

平成19年度冬学期総合科目  
「エネルギー問題・地球環境問題を考える」

平成20年1月25日  
11号館1101教室

# 「核融合エネルギー開発研究の最前線」

(核融合, プラズマ, トカマク, ITER計画, 技術安全保障)

東京大学高温プラズマ研究センター  
小川 雄一

# 核融合とは

## ・核融合

軽い元素(水素,,)  
ビッグバン後の元素生成

## ・核分裂

重い元素(ウラン,,)

## ・化学反応

核分裂(200MeV), 核融合(17.6MeV)

化学反応(~10eV)

2005年はEinstein100年記念

質量の減少とエネルギー

核融合反応の前後では、反応後の方が質量は軽くなる。この質量の減少分がエネルギーとして発生する。下の数式は「特殊相対性理論」に出てくる関係式で、Eがエネルギー、mが質量、cは定数(光速)をあらわす。この式は質量がエネルギーに変換できることを示している。1グラムの質量がもしすべてエネルギーに変換されれば、約2500万キロワット時のエネルギーを発生する。これは原子力発電所1基がおよそ1日に生むエネルギーに相当する。

核融合反応前  
(水素原子核が四つ)

天秤

核融合反応後  
(ヘリウム原子核)

$$E = mc^2$$

アルバート・アインシュタイン  
(1879 ~ 1955)

ドイツ生まれのアメリカの物理学者。1905年に発表した「特殊相対性理論」の中で、質量がエネルギーに変わり得ることを理論的に予言した。

核融合反応

陽子  
(水素原子核)

電子

ヘリウム原子核

$+ E_{\text{energy}}$

核融合反応によって放出されるエネルギー。反応前後の質量の減少分がエネルギーとして放出されたもの。

太陽内部での核融合反応

水素原子核四つが融合して、ヘリウム原子核が合成される(実際の反応はもう少し複雑な過程がある)。このとき、反応前後で減少した質量が膨大なエネルギーへと転化する。

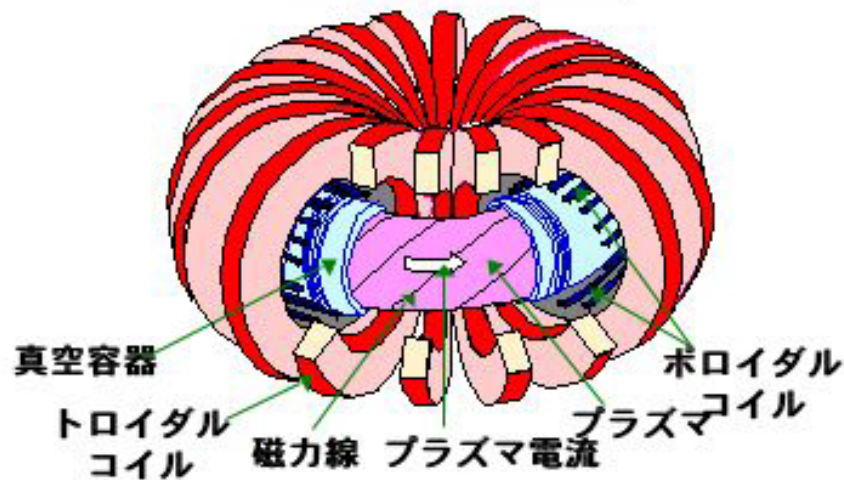
(雑誌: Newtonより)

## 研究はどこまで来たか

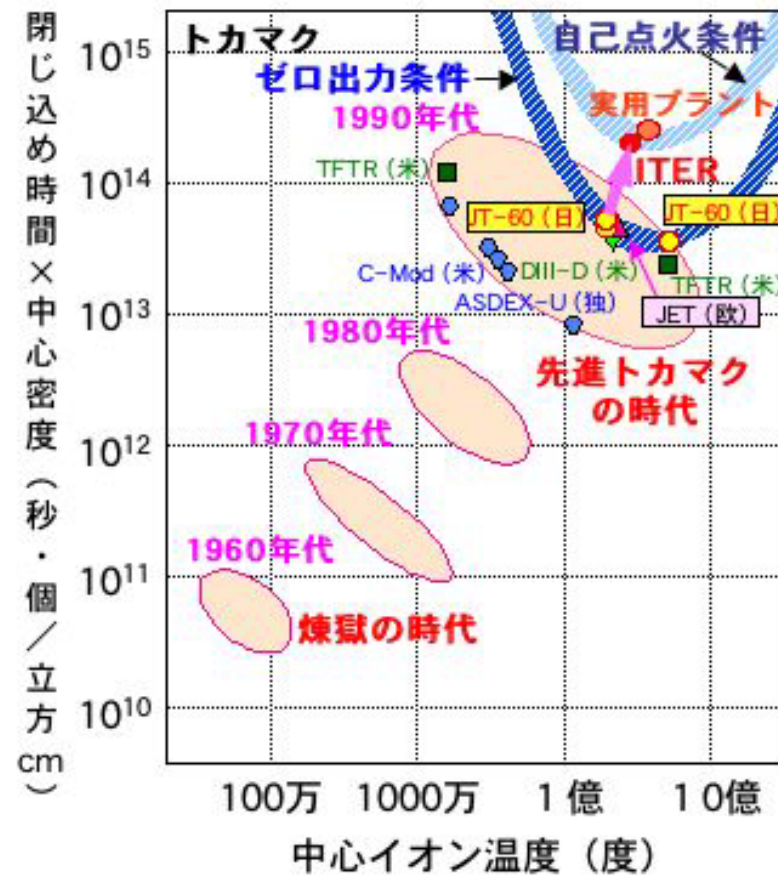
どこまで来たか

トカマク方式により、燃料への加熱入力と反応出力が釣り合う条件（ゼロ出力プラズマ条件）を実現；JET（欧）とJT-60（日）。  
 実用プラントに必要な自己点火条件（燃料への加熱入力を十分上回る出力が得られる条件）の達成をITERで目指す。

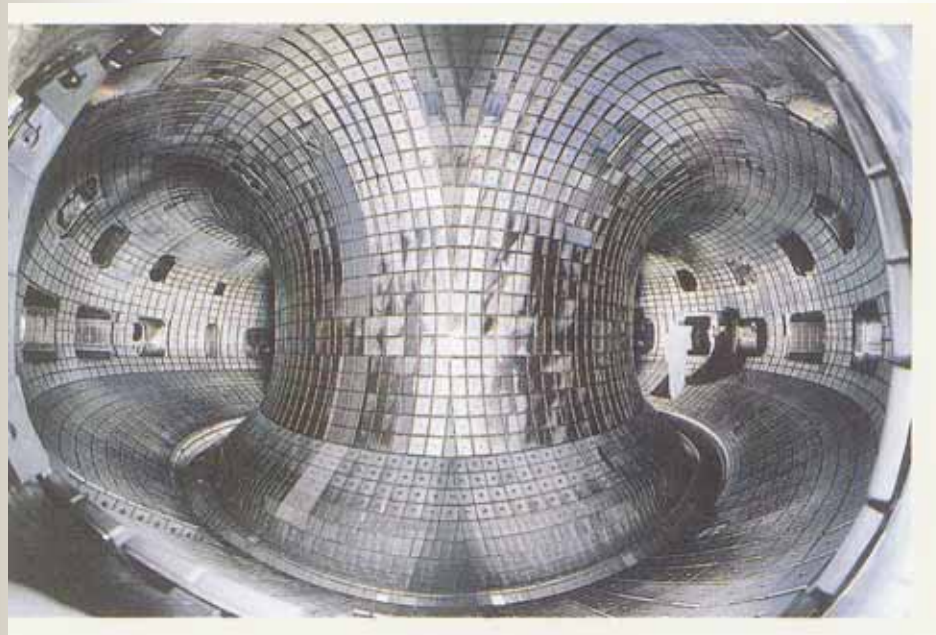
トカマク型装置



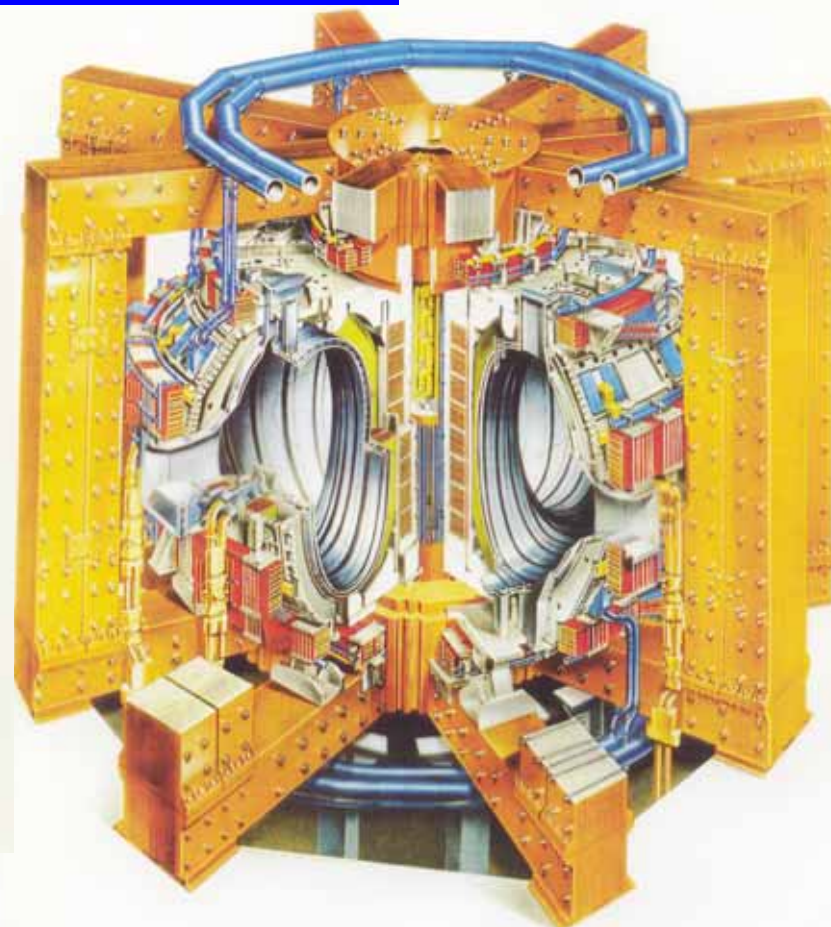
- ・ トランスの原理を使いドーナツ状容器の中にある燃料に電流を流し簡単に太陽の中心温度を実現
- ・ 対称で構造が単純
- ・ 最も進歩した、最も有望な核融合の方式



# 世界の大型トカマク装置



JT-60  
(日本原子力研究所)



JET  
(ヨーロッパ)

# 核融合開発の歴史に見る「夢と現実」

## ・ 1950 - 1970年：萌芽期

- ・ 多様なアプローチによる原理実証研究
- ・ 一筋縄ではゆかない苦難の時代（煉獄）

→ 「夢を売っていた」、「夢を追っていた」

## ・ 1970 - 2000年：成長期

- ・ 炉心プラズマ研究の飛躍、炉工学技術の着実な進展
- ・ 大型装置での研究へ

→ 「夢から現実へ」

## ・ 2000 -                   ：成熟期

- ・ ITERを中心とした核融合の実用化へ
- ・ 開発に巨費と長期を要する

→ 「現実を見据え」、「現実の社会との協調」

# 核融合エネルギーの「夢と現実」

## ・燃料が無尽蔵

- > 重水素に関しては
  - ・核融合炉として必要な元素の資源量は
  - ・他のエネルギーの資源量は？

## ・放射能としてクリーン

- > 核分裂炉に比べれば
  - ・トリチウムの安全性は
  - ・放射性廃棄物は

## ・30年後には実用化

- > 十分な投資があれば
  - ・技術的に実現可能なのか
  - ・何が問題で、その見通しは

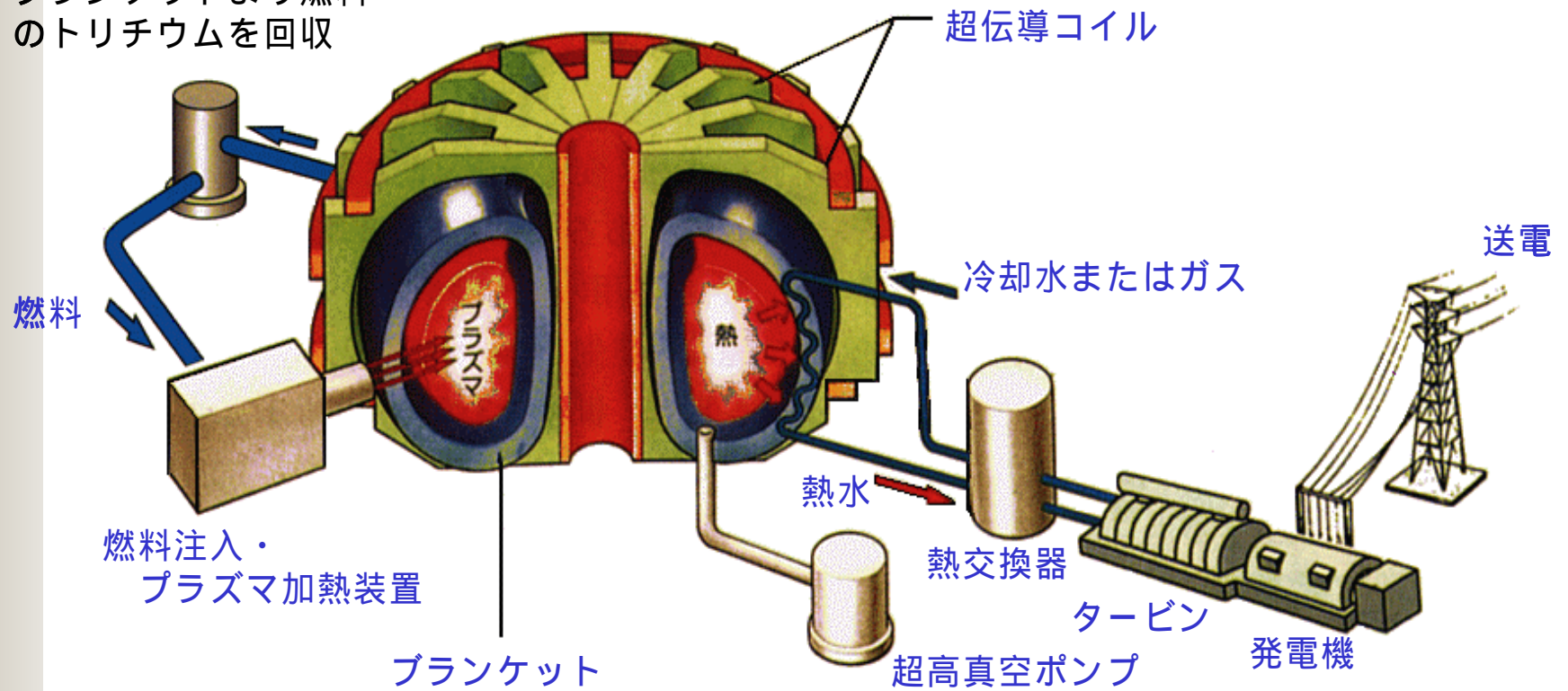
## 核融合エネルギーの「夢と現実」(2)

- ・燃料が無尽蔵(重水素に関しては)
- ・放射能としてクリーン(核分裂炉に比べれば)
- ・30年で実用化(十分な投資があれば)
  
- ・燃料の偏在が少ない
- ・二酸化炭素排出が少ない
- ・核的暴走はない
- ・核拡散の心配が少ない
- ・開発途上国への技術導入の障壁が少ない



核融合の価値が落ちた訳ではなく、  
現実を見据えた対応が必要

ブランケットより燃料  
のトリチウムを回収



核融合発電の原理図



# ○永遠のエネルギーを目指して

## 21世紀の地球環境に調和するエネルギーの開発

### ●優れた環境性

地球の温暖化の原因となる二酸化炭素などの発生が少ない。  
 廃棄物の放射能の量は比較的短い期間ですみやかに減少する。

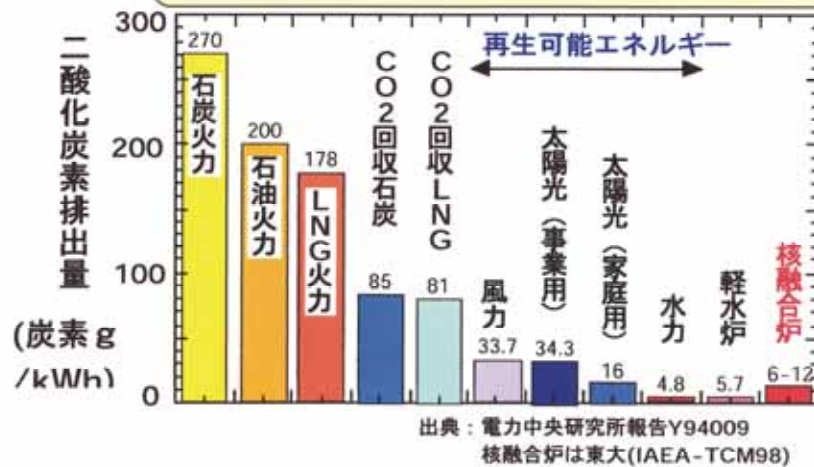
### ●高い安全性

核的暴走がない。  
 崩壊熱密度が小さい。

### ●豊富な資源

重水素は、海水中に豊富に存在。  
 三重水素は、埋蔵量の多いリチウムより生成可能。

発電システムの二酸化炭素排出率

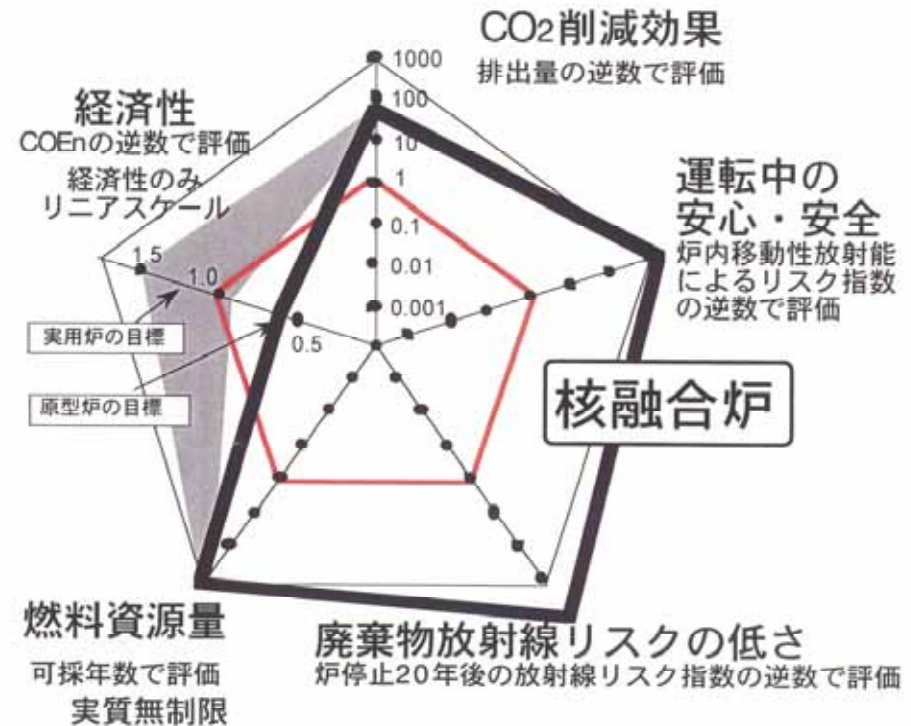


核融合炉の利点



核融合エネルギーは、資源、環境影響、安全性、供給安定性において優れた特性を持ち、基幹エネルギーとしてバランスの取れたシステム

- 1) 資源量が十分  
(燃料、炉を構成する材料)
- 2) 環境影響が小さい  
(温暖化、廃棄物)
- 3) 安全性が高い  
(可動性放射性リスク指数が低い)
- 4) コスト  
(競合可能性、バックストップ)
- 5) 安定供給  
(アベイラビリティ、負荷調整)



現行石炭火力(CO2回収なし)の値を**基準(=1.0)**とした。ただし、**安心・安全と廃棄物放射線リスク**の項目は軽水炉が基準。経済性のみリニアスケールなのに注意

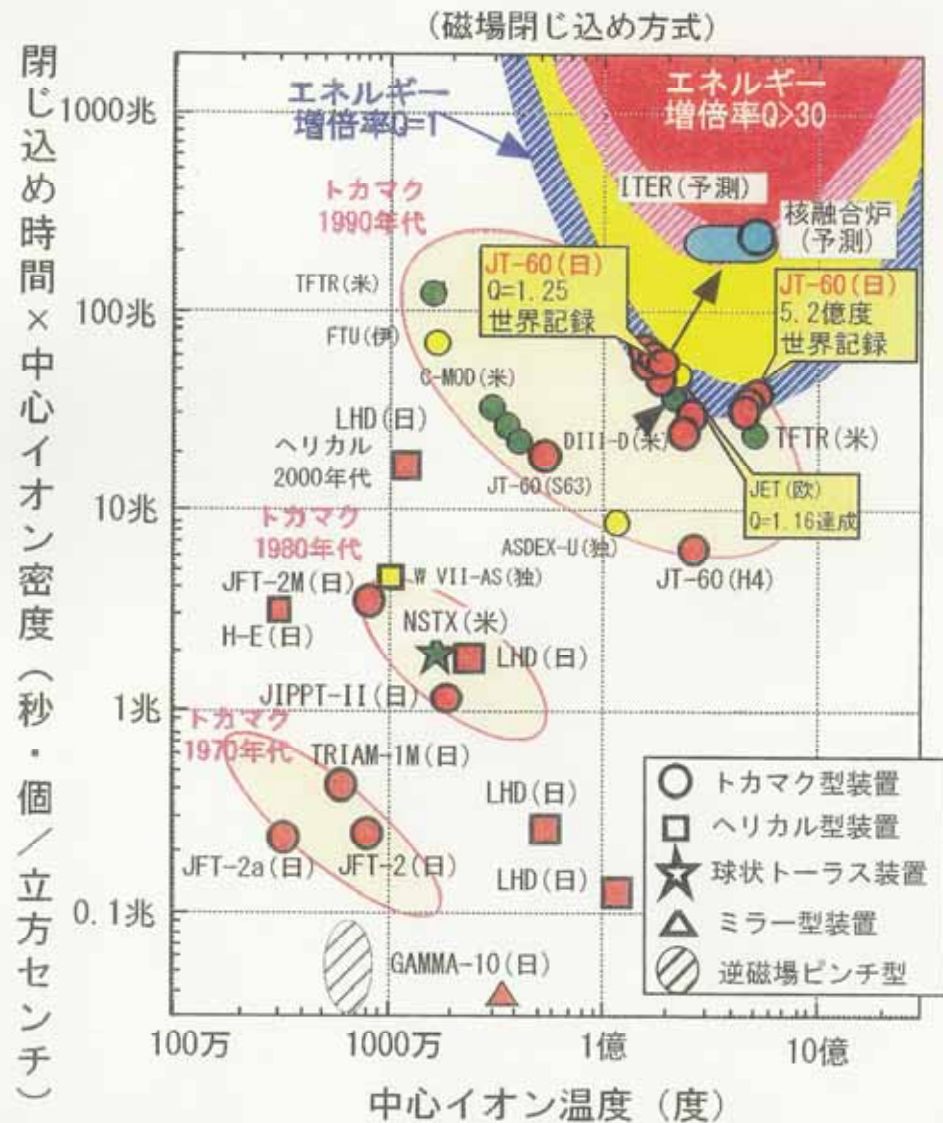
# ITER

— 核融合実現への道 —

核融合は、太陽エネルギーの源です。  
 人類や地球上のすべての生物は、  
 太陽でおこる核融合の恵みを受けてきました。  
 今、人類は自らの手で核融合を実現しようとしています。



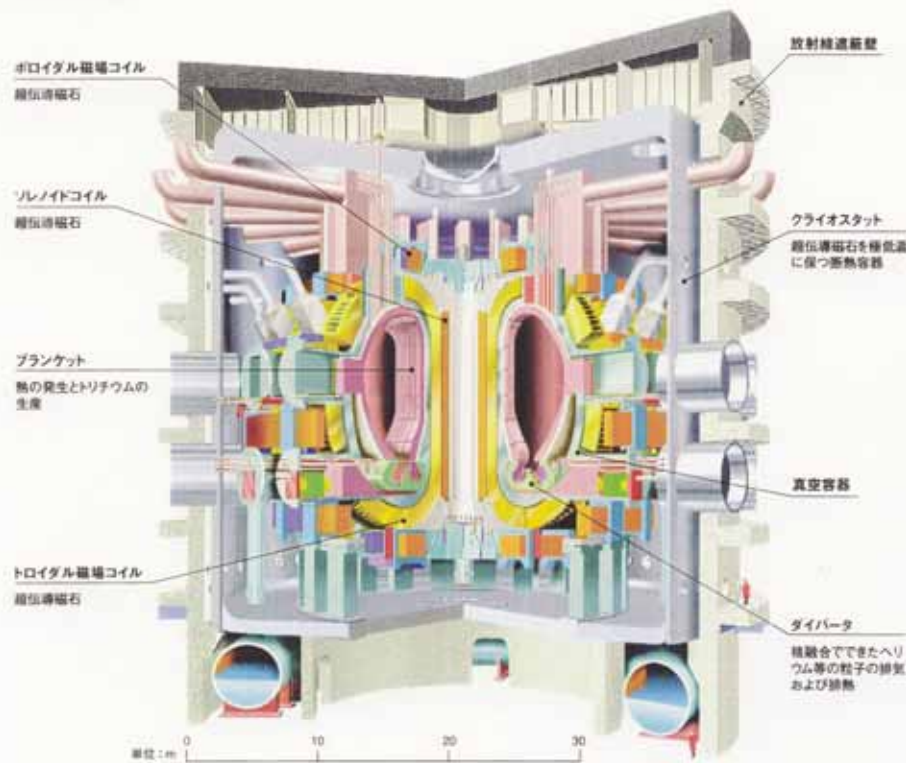
研究者の群像



# 国際熱核融合実験炉 [ITER] 計画

核融合エネルギーの利用は、  
 将来のエネルギー確保という人類に共通の願いに応える有力な方法のひとつです。  
 国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画は、この核融合エネルギーの実現を目指して  
 日本、米国、欧州連合 (EU) およびロシアの4極が、  
 人材と資金を出しあって共同で進めている研究活動です。

ITER概念図



**ITER計画の目標**

- 制御された点火条件と長時間の核融合燃焼
- 核融合エネルギーの利用に必要な工学技術の集大成

**主要諸元**

核融合出力 150万kW  
 燃焼時間 1000秒  
 プラズマ電流 21000A  
 トロイダル磁場強度 5.7テスラ

## 参加極

- ・日本
- ・米国
- ・韓国
- ・インド
- ・ヨーロッパ (EU)
- ・ロシア
- ・中国

## サイト決定

- ・EU (フランス・カダラッシュ)

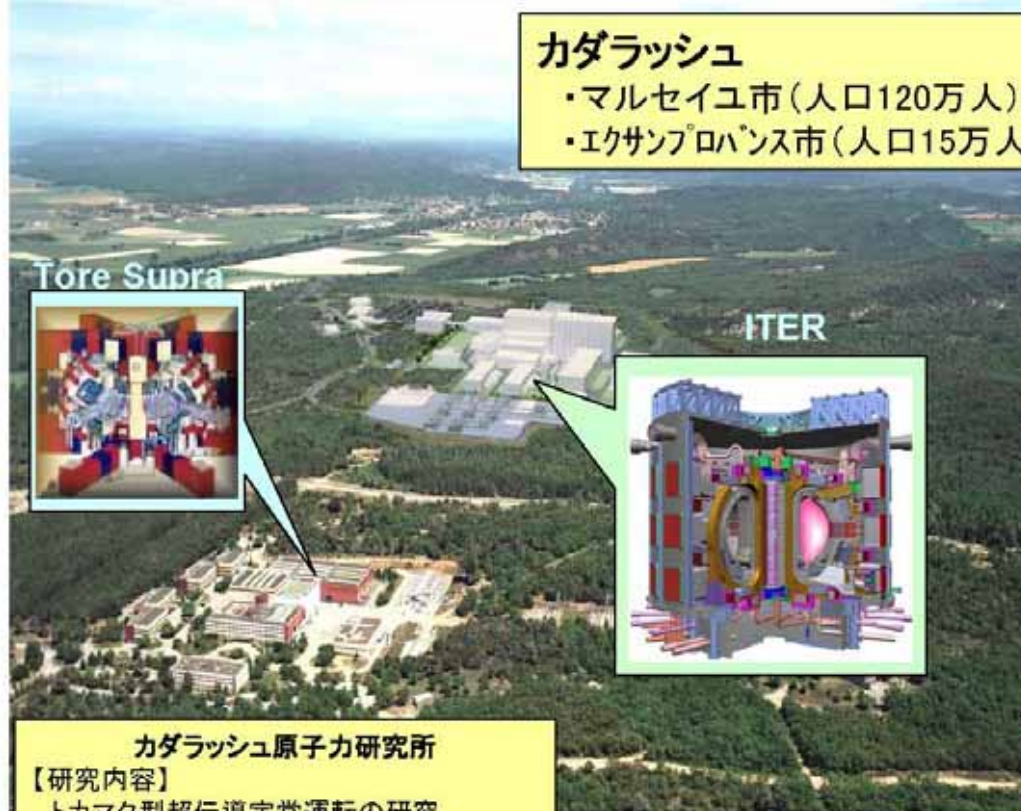
## 機構長決定

- ・池田要 現クロアチア大使

# フランス・カダラッシュ

## カダラッシュ

- ・マルセイユ市(人口120万人)から約100km 車で約1時間
- ・エクサンプロバンス市(人口15万人)から約40km 車で約30分



**カダラッシュ原子力研究所**  
【研究内容】  
トカマク型超伝導定常運転の研究  
核融合炉工学技術  
核燃料開発  
原子炉安全性研究  
廃棄物処理など  
【職員数】  
約5000人  
【主要装置】  
Tore-Supra、実験用原子炉等の18施設

# ITER工学R&Dの成果

中心ソレノイドモデルコイル



外径 3.6 m  
高さ 2.8 m  
Bmax=13 T  
 $\dot{B}=0.6$  T/sec

真空容器セクター



二重壁  
高さ15 m  
精度±5 mm

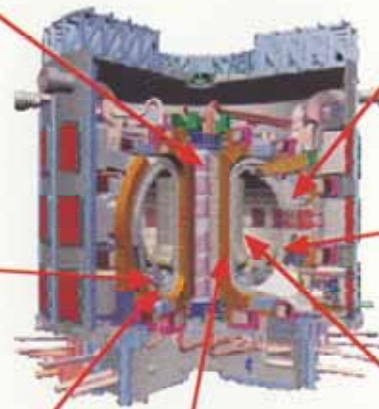
ダイバータ遠隔操作



25トンのダイバータの取付け、  
取外し、精度±2 mm  
ダイバータカセット



熱負荷 20 MW/m<sup>2</sup>



トロイダルモデルコイル



高さ 4 m  
幅 3 m  
Bmax=7.8 T

ブランケットモジュール



HIP接合技術  
1.6 m x 0.93 m x 0.35 m

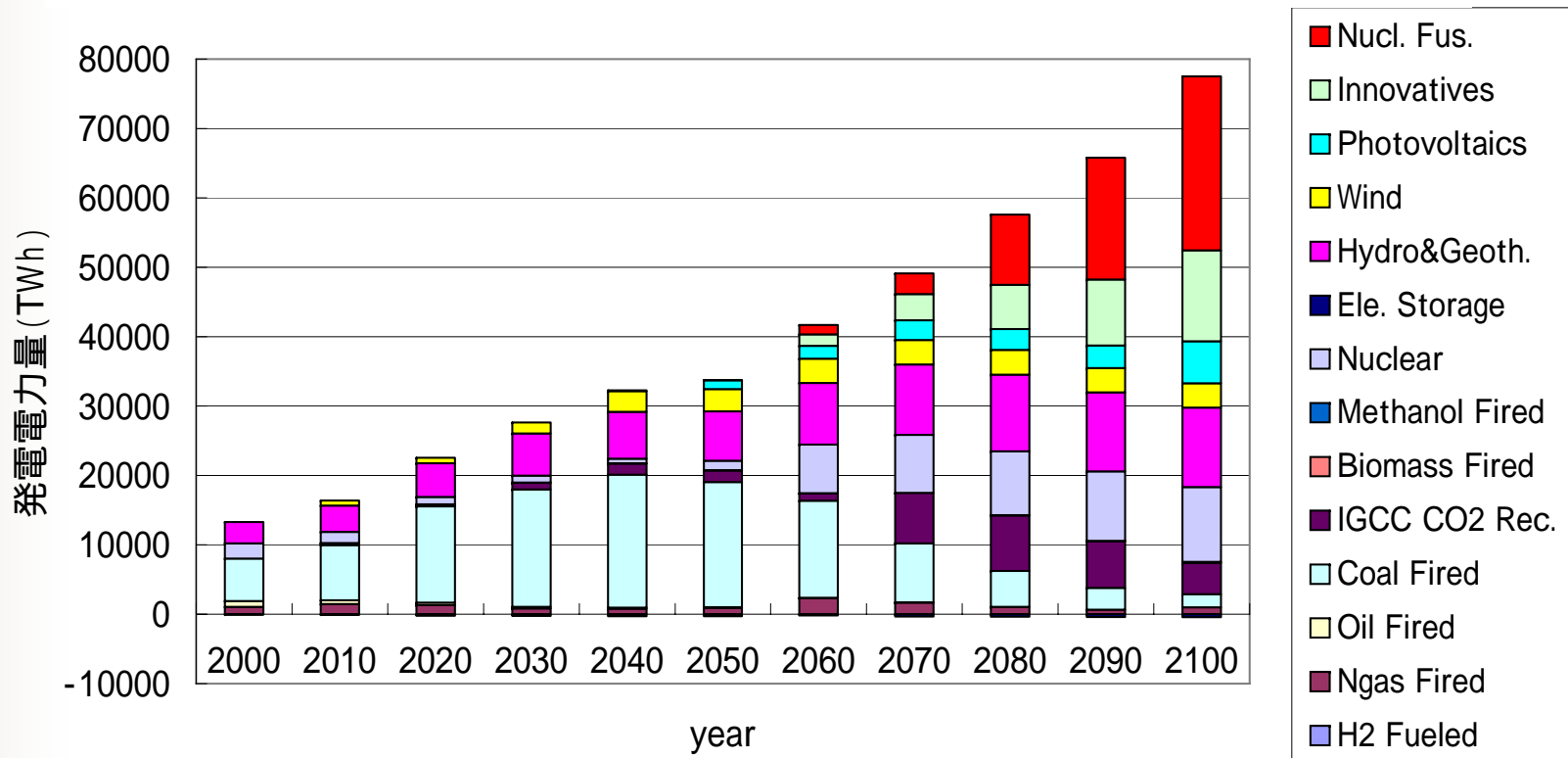
ブランケット遠隔操作



4トンのブランケットの取付け、  
取外し、精度±0.25 mm

# 21世紀における核融合エネルギー導入の可能性

K. Tokimatsu, et al., 第18回 I A E A 核融合エネルギー国際会議 (2000年10月)



――> 21世紀後半の環境問題に対して核融合が**有為な貢献**を果たすためには、核融合炉の**早期実現**が必要

## 最後に

- ・核融合の有する**特長を活かしつつ、課題(問題点)の解決に真摯に取り組む。**
- ・**社会受容性の研究**が益々重要となってくる
  - ・他のエネルギー源(技術)との比較を見据える
  - ・「安全・安心」をはじめとした、社会の理解と支持を得る努力が必須
- ・核融合の価値が落ちた訳ではなく、**現実を見据えた対応が必要**

## レポート課題

未来エネルギーに求められる要件として、「**資源量**」、「**資源の偏在性**」、「**CO2排出**」、「**廃棄物処理**」、「**安定供給**」、「**安心感**」、などが挙げられよう。

これらの観点に対して、「**核融合**」をおよび「**核融合以外の未来エネルギー**」を一つ取り上げ、その両者の特徴および課題を出来るだけ定量的に比較せよ。