

CHDプラズマ実験計画

永岡賢一、CHDチーム

核融合科学研究所

内容

1. 背景
2. CHDプラズマ実験と準備状況
3. データ解析システムの構築
4. まとめ

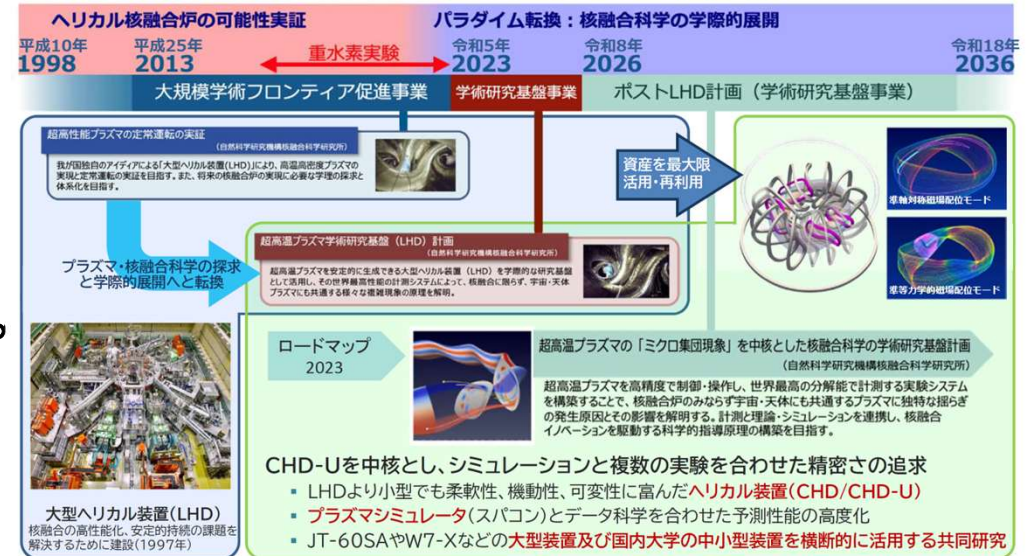
背景

- Post LHD計画として「超高温プラズマの『マイクロ集団現象』と核融合科学」を基本構想とする研究計画の議論を進めている。
- LHDの資産を最大限に活用しつつ、世界トップの精密な計測と制御を駆使できるCHD (Phase1:CHSのリノベーション)/CHD-U (Phase2:新しい装置)へと新規展開する計画。
- 2024年からCHDプラズマ実験に向けた具体的な検討(マイクロ集団現象(MCPOp)準備室/プロジェクト推進本部)を重ねてきた。
- MCPOpの3本柱:
プラズマ実験+シミュレーション・データ科学+国内大学の中小装置を横断的に活用する共同研究



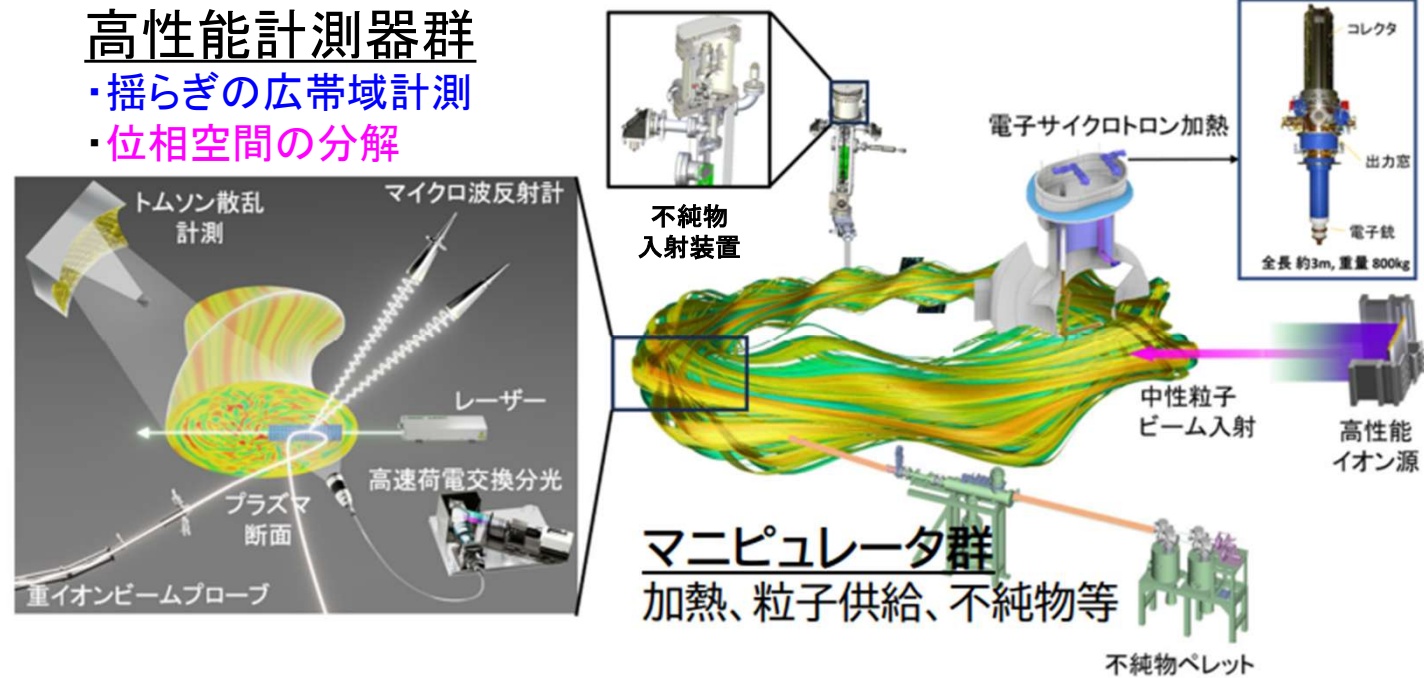
LHD計画からポストLHD計画への展開

培われた研究成果を学術研究基盤とし、社会的要請に応える幅広く、新しい展開へ



CHDプラズマ実験の研究戦略 -揺らぎ・輸送・計測-

- **LHDの資産・知見を最大限生かし高性能プラズマ計測システムを構築**:密度、温度、電位、流れの揺らぎの広帯域計測、位相空間の計測を可能とするシステムの構築
- **データサイエンスの活用による位相空間の解像**
- **高性能な加熱システムによる位相空間の制御性の高度化、シミュレーションとの連携による位相空間ダイナミクスを含めた多様な輸送研究に寄与**



CHDプラズマ実験では、計測器連携運転システムの実証を重要課題の一つと位置付ける

CHDスケジュール

年度	2025	2026	2027	2028	2029	2030
機器整備	■					
装置本体、コイル系	■	■				
受電系・コイル電源	■	■				
加熱(ECH, NBI)	■	■	■	■	■	■
計測機器	■	■				
プラズマ実験						
閉じ込め・乱流輸送			■	■	■	■
位相空間ダイナミクス			■	■	■	■
先進制御				■	■	■
学際・産学連携			■	■	■	■

2026年度内にCHDプラズマ実験開始を目指して、各機器を整備中

CHS

Compact Helical System (CHS)

1988年-1999年(名古屋サイト)
2000年-2006年(土岐サイト)

装置仕様	
Bt	2.0 T
R	1.0 m
a	0.2 m
A_p	5
N_p	8

プラズマパラメータ

放電時間: < 200 ミリ秒

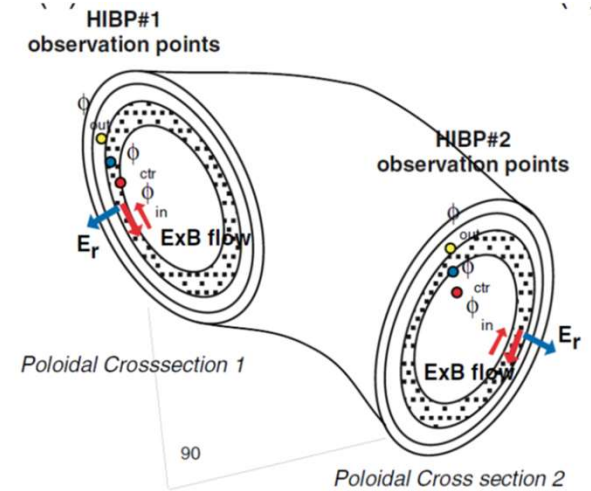
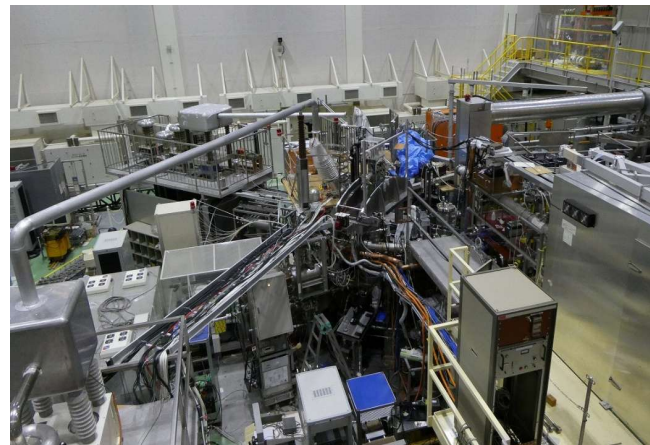
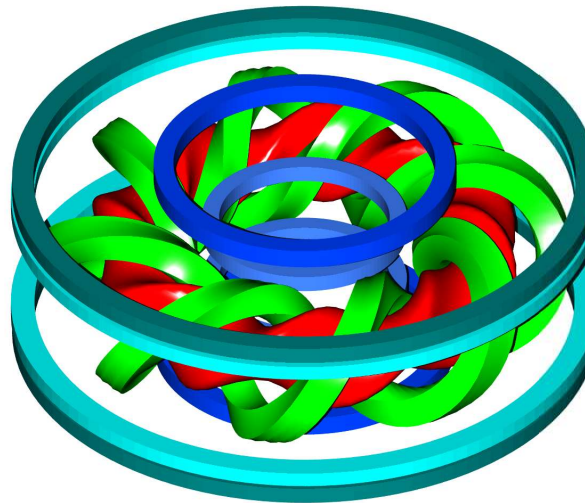
放電周期: 3分

閉じ込め時間: 数ミリ秒

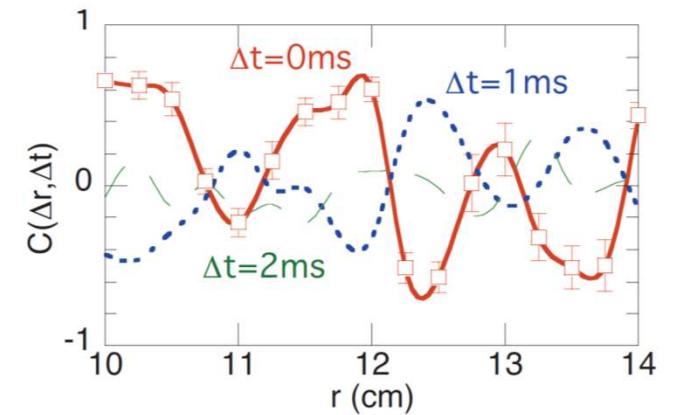
電子温度: < 7000 千万度

イオン温度: < 数百万度

電子密度: $\sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$



(c)

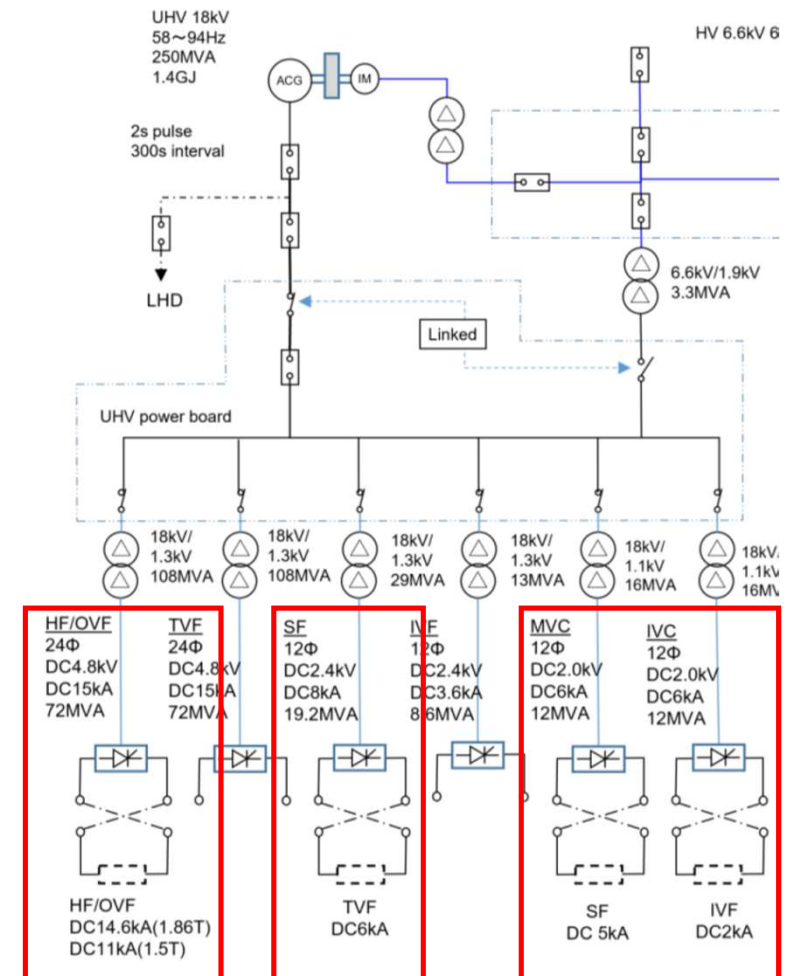


CHD: renovation of CHS

Update of the Coil PS System

	CHS	CHD
Coil Power Supply		
Bt	2.0	1.5
Pulse length	200 ms	1000 ms
Pulse interval	3 min.	3-5 min.

- 4台のサイリスタ盤の更新
- 磁場強度を下げて、パルス幅を伸ばすことを選択
=> LHDの77GHz(1.375Tで2倍高調波加熱)
ジャイロトロンの有効活用
=> 電流駆動やフィードバック制御実験に対応
- リアルタイム制御システム
=> 多様な制御手法に対応するプラットフォーム



CHD: renovation of CHS

Upgrade of ECH and NBI

ECH	CHS	CHD
Gyrotron#1		
Frequency	54.5 GHz	77GHz
Power	450 kW	1MW
Duration	100 ms	< 2 s
Gyrotron#2		
Frequency	106.4 GHz	77GHz/ 50GHz
Power	500 kW	1 MW
Duration	100 ms	< 2 s

NBI	CHS	CHD
NBI#1		
Energy	40 keV	40 keV
Power	1 MW	1MW
Duration	100 ms	< 1 s
NBI#2		
Energy	30 keV	40 keV
Power	1 MW	1 MW
Duration	100 ms	< 1 s

- ジャイロトロン2台(77GHz, 77GHz/50GHz)をLHDから移設
- LHD-ECHの高圧電源3台のうち1台を第26サイクル実験前に改造。
- **100kHzパワー変調=>輸送研究の制御ノブ拡大**
- MG受電/商用受電

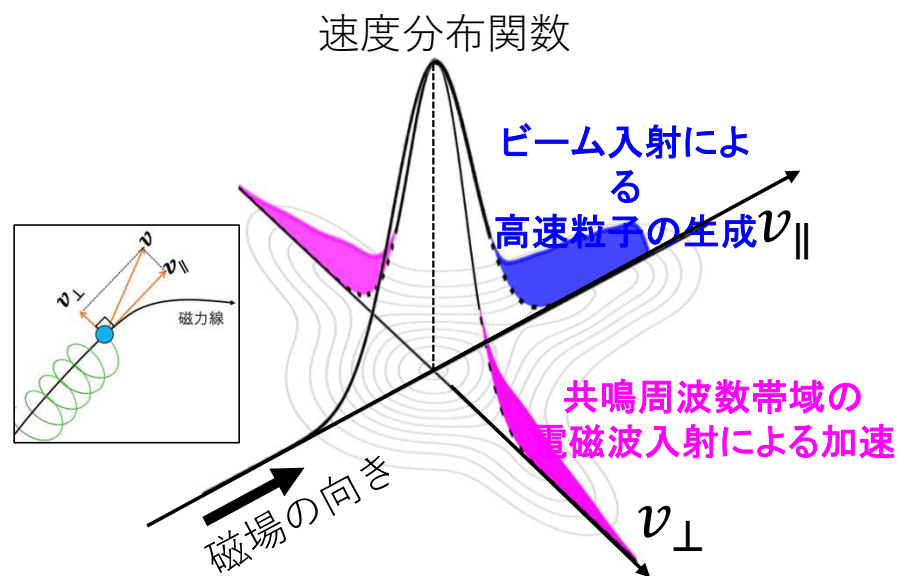
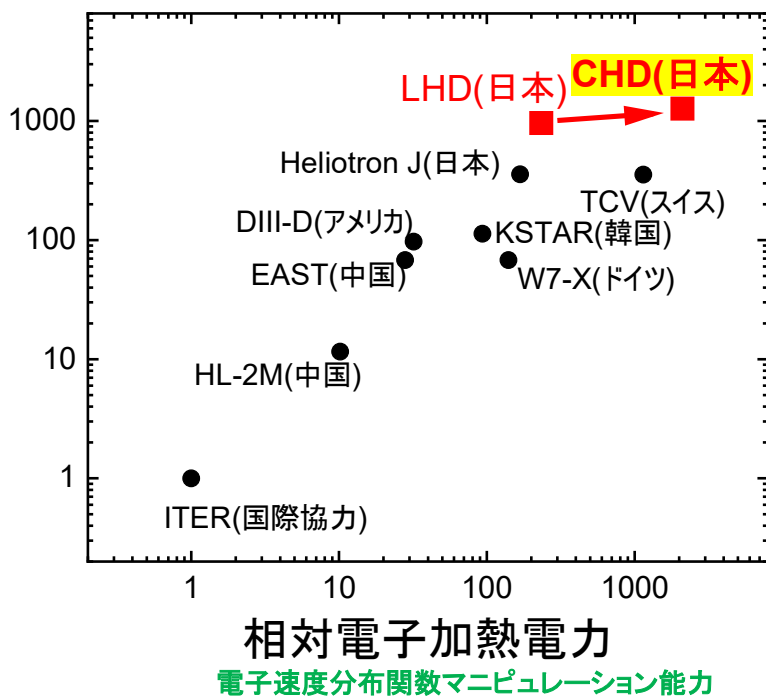
- ビームラインは、既設の1号機、2号機を継続利用
- LHD-NBI4号機の電源(2台:4A+4B)をCHDに移設し、NBI1号機、2号機を運転可能にする
- 商用受電に変更

CHD: renovation of CHS

Upgrade of ECH and NBI

イオン速度分布関数マニピュレーション能力

相対イオン加熱電力



電磁波やビームの入射による速度分布の自在なマニピュレーション

加熱電力密度をLHDより高めて、位相空間の制御性能を活用した実験を実現する

CHD: renovation of CHS

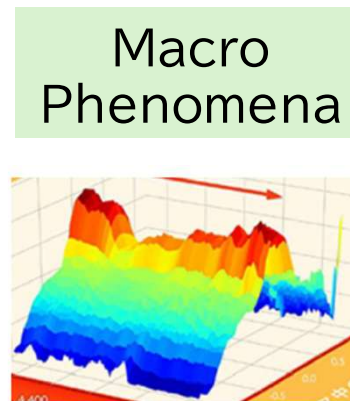
Thomson Scattering systems

Physics quantities to be measured

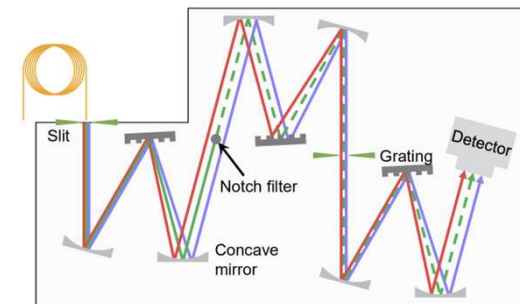
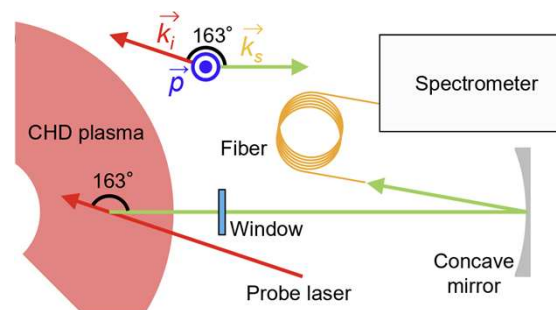
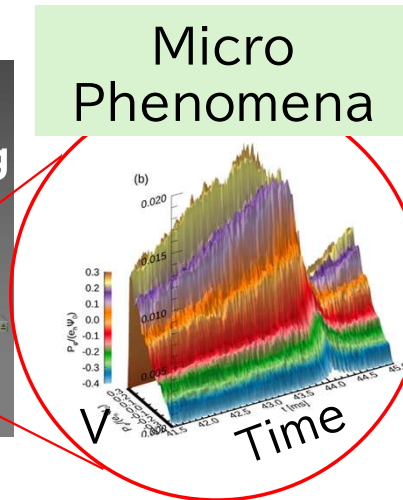
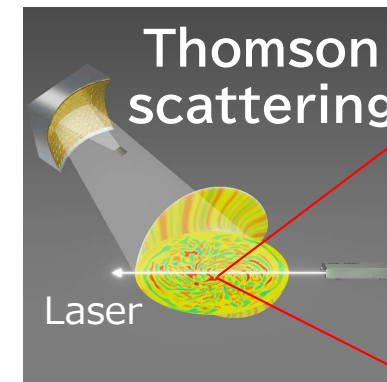
- Local electron temperature profile
- Local electron density profile
- Velocity distribution snapshot (20 ns~) Measurement

Specifications

- 3 systems
 - **High energy Thomson**(Velocity distribution)
 - ✓ 100J (by a factor of >50 for LHD TS-laser)
 - ✓ Max. 50GW
 - ✓ Two time frames per one plasma shot
 - **High rep. rate Thomson**(Local T_e , n_e) up to 100kHz. Local >30 points
 - Standard Thomson scattering system 30Hz., Local >30 points
- End of March 2027—



Temporal variation of T_e profile



論文投稿中: 境健太郎+: Conceptual design of TS system...

CHD: renovation of CHS

Millimeter Wave system

Physics quantities to be measured

- Line averaged electron density ($\overline{n_e}$)
- Electron temperature profile ($T_e(R)$)
- Electron density fluctuation ($\widetilde{n_e}$)
- Electron temperature fluctuation ($\widetilde{T_e}$)
- Magnetic field fluctuation (\widetilde{B})

Specifications

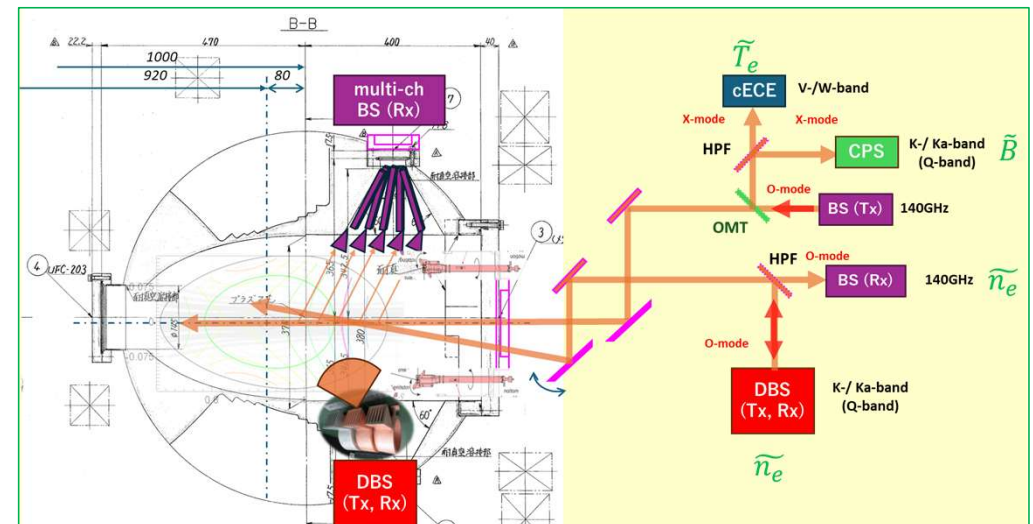
- **Multimodal measurement** will be done. Concentrate multiple microwave diagnostic systems at the 3-O port to allow **synchronous measurement of heterogeneous parameters for turbulence study**.
- Higher harmonic (not only 2nd, also 3rd and 4th) ECE can be observed for study of high energetic electron activity and phase space deformation.
- Shorter wavelength (less than 1mm) THz-wave interferometer is applied to improve the observable density range (wider than that of LHD).
- They will start the observation from the beginning of CHD experiment as an initial system.

Analytical method

- ECEI is also planned to combination measurement with HIBP at the same location.
- Ray tracing code: LHD(CHD?)Gauss, Travis
- **ODAT-SE**

Pictures/Schematics

3-O microwave station for fluctuation measurement



CHD: renovation of CHS

Phase Contrast Imaging

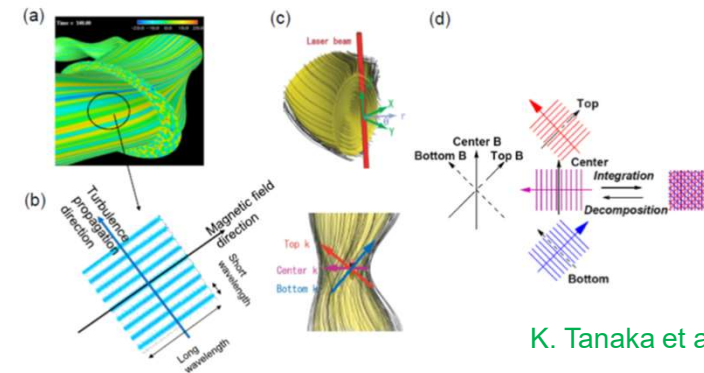
Physics quantities to be measured

- The line-integrated two-dimensional turbulence image
- The spatial profile of turbulence (density fluctuation with ion scale)

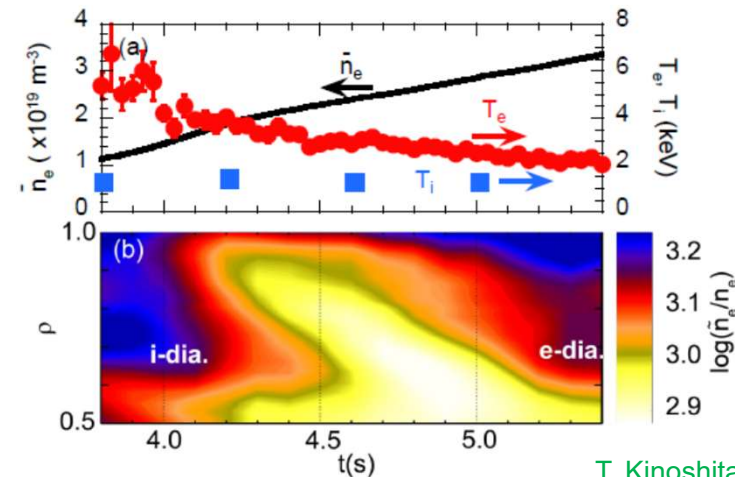
Specifications

- Conceptual design of the diagnostic is the same as LHD.
- In CHD, **three sets of new detector arrays** are planned.
- Each detector array is 32 rows by 2 columns, and **a total of 192 channels**, which are larger than those of LHD **by a factor of 4**, will be available

Pictures/Schematics



K. Tanaka et al, RSI 2008

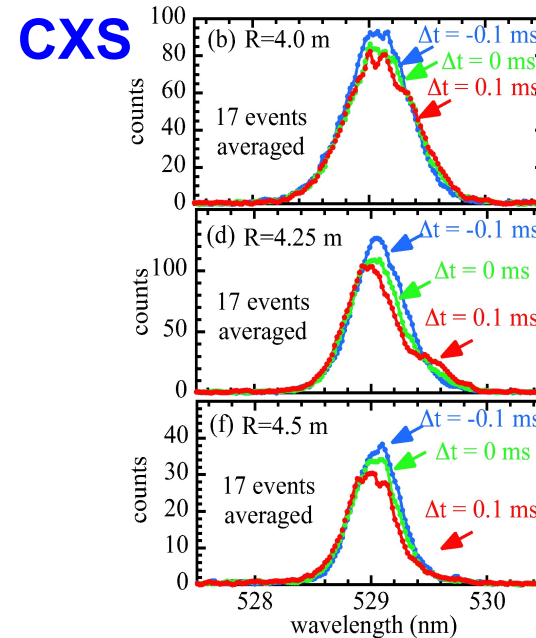


T. Kinoshita et al, PRL 2024

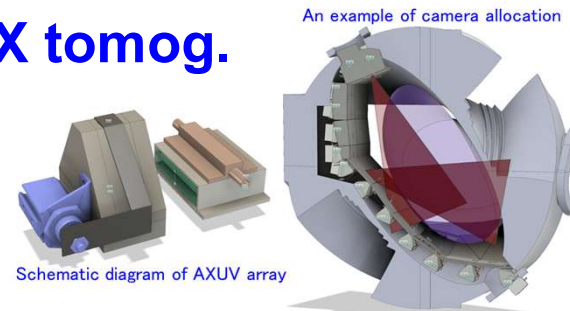
CHD: renovation of CHS

Other diagnostics etc.

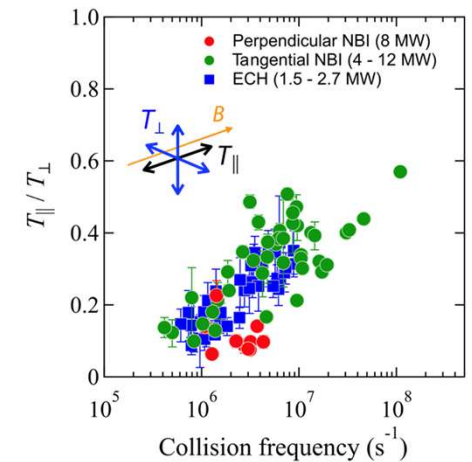
- Heavy Ion Heam Probe
- Charge Exchange Spectroscopy
- Motional Stark Effect Spectroscopy
- Beam Emission Spectroscopy
- Doppler-free spectroscopy
- Polarization spectroscopy
- Impurity pellet injector
- Soft X-ray tomography
- Bolometer
- Hard-X-ray spectroscopy
- Magnetics/Langmuir Probes
- LAN, Data acquisition
- RF probe
- Collective Thomson Scattering(CTS)
- Coherence Imaging Spectroscopy



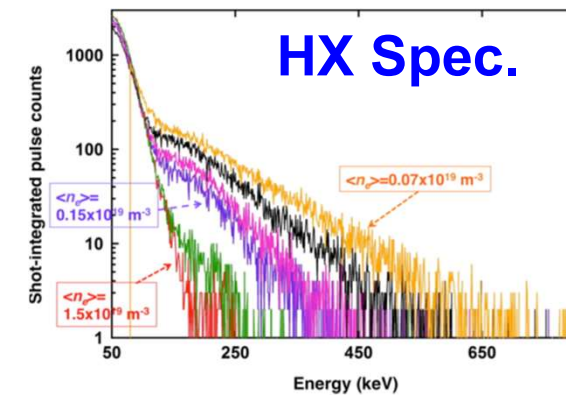
SX tomog.



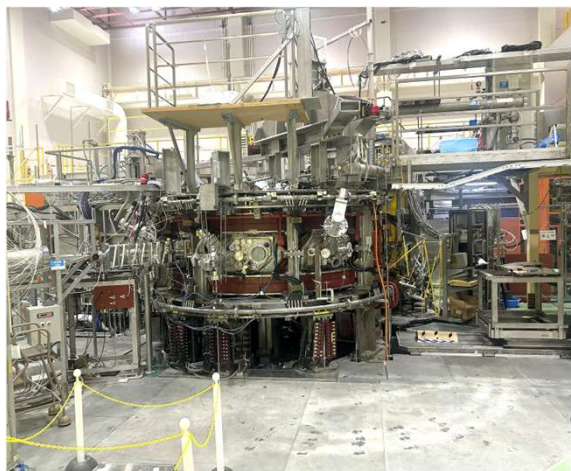
Polarization Spec.



HX Spec.



2025/12時点整備状況



- コイル電源整備
- ECH・NBI電源移設
- 2周波数ジャイロトロン

契約完
40%
LHDで稼働中

- 不要機器(フロア)の撤去
- CHS/CHD本体点検
- 冷却水設備更新作業
- 本体制御系

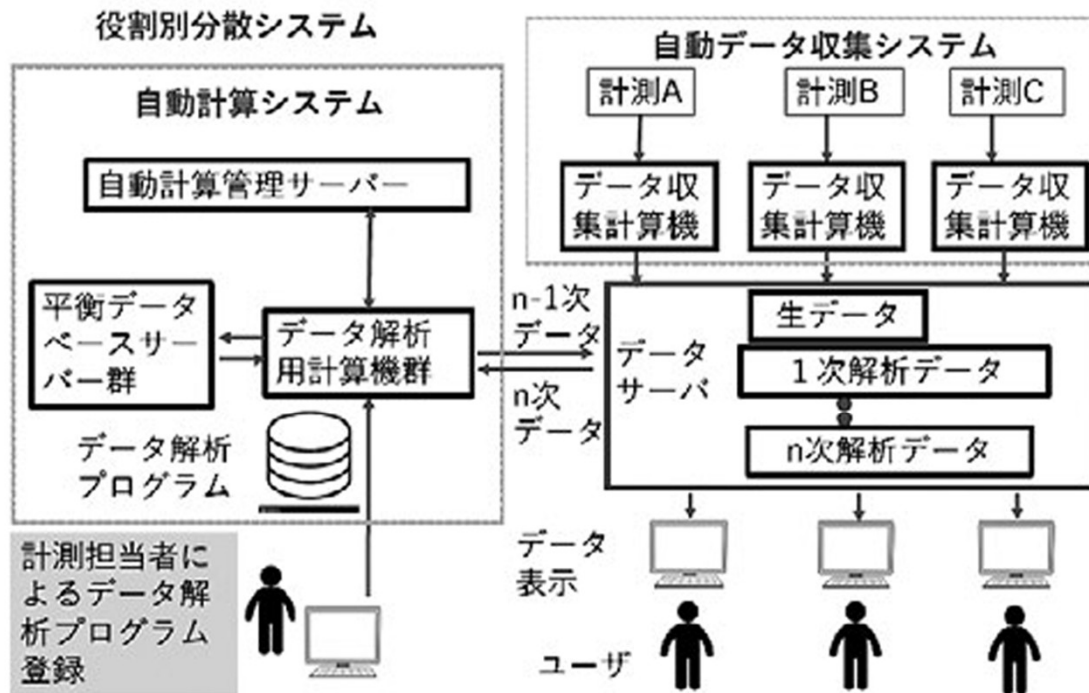
85%
完了
進行中
設計中

内容

1. ミクロ集団現象と核融合科学プロジェクト
2. CHDプラズマ実験と準備状況
3. データ解析システムの構築
4. まとめ

データ解析システムの構築

LHDの自動データ収集+自動解析システム



AutoAnaの依存性ダイアグラム

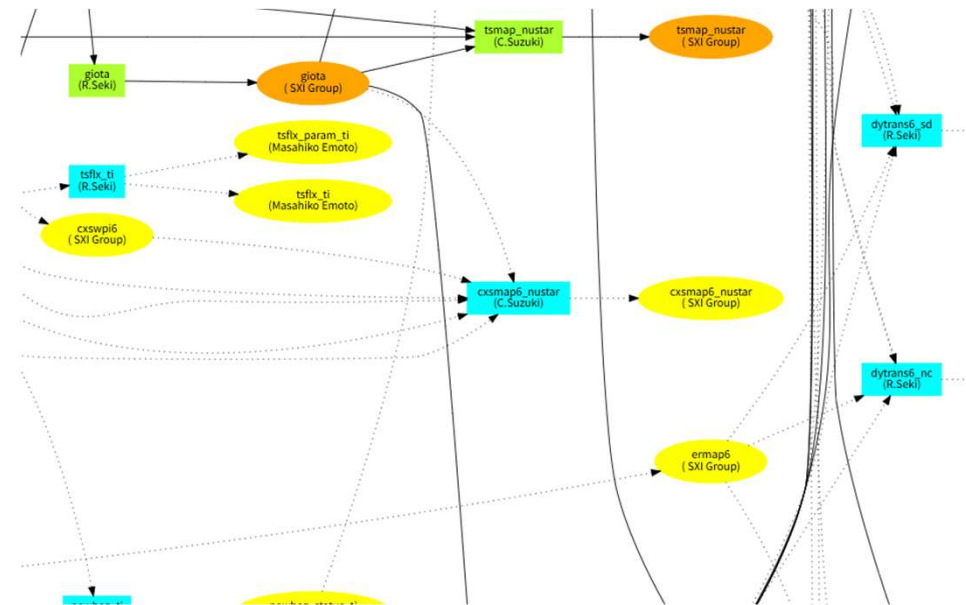


図1 従来型の計測別分散システムと自動計算システムを組み込んだ役割別分散システム。

データ解析システムの構築

LHDの自動データ収集+自動解析システム

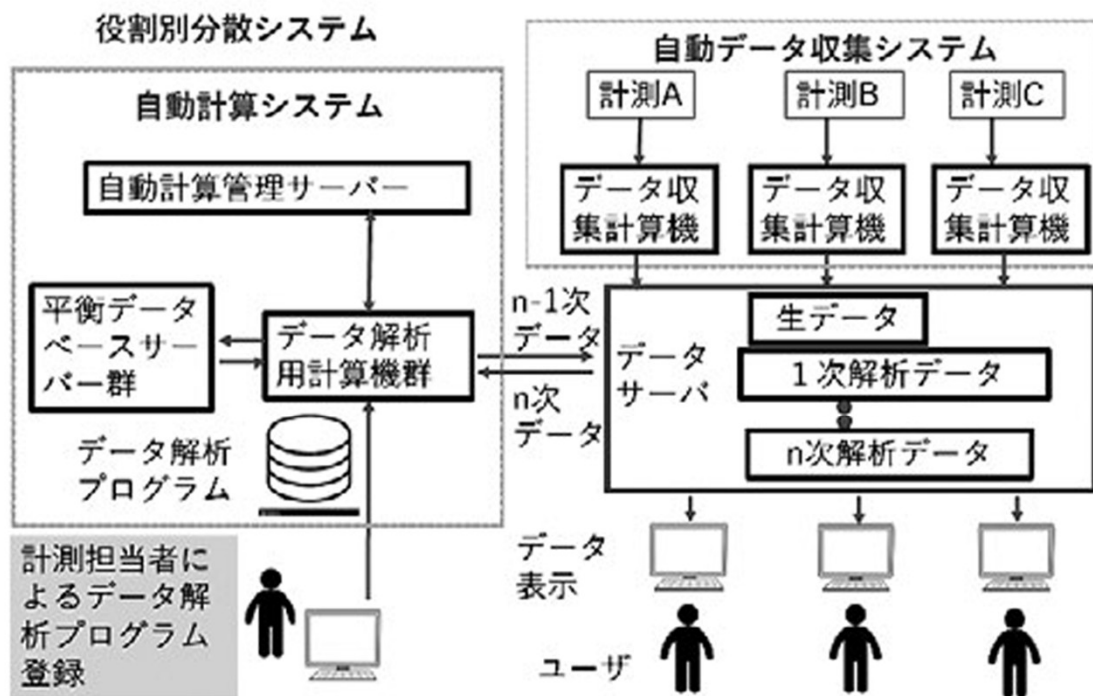


図1 従来型の計測別分散システムと自動計算システムを組み込んだ役割別分散システム。

CHD/CHD-Uでは、新しいデータ解析システムを検討します。

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

- ・システム管理・運用面の課題
- ・データ生成・登録
- ・データユーザーへのサービス
- ・解析ツール・シミュレーションとの連携
- ・データサイエンス・AI活用
- ・IMAS連携
- ・その他

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

○経緯と目的

- CHD実験開始まで、1年。データ解析システムを構築する必要がある。
- システム開発・運用、データ登録、ユーザー(データサイエンス、シミュレーション含む)等で議論して基本方針を固めたい。
- LHDのデータ収集系(LABCOM)は大きな変更無くCHD/CHD-Uに対応
- 解析グループの運用は、有料ライセンス言語の回避、運用面の改善などの対応が必要
- EG登録データ解析ツールとして開発・運用してきたAutoanaに変えて、Workflowをベースとした解析システムの構築の提案があった
- LABCOMの自動収集システムにより登録される raw data の解析も含めて、Workflowによる管理

○本会合で決定した方針

- NetCDF形式によるデータ登録+LHDで行ってきたEG形式(テキストベース)によるデータ提供サービスを可能とするシステムの開発を検討する。
- 自動解析システムは、Workflowをベースとして開発する。現在のAutoanaモジュールの中で、CHD実験に対する優先度を整理して、各モジュールの必要な改造を行う。
- IMAS連携は、IMAS形式のデータ出力インターフェースの整備を進める。

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

①システム管理・運用面の課題、提案等

- 計算モジュールとその運用を属人的ではなく、持続可能で透明性の高いシステムにすることで、問題が起きた際に、個人ではなく“仕組み”として対応できる体制にしたい。将来の装置更新や計測器追加にも柔軟に対応できる解析基盤にしたい。
=> Workflowを用いたシステムを提案する。
- ほとんど使われていないデータの解析に大きな計算資源が使われている
- プログラムの開発人材の確保を含めて、システム開発チームが必要
- データ登録、データ解析サーバー群、ユーザーのアクセスを高速ネットワークでつなぐシステムが必要。LHDネットワークは廃止されることも含めて、新しいネットワークの構成を検討することが必要。今後は、LHDとCHD/CHD-Uを区別せずに、所外の共同研究者からの実験参加、データアクセスを可能とすることが必要。

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

②データ生成・登録面の課題、要望

- LABCOMの収集系に対応できない個別収集系のデータ登録は、自動解析システムの一括管理ではなく、個別の事象に沿った対応が必要
- トラブル対応や例外処理が可視化されておらず、負荷が特定の個人に集中している。プログラム開発ができる人材を確保してほしい。

③ユーザーからの要望等

- システム全体像や責任分担が分かりにくい
- よくわからないデータがたくさん登録されており、とても分かりにくい。なんでもEG登録する方針は見直したほうがいい。
- テキストベースのデータは、読み出しが非常に冗長になることが多く、NetCDF形式等に変更してほしい。メタデータも含めて登録できることが望ましい。

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

④解析ツール・シミュレーションとの連携の課題等

- 実験データの読み込みとGKV, MEGA, FORTEC3Dなどのインプットファイルを生成するためのジョブ投入がWEBブラウザでできるインターフェースなど整備できるとありがたい。VMECのインプット、アウトプットからかなり生成できるだろう。
- 計算結果をデータベースに登録できる仕組みがあるとありがたい。計算結果は、ほとんどがNetCDF形式。
- 実験データのストレージに加えて、計算結果のストレージ等を含めたデータセンターを検討してはどうか？

⑤データサイエンス・AI活用のための課題

- MS10星プロジェクトとの連携がベースになる
- 各計測器の順方向計測モデルの構築を進めることが重要になるだろう。
- 既存コードの解析サーバーへの実装等の外注提案(=>TG)

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

⑥IMAS連携について

- 学術連携センターとMS10関係者の連携によりIMASの調査とLHDの実験データをIMAS形式に変換するインターフェースの作成を外注している。
- Workflow自体はIMASにはない。外のシステムを利用しているのみ。
- IMASは、オープンソースとなっている。個別にシステム構築し、運用することはできる。ただ、ITER-IMASへアクセスするためには、ITERとの契約も必要であり、1年ではできないし、ヘリカルデータがすべてそのままIMASに乗せるのは難しいだろう。
- LHDデータをIMAS形式で出力するインターフェースの整備が1年先の目標として適切だろう。

実験データ解析システム検討会合

日時: 2026/1/14(水) 10:00-

⑦大学の実験装置のデータ解析との連携等

- 実験データの登録の自動化が可能になるとありがたい。現在は、ネットワーク上のGWを通すために自動化できていない。
- 計測器の装置間移動を共同研究として行いやすくできないか？解析モジュールの共通化、リモートで実験データが取れているか確認(ゼロ時データをリモートで見る)ができるようになるといい。
=>CHDは、それらが可能となるだろう。制御室内に計測器毎の専用PCを設置できないこともあり、実験中でも実験装置傍の計測ラック内PCにネットワーク経由でアクセスする方針。所外からの実験参加でも同様の環境が提供できると考えている。
- データの扱いを検討する必要がある。すべて公開には、慎重な意見もある。CHD/CHD-Uではオープンサイエンスが基本方針である。

⑧その他

- ネットワーク構成の検討が早急に必要である。LHD実験同様に共同研究者のリモート実験参加や解析環境の提供が必要。加えて、大学からの主体的な参加(実験装置の設置等)も可能とするために機器制御も可能とするシステムが必要。
=>LHD実験LANの全体を含めて見直し、再構築する。

プラズマ実験解析システム構築タスクグループ

MCPoP推進本部

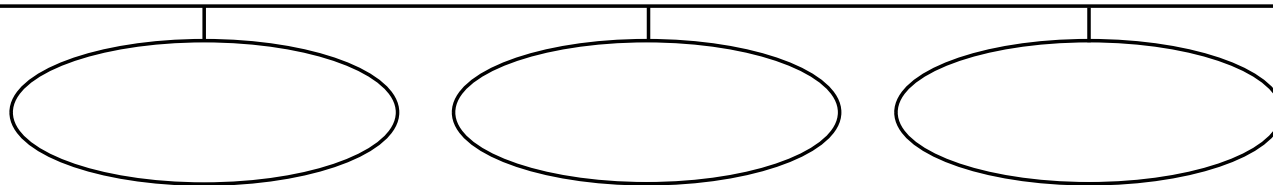
プラズマ実験解析システム構築タスクグループ

プラズマ実験解析システム構築に必要な各機能を実現するための具体的な仕様の決定、作業の工程管理等を行う

- データストレージ・提供サービスシステム
- 計測データ登録
- 自動解析システム
- 解析プログラム整備、シミュレーション連携システム
- AI・データサイエンス連携
- IMAS連携
- ネットワーク構成
- その他

メンバー構成

江本雅彦 (リーダー)
大砂真樹
吉沼幹朗 (サブリーダー)
關良輔
星健夫
草場穰
中村修
永岡賢一
坂本隆一



Summary

- CHD計画: CHSをリノベーションして2026年度中にプラズマ実験再開を目指す
- 磁場強度は下がるが、パルス幅の伸長、加熱パワー密度の増大、計測機器の高性能化 & 計測機器間連携システム
=> データ駆動科学・シミュレーションとの連携等によりプラズマ実験研究の新展開を駆動するプラットフォームを目指す
- データ解析システムを新しく構築する。
=> 是非議論に参加してください。

<CHD計画の目標>

計測機器の高性能化 & 計測機器間連携システムの構築と実証