、雷放電のトリガーがなにか？を解明するための足がかりになら考えられる。この研究が進むことによって、雷放電の理解が深まり、雷予知や避雷のための知見の向上につながると考えられる
		ブレイクスルー	雲内の電荷や電場・放射線などを広範囲で(面的に)観測できる観測測器の開発
E-64	10年未満	注目科学技術	工場や火力発電所、火山などから出る煙・水蒸気などに含まれる窒素酸化物(NOx: 窒素酸化物の総称)や硫黄酸化物(SOx: 硫黄酸化物の総称)は酸性雨の原因となることが知られています。窒素酸化物や硫黄酸化物の除去技術の一例として、コロナラディカルシャワーシステムなど大気中の放電プラズマを利用した研究があります。また、煙に含まれる灰や粉じんは視界不良、摩擦抵抗の減少の原因となるため交通への影響が懸念され、人体・動物などの目、耳、呼吸器官などへの影響などが考えられます。灰や粉じんの除去技術の一例として、空気清浄機や電気集じん装置など 静電気力や大気中の放電プラズマを利用した環境浄化技術 があり、研究が進められています。 地下鉄の粉じん・鉄粉などに対する静電気力や大気中の放電プラズマを利用した微粒子の除去技術は日本のみならず世界的な需要と必要性があると考えられます。一部の地下鉄の粉じんに対して日時・時間帯の調査・研究などされており、地下鉄構内の各場所の粉じんのデータを入手することにより粉じんの除去効率のよい対策が可能と考えられます。また、道路や高速道路などのトンネル内の粉じんの除去についても同様に需要と必要性があると考えられます。粉じん爆発・爆発などの危険性については別途要調査・対策が必要と考えられます。粉じんによって引き起こされた咳やくしゃみ・粉じんなどに菌が媒介する可能性があり、静電気力や大気中の放電プラズマを利用した微粒子の除去技術は重要と考えます。 放電プラズマを利用した研究は、ナノテクノロジー、水質浄化、植物の育成や殺菌、滅菌、医療分野など幅広い応用が期待されており、研究が進められています。
		ブレイクスルー	小型・安価でロバスト性に優れ、粉じんの除去効率とエネルギー効率が良いこと。大気中の放電プラズマによって生成されたオゾンなどがトンネル・駅構内等の配管・建物・人体などへ及ぼす影響の調査。
E-65	10年未満	注目科学技術	イオン・分子・タンパク質などを認識・吸着する技術 環境浄化技術では、汚染物質のみを選択的に吸着し、除染する技術が望まれます。また、地球温暖化問題でターゲットとなる二酸化炭素に関しては、二酸化炭素を捉え、化学的に変換する技術が求められています。 一方、医療健康分野においても、例えば注目されている光免疫療法は、がん細胞に吸着(認識)する抗体に光で活性酸素を生成できる色素をつけて光で癌細胞を死滅させる技術です。また、新型コロナウイルスでも、スパイクタンパク質が有望な標的になることが示唆されています。 少し飛躍した言い方をすれば、これらにおいては全て、特定のイオン・分子・タンパク質などを認識・吸着することが重要であり、これを実現できる科学技術が達成されれば、多くの問題を解決できることになるため、注目しています。
		ブレイクスルー	上記技術に関しては、数多くの研究がなされているが、多くの場合、これらは Try and Error の繰り返しにより探索しています。一方現在は、かなり多くの化学物質が新たに合成されているので、これらをコンビナトリアルで検査できる体制の確立、及びそのデータベース化がブレイクスルーになると考えられます。
E-66	10年以降	注目科学技術	コンパクトで、かつ高精度な大気汚染物質計測装置
		ブレイクスルー	現在コンパクトな大気汚染物質の計測装置が開発されているが、正確さ、精度ともに低く、環境要因に影響される。もう少し精確な装置が開発されれば、いろいろな応用が考えられる。
E-67	10年未満	注目科学技術	プラスチック分解
		ブレイクスルー	結晶化したプラをどうすれば非結晶に戻せるのか
E-68	10年以降	注目科学技術	プラスチック分解技術 再生 PET などリサイクルも活発になると思うが、根本的にプラスチックを分解し、環境に配慮した分解技術が求められている。
		ブレイクスルー	有害物質を出さない分解技術 薬品などを使用しない分解技術
E-69	10年	注目科学技術	マンガンによる炭素固定技術

	以降	ブレイク スルー	マンガン錯体タンパク質の構造決定と反応機構解明
E-70	10年 未満	注目科学 技術	飲料水源となる井戸水に含まれる高濃度のフッ素や窒素化合物などを除去する技術
		ブレイク スルー	フッ素や窒素化合物などを除去できる粉体の吸着剤は水環境中での操作性が悪いという問題がある。粉体を水環境から容易に分離できる技術があれば、高性能な吸着剤が実用可能となる。
E-71	10年 以降	注目科学 技術	沿岸生態系を利用した人為起源二酸化炭素の吸収源拡大 。沿岸生態系(藻場、湿地等)はその高い生物生産性から二酸化炭素を生態系内に隔離する機能を有しており、隔離される炭素はブルーカーボンと呼ばれる。浅場の造成や養殖等によって沿岸生態系の生息面積及び機能を増強し、吸収源対策に寄与する技術として期待される。
		ブレイク スルー	海水温の上昇等により世界的に藻場等の衰退(磯焼け)が進行している海域がある。こういった海域においても、海藻等を繁殖させる革新的な技術・方法論の開発が必要である。
E-72	10年 未満	注目科学 技術	海域への環境リスク評価手法
		ブレイク スルー	国内外での情報共有
E-73	10年 未満	注目科学 技術	海水、雨水などから飲料水への浄化機器、設備
		ブレイク スルー	蒸留するよりも効率よく大容量、低エネルギーで可能になれば、各地の水不足の問題が解決されるものと思われる。
E-74	10年 未満	注目科学 技術	海藻由来のポリマー・疑似プラスチックの形成
		ブレイク スルー	民間企業による産業化
E-75	10年 未満	注目科学 技術	気候変動適応に対する影響評価研究 。確実に温暖化は進み極端な気象が頻発しつつあるなか、現状のハード対策でどの程度の外力まで耐えうるのか、またどの程度のハード対策の強化が必要なのかを地域レベルで検討する必要がある。
		ブレイク スルー	理学分野と工学分野および実務担当者との対話やお互いの常識のすり合わせが必要
E-76	10年 未満	注目科学 技術	気候変動予測を高精度化し、起こり得る現象の一般化と具体的な政策の立案 すること。
		ブレイク スルー	より高精度なモデル確立のためのAI等の客観的な手法を用いた必要情報の精査。生物学・地質学などの一見ランダムで複雑な自然科学の情報から必要な情報を抽出する、コスト面のみでない純粋な科学的視点で環境問題に取り組むなど。
E-77	10年 以降	注目科学 技術	気象コントロール技術 。 二酸化炭素、フロン、水蒸気、メタン等の温暖化ガスを自由にコントロールできる技術知、これら以外の氷河期の再来を抑え込む技術。
		ブレイク スルー	温暖化ガスのコントロールは現在の技術でも制御可能(やる気のみ)だが、氷河期の到来については非常に難しいであろう。 地球の公転、自転を機械的にコントロールするのは不可能に近いであろうから、それ以外の方法で大規模且つ地球史できな気象効果を制御できる新たな科学技術が必要。
E-78	10年 未満	注目科学 技術	現在、英国に続き日本政府も急速なカーボンフリー化を進めることを表明した。しかし短い期間にカーボンフリーかつ十分な電力供給を実現するためには原子力エネルギーが必要不可欠である。とはいえ、原発の新規増設も現実的には難しいことを考えると、現在の軽水炉システムで、安全性と核のゴミの問題を解決する手立てが重要かつ必要不可欠となる。その点で、これらの問題解決に対して東芝が考案している FORSETI燃料 は現実的であり、非常に期待が持てる。実際に、FORSETI燃料では、すでに現行軽水炉で放射性廃棄物の発生源を抑制しプルトニウム消費も促進できる基本的な概念についてその可能性が示されている。
		ブレイク スルー	FORSETI燃料を実用化するためには許認可にむけて大きなハードルがある。それは核反応断面積などの持つ不定性がどの程度燃料設計に影響を及ぼすか、という問題である。この点をクリアにできれば技術的にはカーボンフリー社会実現の目標とされる10年後の実用化が期待できる。
E-79	10年 以降	注目科学 技術	大気中のCO2回収/資源化技術
		ブレイク スルー	高効率な触媒を用いた反応プロセスの開発

E-80	10年以降	注目科学技術	大気中の揮発性有機物などの複合汚染物質の除去技術
		ブレイクスルー	複数の揮発性有機物成分のリアルタイム解析技術
E-81	10年以降	注目科学技術	二酸化炭素固定化、地熱発電等の地球温暖化対策技術
		ブレイクスルー	専門外のため、研究の現状については、あまりよく知らないが、二酸化炭素固定には、大きなブレイクスルーが必要だと考える。地熱発電については、資源は豊富にあるので、環境に負荷のかからない方式(バイナリー方式等)を考案できればよいと考えている。
E-82	10年以降	注目科学技術	微生物による土壌浄化
		ブレイクスルー	ラボスケールで成功したものが実用レベルで成功するとは限らない。一方でスクリーニングに基づくものなので、企業とのマッチングが難しい。大規模な実験を、研究段階で実施できる環境が必要。
E-83	10年未満	注目科学技術	「Society5.0の基盤を支えるレアメタルを自給自足」 電気自動車やスマートフォン等IT機器の普及によって需要が拡大し価格も高騰しているリチウムをはじめ、「産業のビタミン」とも言われるレアメタルは輸入に頼っている。そこで、レアメタルが豊富に含まれる海水や都市鉱山からレアメタルを、廃棄物利用や副産物生成を伴いながら回収する新技術を開発し、日本国内でレアメタルを自給自足する新しい資源循環社会を創造する。
		ブレイクスルー	●工業排ガスなど、一見ゴミにしか見えないものをレアメタル回収時に有効活用し、コスト削減だけでなく、廃棄物削減にも貢献できる、エコな技術を開発。 ●レアメタル回収時に、燃料電池に必要な水素や、農業用肥料に用いるリンなども副産物として生成し、安価な回収技術としてだけでなく、他の産業にも波及効果の高い技術を開発。
E-84	10年未満	注目科学技術	「窒素固定技術」 に注目している。 窒素固定は、通常不活性とされる窒素(N ₂)が反応しやすい、つまり我々の生活に使える物質に変換されることで、例えば窒素がアンモニアに変わる反応を言う。このような窒素源は我々の生活に必要な不可欠である。現在窒素固定は高温高圧を必要とするハーバーボッシュ法による窒素と水素の結合からアンモニアを取得しており、これが大部分を占める一方、エネルギー消費量が膨大であるため代替技術が必要とされている。近年(基礎研究は20年近く前から)、常温常圧で窒素固定が可能な技術が注目されている。これは優れた触媒が開発されたことにより達成されている。今後さらに触媒設計が進めば、ハーバーボッシュ法を超える効率で窒素固定が出来ることが期待される。
		ブレイクスルー	窒素固定技術の目標は簡単で、ハーバーボッシュ法より安価・低エネルギーで窒素が固定化できるかどうかである。現段階ではハーバーボッシュ法を超える様な触媒設計は達成していないが、今後の触媒設計次第では十分にそのような触媒が達成されてもおかしくはない。 例えば、根粒菌がもつ窒素固定酵素も常温常圧で高効率に窒素固定が可能な触媒の一つであり、生物模倣の触媒設計も重要な設計の手がかりとなる。
E-85	10年以降	注目科学技術	・CO₂利活用(CCU)に向けた二酸化炭素の収集技術・DAC アンモニアベースの設備よりも小型でCAPEXの低い、固体吸収式設備に注目している。一方で、集めたCO ₂ 量に対し、現状では効果的な変換先が無いため、CCUについても技術開発が求められる。
		ブレイクスルー	・CCU、DAC より低濃度(空気中)からの濃縮技術および、収集したCO ₂ の効果的な活用法。
E-86	10年未満	注目科学技術	・プラスチックの油化・ガス化技術、およびそれに伴うプラスチックの分離技術 混合プラスチック廃棄物を高温(or触媒)下で低分子量炭化水素または合成ガス等へ変換する技術。油化した後に既存のエチレンクラッカー等へ導入することができ、石油の代替となる。現状ではナフサ留分の収率が低い、油化工程によるコスト増、塩ビやウレタンなどの混入物に弱く、一般廃棄物には適応しにくいといった課題がある。
		ブレイクスルー	・プラスチックの油化・ガス化、分離技術 堅牢性の高いプロセス、またはコンタミを防ぐ高度な分離技術。油化においてはナフサ留分の収率向上、ガス化については、エネルギーの効率化などが課題。

E-87	10年未満	注目科学技術	<p>・材料のリユースに向けた洗浄技術 欧州などではリターナブル PET ボトルの回収・洗浄がはじまっている。リユースの対象拡大に向けた洗浄・検査技術の向上は重要になると考える。</p>
		ブレイクスルー	<p>・洗浄技術 高温での洗浄は容器等を変性させる懸念があるため、低温化が必要。用途拡大に向け、より高精度な洗浄／認証が必要となる。</p>
E-88	10年以降	注目科学技術	<p>CO2の分離・回収技術。吸着材を主体とし、CO2を吸着→分離・回収→利用する技術と市場が確立すれば、CO2の発生を抑制すると同時に、新たな市場が生まれることを期待する。</p>
		ブレイクスルー	<p>工場から出る高濃度の回収については、比較的早い段階で技術確立できるものと想定するが、低濃度の回収や利用用途など、費用対効果を結びつけることが大きな課題と考える。</p>
E-89	10年以降	注目科学技術	<p>CO2や空気など安定に大気中に存在するガスからの有用化学品または燃料等への変換技術。触媒反応がコアになると想定されるが、捕集や高純度化してからのガスでは、コストがかかりすぎるため、捕集や高純度化不要または同時に実施する技術開発を行う。燃料等は社会要請にも依るが低コストなため、意義がある技術となるべく目的物成果が不可欠。他方、有用化学品への変換は少量多品種が見込まれるため、基盤となる変換反応を上記、大気中に安定的に存在するガスから直接的に実施する反応が求められる。</p>
		ブレイクスルー	<p>革新的な触媒、新規な反応形式でエネルギー的に無駄のないプロセスの構築、高度に全体として制御された製造体系の確立。</p>
E-90	10年以降	注目科学技術	<p>リチウムおよびレアメタル回収技術 (理由) リチウムイオン電池は、スマートフォン、タブレットやノートパソコンに使われるにとどまらず、急速に進む自動車の電動化におけるエネルギー貯蔵媒体として、需要が急拡大している。経済産業省を中心に進められる運搬や移動用の大型ドローンの導入も高性能なリチウムイオン電池の使用が前提である。風力発電や太陽光発電を全発電量の2割以上に増やすと、エネルギー需給バランスの瞬時制御が極めて困難となる。大規模停電を発生させぬようにエネルギーの需給制御を行うには、大容量蓄電池を備えたスマートグリッドシステムの確立が必要であり、そのためにも大容量リチウムイオン電池は重要なカギである。また、世界の革新的リチウムイオン電池研究をリードする日本では、リチウムイオン電池市場の奪還は産業基盤安定化への責務である。このように需要が急増するリチウムイオン電池を安価に供給するには、高純度なリチウムとレアメタルの安価で安定な供給が必須である。 リチウムは、以前は南米の塩湖かん水からの供給が大半を占めていたが、現在はオーストラリアの鉱山からの供給が過半を占めている。塩湖かん水からのリチウム資源回収が、1～2年の長い工程を要し、また採取地の深刻な環境破壊が問題となっており、急増するリチウム資源需要に合わせた増産が困難なためである。オーストラリアの鉱山から供給されるリチウムは、複雑な不純物除去工程を要して高コストであり、リチウム資源価格は2015年から2018年の3年で3倍に急騰した。また、鉱山の殆どが中国資本の数社による寡占状態であり、エネルギー安全保障上の懸念がある。リチウムイオン電池が、主要なエネルギー源としての重要度を増すことを考慮すれば、当該懸念は深刻である。 レアメタルも産出量が少なく、抽出が難しい希少金属である。2019年度の世界の資源産出量の63%が中国と、気候得て偏在性が高く、安価・安定な供給の継続に課題がある。市場が小さいことから価格変動も顕著であり、日本の経済において重要な懸念因子である。</p>
		ブレイクスルー	<p>○リチウム資源に関して 使用済みリチウムイオン電池内の資源は再利用されておらず、コバルトなどの遷移金属とともにリチウムの回収・再利用が期待されている。また、南米の塩湖が地面の隆起により孤立した海水の乾燥で生じたことから自明なように、海水には無尽蔵のリチウムが存在する。濃度は約0.17ppmと高く、経済的回収可能範囲である。日本国内には高濃度リチウムを含有する地下水(温泉)が多数存在し、その含有率は海水比で数桁高いものもある。使用済みリチウムイオン電池、海水、および地下水からの高純度リチウムの経済的回収を可能にする技術の創成は、安定なリチウム供給を可能にする。 例えば、リチウムイオン伝導性固体セラミックスを電解質とする電気透析は、原理的に100%の高純度リチウムの回収を可能にし、回収液の前処理や回収されたリチウムを精製する後工程も不要である。ブレイクスルーが必要な課題は、エネルギー効率を含む工程全体の経済性の向上と、システムの大型化による増産が技術の開発である。</p>

E-91	10年以降	注目科学技術	海底鉱物資源の成因研究およびその商業開発
		ブレイクスルー	海底掘削科学調査 揚鉱技術の革新的向上
E-92	10年未満	注目科学技術	環境にやさしいモノづくりを進めていくために、生産者としての企業は環境への負荷を減らすことのできる、新しい技術やシステムの開発をしていく必要がある。かぎりある天然資源が失われることを防ぎながら、ひとつの製品が人々の間で持続的に活用されるように工夫を続けていくことが大事なのである。 循環型社会に向けたバイオマス資源を用いた循環型処理技術 を紹介したい。
		ブレイクスルー	ヒバ油抽出後のオガクズのもう一つの利用方法として炭素材料への変換を行った。また、炭素化のときに発生する熱分解物としての木タールから減圧蒸留して得られる木酢油を有効利用することで青森ヒバ廃材から始まり、青森ヒバ油、ウッドセラミックス、木酢油と環境調和型材料が得られ、循環型システムが、構築できた。
E-93	10年以降	注目科学技術	気候変動対策のためのカーボンリサイクル技術。
		ブレイクスルー	CO2を効率的に活用する技術が必要。個別の技術については実現可能性はあるものもあるが、トータルのプロセスとしてカーボンニュートラルが実現されなければ意味がない。この部分にはまだ意識が向いていないように思われる。
E-94	10年以降	注目科学技術	酸化還元ニュートラルな炭素循環。 直近十数年のSDGsの目標として、CO2排出量削減が目指されているが、CO2を利用可能な物質へと変換するCO2固定化が主として取り組まれている。しかし、これらの手法はCO2の酸化度を変えていないため、本来酸化還元循環されるべき炭素源が削減されてしまい、またそのようにして生産される物質は燃焼等によりエネルギーを取り出すことはできない。そのため、光合成のように普遍的に存在する外部エネルギーを源とする炭素の酸化還元循環は更に先の未来を考えたときに必須となる。CO2還元はその様な文脈において重要な位置づけにある。
		ブレイクスルー	CO2還元はエネルギー効率が悪いいため、より効率的な技術の開発が求められる。特に光触媒、燃料電池などの新反応には大きな期待が持たれる。
E-95	10年以降	注目科学技術	廃水中窒素化合物の資源化 これまで廃水中の窒素化合物は膨大なエネルギーを使用して微生物の働きでN2へと処理されていたが、それをアンモニウムイオンに変換すれば、エネルギーキャリア等として利用可能になる。アンモニアを合成するハーバーボッシュ法では膨大なエネルギーを使用するが、この新しい技術が確立されれば、アンモニア合成と廃水処理に掛かっていた膨大なエネルギーの削減が可能であり、プラネタリーバウンダリー問題の解決にも繋がる。
		ブレイクスルー	以下が課題 * 廃水中の窒素化合物のアンモニウムの変換促進を担う微生物が不明 * どのようにすれば効率よく廃水中の窒素化合物をアンモニウムに変換できるか不明 * アンモニアの純度や濃縮の方法 * どのくらいのアンモニアの純度や濃度でエネルギーキャリア等として利用可能か
E-96	10年未満	注目科学技術	4次元水循環解析技術
		ブレイクスルー	表流水地下水を一体として、その流動を時系列で解析する技術で、日本は世界の最先端技術を有しているが、この技術と、衛星・気象観測、4次元気象解析技術を総合化することにより、地球規模での水の循環をグローバルにもローカルにも解析・将来予測することが可能となり、激化する水災害に対する対策や、世界的に不足が懸念される水資源の確保・管理施策を、飛躍的に進展させることが期待されている。なお、この技術は、水の質の関する解析も行うことが可能であり、水域・地下水の汚染対策にも活用できる。

E-97	10年以降	注目科学技術	<p>「核融合発電」 核融合発電の実現は人類史上最大の投資を伴う事業となるが、日本が自国で真のカーボンニュートラル達成、発電燃料の十分な確保、世界に先駆けての技術構築達成する観点から、推進すべき科学技術である。</p> <p>核融合発電開発の現状：国際熱核融合実験炉 ITER は、日本も機関国である国際プロジェクトである。2025 年からプラズマ実験を開始し、2035 年頃に重水素-三重水素プラズマによる核燃焼プラズマ実験を開始予定である。ITER ではエネルギー利得（入力エネルギーに対する出力エネルギーの比）で 10 を目指しており、核融合発電炉実証を目指す。日本は、燃料の一つである三重水素を効率的に使用するために自己増殖技術、循環および再利用技術を独自に開発しており、次の原型炉設計への展開もすでに進められている。これら燃料に関する技術と装置を総括して保有するのは日本だけであり、世界に先んじて核融合発電を実現する可能性が高い。</p> <p>核融合発電の社会的・技術的な位置付け： 1) 核融合発電がもたらすアウトカムからの動機付け：近來の歴史においてもオイルショック、リーマンショック、そしてこの新型コロナウイルス禍において、経済成長と CO2 排出には強い相関があることを学んできた。そして、電気自動車や水素エネルギーの推進においても、その影響から完全に離れることは難しいと思われる。真にカーボンニュートラル、さらにカーボンマイナスをもたらす 1 次エネルギーは自然エネルギーと原子力発電、そして核融合発電に限られる。またベースロード電源で貢献できるのは原子力発電と核融合発電のみである。2) 日本の地政学的国家戦略からの意義：自然エネルギーの導入が欧州で成功しつつあるが、山間部が多い日本で同規模・同効率で可能であるとするのは地政学見地から合理的ではない。2050 年時は原型炉の運用を目指しており、この段階で商用発電に核融合が直接貢献することは困難である。しかし、国家戦略な長期的視野に基づき 2050 年にカーボンニュートラルを達成する核融合発電の実用技術を有することが重要である。3) SDGs への寄与：発電は基幹技術であるため、SDGs 全 17 項目に対し核融合発電の実現は 8 項目に対する寄与が見込まれるなど、人類が持続して生活を維持するには必須技術である。</p>
		ブレイクスルー	<p>核融合発電の炉心となる超高温プラズマの運転条件は、第 1 世代発電炉については設計が固まっている。この実証実験が ITER の役割であり、核融合反応の検証が 2035 年以降に実施される。第 1 世代発電炉の工学設計は既存技術もしくは現在進行中の開発研究をベースとしており、ITER における核融合運転の実証と時系列を合わせて、科学技術的な根拠を持って合理的な設計を示すことはできる。</p> <p>核融合反応に基づく課題は、物理現象の理解やシミュレーション技術の進展に伴い、その多くは予測され、ITER での検証実験との比較を待つ状況にある。例えば、核融合発電が取り扱う高温プラズマは古典物理学で取り扱われる熱平衡状態から外れた非平衡開放系で強い非線形性を有するが、従来の数値モデルの限界を示すとともにシミュレーション手法をすでに改善した。材料開発ではプラズマに面する材料への高熱負荷および核融合反応で発生する中性子に伴う損傷効果、材料の放射化が指摘されているが、要素研究により改善が進められるとともに、バックキャストに基づく材料開発や放射化材料の除染技術に関する課題の集約と具体化は世界的にも日本が最も先んじている。</p> <p>核融合発電の実現では、技術の開発とともに、社会的な判断が不可欠である。これは、前項目「注目科学技術の概要」において核融合発電の社会的・技術的な位置付けとして 3 項目を記載した。新型コロナウイルス禍では、ウィズ・コロナという言葉が示すように、日々の新型コロナ対策だけでなく、長期的な視点で社会活動の持続する方法の検討が必要なが改めて示された。持続可能な社会のためには長期戦略として島国である日本が自国の電力発電は必須であり、かつ北海道胆振東部地震（2018 年 9 月）で生じた大規模停電（ブラックアウト）回避のためにも電力分散（細目：リスクマネジメントに記載あり）に向けた国家戦略も必要である。核融合発電はコスト評価も課題として残るが、それも含めて社会と情報を深く共有し日本の地政学見地を考慮した核融合発電に関する戦略を構築する必要がある。</p>
E-98	10年以降	注目科学技術	CO2 の回収、貯蔵、変換技術。
		ブレイクスルー	低コスト、省エネルギーでいずれの技術も実現できるデバイスの実現
E-99	10年以降	注目科学技術	核融合の完全な制御および発電システムとして確立する技術。
		ブレイクスルー	核融合を既存の核分裂を主とする原子力の延長と位置付けるところからの脱却がカギを握るのではないかと思われる。もちろん、耐放射線損傷、耐高温に勝る物質材料科学上において技術的革新は重要であるが、核融合システムの安全性や RI 管理等における法整備等についても、核分裂炉と同類とみなすこととなれば、技術革新は沈滞し、斬新なアイデアの創出も、それを取り巻く研究者技術者の発展する機会も喪失することとなるであろう。核分裂炉とは切り離し、新しい革新的技術に果敢に挑戦でき

			る環境整備と国家の長期的なエネルギー戦略を見据えた腰の据わった議論、世論形成も必要となるであろう。
E-100	10年未満	注目科学技術	最近急激に注目されている水素エネルギーではあるが、その普及には 運搬貯蔵媒体 が一つのキーテクノロジーとなる。
		ブレイクスルー	安全性、コスト、軽量化
E-101	10年以降	注目科学技術	重水素とトリチウムによる核融合反応のエネルギーを取り出す核融合エネルギー技術 に注目しています。特に、可動性の放射性物質であるトリチウムを安全に循環制御する技術に注目しています。
		ブレイクスルー	日本は、大量のトリチウムを連続して循環処理する研究設備を有しておらず、核融合エネルギー源の実現に不可欠なトリチウム取扱技術が未成熟である。大量トリチウム取扱施設を整備し、大量のトリチウムを安全に安定して循環運転できる技術の確立が求められている。
E-102	10年以降	注目科学技術	常温常圧の反応条件下で、大気中に豊富に存在する窒素ガスと水から、触媒にモリブデンを使ってアンモニアを合成する。
		ブレイクスルー	実験室レベルなので、大型化にあたり課題が発生すると考えます。また触媒回転数の向上、副生成物の処理なども課題になると考えます。
E-103	10年未満	注目科学技術	水素活用還元プロセス技術 高炉における水素を活用した還元製鉄とCO2分離回収により、製鉄所から排出されるCO2の30%削減を目指すプロジェクト。
		ブレイクスルー	水素還元およびCO2分離・回収技術。 コスト競争力のあるレベルでH2を製造する技術。 水素による還元から発生する吸熱反応によって、高炉内で熱不足が発生。これを抑制・補間する技術。 低エネルギーでCO2を分離回収する技術。
E-104	10年以降	注目科学技術	専門分野ではないが、エネルギー関係の研究。 光合成の理解や、炭素資源に関する研究
		ブレイクスルー	詳しくないので、あまり言えないのですが、時間がかかるとは思いますが、人工光合成や太陽光発電の理解と推進が必要かと思えます。
E-105	10年以降	注目科学技術	微生物の機能を利用して二酸化炭素をエネルギーに変換する研究
		ブレイクスルー	高効率な二酸化炭素から水素を生産する菌の発見
E-106	10年未満	注目科学技術	熔融塩を利用した小型原子炉の運転技術 に注目している。特に、高温融体の取り扱いはまだ未成熟であり、安全対策や腐食対策、事故時の安全性の確認などが必要である。
		ブレイクスルー	アメリカ・オークリッジですでに原理的実証が行われているが、日本では、高温融体である熔融塩の循環運転技術が未成熟である。熔融塩小型原子炉の実現に向けては、熔融塩を長期間安全に運転する技術の確立が求められている。
E-107	10年未満	注目科学技術	環境問題には、 気候変動、資源循環、生物多様性 などがある。現在これらの問題を解決するためには、人間活動が気候変動や生物多様性に与える影響を定量的に評価する技術が必要である。気候変動に関しては、ライフサイクルアセスメントやカーボンフットプリントなどの評価手法が研究・開発され、社会実装が進んでいる。製品がライフサイクルを通じて発生するCO2を定量的に評価することができる。また、組織についても、組織が投入する資源やエネルギーや排出する資源、CO2、廃棄物などのデータから算出することができる。これらの結果をもとに、現状の把握や定量的な目標を設定することができるまで来ている。一方、生物多様性についても、資源消費がどのくらい生物多様性や生態系に影響を与えるかを評価する手法が開発され、一部の評価に活用されている。製品のライフサイクルを通じて、生態系に与える影響を評価する手法として、LCIAなども開発されて、活用されつつある。気候変動や生物多様性の問題は、現在国際的に設定されている世界目標の達成には、なお厳しいものがあり、2050年、2030年の目標達成には、社会全体の変革(生活の仕方、物の生産の仕方、移動の仕方、販売の仕方、資源消費の仕方、資源の選択、廃棄の仕方など)が必要であり、多くの新たな技術や知見が必要である。同時に、これらの技術や知見が、気候変動に関するCO2削減にどの程度効果があるかを定量的に評価する技術が重要である。また、生物多様性に関しても、新たな技術や知見がどのくらい、生物多様性へのネガティブインパクトを削減できるかといった定量的な評価技術が重要である。さらに、これら CO2に関する定量評価技術と生物多様性に関する定量評価技術は、別々の評価技術ではなく、統合化された評価技術であるべきであり、人間の活動や技術の影響を、一括して、同時にCO2排出量と生物多様性へのネガティブインパクトとして評価する技術が必須である。これらに関する影響評価技術 を注目している。

		ブレイクスルー	CO2の排出に関する影響評価技術も生物多様性に関する影響評価技術も、消費する資源の種類および資源消費量が関係し、さらにCO2に対する重み付けや生物多様性に対する重み付けのデータが必要となる。これまでの資源消費のデータは、各国の産業連関表の統計データや世界の資源に関する統計データ(食料、農林水産物、資源消費など)を活用している。そのため、統計データが集計される4,5年サイクルのデータの活用となっている。また重み付けのデータも影響評価する各主体がデータを集め、データベースを作成して決定しているのが現状である。今後社会の要請として、気候変動や生物多様性に関する影響を統合的に評価し、また世界共通の評価方法として評価するためには、これらの統計データや重み付けデータを一括管理し、逐次更新し、さらに多くのユーザーが活用できる共通のプラットフォームが必要である。これを実現するためには、データ集計やAI機能をもったプラットフォームがブレイクスルーとなる。
E-108	10年以降	注目科学技術	人類の生活全体をカバーできるクリーンなエネルギー技術の開発。 大規模な施設を使ってきた時代から、施設建造による環境破壊や、リスクの分散や省エネのため中・小単位でのクリーンエネルギーの技術が開発されるべき。
		ブレイクスルー	効率の良いクリーンエネルギーの開発。それらを蓄える蓄電池技術の向上。効率の良いVPP技術の向上と安定化。それらを推し進めるための国・地方自治体の支援や体制。
E-109	10年未満	注目科学技術	生物多様性に与える影響のうち、直接要因だけでなく、間接要因による影響の強さを定量的に評価する技術。
		ブレイクスルー	経済と環境影響を統合的に整理するための膨大なデータの収集整理が必要。イメージとしては、GTAPと他地域間産業連関分析を統合したエコロジカル・フットプリントのNational Footprint Accountをさらに拡張させ、オーバーユースだけでなくアンダーユースに関する影響を含めること、さらに絶滅危惧種数ではなく、生態系機能の経済的価値等によりとうごうされたスコア値として整理していくことなど。
E-110	10年以降	注目科学技術	二酸化炭素の排出削減は地球温暖化に不可欠だと考えられています。そのためには、 発電所や工場、車などから排出される二酸化炭素を低コストで化学原料や何かに吸収させる技術 の開発が不可欠になると思います。
		ブレイクスルー	世界中で技術開発されているようですが、コストが問題のひとつとなっているようです。もし、低コストで実現できれば、新しい産業の開発にもつながると思います。

付録4 分野別アンケート結果一覧(ICT・アナリティクス・サービス)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術＝「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー＝「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
I-1	10年未満	注目科学技術	ソフトロボティクス。 ソフトロボットの実現により、剛体を組み合わせた従来型ロボットの様々な課題の解決が期待される。 また、ソフトロボットならではの新たな機能の実現が期待される。 すでに、ソフトロボットハンド等、従来型に対して優位性をもたせたものが実用化されている。
		ブレイクスルー	ソフトセンサ開発、ソフトアクチュエータ開発、およびそれらの融合型成型技術。 ソフトロボットの機構の設計技術と制御技術。
I-2	10年未満	注目科学技術	ディープラーニングなど機械学習技術の実システム(ロボット等)への応用。 特に、家庭、災害、医療などの現場での利用。
		ブレイクスルー	技術の基盤はできつつある。データ収集など企業など利用者側への認知がまず重要。
I-3	10年未満	注目科学技術	テレプレゼンスロボット: 新型コロナウイルスの流行によって、オンラインでのコミュニケーションが急速に浸透したが、物理的な空間に対話相手の身体が位置付けられないことで、相手の存在感の欠如という問題が浮き彫りとなった。テレプレゼンスロボットは、ロボットを遠隔制御することで、自身の代役となって会議に出席したり、観光したりするなど、ロボットの身体を間借りすることで上記の問題を克服する技術である。近年、VR技術の発展とともに注目されており、日本のロボティクス分野でもリードする領域でもあるが、withコロナ時代を見据えると、フィジカルディスタンス(物理的接触)とソーシャルインティマシー(心のかかわり)を飛躍的に高めることができる技術であると期待される。
		ブレイクスルー	空間における身体の位置付けが出来ても、空間の雰囲気がわからなければ利用が難しいと考えられる。そのため、遠隔操作者の感情をロボットが表現する技術や、ロボットが表現する仕草や表情から遠隔操作者の感情を読み取る技術等、ロボットを介した技術が必要であると考えられる。
I-4	10年以降	注目科学技術	介護用ロボット。 介護用ロボットは、非常に限られた分野でしか使われていないと思われる。例えば、階段を上り下りできる車椅子などのロボットが開発されないのが不思議。このようなものがあれば、障害者やお年寄りが、金比羅さんなどの観光名所にも自由に行ける。様々な人の人生を豊かにするのではないかな。
		ブレイクスルー	生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発、安全技術導入ロボットの開発が進められている
I-5	10年未満	注目科学技術	環境条件に合わせて柔軟に動ける小型ロボット
		ブレイクスルー	柔軟な制御とモビリティ
I-6	10年未満	注目科学技術	高度な遠隔操作を可能とする高精度ロボット制御技術: 原子力発電所の廃炉に必要な技術として遠隔操作技術が注目されているが、遠隔操作はそのような極限環境での高精度操作のみならず、遠隔医療や遠隔介護などの医療分野やその他多くの分野で導入が期待されている。
		ブレイクスルー	高度な遠隔操作を実現するにあたり最も難しい問題が、通信遅延によるシステムの性能劣化・不安定化である。特に通信遅延が大きい場合やその値が変動する場合にはその影響が顕著である。よって、そのような通信遅延が存在する場合でもシステムを安定化する補償技術や安定化技術が必要となる。
I-7	10年未満	注目科学技術	身体動作を拡張するテクノロジー技術: 身体労働だけでなく、老化や障害によって衰えた動作能力を拡張し、健康寿命の延長、介護負担の軽減につながり、ひいては社会全体の活気、発展にもつながる。
		ブレイクスルー	技術は開発が進んでいるものの、人間の動作特性や機器への適応が軽視されている。工学的な技術と人間の理解が両立した開発が求められ、特に日本は他国と比べて、後者も優れている。分野協力・横断の研究体制を強化することがブレイクスルーにつながると期待される。

I-8	10年未満	注目科学技術	世界トップクラス材料開発技術と産業ロボット技術を有する日本において、発展が目覚ましいAI技術との融合により、「 全自動・自律的に材料を探索するマテリアルサイエンス 」に注目している： 材料開発は産業の根幹であり、付加価値の高い新規材料開発無くして今後の日本の産業は成立しないと思っているが、元素の組み合わせは無数にあり、その探索にはこれまでの人海戦術的な方法では時間やコストのロスが大きく、その解決法としてロボット+AIを活用し、物質の合成から分析まで一貫して行うことに加え、さらに実験条件を自律的に最適化する「全自動・自律的に材料を探索するマテリアルサイエンス」に注目している。 今後日本で優先的に取り組むべき科学技術であると考えています。
		ブレイクスルー	AI, ロボット, 材料科学の各研究者のコミュニティの創出, 装置を開発するための予算, 産業界からの参入が必要である。
I-9	10年以降	注目科学技術	農作業や介護など、人手不足が懸念されている業界で、 人間の作業をアシストもしくは肩代わりする知能ロボット技術 。
		ブレイクスルー	人間の生活環境や作業環境を的確に認識し行動判断できる高度なAIはもちろんのこと、状況の急変などでも重大事故を起こさないような安全性を確実に(数学形式的に)確保できるハードウェア及びソフトウェアの設計・開発手法。
I-10	10年未満	注目科学技術	ジェスチャインタフェース は、パソコンやスマートフォンのようなデバイスを手を使わずに利用することを目的としたインタフェース技術である。従来はマウスやキーボードほどの高速な入力ができないことから、あまり利用されてこなかったが、新型コロナウイルス感染症の流行により、手をつかないハンズフリーな入力方法として注目されるようになってきた。 一方で、これまでに重要視されてこなかったために、ジェスチャ入力を実現する基盤技術や、ジェスチャ入力の実用的な利用方法など、基本的な応用場面の検討が十分にされてきておらず、ジェスチャインタフェースの実現には至っていない。
		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> 身体ジェスチャの認識技術と機械学習アルゴリズムの発展 身体ジェスチャの実用的な応用例の検討 身体ジェスチャの社会的受容の調査
I-11	10年未満	注目科学技術	スマートスピーカーに代表される 音声インタラクション は、パソコンのキーボードとマウスのような高速な入力ができない一方で、パソコンを使うことが苦手ではあるが、対話によるインタラクションを好む高齢者やパソコン初学者に幅広く受け入れられている。新型コロナウイルス感染症の感染拡大の影響で、音声インタラクションは手をつかないハンズフリーな入力方法として注目されるようになった。 一方で、現代の音声インタラクションは定型的な会話や対話しかできず、一般的なユーザが望む対話技術が実現されていない。
		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> 人間の対話モデルに合致した音声インタラクション技術 ユーザの属性(高齢者等)を考慮した対話モデルの構築 「訛り」を考慮した音声認識技術 音声インタラクションだけで簡潔するサービスモデルの実現
I-12	10年未満	注目科学技術	視線インタフェース は、視線計測装置によるユーザの視線情報をもとに、パソコンのキーボードとマウスのような入力を行うために開発されてきた。これまではALSや筋ジストロフィー症患者のように、手足の不自由な人がパソコンを利用するために開発されてきたが、現代ではバーチャルリアリティ(VR)やオーグメンテッドリアリティ(AR)のように、身体的なインタフェースが求められる分野で急速に普及が進んでいる。さらに、新型コロナウイルス感染症の流行により、手を使わないハンズフリーな入力方法としても注目を集めている。 一方で、これまでにあまり重要視されてこなかったため、十分に使いやすい視線インタフェースの実現や、移動を伴う状況で使用できるモバイルな視線インタフェースの実現、さらに視線という難しい現象を扱う高度なアルゴリズムの実現には至っておらず、健常者にとっては使いやすいとは言えないものとなっている。
		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> 高速かつ高精度な視線計測技術 低負荷かつ効率的な視線インタフェース技術 視線入力装置の小型化
I-13	10年未満	注目科学技術	触覚再現 。
		ブレイクスルー	人の多様な触覚を定式化し、接触感を再現する装置の開発。またこのために、様々な触感を定量的に表現できるシステム。
I-14	10年	注目科学技術	いわゆる「 量子コンピュータ 」とその応用に関する技術による超高速、低消費電力な情報処理。

	未 満	ブレイク スルー	量子計算用のビット数を実用規模に増やすための技術、安価なデバイス冷却技術、あるいは、冷却が不要な量子計算素子技術。
I-15	10 年 未 満	注目科 学技術	スーパーコンピュータの計算速度 。理化学研究所の富岳が2020年11月17日に発表された計算速度の比較検討の結果、毎秒44京2010兆回を示し、米国開発のサミットに約3倍の性能差をつけた。この結果は日本の科学技術が非常に高い水準に達していることを裏付けるものだと考えられる。また、富岳を用いたシミュレーションの結果が、昨今の新型コロナウイルス感染症の対策を行うためのマスク開発等に利用されている。このことから、日本のスーパーコンピュータの計算速度に関する技術は注目すべき対象だと考える。今後の展開として、スーパーコンピュータの更なる計算速度向上をねらう開発とともに、市販の計算機の世界に貢献する技術開発に期待をしたい。
		ブレイク スルー	2020年度後半ではApple社が独自のCPUを実装した計算機を販売した。特に、シングルスレッドでの性能はとても高い評価を得ている。このことをブレイクスルーとして今後も市販の計算機に高性能な演算装置を搭載されるのではないかと期待している。
I-16	10 年 未 満	注目科 学技術	ドメイン特化型コンピューティング技術 に注目している。すべてのコンピューティング処理を一つのプログラミング言語や汎用型CPUで行うのではなく、特定の応用分野に着目し、処理の大幅な効率化・高性能化と生産性の向上を狙う。ドメイン特化型においては、処理を記述するプログラミング言語の抽象度から、実際の演算を行う回路の構成方式まで幅広くカスタマイズし、無駄なものをそぎ落とし、超高並列な処理が可能となるように工夫を重ねていく。産業界においては、AI分野向けに特化したチップやプログラミングフレームワークの開発が盛んにおこなわれている。開発のための生産性を向上させ、AI分野に限らず、社会的なニーズがある多様な分野への適応が望まれている。
		ブレイク スルー	ドメイン特化型のプログラミング言語から処理効率が高い実行可能コードを生成するために、ソフトウェアのレイアにおける変換技術の高度化が必要である。現状では、人間が手作業で変換したほうが性能効率が高いコードが生成される場合が多いが、人工知能技術や数値最適化技術を駆使して、人間の手作業での変換をしのぐ性能効率を達成するというブレイクスルーが必要である。また、処理のプラットフォームとして、スパコンのインフラは年々重要になっているが、スパコンの利用に関してはまだ一部の専門家が占有的に使っているのが実状であるため、技術普及や利用の民主化を進め、多様なブレイクスルーを引き金となるべきである。また、ある程度の汎用性が求められるスパコンにおいて、どのようにドメイン特化型の考え方を取り入れていくかは、システムデザインの考え方の面でブレイクスルーが必要と感じる。ドメイン特化型を可能とする現実的に使いやすいハードウェアの開発とその共同利用の方式の面でもブレイクスルーが必要であろう。
I-17	10 年 以 降	注目科 学技術	フォールトトレラントな量子コンピュータ
		ブレイク スルー	<ul style="list-style-type: none"> 量子ビットの大規模化技術 単体量子ビットの高度化(忠実度改善) 極低温下における高集積回路技術
I-18	10 年 未 満	注目科 学技術	ブレイン・マシン・インターフェース
		ブレイク スルー	非侵襲的、かつ効率的に脳内の情報について入力・出力・介入する技術の開発
I-19	10 年 未 満	注目科 学技術	ブレインコンピューターインターフェース
		ブレイク スルー	脳活動・回路の理解
I-20	10 年 未 満	注目科 学技術	リザーブコンピューティング 。特に実際の生物や車両の動きなど物理的リザーブを用いたものに注目している。リザーブコンピューティング自体は、再帰的ニューラルネットワークの一種であり、これが実現されれば、計算の処理速度が向上するだけでなく、電力消費も抑えられると期待されている。
		ブレイク スルー	自分自身が詳しくないので、ボトルネックなどの詳細はわからないが、まだ知名度が低く、知られていないので、より広く知られることで裾野も広がるのではないかとと思う。
I-21	10 年 未 満	注目科 学技術	原子・イオンや超伝導キュービットにより構成される大規模人工量子系を用いた量子技術全般 。Google社による量子コンピューティングにおける量子超越の達成は記憶に新しいが、量子コンピューティングを始めた量子技術(量子シミュレーション、量子センサー、光格子時計など)は、自然界の基礎法則である量子力学の可能性を極限まで活用した技術として注目されている。その実現舞台は多岐にわたり、Google社の用いた超伝導キュービットの他、冷却原子気体、イオントラップ、リドベルグ原子などの原子・イオン系を用いた大規模人工量子系が世界各国の研究機関において実現されている。万能量子コンピューティングを可能とする量子コンピュータの完成までにはまだ長期的な視野が必要であるが、短期的・中期的な視点から見ても、人類が量子系を扱う技術を極限まで高めることはテクノロジーのフロンティアである。

		ブレイクスルー	万能量子コンピューティングを可能とするためには扱える量子ビットの数を現状達成されている数よりもかなり増やす必要がある。量子コンピューティングに限らず、量子技術の性能は扱える量子系のスケールに依存する。そのため、量子系の大規模化のための技術的ブレイクスルーが望まれる。
I-22	10年以降	注目科学技術	誤り耐性量子コンピュータ が開発され、これを用いて量子化学の問題を大規模高精度に解くことができるようになる。
		ブレイクスルー	・qubitの大規模化、コヒーレンスを持続する技術。 ・量子コンピュータ用の大規模量子化学計算手法の開発。
I-23	10年未満	注目科学技術	光デバイスを用いたニューラルネットワークなどの演算回路 が非常にホットなトピックになっています。光信号の高速性と低遅延性によって、深層学習の演算処理性能を向上することが期待されます。2017年にMITのグループがシリコンフォトニクスを用いた初期的な光デバイスを発表し、2020年にLightmatterというベンチャー企業が立ち上げられています。すべてを光回路で置き換えることは現実的ではありませんが、それに適した部分を光回路で演算をする「光アクセラレータ」としての利用が効果的だと思います。
		ブレイクスルー	回路規模のスケールビリティが課題となっています。電子回路を用いた場合は1万以上のノードが可能ですが、光回路では現状100ノード程度が限界です。光回路に適したニューラルネットワークの構成や適用箇所の検討が必要です。
I-24	10年以降	注目科学技術	高性能計算システムの性能向上の限界が見えつつある昨今、新しい計算方式である 量子コンピュータ が注目されている。特に、量子アニーリングは組み合わせ問題を解くためのアクセラレータとして従来の高性能計算システムとの融合が可能であり、その実現性も高くなりつつある。
		ブレイクスルー	量子アニーリングで扱えることができる量子ビット数の向上が必要である。また従来の高性能計算システムとの連携を実現するためのハードウェア的・ソフトウェア的な連携方法の確立が求められる。
I-25	10年以降	注目科学技術	次世代アクセラレータ(イジングマシン、Noisy Intermediate-Scale Quantum(NISQ)デバイス、誤り耐性量子コンピュータ等)を複数種用いることにより実現される画期的な情報処理
		ブレイクスルー	誤り耐性量子コンピュータの実現、各種次世代アクセラレータを複数種用いるためのミドルウェア開発、次世代アクセラレータを複数種用いて解決すべき課題の抽出。
I-26	10年以降	注目科学技術	実用的、汎用的な量子コンピュータ
		ブレイクスルー	量子ビットの拡大
I-27	10年以降	注目科学技術	大規模且つ汎用的な量子コンピューター の開発。
		ブレイクスルー	開発費の投入。大規模な汎用量子計算の実現に向けて、一方向量子計算と呼ばれる手法を利用した「光量子コンピュータ」が期待されている
I-28	10年以降	注目科学技術	半導体量子ビット技術 。実用的量子コンピュータの実現に向けては、基本素子である量子ビットの高集積化が必須となる。半導体量子ビット技術は極めて高い集積度を実現できる可能性がある。かつ、1Kを超える温度でも動作可能であるため、大型の冷凍機を必要としない、コンパクトな量子コンピュータを実現できる可能性もある。
		ブレイクスルー	量子ビットの集積化のためにはビット間の量子情報をリンクさせる結合技術が必要となる。半導体量子ビットの結合技術は結合力が弱い。このことは量子計算速度の低下の原因にもなり得る。これを改善する技術が開発されると、大きなブレイクスルーとなる。
I-29	10年未満	注目科学技術	量子コンピュータ
		ブレイクスルー	桁数の多い計算を安定して行える仕組みが必要
I-30	10年未満	注目科学技術	量子コンピュータ 、量子力学的な現象に基づくコンピュータ。
		ブレイクスルー	実用的な量子デバイスの開発。実用的の意味がまだ、見定められていないと思われる。
I-31	10年以降	注目科学技術	量子コンピューター 。量子力学を使った新たなコンピューティング技術。
		ブレイクスルー	配線と精度の高い制御技法。
I-32	10年未満	注目科学技術	量子コンピュータ および 量子コンピュータ向けコンピュータ言語 の開発
		ブレイクスルー	低温超電導デバイスの実現

I-33	10年以降	注目科学技術	量子コンピュータの開発・運用 近年の科学技術の発展にはコンピュータシミュレーションは不可欠となりつつある。しかしながら、富岳のような世界一の速度を有するスパコンを使用した研究ができる研究者はごく一部であり、シミュレーションの計算コストは常に研究者を悩ませることになる。この量子コンピュータの開発・運用が躍進し、現在のPCレベルで一般普及すれば、シミュレーションにおける計算コストの問題は一気に解消する。科学技術における基礎的研究から応用研究、また計算科学から生まれる新規分野の開拓もなされると期待している。
		ブレイクスルー	技術的なブレイクスルーは門外漢なためわからないが、国策として非常に重要な科学技術であるにもかかわらず、予算規模が先進国と比較して日本は非常に低い。この技術により得られる利益を国は低く見積もり過ぎているのか、そもそも科学立国は捨ててしまったのか…。話がそれるが大学運営交付金の減額などすべてが負のスパイラル的に作用して世界との競争力が低下しているように感じる。結果ありきの予算配分ではなく100年後にも残る科学技術を求める基礎的な分野から応用分野まで現在の10倍から100倍の科学研究予算を配分すべきと考える。
I-34	10年以降	注目科学技術	量子コンピュータの実現かつ、家庭用への転用。
		ブレイクスルー	動作の安定性の実現
I-35	10年未満	注目科学技術	量子コンピュータを用いたアプリケーション開発と量子コンピュータの実用化。
		ブレイクスルー	量子コンピュータを用いたキラーアプリの開発。量子コンピュータは、基礎研究段階にあるが、キラーアプリが無いことが研究開発の加速化の足を引っ張っている。
I-36	10年以降	注目科学技術	量子コンピュータ技術
		ブレイクスルー	量子ビットの量と質の向上、回路、システム連携。
I-37	10年以降	注目科学技術	量子コンピューティングに関する技術開発 近年「量子コンピュータ」という言葉が、脚光を浴びています。現在提案されている量子コンピュータは、「量子ゲート型」といわれているものと「イジング(アニーリング、量子アニーラ)型」というものに大別できます。量子ゲートは、現在の汎用コンピュータの未来発展的な位置づけで、IBM やインテル、グーグルなどにより開発が進められており、万能な計算機と考えられていますが、現時点では商用機は存在していません。もちろん各社からクラウド公開されており、無償または有償にて利用することができますが、量子ビットサイズの制限から、実用的な問題を直ちに取り扱うには、多くの時間が必要と考えられます。量子アニーラは、東京工業大学の西森秀稔教授のグループで着想され、2011年にカナダの D-Wave Systems 社から商用機が販売され、NASA や LockheedMartin が導入したことから、量子コンピュータが現実のものになったと考えられています。 量子アニーラは、「組合せ最適化問題」を解くことに特化したコンピュータで、従来の汎用コンピュータの苦手とする計算領域のひとつを補完することができます。日本でも NEC のグループで開発が進められており、数年後に商用機をリリースすることが予定されています。他では、量子アニーラに着想を得てデジタル回路などで「組合せ最適化問題」に特化した計算機が、各社から提案されています。例えば、日立や富士通は、CMOS デジタル回路にその機能を実装し、NTT と NII のグループは、光パラメトリクス方式でその機能を実現し、東芝は、今春突然この領域に参入してきました。このように、「量子アニーラ」を中心に新しい計算機市場の覇権をかけ、国内の多くの企業が参入を開始しており、非常に暑い市場です。 このようなコンピュータが、具体的に材料科学にどのように役に立つのか、現在では未知数ですが、例えば D-Wave のマシンは TEM-CT の画像構築に適用し、従来より少ない、データを基に 3D 画像構築を行っています。また、富士通は、創薬分野への適用(分子構造の類似性検索)などへの適用を報告しており、日立は、画像内のノイズを除去して鮮明な画像の構築に適用しています。しかし、各社ともキラーアプリを模索しているのが現状です。
		ブレイクスルー	今後の「量子コンピュータ」は、量子ゲート型が主流となると考えられる。世界に比べて日本の開発状況は、専門家によると良く「周回遅れ」、実情は「2~3 周回遅れ」といわれている。シリコン型のトランジスタとは異なる産業で、後れを取ることは国際競争力の著しい低下を招くと想定される。新産業の全体の技術構成を進めつつ、本当に必要な基板技術が確立されていくことが望ましい。特に量子コンピュータに用いる【新規の材料開発】にブレイクスルーが必要と考える。二次元層状材料である遷移金属ダイカルコゲナイドをはじめとするナノ材料開発と、材料研究を加速するための計測技術の開発に国としても注力をいただきたい。

I-38	10年未満	注目科学技術	量子コンピューティング技術 です。
		ブレイクスルー	量子もつれ状態をどのように多数確実に実現するか、量子状態を壊さないように弱測定をどのように行うか、この2つの問題がどのように克服されていくのか興味を持って注目しております。
I-39	10年以降	注目科学技術	量子センサーや量子計算機を量子力学的性質を保ったまま相互に接続するネットワークは「 量子インターネット 」と呼ばれ、欧米や中国が先行して研究開発を進めている。量子インターネットでは、距離に制限なく安全性が担保される量子鍵配送、各所に配置された光原子時計が大陸プレートや地殻変動による局所重力変動による時間の変動をリアルタイムで検出する量子時刻同期、量子計算機集団による高速な量子計算を実現する分散量子コンピューティング、などが可能になると期待されている。
		ブレイクスルー	量子インターネットの実現には、国土に張り巡らされた低損失ダークファイバーのネットワークが必須であり、欧米、中国などでは整備が進められている。日本では関係する研究機関が個別に部分的なファイバーリンクを調達して研究開発を進めている状況であり、国が先導してファイバー網を整備して利用を促進することが大きなブレイクスルーになると考えられる。
I-40	10年以降	注目科学技術	量子技術 特に 量子コンピューティング （ハードウェアとアルゴリズムの両方）および 量子通信
		ブレイクスルー	現時点で実現している物理系の多くは極超低温でなければ動作しないが、一般に普及するためには、室温温度程度の比較的安価に実現できる温度で動作できる必要があると考える。
I-41	10年未満	注目科学技術	量子技術 を生命現象の理解に利用する科学技術。近年量子コンピュータや量子センサーに代表される量子技術の進展が著しく、その生命科学への利用が望まれ、世界中で開発競争が繰り広げられている。量子センサーというこれまでにない方法で、生命現象の新たな理解や、従来にはない精度や感度での診断技術へとつながることが期待されている。
		ブレイクスルー	量子技術はクリーンでドライな環境で開発されてきた。一方で生命現象は複雑でウェットな環境である。量子技術を生命現象に応用するためのハードルが高いのは想像に難くない。そこで量子と生命といったこれまでかけ離れてきた分野をつなぐためのデバイスや材料の開発がブレイクスルーの鍵となる。
I-42	10年以降	注目科学技術	量子計算機の実用化 。量子計算機はすべての分野においてではないが一定の用途（基本的には検索的な計算）に対して本質的に高速に動作することから、ITの社会への寄与に大きく貢献するものと思われる。
		ブレイクスルー	現在実現できている量子 bit 数は小さくこれを大幅に大きくしないと量子計算機の実用化は難しいためブレイクスルーが必要である。 現在、様々な方法が模索されているが、光子を使った光量子計算機の研究がブレイクスルーの端緒になるのではないかと思考する。
I-43	10年以降	注目科学技術	量子力学の原理を応用した量子計算を可能とする 量子コンピュータ
		ブレイクスルー	量子計算を可能とする物理系にはいくつか候補が挙げられるが、どの物理系においても如何に量子ビットとなる素子をスケラブルに集積するかが重要であり、この技術・アイデアが一つのブレイクスルーになると考えている。 また、量子エラー訂正の実装、量子チップのパッケージング、量子チップを操作する外部エレクトロニクスの構築等、全てにおいてスケラブルに実現可能な技術の確立がブレイクスルーになると考える。
I-44	10年以降	注目科学技術	証明可能安全性を備えたプライバシー保護技術
		ブレイクスルー	安全性を保障する理論
I-45	10年未満	注目科学技術	新しい暗号認証方式 。
		ブレイクスルー	量子コンピュータ開発の進展次第と考えられる、暗号と認証を同時に行うことが主流になると考えられる。
I-46	10年未満	注目科学技術	秘密計算 データを秘匿したまま計算処理できる技術。計算する側からはデータの内容を確認することができず、ただ出力された計算結果だけが提示されるので、パーソナルデータや企業秘密といった機密情報の活用時に有効。
		ブレイクスルー	データを複数に分割し、さらにそれぞれを複数のサーバへ分散して計算。個々のデータは乱数によって秘匿されて、複数のサーバへ分けられているため復元が極めて難しく、非常に高いレベルのセキュリティを保つことができる。個人情報や生体情報、企業の機密情報などへの活用が期待されている技術。

I-47	10年以降	注目科学技術	量子暗号通信
		ブレイクスルー	汎用的な量子ビットの準備
I-48	10年未満	注目科学技術	AIによる画像判読
		ブレイクスルー	人間の顔判読だけではなく、野生生物の種類や個体の識別にも応用できる可能性が大いにある。
I-49	10年未満	注目科学技術	AIによる実験データの解析
		ブレイクスルー	複数の因子の重みづけをしながら「解釈」をするアルゴリズムの構築
I-50	10年未満	注目科学技術	AIの新パラダイムとして、 統計的AIと記号的AIを統合した融合AI技術 に注目しています。従来の機械学習の限界を超えられる可能性のある技術として注目されています。
		ブレイクスルー	融合AIを記述するための基礎的な数学的言語がまだ確立されておらず、場当たりに研究がなされているため、統一的な数学的フレームワークが融合AI技術の確立には必要であると思います。
I-51	10年未満	注目科学技術	AIを利用した翻訳技術やさまざまな科学の発展。
		ブレイクスルー	現状ではDeep Learningが注目されており、画像認識についてはレベルの高いところまで実現されており、翻訳についても下訳レベルであれば実現されており、化学、生物、物理などにも部分的に貢献している。ただし、今後より高いレベルの翻訳や飛躍的な科学の発展のためには、新たなAI技術の開発と計算機の能力も大きく発展することが必須であると考えられる。
I-52	10年未満	注目科学技術	AIを利用した有機材料の分子探索
		ブレイクスルー	機械学習による定量的構造物性相関については、すでに高精度での実行が可能であるが、新しい骨格を有する分子の探索を組込むことが難しいのが現状である。これまでに種々の探索アルゴリズムが開発されているので、これを分子に適用することができれば、実現すると考えられる。
I-53	10年未満	注目科学技術	AI技術
		ブレイクスルー	基礎科学の分野などでAI技術による解析等の汎用性が高まることが必要(機器及び使い手双方の進歩が求められる)
I-54	10年以降	注目科学技術	Deep Fake と呼ばれる、深層学習のうちGAN(Generative Adversarial Networks)と呼ばれるニューラルネットワークの枠組みを用いた、極めて自然な人工コンテンツの自動生成技術が完成度を高めている。この技術は、画像や音声などのコンテンツの法的な証拠としての価値といった観点を含めて、社会的に大きな問題をはらんでいるため、これを検知する技術が必須である。
		ブレイクスルー	GANは、検知できないように自動的に完成度を高める仕組みであるため、これを検知する技術の実現は原理的に困難であり、少なくとも私には見通しが見えない。何らかのブレイクスルーが必要である。
I-55	10年未満	注目科学技術	IoT, AI
		ブレイクスルー	新型コロナが落ち着いたら。IoT, AI, 5Gの導入により、生活様式が変わっていくと予想される
I-56	10年未満	注目科学技術	Neuromorphic Computing 近年、深層学習をはじめとする人工知能技術が急速に普及している。人工知能技術は、画像認識の推論精度の観点では、人間に匹敵する精度に到達しているものの、エネルギー効率やコンパクト性という観点では、まだまだ生物の脳のレベルにはほど遠いのが現状である。 Neuromorphic Computingでは、生物の脳を参考にしつつ、人工知能のハードウェアを進める分野であり、推論精度だけではなく、エネルギー効率やコンパクト性という観点においても、生物の脳レベルを目指している。
		ブレイクスルー	よりエネルギー効率の良い学習アルゴリズム

I-57	10年未満	注目科学技術	XAI (Explainable AI) と呼ばれる説明可能な AI。 現在の AI は、深層学習のように非常に強力な一方、モデルがブラックボックスになってしまうという問題点がある。つまり、AI の予測結果がどのような計算過程を経て得られたものなのか分からないため、精度が高かったとしても、その予測の根拠がわからなくなってしまう。具体例として医療業界では「なぜ AI がそのような診断を下したのか」を患者さんに説明できなければ、診断に AI を採用することは困難である。また、AI が間違っていた判定を下した場合に、なぜ間違ったのかを検証することができない。
		ブレイクスルー	現状の XAI の課題として、AI(機械学習)モデルの予測・推測の計算工程を完全に明らかにするものではない。また AI(機械学習)モデルの予測・推測の根拠を完全に示すものでもない。これは現状の XAI が万能ではなく、「ブラックボックス」となっている AI(機械学習)モデルの仕組みを完全に把握し、説明している訳ではないからである。あくまで現状の XAI は、「ブラックボックス」となっている AI(機械学習)の予測・推測の根拠の一部を説明または別の解釈性の代替手法で近似している方法と認識し利用する必要があるため、さらなる発展が見込まれる。
I-58	10年未満	注目科学技術	データ駆動科学と総称される一連の科学技術。 先端計測手法の一つ用いても得られる情報は限られるが、複数の計測手法で得られたデータ、さまざまな試料について得られたデータ、こうしたものを一括して解析することで、従来の計測手法を活用するだけでは得られなかった情報が引き出せる。また、高度な計測手法による計測結果は、そこから十分に情報が引き出されていない場合が多く、再測定するよりも、既存の測定データを解析することで、これまでわからなかった情報が得られる可能性がある。
		ブレイクスルー	1) 埋もれたデータ(様々な研究機関、研究者が持つ過去の計測データ)を適切に読み出し、情報を整理することが最大の課題である。専門家が一つ一つのデータを時間をかけて整理するのが最も確実な方法と思われるが、自分が所有するデータでさえ、古いデータを読み出して、整理するのは重労働である。この作業を少なくともある程度自動化・簡便化する必要がある。また、少なくともこれから得るデータに関しては、整理が簡便となる仕組みが必要である。 2) データを安全に管理するデータベースのような仕組み。既存のブロックチェーンなどの考え方が利用できる可能性はある。
I-59	10年未満	注目科学技術	データ同化技術 に注目している。理由は現在の機械学習(一般に AI と区分される分野)と数値計算、そして実験のすべてをつなぐ技術になりうるためである。この三者が個別に研究を進めてたどり着く限界も、データ同化技術で繋ぐことで限界を突破することが出来る。一見すると難しそうに見えるため応用が余り進んでいない分野ではあるが、何かわかりやすい例やフレームワークが出来ればブレイクスルーになるのではと考えている。
		ブレイクスルー	わかりやすい応用例が最も必要と思われる。ディープラーニングが一世を風靡したのも様々なゲームなどで人間を超える能力と見えるデモを繰り返したのが第一だったと思われる。我々のグループでは正にデータ同化のデモを色々な例に適用すべく現在研究開発に取り組んでいる。
I-60	10年未満	注目科学技術	デジタルトランスフォーメーションによる事象のスマート化。 昨今の計算機性能の向上を社会・生活に活かす取り組み。
		ブレイクスルー	技術的にはかなり実現に近いところに来ているが、汎用的な実用にはセキュリティやロバスト性など課題がある。実績を積みながら成熟していく分野と考えられる。
I-61	10年以降	注目科学技術	ニューラルネットワークやディープラーニングにおいては、入力と出力のみが意味あるものとされて、内部での処理が無視されている、あるいは実質上は説明ができない状況がある。 これに対して、 各階層における処理を可視化できる技術 がようやく初めて提案されており、しかも人の脳内での処理に近いことまで判明している。このように、ニューラルネットワークにおいても、どのような処理がなされているのかを解明することがあつてはじめて、ニューラルネットワークが将来の技術に大いに貢献できる唯一の道であると考えている。
		ブレイクスルー	はじめて提案された段階であり、今後、処理の可視化に関して多くのブレイクスルーが必要となると考える。
I-62	10年未満	注目科学技術	パラレル演算を得意とする GPU が AI、ディープラーニングに導入されているように、今後パラレル演算はギガピクセルの画像に対応すべく発展することが予想される。これらのパラレル演算を高速に行う上で、 量子コンピューティングの QPU はこれまでにない計算手法を実現できる可能性がある。
		ブレイクスルー	現在稼働している量子コンピューティングの実態は、極低温、超高真空など極限環境を要求するものが多い。これが常温常圧で動作するようになれば、各家庭に QPU が導入される。しかしながら、現段階ではそのような実機はない。
I-63	10年	注目科学技術	ビッグデータをデータマイニングし、新たな情報や価値を抽出する情報技術研究。

	未 満	ブレイク スルー	現在の情報やデータだけではなく、デジタル化されていない膨大な過去のデータや情報を発掘、レスキューする必要がある。このためには、図書館、市役所、大学、研究機関などにおいて、蓄積されているデータや情報のリストアップが先決である。データや情報をレスキューし、解析した後の結果の解釈に関しては、様々な分野の専門家、地方行政、ローカルな専門家などの協働が必要である。
I-64	10 年 未 満	注目科 学技術	フェイク情報やフェイクメディアを自動でチェックする技術。 フェイク情報を見抜くためには、情報源レベルとコンテンツレベルのチェックを組み合わせる必要がある。前者は比較的容易で、政治的プロパガンダ、擬似科学や陰謀論に関する有名なサイトをデータベース化し、それを利用する。後者は、ウェブの情報からナレッジグラフを構成し、AIがその知識構造を真偽判定に利用する。フェイクメディアを判定する技術は、現在のディープフェイクの技術の延長線上にあり、着実に発展を遂げることが期待できる。
		ブレイク スルー	ウェブから構成した知識構造をAIが学習し、活用できるようになることは、汎用AIを創るためのマイルストーンである。また、そのような計算を効率よく省エネにできるようになるためには、アルゴリズムやサーバーのアーキテクチャなど、ソフトとハードの両面でのイノベーションが必要になる。
I-65	10 年 未 満	注目科 学技術	プログラムコードを自動で生成する技術。
		ブレイク スルー	人間の感覚的な言葉をプログラムコードに変換する高度な自然言語処理。生成したプログラムの可読性を上げる、デバッグしやすくするための機械学習技術
I-66	10 年 未 満	注目科 学技術	画像ビッグデータ解析におけるAIアシスト。
		ブレイク スルー	この分野は、ここ1、2年の間に劇的に変化しており、ディープラーニング実現のための道具立てが揃ってきた昨今、さまざまな状況に対応できるノウハウの蓄積が期待できると考えます。しかし、より多様で、大局的な見方ができる体制の構築が望まれます。
I-67	10 年 未 満	注目科 学技術	基礎科学のAI活用
		ブレイク スルー	AIプラットフォームの充実と拡張ならびに実装サービス化
I-68	10 年 以 降	注目科 学技術	最近の目覚ましい発展と将来社会へのインパクトが大きい社会技術としては、 人工知能(AI)関連技術やゲノム編集や合成生物学などの生命科学分野の科学技術 が挙げられる。純粋な科学技術の進化だけでなく、社会環境条件との運動で制御が難しく不確実なものであるという点からも注目すべき科学技術である。
		ブレイク スルー	グローバル視点での将来社会の方向性、実現される社会像に依存し、ブレイクスルーについては何とも言えない(当該分野の専門家ではないということにもよる)。
I-69	10 年 未 満	注目科 学技術	自律的な思考が可能な人工知能
		ブレイク スルー	計算機インフラストラクチャーの整備とオープンデータベース環境の構築
I-70	10 年 未 満	注目科 学技術	自律的に学習・推論を行い成長するAI
		ブレイク スルー	倫理観、製造物責任など、人とのかかわりに関する課題の解決が必要
I-71	10 年 未 満	注目科 学技術	実測データを充実させる。 近年、機械学習やAIの発達、大型計算機を用いた大規模予測計算が進んでいる。それらの計算はデータによって精度確認がされなければならない。精度検証のために実測データの拡充が必要であるが、ないがしろにされている面があり、 日本人特有の実直なデータ測定 の価値が再認識されている。
		ブレイク スルー	すぐに形にならない、成果が見えにくい、イノベーションが起きにくい部分であるからこそ、確実にリソースを投入し続ける。データペーパーやデータのオープン化が当たり前になりつつあるので、そこでのデータの公表に評価を与えることにより、データ取得の意欲が高まる。
I-72	10 年 未 満	注目科 学技術	深層学習の解析技術。 ブラックボックスとして扱われがちな深層学習・Deep neural networkの特徴表現や内部状態を解析することで、さらなる精度向上や効率的な学習方法の提案につながることを期待される。
		ブレイク スルー	多くの研究が局所的な解析にとどまっている。ネットワーク全体で学習したことを体系的に分析するためのフローおよび解析技術が必要。
I-73	10 年 未 満	注目科 学技術	深層学習モデルを初めとする機械学習モデルの解釈性に関する技術を用いたモデルの性能向上。 機械学習モデルの解釈性・説明性といった研究への注目が増えてきているが、これらの結果を用いたモデルの性能向上が考えられる。
		ブレイク スルー	機械学習モデルの解釈性・説明性に関する研究はいまだ発展途上である。実応用に基づく研究の必要性、解釈性・説明性への過度な信頼・期待への注意をすることが大事である。

I-74	10年未満	注目科学技術	深層学習等に基づいた人工知能/計算システムの正当性や安全性を保証・評価する理論の構築。 特に結果の安全性を事前に検証できない未知の事象に人工知能を活用する際に重要となると考える。
		ブレイクスルー	深層学習が何故有用な答えを導くのかを説明する数学的なモデルの構築が必要。
I-75	10年未満	注目科学技術	人工知能
		ブレイクスルー	人工知能技術は10年以内に科学技術のみならず、生活基盤までも変革する可能性がある。おそらく、あらゆる技術の基盤ともなり得るだろう。そのため、私の杞憂は、実現に向けてのブレイクスルーではなく、こういった技術が独占されることへの危機意識である。水や空気のように全世界がこの技術を共有しなければ、近い将来に絶大な取返しのつかない格差が生じ、世界が混迷と破綻へ向かうのではないかと。是非とも日本がこの技術の共有を主導して欲しい。
I-76	10年未満	注目科学技術	人工知能とエレクトロニクス分野の融合。
		ブレイクスルー	人工知能は現在あらゆる分野で注目を集めているが、二つの大きな問題がある。一つは適用場所が難しいことであり、もう一つは(本質的には一つ目と同じであるが)人間の言葉をそのまま人工知能が理解するわけではないので、問題を正しく設定することが難しいという点である。特に後者が解決すれば、人工知能の適用場所が拡大され、社会においてより身近な存在になるとと思われる。
I-77	10年未満	注目科学技術	人工知能における学習能力の向上技術
		ブレイクスルー	学習速度の向上速度の向上は、学習アルゴリズムの違いにより異なるため、一概にブレイクスルーの有無は論じられない
I-78	10年未満	注目科学技術	人工知能による新規物性の開拓: 深層学習といった人工知能の活用により、既存の材料の物性や機能性の向上だけでなく、新規な物性や機能性をも発見・開発する。実現されれば、物質科学の大きな転換点となるかも知れない。
		ブレイクスルー	特別な技術的ブレイクスルーは必要ないのではないかと考えている。
I-79	10年以降	注目科学技術	人工知能を活用した臨床医学への進歩
		ブレイクスルー	2-3年前に人工知能のブームが来たが、人工知能自体が万能ではなさそうである。自分で新しいものを生み出すという誤解もあるが、特に臨床医学では、正確に層別化し、その精度を深層学習でより向上させる優れた統計ソフト的な面も持っている。少なくとも今後10年は臨床医は人工知能に仕事を奪われることはなく、逆にうまく活用、共存することで働き方改革を推進するなど新しい動きが出てくると思う。具体的には、人々の人工知能への認識の変化と、臨床医が人工知能ではできない部分を自身でうまく精進するなどすみわけすること、人工知能に適切な臨床情報を与え深層学習がすすむシステムの作成など、人工知能のハード面の進歩のほか適切な社会環境が必要であろう。
I-80	10年未満	注目科学技術	人工知能を実現するための技術全般。 特に低消費電力で、高い演算能力を持つ人工知能を実現するための技術。 対象は、脳科学、デバイス、材料、プロセス・製造技術、回路、アーキテクチャ、ソフトウェア、センシングなど。 既存のデバイス(GPU, DRAM等)と専用のアーキテクチャ、ソフトウェア技術を用いて既にAIが実用化されているが、消費電力効率が悪く、今後AIの応用を広げる上で深刻な課題。昨今の低炭素社会の実現を進める上でも、低消費電力化は必須の課題。また、今あるAIの技術は、脳が持つ高い情報処理能力のごく一部を模倣できているにすぎず、より高い情報処理能力獲得に向けて研究の余地は大きい。 AI関連技術は提供する側も応用して活用する側も産業としての裾野が広く、如何にこの分野で覇権を握れるかが今後何十年にも渡り、国家の明暗を左右しかねない。現状は残念ながら米国のGAFAYや中国のAlibaba等の企業、大学などにこの分野で大きく先行されており、日本としてこの分野でビハインドと言わざるを得ない(一部、健闘している企業、大学はあるが)。AI向けの低消費電力化、高い演算処理能力を実現するための研究開発の強化、対応できる人材の育成が国の喫緊の課題と考える。

		ブレイクスルー	低消費電力、高い演算機能の実現するデバイスはいくつか学会では提案がされているが、まだ単体素子で基礎検討がされているレベル。新しい素子の検討に加えて、どの素子が有望かの見極めが必要。 有望性については、デバイス技術からの側面からだけでは不足で、脳科学、製造技術、回路、アーキテクチャ、システムトータルからの視点での最適化が求められる。異分野を越えたすり合わせまで出来ているところはまだ世界的にもそれほど多くない。一方、こういったすり合わせは日本が得意とする所である。各分野の専門家も日本に居る。ここに日本の勝機があるのではないかと考える。単に単一の技術の研究開発を推進するだけでなく、こういった異分野融合を図る事が出来る場の提供も必要。
I-81	10年以降	注目科学技術	大容量画像データの解析を可能とするシステムの構築
		ブレイクスルー	大容量画像データの解析が可能なシステムの適応を可能とするチームの編成。部分的には10年以内に可能となると思われませんが、生体全体を理解するためにはより大局的な見方ができる見方が必要であろうと思われます。
I-82	10年以降	注目科学技術	誰にでも使えるビックデータや AI
		ブレイクスルー	現在のビックデータや AI 技術は素人が使用するには難しすぎて、分野外の研究者は全く使いこなせていない。技術の精度を高めるのもよいが誰にでも使えるという利便性の獲得が重要と考える。
I-83	10年未満	注目科学技術	Beyond 5G/6G 実現に向けたミリ波、テラヘルツ波デバイス技術。
		ブレイクスルー	ミリ波帯における高出力なパワーアンプ、ローノイズアンプ、およびそれを実現する要素デバイス技術。
I-84	10年未満	注目科学技術	THz(テラヘルツ)応用技術
		ブレイクスルー	・H2O に影響を受けることへの対応 ・受光側の感度・発光側の強度の増強と S/N 比の向上
I-85	10年未満	注目科学技術	テラヘルツ帯での無線通信
		ブレイクスルー	光源の高出力化、小型化および検出器の高感度化、小型化
I-86	10年以降	注目科学技術	指数関数的に増大し続けるデータ転送容量に持続的に対応し、かつデータ転送効率の最大化を両立する 次世代の大容量かつ高効率な光伝送技術
		ブレイクスルー	光ファイバ通信では、心線多重あるいはマルチコア化による大容量化が検討されているが、持続的な容量拡大を実現するためには、空間モードの利用が不可欠となり、空間モードの制御性を考慮した光ファイバケーブル技術の開発が必要。加えて、伝送速度の高速化および多値変調技術の進展に伴う信号処理負荷の増大も重要な課題であり、例えば、Master-Slave 方式のような、信号処理負荷の低減を実現する要素技術の検討が必要となる。
I-87	10年以降	注目科学技術	周波数 0.1~10THz 程度のいわゆる テラヘルツ電磁波の科学技術 に注目している。この帯域はテラヘルツギャップともいわれるほど、前後の周波数帯の電波や光と比べて利用が遅れているとされる。 一方で、この周波数帯は高速通信やイメージング、分光に有用だと考えられている。こうしたテラヘルツ波を自在に操ることができるようになれば、通信やイメージングなどの産業応用のみならず、生化学や固体物理など基礎科学へのインパクトも大きいと考えられる。
		ブレイクスルー	低周波数のテラヘルツ波は通信への応用として最近活発に研究が進められている。まずはこの低周波数帯を皮切りに発振器・変調器・検出器や線形素子などの基本的なコンポーネントの研究開発が進められる必要がある。 そうした通信応用用途のコンポーネントの発達によって、基礎科学の研究者もテラヘルツ波技術にアクセスしやすくなると考えられる。
I-88	10年未満	注目科学技術	人間がシームレスと感じるレベルの通信・情報処理速度の実現とその制御技術。 高速通信が可能なデバイス用材料技術や、吸収、反射、減衰、封じ込めなどの電磁波のコントロール技術(それを可能にする材料技術を含む)。
		ブレイクスルー	電磁波制御機能を有する材料技術、デバイス設計技術においてブレイクスルーが必要と考える。
I-89	10年以降	注目科学技術	洋上通信網の整備: 大容量高速通信を日本の EEZ 内で整備する
		ブレイクスルー	成層圏プラットフォームのような一定空域で滞在することができ、通信を中継できる基地局の配備することが重要なカギとなる。

I-90	10年以降	注目科学技術	量子インターネット 。量子的な光通信を行うことで、ネットワーク型の量子計算や量子暗号通信などのプラットフォームとなる。量子情報技術の中核的なインフラとなる可能性がある。
		ブレイクスルー	まだまだ開発の端緒についたばかりの技術であり、多くの要素デバイスの構築が重要となる。例えば、低損失な光伝送路(光ファイバ、自由空間)や高効率な量子光源と量子光検出器、高効率かつ高忠実度な周波数変換器と量子トランスデューサー、さらには固体量子メモリが必要になると思われる。また、アルゴリズムやプロトコルの研究も重要である。
I-91	10年未満	注目科学技術	量子テレポーテーション による通信
		ブレイクスルー	大量の光子に量子もつれを持たせることをいかに実現するか。
I-92	10年未満	注目科学技術	3. 完璧な言語翻訳機(特に同時通訳可能なもの) いくら英語教育に力を入れようと日本人の言語的ビハインドは無くすることができず、言語習得に要する膨大な時間は計り知れない損失である。その時間を深い考察や議論に充てた方が、よほど建設的だと言える。いい加減、完璧な言語翻訳機を本腰を入れて開発すべきである。 4. AIにはできない仕事の洗い出し AIなど情報科学の発展は目覚ましく、ルーチンワークどころか創造的な仕事まで置き換わりそうな勢いである。今後の社会を予測し安定化するためには、AIにできることとできないことを洗い出す必要がある。
		ブレイクスルー	3. 完璧な言語翻訳機(特に同時通訳可能なもの) 音声認識・解析・翻訳が可能なデバイス開発 4. AIにはできない仕事の洗い出し 情報科学・認知科学・哲学など理系や文系を問わない超異分野間融合
I-93	10年未満	注目科学技術	AIとCG技術の融合 。実際に現場に行かずとも出来る映像制作の範囲が拡大し、表現の範囲が拡大する。また、人の頭の中のイメージを外部に取り出しより伝えやすく出来ることで、アイデアがあっても伝える技術に乏しかった人からも、アイデアを吸い上げ共有することができる。
		ブレイクスルー	人の高次な情報処理のモデル化。脳内処理のコンピュータでのシミュレーションを精度良く出来る必要がある。
I-94	10年未満	注目科学技術	Computer Supported Collaborative learning という研究分野が米国を中心に研究が行われている。コロナ禍の現在において、遠隔の他者との協同による教育活動は注目されこれからの科学技術において注目される内容である。特に遠隔通信による学習環境のプラットフォームの開発技術は重要である。
		ブレイクスルー	5Gなどの通信環境の変化により、遠隔からの教育に関する多様な支援が実現するので、そういった通信網を活用したプラットフォームの開発にブレイクスルーが必要。
I-95	10年未満	注目科学技術	GIGAスクール構想における教育指導法と新しい指導方法 、授業づくりの新機軸
		ブレイクスルー	新学習指導要領が告示され、小学校では2020年度より、中学校では2021年度より本格実施される。プログラミング教育が導入され、コロナ禍においてオンライン授業等が模索されている昨今、ICTを活用した教育及びその効果の検証、実証等が急務である。すでに一人一端末が配備されている現状、早急に授業改善および研究を進めなければならない。研究者、教員、教育委員会が連携して実践を進める必要がある。
I-96	10年未満	注目科学技術	VRを用いたオンライン会議システム技術
		ブレイクスルー	ポストコロナ・ウイズコロナとDXは深く関わってくる。その中でもオンライン会議技術のVR化は注目すべきと考えている。既にZOOMなどのツールが一般に急速に普及しているが、これらはface-to-faceの会議に比べて円滑な意思疎通の観点で劣る。VR技術などを応用した全く新しいリアルなオンライン会議システムの普及が今後重要になってくるだろう。これらは既存の記述の発展として10年以内で実現可能と考えられる。
I-97	10年未満	注目科学技術	VR技術による会議システム 。 会議等
		ブレイクスルー	情報通信のデータ圧縮技術 Peer to Peerでの拠点間通信の確立
I-98	10年	注目科学技術	オンライン活動全般

	未 満	ブレイク スルー	法改正。ICT 環境の整備。ICT に対する対応力。オンラインを大いに活用して いくことで、国際的な交流や メディアの活用を図っていくことができる。
I-99	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	クラウドソーシング、クラウドセンシング。一般市民のデバイスを活用した情報収集や情報処理。 一般市民の参加を促すインセンティブ、及び、セキュリティの確保。
I-100	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	サイバーフィジカルシステム 人口減少、後継者不足などで消えようとしている我が国の卓越した職人によるノウハウをどこまで AI の力で残すことができるか。
I-101	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	トランスヒューマニズム がキーワードになると考えている。 コロナ禍でデジタル化が急激に進んだが、今後はデジタル・デバイスを人体に埋め込む技術(人の能力を拡張する)、人の脳とネット空間を繋げる技術が急速に普及することが考えられる。 遠隔で人が交流できるという点や、瞬時に大量の情報を処理できる点などにおいては歓迎すべきことであるが、どのようにこれを社会に導入するかは慎重に議論すべきだと考えている。何故なら、このような技術が悪用されれば、たちまち「人の自由や権利」が奪われるからである。 科学者、研究者、技術者だけでなく、今こそ人文科学系の学者や研究者を交えて議論した方が良いと思う。今回の日本学術会議に関わる人たちの一部が、中国政府に間接的にも協力していたという事実は、科学者、研究者、技術者だけの判断を仰ぐことは危険を伴うことを示唆しているように思われる。
I-102	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	トリリオンセンサ社会に象徴される多量のセンサーの社会実装。 これにより、安全や健康、自然環境や流通などの様々な問題が解決もしくは効率化されると考えられる。 エネルギーハーベスティングを用いた無線センサへの電源供給。また多量のセンサ情報の同時送信における通信障害の改善。
I-103	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	ポスト Moore の法則時代の新規情報端末。 磁性体を使った磁気メモリにて微細化とは異なる軸で展開。 情報書き込み技術と読取り技術、両輪での性能向上。書き込みはいかに低消費電力化できるか、読み取りはいかに信号 0/1 の電位差を増やせるか、である。
I-104	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	レジレス店舗 顔認証で入店し商品を手にとって退店するだけで決済が完了するシステムであり、レジの人件費削減や店内の混雑を軽減させる効果が期待できる。 (NEC 等、顔認証を活用した「レジレス店舗」のシステムを開発している。) 起こりうる消費者トラブルを想定し、契約の成立の定義について見直しや共通認識が必要である。
I-105	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	遠隔人間支援技術 AI 等を用いた人間と機械の協調のための技術 人間と機械の共生のためには、双方による歩み寄りが必要である。具体的には、人間は機械やロボットを信頼する(安心して触れるなど)、機械は人間の予測不可能な動作を認識し対応する、ということが必要になる。この両者を実現する技術が確立しない限り、最先端の技術は人の仕事を奪うだけであり、人々の幸せを実現する社会を構築することはできない。
I-106	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	現実世界をバーチャル世界に投影する AR の逆 現状だと、あつ森のようにバーチャル内で拡張性のあるサービスはあるが、実際にはその拡張は事前にプログラムされた内容に基づいて行われるものであり、自分の部屋をそのまま、既存のサービスに乗せることが出来ない。しかしながら、映像処理技術の向上により、いくつかのカメラ映像を組み合わせることで 3 次元映像を作るなどが出来ているため、現実世界の映像を簡易に CG 化し、既存のサービスと互換性をもったオブジェクトを生成する技術が出来ればよい。
I-107	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	高度な自動翻訳機 AI 技術等の進化もあわさり、あらゆる言語と同時通訳が可能となる。これにより、意思疎通の深化が可能となり、経済社会活動の様々な領域で求められる活性が実現できよう。

I-108	10年未満	注目科学技術	子どもたちへのアダプティブラーニングの実現 GIGA スクール構想によってハード面については画一的に導入されたが、今後の方向性として、それらの機器を用いたアダプティブラーニングの実証が求められる。ビッグデータを基に、子ども達一人一人に応じた学習支援が実現できれば、学級担任や教科担任の力量に左右されることなく、イノベティブな人材育成が可能になると考えられる。
		ブレイクスルー	ICT 機器に対する学校教員の意識改革と、教育現場におけるソフトウェア・システムの整備が必要
I-109	10年未満	注目科学技術	市民によるデータのクラウドソーシング 。陸域・海域の気象予報は数値モデルによる精度改善が進んでいる。データ同化により衛星画像や気象観測所のデータを取り組む仕組みが大きく寄与しているが、このような観測ではローカルな現象の観測に限界がある。一方で、安価な観測システムを広く市民が観測し、それを取り込む仕組みをつくることで観測網は大幅に広がる。たとえばゲリラ豪雨を予測するための雲情報を市民が撮影して、投稿する仕組みをウェザーニュースが実装している。スマホの普及により、もっと多様な観測情報があり得る。
		ブレイクスルー	課題は既存の高精度観測データと低精度となる市民観測を、精度に応じて上手に活用する仕組みである。ベイズ推論の仕組みの中で統合的に扱う方法論が求められる。
I-110	10年未満	注目科学技術	実用的なスマートコントラクト
		ブレイクスルー	・コンセンサスアルゴリズムの再考 ・End-to-End トラストの構築
I-111	10年未満	注目科学技術	手話の認識と音声への翻訳、多言語手話の翻訳
		ブレイクスルー	3 時限画像処理の実現とカメラの価格と小型化
I-112	10年未満	注目科学技術	情報技術の急速な進歩に人がついていけず、社会の様々なところで分断を引き起こし、乖離や不安感を増大させている。この問題を軽減させるためには、 人の心やコミュニケーションに焦点を当てた技術の進歩 が期待される。この技術は、スマート化・高性能化・効率化とは異なる軸で評価され、人と人のつながりを深化させ、心に安寧をもたらすものである。
		ブレイクスルー	まだブレイクスルーと思われるものは存在しないが、機械を介して人と人をつなげる技術は開発されている。
I-113	10年以降	注目科学技術	人と人のコミュニケーションをストレスなく評価、より良いコミュニケーションに誘導できる技術
		ブレイクスルー	具体的なブレイクスルーのイメージが持てないでいます。もしかしたらいわゆる科学技術ではないところに解決の糸口があるのかもしれませんが
I-114	10年未満	注目科学技術	人の身近にあって、その人の意図を推定し動作を補助・代行する装着型・モバイル型・据え置き型のロボット装置
		ブレイクスルー	幾つかの特定動作を予め候補として持ち、非侵襲的な手段により収集した視覚・力覚情報に基づくユニバーサルな人の意思推定技術の開発。高信頼性、低価格、軽量、省アクチュエータなメカニズムの設計・製作技術の開発。
I-115	10年以降	注目科学技術	超高精細フルカラーホログラフィー スマホやテレビなどの通信・放送分野、さらに離島などの遠隔医療や手術などの高度医療の分野で高精細の3D 映像の実現が期待されている。現在、スマホでは、200 万画素2K(フル HD)の 4 倍の4K (800 万画素)が普及し、放送や医療の分野では、2K の 16 倍の8K(3,300 万画素)がすでに実用化されている。今後は、さらなる高い画素数を持つ 32K や 64K などの空間光変調器(SLM: Spatial Light Modulator)を用いたホログラフィーによる3D 技術の発展が期待される。この超高精細フルカラーホログラフィーの技術は、今後の通信や放送、医療分野の状況を一変させる可能性がある。今後、高い画素数を持つ SLM を実現するためには、液晶デバイスなどの現状 3μm ピッチ程度の画素サイズを 1μm ピッチ以下までに微細化するとともに、デバイスの駆動技術、信号処理技術の開発のほか、ミリ波などアンテナ技術で活用されているフェーズドアレイの技術を光に応用したビームステアリング(Beam-Steering)の開発が不可欠である。この分野では MIT など欧米の大学が先行をつけているが、最近ではソウル大やサムスン電子など韓国勢も力を入れてきている。 https://www.nature.com/articles/s41467-020-19298-4 日本も、官民を問わずこの分野の研究開発へのサポート期待したい。

		ブレイクスルー	今後、高い画素数を持つ SLM を実現するためには、液晶デバイスなどの現状 3 μ m ピッチ程度の画素サイズを 1 μ m ピッチ以下までに微細化するとともに、デバイスの駆動技術、信号処理技術の開発のほか、ミリ波などアンテナ技術で活用されているフェーズドアレイの技術を光に応用したビームステアリング (Beam-Steering) の開発が不可欠である。また、レーザを用いずに LED などの一般的な照明器具、蛍光体などの発光や太陽光などの自然な光を利用したホログラフィーの研究開発も注目される。
I-116	10年未満	注目科学技術	当方の専門外ではありますが、 リアルタイム自動翻訳技術 は、言語の垣根を越えて世界の人がコミュニケーションできる注目技術と思っています。
		ブレイクスルー	基本的には大きなブレイクスルーは無くとも、発展すると思います。ただしAI技術に根差したものであるため、データベースの拡充が翻訳の精度を大きく左右しています。日進月歩で高度化していくはずで。
I-117	10年以降	注目科学技術	流体を用いてホースロボット(索状ロボット)を浮遊させ、火災消火を行う技術 。具体的には東北大学田所研究室が研究開発を進めている Dragon Fire Fighter である。
		ブレイクスルー	法的な問題としてのブレイクスルー: 基本的に、消火技術は消防法や建築法などの法令法規によって、消火器と呼べるもの、設置することで建築物が法的に認可される消火設備などが事細かに決まっており、その法令法規をパスできる技術しか、民間防災企業はその技術開発にほとんど取り組まない(または興味が無い)。そのため、新しい消火技術が導入されやすいように、また研究資金が投資されやすいように規制が緩和されることは重要かと考えます。
I-118	10年未満	注目科学技術	バーチャル空間を日常生活に活用する科学技術
		ブレイクスルー	身体適合性の高いデバイス
I-119	10年以降	注目科学技術	ニューロモルフィックコンピュータ 。特にロボット等実社会での利用。
		ブレイクスルー	素子の 3D 積層による大規模化。現状でも小型のチップは販売されているが、実用的な計算ができるレベルにない。
I-120	10年未満	注目科学技術	プログラマブルハードウェア活用による IoT システムの高性能化及び高電力効率化
		ブレイクスルー	要件定義、ハードウェア・ソフトウェア開発、運用を収容可能なクラウド基盤の確立
I-121	10年未満	注目科学技術	プログラムマネジメント・プログラムマネジメント・ポートフォリオマネジメント 。個別の技術を束ねたり、優先順位等をマネジメントする技術により、より効果的な成果を生み出すために必要である。
		ブレイクスルー	学際的な考え方が必要となる。
I-122	10年以降	注目科学技術	既存のコンピュータに組み込み可能な 手のひらサイズの量子コンピュータ・アクセラレータ
		ブレイクスルー	量子コヒーレンス時間の延長
I-123	10年以降	注目科学技術	光子を用いた量子コンピュータの開発 。現在、google やインテルを始め、超伝導量子根ピュウターの開発が進められているが、真空・極低温装置が必要、通信には光子への変換が必要という課題がある。一方、光子を用いた場合、変換を必要とせず量子コンピューターからそのまま通信を行える可能性がある。
		ブレイクスルー	光子を用いた量子コンピュータでは、汎用計算や大規模化が困難という課題がある。確実に動作する2量子ビットゲートや大規模化が可能になれば、量子通信への変換を必要としない量子コンピューターの開発が可能になると考えられる。
I-124	10年未満	注目科学技術	超電導デジタル回路を用いたコンピュータ・システムの高度化、実用化
		ブレイクスルー	超電導デバイス素子の微細化、回路設計自動化、冷却効率の改善
I-125	10年以降	注目科学技術	万能量子コンピュータのハードウェアの完成 。
		ブレイクスルー	綺麗な量子ビットの作成の実現。誤り訂正符号の確立。大規模化。もちろんそれらが達成したとしても応用するためのアルゴリズムが十分に準備できているかも重要。

I-126	10 年 以 降	注目科 学 技 術	<p>量子コンピュータを用いた様々なシミュレーション。特に、従来の古典コンピュータで実現しなかった生体内反応の量子化学計算によるメカニズム解明。</p> <p>生体内における窒素固定や光合成など、食料問題・エネルギー問題に関わる重要な現象のメカニズムを明らかにするためには、その反応機構を解析する必要がある。しかし、現存する(古典)コンピュータでは、これらの酵素の計算は定性的にすら行えない。なぜなら、反応中心に多数の金属原子を含んでいるため、波動関数を1種類の電子配置で書けないためである。</p> <p>このような物質の計算を行うためには、「多参照の方法」と呼ばれる量子化学計算が不可欠であるが、このアルゴリズムは量子コンピュータと大変親和性が高いことが示唆されている。</p> <p>量子コンピュータを用いた多参照の計算が実現すれば、窒素固定や光合成のメカニズム解明に大きな進展があると期待している。</p> <p>また、メカニズムの情報を元に、生体物質を模倣した構造を合成することで、エネルギー問題解決に向けた新規物質の開発が期待できる。</p>
		ブレイク スルー	<p>①量子コンピュータと親和性の高い量子化学計算アルゴリズムの開発(ソフトウェアのブレイクスルー)。</p> <p>または、②量子コンピュータの量子ビットの個数の増加(ハードウェアのブレイクスルー)。</p> <p>②を実現するための量子ビットの素材の開発もブレイクスルーに繋がるかもしれない。</p>
I-127	10 年 以 降	注目科 学 技 術	量子ゲート方式コンピュータ の実用化に向けた研究開発
		ブレイク スルー	量子ビット数の大幅な増加を可能とするデバイス、アーキテクチャ、製造、制御技術。
I-128	10 年 未 満	注目科 学 技 術	<p>NTT が中心となって進めている IOWN 構想である。AI を含む情報通信技術(ICT)の発展が今後の世界に重要であることは明らかであるが、それにエレクトロニクスと光技術(フォトニクス)を融合して新展開を図ろうとするものである。これまで ICT の発展を支えてきたエレクトロニクスの限界、すなわち集積化においていわゆるムーアの法則を維持できないとの危惧が背景にある。従って、その要諦は光集積回路などの光情報処理技術の活用である。電子の伝導を用いたエレクトロニクスは、非常に大雑把に言えば電子の大きさが小さいためデバイスの微細化が容易であり、ナノテクノロジーの主役である Si 系の加工技術の目を見張る発展もあってコストの低下も著しかった。高速性に優れた光を用いたフォトニクスは、伝送路としての光ファイバーの利用に留まり、通常使われる光の波長が数百ナノメートルと長いことからナノ空間への閉じ込めが困難で、演算などへの適用は研究レベルに留まっていた。しかしながら、ナノフォトニクスと呼ばれる微小光素子を実現する技術、方法論が成熟した昨今、漸く実用化へのスタートを切ることとなった。IOWN 構想では、オールフォトニクスネットワークの名称で、その概念が語られている。</p> <p>この科学技術の特長は、エレクトロニクスかフォトニクスかの択一ではなく、両者の融合にある。これは近年のノーベル物理学賞においても見られ、例えば、光周波数コム技術の開拓によって、数百テラヘルツの可視光の周波数をヘルツ以下の単位で計測できることとなった。これには、フォトニクスの主役であるレーザーとエレクトロニクスで多用されるスペクトラムアナライザの融合が鍵であった。これを利用して、光格子時計という我国発の先端技術を用いれば、時刻を刻む精度を 18 桁まで上げることができる。この精度は、一般相対性理論が予測する重力による時間の遅れを検出可能で、重い元素の探索が可能など、異次元の応用が拓かれる可能性がある。この点も、IOWN 構想に盛り込まれている。</p> <p>上記の光格子時計に留まらず、光通信技術とそれに関わる半導体レーザーの開発、実用化においても、我国の貢献は非常に大きいものがあつた。この意味でも、エレクトロニクスとフォトニクスを融合した科学技術は、我国が世界の先頭を切って推進するにふさわしいものである。</p>
		ブレイク スルー	<p>大雑把に言えば、(質量を持たない光を使った)フォトニクスは(有限な質量を持った電子を使う)エレクトロニクスに比べて、その高速性は圧倒的であり、光同士あるいは透明な材料との相互作用が小さいことから、信号の混信や伝達損失の問題が回避できる。従って、伝送路としての光ファイバーがいち早く実用化し、光通信技術と呼ばれている。一方、信号同士の演算が必須な情報処理において、この特長は欠点となってしまふ。すなわち、光信号の演算処理が容易でない。そもそも、真空中では光同士は相互作用を生じないため、光信号と光信号の間で相互作用を起こすには、間に物質が存在する必要がある。この際、2 つの同一な光信号を足しても信号が 2 倍にならない(非線形な)現象が生じるが、これを非線形光学応答と呼ぶ。この応答を発現する性能は光学非線形性と呼ばれており、これが大きな材料を探索することが課題となる。この問題解決には、以下のような手法が知られている。</p> <p>第一に、物質を構成する分子そのものを設計・合成する化学的な手法、あるいは結晶を設計・成長させる物性物理的手法など、物質科学からのアプローチがある。これには理論計算やいわゆるマテリアルインフォマティクスも活躍しているが、決定打はな</p>

			<p>い。未だに、最適な分子構造あるいはその配列構造が探索されている。固体材料としても、高温超伝導で有名ないわゆる強相関電子系は有力であるなどの指摘もあるが、探索の途上である。</p> <p>次に、光や物質の微細化による非線形光学応答の増強が挙げられる。素朴には、光を狭い物質中に閉じ込めて両者の相互作用を増大させる目論見と捉えられる。この方向が、いわゆるナノフォトニクスである。光の波長程度の周期構造を作製するフォトニック結晶、さらに微細な構造を原子に見立てて配列させて光に対する新物質を創成するメタマテリアル、それを作製しやすいように二次元化したメタサーフェスなど、色々な手法が考案されている。しかし、まだ桁違いの性能に至っているものはない。</p> <p>上記の現状において、実際には光学非線形性の大きさのみならず、その応答速度も重要であることを追記しておく。例えば、光照射によって相転移を生じるような場合、非線形光学応答も巨大になるが、応答速度が遅くフォトニクスのメリットが得られない。従って、高速性を備えた巨大な光学非線形性の実現が求められている。</p>
I-129	10年以降	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>AIによる構造最適設計</p> <p>AIがもたらす解には一般的に物理的な意味を持たない。つまりその解と物理的な意味合い(整合性)が一致することができればよいのだが。</p>
I-130	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>ディープラーニング手法の一つである、敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Networks)</p> <p>少し前から評判になっているので、詳細は解説する必要はないと思われるが、単なる機械学習や画像生成の手法としてだけでなく、人間が脳内で行っているリハーサルのモデル化や他者とのインタラクションモデルとしても活用できるような、幅広い応用範囲がある。</p> <p>機械学習以外の分野の人たちが、柔軟かつ簡便に使えるモデリングツールの開発。また、現状ではできあがったモデルの構造を分析することができないので、ディープラーニングのモデルを構造分析する手法。</p> <p>まだ、モデルをリアルタイムに発展させていくことができないため、逐次学習のための手法。</p>
I-131	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>デジタルデータの信頼性技術:</p> <p>1000年程度の長期間にわたりデジタルデータを健全に保管する技術。人類のもつデジタル情報を預ける記憶媒体の寿命が三年程度であることを知る人は少ない。大きな問題であると思う。また、情報流出を防ぐ情報セキュリティ技術および通信技術の整備は、急務である。</p> <p>国民および国内科学技術研究者、および関係する人間が、重要情報技術の国内内製化の重要性に気づくこと。また、それをやろうとする気概と機運。</p>
I-132	10年以降	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>感性的忠実性が高い高効率映像圧縮技術およびその国際標準化</p> <p>機械学習を用いるアプローチを採用する場合、計算量が膨大であり、ハードウェアの性能向上が必要</p> <p>感性的忠実性の高さを算出する客観評価指標を開発する必要があり、そのためには、大規模な主観評価実験データが必要</p> <p>国際標準化するためには、実用的な計算量に抑えられている必要があるとともに、万人が利用しやすい方式にする必要がある</p>
I-133	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>機械学習の応用が様々な分野への広がることで、これまでには考えられなかったほどのスピードで各分野の技術進展が起こることが期待される。</p> <p>現状では、機械学習を適用する分野に沿った具体的なデータの与え方を個別に考える必要がある。このような制限を出来る限り緩め、あらゆる分野に万能な機械学習の手法が登場することがあれば、その影響は大きい。</p>
I-134	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>具体的な技術ではないが、社会の幸福に資するための技術。ブロックチェーン技術をベースに個人認証、電子政府等を実現</p> <p>技術よりは社会からの信頼</p>
I-135	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>自然言語によって任意の画像を意図に合わせて編集できるシステム</p> <p>DALL-Eなどの枠組みがGPT-3などの言語モデルに基づく知識から提案されるに至っているが、実際には詳細な意図が何を指すかについて詳細に言語理解を行う枠組みが必要である。</p>
I-136	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>深層学習に基づく人工知能技術と、実空間で動作するロボット技術を融合させた知能ロボティクスの研究</p> <p>現在の深層学習技術は単なる写像の学習で、GPT-3などの言語モデルベースの知識ベースもどのような知識がどのように構造化されるかが明確でない。これに対し、ロボット自身の意図に基づき知識を構造化するような枠組みが必要である。</p>

I-137	10年未満	注目科学技術	様々な量子物理現象を高精度・高速にシミュレートできる 量子シミュレータ に注目している。特に光を用いたアプローチは、高精度制御、室温動作、ノイズ耐性といった面で、大きな利点を有する。比較的小規模(数十量子ビット)なものでも、既存のスーパーコンピュータを超える能力を有することが期待でき、それらは10年未満の実現が可能だと思われる。
		ブレイクスルー	電気駆動型の高性能な単一光子源が、実現されると、使用可能な光子数を簡単に増やすことができるようになり、研究が一気に進展することが予想される。加えて、シリコンチップといったCMOSコンパチブルな素子上に単一光子源が集積化できるようになると、光量子回路のチップ化と合わせることで、飛躍的な大規模化が可能になると予想される。
I-138	10年未満	注目科学技術	ソフトウェア無線(SDR:Software Defined Radio) に大変注目している。ソフトウェア無線(SDR)とは、無線システムのデジタル化の比率を高めてソフトウェアでシステム機能を変更することにより、単一のハードウェアで複数のシステム機能に対応できるマルチモードの無線システムを実現することである。
		ブレイクスルー	無線デバイスのハードウェアとソフトウェアの両方の技術のブレイクスルーが必要。

付録5 分野別アンケート結果一覧(マテリアル・デバイス・プロセス)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術=「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー=「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
M-1	10年未満	注目科学技術	3次元(3D)プリンティング技術、付加製造技術(AM:additive manufacturing)を発展させる方向性として、3Dプリントされた構造物に何らかの機能性やの応答性を付与することを旨とした 4Dプリンティング 技術が提案されている。従来の加工技術との比較ではなく、3D技術としての特質を問うものであり、本格的に産業となるきっかけになるのではないかと期待している。
		ブレイクスルー	現在の3Dプリンティングでは粉末を基材とした材料成形が行われているが、バルク材やソフトマテリアル(必ずしもすべて同時である必要はない)含めた材料系の展開が必要である。特に異種材料間の接合技術は現在も様々な分野において課題として挙げられているが、今後はさらにその重要性が高まるものと考えている。
M-2	10年未満	注目科学技術	AIを活用した自動有機合成
		ブレイクスルー	既にいくつかの分子がAIを用いて自動有機合成されているが、まだ合成可能な分子は限られる。より後半な分子の自動合成にはAIが予測できる分子の入力&回帰が必要と思われる。どのように化合物を入力するか、その変数のとり方が最大の課題となるが、より有効な変数を見だし、それに適した回帰モデルが確立すれば、ブレイクスルーとなるかもしれない。 なお、本分野は日本が圧倒的に立ち遅れている分野である。有機合成は医薬・有機ELなどのデバイス分野などの根幹を支える分野であることから、本腰入れて関連研究者へサポートをしないと、20年後の我が国の科学分野は多岐にわたって後進国となすことを警鐘しておきたい。
M-3	10年未満	注目科学技術	シミュレーション技術を活用した高度生産技術 . これまで試作を繰り返していた部品や金型の加工において、実加工を行わずともその完成品の精度や面の美しさを予測できるようになりつつあり、その結果、生産性の大幅な向上が期待される。
		ブレイクスルー	シミュレーション技術を活用するための学術的基盤の確立および分野横断的な協力によるシミュレーション環境の構築
M-4	10年未満	注目科学技術	トポロジー最適化の研究で得られた知見が広く実践的に設計分野に広まれば、目的を効率的に果たすものづくりが可能 になり、サステナブルな社会の実現に貢献できると考えられる。
		ブレイクスルー	課題を共有する観点で、様々な工学分野の連帯が必要である。
M-5	10年未満	注目科学技術	レーザー加工 は、現在の産業を支える基盤技術として不可欠なものとなっているが、その高度化に向けたパラダイムシフトが進行中である。レーザー加工は、制御可能なレーザーパラメーターの多様性からその自由度の高さが利点である一方で、 最適条件を発見 するのが非常に困難であり、多くのマンパワーと時間のコストが必要であった。現在、NEDO、SIP、Q-LEAPで、それらを 完全に自動化 するための研究が推進されており、これらが完成した際には、レーザー加工の新たなパラダイムを、世界に先んじて日本から提唱できる可能性が多く、産業競争力の強化にもつながることが強く期待される。
		ブレイクスルー	レーザー加工条件探索完全自動化のためには、最終的には学理ベースのシミュレーターの構築が必要であるが、そのためにはそもそも物質がなぜレーザーで切断されるのかという根本的な問いに関する答えが必要である。これは、マルチスケール、マルチフィジックスの非常に難しい問題ではあるが、これを解明することが科学技術としてのブレイクスルーにつながる。
M-6	10年未満	注目科学技術	ロボットや輸送機器の軽量化に大きく貢献する金属-樹脂などの異種材料の直接接合技術
		ブレイクスルー	異種材料間の界面や表面凹凸の物理現象の解明と機能(接合強度・耐久性)の向上
M-7	10年未満	注目科学技術	金属積層造形(3D printing)技術
		ブレイクスルー	装置の低コスト化、国内技術の発展

M-8	10年以降	注目科学技術	磁気冷凍とレーザなどの集光型電磁波を用いた遠隔局所冷却技術
		ブレイクスルー	
M-9	10年未満	注目科学技術	人工知能を用いた新材料・新反応の開発
		ブレイクスルー	データベースの強化
M-10	10年以降	注目科学技術	水素使用による新しい製鉄手法
		ブレイクスルー	水素のインフラ整備が必要、現時点ではインフラ・技術面ともに整っておらず実現には時間を要すと感じる
M-11	10年未満	注目科学技術	当方は Smart Factory を含めた デジタルマニュファクチャリングに関わる科学技術 に注目している。現在のコロナ禍において改めてその必要性が問われる中で日本でも急ピッチで研究が進められている。一方で、とくに当方の専門分野である生産工学(ものづくり)分野では、ドイツやアメリカなどと比べると主導権を取れていないのが現状だと考える。これから来る”ニューノーマル”において、日本のお家芸であるものづくりで主導権を維持するためにはデジタルマニュファクチャリングの強化が必須だと考えている。
		ブレイクスルー	”加工学”では高い研究、技術力を持つ日本ではあるが、”生産工学”では海外から一歩遅れをとっていると考えている。上述したデジタルマニュファクチャリングの強化には、加工学と生産工学の融合が必要だと考えている。
M-12	10年未満	注目科学技術	半自動設計システム 。物理を基にAIがある程度、構造体やシステムを設計する。意匠も含める場合もある。
		ブレイクスルー	構造体に関しては以前より手法が開発されていたが造形が困難であった。近年、三次元プリンターによって造形が可能になり、応用範囲が広がった。
M-13	10年未満	注目科学技術	半導体微細加工技術。特に10nm以下のプロセス。
		ブレイクスルー	現行の半導体加工技術ですでに10nmを大きく下回るころまで実用化されているが、実際にはどこまでが達成されているかが不明である。5nm以下のプロセスが本当に実現されているのであれば、現実的に他の代替手法は不要であり、研究開発をSiに特化すべきである。そうでない場合には、並行して代替手法を探索することになる。
M-14	10年以降	注目科学技術	分子自在配向制御による三次元空間や二次元空間における構造制御と機能性の創出。特に、エネルギー分野や新材料開発での利用が期待される。
		ブレイクスルー	分子の集合状態での機能発現とその評価方法を確立。
M-15	10年以降	注目科学技術	無機材料(セラミックス)のソフトプロセス合成
		ブレイクスルー	手間暇掛かり、反応温度、反応時間も大きな合成コストを要する固相合成の代替合成方法として、 短時間で簡便なソフトプロセス合成の確立 。
M-16	10年未満	注目科学技術	3D Display
		ブレイクスルー	ソニーが実用化に成功。さらなる量産化にむけては、ブレイクスルーが必要。
M-17	10年以降	注目科学技術	ゲルマニウム-スズ(GeSn)混晶を用いた光電子エレクトロニクス
		ブレイクスルー	GeSn単結晶形成技術の確立。現行技術では結晶性が低く、本来の性能が発揮できていない。Siに比べて形成温度の低温化が可能であるので、結晶形成技術次第で、超高性能フレキシブルエレクトロニクス応用も期待される。
M-18	10年以降	注目科学技術	注目の科学技術は マテリアルズロボティクス 。現在の材料合成は、研究者の経験と勘に頼っており、時間がかかるため、開発の効率が低い。実験的な材料開発を、ロボットとAIが協調して実験を繰り返し、新材料を見つけるシステム。
		ブレイクスルー	ブレイクスルー以前に、この技術開発に参画する研究者や企業が増えることが第一の段階と考えられる。その後にブレイクスルーが必要な課題が見えてくるのではないかと。
M-19	10年未満	注目科学技術	長時間使用できるウェアラブルデバイス 。電池の小型化、発電・蓄電機能の高度化により、長時間使用可能になる。
		ブレイクスルー	電池の小型化、装着したまま発電・蓄電できる機能の開発、など。

M-20	10年以降	注目科学技術	分子ロボティクス ;センサー, 記憶, 演算, アクチュエーターなどの機能を DNA などの分子で構築する技術
		ブレイクスルー	機能性分子の低コスト化, 大量生産技術
M-21	10年未満	注目科学技術	有機エレクトロニクス . 現在有機 EL をはじめとしたデバイスなどが社会実装も進んでいるが、さらに研究が進めば実用に耐える有機太陽電池、有機トランジスタなどが開発されれば今までにない応用が拓けると期待できる。
		ブレイクスルー	耐久性の高い材料の開発が必須であり、そのためには分子科学に基づいた分子物理の徹底理解とデザイン指針確立が必要と考えられる。
M-22	10年以降	注目科学技術	誘電率がゼロインデックスの量子光学デバイス
		ブレイクスルー	吸収率の高い極薄の光学フィルムは、集光技術や高分解能光学空間技術など多くの光学分野で求められている。しかし、完全吸収(>99.9%)を達成するには通常、損失が大きく厚みのある複数の光学フィルム層が必要である。そこで、高度な機能を備える新しい極薄の酸化物光学フィルムにおいて、キャリアドッピングなどを用いて、広帯域で電子的にチューナブルな応答を示す、極薄の完全吸収体の作成に使用できる、誘電率がゼロに近い(ENZ:Epsilon Near Zero)酸化物材料が現在創出している。こういう技術は広く使えるし、適切な材料群を見つけましたら、様々なレーザや量子デバイスにも応用できる。
M-23	10年以降	注目科学技術	量子センサ
		ブレイクスルー	量子センサに適した母材の探索
M-24	10年未満	注目科学技術	量子センシング 自動運転車や、人間の脳の動きをモニタリングできる携帯型スキャナー
		ブレイクスルー	量子コンピュータと同様、量子キュービットの確立
M-25	10年以降	注目科学技術	量子科学技術全般 に注目している。現状では基礎研究段階のものが多いが、社会実装にむけて、特に IT、DX、AI などどのように連携してくるのか、注目している。また、日本として量子技術分野に関してどの技術で世界をリードできるかも注目する。
		ブレイクスルー	日本では量子コンピュータでも量子通信でも要素技術に注目されるが、キーラーアプリのソフト開発はブレイクスルー、イノベーションと言う観点で非常に重要である。良いシステムを開発することが量子技術に関する日本のプレゼンスを確保できると思う。
M-26	10年以降	注目科学技術	量子技術を利用した、高感度・広ダイナミックレンジセンシング技術 これにより、生物の細胞や神経信号レベルの挙動をリアルタイムかつ低侵襲で計測可能になると考えられる
		ブレイクスルー	光学的な計測が電氣的な計測に置き換わり、システム全体の小型化が実現できること
M-27	10年以降	注目科学技術	量子計算機とそのアルゴリズム開発
		ブレイクスルー	実用的な問題に対する、量子計算機上での量子超越を実現するアルゴリズムの開発
M-28	10年未満	注目科学技術	量子情報、量子センシング
		ブレイクスルー	量子センシングは10年未満に実現される一方、量子情報素子は10年以降に実現されることになると思われる。量子エラー訂正技術、集積化技術などのソフト・ハード面からのブレイクスルーが必要。
M-29	10年以降	注目科学技術	量子生体センシング技術
		ブレイクスルー	原子核制御技術
M-30	10年以降	注目科学技術	インフラ等構造物の劣化・破壊予兆・予測技術および自己修復材料技術 . 人手不足をサポートする技術として注目。
		ブレイクスルー	超高感度・超分解赤外分光、ノイズ低減・信号分離、自己修復アクチュエーションが総合的に実現すれば、人手不足のサポートに繋がる。反面、総合的でない場合は、なかなか人手不足に繋がりにくいと予測する。

M-31	10年未満	注目科学技術	<p>次世代光源およびセンサ開発: 生体などバイオセンシング、セキュリティ分野において光とくに近赤外+赤外を用いた光技術(光源とセンサ・ディテクタ)の確信が重要である。光センシングの基本はシンプルで、1.物質への光照射、2.物質相互作用した光の検出、3.シグナルの解析(今後はMIや機械学習と組み合わせると多変量の評価や診断するシステムが検討されている)である。現在の例としては2ないし3色のLED光源を用いた血中酸素センサーなどがあり、様々な光エネルギー帯を使うことでセンシングできる物質の種類も感度も増加が期待される。</p> <p>その光源開発では、従来の”単色”のレーザー(LED+LD)技術に加え、必要な光帯域のみをすべてカバーする小型高出力な”ブロード光源”が求められる。</p> <p>また様々な光の帯域、特に近赤外帯域や赤外に対応できる検出器の感度は不十分であるため、そのセンサ技術開発(新規の半導体フォトダイオード開発や検出技術開拓など)が重要。</p>
		ブレイクスルー	<p>光センシングは原理がシンプルであるため歴史も古く用途も多岐にわたる。汎用性が高いが確信的なブレイクスルーに至っていない理由はいくつかある。光に関して言えば効率的でかつ用途に合わせた光源出現がないことである。現状は目的の光を、単色のLD(レーザーダイオード)かLEDの組合せで得るか、あるいは高熱源であるハロゲンランプを分光して光ファイバーで誘導して利用するケースが多く、これらを広帯域で任意の光成分だけを持つチップサイズのLED光源+チップ分光器で実現できれば光センシング応用に一定のブレイクスルーが起ると期待している。</p> <p>様々な基盤技術が複合化して達成される科学技術において、例えば、光センシング分野では光源の開発だけでは成り立たないのは必至である。光ディテクタ開発や実際のターゲットセンサ(社会的なニーズに即したターゲット)などセットで研究開発をできる枠組み、コンソーシアム構成が重要と考えるが現状そういった枠組みが少ないように思える。</p>
M-32	10年未満	注目科学技術	<p>in vivo 光イメージング: 生体内の精密可視化は、生命科学分野の鍵技術である。CT, MRI, X線に比して、1細胞イメージングができる in vivo 光イメージングは、近年急激に技術進歩があり、しかも日本から先端技術が世界へ発信されている。しかし、その技術は応用に注目が集まりその進歩の根源である、材料技術にはスポットが当たっていない。</p>
		ブレイクスルー	<p>発光イメージング材料の創製が必要である。イメージング技術は現状ではほぼ常法となっており、新規材料によるブレイクスルーを待っている。最近、生体内深部可視化ができる材料が提案されているが、最適化されているわけではない。大型動物への応用や最終的なヒトへの応用にはいまだ少数的な技術支援が必要であろう。</p>
M-33	10年未満	注目科学技術	<p>in vivo 光イメージング技術は、精密な生体内深部可視化を可能とした先端技術であり、米国で2017年に報告された、ヒトの臓器を豚体内で製造するための計測技術に、研究段階では必須になる技術である。この先端技術は日本が保有しているが、その技術育成体制は中大型研究費はおろか、科研費すら得られておらず大変脆弱である。</p>
		ブレイクスルー	<p>技術はあり、権利も確保しているが、研究費が不足して、新技術の育成と特許の維持がままならない。単に研究費だけの理由でブレイクスルーが損なわれている。</p>
M-34	10年未満	注目科学技術	<p>Page antibody next generation (PhaNGS)は細胞膜上のたんぱく質の網羅的な検出を可能とする技術で、質量分析や抗体を用いる従来の技術と比べて安価で簡便な方法として期待されている。UCSFのJ. A. Wells教授らのチームによって開発された。大量の細胞を必要とし、たんぱく質の3次元構造情報は与えない質量分析と対照的に、PhaNGSは抗体と同様に膜上のたんぱく質の構造情報も与える利点がある。細胞の病理や環境応答、発生段階のダイナミクスの解明に寄与すると期待される。</p>
		ブレイクスルー	<p>現在の技術では細胞膜上のたんぱく質に限定される。(～4000種類)細胞内のたんぱく質にも応用できるようになるとさらにパワフルなツールとなるだろう。</p>
M-35	10年未満	注目科学技術	<p>ウェアラブルバイオセンシングデバイス。 パッチ型のセンサで、さりげなく健康状態などでセンシングできるシステム。</p>
		ブレイクスルー	<p>10年以内の実装に期待できる。 ウェアラブルだけでなく、車内で空間のセンサ配置が求められている。 無線給電システムの開発が重要である。</p>
M-36	10年以降	注目科学技術	<p>ウェアラブル型脳磁計測技術の実現が現実味を帯びている。光ポンプ磁気センサ、ダイヤモンド量子センサ、トンネル磁気抵抗センサなどの次世代磁気センサの高感度化が飛躍的に進んでおり、室温で脳や心臓などの微弱磁場計測が可能になっている。従来の電気的手法と異なり、非接触で生体情報を得られることから、ポストコロナ時代への適合性が高い。また、将来的にはウェアラブル化され、簡便に高空間分解能の脳情報が得られる可能性がある。</p>
		ブレイクスルー	<p>センサ素子の信号/ノイズ比の改善に加えて、外乱ノイズをキャンセルする信号処理技術、得られたデータをエッジまたはクラウドで解析するためのAI技術の開発が必要である。</p>

M-37	10年以降	注目科学技術	<p>コヒーレントラマン散乱顕微鏡による非侵襲細胞分子イメージング。 皮膚の非侵襲計測でヘルスケア領域の活用を視野に、国内外の技術を検討しているが、光学や分光専門の企業での実施はできない先端技術であり、国内外の一部大学の先端領域で検討されている。自分たちは企業のターゲット一致していないため医療への応用を想定していないが、本技術により、癌などの細胞の成分ごとのモルフォロジーの変化が伴う疾患の、非侵襲計測が可能になると考えられる。in vivo 計測で内視鏡などでできればいいが、そこには10年以上の時間がかかると考えられる。一方で、手術時の組織切片の迅速診断にはすぐにも活用できるレベルであり、米国研究チームはベンチャー企業を立ち上げている。しかし、この分野では、分子イメージングではない Optical coherence tomography 技術が専攻して医療活用をめざしてすすめており、欧州で先行している。細胞の分子種を特定できるため、コヒーレントラマンのほうが判別正確性があがると思われるが、医療領域との連携などで政治的・組織的な条件もあるとおもわれ、純粋にいいものが活用されるわけではないのかもしれない。</p>
		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> 工学研究者と医療研究者との連携 工学の研究者が新技術を臨床試験におとしこむまでのハードル 医療の研究者が工学技術を理解できないこともおおいいため、そのバッファートなる研究者も必要であるため、そこがまわっていないと考えられる。 技術的には、集光効率の向上のブレイクスルー レーザー光源の開発の進化
M-38	10年未満	注目科学技術	タンパク質構造を一時的に制御する技術
		ブレイクスルー	大気圧プラズマとタンパク質の相互作用の解明、特にタンパク質分子に着目した荷電メカニズムの解明
M-39	10年未満	注目科学技術	ナノオーダーサイズの装置を制御するナノロボティクス分野 は最近注目されてきているが、まだスタート地点にある。ナノロボットを利用することで、今後革新的な診断、治療、さらにはモニタリング技術が創出できる他、生物学における新たな観察手法の基盤にもなりえ、基礎、応用科学の両面にインパクトを与えようと思われ。
		ブレイクスルー	微細加工技術の発展によって、ナノメートルサイズの緻密な構造物を設計できるようになっており、次の課題はこれらにどのように機能性や操作性を付与するかである。工学的なアプローチはもとより、すでにナノマシーンを使いこなしている、生物、特に微生物学との融合によって、今後新たなブレイクスルーが期待できる。
M-40	10年未満	注目科学技術	バイオセンサは 生体の有する分子識別機能を活用したセンサ であり、そのセンサを用いて分子の検出や測定を可能にするデバイスである。生体や環境などの状態を分子レベルで精密に計測できるため、従来のセンサでは測定できなかった項目を測定可能にする。臨床診断、環境モニタリング、食の安全安心などに応用が期待される。
		ブレイクスルー	センサの精度、長寿命化。デバイスの小型化、省電力化、メモリの増加、データの転送。
M-41	10年以降	注目科学技術	マテリアル分野へのタンパク質の利用。 近年自在な立体構造設計、さらなる高次構造への集合化などが報告されている。
		ブレイクスルー	マテリアルとして有用なタンパク質を選定、開発、改良する技術、低コストでタンパク質を大量に生産、精製する科学技術が必要
M-42	10年未満	注目科学技術	再生医療に資するバイオマテリアル。 遺伝子治療などの生物学的手法では治療困難な疾病に対する、あらたな治療技術。
		ブレイクスルー	技術的なブレイクスルーよりも、工学と医学の連携強化が重要。その点について米国などに比べて大きく遅れており、有用な工学技術が活かされていない。
M-43	10年以降	注目科学技術	細胞内分子を直接可能な光マニピュレーション技術 集光レーザービームの光圧はマイクロメートルサイズの微粒子を溶液中において操作する手法として知られています。最近、細胞内や細胞表面の分子に直接レーザーを照射することにより、その分子の動きを抑制し、分子集合体をレーザーの集光位置に捕捉可能であることが示されており、細胞内分子を自在にその場に局在化させ、分子機能を直接的に操作できる可能性が示唆されています。
		ブレイクスルー	集光レーザービームの光圧は捕捉対象物質の体積に依存するため、溶液中において1個のナノ粒子を捕捉し、操作することは以前として困難です。これらの実現のためのブレイクスルーとして、表面プラズモン共鳴や捕捉対象物質との共鳴効果を用いる方法が提案されています。シングルナノ精度での分子操作へのブレイクスルーにより、上述の細胞内分子操作の有用性が示されると考えられます。
M-44	10年未満	注目科学技術	生体のバイタルデータを非侵襲、侵襲問わずストレスなく計測できる技術
		ブレイクスルー	<ol style="list-style-type: none"> 違和感なく生体に貼りつけられる技術 データ取得およびデータ送信のため、必要な時に必要な電力を供給できる技術

M-45	10年以降	注目科学技術	生物の構造や機能、生態からヒントを得て、モノづくりに応用する「生物模倣」技術のうち、とくに「低炭素社会の実現」に貢献する技術やさらにエネルギー変換効率の高い「人工光合成」の技術
		ブレイクスルー	・若手研究者の育成 ・初等・中等教育における「理科」の教え方の工夫・改善(理科離れを回避する)
M-46	10年未満	注目科学技術	生物学においてイメージングは多くの知見をもたらす基本となる技術で、ここ最近でも超解像顕微鏡やクライオ電子顕微鏡の開発がノーベル賞に輝いている。 光学系と電子系の顕微鏡をどのように融合させていくか 、についてすでに取り組まれているが、作業が非常に煩雑で、まだまだ汎用性が低い。加えて、 観察しながら、物質を同定できるシステム にイメージングマスがあるが、その解像度は低い。これらの技術が発展すれば、生物学に多大な貢献をもたらすことが期待できる。
		ブレイクスルー	光学系と電子系の顕微鏡を融合させる上で、両者の視野をどのように合わせるかが課題のひちつになっており、職人技であるが、視野合わせを自動化することでシームレスになると考えられる。イメージングマスにおいてはよりピンポイントで解像度良く物質を同定できるシステムが必要であり、マスの感度とサンプル処理方法について改良が必要である。
M-47	10年未満	注目科学技術	生命深部を観察する技術 。下村脩博士が発見しノーベル賞を受賞した蛍光タンパク質と大阪大学の平岡泰博士が開発した蛍光生細胞イメージング法によって様々な生命現象が発見されてきたが、それらは薄く展開できる培養細胞か組織表層に限られており、生命の深部にはがんの再発を引き起こすが幹細胞など多様な生命現象が手付かずにて残されている。生命深部を観察できれば、生命科学を革新することができる。
		ブレイクスルー	・生命を通過して乱れた光の情報を余すところなく計測する技術。 ・AIなどを用いて、生命深部に到達・集光する光を設計する技術。
M-48	10年未満	注目科学技術	体内埋め込み型デバイスを用いたバイオマーカー測定による早期診断と病態予測 ：疾病に関与する生体内代謝産物などを体内に埋め込んだセンサーで測定するとともに、データはクラウドベースのシステムに保存され、長期にわたり健康状態をモニタリングできるシステム。健康状態を簡便に長期的にモニタリングでき、健康寿命を延ばすことにもつながる。また、治療効果モニタリングや再発予測も可能となる。
		ブレイクスルー	バイオマーカーの同定および正確な測定が可能なセンサー開発とその小型化
M-49	10年以降	注目科学技術	超高感度サーモグラフィー技術 。ロックインサーモグラフィーなどが数 mK の精度を出してイメージングできるのは素晴らしい。ただ、ロックイン技術無しでもそのれべるが実現できればよいと思います。
		ブレイクスルー	サーモグラフィーは物体の放射率補正が難しい。また、歴史ある技術なので、なかなかブレイクスルーは難しいかもしれません。
M-50	10年未満	注目科学技術	超分子センシング(分子センサー) 特に有機分子や生体機能関連物質、多糖類はキラル分子のセンサーとなる。これによりキラル分子認識・不斉光反応を行い、分子複合体(超分子)生成により超分子センシングを行う。複合体では分子認識により認識サイトが立体的・電子的に変化し、スペクトル変化を誘起するためにセンシングを直接読み取ることができる。このような超分子センサーは生体との親和性が高く、生体内の in-situ センシングにより負荷の少ない医学応用も可能である。
		ブレイクスルー	超分子センサーは、検出対象、材料が多岐に渡るため応用を見据えた開発が必要となる。センシングが求められる分野とセンサー開発分野での横断的協業が必要となる。また分子センサーに特有な弱いシグナルを克服するために、シグナル増幅機能を超分子センサー内に複合させる必要があり、さらなる研究が必要となる。
M-51	10年以降	注目科学技術	微生物と電気・電子デバイスの融合による「バイオハイブリッドデバイス」の創出 に着目しています。 近年、合成生物学と電気・電子工学の融合研究により、微生物の細胞内反応を、遺伝子組み換え技術やコンピュータ制御されたマイクロ流体デバイス等を用いて精密に制御し、細胞を「デバイス」としてセンシング、アクチュエーション、計算等の工学的な応用につなげる研究が行われています。米国では DARPA のプロジェクトが 2016 年頃から開始されており例えば、こちらのリンク https://www.darpa.mil/about-us/control-systems-and-biology のようなプログラムが始動しています。また、そこで得られたデバイスをフィールドアプリケーションに応用するためのプログラム https://www.darpa.mil/program/biological-robustness-in-complex-settings も開始しています。 このように、生物の化学反応をいかにエンジニアリングするか、という従来の合成生物の枠組みを超えて、生物と人工物の融合システムをエンジニアリングする研究が進むことで、今後「クラウド上の AI と連携する微生物システム」のような生物を材料とする高度なバイオハイブリッドシステムの実現が期待できると考えています。

		ブレイクスルー	微生物と人工物(制御用電子回路)の融合例として、近年、光(optogenetics)を利用して細胞内の反応や細胞の成長を制御する等の応用例が論文化されており、生物・人工物の双方においてバイオハイブリッド技術の実現に向けたツールが整ってきたと考えられます。(例: Miliadis-Argeitis, A., Rullan, M., Aoki, S. et al. Automated optogenetic feedback control for precise and robust regulation of gene expression and cell growth. Nat Commun 7, 12546 (2016). https://doi.org/10.1038/ncomms12546). 上記の論文以外にも、遺伝子組み替え・ゲノム編集・制御工学・マイクロ流体デバイスの融合によるバイオハイブリッドシステムの構築研究の論文化が始まっており、成熟したこれらの個別の技術が融合するフェーズに入るものと考えられます。
M-52	10年未満	注目科学技術	CO2実質ゼロを目指した燃料電池などの水素エネルギー技術開発 に注目している。政府の政策さらには国際的な動きの中でCO2削減が急がれている昨今で水素を燃料とする燃料電池普及拡大を目指して研究開発が進められている。PEFCやSOFCでは耐久性向上などの技術開発のフェーズ移行しているがさらに次世代の燃料電池として高効率な燃料電池としてプロトン伝導性セラミックスによる開発がNEDOのプロジェクトとして今年度スタートしている。
		ブレイクスルー	燃料電池開発については課題抽出がされており、その課題を解決することで実用化すると考えられる。電子リークの抑制や電極材料の開発など性能や耐久性、コスト面でより良い材料開発が求められている。
M-53	10年未満	注目科学技術	ありとあらゆるガスを検知するガスセンサ 酸化半導体をはじめとする種々のガスセンサは、古くから日本がリードしてきた科学技術である。最近では、MEMS技術を応用した超小型センサが報告されており、材料の設計、センサ駆動方法を最適化することで、pptレベルのVOCガスの検知も可能となっている。これらの技術は、バイオマーカー検知により疾病の早期スクリーニングへの応用が期待される。一方、昨今のコロナ禍により、室内の空気室監視による自動換気システムに必要なガスセンサや、CO2排出量をあらゆる工程で監視するセンサなど、IoTへの応用を含めて市場拡大のチャンスとなっている。
		ブレイクスルー	ガスセンサのブレイクスルーは、その用途によって異なるため、一概に言えないが、高選択性、高感度、長期安定性の3点を満たすセンサを用途に応じて開発する必要がある。
M-54	10年未満	注目科学技術	オールセラミック固体電池の社会実装 : 実験室レベルで、TDKが充放電可能なオールセラミック固体電池を開発した。カーボンニュートラル世界の実現に向け、従来バッテリーの課題である、漏電のリスク、重量などを克服できる技術である。まずは小型モデルの社会実装にて、モバイル・コンセントレスICチップなどが実用化できると考えられる。中型モデルでは全天候型のドローン、大型モデルでは車載バッテリーのパラダイムシフトが起り得る。更に、超大型モデルでは、家やビルなどの耐災害バッテリーとしても活用が見込める。
		ブレイクスルー	システムの大型化、システムの高出力化、製造コストの低下。
M-55	10年未満	注目科学技術	カーボンリサイクル、カーボンニュートラルを実現するためのパイオものづくり技術 (大量に、安価に、安全に作るための工学技術)
		ブレイクスルー	プロセス全体を俯瞰視した、バックキャスト的(ムーンショット的な?)な考え方による、不足技術・領域の充足。
M-56	10年以降	注目科学技術	スピンゼーベック素子を用いた革新的な温度差発電技術
		ブレイクスルー	発電性能で既存のゼーベック素子を上回る必要がある。
M-57	10年未満	注目科学技術	スピントロニクスとフォトニクスを融合技術 。Society5.0へ向けたトリオンセンサ時代では光による情報の送受信が必須となると考えるが、その際に不可欠となるメモリとしてスピントロニクス技術を高度に融合する技術。光や電気といった出入力を自由に選択できる不揮発・超省エネルギーメモリデバイスへの応用を期待。
		ブレイクスルー	スピントロニクス、フォトニクスの個々の要素技術は確立されつつあるので原理実証からモデルデバイス実証レベルは10年未満で実現すると考える。一方で、速度や消費電力、集積化、それぞれにブレイクスルーが必要であると考えられる。光による磁化制御や量子センシング技術を活用した高感度磁化センシングなどに期待。
M-58	10年未満	注目科学技術	セルロースナノファイバーを利用したコンポジット材料および透明・高柔軟性エレクトロニクス材料 。
		ブレイクスルー	セルロースナノファイバーコンポジットは耐衝撃性に課題がある。

M-59	10年未満	注目科学技術	ホウ素と水素で構成される二次元物質を水素貯蔵材料へ応用する技術。 室温でも紫外線照射で水素を放出できることが最近報告されている Nature Communications 10 (2019) 4880. https://www.tsukuba.ac.jp/journal/technology-materials/20191025180025.html
		ブレイクスルー	水素の再貯蔵方式の確立
M-60	10年未満	注目科学技術	ポスト、リチウムイオン電池
		ブレイクスルー	蓄エネルギーデバイスは、それだけが性能を上げて効果は低く、接続機器、利用システム、通信など、すべての分野が同時にステップアップすることは必要である。
M-61	10年以降	注目科学技術	リチウムイオン電池に続く次世代蓄電池として、 リチウム金属などの溶解析出反応を利用した蓄電池。
		ブレイクスルー	狙った場所に狙った量の金属を自在に析出溶解させるための、基板・金属電極界面の材料設計。
M-62	10年以降	注目科学技術	リチウムイオン電池に替わる 革新型蓄電池(酸化物系全固体電池や多価イオン電池) が期待される。全固体電池としては、硫化物系固体電解質を用いた実用化が現在最も近いが、安全性の懸念から将来的には酸化物系固体電解質の実装が望まれる。イオン伝導性や加工性の観点から克服すべき課題は多く、さらに薄膜型ではなくバルク型全固体電池での実装によってはじめて現在の液系リチウムイオン電池に置き換わる存在となり得る。一方、多価イオン電池はLiではなく、Mg, Ca, Alなど価数の大きなイオンが充放電に寄与する高容量電池であり、豊富な埋蔵量を背景に低コスト化が期待される。
		ブレイクスルー	バルク型酸化物系全固体電池では、良好な界面接合技術の確立、加工性やイオン伝導性に優れた材料探索など、現状基礎研究開発の段階であり、硫化物系固体電解質の利点を上回るような材料、簡便・省エネルギーな接合方法を開拓する必要がある。一方、多価イオン電池は電極材料の探索、材料特性の向上が試みられている段階で、サイクル安定性や実容量で課題が多い。また、詳細な充放電機構はリチウムイオン電池程解明されていないので、オペランド解析や界面評価などの蓄積が必要である。
M-63	10年未満	注目科学技術	環境負荷改善に大きく貢献する摩擦・摩耗・トライボロジーの技術と表面・界面の表面性状・表面粗さの計測・制御技術
		ブレイクスルー	・摩擦・摩耗・トライボロジーに関連する物理現象の解明 ・表面・界面の表面性状・表面粗さと物理現象・機械的性質の相互作用の解明
M-64	10年以降	注目科学技術	希少元素の代替技術 有用な材料にはいまだ希少な元素が不可欠であるものがたくさんある。希少元素の回収・再利用の技術も重要であるが、根本的な元素の代替技術の開発が必要である。
		ブレイクスルー	生物活性・材料特性等発現の要因となる元素の性質の理解
M-65	10年以降	注目科学技術	光反応を用いて二酸化炭素を消費し有用化合物を生成する人工光合成。 分子触媒では、光増感剤、還元剤、触媒を組み合わせる系が検討されている。半導体触媒では、助触媒などを利用した高効率化が検討されている。
		ブレイクスルー	分子触媒を利用した人工光合成はまだ効率が数%と非常に低く、また耐久性にも疑問がある。半導体触媒を利用した人工光合成系は、紫外光領域を利用した場合は効率が低いものも報告されているが、可視光領域の光を上手く利用できていないためトータルでの効率は低い。これら乗り越えるブレイクスルーが必要である。
M-66	10年未満	注目科学技術	高効率・低コスト・小型の発電素子(光電気変換, 熱電気変換等)の開発と汎用化。
		ブレイクスルー	私の知見からは分からない。
M-67	10年未満	注目科学技術	高効率熱発電デバイス(熱で発電する半導体デバイス)
		ブレイクスルー	結晶の熱発電理論の確立
M-68	10年以降	注目科学技術	高電圧水系電池。 近年、水の電位窓拡張(耐電圧性向上)の手法が多く開発され、従来は2V以上の高電圧化が困難とされてきた水を電解液溶媒とした二次電池の大幅な高電圧化の実現可能性が高まっている。水は安全性の面で有利であり、リチウムイオン電池のような発火事故のリスクを大きく減らすことができる。
		ブレイクスルー	水の電位窓拡張というブレイクスルーは既に達成されたが、その機構については不明な部分が多い。液体の機能はどう決まるのか、どう設計すればよいのか、を明らかにする液体材料化学の確立が必要であろう。

M-69	10年以降	注目科学技術	今後注目される科学技術について、電気電子材料関係では 原子力電池 が挙げられる。宇宙や地中深くなど隔離地など簡単に近づけない保守メンテナンスが困難な場所のほか、近年のIoT化に伴う種々の機器の小型電源として期待されている。原子力電池の原理は放射線の種類によって異なるが太陽電池に似通っており、半導体のp型とn型の組み合わせによって放射性物質から放出されるベータ線(電子)を受けて生成される電子と正孔を外部回路に引き出すことで電池として利用できる。利点としては、発電能力の意味での寿命は放射性同位体の半減期によるため充電の必要がなく寿命が非常に長いこと、電池の材料には廃棄物となっている放射性物性を利用できることなどが挙げられる。材料としてはワイドバンドギャップ半導体である高い放射線耐性を持つダイヤモンドが挙げられている。半導体ダイヤモンドの合成、ドーピング制御やデバイス化のプロセス技術については、日本が先導している領域も多いため、今後の動向に注目である。
		ブレイクスルー	量産化されるには製造プロセスの確立が必要。また、放射性同位体を組み込むため安全性の確保と実証が必須。
M-70	10年未満	注目科学技術	酸化物イオン導電体を用いた酸素分離デバイス に注目している。酸化物イオン導電体を用いた酸素分離技術そのものは、歴史が古く、既にこの技術を応用した空燃比制御用酸素センサは広く普及している。しかし、深冷分離や吸着法に変わる酸素濃縮デバイスとしては、最近やっと実用化が始まった段階である。本技術は、酸素分離、濃縮を小型なデバイスで、連続的に行えるため、医療用の酸素などオンサイトでの酸素製造が必要となる場面での活躍が期待される。本技術のブレイクスルーとして、低温で酸化物イオンを伝導する固体電体質材料の開発と低温作動に有用な電極材料の開発の二点が挙げられる。最近では、400℃以下の温度まで10 ⁻² S/cmを超える伝導率を示す固体電解質が開発されており、残すは電極材料の開発という段階まできている。さらに、技術は、酸素源としてCO ₂ を用いることで、CO ₂ のCOへの転化技術にも応用できることから、2050年までにネットゼロエミッションが謳われる現代において、重要な技術へと転換が期待される。この場合も、CO ₂ 還元に適した電極材料の開発が必須となる。
		ブレイクスルー	400℃以下での、酸素還元、CO ₂ 還元反応を可能する電極材料の開発
M-71	10年未満	注目科学技術	酸化物型全固体電池
		ブレイクスルー	イオン伝導性に優れた材料の創製とイオン伝導性に優れた異相接界面の構築
M-72	10年未満	注目科学技術	紙を代表とするサステナブル材料領域
		ブレイクスルー	安価で市場に受け入れられ得る価格帯での実現に向けた材料技術とプロセス技術。
M-73	10年以降	注目科学技術	循環性を意識したライフサイクル全体のプロダクトデザイン及び周辺技術
		ブレイクスルー	循環性を測ることが困難なのが現状だが、循環性を意識した材料設計、製品設計、回収・分離設計、リユース・リサイクル設計をシミュレーションできる技術が出来れば大幅に進展する。差し当たっては、こういった設計技術なしに、事例が今後10年程度で積みあがるのが予測できるため、その間に、並行して設計技術及び周辺技術についてブレイクスルーを期待する。
M-74	10年未満	注目科学技術	新材料の優れた特性を活かすための新回路技術・新制御技術を用いた革新的なパワーエレクトロニクス技術 パワー半導体デバイス新材料として大きな期待を集めている GaN や SiC の優れた特性を十分に活かすための新しい回路技術や制御技術により、身の回りのあらゆる機器において大幅な省エネルギー化・高性能化を実現し、カーボンニュートラルの実現に大きく貢献する技術である。
		ブレイクスルー	新材料の特性を十分に活かすことが可能な回路の設計・実装技術と高速・高精度制御技術が必要となる。
M-75	10年未満	注目科学技術	人工光合成 植物が二酸化炭素と水から化学エネルギーを合成する光合成を人工的に行う技術。
		ブレイクスルー	専門外なので詳しいことは分かりませんが、エネルギー変換効率の向上が実用化への課題、と認識しています。
M-76	10年以降	注目科学技術	人工光合成技術
		ブレイクスルー	二酸化炭素の還元反応のための電極触媒の開発
M-77	10年	注目科学技術	人工光合成技術 。特に、二酸化炭素を水素で還元して付加価値がある炭化水素系の材料に高効率かつ低エネルギーで変換する技術。

	以降	ブレイクスルー	高付加価値の炭化水素系の材料の選定と、その材料へ高効率かつ低エネルギーで変換する触媒および反応システムの開発に対してブレイクスルーが必要。
M-78	10年未満	注目科学技術	全固体電池 化学的に安定で堅牢セラミックスを用いた電池
		ブレイクスルー	高いイオン伝導性、易焼結性を合わせつつ固体電解質の開発 簡便な電池作製プロセスの実現(界面構築など)
M-79	10年未満	注目科学技術	全固体電池の開発
		ブレイクスルー	材料科学、界面科学、固体化学、電気化学の融合により、問題点である高抵抗界面の打破を期待している。しかし、その融合はまだ十分でなく、もっと幅広い人材の投入が必要と考える。
M-80	10年未満	注目科学技術	低エネルギーの光子(長波長光)を高エネルギーの光子(短波長光)に変換するエネルギー変換技術である 光アップコンバージョン は、とりわけ三重項-三重項消滅に基づく光アップコンバージョンは、太陽光程度の光強度でも高い変換効率を示すため、太陽電池や水分解光触媒、バイオイメージングやオプトジェネティクスにおいて革新をもたらす重要技術として注目を集めている。
		ブレイクスルー	太陽光に多く含まれているにもかかわらず、現状では活用できていない近赤外光を紫外/可視光に高効率にアップコンバージョンできれば、太陽電池や水素発生光触媒、バイオイメージングなどといったデバイスや材料の効率を飛躍的に向上させることにつながる。そのためには、近赤外光を紫外/可視光に高効率に変換する固体アップコンバージョン系の開発がブレイクスルーとして必要となる。
M-81	10年以降	注目科学技術	電気自動車や定値用としての次世代蓄電池の開発 が、今後どの程度まで進むか。また、それらが実用化し、社会が大きな変貌を遂げるか。
		ブレイクスルー	現行のリチウムイオン電池にとどまらない、新たなカテゴリーの蓄電池が必要である。例えばコンバージョン反応等の大容量反応を使う必要がある。
M-82	10年未満	注目科学技術	都市鉱山リサイクルを目的とした、高精度な物理選別および新規の生成技術。 複雑な構造・元素組成を有する廃電子機器から、有用な成分(希土類や白金族)を濃縮し、後段の精製工程における負荷を低減する。具体的には、電子基板の選択的な粉砕技術、センシング技術を駆使したソーティング技術などがあげられる。さらに精製工程においても、低温処理・有害性の低い薬剤の使用を実現する新規技術を導入する。例えば、従来の精錬プロセスと比べて低い温度で、白金族金属を可溶性の化合物に変換し、それを塩酸で溶解させる技術が挙げられる。
		ブレイクスルー	個々の技術は優れているものの、時代の変遷とともに変化する製品仕様に柔軟に対応できるかが課題だと考える。特に材料開発においては、新しい元素の組み合わせが模索されるため、その状況によってはリサイクルプロセスの見直しが迫られる。上記の点を解決するためのブレイクスルーが必要である。
M-83	10年以降	注目科学技術	有機系太陽電池をIoT社会におけるスマートデバイスにおける独立電源として有効活用 する。有機系太陽電池は軽量であり、設置場所を選ばないほか、室内光におけるエネルギー変換効率が高いため、屋内用途に適している。また、用いる有機材料は色素を基盤としていることから、意匠性も高く、インテリアに対する調和性を確保できるため、今後の発展が期待されている。
		ブレイクスルー	エネルギー変換効率の向上は未だ課題となっているが、技術として実現されるためには、さらに、スマートデバイスの独立電源として用いるためには、(特にメンテナンスフリーで)長期に渡って安定して動作する、長期安定性・耐久性が非常に重要であると考えられる。したがって、有機太陽電池の大幅な安定性向上を達成する、有機材料あるいは太陽電池セル製作技術のブレイクスルーが必要と考えられる。
M-84	10年未満	注目科学技術	有機薄膜太陽電池
		ブレイクスルー	変換高効率の高効率化、低エネルギーのデバイスプロセス、デバイスの長寿命化。
M-85	10年未満	注目科学技術	トポロジカルフォトリクス 固体中のトポロジカルな性質により予言される様々な新規な現象を、フォトリクス領域へと応用しようとする研究分野。光を回折限界よりも狭い領域に閉じ込めたり、偏光状態を自在に制御できるなど、通信、センシング等、様々な分野で、新しい応用を生み出す可能性を秘める。
		ブレイクスルー	フォトリクスへ応用する際の、光波のトポロジカルな性質の理論的定式化 様々な形状を有するトポロジカル光波回路のシミュレーション技術 トポロジカルな性質を自在に発現させるための、超微細構造製造技術

M-86	10年未満	注目科学技術	<u>AI技術&機械・深層学習(特にマテリアルズ・インフォマティクス)</u> <u>ロボット技術</u> <u>室温超電導デバイス</u> <u>量子コンピューティング</u> <u>スピントロニクス</u> <u>バーチャルシステム</u>
		ブレイクスルー	各分野それぞれ優れた研究を行っているため、現在の延長で進めれば、大部分が達成するものと考えられます。引き続き、研究費のご支援など国のサポートをよろしく願いいたします。
M-87	10年未満	注目科学技術	<u>イベント駆動型イメージセンサー</u> は生体に模倣したイメージセンサーであり、高いダイナミックレンジを有する。従来のフレーム型イメージセンサーと異なり、強度変化が存在した画素のみで、その位置と時間が記録されるため、フレーム型イメージセンサーでは実現できない時間分解能でイメージの取得が可能である。従来の超高速カメラは、最大フレームレートで撮像できるフレーム数が記憶容量やデータ転送上の制限から限られており、膨大なイメージデータを処理することを必要とする問題がある。イベント駆動型イメージセンサーでは、データ容量を大幅に低減することができるため、フレーム数に関する制限が少なくなる。これらのイベント駆動型イメージセンサーは、セキュリティや自動運転等の分野での利用が期待されており、今後急速に発達していく科学技術の一つとして位置付けられる。原子分子光科学の研究分野においても、イベント駆動型イメージセンサーとして位置付けられる、オックスフォード大学が開発したPlmMSカメラやCERNで開発されたTimePixセンサーを用いたカメラを利用した研究例が近年増加している。国内のX線自由電子レーザーを用いた計測においても利用が行われており、従来のフレーム型イメージセンサーとは質の異なる実験データの取得が可能になりつつある。しかし、これらのイベント駆動型イメージセンサーの本質は、「時間軸でのスパース性」と「強度軸におけるマルチスケール性」である。この2つの性質を十分に活かした計測はまだ実現されておらず、データ量を大幅に増やすことなくマルチスケールの計測を実現するための要素技術の一つとなりうる。例えば、分子科学の分野においては、タンパク質分子内の電子移動から折り畳みまでを統一的に計測するための基盤技術につながる可能性がある。
		ブレイクスルー	(1)量子イメージセンサー(1光子が入射することで数1000電子を生成することができる超高感度イメージセンサー)との融合:低照度の条件(1光子検出)における計測を可能とする。(2)センサーの対応波長領域を拡張:軟X線から紫外領域および赤外領域まで拡張することにより、あらゆる時間分解計測においてマルチスケール計測を実現する。(3)時間応答性の向上:サブナノ秒の時間分解能の実現。薬理動態を観測するためのイメージング質量分析装置の高速化が実現可能となる。
M-88	10年未満	注目科学技術	<u>センシング</u>
		ブレイクスルー	センサを作り上げるためには、材料、回路、デバイス、通信、プロセス、量産と多岐にわたる技術が必要であり、一人では到底不可能である。また実際に実用化につなげるためには様々なブレイクスルーが必要だとも感じる。ただし異分野の融合が必須であるということは、例えば材料の課題は回路で解決、デバイスの課題は材料で解決、といったことも期待できる。そのため異分野の研究者が一堂に会し、課題を共有しながら、研究・開発を同時並行で進める必要があると考えている。
M-89	10年未満	注目科学技術	<u>ダイヤモンドのNVセンター(窒素と空孔の複合欠陥)を用いた量子センサ技術</u>
		ブレイクスルー	ダイヤモンド中にNVセンターを高密度、等間隔、等深度に並べる技術が高まることで、センシング感度も高まり、医療系を中心に実用が始まってもおおくはないと考えている。
M-90	10年以降	注目科学技術	<u>ナノダイヤモンドにおける窒素-空孔センター(NVセンター)を利用した量子センサ技術の生命科学への応用</u>
		ブレイクスルー	量子センサ技術の基盤構築と、ナノダイヤモンドの生体内分布やそのコントロール
M-91	10年未満	注目科学技術	<u>ポストイオン化手法を用い超高感度と超高空間分解能を両立した二次イオン質量分析装置</u>
		ブレイクスルー	高空間分解能を達成する輝度の高いイオン源の開発、全元素のポストイオン化をスムーズにするための可変レーザーと制御を可能にする安定なエレクトロニクス
M-92	10年	注目科学技術	<u>マルチタイムスケールにわたる物質(原子・分子)の動きに注目した計測基盤技術の確立。</u>

	未満	ブレイクスルー	<p>エレクトロニクス及びスピントロニクスからトポロジカル物質に関する研究が物性分野では注目されているが、これは電子運動に注目した研究分野である。電子運動に注目するということは、フェムト秒～アト秒の現象の理解が必要となり、そのような先端計測研究が進められている。</p> <p>一方で、原子や分子の運動に基づく現象やデバイスも存在し、マルチタイムスケールにわたる原子や分子の運動の理解も重要である。これらの理解は、非常にきれいな結晶、孤立系や表面などに限定されていることが現在の課題だと考えている。例えば、タンパク質や酵素の反応にしても、液晶デバイス中の分子運動にしても、燃料電池中の酸素原子や水素原子の運動にしても比較的理想的な状態から外れた乱雑の状態において、原子や分子がどのように動いているのかを理解することが重要である。しかし、それにも関わらず、この乱雑な系でのマルチタイムスケールにわたる原子分子の動きに注目した計測技術は手つかずとなっており、ブレイクスルーが必要であると考えている。</p>
M-93	10年未満	注目科学技術	<p>レーザー-SNMSと呼ばれる表面分析法。二次イオン質量分析(SIMS)で発生する二次イオンは、スパッタされた粒子の1%未満であるが、スパッタされた粒子にレーザーを照射することによって、イオン化率をあげることで、感度だけではなく定量性の向上など分析において重要な課題を解決することができる。SIMSのうち、特にTOF-SIMSは分子の3次元分布がサブミクロンで得られる有力な手法だが、レーザー-SNMSが実現すれば、TOF-SIMSの課題の多くが解決し、医療から材料・デバイス開発まで多くの分野で欠かせない計測手法の一つとなる。</p>
		ブレイクスルー	<p>個々の技術は、実現可能な段階まで進んでいる。関連技術の全体を見通して、実現に向けて推進する人材が足りない。</p>
M-94	10年未満	注目科学技術	<p>企業における分析部門や大学における分析センターでは、様々な分析装置が設置されており、日常的に多くの試料が分析されている。そのような分析現場に持ち込まれる多数の試料をまずは分析に適した状態に調製したのち分析装置に導入、さらに得られた膨大な結果を過去の知見をベースに解析するというプロセスで多くの人手と時間が必要となる。そこで計測における工程のすべてをリモート制御や自動制御により達成させるシステムの実現に注目している。</p>
		ブレイクスルー	<p>これまでは人手に依存してきた試料調製や前処理のリモート制御や自動制御を可能とする基盤技術の構築が必要と考える。また解析の自動化については多彩なデータベースの構築と機械学習の幅広い導入が必要と考える。</p>
M-95	10年未満	注目科学技術	<p>現実の構造・機器に設置されたセンサの信号と構造・機器の数値解析モデルを融合させたデジタルツインにより、現実世界の構造・機器の状態をサイバー空間上で再現させることができる。これにより、構造・機器の効率性・安全性を大幅に向上させることができる。</p>
		ブレイクスルー	<p>高性能のセンサ技術、高速の信号処理技術、可視化技術、データ伝送技術にブレイクスルーが必要となる。センサ技術としては光ファイバセンサなどの電氣的センサ以外にも期待がもたれる。信号処理技術や可視化技術では、ソフトよりもハードウェアが重要である。データ伝送技術においては、海上輸送システム(船舶)、洋上風力、海洋開発などを考えると、大容量・高速・低コストの衛星通信が最も期待される。</p>
M-96	10年未満	注目科学技術	<p>光ファイバを用いてひずみや振動、圧力、温度といった物理量や水素や塩分濃度などの化学量を検知・計測することができる光ファイバセンサに注目している。特に分布型光ファイバセンサは光ファイバの任意位置で連続的に計測が可能で、遠隔・長距離・高精度・高分解能計測という優れた特長を活かした応用、例えば洋上風力や海流・潮流を利用した再生可能エネルギー発電、大深度における海洋開発、宇宙開発など極限環境における構造・機器のモニタリング、科学的観測への応用が期待される。</p>
		ブレイクスルー	<p>通常1つの光ファイバには導波路となる1つのコアしかないが、複数個のコアを持つマルチコアファイバを用いるとケーブルなどの形状を把握できる形状センシング(shape sensing)に利用できる。高品質・高強度のマルチコアファイバの設計・製造技術が開発されると、高精度の形状センシングが可能となり、宇宙・海洋分野からロボット、医療分野での広い利用が期待できる。またフォトニック結晶を利用した集積化が可能になると、計測器の超小型化が達成される。これは大きなイノベーションを生むことが期待される。</p>
M-97	10年未満	注目科学技術	<p>光共振を用いた計測技術。今までは、干渉を用いた技術が盛んに研究されていたが、光コムが登場により、光は位相情報よりも周波数情報を用いることが高精度になることがわかってきた。そこで、光の周波数を有効的に使える光共振を用いた計測技術が注目されている。</p>
		ブレイクスルー	<p>光の周波数情報を扱うための周辺デバイスや光源は通信隊が多い(波長1500nm)。これが可視光の方までデバイスが整備されてくると一気にその利用が進むと思う。</p>
M-98	10年	注目科学技術	<p>光周波数コムによる多様な波長帯における超精密計測。さらにそれを応用した分子種の特定制定と、遺伝子の直接同定。また光周波数コムの高い制御性を利用した3次元形状計測などの光計測技術の発達。</p>

	未 満	ブレイク スルー	近年中赤外と紫外領域における光周波数コム光源が実現できるようになり、その帯域における高精度な分光が報告されるようになった。簡便にこの分光が実現できれば、高分子の同定や、核酸の直接分光などが実現できる。しかし現在中赤外・紫外域の光周波数コム発生は特別に調整した周波数変換技術を用いるため、簡便とは言えない。PPLN や光導波路による高効率な変換デバイスが容易に設計・開発出来る様になるとこの課題が解決できると考える。 また、光周波数コムの高い制御性を利用することで、光演算や波面制御などの高機能な光技術の実現が期待される。光演算では位相制御などを組み合わせて所望の情報をやり取りするが、周波数制御された光周波数コムから直接広帯域光を位相制御すればより大量の情報を扱える可能性がある。また、縦モードの安定性を横モードに変換する事ができれば、現在研究が活発なトポロジカル光を使った光技術といった横モードに関する技術に正確な基準を与えることが出来る。これは通常の縦モードの分光器と同じように、横モードの分光器が実現できることを意味する。そのためには、通常行われる光周波数コムの静的な周波数制御だけではなく、動的な制御を安定して実現する方法論を確立する必要がある。
M-99	10 年 以 降	注目科 学技術 ブレイク スルー	高強度光電場における新規物性の探索 高強度光電場において、材料中の電子の振る舞いが通常と違くと、光の電場に沿って螺旋運動を行うことや、さらに材料の物性も変わります。高強度光電場における電子-光-フォノン相互作用を研究すると、新しい材料物性を生み出すことが可能かと思えます。
M-100	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	高繰り返しパワーレーザ技術を用いた高エネルギー密度状態の物性研究とその高速度計測技術 高速データ処理技術
M-101	10 年 以 降	注目科 学技術 ブレイク スルー	材料の自在分解技術 製品使用後に分解することを、製造前に設計して材料をつくり、使用中は壊れずに目的の機能を発揮し、使用後には低エネルギーで分解することを可能にする技術。そのためには、材料の張り合わせや、結合レベルでの、界面や結合の開裂制御技術のブレイクスルーが必要。
M-102	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	室温で SQUID 級(ピコテスラ)の感度を持つ磁界センサ。 将来 AI 技術と合わせることで各種 IoT センシングや生体センシング応用が期待される。MI センサ、MR センサ、原子磁気センサ、ダイヤモンド NVC など各種センサが開発されている。 1/f ノイズや外乱ノイズ低減
M-103	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	小型衛星に搭載可能なテラヘルツセンシング、および広帯域通信向けデバイス。 ミリ波、テラヘルツ帯で安定動作可能なトランジスタ、および集積回路技術。
M-104	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	多機能センシング: 光・熱・磁性などの多様な量子情報を高感度・高分解能にセンシング、情報処理し、アウトプットする事のできるデバイスを、既存の集積回路技術に混載することで、省電力・小型・高速・多機能な知覚デバイスを実現し、健康医療・モビリティ・セキュリティ・農林水産業・運輸・教育など多様な分野での情報収集・処理技術に革新をもたらす。 様々な情報担体を既存の集積回路上で取得・変換・処理・出力できるナノ材料の融合・集積技術が必要となる。
M-105	10 年 未 満	注目科 学技術 ブレイク スルー	超高速撮像技術。 これまで可視化することが難しかった加工現象や化学反応などを明らかにするための撮像技術が進んでおり、今まで見えなかった現象を可視化することができ、それに付随した科学も発展する起爆剤となり得る。 なんと言っても通信技術。色々光学的な工夫は進んでいるが、可視化できる現象のタイムスパンなどのボトルネックとなり得るのが、撮像素子とそのデータを蓄積及び通信する技術。そこが 1 桁 2 桁改善されてくると、一気にさまざまなアプリケーションへ用途が広がってくる。
M-106	10 年 以 降	注目科 学技術 ブレイク スルー	半導体、センサー、電極等に应用可能なダイヤモンドの合成技術。 人工ダイヤモンドの合成技術はいくつかあるが、化学結合が強いため、他の材料のように自由自在に望む特性を有するダイヤモンドを得られるまでには至っていない。従来法とは全く異なる合成法の新規発見が必要である。

M-107	10年未満	注目科学技術	表面科学: 様々な物質科学(物理、化学、材料、医学、薬学、工学)の研究がなされる過程で表面、界面の関わりは必ずと云って良いほど登場する。研究者、開発者はその場面で表面、界面的解釈を求めため初めて表面、界面の文献調査などを行い、自らの研究に相応しい考えに落ち着こうとする。 しかし表面、界面の基礎的研究(理論、実験、評価)に関する最新研究と技術更新は世界的にも非常に乏しい状況である。 表面、界面研究は非常に地味で愚直な取り組みが求められるが、その研究成果、分析技術の展開は非常に幅広く、物質科学の進展を促進する。また分野をまたがる新しい研究を促す可能性も十分にある。
		ブレイクスルー	各所に表面、界面を研究する部門は散在している。それらを統合する(バーチャル的でも良い)組織が出来上がれば目的意識の高い研究者、技術者集団が形成され、また研究成果、技術成果の共有、解析・分析装置の共有も可能となりレベルは一層上がるであろう。
M-108	10年以降	注目科学技術	表面増強ラマン散乱(SERS)などの生体分子の非標識でかつ高感度な測定技術の創出
		ブレイクスルー	生体分子の1分子レベルでの計測は、細胞、組織、個体における計測、診断に将来必須となってくると考えており、さらに非標識に標的分子をマルチ測定する技術が要求されると思われる。
M-109	10年未満	注目科学技術	「薄膜の分子集合構造制御技術」 。これは今すぐに取り組むべきテーマで、国が推進する薄膜デバイスの開発のボトルネックとなっている難題を克服可能にする技術であると同時に、学術的に極めて重要な空白地帯です。同じ機能性化合物でも、分子を寝かせるのか倒立させるのかで、まったく違う物性と応用用途が現れます。こうした分子の並び方を、分子集合構造を表す構造パラメータの一つ、「分子配向」と言います。現状では、分子配向を官能基ごとに直ちに正確に分析し、その構造情報をもとに制御する基礎化学が構築できていないため、勘や経験に頼った総当たりの研究で無駄が多く、最先端のデバイス分野が世界的な行き詰まりを見せています。日本では、世界に先駆けてこの難題を突破する分光解析手法多角入射分解分光(MAIRS)法が実用化され注目度が高まっており、今まさに世界を大きくリードできるポイントにいます。国策課題として分子集合構造の制御技術を取り上げることで、産官学にわたる多くの研究者を巻き込んだ、一大ムーブメントを起こせます。もちろん日本の世界的な波及が期待されており、ノーベル賞級のインパクトが狙えるでしょう。創造性の範囲も、電子デバイス、ウイルスなどのバイオセンサー、パーキンソン病のマーカータンパク質の解析に代表される医学応用など、薄膜デバイスが関わる領域は無限です。
		ブレイクスルー	薄膜の分子集合構造を定量的に理解して構造制御にフィードバックさせるには、作製した手元にある試料について、いかに多くの構造パラメータをラゴレベルの装置で引き出せるかにかかっています。すなわち、分子配向に加えて、結晶多形、結晶化度、コンフォメーションなどを読みだすのに加えて、現在、解析が困難な「非晶質」の内部にある表面モルフォロジーを定量化できれば、薄膜だけでなく、固体燃料電池に用いられるイオン電導ポリマーの性能を、構造から読み解くこともできるようになります。これが実現できれば、まさにブレイクスルー。分子設計から大きく飛躍して「分子集合構造の設計と実現」が日常の技術となって、有機薄膜・固体材料の開発を中心にパラダイムシフトとなるでしょう。10年後には、あつて当たり前の技術にできます。現時点では、上で述べた構造パラメータのうち、結晶化度と多形くらいしか読めない現状を考えると、この変化は非常に大きなインパクトです。とくに国産技術であるMAIRSがアメリカや中国に気づかれ始めている現在、日本で大きく展開することが必須であることはお分かりいただけると思います。
M-110	10年未満	注目科学技術	2次元物質を積層する技術 。半導体デバイスを原子レベルで作るには、2次元物質を積層して設計するのが、設計の精度・自由度のいずれにおいても優れている。インテルも将来計画に2次元物質をポストシリコン物質として掲げている。
		ブレイクスルー	プロセス技術(2次元物質の加工、積層)の確立が、実現に向けてのブレイクスルーになる。また、機械学習を用いた、積層設計による理論的な探索もブレイクスルーになりえる。Siデバイスより、性能が良いことはすでに実験室レベルで確立しているから、実現と大規模化が、巨大な開発資金で実現できるか、に焦点が集まっている。
M-111	10年未満	注目科学技術	III-V族化合物半導体デバイスは、非常に高性能ではあるが、製造過程のうち単結晶薄膜エピタキシャル成長が非常に高コストであるため、現在は高価である。これを、 ハイドライド気相成長法という方法で単結晶薄膜を製造すれば、低コストで製造可能となり、ひいてはIII-V族化合物半導体デバイスが低価格化される。
		ブレイクスルー	研究段階では既にその実績が得られているが、この技術を量産装置に適用させなければならない。
M-112	10年	注目科学技術	AIによる物質合成

	未 満	ブレイク スルー	膨大なデータベースの作成と実際の実験との相違を検証する必要がある
M-113	10 年 未 満	注目科 学技術	GaN 単結晶の作成技術。 パワーデバイスの低損失化が可能になる
		ブレイク スルー	大口径化が課題
M-114	10 年 以 降	注目科 学技術	GaO スイッチングトランジスタ。 β 型は Si に比べて 3400 倍のバリーガ指数(物性指数)であり、GaN の 4 倍、SiC の 10 倍。その上 β 型はバルク結晶が比較的安定的に作製可能とされるため、量産レベルになれば基板作製コストが高い GaN や SiC に対してコスト優位性を持つ可能性がある。また、縦型構造も採用しやすい。
		ブレイク スルー	原理上困難とされる p 型 GaO の作製。縦型エンハンスメント型トランジスタ(研究例はあるが現状は GaN、SiC に性能が及ばない)。廃熱機構。
M-115	10 年 未 満	注目科 学技術	p 型の超ワイドギャップ半導体材料探索と合成 に注目している。現在、SiC、GaN の次のパワーデバイス材料候補として酸化ガリウム(Ga ₂ O ₃)が注目されている。酸化ガリウムは日本国内で準安定相のアルファ型と安定相のベータ型の開発が進んでいる。しかし、ワイドギャップの酸化物半導体であるため p 型化が物理的特性上、ほぼ不可能に近いと理論的に予測されている。したがって、酸化ガリウムに代わる、高耐圧を実現する広いバンドギャップを有する p 型材料の研究開発が非常に重要であり注目している。
		ブレイク スルー	広いバンドギャップを持ち、かつ p 型伝導をする材料を見つけて合成する必要がある。さらに物性的に安定で、ドーピングや薄膜化が可能でないとデバイス応用には向かない。このような様々な要求に耐えうる、新しい p 型の半導体を世界に先駆けて見つけ、量産可能なまでの水準に持っていくには上記内容をクリアする必要がある。
M-116	10 年 未 満	注目科 学技術	ある種の高分子水溶液は温度の上昇に伴ってゾル-ゲル転移する。このような性質をもつ高分子は” インジェクタブルポリマー ”と呼ばれ、室温(体外)ではゾル状態であるが、生体内に注入することで投与部位でゲルを形成させることができる。同時に薬物を注入することで、薬物を患部で徐放することができたり、細胞を同時に注入することで組織再生足場材料として利用できると注目されている。
		ブレイク スルー	インジェクタブルポリマーとしては、poly(propylene glycol)(PPG)鎖の両端に poly(ethylene glycol)(PEG)鎖がついた PEG-PPG-PEG トリブロックコポリマーが最もよく知られている。その他のインジェクタブルポリマーも、PEG-PLGA-PEG と同様生体適合性を担保するために、似たような分子構造を有している。これらの実用に向けた課題としては、 ①乾燥状態が粘稠固体であるため、使用現場での秤量が困難。 ②粘稠固体な上、溶解に長時間を要するなど、調液が困難。 という問題がある。また、ゲル化温度やゲル化時間、ゲル強度などを自在に制御することも必要であると考えられる。
M-117	10 年 以 降	注目科 学技術	ダイヤモンドのカラーセンターを用いた汎用量子ビット ダイヤモンド中の窒素空孔中心(NV センタ)は、室温で量子操作可能なスピンを持つ。これを現状のイジングモデルではなく、汎用の量子コンピューティングの素子として応用することが出来れば、量子コンピューティングに大いなる進展をもたらす。
		ブレイク スルー	ダイヤモンドの結晶性向上、NV センタの安定的な作製、NV センタ間のエンタングルメントの制御等が必要
M-118	10 年 以 降	注目科 学技術	ダイヤモンドやシリコンカーバイドの窒素-空孔センターを活用した量子デバイス
		ブレイク スルー	ダイヤモンド結晶技術
M-119	10 年 以 降	注目科 学技術	ダイヤモンド単結晶を用いた新材料トランジスタ。 Si 半導体の性能限界を超えるべく、現在、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を用いたトランジスタデバイスの開発が盛んに行われている。我が国は GaN を用いた青色発光ダイオード(LED)の開発で世界を先行した経緯があり、それらの化合物半導体作製技術をベースに、新材料トランジスタの開発も世界をリードしている。ダイヤモンドは究極の半導体と呼ばれており、ダイヤモンド単結晶を用いたトランジスタが実現できれば、サステイナブル発電、電力供給、自動車、情報機器等、多くの分野への波及効果も大きい。
		ブレイク スルー	現状では、大面積の良質なダイヤモンド単結晶を作製することが極めて難しい。徐々に技術革新は進んでいるが、極めて難しい結晶成長技術が要求される。大口径のダイヤモンド単結晶が作製できれば、ブレイクスルーとなる。
M-120	10 年 未 満	注目科 学技術	データサイエンスを利用した触媒開発
		ブレイク スルー	ネガティブデータを収集する仕組みづくり。全世界的なデータ収集の構築。

M-121	10年以降	注目科学技術	トポロジカル物質による集積回路形成
		ブレイクスルー	トポロジカル相は、物質の新しい相として 2005 年以降に発見された新しい物質群である。世界各国で研究開発がなされている。特に、物質を実現する、と言う観点から研究が進められている。非散逸性を示す電子・スピン流を利用した超高速トランジスタ、高感度センサ、さらには、量子的な振る舞いを示す粒子の実現が示唆され、量子コンピュータの基盤としても注目がなされている。グラフェン様物質群や有機物質では、通常極低温(数 K)で観測される非散逸流が、室温でも観測される可能性についても報告例がある。対象物質は、徐々に見いだされている状況である。しかしながら、それを集積回路へと展開する技術的なハードルは非常に高い。世界各国の流れとして、興味深い物質群を集積デバイスへと展開するのは、必須の流れであり、マイクロソフトはこの関連物質研究にて、量子コンピュータの開発を目指している。日本は関連物質の物性物理で強いので、さらにデバイス方面への研究開発を推進すべきと考えている。
M-122	10年未満	注目科学技術	ナノスケールの分子設計でバルク有機材料の様々な物性を制御する科学技術
		ブレイクスルー	複雑で秩序の低い階層構造をもつバルク有機材料の内部におけるメソスケール構造(10-100 nm, 高分子鎖の絡み合いや分子のパッキング)をはっきりと分析する手法。または、大胆にメソスケール解析を飛び越して望みの機能材料を与える分子骨格を非感覚的に探索する機械学習。
M-123	10年未満	注目科学技術	ナノテクノロジー : 国内では半導体デバイスの微細化の鈍化に伴って、パワーエレクトロニクス等の(数世代前の技術)研究に大きくシフトしてしましたが、新たなブレイクスルーはナノ領域で起きることは疑いの余地もない。
		ブレイクスルー	量子コンピュータ
M-124	10年以降	注目科学技術	ナノテクノロジーの進展に伴い、 材料の内部構造を制御して新しい機能を発現させるメタマテリアルの創出 に関する研究が 2010 年頃から科学技術界で台頭している。対象とする機能は、マルチスケール・マルチフィジクス現象も含めた音響特性、光学特性、熱特性、変形特性、振動特性など幅広く、次世代材料の開発につながる新しい分野と言える。現在のところはコンセプトベースの研究が多く社会への実用化からはまだ遠いと思われるが、ラボ試験での具現化や理論モデルの構築など実験と解析の両側面からアプローチして前例のない新規材料を提案できる研究姿勢が魅力的である。
		ブレイクスルー	問2で回答したように現在のところはコンセプトベースの研究が多い。最近ではメタマテリアルの研究が増加傾向にありその適切な分類は難しく、全体で括って実現可能性の話をするのは困難である。言い換えると、10年未満に実現可能なメタマテリアルの種類もあるし、既に実現されているものもある。一方、例えば光学クローキングや光学吸収体などすぐに実現ができなさそうなテーマもあり、その点を鑑みて問3では後者を選択した。多くのメタマテリアルではナノ・マイクロスケールでの内部構造の制御が必要とされており、3D プリンタや自己組織化の技術革新やバイオテクノロジーの進歩と連動してブレイクスルーが起こると予測される。
M-125	10年未満	注目科学技術	ナノ粒子やナノバブル の技術。この技術分野は発展途上であり、今後相当な幅広い分野への応用が期待される。
		ブレイクスルー	粒子の大量生産技術の開発が工業化に必須である。
M-126	10年未満	注目科学技術	フォノンエンジニアリング(フォノン工学) [概要] 物質中に周期構造(例えば周期的な貫通穴)を作り込むことで、その物質が本来的に有するフォノンバンドを人工的に改変することができる。すなわち、物質の熱伝導を自由自在に設計することができ、例えば熱電素子の発電効率を向上させることができる。特に、その物質が金属である場合は、フォノンを媒介とした電子間相互作用が著しく影響を受ける。すなわち、元来は金属である物質を、絶縁体あるいは超伝導体に改変することができる。フォノン工学を金属に適用した研究はほとんど前例がなく、まだ始まったばかりであるが、間違いなく 21 世紀の材料・物理学の発展の基軸になる科学技術である。

		ブレイクスルー	「実現に向けてのブレイクスルー」の意味がよく分かりません。実現がブレイクスルーなのではないでしょうか。「実現に向けてのボトルネック」でしたら意味が分かりますが…。 「実現に向けてのボトルネック」についての質問であると思って回答しますと下記のとおりです。 新奇の技術はご高齢の方々には理解できません。そのご高齢の方々をプロジェクトマネージャー等のトップの据えての研究体制(例えば SIP や NEDO 等のイノベーション科学技術政策 w)では、いつまで経っても新鮮な科学技術の芽は育っていきません。 近年の日本の科学技術政策を振り返って Nature 誌から「There is no clear successes」とまで言われているのですから (https://www.nature.com/articles/d41586-020-02540-w)、国家の威信をかけて反論するのか、もしくは反論できないなら科学技術政策の方向を変えるのか、真剣に考える時期に来ていると思います(とつくの昔に…)
M-127	10年未満	注目科学技術	プラズマ触媒 は、揮発性有機化合物(VOC)分解やアンモニア合成から、二酸化炭素からのエネルギー源創出まで、様々な応用が期待されており、これらからのカーボンニュートラルの時勢を考えると、大変有望な科学技術である。
		ブレイクスルー	研究者人口と研究費が不足しているため、エネルギー問題を抜本的に解決するこのような課題には集中して資金投下することによりブレイクスルーが生まれると考える。
M-128	10年未満	注目科学技術	ペイントブルエレクトロニクス 。 溶液中に半導体材料を溶かし込み、所望の場所に溶液を塗布することで電子回路や太陽電池、発光ダイオードを形成させることができる技術。もともと桐蔭横浜大学の宮坂力教授が発見したハライドペロブスカイトを用いた太陽電池の研究が発端だが、最近では同様の技術を用いてトランジスタや発光ダイオードが作成され始め、塗布法だけでエレクトロニクスを構成できそうな状況になってきている。
		ブレイクスルー	長時間安定に動作させるために酸素や水から半導体を守る必要がある。そのため、半導体の封止技術が最も重要。
M-129	10年未満	注目科学技術	マイクロニードル
		ブレイクスルー	厚みを1μm以下、太さ100μm以下の衛生的針の量産
M-130	10年未満	注目科学技術	マテリアルズ・インフォマティクス に注目している。当該研究は、材料開発研究において、データ科学や情報科学を適用したデータ駆動型の材料研究手法であり、従来の実験や計算科学的な材料探索・材料開発に比べて、所望物性を実現する材料を高効率で探索・開発する可能性を秘めている。データ駆動型探索により、従来性能を超える新材料が提案され、実際に合成・検証される事例がいくつか報告されるようになってきている。
		ブレイクスルー	物質科学研究では、量子コンピュータの応用事例も報告されており、物性予測や物質探索などへの展開も視野に入ってきている。
M-131	10年未満	注目科学技術	マテリアルズインフォマティクス
		ブレイクスルー	使用するデータ形式をそろえる。 既存の多くのデータが使用できるように国が補助する。
M-132	10年未満	注目科学技術	マテリアルズインフォマティクスを利用した革新的材料の創出
		ブレイクスルー	実験を主務とする材料科学者の多くがすでにマテリアルズインフォマティクスを取り入れており、一部ではすでに実現されているといえる。
M-133	10年未満	注目科学技術	メタマテリアル技術 狭義のメタマテリアル(電磁波制御材料)だけでなく、音響や流体などに対して、従来にはない振る舞いを示す材料の実用化時期が近づいている。 音響分野であれば軽量性と遮音性を兼ね備えた防音材料。流体分野であれば負の熱拡散を利用した新しい放熱機構の構築などが期待される。
		ブレイクスルー	現在は大学を中心とした基礎研究が主と考えられるが、具体的な利用シーンを想定した民間企業の参画により、実用化が加速されると考えられる。
M-134	10年未満	注目科学技術	モーター用鉄心に利用されている無方向性電磁鋼板および圧粉鉄心は、複雑な製造工程で作製されている。しかし、近年、 金属の塑性変形によって形成する結晶学的集合組織を利用することで無方向性電磁鋼板や圧粉鉄心を製造する技術 が提案されている。これらの技術はこれまでにない製造技術であり、かつ従来の無方向性電磁鋼板や圧粉鉄心に比べてより理想的な材料組織を持つ。よって、これらの技術は、次世代の電磁鋼板や圧粉鉄心の製造技術として注目すべきである。

		ブレイクスルー	これらの技術は磁気特性に適した結晶方位分布を持たせることができるが、残念ながらその結晶方位分布を保持したまま結晶粒を粗大化させる技術が確立されていない。その結果、まだ満足いく磁気特性が得られていない欠点を持つ。そのため、制御された結晶方位分布を保持したまま結晶粒を粗大化させる技術が確立されればブレイクスルーにつながる。
M-135	10年未満	注目科学技術	各種材料のプロント技術。
		ブレイクスルー	R2Rの制御、金属酸化抑制、インク塗布技術、それぞれ、現在研究が進められており、これらが確立されることによって、真空環境不要な金属・半導体プリントの実現が期待できる。このプリント技術は、バイオセンサ(各種ウイルス)の簡易製造など、幅広い応用が期待できる。
M-136	10年未満	注目科学技術	急峻スイッチング素子技術。 これまで計算機技術の発展を支えてきたトランジスタ微細化の本質は、高密度集積と消費電力削減とを両立したことにある。高密度集積は引き続き様々な新技術で進められているが、消費電力削減は物理的限界に直面している。これを解決する新原理のトランジスタ技術が、急峻スイッチング素子技術である。
		ブレイクスルー	様々な急峻スイッチング素子技術が提案されているが、どれもLSIに実用するには短所がある状況である。例えば最有力視されるトンネルトランジスタの場合、駆動電流が低く動作速度が遅いという問題がある。強誘電体ゲートトランジスタの場合、ヒステリシス現象が存在するため回路動作が難しいという問題がある。短所は個々に違うが、これを克服することが実現へのブレイクスルーとなる。
M-137	10年未満	注目科学技術	共同研究者の広島大学先進理工系科学研究科の東清一郎先生のデバイスです。 非常に薄い基板に半導体デバイスを設計する技術 があり、ウェアラブルデバイスの開発に着手されたところですが、体温計測用のウェアラブルデバイス(アップルウォッチなど)は外気温に影響されて正確な計測が出来ないそうですが、東先生のデバイスは、 湿布の様に貼り付けられる ので、外気温に影響されない事が利点です。あるヒアリングの際に、正確な体温のモニタリングがCOVID-19の場合必要であるとのコメントを戴き、これから大いに活躍するとおもいました。
		ブレイクスルー	また、東先生のMOSFETデバイスも今後注目が期待されます。 コロナウイルスを5分で検出できるデバイス に应用することを検討されています。デバイスの動作が確認できた後、かなりの規模の人数で、実データを取得し、検出精度のバリデーションや高性能化などの検討していく必要があり、そのコホート研究実施の協力者が必要と思います。
M-138	10年未満	注目科学技術	近接場熱輻射。 高効率な熱制御が可能と期待できる。
		ブレイクスルー	微細構造の作製方法
M-139	10年以降	注目科学技術	金属鉱物資源の開発にあたり、 これまで生産されていない副成分の含有量と存在形態を新技術により明らかにし、また、選鉱技術を改良することによりレアメタルやクリティカルを生産可能にし、日本及び世界が長期にわたり金属資源の安定供給を実現すること。
		ブレイクスルー	変革領域研究B→Aといった大型で長期の研究費を獲得し、資源開発の上流(探査、地質調査)、中流(鉱山開発、選鉱)、下流(製錬、精製、リサイクル、販売)の各分野の研究者が共通目的を持って研究に取り組むこと。このような形態の共同研究は過去に例がないため、ブレイクスルーにつながる。
M-140	10年未満	注目科学技術	形状記憶ポリマー等の機能性材料や、それらと繊維材料とを組み合わせた機能性複合材料 は、今後の医療、航空宇宙、自動車等の産業分野において重要な役割を果たすと言われている。また、これらの材料を使用した 3Dプリント技術(4Dプリント技術) も、先進国を中心に盛んに研究が行われている
		ブレイクスルー	繊維と樹脂との界面現象が解明されておらず、加工や変形のシミュレーション精度の向上が困難なのが現状である。材料の界面現象をとらえることができれば、高精度な4Dプリント造形パスの設計や、加工物の挙動シミュレーションが可能となり、材料の産業応用がさらに進むと期待できる
M-141	10年以降	注目科学技術	計算機とデータベースを駆使することで、機能性材料の設計を実験なしで行う技術(マテリアルインフォマティクス)。
		ブレイクスルー	機能性材料の構造・設計の特徴を抽出した記述子を確立する。
M-142	10年未満	注目科学技術	元素活用技術。 特に不安定な元素を材料化する技術。
		ブレイクスルー	不安定元素含有分子の合成技術。

M-143	10年以降	注目科学技術	原子層科学技術 に注目している。これまで使用されてきたシリコンに比べて、例えばグラフェンを使用することができれば、コスト面だけでなく、グラフェンは炭素でできているため、環境にも優しい。さらに、その他の特性を持つ原子層物質とも組み合わせ、様々な応用が期待できる。
		ブレイクスルー	現段階の問題は、大面積で質の良いグラフェンを作製できていない。またシリコンに比べてバンドギャップが小さく、制御しにくい。これをある程度制御可能にできれば、ポストシリコンとして需要は大きいと考える。
M-144	10年以降	注目科学技術	原子層材料の積層角度を変化させることで物性を大きく変える。 Twistronics などの原子層科学 。
		ブレイクスルー	原子層材料の作製方法。
M-145	10年以降	注目科学技術	固液界面において、溶液中に分散した導電性高分子ナノ粒子を所望の位置にパターン集積し、回路をつくる技術 。レーザーの局所加熱によって生成する単一微小気泡を用いて行う(ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 19, 22278-22286)。従来はレーザー光を吸収する基板を用いて局所加熱を行うため基板材料に限られた技術であったが、溶液に光を吸収させることで局所加熱を実現しているため適用範囲が広がる可能性がある。フレキシブルエレクトロニクスにおけるデバイス作製に利用が期待される。また、真空プロセスを必要としない省エネルギー省材料に基づいたものづくりとして SDGs に貢献する技術として期待される。
		ブレイクスルー	レーザー光を走査することで単一微小気泡を移動させパターニングを行っているため、一筆書きである。生産性を高めるための工夫が必要である。
M-146	10年未満	注目科学技術	固体物質に存在する固有の点欠陥を高度に制御することにより、固体物質に点欠陥由来の高度機能を付与する 。
		ブレイクスルー	点欠陥の高度制御法の確立。点欠陥量の定量解析法や点欠陥の三次元可視化技術の開発。
M-147	10年未満	注目科学技術	構造体用の高強度ポリマー
		ブレイクスルー	PEEK などの高強度、高耐熱な有機ポリマーを凌駕する新規樹脂モノマーの製造と重合・架橋・混合技術。
M-148	10年未満	注目科学技術	材料の原子配列やナノ構造を制御することで材料強度を向上させるマルチスケールデザイン 。従来からある研究であるが、コンピューターシミュレーションの発展などから今後大きな飛躍が期待される。
		ブレイクスルー	高速のシミュレーションを可能にするハードウェア(スパコン)とソフト(アルゴリズム)にボトルネックがあり、ブレイクスルーが必要である。
M-149	10年以降	注目科学技術	自己修復材料、特に電子伝導性やイオン伝導性を持つソフト材料 。現在 IoT や AI が注目され、それに伴い人体に貼り付けたり、自在形状に変形できるフレキシブル/ストレッチャブルデバイスに注目が集まっている。このようなデバイスにおいてはイオン伝導性や電子伝導性をもち、ソフトに変形できる材料が構成要素として必要と考えられる。この時、材料は繰り返し変形に耐えうることが求められ、自己修復機能を付与することで耐久性の高いソフト材料が実現すると考えられる。
		ブレイクスルー	そもそも、フレキシブル/ストレッチャブルデバイスの需要がどれくらいあるのか、また実際のデバイスにおいて本当にソフトな電子/イオン伝導性材料が必要なのか、また自己修復機能が実際のデバイスの作動環境において本当に耐久性向上などの効果をもたらすのか、などを明らかにする必要があると考えられる。
M-150	10年未満	注目科学技術	自己組織化材料 弱い結合を駆動力に構築される自己組織化材料は、その柔軟性や応答性からスマート材料としての活発な展開がなされている。近年では、セレンディピティーに依存した従来の材料開発に加え、その学理の解明が進みつつある。材料特性が自在に設計できるようになれば、既存の材料にかわり広く応用されることが期待できる。
		ブレイクスルー	メソスケールの構造解析 ナノスケールの構造解析により、自己組織化材料の分子レベルにおける相互作用の解析はめざましく進み、学理の解明に大きく寄与している。一方で、集合体同士の相互作用に関するメソスケールの構造解析は、未解明な点が多い。この分野における解析技術のブレイクスルーが、自己組織化材料の発展に大きく寄与する。
M-151	10年未満	注目科学技術	自己組織的に形成されたテンプレートをを用いた、表面の化学的安定化が不要なナノ構造材料の合成
		ブレイクスルー	化学的親和性を用いたナノ構造材料の場合、鋳型を取り除くことで凝集や崩壊が起こるが、特異性を使わずに種々のテンプレート合成ができれば、材料本来の性質を発言させることができる。
M-152	10年	注目科学技術	柔らかいハードウェア実現のための一連の技術 (素材、アクチュエータなど)

	未 満	ブレイク スルー	柔軟かつ耐久性のある素材への期待を常に持っています。
M-153	10 年 以 降	注目科 学技術	常温・大気中で使用可能な、金属を含まない磁石
		ブレイク スルー	分子間相互作用を強くする手法と分子へのスピン注入の手法が開発されれば実現可能だと考えられる。
M-154	10 年 以 降	注目科 学技術	常温超電導
		ブレイク スルー	超高压で作成する必要があるため、その物質を大規模に生産が出来ない。
M-155	10 年 以 降	注目科 学技術	常温超電導 が超高压ながら達成されたこと。
		ブレイク スルー	常温・常圧超電導の実現
M-156	10 年 以 降	注目科 学技術	新規冷却素子の開発、新しい冷却原理(電気熱量効果、磁気熱量効果、弾性熱量効果)を用いてコンプレッサーを用いた従来型冷却器より小型、高効率の素子もしくは機器を実現する。 とりわけ、高効率のものを実現することはエネルギー消費を抑えるうえで重要である。
		ブレイク スルー	より温度変化の大きな材料を開発する。また、新しい冷却原理を活かせる冷却方法の開発
M-157	10 年 未 満	注目科 学技術	多元素ナノ合金。 通常では混ざりあわない元素同士をナノ粒子化することで混ぜ合わせ、新しい機能を発現させる現代の錬金術ともいうべき技術。
		ブレイク スルー	元素の組み合わせが膨大となるため、無限の機能が期待できる一方、無限の探索空間から所望の機能を見出す技術が必要となる。超高速な合成可能性の予測と機能予測、合成技術などの実現が必須。
M-158	10 年 未 満	注目科 学技術	多孔質炭素材料・ウッドセラミックスの開発 は、木質系廃材を用いて付加価値の高い機能を有する炭素材料の開発を目的としたもので、森林資源の確保と効率的活用、リサイクル、二酸化炭素の抑制などいずれの面からも社会的波及効果は極めて大きいものである。
		ブレイク スルー	循環型処理技術を活用して、多孔質炭素材料・ウッドセラミックスは遠赤外線発熱体、温湿度センサー、電磁シールド材、クラフト、燃料電池電極等への応用が期待されている。現在、最も実用化に近い応用例として遠赤外線ウッドセラミックスニッケル製造装置が挙げられる。ウッドセラミックスの高い遠赤外線放射特性によって黒ニッケルなどの付加価値ある商品化につながる。
M-159	10 年 以 降	注目科 学技術	多彩な元素を有効活用する有機化学 の発展が著しい。特に、典型元素を組み込んだ機能性材料や触媒等が盛んに開発され、多彩な元素を自在に組み込む技術そのものに再注目されている。また、医薬品開発においても、多様な元素の特性に関して注目されている。このように、幅広い分野において、多様な元素の特性を活かした新しいアプローチが試みられている。
		ブレイク スルー	有機材料開発において、硫黄、リン、ケイ素といった元素を組み込んだ分子が近年盛んに開発されてきた。その一方で、合成自体がボトルネックとなってしまう、精密設計した分子を容易に合成できる合成技術の発展に関するブレイクスルーが欠かせない。
M-160	10 年 未 満	注目科 学技術	多数の分子が化学的なエネルギーや情報をやり取りしながら全体として機能するシステム の開発。生命のように自律的に機能する新物質・新材料の創出につながると期待されている。
		ブレイク スルー	多数の分子が連携して機能する分子システムを構築できるかが鍵となる。要素還元主義から脱却し、細胞程度のシステムを合成分子から創り出すことができれば、全く新しい分子科学・分子技術の展開が拓けると期待される。
M-161	10 年 以 降	注目科 学技術	炭化ケイ素(SiC)エレクトロニクス。 従来推進されてきたパワーデバイスに加えて、p型/n型トランジスタが作製できることからSiエレクトロニクスの適用が困難な宇宙空間や原子炉近くでのIC素子や、量子センシングといった多岐にわたる応用が期待されている。
		ブレイク スルー	SiCパワーデバイスに関しては、トランジスタの性能および信頼性向上が必須である。この技術は極限環境向けIC素子にも不可欠である。量子センシング応用には、Si空孔欠陥などの形成・制御技術の確立が不可欠である。
M-162	10 年 未 満	注目科 学技術	窒化ガリウム単結晶。 次期半導体結晶として最も有望な窒化ガリウム。この高品質かつ大型単結晶が育成できれば、画期的な省エネルギー、CO2削減が実現する。ユーザーとしての利は、デバイスの小型化、発熱などのロス低下である。
		ブレイク スルー	大型結晶を作ること、および応用が可能な高品質の実現がブレイクスルーを必要とする過程であり、現在多くの研究が行われている。

M-163	10年未満	注目科学技術	超伝導デバイスを用いた高速・低エネルギーデジタル集積回路の研究が近年、日本と米国を中心に大きく進展しており、高性能コンピュータの実現に近づいている。本技術には、動作周波数において 50GHz を超える単一磁束量子回路や、消費エネルギーにおいて最新の半導体回路に対して5桁以上優れた断熱量子磁束回路などの幾つかの回路方式があり、これらを組み合わせて高性能な情報処理が可能である。動作温度は 4.2K であるが、冷却コストを含めても高エネルギー効率の情報処理システムが実現できる。超伝導量子コンピュータを極低温で制御することも可能であり、大規模量子コンピュータ実現のためのキーテクノロジーとしても期待されている。現在、日本では産総研が、米国では MIT が高度な超伝導集積回路技術を研究開発しており、日米の研究グループで活発な研究が進められている。特に日本においては、世界に先駆けて超伝導マイクロプロセッサの動作実証が行われている。
		ブレイクスルー	マイクロプロセッサの動作実証などを通して超伝導デジタル集積回路の性能の原理的な検証は行われている。ただし、現在の超伝導集積回路の設計ルールは 1 μm であり、回路の高集積性に課題がある。十分な投資による製造技術の研究開発を行い、より高集積な回路を実現できれば大きなブレイクスルーとなる。また、大規模回路設計に必要な CAD ツールの開発も今後必須の技術であり、これらを実施すれば 10 年以内に高性能超伝導コンピュータの実現が可能である。
M-164	10年以降	注目科学技術	超分子重合(共有結合を介さない分子の集積)により グラフェン状のバンド構造をもつ二次元シートなどを創出することで、従前のグラフェン化学を刷新する科学技術。 超分子化学を固体物理へと導く科学技術。
		ブレイクスルー	ディラック点をもつ二次元分子集積法のガイドラインを確立する必要がある。
M-165	10年未満	注目科学技術	通常税制材料とされるセラミックスにフレキシビリティを付与する技術。 この技術が達成されると、例えば宇宙ロケットの耐熱性外壁など、現在はタイル状のセラミックスを貼り合わせて製造している製品の製造プロセスが大幅に改善されるとともに、製品の形状や性能が飛躍的に向上することが期待される。
		ブレイクスルー	成形体へのフレキシビリティ付与はまだ可能性があるが、焼成過程で可塑性材料は消失してしまうことから不可能とされてきた。逆に言うと、焼成を伴わないセラミックス製造技術が必要となる。現在、セメント技術と同様の無焼成セラミックスと謳われた技術は存在するものの、既存のセラミックスには性能が及ばないため、さらに別の技術開発が必要となる。
M-166	10年未満	注目科学技術	電場を印可することで低温で触媒反応を進める技術。 本技術は早稲田大学・関根泰教授の研究グループによって世界にさがけて達成した日本独自の技術である。これまでは高温の反応場を必要としていた触媒反応をエネルギー消費の少ない電場印加により低温反応を実現した。
		ブレイクスルー	幅広い応用利用のためには、電場印加により反応場がどのように変化し反応に寄与しているかの原理解明が必要である。
M-167	10年未満	注目科学技術	二次元物質を利用した機能性材料の創出と次世代の電子デバイス応用: 近年、グラフェン、六方晶窒化ホウ素 (hBN)、遷移金属ダイカルコゲナイドなどの、原子厚の極薄シート(二次元物質)が、次世代の電子デバイス応用を中心に大きな注目を集めている。二次元物質は、その構造より、究極的に小さく、また消費電力を極限まで抑えた電子デバイスの実現するための有力候補として世界中で研究が進んでいる。 特に、複数の二次元物質を重ねることで、従来の結晶材料では困難であった、格子定数に制限されない異種物質の接合が可能となる。特に、二枚の二次元物質を重ねる角度を変えることで、その積層構造としての性質を变調することも可能である。この特徴より、極めて多くの物質の組み合わせが可能になり、多種多様な機能性材料の創出につながる可能性を有する。実際に、二枚のグラフェンシートを、結晶方位をわずかにずらして重ねることで超伝導や絶縁体を実現した例が報告されている。また、電子デバイスとしては二種類の半導体二次元物質を重ねることで、様々な電気的性質を持つ材料からなる半導体ヘテロ構造を形成できる。
		ブレイクスルー	極めて高品質な二次元材料を大面積で成膜し、自在に集積する技術に関するブレイクスルー。 実際に二次元物質を実際に応用していくには、高品質かつ大面積の二次元物質を成膜する合成技術と、集積化するプロセス技術の開発が必要不可欠である。現状では、二次元物質の合成に関しては再現良く可能になってきたが、結晶性や結晶サイズの改善に関する合成研究は今後の大きな課題である。また、集積プロセスは未だマイクロメートルサイズの小さな結晶を対象とした場合がほとんどであり、ウエハーサイズの面積で実証した例は少ない。
M-168	10年以降	注目科学技術	熱電材料の研究開発。 熱電材料の分野では性能指数である ZT が 1 を超えるものが実用化の指標とされてきた。しかしながら、チャンピオンデータであれば 1 を超えるものも数多く見いだされている。それにも関わらず、現在まで実用化されているのは Bi ₂ Te ₃ 系材料ばかりで、実験室レベルの高い ZT 材料が量産化されたという話は一

			向にない。そのため、今後は過度な ZT 競争ではなく実用化を見据えた熱電材料開発に期待している。
		ブレイクスルー	フォノン(熱)の制御と理論的な理解が重要となる。熱電材料では大別すると熱と電気特性によって性能が決まる。しかしながら、電気特性は比較的容易に解析や測定が可能なものの、熱の測定や解析は非常に厄介である。そこで熱に対する新たなアプローチが必要であり、これができるると大きな進展が期待されると考えられる。
M-169	10年未満	注目科学技術	薄膜有機ポリマーを基板表面で垂直に配向させ、界面熱抵抗を下げる(伝熱効率を上げる)技術 :(自動車、航空機、ロボット、医療機器等)電子機器デバイスの高性能化に貢献できる 例えば、 (1)東工大・物質理工 安藤 慎治:スメクチック液晶性前駆体を活用したポリイミド垂直配向膜の創製と pMAIRS/GI-WAXD 測定による配向解析(第 69 回高分子討論会) (2)日立・日立化成・東北大:S. Tanaka, Y. Takezawa, K. Kanie, and A. Muramatsu, "Homeotropically Aligned Monodomain-Like SmA Structure in Liquid Crystalline Epoxy Film: Analysis of Local Ordering Structure by Microbeam Small Angle X-ray Scattering", ACS Omega 2020, 5(33), 20792-20799(2020).[DOI: 10.1021/acsomega.0c01603]
		ブレイクスルー	有機ポリマーの主骨格にメソゲン基の導入が不可欠であり、合成コストの削減がブレイクスルーとなると考えられる。
M-170	10年未満	注目科学技術	非常に優れた物性を有し、NV 中心や負の電子親和力といったユニークな特徴を有する ダイヤモンドを用いた次世代エレクトロニクス(量子技術含) パワーデバイスの他、室温動作の量子センサや量子テレポーテーション、量子コンピューティングの可能性を持ち、電極として CO ₂ →CO や有用分子変換も可能であり、SDGs やゼロエミッションの実現に大きく貢献できる。
		ブレイクスルー	ダイヤモンドの本質的な物性は優れているが、社会実装するためには、まだまだ材料研究が必要である。つまり、次世代(量子)マテリアルとしてのダイヤモンドの研究開発である。パワーでは GaN、量子ダイヤモンドでは、センサ应用到大型予算が組み込まれているが、その元となるダイヤモンドのマテリアルサイエンス研究(単に大面積化だけではなく。)に投資を行い、Si と同様にダイヤモンド(ウエハ)でも世界トップシェアを持つ企業群を育成する必要がある。
M-171	10年以降	注目科学技術	非平衡現象を利用した化学プロセスの創成 。非平衡現象をうまく利用すると、マイクロスケールから、メートルスケールまで、様々な化学プロセスに革新的なシステムを創ると予想される。
		ブレイクスルー	非平衡現象を制御すること。
M-172	10年以降	注目科学技術	物質の性質を理解、利活用し、また新たな物質創成につなげる技術として、 量子化学計算に基づく、化学反応経路探索法 がある。現実には起こりにくい経路を含めて反応経路が明らかになるとすれば、物質の分子レベルでの可能性をフルに活用でき、効率的な物質合成にもつながるものと考えられる。
		ブレイクスルー	既存の反応経路探索は、主に理論化学の分野のものであり、理論の信頼性は常に実験との対比によってなされるべきと考えている。実験的に反応過程を明らかにする技術や、物質のダイナミクスを自在に制御・観測する技術が実現すれば、飛躍的に伸びる分野と考えている。
M-173	10年未満	注目科学技術	有機金属化学分野で最近注目され始めている、 二種の金属のハイブリッド利用 。従来型的手法では困難な分子変換が可能。特に注文すべきは C1 化学への貢献。今後持続可能な社会の維持においては化石資源の有効活用が重要だが、関連の化学はメタンの変換を可能とする可能性が高い。
		ブレイクスルー	計算化学をベースとする新たな配位子構造の提案と新たな遷移金属種の発見。特に後者は、実際の今までの化学のブレイクスルーとなっていたため、上記の分子変換の達成への大きな貢献が期待できる。
M-174	10年未満	注目科学技術	様々な機能性材料の開発において機械学習を取り入れたデータ駆動による マテリアルズインフォマティクス が普及してきており革新的な新材料開発の加速に大きく期待されている。
		ブレイクスルー	機械学習による材料開発はデータベースの構築が極めて需要であり信頼できる大量のデータを収集することが1つのポイントである。また、予測されたデータを現実で合成できるかが問題でありこれまで以上に研究者の創意工夫が必要である。
M-175	10年未満	注目科学技術	流体の界面・表面を利用した科学技術に注目が集まっている。例えばナノバブルやマイクロバブルを使った消毒・洗浄などが注目されている。 また、表面の流動性などを利用した、生化学分析や熱マネジメントなど様々な技術の開発が進んでいる。しか

			し、それらの原理の本質的理解には至っていない。これらの表面界面工学の基礎および応用技術を世界に先駆けて確立することが重要である。
		ブレイクスルー	ナノ・マイクロメートルスケールの流体の挙動分析手法の欠如や、流体の表面界面の幾何的配置の制御の難しさなどを乗り越える必要がある。
M-176	10年以降	注目科学技術	流体制御マイクロデバイス : 局所的に加える小さな体積力によって物体周りの流れ全体を大きく変えることを可能にする。特にプラズマアクチュエータなどに代表される電気的なデバイスなどが候補である。局所的な流れ制御という意味では、すでに利用可能性が示されているが、それを越える段階として「形状工夫による流体機器の設計」から「デバイスパラメータの設定による流体機器の設計」というパラダイムの変換を実現することが重要である。
		ブレイクスルー	大気圧プラズマの発生を担う電源関連装置(電源、周波数発生装置など)のさらなる小型化と誘起体積力の向上(高電圧、高周波数化)
M-177	10年未満	注目科学技術	メカノケミカル現象を応用した研削研磨技術 : ナノテクノロジーや表面技術の発展とともに進歩した分析技術が機械工学分野へ波及している。切削、レーザー加工の進歩と並び、研磨・研削技術の進歩が著しい。特にメカノケミカル現象の解明がかつてよりも容易になり、これらを応用した新しい生産技術が生み出されている。
		ブレイクスルー	局所領域から大面積広範囲をつなぐマルチスケールをリンクする分析技術があれば技術の発展は大きく進む
M-178	10年未満	注目科学技術	室温で動作する量子ビットとその周辺技術。
		ブレイクスルー	量子ビットの性能の向上およびノイズ耐性の向上。
M-179	10年未満	注目科学技術	電子および原子を強い光電場により制御する技術 に注目している。これは高速に振動する光の電場成分を用いて電子や原子を制御する技術であり、デバイスの微細化・高速化を飛躍的に押し進める上で欠かせない技術である。またリチウムイオン電池をはじめとして、エネルギー蓄積の小型化・高密度化を実現するためにはイオンのダイナミクスの理解が必要不可欠であるが、強い光電場により制御されたイオンの挙動を観測は媒質中でのイオンの挙動を理解する上で強力なツールになると考えられており、日本が強みを持つ材料開発をアクティブなデバイスへ繋げる上でも重要な技術であると考えている。 光電場強度としては物質内部の電場強度である 1#197;あたり 1V が目安であり、光電場の周波数帯域としてはポスト 5G と目されるサブテラヘルツ領域から電子の最高速であるペタヘルツ周波数領域において国内外で研究開発が進められているが、実験・観測・理論の困難さから未だに物理的解釈についても統一的理解は確立していない。また現在は巨大な実験装置群が必要であることから社会実装を実現するためには、飛躍的な光源等の小型化が必要であり、光源・材料・微細加工技術・観測手法開発・応用研究の密接した協創関係の構築が必要となるものと考えている。
		ブレイクスルー	任意の光波形を高強度で発生させる技術が確立しておらず、光源開発ならびに光学素子のブレイクスルーが必要である。また現在の実験装置群が巨大であることから、目的に合わせた高強度の光電場を発生させる小型光源の開発が必須である。また小型化された光電場を有効に利用するためには目的に合わせた材料・微細加工技術の大きな進展と、微細空間における光と物質の相互作用の学術的理解が重要になるものと考えている。
M-180	10年以降	注目科学技術	デスクトップサイズの化成品合成工場。 大規模集約型の既存の化成品合成工場では生産の難しい、少量多品種の化成品のフレキシブルな生産が可能になることで、新しい製品の実現やコストの大幅な低減に期待が持たれる。
		ブレイクスルー	高速有機合成反応の開発、触媒利用を含めた高選択性有機合成反応の開発
M-181	10年以降	注目科学技術	電気自動車(EV)においてバッテリーを交換できる技術
		ブレイクスルー	バッテリーの超小型・軽量化、EV用バッテリーの標準化(他社のものでも接続を可能にする技術およびビジネス)

M-182	10年未満	注目科学技術	<p>ラマン散乱分光による生体組織・細胞のイメージング。 生体内の分子の動態を調べるために、蛍光を利用する蛍光顕微鏡は大きく進歩を遂げてきた。タンパク質にコードされた蛍光分子 (GFP など, 2008 年ノーベル化学賞) が発見されたため、遺伝子工学的手法で任意のタンパク質に蛍光タグを結合できるようになったことも大きな理由で、蛍光タンパク質と蛍光顕微鏡は互いが互いを高め合う形で発展してきたといえる (超解像蛍光顕微鏡は 2014 年ノーベル化学賞)。現在は、蛍光分子を利用すれば、生体内で 1 分子の挙動を追えるところまで研究が発展しつつある。</p> <p>上述のように、タンパク質の動態の理解が急速に進んでいるが、“タンパク質以外”についての動態は*進みが遅れている*。具体的には、糖や脂質などの化合物の動態を観察する技術が足りないためである。脂質の動態を追いたい場合、脂質に結合するタンパク質に蛍光タグをつけて、蛍光顕微鏡で観察するのが一般的な方法である。脂質そのものをダイレクトに時間分解能よく調べるのは現在の技術では困難である。</p> <p>そんななか注目されるのはラマン顕微鏡である。ラマン散乱分光を利用した顕微鏡で、物質固有の π 共役電子から、非染色・非破壊に物質を検出でき、最近では生体分子の in situ での観察手段として大きな注目を集めている。</p>
		ブレイクスルー	<p>一番重要なのは、ラマン散乱分光顕微鏡の感度である。蛍光分子は nM の分子が細胞内に存在すれば十分すぎるほどの検出が可能であるが、ラマン散乱分光顕微鏡の場合は、μM 程度の濃度でしかみることができない。例えば植物のアルカロイド系の二次代謝産物の合成過程を調べたかった場合、微量にしか存在しないために検出ができない。ラマン散乱分光の感度を上昇させるためには、ラマン散乱を増強するためのプローブが用いられるが、研究開発が十分とは言えない。また、プローブを利用すると、外部から操作を加えることになるため、プローブに頼らずに、その感度を上げる方法も必須である。</p> <p>次に、顕微鏡の普及である。生物学者にとってはラマン分光はまだまだなじみの薄い技術であるため、キラーアプリケーションが出ていない。典型的な利用法が示されれば、現時点のラマン散乱分光顕微鏡でも、生物学にブレイクスルーを起こす可能性がある。</p>
M-183	10年未満	注目科学技術	<p>「ドレッジデリバリーシステム(DDS)技術を可能とする高度な生体適合性材料、ならびにバイオメテイクスに基づく高分子材料や自己修復材料の医療への応用」に注目している。ナノテクノロジーが発展し生体の微細な構造が明らかとなるに従い、自然界の生物を真似る科学であるバイオメテイクスが提唱されてきている。自然のメカニズムやシステムより学ぶことで、新たなアイデアや技術が生まれることが期待される。さらに、自己修復材料を医療に利用することで、再手術などのリスクやコストを削減できることが期待される。</p>
		ブレイクスルー	<p>バイオメテイクスを活用するためには、生体を動的に観察する技術が飛躍的に向上することが望まれる。また、バイオテクノロジーとバイオメテイクスを融合することで、より飛躍的に医療への応用が進むと期待される。</p>
M-184	10年以降	注目科学技術	<p>ダイヤモンドあるいはウルトラワイドバンドギャップ半導体の pn 接合を用いたベータボルタ電池。</p>
		ブレイクスルー	<p>ダイヤモンド pn 接合を用いたベータボルタ電池で理論値に近い効率が示されているが(T. Shimaoka, et al., Appl. Phys. Lett. 117, 103902 (2020); https://doi.org/10.1063/5.0020135, Ultrahigh conversion efficiency of betavoltaic cell using diamond pn junction)。パワーの絶対値として十分な値を得るためには基板の大口径化、ヘテロエピ、ドーピング技術、デバイス構造においてさらなるブレイクスルーが必要である。</p>
M-185	10年以降	注目科学技術	<p>ナノ表面をを応用した防蝕技術などによる材料の長寿命化: 金属が表面から腐食することはあたりまえのことであるが、この表面をナノレベルでコーティングすることで腐食しない材料が創成出来る。材料腐食は様々な領域で問題になっており、例えば IC の中の銅配線から、瀬戸大橋や大型建築材料の鉄骨や鋼材、または発電所のタービンなど様々な領域で重要な技術である。また、人口減少や国力低下により、国内のインフラメンテナンスが深刻な課題となっているが、それらの問題を解決するヒントとなる。</p>
		ブレイクスルー	<p>画期的な防蝕薄膜形成技術。ナノ-マクロを繋ぐマルチスケール評価技術。</p>
M-186	10年未満	注目科学技術	<p>ペロブスカイト太陽電池 非常に簡単に作製可能、極薄でありながら、発電能力がシリコン太陽電池に迫るいきおいのため、新たな環境でのエネルギー源としての利用が見込まれるため。</p>
		ブレイクスルー	<p>鉛を用いないこと。 発電能力・耐久力のさらなる向上。</p>
M-187	10年	注目科学技術	<p>持続可能な社会の実現に向けた循環型素材の開発</p>

	以降	ブレイクスルー	天然物を利用した高機能性高分子材料の開発
M-188	10年未満	注目科学技術	全固体電池
		ブレイクスルー	硫化物系からどのように脱却し、リチウムイオン電池並みのスペックを発現するかが課題。レアメタルに依存しない材料開発、LCAも重要
M-189	10年未満	注目科学技術	太陽光における微弱で利用困難な近赤外光を可視光に高い効率で変換するためのアップコンバージョン材料に関する技術 。本技術により、太陽電池や人工光合成などにおける、近赤外領域での太陽光利用効率の飛躍的な向上が期待される。
		ブレイクスルー	アップコンバージョン効率を上げるためのエネルギー移動経路の最適化が必要
M-190	10年以降	注目科学技術	蓄電池技術 (太陽電池、風力発電が火力発電を置き換えることになった場合の巨大なもの)
		ブレイクスルー	大型化？
M-191	10年未満	注目科学技術	注目技術: 全固体電池、全固体リチウムイオン電池 概要:従来のリチウムイオン電池の電解質が液体、又はゲル状で引火性があり、振動や衝撃で発火の恐れがあるのに対し、全固体電池の電解質は固体である。したがって安定であり発火することなく安全である。今後の電気自動車の市場増大に伴い、大型の固体電池の登場が待たれている。
		ブレイクスルー	大出力の固体電解質の発見、研究開発がブレイクスルーポイントである。
M-192	10年未満	注目科学技術	天然の光合成を模倣した 人工光合成 。
		ブレイクスルー	光エネルギーを化学エネルギーに高効率に変換するための技術。
M-193	10年以降	注目科学技術	量子効果であるシフトカレントによる新メカニズム太陽電池 。 シフトカレントは発生する電流がキャリア移動度に依存しない量子効果により発生し、中心対称性を持たない結晶に光を照射することで発現する。この現象を有効に活用すれば従来のpn接合型太陽電池の理論限界を超える、超高効率太陽電池が実現することが示唆されている。
		ブレイクスルー	絶縁性を保ちつつ、結晶構造の空間反転対称性を破るマテリアル設計が重要となる。また、数原子層の化合物極薄膜を精密に制御し、形成する技術が必要となる、またその電子構造の非対称性を精密に計測する、放射光技術が必要である。
M-194	10年未満	注目科学技術	界面強度評価 に注目しています。マクロでは溶接・接合部の界面、マイクロ・微視組織では析出物や粒子の界面などがあります。実験的、解析的な検討が多く行われてきましたが、評価方法や評価パラメータなどについては、まだ十分に確立されていません。とくに、異なる材料の界面、微小領域の界面強度評価がメカニズム解明のためには必要と考えています。近年では、異材接合体の界面強度の標準試験や試験規格なども検討されており、我が国が国際的なリーダーシップをとることが期待されます。
		ブレイクスルー	材料・接合プロセスと強度評価は別々に検討されることが多いのですが、これらは相互に影響を及ぼしていますので、同時に検討することが技術開発のスピードアップ、ブレイクスルーになると考えます。また、産学連携も重要と考えます。
M-195	10年未満	注目科学技術	光を用いた量子計測・センシング技術 に注目している。量子力学の原理を巧みに用いることで、古典光学的な限界を超える計測・センシング手法が提案・実証されている。多様な提案があるが、既に、応用に向けた研究が進んでいるものもあり、その内のいくつかは、10年以内には、実用化される可能性がある。
		ブレイクスルー	現在の光の量子状態(例:量子もつれ合い状態)の生成法は、基本原理は、数十年前から変わっておらず既存の手法を少しずつ改良してきたものが用いられている。従来の技術の延長線上ではなく、一気に、大規模な量子状態を生成できるような革新的な量子光源が実現されれば、大きなブレイクスルーとなることが予想される。また、量子状態を直接検出できるような(例えば、量子もつれ合い状態の直接的な識別が可能な)量子的な検出器の実現も、量子計測・センシングだけでなく、光量子コンピュータといった広い量子技術のブレイクスルーにつながることを予想される。
M-196	10年未満	注目科学技術	高分子材料を対象とし、シンクロトロン放射光を利用したメソスケールの材料構造評価および高速撮影による動的挙動評価 に注目しています。例えば、タイヤのゴムには色々な配合剤が含まれており、分子動力学シミュレーション等によって配合剤がどのように物性に寄与するか検証されていますが、あくまで推測の域を出ず、実験による評価が必要であります。これまでメソスケールの材料構造を捉えつつ、動的条件下のものを評価する手法は確立されているとは言い難いと考えています。

		ブレイクスルー	材料の放射線劣化が発生する前に X 線透過像等を取得する実験系の構築
M-197	10年未満	注目科学技術	散乱光から物体形状を推定するためのレーザー分光・波面制御・高速逆変換アルゴリズムの研究 . LIDAR の高精度化, 生体内イメージング等, 多くの応用が期待される. 例えば下記文献. doi.org/10.1038/s41467-020-18346-3 DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.150.
		ブレイクスルー	微弱な散乱光を効率的に計測するための技術開発. 散乱光から物体形状を瞬時に推定するための高速な逆変換アルゴリズムの開発.
M-198	10年未満	注目科学技術	散乱光を用いたイメージングや分光法 . 従来の光イメージングや分光法では, 対象の媒体の深いところを見ることは難しく, その理由は光が散乱されるためです. 光の散乱現象を理解することで, 散乱光を用いたイメージングや分光法の開発が期待されていると認識しています.
		ブレイクスルー	散乱された光から, 特定の情報を取り出すことが課題となっています. これが解決されれば, 散乱光を用いたイメージングや分光法の発展が期待されます.
M-199	10年以降	注目科学技術	磁性や磁気, スピンの化学反応への応用 ; 特に, 例外的にトータルスピンの有限である酸素分子の生成, 消費反応におけるスピンの積極活用
		ブレイクスルー	磁性触媒などの工夫により, 進行が困難な化学反応, 選択性などの制御が困難な化学反応を大きく改善すること.
M-200	10年未満	注目科学技術	「水素冷却による高温超伝導コイルの実現, および超伝導モータの航空機への応用」 高温超伝導材料の研究開発と水素利用の拡大により, 液体水素により超伝導体を冷却する技術の実用化が進められている. 液体ヘリウムの新規大量入手が世界的に困難であること, また水素化社会では太陽光や風力発電の余剰電力による水素製造も計画されているため, 水素による高温超伝導の実用化は重要である. 利用対象は多岐にわたり, 核融合発電炉の超伝導コイル用としての研究開発が進められているが, 併せて着目されているのは超伝導モータによる航空機の電動化であろう. 航空機の電動化は, 推進システムのターボファンエンジン部分に高出力密度の超伝導モータや発電機, 電力変換器を必要とする一方, 発電電力の送電系統最適化, フライトコントロール部分における電気機械式アクチュエータや液体水素燃料の使用検討が進められている. 特に, CO2 低減の観点から, ジェットエンジンの水素燃料化が脚光を浴びている. 水素燃料化により燃料消費量の低減が期待され, 軽量化, 燃料消費低減とともに, 飛行時 CO2 排出ゼロのため, カーボンニュートラルもしくはカーボンマイナスを目指す社会において有力な手段である. また, 水素燃料として極低温液体水素の利用が図れば, 超伝導技術の利用に親和性があり, 強力な推進力の得られる超伝導モータの適用も視野に入る. すでに欧州を中心として, 航空機への水素適用技術開発が進められており, 国内でも JAXA を中心に小型水素ガスタービンと燃料電池を統合した複合サイクルエンジンの開発が進行している.
		ブレイクスルー	水素冷却による超伝導モータでは, 極低温で液体水素を安定して維持冷却する技術開発と, その信頼性実証が不可欠である. 水素ガスを長期保管する技術は確立されているものの, 液体水素では温度制御の損失は気化につながり, またヘリウム冷却とは異なり水素は可燃性であるが故の注意が必要である. これら要素技術は確立されているが, 長期安定利用と制御という点での技術開発が必要である. また, 液体水素を利用する環境下に対する材料の低温脆性や水素透過による脆性による強度への影響などの基礎データの集積と, 軽量化とのトレードオフとなる対策, 対応が必要と考えられる. 合わせて, 航空機の電動化に伴い, 軽量で大容量の電力貯蔵技術の開発も不可欠であり, この電力貯蔵も含めた航空機全体のエネルギーシステムの最適化検討の取り組みも必要である.
M-201	10年以降	注目科学技術	X線結晶学, 電子顕微鏡法, NMR 法, 中性子散乱などの実験と量子化学, 分子シミュレーション, データベース解析などの計算科学による生体高分子の構造をベースとした基礎研究 . 昔から, それぞれ地道な研究がなされているが, X 線結晶解析では, SACLA などを用いて, フェムト秒時間分解可能な, 実験装置が開発されている. また電子顕微鏡を用いて, 蛋白質複合体の解析も進んでいる. 計算科学に関しては, 富岳などの開発により実験の時間スケールのシミュレーションが実現可能となっている. これらの分野の融合を推進することで, 生体分子の原子レベルでの理解が深まると考えられる.
		ブレイクスルー	理論の側からしか言えないが, 実験に関しては, たくさんのデータが蓄積されているので, これらのデータを理解して, 大規模な解析を行なえる知識の蓄積, 連携が必要だと思います. 計算科学に関しては, 海外の蛋白質専用計算機である ANTON に対抗できる計算機の開発とアプリケーションの開発が必要だと思います.

M-202	10年未満	注目科学技術	エアロゾルデポジション は、エアロゾル状に分散させた微粒子を、微減圧(1kPa程度)チャンバー内に設置された基板に空間に噴射することにより薄膜を形成する方法である。本方法は、サブミクロンオーダーの微粒子を凝集させることなく基板に輸送する事ができるため、微粒子を溶融させることなく強固な粒子間結合力を持つ薄膜を形成する事ができる。現在は、エアロゾルをプラズマに投入することにより、微粒子表面を活性化させ、基板との密着力及び薄膜そのものの強度を著しく向上させることに成功している。なお、本方法の更なる利点として、ナノオーダーの微粒子の使用が可能であることから、ナノレベルの微細組織、組成制御が可能で高速薄膜合成法として、半導体薄膜(特に酸化半導体薄膜)の分野で有用なプロセスになるものと考えられる。
		ブレイクスルー	エアロゾルデポジションは、従来の半導体製造プロセスに比べ、大気雰囲気での施工が可能、微粒子を原料に用いるため CVD や PVD に比べて薄膜形成速度が高い。うえ微細組織及び組成の制御が容易など、多くの利点を有している。しかし、原料に微粒子を用いるため原料製造コストが高く、少量多品種の場合はメリットを維持する事ができるが、大量生産のフェーズに入るとランニングコストの高さがネックになる。それゆえ、CVD やゾル・ゲル法で用いられる出発原料をそのまま使用し、加水分解等で合成した微粒子をそのままエアロゾルとして基材に吹き付けるとい、微粒子製造・薄膜形成一貫プロセスの開発を行い、大量生産にも対応できるプロセスに発展してゆくものと考えられる。
M-203	10年未満	注目科学技術	強誘電体に内包する2次元電子ガスおよびホールガスの生成制御。 強誘電体は自発分極を有しており、同符号の電荷同士が向かいあう、帯電ドメイン壁は2次元電子(ホール)ガスを内包している。また、このドメイン壁は特異な電気伝導性や、特異な物性を示すことで知られている。また、強誘電体は分極反転により、分極電荷を反転できることから、スイッチング素子へ応用できる。
		ブレイクスルー	特異な物性を呈する帯電ドメイン壁を、任意の位置に導し、集積化する技術が必要である。この技術は帯電ドメイン壁の物性を用いたデバイスを集積化する上で、必ず必要となる技術である。
M-204	10年以降	注目科学技術	高度ナノ構造制御による新規ナノ材料の開拓
		ブレイクスルー	原子スケールで緻密に構造制御可能で実用スケールで製造可能な技術開発
M-205	10年以降	注目科学技術	自己修復型材料 自己修復型ポリマー、自己修復型ガラス、自己修復型コンクリート、自己修復型電気配線など、自己修復機能を有する材料が研究されている。一言で「自己修復」と言っても、元の分子構造に戻るというような意味(自己修復型ポリマー、自己修復型ガラス、自己修復型コンクリート)から、機能が復元する(自己修復型電気配線)という意味まで、現状では幅の広い意味でつかわれているが、それも技術の黎明期であるがゆえであると考えられる。
		ブレイクスルー	人間の自己治癒にしても、自己修復という現象には「修復のための材料」と「修復のためのエネルギー」が必要となることは間違いない。破壊部に如何に「修復のための材料」を供給し、如何に「修復のためのエネルギー」を付与するかが、技術が広まるかのカギとなると考える。すなわち、この2つの手間を意識されないような形で行われれば、非常に有用な技術であるのに対し、この2つの手間を意識的しなければならぬようであれば、あまり有用とはならないということである。
M-206	10年以降	注目科学技術	自己組織性分子デバイス
		ブレイクスルー	多様かつ複雑系での高次の分子組織化技術の開発
M-207	10年以降	注目科学技術	超ワイドギャップ半導体(ダイヤモンド、c-BN、AlN およびハイブリッド)を用いた超高電圧(高耐圧・高電流)半導体素子およびそのパッケージング、モジュール化技術。 それらを用いた(スマート)送電系統構築。
		ブレイクスルー	基板大口径化、接合技術、結晶成長技術、およびデバイス構造など。
M-208	10年以降	注目科学技術	生分解性海洋性プラスチック
		ブレイクスルー	地球規模で海洋プラスチックを減少させることが必要であり、生分解性海洋性プラスチックの合成に注目が集まっている。具体的には合成系の確立と評価系の確立が必要とされている。
M-209	10年未満	注目科学技術	量子シミュレーション
		ブレイクスルー	汎用コードの実現

M-210	10年未満	注目科学技術	AI 駆動による有機化学。
		ブレイクスルー	AI は様々な場面で期待されている。一方、化学合成では、フロー合成などの新しい反応場が提案されているものの、反応の最適化(収率の向上、選択性の向上)のためには、数多くの反応の最適化を手動にて行っている。少数の反応条件の実験から反応条件の最適化ができるようになる技術が望まれる。複雑な骨格を持つ天然物合成などの多段階の合成ルートを AI 予測する技術はできているので、両方をあわせることにより、有機合成のさらなる進歩が進む。
M-211	10年未満	注目科学技術	AI とロボット技術を用いて、入手可能な原料から望みの有機化合物を自動合成する技術。
		ブレイクスルー	・AI による逆合成解析の正答率の大幅な向上 ・反応条件最適化の自動化と高速化
M-212	10年以降	注目科学技術	トポロジーを利用した基礎科学および応用機械学習
		ブレイクスルー	トポロジーの実験的制御
M-213	10年未満	注目科学技術	トポロジカルフォトリクス 現在、トポロジーをキーワードに数学(幾何学)、物理(材料、理論)等いろんな分野で研究が進んでいるが、果たしてもものになるデバイスなどが出てくるのか。
		ブレイクスルー	トポロジカルフォトリクスにおける具体的なデバイスが誕生する必要がある。
M-214	10年未満	注目科学技術	現在のノイズ混じりの量子コンピュータで実現可能な量子アルゴリズムが本当に有意義なタスクを実行できるかに注目しています。
		ブレイクスルー	理論的保証のある革新的な量子アルゴリズムが出ればよいが、それは本当にあり得るかという問題も含めてなかなか困難であることが予想されます。理論的保証は十分でないものとりあえず使ってみようという現在の研究の流れから、やがて本当に有用なアプリケーションが出現することを期待しています。
M-215	10年未満	注目科学技術	量子コンピューティングによる数値計算
		ブレイクスルー	現在の量子コンピューティングは組み合わせ最適化問題が主なターゲットだが、数値計算に使えるようにするためのブレイクスルーが必要だと思われる。
M-216	10年以降	注目科学技術	量子技術の物理学への活用。量子ビットを活用した新しい物理実験手法の発見。
		ブレイクスルー	量子ビットのコヒーレンス時間の改善。 量子計算技術の有用な応用先の発見(アプリケーションの発見)。 量子技術に対する教育を拡充し、安定的に使える量子計算インフラが実現されたときに、アプリケーション開発に携われる母数が十分にあること。
M-217	10年以降	注目科学技術	「観察・操作・分析」統合顕微鏡ユニットの開発が進められていること
		ブレイクスルー	1 台だけでできても利用ができないので複数の研究者が利用できるシステム
M-218	10年未満	注目科学技術	1. 単一分子レベルの吸収分光が可能な超高感度分光手法および生体応用技術 生体機能のコアとなるのはタンパク質に埋め込まれた機能分子であり、安定状態(平衡状態)からずれた非平衡状態で機能を発揮する。 そのため、この非平衡状態を調べるこそ、生体機能の分子メカニズムの理解にとって本質的に重要である。 これまでは、実験のやり易さから、レーザーなどの外部刺激で反応の開始時間を制御できる反応系が調べられてきた。 しかし、多くの生体反応(酵素反応や酸化還元反応など)は分子同士の物理接触や溶液条件の変動などによってトリガーされるため、実験で制御するのが難しく、研究が遅れている。 そこで、単一分子を観察し、確率的に生じる生体反応を検出する実験手法が望まれる。 ここで分光解析まで行えれば、エネルギーレベルなどの物理的な情報を含めた詳細な議論が可能となる。 ここ30年の間に単一分子の蛍光分光法が開発され、生体応用が進んできたが、単一分子の吸収検出に成功した例は皆無に等しい。 多くの生体機能分子は吸収特性を示すものの、無蛍光性である場合がほとんどであり、単一分子吸収分光の実現によって開拓できる研究領域は大きい。
		ブレイクスルー	1. 単一分子レベルの吸収分光が可能な超高感度分光手法および生体応用技術 新規顕微分光技術、量子光学などの最先端光学技術と分光・顕微技術との融合、超微弱信号の検出技術

M-219	10年未満	注目科学技術	2次電子 STXM-NEXAFS 法 。これまでの 0.1 μm 厚の試料の透過 X 線による観察ではなく、片面研磨の試料の表面観察で、特定の元素の分子結合状態を 2 次元イメージングすることが出来る。試料調整や試料サイズの制約が厳しく、特に 3 次元構造を得る事が難しかった STXM-NEXAFS 法において、これらの問題を解決し、3 次元的な化学構造のナノメートルスケールでの評価が可能になる
		ブレイクスルー	資金が必要ではあるが、既存技術を応用することで実現が可能である
M-220	10年未満	注目科学技術	3D プリンタなどを用いた簡易型顕微鏡技術 。高価な研究用顕微鏡を 3D プリンタなどで、安価に作成しても非常に高いレベルのイメージングが可能である。オープンサイエンスとの流れで非常に将来性がある。また、途上国における病理検査の普及など大きな可能性があると思う。
		ブレイクスルー	光学レンズの 3D プリンタで作成する技術があれば素晴らしい。特に、対物レンズなどの複レンズを構成するオープンサイエンスがあればよい。
M-221	10年未満	注目科学技術	アップコンバージョン材料 。赤外線など未利用の光を可視光に変換する技術。特に太陽光発電や生体イメージングに期待される。
		ブレイクスルー	従来レーザーなどの狭い波長帯域で研究されていたが、広帯域の太陽光の利用や、シリコンのバンドギャップを超える 1100nm 以上の波長の光から 1000nm 以下の波長への大きなエネルギーシフトが注目されている。
M-222	10年未満	注目科学技術	ナノ構造を用いた量子輸送と量子相互作用制御 。ナノ構造を用いて電子や光を制御する技術は成熟している。近年、そのナノ技術を活用して、フォノンを制御することが可能になってきた。今後、さらに、フォノンを通して新しい量子物性制御が可能になるのではないかと注目している。
		ブレイクスルー	ナノ構造制御としては、Si が主流であったが、様々な材料を用いたナノ構造を高度に制御して形成する技術ができれば、様々な量子物性を制御することが可能となる。
M-223	10年未満	注目科学技術	外場による量子相関の制御 ：外場、特に電磁場による物質の量子状態制御については、これまでに多くの研究が行われてきた。そこでは「外場」と「物質」の境界は明確であり、あくまで物質系（～電子系）の状態が制御の対象であった。近年、外場と物質がいわば一体化した、ハイブリッド状態が注目されており、物質あるいは外場単独では得られない新たな状態の解明が課題となっている。一方、多体量子系の物理に量子相関が大きな役割を果たすことが、量子情報科学の研究を契機としてわかってきた。このことは、上記「ハイブリッド状態」の物性解明にも量子相関に着目した研究が重要であることを示唆しており、このような観点からの物性研究と共に、それを応用した多体量子状態あるいは量子相関の制御が、新規材料や材料機能発現のための技術として期待される。
		ブレイクスルー	ハイブリッド状態を保持するための技術、特に応用面では常温での保持技術が重要となる。また、こうした量子状態について多体相関を直接的に観測する実験手法および理論も必要である。
M-224	10年未満	注目科学技術	核スピンの室温超偏極 。核磁気共鳴 (NMR)、磁気共鳴イメージング (MRI) などの感度を桁違いに向上させる核スピンの超偏極を室温で達成する技術。レーザー光とマイクロ波を照射による光励起三重項状態の電子スピンやダイヤモンド中窒素-空孔 (NV) センターなどの電子スピンを活用することで室温で超偏極を達成する技術
		ブレイクスルー	現時点で要素技術や実験室レベルでの原理実証の報告がされているため 10 年以内に実現すると考えるが、効率などを考えると、より適切な物質の探索、レーザーやマイクロ波の操作プロトコルなどでブレイクスルーが必要であると考えられる。
M-225	10年未満	注目科学技術	結晶スポンジ法 ：化合物の、単結晶 X 線構造解析による構造決定を促進するための手法。結晶性が良く、かつ程よく空隙を持つ遷移金属錯体に、構造を特定したい化合物を吸着させることによって、単結晶 X 線構造解析を行うことのできるサンプルを迅速に調整する。
		ブレイクスルー	汎用性の高い足場材料の開発。より大きな化合物や、電荷を有する化合物を包摂することのできる足場材料の開発。
M-226	10年未満	注目科学技術	顕微鏡、分析技術の革新：クライオ電顕、メタボローム解析などの革新
		ブレイクスルー	まだランニングコストや解析時間がかかるので、それが安価で短時間となれば、さらに多くの研究課題の推進に繋がると思われる。
M-227	10年未満	注目科学技術	光を用いた 3 次元顕微鏡技術 。今まで、生物や細胞などの透明な物体を 3 次元的に可視化することは可能であったが、産業で用いられる不透明な物体も 3 次元的な形状がとらえられるようになってきた。
		ブレイクスルー	一応表示することはできるが、その測定精度がいくらであるかということが問題になってくる。今までは 2 次元的な面を展開する光学理論が基礎理論としてあったが、それを 3 次元に拡張することができれば一気に、その測定精度はクリアになり、また向上する。

M-228	10年未満	注目科学技術	単分子吸収分光法
	ブレイクスルー	現在の単分子分光法は全て蛍光測定をベースにしている。これは蛍光測定が感度が高く、容易にS/N比を高くできるためである。一方、単分子の吸収を測定するには、入射光量と透過光量を単分子が吸収する光量(実質的に単光子)の精度で測定する必要があり、現状では極めて難しい。	
M-229	10年未満	注目科学技術	電子回折による結晶構造解析技術の汎用化
	ブレイクスルー	国内にある構造解析データ測定、回折用の電子顕微鏡は限られており、解析技術が容易ではない。安価で誰でもできる解析技術となるにはソフトウェア、ハードウェアともに敷居が低くなる必要がある。	
M-230	10年未満	注目科学技術	電子顕微鏡を用いた低分子の微小結晶構造解析。 分子の立体構造解析はX線あるいは中性子結晶構造解析が得意とするところであるが、大きな結晶が必要となる。ノーベル賞の受賞前後より生体高分子のクライオ電子顕微鏡の解析データは急増しているが、発表のプラットフォームが乏しいこともあって低分子あるいは中分子の構造データはあまり解析例がない。近年の医薬品開発には中分子は重要な位置づけを占めつつあるが、その論理的な分子設計には正確な立体構造が不可欠であり、電子顕微鏡による高精度な立体構造モデルの構築は重要と考える。また、金属配位分子の金属イオンの荷電状態(+2,+3などの形式荷電ではなく+1.2などの実際の電子状態に基づくもの)の決定も高精度であれば可能になると期待されており、医薬品分子設計において重要なツールとなると期待している。
	ブレイクスルー	生体高分子の立体構造データベースはPDBが一般的であり無償で利用できる。低分子の立体構造データベースはCSDが存在しているが有償である。無償で利用できる低分子あるいは中分子の立体構造実験データベースが存在すれば、より一般化するのではないかと考える。	
M-231	10年未満	注目科学技術	電子顕微鏡技術とX線回折技術の融合による構造解析。
	ブレイクスルー	ソフトウェアの改善とデータの蓄積。	
M-232	10年未満	注目科学技術	電磁場の真空揺らぎを用いた一分子の量子状態制御
	ブレイクスルー	サイズ数ナノメートル以下の光共振器を制御して作成する技術	
M-233	10年未満	注目科学技術	入出力に光を用い、デバイス内の演算、記憶等の情報処理には電子スピンなどの量子状態を活用するスピノフットニックデバイスの開発。 超省エネ・超高速動作が可能。
	ブレイクスルー	電子スピン等に起因する量子状態を個別に光で制御したり、読み書きする技術の確立が必要不可欠。光利用と高集積化を両立させる技術も必要となる。	
M-234	10年未満	注目科学技術	非エルミート光学を用いた高感度センシング技術 (Nature 548, 187 (2017), Nature 576, 65 (2019), Nature 576, 70 (2019)) 結合共振器系に増幅利得、吸収損失を分布させたり、結合の一方向性を導入したものは、光エネルギーを必ずしも保存しない応答を示すため、非エルミート光学系(場合によっては、PT対称光学)と呼ばれる。このような系では、上記の効果の強さに応じ例外点(Exceptional point: EP)と呼ばれる固有モードの縮退が起こり、その近傍で起こる様々な新奇現象が報告されている(Nature Photonics 11, 752 (2017))。 近年特に注目されているのが、 例外点のセンサ応用 である。例外点縮退の周りでは、固有モード周波数はパラメータ変化に対し累乗根型の依存性を持つ。そのため、系は個々の共振器周波数のわずかな変化(摂動)に対し大きな固有周波数変化を示す(Nature 548, 187 (2017))。最近、この特性がリングレーザのサニャック効果の増強に応用できることが示された(Nature 576, 65 (2019), Nature 576, 70 (2019))。この結果は、光学式ジャイロスコープの特定の動作点での感度を、例外点を用いることで10倍以上に向上できることを示す。この技術により、従来のリングレーザジャイロが比較的苦手としていた低加速度帯での測定能力の改善が期待される。
	ブレイクスルー	例外点を持つリングレーザジャイロにおいて、信号である周波数変化を増強できる加速度の範囲は狭いため、動作点を精密に移動させる共振器の制御技術が必要である。また、この場合の例外点の実現には光アイソレータ(非相反光学素子)の導入が必要である。ただし、自由空間や光ファイバに基づく比較的大きなリングレーザジャイロに例外点を導入する技術障壁は高くないと考えられ、10年未満の間に航行制御等に向けた応用技術が実現する可能性がある。一方で、オンチップ光回路の共振器系の中に光アイソレータを組み込むことは困難であるため、情報処理端末等への応用には当該技術の実現が必要である。	

M-235	10年未満	注目科学技術	放射光施設から得られる高品質な X 線は高度な解析を可能にし、材料・医療・製薬・生物など幅広い分野の発展に貢献している。放射光をさらに高輝度にした X 線レーザーは時間分解での過渡的な原子や分子の動きの観察を可能にした。さらに短い時間で分解できるアト秒光源としては、高強度レーザーを用いた高次高調波があげられるが、近年では、 X 線レーザーの短パルス化が進み、アト秒かつ高強度な X 線の発生が可能となり、原子・分子内の電子を観察 できる期待が高まっている。このような観察は太陽電池や光触媒、磁気デバイス等の開発につながることを期待される。
		ブレイクスルー	アト秒の光源としては、実証が済んでいる状況であるが、これをアト秒スケールの観察に適用する際に、さらなる開発が必要である。観察したい時間スケールより十分良い同期の精度を実現すること、もしくは、そのアト秒パルスの時間を直接計測する手法の開発が必須である。
M-236	10年未満	注目科学技術	有機半導体レーザーは有機エレクトロルミネッセンス(EL)に続く次世代発光デバイスとして有望視されている。
		ブレイクスルー	超高電圧の印加に耐えられる robust な有機半導体材料の創出
M-237	10年未満	注目科学技術	FCHV などへ利用される水素貯蔵タンクの材料、構造
		ブレイクスルー	高い安全性と低コスト、耐久性能、耐熱性、大容量化が可能になれば、燃料電池を電力熱源とする様々な機器が普及する
M-238	10年未満	注目科学技術	イオン交換膜 を用いることにより、水の電気分解だけで、高圧の水素を生成させる。高価な設備を必要とすることなく、高圧水素の貯蔵運搬ができるようになることを期待できる。
		ブレイクスルー	高圧下でも水素の透過が起きないイオン交換膜、および安価な触媒
M-239	10年以降	注目科学技術	エネルギーキャリアを製造するための反応システム
		ブレイクスルー	水素製造や電解還元のための電極触媒の開発、効率的な電解合成のための反応器の開発
M-240	10年未満	注目科学技術	エネルギーハーベスト、振動、熱勾配、熱変動、電磁波から電気エネルギーを得る技術
		ブレイクスルー	効果的に電気エネルギーを取り出す素子の開発が必要である。
M-241	10年未満	注目科学技術	メタンを直接エタン・エチレン・メタノールへ直接返還させる技術。 メタンの直接変換技術が開発されれば、現在のメタン輸入時の液体にするコストのカットや、産業的利用が大きく拡大される。
		ブレイクスルー	現在なし
M-242	10年未満	注目科学技術	環境電磁工学技術(将来の低電圧駆動 LSI を用いた IoT、ICT、AI 等に必須な、電磁雑音環境下においても LSI の過電圧破壊や誤動作を起こさない技術)
		ブレイクスルー	シグナルインテグリティ技術の向上
M-243	10年未満	注目科学技術	環境発電(エネルギーハーベスティング)
		ブレイクスルー	発電素子を作り上げるためには、材料、回路、デバイス、通信、プロセス、量産と多岐にわたる技術が必要であり、一人では到底不可能である。また実際に実用化につなげるためには様々なブレイクスルーが必要だとも感じる。ただし異分野の融合が必須であるということは、例えば材料の課題は回路で解決、デバイスの課題は材料で解決、といったことも期待できる。そのため異分野の研究者が一堂に会し、課題を共有しながら、研究・開発を同時並行で進める必要があると考えている。
M-244	10年未満	注目科学技術	近年、室温での材料の熱揺らぎを電力に変換する熱電変換デバイスが注目されているが、機械工学において分子や材料の中での熱揺らぎは誤動作の要因としてしか考えられていない。しかしながら、機械サイズの小型化が進む現在、その熱揺らぎの問題は避けがたくなり、 熱揺らぎをその動作の妨げとしてのみ扱うのではなく、デバイス駆動に利用 することができれば、省エネルギー工学における革新技術になると考える。
		ブレイクスルー	細胞は、分子の熱揺らぎを利用し、省エネルギーでその機能を発現している。今後の工学において、細胞中の分子の熱揺らぎにより誘導される細胞機能の発現機構を理解されていけば、特に MEMS 関連技術に新しいアイデアを得て、ブレイクスルーがもたらされる可能性が高い。
M-245	10年	注目科学技術	現在、電力・産業応用関連で「 超電導技術 」は注目すべき技術の一つであると考えられる。

以降		<p>超電導技術は現在、JR 東海が進めている超電導リニアや医療機関で使用される MRI に導入されている。この技術に関して言い方を変えると「強力な磁石」を作る技術であるといえる。よってこの技術をモータ・発電機のコイル等に導入すると、電流密度が高く、強力な磁界を発生するので、モータ・発電機の高出力密度化(出力を維持しつつ従来機よりも軽量となる)が可能となる。</p> <p>現在、この技術は航空旅客機の電動化と関連が出てきている。すなわち航空機の推進システムの一部をガスタービンエンジンから電気モータに置き換えて温室効果ガスの排出を抑えた高効率なシステムの実現を目指している(航空機版のプリウスやリーフ)中で、重量制限が厳しいため、このような高出力密度な超電導モータ・発電機を適用できる可能性が議論されている。また、超電導モータの冷却に液体水素を使用することが出来れば、超電導体の冷却(抜熱)に用いてガス化した一部の水素をそのままガスタービンエンジン燃料に用いることで、冷却コストに関しても抑えることが可能となる。</p> <p>また、超電導体の「電気抵抗ゼロ」という特徴を生かして直流送電ケーブルに使用するという研究もおこなわれており、今後の送電電力の高効率化にも貢献する可能性を秘めている。</p>
	ブレイクスルー	<p>超電導体を電力機器(モータ、発電機、変圧器、etc. ...)に用いる場合、直流抵抗がゼロではあるが、交流電流・磁界(時間変化する電磁界)に関しては、損失が発生する。これは超電導体が磁性体であり、「ヒステリシス特性」を持つためである。一般的に交流電流・磁界を超電導体に与えた場合に起こる損失を「交流損失」と呼称する。この交流損失の発生が超電導体の電力機器の実用化を妨げている原因の大きな要因一つである。本損失を抑えるために、超電導材料でワイヤーを作る際に、超電導体表面に切り込みを入れて磁束密度が印加される表面積を小さくして損失を抑えたり、ワイヤの母材に電気抵抗が比較的高い金属を用いるなどの工夫を行い、交流損失を抑えるための研究が活発に行われてきており、今後これらの研究が進んで超電導体の交流損失を低減するための技術ノウハウの蓄積が出来れば、超電導モータ等の実用化も視野に入ってくると考えられる。</p>
M-246	10年以降	<p>注目科学技術 固体酸化物形電解セル(SOEC)を用いた CO₂・H₂O の共電解による合成ガス(CO・H₂)生成技術</p>
	ブレイクスルー	<p>技術としては SOFC の技術がそのまま転用できるため、あとは SOFC と同じで、いかにして低コストで大型のセルを作製するかが必要となっている。</p>
M-247	10年未満	<p>注目科学技術 再生可能エネルギー電力を利用して二酸化炭素を還元して化成品を合成する技術</p>
	ブレイクスルー	<p>気体の二酸化炭素を原料として直接電解合成して化成品を効率よく合成できる気体フロー型電解セル</p>
M-248	10年未満	<p>注目科学技術 磁性体に温度差を印加して電気エネルギーを取り出す磁性熱電効果</p>
	ブレイクスルー	<p>マグノン・フォノン・エレクトロン間の相互作用をすべて含む解析手法</p>
M-249	10年未満	<p>注目科学技術 太陽光エネルギーのより効率的な利用法の開発である。太陽電池や人工光合成は再生可能エネルギーの最も有力な手段として世界中で盛んに研究がおこなわれているが、利用可能な光の波長やエネルギーに由来する理論的限界が存在することも知られている。この理論限界を超えるための手段として、バンドギャップ以下の光を利用可能なバンドギャップ以上の光へと変換するアップコンバージョンや、一つの光子から二つの電子を取り出すことが出来るフィッション(もしくは多励起子生成)の利用が期待されている。</p>
	ブレイクスルー	<p>高効率なアップコンバージョンやフィッションを達成するための材料開発がブレイクスルーには必要であると考えられている。マテリアルズインフォマティクスや AI、自動合成技術との融合により、効率よく優れた材料を見出すことが重要であろう。</p>
M-250	10年未満	<p>注目科学技術 脱炭素社会へ向けた省エネ技術が注目分野技術である。具体的には省エネ技術の一つであるパワーエレクトロニクス分野における Si および新材料(SiC, GaN, Ga₂O₃)を主体としたパワーデバイスである。今後は再生可能エネルギー発電技術が増大すると考えられることから、発電機・電力変換器におけるますますの利用が期待される。</p>
	ブレイクスルー	<p>将来はいたるところがミニ発電所になっていくため、その発電機および電力変換器の変換効率の向上と設置スペースの小型化が必要と考えられる、</p>
M-251	10年以降	<p>注目科学技術 電気エネルギーや光エネルギーを利用した物質変換技術</p>
	ブレイクスルー	<p>電極触媒や半導体電極、および固体電解質などの開発</p>

M-252	10年未満	注目科学技術	<p>イオン・分子・タンパク質などを認識・吸着する技術</p> <p>環境浄化技術では、汚染物質のみを選択的に吸着し、除染する技術が望まれます。また、地球温暖化問題でターゲットとなる二酸化炭素に関しては、二酸化炭素を捉え、化学的に変換する技術が求められています。</p> <p>一方、医療健康分野においても、例えば注目されている光免疫療法は、がん細胞に吸着(認識)する抗体に光で活性酸素を生成できる色素をつけて光で癌細胞を死滅させる技術です。また、新型コロナウイルスでも、スパイクタンパク質が有望な標的になることが示唆されています。</p> <p>少し飛躍した言い方をすれば、これらにおいては全て、特定のイオン・分子・タンパク質などを認識・吸着することが重要であり、これを実現できる科学技術が達成されれば、多くの問題を解決できることになるため、注目しています。</p>
		ブレイクスルー	<p>上記技術に関しては、数多くの研究がなされているが、多くの場合、これらは Try and Error の繰り返しにより探索しています。一方現在は、かなり多くの化学物質が新たに合成されているので、これらをコンビナトリアルで検査できる体制の確立、及びそのデータベース化がブレイクスルーになると考えられます。</p>
M-253	10年未満	注目科学技術	<p>光触媒関連。新しいエネルギー源として注目されている水素を、効率よく生成するための技術や、有害物質の無毒化といった環境改善に応用が期待されている。</p>
		ブレイクスルー	<p>効率の良い触媒は、有毒な重金属を含有するケースが多いため、いかに環境低負荷な材料を開発するか。水素であれば、生成した水素を製品化するための精製技術が必要であろう。</p>
M-254	10年以降	注目科学技術	<p>大気中や工場などの排ガスから回収された二酸化炭素と水を原料にして電気化学セルを用いた燃料合成技術(電解合成技術)</p>
		ブレイクスルー	<p>電解セル用の高効率な燃料合成用触媒および高耐久性の電気化学セル</p>
M-255	10年未満	注目科学技術	<p>炭酸ガスのケミカルリサイクル技術</p>
		ブレイクスルー	<p>エネルギー的に有利に反応が進む系は限られているので、ターゲットとして設定できる組み合わせは限られている。有効に利用できる系を如何に多く活用していくかの社会的な工夫も必要となる。</p> <p>また、ケミカル原料として使用できる高純度の炭酸ガスの供給ソースも限られてくるので、発生源でのブレイクスルー(化学原料として使用しやすい形で供給する)も必要。究極は人口光合成が可能な触媒開発であるが、これには10年以上の期間が必要であろう。</p>
M-256	10年未満	注目科学技術	<p>熱電発電、蓄熱材料による廃熱回収技術</p>
		ブレイクスルー	<ul style="list-style-type: none"> ・熱電発電素子の高効率化 ・工場廃熱回収に対する補助金制度(設備導入、電力回収、廃熱利活用、FIT)
M-257	10年未満	注目科学技術	<p>がん組織の挙動を体外で再現できる基板を開発し、新たな創薬研究への貢献が期待できる技術。</p> <p>本研究では、培養がん細胞が生体内と同様に、悪性新生物となって動き回る様子を観察できる基板を開発しました。特に、悪性度の高い膵がん細胞が腫瘍組織を形成、浸潤し、かつ免疫系から逃れる様子を再現する事に成功しました。がんの形成や進行の新メカニズム解明のほか、動物実験に頼らない新薬開発に貢献できるものと考えます。</p> <p>北海道大学大学院医学研究院の宮武由甲子助教、同高等教育推進機構の繁富(栗林)香織特任准教授らの研究グループでは、培養がん細胞が自ら微小ながん腫瘍組織を形成、成長しながら動き回る様子を観察できるマイクロナ基板を開発しました。</p> <p>本研究により、がん腫瘍組織があたかも一つの飢えた生き物のように餌を求めて這いずり回ることが明らかとなり、がん腫瘍組織の攻撃的かつ戦略的といえる挙動を世界で初めて動画で捉えることに成功しました。</p> <p>これまでがんに関する研究では、平面の培養皿(ディッシュ)上に培養された細胞を用いることが多く、そこで得られるデータは必ずしも実験動物や臨床検体を用いた実験結果とは一致しないことが問題とされてきました。これは、ディッシュ上の培養がん「細胞」は、生体に生じるがん「組織」そのものとは形状や性質がかけ離れていることが一因と考えられます。また三次元細胞培養技術により得られる模倣的ながん組織でも、がんの浸潤の様子から推測される挙動を再現できていないことから、培養細胞と実験動物の間をつなげる実験系が求められていました。</p> <p>本研究で開発したマイクロナ基板上で膵がん細胞を培養したところ、単なるがん細胞の塊ではない、生体に存在するものにより近い膵がん腫瘍組織を再現できることがわかりました。この膵がん腫瘍組織は組織そのものが成熟してダイナミックに動き回り、さらに死んだ細胞の目印を表面にまとうことで、免疫系からの攻撃を逃れているこ</p>

			とも明らかになりました。この実験系を用いれば、治療の障壁となっているがんの難治性の仕組みが明らかになるとともに、新しい抗がん剤の開発においても、動物試験を減らしながら、多くの化合物をテストする上で有用なツールとなることが期待されます。
		ブレイクスルー	フィルム化による低コスト化の実現。現在はフォトリソグラフィー法による手作業で製作しており、時間がかかり高コストであるため、研究推進のボトルネックとなっています。 フィルム化により様々なパターンの3D構造を構築することが可能となることで、微小癌自己組織化に最も適した構造の探索が可能となります。またこれらの知見は、細胞培養面の物理的な構造のみによって、細胞から組織への分化を誘導させることができるといふ新規現象の細胞生物学的なメカニズム解明にも役立ちます。
M-258	10年以降	注目科学技術	再生医療の実現
		ブレイクスルー	足場材料の素材、足場構築技術に関してのブレイクスルーが必要。
M-259	10年未満	注目科学技術	再生医療を真に実現するために必要なバイオものづくり技術(大量に、安価に、安全に作るための工学技術)
		ブレイクスルー	プロセス全体を俯瞰視した、バックキャスト的(ムーンショット的な?)な考え方による、不足技術・領域の充足。
M-260	10年未満	注目科学技術	細胞集積および細胞シート形成技術を活用した立体組織形成: 近年、細胞塊を集積あるいは細胞シートを重層し、培養細胞を用いて人工的に立体的な組織を形成する技術が急速に発達しつつある。将来的には、iPS技術と併用した再生医療用置換臓器の形成、安定供給可能な人工培養肉の製造技術の確立などに結びつく。前者については、すでに単純な組織置換による治療や実験動物への組織移植(担がんマウス作製)などに应用されており、良好な治療成績あるいは研究実績を有している。機能性の組織である臓器を人工的に形成するに至るまでにはなお一層の技術的進展が必要と考えられるものの、この技術が確立されれば医療の在り方が大きく変わり、一般公衆における更なる健康促進、寿命延長が期待される。一方、後者は前者よりも技術的なハードルは低く、食料の安定供給、安心安全な食肉の確保などにつながる。気候変動や社会情勢変化に影響されることがないため、安全保障の観点からも有用な技術と言える。
		ブレイクスルー	細胞塊の集積、細胞シートの形成など単純な組織形成については、すでに技術的に確立していると言っても過言ではない。機能性の臓器を形成するには複雑な立体構造をいかに実現するか、iPS技術との併用においては、いかに目的の組織に必要とされる細胞へ分化させて効率よく大量培養するか、不必要な分化やがん化をいかに抑制するかなど、様々な課題を解決して行く必要がある。また、疾患の治療の観点から遺伝子編集技術との併用も考えられる。再生医療のみならず人工培養肉の作製においても、倫理的あるいは感情的な理由により社会から忌避的な反応を受ける可能性を否定できない。本技術に限らず、革新的な科学技術の導入、社会実装に際しては、学校教育などにおける正しい科学的な知識に基づくリテラシーの醸成(適切に理解、解釈、分析して自分の知識として記述可能とするレベル)についても十分な注意を払われたい。
M-261	10年未満	注目科学技術	一般的に、物体表面の温度を高精度・高確度・高速に計測することは難しいとされている。 高速・高精度・高確度な表面温度計測が可能となり、人体の皮膚表面温度計測へ応用 したならば、温度だけでなく皮下の血流状態など様々な生体特性を推定できる。その情報から人体の健康状態のモニタリングが可能となり、新型コロナウイルスの感染拡大予防の一助となり得る。
		ブレイクスルー	・熱流体工学に基づく表面温度と健康状態の関係の解明 ・大規模な臨床研究によるビッグデータの取得と解析 ・デバイスの小型化、省電力化、工業化
M-262	10年以降	注目科学技術	セルロースナノファイバー
		ブレイクスルー	長い繊維ができていない。 ナノファイバーから長い状態のファイバーが作れば未来は広がると思うが、本来の性能まではまだまだ難しい。
M-263	10年未満	注目科学技術	センシングと修復・治療が可能な物質。 バイオプローブの分野ではセラノスティックプローブと呼ばれる。環境においても同じようなものが必要。
		ブレイクスルー	センシングと光触媒との機能の連動技術。

M-264	10年未満	注目科学技術	ナノポアシーケンス。 ナノスケールの細孔を利用し、電氣的に DNA やペプチド鎖の配列を高速・安価に読み取る。ナノポアによる DNA シーケンサは実用化されており、次はアミノ酸配列を読み込めるプロテインシーケンサの開発が望まれる。
		ブレイクスルー	アミノ酸一つ一つを見分けるための、ナノポア構造にブレイクスルーが必要。ナノポアタンパク質で最適なモノを見つけるか、固体ナノポアの開発が必要。
M-265	10年未満	注目科学技術	生体高分子のようにいくつかのモノマーをその連鎖を制御しながら高分子化する技術。
		ブレイクスルー	特定のモノマー連鎖を有する高分子の自動合成技術、および、高分子の端から順番にモノマー連鎖を読んでいく技術。
M-266	10年未満	注目科学技術	量子レベルで生命現象をとらえ、制御を行う量子生命制御
		ブレイクスルー	量子レベルでの生命現象が観察可能な顕微鏡の開発
M-267	10年未満	注目科学技術	量子生命科学分野による細胞内タンパク質の可視化技術。 具体的にはナノダイヤモンドを利用して細胞内のタンパク質をラベルすることにより安定的に細胞内で特定のタンパク質の挙動を調べることができる技術。 まだ、研究段階ですぐに実用化できるレベルではないが 5-10 年後には汎用性が高い技術が台頭すると考えられる。
		ブレイクスルー	基盤技術は確立されつつあるためにあとは実験的なデータの蓄積が必要であると思われる。
M-268	10年未満	注目科学技術	持続生産可能な植物ナノセルロースの有効活用技術
		ブレイクスルー	植物からのナノセルロース抽出プロセスの省エネルギー化、および、得られたナノセルロースのキラーアプリケーション開拓

付録6 分野別アンケート結果一覧(都市・建築・土木・交通)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術=「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー=「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
C-1	10年未満	注目科学技術	遠隔での自動データ取得と大容量のデータ転送。人が常駐して継続的に観測できないような遠隔地、狭い地域、マイクロな領域、危険地帯、上空、深海などに生息する動物等の行動データや生理データを、生息環境の気象などの環境データを取得するような技術。
		ブレイクスルー	データの保存と転送は、計測器や計算機(コンピュータ)および計算アルゴリズムの技術と情報機器の改良・開発で発展し続け大容量化は実現可能だと思うが、それを支える電源を小さく、大容量にするのが律速になっているようである。電源を小型化するか、超省電力で動作する計測機器や計算機の開発が必須だと考える。
C-2	10年未満	注目科学技術	近年、室温での材料の熱揺らぎを電力に変換する熱電変換デバイスが注目されているが、機械工学において分子や材料の中での熱揺らぎは誤動作の要因としてしか考えられていない。しかしながら、機械サイズの小型化が進む現在、その熱揺らぎの問題は避けがたくなり、 熱揺らぎをその動作の妨げとしてのみ扱うのではなく、デバイス駆動に利用すること ができれば、省エネルギー工学における革新技術になると考える。
		ブレイクスルー	細胞は、分子の熱揺らぎを利用し、省エネルギーでその機能を発現している。今後の工学において、細胞中の分子の熱揺らぎにより誘導される細胞機能の発現機構を理解されていけば、特に MEMS 関連技術に新しいアイデアを得て、ブレイクスルーがもたらされる可能性が高い。
C-3	10年未満	注目科学技術	再生可能エネルギー拡大のために発電量を増やしても送電線の空き容量不足に直面し、出力抑制も生じている。この課題を解決する科学技術として、少ない送電ロスで大電力を送電できる「 超伝導直流送電(SCDC) 」に注目している。 ●再生可能エネルギーの拡大と安定化を同時解決 超伝導直流送電(SCDC)は日本が諸外国に先駆けて開発してきた技術であり、SCDC 全国網ができれば、再生可能エネルギーの拡大と安定化を同時に実現できる。エリア内の出力抑制がなくなり、再生可能エネルギーの発電適地と電力大消費地がつながる。通常送電に比べて、送電ロスが少なく、超長距離送電が可能で、省エネルギー・省スペース・低コストである。 自然エネルギーの不安定性も地域ごとの蓄電対応でなく、全国の過不足を慣らして対応できる。SCDC には液体窒素循環系が必要だが、世界最長の 1000m 送電に成功しており、このデータをもとに循環ユニットを長距離化(～100km)できる目処も示された。送電損失も交流送電に比べ 1/10 にできる。 ●高速道路の利用による SCDC 全国網 一方、送電ルートの確保について、2019 年度に「エネルギーインフラネットワークと高速道路の高度化に関する研究会」(一般財団法人国土技術センター(JICE)、株式会社国土ガスハイウェイ)で有識者による検討結果が公開されている(http://www.jice.or.jp/reports/autonomy/roads/detail_03)。技術的には、高速道路の空間活用が可能で、効率的な電気・ガス輸送を広域的に行える直接効果と、再エネ活用による温暖化ガス削減、地域創生等の間接効果もあることが示されている。 ●海外の追い上げ 我が国の SCDC 研究が世界最高性能を示したことから(石狩プロジェクト)、各国(ロシア、中国、韓国、アメリカなど)が日本の方式を研究しており、さらに長距離の建設を始めた国も見られる。一方、我が国ではその後の研究開発を支援しておらず、太陽電池のように我が国の技術をもとに、他国が席卷する恐れが現実化している。

		ブレイクスルー	<p>①「高速道路の高度化」が勧められており、自動運転などの車に搭載する技術への対応とともに、SA、PAでの給電、移動中の給電をはじめ、太陽電池を含む様々な技術と連携して開発されている。SCDCはこれらと相性が良いので、その特徴を十分に発揮できる活用について研究開発する必要がある。「高速道路利用の高度化」(前出のJICE報告書)の中でSCDC導入が検討されている。</p> <p>②SCDCは、低電圧で長距離の大電力送電が可能なので、特高変電所が不要となる。その社会実装のための要素技術として、SCDCの大型化(1千万kW送電)、交直変換器・限流機・遮断機等のパワーエレクトロニクス機器の開発と実地試験、冷却の高効率化、超電導送電線の低コスト化などの要素技術開発、超電導発電機と超電導ポンプによる高効率化等のための戦略的な要素技術開発研究などがある。</p> <p>③法制度を含めた対策の研究開発 これまでに高速道路を活用する場合の制度・機器管理上の課題として、整備空間に関する制度の必要性、起案インフラ整備に関する現行法制度、道路関連法に位置付ける5つのケースが検討されており、事業実施の観点からこの5つを比較している(前出のJICE報告書)。現行の法令の下で基幹エネルギーインフラ施設を整備しようとする、いずれの法令を適用しようとしても課題がある。そこで、現行法の運用の緩和、現行法の改正、新たな法律制定の3つの方向から検討されている。今後、研究開発を進めて早期に高速道路への敷設実現を目指す必要がある。現行法の改正、または新たな法律制定が進められる可能性がある。</p>
C-4	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>AIによる建設業での施工効率化</p> <p>まだまだ経験と実績により施工が行われている中、AI開発には技術者の経験を数値化することが必要であるが、個々の能力の差および判断基準が一概ではなく教師データを作成するにはまだまだ課題が多い。</p>
C-5	10年以上	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>建設分野におけるデジタルツインに注目しています。デジタルツインは、現実空間と仮想空間の双方に「もの」を構築する記述です。両空間の「もの」を同期させることで、遠隔からの状況の把握や将来予測などを組み込むことができ、建設業では業務の効率化などは期待されています。5G技術などもこの技術の実現に拍車をかけています。</p> <p>デジタルツインのような技術では、現在の状態を正確に入力する必要があります。そのための構造物の検査・評価技術は重要であると考えています。また、長期的な予測においては過去の情報(質もですが量もです)が重要ですが、これは今から増やすことはできません。その点をうまく補う技術は必要であると考えています。</p>
C-6	10年未満	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>建築現場への3Dプリンタの導入。海外では3Dプリンタを使用した建造物が建てられ始めています。日本においても近い将来この技術が広まると考えられます。</p> <p>日本の場合、建築基準法が足かせとなっています。海外等での実績が増えれば、法改正など動きが起ころ、一部のプレハブなどが置き換わると思います。</p>
C-7	10年以上	注目科学技術 ブレイクスルー	<p>建築廃材や、製材所での廃材など、現在サーマルリサイクルを行っている木質系材料をマテリアルリサイクルに転換していく技術。</p> <p>現在、多くの使用方法などが研究されているが、コストの問題で広まっていない。例えば材料の乾燥に、発電所の排熱を利用するなどの、他分野とのジョイントが進めば、大幅なコストダウンが行われ、ブレイクスルーが発生すると思われる。</p>

C-8	10年未満	注目科学技術	<p>MR 技術を活用した屋内ナビゲーションシステム</p> <p>従来技術を用いたシステムとしては、AR 技術を用いたナビゲーションシステムが多く存在します。先行研究では、スマートフォン内の空間に目的地までの経路線を表示させるシステムを構築しています。しかし、その問題点としては、表現されるホログラムの立体感が低下し、経路線が浮いているように見えてしまうことまた、現実の物体と経路線の遮蔽関係が表現できず、現実空間との相互感の表現が低下してしまうといった問題があり、システムユーザビリティの低下が発生します。</p> <p>そうした問題点を解決し、屋内ナビゲーションにおけるユーザビリティの向上を目的として、MR 技術を用いた屋内ナビゲーションシステムが注目されつつあります。MR とは複合現実と訳されるもので、現実空間と仮想空間を組み合わせる技術です。</p> <p>従来技術の AR と比較して、デジタル情報の単純な投影ではなく、現実空間の中に仮想空間の情報を表現することにより、現実空間に結び付いたホログラムの描写が可能になります。MR を可能にするデバイスとして Microsoft HoloLens と呼ばれる HMD があり、このデバイスには周辺の現実空間の立体形状を認識する環境認識カメラや被写体までの距離を計測できる深度センサが搭載されています。これらのセンサから得られた値を用いることで、屋内の三次元形状をマッピングすることや、マッピングした空間に対して指定したテクスチャを正確に張り付けるといったことが可能になります。ナビゲーションシステムではこの技術を用いることで、事前に設定した複数の目的地に対して、距離を重みとした重み付きグラフを生成し、作成したグラフに対して最短経路を求めるアルゴリズムであるダイクストラ法を用いることで、目的地までの経路を計算し、算出した経路に沿って擬人化エージェントがユーザを先導することができるようになります。</p>
		ブレイクスルー	<p>ワンフロア内における MR 技術を用いた屋内ナビゲーションの実現は、実用の用途が立ちつつありますが、階をまたいだ広範囲の環境に対するナビゲーションは実現されていません。</p> <p>予期される問題として、階段やエレベータの使用に伴う位置推定のずれの発生が挙げられます。そのため、自己位置推定と環境マップの作成を同時に行う SLAM 技術に加え、Bluetooth の電波を使用する環境設置型 BLE ビーコンを位置推定に併用することで、より高精度な屋内位置推定ができると考えます。</p>
C-9	10年未満	注目科学技術	<p>デジタルトランスフォーメーション時代の交通システム“MaaS”。</p> <p>自動運転車も含む新しい交通手段と親和しながら、多種多様な交通機関を選択・予約・決済可能な交通システム。</p>
		ブレイクスルー	<p>交通が果たすべき社会的役割と、交通事業者・アプリ業者・データ業者などの民間の利益創出が win-win となるか。換言すれば、交通プラットフォームビジネスが、都市や地域の持続的発展と整合するか。</p> <p>わが国の交通システムや交通ネットワークの改善に寄与する広域的 MaaS を、わが国のプレーヤーや技術で早期に構築できるか。</p>
C-10	10年以降	注目科学技術	<p>レジリエントでサプライチェーン指向の輸送システムの形成。</p> <p>自然災害国であるわが国において、レジリエントな(強靱な)物資輸送ネットワークを構築することは、急務の課題である。一方で、有用で最適な物資輸送ネットワークを形成するためには、物資や商品のサプライチェーンのメカニズムを把握することが不可欠である。</p>
		ブレイクスルー	<p>大規模な最適化計算と、大規模なシミュレーションが高速に行えること。また、そのためのアルゴリズムを開発すること。</p> <p>物資や商品のサプライチェーンに関する調査を実施すること。</p>
C-11	10年未満	注目科学技術	<p>ロジスティクスの完全自動化: 車両の自動運転, 5G による通信網と AI 技術を用いた効率的な配送経路の策定</p>
		ブレイクスルー	法の整備
C-12	10年未満	注目科学技術	自動運転
		ブレイクスルー	特になし

C-13	10年以降	注目科学技術	自動運転技術。 高齢化社会となり、都市と地方の乖離も進むと思われる、自動車は高齢だから免許返納というわけにはなかなか行かない現状がある。その為、今後必ず必要となってくる技術であると思われる。
		ブレイクスルー	車だけなら数年以内でできると考えているが、予測できない歩行者の動きに合わせた運転は難しい。横断歩道に立っている人がわたる意思があるのかは、AIで判断できるとは思えない。鏡に映った人をどう判断するのか、など、まだまだ解決すべき問題は多いと思う。
C-14	10年以降	注目科学技術	自動運転技術によるモビリティ革新 に注目している。 昨今の社会情勢の変化に伴い、ロジティクスやモビリティの自動化が求められている。特にモビリティでは、様々な状況に対応できる自動運転技術が必要であり、まだ日本では実用化に至っていない。自動運転が普及すると、従来の住環境(鉄道駅の地位の相対的低下など)、産業構造(ドライバー需要、自動車保険など)も大きく変わること想定され、非常にインパクトの強い重要な技術と考えている。
		ブレイクスルー	自動運転技術に関連する半導体素子の演算性能の向上、各種検出器の感度向上、低コスト化、低消費電力化などが必須である。仮に各々の素子は性能を満たしていても、トータルのシステムとしての高いレベルでのバランスが必要であり、コストやシステム性能の観点からも現状では難しい。さらに新しい素子を複数搭載するため、省エネルギー化に対しては逆行する方向となるために、この低消費電力化が最も困難な課題の一つと考えられる。ソフトウェアによる改善も含め低消費電力化にブレイクスルーが必要と考えている。
C-15	10年未満	注目科学技術	自律配送ロボット。 米国等の海外では、配送エリアは限られているが、屋外自律配送ロボットによる飲食店の料理等の商用サービスがある。屋内自律配送については、国内でも海外メーカの自律配送ロボットが、ホテル、レストラン等、限られたエリア、客寄せ要素もあると思われるがアメニティグッズや配膳の商用サービスとして行われている。
		ブレイクスルー	コロナ禍により確実に需要は高まっている。課題は3つあると思われる。配送可能エリアの拡大、安全性、コスト。既に実現しているエリアもあるがまだ限られている。安全性は事故が起こるとメーカ責任となる日本では特に課題となる。コストは、コロナ禍により、需要は高まる一方、人件費は低下、Uber eatsのような副業との競争となる。 ブレイクスルーとしては、エリア拡大・安全性の向上には自己位置推定、周囲検出と言ったセンシング技術を、低コストで実現する技術が必要となる。
C-16	10年未満	注目科学技術	ドローンや地上移動型のプラットフォームに搭載された、画像による写真測量(SfM)やレーザ測量(LIDAR)による自然景観の3次元観測のデジタルアーカイブと、機械学習などを用いた観測データの自動解析による環境情報の抽出からの環境変化アセスメント
		ブレイクスルー	・3次元点群データの機械学習による分類手法の確立と普及 ・各種センサの低価格化・高精度化 ・デジタルデータ保存・利用のプラットフォーム構築
C-17	10年以降	注目科学技術	衛星リモートセンシングによる潮流、潮位の計測と変動の予測技術。 近年、高分解能かつ高頻度で衛星データを取得できるようになってきている。衛星データが監視カメラ映像のように動画像として利用できるようになれば、海洋においては潮流、潮位の計測や変動予測に活用できる可能性がある。ダイナミックな潮流、潮位の計測や変動予測は、高潮、高波シミュレーションなどにも応用可能であり、高潮、高波による浸水被害域の正確なハザードマップ作成に貢献できる可能性がある。
		ブレイクスルー	衛星データが監視カメラ映像のように動画像として利用しやすい環境が整備されることが前提となる。そのため国際的に連携して、計画的に衛星を打ち上げ運用していくことが不可欠である。
C-18	10年以降	注目科学技術	空間情報を活用した社会インフラの制御技術
		ブレイクスルー	光センシングによる構造物のヘルスマonitoring技術。特に、光通信伝送路のように面的に分布する、陸上および海底の社会インフラの空間座標や健全性を分布的に検出し、当該インフラの動的制御や保全に応用する技術。
C-19	10年以降	注目科学技術	流域治水
		ブレイクスルー	水理解析技術の発展と、基本的思想を支える法制度の整備
C-20	10年	注目科学技術	光ファイバを用いた巨大構造物の形状モニタリングシステム。 特に海洋分野における洋上風力発電やメタンハイドレート開発など新たな海洋利用を実現する上での大きなブレイクスルーとなる。

	未 満	ブレイクスルー	必要なブレイクスルーは2点あった。1点目は光ファイバで長距離モニタリングを実現するために反射光ではなく散乱光にフォーカスした計測手法。こちらは近年。BOTDR方式の改良により実現された。もう一点は光ファイバの巨大構造物への実装による実証である。これは学だけでは困難で国が進める海洋開発プロジェクトにこのような新たな技術実証を取り入れ、産学が連携して取り組むことが必要。
C-21	10年以降	注目科学技術	コンピュータによる自律化 。自動車の自動運転の事例は産業界で開発が進んでいるようであるが、 自動車に限らず、航空機、船舶、宇宙機、プラントなど多くの機械的な構造物に対しても適応 可能であると考えられる。現在盛んに研究されているAI技術の画像や音声、テキスト処理以外の応用として、様々な機器や構造物の自律化に注目している。
		ブレイクスルー	脳神経回路を模倣したモデルであるニューロモーフィック技術を使った機器や構造物の自律化は、一部の応用で現状の深層学習技術を凌駕する精度や処理効率を達成するとの報告もある。ニューロモーフィック技術を中心としたコンピュータのハードウェアとプログラミングモデルが成熟することにより、革新的な処理効率を引き起こすブレイクスルーを誘発していくことが必要であろう。
C-22	10年未満	注目科学技術	地図不要の自律自動車システム、ソリッドステート Lidar 現在の自動運転システムは、細部まで記述された地図情報を利用している。しかしながら、このような詳細な情報を保有する地図の容量は、小都市でさえ数ギガバイトに及ぶとされ、自律自動車システムの実現への大きな障壁の一つである。 また、コンシューマに広く普及する、安全で手頃な価格の自動運転車を実現するためには、極めて安価な Lidar が必要である。 これらの課題を解決するために、ソリッドステートの Lidar 及び、GPS で大まかな目的地までの経路を取得し、走行しながら詳細な地図情報をリアルタイムに作成するシステムが必要である。 https://www.technologyreview.jp/nl/self-driving-cars-are-useless-without-specialized-maps-this-invention-could-free-them/ https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/design/kyber-photonics-solid-state-lidar-on-a-chip-system
		ブレイクスルー	・ソリッドステート Lidar ・各車に実装可能な程度に演算量が小さい、走行に必要なローカル情報のリアルタイム作成アルゴリズム
C-23	10年未満	注目科学技術	無人航空機・地上レーザー等の計測技術や ICT を活用した森林施業の効率化
		ブレイクスルー	無人航空機・地上レーザー等の計測で得られた大量の点群データから簡易に森林の構造を把握できる安価なソフトウェアの開発。
C-24	10年未満	注目科学技術	輸送機器の電動化
		ブレイクスルー	電力から動力への変換効率の向上 再生可能エネルギーの発電コスト低減 二次電池・燃料電池の性能向上
C-25	10年以降	注目科学技術	再生可能エネルギーを用いたゼロエミッション・シティ
		ブレイクスルー	太陽電池の高効率化、長寿命化、パワーエレクトロニクスの高効率化、長寿命化、蓄電池の小型化・軽量化・低コスト化など、多様な分野でのブレイクスルーが必要。
C-26	10年未満	注目科学技術	小型計測器を用いた個々人の周囲の環境計測
		ブレイクスルー	科学技術の進歩により計測精度が向上し、従来困難であった大気や水などの個々人の周囲の環境や、個々人の健康状態のモニタリングが可能となりつつある。
C-27	10年未満	注目科学技術	都市下水中に混入している下水集水域居住者の健康に関連する物質をリアルタイムにモニタリングし、特定の疾病の流行や生活習慣に関する情報に変換し、ビジネスに活用したり社会に発信する技術
		ブレイクスルー	都市下水中に含まれる微量物質をリアルタイムに計量する超高感度センサー技術
C-28	10年以降	注目科学技術	安全工学(システムのリスクを低減・制御することで事故を避ける技術の総体)
		ブレイクスルー	被害低減策の体系化(これまで「事故を起こさないようにする」技術が求められてきて結果として保守的な対応になってきたため、今後は「仮に事故を起こしても被害を局在化させる」という技術・マインドに社会が向かう必要があると思います)、安全目標の設定(この程度のリスクなら社会・個人が許容できる、といえる目標の設定手法の確立)、リスクコミュニケーションの手法の確立

C-29	10年以降	注目科学技術	災害時に倒壊した建物内に閉じ込められた要救助者を迅速に助けるためにコンクリートを火薬で破壊する技術
		ブレイクスルー	アスベストを利用した建物の根絶がなされれば当該技術の有用性は高いと思います(破壊によって破片がある程度飛散するため)。あるいは、アスベストの飛散によるリスクよりも要救助者の救出を選択するという社会的合意が得られることはブレイクスルーになるかと思います。
C-30	10年以降	注目科学技術	森林や湿原など生態系を活用した防災・減災技術(Eco-DRR)
		ブレイクスルー	生態学・森林科学・土木工学・気象学など様々な分野間の連携。
C-31	10年以降	注目科学技術	Ecosystem based Disaster Risk Reduction Nature Based Solutions
		ブレイクスルー	社会の価値観の変化、生態系サービスの可視化・価値づけ、法制度の再編
C-32	10年未満	注目科学技術	ひとたび大規模な森林火災が生じると莫大な量のCO ₂ が排出されます。その量は世界のCO ₂ 排出量の30%程度と試算されています。森林火災を未然に防ぐ、あるいは迅速に消火するためには、大規模火災がどこで・いつ発生し、どのように拡大していくかを正確に予測する技術が求められます。そのため、「 大規模火災の高精度シミュレーション技術 」の確立に注目しています。
		ブレイクスルー	大規模火災の高精度シミュレーションを実現するには、現象をまずモデル化する必要がありますが、現在はそのモデルが確立されていません。その理由は、数kmにもおよぶ大規模火災を実験室スケール(小スケール)で再現することが難しいからです。これをブレイクスルーするためには、大スケールでの火災現象を小スケールで再現するための模型実験理論の確立が必要不可欠だと考えます。
C-33	10年未満	注目科学技術	災害大国であるわが国において、近年全国的に地震や台風、豪雨等の被害が頻繁に発生している。特に、降雨量が100mm/hを超える集中豪雨による被害が多数発生しており、その一つ一つが甚大な被害をもたらしている。そのため、防災・減災の観点から災害状況の正確な把握や予測に関する科学技術の発展は必要不可欠であるといえる。 一方でわが国は超高齢社会に突入しており、今後より一層安全で安心な社会の実現が求められる。そのような状況の中、住民や地域における事前準備の不足や防災時における住民の避難誘導の遅延等によりさらなる二次災害が起こる可能性も高くなる。そこで、今後より一層高齢者等の災害弱者が多くなる現状を鑑み、これまでのハードウェアによる対応を行ってきた防災対応を背景として、今後注目される科学技術は、 人工知能(AI)等の先進技術を活用した迅速で正確な状況データの収集・分析、そしてその結果から導かれた対処の情報を可能な限り素早く住民に届け、命を守るための先進的な科学技術の利活用 である。
		ブレイクスルー	従来、水位計やカメラ、センサを用いて河川の水位が計測されており、適宜状態の把握結果に基づき住民に対して必要な指示が出されていた。そのような中、特に河川水位が急激に上昇する豪雨災害の場合、短時間に急激な変化が起こることから避難等の時間に十分な余裕を持ったタイミングで情報提供や指示を住民に伝えることが難しく、堤防の決壊を伴うことで逃げ遅れ等が頻繁に発生している。そこで人工知能(AI)を活用した新たな河川氾濫に着目した危機管理システムは、過去に甚大な被害をもたらした膨大な河川氾濫のカメラ映像(画像)をもとに学習させ、新規にカメラで撮影された映像による画像判読から豪雨時早期に危険性を見出すものである。
C-34	10年未満	注目科学技術	地理的な犯罪予測と、予測に基づく警察活動の技術。 地理的犯罪予測は、過去の犯罪の発生時刻や発生場所の時空間的パターン性を解明し、将来の犯罪発生を予測する技術である。欧米で技術開発が進められてきたが、日本においても先駆的な研究が出つつあり、オープンデータ、AIの発展とともに、技術として確立していくことが期待される。 予測に基づく警察活動は、地理的犯罪予測の結果を活用して、あらかじめ犯罪の発生が想定される時間と場所に警察官を配置する技術である。こちらも欧米では実証実験が進められてきたが、日本でも、京都、神奈川、長野と先駆的な取り組みがなされている。現状ではまた試行段階にあるが、警察内部にも、根拠に基づく施策実施や、働き方改革に伴う業務負担の軽減を求める動機があり、10年以内には実現されていることが期待される。

		ブレイクスルー	<p>犯罪情報のオープン化。 2019年から全国警察が犯罪情報のオープンデータ化を始めたが、空間粒度や公開罪種に制約がある。これがよりオープンになれば、関連する研究、技術が飛躍的に発展することが期待できる。</p> <p>警察と大学との協働 警察と大学とは、歴史的に緊張関係にあったが、近年、京都、福岡、東京、大阪等で、データをシェアしながら共同で研究を実施し、その成果をもとに、論文発表と警察活動の高度化を図ろうとする取り組み事例が見られる。これが一般化すれば、これまで未踏であった、警察と大学との共同研究が実施され、技術発展の大きな足掛かりとなる。</p>
C-35	10年未満	注目科学技術	南海トラフ地震の発生予測と即時津波予測を統合したシステム開発。 即時津波予測システムは現在運用されているが、それに最新の科学技術を組み合わせて、南海トラフ地震などの発生前に地震の切迫度を評価でき、また地震発生後に迫り来る津波を可視化できる様にして、従来より飛躍的に性能が向上するシステムを構築することである。
		ブレイクスルー	各研究者や研究グループが独自に研究開発してきた技術は、現行の即時津波予測システムに関連する可能性をひめていたが、これまで各技術が早熟すぎて、その関連を実現する試みがなされていなかった。その機が熟したことに着目し、即時津波予測システムと統合する研究を実施することがブレイクスルーである。その新たに導入しようと検討している科学技術は、津波電離圏ホールを検出する手法、南海トラフに津波ブイを設置して観測する技術、地震活動の統計解析に基づく地震発生予測、AIを用いて地震活動の精密検知の手法である。
C-36	10年未満	注目科学技術	BIM/CIMの技術。 i-Constructionにも含まれるが、構造物等を3次元化し建設からメンテナンスまで共有することができる。効率化が図れる。
		ブレイクスルー	大容量の操作環境が必要となる。
C-37	10年未満	注目科学技術	i-Construction 建設作業や業務において、ICTを活用し効率化を図る技術。
		ブレイクスルー	現在を進められている技術であり、より社会にアピールが必要と思われる。
C-38	10年未満	注目科学技術	グリーンインフラ、「 生態系を活用した防災・減災(Ecosystem-based disaster risk reduction; Eco-DRR) 」と呼ばれる、生物多様性や生態系の本来持つ機能を生かした防災・減災対策技術。Nature Based solutionといった生物多様性を生かした気候変動への緩和策とその技術
		ブレイクスルー	今まで気候変動や異常気象により生物多様性が減少することに注目が集まってきた。むしろ発想の転換で、生物多様性や生態系を保全することが気候変動の緩和や防災に繋がることの意識改革。その効果の基礎科学的検証が必要である。
C-39	10年未満	注目科学技術	斜面崩壊、地すべりの高リスクエリアを数値化し、これらに伴う土石流等を森林・農地で減衰させ、防災・減災に貢献させる。 このためには、特にどこが高リスクエリアなのかを明らかにすること、それに対して地域がどのような行動をとるべきかを明らかにすることが重要である。 これが実現すれば、現在膨大な砂防関連予算が費やされているが、大幅なコストダウンにつながる。
		ブレイクスルー	ドローンを用いた林内環境の把握。具体的には下層植生の特定が可能な解像度での撮影を可能にすることと、同じく林内表層地質の水分含有量の測定が可能にならなければならない。いずれも、低高度での飛行が必要になるため、現在よりもより精度の高い飛行が必要であるとともに、これらに合わせたカメラの開発が必要。

付録7 分野別アンケート結果一覧(宇宙・海洋・地球・科学基盤)

注:自由記述内容はそれぞれ、注目科学技術=「Q2. その注目科学技術の概要をご説明ください」、ブレイクスルー=「その注目科学技術の実現に向けてブレイクスルーが必要であれば、その内容を教えてください」の自由記述内容について記載。原則として原文を用い、一部、中心と思われる科学技術について太字・下線を付した。

ID	実現時期	分類	自由記述内容
S-1	10年以降	注目科学技術	前述の技術(微小な原始重力波起源宇宙マイクロ波背景放射の偏光を地上で観測する技術)を宇宙空間で実現する技術
		ブレイクスルー	宇宙空間での極低温技術, 超伝導半波長板, L2 ポイントから地球への大容量情報転送
S-2	10年以降	注目科学技術	JAXAの主導する宇宙衛星観測実験プロジェクト“LiteBIRD”による3K宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のBモード偏光場の観測。 Bモード偏光場は宇宙誕生時に生成された重力波の名残であるため、その検出と統計解析に成功すれば、「宇宙の初期条件」が世界で初めて明らかになる。成功すれば関連研究者がノーベル物理学賞を確実に受賞するプロジェクトと言われている。
		ブレイクスルー	銀河系内のダストなどを起源とする前景放射(CMBに対してノイズとして振る舞う)の除去法の開発。観測機器のEMC対策。これらを為すには、相当のマンパワーと研究費が必要。
S-3	10年以降	注目科学技術	宇宙エレベータ。 ロケットを使わず低コストかつ安全に宇宙空間と行き来できるようにするための技術。
		ブレイクスルー	軽くて丈夫な素材。巨大構造物を安全に建造する技術。
S-4	10年未満	注目科学技術	宇宙エレベータ。 早く作って、宇宙からエネルギーをとったり、衛星をコントロールしたりしてほしい。
		ブレイクスルー	一般的に言われている通り、エレベータを支える最強のファイバーの開発。
S-5	10年以降	注目科学技術	宇宙エレベーター。 最も簡単なイメージは宇宙まで伸びた高い塔であり、ロケットを必要とせず、より容易にかつ安価に宇宙へのアクセスが可能になる。各種宇宙開発が活発になるのはもちろんのこと、現在そのメンテナンス性が一つの課題になっている宇宙太陽光発電も実用化に近づくと思われる。
		ブレイクスルー	宇宙エレベーター建設を可能とする、軽量かつ高い強度を持った材料の開発。有力候補はカーボンナノチューブであるが、現在は数cmの長さのものしか作れていない。エレベーター建設には10万kmのワイヤーが必要となるため、この点を突破するブレイクスルーが必要である。
S-6	10年未満	注目科学技術	宇宙からの地震先行現象観測研究: マグニチュード7以上の地震は全球で年平均16回、6以上は約130回発生するため、地上定点観測に比べ短期間に多数のイベント観測が可能となり、これが各国で衛星や宇宙ステーションからの観測が計画・実施される大きな理由となっている。 2017年の大規模地震対策特別措置法の見直しまで、我が国で予知可能な地震は東海地震のみとされており、気象庁が24時間体制で歪計監視を行ってきた。その根拠は1944年東南海地震直前の隆起とされているが、仮にこの地震が100年毎に発生すると仮定すれば、100回のイベントデータを取得するには1万年もの年月が必要となる。宇宙からの地震先行現象観測ではそれが圧倒的に短縮可能となる。 2004年6月29日、フランスはロシアのDneprロケットによりバイコヌール宇宙基地から地震電磁気観測衛星:DEMETERを打上げた。DEMETERはマグニチュード4.8以上の地震9000回の解析結果として、地震前4時間以内にVLF帯の夜間電波強度が低下することを報告した。次に行うべき観測は、本現象の独立した検証と、地方時依存性の調査であろう。 宇宙開発の進展著しい中国は、2003年から国家863計画(中国ハイテク研究)の一環として、中国地震局が地震電磁衛星の研究を開始し、国防科工局と共同で首都圏地震電離層試験網を2009年に設置、国家航天局とイタリア宇宙機関との協力により、世界最古の地震計を発明した張衡の名前を冠した地震電磁観測衛星初号機:ZhangHeng-1を、2018年2月2日に酒泉宇宙センターから打上げ、2021年以降追加し5~6機の衛星群を構築する予定である。(参考 http://www.leos.ac.cn/ http://ceses.roma2.infn.it/)

		ブレイクスルー	<p>地震前大気圏・電離圏変動メカニズムの解明には多分野に渡る学際的研究が必要不可欠であり、そのためには地上観測と連携した地圏－大気圏－電離圏の時空間変動を包括的に観測する衛星群による観測が論理的帰結となる。</p> <p>宇宙基本法の成立から我が国の宇宙政策は安全保障及び産業振興を重点化し、地球科学・宇宙科学の将来計画の空白が続く今、小型・超小型衛星による地球科学・宇宙科学ミッションは、基礎研究・基盤研究を維持する唯一の現実的方策である。</p> <p>基礎研究・基盤研究は科学・技術の基盤であり、これなくして産業振興はもちろん、イノベーションはおろか国防すらも危ういものとなろう。(既にその兆候は現れつつある)</p> <p>参考資料: 【論説】宇宙基本計画 利用大国への道は険しい(茨城新聞, 2020.7.15) http://3coco.org/a/modules/d3pipes_2/index.php?page=clipping&clipping_id=99018 新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立(児玉, 2018) https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201802282931064357 地震短期予測の可能性と防災(上田, 2013) https://bosailab.jp/library/uyeda/uyeda_report_20130126.pdf</p>
S-7	10年未満	注目科学技術	宇宙技術
		ブレイクスルー	電池、燃料電池、原子力電池
S-8	10年未満	注目科学技術	宇宙線ミュオンを利用した建造物の可視化技術
		ブレイクスルー	とくになし
S-9	10年以上以降	注目科学技術	宇宙探査、特に月・火星圏を含む遠方への探査
		ブレイクスルー	既に短時間・限られた人と物資が宇宙に滞在することは十分に可能だが、月・火星を含む有人宇宙探査を進めるに、大質量を安価に宇宙に輸送するための推進技術について1桁規模の大きな科学技術が必要になると考えられる。
S-10	10年未満	注目科学技術	宇宙探査・宇宙利用
		ブレイクスルー	高効率・高推力な宇宙輸送技術
S-11	10年以上以降	注目科学技術	宇宙探査技術 : 現在のところ、NASA が圧倒的にリードしており、宇宙における日本の科学技術は大きくおくれをとっている。また、中国も技術開発を進めており、その進歩は目覚ましい。
		ブレイクスルー	現在のところ、小惑星探査に終始している日本であるが、サンプルリターンミッションを成功させた功績はある。今後、理学と工学を結びつけ、大学、国研、ベンチャー企業、その他関連企業などの知見・技術をうまく融合することができれば、それらは実現可能となるかもしれない。
S-12	10年以上以降	注目科学技術	宇宙用エレクトロニクスの高信頼性に関する技術 宇宙開発が叫ばれているが、カメラ、半導体、バッテリーなどの宇宙空間での高信頼性に関する議論は、市場の小ささからあまり重要視されていない。
		ブレイクスルー	戦略的な開発と、資金投入。
S-13	10年以上以降	注目科学技術	火星探査に必要なエネルギーを現地で発生するための、宇宙用核分裂発電システムの技術開発 。NASA において Kilopower プロジェクトが進んでおり、そのための実証試験として KRUSTY 実験成果も、例えば https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1722554 等で報告されている。
		ブレイクスルー	従来の宇宙炉設計では高濃縮ウランの使用が検討されている。しかし、民間企業や非核兵器国が原子炉電源を必要とする宇宙開発プログラムを開発する未来を思い描いた場合、高濃縮ウランの利用は核不拡散の観点から大きな課題となる。そこで https://www.ans.org/meetings/wm2020/session/view-154/ にて議論されているように、低濃縮ウランを燃料とした(打ち上げ失敗時のリスクも踏まえた)安全な宇宙用原子炉に関する研究開発が重要になると考えられる。
S-14	10年	注目科学技術	月面の水資源探査

	未 満	ブレイクス ルー	月面での電磁波や中性子に代表される放射線の測定により、水資源を探索する。月 で水資源を見つければ、中国、米国や民間企業がしのぎを削るなかで、日本も重要な 位置を占めることができる。
S-15	10 年 未 満	注目科学 技術	月面探査技術 。H3 ロケットの開発も最終段階に入っており、日本も米国および米国の 民間企業に引き離されない程度の技術の蓄積が進みつつある。今回の月面探査につ いてはエレクトロニクスの進歩を受けて 1960 年代とは比較できないほどの効率化が予 想される。例えば、直接光通信による月面に送り込んだヒューマノイドロボットの遠隔操 縦(スレーブモードコントロール)等。月面とは通信をする上で光で数秒ほどのタイムラ グが生じるが、火星やリュウグウほどではない。これらは月面の学術的探査のみなら ず、多くの「スピンオフ技術の発展」が期待される。(実際にアポロ計画の時もそうだっ た)。
		ブレイクス ルー	21 世紀の現在においては 1960 年代に存在しなかった、「光通信」「近傍大容量通信 (ブルトウス)」、ドローンに代表される「ネオジウム磁石モーター」「パワー半導体」、さ らに高効率薄膜太陽電池、等、「ハードウェア」については大きな発展を遂げた。今後 求められるのは、それらを制御するソフトウェア、あるいは AI 等の操作援用システムな どである。(これはそのまま、「テレワークによる工場での生産管理」に転用可能)。さ らに一部の構造材料(鉄鋼材料、セメント、コンクリート)を月面資源から作製できるよ うになれば、さらなる飛躍が期待される。「ハードウェア」としては新しいタイプの「冶金技 術」が必要になる可能性がある。
S-16	10 年 以 降	注目科学 技術	現在進められている日本も参画する国際宇宙探査「アルテミス」計画は、月へのピンポ イント着陸技術を実現することが目的に進められている。2020 年の統合イノベーション 戦略に定義される、コロナ禍を踏まえた強靱で持続可能な社会づくりのために、人類 の知的好奇心を満たし人類の活動領域の拡大を目指して、宇宙科学技術の研究開 発に取組み「新たな日常」づくりに貢献するものである。さらにその先の「新たな日常」 づくりのため、 濃い大気をまとう重力天体である惑星(特に火星)への着陸技術の獲得 が注目している科学技術である。
		ブレイクス ルー	「アルテミス」計画では、大気をまわらない小重力天体である月へのピンポイント着陸技 術を実現することが目的の一つである。さらにその未来には、濃い大気をまとう重力天 体である惑星(特に火星)への着陸技術が必要とされる。重力天体への着陸技術は 「アルテミス」計画で実現が可能とされるが、大きな差は惑星大気中を飛行する時の濃 い大気の影響の有無であり、大気の空力特性を存分に利用した着陸技術の実現が、 省エネルギー・省コストでの着陸成功の可否を握ると考えられる。大気突入の際の過 熱対策や、ドローンのようなプロペラ機での大気中移動技術が、ブレイクスルーとな ると予想できる。
S-17	10 年 以 降	注目科学 技術	高速で大規模な宇宙空間の移動技術 滅びつつある地球を救えなかった場合のバックアッププランであると共に、小惑星等 の地球への激突に備える(地球生命の他星系への移動)ため。
		ブレイクス ルー	開発費の大規模な投入。
S-18	10 年 以 降	注目科学 技術	将来の宇宙探査など長期惑星探査における身体スキャンの技術に活用できるもの に 注目。自分も一部ストレス評価指標で研究を推進しているため。その研究の流れで、 意外にこの領域に使える技術がないことがわかったが、未来あるいは遠隔医療を考 えると、ニーズは高い分野と思っている。
		ブレイクス ルー	・遠隔で管理できる評価装置・評価法開発 ・個人情報をとまなう実証試験におけるデータのクラウド管理と医師との連携
S-19	10 年 以 降	注目科学 技術	生命が存在可能な太陽系外惑星の発見 。 現在までに 4000 個を超える太陽系外惑星が発見されており、中には太陽に似た質 量・明るさの恒星の周囲を回る地球サイズの岩石惑星も見つかり始めている。太陽系 外惑星の発見は 1995 年のペガサス座 51 番星の惑星(2019 年ノーベル物理学賞受 賞テーマ)に始まり、NASA 等による専用観測衛星の打ち上げなどによりここ 20 余年 で一大研究分野へと成長を遂げた。今後は、岩石でできた地球タイプの太陽系外惑 星の大気の成分分析や惑星表面からの反射光の精密分光観測などから、表面に海 が存在するか否か、あるいは生命の兆候を示す大気成分が検出されるか否かが注目 される。
		ブレイクス ルー	地球サイズの太陽系外惑星は非常に小さく暗いため、従来の望遠鏡では感度・分解 能共に不足していて、大気分析や反射光の分光を行うことが困難である。これを 実現するためには、口径 30 メートル級の可視光赤外線望遠鏡と高分散分光装置が必 要である。
S-20	10 年 以 降	注目科学 技術	無線電力供給技術 。特に宇宙空間で発電された電力を無線で地上のデバイスに供 給する技術。
		ブレイクス ルー	精密な電磁波コントロール技術が必要。

S-21	10年未満	注目科学技術	有人宇宙探査に向けた宇宙環境計測技術
		ブレイクスルー	今後は日本もより積極的に有人宇宙探査に乗り出すべきだと考えている。特に月・火星を含めた宇宙探査を行う場合、人間が長期間宇宙に安全に滞在するため宇宙放射線、宇宙嵐など宇宙環境の予測技術について1桁精度の高い計測が必要となると考えられる。これには、太陽活動を含めた宇宙環境の予報技術と宇宙放射線・宇宙嵐などの測定技術の両方にブレークスルーが必要であり、これらは10年から20年かけて育成していくべき基礎研究と考えられる。
S-22	10年未満	注目科学技術	海底資源や海洋資源の開拓、海水中に存在するイオンの有効活用
		ブレイクスルー	例えば、その資源どのように掘削するか、目的成分を抽出または濃縮するための膜技術、分離濃縮した溶液からの簡便な材料合成転換技術
S-23	10年未満	注目科学技術	海面の高さを、高頻度で面的に把握する技術の確立。 人工衛星海面高度計の観測技術の向上により、外洋の変動予測技術が格段に向上し、気候や気象の予測精度は格段に向上した。ところが、現在の衛星観測では時間と空間の分解能に限界があるため、人間活動の中心である沿岸域での海況予測が達成されておらず、我々の暮らしの中での現実的な予報の達成度は向上していない。
		ブレイクスルー	面的な海面高の計測が可能な合成開口レーダ技術の向上はあるが、それを小型衛星にも搭載できるまで小型化・低価格化するための改良技術が成されれば、より高頻度の観測が可能となり、漁業・運輸・気象予報・救命・安全保障などの観点で大幅な改善がもたらされる。
S-24	10年未満	注目科学技術	海洋利用の巨大システムのデジタル化
		ブレイクスルー	重厚長大産業への人工知能適用は思う様に進んでいない。ハード面では日本の高い技術力が競争力につながっているが、情報技術関連人材が不足しており、多くのデータが無駄になっている。ここで求められるのはシステムイノベーションであり、ソフトとハードが連携したシステム作りが重要となる。必要なブレークスルーはこうしたシステムイノベーションを起こすための方法論だと考える。
S-25	10年未満	注目科学技術	深海に到達することが可能な自動昇降ブイ(アルゴフロート)を全球に展開することで、海洋深層の流れや水塊の分布を計測する。 海洋深層は、深宇宙の探索と同様に、観測的把握が難しいフロンティア領域であり、そこには数千～数万年の地球の記憶が刻まれている。それを正確に把握することができれば、国連の持続可能な開発目標に直結した、この後の数十年～数百年間の気候・生態系変動の予測が可能になる。
		ブレイクスルー	深海でも使用可能な高精度の化学・生物センサーの開発と、自動昇降ブイの量産化。さらに、それらを国際展開するための組織作り。
S-26	10年以降	注目科学技術	生分解性海洋性プラスチック
		ブレイクスルー	地球規模で海洋プラスチックを減少させることが必要であり、生分解性海洋性プラスチックの合成に注目が集まっている。具体的には合成系の確立と評価系の確立が必要とされている。
S-27	10年未満	注目科学技術	AIを利用した様々な事項の予測と利用
		ブレイクスルー	学習させるためのビッグデータが必要
S-28	10年以降	注目科学技術	これまでの予想を遥かに超えるパンデミックや自然災害に対する科学技術の備え が必要である。AIが社会に浸透してくるとこれからは「予測の社会」と考える。明日、明後日の天気予報やポイント予想は当たるようになってきたが、数カ月予想はまだ当てにならない。天気だけでなく、 社会的・経済的な状況から予測 することが必要とされる。
		ブレイクスルー	予測のためのソフトやAI
S-29	10年未満	注目科学技術	光格子時計技術に基づく、高精度の上下地殻変動観測技術 は、地下の不均質な地震発生場の推定に極めて有用と考えます。
		ブレイクスルー	幅広い空間領域に観測網を設置するために、コストを下げるのが課題と耳にしています。
S-30	10年未満	注目科学技術	自然の攪乱に対するレジリエンスに関して予測する技術。 自然生態系は地震・洪水・干ばつなど様々な攪乱のある中である程度の耐性を持って成立しています。一方で近年自然がこれまでに経験してこなかったような人為的な環境破壊や異常気象が起こっています。自然はどのような攪乱に弱く、どの程度ならば自然の回復力によって回復が期待されるのか。持続可能な開発をしていく上で、このような自然の頑強性レジリエンスに関する研究が必要とされています。

		ブレイクスルー	生態学・地学・工学などの異分野融合によるアプローチ。
S-31	10年未満	注目科学技術	集合行動の予測 特定の目的を持たない個人(個体)の振る舞いから、集団レベルで機能が創発する現象ただ、そこれで創発する機能は、初期状態によって大きく変わる複雑系として理解する必要がある
		ブレイクスルー	個人や個体(ロボットを含む)レベルの行動と集合体の機能を理解する目標を掲げた、人文・社会科学(行動学)と理工学(主に計算科学)の融合研究による予測科学の構築
S-32	10年未満	注目科学技術	数理モデルによる政策効果の予測 感染症対策など国が政策的な対応が迫られることが多い。政策が社会にどのような効果をあたえるかを推測することが重要であることは明らかである。現在のところ所謂金融政策以外は経験と勘に基づいているようにおもわれる。優れた数学モデルを構築しそれをもとに予測することができるようにすれば、感染症対策だけではなく、自然災害対策にも十分役立つとおもわれる。
		ブレイクスルー	いかに良いモデルが作れるかが肝要である。このためには経済学者、社会学者と数学研究者との共同研究はもちろん政策決定の現場からのフィードバックが必要である。そのためには、数学においては大学入試において文系理系の区別を(英語同様)廃止すべきである。
S-33	10年未満	注目科学技術	地上および人工衛星により地球環境・資源・自然災害・農作などの状況を複合的に高分解能でモニタリング・評価する技術
		ブレイクスルー	高分解能および複合的に評価やモニタリングするためには、たとえば農作であれば作付け時期、収穫量など現場のデータなどと組み合わせていくことなどが必要
S-34	10年未満	注目科学技術	微小な原始重力波起源宇宙マイクロ波背景放射の偏光を地上で観測する技術
		ブレイクスルー	大規模な超伝導検出器の制作と運用、読み出し技術、マイクロ波ビッグデータの解析の技術と大規模スーパーコンピュータの開発
S-35	10年未満	注目科学技術	複数の時系列データからシステムの因果構造を推定する解析技術。 細胞や脳、社会、生態系といった複雑システムを理解し、予測・制御することができるようになる。
		ブレイクスルー	非線形力学系の研究分野と機械学習分野がより近接し、融合することが必要。
S-36	10年未満	注目科学技術	プロトン移動
		ブレイクスルー	プロトン移動理論の構築、プロトン移動が効率よく起こる系の同定
S-37	10年未満	注目科学技術	ベイズ推定などの統計的裏付けのある曲線フィッティング手法の開発
		ブレイクスルー	表計算ソフトなどのプラグインとして組み込める形(エクセルのソルバーと同等のレベル)での、特にコンピュータの糖度な知識を持たない者でも使用可能なパッケージとしての提供。これにより、データ科学を今までとは異なったレベルで、データ科学以外の分野の研究者が活用することが可能となり、今までにない研究の加速が可能となると考えられる。さらに、すでに一部行われているような実験パラメータ最適化の全自動化も促進されると考えられる。
S-38	10年未満	注目科学技術	遠隔での自動データ取得と大容量のデータ転送。 人が常駐して継続的に観測できないような遠隔地、狭い地域、マイクロな領域、危険地帯、上空、深海などに生息する動物等の行動データや生理データを、生息環境の気象などの環境データを取得するような技術。
		ブレイクスルー	データの保存と転送は、計測器や計算機(コンピュータ)および計算アルゴリズムの技術と情報機器の改良・開発で発展し続け大容量化は実現可能だと思いが、それを支える電源を小さく、大容量にするのが律速になっているようである。電源を小型化するか、超省電力で動作する計測機器や計算機の開発が必須だと考える。
S-39	10年未満	注目科学技術	近年 ラボオートメーション技術 が大きく発展し、単なる作業の自動化以上に、高い再現性と精密な操作が可能になりつつある。特に海外の研究機関では実験の自動化技術を積極的に取り入れているものの、日本では未だに「手技」に拘り続けている風潮がある。高度な実験操作の自動化が可能になれば、その波及効果は非常に大きく、生物学・化学・材料科学分野で広く展開できるものと期待できる。
		ブレイクスルー	操作の自動化には、これまでに積み重ねられてきた実験科学技術と情報科学との融合が不可欠であると考えている。これまでの職人芸をいかにデジタルな表現に落とし込むかという点において、強化学習・機械学習等の活用が必要とされている。
S-40	10年	注目科学技術	実験の自動化。 化合物の合成実験、化合物の活性を調べるアッセイ実験など。今年度のコロナの状況で特に必要性が増し、また話をよく見かけerようになった気がする。

	未 満	ブレイクス ルー	別分野なので詳細はわからないが、機器や仕組みが高価なように感じる。大勢の人が 試しやすくなるといいのかもしれない。
S-41	10 年 未 満	注目科学 技術	多様性を解析する情報処理システムの構築。 ヒトの多様な生活を取りまとめて効率化を図ることができる。また、研究においては腸内 細菌の多様性を解析でき、有効な研究ができる。
		ブレイクス ルー	どのようなプログラミングを構築するか、また、多様性をどのようにしてデータ化するか、 などの技術革新が必要と考える。
S-42	10 年 未 満	注目科学 技術	理論駆動モデリングとデータ同化を融合した数理モデリング技術。 この技術を用いれ ばデータ駆動によるメカニズムのブラックボックス化を回避することができ、かつ定量的 な予測が可能となる。また原理を解明することができるため、予測の精度も事前に知る ことがかかろうであり、予測の理由と確率を説明できる機械学習モデルの構築が可能と なる。
		ブレイクス ルー	理論駆動数理モデリングの構築手法を定式化することができるのか？全く分かってい ない。個人の技量に依存することが多分にあり、数理モデリングの構築術に関する技 術教本が望まれる。理論数理モデリングの精度をどのように評価するのかも大きな問 題となる。
S-43	10 年 未 満	注目科学 技術	He パスを用いた軟 X 線分光法。 軽元素を含む物質との相互作用が強い軟 X 線は空 気中でも 1 mm 程度伝搬すると強度が減衰してしまうため、従来は観測したい試料を真 空チャンパー中に設置して軟 X 線分光を行ってきた。しかしオペランド分光などの 組み合わせを考えた場合、電場印加装置や温度変化のセットアップなどは大気圧下 で組み上げる方が容易である。また本当のその場観測を行うには真空中での試料表面 の分子の状態分析よりも大気圧下における動作下における分析を行うべきである。 そこでヘリウムガスを用いた測定セットアップの開発が注目される。原子番号が 2 番で あるヘリウムは一般的な軟 X 線のエネルギー領域の光に対する吸収強度が低く、ヘリ ウムで満たした空間では軟 X 線は 1 cm 程度まで透過率 90% 以上で伝搬させることが 可能になる。そのため軟 X 線ビームをヘリウムガスで満たした空間に照射し、その空 間に試料を設置しておけば、大気圧下での状態分析が可能になる。密閉空間自体は 大きくとることも可能なため、そこに外場印加装置などを配置すればオペランド軟 X 線 分光や、大気圧下での試料の顕微分光などを実施することができると考えている。実 際に SPring-8 の理研ビームラインやスウェーデンの MAX II の建設ビームラインにお いてトライされると思われる。
		ブレイクス ルー	原理は容易であるが、実際に組み上げて信号が取得できるようになるまでの光学調整 や外場印加による試料の状態変化が He パスセットアップの中でも同様に起こってい ることを確認していくまでに試行錯誤の時間がかかると考えられる。現場での人々の専 門領域は深く狭いことが多いと思われるため開発を加速させるには電池材料、ソフトマ ターなど実際のものを扱う専門家と軟 X 線分光の光学系に精通した専門家との協力が 不可欠と考えている。
S-44	10 年 未 満	注目科学 技術	X 線自由電子レーザーを用いた非晶性物質の回折イメージング
		ブレイクス ルー	現在、理化学研究所高輝度光科学センターにより SACLA が運営され、X 線自由電 子レーザーを利用することは可能であるが、その適用可能性を示す基礎データの蓄 積が不十分である。生体高分子や金属材料などに関して様々な基礎データの蓄積が 必要であり、それを実現するように利用推進を図るべきである。
S-45	10 年 未 満	注目科学 技術	タニグチ式望遠鏡の技術 について注目しています。この技術を用いれば、これまでの 宇宙望遠鏡のコストの 200 分の 1 まで減少させることができ、これまでの歴史上解決し 得なかった Seidel 収差 5 問題をすべて解決出来ます。理論は確立しており、望遠鏡 の試作品も仕上がっています。予算および提携先さえあれば、宇宙での使用を想定し た素材を用いて、より解像度のよいものを制作することが出来、今後の月面探査や火 星探査など将来的に深宇宙探査へ役立てることが出来ます。日本で現在進行形の望 遠鏡のプロジェクトがあっても、この技術も並行して行う価値があります。日本の予算が 少ない中、とても良いこの技術を形にすることは、とても価値のあることだと思ってい ます。
		ブレイクス ルー	予算と提携先さえあれば実現が可能のため、お互いのニーズが一致するようなマッ チングが出来るネットワークがあることを望みます。
S-46	10 年 未 満	注目科学 技術	デュアルコム分光を利用した汎用分光システム。 近年、光周波数コム(光コム)という精 密制御された新しいレーザー光源に関する研究開発が進んできている。デュアルコム 分光は、2 台の光コムを用いたフーリエ分光法の一つで、従来よく知られたフーリエ赤 外分光計 (FTIR) に比べて、非常に高精度かつ高速な測定が実現できることから、次 世代の分光計として注目されている。
		ブレイクス ルー	デュアルコム分光の計測技術自体は、各国の大学や研究所のレベルでは確立されつ つある。しかし、現行の光コム光源システムはやや扱いが複雑で、また光源コストが高 額であることなどの理由から、広く普及するには至っていない。光コム光源システムの

			低コスト化、簡便化、汎用化されたモデルシステムの開発などの点においてブレイクスルーが達せられれば、この技術はさらに急速に発展・普及するものと思われる。
S-47	10年未満	注目科学技術	ランダムレーザー光源技術関連: センサーや生体観察イメージングには高輝度、強度むらの無い光源が必要となり、その有力な技術がランダムレーザーである。不規則な構造から発生するレーザーであるため、様々な材料でレーザー発振を誘起できるが、発振波長域が狭く、電気駆動の実現が必要となっている。
		ブレイクスルー	電気駆動化のデモンストレーションが必要。
S-48	10年未満	注目科学技術	レーザー技術と超音波技術を組み合わせた光音響イメージング技術による複合材の非破壊三次元イメージング技術。 例えば SDGsの観点からセルロースナノファイバ強化樹脂の開発が進められているが、その開発において内部繊維配向や内部繊維分布を計測するために X 線 CT が用いられている。しかし X 線 CT は大掛かりな装置が必要で、計測時間が長く、かつ計測可能範囲は数 cm 立方程度で実用的に用いることは現状難しい。また形態イメージングであることから画像診断には高度に専門的な知識が必要である。光音響イメージングは機能イメージングが可能で、素材を見分けることができ、超音波エコー装置と同等の簡便さで広範囲を短時間に計測可能である。
		ブレイクスルー	光音響イメージングでは、超音波センサと計測対象との音響カップリング材として水やゼリーが用いられているが、実用的ではないため、直接接点することなく、空中をリモートで計測できる技術を開発する必要がある。
S-49	10年未満	注目科学技術	高強度・超高速レーザー科学技術 について: これまで人類が手にしたことのない短い時間分解能であるアト秒(10 ⁻¹⁸ 秒)や超高強度レーザー電場(>10 ²³ W/cm ²)の実現により、原子殻や素粒子のダイナミクスを直接、実時間観測できるようになり、これまで見たことのない新しい現象の発見が期待される。
		ブレイクスルー	超高強度レーザー電場発生とアト秒パルスの発生は、それぞれで技術が進展している。それぞれ独立に進展していく上では、レーザーの高強度化には、地味な問題ではあるが、発生する熱の排熱や安定化、広帯域な波長をカバーする高耐力・低分散の多層膜技術などのブレイクスルーが必要となる。また、超高強度とアト秒の両方が同時に成立するような技術の実現には、超高強度レーザーは動作繰り返しが数ヘルツやシングルショットで動作させることが現実的であるため、アト秒パルス発生も現在のキロヘルツを中心とした高繰り返しのシステムからシングルショットでも安定に発生させ、計測できるようなブレイクスルーが必要である。
S-50	10年未満	注目科学技術	私は、 DASとよばれる光ケーブルにレーザー光の送受信機により、地震動をとらえる技術 に注目している。この技術自体はもうすでに開発はされているが、地震動をとらえる歴史はここ2、3年くらいである。特に日本は光ケーブルも国土にくまなく配備されており、また地震の数も世界の地震の約2割が日本列島周辺域で起きているので、新しい地震や地球にまつわる科学の進展が世界をリードする形で日本で起きる可能性が高いと思われる。日本の地震観測体制では、通常20km間隔くらいで地震計が配備されているが、光ケーブルがうまく役立てられれば、国道沿いには10m間隔で地震計が配備されるのと同等のことに相当し観測点の数は宇宙学的に増えると考えてもよい。ただ、ノイズを拾いやすい技術でもあるので、既存の観測網と補い合う方法を考えていく必要もあるだろう。現状では国道に配備された光ケーブルを利用した地震観測の実施は、東北地方や四国で限定的に行われているだけである。もしこれが津々浦々まで進めば、たとえば活断層が普段からゆっくりすべっていたことがわかったり、もっと詳細に内陸地震現象の時間発展の全貌が明らかになるかもしれないし、海溝型巨大地震の前兆の役割を担うスロー地震の研究が進むかもしれない。また、この科学技術は、他への応用が非常に期待され、得られる情報は国道沿いの道路のリアルタイムなメンテナンス情報となりうるし、さらにはトラックの過積載の検知や車両のスピード違反の取り締まりなどにも応用でき、その際は研究者と行政との連携が非常に大事になってくるが、人口減と予算減の世の中の流れの中、人間社会や社会インフラをより適切に維持するのにも役立ち、社会的波及効果も大変大きいと思われる。
		ブレイクスルー	学術的なブレイクスルーよりも、研究者と行政組織の協力やその協力関係の推進が大事であると思われる。DASを国道沿いに配備された光ケーブルの学術的な利用を推進するような動きがあるほうが、この研究は進むと考えられる。とくに国道を管轄する国土交通省の地方整備局の現場の役人の方たちの科学への理解、国土交通省本省の科学や新しい技術に対する機動力と柔軟性を持った対応が大事になってくると思われる。

S-51	10年未満	注目科学技術	<p>新しい科学技術として、超高分解能共鳴非弾性軟 X 線散乱 (RIXS) を用いた電子構造研究に注目している。</p> <p>次世代テクノロジーの基盤となる巨大物性応答、省エネルギーデバイスを開発、設計する上で、物質の電子構造の詳細を明らかにすることは必要不可欠である。特に新しい超伝導体や磁性材料、熱電材料等の物性発現機構を解明する上で、電子の持つ電荷、軌道、スピンの自由度を分離観測することは極めて重要であると言える。RIXSは、高輝度放射光を物質に入射し散乱光を検出する光 in-光 out 型の電子構造探索手法であるため、従来の電子分光法とは異なり電場、磁場を印加したデバイス駆動状態でのオペランド計測が可能であり、偏光や外場を適切に選ぶことにより、電子の複合自由度の情報を全て抽出することができる。さらに固体物質のみならず液体や気体、及びそれらの界面状態の電子構造を観測できる強力な分光手法であり、最近では体外式膜型人工肺(ECMO)のチューブ内血栓の生成機構の探索に利用される等、ライフサイエンス分野での活躍も期待されている。</p> <p>一方で、散乱光を検出する計測手法であるため、非常にシグナルが小さく、さらに内殻吸収端における共鳴条件で測定する必要があるため、励起光エネルギー可変の高輝度放射光光源が必要不可欠である。この点において、次世代3GeV放射光(東北放射光)の完成が待たれる。</p>
		ブレイクスルー	<p>小さなシグナルを高効率、高エネルギー分解能で測定するために、最先端の二次元散乱光検出器の開発が必要不可欠である。</p>
S-52	10年未満	注目科学技術	<p>超高速・超高強度光科学。2018年にノーベル物理学賞を受賞したチューブパルス増幅(CPA)に端を発した高出力の小型レーザーは、10ペタワットの高出力域に達し、アト秒域の超短パルス、10^{23}W/cm^2の高強度領域に入ってきている。アト秒科学や物質科学、高エネルギー密度科学の科学フロンティアの開拓とともに、レーザー粒子加速などでの産業応用まで幅広い社会貢献が期待できる科学技術である。大型国家プロジェクトから大学・各研究機関まで、また欧米や日本、中国など世界レベルで各種の研究開発が進められており、人類の将来社会のために重要な位置づけの科学技術と考える。</p>
		ブレイクスルー	<p>応用分野が広く産業応用でも微細加工技術など既に実用化されている分野もある。極限技術への挑戦が基礎科学のフロンティア開拓だけでなく、応用技術の適用拡大にも繋がる意義・効果があり、超高速ではzeptosecondへの挑戦、10^{24}W/cm^2以上の超高強度の実現にCPAを超える新たな方法の開発が必要と言われており、これらに対してブレイクスルーが必要となる。</p>
S-53	10年未満	注目科学技術	<p>軟 X 線発光分光法による液体中の特定分子の分子軌道対称性判別。放射光施設によって作られる軟 X 線ビームのうち、2種類の直線偏光(縦偏光・横偏光)を入射光として用い、分子からの発光スペクトルピークの強度変化を観測する。複数の発光ピークが観測されていても、この偏光依存性測定の結果どちらの偏光照射でそのピーク強度が増強するかを見ることで、そのピークの元となる分子軌道の対称性が判別できる。単純な発光分光測定のみではスペクトル形状が得られても、その構造がどの分子軌道由来なのかを帰属するのが難しい。分子軌道計算結果も完璧に実験結果とエネルギー値が合うものではないため、この分子軌道対称性の情報が加わるとより正確な分子軌道の帰属が行えるようになる。また計算手法の開発のための実測データの提供をすることができるようになる。偏光依存性測定自体は昔からあったが、平面上にきれいに特定の向きに分子を並べた系に対しての軟 X 線吸収分光測定が行われるのが主流であった。これは吸収分光では電子の動きが 1step(内殻電子の遷移のみ)であるため全ての分子を配向させていないと偏光依存性が現れないからである。しかし発光分光測定においては電子の動きが 2step(内殻電子の遷移と価電子の内殻への遷移)であるため、励起エネルギーをうまく選べば光励起させる分子の配向を選ぶことができ(たまたま特定の方向を向いていた分子のみ励起される)、その分子のみから発光が起こるため、分子の向きがランダムでそろっていない液体中の分子に対しても発光スペクトルピークの対称性判別が可能になるという原理である。現時点では液体の偏光依存性測定を行えるビームラインがほとんどない状態であるが、次世代の東北放射光施設が完成した場合、光強度が上がるため、高分解能で高効率な分析が可能になり、これとオペランド分光や顕微分光を組み合わせることで、より詳細な電子状態解析が可能になり、分子軌道計算と合わせてより具体的な分子構造や分子の周りとの相互作用の様子が明らかにできるようになると考えている。</p>
		ブレイクスルー	<p>縦偏光・横偏光の光を作った際の偏光度をより高くできれば詳細な偏光依存性を観測することができると思われる。また照射強度の規格化が重要であるため、実際の照射光強度の検出方法をしっかり確保しておくことや、参照物質を同時に測定して照射された光強度の見積もりができるように工夫することが重要と考える。また軟 X 線は空気でもすぐに減衰してしまうのでオペランド分光として組み上げていく際には、いかに観測したい場所まで軟 X 線を減衰させることなく持っていかかが重要で、これは試料周りの装置のアイデア勝負となると考えている。</p>

S-54	10年未満	注目科学技術	軟 X 線非弾性散乱を用いた水和水の状態解析技術 。現状では技術面も含めて基礎研究要素が大きいですが、測定・解析技術が確立され産業界でも自由に利用できるようになると、大きく貢献しうる。
		ブレイクスルー	輝度の高い軟 X 線光源
S-55	10年未満	注目科学技術	放射光施設から得られる高品質な X 線は高度な解析を可能にし、材料・医療・製薬・生物など幅広い分野の発展に貢献している。放射光をさらに高輝度にした X 線レーザーは時間分解での過渡的な原子や分子の動きの観察を可能にした。さらに短い時間で分解できるアト秒光源としては、高強度レーザーを用いた高次高調波があげられるが、近年では、 X 線レーザーの短パルス化が進み、アト秒かつ高強度な X 線の発生が可能となり、原子・分子内の電子を観察 できる期待が高まっている。このような観察は太陽電池や光触媒、磁気デバイス等の開発につながる事が期待される。
		ブレイクスルー	アト秒の光源としては、実証が済んでいる状況であるが、これをアト秒スケールの観察に適用する際に、さらなる開発が必要である。観察したい時間スケールより十分良い同期の精度を実現すること、もしくは、そのアト秒パルスの時間を直接計測する手法の開発が必須である。
S-56	10年以降	注目科学技術	100 GHz から数 THz の高周波高電界による電子線形加速器技術 に注目している。現在の高エネルギー電子加速器の加速電界周波数の主流は 1 - 10 GHz であるが、この領域では加速勾配は 100 MV/m が限界である。そのため高エネルギー化にはより高い周波数での加速が望まれる。一方、近年著しく発展してきたレーザー航跡場加速では従来の高周波加速のような精密な加速位相の制御、共振器構造の精密制御設計などの困難な課題も多い。そこで、高周波加速器技術の延長である 100 GHz から数 THz 領域の高勾配電子加速器技術の研究発展に注目する。
		ブレイクスルー	これまで以上に精密に制御された加速器構造の設計・製作が本科学技術の発展の鍵となる。
S-57	10年以降	注目科学技術	エネルギーフロンティアレプトン加速器 (ILC) を用いたヒッグスファクトリーの実現。
		ブレイクスルー	科学的、技術的には成熟しているが、国内・国外における運営体制の確立が、次のステージに進めていく上で急務。
S-58	10年以降	注目科学技術	加速器駆動システムによる核変換技術 ： 使用済み核燃料中に存在する高レベル放射性廃棄物について、放射性毒性が強く半減期の長い核種を短寿命核種あるいは安定核種に核変換するための技術。加速器駆動による核破砕中性子源と、MA を装荷した未臨界炉心を組み合わせ、外部源駆動の未臨界増倍によって MA 核種を核変換し放射性毒性を低減する。
		ブレイクスルー	ADS 実現に向けた研究を実施するための炉物理実験施設として、2020 年度までは京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)を活用することができ、FFAG 加速器と未臨界炉心を組み合わせた基礎実験を実施することができた。しかし、KUCA で使用されている高濃縮ウラン燃料板を米国に返還せねばならず、KUCA において低濃縮 U 燃料が使用できるようになるまで、国内において ADS 炉物理実験を実施することが極めて困難な状況である。 炉物理実験分野において今後訪れる困難状況を打破するためには、核燃料を用いない積分実験結果を活用して、高精度な ADS 設計計算に必要不可欠となる評価済み核データの更新(データ同化)を実施できるような技術開発が重要になる、と個人的には考えている。
S-59	10年未満	注目科学技術	雲を直接取り扱った高解像度気候モデルによる、気候実験。 従来の気候予測では直接表現することができないが、気候システムで重要な役割を果たす“雲”を直接取り扱うことのできる高解像度気候モデルによる気候実験が可能になりつつある。これが実現すれば、気候予測の最大の不確実性要因である“雲”に関わる不確実性が軽減され、精度良い気候予測が可能になる。
		ブレイクスルー	現在よりも高性能でかつ継続的に利用可能な大型計算機と、従来の(既存の)気候予測に用いられる大循環モデルよりも高速でかつ高解像度で利用可能な気候モデルの開発
S-60	10年未満	注目科学技術	量子ビーム(線質の異なるイオンビームやガンマ線などのこと)を用いて既存の遺伝子を融合させ、新奇有用遺伝子を生み出す技術 について調査すべきである。 近年、一つ一つの遺伝子を狙って壊せるゲノム編集技術が台頭してきた。ゲノム解読技術、オーソログ遺伝子解析技術とゲノム編集技術を組み合わせることで、既存の遺伝子を壊した変異体を効率良く作出することができるようになると予測される。しかし、複数個の遺伝子が同時に切断され、末端結合修復によって元とは異なる組み合わせで再結合したような、融合遺伝子を生み出す(見つける)ことは量子ビームにしかできない芸当である。 この技術が実用化されれば、生物の進化を遺伝子のレベルから論じることが可能とな

			るばかりか、地球上のどの生物も持たないスーパー遺伝子資源の創成まで可能になる。 なお、この基盤的技術開発研究は、生物用の量子ビーム照射装置群を有し、量子ビーム変異誘発研究を推進してきた量研・高崎研で行うことで、インプットの最小化とアウトプットの最大化が図れる。
		ブレイクスルー	一般に、量子ビームによって植物に生じた突然変異は、照射個体ではなく、照射個体を自殖して得られた次世代以降の個体で調べられる。その理由の一つは、照射個体では変異細胞と正常細胞がキメラ状に存在するのに対し、すべての細胞が変異細胞であるような次世代以降の個体を用いることで、遺伝子解析が容易になるためである。しかし、生殖過程において、遺伝子融合を起こすような大規模変異を有する細胞は減数分裂組換えが異常になるため、次世代に伝わりにくい。この技術開発研究をスムーズに実施するための肝は、遺伝子融合を照射個体で調べることである。ここでは、照射個体に変異細胞と正常細胞が共存するという問題を解決する、ブレイクスルーの一例を示す。モデル植物シロイヌナズナで葉や種皮の色を支配する TT 対立遺伝子座の片方が壊れた幼苗に量子ビームを照射する。育成後の植物体から、正常な TT 対立遺伝子座も壊れて葉の色が変化したセクターを探す。このセクターは照射の時点で一つだった細胞がクローナルに増殖した細胞集団であるので、このセクターを切り取って全ゲノムシーケンズ解析することで、照射個体における遺伝子融合を効率的に調べることができる。
S-61	10年未満	注目科学技術	電気化学的手法を用いた海洋底質環境の『見える化』。 海洋の底質環境は、調査の困難さ等から、リアルタイムで把握することが非常に難しい。底質中の酸化還元電位は、溶存酸素濃度、pH、硫化物量、水温等と密接にリンクしており、底質環境を可視化するのに非常に有効である。現在、電気化学的手法を用いた底質環境電位リアルタイムモニタリングシステムが開発されつつあり注目されている。
		ブレイクスルー	現在は海洋底質環境をモニタリングしたデータを有線で海上まで送信しているが、海底から無線でデータ送信(web にリンク)できる技術が開発されれば、飛躍的に技術が進歩する。
S-62	10年未満	注目科学技術	光格子時計。 重力・位置の精密測定
		ブレイクスルー	
S-63	10年未満	注目科学技術	高輝度軟 X 線放射光を発生する放射光施設および光源技術。
		ブレイクスルー	高輝度軟 X 線放射光の発生そのものは既存および視野に入っている技術の R&D で十分に達成可能と思われる。その後、この光の特性を最大限に活用するには、大きなブレイクスルーがいくつも必要と思われる。例えば、コヒーレンスを殺さない光学素子、制御、など。また、計測系にも同様のブレイクスルーが期待される。さらには光を使いこなす研究者自身が進化しなければならないだろう。

付録8 回答協力者名簿

注：氏名のみ。掲載不要の連絡があった者を除く。

阿部真人	井岡聖一郎	奥村恭幸	加藤雄樹	岩崎広英	宮地幸祐	栗田玲
阿部仁	井芹寧	奥津光晴	加納英明	亀井真之介	宮田潔志	桑水流理
阿部博弥	井手一郎	奥本健二	嘉部量太	儀我美一	宮田健	軽尾友紀子
愛知真木子	井上豪	横井太史	河口研一	義永那津人	宮田耕充	建石寿枝
芦川直子	井上拓郎	横山啓太	河口範明	菊地洋右	宮本佳明	検崎博生
芦田昌明	井上智博	横田浩章	河野大輔	吉井達之	宮野隆	見市文香
綾塚祐二	井上奈穂	横田紘子	河野直樹	吉岡朋彦	朽網道徳	原康祐
綾部信哉	井尻貴之	横田裕一郎	海住英生	吉岡靖雄	牛尾康一	原聡
安井伸太郎	井田大地	王斗艶	垣村尚徳	吉川貴徳	京極大助	原雄二
安江健一	磯崎瑛宏	岡井大祐	柿崎真沙子	吉川研一	橋口晶子	古屋敷智之
安川智之	磯谷綾子	岡根正樹	角村貴昭	吉川信行	橋爪章仁	古屋理香子
安達三美	一柳満久	岡村好子	笠原堅	吉田一朗	橋爪良信	古賀大尚
安田剛	稲垣毅	岡田敬志	笠原浩太	吉田学史	橋本義輝	古山通久
安田知子	稲垣亨	岡田豪	梶川昌孝	吉田幹生	橋本信幸	古市泰郎
安藤候平	稲垣昭子	岡田智成	葛西伸哉	吉田健一	橋本哲郎	古川真衣
安藤康高	稲城玲子	岡田龍一	釜石隆	吉田秀謙	橋本理尋	古川陽
安藤大樹	稲葉優文	岡部孝裕	鎌田英一郎	吉田正人	橋本涼太	古澤毅
安藤卓人	宇佐見護	岡部敏弘	鎌田海	吉田誠	郷右近展之	虎野吉彦
伊東真知子	宇田川将文	岡本薫	鎌田貴久	吉田優	鏡味麻衣子	五月女宜裕
伊藤久義	宇都卓也	岡本潤	茅根裕司	吉田洋之	玉手亮多	後藤聡
伊藤元雄	宇野裕美	岡本亮	間宮純一	吉敷祥一	玉田洋介	光武亜代理
伊藤晃成	羽田真毅	岡本和也	関貴弘	吉野幸一郎	桐谷乃輔	工樂樹洋
伊藤浩史	雨宮護	岡野憲司	関崎真也	吉野浩教	錦慎之助	幸瞳
伊藤克敏	臼木智昭	岡澤敦司	丸山伸伍	吉野大輔	琴浦聡	幸福智
伊藤寿朗	浦出芳郎	沖真弥	丸山真幸	吉澤信	近江靖則	恒川直樹
伊藤博人	瓜田幸幾	沖野友哉	丸山善宏	久米一規	近藤剛弘	江川麻里子
伊藤隼哉	永安一樹	下川淳	丸山美帆子	久米祐一郎	近藤徹	江田慧子
伊藤民武	永井信	下池季樹	岸本圭子	久保耕司	金高健二	溝尻瑞枝
伊藤有加	永島壮	下田陽一朗	岩井一正	久保利隆	金山範明	溝田功
伊藤良一	永野修作	加藤英明	岩下靖孝	久保和也	駒大輔	溝内健太郎
伊野浩介	永野智己	加藤頭	岩崎憲治	及川大地	熊崎美枝子	荒巻光利
伊澤かんな	越山友美	加藤重城	岩崎由香	宮下幸雄	熊代成孝	荒勝俊
伊澤栄一	榎戸輝揚	加藤常員	岩瀬英治	宮原郁子	熊谷悦史	荒川雅
伊高健治	遠藤知弘	加藤真一郎	岩倉いづみ	宮原英隆	熊谷直喜	荒木祐二
依田浩子	塩見邦博	加藤節	岩渕司	宮崎佑介	熊田亜紀子	降旗大介
衣斐大祐	奥山勇治	加藤峰士	岩崎健太	宮崎裕明	栗田弘史	香山尚子

高岡勝吉	佐藤敬子	三浦孝太郎	山内武紀	手束聡子	小林亜利紗	上村顕也
高屋智久	佐藤幸紀	三浦泰人	山内豊明	手嶋勝弥	小林正人	上谷幸治郎
高橋広	佐藤幸治	三好大輔	山本大介	酒井孝明	小林芳成	上塚洋
高橋治子	佐藤根大士	三枝幹雄	山本直嗣	酒井康德	小林隆一	上田潤
高橋俊	佐藤修	三谷曜子	山本博文	酒井和哉	小林亮	上田正人
高橋章	佐藤秀隆	三池知紘	山本裕子	周防裕政	小林亮太	城鮎美
高橋知里	佐藤尚	三瓶由紀	山本裕紹	秋月信	小澤隆弘	城野理佳子
高橋亮	佐藤伸	三木寛之	山本隆一郎	秋山吉寛	庄司靖	植草秀裕
高橋亮平	佐藤文俊	三輪洋平	山縣一夫	秋枝静香	庄司雄哉	植村知博
高際良樹	佐藤優子	山浦悠一	四竈泰一	舟木剛	松井雅樹	織谷幸太
高崎一人	佐藤裕公	山下健一郎	市橋伯一	出浦桃子	松井翼	織田ゆかり
高山範理	佐藤陽祐	山下善道	市川香	勝山正則	松浦俊一	新井寛
高瀬堅吉	佐藤隆太	山下直美	氏原嘉洋	小笠真由美	松浦大輔	新井郷子
高谷大輔	佐道泰造	山下由衣	児玉哲哉	小粥康充	松岡常吉	新熊亮一
高田寛	佐野幸恵	山家清之	寺坂尚紘	小熊博	松岡涼	新見康洋
高田健太	佐野伸行	山吉麻子	寺田かおり	小坂田文隆	松下雄一郎	新藤孝敏
高田乃倫予	佐野大輔	山口宜秀	寺田堂彦	小阪田泰子	松原真己	新道真代
高畑佳史	斎藤徳人	山口繁生	寺内淳	小山知嗣	松山誠	森安俊介
高門輝	細井卓治	山口良文	寺尾寧子	小寺紗千子	松政文彦	森貴洋
黒岩崇	細将貴	山口諒	寺尾豊	小寺哲夫	松川哲也	森義治
黒岩眞吾	細川千絵	山根正明	寺尾悠	小松一彦	松村太陽	森啓二
黒子めぐみ	細川陽一郎	山際勝也	寺本篤史	小松正	松村和明	森口哲次
黒倉健	細田奈麻絵	山崎貴司	時実悠	小西邦昭	松田二子	森川岳生
黒田悦史	細野光章	山崎淳司	七井靖	小川敬也	松田佑	森貞真太郎
黒田知宏	坂上和之	山崎敦	室越章	小川新平	松島潤	森本景之
黒田有希子	坂内博子	山村栄虎	室山真徳	小川美香子	松尾亮太	森本祐麻
今喜裕	坂尾こず枝	山村昌平	篠原慶規	小川敏夫	松本直浩	森陽平
今枝泰宏	坂本綾子	山中紀明	篠原健司	小川法子	松本靖彦	真柄仁
今川究	坂本大介	山中正道	篠原悠作	小川祐紀雄	松本翼	真木祥千子
今泉充	榊原啓之	山田周歩	篠崎健二	小川和彦	沼田真也	神谷由紀子
根本広明	桜井健介	山田尚之	篠島亜里	小谷哲也	沼田泰英	神田祥宏
佐貫理佳子	笹原和俊	山田忠史	柴田英昭	小池千恵子	上井幸司	神田洋紀
佐久間哲史	笹子滋正	山田直臣	柴田幹大	小木雅世	上山健彦	秦野歳久
佐々木一哉	三井正	山田裕貴	芝清隆	小野崎徹	上相真之	針金由美子
佐々木徹	三井正明	山田洋明	車兪澈	小野昌彦	上船雅義	須賀三雄
佐川龍之	三井雄太	山内将行	若宮伸隆	小野田忍	上村佳奈	須志田隆道

須藤雄気	西尾美和子	川井貴裕	村上睦美	大澤友紀子	中村乙水	長堀紀子
須崎友文	西堀麻衣子	川越至桜	村瀬良朗	滝久智	中村桂一郎	長澤忠広
水口将輝	西野恒	川原浩一	村木里志	滝田亮一	中村真也	鳥阪綾子
水口千穂	青森久	川合伸幸	多田和也	滝本裕則	中村奈緒子	鳥飼宏之
水上象吾	青木航	川崎昌紀	太田公規	瀧健太郎	中村芳明	鳥巢久美子
水瀬賢太	青柳吉輝	川崎拓実	太田香	巽信彦	中村隆一	塚野浩明
水谷正義	青柳智	川内敬子	太田千春	谷屋啓太	中村和弘	辻村恭憲
水谷武臣	青柳里果	川内健史	太田泰友	谷口正輝	中塚祐子	坪田健一
水野聖哉	斉藤毅	川又生吹	太田朋子	谷峻太郎	中塚理	堤浩子
杉安和憲	斉藤泰久	川野竜司	太田優一	谷村あゆみ	中田彩子	堤卓也
杉江隆一	石井あゆみ	川瀬啓悟	打矢隆弘	谷中裕	中田陽介	堤田恭太
杉藤泰子	石井雅樹	浅井華子	大岡忠生	谷田部然治	中島清隆	天田直樹
杉本健士	石井慶子	浅井孝夫	大屋瑤子	谷本輝夫	中島徹夫	天野史章
菅野茂夫	石井伸佳	浅井智広	大音隆男	池上和志	中島美紀	殿崎薫
菅洋志	石井智	浅岡章一	大久保敬	池端久貴	中島裕美子	殿城亜矢子
瀬島吉裕	石井和之	浅原彰文	大久保茂子	池田篤史	中島和秀	田熊隆史
成田克	石垣美歌	浅沼博司	大峽淳	池田陽子	中嶋宇史	田原一邦
星野毅	石居真	浅田勇人	大橋憲太郎	池内与志穂	中嶋誠二	田原優樹
正岡功士	石橋仁	浅野克彦	大兼幹彦	竹村俊彦	中馬吉郎	田口恵子
正岡重行	石山智大	浅野桃子	大江純一郎	竹村洋子	中本圭一	田口博明
清家美帆	石川可奈子	浅野陽樹	大上雅史	竹中規訓	中野伸一	田所聖志
清剛治	石川俊之	船橋伸禎	大森峻一	竹中弘祐	仲上祐斗	田村勝
清水かほり	石川春人	前園涼	大神田淳子	竹中瑞樹	仲西友紀	田村誠
清水雅弘	石川尚人	前多隼人	大石真也	竹内知子	仲田麻奈	田代陽介
清水研一	石川敦之	前田宗利	大谷喜永	竹内洋輝	猪股邦宏	田中一生
清水透	石川勇人	全伸幸	大谷鷹士	竹澤由高	猪石篤	田中幹子
清水由紀	石川亮	早坂和弘	大谷哲久	中寛史	潮田亮	田中剛
清野聡子	石谷太	早川裕弐	大津康德	中吉嗣	町田修一	田中克
西元修司	石塚知香子	相田知海	大津博義	中原久志	長岡弘太朗	田中宗
西山英輔	石田紗恵子	相澤修	大塚章弘	中江進	長岡純治	田中大一郎
西川義晃	石田繁巳	増山雄太	大島一夫	中根茂行	長山雅晴	田中都
西村治道	石田邦夫	増子貴子	大島武	中山智喜	長森英二	田中優子
西村邦裕	石内鉄平	増田卓也	大洞光司	中新信彦	長谷川健	田中有弥
西村由希子	石北央	村岡貴博	大浜剛	中西英行	長谷川美貴	田辺章悟
西田貴明	赤川貢	村山英晶	大本義正	中西貴之	長田茂宏	渡辺謙太
西田哲	折田和泉	村社純一	大野雅史	中川大也	長田裕也	渡辺大輔

渡邊育夢	藤本貴史	白井克明	富田峻介	北佐枝子	木戸屋浩康	鈴木智大
渡邊源哉	藤門範行	白水貴	富田昌弘	北村恭子	木村郁夫	鈴木勇輝
渡邊総一郎	藤澤剛	白石希典	布浦拓郎	北田研人	木村啓二	鈴木祐麻
渡邊賢	藤澤彰利	白川善幸	武仲能子	北野政明	木村圭	鈴木誉保
渡邊勝己	陶山史朗	白鳥聡志	武田洋平	牧昌次郎	木村恵	鈴木亮
渡邊友亮	道永昌太郎	白木智丈	武田良彦	牧野高紘	木村剛	鈴木亮
渡邊隆行	道畑正岐	畑中美穂	武藤慶	堀河俊英	木村真晃	和田龍一
土屋敬志	徳田規夫	畠中和明	武藤克也	堀司	木谷茂	和田良太
土屋雄一朗	徳樂清孝	八ッ橋知幸	伏島あゆみ	堀瀬友貴	木内謙一郎	國分陽子
島元世秀	奈良雅之	八重樫咲子	福井雅之	堀正和	木内隆史	國友栄治
島添健次	内村智博	八代田陽子	福元豊	堀千明	門田幸二	嶽本あゆみ
島田幹男	内田雅也	八尾竜馬	福原武志	堀川裕加	野崎達生	廣津直樹
嶋田崇史	内田健太郎	八木修平	福山繭子	堀琢磨	野村俊之	檜井栄一
東海林敦	内田幸明	板倉隆二	福田伊津子	堀田純一	野村和晴	澁谷容子
東泰孝	内田正宏	飯森俊文	福田伸子	堀部直人	野徹雄	澤井大樹
東田英毅	内田博	飯泉佳子	平松正顕	堀豊	矢ヶ崎朋樹	澤島康仁
東島仁	内田由紀子	飯村壯史	平瀬祐子	堀磨伊也	矢野剛久	澤隆雄
東野智洋	内田祐介	飯塚大輔	平田善彦	本間剛	柳井修一	濱武英
湯原義公	内田和久	飯田真一	平島剛志	本間実咲	由里本博也	濱野吉十
湯浅裕美	南光一樹	飯田佑輔	平野拓一	本橋輝樹	与那嶺雄介	眞岩宏司
董冕雄	南豪	樋口ゆり子	平野敏行	本郷研太	楊井伸浩	眞弓皓一
藤井孝藏	楠見敏則	樋口雄介	平林公男	本郷節之	落合恭子	眞正浄光
藤井宏之	楠城一嘉	樋山恭助	米谷衣代	本山三知代	利部慎	眞鍋康子
藤井麻樹子	二宮啓	尾形慎	米田英嗣	本多新	李聖林	眞鍋史乃
藤井翔	日江井純一郎	尾形哲也	片岡憲一	麻生英樹	立木佑弥	齋藤理一郎
藤原英樹	日高興士	尾崎省吾	片岡研介	妹尾博	龍田典子	筈野哲史
藤原慶	日出間るり	美濃規央	片山一成	末武勲	緑川光春	船富卓哉
藤原修	能登裕之	稗田睦子	片山健夫	満上育久	林郁子	饒村修
藤原秀紀	馬場暁	疋田育之	片山裕美子	湊元幹太	林慶	齊藤尚平
藤原祥高	馬場知哉	百留忠洋	片宗優貴	蓑島維文	林潤	齊藤陽子
藤原正澄	馬嶋景	浜島りな	峰松翼	椋木雅之	林将平	齊藤亮平
藤山陽一	梅川結	浜本洋	法上拓生	名黒功	林晋一郎	柳谷耕太
藤川貴史	梅崎良則	富永依里子	芳賀永	名取賢二	林田祐樹	高橋啓介
藤川茂紀	萩原大祐	富樫陽太	芳賀聡	名村今日子	林勇吾	高橋慶太
藤田雅俊	柏木才助	富松重行	豊泉太郎	茂本勇	鈴木志野	高橋正之
藤本一朗	白井孝治	富中悟史	豊福雅典	網代広治	鈴木真理子	高須賀明典

高鶴裕介
高島秀聡
高木聡
HOMMERICH CAROLA
賈軍軍(JiaJunjun)
櫻井香里

調査資料-315

専門家が注目する科学技術に関するアンケート調査(NISTEP 注目科学技術 2020)

2021 年 10 月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所
科学技術予測・政策基盤調査研究センター

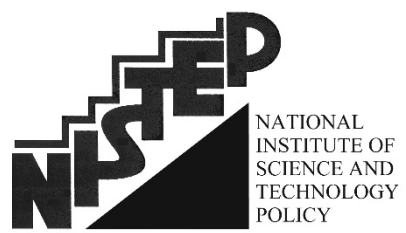
〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館 東館 16 階
TEL: 03-3581-0605 FAX: 03-3503-3996

A survey of science and technology that experts are focusing on 2020

October 2021

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan

<https://doi.org/10.15108/rm315>



<https://www.nistep.go.jp>