

A detailed photograph of the interior of a tokamak fusion reactor, showing the complex, curved, metallic structure of the vacuum chamber and the intricate arrangement of the toroidal field coils. The lighting is dramatic, highlighting the metallic textures and the depth of the structure.

# 核融合科学研究所における学術研究の現状 ～定常ヘリカル型核融合炉の実現へ向けて～

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  
竹入康彦



# 核融合科学研究所における研究計画

大規模電力供給が可能なエネルギー源として、  
燃料資源が無尽蔵で、二酸化炭素を排出せず、安全性が高い  
核融合発電の早期実現を目指した学術研究を推進



定常ヘリカル型核融合炉に必要な理学・工学にかかる学理を  
探求し、その体系化を図る

## 核融合科学研究所の目標・計画

- ・将来の核融合による大規模電力供給の実用化を目指し、  
大型ヘリカル装置計画  
数値実験炉研究  
核融合工学研究  
を3つの柱として、核融合炉に必要な理学・工学を探求し、学術研究として体系化を図り、30年後の核融合炉の実現を目指す
- ・大学共同利用機関として、また、核融合研究の中核機関として、大学等との共同研究を中心に、人材育成・教育を牽引する

➡ 3つの研究プロジェクトにより推進

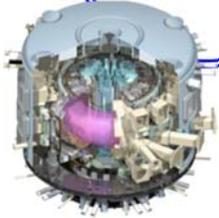


# 大型ヘリカル装置計画、数値実験炉研究、核融合工学研究を柱とした研究推進

核融合炉の実現



ITER・BAへの寄与



核融合炉に必要な  
理学・工学にかかる  
学術研究の体系化

大型ヘリカル装置計画

超高性能化



核融合に関連する  
広範な工学分野  
の学術研究推進

数値実験炉研究

数値実験炉  
研究



基盤的理論・  
シミュレーション  
研究

核融合理論・  
シミュレーション  
研究

核融合工学研究

工学基盤  
工学実証

核融合炉の  
設計



プラズマ物理をはじめ  
とする関連基盤研究の  
推進と基盤の確立

社会の理解



他分野との連携研究  
新分野創成

例えば、材料科学、天文学、  
医療・生命科学との連携研究



応用研究の推進  
社会へ還元





# 共同利用・共同研究により核融合研究を推進

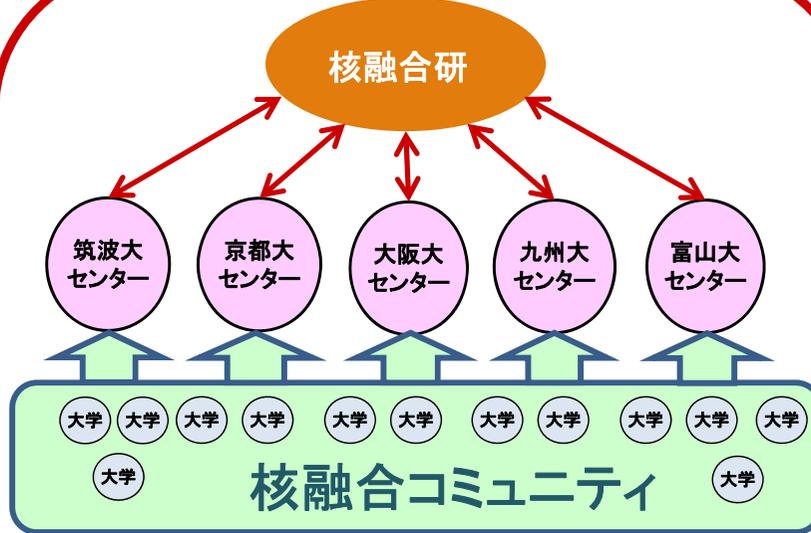
## 3つの異なる形式により幅広く共同研究を展開

### 一般



- 全国の大学研究者が核融合研の研究者と、核融合研が所有する様々な装置や計算機を用いて行う、核融合のみならずプラズマの基礎から応用まで広範囲な課題を対象とした単年度・共同研究(研究会の開催を含む)
- ネットワーク型を開始
- 機器の貸し出し制度の整備 (383件)

### 双方向型

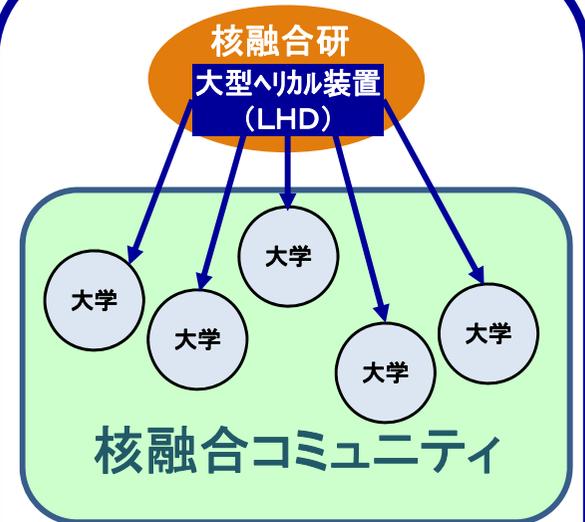


- 大学附置研・センターの特長ある装置を核融合研の共同研究装置と位置づけて核融合炉実現に向けた重要課題を分担し、核融合研の研究者のみならず、全国の大学研究者が参加して推進する共同研究 (109件)

※( )内の数字は  
平成28年度の採択件数

共同研究者数(1, 505人) ※平成26年度の人数  
共同研究の実施機関(213機関) ※平成26年度の機関数  
大学等と共同研究・連携教育で協定を締結(11件) ※平成28年4月1日現在

### 大型ヘリカル装置計画



- 核融合研の主装置である大型ヘリカル装置(LHD)への適用を目指した萌芽的研究を、先ずアイデアを持っている大学において行う共同研究 (複数年度計画を認める)
- 本研究が進んだ後のLHDを用いた研究は、原則として一般共同研究で実施 (34件)

多様化する大学やコミュニティのニーズを的確に反映  
大学の研究、活性化に大きく寄与



# 大型ヘリカル装置(LHD)による核融合科学研究の推進

—核融合炉の早期実現へ向けた学術研究—

我が国独自のアイデアに基づく大型ヘリカル装置(LHD)は、世界最高の定常プラズマ運転性能

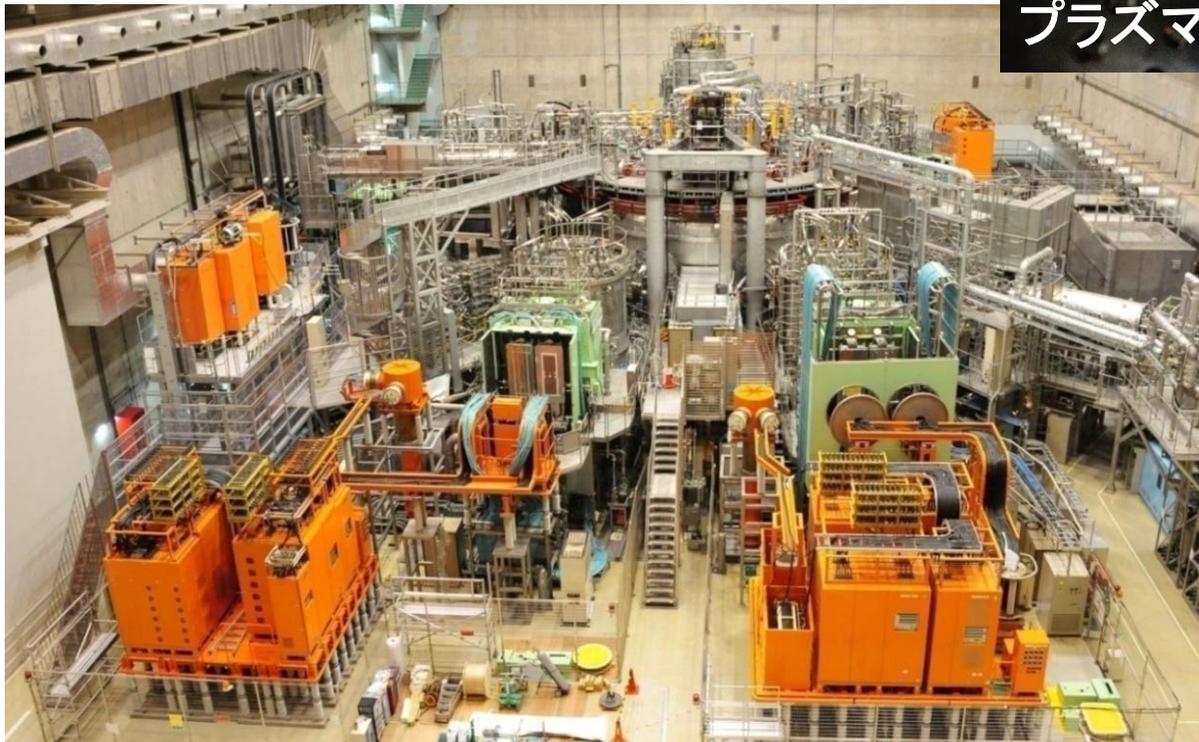
超伝導ヘリカルコイルが作る閉じ込め磁場により、超高温プラズマを定常に保持

- ・ 重水素ガスを用いた実験の計画
- ・ プラズマ加熱能力の増力

により、最高性能化計画を推進



プラズマ真空容器内部



核融合炉を見通せるイオン温度1億2,000万度以上のプラズマ等、世界の他の実験では難しい、安定した定常プラズマの実現へ

これらの超高性能プラズマを対象とした学理の探究と体系化

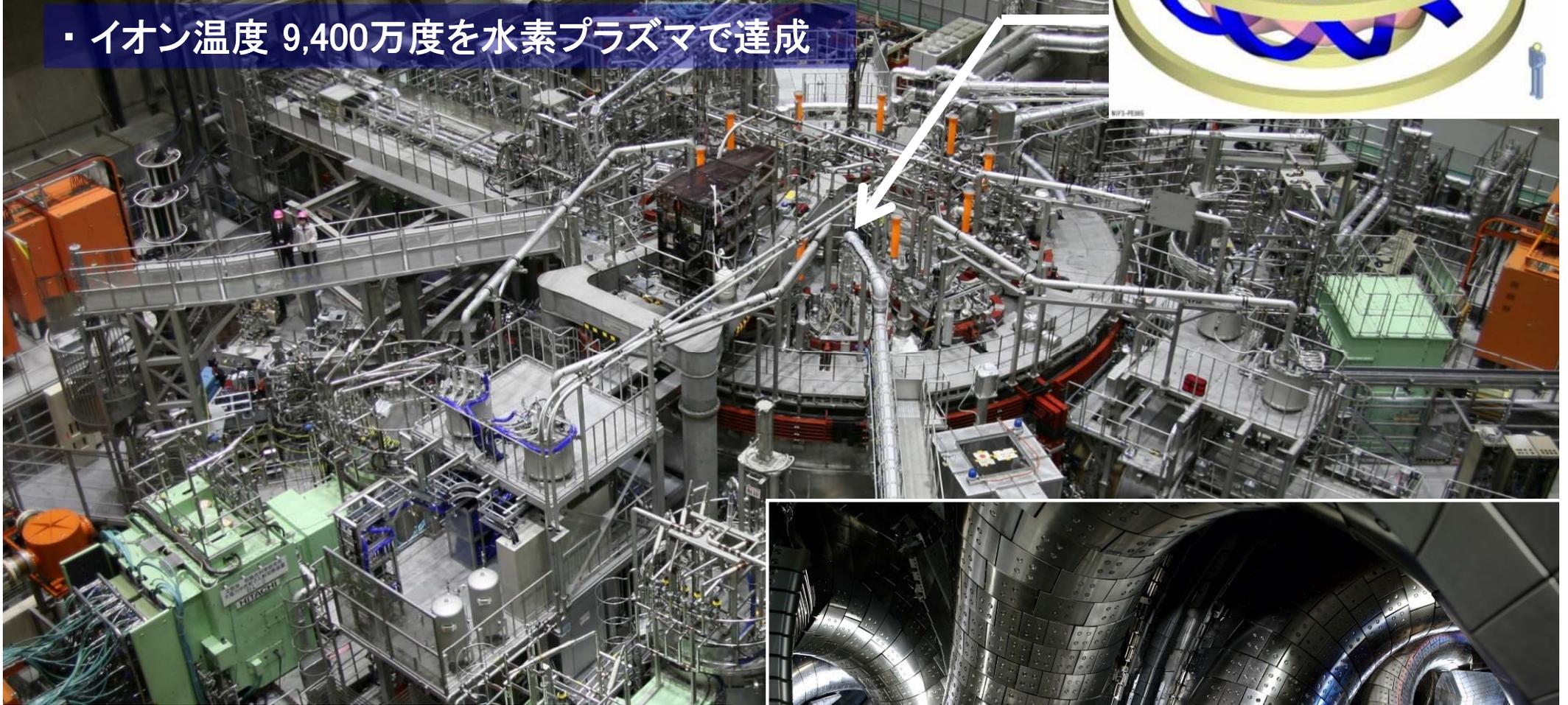
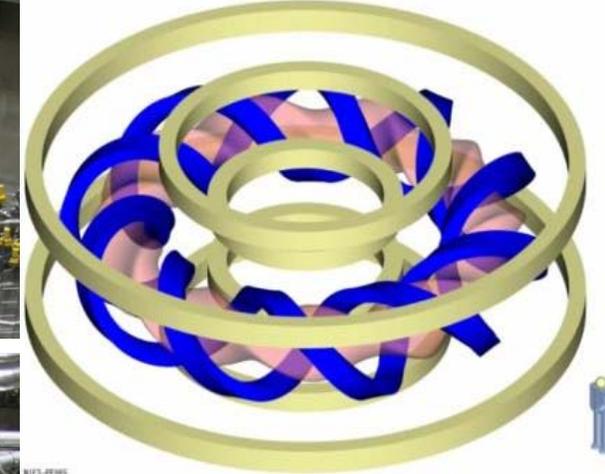
定常運転装置として世界のトップの地位を維持



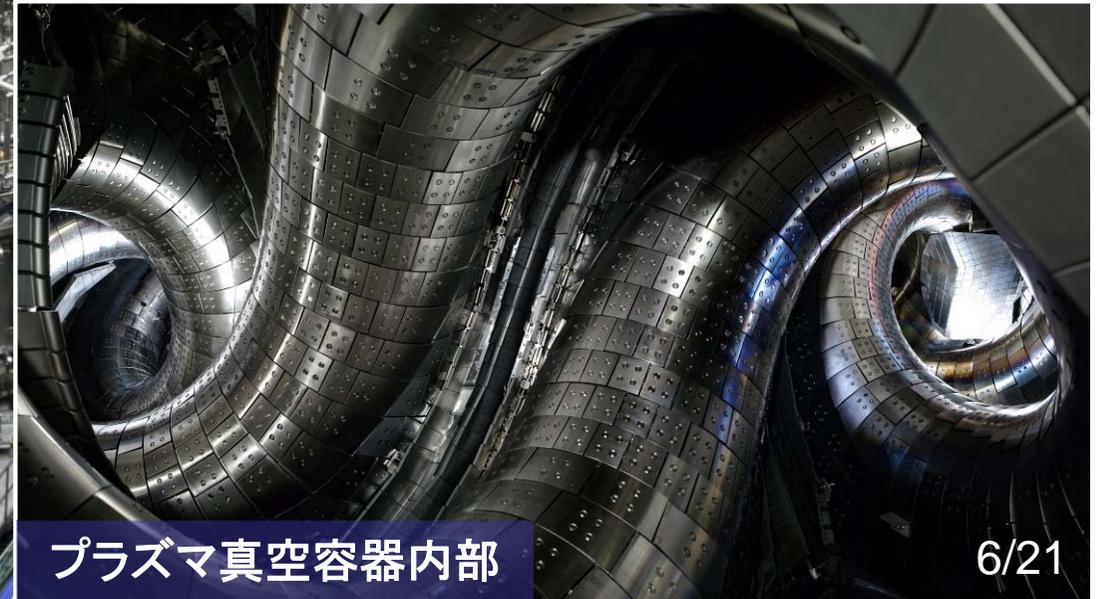
強みを生かして、世界の研究を牽引

# 大型ヘリカル装置(LHD)

- ・ 超伝導コイルの作り出す磁場のカゴにより、容器の壁に  
触れないよう、高温プラズマを真空中に保持
- ・ イオン温度 9,400万度を水素プラズマで達成



- ・ **世界最大の超伝導核融合プラズマ実験装置**  
装置の高さ：約9m  
装置の直径：約13m  
装置の重量：約1500トン
- ・ 1998年3月実験開始



プラズマ真空容器内部

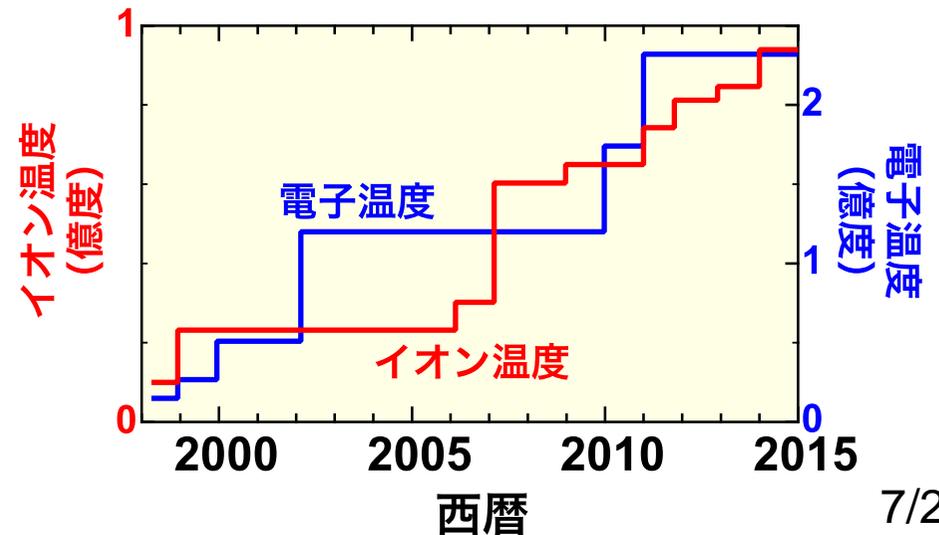


# LHDのプラズマ性能の進展: 目標の8合目まで到達

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	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	9,400万度 (密度 10兆個/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 閉じ込め1秒以上
電子温度	2億3,000万度 (密度 2兆個/cc) 1億2,000万度 (密度 16兆個/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 (温度 1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場 0.425T) 4.1% (磁場 1T)	5% (磁場 1-2T)	5%以上 (磁場 5T以上)
定常運転	54分 (500 kW) 48分 (1200 kW)	1時間 (3 MW)	定常 (1年)

## ブレークスルーとなるプラズマ物理の革新的 発見と体系的理解

- ・不純物の自動排出機構
- ・不安定性の自己安定化
- ・良好な粒子閉じ込めと高い安定性の両立
- ・核融合条件の10倍以上となる超高密度プラズマ、等



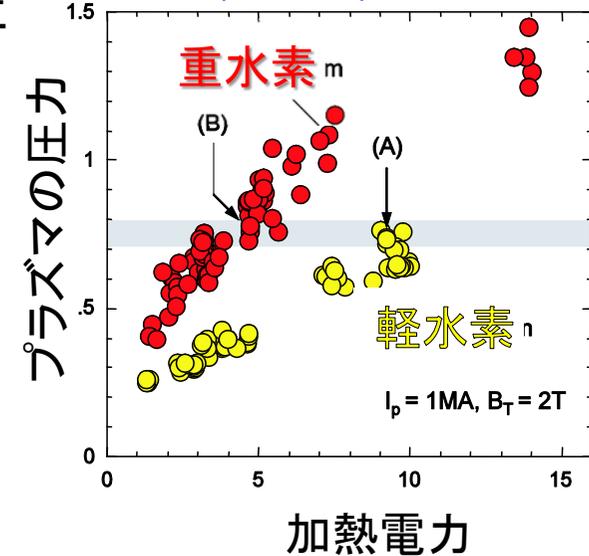


# ～大型ヘリカル装置は目標に向かって新たなステージへ～ LHD重水素実験(H29～H37)の目的と意義

**重水素実験**により核融合炉へつながる**世界最先端**となる成果が期待される

- **閉じ込め改善によるヘリカルプラズマの最高性能化の実現**  
核融合炉実現を見通せる高性能プラズマの研究が可能に  
→ 新たな研究領域の開拓や実験の多様性を拡大する  
→ 核融合炉設計につながるデータベースの蓄積と学術基盤の構築
- **同位体効果**をはじめとする閉じ込め物理の研究  
トカマク装置の重水素放電で広く観測されている閉じ込め改善等に関する学術研究をヘリカル装置で行う
  - 未解明な物理機構を、閉じ込め方式の異なるLHDで学術的に解明
  - プラズマ物理学および核融合炉設計に重要な価値
- **定常プラズマ装置LHDの重水素実験**により新たに可能となる核融合炉実現へ向けた研究
  - ヘリカル系における**高エネルギーイオン**の閉じ込め実証と燃焼プラズマへの展望
  - **長パルス放電**による炉材料内における**水素同位体挙動**の研究

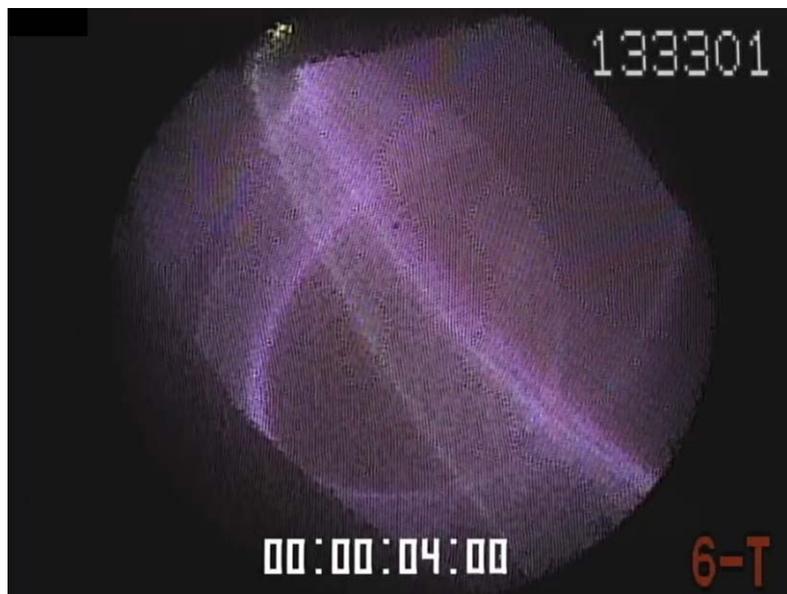
トカマク(JT-60U)の実験結果



燃焼プラズマ実験を十分な確度で予測できるモデルの構築

世界的なインパクトを持つ、先駆的研究を展開

独W7-X(超伝導ヘリカル装置)、仏WEST(超伝導トカマク装置)の追随を許さないために、研究の**早期展開が必要**

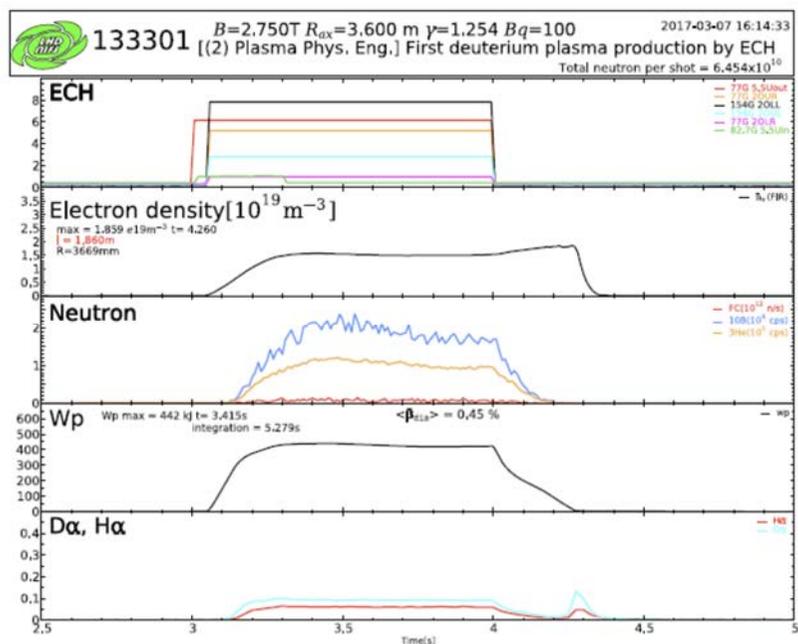


平成29年3月7日、重水素プラズマを初点火

重水素ファーストプラズマをECHにより1秒間生成

- ・温度：1,200万度（イオン）、7,000万度（電子）
- ・密度：19兆個/cc ( $1.9 \times 10^{13}$ /cc)
- ・中性子発生量：650億個 ( $6.5 \times 10^{10}$ )

引き続き3月は、実験で発生する中性子の計測による実験室の遮蔽性能の確認のための調整運転として、NBIによる加熱実験も行い、放射線障害防止法に基づく「施設検査合格証」が交付（3月29日）



146名の来賓、所員約300名が出席した点火式

## 核融合発電炉の早期実現のカギ

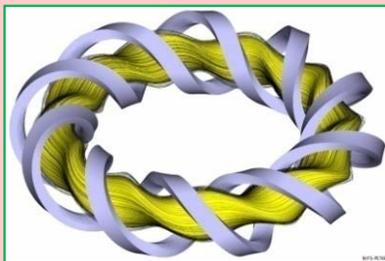
二大課題 = **核融合燃焼** (重水素と三重水素の核融合) と **定常運転**

① **核融合燃焼** の実証・制御 → 国際熱核融合実験炉 (ITER、国際協力)

② **定常運転** (発電に必須) → { LHD (核融合研) と  
JT-60SA (量研機構) 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

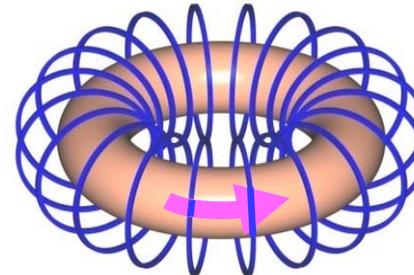
電磁石をねじる: **ヘリカル方式**  
(LHD)



本質的に1年でも**定常運転が可能**

課題: 点火を見込める**プラズマの高性能化**  
⇒ イオン温度1億2,000万度 (LHD)

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**

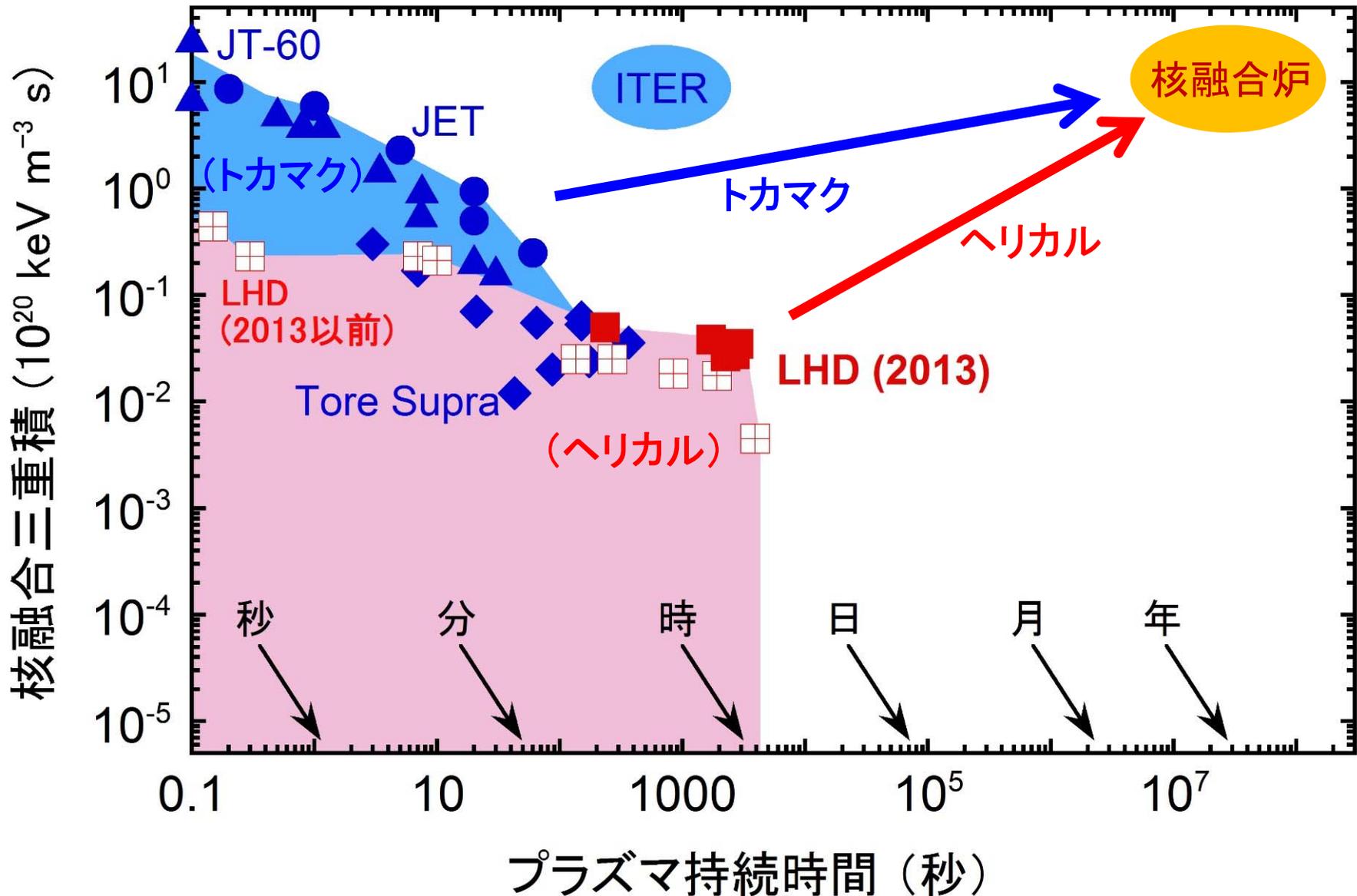
課題: **定常運転**  
プラズマ中の電流の高効率駆動

本質的に**定常運転が可能**なLHDで**重水素実験**を行って**プラズマを高性能化し**、**ヘリカル方式の核融合炉設計への見通しを得る**

# 核融合炉実現への道

(核融合プラズマ性能指標)

核融合三重積 = イオン温度 × 密度 × 閉じ込め時間





# 核融合工学研究プロジェクトと炉工学研究の推進計画

2010

2012

2015

2017

2022

大型ヘリカル装置

最高性能化

先端基礎学術研究



炉設計の段階的高度化

→ 概念設計

→ 基本設計



工学基盤の構築

実機能・実規模・実環境・  
工学実証研究

核融合作業部会の指摘に基づく工学基盤構築の実施

(1)低放射化材料研究



超高熱負荷対向壁  
の製作と核融合模  
擬条件での実証研  
究

(2)大型高磁場超伝導  
マグネット研究



100 kA級導体開発  
とヘリカル巻線の  
試作

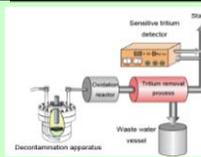
(3)高熱流プラズマ  
対向壁研究



ブランケットの試作  
と核融合模擬条件  
での実証研究

(4)長寿命液体  
ブランケット研究

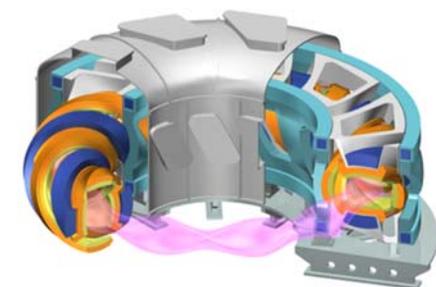
(5)微量トリチウム  
管理技術研究



微量トリチウムの  
分離・回収装置の  
実証研究

寄与

核融合炉の  
工学設計



核融合炉

大学等との共同研究と人材育成

核融合工学研究プロジェクト

世界最大級の大型実験設備による核融合工学基盤の構築  
NIFSを中核とした大学とのネットワークにより推進

## (1) 大型高磁場超伝導マグネット研究

◇温度可変低温設備 (4.2 ~ 50 K)  
高温超伝導の研究にも対応



◇大口径高磁場導体試験装置

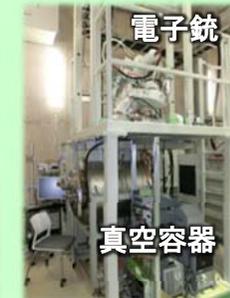
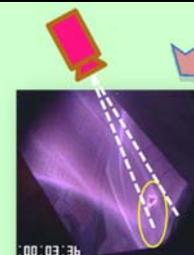


直径70 cmの  
大試験空間、  
強磁場13テスラ  
(世界最大)

## (3) 高熱流プラズマ対向壁研究

◇LHD照射試験装置

◇超高熱負荷試験装置 (ACT2)



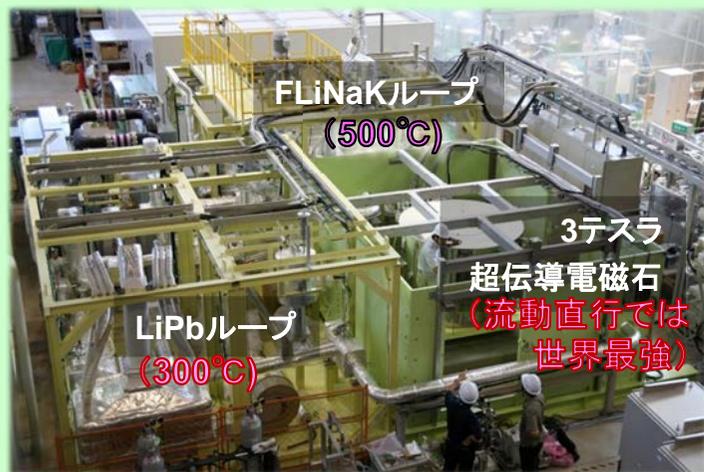
◇イオンビーム解析装置

平成24年度特別経費  
及び補正予算

エネルギー循環工学の  
研究拠点形成を加速

## (2) 長寿命液体ブランケット研究

◇熱・物質流動ループ装置 (Oroshi-2)  
世界唯一のツインループ装置



## (4) 低放射化構造材料研究

◇透過型電子顕微鏡 (TEM)



◇集束イオンビーム/  
電子ビーム加工観察  
装置 (FIB-SEM)

◇超高真空クリープ  
試験装置 (全7台)



◇高温静水圧焼結接合  
試験システム (HIP)



# 最近の研究成果(1)

大口径高磁場導体試験装置による核融合炉へ適用可能な大電流超伝導導体の特性試験

大口径高磁場導体試験装置

13 T,  $\phi 700$  mm SC Magnet

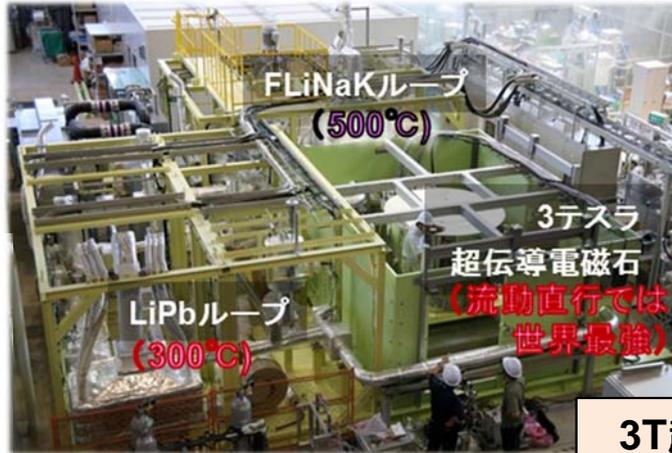
HTS (YBCO) 導体 (MIT + NIFS)

HTS (GdBCO) 導体 (NIFS + 東北大)

LTS ( $Nb_3Sn$ ) 間接冷却導体 (NIFS)

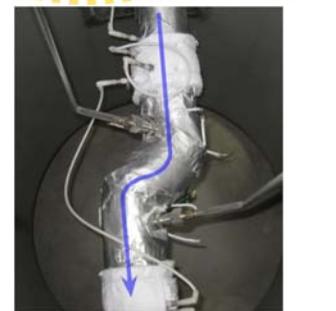
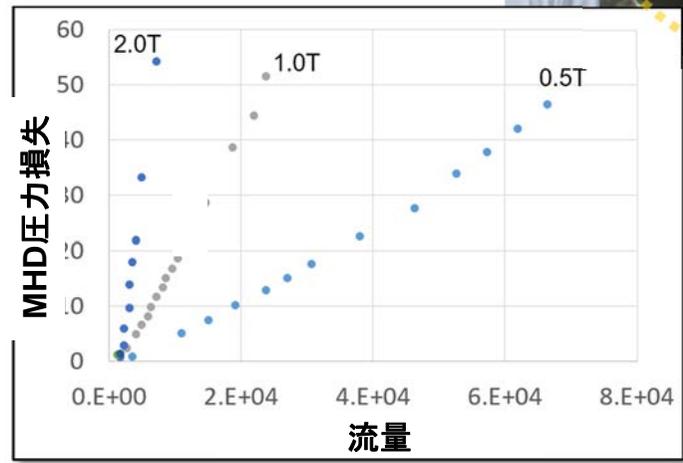
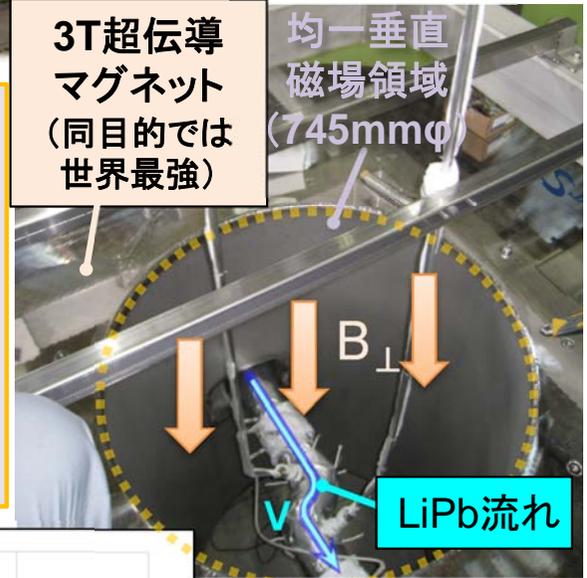
試験導体のうち試験部  
接続部  
ステンレスリング (冷却配管付き) (外周に熱絶縁用 FRP 層)  
試験導体 (約 50mm 高さ)  
684mm  
532mm

熱・物質流動ループ装置 (Oroshhi-2)  
世界唯一のツインループ装置



液体金属トリチウム増殖材の強磁場下の圧力損失の評価と解析

熱・物質流動ループ装置オロシ2を用い、強磁場下で二重屈曲管 (U字管相当) を流れる液体金属 LiPb の MHD 圧力損失が流量に比例することを世界で初めて実証。(京大との共同研究)



屈曲管流路 14/21

# 最近の研究成果(2)

ヘリカル炉設計:  
 安定な運転領域の同定  
 先進的なダイバータ概念の開拓

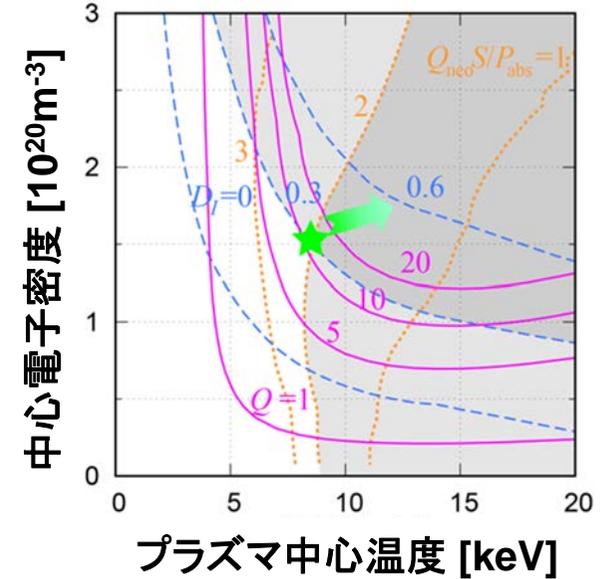
ダイバータ試験体の  
 製作と熱負荷  
 試験

◇ 超高熱負荷試  
 験装置(ACT2)

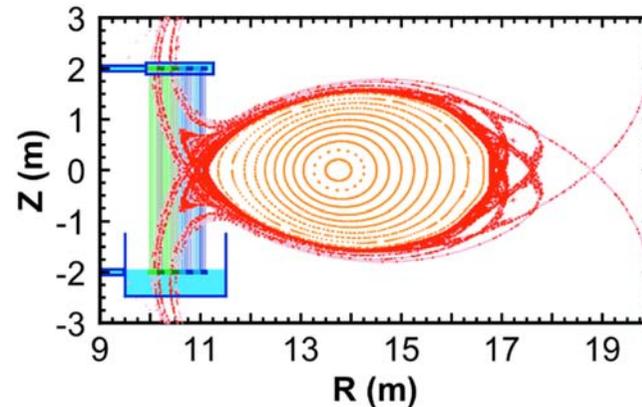
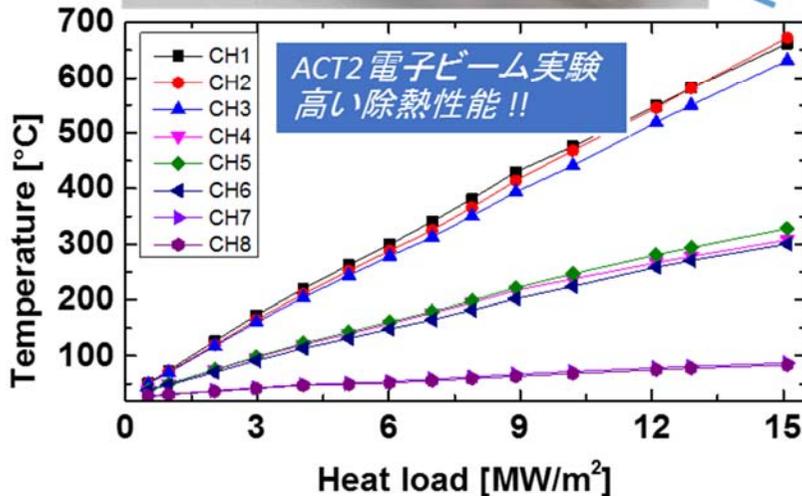
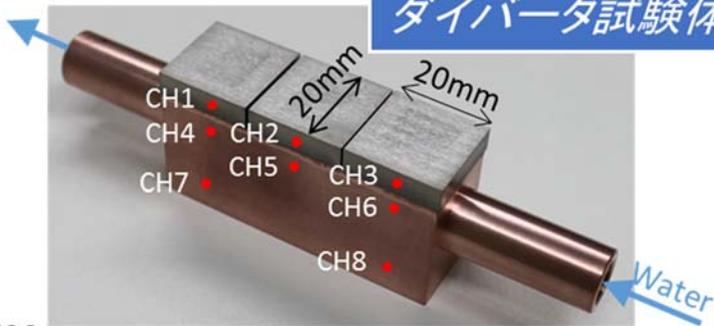


先進的ろう付接合法により、高い除熱性能を有するダイバータ試験体の開発に成功

LHDで達成済みの運転領域を炉条件に外挿、閉じ込め改善・配位最適化でさらに高利得 ( $Q > 10$ ) も実現可能

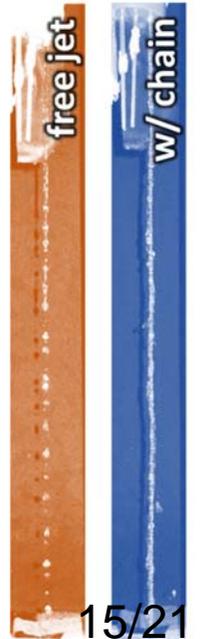


ダイバータ試験体



## 液体金属シャワーダイバータ REVOLVER-D

- ・ 溶融スズ噴流のシャワーをエルゴディック層にリミタ兼ダイバータとして挿入
- ・ 噴流には内部抵抗(チェーン)を入れて安定化、液滴化防止
- ・ 耐熱負荷特性に優れ、保守も容易





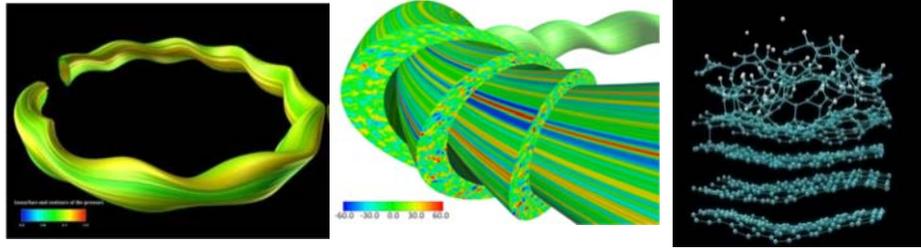
# 数値実験炉研究プロジェクト

仮想現実空間にヘリカル炉を創造：物理・工学性能、経済性の最適化を図る

基盤的理論・シミュレーション



炉心プラズマからプラズマ対向壁までの3次元大規模シミュレーション



大型ヘリカル装置  
最高性能化  
データベースによる  
検証・指針

核融合工学：  
構造解析  
材料開発

ヘリカル型核融合炉  
設計：  
技術的・経済的・  
環境的成立性 /  
安全性・効率の評価

マルチスケール、複合物理、多階層モデルの構築を通じて、予測性の向上



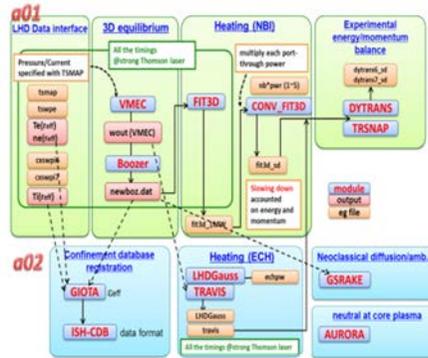
入力条件

熱・粒子  
供給

磁場構造

熱・粒子  
制御

$\alpha$ 粒子発生



出力

熱・粒子  
中性子

条件変更

モジュール結合された統合輸送コード体系

フィードバック

定常・高密度・高ベータ性能を有する無電流炉心  
プラズマと炉構造を含めた核融合炉全体の最適化

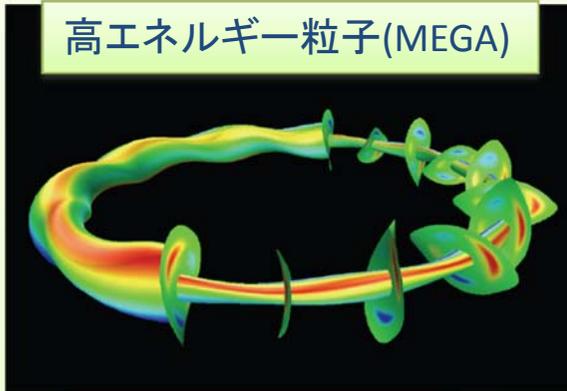
数値  
実験炉 → ヘリカル型核融合炉 16/21



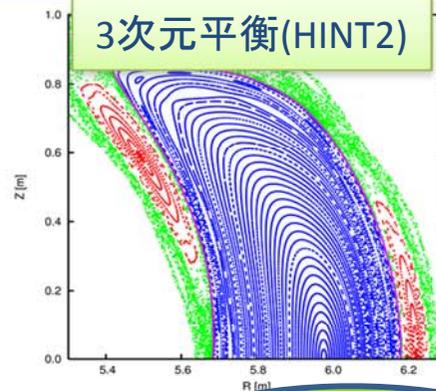
# 数値実験炉研究プロジェクト

数値実験炉構築に向けたシミュレーションコードの開発・高精度化と  
核融合プラズマの物理機構解明・体系化(理論検証・実験検証)

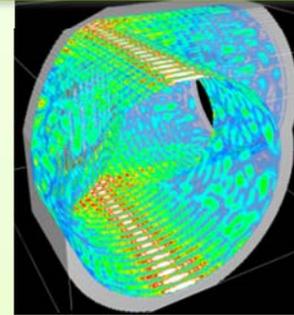
高エネルギー粒子(MEGA)



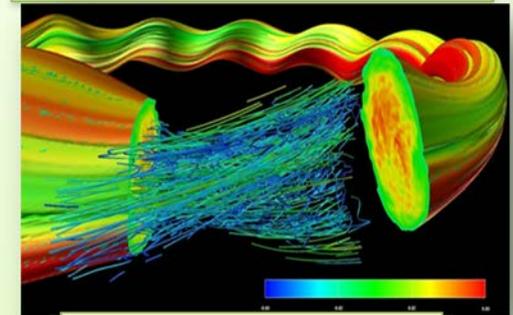
3次元平衡(HINT2)



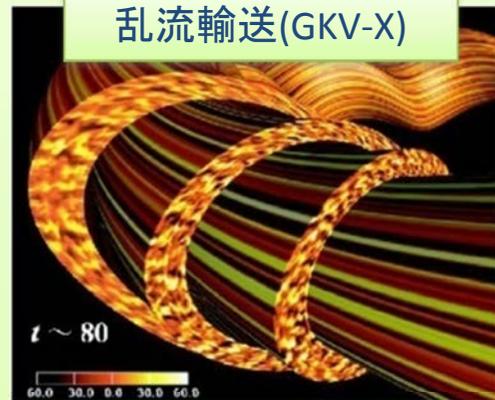
電磁波伝搬(ECH)



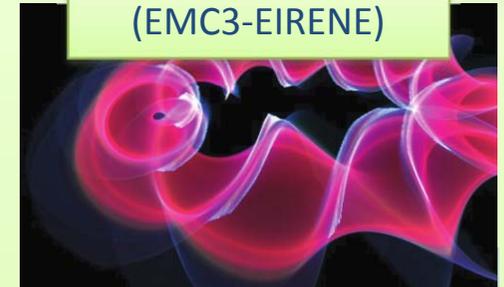
非線形MHD(MINOS)



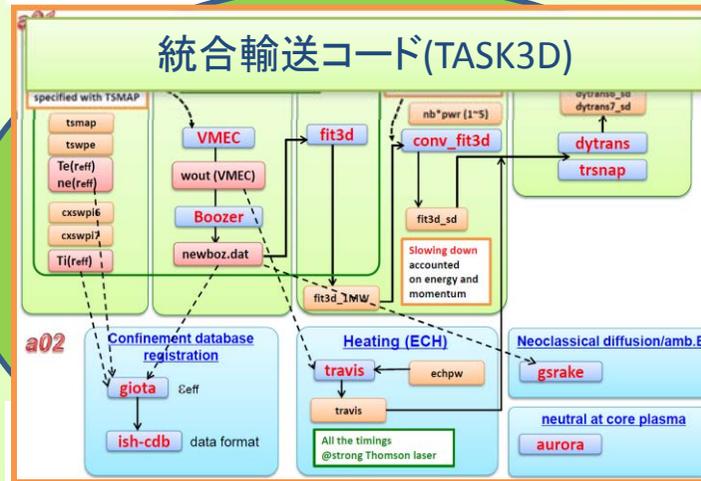
乱流輸送(GKV-X)



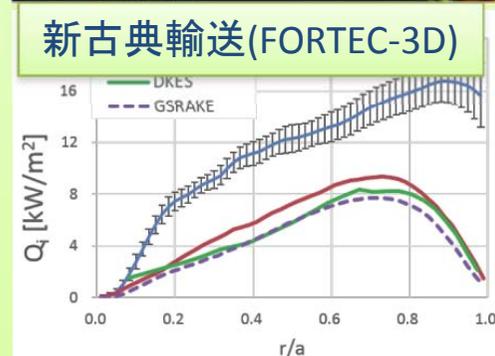
周辺プラズマ輸送  
(EMC3-EIRENE)



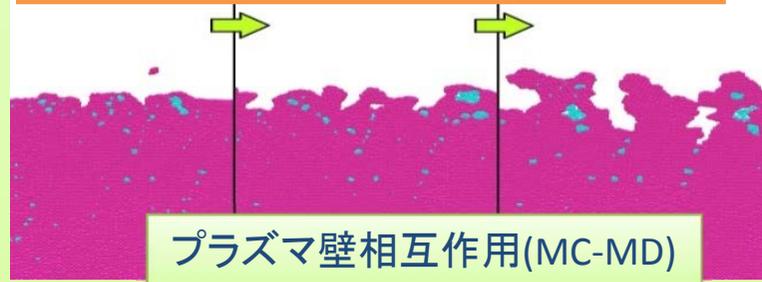
統合輸送コード(TASK3D)



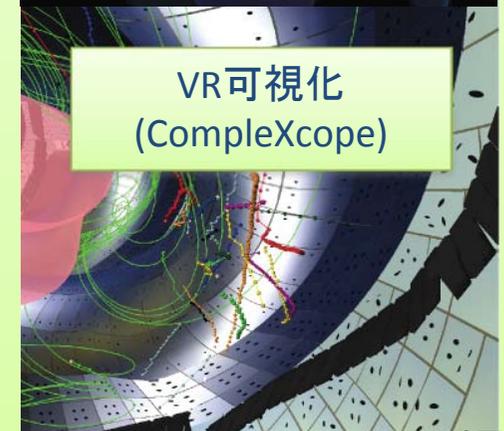
新古典輸送(FORTEC-3D)



プラズマ壁相互作用(MC-MD)



VR可視化  
(Complexscope)

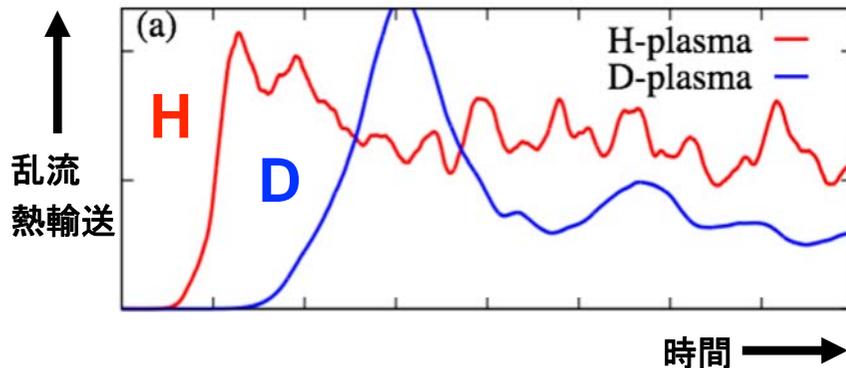
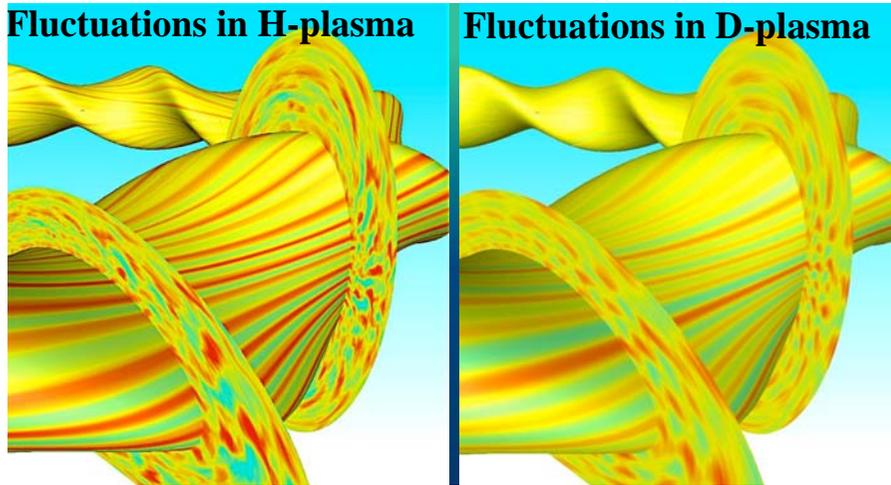


# 数値実験炉研究プロジェクト

## 最近の成果(1)

### 乱流輸送に対する同位体効果の発見

同位体効果と衝突による捕捉電子不安定性(TEM)の安定化とゾーナルフロー生成の増大が、重水素プラズマにおける乱流輸送の低減をもたらす。

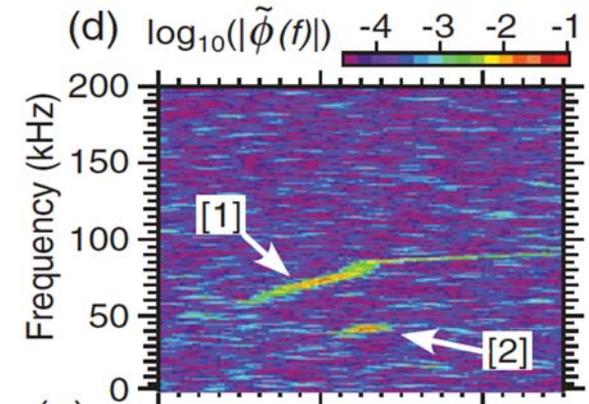


To appear in Phys. Rev. Lett. (2017)

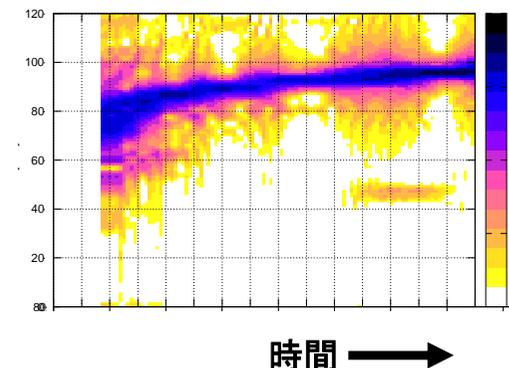
### 高エネルギー粒子によるプラズマ振動発生 の物理機構の解明

LHDの高エネルギー粒子により駆動された振動現象の周波数の時間発展および周波数が半分となる振動の励起が再現された。

実験での  
振動周波数  
の時間発展



シミュレーション結  
果



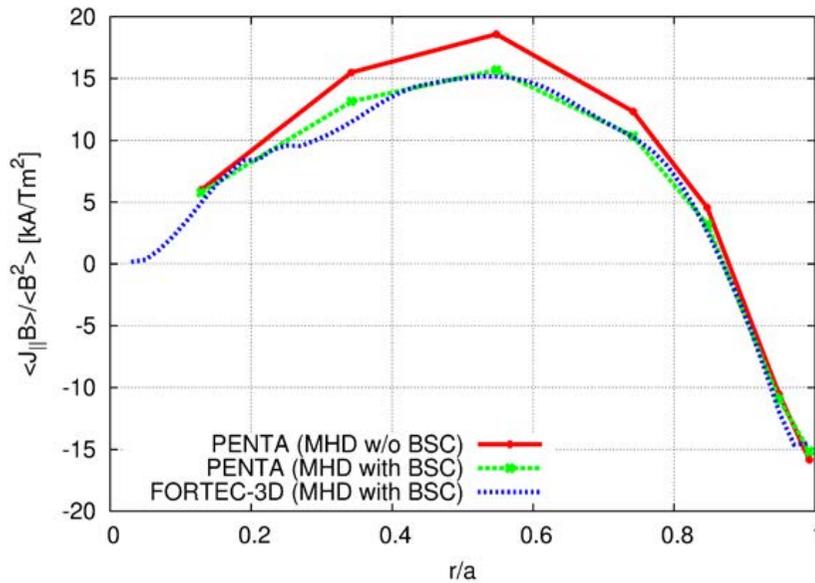
IAEA-FEC (2016)

# 数値実験炉研究プロジェクト

## 最近の成果(2)

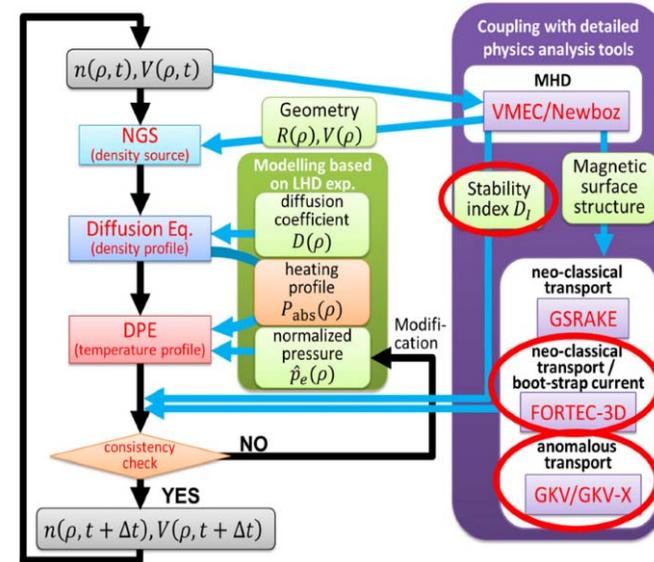
### FFHR-d1におけるブートストラップ電流分布の予測

ローカルおよびグローバルシミュレーションコード (PENTA/FORTEC-3D)によりFFHR-d1におけるMHD平衡と無撞着な信頼性の高いブートストラップ電流分布の計算が実現。

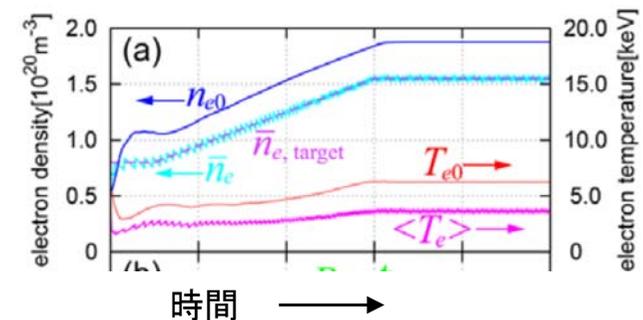


FFHR-d1のQ~10運転シナリオにおけるブートストラップ電流分布

### 統合輸送コード開発の進展

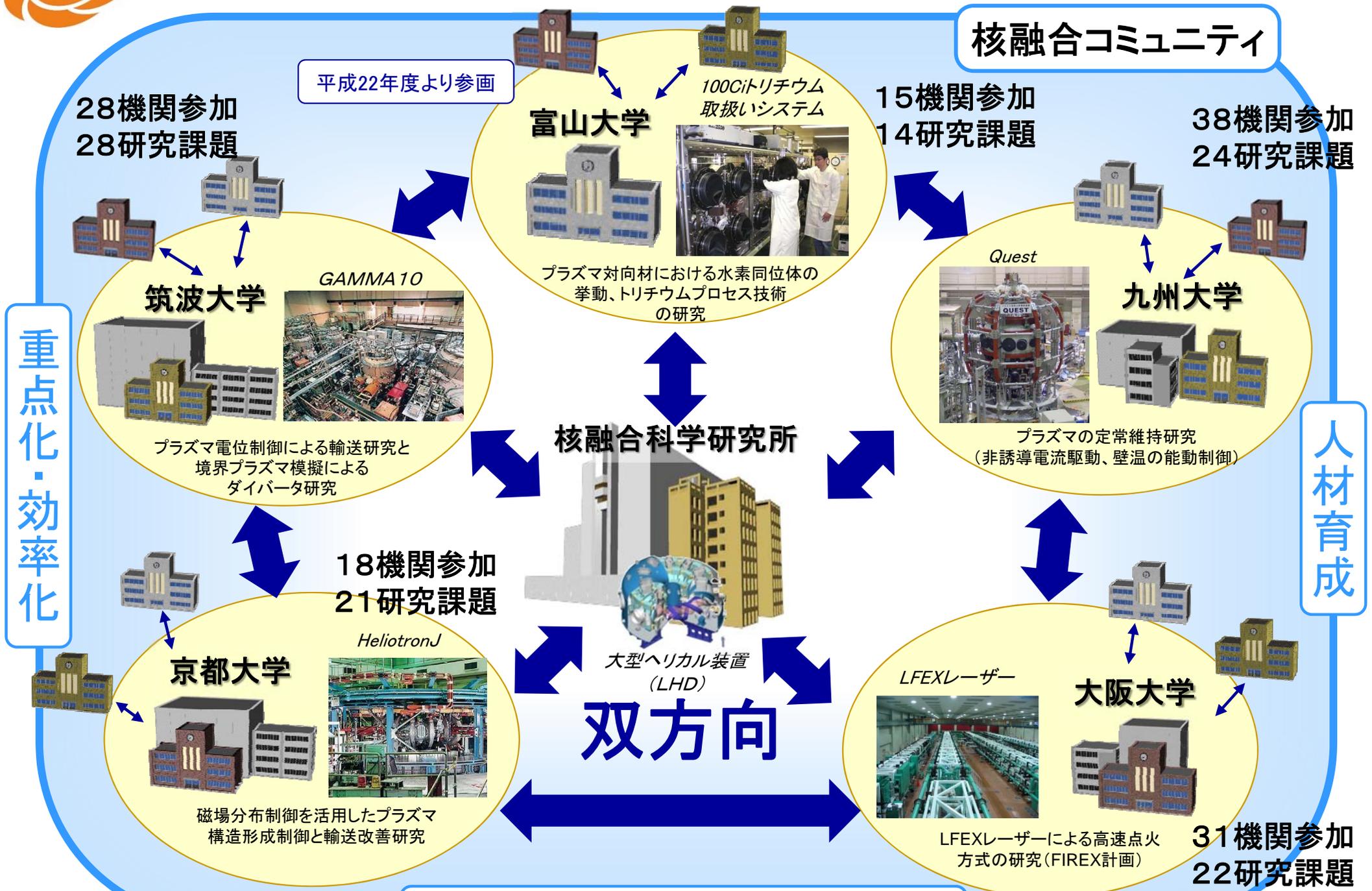


大規模シミュレーションコード(GKV・FORTEC-3D)の入力データ生成や密度・温度時間発展計算等の機能が進展し、FFHR-d1の運転シナリオ検討へ応用される。





# 双方向型共同研究 - コミュニティの総力を挙げた共同研究 -





# まとめ

核融合炉の実現に向けて  
プロジェクト体制で学術研究を推進



{ 大型ヘリカル装置計画プロジェクト(重水素実験)  
数値実験炉研究プロジェクト  
核融合工学研究プロジェクト(定常ヘリカル型原型炉設計を含む)

の3本柱を中心とした研究を、大学共同利用機関として

工学分野を取り込んだ**双方向型共同研究**

などの大学等との連携・共同研究を軸に推進し、

**定常ヘリカル型核融合炉に必要な理学・工学にかかる  
学術研究の体系化(→定常環状プラズマ型核融合炉)**

を進めている。

また、将来の核融合研究・開発を担う**人材育成・教育**を、**双方向型共同研究、総研大等**で進められている。

**2017年3月7日に重水素実験を開始**



**ヘリカル型定常核融合炉の実現に向けて  
今後、研究を更に加速して推進する**