



大型ヘリカル装置における重水素実験計画(案)

自然科学研究機構 核融合科学研究所
大型ヘリカル研究部
山田弘司

大型ヘリカル装置
Large Helical Device (LHD)

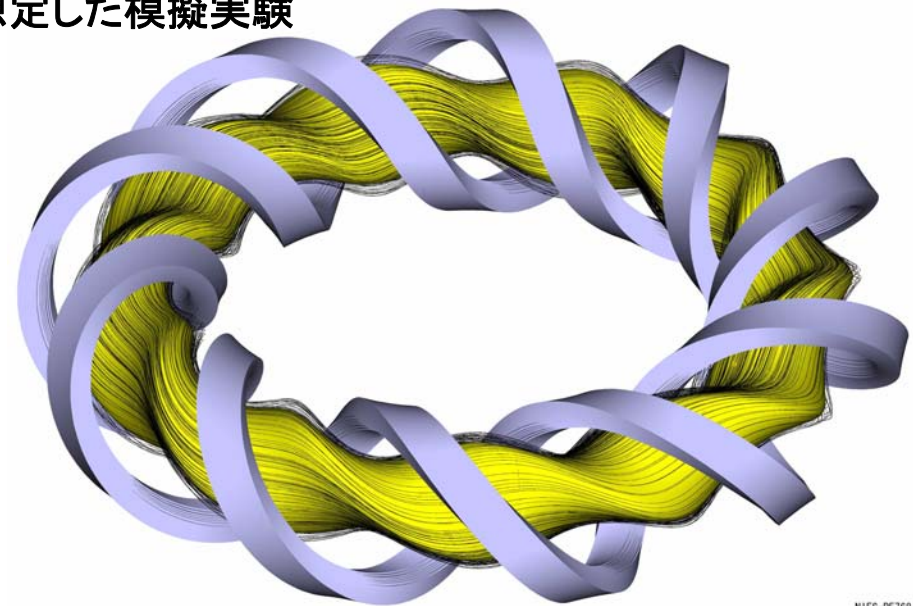
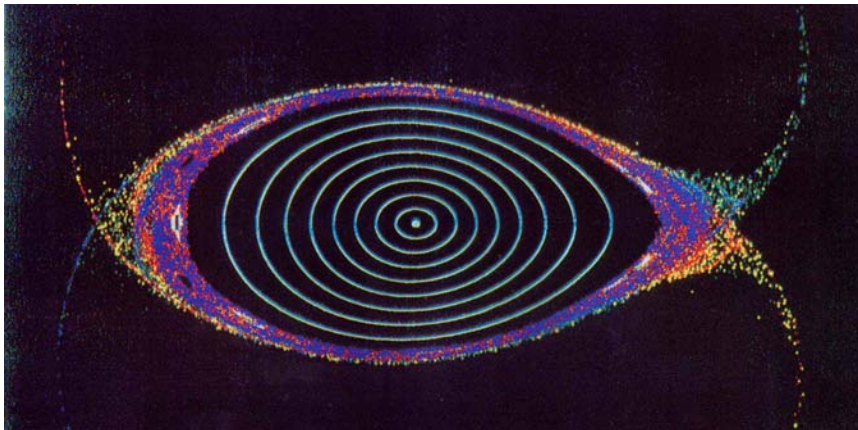
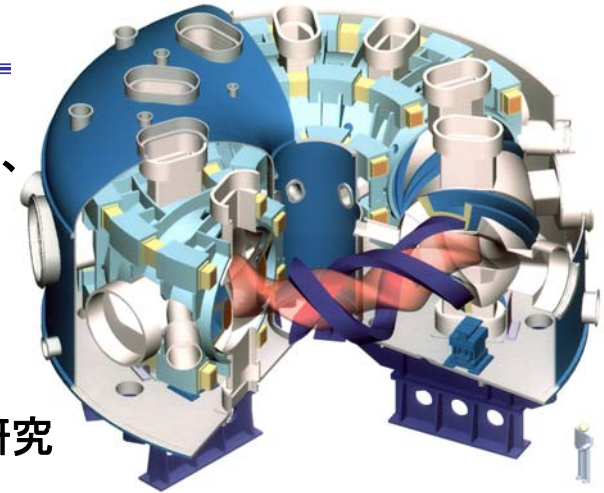
概要

1. LHD実験が取り組む課題と重水素実験研究の展望
2. LHD以外で行われた重水素実験からの知見
3. LHDでの重水素実験とそれに伴う中性子・トリチウム発生量
4. まとめ



重点研究課題

- (1) 高い核融合三重積(密度×イオン温度×閉じ込め時間)を実現し、核融合炉に必要なプラズマの閉じ込めの広範な研究
- (2) 高イオン温度プラズマのために電場の閉じ込めへの影響を活用
- (3) 長時間プラズマ生成実験を行い、安定連続運転を実証
- (4) プラズマと磁場との圧力比(β 値)5%以上の実現と関連する物理研究
- (5) 周辺プラズマ排気装置(ダイバータ)による閉じ込めの改善
- (6) プラズマの閉じ込めの、燃料元素の質量依存性の解明
- (7) 核融合炉で発生する高エネルギーの粒子を想定した模擬実験



ヘリカルヘリオトロン磁場配位 + 超伝導コイル = 無電流定常プラズマ保持



実験結果のまとめ(H18年度途中)と目標値

達成値 [目標] (H17年度は緑、H18年度は赤、で表示)

イオン温度

中心イオン温度 1億5千万度 [1億2千万度]
 密度 3 兆個/cc(アルゴンガス) [20 兆個/cc]
 水素ガス: 中心温度3,600万度 20兆個/cc
 [H17: 3,000万度]

電子温度

中心電子温度1億2千万度 [1億2千万度]
 密度5兆個/cc [20兆個/cc]

体積平均ベータ値

4.8 % (磁場 0.425 万ガウス)
 [H17: 4.5%] [≥ 5 % (磁場 1 - 2 万ガウス)]

密度

中心密度1,000兆個/cc(温度400万度)[400兆個/cc程度]
 [H17: 500兆個/cc]

蓄積エネルギー

144万ジュール[400万ジュール程度]
 [H17: 137万ジュール]

定常運転

31分45秒 (700 kW) 13,000万ジュール [1時間 (3,000 kW)]
 54分28秒 (500 kW) 16,000万ジュール

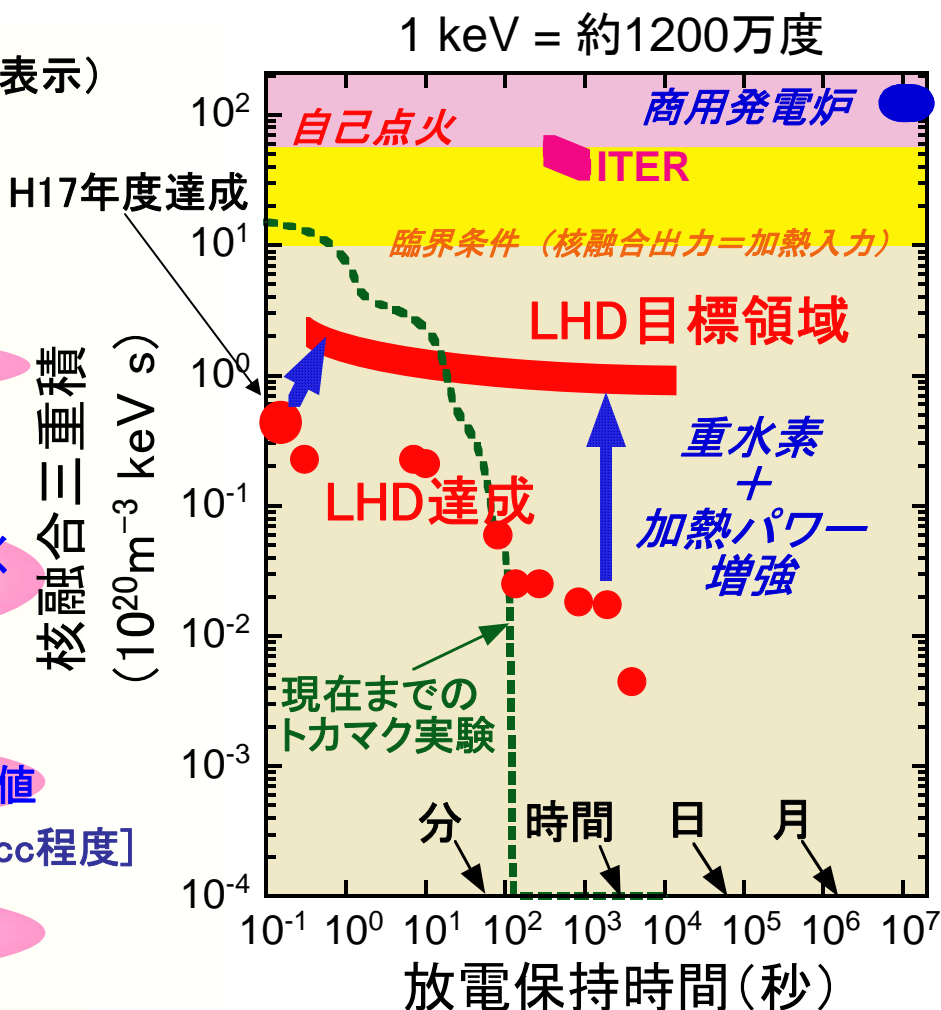
核融合炉の温度条件に到達

プラズマ圧力条件に近づく
世界最高の定常ベータ値

トカマク、ヘリカル型の最高値

3大トカマクに比肩

世界最高の入力エネルギー値



核融合臨界条件
1億度、100兆個/cc、1秒

核融合炉 β 5%



重水素実験の目的と期待される成果

LHD実験計画の基本理念

1. ヘリカル系閉じこめ配位を用いた核燃焼実験装置の設計を確実なものとするデータベースと理解を築く
2. トカマク概念との代替性・補完性を学術基盤から問う

重水素実験が必要な理由 ⇔ 重水素実験の目的

閉じ込め改善による高性能化の期待大

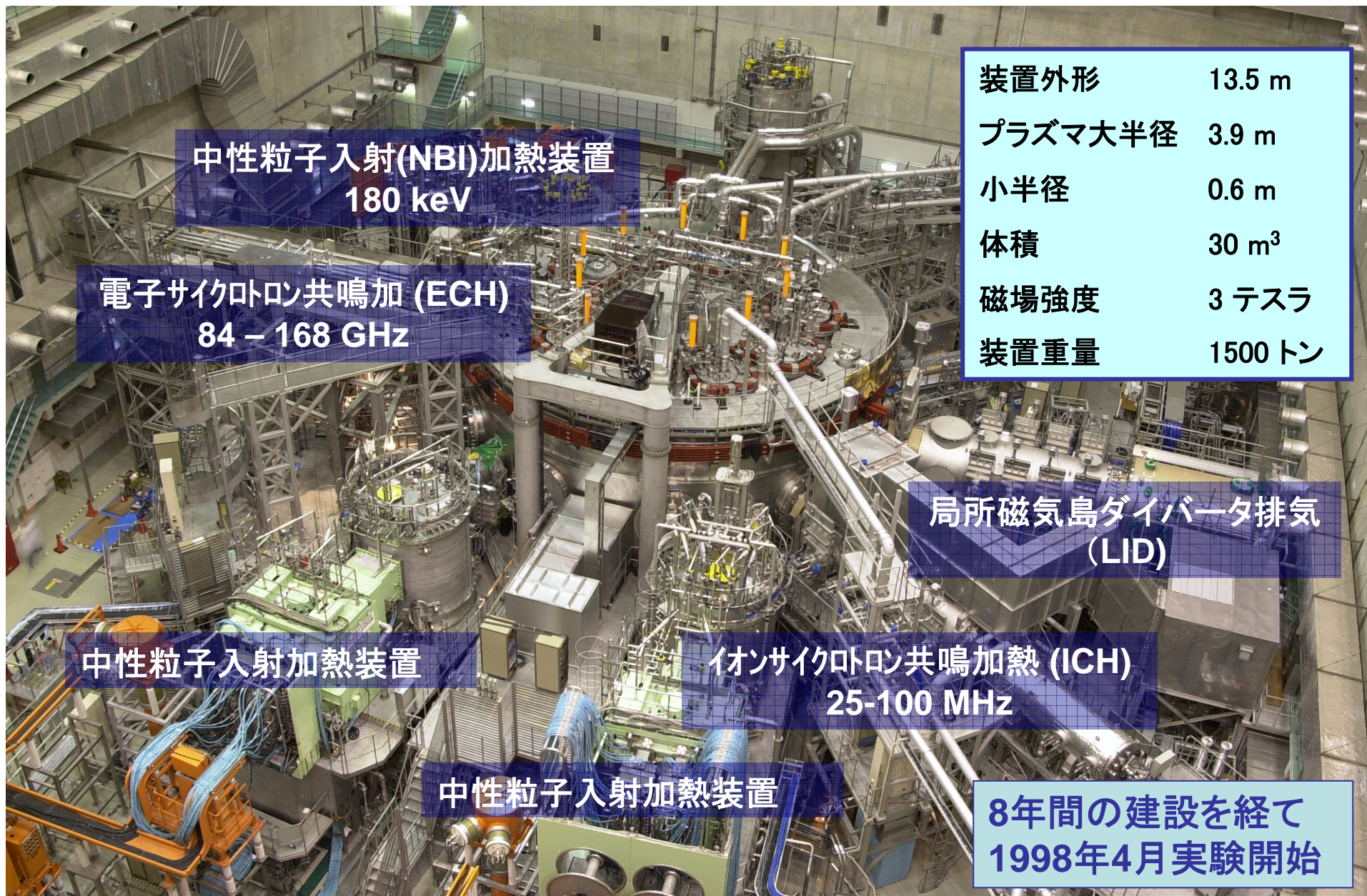
現状より核融合条件に近いプラズマの研究が可能
新たな研究領域の開拓や実験の多様性の拡大
ブレークスルーの発現

+

閉じ込め物理の質量依存性(同位体効果)を明らかにして重水素・三重水素プラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築すること

← 操作は単純であるが生ずる影響は複雑で、原因は未解明

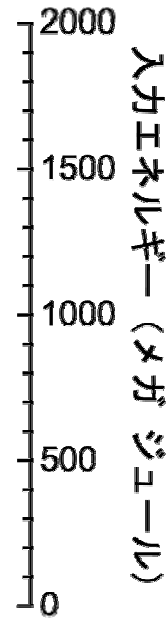
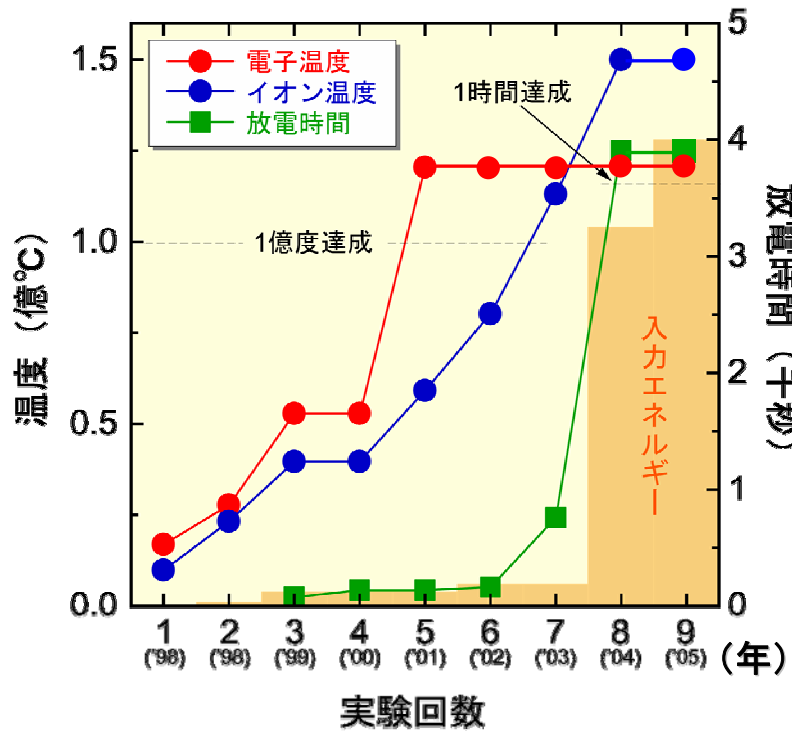
核融合科学研究所が進める大型ヘリカル装置(LHD)実験





LHD実験の順調な進展

1億度を超えるプラズマの閉じ込めに成功 → 研究領域の拡大



プラズマ加熱の増強
排気・燃料供給能力の増強

新しい発見

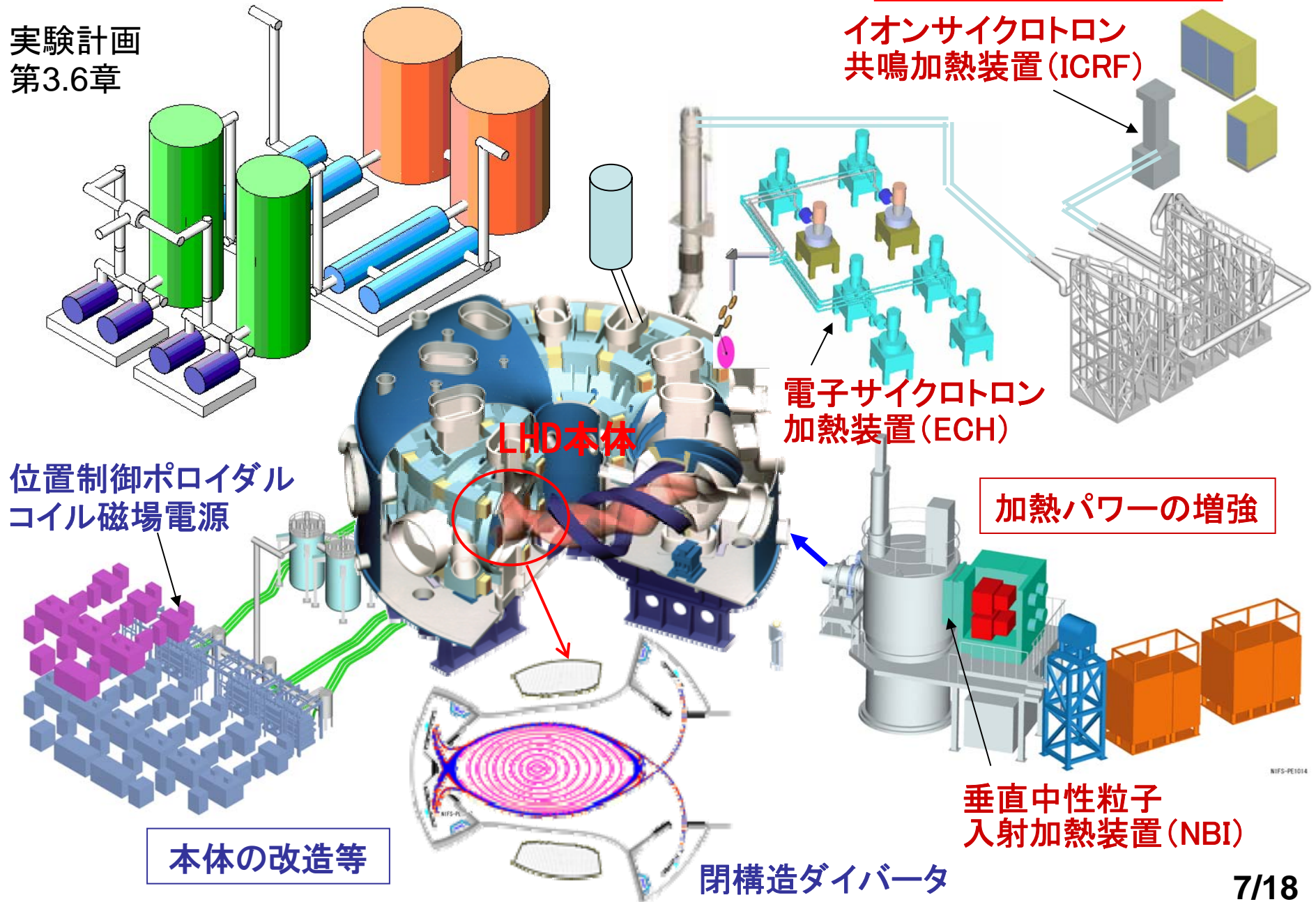
重水素実験によって加速

プラズマパラメータ領域の拡大

大型ヘリカル装置(LHD)の増強計画案

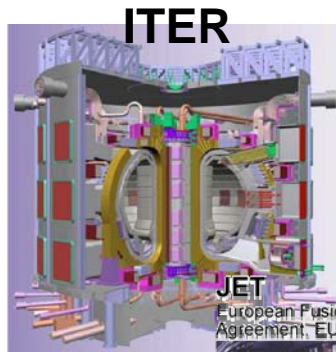
重水素実験計画

実験計画
第3.6章



NIFS-PE1014

世界の核融合研究開発活動



ITER

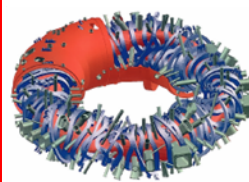
JET
European Fusion Development Agreement, EU



ASDEX-Upgrade
Max Planck Institute for Plasma Physics, Germany



W7-X
Max Planck Institute for Plasma Physics, Germany



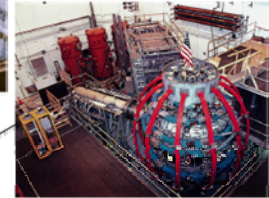
LHD
National Institute for Fusion Science, Japan



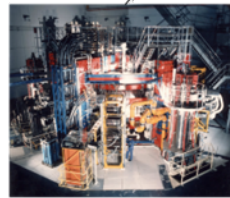
JT-60U
Japan Atomic Energy Agency, Japan



NSTX
Princeton University, USA



TJ-II
CIEMAT, Spain



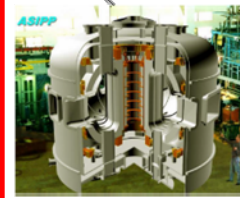
Tore Supra
CEA, France



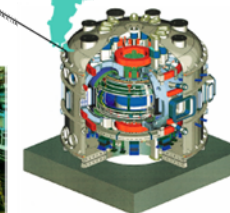
TEXTOR
Forschungszentrum Jülich, Germany



H-1NF Heliac
Australian National University, Australia



EAST
Institute of Plasma Physics, China



KSTAR
National Fusion Research Center, Korea



DIII-D
General Atomics, USA

Oak Ridge National Laboratory, USA

University of Texas, USA

University of California, USA

Institute for Plasma Research, India

Khar'kov Institute of Physics and Technology, Ukraine

Kurchatov Institute, Russia

核融合を目指した高温プラズマ実験は重水素が主流

例: JT-60U(日本原子力研究開発機構、那珂市) 平成3年より実施

世界の核融合プラズマ実験は重水素で実施

閉じ込め時間の改善度			
装置名	追加熱 無	追加熱 有 Lモード	追加熱 有 Hモード
Alcator C (米)	1.5	-	-
ASDEX (独)	1.5	1.3	2
ASDEX-UG (独)	-	1.5	1.5
DIII-D (米)	1.4	1 - 1.4	2
FTU (伊)	1.4	-	-
ISX-B (米)	1.4	-	-
JET (EU)	1.4	1.2	1.2
JFT-2M (日)	1.4	1.4	1.4
JT-60U (日)	-	1.4 - 1.6	-
TEXTOR (独)	1.4	-	-

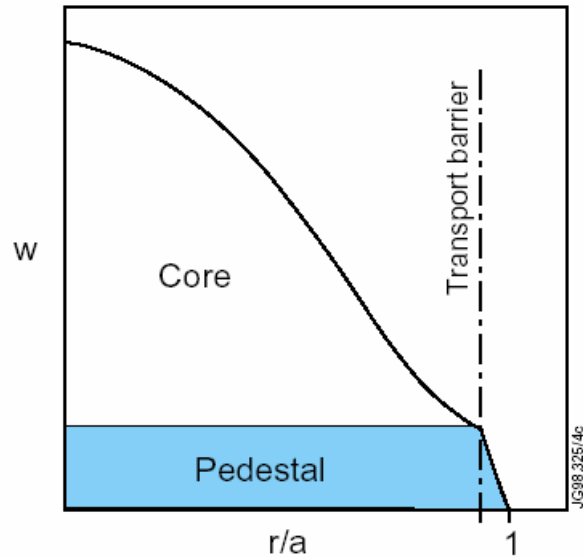
(重水素実験におけるエネルギー閉じ込め時間を水素実験におけるエネルギー閉じ込め時間で割った値)

1. 高い閉じ込め性能が得られる
同じ実験装置・条件で、より高い温度のプラズマが実現できる
2. 将来の核融合炉に向けて燃料元素の質量依存性の理解が進む
3. 発生する中性子を精密に測定することにより、炉条件に近い高エネルギー粒子の磁場中での振舞いの研究が可能となる

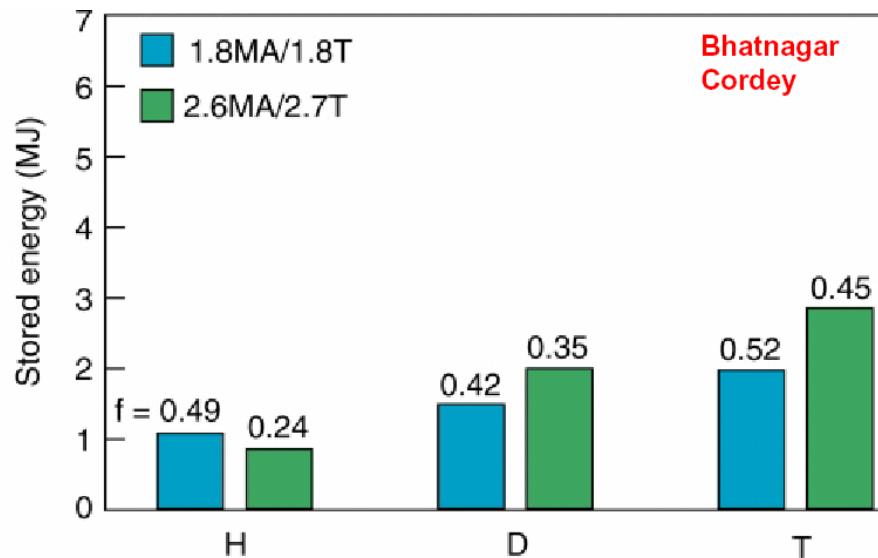
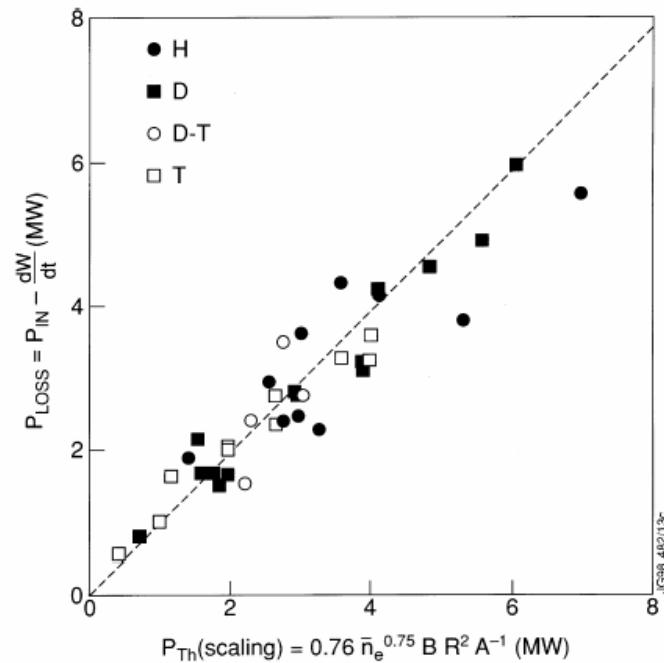
トカマクにおける同位体(質量比)効果

JETにおける閉じ込め改善(H)モード特性

プラズマエネルギーの径方向分布



加熱パワー



$$P_{th} \propto \bar{n}_e^{0.75} B R^2 A^{-1}$$

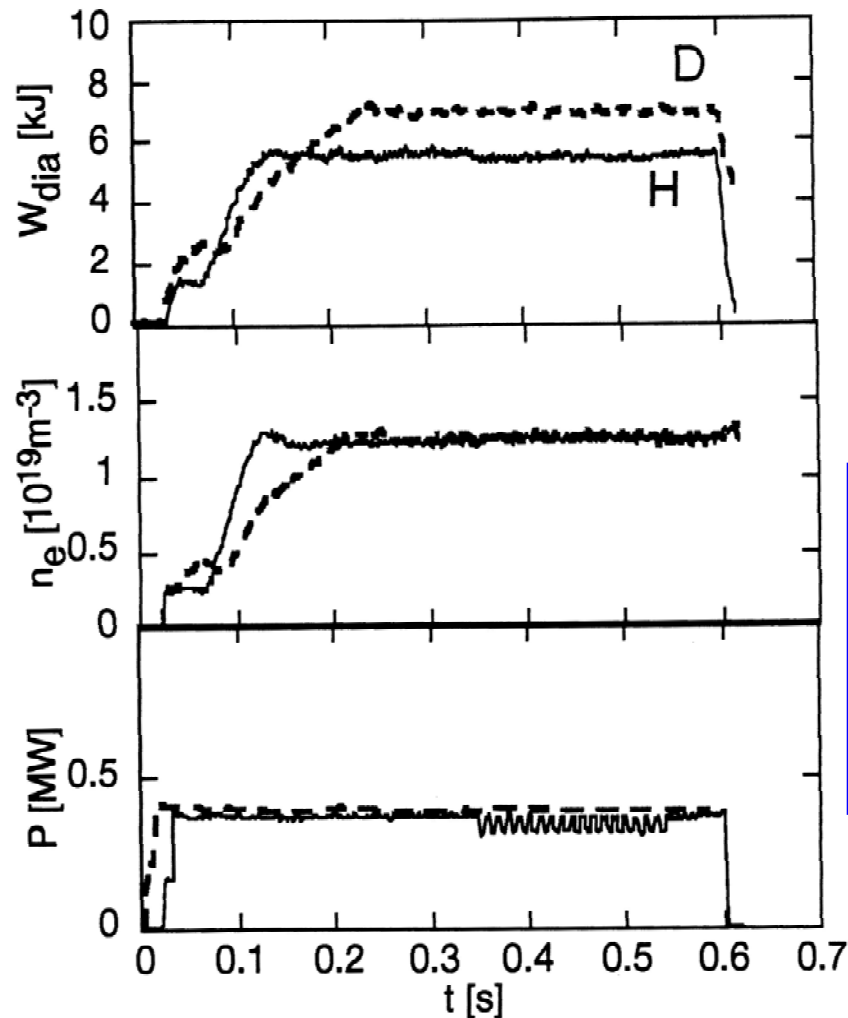
閉じ込め改善モードへの遷移パワーの閾値が質量に反比例して減少

台部(ペデスタル)の蓄積エネルギーが質量に比例して上昇

ヘリカル系 W7-ASにおける同位体効果

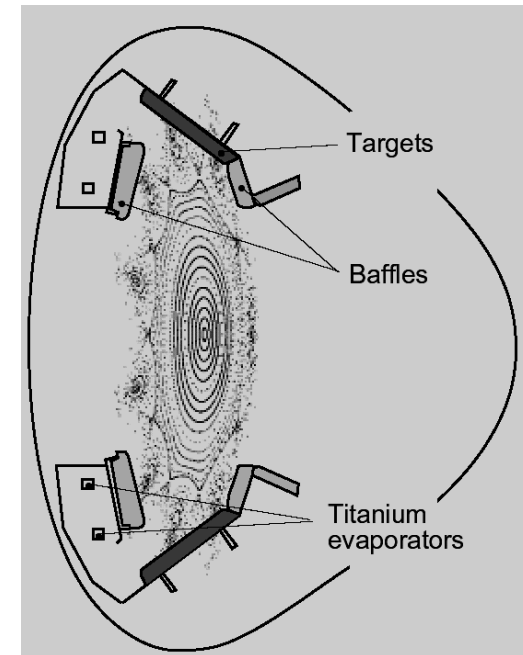
軽水素と重水素のECHプラズマの比較

おのおの B_2H_6 & B_2D_6 のボロナイゼーション後



- 弱い ($\tau_E \propto M^{0.2}$) がはっきりしている
 - セパトリック境界配位では明瞭だが、リミター境界配位や NBI 放電でははっきりしない
- 同位体効果は良好な粒子制御条件で現れる？

▪ ダイバータによる粒子制御性能の強化が望まれる



LHD以外での重水素実験から得られた知見

- 質量比効果はプラズマ実験であらゆる運転領域で見られるが、現れ方が多様
その依存性は $A^{-0.2}$ から A^1 と幅広い。
プラズマ端部からコアまで全ての閉じ込め領域に影響している。
- 質量比効果は确实かつ強固な性質であり、プラズマ端部における原子過程だけによって起こるものではない。実験および理論に残された課題は大きい
- 観測が示唆するもの
 - ◎ 質量比効果はイオンの熱伝導損失に与える影響が大きい
 - 電場を介した異常輸送の低減？
 - 回転運動量の輸送に与える影響が大きい
 - ◎ 電子熱伝導損失が支配的な系、プラズマの回転が仕事をしにくい系、MHDが限界を決めていない系では質量比効果がでにくいのか？
- 演繹される有効な手段
 - ◎ プラズマの回転(電場)を利用した閉じ込め改善モード
 - ◎ イオン加熱が有効な実験条件が重水素実験に有利
→実験計画 第3.3章 実験シナリオへ反映

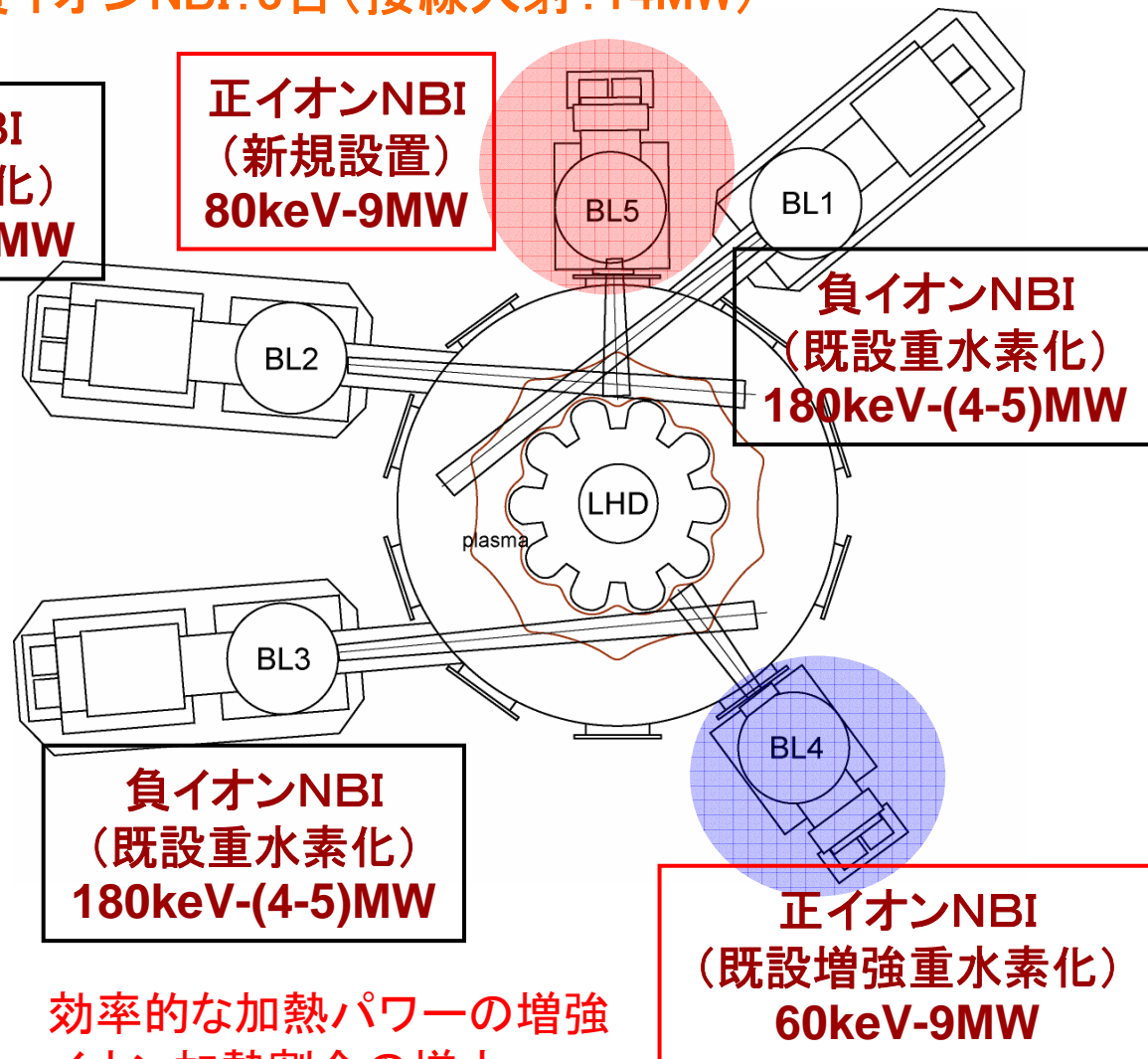
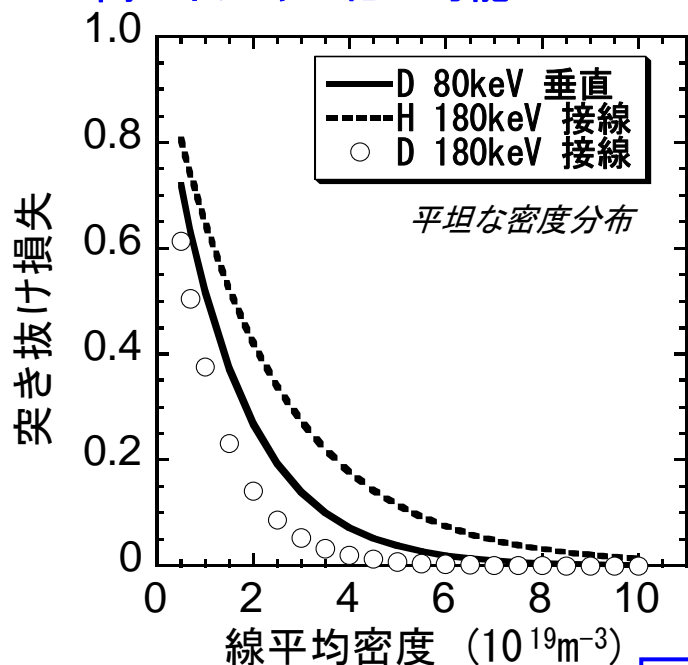


重水素中性粒子ビーム入射(NBI)システム増強

低エネルギー・正イオンNBI: 2台 (垂直入射: 18MW)

高エネルギー・負イオンNBI: 3台 (接線入射: 14MW)

- ・垂直入射の有効性
- ・重水素化による荷電交換効率の増大
→ 高エネルギー化が可能



効率的な加熱パワーの増強
イオン加熱割合の増大

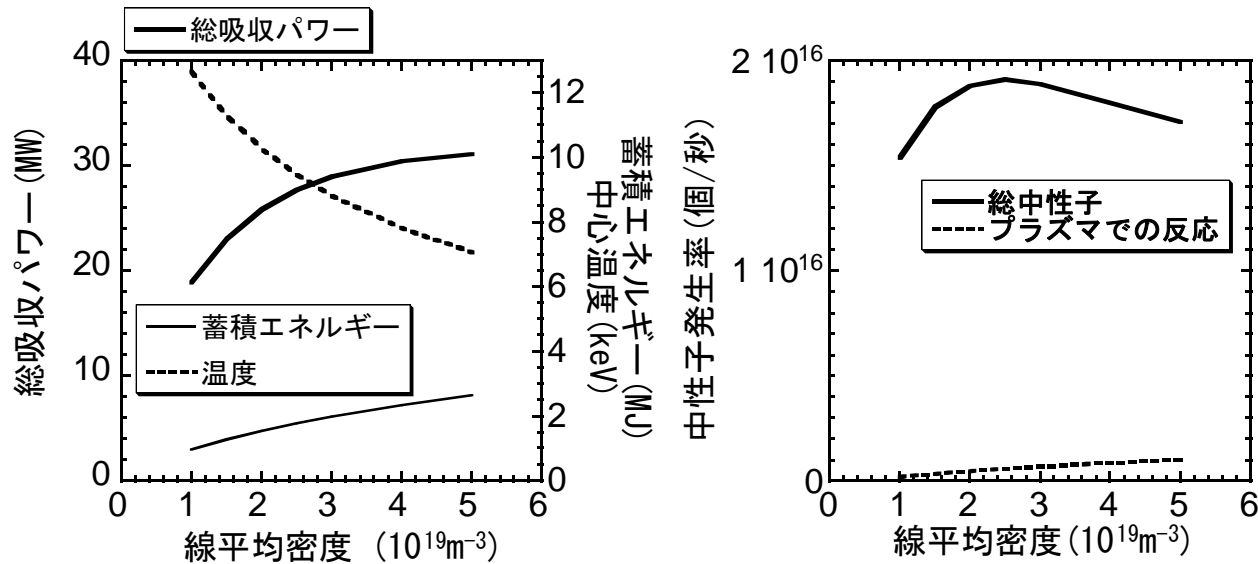
高加熱パワーは熱・粒子制御の性能強化と協調必要



重水素実験で予想されるプラズマ性能と中性子・トリチウム発生量

- ・加熱パワー NBI 入力パワー 32MW (垂直80keV 18MW, 接線180keV 14MW)
ICH、ECHパワー 合わせて 3MW
- ・エネルギー閉じ込め時間 ISS95則の2倍 ・磁場 3T

→ 密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、中心温度は1億2千万度(LHD計画の所期の温度目標)
密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において、蓄積エネルギー3.8MJ、3%を越える β 値、5千万度



ビーム効果が
支配的

最大中性子発生率運転条件

線平均密度	$2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	総加熱吸収パワー	27.7 MW
中心温度	1億1千万度	蓄積エネルギー	1.77 MJ
中性子発生率	1.91×10^{16} 個/秒	(このうち熱中性子反応は 5.98×10^{14} 個/秒)	

- ・ 3秒間の放電1回で生じるトリチウム量は $1.0 \times 10^8 \text{ Bq}$



代表的な放電条件での中性子・トリチウム発生量

運転条件	放電時間	中性子発生量率	中性子発生量	トリチウム量
従前計画の標準放電 NBI 250keV, 20MW	10秒	2.4×10^{16} 個/秒	2.4×10^{17} 個	4.1×10^8 Bq
今回検討の中性子最大発生率を伴う放電 NBI 80 keV, 18MW 180 keV, 14MWなど	3秒	1.9×10^{16} 個/秒	5.7×10^{16} 個	1.0×10^8 Bq
今回検討の平均放電 NBI 80 keV, 10.8MW 180 keV, 8.4MWなど	3秒	3.3×10^{15} 個/秒	9.8×10^{15} 個	1.7×10^7 Bq
ICRF定常放電	3600秒	2.9×10^{13} 個/秒	1.0×10^{17} 個	1.7×10^8 Bq

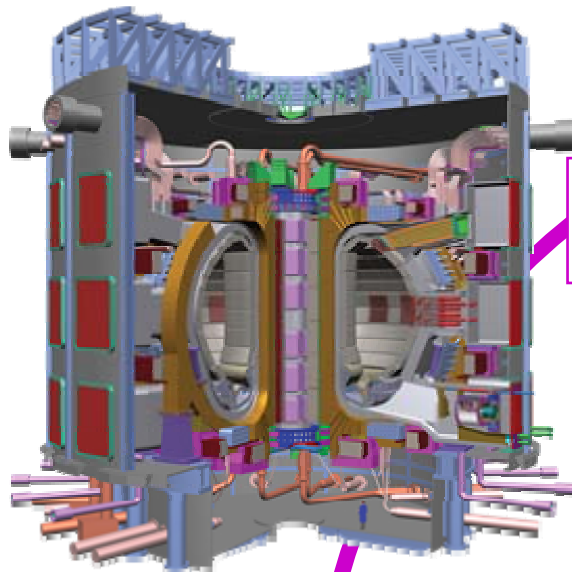
参考: JT-60Uの中性子発生率の最高値 4.5×10^{16} 個/秒



LHD計画を基盤として、ヘリカル型核融合炉実現へ

ヘリカル型核融合炉 (FFHR)

ITER



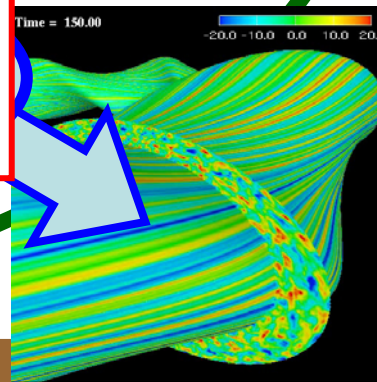
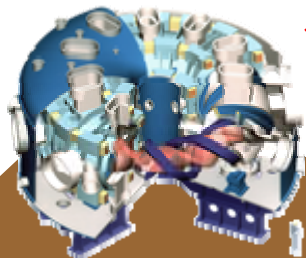
核燃焼プラズマ
の物理



理工学にわたる階層連結モデル

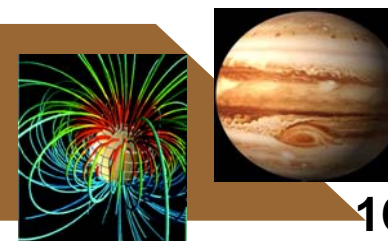
無電流プラズマによる
定常・高密度・高ベータ
実証

LHD



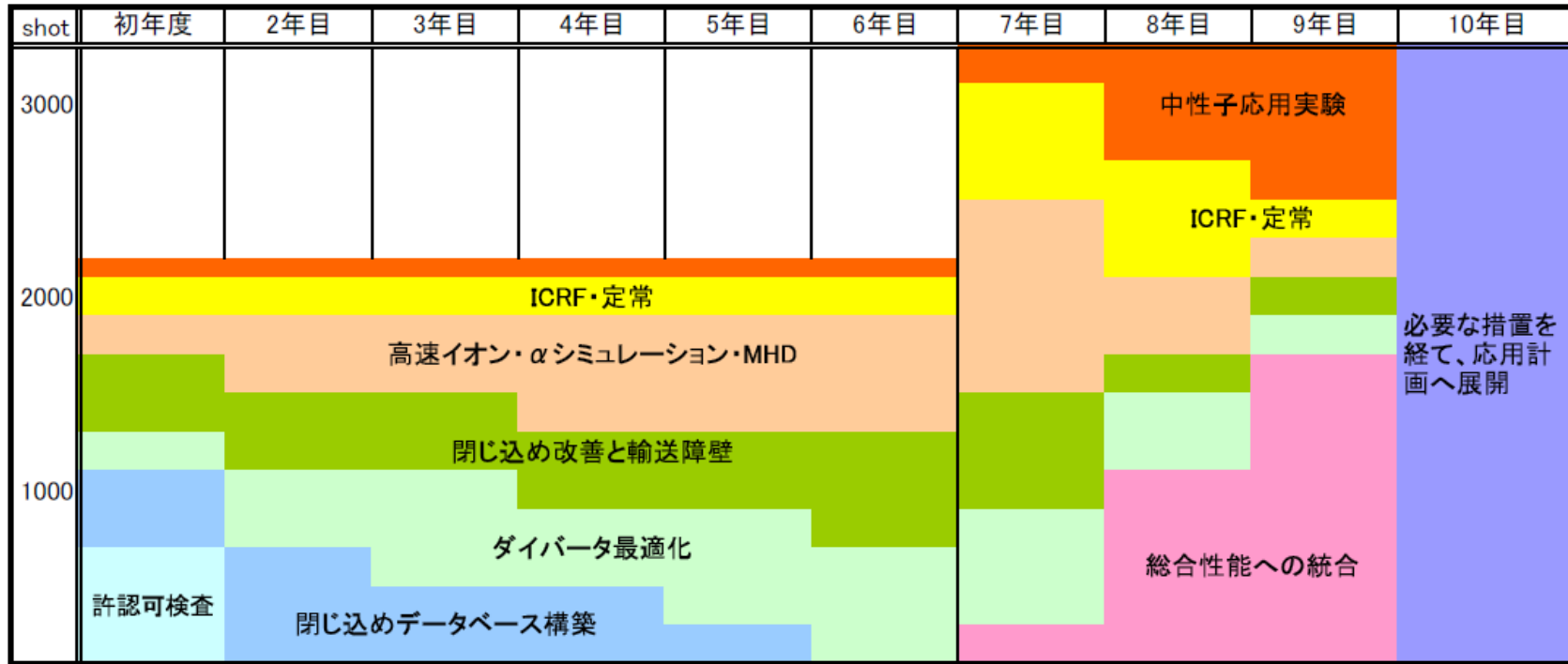
LHDニューメリカル・
テストリアクター

基礎学術基盤





LHD重水素実験計画・年次計画案



中性子発生上限(1-6年目: 2.1×10^{19} /年、7-9年目: 3.2×10^{19} /年)内で、それぞれ年間2100および3200回程度の重水素実験機会が共同研究に提供される

- ・ 合計2万回程度の重水素実験によって、核融合炉設計のための「予測性能に優れた物理モデルの構築」を行う必要あり
- ・ そのためには高性能かつ多様なプラズマが期待できる重水素実験が必要
- ・ 実験の進捗状況に応じて軽水素やヘリウムのみの実験、あるいは休止期間もある



まとめ

LHDにおける重水素実験はヘリカル系核融合炉設計に必要不可欠である、と同時にトロイダルプラズマの総合的理解に大きな貢献をなしえる

ガス種を水素から重水素へ変えるという単純な操作によって明瞭で複雑な同位体効果が現れる。特に、閉じ込め改善は端的かつ好ましい変化。これらを実証し、物理機構を解明する必要がある

重水素実験は物理研究の多様性を生む機会を拡大する

ICRF加熱、 α シミュレーション実験、プラズマ壁相互作用
運転領域の拡大

例：閉じ込め時間ISS95則の2倍(現状1.5倍)、NBI加熱パワー32MW(19MW)

→ 密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、中心温度は1億2千万度

→ 密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、蓄積エネルギー 3.8MJ、 β 値 3%、中心温度 5千万度

技術的な利点が生じる

正イオン中性粒子ビーム入射(NBI)の導入による加熱増強

加熱増強および熱・粒子制御強化の計画の詳細は最新の成果(内部拡散障壁による超高密度プラズマ、高ベータ、長時間放電特性など)を持って検討を重ねる。