

第3の燃料供給手法：超音速ガスパフ (スーパーソニックガスパフ：SSGP)

村上昭義・宮澤順一

プラズマに燃料水素を供給する手法は、大きく分けて以下の2つの手法がこれまでにありました。

1つは、ガスパフと呼ばれるもので、真空容器内に燃料ガスを噴出するものです。この手法は、もっとも簡便な手法でこれまで多くのプラズマ発生装置に使用されてきました。しかし、将来の核融合炉を模擬できるような高温のプラズマにおいては、従来のガスパフではプラズマの密度を上げるのに限界があることがわかってきました。

これを補う手法として、ペレット入射と呼ばれるもう1つの手法があります(この話の前に掲載されています)。この手法の場合、プラズマ中心部に直接、粒子を供給できるため、供給効率に優れています。本研究所の大型ヘリカル装置では、このペレット入射によって中心部に急峻な密度分布をもつ超高密度のプラズマが生成されています。一方、このペレット入射には、マイナス263℃という極低温や高速で射出するための設備が必要で、固体水素の塊がプラズマになる過程で、プラズマの温度を大きく下げてしまいます。

そこで、これら2つの手法の中間的な特性を持つ新たな燃料供給手法として超音速ガスパフと呼ばれる手法を開発し、核融合炉における粒

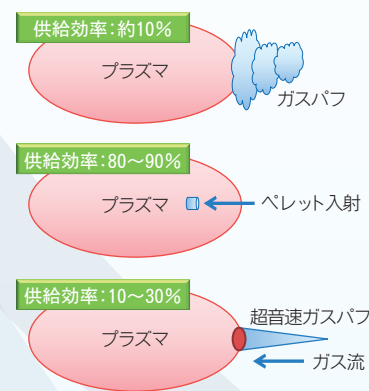


図1 ガスパフ、ペレット、超音速ガスパフそれぞれの場合における燃料供給のイメージ図と供給効率の目安。

子供給に応用しようと考えています。(図1に3種類の供給イメージを示します。)この手法は、単位時間あたりにプラズマへ供給する粒子の数が従来のガスパフより多く、パルス状にガスを連続入射することができます。従来のガスパフより10倍から20倍程度の高い圧力のガスを、超音速ノズル(ラバールノズル)を介して噴出し、収束性の高いガス流をプラズマへ供給します(図2参照)。

超音速ガスパフに使用されているソレノイドバルブは、従来のガスパフで使用されているピエゾバルブより、20倍程度の耐圧があり、時間応答特性に優れています。超音速ノズルは、ロケットや航空機のエンジンなどに使用されていますが、ばらばらになっている気体の流れを整え、音速よりも速い超音速の流れを作るものです。超音速ガスパフは、これらの組み合わせで、超音速ガス流を発生させプラズマ周辺部の密度制御性を向上させました。

ペレット、超音速ガスパフ、従来のガスパフの

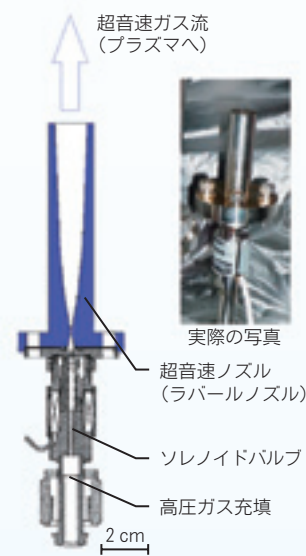


図2 超音速ガス流を発生させるソレノイドバルブと超音速ノズルの断面図と実際の写真。

それぞれの場合における平均のプラズマ密度の時間発展を図3(a)に示します。0秒でそれぞれの手法を用いた入射が行われていますが、超音速ガスパフの密度の到達値は、ペレットとガスパフの間であることがわかります。密度の上昇の仕方に注目してみても、ペレットが1番急峻な上昇を示し、従来のガスパフがゆっくりとした密度上昇を示していますが、超音速ガスパフは、両者の中間の上昇の仕方を示しています。ペレットのようにプラズマ中心部に粒子を供給しているわけでない超音速ガスパフが、なぜペレットと従来のガスパフの中間の性質を示すのでしょうか。それは、超音速ガスパフによって供給された粒子が拡散によってプラズマの中へ運ばれる量がガスパフより多いことに起因します。プラズマに入射されたガスは、すぐに電離し、そこでの密度を増加させます。超音速ガスパフは、その特長によって、周辺部の密度をガスパフより大きく上昇させます。図3(b)に密度分布の時間変化を示します。横軸の規格化小半径は、0がプラズマ中心部で1がプラズマの端を表します。①入射前は低い密度でしたが、超音速ガスパフが入射されて②35ミリ秒では、周辺部の密度が大きく上昇しているのがわかります。プラズマとなった粒子は、密度の高いところから低いところへ流れるように内側の密度を増加させます。水桶に熱湯を入れると、しばらくして温度が一定になりますが、それは、熱湯

の温度が全体に拡散されるためです。それと同じように、プラズマの周辺部に供給された密度の高い粒子が、拡散によって中心部に供給されていきます。その後、プラズマ全体の密度が均一化していることが入射③135ミリ秒後の分布からわかります。このようにして、超音速ガスパフは、従来のガスパフより供給効率を高くできる特性があるのです。

上記の供給特性の他に、超音速ガスパフは高い繰り返し頻度で粒子を供給することができます。最大で500ヘルツ(1秒間に500回)の繰り返しで入射できることがテストでわかりました。この特長を使ってプラズマに密度の揺動を起こす実験も行っています。パルス幅1ミリ秒を50ヘルツで入射した実験では、周辺部の密度が入射周期に対応して変動することを観測できました(図4参照)。このような密度揺動を励起することで、プラズマ中に存在する揺動を制御することなどを目的としたプラズマ物理の深い理解に関わる実験にも使用されています。

村上昭義: 総合研究大学院大学
物理科学研究科 核融合科学専攻
5年一貫制博士課程5年
日本学術振興会特別研究員
宮澤順一: 核融合システム研究系 准教授
総合研究大学院大学
物理科学研究科 核融合科学専攻/併任

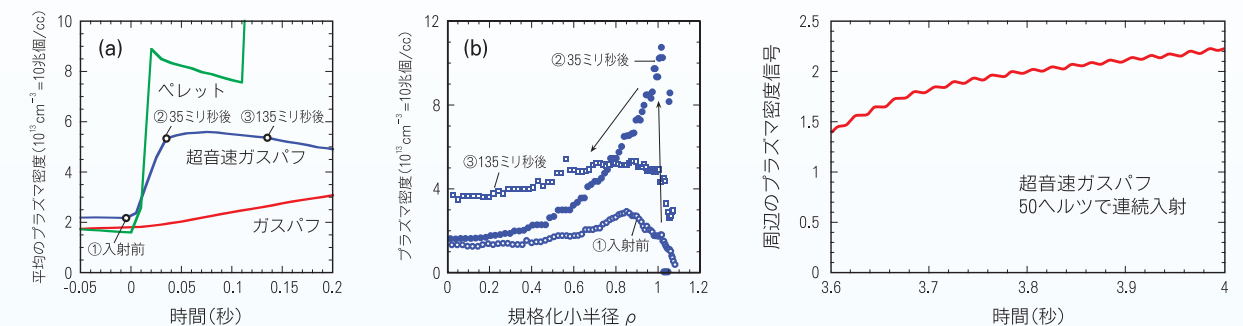


図3 (a)は平均のプラズマ密度の時間発展を示します。ペレット(緑)、超音速ガスパフ(青)、ガスパフ(赤)が時刻0秒からそれぞれ入射されています。このとき超音速ガスパフのガス圧は50気圧でパルス幅は30ミリ秒(ms)です。(b)は超音速ガスパフ入射時のプラズマ密度分布の変化を示します。(a)の超音速ガスパフの放電をプラズマの規格化小半径として分布で示しています。①(○)は超音速ガスパフの入射前の密度分布を、②(●)は超音速ガスパフが入射されてから35ミリ秒(ms)後の密度分布を表しています。このとき、周辺部の密度が顕著に上昇していることがわかります。③(□)は入射後135ミリ秒(ms)後を示し、②の密度がプラズマ全体に拡散された分布を表しています。

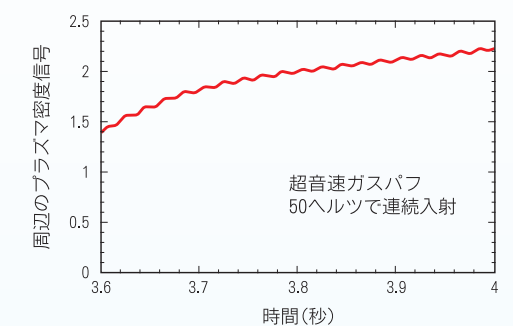


図4 超音速ガスパフを50ヘルツ(Hz)で連続入射したときの、周辺のプラズマ密度信号を示します。