

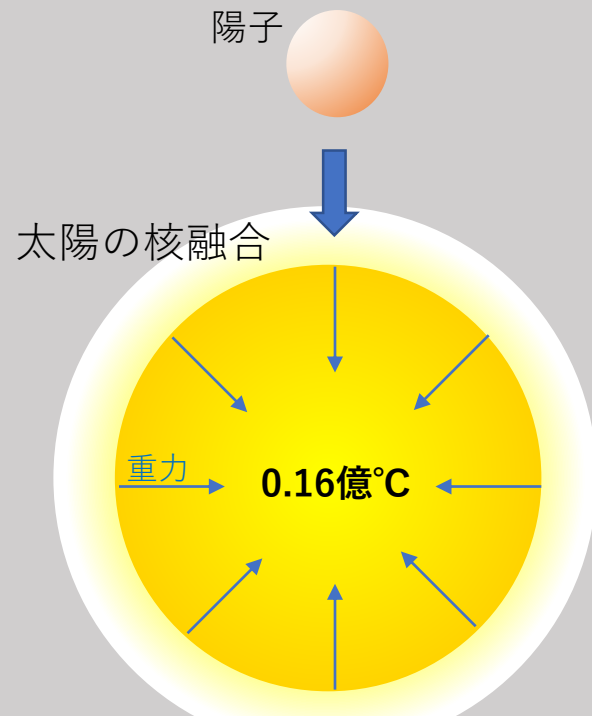
# 核融合における 過去のビッグイノベーションと 今後期待されるイノベーション

慶應義塾大学  
岡野邦彦

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

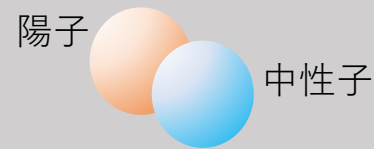
## 水素同位体と核融合

水素  
H<sub>2</sub>Oの形で无尽蔵

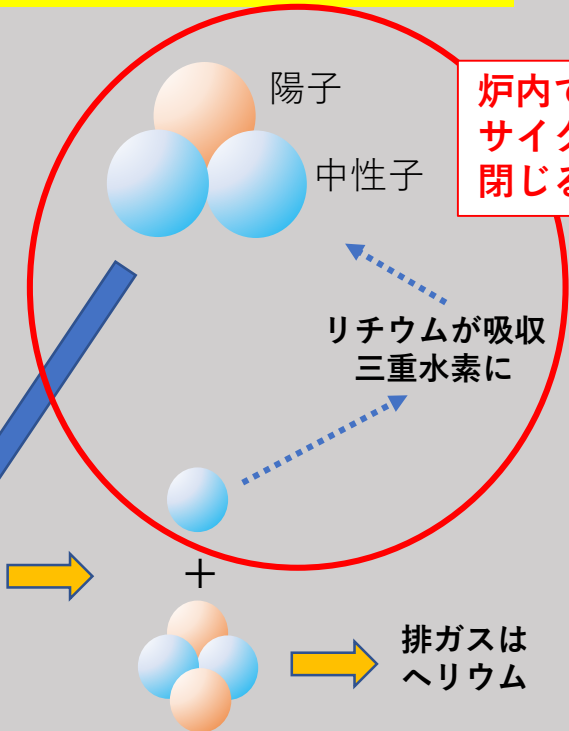


太陽直径～地球の109倍  
反応率は小さいが  
巨大なので燃える

重水素  
(海水中の水素の7000個に1個)



三重水素  
海水にも豊富なりチウムから作る



炉内で燃料  
サイクルが  
閉じる

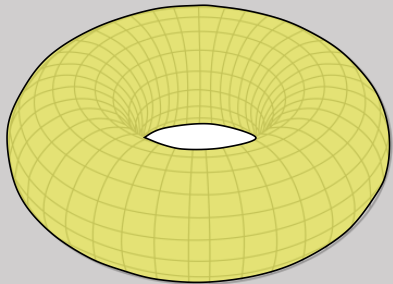


重水素と三重水素の核融合炉  
1億°C  
既存技術での実現を目指す

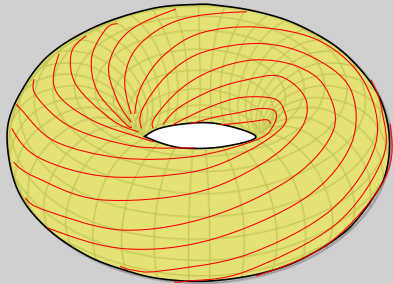
高温水素（プラズマ）を**重力**で閉じ込めるのが太陽  
**磁場**や**慣性**で閉じ込めるのが人工の核融合炉

## 磁場方式

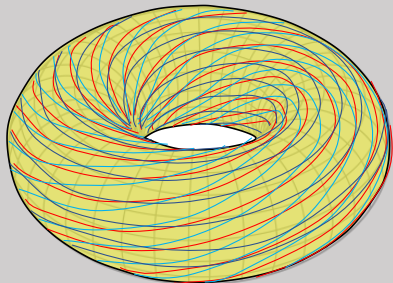
プラズマが磁力線を横切れないのを利用  
**ねじれピッチが異なる磁力線**の  
「多重カゴ」で覆って漏れを防ぐ



トーラス  
プラズマ



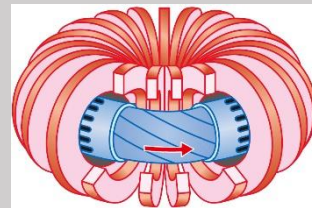
一重の  
磁力線カゴ  
隙間から漏れる



多重の  
磁力線カゴ  
この図は3重  
実際は無限重

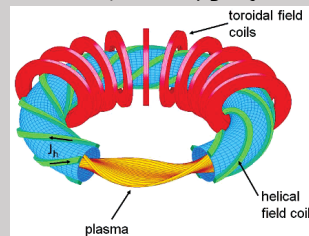
磁場方式核融合炉  
2つの磁場の握り方

トカマク方式



↑ 電流を流してねじる  
または  
↓ コイルをねじっておく

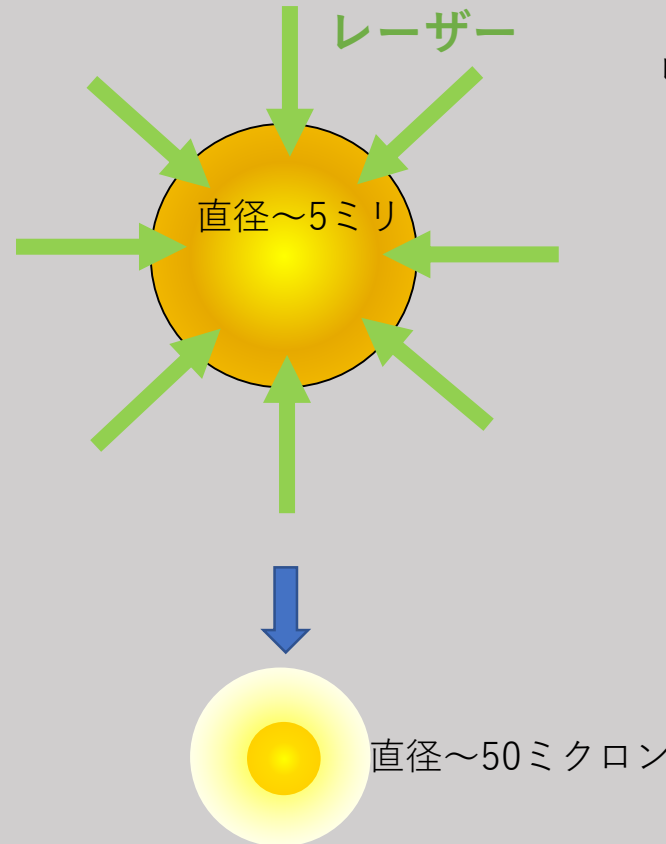
ヘリカル方式



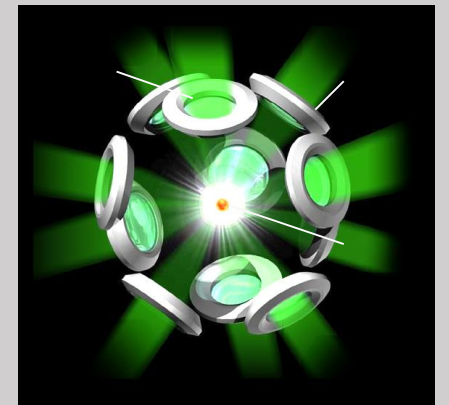
上図は「核融合エネルギーのきほん」  
（誠文堂新光社刊、2021年）による。  
下図は、Friedrich Wagner, "Physics of  
magnetic fusion", European Physics of  
Journal, 54, 01007(2013).

## 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



レーザー方式核融合炉のイメージ



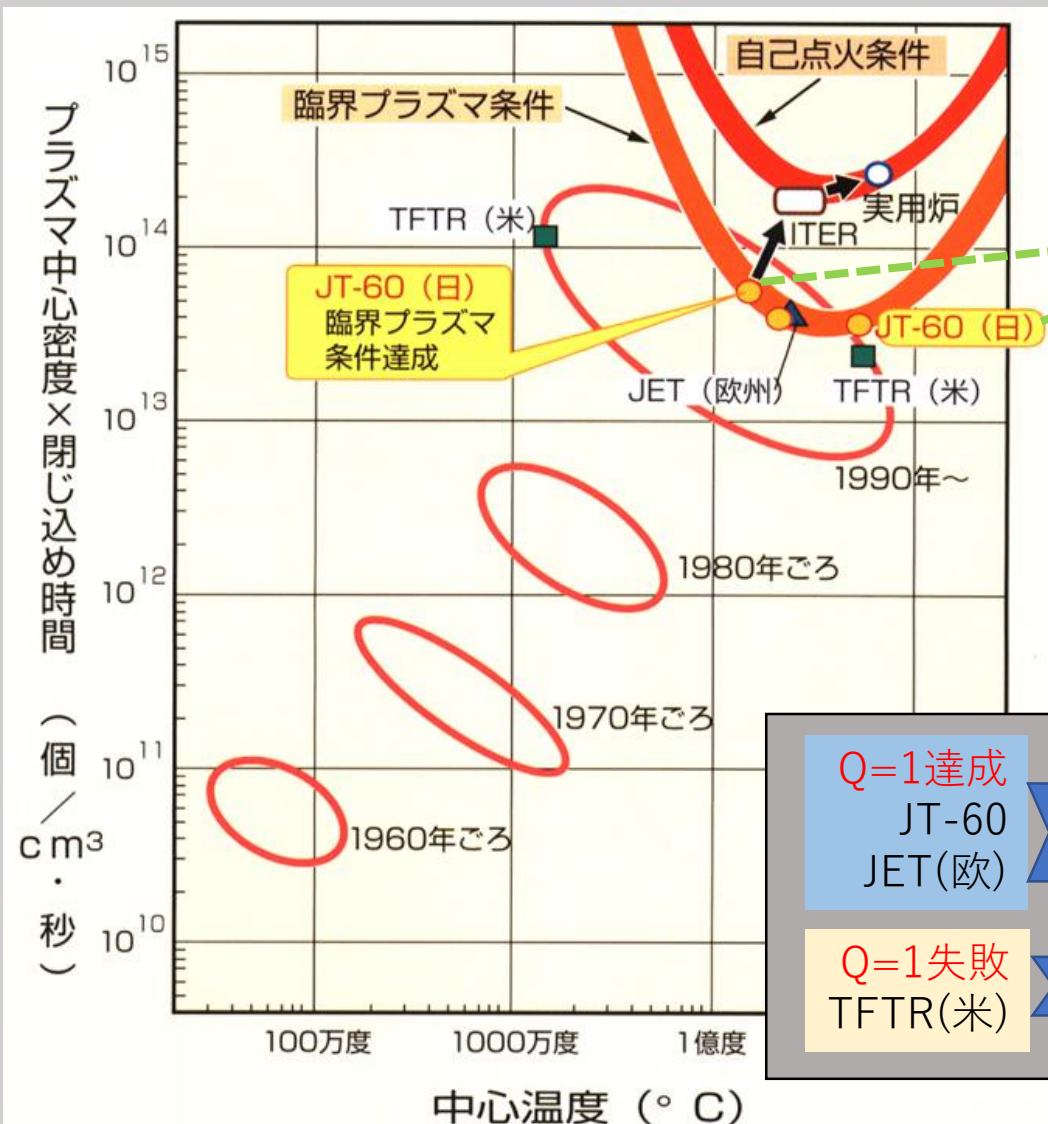
大阪大学レーザー科学研究所



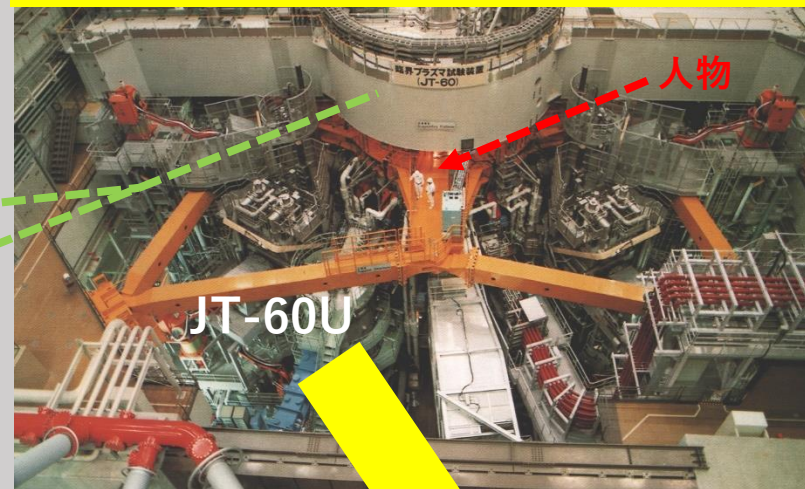
# トカマク

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

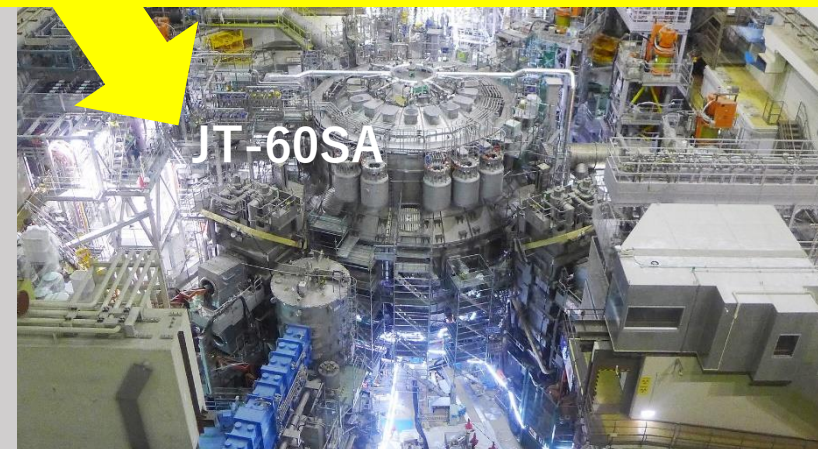
**臨界条件**：加熱入力と核融合出力がバランスする条件

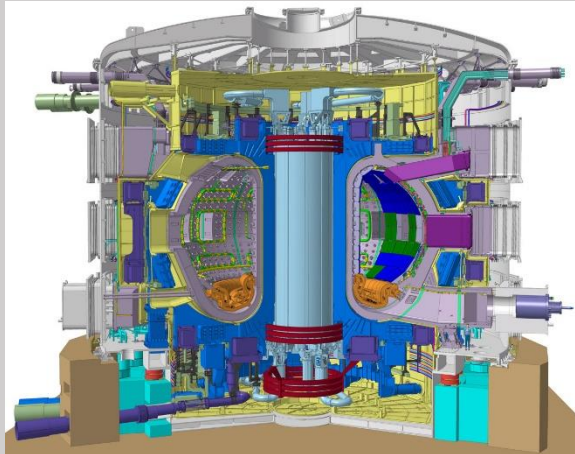


日本の**JT-60U**は、**臨界条件**や、**世界最高温度**などを達成



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





ITER機構による

## ITER：建設中 実験炉 核融合出力50万kW 発電はしない

2007

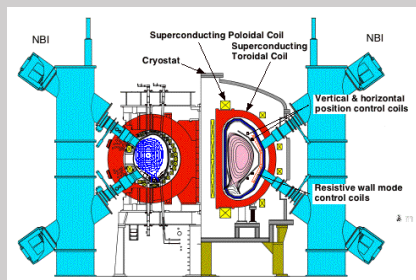
日欧米露中韓印の  
国際協力で仏に建設中

2025

完成  
運用開始予定

2035

パワー増幅率 $Q=10$   
300秒



量子科学技術研究開発機構

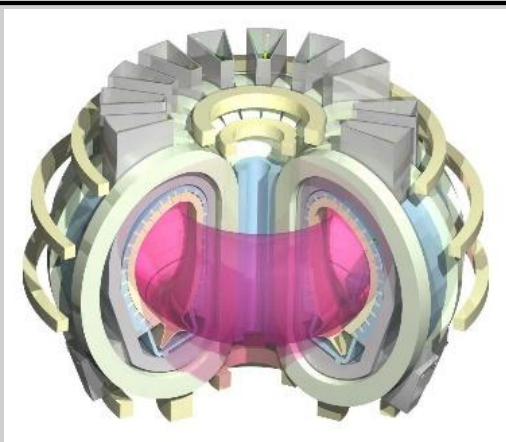
## JT-60SA： $Q=1.2$ (世界最高/実燃料換算)達成のJT-60(日本)を超伝導コイルに改修済

2009

改修開始

2020

完成済  
運用(総合試験)開始



量子科学技術研究開発機構

## 原型炉：計画中 核融合発電の実証 経済性の見通し

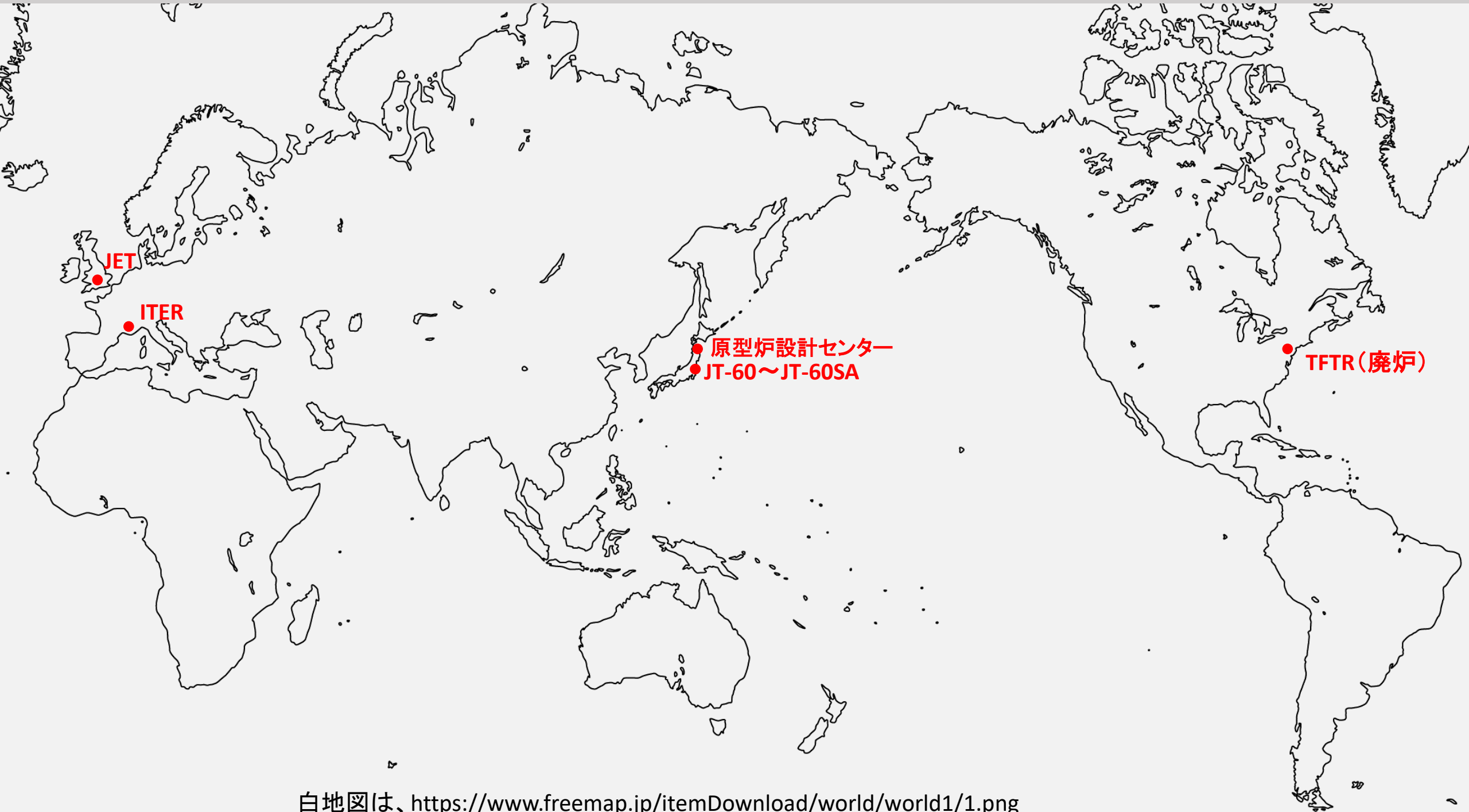
概念設計  
要素技術開発

2025

工学設計  
実規模技術開発  
への移行判断

2035

建設段階への  
移行判断



白地図は、<https://www.freemap.jp/itemDownload/world/world1/1.png>



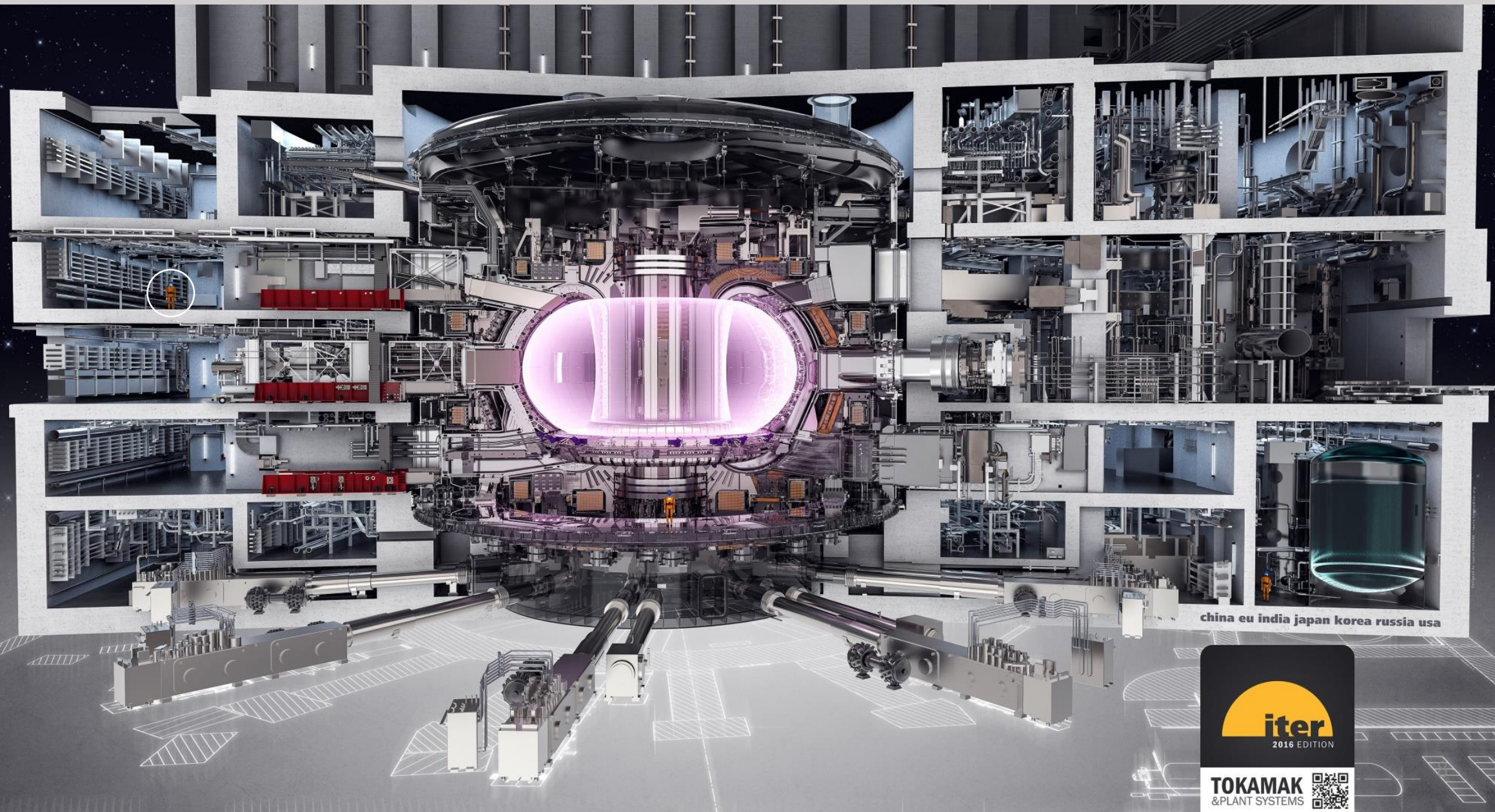


ITER建設地全景 2022年4月22日撮影  
ITER機構提供



本体 2万トン。総建設費 2兆円超。完成目標 2025年頃。  
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





# 核融合炉の主要要素技術

ITERの次は原型炉で発電実証と経済性の確認  
原型炉を実現するための要素技術はほぼ手にしている

## 核融合炉の主要要素技術

プラズマ性能に直結

材料・工学の制約

バランスがとれた  
設計が重要

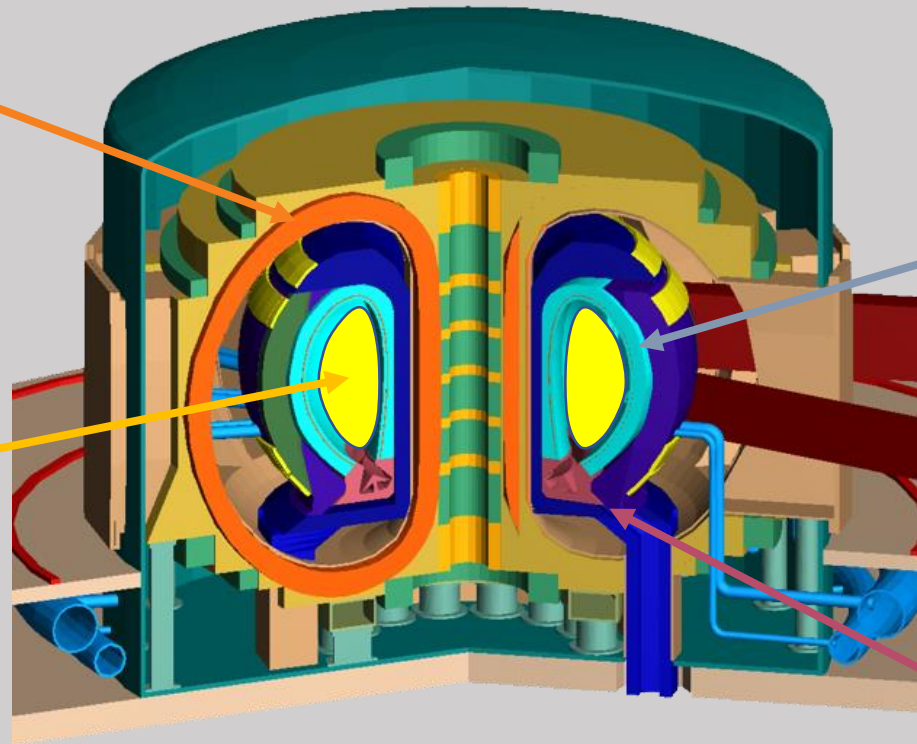
### ①超伝導コイル

強磁場・大型  
超低温と1億°Cが共存

### ②プラズマ

プラズマを浮かしながら  
燃し続ける

燃料は閉じ込める  
燃焼で出たヘリウムは排気  
の相反目標を同時達成



### ④ブランケット

- 1) 冷却
- 2) 発電タービン用の高温水等を発生
- 3) リチウムから燃料を生産

### ③排熱部

ロケットノズル並みの  
熱の処理



# ①原型炉の超伝導コイル

## 原型炉コイルはITERの技術を踏襲

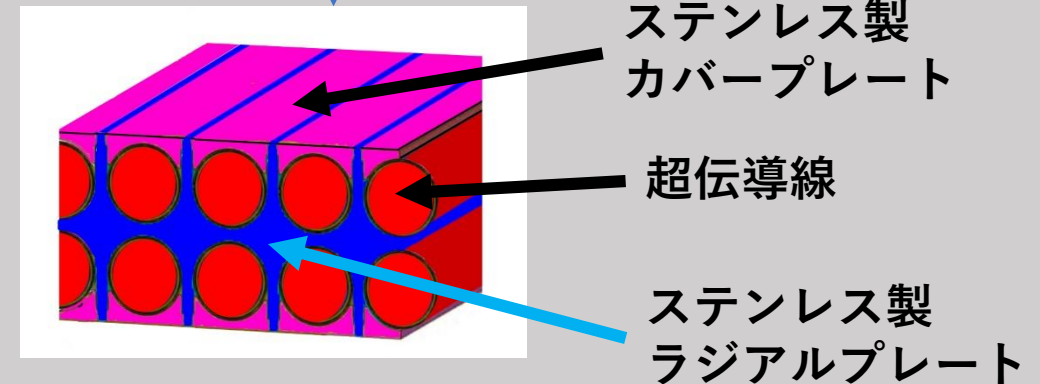
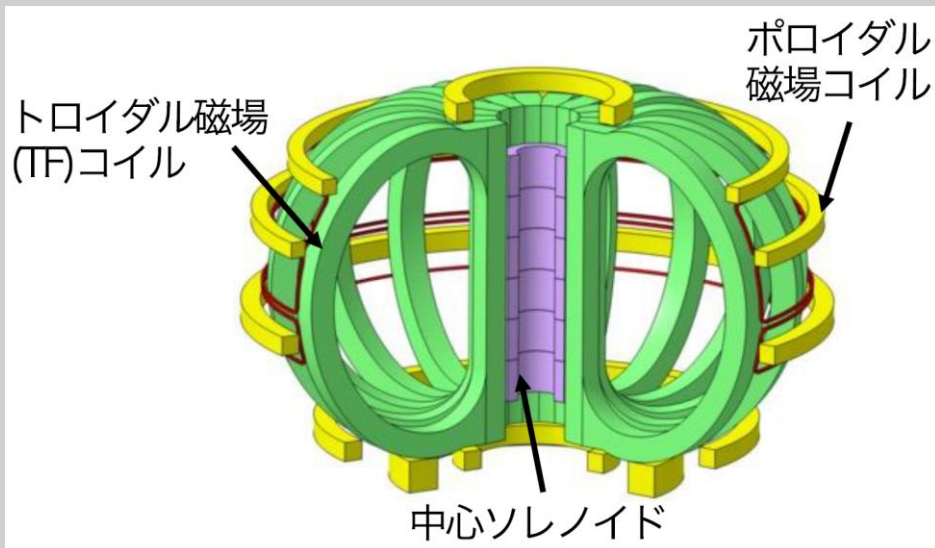
**超伝導材：**ITERと同じ

**構造材：**ITERより20%大きな応力に耐える  
極低温用ステンレス材が必要。  
試験的には達成済。量産化が必要。

⇒コイル実現性は十分に高い

|        | ITER           | 原型炉           |
|--------|----------------|---------------|
| 超伝導材   | ニオブスズ          | ニオブスズ         |
| 最大磁場   | 11.8テスラ        | 13テスラ         |
| 設計最大応力 | 667MPa         | 800MPa        |
| 形状     | D型(16.5m x 9m) | D型(20m x 14m) |
| 応力支持構造 | ラジアルプレート式      | ITERと同じ       |

超伝導線は構造材で支える必要がある。



# ①原型炉の超伝導コイル

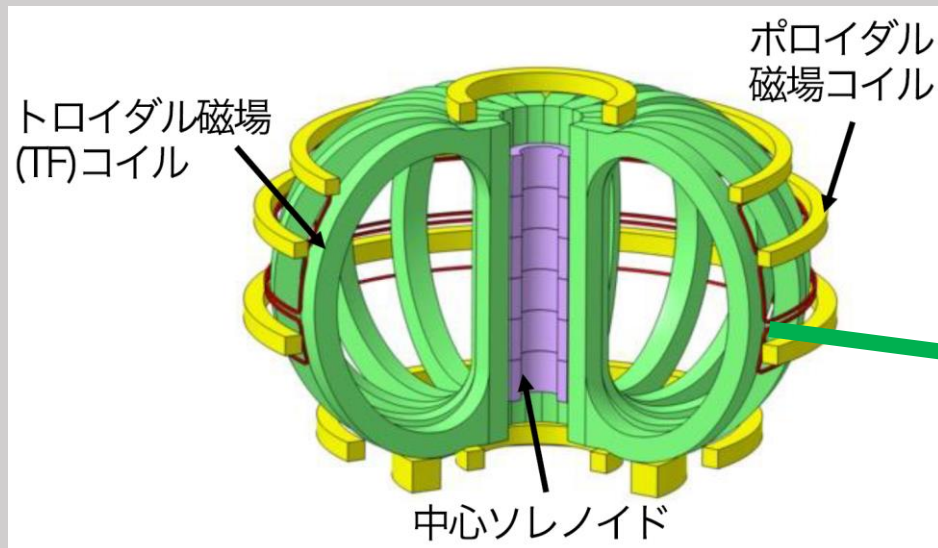
## 原型炉コイルはITERの技術を踏襲

**超伝導材**：ITERと同じ

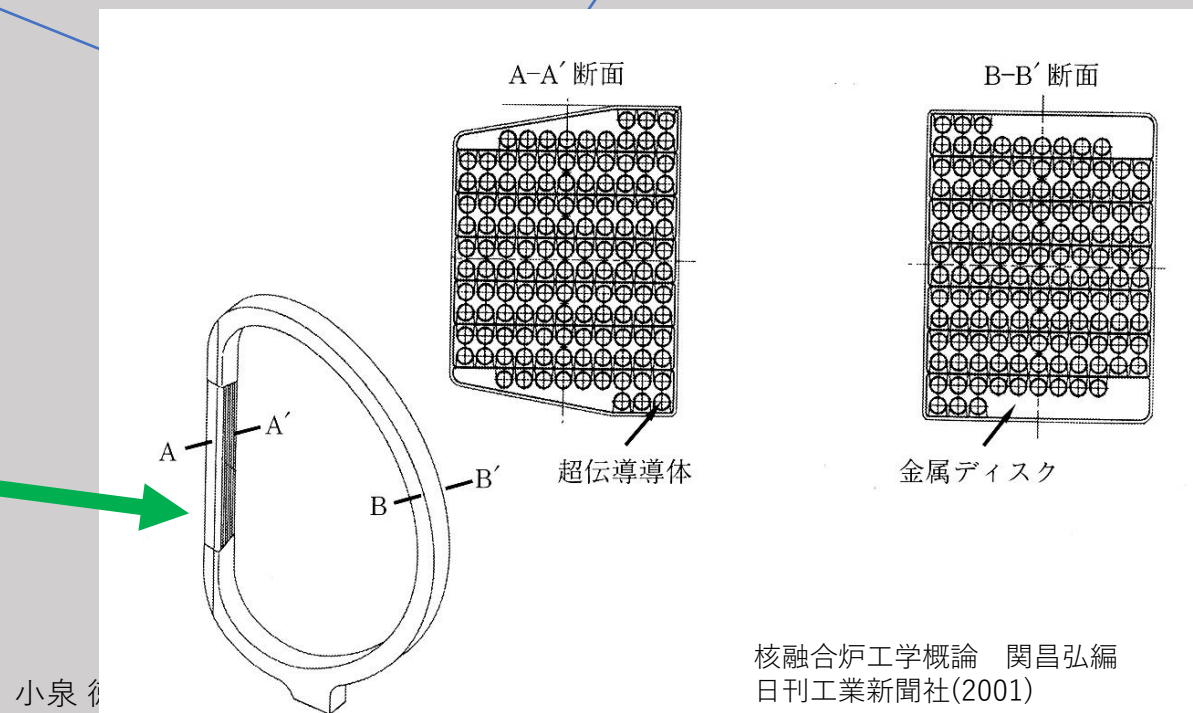
**構造材**：ITERより20%大きな応力に耐える  
極低温用ステンレス材が必要。  
試験的には達成済。量産化が必要。

⇒コイル実現性は十分に高い

|        | ITER           | 原型炉           |
|--------|----------------|---------------|
| 超伝導材   | ニオブスズ          | ニオブスズ         |
| 最大磁場   | 11.8テスラ        | 13テスラ         |
| 設計最大応力 | 667MPa         | 800MPa        |
| 形状     | D型(16.5m x 9m) | D型(20m x 14m) |
| 応力支持構造 | ラジアルプレート式      | ITERと同じ       |



坂本宜照、文部科学省、第25回核融合科学技術委員会、令和3年6月24日、資料2-2より



小泉 徹  
<https://www.riken.ac.jp/>  
の図を

核融合炉工学概論 関昌弘編  
日刊工業新聞社(2001)

図 6.9 ディスク型トロイダル磁場コイルの構造



# ①原型炉の超伝導コイル

## 原型炉コイルはITERの技術を踏襲

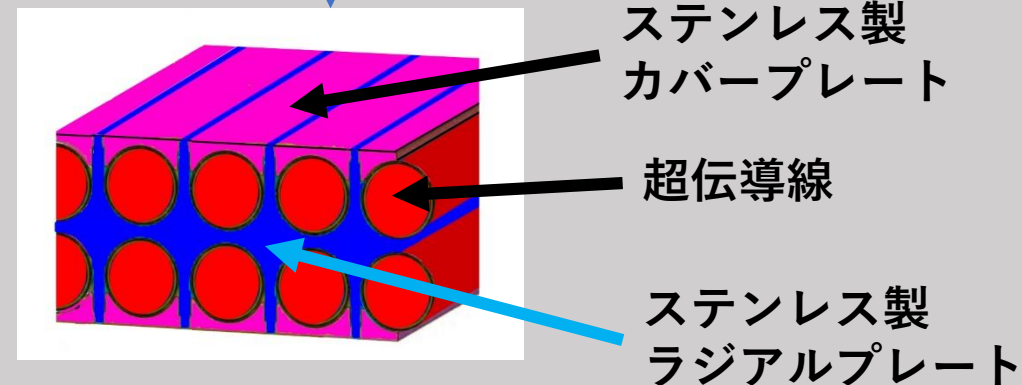
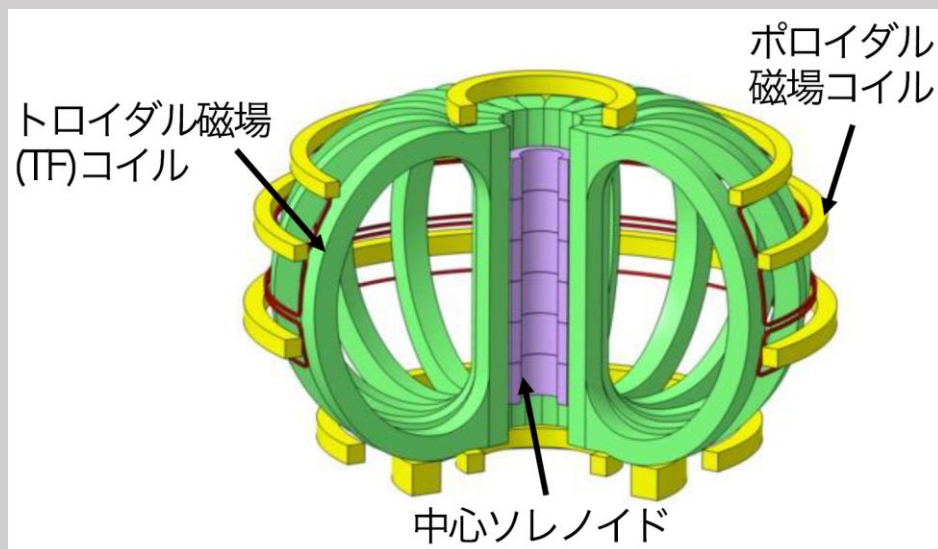
**超伝導材**：ITERと同じ

**構造材**：ITERより20%大きな応力に耐える  
極低温用ステンレス材が必要。  
試験的には達成済。量産化が必要。

⇒コイル実現性は十分に高い

|        | ITER           | 原型炉           |
|--------|----------------|---------------|
| 超伝導材   | ニオブスズ          | ニオブスズ         |
| 最大磁場   | 11.8テスラ        | 13テスラ         |
| 設計最大応力 | 667MPa         | 800MPa        |
| 形状     | D型(16.5m x 9m) | D型(20m x 14m) |
| 応力支持構造 | ラジアルプレート式      | ITERと同じ       |

超伝導線は構造材で支える必要がある。



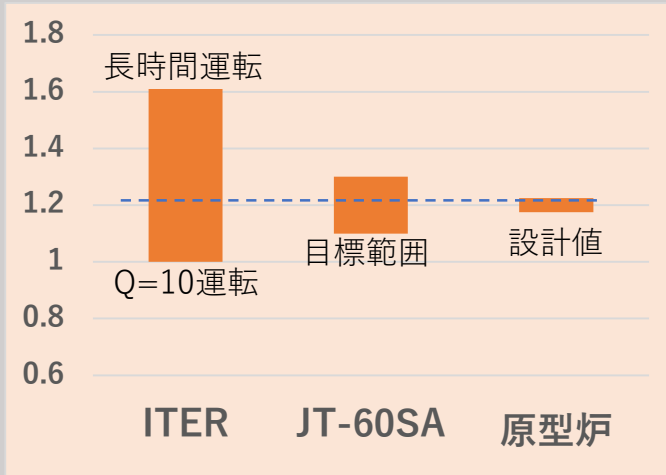
## ②原型炉のプラズマ

Based on JT-60SA Research Plan, Ver.4.0,  
2018, JT-60SA Research Unit.

### ①エネルギー閉じ込め指数 H

ITER設計基準(1.0)の改善指数

ITER後半で確認可能。

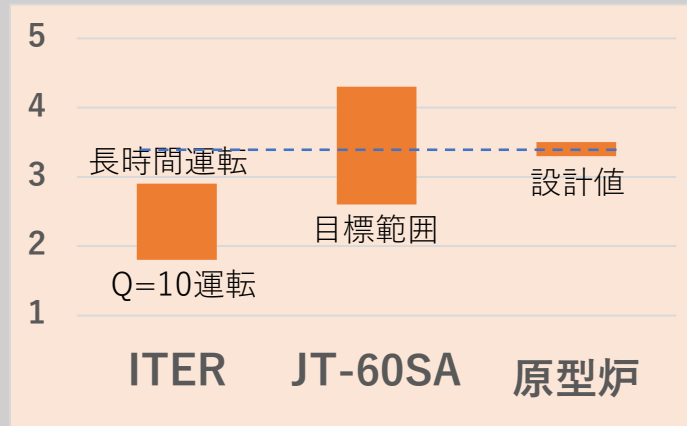


### ②プラズマ圧力指数 G

磁場で保持可能な最大圧力の指数

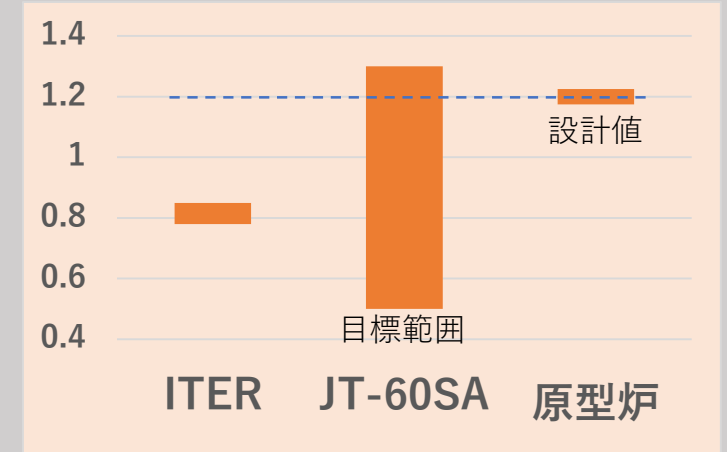
JT-60SAで同時達成の確認が可能。

ITERでも確認可能と思うが、ITERしかできない燃焼試験を優先。



### ③プラズマ密度指数 R

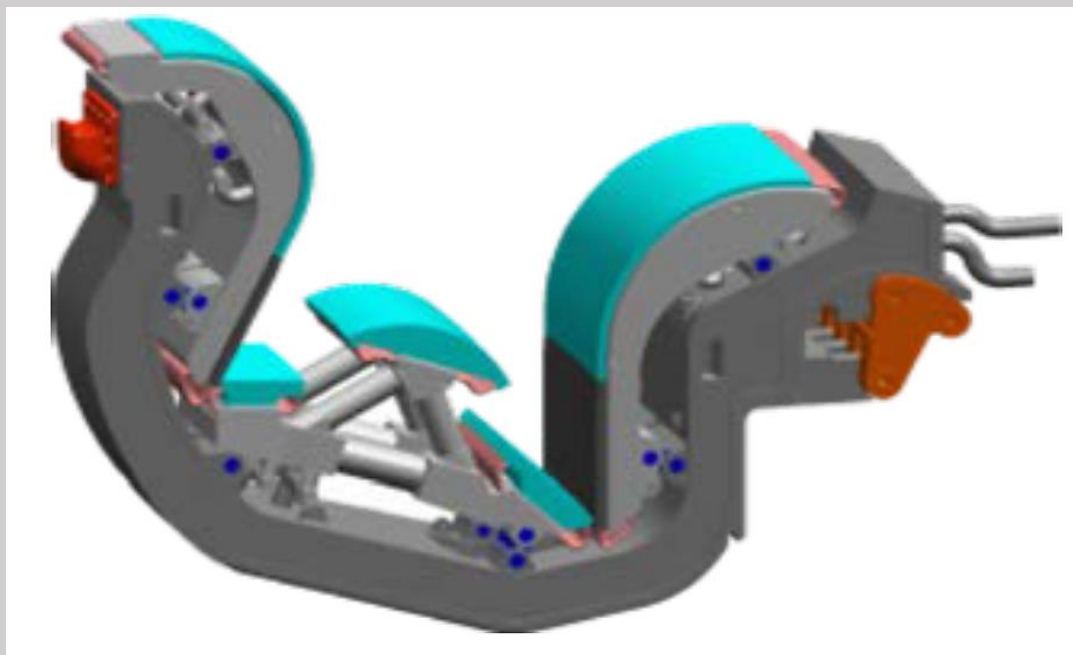
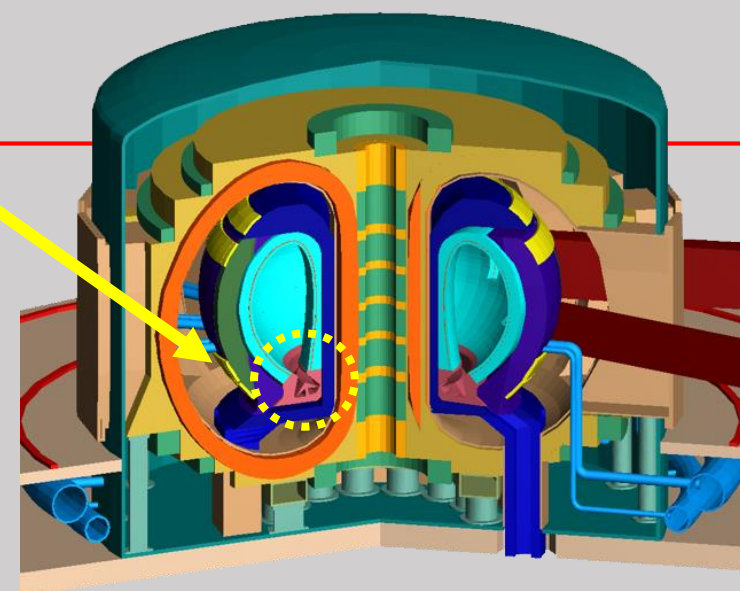
ITER設計基準(1.0)の改善指数





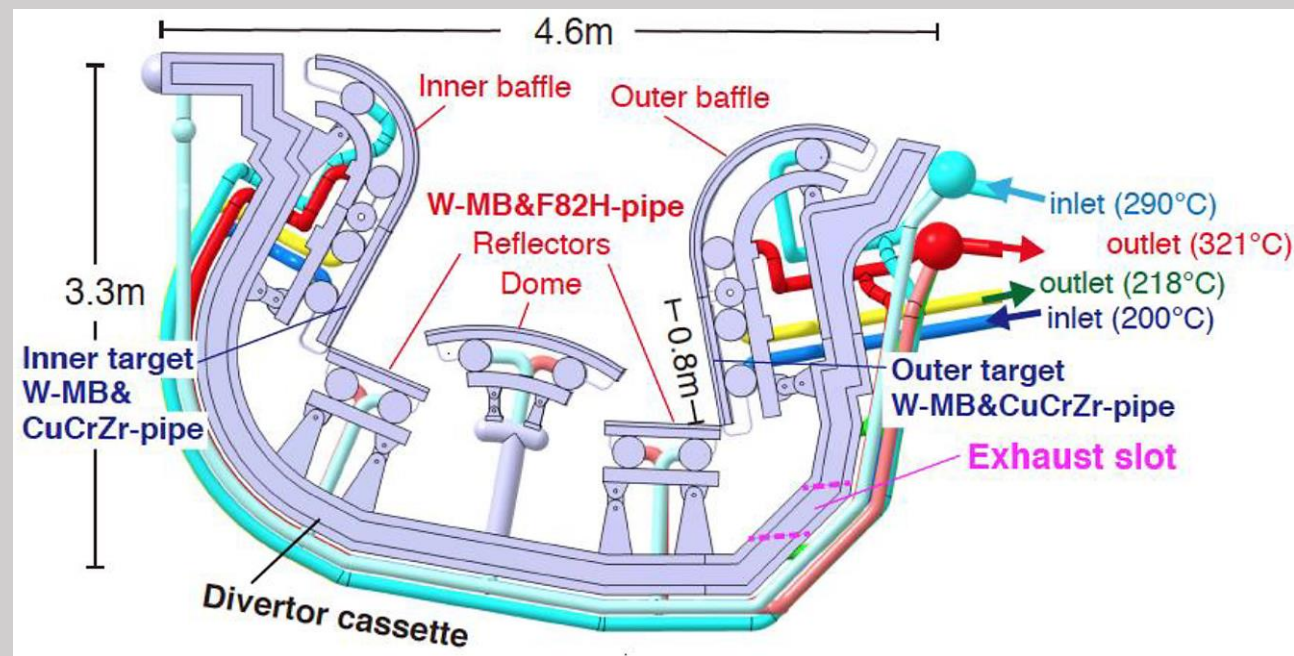
### ③原型炉の排熱部(ダイバータ)

原型炉排熱部設計は、ITERと同じ構造を踏襲する。  
ITERの熱条件（ $10\text{MW}/\text{m}^2$ 以下）と同じ条件になるように  
原型炉のプラズマを制御する。 この制御は、今後の  
ITERやJT-60SAでの実験で確かめることが必要。



ITERの排熱部

森 雅博、文部科学省、第10回核  
融合科学技術委員会、平成29年4  
月12日（水）、資料4より



原型炉の排熱部

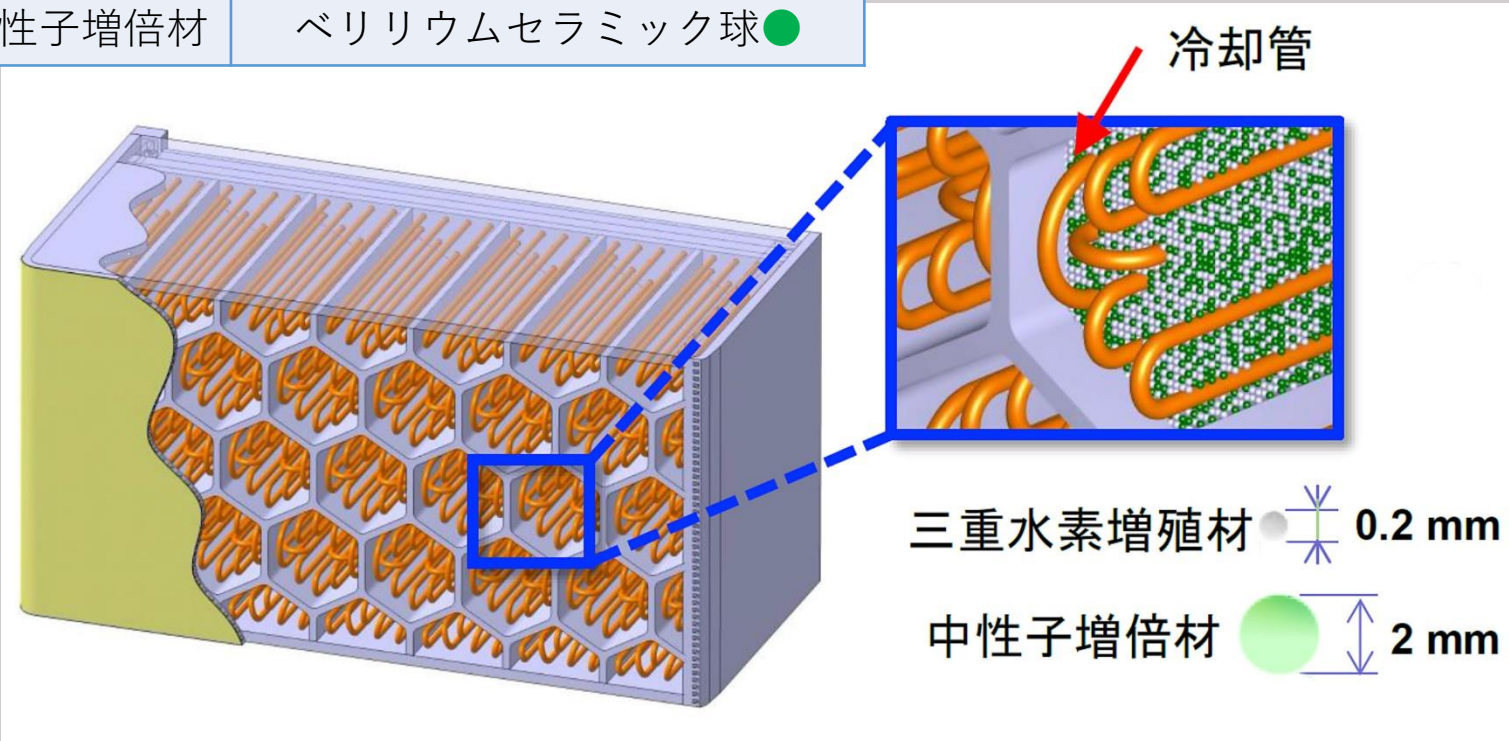
坂本宜照、文部科学省、第25回  
核融合科学技術委員会、令和3  
年6月24日、資料2-2より

## ④原型炉のブランケット

原型炉ブランケットは、ITERでテストする試験体と同じ材料で設計。

|               |              |
|---------------|--------------|
| 構造材           | 低放射化ステンレス鋼   |
| 三重水素の増殖       | リチウムセラミック球●  |
| 増殖率を上げる中性子増倍材 | ベリリウムセラミック球● |

ITERで性能を確認して  
原型炉の設計に反映する。



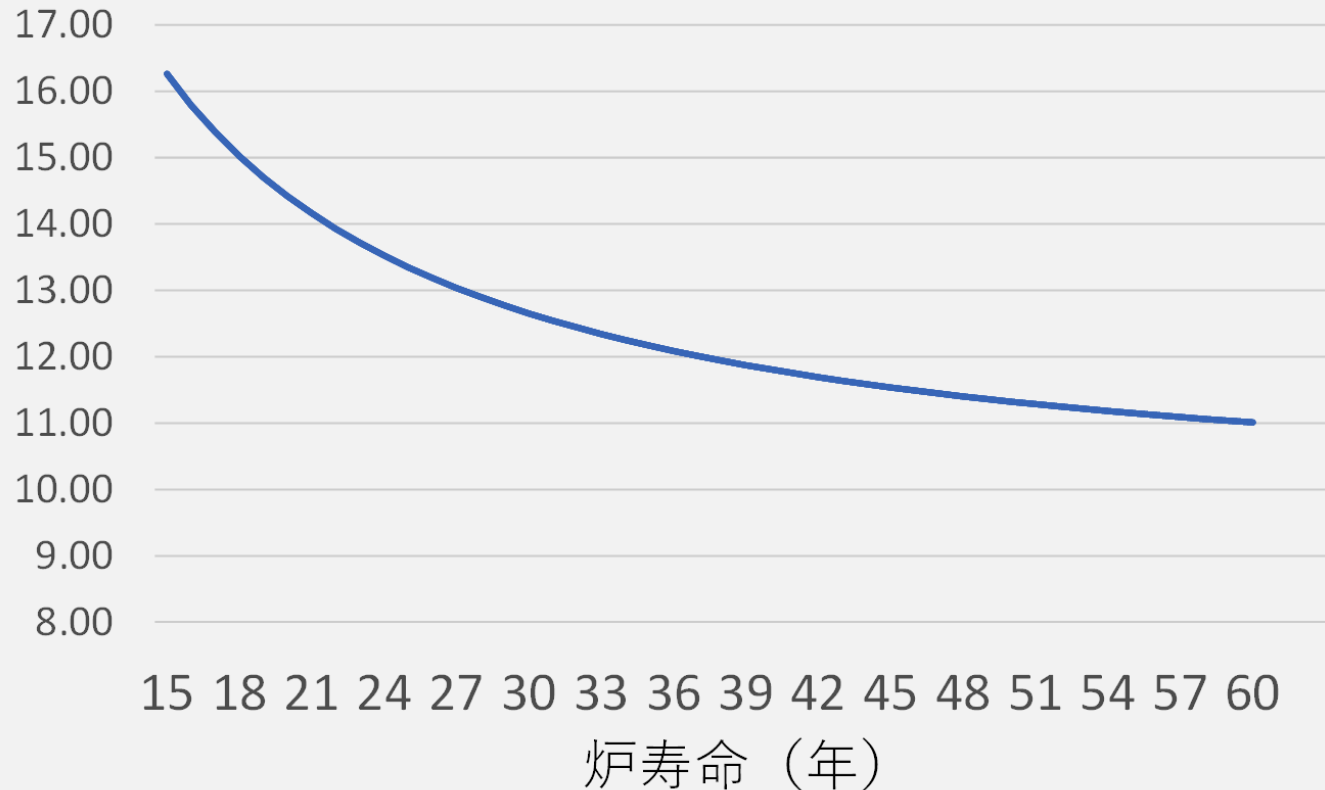
坂本宜照、文部科学省、  
第25回核融合科学技術  
委員会、令和3年6月24  
日、資料2-2より



# 実用炉の建設費と発電原価予測

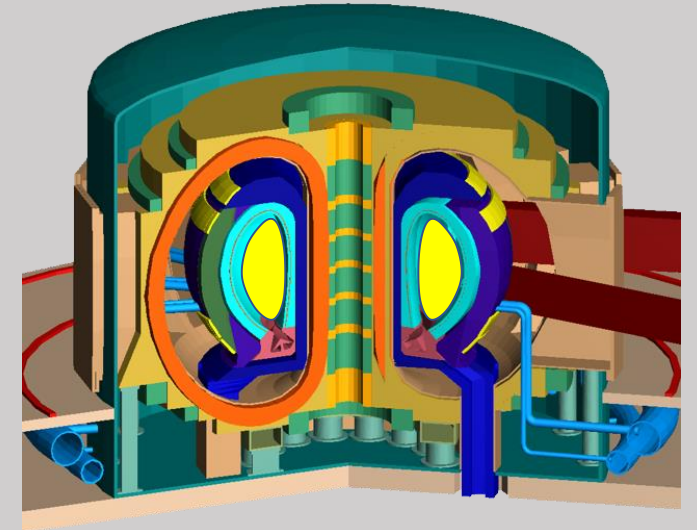
# 実用炉の発電原価

COE(cents/kWh)



| 炉寿命                  | 30 年 | 40 年 | 60 年 |
|----------------------|------|------|------|
| 発電原価<br>(cents/kW 時) | 12.7 | 11.8 | 11.1 |

2基併設なら10.2

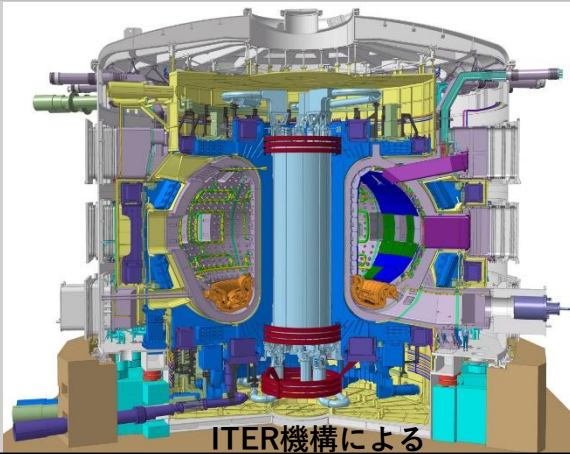


100万キロワット級実用炉概念、**CREST\***の例で、2019年の建設費解析をもとに、COEを予測。割引率2%、稼働率80%、保守運用費は総建設費の4%等を仮定

<https://ieei.or.jp/2022/06/exp1220629/>

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





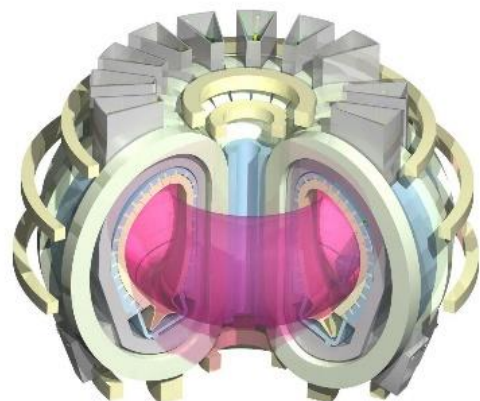
ITER機構による

**ITER**  
建設費と運用費総額  
2.5兆円

国際協力で同じものを各国で  
作っていたりするため高い

## 核融合炉の建設費

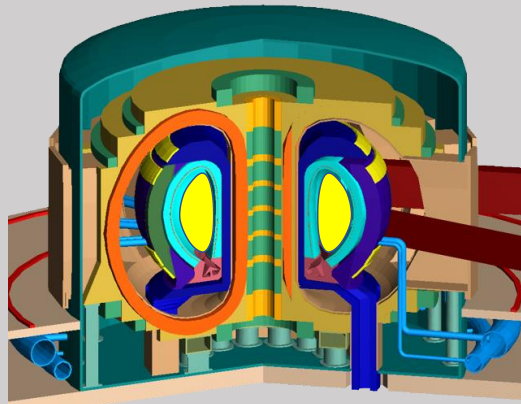
K. Okano et al., Nucl. Fusion **40**, 635 (2000).  
R. Hiwatari, T. Goto et.al., Plasma and Fusion  
Research: Letters Volume 14, 1305047 (2019)pp1-5.  
換算率を100円/\$としている。



量子科学技術研究開発機構

**原型炉**  
開発費を含む建設費  
～2兆円程度

国内に建設する認識



**実用炉**  
総建設費  
0.8～0.9兆円程度  
(送電端116万kW)

2基併設ならさらに-8%  
11.1⇒10.1cents/kWh

0.93兆円

21%

41%

38%

建屋等

発電設備等

炉本体

初号機

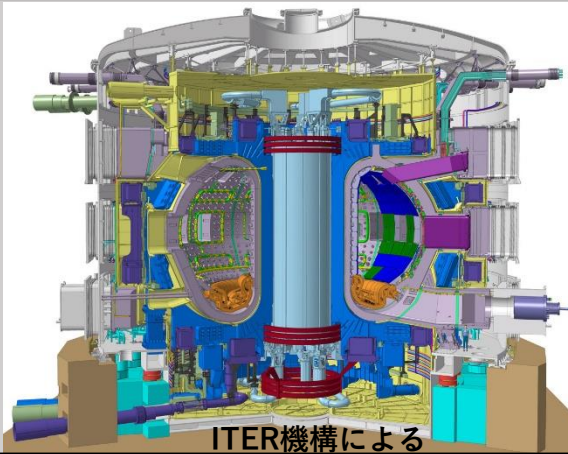
0.80兆円

24%

48%

28%

10基目



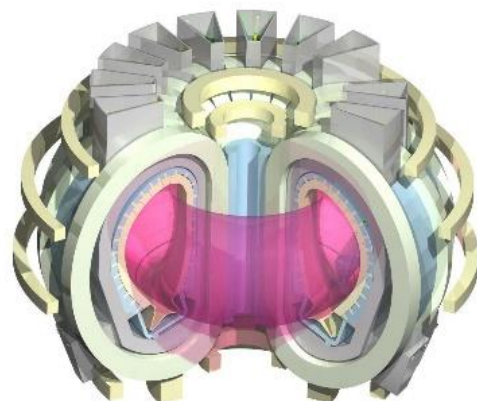
ITER機構による

**ITER**  
建設費と運用費総額  
2.5兆円

国際協力で同じものを各国で  
作っていたりするため高い

## 核融合炉の建設費

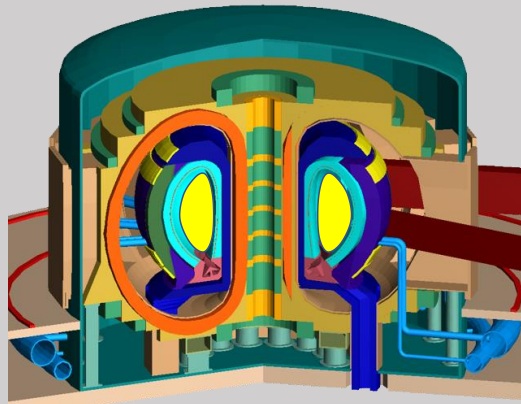
核融合炉には、**燃料サイクルの  
ための各種施設が国内外に不要。**  
この点は、総建設費には反映され  
ていないので、国全体では  
もっと割安である。



量子科学技術研究開発機構

**原型炉**  
開発費を含む建設費  
～2兆円程度

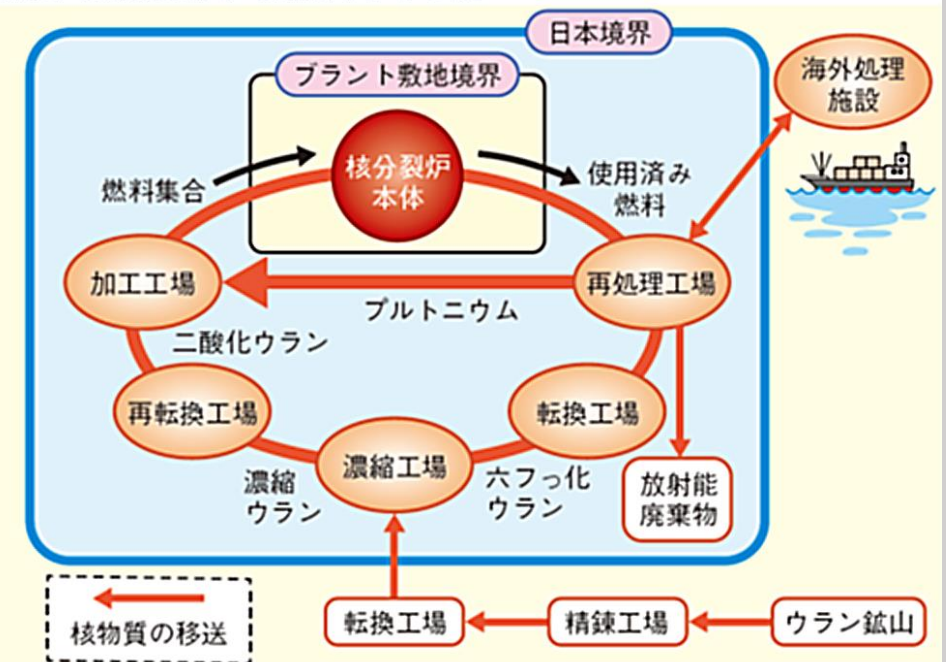
国内に建設する認識



**実用炉**  
総建設費  
0.8～0.9兆円程度  
(送電端116万kW)

2基併設ならさらに-8%  
11.1⇒10.1cents/kWh

### ▶ 原発（核分裂炉）の燃料サイクル



「核融合エネルギーのきほん」（誠文堂新光社刊、2021年）による。

# 過去のビッグ・イノベーション 期待されるイノベーション

要素技術で大発明がなくても、核融合炉はできるが、より低コストな核融合炉の実現に望まれるイノベーションはいろいろある。



# 要素技術のイノベーション例

①超伝導

②プラズマ

③排熱部（ダイバータ）

④ブランケット

# ①超伝導コイル 過去のビッグ・イノベーション

## ニオブスズ導体

ITER以前は、大型コイルといえばニオブチタン。10Tを超える強磁場が可能なニオブスズの実用化は、大きなイノベーションだった。



次は、強磁場の高温超伝導？

・・・ではない

コイルが太くなり小型にはならない（右下図）

磁場強度は支持構造材で決まっている。

同じ強度の材料だと磁場強度の二乗で太くなる。

高温の恩恵にはあずかれない

温度が高いと金属強度が落ちるので、  
高温超電導線も、液体窒素温度(-170℃)ではなく、  
ヘリウム冷却の -270℃ で使うしかない。

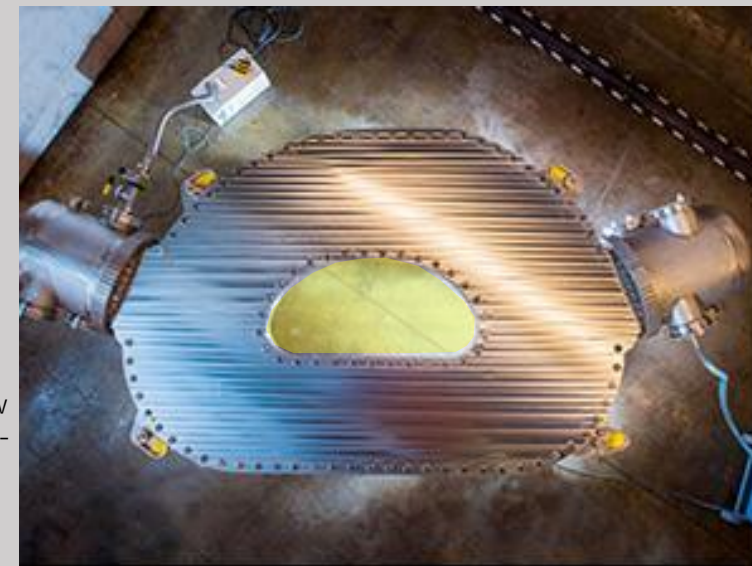
強磁場化には**極低温用の高強度金属**がまず必要

ITERの11.8T  
D型コイル



ITER機構

MIT開発の  
高温超電導20T  
D型コイル



<https://www.psfc.mit.edu/news/2022/mit-expands-research-collaboration-with-commonwealth-fusion-systems-to-build-net-energy>

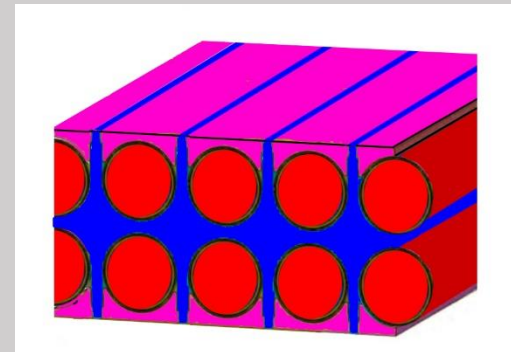
# ①超伝導コイル 期待のイノベーション

## 1) React & Wind

ニオブスズはセラミックスなので、焼くことで超伝導材線になる。焼いたあとは、変形に弱く、コイル枠に巻くことはできない。

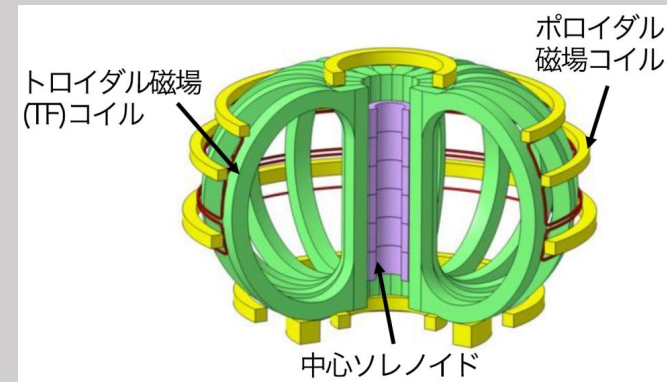
コイル形に巻く ⇒ 焼く (Wind & React) ⇒ コイル枠に入れる  
× コイルと同じ巨大オーブンが必要  
× 焼いたコイルに絶縁材を巻き、枠に高精度で入れるの大変

React & Wind (工場で焼いた超伝導線をコイル枠に直接巻ける) なら、大幅な製造コストダウンにつながる。



## 2) 長寿命絶縁材

超伝導コイルは、炉寿命中の交換しない。コイル寿命が炉の寿命。そのコイル寿命は、絶縁材の照射損傷で決まっている。耐放射線性の高い絶縁材があれば、運用期間延長につながる。





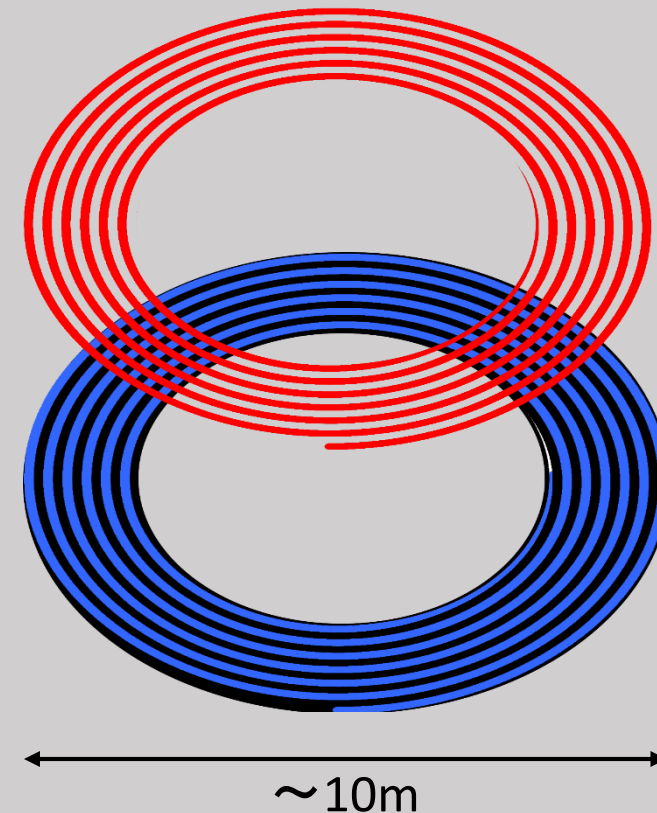
# ①超伝導コイル 期待のイノベーション

## 1) React & Wind

ニオブスズはセラミックスなので、焼くことで超伝導材線になる。焼いたあとは、変形に弱く、コイル枠に巻くことはできない。

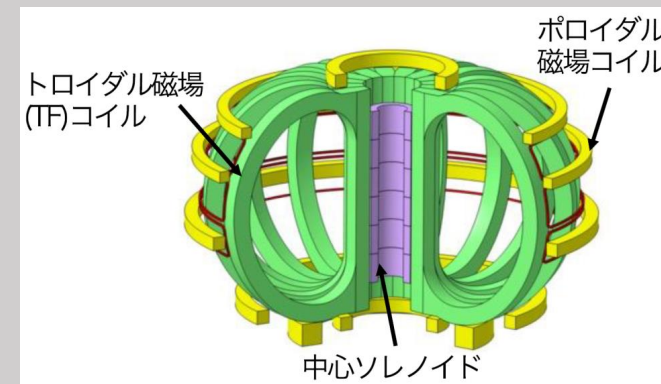
コイル形に巻く ⇒ 焼く (Wind & React) ⇒ コイル枠に入れる  
× コイルと同じ巨大オーブンが必要  
× 焼いたコイルに絶縁材を巻き、枠に高精度で入れるの大変

React & Wind (工場で焼いた超伝導線をコイル枠に直接巻ける) なら、大幅な製造コストダウンにつながる。



## 2) 長寿命絶縁材

超伝導コイルは、炉寿命中の交換しない。コイル寿命が炉の寿命。そのコイル寿命は、絶縁材の照射損傷で決まっている。耐放射線性の高い絶縁材があれば、運用期間延長につながる。



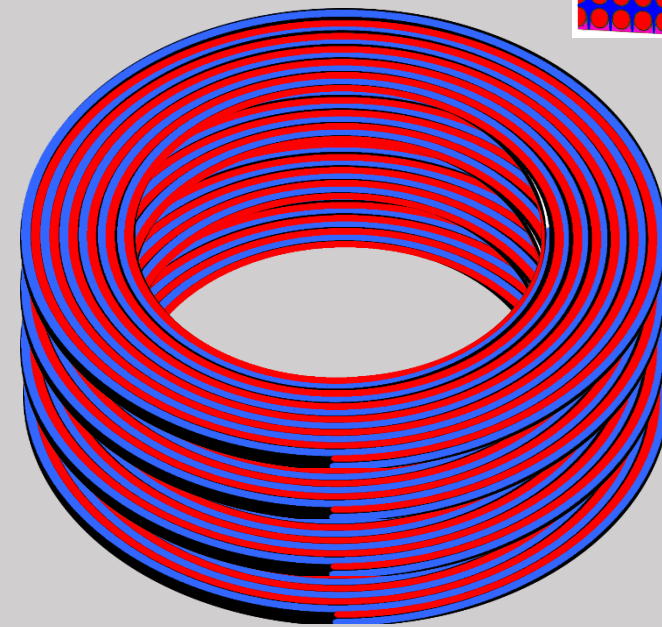
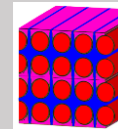
# ①超伝導コイル 期待のイノベーション

## 1) React & Wind

ニオブスズはセラミックスなので、焼くことで超伝導材線になる。焼いたあとは、変形に弱く、コイル枠に巻くことはできない。

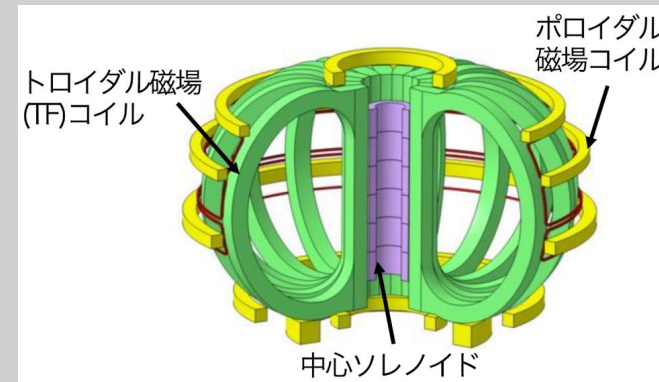
コイル形に巻く ⇒ 焼く (Wind & React) ⇒ コイル枠に入れる  
× コイルと同じ巨大オーブンが必要  
× 焼いたコイルに絶縁材を巻き、枠に高精度で入れるの大変

React & Wind (工場で焼いた超伝導線をコイル枠に直接巻ける) なら、大幅な製造コストダウンにつながる。



## 2) 長寿命絶縁材

超伝導コイルは、炉寿命中の交換しない。コイル寿命が炉の寿命。そのコイル寿命は、絶縁材の照射損傷で決まっている。耐放射線性の高い絶縁材があれば、運用期間延長につながる。



# 要素技術のイノベーション例

①超伝導

②プラズマ

③排熱部

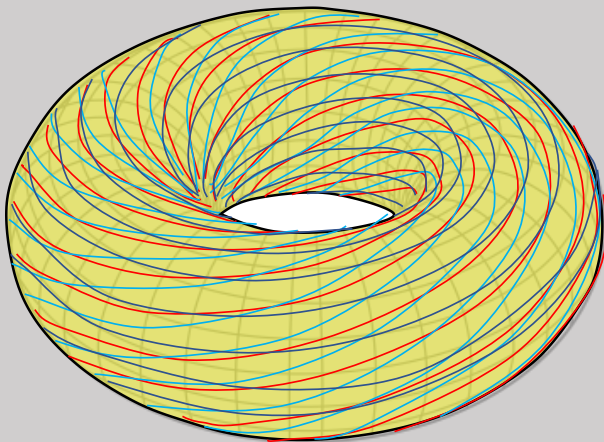
④ブランケット



## ②プラズマ 過去のビッグ・イノベーション

**トカマクの発明** 1950年代に旧ソ連で発明、tokamakは「電流」の意味

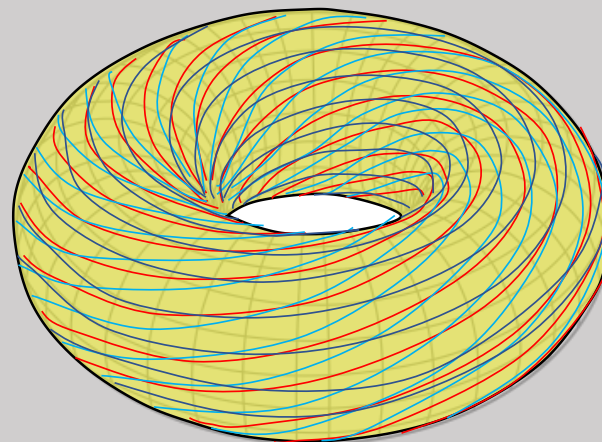
### トカマク型



#### ITERもトカマク型

コイルとプラズマ中の電流が作る磁場の合成で磁力線をねじる。  
電流があることで強い自己制御性があり、閉じ込め性能が高い。  
限界を超えると自己制御性を突然失う。

### ヘリカル型

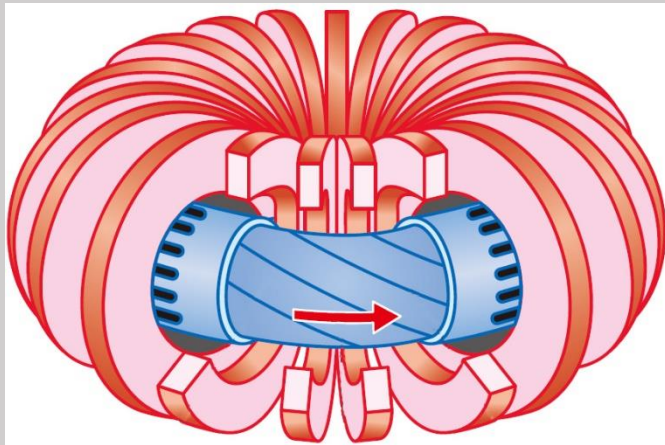


コイルだけで磁場をねじる。  
電流による自己制御性はないので、それを失うこともない。  
高精度なねじれコイルが必要。

## ②プラズマ 過去のビッグ・イノベーション

**トカマクの発明** 1950年代に旧ソ連で発明、tokamakは「電流」の意味

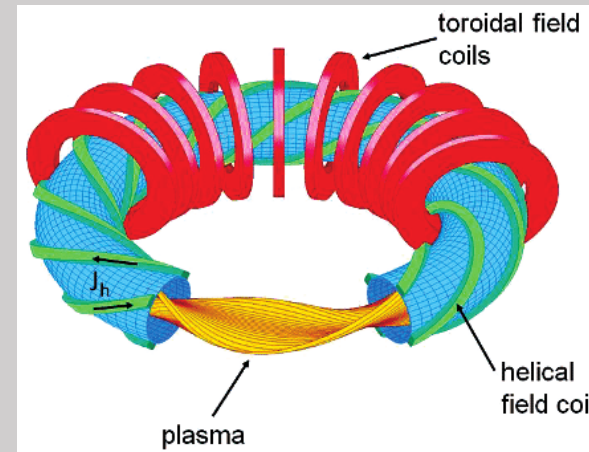
### トカマク型



#### ITERもトカマク型

コイルとプラズマ中の電流が作る磁場の合成で磁力線をねじる。  
電流があることで強い自己制御性があり、閉じ込め性能が高い。  
限界を超えると自己制御性を突然失う。

### ヘリカル型



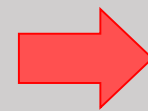
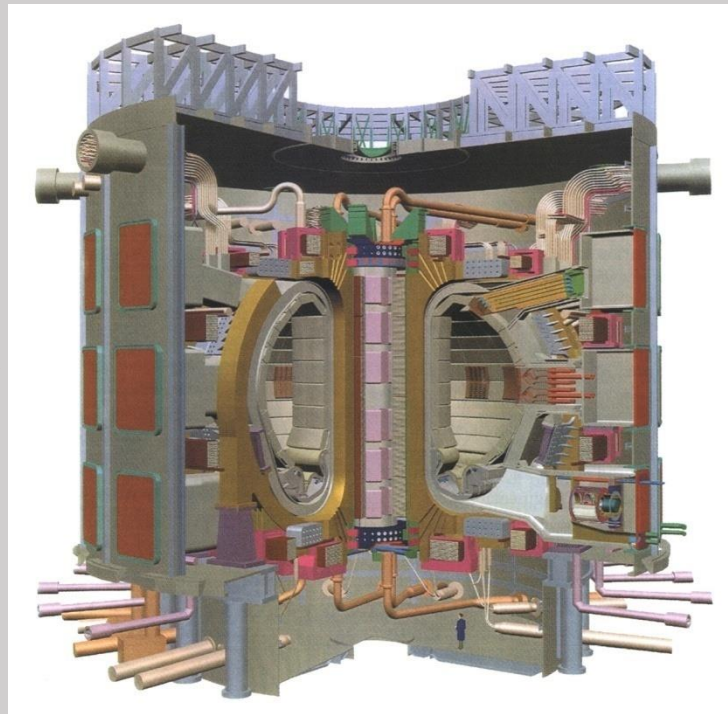
コイルだけで磁場をねじる。  
電流による自己制御性はないので、それを失うことはない。  
高精度なねじれコイルが必要。

## ②プラズマ 期待のイノベーション

### ITERによる核燃焼プラズマ

核融合自己加熱50%以上で1億°Cを維持  
燃焼灰のヘリウムを連続排気しつつ、燃料は閉じ込めて連続燃焼を維持  
確実にできると思うが、過去の実験にはなかった大きな転換点

加熱パワー



10倍以上の  
パワー（熱）

熱出力50万kW



# 要素技術のイノベーション例

①超伝導

②プラズマ

③排熱部(これ以後、ダイバータ)

④ブランケット

### ③ダイバータ 過去のビッグ・イノベーション

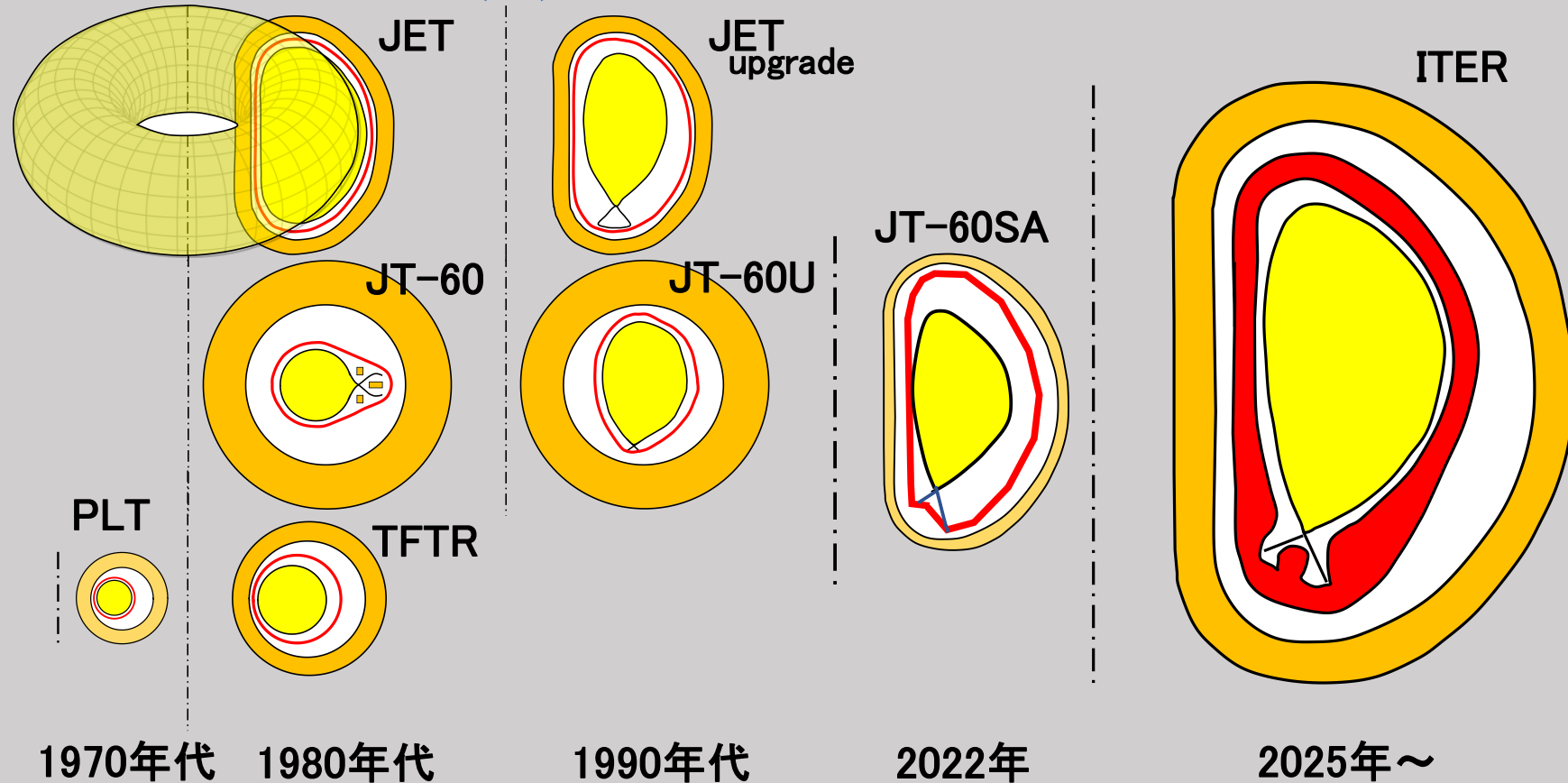
#### Highモード（Hモード）

磁力線を排熱部に誘導するのをダイバータ構造といい、今は、排熱部の代名詞。

1980年代、上下非対称は良くないと思っていたが、下付きの非対称ダイバータで閉じ込め性能が2倍になるのをドイツの装置で発見。

Hモードがなければ磁場で核融合炉はできなかったかもしれない。

下付きダイバータによって閉じ込め性能が2倍



### ③ダイバータ 期待のイノベーション

右上図：坂本宜照、文部科学省、  
第25回核融合科学技術委員会、令  
和3年6月24日、資料2-2より

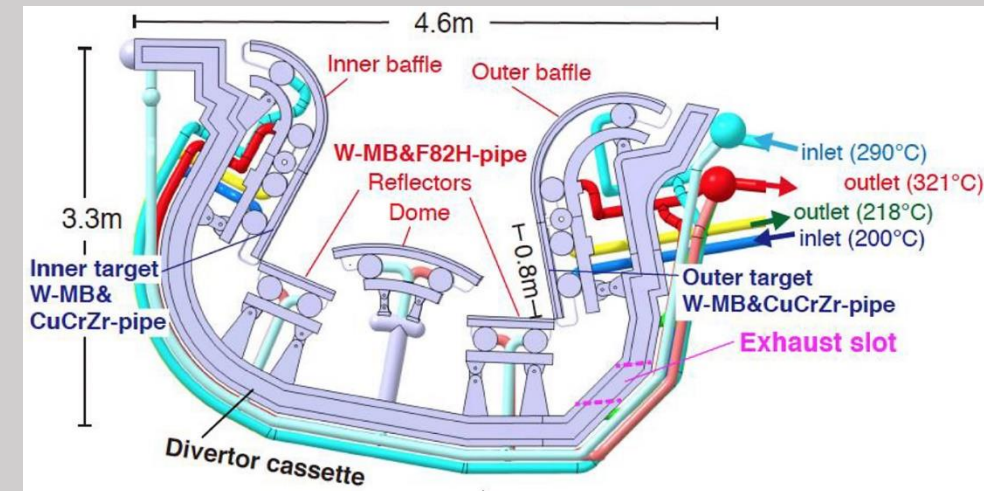
#### 1) 熱伝導率が高く中性子に強い合金

核融合出力はダイバータの冷却で制限される。

ロケットノズル並みの熱量がくる。

- 表面はタングステン (W) タイル (割れやすい)
- 裏は熱伝導率が高い銅合金パイプ (照射下で短寿命)

傾斜材料のような、熱を伝えやすく、割れにくい材料があれば、さらに多くの熱を冷却でき、高出力化が可能。



#### 2) 排熱部に来る前に冷やす

排熱部にくる前に放射させて冷やし、排熱部の熱負荷を低減。

プラズマ制御の問題なので、  
JT-60SA/ITER/原型炉 + スパコンシミュレーション  
で最適なプラズマを開発する。  
実現すれば、さらに高出力の核融合炉が可能。

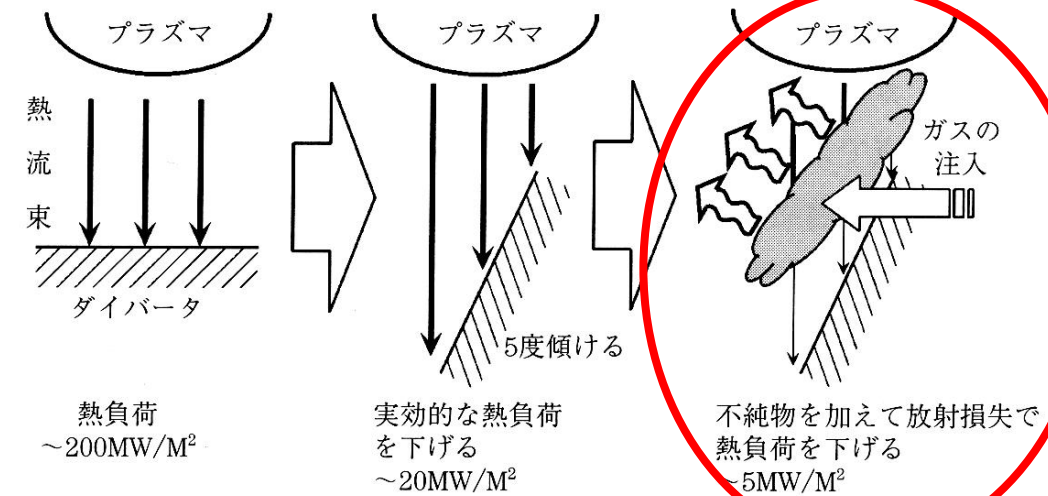


図 12.4 ダイバータに入る熱の大きさ



# 要素技術のイノベーション例

- ①超伝導
- ②プラズマ
- ③ダイバータ
- ④ブランケット

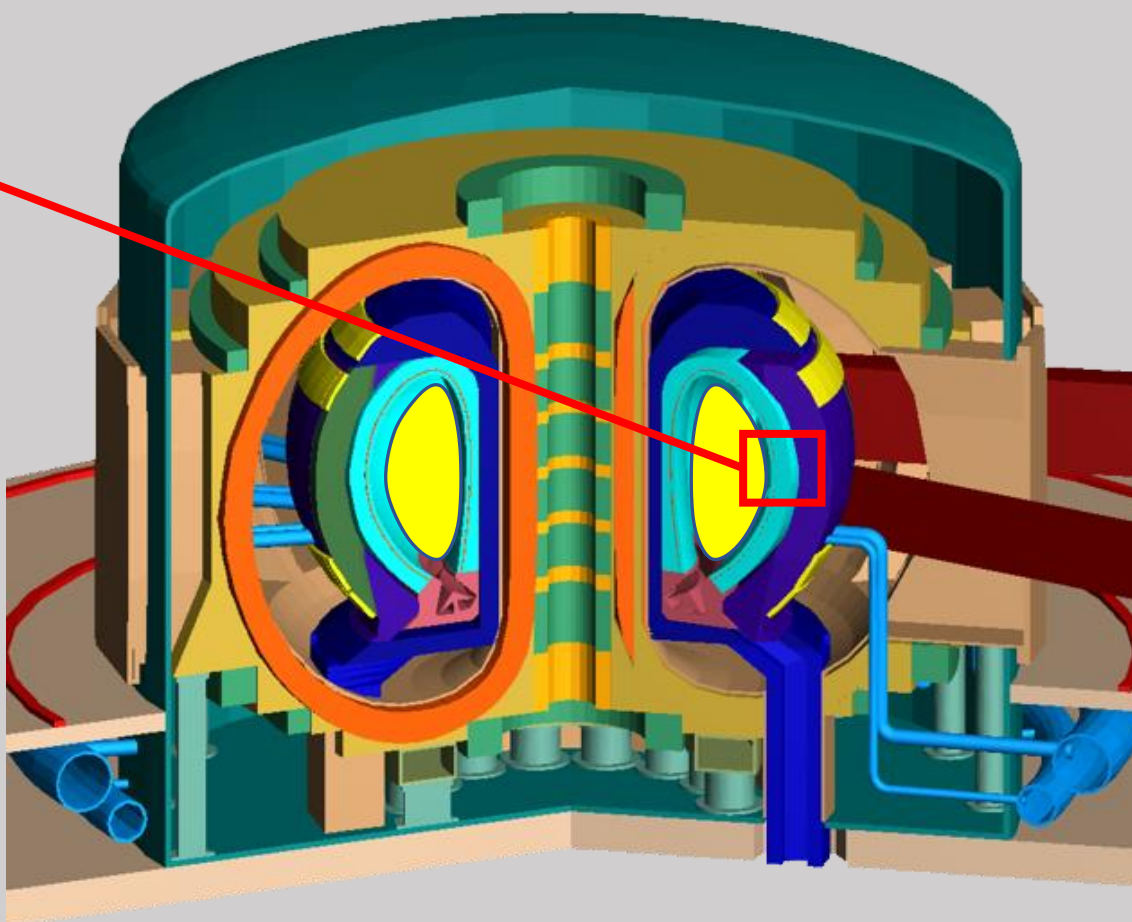
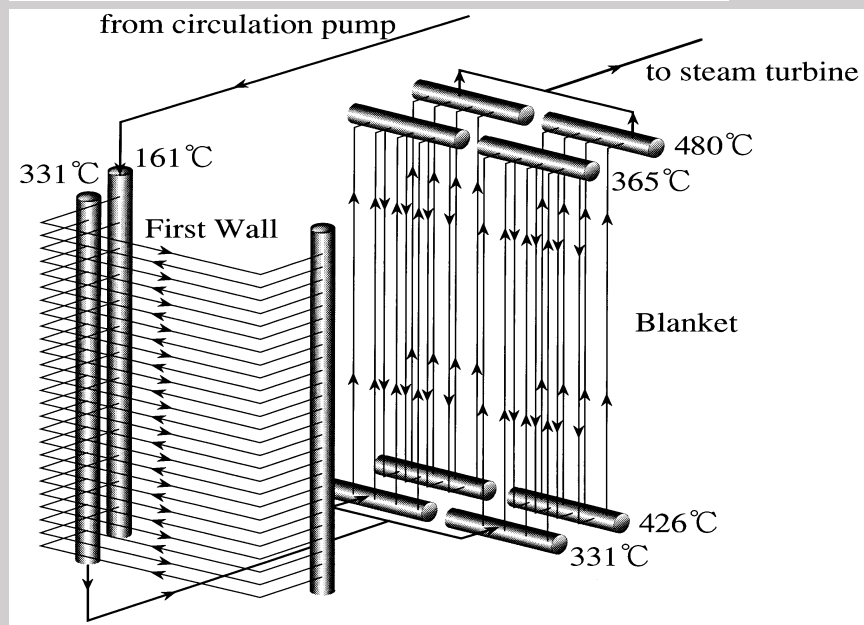
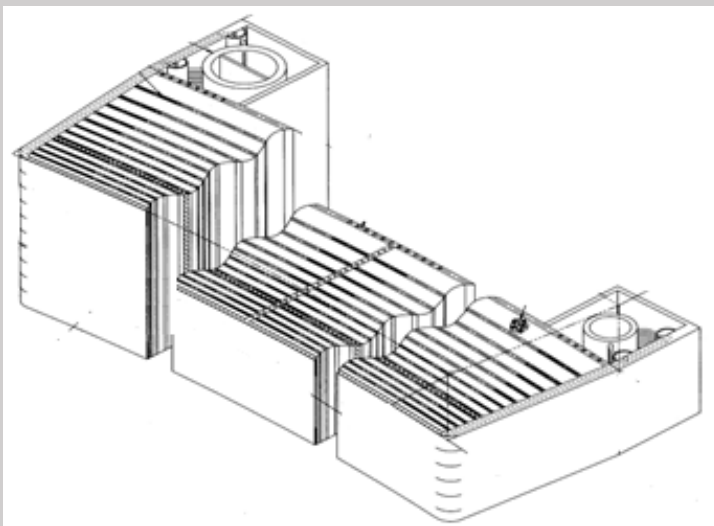
## ④ブランケット 過去のビッグ・イノベーション

冷却効率、耐電磁力強度、燃料増殖率の同時達成

右図：坂本宜照、文部科学省、第25回核融合科学技術委員会、令和3年6月24日、資料2-2より  
左図：K.Okano, Z. Asaoka, T. Yoshida, et.al., Nuclear Fusion, Vol.40, No.3 (2000), pp.635-645

かつての設計（～2015年）

電磁力に対する強度に余裕がとれない。壁厚みを増すと増殖率が下がるジレンマ。

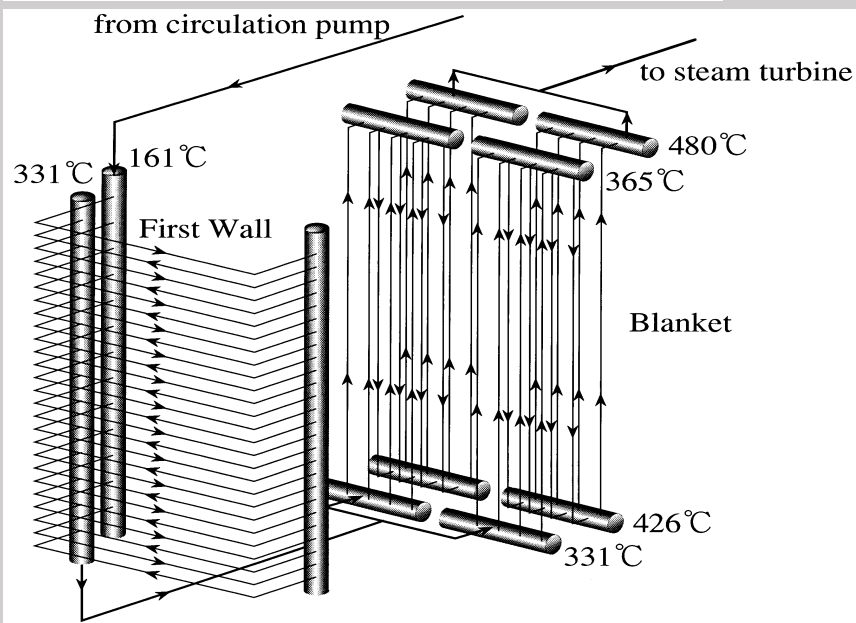
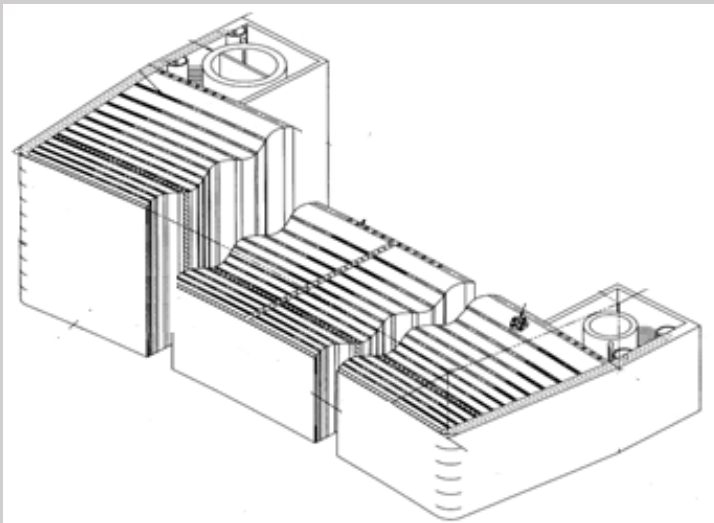


# ④ブランケット 過去のビッグ・イノベーション

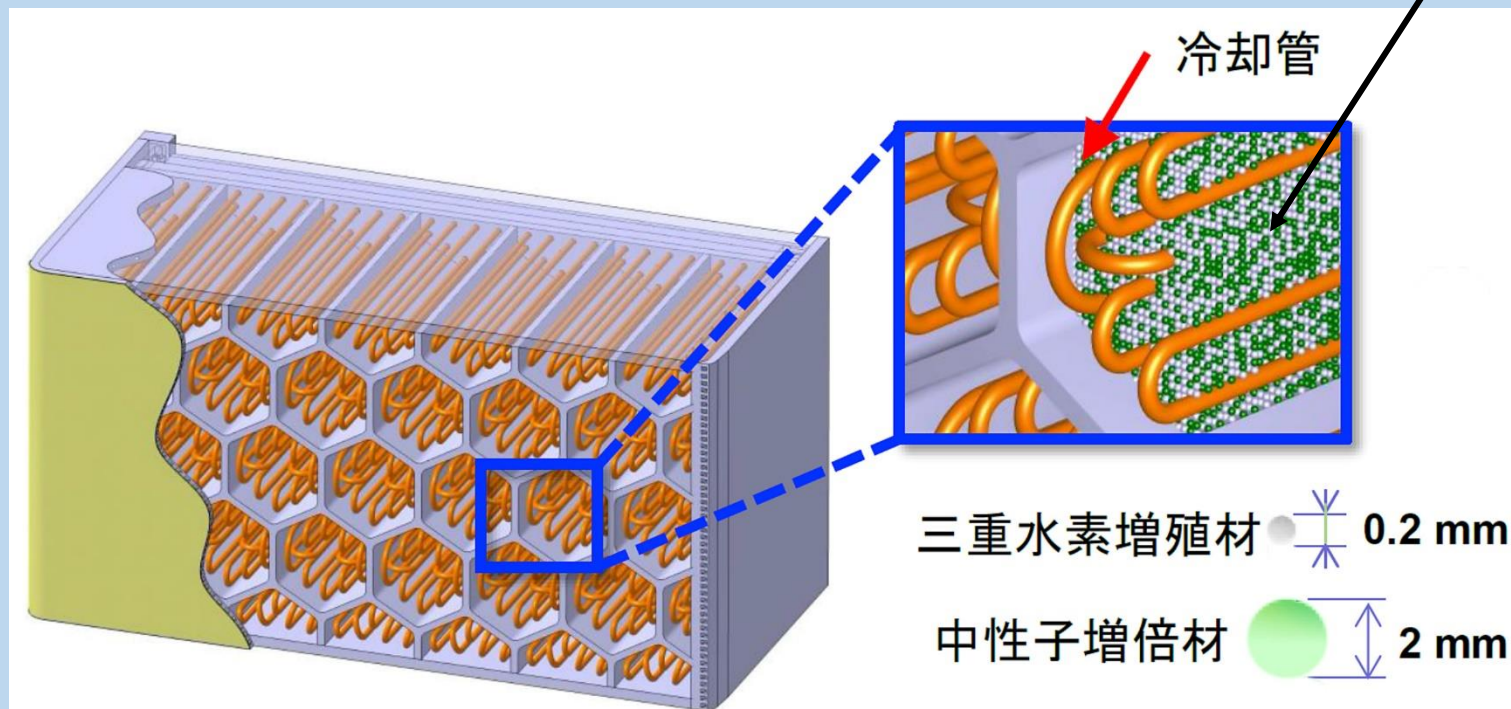
## 冷却効率、耐電磁力強度、燃料増殖率の同時達成

右図：坂本宜照、文部科学省、第25回核融合科学技術委員会、令和3年6月24日、資料2-2より  
左図：K.Okano, Z. Asaoka, T. Yoshida, et.al., Nuclear Fusion, Vol.40, No.3 (2000), pp.635-645

かつての設計（～2015年）  
電磁力に対する強度に余裕がとれない。壁厚みを増すと増殖率が下がるジレンマ。



最新の設計  
冷却流路方向の変更、レイヤ構造を六角筒に変更  
増殖率は落とさず強度を改善。





## ④ブランケット 期待のイノベーション

### 1) 液体金属冷却

液体金属冷却（リチウムまたはリチウム鉛）に変更できると、冷却材が、燃料増殖材を兼ねられ、構造は非常に単純化する。

課題 ①材料との共存性 新しい合金が必要。  
②磁場の中で液体金属は流せない  
レーザー核融合なら使える。冷却管内部を絶縁すれば使える。

### 2) セラミックス構造材＋ガス冷却

SiC（シリコン・炭素）セラミックスが期待されている。  
高温で使えるので高温ガス冷却が可能  
強磁場でも電磁力を受けない。

課題 ①溶接加工ができない  
②金属のように溶かして再利用は無理

イノベーションには期待するが、まずは、原型炉も実用炉も、水で冷やすのが日本の第1オプション。

原型炉では、液体金属冷却、セラミック＋ガス冷却もテストできる場所を用意しており、間に合えば、初代実用炉に使う。

1億度もあるのに、お湯を沸かすの？  
というのは、よくある質問。

全ては、材料との共存性が支配する。  
現時点で可能なのは、水冷却と判断している。

超臨界・超々臨界条件で設計しないのは、放射線環境下での材料との共存性が悪いとわかったから。  
材料開発で、解決できる可能性はある。

熱効率 33.3% ⇒ ～45%

# 昨年末の米国のレーザー核融合の発表について

# 磁場方式(トカマク)での臨界条件達成の記録 (ゲイン $Q > 1$ )

JT-60U (日本)

Q=1.0 (DD模擬) 1991年

Q=1.25 (DD模擬) 1997年

JET (欧州)

Q=1.1、(DD模擬) 1991年

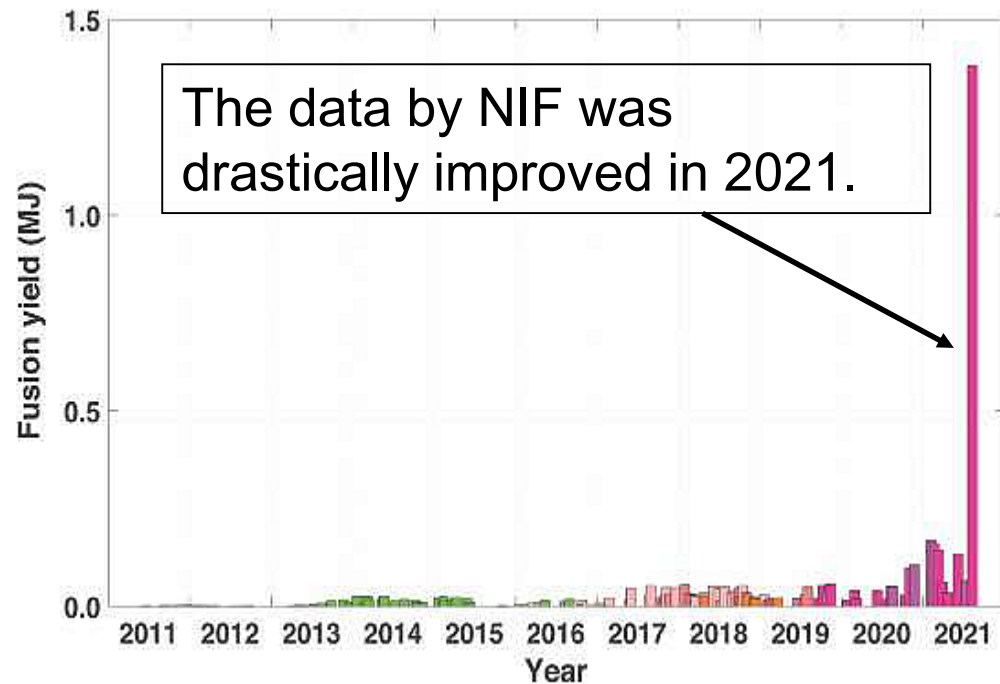
Q=0.7、22MJ、4秒 (DT) 1997年

Q=0.33、59MJ、5秒 (DT) 2021年

ITERは、DT燃焼で $Q=10$ を達成予定。



# National Ignition Facilityによるレーザー核融合の成果



## 発生した核融合エネルギー

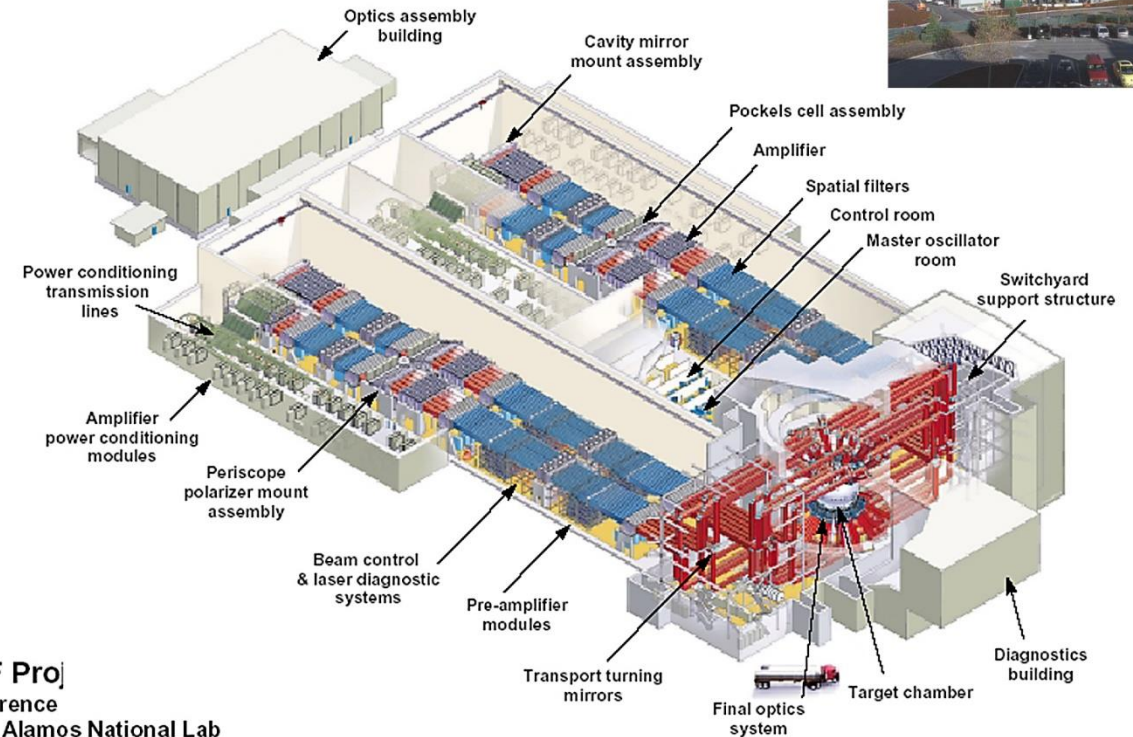
2003～2020年 レーザーエネルギー × 0.1

2021年 レーザーエネルギー × 0.7  
1.35MJ

2022年 レーザーエネルギー × 1.5  
3.15MJ

ただし、建設時の目標は5～10倍

## The National Ignition Facility



NIF Proj  
Lawrence  
Los Alamos National Lab  
Sandia National Lab  
Univ. of Rochester/Lab for Laser Energetics

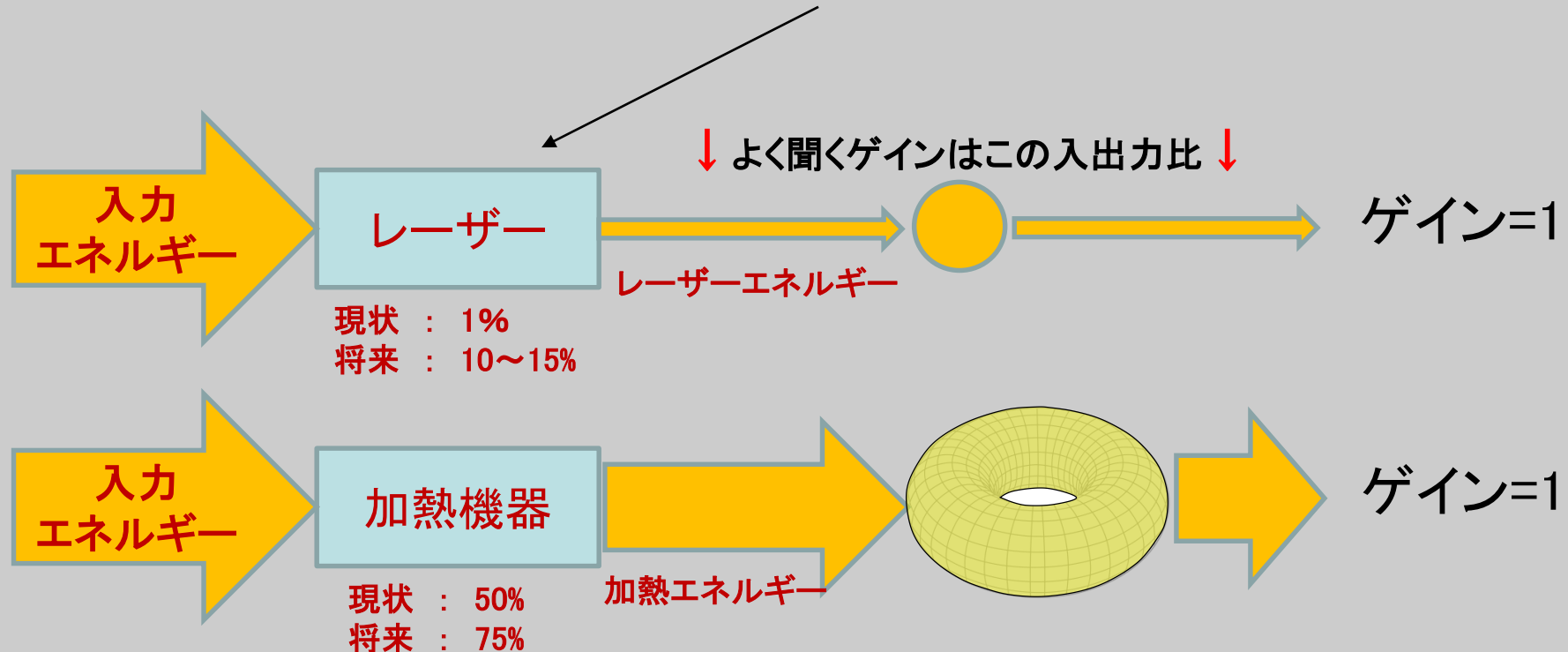
John Woodruff - 2

「入力より大きなエネルギーを生み出した」は本当？

核融合の利得(以下ゲイン)

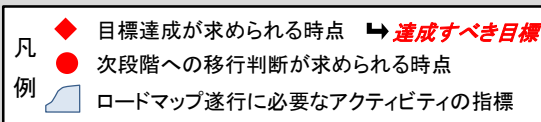
レーザー方式はパルス、磁場は連続的だが、瞬間エネルギーで比較することになれば、ゲインとして比較は可能。

それでも同等に比較するのに無理があるのは、電気効率の差による



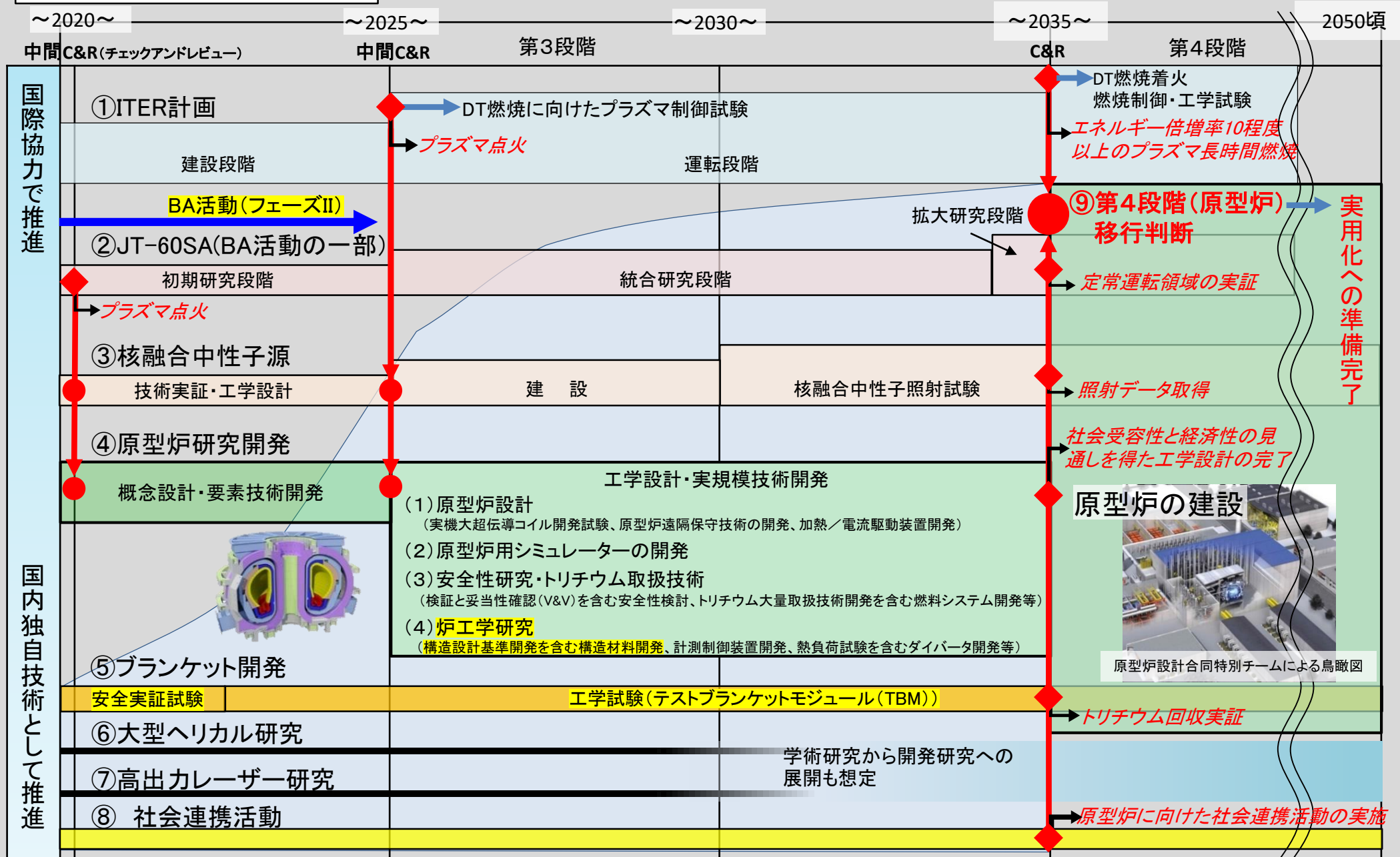
この効率の差から、実用炉に向けたゲイン目標は  
磁場方式: 30程度    レーザー方式: 100~200。

(このスライドは空白です)



# 日本の原型炉研究開発ロードマップ

文科省2018年発表 [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm)





# 中国の核融合開発計画

日本の計画は、「ITERが成功裏に終わるまでは先に進めない」という考えに制約されている。

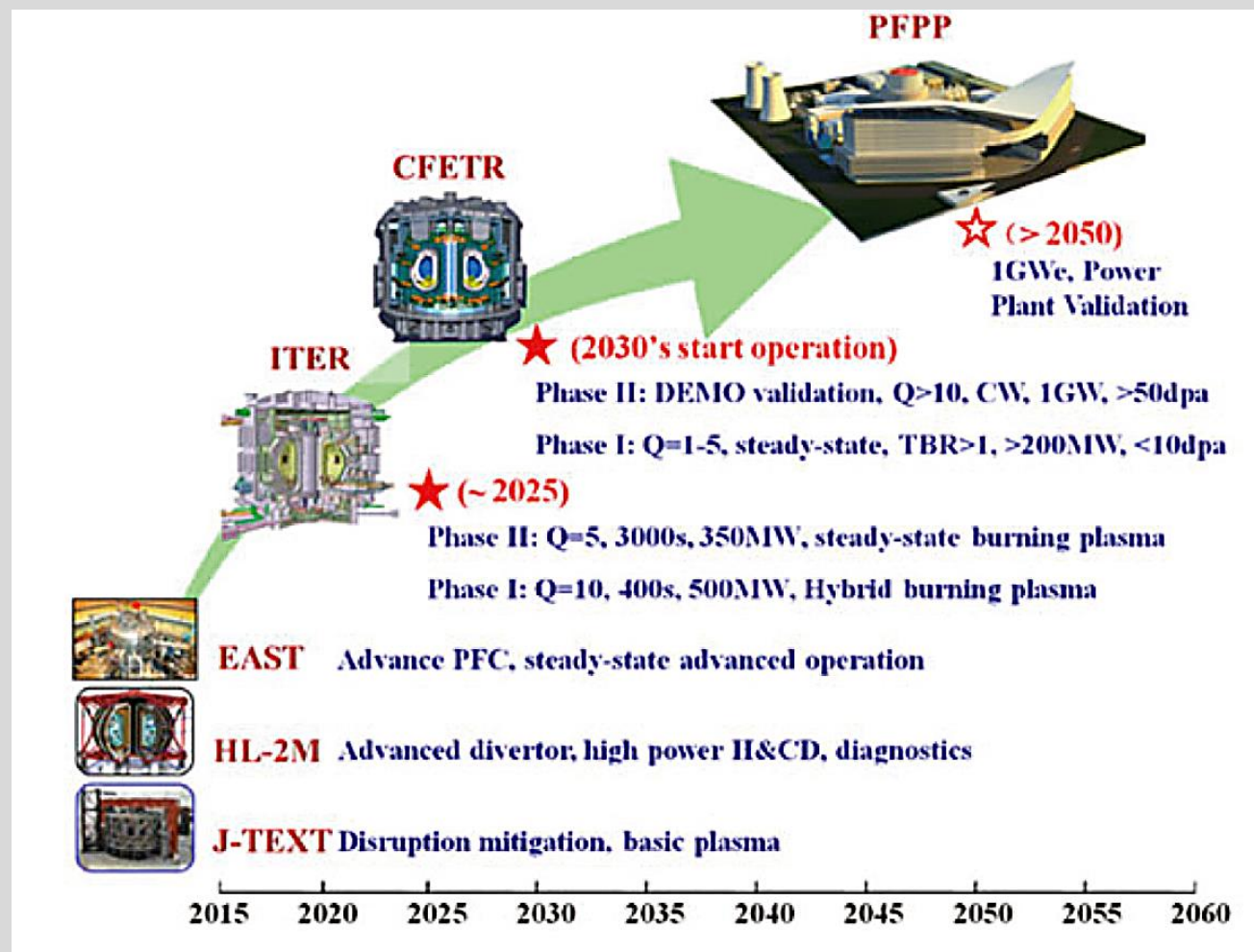
中国は、「ITER建設で得た知見で原型炉の建設には十分」との考え。

「ITERの成功を待たないで、ITER完成後、すぐにも大型原型炉を建設し、2030年代に運用を開始する」

小型炉には興味を示していない。

中国の方が先に核融合炉を開発し、この分野で優位に立つ可能性は高いように思う。

日本も、政府の主導で早く原型炉段階に入るべき。予算を付けて本気度を国が見せれば産業界やベンチャーもきっとついてくる。技術は、現時点では日本の方が上に思うが、ITERの成功まで座して待っていたら、中国に置いて行かれる。



CFETRの設計: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/fec2018-preprints/preprint0216.pdf>

図は、Yuanxi Wan et al.: "Overview of the present progress and activities on the CFETR", Nuclear Fusion, Vol.57, 102009 (17pp) (2007) による。

# 中国のEAST

JT-60SAよりだいぶ小型とはいえ、  
2021年には、1.2億度を101秒、0.7億度を1000秒以上。

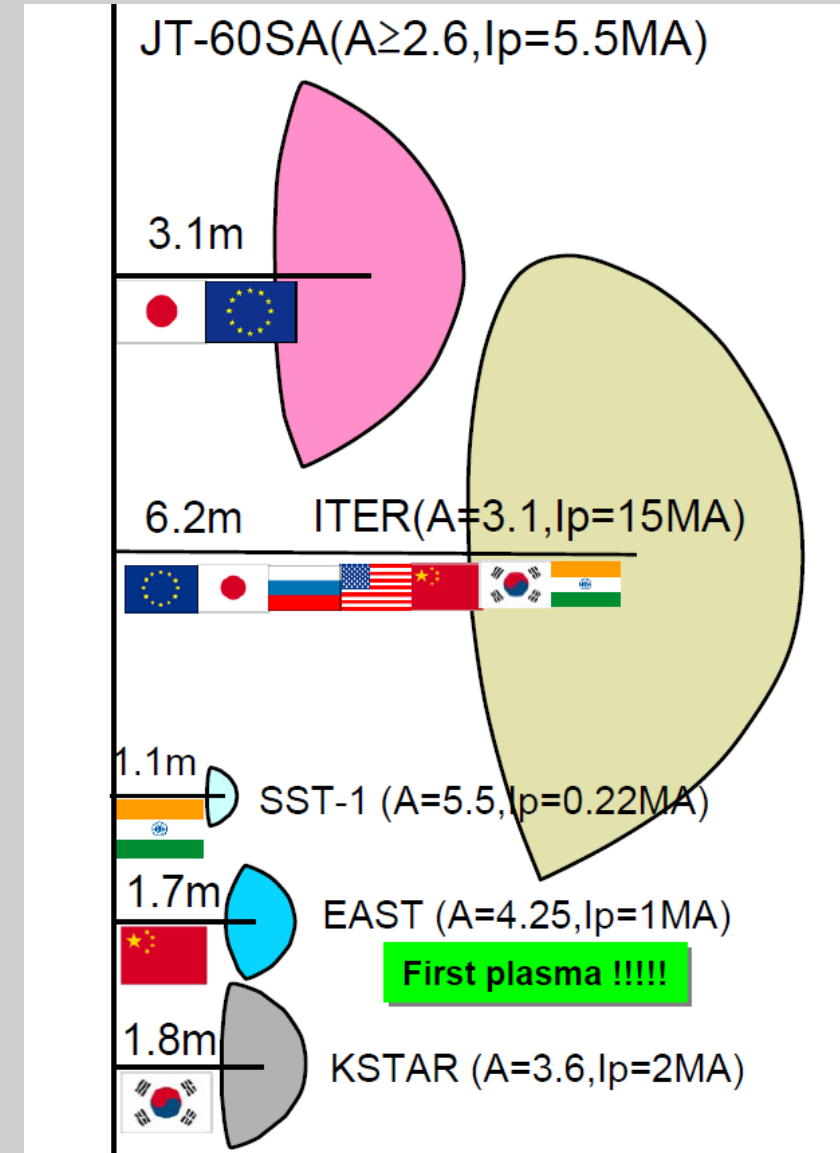
密度は薄く、DTではないので中性子が出ないが、

@1000秒以上の加熱・電流駆動入力を維持した

@高温プラズマを維持した

@その間、ダイバータの排熱に成功した

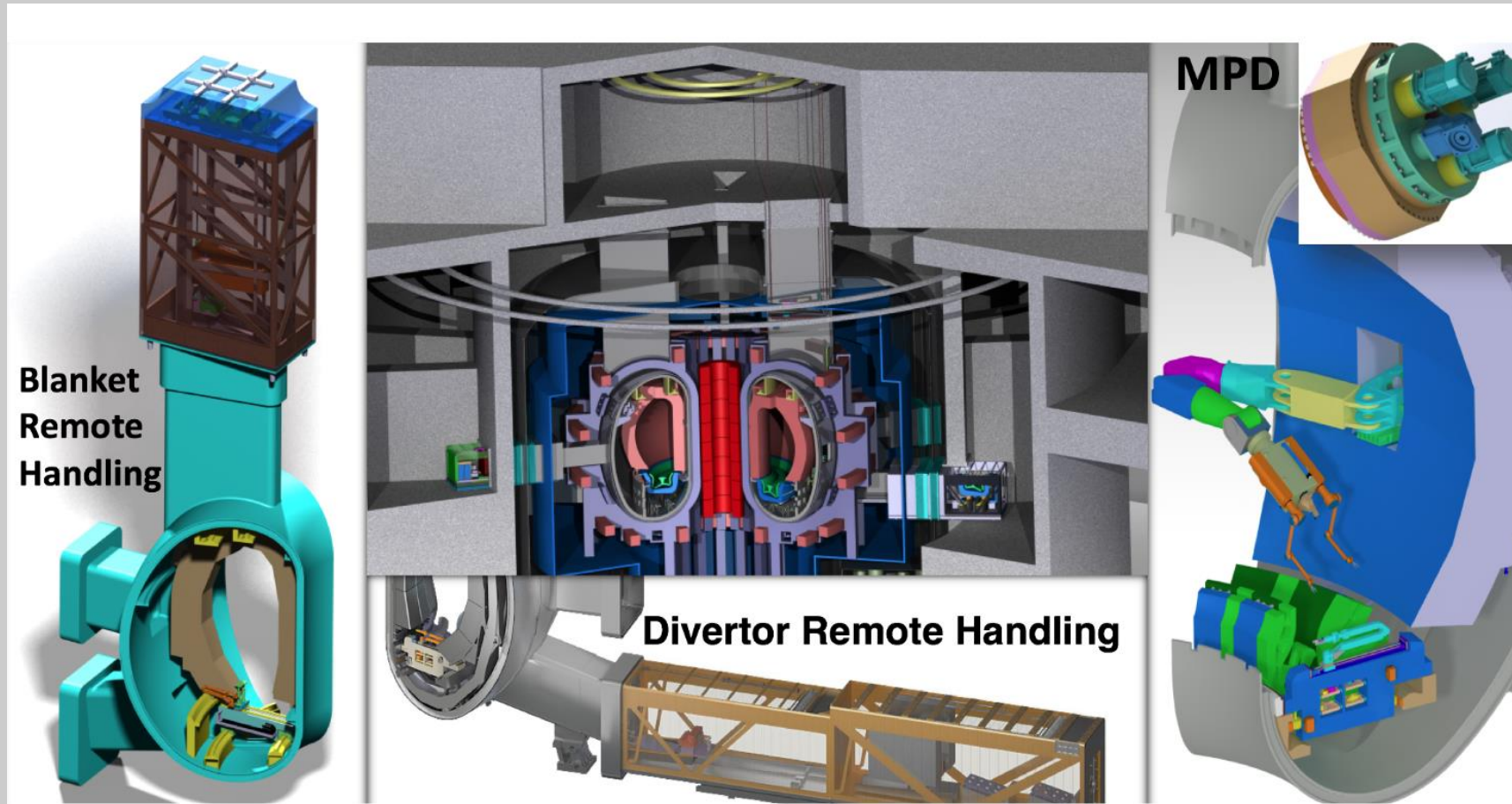
決して大発明で奇跡を起こしたわけではなく、堅実な  
進歩をしている。



<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/6876.pdf>

# 中国の原型炉案 CFETR

中国のCFETRは、炉設計の専門家の目で見ても、炉本体だけでなく、メンテナンス方法から、建屋まで、実現性を考えて綿密に設計しているのがわかる。



# まとめ

- @大発明がなくても原型炉はできるが経済性をあげるイノベーションは色々ある
- @日本は原型炉を自国単独でも建設できる技術をすべて持つ（他は中・欧）
- @米国のレーザー核融合の成果は、立派であるが、いささか成果を誇張しすぎ。  
計画本来の目標、ゲイン $>5$ は達成できていない（見込みはありそう）。
- @日欧が投資に躊躇する中、中国が大型の原型炉計画を進めようとしている
- @日本も政府主導で早く原型炉段階に入るべき



停止せず福島のように？

そうはならない

# 停止せず福島事故のように？

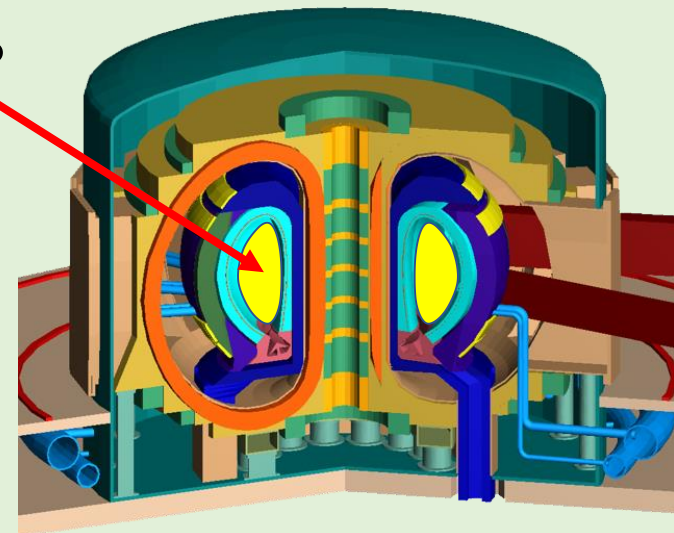
核発熱で

①福島事故は核分裂は止まった。その後冷却ができずに燃料棒が溶けた。核分裂の暴走ではない。爆発も水素ガスの化学的爆発。

②原発は炉心に約1年分の燃料があるので、核分裂が止められない最悪の場合もありえる。(チェルノブイリ)

①核融合炉の燃料は一億度のプラズマ。燃料が「溶ける」ことはそもそもない。

②核融合炉は燃える分だけの燃料を供給しながら運転している。燃料供給が止まれば停止。



# 停止せず福島のように？

2枚目

燃料が止まらなかったらどうなるの？

燃料供給も、電源も、磁場も止められず、核融合反応が増加、という仮定をしたら？

**磁場の性質から必ず核融合が止まる**

プラズマ圧力が磁場が保持できる上限を超えれば必ず冷えて停止。

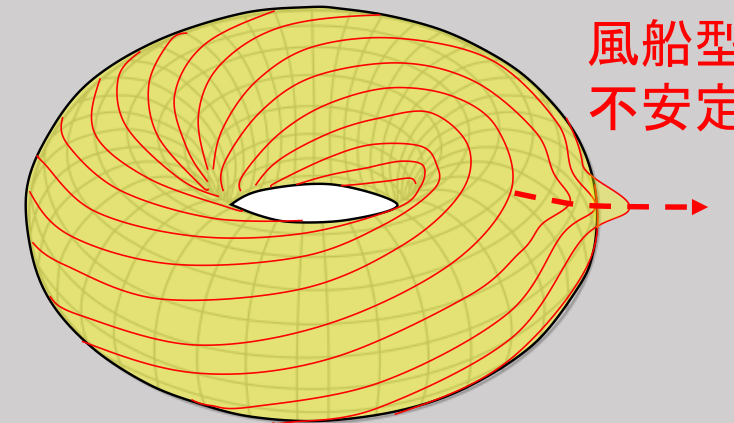
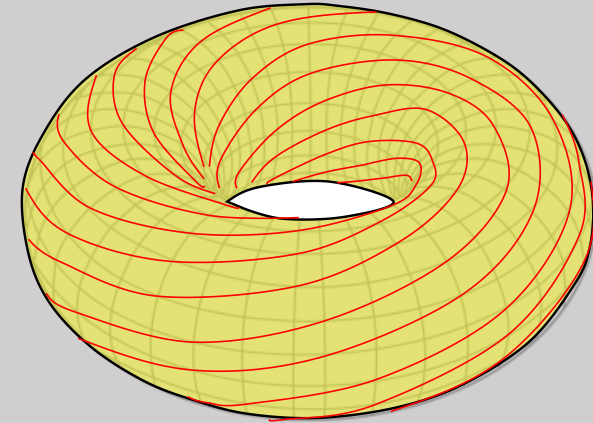
！！プラズマ温度は1億度だが、**圧力は1気圧程度！！**

核融合炉は磁場の多重カゴでプラズマを閉じ込める。

高温で圧力が上がりすぎると、**磁場カゴが変形**（右図）、そこから**余分な熱が逃げ**、温度が急降下。

勝手に核融合は止まる。

圧力上限を超えると・・・



風船型  
不安定性

# 廃棄物とその処分

100年間で100万分の1まで減衰  
再利用も可能



# 廃棄物とその処分

高レベル廃棄物はない。

低レベル廃棄物と高ベータガンマ廃棄物はある。(右図)

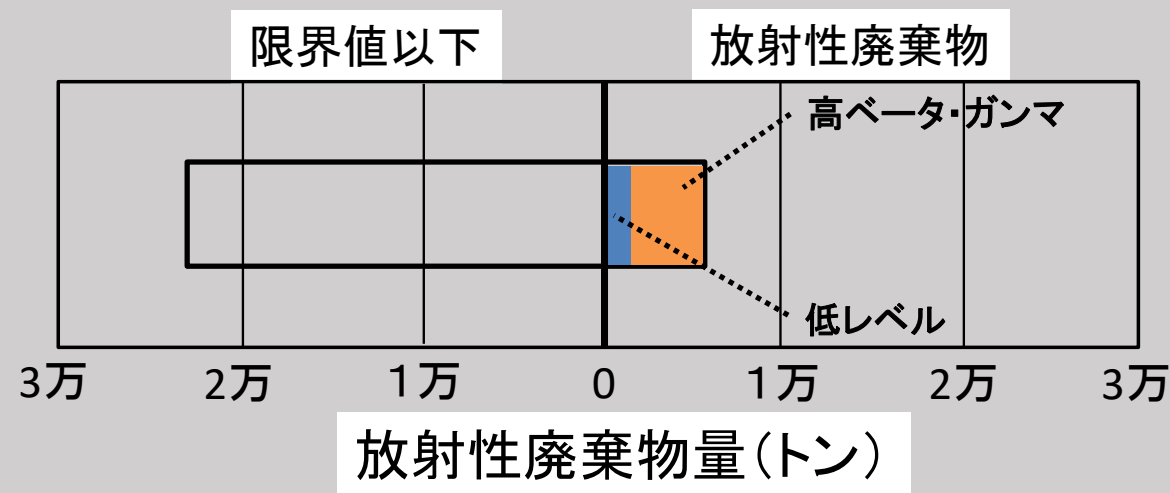
既存技術で処分可能。ただし...

核融合炉の高ベータガンマ廃棄物は、原発よりかなり多い。30年で4500トン vs 200トン  
大型になる核融合炉の弱点。

保管スペースは、50mプールの体積程度(水は不要)  
(1トンあたり1m<sup>3</sup>くらい取って保管するので、50m×25m×3.6m)

残る大部分は100年保管できれば、  
放射性とみなされる限界値以下に。  
捨てずに次の核融合炉に再利用できる。

30年の運用で発生する核融合炉の放射性廃棄物  
ただし、100年保管後。



K. Tobita & R. Hiwatari, Journal of Plasma and Fision  
Research Vol.78 No.11 (2002) pp.1179-1185 をもとに筆者が  
作成。

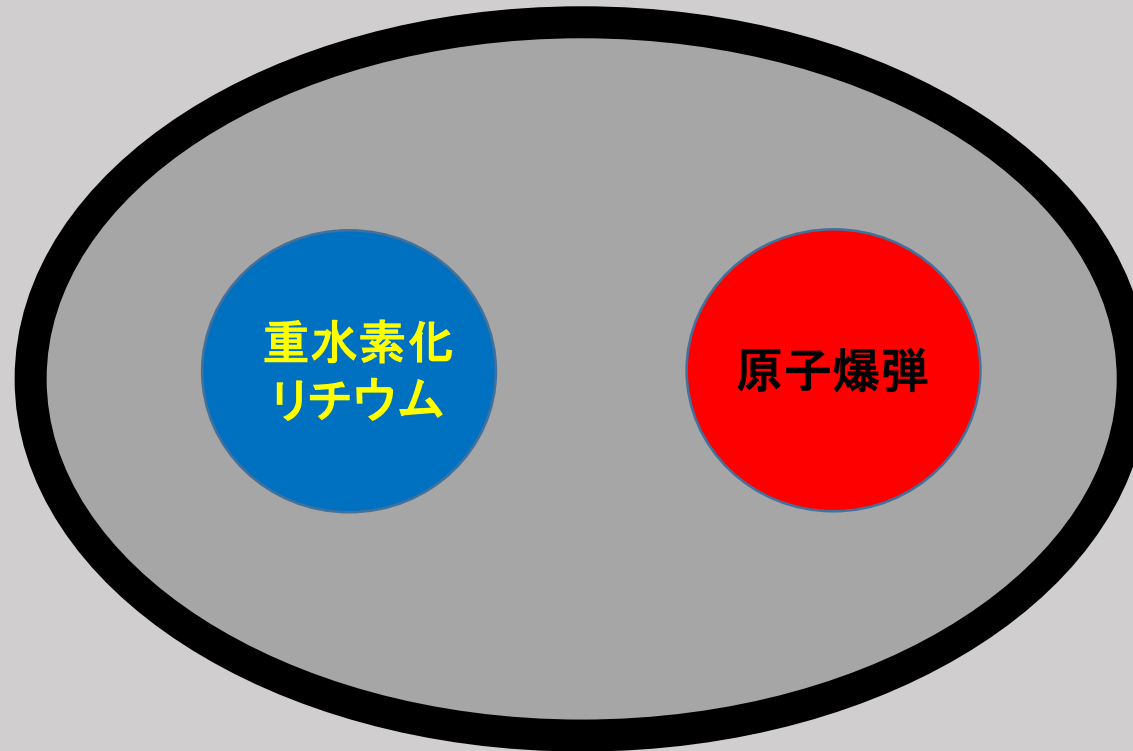
高ベータガンマ廃棄物は運転期間に比例して発生。

# 水爆開発の隠れ蓑に使われないか？

水爆開発に核融合炉は無用

常温で固体

水爆では、楕円の容器の二つの焦点に原爆と重水素化リチウムを置く。  
原爆の中性子でリチウムは瞬時に三重水素に変わり、  
原爆の熱で1億度になって、三重水素と重水素が核融合を起こす。



三重水素はすこし混ぜてあると威力を増すらしいが、水爆に必須ではない。  
秘密裏に三重水素を作るなら、核分裂炉の中にリチウムを入れておくほうがずっと簡単。