



# 工学研究科・エネルギー理工学専攻 エネルギー電磁流体工学グループ



教員: 渡邊 清政 (kiyowata@nifs.ac.jp)

web; <http://fusion-mhd.energy.nagoya-u.ac.jp>

主な研究課題

研究室 @ 核融合科学研究所

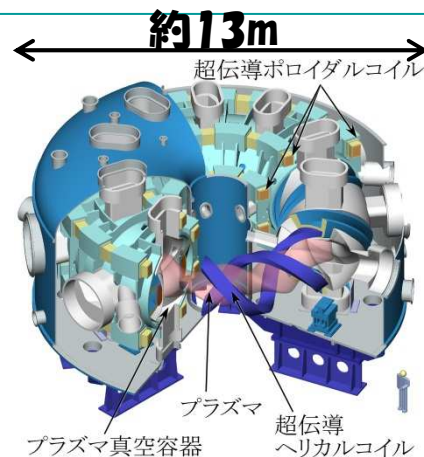
## 電磁流体である核融合発電用炉心プラズマの閉じ込め性能に関する研究

具体的には、

核融合炉に必要な**低衝突高ベータ**(プラズマ圧力と磁気圧の比)プラズマを実現するため、**電磁流体力学的(MHD)不安定性**の閉じ込めに与える影響とその低減法に関する研究指導を世界最大のヘリカル型核融合実験装置である**LHD(大型ヘリカル装置)**を使った**実験、計測、数値解析**を通して行う。

また、ITER(国際熱核融合炉)に代表されるトカマク方式の炉心プラズマのMHD特性(ディスラプション等)に関連した研究課題も取り扱う。

磁場 3万ガウス  
(地磁気の10万倍)  
プラズマ体積30m<sup>3</sup>  
(8畳間一杯)



大型ヘリカル装置(LHD)



10.5PFlops  
富岳の約40分の1

核融合関連研究専用の  
スーパーコンピュータ

# 高温高密度プラズマの安定的な維持(閉じ込め)における「MHD」 / 「輸送」の役割とは？

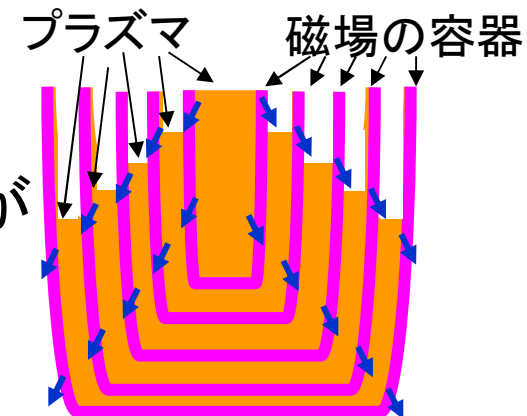
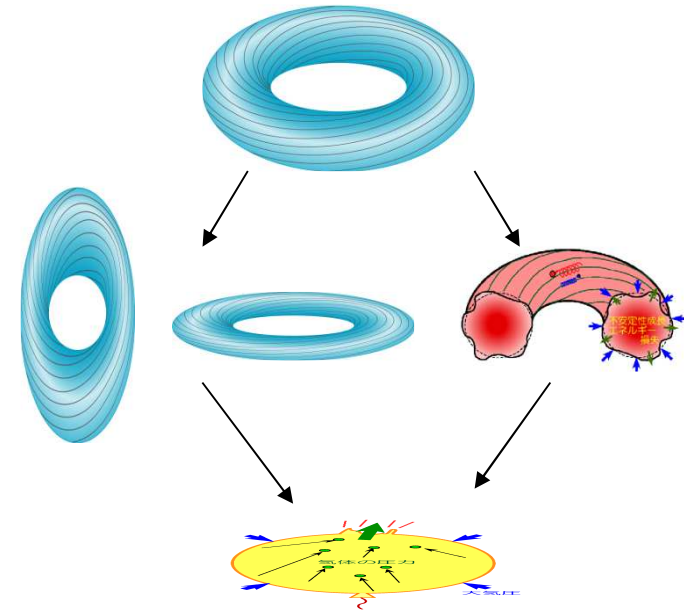
磁場核融合炉心では、  
磁場の容器中に高温高密度(高圧)  
のプラズマを安定的に閉じ込めたい。  
**それを妨げる2種類の現象。**

プラズマ自身が磁場、電場を作る。  
=> プラズマが磁場の容器を变形・破  
壊し、「**あっという間**」にプラズマが  
容器から飛び出す。

=> **「MHD(電磁流体力学的)不安定」**

磁場の容器には、「すきま」がある。  
=> 「すきま」から「**じわっ**」とプラズマが  
漏れ出る。

=> **「輸送」** 比喻であることに注意



# 研究概要

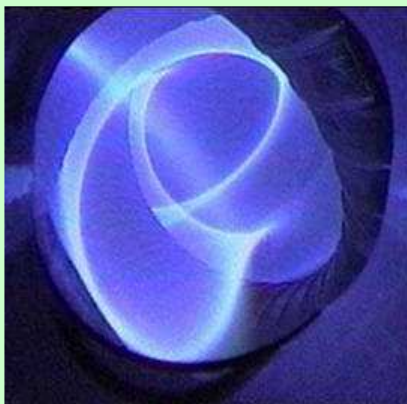
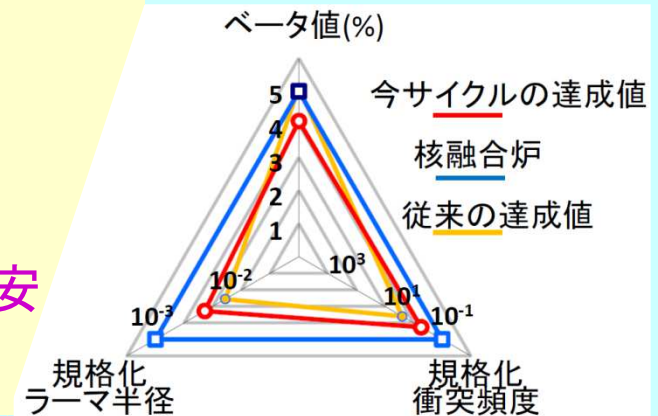
核融合では高温高密度(=高圧力)プラズマを磁場で閉じ込める

荷電粒子の集合であるプラズマは電流・電場を発生  
 =>電場・電流は閉じ込め容器である磁場を変形・破壊  
**「電磁流体力学的(MHD)現象」**

圧力が高いほど、核融合の熱出力は増大  
 電場・プラズマ電流は増大

より低い磁場で高い圧力(高ベータ)のプラズマの安定的な維持が経済的な炉心プラズマの必須条件

## 核融合炉達成度の3指標



LHD炉心プラズマ

LHDでは、経済的核融合発電炉の条件の一つであるベータ値5%を実現。

更に、高磁場(低ラーマ半径)、高温(低衝突)で、高ベータの実現が必要。

磁場容器形状の制御や加熱・粒子手法の最適化による圧力分布制御

=> **更なる高温・高ベータ炉心プラズマの制御手法の開発**

**良好な高密度での閉じ込め性能の利用**

不安定性の計測、理論予測との比較を通じ、

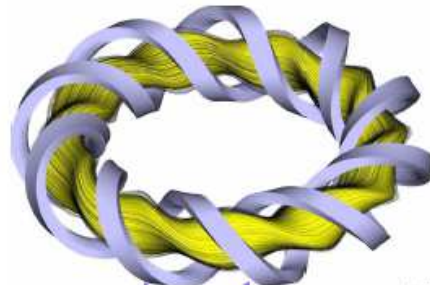
=> **破壊現象の低減・回避法の開発**



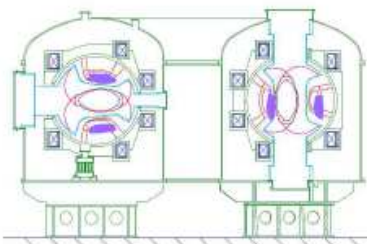
# 1. 更なる高温・高ベータ炉心プラズマの制御手法の開発

プラズマ状態の燃料は電荷をもっているため、磁場の容器(磁力線で編んだ籠・磁気面)で閉じ込める。

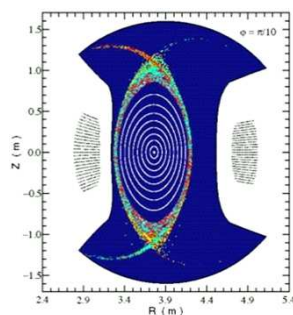
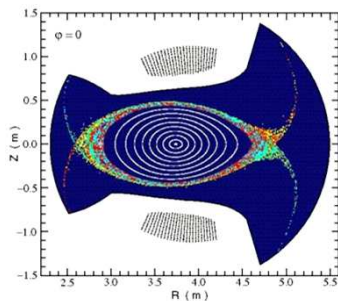
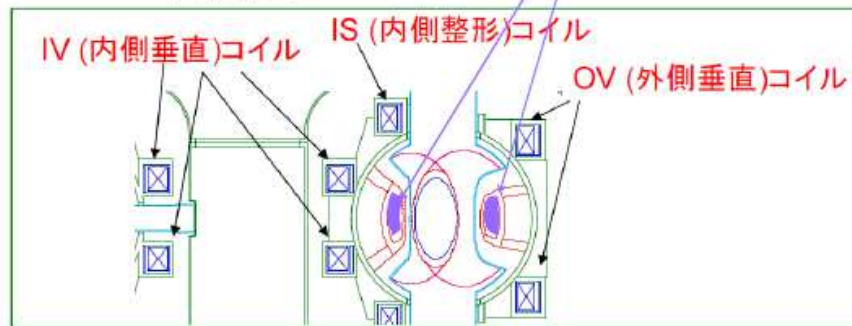
大型ヘリカル装置の磁場の容器は、ねじれている。  
右図の金色のスジが磁力線、磁力線の塊が磁場の容器(磁気面)。



紫色のらせん(ヘリカルコイル)は磁場を作る超伝導コイル。



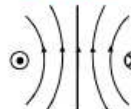
LHDの水平断面図



磁場容器の特性評価や圧力分布の制御方法については、シミュレーション等で予測し、実験シナリオを作成。

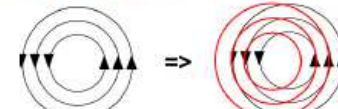
LHDには、ヘリカルコイル以外にIV, IS, OVコイルと呼ぶドーナツ状のコイルがあり、磁気面の第半径位置や磁気面形状を制御できる。

双(二重)極磁場成分



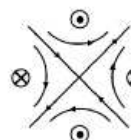
主にIV, OVコイルで形成

ヘリカルコイルによるポロイダル磁場成分



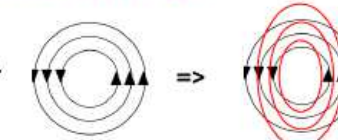
右側のポロイダル磁場が強められ左側のポロイダル磁場が弱められ、磁気面は左側に移動 => 磁気面位置制御

四重極磁場成分

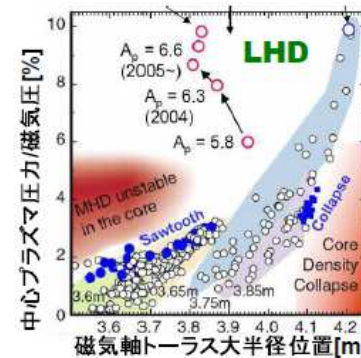


主にISコイルで形成

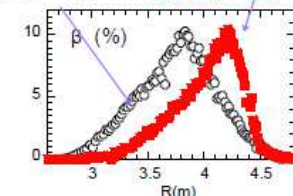
ヘリカルコイルによるポロイダル磁場成分



赤道面でポロイダル磁場が強められトラス上下でポロイダル磁場を弱められ、磁気面は縦長に変形 => 磁気面形状制御



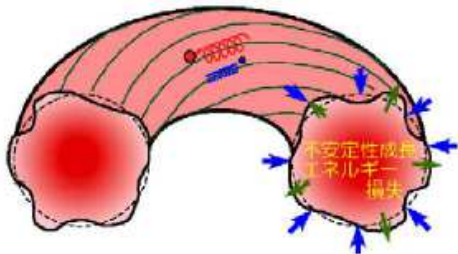
標準圧力分布 放電  $\langle \beta \rangle \sim 5\%$     尖頭化圧力分布 放電  $\langle \beta \rangle \sim 3\%$



平成24年度 文部科学大臣表彰

磁場容器形状の制御や圧力分布制御で、経済的核融合発電炉の条件の一つであるベータ値(=プラズマ圧力/磁場の圧力)5%を実現。

## 2. 破壊現象の低減・回避法の開発



プラズマの「不安定性」

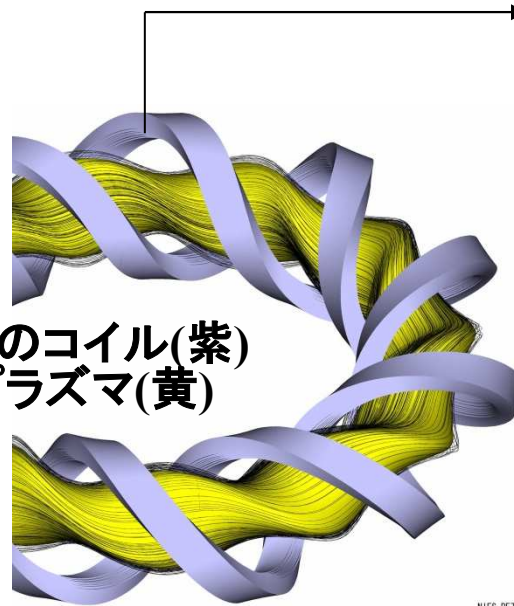
MHD不安定性が発生すると、磁場容器やプラズマ（温度や密度）の「揺らぎ」が発生し、容器が壊れたり、プラズマが飛び出す

「揺らぎ」を計測し、その特性を調べる

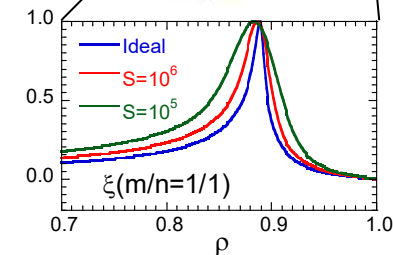
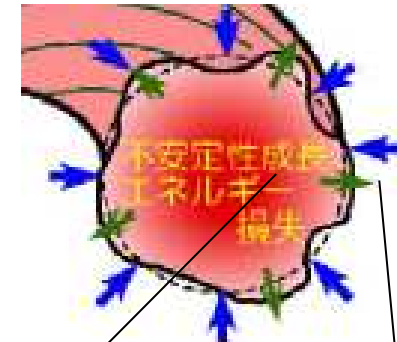
実験・計測

研究手法

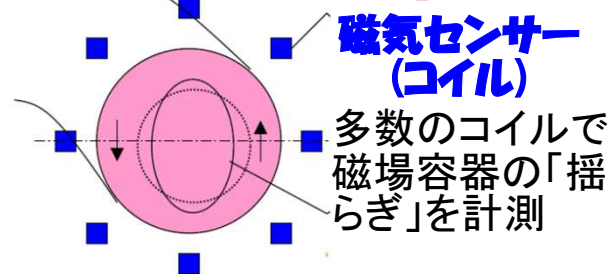
- ・実験手法を考え、実験・計測
- ・計測器を製作し、実験・計測
- ・シミュレーションモデルを製作・改良し、実験結果と比較



磁気容器の断面図



「不安定性」計測器の例



「不安定性」のシミュレーション結果の例

「作業仮説」に基づくシミュレーションにより、不安定性の特性を推定 **シミュレーション**

「揺らぎ」の計測結果と、シミュレーションを比較し、「不安定性」の原因を推定、影響を予測



**単位** 学生の多くはJR多治見駅付近に居住(名古屋地区まで、JRと地下鉄で40~50分)主に修士1年の前期に名古屋地区の名大キャンパスの講義で取得。大学院の一部の単位は土岐地区(総合研究大学院大学)の講義でも取得可。

## **卒論研究**

LHD実験の場合、土岐地区(核融合研)で実行(東山地区、その他の場合もあり)。土岐地区には個別のPCを用意。院試前(前期)は、基本的に東山地区でゼミを開催(個別対応)。

## **修論研究**

主として土岐地区(核融合研)で実行(東山地区、その他の場合もあり)。修士卒業には、最低1回の国内学会での発表が必須。

## **核融合科学研究所内の学生数:50名超**

(名大工学研究科工ネ理/総工ネ専攻, 電気工学専攻, 名大理学研究科素粒子宇宙物理学専攻, 総合研究大学院大学核融合科学専攻, 九州大学総合理工学専攻, 特別共同利用研究員[全国の大学])

- ・ 電磁波を使ったプラズマの温度・密度の揺らぎ計測、揺らぎの構造同定

計測器設計・製作

計測、実験解析、イメージング

- ・ 磁気計測器を使った磁場容器形状の計測器開発と計測結果を使ったプラズマの制御、更なる高温/高ベータプラズマの制御手法の開発

計測器設計・製作

実験・計測、実験解析

- ・ ヘリカルプラズマにおけるMHD不安定性のシミュレーション研究

数値計算、実験解析

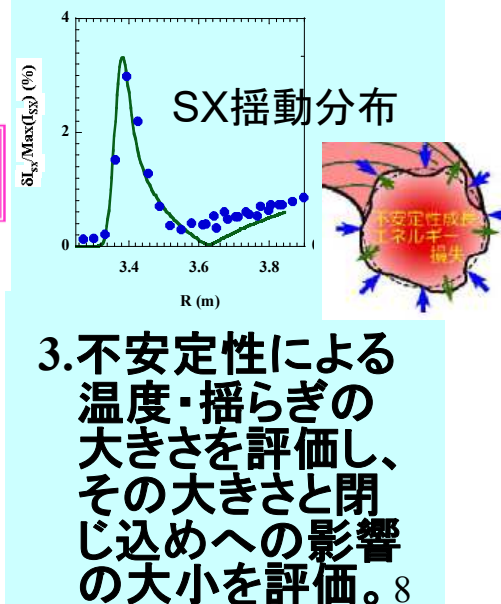
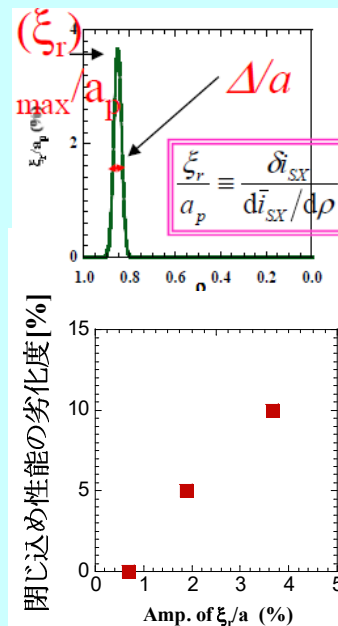
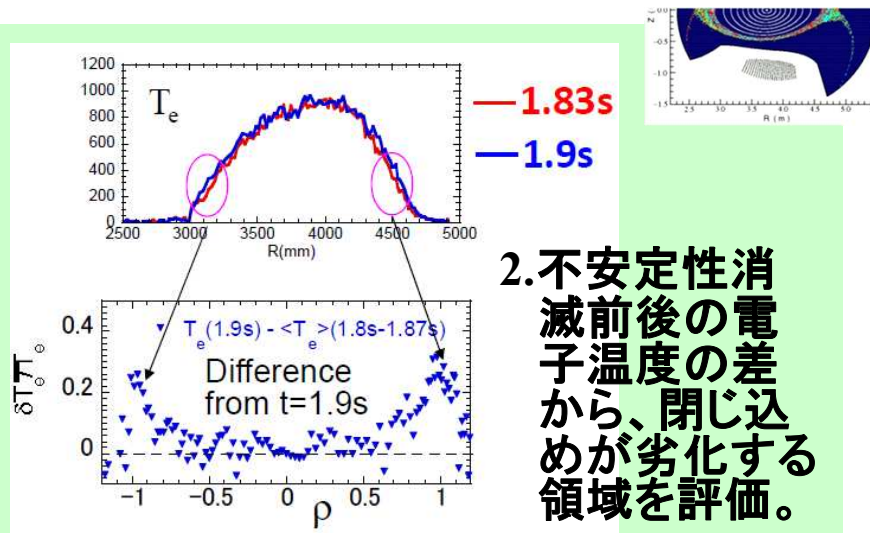
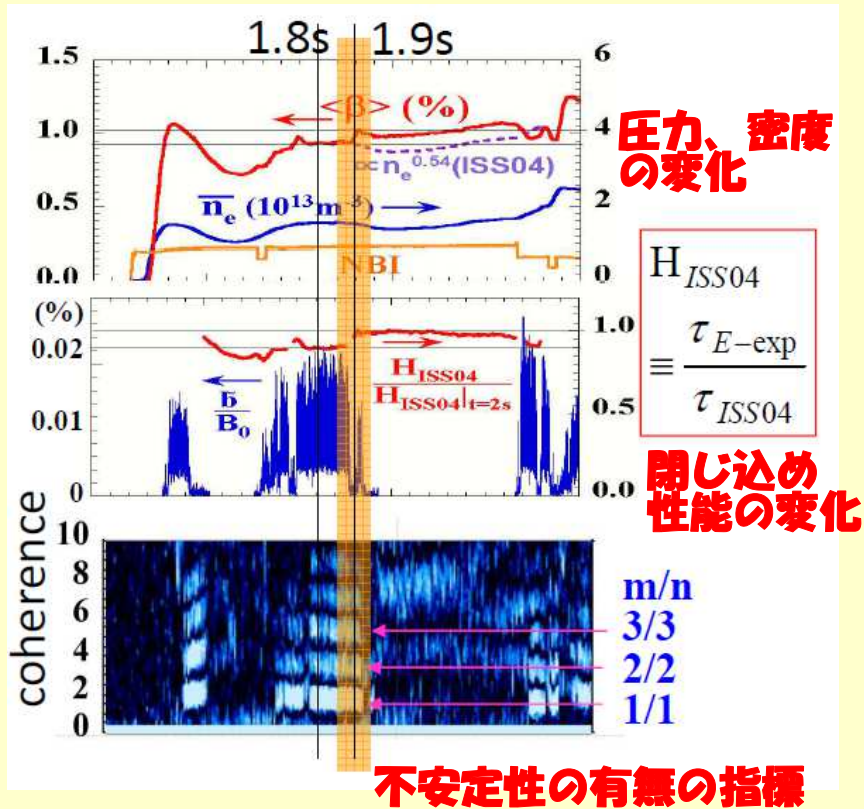
- ・ トカマクディスラプション時の平衡ダイナミズムの解明とダメージ回避/低減法の開発

実験、実験解析、数値計算

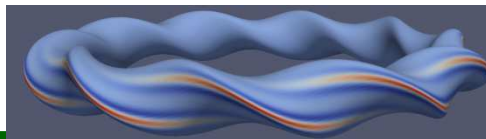


## MHD不安定性の閉じ込めへの影響の研究

1. MHD安定境界条件(不安定性が起こる瀬戸際)を過去の実験から予測し、実験。

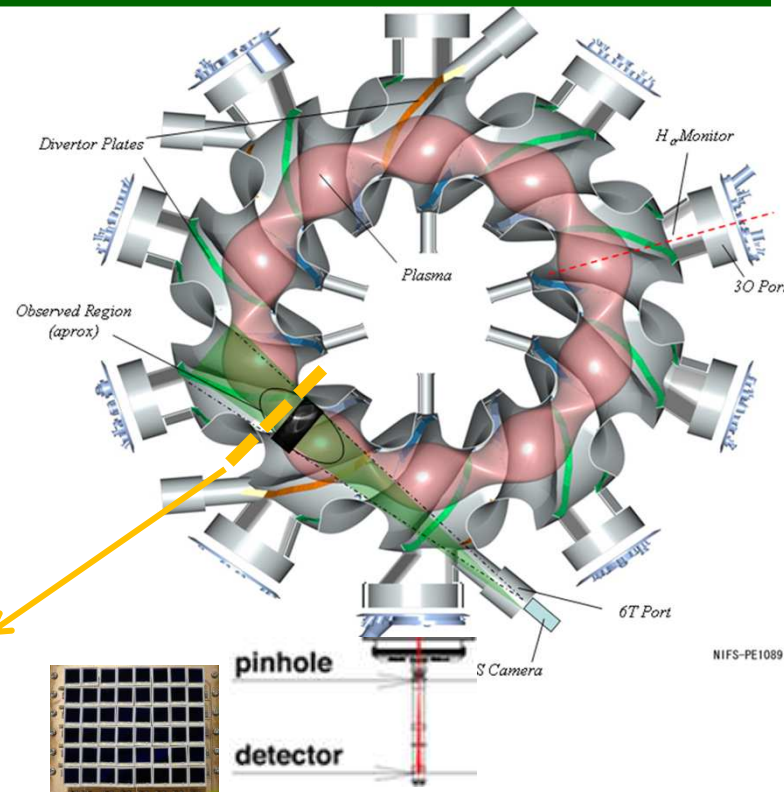
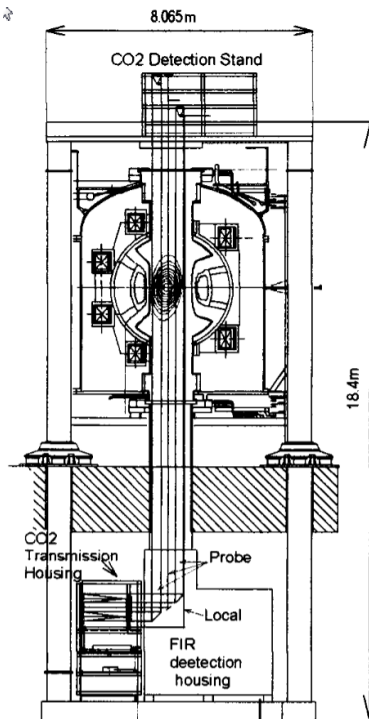
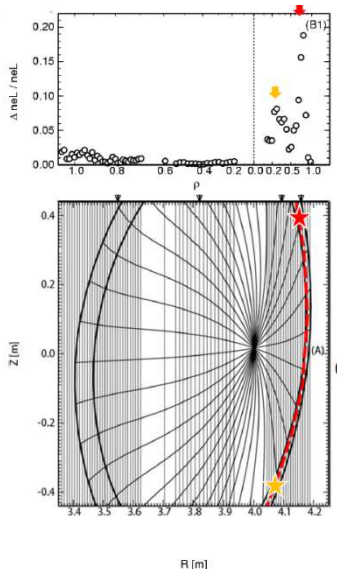




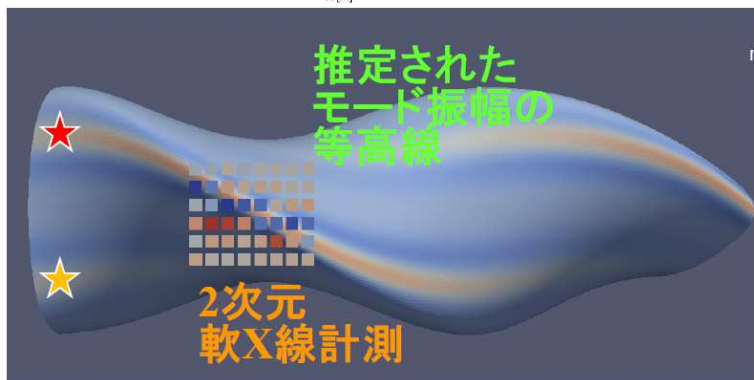


## 「イメージング」法によるMHD不安定性の原因解明

Co2 80ch Laser Imaging interferometer (~100kHz)



2D SX Detector Array 6x8 (~50kHz)

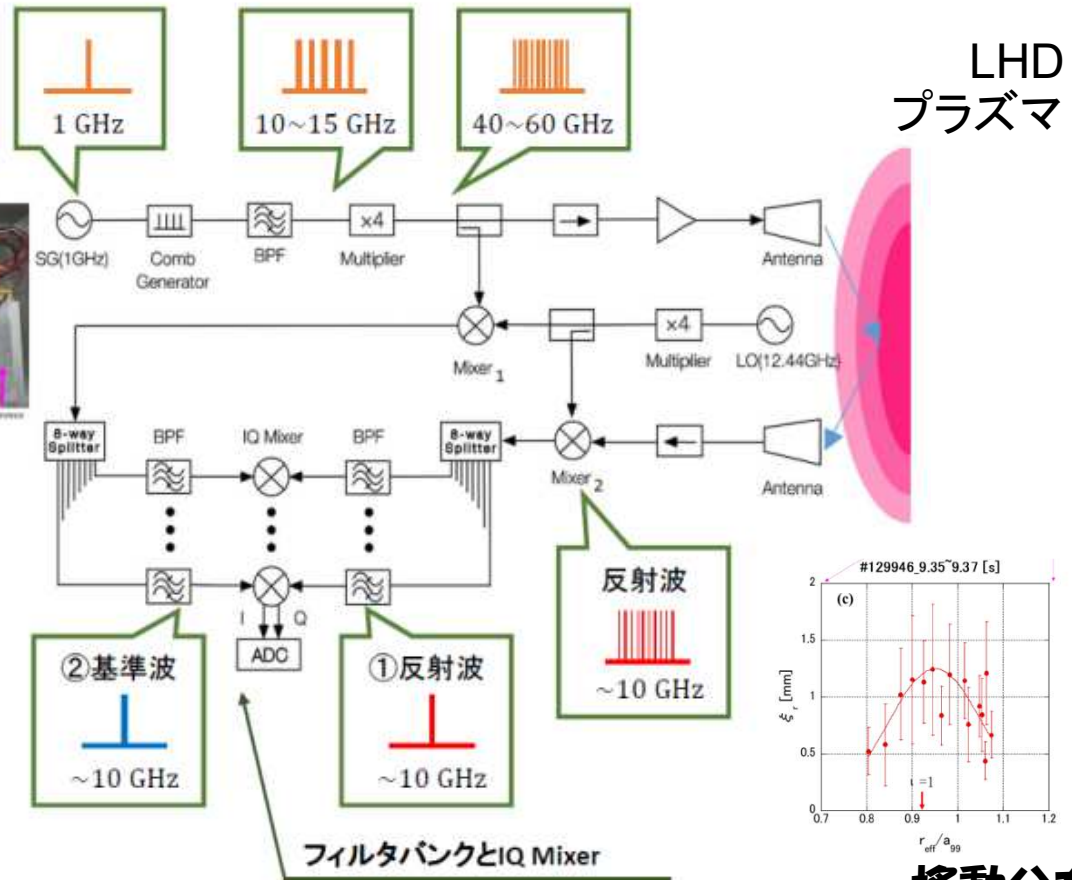
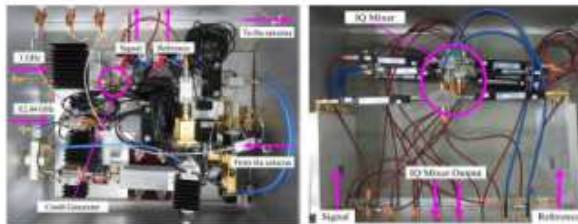


- 2次元軟X線発光分布の計測結果から、
- ⇒ ポロイダル方向は横長断面のトーラス外側赤道面を通る磁力線に局在
- CO2レーザ干渉計の計測結果から、
- ⇒ 磁力線方向にも悪い曲率部(トーラス外側)に局在、小半径方向にも局在
- # 左図のようなモード構造を推定
- # 振幅の大きい領域は、曲率が悪い領域と一致
- ⇒ **バルーニングモードと同定**

「マイクロ波コム反射計を用いたLHDプラズマにおける交換型不安定性の構造研究」

## マイクロ波コム反射計の概要

計測電子密度レンジ:  $2 \sim 4 \times 10^{19} [m^{-3}]$   
 発振周波数: 40~60 [GHz]でシステム設計



### 主な開発要素

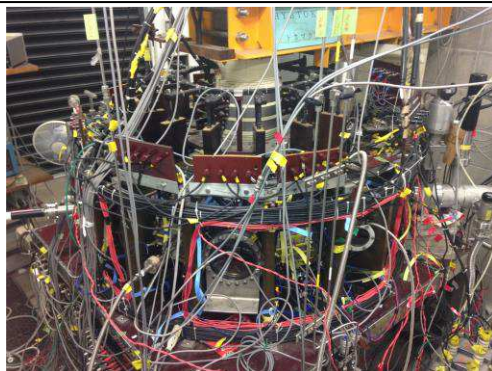
- 発振周波数の仕様設計
- 特性試験と最適運転領域の探索
  - Comb出力信号強度の最適化
  - BPFの最適化
  - 逓倍器出力信号強度の最適化
  - Mixer出力信号強度の最適化
  - LO発振周波数の最適化
  - IQ Mixer出力信号強度の最適化
- プラズマ実験に向けてのベンチテスト
  - 空間分解能の評価
  - $\xi_r$ の最低検出レベルの評価
  - 位相検出法の試験

- 40~60 GHzの周波数のうち、8つを抽出し位相差の検出、 $\xi_r$ の評価を行う。

揺動分布

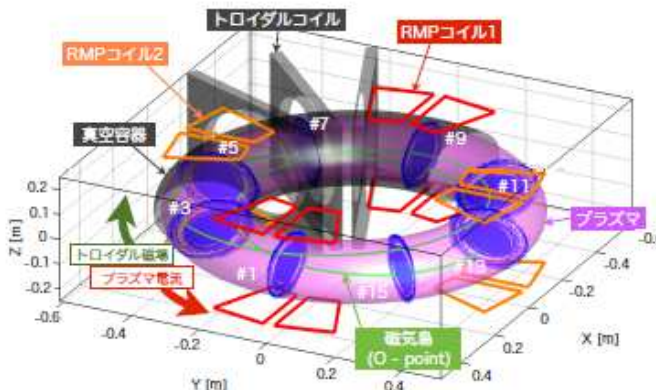


## 小型トカマクを使った共鳴摂動磁場とMHD不安定性の相互作用に関する研究



HYBTOK-II主要パラメータ

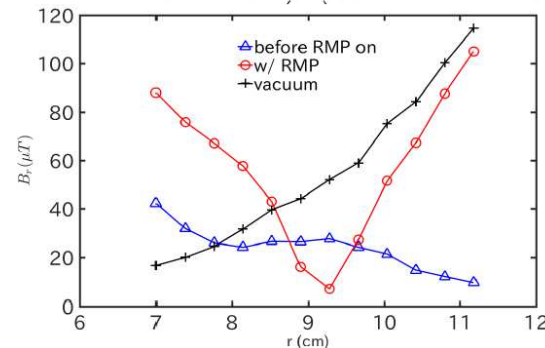
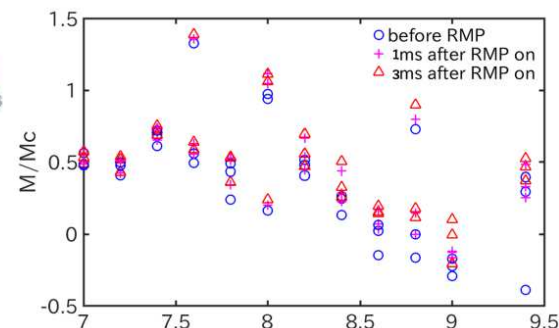
大半径 $R_0$	0.40 m
リミタ半径 $a$	0.11 m
プラズマ電流 $I_p$	~ 15 kA
トロイダル磁場 $B_t$	~ 0.4 T
放電時間	~ 20 ms



低モードRMPコイル

ポロイダルモード数	2
トロイダルモード数	1

イオン反磁性方向の振動RMPを印加した時のプラズマ流速の変化



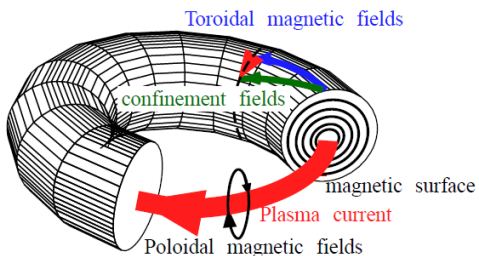
径方向摂動磁場の変化

**名大・電気系の小型トカマクHYBTOK-IIで、RMPコイルを追加し、RMPの浸透・増幅特性を調べる。特に、小型装置の特質を生かし、直接2次元流速分布を計測し、RMP(共鳴摂動磁場)応答と流速の関係の解明をトライ。**

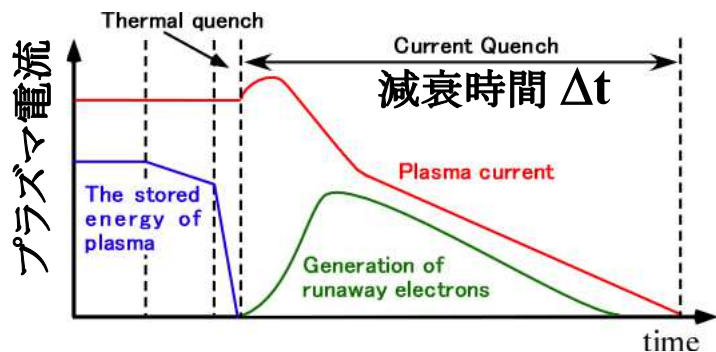
回転RMP磁場浸み込みには、プラズマ流速との相対速度が重要。フロー速度そのものも、外部RMPの影響を直接受ける。

吉本(名大・エネ理)、  
2017年度修論。

## 「トカマクにおけるディスラプション時の電流減衰時間の決定機構の研究」



トカマク型は、プラズマ電流により莫大な電磁エネルギーを保持。  
MHD不安定性等により磁場容器が破壊されたりプラズマが飛び出ると、短時間( $\sim < 0.1s$ )に莫大なパワーを放出し装置を損傷。また、装置に誘導電流を励起し、強い電磁力で装置を損傷。



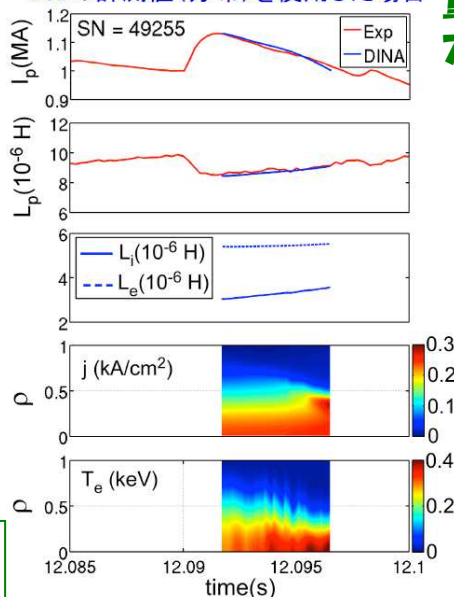
- # 電磁エネルギー  $LI_p^2/2$   
( $L$ ; 自己インダクタンス、 $I_p$ ; プラズマ電流)  
解放されるパワー;  $LI_p^2/2/\Delta t$
- # 装置に誘起される誘導電流;  $I_p/\Delta t$   
装置にかかる電磁力;  $B_t I_p/\Delta t$
- => 電流減衰時間に強く依存

電流減衰時間の決定機構は未解明

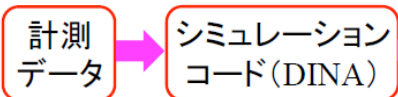
ITER(国際熱核融合炉)での重要課題の一つ

### 計測データと数値計算を組み合わせた実験解析で電流減衰時間の予測モデルを構築

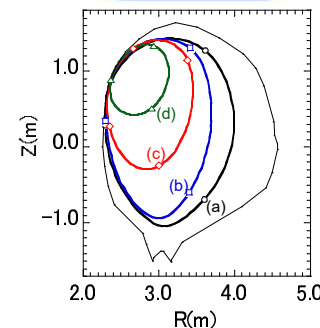
ECEの計測値(分布)を使用した場合



### 量子科学技術研究開発機構の大型トカマク装置(JT-60U)



プラズマの振舞い







# 学生の研究課題実績 (抜粋)



- 名大、エネ理2021年3月修士課程修了  
「LHDにおける外部共鳴摂動磁場による交換型不安定性の抑制手法の研究」  
実験、計測、実験解析
- 名大、エネ理2021年3月卒業研究  
「LHDにおける高速イオン軌道特性に対する径電場効果の研究」  
シミュレーション
- 名大、エネ理2020年3月修士課程修了  
「トロイダル電流印加時の低磁気シアヘリオトロンプラズマにおける交換型MHD不安定性の数値解析」  
数値計算
- 名大、エネ理2020年3月修士課程修了  
「オーミック加熱小型トカマク(HYBTOK-II)プラズマの流速計測」  
実験、計測、実験解析
- 名大、エネ理2020年3月修士課程修了  
「マイクロ波コム反射計を用いたポロイダル方向変位の計測及びLHDでのその特性研究」  
計測、実験解析

- 総研大2013年3月博士課程修了  
「ヘリカルプラズマにおける巨視的MHD不安定性特性に関する実験研究」  
実験、実験解析
- 総研大2013年3月5年一貫性博士課程修了  
「非等方圧力MHD平衡解析に基づくLHDプラズマの圧力非等方度同定手法の研究」  
数値計算、実験解析

- 名大、エネ理2012年3月博士後期課程修了  
「トカマク型核融合装置における電流消滅時のプラズマ応答に関する研究」  
実験、実験解析、数値計算

# 核融合発電炉心開発の研究課題

## (燃焼システム)

### 炉心プラズマ

高温高密度(高熱)プラズマを効率的に安定に(長時間)閉じ込める手法の開発

## (灰・熱除去システム)

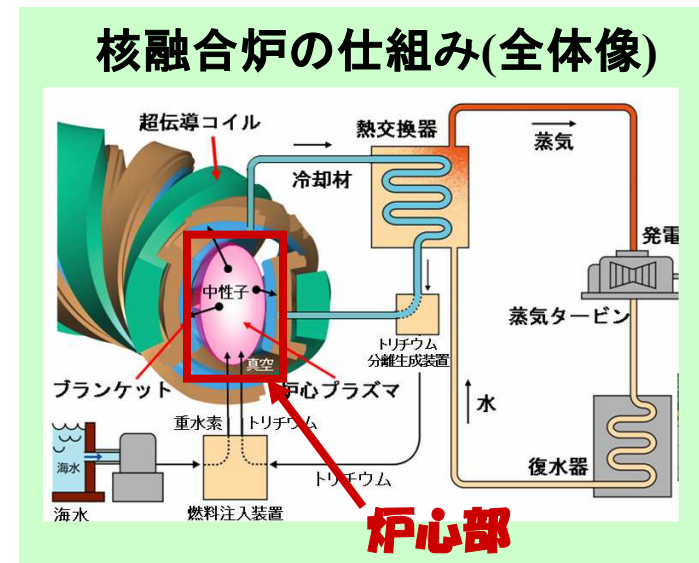
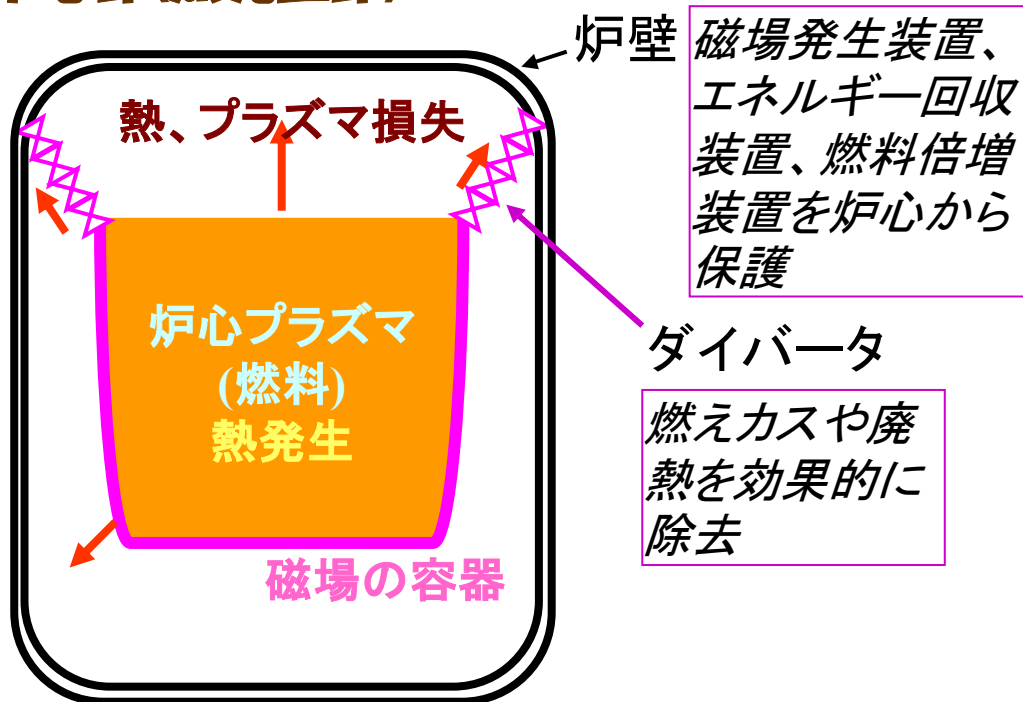
### 炉壁・ダイバータ

高熱のプラズマに長時間さらされても大丈夫な壁の開発、若しくは熱を分散する手法の開発

- ・ 燃料補給法、核融合出力制御装置の開発
- ・ 燃料生成法の研究
- ・ 高性能磁場容器(超伝導)の開発 等

## 補機部

## 炉心部(熱発生部)

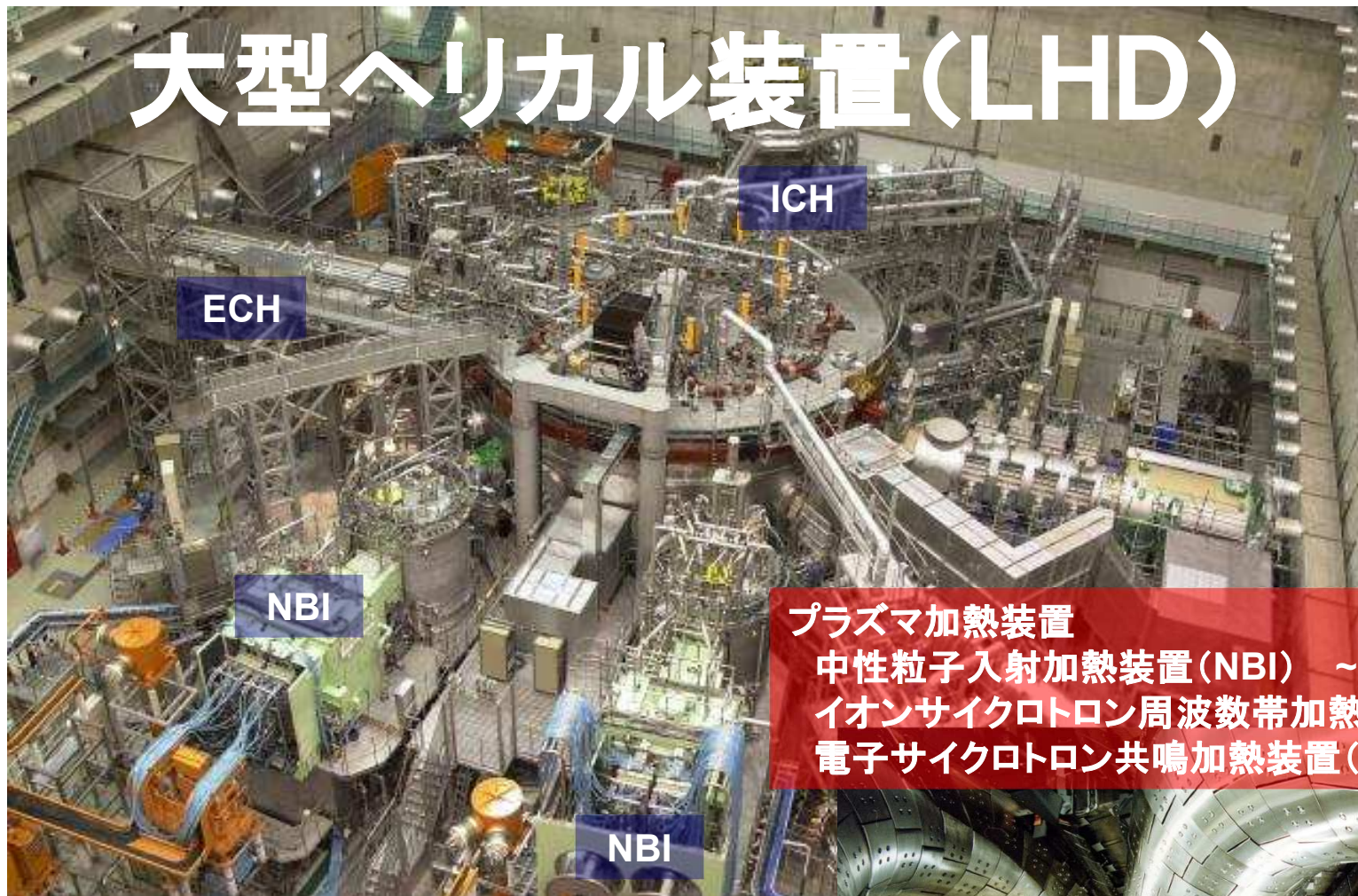


## 核融合炉心部(模式図)



# 大型ヘリカル装置(LHD)

1990年  
建設開始  
1998年3月  
実験開始



プラズマ加熱装置  
中性粒子入射加熱装置(NBI) ~30MW  
イオンサイクロトロン周波数帯加熱装置(ICH) ~3MW  
電子サイクロトロン共鳴加熱装置(ECH) ~2MW

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



プラズマ真空容器内部



# 目指せ! ガンダム -小型化、非中性子炉への挑戦-

18m



3m

ガンダムは核融合炉( $D+{}^3\text{He}$ 、出力1000万kW; 原発10機分)で起動

$D+{}^3\text{He} \rightarrow$

${}^4\text{He}(3.7\text{MeV})+H(14.7\text{MeV})$

H、 ${}^4\text{He}$ を使った直接発電が可能。トリチウム増殖は不要。  
 $\Rightarrow$  ブランケットは不要。

- D-T炉に比べて7倍の高温が必要。
- ${}^3\text{He}$ は地球上にない(月の表面には豊富に存在)。

1000万kWを $3^3\text{m}^3$ 以内で収めるのには、新しい方式が必要??  
(ミノフスキー核融合炉???)