

核融合科学技術委員会 原型炉開発総合戦略タスクフォース(第34回)
国内外の動向を踏まえた原型炉戦略の加速について

武田 秀太郎

九州大学 都市研究センター フュージョンエネルギー部門 部門長・准教授

背景：各国政府は早期発電実証に向けた国家戦略を既に推進している

各国の打ち出すフュージョン早期発電戦略



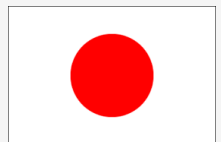
多様な民間企業に補助金を付け競争させる



政府として明確な道筋のもと新施設 + 官民連携



政府計画として一本槍で強力に設備投資



諸外国から5~10年の遅れ、明確な早期実現ビジョンなし

学術成果

先進要素技術

早期実現に必要な周辺技術

統合試験

燃料の燃焼や熱取り出しなどの統合試験

発電実証

フュージョン反応による発電の実証

実施主体

GAMOW (2020) / INFUSE (2023)
助成金

FIRST (2032年)
核融合統合研究試験施設 (計画段階)

2035~40年
競争により決定

民間主導
による官民連携

CHIMERA (2024年) 炉内環境模擬試験施設
H3AT (2024) / LIBRTI 燃料系試験施設
RACE (2014) 遠隔取り扱い試験施設

2040年
STEPプログラム (球状トカマク)

政府主導
による官民連携

CRAFT (2025年)
核融合技術総合総合研究施設

BEST (2027年)
燃焼プラズマ実験超伝導トカマク

2030年代
CFETR (従来型トカマク)

中国政府

ムーンショット (2024)
研究費

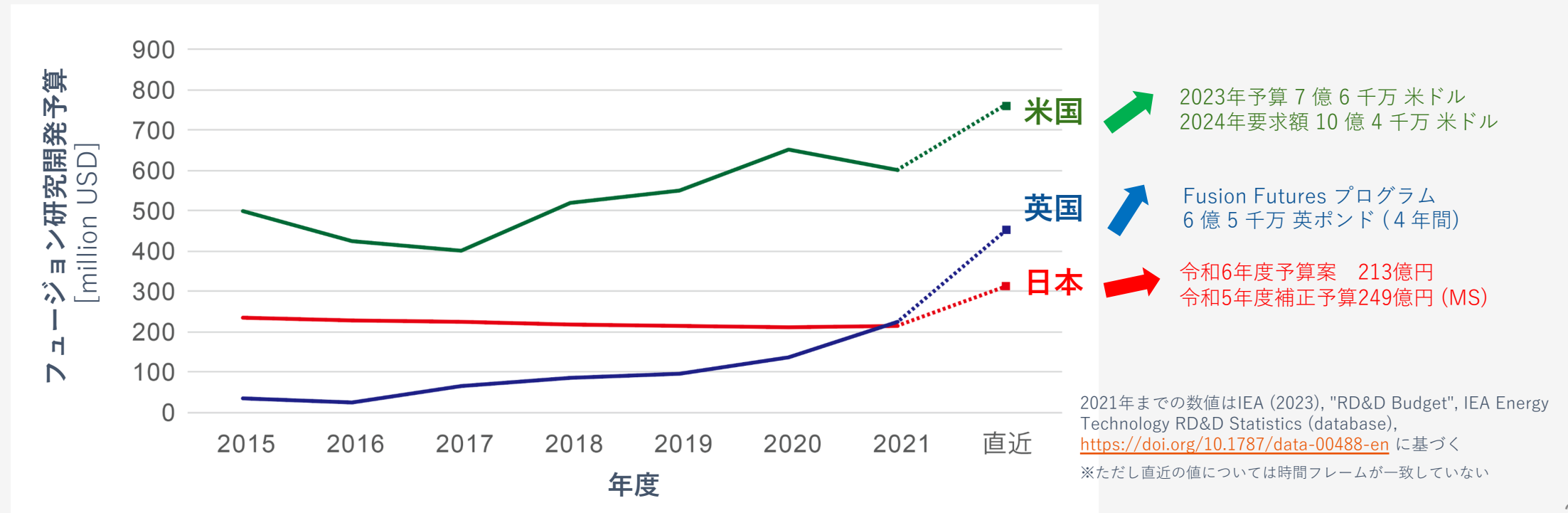
(計画なし)

2045 or 50年
JA-DEMO (従来型トカマク)

未定 (当面はQST)

フュージョンインダストリーの成長を予見する各国政府は、早期発電実証に向け、関連予算を増額することにより重点的な研究開発を展開している。

我が国におけるフュージョン関連予算は長年横ばいであったがR5補正において462億円に増補。しかし同時期に、**米国は1,500億円の予算を要求し、英国もまた1,200億円のパッケージを発表した。**これにより、**我が国のフュージョン関連予算は相対的に見劣りする水準に沈んでいる。**

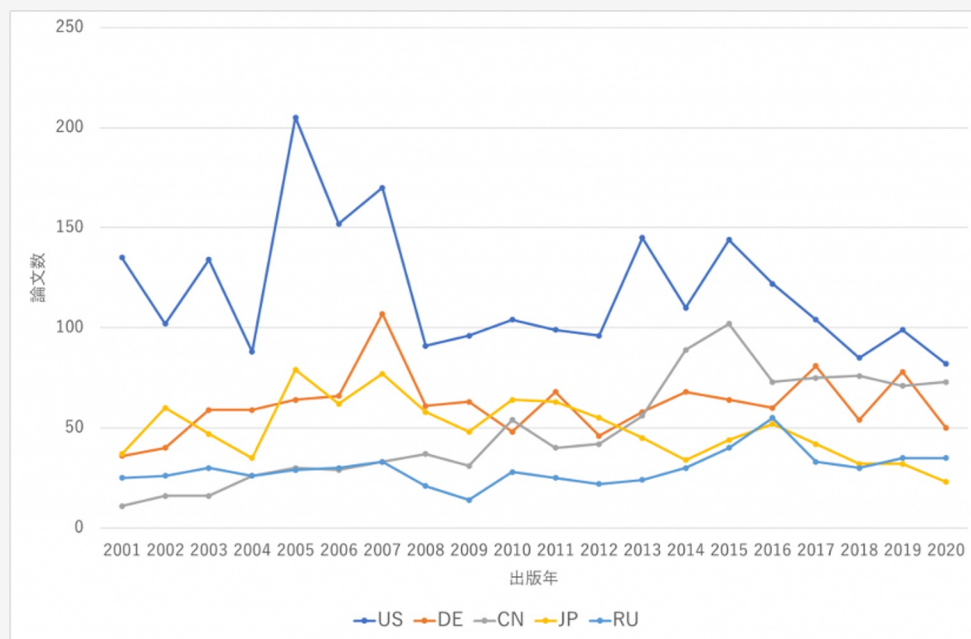


国際競争の競争力の原点が、フュージョン分野における研究開発力にあることは疑いがない。

我が国は長年、フュージョン分野における研究開発で世界をリードしてきた。

しかしここ20年間で、関連特許出願数は2001年の1位から2020年に4位（中国1位）まで、論文数は2001年の2位から2020年に5位（米国1位）にまで低下しており、**地盤沈下は顕著である。**

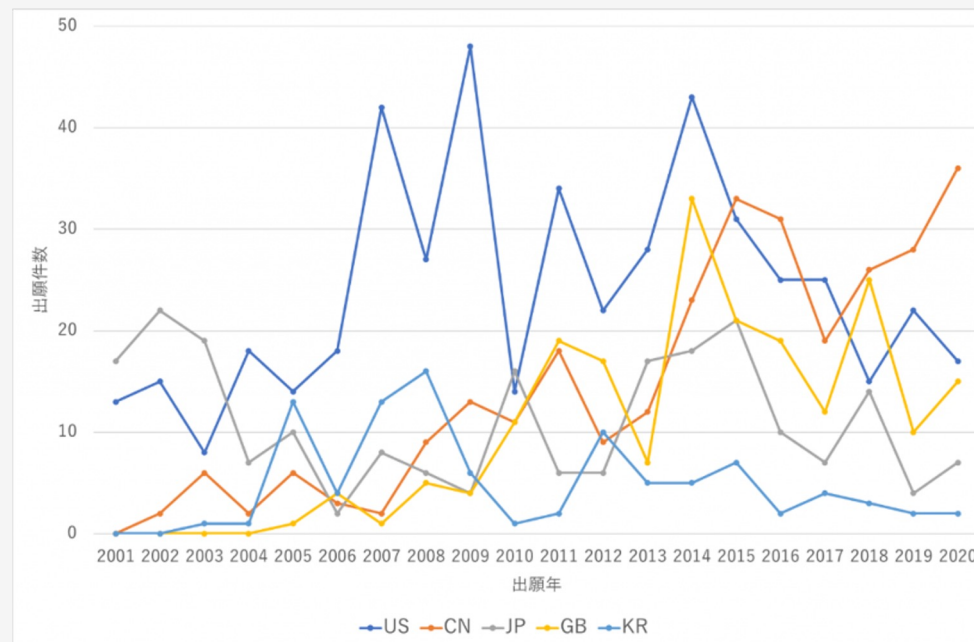
核融合に関連する論文数の推移



米国 1 位

日本 5 位

核融合に関連する特許数の推移



中国 1 位

日本 4 位

発電実現時期

米英中から5~10年遅れの目標。

産業競争力ならびにサプライチェーン構築の観点から埋められないビハインドが懸念。

政府予算

米バイデン政権2024年度要求額 **約1,500 億円**、英 Fusion Futures Program **約1,200億円** に対し、R5 補正・R6 予算案合計で **462 億円**と見劣りする水準。

装置計画

早期のフュージョン発電実現に向け、米中が必要となる**統合試験 (FIRST/BEST等)**の計画を進める一方、我が国ではこれに類する**新規装置の計画は進んでいない。**

民間投資

我が国でも複数のフュージョンスタートアップが設立され、**150 億円**を超える民間資金が流入する一方、同期間に世界の民間投資は**約 1 兆円**に上り、その差は歴然である。



米英中は早期発電実証目標からバックキャストにより策定されたロードマップに基づき、体系的かつ着実に新規施設投資・人材育成・制度改革を含めた包括的な戦略を推進している。

我が国においても同様の視点から、バックキャストによる早期発電実証に向けた戦略の見直しが必要である。

原型炉戦略に関連する社会からの要請の概観

人材の育成

体系的な人材育成システムの構築や研究開発を支える人材の育成

研究開発の加速

「2030年代に発電実証する」ことを目的とした支援のあり方を検討

法整備

資金支援のため必要となる関係法令の改正

諸外国に伍する
予算規模で推進

早期の発電実現（2030年代）

諸外国に先駆け、2030年代にフュージョン発電を実現する。

サプライチェーンの構築・ 炉メーカーの排出

フュージョン炉メーカーを輩出し、サプライチェーンの中核たる地位を築くことによりフュージョン関連輸出を振興する。

エネルギー黒字国への転換

フュージョン関連輸出を我が国の基盤産業とすることで、エネルギー関連国際収支を近代以来で初めて黒字化する。

社会の要請に応え「2030年代に発電実証」を目的とした支援を議論することは本TFの責務と考えられ、このため原型炉計画の見直し、もしくは発電実証の捉え方そのもの見直しに着手する必要性が考えられる。

このためには以下の2路線が選択肢となり得る。

- 1) **原型炉により我が国初のフュージョン発電実証を行う路線を維持する場合、
原型炉計画のさらなる前倒しを達成する目標・基本設計の抜本的な見直し**
→ (第一期)目標のさらなる改訂と、それに基づいた基本設計の見直し等
- 2) **現行の原型炉計画の基本設計を含めた大枠を維持する場合、
原型炉に先駆けて小規模な発電実験を行う装置を並行して推進**
→ 民間を活用し、2030年代のDT燃烧装置稼働を原型炉計画の一貫として官民推進等

このうち、2030年代の発電を実現する原型炉は計画の抜本的な見直しを伴う。
ムーンショット目標10もまた科研費に類する多用途研究支援が示されている。

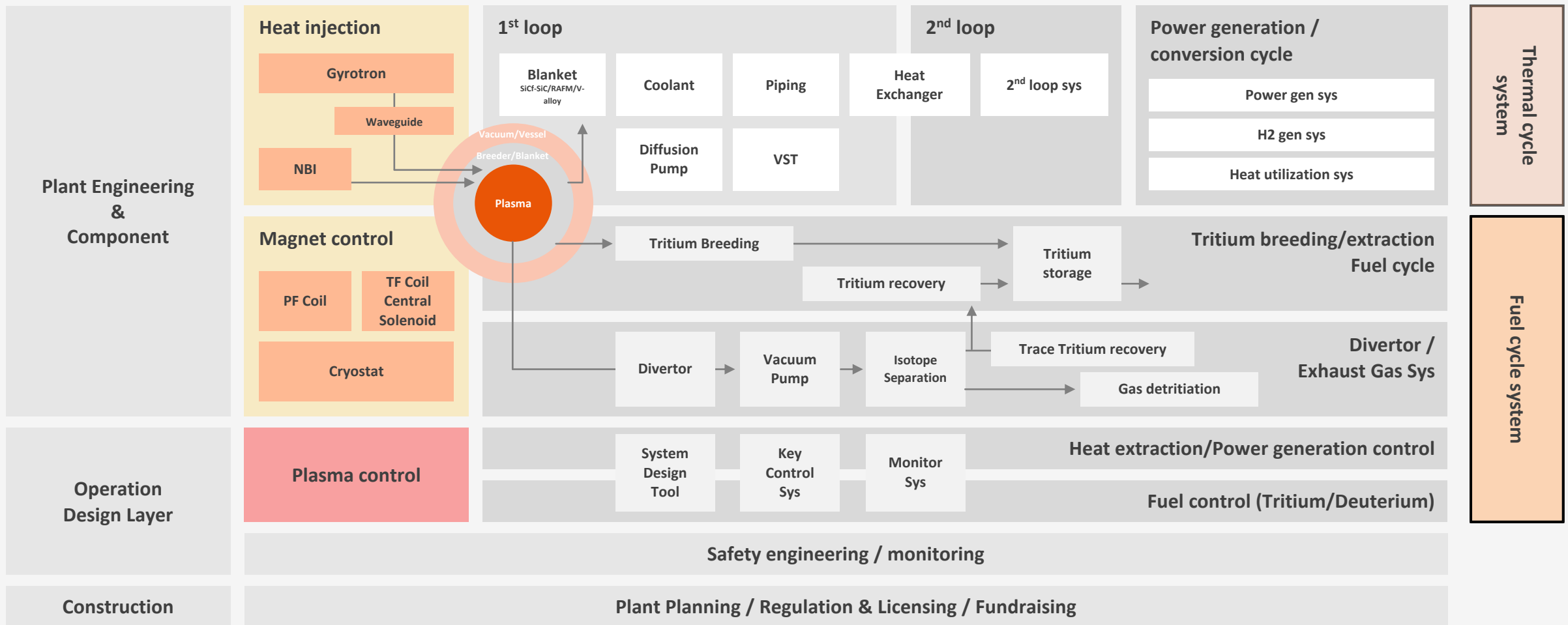
**諸外国と同様、意欲的な民間計画を官民連携で支援し、2030年代の民間実証炉実現を目指しつつ、
得られた知見をもって原型炉計画を加速させる選択肢を検討する。**

提案：早期発電実現に必要なとなる共通基盤装置としてのDT燃焼装置

発電早期実現の観点からは、炉心プラズマの研究のみならず、発電に必要なとなるBOP（炉心以外の冷却ループ、熱交換器、燃料系、発電系などの周辺機器類）の研究開発も急務である。

我が国国内で装置経験を有する

我が国国内で未だ装置経験を有さない領域

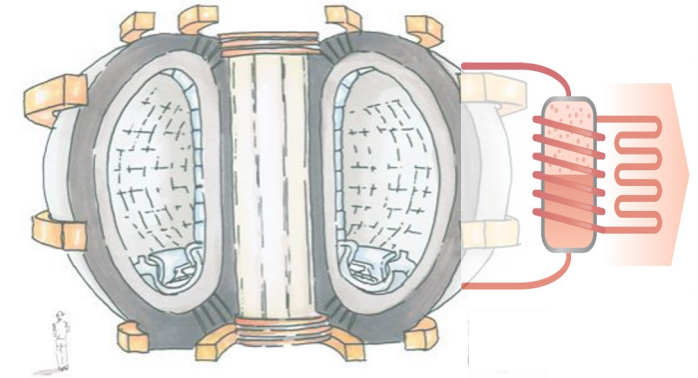


既に中国はDT燃焼統合試験BESTの建設に着手している。また米国でも中性子照射、燃料サイクルを一貫して試験するFIRSTと仮称される新施設の議論が行われ、加えて世界中のスタートアップが同等の計画を進めている。

設計にあたっては統合的なDT燃焼試験の実施を主眼とし、稼働率、Q値、TBR等については目標としないことで設計難度の低下が図られている。

DT燃焼統合試験装置が果たすTRLのギャップを埋める領域

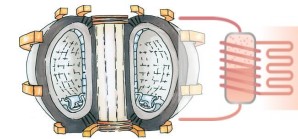
原型炉 (例 JA-DEMO)



実験炉 (例 JT-60SA)



DT燃焼統合試験



大半径	3.0 m	2 - 4 m	8.5 m
DTプラズマ燃焼	行わない	燃焼を行う	燃焼を行う
稼働率・TBR	要件としない	要件としない	安定稼働・燃料自己充足
熱/Tの取り出し	行わない	BLK試験を行う	行う
DTフュージョン出力	なし	定常 Q ~ 1 / 数十MW程度	Q = 17.5 / 1,500 MW
発電	なし	実験的に少量は可能	定格出力 & 連続発電

原型炉戦略の観点からは、DT燃焼統合試験装置の実現は、以下のインパクトを有し得る。

- ・ **中性子照射試験のみならずブランケット試験、さらにトリチウム燃料サイクルを含めたBOPのTRL向上、関連規制ならびにサイト整備**など、得られる成果は総合的に原型炉計画の加速を可能とする。
- ・ 加えてDT燃焼装置は、**ブランケットからの熱取り出し試験の一貫として小規模な発電実験が技術的に可能であり、現行の原型炉計画の大幅な変更を伴わないまま、2030年代のフュージョン発電を可能**とする。

ここでDT燃焼装置の実現にあたっては、

- ・ 投入公的資金の最小化
- ・ 早期実現
- ・ 民間への技術移転
- ・ 産業基盤の育成と維持

等の観点から、民間を活用した上で、一定の期限と目標を設け、**様々な型の事業者間競争により達成するマイルストーンプログラム式支援**が選択肢となり得る。

NASA COTS (商業軌道輸送サービス)

2006年1月～2013年11月

- 民間企業による低地球軌道への貨物・乗組員輸送システムの開発支援プログラムであり、民間技術移転によりNASAコスト低減ならびに産業育成を図った。
- 当初20社以上の応募企業を2段階選抜で絞り込み、
1) マイルストーン方式 かつ 2) 50%以上民間負担 で開発支援

応募企業

SpaceX

Orbital Sciences/Orbital ATK

Andrews Space

SpaceHab

Rocketplane Kistler

SpaceDev

t/Space

Boeing

Lockheed Martin

第一段階選考

選定

×

選定

選定

選定

選定

×

×

×

第二段階選考

選定

×

×

×

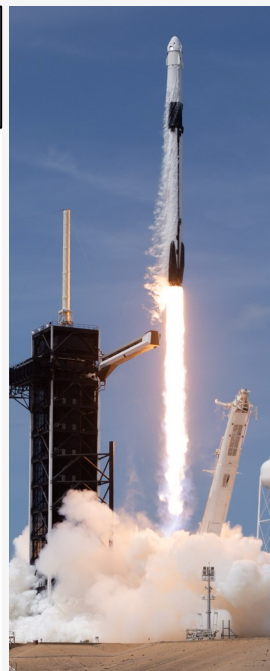
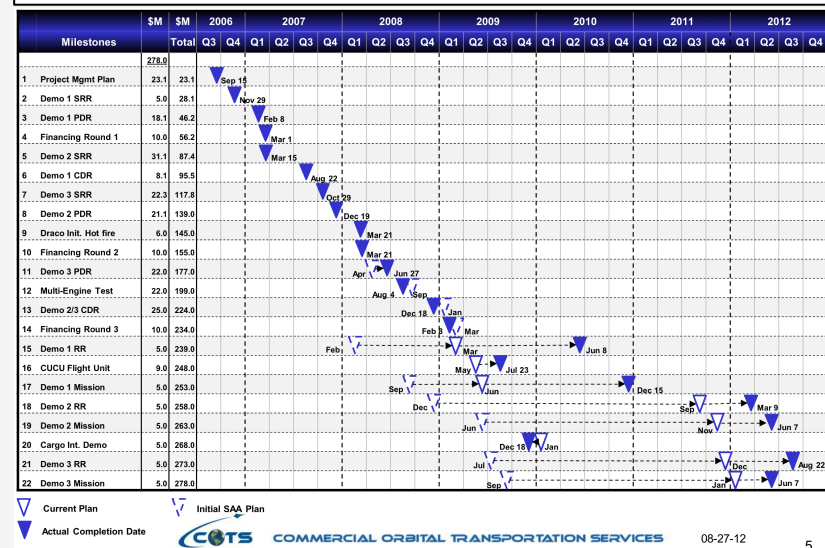
×

×

×

×

SpaceX社に設定されたマイルストーンと
マイルストーンごとの支払い額
(最終負担 Space X 454 百万ドル / 政府 396 百万ドル)



NASA CRS (商業物資輸送サービス)

2009年1月～2016年12月

- 国際宇宙ステーションへの貨物輸送のために輸送サービスを購入する標準調達契約
- COTSの選定企業に対して継続的な発注を行う

https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Lindenmoyer_%20COTS%20Summary%20%28ARPA-E%2010-23-2018%20R1%29.pdf より引用

社会から2030年代発電に向けたロードマップ検討を要請され、一方で原型炉の抜本的な見直しが難しい場合、2030年代の発電については官民連携で推進し原型炉戦略と補完させることは一つの方向性ではないか。

我が国においても、閉じ込め方式を限定せず民間に公募し、公的機関から技術移転しつつ、**特に基金を設けマイルストーン方式により発電実験を含むDT燃烧装置の2030年代の実現に向けた支援を検討する余地がある。**

米国DOEでは既に早期発電実証に向け、COTSをベンチマークとしたマイルストーン支援プログラムINFUSEが開始されている。

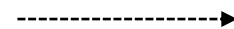
(参考) 米国NASA COTS

ターゲット：打ち上げ・運用まで

技術的な成熟度：高い

コスト負担：およそ公50%、民50%

知財：NASAからシェア



(参考) 米国DOE INFUSEプログラム

ターゲット：発電所の設計まで（後継は未定だがCOTS Phase2相当が構想）

技術的な成熟度：低い

コスト負担：公100%

知財：新規開発（民間使用权、公的に権限。バイドール法傘下）

民間を活用したDT燃烧装置の国内における建設は、ITERに育まれた産業基盤の維持と発展だけでなく、ブランケット試験、トリチウム燃料サイクルを含めたBOPのTRL向上が期待され、原型炉計画の加速に資する。

ITER/BA および
原型炉計画
公的資金・公的計画

+

**マイルストーン型支援
DT燃烧装置(発電実験)**
官民連携
発電早期実現・原型炉を加速

ムーンショット目標10
大学を主対象として
多様な研究を支援

SBIR
スタートアップ支援

2025

2030

2035

2040

2045

2050

従来：

原型炉計画

建設移行判断
(ITER燃焼試験後)

第1期目標
(前倒し目標)

第2期発電目標

提案：

マイルストーン方式により
競争的に支援

DT燃焼装置
統合実証施設

運転開始

発電実験

熱取り出し試験の一環として2030年代に実施

基盤技術施設
超伝導試験、中性子照射など

原型炉計画
連続安定稼働・大規模電源を目指す

建設移行判断
(ITERと並行して検討)

発電実証

(第1期目標を見直し前倒し)

多様な炉形式

ユースケースを示し他産業応用を含めた早期社会実装を目指す

ムーンショットによる多用途実証

スピノフ技術の早期社会展開

商用炉

原型炉戦略の加速に必要と考えられる制度上の施策

国家的視座からの推進	フュージョンエネルギー基本法を制定の上、基本計画を策定し、省庁横断による推進体制を確立。
規制体系の確立	原子力規制と異なる枠組みで規制されるフュージョンエネルギーについて、その詳細を専門家間で早急に議論。
ファンディングエージェンシー	官民連携を達成するファンディングエージェンシーの確立。 特に、NEDOがフュージョンを支援するために必要となる措置。
フュージョン産業支援	民間に発注を積極的に行いアンカーテナンシーとして産業基盤を維持。 関連技術のスピンオフによる早期マネタイズを支援。
フュージョン版シリコンバレー	自治体に対する支援を実施し、フュージョンエコシステムを育み、 フュージョン関連立地自治体の地方創生を実現。
人材の体系的育成	大学ネットワークによる総合的な教育プログラムを実施。 職業訓練としてのフュージョン周辺人材育成について、新たに検討。
投資を促す新制度	建設費用回収のリスク低減を目的とした、フュージョン向け減税など 新たな制度を検討。
責任ある体制	新法人を設立し、責任ある主体によってPJ推進。 基本法の制定による会議体の設置などを視野に議論。

人と社会に支えられたフュージョンに向けて

フュージョンエネルギーの実現には、科学技術に取り組む人材のみならず、装置や材料の研究開発を行う工学人材、そして実際の建設・製造に携わるものづくり人材まで多種多様な人材が必要となる。こうした人材を重層的に抱えることが国際競争における各国の競争力そのものである。

我が国も、米英に遅れることなく直ちにフュージョン関連分野で学位を有するコア人材と、フュージョンを実現に導く周辺人材の双方についての体系的な獲得ならびに育成を行う必要がある。

コア人材については、全国の大学ネットワークに予算を配分することにより、日本全国の大学が連携して実施する質の高い総合的な教育プログラムを実施するため必要な措置を取るべきである。

また周辺人材については今後数千名の人材が新たに必要であり、社会人を対象としたリカレント教育や企業におけるインターンシップ等の施策が必要である。こうした職業訓練としての性質をもつ周辺人材育成について、その実施主体、また枠組みを含め、新たに検討されるべきである。

加えてプラント運用に必要なオペレーターならびにレギュレーターについても、炉メーカーの支援の下、電気事業者と連携しつつ、体系的かつ戦略的に育成されなければならない。

英国政府は、フュージョンの実現に必要な人材を今後5年以内に最低3,000名、今後10年以内に7,000名と推計[1]し、UKAEAの下で体系的な育成プログラムを展開している。

Fusion Industry Programme



<https://careers.ukaea.uk/early-careers/fusion-industry-programme/>

UKAEAは、8週間のフュージョン業界におけるインターンシッププログラムを提供している。特に選抜された学生には生活費を支給。

3-Sci社 / AtkinsRéalis社/ digiLab Solutions社/ Full Matrix Ltd社/
Fusion Advisory Services Ltd社/ Fusion Energy Insights社/ IDOM
UK社/ nTtau Digital Ltd社/ openSPDM社/ Oxford Sigma社/ TAE
Technologies Inc社/ Tokamak Energy社/ Woodruff Engineering社/
Woodruff Scientific Ltd社 計25ポストが現在公募されている (2024
年6月3日現在)

Oxford Advanced Skills (OAS)



UKAEAはカルハムに広大な職業訓練施設を開設し、様々なレベルの技術者の職業訓練を実施している。

応募による訓練生の受け入れだけでなく、民間企業からの技術者の受け入れによるトリチウム取り扱い職業訓練を実施するなど、フュージョン関連におけるリスキリングも実地で実施されている。

フュージョン版シリコンバレーによる地域創生を

フュージョン研究成果はスピンオフとしての展開を含め、民間との共創関係の創出に資する大きなポテンシャルを秘めている。

そこで原型炉のサイト選定・整備にかかる議論を加速して行った上で、フュージョン・エコシステムの創出を日本各地に支援し、各地域におけるフュージョン関連産業の研究開発拠点の集積＝フュージョン版シリコンバレーの創出による地域振興を目指すことが重要ではないか。

原型炉早期実現を見据えた責任ある体制の議論を

原型炉は、研究開発のみならず、サイト整備、EPC（設計・調達・建設）、また建設後の保守運転に至るまで数十年に亘り数百社が関わるものが想定される巨大プロジェクトである。

新法人の設立を含め、責任あるプロジェクト管理を可能とする新たな推進主体の議論が必要である。新法人の下、民間への技術移転、アンカーテナンシーとしての業界支援、さらにファンディングエージェンシーとしての支援等が官民パートナーシップを通じ実効的に行われることを期待する。

英国政府は2024年5月にフュージョン発電所サイトのアセスメントならびに整備に係るconsultationの公募を発表し、40ページに亘り立地条件ならびに安全規制の論点を整理し公表している。



論点の要約

1. フュージョンエネルギー施設の計画プロセスは、他の複雑なエネルギー発電施設と同様で良いか？
2. すべてのフュージョン技術をNPSプロセスに含めるという政府の提案は妥当か？
3. フュージョンNPSプロセスにおいて、オープンサイトアプローチを取るという政府の提案は妥当か？
4. 容量に関係なく、英国の全てのフュージョンエネルギー施設をフュージョンNPSプロセスに含めるという政府の提案は妥当か？
5. フュージョンNSIPプロセスに熱・電気施設の両方を含めるという政府の提案は妥当か？
6. エネルギー法2023に規定されているフュージョンエネルギー施設の定義は、本NPSの目的上、フュージョンエネルギー施設とフュージョン研究施設を区別するのに適しているか？
7. フュージョンエネルギー施設の配備期限を設けないという政府の提案は妥当か？
8. フュージョンエネルギー施設の合理的な代替案を評価する際、開発者は他の要因を考慮すべきか？
9. 提案されている基準は、必要な面をすべて網羅しているか？
10. フュージョンエネルギー施設の立地適性を評価するアセスメントに追加プロセスはあるか？
11. 異なるフュージョン技術ごとに個別の基準を設けるべきか？
12. フュージョンNPSの実施モデル案は妥当か？

NPS – National Policy Statement
NPIS – Nationally Significant Infrastructure Projects

附属書2：核融合エネルギー施設の高レベル立地基準案

テーマ	基準
安全ならびにセキュリティ	洪水リスク
	主要な危険場所への近接
	民間航空機の動きに近い
	軍事活動に近接
環境保護	公道
	国際的に指定された生態学的に重要な場所
	国指定の生態学的に重要な場所
	アメニティ、文化遺産、景観に価値のある地域
運営上の必要条件	土地利用計画
	操業に必要な敷地面積
	適切な冷却源へのアクセス
	グリッド接続

(ご参考)

フュージョンエネルギー 産業エコシステムロードマップ2050

太陽の反応を地上で再現するフュージョンエネルギーは、クリーンで安全、かつ無尽蔵という特性を有する究極の脱炭素エネルギーである。世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置JT-60SAの初プラズマ生成（2023年10月）、米NIFによる初の正味エネルギー利得の達成（2022年12月）などは、人類がこの夢のエネルギー源の実現に今までになく近づいていることを示している。

現在、世界でフュージョンエネルギーの実用化に向けた国際競争が激化している。その将来的な市場規模は1,000兆円とも試算され、フュージョンは脱炭素・エネルギー安全保障のみならず、産業としても極めて大きな可能性を有している。

フュージョンエネルギー研究で先行し、世界に冠たるものづくり力を有する我が国には、この新たな国際市場において世界的シェアを確保し、新たな輸出産業へと成長させる「勝ち筋」が見えている。**フュージョンエネルギーは、近代以来エネルギーによる国富流出に苦しめられてきた我が国を、歴史上初めて「エネルギー黒字国」へと転じさせる可能性を秘めたゲームチェンジャーである。**

しかし、その勝ち筋が今まさに眼前で閉じつつある。フュージョン関連研究開発予算は米英中と比べて低い水準に留まり、また省庁を横断した実効的な支援も不十分である。結果として、フュージョン関連の特許数・論文数、またフュージョン関連民間投資といった指標において、既に我が国は諸外国に遅れを取っている。

令和5年4月に内閣府が発表した「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」は、国際協調から国空い競争へと移り変わる局面に対応し、我が国初の国家戦略として国内外に力強いメッセージを発信した。

そこで示された戦略の多くは、関係各所の迅速な働きにより既に実施され、または実施が計画されていることから、本戦略は既にその重要な役割を一定程度果たしたものと評価できる。

しかしその後の国際競争のさらなる激化、世界情勢の急速な変化は、常に我が国として未来を見据えねば世界から取り残され、この膨大な可能性を有する市場から取り残されることを意味する。

1969年、米国が当初不可能と思われた月面有人着陸を成し遂げた時、それを実現たらしめたのは政治主導による比類なきリーダーシップであった。果敢かつ速やかなる行動により、我が国も国家的見地からフュージョンの推進が必要である。

当報告は、国家的ビジョンに基づきフュージョンインダストリーへの我が国の取り組みを提言するものである。

国内外において、フュージョンエネルギーへの投資は増大の一途を辿る。これは、長年学術研究期にあったフュージョンエネルギーが、今まさに産業黎明期へと差し掛かっていることを示している。

産業化の進展にあたり、そのフェーズもまた10年単位で変化が見込まれる。我が国は、以下に示す見通しに基づき、長期的ビジョンをもった一貫性ある支援政策を打たなければならない。

学術研究期（従来）

ITER計画など実験装置を主な市場とし、**国際協調の性格が強い**。
市場規模は1,000億円程度。

産業黎明期（～2035年）

公的計画に加えて革新的な取り組みを行う民間企業による投資が活発化し、**国際競争が進む**。市場規模は数千億円規模に成長。

産業成長期（～2045年）

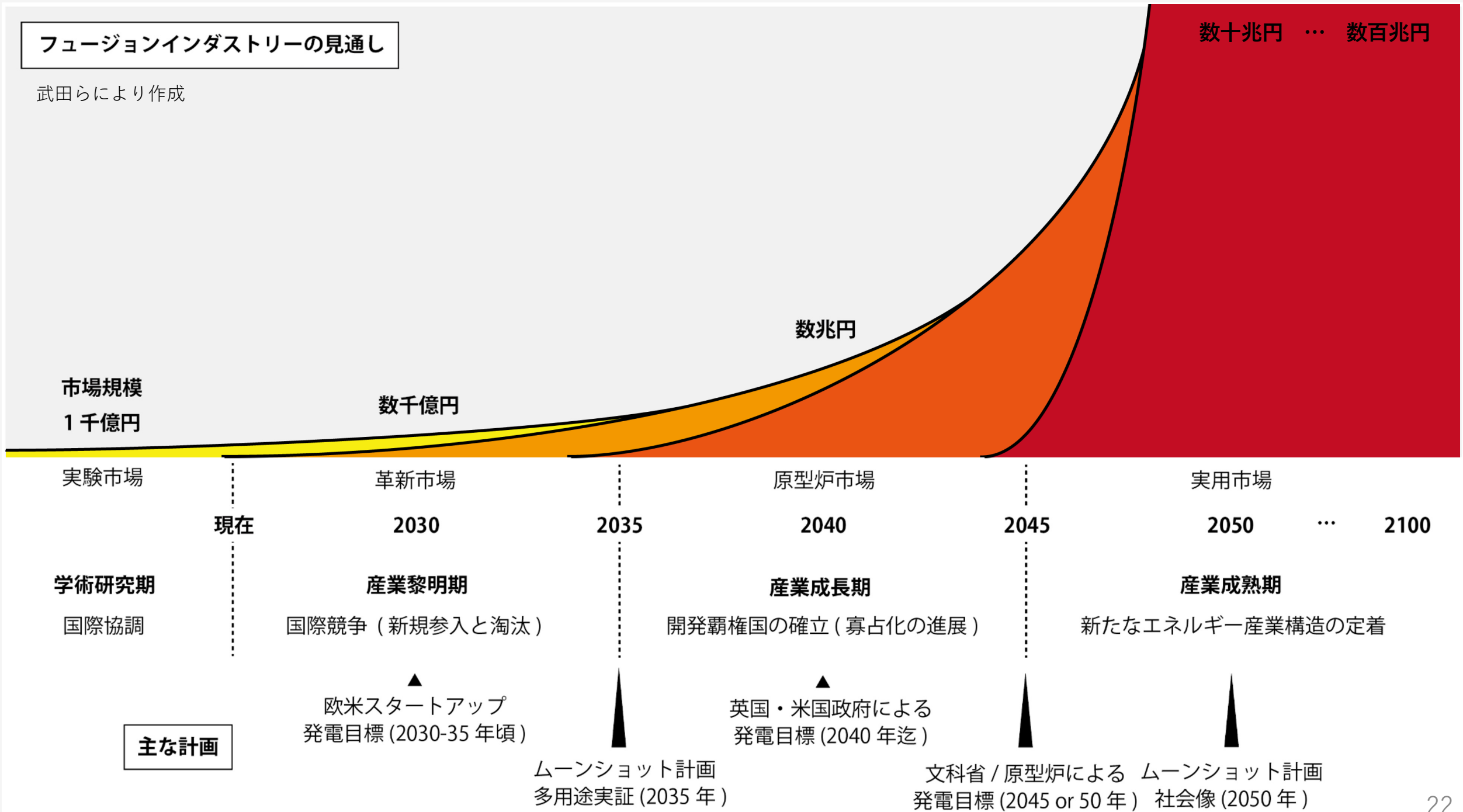
各国政府による発電所（原型炉等）の建設が進む一方、**プレーヤーの寡占化が進み**、技術覇権国家が数カ国に絞られる。市場規模は数兆円規模に達する。

産業成熟期（2045年～）

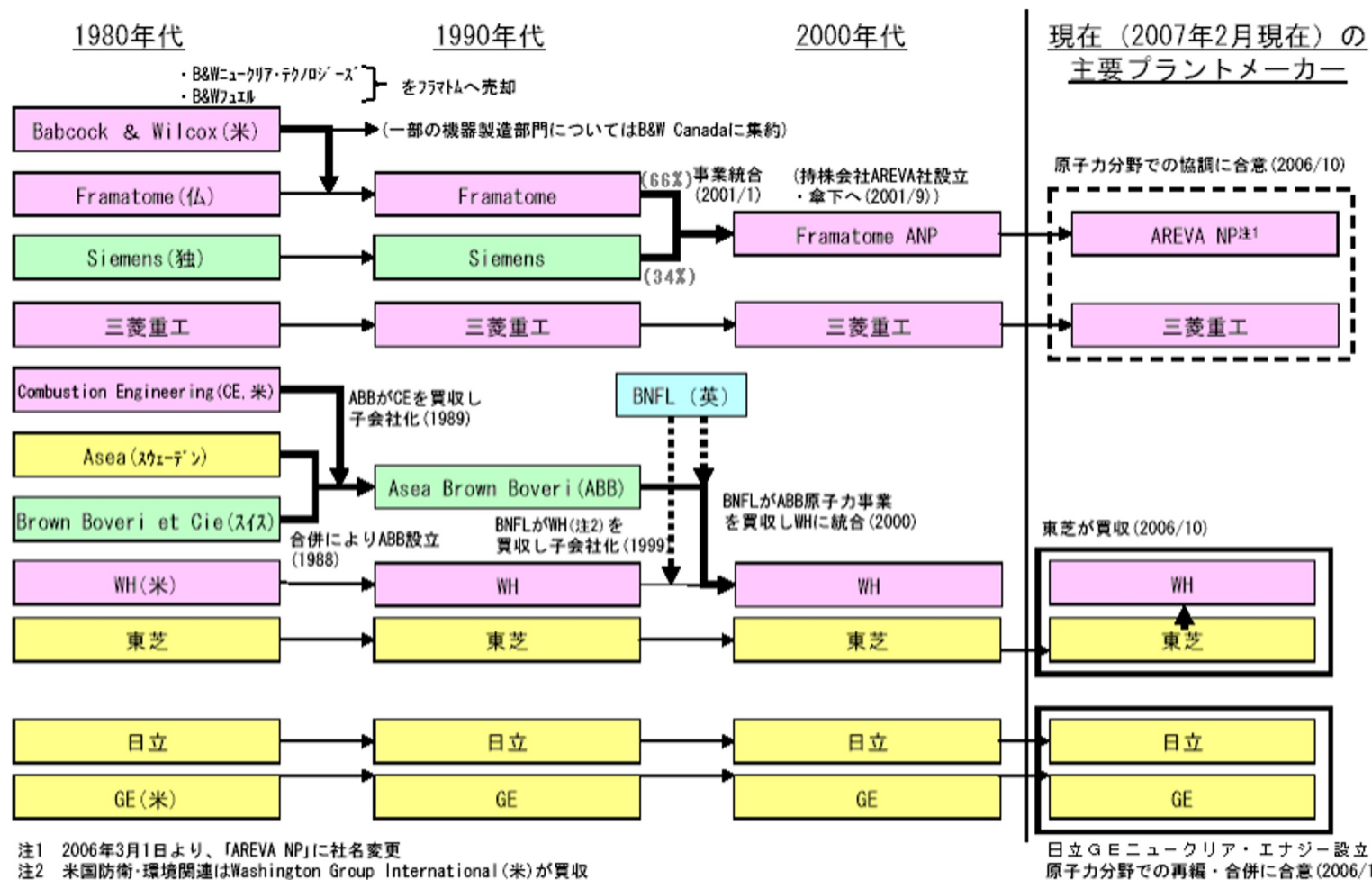
フュージョンが社会基盤をささえるエネルギー源としての地位を確立する。**世界的な基幹産業の一つ**として、数十兆円～数百億円市場に育つ。

フュージョンインダストリーの見通し

武田らにより作成



(ご参考) 原子力産業における国際寡占化 (1980年代～)



世界の主要なプラントメーカーの変遷

原子力業界では、1980年代においては国ごとにメーカーが独立していた。

しかしその後、統合が進み、国際的に連携したメーカーのみが生き残っている。

注1 2006年3月1日より、「AREVA NP」に社名変更
 注2 米国防衛・環境関連はWashington Group International (米)が買収

Framatome: フラマトム社(フランス) Siemens: シーメンス社(ドイツ) PWR中心 BWR中心 PWR・BWR両方あり
 GE: ゼネラル・エレクトリック社(米国)
 WH: ウェスチングハウス社(米国)
 B N F L: 英国原子燃料公社
 A R E V A 社: アレバ社。原子力産業複合企業体。傘下に原子力部門 (Areva NP)、原子燃料部門 (Areva NC)、送電設備部門 (Areva T&D)を持つ。

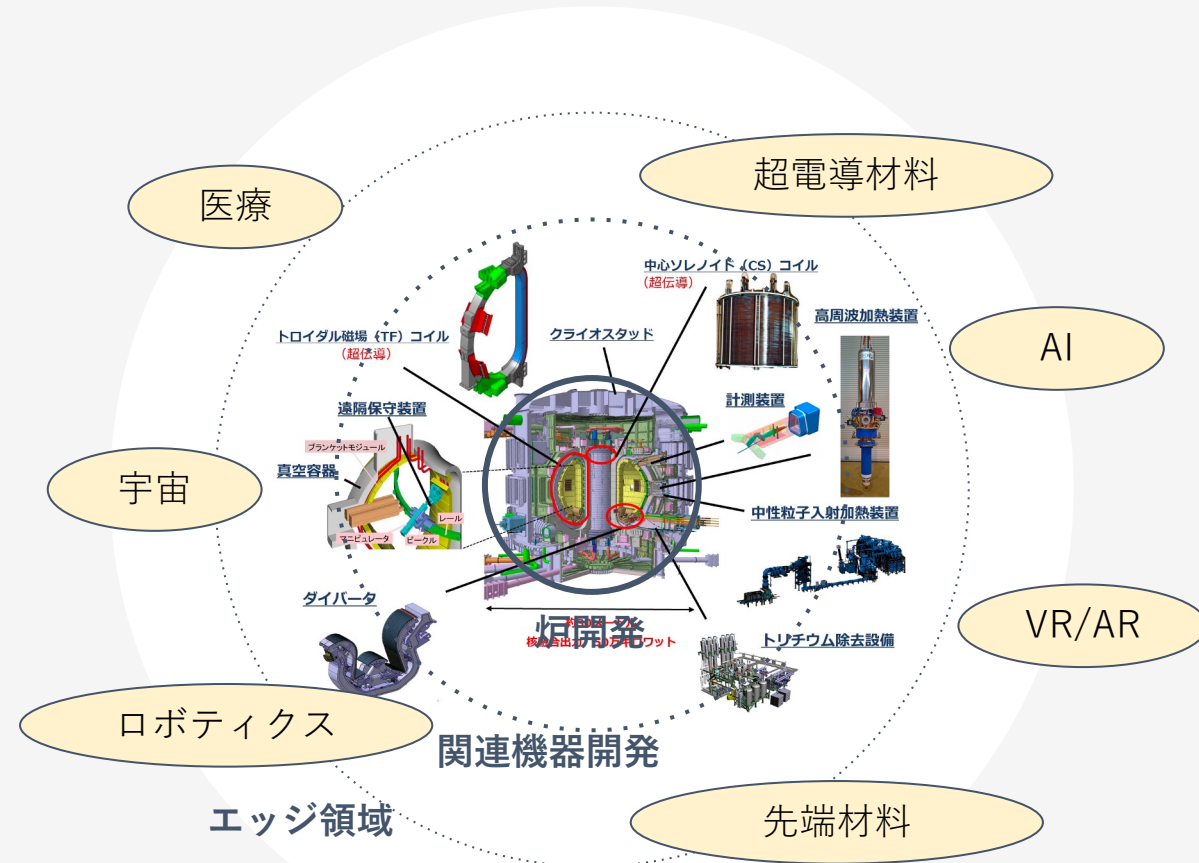
https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_04-01-01-03-02.html
https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_01-09-06-01-06.html
 より引用

フュージョンエネルギー実現に必要な各種機器の開発製造において、我が国のものづくり産業は世界的にも中核的な位置を果たしてきた。

こうした背景から、我が国にはフュージョンエネルギー関連機器のサプライチェーンが存在する。言い換えれば、**フュージョンエネルギーは、国内に多くの経済効果と雇用を創出する国産エネルギーである。**

国内にフュージョン発電所を建設した場合、その経済効果は5兆6百億円に上り、20年間でのべ230万人の雇用を創出すると推定される。これは、多くを輸入に頼らざるを得ない太陽光・風力といった再生可能エネルギーと大きく異なる点である。

加えて、核融合産業における研究開発は、医療、宇宙、ロボティクス、VR/AR、超電導材料、AIなど多岐に渡って先進産業の育成に貢献する。



(ご参考) フュージョン発電所の建設並びに20年間の運用がもたらす経済効果 (出力1.5GWのケース、九州大学武田による試算)

建設ならびに運用に必要な費用：
(QST日渡およびHelical Fusion後藤による試算) 2兆4,623億円

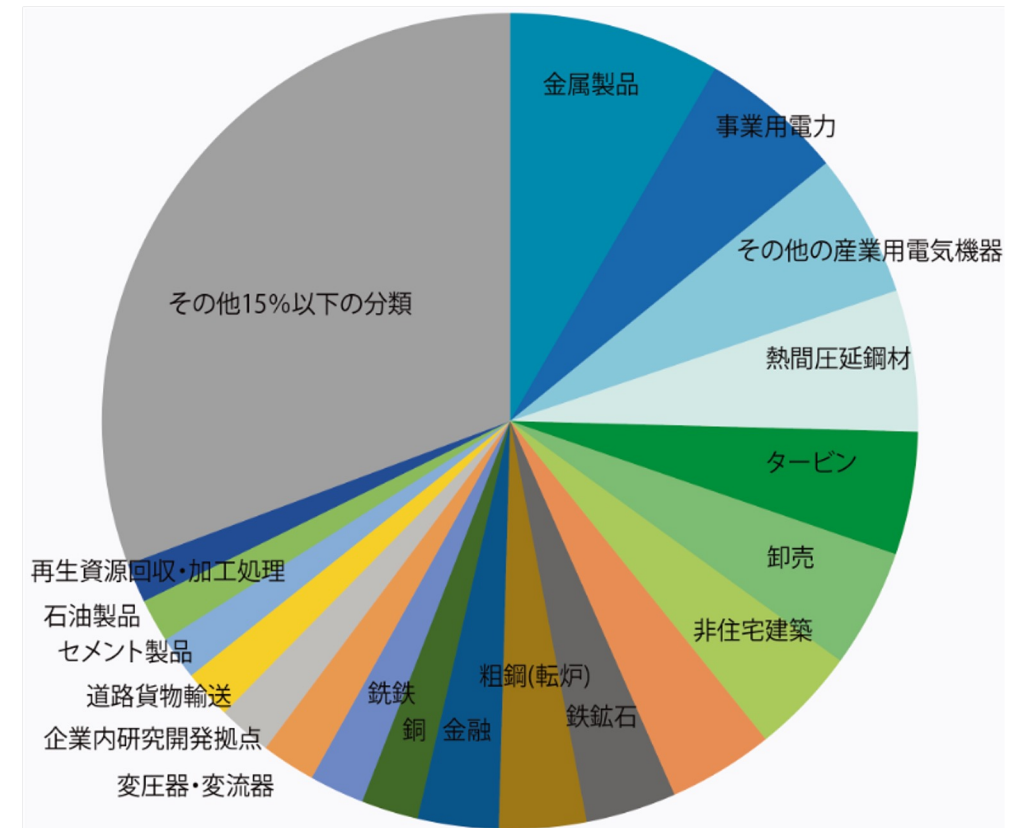


国内産業に生じる経済波及効果： 5兆640億円

国内において創出される付加価値額 3兆3,800億円
特に 所得増加分 1兆7,800億円

建設および20年間の運用で生じる雇用 のべ230万人・年

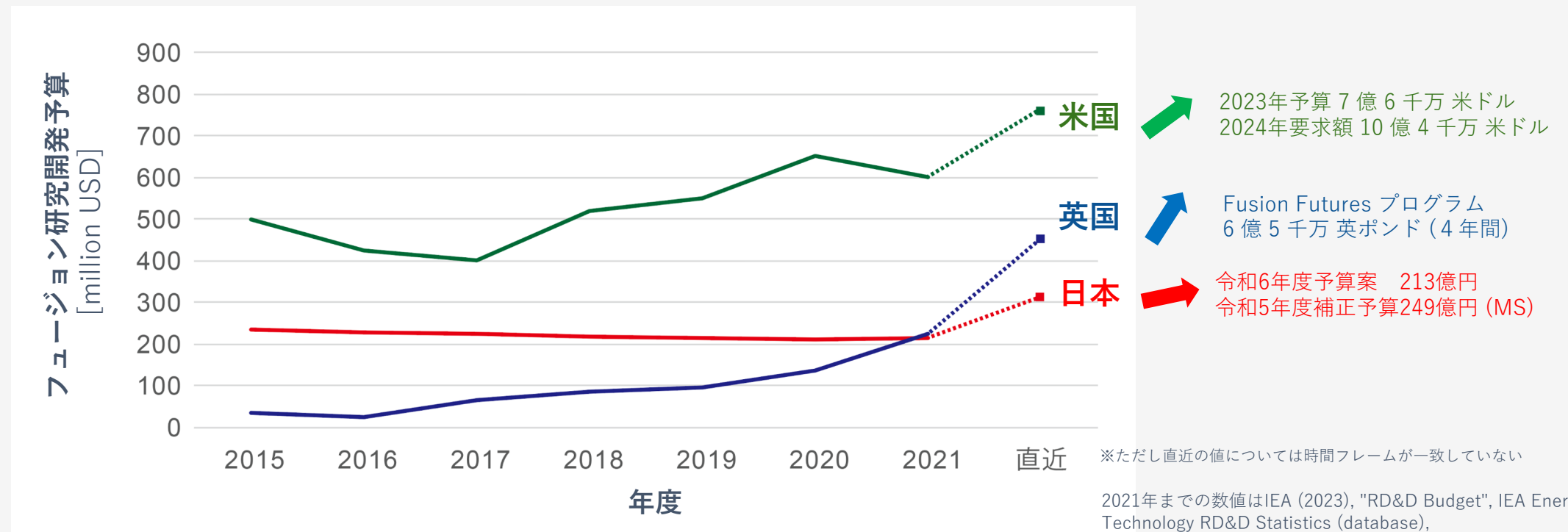
- 経済波及効果のうち77.9%が日本で生じており、日本への受益が大きい。
- 産業としては、金属製品(8.4%)、事業用電力(5.7%)、産業用電気機器(5.7%)、鋼材(5.6%)などセクターへの受益が大きい。



我が国産業振興の観点から、フュージョン発電所の建設並びに運用には大きな経済的メリットが存在する。

フュージョンインダストリーの成長を予見する各国政府は、既に自国への技術の囲い込みを開始するとともに、関連予算を増額することにより重点的な産業化支援政策を展開している。

我が国におけるフュージョン関連予算は長年横ばいであったがR5補正において462億円に増補。しかし同時期に、**米国は1,500億円の予算を要求し、英国もまた1,200億円のパッケージを発表した。**これにより、**我が国のフュージョン関連予算は相対的に見劣りする水準に沈んでいる。**



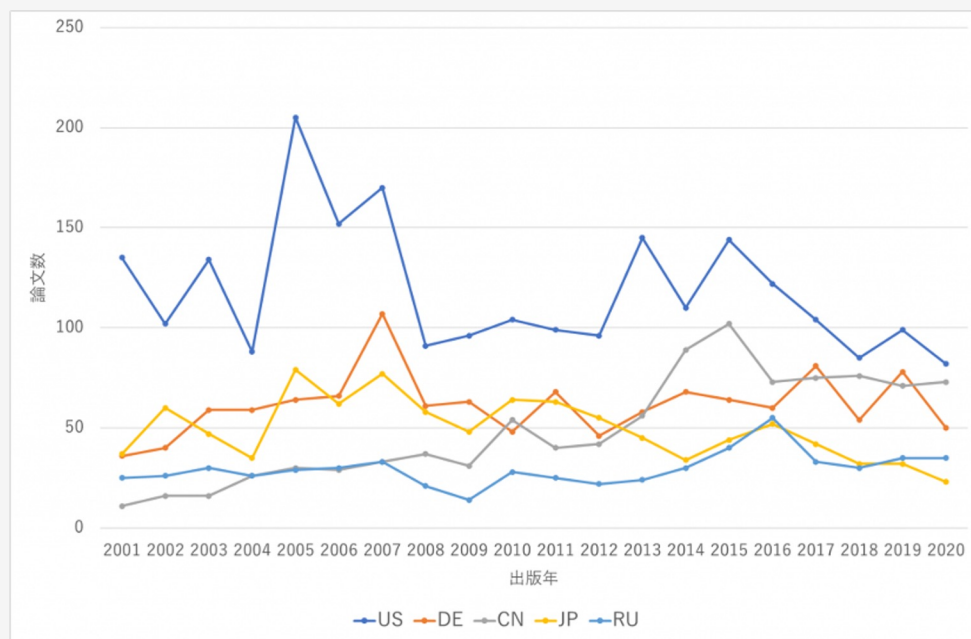
2021年までの数値はIEA (2023), "RD&D Budget", IEA Energy Technology RD&D Statistics (database), <https://doi.org/10.1787/data-00488-en> に基づく

国際競争の競争力の原点が、フュージョン分野における研究開発力にあることは疑いがない。

我が国は長年、フュージョン分野における研究開発で世界をリードしてきた。

しかしここ20年間で、関連特許出願数は2001年の1位から2020年に4位（中国1位）まで、論文数は2001年の2位から2020年に5位（米国1位）にまで低下しており、**地盤沈下は顕著である。**

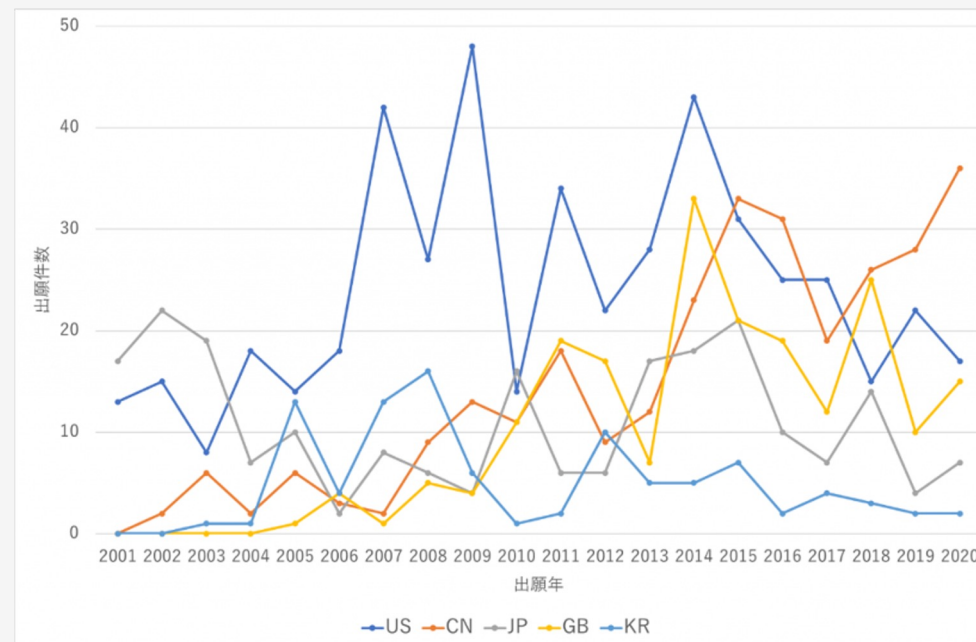
核融合に関連する論文数の推移



米国 1 位

日本 5 位

核融合に関連する特許数の推移



中国 1 位

日本 4 位

産業化への動きの一翼を担うのが、フュージョンエネルギーに取り組む挑戦的なスタートアップの数々である。

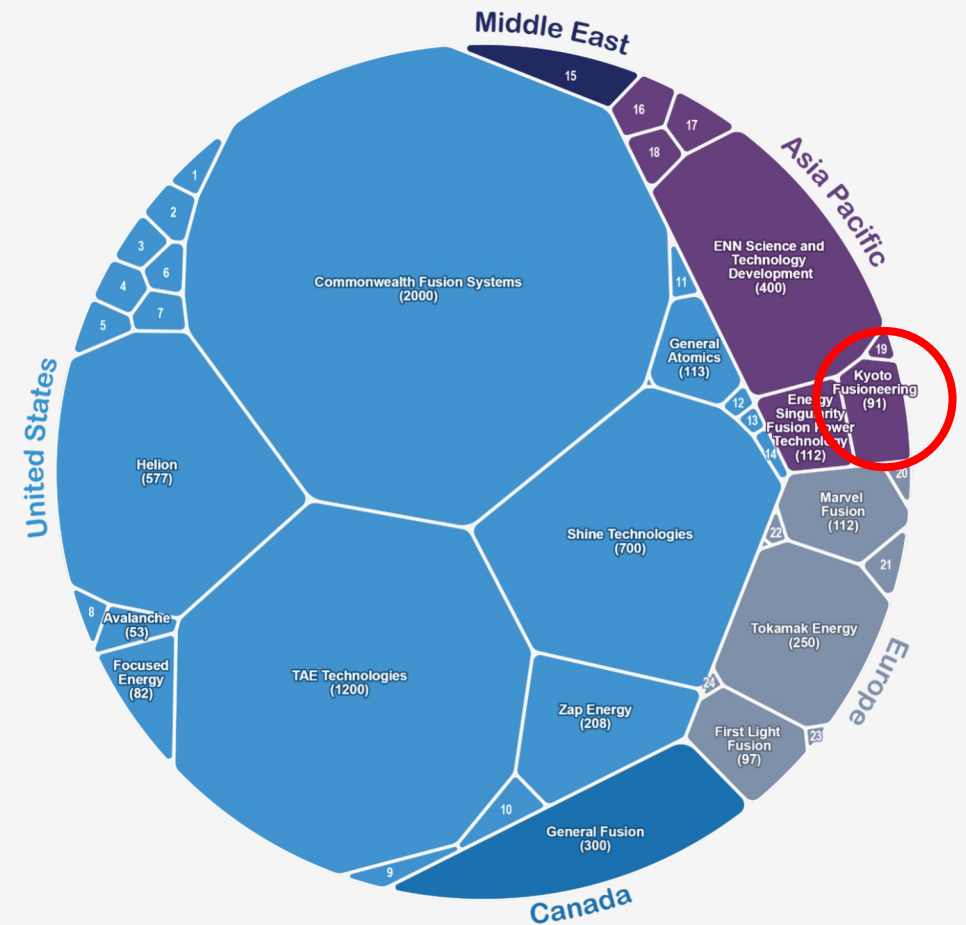
機運の高まりを受け、フュージョンに取り組むスタートアップは増加の一途を辿り、現在世界に50社以上が存在する。

こうしたスタートアップへの累計投資額は1兆円に迫る勢いである。米国では2021年、初めて民間からの投資が政府予算を上回り、業界に新たな活力を与えた。

世界的な流れにあって我が国にもフュージョンスタートアップが複数社誕生したものの、その資金調達額は合計で150億円程度に留まり、**諸外国のスタートアップと比べて桁で小さい資金力しか有していない。**

フュージョンスタートアップの資金調達額

その大部分が米国企業であり、我が国企業の調達額は僅か



Fusion Energy for Canada (2023) より引用

背景の骨子

市場

学術研究期から産業黎明期へと移り変わりつつあり、市場は既に数千億円規模。今後、2040年代に数兆円規模をへて最終的には1,000兆円規模まで成長する可能性を有し、付随する経済効果ならびに雇用創出効果もまた膨大である。

産業

国際競争が始まっており、覇権国となることを目指し、各国が経済安全保障の観点から自国サプライチェーンの発展に注力を始めている。

政府予算

我が国におけるフュージョン関連予算は長年横ばいであったものがR5補正予算において増補された。しかし1,000億円規模の米国・英国予算と比較すると未だ見劣りする低い水準にある。

研究力

我が国のフュージョン関連論文数・特許数は地盤沈下し、米英中に遅れを取りつつある。

民間投資

我が国でも複数のフュージョンスタートアップが設立され、150億円を超える民間資金が流入する一方、同期間に世界の投資は1兆円に上り、その差は歴然である。

英国は、2040年のフュージョン発電の実現を国家戦略とし、立地の選定を終え、バックキャストによる政策を次々と打ち出している。中国も国家プロジェクトとして、2030年代の発電に向け大規模な建設プロジェクトを急ピッチで進めている。

一方我が国の発電開始目標は2045年と、米英中から5～10年間遅れたままである。

この5～10年の遅れは、産業競争力ならびにサプライチェーン構築の観点から埋められない差を産む。**将来の日本の産業界の立ち位置が、下請けとなるのか、プレーヤーとなるのかの分水嶺である。**

供給される研究開発資金の観点からも、公的資金（我が国 約400億円 vs. 米英 約1,000億円）ならびに民間資金（我が国 約150億円 vs. 米英 約1兆円）の双方で我が国は大きく見劣りし、今後さらに研究開発競争に取り残されていく可能性も否めない。

我が国が国際競争を勝ち残るには、トップダウンによる、諸外国に伍する時期の発電開始を目指した強力な政治リーダーシップが今まさに必要である。

"We choose to go to the moon. 我々は月に行くことを自ら選んだ."

新規プレイヤーの参入と淘汰が繰り返される国際競争において、我が国がまず注力すべきは人材育成、フュージョン分野の研究開発力、そして輸出競争力の世界水準への向上である。この観点から以下の3目標を2030年までに達成する。

研究開発を支える人材の育成：

フュージョン分野におけるコア人材300名、周辺人材3,000名の育成を達成する。
(参考：英国Fusion Skills Programme 2,200名育成/5年)

研究開発力の首位奪還：

フュージョン研究の分野において論文数・特許出願数ともに世界首位を達成し、再び我が国として研究力世界トップの座を奪還する。

関連製品の輸出競争力強化：

フュージョン関連機器市場において世界シェア5割を達成する。

国際競争が激化する産業成長期において、我が国がフュージョンインダストリーの創出において主導的立場を確保するため最も重要な国家目標は、諸外国に先んじて我が国がフュージョン発電を実施するビジョンならびにロードマップである。

フュージョンによる早期発電の達成：

2040年までのフュージョン発電の達成を新たなフラッグシップ目標として掲げることを提言する。

このために必要となる研究開発についてバックキャストで策定し、必要に応じ新施設の建設を含めたあらゆる手段を講じるべきである。

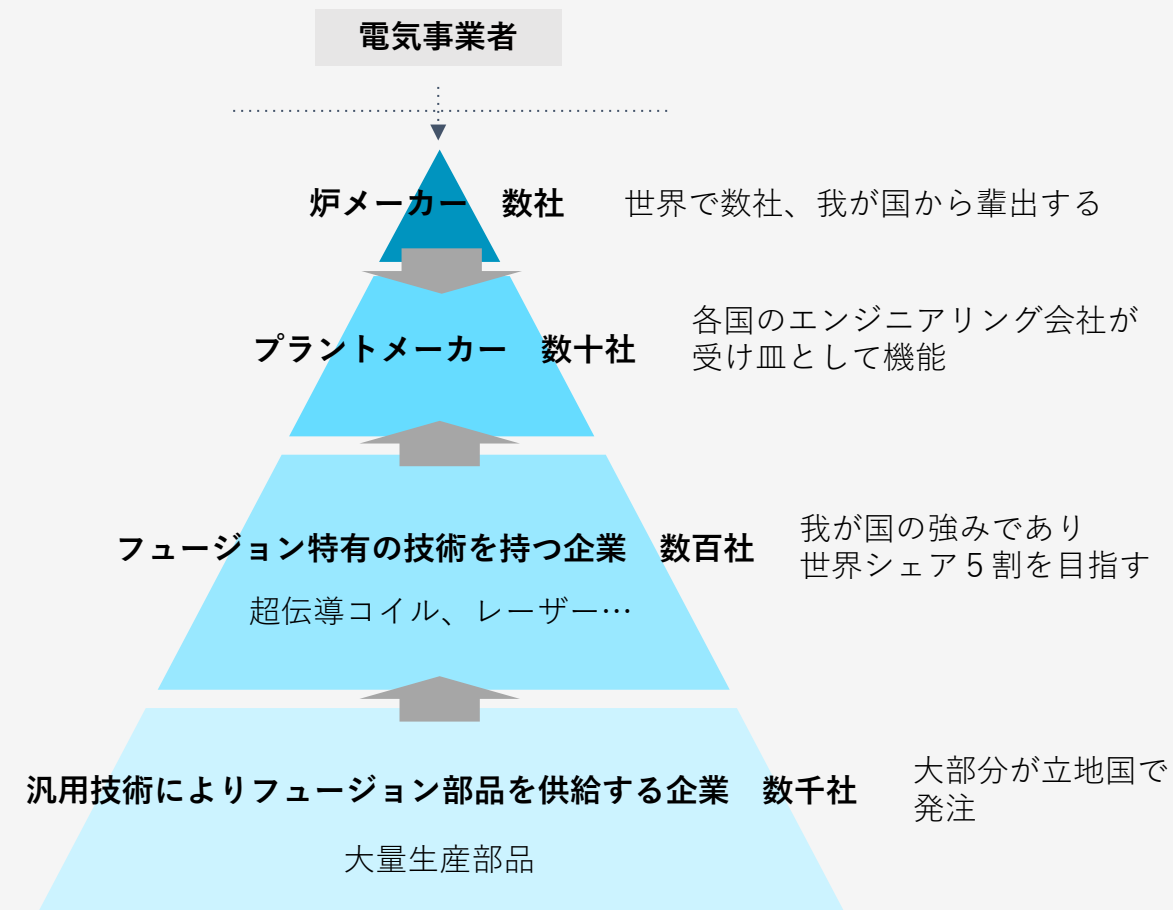
産業成長期では、市場が拡大する一方で、少数のプレーヤーがサプライチェーンを取りまとめる寡占化が同時に進行する。

日の丸フュージョン炉メーカーの輩出：

フュージョンエネルギーを我が国の次なる輸出産業へ育成するためには、サプライチェーンの上流に位置するプレーヤーを我が国から一社でも多く輩出する必要がある。

このためフュージョン関連技術を持つ企業に限らず、高度な知財に保護されたフュージョン炉心技術を提供する「フュージョン炉メーカー」を我が国から輩出し、サプライチェーンの中核たる地位を築くことを目標とする。

フュージョンサプライチェーン



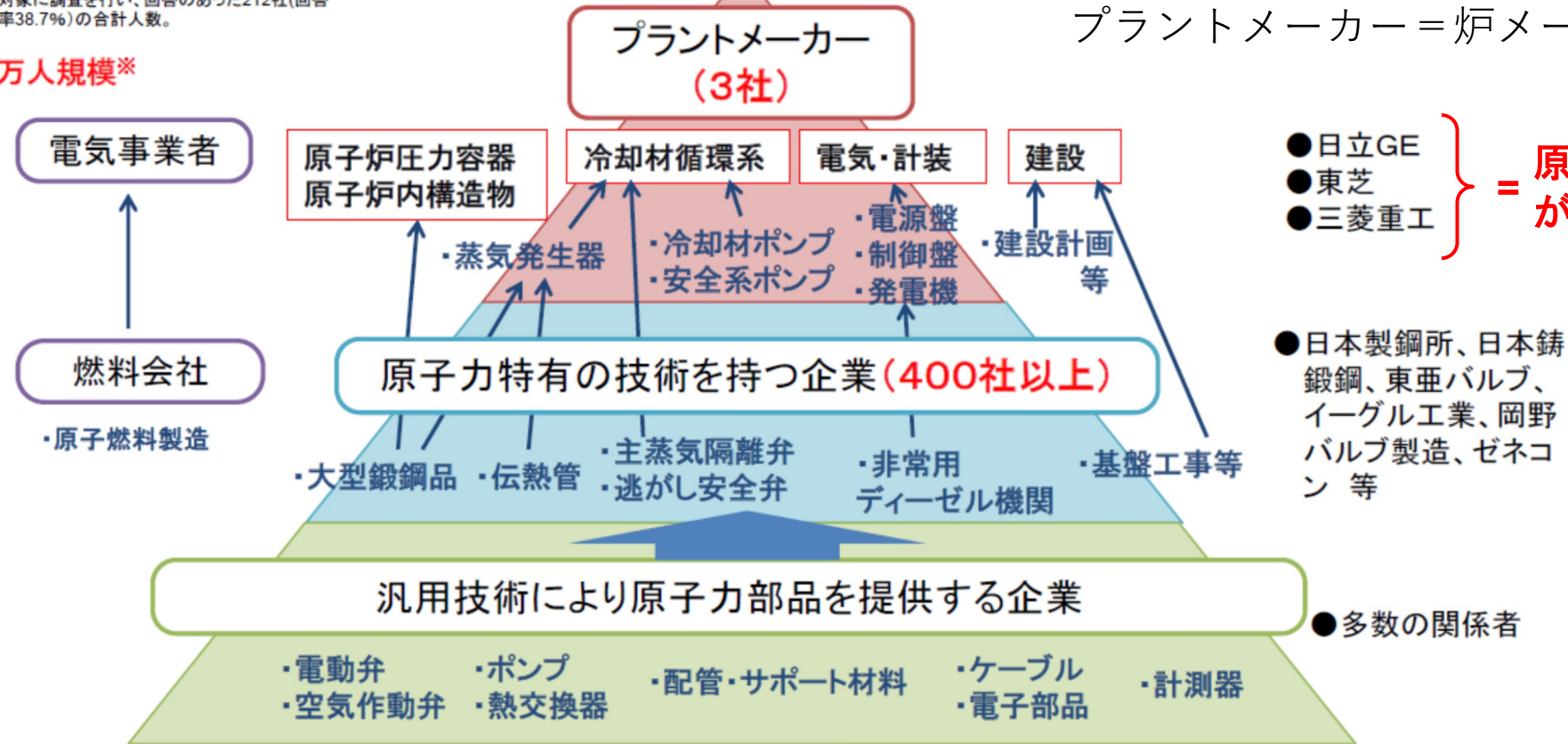
(ご参考) 原子力発電のサプライチェーン構造

画像は <http://www.aesj.or.jp/~snw/sympo/sympo2021/5symp-shiryo2-snw.pdf> より引用

※ 社団法人原子力産業協会「原子力発電に係る産業動向調査2010報告書」より会員企業及びその他の原子力関連企業合計547社を対象に調査を行い、回答のあった212社(回答率38.7%)の合計人数。

約5万人規模※

原子力発電のサプライチェーン



原子力業界においては、プラントメーカー＝炉メーカーであった。

第47回原子力委員会定例会(H24.10.30)資料1-1を一部修正

一方、設計に高い専門性が要求され、かつ要素技術が知財で幾重にも保護されたフュージョンエネルギーについては、炉心技術ならびに設計を提供する「フュージョン炉メーカー」がバリューチェーンの最上流に位置する可能性がある。

開闢以来エネルギー資源の欠如に苦しんできた我が国は、第二次世界大戦を皮切りに、近代史において数多くの不利益を被ってきた。

しかしながら、海水から無尽蔵に燃料が採取可能なフュージョンにおいて、価値を産むものは燃料資源でなく高度な科学技術力であり、その利得は燃料産出国でなく装置製造国に流入する。これは、エネルギーが「地」政学から「知」政学へと転換することを意味する。

我が国をエネルギー黒字国に：

産業成熟期においては毎年数基～数十基の建設需要がコンスタントに生じ、その市場規模は数百兆円に達する。これは、今日の自動車産業に相当する規模である。我が国が自動車産業におけるリーダー国を維持しているように、フュージョンインダストリーにおいてもリーダー国の地位を獲得することで、年数十兆円の新たな貿易収支の稼ぎ頭へと育成する。

フュージョンの実現によりエネルギーが「知」政学となった社会において、我が国として毎年数十兆円のフュージョン関連輸出を行うことでエネルギー関連貿易収支を黒字化し、歴史上初めて「エネルギー黒字国」と成ることを目指す。

目標の骨子

人材の育成（～2030年）

フュージョン分野におけるコア人材300名、
周辺人材3,000名の育成を達成する。

研究首位の奪還（～2030年）

フュージョン研究の分野において論文数・特許出願数世界
シェア首位を達成し、世界トップの座を奪還する。

輸出競争力強化（～2030年）

フュージョン関連機器市場において世界シェア5割を達成する。

早期の発電実現（2040年）

諸外国に先駆け、2040年にフュージョンによる発電を実現する。

サプライチェーン最上流の 確保（～2040年）

フュージョン炉メーカーを輩出し、サプライチェーンの中核たる
地位を築くことによりフュージョン関連輸出を振興する。

エネルギー黒字国への転換 （～2050年）

フュージョン関連輸出を我が国の基盤産業とすることで、
エネルギー関連国際収支を近代以来で初めて黒字化する。

国家的視座からの推進を

フュージョンエネルギーの推進は科学技術のみならず、フュージョン分野での覇権の獲得による産業の創出、輸出競争、経済ならびにエネルギー安全保障という国家的視座に基づいて行われなければならない。

特に、国家としてのフュージョンエネルギー研究開発の基本方針、総合的な施策と計画は、安全保障を含めた上記の国家的視座から定期的に見直されるべきである。

そのためには、フュージョンイノベーション戦略において示される通り、内閣府が司令塔機能を担い、真に省庁を横断した推進体制を構築することが必要不可欠である。

したがって、フュージョンエネルギー推進法を閣法で制定し、内閣府に司令塔組織と、文部科学省、経済産業省、資源エネルギー庁、環境省をはじめ関連省庁により構成される実務者級のチームを組織し、フュージョンエネルギー基本計画を策定することで、実効性のある省庁横断政策を実施するべきである。

世界に先駆けた発電達成を

フュージョンの安全保障上、産業振興上の重要性を鑑み、バリューチェーンの最上位を我が国が押さえる観点から、発電目標について、2040年への前倒しの検討を行うべきである。前倒しのため必要となる技術的な議論について、文部科学省の下で直ちに着手すべきである。

発電早期実現の観点からは、炉心プラズマの研究のみならず、発電に必要となるBOP（炉心以外の冷却ループ、熱交換器、燃料系、発電系などの周辺機器類）の研究開発が急務である。既に中国はBESTにおいて統合試験を計画する。また米国でもまたフュージョン炉心から中性子照射、燃料サイクルを一貫して試験するFIRSTと仮称される新施設の議論が行われている。

こうした国際的な潮流にあって我が国も、現状で設計可能な水準のトカマク炉を炉心として用いる、トリチウムを用いたDT燃焼試験を実施可能な新たな試験施設の設計に着手するべきである。

本施設の設計にあたっては統合的なDT燃焼試験の実施を主眼とし、稼働率、Q値、TBR等についてはこれを目標としないことで設計難度の低下を図り、2035年頃の稼働を目指すべきである。

(ご参考) 日本版FIRST (トカマク統合実証施設)

我が国では実際の燃料を使ったプラズマ燃焼は実施されたことがなく、世界でもまだ熱取り出しは行われたことが無い。

現状の科学的知見で設計・建設可能なトカマクにより、我が国初のDT燃焼プラズマを達成。ブランケット試験（熱/T取り出し）、材料試験（中性子）を実施し、原型炉を早期実現。

	JT-60SA	日本版FIRST	原型炉 JA-DEMO
サイズ感のイメージ			
装置の規模 (大半径)	3 m	3 - 4 m	8.5 m
DTプラズマ燃焼	使わない	燃焼を行う	燃焼を行う
稼働率・TBR	要件としない	要件としない	安定稼働・燃料自己充足
熱/Tの取り出し	行わない	BLK試験を行う	行う
フュージョン出力	なし	定常 $Q \sim 1$ / 数十MW程度	$Q = 17.5 / 1,500 \text{ MW}$
発電	なし	実験的にパルスで少量	定格出力 & 連続発電
		5,000 億円程度	2 兆円程度

提言ロードマップ

2025

2030

2035

2040

2045

2050

従来：

原型炉戦略

建設移行判断
(ITER燃焼試験後)

第1期目標
(前倒し目標)

第2期発電目標

提言：

日本版FIRST
トカマク
統合実証施設

現状で設計建設
直ちに着手

運転開始

発電実験

熱取り出し試験の一環として実施

基盤技術施設
中性子源、HTS
試験など

原型炉計画
連続安定稼働・
大規模電源を
目指す

建設移行判断
(ITERと並行して検討)

発電実証

(第1期目標を見直し前倒し)

多様な炉形式

ユースケースを示し他
産業応用を含めた早期
社会実装を目指す

ムーンショットによる多用途実証

スピノフ技術の早期社会展開

商用炉

世界トップレベルのフュージョン規制体系の確立を

フュージョンは原子力と異なる技術であることから異なる安全規制が必要となるが、この規制体系の考え方が国から示されないままでは、民間企業の参入が促進されず産業の創出も成されない。

またトリチウムを用いた燃焼試験の実施のためにも、規制が早期に確立されることが不可欠である。

米国・英国は既に昨年、原子力規制とは異なる規制の枠組みで、フュージョン規制を位置付けることを示した。この判断は、規制がこれらの国におけるフュージョンの産業化の障壁となる懸念を払拭し、米英における民間投資を呼び込んでいる。

我が国でもまた、核融合エネルギーの利用方法の視点、放射線リスクポテンシャルの視点から、内閣府が司令塔となり早急に原子力基本法をはじめ国内特有の規制上の課題を洗い出し、米英と同様にフュージョン規制を原子力規制と異なる枠組みで対応することが可能であるか否かを、国として早急に示さなければならない。

このため関連する各種学協会（プラズマ・核融合学会、機械学会、レーザー学会、日本電気協会ほか）、日本学術会議などにおける専門家の議論を活用すべきである。

研究力首位奪還を達成するファンディングを

我が国フュージョン業界の最大の問題の1つは、ファンディングの欠如である。米英に伍する1,000億円規模の予算投入を行い、世界トップレベル人材の獲得および育成、研究環境の改善、知財戦略に投資することで、研究開発力の世界首位奪還を達成せねばならない。

課題となるのが、フュージョン分野におけるファンディングエージェンシーの不在である。

エネルギー分野におけるファンディングエージェンシーとして新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)等がある。現状、NEDO法「原子力に係るものを除く。」がフュージョンを含むか否かの解釈が定まらないために、NEDOがフュージョンを支援できない状態が続いているが、NEDOがフュージョンエネルギーを支援するために必要となる措置を講じるべきである。

また、基金の設立、QSTが核融合に関する民間投資を行うために必要な法改正ならびに組織体制の増強を行うことも、ファンディングエージェンシーの選択肢となり得る。

その上でファンディングエージェンシーを通じ、社会実装に向けた投資、官民パートナーシップの推進、特許出願などの支援、また成果に応じて段階的かつ長期的に補助金を付与する枠組みなど、我が国のフュージョン研究力の首位奪還と市場シェアの確保に直ちに動くべきである。

ITERに育まれたフュージョン産業の離陸支援を

ITER計画は、フュージョン業界における事実上のアンカーテナンシー（政府による業界基盤の安定化を目的とした長期的な購入計画）としての役割を長年果たし雇用維持に大きく貢献した。

しかし、各国がそれぞれの計画に注力する現状は、早期に我が国も独自プロジェクトを開始せねば、過去数十年に亘り維持されてきたフュージョン人材が失われることになりかねない。

そこで、上で提唱された日本版FIRST（トカマク統合発電実証施設）の建設など、国もしくは研究機関が主体となって民間に発注を積極的に行っていくことで、新たなアンカーテナンシーとして、ITERから切れ目なく国内フュージョン産業育成を行うべきである。

加えて、産業基盤構築の観点から、フュージョンに取り組む企業が関連技術をスピンオフして市場展開することを政府として支援するべきである。これにより早期のマネタイズを実現することで、フュージョン産業拡大の分水嶺を諸外国に先立って構築する。特に高温超電導材料やレーザー技術、セラミック複合材料など、幅広い産業応用が見込まれる技術については、経済産業省を中心に知財化支援や輸出支援を進め、従来のフュージョン政策の境界を超えて産業化を支援するべきである。

フュージョン版シリコンバレーによる地域創生を

長年のフュージョン研究成果は我が国の宝であり、スピンオフとしての展開を含め、フュージョン研究成果は民間との共創関係の創出に資する大きなポテンシャルを秘めている。

加えてQSTや大阪大学レーザー研究所などでは保有する装置の開放の取り組みも進んでいる。

そこで、自治体に対する支援を実施し、フュージョン・エコシステムの創出を日本各地に支援すべきである。これは国内外企業の誘致ならびに地域産業振興、すなわち各地域におけるフュージョン関連産業の研究開発拠点の集積に繋がり得る。

各自治体と協力の上で、特に「場」「繋がり」「人材」「資金」についてはフュージョンエネルギー産業協議会に対し、「装置」についてはITER関連インフラの大学・民間への開放を含めQST他に支援を要請することで、実効的なフュージョン・エコシステム創出を達成すべきである。

これにより、我が国に「フュージョン版シリコンバレー」を誕生させ、長期的な研究開発上の地位向上を図るとともに、フュージョン関連立地自治体の地方創生を実現する。

人と社会に支えられたフュージョンに向けて

フュージョンエネルギーの実現には、科学技術に取り組む人材のみならず、装置や材料の研究開発を行う工学人材、そして実際の建設・製造に携わるものづくり人材まで多種多様な人材が必要となる。こうした人材を重層的に抱えることが国際競争における各国の競争力そのものである。

我が国も、米英に遅れることなく直ちにフュージョン関連分野で学位を有するコア人材と、フュージョンを実現に導く周辺人材の双方についての体系的な獲得ならびに育成を行う必要がある。

コア人材については、全国の大学ネットワークに予算を配分することにより、日本全国の大学が連携して実施する質の高い総合的な教育プログラムを実施するため必要な措置を取るべきである。

また周辺人材については今後数千名の人材が新たに必要であり、社会人を対象としたリカレント教育や企業におけるインターンシップ等の施策が必要である。こうした職業訓練としての性質をもつ周辺人材育成について、その実施主体、また枠組みを含め、新たに検討されるべきである。

加えてプラント運用に必要なオペレーターならびにレギュレーターについても、炉メーカーの支援の下、電気事業者と連携しつつ、体系的かつ戦略的に育成されなければならない。

フュージョン社会実装への投資を促す新制度を

我が国の経済安全保障に資するところの大きいフュージョンエネルギーであるが、高額となるプラント建設においては財源の議論が不可欠であり、ここでは民間からの投資・融資の導入が鍵を握る。

そこで、民間資金の呼び水とするため、建設費用回収のリスク低減を目的としたフュージョン向け固定価格買い取り制度ないしは長期脱炭素電源オークション制度等の導入を検討するべきである。

さらに、発電のみならず、フュージョンによる燃料製造や医療応用など多様な成果物を対象とした価格差に着目した支援制度（サプライチェーン支援制度）についても併せて検討することで、多様な社会実装に向けた民間投資・融資を呼び込むべきである。

こうした施策により、政府予算のみならず幅広い民間資金の活用により、フュージョンの社会実装を目指さなくてはならない。

原型炉早期実現を見据えた責任ある体制の議論を

原型炉は、研究開発のみならず、サイト整備、EPC（設計・調達・建設）、また建設後の保守運転に至るまで数十年に亘り数百社が関わるのが想定される巨大プロジェクトである。

特に、日本版FIRST（トカマク統合発電実証施設）の建設着手にあたっては、民間企業との官民連携を通じたプロジェクト推進が不可欠である。フュージョン推進のみをミッションとした新法人の官民連携での設立、JVの設立等を含め、責任あるプロジェクト管理体制を可能とする新たな推進主体の議論が必要である。

新法人の下、民間への技術移転、アンカーテナンシーとしての業界支援、さらにファンディングエージェンシーとしての支援等が官民パートナーシップを通じ実効的に行われることを期待する。

さらに、激化する国際競争環境と、我が国経済ならびに安全保障においてフュージョンエネルギーが果たす重要性を鑑みれば、基本法の制定による戦略本部の設置などよりハイレベルな推進体制への移行についても検討が必要である。内閣府を司令塔とした各省庁連携を通じフュージョン研究開発に携わる各機関の連携深を深めていき、将来的には機関の一元化を見据えた議論を始めることが重要であり、責任あるフュージョンエネルギー推進体制への道筋である。

提言の骨子

国家的視座からの推進

フュージョンエネルギー推進法を閣法で制定の上、基本計画を策定し、省庁横断による推進体制を確立。

世界に先駆けた発電達成

発電目標について、2040年への前倒しを検討。
このため必要となるトカマク統合発電実証施設を我が国独自で推進。

規制体系の確立

フュージョン規制を原子力規制と異なる枠組みで対応することが可能か否かを国として早急に判断。

ファンディングエージェンシー

フュージョンにおけるファンディングエージェンシーの確立。
特に、NEDOがフュージョンを支援するために必要となる措置。

フュージョン産業支援

民間に発注を積極的に行いアンカーテナンシーとして産業基盤を維持。
関連技術のスピノフによる早期マネタイズを支援。

フュージョン版シリコンバレー

自治体に対する支援を実施し、フュージョンエコシステムを育み、
フュージョン関連立地自治体の地方創生を実現。

人材の体系的育成

大学ネットワークによる総合的な教育プログラムを実施。
職業訓練としてのフュージョン周辺人材育成について、新たに検討。

投資を促す新制度

建設費用回収のリスク低減を目的とした、フュージョン向けFITなど
新たな制度を検討。

責任ある体制

官民連携で新法人を設立し、責任ある主体によってPJ推進。
基本法の制定による戦略本部の設置などを視野に議論。