

## NIFS発の計測技術の国際展開で進めるヘリカルプラズマにおける不純物輸送研究

田村直樹

将来の核融合炉では、燃料となる水素同位体及びプラズマを加熱する高エネルギーヘリウム以外の粒子を不純物と呼びます。これら不純物の主な発生源は、プラズマを閉じ込める真空容器などですが、重水素と三重水素の核融合反応によって生じる高エネルギーヘリウムも、プラズマにエネルギーを与えるという役目が終わると、同様に不純物となります（エネルギーを失ったヘリウムは、燃えかすという意味からヘリウム「灰」と呼んでいます）。不純物は、プラズマのエネルギーを吸収し光として放出してしまうため、不純物の量が増えるとプラズマの温度が下がり、核融合炉の出力が低下してしまいます。このため、核融合炉に必要な高温プラズマをできるだけ長時間にわたって維持するためには、プラズマ中の不純物の量をできるだけ少なくする必要があります。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）を始め様々な磁場閉じ込め核融合プラズマ実験装置では、プラズマ中の不純物の量を減らす方法を見いだすべく、不純物をあえてプラズマに注入してプラズマ中の不純物の振る舞いを明らかにする実験を行っています。

これまで、不純物を高温プラズマに注入するために、プラズマの外から、1)ガスとして吹きかける、2)小さい固まり（ペレットと呼んでいます）にして吹き矢の原理で飛ばす、3)強いレーザー光

で蒸発させて飛ばす（レーザー・ブローオフ法と呼んでいます）、などの方法が行われてきました。しかし、いずれの方法にも共通した問題点があり、実験の精度を上げる上での課題となっていました。その原因は、磁力線でできたカゴで閉じ込められた高温プラズマの周りに広がっている、比較的低温のプラズマ領域にあります。プラズマの外から注入された不純物の一部は、この低温プラズマにも入り込んでいきます。このため、先述の1)から3)の方法では、高温プラズマにどれくらいの量の不純物が入ったか正確には分からないのです。

そこで核融合科学研究所では、この不純物を注入する実験の精度を上げるために、トレーサー内蔵固体ペレット（Tracer-Encapsulated Solid Pellet: TESPEL）を開発しました。TESPELは高温プラズマ中に注入したいトレーサー不純物をプラスチックで包んだ、二層構造をしたペレットです（図1参照）。この構造により、高温プラズマの周りにある低温プラズマを通過している間は、外層部のプラスチックの部分だけが溶けるため、トレーサー不純物を全て高温プラズマの中に注入することができるのです。さらに、外層部のプラスチックの厚みを調節することで、注入する位置を変えることができます。つまり、TESPELを使うことで、これまでの不純物注入法ではできなかった、既知の量の不純物をプラズマ中の任意の位置に注入することができるようになりました。この効果をみなさんの身近なものに例えるなら、胃で溶けずに腸で溶ける整腸剤でしょうか。LHDでは、このTESPELを用いて、これまで知られていなかったプラズマ中の不純物の振る舞いを明らかにしてきました。

ところで、先述のとおり、高温プラズマ中の不純物の振る舞いに関する研究は、LHDも含めて様々な実験装置で行われています。これは、ある物事を調べるとき、一つの観点からだけでは分からないことがあるからです。例えば、ある方向から見て『円』だと思ったものが、別の方向から見て『三角形』だった場合、その時初めてそれが『円錐』

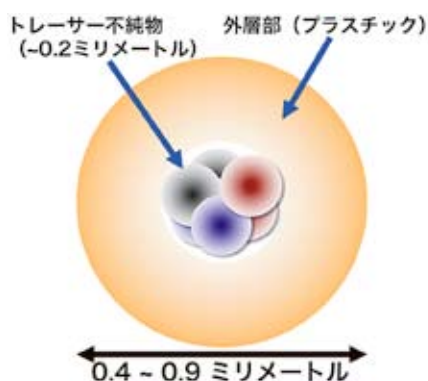


図1 トレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)の模式図

だったことが分かります。このように、ある物事を様々な視点で調べることは、その物事の本質を知る上で大変重要です。このことは、核融合プラズマ研究においても同様です。プラズマ中のある現象を一つの装置で調べて分からなくても、別の装置で調べ、比較することで分かることがあります。ここでさらに重要なポイントが、その調べ方です。例えば、モノの長さを正確に比較したい時、同じ定規を使った方がいいことは、みなさんすぐにお分かりいただけると思います。そこで核融合科学研究所では、異なる実験装置で得られる実験結果を正確に比較できるように、国際共同研究プロジェクトとして、TESPELをスペインのエネルギー環境技術研究センターの中型ヘリカル装置TJ-IIなどに導入してきました。そして、2018年には日独の国際共同研究プロジェクトとして、LHDと同規模のヘリカル型プラズマ実験装置である、ドイツのマックス・プランクプラズマ物理研究所のWendelstein 7-X (W7-X) にTESPELを導入しました。図2に、W7-Xに取り付けられたTESPELをプラズマに入射するための装置の写真を示します。TESPEL格納ディスクに装填されたTESPELは、後方に取り付けられた加速ガス噴出弁から瞬間的に噴き出す30気圧という高圧のヘリウムガスによって加速、押し出され、プラズマに向けて飛んで行きます。一方、加速ガス自体は不要なので、プラズマに入れないようにするために、TESPELが通っていく経路の途中には、加速ガスを排気するための真空容器と真空ポンプの組合せ

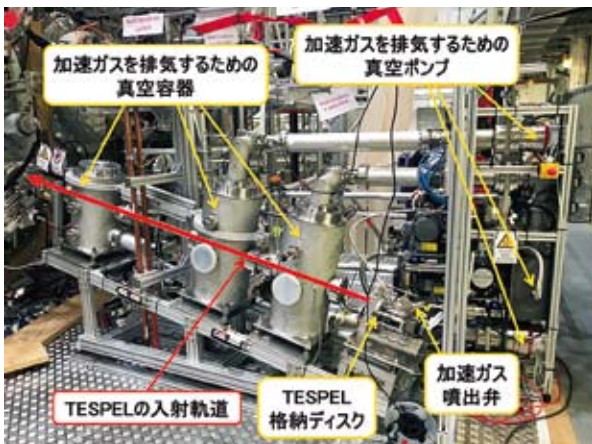


図2 ドイツのマックス・プランクプラズマ物理研究所のヘリカル型プラズマ実験装置Wendelstein 7-Xに取り付けられたTESPEL入射装置

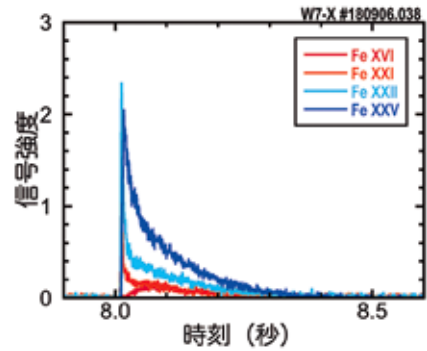


図3 W7-Xで生成されたプラズマにTESPELを使って鉄を注入した実験の結果の一例。TESPELによって注入された鉄の多価イオンからの発光信号が示されている。

を3系統設けています。これにより、世界最大級のヘリカルプラズマ中の不純物の振る舞いを正確に比較できる環境が整ったと言えます。

図3に、W7-Xで生成されたプラズマにTESPELを使って鉄を注入した実験の結果の一例を示します。この場合、TESPELは時刻8秒付近でプラズマに入射されています。通常、プラズマの温度に応じて、様々な価数の鉄イオンができますが、高い価数のイオンができるためには、高いプラズマ温度が必要です。レーザー・ブローオフ法をはじめとする従来の注入法で不純物をプラズマに注入した場合、不純物はプラズマの温度が低い領域から高い領域へ徐々に侵入していきます。そのため、より価数の高いイオンからの発光信号は、不純物が注入されて少し時間が経過してから観測されます。図3が示すように、TESPELによって鉄が注入された直後からFe XXV発光信号が観測されていることは、TESPELによって鉄がプラズマの温度が高い領域に直接注入されたことを意味しており、W7-XにおいてもTESPELがうまく機能していることを示しています。この実験では、鉄は0.1秒程度の減衰時定数でプラズマから排出されることが分かりました（プラズマ中に最も多く存在する24価の鉄イオンからのFe XXV発光信号（図3中青線）から評価）。その一方で、実験条件を変えると、不純物がプラズマ中に長く留まっている結果も得られています。今後、LHDで得られている実験結果との詳細な比較を進めていくことで、ヘリカルプラズマにおいて不純物をできるだけ少なくするために必要な知見の総合化を目指す予定です。

(高温プラズマ物理研究系 准教授)