

- (4)ヘリカルプラズマの物理を学術的、体系的に理解し、核融合炉の設計・製作に必要な条件を確立する。
- (5)他の方式(トカマク)との共通点・相違点を体系的に研究し、環状プラズマを総合的に理解する。
- (6)以上の事柄を重水素実験により明らかにし、目標プラズマパラメータを達成することにより、将来のヘリカル型核融合実証炉の設計を可能とする高温プラズマの学術的な理解を進めると共にデータベースの蓄積を図る。

以下では、こうした重水素実験の目的を達成するために必要な物理検討、実験シナリオ、実験スケジュールなどの検討を行う。また、重水素実験に際して発生する中性子・トリチウム量の評価を行うと共に、重水素実験を実施するために必要な、機器の改造、加熱装置の増強等の機器整備計画案も示す。

## 3.2 物理検討

多くの磁場閉じ込めプラズマ実験において、重水素を用いることにより閉じ込めの改善が見られている。はじめに、これらについて分析する。

### 3.2.1 トカマク実験における閉じ込め改善について

#### 3.2.1.1 概観

トカマク実験において、水素プラズマから重水素プラズマへ転換した際のエネルギー閉じ込め時間の改善度 $\tau_E(D)/\tau_E(H)$ を表 3.2-1 に整理する。LOC は線形オーミック閉じ込め (Linear Ohmic Confinement)、SOC は飽和オーミック閉じ込め (Saturated Ohmic Confinement))を表す。

表 3.2-1 諸トカマク装置の重水素化によるエネルギー閉じ込め時間の改善。

	LOC	SOC	L mode	H mode
Alcator C	-	1.5	-	-
ASDEX	1.3	1.5	1.3	2
ASDEX-UG	-	-	1.5	1.5
DIII-D	-	1.4	1 1.4	2
FTU	1.1	1.4	-	-
ISX-B	1.4	1.4	-	-
JET	-	1.4	1.2	1.2
JFT-2M	1.1	1.4	1.4	1.4
JT-60U	1.2	-	1.4 1.6	-
TEXTOR	1.4	1.4	-	-
TFTR	-	-	1.15	1

また、DT 実験を実施した大型装置である JET と TFTR から得られた、DT 実験時と DD 実験時のエネルギー閉じ込め時間の比較を行ったものが図 3.2-1 である。ここにおいても、燃料イオンの質量数を増加させることによって閉じ込め改善が図られることが示されている。

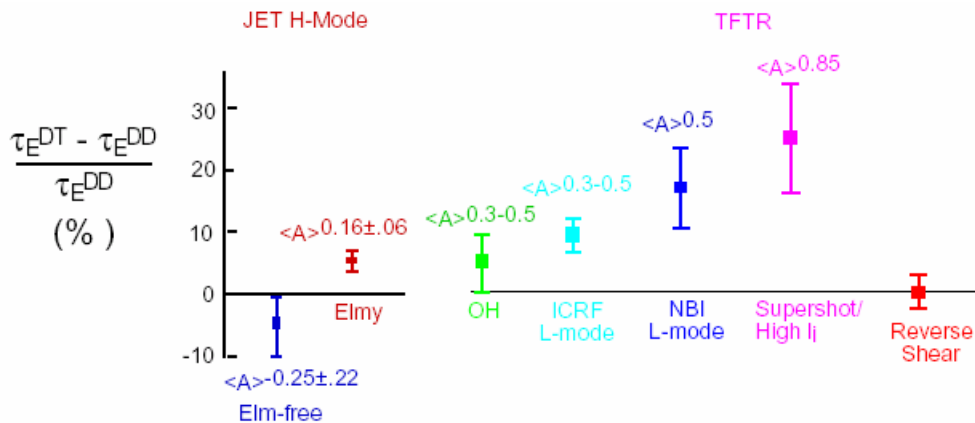


図 3.2-1 JET の H モードと TFTR における種々の閉じ込めモードにおけるエネルギー閉じ込め時間の増分の比較

これらの表・図に示されているように多くのトカマク実験で、異なる閉じ込めモードにわたって広く燃料イオンの質量数の増大(例えば、水素から重水素への転換)による閉じ込め改善が観測されており、次のようにまとめられる。

- 1) オーミック放電では線形閉じ込め状態よりも飽和閉じ込め状態において、燃料ガスの質量数  $A$  に対して、 $A^{0.5}$  程度のより強い依存性が見られる。
- 2) L モードよりも H モードの方が  $A^{0.3}$  から  $A^1$  へと、より強い依存性が見られる。
- 3) 反転磁場配位による内部輸送障壁を伴うような高性能プラズマでは質量比依存性は小さいようである。

以下に特徴的な個別の事例を述べる

### 3.2.1.2 オーミック加熱閉じ込め

オーミック加熱閉じ込めでは電子加熱が支配的であり、これまでのヘリカル系実験と類似した状況であると考えられる。

図 3.2-2 に ASDEX におけるオーミック加熱プラズマの電子密度および電子温度分布を示す。同様の電子密度に対して重水素プラズマの場合、より高い電子温度が得られ、閉じ込めが改善されていることが分かる。さらに、端部でのより低い電子密度、そして電子密度分布の尖塔化が見られる。

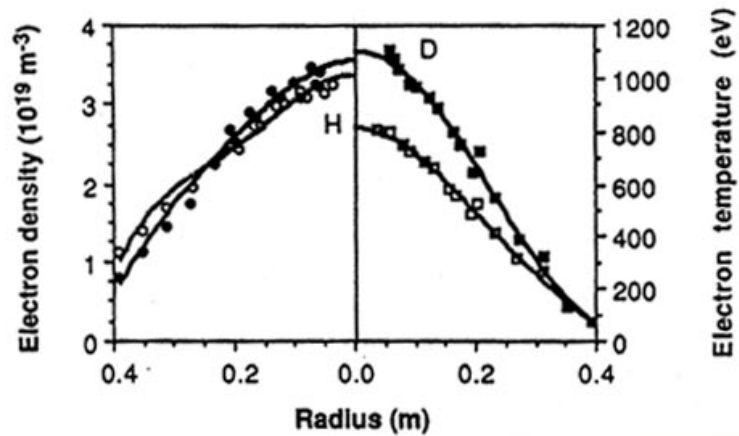


図 3.2-2 ASDEX における水素(白)および重水素(黒)を用いたオーミック加熱プラズマの電子密度(左)、電子温度(右)分布

図 3.2-3 に、同じく ASDEX のオーミック放電におけるエネルギー閉じ込め時間の密度依存性を示す。オーミック放電ではアルカトル則で記述される密度に比例する状態が低密度領域で観測され、これが高密度で飽和している。重水素を用いると、この閉じ込めの飽和状態が大きく改善されていることが分かる。さらにペレット入射によっても、飽和状態が劇的に改善されている(破線)。これらの事実は、イオンの伝導損失の役割が重要であることを示唆している。

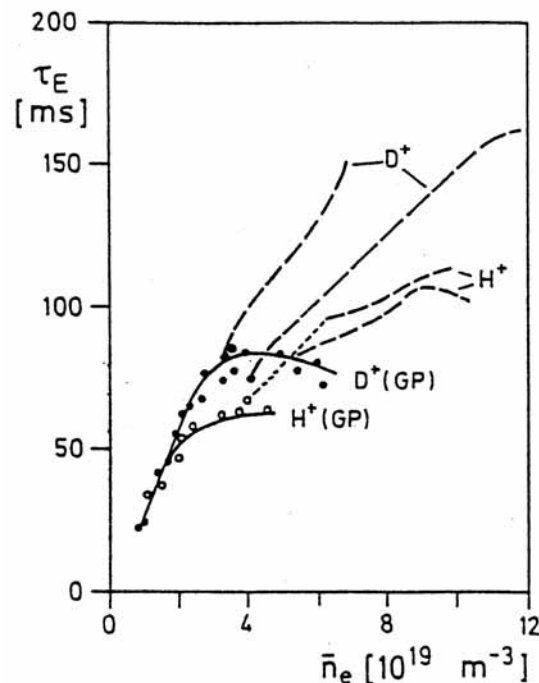


図 3.2-3 ASDEX のオーミック放電におけるエネルギー閉じ込め時間の密度依存性。

### 3.2.1.3 Lモード

図 3.2-4 に ASDEX におけるバルクプラズマと NBI の水素、重水素の組み合わせ実験結果を示す。これによると、水素プラズマへの水素ビーム入射時が最も閉じ込めが悪く、重水素プラズマへの重水素ビーム入射時が最も閉じ込めが良い。同位体効果が足し算で現れている。しかし、この同位体効果はオーミック加熱時よりも緩やかである。Lモード閉じ込めはボーム的であり、そこではラーマー半径効果の弱い長波長の乱流が支配的であることが示唆されていることに留意する必要がある。

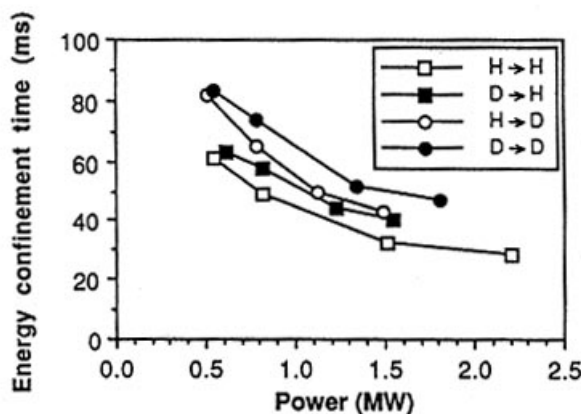


図 3.2-4 ASDEX における NBI 加熱された L モードプラズマのエネルギー閉じ込め時間の加熱パワー依存性

次に TFTR での角運動量(トロイダル回転)の輸送をしてみる。図 3.2-5 に角運動量の輸送係数をモデルと比較したものを示す。ここで、スケーリングモデルは

$\chi_{\phi, scale} \propto P^{0.65} n^{-0.73} l_i^{0.65} A^{-0.8}$  と記述される。観測された角運動量輸送係数は  $A^{-0.8}$  という強い

質量比依存性を示した。さらに図 3.2-6 に示されるように、この角運動量閉じ込めとエネルギー閉じ込め時間の間に強い相関があることが分かった。トカマクの L モードにおいてはイオンの熱伝導損失が主たる損失機構であり、角運動量の輸送がイオンの熱輸送と関係していることが示唆されている。

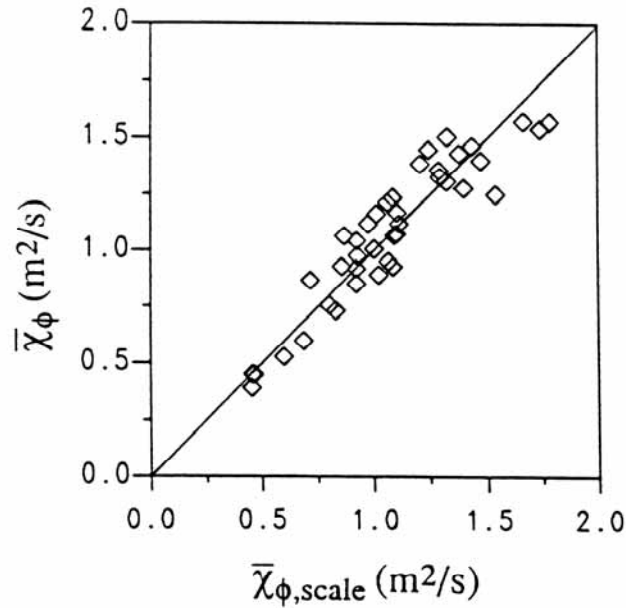


図 3.2-5 トロイダル角運動量輸送係数のスケーリングと実験値の比較

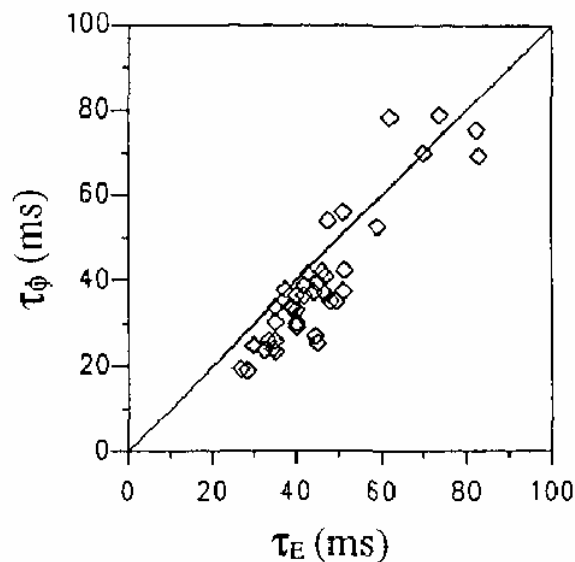


図 3.2-6 トロイダル角運動量閉じ込め時間とエネルギー閉じ込め時間の相関

#### 3.2.1.4 Hモード

トカマクプラズマの、Hモードにおけるエネルギー閉じ込め時間のスケーリング則はジャイロボーム的である。ジャイロボーム拡散を仮定すると、ラーマー(ジャイロ)半径が質量の平方根に比例するため、熱輸送係数が  $A^{0.5}$  の依存性を持つこととなり、重水素の方が水素よりも1.4倍程度閉じ込めが「悪く」なることが予想される。

しかしながら、JETにおける三重水素までを用いた実験によって、熱化プラズマのエネルギー閉じ込めは、図 3.2-7 に示すように  $A^{0.16 \pm 0.06}$  の、弱いながらも質量に対して正の依存性をもつことが示されている。

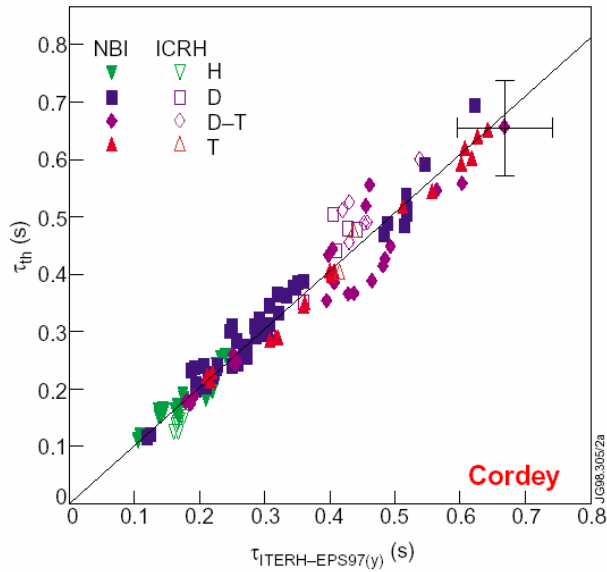


図 3.2-7 JET における燃料ガスを変えた場合のエネルギー閉じ込め時間

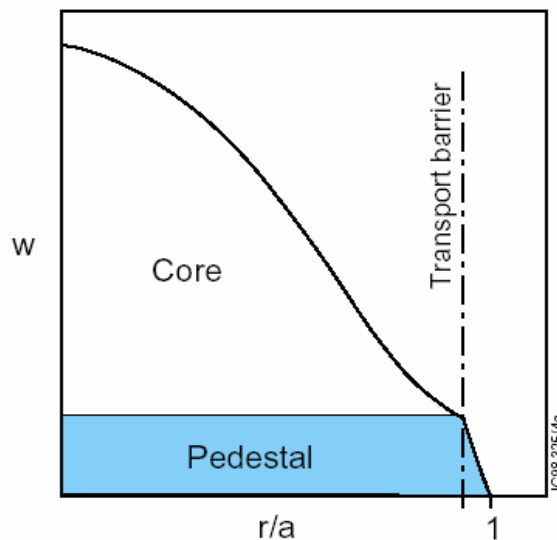


図 3.2-8 圧力分布を H モードに固有なペDESTAL部とその上のコア部に分けて考える。

さらに、H モードにおいて特徴的なことはペDESTAL部において、同位体効果が顕著なことである。図 3.2-8 に示すように、H モードに固有なペDESTAL部とその上のコア部に閉じ込めを分けて考える。図 3.2-9 に JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーを示す。水素から重水素、三重水素と同位体質量が大きくなるにつれ、蓄積エネルギーは増大し、 $W_{ped} \propto A^{0.96}$  と、ほぼ質量に比例して閉じ込めが改善されている。図 3.2-10 にあるように  $W_{ped}$  は  $BT^{0.5}A^{0.5}$  でスケールすることができる。

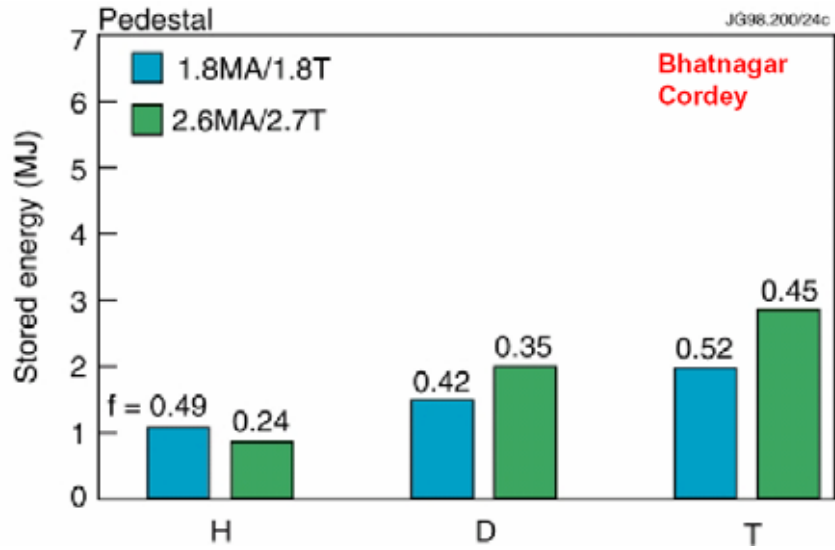


図 3.2-9 JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーへの同位体効果

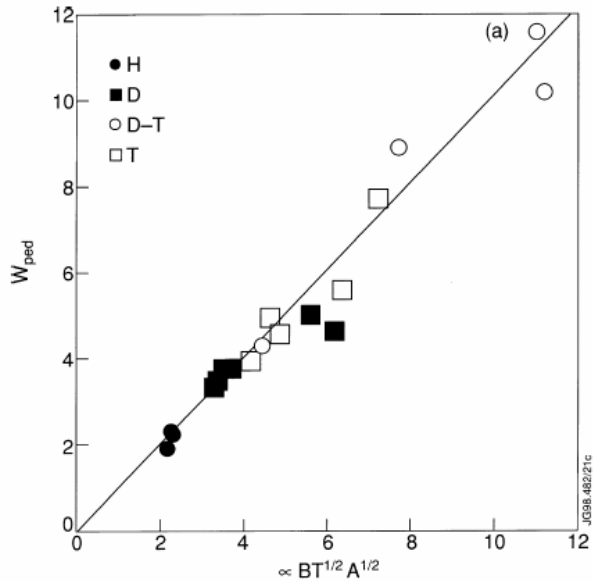


図 3.2-10 JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーのスケールン表  
現との比較

一方、コア部においては、図 3.2-11 に示すように  $\chi_i \propto A^{0.73 \pm 0.04}$  と評価されるイオンの熱輸送係数の劣化が見られ、コア部の熱化成分の閉じ込めは  $\tau_{th,core} \propto A^{-0.17 \pm 0.1}$  と評価される (図 3.2-12 参照)。このようにコア部ではジャイロボームの描像と矛盾しない結果となっている。

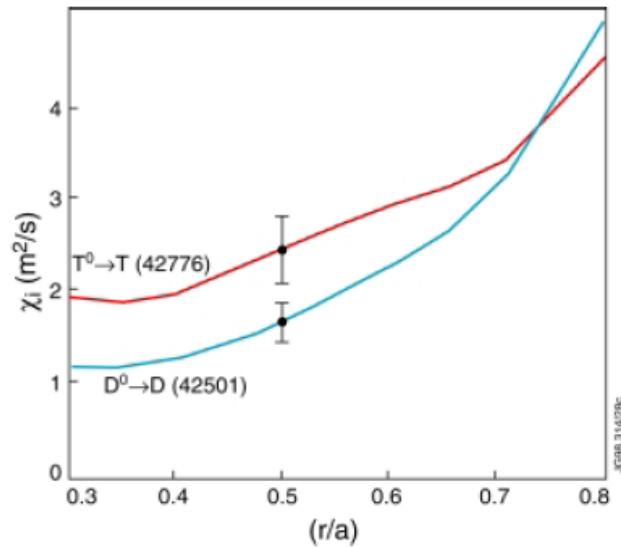


図 3.2-11 JET におけるイオン熱伝導係数の径方向分布

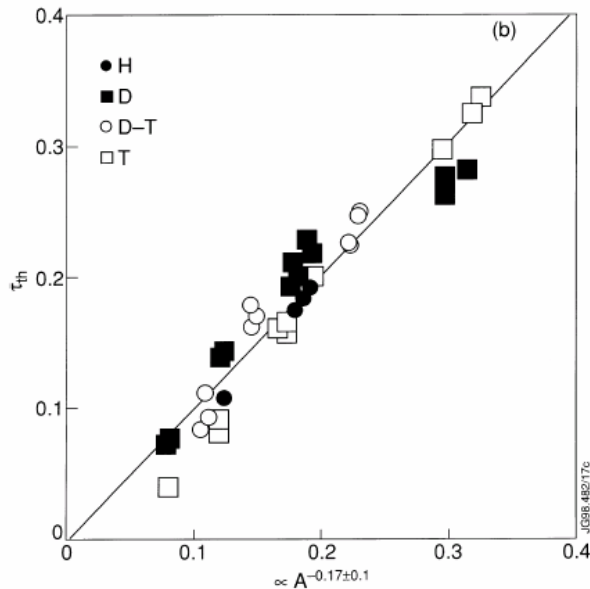


図 3.2-12 JET におけるコア部のエネルギー閉じ込め時間のスケールリング則との比較

H モードのエネルギー閉じ込めについてまとめると、ペDESTAL部では質量比に見られる同位体効果による改善が顕著であり、コア部については質量比がやや弱い劣化をもたらすということである。結果として、この両者が相殺し、全体の閉じ込めは質量比に対して緩やかな改善を示すことになっている。

図 3.2-13 に燃料ガスを変えた場合の ELM の波形を示した。ペDESTAL部における顕著な同位体効果は、この ELM 周波数の低下とそれによるエネルギー損失の抑制によるものと考えられている。これはバルーニング不安定性に対する有限ラーマー半径による安定化効果が、ラーマー半径の大きい、より重い水素同位体の方が有効であるためと考えられている。



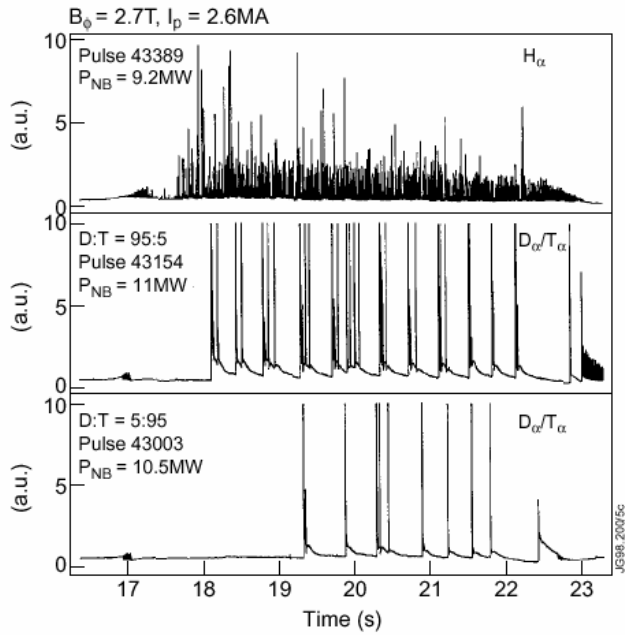


図 3.2-13 JET における ELM 波形

さらに、H モードにおいて顕著な同位体効果は、H モードへの遷移の閾値パワーの軽減である。図 3.2-14 に示すように、H モードへの遷移に必要な加熱パワーは質量比に反比例して少なくなる。

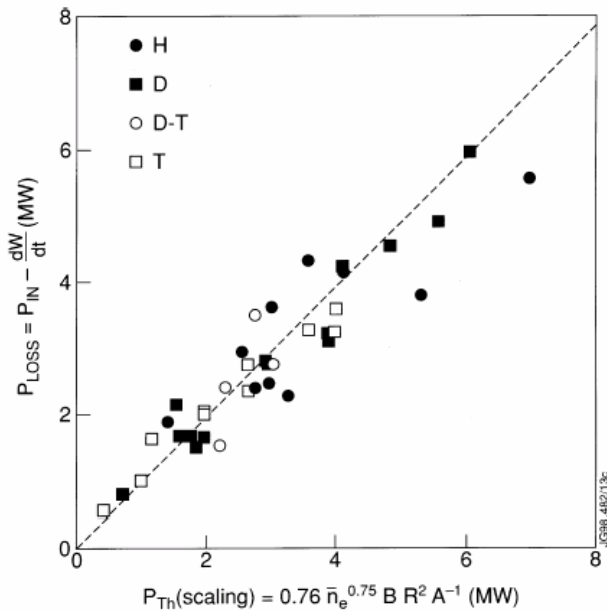


図 3.2-14 JET における H モード閾値パワーのスケーリング表現との比較

同様の結果が、ASDEX や DIII-D など多くのトカマク装置で確認されている。ここでも L モードで見られたような質量の加算効果が見られている。重水素プラズマでは閉じ込めの改善によって周辺部の温度が高くなり、それが閾値パワーの軽減をもたらしていると理解されている。また、ELM 周波数の低下も関連していると考えられている。

### 3.2.2 ヘリカル系における閉じ込め改善について

ヘリカル系では、重水素による同位体効果について、W7-AS において精密な比較実験が行われている。図 3.2-15 に典型的な ECH 放電を示す。ここでは、リサイクリングの影響を避けるため、重水素化したボロナイゼーションによる壁コンディショニングを行っている。運転密度と加熱パワーを正確に調整し、同じ条件での放電を比較した。蓄積エネルギーが重水素によって 2 割程度上昇することが観測され、重水素による閉じ込め改善があることを実証した。

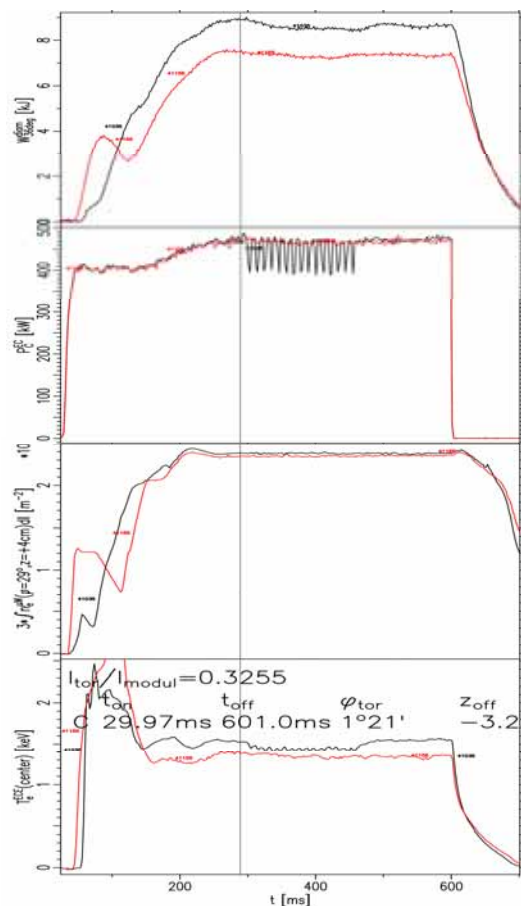


図 3.2-15 W7-AS における ECH 加熱された水素 (赤) および重水素 (黒) 放電の波形。上から蓄積エネルギー、ECH 加熱パワー、線密度、中心電子温度を示す。

W7-AS では、NBI 加熱時に発生する高密度 H モードについても重水素の効果を経験的に調べている。図 3.2-16 に蓄積エネルギーの密度依存性を示す。水素の場合は  $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  を越えるところで、蓄積エネルギーが大きく不連続に上昇して閉じ込め改善モード (高密度 H モード) が発現する、いわゆる遷移現象が明確に見られる。一方、重水素の場合は  $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  以下の密度において、明らかに水素放電より高い蓄積エネルギーが実現された。しかし、この場合、高密度 H モードへの明確な遷移が観測されていない。これは、重水素と水素プラズマにおいて、閉じ込め改善に関わる特性が異なることを示す例となっている。

る。

ここで注意したいのは、W7-AS において重水素と水素の違いが明確に見えるのは、磁気島によってプラズマ境界が規定される場合であり、リミター配位やNBIの高パワー加熱時においてリサイクリングが大きくなる場合は、その差異が明瞭でなくなることである。これらは、周辺部での原子過程が原因となっていること、そしてその影響がコアプラズマに及ぶことを示唆しており、粒子制御の重要性を喚起している。

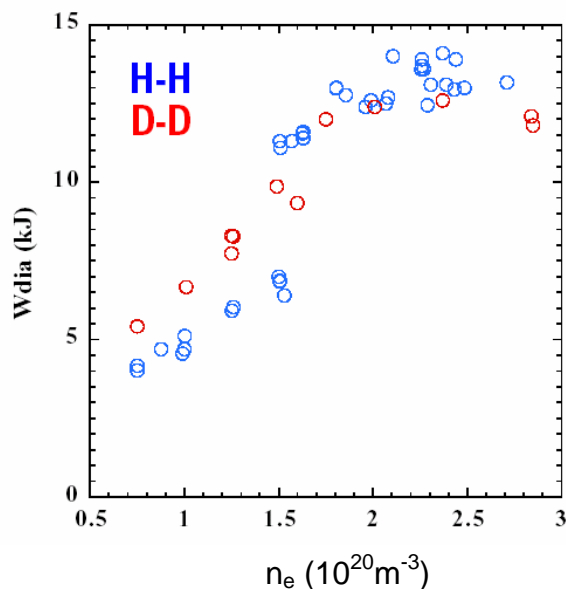


図 3.2-16 W7-AS における蓄積エネルギーと密度の関係。NBI加熱パワーは1 MW

また、Heliotron E および ATF においても小規模ながら、重水素プラズマ実験が行われている。そこで得られたエネルギー閉じ込め時間を、同様な条件での水素プラズマと ISS95 則を元に比較したものが図 3.2-17 である。

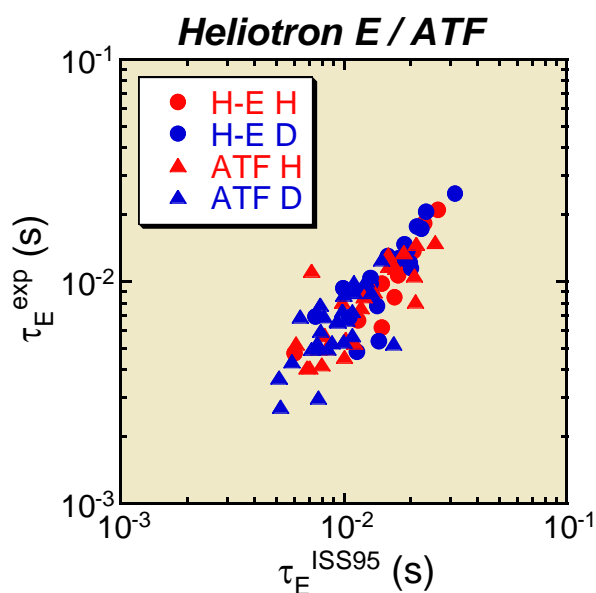


図 3.2-17 Heliotron E と ATF でのエネルギー閉じ込め時間の重水素・水素の比較

また W7-AS での NBI 放電について、重水素ビームの加熱吸収パワーの算定が仮の予備的なものであるが、図 3.2-17 と同様にエネルギー閉じ込め時間について W7 スケーリングを元に比較したものが図 3.2-18 である。

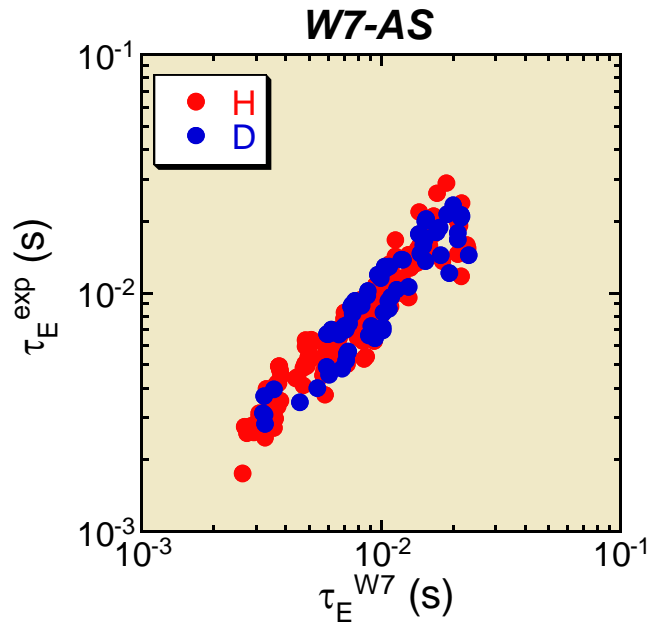


図 3.2-18 W7-AS におけるエネルギー閉じ込め時間の水素、重水素プラズマの比較

これらの実験結果をスケーリング則からの閉じ込め改善度として、まとめたものが図 3.2-19 である。これからは、重水素により、Heliotron E および ATF では小さいが、同位体効果があることが示唆されるが、W7-AS では明瞭な差があることを示してはいない。

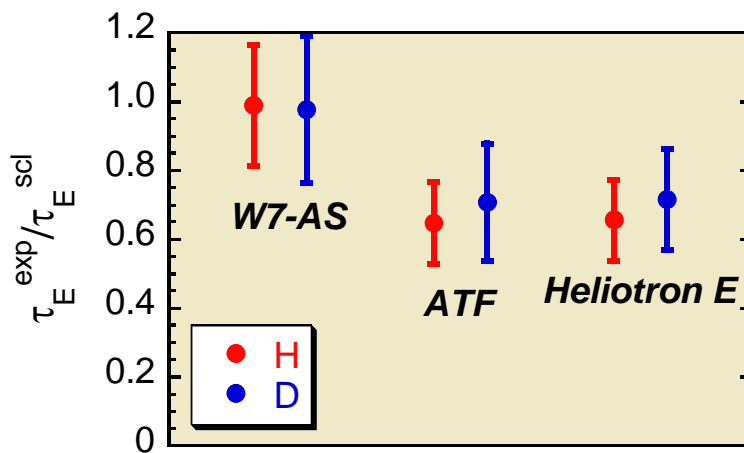


図 3.2-19 ヘリカル系におけるエネルギー閉じ込め改善度の比較

ここで、エネルギー閉じ込め時間は確かにプラズマ性能を端的に示すスカラー量ではあるが、この0次元の量はさまざまな物理現象が複合して投射された結果であり、また、スクエリング表現では扱えない物理を反映した、ある分散を伴っている。したがって、輸送を司る現象を一意的に表すものではないことに注意しなければならない。

ヘリカル系においても、図3.2-15および図3.2-16に示したように、水素と重水素プラズマでの輸送特性には明確な差異を示す実験結果がある。一方、エネルギー閉じ込め時間に縮減して統計的に見ると明瞭な差異がデータ分散の中に隠れてしまうことがあり、この一見矛盾した結果を解きほぐすことが課題である。LHDにおける重水素実験においても、水素プラズマとの多様な差異が観測されると予想され、これらを矛盾なく説明する物理モデルの構築が、将来の核燃焼実験の予測のために必要不可欠である。

### 3.2.3 閉じ込めに関するまとめ

同位体効果はトカマク実験においてあらゆる運転領域で見られている。その質量比依存性は  $A^{-0.2}$  から  $A^1$  と幅広く、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。同位体効果は確実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。一方、大型装置や、小型装置であっても粒子制御の良好な状態において、その効果がより明瞭となる傾向があり、これはプラズマ周辺部における原子過程が一因とはなっていることを示しており、この効果がコアプラズマへ及ぶことも示唆している。

トカマク、ヘリカル系を問わず、環状プラズマにおいては、輸送係数が規格化ラーマー半径に比例して大きくなるいわゆるジャイロボーム型の輸送が基本的な輸送過程であると考えられている。そこでは、質量  $A$  に対してエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  は  $A^{-0.2}$  の依存性を示し、重水素では若干の閉じ込め劣化が予想される。実際、大型トカマクにおける軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験で矛盾ない結果が得られている。これらは特にコアプラズマについて当てはまる事実であるが、ヘリカル系では未確認である。

同位体効果が最も顕著に現れるのがトカマクの H モードである。トカマクでは閉じこめ境界に障壁が形成される H モードにおいて、その遷移に必要な加熱パワー閾値が  $A^{-1}$  の依存性を示す。つまり、重水素実験条件では軽水素実験条件の半分の加熱パワーで H モード遷移が発生する。さらに H モードのペDESTAL部の圧力および幅が  $A^{0.5}$  即ち、イオンのラーマー半径に比例する実験結果がある。重水素実験では軽水素実験時よりも H モード時の ELM 周期が長くなるのが、これらと関連していると考えられている。H モードについてのトカマク実験からの知見を整理すると、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも、(a)低い加熱パワーで遷移を起こし、(b)ペDESTALの圧力、幅とも大きくなり、(c)ELM 周期が長くなる。結果的にペDESTAL部で稼ぐ蓄積エネルギーは  $A^{0.5}$  に比例することになり、全体のエネルギー閉じこめに対する同位体質量効果は  $A^{0.41}$  として現れる。

ヘリカル系においても W7 - AS の実験から、エネルギー閉じ込め時間や閉じ込め改善モードの遷移特性に差異が観測されている。

このように、質量による同位体効果は多種多様な実験でその存在が広く認められている普遍的な性質である、一方、実験および理論に未解決として課された課題も大きい。

これらの知見から、LHD の重水素実験に当たって、考えられる留意点として以下の3点が

あげられる。

- (1) 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との関連もある。
- (2) 角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同位体効果が出にくい可能性がある。また、ゾナルフローなどの流れのシアへの影響に注目しておく必要がある。
- (3) LHDはプラズマ径が大きいので、コア部での原子過程の役割は小さいが、周辺プラズマでの原子過程の影響(放射損失や荷電交換による運動量損失など)を抑制する良好な粒子制御を実現することが、好ましい同位体効果を促すと考えられる。

そこから、演繹される戦略としては、プラズマの回転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の前提、という観点が重要となる。

### 3.3 実験シナリオ

将来の核融合炉では重水素・三重水素が燃料として用いられるのに対して、LHDでは軽水素あるいはヘリウムのみを用いるプラズマ実験をこれまでに10年間実施してきた。LHDにおける重水素実験は核融合反応そのものを研究対象とするのではなく、核融合反応の実現に必要とされる高温プラズマの物理の体系化および要素技術の実証を行うことが役割を担う。

これまでに集積された実験データは大型トカマク実験と比較・対照できるレベル(物理パラメータの差異が1桁以内)に達している。そこでは多くの科学的な知見が蓄積されてきており、今後さらにヘリカル系核融合炉を見通すために研究の統合化を図っていくことが中長期的な目的となる。このためには、プラズマの特性を核融合炉条件へ外挿できるモデルを確立することが必要であり、そこでは、できる限り核融合炉条件に近い実験データの集積を図ることが求められる。そのため、プラズマ性能の向上を図るとともにプラズマ燃料の同位体効果を把握することが本質的な課題と位置づけられる。

重水素実験においては、LHD実験の最終目標とされるプラズマ性能の達成が目的となる。  
すなわち

- 1) 密度  $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  において中心温度 10keV を越える高温高性能プラズマを生成維持する。
- 2)  $10^{20} \text{m}^{-3} \text{s keV}$  を越える核融合三重積を達成し、内部輸送障壁を利用した超高密度プラズマによってさらに伸長を図る。
- 3) 磁場 1T においてベータ値 5% を達成し、さらに高磁場化による性能向上を進める。

の3点が目標となる。

目標1) について言えば、重水素の利用により閉じ込めが33%向上すれば、装置工学的に十分耐用性のある、磁場 3T、25MW の加熱吸収パワーによって達成されることが予想される。一方、この閉じ込め改善がない場合は、加熱パワーでは 50MW を必要とする。あるいは