

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

は 25MW の加熱時に磁場を 4.2T に増強しなければならない。加熱パワー50MW および磁場 4.2T は装置工学上の仕様を越えており、実現することは極めて難しい。したがって、閉じ込め改善が目標を達成するために必須である。

プラズマ燃料として重水素を用いる実験では中性子や α線の発生を伴うため、それらの計測機器への影響や、実験条件の転換にかかる作業への制約、そして現実的かつ段階的な設備整備の観点から、実験計画の初期段階においては軽水素のみを用いた基礎実験を遂行することが適当である。現在の核融合炉開発のための高温プラズマ研究は重水素・三重水素(DT)反応を目標としており、基礎実験から得られた理解を応用していく段階として、軽水素を用いた現在の実験の次に核融合プラズマ条件により近い燃料である重水素を用いた実験を志向することが理にかなっている。

また、後述するように、重水素を用いることによって閉じ込めが改善することが期待され、これによって装置設備が現有のままでも、より高性能なプラズマを研究対象として手にすることが可能である。大型トカマク実験を中心に核融合プラズマ実験では世界的に重水素が用いられているのはこのためである。閉じ込め性能を代表する核融合三重積(温度、密度、エネルギー閉じ込め時間の積)で見ると、重水素の利用によって多くのトカマク実験で見られているように閉じ込め性能が50%向上すれば、2倍以上の改善が得られることとなる。さらに、主要な加熱装置である中性粒子入射(Neutral Beam Injection, 以下 NBI と記す)装置の増強を、重水素を用いることによって効果的に行うことができる。このように上記の吸収加熱パワー25MW の確保と重水素の利用は相乗的に LHD 実験計画の飛躍的な進展に直接つながるものである。

したがって、現在得られつつある物理的理解および実験設備整備の基盤の上に、核燃焼プラズマを扱う次段階の研究計画を見据えるためには、LHD における重水素実験の遂行により、プラズマの高性能化を図り、閉じこめ物理の質量依存性(同位体効果)を明らかにして、DT 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を最重要課題として位置づけ、これに取り組むことが是非とも必要である。この結果として設計が可能となる、次段階の、DT プラズマを対象とした研究計画は土岐サイトで実施するものではない。

加えて、実験計画の策定に当たっては、世界に類のない実験環境を提供する共同利用装置としての位置付けから、実験機会の増大、具体的には放電回数をできる限り十分に確保するという観点も重要である。

3.3.1 重水素実験の課題と予想される成果

重水素の利用により、大きく3つの結果が生まれる。

磁場閉じ込めの根本的な要素にラーマー運動があるが、重水素イオンのラーマー半径が軽水素イオンのそれと比較して $\sqrt{2}$ 倍大きいことが輸送機構に多様に作用する。この他にも原子過程や化学反応にも質量の違いが影響を与え、これらの基礎物理過程に同位体効果という視野の拡大が生じる。結果として閉じ込めおよびMHD安定性の改善に繋がるものと期待されると同時に、三重水素の振舞いに対する予測精度が飛躍的に高まる。

さらに、質量の異なった軽水素と重水素を混合することにより、イオンサイクロトロン共鳴(ICRF)加熱の選択枝が拡大されプラズマ加熱の効率化を図ることができる、NBI の重水素

化により高い中性化効率を利用して、高エネルギー化、ひいては加熱パワーの増力を行うことができる、などの実験手法の拡大をもたらす、研究の多様性を生む。

以上の観点からの課題と予想される成果を以下に整理する。

(1)閉じこめの改善

トカマク、ヘリカル系を問わず、トロイダル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。ジャイロボーム型の輸送モデルでは質量 A に対してエネルギー閉じ込め時間は $A^{-0.2}$ の弱い依存性を示し、重水素では若干の閉じこめ劣化が予想される。大型トカマクでは、軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験によって、プラズマ中心部についてはこれを支持する結果もある、一方、輸送係数が質量 A の平方根程度で逆に改善されるという結果もある。さらにプラズマの閉じ込め性能そのものは中心部の局所的な性質だけに支配されるものではないことに注意が必要である。以下に述べる構造形成が関わる。これらの性質を基本的なところから明らかにしていく必要がある。

トカマクでは高い加熱パワー入力条件でプラズマが自発的に遷移を起し、輸送障壁を形成することが知られており、ヘリカル系でも類似の現象が観測されている。

トカマクでは閉じ込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プラズマ条件よりも半分の加熱パワーでHモード遷移が発生する。

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。

Hモード時のELM周期は重水素プラズマの場合、軽水素プラズマよりも長くなる。

Hモードについてのトカマク実験から得られた知見を整理すると、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Hモード遷移を起し、(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 $A^{0.5}$ に比例することにより、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。すなわち、周辺部で温度密度が上昇し、中心部の若干の劣化があっても、総和として閉じ込めが大きく改善する。

トカマク実験では内部輸送障壁についてもHモードと類似した性質が観測されている。

以上のことから、LHD実験において特に肝要なことは以下の点である。

ヘリカル系においても基本的な閉じこめ性質がジャイロボーム的であり、ペDESTALの形成も観測されている。しかしながら、同位体質量効果は未確認である。重水素を用いた実験により閉じ込めの改善が期待され、またその結果をトカマクで得られた知見と比較検証することはトロイダルプラズマの包括的理解即ち外挿性の高い理解を得るために極めて重要である。

ヘリカル系特有の閉じこめ改善方法として新古典拡散による電場を利用するものがある。重水素を用いることにより、電子ルートへの遷移が起こりやすくなる。生じた電場がイオンの閉じこめを改善することが期待される。

閉じこめ改善の実現は、同じ加熱パワーに対して、プラズマパラメータ領域が高温、高密

度領域へ飛躍的に拡大することを意味しており、経済的・効率的な戦略である。

(2) MHD 安定性の改善と安定性限界への試み

トカマクではHモードペDESTALの圧力勾配がballooning mode で決まっており、重水素を用いることにより、より安定化される(上記記述部分に関連)。

アルフベン固有モードについては、中性粒子ビームエネルギーが同じであればアルフベン速度、ビーム速度ともに $A^{0.5}$ で遅くなるので、重水素を用いても変化はないと考えられが、重水素ビームの採用によりビームエネルギーを高くすることができれば、不安定化されやすくなる。特徴周波数が $A^{-0.5}$ に比例しており、重水素では下がるため、計測精度および理論との比較研究の向上が期待できる。

現在のヘリカル系実験でのベータ限界はMHD特性よりもエネルギー閉じ込め時間と加熱パワーの積で決まっている。重水素実験により、閉じ込め改善と加熱パワーの増大を図ることができるので、ベータ値の増加を図り、MHD安定性によるベータ限界へ近接し、MHD安定性が運転領域限界を規定すると予測される条件での実験研究が可能となる。

(3) 加熱実験手法の拡大

NBI の加熱パワーを増大するには加速電圧を上げる(高エネルギー化)が効率的であるが、その場合シャインスルー損失が問題となる。これは高い温度達成を指向した低密度運転において深刻である。重水素を用いれば荷電交換断面積が倍増するので加熱パワーを倍増させても同じ吸収効率を確保できる。

NBI に重水素を用いることにより、ピッチ角散乱を起こす臨界エネルギーが増えるため、同じエネルギーに対してイオンに吸収されるパワーが増大する。ビームのエネルギーと電子温度の比が30程度の場合、イオン加熱パワーは軽水素の場合、全体の1/4であるが、重水素の場合は1/3となる。また、軽水素プラズマへの重水素ビーム入射ではこの比は1/2に達する。このように、現状では電子加熱が支配的であるという拘束を同等のイオン加熱が行われる条件へ大幅に緩和することができる。

イオンサイクロトロン加熱は、軽水素マイノリティでの条件で行われる。マジョリティとして、ヘリウムを用いることも可能であるが、スパッタリング軽減のため重水素を用いることが望ましい。また He^3 マイノリティ、重水素マジョリティの組み合わせも可能となる。

(4) 水素同位体と壁との相互作用

燃料ガスとなる水素および重水素は、プラズマ周辺部から低エネルギーのイオン、あるいは比較的高エネルギーの荷電交換中性粒子として流出、対向壁に入射し、一部は固体壁中に蓄積する。水素同位体の対向壁面でのリサイクリングとそのプラズマ性能への影響を明らかにすることはプラズマ・壁相互作用研究の課題となる。これらリサイクリングと蓄積の挙動には質量比による同位体効果があることが知られており、興味深い研究対象である。

3.3.2 重水素実験に取り組む際の方針

(1) NBIの高エネルギー化による加熱パワー増大

前述したように、重水素実験に伴って加熱パワーを増強し、吸収パワーを25MWとすることが目標の達成の手段として求められる。

重水素ビームはプラズマ中での吸収効率が高いため、加速電圧を増やして高エネルギー化を図っても、加熱効率を劣化させることはない。あるいは、加速電圧を上げなければ、ビームがプラズマの中心まで届かず、有効な加熱が得られないということになる。すなわち、加速電圧の増強によって、加熱パワーを増大しつつ、軽水素と同様の加熱吸収効率を得られることが期待される。このためには電源の増強とイオン源の改造が必要となるが、パワー増強の効率的な手段たりえる。

また、重水素実験で発生する中性子およびトリチウムの多くは重水素ビームと重水素プラズマの間の核融合反応によるものであり、この量は入射エネルギーと共に増加する。したがって、NBIの重水素化を図るに当たって、必要とされる技術開発要素、設備投資、および発生する中性子・トリチウムの量と、期待される効果のバランスを最適化することが必要である。

この最適化にあたり、考慮すべきことは比較的低エネルギーの垂直入射NBIの採用である。LHD実験計画当初は、ヘリカル系に特有な捕捉粒子の振る舞いを懸念し、損失の少ない、環状のプラズマに対して接線方向からの入射を採用した。このためプラズマ中のビーム経路が長くなり、中心まで加熱を行うために高い加速電圧が必要となった。また、接線ポート径の制約から収束がよいイオン源が必要なことから、180keVの負イオン源からなる設計がなされ、現在3ビームラインで14MWの入射が行われている。そして、従来の重水素化案ではこれらについて250keV程度に増強することとされていた。

この10年間の実験研究の進展に伴い、磁気軸を内寄せすることによる新古典拡散の最適化配位が、そこで心配されたMHD不安定性の影響が深刻なものでなく、プラズマ自身の閉じ込め及び、ICRFによって生成された高エネルギーの捕捉粒子の閉じ込めに優れていることが明らかになった。これはLHD実験で得られた顕著な成果である。つまり、NBIの入射方向が接線方向であるという制約は排除して考えてよいと判断されるに至った。

さらに、接線入射NBIは加速電圧が高いため、その加熱パワーの大部分がターゲットプラズマの電子に吸収される。核融合条件では核融合で生じたアルファ粒子による加熱が同様に電子に対してもっぱら起こることに対応してはいるが、イオンの閉じ込め物理を研究するため現段階の実験にあっては必ずしも望ましい状況とは言えない。加速電圧を電子温度の15倍程度までに抑えれば、NBIの加熱パワーをターゲットプラズマのイオンに付与することができる。これは現在のLHDでは40-80keV程度に対応し、もし接線入射であれば、その長い経路長によって周辺部にしかビームは侵入できない。しかし、垂直方向へ入射することができれば、この程度の低いエネルギーでも、プラズマ中心を加熱することが可能である。

また閉じ込め改善の観点から、プラズマ中心部への高エネルギーの粒子補給を取り入れるべきであり、電流の大きなNBIを採用することが望まれる。

垂直入射ビームの加速電圧は接線入射に比べて低く設定することになり、正イオン源を採用することになる。この場合、重水素化によってイオンビームから中性粒子ビームへの変換効率が改善し、加熱パワーを向上させることが容易となる。負イオン源の場合はこの変換

効率は水素と重水素で変わらない。

これらの検討結果により、NBIの加熱パワーの増強は垂直入射NBIで進めることとし、実際、平成17年度の第9サイクル実験から正イオン加速による40keVの垂直入射NBI(3MW)を稼働させている。

以上の状況を総合して、重水素実験への対応として以下の方針を採用する。

NBIの重水素化および加速電圧の増強は垂直入射NBIについて行う。

そのエネルギーは60-80keVに最適値があると考えられる。現有の40keV入射NBIを用いた実験の結果に基づき、対費用効果を含めた判断をする必要があるが、80keVを主案として検討する。重水素実験前の垂直NBI2ビームラインで入射加熱(ポート通過)パワーを12MW(40keV)から18MWへの増強を図るものとする。

接線入射NBIはすでに高エネルギーであり、重水素化に際してエネルギーを増大させるには、垂直入射NBIに比べて技術的な困難さおよび設備投資が大きくなる。このため、加熱パワーの増強は、有利な点が多い垂直入射NBIに因るものとし、接線入射NBIの加速電圧の増強は行わない。一方、これらの接線入射NBIの重水素化については、高エネルギー粒子に伴う特有の物理現象の研究や荷電交換反応の増大により低密度での加熱パワーを促進させ高いプラズマ温度を指向した実験には適切な手法足りえる。また、低密度時の加熱パワー吸収を改善し、高い温度を得る手段として重水素を用いることは有効である。したがって、既存の3ビームラインいずれも軽水素-重水素運転の切り替えを容易にできる設備の準備を行う。エネルギーおよび入射加熱パワーは軽水素、重水素のいずれの場合もそれぞれ、180keV、14MWとする。ただし、重水素運転時は電流の引き出し特性の劣化が予想されるため、これに対する措置の検討が必要である。

NBIの総加熱パワーは最大で32MWとなる。

重水素ビーム入射実験は主として高加熱パワー時での研究に当て、必要な実験機会を確保し、機器の高負荷運転の繰り返し再現性を優先するため、放電時間は3秒を基本とする(従来計画は10秒)。長時間運転については目的を絞り、見込みが十分ある場合については、全体計画での整合性を考慮し、合理的にそのショット数を定める。

以上の方針に基づいて、代表的な放電条件を以下にあげる。

まず、最大の性能を引き出すことができる条件として以下を仮定する。

- ・磁場強度：3T
- ・NBI加熱：180keV：14MW(重水素) (ポート通過パワー)
80keV：18MW(重水素) (ポート通過パワー)

図3.3-1にある突き抜け損失を考慮し、軌道損失は垂直の場合18%、接線の場合はないとする。

- ・ICH加熱とECH加熱：合わせて3MW
- ・閉じ込め時間 ISS95則の2倍

- ・電子とイオンの温度は等しいとする。
- ・密度は平坦な分布 $(1-\rho^8)^2$ 、温度はパラボラ分布 $(1-\rho^2)^2$ 、NBI 加熱吸収分布は $1-\rho^2$ とする。

この条件では、密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、中心温度は10.3keVとなり、LHD計画の所期の温度目標条件にかなう放電が期待される。また、密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において、蓄積エネルギーは3.8MJとなり、3Tの強磁場においても 値が3%を越え、かつ高温(体積平均温度で2keV以上)のプラズマを実現できることが予想される。

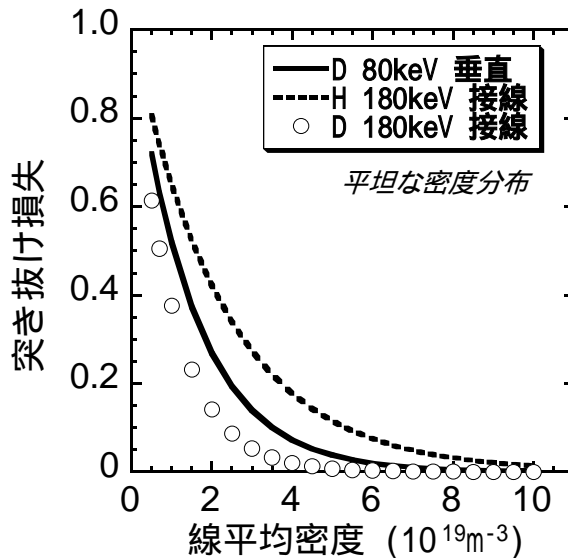


図 3.3-1 線平均密度に対する NBI 入射電力の突き抜け損失の比率。

(2) ICRF の増強と運転形態

重水素を利用することにより、水素マイナリティの標準的なICRF加熱実験が可能となる。加熱パワーを重水素実験期間中に現状の2MWから3MWへ増強する。

例として、LHD実験目標に挙げられている3MW での1時間放電については、 $\langle n_e \rangle = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e = T_i$ とし、重水素の利用による閉じ込め改善によって $\tau_E = 2\tau_E^{\text{ISS95}}$ が得られたと仮定すると、温度は2.7keV、蓄積エネルギーは1MJとなる。

(3) 閉ダイバータ構造の導入による粒子制御性能の向上

これまでの重水素を用いた実験から、その同位体効果は大型装置もしくは小型装置であってもダイバータおよび壁コンディショニングによって良好な粒子制御を実現できた場合により顕著に現れることが示唆されている。また、その差異の同位体効果は周辺プラズマのみならず、コアプラズマへ影響を及ぼしている。LHDはコアプラズマが原子過程の影響を直接には受けないだけの大きさを持っているが、良好な粒子制御によって、周辺プラズマでの原子過程による放射や運動量損失を抑制することが、重水素実験にとって重要となる。したがって、閉ダイバータの導入による粒子制御性能の向上を合わせて考えることが求められる。