

核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会

中間とりまとめ

令和5年8月

文部科学省 核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会

1. 挑戦的な研究の支援の在り方について

(1) 検討会設置の背景

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略(令和5年4月14日 統合イノベーション戦略推進会議)に基づき、「ゲームチェンジャーとなりうる小型化・高度化等をはじめとする独創的な新興技術の支援策を強化」して、フュージョンテクノロジーとしての研究開発の幅を持たせるためには、現在、建設中の実験炉 ITER から原型炉そして実用炉と段階的にフォアキャストで研究開発を推進するアプローチとは異なる発想で研究の支援の在り方を検討することが必要である。その観点を踏まえて、フュージョンエネルギーが実現した未来社会を議論し、そこからのバックキャストで取り組むべき研究テーマを検討するため、本検討会を設置し、これまでに計3回開催した。

(参考)フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の抜粋

●ゲームチェンジャーとなりうる小型化・高度化等をはじめとする独創的な新興技術の支援策を強化すること

他国や民間企業においては、先進的な技術や多様な炉型等にも取り組んでおり、これら独創的な新興技術はゲームチェンジャーになりうる。フュージョンテクノロジーとして幅を持たせ、将来のリスクヘッジをはかるため、我が国においても未来の可能性を拓くイノベーションへの挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討を令和5年度から開始する。その際、産業化や共通基盤技術の醸成を見据えて、研究機関と民間企業の協働を推奨する。

(2) 挑戦的な研究例について

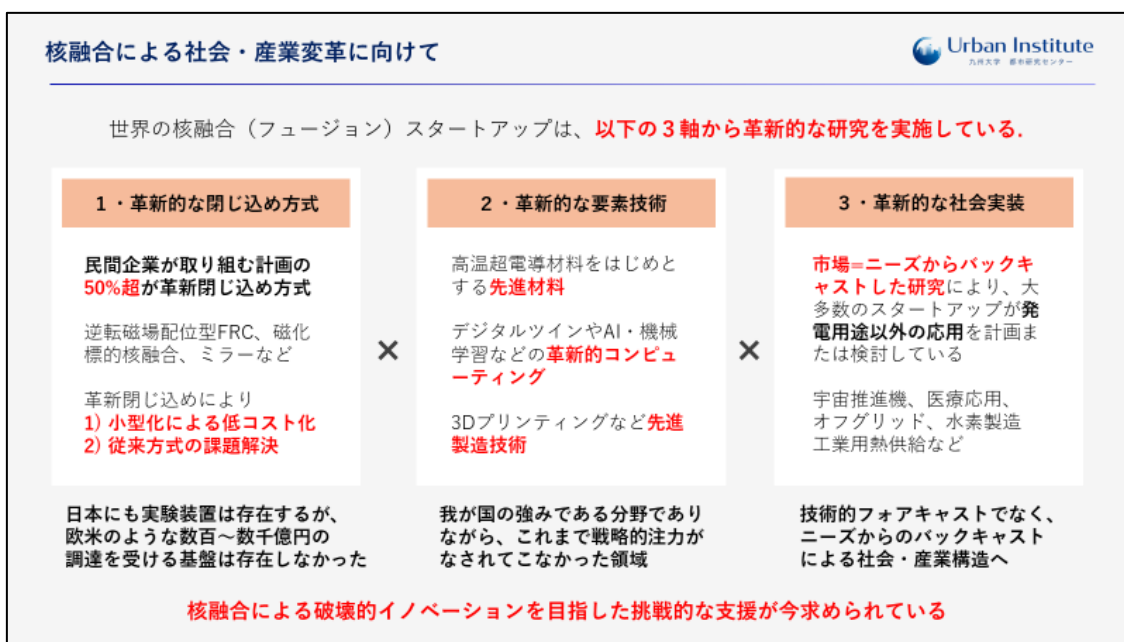
世界において民間企業の挑戦的な研究を牽引する核融合スタートアップは43社まで急増し、その累計投資額は約6ビリオンドルを超え、その3社に2社が2035年かそれ以前の初送電を見込んでおり¹、代表的な閉じ込め方式(トカマク、ヘリカル、レーザー)に加えて革新的な閉じ込め方式²、革新的な要素技術、革新的な社会実装の3軸に沿って取組を推進している。世界のスタートアップは、発電用途以外の、例えば、宇宙・海洋推進機、オフグリッド、水素製造、工業用熱供給等の市場ニーズからバックキャストした研究開発として、先進材料や革新的コンピューティング、先進製造技術、工業用部品の採用による、小型化及び高度化を追求している。また、発電の実現目標が近いこと等から、短い研究開発サイクルで失敗と成功を繰り返しながら、実用化を進めている。

¹ The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association

² 2023年6月21日時点の IAEA FusDIS

(<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>)に基づきカウントすると52%が革新的な閉じ込め方式に該当。

一方で、我が国においては、代表的な閉じ込め方式はもちろん、革新的な閉じ込め方式についても、複数の装置³が運用中であり、多様性を一定程度確保している。また、革新的要素技術は、我が国が技術的に可能でありながら欧米と比して注力の弱い領域である。



第1回 有識者提出資料より抜粋

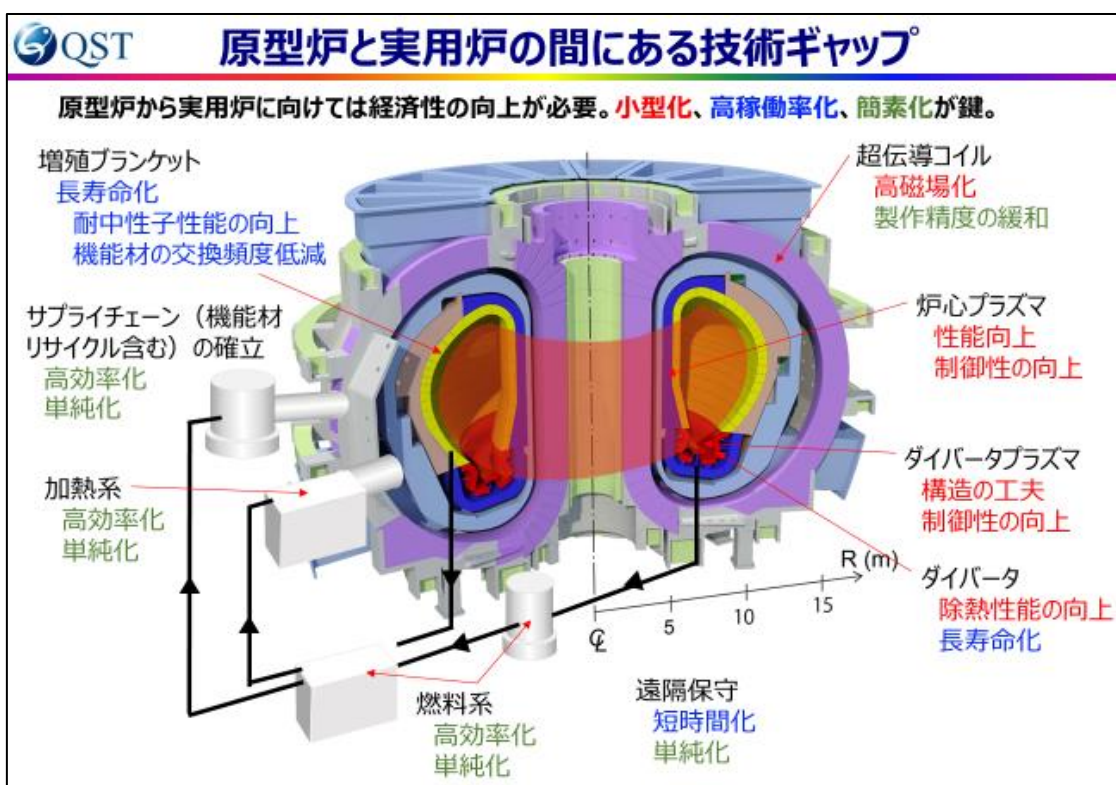
こうした、スタートアップの動きに加えて、米国や中国はフュージョンエネルギーの実現に向けて取り組みを進めている。例えば、米国エネルギー省は、ARPA-E プログラムの中で大幅にコストを削減する等の革新的な技術開発をこれまでに支援しており、令和5年6月には、2030年代の運転を目指すパイロットプラントの建設に向けた初期費用として、8社のスタートアップに合計46ミリオンドルの支援を発表した。また、中国は、政府主導により2030年代までにイーターと同規模の工学試験炉を建設した後、改造し、2050年代まで発電炉(原型炉)として運転予定である⁴。更に、高温超伝導磁石等を用いた小型トカマク型による実用化を目指すスタートアップが多額の資金調達を実施している。

³ 2023年6月21日時点のIAEA FusDIS (<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>) に基づきカウントすると、6つの装置が運用中。

⁴ [FPA22 Strategy Activities ASIPP Yuntao.pdf](https://www.firefusionpower.org/FPA22_Strategy_Activities_ASIPP_Yuntao.pdf) (firefusionpower.org)

一方で、ITER や 2050 年頃の運転を目指す原型炉の閉じ込め方式であるトカマク型でさえ、実用炉に向けて小型化、高稼働率化、簡素化を鍵とした経済性の向上に取り組むことが必要である。具体的な開発要素としては、例えば、超伝導コイルの高磁場化や炉心プラズマの性能・制御性の向上等による小型化、増殖ブランケットの長寿命化や遠隔保守の短時間化等による高稼働率化、加熱系や燃料系等の単純化による簡素化が挙げられる。

また、これらの研究テーマへの取組方法としては、潜在的なアイデアも取り込むべく、幅広くアカデミアや産業界から研究開発課題を募集し、専門家によるレビューを経て、全体を統括する PD(プログラムディレクター)の下で研究開発を実施することが有効である。



第1回 有識者提出資料より抜粋

(3) 支援の在り方について

- ✓ フュージョンエネルギーは未来社会、人類の発展に貢献する可能性を有することから、明確なビジョンを基に研究開発に取り組むべきであること。
- ✓ 核融合分野は非常に幅広い科学技術分野を巻き込みながらイノベーションを生み出す可能性があることから、学際的に取り組むべきであること。
- ✓ 社会実装からのバックキャストで研究開発に取り組むスタートアップは、早く取り組んで、早く失敗するアプローチで挑戦的な研究に取り組んでいることから、失敗を恐れず研究できる環境を設けるべきであること。
- ✓ 潜在的なアイデアも取り込むべく、幅広くアカデミアや産業界から研究開発課題を募集し、専門家によるレビューを経て、全体を統括する PD の下で研究開発を実施することが有効であること。
- ✓ 独創的な新興技術の支援によりフュージョンテクノロジーとしての研究開発の幅を持たせるためには、従来とは異なる発想・潜在的なアイデアが求められることから、核融合の高い専門性を既に有する研究者に加えて、若手の研究者等も挑戦できる環境を作るべきであること。

等の意見を踏まえ、総論として、核融合の挑戦的な研究の支援については、ムーンショット型研究開発制度を念頭に検討することで合意した。以下は、ムーンショット型研究開発制度(以下、「MS」という。)において、フュージョンエネルギーに関する新目標案を設定することを前提に、これまで議論した内容をまとめたものであり、今後の議論によって変わりうる。

2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案

(1) 目標案

①MS 目標案の名称

2060 年までに、豊かで安定的なフュージョンエネルギーを生み出す地上の太陽を作り出し、エネルギー資源の制約と温室効果ガスから解放されたダイナミックな社会を実現

②実現したい 2060 年の社会像

人類の挑戦に必要なエネルギーを十分に供給できる安全安心なエネルギーシステムを実現し、発展し続ける社会

(2) ターゲット

①2060 年の達成シーン

- (エネルギー問題の解決への貢献) ネットゼロ社会を実現する切り札として安定的で豊富なフュージョンエネルギーによる、我が国のエネルギーの自給自足を実現(例えば、核融合熱により水素や合成燃料の製造を可能にする。)
- (環境問題の解決への貢献) フュージョンエネルギーによる、幅広い産業や、都市部や遠く離れた村落部も含めた一般家庭の炭素排出量の抜本的改善を達成
- (環境問題の解決への貢献) フュージョンエネルギーにより、産業革命以降、大気中に蓄積し気候変動に寄与している二酸化炭素を資源として利用することで、産業革命以来のサイクル逆転を駆動(Beyond Tipping Points)
- (人類の挑戦への貢献) フュージョンエネルギーにより、宇宙探査・海洋探査等の未知な領域への挑戦を実現
- ターゲットを達成するドライバーとして、世界を牽引するスタートアップを少なくとも1社を創出

②2035 年に実現すること

- フュージョンエネルギーとして、電気エネルギーに限らない、多様なエネルギー源としての活用を実現
- 核融合反応で生成される粒子の利用や要素技術等の多角的利用として、フュージョンエネルギーの応用を加速
- スタートアップの創出や意欲ある研究者の挑戦を促す研究支援体制や支援制度の整備によるドライバーとなりうる者の育成

(3) 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

- (マイナスからゼロへ) エネルギーが“地”政学から“知”政学へ変わるとともにエネルギー限界費用“ゼロ”及び炭素負債(カーボンデット)の返済により、エネルギー資源の制約から解き放たれ、温室効果ガスに起因する気候変動が解決することで、紛争や飢餓の根源的理由の一つが消失
- (ゼロからプラスへ) 宇宙空間やサイバー空間等、未知の空間への展開による新たな価値観の創造。環境技術や医療技術等の人類の福祉に資するイノベーションによる社会の活気・活力の増加。

(4) 社会像実現に向けたシナリオ

① 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

分野・領域

- 革新的な要素技術を核融合プラントとしてシステムインテグレーション
- 「高効率化」「高機能化」「低コスト化」「高知能化」等のアプローチによりフュージョンエネルギーの利用可能性の向上
- 実用炉と原型炉の技術ギャップを小さくし、開発期間のギャップを短くするために必要な研究開発
- 他分野への波及効果が高いコア技術とすることで、産業界にイノベーションや開発の意欲を喚起

研究課題

- 果敢な挑戦でありつつも、明確な「結論」が導かれる客観性、国際的な学問水準の高さ、方法論の妥当性、他国の研究も踏まえた新規性・革新性を基に課題を選定し、ポートフォリオを作成

② 2035年、2060年のそれぞれにおける、達成すべき目標(マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

2060年

(マイルストーン)

- 革新的フュージョンエネルギーシステムの実現
- 革新的な熱利用技術の実現

(マイルストーン達成に向けた研究開発)

- 革新的フュージョンエネルギーシステムに実装する要素技術
- 核融合炉の量産化を可能とする資源確保、低コスト化

(波及効果の例)

- プラント技術の核融合以外の熱源への応用

2035年

(マイルストーン)

- フュージョンエネルギーの早期実現に向けた革新的なフュージョンエネルギーシステムの実証
- フュージョンエネルギーの多様な社会実装に向けた革新用途の実証(可搬型装置や宇宙推進装置などの新展開が見通せる技術の原理実証等)
- 挑戦を可能とする基盤的革新技術の多角的な応用と同時に産業基盤の構築

(マイルストーン達成に向けて想定される研究開発)

次ページの表を参照のこと。

(波及効果の例)

- 核融合反応で生成される粒子等を利用した医療技術や環境技術
- 高温超伝導技術の航空機推進用超伝導モーター・発電機等への応用
- 高除熱機器(ダイバータ)の材料や構造の宇宙分野(ロケット)への応用
- 製作技術の航空機製作等への応用

(マイルストーン達成に向けて想定される研究開発)

目的	アプローチ	手段	キーワード(要素)	キーワード(技術)
経済性の向上	コンパクト化(小型化)	革新的核融合システムの構築 (システムインテグレーション)	革新的核融合方式 慣性閉じ込め方式 革新的磁場閉じ込め方式 磁場構造の改良 ダイバータの高性能化	ミュオン触媒、ビーム駆動等 レーザー、ビーム ヘリカル、FRC、ダイポール等 球状トカマク、断面形状 磁場構造、液体金属壁
高効率化	炉心高性能化	炉周辺機器の飛躍的な改良	高ベータ化 燃料混合、取放出 超伝導マグネット、コイル ブランケット プラズマ加熱装置の高効率化 超高速燃料供給システム メインテナンス技術 高繰り返しパワーレーザー	ダイポール、FRC等 乱流輸送、乱流混合 高温超伝導、水素冷却、モジュール化 液体金属、溶融塩 高周波、中性粒子ビーム、固体マイクロ波光源 ペレット、プラズモイド 遠隔交換・保守ロボット
資源確保	長寿命化 リサイクル技術	リサイクル技術	先進材料 サイト内循環	耐高流束材料 リチウム回収、リチウム濃縮手法
低コスト化	低炭素化 汎用技術化、民生品化	汎用技術化、民生品化	電磁波・プラズマ技術 計測・制御技術 低温、超伝導技術 高度な加工技術 多様な熱利用	ペリウム精錬・低コスト化 汎用計測器、ターゲットサイズ 量子コンピュータ、超伝導古典コンピュータ 3Dプリンティング、積層加工、レーザー加工 水素製造、炭素固定、合成燃料 中性子環境の高温プロセス
高度化 (高性能化)	高機能化	コンビナート構築	ダイバータの高温熱利用 SMES(超伝導エネルギー貯蔵装置)	
高知能化	変動負荷対応 計測の高度化 情報統合型コンピューティングの活用	変動負荷対応 計測の高度化 情報統合型コンピューティングの活用	リアルタイムでのプラズマ計測・制御技術 デジタルツイン、ビッグデータ、 AI・機械学習の活用	
省資源化	先進材料の開発 先進低温技術の活用	先進材料の開発 先進低温技術の活用	自己修復性材料 水素冷却	
低放射化	先進燃料の利用	先進燃料の利用	p- ¹¹ B、D- ³ He	超高ベータ、ビーム駆動等
宇宙開発、海洋開発	先進材料の活用 宇宙・海洋推進器、基地電源の開発 可搬エネルギー源の開発	先進材料の活用 宇宙・海洋推進器、基地電源の開発 可搬エネルギー源の開発	バナジウム合金、複合材料 先進燃料核融合 先進燃料核融合	コンパクト電源
環境技術、医療技術	粒子線源の活用	粒子線源の活用	核変換、計測技術	アルファ線、高エネルギー中性子線

(5) 目標達成に向けた国際連携のありかた

- 国内機関だけでは核融合のすべての技術開発をカバーできないことや、MSで取り組む研究開発であれば国際連携の中で技術的優位性及び国際的地位を確保すべき
- 国際連携のためには「求心力(日本の強み)」「吸収力(応用力)」「持続力(人材育成等)」が必要
- 特に、民間企業が関わる際は、企業独自の商取引としての国際連携・協力(知財の管理を含む)の検討も必要

(6) 目標達成に向けた分野・セクターを超えた連携のあり方

- 国が主体となる活動との分担・協力等、産学官による集中的な取組
- 国際連携と同様に、「求心力」「吸収力」「持続力」が必要

(7) ELSI(目標達成に向け取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

- 環境アセスメント
- 電源の所有者に競争原理が働く、マーケットルールの確立
- フュージョンエネルギーの認知度の向上
- フュージョンエネルギーについて社会的受容性の醸成
- 規制、規格基準策定の在り方の検討

以上