

ほらいずん

カーボンニュートラルに資する 基盤的科学技術の将来展望 — 専門家アンケート結果概要 —

科学技術予測・政策基盤調査研究センター

特別研究員 蒲生 秀典、主任研究官 小倉 康弘、上席研究官 黒木 優太郎

【概要】

世界的な課題である地球温暖化に対応するため、我が国では 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。科学技術・学術政策研究所では、2019 年に公表した第 11 回科学技術予測調査において、2050 年までの実現が期待される 702 の科学技術トピックを選定し、産学官の専門家に対するアンケートを実施、重要度、国際競争力、実現見通し、政策手段などを評価した。カーボンニュートラルに直接関わるトピックの多くは、環境・資源・エネルギー分野において設定し、既に評価を得ている。本研究では、カーボンニュートラルに資する基盤的科学技術として、材料系・バイオ系の革新技術及び情報技術を活用した省エネ・省資源技術に関する科学技術トピック、並びにそれらの社会実装に伴うライフスタイルや社会システムなどの抜本的な変化に関わる社会トピックを新たに設定し、予測調査を実施した。その結果、低貴金属触媒燃料電池、CO₂ 光還元による再資源化、安価材料の蓄電池などの革新技術が、重要度と国際競争力が共に高いと評価された。社会トピックにおいては、モビリティに関連するトピックの重要度が高く、社会的実現には法規制の整備が必要とされた。

キーワード：カーボンニュートラル、科学技術予測、科学技術トピック、社会トピック、専門家アンケート

1. はじめに

世界的な課題である地球温暖化に対応するため、第 26 回気候変動枠組条約締約国会議 (COP26) 終了時点で世界 150 カ国以上が 2050 年カーボンニュートラルを表明している¹⁾。我が国では 2020 年 11 月に 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言、「グリーン成長戦略」²⁾ を策定し、産業とエネルギー政策の両面で成長が期待される、エネルギー・製造からオフィス・家庭・ライフスタイルに至る 14 の重要分野について実行計画を示している。さらに、昨今の世界情勢に鑑みエネルギーの安定供給を加えた「GX^{注1} 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ」³⁾ を閣議決定し、徹底した省エネの推進、再エネの主力電源化の他、水素・ア

ンモニア導入推進、蓄電池産業、資源循環などへの投資を促している。(公財) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) が公表している 2050 年カーボンニュートラルシナリオ分析⁴⁾ によると、エネルギーミックス、電化と電力部門の脱炭素化等と併せて、省エネ、物質・サービスに体化されたエネルギーの低減の必要性が示されている。シナリオからの示唆の一つとして、デジタル社会でのシェアリング・サーキュラーエコノミー推進が情報を活用した新たな省エネを実現し、エネルギーシステムコストが大幅に低減する可能性があるとしている。

文部科学省科学技術・学術政策研究所 (NISTEP) では、約 5 年ごとに科学技術に関する大規模な予測調査を実施している。2019 年に公表した第 11 回科学技術予測調査⁵⁾ では、科学技術 7 分野^{注2} を設定し、

注1 GX (グリーントランスフォーメーション)：温室効果ガスを発生させる化石燃料から太陽光発電、風力発電などのクリーンエネルギー中心へと転換し、経済社会システム全体を変革しようとする取り組み

2050年までの実現が期待される702の科学技術トピックを選定、産学官の専門家へのWebアンケートによって、それぞれのトピックについて重要度、国際競争力、科学技術的／社会的実現年、政策手段などの回答を得た。カーボンニュートラルに直接関わるトピックの多くは環境・資源・エネルギー分野において設定しており、このとき既に評価を得ている。本研究では、冒頭に述べた情勢変化に鑑み、カーボンニュートラルに資する基盤的科学技術として、ICT・サービスを活用した省エネ・省資源や、マテリアル・デバイス及びバイオテクノロジー関連の革新技術に関する科学技術トピック、並びにそれらの社会実装に伴う食、住居、教育、移動、ビジネスモデル、経済システム、経済格差・不平等に関わる社会トピックを新たに設定し、予測調査を実施した。本稿では、その内の専門家アンケート結果の概要を記す。なお、調査の詳細については、NISTEP調査資料を参照されたい⁶⁾。

2. アンケート調査の概要

アンケート調査に先立ち、社会やライフスタイルの変容に関する先駆的な調査に係る資料の参照⁷⁻⁹⁾と並行し、産学官の専門家30名にヒアリングを行い、科学技術トピック41件及び社会トピック19件、計60トピックを設定した。アンケートはWeb形式で、2022年12月20日～2023年1月15日にかけて実施し、それぞれのトピックについて重要度、国際競争力、科学技術的／社会的実現見通し、実現に影響の大きい要因、実現に向けた政策手段など、図表1に示す質問をした。産学官の専門家790名から回答を得た。

3. アンケート結果概要

3.1 科学技術的／社会的実現年

アンケート結果について、社会的実現年順に年表形式で、図表2(科学技術トピック)及び図表3(社会トピック)に示す^{注3)}。科学技術トピック及び社会トピック60件中、その大半の57トピックが

2040年までに社会的に実現(社会実装)すると予測されている。

AIによる高精度な温室効果ガス排出量予測、1週間以上の長期の天候予測精度向上による電力需要予測、社会活動の高精度予測による都市全体の省エネルギー化などのICT関連技術は2035年までの早期実現が予測された。マテリアルフロー(使用、分解、回収)を考慮した材料(素材、添加剤)設計、資源制約が少ない安価な材料使用の高性能蓄電池、低濃度CO₂濃縮などのマテリアル関連技術は2034年～2037年という結果であった。水素細菌など微生物の活用、海洋におけるCO₂貯蔵、CO₂の光還元反応による炭素原子の再資源化、高性能燃料電池などマテリアルやバイオ関連技術の実現は2037年以降と予測された。社会トピックにおいては、サブスクリプションや代替食品、e-ラーニング等に関連するトピックは早期実現が予測されたが、自動運転車の導入や集約的管理、環境等に配慮した消費者感覚の醸成、サプライチェーン・インフラの再構築のように、今後更に個人の行動、社会・経済システムの変質を要するトピック

図表1 アンケート調査の質問項目

項目	内容	選択肢
重要度 (単数選択)	30年後の望ましい社会を実現する上で、日本にとっての現在の重要度	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
国際競争力 (単数選択)	現在の日本が置かれた国際競争力の状況	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
政策的取組の進展度 (単数選択)	各トピックに関連する政策的取組の進展の度合い	非常に進展している、進展している、どちらでもない、遅れている、非常に遅れている、わからない
社会的取組の進展度 (単数選択)	各トピックに関連する社会的取組の進展の度合い	非常に進展している、進展している、どちらでもない、遅れている、非常に遅れている、わからない
科学技術的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで科学技術的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
科学技術的実現に影響の大きい要因 (複数選択可)	科学技術的実現に及ぼす影響の大きい要因	技術的要因、制度的要因、文化的要因、コスト面の要因、資金的要因、人材的要因、研究開発体制面の要因、その他
科学技術的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	科学技術的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、研究開発費の拡充、研究基盤整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的課題への対応、その他
社会的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで科学技術的な実現に続き、日本で社会的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
社会的実現に影響の大きい要因 (複数選択可)	日本での社会的な実現に及ぼす影響の大きい要因	技術的要因、制度的要因、文化的要因、個人の内発的要因、コスト面の要因、資金的要因、人材的要因、研究開発体制面の要因、その他
社会的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	日本での社会的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、事業補助、事業環境整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、経済的インセンティブ付与、倫理的・法的・社会的課題への対応、その他

・科学技術的実現とは、所期の性能を得るなど技術的な環境が整う、例えば、研究室段階で技術開発の見通しがつくこと。または、原理・現象が科学的に明らかにされること。
 ・社会的実現とは、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こと、あるいは普及すること。

注2 科学技術7分野：①健康・医療・生命科学、②農林水産・食品・バイオテクノロジー、③環境・資源・エネルギー、④ICT・アナリティクス・サービス、⑤マテリアル・デバイス・プロセス、⑥都市・建築・土木・交通、⑦宇宙・海洋・地球・科学基盤

注3 科学技術的／社会的実現年は、得られた回答を時期の早い順に並べ、その両端の1/4ずつを除いた中間の1/2の幅に関し、その中央値を実現年の代表値として示している。したがって代表値は、「その年までに実現すると全回答者の約半数が予測している時期」を意味する。

図表 2 科学技術トピックの社会的／科学技術的実現年・重要度・国際競争力

社会的 実現年	科学技術的 実現年	分野	科学技術トピック	重要度	国際 競争力
2031	2028	ICT	実空間における実演を遥かに超えたUn-Realなエンターテイメントがメタバース上で普及し、物理的なイベントが低頻度・高価格化する	-0.38	0.13
2032			環境価値の取引において、改ざん等の不正を防止するブロックチェーン技術	-0.03	-0.21
	ウェアラブルセンサ等を用いて、従業員の心身の健康状態を予測し、個別に適切な働き方を推奨することで、従業員エンゲージメントと生産性が向上する		-0.04	-0.06	
2033	人工知能技術を用いた映像解析による、高精度な温室効果ガス排出量予測技術		0.82	0.18	
	出勤による冷暖房効率化、移動に伴う温室効果ガス排出、天候による発電量変化などを総合的に勘案し、日ごとの推奨テレワーク率を予測するシステム		0.03	0.13	
	IoTとデジタルデータ活用の進展により、電化製品についてはオフラインのものも稼働状況が全て計測され、廃棄(回収)時に記録され、リサイクルや少資源製品設計に活用される		0.41	0.41	
2034	IoTやウェアラブルセンサーを活用して、個人・時間単位での二酸化炭素排出量を収集・可視化するシステムが構築される		-0.01	-0.13	
	2029		都市やサプライチェーンにおける、温室効果ガス排出が集計できるデータプラットフォーム(データ蓄積、交換、およびそのための制度)が確立し、世界の半数以上の国で普及する	1.11	0.08
2031	マテリアル		シミュレーションによる予測とIoTを用いた構造ヘルスマonitoringによるリアルタイムの実測を活用して、現状の実測データのみでの保証に代えて、環境性能に最適化された材料・構造を迅速かつ低コストで保証するシステムが確立される	0.85	0.16
	ICT		1週間以上の長期の天候予測精度が向上し、波及的に天候の影響を大きく受ける電力需要や自然エネルギーによる電力供給の予測精度が向上する	1.13	0.61
2035	マテリアル	各種予測技術の向上により、各種生産プロセスにおける過剰生産が相対的に低下し、廃棄物が大幅に低減する	0.92	0.36	
		高速次世代通信5G/6Gを実現するガラス・塗料・建材一体型アンテナ及びその材料	0.32	0.50	
2032	ICT	輸送機器向けの高強度かつ高延性(鉄鋼材料45GPa、アルミ合金15GPa)の超軽量構造材料	1.13	0.82	
		蓄電池の内部構造劣化状態と寿命の可視化・データ共有が可能となり、リユース及びリサイクルシステムが確立する	1.19	0.58	
2036	マテリアル	複雑な社会現象をシミュレーションすることができるエージェントシミュレーションを活用した、社会活動の高精度な予測が可能となり、スマートシティ機能がその状況に応じて都市を最適化することで、都市全体の省エネルギーが進展する	0.85	-0.06	
		スマートシティに含まれるスマート機器が、自然環境や社会環境の変化に応じて、動的にソフトウェアの動きや機器構成を更新する都市OS(オペレーティングシステム)技術が確立する	0.52	-0.13	
2032	マテリアル	材料に関する情報のデジタル化が進み、マテリアルフロー(使用、分解、回収)を考慮した材料(素材、添加剤)設計が主流となる	1.36	0.38	
		使用時は耐久性が高く、使用後は海水や太陽光などの自然環境で容易に分解でき、海洋生態系への影響が小さい可食化プラスチック	1.03	0.43	
2033	マテリアル	資源制約が少ないナトリウム系などの安価な材料を用い、高エネルギー密度かつ安全性が高く、サイクル寿命の長い蓄電池	1.24	0.74	
		特定の波長を吸収して、窓と一体化可能あるいは夜間でも発電できる、軽量・フレキシブルで都市や景観に調和する太陽電池	0.96	0.58	
2034	バイオ	物理的なシミュレーションと社会・人間行動のシミュレーションを組み合わせることによって、その社会的インパクト、行動の容容までを考慮した温室効果ガス排出量低減効果の評価が可能となる	0.90	0.12	
		生物機能を用いた物質製造や設計を目的とした、バイオ関連情報とマテリアル関連情報とを統合したデータベースの整備	0.70	0.03	
2035	ICT	イン・メモリ・コンピューティング(in-memory-computing:全てのデータをメモリー上に持つことにより、高速に処理する技術)の普及により、大規模データを用いた計算が10万倍位高速に処理できるとともに、計算に伴う消費電力量が大幅に低下する	0.51	-0.27	
		電気自動車(EV)を中心としたモビリティが普及し、EVと電力網が協調し調和のとれた電力供給が実現したスマートシティが、国内6都市以上で実現する	1.29	0.15	
2036	バイオ	人工酵素(完全にプログラム可能なタンパク質触媒)の開発のための、既存のタンパク質構造予測システムを超える、AI・シミュレーション技術	0.68	0.09	
		使用中は長寿命で物性を維持するが、リサイクルしたい時にスイッチが入るかの如く、接着面の剥離、接着剤のみの分解などが進み、部材のポリマー(重合体)の分解をせずにリサイクルが可能な、スイッチ型リサイクル材料技術	0.97	0.48	
2033	マテリアル	大気中の低濃度のCO2を分離膜などにより濃縮する技術	1.42	0.42	
		計算材料科学の進展、AI技術の適用により材料レベルからのデジタル・ツインの構築が可能となり、デジタル空間上での製造物設計と統合され、材料製造プロセスにおける温室効果ガス排出量を最適化した材料開発が可能となる	1.12	0.26	
2034	バイオ	水素とCO2を原料に水素細菌などの微生物を用いて炭化水素等を製造する技術	0.91	0.31	
		漁場良化をもたらす、海洋におけるCO2貯留技術	0.85	0.41	
2037	マテリアル	リマニュファクチャリング製品(使用済み製品からの再生製品)が新品製品の一部を代替し、新品生産額の50%を占めるようになる	1.22	0.40	
		量子コンピュータを用いた最適マッチング技術により、食糧の需給調整やフードサプライチェーンにおける入出荷の最適調整が実現し、フードロスが低減する	0.63	-0.08	
2038	バイオ	沿岸海域の海洋主要元素・物質(窒素・炭素など)動態の全体把握と、高光合成藻類等を含む最適生態系構築による、高生産性ブルーカーボン利用システム(湖等の淡水域についても)	1.02	0.45	
		意図的に降雨を引き起こす技術(人工降雨技術)が確立し、産業界等で一定程度活用される	-0.25	-0.07	
2039	マテリアル	400℃以下で発電可能で、発電効率70%以上の固体酸化物形燃料電池	1.21	0.86	
		太陽光による水分子の光分解触媒の探索およびCO2の光還元反応による炭素原子の再資源化技術	1.27	0.84	
2040	2037	バイオマスや炭酸ガスなどを100%の原料とし、原油や鉱物資源を全く使わずに作られるデジタルファブリケーション(原理的に少資源が可能な3Dプリンターなど)専用の構造材料や機能性材料	1.25	0.22	
2041	2034	貴金属触媒使用量が対2021年比で10分の1以下となる、発電効率80%以上の固体高分子形燃料電池	1.34	0.82	
2043	2039	合成生物学的にデザインされた微生物やバイオ材料を利用した、省エネルギー・低コストで実用的な、鉱石や廃棄物等からのレアメタル等金属資源の回収・抽出技術(バイオリッチングを含む)	0.81	0.20	
2047	2041	現在のスパコン程度の性能を1チップで実現可能な、光デバイスを半導体チップの中に一体化した光電融合プロセス	0.93	0.38	
2047	2041	テラフォーミング(惑星地球化計画)を目指した、砂漠等過酷環境での生態系構築のための、土壌微生物叢・植物等生物群の合成生物学的デザイン	0.14	-0.08	

・重要度・国際競争力:非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)として、指数を算出。

・ICT:ICT・アナリティクス・サービス分野、マテリアル:マテリアル・デバイス・プロセス分野、バイオ:農林水産・食品・バイオテクノロジー分野

図表 3 社会トピックの社会的／科学技術的実現年・重要度・国際競争力

社会的 実現年	科学技術的 実現年	分類	社会トピック	重要度	国際 競争力
2030	2028	ビジネス モデル	製品(日用品を含む)の所有に対する支払から、機能に対する支払(リース・シェア・サブスクリプション)に転換し、維持・適応サービスの向上により、製品当たりの利用期間が長期化する	0.35	-0.12
2031	2029	教育	地域センターがe-ラーニングの拠点となり、学生たちの学習・他の学生との中心的な意見交換・活動の場になる	0.02	-0.55
2032	2030	食	外食中心の健康的な食生活が普及し、過剰な食糧の利用が回避されることで、社会全体の食糧需要が抑えられ、フードロス・物流費用が低減される	0.31	-0.04
2033	2029	食	フードシェアリングの普及、食糧の消費に関する情報利用技術の発展により、フードロスが極小化される	0.61	-0.13
		ビジネス モデル	大企業だけでなく中小事業者にも利用可能な簡便なLCA(ライフサイクルアセスメント)ツールキットが普及することで、サプライチェーンを通じた環境データの透明化により、環境コストに基づく消費の選択が可能になる	0.86	-0.12
	2030	食	温室効果ガス排出削減、フードセキュリティ対策として代替食品(昆虫食・人工肉等)が普及する 各種メディアを通して健康的・合理的な食生活の認識・実践が普及することで、食糧需要が抑えられ、フードロス・物流費用が低減される	0.64	0.16
		ビジネス モデル	物的な財は、デポジットを含んだ価格付けによって販売されたり、公共調達において再利用・再生品の利用が優先されるなどして、モノの生産・消費・廃棄の流れからリユース・リマニュファクチャリング・リサイクルシステムへの転換が起こる	0.95	0.19
			製品のモジュール化・部品の規格化が進展してリサイクルが容易な生産システムに移行するとともに、使用済み製品の収集システムの確立及び製品の修理を行う専門業者が配置されるなどにより、同一地域内で完結する生産・資源回収システムが構築される	0.71	0.21
			マテリアルフローの把握により、サプライチェーンの各段階における温室効果ガス排出削減ポテンシャルが明確になることで、排出削減に伴う経済への負の影響を極小化する	1.07	0.30
2034	2029	移動	集中的に管理された自動運転車が商品の配送等に活用されている	0.84	0.06
	2030		日常的な移動は、ウォーキングやサイクリングのような手段が中心となっている	0.54	-0.43
	2031	食	物流におけるエネルギー・温室効果ガス排出費用の上昇に伴い、食料の地産地消が主流になる	1.05	-0.06
		移動	市内交通への電気自動車、中長距離交通へのプラグインハイブリッド・燃料電池車等、適材適所でモビリティが配置される	1.24	0.25
		経済シス テム	脱炭素に向けて個人の行動変容を促すため、労働ベース(所得税)から物質ベース(炭素排出量)の課税に転換されるとともに、元来環境負荷が高い産業部門への影響を勘案し、転換の補償としてベーシックインカムを配分する	0.53	-0.36
2035	2032	住居	家計による電気自動車等を利用した蓄電・余剰電力の取引を含めた、地域内の自律的再生可能エネルギーシステムが確立している	1.09	0.12
2036		経済格差 ・不平等	LCA(ライフサイクルアセスメント)を通して資源の生産・調達経路を認識することで、国家戦略として環境・人権に配慮した持続性規準、サプライチェーンを再構成する	0.79	-0.39
2037	2034	経済格差 ・不平等	サプライチェーンを通じた環境負荷と経済格差との関連について世間一般に認識されることで、環境公正・気候公正に対する消費者の認識が醸成され、消費行動の変容を通して公平性に配慮した経済システムに移行する。	0.80	-0.31
2040	2035	住居	公共スペースや集合住宅の設計の向上により、地域の中心都市に住宅・都市機能が集積したコンパクトシティが形成され、都市区域内のエネルギー利用効率が向上する	1.04	0.17

・重要度・国際競争力:非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)として、指数を算出。

クに関しては、より後期の実現が予測された。

3.2 重要度・国際競争力

重要度と国際競争力が高いと評価されたトピックを、図表 4 (重要度)、図表 5 (国際競争力) に示す。重要度は上位 5 トピック中 4 トピックが、低濃度 CO₂ 濃縮、マテリアルフロー、燃料電池、炭素原子の再資源化などのマテリアル関連技術であった。ICT 関連ではモビリティ関連のトピックの評価が高かった。国際競争力の上位 5 トピックは全てマテリアル関連で、いずれも重要度も高いと評価されたトピックであった。

3.3 科学技術的／社会的実現に向けた政策手段

図表 6 および図表 7 に示すように複数回答で聞いた必要な政策は、科学技術トピックでは、科学技術的実現のための人材の育成・確保と研究開発費の拡充の選択割合が高かった。計算科学やデータ科学に関連するトピック群では人材の育成・確保が、また、CO₂ や希少資源の回収・利用関連やインメモリコン

ピューティング技術では研究開発費の拡充が必要とされた。社会トピックに関しては、教育拠点としての地域センターの形成に関するトピックで人材の育成・確保が必要と評価された。

3.4 社会的実現に必要な政策手段及び影響 (要因)

図表 8、9 には、社会的実現に必要な政策手段、社会的実現に影響が大きいと考えられる要因について、全体の中で社会トピックが高い選択割合となった選択肢の結果を示している。図表 8 では特に選択割合の多かった「法規制の整備」上位 5 トピックを挙げているが、上位 4 トピックは社会トピックであり、2 つは移動、それ以外は財政システム、住居に関連するものであった。また図表 9 は「個人の内発的要因」の選択割合の高い上位 5 トピックは、全て社会トピックが占めた。このうち 3 つが食に関するもので、最も割合が高かったのは移動手段としてのウォーキング・サイクリング、もう 1 つは消費行動の変化による環境・気候公正を反映した経済システムへの移行であった。

図表 4 重要度指数が高い5トピック

	重要度	分野	科学技術&社会トピック
1	1.42	マテリアル	大気中の低濃度のCO2を分離膜などにより濃縮する技術
2	1.36	マテリアル	材料に関する情報のデジタル化が進み、マテリアルフロー(使用、分解、回収)を考慮した材料(素材、添加剤)設計が主流となる
3	1.34	マテリアル	貴金属触媒使用量が対2021年比で10分の1以下となる、発電効率80%以上の固体高分子形料電池
4	1.29	ICT	電気自動車(EV)を中心としたモビリティが普及し、EVと電力網が協調し調和のとれた電力供給が実現したスマートシティが、国内6都市以上で実現する
5	1.27	マテリアル	太陽光による水分子の光分解触媒の探索およびCO2の光還元反応による炭素原子の再資源化技術

図表 5 国際競争力指数が高い5トピック

	国際競争力	分野	科学技術&社会トピック
1	0.86	マテリアル	400℃以下で発電可能で、発電効率70%以上の固体酸化化物燃料電池
2	0.84	マテリアル	太陽光による水分子の光分解触媒の探索およびCO2の光還元反応による炭素原子の再資源化技術
3	0.82	マテリアル	貴金属触媒使用量が対2021年比で10分の1以下となる、発電効率80%以上の固体高分子形料電池
		マテリアル	輸送機器向けの高強度かつ高延性(鉄鋼材料45GPa%、アルミ合金15GPa%)の超軽量構造材料
5	0.74	マテリアル	資源制約が少ないナトリウム系などの安価な材料を用い、高エネルギー密度かつ安全性が高く、サイクル寿命の長い蓄電池

図表 6 科学技術的実現に必要な政策手段：人材の育成・確保 (選択割合* 上位5トピック)

	選択割合	分野	科学技術&社会トピック
1	66%	マテリアル	計算材料科学の進展、AI技術の適用により材料レベルからのデジタル・ツインの構築が可能となり、デジタル空間上での製造物設計と統合され、材料製造プロセスにおける温室効果ガス排出量を最適化した材料開発が可能となる
2	65%	バイオ	人工酵素(完全にプログラム可能なタンパク質触媒)の開発のための、既存のタンパク質構造予測システムを超える、AI・シミュレーション技術
		社会(教育)	地域センターがe-ラーニングの拠点となり、学生たちの学習・他の学生との中心となる意見交換・活動の場になる
4	63%	バイオ	生物機能を用いた物質製造や設計を目的とした、バイオ関連情報とマテリアル関連情報とを統合したデータベースの整備
5	58%	ICT	量子コンピュータを用いた最適マッチング技術により、食糧の需給調整やフードサプライチェーンにおける入出荷の最適調整が実現し、フードロスが低減する

* 選択割合: 各問の回答者総数のうち、各選択肢を選んだ回答者の割合

4. まとめ

専門家へのアンケートの結果、貴金属触媒量の少ない高性能燃料電池、水の光分解触媒とCO₂光還元による炭素原子の再資源化、安価な材料で高性能な蓄電池などの革新技術が、特に重要度と国際競争力が共に高いと評価された。また、計算科学、データ科学に関する科学技術の重要度は高いが、国際競争力が比較的

図表 7 科学技術的実現に必要な政策手段：研究開発費の拡充 (選択割合上位5トピック)

	選択割合	分野	科学技術&社会トピック
1	67%	マテリアル	太陽光による水分子の光分解触媒の探索およびCO2の光還元反応による炭素原子の再資源化技術
		バイオ	水素とCO2を原料に水素細菌などの微生物を用いて炭化水素等を製造する技術
3	66%	バイオ	合成生物学的にデザインされた微生物やバイオ材料を利用した、省エネルギー・低コストで実用的な、鉱石や廃棄物等からのレアメタル等金属資源の回収・抽出技術(バイオリーチングを含む)
		ICT	イン・メモリ・コンピューティング(in-memory-computing: 全てのデータをメモリー上に持つことにより、高速に処理する技術)の普及により、大規模データを用いた計算が10万倍高速に処理できるとともに、計算に伴う消費電力量が大幅に低下する
5	64%	マテリアル	大気中の低濃度のCO2を分離膜などにより濃縮する技術

図表 8 社会的実現に必要な政策手段：法規制の整備 (選択割合上位6トピック)

	選択割合	分類	科学技術&社会トピック
1	87%	移動	集中的に管理された自動運転車が商品の配送等に活用されている
2	68%	移動	市内交通への電気自動車、中長距離交通へのプラグインハイブリッド・燃料電池車等、適材適所でモビリティが配置される
3	62%	経済システム	脱炭素に向けて個人の行動変容を促すため、労働ベース(所得税)から物質ベース(炭素排出量)の課税に転換されるとともに、元来環境負荷が高い産業部門への影響を勘案し、転換の補償としてベーシックインカムを配分する
4	59%	住居	家計による電気自動車等を利用した蓄電・余剰電力の取引を含めた、地域内の自律的再生可能エネルギーシステムが確立している
5	58%	ICT	スマートシティに含まれるスマート機器が、自然環境や社会環境の変化に応じて、動的にソフトウェアの動きや機器構成を更新する都市OS(オペレーティングシステム)技術が確立する
		ICT	電気自動車(EV)を中心としたモビリティが普及し、EVと電力網が協調し調和のとれた電力供給が実現したスマートシティが、国内6都市以上で実現する

図表 9 社会的実現への影響：個人の内発的要因 (選択割合上位5トピック)

	選択割合	分類	科学技術&社会トピック
1	62%	移動	日常的な移動は、ウォーキングやサイクリングのような手段が中心となっている
2	59%	食	各種メディアを通して健康的・合理的な食生活の認識・実践が普及することで、食糧需要が抑えられ、フードロス・物流費用が低減される
3	56%	食	フードシェアリングの普及、食糧の消費に関する情報利用技術の発展により、フードロスが極小化される
4	52%	経済格差・不平等	サプライチェーンを通じた環境負荷と経済格差との関連について世間一般に認識されることで、環境公正・気候公正に対する消費者の認識が醸成され、消費行動の変容を通して公平性に配慮した経済システムに移行する。
5	51%	食	温室効果ガス排出削減、フードセキュリティ対策として代替食品(昆虫食・人工肉等)が普及する

低く、特に政策手段として人材の育成・確保が必要であり、一方、CO₂や希少資源の回収・利用など環境関連技術やインメモリコンピューティング技術では、研

究開発費の拡充が必要とされた。これは、「GX 実現に向けた基本方針」³⁾ で示された蓄電池、資源循環、省エネ技術推進の具体的な方向性を示す結果である。社会トピックにおいては、モビリティに関連するトピックの重要性が高く評価され、またこれらモビリティやそれを通じたエネルギーの活用といったトピックの社会的実現に必要な政策手段として、法規制の整備が必要との結果となった。「グリーン成長戦略」²⁾ では、自動車・蓄電池産業の区分において、エネルギー政策との両輪での政策推進・ルール整備がうたわれるとともに、次世代電力マネジメントにおいてはエネルギーの最適利用、ライフスタイル関連では自律分散型エネルギーシステムへの方向性が示されており、そのための法整備認識の高まりが結果に反映されたと想像される。また個人の内的要因による影響は、移動や食生活に関連するトピックで選択される割合が高かった。

統合イノベーション戦略 2023¹⁰⁾ では、「先端科学技術の戦略的な推進」の中で、GX 実現を通じた脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長を同時に実現するため、カーボンニュートラルや多様なエネルギーの

活用に向けた省エネ、再エネ等の革新的技術開発を推進するとしている。具体的には、革新的環境イノベーション技術の研究開発・低コスト化の促進などの技術開発に加え、国民の行動変容の喚起を挙げている。ここでは、BI-Tech（行動科学の知見と先端技術の融合）を活用した製品・サービス・ライフスタイルのマーケット拡大を目指す。本調査でも取り上げた、サービス分野のトピック「従業員の心身の健康状態を予測し、個別に適切な働き方を推奨することで、従業員エンゲージメントと生産性が向上する」、社会トピック「個人の行動変容を促すため、労働ベース（所得税）から物質ベース（炭素排出量）の課税に転換されるとともに、元来環境負荷が高い産業部門への影響を勘案し、転換の補償としてベーシックインカムを配分する」等のトピックは、政策的取組、社会的取組いづれも進んでいないとの評価⁶⁾ であり、今後のこれら取組の推進が期待される。このため、個人の行動変容を実現するためのデザイン思考、またそれを組織や社会の変容に関連付けるためのシステム思考のような視点も重要であろう。

参考文献・資料

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁. 脱炭素化に向けた諸外国の動向. 2021 年
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-2.html#n19>
- 2) 内閣官房, 経済産業省他. 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. 2021 年
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf
- 3) 内閣官房. GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ. 2023 年
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf
- 4) 経済産業省 CCS 長期ロードマップ委員会・(公財) 地球環境産業技術研究機構 (RITE)、2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析. 2022 年
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/001_05_00.pdf
- 5) 科学技術・学術政策研究所. 第 11 回科学技術予測調査 S&T Foresight 2019 総合報告書 [NISTEP REPORT No.183] の公表について. 2019 年 <https://www.nistep.go.jp/archives/42863>
- 6) 科学技術予測・政策基盤調査研究センター. カーボンニュートラルに資する基盤的科学技術の将来展望 (仮). 2023 年 11 月発行予定
- 7) Leppänen, J., et al. *Scenarios for sustainable lifestyles 2050: From global champions to local loops*. UNEP/Wuppertal Institute Collaborating Centre on Sustainable Consumption and Production (CSCP), Wuppertal, 2012
https://www.cscp.org/wp-content/uploads/2016/05/Scenarios-for-Sustainable-Lifestyles_2050.pdf
- 8) Sessa, C., A. Ricci. The world in 2050 and the New Welfare scenario. *Futures*, 58, 77-90, 2013,
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2013.10.019>
- 9) Glenn, J. and the Millenium Project Team. *Work/technology 2050: scenarios and actions*. Millennium Project, Washington DC, 2019
<https://www.millennium-project.org/projects/workshops-on-future-of-worktechnology-2050-scenarios>
- 10) 内閣府総合科学技術・イノベーション会議. 統合イノベーション戦略 2023 (令和 5 年 6 月 9 日閣議決定), 2023 年
https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2023_honbun.pdf