

# 核融合エネルギーの開発

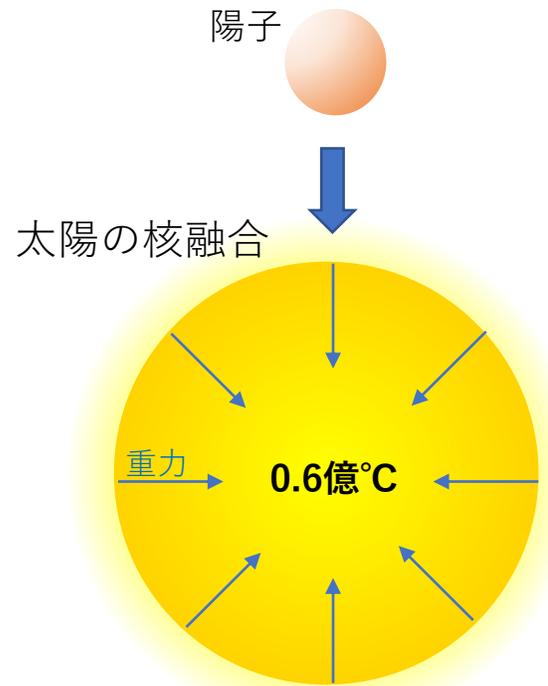
50万kW級実験炉の着火が間近

元 慶應義塾大学  
岡野邦彦

<b>核分裂</b>	<b>重い元素</b> (ウランなど) の分裂でエネルギー発生	⇒ 分裂後は <b>様々な元素</b> (放射性物も)
<b>核融合</b>	<b>軽い元素</b> (水素など) の融合でエネルギー発生	⇒ 融合後は <b>特定の元素</b> (He等)

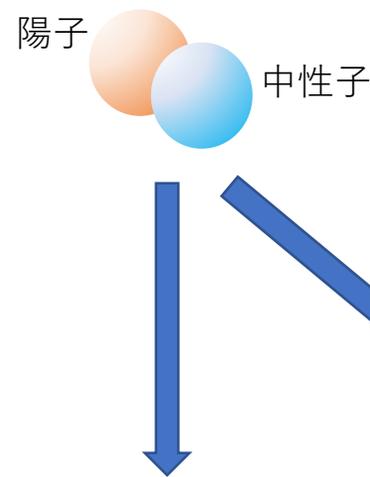
**水素同位体と核融合**

**水素**  
H<sub>2</sub>Oの形で無尽蔵



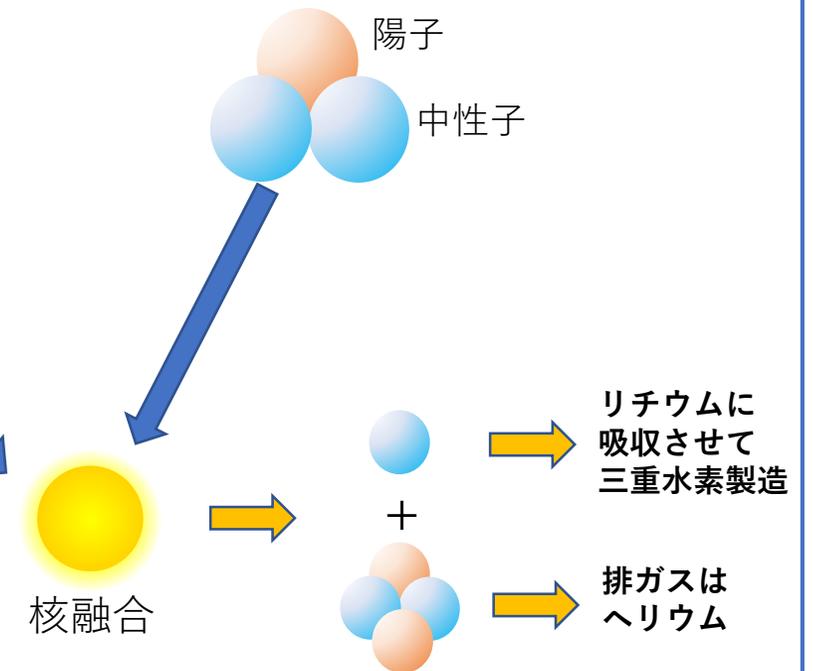
太陽直径～地球の109倍  
反応率は小さいが  
巨大なので燃える

**重水素**  
(海水中の水素の7000個に1個)



重水素だけを使う  
未来の核融合炉  
~5億°C  
既存技術では姿を描けない

**三重水素**  
海水にも豊富なリチウムから作る

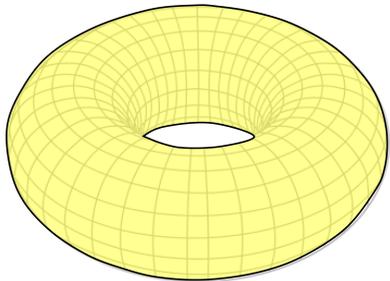


重水素と三重水素の核融合炉  
1億°C  
既存技術での実現を目指す

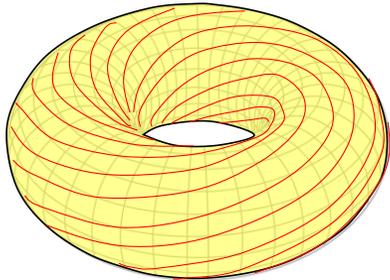
高温水素（プラズマ）を**重力**で閉じ込めるのが太陽  
**磁場**や**慣性**で閉じ込めるのが人工の核融合炉

## 磁場方式

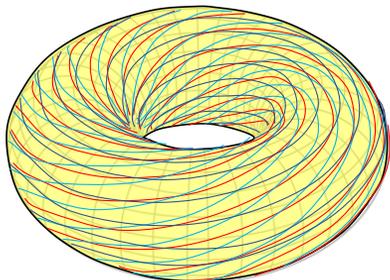
プラズマが磁力線を横切れないのを利用  
ねじれピッチが異なる**磁力線**の  
「多重カゴ」で覆って漏れを防ぐ



トーラス  
プラズマ



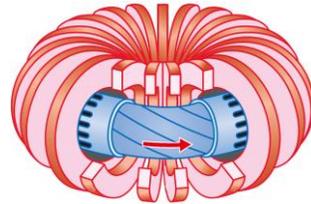
一重の  
磁力線カゴ  
隙間から漏れる



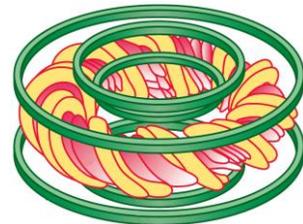
多重の  
磁力線カゴ  
この図は3重  
実際は無限重

磁場方式核融合炉のイメージ

直径10~20メートル



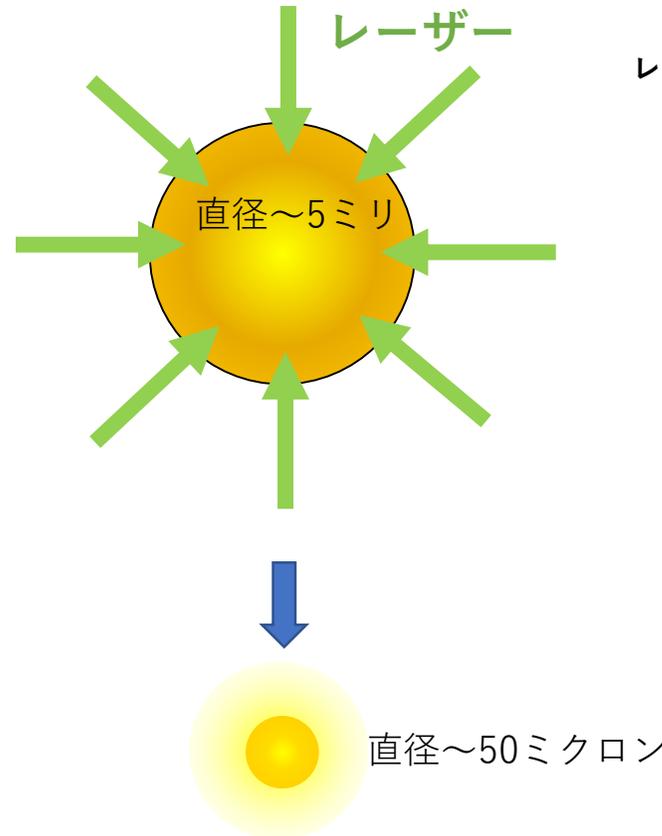
↑電流を流してねじる  
または  
↓コイルをねじっておく



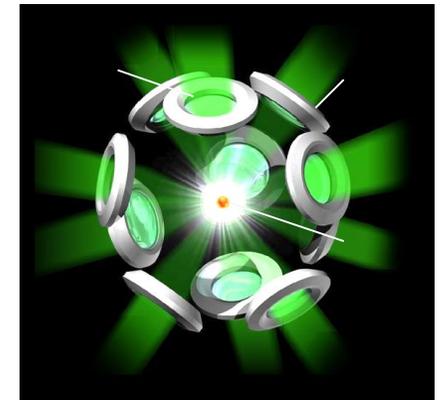
装置イメージ図は「核融合エ  
ネルギーのきほん」（誠文堂  
新光社刊、2021年）による

## 慣性方式（～レーザー方式）

数ミリの燃料球をレーザー等で瞬間加熱+圧縮  
質量があるのですぐには飛び散れない（**慣性効果**）  
100億分の1秒で核融合⇒それを繰り返す



レーザー磁場方式核融合炉のイメージ

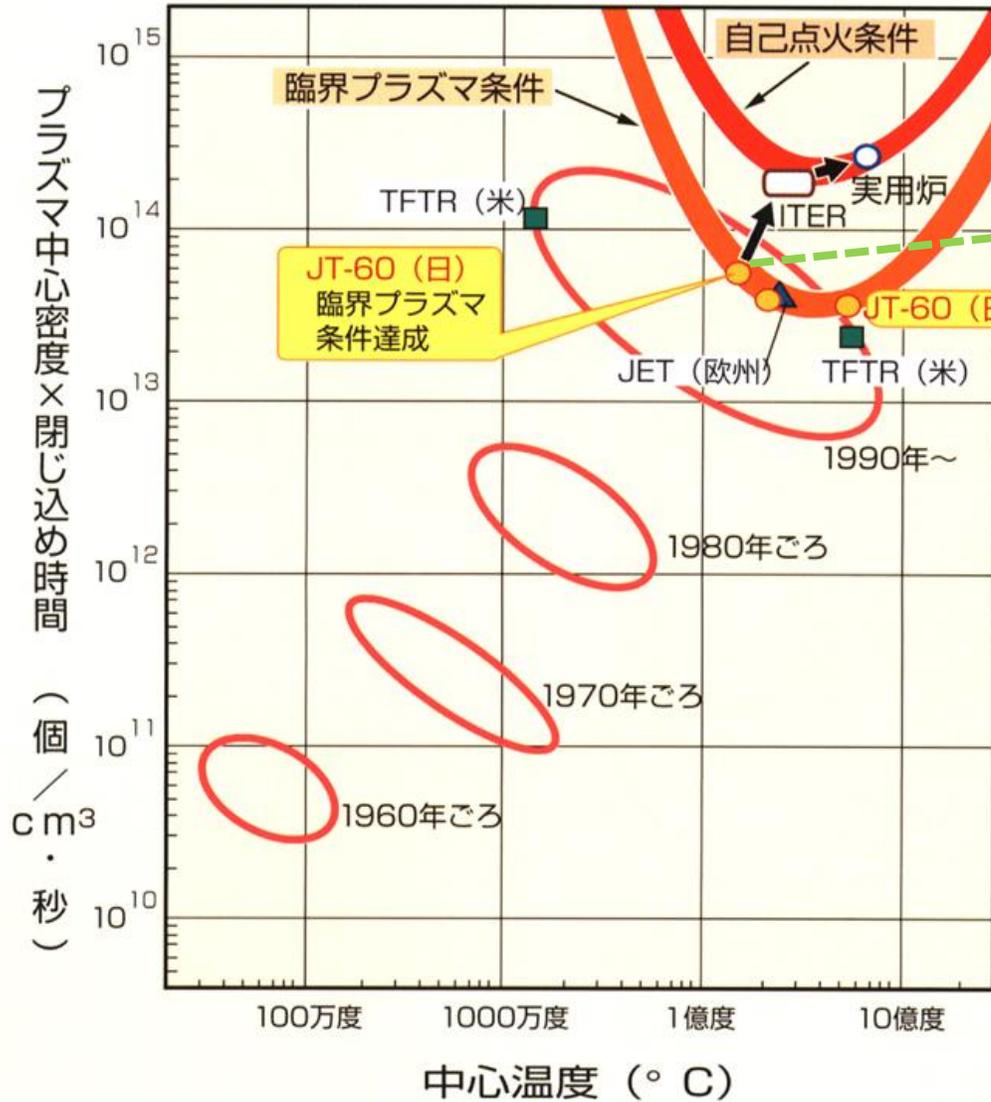


大阪大学レーザー科学研究所

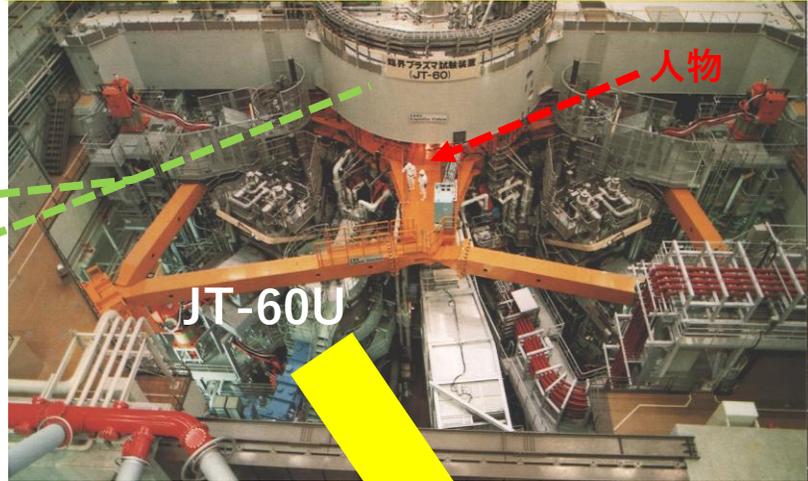
# 磁場方式

1960年代より10年毎に一桁の進歩。日本と欧州の装置で**臨界条件**は達成済。  
 次は超伝導コイルを使う実験炉**ITER**（建設中）で**50万kWの核融合出力**をめざす

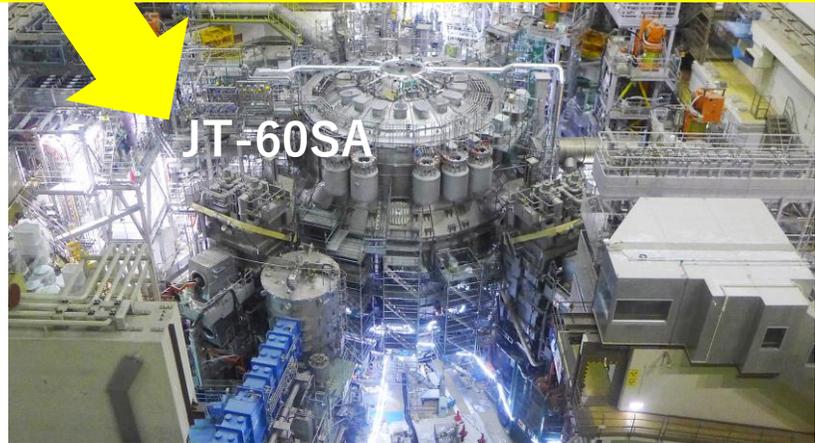
**臨界条件**：加熱入力と核融合出力がバランスする条件



日本の**JT-60U**は、**臨界条件**や、**世界最高温度**などを達成



2020年に、**超伝導コイル**の**JT-60SA**への改修完了  
 ITERのための試験とITER以後に向けた試験を実施予定



図・写真：量子科学技術研究開発機構

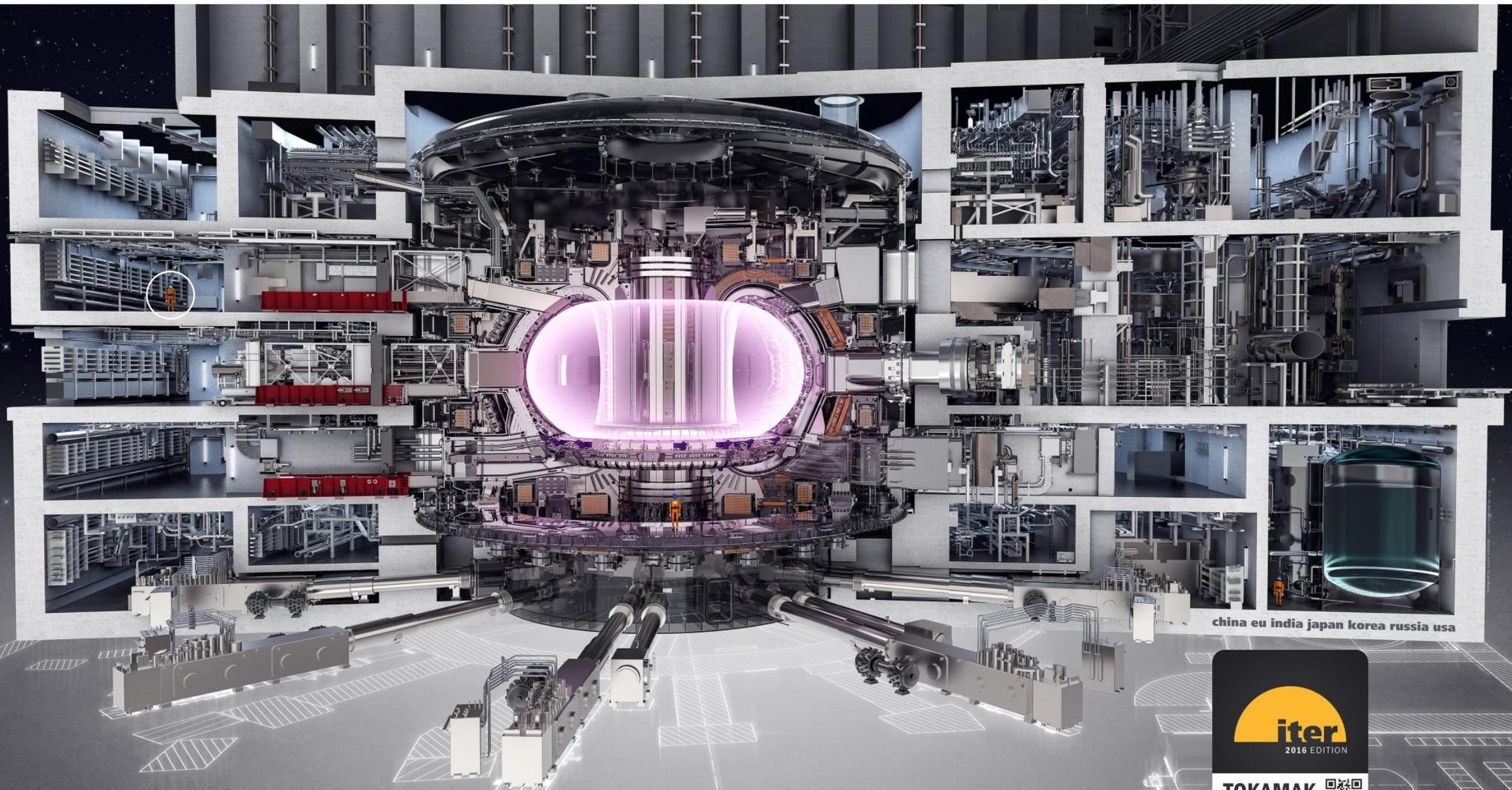


ITER建設地全景 2021年5月6日撮影  
ITER機構提供



本体 2万トン。総建設費 2兆円超。完成目標 2027年。  
新国立競技場くらいの重量、その16倍くらいの建設費。

ITER機構提供

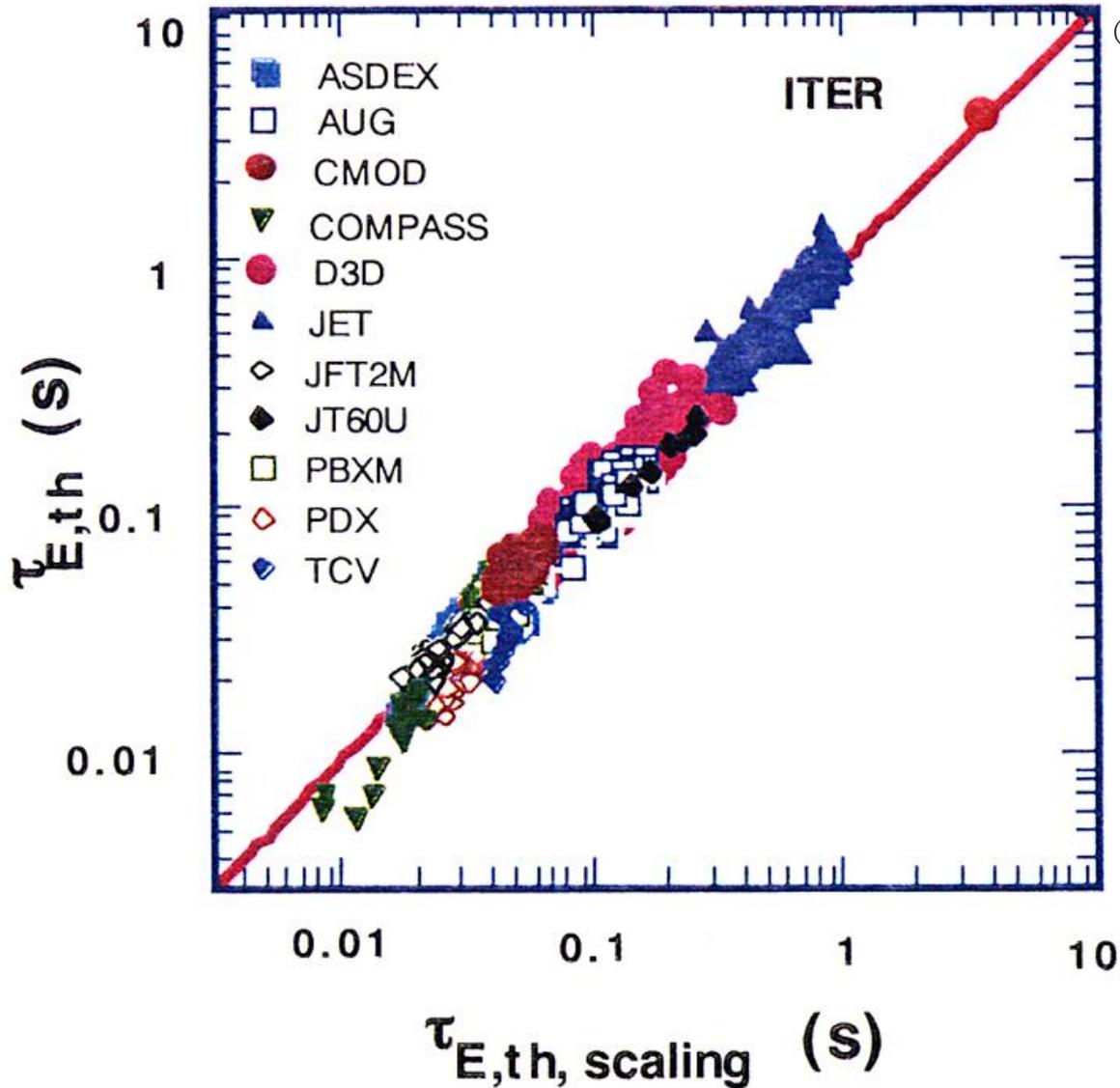


china eu india japan korea russia usa



TOKAMAK  
& PLANT SYSTEMS





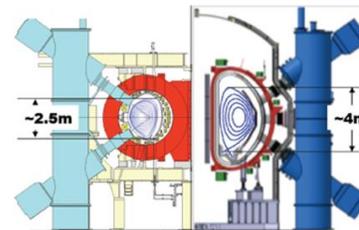
(ITER工学設計活動の成果)

核融合プラズマの物理は極めて複雑で、現代のスパコンをもってしても、全体の統合計算はまだできていない。それでも、ITERの設計を可能にしたのは、今風に言えば、

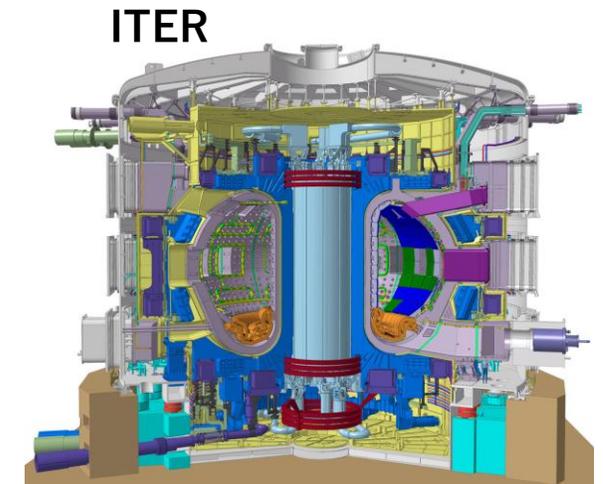
### ビッグデータの機械学習で得たスケールリング則

これに基づき、世界最大級のJT-60U（プラズマ半径が約3m）より半径で2倍以上大きいITER（同6.2m）の性能を予測した。

世界最大級の  
JT-60U | JT60SA



量子科学技術研究開発機構



ITER機構提供

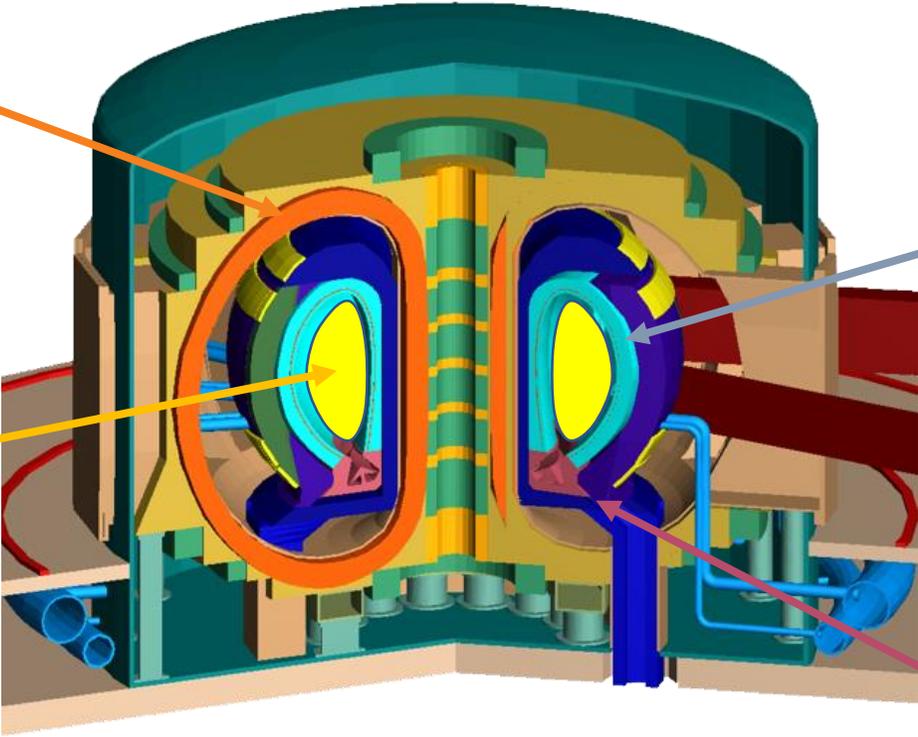
核融合炉はどこが難しいのか

これらの技術はITERで確立  
ITER以後は？

プラズマ性能に直結 材料・工学の制約

**①超伝導コイル**  
かつてない**強磁場・大型**の超伝導コイルが難しい  
  
超低温と**1億°C**が共存するので難しい

**②プラズマ**  
1億°Cのプラズマを磁場で制御し、**浮かしながら燃し続ける**のが難しい  
⇒難しいが何かあればすぐ停まる  
  
燃料（重水素と三重水素）は閉じ込めたいが、排気（ヘリウム）は取り出したいという**相反目標の同時達成**が難しい



**④ブランケット**  
1億°Cプラズマに直面する面  
1) 材料の許容温度を維持  
内部  
2) 発電タービン用の高温蒸気や高温ガス等を発生  
3) リチウムから三重水素を生産  
これらの**同時達成**が難しい

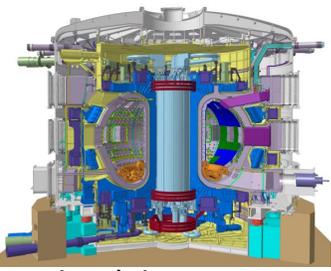
**③排熱部**  
ロケットノズル並みの**熱の処理**が難しい

核融合炉の概念図は K. Okano, Z. Asaoka, T. Yoshida, et al., Nuclear Fusion, Vol.40, No.3 (2000), pp.635-645 による

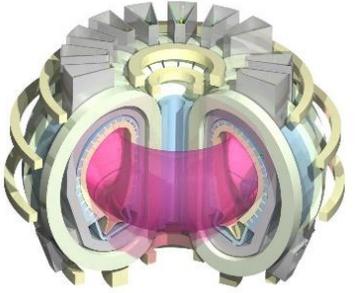
# 今後の核融合炉開発計画

2007年                      2035年                      2050年～

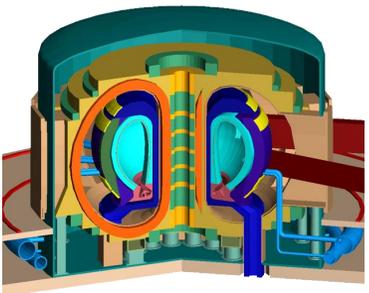
## 核融合開発の段階



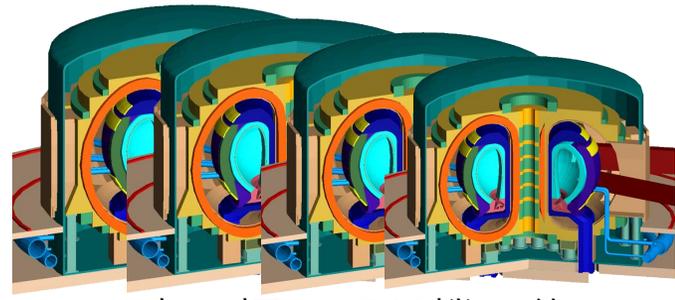
実験炉ITER  
7地域協力で建設中



大規模発電の実証



実用炉初号機



実用炉2～5号機以後

K. Okano, Z. Asaoka, T. Yoshida, et.al.,  
Nuclear Fusion, Vol.40, No.3 (2000), pp.635-645.

## 建設計画とコスト

2兆円超	2兆円？		5000億円以下
日本分担分を提供 約2900億円を予定	正式ロードマップあり 予算は未定	この範囲は私案	

ITERは、核融合炉が技術的に実現できることを実証する。  
ITERだけでわからないことは「どこまで高性能な（＝コストが安い）核融合炉に到達できるか。」  
これは未知への挑戦。  
その第一歩が大規模発電実証とJT-60SAによる先進的プラズマの開発。

### 大規模発電の実証に2兆円を掛けるのは高いか？

決して安いと思わないが、ここを通らなくては、先には行けないとも言える。  
比較するなら、例えば、石油輸入額は毎年7兆円程度、天然ガス輸入額は毎年4兆円程度で推移。

核融合は、広い国土も資源もないが、世界に誇る技術がある日本が挑戦すべき未来なのではないか。

太陽光や風力は、世界的には期待できるが、1人当たりの利用可能量では偏りがあり、国土が狭く人口が多い日本には地の利がない。それだけに頼って、**長期的技術革新を忘れたら、技術立国として勝ち残れないのではないか。**

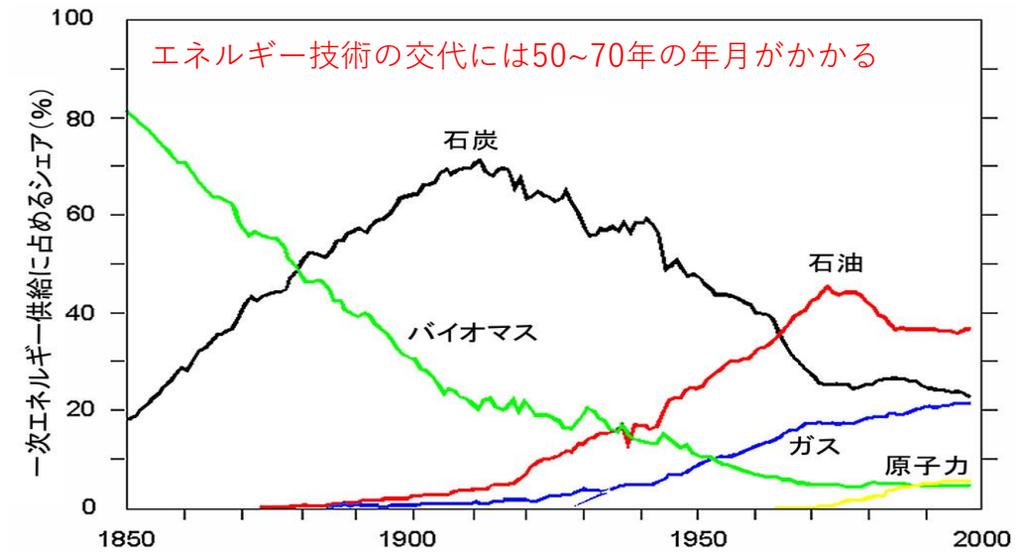
環境・エネルギー問題の政治化により、視野が10年オーダーに矮小化されているのではないか。

**本当は100年の視野で考える問題（右上図）。**

**核融合**は、海水中の重水素とリチウムが燃料資源（三重水素はリチウムから製造する）

全地球の陸地に年間に降る太陽光の1%を発電等に利用できるとして、核融合は**その64万年分**を供給可能。将来、重水素だけで燃せるなら、実質的に無尽蔵。

**核融合は未来オプションとして「手が届く」段階に来た**長期開発が必要だが、実現の見通しがある。海に囲まれた**日本に地の利があるエネルギー**。



A. Grubler, N. Nakicenovic, Technological Forecasting and Social Changes 53 (1996) pp.97-110 による

