

# LHD, for What, and What beyond

## — 学術研究の大型プロジェクトの未来を拓く —

中部大学 伊藤公孝

**本日の主題**：研究の未来を拓くために

**本講演**：LHDの歴史から学び、post-LHDに活かし、NIFSでの実験研究の方向を見出す

本稿の考察については、特に故伊藤早苗・故若谷誠宏両氏に負うところが大きい。  
また、本日の場を作ってくださった佐藤哲也先生・山田所長に感謝します。

0. 岐路に立つ核融合科学研究所と共同研究者
1. LHDとは何であるのか
2. LHDの先へ：核融合科学研究（実験研究）の今後へ

「学術研究の大型プロジェクト・大規模学術フロンティア事業」としてのLHD計画が終了(2022)。LHDは学術研究基盤事業として3年間予算措置、**本年度最終実験**。

## その先である：どうするのか？

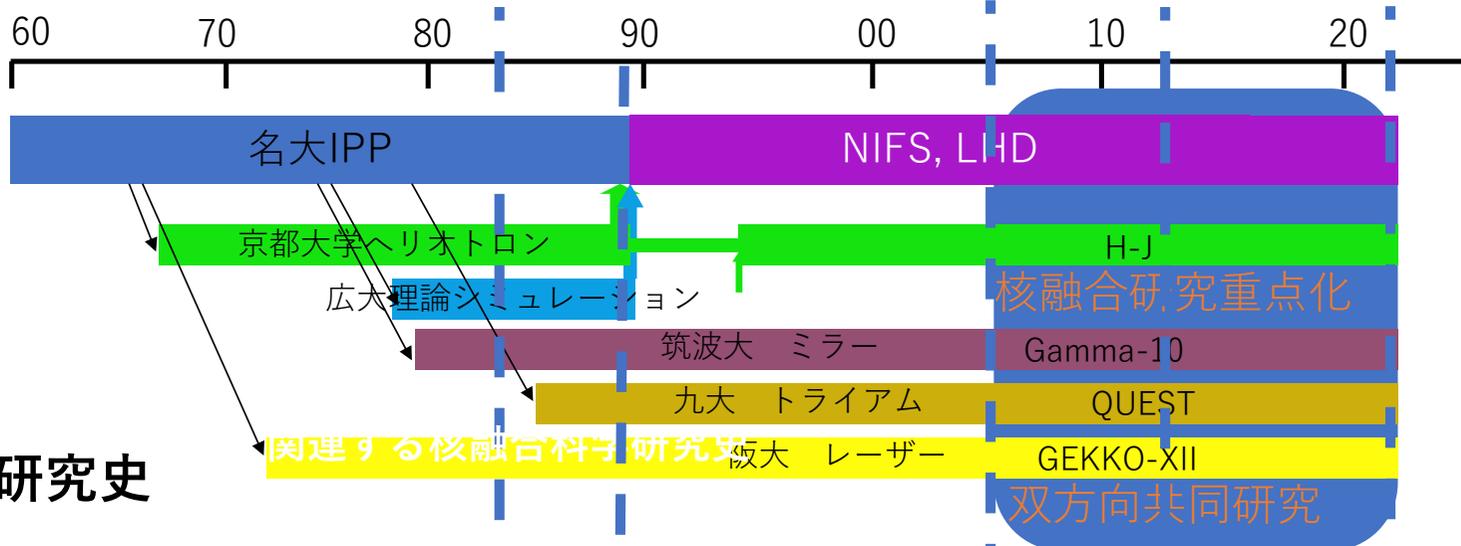
学術研究では研究機会を自分で勝ち取るもの。（佐藤先生のご講演も同じ立場。）

「どうなるのか」という問いから頭を切り替えてください。 他人事ではない！

どうすれば研究機会を勝ち取れるのか、

**LHDの歴史、すなわちLHDの成功体験と蹉跌から学ぶ。**

# LHDとは何であるのか



関連する  
核融合科学研究史  
(2022まで)

LHDの選択  
(学術審議会)

法人化

フロンティア  
事業

フロンティア事  
業終了

成功体験  
LHD, for What

NIFSの歴史 (佐藤先生講演)

大きな岐路

新たな道へ  
LHD, What beyond

## 大学の大型計画とLHDの選択（学術審議会のためのWG,1984）

### 背景

多岐路線と称して、さまざまな方式が、自らの長所を論い・他を貶めるような風潮。

1980年代を迎え、多角化した核融合研究の次にステップをどうするか、学術審議会核融合部会（部会長早川幸男先生）は、

学術審議会特定領域推進分科会核融合部会第2次作業会（主査 宅間宏先生）を発足させ、科学的アセスメントを求めた。（1984年12月から1985年5月）

（参考文献：宅間宏、核融合研究 55 (1986) 47)

## 作業会（主査 宅間宏先生）メンバー

部会長	早川（名大）			
区分	軸対象系 AT	ヘリカル HS	開放系 OS	慣性系 IC
専門委員	まとめ △宅間（電通大）			
主査	△藤田（プラ研）	△宮本（東大）	△池上（プラ研）	△西川（広大）
副主査	宮本（東大）	池上（プラ研）	西川（広大）	宅間（電通大）
専門委員外	△井上（東大） 狐崎（原研） 下村（原研） △田中（京大） 浜田（プラ研） 毛利（プラ研） 本島（京大）	△飯吉（京大） 伊藤（原研） 藤原（プラ研） 松岡（プラ研） 若谷（京大）	板谷（京大） 犬竹（筑波大） △谷津（筑波大） △佐藤（東北大） 佐藤（プラ研） 渡辺（広大）	田島（プラ研） △中井（阪大） 西原（阪大） 八井（長岡技大） 八巻（名大）

△：幹事会メンバー

## 早川委員会で考えた問題

10年先には3大トカマクの成果が出ているだろう。その中で、世界最先端の学術的研究を行うためには、研究目的はどうあるべきか？  
それはどのようにアプローチ出来るか？

外部導体系の検討グループにいたので、「トーラスプラズマの総合的理解」が旗印だと考え、説明した。

# 問題設定

第一の問題設定「選択のための論理構成」：どういう論理で選択するか？

“from alternatives”ではなく、「学問研究目的」で

第二の問題設定「学問的研究の目的」

問われていたことの中核は、「多岐路線」という枠に替わる、核融合科学に関わる学術的新基軸を探すための方法論であった

## 結論

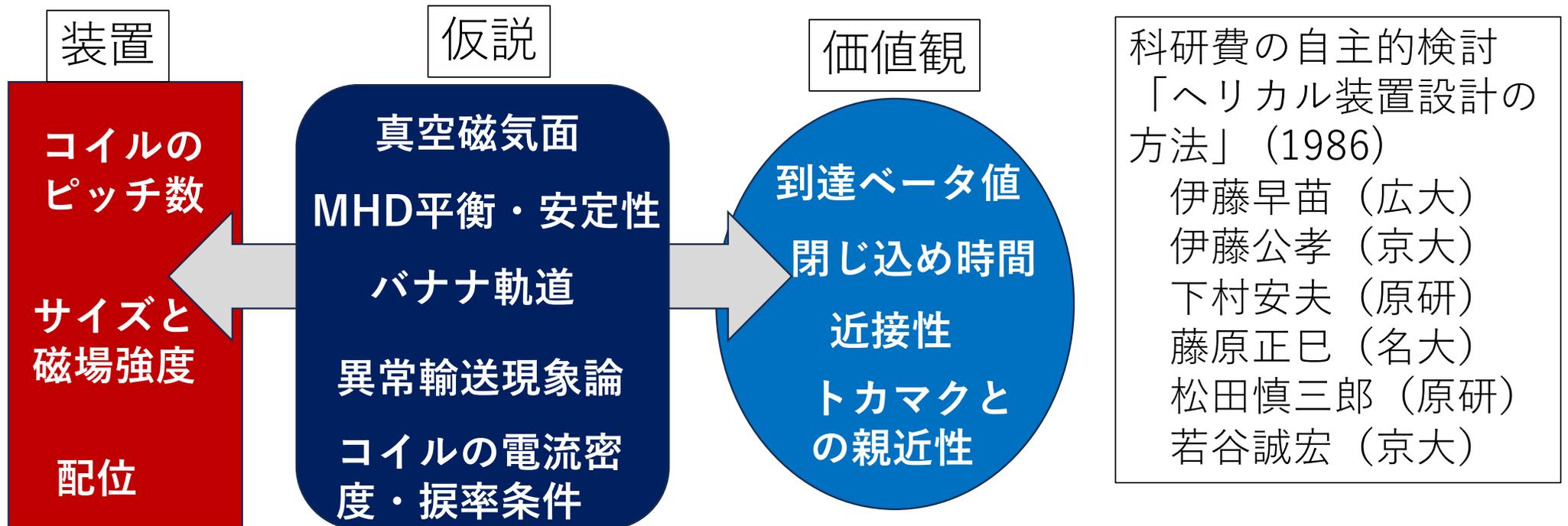
次期大型装置としてHS系を選び、

トカマクを含む環状系の諸問題を解決するための研究を行う。

外部導体系の持つ炉工学的な長所を利用して定常運転炉を実現する可能性を探ることも、重要な研究課題となることは言うまでもない。

「あれかこれか」を問うのではなく、普遍性を探求するという新規軸  
LHD計画は普遍化探求か、代替炉形式か、捉え方の差と幅があり、LHD装置の運命を決めた。

## 研究目的と装置設計を結びつけるものは仮説の選択



”deeper magnetic well, low aspect ratio, moderate rotational transform, moderate magnetic shear, and orbit-drift control” ( $l = 2$ , 低い  $m$ )

# LHDの設計：研究目的をどのように装置設計に結びつけるか

7b

予算等の拘束条件の下、「目的に即した最適化の仮説を採用する」という方法論を明確にした。

## 研究目的と装置設計を結びつける仮説の選択

飯吉厚夫：日本物理学会誌  
44 (1989) 309

かつて：“high rotational transform, high magnetic shear” (ヘリオトロン E)

今般：“deeper magnetic well, low aspect ratio, moderate rotational transform, moderate magnetic shear, and orbit-drift control” (有利さの追求、トカマク等との親近性) 「トーラスプラズマの総合的理解」という目的に叶う。

LHDは $m=10$ を選択。先鋭的な $m=8$ の場合を小型な先駆装置で確認するという考え方から、CHS (compact helical system)を名古屋大学で建設

「最適化ステラレーター」という見方を明確に位置付けたのは、Max-Planck-プラズマ物理学研究所であろう。「測地線曲率の最小化」を最適化の基準とする仮説を選び今日に及ぶ。

プラズマの磁気軸を平面上に拘束するのではなく立体的に変動する自由度を持たせれば、更なる「トーラスプラズマの総合的理解」での普遍化が可能になることは、早川委員会でも認識されていた。早川座長はその自由度を重視したが、普遍化に繋がるのはどのような自由度であるのかその時点では明確ではなかったため、詳細を追求しなかった。

## 物理的描像の転回：

1990年代は、プラズマの異常輸送の問題を、「線形・局所的・決定論的」モデル（代表的にはKadomtsev 公式に線形不安定性を代入したもの）から、「非線形・非局所・確率論的」描像へと転換する時代

その嚆矢は、例えば

H-モードの電場分岐モデル[S.-I. Itoh and K. Itoh]

乱流が帯状流を生むことをシミュレーションで実証[Hasegawa and Wakatani]

大域的な径電場はその頃までトカマクでは重視されなかった物理量であるが、それに着目することで「非線形・非局所・確率論的」描像への転換が加速された。このことに象徴されるように、LHD計画の発足の持つ中核的意味は、ある炉形式を研究することではなく新しい研究方法を提示することである。

## 生み出された成果とインパクト（一例）

帯状流の実験的発見：[A. Fujisawa, et al.: PRL (2004)]

閉じ込め時間の水素同位体効果： $\tau_E$ が質量数にきわめて弱い依存性[H. Yamada, et al.: PRL (2019)]

磁場トポロジーの効果：[K. Ida, et al.: PRL (2002)]

突発現象：“tongue”形変形の発生を同定。モード探査では不十分 [K. Ida, et al. Sci. Rep. (2016)]

.....

2011年仁科記念賞（藤澤・居田）

『高温プラズマにおける自発電磁場の実験的検証』

帯状流・帯状磁場の発見(Fujisawa)、  
輸送ヒステリシスの発見(Inagaki)、  
非線形結合によるGAMの突発(Ido)、  
電場勾配による乱流抑制の実証(Fujisawa)、  
電場曲率による乱流抑制の実証(Tokuzawa)、  
内部輸送障壁と電場パルセーション(Fujisawa)、  
不純物ホール(Ida)、  
磁気面破壊と運動量輸送(Ida)、等々

## 核融合の開発研究にも大きな寄与

ITERは燃えない？ [J. Glanz: Science **274** (1996) 1600]

帯状流があれば燃えるとの理論的予測（アメリカ:1998）

帯状流の存在を実験で発見(NIFSと共同研究者:2004)

今のCompact ITER建設への弾みをつける

## LHDの成功体験

LHDの選択は：

学問的研究の目的と併せて実験施設を選ぶ**論理を創案。**

「多岐路線」という枠に替わり、**学問的普遍化を目的**にした。

LHD装置の設計は、**研究目的に基づいた仮説**に依る。

LHD計画は研究潮流の創出を目指していた。研究者たちは

**学術的な価値ある成果**を生み出してきた。

核融合**開発研究の難問を解決**するインパクトも持っていた。

---

**方法論、研究潮流と成果ゆえに、LHD計画は大きな成果を挙げたと言える**

これだけ素晴らしい成果があったのに、なぜLHDは「学術研究の大型プロジェクト・大規模学術フロンティア事業」から外されたのか？  
しかも、外されたのは1つだけである！

## LHDの目的と運営の重点の間に、齟齬

LHの方式選択において述べられた二つのテーマの混乱、  
特に学問的目的を二の次に：

学術界からは、主客転倒していると受け取られていた  
**学術界の見方に無関心であった**などが原因に挙げられる。

実は**2009年**ころが**岐路**であった。

研究と組織について、  
佐藤先生講演

# 令和6年度 学術研究の大型プロジェクトの一覧

## 大規模学術フロンティア促進事業(11事業)

**データ駆動による課題解決型人文学の創成**  
 ～データ基盤の構築・活用による次世代型人文学研究の開拓～  
 (人間文化研究機構国文学研究資料館)

国内外機関等との連携による更なる画像データの拡充、画像データのAI活用等によるテキストデータ化、データ分析技術開発の推進など、国文学を中心とするデータインフラを構築し、様々な課題意識に基づく国内外・異分野の研究者との共同による大規模データを活用した次世代型人文学研究を開拓する。



**大型光学赤外線望遠鏡による国際共同研究の推進 (すばる)**  
 (自然科学研究機構国立天文台)

米国ハワイ島に建設した口径8.2mの「すばる」望遠鏡により、銀河が誕生した頃の宇宙の姿を探る。太陽系の最も遠くで発見された天体の記録を更新するなど、多数の観測成果。



**宇宙と生命の起源を探究する大型ミリ波サブミリ波望遠鏡アルマ2計画**  
 (自然科学研究機構国立天文台)

日米欧の国際協力によりチリに建設した口径12mと7mの電波望遠鏡からなる「アルマ」により、生命関連物質の探索や惑星・銀河形成過程の解明を目指す。



**30m光学赤外線望遠鏡 (TMT) 計画の推進**  
 (自然科学研究機構国立天文台)

日米加印の国際協力により口径30mの「TMT」を米国ハワイ島に建設し、太陽系外の第2の地球の探査、最初に誕生した星の検出等を目指す。(※2021年度に計画期間終了)



**KEK スーパーBファクトリー計画**  
 (高エネルギー加速器研究機構)

加速器のビーム衝突性能を増強し、宇宙初期の現象を多数再現して「消えた反物質」「暗黒物質の正体」「質量の起源」の解明など新しい物理法則の発見・解明を目指す。前身となる装置では、小林・益川博士の「CP対称性の破れ」理論(2008年ノーベル物理学賞)を証明。



**大強度陽子ビームで究める宇宙と物質の起源と進化 (J-PARC)**  
 (高エネルギー加速器研究機構)

日本原子力研究開発機構と共同で、世界最大級のビーム強度を持つ陽子加速器施設を運営。ニュートリノなど多様な粒子ビームを用いて基礎研究から応用研究に至る幅広い研究を推進。



## 学術研究基盤事業(3事業)

**研究データの活用・流通・管理を促進する次世代学術研究プラットフォーム (SINET)**  
 (情報・システム研究機構国立情報学研究所)

国内1,000以上の大学等を高速通信回線ネットワークで結び、約300万人の研究者・学生が活用する、多岐にわたる学術情報の流通促進を図るための学術ネットワーク基盤である「SINET」と、データ駆動型研究を推進するため研究データの「管理」「公開」「検索」基盤から構成される研究データ基盤を一体的に運用。



**高輝度大型ハドロン衝突型加速器 (HL-LHC) による素粒子実験**  
 (高エネルギー加速器研究機構)

CERNが設置するLHCについて、陽子の衝突頻度を10倍に向上し、現行のLHCよりも広い質量領域での新粒子探索や暗黒物質の直接生成等を目指す国際共同プロジェクト。日本はLHCにおける国際貢献の実績を活かし、引き続き加速器及び検出器の製造を国際分担。



**「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究の推進**  
 (東京大学宇宙線研究所)

ニュートリノの観測を通じて、その性質の解明やニュートリノを利用した宇宙観測を目指す。(2015年梶田博士はニュートリノの質量の存在を確認した成果によりノーベル物理学賞を受賞。また、2002年小柴博士は、前身となる装置でニュートリノを初検出した成果により同賞を受賞。)



**大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) 計画**  
 (東京大学宇宙線研究所)

一辺3kmのL字型のレーザー干渉計により重力波を観測し、ブラックホールや未知の天体等の解明を目指すとともに、日米欧による国際ネットワークにより、重力波天文学の構築を目指す。



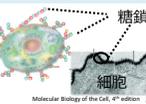
**大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験 (ハイパーカミオカンデ計画)の推進**  
 (東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構)

ニュートリノ研究の国際協力による次世代計画として、新型の超高感度検出器を備えた大型検出器の建設及びJ-PARCの高度化により、ニュートリノの検出性能を著しく向上。素粒子物理学の大統一理論の鍵となる陽子崩壊の初観測や、CP対称性の破れなどのニュートリノ研究を通じ、新たな物理法則の発見、宇宙の謎の解明を目指す。



**ヒューマンライコームプロジェクト**  
 (東海国立大学機構、自然科学研究機構、創価大学)

多くの生命現象や疾患に関与するものの全容が未解明である「糖鎖」について、ヒトの糖鎖情報を網羅的に解読し、医学をはじめ幅広い研究分野との新たな連携を産み出す糖鎖情報の基盤を構築。ヒトの生命現象の解明、老化・認知症・がん、感染症等に関する革新的な治療法・予防法の開発を通じ、生命科学の革新、病気で苦しむことのない未来を目指す。



**南極地域観測事業**  
 (情報・システム研究機構国立極地研究所)

国立極地研究所を中核機関とし、関係省庁が連携・協力して研究観測の企画・実施、観測に関わる昭和基地等の設置活動を行っている。新たにドームふじ観測拠点IIにおいて約3,000mの深層掘削を開始。100万年を超える最古級のアイスコアを採取し、地球環境変動の解明を目指す。これまでオン・ホルルの発見など多くの科学的成果を獲得。



**超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD) 計画**  
 (自然科学研究機構核融合科学研究所)

超高温プラズマを安定的に生成できる大型ヘリカル装置 (LHD) を学際的な研究基盤として活用し、世界最高の時空間分解能をもつ計測システムによって、核融合に限らず、宇宙・天体プラズマにも共通する様々な複雑現象の原理を解明。



「超高性能プラズマの定常運転の実証」計画について「積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきである」と評価（2013年9月）

## 2. 計画推進に当たっての留意点

本計画の推進に当たっては、以下の取り組みが必要である。

2022年と予想されている原型炉の形式の選択を視野に置き、仮にトカマク方式に確定した場合のLHDの役割について、巨額化する経費、核融合実現への寄与とその有効性、期待される科学的成果の重要性などに鑑みて、研究者コミュニティにおいて現時点からの真摯な検討が望まれる。

本計画については、環状プラズマの総合的理解の推進を重視すべきであり、それが我が国の学術的地位を向上させることにつながる。特に、本計画によって、理論的に解明できていないアイソトープ効果等の研究を推進し、物理理解の新たな展開を促し、学術的な価値を高めることが必要である。

10年後（2022年）に何が起きるか書いてある。

### LHD計画の成功体験

LHDの選択は：学問的研究の目的の創案。

**研究目的に基づいた仮説**に依る設計。

**学術的な価値ある成果と開発研究の難問解決**をもたらす。

### LHD計画の蹉跎

LHDの目的と運営の重点に、**齟齬**：LHD計画の学問的目的を二の次  
**学術界の見方**（主客転倒していると）**に無関心であった。**

---

**LHD計画の成功体験と蹉跎をpost-LHD計画に生かすにはどうするか？**

「岐路に立つ核融合科学研究所と研究者」と書いたが、岐路をどちらへ向かうのか？

NIFS吉田イニシアティブ「**学問回帰**」

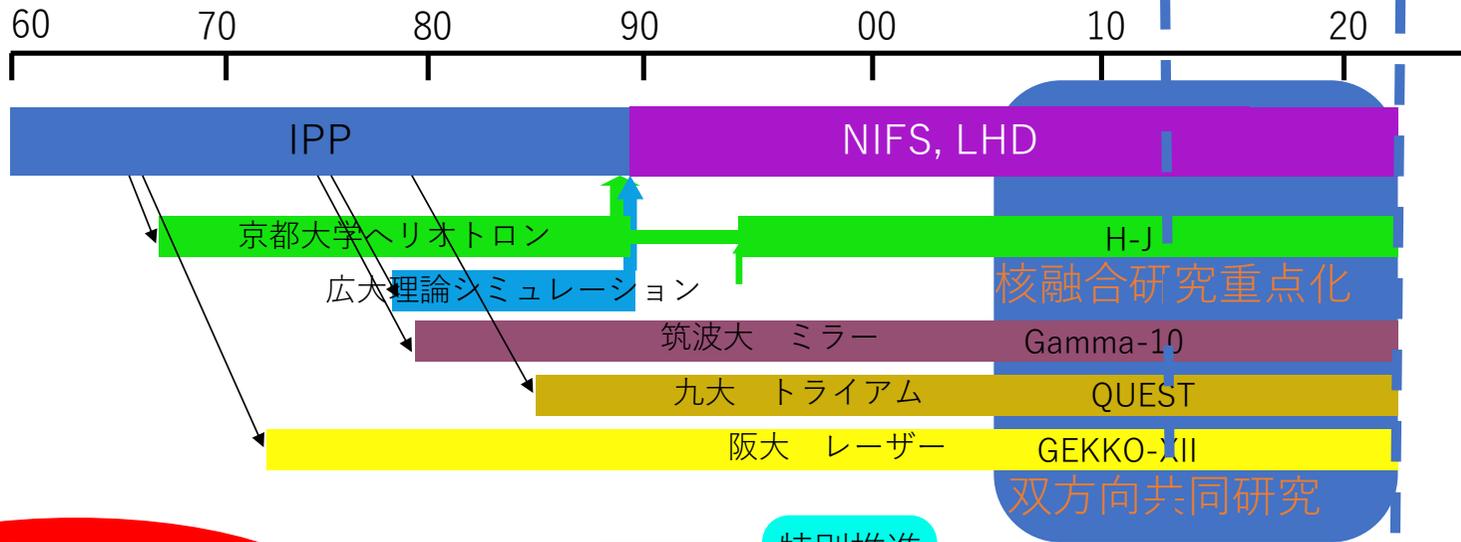
組織：Academic-Research-Oriented

研究内容：新ロードマップ（実験科学を中心に）

cf: シミュレーション科学（佐藤先生）

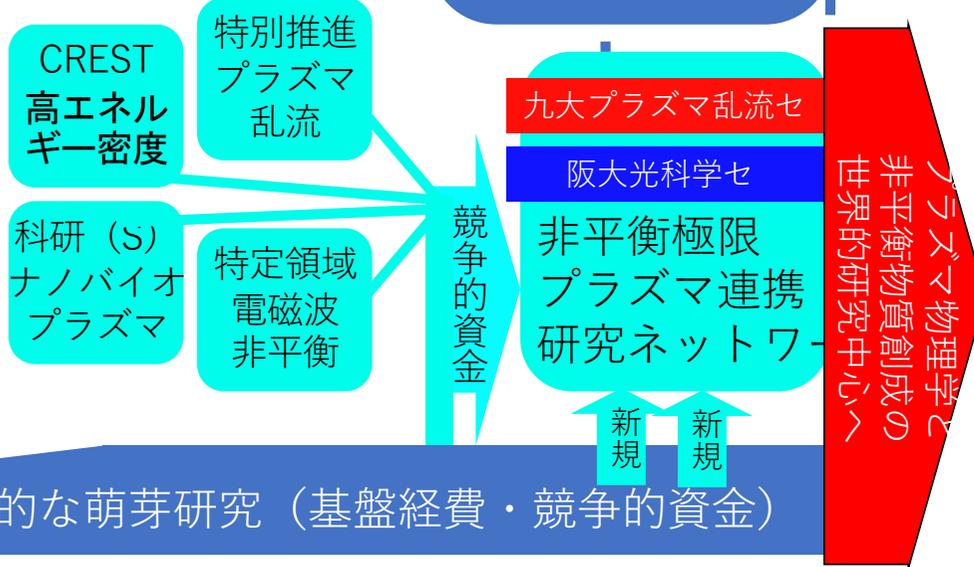
**核融合科学研究の今後（実験科学を中心に）を説明するために、まず、「その前に準備していたこと」を説明する。**

# LHDの完了を見通すと：次の学術研究の構想（2010年代半ばの視点）



LHDのフロンティア事業終了想像、未来を検討

プラズマサイエンス核融合 (日本学術会議~2010)

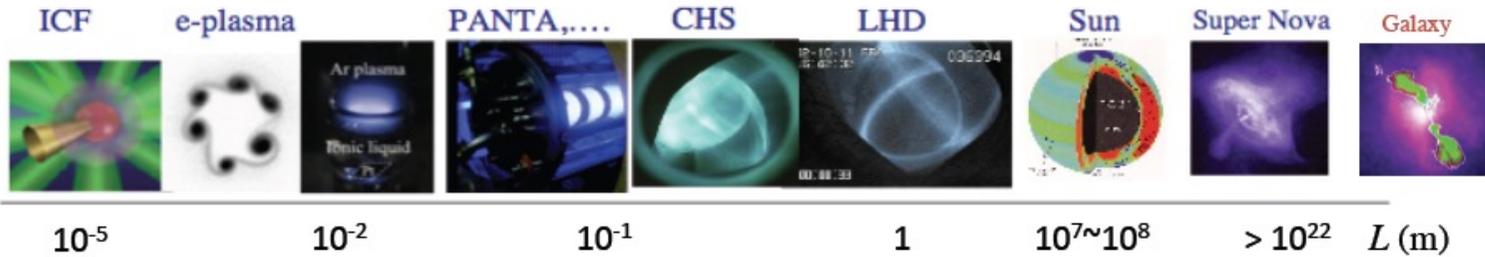


ロードマップ

# LHDの完了を見通すと：次の学術研究の構想（2010年代）

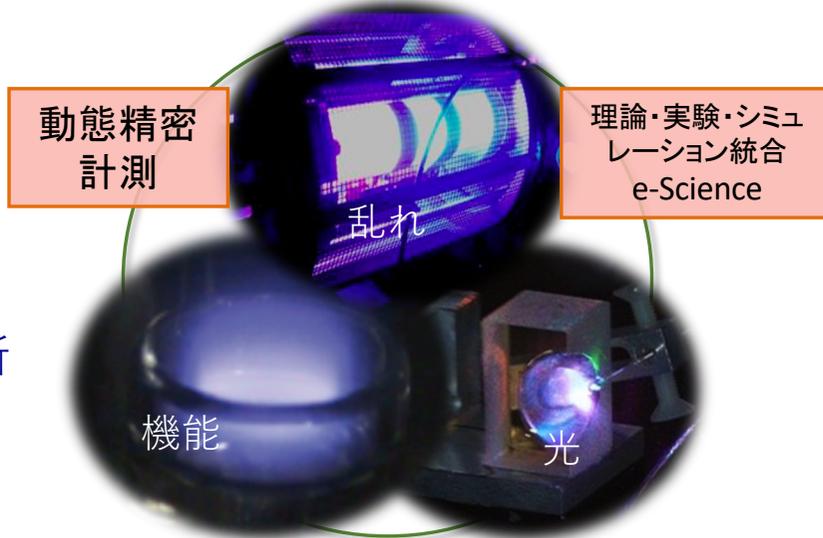
## 非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネットワーク拠点

文部科学省  
ロードマップ  
(2010, 2011,  
2014)



非平衡極限プラズマ研究プラットフォーム

3つの極限の追求



極限フロンティア拡大新たな領域へ

**極限的乱流場**  $10^{15}$ 倍  
乱流動的統合観測法

**極限的光場**  $10^{28} \text{W/m}^2$   
プラズマフォトンクス

**極限的機能性**  $10^{-10} \text{m}$   
プラズマバンドエンジニアリング  
非平衡性プラズマ

軸性ベクトル生成起源の解明、  
極限状態の探究と新機能性物質の創成

みなさん、一度は自分の目で読んでください！

## 計画名称：超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

実施機関：NIFS

連携機関：九州大学(極限プラズマ研究連携センター)、大阪大学(レーザー科学研究所)、東京大学(大学院新領域創成科学研究科)、中部大学(ミュオン理工学研究センター)、量子科学技術研究開発機構(量子エネルギー部門)

日本学術会議プラズマサイエンス小委員会の審議に基づき、現在 NIFS で実施中の「超高温プラズマ学術研究基盤(LHD)計画」やロードマップに掲載された「非平衡極限プラズマ連携」等から統合的に研究を発展させると。

「文部科学省 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」により価値が認められロードマップ2023に掲載。

前よりさらに普遍的な学理を探求

「プラズマの構造と発展を規定する「位相空間構造」を定量化し、「位相空間物理に深化したプラズマの総合的理解」を提示する。」

# 新ロードマップ：超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

項目 (研究テーマ)	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目	10年目 以降	備考
<b>1. 装置整備</b> ミクロ集団現象のメカニズムと効果を解明するために必要な、速度分布関数を高精度で制御・計測する装置群を、これまでの研究基盤を最大限活用して整備する。 <b>Phase-I</b> ① 既存のプラズマ装置 (CHS) を活用し、CHD として整備する。 ② 計測セクションとマニピュレータセクションを段階的に移設、導入し、実験に供する。 <b>Phase-II</b> ③ Phase-I の実験に並行して、プラズマ装置 (CHD-U) の製作を進め、5年目に、CHS と入れ替える。 ④ 計測セクションとマニピュレータセクションを増強し、実験に供する	① CHD の整備			② 計測セクションの移設、導入 ② マニピュレータセクションの移設、導入		③ CHD-U の製作・導入		③ CHD-U の増強 ④ 計測セクションの増強 ④ マニピュレータセクションの増強				
<b>成果指標</b>	①の完了と②の実施開始				③の完了と④の実施開始					Phase-II 実験の実施		
<b>2. ミクロ集団現象の研究</b> プラズマの構造と発展を規定する「位相空間構造」を定量化し、「位相空間物理に深化したプラズマの総合的理解」を提示する。 ① 速度分布関数の制御・操作実験と高時空分解能計測 ② 理論・シミュレーション研究 ※ 本研究は、現在実施中の「超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD) 計画」や「非平衡極限プラズマ連携」等を統合して研究を進展させる。	プラズマに独特な揺らぎの発生機構と効果 (非平衡プラズマ中の物質・エネルギー輸送) の解明							核融合研究の積年の難問を解決する科学的基盤を形成				
<b>成果指標</b>	年間論文数 50 本					年間論文数 100 本					年間論文数 100 本	

計画は提出した。

計画に予算がつくだけの説得力があるか。

どのように装置設計すれば説得力が出るか？

説得する相手は誰か？

首脳部がなんとかしてくれるという「前年同」ボケからの脱却を。大型フロンティア延長はだめだった！

ではどうする？

# 新ロードマップ：超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

項目 (研究テーマ)	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目	10年目 以降	備考
<b>1. 装置整備</b> ミクロ集団現象のメカニズムと効果を解明するために必要な、速度分布関数を高精度で制御・計測する装置群を、これまでの研究基盤を最大限活用して整備する。 <b>Phase-I</b> ① 既存のプラズマ装置 (CHS) を活用し、CHD として整備する。 ② 計測セクションとマニピュレータセクションを段階的に移設、導入し、実験に供する。 <b>Phase-II</b> ③ Phase-I の実験に並行して、プラズマ装置 (CHD-U) の製作を進め、5年目に、CHS と入れ替える。 ④ 計測セクションとマニピュレータセクションを増強し、実験に供する	① CHD の整備 ② 計測セクションの移設、導入 ② マニピュレータセクションの移設、導入 ③ CHD-U の製作・導入 ④ 計測セクションの増強 ④ マニピュレータセクションの増強											
<b>成果指標</b>	①の完了と②の実施開始				③の完了と④の実施開始					Phase-II 実験の実施		
<b>2. ミクロ集団現象の研究</b> プラズマの構造と発展を規定する「位相空間構造」を定量化し、「位相空間物理に深化したプラズマの総合的理解」を提示する。 プラズマに独特な揺らぎの発生機構と効果 (非平衡プラズマ中の物質・エネルギー輸送) の解明 核融合研究の積年の難問を解決する科学的基盤を形成		Phase-I 実験 (CHD)				Phase-II 実験 (CHD-U)						
① 速度分布関数の制御・操作実験と高時空分解能計測 ② 理論・シミュレーション研究と速度分布関数の計測と連携した解析												
<b>成果指標</b>	年間論文数 50 本				年間論文数 100 本					年間論文数 100 本		

佐藤先生のお話  
シミュレーション全体像

計画は提出した。

計画に予算がつくだけの説得力があるか。

どのように装置設計すれば説得力が出るか？

説得する相手は誰か？

首脳部がなんとかしてくれるという「前年同」ボケからの脱却を。大型フロンティア延長はだめだった！

ではどうする？

※ 本研究は、現在実施中の「超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD) 計画」の「非平衡極限プラズマ連携」等と合わせて研究を進展させる。

# 新ロードマップ：超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

項目 (研究テーマ)	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目 以降	備考
<b>1. 装置整備</b> ミクロ集団現象のメカニズムと効果を解明するために必要な、速度分布関数を高精度で制御・計測する装置群を、これまでの研究基盤を最大限活用して整備する。 <b>Phase-I</b> ① 既存のプラズマ装置 (CHS) を活用し、CHD として整備する。 ② 計測セクションとマニピュレータセクションを段階的に移設、導入し、実験に供する。 <b>Phase-II</b> ③ Phase-I の実験に並行して、プラズマ装置 (CHD-U) の製作を進め、5年目に、CHS と入れ替える。 ④ 計測セクションとマニピュレータセクションを増強し、実験に供する	① CHD の整備 ② 計測セクションの移設、導入 ② マニピュレータセクションの移設、導入 ③ CHD-U の製作・導入 ④ 計測セクションの増強 ④ マニピュレータセクションの増強										
<b>成果指標</b>	①の完了と②の実施開始				③の完了と④の実施開始					Phase-II 実験の実施	
<b>2. ミクロ集団現象の研究</b> プラズマの構造と発展を規定する「位相空間構造」を定量化し、「位相空間物理に深化したプラズマの総合的理解」を提示する。 ① 速度分布関数の制御・操作実験と高時空分解能計測 ② 理論・シミュレーション研究	プラズマに独特な揺らぎの発生機構と効果 (非平衡プラズマ中の物質・エネルギー輸送) の解明 核融合研究の積年の難問を解決する科学的基盤を形成 Phase-I 実験 (CHD) Phase-II 実験 (CHD-U) 速度分布関数の計測と連携した解析										
※ 本研究は、現在実施中の「超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD) 計画」や「非平衡極限プラズマ連携」等を統合して研究を進展させる。											
<b>成果指標</b>	年間論文数 50 本				年間論文数 100 本					年間論文数 100 本	

計画は提出した。

計画に予算がつくだけの説得力があるか。

どのように装置設計すれば説得力が出るか？

説得する相手は誰か？

首脳部がなんとかしてくれるという「前年同」ボケからの脱却を。大型フロンティア延長はだめだった！

ではどうする？

自分で提案した研究の明瞭化;

超高温プラズマの「マイクロ集団現象」、具体的には「プラズマの構造と発展を規定する「位相空間構造」を定量化し、「位相空間物理に深化したプラズマの総合的理解」を提示する。

核融合科学としての挑戦性（10年後にはITERが動いている）  
新領域を開拓（遠非平衡系のプラズマを端的に表す）  
核融合開発の課題解決に学問的進歩を通じて寄与できる能力

### ① 位相空間物理に深化

$$df/dt = \dots E \dots f \dots$$

$$dE/dt = \dots E \dots f \dots$$

この協同的機構  
を実験研究する

衝突緩和過程は範疇外

### ② 位相空間構造を定量化

速度分布関数を測  
ることが必須

### ③ プラズ マの総合 的理解

位相空間構造には、二種類ある。モード型、非モード型(granulation, clump, hole, BGK, etc.)。

## モード型 (コヒーレント成分、分散関係を満たす)

(a) 波動のVlasov方程式の解  $\tilde{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$ 。

波数と周波数を伴い、時間・空間・速度の分解能を要求する

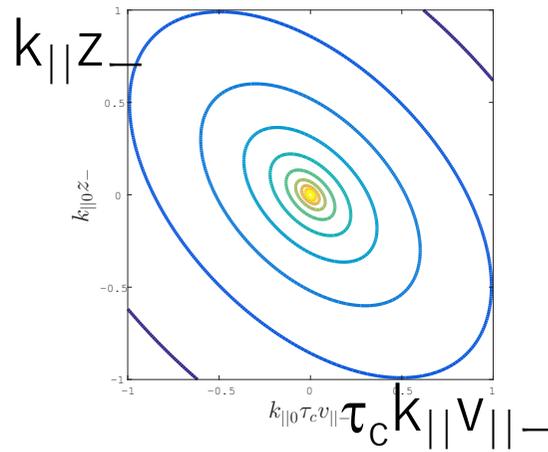
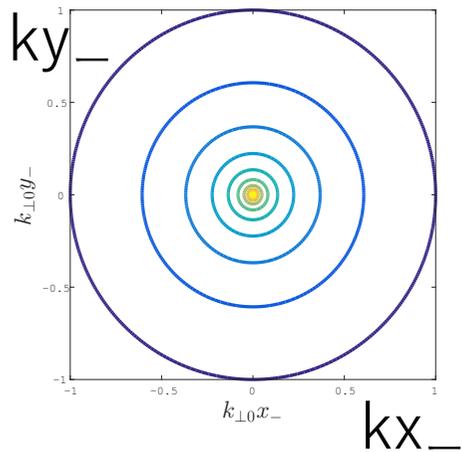
$$f_{k,\omega} = -\frac{i}{(\omega - kv + i/\tau_c)} \frac{q}{m} E_{k,\omega} \frac{\partial \langle f \rangle}{\partial v}$$

1次元伝播の波動の線形解の例

(b) 揺動の準粒子の位相空間もありうる。

## 非モード型(granulation, clump, hole, BGK, etc.)

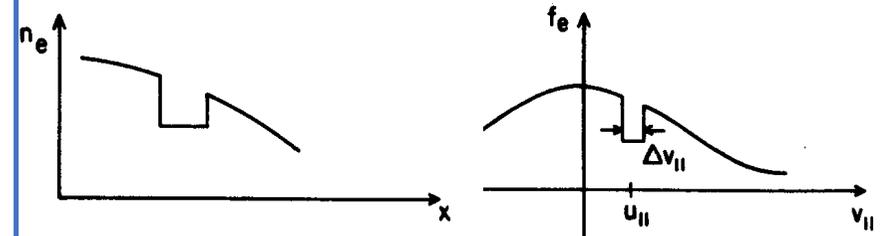
例えば、 $\langle \delta f(1) \delta f(2) \rangle$



空間 3 次元・速度 1 次元の、4 次元空間の中にできる二粒子分布塊の例。Y. Kosuga, et al.: Nucl. Fusion 57 (2017) 072006

例えば、Box-hole 分布

$$f_i = \begin{cases} \tilde{f} & \begin{cases} -\Delta x \leq x \leq \Delta x \\ -\Delta y \leq y \leq \Delta y \\ -\Delta v_{\parallel} \leq (v_{\parallel} - u_{\parallel}) \leq \Delta v_{\parallel} \end{cases} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$



空間 2 次元・速度 1 次元の 3 次元空間の中にできる塊の例。

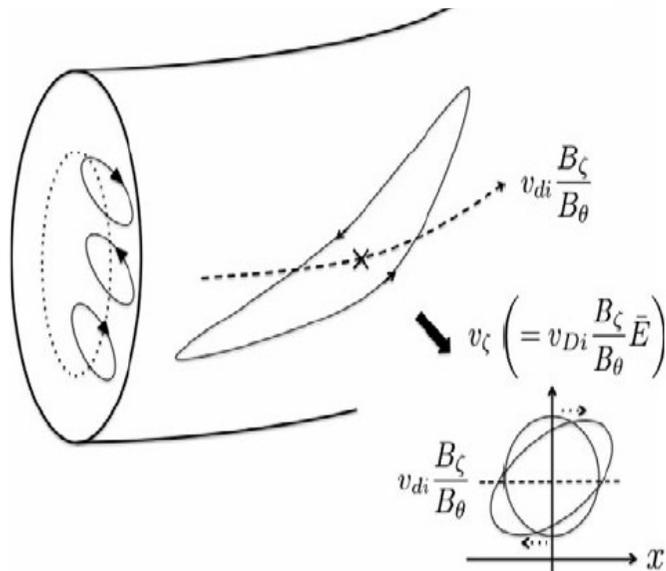
P. W. Terry, et al.: PF B2 (1990) 2048

これらがどう見えるか、例えば九大の小菅さんに相談してください。

**大事なのか？**

例えば、実・速度空間に及ぶ渦運動の非等方性が、乱流による流れの変換を生む。

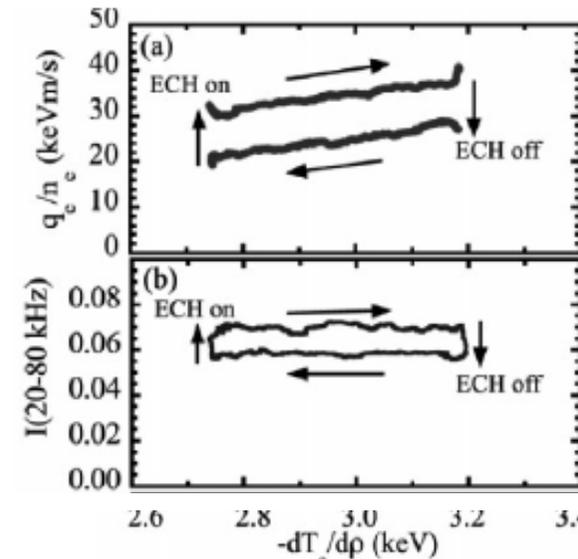
## バナナ粒子の位置と速度



Y. Kosuga et al.: PPCF 55 (2013) 125001.

LHDで見つかった輸送ヒステリシスをモードで説明できますか？

• • • •



謎のリストを作って下さい。  
そこに研究の未来があります。

LHD「装置」実験だけではなく、CHSなどの研究も含めた「LHD計画」となることにより、豊かな科学的成果が得られた。

「非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネットワーク拠点」を発展してとあるように、**極限的プラズマ実験・研究を包含する「post-LHD計画」**へと展開することにより、さらに豊かな研究成果が上がる。

例えば、乱流局在（これによってスカラー場と多種の軸性ベクトル場が結合する）を解明するPLATO実験研究、高エネルギー密度状態での乱流構造形成を解明するレーザープラズマ研究・・・、等等と魅力的な研究テーマが生まれている。

さらに計画の魅力が増し支持が増えると思う。

## 研究としての正統性：

1. 研究の意義（興味深さ、学問的開拓・・・）の自覚、学会等での共有。
2. ロードマップ2023に準拠していること。（広い学术界）
3. 「今後の大型研究施設計画の在り方についての答申（同検討ワーキンググループ）(R6)」に準拠していること。（核融合科学界）

（一部を引用すると）大型研究施設計画の策定においては、そのための合意形成プロセスが説得力のある正当性を備えたものであることが必要である。

## LHD装置実験の'Grand Finale'に一言

今年度の実験が最後：「研究の未来開拓につながる」ものに重点を。

研究成果の科学的アセスメント(Then, what)をまとめる：

素晴らしい科学的成果が上がったことについて、authoritativeなまとめを作る。  
広い学术界に通じるような簡にして要を得たまとめを作る。

LHD実験研究のJournal of Fusion EnergyのLHD特集号はデータベースとして完成が待たれる。しかし、科学的展望は今後に残されていると理解。

科学的成果をまとめられるチームを作り、科学的説得力のあるドキュメントを。

LHDの成果の大きさは、post-LHDの説得力になる。

## 0. 岐路に立つ核融合科学研究所と共同研究者

### 1. LHDとは何であるのか：

関連する核融合科学研究所

LHDの選択：学問の方法論の提示

LHDの設計：研究目的をどのように装置設計に結びつけるか：仮説の選択

LHDの研究：生み出された研究潮流

LHDの蹉跎：「学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会」の例

### 2. LHD, What beyond：核融合科学研究（実験研究）の今後へ

LHDの完了を見通して：次の学術研究の構想（2010年代半ば～）があった

新ロードマップへの提案：核融合科学に関わる学術の大型研究(2023)

LHDの歴史から学んだ方法論：計測可能性と新しい仮説の選択という課題

Post-LHD装置：研究としての正統性確立を

LHD装置実験のGrand Finaleへ

# NIFSの研究ルネッサンスを！

31

学術研究の大型プロジェクトを通じた、核融合科学にかかわる実験科学の未来について述べました。

これから、シミュレーション科学の未来開拓の道について、佐藤哲也先生が講演されます。

岐路に立つ核融合科学研究所と研究者が、学問回帰の道を選ぶ事で、**NIFSの研究ルネッサンス**をもたらしてくれることを期待します！