

フュージョンエネルギー開発の現状と実用化への展望



自然科学研究機構 核融合科学研究所

山田弘司

核融合 : (Nuclear) Fusion : フュージョン

- 「フュージョン」が最近、世に喧伝。巨額の投資があるよし
- フュージョンエネルギーもいいことづくめではないでしょう？
- エネルギー問題における潜在的価値と「リアリティ」は？
- すぐにでもできるものと思ったら、それは誤解
- 不確実性・予見性に対しては、熱さだけでなく冷徹さと俯瞰が必要



フュージョンエネルギーの特長

- 燃料は實際上、無尽蔵で偏在していない
- 固有の安全性がある
- CO₂ を出さない
- ウランやプルトニウムのような核分裂性物質はない
- 長寿命の放射性廃棄物はない
- 基幹電力となりうる



2リットルの水に
ある 0.06 g の
重水素



iPhone17 Pro 2台に
ある 0.2 g の
リチウム6

フュージョン

平均的な日本の家庭が1年間以上
消費する電力を発電することができる
(約5,000キロワット時)

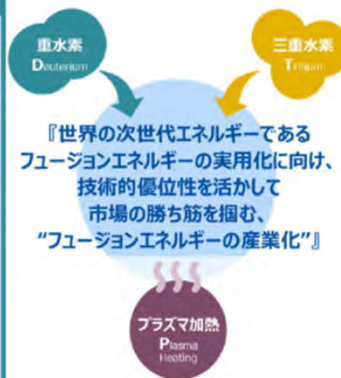
では、何が問題 ？

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略(概要) ※令和7年6月4日改定

ITER計画/BA活動の知見や新興技術を最大限活用し、**世界に先駆けた2030年代の発電実証を目指し、バックキャストによるロードマップを今後策定するとともに、QST等のイノベーション拠点化を推進し、フュージョン産業エコシステムを構築**

(1)フュージョンインダストリーの育成戦略 Developing the Fusion industry

- ①産業協議会(J-Fusion)との連携
(国際標準化、サプライチェーンの構築、知財対応、ビジネスの創出、投資の促進等)
- ②科学的に合理的で国際協調した安全確保
(当面は、RI法の対象として位置づけ。新たな知見や技術の進展に応じて、アジャイルな規制を適用。G7やIAEA等との連携など、国際協調の場も活用)
- ③社会実装の促進に向けたTFの設置
(現状の技術成熟度の評価に加え、実施主体の在り方やサイト選定の進め方等について検討)



(2)フュージョンテクノロジーの開発戦略 Technology

- ①原型炉実現に向けた**基盤整備の加速**
(工学設計や実規模技術開発等、原型炉開発を見据えた研究開発の加速。ITERサイズの原型炉の検証)
- ②スタートアップを含めた**官民の研究開発力強化**
(NEDO、JST、QST等の資金供給機能の強化の検討。技術成熟度の高まりやマイルストーンの達成状況に応じ、トカマク、ヘリカル、レーザー等多様な方式の挑戦を促進)
- ③ITER計画/BA活動を通じた**コア技術の獲得**
(日本人職員数の増加や調達への積極的な参画促進。様々な知見を着実に獲得し、その果実を国内に還元)

(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 Promotion

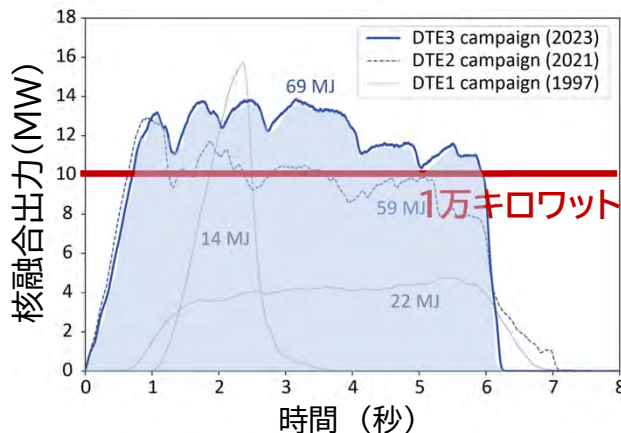
- ①内閣府が政府の司令塔となり、関係省庁と一丸となって推進
(世界に先駆けた2030年代の発電実証の達成に向けて、必要な官民の取組を含めた工程表の作成)
- ②QST、NIFS、ILE等のイノベーション拠点化
(産学官の研究力強化及び地方創生の観点から、スタートアップや原型炉開発に必要な大規模施設・設備群の整備・供用)
※QST:量子科学技術研究開発機構、NIFS:核融合科学研究所、ILE:大阪大学レーザー科学研究所 ※(2)①②と連動
- ③大学間連携・国際連携による**体系的な人材育成システム**の構築と育成目標の設定
(核融合科学研究所(NIFS)が中核となり、教育プログラムを実施。ITERをはじめ、海外の研究機関・大学等に人材を派遣)
- ④**リスクコミュニケーション**による国民理解の醸成等の環境整備
(J-Fusionや関連学会等とも連携し、社会的受容性を高めながら、関係者が協調して活動を推進)

「フュージョンエネルギーはいつ実現するのですか？」

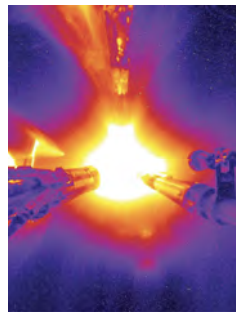
輝かしい科学的成果

JETによる核融合エネルギー発生

Courtesy of EUROfusion



米国・NIFでの
2.1MJのレーザー投入
エネルギーに対して、
8.6MJの核融合出力



「蜚蜚楼プロジェクト」という批判

核融合エネルギーを
プラント規模で発生

核融合実験炉
ITER (イーター)

核融合原型炉
DEMO (デモ)

実用化

核融合エネルギーによって
発電するプラント

実験装置

事実

— 彼我の距離 —

期待

未来予測: 不確実性と予見性の拮抗

参照点がセクターによって極端に異なる

→ 「設定問題」の定義を誤解なく共有すること



南仏
サン・ポール・
レ・デュランス



ドローンによるITER探査 2026年4月

国際熱核融合実験炉(ITER)計画 日欧米露中韓印による人類史上最大の国際事業



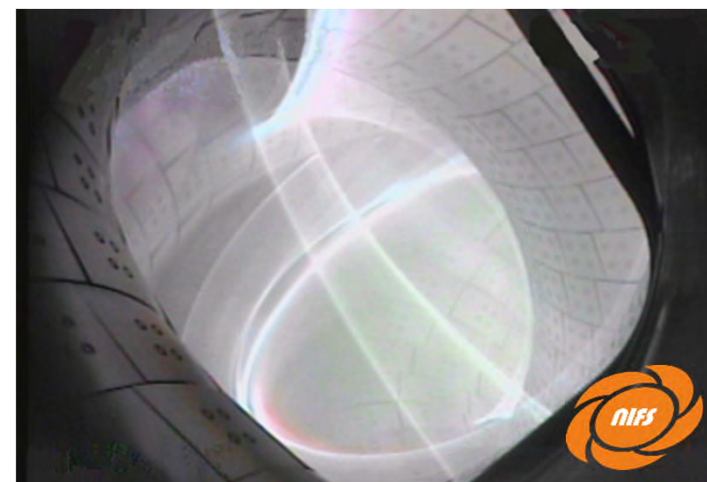
フュージョンエネルギーを実現するための科学と技術

1. 超高温プラズマの生成・保持

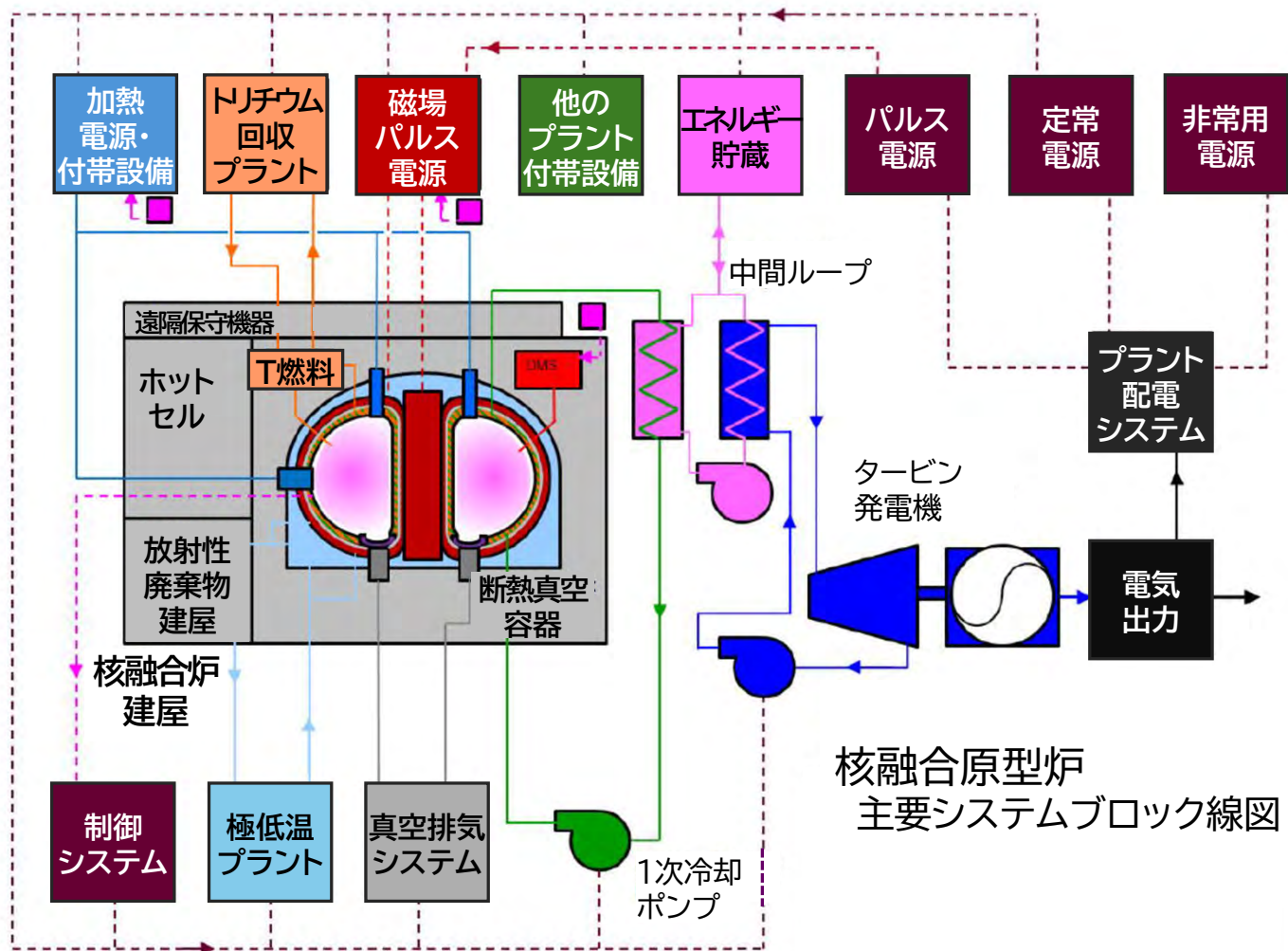
- 水素燃料を1億度を超える電離したガス(プラズマ)に
- その容器は？
 - ・ 磁場
 - ・ 慣性力
- 発電に使えるようになるための**必要条件**
 - ・ 着火する1億度を超える高い温度
 - ・ 十分な燃える量（密度と滞在時間）

2. 磁場閉じ込め方式による技術と

フュージョン発電プラントの要件：**十分足らしめる**には



フュージョン発電プラントの主要機器のシステム

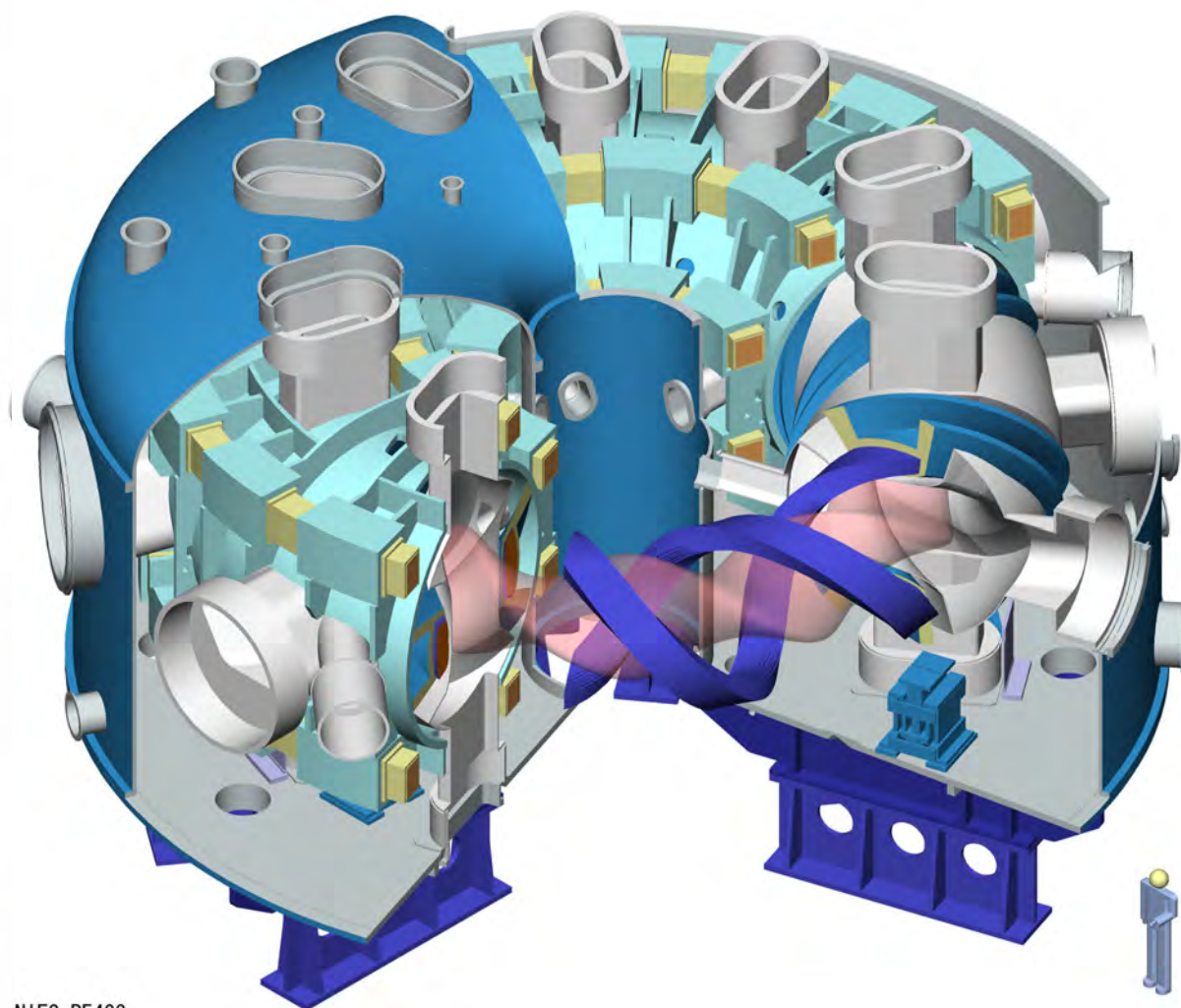


核融合原型炉
主要システムブロック線図

磁場閉じ込め核融合実験装置 本体の構成

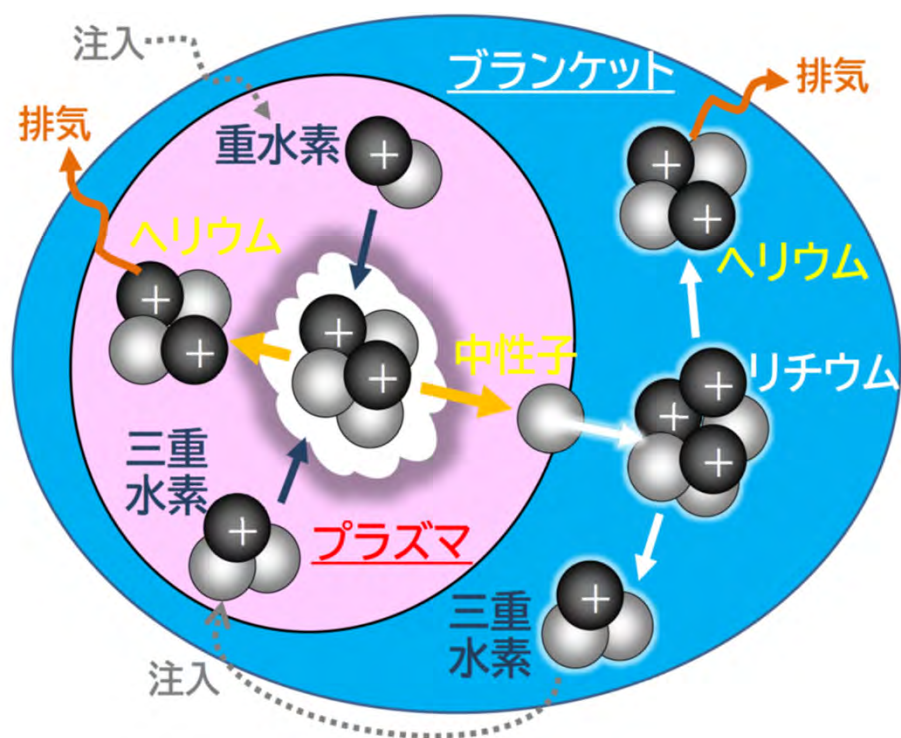
大型ヘリカル装置(LHD)

を披露例として

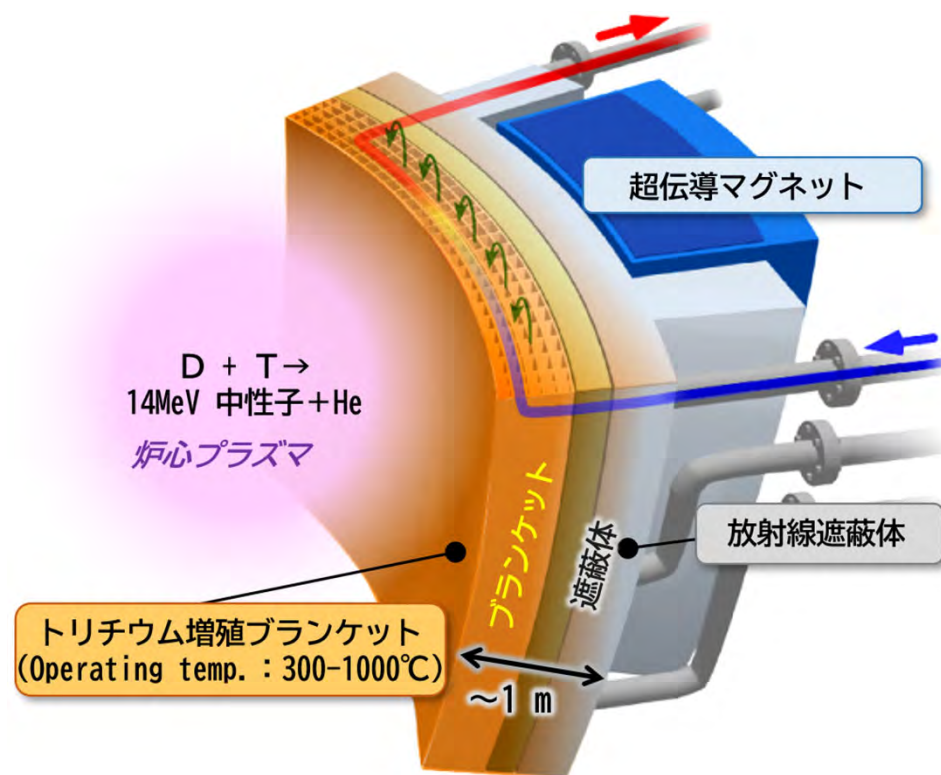


NIFS-PE423

フュージョン発電プラントの基本プロセスとシステム



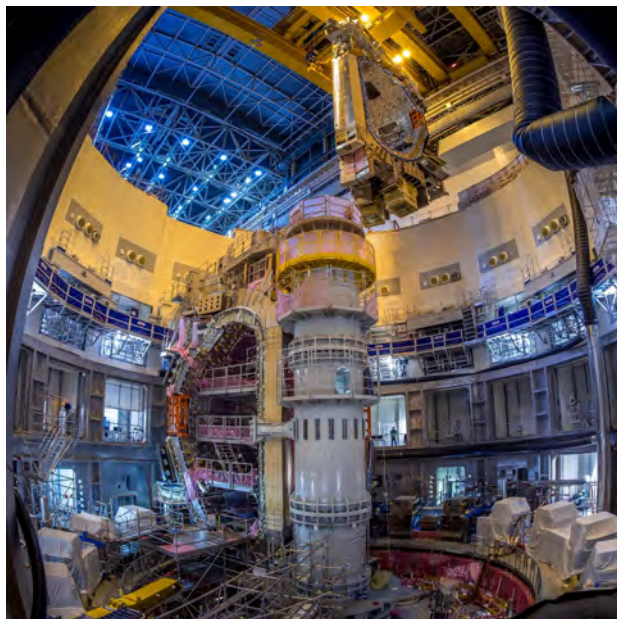
まとめると
重水素 + リチウム → ヘリウム×2



工学システムとしては「**ブランケット**」が**炉心**と言ってよい
1. 熱変換、 2. トリチウム生成、 3. 中性子遮蔽

フュージョン炉の主要な複雑要件

超大型で大重量の機器
同時に精密で高い精度



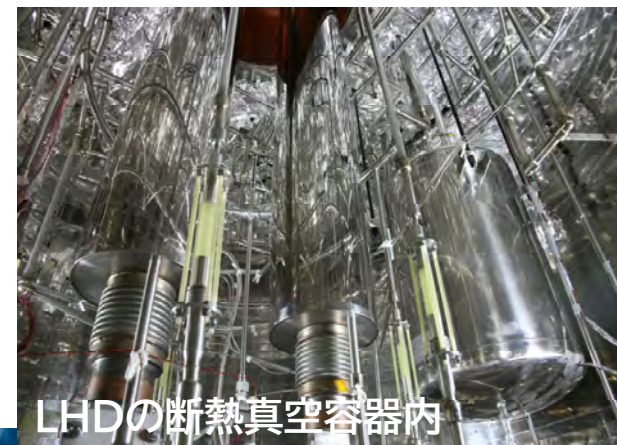
ITERの本体組立
40°/360° モジュール 1,400トン
10mに対して1mmの精度

超伝導



ITERのトロイダルコイル導体
直径44mm、6万8千アンペアを流す

極低温技術



LHDの断熱真空容器内



LHDの圧縮機

LHDの冷却設備
4.4Kで6kW、液体He650ℓ/時

フュージョン炉の主要な複雑要件

強大な電磁力



1m当たり1,000トン之力

大きな熱負荷

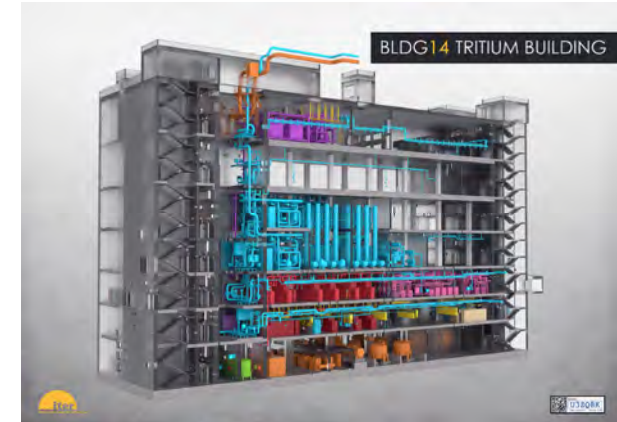


大容量の超高真空



1兆分の1気圧
宇宙ステーション周りの1/100以下

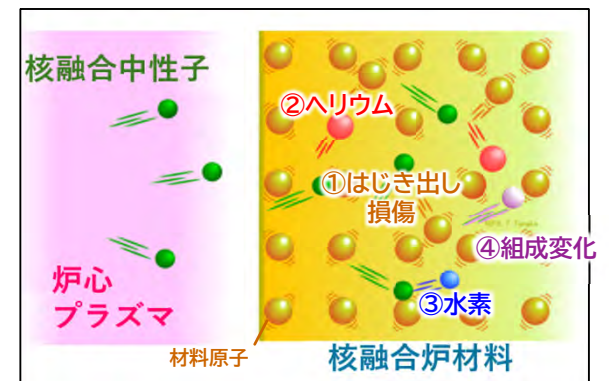
トリチウム取扱技術



ITERやフュージョン炉では
5kg程度のトリチウムを循環

耐中性子材料

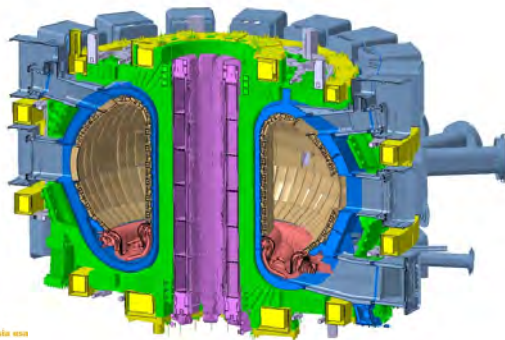
ITERやフュージョン炉になると
1万キロワット/m²
衛星の大気突入と同程度



ITER(実験炉)の次は発電実証を行うフュージョン原型炉

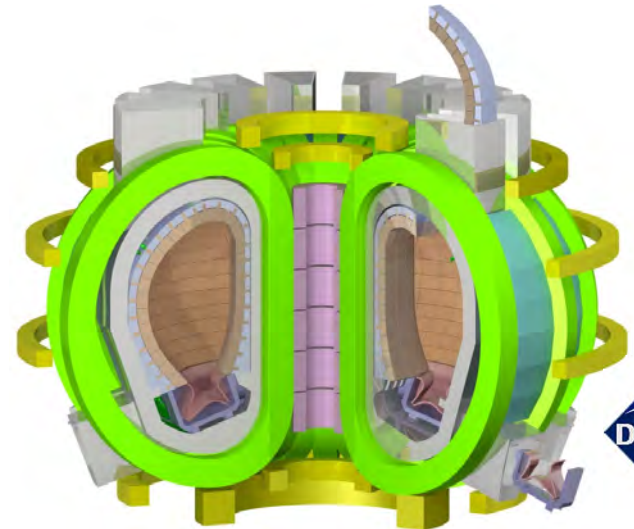
数年前までは、国際的に共有されてきた基本構想 — 21世紀中ごろでの実用化

ITER



科学的実証・技術的実現性
熱出力 50万キロワット
発電はしない

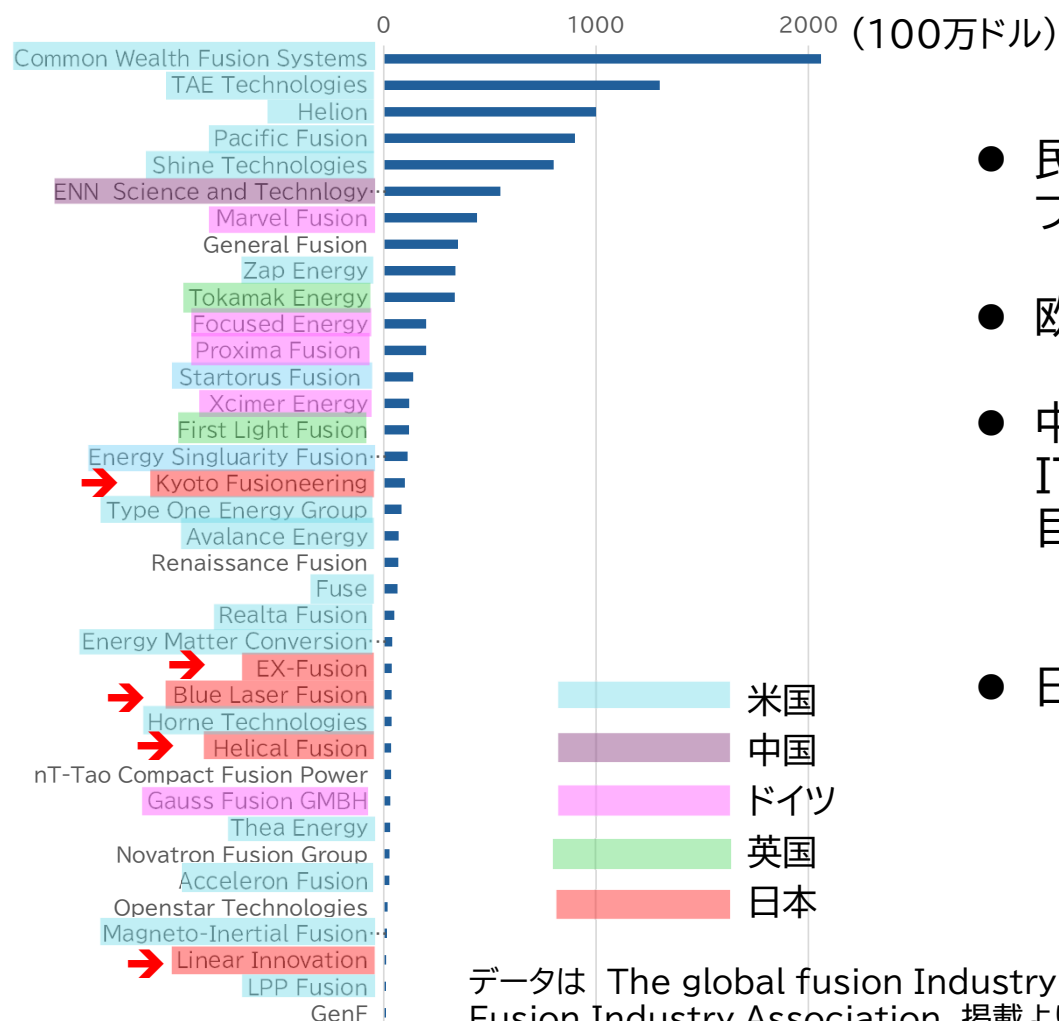
原型炉



技術的実証・経済的実現性
熱出力 150～200万キロワット
数十万キロワットの発電

- ITERの計画遅延(運転開始は2034年、核融合燃焼実験は2039年)
- カーボンニュートラル、AI普及による電力不足、エネルギー安全保障 → 巨額の投資先に

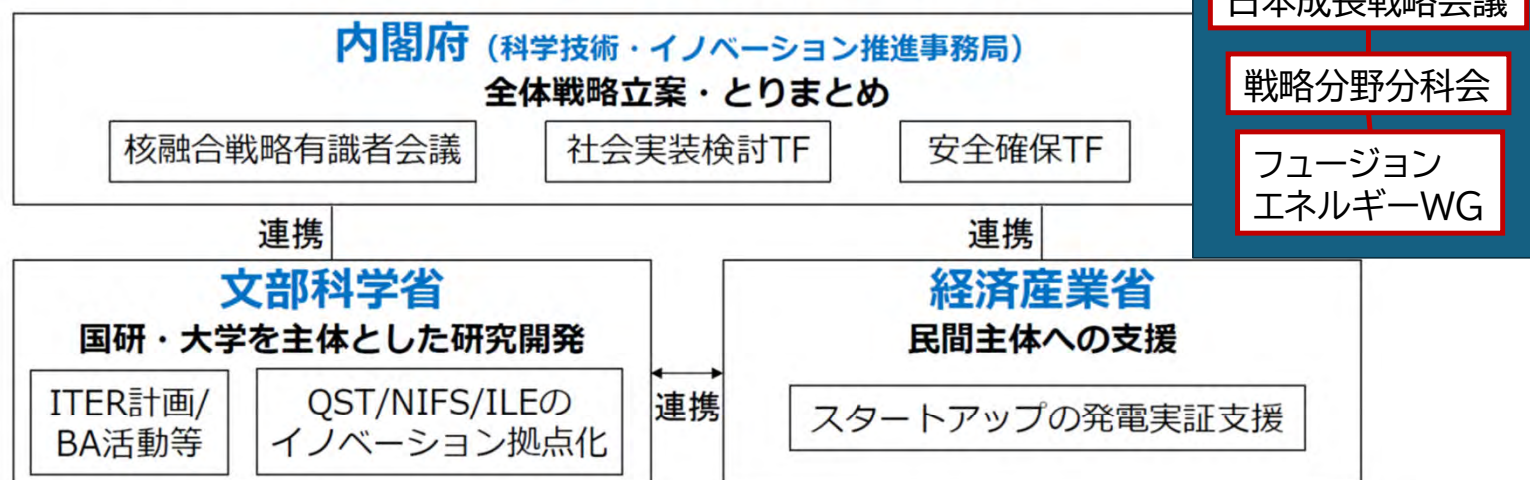
フュージョンエネルギーへの投資が世界的に増大



データは The global fusion Industry in 2025, Fusion Industry Association 掲載より

- 民間は米国が突出
フュージョンはビジネス！
- 欧州・英国は官民パートナーシップ
- 中国は国策による大規模投資。
ITERに先んじて核融合燃焼を
目指すなど猛進
- 日本は？

フュージョンエネルギーに関する政府の推進体制のイメージ



【2030年代発電実証に向けた主な役割分担のイメージ】

- **内閣府**：社会実装検討TFにおいて、発電実証の定義や2030年代の発電実証に向けたマイルストーンの考え方等を整理（例 いつまでに、どの技術課題を、どの水準で）
- **文科省**：ITER計画/BA活動等を通じた研究開発、**発電実証を目指すスタートアップ単体では対応が困難な共通的な技術課題の解決に向けたイノベーション拠点化**
- **経産省**：発電実証を目指すスタートアップ等の技術開発を支援。社会実装検討TFの検討結果を踏まえ、事業者の提案に基づき具体的なマイルストーンを設定

出典)
第4回社会実装検討タスクフォース 令和7年12月12日「資料 1-2」より抜粋
内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局

フュージョンエネルギーの実現への本質的前提課題

- 一つ、2億度以上の電離した気体燃料を閉じ込めること
- 一つ、電離した気体の圧力を高くし、効率よく反応を起こすこと
→ コンパクト（小さくできないか？）
- 一つ、強烈な熱負荷に耐える方法を定めること
- 一つ、強烈な中性子の照射に耐える材料を定めること
→ 寿命（保守性と稼働率）
- 加えて、燃料であるトリチウム(三重水素)の確保

目標設定： 原型炉の発電プラントの保守的な定義

- ・ 数十万キロワットを越える定常かつ安定な電気出力
- ・ 実用に供しうる稼働率
- ・ 燃料の自己充足性を満足するトリチウム増殖

- 早期実現を謳うことはこれらの使命・目標を下げることにつながる



多段階運転期における目標と装置仕様（案）

- 第1期： 発電に特化したブランケットを装着してITER程度のプラズマ体積を確保し、短パルス運転（数分）にて正味電力 ~ 0 規模の発電を実証
- 第2期： 燃料増殖も行うブランケットに交換し、数時間の長パルス運転（数時間）にて燃料増殖を実証
- 第3期： 並行して実施する研究開発の成果を反映し、加熱装置の高効率化やプラズマ性能の向上により、定常運転にて $\sim 100\text{MW}$ （正味電力 > 0 ）規模の発電を実証

	第1期 システム統合運転期（発電実証）	第2期 ブランケット機能試験期（+燃料増殖実証）	第3期 拡張運転期（+定常運転実証）
目標概要	- 短パルス運転（数分） - 発電端出力 $> \sim 180\text{MW}$ - 正味電力 ~ 0	- 長パルス運転（数時間） - 正味電力 ~ 0 - 三重水素自己充足性の確認($\text{TBR}>1$)	- 定常運転 - 正味電力 > 0 ($\sim 100\text{MW}$) - 三重水素自己充足性の実証($\text{TBR}>1$) - 保守シナリオの確認
装置仕様	発電実証： - ITERをベースとした運転シナリオ ✓ フュージョン出力：$\sim 500\text{MW}$ ✓ Q値(プラズマへの入力/出力パワーの比):10 ✓ パルス幅：~ 400秒 - 発電ブランケット ✓ 発電に特化したブランケット ✓ ITERと同サイズ（厚さ0.45m） - 加熱・電流駆動装置 ✓ 電子サイクロトロン加熱のみ	発電実証： - プラズマ圧力を上げた運転シナリオ ✓ フュージョン出力：$\geq 500\text{MW}$ ✓ Q値：~ 10 - 加熱・電流駆動装置 ✓ 電子サイクロトロン加熱／中性粒子ビーム加熱 - 蓄熱システム（オプション） 燃料増殖実証： - 増殖ブランケット - 増殖領域（厚さ0.5m） - 遮蔽領域（厚さ0.35m）	発電実証： - JT-60SAの成果を反映した運転シナリオ（さらに高いプラズマ圧力、高いプラズマ閉じ込め） - フュージョン出力：$> 500\text{MW}$（第2期を上回る出力） - 加熱・電流駆動装置の高効率化 燃料増殖実証： - 改良型増殖ブランケット 保守シナリオの確認： - 多段階運転期の移行時に遠隔操舵でのブランケット交換手順・時間の確認

出典)
第3回社会実装検討タスクフォース
令和7年11月7日「資料 2-2」より抜粋
内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局

論点 1 原型炉建設の判断、建設と「実証」、つぎに「実用化」の見通しは？



原型炉は発電プラント

- 数十万キロワットを越える定常かつ安定な
電気出力
- 実用に供しうる**稼働率**
- 燃料の自己充足性を満足する**トリチウム増殖**

- 「世界に先駆けた2030年代発電実証を目指す」の定義
 - ・ プロジェクトの目標が構成者の同床異夢とならないよう
 - ・ 「**てがかり**(専門)」かつ「**目に見える成果**(ステークホルダー・一般市民)」である仕掛け
- **早期実現**をもたらすには？ ← 今まで通りでは不十分という批判
 - ・ 目標を下げるのか？
 - ・ これまでにない方法を取る(イノベーション、ブレークスルーの涵養、データ戦略・失敗からの学び)
- 「**実証**」の定義は合意できよう。実証は「**実用化**」の必要条件であるが十分条件でない
 - ・ 実用化を判断するのは社会・経済
- **誰が**何に基づいて決断するのか(できるのか)? **Ownership** と **Fund**
 - ・ 専門家による合意形成のメカニズム(**パラダイム形成**)と 政策との整合
 - ・ 核融合は**総合エンジニアリング**、完成品とするには政治力を含めた課題解決能力要

論点 2 産業展望、国際協力、人材育成

- 今までにはない**資本と人材の巻き込み**が劇的に進んでいる
 - ◆ **フォーキャストの科学技術開発の視点**に加えて **バックキャストの経済開発からの視点**
- **バックキャストの意義**： 臆見や期待からの根拠薄弱な**仮定のすり替え**ではなく、**共通課題の定義と解決への協働** ⇔ **「エネルギー供給側と需要側の連携」**
- **骨太の取組** 1. **法整備**(規制・制度) 2. 裏付けとなる**予算・資本手当** 3. しかるべき**人・組織**
- **垂直統合と水平協力**
 - ◆ **ITERと原型炉設計**： **信頼できるレファランス**必須（それ自身がPlan B化していったよい）
 - ◆ **イノベーション、エコシステム、国際的・学際的展開、波及効果、多様性、循環、人材育成**
- 我が国単独でフュージョン発電炉を製作する潜在力はあるも
 - ◆ 戦略(何をやり、何は任せる) と 戦術(どうやってやる) の多様化(ゆるやかな紐帯のある)
 - ◆ 勝ち筋の基幹技術は？ 日本(産業)のコアコンピテンシーを何におくのか？

フュージョンはエネルギー経済の問題を資源から技術へ転換、それは産業と人材に宿る
人材育成には長期的な視点が必要