

核融合科学技術委員会
原型炉開発総合戦略タスクフォース
平成27年12月24日

ヘリカル方式核融合研究の 進捗状況と今後の取り組み ～LHDを基盤とした核融合科学研究所の戦略～

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

磁場閉じ込め核融合発電への課題

日本の選択

核融合発電炉は、定常運転



パルス運転では、ヒートサイクルによる金属疲労のため、炉壁等の交換サイクルが短くなり、経済的な運転が不可能、また、発電電力の平滑化が難しい

核融合炉の早期実現のカギ

二大課題 = 核燃焼(重水素と三重水素の核融合)と定常運転

① 核燃焼の実証・制御 → 国際熱核融合実験炉(ITER、国際協力)

② 定常運転 → { LHDと
JT-60SAを当面同時進行 } → 将来一方を選択？

課題

LHD イオン温度1億2000万度等プラズマの超高性能化

JT-60SA 核融合条件を100秒維持する定常化、これと関連してプラズマ電流の高効率駆動

ヘリカル方式の原型炉 → 重水素実験をはじめとするここ数年の研究で確実に建設できる見通しを立てる

核融合科学研究所の目標と役割

- ・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、**ヘリカル型定常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、25～30年後に核融合炉の実現を目指す**
- ・**大学共同利用機関**として、また、**核融合研究の中枢機関**として、**大学等との共同研究を軸に、学術研究、科学技術、人材育成・教育を牽引する**



ヘリカル型定常核融合炉の実現へ向けた
3つの研究プロジェクトの推進

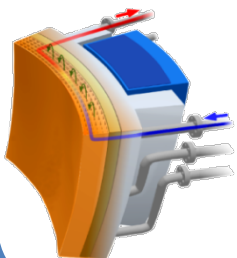
ヘリカル炉実現へ向けた研究プロジェクト体制

共同研究を基盤に3つのプロジェクトを連携させて、ヘリカル型定常核融合炉の早期実現に向けて、研究を推進

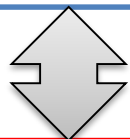
ヘリカル型定常核融合炉



核融合工学研究プロジェクト

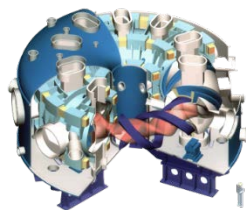


ヘリカル炉設計、ブランケット、超伝導技術開発、ダイバータ、低放射化構造材研究など

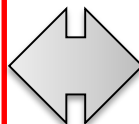


配位最適化など

大型ヘリカル装置計画プロジェクト

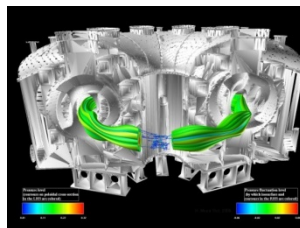


無電流プラズマの定常維持、高ベータ、高温・高密度化とそのプラズマ性能の検証
閉じ込め性能に対する物理機構解明



物理機構解明など

数値実験炉研究プロジェクト



プラズマ物理、複雑性科学の探究
統合コード開発
⇒数値実験炉の実現



①ヘリカル方式における核融合研究(炉工学研究等を含む)の進捗状況

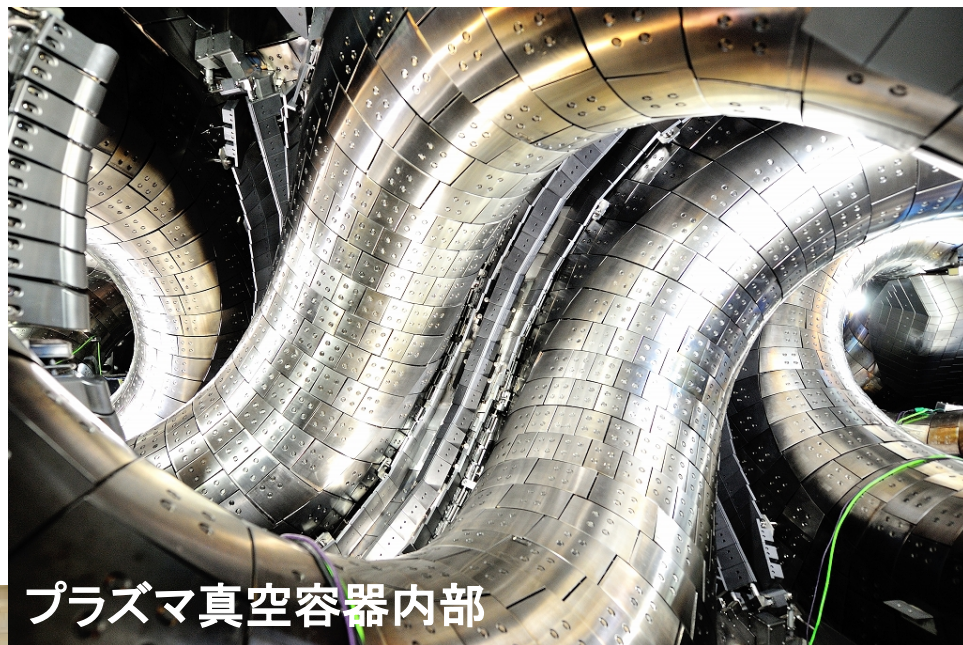


大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクト —超高性能プラズマの定常運転の実証—

LHDプロジェクトの目的

- ・ヘリカル型定常核融合炉を見通す
学術基盤の構築
- ・トロイダルプラズマの包括的理解

我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式により、核融合炉を見通せる超高性能プラズマを、世界の他の実験では難しい、安定した定常プラズマで実現



プラズマ真空容器内部



- ・世界最大級のヘリカル型装置であると共に、世界最大級の超伝導核融合実験装置
- ・ヘリカルコイル主半径:3.9m
プラズマ小半径:0.6m
磁場強度:3T
- ・1998年3月実験開始
- ・99%を超える高い稼働率で、17年間にわたり18回の実験サイクルを遂行

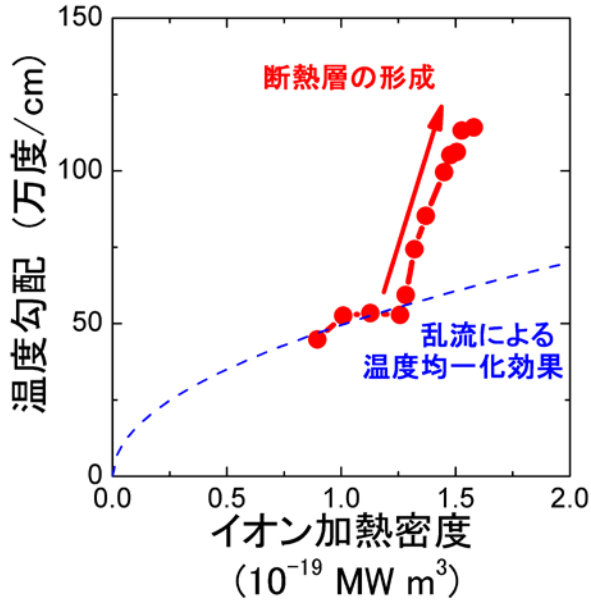


ヘリカル炉実現へ向けたLHDにおける研究課題

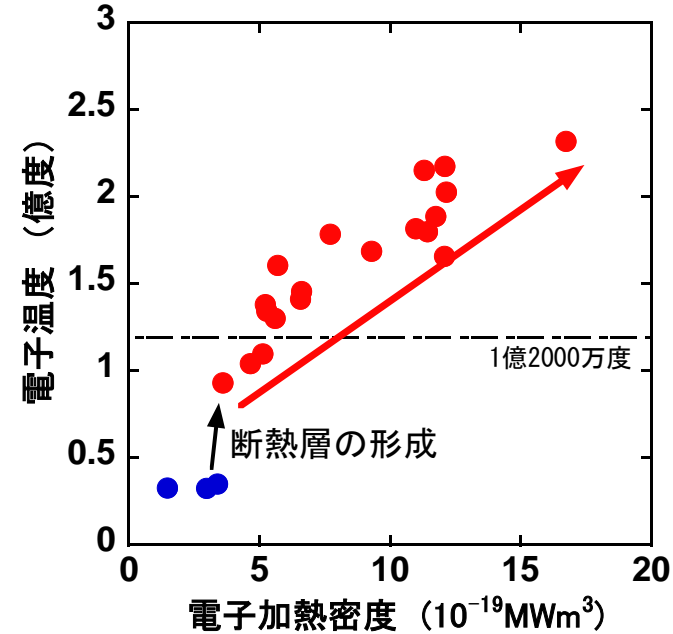
- ・核融合炉に外挿しうる高温度プラズマの実現
 - －高イオン温度(10keV)の達成
 - －高イオン温度と高電子温度の同時達成
- ・高ベータ領域の拡大とMHD物理の高度化
 - －低衝突(高磁気レイノルズ数)領域での高ベータ領域の拡大(高温化)
 - －ベータ限界に対する研究、摂動磁場遮蔽閾値の評価
- ・定常運転領域の拡大とそれによるプラズマ・壁相互作用の解明
 - －定常プラズマ放電の高温度化・高密度化
 - －プラズマ・壁相互作用研究の高度化
- ・ダイバータ部の熱負荷低減と粒子制御
 - －ダイバータ・デタッチメント
 - －閉ダイバータ
- ・輸送(熱・粒子・不純物・運動量)の物理機構解明と高エネルギー粒子の閉じ込め
 - －閉じ込めの同位体効果の解明
 - －核融合炉に外挿しうる高エネルギー粒子の閉じ込め性能の解明



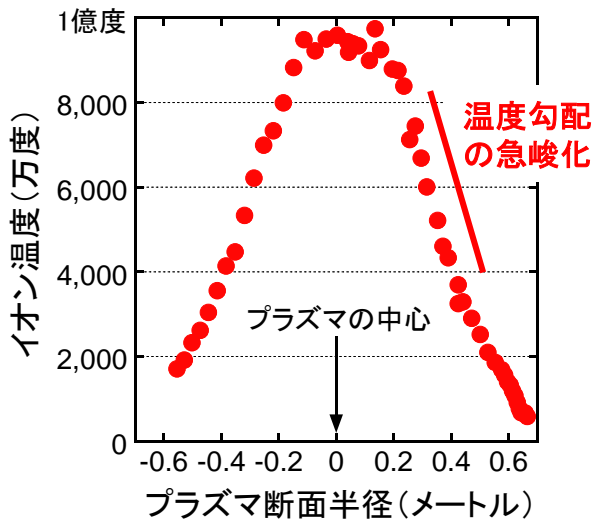
イオン及び電子に対して、内部輸送障壁が形成され、加熱電力の増加と共に温度が上昇



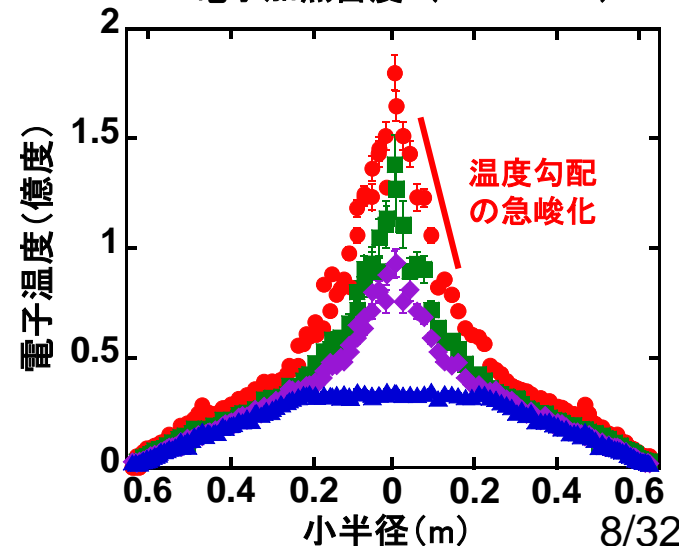
- イオンへの中心加熱入力、電子への中心加熱入力の増加により、温度が上昇すると、断熱層が形成
→内部輸送障壁の形成



- イオン、電子それぞれに対して、内部輸送障壁の形成を伴う温度上昇を実現
→加熱入力の増加により温度が上昇

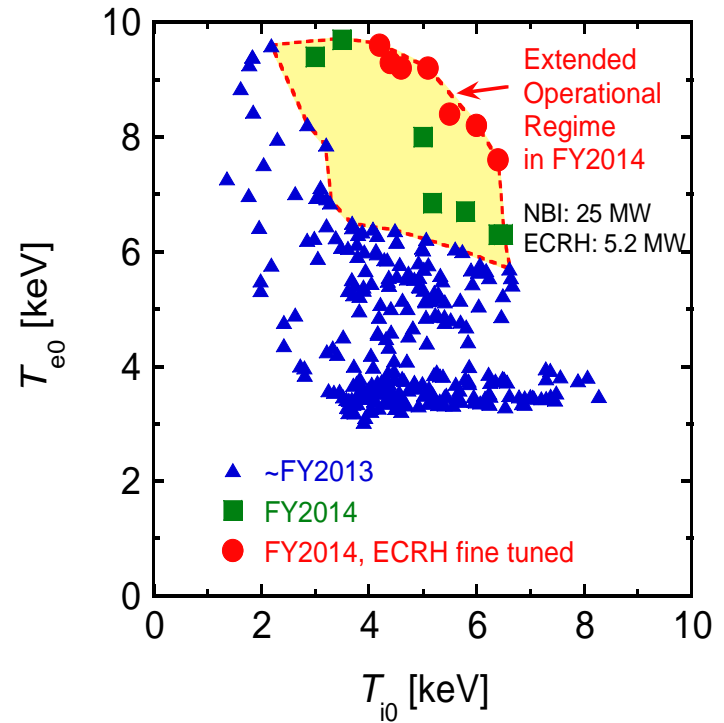
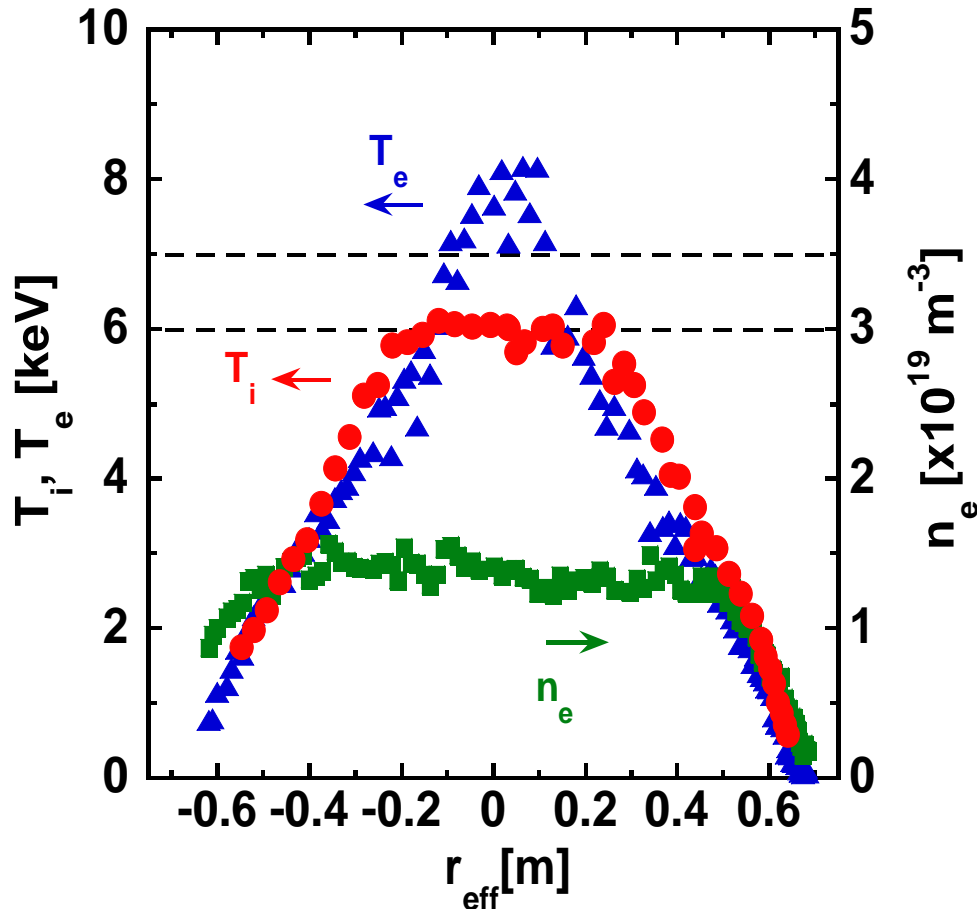


- イオン温度: 8.1keV、電子温度: 10keV を達成



高イオン温度と高電子温度を同時に達成

- ・ ICRHによる壁コンディショニング効果を活用した高イオン温度プラズマに、中心集光のECHを重畳
- ・ $T_i \sim 6$ keV と $T_e > 7$ keV を、電子密度 $n_e \sim 1.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で同時に達成
- ・ イオンと電子に対して、共に内部輸送障壁形成による閉じ込め改善を観測



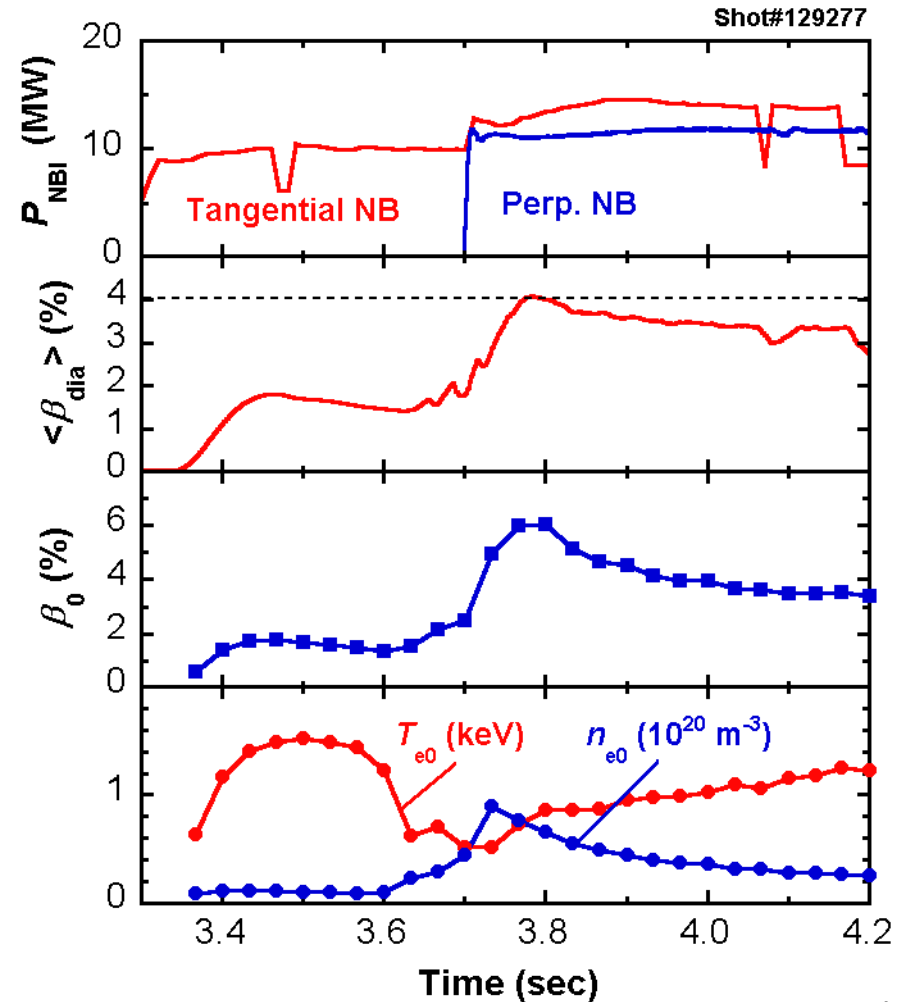
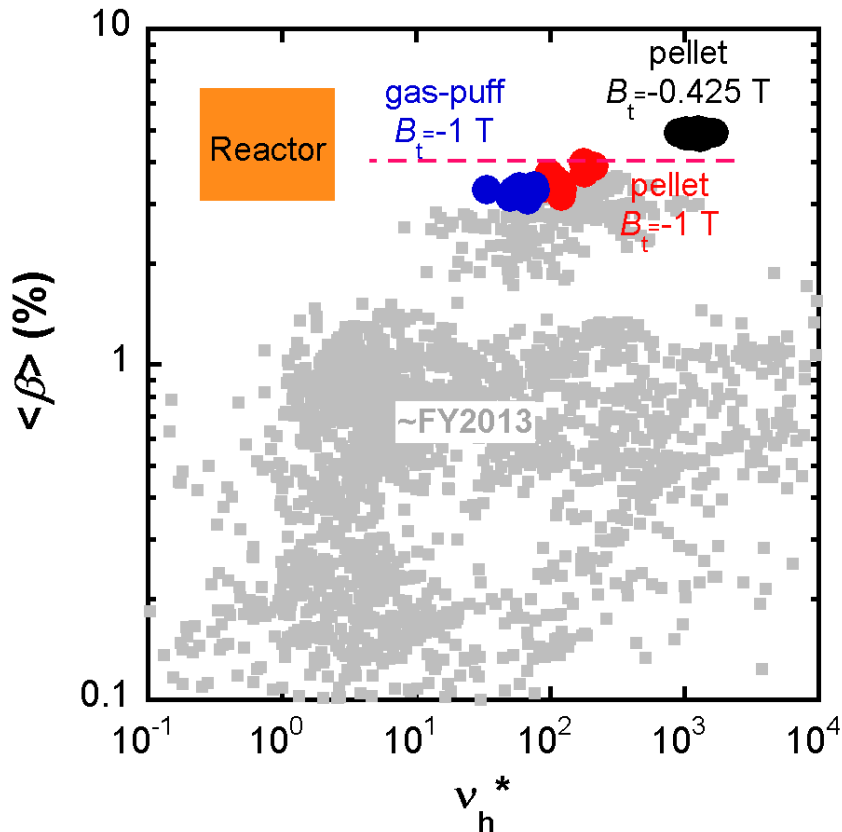
- ・ ECHの増強と入射の最適化により、高電子温度の領域が拡張



低衝突領域に高ベータ領域が拡大

$\langle \beta \rangle = 4.1\%$ を $B_t = 1\text{ T}$ で達成

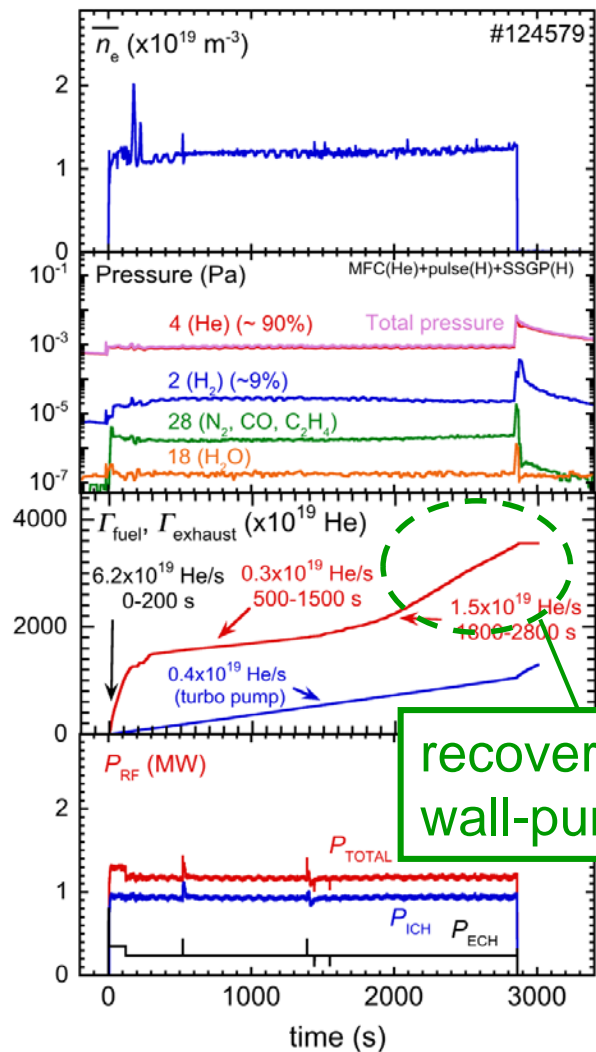
- ヘリカル型核融合炉の条件であるベータ値5%は、低磁場(0.425T)で既に達成
- 核融合炉条件に外挿できる、より低衝突領域(高温領域)に高ベータ領域を拡大





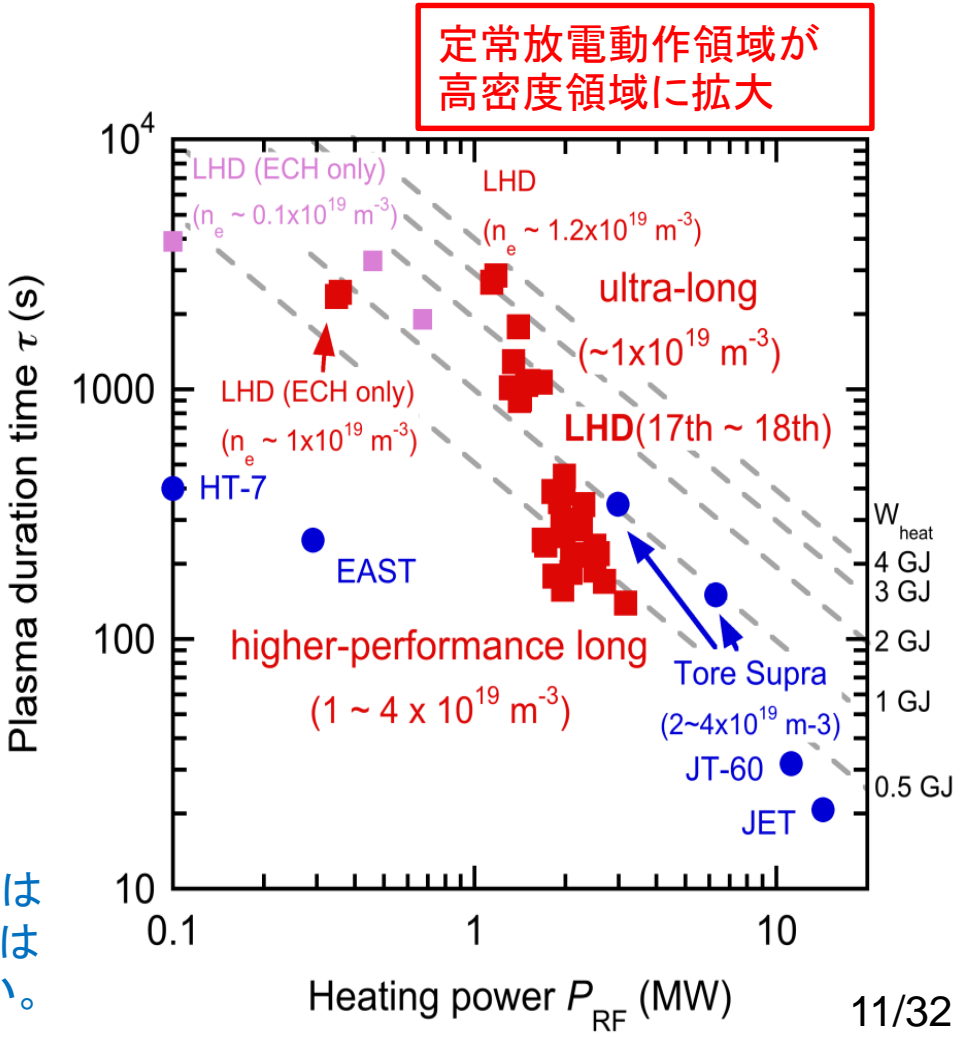
ICHとECHによる高性能定常放電(47分39秒) 2keV、 $1.2 \times 10^{19} m^{-3}$ 、1.2MW (3.36GJ)

- ・ LHDの定常プラズマ性能は、トカマク型プラズマを大きく引き離している
- ・ 定常放電に関する熱・粒子制御、PWI、加熱最適化等の課題の研究を推進

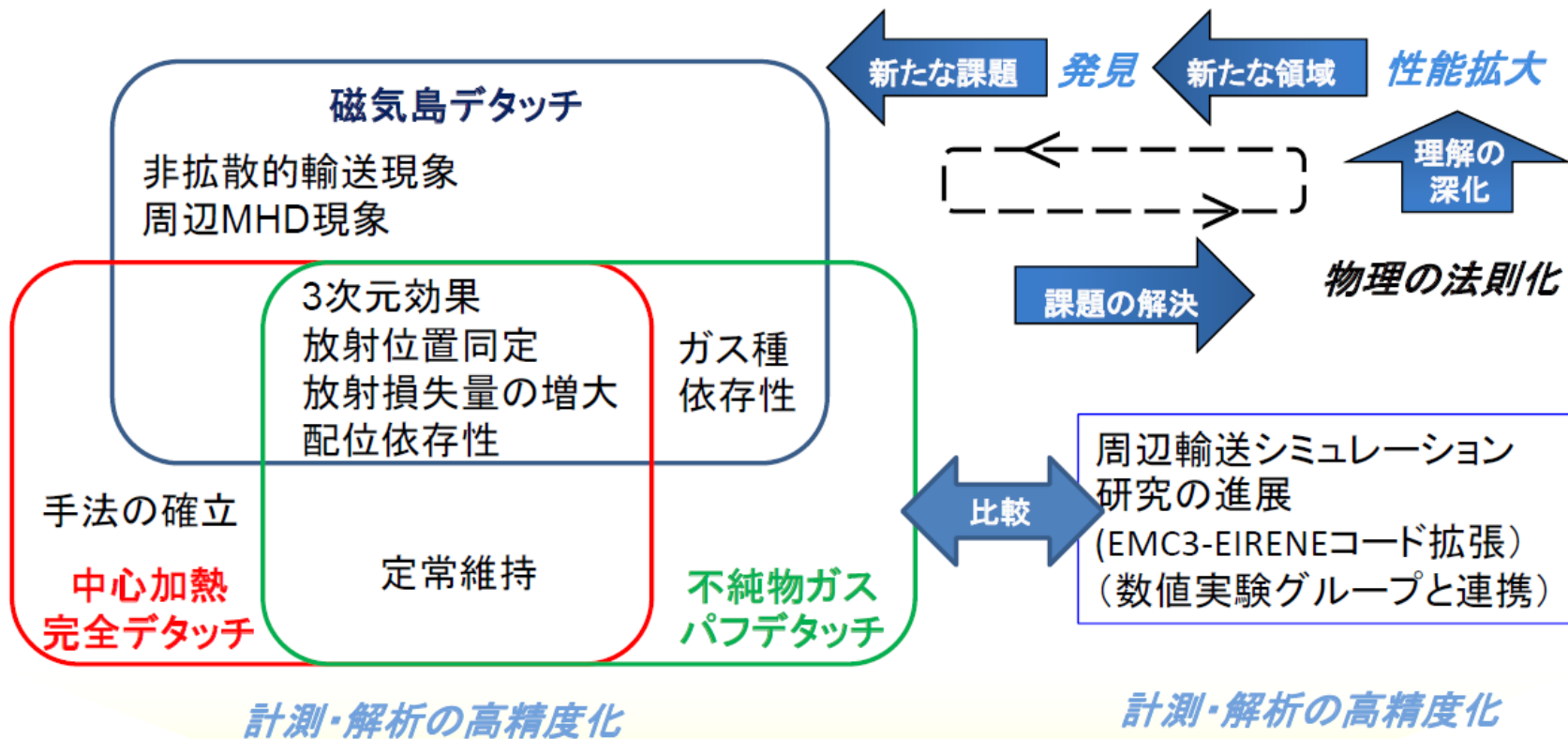


recovered wall-pumping

真空容器壁は定常状態にはなっていない。



LHDにおけるダイバータ熱負荷低減実験



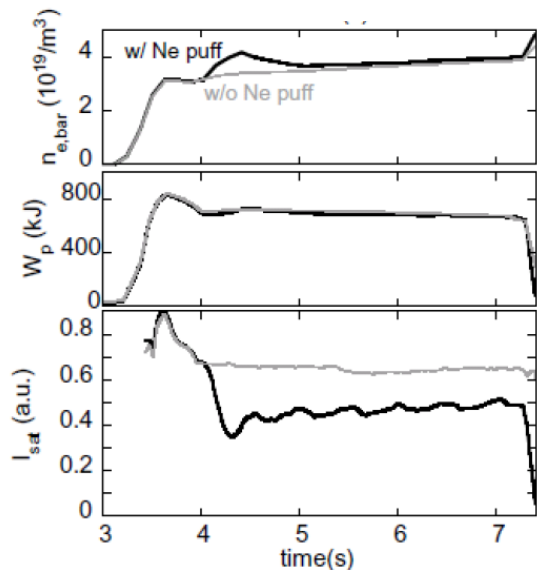
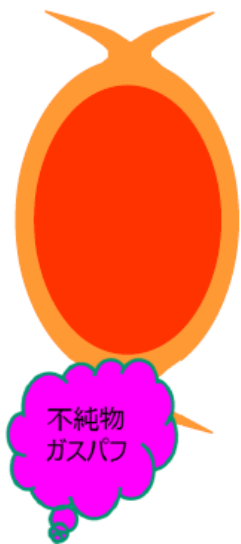
核融合炉へ外挿しうる熱負荷軽減運転の確立

- ・十分な放射損失量 (~80%)
- ・定常維持
- ・良好な閉じ込め性能との両立

高Zパフを用いた研究

ネオンパフをパルス状に追加し、長時間のデタッチメントを維持

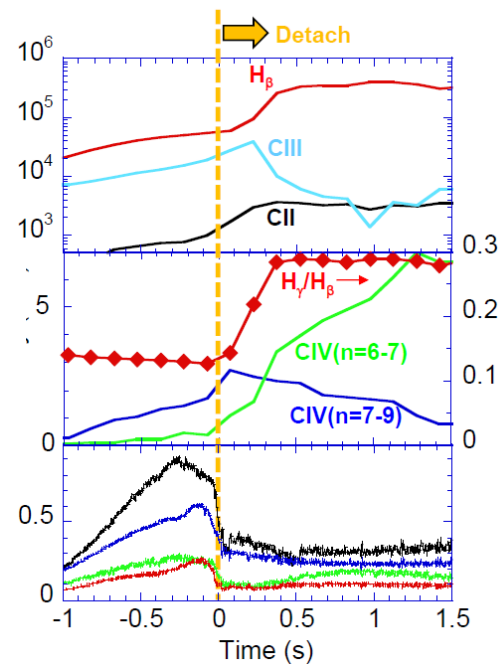
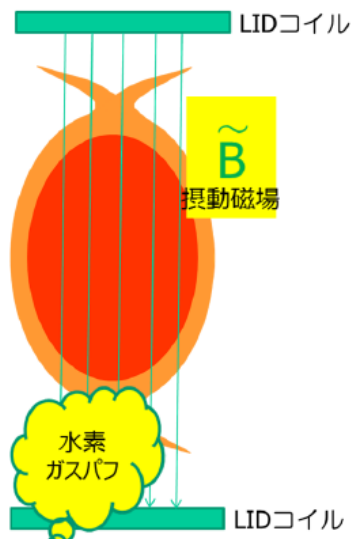
プラズマエネルギーを保持したまま加熱入力の2~3割の放射損失を安定に保持



共鳴摂動磁場を用いた研究

共鳴摂動磁場を用いたデタッチプラズマ生成に成功

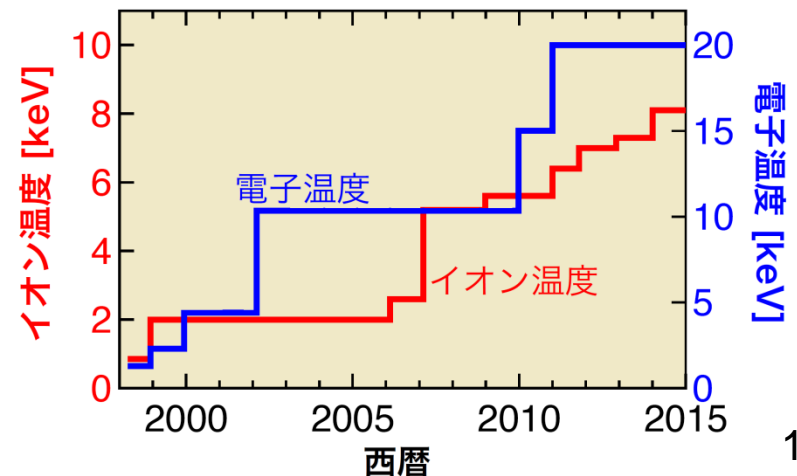
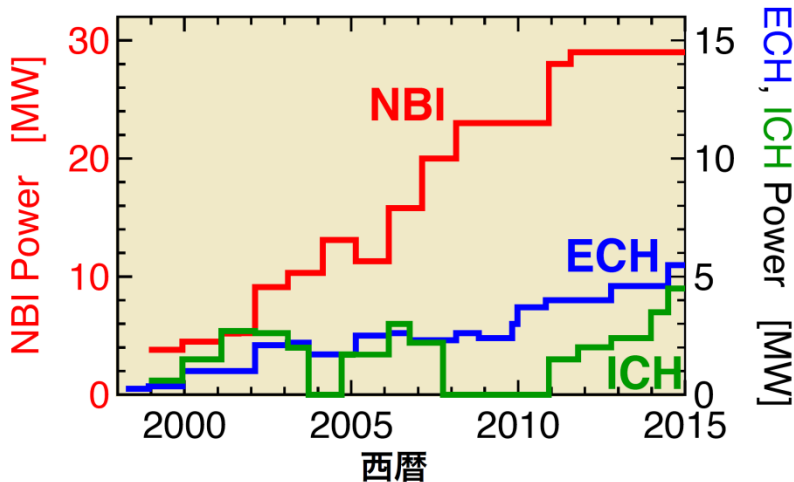
放射、不純物の挙動を実験観測、理論モデルの予測と定性的に一致



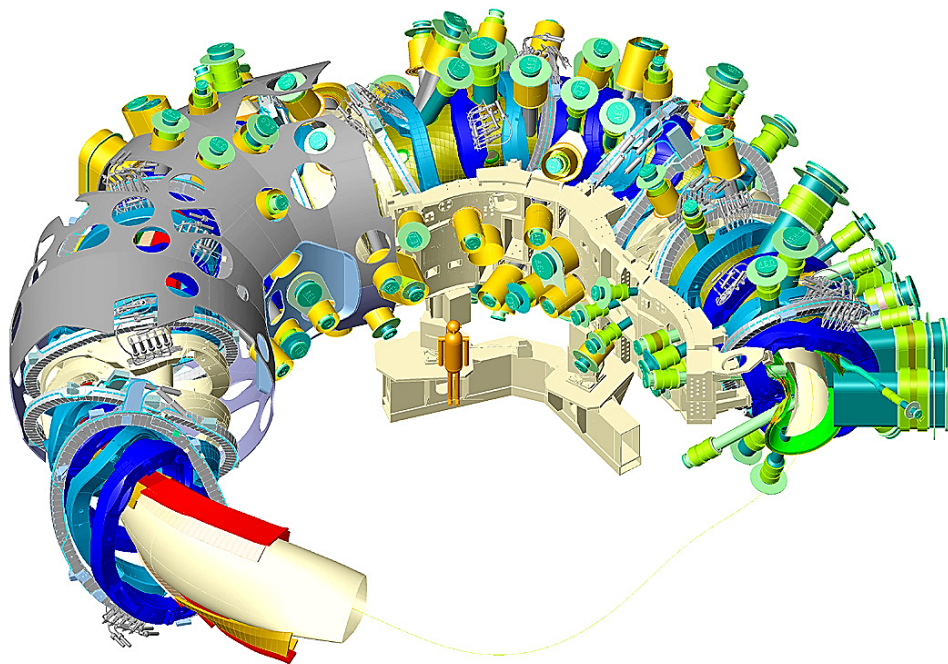


LHDのプラズマ性能の進展 -最終目標の8合目まで到達-

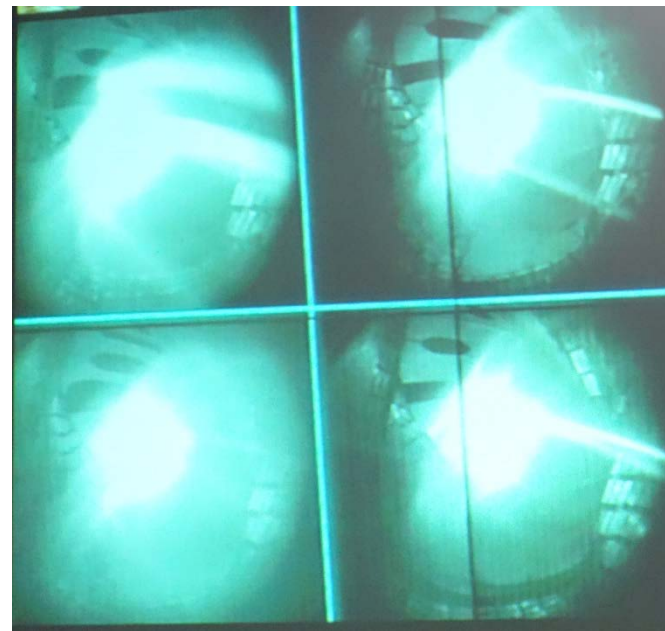
プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	8.1 keV (密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10 keV (密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10 keV以上 $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ 以上 閉じ込め1秒以上
電子温度	20 keV (密度 $2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$) 10 keV (密度 $1.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10 keV (密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	
密度	$1.2 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ (温度 0.25 keV)	$4 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ (1.3 keV)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場 0.425 T) 4.1% (磁場 1T)	5% (磁場 1-2 T)	5%以上 (磁場 5 T以上)
定常運転	54分 (500kW) 48分 (1200kW)	1時間 (3 MW)	定常(1年)



- LHDと同規模の超伝導ヘリカル型装置W-7Xが稼働を開始し、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
- 無電流磁場閉じ込め方式による定常プラズマ研究の大幅な進展が期待される



超伝導ヘリカル型装置 Wendelstein-7X (W-7X)



2015年12月10日に運転を開始したW-7Xのファーストプラズマ



核融合工学研究プロジェクト

原型炉に向けたヘリカル核融合炉 FFHR-d1 の概念設計活動と
主要5課題のR&Dを推進

✓ 核融合工学研究プロジェクト (Fusion Engineering Research Project, FERP) の主目的は
「ヘリカル型核融合炉の実現に向けた工学基盤の構築」

- FERPは13のタスクグループで構成
- 5つの主要R&Dを推進
- 炉設計・R&Dの全体報告書をH28年5月に発行予定

✓ ヘリカル型核融合炉FFHR-d1概念設計活動

- 3-D CADによる構造設計 (最大電磁応力<600 MPa)
- 3-D 中性子輸送計算 (ダイバータの中性子負荷)
- 炉心プラズマ設計 (準最適化ヘリオトロン)
- FFHR-d1概念設計中間報告書をH25年4月に発行

✓ 主要5課題のR&D推進

- 超伝導マグネット (超伝導コイル試験)
- 液体ブランケット (熱・物質流動ループ試験)
- 材料研究 (材料特性、被覆技術)
- ダイバータ (Wモノブロック試験)
- トリチウム・安全

核融合工学プロジェクト実施体制

高密度プラズマ物理、高温プラズマ物理、
プラズマ加熱物理、装置工学・応用物理、
核融合システム、核融合理論シミュレーション、
所外共同研究

超伝導マグネットグループ:三戸主幹 / タスク及びサブタスク		
コイル巻線・冷却	大型強磁場導体試験設備	榎、三戸
	Coil導体とコイル巻線	屋花、今川、
	間接冷却導体とコイル巻線	高畑、田村、
	高温超伝導導体とコイル巻線	榎、三戸
柳	電磁力支持構造	田村、今川
	クワイオスタット	田村
低温・コイル電源システム	低温システム	渡辺、岩本、高田
	バスライン・電流リード	山田修、尾花
岩本	コイル電源	丸石、山田修

炉内機器グループ:室賀主幹 / タスク及びサブタスク		
ブランケットシステム開発・設計 田中照也	増幅・遮蔽ブランケット	田中照、八木、長坂、近藤正
	炉内構造材料	長坂、菱沼、能登、室賀
(東北大大浴との 双方向共同研究含む)	熱・水素同位体回収システム	八木、後藤、高山、菱沼、田中照
	第一壁	廣岡、芦川、矢嶋、加藤大
炉内機器開発・設計・保守 田村	真空容器	田村、増崎
	ダイバータ	増崎、時谷、河村、宮澤、村上、加藤大、坂上
	遠隔保守	丸山、大沼、成嶋

工学研究推進会議

相良総主幹、
今川統括主幹、
三戸、室賀、及び
タスクリーダー

- ・ヘリカル炉概念設計
- ・ヘリカル炉基本設計
- ・実規模超伝導導体試験研究
- ・ヘリカル巻線工学研究
- ・液体ブランケット長寿命化試験
- ・高磁場下の伝熱流動工学研究
- ・低放射化材の高温化試験
- ・耐熱化表面改良工学研究
- ・3次元形状ダイバータ試験研究
- ・水素同位体低減LHD照射研究
- ・微量トリチウム除去回収研究
- ・実時間検出機器開発研究

炉システム設計グループ:相良総主幹 / タスク及びサブタスク			
設計統合 相良	課題抽出と全体企画	相良、宮澤、後藤拓	
	ヘリカル炉概念設計	後藤拓、宮澤、相良	
建屋配置設計 後藤拓	配置設計と工程	後藤拓、柳、西村新	
	炉建屋設計	田村、後藤拓、宮澤	
電源・発電設備 丸石	発電・電力供給システム	丸石、山田修	
	送電・水素製造システム	山田修、菱沼	
トリチウム燃料システム 田中将 (富山大との 双方向共同研究 含む)	トリチウム処理システム	田中将、杉山	
	安全管理	西村清	
	生体遮蔽・放射化見積	西村清	
	法整備・許認可申請	西村清	
運転制御 御手洗(東海大)	安全解析・制御システム	御手洗	
	燃焼制御	中西	
炉心プラズマ 宮澤	高性能プラズマ	宮澤、後藤拓、成嶋、市口、佐竹、鈴木	
	TOT効果・α粒子損失	植山、村上(京大)、關	
	立ち上げシナリオ	御手洗、後藤、坂本	
プラズマ加熱 津守	NBI	津守、長壁	
	ECH	伊達、吉村、出射(九大)、下妻、久保	
燃料供給 坂本	ICH	笠原、斎藤、武藤	
	ベレット	坂本	
計測 磯部	ガスパフ	宮澤	
	磁気計測	磯部	
	中性子計測	磯部	
	ダイバータ計測	増崎	
	分光計測	後藤基	
磯部	干渉計/反射計	秋山、田中謙、徳沢、	
	トムソン散乱	山田二、安原	
	荷電交換分光	吉沼	

2015. 4. 1 現在v6

FERPにおける13のタスクグループと5つの主要R&D