

The background image shows the interior of a tokamak vacuum chamber, characterized by its complex, curved metallic structure and numerous small ports and components. The lighting is dramatic, with bright highlights and deep shadows, creating a sense of depth and technical complexity.

# 1億度にプラズマを加熱する - 太陽を地上に -

竹 入 康 彦

総合研究大学院大学 核融合科学専攻  
自然科学研究機構 核融合科学研究所

サイエンス・カフェ  
2012年6月23日 湘南国際村センター

写真: LHDの真空容器内部

# 人類の母なる太陽

## 地上に太陽を創る挑戦

太陽のエネルギー源

核融合  
(フュージョン)

宇宙のエネルギー  
太陽(星)のエネルギー  
核融合

宇宙の目に見える物質の99%はプラズマ  
空に輝く太陽や星のエネルギー源は核融合反応

宇宙が誕生して 137億年  
ビッグバン、核融合反応の開始

# 太陽の核融合反応

水素(陽子) 4個が融合してヘリウムに



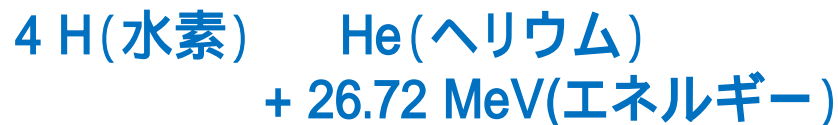
46億年前から安定に燃焼 → あと50億年以上燃え続ける

# 太陽(恒星)は核融合により輝き、 エネルギーを創成

---

## 太陽の核融合

水素(陽子) 4個が融合 (Proton-Proton  
反応:P-P反応)してヘリウムに



### 太陽の中心(核)

主成分:水素

圧力:2,500億気圧

温度:1,500万度

密度:160 g/cc

水素が高温のガス「プラズマ」状態  
になっている

発生したエネルギーは、  
約50万年かけて表面まで達し、  
宇宙空間に放出される

46億年前から安定に燃焼

あと50億年以上燃え続ける

# そして、宇宙の物質は核融合により創られた

---

- 水素が燃え尽きると赤色巨星となり、ヘリウムから炭素、窒素、酸素と核融合が進み、最後に鉄になります。
- その後、超新星爆発により、さらに重い元素が生成され宇宙空間にばらまかれます。



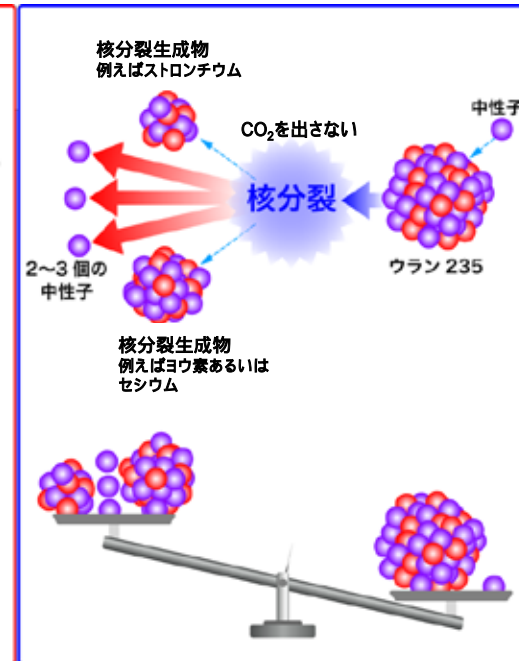
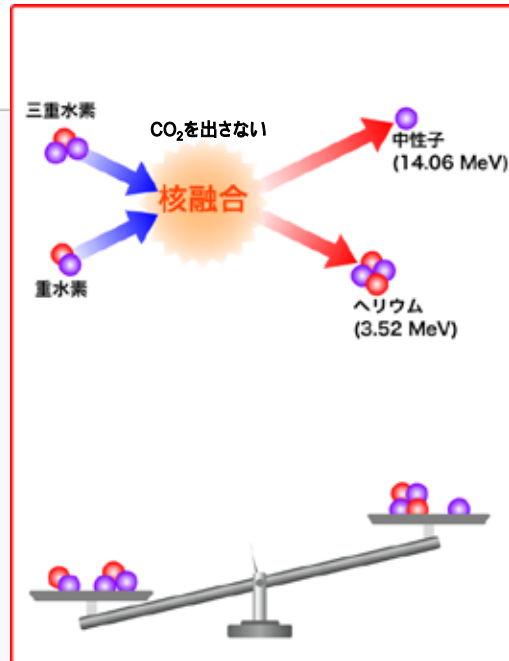
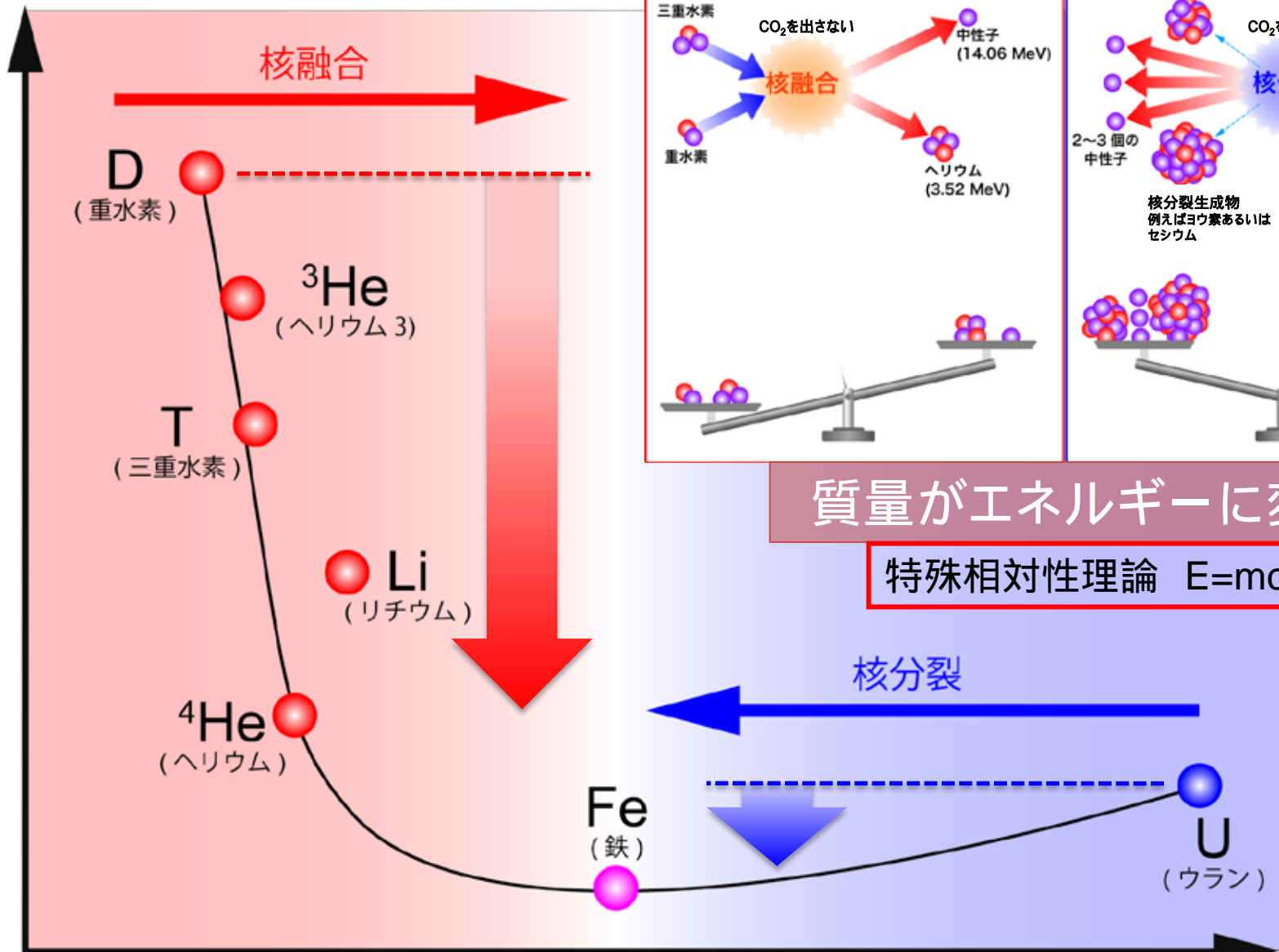
赤色巨星では、核融合により重元素がタマネギ状に創られる

核融合反応とは  
—地上に太陽を創る—



# 核融合と核分裂(原子力)

原子核の粒子当たりのエネルギー



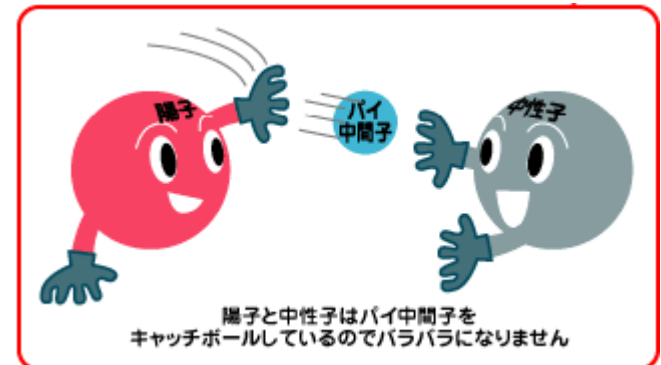
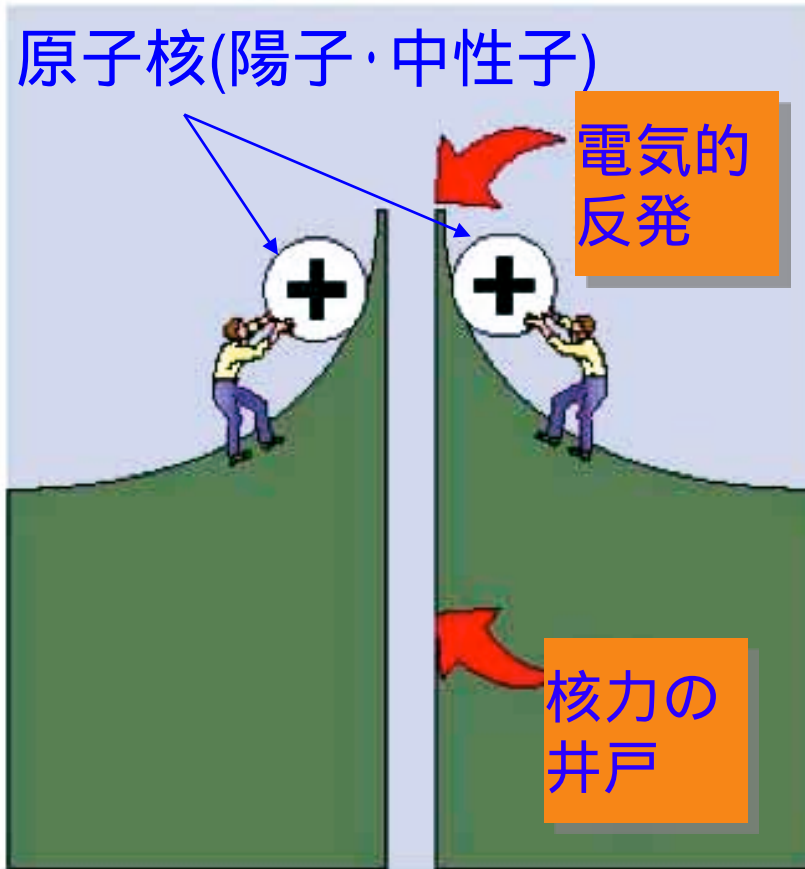
質量がエネルギーに変化

特殊相対性理論  $E=mc^2$

原子の重さ

# どうして原子核同士がくっつくのか？ —湯川秀樹の中間子論—

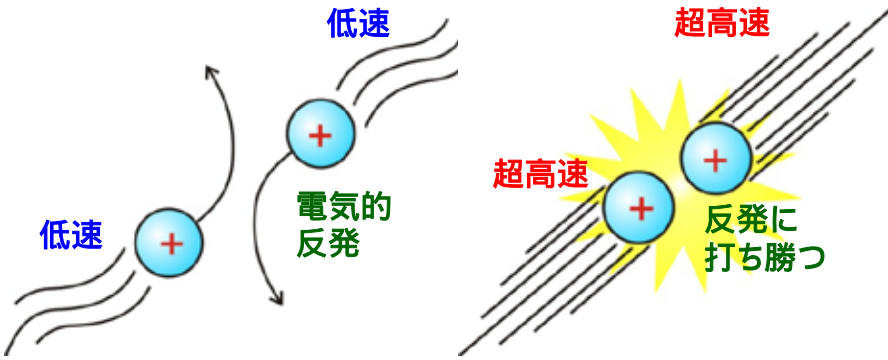
ある距離まで近づけば今度は互いに引き合う！  
湯川秀樹博士



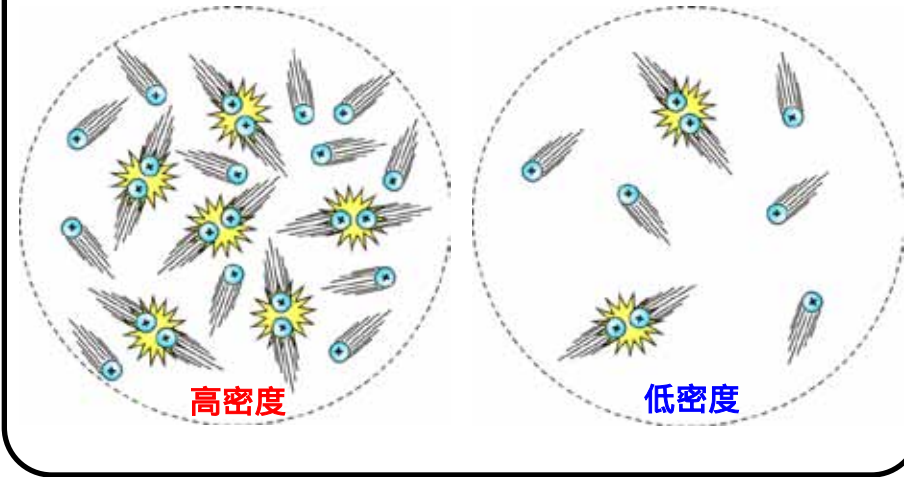
電氣的反発の丘を越えて核力の井戸の中へ

# 核融合反応を持続して起こして、エネルギーを発生させるためには

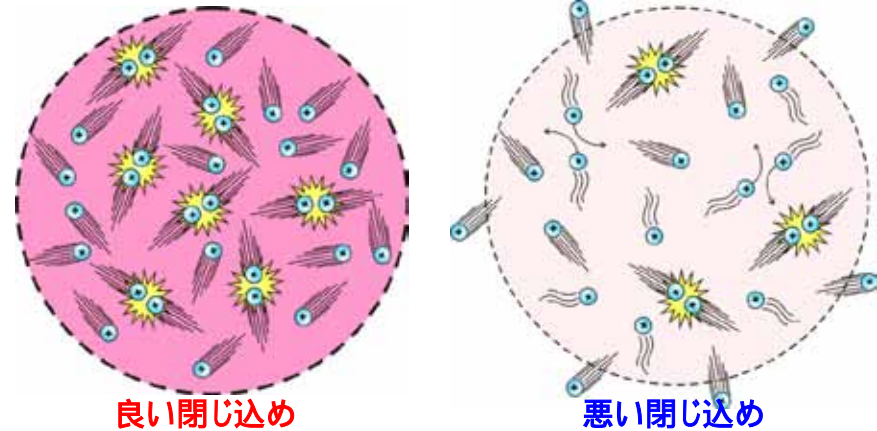
(高温) 原子核同士を融合させるためには、粒子同士を**超高速 (= 高温)**で正面衝突させる必要があります。



(高密度) 衝突の回数を増やすためには、**粒子の密度を増やす**必要があります。



(長い閉じ込め時間) 温度が高く、密度の高い粒子の状態、エネルギーの高い状態を長い時間維持しないと、つまり、**冷めにくくしないと**、反応が持続しません。



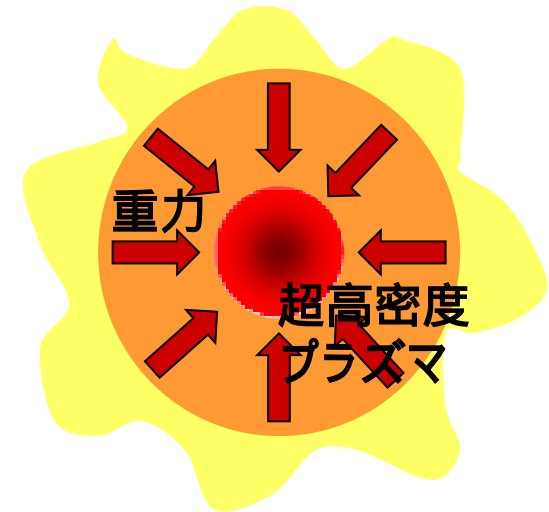
核融合反応持続に必要な3条件：**高温・高密度・良い閉じ込め**

# 地上に太陽を創れるか？

太陽の核融合をそのまま地上で起こすことはできない。

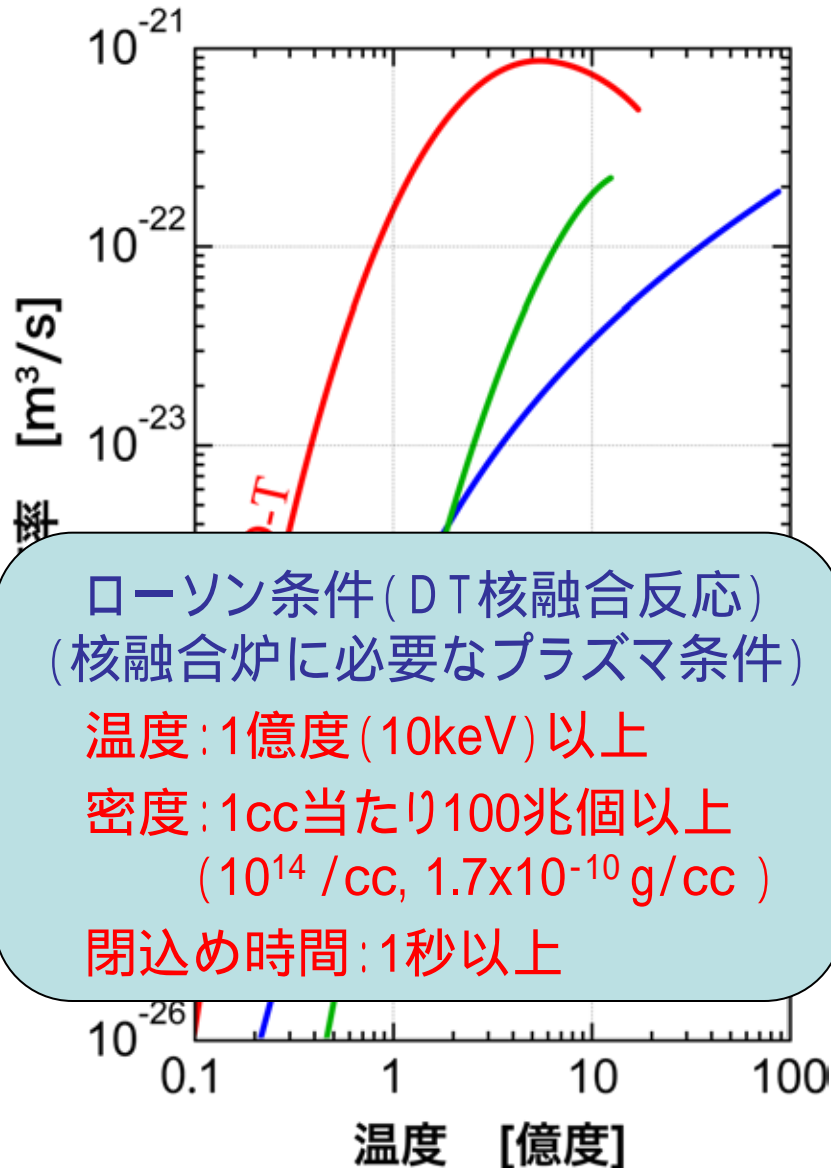
P-P反応は反応確率が低く、140億年に1回しか起こらない。  
太陽中心のプラズマは超高密度 ( $160 \text{ g/cm}^3$ : 鉛の14倍)。  
低反応率をカバー。

太陽は重力でプラズマを閉じ込めている。  
閉じ込めに最低限必要な質量は、地球  
の質量の24,000倍

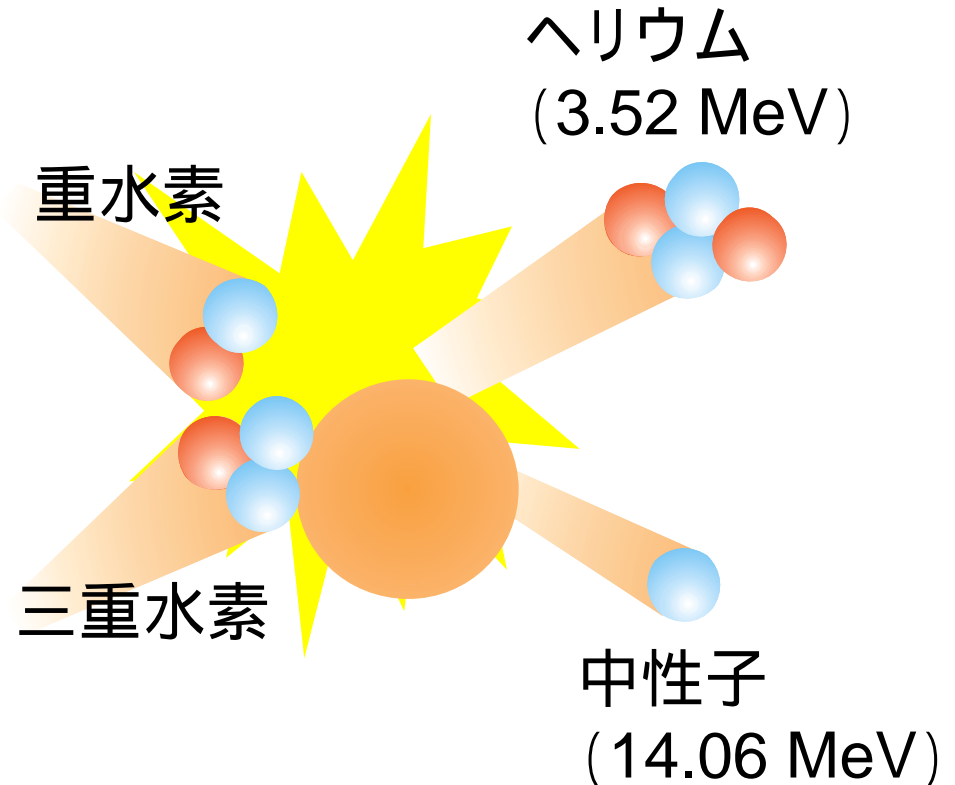


▶ 別の核融合反応、別のプラズマ閉じ込め  
方法が必要

# 地上で核融合を実現するには、もっとも反応しやすいDT(重水素・三重水素)反応を利用する。



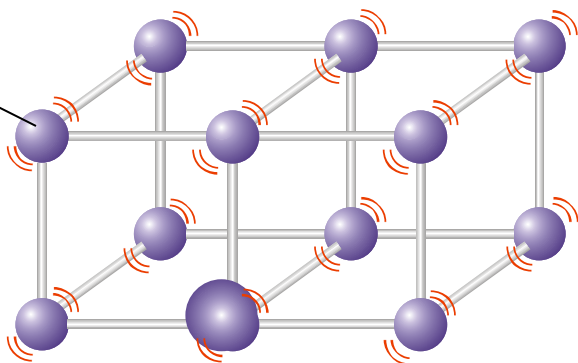
地上での実現を目指している核融合反応



プラズマを閉じ込める

# 高温のガス: プラズマ —物質の第4状態—

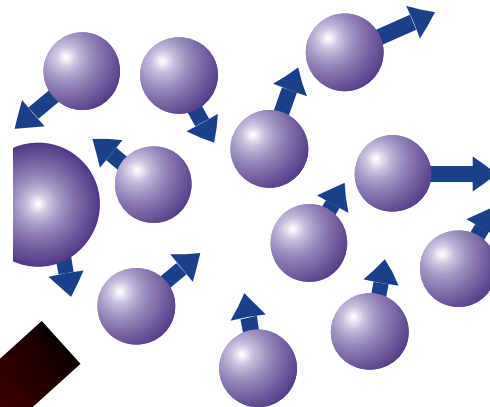
原子  
または  
分子



固体

原子や分子が結合している

加熱



液体

原子や分子が自由に運動する

加熱

加熱

原子核同士が  
直接衝突できる

電子

原子核

蛍光灯	1万
稲妻	10万
太陽中心	1500万

プラズマ

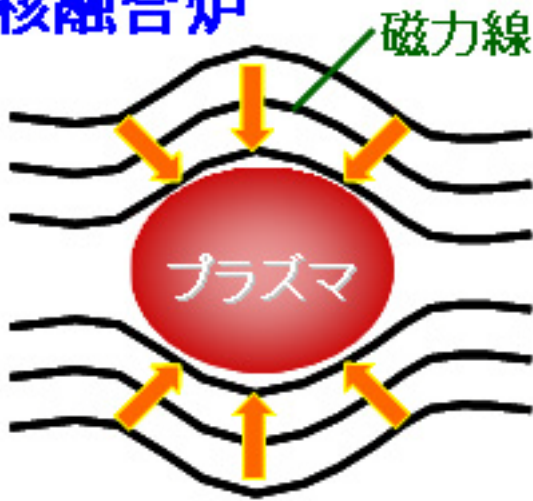
気体

原子や分子が激しく運動する

原子核(イオン)と電子がバラバラになっている

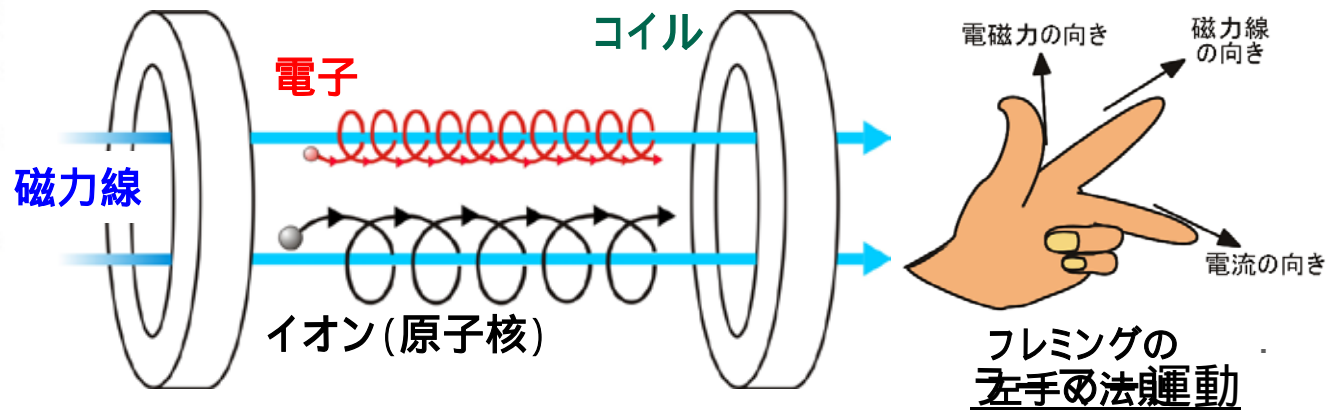
# 地上の核融合反応には、 磁場によるプラズマの閉じ込めを利用する。

核融合炉

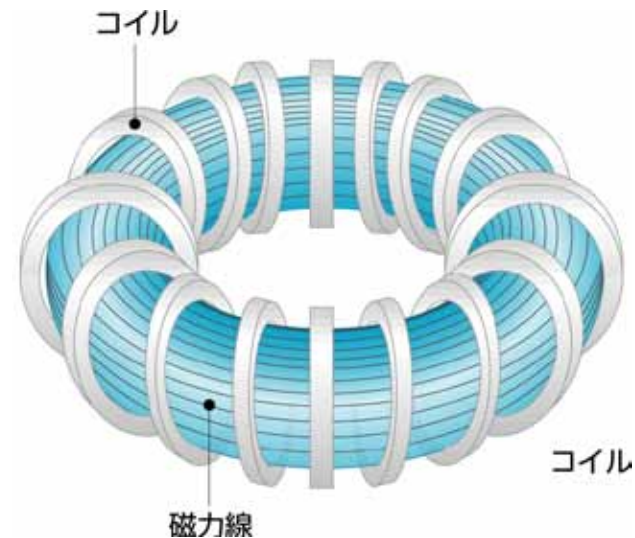


磁場による閉じ込め

プラズマの粒子(荷電粒子)は磁力線に巻きついて運動(ラーマー運動)する性質を利用



端が無いように、つなげてドーナツ状(トーラス)にしてやればプラズマを閉じ込められるのではないか？

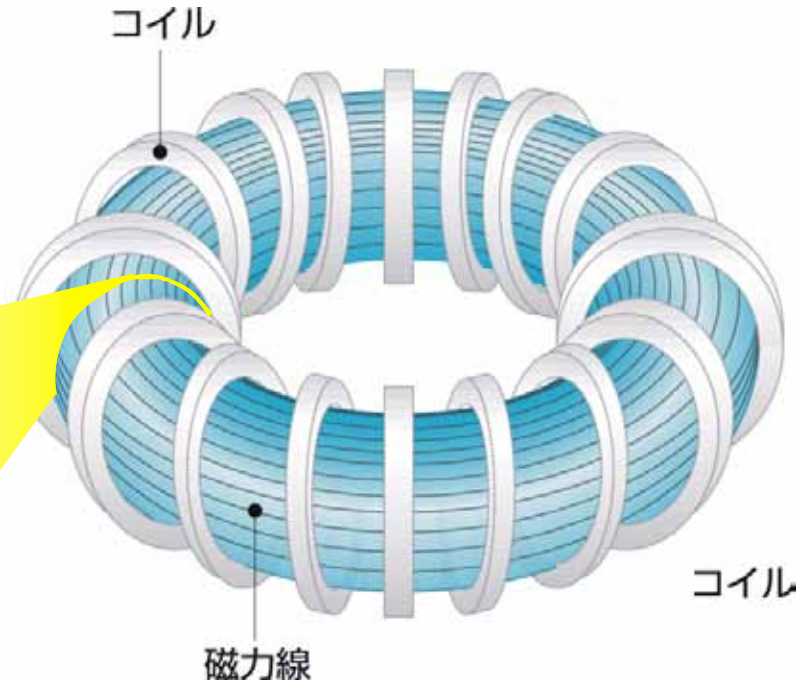
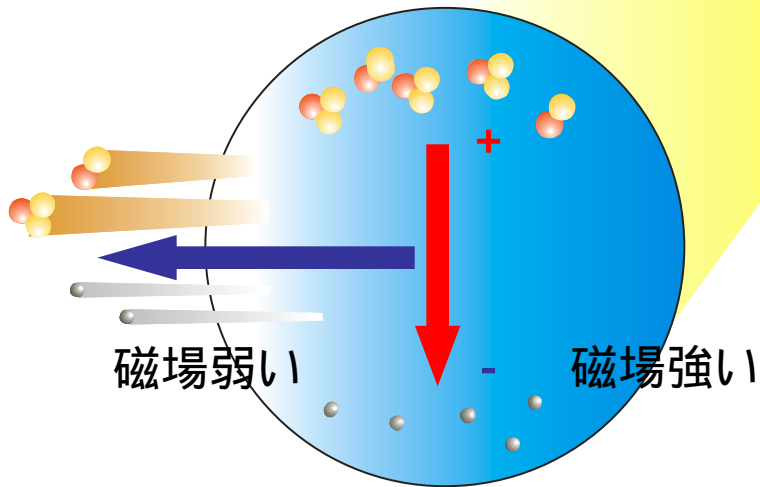




# 単純なトーラス(ドーナツ形状)磁場では、 プラズマは閉じ込められない。

磁場が不均一なせいで、原子核と電子が上下に分離してしまう

その電場のせいで、粒子が外に逃げる力が発生する

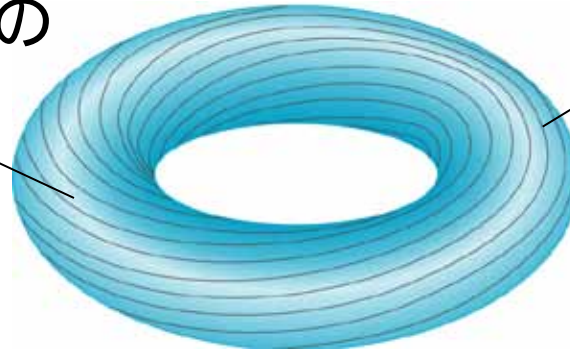


トーラスの上下を、磁力線で  
つなげば良い

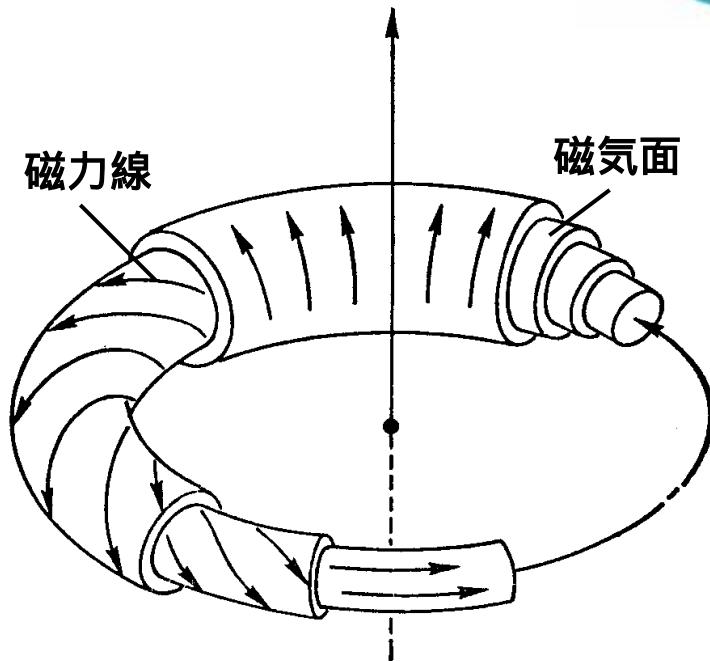
 磁力線をひねってやる

# トーラスに沿って磁力線にひねり (回転変換)を与える → 磁気面の構成

ドーナツ状の  
プラズマ



磁力線



磁力線

磁気面

トーラスで、シアのある磁場

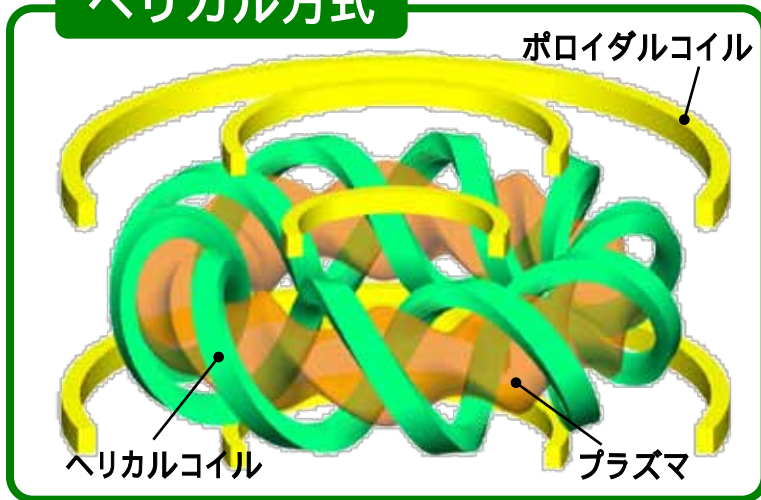
回転変換のある磁場では、  
磁力線はトーラスを何回  
も回るとドーナツ型の閉  
じた面を形成する。

磁気面

磁力線は磁気面  
上に存在する

# どのようにして、回転変換を与えるか —ヘリカル方式とトカマク方式—

## ヘリカル方式

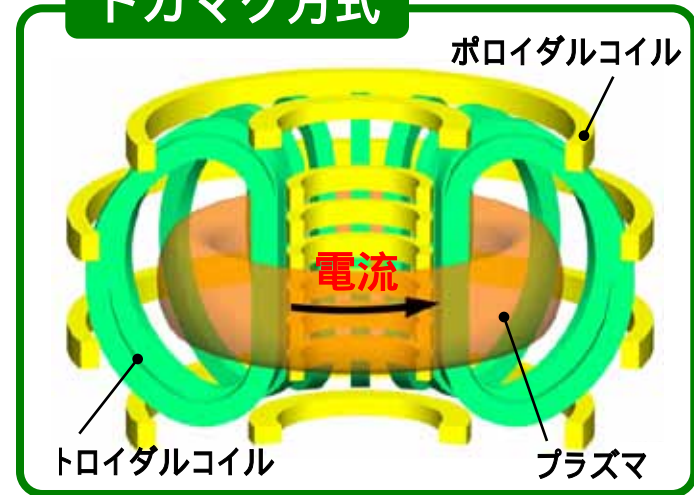


外部コイルのみにより回転変換を与え、磁気面を形成する。

**連続運転**に適している。

我が国独自のアイデアにより開発(我が国の**オリジナル**)。

## トカマク方式



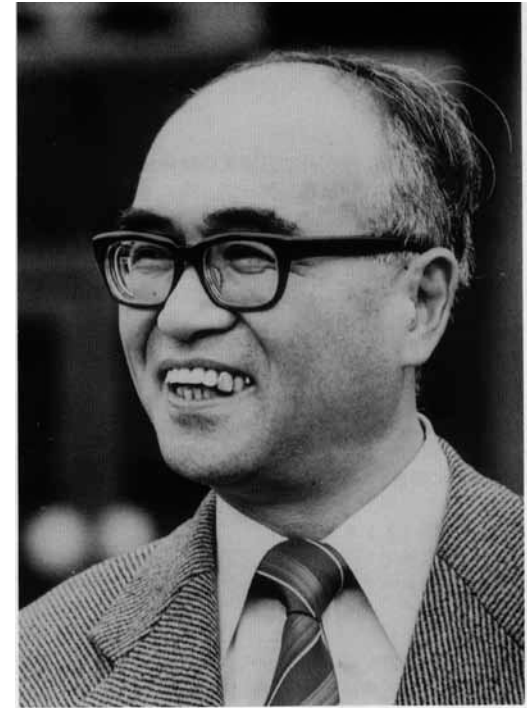
トーラス方向に電流を流すことにより回転変換を与え、外部コイルとの組み合わせにより磁気面を形成する。

連続運転のためには、**プラズマ電流を維持する必要**がある。

大型ヘリカル装置  
(Large Helical Device)  
による核融合研究

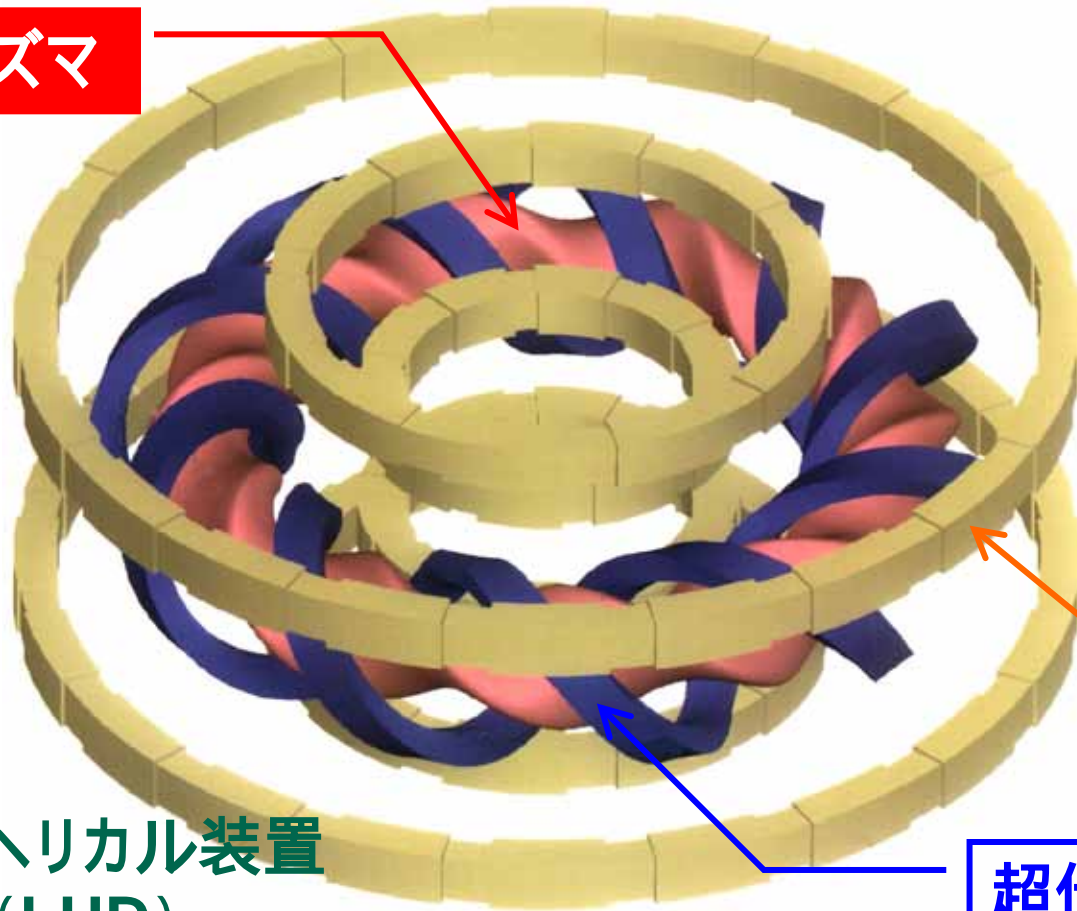
# 我が国独自の方式 -ヘリオトロン方式-

- ・ 京都大学の宇尾光治先生が発案した方式で、1958年に発表。
- ・ 50年以上にわたる研究により、現在は、超伝導の大型ヘリカル装置(LHD)による研究へ進展。



宇尾光治先生

プラズマ



超伝導ポロイダル  
コイル

超伝導ヘリカルコイル

大型ヘリカル装置  
(LHD)

# 大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD)

直径8mで精度2mm

- ・ 電線1本1本の組み立て精度は60ミクロン
- ・ 精度 = 組み立て精度 + 熱歪 (-270 ) + 電磁力 (1000トン/m)

クライオスタット

電磁力支持構造物

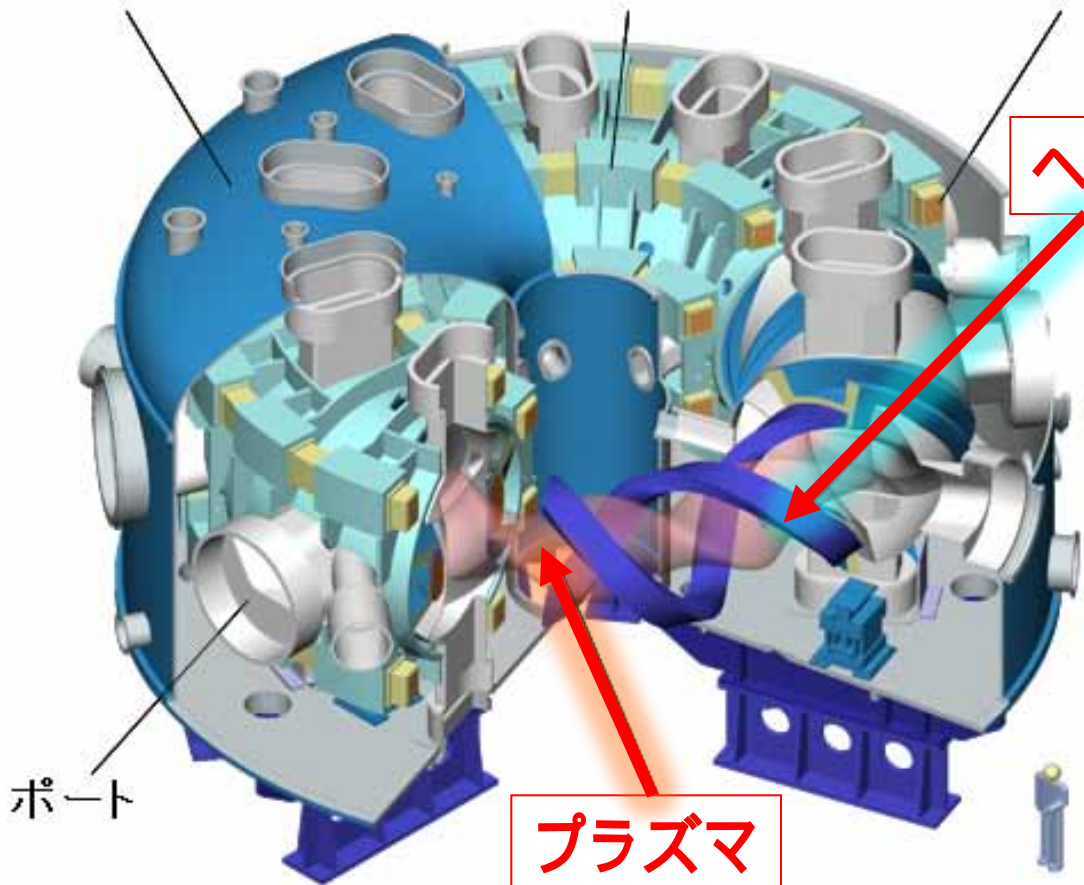
ポロイダルコイル

ヘリカルコイル

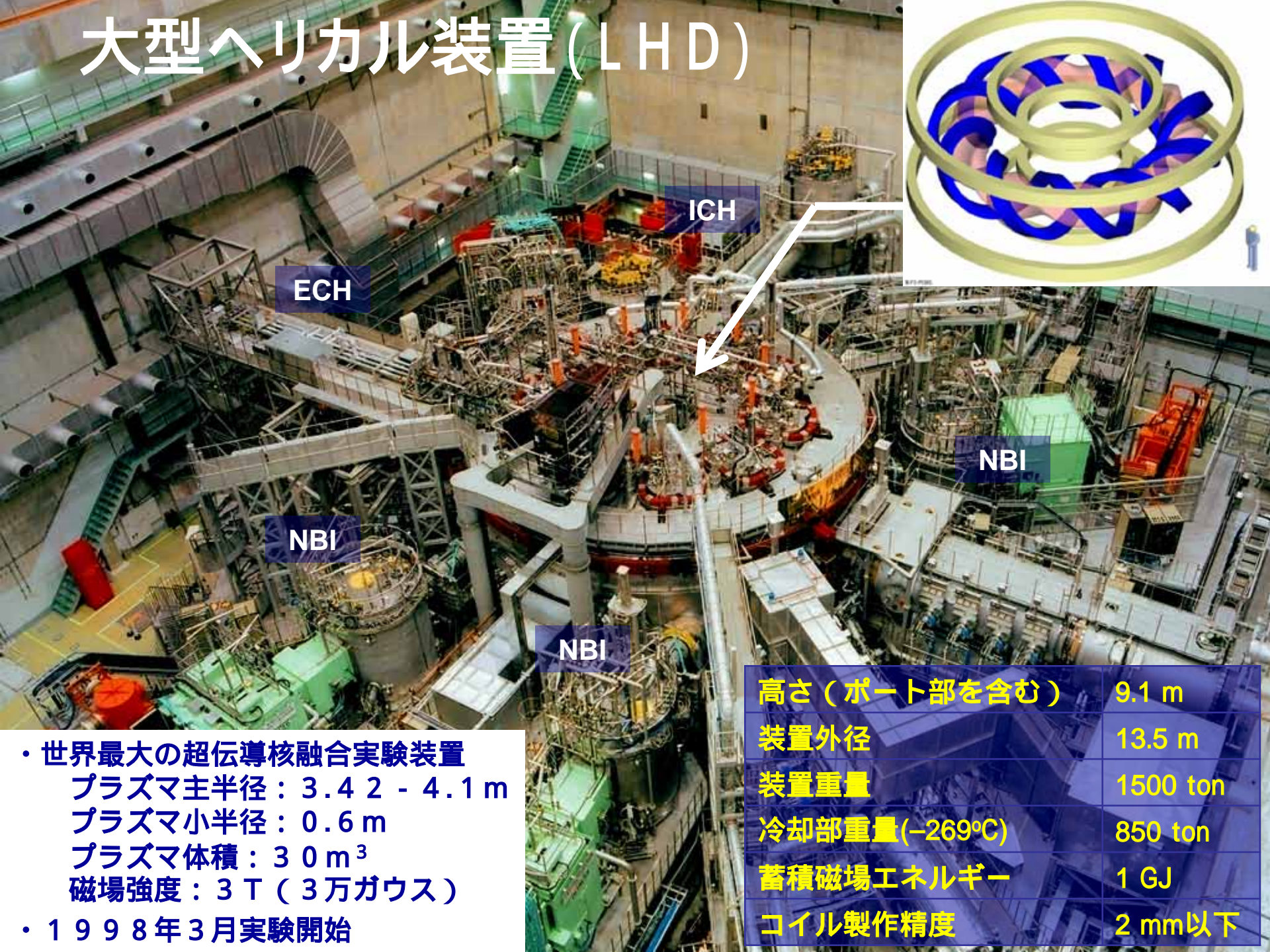
世界最大の  
超伝導核融合実験装置  
・コイルを-270℃に冷却  
・強力かつ正確な磁場で  
プラズマを閉じ込める

ポート

プラズマ



# 大型ヘリカル装置 (LHD)



- 世界最大の超伝導核融合実験装置  
プラズマ主半径：3.4 m - 4.1 m  
プラズマ小半径：0.6 m  
プラズマ体積：30 m<sup>3</sup>  
磁場強度：3 T (3万ガウス)
- 1998年3月実験開始

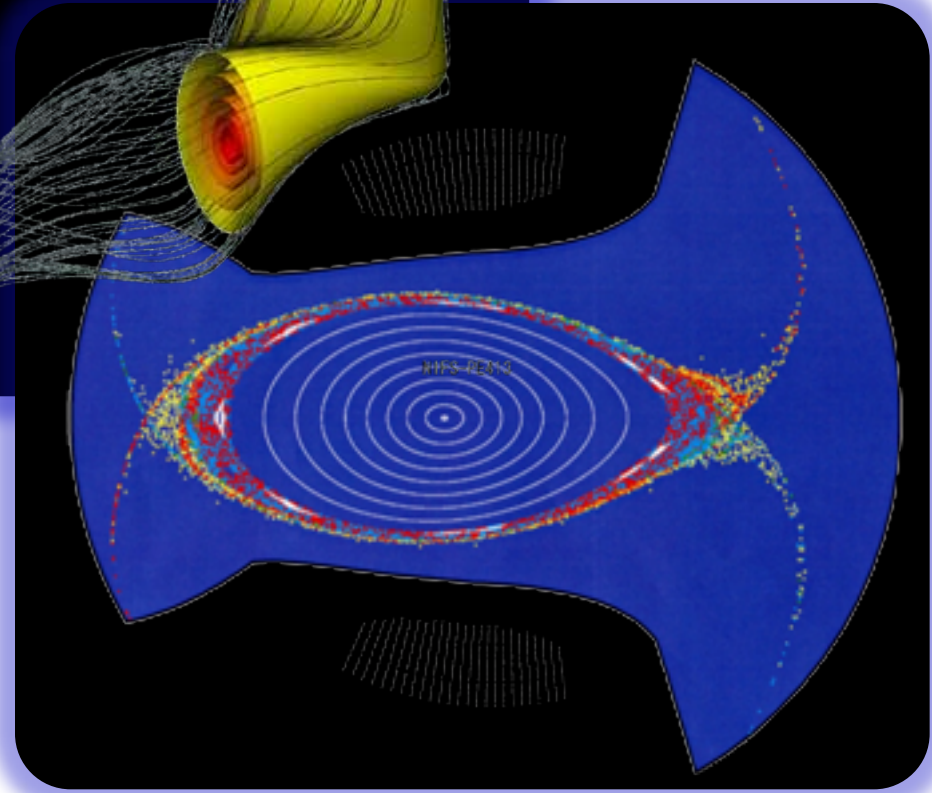
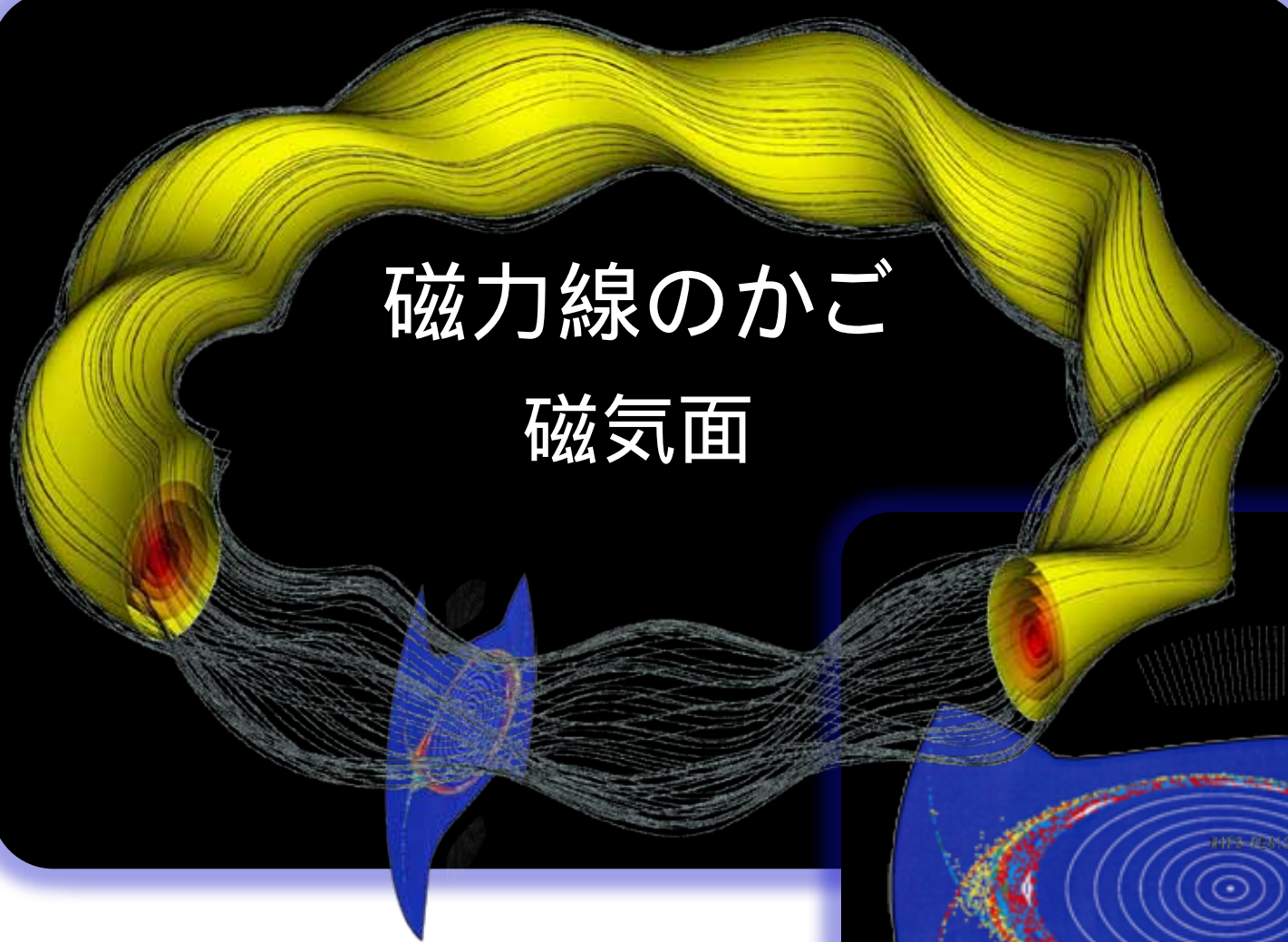
高さ (ポート部を含む)	9.1 m
装置外径	13.5 m
装置重量	1500 ton
冷却部重量 (-269°C)	850 ton
蓄積磁場エネルギー	1 GJ
コイル製作精度	2 mm以下

# 大型ヘリカル装置(LHD)の真空容器の中





# 磁力線のかご 磁気面

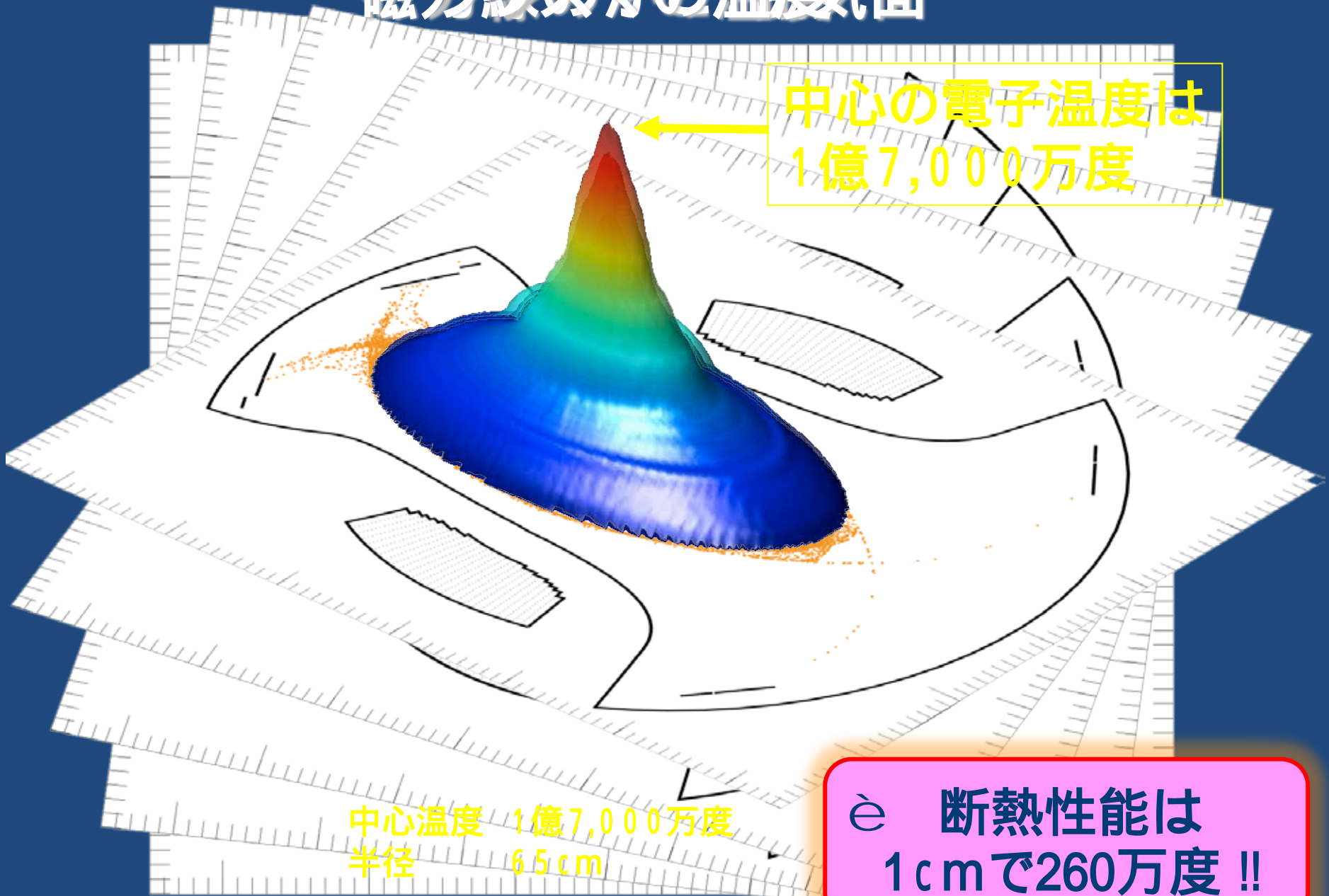


# 磁力線束の温度気面

中心の電子温度は  
1億7,000万度

中心温度 1億7,000万度  
半径 65cm

è 断熱性能は  
1cmで260万度 !!



プラズマを  
高温に加熱する

# プラズマをどのようにして加熱するのか？(1)

電磁波による加熱 → プラズマ粒子を電磁的に加速 → 熱化による温度上昇

## マイクロ波による加熱



磁力線のまわりを回る電子を加速し、その熱化により加熱

電子レンジ(2,450メガヘルツ)と原理は似ているが、周波数が高い(50,000メガヘルツから200,000メガヘルツ)

LHDでは2.3億度の電子温度を達成

## 高周波による加熱

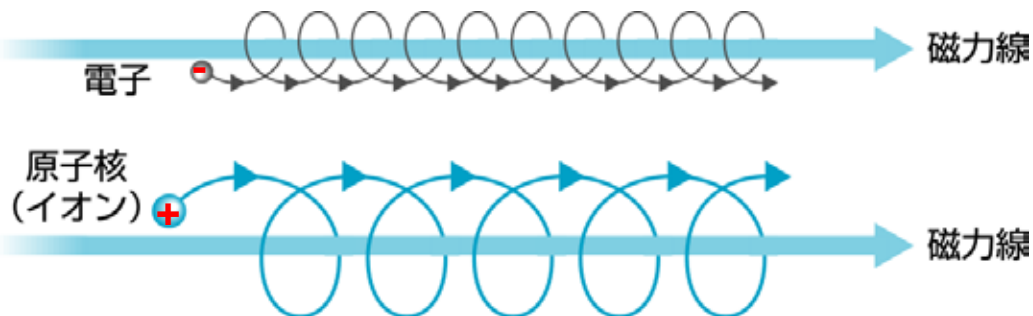


磁力線のまわりを回るイオンを加速し、その熱化により加熱

電磁調理器(20kHz)と原理は似ているが、周波数はFM放送に近い(数10メガヘルツ)

LHDでは、54分の連続プラズマ保持を達成

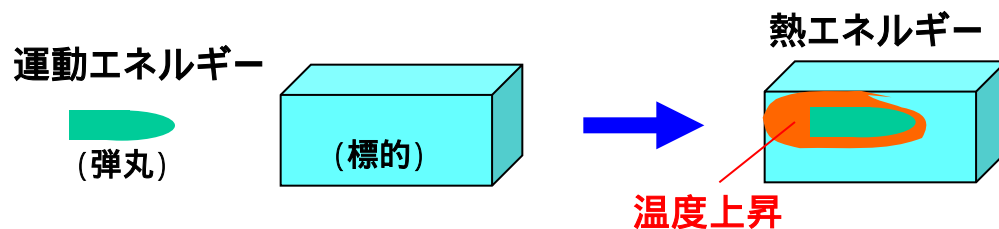
電子の回転  
周波数と同期



イオンの回転  
周波数と同期

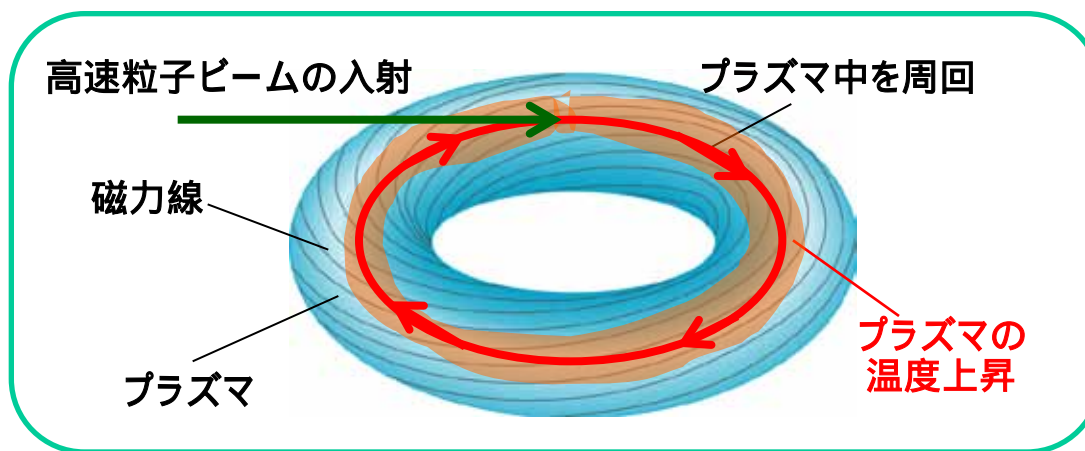
# プラズマをどのようにして加熱するのか？ (2)

粒子ビームによる加熱 → 高速粒子とプラズマとの摩擦熱  
運動エネルギーを熱エネルギーに変換



弾丸を標的に撃ち込み、標的の温度を上昇させる

小惑星 (弾丸) の衝突により、惑星 (標的) の温度が上昇する



高速で入射された粒子とプラズマ粒子との摩擦熱でプラズマの温度を上昇させる

# 粒子ビームによる プラズマの加熱

どのようにして高速粒子を作るのか？

プラズマ粒子の熱速度よりも高速の粒子ビームが必要  
2,000km/s以上

叩き出し せいぜい音速(340m/s)

化学的推進剤(爆発力)

ジェット機 マッハ2(0.7km/s) (参考)彗星(小惑星)

ピストル(機関銃) マッハ2~3(1km/s) 100km/s

ロケット 10km/s

→ 化学的には無理

電氣的にイオン(荷電粒子)を加速

100Vで水素イオンを加速 138km/s

10kVで水素イオンを加速 1,380km/s

1,000kVで水素イオンを加速 13,800km/s

(参考)光速 300,000km/s

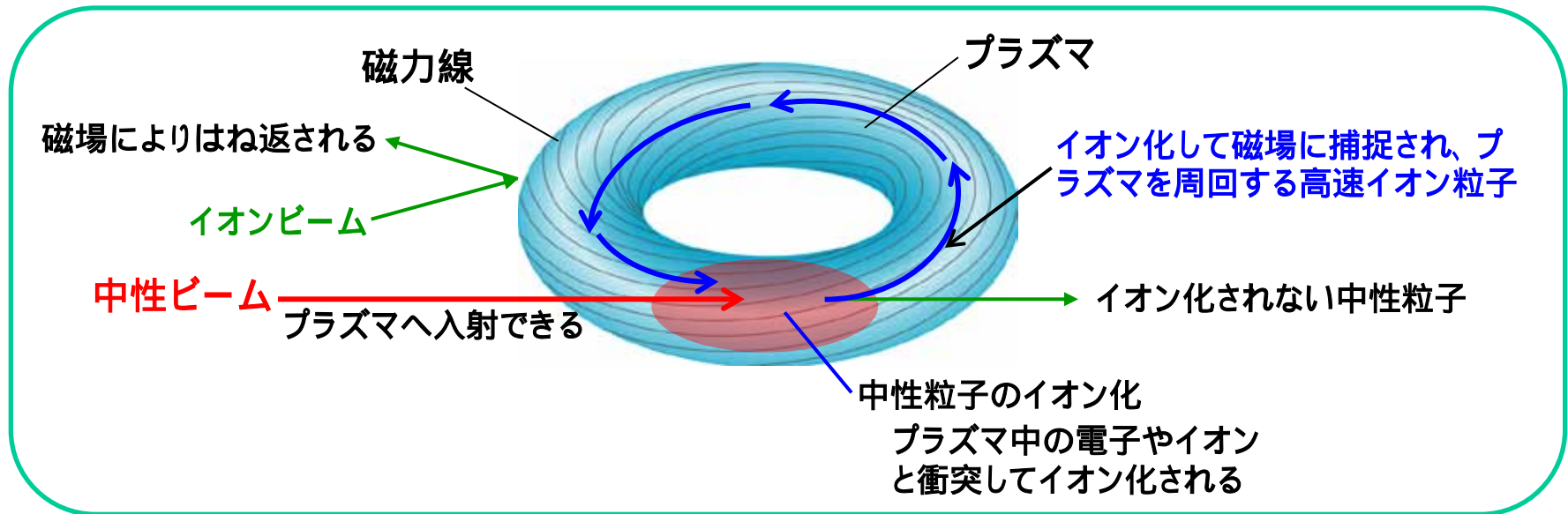
小惑星探査はやぶさのイオンエンジン(電気推進機)では、1kVでキセノン・イオンを加速して、約30km/sが得られている。

イオン銃(イオン源)を用いて粒子を加速→イオンビーム

イオンビームのままではプラズマに入射できない

→ 電気を帯びた荷電粒子はプラズマを閉じ込めている  
磁場にはね返されてしまうため入射できない

イオンビームを電氣的に中性な粒子にしてから  
プラズマに入射する



入射した高速中性粒子はプラズマ中で再びイオン化

→ 深くプラズマ中に侵入してイオン化することが重要

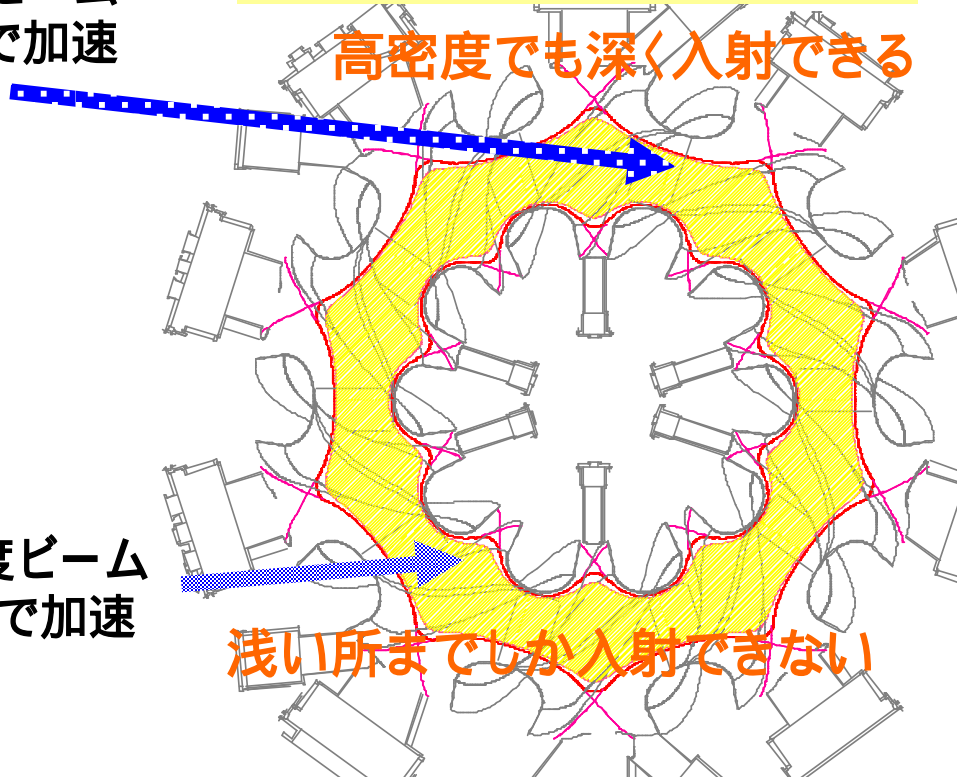


# 世界最大のLHDでは180kVで加速された水素ビーム(6,000km/s)が必要

LHD(大型ヘリカル装置)  
世界最大のプラズマ直径7.5m

高密度でも深く入射できる

高速度ビーム  
180kVで加速



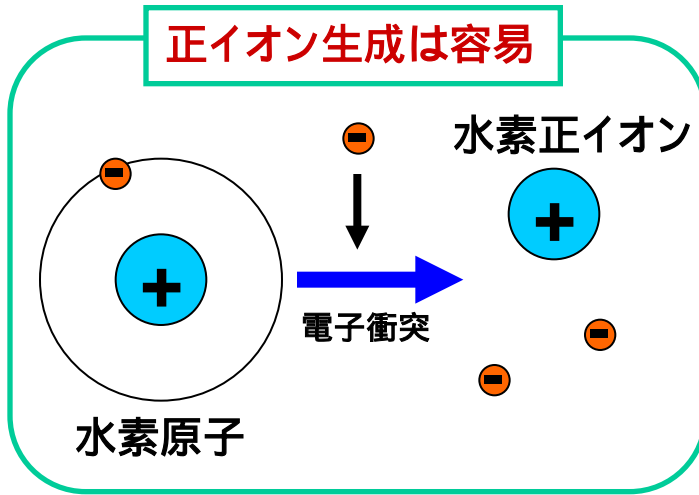
ビームが深く入射できる方がプラズマ性能は高くなる

180kVで加速した高速度ビームは、**負イオン**でなければ中性化できない

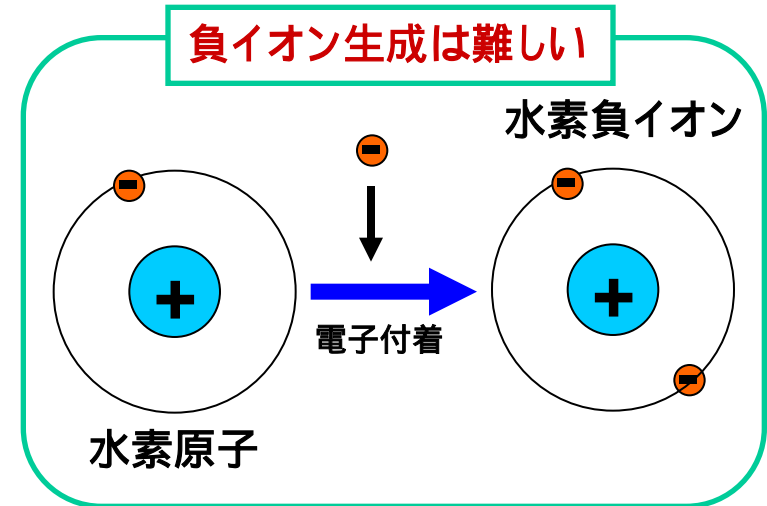
10,000kW以上の加熱電力が必要  
→ 大電力の大型負イオン源の開発

しかし、当時(1990年頃)粒子ビーム加熱用負イオン源は実用化されていなかった

# 負イオンは中性化しやすい (壊れやすい)ので作りにくい 1Aからの出発



既に世界中の大型NBI  
で実用化されていた  
60kV-50A程度

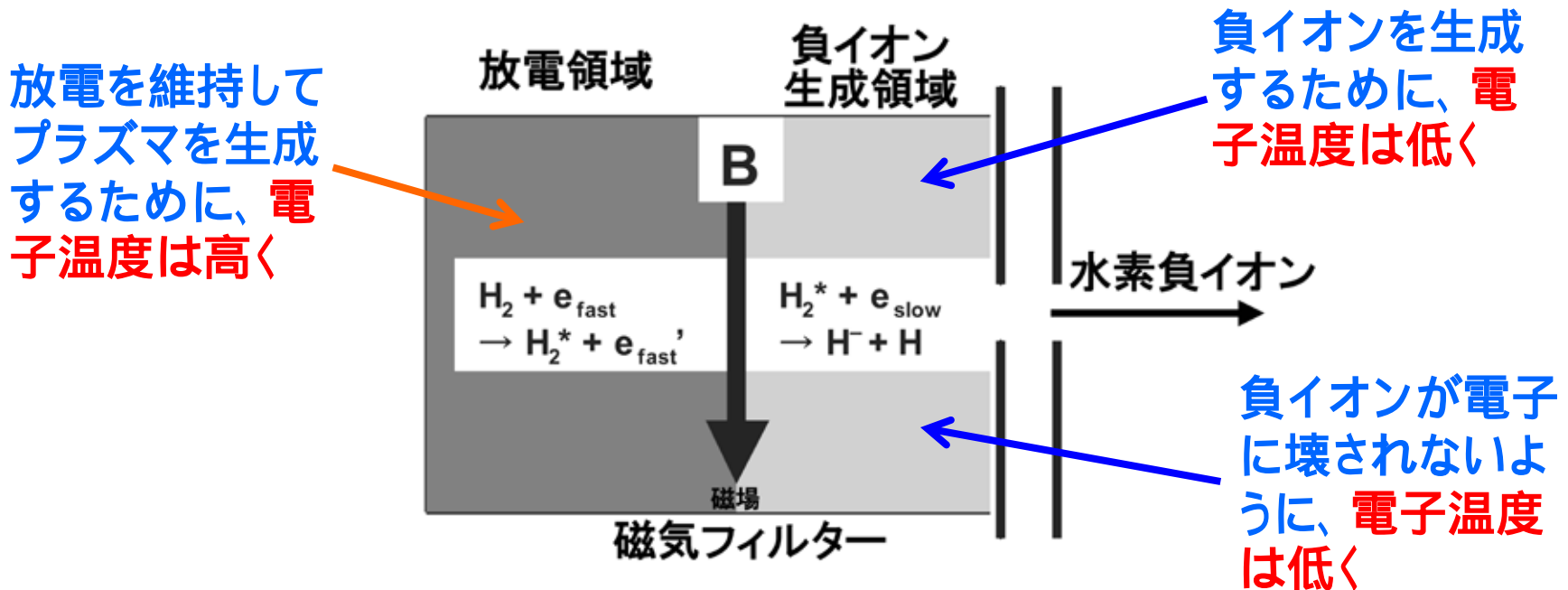


当時、1A以上の負イオン  
源は存在していなかった

# プラズマ中で負イオンを作る

負イオン電流が増えない！せいぜい1～3A

水素ガスを電離してプラズマを生成し(中性水素、正イオン、電子で構成)、その中で負イオンを作る



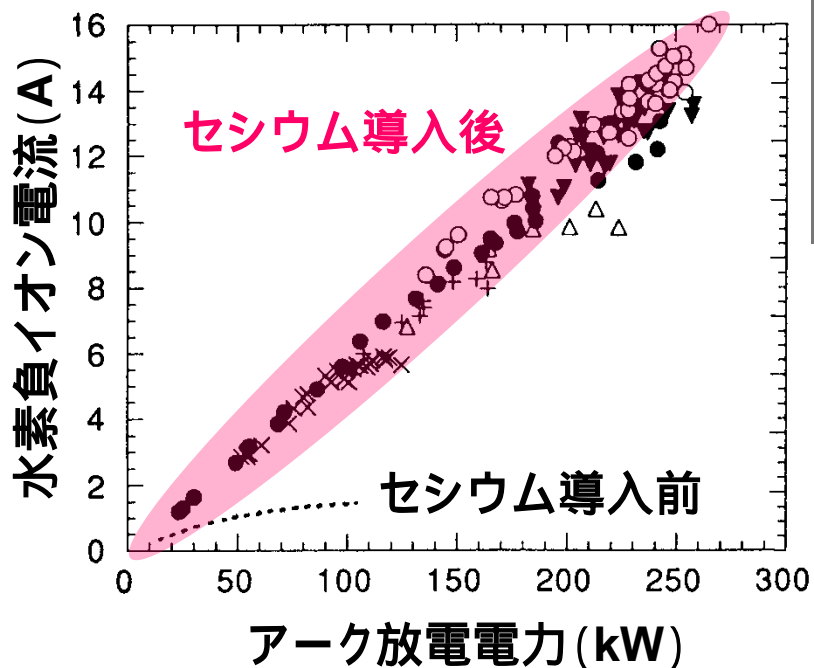
プラズマ中に磁場をかけて(磁気フィルター)、電子温度を制御することにより、負イオンを生成

# セシウムの導入により劇的に負イオン電流が増えた 3 ~ 10倍以上の増加

セシウム (Cs) はアルカリ金属で、物質中、最も電子を与えやすい

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	H															2		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	10		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	18		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
			L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



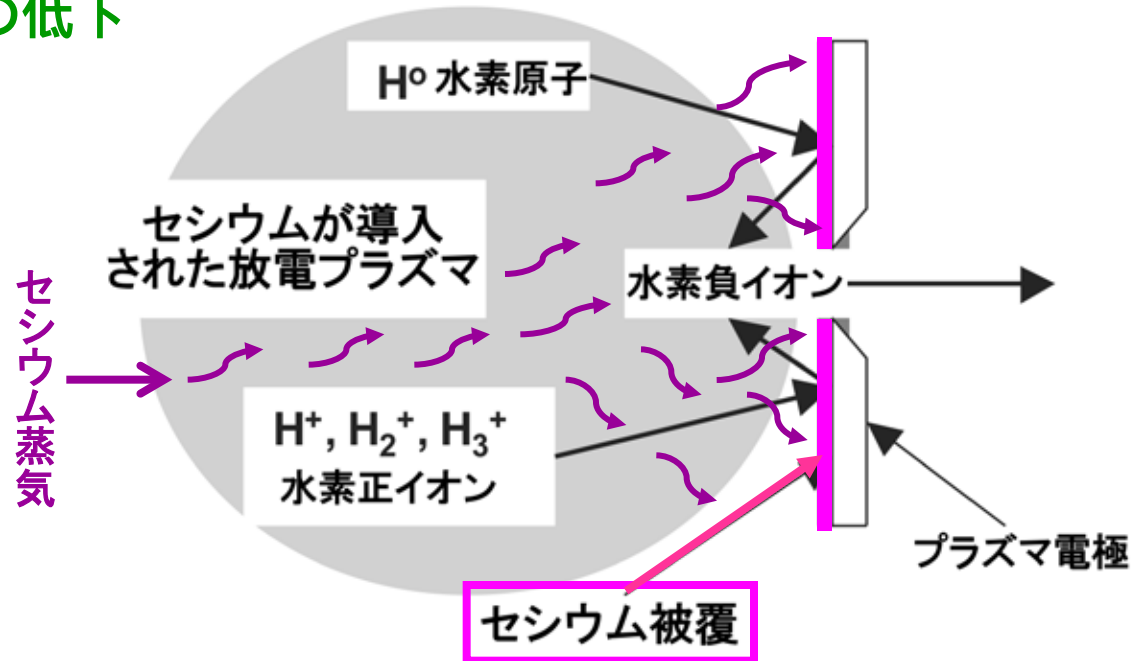
微量のセシウム (Cs) を水素プラズマ中に導入

# 負イオン源開発のブレークスルー

## セシウムで被覆された電極の表面効果による負イオン生成

少量のセシウム (Cs) をプラズマ中に導入することにより、**飛躍的に性能が向上**

- ・負イオン電流の大幅な増加 (3 ~ 10倍以上)
- ・引出電子電流の大幅な減少
- ・動作ガス圧力の低下



必要な性能の負イオン源開発に見通しが立つ

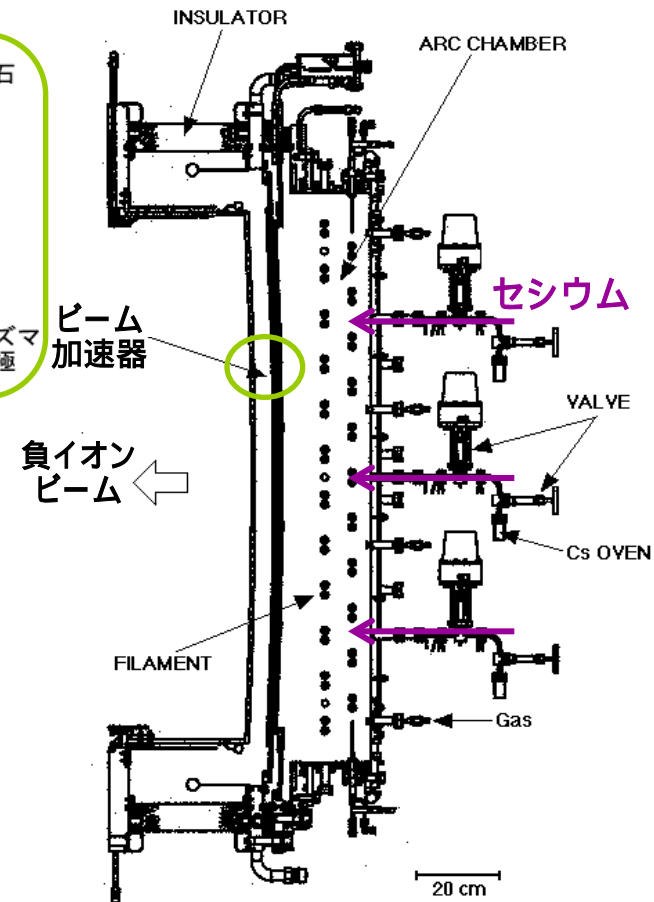
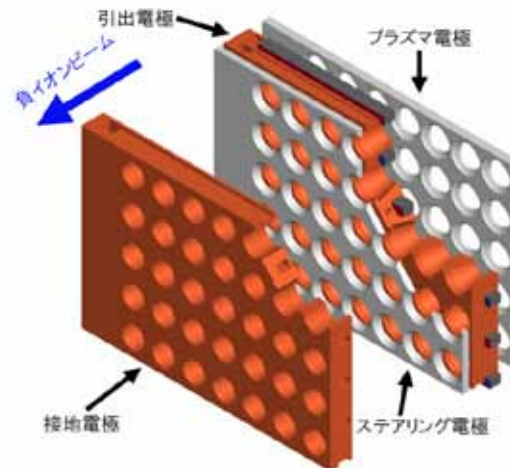
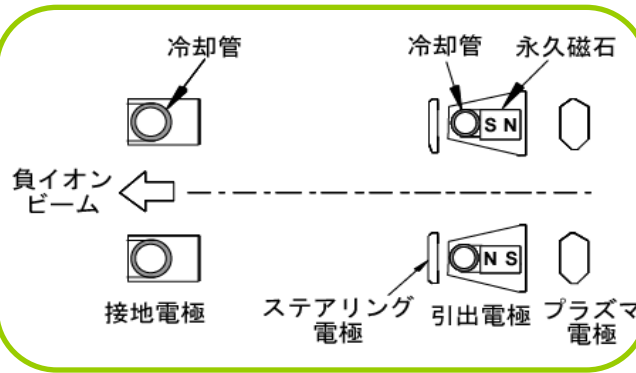
**最適化と大型化により世界最高性能の負イオン源の開発に成功**

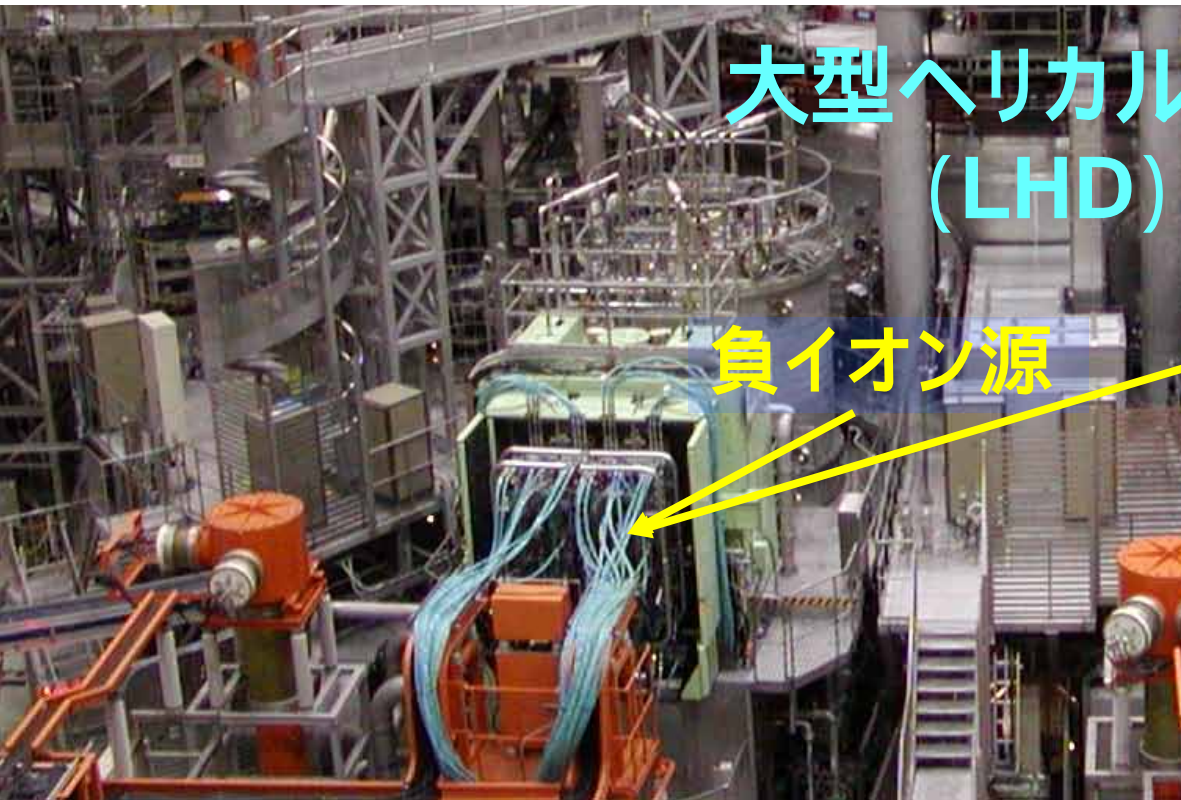
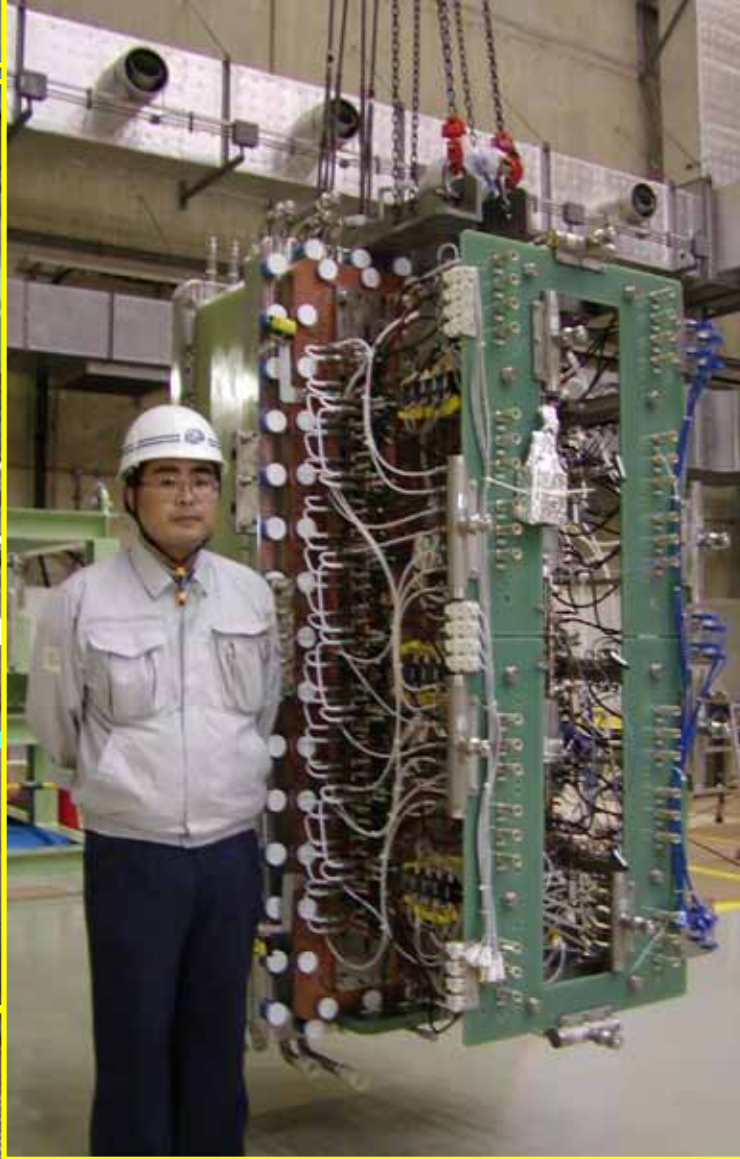
# 大型大電流負イオン源 (180kV-30A: 世界最高)

- セシウムの利用による負イオン生成
- 大型プラズマ生成室 35cm(幅)x145cm(長さ)x21cm(深さ)
- 大面積電極による負イオンビームの加速 (電極面積: 25x125 cm<sup>2</sup>)

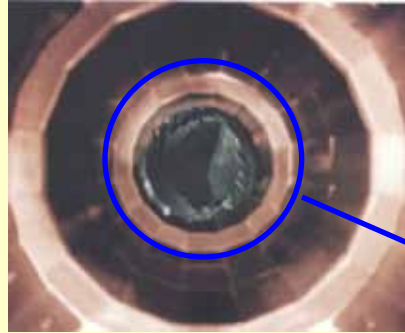


## ビーム加速器

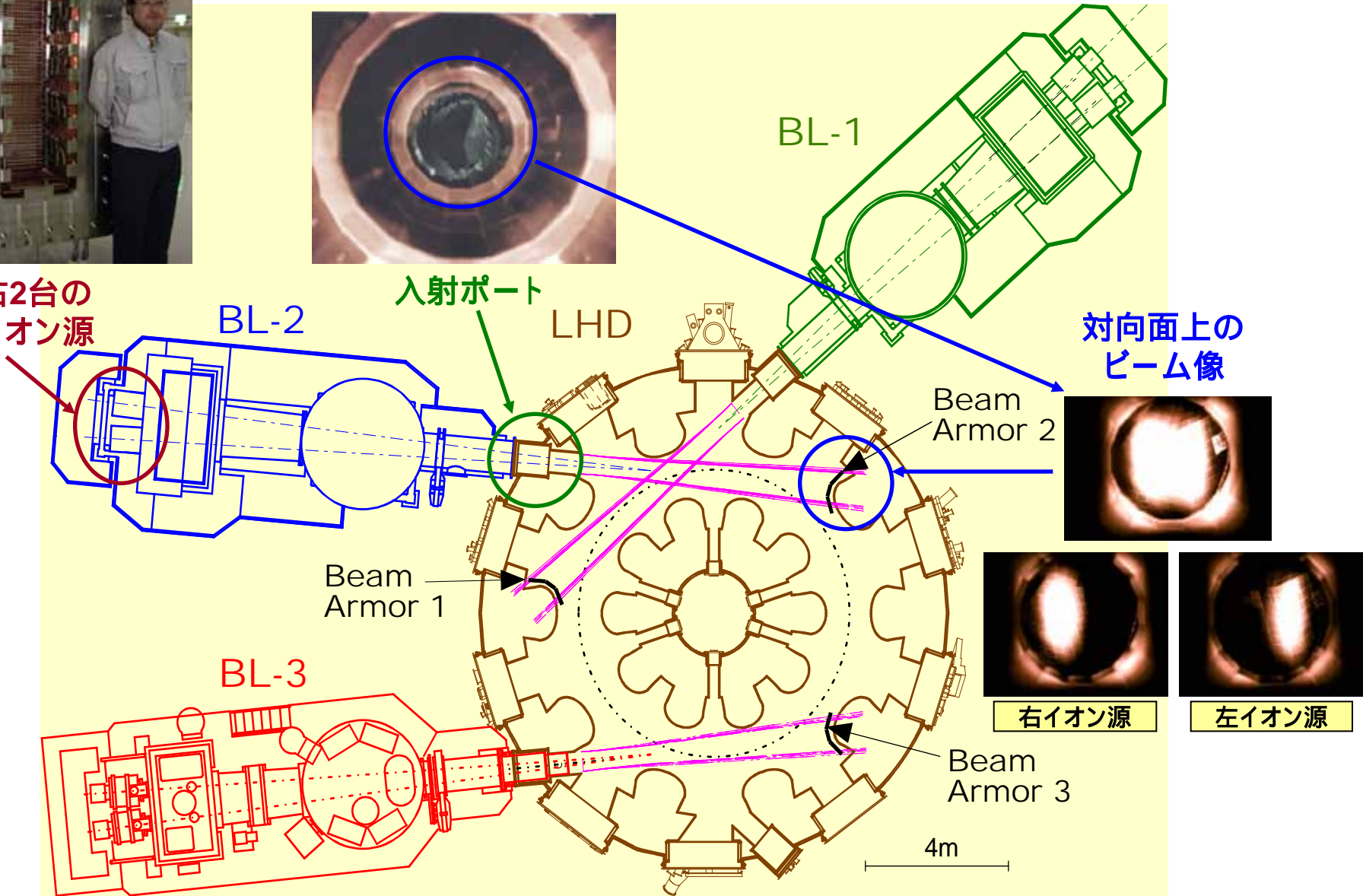




# 世界最高出力の負イオン源を用いて、 合計16,000kWのビームをLHDへ入射



左右2台の  
負イオン源

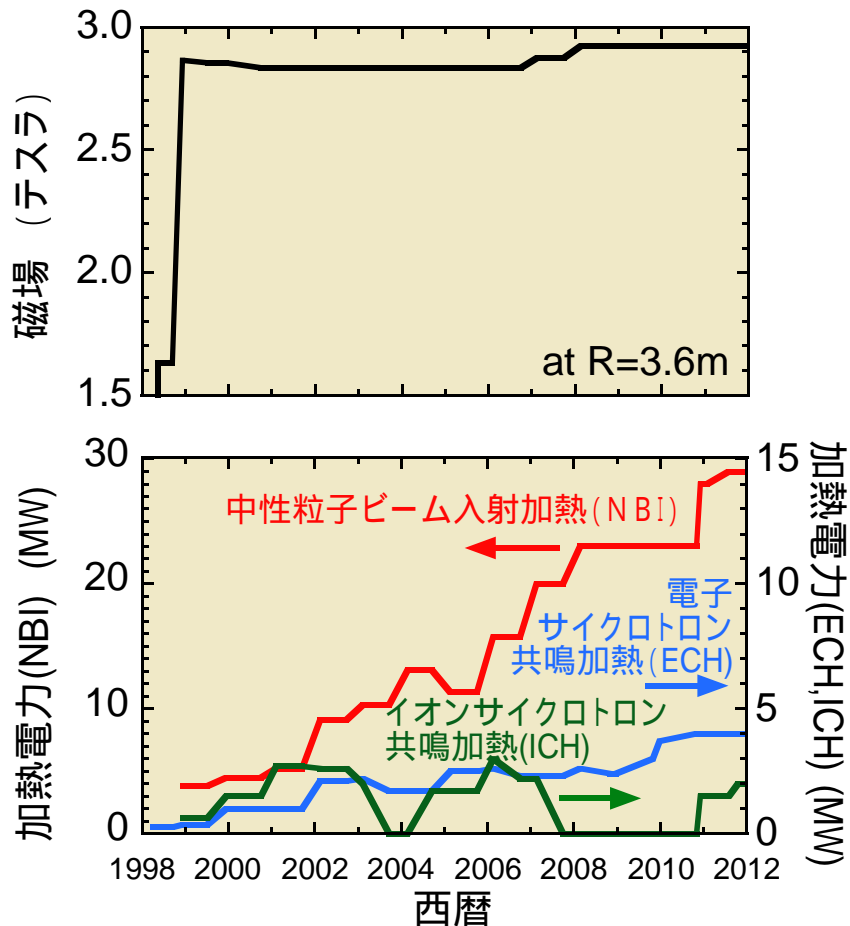




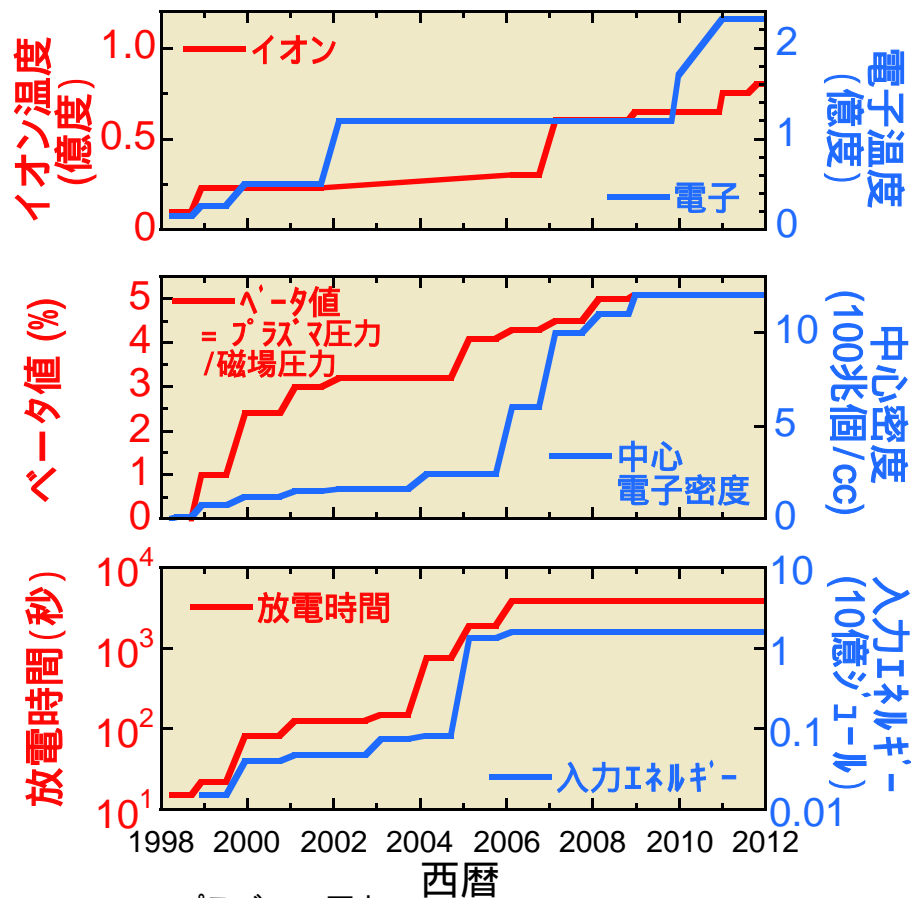


# 粒子ビーム加熱により8,000万度のイオン温度を達成 加熱装置の性能向上と共にLHDのプラズマ性能が進展

## 装置技術としての増強



## プラズマ性能の進歩



$$\text{ベータ値} = \frac{\text{プラズマの圧力}}{\text{磁場の圧力}}$$

# 核融合発電の 実現へ向けて



# LHDの達成値と発電所の設計へ向けた目標値

達成値 [目標] (赤字: H23年度達成)

## イオン温度

中心イオン温度 1億5千万度 [1億2千万度]  
密度 3 兆個/cc(アルゴンガス) [20 兆個/cc]  
水素ガス: 中心温度8,000万度 15兆個/cc

核融合炉の温度条件に到達

## 電子温度

中心電子温度2億3千万度 [1億2千万度]  
密度2兆個/cc [20兆個/cc]

プラズマ圧力条件に近づく  
世界最高の定常ベータ値

## 体積平均ベータ値

5.1 % (磁場 0.425万ガウス)  
3.4 % (磁場 1万ガウス) [ 5 % (磁場 1-2万ガウス)]

トカマク、ヘリカル型の最高値

## 密度

中心密度1,200兆個/cc(温度300万度)[400兆個/cc程度]

3大トカマクに比肩

## 蓄積エネルギー

144万ジュール[400万ジュール程度]

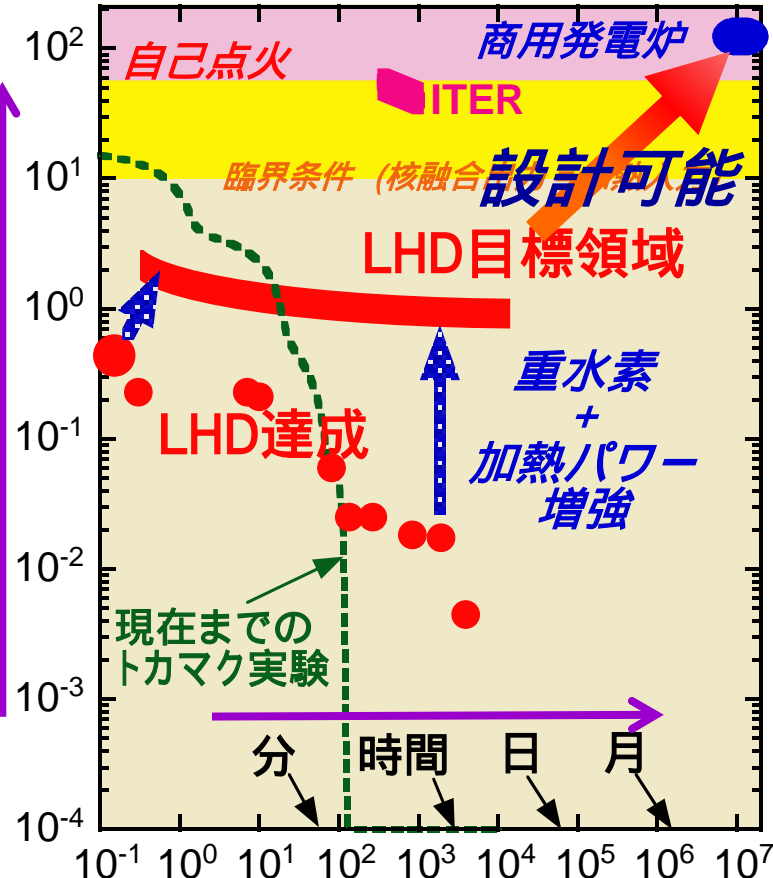
世界最高の入力エネルギー値

## 定常運転

31分45秒 (700 kW) [1時間 (3,000 kW)]  
54分28秒 (500 kW) (入力エネルギー 16億ジュール)  
13分20秒 (1,000 kW)

核融合三重積

↑ プラズマに火をつける



↑ プラズマを連続的に保つ

核融合臨界条件  
1億度、100兆個/cc、1秒

核融合炉 b 5%

# 磁場閉じ込め核融合発電の課題

核融合発電炉の早期実現のカギ

二大課題 = 核燃焼(重水素と三重水素の核融合)と定常運転

核燃焼の実証・制御      è 国際熱核融合実験炉(ITER)

定常運転  
(発電には定常運転が必須)      è { 大型ヘリカル装置(LHD)と  
JT-60SA(原子力機構)を同時進行 }

プラズマの閉じ込め: 磁力線を環状に回し、かつねじる      è 2通り

電磁石をねじる: **ヘリカル方式**

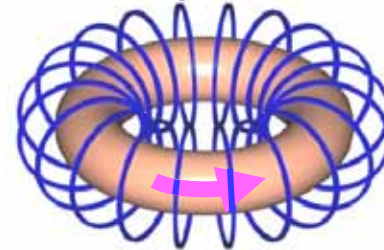
(大型ヘリカル装置)



本質的に1年でも定常運転が可能

プラズマ中の大電流: **トカマク方式**

(ITER, JT-60SA)



短時間運転 高性能プラズマを生成

課題(ヘリカル方式)

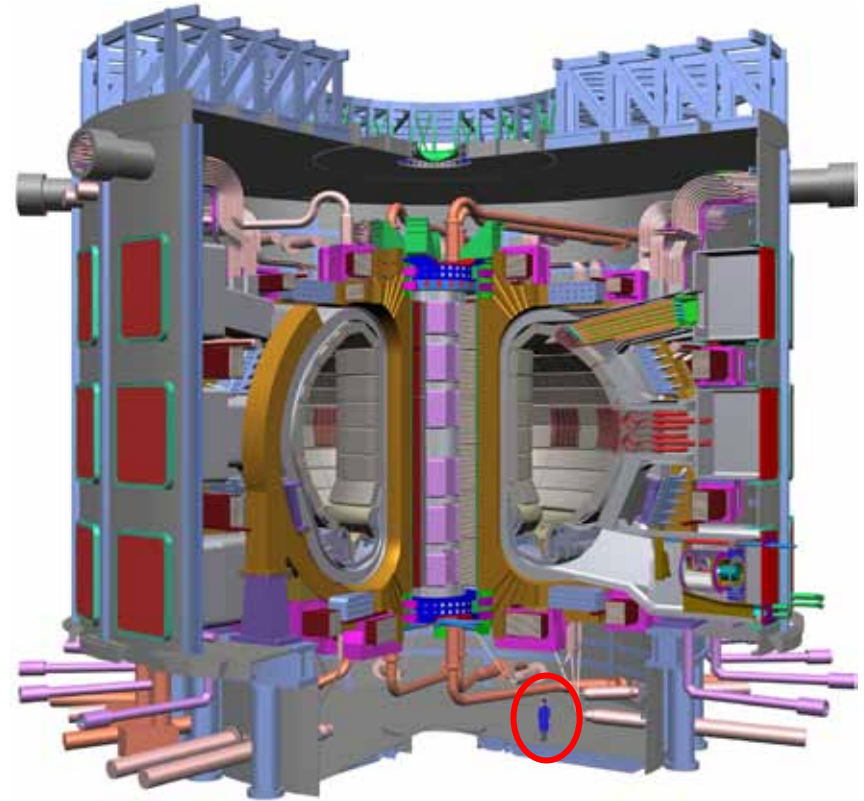
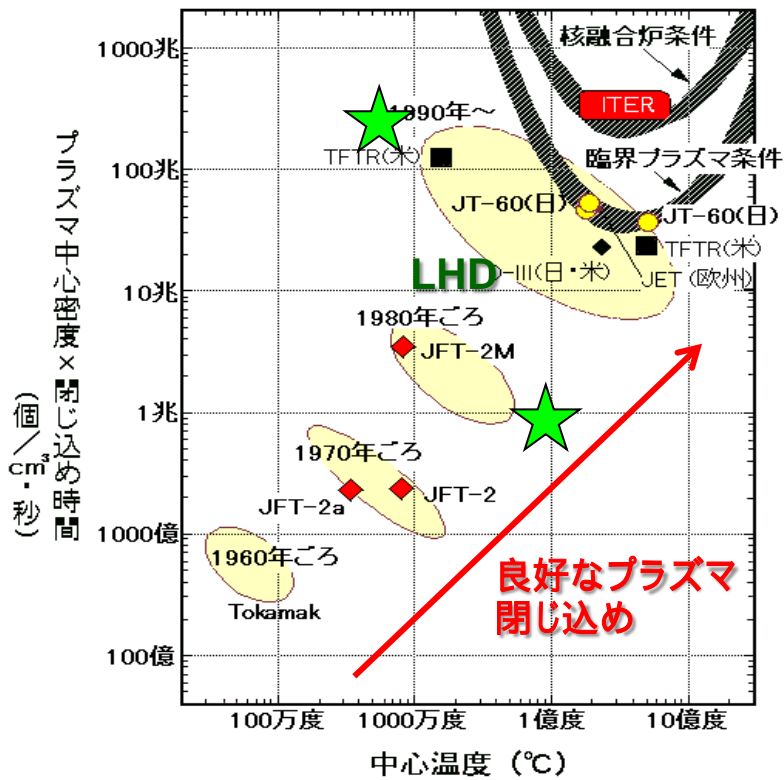
点火を見込めるプラズマ高性能化

課題(トカマク方式)

定常運転

プラズマ中の電流の高効率駆動

# プラズマ閉じ込め性能の進展と燃焼実験へ



ドーナツ半径: 6 m, プラズマ半径: 2 m

## 国際熱核融合実験炉 ITERのミッション

- ・ 燃焼プラズマ実験
- ・ 定常運転(～数千秒)

国際協力: 日本、EU、ロシア、アメリカ、中国、韓国、インド

- ・ トカマクの課題: 連続運転(日、週、月、...)
- ・ LHD(大型ヘリカル装置)は、連続運転が可能。プラズマ性能の見通しが得られれば、**持続燃焼**(発電)する装置の設計が可能になる。

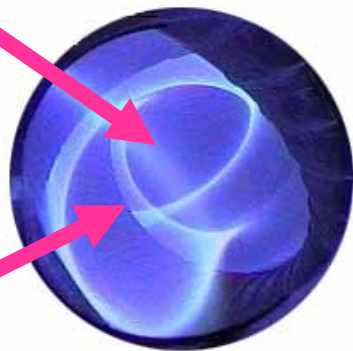
# 核融合発電のしくみ

# プラズマの持続燃焼とは - 地上の核融合 -

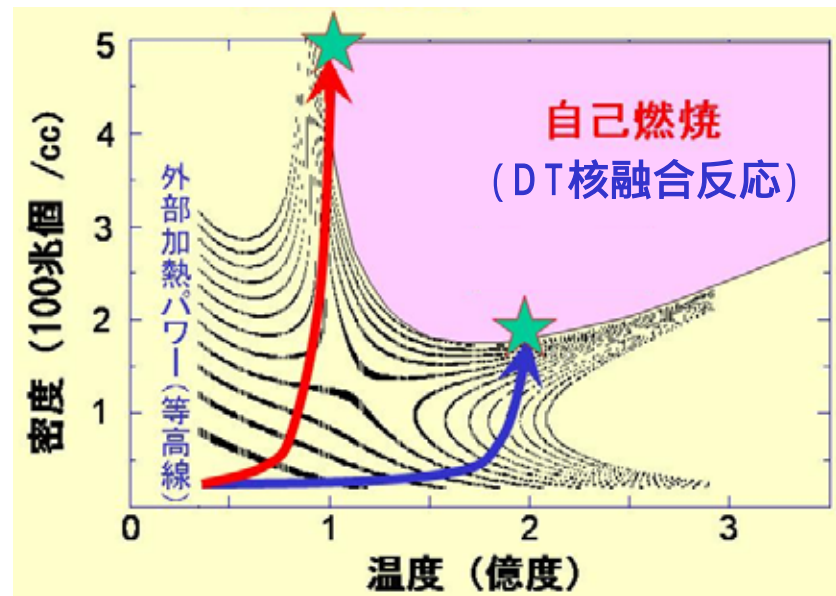
高温度に加熱することで核融合プラズマは点火し持続燃焼する

加熱

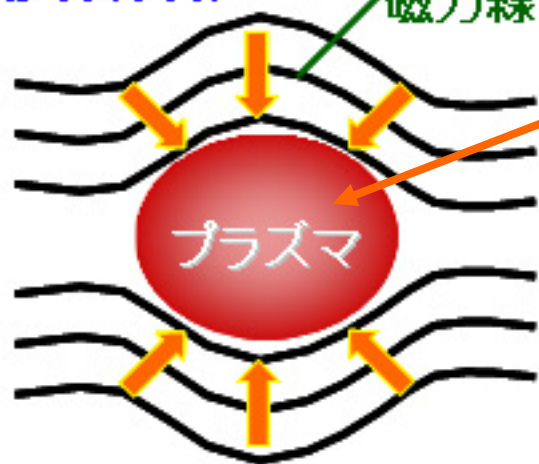
加熱



温度・密度  
の上昇



核融合炉



磁場による閉じ込め

燃焼プラズマ (DT核融合反応)

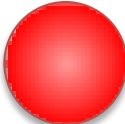




高エネルギー・ヘリウム原子核  
そのエネルギーによりプラズマ  
を加熱して燃焼条件を保持する  
→ 持続燃焼

エネルギーとして取り出す  
→ 核融合エネルギー発電

# 重水素と三重水素による プラズマ燃焼

高温のプラズマ状態

	平均速度
 重水素の原子核	1100 km/秒
 三重水素の原子核	900 km/秒
 電子	

温度で表すと1億度





中性子

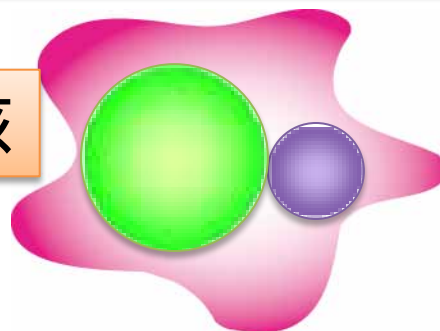
エネルギー 1400

発電に使われる

フュージョン  
(融合)反応

三重水素の原子核

エネルギー 1



重水素の原子核

エネルギー 1

ヘリウムの原子核

エネルギー 350

プラズマの加熱(温度維持)に使われる

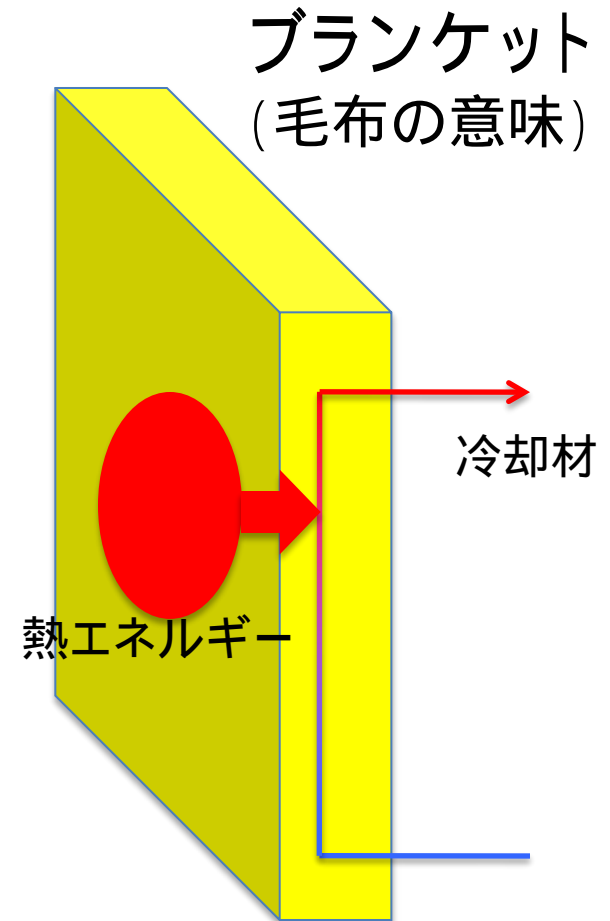
# 中性子を熱に変える

プラズマ

中性子



運動エネルギー

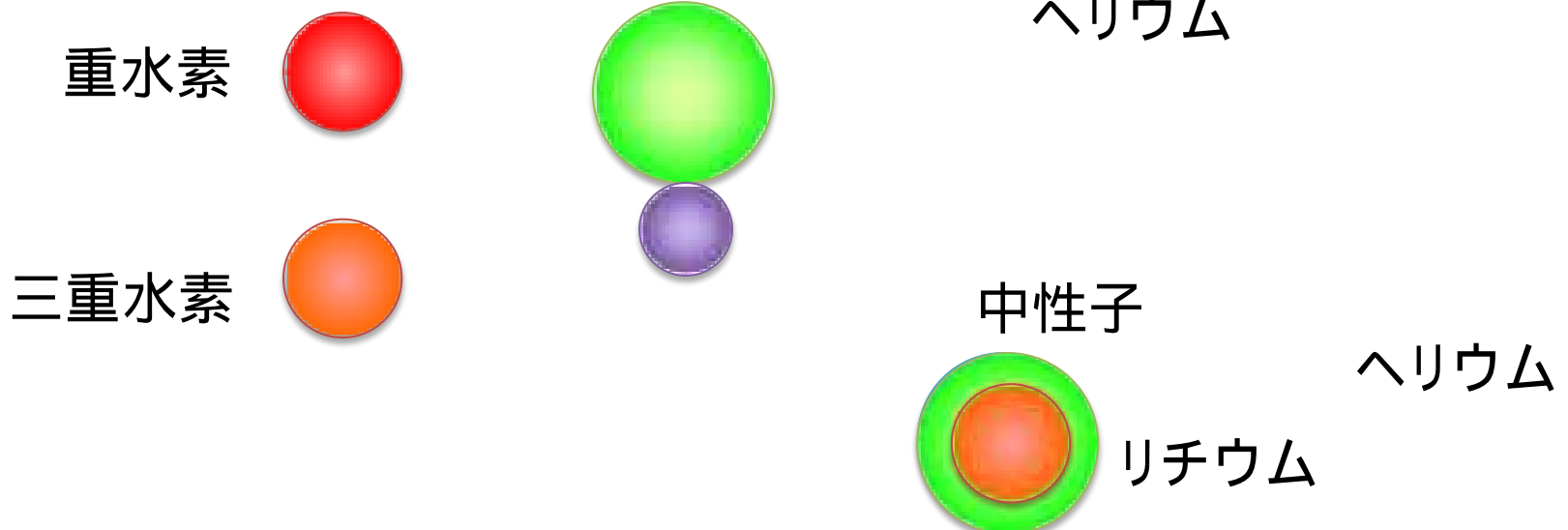
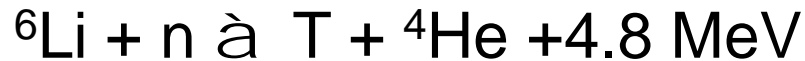


# 三重水素はリチウムから作られる

三重水素(トリチウム)は  
水素の同位体

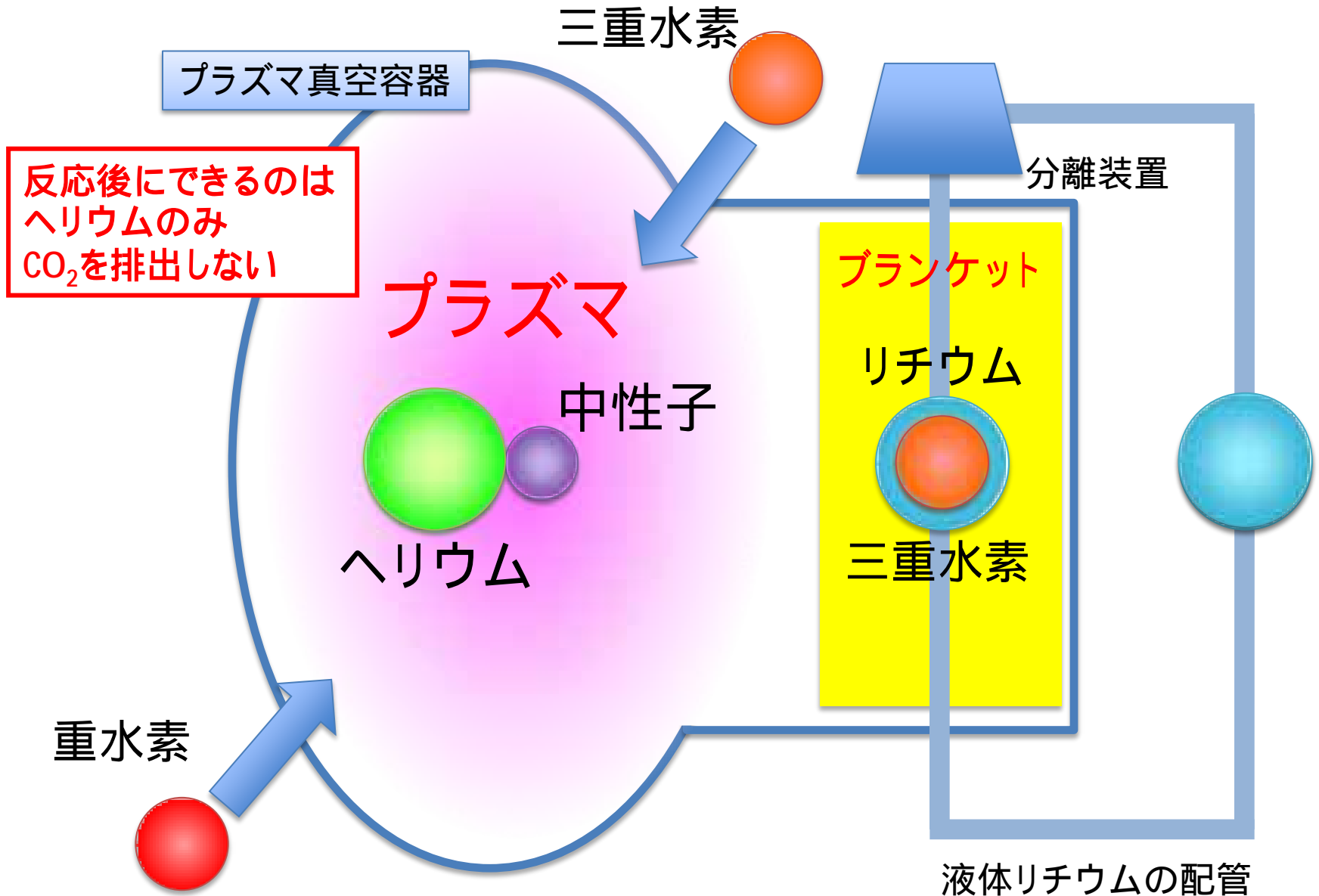
水素の3倍の重さ  
自然界にも存在します

ブランケットの中でリチウムを使って生産

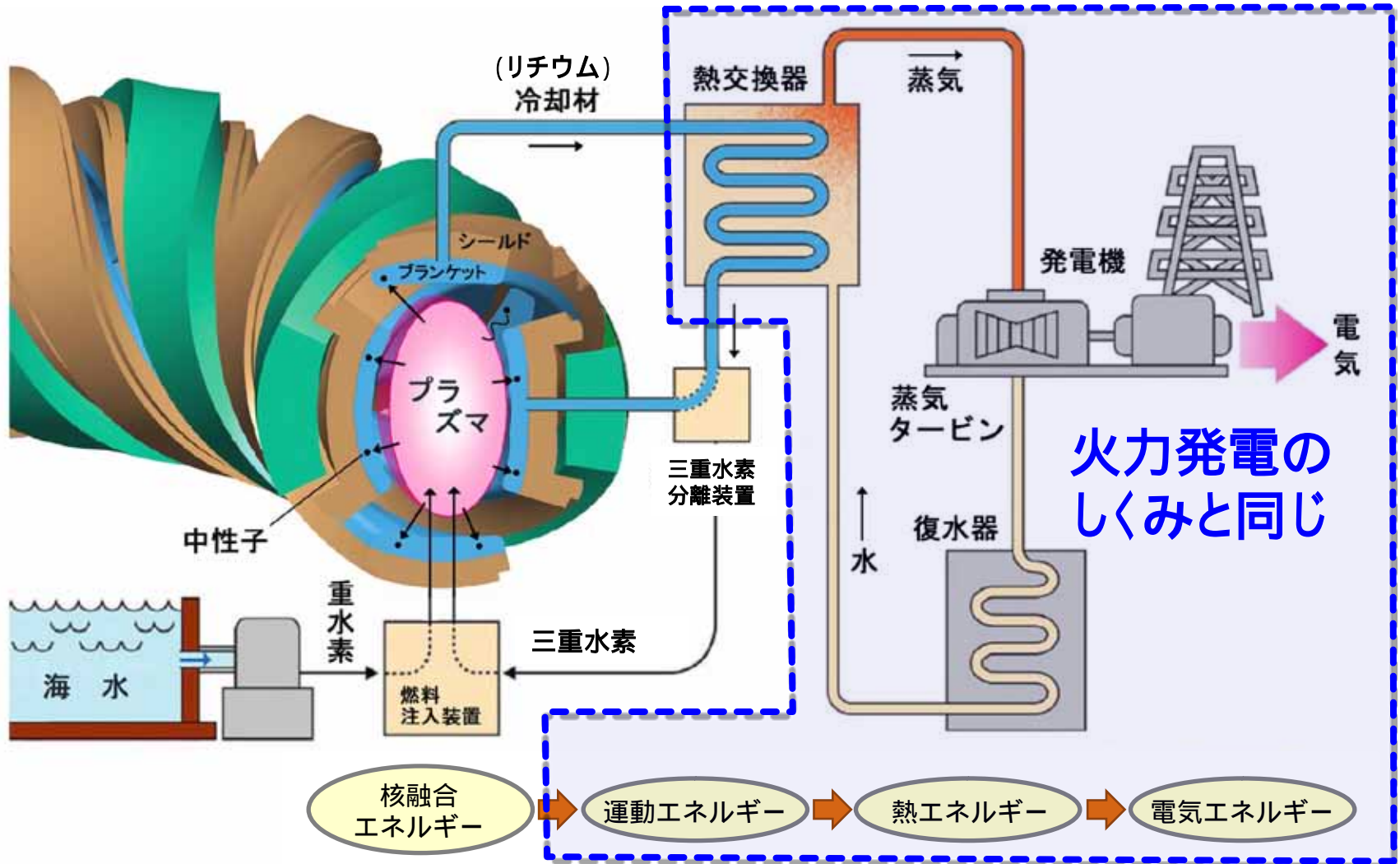


海水中に2000億トンのリチウム 事実上、無尽蔵

# 核融合炉は燃料の三重水素を生成しながら運転 - 供給する原料は重水素とリチウム -



# 核融合発電のしくみ



燃料の三重水素(T)はリチウム(Li)からつくる  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4.8 \text{ MeV}$

# 核融合の燃料は海から採れる！



携帯電話の電池  
リチウム 0.3g



水 3リットル  
重水素 0.1g

日本の一人当たりの年間電気使用量  
を発電できる

重水素は水の中に含まれている

水素	99.985%
重水素	0.015%

海水中に2000億トンのリチウム 事実上、無尽蔵

核融合発電は  
いつ実現するのか？

# ヘリカル型核融合発電所の実現に向けて

2010年代

2020年代

2030年代

2040年代



ヘリカル型  
核融合発電所

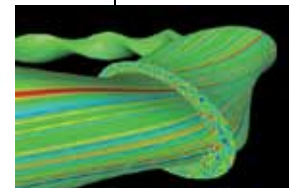
2030年代に  
核融合発電を実現

設計

建設

運転

LHD数値実験炉(スーパーコンピュータの活用)



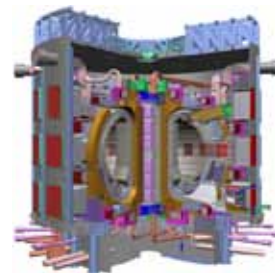
照射施設 IFMIF



LHD実験  
軽水素 → 重水素

材料照射実験

実験炉 ITER



建設

運転

克服すべき課題

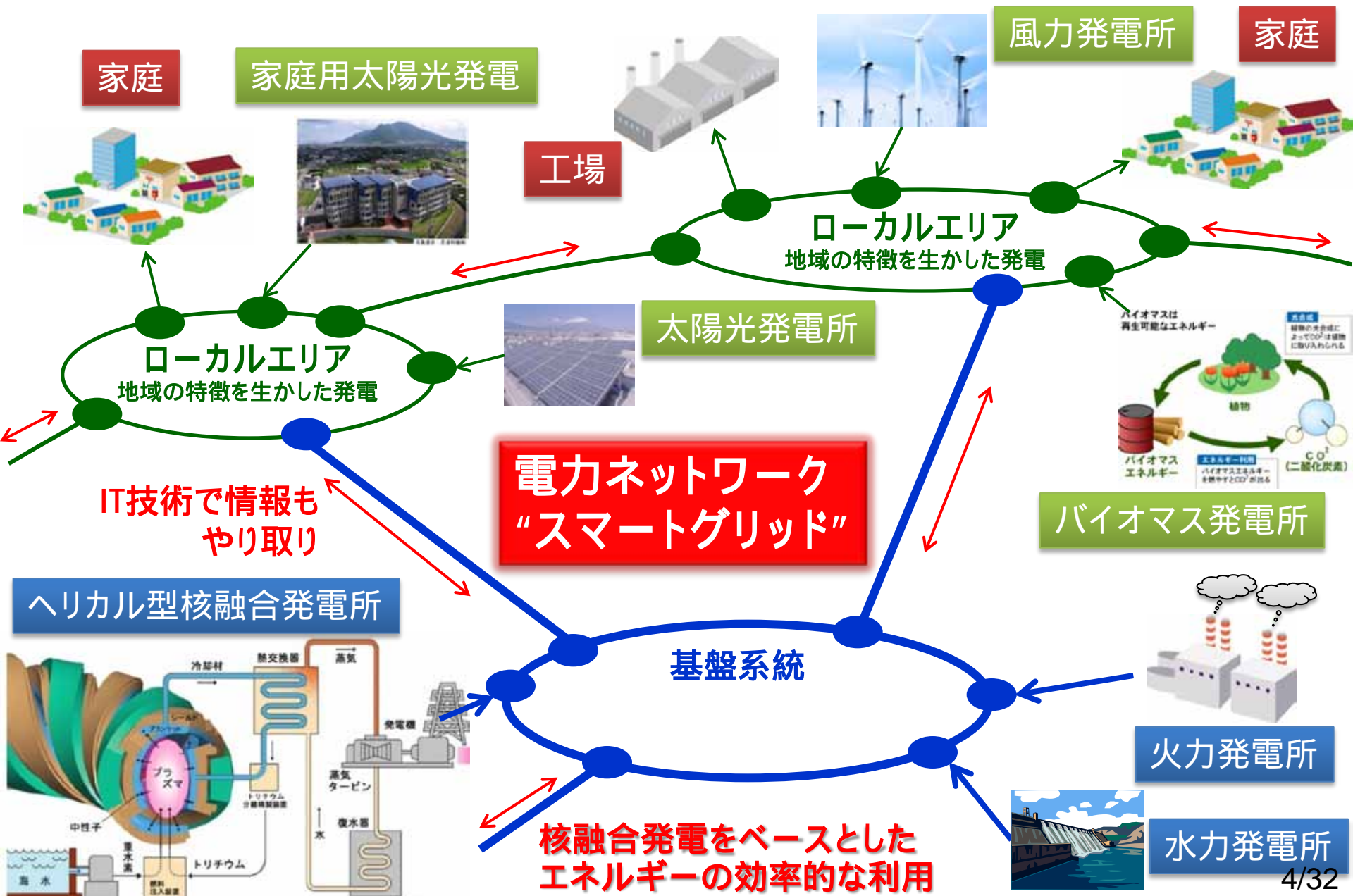
プラズマの  
高性能化

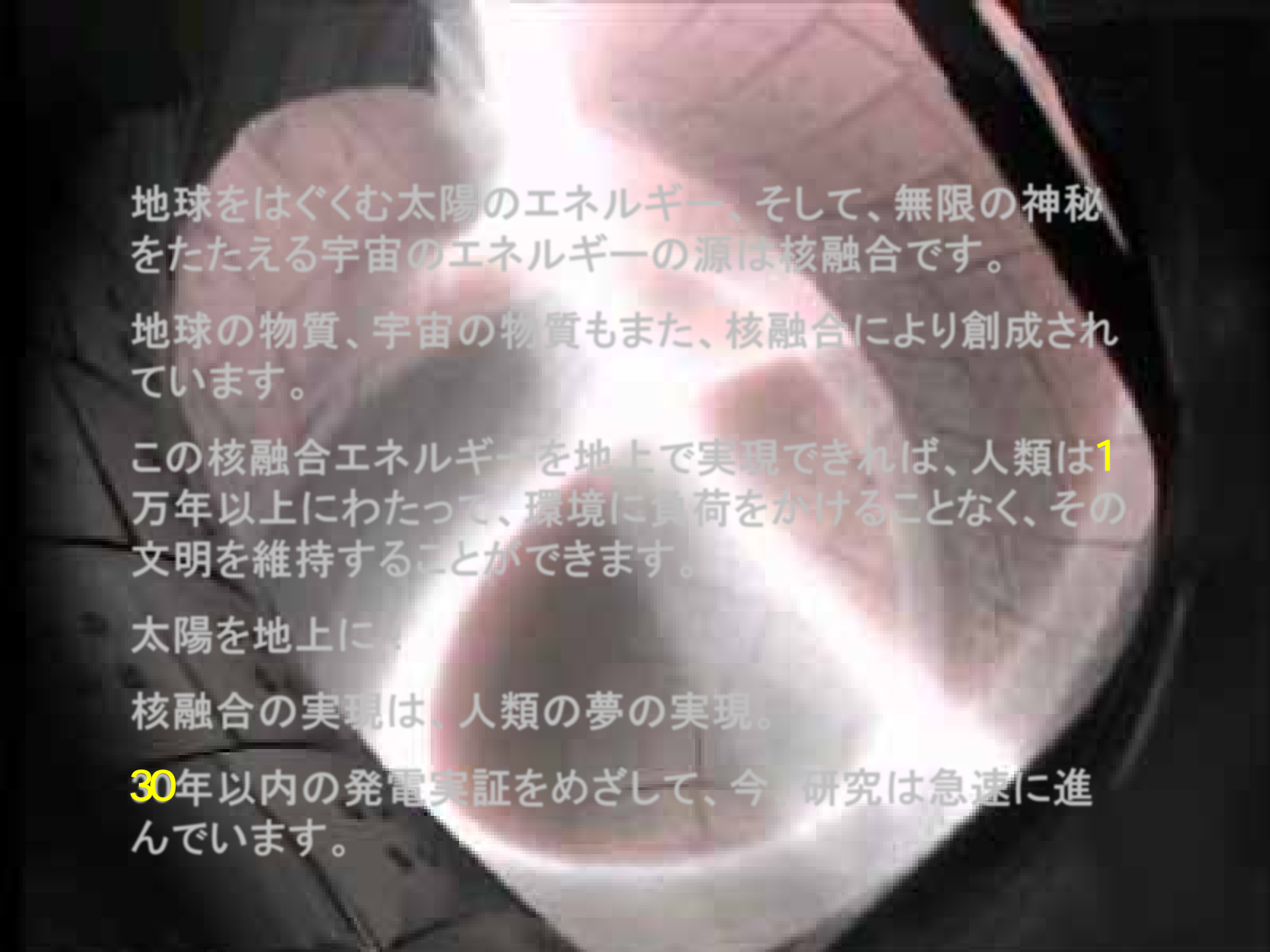
炉材料開発

燃焼プラズマ  
での工学技術  
の実証



# 将来のエネルギーシステム





地球をはぐくむ太陽のエネルギー、そして、無限の神秘をたたえる宇宙のエネルギーの源は核融合です。

地球の物質、宇宙の物質もまた、核融合により創成されています。

この核融合エネルギーを地上で実現できれば、人類は1万年以上にわたって、環境に負荷をかけることなく、その文明を維持することができます。

太陽を地上に！

核融合の実現は、人類の夢の実現。

30年以内の発電実証をめざして、今、研究は急速に進んでいます。

**おしまい**

**ありがとうございました**