

## 核融合炉の熱負荷とデタッチメントプラズマ

小林 政 弘

核融合炉の設計において、最重要課題の一つである装置壁への熱負荷についてその原因と対策方法である「デタッチメントプラズマ」について、最近の研究成果から紹介いたします。

核融合炉では、効率良く電力を発生するために炉心のプラズマは約1億度という極めて高い温度まで加熱されます。しかし、このような高温のプラズマが装置壁に直接接触すると、壁の材料が溶けてしまいます。そこで、図1(a)に示すように少し温度の低いプラズマ(約100万度)でできた数センチほどの薄皮でその周りを覆っています。薄皮のことを「スクレープオフ層」と呼びます。さらに、この薄皮も装置壁に触れないように磁力線を使ってプラズマ全体を宙に「浮かせる」よう工夫されています。このように、プラズマは磁力線を使って色々な形に変形できますが、これはプラズマの「磁力

線に沿って動きやすい」という性質を利用しています。ところで、プラズマは完全に宙に浮くわけではなく、必ずそれを支える“支柱”のような磁力線が装置壁のどこから伸びて、プラズマ全体を固定する必要があります。この“支柱”のことを「ダイバータ」と呼びます。結果として、プラズマから漏れ出てきた熱はこのダイバータに集中します。ここで過大な熱負荷が発生して、時にはダイバータ板を溶かしてしまいます。ここで、できるだけ炉心から出てくる熱を広く薄くダイバータ板に当ててあげたいのですが、先ほど述べた「磁力線に沿って動きやすい」というプラズマの性質のために、そのままではなかなかプラズマの熱は広がってくれません。すなわち、この性質はプラズマの形を様々に変形するためにはとても便利ですが、一方で装置壁への熱負荷を下げるという点ではありがたくないのです。

できるだけ熱負荷を下げるために考え出されたのが「デタッチメントプラズマ」という方法です。日本語では「非接触プラズマ」と呼ばれ、プラズマがダイバータ板から“離れている”状態のことを意味します。このような状態はプラズマの温度を下げることにより実現されます。プラズマの粒子数を増やしたり(すなわち密度を濃くしたり)することで、温度は下がってきます。デタッチメントに遷移するときのダイバータ部におけるプラズマの変化の様子が図2に示されています。大体、温度が10万～5万度くらいまで下がると、突然プラズマは光を放し始めます。これは「放射損失」とよばれ、プラズマの持っている熱を光に変えて四方八方に散らしてくれるのです。したがって、ダイバータ板にプラズマが当たる前に熱がより広い領域に分散してくれます。放射損失はプラズマ中に微量の不純物を入れることで起こりやすくなります。通常は、不純物は炉心に入ってしまうと核融合反応の効率を下げてしまうので嫌がられますが、周辺のスクレープオフ層では、放射損失を促進

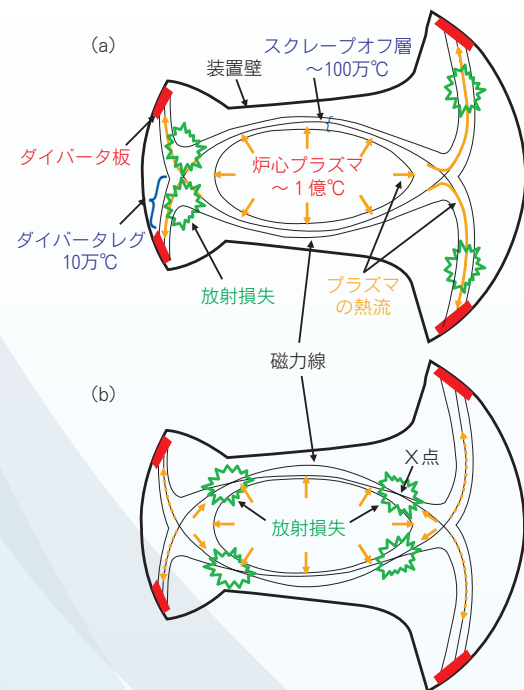


図1 (a)核融合炉における装置壁、磁力線、炉心プラズマ、スクレープオフ層、ダイバータ、プラズマの熱流、放射損失分布の概略図。(b) 磁力線の“結び目”X点を形成した時の放射損失分布の概念図。

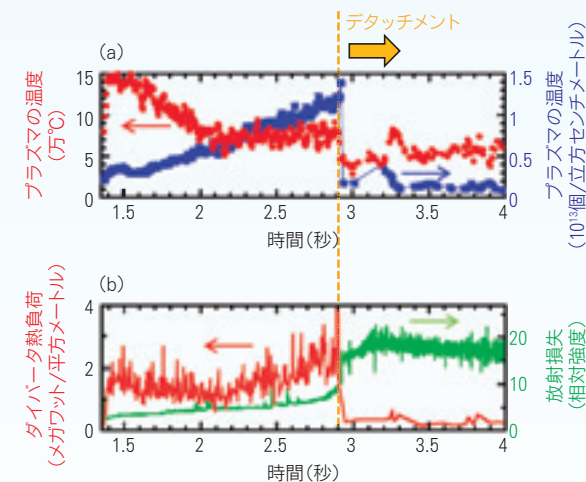


図2 デタッチメントプラズマに遷移するときのダイバータ部の各種パラメータの時間変化。(a) プラズマの温度(赤)、密度(青)、(b) ダイバータ板の熱負荷(赤)、放射損失(緑)。2.9秒からデタッチメントに遷移している。

してくれるので逆に歓迎されます。このように放射損失によってプラズマの熱がダイバータ板に届かなくなるために、これを「非接触」と呼ぶのです。

さて、放射損失はプラズマの温度を下げてくれますが、放射損失は温度が低いと更に起こりやすくなります。したがって、温度が下がると更に放射損失が起こって、また温度が下がって...というふうに、どんどん効果が促進されていきます。ここで注意すべきは、上述したように宙に浮いたプラズマは磁力線の“支柱”あるいはダイバータに当たることによって支えられているということです。あまりに放射損失が大きくなってプラズマの熱がダイバータあるいは“支柱”まで届かなくなると、プラズマが実質的に支えを失うことになります。

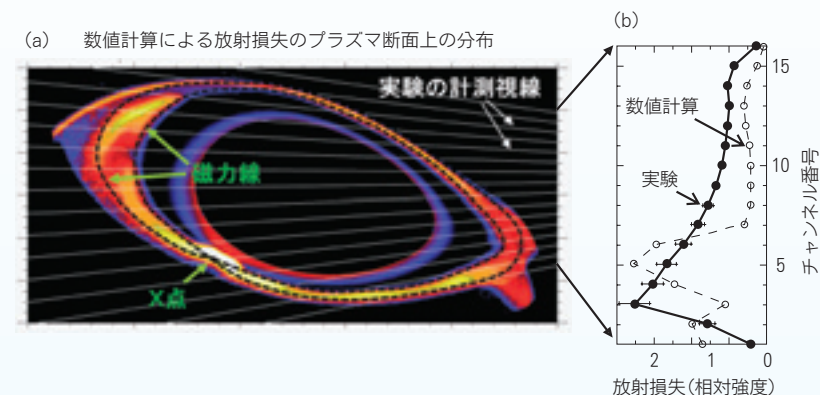


図3 (a)放射損失分布の数値シミュレーションの予測。磁力線の“結び目”X点に放射損失が集中している。白線は実験の計測器の視線を示す。(b)実験結果と数値シミュレーションとの比較。定性的にシミュレーションと実験結果はよく一致している。

このため、放射損失が起こっている(強く光っている)領域が不安定になってフラフラと動き始めます。時には炉心まで入って行って不純物をまき散らしてプラズマが消えてしまうこともあります。すなわち、放射損失によるデタッチメントも度が過ぎると悪影響をもたらすのです。

このような不安定性を抑えるために、磁力線の形を工夫して制御する試みがなされています。それは図1(b)に示すように、スクレープオフ層に磁力線の“結び目”(X点と呼ばれる)のようなものを作り、ここに放射損失の領域を固定しようという方法です。このX点へは、磁力線に沿って流れるプラズマの熱がなかなか届かず、結果として冷えやすくなります。放射損失は冷えたプラズマを好みますので、ここにとどまり易いと考えられます。これまでに何度か実験を繰り返し、放射損失の分布を調べてきました。図3は数値シミュレーションによる放射損失の予測と実験結果を比べたものですが、おおよそ予想したような振る舞いをプラズマがすることが確認されています。炉設計の課題の解決に希望を与えてくれています。ですが、プラズマの持つ性質は上述したように時にはありがたく、時にはありがたくないという諸刃の剣であることが分かります。この点に気をつけながら、最終目標である核融合炉の実現に向けて、時に相矛盾する性質をいかに調和させ全体として統一したシステムを作り上げるかという観点から、これからの研究にますます必要となっています。

(高密度プラズマ物理研究系 助教)