

核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会

最終とりまとめ

（素案）

目次

1. 挑戦的な研究の支援の在り方について	2
(1) 検討会設置の背景	2
(2) 挑戦的な研究例について	2
(3) 支援の在り方について	5
2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案	6
(1) 目標案	6
①名称	6
②実現したい 2060 年の社会像	6
(2) ターゲット	6
①2060 年の達成シーン	6
②2035 年に実現すること	6
(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	7
(4) 社会像実現に向けたシナリオ	7
①挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題	7
②2035 年、2060 年における、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	8
(5) 目標達成に向けた国際連携の在り方	10
(6) 目標達成に向けた分野・セクターを超えた連携の在り方	10
(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）	10

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ーキャスト的なアプローチに加え、従来の延長線上の取組とは異なる発想で、挑戦的な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的なアプローチ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

世界では、民間企業の挑戦的な研究を牽引するスタートアップは43社まで急増し、その累計投資額は約60億ドルを超え、その3社に2社が2035年かそれ以前の初送電を見込んでいる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、宇宙・海洋推進機、オフグリッド、水素製造、工業用熱供給等の発電用途以外の市場ニーズからバックキャスト的なアプローチで、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、短いサイクルで失敗と成功を繰り返しながら、実用化に向けた研究開発を進めている。

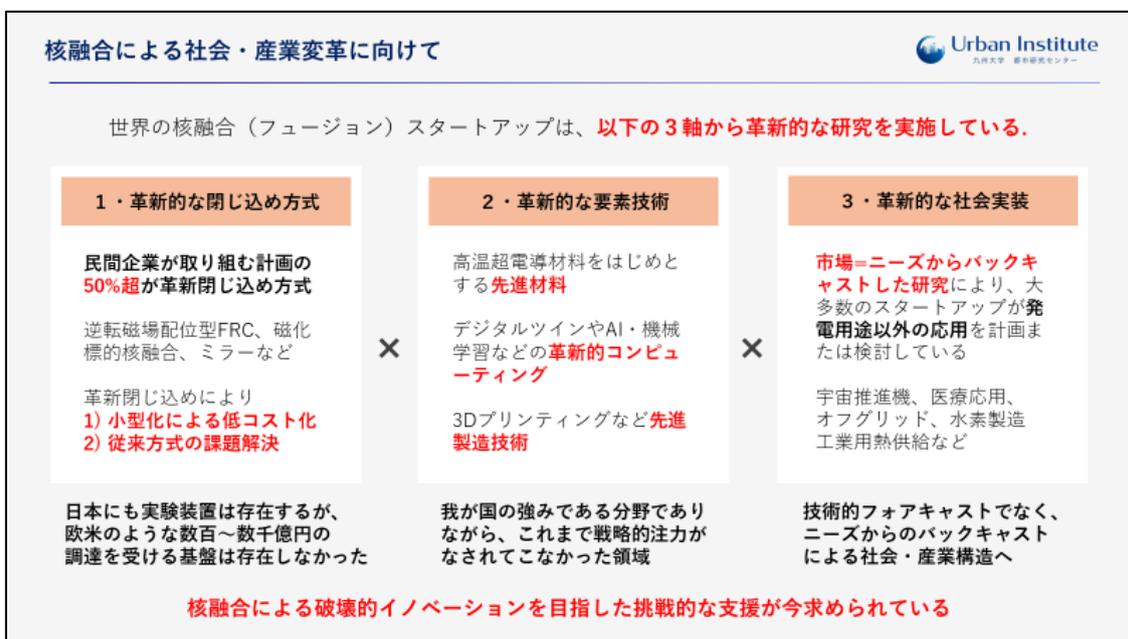
一方で、我が国においては、代表的な閉じ込め方式はもちろん、革新的な閉じ込め

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。

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、革新的な要素技術は、我が国の強みである分野でありながら、これまで戦略的注力がされてこなかった領域である。



第1回 有識者提出資料より抜粋

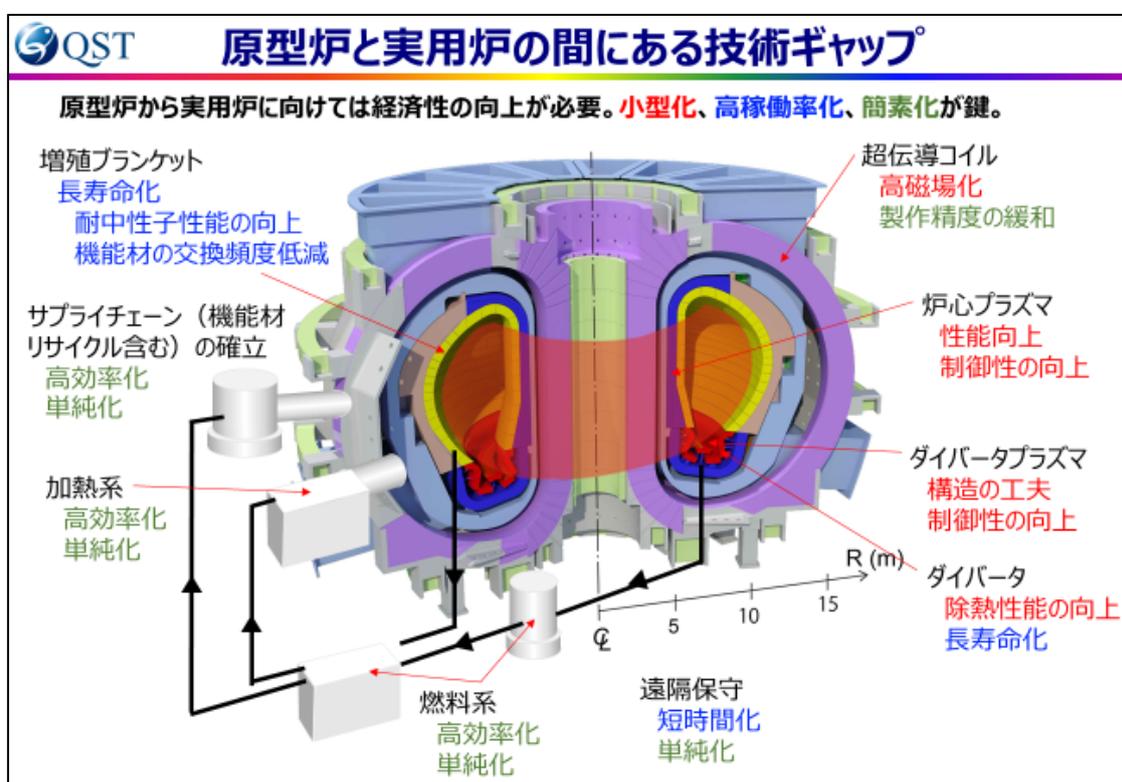
こうしたスタートアップの動きに加えて、米国や中国はフュージョンエネルギーの実現に向けて取組を進めている。例えば、米国エネルギー省は、ARPA-E プログラムの中で大幅なコスト削減等の研究開発を支援しており、令和5年6月には、2030年代の運転を目指すパイロットプラントの建設に向けた初期費用として、8社のスタートアップに合計4,600万ドルの支援を発表した。また、中国は、2030年代までにITERと同規模の工学試験炉を政府主導で建設した後、2050年代までに発電炉（原型炉）として改造し、運転を開始する予定である⁴。さらに、高温超伝導磁石等を用いた小型トカマク型による実用化を目指すスタートアップが、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 \(firefusionpower.org\)](https://www.firefusionpower.org/FPA22_Strategy_Activities_ASIPP_Yuntao.pdf)

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においても、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須である。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、非常に幅広い分野・領域・人材を巻き込みながら、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。
- ✓ 目指すべき社会像からのバックキャスト的アプローチで社会実装や研究開発に取り組むスタートアップは、短いサイクルで失敗と成功を繰り返しながら、挑戦的な研究に取り組んでいることから、失敗も許容しながら革新的な研究成果の発掘・育成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 の下で研究開発を推進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幅を持たせるためには、従来の延長戦上の取組のみならず、既存の枠組みにとらわれない発想や潜在的なアイデアが求められることから、核融合分野の高い専門性を既に有する研究者に加えて、核融合分野以外の専門分野の研究者や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、フュージョンエネルギーの実用化に向けた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

①名称

2060年⁵までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、エネルギー資源の制約から解放された活力ある社会を実現

②実現したい2060年の社会像

フュージョンエネルギーの多面的な活用により、人類の挑戦に必要となるエネルギーが供給される活力ある社会(無尽蔵なエネルギー源により、人類の活動領域を拡張)

(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を実用化し、我が国のエネルギー安全保障に貢献
- <環境問題の解決への貢献> フュージョンエネルギーの多様な方法での活用(例えば、核融合反応熱による水素製造)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に貢献
- <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、大気中の二酸化炭素から、資源として合成燃料を製造することで、産業革命以来の悪循環を好転
- <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
- <技術による課題解決への貢献> 我が国から輩出されたスタートアップが、世界の課題解決や技術開発を牽引

②2035年に実現すること

- フュージョンエネルギーを、電気エネルギーとしての発電に限らない、多様なエネルギー源としての活用可能性を明確化

⁵ カーボンニュートラルへの貢献や他国等の野心的な目標時期を背景として2050年等に設定する議論があったものの、ムーンショット目標設定の考え方・基準におけるCredible: 野心的であるが、科学的に実現可能性を語り得るもの、を理由に2060年に設定。

- 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って、幅広い分野との頭脳循環を生み、牽引役となりうる人材の育成

(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放され、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>豊かで安定的なフュージョンエネルギーにより、宇宙・海洋領域やサイバー領域等、未知な領域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

- 既存の枠組みにとらわれない発想や革新的な要素技術をシステムとして統合
- 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
- 原型炉から実用炉への技術的な乖離を最小化し、開発期間の短縮に必要な研究開発
- 他分野への波及効果が高い共通基盤技術の開発

研究課題

- 研究全体を俯瞰したポートフォリオを構築し、我が国の基礎研究力や研究基盤を基に研究開発を積極的に推進し、失敗も許容しながら挑戦的な研究開発を推進
- 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、他国の研究動向も踏まえた新規性・革新性を基に研究課題を選定

②2035年、2060年における、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>

- 革新的なフュージョンエネルギーのシステム（革新的なアイデアや要素技術の統合による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（例えば、宇宙・海洋推進器、オフグリッド、水素製造等）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の開発
- 核融合炉の量産化を可能とする資源確保や低コスト化に資する研究開発

<波及効果の例>

- プラント技術の核融合炉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原理実証
- フュージョンエネルギーの多様な社会実装に向けた用途の実証（可搬型装置や宇宙・海洋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>

目標案の達成に向けて、ポートフォリオを戦略的に構築し、次ページに掲げられている研究開発等を挑戦的かつ体系的に推進

<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・海洋分野への応用
- 製造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 高ベータ化、低循環電力化 燃料混合、灰放出 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	ミュオン触媒、ビーム駆動等 レーザ、ビーム 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 FRC、ダイポール、ヘリカル等 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、高性能マイクロ波光源 ペレット、プラズモイド 遠隔交換・保守ロボット
高効率化	炉心高性能化 炉周辺機器の飛躍的な改良			
資源確保	長寿命化 リサイクル技術 低放射化		先進材料 サイト内循環 電磁波・プラズマ技術	耐高流束材料 リチウム回収、リチウム濃縮手法 ベリリウム精錬・低コスト化
低コスト化	汎用技術化、民生品化		計測・制御技術 低温・超伝導技術 高度な加工技術	汎用計測器、データサイエンス 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
高機能化 (高性能化)	コンビナート構築 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		多様な熱利用 ダイバータの高温熱利用 SMES(超伝導エネルギー貯蔵装置) 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		自己修復性材料 水素冷却	
低放射化	先進燃料の利用 先進材料の活用		p ¹¹ B、D ³ He バナジウム合金、複合材料	超高ベータ、ビーム駆動等
多様化	宇宙開発、海洋開発 環境技術、医療技術	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 粒子線源の活用	先進燃料核融合 先進燃料核融合 核変換、計測技術	コンパクト電源 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在り方

- 国内の機関だけで、核融合分野の全ての技術開発を実施することは困難であることから、ムーンショット型研究開発制度の枠組みの中で、技術的優位性を維持しつつ、国際連携に積極的に取り組むべき
- 国際連携のために、「日本の強みを引き出すこと等」「国際連携の成果を応用すること等」「人材育成の仕組みやオープンサイエンスの戦略等」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在り方

- ITER 計画や BA 活動等の国が主体的に推進している研究開発とムーンショット型研究開発制度において実施する研究開発が重複しないように整理
- 加えて、社会実装を推進する観点から、国が主体的に推進しているプロジェクトとの情報共有等の協力を活性化
- 研究開発成果の社会実装を進めるため、大学や研究機関とスタートアップを含めた民間企業等が連携した研究開発体制の構築
- 連携のために、「Win-Win の関係を構築すること等」「連携の成果を応用すること等」「人材育成の仕組みやオープンサイエンスの戦略等」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）

- フュージョンエネルギーの認知度の向上、社会的受容性の醸成のため、ムーンショット型研究開発制度においてシンポジウムの開催等のアウトリーチ活動を行う
- フュージョンエネルギーの社会実装を見据えて、規制や規格基準等の社会科学に関する研究も併せて取り組む

以上