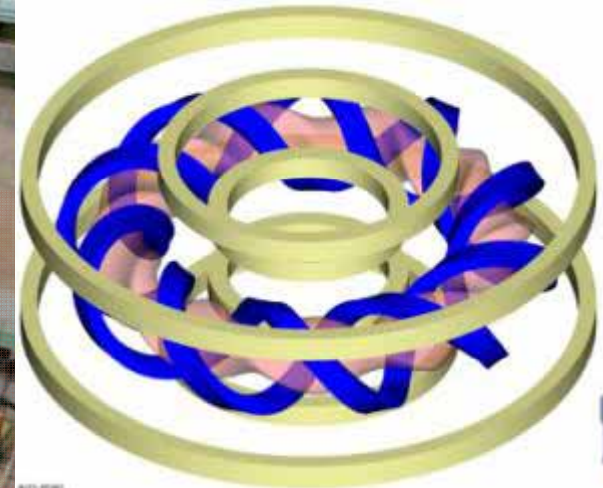
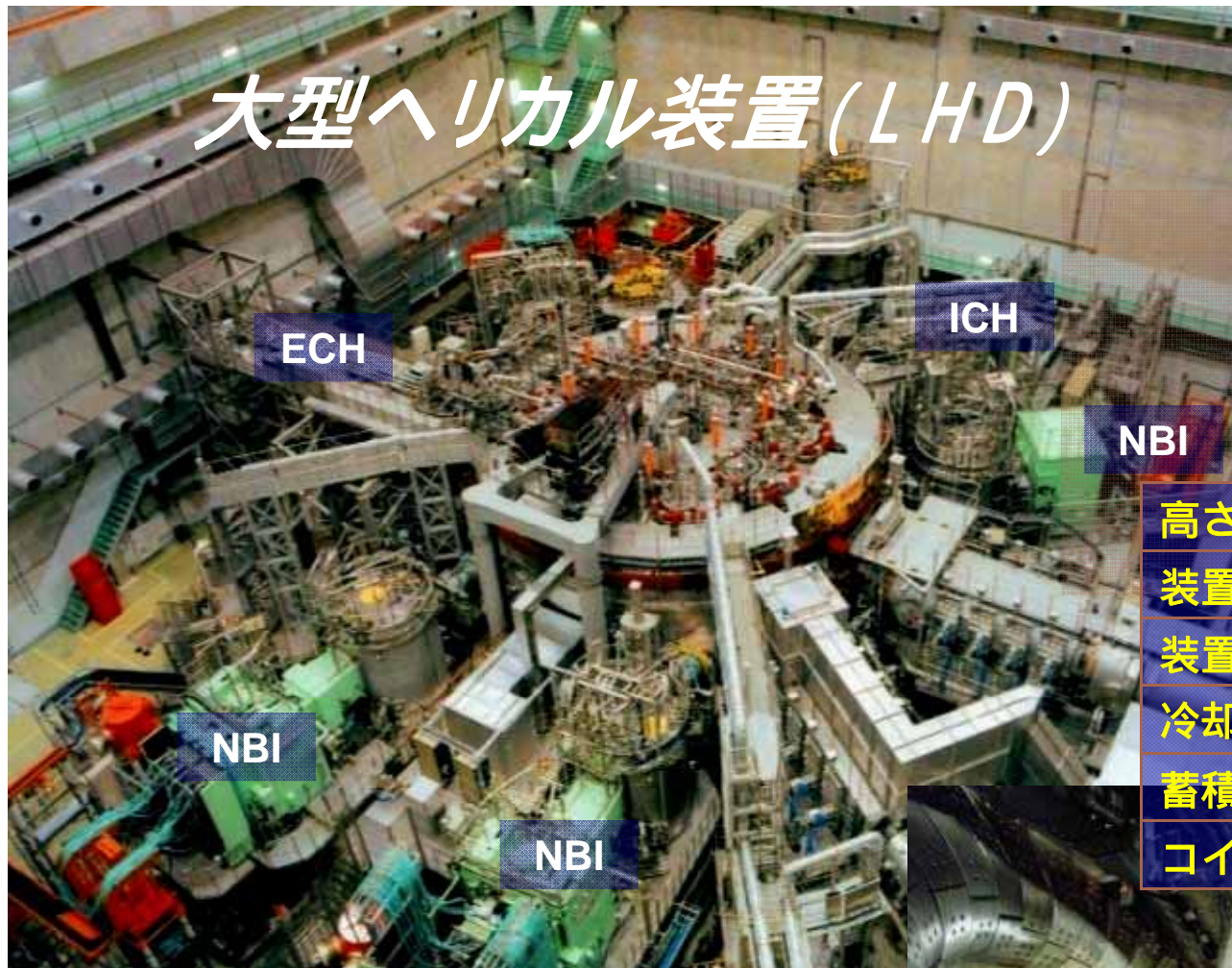


# 大型ヘリカル装置(LHD)



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

- ・ 世界最大の超伝導定常核融合実験装置  
プラズマ主半径：3.9 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
- ・ 13回の長期運転を実施、LHD超伝導・低温システムの高い信頼性を実証

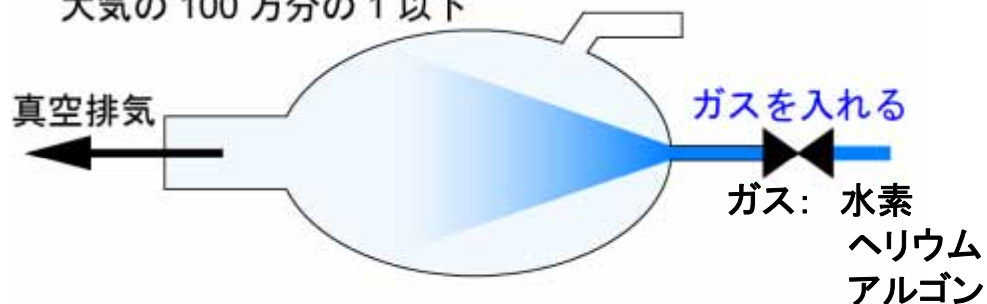


プラズマ真空容器内部

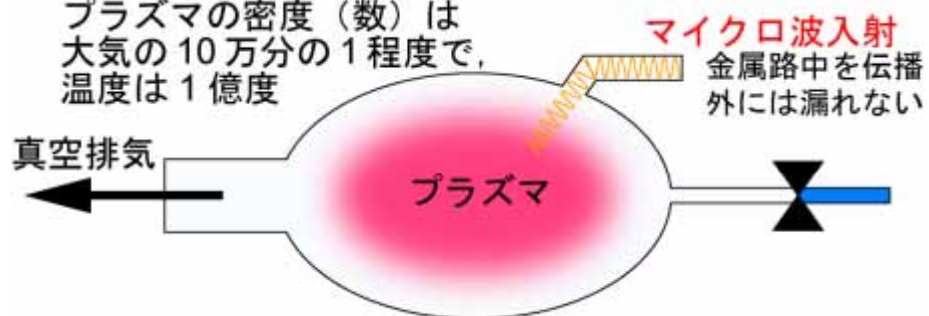


# LHDのプラズマ

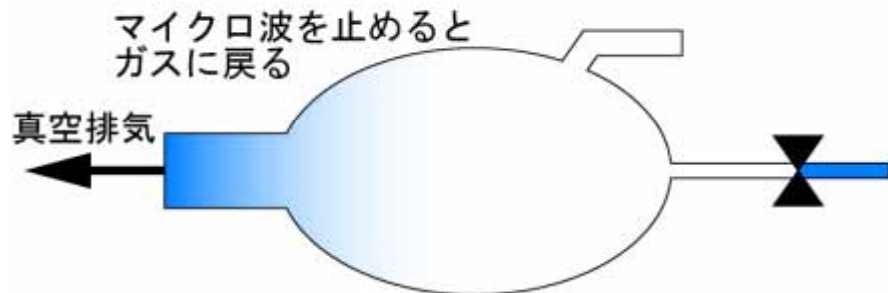
ガス分子の密度（数）は  
大気の100万分の1以下



プラズマの密度（数）は  
大気の10万分の1程度で、  
温度は1億度



マイクロ波を止めると  
ガスに戻る



磁場の籠で壁から浮かす  
→ 高温度になる





# LHD計画の現状

## 達成値 [最終目標]

### 中心イオン温度

水素ガス: 6,500万度 [1億2,000万度]  
16兆個/cc [20兆個/cc]

アルゴンガス: 1億5,000万度、密度3兆個/cc

### 中心電子温度

1億2,000万度 [1億2,000万度]  
密度5兆個/cc [20兆個/cc]

### 体積平均ベータ(プラズマ圧力/磁場圧力)値

5.1 % (磁場 4250 ガウス)  
[ $\geq 5\%$  (磁場 1 - 2 万ガウス)]

### 密度

中心密度1,200兆個/cc (温度300万度)  
[400兆個/cc]

### 定常運転

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

### 従来の核融合条件

1億度、100兆個/cc、1秒  
→ 核融合三重積  
プラズマ圧力条件  
ベータ( $\beta$ )値5%

核融合実現の温度条件に到達

プラズマ圧力条件に到達  
世界最高の定常ベータ値

新しい核融合条件(超高密度・低温度)  
新しい炉へのシナリオ

核融合実現の密度条件の12倍を達成

世界最高の入力エネルギー値

→ さらなる学術的、体系的探究に道を開く成果



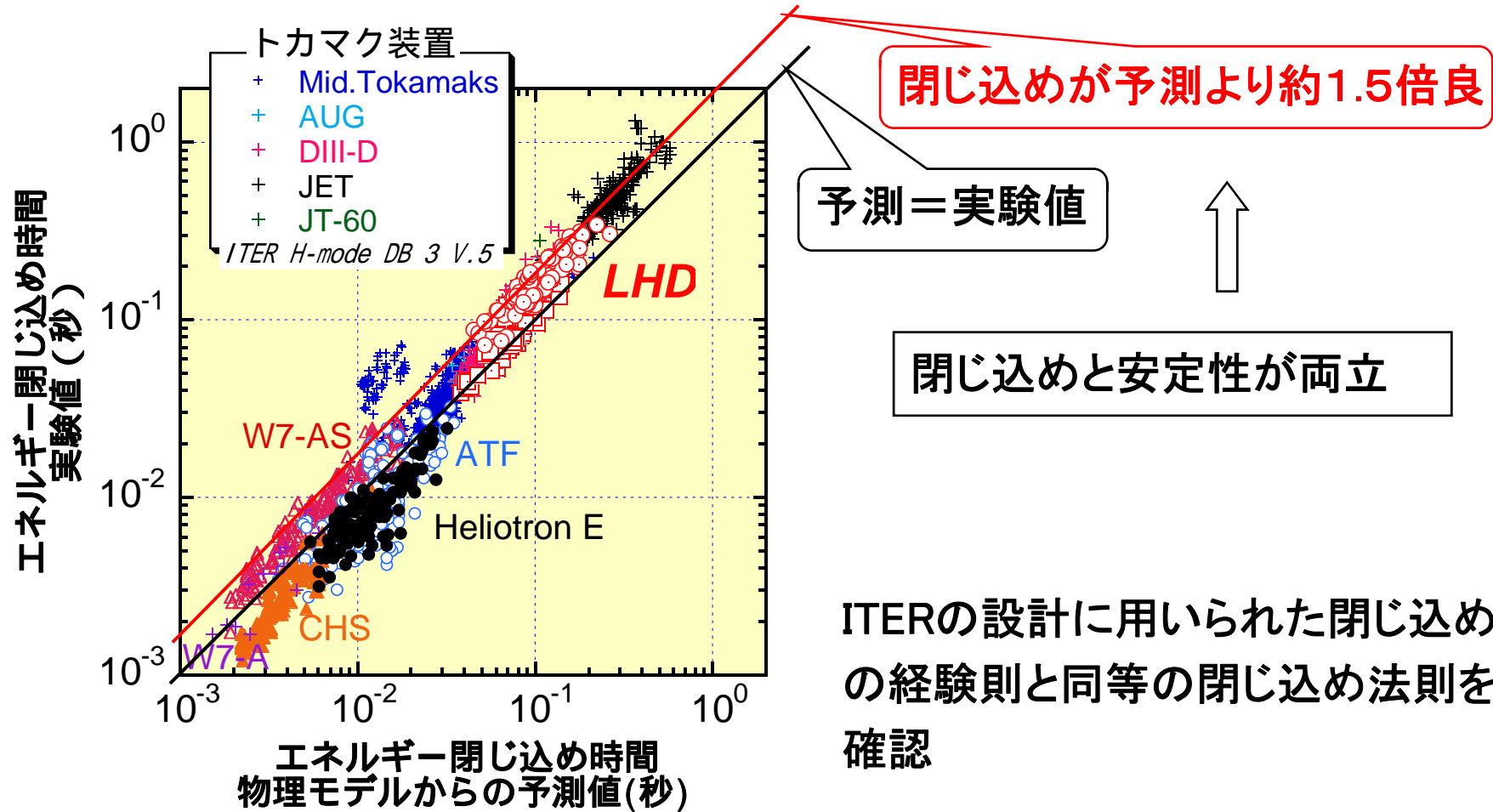
# LHD規模の装置ではじめて プラズマの閉じ込めの精密な基礎研究が可能に

## 研究成果のハイライト

- ✓ 理論との精密な比較が可能に
- ✓ 閉じ込め性能と安定性能が両立することを発見  
↓ ← 帯状流の発見  
予測を上回るプラズマ閉じ込めの実現  
不安定性の影響が極めて小さい
- ✓ 従来の核融合条件を大幅に上回るプラズマ密度の実現  
↓  
新しい核融合炉へのシナリオの作成が可能に
- ✓ プラズマの中心部から不純物が吐き出される「不純物ホール」の発見  
↓  
輻射が抑えられるため、より高温プラズマが実現可能に
- ✓ 多くの非線形現象、非局所現象を発見



# プラズマの閉じ込めに関する経験則



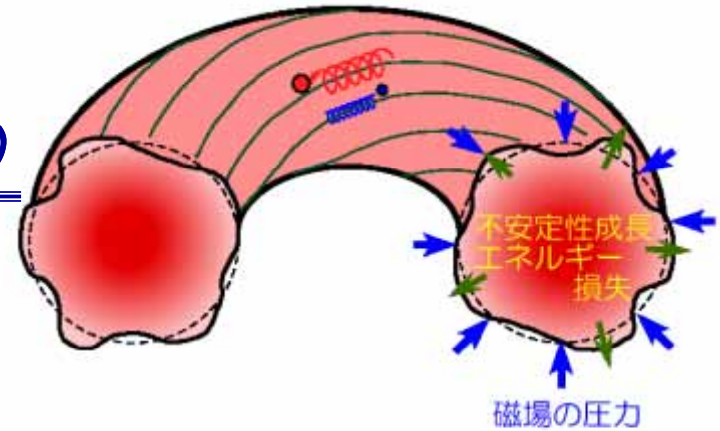
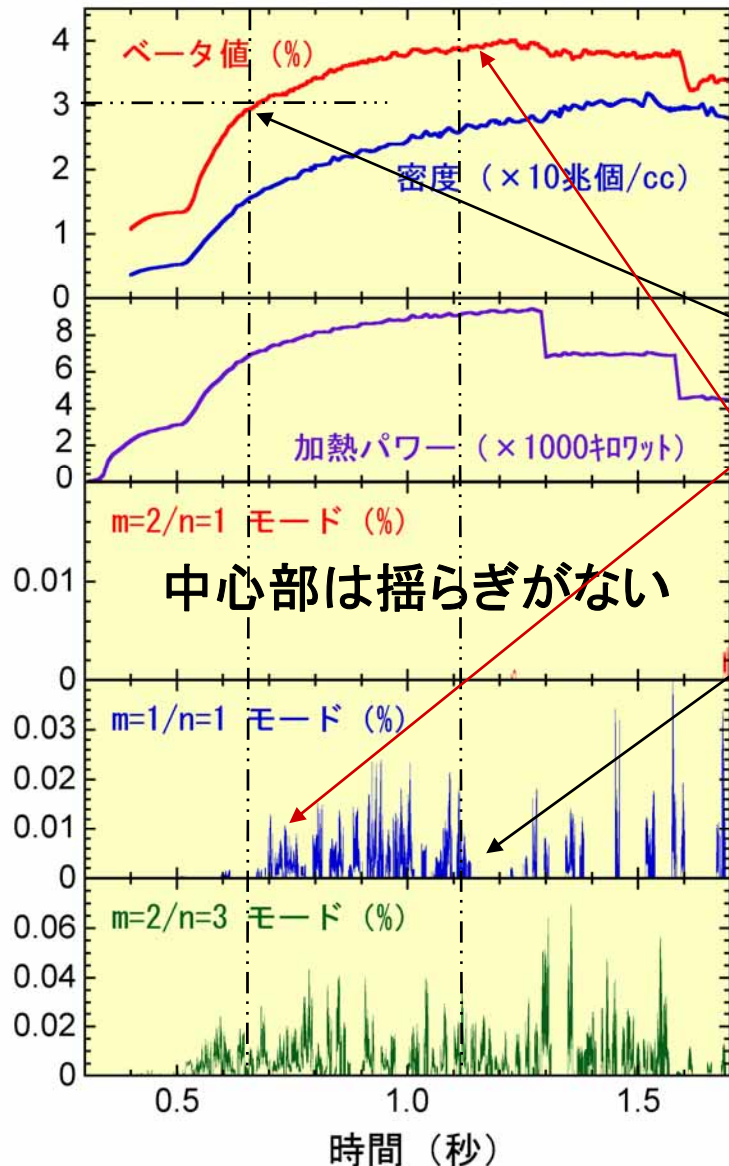
ITERの設計に用いられた閉じ込め  
の経験則と同等の閉じ込め法則を  
確認

$$\tau_E^{\text{ISS04}}(s) = 0.134 \times a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} n^{0.54} B^{0.84} t^{0.41}$$

$$\propto \rho^{*-0.79} \beta^{-0.18} \nu^{*0.00} t_*^{1.06} \epsilon^{-0.08}$$



# プラズマの高い安定性を実証(高 $\beta$ 実験)



ベータ値(プラズマの圧力と磁場の圧力の比)が3%を超えると、プラズマの周辺部に、磁場の揺らぎが発生

↓  
1秒を過ぎると揺らぎは断続的に見られるものの、抑制され、ベータ値が4%に到達 ⇒ 揺らぎの影響は小

↓  
プラズマが自発的に安定を保つ機構が存在することを示唆

↓  
5.1%のベータ値を達成、さらに高いベータ値実現へ

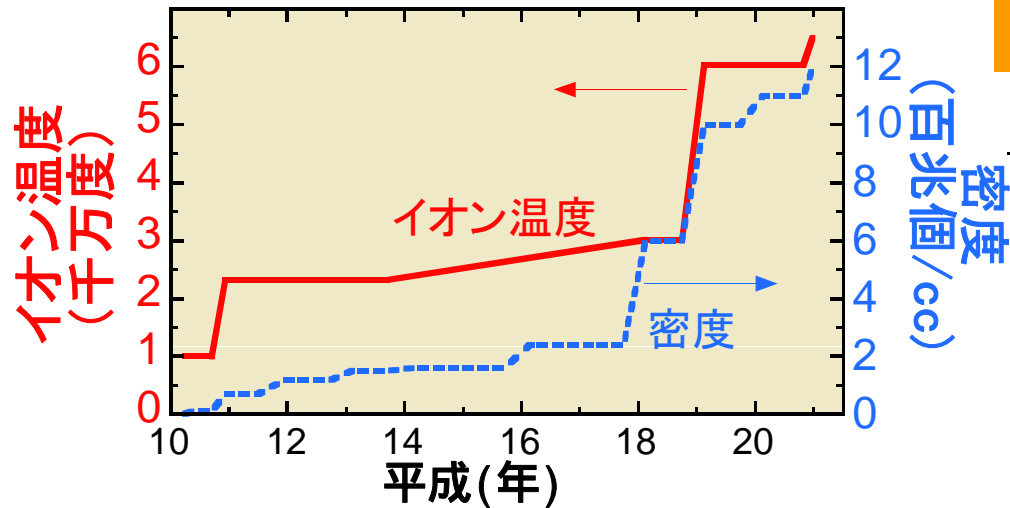
経済的な核融合炉には5%以上のベータ値が必要



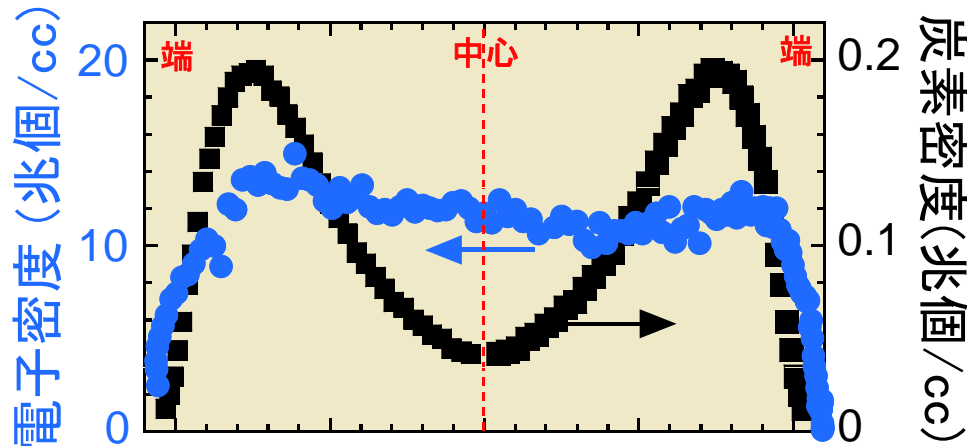
# 着実な性能向上と物理の新発見

目標達成の明るい見通し→7合目

平成10年の実験開始以来の性能向上



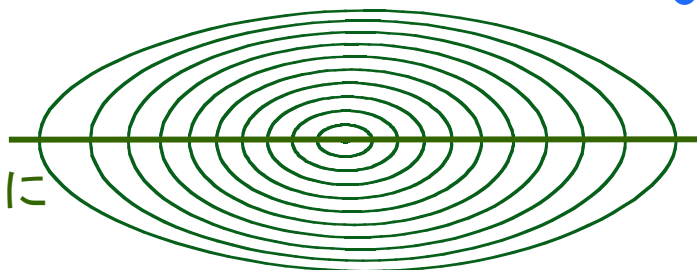
- **イオン温度** 6,500万度
- **中心密度** 1,200兆個/cc  
従来型核融合条件の10倍以上  
→ **革新的な超高密度シナリオ**



電子と炭素イオンの分布

- イオン温度の上昇とともに **不純物の吐き出し**を確認  
温度を上げることに好都合  
中心部の不純物は0.3%以下
- 異なった物理量の干渉

プラズマ断面に沿って計測





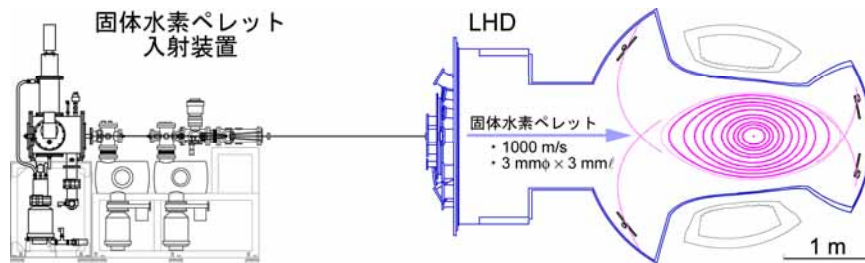
# 超高密度プラズマの生成

- 生成シナリオ

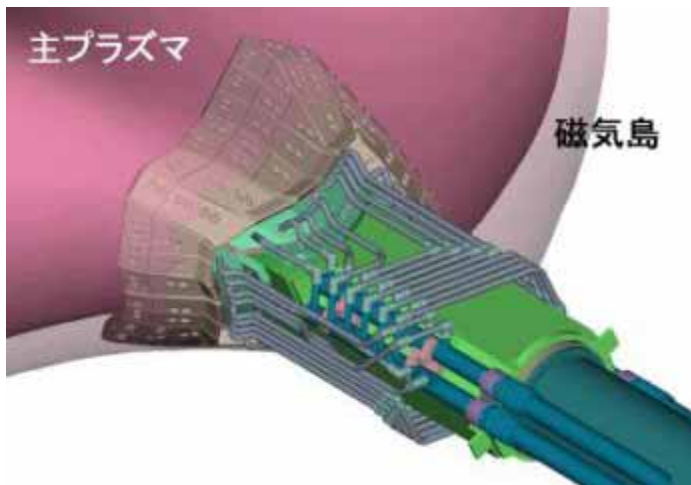
粒子制御(固体水素ペレット+強力な粒子排気) → 内部拡散障壁(IDB)の形成

→ 閉じ込め改善

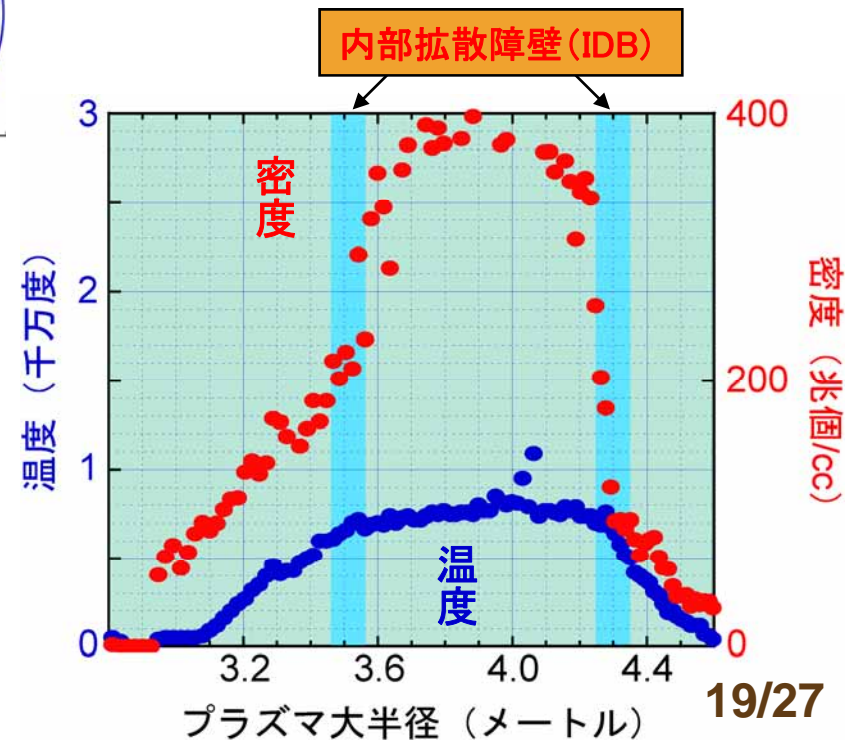
- 固体水素ペレット入射 (燃料粒子補給)



- 高効率粒子排気(LIDダイバータ )



この原理により  
1,200兆個/ccの高密度  
プラズマの実現





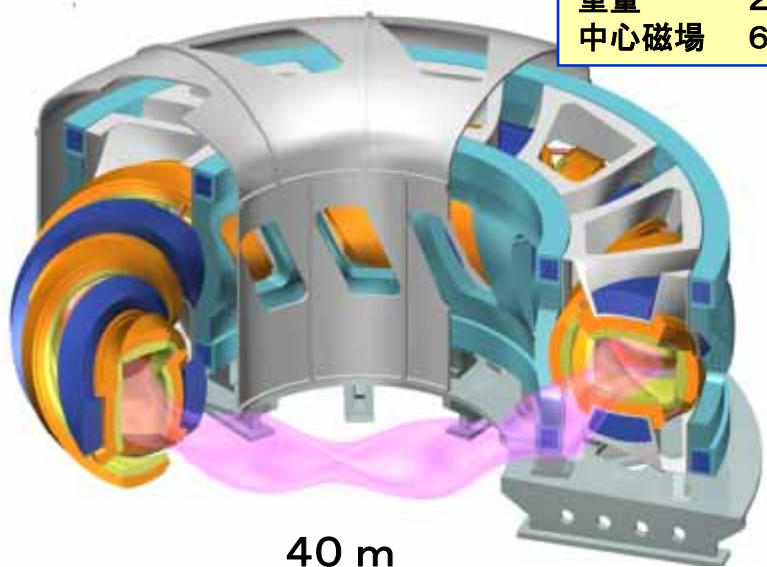


# 高密度運転による新たなシナリオ

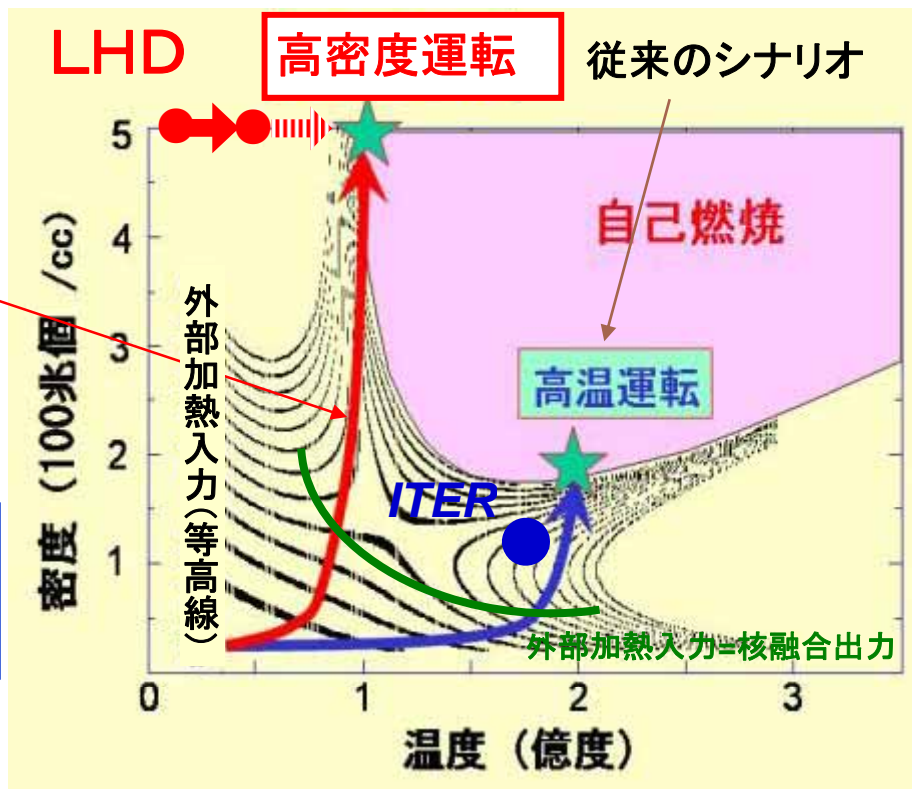
内部拡散障壁 (IDB) という新しい物理の効果  
点火の新しいシナリオ (高密度点火)

## LHD型ヘリカル炉

電気出力 100万kW  
重量 2万5千トン  
中心磁場 6万ガウス



40 m

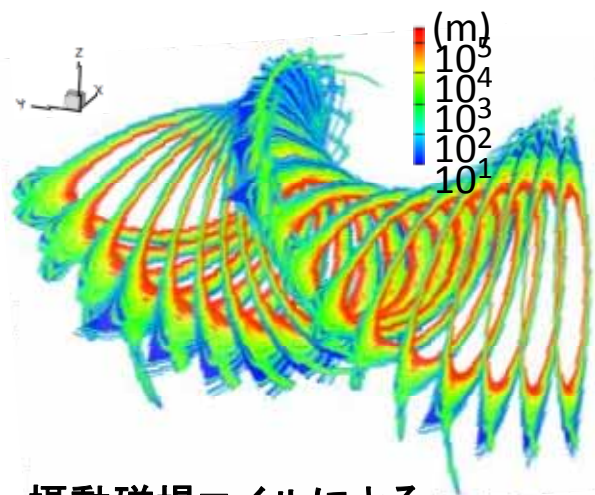


- ・ 電流駆動が必要で、不安定性による運転密度限界があるトカマクでは不可能な高密度運転が可能
- ・ 高密度運転はダイバータ熱負荷や第一壁損耗などの工学要求を大きく軽減
- ・ 現在のLHDから炉への条件を緩和

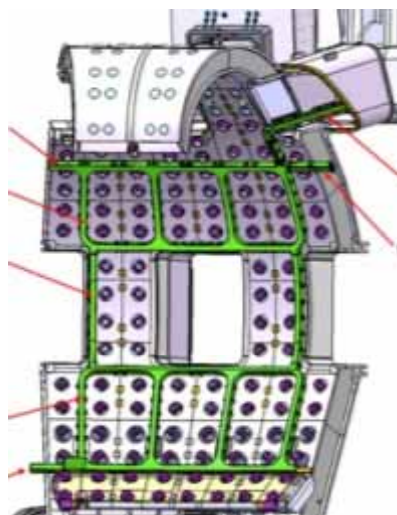


# 環状プラズマにおける3次元の物理

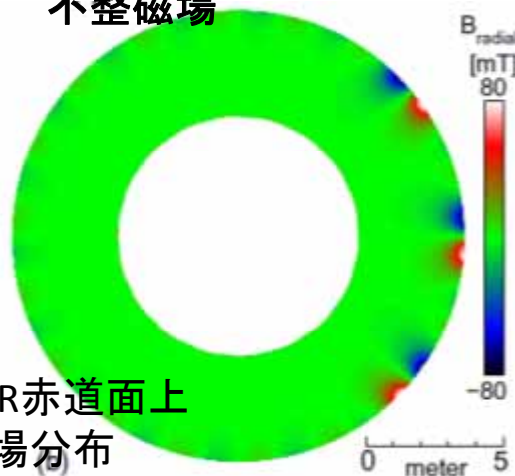
**ヘリカル方式**：本質的に3次元であるため、元々3次元で研究  
**トカマク方式**：軸対称性の破れを考慮する必要(精密化) → 3次元



摂動磁場コイルによる  
周辺プラズマの安定化

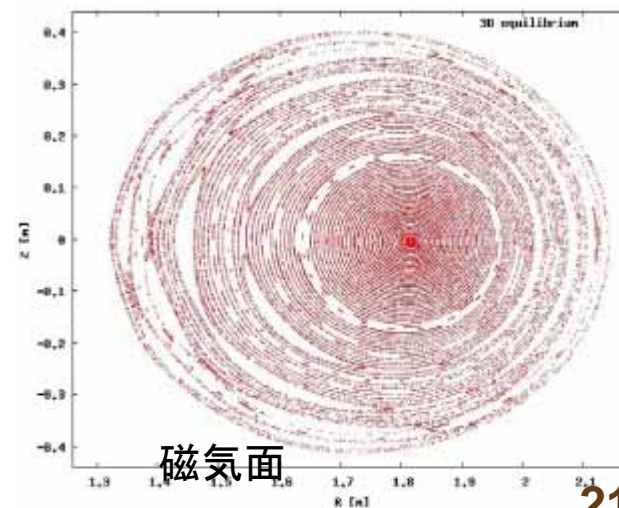


磁性材料使用による  
不整磁場



ITER赤道面上  
磁場分布

磁気島の発生と抑制



→ ヘリカル系における研究で概念・手法が発展  
基礎理論からの高い学術性が要求  
精密科学としてのプラズマ物理学

例：LHDにおける周辺部のカオス的磁気面における  
3次元輸送解析

→ トカマク方式の設計に寄与  
特に、ITERに関連して喫緊の課題

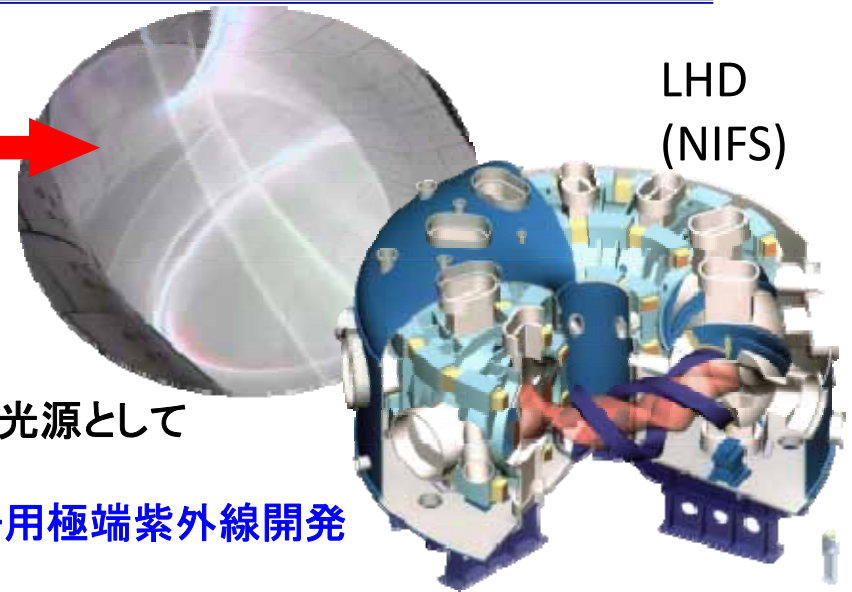


# 分野間連携による相乗的進展・新たな学問分野の創成



Hinode  
(NAOJ,  
JAXA)

太陽コロナの理解を  
目指した共同研究が進行



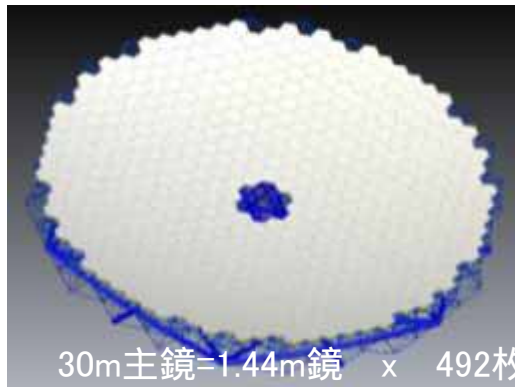
LHD  
(NIFS)

LHDプラズマを光源として  
X線天文学、  
リソグラフィー用極端紫外線開発

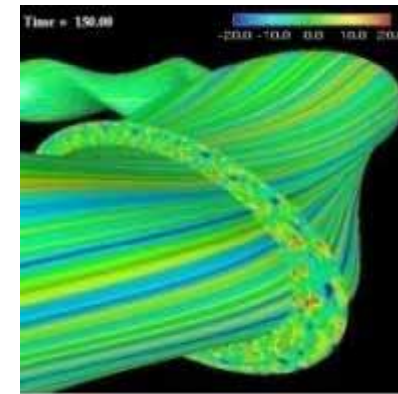
## 新分野創成に向けた取り組み

- イメージングサイエンス (→機構・新分野創成センター)
- 自然界における階層と全体の科学(連結階層シミュレーション)
- プラズマ物理とナノサイエンスの融合

次世代超大型望遠鏡のための  
マイクロ波による鏡試作開発  
核融合研・国立天文台共同



30m主鏡=1.44m鏡 x 492枚





## 今後の課題: 重水素を用いたプラズマ閉じ込め研究 —未解決の問題に学術的に取り組む—

### 核融合燃焼プラズマの精密な予言の基盤

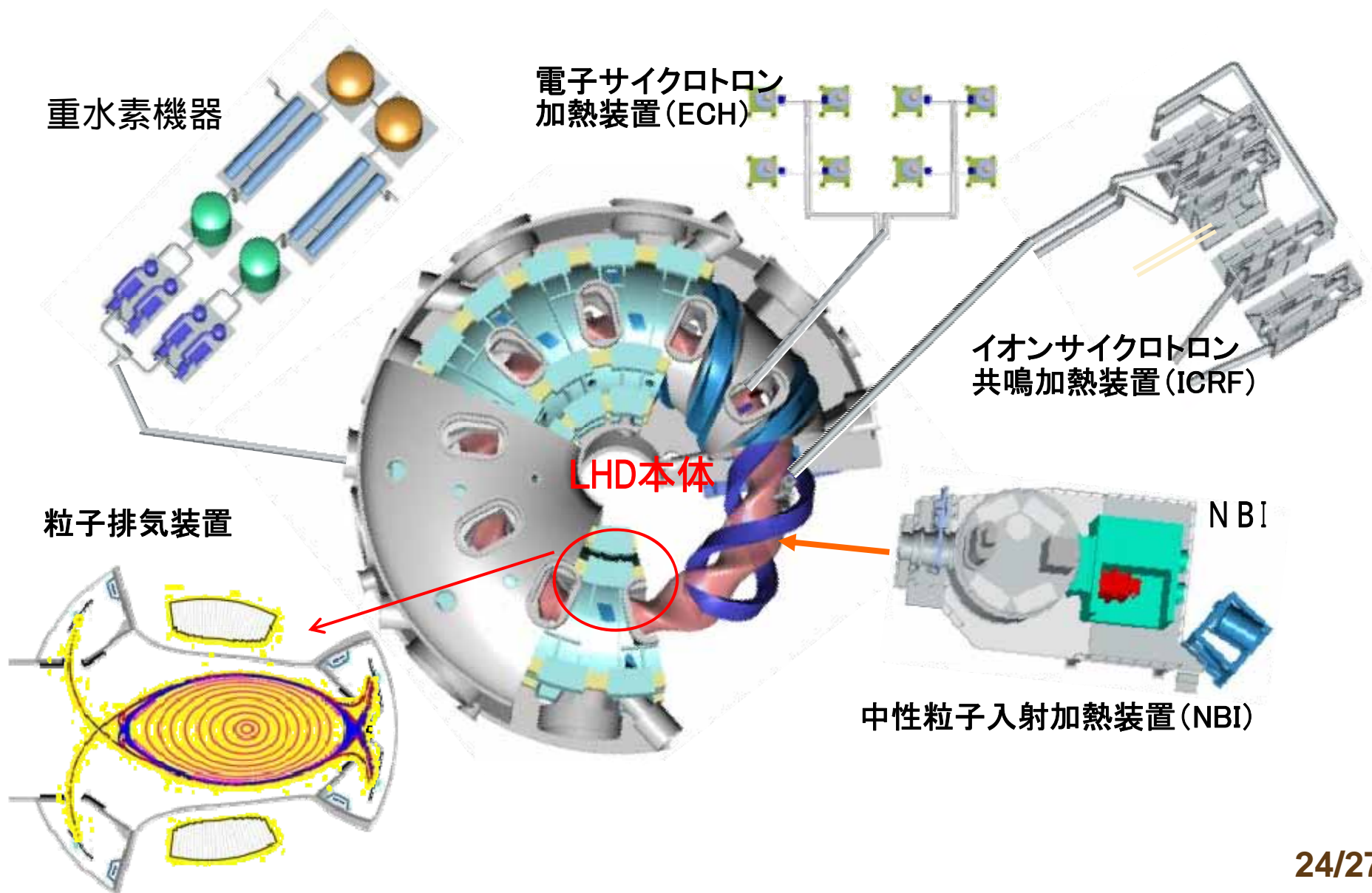
1. 重水素による閉じ込め性能向上 (トカマクでの観測) → プラズマの高性能化
2. 閉じ込め改善の物理  
イオン質量数効果、閉じ込め改善の度合い、温度・密度の構造分布  
乱流による輸送の抑制、核融合炉プラズマへの外挿性
3. プラズマと壁の相互作用がプラズマ閉じ込めに与える影響  
金属や軽元素の壁によりプラズマ閉じ込めが変わるのはなぜか
4. プラズマ性能の限界や寿命の予測  
定常プラズマ研究の重要課題

重水素を用いたLHD実験はこれらの問題解明に寄与



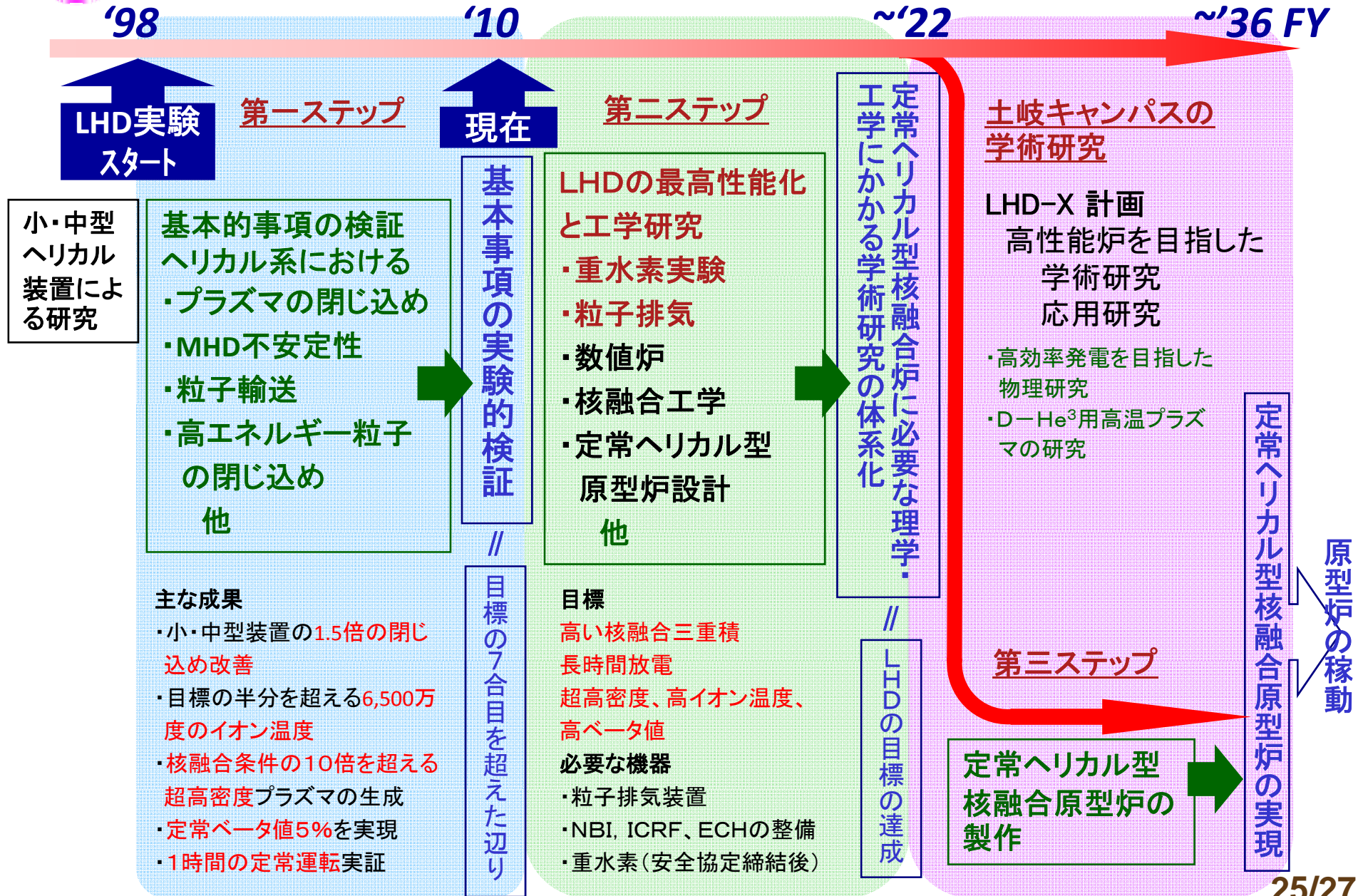
# LHD最高性能化

重水素実験(協定締結後実施)





# LHD計画と核融合炉へのロードマップ概略





# 研究の進展による収斂と展開



## 1. 核融合原型炉の早期実現のカギ

① 核燃焼の実証・制御 → ITER

② 定常運転

→ { LHD : 高性能プラズマの実現

{ JT-60SA : 定常運転の実証、循環エネルギーの最小化の実証

2. 合理的な選択を研究者が責任を持って行える最低条件

3. 共同利用・共同研究、連携、人材育成

4. 広がり・学術の基盤(大きな挑戦を支え、可能とする)



# 核融合科学研究所は大学共同利用機関として コミュニティから高い信頼と大きな期待を 持たれています

## 研究面

世界最先端の研究現場  
充実した共同研究制度  
文献・データベースサービス

## 運営面

コミュニティの意見反映  
コミュニティ形成支援  
透明性と公開性

## 教育面

総研大  
連携大学院  
特別共同利用研究員

高い外部評価

核融合研究は将来のエネルギー問題を解決するという社会への高い貢献が期待されている息の長い研究課題です

また、対象とする高温・高密度プラズマ物性は非線形現象の支配する学術研究の宝庫でもあります

核融合科学研究所は大学研究の中核拠点として、大学と共に、核融合炉の実現と新しい学術課題の発見への期待を持ち、LHDを中心とした世界最先端の学術研究活動をプロジェクト研究を中心として展開していきます

また、将来を担う若手研究者の育成も大学のもっとも重要な使命として行っていくます

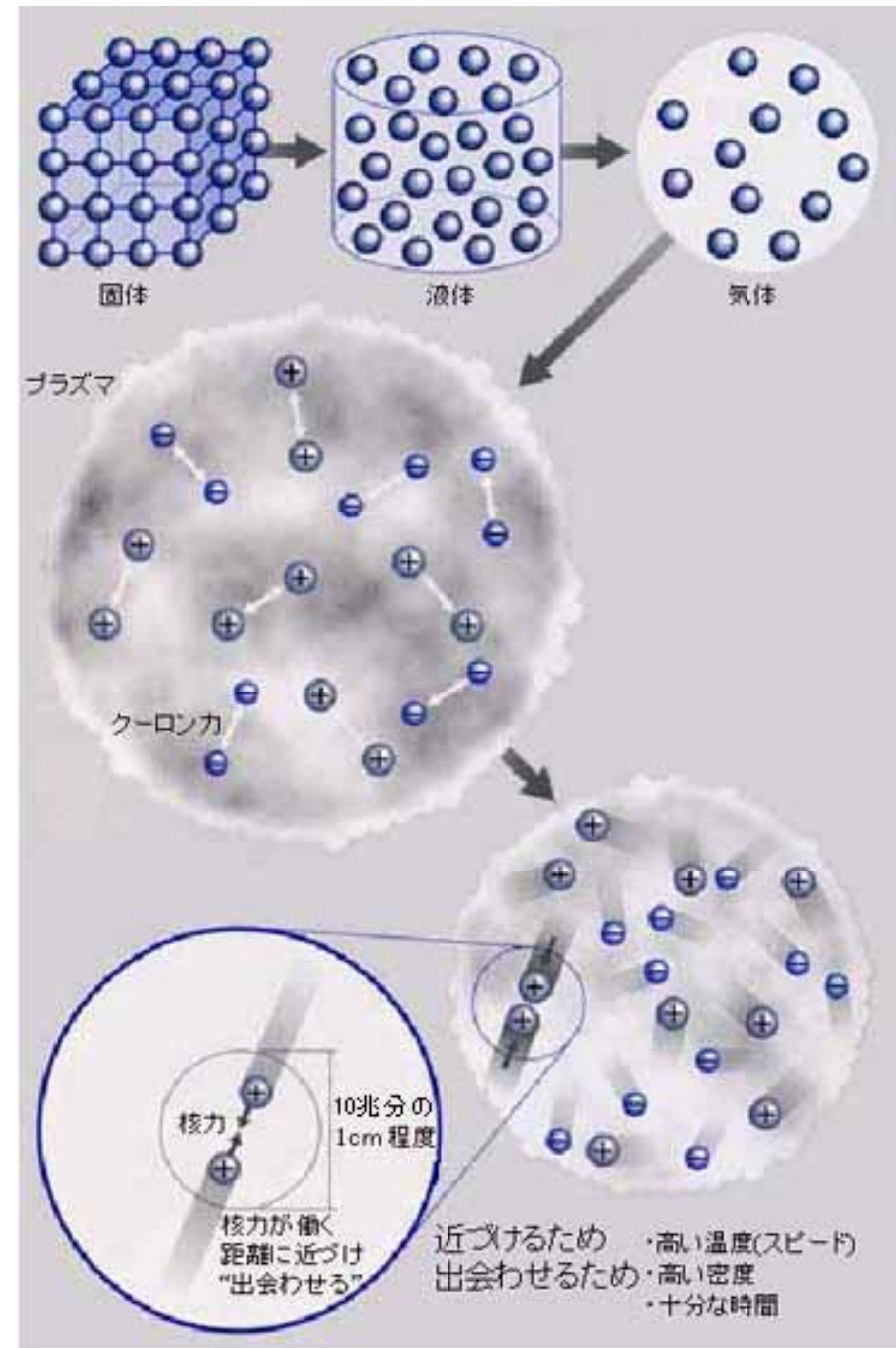


以下 參考資料



## 太陽で起こっている核融合反応を地上で起こすには太陽よりもはるかに高い温度が必要

- ・原子核同士を融合させるためには、クーロン力に逆らって、粒子同士を超高速で正面衝突させる
- ・そのためには、物質を電子と原子核がバラバラな状態のプラズマにし、高温(高スピード)・高密度にすると共に、十分長い時間このようなプラズマを閉じ込める
- ・プラズマは第4の物質状態



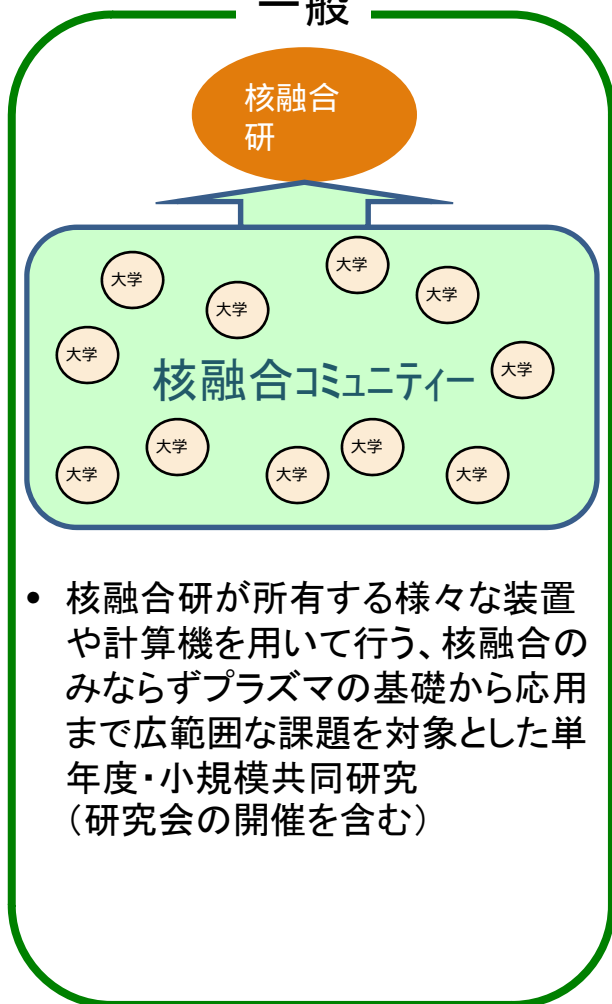


# 共同利用・共同研究の現状

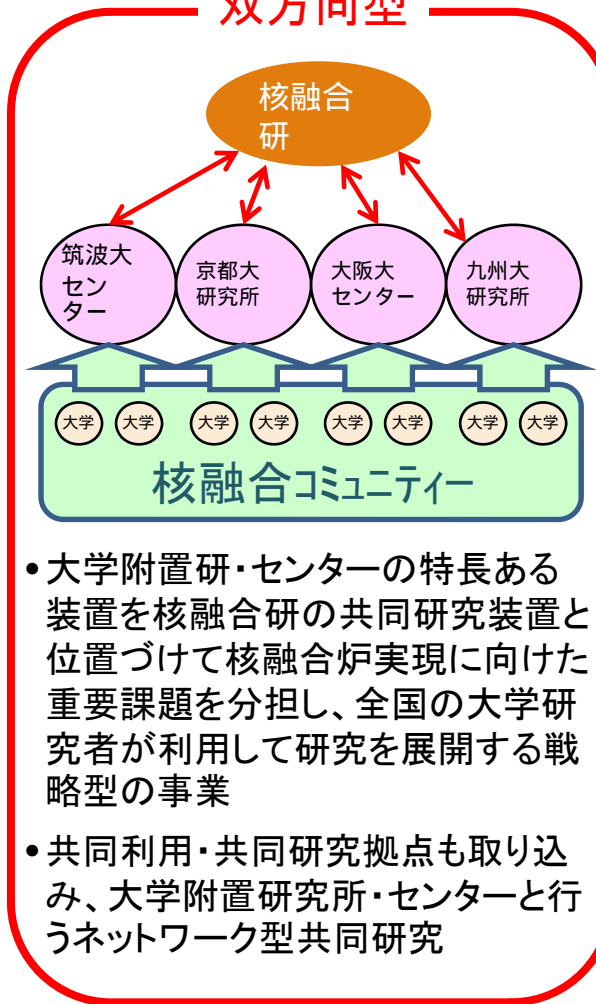
現状

3つの異なる形式により幅広い共同研究を推進

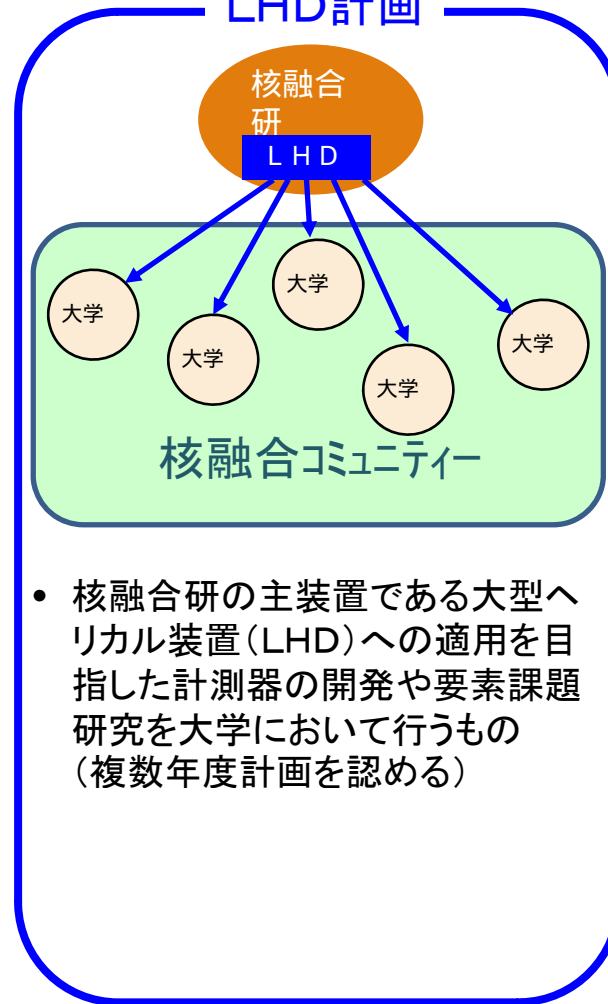
一般



双方向型



LHD計画



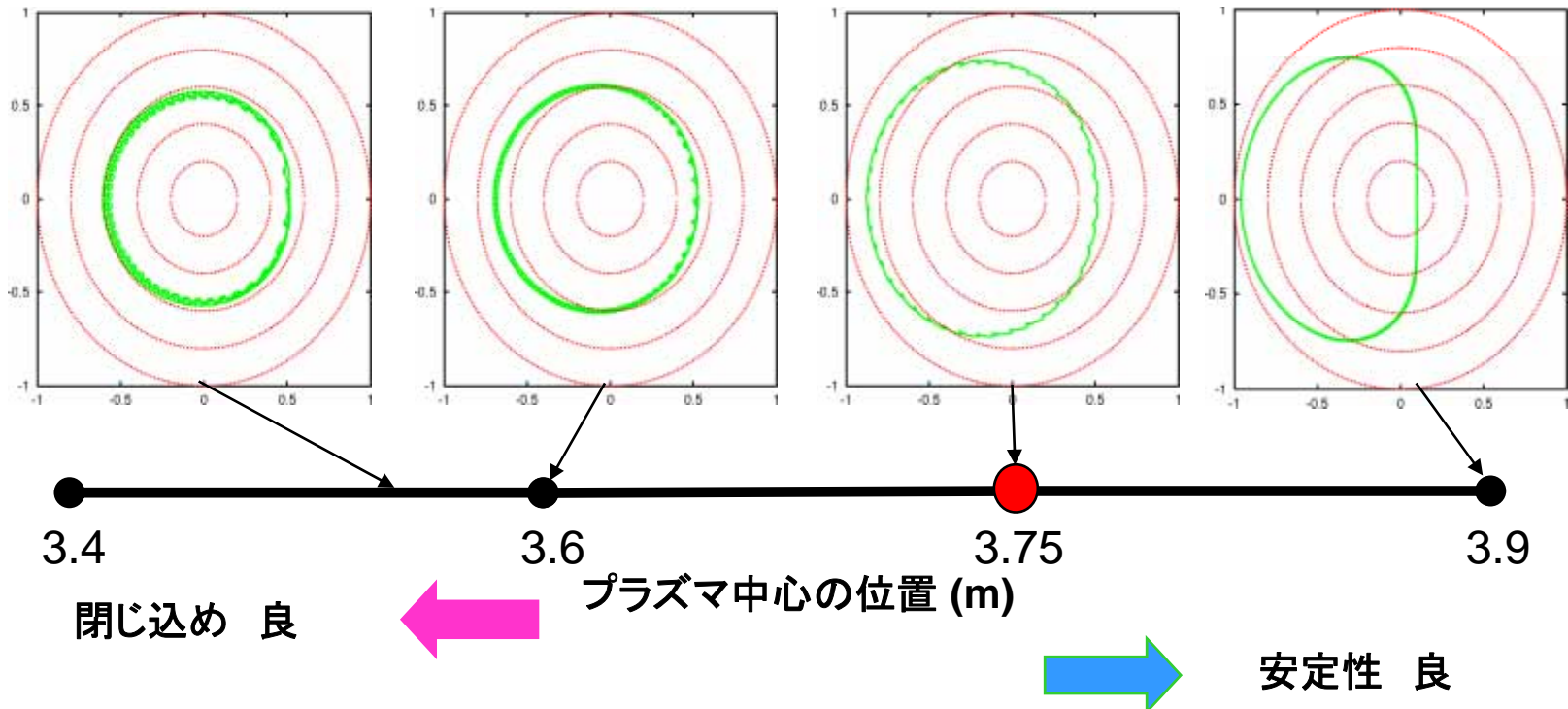
多様化する大学やコミュニティのニーズを的確に反映



## 閉じ込め性能と安定性能が両立することを発見

理論的に、

粒子の閉じ込めが良いプラズマ位置と  
プラズマが安定で維持されるプラズマ位置  
は両立しないと考えられていた



プラズマの位置が3.6 m付近の内寄せと呼ばれる位置で、両者が成り立つことを実験的に発見

↓  
予想を超える閉じ込め性能の実現



# LHDによる定常プラズマの最高性能化

炉心プラズマ性能	現状 1	現状 2	達成目標	発電原型炉
温度	6,500万度	1,200万度	1億度	8,000万度以上
密度	16兆個/cc	6兆個/cc	20兆個/cc	600兆個/cc
保持時間	1秒	1時間	3秒	1年

- ① 温度1億度、密度20兆個/ccの高性能定常プラズマの実現 → 炉心プラズマへの確信  
 ← 発電原型炉との大きさの違いを考慮すれば、炉心プラズマと等価な性能
- ② 入力パワーが3MW以上の高温プラズマを1時間安定に持続  
 ← 今後10年以上、世界的にも他の実験計画では、数分までに留まる  
 ← 世界唯一無二の実験データを蓄積でき、世界をリード

今後、核融合燃焼の実証と定常制御研究の双方が必要であり、  
 両者を同時に実施している事によって核融合研究開発を加速できる  
 日本では2015年までLHDが唯一の大型実験装置



## トカマク方式大型装置

- JET(英、EU) 稼働中、運転時間 60秒
- JT-60SA(日本原子力研究開発機構) 建設中  
2016年実験開始予定、運転持続時間目標 100秒
- ITER(仏、ITER機構) 建設中  
2026年より核燃焼実験、運転持続時間目標 1,000秒

## ヘリカル方式大型装置

- LHD(核融合科学研究所) 稼働中、運転持続時間実績 1時間
- W7-X(独、マックスプランク研究所) 建設中  
2015年実験開始予定、運転持続時間目標 30分