

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

目次

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 1. | はじめに | 1 |
| ✓ | 我が国におけるエネルギー問題、環境問題 | 1 |
| ✓ | 解決策としてのフュージョンエネルギー | 1 |
| ✓ | 新たな産業としてのフュージョンエネルギー | 2 |
| 2. | 国家戦略のビジョン | 4 |
| 3. | ビジョン達成に向けた基本的な考え方と具体策 | 4 |
| 3-1. | フュージョンインダストリーの育成戦略 | 4 |
| 【見える】 | | 4 |
| 【繋がる】 | | 7 |
| 【育てる】 | | 8 |
| 3-2. | フュージョンテクノロジーの開発戦略 | 8 |
| 3-3. | フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等 | 10 |
| 4. | おわりに ～フュージョンエネルギーが実現する社会～ | 11 |

1. はじめに

✓ 我が国におけるエネルギー問題、環境問題

異常気象等の気候変動による影響が深刻化していることを受け、世界各国が人類共通の課題としてカーボンニュートラルに向けた目標に取り組むを加速する中、我が国も 2050 年のカーボンニュートラル実現を掲げて、様々な取組を進めている。

特に、2022 年 2 月に発生したロシアのウクライナ侵略により、原油・ガス市場等のエネルギー価格の高騰を始め、世界のエネルギー情勢はこれまでとは異なる様相を呈しており、その影響が我が国にも及んでいる。エネルギー自給率が 13.4%¹と他の OECD 諸国と比較しても低い²水準にある我が国にとっては、今後いかに化石燃料からクリーンエネルギーへ移行しつつエネルギー安全保障を確保していくのが重要な課題になっている。

✓ 解決策としてのフュージョンエネルギー

フュージョンエネルギーとは、軽い原子核同士（重水素、三重水素）が融合して別の原子核（ヘリウム）に変わる際に放出されるエネルギーであり、太陽や星を輝かせるエネルギーでもある。

フュージョンエネルギーは、①カーボンニュートラル（発電の過程において二酸化炭素を発生しない）、②豊富な燃料（燃料は海水中に豊富に存在し、ほぼ無尽蔵に生成可能な上に、少量の燃料から膨大なエネルギーを発生させることが可能）、③固有の安全性（燃料の供給や電源を停止することにより反応が停止）、④環境保全性（発生する放射性廃棄物は低レベルのみであり、従来技術による処分が可能）という特徴を有することから、エネルギー問題と地球環境問題を同時に解決する次世代のエネルギーとして期待されている。

また、燃料の生成源となる海水は地球表面の 3 分の 2 を覆っており、技術さえ保有していれば多くの国が燃料を生成することが可能になることから、資源の偏在性を解消して世界の平和と安定にも資するエネルギーとしても期待が高まっている。同時に、エネルギーの覇権が資源を保有する者から技術を保有する者へと移ることから、技術の獲得によるエネルギー安全保障の確保が重要となる。なお、原子力発電は、「第 6 次エネルギー基本計画」³において、原発依存度を可能な限り低減するとともに、必要な規模

¹ 総合エネルギー統計 2021 年度速報値

² 各国の 2020 年エネルギー自給率（日本のエネルギー エネルギーの今を知る 10 の質問 2022 年度版より）：カナダ 182.6%、米国 106.0%、イギリス 76.0%、フランス 54.9%、ドイツ 34.7%。

³ 令和 3 年 10 月 22 日 閣議決定

を持続的に活用していく方針が示されている。また、「GX 実現に向けた基本方針」⁴も踏まえて、足元のエネルギー危機を乗り切るため、再生可能エネルギーや原子力などの脱炭素電源への転換を進めていく。これら原子力発電を推進することによる人材輩出等は将来的にフュージョンエネルギー開発にも資するものである。一方、核融合は核分裂との原理の相違に起因する特徴（固有の安全性や環境保全性等）を有することや、近年、英国や米国においては学術用語としての“Nuclear fusion（ニュークリア フュージョン）”をエネルギー分野では“Fusion（フュージョン）”と呼称していること等を踏まえ、核分裂との混同等の疑問に対して丁寧な説明で理解を得つつ、本戦略では、核融合エネルギーをフュージョンエネルギーと表現する。

✓ 新たな産業としてのフュージョンエネルギー

国際プロジェクトで建設が進められている ITER は、これまでにない高度な技術での機器製作が要求されているが、ものづくり技術の進展により、2020 年から炉心組立を開始し、初プラズマまでの建設活動は 77.5%（2022 年 12 月時点）まで完了した。また、パワーレーザーによる爆縮方式で制御技術が向上した結果、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⁵。

世界のカーボンニュートラルに向けた動きの中で、このような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⁶。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⁷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⁸を強力に進めており、今後、研究開発

⁴ GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～（令和 5 年 2 月 10 日 閣議決定）

⁵ 2022 年 12 月 5 日に核融合反応を実現し、12 月 13 日にはその研究成果を米国エネルギー省が発表。2.05MJ のレーザー光エネルギーを入力し、約 1.5 倍の 3.15MJ のエネルギーを生成。

⁶ Fusion Industry Association の調査によると、2021 年までに約\$2B の民間投資がなされており、今後さらに約\$2.7B の民間投資が行われる予定。

⁷ 米国 Commonwealth Fusion Systems：2025 年に実験炉 SPARC、2030 年代初期に商用炉 ARC の稼働。英国 Tokamak Energy：2030 年代早期にパイロットプラント ST-E1、2030 年代中期に商用炉の稼働。米国 TAE Technologies：2030 年代初期に商用炉の稼働。英国政府（英国原子力公社 UKAEA）：2040 年代までにプロトタイプ炉 STEP を稼働。

⁸ 2025 年から要素技術の獲得のための施設群 CRAFT の運転、2027 年から実燃料による運転も計画している実験装置 BEST の運転、2030 年代までに ITER と同規模の工学試験炉を建設

競争の脅威となりうる。

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（フュージョンテクノロジー）を必要とし、その基盤となる産業界（フュージョンインダストリー）は裾野が広く、更に、フュージョンテクノロジーは他分野への波及効果も期待される。

スタートアップに投資された資金は様々な企業に共同研究や機器調達という形で投じられ、海外ではサプライチェーンが構築されつつある。米国（2022年3月）や英国（2021年10月）の政府は、フュージョンエネルギーの産業化を目標とした国家戦略を策定⁹し、自国への技術の囲い込みを開始しており、発電の実現を待たずして産業化への競争が既に生じている。

我が国は、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。そのため、他国との連携による相乗効果により、他国の技術を国内開発に活かすとともに海外市場を獲得するチャンスである¹⁰。一方で、加速する他国の状況を踏まえると、このままでは、我が国は、技術を提供するだけで産業化に遅れ、結果的に市場競争に敗れるというリスクに晒されている。特に、他産業への波及効果も有するフュージョンテクノロジーは、技術安全保障を基盤とした経済安全保障の確保として重要である。

我が国でフュージョンエネルギーを最短距離で実用化するためには、原型炉の発電実証時期とコスト等を明確化し、原型炉を早期に建設することが肝要であるため、従来の ITER 計画/BA 活動からの原型炉開発というアプローチを強力に推進する。加えて、産業化に向けた他国の動きに遅れをとることなく、この機を活かして、フュージョンエネルギーを新たな産業として捉え、構築されつつある世界のサプライチェーンに我が国としても時機を逸せずに参加すること等の多面的なアプローチが必要である。

そうすることにより、産業化を志向する中で培われた新たな技術やイノベーションの還元による原型炉開発アプローチの強靱化に加え、将来的なフュージョンインダストリーエコシステムの基盤を今から構築でき、フュージョンエネルギーの実現を加速する新たな方策となる。

し 2050 年代に発電炉に改造を予定。

⁹ 米国は Developing a Bold Decadal Vision for Commercial Fusion Energy というシンポジウムをホワイトハウスで開催。英国は Towards Fusion Energy (The UK Government's Fusion Strategy) を策定。

¹⁰ 2023 年 1 月には英国 Tokamak Energy 社と古河電気工業株式会社が、高温超電導線材の供給に関して合意。

2. 国家戦略のビジョン

上述の背景を踏まえ、この先10年を見据えた戦略として、「世界の次世代エネルギーであるフュージョンエネルギーの実用化に向け、技術的優位性を活かして市場の勝ち筋を掴む、“フュージョンエネルギーの産業化”」をビジョンに掲げる。

本ビジョンの達成に向けては、我が国の民間企業の更なる参画を促進し、産学官が連携して取り組む必要があり、民間投資の呼び水となる具体的なアクションを盛り込んだ国家戦略を策定する。

3. ビジョン達成に向けた基本的な考え方と具体策

ビジョンを達成するための基本的な考え方として、フュージョンインダストリーの育成戦略、フュージョンテクノロジーの開発戦略、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等に一体的に取り組む。また、ビジョンの達成に向けた戦術となる具体的なアクションは以下のとおり。

【内：内閣府、外：外務省、文：文部科学省、経：経済産業省、環：環境省】

3-1. フュージョンインダストリーの育成戦略

昨今の世界の民間企業や大規模な投資の動きを踏まえ、海外市場に我が国も時機を逸することなく展開することが重要である。また、ITER計画の進捗に伴って調達が増加することにより需給が縮小する一方で、原型炉建設に必要な調達により需給が拡大するまでの間、需給の空白期間が生じる。そのため、我が国の原型炉開発への民間企業の参画を見据えた必要な技術獲得を促進し、将来のフュージョンインダストリーエコシステムの確立を目指して、その基盤を構築することが必要である。

これまでフュージョンエネルギー開発に関わってきた民間企業のより一層の参画に加えて、これまで関わってこなかった意欲ある民間企業を新たに巻き込み、フュージョンインダストリーを盛り上げるため、「見える、繋がる、育てる」の各段階で継続的に支援を行う。

【見える】

戦略の対象の可視化により、産業の予見性を高め、フュージョンインダストリーに参画する民間企業を増やす。

- フュージョンエネルギーの社会的位置づけを明確にすること【内（関係省庁）】

研究開発の延長でフュージョンエネルギーの社会実装を捉えるのではなく、我が国の将来のエネルギーミックスからバックキャストでフ

フュージョンエネルギーの位置づけを明確にするため、関係省庁と協力しながら社会的・経済的有用性やコスト目標等の検討を行う。

- 産業の予見性を高めるため、発電実証時期を早期に明確化すること【文】
海外市場の獲得を目指すこととともに、国内市場の形成も重要である。文部科学省の原型炉研究開発ロードマップ（一次まとめ）¹¹においては発電の実現時期を 2050 年頃としており、また、文部科学省の原型炉開発総合戦略タスクフォースにおいて技術的には前倒しが可能という検討結果が示された¹²。ITER 計画の進捗及び諸外国で掲げられている野心的な目標^{7,8}も踏まえ、発電実証時期を出来るだけ早く明確化するとともに、研究開発の加速により原型炉を早期に実現する。

- 技術成熟度も記載したフュージョンエネルギーに関する技術マップ及び産業マップを作成し、経済安全保障の視点も踏まえて取り組むこと【内】

フュージョンインダストリーのサプライチェーンと担い手を整理し、民間企業の参画を促進するため、産業ニーズの見える化及び他分野への波及が期待される技術の見える化をする技術マップ及び産業マップを内閣府が作成する（図 1：技術マップのイメージとして QST¹³において作成）。

なお、フュージョンエネルギーに関する各技術を国内企業で網羅できているものの、フュージョンエネルギーは多様な領域の技術の集合体であり、リソース（資金、人材、時間等）は限られるので、全ての領域に満遍なく取り組むよりも、必要な領域にリソースを重点的に投入することが求められる。また、加速する他国の動きも考慮した経済安全保障の視点も踏まえる必要があるため、研究開発や産業育成の際には、以下の考え方で戦略的に取り組むべきである（図 2）。その際、日本が強みを有するコアとなる領域のうち、経済安全保障上、重要な領域を最優先に取り組む等の優先順位付けを行うべきである。

¹¹ 平成 30 年 7 月 24 日 原型炉研究開発ロードマップについて（一次とりまとめ）

¹² 令和 4 年 10 月 28 日 核融合発電の実証時期の前倒しに関する検討を踏まえた原型炉開発に向けたアクションプランの検討について

¹³ 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

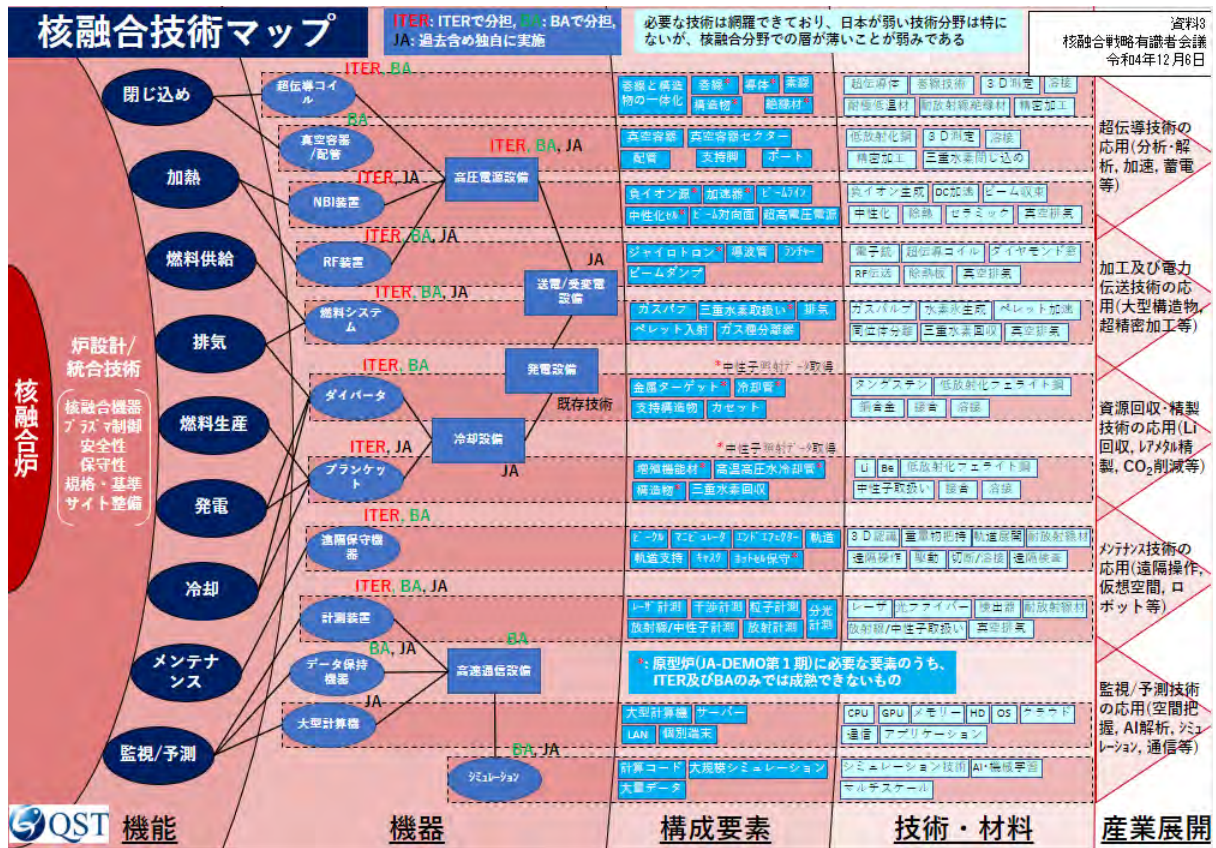


図1 技術マップ

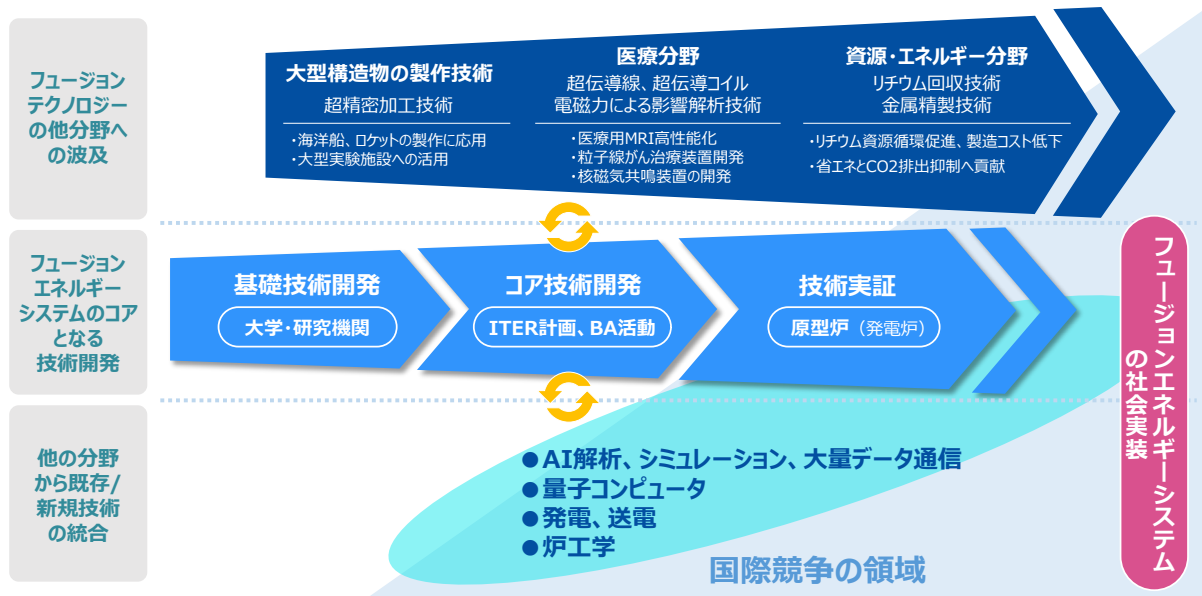


図2 社会実装に向けた研究開発や産業育成の考え方

- ・フュージョンエネルギーシステムのコアとなる領域

市場規模や日本の強み/弱みは関係なく取り組むべき領域であり、経済安全保障（自律性、不可欠性）の観点からも重要となる。

特に、日本が強みを有する技術は、海外市場を獲得するチャンスとなることから特に重点的にリソースを投入すべき領域であり、また、同志国が強みを有する領域は戦略的な国際協調をしながら取り組むべきである。さらに、他国に確保されると我が国のフュージョンエネルギーの実現に支障が生じうる領域は、サプライチェーンの観点からも日本の強み/弱みに関係なく、取り組むべきである。

- ・フュージョンテクノロジーの他分野への波及が期待される領域

フュージョンエネルギーシステムにおける位置づけや日本の強み/弱みは関係なく、様々な核融合炉で共通的に活用できる等、市場が期待されるために取り組むべき領域。特に、資源・エネルギー分野や医療分野、安全保障分野等の幅広い産業への波及（スピリアウト）が期待される領域は、フュージョンインダストリーとして広がりをもたらすとともに民間企業の更なる参画を促す効果も期待されるため重要となる。

- ・他の分野から既存/新規技術の統合が期待される領域

フュージョンエネルギーシステムの社会実装には、学術としての核融合分野の研究開発に加えて、AI 解析やシミュレーション、大量データ通信等の他分野の技術を統合することが重要となる領域。

【繋がる】

フュージョンエネルギーの要素技術を他の要素技術や他分野の技術とマッチングすることで新しいフュージョンインダストリーの種を作る。

- フュージョンインダストリーの育成を目的とした場の設立【内（関係省庁）】

民間企業におけるフュージョンエネルギーに関する情報交換やビジネスマッチング等を促進し、フュージョンインダストリーを育成するため、産学官の場である核融合エネルギーフォーラムを発展的改組し、一般社団法人核融合産業協議会（仮）の令和5年度設立を目指す。なお、民間企業が組織として参画する形とし、意欲ある民間企業の新たな参画も促す。更にアカデミアや QST の参画による産学官連携も促進する。

【育てる】

種をフュージョンエネルギー開発の成果として開花させ、製品・サービスとして社会実装できるようなイノベーションが生まれる環境を構築する。

- スタートアップを含めた民間企業が保有する技術シーズと産業ニーズのギャップを埋める支援を行うこと【内、文】

仮に民間企業に技術シーズがあったとしても、社会実装に適したニーズまでは更なる研究開発を要するため、フュージョンインダストリーを担う民間企業の研究開発を支援する。特に、スタートアップへの支援については令和5年度から強化する。
- 安全規制に係る同志国間での議論に参画すること【文、外】

米国や英国等では安全規制に関する議論が先行しており、海外市場獲得のためには国際協調による規制の策定及び標準化が必要なため、Agile Nations（アジャイルネーションズ）¹⁴の枠組みの下で「国際的な核融合規制へのアプローチ」に関する議論を行うためのワーキンググループ等に参画し、令和5年度にはワーキンググループとしての議論をまとめる。
- 安全確保の基本的な考え方を策定すること【内（関係省庁）】

安全規制の内容によってフュージョンエネルギーに必要な機器に要求される性能や設計等が変わるので、民間企業の参画を促進するためには早期に安全規制を検討する必要がある。

そのため、内閣府に、技術者や規制の専門家、一般市民を構成員とするタスクフォースを設置し、関係省庁の協力を得ながら、フュージョンインダストリーの育成、原型炉開発の促進も念頭においた安全確保の基本的な考え方を産業化に乗り遅れないように検討する。なお、その際に、核融合は核分裂とは原理が異なることから、規制を検討する体制も含めて議論を行う。

3-2. フュージョンテクノロジーの開発戦略

将来の不確実性に備えて、戦略的自律性及び不可欠性を踏まえたフュージョンテクノロジーのポートフォリオを描くため、ITER 計画/BA 活動及び関連する国内研究開発を通じてフュージョンエネルギーのコアとなる技術開発の推進に加えて、未来の可能性を拓く挑戦的な研究も支援する。

¹⁴ Agile Nations は、参加政府間の革新的な規制の実践に関する協力を促進することを目的とした政府間規制協力ネットワークである。

- 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【内、文】

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。
- ITER 計画/BA 活動を通じてコア技術を獲得すること【文】

我が国は ITER 計画において主要機器を担当しているとともに、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とから、フュージョンエネルギーに必要なコア技術を獲得するため、両活動を引き続き推進する。
- 将来の原型炉開発を見据えた研究開発を加速すること【文】

将来の原型炉に向けた設計を加速するため、民間企業の更なる参画を促すための仕組みを導入するとともに原型炉の研究開発を推進する。
- フュージョンエネルギーに関する学術研究を引き続き推進すること【文】

フュージョンエネルギーは多様な技術の集合体であり、更なる広がりを持ちうることに加えて、多くの未解決課題を持つがゆえのイノベーションの不確実性から、引き続き、幅広い分野の知的創造活動である学術研究を推進する。
- スタートアップを含めた民間企業等による新技術を取り込むことを念頭において原型炉開発のアクションプランを推進すること【文】

ITER 計画等の研究成果を基に作成したアクションプランは合理的であるため、それをベースにする一方、フュージョンエネルギーの早期実現やコストダウン等に貢献する新興技術や国際協力を柔軟に取り込むべきである。

また、原型炉開発に必要な技術ニーズが民間企業には不明確なことから、自社の技術レベルとのギャップを測ることができず、参画に足踏みされる。加えて、長期かつ困難な技術開発を伴うプロジェクトであることから、その開発において適切な技術ロードマップを作成の上、ステー

ジゲート方式を導入し、適切な進捗管理を行う。

3-3. フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等

今回策定する国家戦略を、推進力を持って産学官連携で取り組むため、戦略を推進する枠組みを構築する。

- 内閣府が政府の司令塔となり、関係省庁と一丸となって推進すること【内（関係省庁）】

内閣府（科学技術・イノベーション推進事務局）が政府の司令塔となり、フュージョンエネルギーの実用化というイノベーションの実現に向けて戦略を推進する。その際、変化する市場や研究の進展等に対応するため、EBPM¹⁵も活用しながら本戦略の定期的な改訂を行う。

- 原型炉開発に向けて QST を中心に、アカデミアや民間企業を結集して技術開発を実施する体制、民間企業を育成する体制を構築すること【文】

原型炉への移行判断の後に体制を構築しては産業化に乗り遅れるため、体制構築に向けた議論を令和5年度より開始する。ただし、原型炉開発の主体のいない現状においては、まずは QST を中心としつつ民間企業も参加する実施体制を構築するとともに、進展に応じて適切な体制とする。それにより、商用炉の主体となりうる民間企業を育成する。

- QST に ITER 計画/BA 活動等で培った技術の伝承・開発や産業化、人材育成を見据えたフュージョンテクノロジー・イノベーション拠点を設立すること【文】

市場獲得を目指し、QST が保有する技術を早期に民間企業へ移転するため、研究開発から社会実装まで取り組むフュージョンテクノロジー・イノベーション拠点の早期設立を目指し、令和5年度から検討を開始する。拠点においては、民間企業と繋ぐ技術コーディネーターの設置や、QST が保有する施設・設備の民間企業への供用等に取り組む。

- 将来のキャリアパスを明確化し、フュージョンエネルギーに携わる人材を産学官で計画的に育成すること【文】

原型炉開発などのフュージョンエネルギーに携わる人材の戦略的な育成のため、原子力分野等を含む産業界やアカデミアからの若手人材を、ITER 計画や JT-60SA 等の国内外の大型計画に対して派遣する取組を

¹⁵ EBPM : Evidence-based Policy Making。エビデンスに基づく政策立案。

推進する。その派遣された人材が、継続的にフュージョンエネルギーのポストで活躍するといった人材の流動化が起きるよう、所属機関でのポジションを維持したまま派遣するなど、キャリアパスに配慮する。

- 国内大学等における人材育成を強化するとともに、他分野や他国から優秀な人材を獲得する取組を行うこと【文】

少子化により人材が不足している日本において、フュージョンエネルギー人材の母数を増加させるため、核融合科学の学際化を進めて幅広い頭脳循環を実現することで、他分野や海外から人材を獲得する。複数大学からの学生や若手研究者、海外からの人材等が参加し、フュージョンエネルギーに関して俯瞰的に学習できる教育プログラムの提供に向けた検討を進める。

- 国民の理解を深めるアウトリーチ活動を実施すること【文】

社会的受容性を高めながらフュージョンエネルギーの実用化を進めていくため、アウトリーチヘッドクォーター¹⁶の体制を強化し、フュージョンエネルギーへの国民理解を深める活動を推進する。

4. おわりに ～フュージョンエネルギーが実現する社会～

フュージョンエネルギーは、すぐに使えるエネルギー資源の乏しい我が国のエネルギー問題や環境問題を解決し、我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱されている **Society 5.0** を支える基盤となるだけでなく、地球規模で人類の持続可能な発展を可能とし、人類社会に我が国が大きく貢献できる科学技術である。

例えば、フュージョンエネルギーの実現により、エネルギー資源の偏在性が解消されれば、世界各国でエネルギー資源に関する争いが無くなり、世界平和と安定に貢献できる。また、既存エネルギー源の代替としてだけでなく、少量の燃料から膨大なエネルギーを発生するフュージョンエネルギーを宇宙開拓や深海探査の動力源に用いることにより、人類未踏のフロンティアを切り拓くことも期待される。本国家戦略のその更に先には、そのような未来が待っている。

なお、フュージョンエネルギーを実現させるためには、いまだ解決されるべき課題が残されており、変化する市場や研究の進展等にも対応するため、本戦略の定期的な改訂を行うこととする。

¹⁶ 大学及び研究機関が個別に実施しているアウトリーチ活動を集約させ、一体となって戦略的な活動を実施することを目的に、平成 31 年 2 月にアウトリーチヘッドクォーターを立ち上げ（実施体制：文部科学省、QST、核融合科学研究所、大学等の関係者）。