A detailed photograph showing the interior of a tokamak fusion reactor. The image displays the complex, curved metallic structure of the vacuum chamber, composed of numerous small, riveted panels. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and scale.

# 核融合科学研究所における 研究活動の現状 ～定常ヘリカル型核融合炉の実現を目指して～

# 核融合科学研究所の概要

- 平成元年5月に核融合プラズマの学理とその応用の研究の推進のため、全国の大学の共同利用機関として設置(文部省学術審議会昭和59年答申)
- この目的達成のため、我が国独自のアイデアに基づく世界最大の超伝導大型ヘリカル※ 装置(LHD※)を中核として、核融合・プラズマ物理学に関する実験研究、理論・シミュレーション研究及び核融合工学研究等を推進
- 平成16年度に法人化、核融合科学に関する総合研究を推進する大学共同利用機関として自然科学研究機構の一員となる

※ ヘリカルは「らせん形の」の意。環状プラズマを磁場の容器で閉じ込めるために、ねじれた(らせん状)の(超伝導)コイルを用いるプラズマ 実験装置を総称して「ヘリカル型」と呼ぶ。LHDは、Large Helical Device (大型ヘリカル装置) の略。

- 沿革：平成元年 大学共同利用機関核融合科学研究所設置<sup>※※</sup>  
 平成 9年 大型ヘリカル装置(LHD)完成  
 平成10年 大型ヘリカル装置実験開始  
 平成16年 大学共同利用機関法人「自然科学研究機構」  
 設立、同機構の一研究所に再編  
 平成29年 LHD重水素実験開始

※※ 令和元年5月 研究所創立30周年

職員数(平成31年4月1日現在)：	231名
・ 所長	1名
・ 研究教育職員	124名
・ 技術職員	46名
・ 事務職員	43名
・ 年俸制職員(特任教授他)	17名(うちURA職員 2名)

2019年度予算額(運営費交付金)： 84億円





# 核融合科学研究所における研究目標・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(NIFS)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、核融合科学の中核的研究拠点として、大学等との共同研究を中心に、日本全体の核融合科学及び関連理工学の研究を推進するとともに、人材育成・教育を牽引する

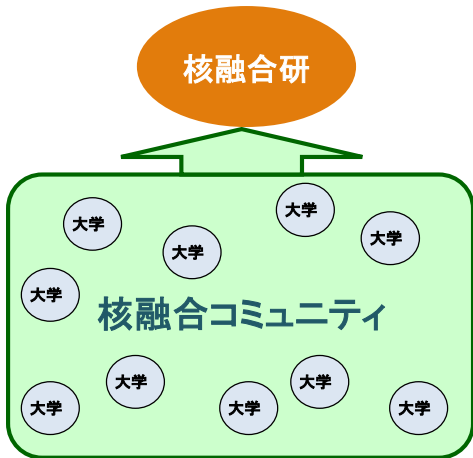
➡ 3つの研究プロジェクトにより推進



# 共同利用・共同研究により核融合研究を推進

## 4つの異なる形式により幅広く共同研究を展開

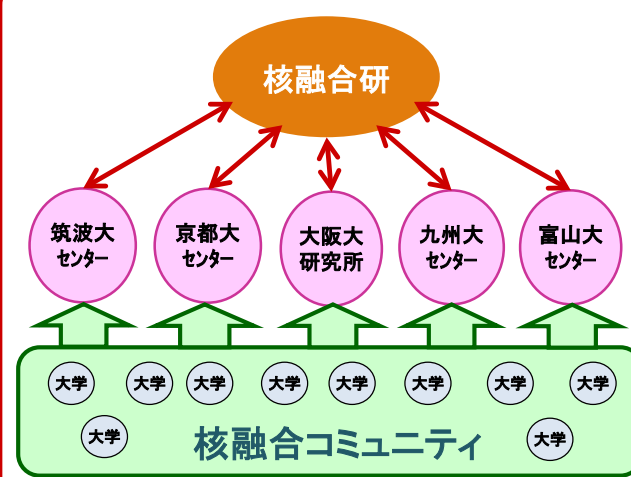
### 一般



- 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

(426件) ※2019年度の採択件数

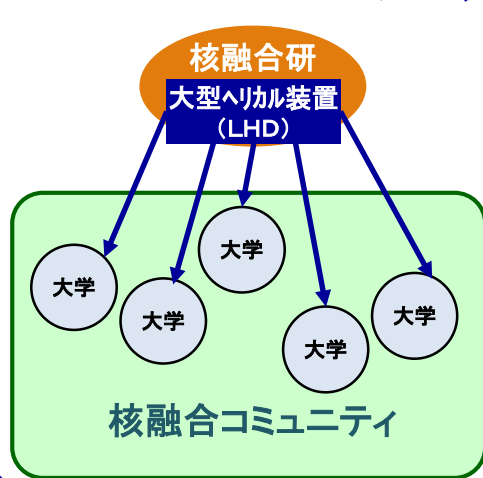
### 双方向型



- 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

(103件) ※2019年度の採択件数

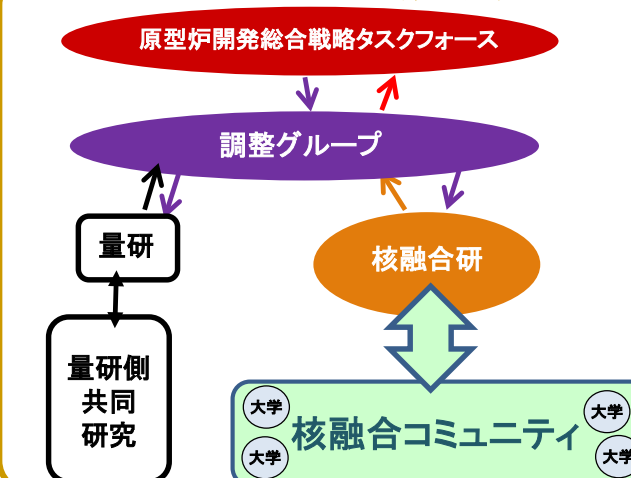
### 大型ヘリカル装置計画



- 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

(26件) ※2019年度の採択件数

### 原型炉研究開発



- 「原型炉開発に向けたアクションプラン」に沿って、原型炉開発に向けた開発課題を解決するため、全国の大学研究者が参加し、量子科学技術研究開発機構(量研)の共同研究と並行して、核融合研が推進する共同研究

(6件)(2019年度開始) ※2019年度の採択件数

共同研究者数 (1,524人) ※平成30年度の人数

共同研究の実施機関 (234機関) ※平成30年度の機関数

大学等と共同研究・連携教育で協定を締結 (12件) ※2019年4月1日現在

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



# 国際的核融合コミュニティの中核

政府間協定等の枠組みに参画: 6つの2国間協定(米、中、韓、露、豪、EU)

3つの多国間協定(国際エネルギー機関実施の3協定)

国際連携事業: ・日米科学技術協力 ・日中科学技術協力 ・日韓核融合協力

・機関間連携ネットワークによる拠点形成(NINS)等

➔ 核融合研をハブとしてコミュニティから多数の研究者が参画、国際的流動性高める

事業による 人事交流実績 (平成30年度)	日米		日中		日韓		機関拠点	
	人	日	人	日	人	日	人	日
日本へ招聘	46	216	25	227	43	180	6	82
日本から派遣	78	924	31	183	68	269	30	322



データベースの世界標準化を主導

- 原子・分子データセンター
- 閉じ込め物理データベース



2017年に観測された2つの中性子星合体に伴う重力波検出と合体後の爆発光の解析を可能にするデータを提供



# 教育・人材・若手研究者育成への貢献

## ●核融合科学研究所(NIFS)の大学院教育・人材育成の特徴

NIFSが属する総合研究大学院大学、六つの大学との連携大学院(北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、富山大学、九州大学)、特別共同利用研究員制度における教育は、NIFSが保有する最先端の大型ヘリカル装置(LHD)やプラズマシミュレータ等、高度な研究環境を活用し、国内外の第一線で活躍する研究者と日常的に接しながら行われており、世界的にもユニークなものである。

## ●総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻

### ◆高度な研究環境を活用した5年一貫制博士課程の大学院大学

#### ○核融合科学専攻

- ・核融合システム講座(LHD等による高温プラズマ実験研究、炉工学や先端材料開発等の研究)
- ・核融合シミュレーション講座(スーパーコンピュータを駆使した高温プラズマの挙動解明等の理論・シミュレーションに関する研究)

○核融合科学専攻在籍者:14名(平成31年4月1日現在)

(外国人5名 →グローバル化) ※ 中国・インド・ベトナム

○博士号取得者:151名(平成6年度～平成30年度)

## ●総合研究大学院大学以外の大学院教育(平成30年度)

○連携大学院学生(28名):名古屋大学(理学研究科・工学研究科)、九州大学(総合理工学府)、東京大学(新領域創成科学研究科)

○特別共同利用研究員(21名):東北大学、明治大学、福井大学、長岡技術科学大学、名古屋大学、名古屋工業大学、大阪大学、中国科学技術大学、等

○共同研究による全国の大学院生の教育・人材育成:東京大学、京都大学、九州大学、等



# 核融合研究、重水素実験等の研究所の活動に対する 社会や国民の理解を得るための取り組み

開かれた研究所として、情報の徹底的な公開、積極的な広報活動を実施

## ○毎年夏に市民説明会を開催(平成18年度から)

- ・重水素実験の実施状況と安全性、研究計画について説明  
(13年間でのべ5,365名)
- ・平成30年度:三市合計23会場235名  
(土岐市7会場112名、多治見市15会場105名、瑞浪市1会場18名)



市民説明会の様子

## ○市民学術講演会の開催(年2回、多治見市・土岐市)

- ・科学技術一般に関する講演、核融合研究の進展などの講演

## ○研究所オープンキャンパスの開催(例年2,000名程度)

- ・重水素実験質問コーナーを設けて、重水素実験についても丁寧に説明

## ○フュージョン・フェスタ in 東京(2,650名を超えるご来場(平成30年度))

- ・核融合研究について広く社会・国民に知ってもらうために東京で開催、講演会と科学・工作教室等で構成

## ○随時の見学受付(平成29年度4,300名)

- ・研究所スタッフがLHDに関連する施設を案内

## ○広報誌の発行など

- ・研究所の活動を分かりやすく紹介したプラズマくんだよりの隔月発行など



市民学術講演会の様子



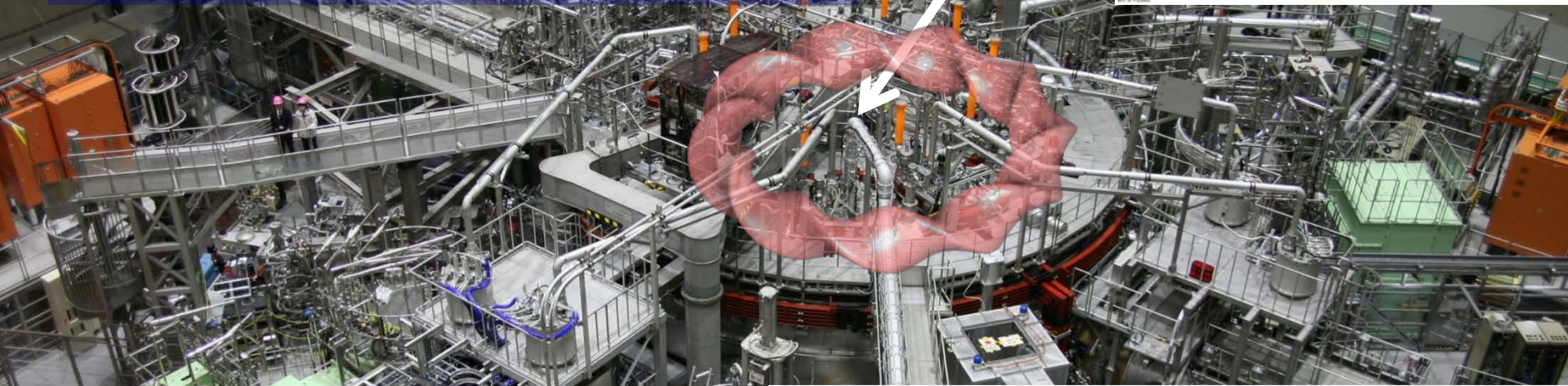
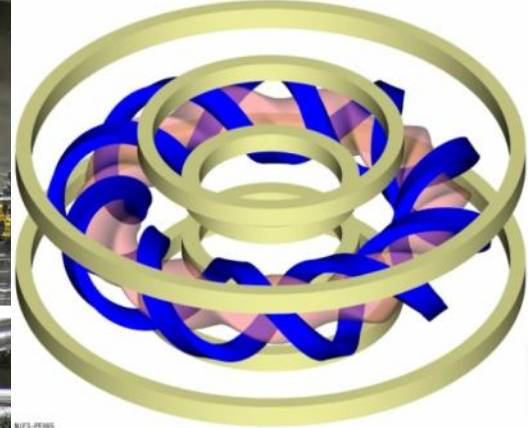
プラズマくんだより



オープンキャンパスポスター

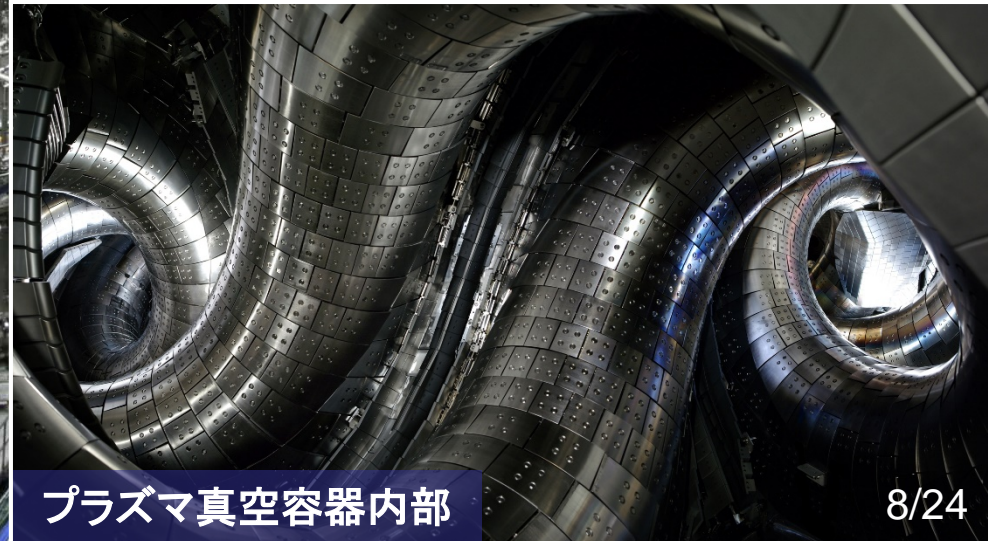
# 大型ヘリカル装置 (LHD)

- ・ 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
- ・ 我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式
- ・ 世界最高の定常プラズマ運転性能



・ 重水素実験により、イオン温度  
1億2,000万度を達成

- ・ 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

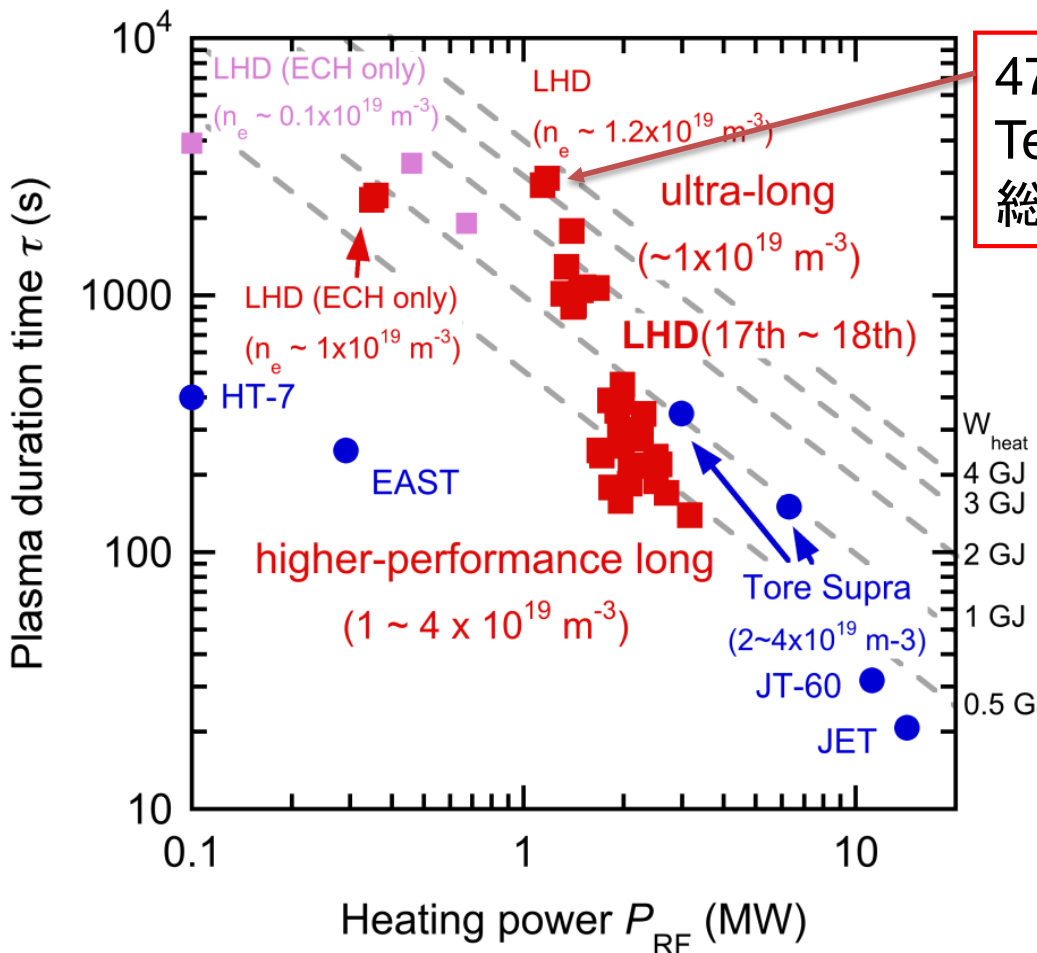




# 大型ヘリカル装置(LHD)の定常運転性能

2,300万度の高温プラズマを48分間、定常に維持

密度: 12兆個/cc、加熱電力: 1,200kW(加熱入力: 3.4GJ)



47分39秒

Te~Ti~2 keV,  $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 1.2 MW,  
総入力エネルギー: **3.36 GJ (世界記録)**



- ヘリカル方式の原理的特長である定常運転を世界最高レベルで実証
- トカマクにおける定常研究を大きく凌駕する成果

# 磁場閉じ込め核融合発電の実現を目指して

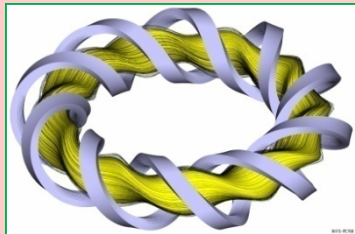
核融合発電炉の早期実現のカギ

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

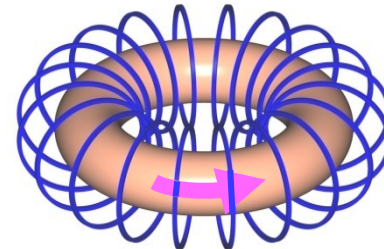
電磁石をねじる: **ヘリカル方式**  
(LHD)



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1億2,000万度達成 (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**とともに、核融合実現に貢献

# LHD重水素実験を開始(平成29年3月7日)



普通の水素ガスより重い重水素ガスを使うと、プラズマ性能の向上が期待される。

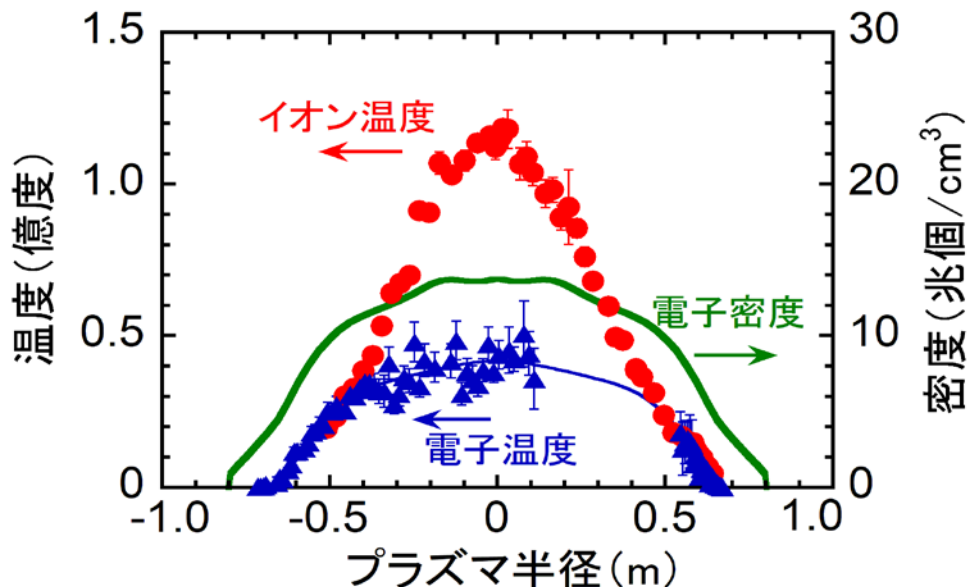
- ・ 重水素実験を開始した翌週に、イオン温度が1億度を超え、これまでの最高イオン温度を更新(軽水素プラズマの最高は9,400万度)
- ・ 主要な核融合条件の1つであるイオン温度1億2,000万度を同年7月5日に達成



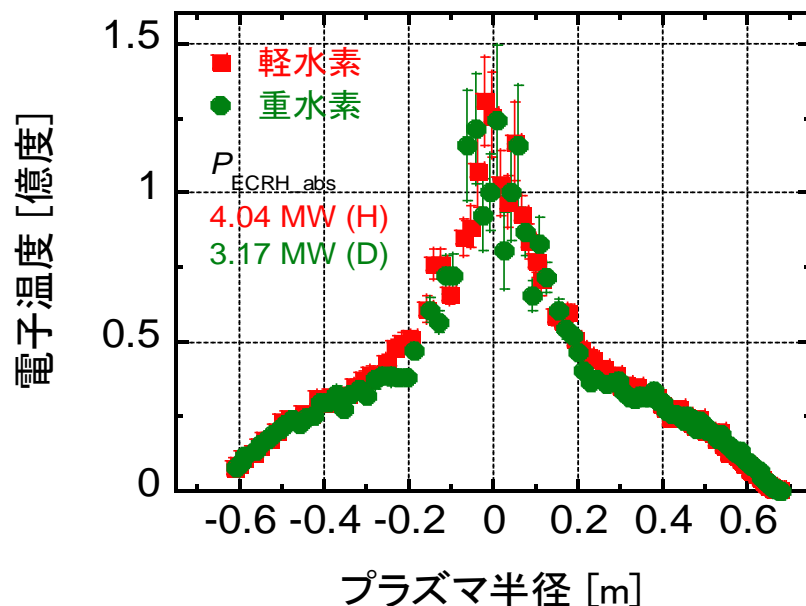
146名の来賓、所員約300名が出席した点火式

# イオン温度1億2,000万度を達成、同位体効果も観測

- 定常運転性能に優れたLHDで、重水素実験により、主要な核融合条件の1つであるイオン温度1億2,000万度をヘリカルで初めて達成。  
(軽水素プラズマの最高は9,400万度)
- 重水素ECHプラズマでプラズマの閉じ込め改善(同位体効果)を観測

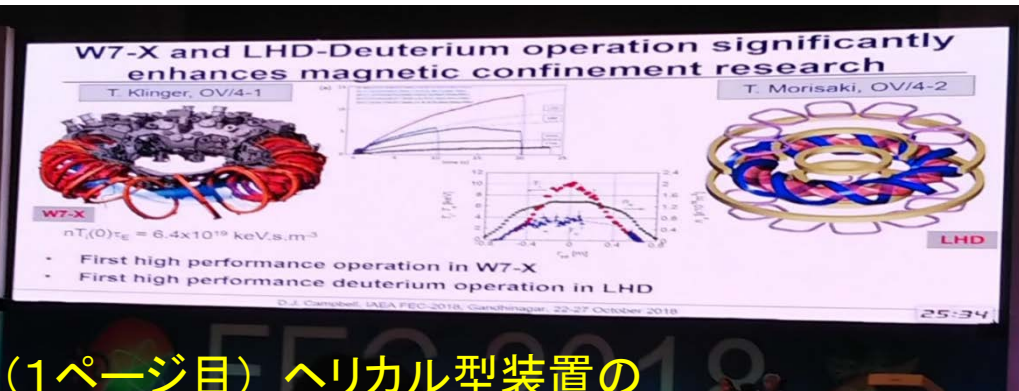


イオン温度1億2,000万度の達成



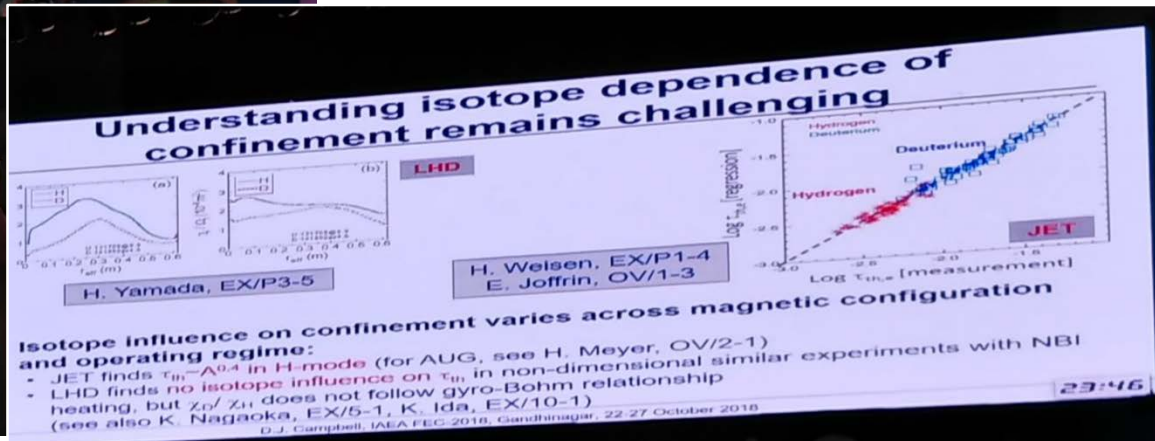
電子温度1億2,000万度を実現するのに必要なECH加熱電力は、重水素の方が低い  
→プラズマの閉じ込めが良い(同位体効果)

# 世界が注目しているLHD重水素実験



- 国際原子力機関(IAEA)主催の核融合エネルギー会議(2018年10月22日~27日、インド、700件以上の発表)のサマリーの冒頭(1ページ目と2ページ目)で、LHDが取り上げられた。

(1ページ目) ヘリカル型装置のW7-X(ドイツ)とLHDの重水素実験開始が、最も注目されるトピックスとして1番目に紹介され、LHDの1億2,000万度のイオン温度達成のグラフが引用された。



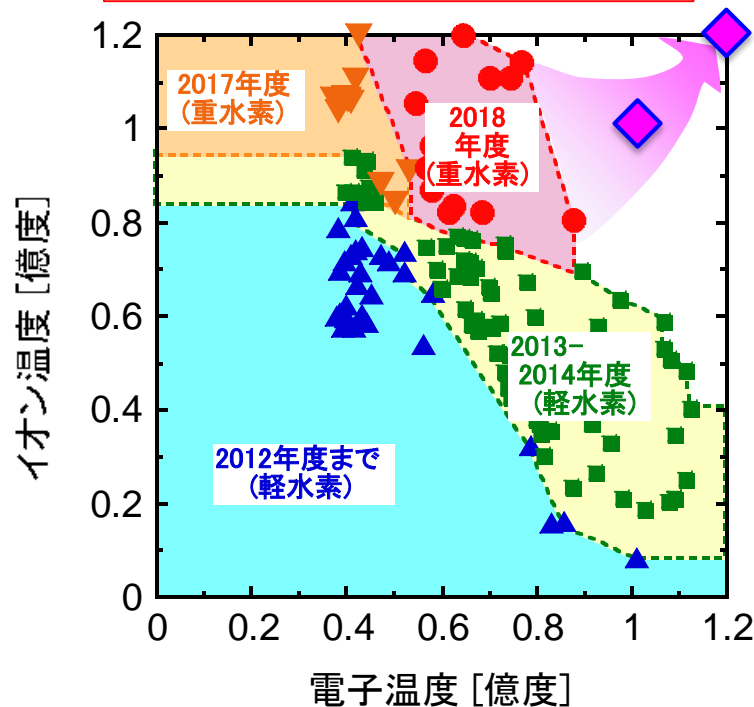
- 核融合に関する世界最大の会議で、ITERをはじめとする核融合研究におけるLHD研究の重要性が示された。

(2ページ目) プラズマ閉じ込めの同位体効果の解明は重要であることが指摘され、LHD(ヘリカル)、JET(世界最大のトカマク)の同位体効果に関する研究成果が引用された。

重水素実験により核融合炉へつながる世界最先端の研究を展開

- 核融合炉実現を見通せる高性能プラズマ研究の推進
  - イオン及び電子が共に1億度を超える核融合炉級プラズマの実現へ (H30: イオン温度1.2億度のプラズマを0.64億度に高電子温度化—研究が進展)
  - 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
- 理論的に未解明な同位体効果をはじめとする学術的価値の高い課題に対する研究の推進 (ITERへも貢献)
  - 超高性能プラズマに発現する新たな現象の解明
  - 環状プラズマの総合的理解のための学理の体系化
- 重水素実験により新たに可能となる研究の推進
  - 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

高温領域拡大による核融合炉級プラズマ研究の加速



## LHD後継計画へ向けて → 定常高温プラズマにおける熱・粒子制御法の確立

- 大規模学術フロンティア促進事業による支援は2022年度まで → 炉心プラズマ課題の解決へ
- 核融合実現への共通課題(定常プラズマ研究)をLHD後継計画として、フロンティア事業へ
  - ・核融合実現には定常状態における高温プラズマと対向壁との相互作用の解明、制御が必須
  - ・そうした研究は現状LHDのみが可能。トカマク炉心プラズマの定常化研究でJT-60SAと連携
  - トカマクを含めた世界の核融合研究に貢献



# 「核融合プラズマの定常制御」に係る課題の解決 (LHD後継計画)

LHD-P  
将来計画

- 重水素実験によりプラズマが高性能化するなど、現行の大規模学術フロンティア促進事業が終了する2022年度までに、核融合炉心プラズマの振る舞いを学術的に明らかにする見通しが立った。  
→一方、定常プラズマの熱・粒子制御にかかる課題が残されている。
- トカマクを含めた環状プラズマによる核融合炉の実現のためには、**定常プラズマの熱・粒子制御**の課題解決は必須であり、現状、**世界的に見て、LHDでなければこうした課題に取り組めない**。→世界に先駆けて解決
- **LHD後継計画**として、こうした核融合炉実現へ向けた最重要課題の1つである「核融合プラズマの定常制御」に係る研究計画を、2023年度からの6年計画で学術会議マスタープラン2020へ応募 →ロードマップ掲載、フロンティア事業へ  
課題名：『**定常高温核融合プラズマを実現する粒子・エネルギー循環の学理**』
- 高温プラズマと対向壁との間における**粒子・エネルギー循環に対する定常状態を実現**して、それに係る相互作用を解明し、その制御法を確立することを目的とする。
- そこで、粒子循環の定常状態を実現するために**真空容器内を全金属化し、加熱装置を定常仕様へ改造し、ダイバータ冷却能力を増強**するなどのLHDの改造を行い、定常実験を可能とする。
- 並行して、**トカマク炉心プラズマの定常化研究**に関してJT-60SA計画と連携  
→LHDとJT-60SAが連携して定常制御にかかる課題を解決する  
→核融合の早期実現へ向けた研究に貢献

真空容器壁をタングステン(W)に交換して、**粒子・エネルギー循環の時定数を短縮**  
 ⇒ **3時間程度**の長時間放電で「**定常プラズマ**」の物理へのアクセスが可能に

既設の  
大型装置

三大トカマク(日、米、欧)

LHD(核融合研・現行プロジェクト)

計画中の  
大型装置

JT-60SA(量研・連携研究機関)

ITER(国際協力)

LHD-U(核融合研・本計画)

プラズマ  
保持時間  
(sec)

1

10

100

1000

10<sup>4</sup>

燃料粒子循環・不純物挙動

固体表面の浸食・堆積

固体内拡散

系内粒子バランス

短い時空間スケール

MHD

電流拡散

波・粒子  
相互作用

エネルギー・  
粒子閉じ込め

原子・分子過程

・Wの循環機構、プラズマへの影響  
 ・多粒子間のマルチスケール現象

長い時空間スケール

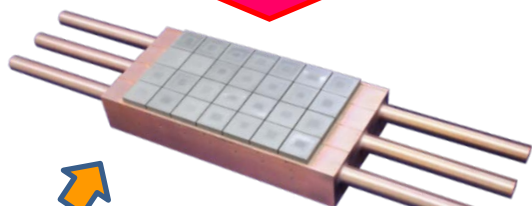
粒子・エネルギー循環



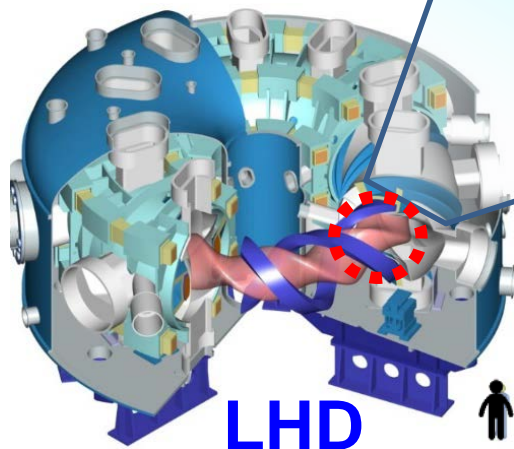
↓ 現行機器



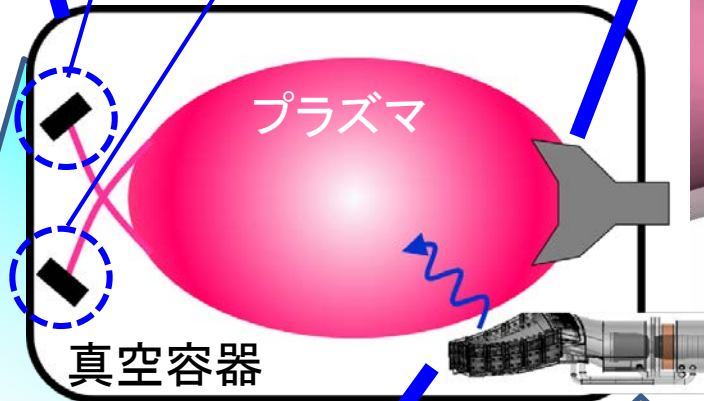
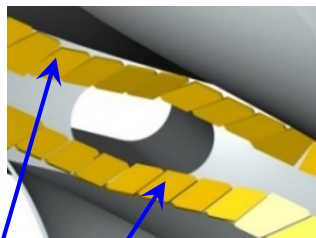
改造



高除熱ヒートシンク付  
タングステン板

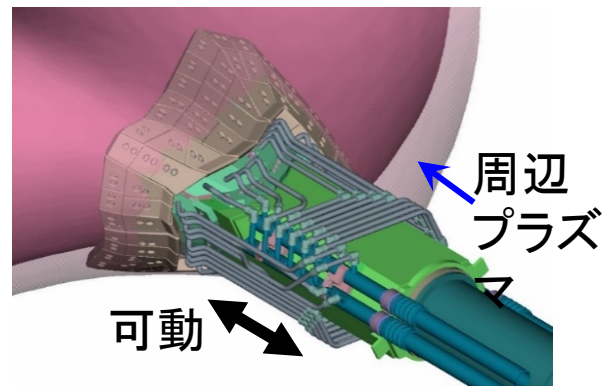


真空容器壁の全金属化



学術・応用研究への展開

↓ 周辺プラズマ研究  
ステーション



加熱用高周波  
アンテナ

加熱装置の定常高性能化

電子加熱用発振管 →

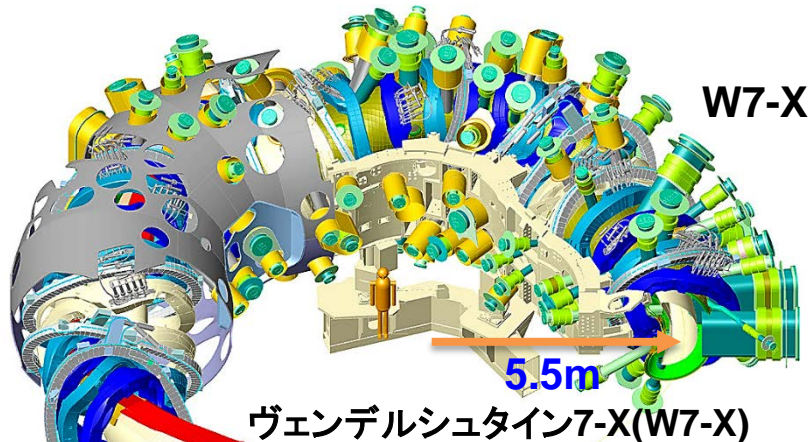


- 周辺プラズマ-固体壁相互作用研究
- 固体中の粒子挙動の解明
- 原子・分子過程データベースの構築

# ヘリカル型定常プラズマ研究の世界的な潮流

- LHDと同規模の超伝導ヘリカル型装置ヴェンデルシュタイン7-X(W7-X)が、マックスプランクプラズマ物理研究所(ドイツ)で稼働を開始、ヘリカル型のプラズマ研究はLHDとの日欧2大ヘリカル研究体制に
- ITERを牽引している欧州では、定常核融合炉の実現へ向けて、ヘリカル方式による研究を強化、中国でもヘリカル方式の研究を開始
  - 世界的に定常プラズマ研究の大幅な進展が期待されると同時に競争が激化
  - LHD研究の早期展開が必要

グライフスバルト



(2016年2月3日)  
 アンゲラ・メルケル首相が実験開始記念式典に参加し、ファーストプラズマ(水素)点火のボタンを押した。



# 核融合工学研究プロジェクトと炉工学研究の推進計画

工学P  
概要

## ヘリカル型核融合炉設計の高度化と、連動した工学基盤構築及び体系化

2010 2012 2016 第3期中期計画 2022



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

工学基盤の構築

実機能・実規模・実環境・工学実証研究

核融合炉の工学設計とR&D

(1)低放射化材料研究

(2)大型高磁場超伝導マグネット研究

(3)高熱流プラズマ対向壁研究

(4)長寿命液体ブランケット研究

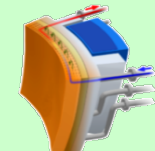
(5)微量トリチウム管理技術研究



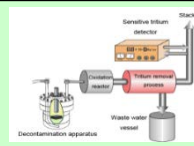
超高熱負荷対向壁の製作と核融合模擬条件での実証



100 kA級導体開発とヘリカル巻線の試作



ブランケットの試作と核融合模擬条件での実証研究



トリチウムの測定技術、分離・回収技術の実証研究

寄与



ヘリカル型核融合炉

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

◇大口徑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)

## 2. 高熱流プラズマ対向壁研究

◇LHD照射  
試験装置

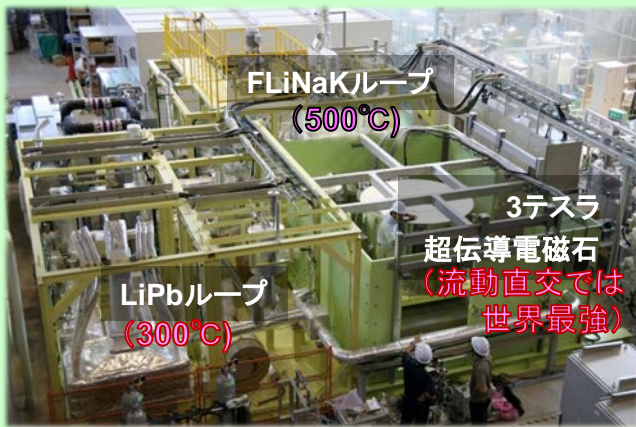
◇超高熱負荷試験装置 (ACT2)



◇イオンビーム解析装置

## 3. 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8台)



◇高温静水圧焼結接合  
試験システム (HTW)

## 概要

- ・大学との共同研究、国際共同研究に基づき、ヘリカル型核融合炉への導入に向けて**高温超伝導技術の高度化**を行い、**導体開発、コイルの設計、製作、試験**へと展開する。これにより**経済的な核融合炉の早期実現**に資する
- ・世界の高温超伝導を用いた**核融合試験装置構想の実現**を先導する
- ・高温超伝導**実応用研究**のパイオニアとして様々な分野の基盤技術を構築し、広く**社会に貢献**する

### ITER/BAへの貢献



ITERトロイダル磁場コイル接続部試験



JT-60SA 中心ソレノイドコイル試験

### NIFSの中核設備

温度可変低温設備

強制冷却コイル試験装置



大型超伝導コイルの低温特性試験



大型超伝導導体の強磁場特性試験

-269°C~室温のヘリウムを供給

大口径高磁場導体試験装置 (\*)



大学との連携による共同研究 (大学の研究力強化)

### 国際協力の推進



マサチューセッツ工科大学 (MIT) との共同研究において、高温超伝導大型導体短尺サンプルを試験、大口径高磁場導体試験装置を使用 (\*)

(\*) 米国 National Academy of Sciences 核融合プラズマ研究報告書にも記載された国際プラットフォーム

線材接合部評価装置



東北大学

交流損失測定装置



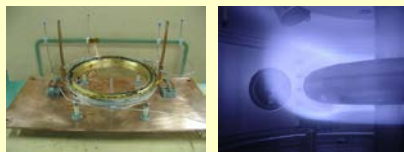
鹿児島大学

超伝導線材歪特性評価装置



上智大学

磁気浮上内部導体装置



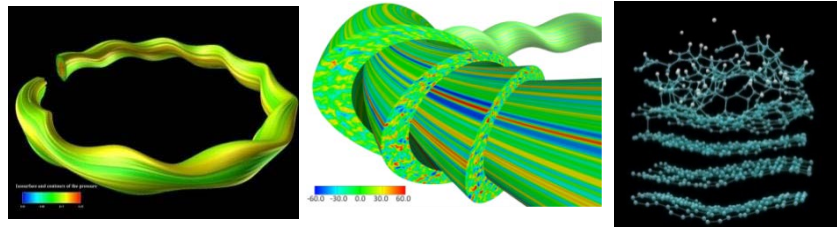
東京大学

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

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

全装置サイズでのプラズマのふるまいの予測

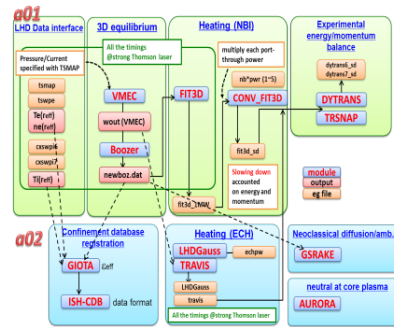
入力条件

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

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

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 22/24

# プラズマシミュレータの増強と国内外共同研究の推進による新たな物理課題への挑戦

- 数値実験炉の構築に向けたコアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び**統合化**のための研究
- コアプラズマにおける**乱流輸送のモデル化**と統合輸送コードへの組み込み、各種輸送コードに**複数イオン種効果**の取り込み
- タングステンを中心とする**プラズマ対向材**のシミュレーションモデル開発と物性値評価への応用

富士通 FX100  
(最大理論性能: ~2.6PF,  
総記憶容量: ~81TB,  
期間:2015-2020)



10ペタフロップスクラスの理論性能を持つプラズマシミュレータへの増強: (2020年)



重水素プラズマ点火式後、国内外の共同研究者と一緒に

大型ヘリカル装置の研究には、約100名の研究者と、国内から約400名の研究者と約150名の大学院生、海外からも約70名の研究者が参加