

水素の氷粒をプラズマへ ～固体水素ペレット入射とその溶発イメージング計測～

本 島 巖

将来の核融合炉では、核融合反応によるプラズマ自身の燃焼により、外部からの加熱入力無しで高温プラズマ状態を維持することができます。その間、水素燃料は核融合反応によって減少していくため、核融合プラズマを定常に維持するためには外部から継続的に燃料を供給する必要があります。言うなれば、ガスコンロの火を灯すためにはガスを供給する必要があることと同じです。その有効な供給法のひとつに固体水素ペレット入射法があります。一般的に、ペレットは『小さな粒』という意味で用いられますが、その意味のとおり、水素を摂氏マイナス263度まで冷やして作った固体水素の氷粒(直径数ミリメートル)を秒速1000メートル以上の速度でプラズマに入射します。なお、音の速度は秒速340メートルなので、音速よりも3倍近く速い入射速度です。ペレットは1億度を超える高温のプラズマによってあっという間に(1000分の1秒程度)溶発してガスになり、プラズマの燃料となります。しかしながら、ペレットは溶発しながらもプラズマ中を高速で飛んでゆくのプラズマ内部まで効率よく水素燃料を供給できます。これが、ペレット入射法の最大の特長と言えます。

図1(a)は大型ヘリカル装置(LHD)で用いられている固体水素ペレット入射装置を示しています。小型冷凍機を用いて細い管の中にペレ

ットを作り、その管の一方に高圧のヘリウムガス(1気圧の30-40倍程度)を詰めて高速バルブを開き、ペレットを一気に加速します。加速の原理は吹き矢を想像していただくと分かりやすいと思います(図1(b))。最近、ペレット入射装置はアップグレードされ、以前より2倍の個数のペレットを入射することができるようになりました。

さて、ペレットはどのように溶発し、どのようにプラズマに吸収されるのでしょうか?この疑問に答えることが、燃料供給法を確立するために極めて重要です。ペレットは溶発する際、ペレットの周りに弱電離した高密度プラズマ塊(プラズモイド)を形成します。プラズモイドは散逸して、最終的にプラズマに吸収されるのですが、その振る舞いは、プラズマとの相互作用を受けて大変複雑です。このプラズモイドの挙動を理解、さらには正確に予測することができれば、将来の核融合炉における燃焼制御や燃料供給効率の向上を可能にすることができます。

プラズモイドは磁力線に沿って長細く伸びながら、光を発していることが観測されています(図2(a))。実はこのプラズモイド、高温プラズマが発する光の数倍強い光を放ちながら進んでいます。私たちは、プラズモイドから発せられた光からプラズモイドの内部情報(電子温度、電子密度)を得るためのイメージング計測手法を

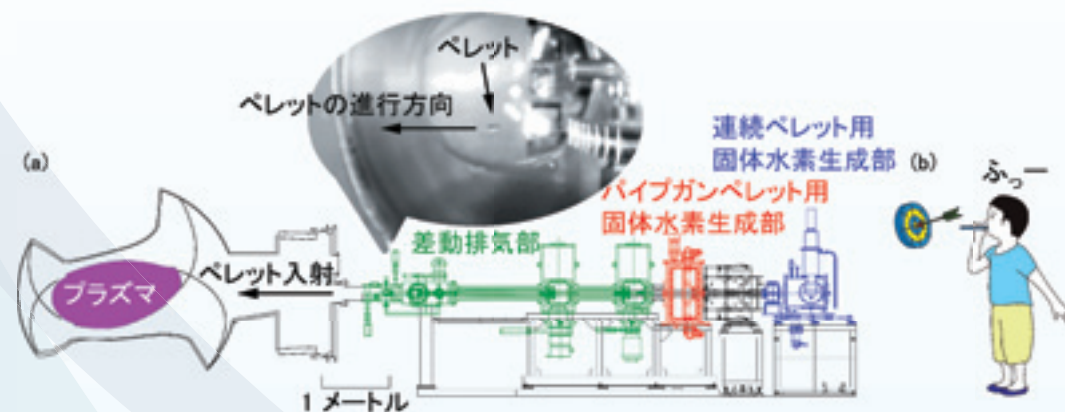


図1 (a)LHDに設置している固体水素ペレット入射装置とペレットの画像。二種類のペレット入射装置が集約されています。(b)ペレットの加速は吹き矢と同じ原理を利用しています。

開発してきました。この計測により得られたプラズモイドの基本的なパラメータは、ペレットの溶発過程におけるプラズモイドの挙動を理解・予測するために決定的な情報となります。

本計測では、分岐されたイメージファイバと高速度カメラを用いて観測を行っています。イメージファイバは医療用内視鏡等にも用いられており、7万5000本もの光ファイバを束ねたもので、プラズモイドの詳しい空間分布を得ることができます。また、高速度カメラは毎秒最大10万枚もの画像を得ることができます(一般的に、デジタルカメラの動画で得られる画像は、せいぜい毎秒数10枚です)。高速度カメラは例えば、野球の試合等でスローモーション映像を撮るために用いられていますが、ペレットの溶発等、速い時間スケールの物理現象を観測する上でも駆使されています。プラズモイドの光は対物レンズの付いたイメージファイバで観測され、最終的に1台の高速度カメラに結像されます。各ファイバには異なる狭帯域光学フィルタが装着されています。狭帯域光学フィルタとは、ある波長の光だけを透過するフィルタのことを言います。

プラズモイドの光のスペクトル(図2(b))は、プラズモイドの電子密度、電子温度に依存しています。例えば、図2(c)に電子密度の異なる条件における、ある波長領域のプラズモイドの光のスペクトルを示しています。電子密度が高い場合は、スペクトルの裾野がより広がっている

ことが分かります。透過幅の広い狭帯域光学フィルタと狭い狭帯域光学フィルタを用いし、それらを通してプラズモイド光の強度を見てみます。すると、電子密度が低いとき、スペクトルはピークしているもので、いずれのフィルタでも得られる光の強度は同等です。一方で、電子密度が高いときは、スペクトルの裾野が広がっている分だけ透過幅の広いフィルタの方が得られる光の強度は大きくなります。すなわち、各フィルタで得られた光の強度(図2(a))を比較することにより、光のスペクトルを再構築することができ、プラズモイドの電子密度分布、電子温度分布を求めることができるわけです。図3に典型的なプラズモイド内の電子温度、電子密度のイメージング結果を示しています。プラズモイドの中には、温度が約1万度、密度が10京個/ccのオーダの電子が分布しており、この時のターゲットとなるプラズマ本体の密度は中心で20兆個/ccですから、プラズモイドの密度は約5000倍も高いことが分かりました。また、プラズマの温度によって、プラズモイド内の電子密度分布が異なっていることも分かってきました。今後、様々なプラズマ条件下に入射されたプラズモイドの内部分布を調べ、ペレット溶発の素過程の理解に迫りたいと考えています。また、本計測手法は海外の核融合実験装置でも興味を持たれ、海外の研究機関との共同研究がスタートしています。(高密度プラズマ物理研究系 助教)

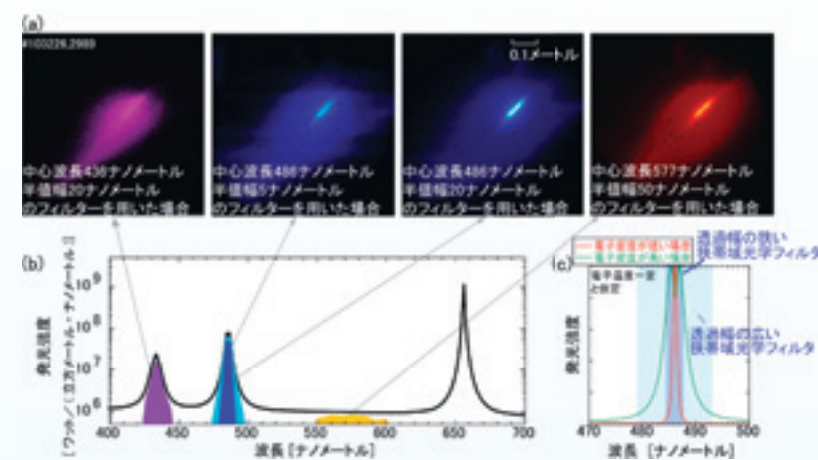


図2 (a)典型的なプラズモイドの発光画像。同じプラズモイドを異なる狭帯域光学フィルタを通して観測しています。各画像で発光強度が異なっており、これらの画像の強度を比較することにより、プラズモイドの内部情報を得ることができます。(b)プラズモイドの発光スペクトル例。スペクトルに複数のピーク(バルマー系列と言います)が存在していることが分かります。(c)異なる電子密度条件下におけるプラズモイドの発光スペクトル(波長領域を470-500ナノメートルに拡大)。緑線は電子密度が高い場合、赤線は電子密度が低い場合のスペクトルを示しています。プラズモイドの光のスペクトルはプラズモイドの電子密度、電子温度に依存します。

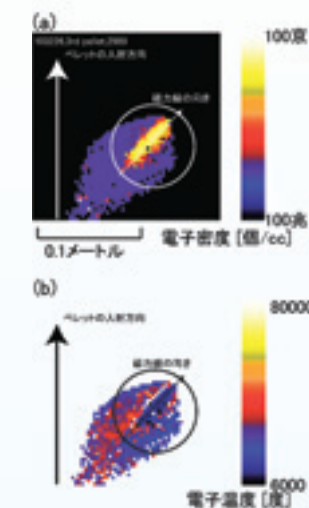


図3 プラズモイドのイメージング結果を示しています。(a)は電子密度イメージング、(b)は電子温度イメージングです。なお、電子密度は対数スケールで表しています。○で囲まれた部分にプラズモイドのイメージングが示されています。