閉じ込め磁場を変化させてプラズマの性能を改善する

小林政弘

核融合炉のプラズマは、できるだけ高温・高密 度にして核融合反応を促進し、たくさんのエネル ギー出力を得ることが重要です。一方で、エネル ギー出力の増加に伴って、装置壁への熱負荷も徐々 に増えていきます。あまり熱負荷が大きくなると、 装置壁の損傷が起こるなど核融合炉にとっては望 ましくありません。従って、核融合炉では中心プ ラズマのエネルギーを上げるということと、装置 壁への熱負荷を減らすという相矛盾する性質を両 立させることが要求されます。これを実現させる 方法としてこれまで、プラズマの燃料以外に、プ ラズマの周辺部に少量の不純物を入れることによ り、装置壁の近くのプラズマを冷やして壁への熱 を減らす試みがなされてきました。ただし、この 方法で確かに壁の熱負荷は下がるものの、不純物 の侵入などによって同時に中心のプラズマまで温 度が下がってしまうことがしばしば起こります。 そこで大型ヘリカル装置(LHD)では新たな試みと して、プラズマを閉じ込めている磁場の構造を変 化させることにより、プラズマの性能の向上と壁へ の熱負荷の軽減の両立に取り組んできました。今 回はその成果について報告いたします。

今回の新たな試みにおける磁場構造の変化の様 子を図1に示します。図1(a)は通常の磁場構造で、 磁気面とよばれる磁場構造がプラズマを囲むこと によって閉じ込めを維持しています。一方、図1(b) では外部から微小な磁場を加えることにより、磁 力線のトポロジーを変化させ、閉じ込め領域の外 側に別の閉じた構造が現れます。この領域はあた かも海に浮かぶ"島"のようなので「磁気島」と呼ば れています。通常、磁気島はプラズマの閉じ込め を劣化させることが多いですが、今回の実験では 磁気島をできるだけプラズマの周辺部に作り、閉 じ込め領域(中心部)のプラズマに影響がないよう に工夫しました。このような構造にすることで、周 辺部のプラズマを中心プラズマから"切り離し"、周 辺のプラズマだけを冷却するとともに中心のプラ ズマの性能を維持することが本手法の目的です。



図1 磁場閉じ込め核融合炉の磁場構造。(a)通常の磁場構造、 (b)磁気島が形成された場合。

不純物はプラズマのエネルギーを光に変えるこ とによってプラズマを冷やします。その様子を LHDにおいて特殊な計測器で観測した結果を図2に 示します。図2(a)は磁気島のない通常の場合の磁 場構造で、これに対応した発光分布が図2(b)、(c) です。図周辺部に不純物による発光がみられ、こ れによって周辺プラズマは冷やされますが、その 発光は徐々に閉じ込め領域に入ってしまい、結果 として中心のプラズマを冷やしてしまいます。一 方、図2(d)のように磁気島がある場合、図2(e)、(f) に示すように不純物の発光は磁気島内に留まり、 それ以上は閉じ込め領域には侵入せずに周辺部だ けを冷やすことが実証されました。



図2 磁力線構造と不純物の発光分布。(a-c)磁気島無し、(d-f) 磁気島有り。(a、d)磁力線構造。(b、c、e、f)不純物の発光分布。

NIFS NEWS

この時の装置壁の熱負荷の分布を図3(b)に示し ます。図3(b)では磁気島が無い場合を100%にし て、磁気島がある場合の熱負荷を表しています。 すなわち100%未満が減少していることを示して います。装置のトロイダル方向のすべての位置で 熱負荷が減少していることが確認できました。こ れは磁気島ができることにより、そこでの不純物 発光が促進されてプラズマが効率的に冷やされ、 結果として装置壁の熱負荷が減るためであること がデータ解析やシミュレーションの結果から分か ってきています。減少率がトロイダル位置によっ て違うのは、図3(a)に示すように磁気島のポロイ ダル位置がトロイダル方向に変化することに関係 していると考えられています。現在、できるだけ 均一にかつ更に熱負荷を減少させるよう、実験を 継続しています。



図3 (a)磁気島のポロイダル位相角、(b)装置壁の熱負荷分布。 磁気島が無い場合を100%とし、磁気島がある場合の熱負荷の 割合。

この放電におけるプラズマの圧力の分布を図4に 示します。ここで圧力はプラズマの温度と密度の 積であり、プラズマ性能の重要な指標です。この 図から、磁気島がある場合のほうが中心部でより 高いプラズマ圧力が形成されており、閉じ込め性 能が良くなっていることが分かります。改善の要 因としては、上述のように不純物の発光が周辺部 に留まっていることや、磁場構造によるプラズマ の輸送への影響、プラズマの加熱分布の変化など が考えられています。また、このような閉じ込め の良好な状態は、近年の重水素を用いた実験で発 現しやすいことが分かってきました。一方で、プ ラズマ性能の物理的な理解は核融合研究の長年の テーマであり、いまだ未解明の部分が多いとされ ています。今回の実験結果は、プラズマの閉じ込 めと装置壁の熱負荷軽減の両立に関する新たな知 見として、極めて重要な結果であり、また将来の 核融合炉の設計に大きな可能性を示すものとして、 今後の研究の進展に大きく寄与することが期待さ れます。

(高密度プラズマ物理研究系 准教授)



図4 磁気島が無い場合(青)と有る場合(赤)のプラズマのエネ ルギー密度分布。プラズマのエネルギー密度はプラズマの圧力 に相当します。