

核融合スタートアップ企業の紹介

芦川 直子

Materials Research Team, Kyoto Fusionneering Ltd.,

核融合について学び・発信するフュージョンエネルギースクール事業
2026年1月10日-12日、九州大学

■ コンテンツ

- **なぜ核融合エネルギーが必要か？**
- **民間による核融合エネルギー開発**
- **核融合エネルギーの仕組み**
- **発電に向けた最近の進展**

なぜ核融合エネルギーが必要か？

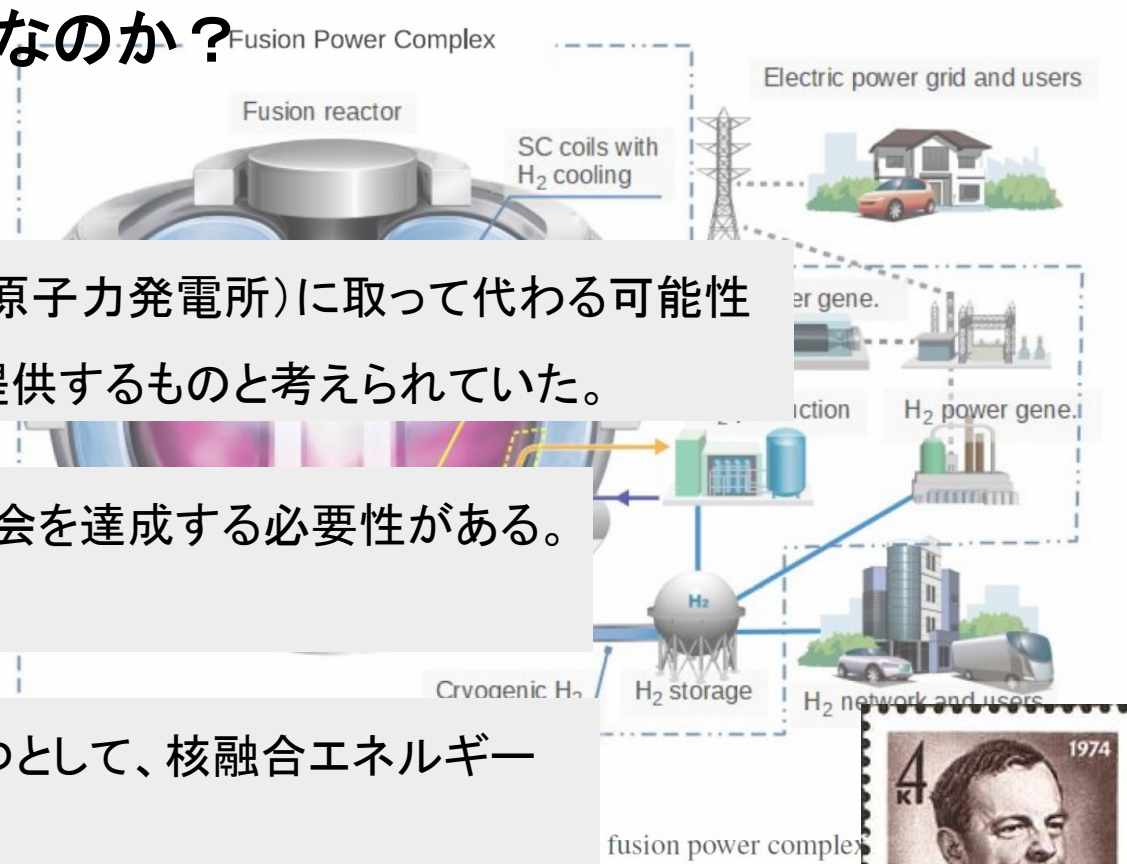
核融合エネルギーはなぜ私達に必要なのか？

その答えは段々と変化してきた。

➤ ~2000年代: 核融合プラントは核分裂炉（原子力発電所）に取って代わる可能性があり、信頼性の高いベースロード電源を提供するものと考えられていた。

➤ 2000年代~早期にカーボンニュートラル社会を達成する必要がある。
核融合エネルギーは、その手法の一つ。

➤ 現在(2026年): 輸出可能な産業技術の一つとして、核融合エネルギーが着目されている。



「社会が必要とするときに、核融合は実現される」^{*2, *3}

*1 H. Chikaraishi, N. Ashikawa, et al., PFR, 18 (2023) 1205001

*2 日本語訳は下記のサイトから引用。 <https://spectra.mhi.com/jp/can-nuclear-fusion-give-us-unlimited-emissions-free-energy>, *3 写真は <https://ja.wikipedia.org/> から

*4 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%AC%E9%83%BD%E8%AD%B0%E5%AE%9A%E6%9B%B8>

スマートグリッド化から、電力消費の増加が予測されている

ここ近年(10年)、電力機器の省エネ化がすすめられてきた。

しかし、今後のスマートグリッド化、データセンター等のニーズ拡大で、消費電力の増加が見込まれている

データセンター・半導体工場の新增設に伴う個別計上最大需要電力

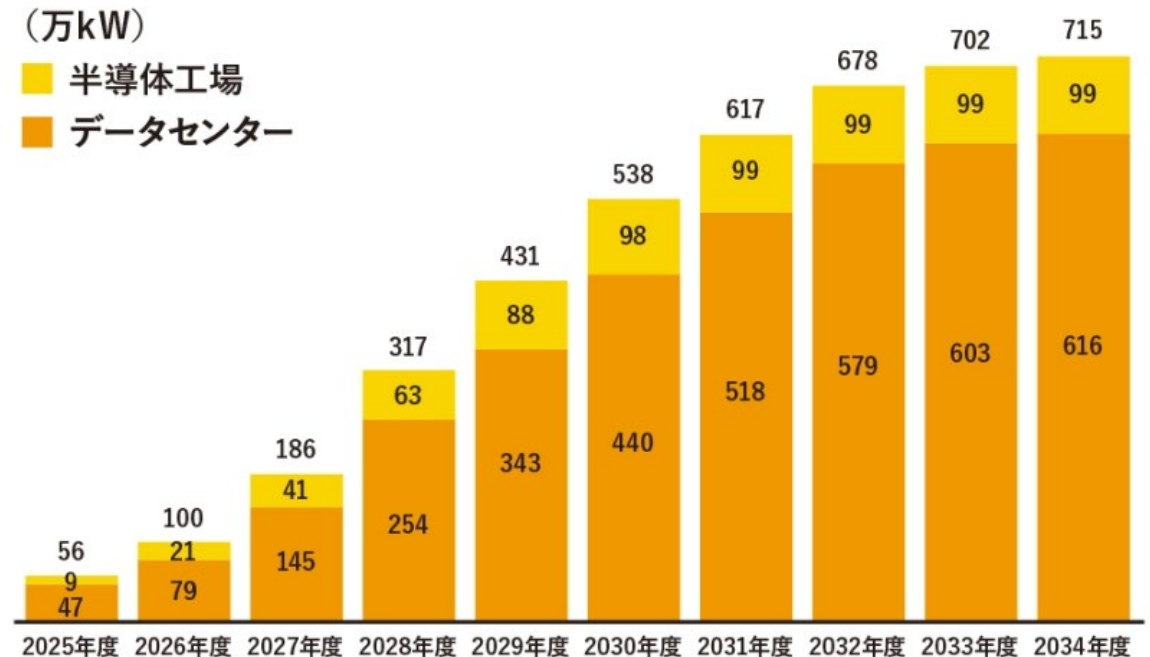
IT関連消費電力予測	2016年	2030年	2050年
IPトラフィック (ZB/年)	4.7	170	20,200
消費電力 (国内: TWh/年)	41	1,480	176,200
消費電力 (世界: TWh/年)	1,170	42,300	5,030,000

120倍



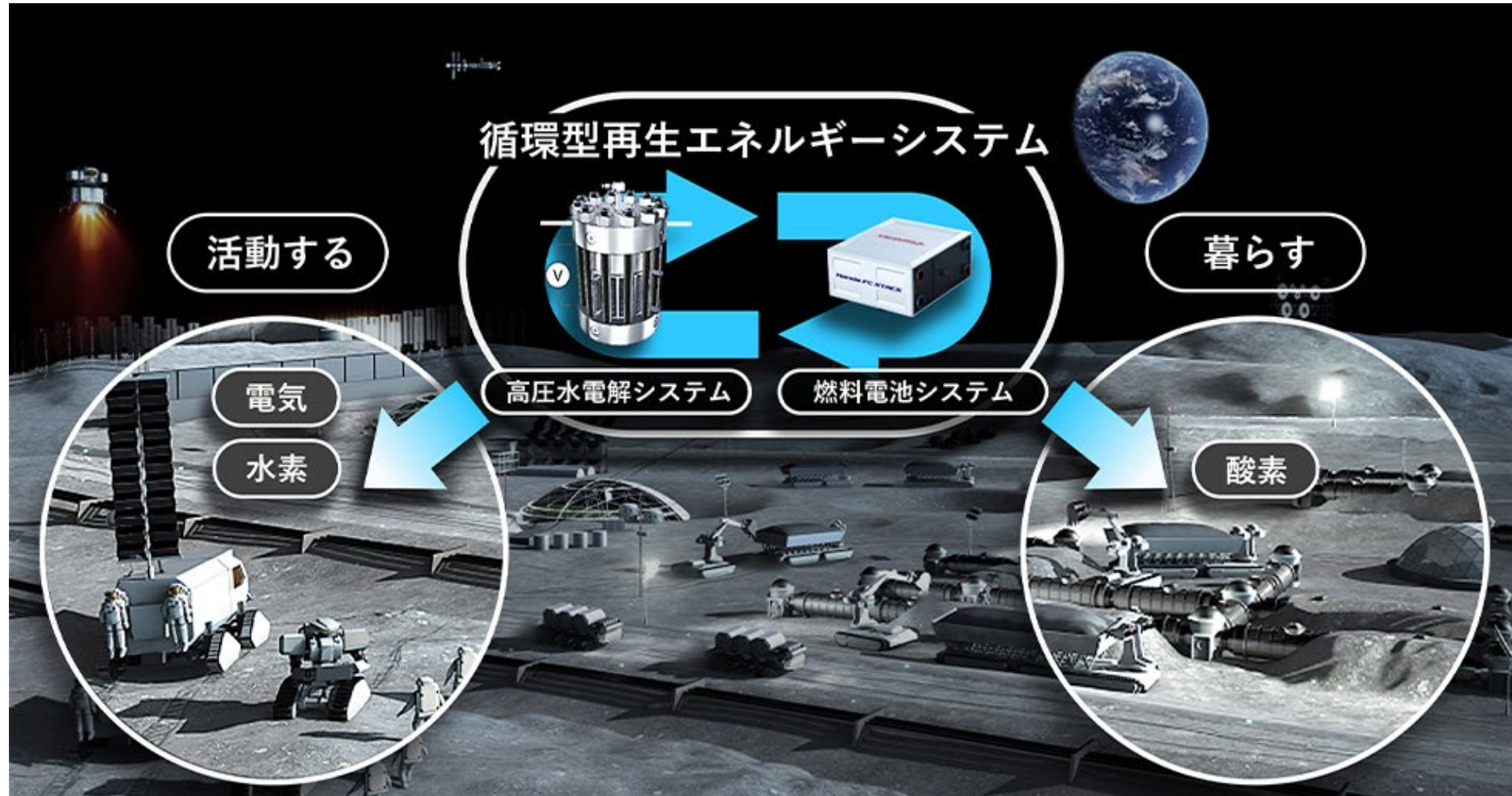
出典：科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

日本は労働人口が減少するので、特にスマートグリッド化、無人運転、AIによる代用等が重要となる



出所：「電力広域的運営推進機関HP 2025年度 全国及び供給区域ごとの需要想定について」をもとにJOGMECが作成
<https://www.jogmec.go.jp/>

宇宙居住と核融合エネルギーの親和性



月面での循環型再生エネルギーシステムの活用 イメージ図 ©JAXA/Honda

宇宙居住空間（月よりも遠い世界、太陽エネルギーが少ない世界）
資源循環、シンプルな燃料、エネルギー製造、多用途

核融合エネルギー開発

- 1) 核融合プラントで必要となる機器に関する基礎実験は進められているが、実規模制作や実証試験は現在進行中
- 2) 核融合プラント内部は、相互に連動しての運用が不可欠で、燃料の効率的運用にはAI等を利用した予測制御も必要になる
- 3) 定常運転状態となった核融合プラントでは、燃料を近隣およびプラント内部で確保可能なため、特に日本のようなエネルギー資源に制約がある国では、重要なエネルギー源となる
- 4) 太陽エネルギーが乏しい世界（たとえば宇宙空間）でも利用可能。核融合エネルギーは宇宙推進（ロケット）用途での研究も行われている

民間による核融合エネルギー開発

近年の核融合エネルギー開発の動向

<海外>

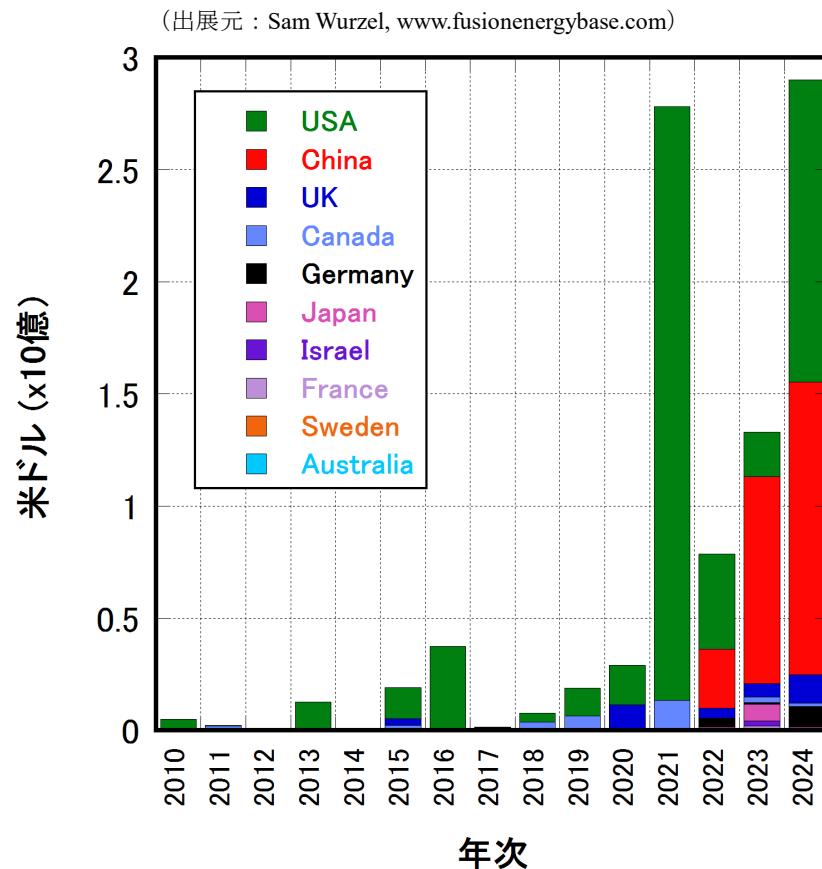
- ARC装置（アメリカ）2030年代前
- STEP装置（イギリス）が2040年まで
エネルギー出力が可能な核融合エネルギー装置としての稼働を目指している。

<日本>

- FAST計画が2035年の運用開始を目指した設計を開始
<https://www.fast-pj.com/>
- 量研が主導する原型炉開発計画を前倒して2030年代の発電実証を目指す議論を開始

従来の計画よりも約10年ほど短く、かつ世界共通の動向にもなっている。
このような装置で「核融合反応からエネルギー取り出しが可能か」という検証の後、実際に電線を介して私たちの生活で使用する電気として供給可能か、という社会的な議論となっていく。

世界の核融合エネルギー開発に向けた民間投資額



・従来の公的機関によるプロジェクト支援から、**民間投資による開発へのパラダイムシフト**

・核融合エネルギー開発は**商業的な視点**として見られつつある

・アメリカが先駆的な役割を果たしているが、近年は**中国での民間投資が増えている**。

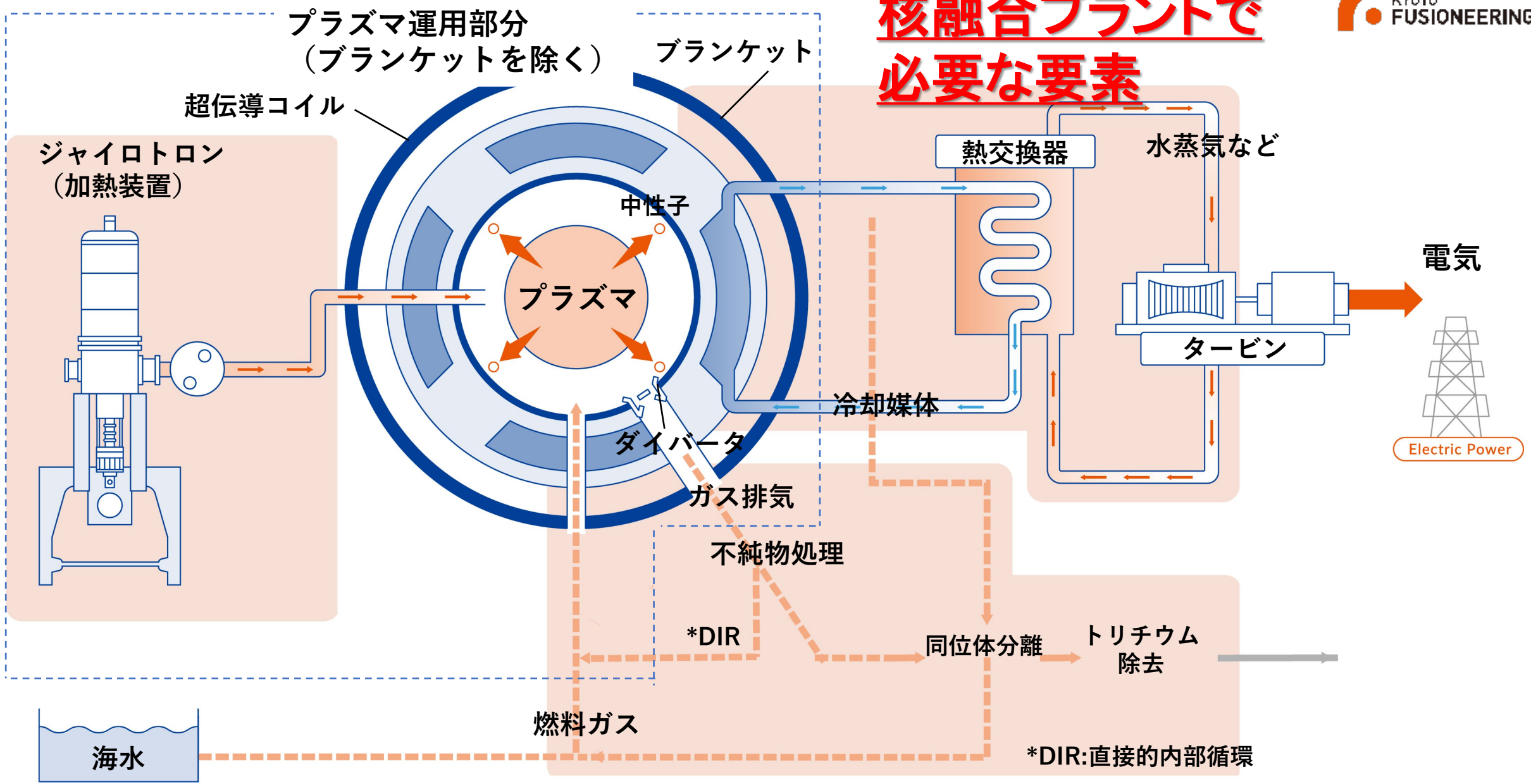
CFS社（米）だけでも20億ドル

・公的から民間プログラムへの変化は、例えば宇宙開発研究でスペースX社のように、今では**民間企業がNASAと協力して宇宙飛行の役割を果たす**ようになった事例が参考になる。

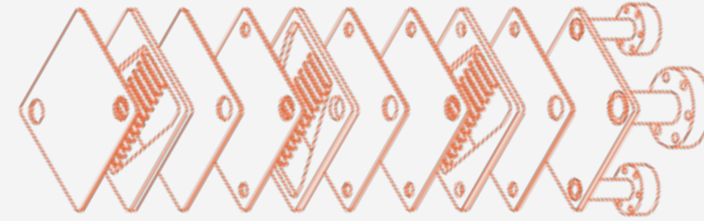
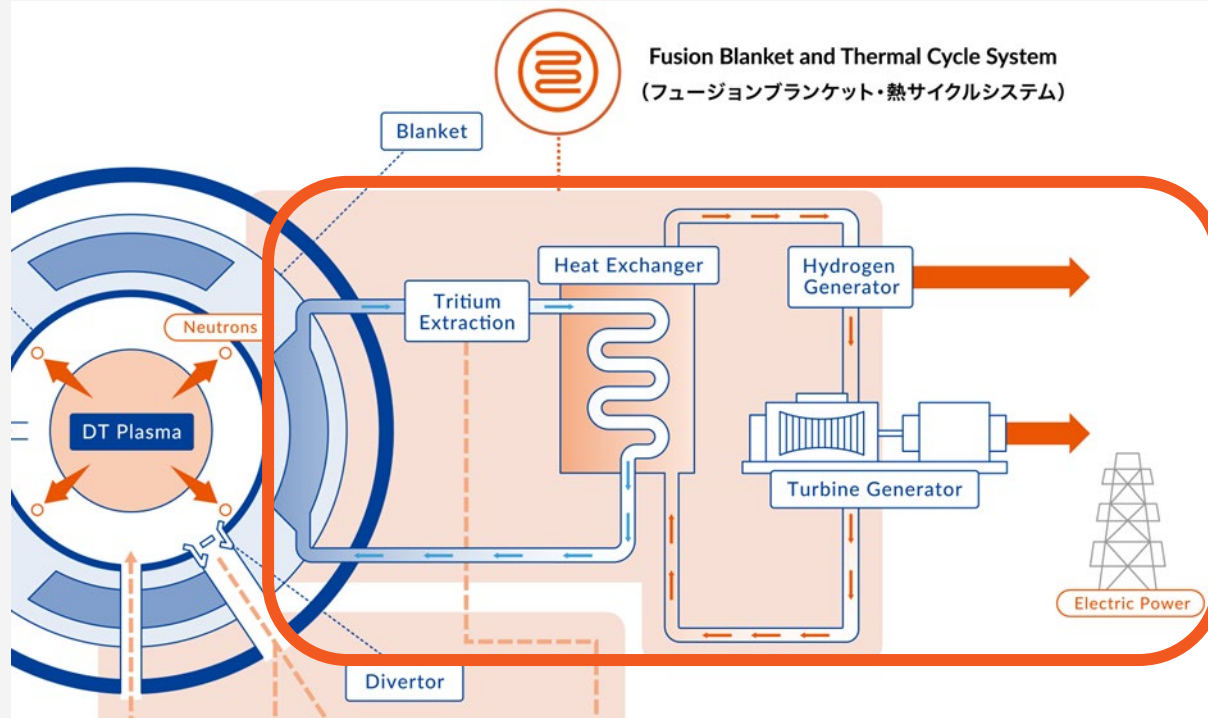
表1 各国の調達金額 (年次ごとの金額は図2に記載)

金額 (米\$)	米国	中国	カナダ	英国	ドイツ	日本	イスラエル	フランス	スウェーデン	オーストラリア
	5.63 B	2.49 B	321 M	200 M	139 M	106 M	22 M	16.4 M	8.4 M	3.6 M

核融合プラントで 必要な要素



熱エネルギーから電力へ

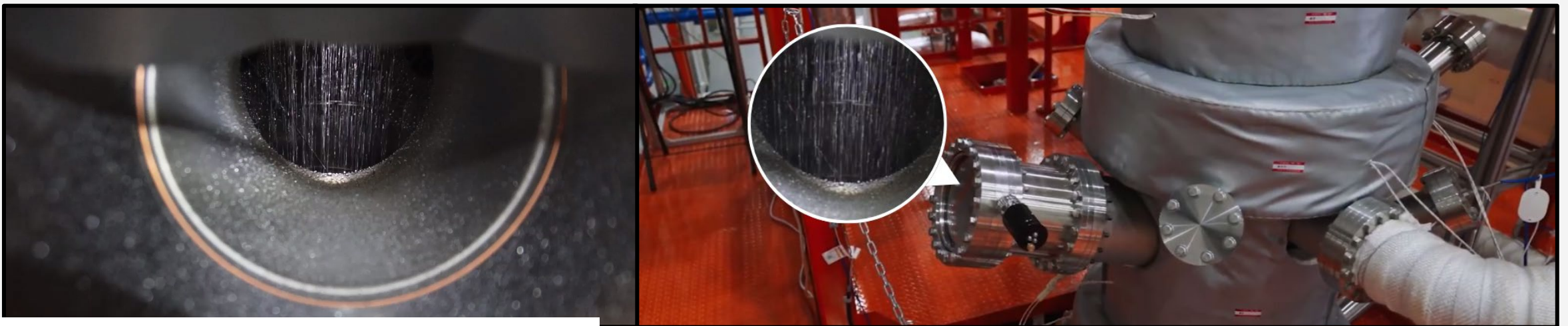


Heat exchanger

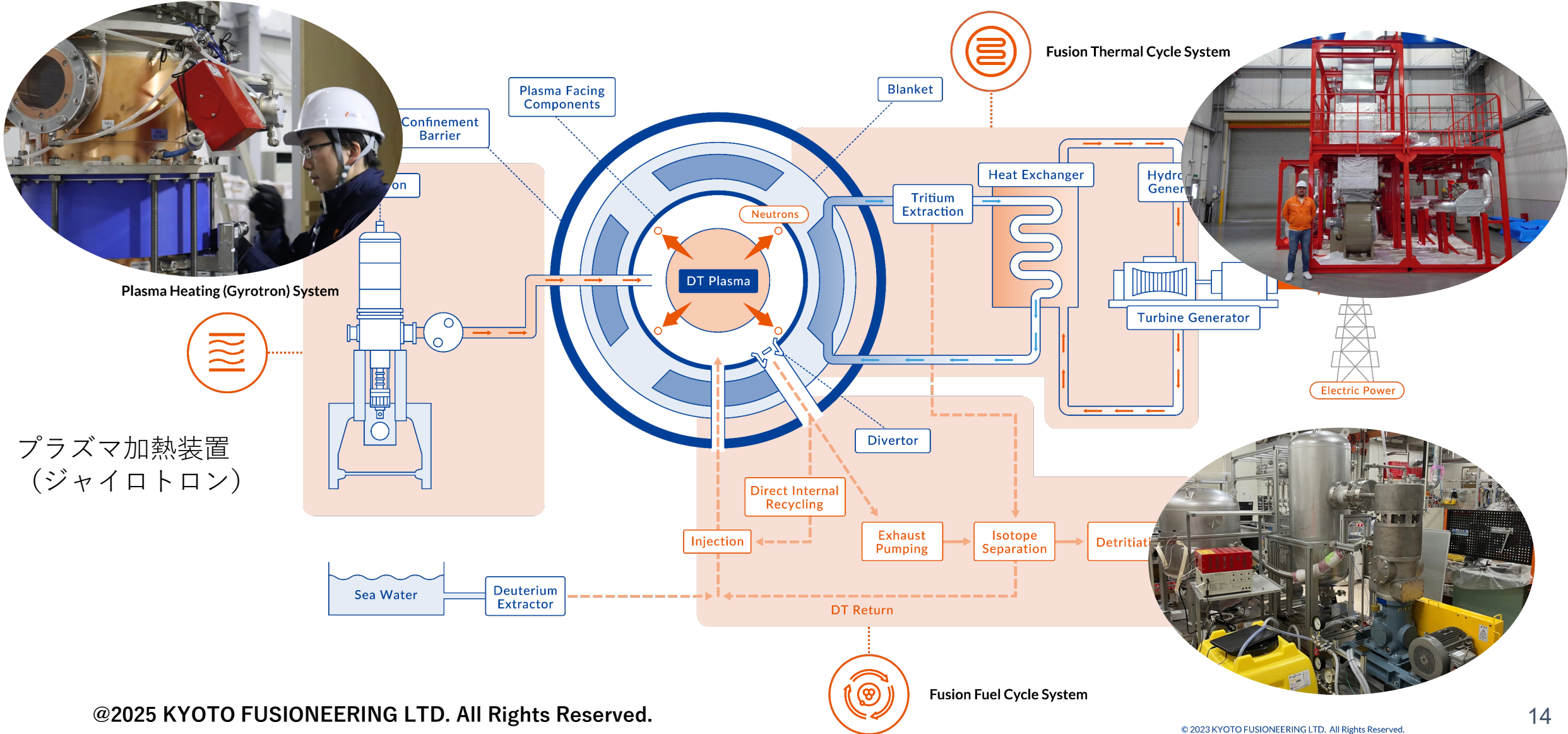
- Compatibility with exotic coolants
- Minimise tritium permeation
- Good heat transfer properties

Tritium extraction

Various methods being developed: gas sweeping, permeation against vacuum, electrochemical, etc.



京都フュージョニアリングの事業領域



ジャイロトロン: 販売商品の一例



核融合エネルギーの仕組み

核融合エネルギーとは？

太陽の輝きは、主に水素を燃料にした核融合反応



**太陽の核融合反応を地上で起こせば、
巨大なエネルギー源となる！**

エネルギーと質量

$$\text{エネルギー} = \text{質量} \times \text{光速}^2$$
$$(E = mc^2)$$

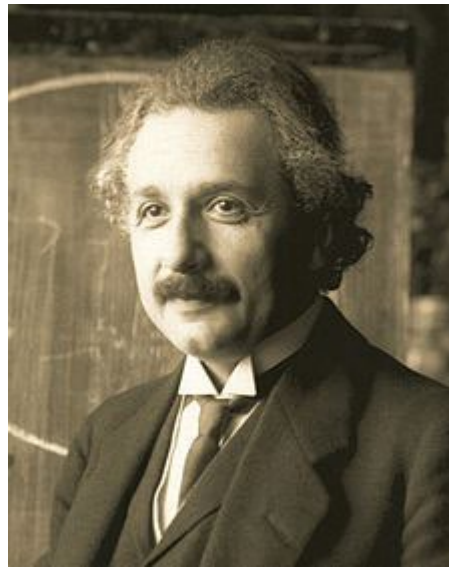
原子核反応(核融合、核分裂)



反応の前後で質量が変化

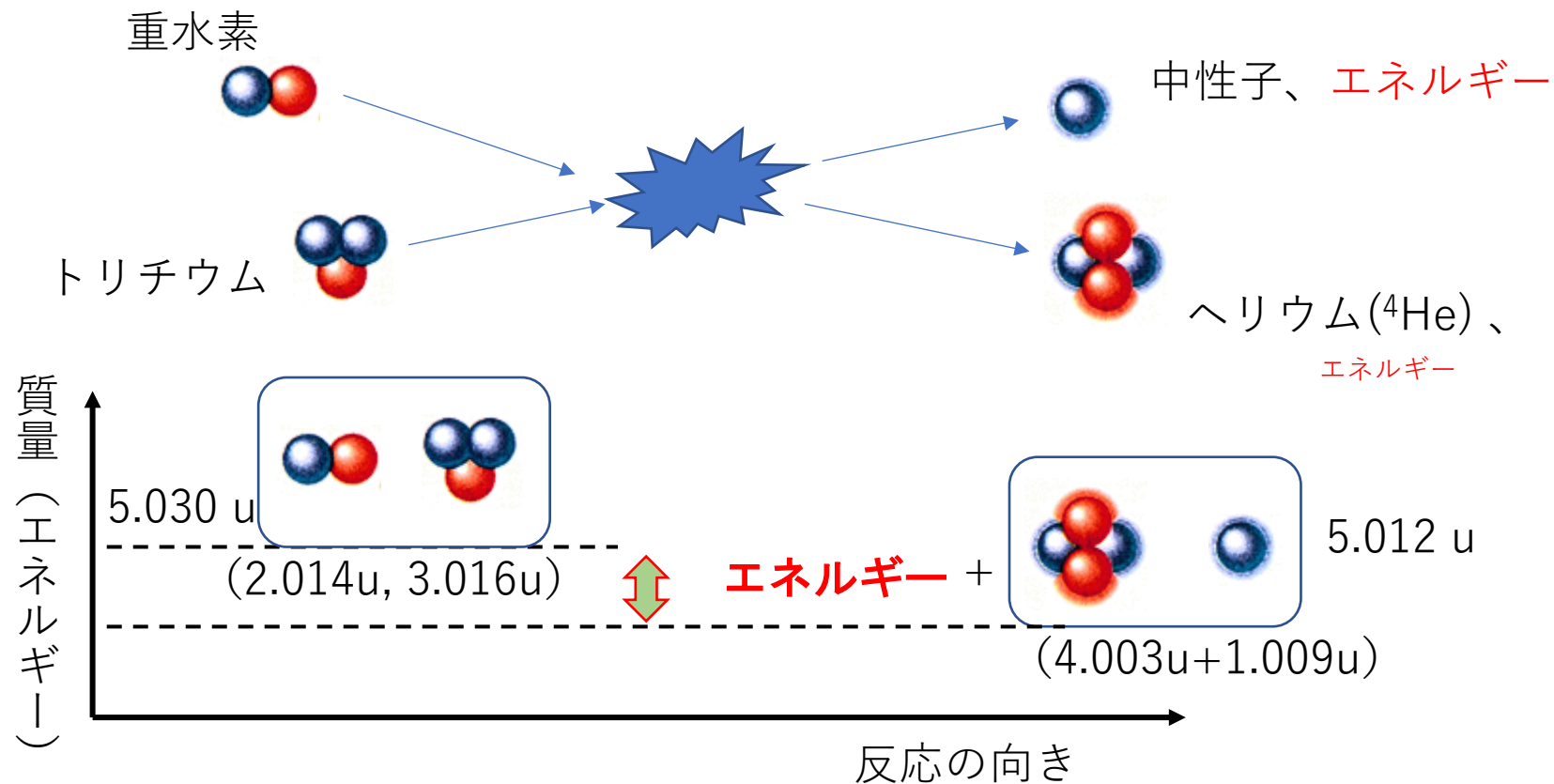


エネルギー



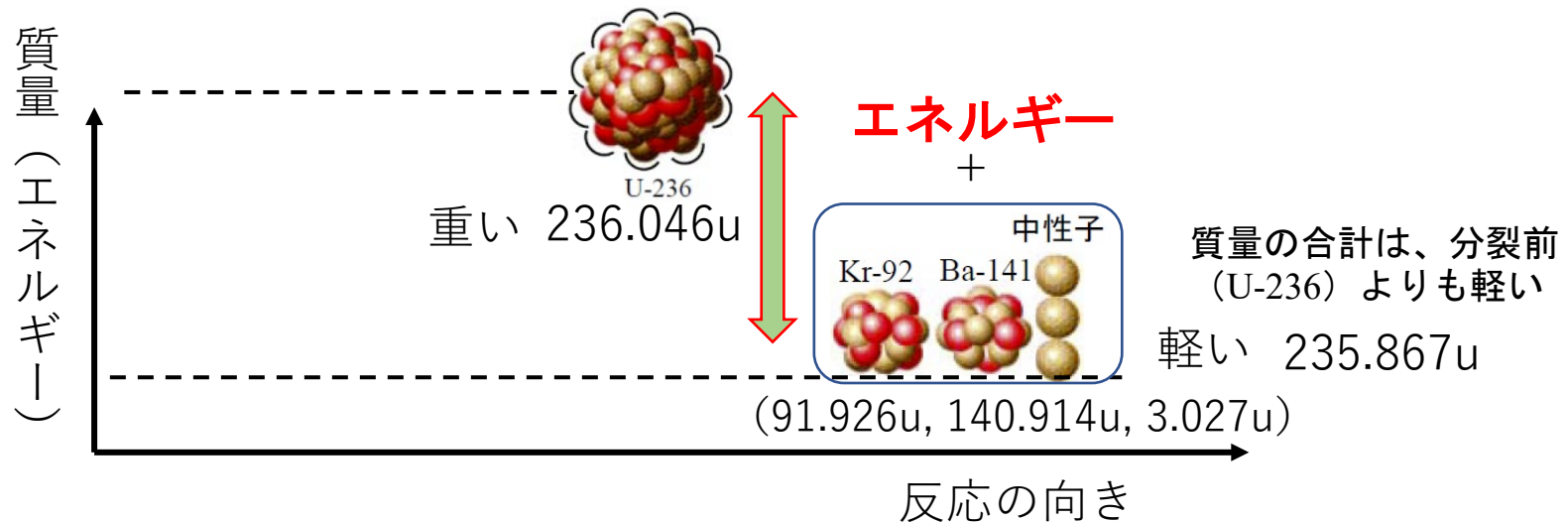
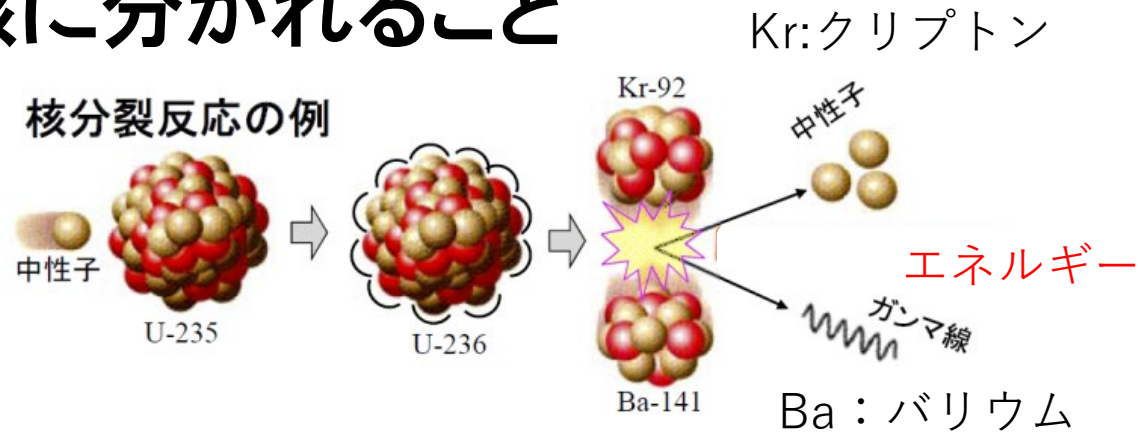
アルバート・アインシュタイン (Albert Einstein)

核融合反応…軽い原子核を融合させて別の重い原子核を作ること



単位[u]は原子質量単位

核分裂反応…重い原子核が分裂して 軽い原子核に分かれること



単位[u]は原子質量単位

核融合エネルギーとは？

1920-1930年代：核融合反応の発見

1930年代：核分裂反応



1938年：ハンス・ベータ
ノーベル物理学賞

「原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見」
* 恒星のエネルギーが核融合反応であることを発見



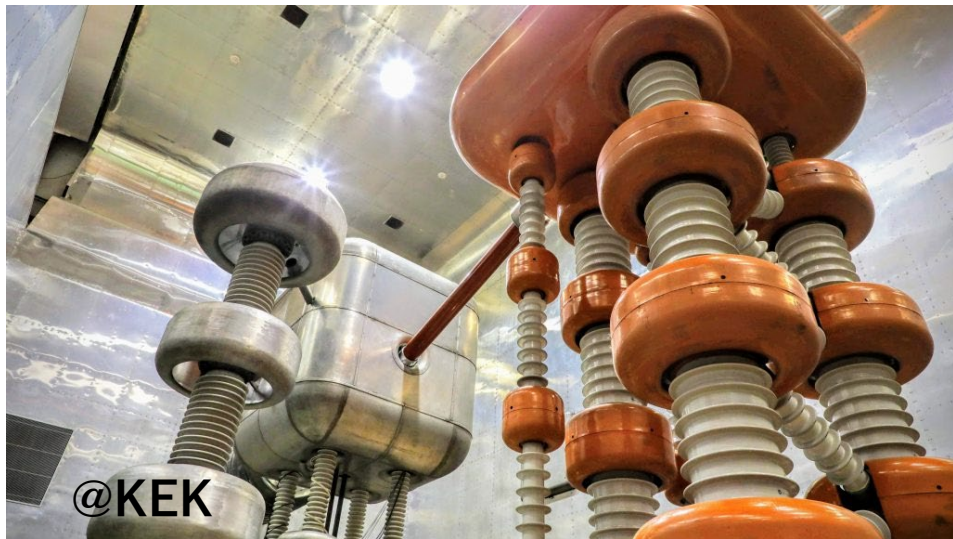
1940年代：核分裂の連鎖反応に成功

1950年代：原子力発電所の運転開始

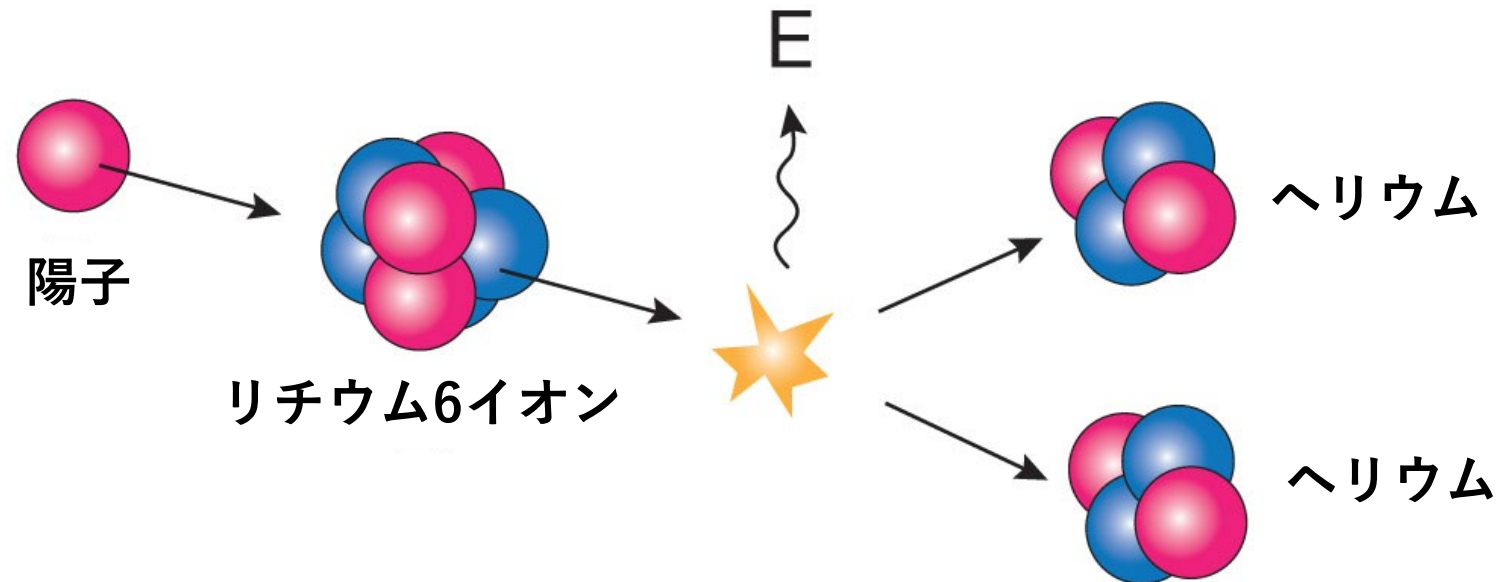
核融合炉は、まだ実用化に至っていない

核融合反応自体は1930年代初期に発見されていた！

コッククロフト・ウォルトン型加速器



1932年4月にJohn CockcroftとErnest Waltonは原子を分離することに成功した。



- この方法では、**1回の反応を起こすのに膨大なエネルギー**が必要！
- 人工的にエネルギー取り出しができるよう、長時間持続する核融合反応を起こすのが難しい

プラズマとは？



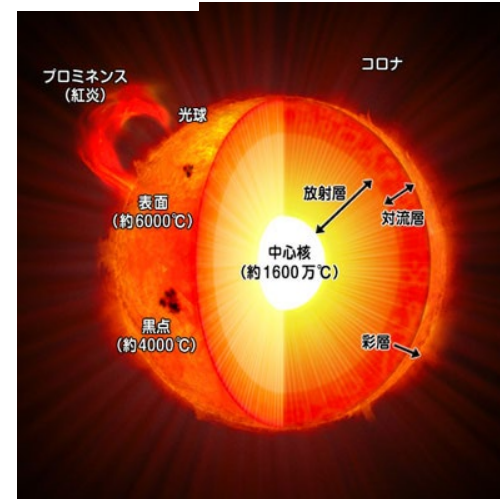
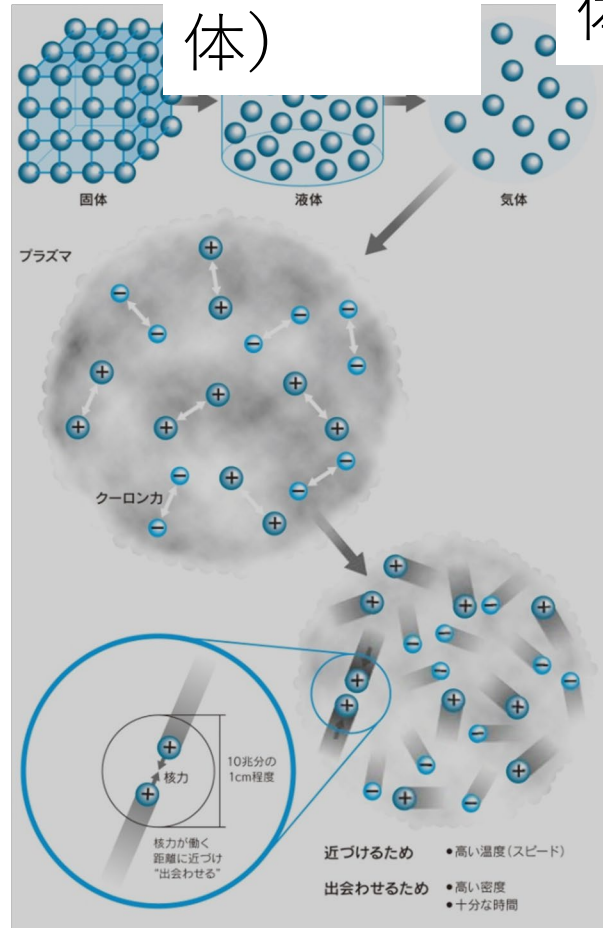
氷（固体）



水（液体）



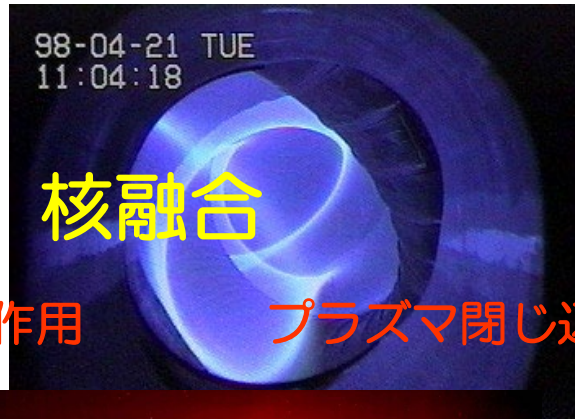
水蒸気（気体）



太陽も核融合反応で輝いている



壁相互作用



核融合

プラズマ閉じ込め



非線形現象

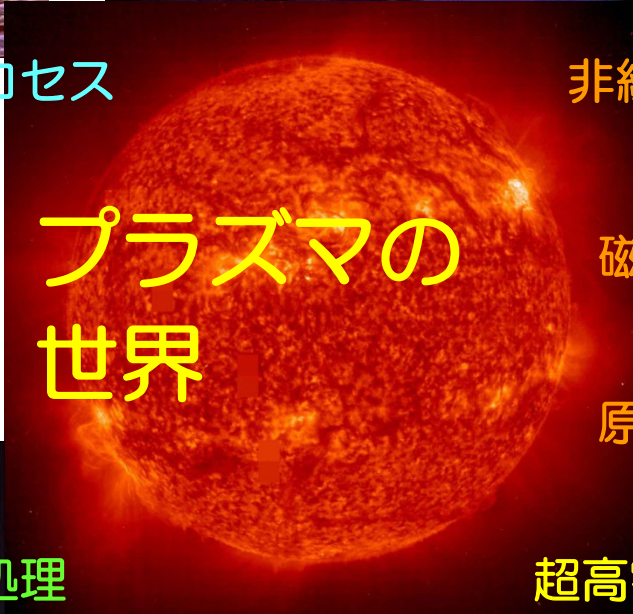


プラズマ応用

半導体プロセス

表面処理

新物質創成



プラズマの世界

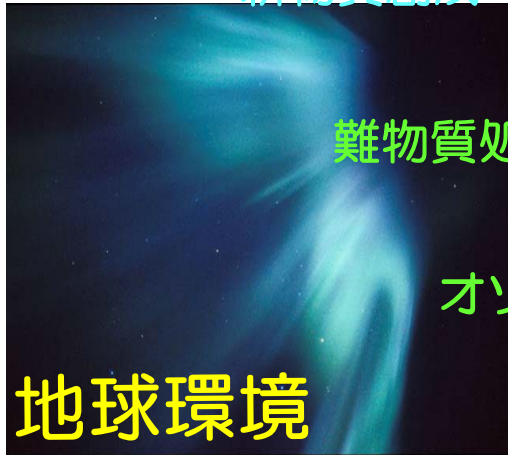


基礎科学

磁気流体现象

原子・分子過程

Mackley / F5 Tornado Safaris



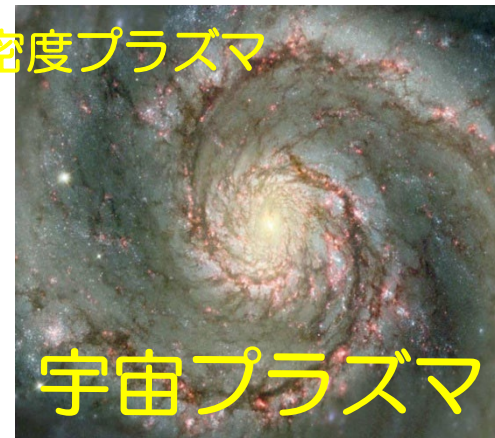
難物質処理

地球環境

オゾン層保護



宇宙推進器



超高密度プラズマ

宇宙プラズマ

地球上のプラズマ

オーロラ



太陽からの高エネルギー粒子で、大気が電離している

炎



酸化反応で発生した熱で、原子や分子が電離している

雲にたまった電気が地面に放電している

稲妻



物質のしくみ

分子



原子



原子核と電子

(電氣的な力で引き合っている)

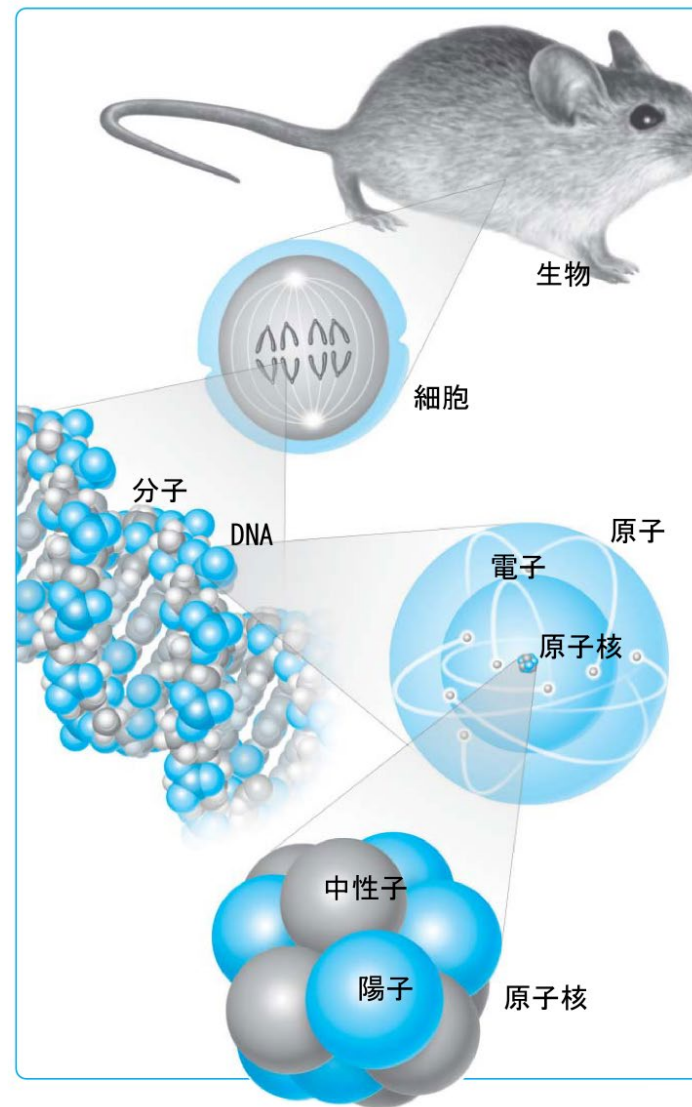
原子核



陽子と中性子

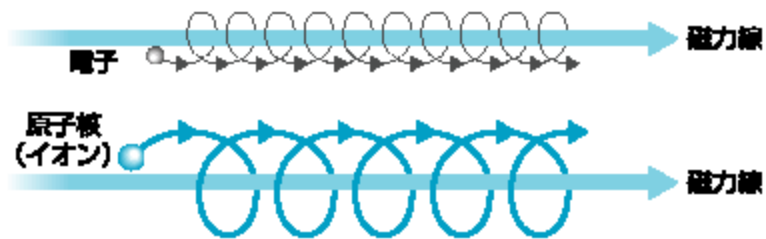
(核力：湯川秀樹の中間子論)

化学反応 → 原子の組換え
核反応 → 原子核の組換え



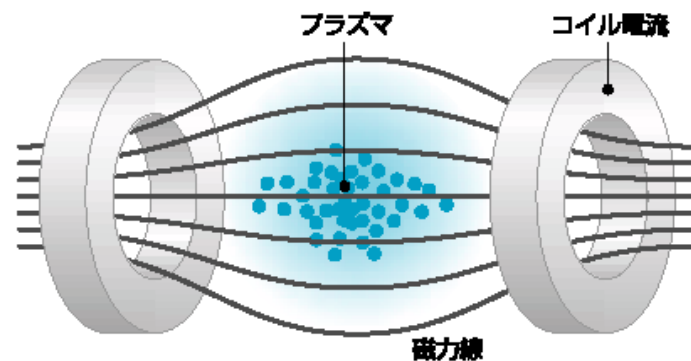
プラズマを閉じ込める

プラズマは、磁力線に巻きついて運動する性質がある。(ラーマー運動)



これは使える！

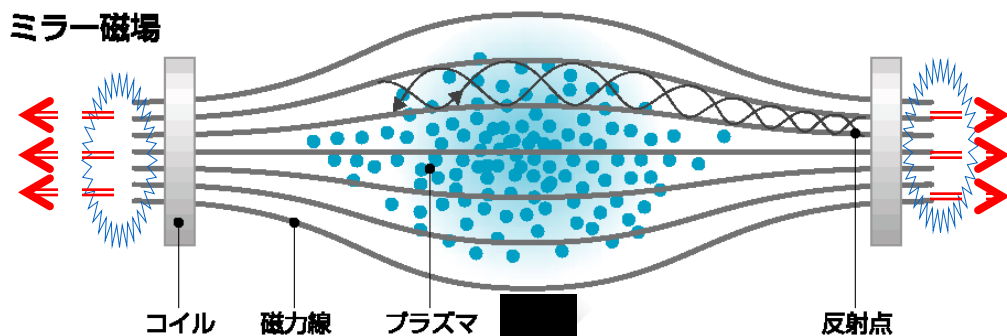
磁力線で『かご』をつくり、プラズマを閉じ込める。



『磁場閉じ込め方式』
世界の核融合研究の主流。

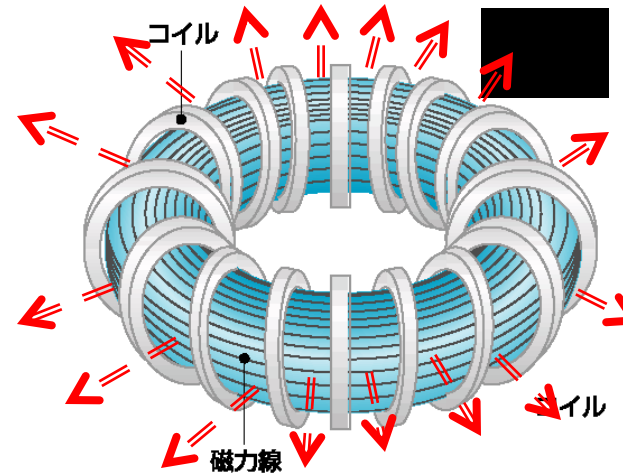
どういふ磁場構造にする？

まず初めに考えた。
水戸納豆のワラのようにする。



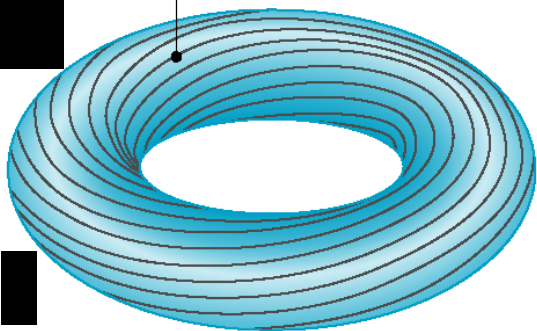
・・・がしかし、**両端**から漏れる！

ならば端をなくせ！
コイルをドーナツ状に並べる。



ところがそうはうまくいかない！
電場が作用して、こんどは磁力線を横切って漏れる！

結果としてできる
ねじりドーナツ形の磁力線



いろいろ考えた結果、磁力線をねじれば電場を打ち消せることがわかった！

現在の主な核融合研究は、この**ねじられた磁力線**をもつ実験装置を用いて進められている。

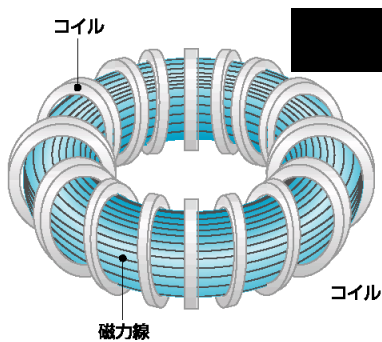
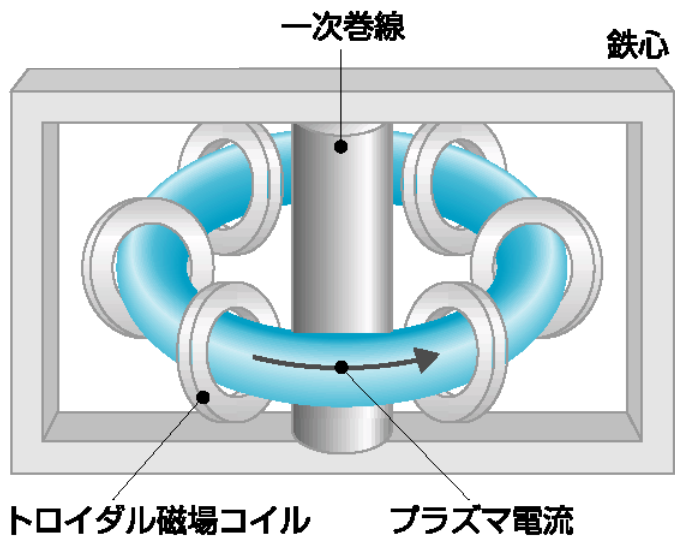
どうやって**ねじる**のか？

ねじれた磁場を作る方法

トカマク型



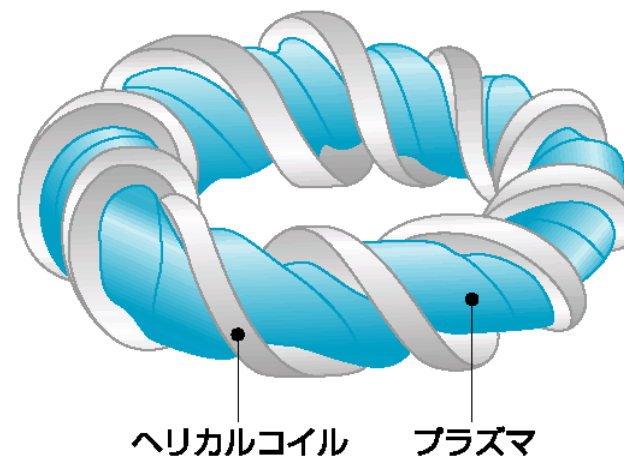
プラズマ中に電流を流す。



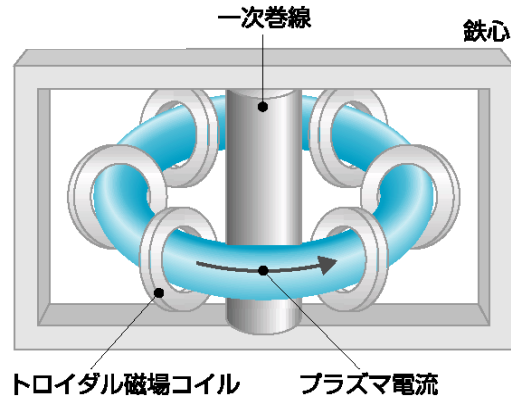
ヘリカル型



コイルそのものを**ヘリカル**状にねじる。

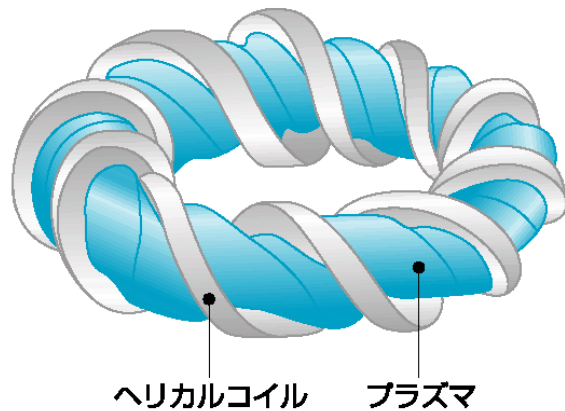


トカマクとヘリカルと比較



【トカマク】

- コイル系が比較的単純で建設しやすい。
- 多くの装置が存在する。
- 実験データの蓄積がある。
- プラズマ電流を流しつづける必要がある。
- プラズマ電流に起因する不安定性が発生する。



【ヘリカル】

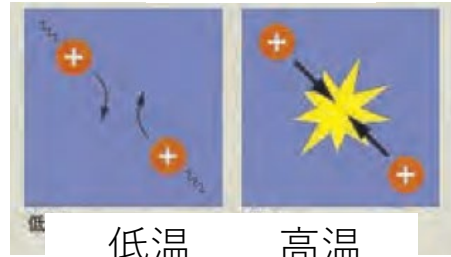
- **ヘリカルコイルが単純でないので建設が困難。**
- **まだ装置は多くない。**
- **実験データ、経験の蓄積が必要。**
- **定常的な磁場配位維持が可能。**
- **プラズマ電流に起因する不安定性が発生しない。**

核融合科学研究所では**ヘリカル型プラズマ**の実験を行なっている。

核融合発電に必要な条件

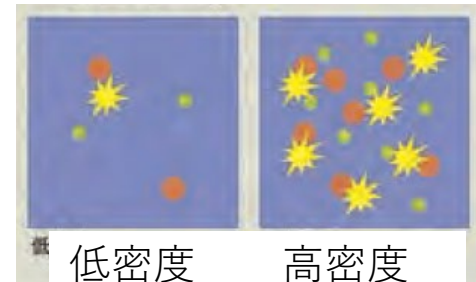
核融合の燃料であるプラズマを閉じ込める。

高温



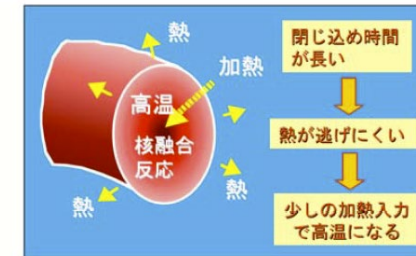
高温 = エネルギーが高い = 激しい運動
正の電気を持つ原子核（イオン）同士の衝突が起こるようになる

高密度



十分な頻度で核融合反応
が起こるようになる

長い閉じ込め



$$\text{閉じ込め時間 [秒]} = \frac{\text{プラズマエネルギー [ジュール]}}{\text{プラズマ加熱パワー [ワット]}}$$

$$\text{閉じ込め改善度} = \frac{\text{実際の閉じ込め時間 [秒]}}{\text{比例則による閉じ込め時間の計算値 [秒]}}$$

プラズマの閉じ込め性能
と、閉じ込め改善

燃料としてガス状もしくは
氷（ペレット）の水素
同位体を供給する

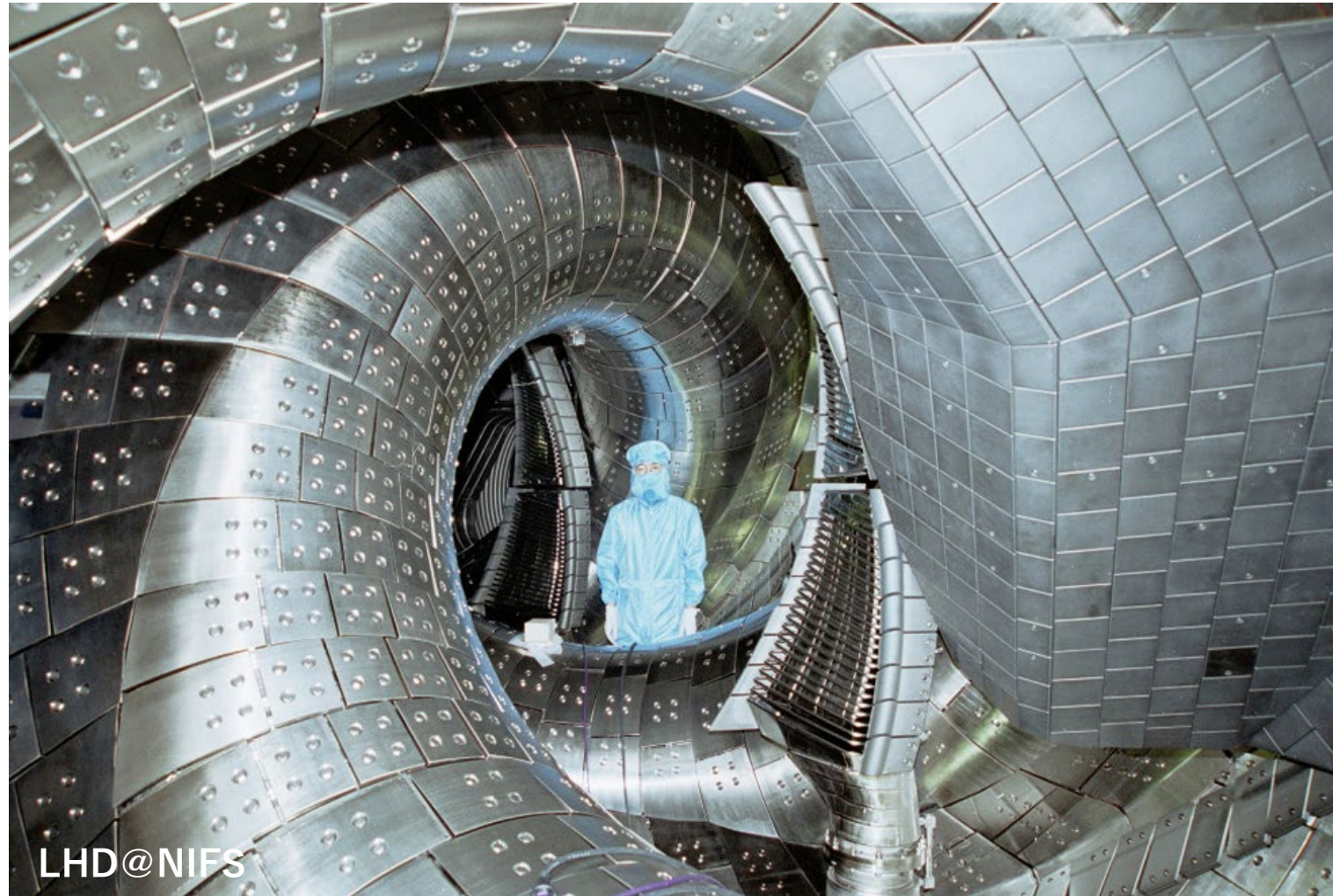
核融合三重積：イオン温度、イオン密度、エネルギー閉じ込め時間

LHDのプラズマ放電（核融合科学研究所）

LHD@NIFS

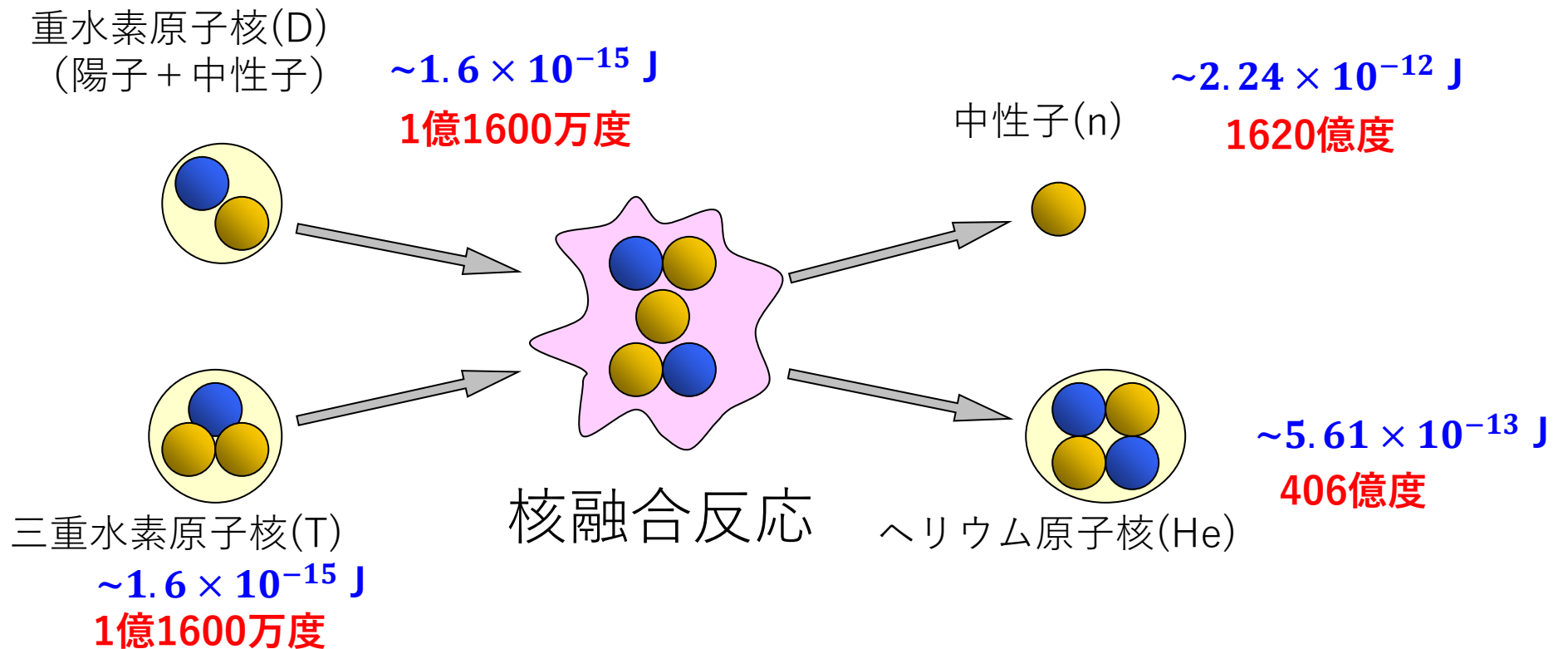


LHDの真空容器内



液体ヘリウム（**4K**）で冷却された超伝導コイルが使用されている

なぜ「核融合」が難しいのか

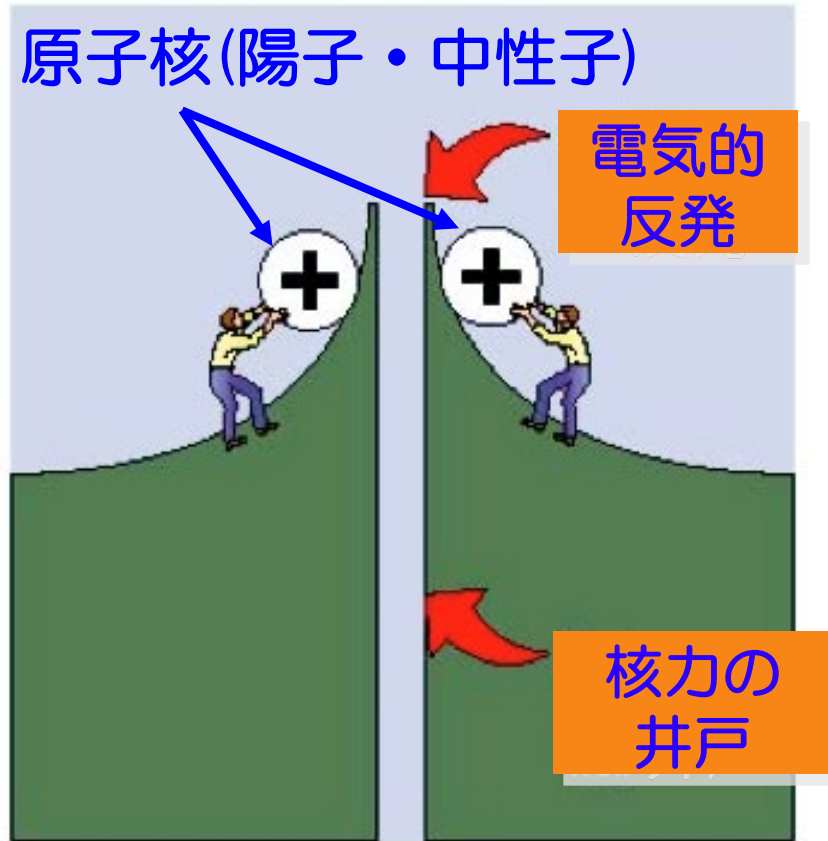


- 軽い原子核（イオン、正電荷）同士が**核反応**し重い原子核を作る
- 原子核の組み合わせが変わる：高いエネルギーが必要・高温
- 質量が反応前後で変化し、エネルギーが発生する

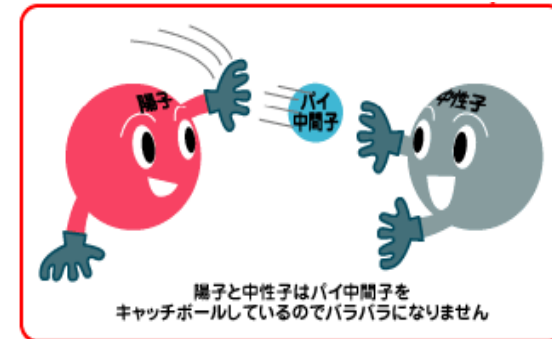
* 正と正がなぜ近づくことができるのか？

湯川秀樹の中間子論

ある距離まで近づけば今度は互いに引き合う！

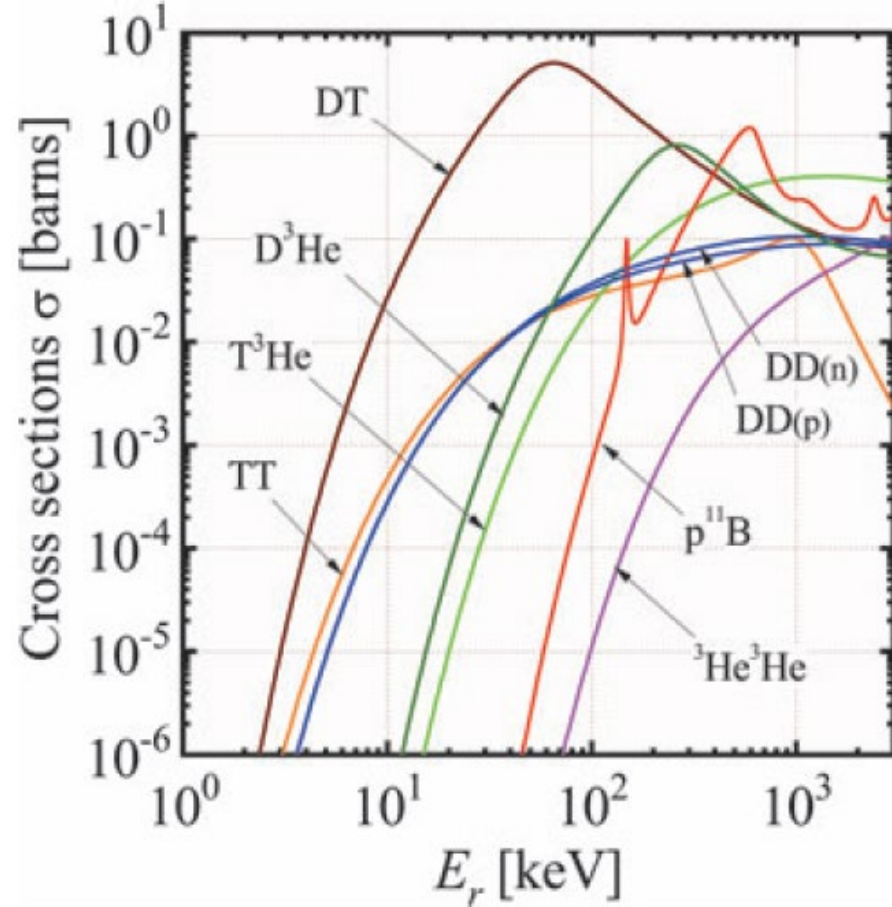


湯川秀樹博
士



電気的 反発の丘を越えて核力の井戸の中へ

核融合反応断面積

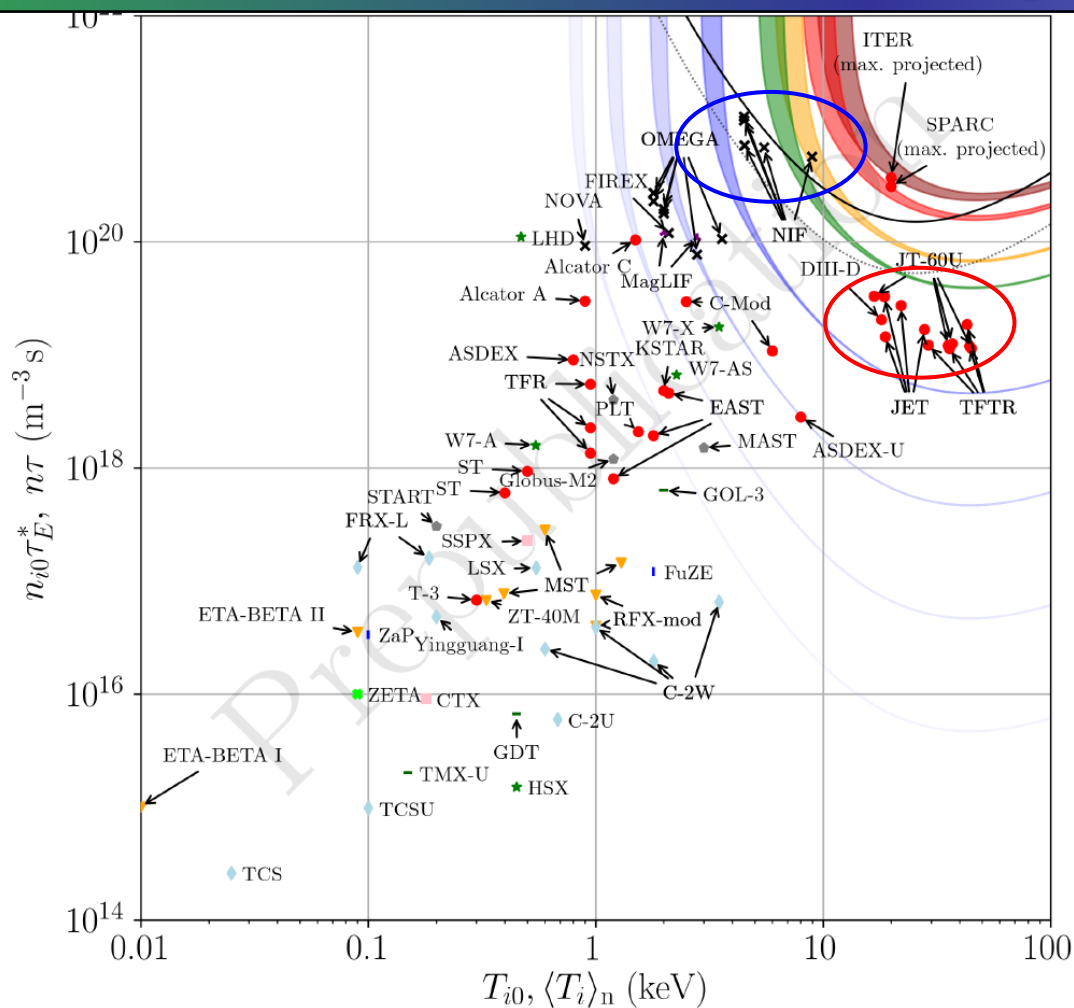


- 可能性のある燃料（元素）の組み合わせは複数
- エネルギーが低い、入手可能な元素などの条件から、早期の核融合エネルギー利用に向けて、重水素（D）-トリチウム（T）が第一候補となっている。
- D-T実現以降のシナリオとしては、より安全性の高いD-³Heなども候補

図1 核融合反応断面積（反応粒子の相対運動エネルギーの関数）。

発電に向けた最近の進展

エネルギー増倍率Qの向上



Q=10 *ITERでの目標値

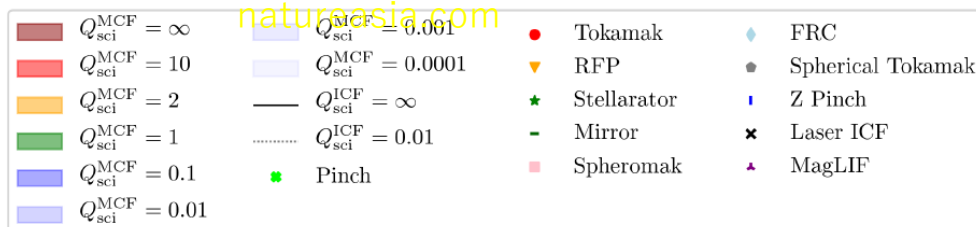
Q=1

Q=0.1

- 磁場閉じ込め装置、レーザー核融合装置共に、エネルギー増倍率 $Q = 1$ 辺りを得ている
- 磁場閉じ込め核融合では、ITERで $Q = 10$ を目指す

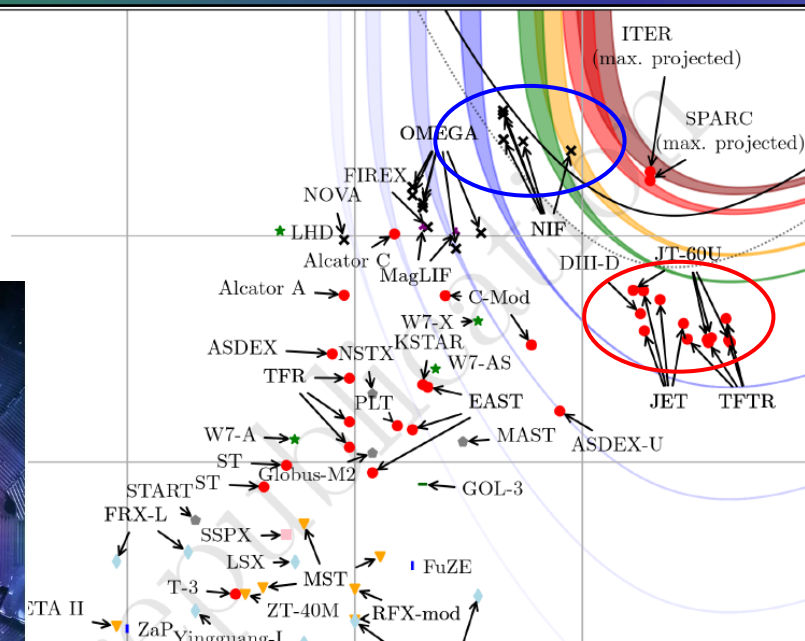
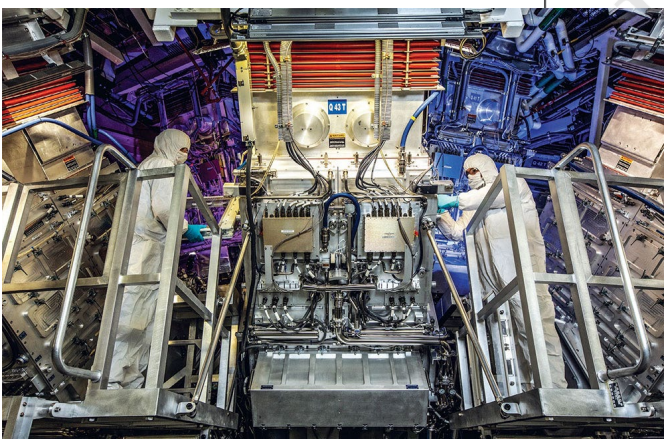
エネルギー増倍率Q

= 核融合出力 / 外部からの加熱入力



エネルギー増倍率Qの向上

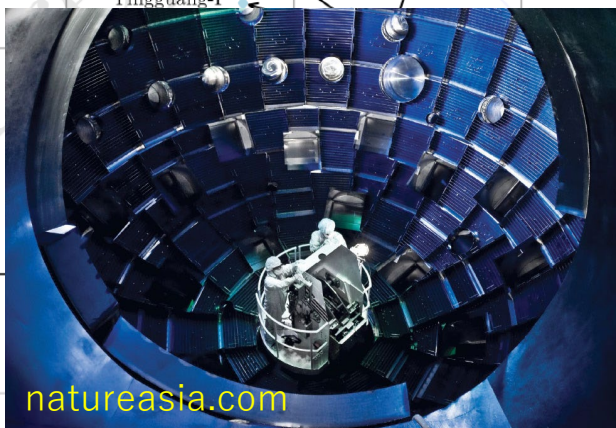
ローレンスリバモア研究所
(米国) 2022年12月, $Q > 1$
は大きなニュースとなった



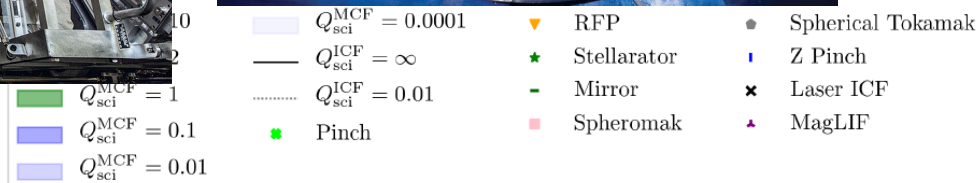
Q=10 *ITERでの目標値

Q=1

Q=0.1

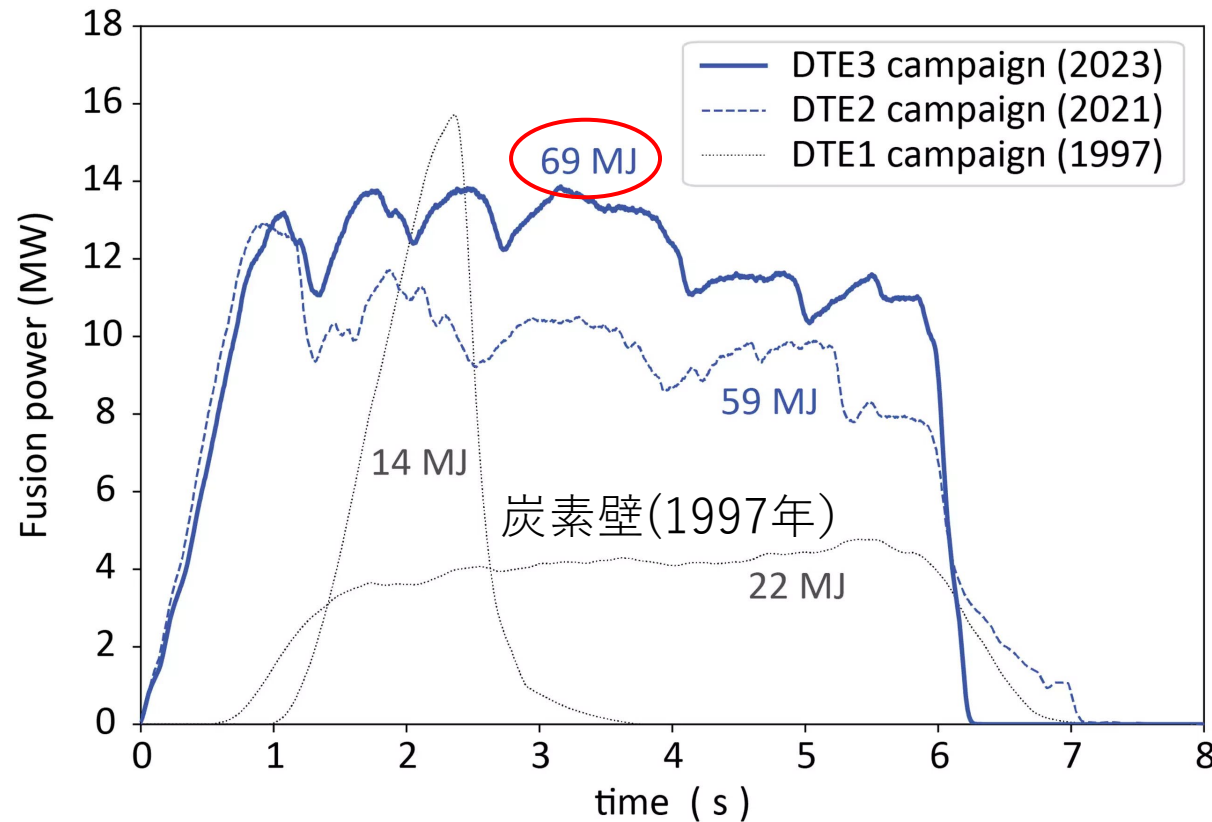


natureasia.com



エネルギー増倍率Q
= 核融合出力 / 外部からの加熱入力

JET(英国)による69MJ達成 (重水素-トリチウム実験)

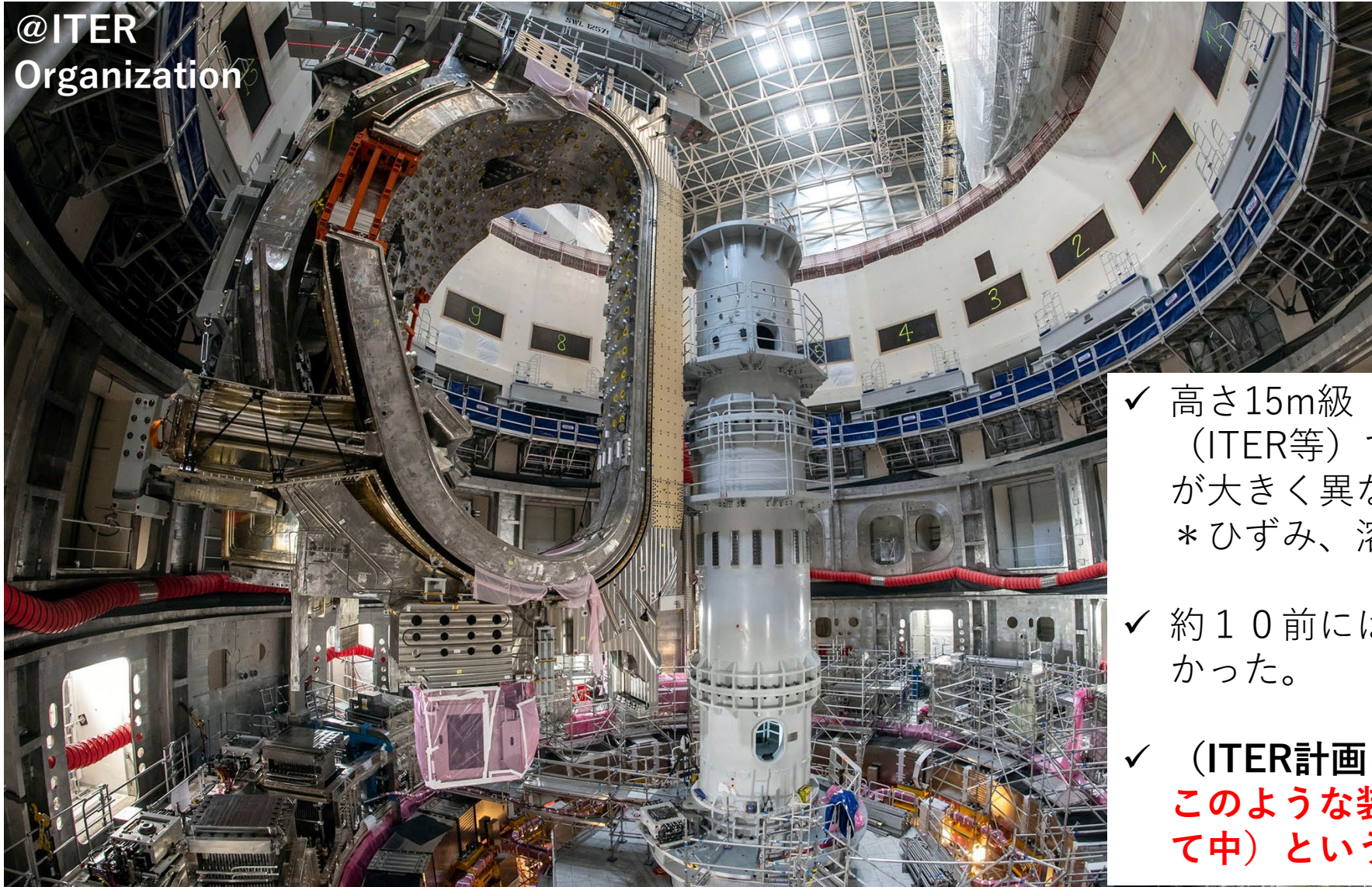


DTE2, 2022年2月 プレスリリース

- 重水素-トリチウムによるプラズマ実験
- プラズマに面する材料を、ITERと同様に変更 (2011年～、ITER Like Wall (ILW)と称されている)。
- 金属壁で高核融合エネルギーを得た

図 : https://www.ipp.mpg.de/5405892/jet_rekord_2024
参考 : 「JETでトリチウムと重水素の核融合実験を近く開始」
Nature ダイジェスト Vol. 18 No. 6(2021) | doi :
10.1038/ndigest.2021.210608

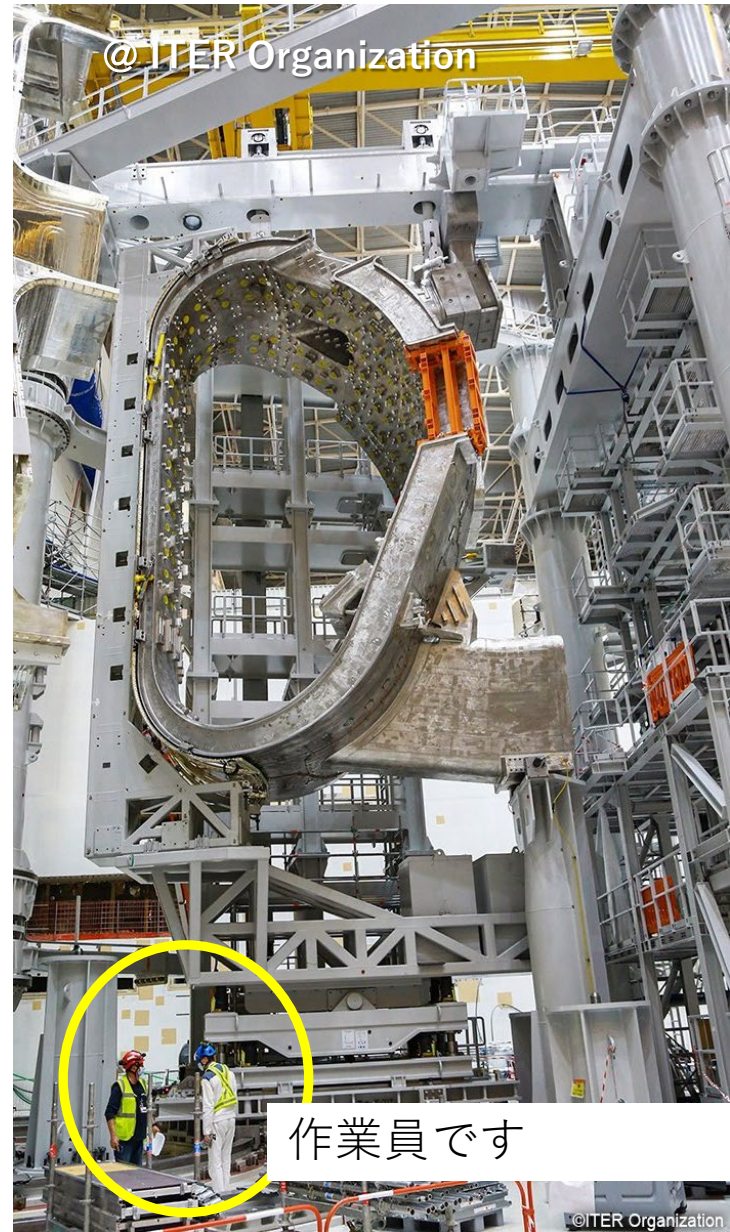
国際熱核融合実験炉（ITER、仏国）の現状（2022年5月） トカマクピットへの真空容器モジュール（総重量1380t）設置



着実な装置組み立ての進展
高さ約30m,
直径約30m

- ✓ 高さ15m級（LHD）と30m級（ITER等）では、製作の難しさが大きく異なる。
* ひずみ、溶接、・・・
- ✓ 約10年前にはこのような写真はなかった。
- ✓ **（ITER計画は遅れているが）
このような装置を作った（組み立て中）という事自体が大きな進展**

ITER : 大きさの比較



作業員です

ITER:

- ブランケット、トリチウム処理/燃料循環系に至るまで、すべてのパッケージが含まれている

* 発電はしない

- 多様な技術開発を、多国間で協力し、その情報を共有する
 - * ITER以外に同クラスの実験装置を計画しているのは、中国のみ

スタートアップ企業など:

- 各グループ/企業で、核融合装置もしくは必要な機器に限定した開発等、多様な展開が進んでいる
 - * エネルギー製造も視野に入れている計画あり（発電だけでなく、**水素**も想定）
- 宇宙工学を見れば、民間参入は後押しになるはず
- 資金の流れによって、多様な装置作製が進められている。ただし、目指すターゲットとのギャップ（夢と現実の乖離）が大きな場合もあることに注意
- 未公開情報の可能性

ありがとうございました