

核融合研究作業部会  
平成24年5月31日

資料4-2

# 炉心プラズマ研究(ヘリカル) -大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクト-

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
核融合科学研究所

大型ヘリカル装置計画 実験統括主幹 竹入康彦

**NINS**  
National Institutes of Natural Sciences



写真:大型ヘリカル装置(LHD)の真空容器内部

# 磁場閉じ込め核融合原型炉へ向けた炉心プラズマの課題

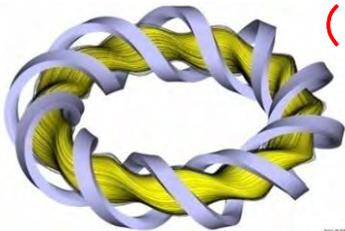
核融合発電炉の早期実現のカギ

二大課題 = 核燃焼(重水素と三重水素の核融合)と定常運転

- ① 核燃焼の実証・制御 → 国際熱核融合実験炉(ITER)
- ② 定常運転  
(発電には定常運転が必須) → { 大型ヘリカル装置(LHD)と  
JT-60SA (原子力機構)を同時進行 }

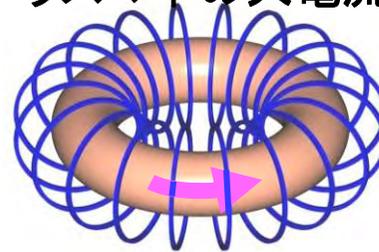
プラズマの閉じ込め: 磁力線を環状に回し、かつねじる → 2通り

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)



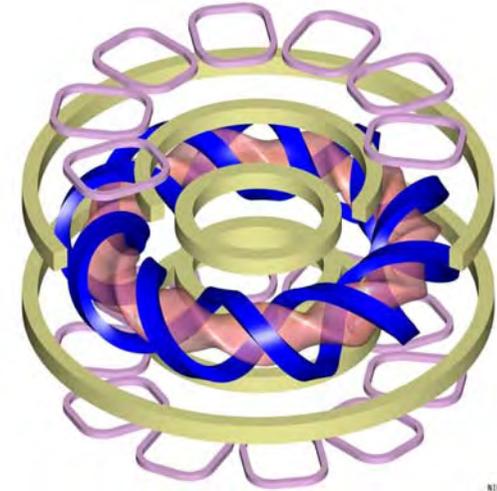
短時間運転 高性能プラズマを生成

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



# 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 (-270°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 : 3.9m
  - プラズマ小半径 : 0.6m
  - プラズマ体積 : 30m<sup>3</sup>
  - 磁場強度 : 3T (3万ガウス)
- ・ 1998年3月実験開始
- ・ 15回の長期運転を実施  
超伝導・極低温システムの高い信頼性を実証

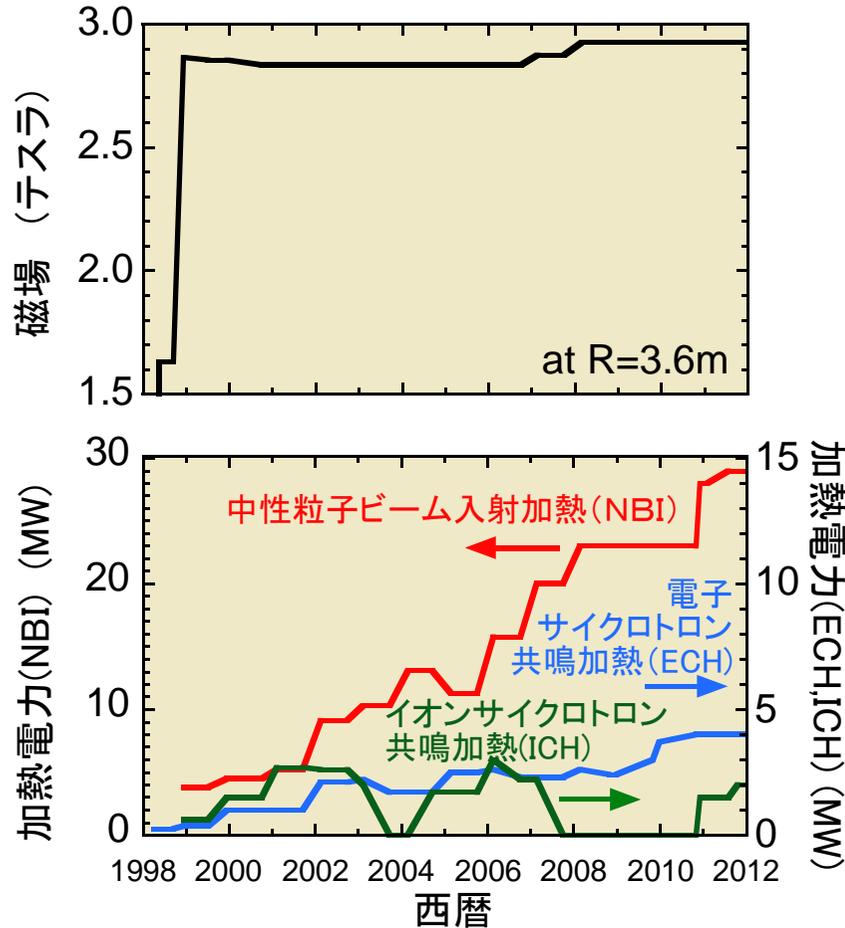


プラズマ真空容器内部

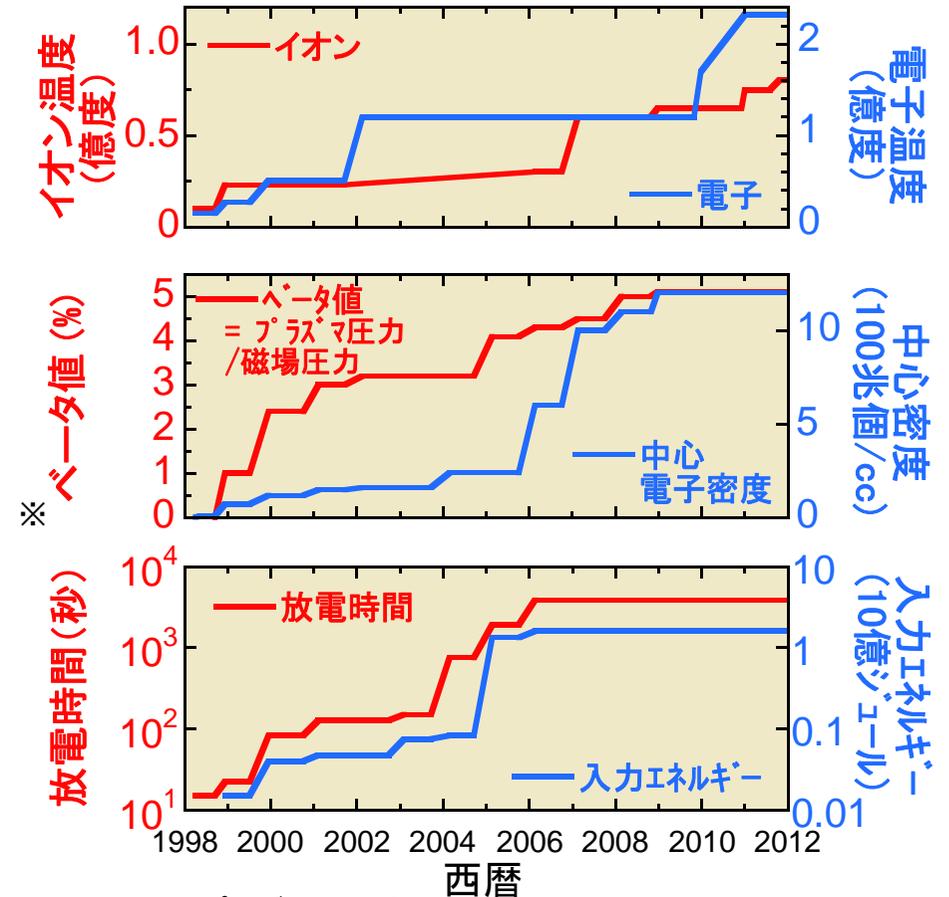


# 実験開始以来、14年間のプラズマ性能の進展

## 装置技術としての増強



## プラズマ性能の進歩



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

定常・安定性に優れたヘリカル方式と高い信頼性を持った超伝導コイルシステム  
 → 14年間で11万回以上のプラズマ放電を共同研究の機会として供してきた



# 大型ヘリカル装置のプラズマ性能

## 大型ヘリカル装置最終目標の7合目に至る

赤字は平成23年度達成

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	中性粒子ビーム入射 加熱装置改造による 目標値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	8,000万度 (密度15兆個/cc)	9,000万度 (密度16兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	1億2,000万度以上 100兆個/cc以上
電子温度	2億3,000万度 (密度2兆個/cc)	←	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	
密度	1,200兆個/cc (温度300万度)	←	400兆個/cc (1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場0.425 T) 3.4% (磁場1T)	4% (磁場1T)	5% (磁場1-2 T)	5%以上 (磁場5 T以上)
定常運転	54分28秒(500kW) 13分20秒(1MW)	←	1時間(3 MW)	定常(1年)



# 重水素実験を柱としたLHDの最高性能化

## LHD実験計画の基本理念

1. ヘリカル方式による原型炉設計を確実なものとするデータベースと体系的理解を築く
2. トロイダルプラズマの総合的理解を獲得する
  - トカマク方式を含めた相補性を学術基盤から問う
  - ITER等のトカマク方式の研究・開発の加速にもつながる
3. 共同利用・共同研究、大学等における学生教育を含めた人材育成を推進

- 閉じ込め改善による高性能化を実現して、より核融合条件に近い高性能プラズマの研究を可能とする。これによって新たな研究領域の開拓と実験の多様性を拡大する。
- 閉じ込め物理の質量依存性(同位体効果)を明らかにして重水素・三重水素プラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築する。
- 高エネルギーイオンの閉じ込め性能が燃焼プラズマを展望できることを示す。

## 数値目標

LHDの最終目標値を達成し、さらに内部拡散障壁を利用した超高密度プラズマ等により性能を拡大・伸長

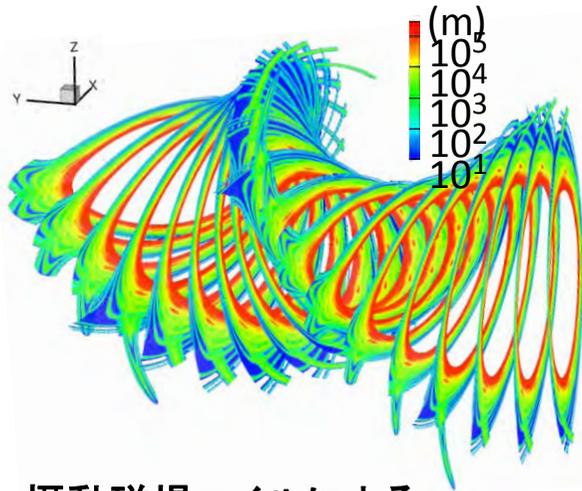
- 密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において中心温度10keVを越える高温高性能プラズマを生成維持
- 磁場1Tにおいてベータ値5%を達成し、さらに高磁場化による性能向上



# 環状プラズマにおける3次元の物理 -プラズマ物理の体系化-

**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

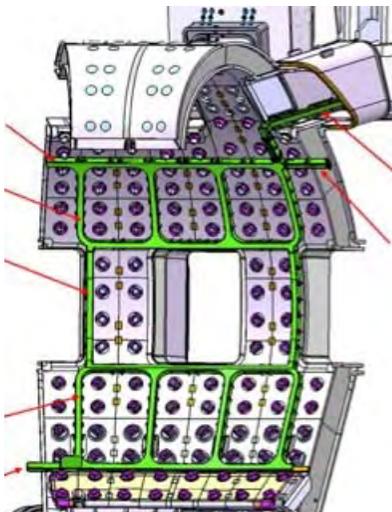


- ヘリカル方式における研究で概念・手法が発展
- 基礎理論からの高い学術性が必要
- 精密科学としてのプラズマ物理学

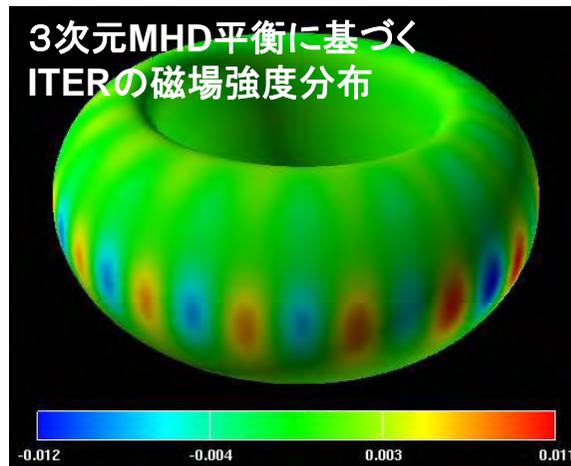
例：LHDにおける周辺部のカオス的磁力線領域における3次元輸送解析

→ 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

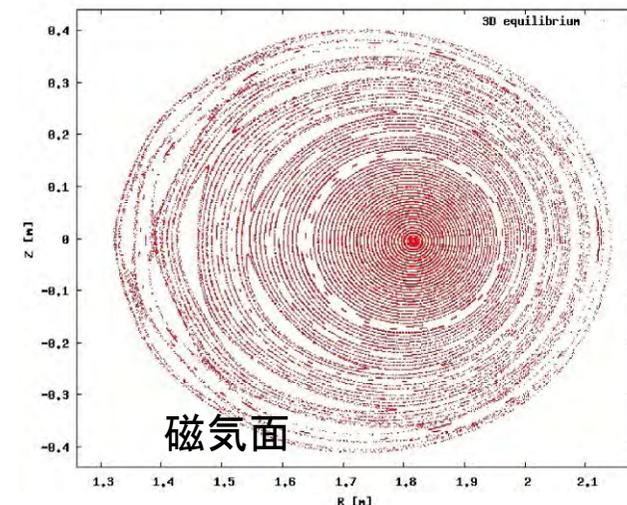
摂動磁場コイルによる  
周辺プラズマの安定化



磁性材料使用による  
不整磁場



磁気島の発生と抑制



磁気面

# 審議会における審議状況

## ○科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

学術研究の大型プロジェクト推進について（審議のまとめ） 平成22年10月27日

「高性能核融合プラズマの定常実証研究」は、

「基本的な要件が満たされており、一定の優先度が認められる計画（18計画）」

- ・ 2計画（注：大型ヘリカル装置とJT-60SA）が並行して進められることとなるが、それぞれに特色があり、相互のポジティブフィードバックが期待。
- ・ 我が国のエネルギー問題解決への寄与が期待され、国として進めるべき計画。

## ○科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 核融合研究作業部会

核融合研究作業部会 審議メモ 平成23年9月14日

### LHD計画（ヘリカル方式）による核融合研究の現状と課題

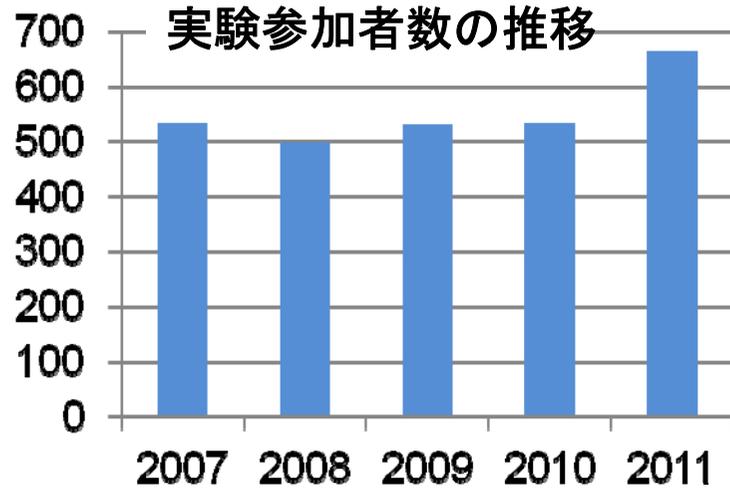
ヘリカル方式は本質的に定常運転に優れた概念である。超伝導コイルを有した大型ヘリカル装置（LHD）という実験設備と、実施主体である核融合科学研究所の大学共同利用機関としての共同利用・共同研究という手法の特徴を活かして、特に、プラズマの定常性に関わる学理の構築を図っている。JT-60SAの稼働までは、国内唯一の大型実験装置であり、我が国の磁場閉じ込め物理研究における国際的リーダーシップと人材育成を確保するために果たす役割は極めて大きいものがある。LHDを用いた研究によって原型炉開発の可能性を追求するためには、より核融合条件に近い高性能の定常プラズマを実現することが必要であり、今後、ダイバータ改造による熱粒子制御の向上や重水素の使用のための実験設備の拡充と定常及び安定性に関する学術的に重要な課題の解明に一層の努力を払う研究展開が必要である。（後略）



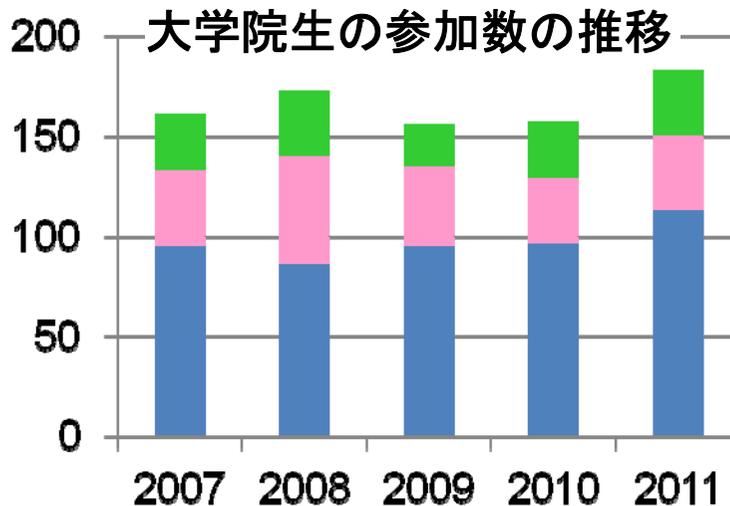
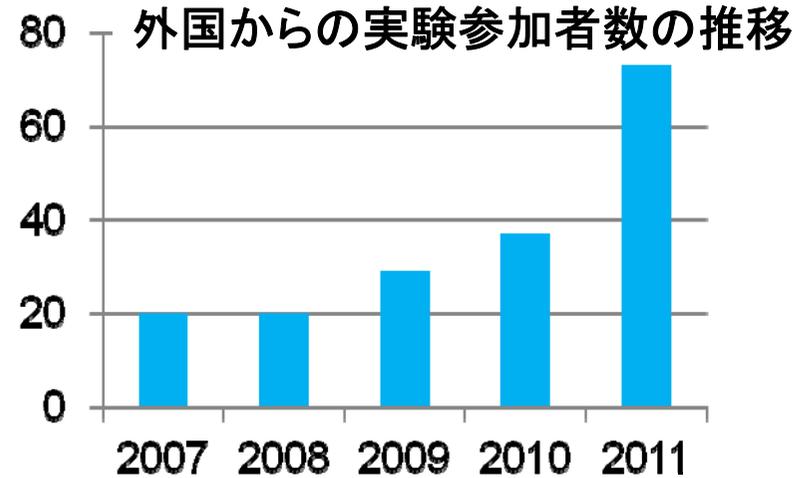
# 共同利用・共同研究と大学院教育・人材育成の推進

- 大型ヘリカル装置は全国共同利用装置、世界にも開かれている -

- 国内外から600名以上の研究者が実験に参加(所内内数は今年度113名)



- 外国からの実験参加が急増  
← LHDへの国際的期待の高まり

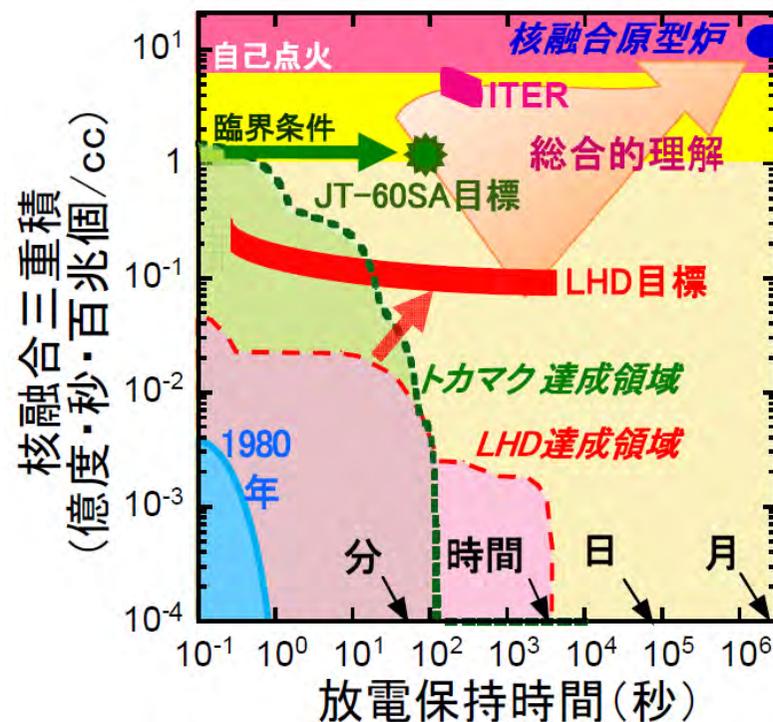
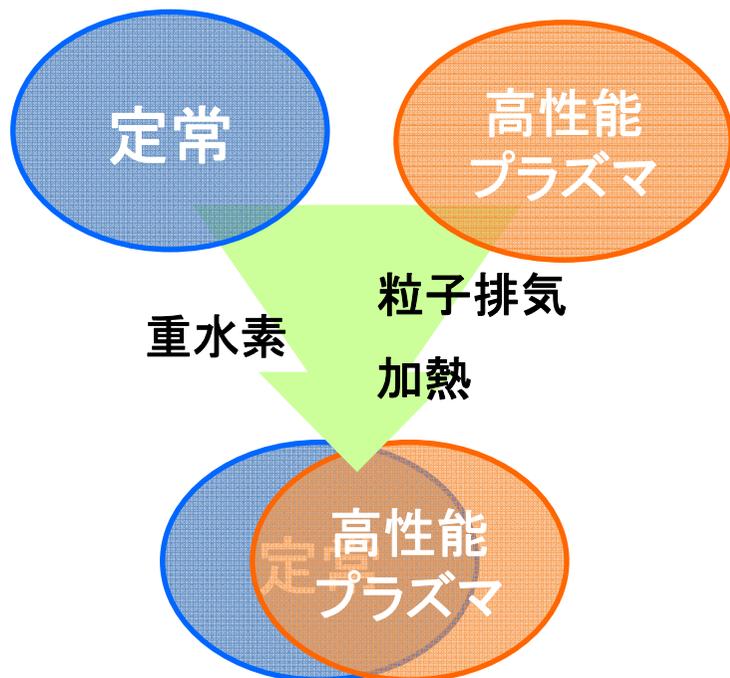


- LHD計画共同研究(炉工学)
- LHD計画共同研究(プラズマ)
- LHD実験グループ

- 毎年、150人以上の大学院生がLHD実験計画に参画 → 学位取得へ
- 海外からも大学院生が長期滞在する例が増える

# 原型炉工学設計活動に向けたLHDの役割

## -LHDは2019年まで日本における唯一の大型実験装置-



- 定常ヘリカル型核融合炉の学理・工学にかかる学術研究の体系化研究  
点火を見込める高性能プラズマの実証 ← 重水素実験を軸とした超高性能化
- 環状プラズマの総合的理解  
ITER及びJT-60SAによるトカマク方式の研究・開発への貢献
- 全国の大学等との共同研究、国際共同研究の推進  
原型炉に向けたプラズマ物理と関連理工学に係る学理の集約
- 大学院教育を通じた人材育成と供給