

核融合とは何か

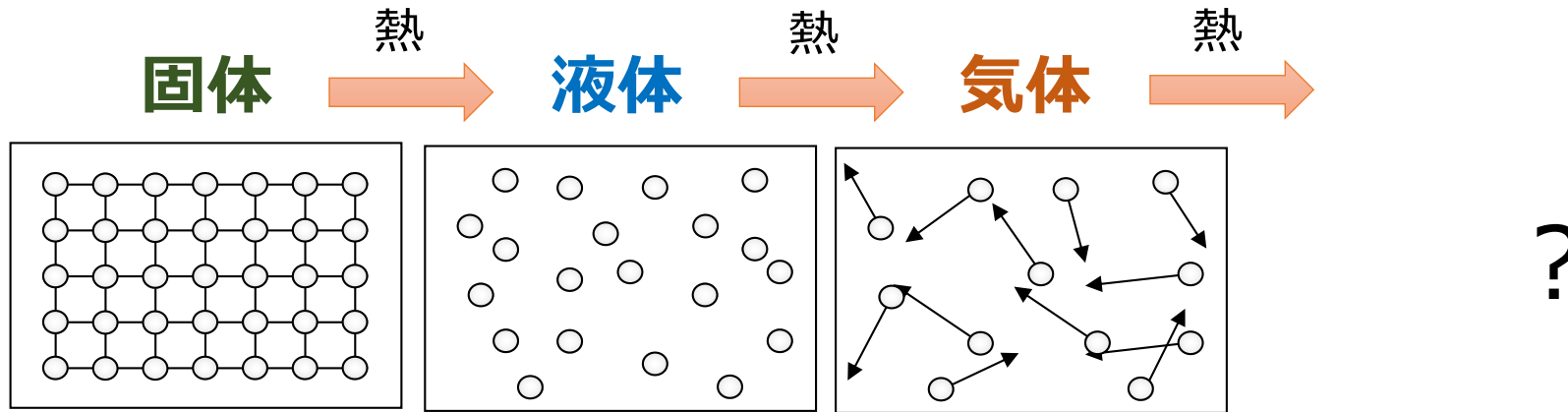
プラズマ物理と閉じ込め方式の基礎

慶應義塾大学理工学部

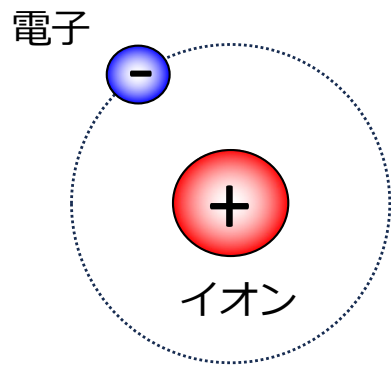
星野 一生

プラズマとは？

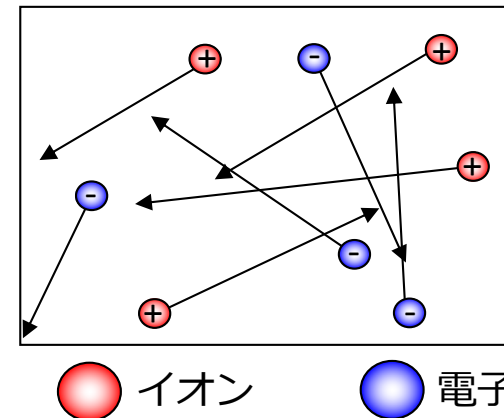
プラズマとは？



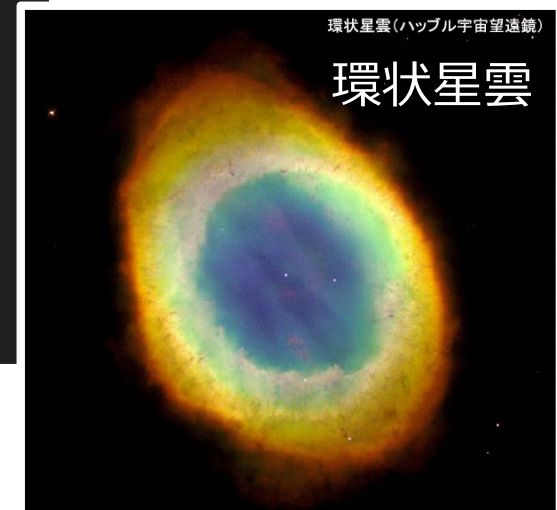
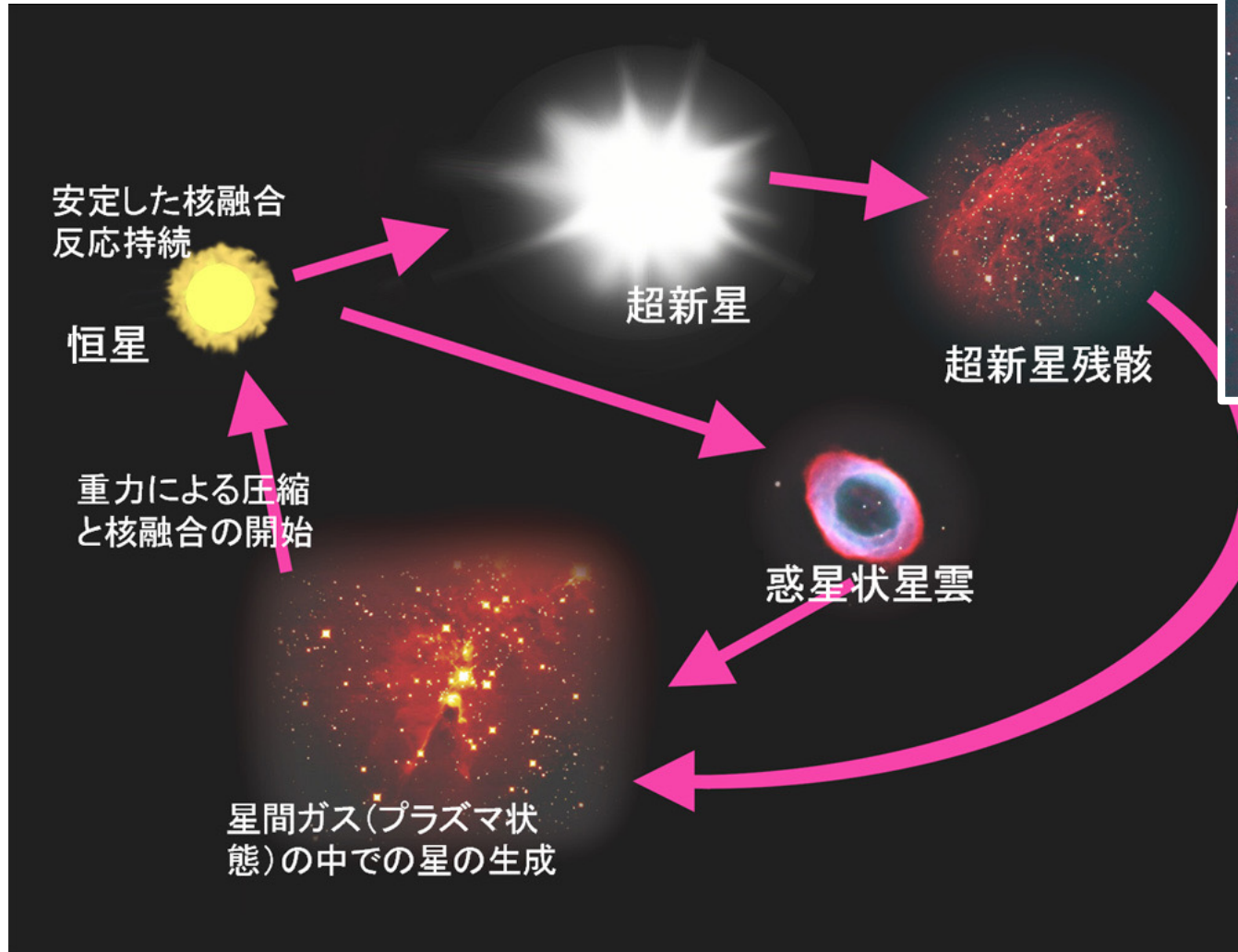
第4の物質状態 プラズマ



イオンと電子も
ばらばらに



身近なプラズマ： 宇宙



プラズマエネルギーのすべて より

材料・加工

微細加工、薄膜生成、表面処理・改質、溶接、etc

環境・宇宙

集塵、ゴミ処理、水処理、ロケット推進、etc

光・エネルギー

光源、プラズマディスプレイ、核融合、荷電ビーム、etc

医療・バイオ

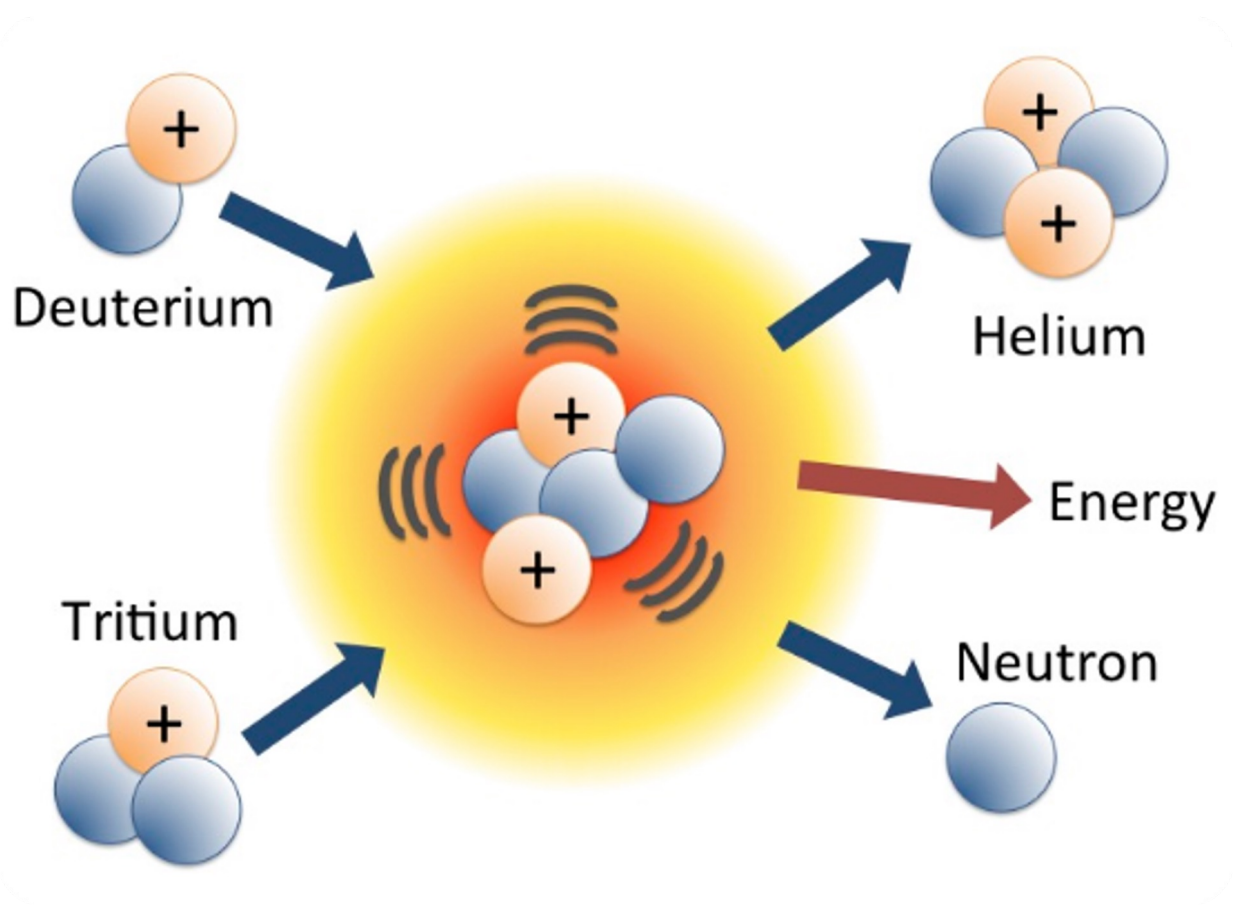
ガン治療（陽子線、BNCT）、殺菌、細胞培養、etc

フュージョンエネルギー

(核融合)

核融合反応

軽い核種が衝突・融合して、より重い核種になる核反応

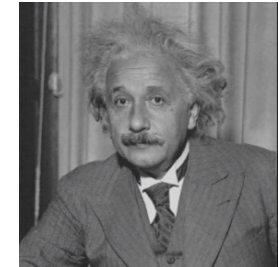


フュージョン（核融合）エネルギー

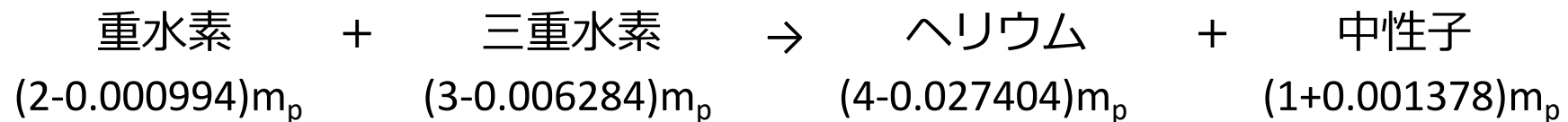
核融合反応前後の質量差が
エネルギーに変わる

アインシュタインの関係式

$$E=mc^2$$



・ 重水素と三重水素の場合



m_p : 陽子一個の重さ

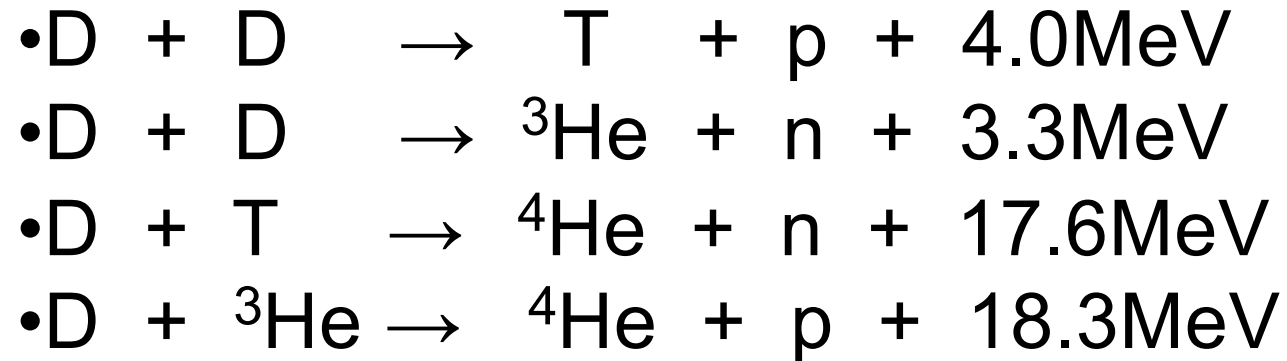
一回の反応で得られるエネルギー

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0.01875 m_p c^2 = 2.818 \times 10^{-12} \text{ J} = 17.6 \text{ MeV}$$

燃料 1 g = 石油 8 トン分のエネルギー
= 10km/Lの車で地球2.4週分

このフュージョンエネルギーを産業利用へ！

主な核融合反応



D : 軽水素、 D : 重水素、 T : 3重水素、
n : 中性子、 p : 陽子

D : 海水中に豊富に存在。
T : Liから生成 (Liは海水中から回収)
 ${}^3\text{He}$: 月面上に豊富に存在

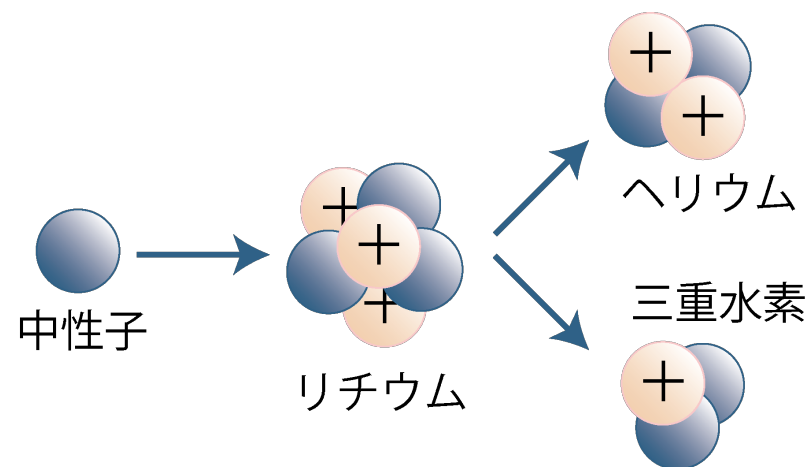
フュージョンエネルギーの特徴

燃料は、重水素と三重水素

重水素は海水中に豊富に含まれる。

三重水素は？

核融合反応で生じた中性子を利用してリチウムから生成



重水素は無尽蔵。リチウムも
核融合で使うなら **1550** 万年分

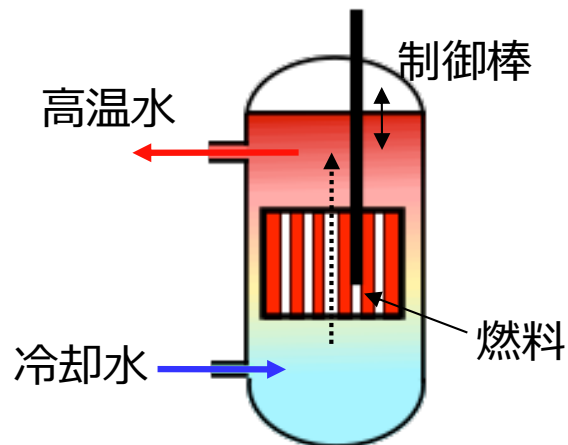
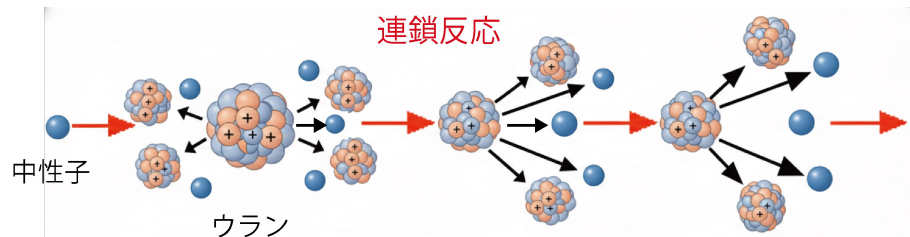
エネルギー資源に乏しいが、海に囲まれた日本にとっては、
夢のようなエネルギー源

フュージョンエネルギーの特徴

安全性は？ 核融合炉は原理的に暴走しない、すぐ停止できる

核分裂

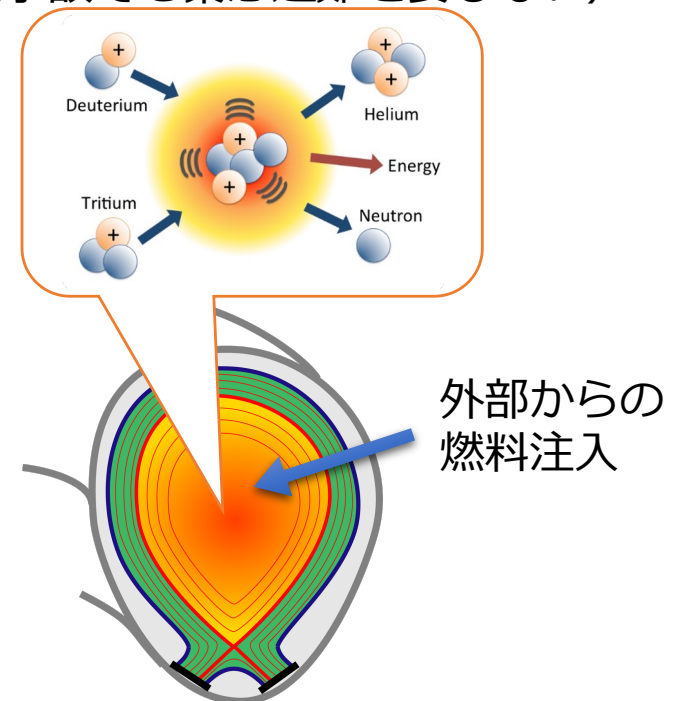
- ・ 前の反応が次の反応を起こさせる
(連鎖反応)
- ・ 燃料を数年分炉の中に置いておく
- ・ 暴走しないよう制御が必要



核融合

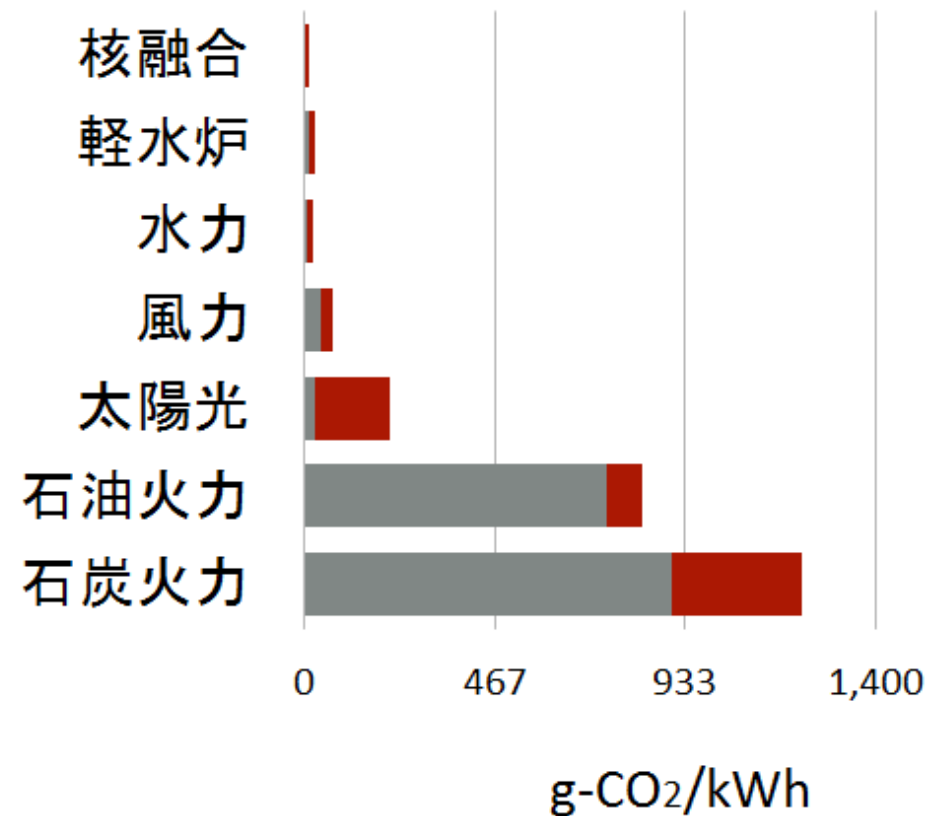
- ・ 反応が連鎖しない
- ・ その時に必要な量しか炉内にない
- ・ 常に外部から制御 (燃料注入、加熱等) しないと、反応が続かない
- ・ 内在放射線リスクが限定的

(重大事故でも緊急避難を要しない)



環境負荷

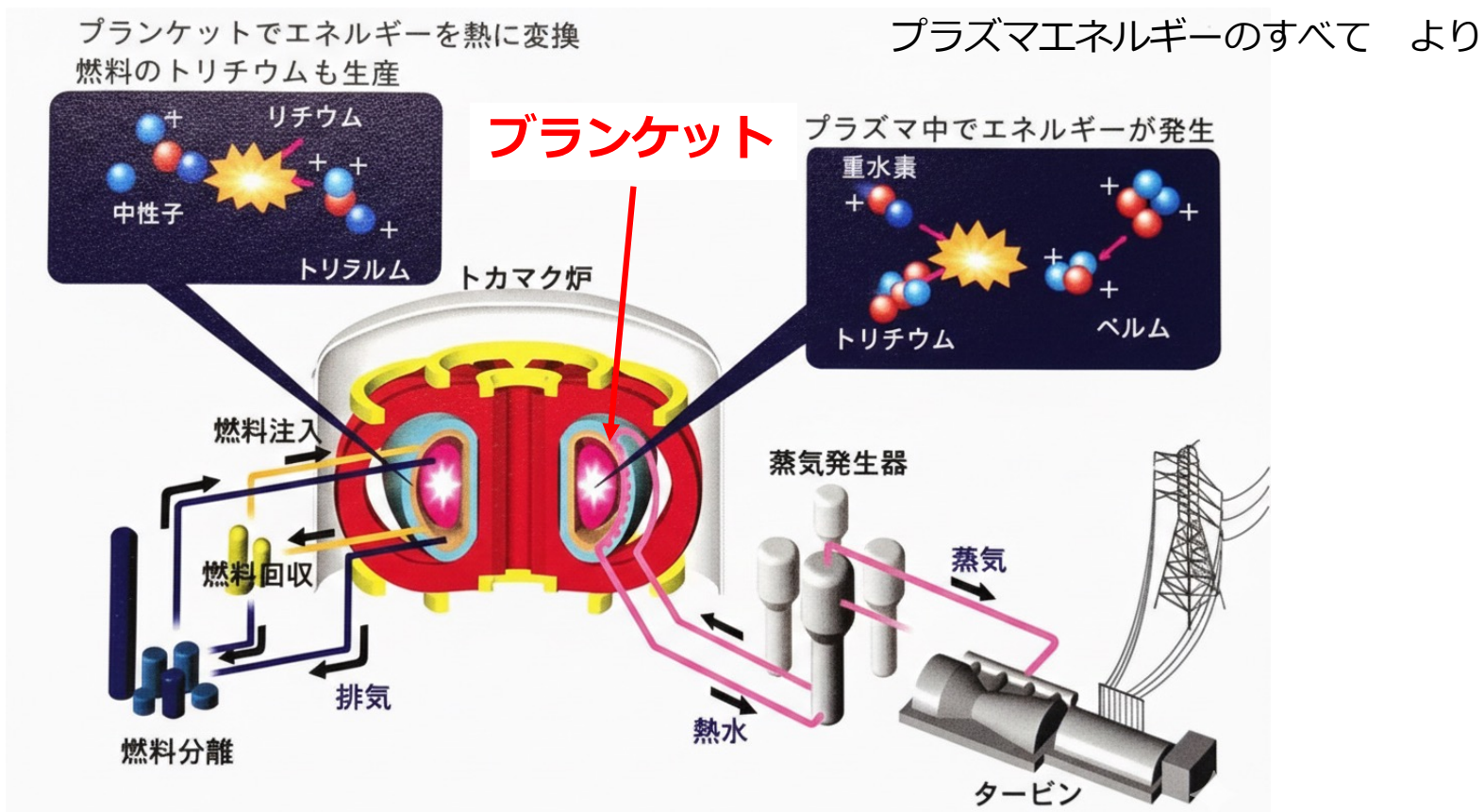
CO₂排出量



以下の資料から換算

- 内山洋司、電力中央研究所報告 Y94009 発電システムのライフサイクル分析(1995年)
- 時松宏治他、6th IAEA- TCM on Fusion power plant design and technology (1998)

フュージョンエネルギーから電力へ



炉心を取り囲む**ブランケット**で核融合反応で生じた中性子を受け止め、熱エネルギーに変換。

その後は、火力・原子力発電と同様に、タービンを回して発電。

ブランケットにはリチウム化合物が詰めてあり、燃料である**三重水素の生成**も行う

フュージョンエネルギーのデメリットと見通し

夢のような核融合エネルギーであるが、当然デメリットもある

- **放射性物質（三重水素を含む）の取り扱い**

→ 解析の結果、内在放射線リスクが限定的であり、重大事故時にも緊急避難を要しない見通し

- **放射化物**

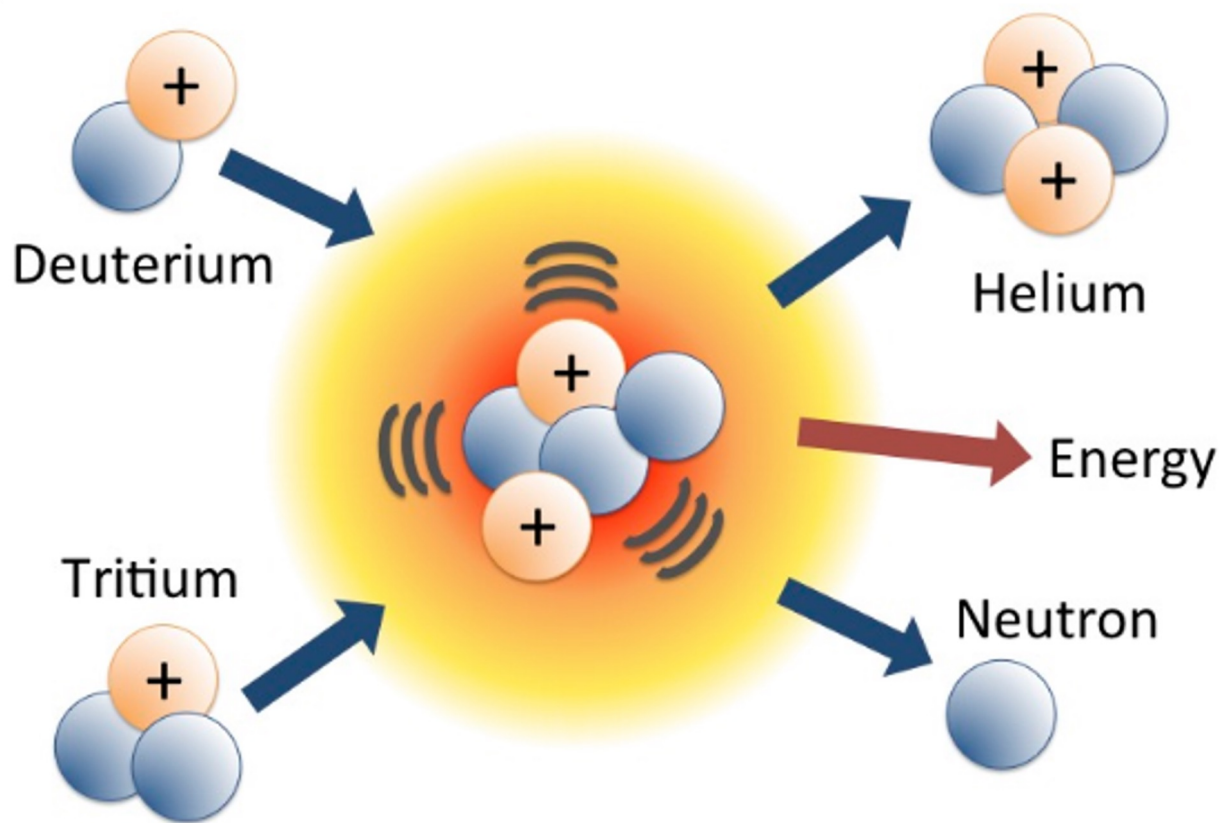
ブランケットやダイバータは交換機器であるため低レベルだけど大量の放射化物。

- **（まだ）多くの技術的課題**

→ 課題の整理と解決に向けた計画（アクションプラン）の策定

核融合反応に必要な条件と 閉じ込め方式

核融合反応に必要な条件



- クーロン斥力に打ち勝つ高いエネルギー (= 高温)
- 反応頻度を増やすための高い密度
- 高温を維持するためのエネルギー閉じ込め時間

核融合反応に必要な条件

ローソン条件

核融合反応が持続するために必要な
温度・密度・閉じ込め時間の関係

ローソン図

ローソン条件を満たす関係を
エネルギー増倍率 Q で図示したもの

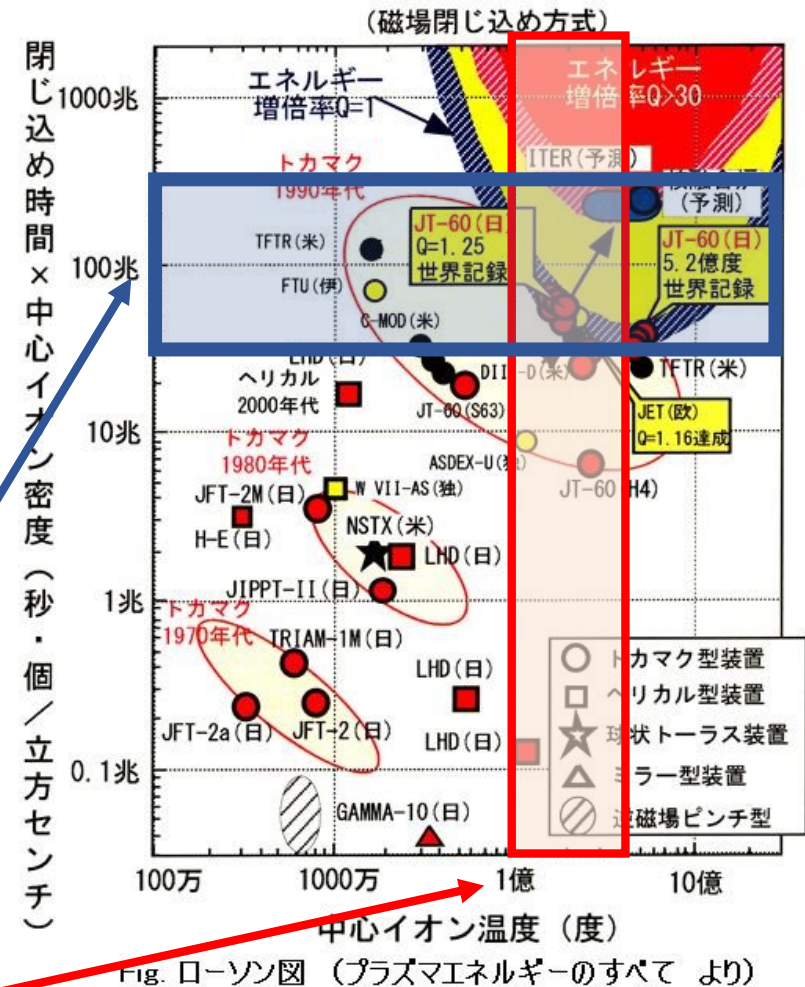
(Q =核融合出力/加熱パワー)

$Q=1$ ならエネルギー収支なし
発電プラントとしては $Q>10$ が目標

どうやってプラズマを
高密度で長時間閉じ込める？

$Q>1$ を得る為には、数億度が必要

→ 燃料はプラズマ化



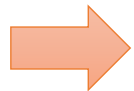
プラズマの閉じ込め

太陽では**重力**によってプラズマを閉じ込める。

高密度 ($156\text{g/cm}^3 = 2.5 \times 10^{11}$ 気圧) のため、
比較的低い温度 ($1500\text{万}^\circ\text{C}$) でも十分な反応

数億度のプラズマをどうやって地上で閉じ込めるのか？

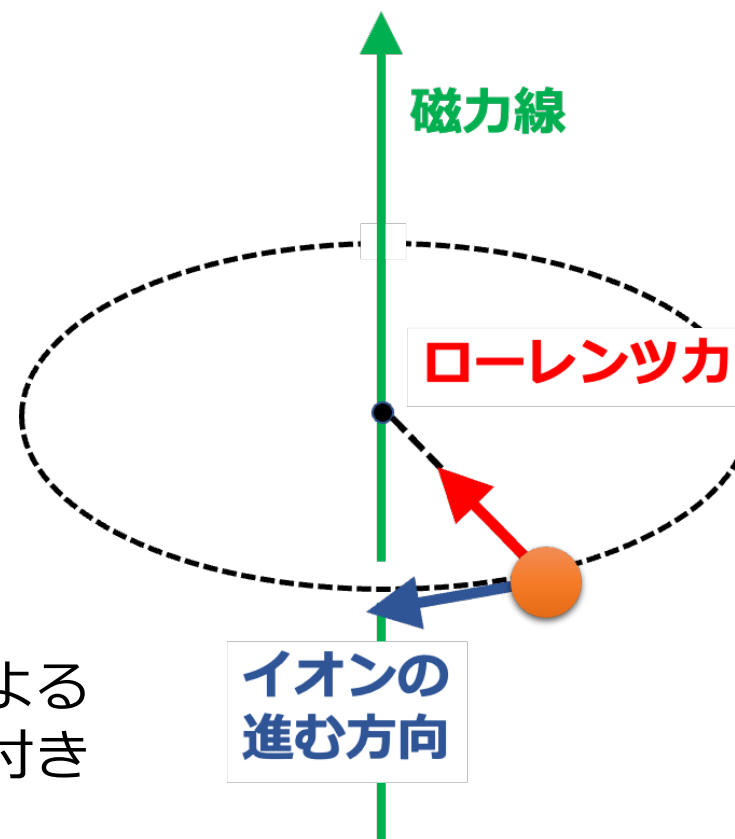
直接閉じ込められる容器 (物質) は存在しない。
つまり、壁から浮かせなければいけない



- ・ **磁場閉じ込め核融合**
- ・ **慣性核融合**

磁場閉じ込め核融合

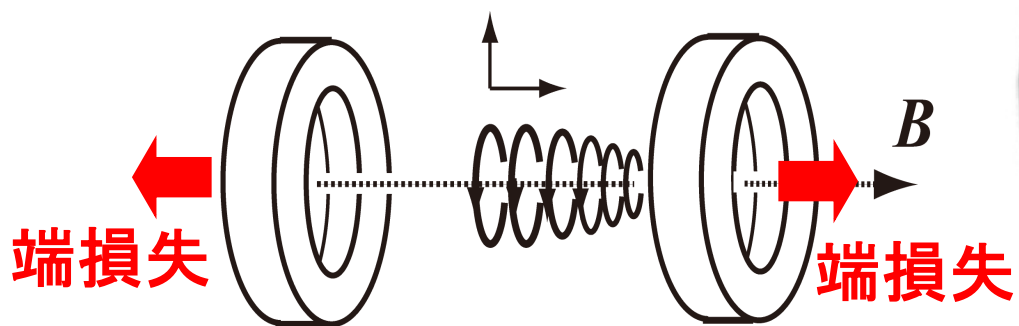
プラズマ = 荷電粒子
その特徴を生かし、
磁場を使って閉じ込める



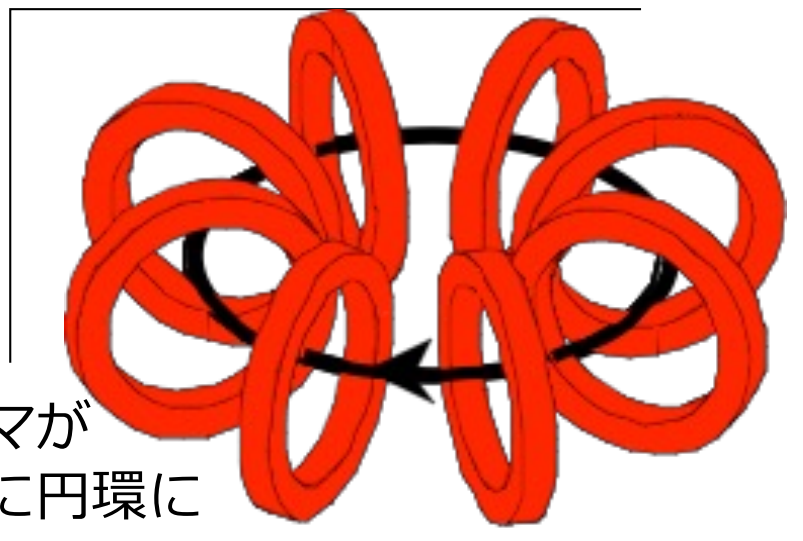
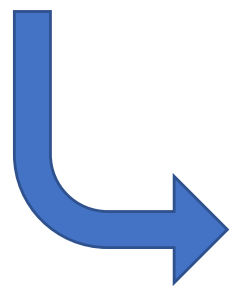
ローレンツ力による
磁力線への巻き付き

磁場による高温プラズマの閉じ込め

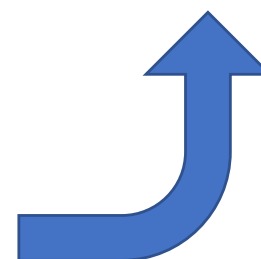
プラズマはローレンツ力により
磁力線に巻き付く



さらに磁力線を螺旋状にねじって
荷電分離を解消→**プラズマ閉じ込め**

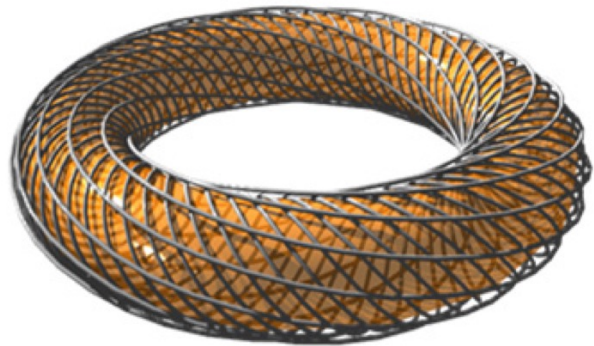


端からプラズマが
逃げないように円環に



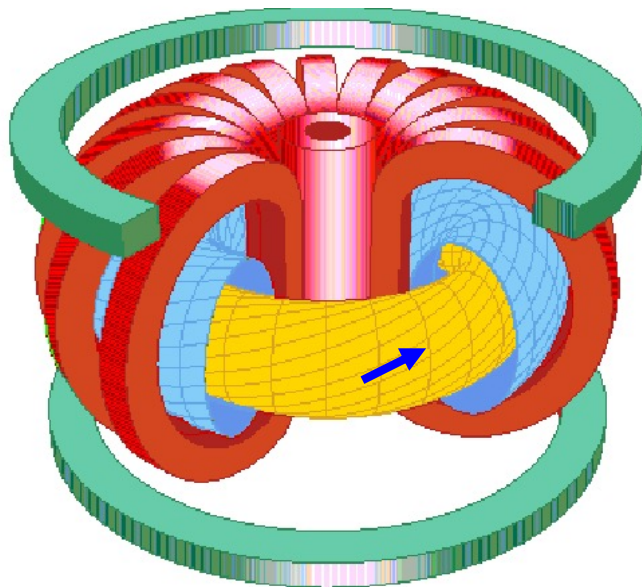
そのままではプラズマが
逃げ出す。。。

磁場閉じ込め方式

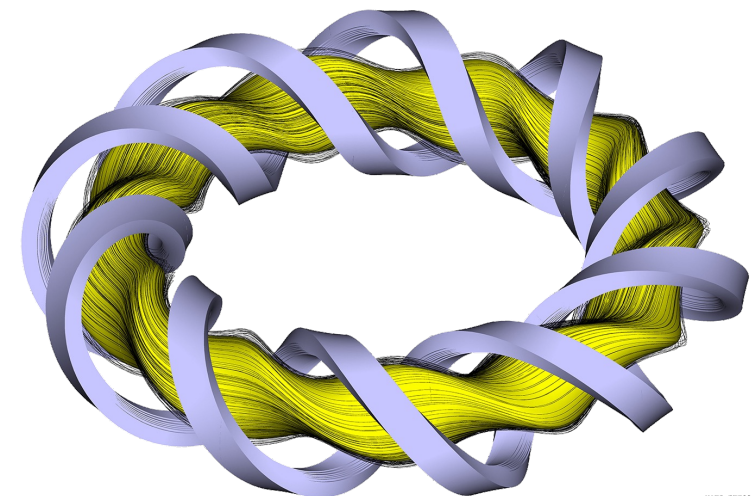


どうやって磁力線をねじる？

トカマク型
磁場配位



ヘリカル型
磁場配位

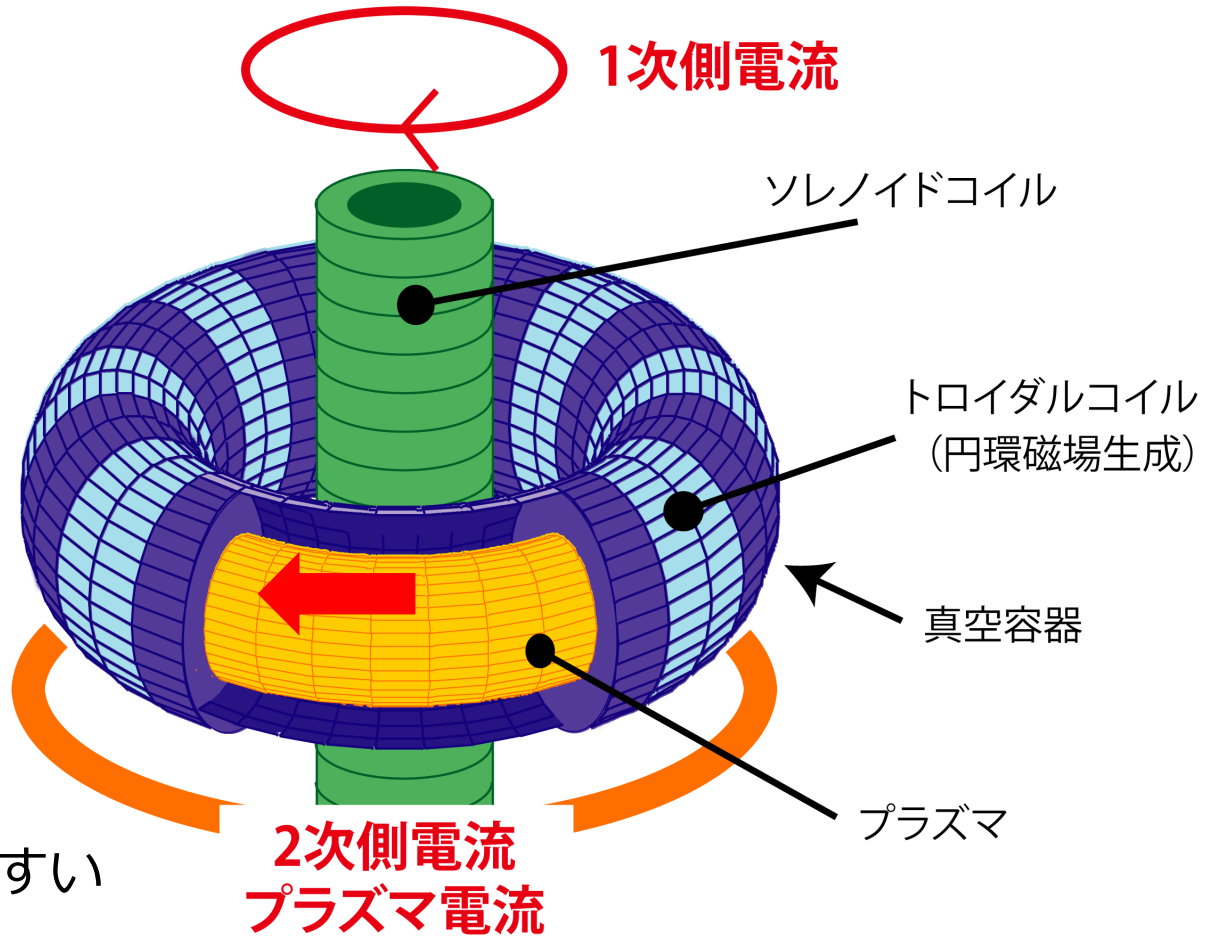


トカマク型磁場閉じ込め方式

プラズマ中に電流を流して磁場をねじる。どうやって？

→ トランスの原理（電磁誘導）

トカマク方式

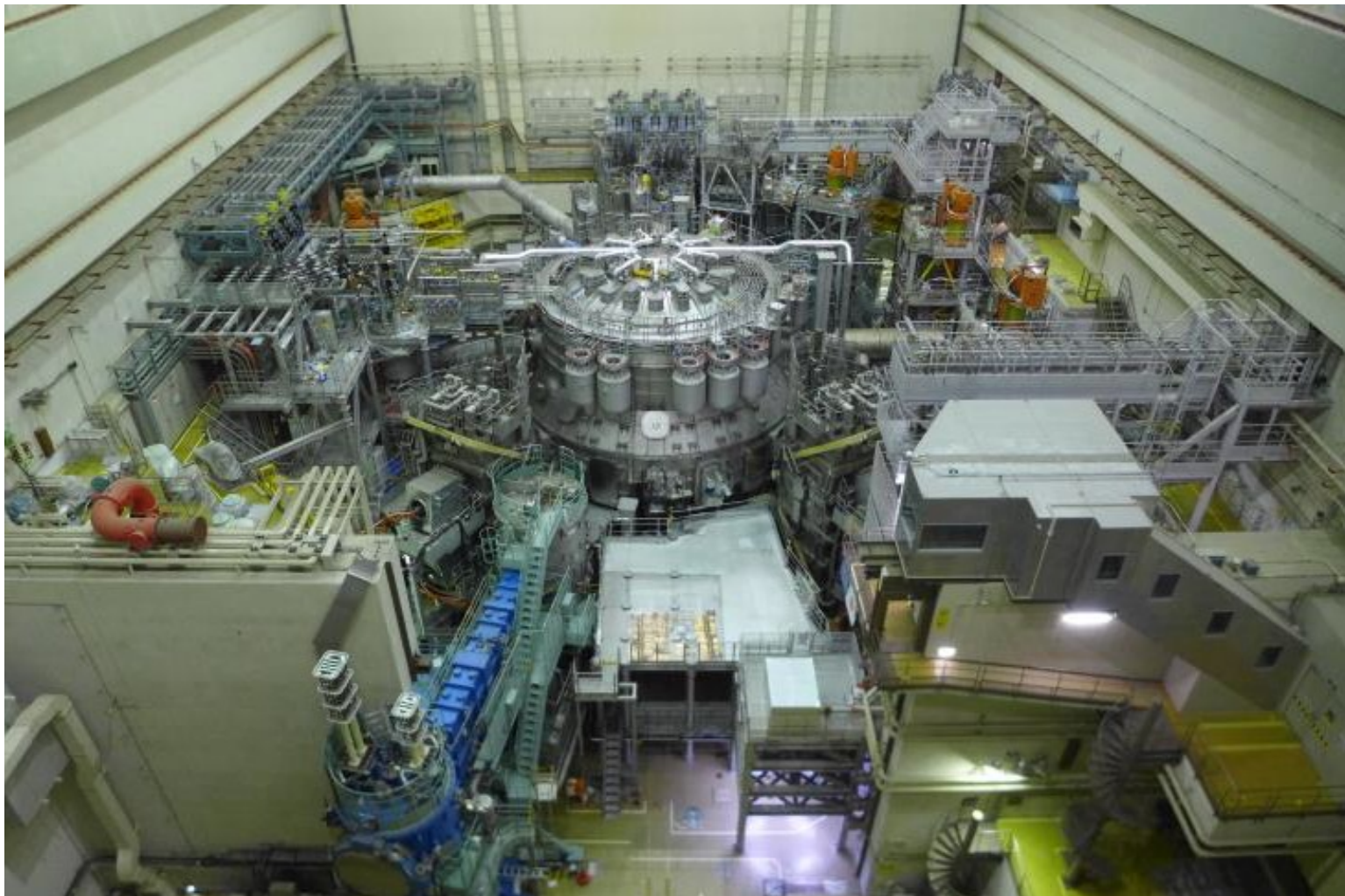


現在の主流の方式
高いプラズマ性能の実現
プラズマが不安定になりやすい
原理的には定常運転に課題

トカマク型磁場閉じ込め方式

量子科学技術研究開発機構・那珂フュージョン科学技術研究所

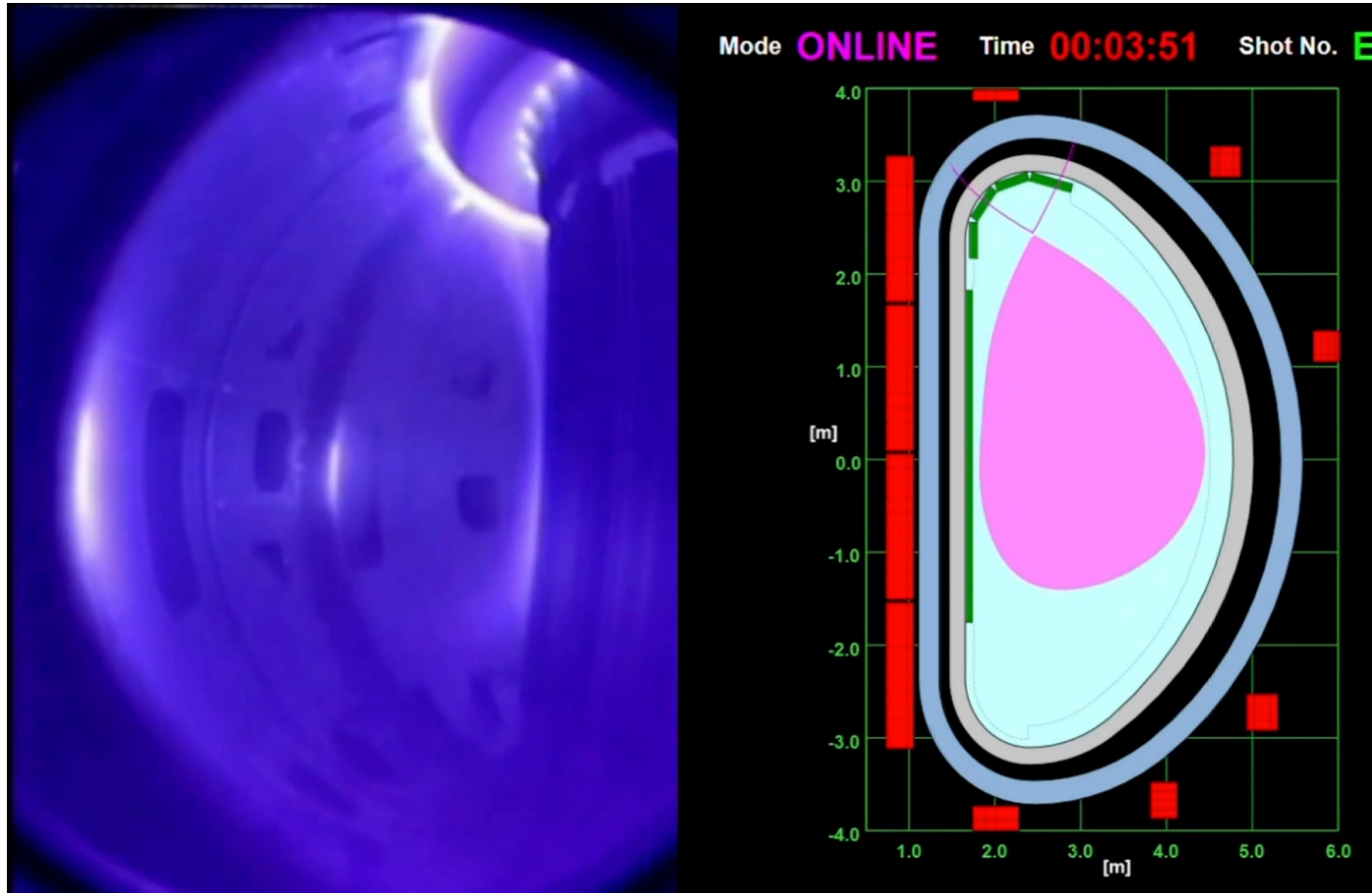
JT-60SA



トカマク型磁場閉じ込め方式

量子科学技術研究開発機構・那珂フュージョン科学技術研究所

JT-60SA



Youtube JT-60SA 量子科学技術研究開発機構
【核融合】JT-60SA 「必見！プラズマ映像」 0:08付近

ITER

日欧米露韓中印の7極が共同で建設する核融合実験炉

目的

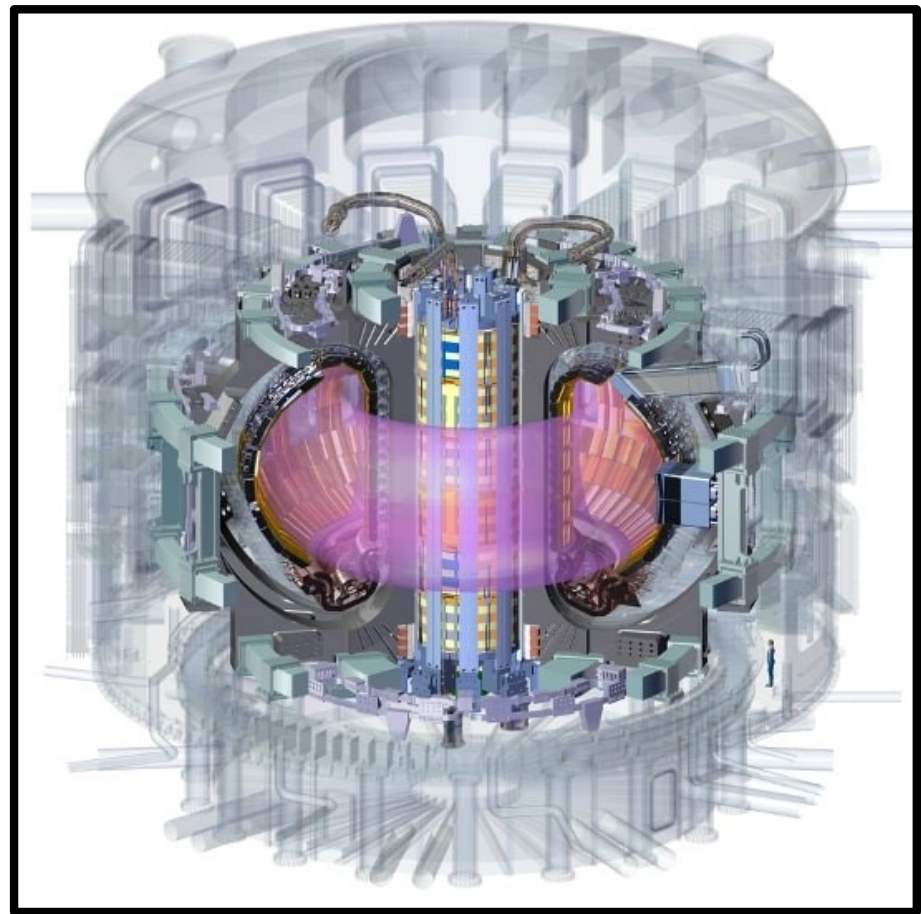
- 核融合出力50万kWを400秒程度維持
- 炉工学技術の実証
- 機器開発・試験



30m



フランス サン・ポール・レ・デュランス

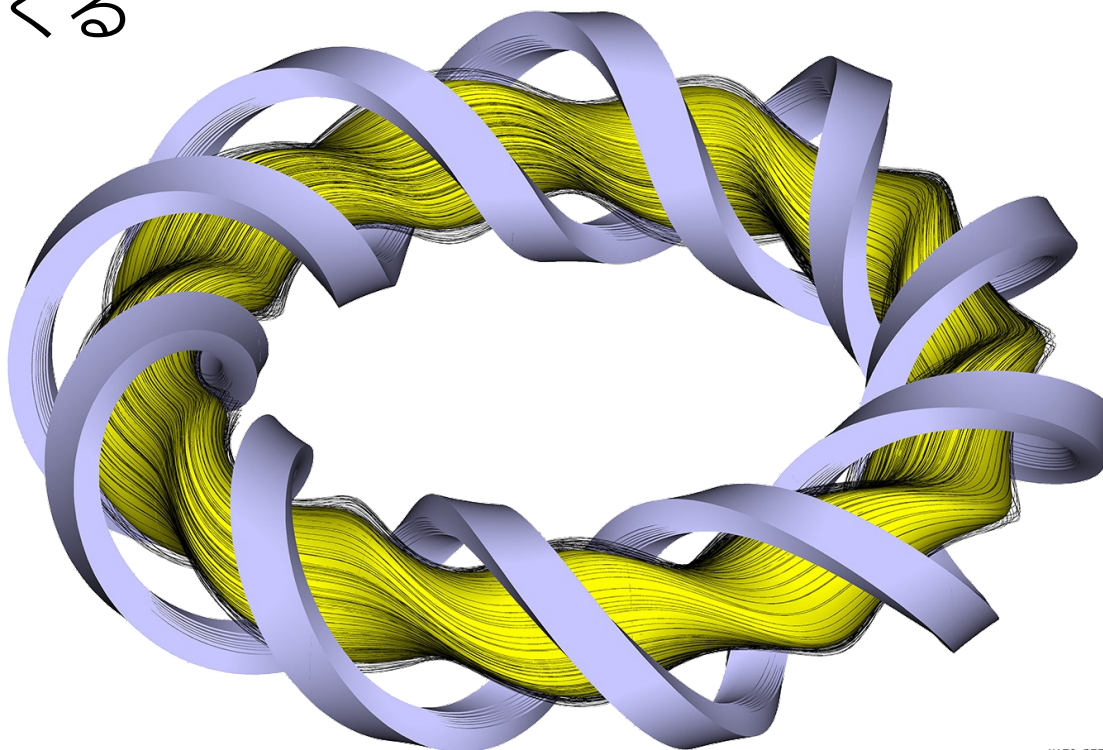


ITER



ヘリカル型磁場閉じ込め方式

ねじれたコイルによって、
直接ねじれた磁場をつくる



NIFS-PE768

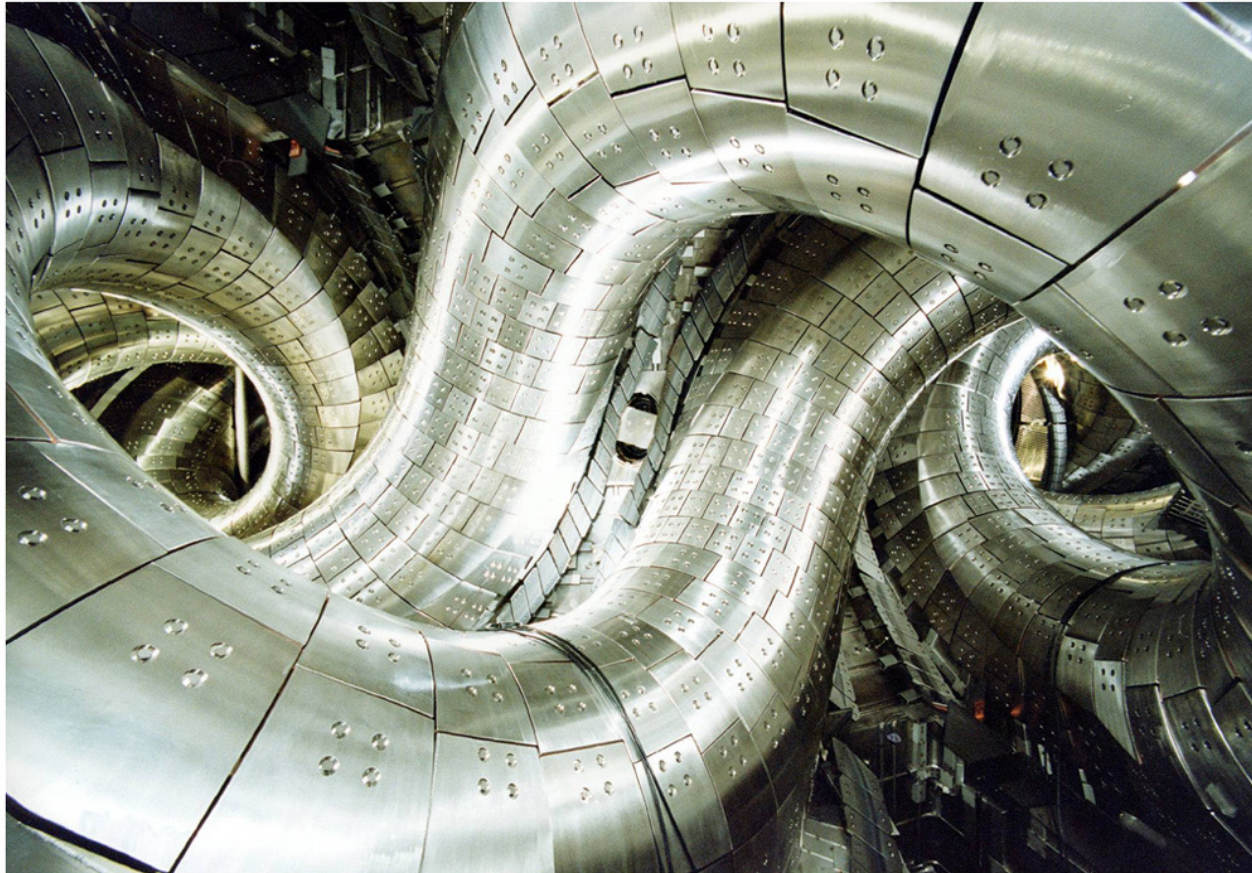
プラズマエネルギーのすべて より

原理的に定常運転に強い
プラズマは比較的安定
複雑なコイル設計・制作と大型化する傾向

ヘリカル型磁場閉じ込め方式

核融合科学研究所

LHD



慣性閉じ込め方式（レーザー核融合）

1. 加熱・圧縮

燃料の小さな粒（ターゲット）に、周囲から強力なレーザーを照射し太陽中心の10倍もの密度へ一気に圧縮

2. 膨張の開始

超高圧縮によるすさまじい内圧により、燃料が急激に膨張（拡散）

3. 慣性閉じ込め

慣性による膨張までのわずかな時間差で、核融合反応を完結させる

慣性閉じ込め方式（レーザー核融合）

アメリカ、ローレンス・リバモア国立研究所

NIF (National Ignition Facility)

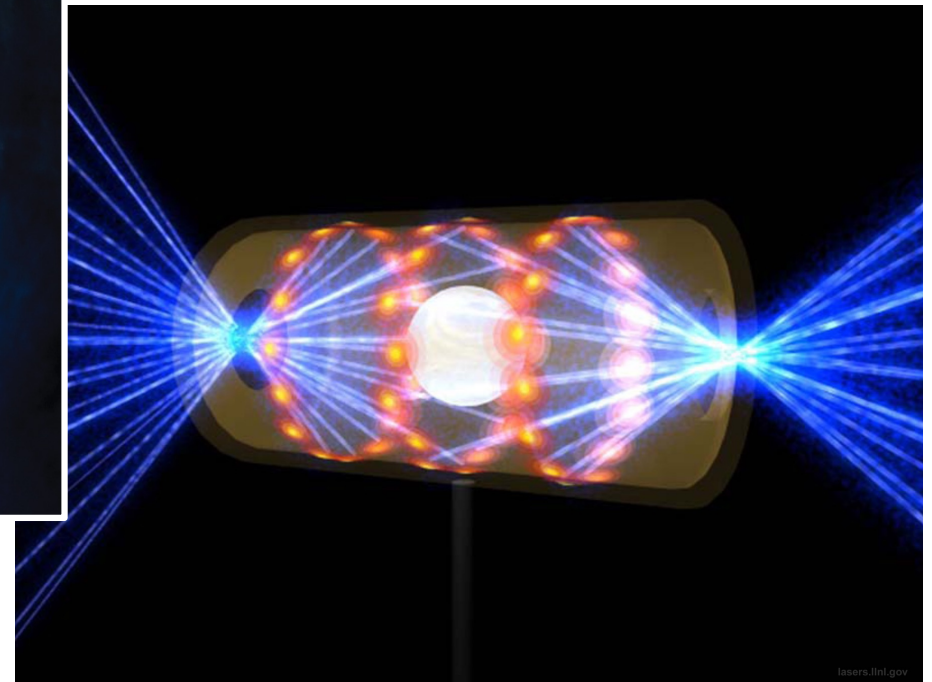
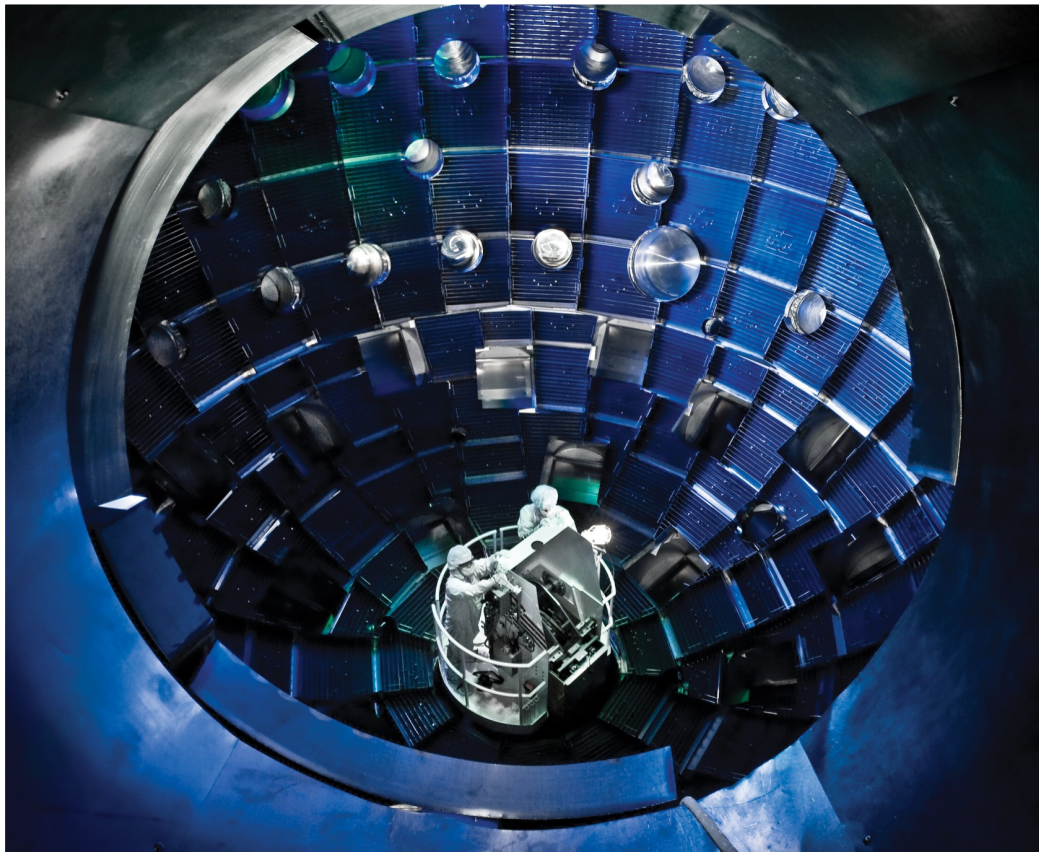


Image: LLNL / CC BY-NC-SA 4.0

フュージョンエネルギーの 実用化へ向けて

フュージョンエネルギー研究開発の全体像

- ◆ 我が国としてフュージョンエネルギーを最短距離で実用化するため、**世界に先駆けて2030年代の発電実証を実現するという高い目標**を掲げ、従来のITER計画/BA活動から原型炉開発というアプローチを強力に推進。
- ◆ また、スタートアップを含めた官民の研究開発力を強化するとともに、QST等のイノベーション拠点化を推進することにより、**トカマク型、ヘリカル型、レーザー型等多様な方式の挑戦を促す**。

SBIRフェーズ3基金 (Small Business Innovation Research)

✓ 中小企業イノベーション創出推進基金を造成し、スタートアップなどの有する先端技術の社会実装を促進

BRIDGEプログラム (システム改革型)

✓ 我が国のフュージョンエネルギーシステムの国際標準化の推進



ムーンショット型研究開発制度 (目標10)

✓ 未来社会像からのバックキャストによる挑戦的な研究開発を推進
「2050年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現」

QST、NIFS、ILE等のイノベーション拠点化

✓ スタートアップ等への供用も可能とする実規模技術開発のための試験施設・設備群の整備

- **第4の物質状態「プラズマ」**

宇宙・太陽、雷やオーロラ等の自然現象、蛍光灯や炎など身近にも。

- **フュージョンプラズマエネルギー**

太陽の熱・光のエネルギー源

地上で実現できれば、燃料は無尽蔵・安全性が高い等、夢のエネルギー
プラズマの閉じ込め方式：磁場閉じ込め（トカマク・ヘリカル）、慣性

- **核融合エネルギー実用化へ向けた現状**

世界7極合同で建設を進めるITER：科学的実証と炉工学技術実証

2030年代の発電実証を目指し、これまでの研究開発を土台に
設計研究・産業化が加速