

磁力線で編んだかごの形状を工夫して 高温のプラズマを閉じ込める

シンビオ社会研究会講演会
2023/5/11 京都大学・宇治キャンパス



研究拠点形成事業
Core-to-Core Program



自己紹介

氏名: 小林進二

現所属: 京都大学・エネルギー理工学研究所

担当学部: 工学部・電気電子工学科(協力講座として)

担当大学院: エネルギー科学研究科・変換専攻

研究歴 2001: 筑波大学・物理学研究科 博士(理学)取得

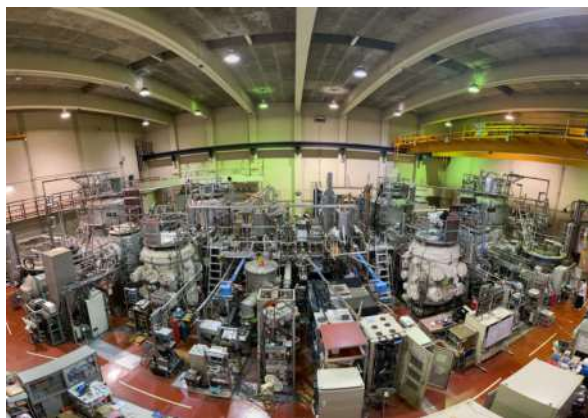
2001-2002: 日本原子力研究所(現在: 量子科学技術研究開発機構) 博士研究員

2002~現在: 京都大学・エネルギー理工学研究所

専門分野: プラズマ物理・核融合学。ヘリオトロンJを用いたプラズマの輸送研究。

最近は宇宙の粒子加速現象(統計加速、 γ 線バーストの源)の実験室模擬に注力している。

➡ 四次元時空？



GAMMA10(直線装置)

<http://www.prc.tsukuba.ac.jp>

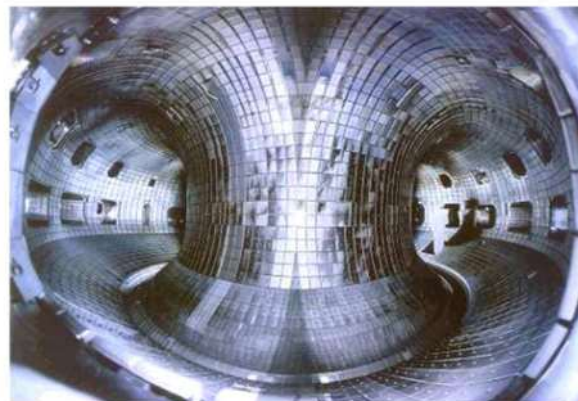
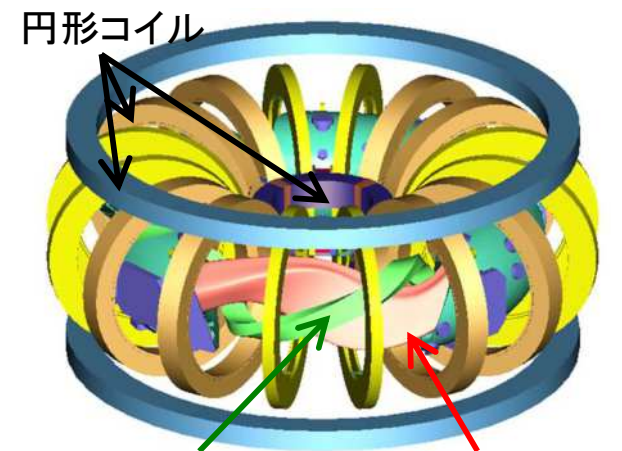


図2 JT-60真空容器内写真

[出典]日本原子力研究所那珂研究所(編):核融合炉をめざして
-核融合研究の進展と拡がり-平成11年度(1999年11月)p.20

トカマク(二次元対称)



ヘリカルコイル

プラズマ

ヘリオトロンJ(三次元形状)

概要

核融合発電を目指して、磁場を使って高温のプラズマを閉じ込める研究が各国で盛んに行われている。本講演では、

- なぜ高温のプラズマを閉じ込めることが難しいのか？
- プラズマを閉じ込めるためにどんな工夫がなされているのか？

磁場中の荷電粒子の動きを例に挙げて概要を紹介する。

これを踏まえて、京都大学宇治キャンパスに設置されているプラズマ実験装置ヘリオトロンJは、何を目的として作られ、どんな研究を行っているのか？ 紹介する。

内容

1. 核融合反応
 - ✓ 発電炉として成立するためには？
2. 磁場を使ってプラズマを閉じ込める
 - ～荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？～
 - 磁気ミラーと勾配ドリフト
 - 単純トーラス磁場と $E \times B$ ドリフト
3. トカマク型配位と課題
4. ヘリカル型配位と課題
5. ヘリオトロンJの紹介
 - ✓ 研究の目的
 - ✓ 実験結果の一例

核融合とは？

軽い元素(例えば水素)同士が融合しより重い元素に変化する反応

太陽(恒星)内部では水素から始まる核融合反応



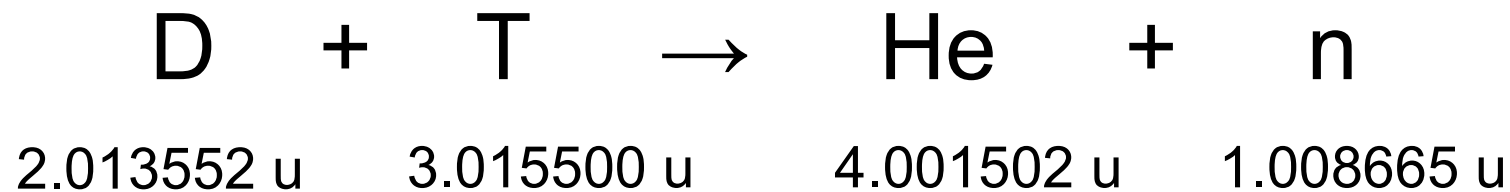
金星の太陽面通過 (2012/6/6)



金環日食 (2012/5/21)

我々を構成するほとんどの物質は核融合で生成(重元素は超新星爆発)

地上で核融合エネルギーを取り出すには重水素・三重水素反応を利用



質量差 Δm は $\Delta m = 0.018885 \text{ u} = 3.1358 \times 10^{-29} \text{ kg}$

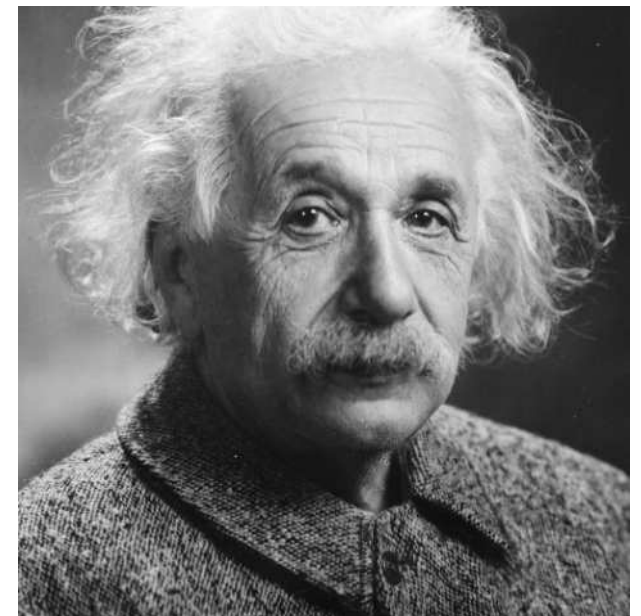
$$\Delta E = \Delta mc^2 = 2.82 \times 10^{-12} \text{ J} = 17.6 \text{ MeV}$$

ただし

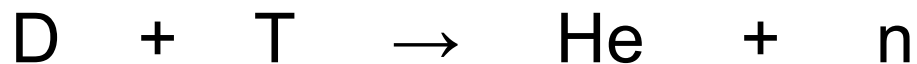
eV: 電子ボルト $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

M: メガ $M = 10^6$

c: 光速 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$



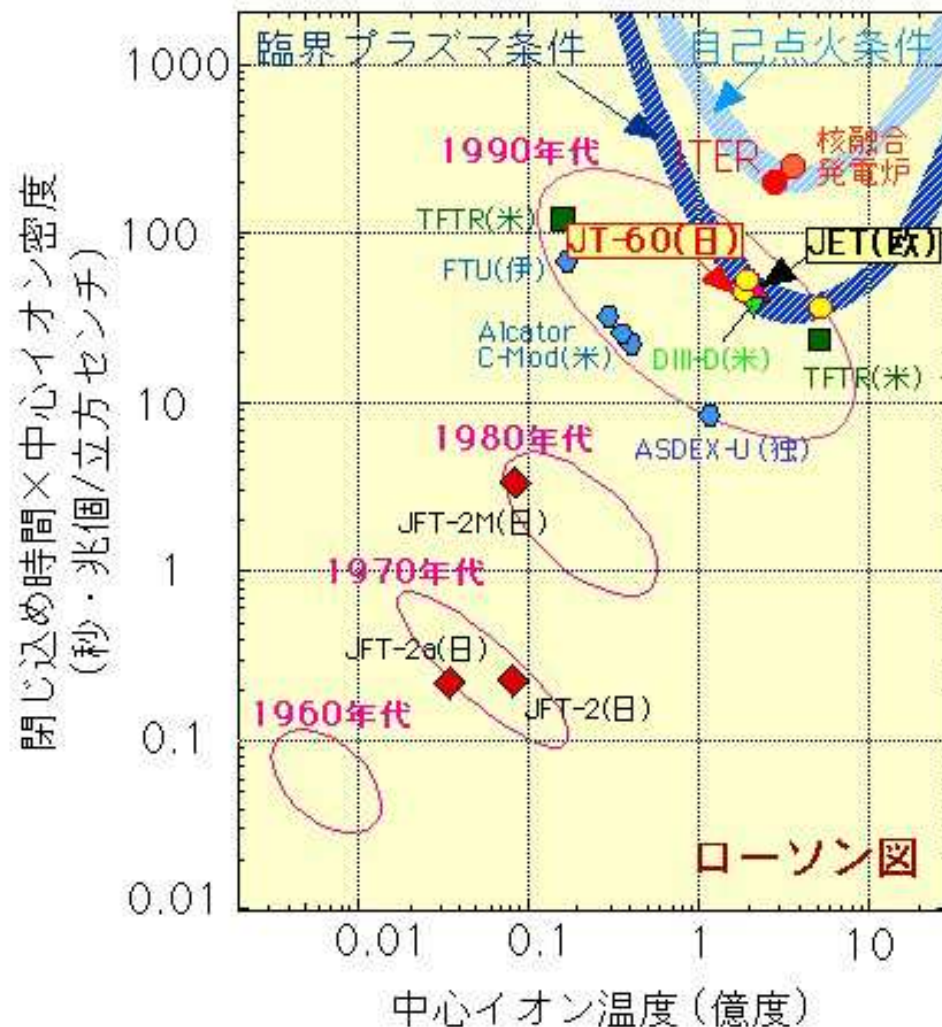
核融合発電が成立する条件:ローソン条件



ローソン条件:

核融合反応を起こすために必要な電力と、
発電所内で利用できる電力を比較して、
炉心プラズマに必要な条件を導く

- 温度: 1~2億度 (=10-20keV)
- 密度: 1立方メートルあたり 2×10^{20} 個
- 閉じ込め時間: 1秒
(=保温時間、と置き換えても良い)

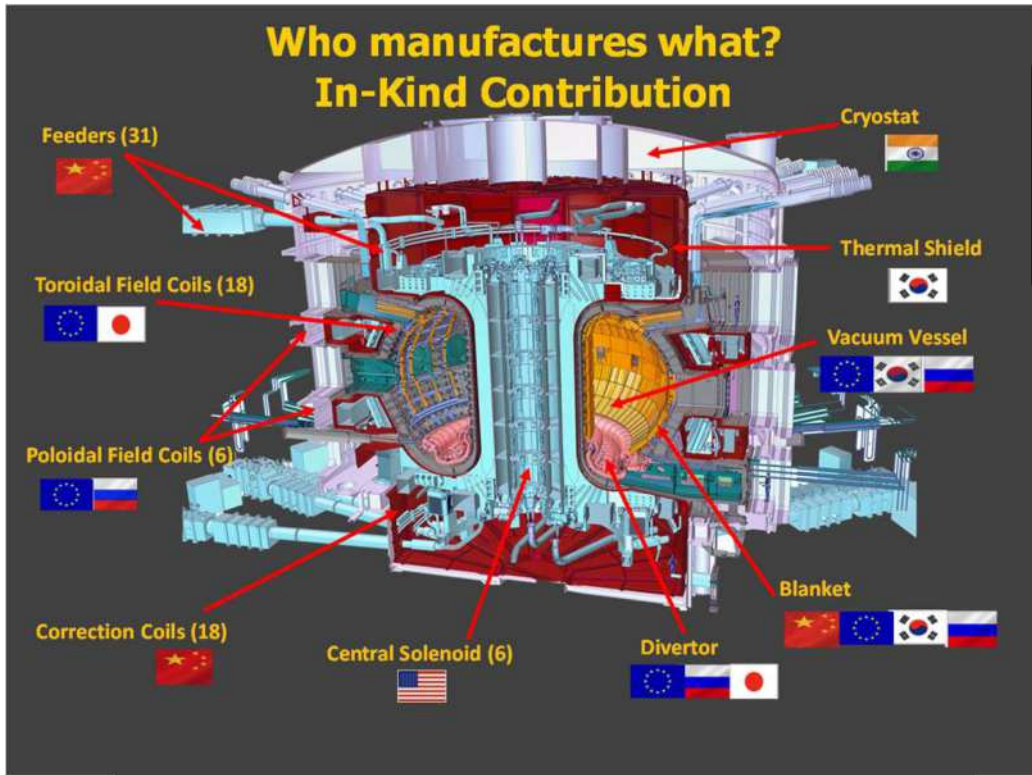
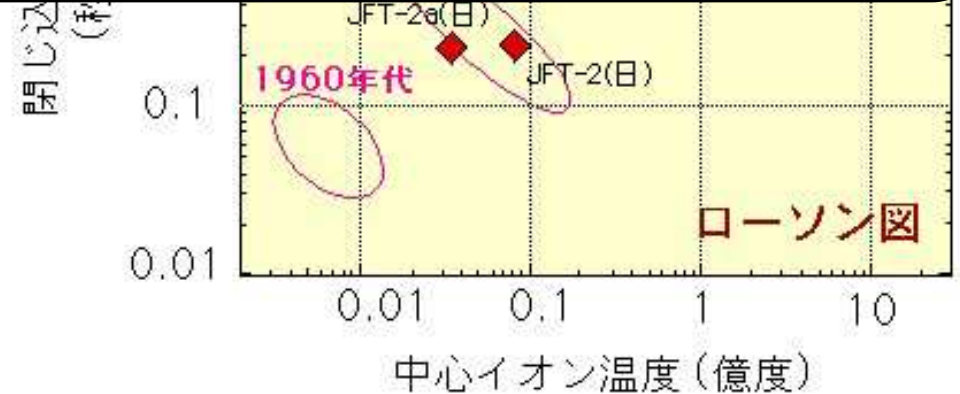


炉心条件を目指す国際熱核融合炉実験装置

- 国際熱核融合炉実験装置(ITER)では、自己点火条件の達成を主目的
- 7極(中、欧、印、日、韓、露、米)による国際共同研究



イオン温度 **1億度**
 プラズマ密度 **$2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$**
 閉じ込め時間 **1秒**



$R=6.2 \text{ m}, a=2.0 \text{ m}, I_p=15 \text{ MA}, B_T=5.3 \text{ T}, M=23,000 \text{ tons}$

フランス・カダラッシュに建設中

荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

磁界の力を利用

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

ローレンツ力

$$mv^2/r = qvB$$

(力の大きさから)

旋回半径

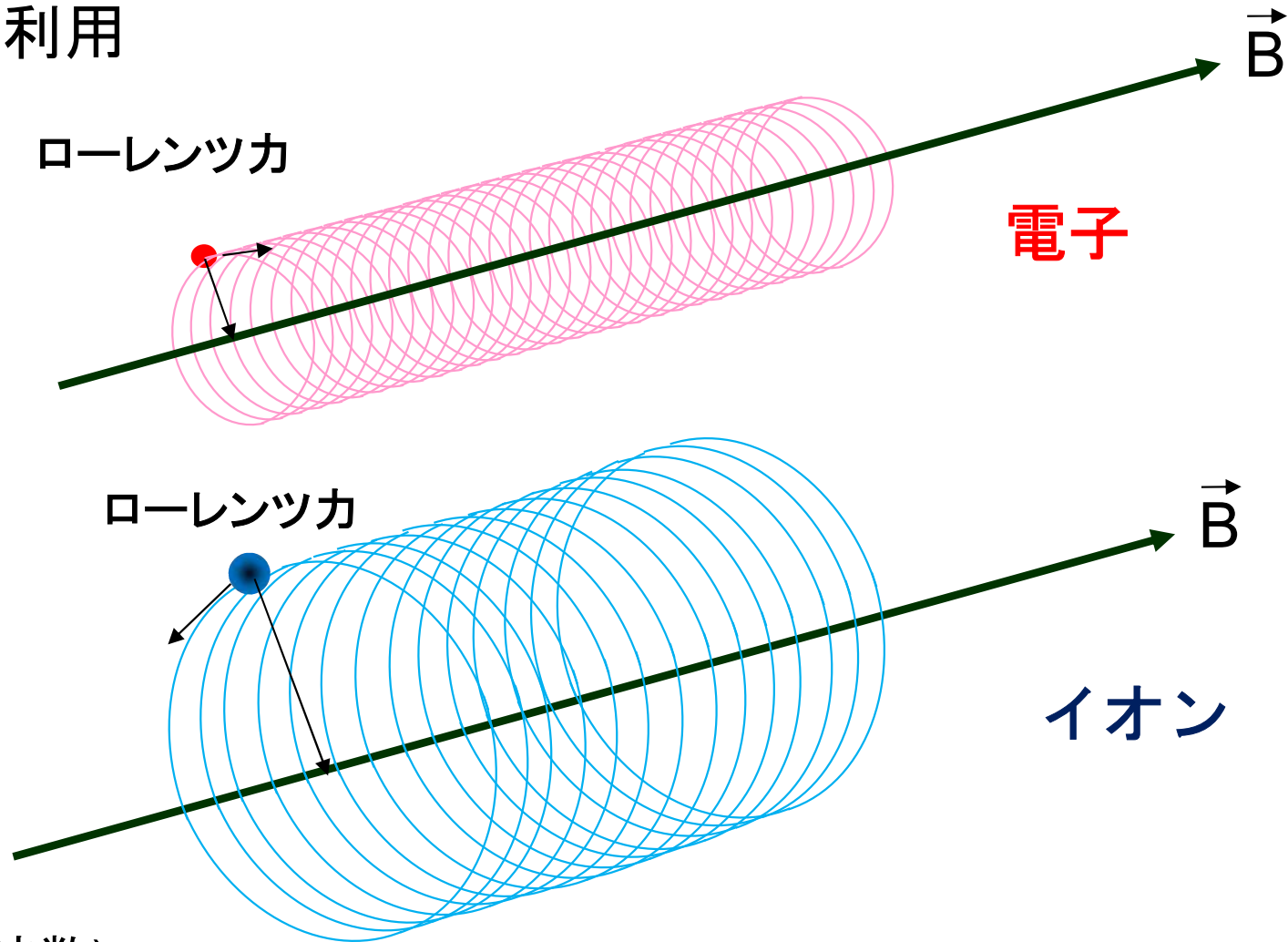
$$r = mv/qB$$

(Larmor radius)

旋回周期

$$\omega = qB/m$$

(サイクロトロン周波数)



限られた条件：磁力線が直線ならばきれいに巻き付く

荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

一様な磁場中では → 荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動できる

磁場強度が変動(時間・空間的に)する場合は？

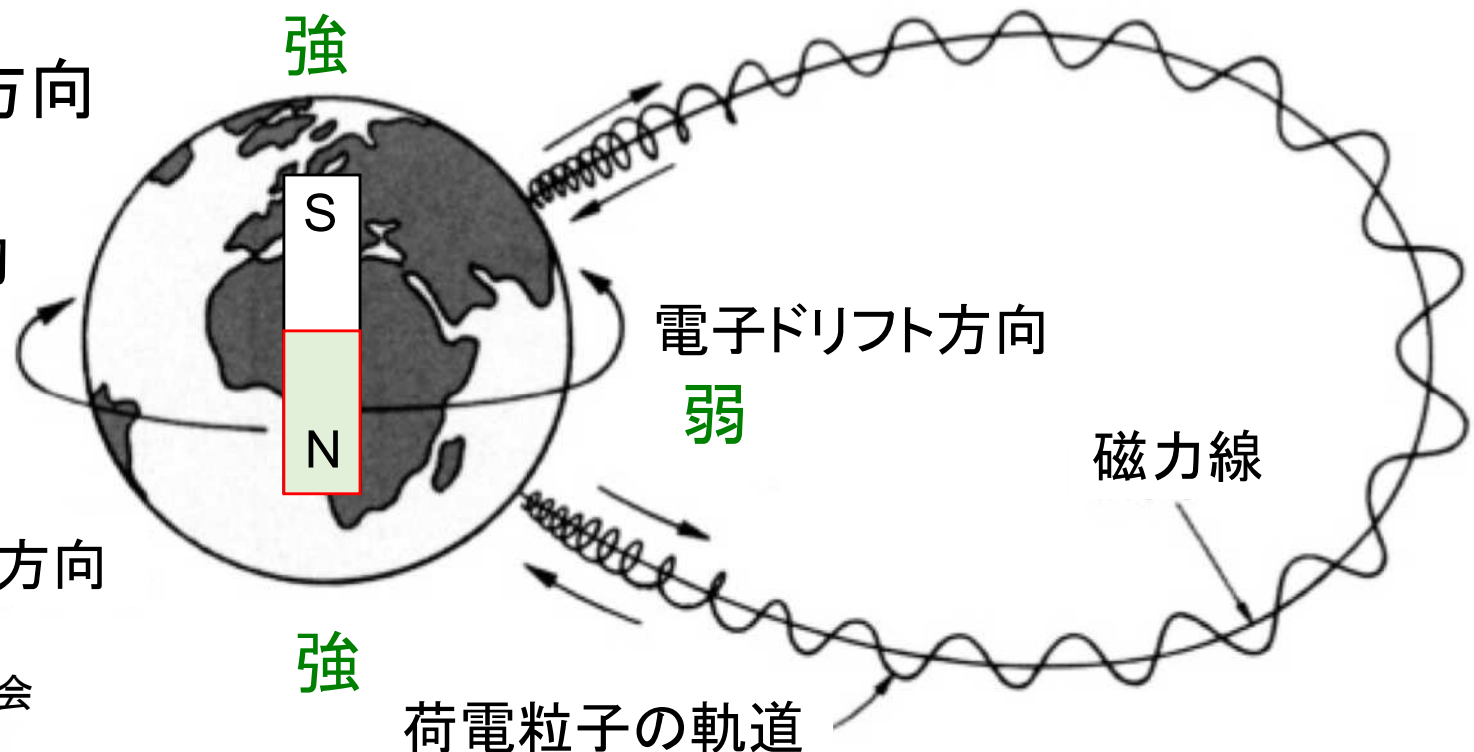
➤ 地磁気に捕捉された荷電粒子もドリフトする

荷電粒子は緯度方向
だけでなく
経度方向にも運動

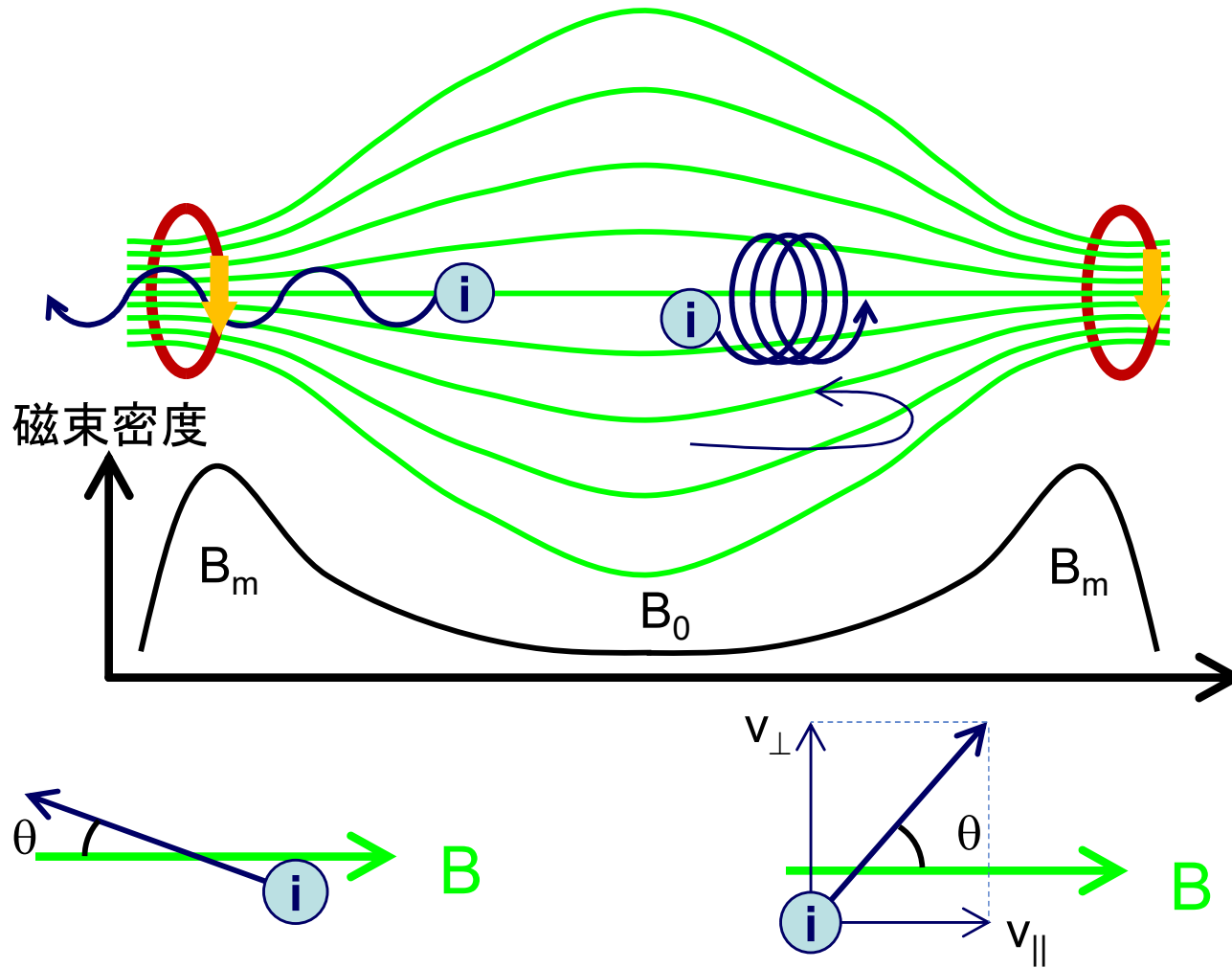
弱

イオンドリフト方向

参考: 小原, プラズマ・核融合学会
誌 82号(2006)756.

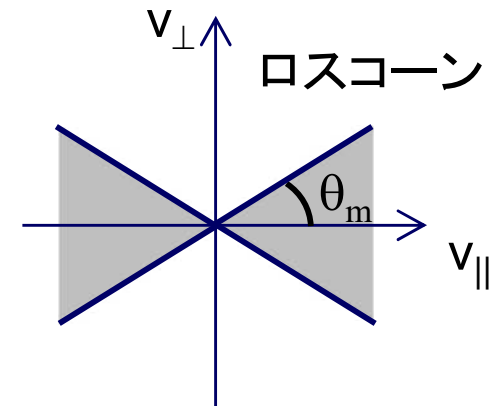


磁場を使ったプラズマ閉じ込め（磁気ミラー方式）



ミラー閉じ込めの条件

$$\frac{B_0}{B_m} = \sin^2 \theta_m < \frac{v_{\perp}^2}{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}$$



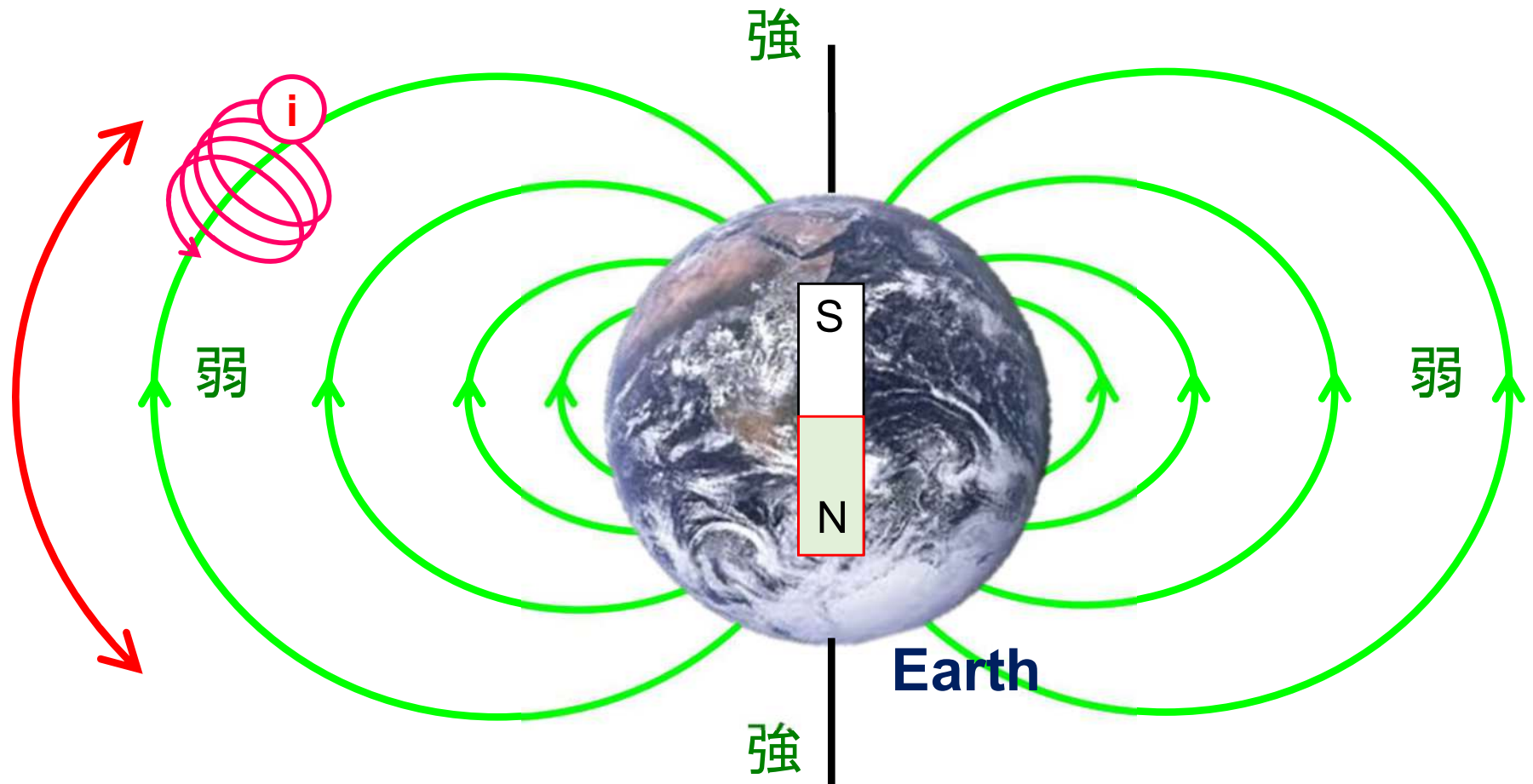
荷電粒子の進行方向と磁力線とのなす角（ピッチ角）が小さいと閉じ込め系内から逃げてしまう。

➤ 閉じ込めの劣化

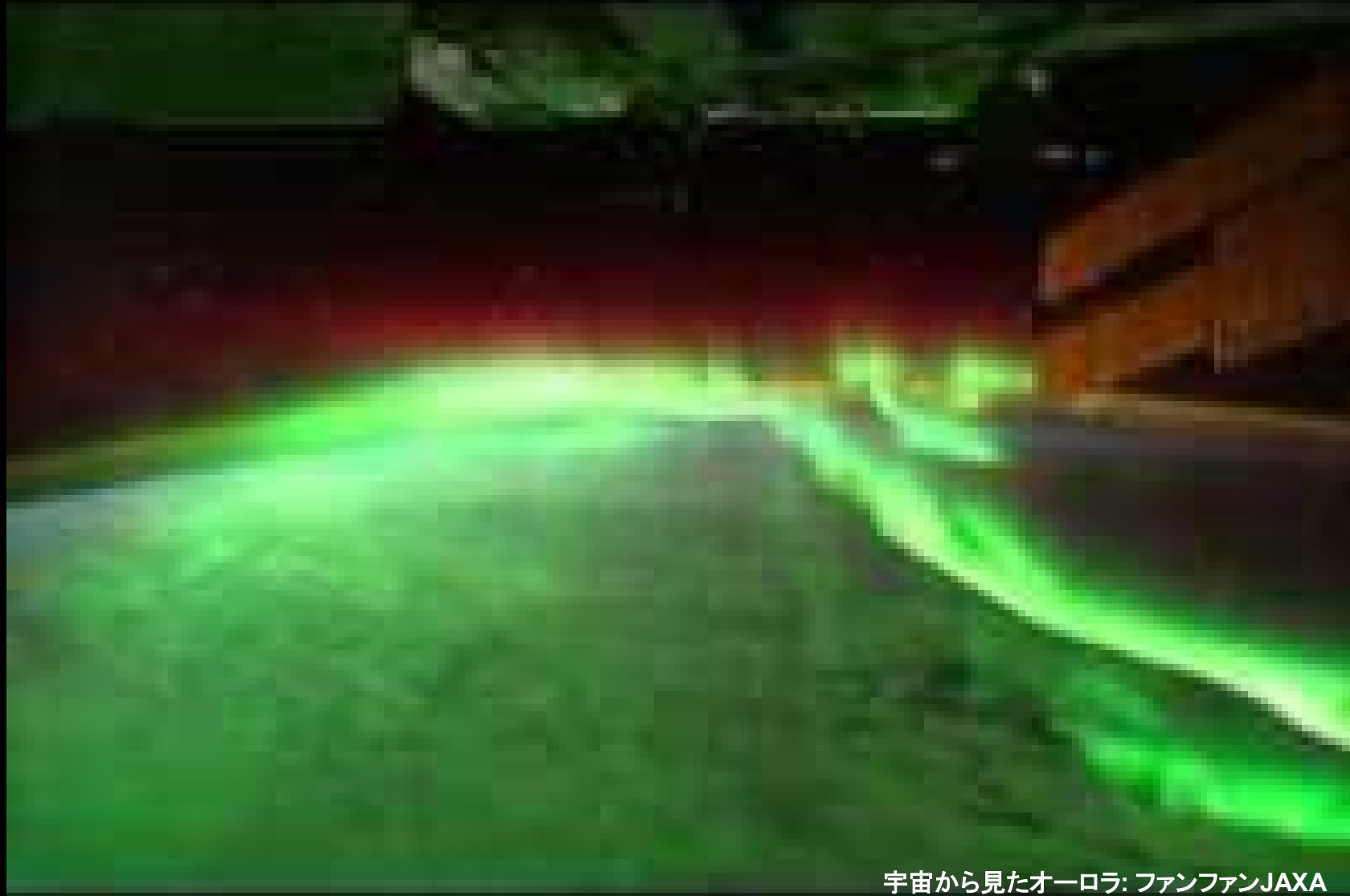
地磁気の磁気ミラー効果

地磁気は極域で強く、赤道面で弱い。

➤ 荷電粒子は極域間を往復する



荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

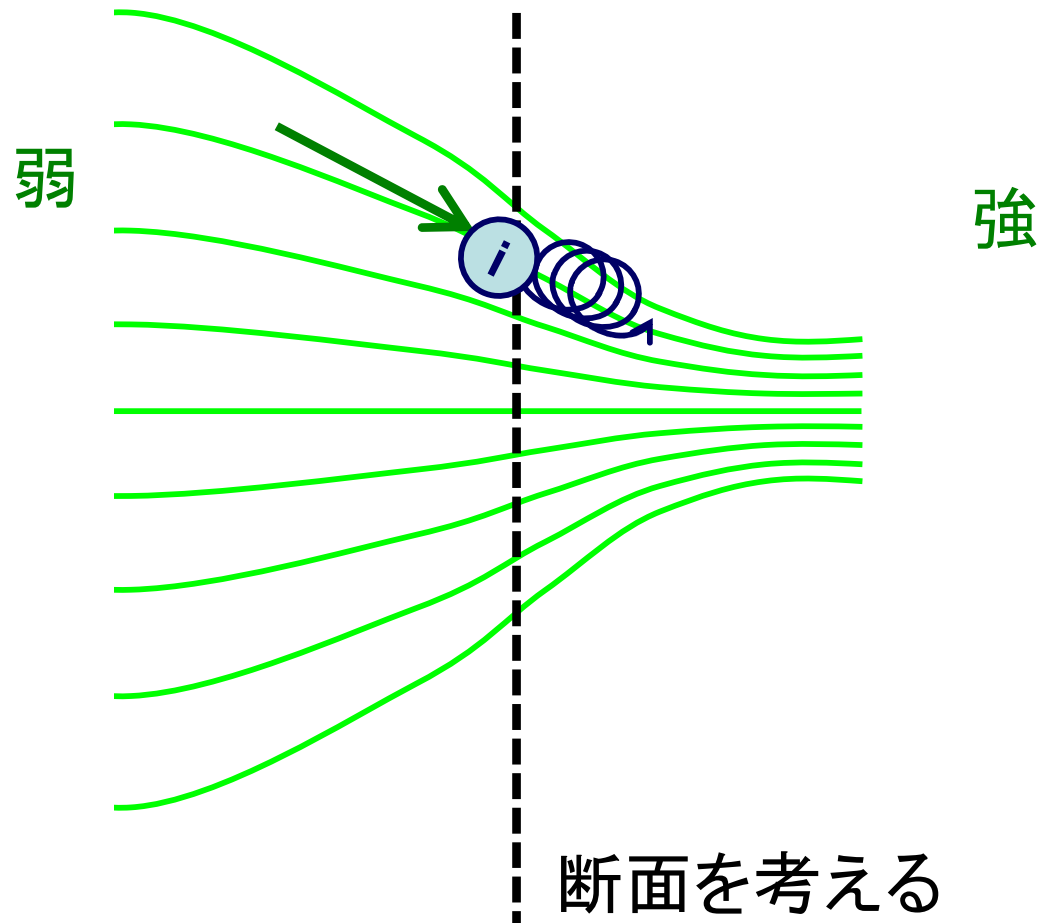


宇宙から見たオーロラ: ファンファンJAXA
<https://youtu.be/M99NywdrFfw>

荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

一様な磁場中では → 荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動できる

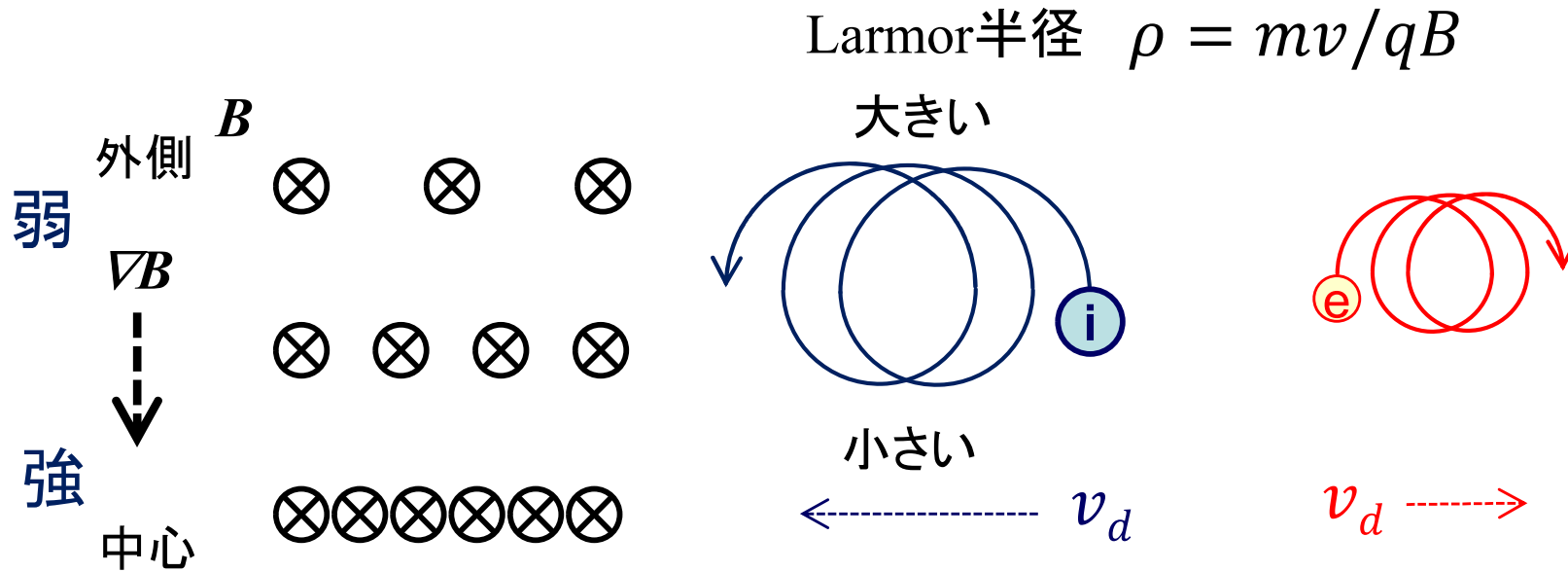
磁場強度が変動(時間・空間的に)する場合は？



荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

一様な磁場中では → 荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動できる

磁場強度が変動(時間・空間的に)する場合は？



空間的に変動する磁場
➤ 横滑り(ドリフト)する

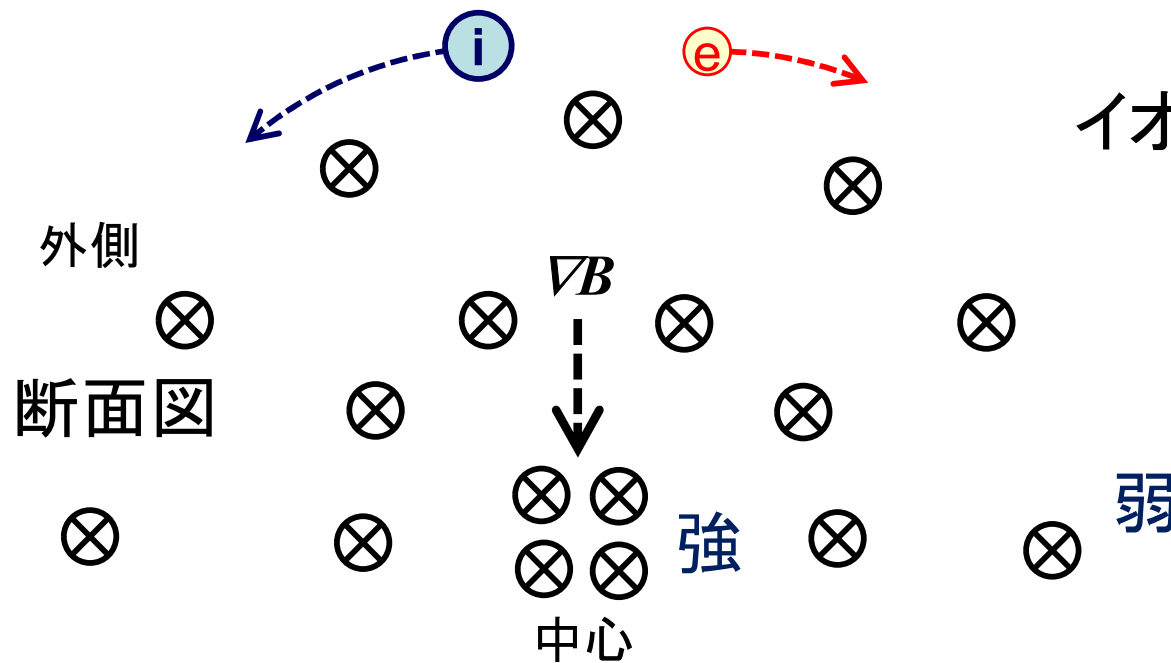
$$v_d = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{q B^3}$$

荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

一様な磁場中では → 荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動できる

磁場強度が変動(時間・空間的に)する場合は？

ミラー磁場の場合、中心軸上で磁場強度が強い



イオンと電子は周方向にドリフト

$$v_d = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{q B^3}$$

強 弱

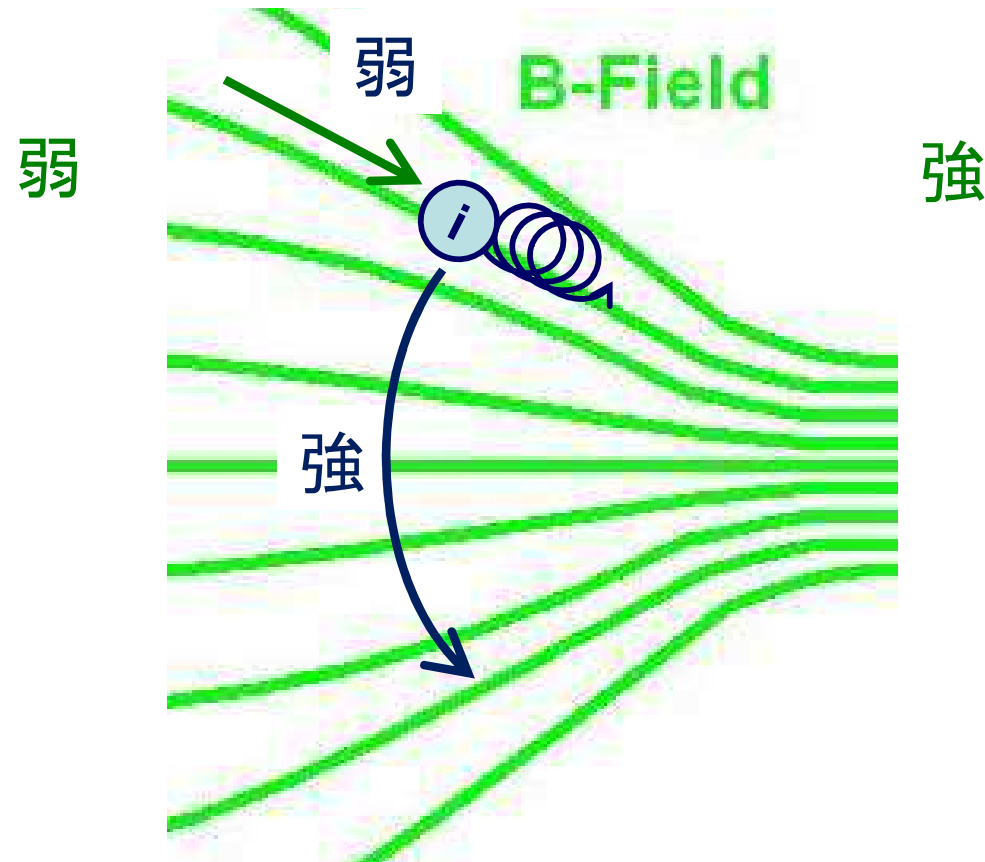
荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する？

一様な磁場中では → 荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動できる

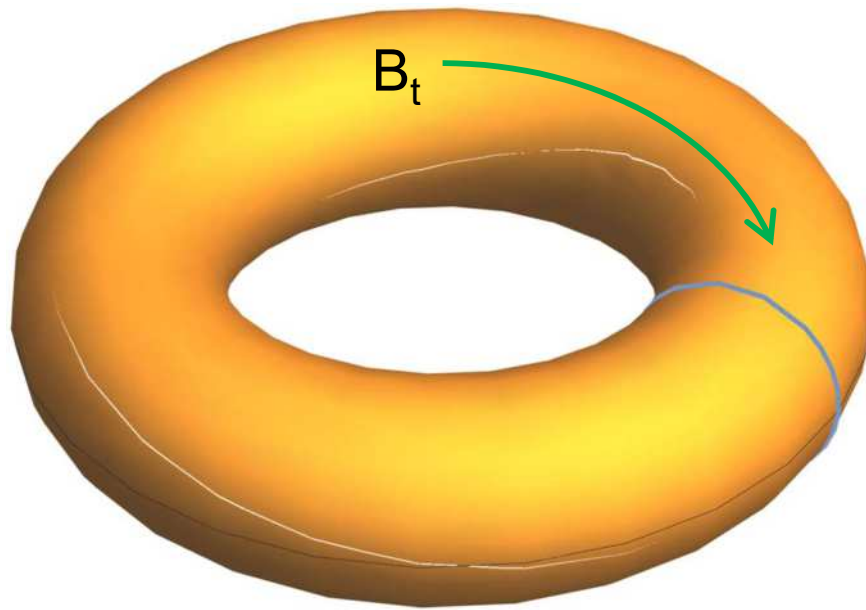
磁場強度が変動(時間・空間的に)する場合は？

➤ 磁力線を横切ってドリフトする

- ドリフトはプラズマの輸送を考える上で重要
- 核融合を困難にする要因の一つ



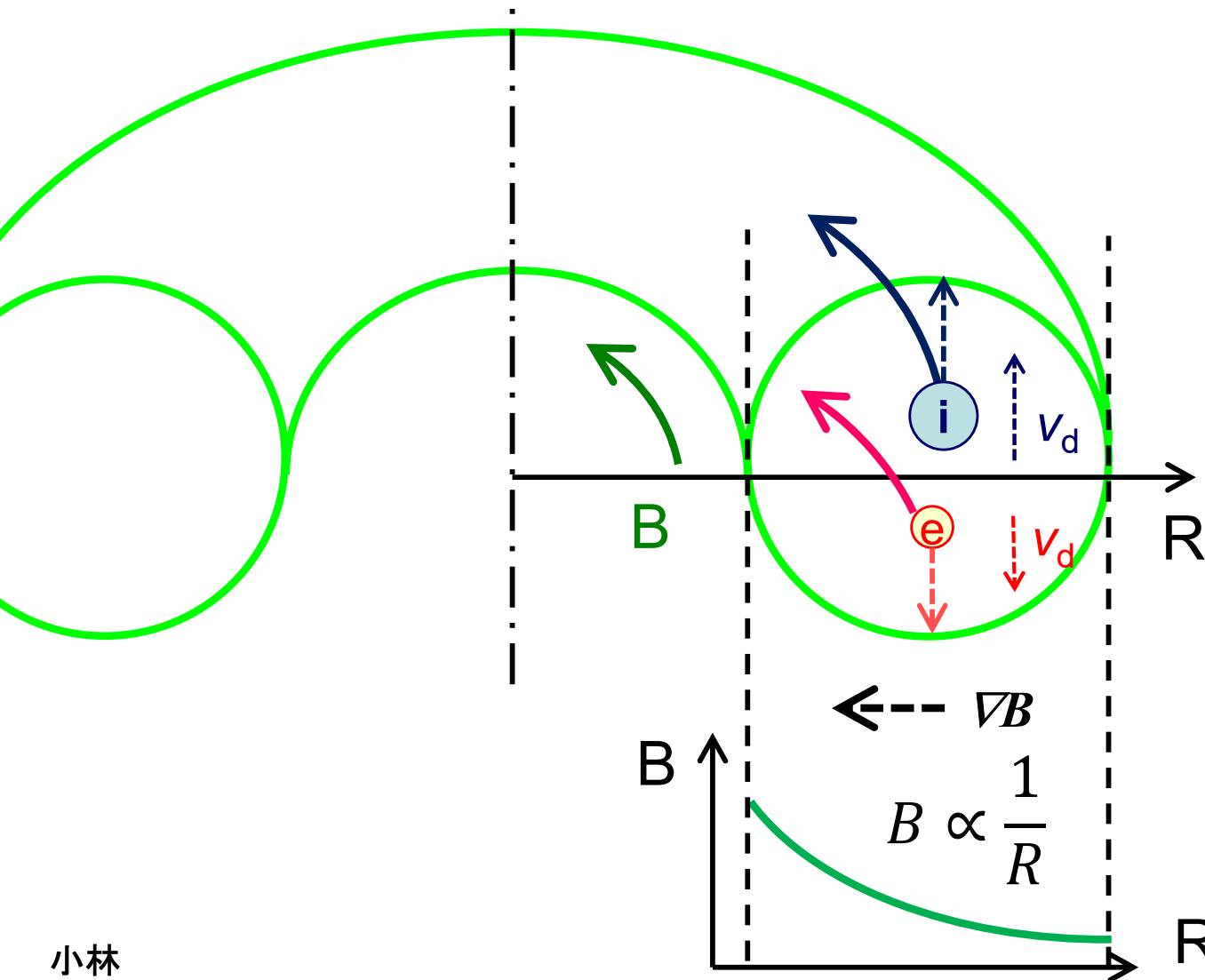
磁力線をトーラス（ドーナツ）形状にしては？



ミラーのように、両端に出口がない

磁場を使ったプラズマ閉じ込め：単純なトーラスでは？

磁力線を円形につないで出口をなくしたら？



単純につなぐだけだと

イオン：上側

電子：下側

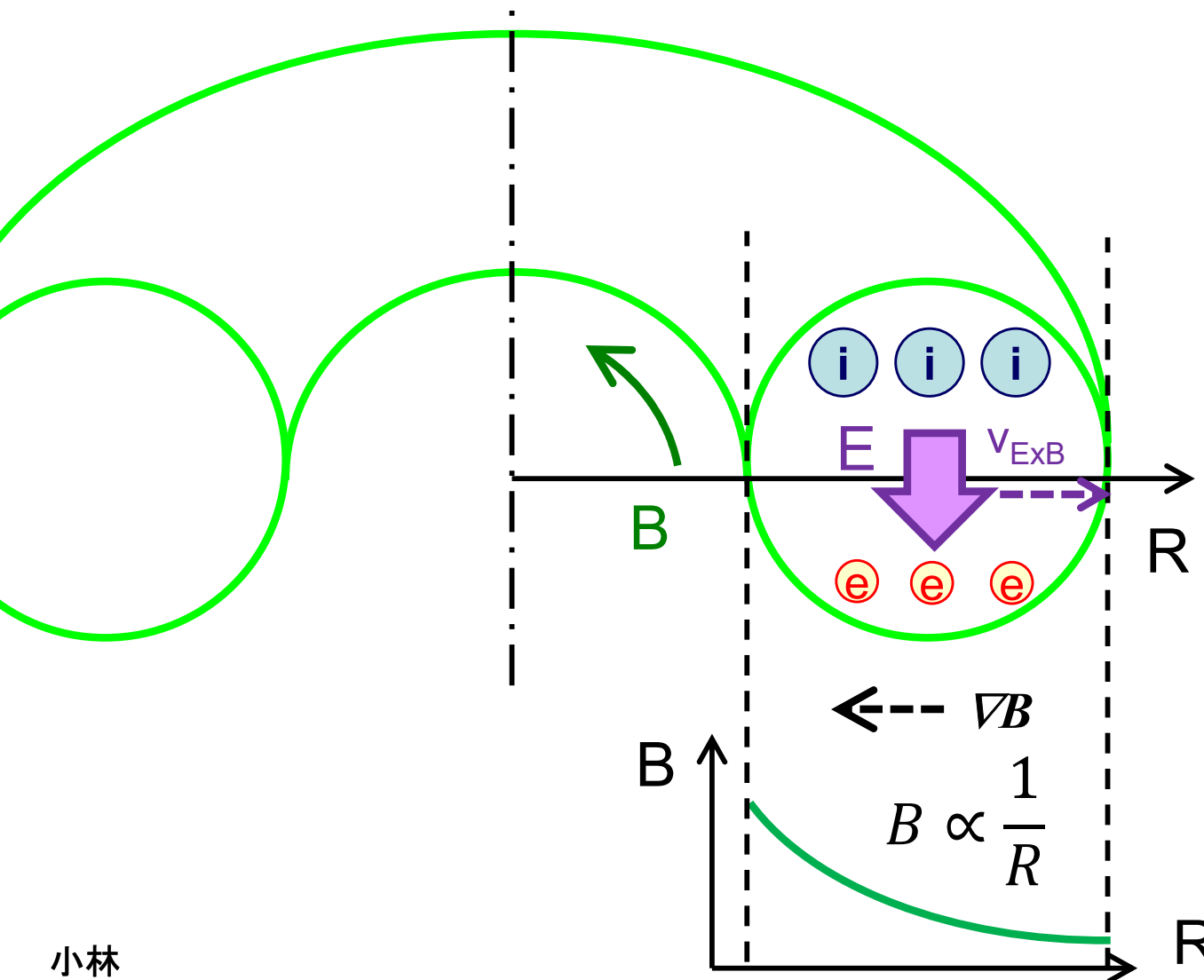
にドリフトする

$$v_d = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{q B^3}$$

→ 荷電分離する

磁場を使ったプラズマ閉じ込め：単純なトーラスでは？

磁力線を円形につないで出口をなくしたら？



単純につなぐだけだと

イオン：上側

電子：下側

にドリフトする

→ 荷電分離が電界を生む

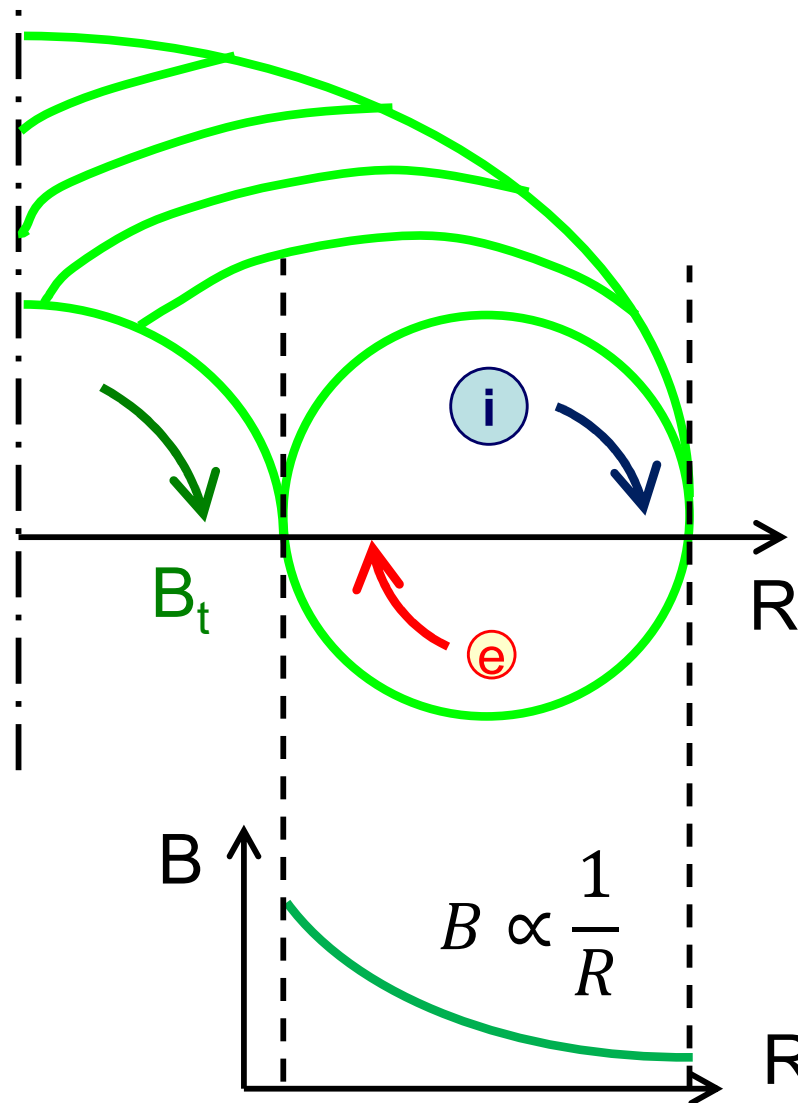
$E \times B$ の外積による力が発生し、荷電粒子は外向きにドリフト。

$$v_{E \times B} = \frac{E \times B}{B^2}$$

➤ プラズマは逃げる

トーラスでプラズマを閉じ込めるには磁力線をねじる必要

どうするか？ → 磁力線を円形につなぐ+ねじる

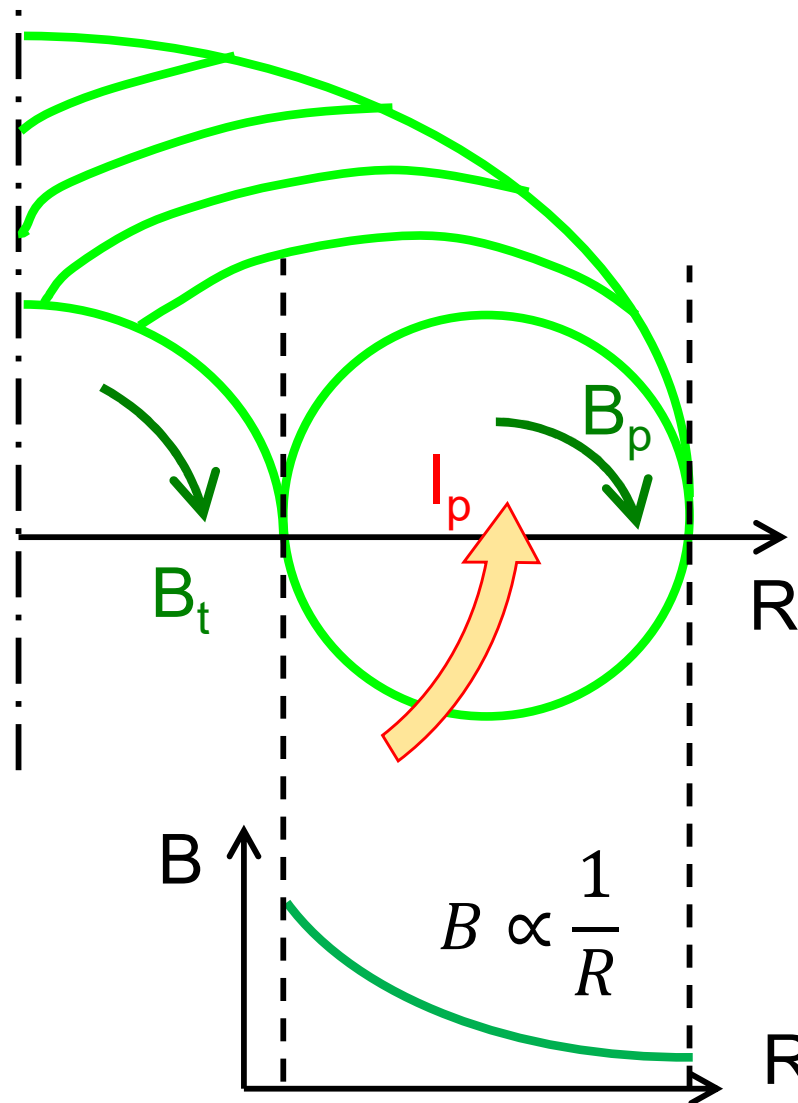


荷電分離が起きない

ではどうやってねじる？

1. プラズマのトーラス方向に電流を流す
➤ トカマク方式
- ねじったコイルを用いるヘリカル方式

トカマク方式はプラズマ電流を用いて閉じ込め磁場を作る



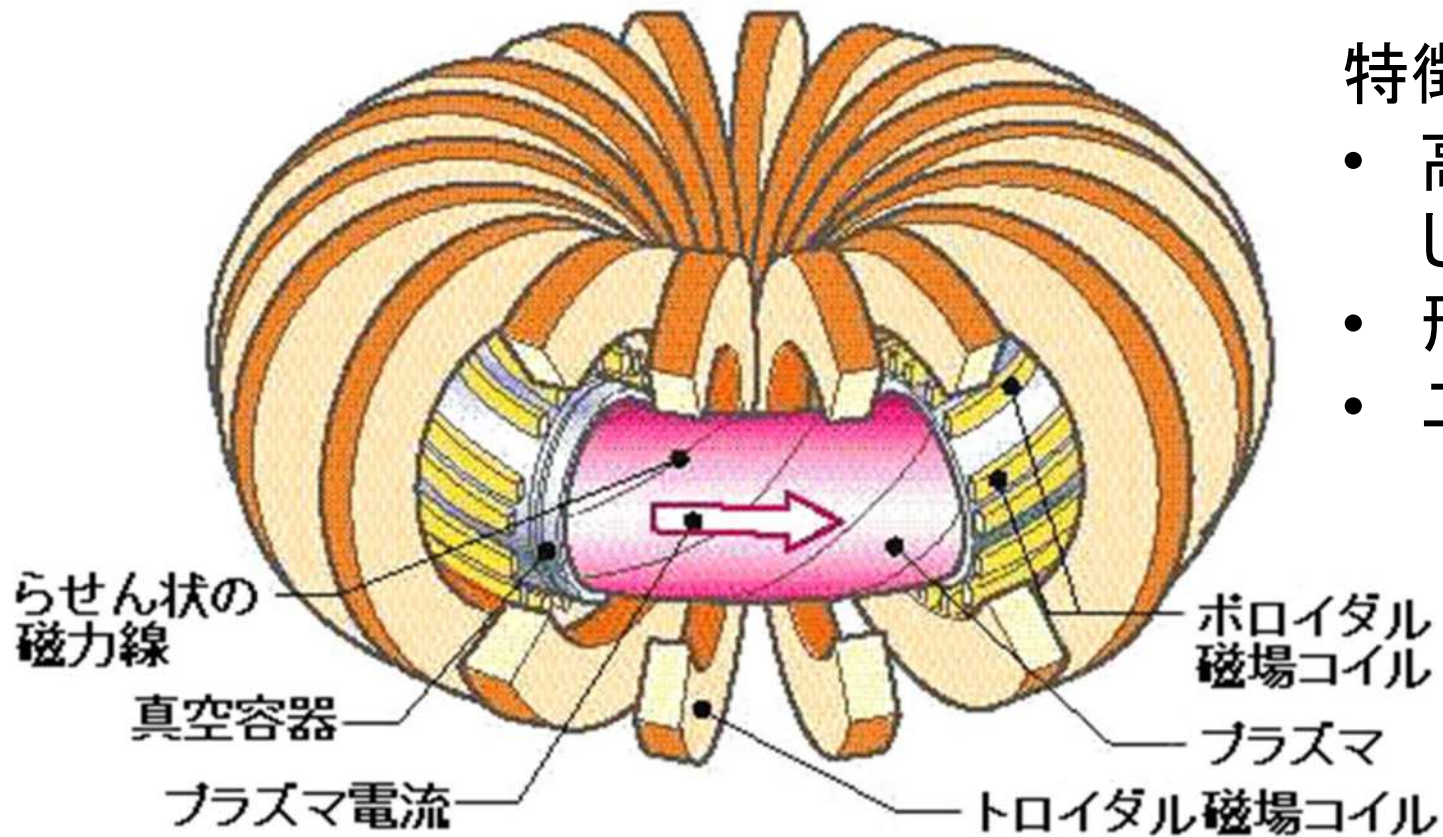
周方向に電流を流す
(トロイダル電流 I_p)

➤ 断面内に磁場が発生
(ポロイダル磁場)

➤ 荷電分離を抑制

トカマク型磁場配位

トカマク型磁場配位



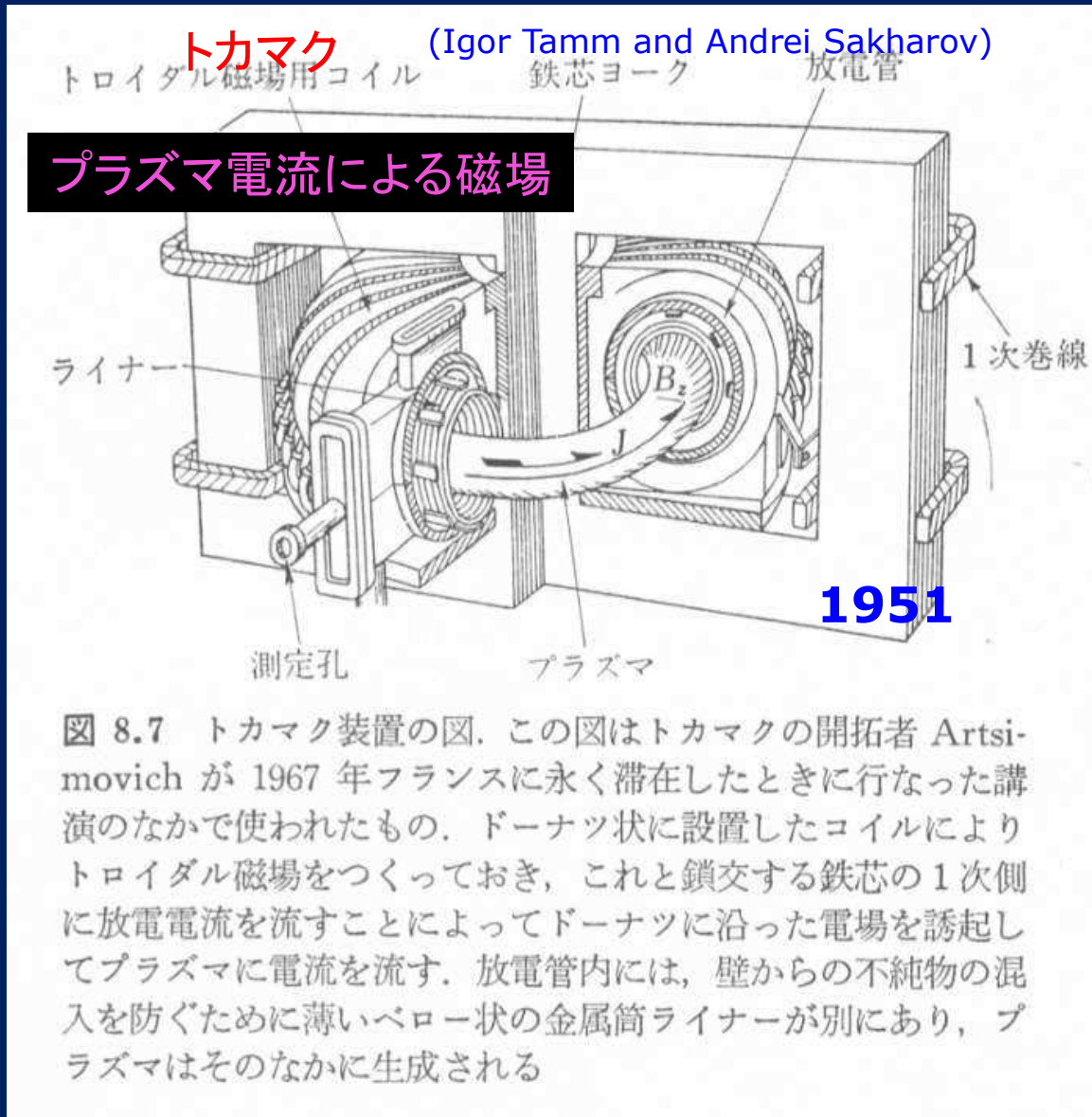
特徴:

- 高温のプラズマを生成しやすい(1億度以上)
- 形状が単純
- 二次元対称性がある

✓ プラズマ電流がなくなると、閉じ込められていたプラズマ
(熱・粒子)が瞬時に逃げる！

➤ プラズマ電流を「維持」＋「不安定性による消滅」を抑制する技術

初期のトカマク

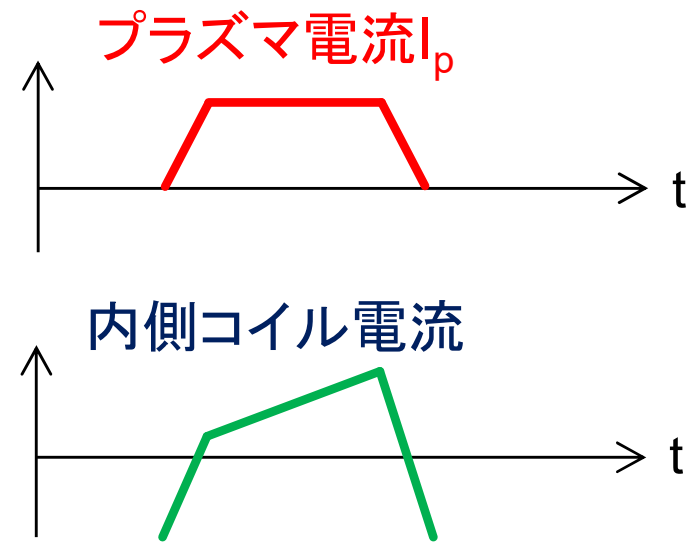
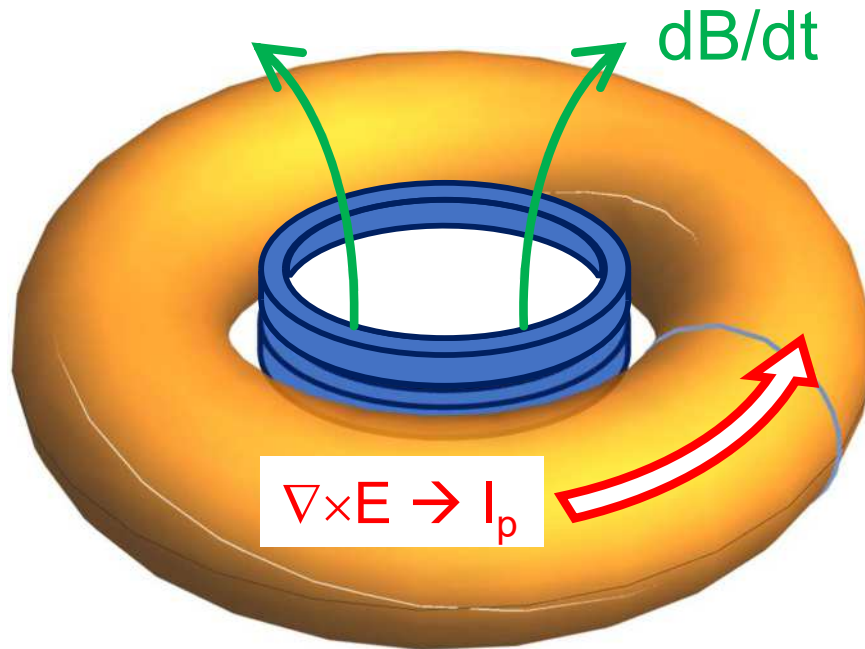


L.A. Artsimovich
1909-1973

Tokamak: TOroidalnaya KAmera ee MAgitnaya Katushka
「トロイダル容器と磁場コイル」

トカマクプラズマの課題

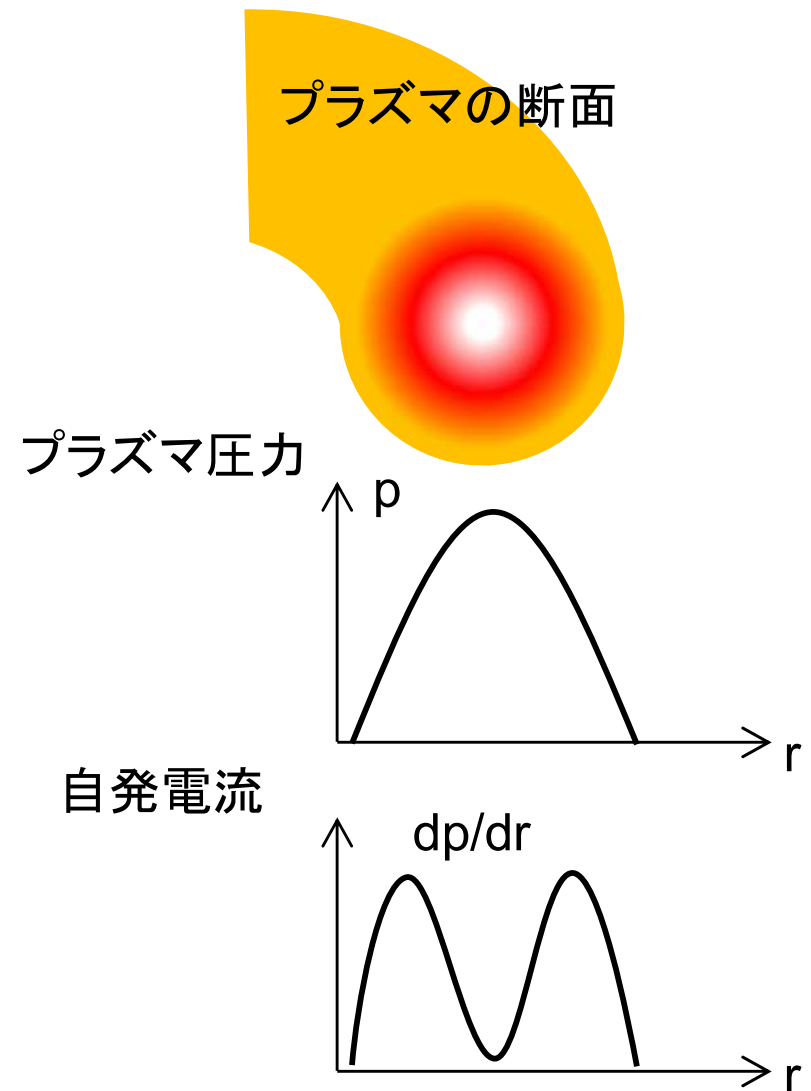
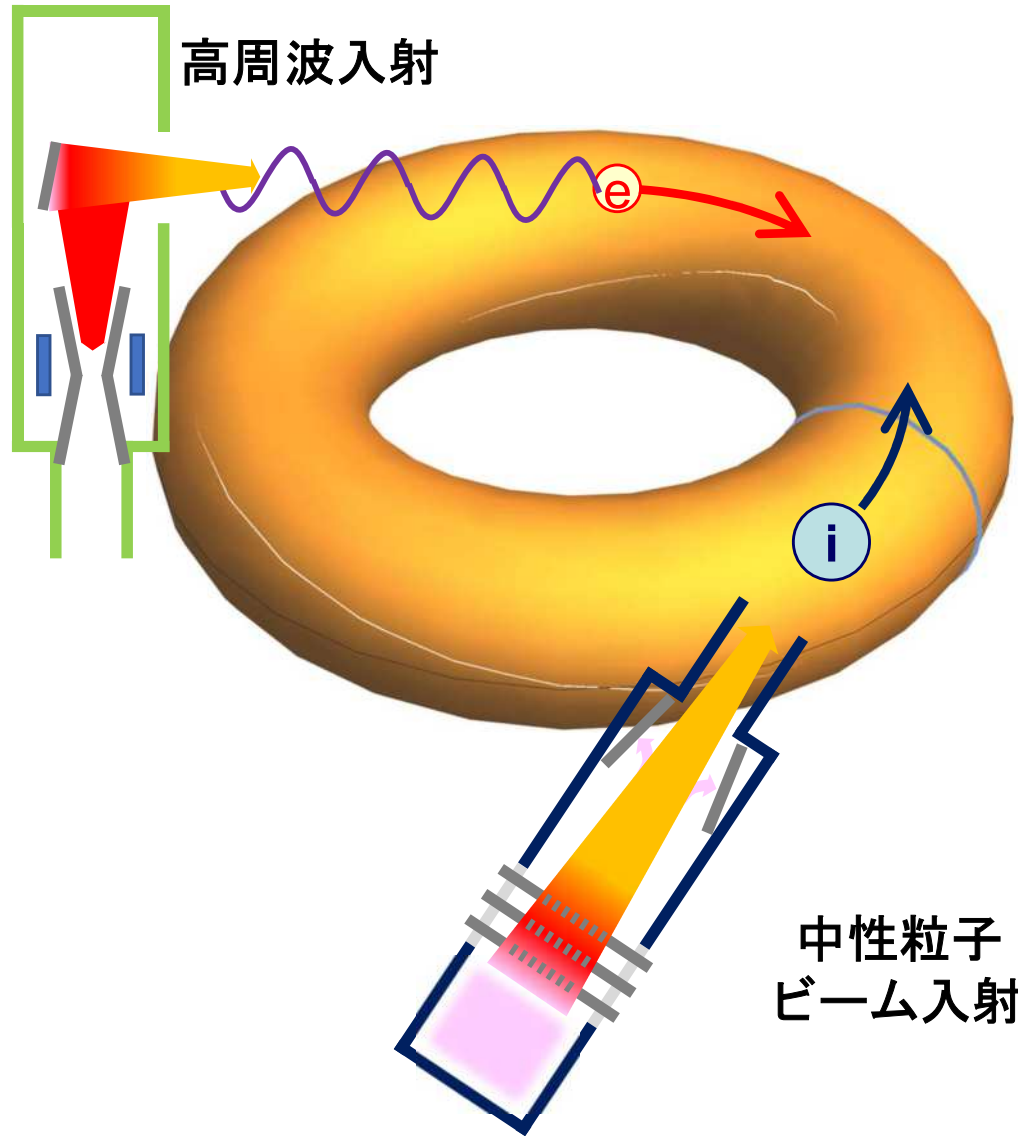
プラズマ電流を流すには内側コイルの時間変動が必要



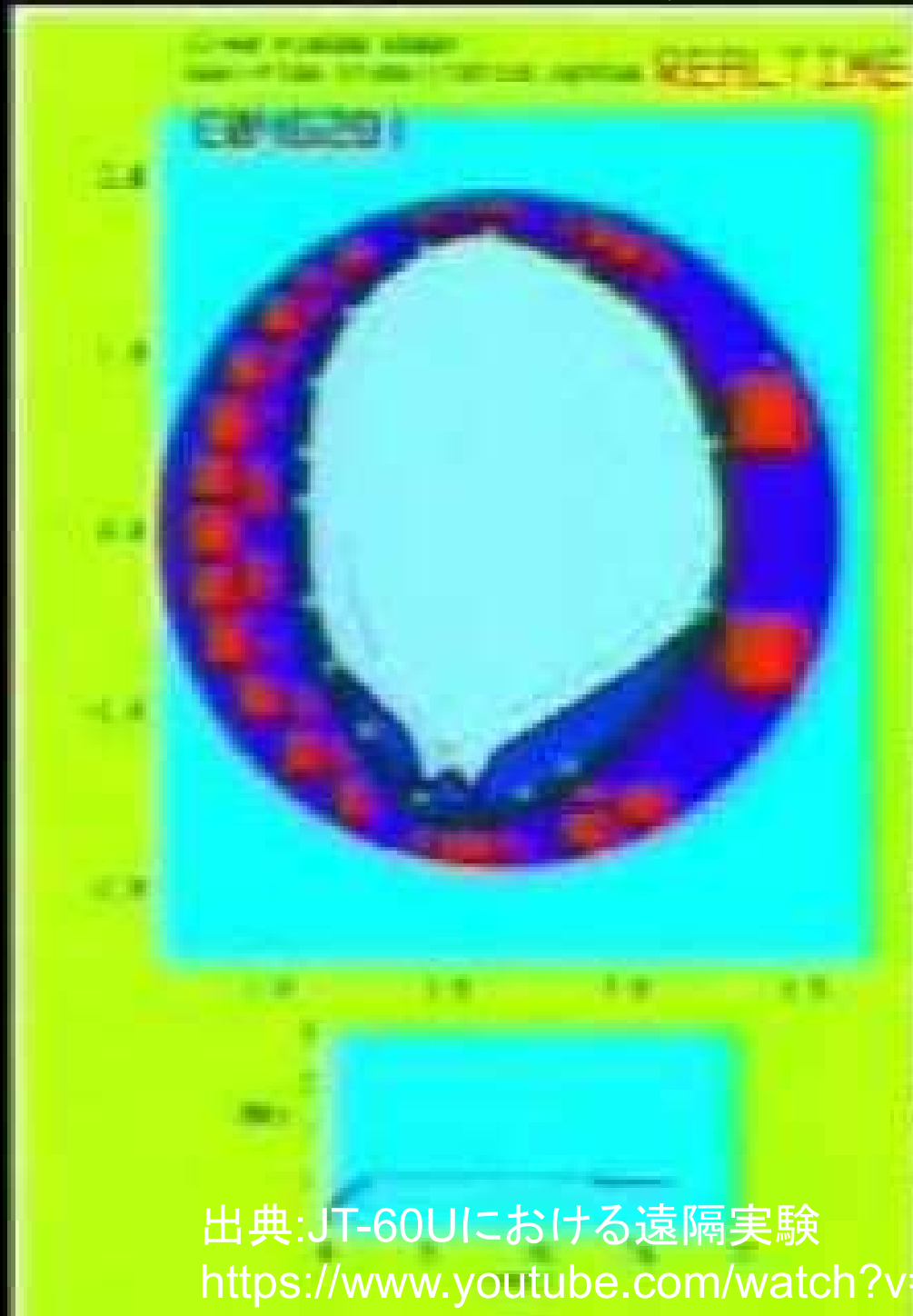
→この場合だとパルス的な繰り返し放電しかできない

トカマクプラズマの課題

定常な電流を維持するために、いろいろな手法が用いられる



トカマクプラズマの電流制御（遠隔実験）

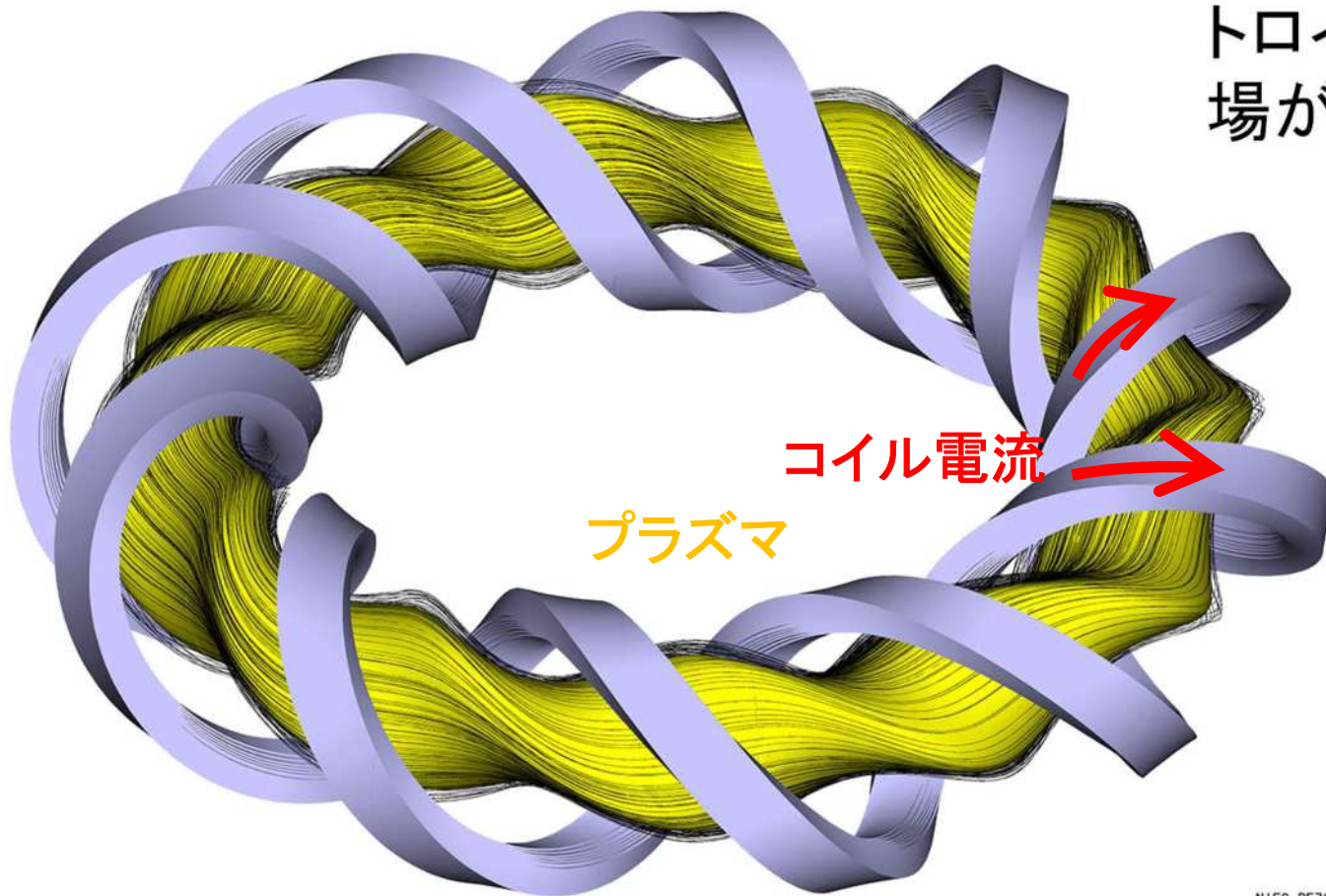


出典:JT-60Uにおける遠隔実験

<https://www.youtube.com/watch?v=DCHuHhGtCIU>

ヘリカル方式（LHD型磁場配位の場合）

ヘリカルコイル（一対）



核融合科学研究所HP

ねじったコイルに電流を流すと、トロイダル磁場とポロイダル磁場が同時にできる。

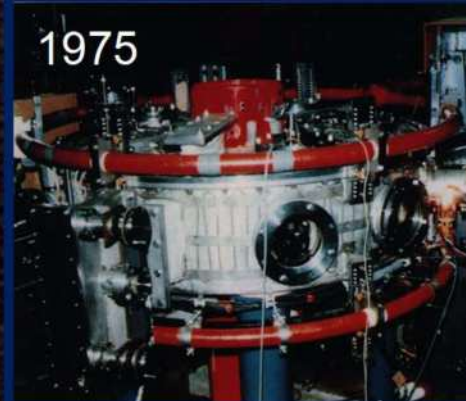
- プラズマ電流が不必要
- 本質的に定常運転が可能
- ✓ イオン温度がトカマクと比べて低い
- ✓ コイル形状が複雑
- ✓ **3次元磁場配位に起因した粒子損失がある**

NIFS-PE768

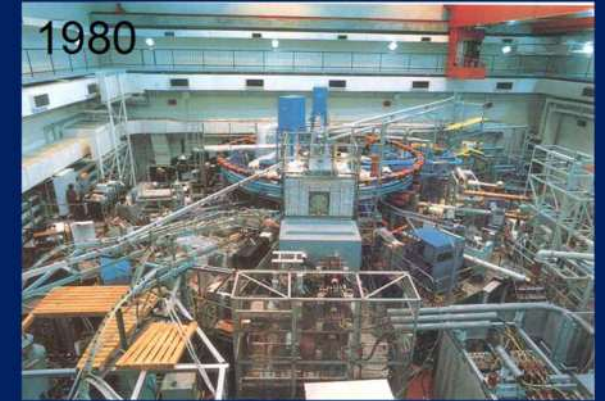
京都大学ヘリオトロン核融合研究グループの歩み



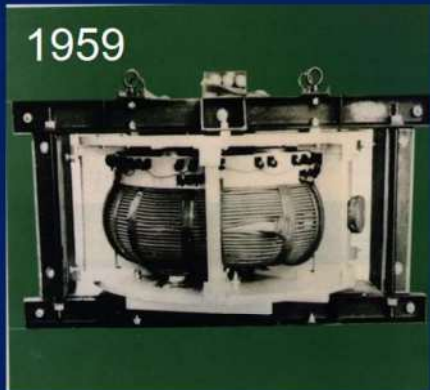
宇尾光治 先生



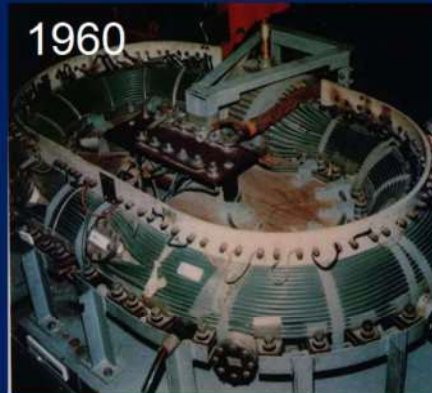
1975
ヘリオトロンDM装置
大半径 0.45メートル
平均小半径 0.04メートル
磁場強度 1テスラ



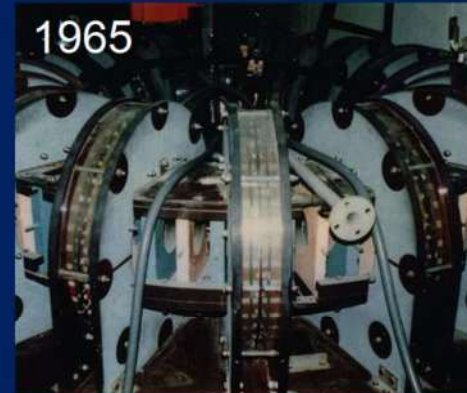
1980
ヘリオトロンE装置
大半径 2.2メートル
平均小半径 0.2メートル
磁場強度 2テスラ



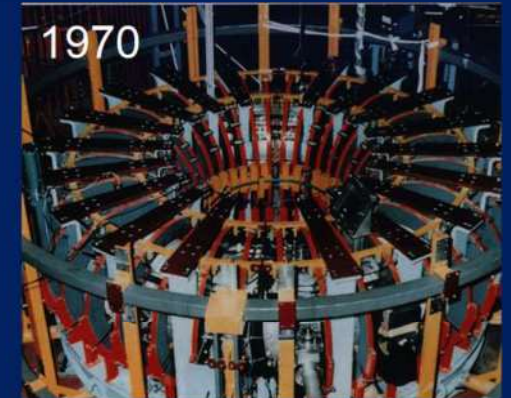
1959
ヘリオトロンA装置



1960
ヘリオトロンB装置
平均大半径 0.47メートル
小半径 0.075メートル
磁場強度 0.6テスラ



1965
ヘリオトロンC装置
大半径 1.02メートル
小半径 0.07メートル
磁場強度 0.1テスラ



1970
ヘリオトロンD装置
大半径 1.085メートル
小半径 0.1メートル
磁場強度 0.3テスラ

ヘリカル・ステラレーターの歴史

ステラレーター
コイルのみで磁場

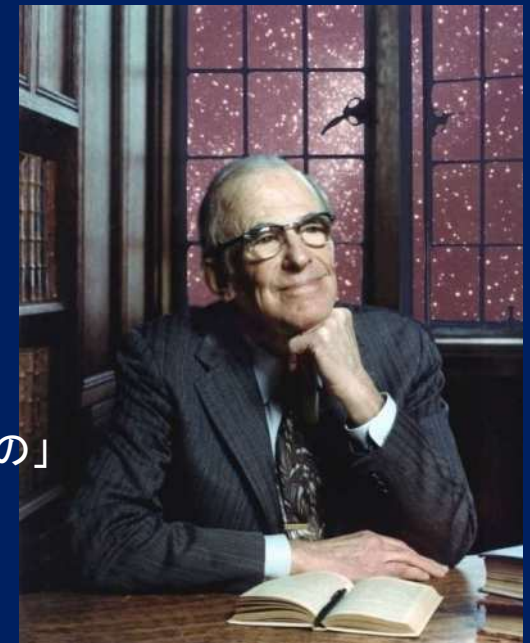
(Figure 8)



1955年第1回国際連合主催
原子力平和利用国際会議
(ジュネーブ)
核融合研究の公開
1958年第2回

Stellarator:
「星を模擬Stellaratorするもの」

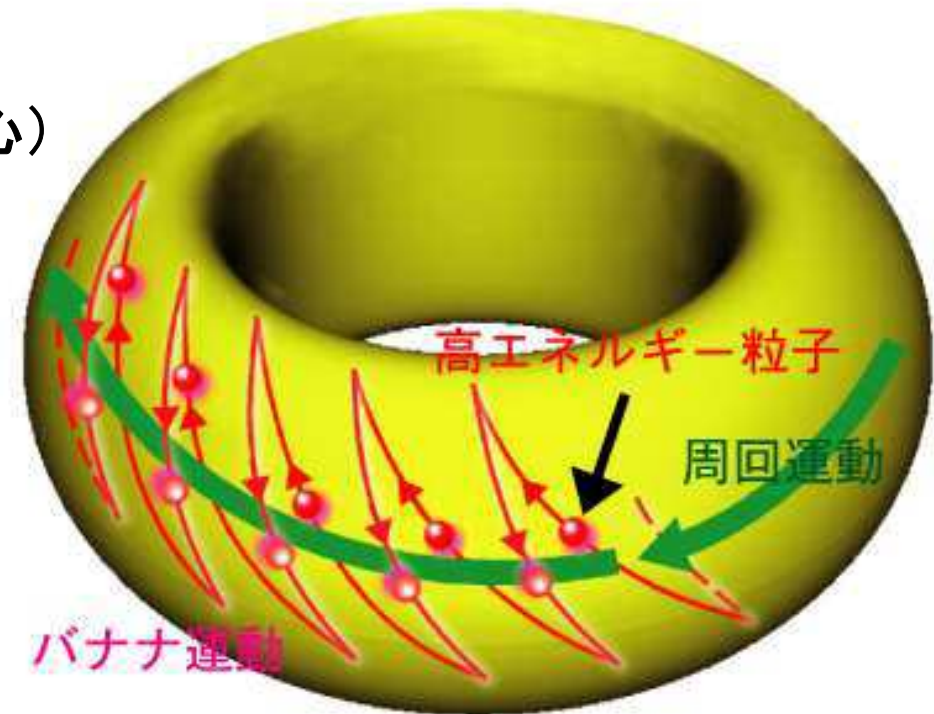
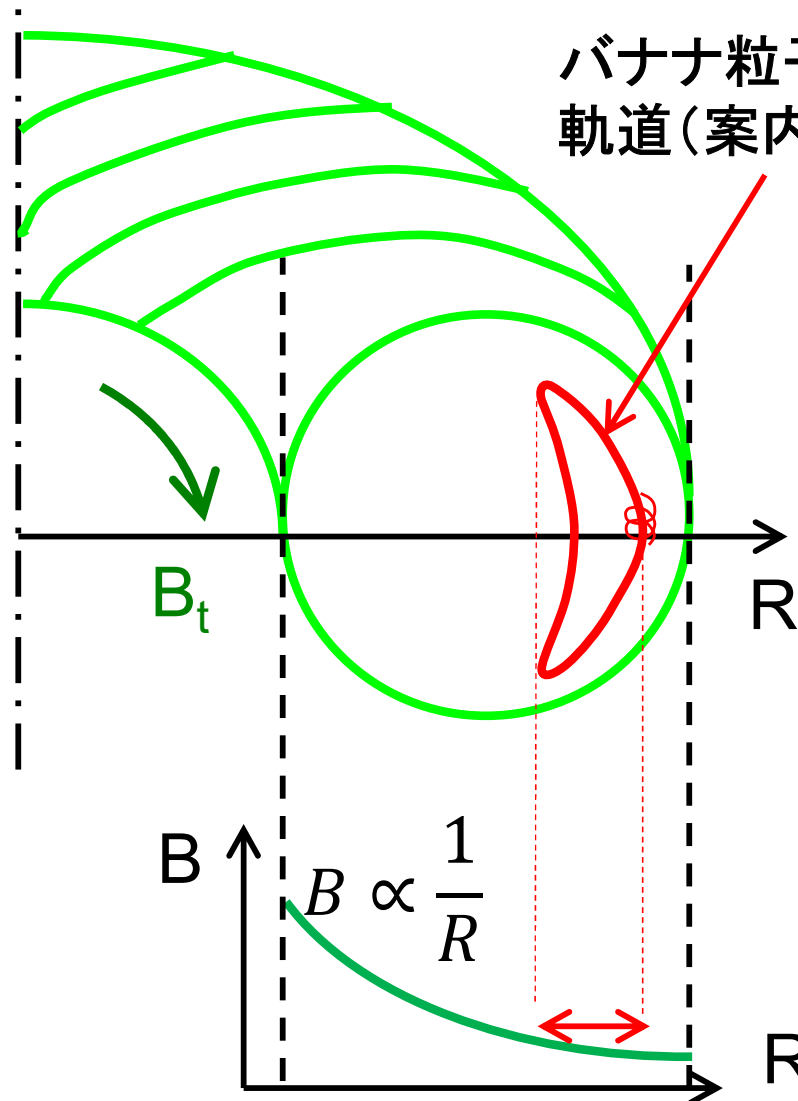
L. Spitzer Jr.
1914-1997



スピッツァー宇宙望遠鏡
<https://www.spitzer.caltech.edu/>

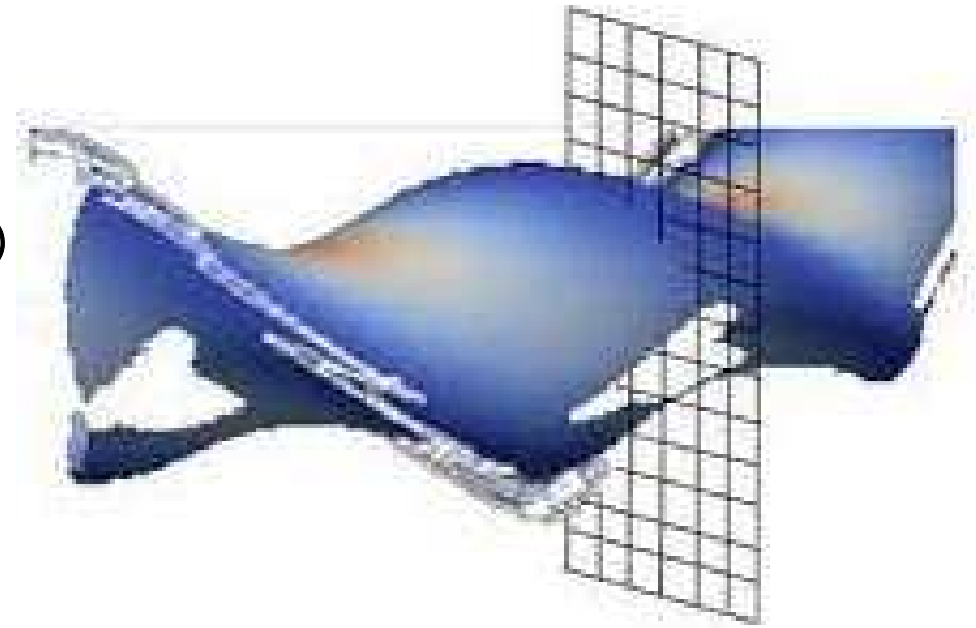
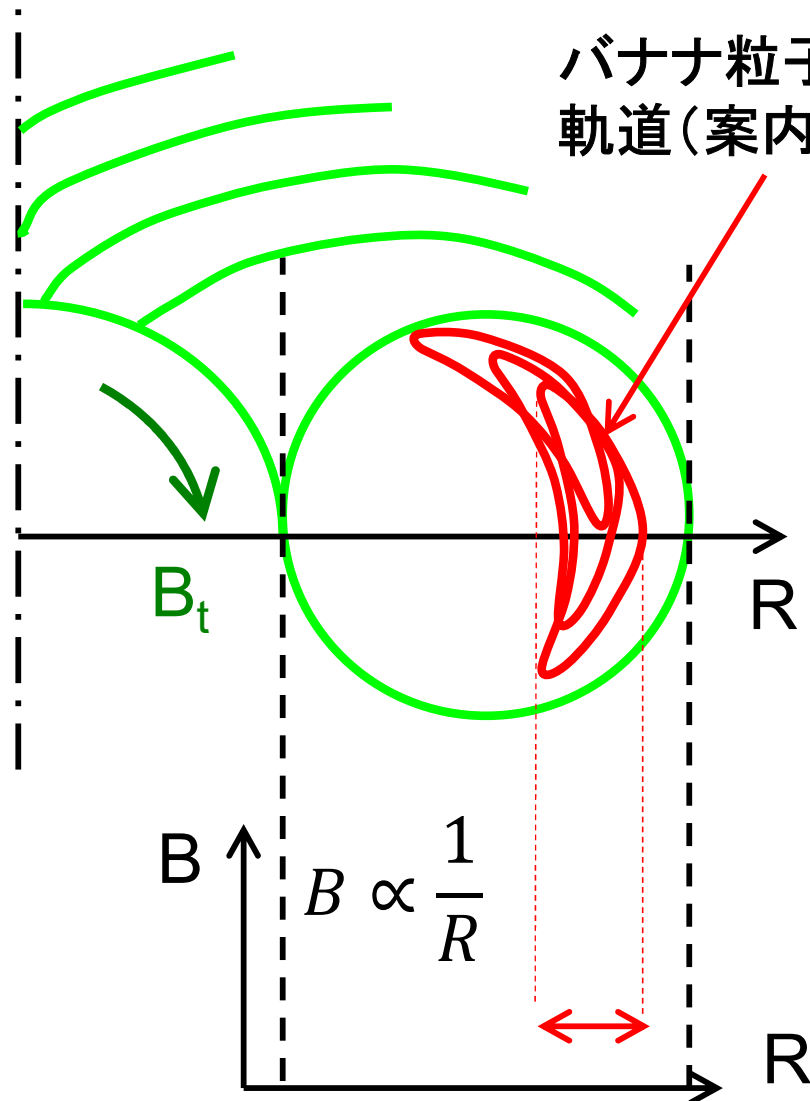
トーラス装置でもミラー閉じ込めされる粒子がある

量子科学技術研究開発機構
(旧日本原子力研究開発機構)HP



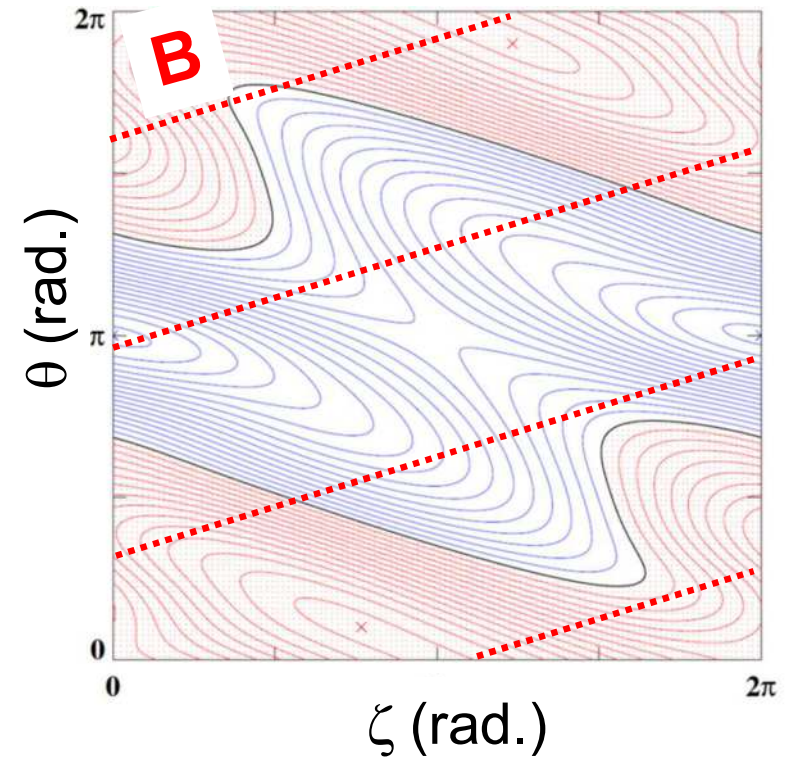
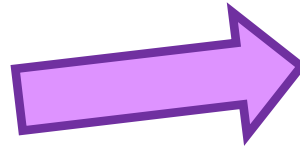
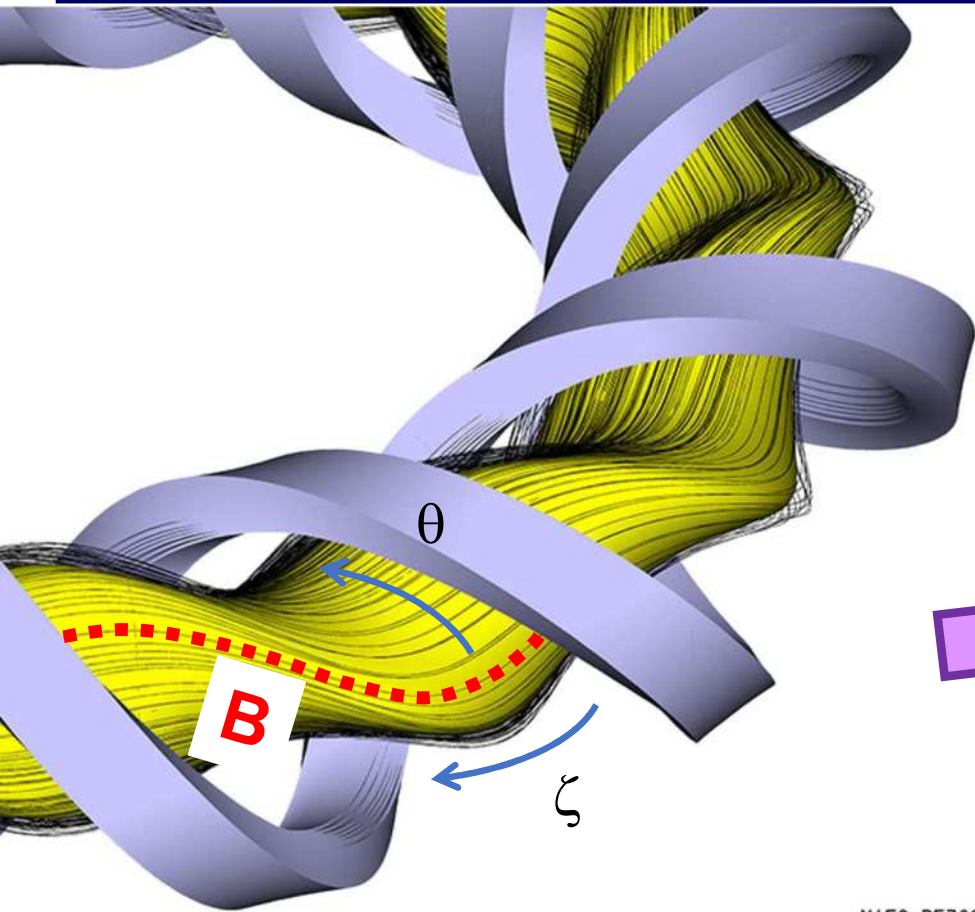
トカマクの磁場配位は二次元対称なので
バナナ運動する荷電粒子の軌道も対称
→荷電粒子は逃げない

ヘリカルの場合バナナ粒子の軌道は保存しない



- ✓ 3次元磁場配位になると、バナナ粒子のミラー反射点がポロイダル方向に変化する
 - ✓ バナナ軌道の中心が外側に逃げる(軌道が保存しない)
- ➔ 荷電粒子が逃げる

磁力線に沿った座標系を考えてみる（磁気座標系）



NIFS-PE768

- “曲線”の磁力線が”直線”になるように座標変換
- 磁力線のねじれの強さが、直線の傾きになるように、新たに座標軸（トロイダル方向、ポロイダル方向）を定義
- 磁力線で編んだ面（磁気面）上の磁束密度を、座標系に投影

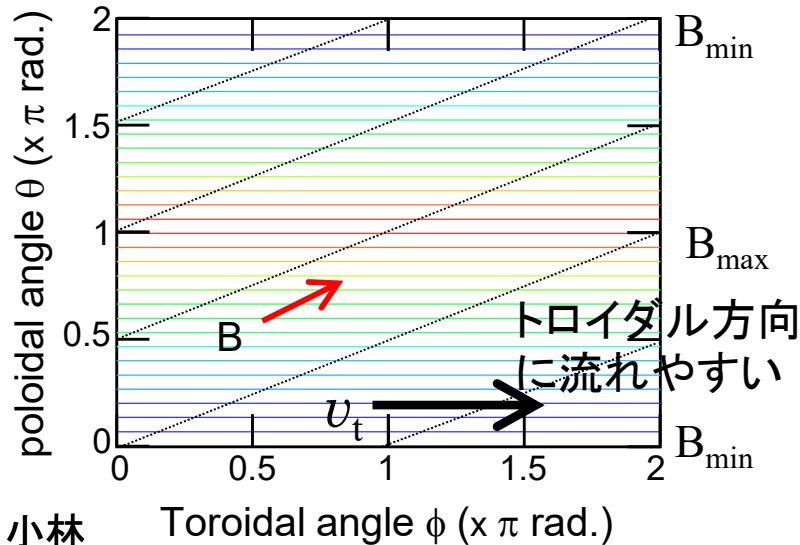
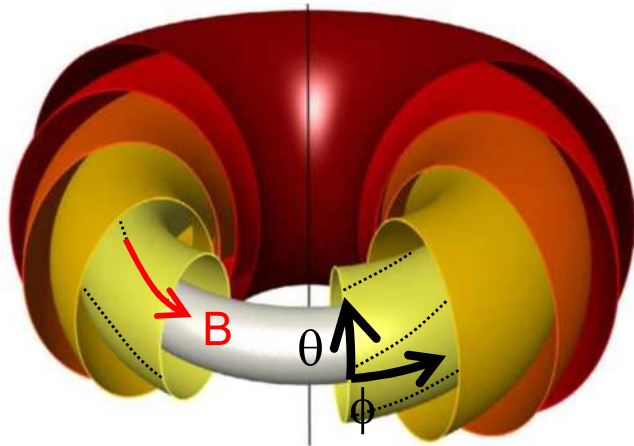
ヘリカル系磁場配位の課題:

磁場の3次元性(対称性の欠如)が粒子損失と粘性増大の要因に

トカマク配位は2次元対称性を持つ

$$B(\phi, \theta) \sim B(\theta)$$

→ 粒子の軌道は保存する
(ある磁気面から逸脱しない)

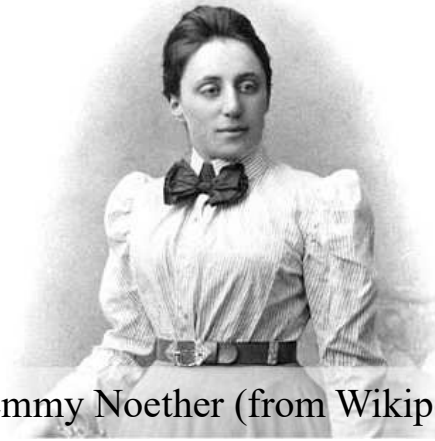


小林

ネーターの定理

ある系が連続的な対称性を持つ場合、対応する保存則が存在する。

➤ 幾何学的に対称できれいな配位は閉じ込めが良い



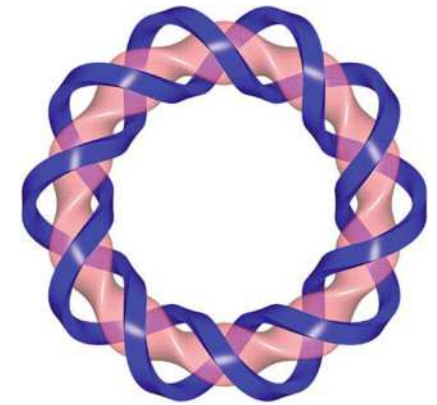
Emmy Noether (from Wikipedia)

配位の対称性欠如に起因して

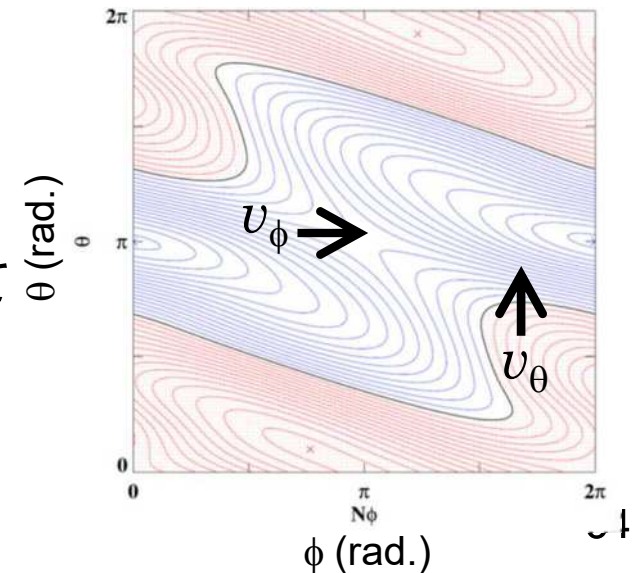
- 磁気面を横切る粒子損失
- 粘性の増大

シンビオ社会研究会講演会

LHDのコイル・プラズマと磁場強度分布



ヘリカル系は対称性がない



先進ヘリカルでは”準”対称性を導入した配位設計

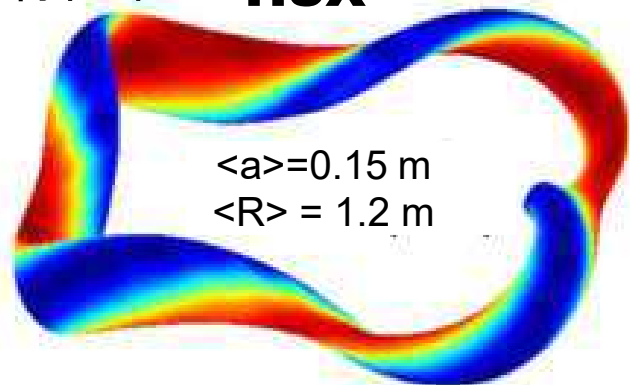
- 準対称性を導入することで、捕捉粒子の軌道が保存されることを狙う
 - 形状を変えると磁場配位の特徴が変わる

Courtesy by D. Spong and H. Liu

稼働中

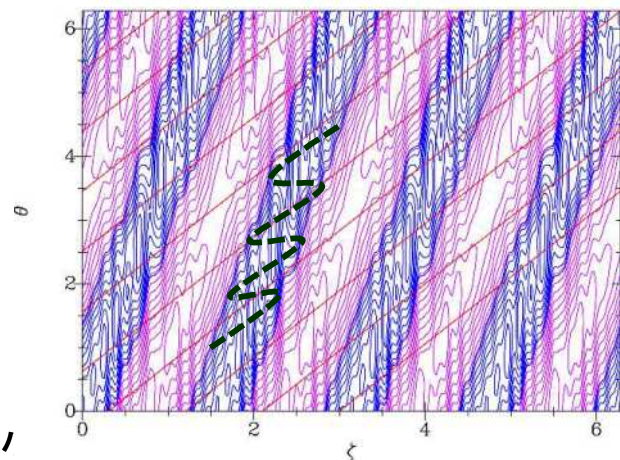
HSX

$\langle a \rangle = 0.15 \text{ m}$
 $\langle R \rangle = 1.2 \text{ m}$



Quasi-helical symmetry
 $|B| \sim |B|(m\theta - n\zeta)$

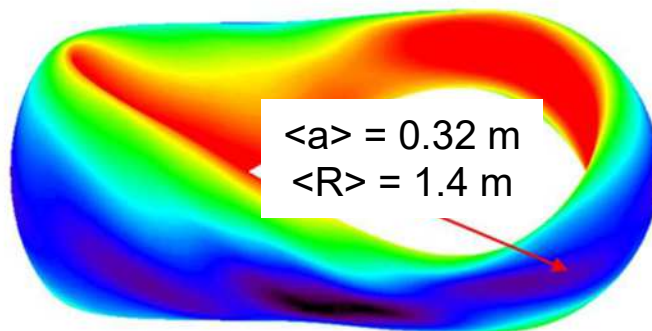
$|B|$ at $r/a = 0.20$ (blue: $B < 1\text{T}$, purple: $B > 1\text{T}$)



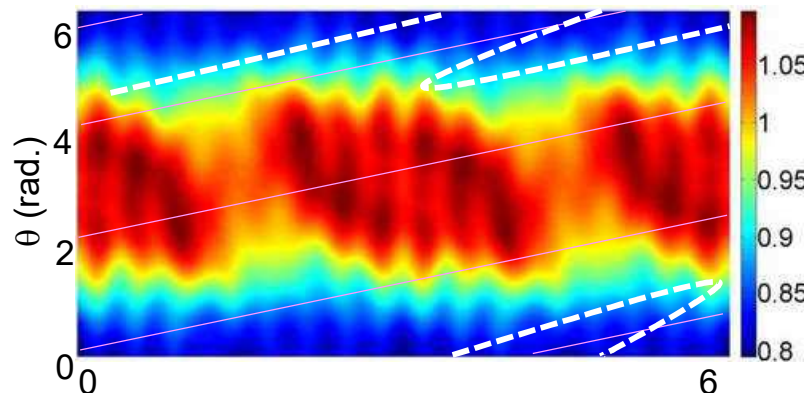
建設中

CFQS

$\langle a \rangle = 0.32 \text{ m}$
 $\langle R \rangle = 1.4 \text{ m}$



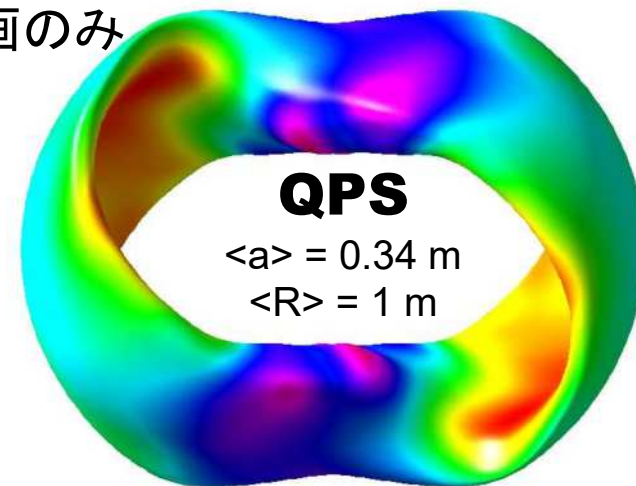
Quasi-toroidal symmetry
 $|B| \sim |B|(\theta)$



計画のみ

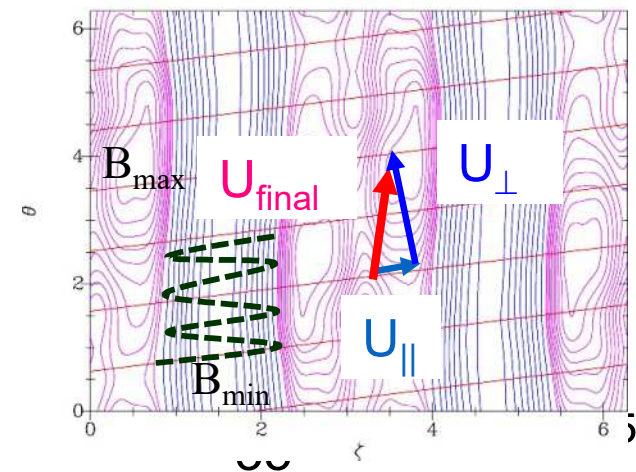
QPS

$\langle a \rangle = 0.34 \text{ m}$
 $\langle R \rangle = 1 \text{ m}$



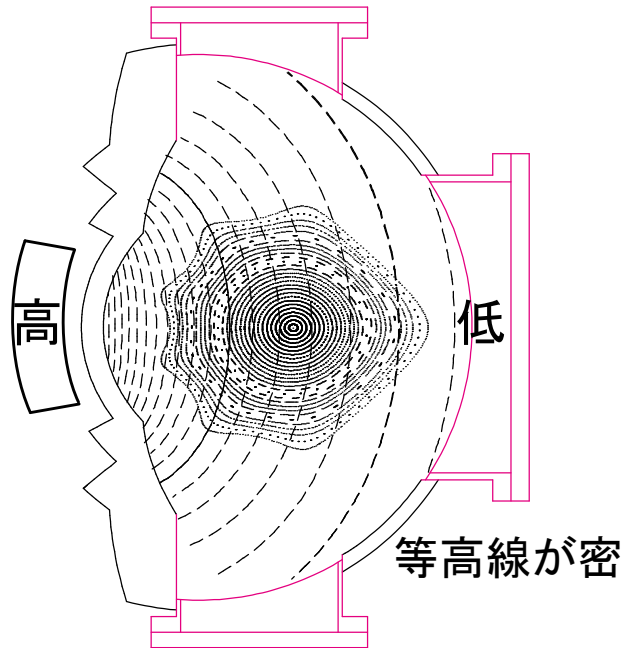
Quasi-poloidal symmetry
 $|B| \sim |B|(\zeta)$

$|B|$ at $r/a = 0.20$ (blue: $B < 1\text{T}$, purple: $B > 1\text{T}$)

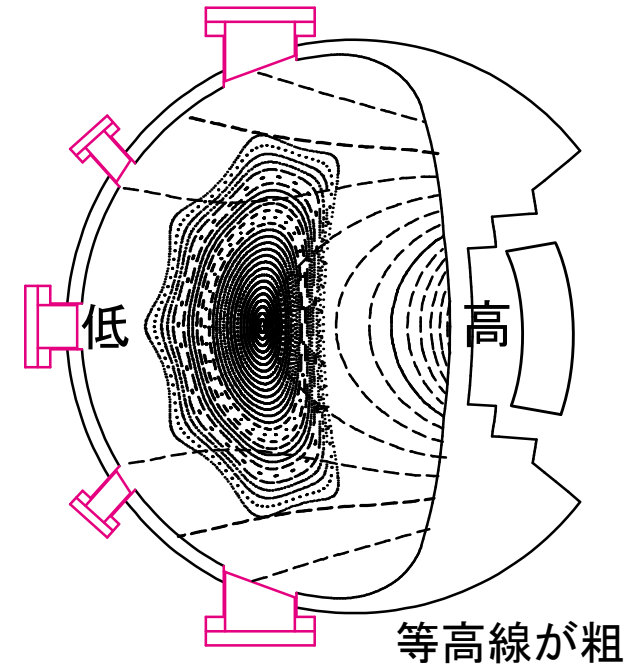
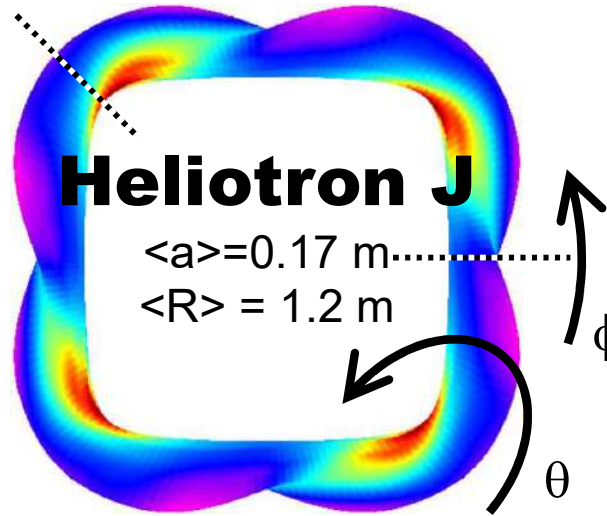


ヘリオトロンJは準等磁場配位に分類： 低磁気シア・磁気井戸・柔軟な配位選択が特徴

ヘリオトロンJ磁場強度の
Contour map

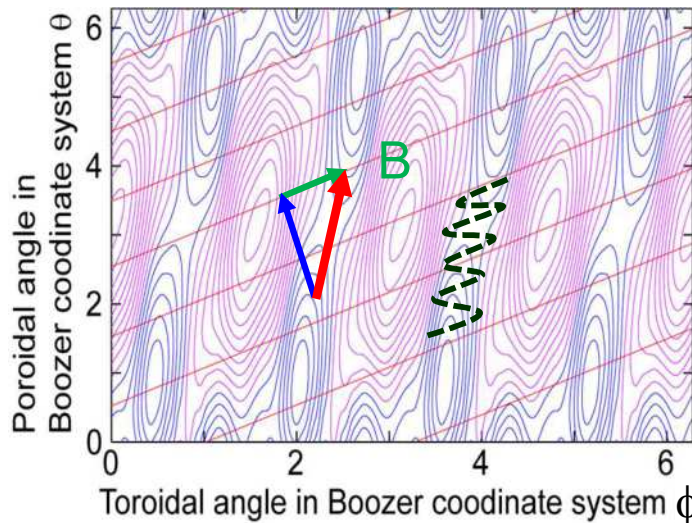


$$B \propto 1/R$$



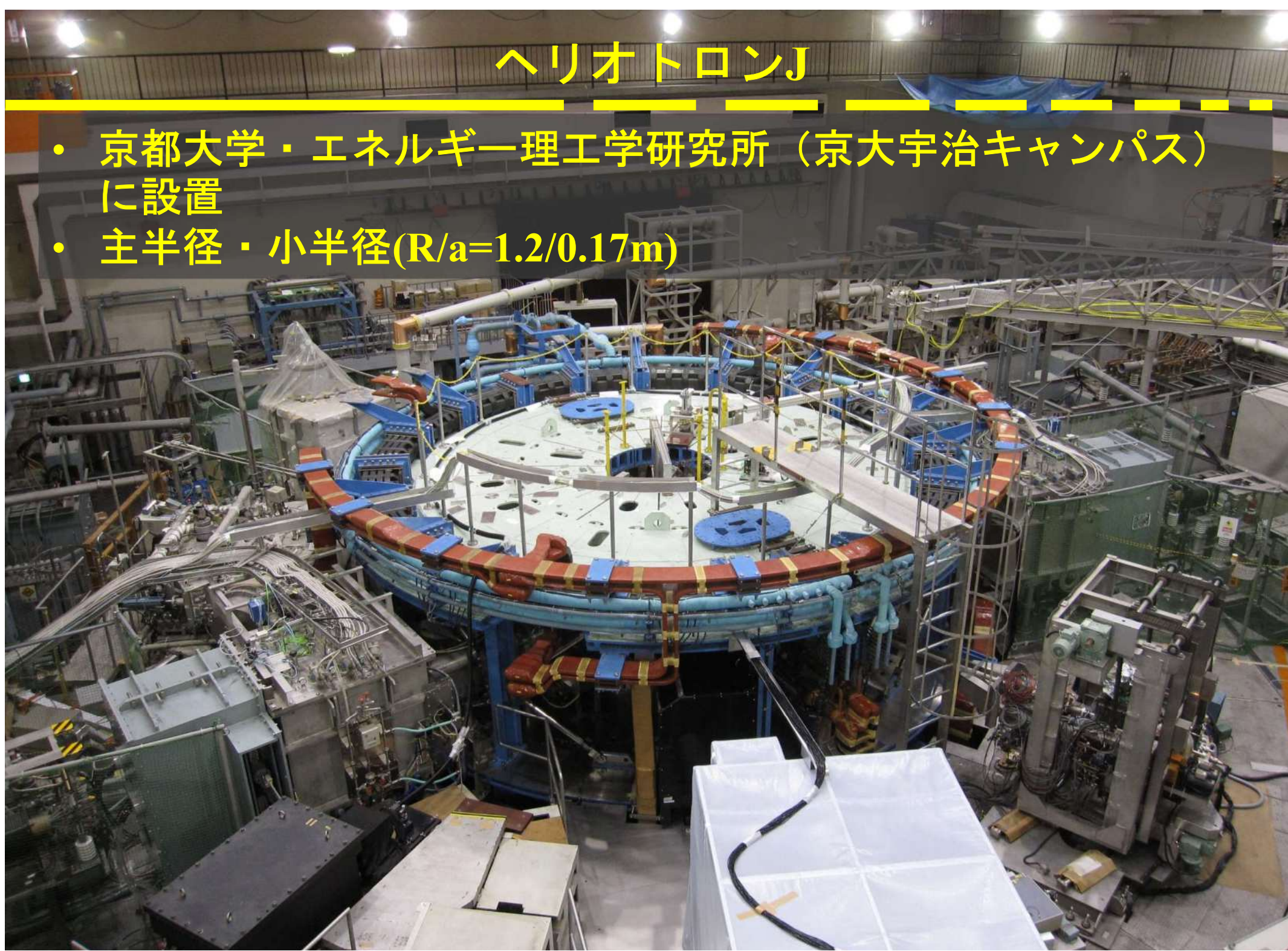
$B \sim \text{Uniform}$
 かつ、強弱逆転

準等磁場：
 磁場強度の変動が
 小さい領域を有する

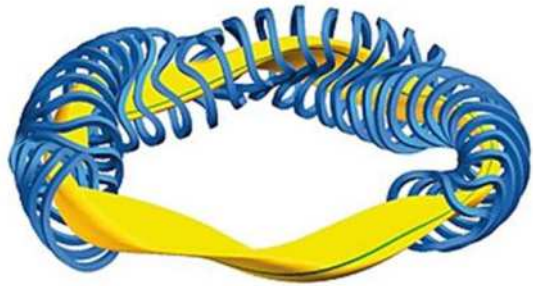


ヘリオトロンJ

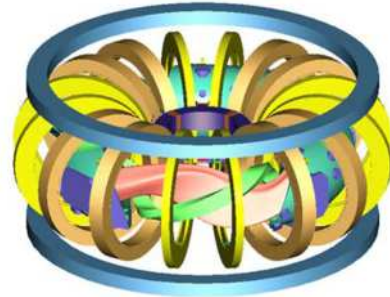
- 京都大学・エネルギー理工学研究所（京大宇治キャンパス）に設置
- 主半径・小半径($R/a=1.2/0.17\text{m}$)



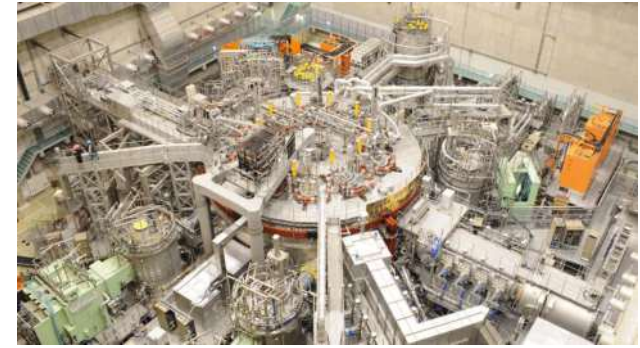
世界のヘリカル型プラズマ閉じ込め装置



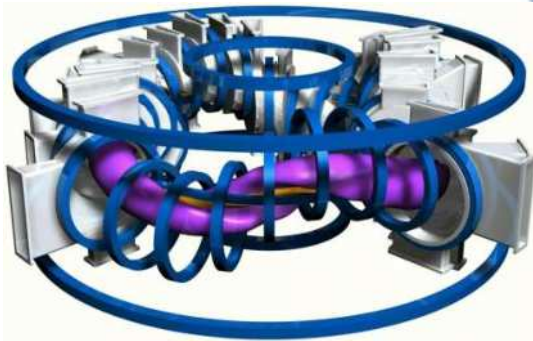
W7-X(ドイツ)



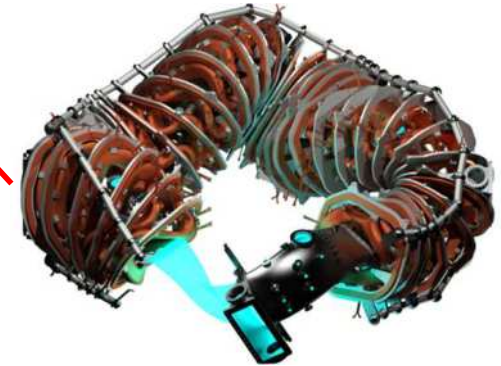
Heliotron J(日本)



LHD(日本)



TJ-II(スペイン)



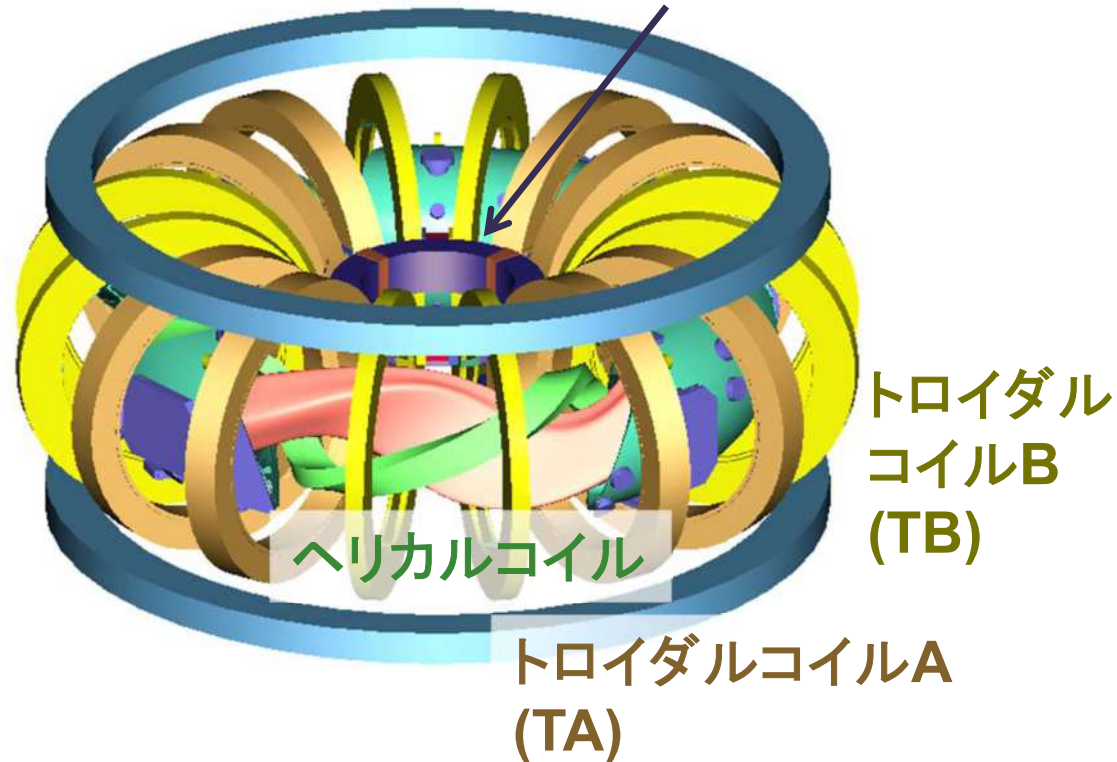
HSX(米国)



H1-NF(オーストラリア)

ヘリオトロンJは準等磁場配位に分類： 低磁気シア・磁気井戸・柔軟な配位選択が特徴

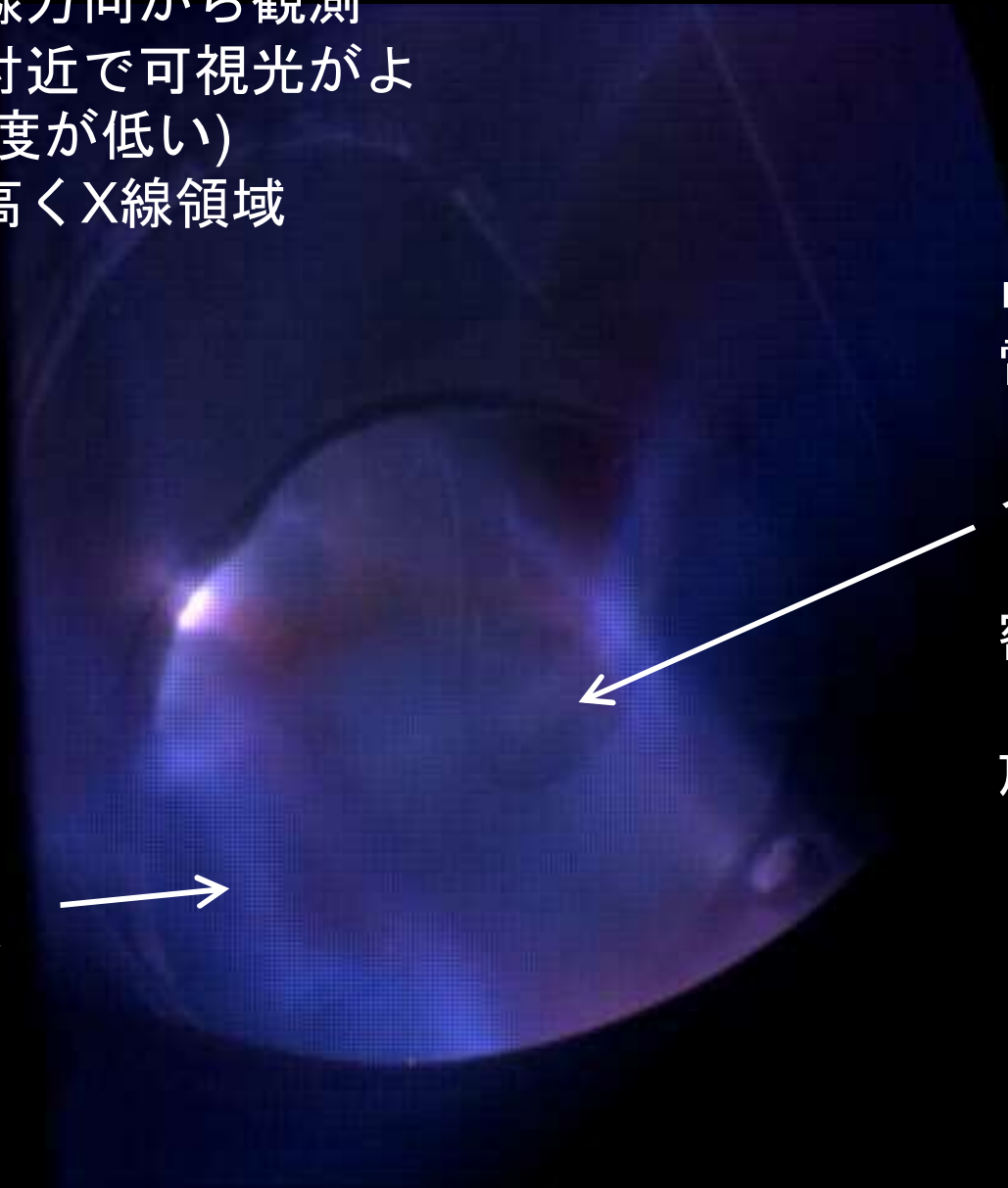
外側垂直磁場コイル 内側垂直磁場コイル



- ✓ 5種類のコイルで磁場配位を構成
- ✓ コイル電流比を変える事で配位の特徴を広く変えることができる
 - 磁力線のねじりの強さ
 - 幾何形状
- 配位の特徴に対して、熱の輸送がどのように応答するか実験的に明らかにすることが課題
- 将来のヘリカル型装置に向けた配位の方角性を見極める

ヘリオトロンJプラズマの放電

- ドーナッツを接線方向から観測
- プラズマは境界付近で可視光がよく観測できる(温度が低い)
- 中心部は温度が高くX線領域



中心部分では
電子温度

:2keV(2千万度)

イオン温度

:300eV(300万度)

密度

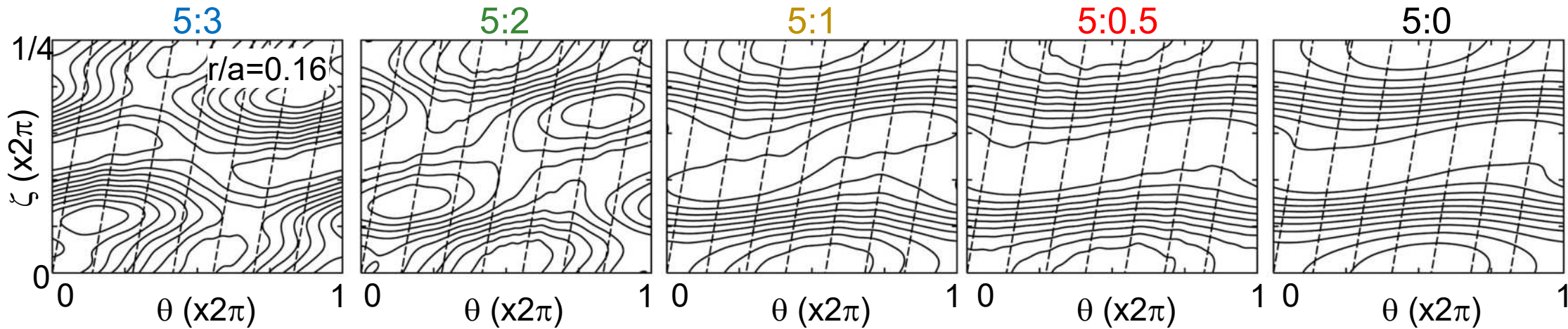
: $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

放電時間

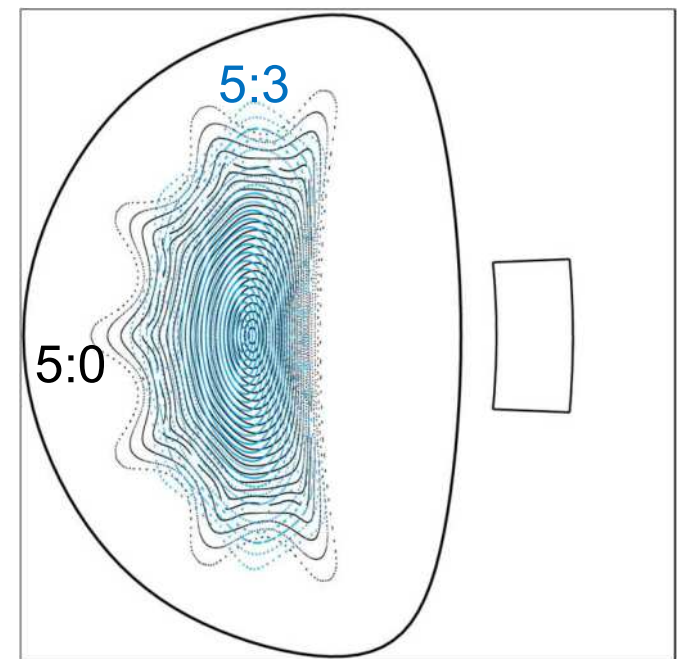
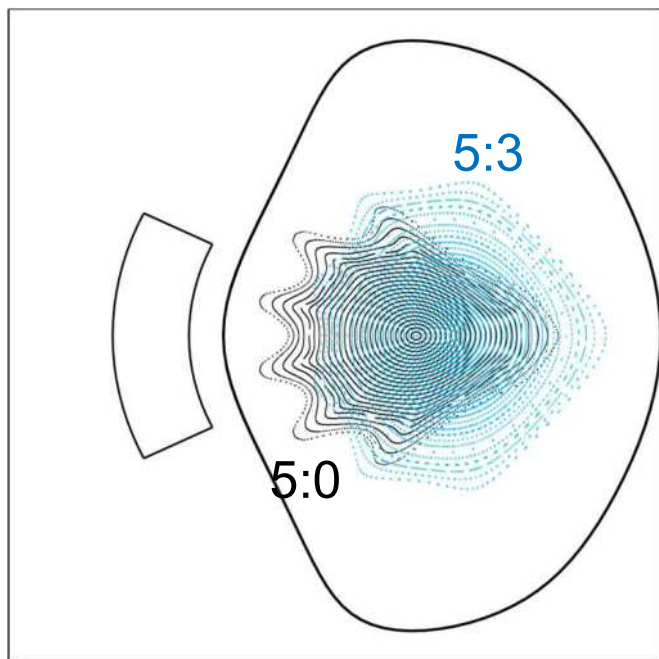
:0.1-0.2秒

プラズマの境界
内側:閉じ込めが良い
外側:磁力線が真空容器に衝突

トロイダルコイルの電流比(TA:TB)を変えると？



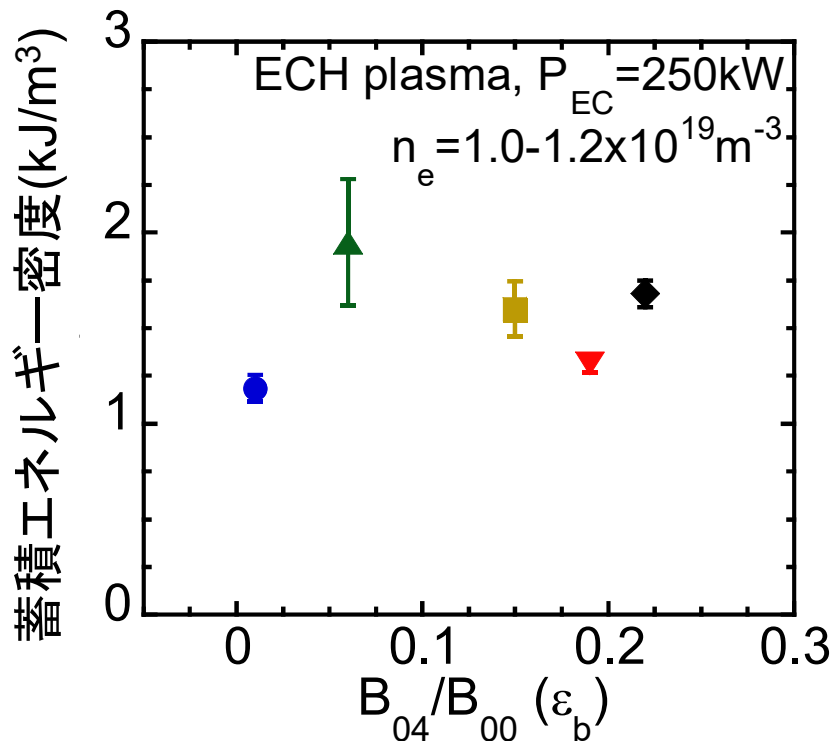
トロイダルミラー比が強くなる → ポロイダル方向の対称性が良くなる
 磁場の強い箇所、面積が小さくなる



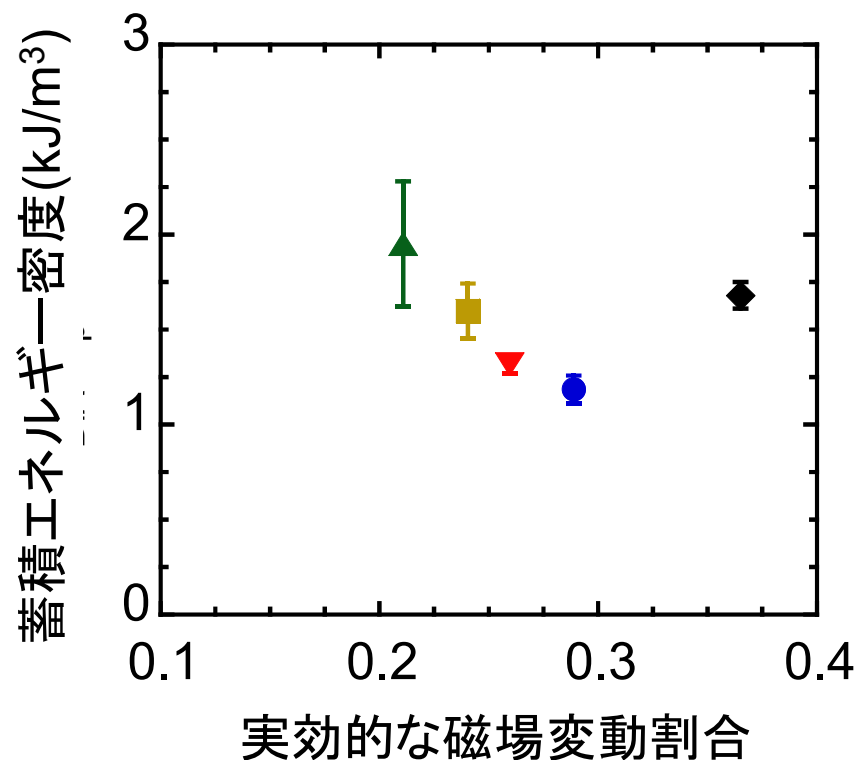
トロイダルコイルの電流比(TA:TB)を変えると？

プラズマの蓄積エネルギーが高くなる場合は理論的な予想と一致

Bumpiness dependence



ϵ_{eff} dependence



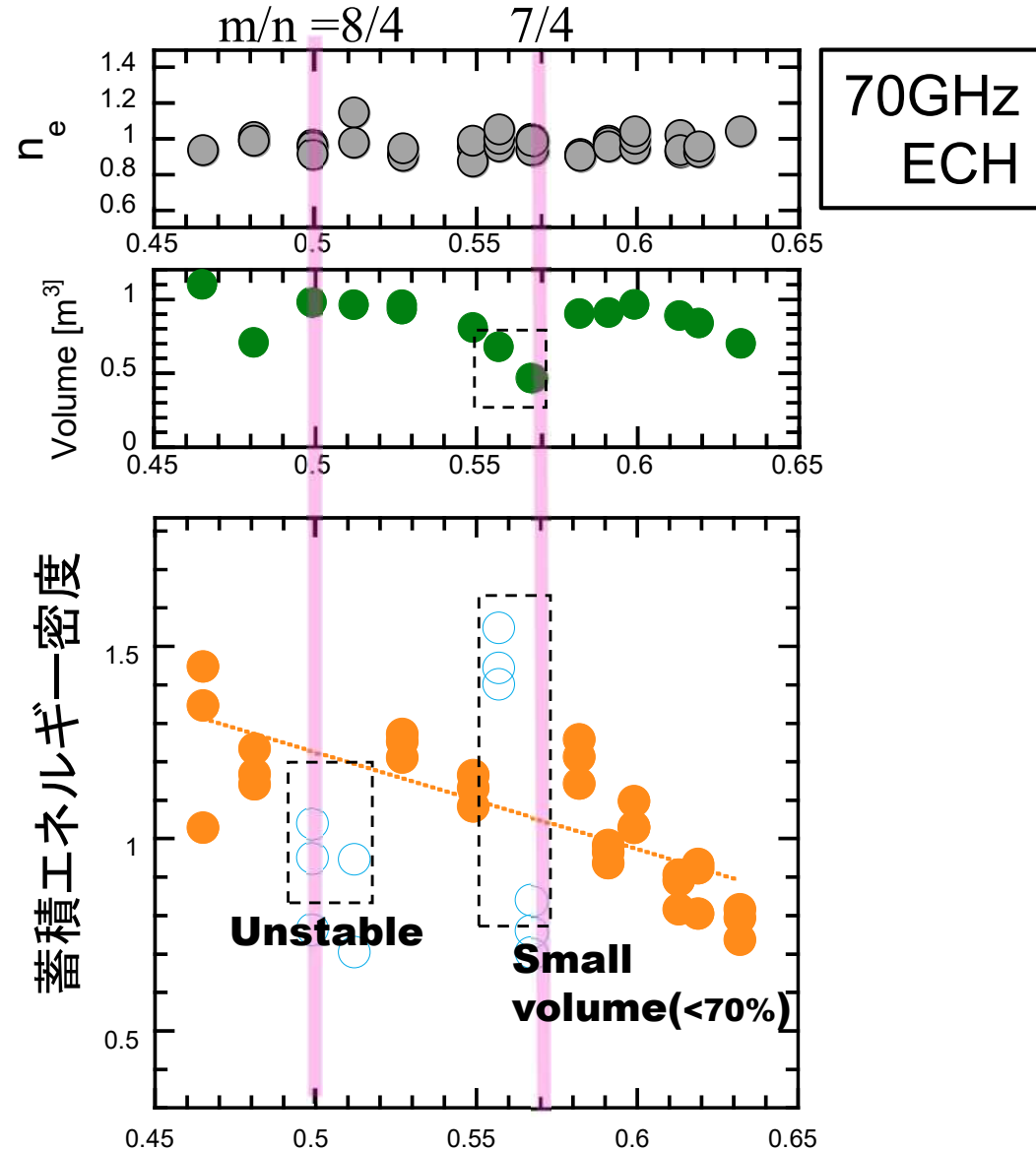
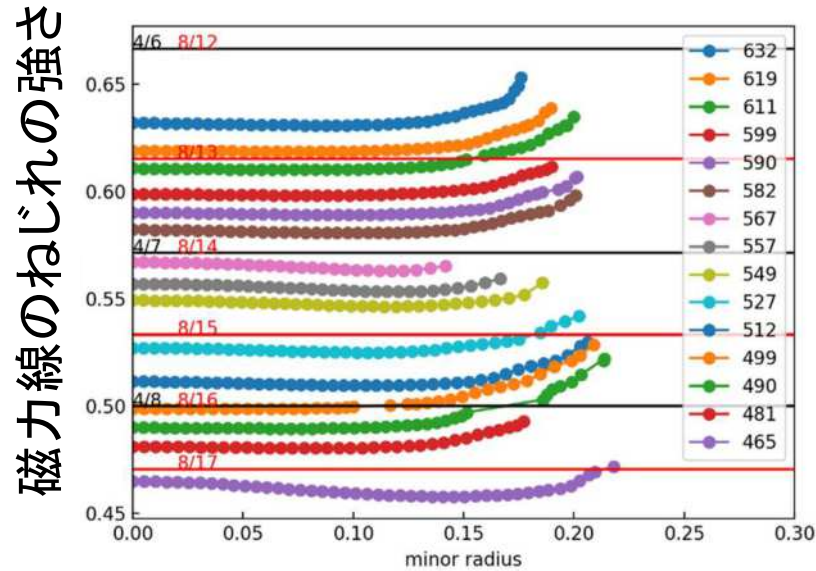
プラズマの蓄積エネルギーを最も高くできるのは、トロイダルコイルの電流比が5:2の場合

5:2の場合に実効的な磁場変動割合が最も低い

磁力線のねじれの強さを変えると？

他の実験装置で得られた経験則とは一致しない

磁力線のねじれの強さを変える



- ✓ Scan of iota 0.46-0.63
- ✓ Significant change of W_p/n_e around rational surfaces
- ✓ Confinement degradation with iota
 - Opposite dependence on ISS04

$$\tau_E^{ISS04} = 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{-0.54} B^{0.84} t_{2/3}^{0.41}$$

まとめ

- 磁場閉じ込めプラズマの基礎、「単一荷電粒子のドリフト運動」
- トカマク型配位、ヘリカル型配位の特徴と課題の概略
- ヘリオトロンJの目的・実験
 - ✓ 磁場配位の特徴(ねじれ・形状)に対して、熱輸送・エネルギー閉じ込めの特性を調べることで、将来のヘリカル型装置で採用すべき、磁場配位の方向性を見極める
 - ✓ 実験結果の一例を紹介