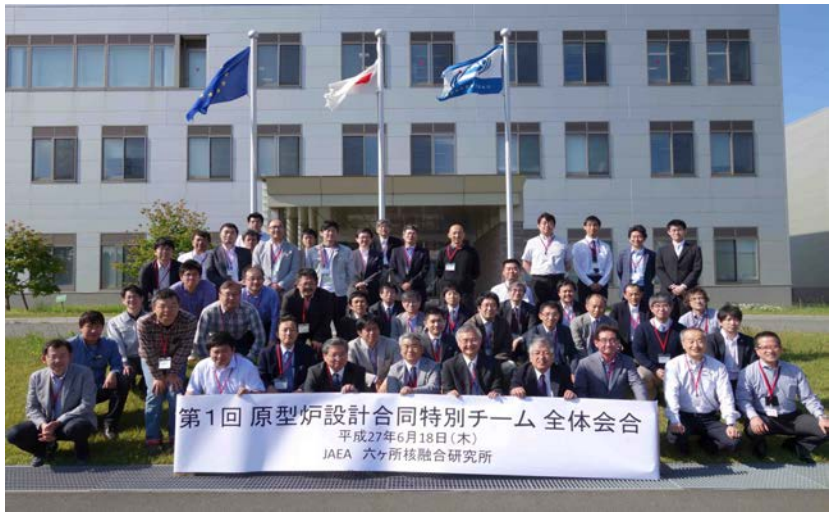
核融合反応の起こし方
①磁場を使う

量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所
宇藤 裕康

自己紹介

うとう　　ひろやす
宇藤　裕康



～略歴～

2009年3月 東北大学大学院 量子エネルギー工学専攻 博士後期課程 修了

2009年4月 日本原子力研究開発機構 入所

- 核融合原型炉のシステム設計研究に従事

現在　量子科学技術研究開発機構 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所
核融合炉システム研究グループ

- 産学が連携する核融合原型炉の設計チームにも所属

量子科学技術研究開発機構

略称：量研、QST

2016年4月発足：

放射線医学総合研究所（放医研）と
日本原子力研究開発機構の一部が統合

人類究極のエネルギー源、核融合の研究

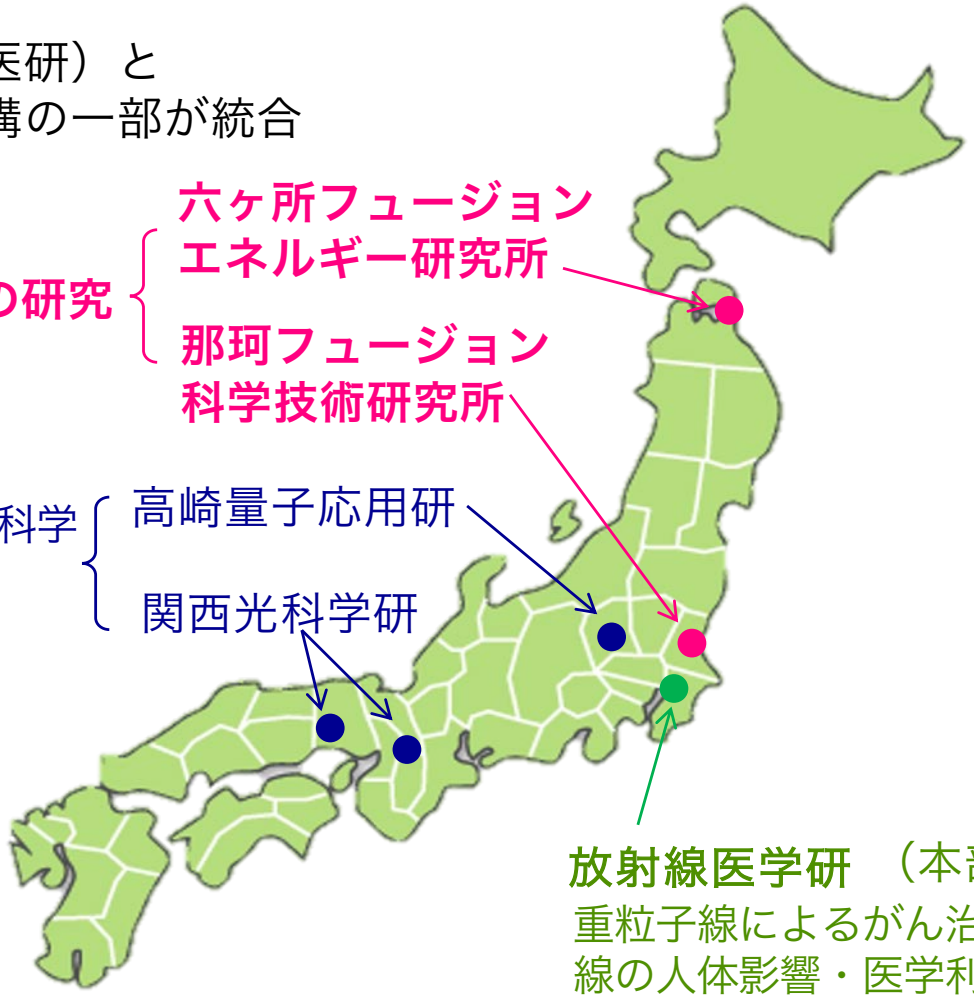
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所

那珂フュージョン科学技術研究所

量子ビームによる物質･材料科学、生命科学
高強度レーザーを利用した光量子科学

高崎量子応用研

関西光科学研



放射線医学研（本部）
重粒子線によるがん治療、放射線の人体影響・医学利用

核融合反応を起こすには？（おさらい）

地上で核融合反応を起こすのに必要な温度

固体（氷）

気体(水蒸気)

プラズマ
（水プラズマ）

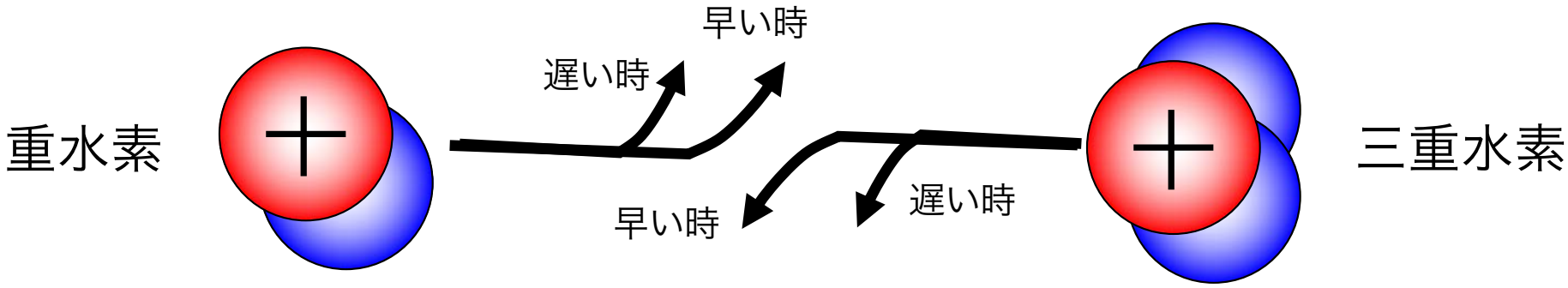
地上で起こす
重水素/三重水素
の核融合の条件

液体(水)

気体分子が電
子とイオンに
なりばらばら
になった状態

+イオンを+イオンに近づけると…

➡クーロン力（反発力）が働く



⇒この反発力に打ち勝つ速度が必要

+イオン間に作用する静電エネルギーU(N)

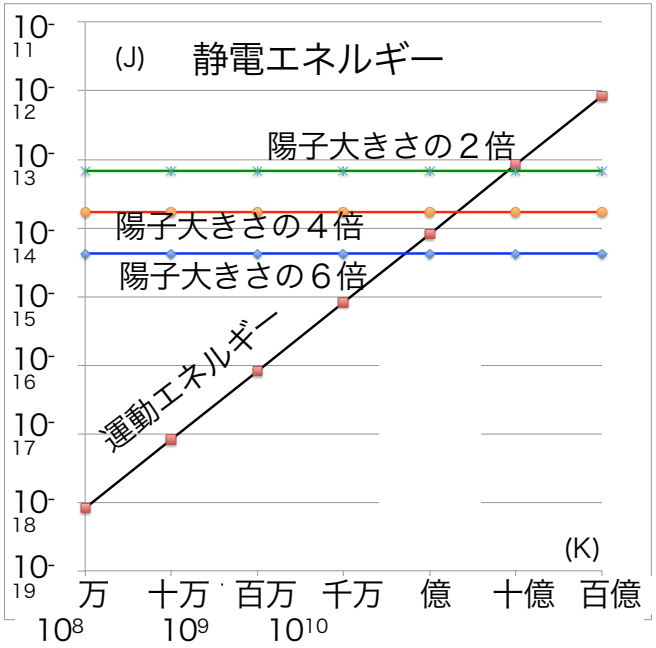
$$U = k\frac{Q_1 Q_2}{r}$$

$k=9.0\times10^{9}\ \mathrm{Nm/C^2}$
$Q_1=Q_2=1.6\times10^{-19}\ \mathrm{C}$
$r_1= N\times1.7\times10^{-15}\ \mathrm{m}$

温度Tのイオンの運動エネルギー

$$E = K\frac{3T}{2} \times 4$$

$K=1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J/K}$
ボルツマン定数



4倍しているのは同じ速度のイオン同士が正面衝突した場合、
相対速度が２倍、エネルギーが４倍になるので

どれくらいのスピードが必要か？

イオン温度として数10keV以上

（**数億度以上、～1000km/s**）

密度として10^{20}個/m^3

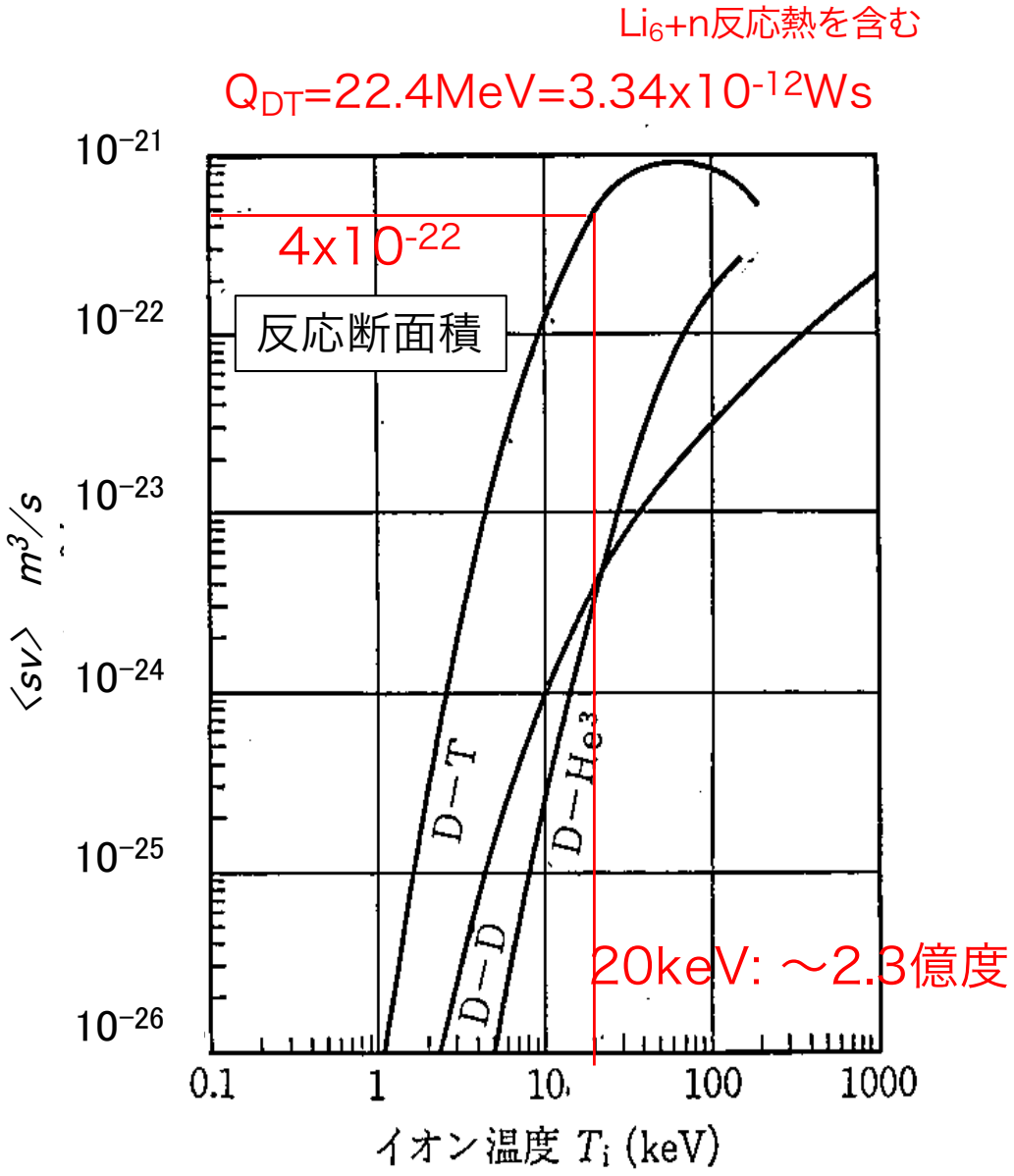
（0°、1気圧の空気の数密度の27万分の１）

$$P_{fusion} = \frac{n^2}{4} \langle sv \rangle Q_{DT}$$

$$= \frac{10^{20} \times 10^{20}}{4} \times 4 \times 10^{-22} \times 3.34 \times 10^{-12} [m^{-6}] \frac{[m^3]}{[s]} [Ws]$$

$$= 3.34 \times 10^{6} W/m^3 = 3340 kW/m^3$$

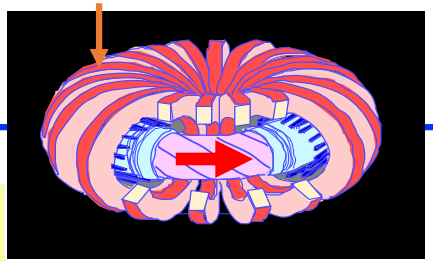
⇒　**数MW/m^3が可能**



核融合反応の起こし方 ～なぜ磁場を使うか～

磁場閉じ込め核融合炉の種類

トロイダル磁場コイル



プラズマ電流

トーラス系

軸対象系

トカマク型

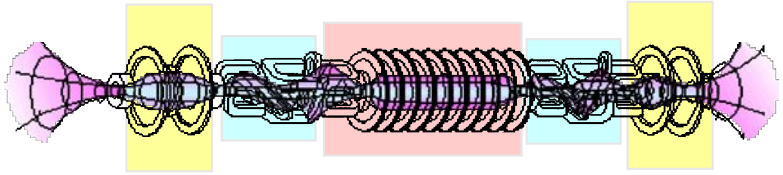
非軸対象系

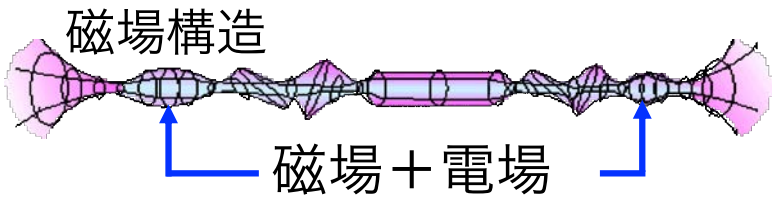
ヘリカル型

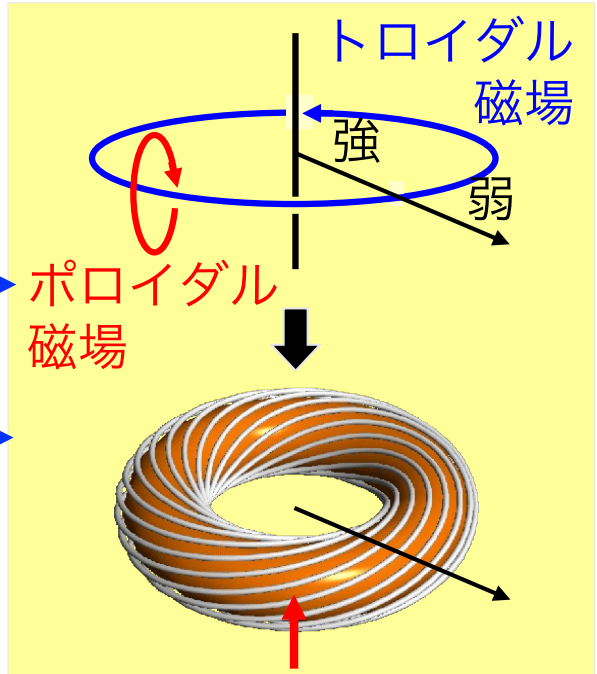
ヘリカルコイル

開放端系

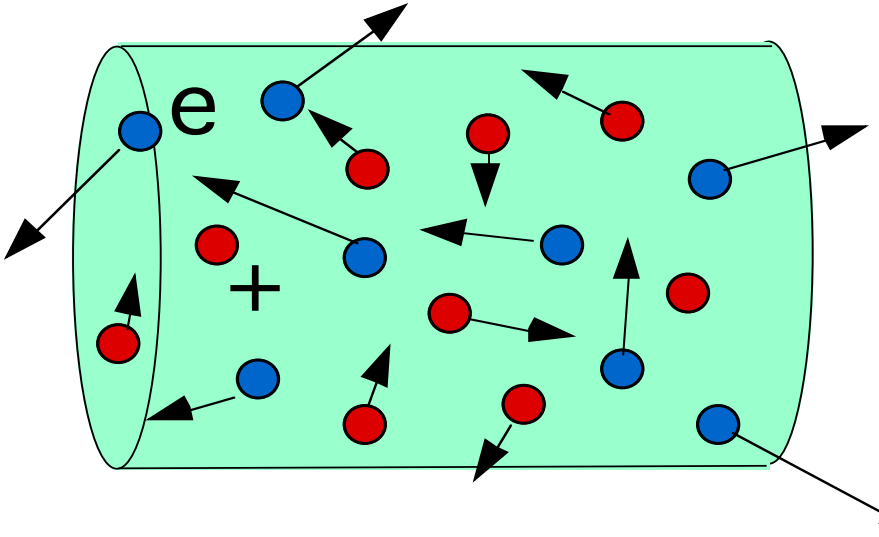
タンデムミラー型 ： GAMMA10







なぜ磁場を使うのか？



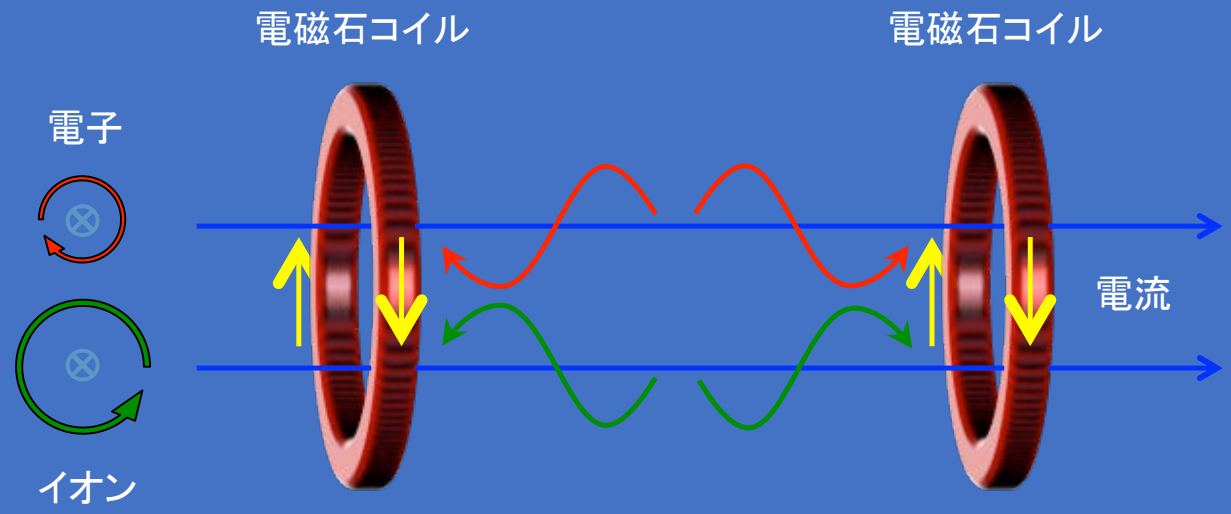
10 keVのプラズマの熱速度

v_e = 59300 km/s

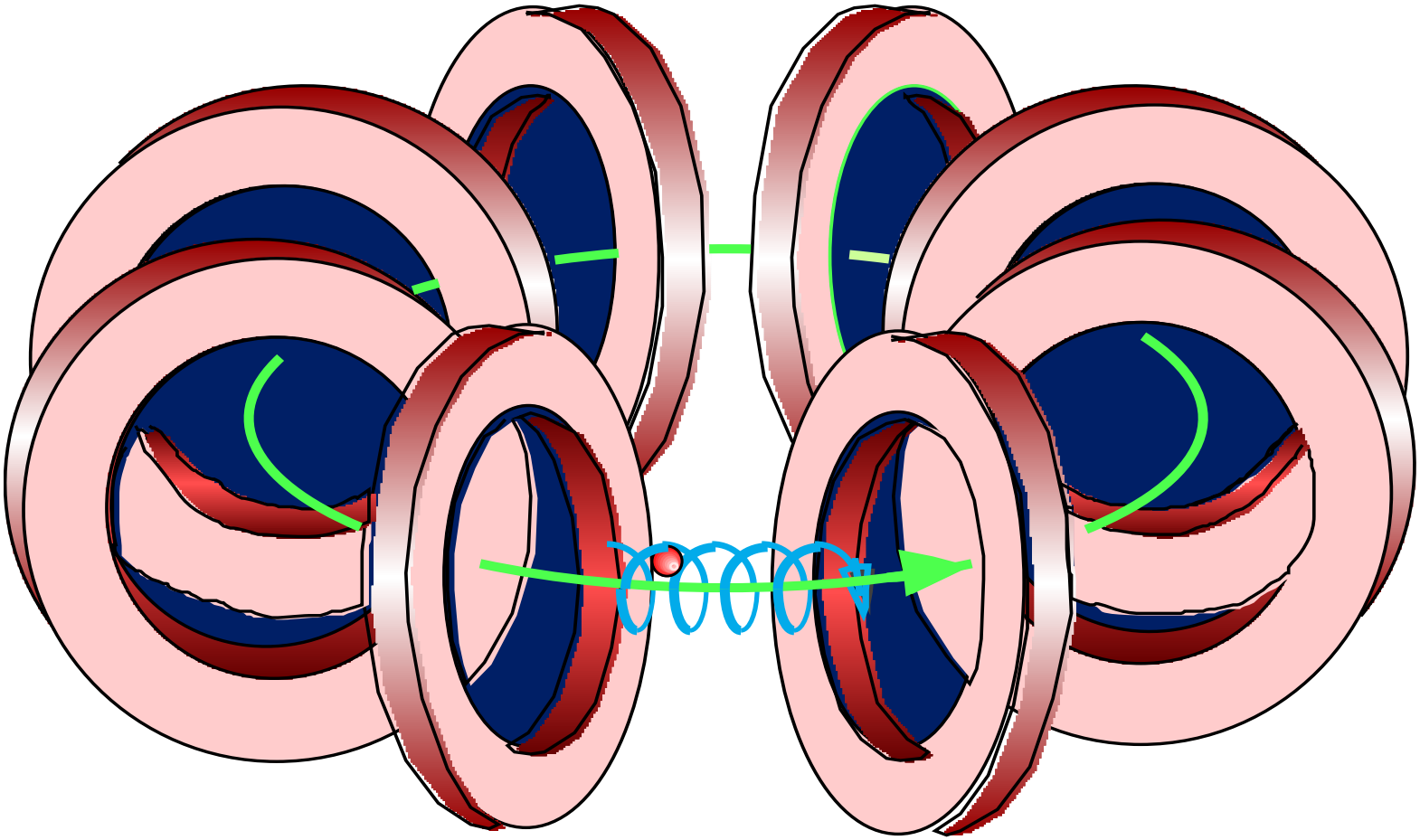
v_D = 976 km/s

地球と同じ大きさ（半径6300 km）の容器にイオンが留まれる時間　約13秒

荷電粒子は磁力線に巻付いた螺旋運動（ラーマ運動）をする

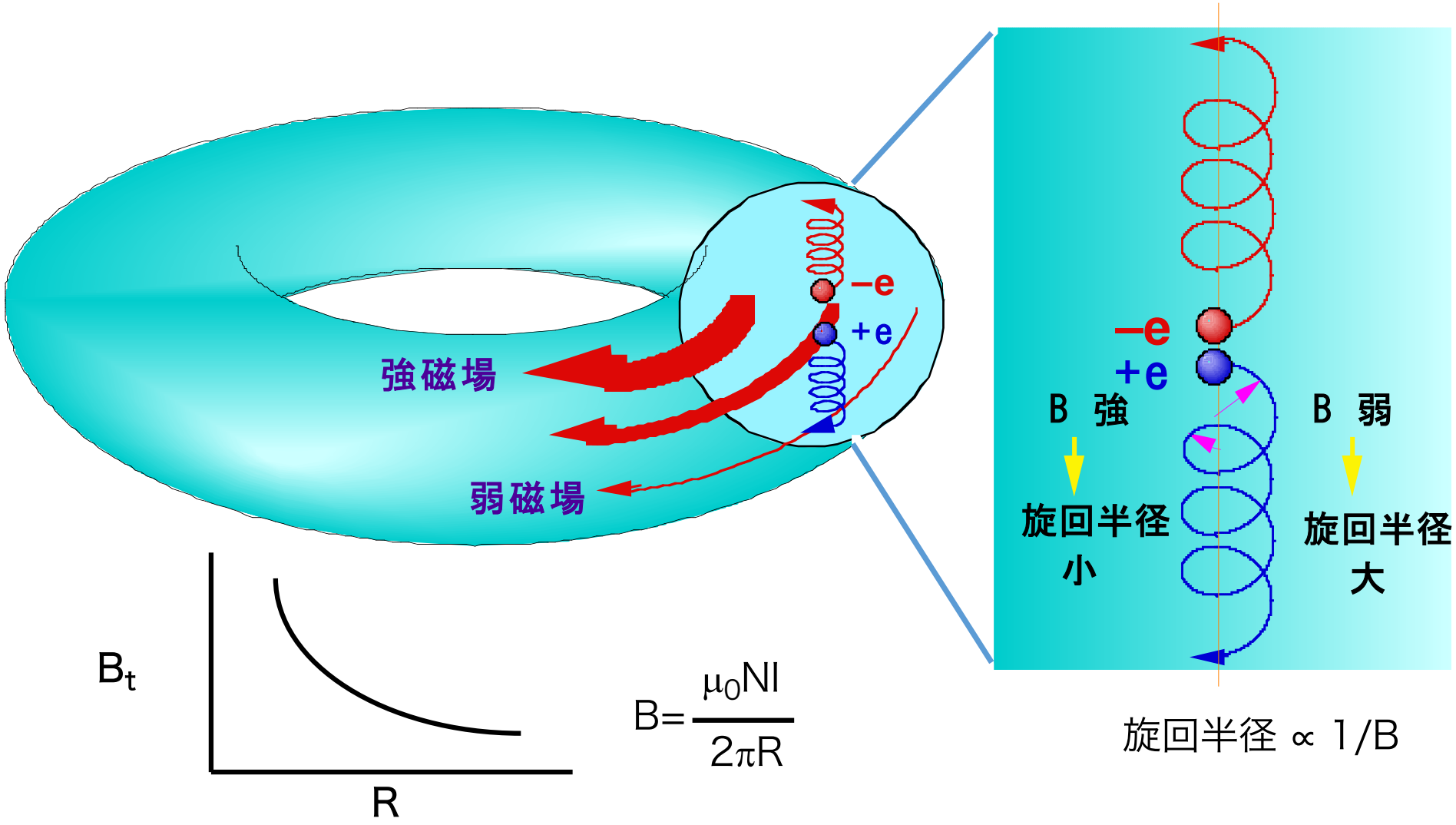


ドーナツ型の磁力線で万事解決？



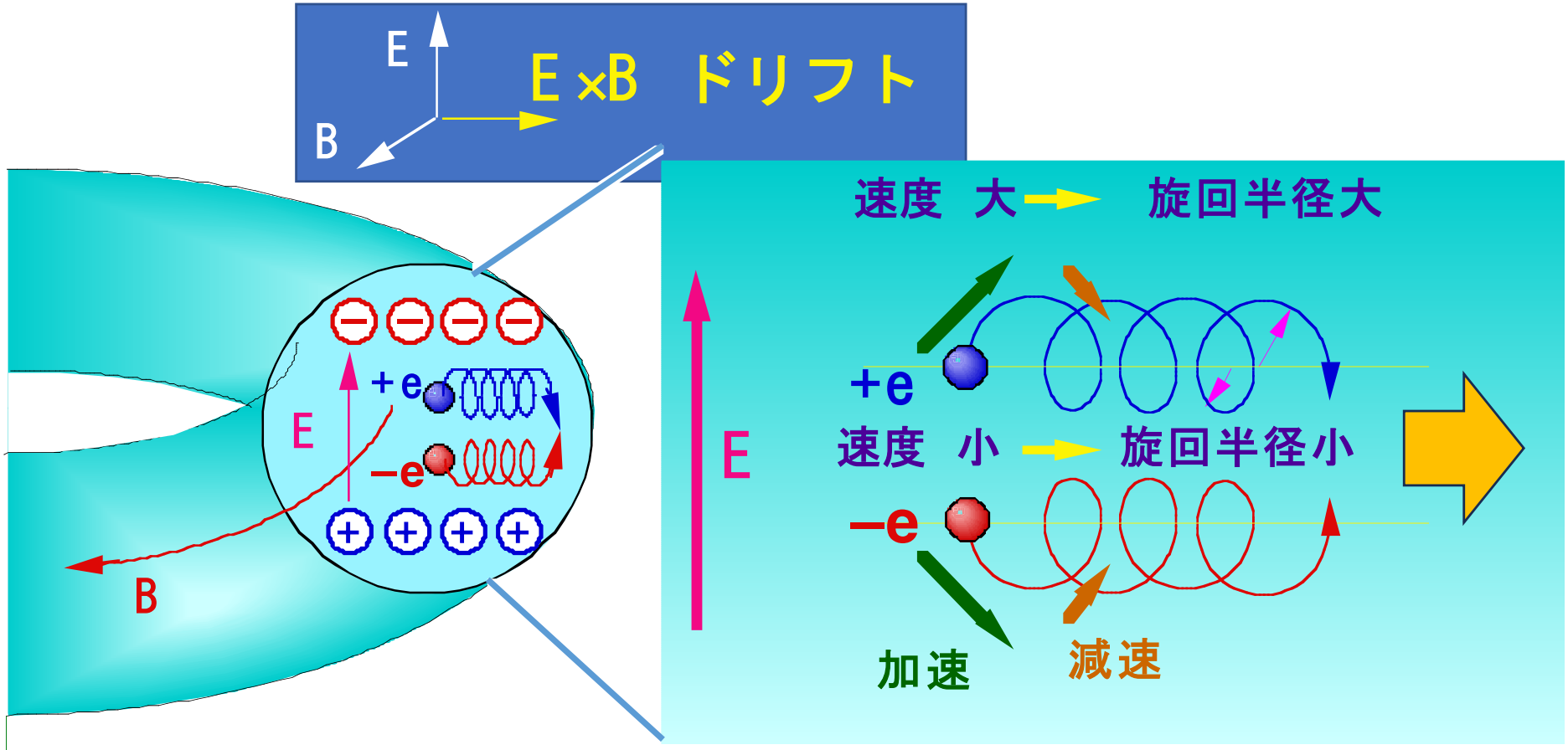
磁場勾配による粒子軌道のため荷電分離

トロイダル磁場は大半径方向に勾配（∇B）
∇Bドリフトにより電荷の分離を引き起こす



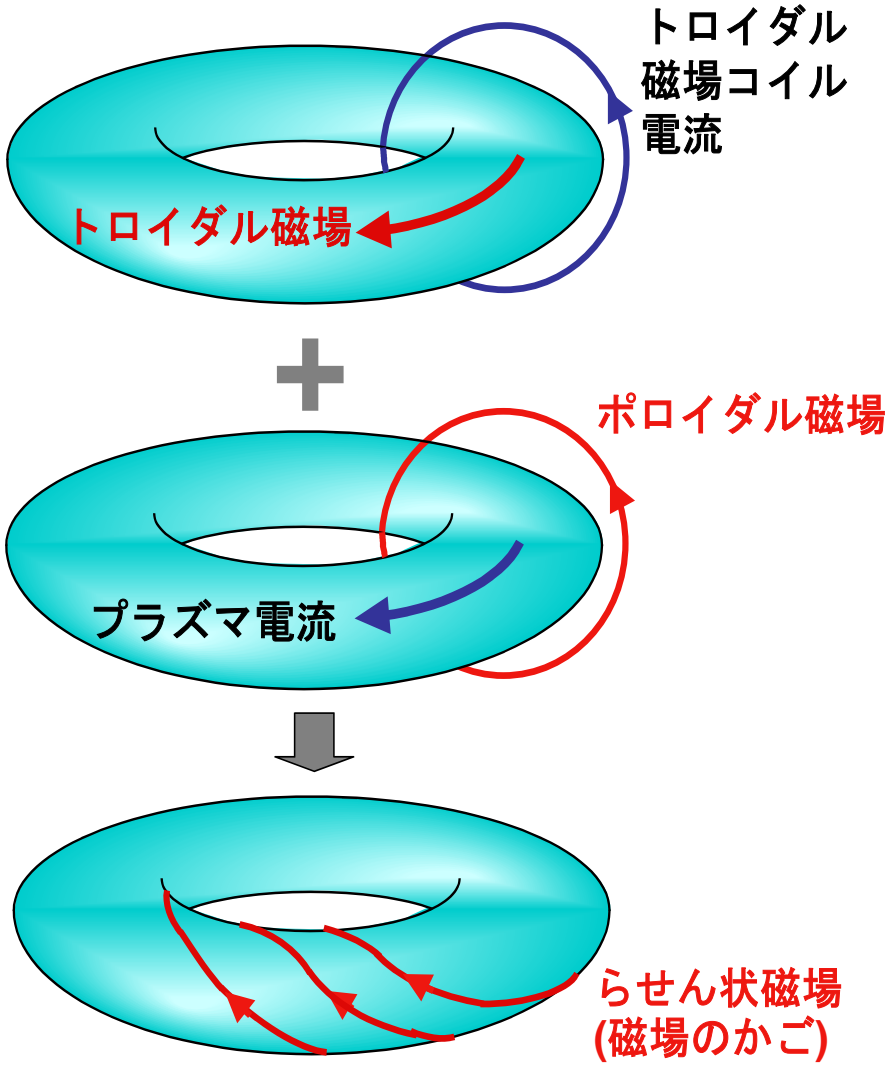
トロイダルドリフトによる損失

電荷の分離により電場が生成
→この電場により粒子は外向きのドリフトを生じる



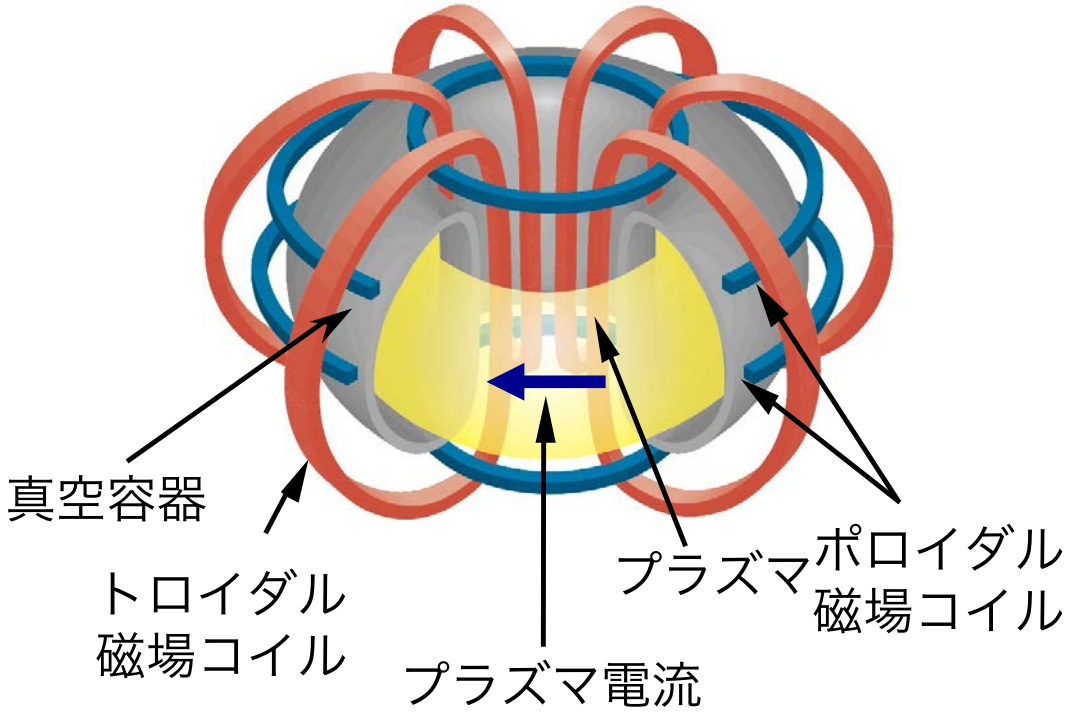
ドーナツ状にしてもプラズマは逃げてしまう！ではどうする？？

荷電分離の中和する



プラズマをねじる！

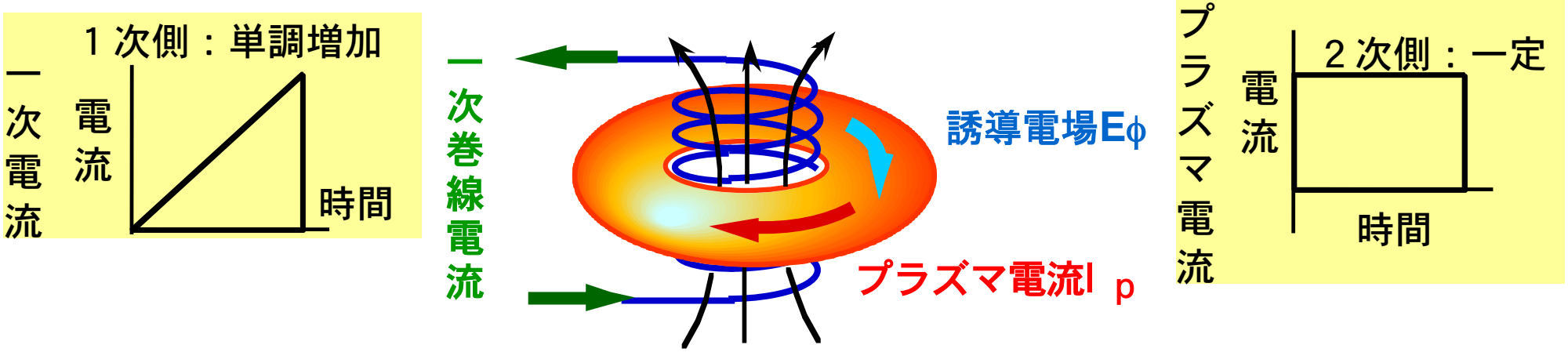
プラズマ電流でポロイダル磁場を作る



ではどうやってプラズマ電流を流すか？

どうやってプラズマに電流を流すか？

誘導電流
一次巻き線電流の変化によりトーラスを貫く磁束Ψ_{ex}を変化させ、
それにより生じる誘導電場E_fで電流を流す（：トランスの原理）。
最も信頼性が高く、現在の実験装置では主要な電流駆動法。
原理的に、パルス運転しかできない。



周回電圧 $V_{loop}^{surf}=d\Psi_{ex}/dt$
誘導電場 $E_f^{surf} = V_{loop}^{surf}/(2\pi R)$.

トランスの原理ではパルス運転しかできないので他の方法が必要

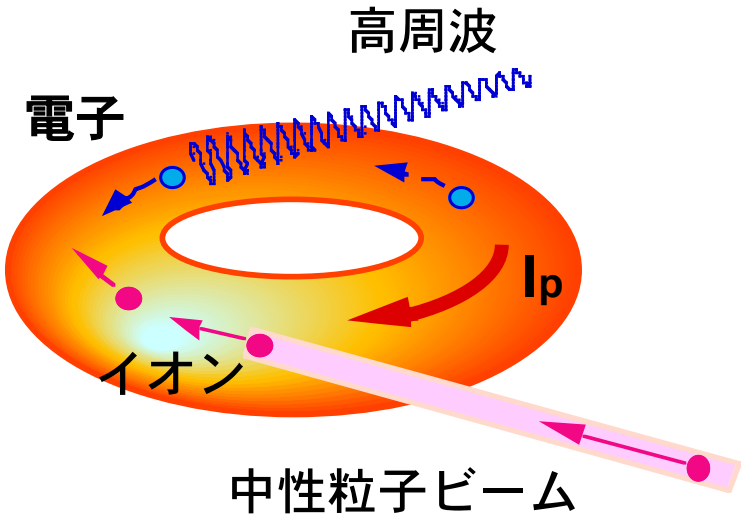
トカマクの連続運転のための電流駆動

● **非誘導電流駆動**

外部から中性粒子ビームや高周波を入射して電流を駆動する。

➡パワーが必要

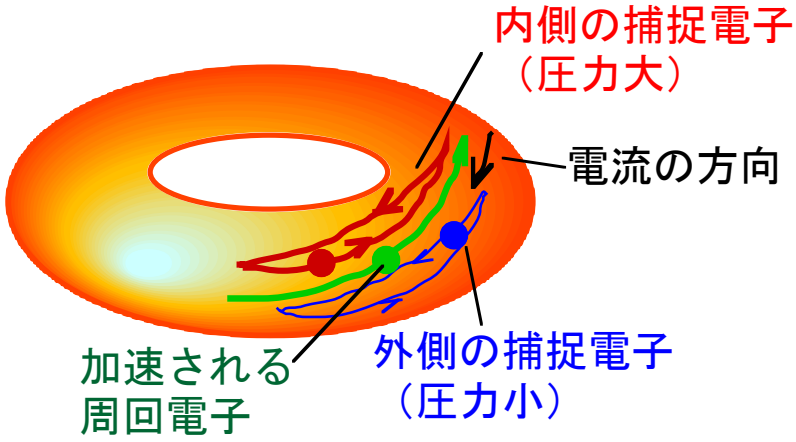
中性粒子ビームや高周波は、プラズマの加熱にも用いられる。



● **ブートストラップ電流（自発電流）**

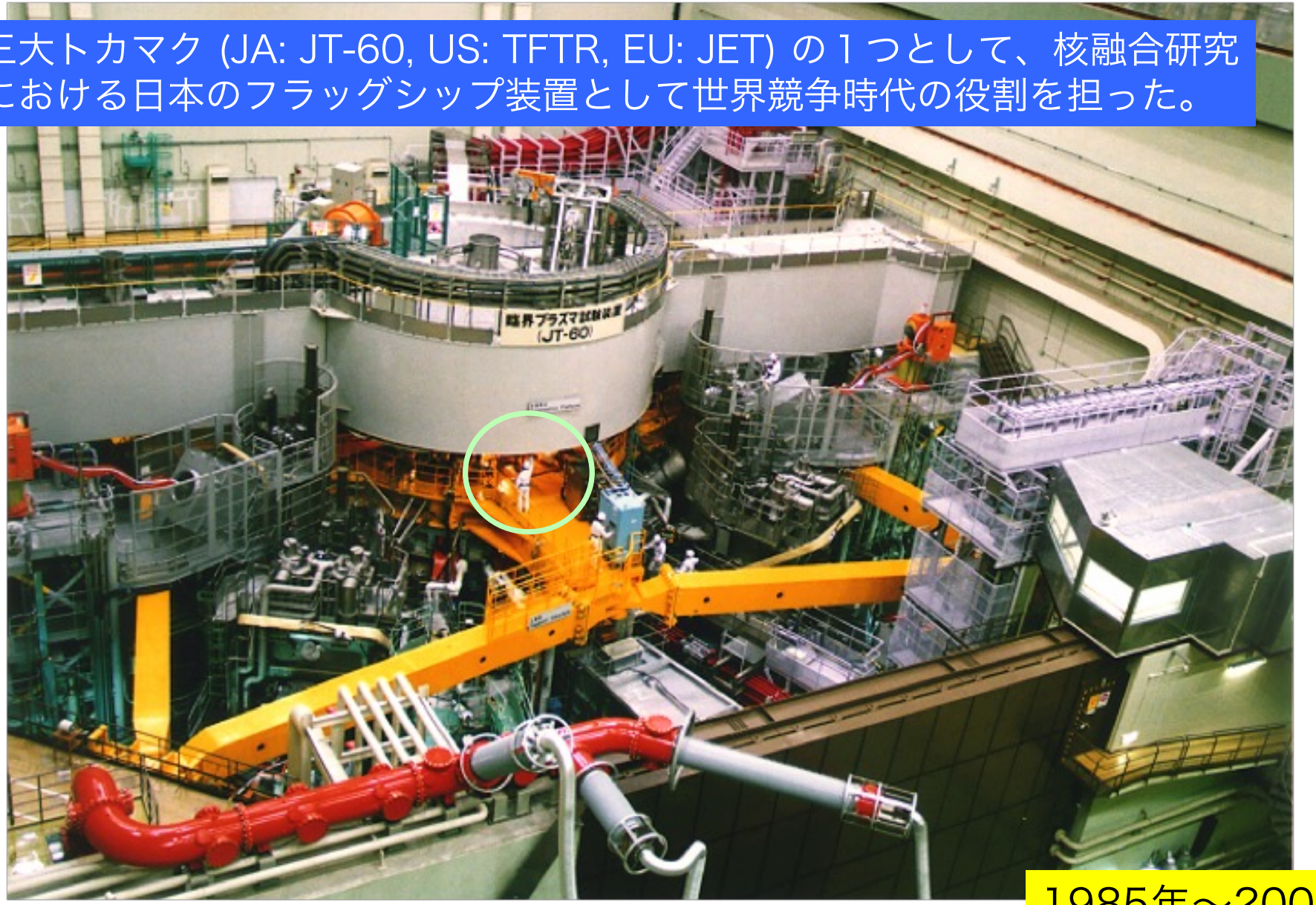
プラズマ中の圧力勾配により自発的に流れる電流。

➡パワー不要



磁場閉じ込めプラズマ試験装置（JT-60）

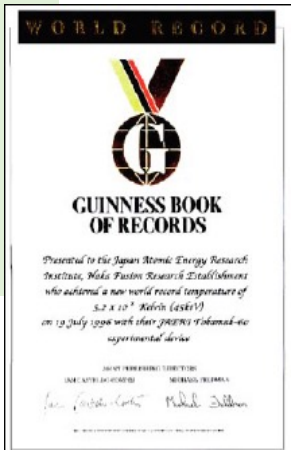
世界三大トカマク (JA: JT-60, US: TFTR, EU: JET) の１つとして、核融合研究開発における日本のフラッグシップ装置として世界競争時代の役割を担った。

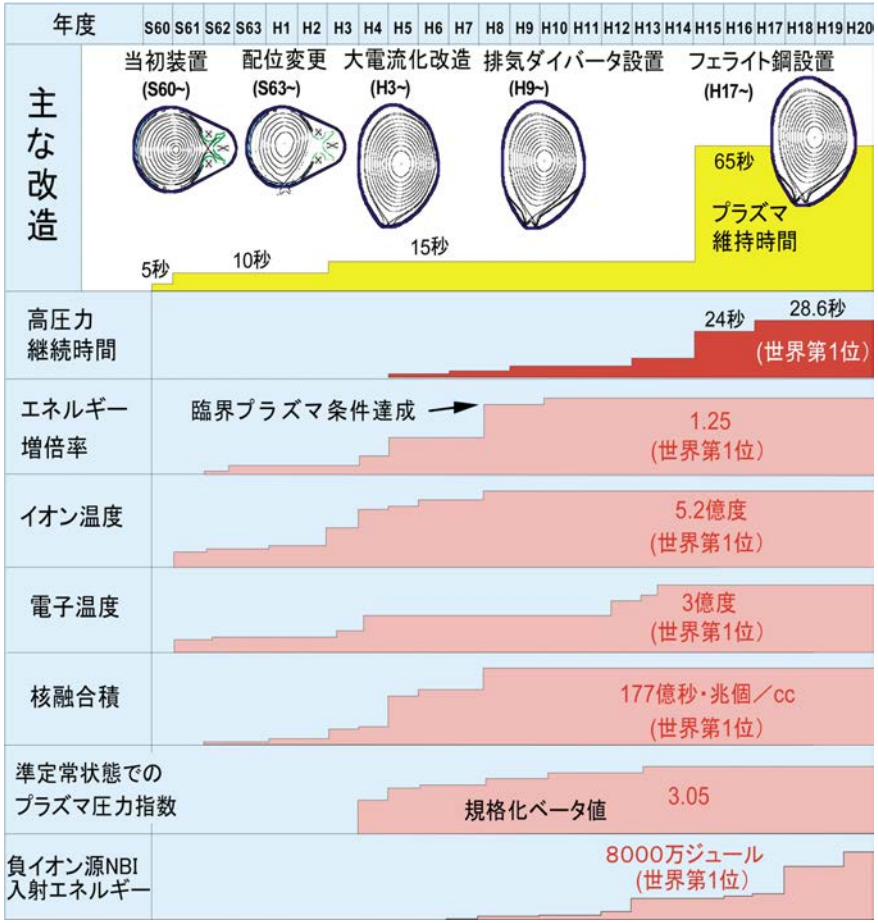


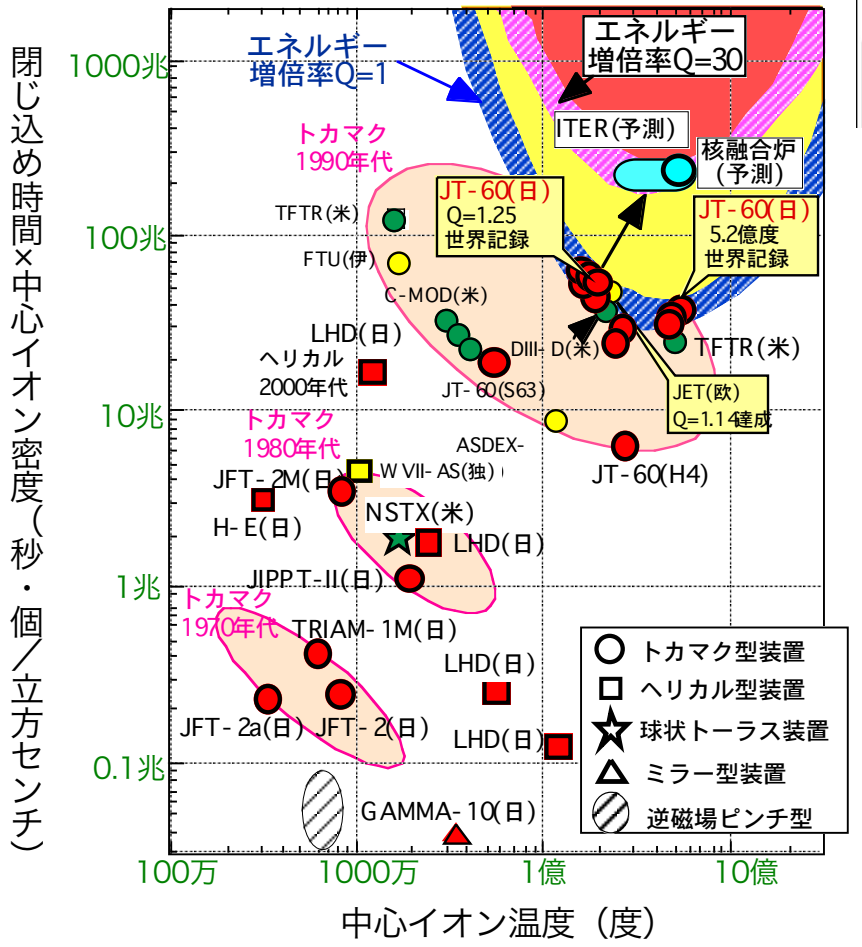
1985年～2008年運転

日本は世界の核融合研究の最前線をリード

平成 8年：臨界プラズマ条件達成、イオン温度5.2億度（世界最高値、ギネスブック認定）
平成10年：エネルギー増倍率1.25（世界最高値）
平成17年：高自発電流割合(75%）の長時間維持(7.4秒間）　（世界最長）
平成18年：フェライト鋼の効果により、ITER相当の高性能プラズマの長時間維持（28秒間）（世界最長）
平成19年：ITERの高出力密度化をもたらす高圧力プラズマの安定維持（28秒間）（世界最長）
平成20年：　実験完遂。　JT-60SAへ向けて改修開始

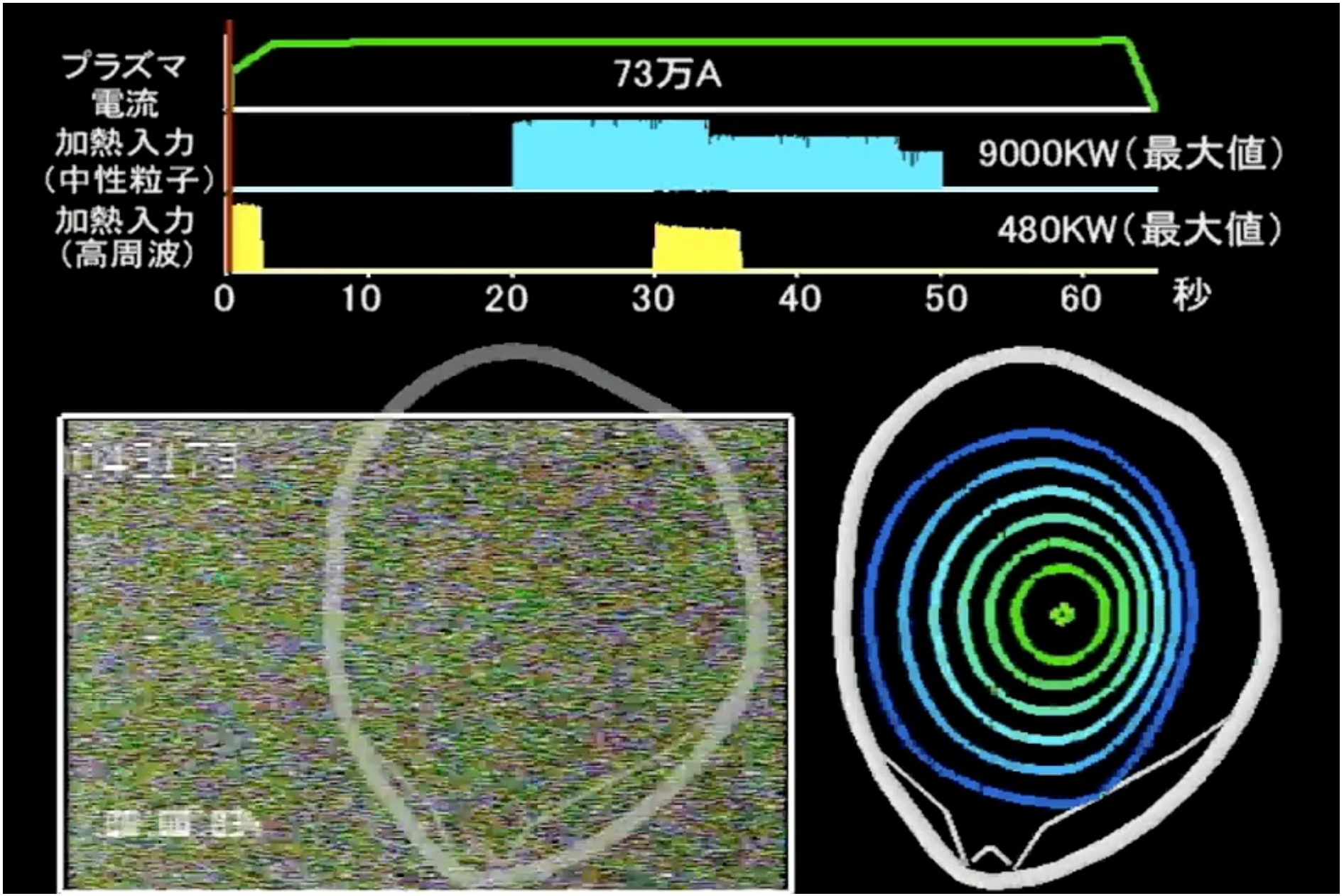






磁場で核融合プラズマを自在に制御する

超高温プラズマ実験（例）


プラズマ
電流
73万A
加熱入力
（中性粒子）
9000KW（最大値）
加熱入力
（高周波）
480KW（最大値）
0
10
20
30
40
50
60
秒

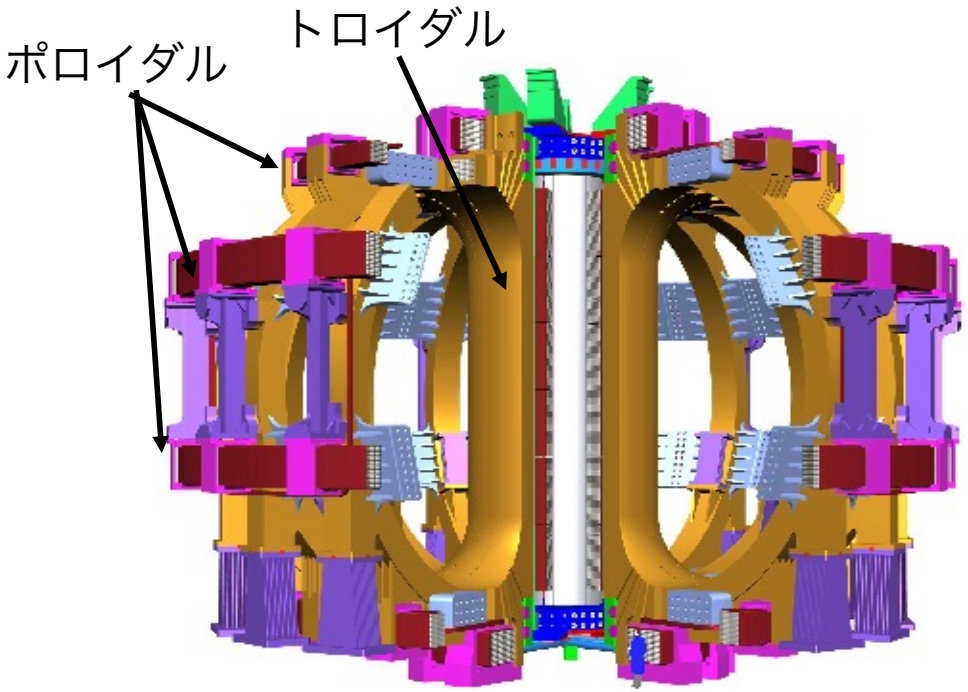
核融合炉ではどう磁場を使うか？

核融合に必要な磁場

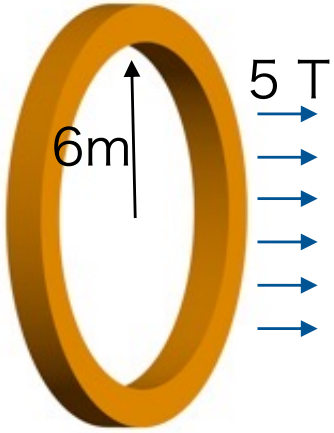
プラズマ圧力 p ~ 5 atm (0.5 MPa)

β 値（$=p/(B^2/2\mu_0)$）　~ 5%

➡ B ~5 T



銅コイルの消費電力



~15 MA/コイル12個

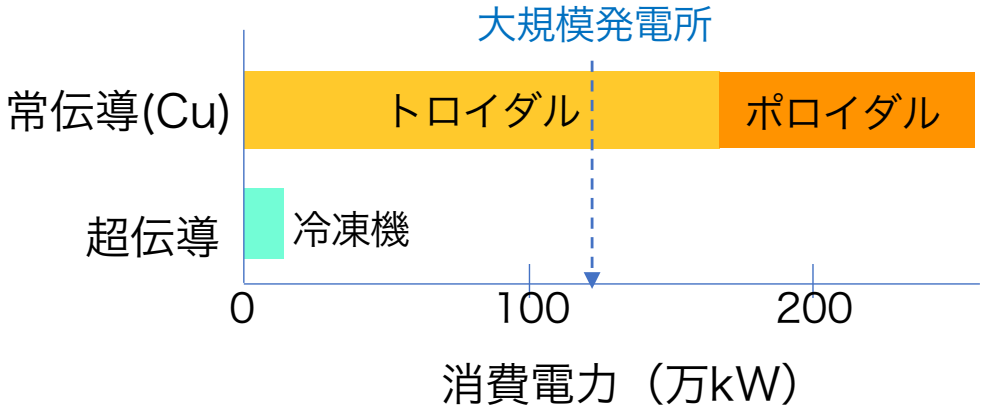
$P = \eta J^2$

$\sim r\,(900B)^2$

コイル12個

~1,500 MW

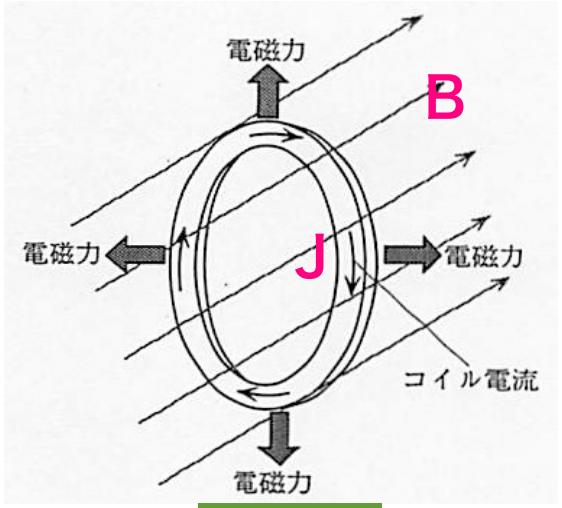
大規模発電所１基分を消費



➡ **超伝導コイルが必須！**

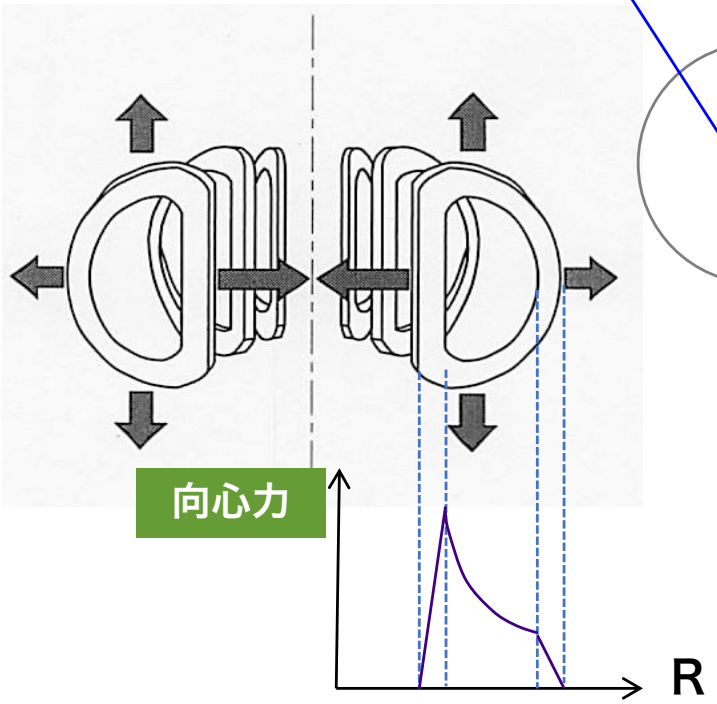
コイルに働く力

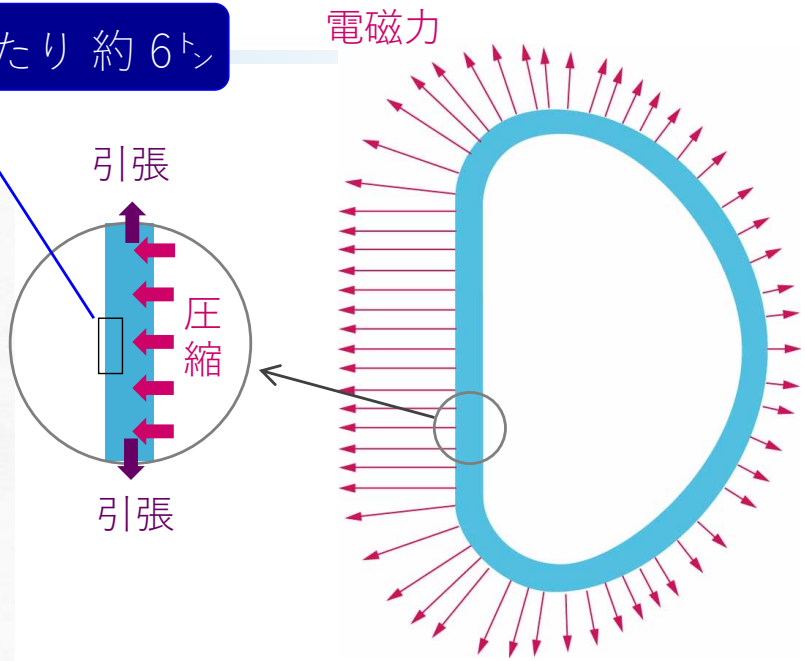
1平方センチあたり 約 6トン

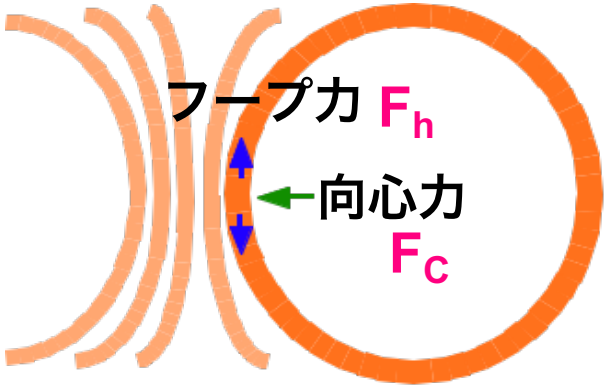


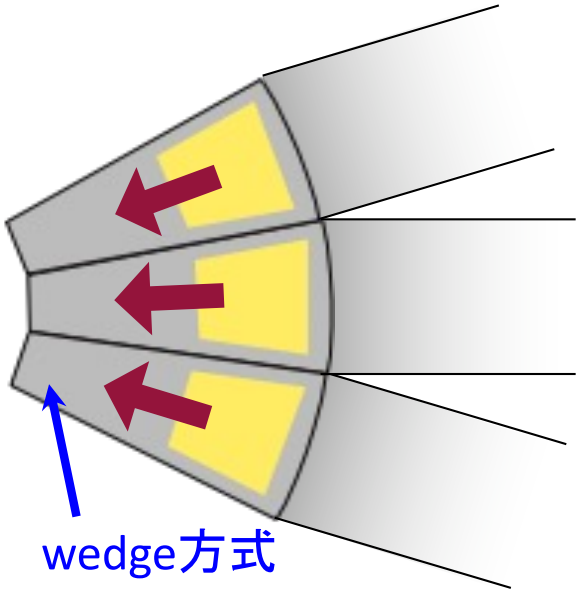
フープ力

$F_h = J \times B$



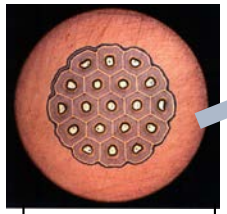




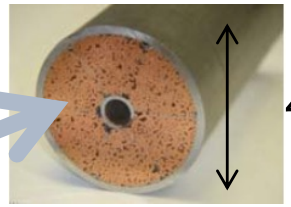


電磁力に耐えるコイル構造

導体が潰れない工夫



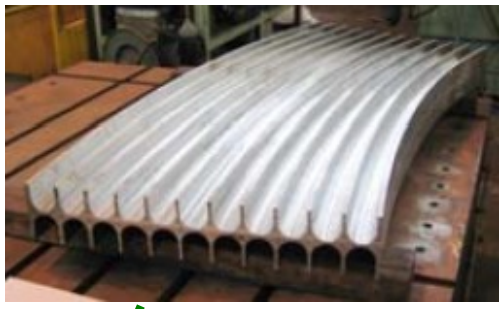
ϕ 0.8 mm
フィラメント



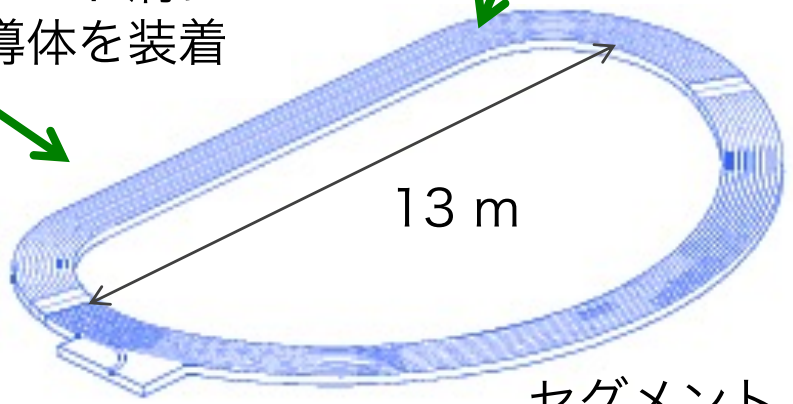
43.7mm

Cable-in-conduit導体

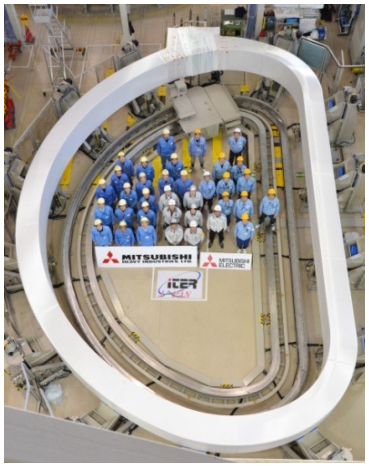
ラジアルプレート セグメント

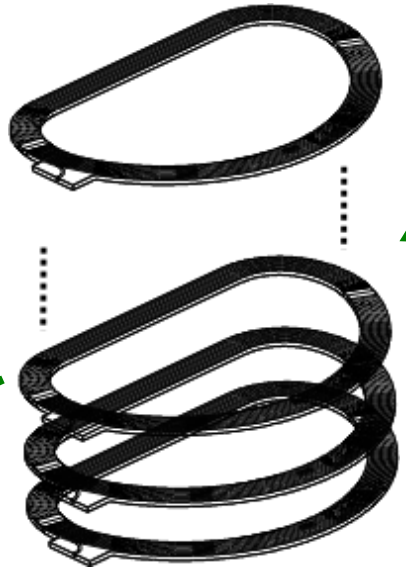


プレート溝に
導体を装着



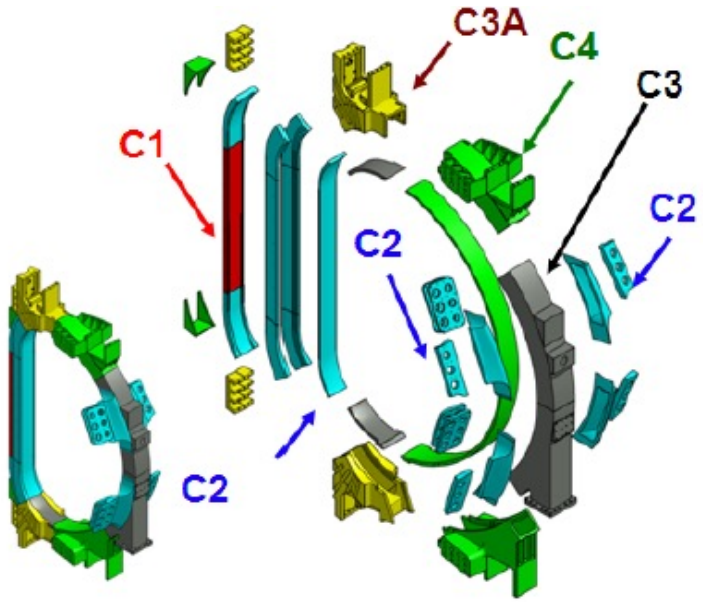
13 m



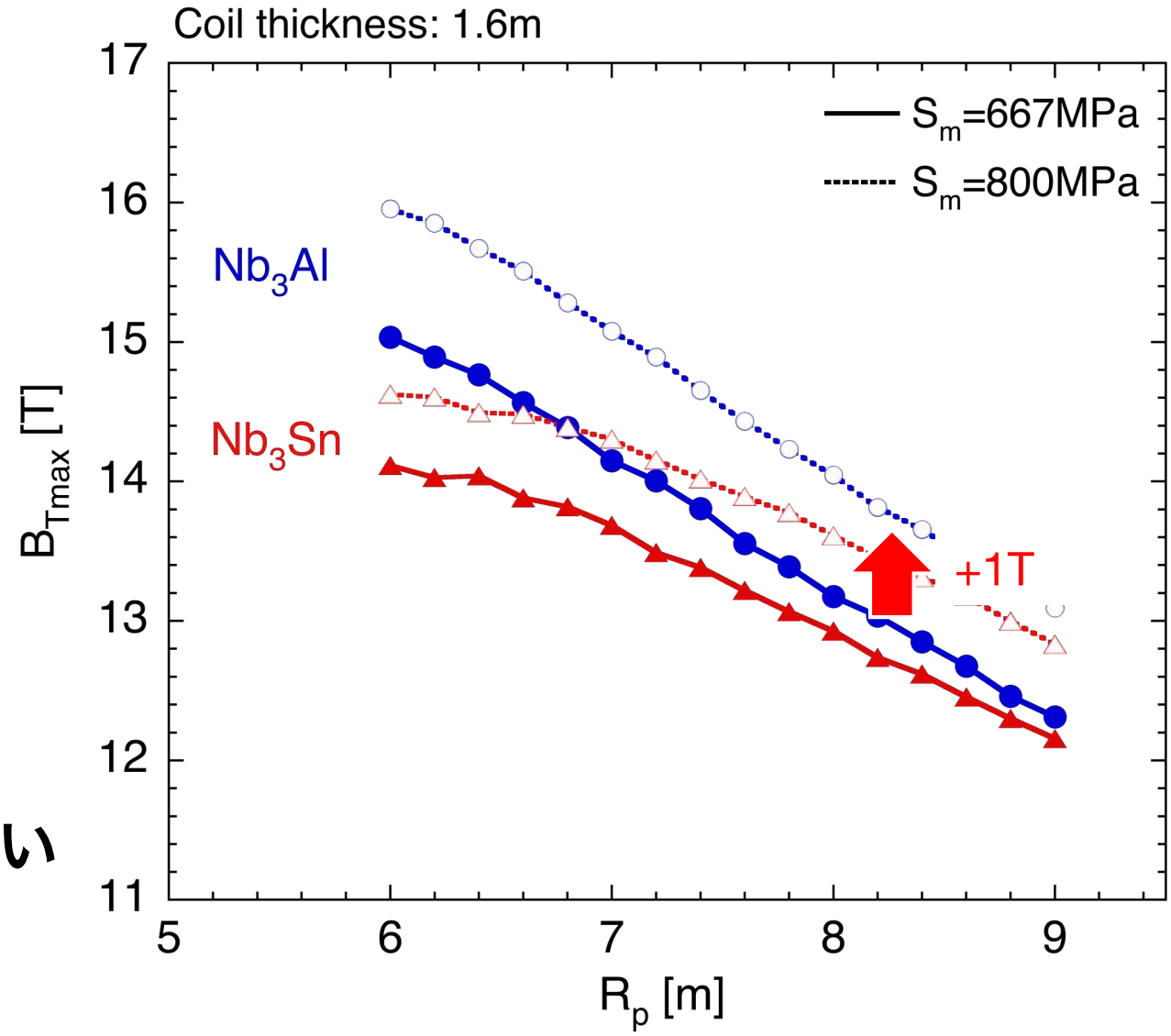


セグメント × 10ヶ溶接
➔ ラジアルプレート

構造材の強度が増すと磁場が増やせる



構造材の強度の影響が大きい



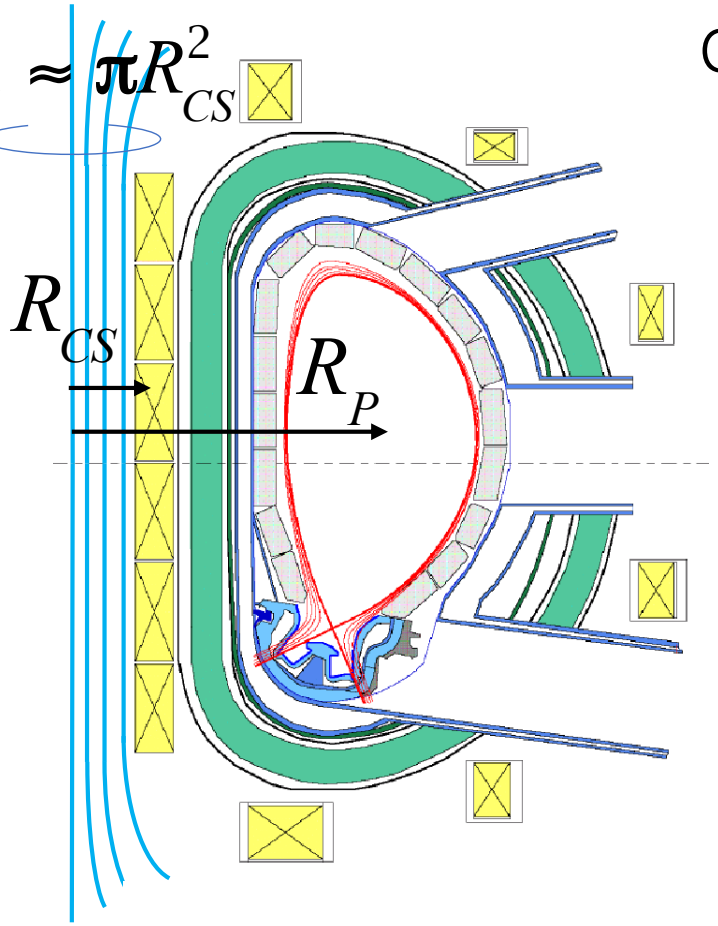
供給磁束と炉寸法

B_{CS} せいぜい 13 Tどまり

ITERの場合、CS経験最大磁場 13 T

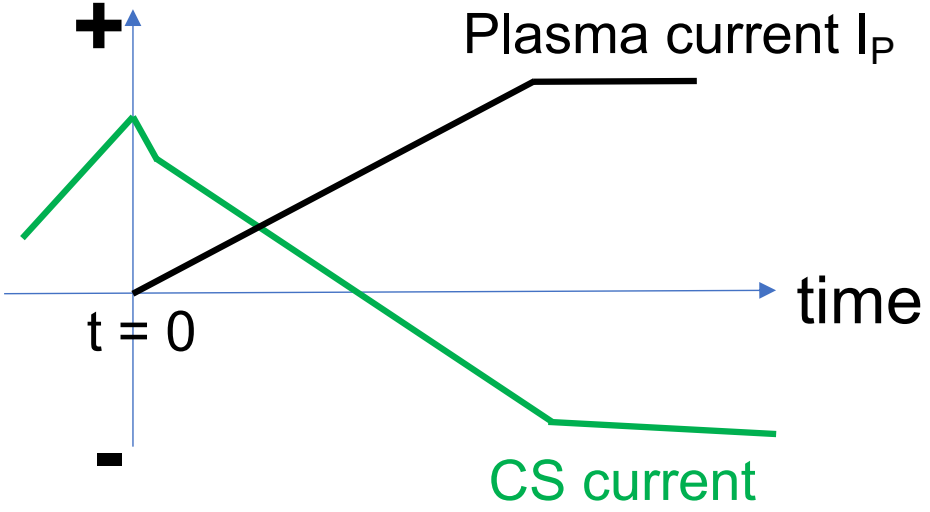
中心Solenoid
断面積

$S_{CS} \approx \pi R_{CS}^2$



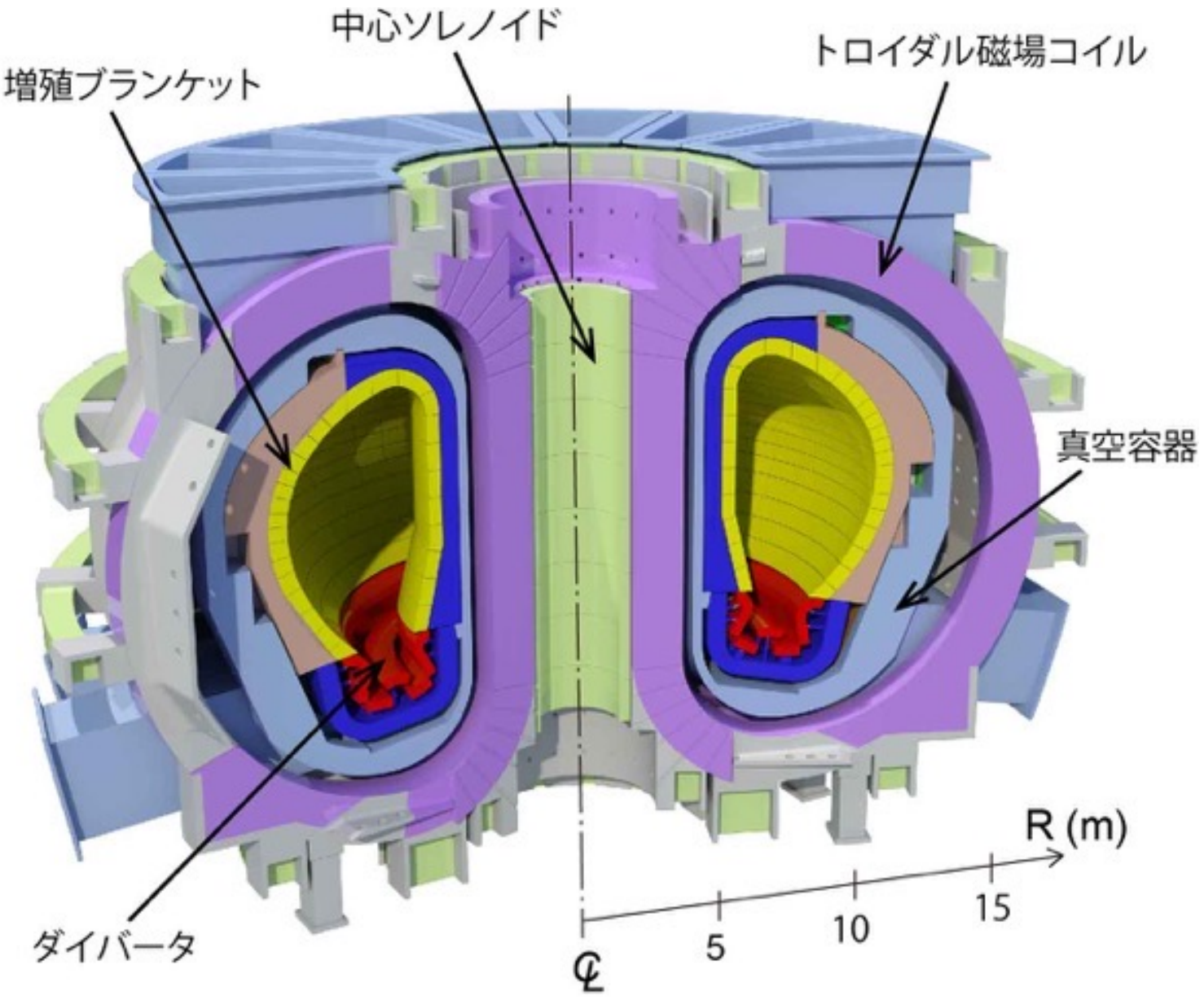
CSによる誘導プラズマ電流：

$$\Delta I_P \approx \frac{\Phi_{CS}}{L_P} = \frac{B_{CS} S_{CS}}{L_P} \approx \frac{2 B_{CS} \pi R_{CS}^2}{L_P} \propto R_{CS}^2$$



供給磁束量は炉寸法に影響

日本の原型炉 –炉心本体の全体像-



主半径：8.5m
小半径：2.42m
核融合出力：1.5GW
発電端出力：0.64GW

中心トロイダル磁場：6T
プラズマ電流：12.3MA
加熱入力：< 100MW
規格化ベータ値：3.4
規格化密度：n_e/n_{GW}=1.2
閉じ込め改善度：1.3

冷却水：PWR条件
稼働率：～70%
運転方式：定常運転
トリチウム増殖率：1.05

特別チームのホームページ

https://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/ddjst/

おわりに

核融合エネルギーの実現を担うのは平成生まれの皆さんです！