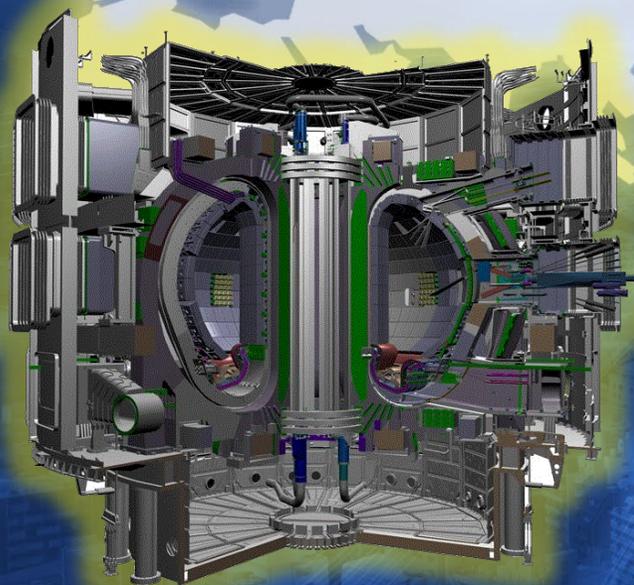
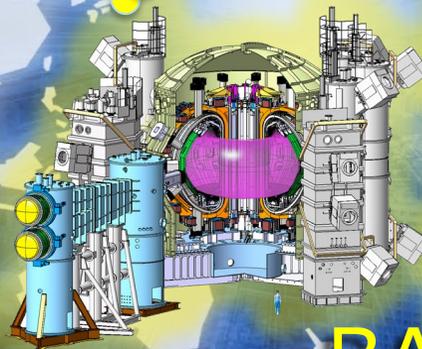


# フュージョンエネルギーの基礎及び 技術的に取り組むテーマ

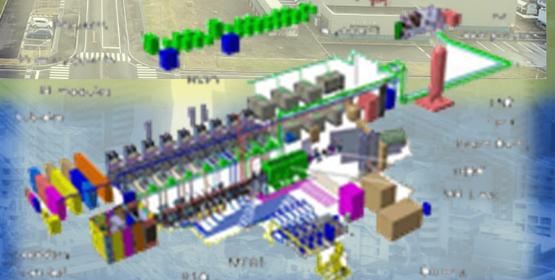


ITER計画



BA活動

幅広いアプローチ活動

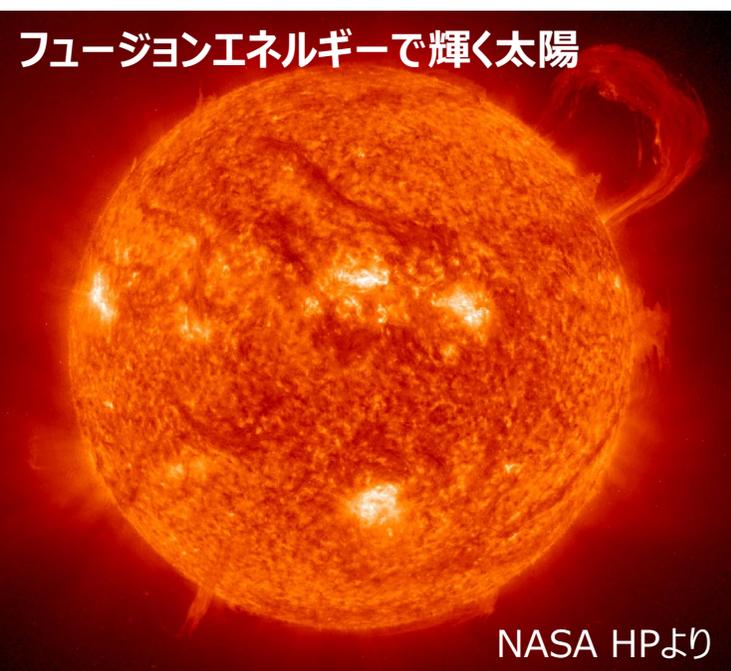
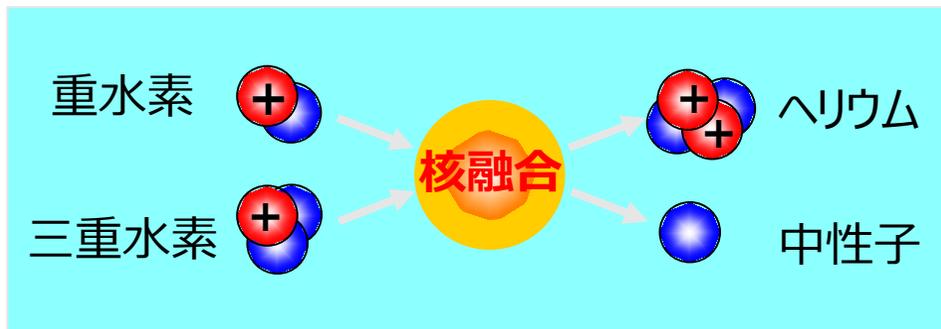


国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

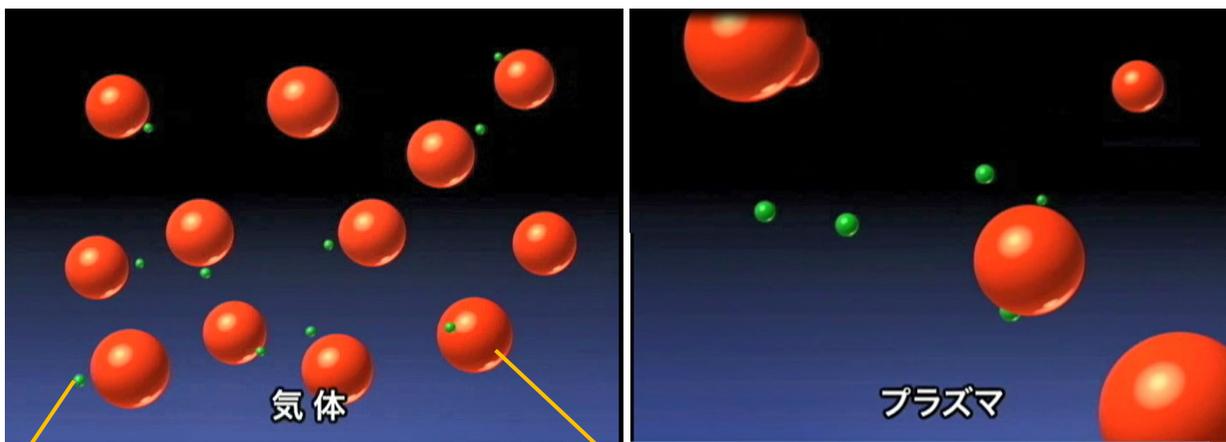
量子エネルギー部門

竹永 秀信

- 太陽で起きている核融合反応を地上で実現し、エネルギーとして利用（地上に太陽を!!）
- カーボンニュートラルに貢献できる環境に優しく、安全性に優れた将来の大規模エネルギー源と期待



- ・ 地上で最も起きやすい反応は重水素と三重水素の原子核反応。
- ・ 重水素と三重水素をプラズマ状態にして、1億度以上に加熱。



電子（マイナス電荷） 原子核（プラス電荷）

## 燃料が豊富

中性子 リチウム → ヘリウム 三重水素

リチウムから自分で三重水素を作る

燃料は無尽蔵  
(海中から)  
重水素33g/トン  
リチウム0.2g/トン

## 少しの燃料で沢山のエネルギー

燃料1gで石油8トン分のエネルギー

エネルギー問題・環境問題の根本的解決

エネルギー ← 質量差

$$E = m \cdot c^2$$

He n

T D

$E=mc^2$

## 環境に優しく安全

燃焼 停止

燃料 開 燃料 閉

燃えかすはヘリウム  
燃料の元栓を締めると反応が停止  
CO<sub>2</sub>は出さない  
廃棄物の処理が容易

重水素

ヘリウム

核融合反応

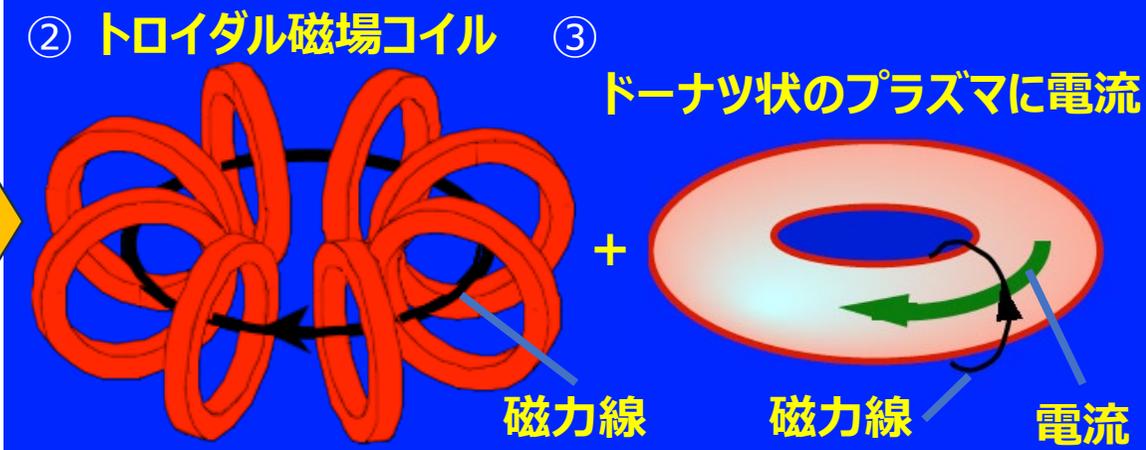
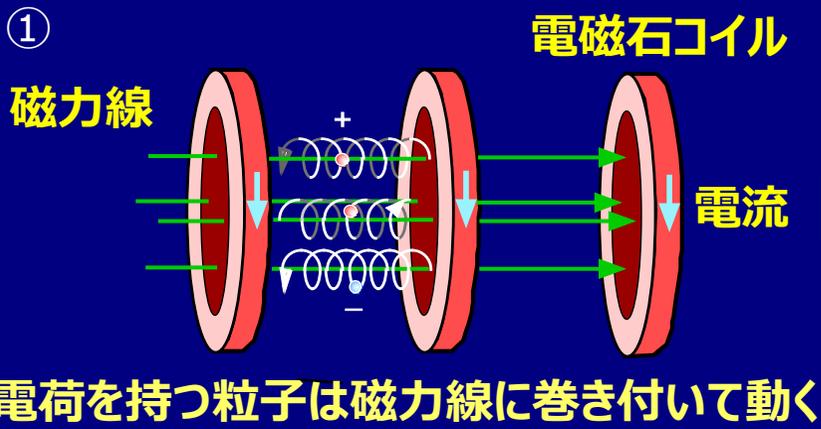
三重水素

中性子

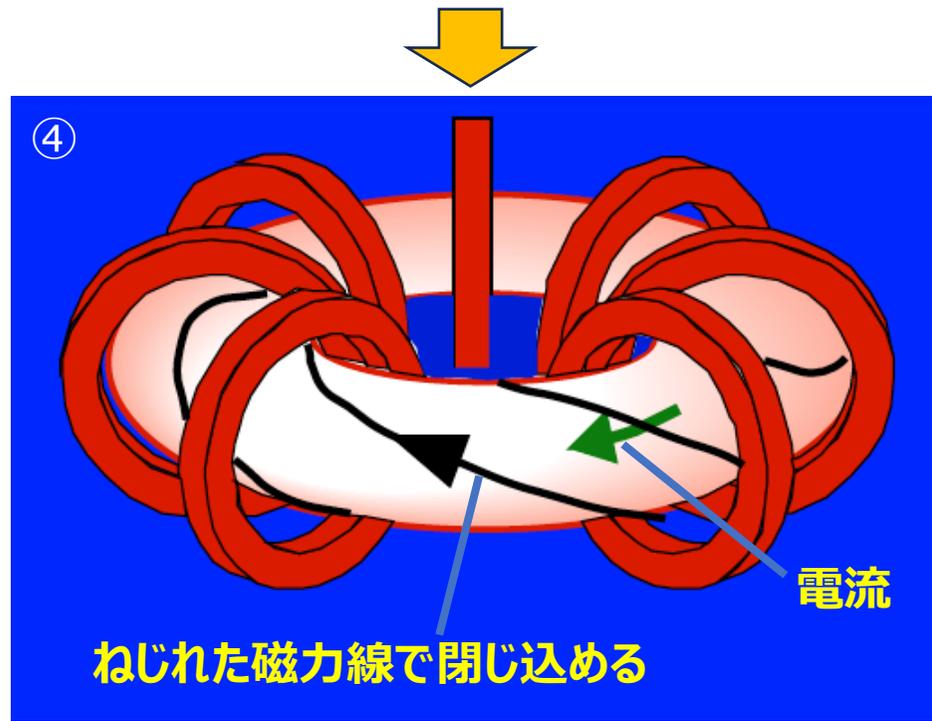
## 先端技術の結晶



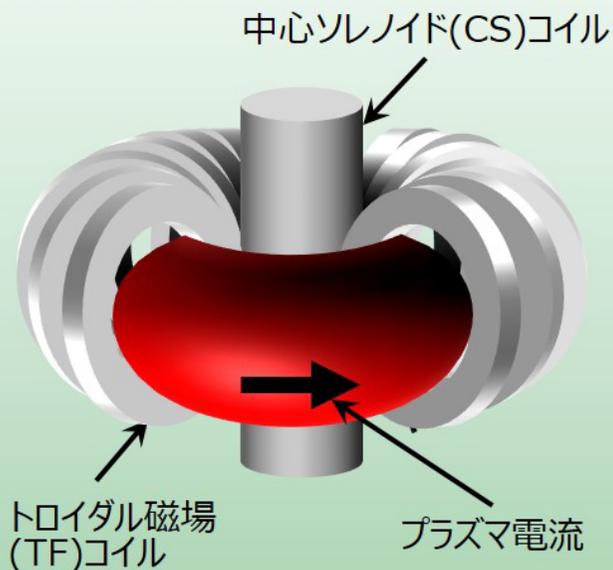
超伝導、ロボットなど  
未来に向けた先端技術開発



- ① 高温にするためにはプラズマを容器から浮かす必要がある。  
電荷を持つ粒子が磁力線に巻き付いて動く性質を利用。  
直線の磁力線では両端から粒子が損失。
- ② 両端からの損失を防ぐためコイルをまるく並べて、ドーナツ状のプラズマを生成。
- ③ ドーナツ状のプラズマ中に電流を流して別方向の磁力線を作る。
- ④ 2つの磁力線を合わせて、ねじれた磁力線のかごを作りプラズマを閉じ込める。



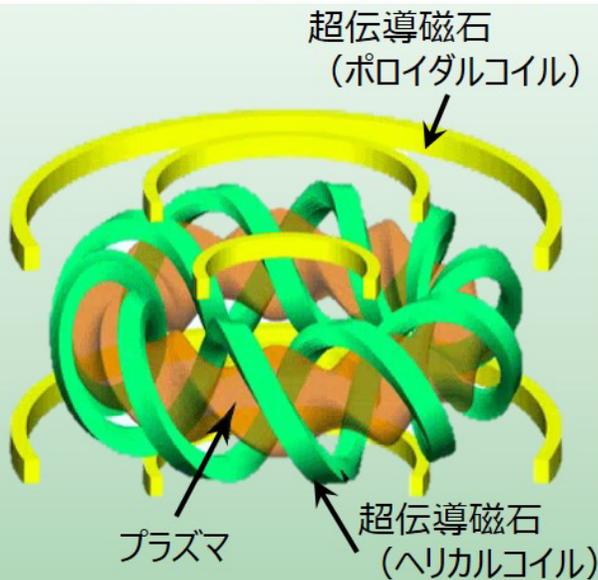
## ●トカマク型（磁場閉じ込め）



- TFコイルが作る磁場と、プラズマ電流が発生させる磁場を重ね合わせ、ドーナツ状のねじれた磁場のかごを形成
- 閉じ込め性能が高く、核融合反応に必要な条件のプラズマ生成に成功 ⇒ITERで採用
- プラズマ電流はCSコイルや加熱装置により発生 ⇒プラズマの安定性に課題
- 日本は、JT-60でイオン温度5.2億度(世界記録)達成など、世界トップレベル

核融合実験炉ITER <ITER機構>  
大型トカマク装置JT-60SA  
<(国研)量子科学技術研究開発機構>

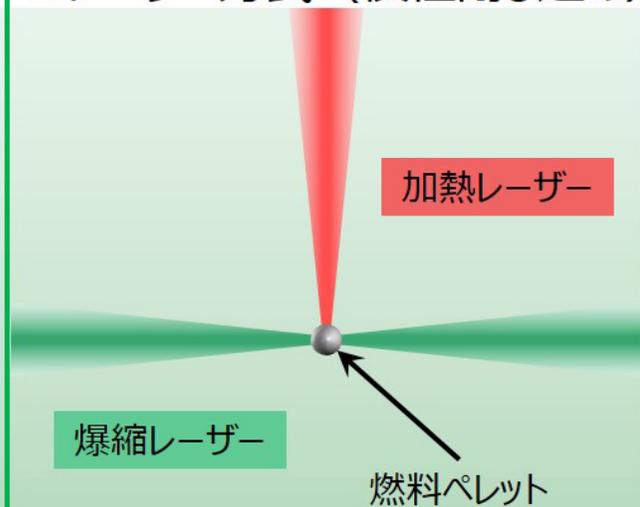
## ●ヘリカル型（磁場閉じ込め）



- ドーナツ状のねじれた磁場のかごを作るためにねじれたコイルを使い、プラズマ電流を必要としないことが特徴
- プラズマの安定性に優れ、長時間運転に優位性 ⇒LHDによる定常運転(約1時間)は世界記録
- プラズマはコイルに沿ってらせん状になる ⇒粒子が飛び出しやすく、閉じ込め性能に課題

大型ヘリカル装置LHD  
<(共)核融合科学研究所>

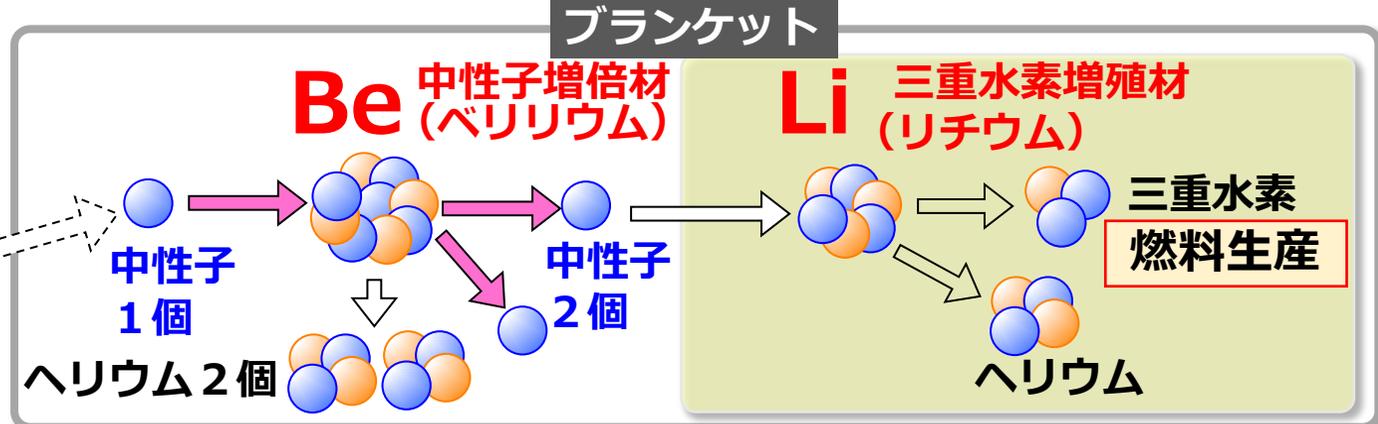
## ●レーザー方式（慣性閉じ込め）



- 燃料ペレットをレーザーで瞬時に加熱・蒸発させ、中の燃料に爆発的な圧力をかける爆縮という現象が発生
- 閉じ込め時間は燃料プラズマが慣性によりその場に留まるほんの一瞬であり、その間に核融合反応を起こす必要
- レーザーの効率向上や、大量のペレットに順次レーザーを精密に照射し続けること等が課題

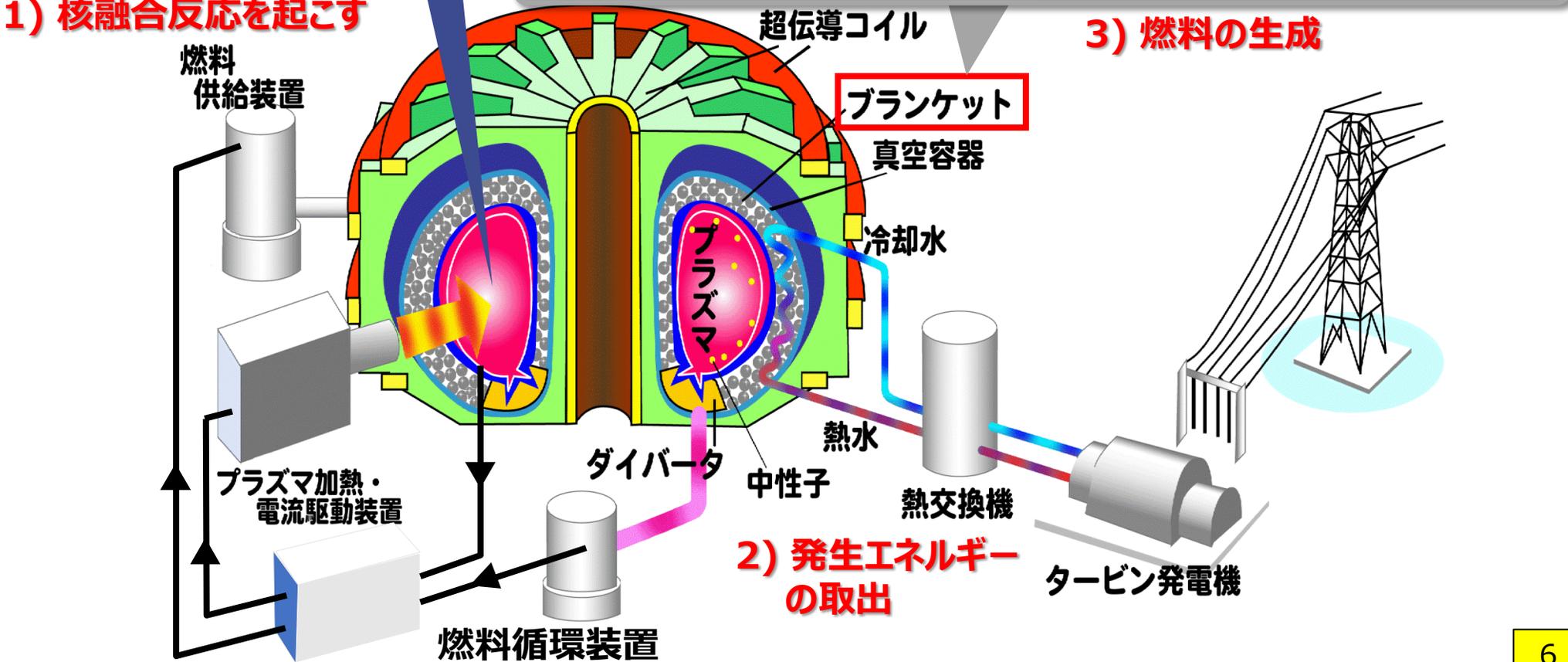
激光XII号・LFEX  
<大阪大学>

# 核融合発電炉の原理



## 1) 核融合反応を起こす

## 3) 燃料の生成

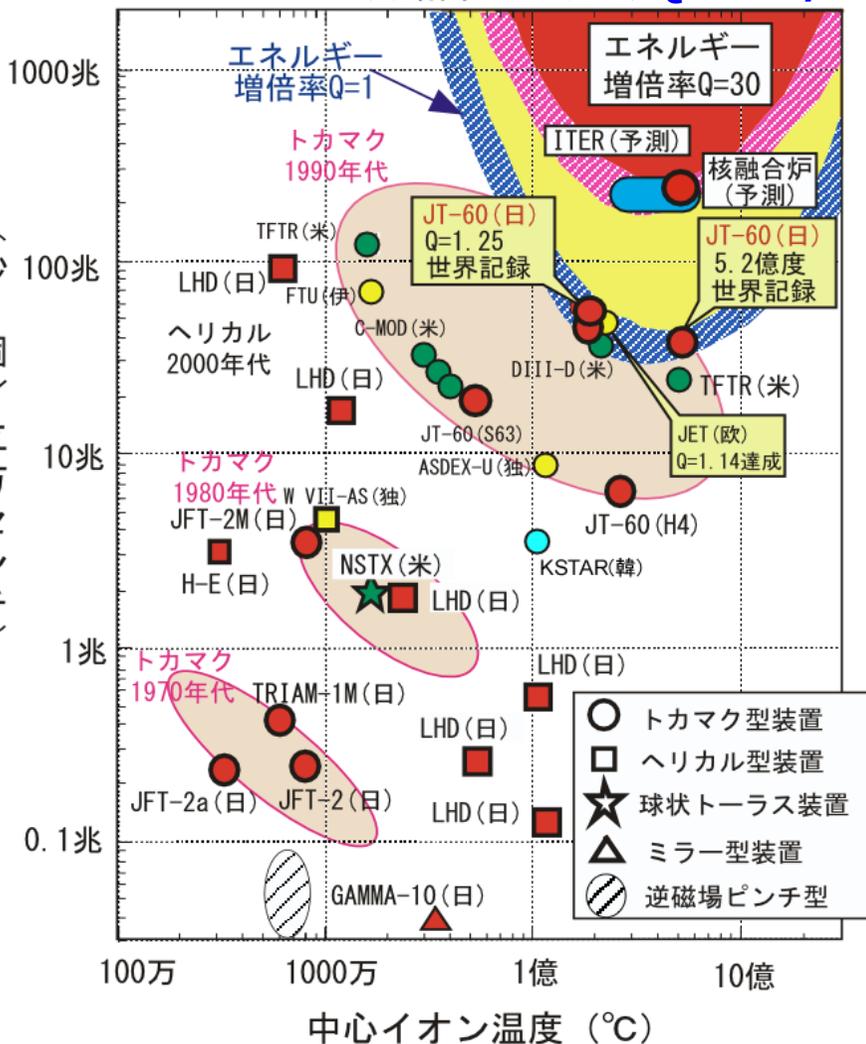


## プラズマ性能の進展

1990年代に1億度、エネルギー増倍率  
 $Q=1$ の領域にプラズマ性能が到達。

(磁場閉じ込め方式)  $Q = \text{出力} / \text{入力}$

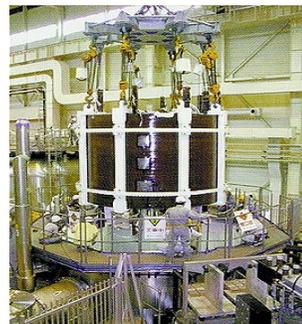
閉じ込め時間 × 中心イオン密度  
 (秒・個/立方センチ)



## 工学技術の進展

ITERのための工学技術等を開発。

大型超伝導コイルの開発



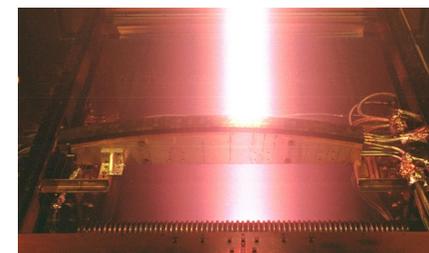
ブランケットの開発



大型加工技術の開発  
 (真空容器)



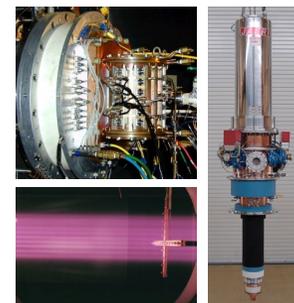
耐高熱負荷機器の開発  
 (ダイバータ)



遠隔保守装置の開発



プラズマ加熱装置 (ビーム、高周波) の開発



## 試験装置

Test device

科学的実現性

JT-60



超高温プラズマの実現

世界最高イオン温度  
5.2億度を達成

現在

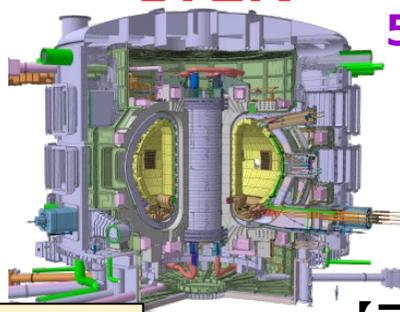
## 実験炉

Experimental reactor

核融合燃焼の実証

ITER

熱出力:  
50万kW



【フランス】

課題

1) 核融合反応を起こす

今世紀  
中葉

## 原型炉

DEMO reactor

発電実証

電気出力:数十万kW



実用炉

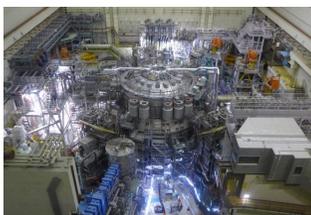
ITERを支援する

ITERでできないことを補う



幅広いアプローチ活動 Broader Approach (BA) activities

【茨城 那珂研】

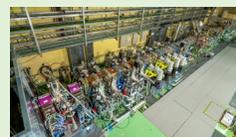


サライト・トカマク計画事業  
(JT-60SA)

【青森 六ヶ所研】



IFERC事業  
原型炉設計  
スーパーコンピュータ  
ITER遠隔実験



IFMIF/EVEDA事業  
材料照射施設のため  
の世界最大電流の加速  
器開発

課題

- 2) 発生エネルギーの取出
- 3) 燃料の生成

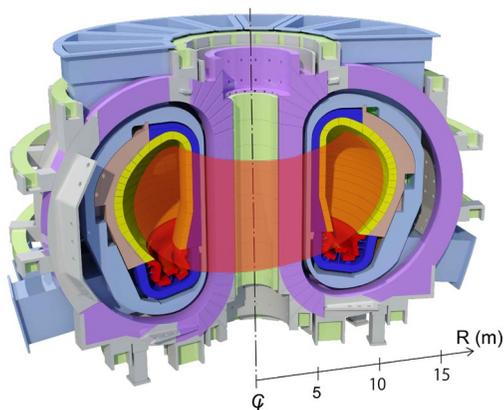
## 原型炉設計合同特別チーム

- QST六ヶ所研にチームを設置 (2015年6月)
- 産学連携のオールジャパン体制で原型炉概念の構築を目指す
  - ① 数十万kWを超える定常かつ安定した電気出力
  - ② 実用に供し得る稼働率
  - ③ 燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖

### JA-DEMO

主半径 8.5 m  
核融合出力 1.5 GW

ITER  
主半径 6.2 m  
核融合出力 0.5 GW



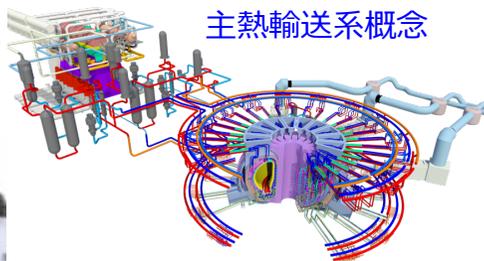
2023年4月現在のメンバー数：  
152名

大学等：59  
産業界：54  
QST：39

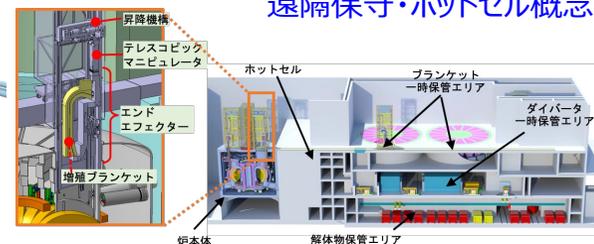
## 日本独自の原型炉目標の達成に見通し

- ① 約64万kWの電気を発生
- ② 運転後期には稼働率~70%

### 主熱輸送系概念

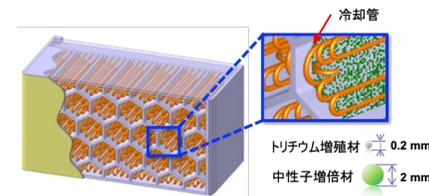


### 遠隔保守・ホットセル概念

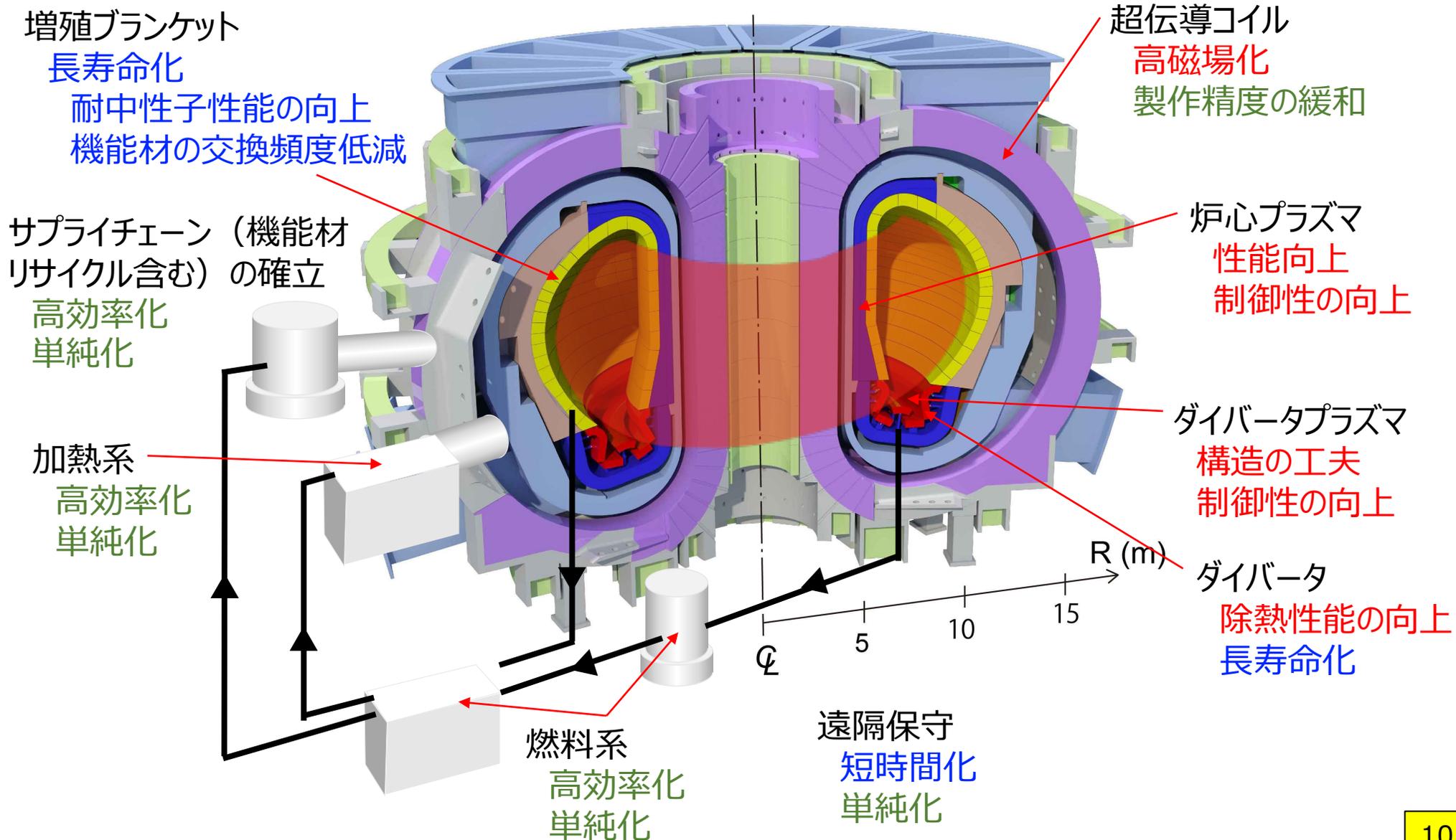


- ③ 増殖ブランケット筐体の堅牢性とトリチウム生産性を両立

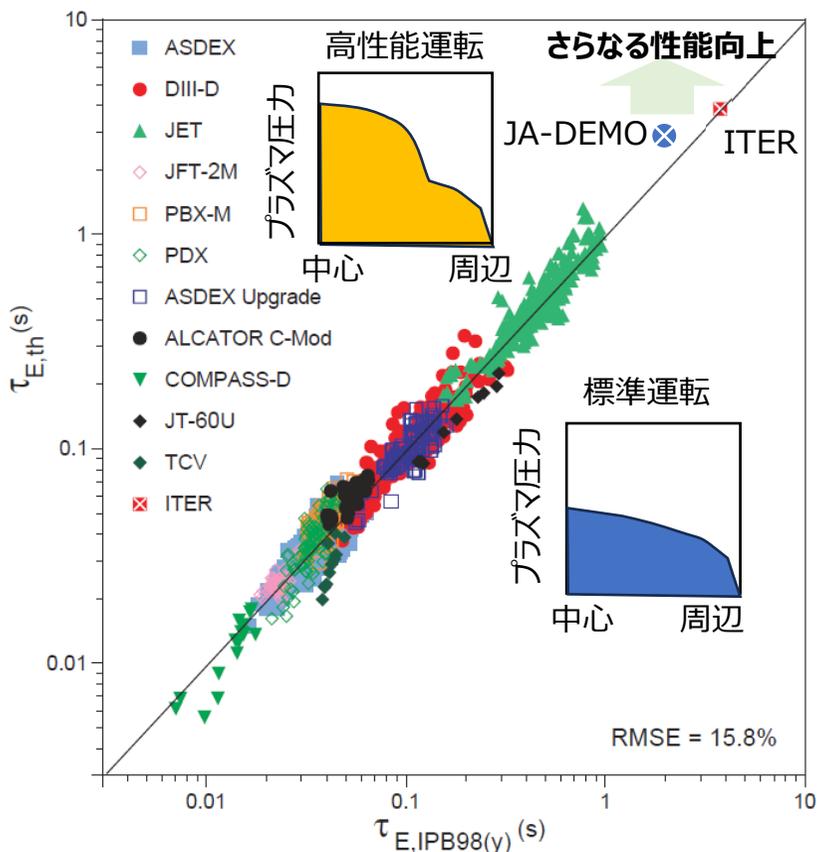
### 増殖ブランケット概念



原型炉から実用炉に向けては経済性の向上が必要。**小型化**、**高稼働率化**、**簡素化**が鍵。

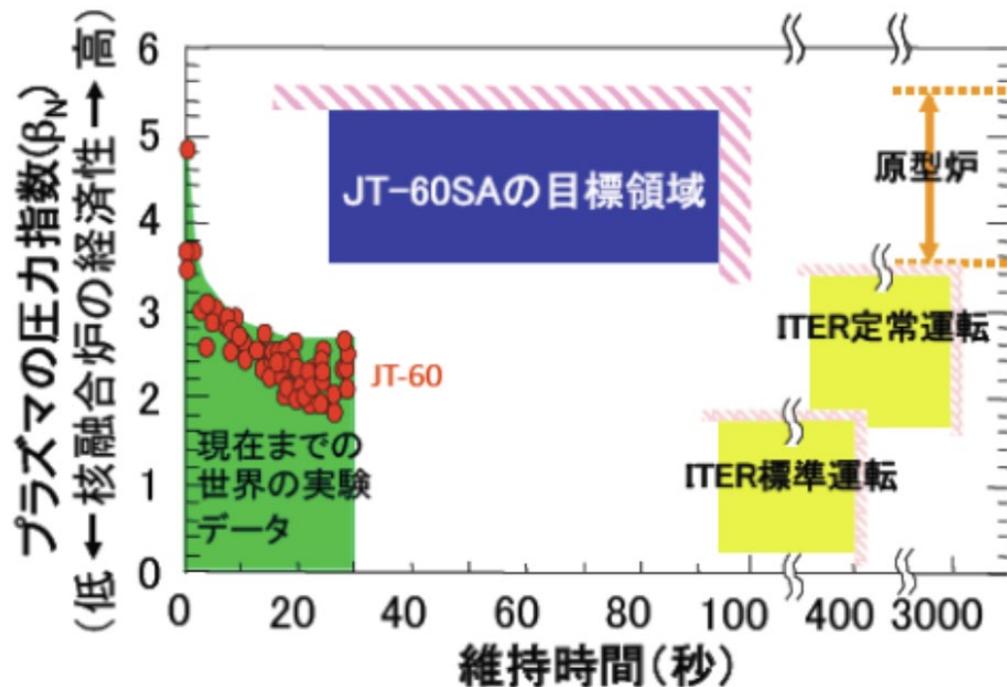


- 閉じ込め性能（主にQ値に関係）
  - JA-DEMOは高性能運転（標準運転からの性能向上度1.3）で設計。
  - これまでの多くのトカマク装置（小型、中型、大型）でのデータを基に予測しており、さらなる性能向上の余地はあるか？
  - 学術的なアプローチの必要性。



$$\tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.0562 M^{0.19} I_p^{0.93} B_t^{0.15} R^{1.39} a^{0.58} \kappa_a^{0.78} n_{19}^{0.41} p^{-0.69}$$

- 圧力指数（主に出力に関係）
  - JA-DEMOは3.4で設計。
  - 少ない制御ツールで安定化可能な領域は？
- 高性能プラズマや圧力指数が高いプラズマは不安定になりやすい。
  - ➔ 制御性の向上（例えば、AIを用いた制御等）により、安定な運転領域を拡大できれば、小型化の可能性。

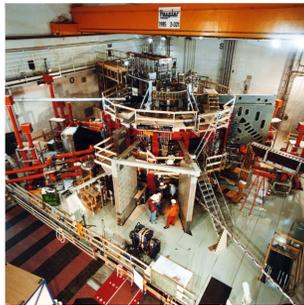


# (参考)国際共同データ解析

## 欧州



JET



ASDEX-U



ASDEX



COMPASS



TCV

## 日本

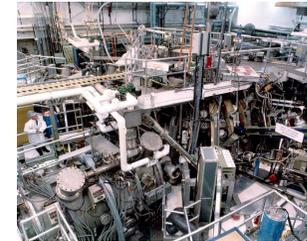


JT-60U



JFT-2M

## 米国



DIII-D



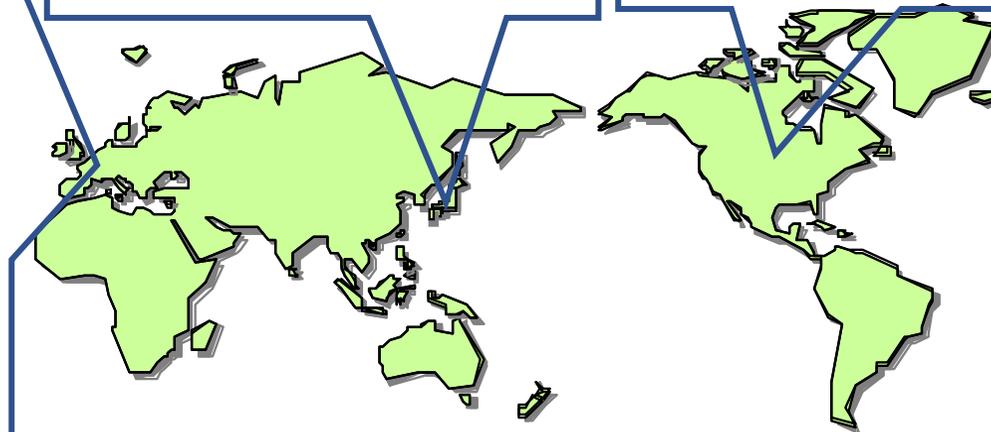
C-MOD



PBX-M



PDX



## 超伝導コイル

### ○ 高磁場化

- 高磁場化によりプラズマ電流を大きくすることができ、閉じ込め性能が向上し小型化。
- 高強度低温鋼の開発：高磁場下の電磁力に耐えうる構造材が必要。
- 高温超伝導：コイルとして機能させることが必要。
- 高強度耐放射線絶縁材料：高磁場下の電磁力に耐え、かつ放射線にも耐えうる絶縁材が必要。

### ○ 製作精度の緩和

- 製作工程の簡素化で低コスト化。

## ブランケット

### ○ 長寿命化

- 加工性も有する耐中性子性能が高い構造材の開発（例えばSiC/SiC）が必要。
- 機能材の交換頻度を低減できる液体増殖材（例えばリチウム鉛）の開発が必要。
- 核融合中性子源でのデータ取得が必要。

## ダイバータプラズマ

- 小型化の妨げとなるのはダイバータへの熱負荷が増大すること。ダイバータプラズマで熱負荷を分散させることが必要。

### ○ 構造の工夫

- 磁力線を広げる等、磁力線構造の工夫により、ダイバータへの熱負荷を分散することが必要。

### ○ 制御性の向上

- 不純物からの放射光で熱負荷を分散。
- ダイバータや周辺プラズマにはある程度不純物を混入させ、炉心プラズマには入らないように（炉心プラズマの性能を損なわずに）制御することが必要。
- 非接触ダイバータを安定に制御することができれば、小型化の可能性。

## ダイバータ

### ○ 除熱性能の向上及び長寿命化

- 液体ダイバータ等、新概念の導入。

- これら原型炉から商用炉への技術ギャップに関する研究開発は、QST、NIFS、大学等がそれぞれで実施しており、系統的な研究開発に至っていない。潜在的なアイデアもあると考えられる。
- 幅広いアカデミアや産業界からもアイデアを取り組むことが重要。
- 商用炉であることから、産業界にどのように技術を蓄積するかの観点が重要。
- 幅広く研究開発課題を募集し、専門家でレビューして実施課題を選定する進め方が適切と考えられる。
- 研究開発を実施するに当たっては、それぞれの課題が関連することが想定されることから、全体を統括するPDを置くことが有効である。