

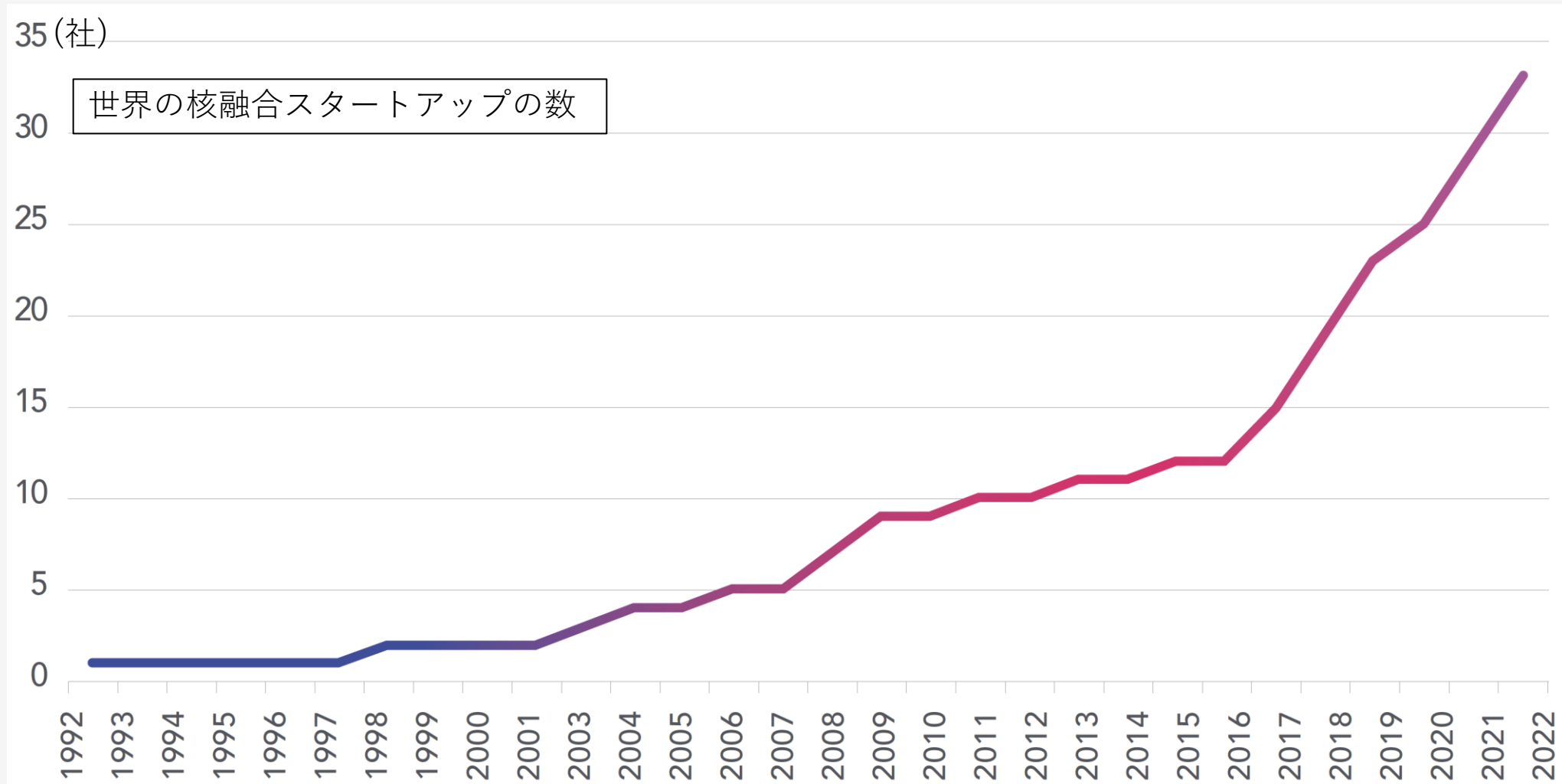
文部科学省 核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会 第一回

国内外スタートアップの研究

武田 秀太郎

九州大学 都市研究センター 准教授

過去20年間、核融合（フュージョン）エネルギーの実現に取り組む**スタートアップ企業**の数は増加の一途



核融合スタートアップは2021年単年で約5,000億円の投資を集め、累計投資額は7,500億円を超えると推定

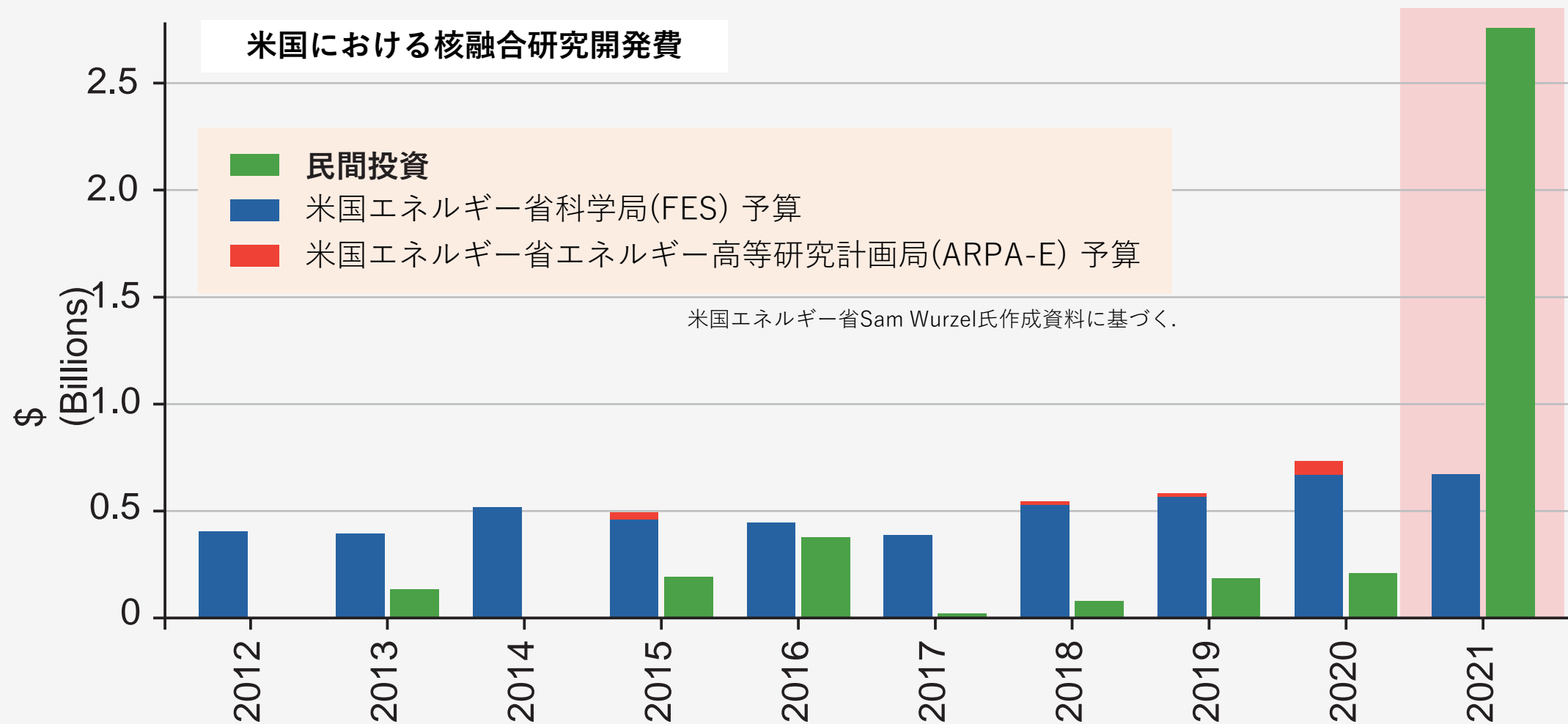
調達順位	会社名	国	推定資金調達額 (USD)	創業年	従業員数	主な投資家
1	Commonwealth Fusion Systems	米国	\$2B+	2018	300+	Bill Gates, Temasek, Khosla, Lowercarbon Cap, BEV, ENI
2	TAE Technologies	米国	\$1B+	1998	400	Google, Venrock, Chevron, Sumitomo Corp,
3	Helion Energy	米国	\$578M	2013	90	Dustin Moskowitz(Asana), Capricorn
4	General Fusion	カナダ	\$300M	2002	210	Jeffrey Bezos, Temasek, GIC
5	Tokamak Energy	英国	\$250M	2009	190	Hans-Peter Wild, Legal&General, Winton Ventures
6	Zap Energy	米国	\$200M	2017	60	Lowercarbon Capital, Chevron, Shell, DCVC, BEV, Addition

⋮

Fusion Industry Association, "The global fusion industry in 2022" (2022) を基に作成.

-	京都フュージョニアリング	日本	123.3 億円	2019	~90	JICベンチャー・グロース・インベストメンツ ほか
-	Helical Fusion	日本	8.7 億円	2021	~10	SBIインベストメント、ソニーグループ、KDDI、三井金属鉱業、三菱UFJキャピタル ほか
-	EX-Fusion	日本	1.3 億円	2021	~10	ANRI、大阪大学ベンチャーキャピタル ほか

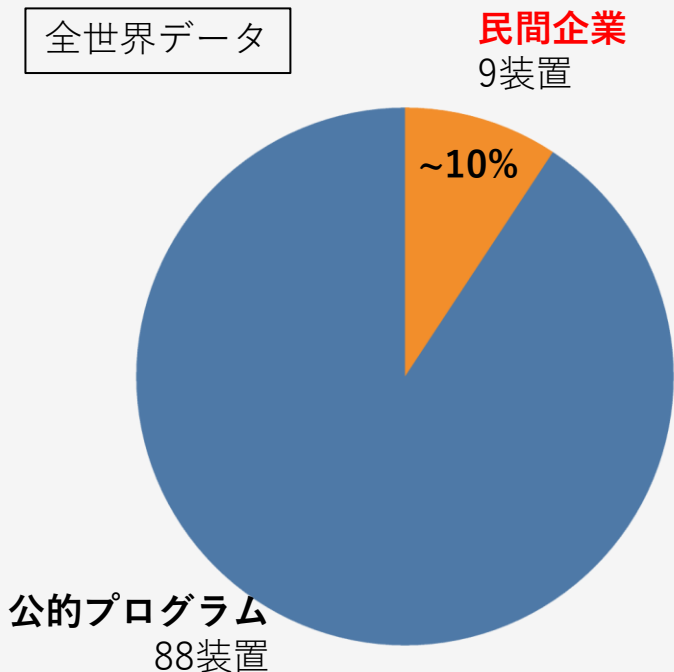
米国では2021年、**初めて民間からの投資が政府予算(ITER予算含む)を上回り**、業界に活力を与えている。



ITERに限らない、小型化・高度化等をはじめとする独創的な核融合R&Dへの資金供給路が確保されている

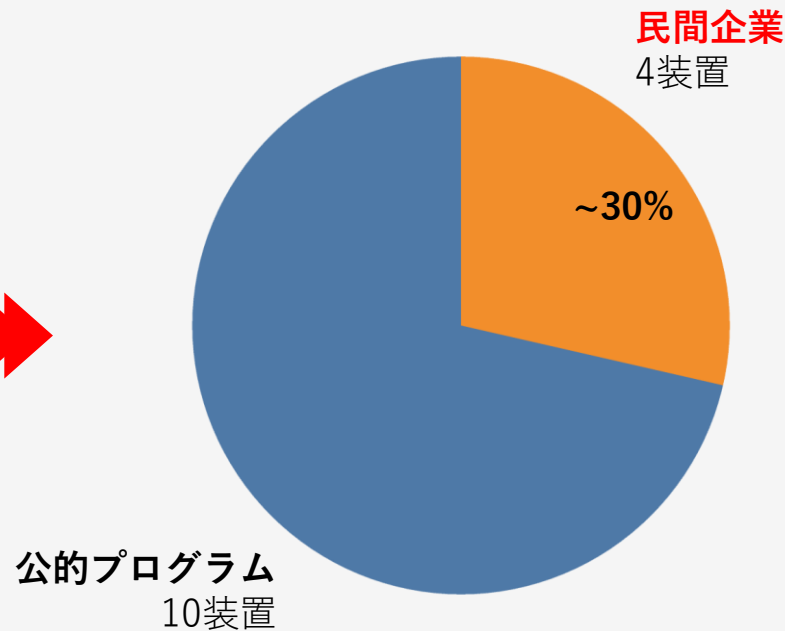
この民間資金による活力は、核融合装置の計画数という形で既に具現化されている。

全世界データ



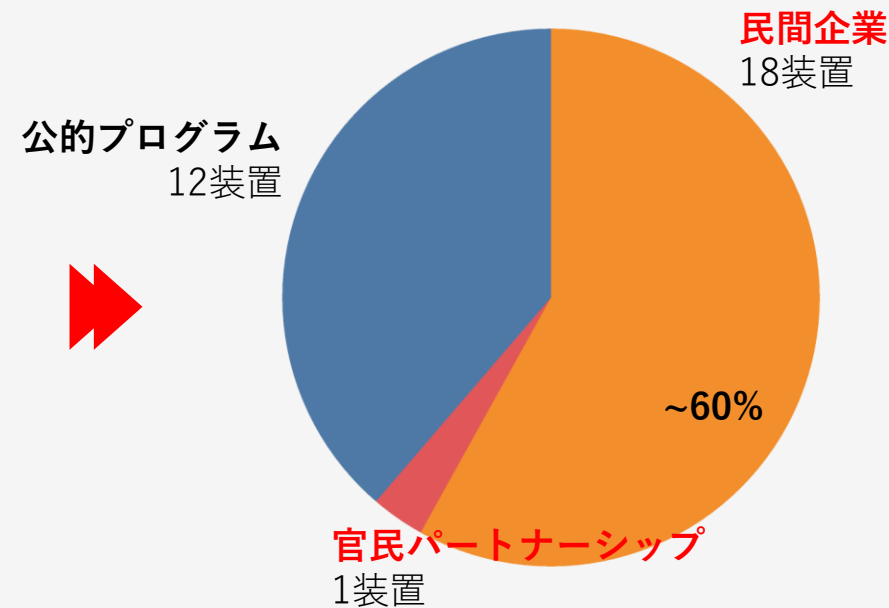
現在稼働中の核融合装置数

10%



建設中の核融合装置数

30%



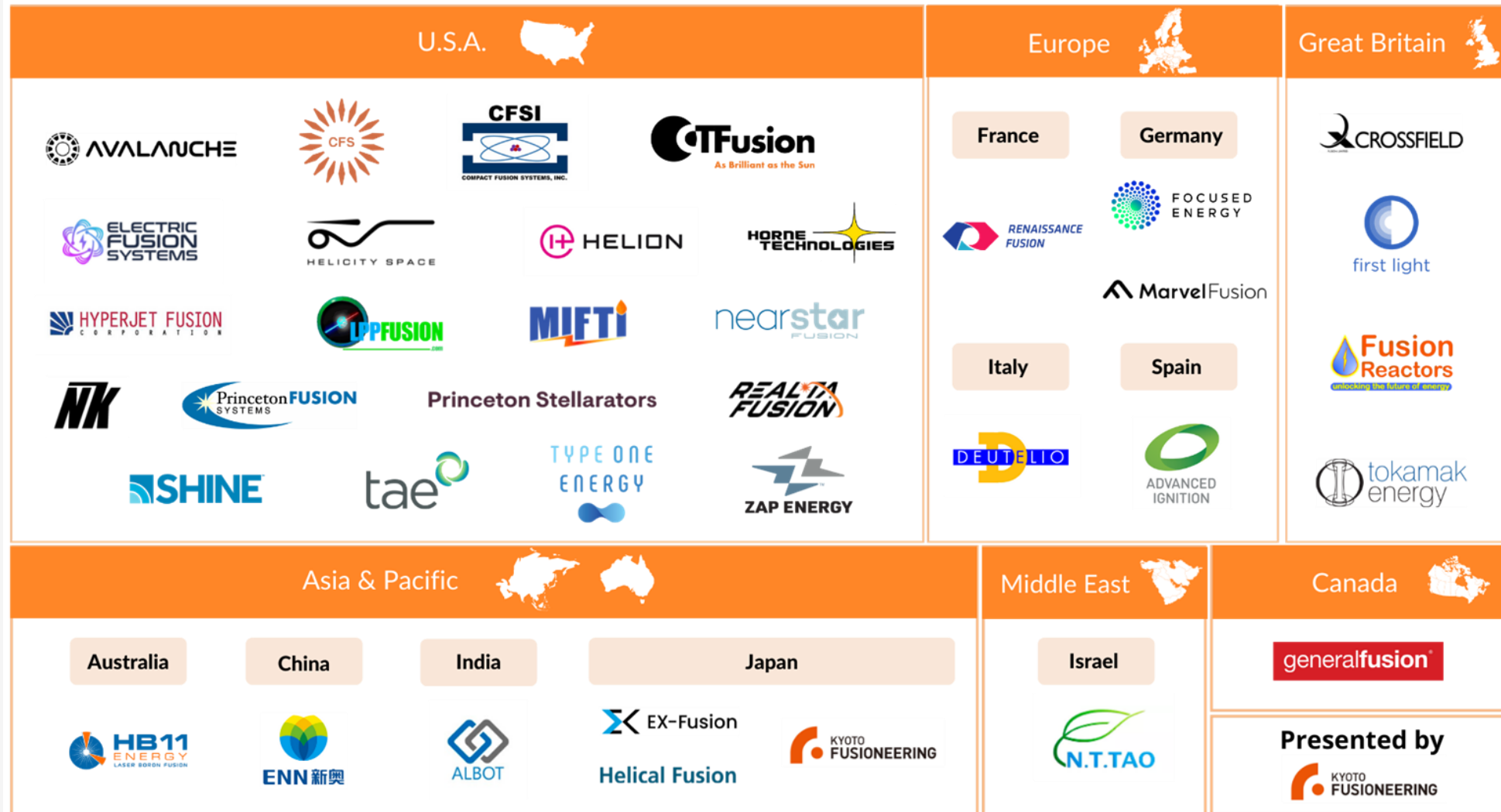
計画中の核融合装置数

60%

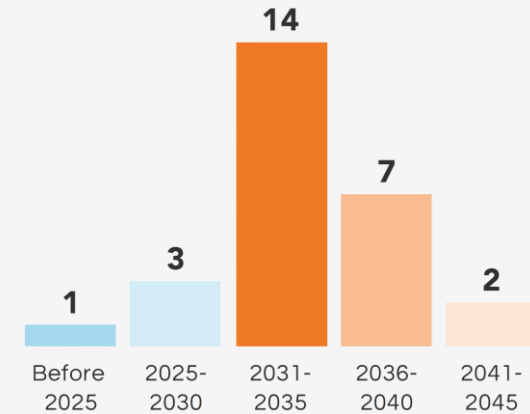
が民間企業・民間資金によるもの

勢いを増す核融合スタートアップ

但し、いまだ核融合スタートアップの地理的中心は欧米。



最も特筆すべきは、核融合の実現に掲げる目標の短さにある。
世界の3社に2社が、2035年かそれ以前の初送電を見込んでいる。



では彼らはなぜ短い実現目標を掲げるか？
各国スタートアップとの交流を通じて感じる3つの理由.

核融合による初送電を見込む年代 (27社回答)

小



中



大

投資家からの資金調達や人材獲得へのアピール：
ベンチャーキャピタルからの投資期間は10年程度の制約がつくことが一般的

気候変動等への対応への切迫感：需要の観点 - 2030年代の低炭素電源の必要性

自社の革新的な取り組みによる技術的自信と楽観

では彼ら核融合（フュージョン）スタートアップは、技術的に何に取り組んでいるのか？

革新軸1・革新的な閉じ込め方式

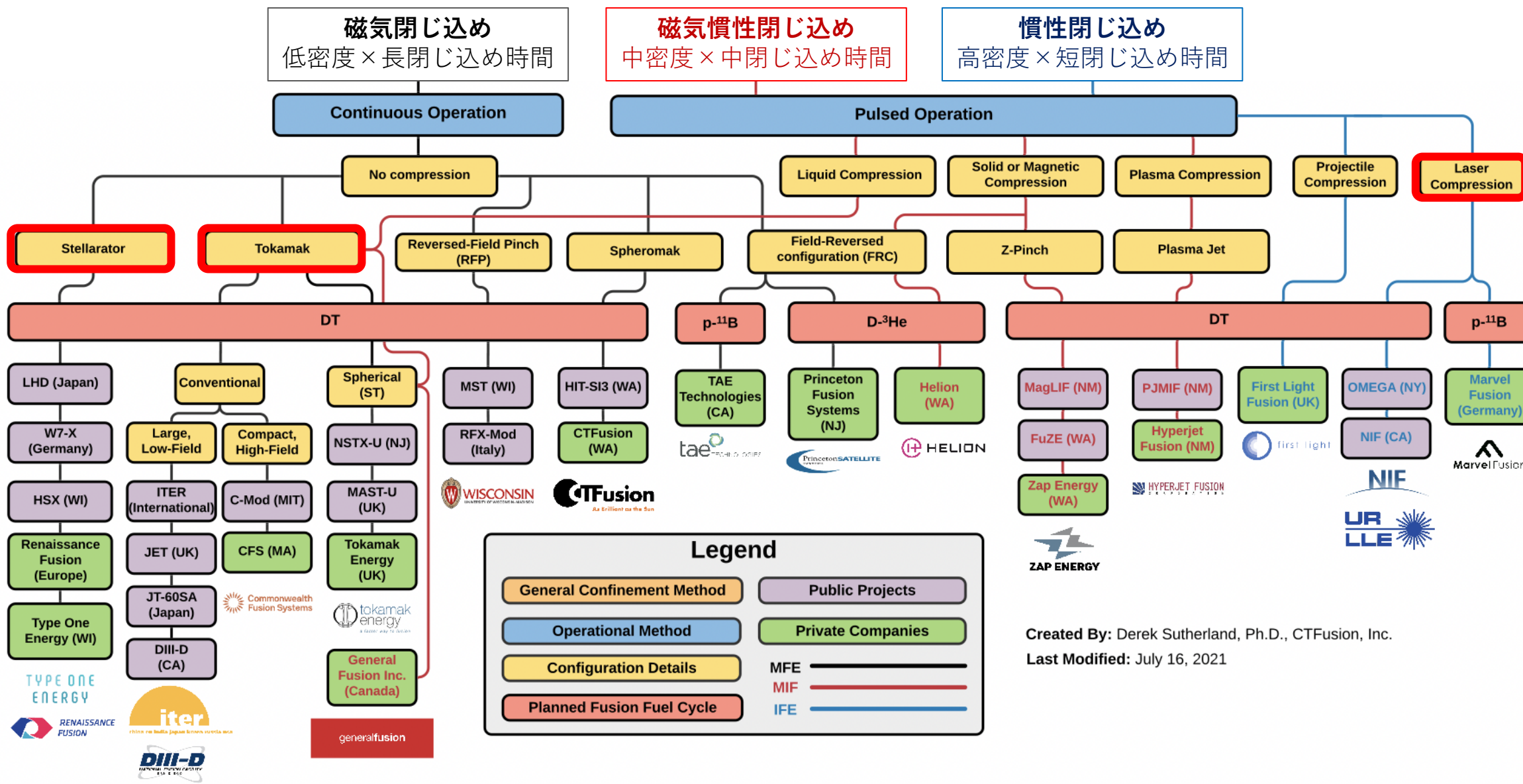
×

革新軸2・革新的な要素技術

×

革新軸3・革新的な社会実装

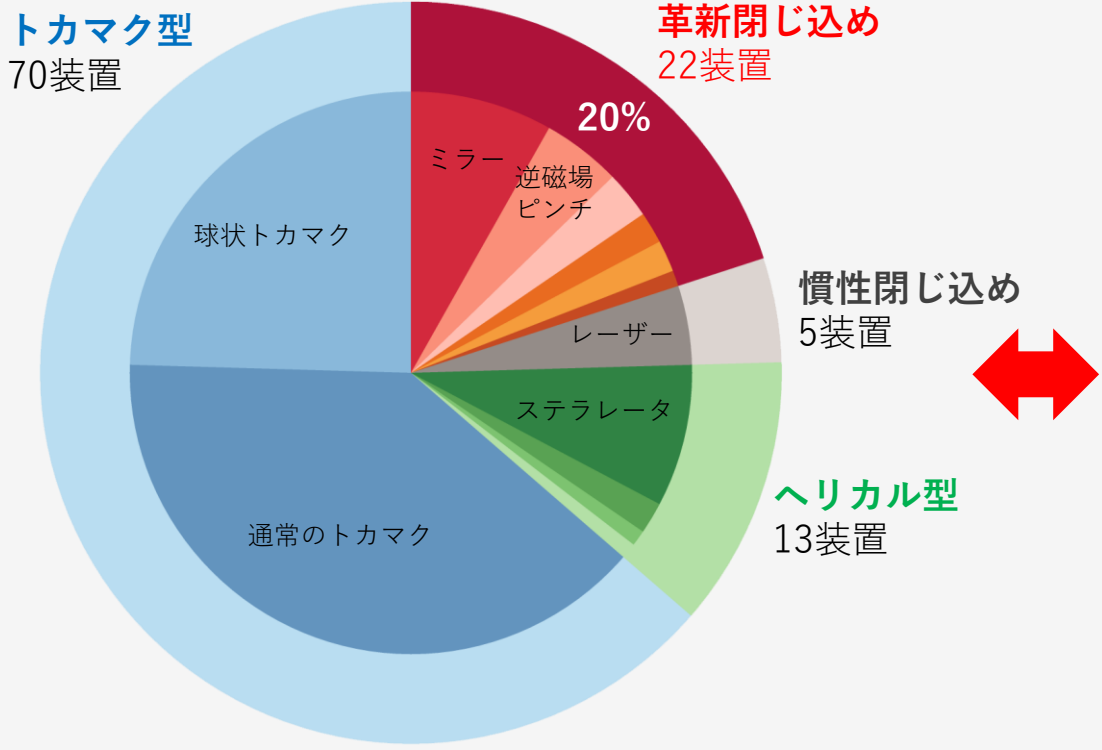
(ご参考) 世界で取り込まれている主要な閉じ込め方式 (公的・スタートアップ含む)



このうちトカマク型、ヘリカル型、レーザー方式が代表的な閉じ込め方式とされてきた

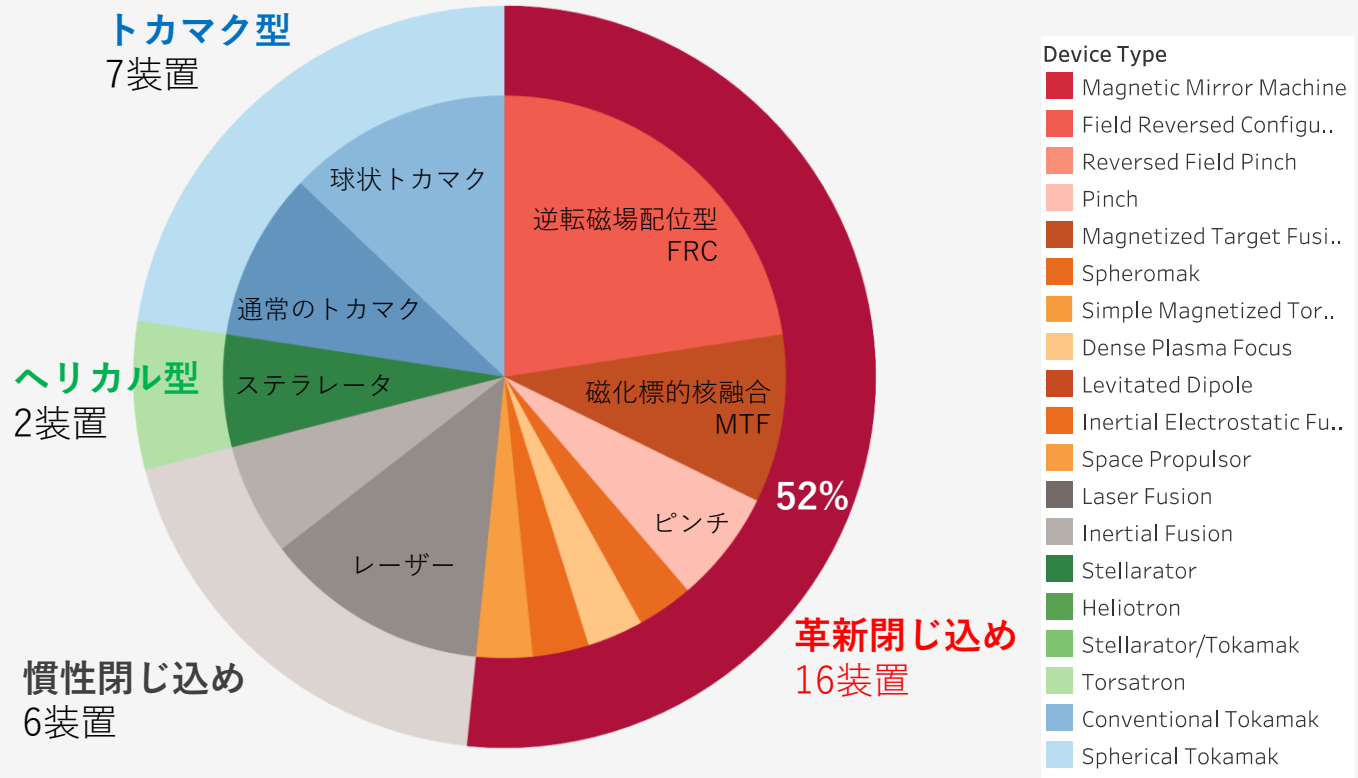
革新軸 1 ・ 革新的な閉じ込め方式

全世界データ



公的プログラムで取り組む方式

20%



民間企業が取り組む方式

52%

が革新閉じ込め方式 (トカマク・ヘリカル・レーザー以外の方式)

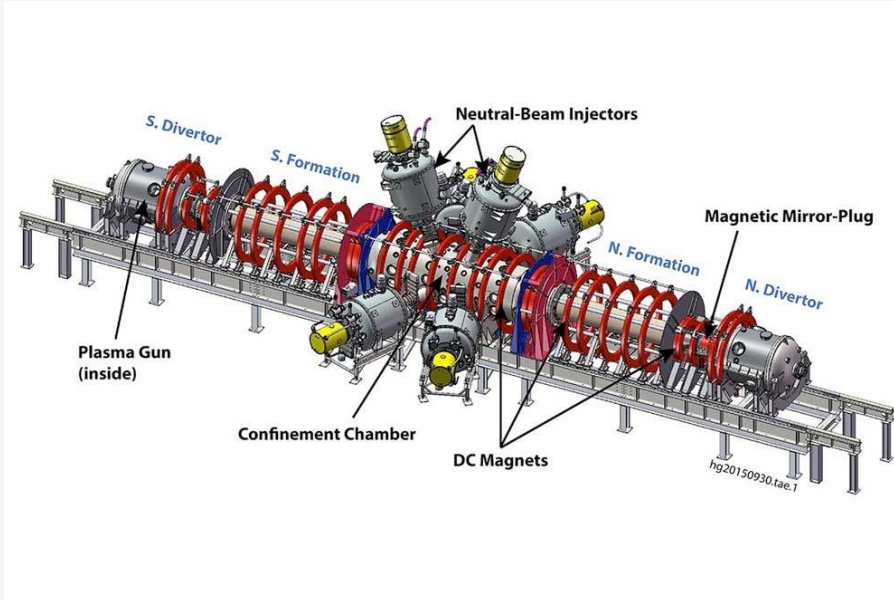
- Device Type
- Magnetic Mirror Machine
 - Field Reversed Configur..
 - Reversed Field Pinch
 - Pinch
 - Magnetized Target Fusi..
 - Spheromak
 - Simple Magnetized Tor..
 - Dense Plasma Focus
 - Levitated Dipole
 - Inertial Electrostatic Fu..
 - Space Propulsor
 - Laser Fusion
 - Inertial Fusion
 - Stellarator
 - Heliotron
 - Stellarator/Tokamak
 - Torsatron
 - Conventional Tokamak
 - Spherical Tokamak

※ 純粋に装置数による比較であり、予算規模を反映しない点を付記する

革新軸 1 ・ 革新的な閉じ込め方式

革新閉じ込め方式の事例

TAE Technologies 社 - 逆転磁場配位型 (FRC)



- 磁場反転配位FRCのプラズマを発射し中心で衝突合体
- その後、中性粒子ビームNBIにより高温プラズマを維持
- p-11B（ホウ素）を燃料として用いることで、中性子を生じさせない

郷田博司, BINDERBAUER Michl W., J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.1 (2017) 24 - 27.

General Fusion 社 - 磁化標的核融合 (MTF)



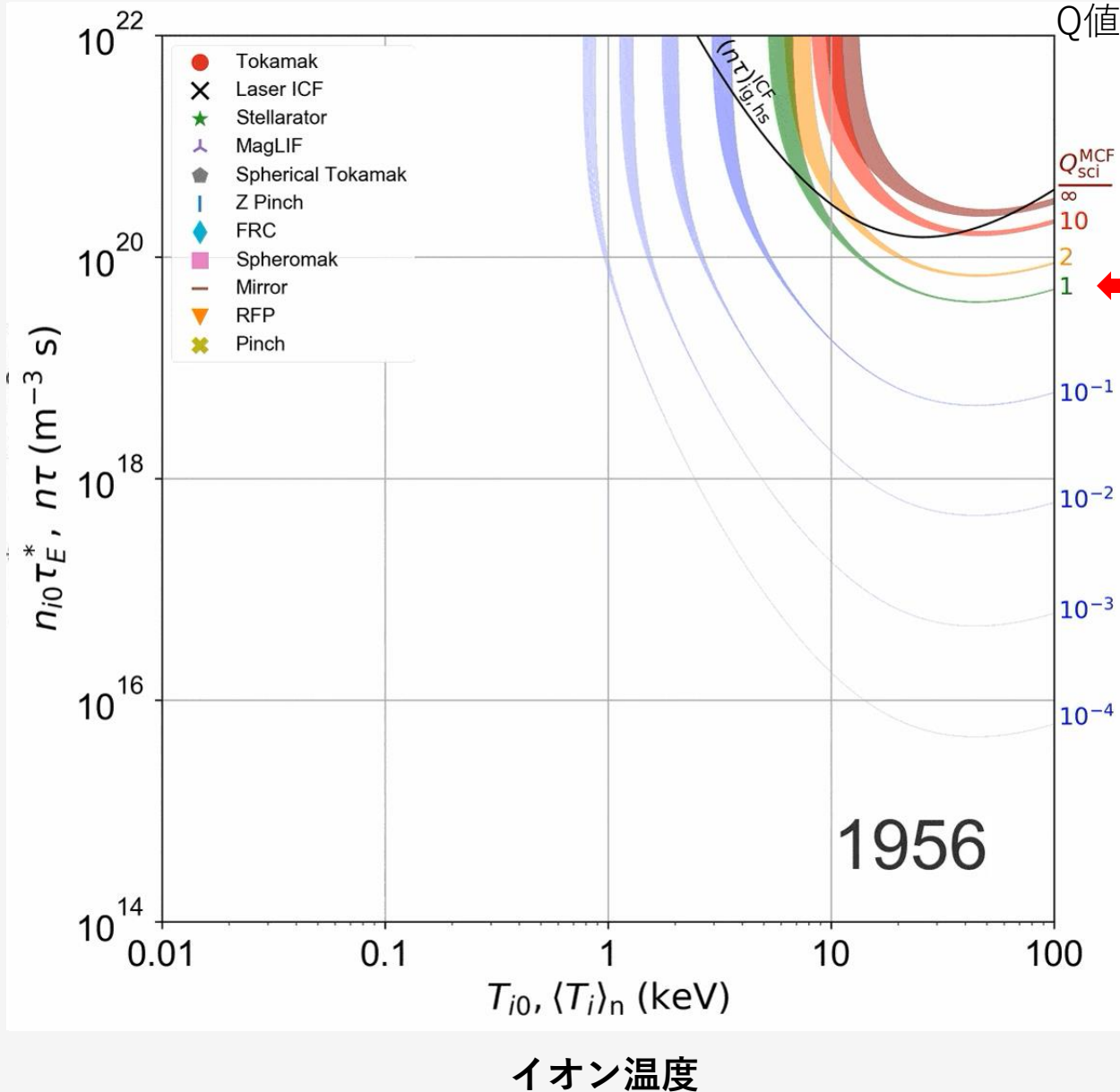
- 磁化プラズマを液体金属の渦中に注入する
- ピストンが全方位から液体金属を圧縮し、核融合反応を起こす
- 小型化および工業用パーツ使用による低コスト化

Kyle Pearce, CC Attribution-Share Alike 2.0 License

革新閉じ込めにより 1) 小型化による低コスト化 and/or 2) 従来閉じ込め方式の課題解決を狙う

革新軸 1 ・ 革新的な閉じ込め方式

イオン密度 × 閉じ込め時間



各閉じ込め方式の性能の進捗 (三重積)

$$\text{臨界プラズマ条件: } \frac{\text{得られる核融合エネルギー}}{\text{必要エネルギー}} = 1$$

エネルギー増倍率 (Q値)

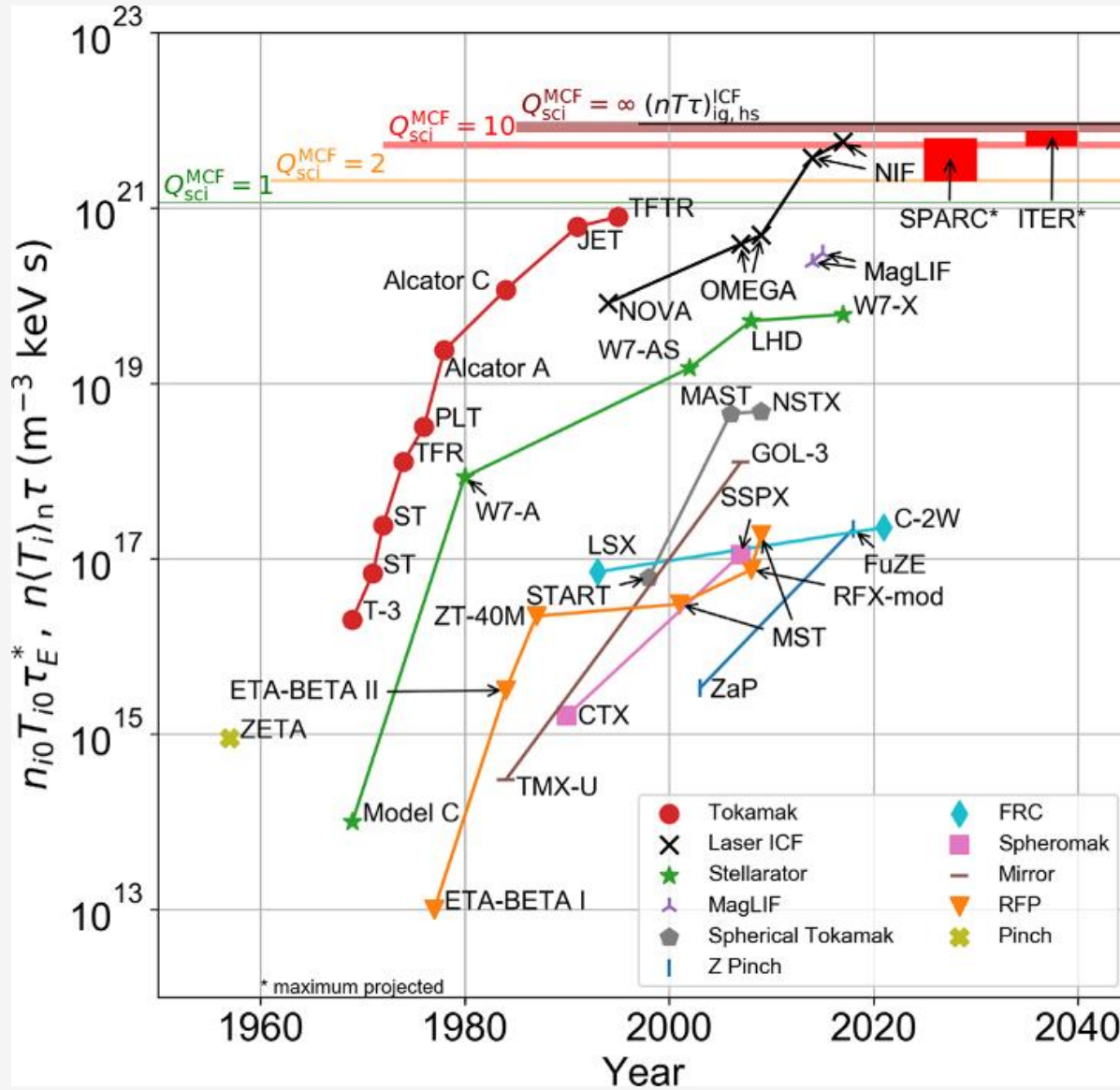
- 実現に向けた核融合装置の着実な進捗により、**エネルギー増倍率 (Q値) は 1 を上回る**所まで到達した
- 但し、**右上には”主要な閉じ込め方式”が集中**

ローソン図: 核融合装置の性能を表現

縦軸・閉じ込めに関する性能
横軸・温度に関する性能

革新軸 1 ・ 革新的な閉じ込め方式

イオン密度 × イオン温度 × 閉じ込め時間 (3重積)



実験実施年

各閉じ込め方式の性能の進捗 (時系列)

- トカマク方式が先行も、ITER計画に注力のため3重積の向上は目指されていない
- NIF (米国立点火施設) に代表されるレーザー方式の伸長が著しい
- ヘリカル方式がその後を追っている

革新閉じ込め方式は、
現在はまだ性能の向上を図っている段階

世界の民間企業が発表している発電炉5計画のうち
革新閉じ込めは1計画に過ぎない
(トカマク4計画、レーザー1計画)

革新軸 1 ・ 革新的な閉じ込め方式

日本には、現在 **6つの革新閉じ込め方式装置が運用中、加えて1装置が建設中**である。

日本に所在する革新閉じ込め方式の装置



米国の18装置と比して少ないものの、欧州と比すれば実験装置の多様性を確保している。

ただし、米国は18装置中14までが民間企業によるものだが、
日本には民間企業による革新閉じ込め装置が存在しない*点で特徴的である

※ ただし日本大学FAT-CMについては民間装置とする見方も存在する

革新軸 2 ・ 革新的な要素技術

また、革新的な閉じ込め方式でなく、**革新的な要素技術により小型化・高度化を追求する**民間企業も多い

先進材料

- 高温超伝導材料を始めとして、セラミック、高性能レーザーや合金など革新材料により大幅な小型化・高度化を計画

革新的コンピューティング

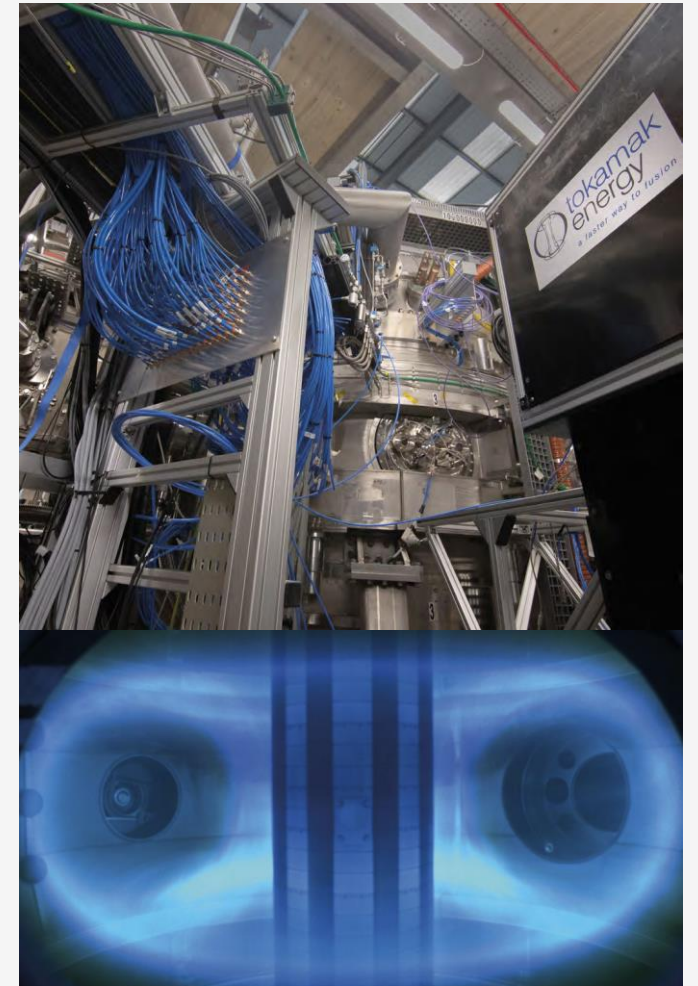
- デジタルツインによるシミュレーションやAI・機械学習による予測などによる、高効率な設計および実験

先進製造技術

- 3Dプリンティングを始めとする先進製造技術の応用による低コスト化・短納期化

工業用部品の採用

- 可能な限り工業用部品を採用することによる低コスト化

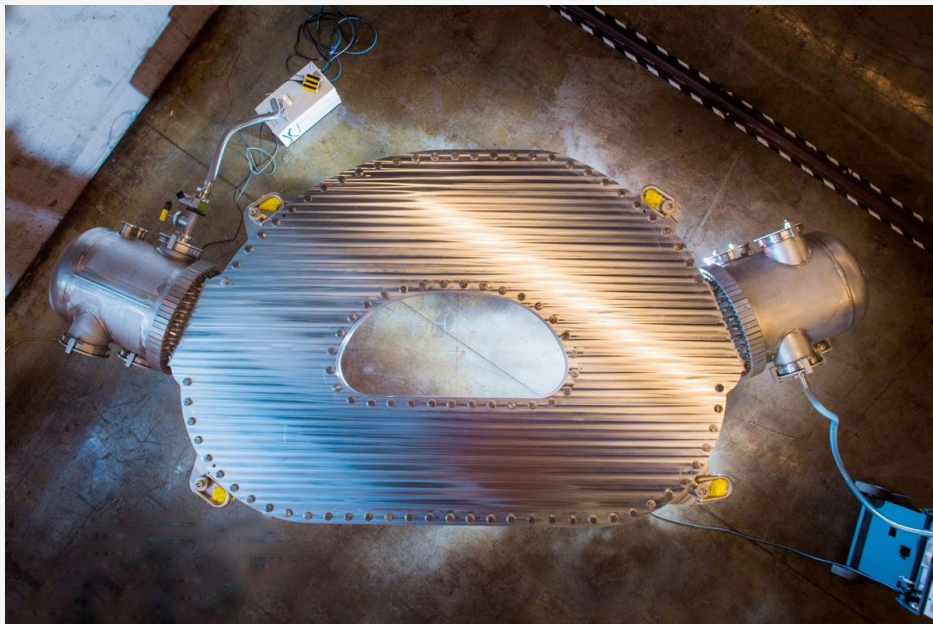


Fusion Industry Association (2022),
“The global fusion industry in 2022”

革新軸 2 ・ 革新的な要素技術

民間企業の事例

Commonwealth Fusion Systems 社 – トカマク型



- 高温超伝導材料である希土類バリウム銅酸化物(REBCO)により20テスラという超強力磁場を達成
- これにより、**トカマク型の大幅な小型化**を達成する計画

Courtesy of Commonwealth Fusion Systems:
<https://cfs.energy/news-and-media/cfs-commercial-fusion-power-with-hts-magnet>

民間・公的機関パートナーシップの事例

英国原子力公社 + NVIDIA社 – トカマク型



- デジタルツインの構築により、**中性子輸送シミュレーション、AIによるロボット制御トレーニング、メンテナンス改善によるダウンタイム短縮**などを可能とする

NVIDIA社プレスリリースより引用
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000301.000012662.html>

革新要素技術による核融合実用化の加速の検討は、我が国が技術的に可能でありながら欧米と比して注力の弱い領域

革新軸 2 ・ 革新的な要素技術

(ご参考) 米エネルギー省エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E) GAMOWプログラム 採択プログラム一覧

- 燃焼プラズママシンの不安定性制御のための高効率メガワット級ジャイロトロン (Bridge 12 Tech 社)
- 効率的なトリチウム抽出のための界面工学膜 (コロラド鉱山大学)
- 核融合エネルギー炉モデル統合装置FERMI (オークリッジ国立研究所)
- ファーストウォール/ブランケット用途のための先進キャストブルナノ構造合金 (オークリッジ国立研究所)
- 先進的な製造と設計によるプラズマに面したコンポーネントの革新 (オークリッジ国立研究所)
- 核融合環境用ODS鋼の微細構造最適化と新規加工開発 (パシフィック・ノースウェスト国立研究所)
- 超高フラックスDT中性子源を可能にするプラズマウィンドウ技術の応用 (Phoenix 社)
- プラズマ加熱制御用ワイドバンドギャップ半導体アンプ (Princeton Fusion Systems社)
- 高速核融合燃料サイクルのためのEM増強HyPORループ (サバンナリバー国立研究所)
- LiT直接電解のプロセス増強スケールアップ (サバンナリバー国立研究所)
- ENHANCEDシールド： 小型超伝導トカマクを可能にする重要な材料技術 (ストーニーブルック大学)
- AMPERE - プラズマ曝露ロバスト電極用先端材料 (カリフォルニア大学ロサンゼルス校)
- トリチウム回収を組み込んだ核融合炉用の再生可能な低Z壁 (カリフォルニア大学サンディエゴ校)
- 核融合用にカスタマイズされた先進高温超電導導体 (ヒューストン大学)

米国は戦略的に革新要素技術に投資するプログラムを有する

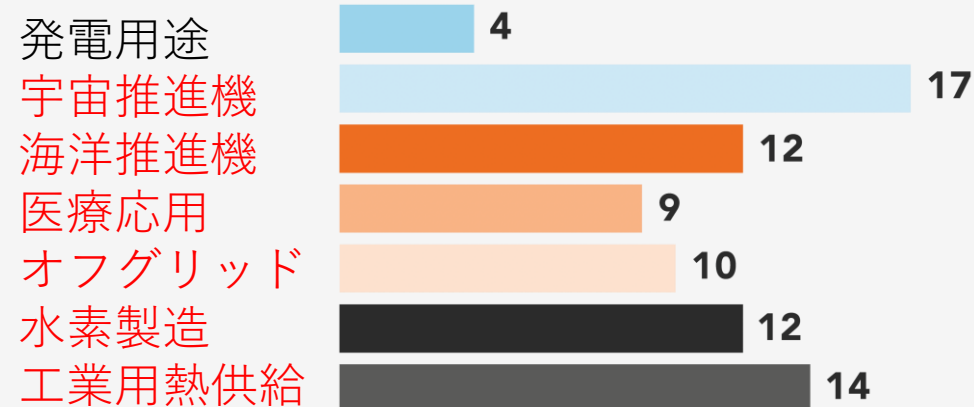
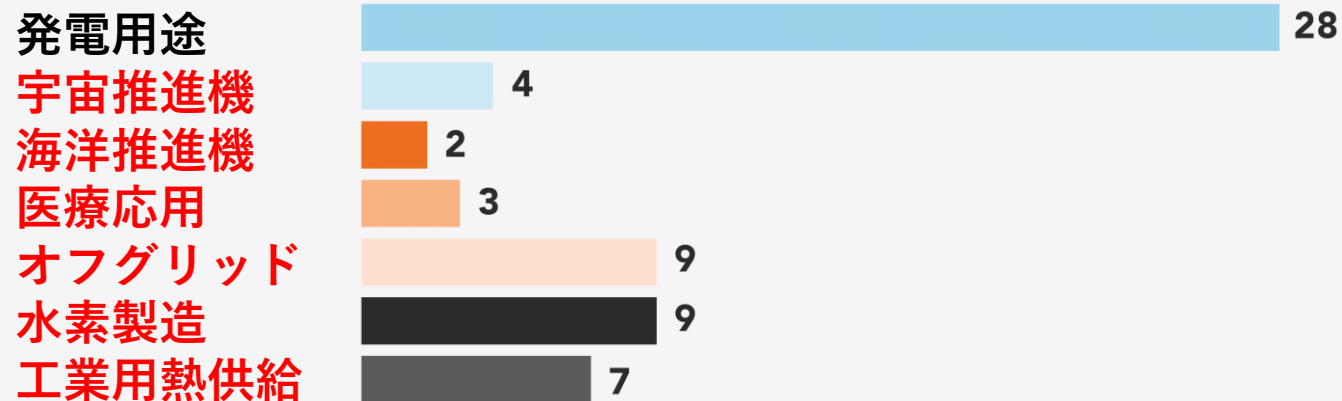
革新軸 3・革新的な社会実装

核融合スタートアップの大多数が、**発電以外の核融合エネルギーの応用を計画または検討している**

核融合エネルギーにより狙う主たる市場
(複数回答可、33社中)

+

左に追加で検討している
核融合のスピノフ用途



医療応用、工業用熱供給、推進機など、
ニーズ = 市場からバックキャストした核融合の研究が行われている点が特徴的

革新軸 3 ・ 革新的な社会実装

民間企業の事例

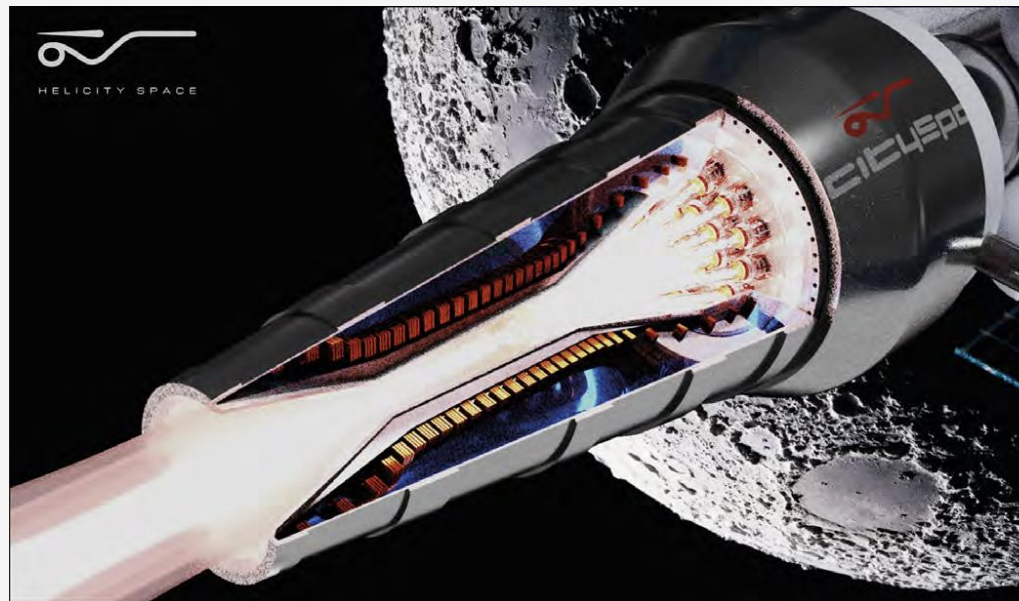
Phoenix 社 – 核融合中性子源



- 加速器を用いた核融合中性子源により、**中性子イメージング、医療用放射性同位元素の製造**などの社会実装を行う

Courtesy of Phoenix LLC:
<https://www.phoenixneutronimaging.com/>

HELICITY SPACE Corp 社 – 核融合ロケットエンジン



- 2032年のパイロットフライトを目指し、磁気慣性閉じ込め核融合エンジンにより火星まで2ヶ月、木星まで1年のフライト実現を目指す

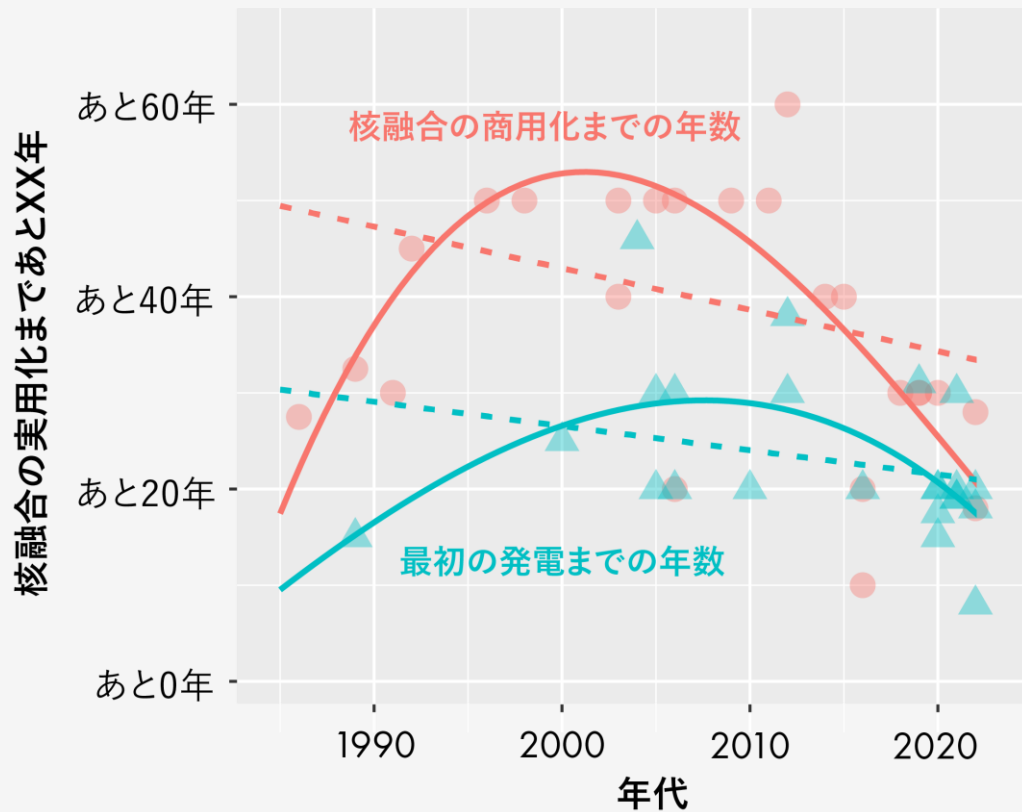
Fusion Industry Association (2022), “The global fusion industry in 2022”
より引用

足元の産業応用から将来の宇宙拡張まで、
核融合による幅広い社会・産業構造の変化に取り組む挑戦の多様性が存在

科学者による
「核融合はあとX年」
の予測の推移

JETが16 MW出力達成 (1997)
JT-60が $Q_{eq} = 1.25$ 達成 (1998)
NIF建設完了 (2009)
ITER建設開始 (2010)

← 公的プログラムの進捗による期待感の反転



科学者が核融合の実用化まであと何年と予測してきたか、その過去40年の推移を分析した結果、

90年代末~2010年頃の公的プログラムの着実な成果が、現在の核融合ブームの端緒となった可能性が示唆された

公的プログラムの着実な進捗

民間の参入による
業界への活力・
人材流入



核融合への期待値の
高まりによる
民間への挑戦的支援

民間スタートアップの破壊的な挑戦

世界の核融合（フュージョン）スタートアップは、**以下の3軸から革新的な研究を実施している。**

1・革新的な閉じ込め方式

民間企業が取り組む計画の
50%超が革新閉じ込め方式

逆転磁場配位型FRC、磁化
標的核融合、ミラーなど

革新閉じ込めにより

- 1) **小型化による低コスト化**
- 2) **従来方式の課題解決**

日本にも実験装置は存在するが、
欧米のような数百～数千億円の
調達を受ける基盤は存在しなかった

2・革新的な要素技術

高温超電導材料をはじめと
する**先進材料**

デジタルツインやAI・機械
学習などの**革新的コンピュー
ーティング**

3Dプリンティングなど**先進
製造技術**

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
なされてこなかった領域

3・革新的な社会実装

**市場=ニーズからバックキ
ャストした研究**により、大
多数のスタートアップが**発
電用途以外の応用**を計画ま
たは検討している

宇宙推進機、医療応用、
オフグリッド、水素製造
工業用熱供給など

技術的フォアキャストでなく、
ニーズからのバックキャスト
による社会・産業構造へ

核融合による破壊的イノベーションを目指した挑戦的な支援が今求められている