

可知化センシングユニット R6年度報告

Sensing and Intellectualizing Technology Unit (S&I)

核融合研 6年度ユニット成果報告会
令和7年5月28日

可知化センシングユニットメンバー一同

本日の報告事項

- 本日の報告事項、ユニットの概要（上原日和／約6分）

成果報告

非公開(取扱注意)

- 「LHDにおける磁気島ダイナミクスと可知化に向けた取り組み」（武村勇輝／約12分）
～質疑応答 約3分～
- 「単発超高速バーストイメージングによる高エネルギープラズマの多階層時間発展計測」（太田雅人／約10分）
～質疑応答 約3分～

ユニットの取り組み

非公開(取扱注意)

- 「オープンサイエンスの成果と取り組み」（中西秀哉／約7分）
 - 「データ理解の挑戦 ～VR可視化研究について～」（大谷寛明／約5分）
～質疑応答 約5分～
 - CHDにおける計測開発の状況（田中謙治／約4分）
 - ユニット全体で取り組む研究の提案（田中謙治／約10分）
-
- 総括（上原日和／約3分）
～質疑応答 約5分～

ユニットの研究目的と目標

「可知化センシング」とは

可知（知ることができる、分かる）

→現象を、計測し、知ることができる形に表現する。

可知化センシングユニットの研究目的

革新的な計測・解析・表現手法とそれらを統合した新たな自然理解システムを実現する。

- これまでにない**高空間分解能・高時間分解能**を持つ計測器によって測定可能領域を拡大する。
- 取得されたデータは、従来の物理的視点と相補的な**統計数理・データサイエンス**の考え方を採り入れた解析手法を用いて情報量を最大限に抽出する。
- さらに多種多様の現象やデータを**視覚・聴覚・触覚などの情報へ変換**して、対話的な方法でデータ内部に潜む複雑な構造や相関関係を解明する。
- これらの一連の研究手法を高度化することで、**核融合科学の未解明問題**に挑む。

ユニットメンバー(所内)

(敬称略、順不同)

- 上原 日和 *昨年度ユニット長* レーザー工学、光学
- 江本 雅彦 機械学習、データベース
- 大谷 寛明 可視化情報学、シミュレーション技法
- 太田 雅人 超高速計測
- 川口 晴生 光学、光渦の応用
- 榊原 悟 電磁流体力学、揺動計測・解析
- 佐瀬 卓也 放射線科学、レギュラトリーサイエンス
- 武村 勇輝 MHD揺動計測・解析
- 田中 謙治 *現ユニット長* 乱流計測、乱流駆動輸送解析、レーザー計測
- 田中 将裕 同位体科学、地球化学・環境科学
- 中西 秀哉 オープンサイエンス、核融合クラウドデータ基盤
- PETERSON Byron プラズマ計測
- 向井 清史 画像計測、周辺プラズマ
- 横山 雅之 核融合プラズマの統計数理・データ駆動的な研究
- 渡邊 清政 MHD・ディスラプション解析、輸送解析
- 安原 亮 レーザー工学、レーザー応用、プラズマ計測
- Zhao Mingzhong 光計測、核融合材料
- Yu Linpeng レーザー工学
- 宮川鈴衣奈 レーザー加工、結晶工学
- Zangpo Jigme 光計測

新メンバー(前回報告以降に加入)

- Sanchez Fabien COE研究員
- 彌富 豪 COE研究員
- 糟谷 直宏(九大) 客員教授
- 山ノ井 航平(阪大) 客員教授

ユニット研究戦略会議・外部メンバー

(敬称略、順不同)

- 矢野恵佑(統計数理研究所)
- 時田茂樹(京都大学)
- 平等拓範(理研、分子研)
- 古瀬裕章(物質・材料研究機構)
- 藤原英樹(北海学園大学)
- 寶珍輝尚(京都工芸繊維大学)
- 山中顕次郎(国立情報学研究所)
- 吉川正志(筑波大学)
- 長谷川真(九州大学)
- 小山田耕二(大阪成蹊大学)
- 赤田尚史(弘前大学)
- 石井宏和(生理学研究所)
- 筒井広明(東京科学大学)
- 三瓶明希夫(京都工繊大)
- 木下稔基(九州大学)
- 合谷賢治(秋田県立大学)
- 岸哲生(東京科学大学)

核融合データの統計思考による解析
 レーザー装置、レーザープラズマ
 レーザー工学
 レーザー装置、レーザー材料
 ナノ光学、光物性
 マルチメディアデータ工学・検索
 高遅延広帯域データ伝送
 粒子輸送計測・解析、データ処理
 データ処理
 可視化情報学
 環境放射能計測、被ばく線量評価
 生体イメージング
 核融合プラズマに関する逆問題
 トモグラフィー計測
 プラズマ計測
 レーザー加工、光計測
 無機材料、光計測

新メンバー(前回報告以降に加入)

- 富田 健太郎(北海道大学)
- 糟谷 直宏(九州大学)
- 井戸 毅(九州大学)
- 文 賛鎬(九州大学)

その他の所外ユニットメンバー

(敬称略、順不同)

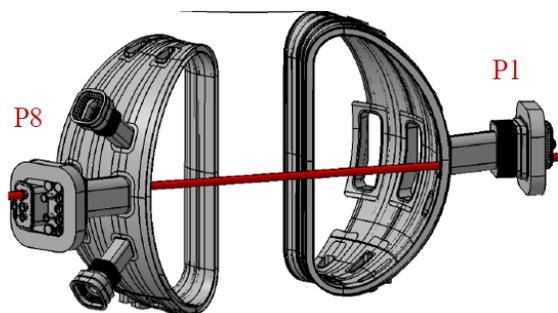
- 三分一史和(統計数理研究所)
- 浜口智志(大阪大学)
- 村上定義(京都大学)
- 森下侑哉(京都大学)
- 稲垣滋(京都大学)
- 江尻晶(東京大学)
- 石澤明宏(京都大学)
- 大野暢亮(兵庫県立大学)
- 坂本尚久(神戸大学)
- 川原慎太郎(海洋研究開発機構)
- 杉山貴彦(名古屋大学)
- 田口明(富山大学)
- 立花優(長岡技術科学大学)
- 栗田直幸(名古屋大学)
- 鈴木正敏(東北大学)
- 平尾茂一(福島大学)
- 横山須美(長崎大学)
- 岸本泰明(京都大学)
- 中島秀紀(九州大学)
- 山本直嗣(九州大学)
- 森田太智(九州大学)

統計数理
 物理駆動AI研究
 プラズマ物理大規模シミュレーション
 データ同化制御
 プラズマ物理、データ科学
 プラズマ物理、計測技術
 乱流理論、乱流シミュレーション
 可視化情報学
 可視化情報学
 可視化情報学
 化学工学による同位体分離濃縮
 化学工学による同位体分離濃縮
 化学工学による同位体分離濃縮
 環境同位体計測、環境シミュレーション
 放射線生体影響評価、被ばく線量評価
 環境放射能計測、環境シミュレーション
 環境放射能計測、被ばく線量評価
 乱流理論、乱流シミュレーション
 航空宇宙工学、核融合学
 航空宇宙工学、核融合学
 航空宇宙工学、プラズマ計測

アカデミックプラン

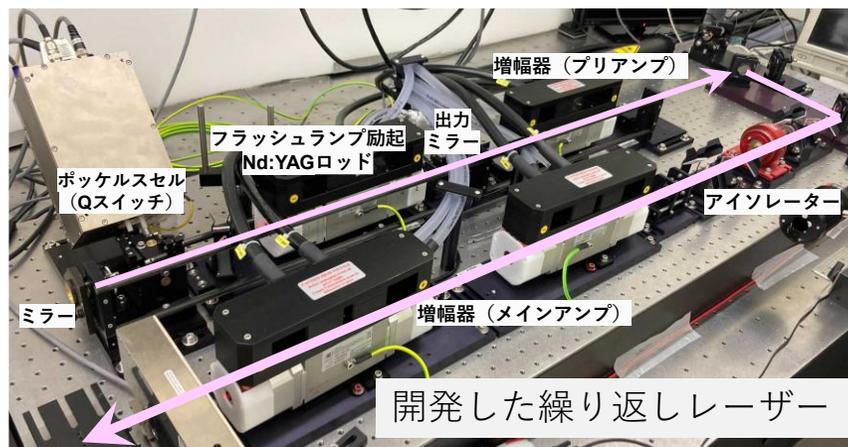
(A) 先進プラズマ計測・解析で挑む揺動・ダイナミクス研究

- 光位相コントラスト計測による揺動計測性能の向上、レーザートムソン散乱計測の時間分解能の向上を図るとともに、得られた観測結果に対して、データサイエンス手法を駆使した解析手法の高度化を行う。
- これまで観測できなかった電子温度・密度分布の時空間的なダイナミクスを直接観測し、乱流揺動の輸送特性の解明や揺動データに潜む法則性、突発的・過渡的なプラズマ現象を理解する。
- 電子工学、光学、量子エレクトロニクス等の理解を基に計測応用のための光源・検出器等の高性能化を目指す。



S. Coda et al,
NF2021

JT-60SA(など)に位相コントラストイメージングを適用



開発した繰り返しレーザー
高速トムソン散乱のレーザー改良で計測性能向上
速度分布関数の直接計測を目指す



CHDにおける計測開発、設計を進めており、後ほどのコーナーで報告

多様なプラズマを対象とした超高速計測法の研究(後述)

マルチモーダル計測のプロジェクト立ち上げ(後述)

などが進行中

(B) データサイエンスによる予測・判断志向研究を通じたサステナブルプラズマ制御

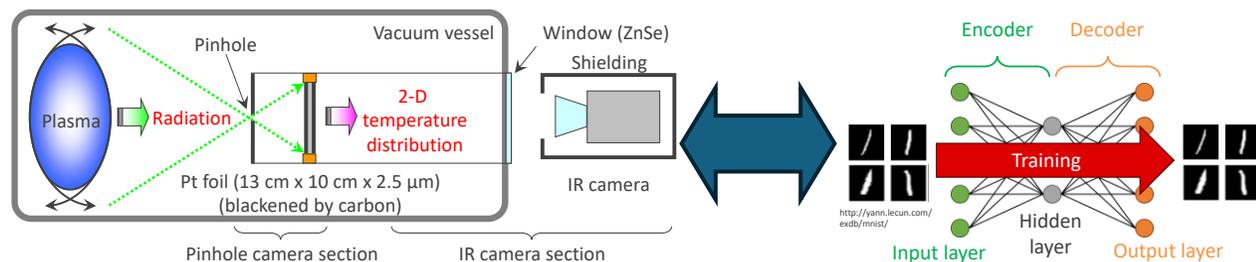
- 超高温プラズマのリアルタイム制御を目指し、制御対象となる現象にまつわるデータ群に対して、統計数理が得意とする「データへのあてはめ」という考え方との融合を図ることで、複雑システムの挙動予測や意思決定の方法論を磨く。
- 物理情報に基づくニューラルネットワークを使ったデータ分析・可視化をおこない、得られた結果を基に核融合研究をハブとして、統計数理、情報学、データ科学の先端分野を開拓する。



統計数理学の考え方で核融合研究の諸課題を捉える
→放射崩壊・ディスラプション予知とその活用による制御実証をめざす

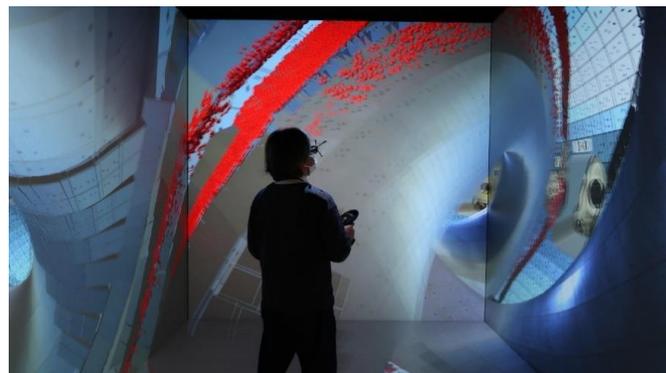
偏光計と機械学習を組み合わせた新たな内部磁場揺動計測手法の確立を目指した検討が進行中(後述)

イメージングボロメータ計測と機械学習を併用してプラズマの放射崩壊の予測に成功
(前回報告会で紹介、今後の展開について後述)



(C) データ理解への挑戦とパブリックコミュニケーションへの展開

- 3次元+ α の解析を可能とするVR表示などの表現法、データ科学を使って多次元時系列データの次元削減等による解析や離散データからの偏微分方程式の導出等を研究する。
- 感覚から知覚・認知を経て、科学知を得るまでの過程を構造化・定式化して、知的探求プロセスを方法論として確立する。
- 研究成果の社会還元及び核融合の実用化に向けた合意形成のため、オープンサイエンス、アウトリーチ活動やレギュラトリーサイエンスを推進する。
- 原型炉に向けて安定同位体、放射性同位体の環境における物質循環・移動過程を明らかにする。



・ **可視化手法の改良や、触覚デバイスの用いたVR可視化研究を始めている。(後述)**

大谷 寛明提供

オープンサイエンス研究:雷神スパコンとLHDデータストレージを直結したネットワーク技術開発、LHDデータのDOI化

➡ DOI登録で特筆すべき成果が得られており、後述する

同位体研究:大気中トリチウム捕集システムを構築し、濃度推移を明らかにしている。
LHDからサンプリングした試料の解析を進めており、核融合システム内挙動理解をめざす

LHDにおける磁気島ダイナミクスと 可知化に向けた取り組み

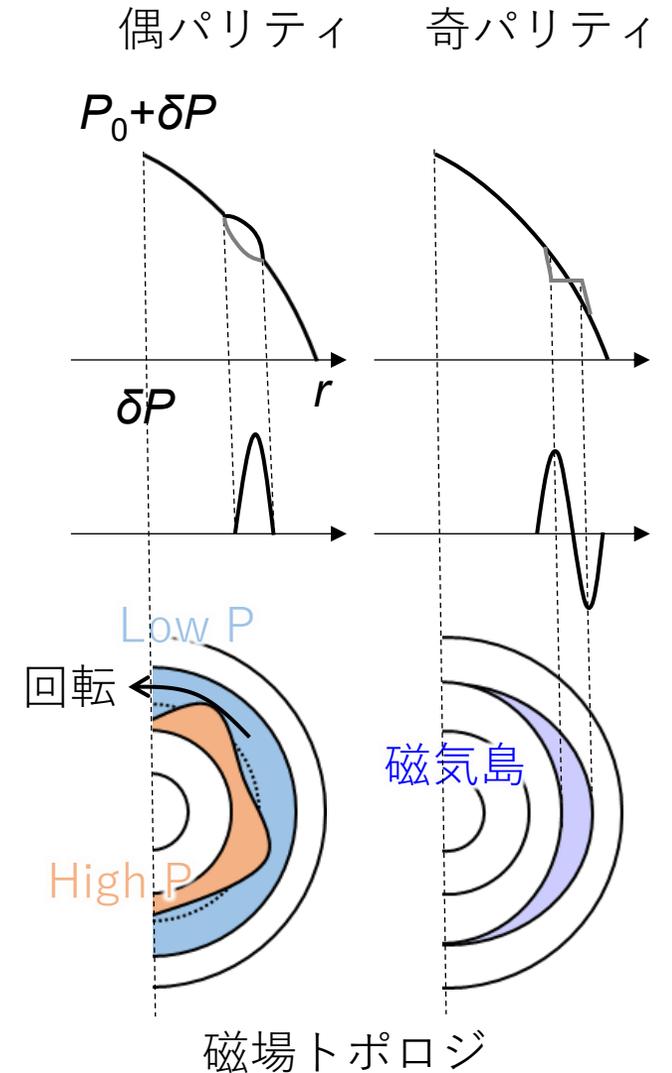
武村勇輝 可知化センシングユニット
ユニット成果報告会 核融合科学研究所
2025/5/28

背景と概要

- 磁場閉じ込めトーラスプラズマにおいて、MHD不安定性によるプラズマ圧力（温度・密度）揺動分布の**パリティ**（偶奇対称性）は磁場容器の**トポロジと密接に関連**
 - 偶構造：磁気島を伴わない磁場構造
 - 奇構造：閉じ込め劣化をもたらす磁気島の存在を示唆
- 発生・消失時の磁気島の挙動はモード構造の**パリティ遷移**として現れる

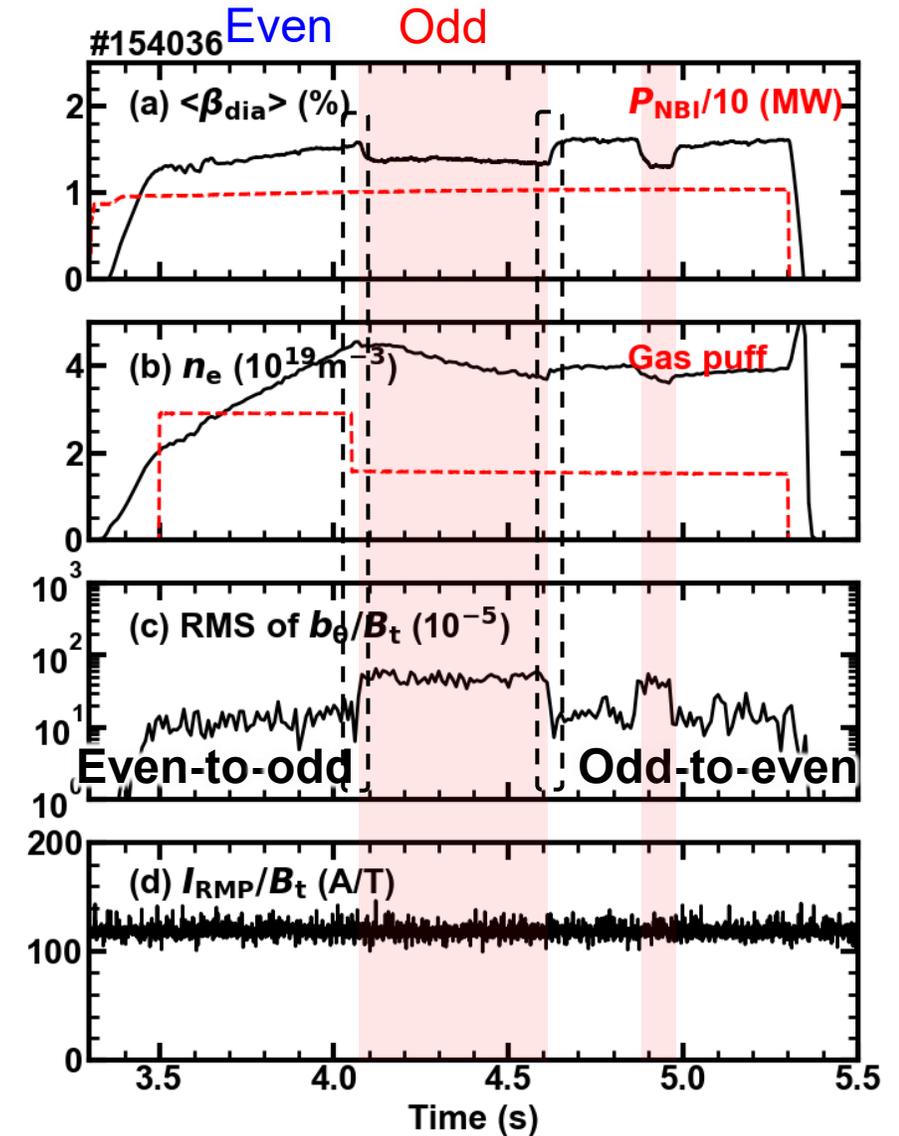
概要

- LHDで観測される磁気島を伴う不安定性とその発現・消失の様子
- 偏光計による磁場揺動分布計測を用いた磁気島発現・消失現象計測システムの検討
- 磁気島研究とCHDでのアクチュエータや高性能計測器の開発計画について



LHDにおける磁気島を伴う不安定性と磁気島の発生・消失

- LHDで最も発現が予想されるMHD不安定性は抵抗性交換型不安定性
 - 線形理論では磁気島は伴わないと予測
 - 抵抗性交換型不安定性と推定されるMHD揺動の局所構造から磁気島は形成されていないことを確認
[Watanabe+ PoP 2011]
- ある特定の実験条件では、磁気島を伴う不安定性を観測
[Takemura+ PoP 2022]
- 磁気島を伴わない不安定性（偶パリティ）から、偶→奇遷移、あるいは奇→偶遷移も報告されている
→奇→偶パリティ遷移の観測は世界初
[Takemura+ Scientific Reports 2025]
 - パリティ遷移が起こる理由は未解明

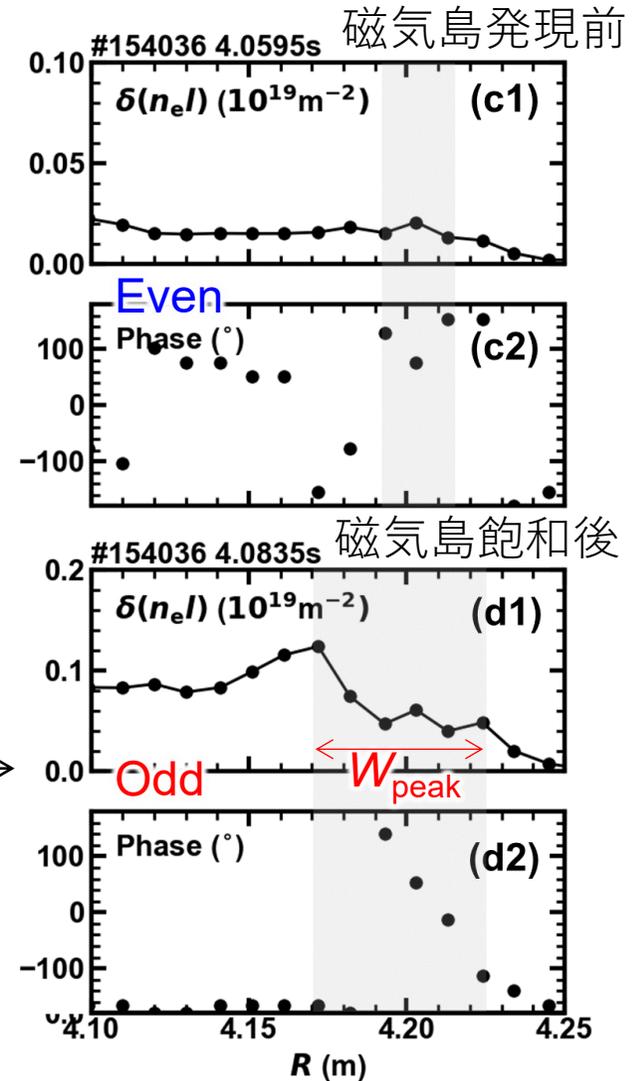
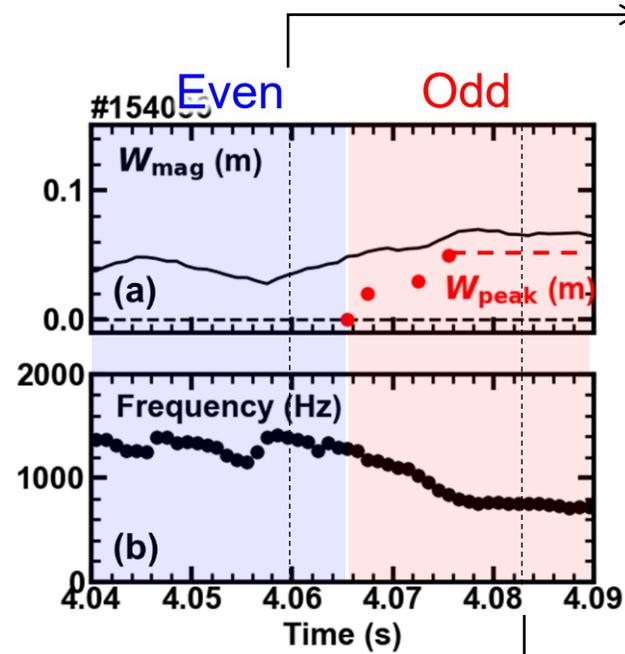


モード構造のパリティ遷移

高空間分解能の干渉計に詳細なモード構造を計測

- $t = 4.06$ 秒の前に偶パリティモードを観察
 - 抵抗性交換型モードと考えられる
- 4.067秒付近で、 $m/n = 1/1$ 揺動の径方向分布が奇パリティに変化(W_{peak} が有限)
- W_{peak} は拡大開始から約10ミリ秒後に飽和
- 2 cm以下 (プラズマ小半径の3%以下) の磁気島の検出が困難

→ 磁気島の形成・成長の過程を捉えるには
小幅の磁気島の観測が不可欠

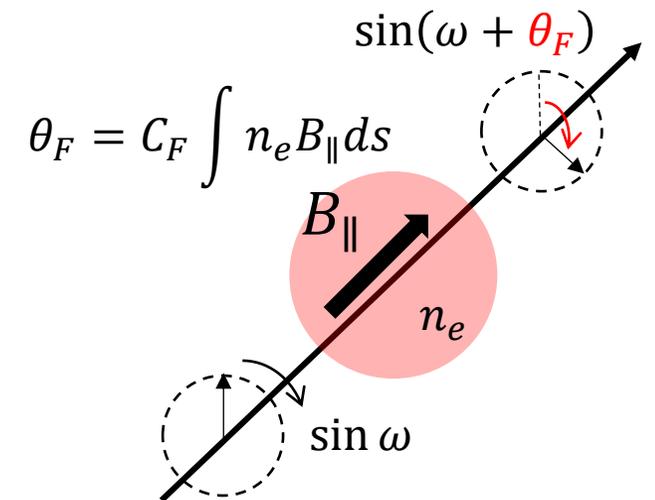


W_{mag} : 共鳴面でピークした擾動電流分布を仮定して外部磁場揺動強度から評価

W_{peak} : 不安定性の擾動密度分布におけるピーク間の距離

内部磁場揺動の非接触計測手法の検討

- AIおよび物理計測の専門家が在籍する**可知化センシングユニット**内外メンバーとの連携により、**内部磁場揺動分布の従来にない高時間分解能・非接触計測手法**の確立を目指す
 - 内部磁場揺動強度は磁気島幅に依存するため、**磁気島幅が小さいときの磁気島計測**に特に有用
 - **偏光計測 + 機械学習 + α** (ポロイダル・トロイダル方向の外部磁気計測等)
- **Faraday効果による偏光計の開発**
 - **数十kHz**の時間分解能で偏光角の計測が可能
 - Faraday効果による偏光角は視線方向の内部磁場成分および電子密度に依存し、視線積分量として観測→ **局所磁場の再構成が課題**
 - **少視線の再構成は物理的・統計的制約条件のモデル化が鍵**
- **機械学習によるモデル化**
 - 例えば、局所磁場揺動計測が可能な小型実験装置で取得した教師（正解）データをニューラルネットワークで学習



検証環境 HYBTOK-II

内部磁場揺動の直接計測とアクチュエータが検証のカギ→HYBTOK-IIトカマク

- 密度計測用の干渉計が設置予定
 - 偏光計に流用可能
- 低温プラズマのためプローブ挿入可能
 - 磁場に加え、温度、密度、フロー計測
- 補助コイルによる複雑な外部摂動磁場を印加可能
 - 回転周波数や内部磁場揺動強度の制御
- FPGA制御系による再現性が高い繰り返し運転可能
 - 放電時間の伸長
 - 多様な計測視線でのデータ蓄積可能
 - SN比改善に向けたアンサンブル平均にも寄与
 - 可知化センシングユニットの渡邊氏との連携

大きさ: 大半径 40 cm, 小半径 12.8 cm, リミター半径 11.0 cm

真空度: 1×10^{-7} Torr程度

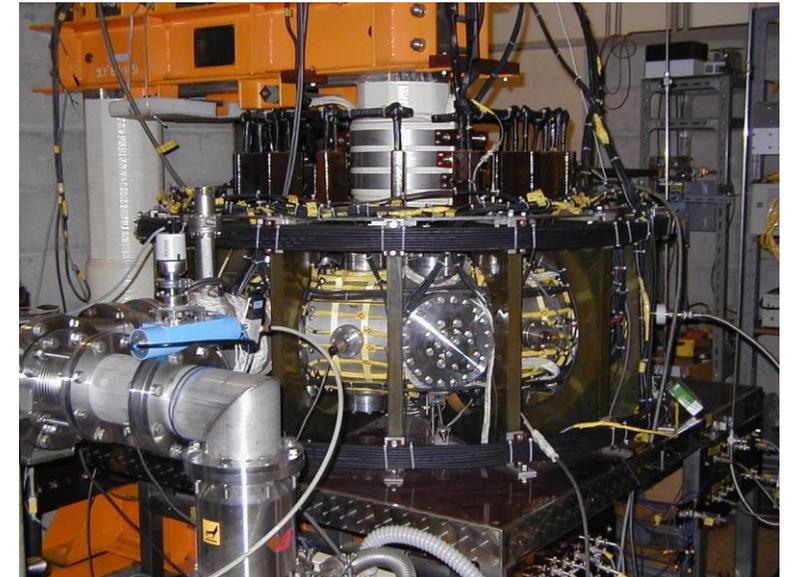
プラズマ電流: 10 – 15 kA

トロイダル磁場: 0.5 T

線平均電子密度: $2 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

電子温度: 周辺部 20 eV, 中心部 100 eV 程度

トロイダル磁場、垂直磁場、プラズマ電流用変圧器はコンデンサーバンクによって運転



CHDでのアクチュエータや高性能計測器の開発

- 可知化センシングユニットと他ユニットとの連携のもとCHDへのアクチュエータや高性能計測機器導入のための検討が進展

- アクチュエータ

→ 柔軟なパラメータ空間を通じて、斬新かつ多様な実験の展開を支援

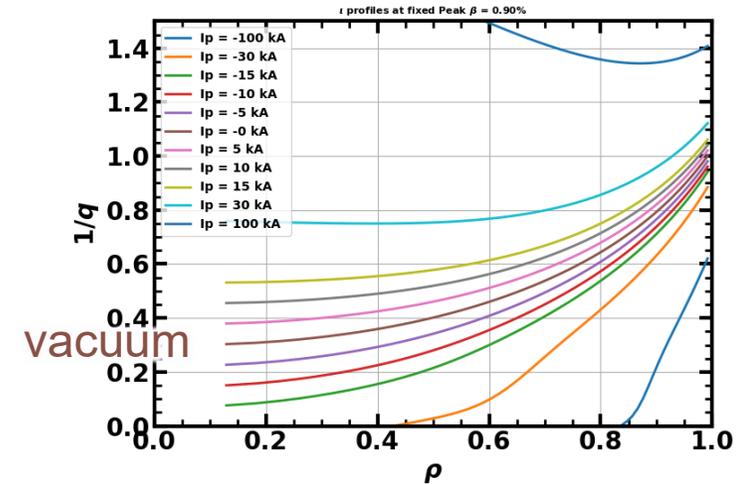
- 摂動磁場コイル：摂動磁場印加による磁気島の制御、主成分は $m/n=2/1$
- CSコイル：共鳴有理面の（磁気島）位置や磁気シア（磁気島幅）の制御

- 高空間分解能計測

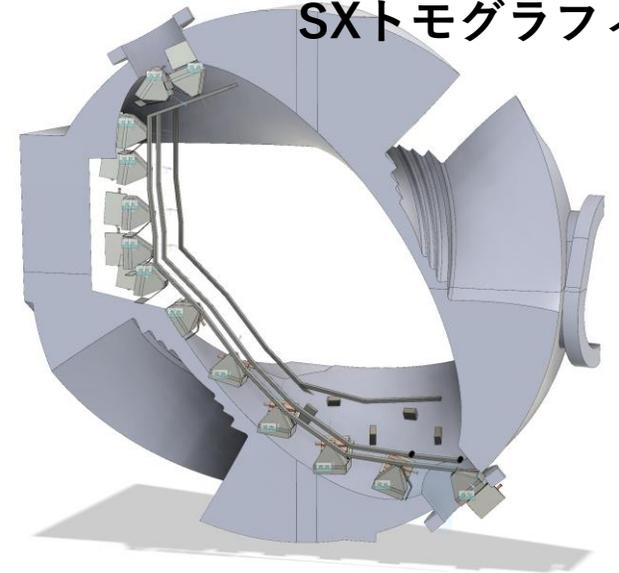
→ 精密な計測により新たな物理的知見の創出を加速

- 軟X線トモグラフィ計測、高速TS等：磁気島による圧力揺動の微細分布計測

回転変換分布



SXトモグラフィ



まとめ

LHDにおける**磁気島発現・消失現象**およびそれに関連する**パリティ遷移**を紹介

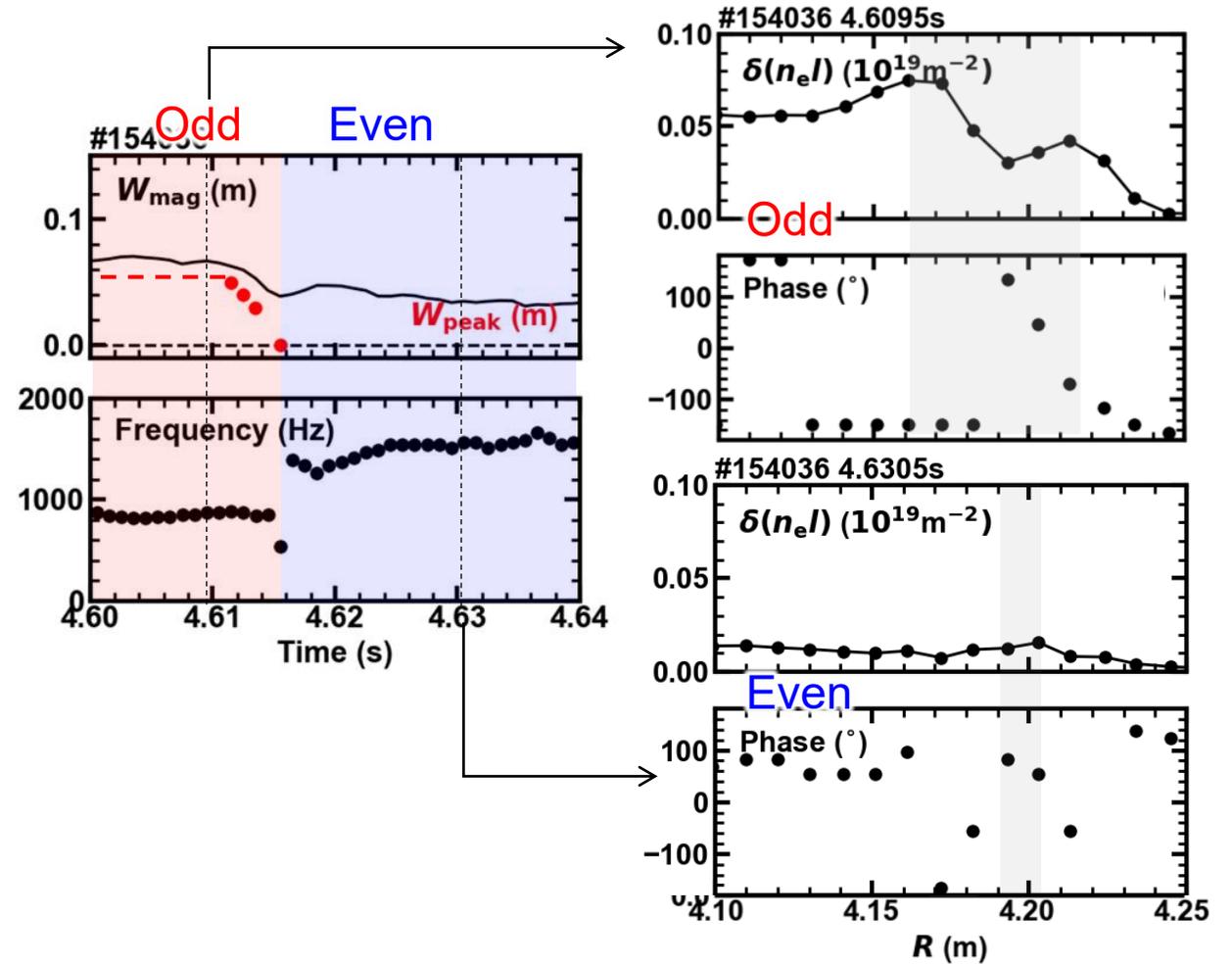
- LHDにおけるMHD不安定性のモード構造の詳細計測により、従来観測されていた偶→奇パリティ遷移に加え、磁気島消失に関連する**奇→偶パリティ遷移**を世界で初めて観測
- 磁気島発現・消失過程の理解が大きく前進
- 今後のさらなる理解のためには、詳細な磁気島計測が不可欠

磁気島研究の進展に向けた取り組み

- **可知化センシングユニット**の強み（計測・AI技術）を生かした、**偏光計と機械学習**を組み合わせた**新たな内部磁場揺動計測手法**の確立を目指した検討が進行中
 - CHD計画では、**可知化センシングユニット**を核とした連携体制のもとで、アクチュエータ（RMPコイル・CSコイル）や高性能計測機器の検討が進展
- 磁気島は多様な物理現象に関わっており、幅広い研究の進展や新たなトピックスの創出が期待される

磁気島消失に関する奇→偶パリティ遷移の発見

- 両方の遷移において、奇パリティモードと偶パリティモードの密度揺動の振幅と位相の分布は類似
 - 磁気島消失後は偶モードが支配的
 - 磁気島が消失する時間は約4ミリ秒
 - 磁場揺動の振幅の減少が停止すると、周波数はステップ状に増加
- 両方のパリティ遷移は、抵抗性交換型不安定性と奇パリティモードとの競合の結果であると考えられる



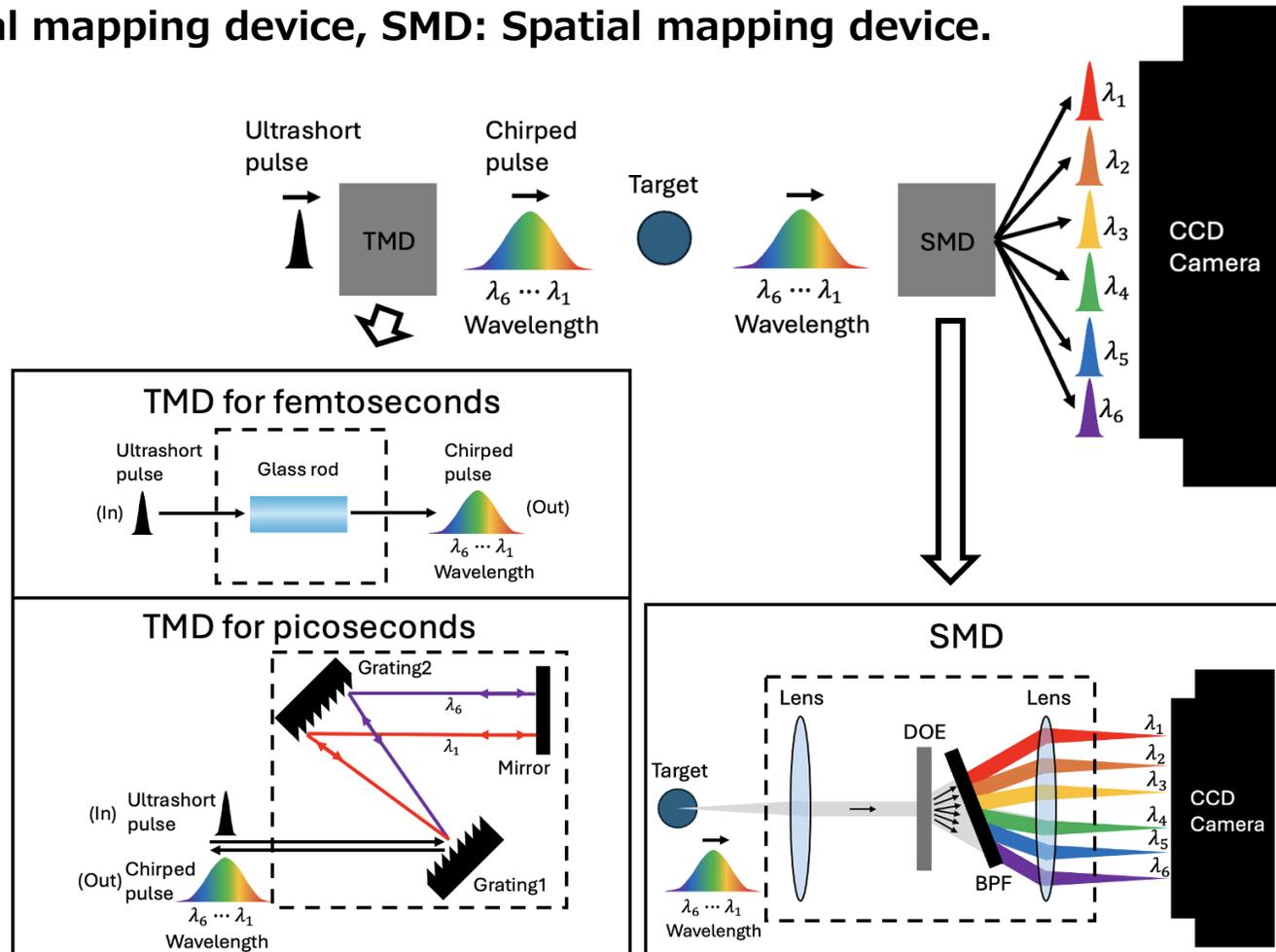
単発超高速バーストイメージングによる 高エネルギープラズマの多階層時間発展計測

核融合科学研究所 可知化センシングユニット 太田雅人

単発超高速バーストイメージング： Sequentially Timed All-optical Mapping Photography (STAMP)計測

K. Nakagawa *et al.*, Nat. Photonics 8, 695 (2014). (東京大学中川桂一准教授の協力)

TMD: Temporal mapping device, SMD: Spatial mapping device.



1. 単発連射 (二次元像)
2. 超高速計測 (200 fs)
3. マルチスケール計測 (fs~ns)

単発時間発展計測の必要性

- 高エネルギープラズマ実験では、ターゲット（固体等）はシングルショットでプラズマ化し消失
- プラズマの不安定性は初期条件に大きく依存
- 大型装置のマシントイムは限定的

時間的多階層計測の必要性

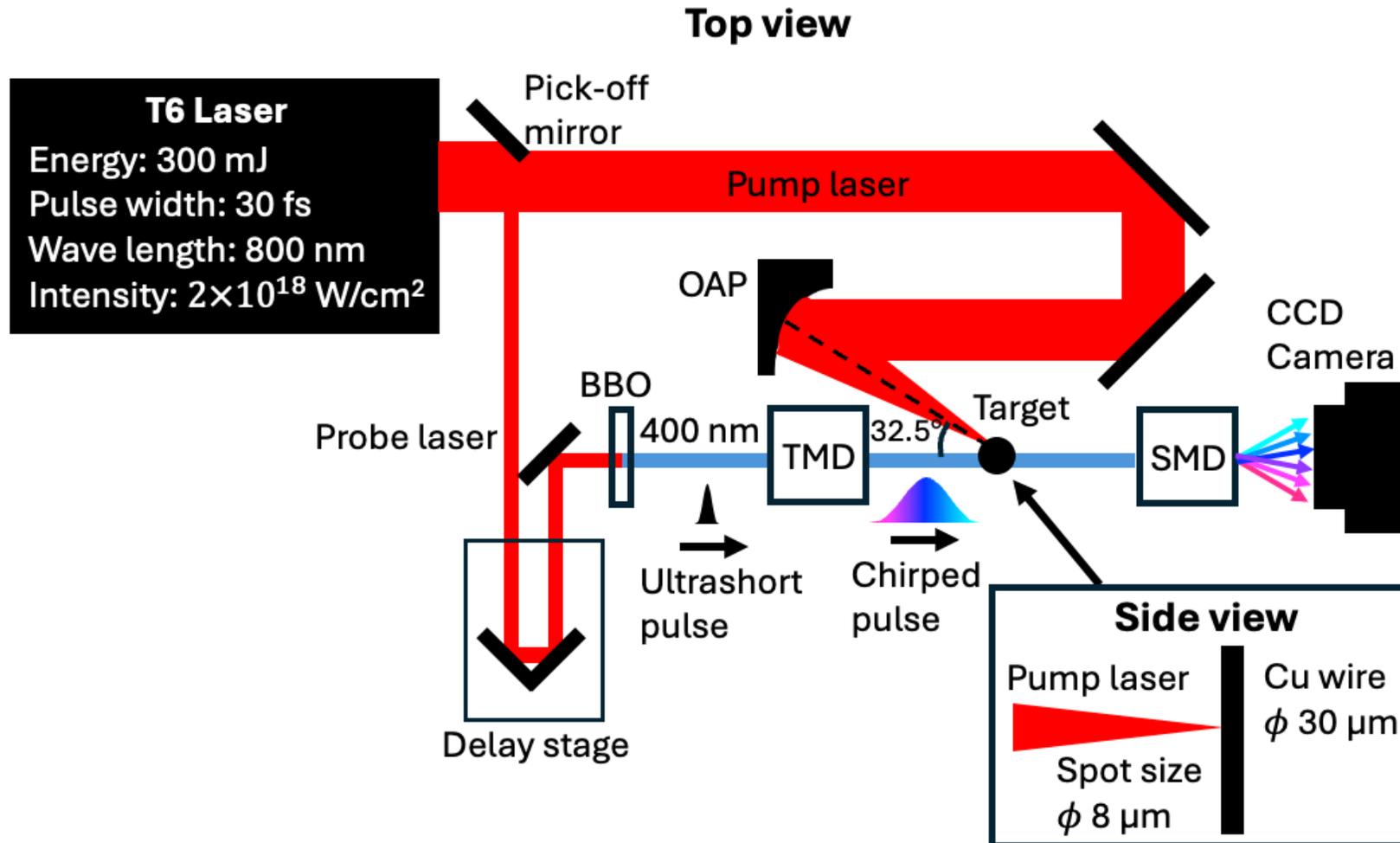
**核融合研究において、
初期プラズマ微小擾乱の不安定性成長は重要な研究課題**



**空間的にミクロ～マクロなプラズマ現象を観測するためには、
時間的にもマルチスケールな計測が必要**

実験セットアップ (相対論的高強度レーザー&STAMP)

相対論的高強度レーザー(T6システム) : 京都大学化学研究所時田茂樹教授協力



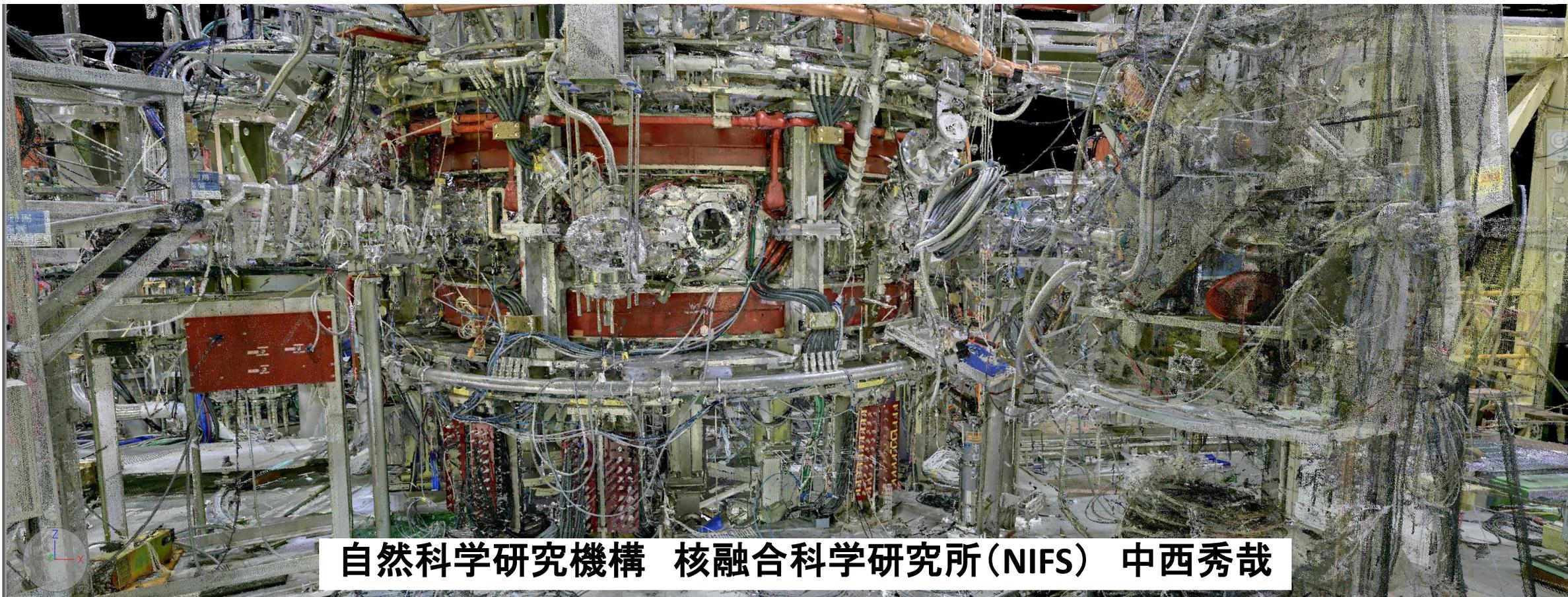
総括

- 相対論的高強度レーザー実験に世界で初めてSTAMP計測を導入
- フェムト秒～ナノ秒にわたる超高速プラズマダイナミクスの単発多階層計測に成功
- 相対論的レーザー強度に特有な高エネルギープラズマ現象（不安定性・電荷分離場等）を観測

今後の展望

- 磁場閉じ込め核融合実験における水素ペレットのプラズマ化の時空間発展計測
- 磁場閉じ込め核融合プラズマを想定した低波長光源を用いた単発多階層時間発展計測の確立
(中赤外レーザーやテラヘルツ等)
- EBIT実験におけるレーザー生成高密プラズマの精密計測
(共同研究withプラズマ量子プロセスユニット：木村、坂上、加藤)

核融合データのオープン・サイエンス化に向けた取り組み



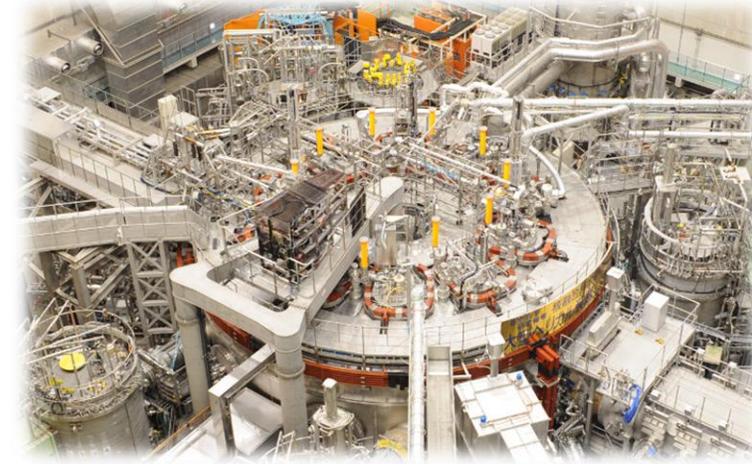
自然科学研究機構 核融合科学研究所(NIFS) 中西秀哉

CHS装置の3D点群データ(有体物デジタルアーカイブ)

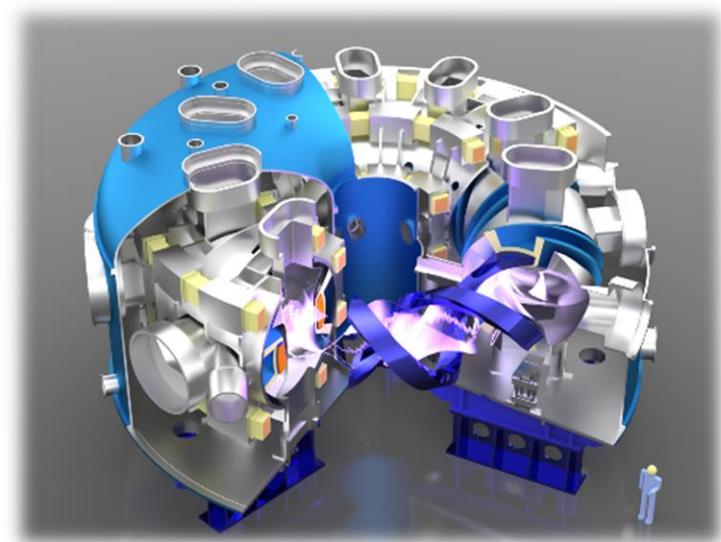
本発表で表明される見解および意見は、発表者個人のものであり、所属機関・法人の公式方針または立場を反映するものではありません。

核融合データのオープン・サイエンス化

1. 核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)が過去25年余で蓄積した **実験データ(4千万件強)**を2023年より完全オープン化、**商用クラウドからインターネット向け一般公開【2024.6 プレス発表】**
2. FAIR原則 (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) に沿って世界標準の **永続識別子DOI**を附与、2024年12月には **研究データDOI登録で世界初の1千万件の大台を突破【2025.2 プレス発表】**
3. 核融合データ利活用の場「**プラズマ・核融合クラウド**」を、**国際原子力機関 (IAEA) Fusion Data Lake** 構想に連携協力、国際的な研究データ流通の加速化に取り組み
4. 研究コンテキストを説明する関連メタデータ・文書類もオープンに！**実験装置の3Dスキャン&デジタルアーカイブ化**を開始
(by 2024年度文部科学省オープンアクセス加速化事業)



LHD



核融合研究データのオープンな利活用基盤 プラズマ・核融合クラウドの構築

- AI/ML ← HPCの近くに膨大なデータセットが必要
- 実験データ解析と、数値モデル計算の統合環境

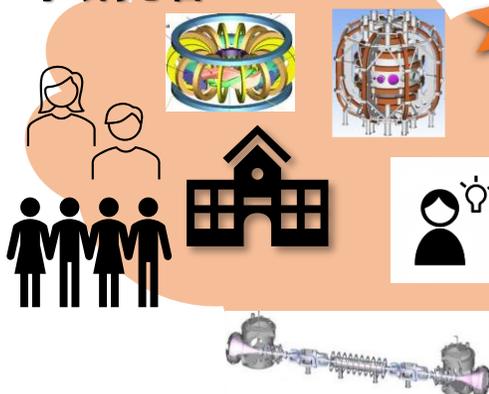
核融合データ・実験装置・計算環境の学際的利用の場

- “共創の場” データ科学など異分野や産業界・市民
- “実践教育の場” 人材・新アイデア/文化・分野拡張

ITER実験データ



大学等研究者



Modeling
Design & Validation
Sensing & Analysis

データ・コード・計算資源の統合



オープン・サイエンス

シチズン・サイエンス

データ科学

産業界・異分野

核融合研究を始める国々との
グローバル・パートナーシップ

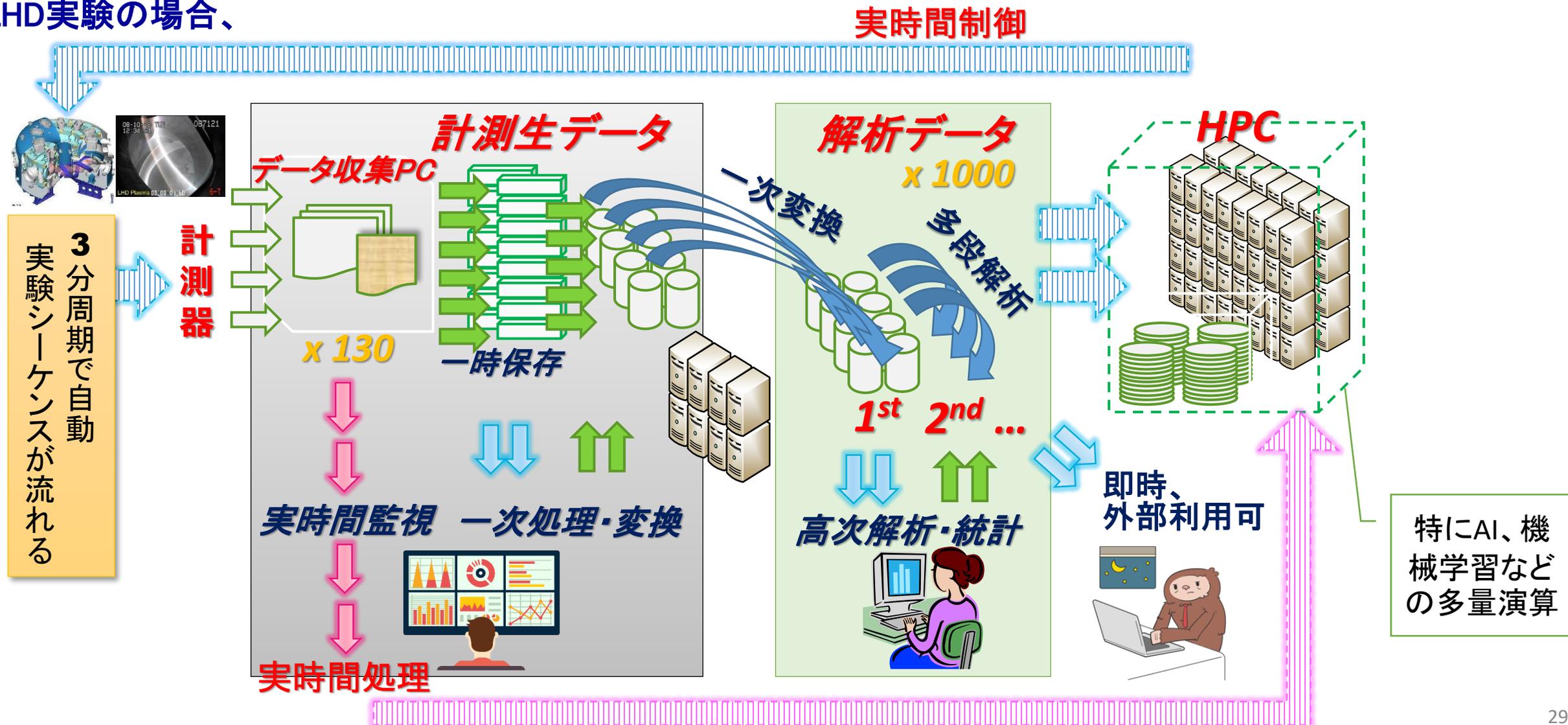


人材・新アイデア／文化・分野拡充

核融合実験では、多数の計測・解析データが自動生成される

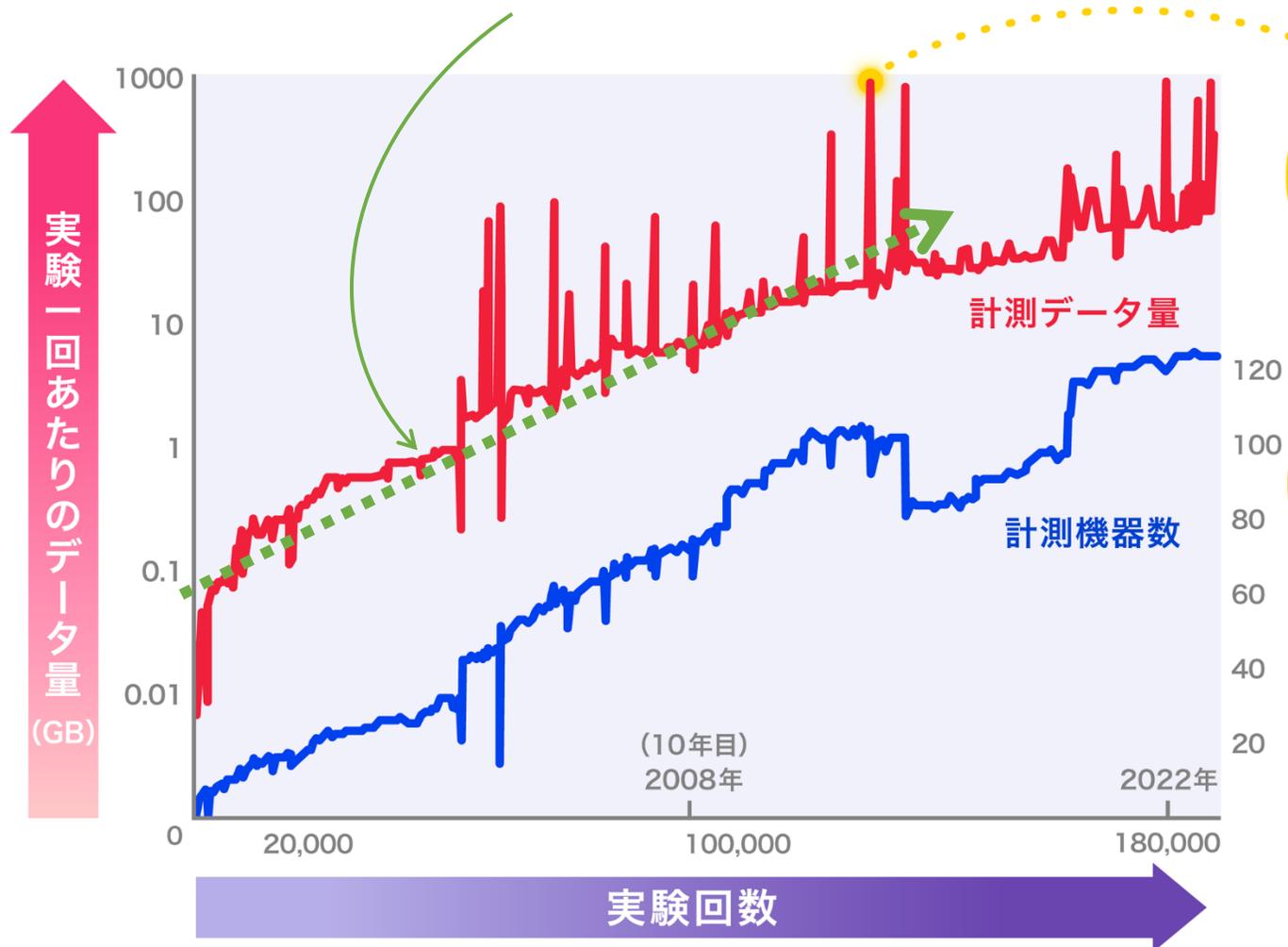
- 3分周期で、計測ノード・・・130種、解析プログラム・・・200～400個 が稼働(=1日に約120回)

LHD実験の場合、



過去25年余のLHD実験データの伸び

- 10年で約100倍・・・ムーアの法則に沿った、きれいな「データ爆発」を観測



データ計測量
世界記録を
更新！

25年分の
LHDによる
実験・計測データ
が蓄積

データ利活用に向けた課題

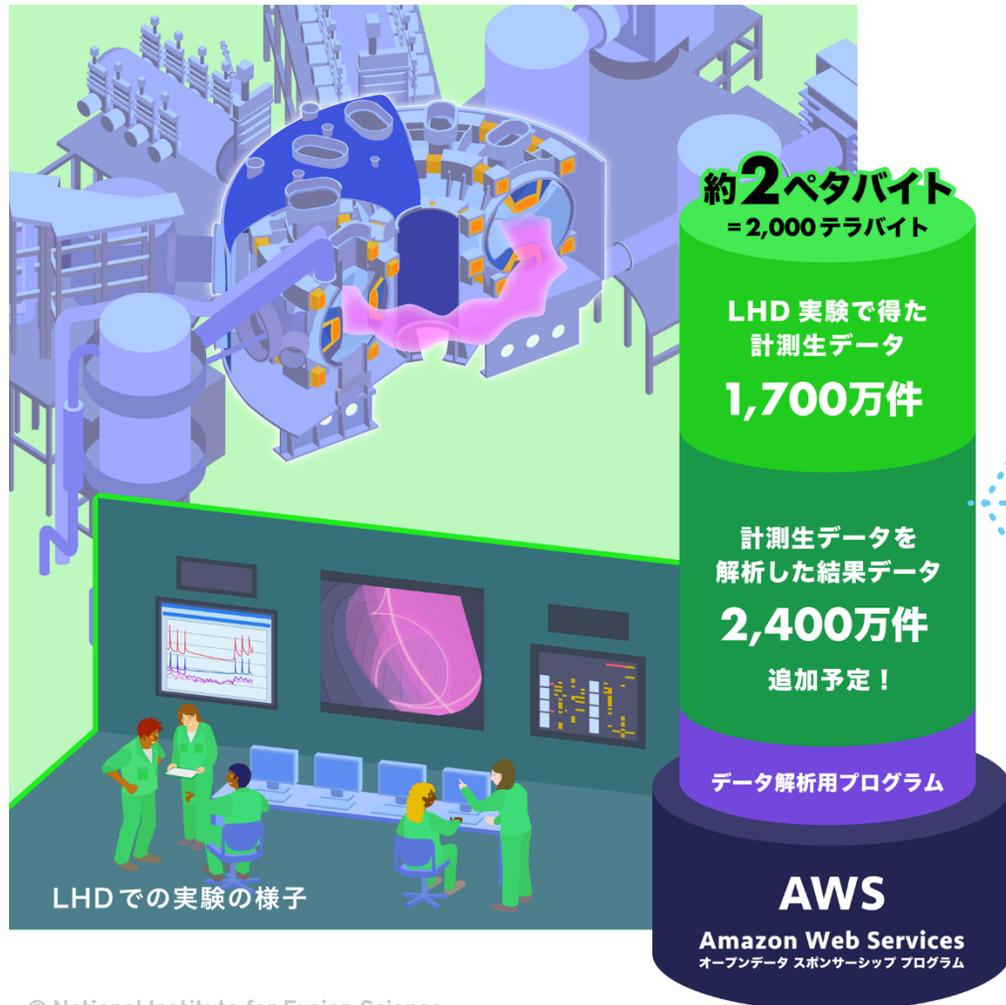
- 数千万件に及ぶ多数データ (DOI付与、引用方法、...)
- 膨大な計測データの解析環境
- ボーンデジタルな非可読データ (研究の文脈が理解しづらい)

- 2024年、計測生データ収集量が実験1回あたり約 77 GB に

© National Institute for Fusion Science

商用クラウドサービスによる全計測データ公開 (2024.6.14 に発表)

- アマゾン(AWS)オープンデータ・スポンサーシップ・プログラム (Open Data Sponsorship Program) によるLHD実験データ全公開の支援 → 誰でも無償で自由にインターネットからアクセス可能



核融合研究データで世界初!



✖ <https://registry.opendata.aws/nifs-lhd/>

Registry of Open Data on AWS

NIFS Large Helical Device (LHD) Experiment

analytics anomaly detection archives computed tomography datacenter digital assets electricity energy fluid dynamics image processing physics post-processing radiation signal processing source code turbulence video x-ray x-ray tomography

Description

The Large Helical Device (LHD), owned and operated by the National Institute for Fusion Science (NIFS), is one of the world's largest plasma confinement device which employs a heliotron magnetic configuration generated by the superconducting coils. The objectives are to conduct academic research on the confinement of steady-state, high-temperature, high-density plasmas, core plasma physics, and fusion reactor engineering, which are necessary to develop future fusion reactors. All the archived data of the LHD plasma diagnostics are available since the beginning of the LHD experiment, started on 31st of March, 1998.

Update Frequency

Archived data files are updated nightly when new or revised data are generated in LHD experiment.

License

This data is available for anyone to use under the "Rights and Terms"

Documentation

https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Repository_en.html

Managed By

NIFS

See all datasets managed by NIFS.

Contact

For any questions regarding data delivery or any general questions regarding the LHD Experiment data repository, please send email to the Data Acquisition and Analysis group at Comp_DAE@nifs.ac.jp.

How to Cite

NIFS Large Helical Device (LHD) Experiment was accessed on DATE

Resources on AWS

Description
LHD Diagnostic data

Resource type
S3 Bucket

Amazon Resource Name (ARN)
`arn:aws:s3:::nifs-lhd`

AWS Region
`ap-northeast-1`

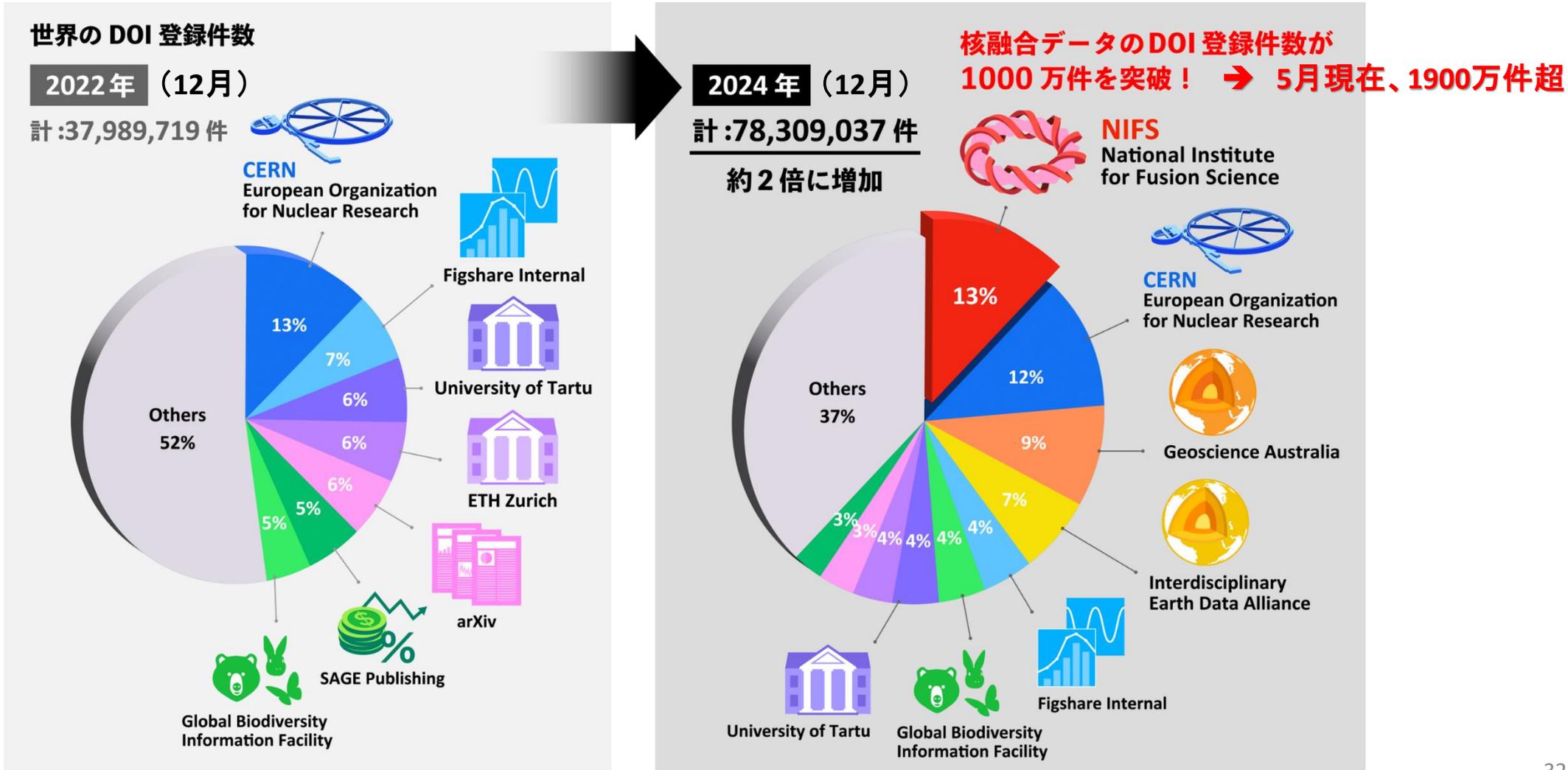
AWS CLI Access (No AWS account required)
`aws s3 ls --no-sign-request s3://nifs-lhd/`

Explore
[Browse Bucket](#)

➔ **Accessibility の向上**

核融合実験データにDOIをつけて Findable に (2025.2.7 に発表)

- 2020年頃より欧州が強力にオープンサイエンス推進・・・Horizon2020 計画
- 加速器素粒子物理・バイオ分野が先行。2023年より、地球科学(豪・米)が急迫
- 2024年12月、**NIFSのフュージョン実験データが世界初1千万件の大台を突破！**



データ理解の挑戦 VR可視化研究について

大谷寛明

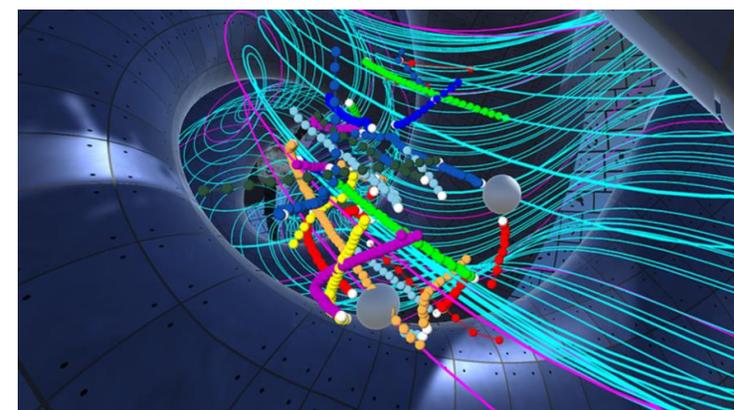
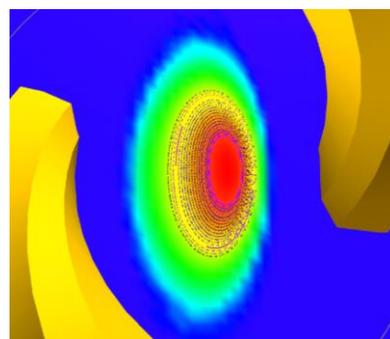
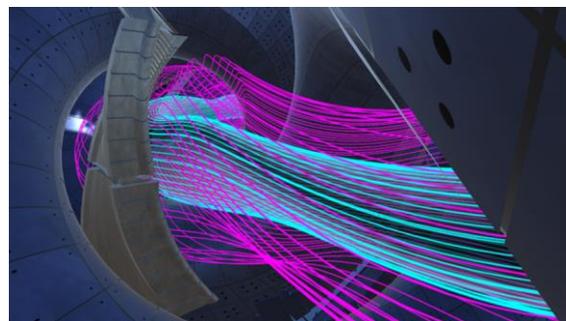
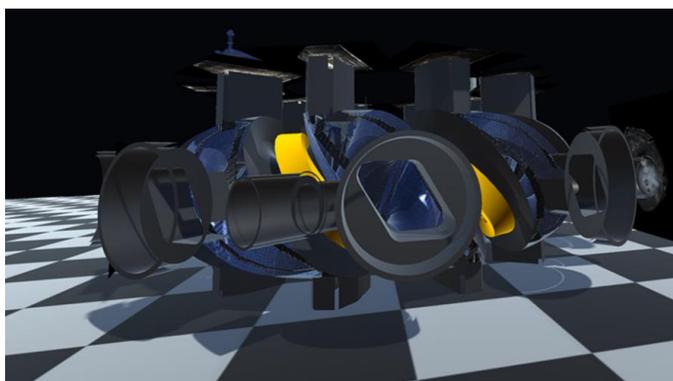
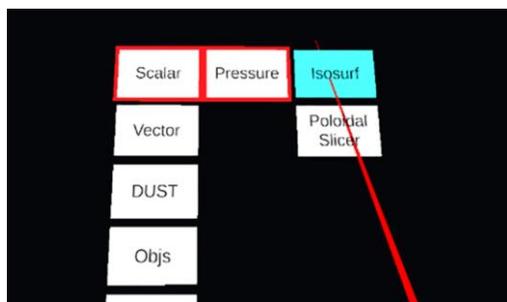
データ理解への挑戦

- 可知化とは、データ内部に潜む複雑な構造や相関関係を解明して、学術的な「知」識へと発展させることを「可」能にすることである。
- 多種多様の現象やデータを視覚・聴覚・触覚などの情報へ変換して、対話的な方法でデータ内部に潜む複雑な構造や相関関係を解明する。

ヘッドマウントディスプレイのための LHD可視化ソフトウェア「Digital-LHD」の開発

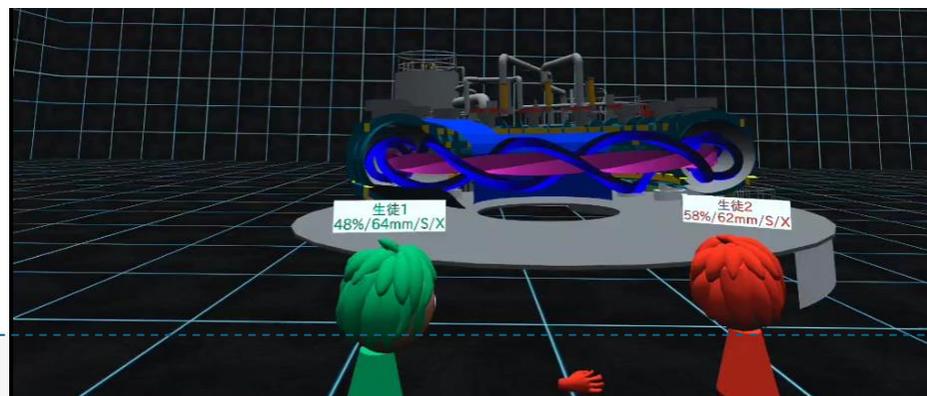
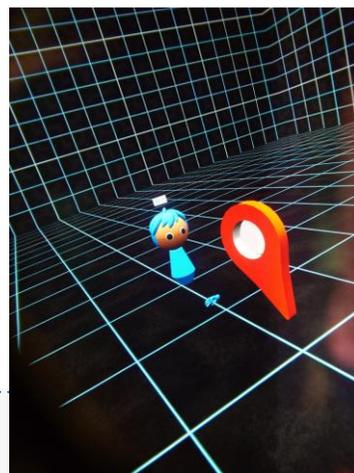
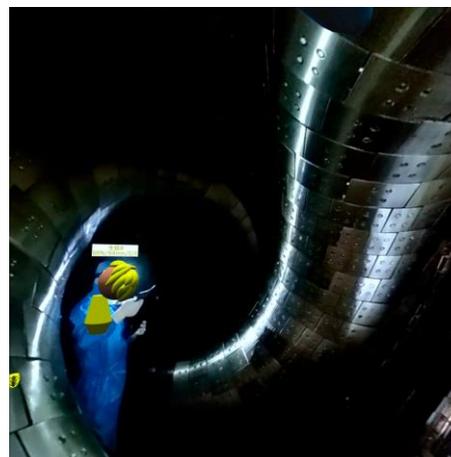
- 兵庫県立大学の 大野暢亮教授と大野研究室学生
- 神戸大学の 陰山聡教授との共同研究
- PFR, Vol.19, 1401029 (2024)

- 圧力の等値面やポロイダル断面上のカラーマップ
- 磁力線の流線やポアンカレプロット、
- 矢印
- ドリフト粒子軌道 (3次元音響)
- ダスト粒子の観測データ



VR空間共有環境の構築

(株)アルファコードのVRiderCOMMSを導入
ひとつのVR空間を複数のユーザで共有
全天球カメラ画像や動画、3Dモデルを
同時に複数のユーザが観察することができる。



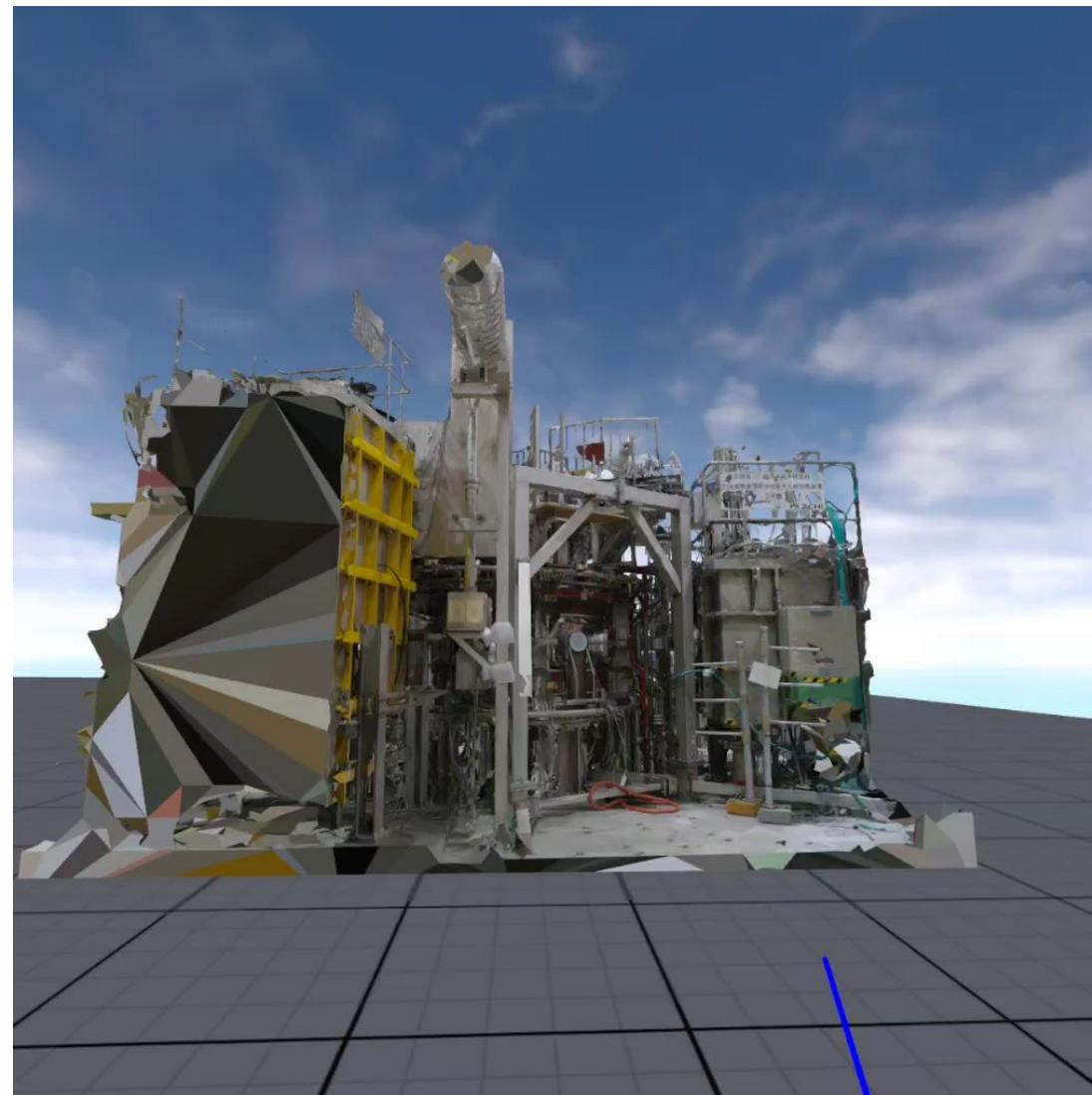
CHS 3Dスキャン

株式会社シュールド設計

- レーザースキャン
- フォトグラメトリ
- 3Dガウシアンスプラットニング

今後の展開

- 3DスキャンデータとCADモデルの差分
- 点群、3DgaussianのWeb表示
- CHS内部の計測、変状点検
- CHSへの搬出入計画
- 点群データの特徴点表示



フォトグラメトリデータを
ヘッドマウントディスプレイに表示

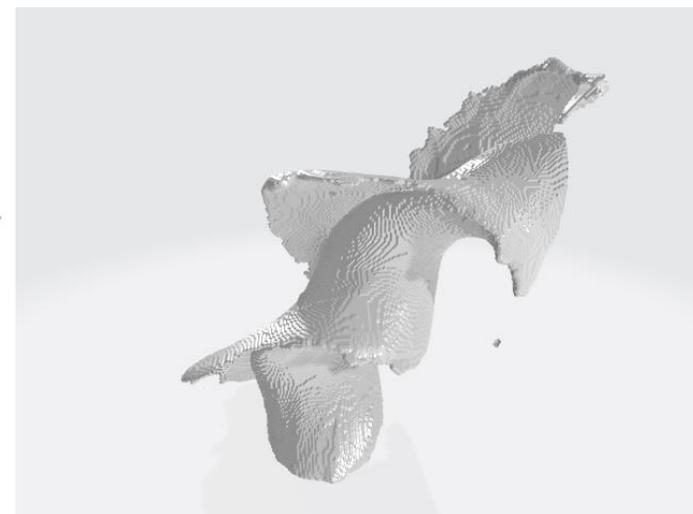
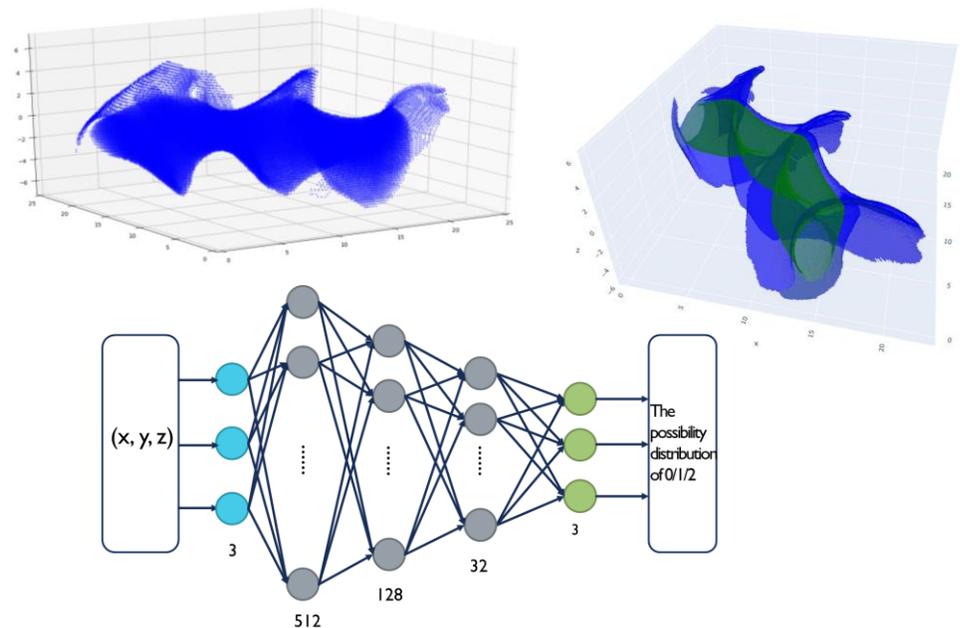
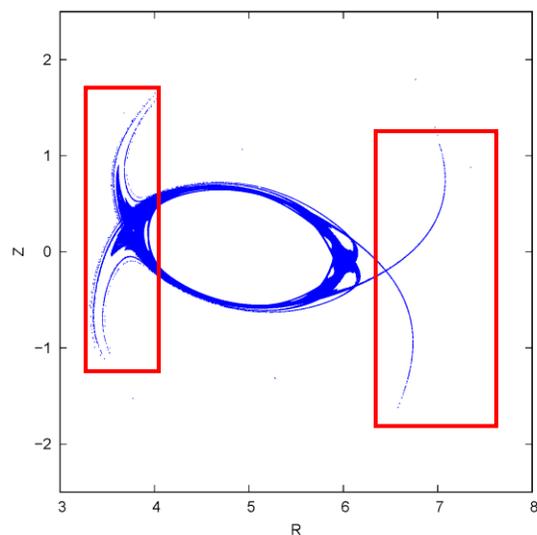
核融合プラズマの形状可視化

- 京大胡 昆祁さん、大阪成蹊大学小山田耕二先生との共同研究
- J. Adv. Simulat. Sci. Eng., Vol.12, No.1, (2025), pp.249-266.

炉設計の手順

- VMECによるプラズマ平衡データ
- MGTRCによる磁力線追跡
- **磁力線のポアンカレマップ**
- 核融合炉内部構造体との接触

- 近似を使用せずに、磁力線追跡の開始点の分布を機械的かつ効率的に決定する方法の提案
- 全結合ニューラルネットワークを使って、磁力線の分布形状を示すボクセルデータを形成
- 最外側でのラーマー半径を計算して閉曲面の形成
- 3Dモデルの生成



可知化センシングユニットの活動状況 ～新しい研究活動の試み～

田中謙治

1. CHDの計測開発
2. 高温プラズマ計測の新しい分野への適用
3. 新しいマルチモーダル計測（→科研費基盤Sへ申請準備）

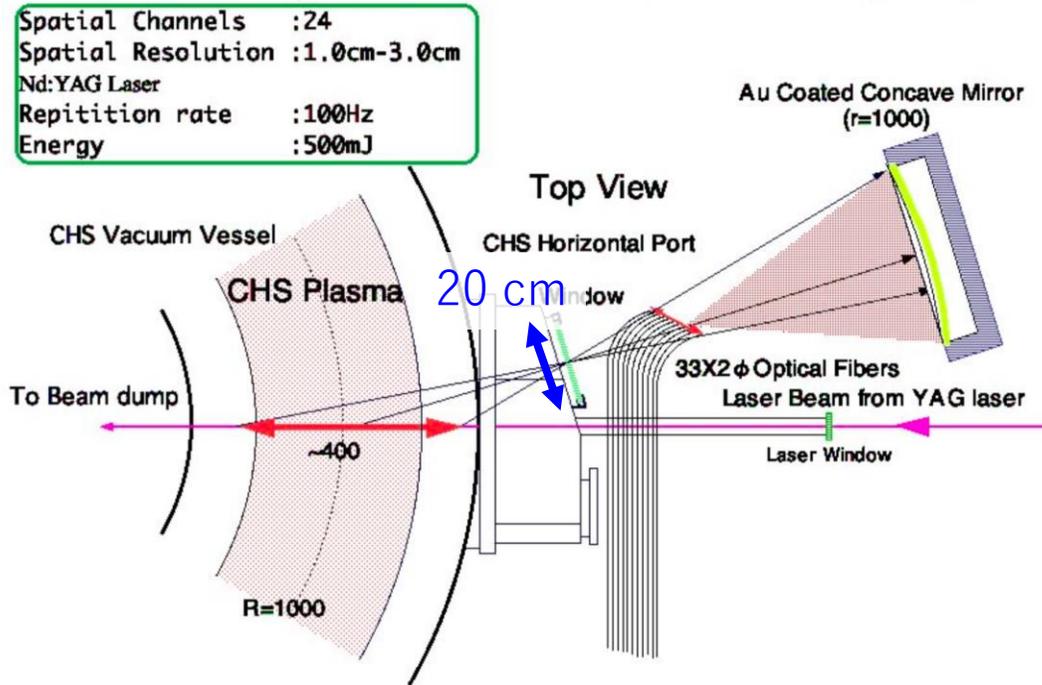
1. CHDの計測開発

2. 高温プラズマ計測の新しい分野への適用

3. 新しいマルチモーダル計測（→科研費基盤Sへ申請準備）

高精度トムソン散乱計測の開発 安原、境（プラズマ量子プロセスユニット）

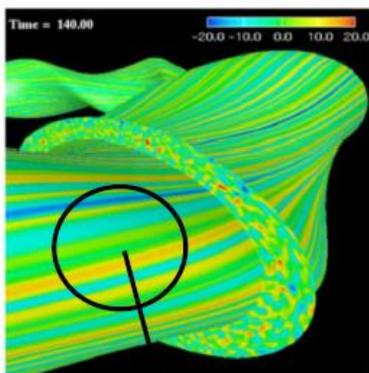
主要受光光学系はCHSと同じ
後方散乱（散乱角 ~ 163 deg.）
凹面鏡を用いて像転送（縮小光学系）
 $\sim F/2.5 \rightarrow$ 立体角は $\Delta\Omega \sim 0.13$ sr



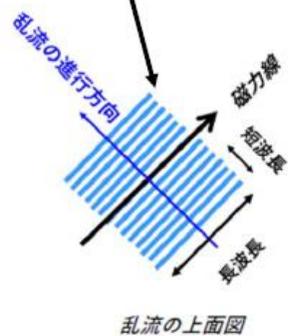
K. Narihara et al., Rev. Sci. Instrum. (1995)
T. Minami, PhD thesis (2003)

- ✓ 通常トムソン散乱システム
LHDより移設、30Hzレーザー+ポリクロメータ
→通常の分布計測用
- ✓ 高速トムソン散乱システム
新規導入100kHzまで計測、1kHzで100msまで計測
ポリクロメータをLHDより移設
→高速時間変化（MHD, ペレット等）
- ✓ 速度分布関数測定用トムソン散乱計測
100Jレーザーを2台導入、プラズマショット中で2タイムフレーム計測
分光器を新規導入、及びポリクロメータをLHDより移設
→速度分布関数を直接計測してSingle Maxwell分布からのずれを計測

(a)

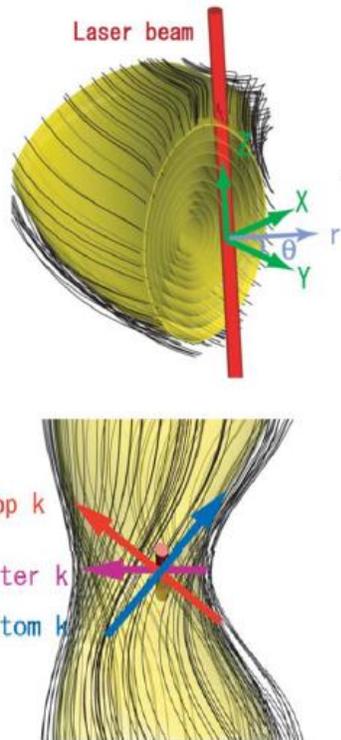


乱流シミュレーション



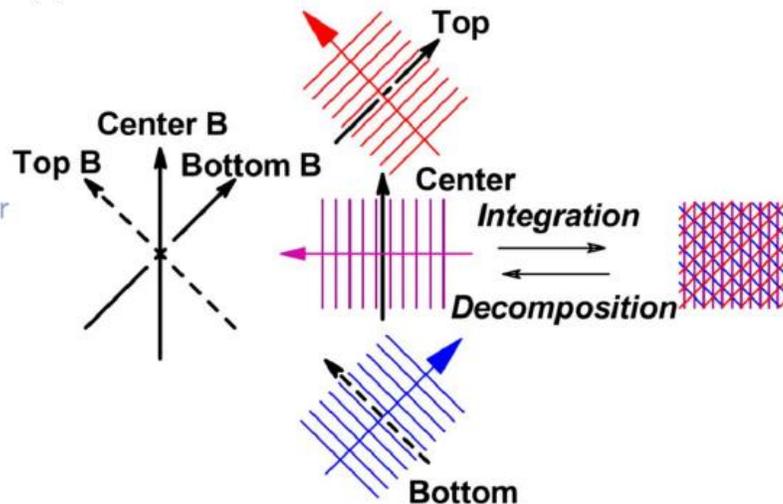
乱流の上面図

(b)



磁力線は空間的に変化

(c)

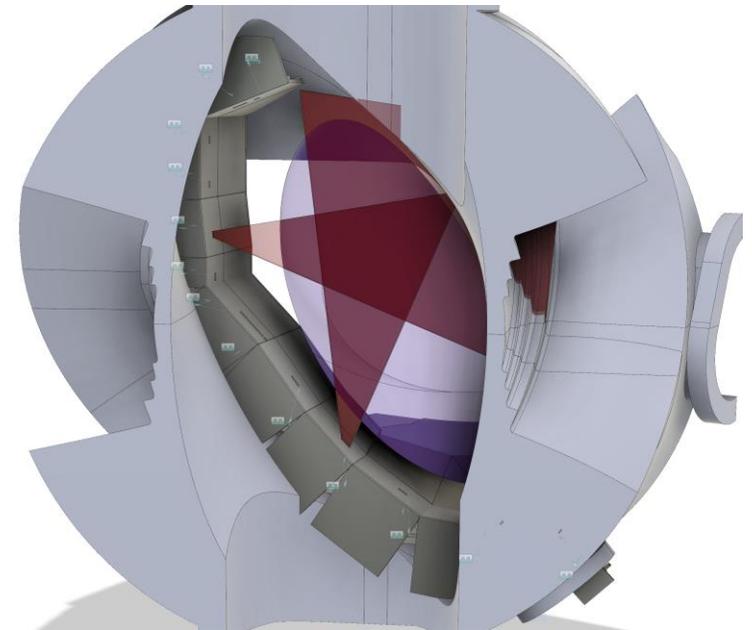
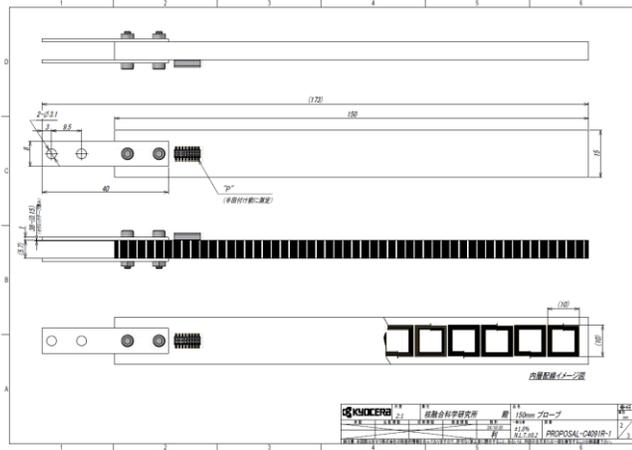


ビーム軸に沿って計測した揺動の二次元パターンを空間フーリエ変換して進行方向を同定。進行方向は磁力線に垂直。磁力線の角度の空間変化は平衡計算でわかるので、乱流の進行方向から乱流の空間位置を決定する。

- ✓ CHDの磁力線のシア角度はLHDと同程度。
- ✓ LHDの2 D-PCIと同程度の空間分解能(ビーム軸方向に小半径の10-30%)が可能。
- ✓ 全空間領域における乱流の空間分布を時間連続的に計測可能
- ✓ 二次元の検出器が製造中止になっており、2x16chの検出器3台で同時計測で、6x16 chで計測

K. Tanaka et al, Rev. Sci. Instrum 2008,
田中謙治 他 プラズマ核融合学会誌解説記事 (2023)

- ✓ 放射損失計測用抵抗性ボロメーター (向井)
ポロイダルアレイだが将来的にはLHDに適用した接線視野のカメラ計測も計画
- ✓ MHD不安定性計測のための軟X線計測 (山崎 (広大))
ポロイダルアレイだが将来的には複数視野によるトモグラフィを計画
- ✓ MHD不安定性のための磁気プローブアレイ、挿入式プローブ (武村)



1. CHDの計測開発

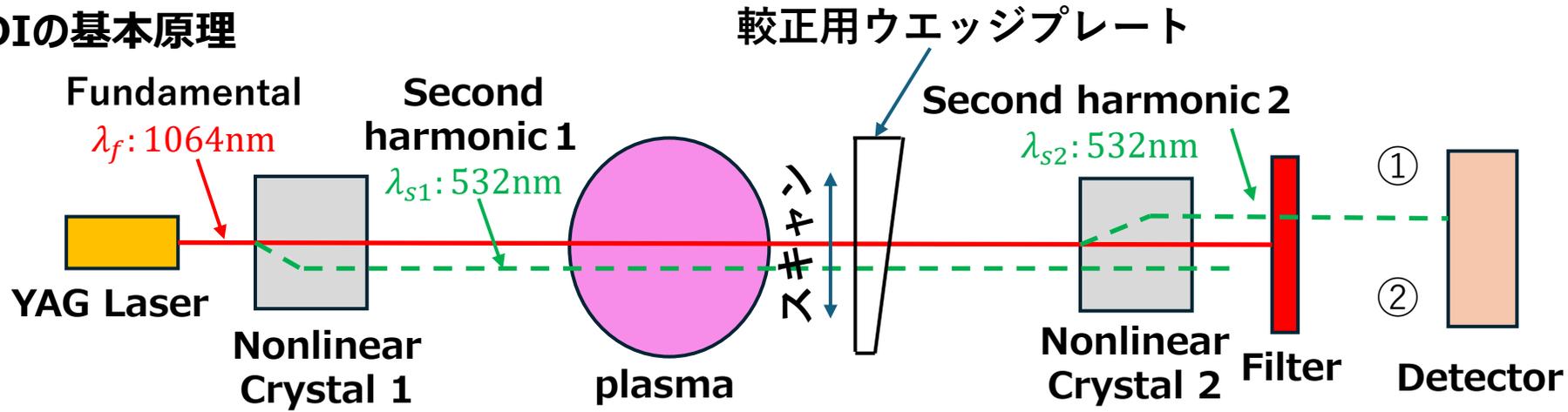
2. 高温プラズマ計測の新しい分野への適用

3. 新しいマルチモーダル計測 (→科研費基盤Sへ申請準備)

Dispersion Interferometer (DI) のレーザー生成プラズマへの適用

田中謙、横溝（九大大学院生）、吉原（九大大学院生）、Jin(九大研究生)、上原、鈴木千（プラズマ量子プロセスユニット）、加藤（プラズマ量子プロセスユニット）

DIの基本原理



第二高調波(Second Harmonics, SH)の位相変化

$$\begin{aligned}
 \text{SH1 : } \quad \varphi_1 &= 2\omega t + \frac{2\omega n \Delta d}{c} + \frac{c_p \bar{n}_e L}{2\omega} + \phi_1 \\
 \text{SH2 : } \quad \varphi_2 &= 2 \left(\omega t + \frac{\omega n \Delta d}{c} + \frac{c_p \bar{n}_e L}{\omega} + \phi_2 \right)
 \end{aligned}$$

振動 プラズマ

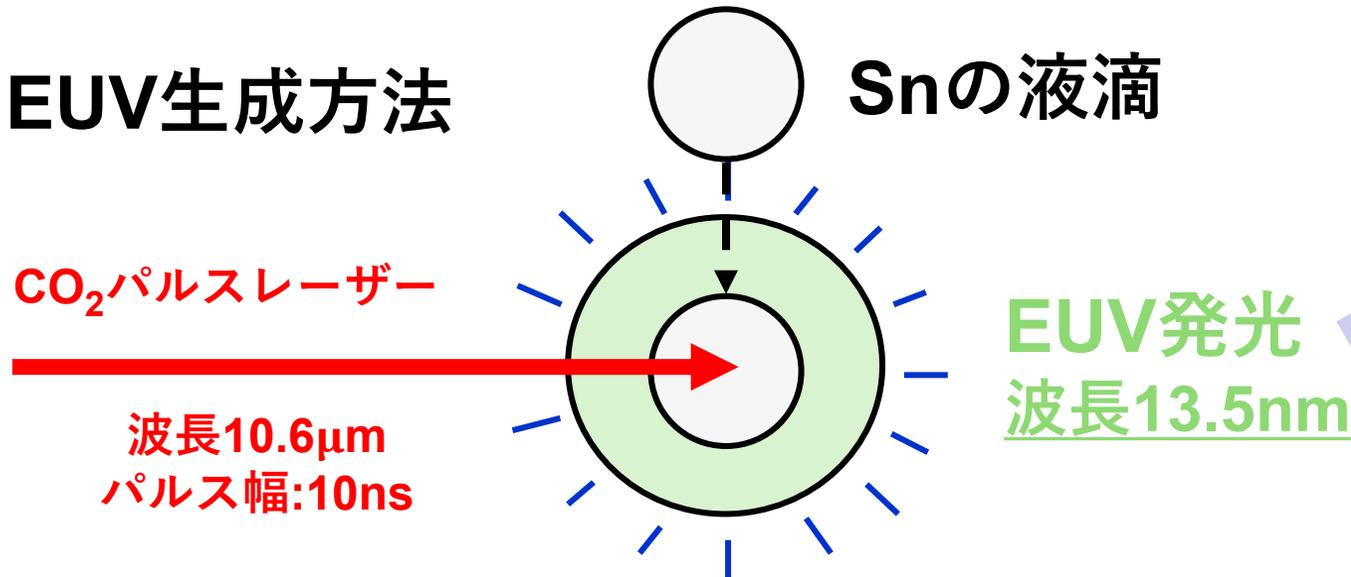
検出信号

$$\begin{aligned}
 I &= I_{DC} + I_{AC} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\
 &= I_{DC} + I_{AC} \cos \left(\frac{3 c_p \bar{n}_e L}{2 \omega} + \phi_0 \right)
 \end{aligned}$$

DIは高温プラズマの電子密度計測に近年用いられている（Akiyama et al, Journal of Instrum.2020）。同軸の基本波と第二高調波の干渉を計測するが、振動による位相変化がキャンセルされ安定した計測が可能。

EUV光源：次世代露光光源として注目

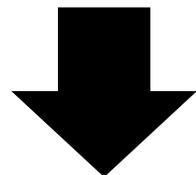
EUV生成方法



Sn Laser Produced Plasma (LPP)

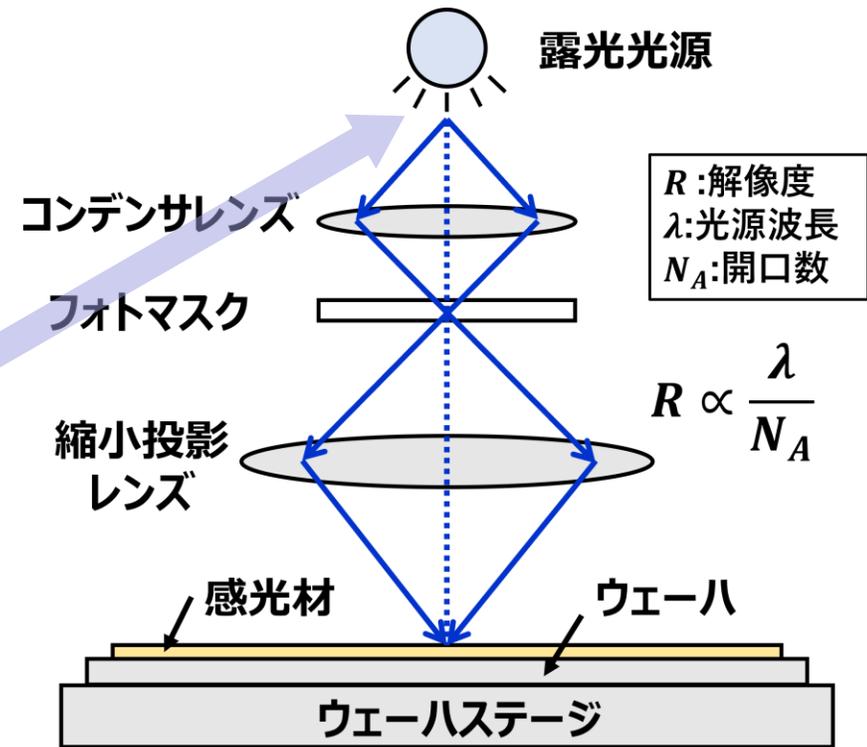
EUV発光は極端に波長が短い^{ため}、取り扱いが難しい

实用レベルの生産
→(蘭)ASML社のみ



实用レベルに達したものの
生産性が低い

EUV光源には数多くの課題がある

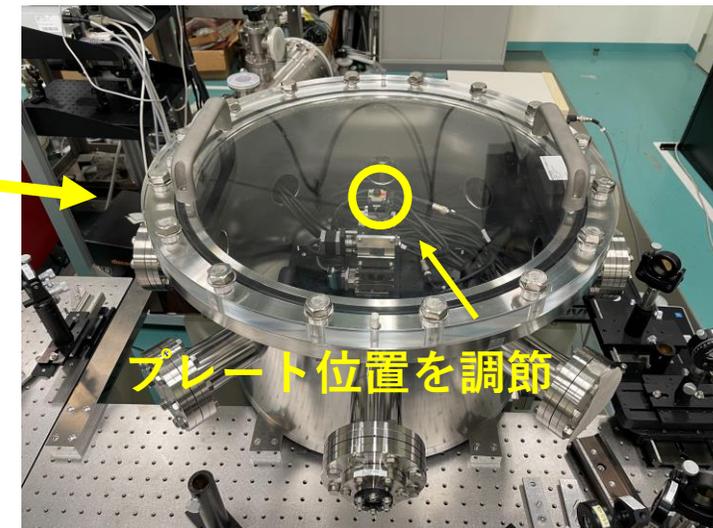
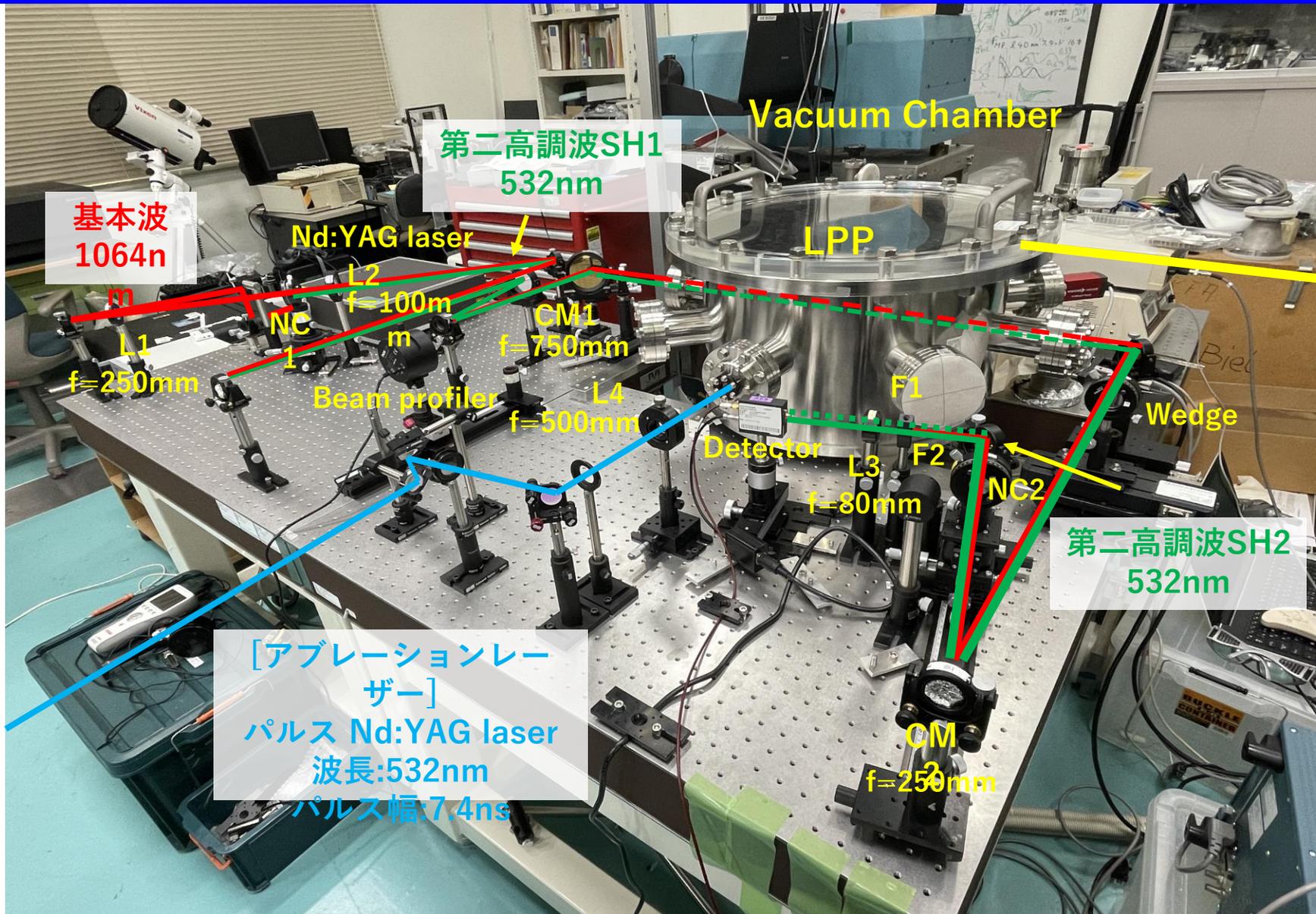


短波長光源で半導体が微細化

露光光源の波長の比較

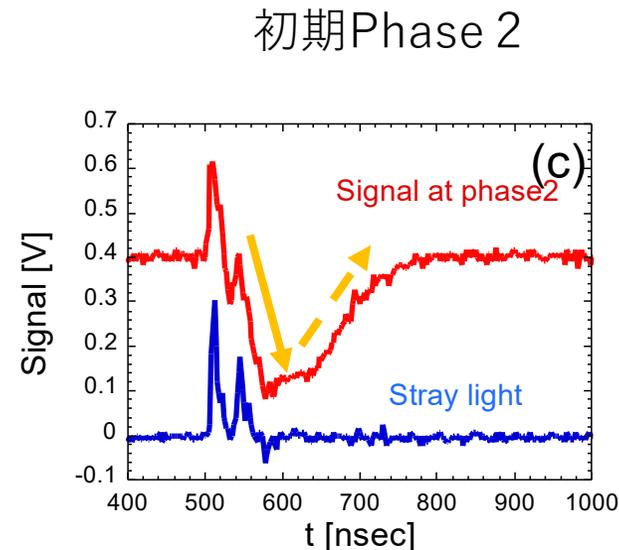
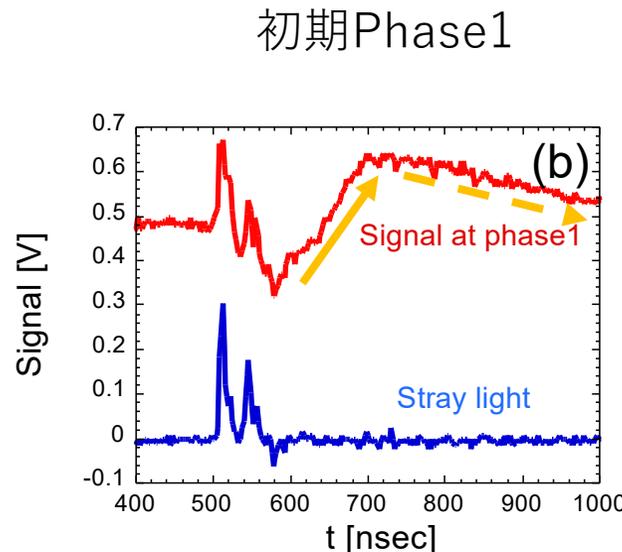
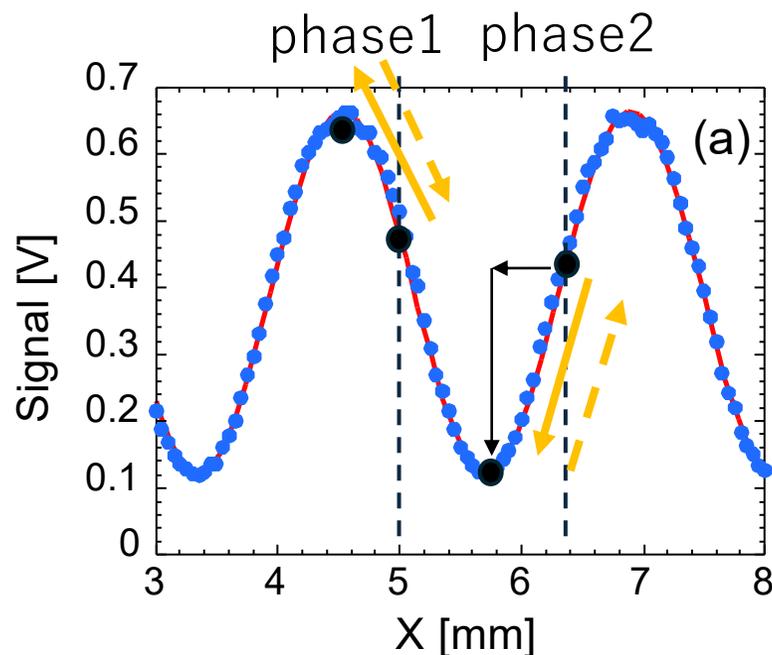
年代	露光光源	波長λ[nm]
2000年	ArF	193
2010年	EUV	13.5

タングステンプレートに532nm YAGパルスレーザーによるLPPの計測を開始した。



プレート位置：
レーザービームのエッジから0.5mm

DIによる初期的なデータを取得した。初期位相により信号が反転→干渉計として動作



	初期Phase1	初期Phase2
位相変化 Δx	198.3°	93.1°
*線平均電子密度	$7.69 \times 10^{23} [m^{-3}]$	$3.61 \times 10^{23} [m^{-3}]$

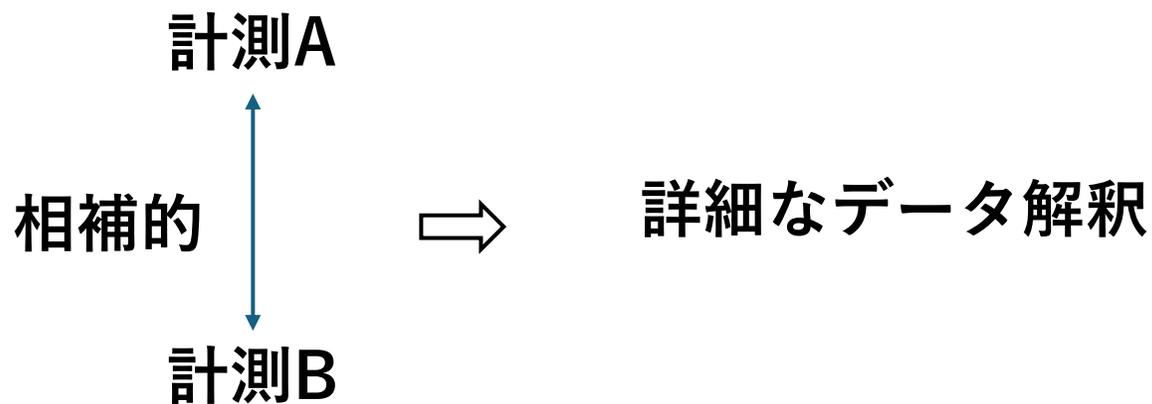
L=1mmを仮定

- ✓ レーザーパルスは10nsだが、プラズマは300-500ns程度維持される。
- ✓ 迷光の除去が必要。
- ✓ 初期位相が不安定。
- ✓ 1064nm YAGレーザーでSnプレートで実験を予定。
- ✓ EUVの計測を予定。

1. CHDの計測開発

2. 高温プラズマ計測の新しい分野への適用

3. 新しいマルチモーダル計測（→科研費基盤Sへ申請準備）



(a) 従来のマルチモーダル計測

Multi ; 複数、Modal;手法

複数の異なるセンサーや計測方法を同時に利用して、より詳細な情報を取得し、より正確な分析や予測を行うための手法

例

材料解析の分野

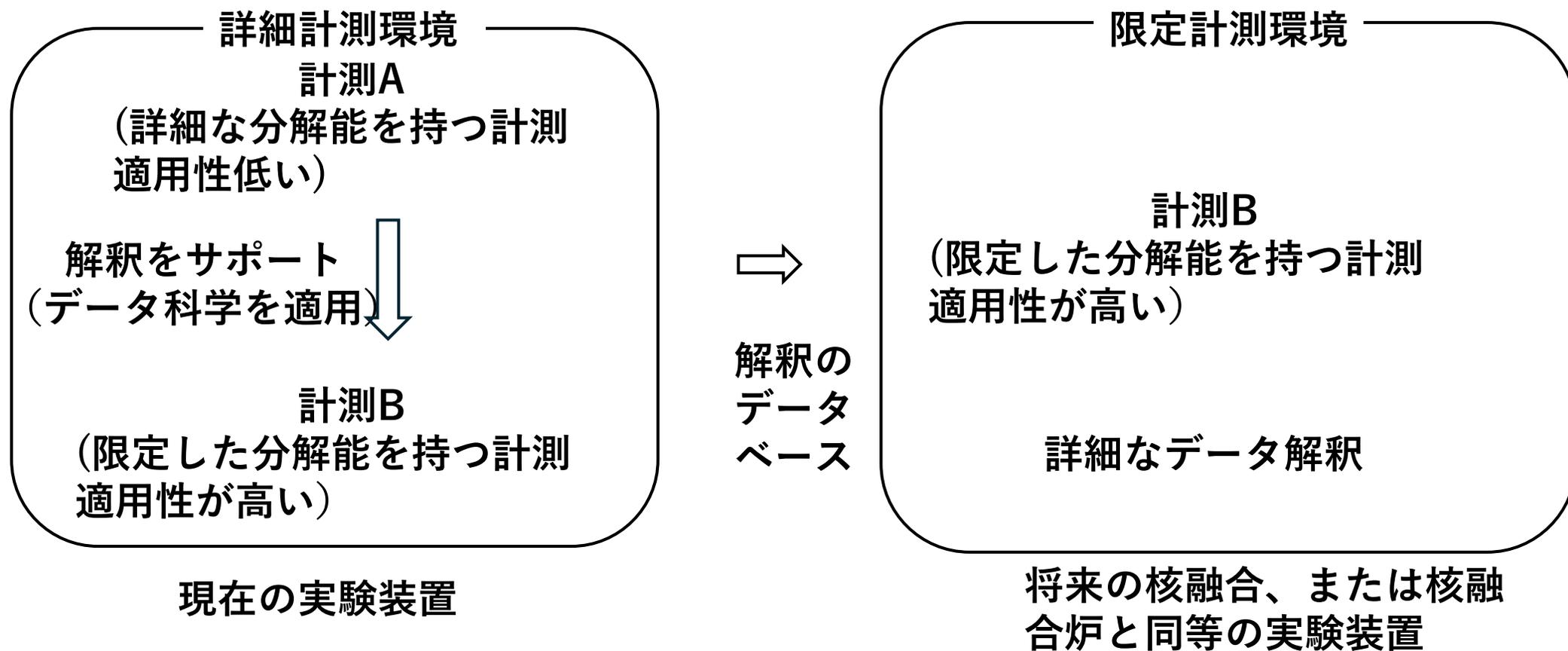
✓ X線散乱とX線吸収スペクトルの同時計測により材料の詳細な原子構造を計測する。

プラズマ計測の分野

✓ 周辺の電子密度分布はLiビーム、内部は干渉計で計測し、干渉計のアーベル変換の周辺情報にLiビームの計測データを使う。

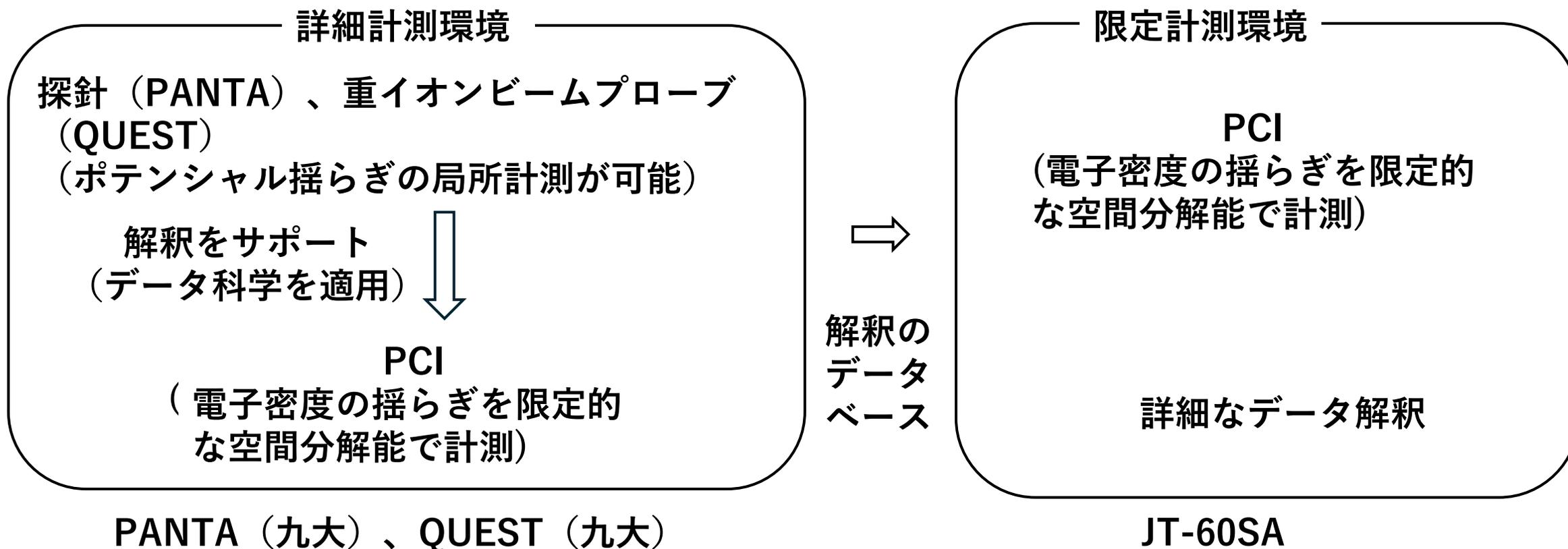
✓ 協同トムソン散乱のデータ解釈に電子密度、電子温度は非協同トムソン散乱のデータ、バルクイオンの温度は密度は荷電交換分光のデータを用いて高速イオンの温度、密度を計測する。

新しいマルチモーダル→詳細-限定マルチモーダル



(b) 詳細-限定マルチモーダル計測

詳細-限定マルチモーダル計画



(b) 詳細-限定マルチモーダル計

可知化センシングユニットはCHDの計測の開発に貢献。

高温プラズマに用いられた計測手法をレーザー生成プラズマに適用し新しい物理の知見の獲得を目指す。

詳細-限定マルチモーダル計測を提案して科研費基盤Sにトライする。

【アカデミックプラン】

(B) データサイエンスによる予測・判断志向研究を通じたサステナブルプラズマ制御

(C) データ理解への挑戦とパブリックコミュニケーションへの展開

に対応

【体制】 草場穫（核融合科学学際連携センター）、向井清史、横山雅之（可知化）、
鈴木優也（総研大D4）、鋳持尚輝（位相空間乱流）、庄司主（プラズマ・複相間）

【概要】

● LHDデータ資源を有効活用し学際的展開を図る

- 核融合の専門家以外にもLHDデータを使ってもらうきっかけを創る
- まずは放射崩壊現象の異常検知をテーマに、ベンチマークデータ（モデルの性能を評価し、比較するためのデータセット）の公開準備を進めている

● 人材獲得・育成も兼ねる

- 総研大夏の体験入学で課題を実施する（2025年度）
- 高専生を対象としたプログラムコンテストの開催を検討中
- 機械学習コミュニティ最大級のオンラインプラットフォームKaggleでのコンペを目指す

総括①

昨年度評価を受けた対応（詳細な回答は報告書参照）

（提言の概要）

ユニット内での議論や研究者同士の交流活動の活性化により積極的なユニット内活動を期待する。

（回答の概要）

新たな取り組みとして、月例ユニット会議において**参加者全員が進捗報告**するコーナーを設けた。これは、自身の進捗把握・研究サイクル見直しが主目的であったが、出席者全員が必ず発言しすることで**当事者意識を高める効果**が得られた。ユニットセミナー後の懇親会など多数開催し、**ユニット内・ユニット間・所内外メンバー間のアイスブレイク的**な交流を促進した。

これらの活動の効果もあり、昨年度報告以降に計8回開催したユニット研究戦略会議においても、所内外メンバーからの発言が徐々に増加し、年度後半には**ユニットテーマに関する活発な議論**が交わされるまでに改善した。

（提言の概要）

計測技術とデータサイエンスの統合という目標は多様なプラズマ現象の総合理解を図るには不可欠な視点であることを念頭に、ユニット内での連携を進め、優れた成果の創出につなげることを期待する。成果報告会においては、「センシング」「可知化」が同じユニットにある価値を示していただきたい。

（回答の概要）

上述のアイスブレイク的な活動による**発言・議論の活性化**のほか、ユニットセミナーを9回開催し、**幅広い分野に亘った話題提供**をおこない、分野間連携や共同研究を促した。

計測とデータ科学を融合したユニット全体で取り組む研究の発足については、現ユニット長の田中謙治氏を**対策委員長に任命**し、ユニット研究戦略会議等の場で具体的な議論を開始し、**今回紹介した複数のテーマが立ち上げられた**。これらの課題について実際に連携して研究をスタートさせるため、研究資金獲得に向けた申請書の内容について研究戦略会議にて**全員からの意見を取り入れながら具体化**を進めている。**ユニット一丸となって取り組む**研究について舵取りが行われており、今後の進展が期待される。

総括②

昨年度評価を受けた対応（詳細な回答は報告書参照）

（提言の概要）

ロードマップ2023 のプロジェクトを具現化する新実験装置(CHD)設計では、構造形成・持続性ユニットおよび位相空間乱流ユニットと共に本ユニットがプロジェクトの中核となることを期待する。

（回答の概要）

先のコーナーで報告した通り、**CHDにおける計測器の設計や整備**において、当ユニットは、**位相区間乱流ユニット等との強固な連携**に基づいてプロジェクトの中核的立場で貢献している。引き続き、次期装置計画のための開発やプラットフォームの整備を滞りなく進めていく。

自己評価と今後についての考え

- ユニット体制構築の真価が問われているが、ユニット全体で団結して取り組むテーマの議論が所内外メンバーを巻き込んで着々と進んでおり、理想の環境へと近づきつつある。
- ITERスクールの実行委員会を当ユニットが引き受けた。負担が大きかったが、団結のきっかけとなった。
- 若手メンバーを中心に、研究の学際化が順調に進められている。また、太田氏の研究をはじめとした先進的な計測法のプラズマ応用が大いに期待される。
- 今後、ユニット研究戦略会議がより活性化し、共同で取り組むテーマの議論のみならず、プラットフォームの整備や人事提案に関する議題などを取り扱い、核融合分野の中核的な役割を担う会議へと発展することを期待する。

特筆される研究成果①（途中経過や展望含む）

・LHDとW7Xの乱流揺動の比較研究

W7Xの位相コントラストイメージングに検出器を持ち込んで乱流揺動を計測した。NIFSで開発した乱流揺動振幅の絶対値評価手法をW7X装置に適用してデータを取得した。同じ電子密度、加熱条件下で線積分した乱流揺動レベルがW7XよりLHDの方が低いことを実験的に示した。

・TCVTカマクでの同位体効果の研究

スイス連邦工科大学プラズマ科学センターのTCVTカマクにおいてオーミック放電における軽水素と重水素プラズマの閉じ込め特性を明らかにする同位体効果実験を行い解析した。密度が低い領域では同じ密度で閉じ込め特性に差がないが、密度が高い領域では重水素プラズマの閉じ込めが良いことを示した。ジャイロ運動論シミュレーションにより、この結果は補足電子不安定性揺動の衝突周波数による安定化の同位体効果でによるとが明らかになった。

・分散干渉計を用いたレーザー生成プラズマの電子密度時間連続計測

量子プラズマユニットや九大と連携し、レーザー生成プラズマの電子密度の時間変化を分散干渉計で計測することに最近成功しており、今後スズプレートを用いた実験を行い、極端真空紫外光線の光源のモニター計測法として確立することを目指す。

・磁場閉じ込めプラズマで観測されるMHD不安定性の研究

MHD不安定性の径方向モード構造における新たなタイプのパリティ遷移をLHD実験により発見した。本遷移は磁場構造のトポロジー変化に起因し、炉心プラズマの閉じ込め劣化に関与する磁気島構造の消失とも密接に関連している。この成果により、磁気島の消失メカニズムの理解の進展が期待される。

特筆される研究成果②（途中経過や展望含む）

・大型ヘリカル装置におけるペレット入射後のコア密度崩壊(CDC)現象

ペレット入射後のコア密度崩壊(CDC)現象の異常検知を用いた予測手法を開発した。干渉計データに対して、教師なし異常検知モデルの一つであるIsolation Forestアルゴリズムを導入し、CDC兆候のリアルタイム識別に成功した。また、高性能計測によるCDCダイナミクスの観測のために、本手法をマイコンに実装し、計測トリガを開発した。次期LHD実験にて本手法の実証を予定している。

・イメージングボロメータを用いた放射崩壊の異常検知

LHDプラズマの放射崩壊の前兆となる異常な輻射構造を、イメージングボロメータとオートエンコーダを用いた異常検知により明らかにした。本内容はJSST2024においてOutstanding Presentation Awardを受賞し、JASSEで受理された。現在、本手法を不純物デタッチメント実験にも適用した論文を執筆中である。

・ダイナモ現象に関するMHDシミュレーション研究では、

Yin-Yang格子を用いたkinematicダイナモのMHDシミュレーションを行っている。強制的に東向きあるいは西向きの流れを加え、ベクトルポテンシャルの乱数による初期揺動を与えているが、発生する双極子磁場の向きが流れの向きや初期揺動に依存しないという興味深い結果が得られた。現在、その詳細をまとめ、論文を執筆中である。

・オーロラ現象に関する連結階層シミュレーション研究

コードをプラズマシミュレータに移植することに成功した。ミクロ層のシミュレーションボックスを大きくした系での計算の結果、複数のダブルレイヤーが形成されることを確認している。現在、その詳細構造について調べている。

特筆される研究成果③（途中経過や展望含む）

・触覚デバイスを利用したVR可視化研究

触覚デバイスをPCに接続してUnityを使って触覚デバイスの振動挙動を制御するインターフェースを開発した。今後、数値データを可視化するアプリケーションと接続して数値データに合わせて触覚デバイスを振動させるプログラムを開発予定である。

・オープンサイエンス化の研究

LHD実験の過去25年におよぶデータを2023年より完全オープン化しています。昨年(2024年)12月には、実質的な世界標準であるデジタルオブジェクト識別子(Digital Object Identifier:以下DOI)を付与した実験データの登録件数が1千万件を突破しました。この数字は現時点において、世界最多の登録件数となります。

・材料中トリチウム分析(センシング)に関する研究

プラズマ・複相間輸送ユニットと共同で、高周波誘導加熱法によって比較的大型の炭素板に滞留しているトリチウム量分析手法を確立した。これにより、大型核融合装置(LHD)内のトリチウム分布に関する知見が得られるようになり、今後の分析によりトリチウム挙動を明らかにできる。LHD内では複雑なトリチウム分布が予想されるため、可知化ユニットの先進的な研究成果を活用してトリチウム分布の可視化に取り組む。

特筆される研究成果④（途中経過や展望含む）

・レーザー加工を導入したプラズマ対向材料の開発

超高流束協奏材料ユニットやプラズマ・複相間輸送と共同で、レーザーで表面改質したタングステンと銅の接合に関する研究を進めている。今年度、レーザー照射によるタングステン組織への影響を詳細に明らかにし、さらにレーザー亀裂に対して銅の無欠陥接合がなされていることを、詳細な断面組織分析によって見出した。現在、接合性能や耐熱性能の調査を進めている。今後、ダイバータデバイスの高度化に資する研究としての発展が期待される。

・構造化された光を使った加工・計測応用

光渦などの構造化された光を使った加工や計測応用の研究を理研などと共同で行っており、今年度、光渦フェムト秒レーザー照射で多様な特徴的な構造体がタングステンに誘起されることを見出した。現在、軌道角運動量を利用した加工についての原理解明を進めており、今後はこの知見を応用したプラズマ計測法の開発に取り組む。