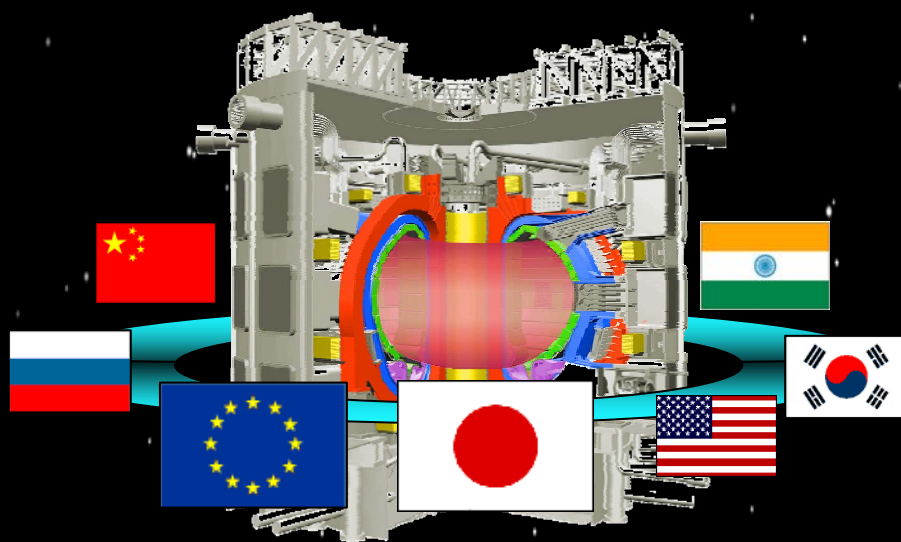




# 核融合エネルギーを求めて(1) — 絵で分かる核融合の基礎 —



**日本原子力研究開発機構**  
那珂核融合研究所・核融合研究開発部門  
〒311-0193 茨城県那珂市向山801-1  
電話：029-270-7390、FAX：029-270-7393  
E-mail：naka-promo@jaea.go.jp

# もくじ

1. 核融合反応とは
2. 湯川秀樹博士生誕百年
3. 湯川秀樹博士の業績
4. 核融合反応の場合の核力
5. 質量の減少=エネルギー
6. 核融合発電の仕組み
7. 核融合燃料は無尽蔵
8. 核融合炉は暴走しない
9. 廃棄物処理が比較的容易
10. プラズマとは
11. 核融合の実現には1億度のプラズマと磁力線が必要
12. 磁力線をねじる、これが閉じ込め装置のみぞ
13. トカマク型磁場閉じ込め装置
14. 臨界プラズマ試験装置JT-60
15. JT-60の内部の様子
16. JT-60プラズマの例
17. 5億度ってどんな温度？
18. 日本の研究が世界の最先端！核融合実験炉まであと一歩
19. 核融合炉を作る技術開発にも日本が大きく貢献
20. 国際熱核融合実験炉(ITER)計画
21. ITERの建設地：フランス・カダラッシュ
22. 日本が製作分担するITERの機器
23. ITER機構発足に向けた最近の状況
24. ITER協定案に署名
25. 核融合研究開発の開発ステップ
26. 技術開発における幅広いアプローチ
27. 核融合での幅広いアプローチ
28. 幅広いアプローチ：国際核融合エネルギー研究センター
29. 幅広いアプローチ：原型炉設計R&D調整 プランケット関連技術開発
30. 幅広いアプローチ：サテライトトカマク JT-60の超伝導化改修
31. 幅広いアプローチ：IFMIF-EVEDA
32. 核融合エネルギー実現までの道筋-ITERと幅広いアプローチの役割-
33. まとめ

# 1. 核融合反応とは

核融合反応というのは、軽い元素の原子核同士を融合させ、重い元素に変化させる反応です。原子力発電で利用されている核分裂反応は、重い元素を分裂させ、より軽い元素に変える反応で、核融合反応とは逆です。地上で核融合を起こそうとするには、もっとも軽い元素である水素の仲間の重水素と三重水素を融合させ、より重たい元素であるヘリウムと中性子に変化させる反応を利用します。

この反応で発生したエネルギーはヘリウムや中性子の運動エネルギーの形で出てきます。つまり、反応によって、高速のヘリウム原子核と高速の中性子が発生することになります。



## 2. 湯川秀樹博士生誕百年

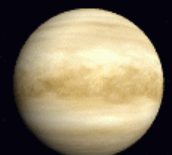
2007年は、日本人ではじめてノーベル賞を受賞した湯川博士の生誕百年です。湯川博士の業績は、原子核の中の小さな粒子を結びつける粒子（中間子）の存在を予言し、粒子を結びつける力（核力）を解明し、原子核反応の根本原理を明らかにしたことです。湯川博士は、現在のプラズマ・核融合学会の前身である核融合懇談会の初代会長であり、初期の核融合研究において極めて重要な役割を果たされました。現在に続く核融合エネルギー開発というチャレンジは日本人の優れた研究成果が発端になっていると言っても過言ではありません。

**日本人初のノーベル賞受賞者湯川博士の業績**  
**原子核の中の小さな粒子の間を結びつける粒子を予言し、その結びつける力(核力)を解明**



- ・2007年は湯川秀樹博士生誕百年
- ・核融合懇談会(現:プラズマ・核融合学会)初代会長
- ・日本人初のノーベル賞受賞者

湯川秀樹博士



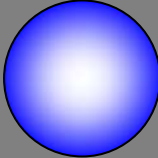
### 3. 湯川秀樹博士の業績

少し分かりやすく比喩的に説明します。水素の原子核は陽子と呼ばれプラスの電気を帯びています。その重さは炭素原子核の重さを12とすると、1と1万分の78です。中性子は陽子とよく似た重さで、1と1万分の87です。重水素の原子核は陽子と中性子から成りますが、中性子は電気を帯びていませんから、重水素の原子核も普通の水素と同様1個のプラスの電気があるだけで、化学的な性質は普通の水素と同じです。このような重水素の重さは、単純に陽子と中性子の合計の重さ2と1万分の165にはなりません。単純合計より1万分の24だけ軽い2と1万分の141となっているのです。湯川博士は、陽子と中性子を結合させるための強い力を中間子のキャッチボールで生み出すと予測しました。中間子はおおよそ1万分の1500ぐらいの重さですので、図のように陽子と中性子は中間子の重さ分だけ削り取られていることになりませんが、この時ちょっとだけ(1万分の24だけ)余分に削り取られていると言えます。後の話しを簡単にするためこの減った質量を  $\Delta$  とします。

#### 水素の原子核

陽子 

質量:  $1 + \frac{78}{10000}$

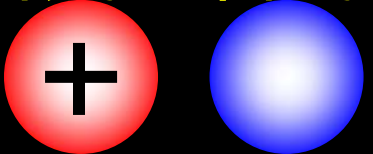
中性子 

質量:  $1 + \frac{87}{10000}$

陽子と中性子は殆ど同じ重さ

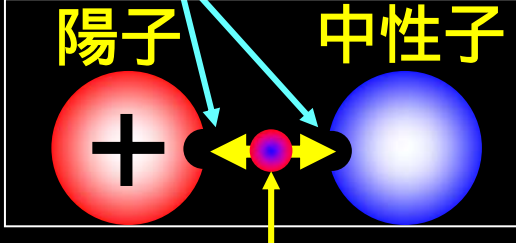
#### 重水素の原子核

陽子 中性子



質量は？

減った質量:  $\Delta$



強い力(核力)の源: 中間子

$$2 + \frac{78+87}{10000} = 2 + \frac{165}{10000} \times \text{中間子: } \frac{1500}{10000} \text{ ぐらいの質量}$$

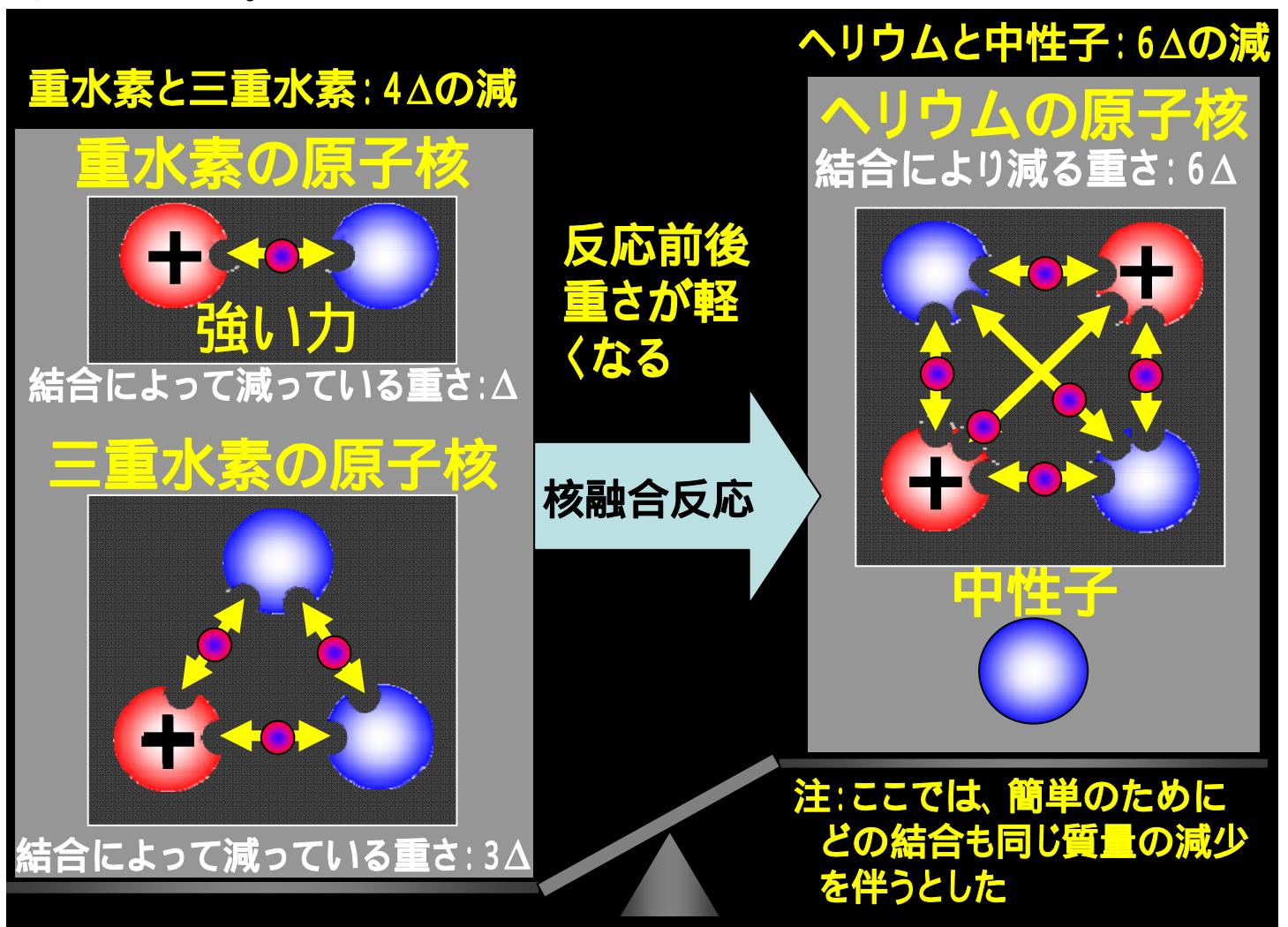
$$2 + \frac{141}{10000} \quad \frac{24}{10000} \text{ だけ軽い!}$$

# 4. 核融合反応の場合の核力

最初に出てきた重水素と三重水素が反応して、ヘリウムと中性子になる核融合反応の場合を考えましょう。重水素は先に示したように結合によって 4 だけ質量が減っています。三重水素の原子核は陽子ひとつと中性子 2 つからなります。三重水素の場合、粒子間の結合の手が 3 つ（中間子が 3 つ）あることとなりますから、陽子 1 個と中性子 2 個の質量の合計より 3 だけ軽くなります。つまり核融合反応前の質量は、陽子や中性子がばらばらにある状態より、4 だけ軽くなっています。

ヘリウム核は、陽子 2 個と中性子 2 個からなりますが、粒子の間の結合の手は 6 個、従ってばらばらな状態より 6 軽くなっています。中性子は単体ですから重さは軽くなりません。

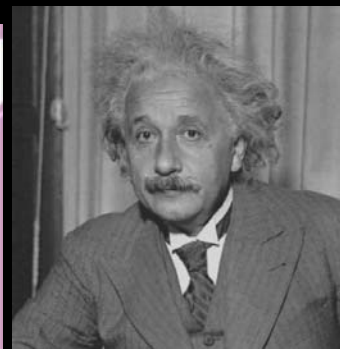
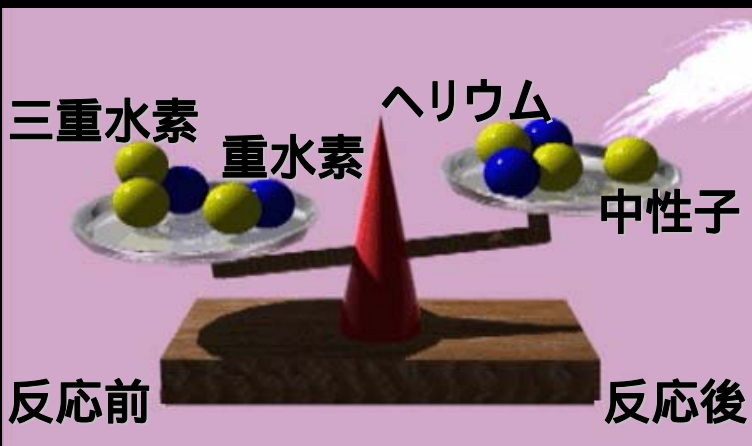
このように考えると反応前は 4 の減少なのに対して、反応後は 6 の減少ですので、反応後のほうが軽くなっていることが分かります。



# 5. 質量の減少 = エネルギー

核融合反応前に比べて、反応後のほうが重さが軽くなるのがなんとなく分かったでしょうか。原子核の中の粒子を結びつける中間子が多ければ多いほど、質量が原子核の中の粒子がばらばらな状態に比べて軽くなるのが、その理由です。その重さはどこへ消えたのでしょうか？1900年代初頭に有名な相対性理論を打ち立てたアインシュタイン博士は、もう一つ重要な発見を行いました。それは、「質量（重さ）」は「エネルギー」と等価であるという原理を発見したのです。質量の減少はヘリウムや中性子の運動エネルギーとなって現れるのです。これが核融合エネルギーなのです。

重水素と三重水素 1 g の燃料で石油 8 トン分のエネルギーを出せます。百万キロワット級の発電所を 1 年動かすために石油 130 万トンが必要ですが、核融合を利用するとわずか 160kg ですみます。少ない燃料で沢山のエネルギーを出せることが、核融合エネルギーの一つの特徴と言えます。



$$E=mc^2$$

アインシュタインの原理  
エネルギーと質量は等価  
発電所の1年間の燃料

重水素と三重水素の燃料  
1グラム(直径約20cmの  
風船)で石油8トンに相当  
するエネルギーが発生

石油火力: 石油 130万トン



核分裂: ウラン 0.7トン



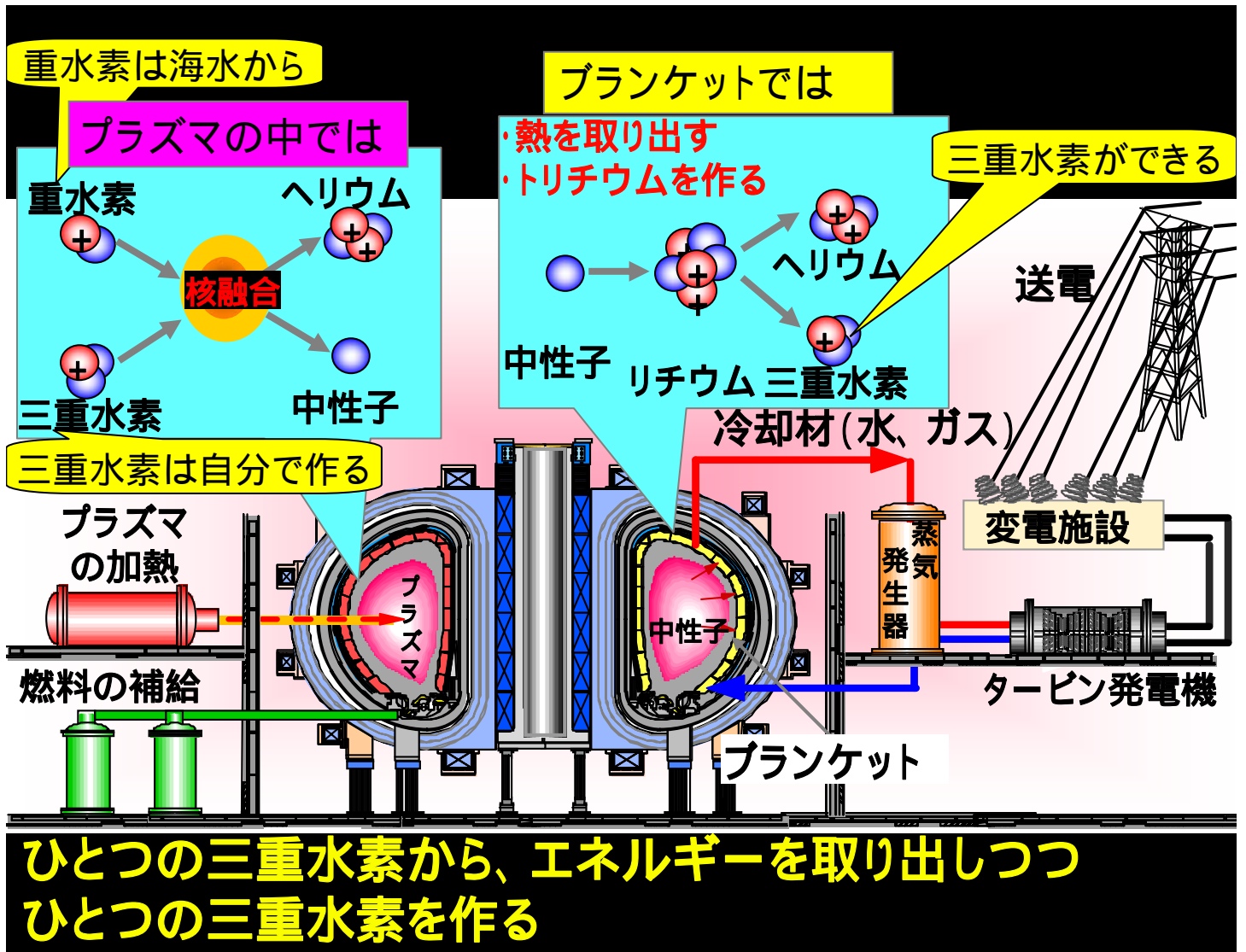
核融合: 重水素とトリチウム 0.16トン



100万kWの発電所として

# 6. 核融合発電の仕組み

核融合発電の仕組みを見ていきます。磁力線の器で閉じ込められたプラズマと呼ばれるガス状の炉心の中では、重水素と三重水素が反応して高速のヘリウムと中性子が発生しています。ヘリウムの原子核は電気を帯びていますから、磁力線があるとその外には逃げ出せませんので、プラズマ中に留まり、プラズマがさめないよう暖める役割を果たします。一方中性子は電気を帯びていませんから、自由に外に飛び出し、プラズマを囲むブランケットと呼ばれるものに吸収され、最終的には熱となって冷却水で炉外の発電機を駆動する源となります。ブランケットの中にはリチウムと呼ばれる材料が置かれ、プラズマからきた中性子と反応して、ヘリウムと三重水素に変わります。つまり、燃料の一つであり、天然にはほとんど存在しない三重水素を、核融合発電では自分自身で作ることになります。





# 7. 核融合の燃料は無尽蔵

先に見たように、核融合発電の燃料はつまるところ、重水素とリチウムということになります。重水素は海水1立方メートル中に33gも含まれていますから、ほぼ无尽蔵といえます。リチウムは電池で使われているなじみのある材料です。鉱物資源として940万トンほどあるといわれています。海水にも海水1立方メートル中に0.2g含まれており、総量で2330億トンほど存在するといわれています。これは100万キロワット級発電所1500基の1550万年分の燃料に相当します。したがって、リチウムも重水素も无尽蔵に存在すると考えてもいいと思います。ノートパソコン用電池のリチウム6gとバスタブ4分の1の残り湯から取れる重水素1.7gで石油35トンに相当するエネルギーを発生させることができます。

核融合はどこにでもある海水、水から取れるものを燃料にします。燃料が无尽蔵で偏在しないということも、核融合の魅力の一つです。

鉱物埋蔵量：940万トン  
海水資源量：2330億トン  
100万kW級核融合炉1500基  
鉱物資源：600年分  
海水資源：1550万年分

ノートパソコン用電池  
1個(リチウム6g)



+

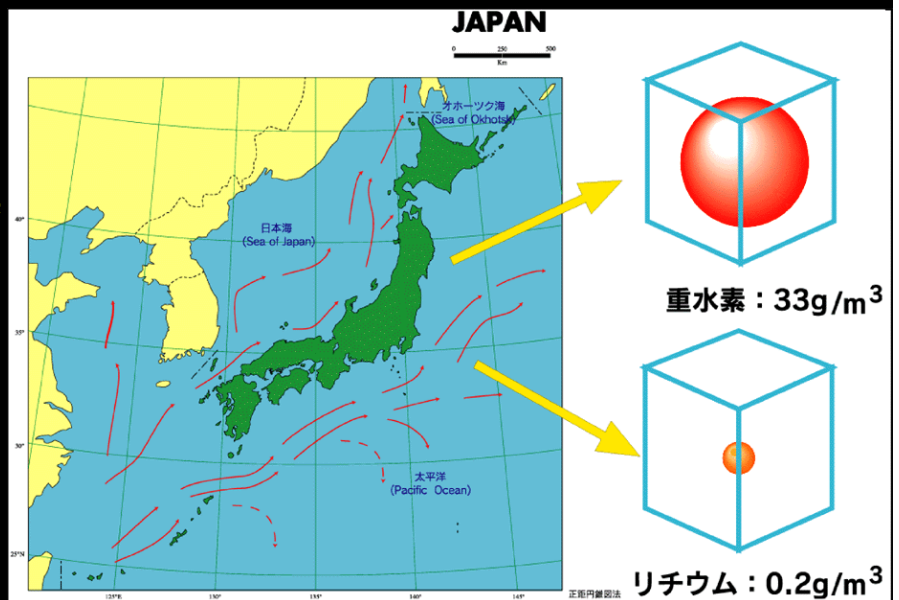


=



バスタブに1/4程度の水  
(重水素1.7g)

石油35トン



日本の一世代あたりの年間エネルギー使用量の30年分

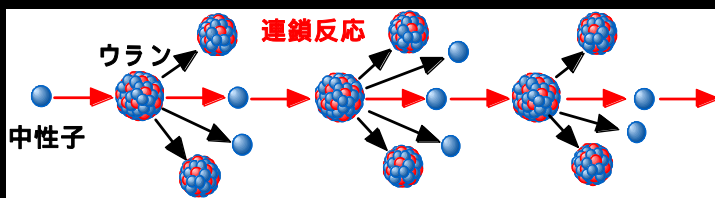
# 8. 核融合炉は暴走しない

核分裂反応を利用する軽水炉では、燃料を一箇所に一定量以上集め、中性子が次の反応を連鎖的に誘発することを利用し、反応を増大させ、制御棒を用いて反応を一定レベルに制御し、一定出力を定常的に出すようなシステムとなっています。

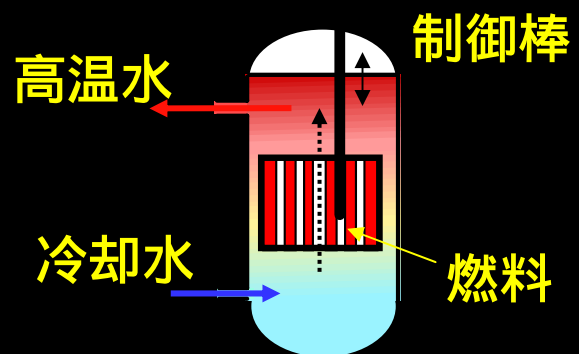
核融合炉では、燃料は希薄なガス状で外部から常に供給しますので、ガスレンジのように元栓を閉じれば反応は止まってしまいます。連鎖反応を利用しないシステムですので、原理的に暴走することはありません。

核融合は、このように何があっても安心・安全なエネルギー源となり得るので、一層魅力あるものといえます。

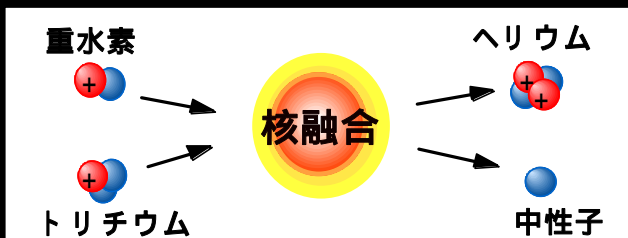
## 核分裂反応



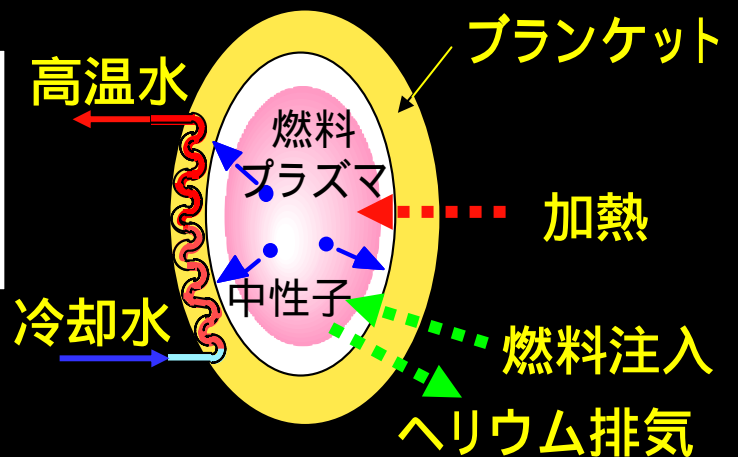
炉内燃料は数年分



## 核融合反応



炉内燃料は数十秒分のみ

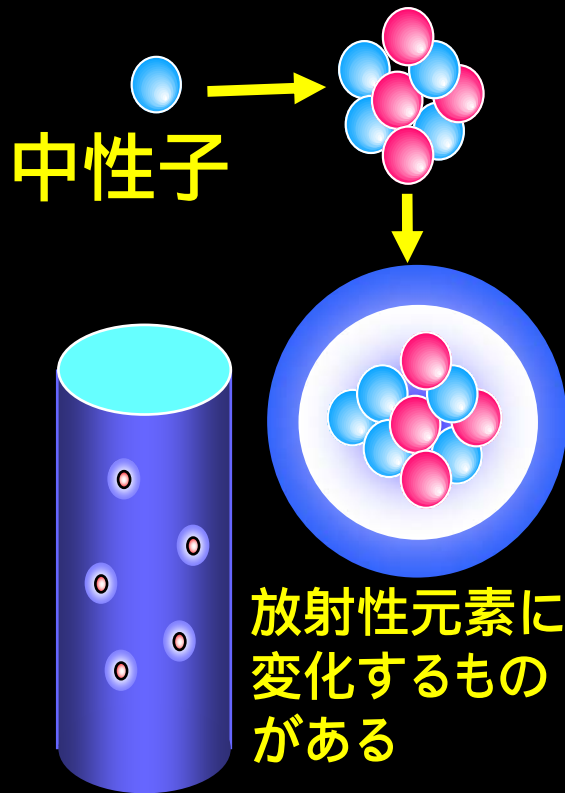


連鎖反応を必要としない  
原理的に暴走しない

# 9. 廃棄物処理が比較的容易

核融合発電でも、放射性廃棄物は出ます。核融合反応で生成された中性子により、炉の構造材料などが放射性元素に変化するため、炉心を取り巻く多くの構造物が放射化され、場合によっては数万トンもの放射性廃棄物を発生します。

どれくらい危険なものなのかを理解するために、百万kWの発電所を30年運転した後にできる放射性廃棄物を、摂取許容濃度まで薄めるのに必要な水の量を計算した結果を示します。例えば軽水炉の場合、炉を止めた直後では概ね日本海ぐらいの量の水で薄めれば飲めます。百万年後では琵琶湖ぐらいの水が必要です。石炭火力の場合、日本最大の奥只見ダムぐらいの水が要ります（石炭には放射性物質が結構含まれています）。核融合炉の場合、炉停止直後は日本海ぐらいの水が必要ですが、50年ぐらい経つと石炭火力よりも少ない水でよくなります。これは、核融合では高レベル放射性廃棄物が出ないためです。核融合は、廃棄物処理が比較的容易な、環境に適合したエネルギー源といえます。

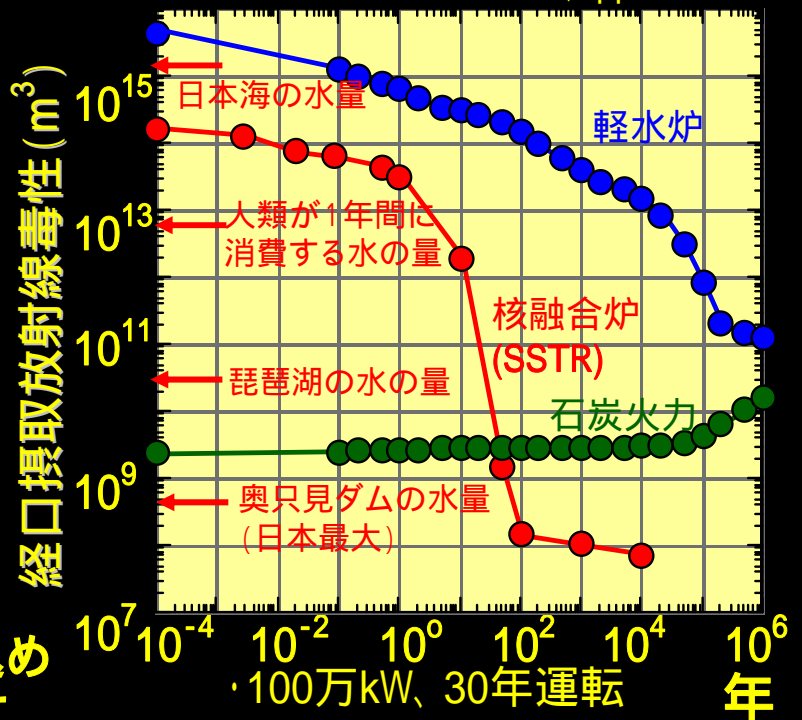


放射性元素は固体中に閉じ込められている。材料元素に応じて、できる放射化物の種類は決まる

## 放射性毒性の評価例：

水で薄めて飲めるようにするためにはどれぐらいの水が必要か？

摂取基準：米国10CFR Pt20, App.B Table 2



・100万kW、30年運転

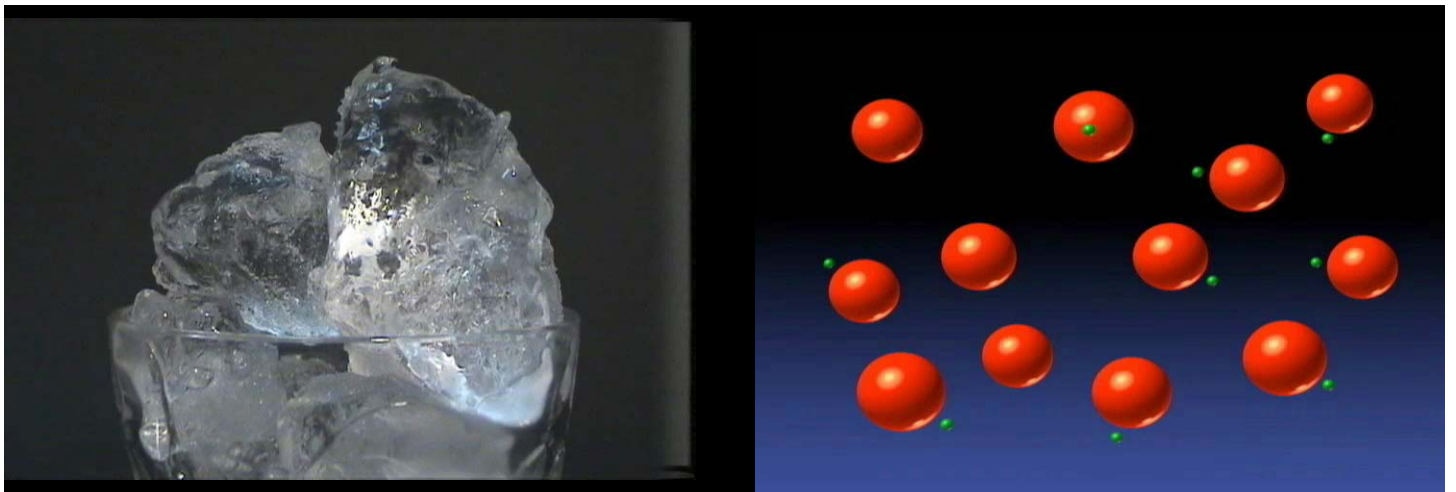
・軽水炉：燃料のみ

・石炭火力：石炭灰のみ

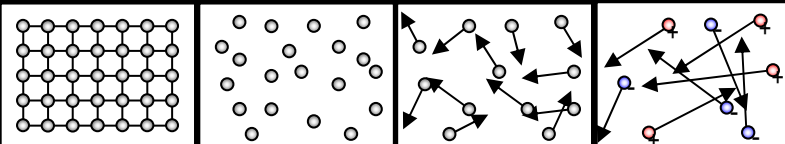
# 10. プラズマとは

後ほど述べるように核融合の炉心は数億度もの超高温状態になります。水の例ですと、摂氏0度以下では固体の氷、0度を超えると氷が解けて液体の水になり、百度を超えると気体の水蒸気になります。金属のようなものでも基本的には同じように、固体、液体、気体とその状態を変化させます。もっと温度を上げるとどうなるのでしょうか？1万度ぐらいになると、気体を構成する元素がプラスの電気を帯びたイオンとマイナスの電気を帯びた電子に別れ、電気を帯びた粒子が飛び交う状態となり、これをプラズマ状態と呼んでいます。気体とよく似ていますが、飛び交う粒子が電気を帯びていることが通常の気体と異なる点です。

実は、宇宙の99%以上はプラズマ状態であり、物質のあり方としてはとても自然な状態なのです。地上でも、プラズマテレビ、蛍光灯、雷やオーロラなど、案外身近にあるものなのです。



1万度を超えるとどんな物も電子とイオンに分離(プラズマ状態)



固体

液体

気体

プラズマ状態

0度

100度

数千度

氷 水

水蒸気

電離ガス

固体 液体 気体

プラズマ

宇宙の構成物質の  
99%以上が  
プラズマ状態

# 11. 核融合の実現には 1億度のプラズマと磁力線が必要

核融合反応では、+の電気を帯びた重水素と+の電気を帯びた三重水素が融合反応を起こさなければなりません。そのためには、両者を十分近づける必要がありますが、プラス同士の電気が反発し合うため、非常に早いスピードで勢いをつけてぶつける必要があります。ガス状粒子を1億度以上にすることが必要です。

1億度以上の温度の物質を閉じ込める器は普通には存在しません。そこで、電気を帯びた粒子は磁力線に巻きつく性質があることを利用し、端のない磁力線を電磁石コイルでつくり、その中にプラズマを置くと、高温の電気を帯びた粒子は磁力線にまきつきながら磁力線の輪をぐるぐるまわることになり、外へ逃げ出せなくなります。

磁力線で超高温プラズマを閉じ込める、これが磁場閉じ込め核融合装置です。

**重水素** + **三重水素** **反発**

**電気を帯びた粒子は磁力線に巻きつく**

**電磁石コイル**

**電流**

**磁力線**

**電流**

**イオン同士の電氣的反発に打ち勝って接近できるほどの高速で衝突させる必要がある**

**高速の状態 = 高温**

**燃料を1億度以上の超高温にすることが必要**

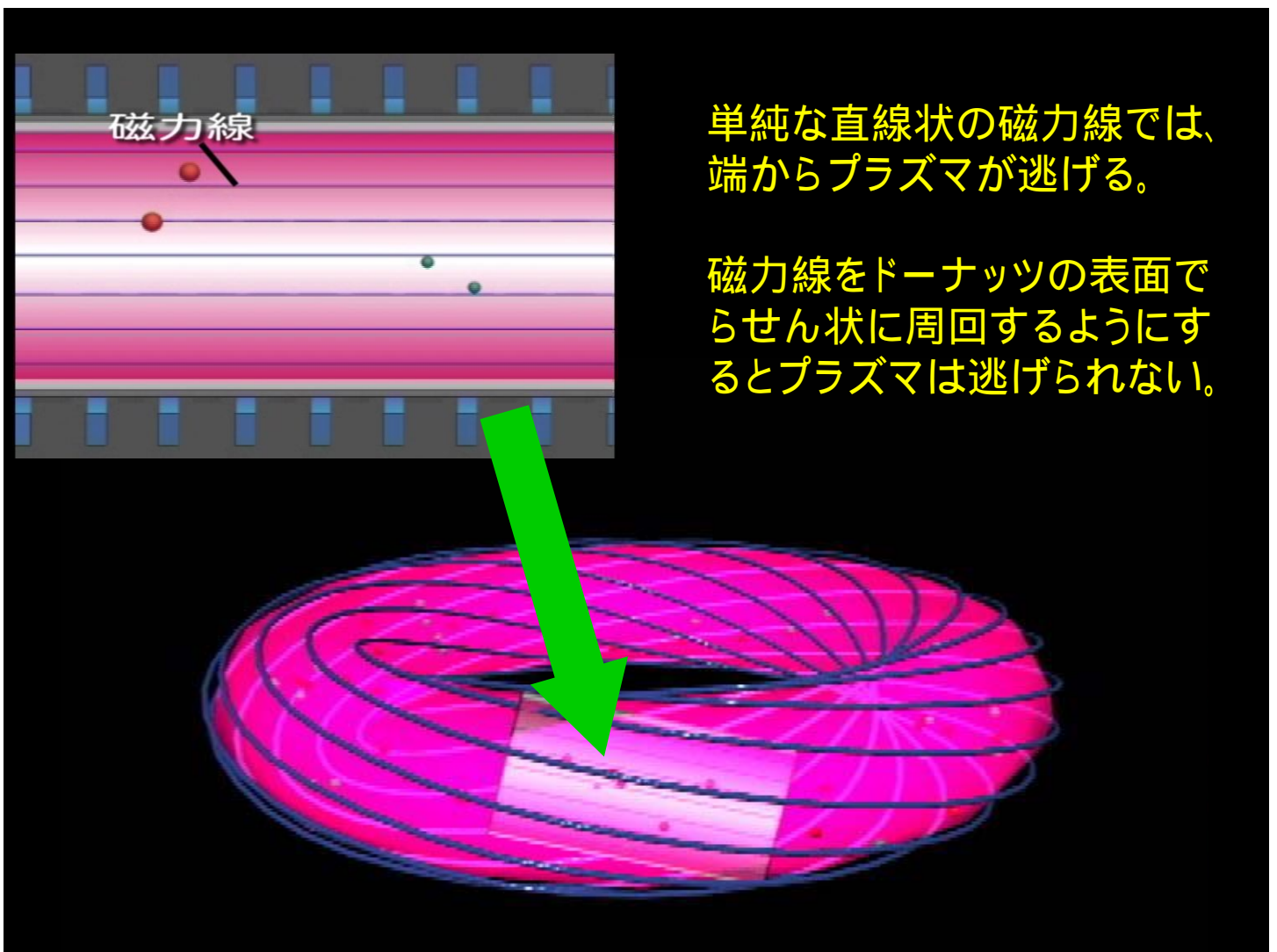
**電磁石コイルをうまく並べて端のない磁力線を作る**

## 12. 磁力線をねじる、 これが閉じ込め装置のみそ

端のない単純な磁力線では、数億度もの超高温プラズマを閉じ込めることができません。遠心力のような力が働いて外に飛び出してしまいますので、もう一工夫が必要です。

そこで、磁力線を下図のように、ドーナツ状の表面をらせん状に周回するように捻ってやります。そうすると、ドーナツの外側を走っているときにはドーナツの外に向けて飛び出そうとするのですが、ドーナツのホールの内側に来ますとドーナツの内側、つまり、プラズマの中心に向かって行こうとしますので、プラズマから出て行こうとするのと、プラズマの中心に向かおうとするのが相殺してしまいます。

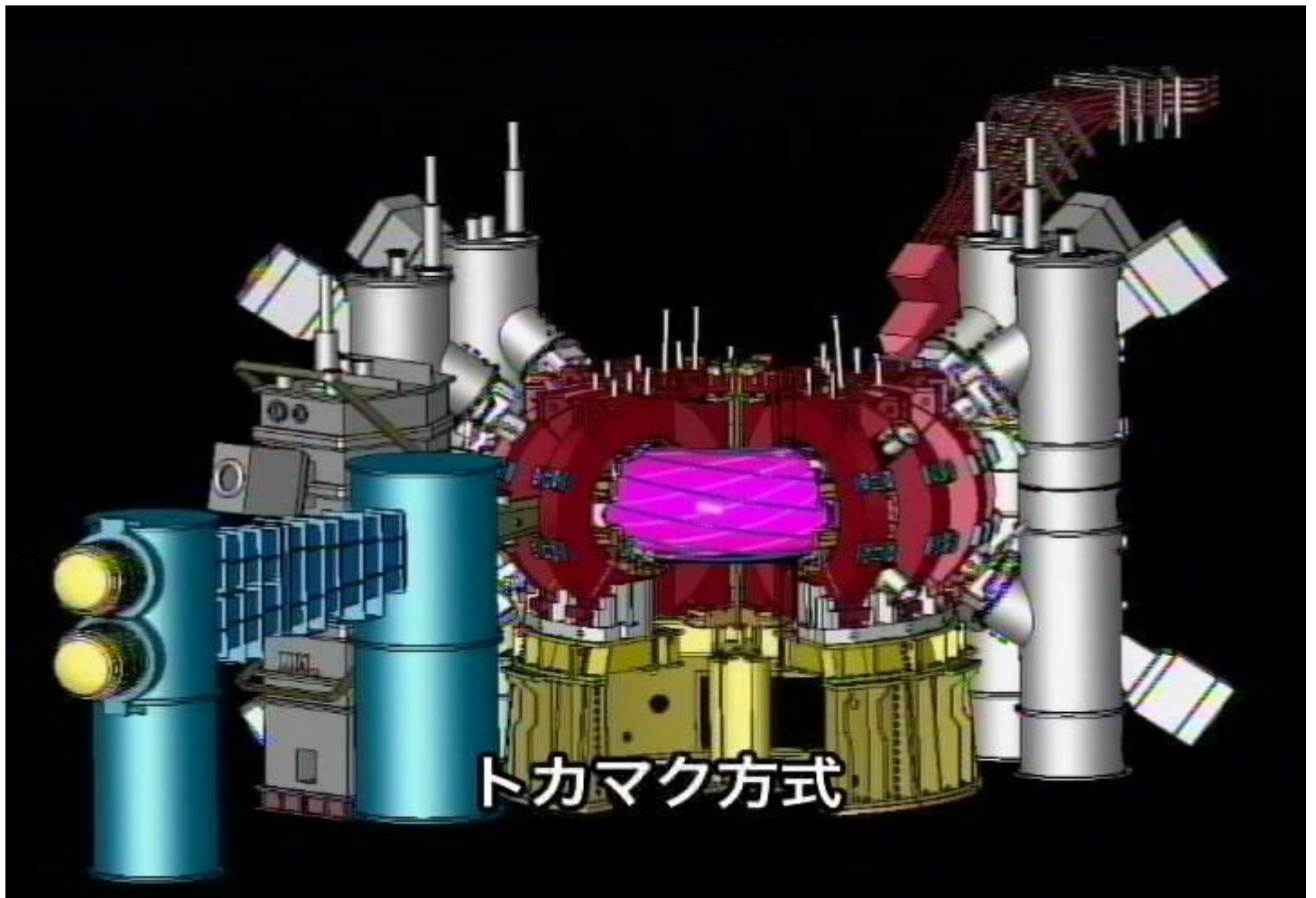
このような磁力線の器を作ってプラズマを閉じ込める装置をトカマク型磁場閉じ込め装置といい、旧ソビエトで発明されました。



# 13. トカマク型磁場閉じ込め装置

これがトカマク装置のポンチ図です。赤い電磁石コイルに囲まれた部分には、先に示したようにドーナツ表面に磁力線がらせん状に周回するのが見えるようにしてあります。周りにあるグレーや赤や青色の装置はプラズマを数億度に加熱するために配置されています。

トカマク方式はらせん状の磁力線を振るために、プラズマの中に電流を流していることが特徴です。岐阜県土岐市にある大型ヘリカル装置LHDはプラズマ中には電流を流さず、外部の電磁石コイルだけを用いてらせん状の磁力線を作り、プラズマを閉じ込める装置で、ヘリカル型磁場閉じ込め装置と呼ばれています。トカマクもヘリカルも基本的にはドーナツ状のプラズマをドーナツの表面で磁力線がらせん状に周回させていることは共通しています。



## 14. 臨界プラズマ試験装置JT-60

これが茨城県那珂市にある日本原子力研究開発機構、那珂核融合研究所にある臨界プラズマ試験装置JT-60です。世界3大トカマクのの一つとして、1985年から稼動しています。横40メートル、高さ40メートル、奥行き80メートルの建物の中に収められ、トカマク本体は、直径約15メートル、高さ約13メートル、総重量約5000トンあります。写真の上に乗っている装置は計測装置が置かれた架台で、黄色い柱状のものは本体を支える支持構造物です。残念ながら前頁のポンチ図のように電磁石コイルはほとんど見えません。





## 15 . JT-60 真空容器内の様子

JT-60の真空容器内部です。高さ約3メートル、一周約20メートルあります。真空容器内部は、約1万2千枚の炭素製タイルで覆われています。特に足元付近のダイバータと呼ばれる部分には、熱を伝えやすく強い炭素繊維複合材が用いられています。ダイバータとは、プラズマ中の不純物粒子などを低温の粒子にして外部に排出する装置で、原子力機構が発明したものです。JT-60ではITERと同じようW型ダイバータという方式を採用し、その有効性を実証しました。

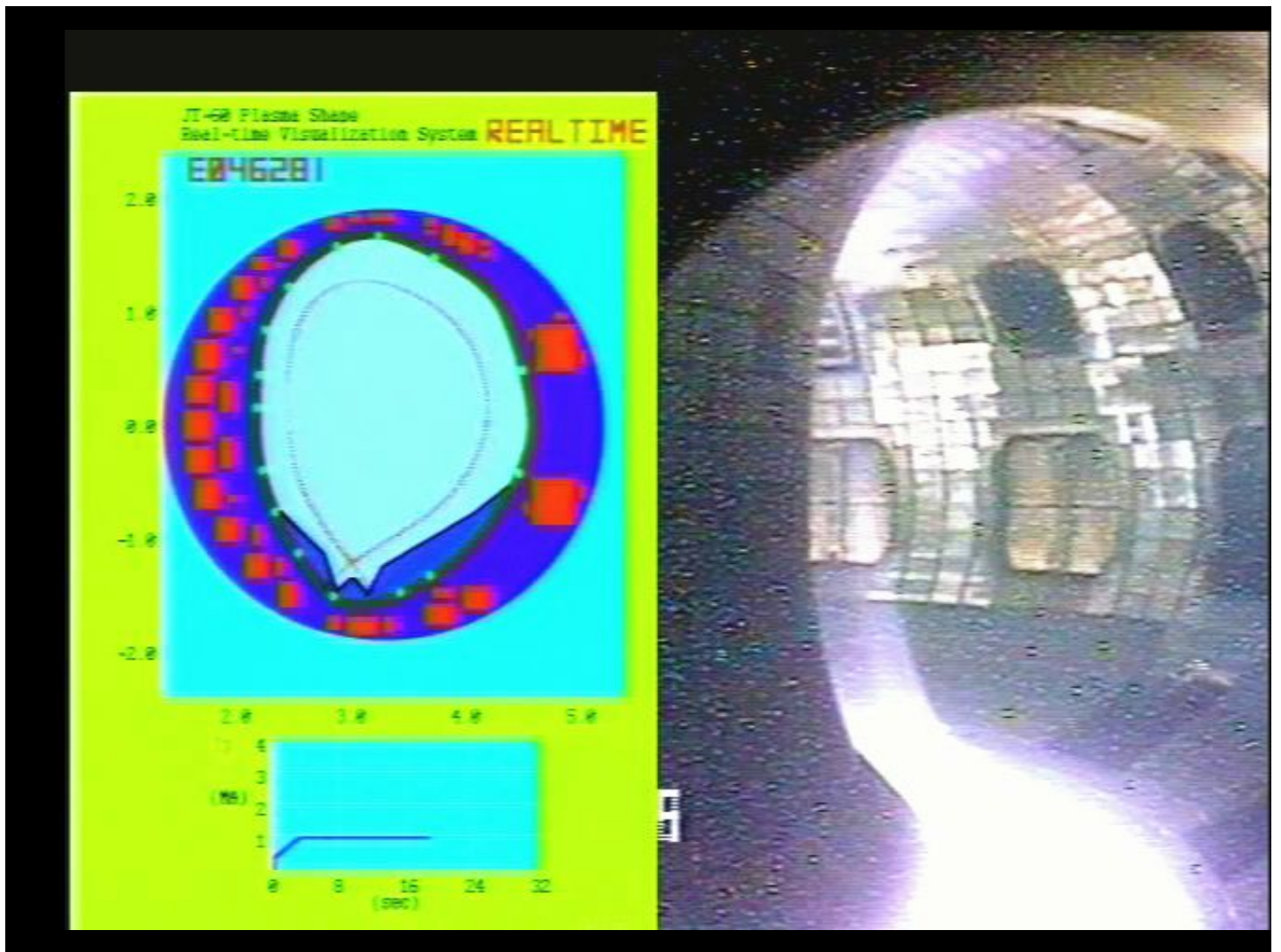
真空容器はインコネル625という材料で、薄い板を二重構造にしています。表面積は大体1000平方メートル程度です。



# 16. JT-60プラズマの例

JT-60プラズマの例です。左側はプラズマの外の磁力線分布を測定し、それに基づいて再現したプラズマの形状が示されています。Dの文字のように外側が少し膨らんだ形をしています。

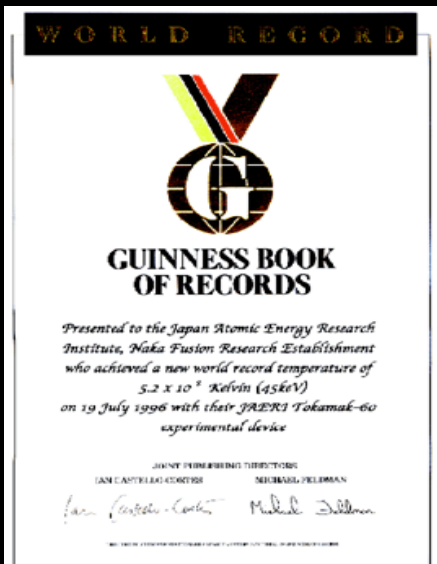
右の写真はその時のドーナツの接線の方向から見た可視テレビの映像です。下側で光の強い部分がありますが、これは、温度が数万度と低い部分で、目に見える波長の光が出ています。プラズマの中心部は透明に見えていますが、1億度以上の超高温状態で、目に見えないX線領域の光が沢山出ています。真空容器に穴がいくつか開いているのが見えますが、プラズマを加熱するための高周波を入射するためのアンテナが設置されていたり、プラズマの性能を測定する装置が設置されています。



# 17. 5億度ってどんな温度？

JT-60プラズマでは、5.2億度の温度を達成しました。これは、人類が地上で作った世界最高の温度としてギネスブックにも登録されました（下図、ギネスブックの証書を参考）。5.2億度って想像できるでしょうか。下にいろいろな温度を列記しましたが、耐熱性の高い金属タングステンが溶ける温度でも5600 程度で、身近な例がなかなか見つかりません。1万 を越えると地上の温度と比較できなくなります。これではイメージが湧かないので、仮に100 で10cmになる温度計で測定したとしましょう。そうすると、5.2億度というのは、目盛りの高さが520km、人工衛星がある高さと同じ高さになってしまいます。

10億度	超新星周辺の温度
5.2億度	JT-60の最高温度
1600万	太陽中心の温度
500万	太陽コロナの温度
5555	タングステンの沸点
5500	太陽表面温度
1740	鉛の沸点
327.5	鉛の融点、
100	水の沸点



5.2億 だと  
温度計の  
目盛は  
520kmの高さ、  
人工衛星と  
同じくらいの  
高さまで  
上がっちゃう！

100 が10cm

520km

5億度

100

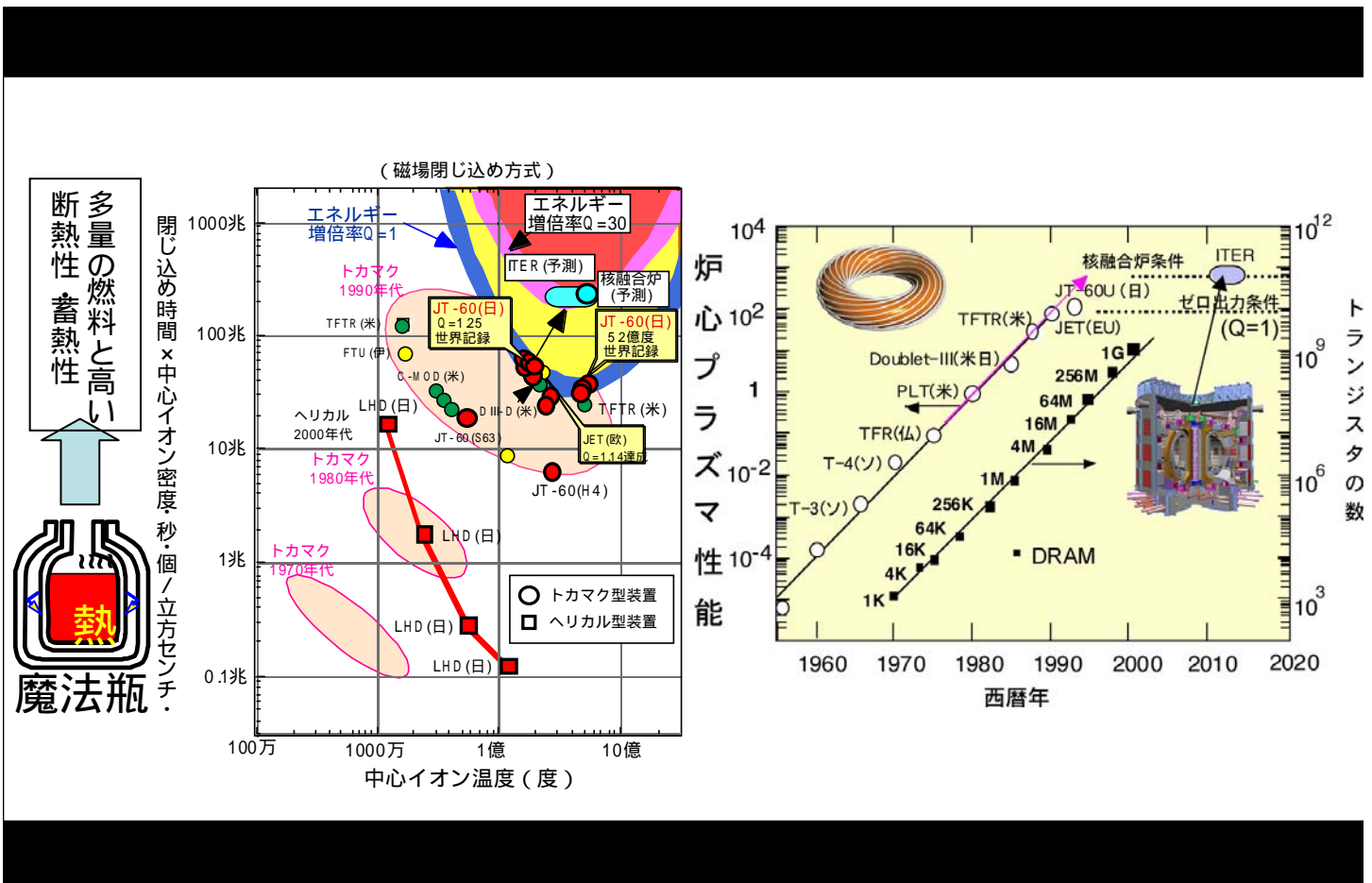
10km

# 18. 日本の研究が世界の最先端！

## 核融合実験炉まであと一歩

炉心プラズマ研究の進展をまとめました。左は、横軸がプラズマの温度、縦軸が燃料プラズマの密度とプラズマの断熱性能を示す閉じ込め時間（熱が逃げる特徴的な時間で、長ければ長いほど熱が逃げにくく断熱性が高いことを示す）です。10年毎に縦軸も横軸も1桁ずつ向上しているのが分かります。図中の青い帯は、外部から入れた入力と核融合反応で出てくる出力が同じになる条件、臨界プラズマ条件を表します。JT-60（グラフ中●）は1996年臨界プラズマ条件に到達しました。1998年にはエネルギー増倍率1.25（出力/入力=1.25）の世界記録を達成しました。

右は左図の縦軸と横軸の積（概ね核融合出力に比例）がどのくらい早い速度で進展したかを描いたもので、半導体メモリチップの容量の進展速度に匹敵するくらい急速に進展しているのが分かります。図にもあるように、核融合炉の炉心まであと一歩です。



# 19. 核融合炉を作る技術開発にも 日本が大きく貢献

核融合炉を建設するためには、さまざまな技術開発が必要です。後で出てくる国際熱核融合実験炉(ITER)が建設可能かどうかを実証するために、国際協力で実規模大の7つの試作開発を行いました。7つの試作開発のうち、原子力機構は、最も製作が困難だと考えられていた装置中心部の大型超伝導コイル、大型の真空容器、ブランケット遠隔保守ロボットの開発をホスト国として研究開発の取りまとめを行い、関係する国の部分的な試作を統合して開発を主導し実験炉建設の技術基盤の構築に大きく貢献しました。この過程では、原子力機構内部はもちろん、広く産業界との連携が重要な役割を果たしました。

**真空容器セクター**

**中心ソレノイドモデルコイル**

**ブランケット遠隔操作**

**ブランケットモジュール**

**トロイダルモデルコイル**

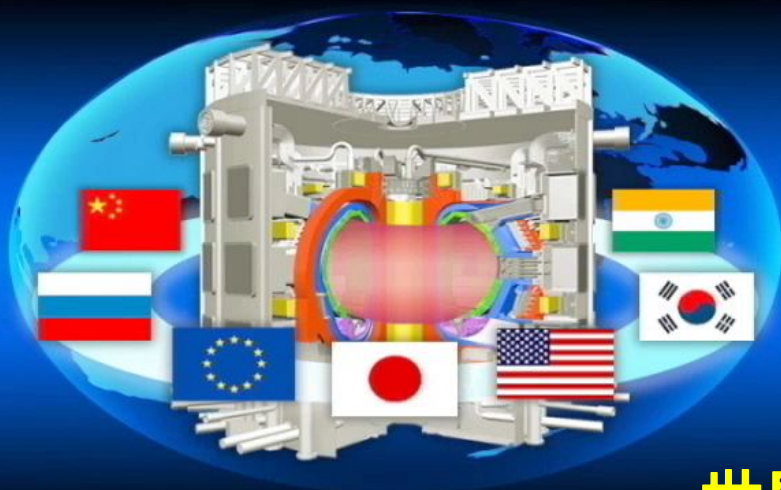
**ダイバータ遠隔操作**

**ダイバータカセット**

## 20. 国際熱核融合実験炉(ITER)計画

JT-60などの大型トカマクが稼動しはじめた1985年、米ソ首脳会談で核融合の国際協力について話し合われたのが国際熱核融合実験炉（ITER：イーター）計画のきっかけです。米ソ日欧の4極が1988年から1990年までITERの概念設計活動を行い、1992年から9年間にわたって工学設計活動が行なわれました。その後、ITERの建設に向けた国際協議を継続し、新たに韓国、中国、印度を加え7極で政府間協議をまとめ、2005年にフランスカダラッシュにITERを建設することに合意しました。

ITERは人類が初めて地上で50万キロワットもの核融合エネルギーを人間の制御下で発生させるという試みで、核融合エネルギーの科学的・技術的成立性を実証するものです。世界人口の半分以上の人々が研究開発を支え、30年にわたる長期の国際共同プロジェクトです。ITER計画で日本は重要な役割を果たします。



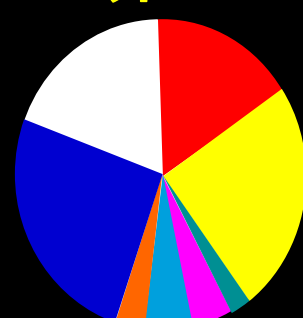
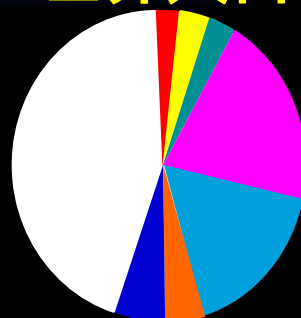
建設地：フランス・カダラッシュ  
建設10年、運転20年、合計30年のプロジェクト

21世紀の原子力  
平和利用の象徴

世界人口

世界GNP

	人口	GNP
世界	61億人	54兆ドル
ITER参加極	56%	81%

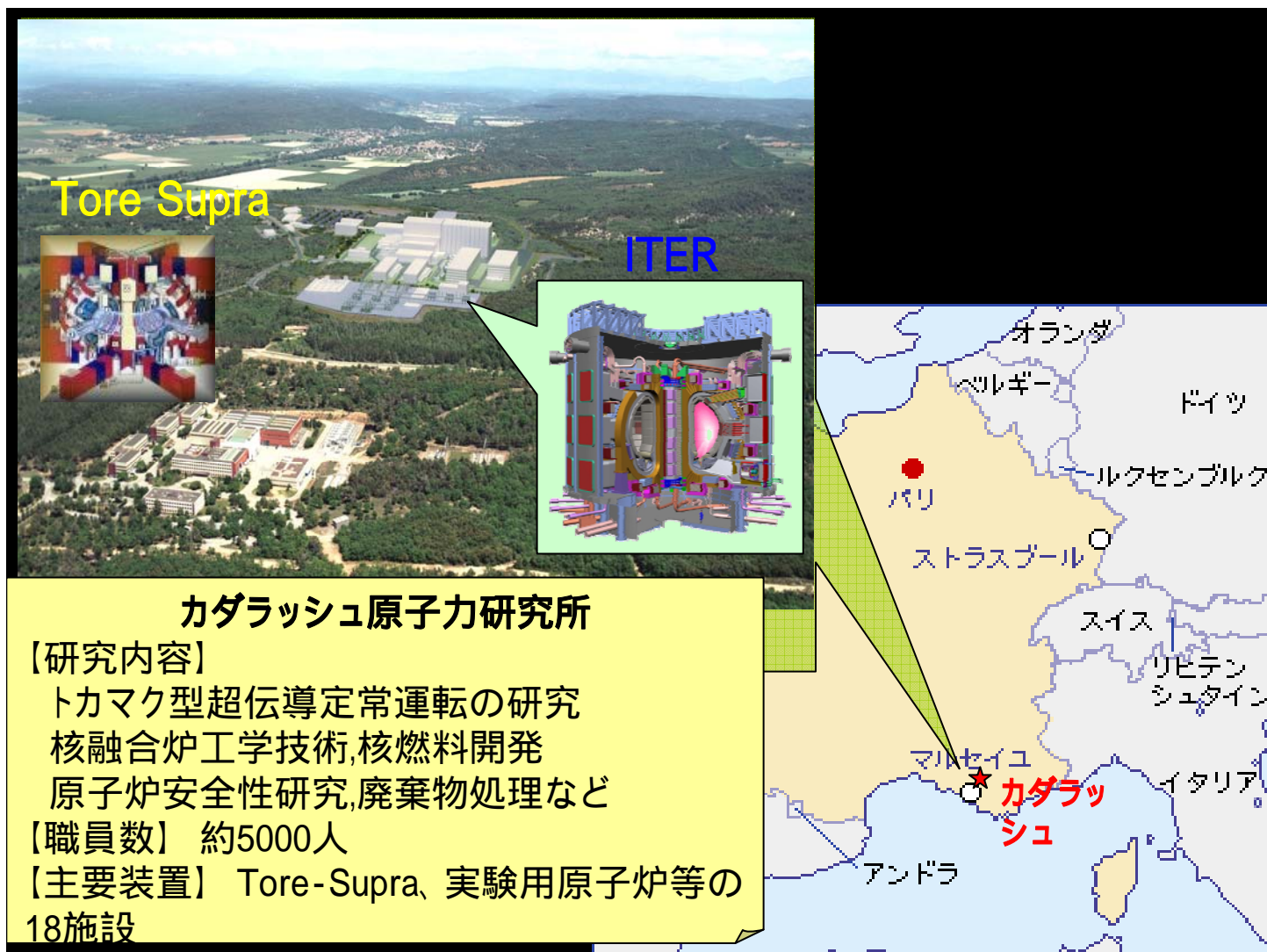


**日本が重要な役割：  
先端機器を一番多く製作、研究者も多く派遣**

## 21 . ITERの建設地: フランス・カダラッシュ

ITERの建設地はフランスカダラッシュに決まりました。カダラッシュは、地中海に近い南フランスにあり、人口120万人のマルセイユから約100km、車で約1時間の距離です。また、地中海沿いの都市エクサンプロバンス（人口15万人）から約40km（車で約30分）に位置しています。

カダラッシュには職員数5000人規模のカダラッシュ原子力研究所があり、超伝導コイルを用いた中型のトカマク装置トールスーパーによる高温プラズマの研究も行なっています。



## 22. 日本が製作分担するITERの機器

### ITERのハイテク機器の多くを 日本が調達します。

#### 中心ソレノイドコイル

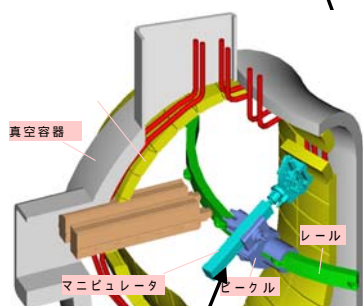
プラズマの立ち上げ、燃焼、立ち下げの制御に必要な磁場を発生する超伝導コイル

#### トロイダル磁場コイル

高温のプラズマを閉じ込めるため磁場を発生する超伝導コイル

#### ブランケット遠隔保守機器

ブランケットの保守・交換作業を行う遠隔操作機器



#### 計測装置

プラズマ中のイオンと電子の密度・温度、不純物、中性子等の分布を測定する機器

#### 高周波加熱装置

電子レンジの原理で電磁波でプラズマを加熱する装置

#### ダイバータ

核融合で発生するヘリウムや不純物粒子を排出する装置

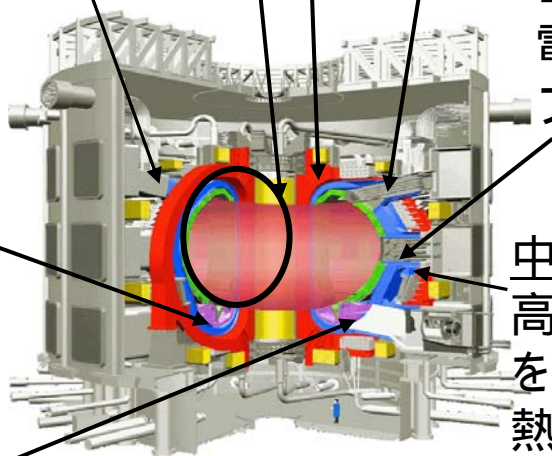
#### 中性粒子入射加熱装置

高エネルギーの中性粒子をプラズマに入射して加熱する装置

#### トリチウムプラント設備

燃料であるトリチウムの分離回収、精製、処理及びプラズマへの再注入を行うための設備

(高電圧機器の一部は日本分担分として調達)





## 23 . ITER機構発足に向けた最近の状況

ITERを実施する主体は、ITER機構という国際機関です。平成18年3月にITER機構長予定者として日本から池田要氏がカダラッシュサイトに着任後、欧州推薦のホルトキャンプ氏が首席副機構長として承認され、組織の基盤整備、副機構長予定者6人の決定などが行なわれました。

これまでの活動拠点であった、ドイツのガルヒンクサイト及び那珂市の那珂サイトは平成18年末に閉鎖され、カダラッシュの共同作業サイトに集結し、活動の準備を進めています。

平成19年2月現在では、ITER機構職員に相当するスタッフは120人で、このほかに滞在研究者10数名、AD技術者、秘書等約50名がカダラッシュサイトで活動しています。

### 機構長予定者




 池田 要氏

### 首席副機構長 予定者




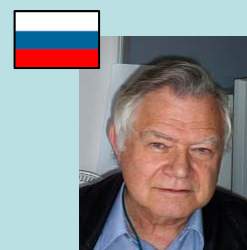
 ノベルト・ホルトキャンプ




 カルロス・アルハンドレ  
(安全担当)




 ワン・シャオキ  
(官房担当)




 バレリ・チュヤノフ  
(核融合科学技術担当)




 ゲリー・ジョンソン  
(トカマク担当)



 ヨン・ハン・キム  
(エンジニアリング担当)



 ディラジ・ボラ  
(制御・加熱電流  
駆動・計測担当)

## 24 . ITER協定案に署名

平成18年11月、パリ・エリゼ宮でITER実施協定の調印が行なわれました。署名後、可能な範囲で実施協定を暫定適用し、実質的なITER機構体制での活動を始めました。ITER機構は、フランスの法人格を持ち、基金を基に、契約及びスタッフの雇用が可能です。

平成19年中には、各締約極における手続きに従い、全ての加盟極が批准などを行なった後、協定が発効し、ITER機構が正式に発足することになります。平成19年3月時点では、4極の国内手続きが終了しています。我が国では平成19年3月現在、国会で協定案の審議が行なわれているところです。

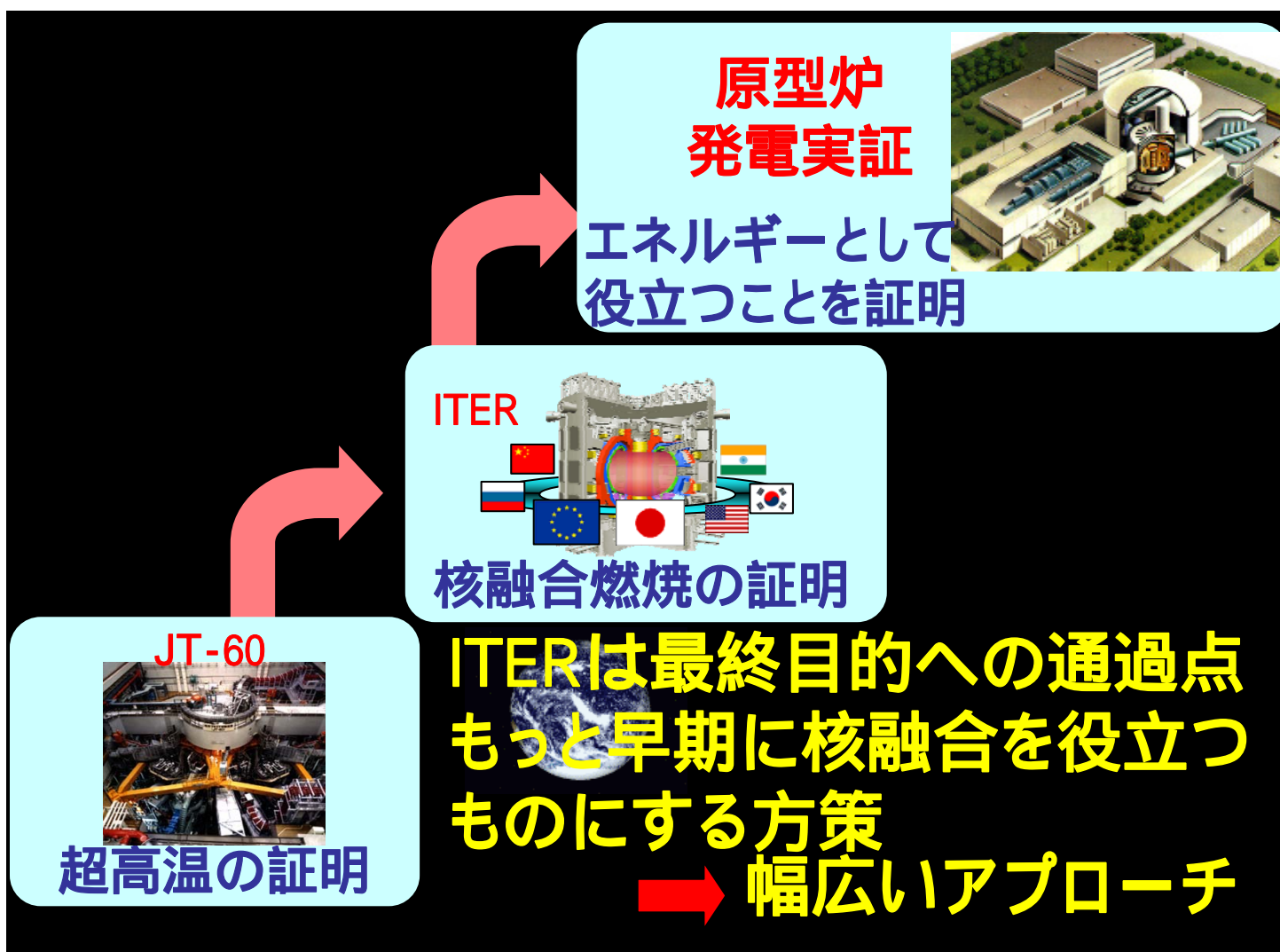
### ITER協定署名式 2006年11月21日(火)パリ、エリゼ宮



## 25. 核融合研究開発の開発ステップ

これまでのJT-60などの成果に基づいて、国際協力により50万キロワットもの核融合エネルギーを発生させる試み、ITER計画に着手しようとしています。しかし、ITER計画を行なうことが最終目的ではありません。核融合で電気を発生させ、核融合がエネルギーとして人類に役立つことを証明することが最終目的です。したがってITERはこの最終目的に向かう重要な通過点なのです。

私たちは、できる限り早くこの最終目的に到達するためのあらゆる努力をしなければなりません。ITERの国際協議を行なっている過程で、日本と欧州で協力して、ITER計画と並行して核融合の早期実現に必要な研究協力を行なうことに合意しました。このITER計画と並行して日欧で進める研究プロジェクトを幅広いアプローチと呼びます。



## 26. 技術開発における幅広いアプローチ

動力エンジンの開発に成功して、そこから、どのようにジャンボジェット機まで到達するか、比喩的に紹介することで、技術開発における幅広いアプローチを説明したいと思います。

まず、動力エンジンを用いて人類が空を飛べることを実証しなければなりません。しかし、空を飛べるという証明を待っているだけではジェット機に到達するのに非常に長い時間がかかります。空を飛ぶ試みと並行して、より抵抗の少ない機体の設計、レーダーなどの遠隔制御技術、計算機によるシミュレーション、軽くて強い材料や耐熱材料、性能改良機などの幅広い技術開発を進めなければなりません。これらの研究開発を空を飛ぶ試みと並行して進めることにより、ジャンボジェット機的设计・製作の早期実現が可能となります。

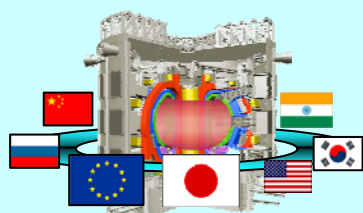


## 27. 核融合での幅広いアプローチ

電気の発生を目指す核融合研究の幅広いアプローチも同じです。JT-60などの超高温プラズマの研究成果により、実験炉ITERを用いて、人類がはじめて制御された形で核融合エネルギーを大量に発生させ、核融合エネルギーの科学的・技術的可能性を実証します。しかし、このITERの試みと並行して、発電炉の設計、遠隔実験技術、計算機によるシミュレーション、強くて長寿命の材料、炉心性能改良のためのサテライトトカマクなどの幅広い技術開発を進め、これらの成果を統合して、早期に発電実証する原型炉を実現する、このような幅広い取り組みを日本と欧州が協力して進めるのが、核融合の幅広いアプローチなのです。

### 原型炉 発電実証

安全で効率的・効果的に  
エネルギーとして役立つ



実験炉ITER



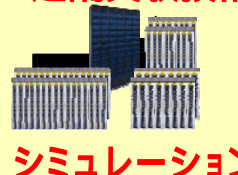
JT-60



原型炉設計R&D



遠隔実験技術



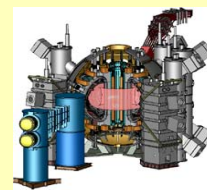
シミュレーション

国際核融合  
エネルギー研究センター



材料照射施設開発

青森県で展開



JT-60SA  
(サテライトトカマク)



幅広いアプローチ

## 28. 幅広いアプローチ:

### 国際核融合エネルギー研究センター

幅広いアプローチプロジェクトの一つである国際核融合エネルギー研究センターでは、計算機シミュレーション、遠隔実験、原型炉設計 R&D 調整などの活動を行います。

原型炉設計R&D調整センター：原型炉の概念設計研究を日欧で実施し、開発課題の抽出、関連する予備的R&D活動を実施

ITER遠隔実験センター：高速ネットワークを利用して、日本の研究者がITERの実験条件の提案・データ収集・解析等を行う。

計算機シミュレーションセンター：次世代グリッドコンピュータを用いて、ITERの燃焼プラズマ挙動、サテライトトカマクの先進定常プラズマ挙動、次世代核融合炉設計、先進材料開発等に関連するシミュレーションを実施。

### 幅広いアプローチ 国際核融合エネルギー研究センター

#### 原型炉の設計と予備的 R&Dの実施

##### 原型炉設計研究開発調整



#### ITER遠隔実験センター からITERの実験に参加



#### 次世代グリッドコンピュータを用いた核融合シミュレーション

##### 核融合シミュレーション



青森県六ヶ所村で実施

## 29. 幅広いアプローチ:

### 原型炉R & D調整ブランケット関連技術開発

原型炉設計R&D調整活動の例としてブランケット関連技術開発を紹介します。

原型炉を実現するためには、発電用の熱を取り出し、燃料であるトリチウムを製造するブランケットの開発が重要です。原型炉R&Dセンターでは原型炉のための予備的R&Dとして、ブランケットのためのR&Dを重点的に進めます。ブランケットの構造材料でありプラズマに面する第一壁材料の開発、ブランケットの構造設計、中性子を増やすための増倍材（ベリリウム）、トリチウムを増殖する増殖材（リチウム）などの機能材料、遠隔保守技術などの技術開発に加え、トリチウム回収技術・計測技術などの研究開発を行ないます。

**保守技術の開発**

ブランケットはプラズマを取り囲むように設置

モジュール構造、遠隔保守機器で脱着

**第一壁材料の開発**

**構造設計**

ブランケット内部にベリリウム(中性子増倍材)、リチウム(増殖材)が冷却配管とともに層状に設置

1500mm

リチウム

ベリリウム

**増倍材、増殖材等の機能材料の開発**

高さ1~1.5m程度 (ITERの遮へいブランケット)

ベリリウム、リチウムは粒状

リチウム ベリリウム

# 30. 幅広いアプローチ:

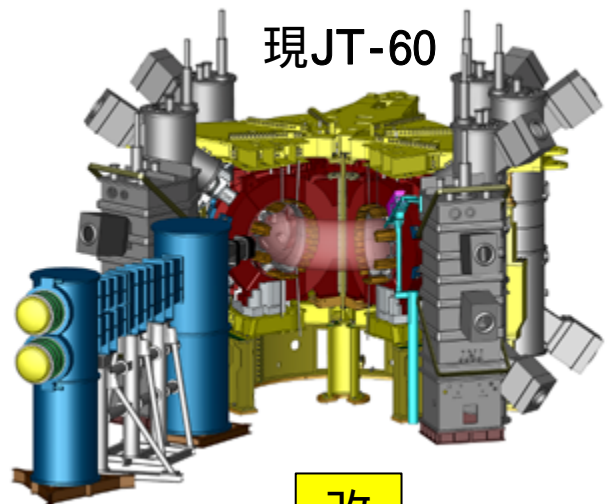
## サテライトトカマク JT-60超伝導化改修

幅広いアプローチプロジェクトとの一つとして、日欧で協力してJT-60に超伝導コイルを導入する改修を行ないます。既存の電源や建家等のJT-60施設を有効活用し、トカマク本体だけを入れ替え、加熱装置など一部の施設を改造します。平成19年に超伝導コイル部品の製作に着手し、平成26年頃からITERのサテライトトカマクとしてITER計画を支援するとともに、国内トカマク重点化装置として人材育成及び原型炉のための新領域の開拓のための炉心プラズマ研究に着手する予定です。

現JT-60



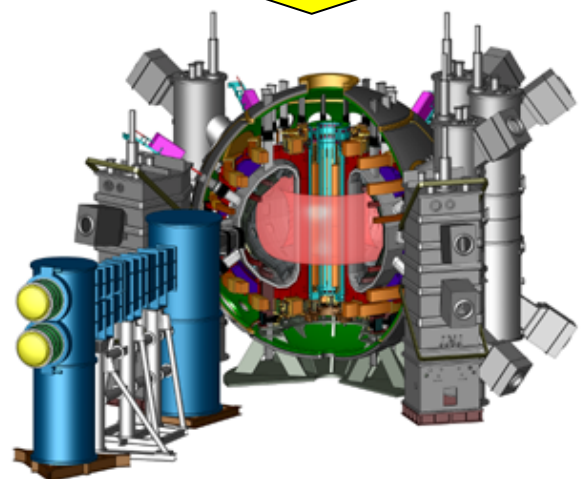
現JT-60



改修

JT-60SAのパラメータ

プラズマ電流	550万アンペア
主半径	3.01m
副半径	1.14m
楕円度	1.83
磁場	2.72テスラ
持続時間	100秒



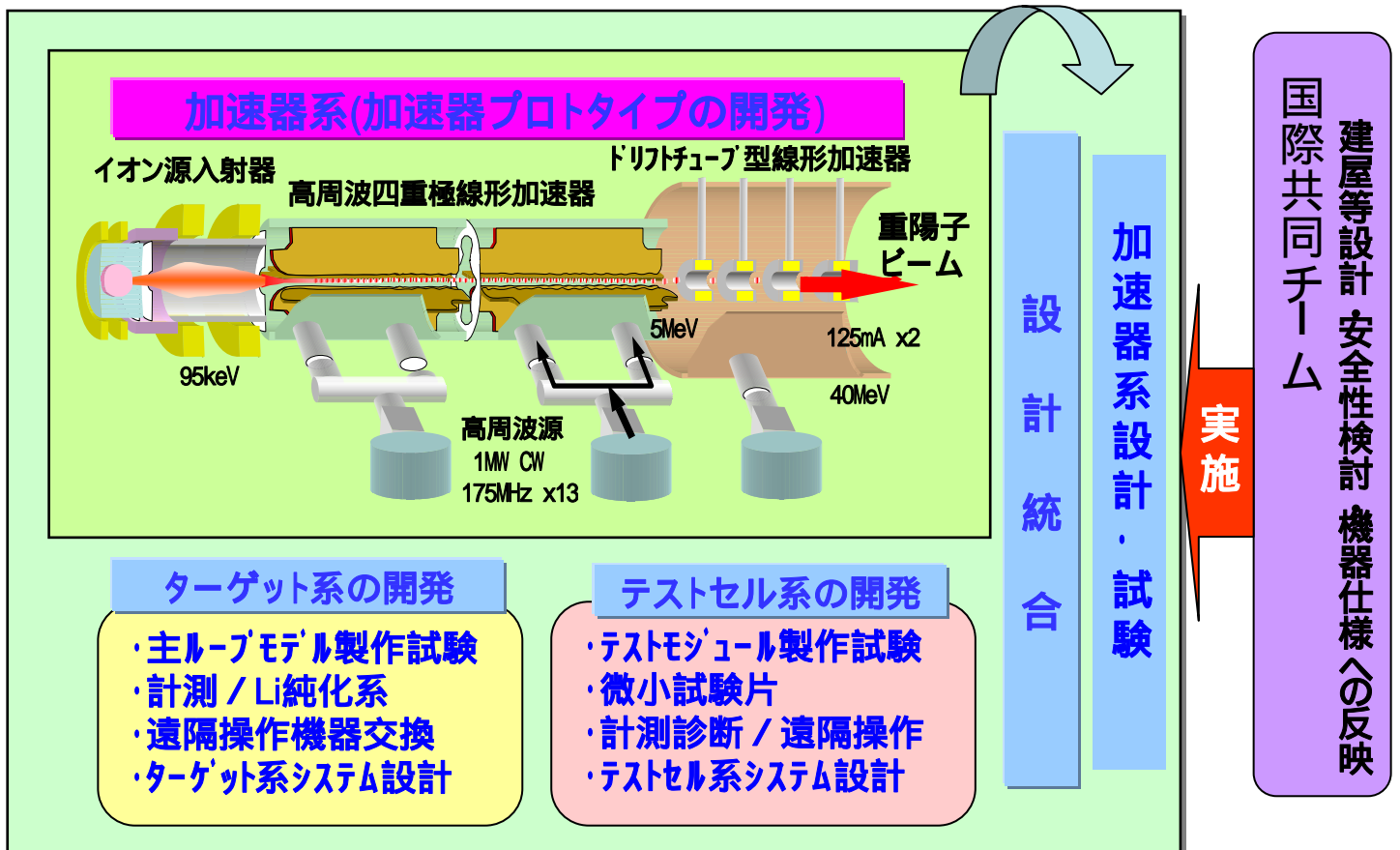
改修後のJT-60(JT-60SA)



# 3.1. 幅広いアプローチ: IFMIF-EVEDA

## 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計

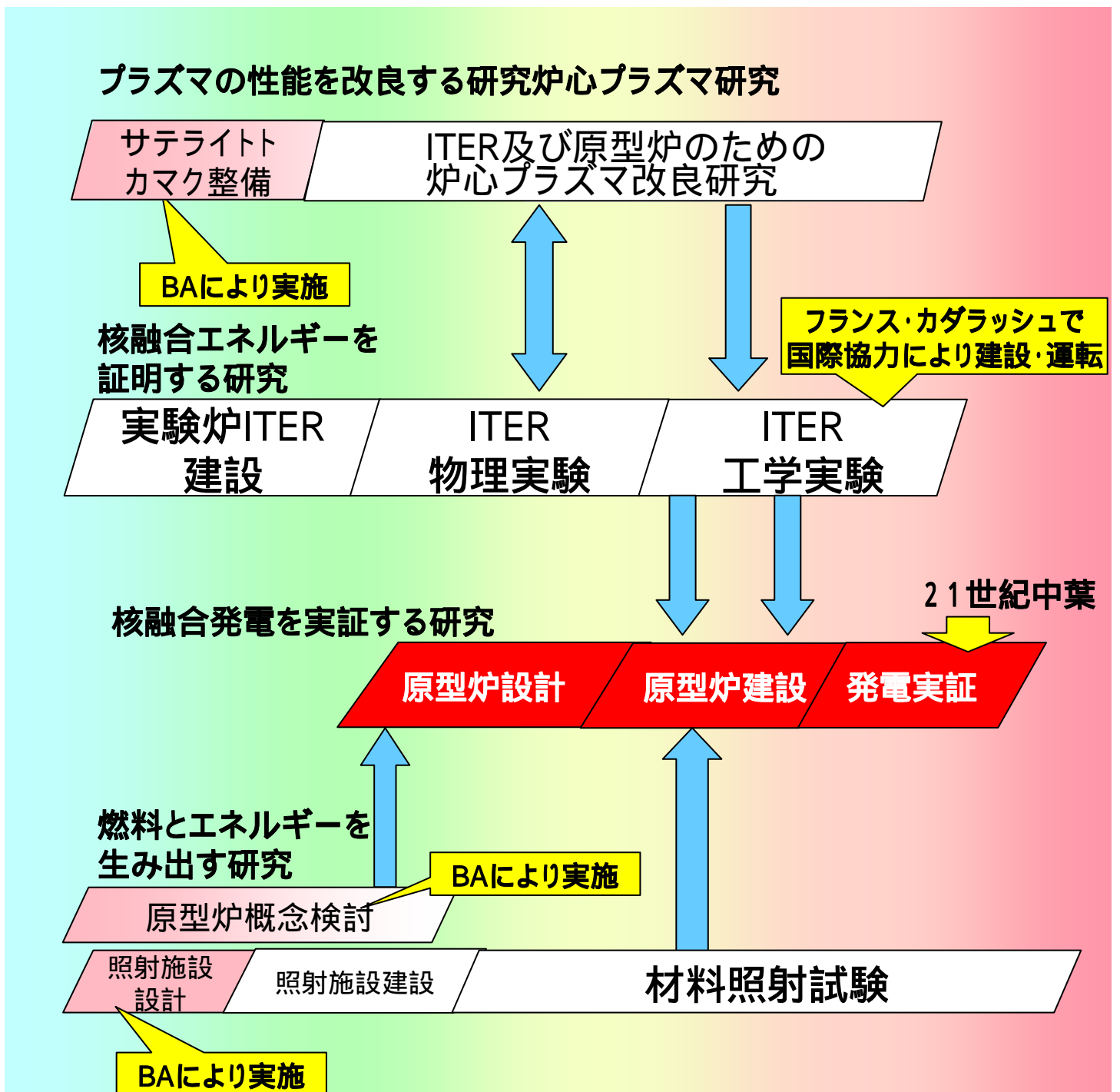
原型炉の建設のためには、原型炉の第一壁が長時間の強力な核融合中性子照射に耐えることを証明する必要があります。残念ながらそのような強力な中性子を長時間にわたって照射する施設がありません。世界中の核融合研究者は、そのような核融合中性子の照射施設が必要であると考え、1995年から国際協力で核融合材料用照射施設の概念設計、要素技術開発を進めてきました。これをさらに一歩進めて、幅広いアプローチプロジェクトの一つとして、国際核融合材料照射施設（IFMIF）の工学実証・工学設計活動を行ないます。IFMIFの建設判断に必要な十分に統合された工学設計とその裏付けとなる技術データを取得することを目的として、総合的なIFMIFプラントの最終設計と原型コンポーネントの製作プロセスの開発とIFMIFの運転上クリティカルとなる長時間耐久性などの性能実証を行います。



# 32. 核融合エネルギー実現までの道筋

## -ITERと幅広いアプローチの役割-

核融合エネルギーの実現に向けて、ITER計画、幅広いアプローチ（BA）計画を中心として、21世紀中葉の核融合発電に向けて研究を進めます。



## 33.まとめ

### 核融合は魅力あるエネルギー源

無尽蔵、高い環境適合性、安全・安心、資源の偏在なし  
けれども、容易ではない

最先端技術、優れた研究者、持続的な開発、  
世界規模の協力が必要

### 核融合実験炉(ITER)建設がスタート

人類が初めてその制御下で50万kWの安定した核融合  
エネルギーを実証  
核融合エネルギーの科学的・技術的成立性の実証を行う

### 30年にわたる世界規模の研究協力が必須

日本が果たす役割は大きい(多くの先端機器を分担、  
優れた研究者を多く派遣)

### 核融合を利用するための研究の着手

核融合エネルギーを電気や燃料に変換するための総合  
的な技術開発の準備

原子力機構は、これまでの実績を活かして、  
ITER計画や幅広いアプローチ計画等の実施  
を通して、核融合エネルギーの早期実現の  
ための研究開発を進めていきます

# FAQ

- R 1. リチウムを取り出す技術は進展している？
- R 2. 核融合炉から発生するヘリウムガスについて
- R 3. 核融合の出力の計算方法を越えて反応を起こさないか？
- R 4. トリチウムは外部に漏れる危険はありませんか？
- R 5. 冷却装置に異常が発生した場合に何が起きるか？  
電源喪失時に何が起こるか？
- R 6. プラズマはブランケットに触れないか？  
プラズマの熱はどうブランケットに伝わるか？  
普通の場合ブランケットは何度に耐える必要があるか？
- R 7. 中性子は完全に遮へいできるか？
- R 8. 冷却材の温度、圧力は？  
電気出力100万kWの核融合炉を動かすための電力は？
- R 9. 核融合の出力の計算方法
- R 10. ダイバータとはどんなものか？役割と仕組み
- R 11. プラズマ中の断熱層の作り方

# R1. リチウムを取り出す技術は進展している？

リチウムの海水からの回収は技術的に  
経済的にめどがたっているか？

100万kW級の核融合炉1500基が1年間に使うリチウム量は1.5万トンです。  
鉱物埋蔵量940万トンでは600年もちます。

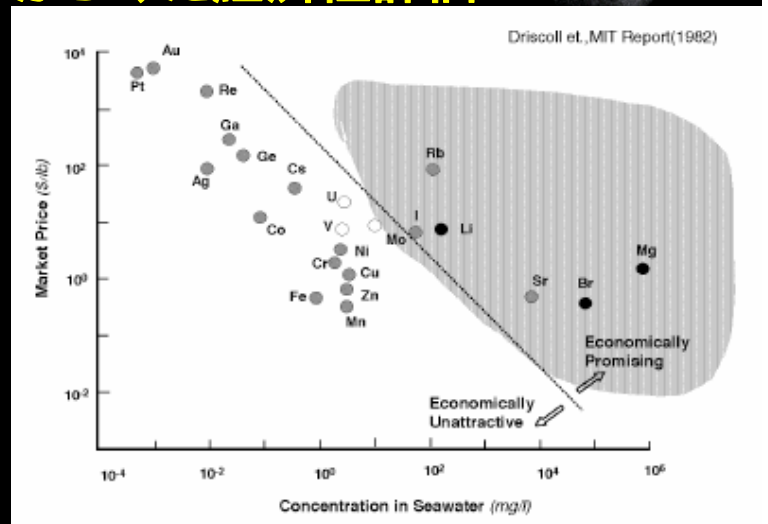
海水の溶存金属濃度と市場価格  
からみた経済性評価

海水リチウム回収について

リチウム濃度は170ppbで  
海水中資源量は2330億トン

四国工業技術研究所

- ・マンガン酸化物系吸着材による海水リチウム採取の研究
- ・イオンふるい落とし結晶法でリチウムの高い濃縮度を実現



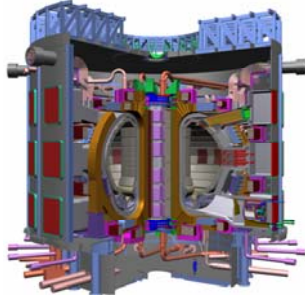
マンガン酸化物系吸着材を海水流に設置し炭酸リチウムとして回収する。その採取コストは採取船の場合、市価400円/kg-Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の倍程度700円/kg-Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>と推定されている。

## R 2 . 核融合炉から発生するヘリウムガスについて

核融合発電をどんどんすると地球がヘリウムに覆われてしまい、木星のように死の星になるのでは？  
地球環境に悪さをするのでは？

電気を100万kW発生する核融合炉を1年間動かし続けると、直径13m位の気球を1個作れる位のヘリウムができます。

ITERの1回の放電



風船1個分のヘリウム



核融合発電炉1台1年運転



直径13mの気球の1個



全世界で稼働中の原子力発電施設429基(1997年)の総発電電力(3億6000万kW)を全て核融合炉で発生させるとすると、概略360台の核融合炉が必要ですので、年毎に360個の気球ができるに過ぎません。

これは成層圏に存在するヘリウム量の約3億分の1に過ぎません。ヘリウムは安全で安定したガスなので、この程度のヘリウムが発生したとしても、何の問題も発生しません。

## R3 . 核融合の出力の計算方法を超えて

反応を起こさないか？

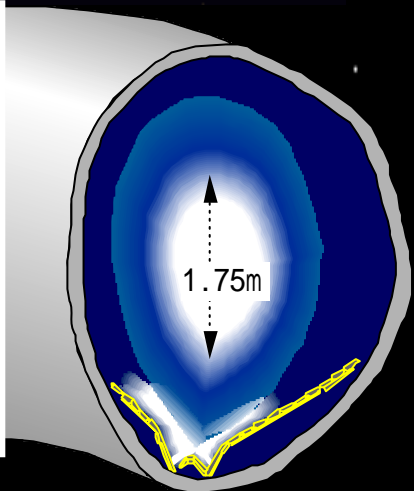
**反応を起こさない**：なぜなら、R9に示す計算はプラズマ中にある全ての燃料イオンが反応した時のもので、これ以上反応を起こす燃料がない

**数十秒分の燃料はどこにある？**：プラズマの外にイオンではなく通常のガスの状態(壁温程度)で漂っている。

**燃料供給はどうするのか？**：

1. プラズマの外に漂っている中性ガスをじわじわとしみ込ませる
  2. 外から入射する中性粒子ビームで補給する
  3. 燃料を固体(重水素と三重水素の氷)にして高速で注入する
- 上記1は容器内に燃料の素があるが、2、3は容器外から入射する

予想外の反応が起きるためには、容器とプラズマ間に漂っている数十秒分の燃料の素が数億のプラズマまで到達しなければならないが、それは不可能。簡単には、密度が低い所から高い所へ逆流しない。

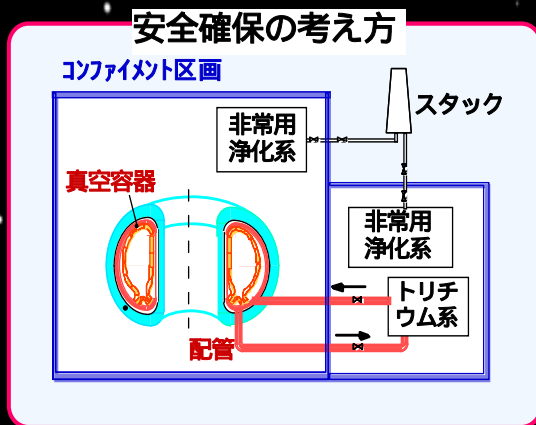
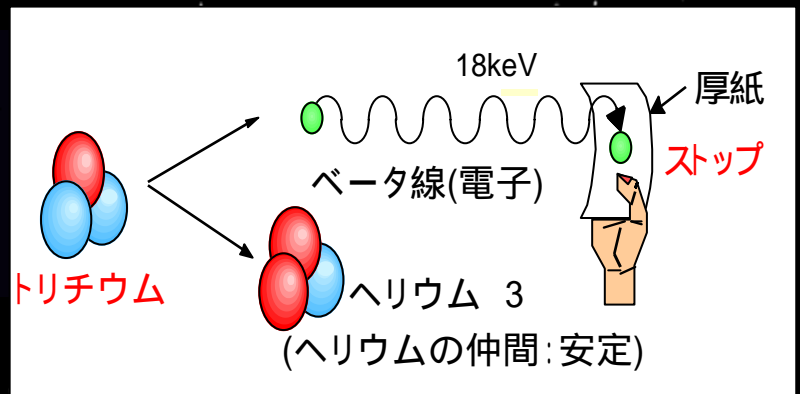


# R4. トリチウムは

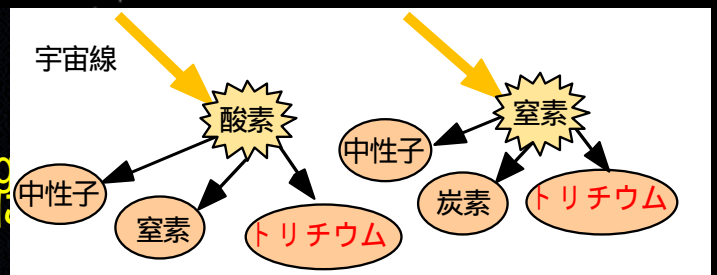
## 外部に漏れる危険はありませんか？

漏れることが無いとは言えないため、  
トリチウムの閉じ込め性能を確保する必要がある

トリチウムを出す放射線は、厚紙や皮膚等を透過できないため、外部被ばくは問題となりませんが、体内に取り込まれた場合の内部被ばくは考慮する必要があります。



炉本来の運転要求 気密性、堅固さが自動的に確保されているその上で多重閉じ込め、影響緩和を行う



トリチウムは宇宙線で年間 200g 天然に作られています。(水 1 中に数億個存在します)

体内に取り込まれたトリチウムは、汗や尿と共に代謝により体外へ排出され、個人差はありますが、約 10日で半分の割合で減少していきます。

- トリチウムの閉じ込め性能を確保し、放射線障害の防止を図る
- ・事故の発生防止 : 放射性物質を内包する機器の構造・強度の確保
- ・事故時の影響緩和 : 万一事故を仮定しても、放射性物質の除去・低減



## R5 . 冷却装置に異常が発生した場合に何が起きるか？

### 電源喪失時何が起こるか？

#### ブランケットの冷却装置に異常が発生し、 冷却水が流れなくなったら？

現在、原子力機構が想定しているITERで試験する予定の固体増殖水冷却方式のブランケットの場合、冷却水温度は280～325℃を想定。この時、増殖材であるリチウムは最大で900℃、中性子増倍材のベリリウムは最大で600℃を想定し、第一壁構造材料である低放射化フェライト鋼は最大で500℃としている。このようなブランケットの冷却装置に異常が発生し、冷却水が流れなくなった場合、第一壁表面から熱と中性子が来るので、第一壁表面の温度が上昇し、やがて構造材料の表面が溶け蒸発し始め、炉心プラズマに混入する。わずかな金属不純物の混入により、炉心プラズマの閉じ込め性能が劣化し、プラズマの温度が下がり核融合出力が低下する。極めて多量の金属不純物が混入した場合には、ディスラプションに至る。

#### 電源喪失に至った場合に何が起こるか？

JT-60では、運転中30分平均で系統系電力40MWを消費している。停電時には、計算機等の制御機器の正常動作を確保するため、無停電電源(バッテリー)を有しているほか、受電容量の約1/4の非常用電源(ディーゼル発電機)を有しており、最低限機器を安全に停止するための電源を確保している。将来の核融合炉も非常用として同様の設備が整備される。外部の系統系から受電するのは炉を運転する最初の期間だけで、炉が定格運転となれば、核融合炉自身で発電する電力を利用する。その際にも当然、非常用の電源は準備される必要がある。

- R 6 . プラズマはブランケットに触れないか？  
プラズマの熱はどうブランケットに伝わるか？  
普通の場合ブランケットは何度に耐える必要があるか？

### プラズマはブランケットに触れないか？

プラズマ着火や立ち上げ時の1時期にはプラズマが直接ブランケットに触れるが、この時期のプラズマは温度も低くブランケットの表面の第一壁を損傷しないようにすることが可能。通常運転時(核融合燃焼している時)に、計算機や電源等のプラズマ制御系に異常が発生し、完全に制御できない状態に至った場合やディスラプションを緩和する制御が不能になった場合等には、超高温のプラズマが第一壁に触れる場合がある。

### プラズマの熱はどうブランケットに伝わるか？

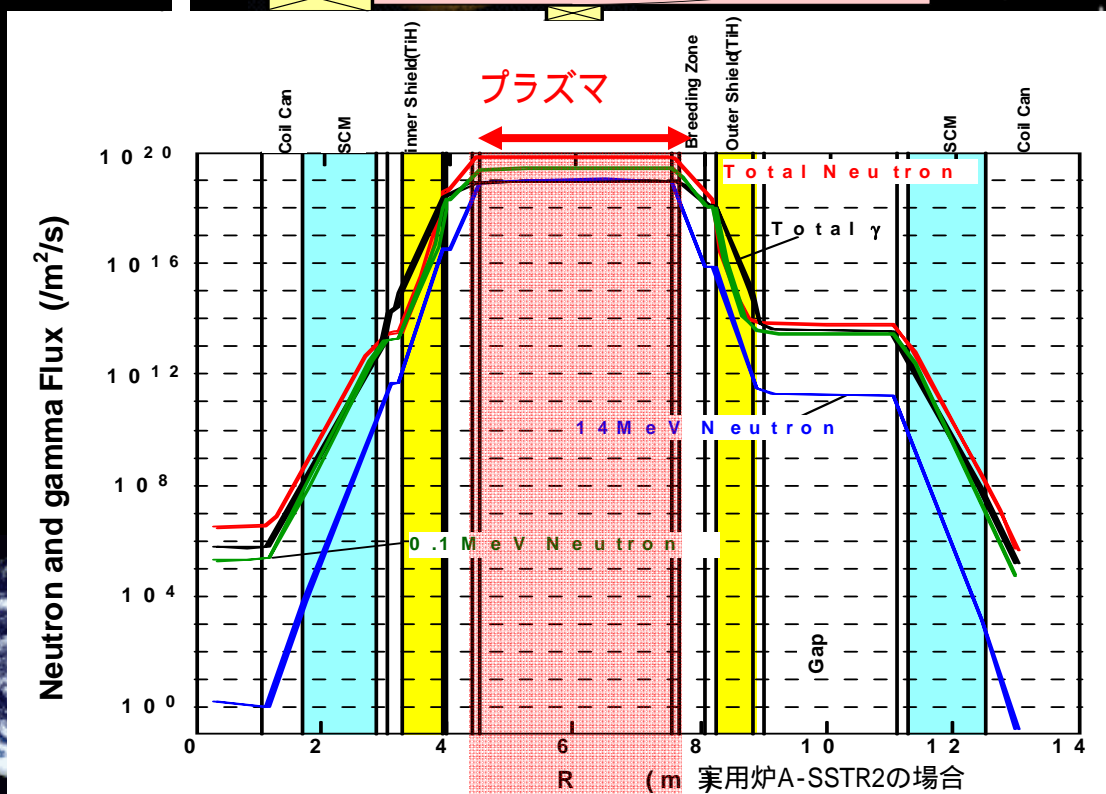
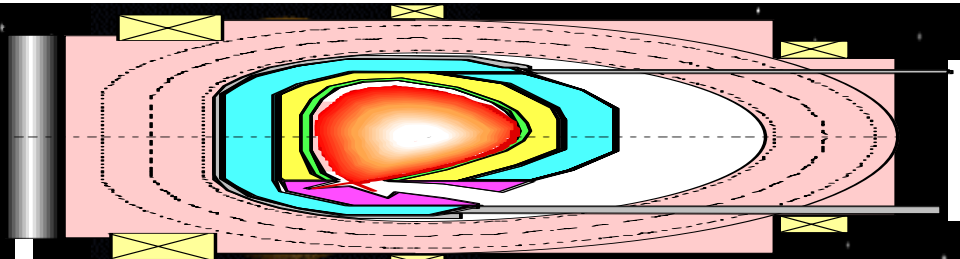
通常運転時、プラズマの熱は直接的にはブランケットに伝わらない。プラズマの熱は、ダイバータ部に流れる。核融合反応で発生した中性子がブランケットに吸収されて出る熱とプラズマから発生する電磁波等でブランケットに熱が伝わる。

### 普通の場合ブランケットは何度に耐える必要があるか？

ITERで試験する予定の固体増殖水冷却方式のブランケットの場合、第一壁の最大温度として500 を想定。

## R7 . 中性子は完全に遮へいできるか？

- ・中性子は完全には遮へいできません。
- ・中性子が超伝導コイルを放射化すると、発熱が起こり超伝導導体が維持できなくなるため、十分遮へいする必要があります。
- ・超伝導コイルの外側には、クライオスタットと呼ばれる真空断熱壁を設けていますが、真空容器とクライオスタットとの間には十分スペースがあるので、必要に応じて遮へい体をおくことができますので、実質クライオスタットの外側には中性子が漏れないようにできます。
- ・更に、本体を設置している建家にも遮へい効果がありますので、プラント外への漏れは完全になくすることができます。



## R 8 . 冷却材の温度、圧力は？

電気出力100万kWの核融合炉を動かす為の電力は？

### 冷却材の温度、圧力は？

ITERで試験する予定の固体増殖水冷却方式のブランケットの場合、冷却水温度285 ~ 325 圧力15.5MPaを想定。構造材料の開発等が進めば、冷却水温度は285 ~ 510 圧力は25.5MPaといったより高温・高圧の冷却を期待している。ヘリウム冷却で900 という先進的な炉設計例もある。

### 電気出力100万kWの核融合炉を動かすための電力は？

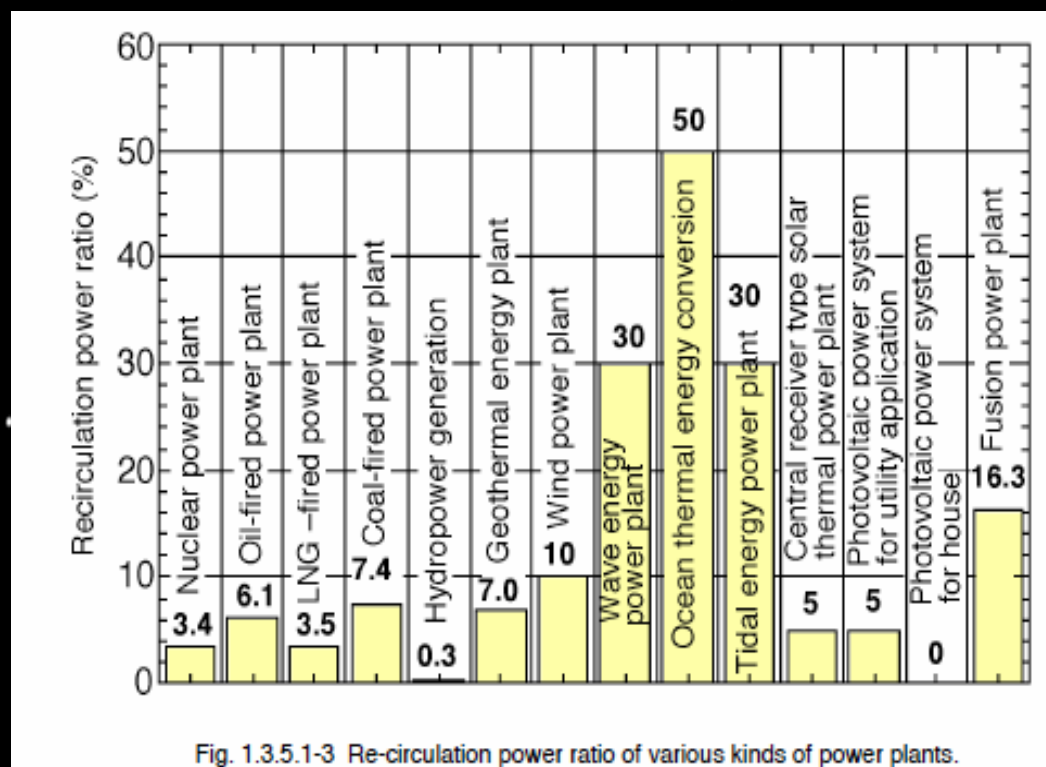


Fig. 1.3.5.1-3 Re-circulation power ratio of various kinds of power plants.

各種発電システムの所内電力比(循環電力 / 発電機末端電力)

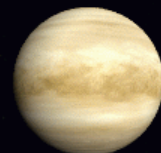
原型炉SSTR(100万kW、原研)では、16.3%程度の循環電力が必要としている

# R 9 . 核融合の出力の計算方法

1回のDT反応で出てくるエネルギー

$$E_f = 17.6\text{MeV} = 2.8 \times 10^{-12}\text{J} = 7.8 \times 10^{-19}\text{kWh}$$

(その内中性子のエネルギーは80%)



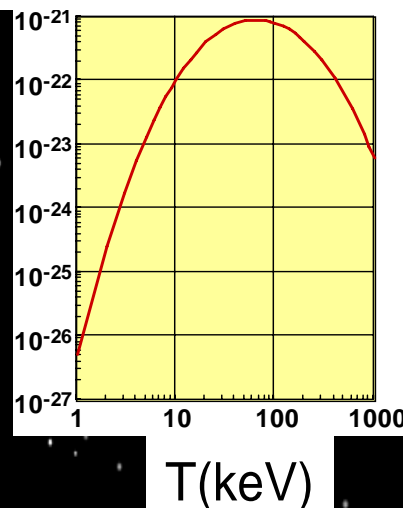
密度n、温度Tのプラズマの核融合出力

$$P_f = 1/4 \cdot n^2 \langle \sigma v \rangle E_f$$

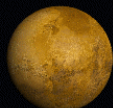
$\langle \sigma v \rangle$ は核融合反応断面積(右図参照)

20keVでは $4 \times 10^{-22}\text{m}^3/\text{s}$

DT反応断面積の温度依存性



$\langle \sigma v \rangle (\text{m}^3/\text{s})$



温度が20keV、密度が $10^{20}\text{m}^{-3}$ の核融合出力の計算

$$P_f = \underbrace{(10^{20}\text{m}^{-3})^2}_{n^2} \times \underbrace{4 \times 10^{-22}\text{m}^3/\text{s}}_{\langle \sigma v \rangle} \times \underbrace{2.8 \times 10^{-12}\text{J}}_{E_f} \div 4$$

$$= 2.8 \times 10^6 \text{ m}^{-3}\text{J/s} = 2.8 \times 10^6 \text{ Wm}^{-3}$$

温度20keV、密度が $10^{20}\text{m}^{-3}$ の核融合出力は $1\text{m}^3$ あたり2.8MW

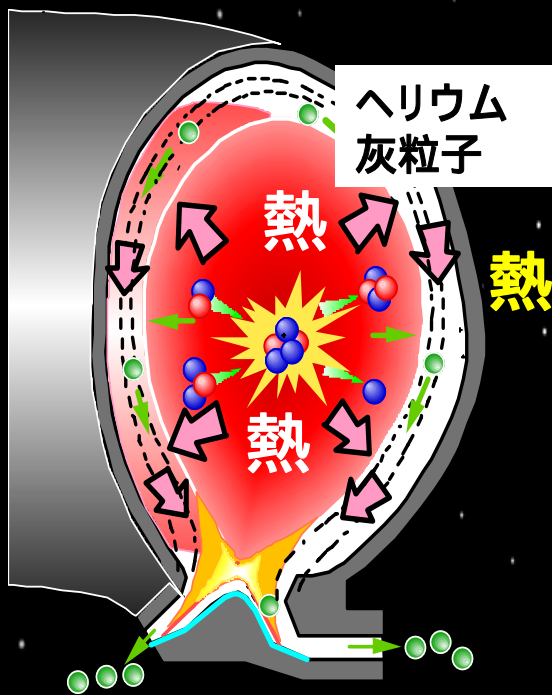
プラズマが $1000\text{m}^3$ で一様とすれば、  
2.8GWの核融合出力となる



# R10. ダイバータとはどんなものか？

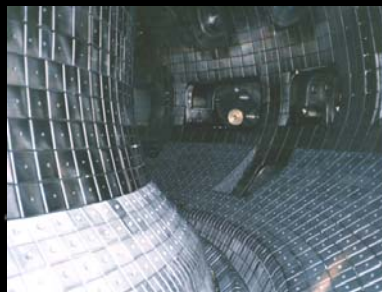
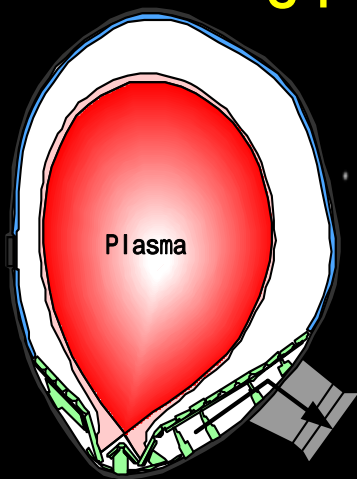
## 役割と仕組み

プラズマ電流と同じ向きに電流を流して  
プラズマ表面の磁力線をダイバータに引き込み、  
プラズマからの熱・粒子を処理

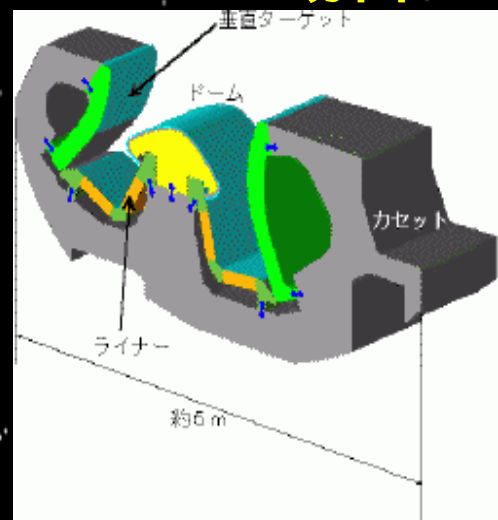


**ダイバータ：  
熱除去・粒子排気**

JT-60の場合



ITERの場合

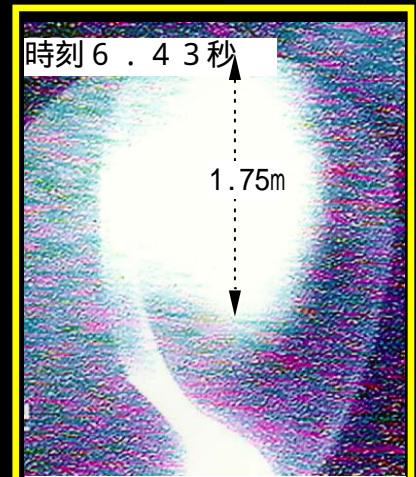
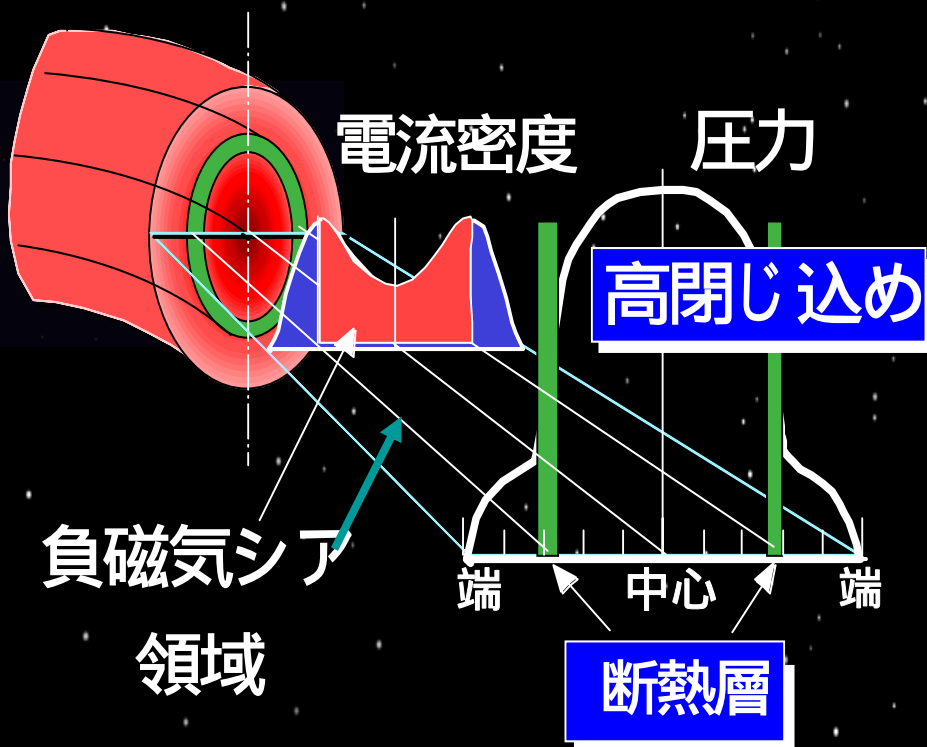


**ダイバータは日本(旧原研)の発明**

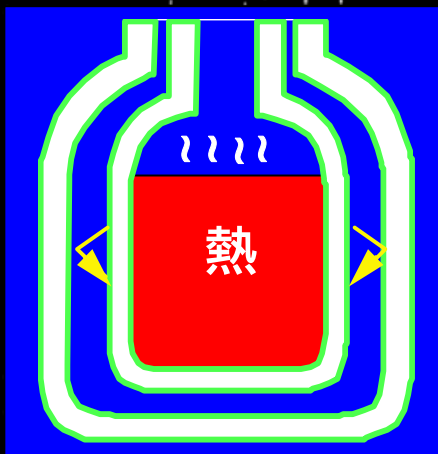


# R11. プラズマ中の断熱層の作り方

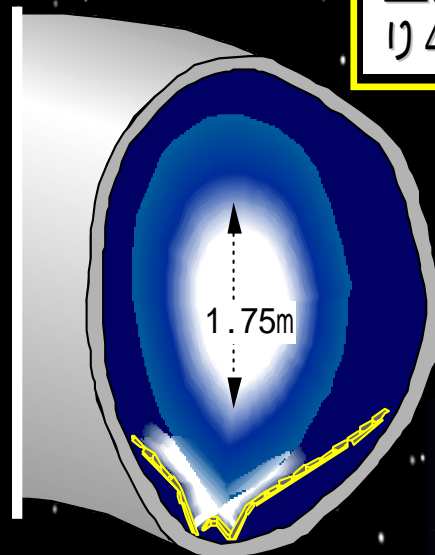
プラズマ中に流れる電流の分布を凹型にし、磁力線の捩じれ度合いを通常の状態の逆にする(磁気シアを負にする)ことで、断熱層を形成する。



中央部の明るい部分は、断熱層の内側の高閉じ込め部分  
温度は1億9千万度、密度は1立方センチ当たり48兆個



二重の断熱層





平成19年3月  
RCG2007.1-1