

概要

1. 本調査の目的

本調査は、科学技術予測調査の実施に向けたホライズン・スキヤニング（科学技術や社会などの早期の兆しをとらえる）調査の一環であり、次期（第12回）科学技術予測調査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る。

第11回科学技術予測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、ホライズン・スキヤ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、クロージ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、機械的情報収集であるために専門家の視点が必要であった。

これらの状況を踏まえ現在は、第12回科学技術予測調査に向けた現状のホライズン・スキヤニング体制を強化し、研究論文の被引用情報や各国・機関等が策定した規則・規定などの最新情報収集・分析ツールなどを導入し、情報量や調査範囲を拡充した。その一方で、専門家による最新の知見については更なる蓄積が求められる。

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、次期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、次期科学技術予測調査の目的に限らず科学技術の動向調査として活用し、結果は文部科学省における政策検討の基礎資料としても提供する。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. 前回調査からの変更点

本調査は2020年度より開始した定常的調査であるが、調査設計については固定せずに適宜見直す。概要図表2に、前回調査（注目科学技術2020）からの変更点について示す。

まず目的について、前回調査では次期科学技術予測調査の基礎資料とすることを主目的としていたが、調査によって得られる科学技術は多岐に渡り、政策に係る情報も多いため、政策形成の場においても積極的な情報提供を行うこととした。それに伴い、より詳細な分析を行う目的で質問項目も追加または変更を加えた。特に前回は「注目科学技術」についてのみの調査であったのに対し、今回は、現時点で実現可能性や期待される効果は不明であるものの、将来的に実現すれば学術・経済・社会へ大きな変化をもたらす得る科学技術として「兆し科学技術」も調査に加えた。

概要図表1(本編図表 2-1) 前回からの変更点概要

*変更点に太字・下線

	前回調査	今回調査
目的	次期科学技術予測調査の基礎資料	次期科学技術予測調査の基礎資料 <u>政策検討の基礎資料</u>
調査項目	注目科学技術	注目科学技術、 <u>兆し科学技術</u>
質問項目	<ul style="list-style-type: none"> ・科学技術の概要 ・実現に向けたボトルネック ・実現時期 選択肢:10 年未満、10 年以降 	<p>< 注目科学技術 ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・科学技術の概要 ・<u>当該科学技術の研究段階</u> ・<u>当該科学技術のキーワード</u> ・<u>当該科学技術に対する専門度</u> 選択肢: 高、中、低 ・実現時期 選択肢: <u>5 年未満、5 年以降</u> 10 年未満、10 年以降 ・<u>学術的效果</u> 選択肢: 高、中、低 ・<u>経済的效果</u> 選択肢: 高、中、低 ・<u>社会的効果</u> 選択肢: 高、中、低 ・実現に向けて <u>必要な要素</u> <p>< 兆し科学技術 ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・科学技術の概要 ・科学技術のキーワード ・科学技術に対する専門度 選択肢: 高、中、低

上記のように、今回調査については質問項目を増やし、注目科学技術については「科学技術の概要」「研究段階」「実現に向けて必要な要素」のそれぞれについて回答を求めた。加えて、実現した際の各種効果についても調査したことから、本調査結果は単に科学技術についての情報だけでなく、その独創性や優位性、それらを取り巻く状況、何が課題・問題なのか、実現すればどのような影響が考えられるのか、必要な要素技術は何か、などの多様かつ重要な記述が多く含まれる。これらの記述については付録にて原則そのまま公開しており、詳細はそちらを参照頂きたい。

一方で全体としての記述量は多いということもあり、各記述の要素を盛り込みつつ本調査結果の幅広い活用を促すという観点から、本報告書の作成にあたっては「短縮版」を作成した。短縮版の作成にあたっては、回答者の意図とのずれが発生することを避けるため、一部軽微な平仄をそろえる以外には付け加え等を行わず、語順を入れ替える場合には意図が変わらないように留意した。ただし、一部の略語において、略語のみが用いられてる場合など、必要に応じ適宜補足を加えた。

また、短縮版は基本的に科学技術を単位として作成しており、ひとつの回答が「または」等で区切られているなど複数の科学技術が含まれている場合には、短縮版も複数作成した。文量是一文で統一しているため、元々の回答の長さによっては全ての要素を入れ込んでいるわけではないことに留意頂きたい。

3. 調査概要

アンケート調査の概要を概要図表 2 に示す。

概要図表 2(本編図表 3-1) アンケート調査概要

調査時期	2022 年 3 月 1 日～2022 年 3 月 21 日
質問項目	<p>1. 注目科学技術</p> <p>Q1. あなたの専門で現在注目している、今後実現が期待される科学技術があれば、その科学技術の概要をご説明ください</p> <p>Q2. その科学技術の内容をよく表していると思われるキーワードを 3 つ以上記入してください</p> <p>Q3. その科学技術について、あなたの専門度を教えてください 選択肢：高、中、低</p> <p>Q4. その科学技術について、いつ頃の実現が想定されますか 選択肢：5 年未満、5 年以降 10 年未満、10 年以降</p> <p>Q5. その科学技術の研究段階を教えてください</p> <p>Q6. その科学技術が実現した際に期待される学術的効果^(注)について教えてください</p> <p>Q7. その科学技術が実現した際に期待される経済的効果^(注)について教えてください</p> <p>Q8. その科学技術が実現した際に期待される社会的効果^(注)について教えてください 選択肢：(Q6～8 共に) 大、やや大、中、あまりなし、なし、不明</p> <p>Q9. その科学技術の実現に向けて必要な要素（要素技術の進展や、社会的要素など）があれば、その内容を教えてください</p> <hr/> <p>2. 兆し科学技術</p> <p>Q1. 現時点で実現可能性や期待される効果は不明であるものの、将来的に実現すれば学術・経済・社会へ大きな変化をもたらし得る科学技術（兆し科学技術）があれば、その科学技術の概要をご説明ください（自由記述）</p> <p>Q2. その科学技術の内容をよく表していると思われるキーワードを 3 つ以上記入してください（自由記述）</p> <p>Q3. その科学技術について、あなたの専門度を教えてください 選択肢：高、中、低</p>
形式	オンライン（専用ウェブサイト開設）
調査対象者	NISTEP 専門家ネットワークの専門調査員 1681 名
回答者	308 名
回答数	534 件

(注)「実現した際に期待される効果」について

学術的効果：例えば、知（科学基盤・基礎科学）の創出、今後の新たな技術を生み出す、他分野へ波及効果（新分野の創出、他分野の発展加速等）をもたらすなど。

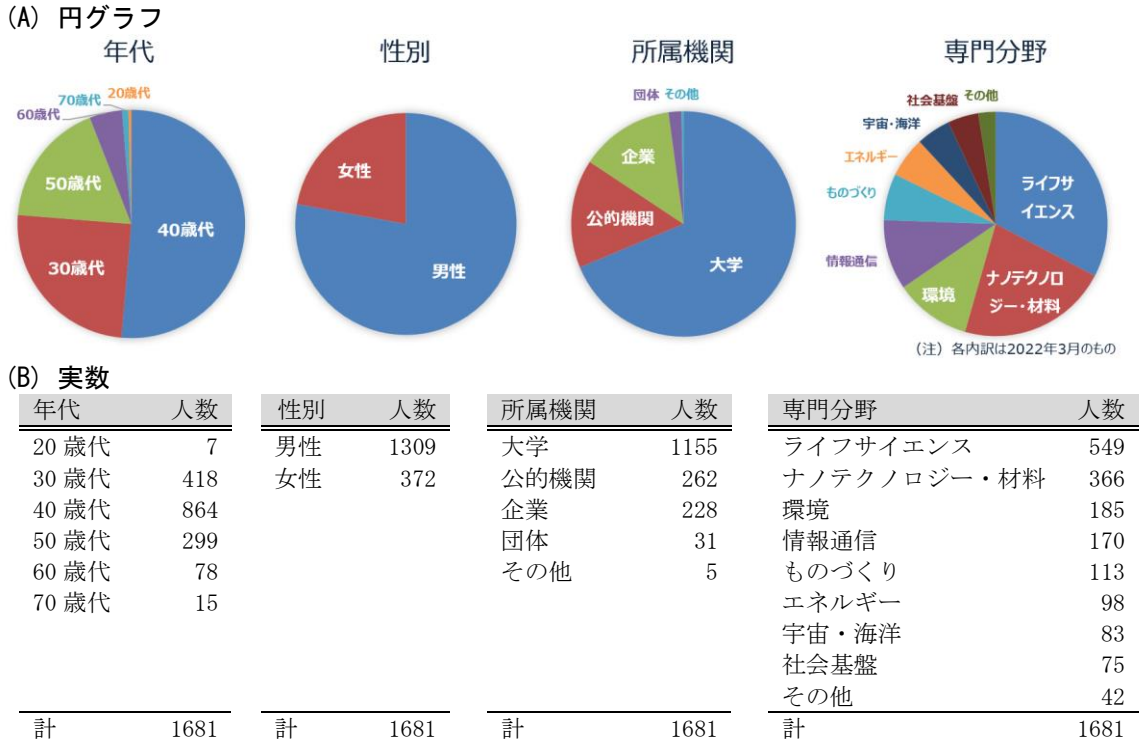
経済的効果：例えば、新たなサービス・事業・産業の創出や既存産業の発展への寄与、産業競争力を向上させる可能性、技術・素材・製品・製法等の改良、新たな雇用創出など。

社会的効果：例えば、個人・社会の安全・安心の維持・向上、個人・社会の健康・幸福度向上、くらし・ライフスタイルの改善、社会的基盤（都市・地域・交通・インフラ）の強化、地域社会への貢献、社会の福祉・公正性や不平等問題への貢献、環境・エネルギー・資源・生態系への貢献、社会的課題の解決、新しい文化創造、国際社会への貢献など。

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当研究所が運営している。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。

概要図表 3 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、次いで 30 代、50 代が多い。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 3 割、ナノテクノロジー・材料が約 2 割である。

概要図表 3(本編図表 3-2) 専門家ネットワークの年代・性別・所属・専門分野内訳



その後、科学技術予測調査への活用のため、機械的分類と人間による評価を組み合わせたハイブリッド方式によって、アンケート結果を第 11 回科学技術予測調査の分野と紐づけた。まず、科学技術の自由記述に対し、第 11 回科学技術予測調査で分野毎に設定した計 702 トピックを類似度ベースで機械的に複数紐付け、次にそれらを候補として妥当と思われる分野に人間が割り付けた。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を用いて、単純な単語一致よりも柔軟な算出を行った。具体的な手法や分散表現辞書は過去の文献のものを適用した。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 回科学技術予測調査の細目の範囲内に該当するか否かで割り振ったため、この割り振りは厳密な学術分野ではなく、あくまで第 11 回科学技術予測調査の調査対象範囲である点に留意されたい。

4. 結果概要

4.1. 注目科学技術・兆し科学技術別の回答者属性内訳

概要図表 4 に、注目科学技術・兆し科学技術別の回答者属性内訳を示す。まず全体のうち、注目科学技術は 395 件、兆し科学技術は 138 件であった。

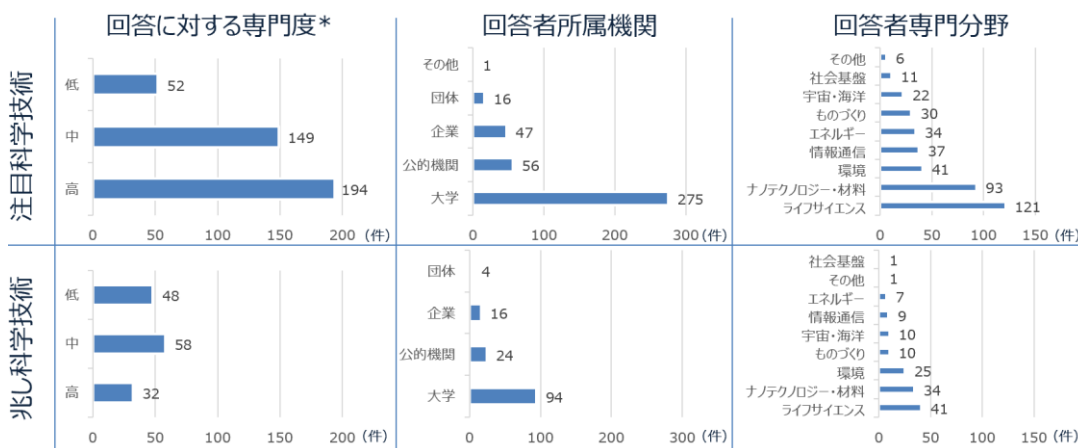
回答に対する専門度については、注目科学技術は設問を「あなたの専門で」と設定したこともあり、多い順に高、中、低となっている。対して兆し科学技術については、専門度中が最も多く、次いで低、高の順である。大まかな傾向として、注目科学技術については自身の研究又は業務に関連した回答が、兆し科学技術については自身の専門知識に関連した回答が多いことが伺える。

所属機関については、注目科学技術・兆し科学技術のいずれについても大学が約 7 割と最も多い。これについては元々の専門家ネットワークの属性割合と同等であり、それが反映されていると考えられる。回答者専門分野についても、注目科学技術・兆し科学技術のいずれについてもライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料が多く、これは所属機関と同様に専門家ネットワークの属性割合と同等であり、それが反映されていると考えられる。

従って回答に対する専門度については注目科学技術と兆し科学技術で違いがみられるが、回答者所属機関及び回答者専門分野については違いが見られない。また、回答者所属機関及び回答者専門分野の偏りは元々の専門家ネットワークの属性割合と同等であることから、いずれかの属性に偏った調査にはなっていないことが伺える。

本調査は専門家ネットワークの協力を中心とした調査であるという特性から、以降のまとめにおいて大学、ライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料の回答が多い傾向にあることは本調査が持つ特性としてご留意いただきたい。

概要図表 4(本編図表 4.1-1) 注目科学技術・兆し科学技術別の回答者属性内訳



*専門度について

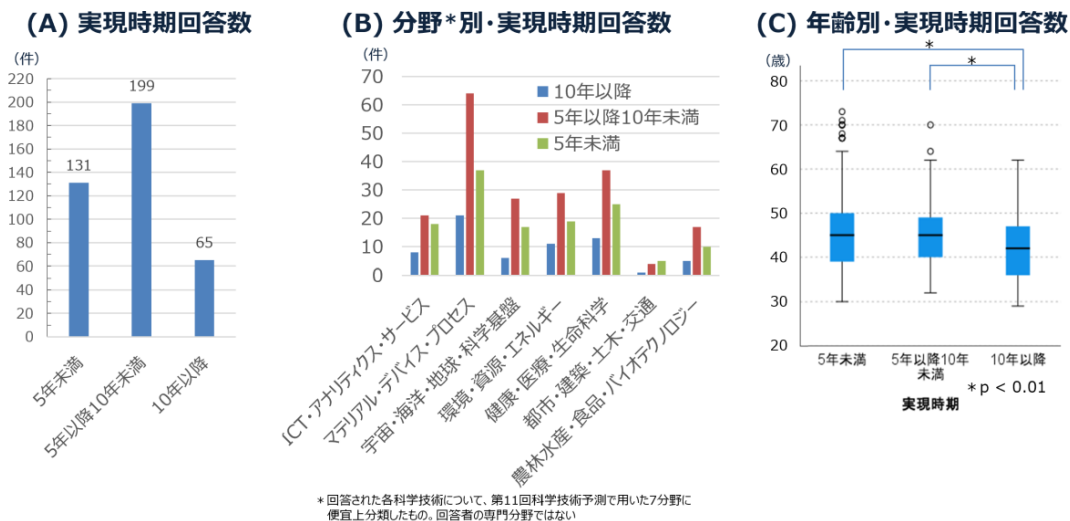
- 高：例えば、現在、当該科学技術に関連した研究又は業務に従事している（文献による調査研究を含む）等により、当該科学技術に関連した専門的知識を持っている、など。
- 中：例えば、過去に当該科学技術に関連した研究又は業務に従事したことがある。あるいは、隣接領域の研究又は業務に従事している等により、当該科学技術に関連した専門的知識をある程度持っている、など。
- 低：例えば、当該科学技術に関連した専門的な本や文献を読んだり、専門家の話を聞いたことがある、など。

4.2. 実現時期

注目科学技術については、当該科学技術の実現時期を「5 年未満」「5 年以降 10 年未満」「10 年以降」で調査した。概要図表 5 に、(A) 実現時期別の回答数、(B) 第 11 回科学技術予測調査分野別の実現時期回答数、(C) 年齢別の実現時期回答数を示す。結果は以下のとおり。

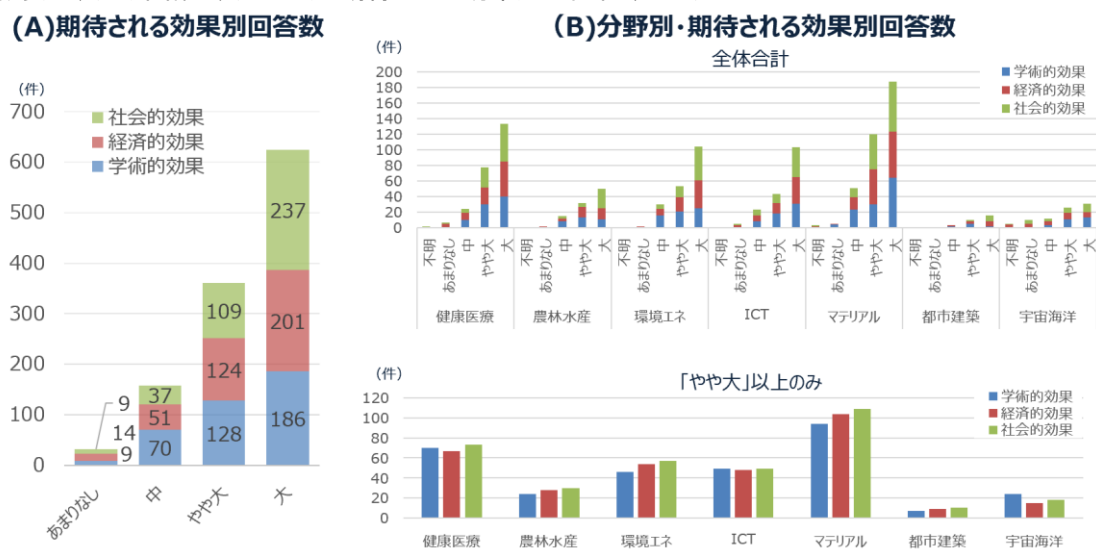
- (A) : 実現時期別の回答数では、約半数(395 件中 199 件)は「5 年以降 10 年未満」であり、次いで「5 年未満」であった。
- (B) : 実現時期回答数を第 11 回科学技術予測調査分野別にみると、傾向に(A)と大きな違いは見られないものの、中でも都市・建築・土木・交通分野は「5 年未満」の回答が最も多い。また、ICT・アナリティクス・サービス分野は、「5 年未満」と「5 年以降 10 年未満」の回答数の差が比較的小さい。
- (C) : 実現時期回答数を年齢別にみると、「10 年以降」の回答者は、他の実現時期に比べて比較的若い。

概要図表 5(本編図表 4.2-1) 実現時期別の回答数



4.3. 実現した際に期待される効果

概要図表 6(本編図表 4.3-1) 期待される効果別の回答数: グラフ



概要図表 7(本編図表 4.3-2) 分野別の期待される効果(やや大以上)：実数及び割合

	実数			割合		
	学術	経済	社会	学術	経済	社会
健康医療	63	62	67	32.8%	32.3%	34.9%
農林水産	24	29	31	28.6%	34.5%	36.9%
環境エネ	44	52	55	29.1%	34.4%	36.4%
ICT	39	41	42	32.0%	33.6%	34.4%
マテリアル	93	106	109	30.2%	34.4%	35.4%
社会基盤	7	9	10	26.9%	34.6%	38.5%
宇宙海洋	44	26	32	43.1%	25.5%	31.4%

(注)

①分野の正式名称と略称との対応

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各効果についての解説

学術的效果：例えば、知(科学基盤・基礎科学)の創出、今後の新たな技術を生み出す、他分野へ波及効果(新分野の創出、他分野の発展加速等)をもたらすなど。
 経済的效果：例えば、新たなサービス・事業・産業の創出や既存産業の発展への寄与、産業競争力を向上させる可能性、技術・素材・製品・製法等の改良、新たな雇用創出など。
 社会的効果：例えば、個人・社会の安全・安心の維持・向上、個人・社会の健康・幸福度向上、くらし・ライフスタイルの改善、社会的基盤(都市・地域・交通・インフラ)の強化、地域社会への貢献、社会の福祉・公正性や不平等問題への貢献、環境・エネルギー・資源・生態系への貢献、社会的課題の解決、新しい文化創造、国際社会への貢献など。

(A)(B)共に、いずれの期待される効果についても「大」が最も多く、その後「やや大」、「中」、「あまりなし」と、期待される効果が小さくなるにつれて回答数も少なくなる傾向にある。そこで「大」「やや大」に絞って集計すると、全体的に大きな差はないものの、宇宙・海洋・地球・科学基盤分野のみ、経済的效果(31.4%)や社会的効果(25.5%)よりも学術的效果(43.1%)の回答割合が多い結果となった。その他の分野(農林水産・食品・バイオテクノロジー分野、環境・資源・エネルギー分野、ICT・アナリティクス・サービス分野、マテリアル・デバイス・プロセス分野、都市・建築・土木・交通分野)では、社会的効果の割合が最も多く、次いで経済的效果、学術的效果の順という傾向が見られた。健康・医療・バイオテクノロジー分野については全体的にほぼ変わらない結果となった。

4.4. キーワード

本調査では、注目科学技術、兆し科学技術共に「その科学技術の内容をよく表していると思われるキーワード」を収集した。概要図表 8 に、表記ゆれ(AI と人工知能等)は統一し、周辺キーワード(量子コンピュータや量子センサ等)をグループ化したうえで、6 回以上の回答があったキーワード群を示す。キーワードは最低でも 3 つを必須回答としており、重複含め 1793 件のキーワードが得られた。なお、キーワードのまとめ方は一例である。

最も多いのは、人工知能、機械学習、深層学習、強化学習等のキーワードからなる、いわゆる AI に関連したキーワード群であり、71 回であった。次いで、量子コンピュータ、量子暗号、量子力学等のキーワードからなる、量子に関連したキーワード群であり、32 回であった。以降、20 回以上の回答があったキーワード群として、宇宙、カーボンニュートラル、ビッグデータ、電池、タンパク質等が挙げられる。

概要図表 8(本編図表 4.4-1) キーワードリスト

No.	キーワード	回答数
1	人工知能・機械学習・深層学習・強化学習	71
2	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)・耐量子暗号 (量子暗号)・量子力学 (量子もつれ・量子超越性)・量子関連技術 (量子雑音限界・量子ビーム・半導体量子ビット技術・量子材料・量子センサ・室温量子材料・量子光源)・量子化学	32
3	宇宙 (宇宙探査・宇宙利用・宇宙環境 (製造・計測)・宇宙資源・宇宙エレベーター・宇宙物理・宇宙エネルギー伝送・宇宙天気予報)	24
4	カーボンニュートラル・二酸化炭素技術 (回収・吸収・利用・資源化・電解・固定・還元反応触媒・隔離・燃料合成・フリー・CCUS)	23
5	ビッグデータ・ビッグデータ解析・データ駆動科学	23
6	電池 (高密度エネルギー電池・リチウムイオン電池・太陽電池・ペロブスカイト型太陽電池・原子力電池・燃料電池・シリコン電池・微生物電池)	22
7	人工タンパク質・代替タンパク質・スーパータンパク質・タンパク質工学 (構造解析・相互作用・合成・大量生産・超複合体・解誘導薬・光受容)	21
8	イメージング技術 (リアルタイムイメージング・バイオイメージング (ライブセル・インビボ)・光イメージング・毛髪イメージング・微細領域イメージング)	17
9	再生可能エネルギー・エネルギー変換	13
10	予測・観測 (地震発生)	13
11	地球環境・水循環・環境科学技術	12
12	DNA・DNA オリガミ・DNA ナノテクノロジー・DNA 合成	12
13	分子 (分子コンピューティング・分子サイバネティクス・分子モデリング・分子夾雑・分子界面・分子生理・分子分光学)	11
14	水素製造・水素・水素エネルギー	10
15	バイオマス資源(木質バイオマス)	9
16	神経医学・精神疾患 (アルツハイマー・うつ病・神経発達障害・神経変性疾患・神経膠芽腫)	9
17	合成生物学 (人工細胞・人工細胞リアクタ・人工細胞核)	8
18	エネルギーシステム (発電・蓄電)	8
19	ロボット (海中ロボット・実験ロボット・知能ロボット・テレプレゼンスロボット)	8
20	ゲノム編集・ゲノム合成	8
21	マテリアルズ・インフォマティクス技術	8
22	環境保全・保護	8
23	健康科学・健康寿命	7
24	テラヘルツ通信技術	7
25	メタマテリアル	7
26	遺伝子治療	7
27	資源エコシステム	7
28	生物多様性・保全	7
29	細胞プリンティング・細胞再構築・細胞移植・細胞接着・細胞小器官の固定技術	6
30	遺伝子技術 (遺伝子工学操作・遺伝的アルゴリズム・遺伝的多様性・遺伝子発現)	6
31	ウイルス・細菌・細菌叢・	6
32	プラスチック (分解・削減・バイオプラスチック・マイクロプラスチック・炭素繊維強化プラスチック)	6
33	バーチャルリアリティ (VR)	6
34	がん治療・がん細胞診断	6
35	シミュレーション技術	6
36	レーザー方式・応用・加速・アブレーション・スキャナー	6
37	核融合発電・核融合エネルギー	6
38	再生医療	6
39	人工培養肉	6
40	地球温暖化	6

5. 結果：具体事例

ここでは、概要図表 8 のリストに挙げたうちの上位グループについて、「科学技術の概要」「研究段階」「必要な要素」「キーワード」のいずれかに検索キーワードが一度でも出現した回答について抜粋して紹介する。

5.1. 人工知能・機械学習・深層学習・強化学習

検索キーワードは「AI」「強化学習」「人工知能」「機械学習」「深層学習」。回答数は、注目科学技術が 77 件、兆し科学技術が 14 件の計 91 件。

(1) AI 等の活用に注目する場合と、(2) AI 等そのものに注目する回答事例が複数みられる。事例を以下に複数抜粋する。括弧内の数字は付録 3 における通し番号を示す。

(1) AI 等そのものに注目する事例

- ・離散写像の極限としての微分方程式の数学的解析を通じた機械学習の理論的解析や、逆に数値解析の手法を機械学習で一部代替など、機械学習と数値解析の融合【25】
- ・Explainable AI 技術及び可視化された注視領域を効果的に理解する方法【99】
- ・Attention 機構を用いた深層ニューラルネットワークだけでなく、それ以外の高性能ニューラルネットワークの学習・構築が可能な類似手法の統一的な構築方法・設計方法にまつわる科学技術【198】
- ・対象問題を解決するために役立つ情報を獲得するためのタスクを別途定義し、与えられた大量の教師なしデータからの当該タスクを用いた自己学習により、少量の教師情報で対象問題を精度高く解決する手法【113】
- ・データから人が理解できる形での数式化を提案できる、AI Feynman などの近年のデータサイエンス技術を取り入れたデータ関係性の Symbolic Regression (数式回帰) 手法【470】

(2) AI 等の活用や効果に注目する事例

- ・在宅医療、テラーメイドシミュレーションや精密医療等、医療現場での活用【9, 66, 161, 172, 185, 296, 459】
- ・インフラの維持管理。運営や防災・減災への活用【6, 68, 109, 195, 257, 284, 316, 346】
- ・新規材料開発・探索やデバイス開発、プロセス等への活用【1, 27, 62, 91, 125, 166, 211, 216, 294, 327, 343】
- ・テラヘルツ領域の活用に向け、ビルの壁や車のボディなどのメタマテリアルを人工知能技術と融合させ、スマートな動作を可能とする Intelligent Reflecting Surface【31】
- ・大量の実データの機械学習に基づくメディア生成の真贋判別【44】
- ・生物の同定、家畜生産への活用、野生動物のバイオリギングや介入及び制御【46, 274, 384, 440, 493】
- ・赤潮や太陽嵐等の環境変動の予測【157, 206, 332】
- ・実用的プログラムの自動合成【259】
- ・タンパク質構造予測、合成経路反応予測、薬剤開発への活用【117, 169, 273, 322, 490】
- ・消費者の嗜好性予測、意思決定支援【140, 289, 369, 372】
- ・無人船、移動体自律化【311, 377, 512】
- ・実験、研究の自動化や推進【281, 298, 474, 491, 507】

5.2. 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）・耐量子暗号（量子暗号）・量子力学（量子もつれ・量子超越性）・量子関連技術（量子雑音限界・量子ビーム・半導体量子ビット技術・量子材料・量子センサ・室温量子材料・量子光源）・量子化学

検索キーワードは「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」「量子暗号」「量子力学」「量子もつれ」「量子超越性」「量子雑音限界」「量子ビーム」「量子ビット」「量子材料」「量子センサ」「量子光源」「量子化学」。回答数は、注目科学技術が15件、兆し科学技術が7件の計22件。

(1)量子コンピュータ等そのものに注目している場合と、(2)その活用法や波及効果にも注目している回答事例が複数みられる。事例を以下に複数抜粋する。括弧内の数字は付録3における通し番号を示す。

(1) 量子コンピュータ等そのものに注目する事例

①量子計算

- ・従来計算機と量子計算機による協調計算【56】

②量子コンピュータ

- ・トポロジカル超伝導体に現れるマヨラナ粒子の非可換統計性の量子コンピュータへの応用【30】
- ・極低温環境を効率よく生み出す技術【147】
- ・ワイドバンドギャップ半導体を用いた室温での量子技術【147】
- ・量子コンピュータをシステムとして取り組むアーキテクチャの開発【129】
- ・計算機科学のインターセクションとなる融合・境界領域の研究【129】
- ・量子コンピュータ用の暗号通信【128】
- ・量子コンピューターのための量子光源モジュール【409】
- ・量子コンピュータ向けドメイン特化型言語のコンパイラ・最適化技術やソフトウェア工学を発展させたテスト・検証技術など、量子コンピュータ向けソフトウェア開発法【413】
- ・量子コンピュータの実現【245, 388, 404, 482】

③量子ビーム線源・パワーレーザー

- ・高エネルギー、高ピークパワー、高平均出力(照射繰り返し率の高い)パワーレーザーの開発【337】
- ・レーザーダイオード励起、セラミック結晶を用いた次世代パワーレーザー製作コストの低減【337】

(2) 量子コンピュータ等の活用や効果に注目する事例

①量子センサ

- ・バイオセンシングと、薬剤候補の効率的な選定や疾病解明【10】

②量子化学、量子材料等

- ・生物の化学感覚器が持つ分子認識能の機構解明と再現【165】
- ・原子・分子レベルで構造が制御された新たな量子特性を示すナノ材料【199】
- ・第三者による鍵の盗聴を確実に検知することが可能な、量子暗号通信【245】

③量子コンピュータ

- ・従来のコンピュータを凌駕するスピードでの信号処理演算、古典的な量子化学計算では実現できなかった高速・高精度量子化学計算【245, 435】
- ・生体高分子や合成高分子など様々な化学反応予想、試行錯誤無しの最適反応条件特定【314】

④量子もつれ

- ・分光測定(レーザーを含む古典的な光を用いた測定)の検出限界を上回る測定技術【188】

⑤量子ビーム線源・パワーレーザー

- ・新しい物質の創成や物質の形状変化(レーザー加工)への応用【337】
- ・宇宙や地球・惑星の内部などの極限状態の再現【337】
- ・クリーンエネルギー源の開発を目的としたレーザー核融合炉【337】
- ・レーザープラズマ加速技術を用いた小型装置での高エネルギー量子ビーム生成及び建築コストの大幅削減【494】

5.3. 宇宙（宇宙探査・宇宙利用・宇宙環境（製造・計測）・宇宙資源・宇宙エレベーター・宇宙物理・宇宙エネルギー伝送・宇宙天気予報）

検索キーワードは「宇宙」。回答数は、注目科学技術が 15 件、兆し科学技術が 7 件の計 22 件。

(1)宇宙探査や利用に関する科学技術、(2)宇宙を計測・観測、予測・予報する科学技術、(3)宇宙機等のための基盤技術に注目する回答事例が複数みられる。事例を以下に複数抜粋する。括弧内の数字は付録 3 における通し番号を示す。

(1) 宇宙探査や利用に関する科学技術

地球資源の枯渇への対応や、人類の活動圏拡大に向けた科学技術が多い。

①宇宙探査・宇宙利用、宇宙資源、宇宙エネルギー伝送、宇宙エレベーター

- ・月の水資源や小惑星の鉄・プラチナなど宇宙資源の探査・採掘及び持ち帰り技術、月面での水・酸素生成技術【73, 524】
- ・宇宙資源やエネルギーの伝送・移送【242】
- ・宇宙空間を活用した経済活動や技術開発を大きく進展させるための宇宙エレベーター【485】

(2) 宇宙を計測・観測、予測・予報する科学技術

活発化する太陽活動や超小型衛星の普及に伴う事故頻度の増加を見越して、人工衛星の不具合、通信障害、人体や社会インフラへの悪影響を防ぐものや、宇宙空間での活動に向けた科学技術が多い。

②宇宙環境（製造・計測）、宇宙天気予報

- ・地球の気象予報レベルの宇宙天気予報、AI 技術を利用した宇宙天気予報、社会インフラへの影響予測が可能な、宇宙天気の高精度予報技術【41, 206, 276, 307】
- ・宇宙空間での低ノイズ観測のための冷凍技術【261】
- ・宇宙環境変動の 24 時間観測・リアルタイムモニタ・計測、多数の衛星を太陽の周りを周回させ常時監視する宇宙環境計測【41, 407】
- ・磁気シールドで宇宙線を防ぐ技術【501】

(3) 宇宙機等のための基盤技術

衛生等の材料など、宇宙利用のための基盤技術が多い。

③宇宙物理等

- ・装置損傷防止、高効率燃料利用、難燃性の再生可能燃料利用などが可能な繰り返し放電による確実な点火技術【113】
- ・テラヘルツ波を利用した 100 Gbps 超の Beyond 5G/6G 向け無線伝送技術【248】
- ・燃料使用量を大幅に低減し、衛星の寿命を大幅に伸ばす全電化衛星【288】
- ・宇宙分野の耐熱性材料に向けた、5 種類以上の元素からなるハイエントロピー合金、宇宙などの殊環境での製品製造が可能なオールオブティクス製造【323, 473】
- ・3K 宇宙マイクロ波背景放射の B モード偏光場の観測及び統計解析による宇宙の初期条件の解明【127】
- ・宇宙や地球・惑星の内部などの極限状態を再現可能な次世代パワーレーザー【337】

5.4. カーボンニュートラル・二酸化炭素技術（回収・吸収・利用・資源化・電解・固定・還元反応触媒・隔離・燃料合成・フリー・CCUS）

検索キーワードは「カーボンニュートラル」「二酸化炭素」「脱炭素」「カーボンフリー」「CCU」「CO₂」。回答数は、注目科学技術が 40 件、兆し科学技術が 4 件の計 44 件。

(1)CO₂ の資源化等に関わる科学技術、(2)資源の確保や産生、循環やリサイクルに関わる科学技術、(3)再生可能エネルギー等の産生や確保、変換に関わる科学技術(4)その他、環境保全や負荷低減に関わる科学技術に注目する事例が複数みられる。事例を以下に複数抜粋する。括弧内の数字は付録 3 における通し番号を示す。

（１）CO₂ の資源化等に関わる科学技術

- ・ガス発酵を行う微生物を用いた二酸化炭素の消費と有用物質生産【17】
- ・水素タンクに入れておくだけで多量の水素を保有できる軽量水素吸蔵・貯蔵材料【33】
- ・高濃度二酸化炭素を直接電解還元してメタノールを合成する技術及び電解セル【34】
- ・共有結合性有機構造体(covalent organic framework)による分離技術【65】
- ・沿岸生態系の CO₂ 吸収・隔離機能を活用したネガティブエミッション技術藻類等の海洋生物による二酸化炭素の隔離・貯留の定量化と普及【131, 136】
- ・一酸化炭素あるいは二酸化炭素を固定し有用物質生産を行う好熱性(嫌気性)微生物の育種【132】
- ・CO₂ 還元反応触媒や CO₂ 吸着材料【177】
- ・電気透析を活用して海水から CO₂ を回収する技術【336】
- ・CO₂ からの燃料や化成品の高純度合成と同時に副生水から水素を製造し、再度 CO₂ との反応へリサイクルするシステム【345】
- ・建築分野のライフサイクル CO₂ の把握・評価【353】
- ・二酸化炭素を酢酸菌で酢酸に変換し、それを炭素源として油脂発酵する技術【360】
- ・CO₂ の電解による有機物合成、CO₂ と水から界面活性剤などの化学物質を合成する触媒【360】
- ・塩基性岩石の化学風化促進による大気中 CO₂ の吸収と土壌改質、溶出イオンによる海洋酸性化の緩和【410】

（２）資源の確保や産生、循環やリサイクルに関わる科学技術

- ・海底鉱物資源、特にレアアース・コバルト・ニッケル資源の開発技術【48】
- ・日用品のプラ製品から、未使用原料からの製造と遜色ないプラ製品を再生する高度リサイクル技術【160】
- ・炭素を含む同位体分子を高精度かつ高感度に分析可能なレーザー分光に基づく分析法【258】

（３）再生可能エネルギーや水素等の産生や確保、変換、貯蔵や利活用等に関わる科学技術

- ・鉛フリーかつ高効率・長期信頼性を有するペロブスカイト太陽電池など、ペロブスカイト太陽電池【70, 197】
- ・廃水から NH₄⁺(エネルギー)への変換・回収技術【71】
- ・太陽光などの再生可能エネルギーによるアンモニア製造【77】
- ・アンモニアを燃焼させて発電所や内燃機関の熱エネルギーとして利用する技術、アンモニアからの水素製造【86, 118】
- ・高出力かつ高エネルギー変換効率を有した中低温作動型燃料電池【110】
- ・イオン伝導体を Li 分離膜とした Li 選択的な回収技術など、リチウムイオン電池原料循環技術【146】
- ・大量に水素を取り扱う将来を想定し、液体水素の冷熱も有効利用した電力需給調整システム【151】
- ・人工光合成に関する技術、有用物質の製造【239, 469】
- ・地球周回軌道上の太陽電池パネルで発電した電力をマイクロ波送電により地上に送る技術【242】
- ・微生物が土壌や水質を浄化する過程で発生する電子を有効活用した電池【320】
- ・核融合発電燃料の一つである三重水素を効率的に使用するための自己増殖技術、循環および再利用技術【386】

（４）その他、環境保全や負荷低減に関わる科学技術

- ・動物飼育由来の食肉を代替する培養肉生産法【72】
- ・固液分散系製品における添加剤の 9 割以上削減や高温熱処理プロセスが不要になる技術【104】
- ・木質バイオマスから環境負荷の小さいリグニン抽出および有用材料・化学原料の合成【119】
- ・バイオマス資源を活用した多孔質炭素材料(ウッドセラミックス)の蓄電池電極【227】
- ・燃料電池システムを活用したバス・トラック・鉄道【253】
- ・衛星観測による温室効果気体や大気汚染物質のポイントソース(単一発生源)の検出と定量【305】
- ・反応性窒素 Nr を安価かつ容易に定量、測定する技術【315】
- ・木質バイオマス発電所で生じる木灰と食品残差を組み合わせた有機堆肥化及びその地場利用【350】

6. 実現に向けて必要な要素

本調査では、科学技術だけでなく、その実現に向けて必要な要素についても調査した。他方で、直近の科学技術予測調査である第 11 回科学技術予測調査においても、必要な要素のうち、政策手段については「実現に向けて必要な政策手段」として項目別に調査した。今回得られた回答のうち、それらの項目に関連した記載には概ね以下のような内容が見られた。

（１）人材の育成・確保

研究を発展させるためにはポストドク等の他、特定の専門家の人材育成が必要との回答が見られる他、科学技術に関する理解の浸透や社会的教育についても回答が見られる。

（２）研究開発費の拡充、事業補助

研究開発費の拡充そのものや、公的資金の投資対象についての意見の他、コストダウンについても回答が見られる。

（３）研究基盤整備、事業環境整備

高度な設備の維持や実証実験といった回答の他、関係者の科学技術についての理解の浸透、データ量や品質管理、データの利用やデータベース整備についての回答が見られる。

（４）国内連携、国際連携

他の項目に比べて多くの回答が見られる。異分野連携や産学官連携の必要性だけでなく、分野融合的・横断的研究拠点の整備や、学会等プラットフォームの充実についての回答が見られる。連携対象についても幅があり、異分野であっても、例えばバーチャルリアリティ（VR）やメタバースに関しては、人文社会科学や認知科学など幅広い分野との連携に基づく大きな研究コミュニティの構築が必要との意見が見られた。他方で DNA ナノテクノロジーについては生化学とバイオテクノロジー、ヘルスケア情報を取得する研究領域については医学系と情報工学系、心理系などが連携対象であった。

（５）法規制の整備：法令・基準の緩和・廃止又は強化・新設

指針の提示や規制の緩和の他、税制の整備や省庁が連携した政策検討が必要との回答が見られた。

（６）倫理的課題への対応

倫理的な議論や取り決め、倫理審査に関する回答の他、社会的合意形成に関する記載が見られた。