

【ムーンショット目標10】

「2050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、資源制約から解放された活力ある社会を実現」

研究開発構想

令和6年2月

文部科学省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、以下のムーンショット目標（令和5年12月26日総合科学技術・イノベーション会議決定）の達成に向けて研究開発に取り組む。

<ムーンショット目標>

「2050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、資源制約から解放された活力ある社会を実現」

<ターゲット>

- 2050年までに、様々な場面でフュージョンエネルギーが実装された社会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により、フュージョンエネルギーの応用を実証する。



図1 ムーンショット目標（フュージョンエネルギー）

2. 研究開発の方向性

「核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会」の最終とりまとめ（令和5年10月）や「ムーンショット目標10 フュージョンエネルギー国際ワークショップ」（令和6年1月31日開催）での議論等を踏まえ、現時点での研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

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、フュージョンエネルギーが実現した未来社会からのバックキャスト的なアプローチによる挑戦的な研究開発を推進することが重要である。

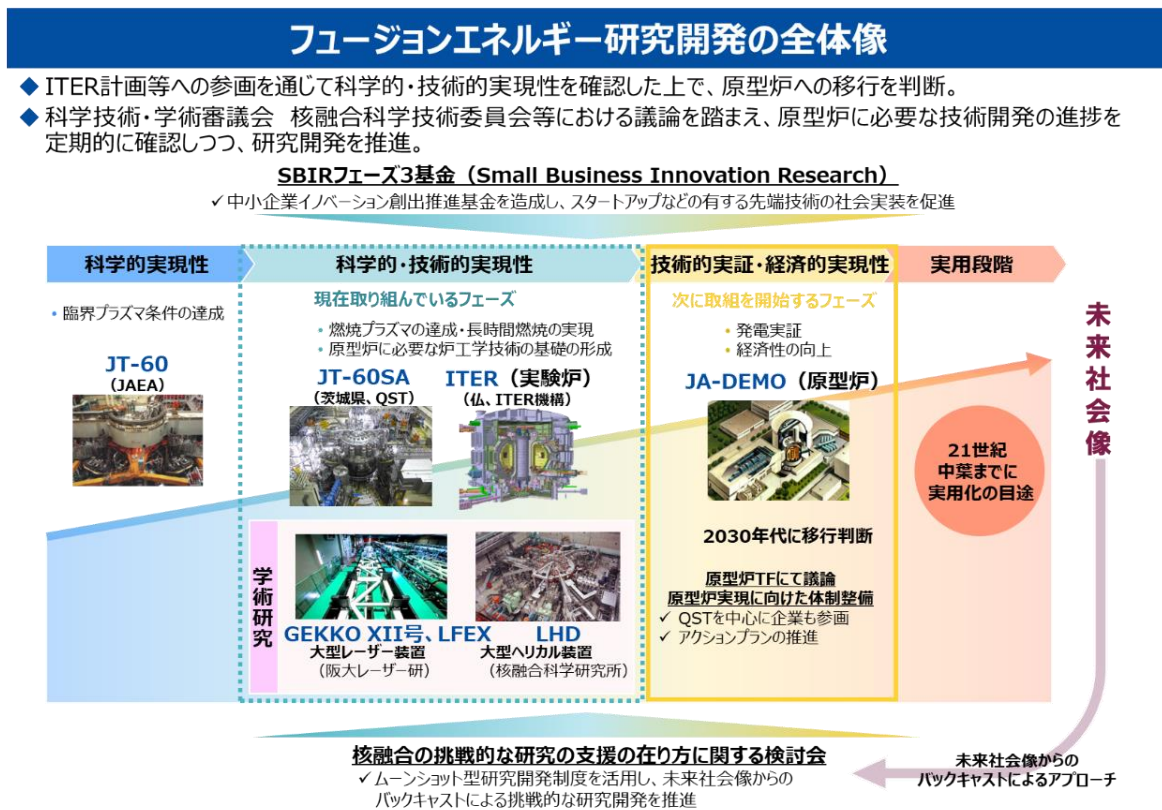


図2. フュージョンエネルギー研究開発の全体像

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、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・海洋推進器、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。

¹ The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association

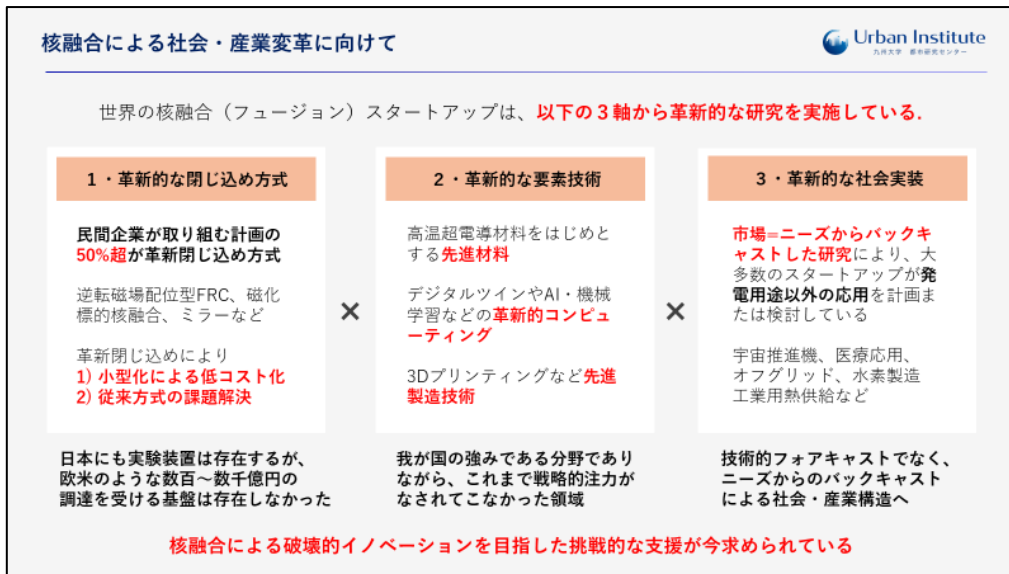


図3. 革新的な閉じ込め方式、革新的な要素技術、革新的な社会実装の3軸

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。

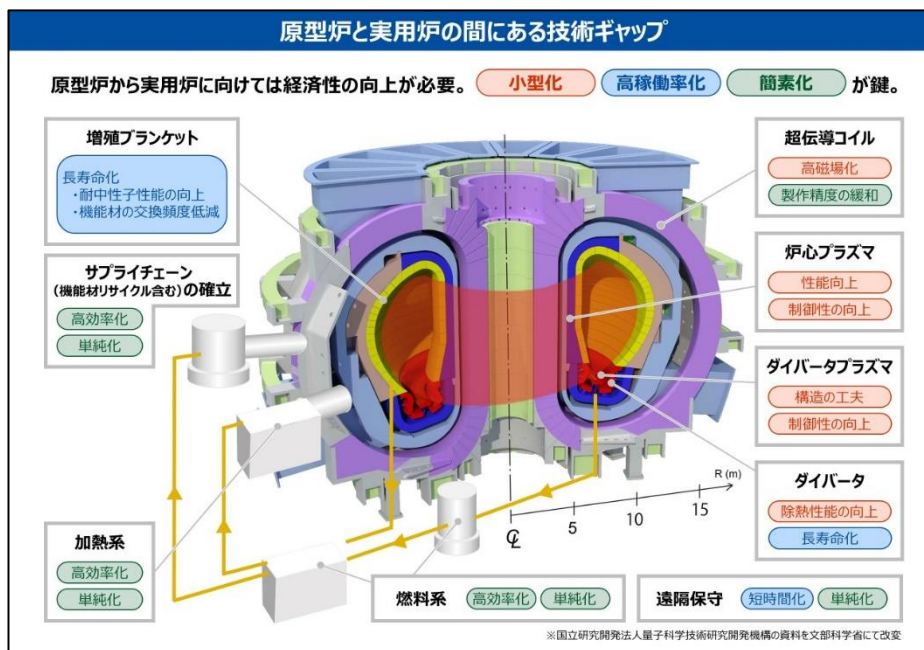


図4. 原型炉と実用炉の間にある技術ギャップ

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。

これらを推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域とし、革新的な社会実装を実現するため、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する。

(2) 目標達成に当たっての研究課題

フュージョンエネルギーの実現に向けて、ITER 計画等の研究開発の全体像を俯瞰しつつ、本目標達成に向けたポートフォリオをプログラムディレクター (PD) が構築する。その際、我が国の基礎研究力やこれまでに整備した研究基盤を基に、失敗も許容しながら挑戦的な研究開発を積極的に推進する。

研究開発体制のイメージは、レイヤー①の革新的な社会実装に応じて、プロジェクトマネージャー (PM) を公募し、明確なビジョンとシナリオの下、国内外の多様な研究者の英知を結集した研究開発体制を構築することとする。

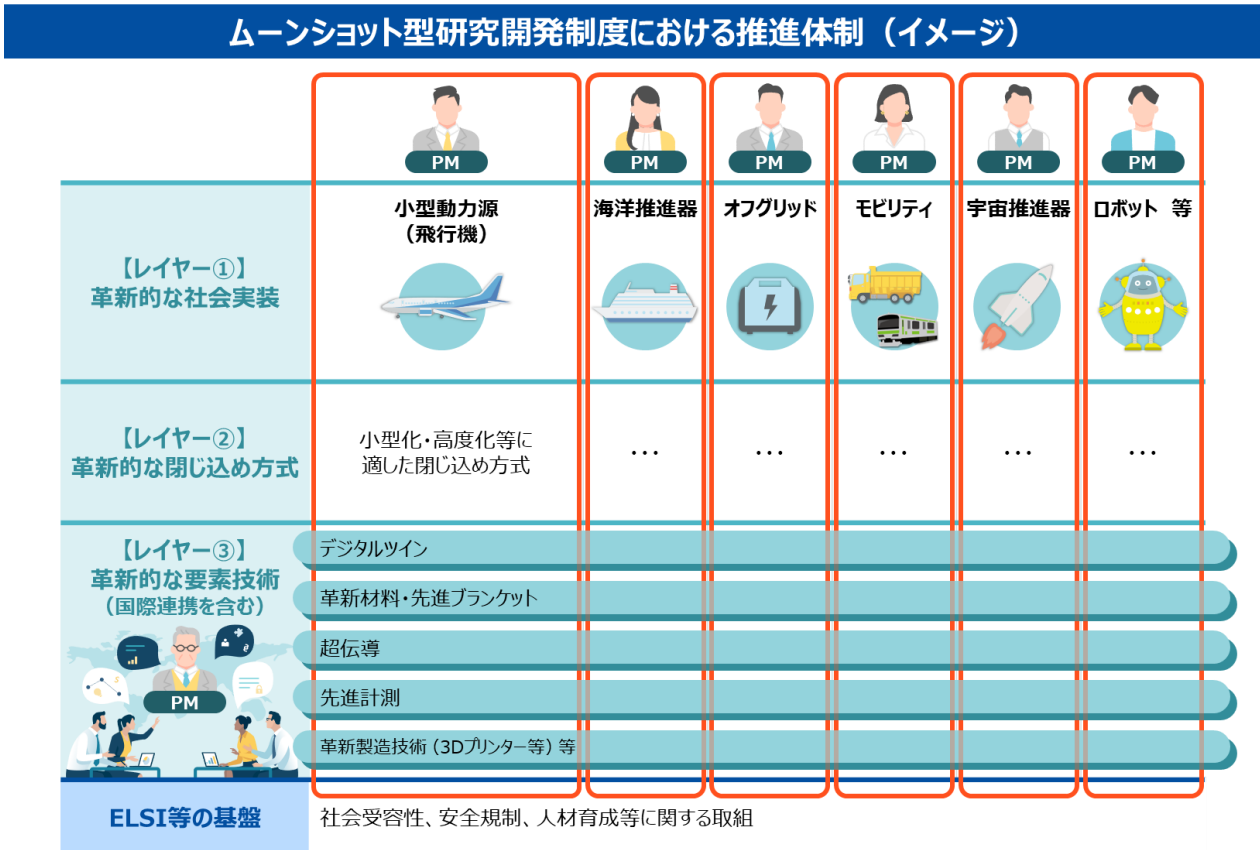


図 5. 研究開発体制のイメージ

また、レイヤー③の革新的な要素技術のうち、社会実装に必要となる共通的な要素技術については、別途 PM を公募し、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一体的に推進することで、フュージョンエネルギーの利用可能性の向上を目指す。

研究開発プロジェクトを選定する際には、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・革新性を基にする。なお、国内の機関だけで、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、国際連携による積極的な取組を推奨する。また、ELSI (倫理・法的・社会的課題及びその解決策) 等の基盤を整備するため、社会受容性に関する取組、安全規制等の社会科学に関する研究、人材育成に関する取組も推奨する。

(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た研究開発>

- 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

②達成すべき目標（スケジュール）

目標達成に向けたスケジュールは、PM は革新的な社会実装のビジョンやシナリオについて前半5年間で概念実証を目指して、革新的な要素技術等の研究開発を進める。ステージゲート評価の結果、5年を超えて継続することが決定した場合は、最大10年間の支援を実施し、原理実証を目指す。なお、研究開発成果の社会実装を進めるため、後半5年間は民間資金も導入することとし、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が期待される。

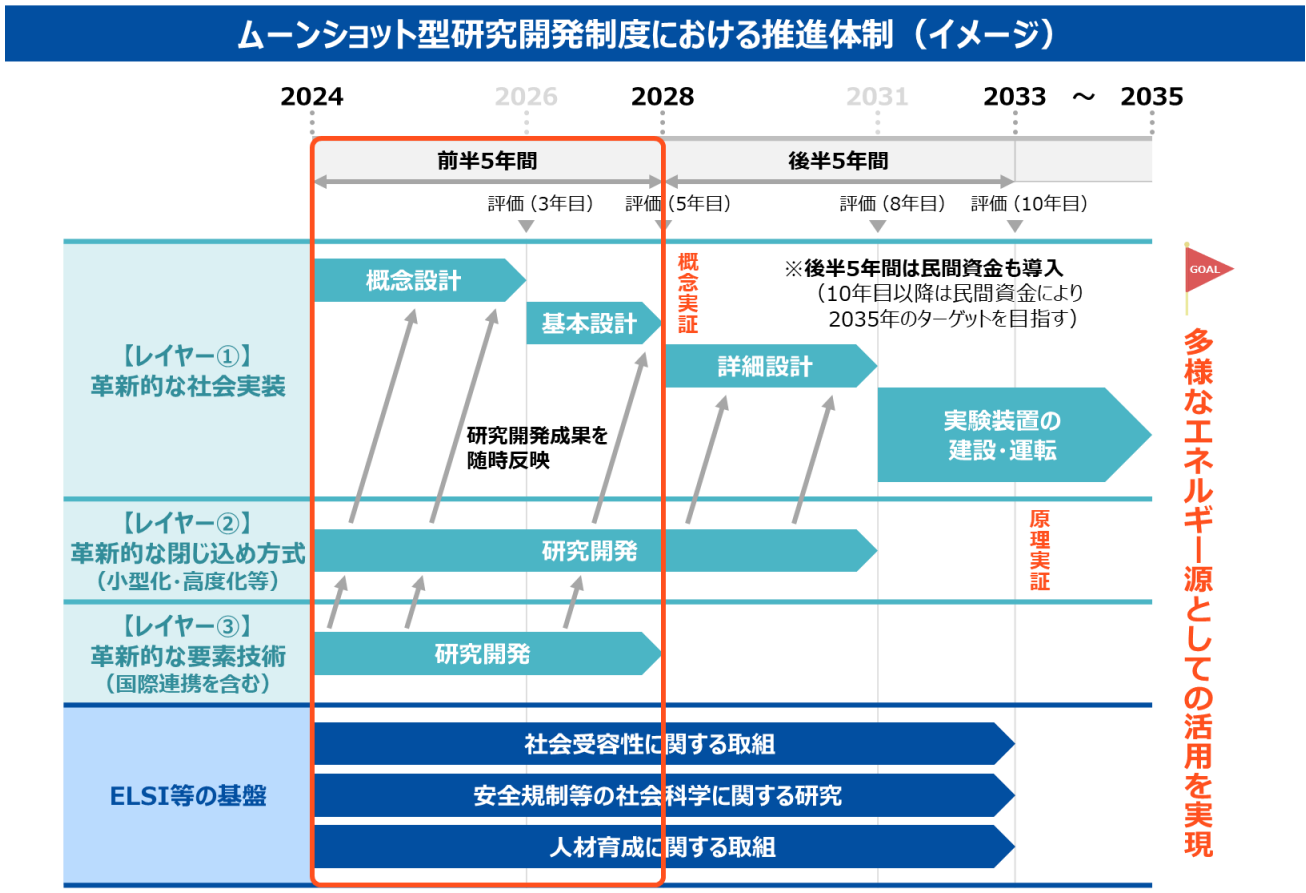
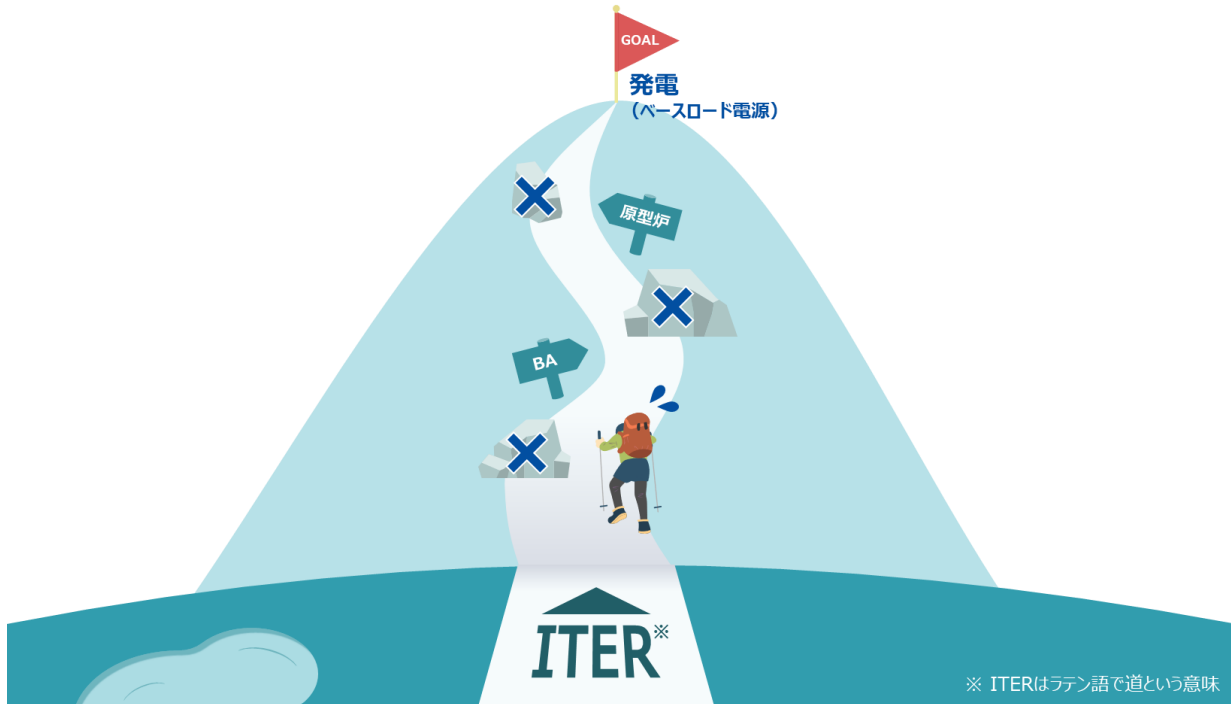


図6. 目標達成に向けたスケジュールのイメージ

ムーンショット型研究開発制度との協働がない場合

ITER※／BA／原型炉から発電へと続く道の途中で困難が生じたときに、代替手段がないため、社会実装が遅れる。



ムーンショット型研究開発制度との協働がある場合

革新的な社会実装を目指す研究が先回りして成果を創出することで、ITER／BA／原型炉から発電へと続く道をより確実なものにすることが可能。

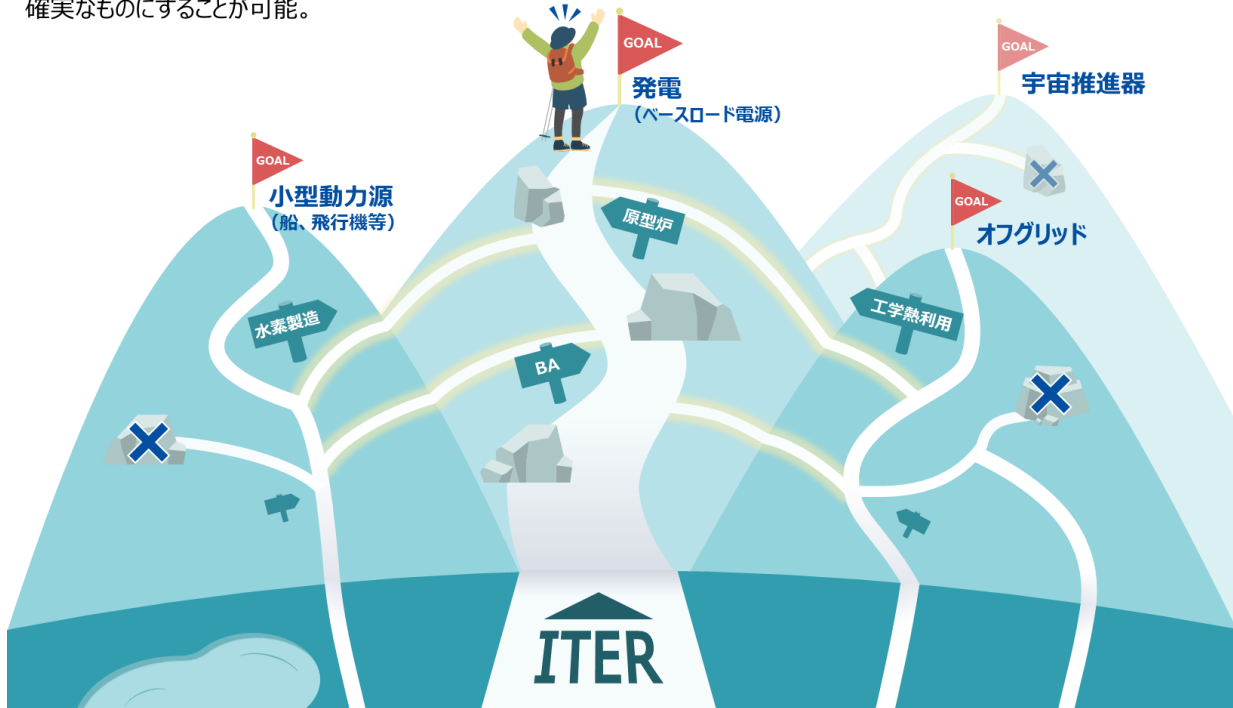


図7 ムーンショット型研究開発制度との協働

<参考：目標達成に向けた分析>

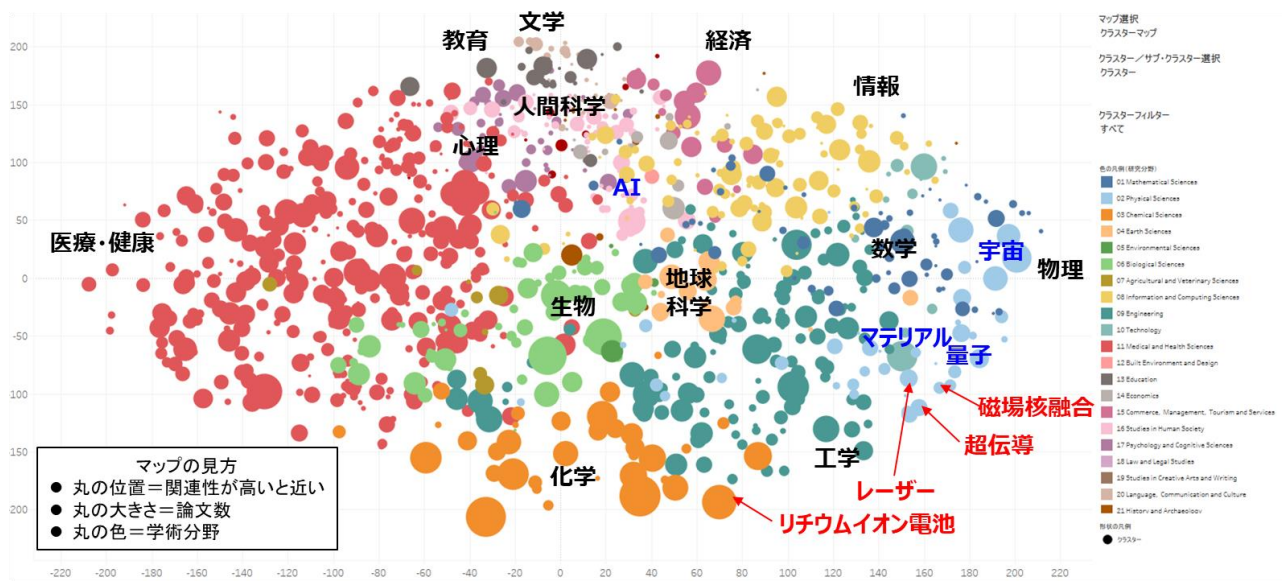
(1) 目標に関連する分野・技術群の構造

科学技術領域としての核融合分野に関する研究の位置づけは、e-CSTI²の分析では、他分野と比較して論文数は大きくはなく、核融合分野のキーワード（図中では磁場核融合、超伝導等）を含むクラスターは、物理領域（水色）の中では工学領域（緑色）に近く、量子やマテリアルをキーワードを含むクラスターとは近い関係にある。

科学技術としての核融合、世界の位置づけ

科学技術領域としての核融合関連研究の位置づけは、

- 他分野と比較して論文数(=規模)は大きくはなく、物理領域の中では工学に近い位置づけ。
- 量子やマテリアルを含むクラスターとは近い関係であり、戦略策定の参考になる。



※ データベースに含まれる論文の中で、各キーワードに関連するクラスターの配置。大きさは世界の論文数。

図 8. 核融合分野の研究の位置づけ

フュージョンエネルギーを生み出すには、強磁場から高電圧、真空から高圧力等の多様な技術が集合した技術群を必要とし、その基盤となる産業界は裾野が広く、更に他分野への波及効果も期待される。技術マップの一例として、フュージョンエネルギーを生み出すために必要な多様な技術群を構成する技術を整理した結果を次に示す。図左には核融合炉に必要な機能を列挙しており、その実現に必要な機器や構成要素等を右に順々に記載している。図右には、より一般化した表現で技術や材料を記載することで、他分野へのスピナウトによる産業展開を想定している。

² 客観的根拠（エビデンス）に基づき、日本の科学技術政策の政策立案及び国立大学法人・国立研究開発法人等の法人運営を推進するため、科学技術イノベーション関連データを収集し、データ分析機能を提供するシステム。書誌情報データベースにある 2010～2019 年の全論文を対象に分析。

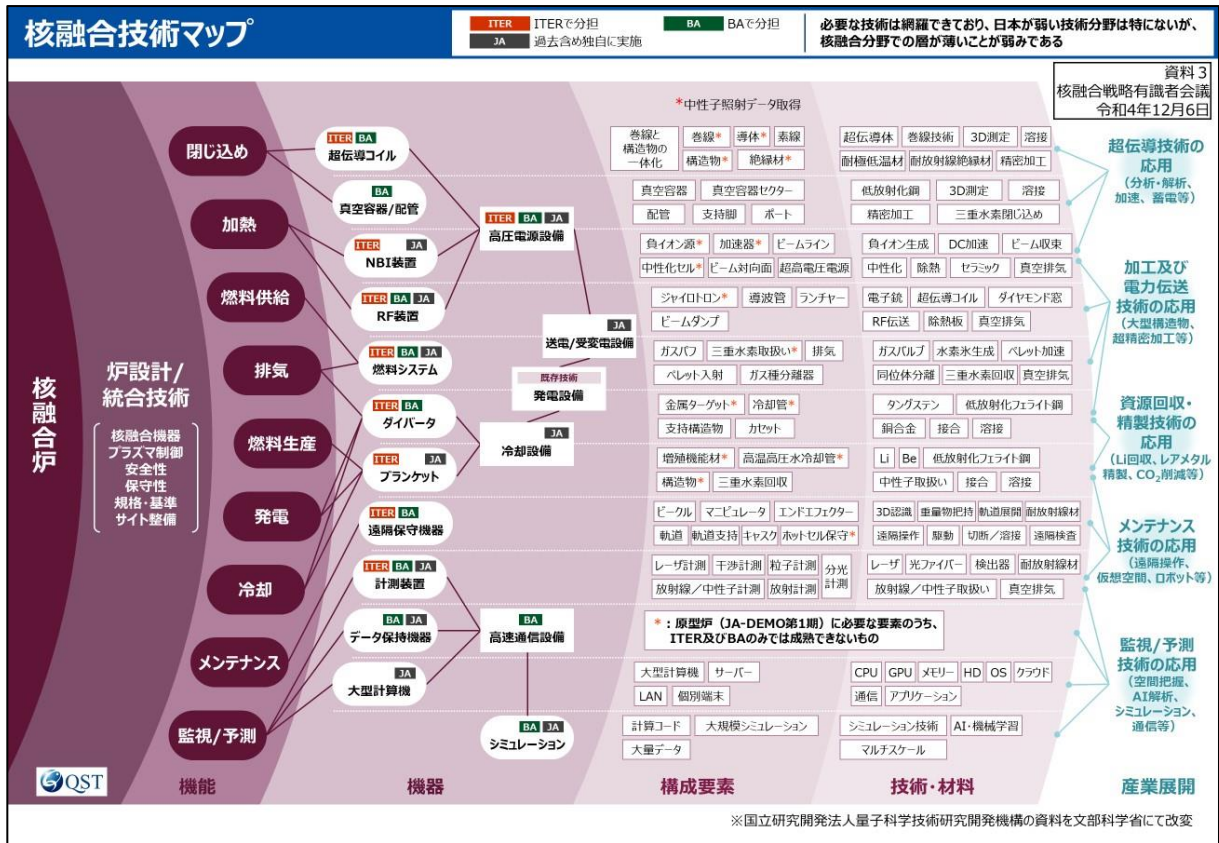


図9. 技術マップ

(2) 関連する研究開発の国内動向

我が国は、ITER 計画に参画し、フュージョンエネルギーの実現に必須となる核融合機器の技術開発に取り組むとともに、原型炉に必要な技術基盤を確立するため、欧州との国際協力による BA 活動を実施し、ITER 計画を補完・支援してきた。BA 活動で取り組む JT-60SA については、2023 年 10 月 23 日に初めてプラズマを生成し、世界最大のトカマク型超伝導プラズマ装置となった。このように、ITER 計画や BA 活動を通じて科学的・技術的実現性を確認した上で、原型炉への移行判断を実施することとしている。

原型炉開発に向けたアクションプラン（文部科学省核融合科学技術委員会）については、2021 年度にフォローアップとして第 1 回チェックアンドレビューの報告書が取りまとめられ、第 1 回中間チェックアンドレビューの項目は概ね達成されていると評価された。一方で、原型炉のその先の実用炉に向けては、小型化、高稼働率化、簡素化を鍵とした経済性の向上が課題となっている。

また、世界 7 極で実施している ITER 計画、日欧で実施している BA 活動に加えて、日米科学技術協力協定、日韓科学技術協力協定、日中科学技術協力協定等の下で、二国間での国際協力を実施してきている。また、英国とは核融合実験装置 JET、ドイツとは ASDEX 等を通じた国際協力を実施してきている。

(3) 日本の強み、海外の動向

我が国は、ITER 計画において、産学官で連携した技術的・学術的な総合理工学研究の成果を反映させ、必須となる主要機器の製作を担当するとともに、BA 活動を通じて原型炉開発に必要な取組を行っている。これまでの研究開発を通じて培った技術的優位性ともものづくり産業における信頼性及びそれらを支える基礎研究の基盤と人材育成システムを有しており、他国にとっての有力なパートナー候補である。

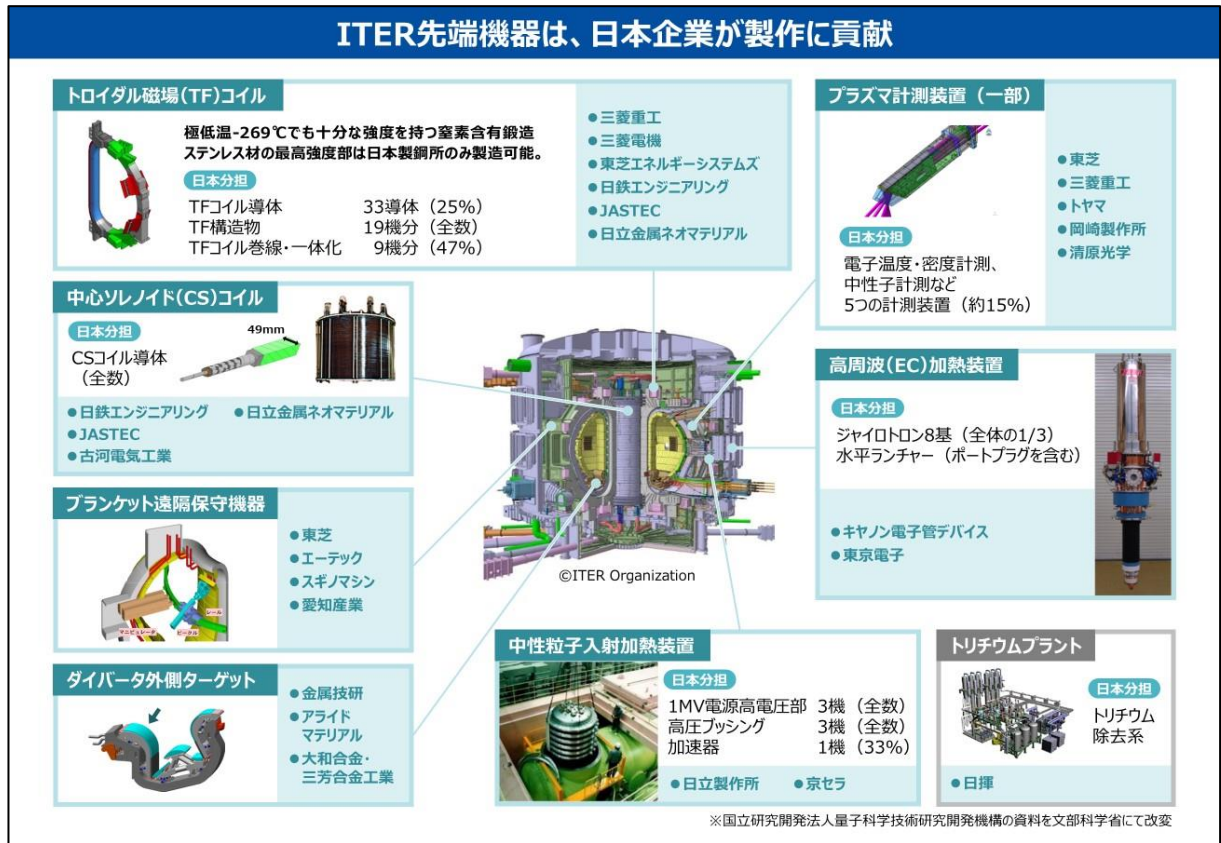


図10. ITER 計画における日本調達機器の例

e-CSTI を用いて、関連クラスターをより詳細に分析をした結果を次に示す。日本は全てのサブクラスターで Top10%論文を有しており、他国と比較して偏りが少ない。特に、ヘリカル型を筆頭に材料研究等においてシェアがある。また、全論文を対象にした国別シェアにおいては、トカマク設計、加熱装置、原型炉等の比較的工学的な分野で比較的高いシェアがある。国別シェアの比較では、試験装置を有する国や領域において高いシェアを有する傾向が見られ、JT-60SA が稼働することは日本にとって有利な研究環境となる。

サブクラスター内での国別シェア (Top10%論文)

核融合関連サブクラスターの中での国別シェアは、

- 我が国は、全てのサブクラスターでTop10%論文を有しており、特に、ヘリカルを筆頭に材料研究、乱流シミュレーション、イオン源、FRCなどの研究でシェアがある。
- 試験装置に紐づいたシェアが見られる一方で、ドイツは全分野で一定のシェアを確保。

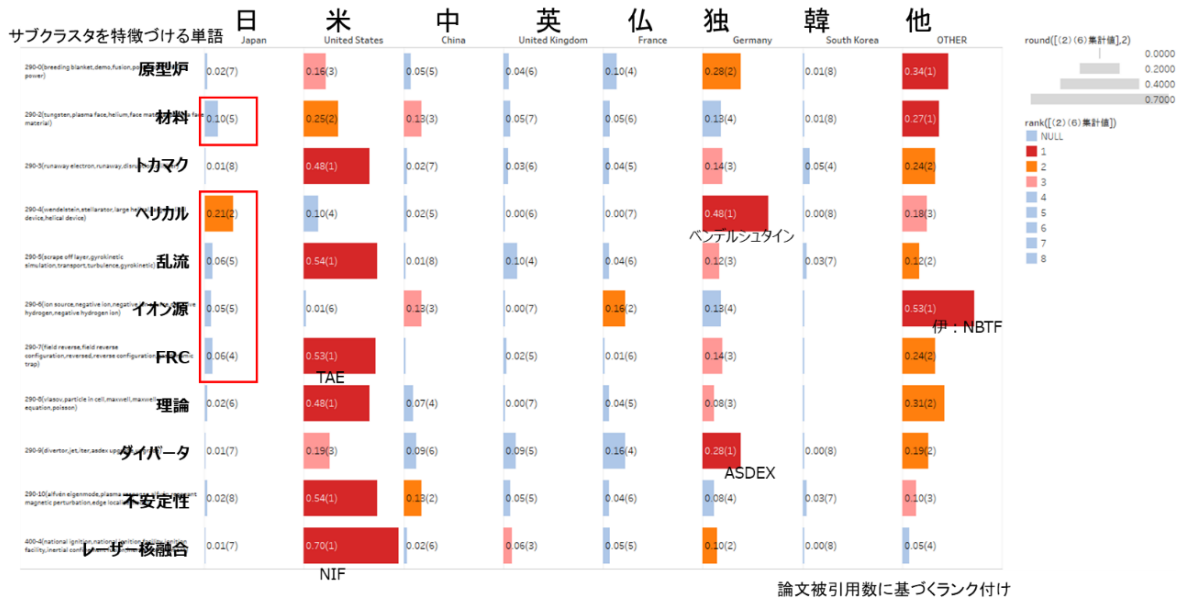


図 1.1. 核融合関連サブクラスター内での国別シェア (Top10%論文)

サブクラスター内での国別シェア (全論文)

- 全論文を対象にした場合、我が国では、トカマク設計、加熱装置 (イオン源、電子加熱)、原型炉などの比較的工学的な分野で比較的高いシェアが見られる。

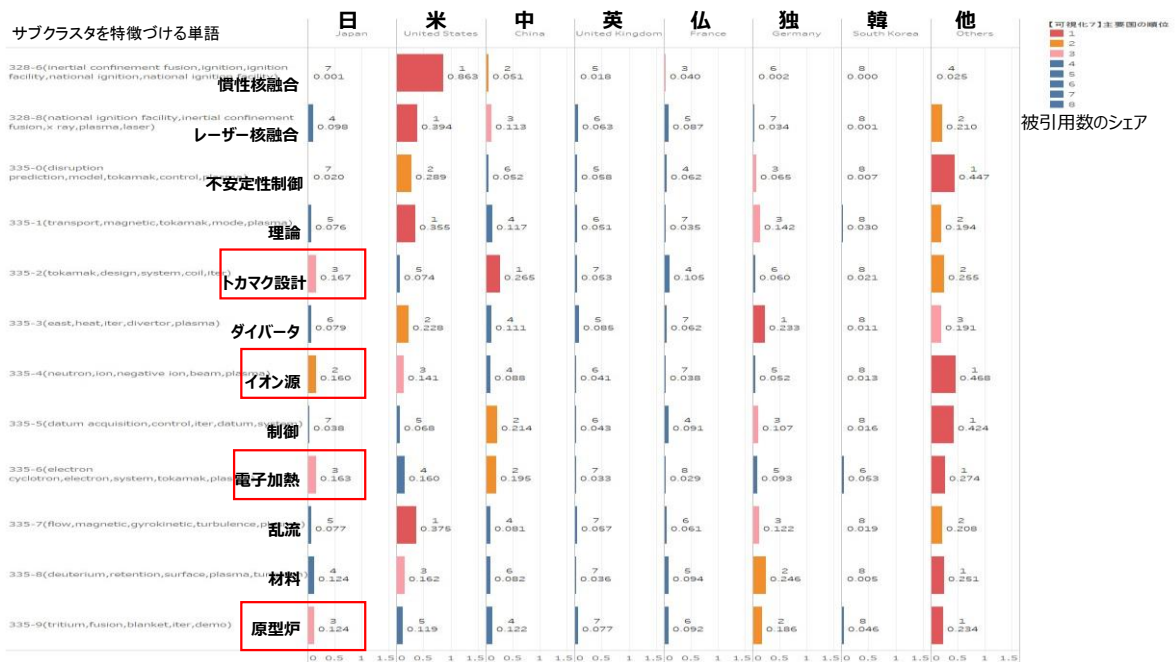


図 1.2. 核融合関連サブクラスター内での国別シェア (全論文)

世界における主な研究開発の動向としては、米国がレーザー核融合、慣性核融合サブクラスターで高いシェアを有しており、2022年12月に、米国ローレンスリバモア国立研究所において、実際の燃料を用いた核融合反応により、史上初めて入力エネルギーを上回る出力エネルギーを発生させることに成功した。

世界のカーボンニュートラルに向けた動きの中で、政府主導による科学的・技術的進展もあり、諸外国においては民間投資が増加している。その活況な民間投資を受け、米国や英国等のフュージョンスタートアップは、これまでの政府の計画よりも早い野心的な発電時期を目標に掲げ、研究開発競争を加速している。また、中国においては政府主導で実験装置や原型炉の建設に向けた計画を強力に進めている。

核融合反応の実現を目指す多様な炉型

世界各国で、多様な炉型による取組が進展



図 1 3. 核融合反応の実現を目指す多様な炉型