

# 核融合の実用化と 環境・エネルギー問題におけるその役割

Realization of Fusion Energy and the Role in the Energy  
and Environment Issues

(財)電力中央研究所  
東京大学大学院 新領域創成科学研究科

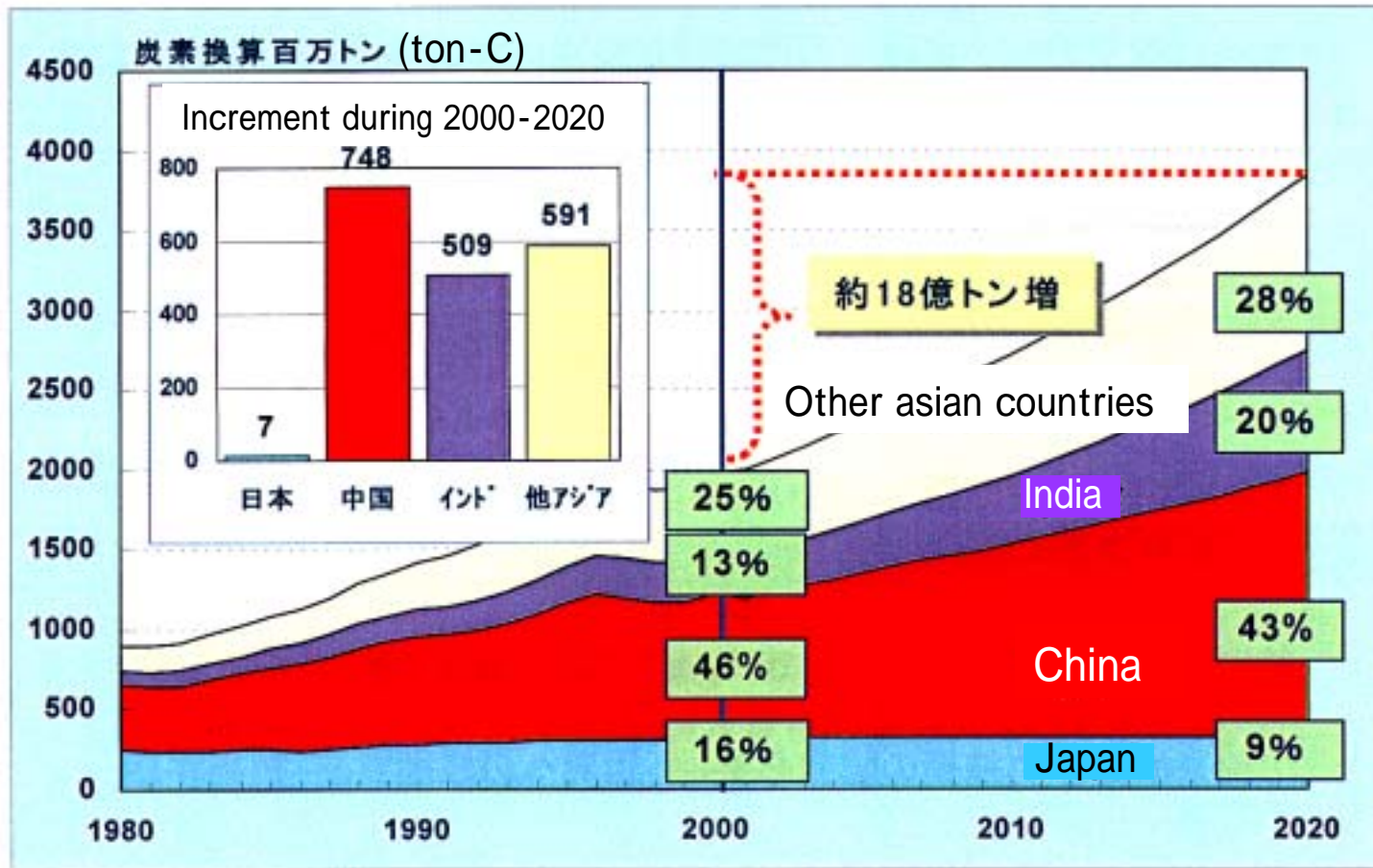
岡野邦彦

Central Research Institute of Electric Power Industry  
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Kunihiko OKANO

科学者の立場からは、日本のCO2を減らすことだけに成功しても、日本の責任をまっとうしたとは到底いえない。化石エネルギーによって発展してきた日本は、世界の環境問題に貢献可能な革新エネルギー技術の開発を目指す義務があるように感じる。

参考2: 日本のCO<sub>2</sub>排出量の見通し (わが国の長期エネルギー需給展望より)  
 Perspective on the CO<sub>2</sub> emission of Japan



出所) 日本エネルギー経済研究所計量分析部推計

日本エネルギー経済研究所 伊藤浩吉、第41回原子力総合シンポジウム(2003) 講演より

# 未来エネルギーとしての条件は？

Key issues for future energy systems

- 1) 資源量が豊富で偏在が少ない (resource: abundant & wide distribution)
- 2) 低環境破壊・少廃棄物量 (low environmental load, less waste)
- 3) エネルギー価格が合理的範囲 (reasonable cost)
- 4) 十分なエネルギー量を安定して供給 (capacity and vulnerability)
- 5) 安全かつ安心 (safety and security)

すべてに100点満点を求めたら回答はない

どのエネルギーシステムにもそれなりに弱点はある  
各々の特長を生かした使い方を考えなければならない

No solution without defect. The best mixing use is required.

# 21世紀を支えてくれそうなエネルギーは？

## 石炭 (coal)

200-300年分くらいの埋蔵量あり。CO<sub>2</sub>発生が多い。しかし、既に手中にある確実なエネルギー源でもある。できるだけクリーンに上手に使いたい。

## 天然ガス (natural gas)

60-80年程度の埋蔵量(発見済分) CO<sub>2</sub>排出は石炭の54%、石油の70%でもっともクリーンな火力。短期的には21世紀前半のホープ。

## 原子力(核分裂) (fission)

CO<sub>2</sub>排出は微少。鉱山ウランは残少(確認分は40年程度)。プルトニウムや海中のウランを使えばほぼ無限。高レベル放射性廃棄物や核拡散が問題。

## 自然エネルギー (renewable energy)

1. 水力：日本には開発余地はあまりない。ダムは環境破壊の側面も。
2. 太陽光・風力：期待できるが天候などに左右されるのでこれだけでは…
3. 地熱：クリーンで安定しているが建設適地は限りがある

やはり、革新的新技術が必要。

そのひとつの目標が

## 「核融合エネルギー」

海が燃料資源に・・・無尽蔵で世界中で手に入る

水力・原子力並の炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)発生量

合理的コスト達成の見込みあり

高レベル長寿命放射性廃棄物がない

ブルトニウムの核拡散危機とは無縁

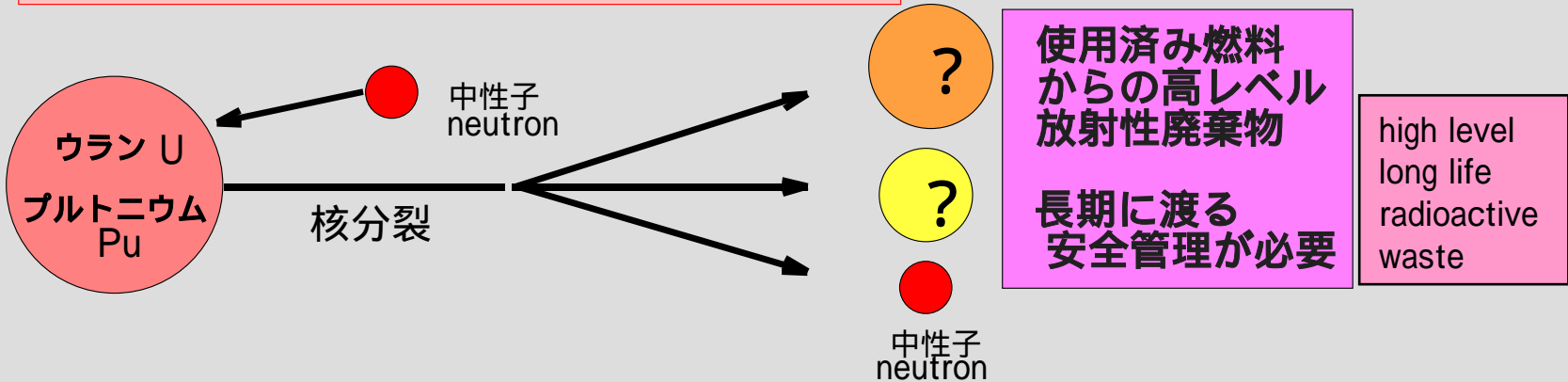
など・・・

しかし、その実用化への見通しは？

# 核分裂と核融合

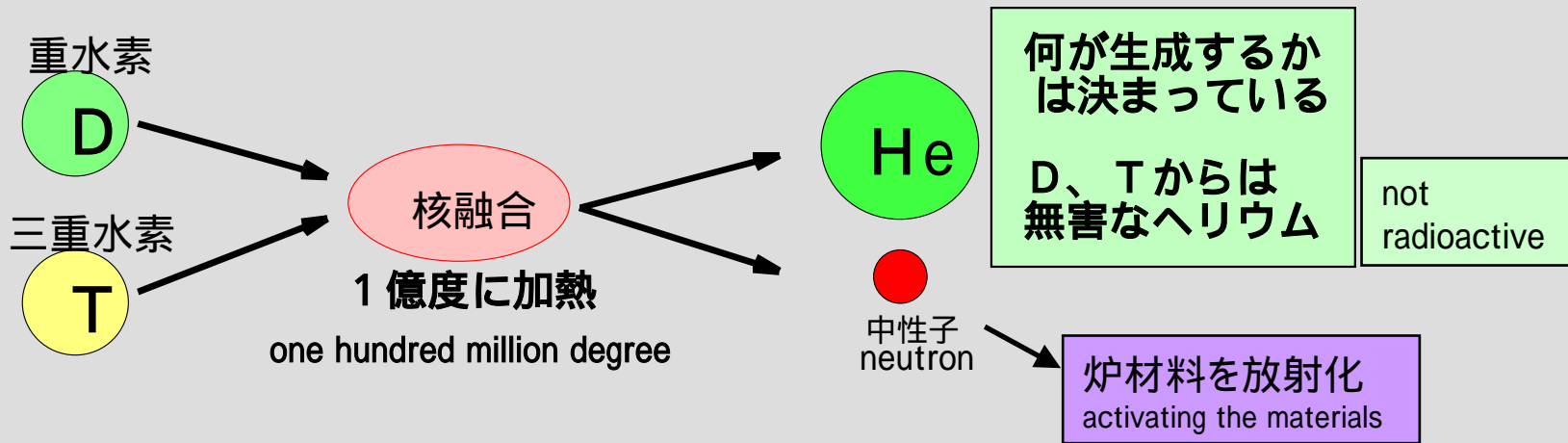
## Fission

**核分裂** 重い元素が分裂してエネルギーを放出

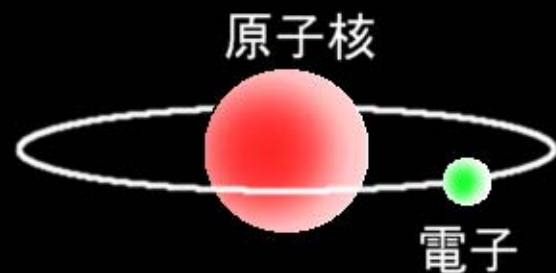


## Fusion

**核融合** 軽い元素が合体してエネルギーを放出



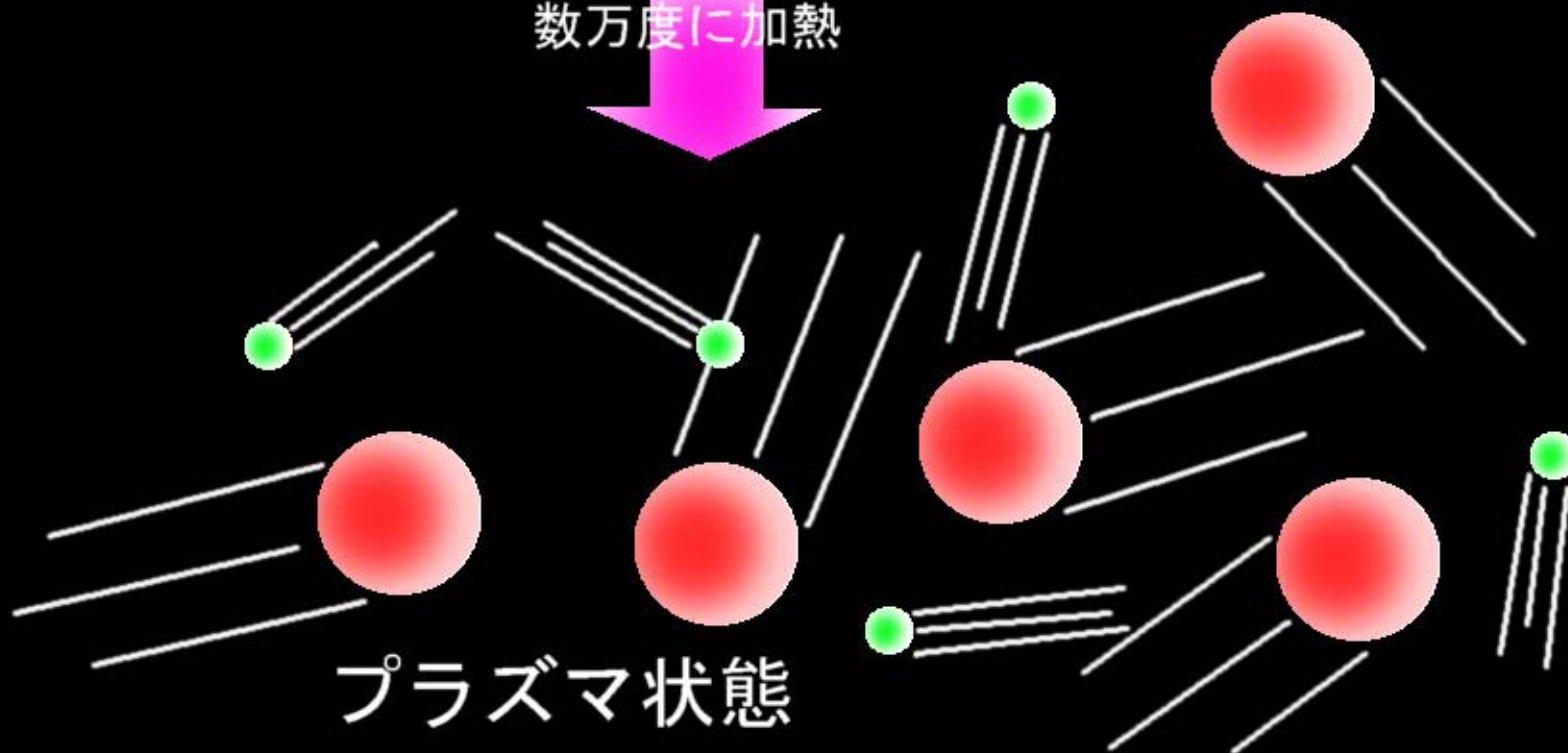
# 数億度までどうやって加熱，どうやって保持？



## 水素の気体分子

電子は原子核周辺に拘束されている

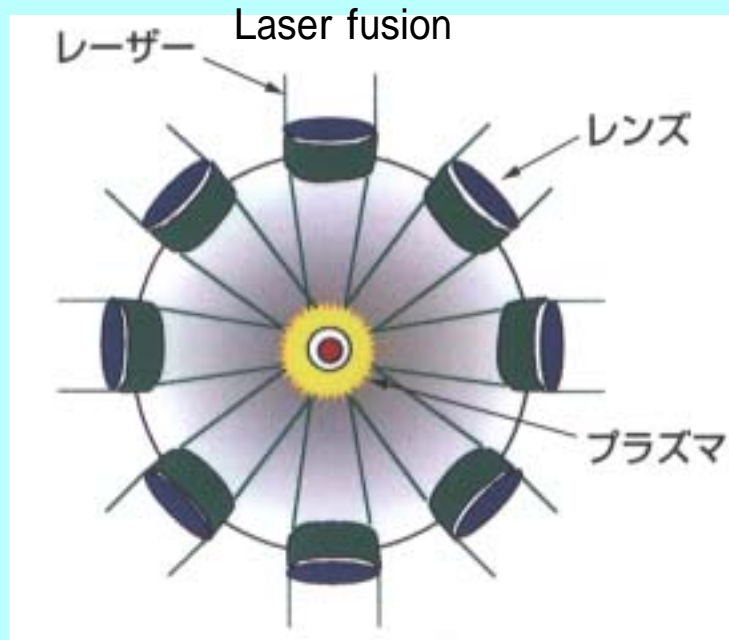
数万度に加熱



Two ways to realize the fusion power plant

# 核融合エネルギーへの2つの道

## レーザー方式



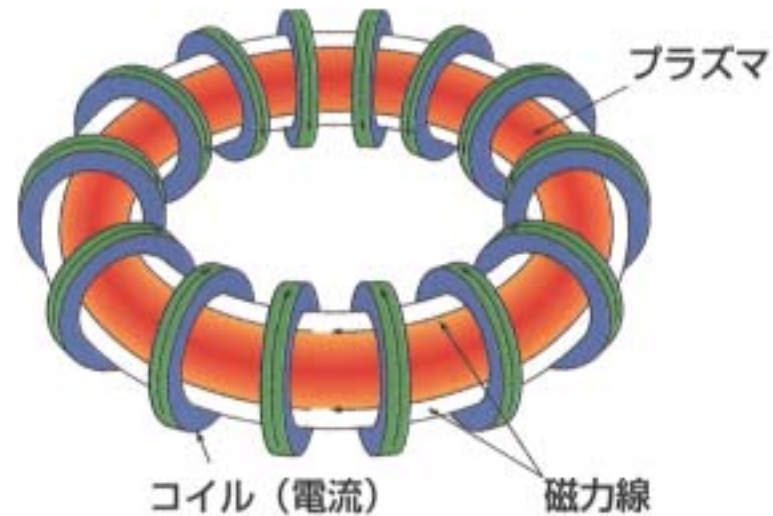
核融合の燃料(水素)を詰めた直径数ミリの球を強力なレーザー光で照射し、瞬間加熱。飛び散ってしまう前に核融合を起こさせる。これを繰り返すことでエネルギーを連続して出す。

## 人工の超新星

artificial super nova

## 磁場方式

magnetic confinement fusion



プラズマが磁場を横切れないことを利用。ドーナツ状の磁場を作って、その中に1億度の水素ガス(プラズマ)を封入し核融合を起こす。

## 人工の太陽

artificial star



**もっともよく研究されているのはトカマク型**

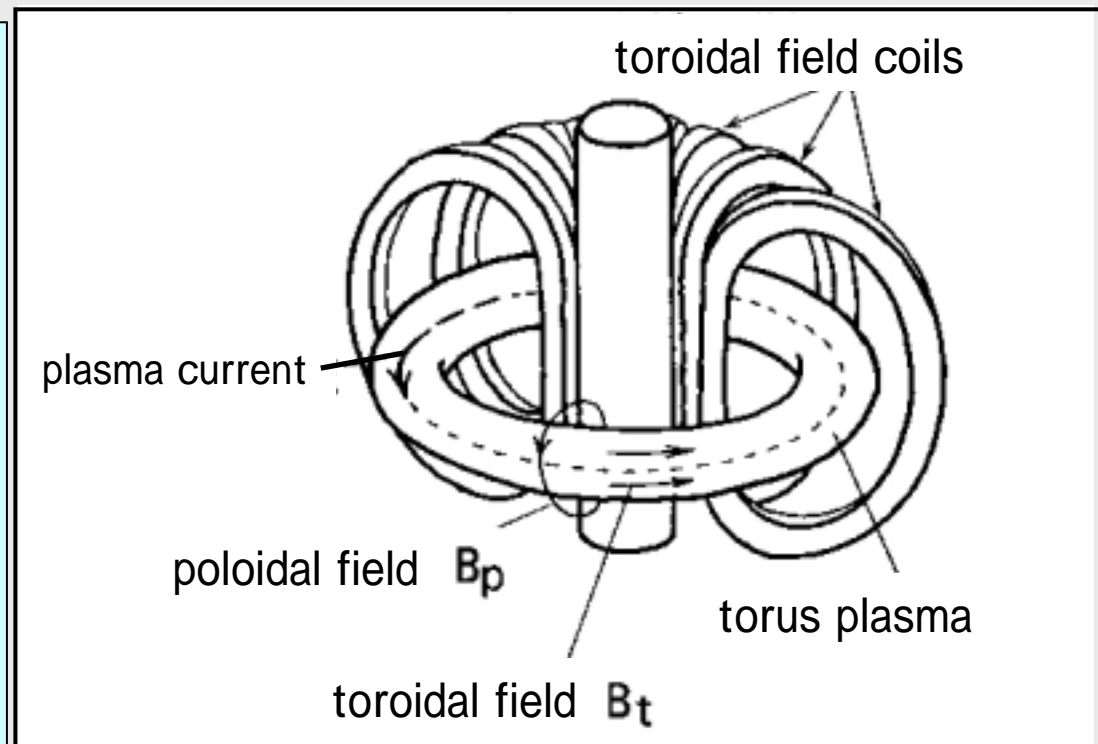
トーラス型(ドーナツ状)のプラズマを磁場で閉じ込める

プラズマが安定であるには、

- 1) 強いトーラスに沿った磁場  
(トロイダル磁場、 $B_t$ )
- 2) プラズマの中を流れるプラズマ電流が作る磁場  
(ポロイダル磁場、 $B_p$ )

の両方がバランスよく存在している必要がある

プラズマを支える磁場は $B_t$ と $B_p$ を合成したもので、**磁力線は螺旋状**



Concept of Tokamak system

有限の圧力  $p$  を持ち、電流  $j$  が流れるプラズマが磁場  $B$  からの力で支えられるための力の釣り合いは

$$j \times B = \nabla p$$

$j$  あるいは  $B$  とのスカラー積を作ると：

$$j \cdot \nabla p = 0$$

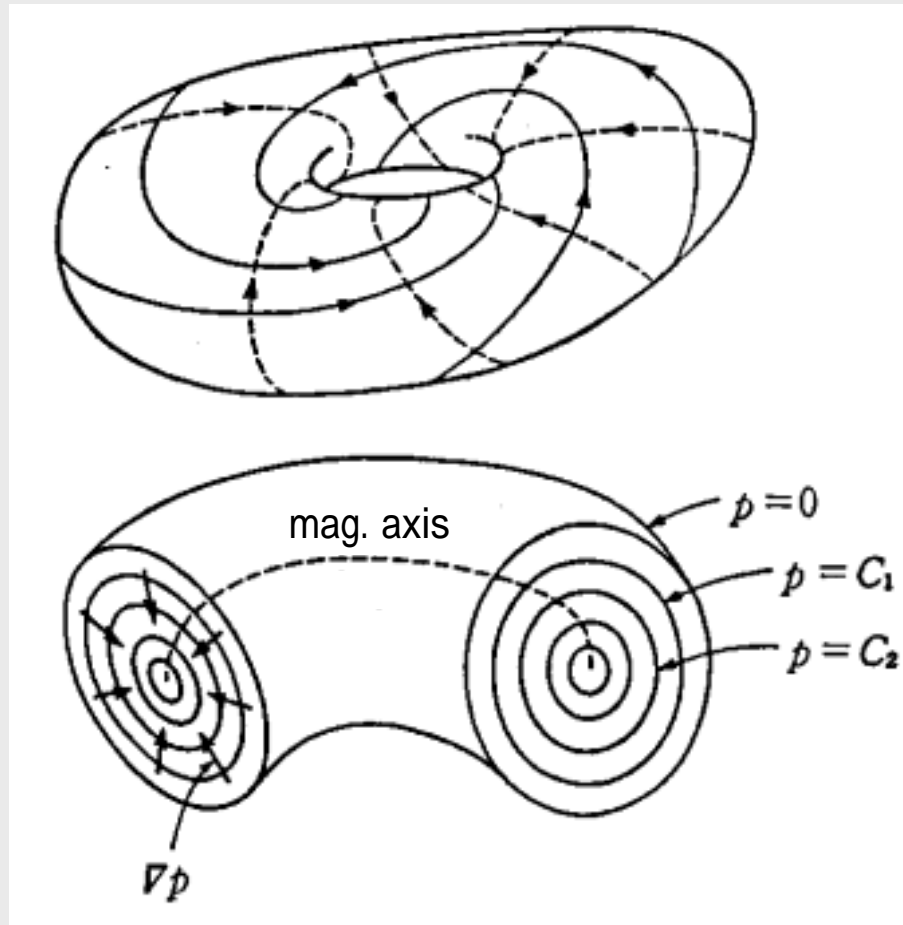
$$B \cdot \nabla p = 0$$

等圧面 ( $p = \text{一定}$ ) は  $\nabla p$  に直交。

**螺旋状の磁力線  $B$  もプラズマ中の電流  $j$  も、等圧面上を巡る構造**を形成しなければならない。この面を磁気面とよぶ。

## 磁気面を作ってプラズマを閉じ込める

plasma confinement with magnetic flux surfaces



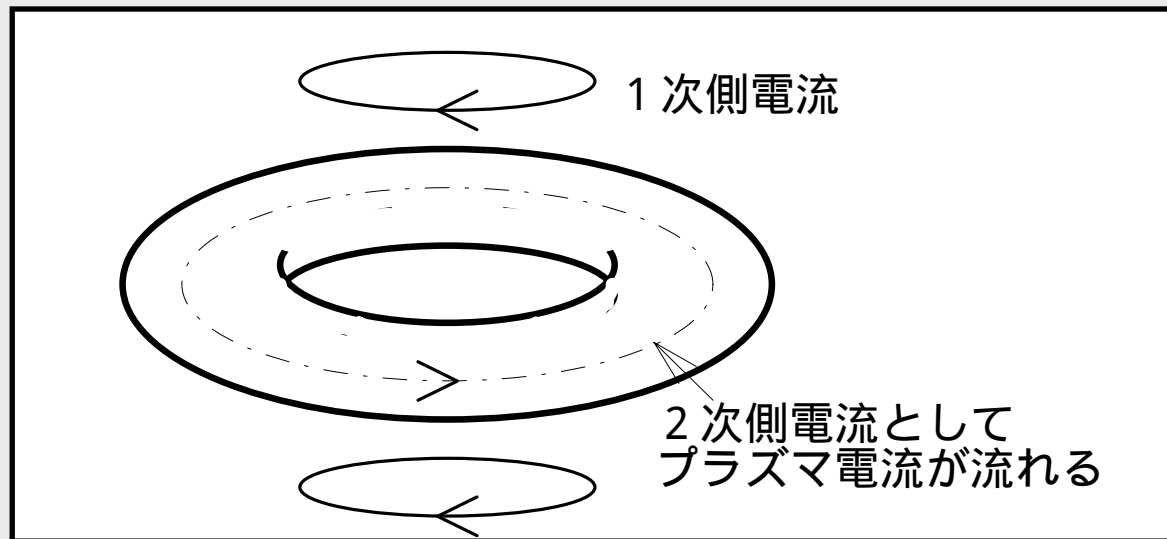
図：内田岱次郎、井上信幸「核融合とプラズマの制御」東京大学出版会、1980

# Plasma heating & current drive

## 0) Inductive current drive & Joule heating

プラズマの電気抵抗に応じた加熱が起こる。しかし、**抵抗値 (温度)<sup>-1.5</sup>** なので高温ではパワーが入らない。

一方、失われるパワーは、**熱平衡電子の制動放射 (温度)<sup>0.5</sup>**、**シンクロトロン放射 (温度)<sup>2</sup>** などのために、**ジュール加熱では数千万度が限界**。  
**電流もパルス**でしか流せず実用炉に向かない。



The most effective current drive method. Plasma heating via Joule heat ( $RI^2$ ) is also possible.

Since **Resistivity  $R$  (Temp)<sup>-1.5</sup>**, therefore Joule heat decreases with temperature.

On the other hand, **Brems.radiation power  $P_{\text{brem}}$  (Temp)<sup>0.5</sup>**、**Synchrotron radiation power  $P_{\text{sync}}$**

**(Temp)<sup>2</sup>**, therefore the achievable temperature via Joule heat is restricted up to **several ten million degree**. And the induced current never be in steady state.

This method is not feasible for steady state power plants.

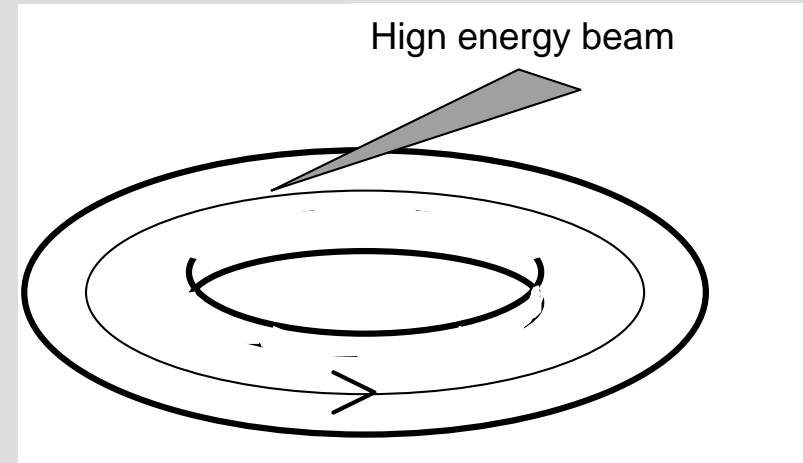
## Non-inductive current drive & heating

### 1) Beam injection

高いエネルギーのビーム粒子をプラズマに入射。そのエネルギーで加熱。イオン流で電流も駆動

・数100keV ~ 数MeVのビーム  
が必要

400keV・数MWまでは実働中。1MeV・  
数十MWを開発中

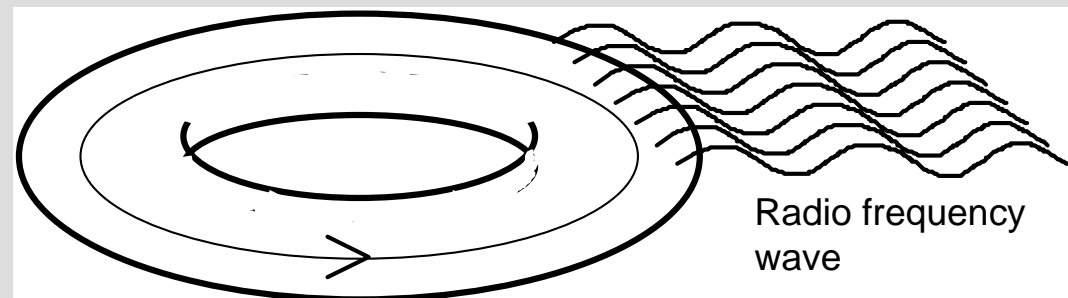


### 2) RF injection

強力な高周波（電磁波）を入射してプラズマ粒子を直接加熱・加速  
加熱や電流駆動が可能。プラズマ中の様々な共鳴周波数を利用。

・数10MHz ~ 数GHz

MHz帯は実用化済  
百GHz帯・数百KWは実働中。  
MW級を開発中



# 磁場核融合(トカマク)方式における研究の進展と現状

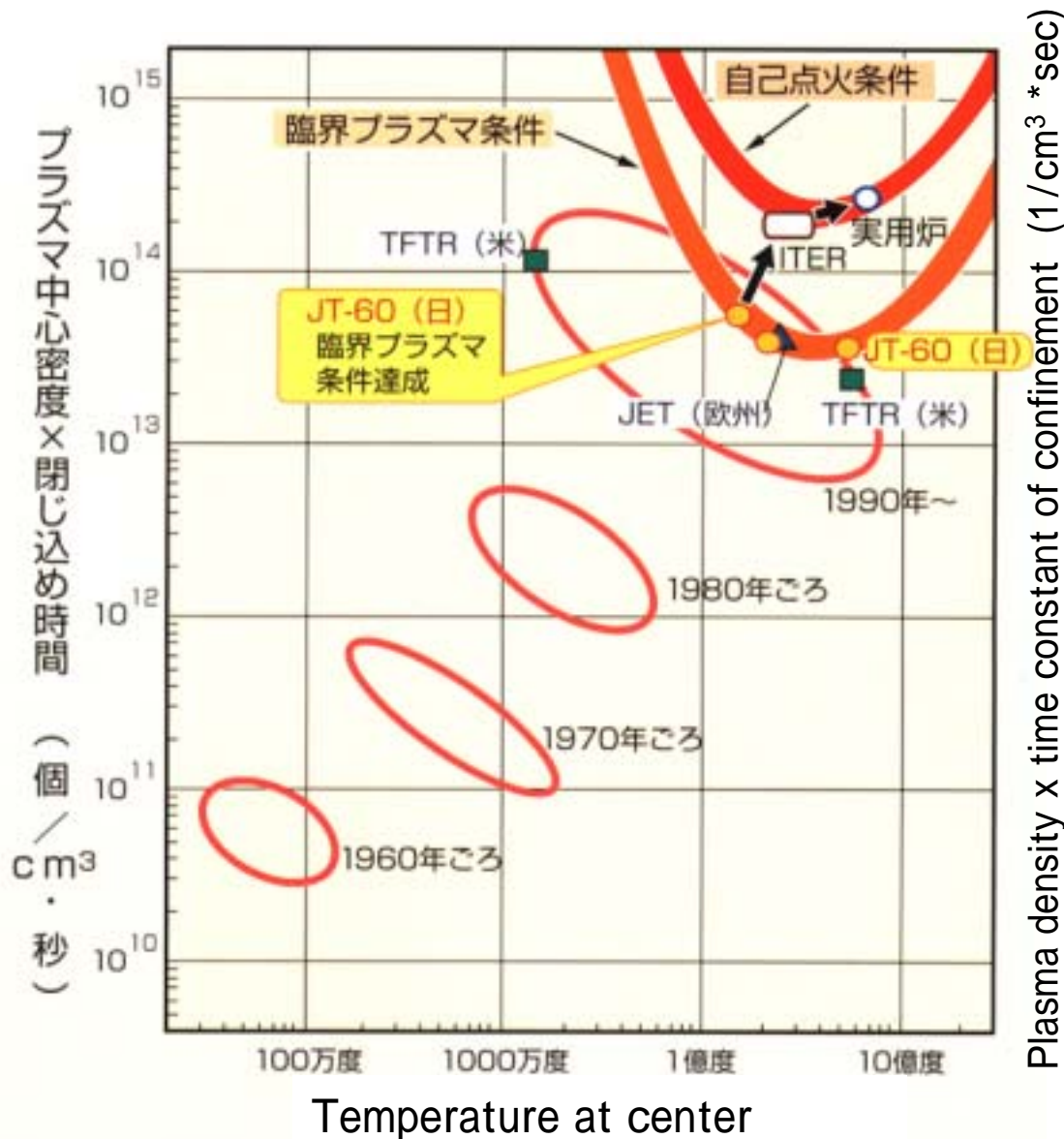
トカマクがもっとも高い性能を示してきた

10年毎に一桁以上の性能向上を実現

エネルギー収支率~1 (臨界条件)を達成済 (ただし瞬時的)

次期実験炉ITERで、50万kW級連続燃焼をめざす

中型の火力発電所並

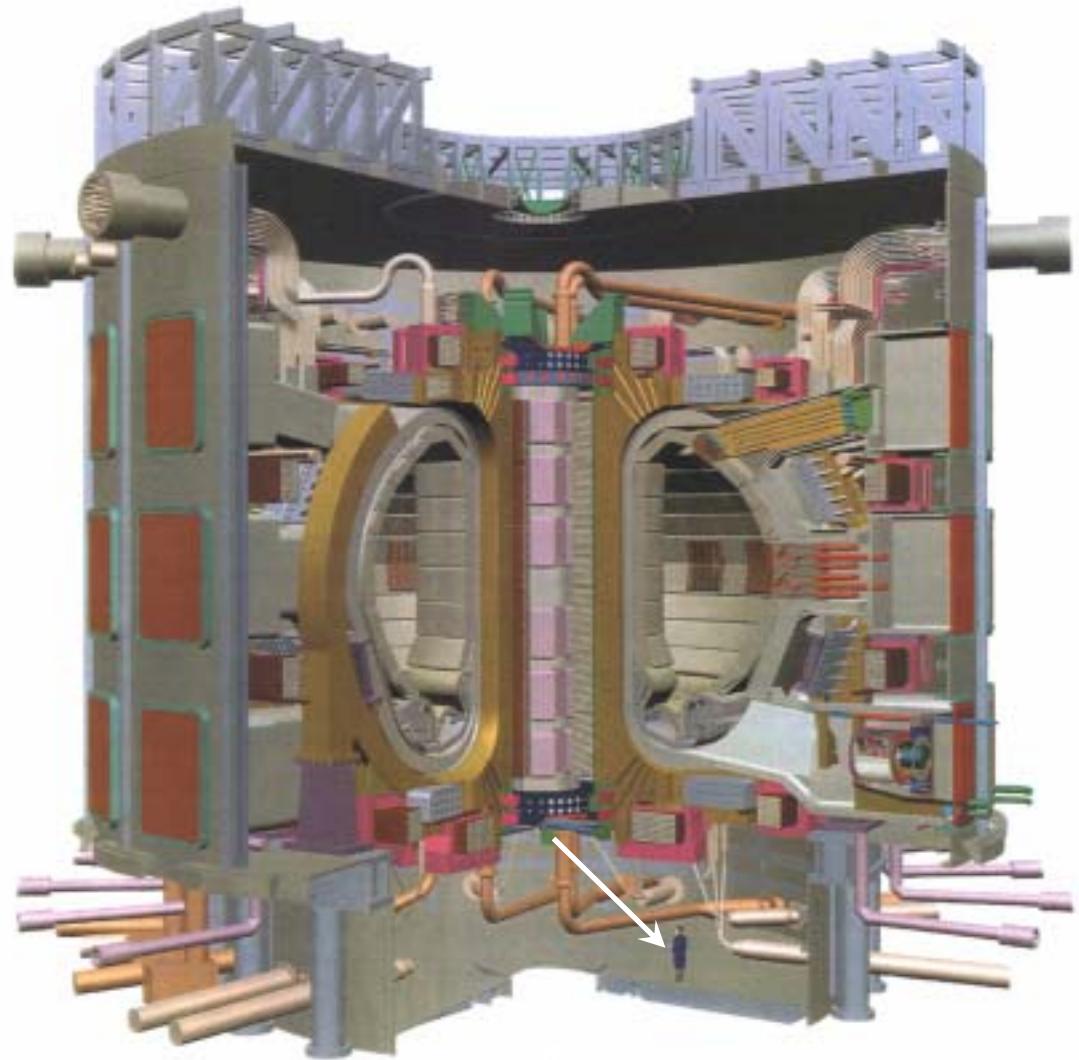


日本原子力研究所「ITER - 核融合実現への道 - 」より

「地上の人工太陽」の実現は間近に迫っている。

次期核融合試験装置の主役は磁場方式のITER(イーター)の建設を国際協力で計画中。

本体は仏・カダラッシュに建設が決定。日本には遠隔実験センター、補間実験用トカマクなど、1000億円規模の関連施設を建設。

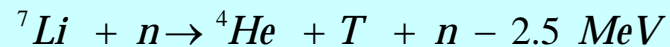
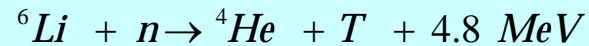


# 核融合の燃料資源(resource of fusion fuel)

## 核融合反応

重水素(記号D) + 三重水素(記号T) → ヘリウム(He) + エネルギー

→ 発電所内でリチウム(Li)から作る



### 1) 重水素(海水中に無尽蔵) Deutrium: abundant in seawater

地球の水に含まれる水素の0.015%は重水素(D)

海水中には重水素が50兆トン

100万キロワット発電所1500基(～世界の電力量相当)を運転するとしたら  
数千億年分…というより無尽蔵と見るべき

高効率な重水素の大量製造技術は実用化済。  
製造に要するエネルギーは微少で大量生産技術も現存。

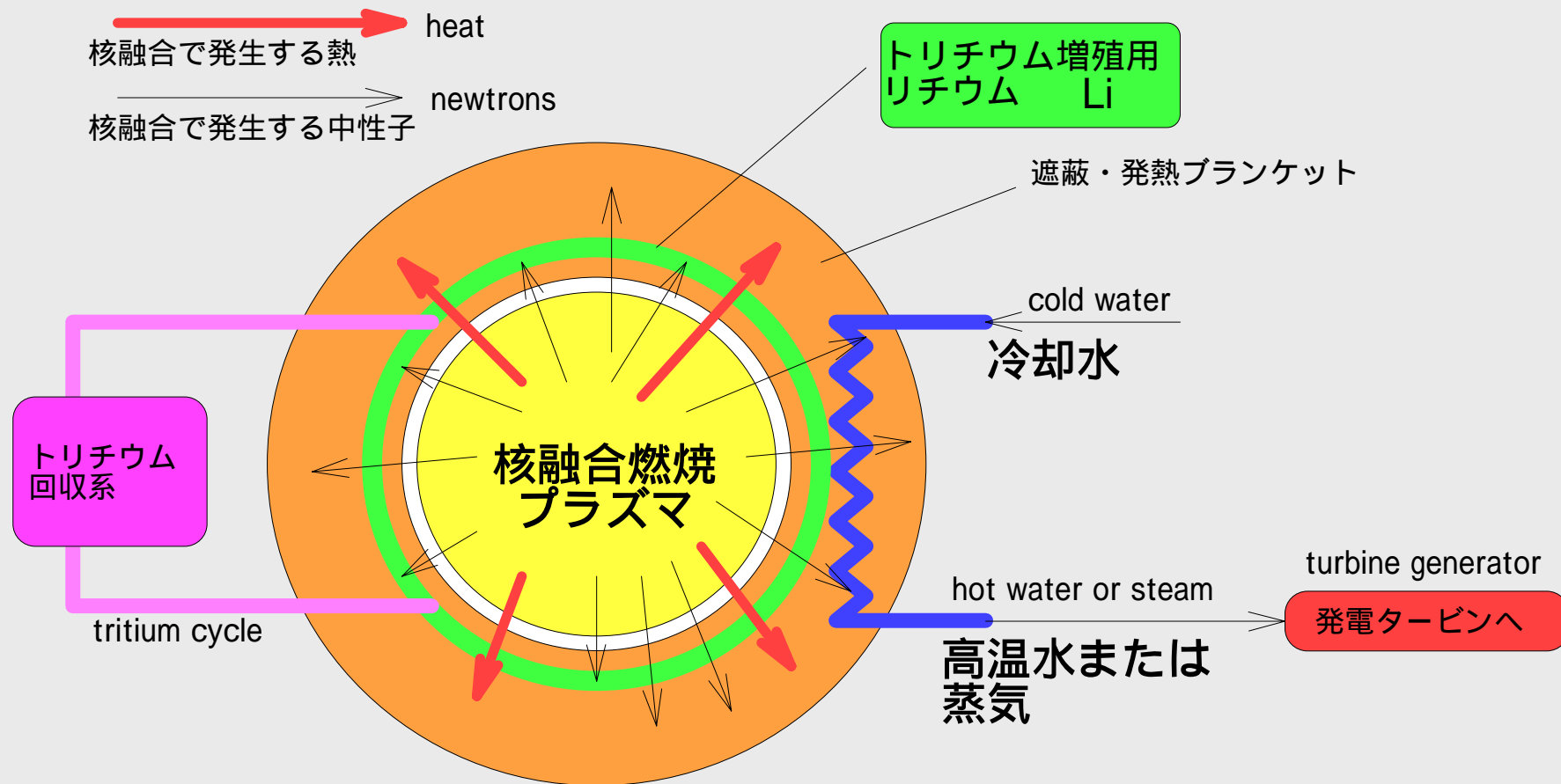
### 2) リチウム(海水中に無尽蔵) Litium: abundant in seawater

100万キロワット発電所1500基(～世界の電力量相当)を運転するとしたら  
発見済の鉱山…600年分 (+ 発見予想分:5万年分)

海水中には…150万年分が回収が容易に可能な濃度で存在

海水からの回収技術も存在。コストは鉱山からの2倍程度。

# トリチウム増殖ブランケットの概念 Concept of tritium breeding blanket



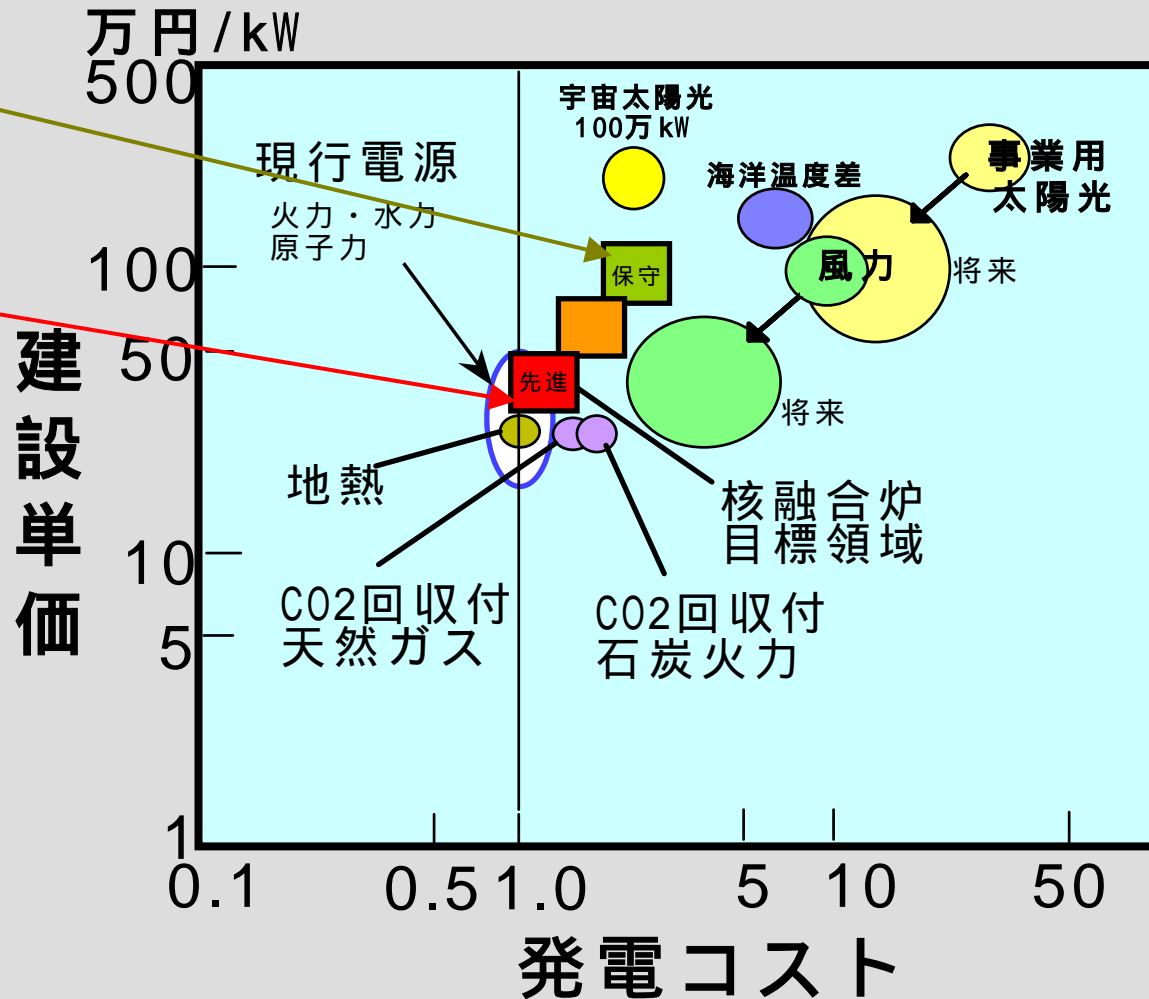


# 核融合エネルギーの経済性

ITER同等技術で炉を大型化して発電炉にした場合。

ITERと関連R&Dで開発する高性能な概念を仮定した場合

核融合エネルギーは、安いエネルギーになるとまではいえないが、CO<sub>2</sub>発生が少ない未来エネルギーとしての合理的なコスト内で発電が可能と考えられている。



# 先進設計実用炉の例

電力中央研究所による *CREST* 炉

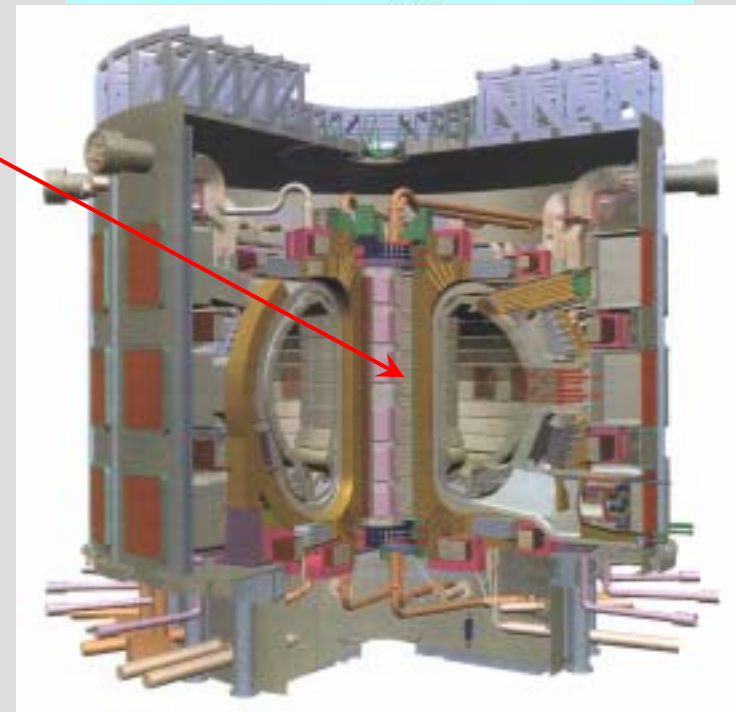
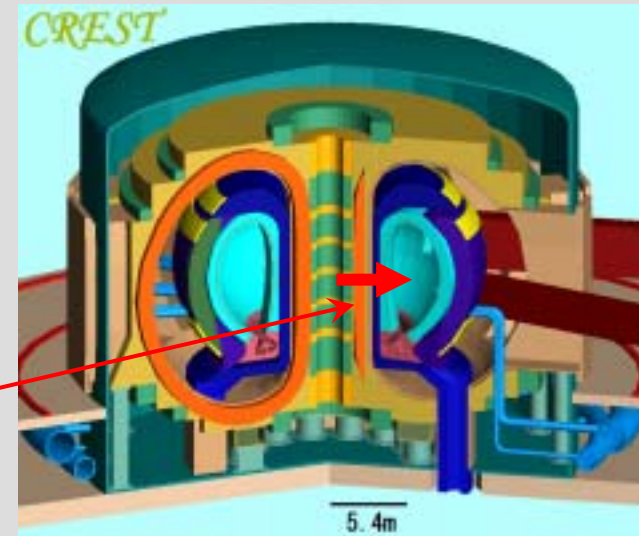
凹状電流分布高性能化でITER基準運転の2倍以上のプラズマ圧力をめざした設計。

CRESTプラズマの半径 = 5.4m  
ITERプラズマの半径 = 6.2m

小型化と高効率化でコスト低減の見通しを示した例

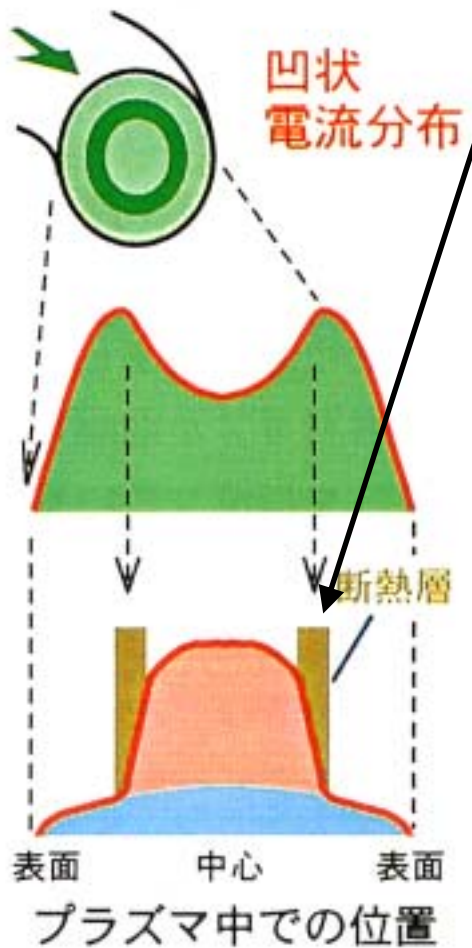
実現へのキーは

- 1) プラズマ性能の改善  
(ITERとJT-60改造機で研究)
- 2) もっと強い超電導磁石の開発
- 3) 先進材料の開発

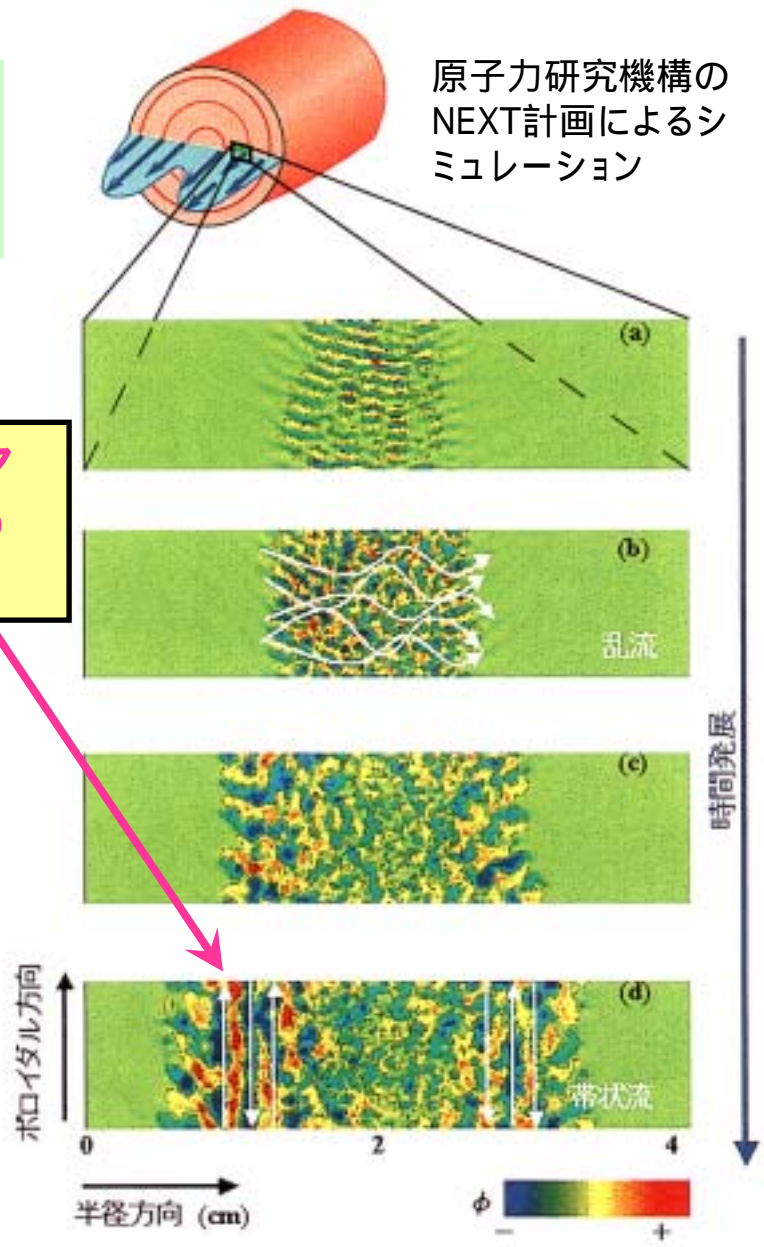


# 凹状電流分布が高性能な理由 - その1

内部のエネルギーを外に逃がさない断熱層ができる  
 凹状分布で存在が可能になる高速で速度差のある流れが、外向きの乱流を分断する。



いわばエアカーテンの原理



図は、日本原子力研究所「核融合炉をめざして」核融合研究の進展と拡がり(平成12年)より

## 凹状電流分布が高性能な理由 - その2

**凹状範囲**は理論的に安定になりやすい。

**周辺部**の不安定性は、近接して外に置いた**導体の壁**で安定化できる。

凹状分布だと、不安定な範囲が周辺導体に近いので、強く安定化が可能。

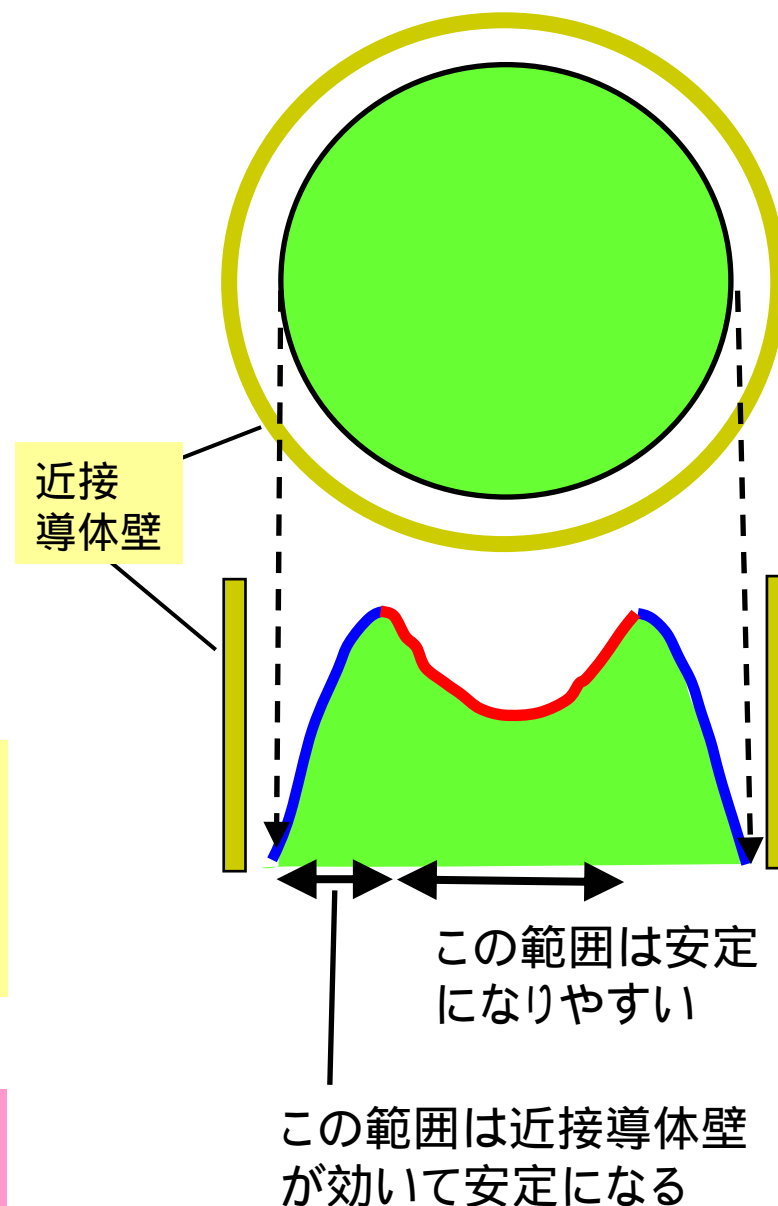
高い圧力の状態まで安定に維持できる

理論上の規格化圧力  $N$  で比較すると

凸状分布:  $N < 3.5$  (近接導体なし)

凹状分布:  $N < 5.5$  (近接導体あり)

ただし、これは理論上限  
限界を極められるかは今後の研究が必要



核融合も放射性廃棄物がでる。燃料のトリチウムも、半減期は12.3年と短いがやはり放射性物質。

本当に安全でクリーンなエネルギーと言えるのか？

## 安心感のひとつの測り方 毒性指数

何倍に希釈したら人体に有害でないと言われる濃度になるか？  
と考えると、希釈に要する水や空気の体積で定義する

### 運転中では

核融合炉の運転中に炉内に存在する物質の潜在的な毒性指数は、核分裂炉の1/1500である。

廃止後の廃棄物はどうか？

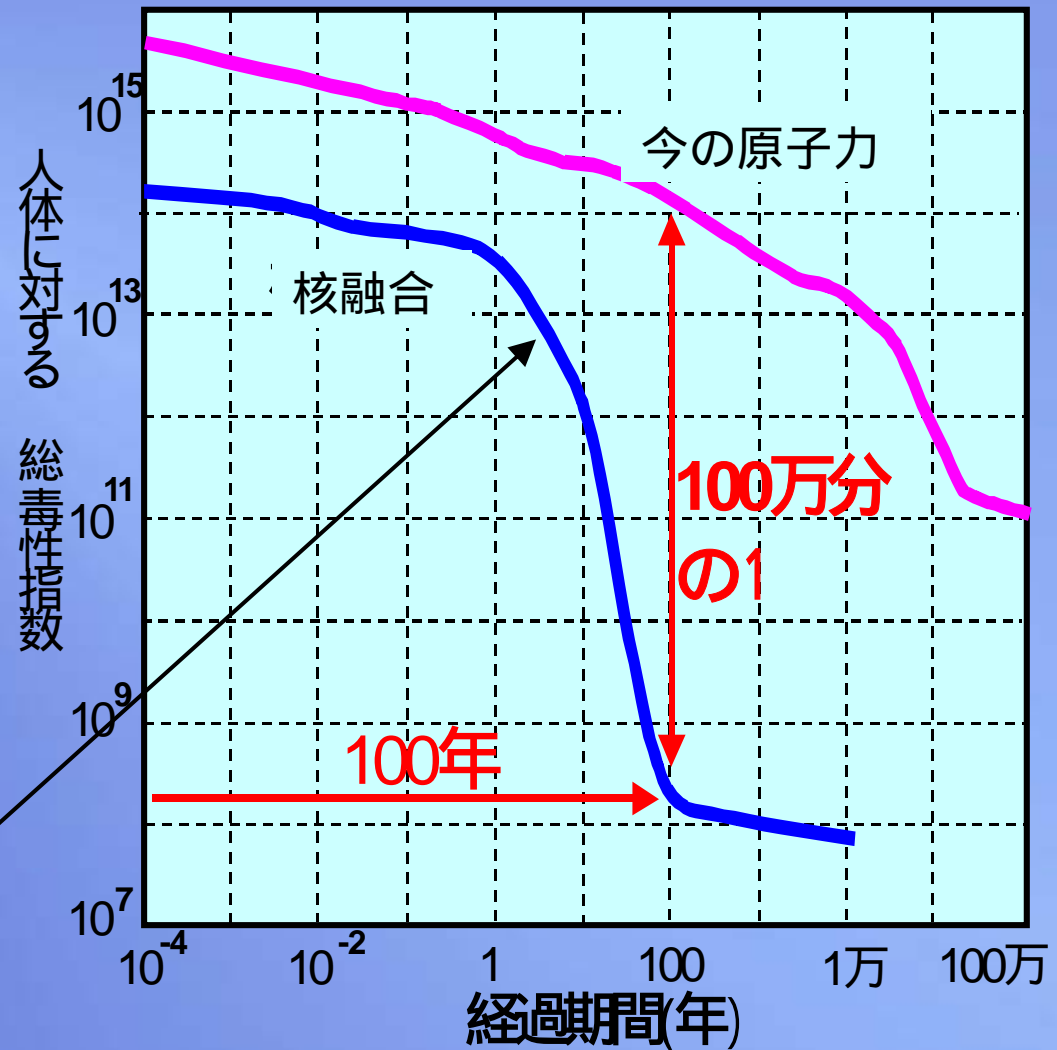
# 核融合炉の放射性廃棄物

Radio active waste from fusion

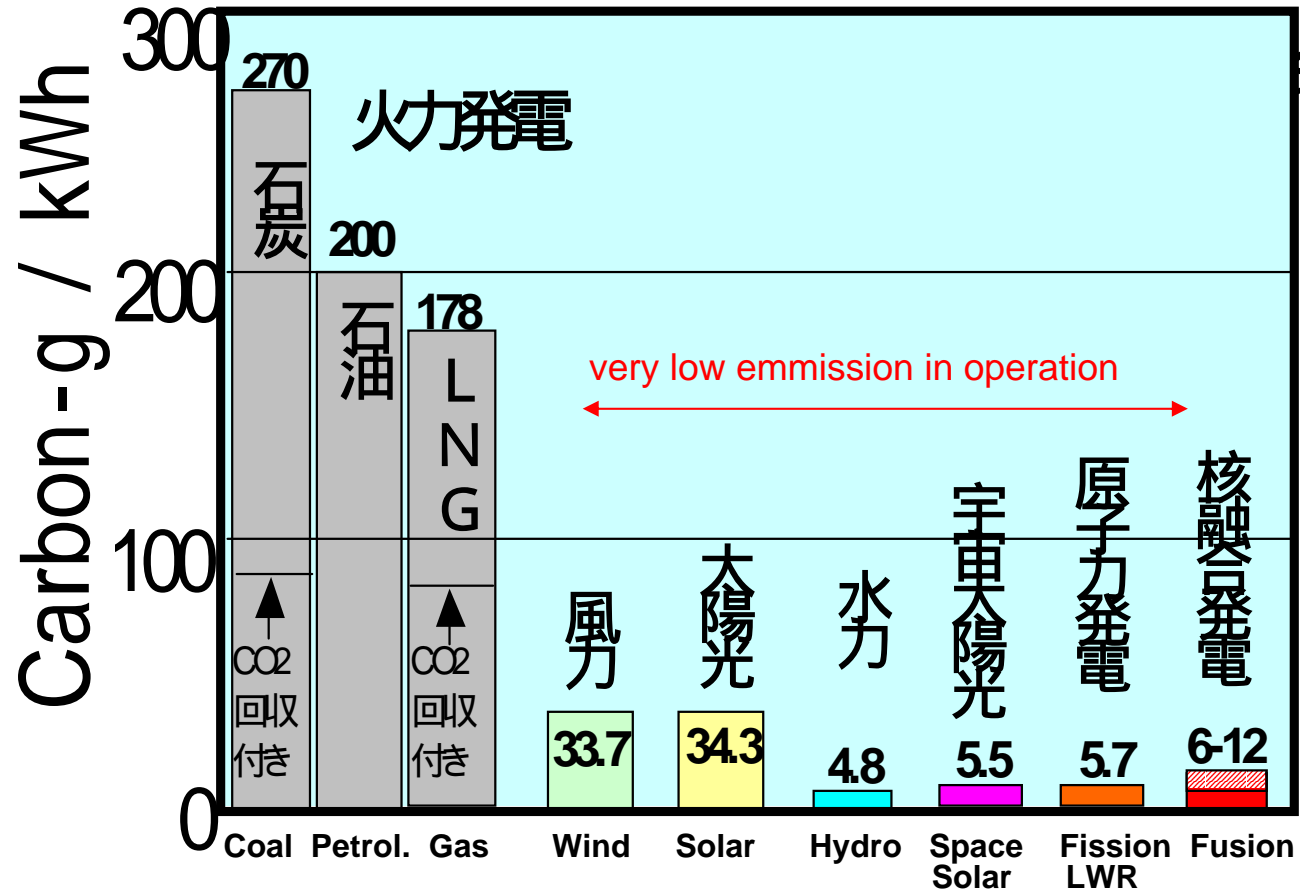
核融合炉からも放射性の廃棄物は出るが、何千年・何万年も残るものや高レベルに分類されるものではなく、毒性度指数も現行の原子力より桁違いに低いとされる

The hazard potential of the waste from fusion is much lower than that from fission. Radioactive hazard reduces down to one millionth within 100 years.

運用終了後の廃棄物：原子力発電からの廃棄物に比べ**100年で百万分の1**まで減衰。廃棄でなく再利用の可能性もある。



# CO2 emission rate of various power plants



CO<sub>2</sub>は火力では燃料の燃焼で、その他は、かなりの部分が建設・廃棄で発生する。風力や太陽光は設備が大きいため建設時のCO<sub>2</sub>発生が無視できない。

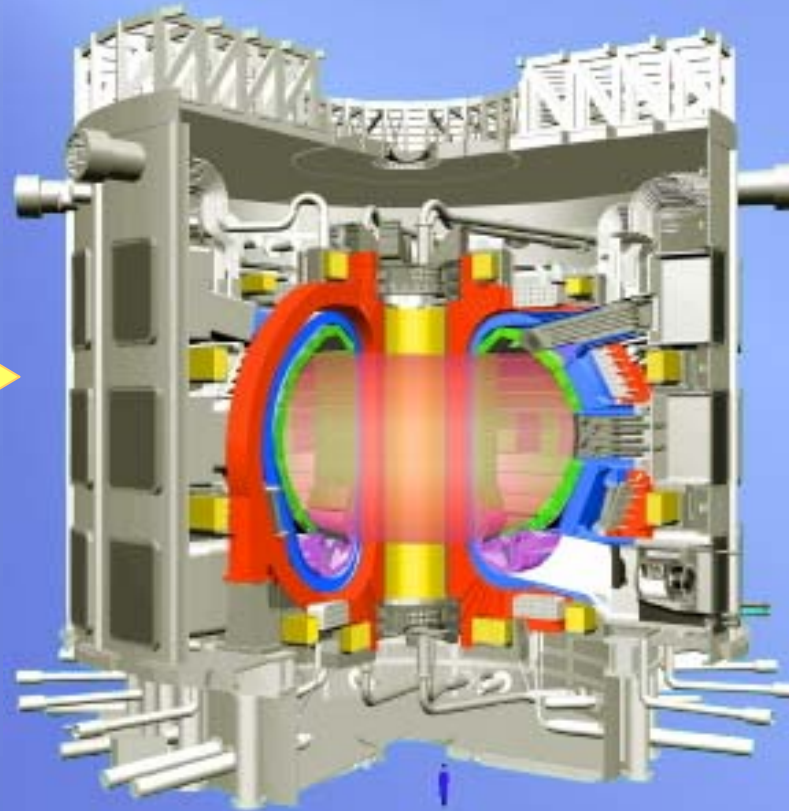
核融合は時松等、6th IAEA TCM on Fusion power plant design and technology (1998)、宇宙太陽光は、NEDO Research Report NEDO-GET-0007 (2001)、その他は内山洋二、電力中央研究所報告Y94009 発電システムのライフサイクルアセスメント(1995)

# ITERとは

核融合燃焼を長時間持続し、投入エネルギーの10倍以上のエネルギーを発生させることをめざす

ITER will produce fusion energy ten times as large as the injection energy

加熱パワー →

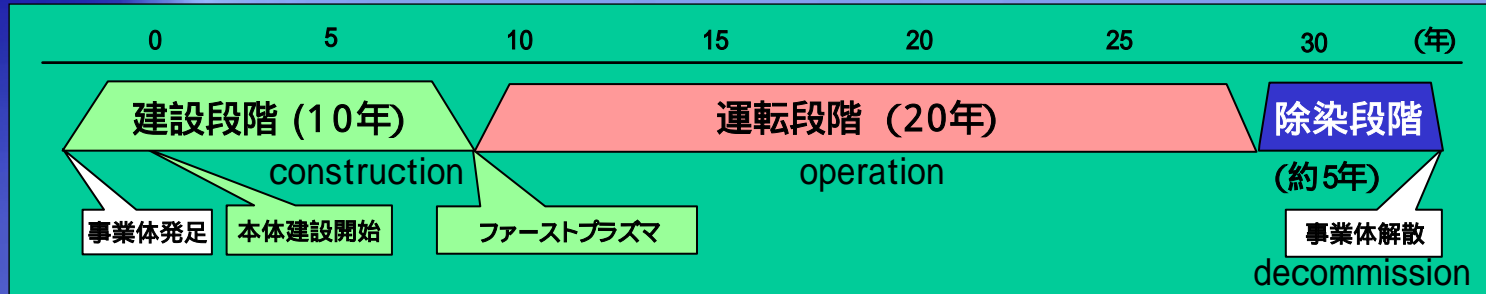


→ 10倍以上の  
プラズマ  
エネルギー

熱出力50万kW



# ITERのスケジュール



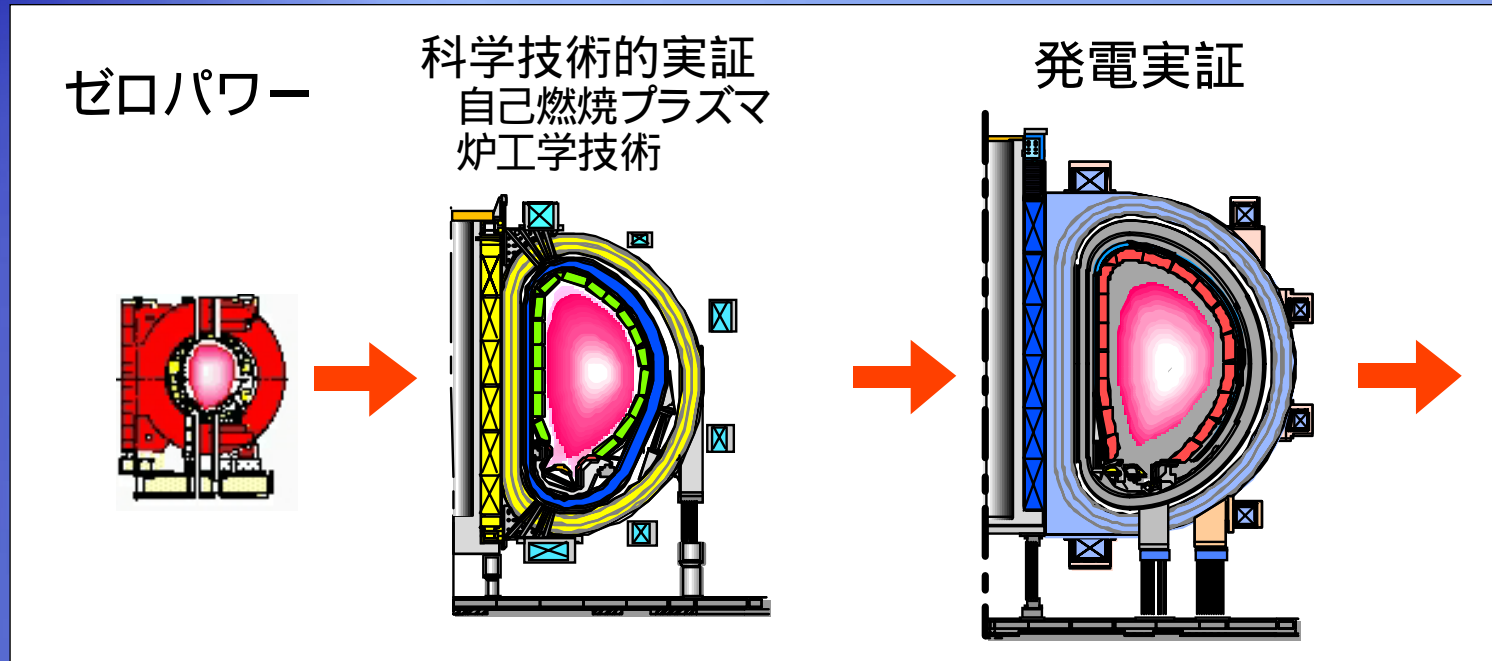
## ITER コスト評価

建設費	約 5000 億円
運転費 (廃止措置積立金を含む)	約 300 億円 / 年

# 核融合エネルギー実用化へのステップ

Steps toward commercial fusion plants

JT-60 → 2007~ 実験炉 (ITER) → 2030~ 原型炉 Demo



$Q \sim 1$ , 10秒

$Q > 10$ , 400秒

$Q = 30 \sim 50$ , 定常運転

2050~  
実用化  
Commercial  
plants

# By what time the fusion should be ready?(1)

From an environmental point of view

**Our target to keep the concentration of CO<sub>2</sub> less than 550ppm after 2100**

What we have to do?

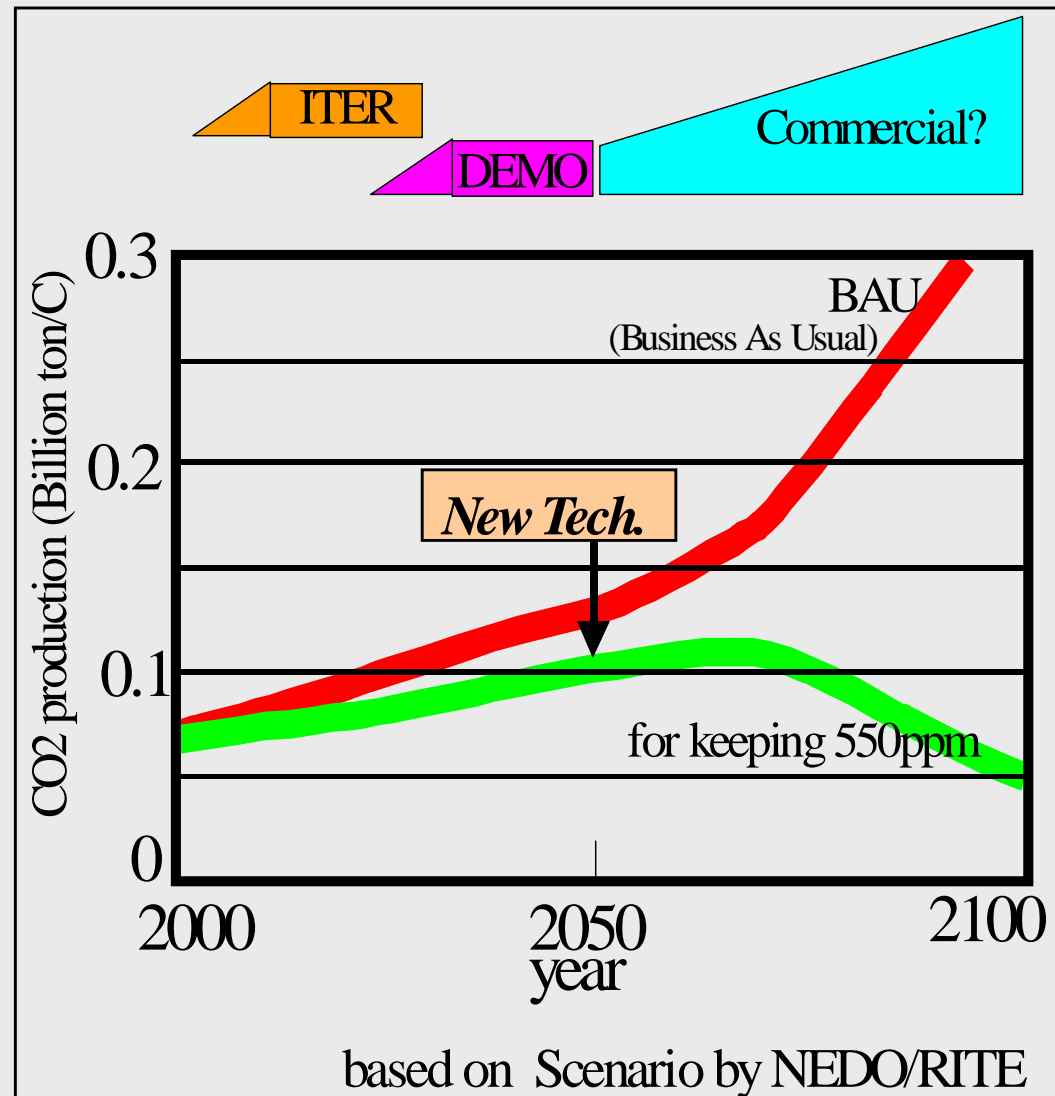
**1) Immediately**

**Reduce the gradient** of CO<sub>2</sub> production by using all the available technologies

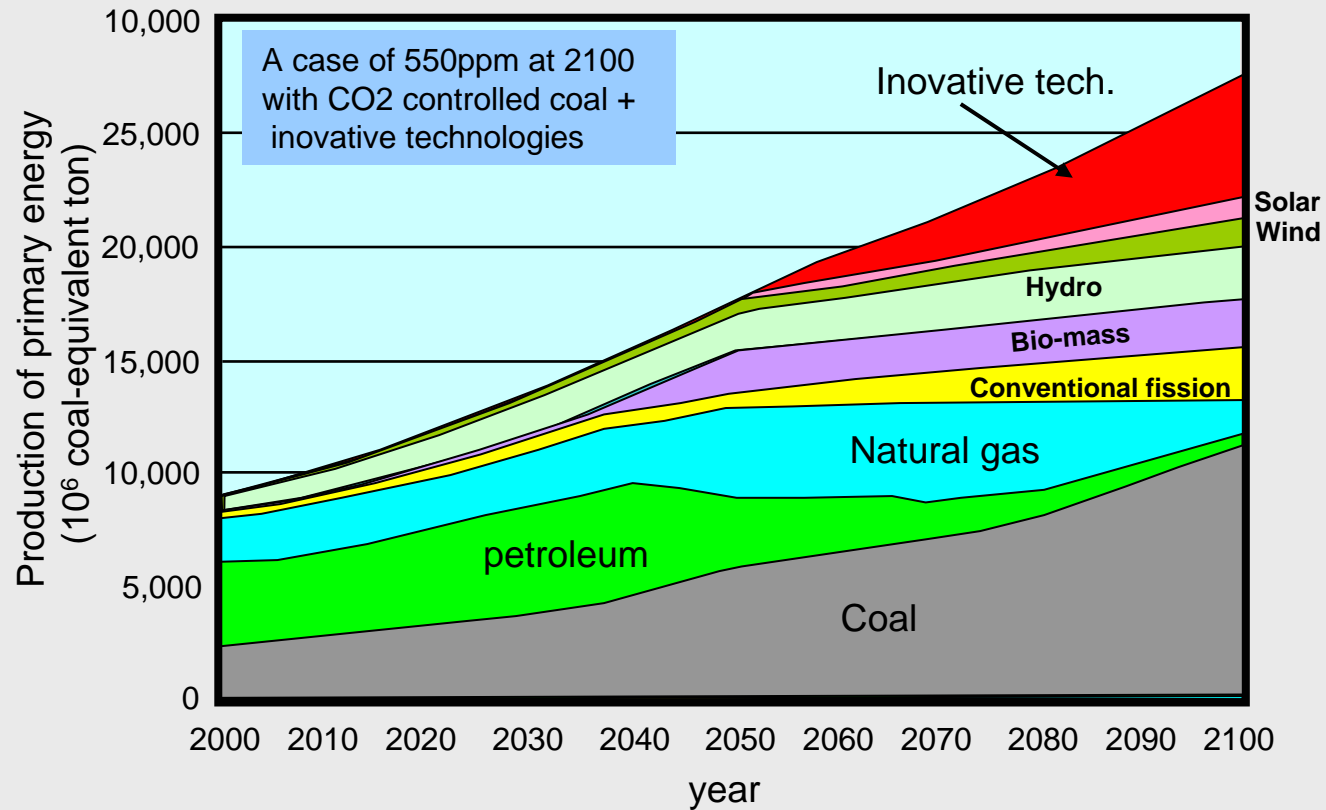
**2) After the middle of this century**

**Reduce further** by **Introducing new technologies**

There are a lot of competitors. If fusion is not ready in time as one of **these new technologies**, the motives (and budget) for fusion study might be diminished.



## An example of scenario to achieve 550 ppm at 2100



NEDO/RITE「地球再生計画」の例より

In order to contribute to world environment control, inovative technologies are expected to be ready by ~2050.

21世紀のエネルギー問題を弱点なく解決できる100点満点の回答はまだない。弱点を知りつつも、それらをうまく使うことが重要。

核融合プラズマエネルギーは未来エネルギーへの要請をバランスのよく達成できる有望な選択肢のひとつとして、2050年ころの実用化をめざして開発を続けている。次はITERによって人類初の核融合点火・連続燃焼で、50万kWの熱出力連続発生をめざす。