

核融合の挑戦的な研究の支援の 在り方に関する検討会 ～最終とりまとめ案(概要)～

研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)付

目次

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
- (2) 挑戦的な研究例について
- (3) 支援の在り方について

2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案

- (1) ムーンショット目標案
- (2) ターゲット
- (3) ムーンショットが目指す社会
- (4) 目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

3. 研究開発の方向性

- (1) 挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域
- (2) 目標達成に当たっての研究課題
- (3) 目標達成に向けた研究開発の方向性
 - ①達成すべき目標（マイルストーン）
 - ②国際連携の在り方
 - ③分野・セクターを超えた連携の在り方
 - ④ELSI（倫理的・法的・社会的課題及びその解決策）

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に基づき、実験炉ITERから原型炉そして実用炉と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。
- ✓ 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。

(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急増。2035年かそれ以前の初送電を見込む。
- ✓ 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、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。
- ✓ 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。

(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。

1. 挑戦的な研究の支援の在り方について

(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。



ムーンショット型研究開発制度を念頭に検討

2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案

(1) ムーンショット目標案

<中間とりまとめ>

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

<修正案>

2050/2060年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和した活力ある社会を実現

(2) ターゲット

- 2050/2060年までに、社会の様々な場面でフュージョンエネルギーが実装されたシステムを実現する。
- 2035年までに、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証する。
- 2035年までに、エネルギー源としての活用に加えて、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を促進し、フュージョンエネルギーの応用を加速する。

(参考) ムーンショット目標の一覧

- ① 2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現
- ② 2050年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現
- ③ 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現
- ④ 2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現
- ⑤ 2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出
- ⑥ 2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現
- ⑦ 2040年までに、主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステイナブルな医療・介護システムを実現
- ⑧ 2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現
- ⑨ 2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現

2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案

(3) ムーンショットが目指す社会

<資源制約の克服への貢献>

- 海水中に豊富にある資源から地上の太陽※を生み出し、エネルギー資源の偏在性から生じる紛争や飢餓が消失する。

※太陽内部で核融合反応により発生している膨大なエネルギー(フュージョンエネルギー)。同様の反応を、地上で人為的に起こすことを目標に、「地上に太陽を作る技術」としてフュージョンエネルギーが研究されてきた。

<エネルギー問題の解決への貢献>

- 安定的で豊富なフュージョンエネルギーを活用し、我が国のエネルギー安全保障に貢献する。

<人類の挑戦への貢献>

- 小型動力源として活用し、宇宙探査・海洋探査等の未知な領域への挑戦を可能とする。

<脱炭素社会の実現への貢献>

- 安全・安心のフュージョンエネルギーシステムを実現し、幅広い産業や一般家庭の炭素排出量を抜本的に改善する。

<環境問題の解決への貢献>

- 大気中の二酸化炭素から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させる。

<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する。

2. フュージョンエネルギーに関する新しい目標案

(4) 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。

3. 研究開発の方向性

(1) 挑戦的研究開発を推進すべき分野・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

(2) 目標達成に当たっての研究課題

- 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

3. 研究開発の方向性

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

①達成すべき目標（マイルストーン）

2050/2060年＜マイルストーン＞

- ✓ 小型動力源等の革新的な社会実装を可能とする革新的なフュージョンエネルギーシステム（革新的なアイデアに基づく閉じ込め方式や要素技術を統合したシステム）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＞

- ✓ 目標の達成に向けて、ポートフォリオを戦略的に構築し、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

3. 研究開発の方向性

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性 (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	ミュオン触媒, ビーム駆動等 レーザー, ビーム FRC, ダイポール等
		トカマクの飛躍的な改良	磁場構造の改良 ダイバータの高性能化	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	高ベータ化、低循環電力化 燃料混合, 灰放出	FRC, ダイポール, ヘリカル等 乱流輸送, 乱流混合
		炉周辺機器の飛躍的な改良	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 メンテナンス技術 高繰り返しパワーレーザー	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
資源確保	長寿命化 リサイクル技術 低炭素化	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	
高度化 (高性能化)	高機能化	コンビナート構築	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)	水素製造, 炭素固定, 合成燃料 中性子環境の高温プロセス
		変動負荷対応	リアルタイムでのプラズマ計測・制御技術	
	高知能化	計測の高度化 情報統合型コンピューティングの活用	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	$p\text{-}^{11}\text{B}$ 、 $\text{D}\text{-}^3\text{He}$ 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	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	核変換, 計測技術	アルファ線, 高エネルギー中性子線

3. 研究開発の方向性

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

②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、国際連携の成果を応用すること、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

③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、連携の成果を応用すること、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

④ELSI（倫理的・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