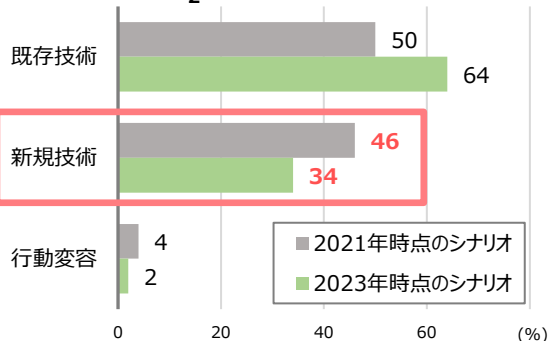


1. 現状認識・目的

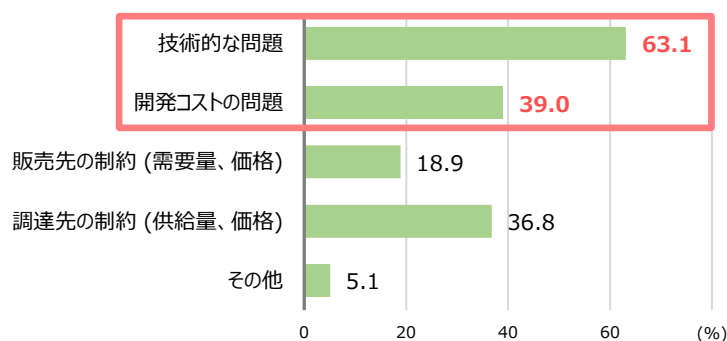
- 近年、期限付きカーボンニュートラル目標を表明する国・地域が増加しており、GDPベースで世界全体の約94%を占める（2023年5月時点）。排出削減と経済成長をともに実現するグリーントランスフォーメーション（GX）に向けた長期的かつ大規模な投資競争が激化しており、GXに向けた取組の成否が企業・国家の競争力に直結する時代に突入している。
- 2050年までにカーボンニュートラルを達成するためには、既存技術の展開・普及による寄与のほかに、新規技術の実現・普及が不可欠とされているが、技術的問題や開発コストの課題は大きく、イノベーションへの資金投入拡大による技術開発の促進が不可欠である。諸外国では、企業の実証研究のみならず、基礎・基盤的な研究開発への投資も加速しており、例えば米国では、エネルギー省（DOE）や米国科学財団（NSF）等における気候変動・グリーンエネルギー関連予算のうち約74億ドルが基礎研究に該当する。
- 循環型経済や持続可能性への関心の高まりを受け、欧州バッテリー規制やカーボンプライシングなどの規制・制度の導入・検討が進んでいる。また、毒性や可燃性、環境影響等の有害性を持つ材料についての問題意識も高まっており、欧州をはじめとして各国で規制が検討されている。こうした社会・経済制度の動向にいち早く対応していくことも求められる。
- カーボンニュートラルやGXを達成するためには、こうした社会・経済的要請を踏まえつつ、産業界における技術開発や実証と並行してアカデミアにおける研究開発と人材育成への支援、企業とアカデミアの連携による社会実装が求められる。文部科学省では、令和5年度より「革新的GX技術創出事業（GteX）」及び「先端的カーボンニュートラル技術開発（ALCA-Next）」を開始した。GteXの開始にあたっては、本委員会で議論・審議を行い、基本方針及び研究開発方針（令和5年4月文部科学省決定）を取りまとめた。
- 他方で、GX実現に向けた研究領域は多岐に渡るため、様々な施策を組み合わせる必要がある。そのため、本委員会では、GX実現に向けてアカデミアに求められている課題・役割は何か、様々な関連領域や施策の方向性等について検討を進めた。

世界がネットゼロに至るまでのCO₂削減要因の割合



(出典) IEA「Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach - 2023 Update」(2023年9月)に基づき作成

カーボンニュートラル実現に向けた日本企業の課題意識



(注) 対象は大企業。2つまでの複数回答。
(出典) 日本政策投資銀行「企業行動に関する意識調査結果」(2023年8月)に基づき作成

各国の研究開発の投資状況

国	エネルギー関連の基礎研究に対する投資額*
米国	69億ドル (FY2025) (DOE) 5億ドル (FY2025) (NSF)
ドイツ	2.22億ユーロ (FY2022) (連邦政府)
英国	3.7億ポンド (2023年6月時点で進行中のプロジェクト) (UKRI傘下EPSRC (工学・物理科学研究会議))

(※) ドイツ：連邦経済・気候保護省 (BMWK) 資料より、各分野の予算項目内に「Basic research into ...」とあったものを「基礎研究」として集計。風力は「Environmental aspects of wind energy」と「Wind physics and meteorology」、材料研究はそのものを基礎研究としてカウント。
米国：FY2025大統領予算教書、NSF予算要求書より。
英国：UKRI傘下EPSRC (工学・物理科学研究会議) 公開情報より。
(出典) CRDSの情報を基に文部科学省作成。

2. GX実現に向けて、アカデミアに求められる研究開発の方向性

① 社会ミッションからのバックキャスト

- GXの実現は、社会・経済システムの変革を伴う。様々な技術や選択肢を組み合わせ、全地球規模で俯瞰的に考える必要。規制や国際標準化なども見据え、社会ミッションからバックキャストする視点も必要。
- 経済的・社会的・環境的最適化や社会科学・人文学・地政学を含む様々な分野の融合の中で、研究領域をまたいだテーマの議論が重要。その際、アカデミアや企業の若手研究者が考え方をアップデートしながら密にコミュニケーションすることが重要。
- 外部環境変化も踏まえ、技術が持つ社会的な価値の評価やシナリオ形成といったソフトな研究開発や、シナリオ分析や技術経済分析ができる人材、横断的に新規技術の応用先を考えられる人材の育成が重要。

② 革新的な技術の創出

- 政府全体でGX実現に向けた取組が進む中、文部科学省・アカデミアに求められるのは、様々な技術シーズにつながるサイエンスの芽を生み出すことと、それらを将来、企業がコミットや経営判断できるところまで育てること。基盤となる従来からの学問体系の発展や人材育成を置き去りにせず、新しいプレイヤーの積極的な発掘、異分野の多様な研究者を巻き込む仕組みも重要。
- 他方、社会課題解決につなげるには、ボトルネック課題という需要側からのアプローチにより、社会が求めるサービスも意識して研究を進める必要。ニーズ側（産業界）とシーズ側（アカデミア）の密なコミュニケーション・連携の仕組みが重要。
- 「先端バイオ×AI」など、境界領域や思いもしない組み合わせによるイノベーションを生み出すことも重要。

③ 出口を見据えた戦略的なマネジメント

- 社会実装を念頭に置き、代替技術や競合技術等の動向を常に注視して、研究開発開始後もスピード感をもって軌道修正しながら進めることが重要。研究シナリオの策定段階からアカデミアと企業が密にコミュニケーションし、社会が求めるサービスを意識した要素技術研究、先の展開が比較的読みにくいような冒険的な提案に企業が参画する仕掛けを検討することも必要。
- オープン・クローズ戦略、知財の取扱い、国際標準化、国際連携を意識しながら研究開発を進めていくことが重要。社会実装の観点では、コスト削減や製造技術、制度設計においてもアカデミアにおいて貢献できる課題があるかを考慮することも必要。
- 社会ニーズに基づく研究要素分析や、有望テーマの研究開発をどう推進すべきかなど、研究マネジメント自体の研究も重要。

3. 具体的な論点

① 社会ミッションからのバックキャストिंग

<学際的・俯瞰的な広い視野での議論>

- 炭素・水等の全地球上での物質循環を考えた上でのエネルギーと環境負荷について、研究分野枠を超えてトータルで考えることが必要。安全保障的にも心配が増える中、アカデミアに期待されるものは個別技術分野はもちろんであるが、精緻な研究・技術を持って全体を俯瞰・予測・提言するところこそが重要。
- 欧州における規制動向や、国際標準化といった動きを踏まえ、資源循環などの体系化の難しい研究領域を俯瞰的に研究し、国際連携によるシナリオを形成する学問としての研究領域に期待。
- 資源循環を含む経済的、社会的、環境的最適化や、社会科学、人文学、地政学を含む様々な分野の融合の中で、同じ目的を持って研究領域をまたいだ議論・研究ができるような環境が重要。

<社会的インパクトの考慮>

- 将来社会が求める新たな価値軸を取り入れることが必要。循環経済、自然資本、経済安全保障といった、昨今の国内外を取り巻く外部環境変化に伴い重要性が顕在化した概念の導入も一案。
- 脱炭素だけでなく、希少鉱物資源管理、エネルギー安全保障、経済安全保障といった観点から、各技術が持つ社会科学的な価値、環境や産業への影響を定量的・定性的に評価した上で、注力すべき技術領域を探索することが重要。
- 要素技術の導入によりどのような社会的価値・社会科学的インパクトを生み出すのかといった、ソフトな研究開発も必要。
- バックキャストする際の起点となる未来像をはっきりと定義しにくい場合は、抽象的な未来像を持ったうえで、1～2年後の技術開発のゴールとして市場に受け入れられるスペックを設定し、そこから短期的なバックキャストをしていくことも必要。

<これまでになく人材育成の取組>

- シナリオ分析や技術経済分析ができる人材を育てるとともに、そのような方向性に進むことをたたえるような仕組みも必要。
- 創出された成果が、当初想定していた分野とは異なる分野の社会課題解決において有用となる場合がある。横断的にいろいろなプロジェクトの新規技術の応用先を考えられる人材を育てることも必要。
- シーズレベルの基礎研究・技術開発を俯瞰的に見ている人材と、ビジネス側でビジネスモデルを用意している人材とのコミュニケーションも必要。
- プロジェクト全体を牽引する人材として、技術だけではなく経済性や社会課題の観点も含め、日本あるいは世界全体の広い意味で俯瞰できる人材を発掘・育成することが必要。そのためには、大学院生・学部生・教員への意識啓発も必要。
- 次の人材を育てるためには、若い研究者が元気に活動している姿を見せることが大切。
- 受け身の人材ではなく、自分から考えて行動するような人材を育てることが重要。
- 問題を解決する人材だけでなく、何が問題かを見つけ出す人材の育成を行う観点も重要。
- 若手研究者や企業の若手も含めたワーキンググループなど、若手同士の交流・議論の機会を増やし、資源や資金等が限られる中でどのように集中化・分散化していくかの議論や、研究テーマの提案をできるとよい。

② 革新的な技術の創出

<多様なシーズと社会のニーズのバランス>

- 0を1にするような革新技術を生み出すところは文部科学省、1を100、1,000、万に発展させるところは経済産業省や環境省など、役割分担を検討した上で、アカデミアが貢献できる領域・分野・研究テーマが何なのかを議論することも大切。特に、TRLが低くまだ企業がコミットや経営判断をできないところで芽を生み出すことが、アカデミアに求められる領域。
- アカデミアはGXの苗床になるべきであり、領域を過度に狭め過ぎないことが重要。産業界のロードマップに対応できるようなものを経済産業省・NEDOで、チャレンジングな取組を行いアカデミアから新しいシーズを創出するところを文部科学省・JSTで行うと、プロジェクトの価値が社会全体で上がる。
- 様々な技術シーズにつながるサイエンスの芽を育てることが重要。基盤となっている従来からの学問体系の発展や人材育成を置き去りにせず、新たなチャレンジがされていくような仕組みも重要。
- 新しいプレイヤーの積極的な発掘、異分野の多様な研究者を巻き込む仕組みが重要。
- 日本は研究の幅が広いことが強み。新たなテーマが出てきた際に対応できるだけでなく、注目が集まり各国の取組が進展した際にも、最後までプレゼンスを維持できるようになることが必要。

<社会のニーズとの接続>

- ボトルネック課題という需要側からのアプローチにより、社会が求めるサービスを意識した要素技術研究を進めることが重要。
- 産業界での取組をさらに進めていくためのボトルネックについて、ニーズ側（産業界）からシーズ側（アカデミア）への情報発信も必要。産業界とのコミュニケーションをどのように行っていくか、有効にニーズを反映させていくことが重要。
- プロトタイピングやPOCの早期化を通じて、文部科学省・JSTと経済産業省・NEDOとの連携をさらに強化していくことが必要。

<学際融合、掛け算の重要性>

- 何をどのように攻めるかの議論はあるが、量子、AI、DX、先端バイオ、宇宙などは外せない技術分野。「先端バイオ×AI」、「先端バイオ×エンジニアリング」、「先端バイオ×化学」など、境界領域あるいは思いもしない組み合わせによるイノベーションを期待。

③ 出口を見据えた戦略的なマネジメント

<実用化技術と基礎研究の柔軟な行き来>

- 代替技術や競合技術等の技術動向や海外を含む研究動向等を常に注視して、研究開発開始後も軌道修正をしながら進めることが必要。
- 橋渡しの仕組みの検討が必要。また、橋渡しした後、サイエンスでどのようにサポートするかも重要。
- 既に実用化された技術であっても、製品の性能向上やコスト削減等のために技術を高度化するには基礎研究が必要。現在の課題を継続して続けること、基礎研究に立ち返りながら社会実装を進められる仕組みが重要。

<企業視点の取り込みとアカデミアからの働きかけ>

- 世界の市場を獲得するという観点を含め、企業の本音を聞き出す工夫が必要。
- 企業や産業のニーズを把握するだけでなく、三次産業、商社、金融等の意見も取り入れられるコミュニケーションハブ構築も重要。
- 研究シナリオの策定段階からアカデミアと企業が一緒に活動することを期待。先の展開が比較的読みにくいような冒険的な提案にどのような形で企業に参画してもらうか、その仕組みを考えることが重要。
- 博士課程学生が企業に行って研究する、企業の研究人材が大学に来て研究するなど、人材の流動性を確保し、大学と企業がよりオープン・ダイナミックに一緒になって研究開発や評価を行う仕組みが必要。
- 研究開発段階で企業が参画しやすい、また、成果となる技術を企業が引き取りやすい仕組みづくりも重要であり、バランスの良いオープン・クローズ戦略が必要。複数の企業が加わったときに知財をどう扱うか、最初から決めておくことも重要。
- 研究自体の幅を広げることはもちろん、新たな技術の研究開発において需要側がどう使いたいかを把握し、ある程度ニーズが見えてきたところをいかにリーズナブルな価格で出していくかという研究、需要側がどう取り込むかという研究も併せてできると、更に幅が出てくるのではないか。
- Climate Techはまだ制度が定まっていない段階であり、アカデミアの知見に基づき公益性・中立性を担保した評価を行いつつ、スタートアップ側やベンチャーキャピタル側が制度設計を一緒に進めていくことも必要。
- 直近で市場性が見えないロングスパンの研究開発に関しては、現在の市場起点とは異なる評価軸が必要。その際、LCAも含めて評価することも重要。研究者自身による技術・研究コストと社会との関係性分析・評価や、アカデミア側からのアピールによる市場側の意識醸成も大切。

<国際社会の中での競争と協調>

- 日本によい技術が多くある中で、それらが競争力を持つためには、製造技術にアカデミアがどう協力できるのかについても考慮することが必要。
- 日本が強みを持つ分野に関しては、国際的な市場を効果的に活用して技術開発・普及を加速するために、国際的なパートナーづくりや海外のコンペティターとの付き合い方の議論が必要。
- 日本が必ずしも強くない分野に関しては、先進国だけでなく新興国も含む海外と積極的に連携しつつ、日本のイニシアチブで進める方法も有効。

<研究マネジメントの深化>

- 社会課題のニーズの分析に基づく要素研究の切出しや、有望テーマをどう扱うかという研究マネジメントについての研究の加速に期待。
- ヨーロッパ等では、マネジメント手法を開発するようなプロジェクトを伴走させるケースもあり、研究開発マネジメントにおいて参考にすべき。
- プロジェクトを進める際に、社会科学的・経済的・経営的な観点で見られるメンバーが入ってアドバイス等を行う仕組みも有用。

④ 個別領域

- デジタル技術
 - ✓ 目的/需要があって効果が発揮される技術であり、様々な分野においてデジタル技術をどう使うかの工夫が重要。
- 縦軸（蓄電池、鉄鋼、化学、自動車、半導体）と横軸（資源循環）を掛け合わせた技術領域
 - ✓ EUのELV規制、電池規制、容器包装規制などの社会環境の変化により、単なるリサイクルではなくリソーシング（混合物である使用済み製品から単に分離して処理するだけでなく高機能な再生素材・製品を直接製造する新技術）や資源代替などの新たな技術が求められる。
- 領域横断や境界領域、組み合わせによるイノベーション
 - ✓ 量子、AI、DX、先端バイオ、宇宙などは重要な技術動向であり、「先端バイオ×AI」、「先端バイオ×エンジニアリング」、「先端バイオ×化学」など、境界領域あるいは思いもしない組み合わせによるイノベーションを期待。
 - ✓ 異種の領域が協力した技術開発（例：CCUSの分野にてバイオ技術を利用した有用物質生産）や、CO₂削減とともにアップサイクルを実現する技術も重要。
- 燃料電池・水素・アンモニア
 - ✓ カーボンニュートラルに向けて、基礎、分野横断技術の拡充が必要である。
 - ✓ 日本の産業、アカデミアが世界の中で強みを持つ技術領域であり、現在の強みを更に活かす必要がある。
- 蓄電池
 - ✓ 固体リチウム電池、燃料電池は、省エネルギー、蓄エネルギー、エネルギー循環の課題に対してアカデミアがその材料、デバイス評価を含めて貢献可能。
 - ✓ 日本の産業、アカデミアが世界の中で強みを持つ技術領域であり、現在の強みを更に活かす必要がある。
- 化学・素材技術
 - ✓ GX実現に向けた社会の基盤技術が蓄電池、燃料電池、水素、アンモニアであり、この技術を支えるのが化学・素材関連技術。日本の産業、アカデミアが世界の中で強みを持つ技術領域であり、現在の強みを更に活かす必要がある。
- 半導体
 - ✓ エネルギーを効率的に利用するためにデジタル技術の活用が必須。半導体産業が直接的あるいは間接的に貢献できる分野が多くあり、アカデミアでの研究開発の促進が期待される（例：人工知能とデジタル制御による最適化、クラウドサーバーの省電力化、化合物半導体によるパワーデバイス、半導体製造工場における省エネルギー・省資源技術。その他、要素技術、分析解析技術、シミュレーション等ではアカデミアの役割が大きい）。
- 再生可能エネルギー、次世代ネットワーク（系統・調整力）、脱炭素目的のデジタル投資、インフラ、自動車、次世代革新炉
 - ✓ 今後の大幅な拡大や強化が必要である。

※ここで挙げた個別領域は、本委員会における検討の足掛かりにするために、我が国のアカデミアが強みを発揮できる技術領域や戦略的に注力すべき技術領域等についてアンケートを行った結果であり、これをもって具体的な技術領域の特定・決定等を行うものではない。

※アカデミアにおいては、領域横断型での技術開発や、幅広い領域における人材育成も重要であり、注力すべき技術領域を絞りすぎないように留意することも重要。

これまでの審議状況

第1回：令和4年12月20日

- ・グリーン分野に関する政策動向について
- ・GXを取り巻くアカデミア・産業界の研究開発・技術・産業動向等について
- ・国際動向、技術評価等の視点からの話題提供
- ・GX関連重要領域の動向について話題提供
- ・総合討議

第3回：令和5年2月14日

- ・GX関連領域の研究動向等について話題提供
- ・GX関連領域における産業界からのアカデミアへのニーズについて話題提供
- ・GteXの基本方針、研究開発方針の骨子案等について
- ・総合討議

第2回：令和5年1月23日

- ・令和5年度予算案における文部科学省関連施策について
- ・GX関連領域の研究動向等について話題提供
- ・GteXの概要及び今後の進め方について
- ・GteXの基本方針、研究開発方針の検討事項について
- ・総合討議

第4回：令和5年3月13日

- ・GX関連領域について話題提供
- ・GteXの基本方針、研究開発方針等について
- ・総合討議

第5回：令和5年3月30日

- ・GteX基本方針（案）及び研究開発方針（案）について
- ・GteX研究開発計画（素案）等について
- ・総合討議

GteXの基本方針及び各領域（蓄電池、水素、バイオものづくり）の研究開発方針（令和5年4月 文部科学省決定）

第6回：令和5年9月21日

- ・文部科学省のGX関連施策の状況
- ・前回までの議論の振り返り及び今後の議論の進め方
- ・GXに関する俯瞰的課題提供
- ・総合討議

第8回：令和6年3月1日

- ・文部科学省のGX関連施策の状況
- ・前回の議論のまとめ
- ・GX関連領域における話題提供
- ・総合討議

第7回：令和5年12月19日

- ・GteX及びALCA-Nextの採択結果等
- ・GX関連領域における産業界等からの話題提供
- ・前回の議論のまとめと事前アンケートの結果紹介
- ・総合討議

GteXの推進の方向性、GX実現に向けて今後取り組むべき研究開発の方向性について検討