

フュージョンの社会実装に向けた 海外の取組について



内閣府

科学技術・イノベーション推進事務局



目次

1. 米国

2. 英国

3. その他

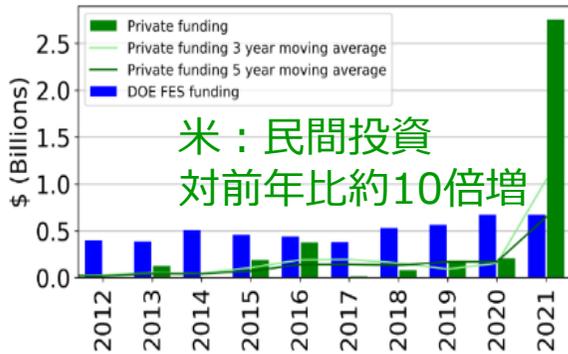
米国における民間・国の取り組み



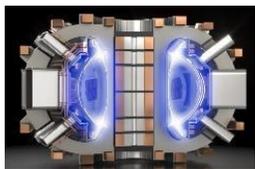
- 米国においては、**スタートアップを中心とする民間企業がフュージョン産業をけん引**している。
- **フュージョンパイロットプラント (FPP) の実現に向けての要件**を定義。
- 政府としては、民間企業に実現に向けたマイルストーンを提案させ、達成した際に支払う形のプログラムによって支援を実施。**民間企業による意欲的な取り組みの支援と投資の呼び込みを喚起**し、産業のエコシステムを構築している。

民間企業の活況

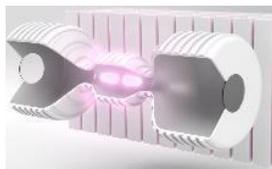
- フュージョンエネルギー関連スタートアップへの投資額が急増



- 主たるプレイヤー (例)



Commonwealth Fusion Systems
2,800億円以上を調達
ビル・ゲイツ、Googleなど



Helion Energy
800億円以上を調達
サム・アルトマンなど

発電実証を目指す様々な炉型を主体としたスタートアップに対して、VCや投資家が巨額投資

フュージョンパイロットプラント実現に向けての要件

- 米国科学・工学・医学アカデミーの報告書において、パイロットプラントはFOAK（商用初号機）を可能とするための主要な性能とコストの実証が求められており、以下の定義がされている。

- ・フュージョンパイロットプラント：
発電容量50MWe以上で、総建設コスト50-60億ドル未満に抑える必要
- ・FOAK核融合発電所：
米国電力市場で実現可能で、**運用寿命40年とすれば総建設コストを50-60億ドル未満に抑える必要**

政府としての支援

- 上記の定義を元にフュージョンパイロットプラントの実現に向けたマイルストーンを民間企業に提案させ、達成時に支払いを行うマイルストーンプログラムを実施。
- 2023年採択発表以降、受賞企業はマイルストーンに対して政府が拠出した4,600万ドルに対し、3億5,000万ドル超の新たな民間資金を集めている。



目次

1. 米国

2. 英国

3. その他



- 英国においては、政府主導の「STEPプログラム」において、**2040年をターゲットに、100MWの発電を行うプロトタイプ発電炉を設計、建設することを目標**として社会実装に向けての検討が進められている。
- **英国原子力公社（UKAEA）の完全子会社である英国産業核融合ソリューション社（UKIFS）**がプロジェクト主体を担う。連携先企業を公募で決定し、民間企業を巻き込みながら一体となってプロジェクトを推進。
- 政府として民間企業・研究機関に対しての関連技術の開発に対しても支援を行い、STEPを補完している。

STEPについて

設計概要

- 主体：**英国原子力公社（UKAEA）の完全子会社である英国産業核融合ソリューション社（UKIFS）**がプログラムを推進。2025年1月に、エンジニアリングおよび建設のパートナー候補企業が公開され、2025年末または2026年初頭に契約締結される予定。
- 予算：概念設計のPhase1において、2.2億ポンド（≒440億円）の予算を投資。2025年6月に、STEP含めフュージョンエネルギー分野に5年間で25億ポンド（≒0.5兆円）を投資することが決定。
- 建設地：ノッティンガムシャー州の石炭発電所があった土地に建設を決定。



STEP概念図



建設予定地

今後の進展

- **2040年に最初の運転を開始し、可能な限り早期に少なくとも100MWの正味のエネルギーを実証することを目標として進捗。**
- Phase1
概念設計
2019 ~ 2024
- 2024年まで概念設計、主要な技術・インフラプログラムを実現するための組織体制の構築、用地選定、適切な規制枠組みの整備に注力（2025年3月発表）。
 - 並行して、社会実装への道筋を検討。
- Phase2
設計・製造
2025 ~ 2032
- 主要産業を巻き込んで、クリティカルとなる技術の開発をプログラムし、設計、実証、コンポーネントの製造へと移行する。また、建設地の地方自治体の協力パートナーや周辺地域と緊密に連携し、**計画承認と許可の取得**を目指す。
- Phase3
建設
2032 ~ 2040
- 発電所の建設とインフラ整備に関するもので、計画許可と同意が得られ次第、**2030年代に開始**される。STEPプロトタイプ発電所は**2040年に最初の運転を開始し、可能な限り早期に少なくとも100MWの正味のエネルギーを実証**する予定。

STEP以外の民間企業等向け制度

- Fusion Industry Programme（うちChallenge Scheme）：革新的技術の開発促進。加熱・冷却システムの革新および新素材・製造技術によるプラント稼働率の向上を重点分野とする。
- LIBRTI：トリチウム燃料の持続的・自己完結的な供給方法の確立のため、制御されたトリチウムの育成技術を実証することを目的。

目次

1. 米国

2. 英国

3. その他

その他の国におけるフュージョン戦略の考え方

○フランス

French Strategy for Energy and Climateでは、2050年までのカーボンニュートラルの実現を目的としている。フュージョンについては、国家的なフラッグシップであるITERの推進とBA、DONES等への貢献、アジア・欧州・北米の先進的な研究所との科学協力を推進することとしている。

○ドイツ

Fusion 2040では、慣性核融合と磁気核融合について、技術に対するオープンなアプローチで開発し、2030年代前半までを研究開発段階とし、2030年代前半～2040年代初頭を移行フェーズ（TRL7～8に相当する発電所のプロトタイプ構築）、2040年代以降に運用段階としている。また、社会実装段階では産業界の重要性がますます高まると言及しているほか、社会実装に必要な技術的課題として、第一壁と高温プラズマとの相互作用、炉材料開発、レーザーシステムなどを特定している。

○中国

核融合の要素技術を獲得するための大規模試験施設群CRAFTを2019年に建設開始し、2025年完成を見込む。

ITERに先立ってDT運転を行うトカマク型核融合実験炉BESTを2023年に建設開始し、2027年に運転開始を見込む。

中国版原型炉CFEDRを構想。CRAFTによる工学実証を踏まえR&Dを実施（プラズマ半径は7.8mであり、ITERより大きい）。

CRAFT : Comprehensive Research Facility for Fusion Technology

BEST : Buring plasma Experimental Superconducting Tokamak

CFEDR : Chinese Fusion Engineering DEMO Reactor

參考資料



- 米国エネルギー省において、2022年3月「大胆な10年ビジョン」を発表し、フュージョンの研究開発を加速し、**2030年代に民間主導でパイロットプラントの稼働を実証すること**等を盛り込んだ。
- これを踏まえ**具体的な10年戦略として2024年6月「Fusion Energy Strategy 2024」**を発表。
- 民間企業の意欲的な取り組みの後押しを通じて**フュージョンパイロットプラントまでの科学技術ギャップを埋め、商業展開への道筋を準備**することが目的。
- 民間でフュージョンパイロットプラントの発電実証を行うこととし、大学や国研は共通技術の開発を行うとされていることが特徴。



①フュージョンパイロットプラント実証のための科学とエンジニアリングのギャップを解消する

- 新しいプログラムの創設や既存プログラムの再定義
 - 燃焼プラズマの維持・極限環境に耐える工学・核融合エネルギーの利用の3分野に重点を置く。
- 官民パートナーシップ（PPP）の活用
 - 新たに民間施設での基盤科学・核融合R&Dを推進するプログラム、地域ハブを基盤とする官民民間施設での基盤科学・核融合R&Dを推進するプログラム等を通じて、すでにあるプログラムを補完する。
- **民間主導の核融合パイロットプラント実証への科学とエンジニアリングのギャップを解消するため、新たにFIREプログラムを設置**する。等



②商業核融合導入への道筋を整備する

- 2030年代に民間主導の商業的に意義のあるフュージョンパイロットプラントを実現し、その後2040年代を通して商業的な核融合導入を目指す「大胆な10年ビジョン」を掲げる。
- 商業導入への道のりでフュージョンエネルギーが直面するリスクと取り組みを示す。
 - 公的・民間資本から、多くの資金が必要となる。大きな民間投資や広範なパートナーシップを生むPPP等を進める。
 - 核融合パイロットプラント・商業導入拡大に必要な**軽同位体の数量と濃縮度を決定するにはさらなるR&Dが必要**。国内供給を含む核融合燃料同位体の**持続可能かつ経済的に実行可能な供給を2030年代半ばから後半までに確保**する。
 - **社会に受容されるための、ワークショップ含む関心層のコミュニティ形成等**。
 - **廃棄物を最小化し、費用対効果が高い分離・リサイクル・処分経路を開発**するためのR&Dが必要。**効果的な核融合廃棄物管理**のための経路特定と準備のプロセスを行う。



③外部パートナーシップを構築・活用する

- 将来の商業核融合導入の拡大に至るまで、**省庁、各国、民間部門、学会、非政府組織（NGO）や非営利団体、慈善活動、地域社会、州・地方政府とパートナーシップを構築し、活用**する。



1 ドル = 145円で換算

①マイルストーンベースのフュージョン開発プログラム (MILESTONE-BASED FUSION DEVELOPMENT PROGRAM)

- 担当省庁：エネルギー省（DOE）
- 支援趣旨・目的：
 - ・民間セクター主導で、DOE研究所、非営利団体、その他様々な機関を巻き込み、核融合エネルギーの研究開発、実証、商用化に向けた取り組みを実施する。なお、連邦政府以外の財政的なコミットメントが求められる。
 - ・具体的には、**核融合パイロットプラント（FPP）の実現に向けたマイルストーンを提案する。**
 - ・FPPとは「**少なくとも3時間連続して50MW以上の正味電力を生成し、1年間のフルパワー運転への迅速な道筋を持つもの**とし、その資本コストが民間投資家や商業化パートナーを引き付ける条件を満たすもの」と定義
- 支援条件：総開発費の50%以上を応募者が負担。**政府支援はマイルストーン達成時に支払われる。**
- 支援期間：最長5年間
- 支援額：500万～2,500万ドル（約7億2,500万円～36億2,500万円）（18か月）
- 求められる成果物：FPPの事前概念設計と技術ロードマップを採択後18か月までに提出。
- 応募資格：
 - ・代表者は民間企業のみ（大学・国研はチームとして参画可能）
- 支援件数：
 - ・2023年に8社を採択（総支援額4,600万ドル（約67億円）、18か月）
- 2023年8月採択企業
 - ・慣性閉じ込め方式
 - ① Focused Energy Inc.
 - ② Xcimer Energy Inc.
 - ・イノベーティブなコンセプト
 - ③ Realta Fusion Inc.（ミラー型）
 - ④ Zap Energy Inc.（Zピンチ型）
 - ・磁場閉じ込め方式（ヘリカル式）
 - ⑤ Princeton Stellarators Inc. (renamed Thea Energy)
 - ⑥ Type One Energy Group.
 - ・磁場閉じ込め方式（トカマク型）
 - ⑦ Commonwealth Fusion Systems
 - ⑧ Tokamak Energy Inc.



<実証内容詳細>

- フェーズ 1b と、フェーズ 2 を実現するための道筋を実現することが求められる。
 - ✓ フェーズ 1a：核融合プラズマエネルギーの増加 ($Q > 1$) を生み出す。
 - ✓ **フェーズ 1b**：核融合エネルギーを、発電に特有の時間スケールで補填し、**電力に変換**する。
 - ✓ **フェーズ 2**：**環境サイクル(environmental cycle)を通じた核融合エネルギーと電力の生産**。核融合発電所によるエネルギー生産によって機器が劣化することの影響評価も必要。
 - ✓ フェーズ 3：複数回の環境サイクルや複数の設計にわたる核融合発電と電力生産の実証。

- 申請者は以下の 2 つのティアを選択または両方で申請できる。
 - ✓ Tier1：2020年代後半までに**予備設計審査に係るマイルストーン案**を明確に示す。マイルストーン案は2030年代初頭までに運用開始可能なFPPに関する構想である必要。
 - ✓ Tier2：**物理的基盤や必要な材料・技術など核融合性能の大幅な改善につながるマイルストーン案**を示す。2020年代半ばから後半までにFPP構想を具体的に記述する必要。

- 申請には、科学的・技術的考慮事項、商業化に関する考慮事項、ビジネスおよび財務上の考慮事項が存在。
 - ✓ 科学的・技術的考慮事項：
 - ①核融合エネルギーQの必要な性能向上を達成するための戦略とリスク
 - ②高デューティサイクル運転（定常運転または繰り返しパルス運転）のための戦略
 - ③統合された**第一壁及びブランケット**のための実現可能な戦略
 - ④持続可能な燃料サイクルを実証するための戦略（**トリチウムの確保**等）
 - ⑤FPPから商用炉を作るための技術的なギャップの整理 …等
 - ✓ 商業化に関する考慮事項：
 - ①将来的な収益と利益の創出モデル
 - ②FPP、商用炉の**コストやスケジュール見積もり**
 - ③信頼性、稼働率、保守性、検査性への対応戦略
 - ④**安全性・サイト選定** …等
 - ✓ ビジネスおよび財務上の考慮事項：
 - ①今後の**資金調達計画**およびその現状
 - ②知的財産権の管理 …等



1ドル=145円で換算

② FUSION INNOVATION RESEARCH ENGINE (FIRE)

- 担当省庁：エネルギー省（DOE）
- 支援趣旨・目的：
 - 基礎科学と実用化のギャップを埋める。エンドユーザーを見据えて、以下の4つの重要技術領域を対象とする。
 - 1：プラズマ対向部品向けの核融合炉材料
 - 2：ブランケット及び燃料サイクルシステム
 - 3：プラズマ閉じ込め・制御技術
 - 4：炉設計の最適化のためのシミュレーション
- に焦点を当て、エンドユーザーのニーズを取り込み、戦略的に重要技術の開発を推進。また研究成果の他のDOEプログラムへの共有を推進。
- 支援条件：企業は総費用の20%以上を応募者自身で負担
- 支援期間：4年間
- 支援額：200万～500万ドル（約2.9億円～7.25億円）（1年間）
- 応募資格：大学、民間企業等
- 支援件数：2025年に6件を採択（支援総額1億700万ドル（約155億円））。
- 採択課題：
 - ①Advanced Profile Prediction for Fusion Pilot Plant Design
（主な実施機関：Massachusetts Institute of Technology）
 - ②Fuel Cycle Fusion Innovation Research Engine
（主な実施機関：Savannah River National Laboratory）
 - ③Accelerating Fusion Blanket Development through Nuclear Testing
（主な実施機関：INL）
 - ④Target Injector Nexus for Development Research
（主な実施機関：General Atomics）
 - ⑤Rapid High-Fidelity Bulk Irradiated Materials Data Generation to Accelerate Solutions for Commercial Fusion Energy Systems
（主な実施機関：Massachusetts Institute of Technology）
 - ⑥Integrated Materials Program to Accelerate Chamber Technologies
（主な実施機関：University of Tennessee）



③ Innovation Network for Fusion Energy (INFUSE)

1ドル=145円で換算

- 担当省庁：エネルギー省（DOE）
- 支援趣旨・目的：費用対効果が高く革新的な核融合エネルギー技術の開発のための研究を民間部門で加速。材料科学や計測技術、モデリングやシミュレーション、商業化を支援する活動を推進する。
- 支援期間：1年間（最大2年）
- 支援額：10～50万ドル（約1,450万円～7,250万円）
- 応募資格：
 - ・米国の民間企業。ただし、**国立研究所または高等教育機関のいずれかとの連携が必要。**
 - ・**資金は国立研究所または高等教育機関に提供される。**
- 支援条件：総費用の20%以上を応募者が負担。
- 支援件数：2024年は17件を採択（支援総額460万ドル（約6.7億円））
- 採択企業：
 - ①Blue Laser Fusion | CalTech
 - ②Commonwealth Fusion Systems | Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
 - ③Commonwealth Fusion Systems | Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
 - ④Electric Power Research Institute, Inc. | Savannah River National Laboratory (SRNL)
 - ⑤ExoFusion | Penn State University
 - ⑥Focused Energy Inc. | University of Rochester
 - ⑦Focused Energy Inc. | Savannah River National Laboratory (SRNL)
 - ⑧General Atomics | Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
 - ⑨General Atomics | Idaho National Laboratory (INL)
 - ⑩Kyoto Fusioneering America Ltd. | Idaho National Laboratory (INL)
 - ⑪Marathon Fusion | Colorado School of Mines
 - ⑫Realta Fusion | Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
 - ⑬Realta Fusion | Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)
 - ⑭TAE Technologies | Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)
 - ⑮Tokamak Energy Inc | Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
 - ⑯Type One Energy Group Inc. | FSU
 - ⑰Xcimer Energy Corporation | Savannah River National Laboratory (SRNL)

米国エネルギー省によるTRLの現状認識



我々はフュージョンサイエンスとフュージョンエネルギー開発の転換点にあるが、重大な研究開発上の課題が残っている

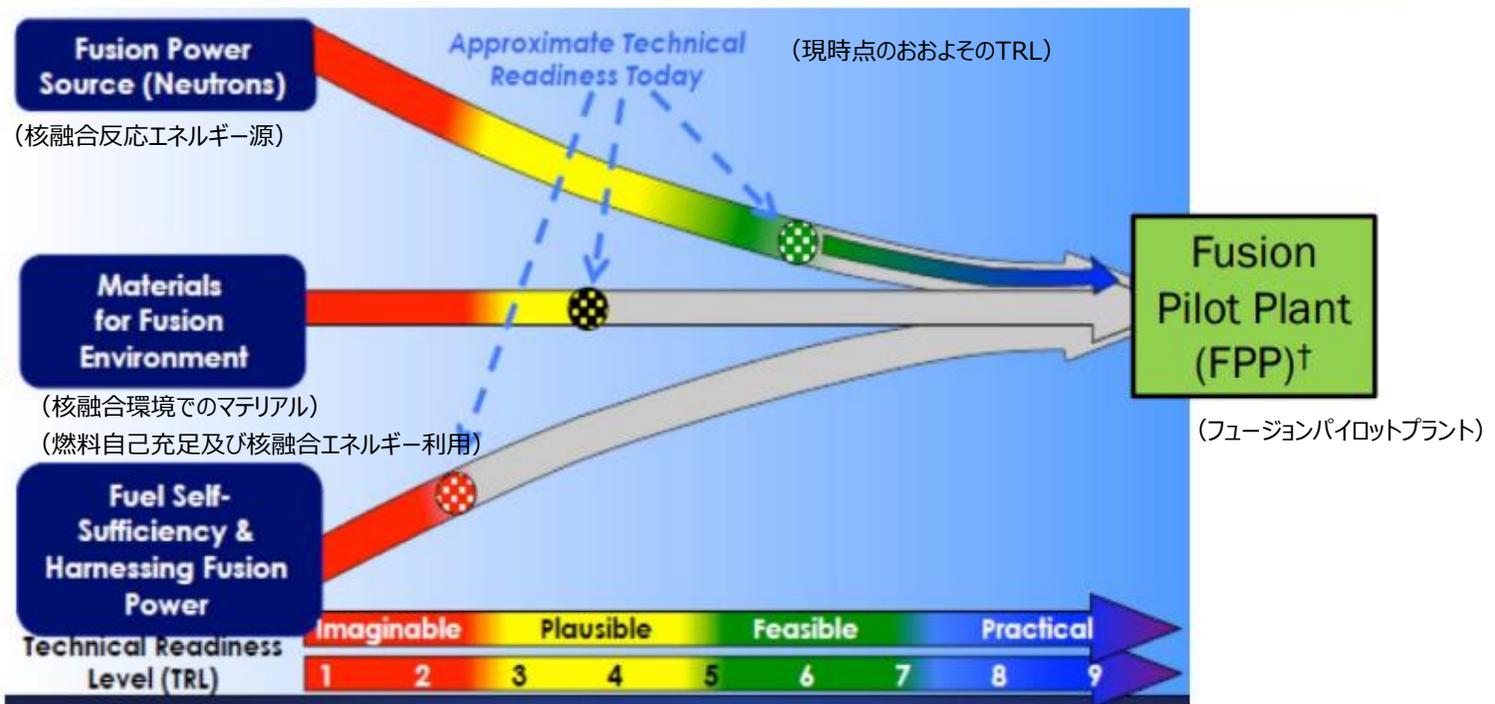
We are at an inflection point between fusion science and fusion-energy development, but significant R&D challenges still remain

Topics/disciplines

Predict, control, sustain a burning plasma
(予測、制御、プラズマの維持)

Survive extreme heat and irradiation flux at the first wall
(第一隔壁の耐熱、耐放射線性の確保)

Tritium breeding, processing, containment
(トリチウム増殖、処理、閉じ込め)



†As defined in the 2021 NASEM report *Bringing Fusion to the U.S. Grid*, i.e., >50 MWe net electricity for >3 continuous hours with timely path to 1 full-power year; on the path to commercial viability.
Figure adapted from presentation by M. Wade at APS-DPP community planning workshop (2019).



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

Office of the
UNDER SECRETARY
FOR SCIENCE & INNOVATION

<出典： 米国エネルギー省説明資料 (和訳を加筆) >

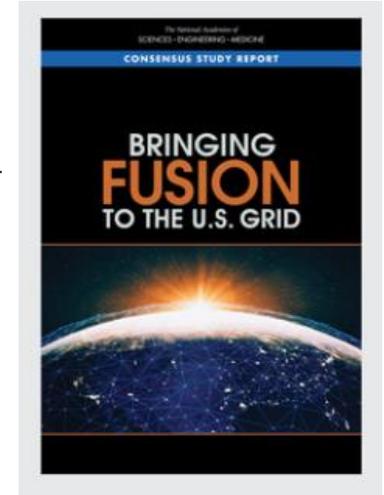
米国におけるフュージョン戦略の考え方



BRINGING FUSION TO THE U.S. GRID (2021) 「フュージョンを米国の電力網へ」
National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (米国科学・工学・医学アカデミー)

【報告書の指摘事項のポイント】

- パイロットプラントは、商業プラントへ向け、技術が実装可能であり、他の発電方式と対比しうる発電コストであることを実証する必要がある。FOAK（商用初号機）に先立って、想定される交換頻度、廃棄物処理、安全上の考慮事項、環境上の考慮事項等について理解を深められるものでなければならない。
- パイロットプラントはFOAKを可能とするための主要な性能とコストの実証が求められる。それぞれの定義は以下のとおり。
 - ・パイロットプラント：
発電容量50MWe以上で、総建設コスト50-60億ドル未満に抑える必要
 - ・FOAK(商用初号機)核融合発電所：
米国電力市場で実現可能で、運用寿命40年とすれば総建設コストを50-60億ドル未満に抑える必要
- 現時点では、ダイバータやプラズマ第一壁などプラズマに直接的にさらされるコンポーネント（PFCs：Plasma-Facing Components）や統合的なブランケットの技術成熟度（TRL）は非常に低く、相当の研究開発が必要である。
- 米国のフュージョン産業は、ITERから得られる技術、ノウハウ、経験から恩恵を受けている。ITERから得られた経験を活用することは、パイロットプラントの厳しいスケジュールを達成する上で重要。
- パイロットプラントは科学的課題と技術的課題の双方を包括的に検討する必要がある。より低コストのパイロットプラントを実現するには科学的・技術的イノベーションが不可欠であり、設計を確定し建設を開始する前に徹底的に評価されなければならない。
- パイロットプラントをFOAKの予定コストよりも低いコストで建設できない場合、また経済的に競争力のあるコストで電力を発生する可能性がない場合は、建設に進む前にコストを減じ、コンセプトを改善することが求められる。
- パイロットプラントを成功裏に稼働させるためには、残された技術的・科学的課題の解決及びパイロットプラントの設計、建設、運転の双方に対してDOEと民間企業からの緊急の投資が必要。





- 英国において、2021年に初めて公表されたフュージョン戦略を2023年に改訂（‘Towards Fusion Energy 2023–The next stage of the UK’s fusion energy strategy–’）。
- **国主導でSTEP計画によりプロトタイプ核融合発電所を建設し、正味のエネルギーを供給することで、核融合の商業的実現可能性を実証**することに加えて、**民間・研究機関の多様な核融合技術を支援**し、将来数十年にわたり核融合技術を輸出可能な、世界をリードする核融合産業を英国に構築することを目的としている。
- 国際協力、科学技術の強み、商業化という3つの柱を引き続き重視。発展的に新プログラム「**Fusion Futures**」を創設したことを打ち出した。

英国のスタンス

- 民間セクターでの投資が急増し、技術が成熟しつつあり、2030年代にプロトタイプを市場に出そうとする企業も登場。
- 大規模で国際的なプロジェクトは必要であるがそれはあくまで一つの柱であり、民間需要に応じたスピード感のある開発・導入等も必要。
- 英国の目標として「**純エネルギーを供給するプロトタイプ核融合発電所を英国内に建設することで、商業的実現可能性を実証すること**」と「**今後数十年に核融合技術を輸出できる世界をリードする核融合産業を構築すること**」を掲げている。

英国政府の支援



- **Fusion Futures Programme** を立ち上げる。**最先端の新しいR&Dプログラム**であり、**2027年までに最大6億5,000万ポンド（約1,300億円）を投資**する。

- インフラ：核融合クラスターを拡大し、企業が使える研究施設や新しい燃料生成施設を整備
- 人材育成：大学や企業と連携し、最大5,600万ポンドを投じ、今後5年間で2,200人超の幅広い人材を育てる「Fusion Skills Centre」を設立
- 産業・商業機会：核融合産業プログラムを拡充し、ITERとの協力や、英国核融合企業向けの投資ファンド設立を検討



- 国際的なリーダーシップ

- 国際的なR&D協力を通じて核融合の商業化を加速すること等を目指す。
- JETで培ったMCF技術を中心に協力してきたが、**今後は慣性核融合など他の技術にも国際連携を広げる。**



- 科学技術分野でのリーダーシップ

- **核融合研究施設において世界的リーダーシップを維持**。工学分野も含め、優秀な人材を育成・定着させる。
- JETの運転終了に伴う、将来の商業炉の廃炉計画策定に役立つ貴重な知見・知的財産（IP）を獲得。STEP建設。



- 商業的リーダーシップ

- **STEPに各国の投資を呼び込み、サプライチェーン革新の推進力と位置づけるため**、最大1,100万ポンドを追加投資。
- **クラム・キャンパスを世界的な核融合イノベーション拠点に変革**する「Fusion Foundations」を開始し、追加投資。
- 研究成果や知財を輸出等に結び付けるために、最大1,800万ポンド（約36億円）を投資し「**Technology Transfer Hub**」（技術移転ハブ）を設立予定。



- STEPの設計については、以下の要素がプラントの主要な特性であると公表されている。

1.発電能力 (Power)

○正味 **100MWe** の電力を安定して供給できるという確信

2.燃料 (Fuel)

○トリチウムの**自給自足** を達成できるという確信

3.保守性 (Maintainability)

○運転サイクル (停止期間を含む) の信頼性のある見積もり

4.開発の柔軟性 (Development Flexibility)

○データを取得できる能力

○将来の商業炉開発に役立つ検証や改良を支援できる能力

5.安全性と環境 (Safety & Environment)

○リスクが **ALARP (合理的に実行可能な限り低い水準)** にあることを実証できる確信

○環境への影響を最小限に抑えて実現できること

6.スケジュール (Schedule)

○プログラム全体のスケジュールと、その見積もりの信頼性

7.コスト (Cost)

○プログラム全体のコストと、その見積もりの信頼性

○将来の **商業炉の推定コストと発電単価 (LCOE)** (後に策定予定)



PHILOSOPHICAL TRANSACTION OF THE ROYAL SOCIETY A
Delivering Fusion Energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP)(2024)
The Royal Society (英国王立アカデミー)



【報告書の指摘事項のポイント】

- 核融合が2050年よりもずっと前にCO2の排出量の削減に貢献する可能性は非常に低いと断言することは重要。**核融合発電所で生産されるエネルギーは、たとえ国家戦略上の動機があったとしても、手ごろな価格でなければならない。**核融合炉の燃料の豊富さと低コストにより、均等化発電原価(LCOE)は、核分裂発電所と同様に、発電所の建設費によってほぼ決定される可能性がある。
- STEPは核融合エネルギー発電に関する**技術的なソリューションの開発だけでなく、その技術の商業化、そして英国において国際競争力のある核融合エネルギー産業の創出を目的**とした、より広範な政府介入策の一環である。
- STEPは、政府が設立した有限会社であるUK Industrial Fusion Solutions(UKIFS)によって実施される。この会社は、**純粋な公共部門の組織よりも、この規模のプロジェクトを実施するために必要な商業関係と専門知識を構築するのに適した手段**。最初はUKAEAで育成されるが、最終的にはSTEPは独立する予定。UKAEAはUKIFSを支援するため、技術的障壁を克服するために必要な研究開発能力を提供し、直面する各技術障壁に直接対処する方針に沿って組織される科学パートナーとして機能する。
- STEPは、大きな技術的不確実性、大規模性、複雑性、長期間、多額のコストといったあらゆる側面で大きな不確実性に支配されており、開始時に要件を固定し、変更を最小限に抑えることは困難。このため、**不確実性を受け入れ、管理するというプロジェクト編成方法を必要としている。**
- **組織はプロジェクトの段階的な進展に合わせて進化し、重要なステークホルダーと連携し、あるいは少なくとも影響を与える能力を備えていなければならない。**まず、プロジェクト組織は既存組織から発展し、多くの側面で異なるものでなければならないが、同時に親組織の設計を補完するものでなければならない。このため、契約によって民間セクターの能力が加わり、単一の目的を持つ結束力のあるチームへと融合される必要がある。また、このような複雑なプラントを実現するには、**産業界が全体モデルの一部にならなければならない**、**作業を通じて産業界の能力を開発することも包括的な目標**である。
- **STEPプログラムは、初期段階から設計にコスト意識を組み込んでいる。**大規模なメガプロジェクトはモジュール方式で設計されていないとコストとスケジュールが大幅に超過するため、STEPでは、様々な種類のモジュール化と標準化を意識的に検討し、商業可能性の道筋が可能な最小のプラントサイズを探っている。
- 設計に多くの変更が行われたスペースシャトルプログラム等の教訓は参考となる。

【論文タイトル】

1. エネルギー生産のための球状トカマク
2. エネルギー生産のための球状トカマク (STEP) の文脈: 英国の公共部門のアプローチ 核融合エネルギーへ
3. STEP-重大な不確実性に取り組むための主要なプロジェクトを組織する
4. コンセプトデザインの概要: 選択と妥協の問題
5. プラズマバーンギャップに注意
6. 新しいプラズマ体制の制御
7. 磁気ケージ
8. メンテナンスのロックを解除 - メンテナンスのためのSTEPの設計と再マウントの実現 マグネットジョイント
9. 熱の管理: 容器内コンポーネント
10. ライフサイクルレンズを用いた発電所材料の開発
11. 持続的な燃料供給とトリチウムの自給自足のためのアウトライン設計を融合
12. ポジティブであり続ける: ネットパワーを生み出す
13. 安全性: 不確実な用途における比例アプローチ
14. デジタル: 経路を加速する
15. STEPプログラムのコストの最適化
16. 設計の成熟: 初の核融合発電所の成熟における課題



- STEPプログラムは活動の一環として、**社会実装へ向けたコスト見積もりの手法についての検討**が進められており、UKAEAのウェブサイトに報告書が掲載されている。
- **STEPのコストの不確実性が高く**、その要因については技術や設計の成熟度、プログラムの成熟度、商業戦略の状況、そして基礎となる見積りの正確さなどが挙げられている。
- 加えて、**設計段階の早い時期からコスト分析を取り入れることが全体としても最適な設計に繋がる**ことが挙げられている。

①「核融合発電所のコストモデリングにおける不確実性」“Fusion Power Plant Cost Modelling Uncertainties”

コストモデリングのベストプラクティスは、基礎的なコストを評価し、それに対応する不確実性やリスクを見積もり、さらに楽観バイアス（optimism bias）の補正を適用することである。**コストの不確実性の要因には、技術や設計の成熟度、プログラムの成熟度、商業戦略の状況、そして基礎となる見積りの正確さが含まれる。**

STEPプログラムでは、不確実性の評価を含むベストプラクティスのコスト見積り手法を適用している。概念設計フェーズを通じて、設計に関する理解が深まるにつれて、コストの不確実性が増してきた。

大きな不確実性が存在するため、STEPプログラムは現時点で総プログラムコストを公表していない。その代わりに、差別的なコスト分析を用いて設計上の意思決定を支援し、STEPプロトタイプ発電所のコストを最適化すると同時に、総プログラムコストモデルに対する信頼性を高めている。

②「核融合発電所向け統合コストモデルの開発」“Developing Integrated Cost Models for Fusion Power Plants”

設計段階の早い時期からコスト分析を取り入れることで、個々のシステムだけでなく全体としても、コストを最適化した設計ができる。核融合発電所は多くの要素が密接に結びついているため、コストを最適化するには「統合的なコストモデリング」を使った包括的な方法が不可欠である。こうした方法を取ることで、設計の選択肢を幅広く検討でき、コストに大きく影響する要因（コストドライバー）を見つけて分析し、性能とコストのバランスをどう取るかを検討できる。

この論文では、**トカマク型発電所における大きなコスト要因である「装置の大きさ」を、小型の球状トカマクではインボード側（装置の内側）の構造を工夫することで最適化できる**ことを示した。また、再循環電力を最も多く消費する「加熱・電流駆動システム」の効率が**発電所全体のコストに与える影響**についても論じている。さらに、**磁場コイルの導体材料をどう選ぶか**といった設計判断において、**コスト評価を総合的に行うことの重要性**を示した。

また、システム解析の中にコストモデルを組み込み、複数の工学的な解決策にかかるコストを見積もることは、開発チームの中に「コストを意識する文化」を根付かせる効果もある。これはどんな複雑で学際的なプロジェクトにも役立つが、特に**「核融合発電所が既存のエネルギー源に代わる、経済的に実現可能な選択肢になり得る」**ことを証明しようとする**第一世代の核融合発電所にとっては、非常に重要**になる。



① Fusion Industry Programme (FIP)

- 担当省庁：英国原子力公社 (UKAEA)
- 支援趣旨・目的：サプライチェーン・要素技術（加熱冷却、材料、製造、燃料サイクル等）の実装を加速することとエコシステム拡大。
- 支援概要：（1）Challenge Scheme、（2）Voucher Scheme（研究機関との連携）、（3）Fusion Industry School（人材育成）に分けられる。

<Challenge Scheme について>

- 支援概要：**核融合産業における革新的技術の開発促進**。特に加熱・冷却システムの革新および新素材・製造技術によるプラント稼働率の向上を重点分野とする。
- 支援期間・段階：Phase 1…技術的実現可能性の検証（3～6か月）、Phase 2…プロトタイプ開発（最大18か月）。
- 求められる成果物：Phase 1…フェージビリティスタディ（報告書等）、Phase 2…プロトタイプ+実地試験（成果報告）。
- 求められる提案内容：
 - ・ **少なくとも2つの技術的マイルストーンを設定**すること
 - ・ **明確な商業化計画**を示し、手頃なコストの開発済みソリューションの市場投入ルートを提示すること
 - ・ プロジェクト全体を通じて**少なくとも1社の将来顧客と協働**すること
 - ・ 将来的に核融合プラント環境で正式採用されることを視野に入れ、**規制認証や承認の取得を進めるもの**が優先される 等
- 重点分野：
 - ・ **革新的な加熱・冷却システムによる性能向上**
マイクロ波加熱の課題、中性粒子ビーム加熱の課題、高熱流束部材の課題
 - ・ **新素材・製造技術による稼働率向上**
RAFM鋼、CNA、ODS鋼などの開発、中性子遮蔽材の大規模製造、トリチウム増殖材の大規模製造のうち少なくとも一つのテーマ
- 採択件数・予算・支援額：

年月	件数	総支援額	1件当たり支援額
2021年11月	15件	230万ポンド（約4.6億円）	5万～20万ポンド
2023年2月	18件	310万ポンド（約6億円）	最大100万ポンド
2023年12月	9件	1160万ポンド（約23億円）	50万ポンド～140万ポンド
2024年5月	6件	960万ポンド（約19億円）	46万ポンド～190万ポンド
2025年3月	16件	350万ポンド（約7億円）	10万ポンド～25万ポンド

- 具体的な採択実績：
 - ・ Amentum社（Jacobs UK）：液体リチウム試験施設の拡張に向け、Phase1での採択に引き続き2024年Phase2にて支援。リチウムを安全に取り扱える力を高めること、高温や既知の不純物環境における核融合炉用材料の試験実施を目指す。
 - ・ TWI Ltd「CoreFlow（熱管理を簡素化する技術）等」で2023年2月Phase1 に採択、2023年12月Phase2に採択。



②Lithium Breeding Tritium Innovation (LIBRTI)

- 担当省庁：英国原子力公社 (UKAEA)
- 支援目的：トリチウム燃料の持続的な供給方法確立
- 支援期間：4年間 (2022、23～2027、28年)
- 支援額：総額900万ポンド (約1億8000万円)
- 応募資格：大学、学会、産業界
- 採択課題：12件 (プロジェクト名及びリード組織)
 - ①「液体リチウムデジタルツインの開発」 アメンタムクリーンエネルギーリミテッド
 - ②「固体増殖材料としての 6LiD の妥当性の研究」 アストラルニュートロニクス株式会社
 - ③「TRIMAX(トリチウム炉統合解析実験、マルチフィジックスコード)」 バンガー大学 - 原子力未来研究所
 - ④「マルチフィジックスを用いたスケールモックアップと実物大の相関」 IDOM UKリミテッド
 - ⑤「TRI-PRISM(トリチウム透過モニタリング用リアルタイムインラインセンサ)」 京都フュージョニアリング
 - ⑥「TriBreed(バーミンガム大学の高磁束中性子源施設を使用)」 ランカスター大学
 - ⑦「ブリーダーにとらわれないトリチウムインベントリデジタルツインシステム」 マンチェスター大学材料学部
 - ⑧「openTBB(Tritium Breeding Blanket)の開発 - マルチフィジックス輸送シミュレーション」 米国の大学
 - ⑨「VICE(セラミックスにおけるトリチウム増殖における不確実性の定量化、製造および試験)」
オックスフォードシグマ
 - ⑩「リチウム不純物制御、診断、照射試験などの実験プログラム」 トカマクエネルギー
 - ⑪「校正済み中性子源用のインライントリチウム検出機能を備えた小型固体リチウムセラミック増殖装置を開発」
バーミンガム大学
 - ⑫「FLiBeでのトリチウム育種」 エジンバラ大学