

SIV-2

LHD重水素実験による閉じ込め研究の進展と計測計画 Development of confinement study and diagnostics for the deuterium experiment in LHD

居田克巳
Katsumi Ida

自然科学研究機構 核融合科学研究所
National Institute for Fusion Science

閉じ込め研究の進展

核融合トロイダルプラズマ研究において閉じ込め改善の物理機構は最重要課題であるにも関わらず、いまだに未解決の課題が多い。例えば、プラズマ周辺部の境界条件がコアの閉じ込めに大きな影響を与えている事は多くの実験で明らかになっているが、その物理機構は解明されていない。真空容器壁のコンディショニングを行い、真空容器壁を低リサイクリングにすると、周辺部の閉じ込め改善が得られるだけでなく、コアの閉じ込め改善も観測される事はよく知られている。

これらの実験事実は周辺とコアの輸送のカップリングが重要であることを示唆している。一方、水素と重水素はその質量が異なるが故にプラズマへの侵入速度も異なる。その為、同位体効果はバルクプラズマの質量が変化する事に加えて、周辺の中性子の侵入長、ひいてはプラズマ周辺部の境界条件をも変化させている点が重要であると考えられるようになった。

実際、水素と重水素でHモードにおける周辺のペDESTALの幅、ひいてはペDESTALの高さが変わる事が観測されている。(図1)

従って同位体効果は、水素と重水素の侵入の違い、周辺密度変化の違い、周辺とコアの輸送

のカップリング等を包括的に研究する事が重要であると認識させつつある。このような研究の進展をふまえて、水素と重水素の比の空間分布を正確に計測し、短波長、長波長の乱流の空間分布との関連を調べる計測計画が必要である。

荷電交換分光による水素と重水素の比の測定

水素の中心波長は656.28nmと重水素の中心波長は656.10nmである。プラズマ周辺部は温度が低いので、観測されたスペクトルを2本のラインでフィットすることで、水素のH α 線と重水素のD α 線の分離が可能である。その2本のラインの高さの比から、水素と重水素の密度比を求める事ができる。しかしながら、H α 線、D α 線はほとんどがプラズマ周辺から発光する為に、コアの密度比が測定できない。従って、コア部の水素と重水素の密度比を求める為には、バルクプラズマと中性粒子ビームとの荷電交換反応を利用したバルクプラズマ荷電交換分光を用いなければならない。

ところが、温度が高いプラズマのコア部においては、ドップラー効果による輝線幅は中心波長の差0.18nmよりはるかに大きいので、水素と重水素が混合プラズマでは、H α 線、D α 線は2本の輝線ではなく1本の輝線として観測される。よってコア部においてはH α 線、D α 線のラインの分離は事実上不可能となる。

そこで考えられたのが、ドップラー効果がゼロとなる視線(半径方向)で精度よく中心波長を計測し、その中心波長から、水素と重水素の比を求める手法である。LHDにおいて予想されるスペクトルを図2に示す。水素が100%の場合には観測される中心波長が656.28nm、重水素が100%の場合には観測される中心波長が656.10nmとなる。一方、水素が50%、重水素が50%の場合には中心波長が656.19nmとなる事が予想される。図2で示されるように、この波長

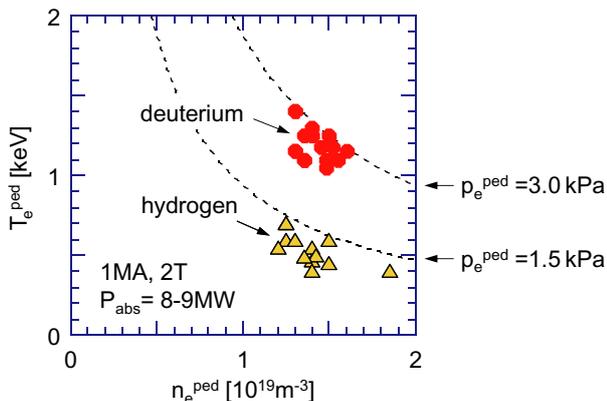


図1 ペDESTAL温度の密度依存性[1]

シフトはドップラー幅に比べてはるかに小さい値であるが、中心波長の測定精度は、そのスペクトルの統計精度で決まり、光量が十分ある場合には、0.01nm（波長シフトの5%程度）の精度で求める事ができるので、波長シフトから水素・重水素比の計測が十分可能と考えられる。

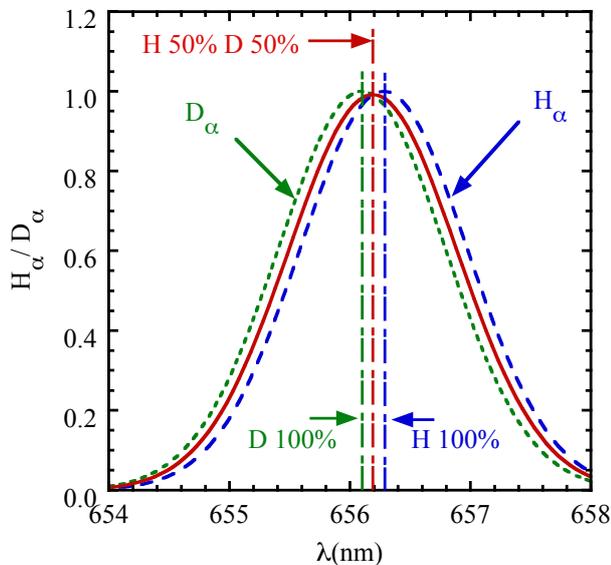


図2 水素の重水素混合プラズマで予想される、 $H\alpha$ 線、 $D\alpha$ 線スペクトル

反射計による水素と重水素の比の測定

トロイダルプラズマにおいては、磁力線がもつ曲率（測地線曲率）の為にプラズマ中に振動する回転が生じる。この振動はgeodesic acoustic modes (GAM)振動と呼ばれ、その振動数はイオンの熱速度（複数のイオン種のプラズマの場合は、平均的なイオン熱速度）、電子温度とイオン温度の比、回転変換角度（安全係数 q ）で決まる。従って、電子温度とイオン温度の比、回転変換角度が既知の場合には、振動数から平均的なイオン熱速度、ひいては実効的な質量比がわかる。水素と重水素では質量数が2倍異なるので、実効的な質量比から、水素と重水素の比を求める事ができる。

図3はLHDにおいて、反射計で計測したGAM振動数とそれから求めた質量比の時間変化である。本実験では、バルクプラズマは水素（質量数1）であるが、炭素（質量数12）をはじめとする不純物がある為に、実効的な質量数が2付近の値となっている。この実験は、GAM振動数から実効的な質量数を求められる事を初めて実証したもので、重水素実験における水素・重水比の計測にも成果が期待できる。

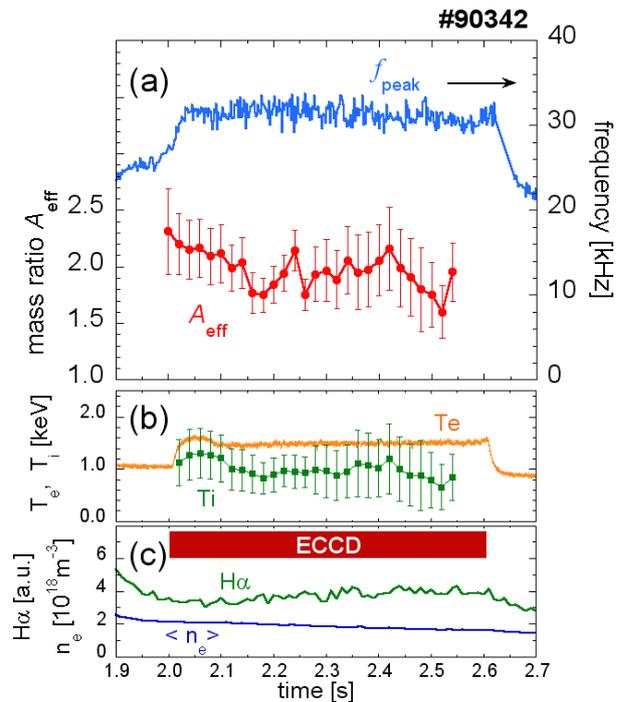


図3 LHDにおいて観測されたGAM振動数(f_{peak})、電子温度(T_e)、イオン温度(T_i)、水素の輝線($H\alpha$)、体積平均密度($\langle n_e \rangle$)と、質量比(A_{eff})の時間変化[2]

反射計の利点は、質量比と乱流の計測が同時にできる事である。質量比が変化した時に、乱流がどのように変化するかは重要な研究課題である。また最近の乱流研究において、長波長乱流の閉じ込めへの役割が認識されるようになった。長波長乱流は、それ自体大きな輸送を引き起こさないが、輸送を決定している短波長乱流とエネルギーを受け渡すという相互作用を持っている。この相互作用を通じて、プラズマの異なる位置（例えばコアと周辺）の乱流の大きさを変化させることができ、いわゆる非局所輸送現象を引き起こす。

LHDの重水素実験は、ヘリカルシステムにおいてトカマクと同様な同位体効果が観測されるかどうか重要な課題であるのは間違いのない。しかしながら、さらに重要なのは、同位体効果の物理的メカニズムを調べる事である。とりわけ、非局所輸送研究で先導的立場にあるLHDでそれを明らかにする事が期待されている。

参考文献

- [1] H.Urano, Nucl. et. al. Fusion 52 (2012) 114021.
- [2] T.Tokuzawa, et. al., submitted to Phys. Rev. Lett.