

令和元年6月25日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18307

研究課題名(和文)革新的ピストンを用いた2段ガス加速方式による固体水素ペレット入射の高速化研究

研究課題名(英文) Study of high-speed solid pellet injection by two-stage gas acceleration using innovative piston

研究代表者

本島 巖 (MOTOJIMA, Gen)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00509507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合燃料供給法の一つである固体水素ペレット入射法において、「アイスピストン」を用いたこれまでにない2段ガス加速方式を提案し、実験的に検証するものである。これまでの金属製のピストンの代わりとなるものとして、あらかじめ大型サイズのペレット「アイスピストン」を生成しておき、それを射出して高圧圧縮ガスを作り出し、2段ガス加速方式として活用した。アイスピストンを駆動するための大流量の高速射出弁を製作したのち、低温冷凍装置をチャンバに組み込み、アイスピストンの生成とその射出による圧縮性を調べた。その結果、アイスピストンを使って、200 kPaのガスを30 MPa以上まで圧縮することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で行ったアイスピストンを用いた加速方式は、原理的に、「高速」かつ「繰り返し」で、物体を加速することが可能な方式である。よって、核融合燃料供給として本成果を活かすことが可能であるのはもちろんのこと、核融合燃料供給の研究だけにとどまらず、スペースデブリ実験など、物体を加速させることが必要な実験にも応用できるものである。

研究成果の概要(英文)：The high-speed solid pellet injection by two-stage gas acceleration using an innovative piston has been developed. The innovative idea in this study is the use of solid-ice (ice piston) instead of the metal for the material of the piston. In this study, the fast valve with a large amount of gas flow was manufactured. The test chamber with the valve and a compact cryocooler was prepared. The compression test shows that high pressure over 30 MPa was attained using the ice piston.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：燃料供給 固体水素ペレット 高速化 アイスピストン

1. 研究開始当初の背景

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る。一方、燃料は核融合反応によって減少していくため、定常な炉心プラズマ維持のためには外部からの継続的な燃料粒子供給制御が必要となる。「固体水素氷粒ペレット」は燃料粒子供給の有力な方法の一つであり、大きさ数ミリメートル、速度数千メートル/秒でプラズマへ入射され、プラズマ中心部へ効率良く燃料を供給できる。プラズマ中心への燃料供給によりプラズマ密度分布を尖塔化できれば、炉心プラズマの性能を上げられることがこれまでの研究で予想できている。すなわち、同じ核融合出力に対して必要なプラズマ密度を低くでき、プラズマ制御性を容易にすることができる。

しかしながら、核融合炉では想定されるプラズマが非常に高温となるため、ペレットがプラズマ中心に到達する前に溶発してしまうことが懸念されており、核融合炉において確実にプラズマ中心に燃料を供給できるペレット入射法の開発が必要である。その開発の大きな鍵のひとつは、射出速度の高速化である。高速化することにより、プラズマ周辺部での溶発が抑えられ、より中心まで燃料を供給できる。現在までに実用化されているペレットの加速方法の一つに、圧縮したガスの膨張を利用してペレットを加速する圧縮1段ガス加速方式(いわゆる「吹き矢」と同じ原理)がある。しかしながら、ペレット速度は現状 1.4 km/s 程度までに留まっている。それ以上の高速化を達成するには、新規の加速方式を開発する必要がある。ペレットの高速化の方法の一つに、2段ガス加速方式がある。2段ガス加速方式は、圧縮ガス射出方式ではあるが、ピストンを使うことで加速ガスの圧縮化を促進し、100 MPa オーダの高圧ガスを作り出して射出することができる(1段ガスは約 4 MPa)。図1に理論計算に基づく加速ガス圧 - 射出速度の関係を示す。2段ガスにより 100 MPa 以上の加速ガス圧が達成できれば、2.5 km/s 以上の入射速度が得られる。これは1段ガスに比べ約2倍の射出速度である。2段ガス加速方式の開発は、現在米国オークリッジ国立研究所が、過去には国内で京都大学が行っており、2.5 km/s 程度のペレット入射が達成されている。しかしながら、これまでの2段ガス加速方式で用いているピストンはチタン合金等の金属製が使用されており、射出毎の動作時に、射出管との摩擦によりピストンが劣化するという報告があり、長期間の動作に対しその信頼性には改善の余地がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、長期間でも信頼性のある2段ガス加速方式の開発のため、駆動による金属ピストンの摩耗を解消できる、斬新な発想に基づく2段ガス加速方式を開発することである。具体的には、これまでの金属製のピストンの代わりとなるものとして、プラズマへ入射するペレットとは別に、あらかじめ大型サイズのペレット「アイスピストン」を生成しておき、それを射出して 100 MPa オーダの高圧圧縮ガスを作り出し、2段ガス加速方式として活用する。本研究では、高圧圧縮ガス生成のために、金属製ピストンを用いず、その代用として大サイズのアイスピストンを用いていることに新規性がある(図2参照)。高圧圧縮ガスを作り出した後は、アイスピストンは直ちに気化し、真空ポンプによって排気される。すなわち、アイスピストンは、1回の射出のみの使用となり、次の入射の際には、新しいアイスピストンがあらためて生成される。射出毎に新しいピストンを用意することになるので、金属製ピストンでは得られない高い信頼性を獲得することが出来る。また、真空ポンプによって排気された水素は、再

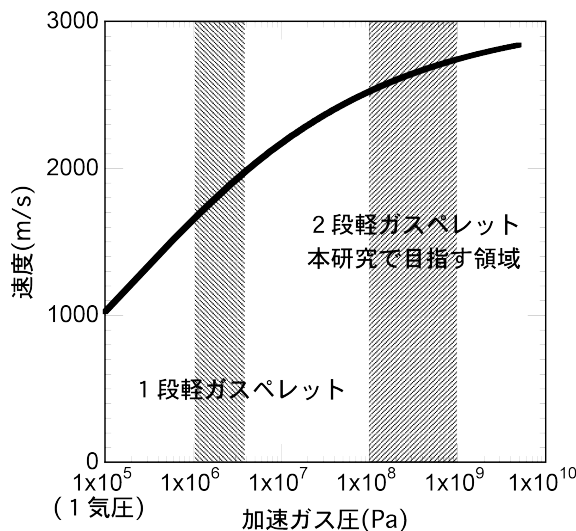


図1 理論計算 (Ideal Gun Theory[1]) に基づく加速ガス圧と射出速度の関係。

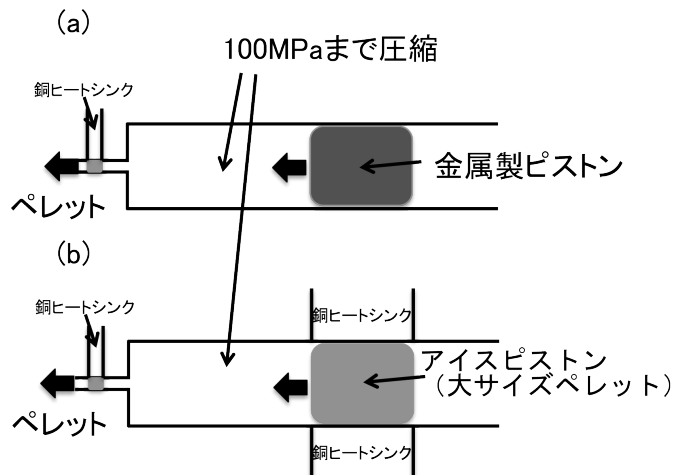


図2 (a)これまでの2段ガス加速方式、(b) 本研究で開発する2段ガス加速方式。

度アイスピストンの生成に活用することが出来、循環させれば水素燃料を消費することもない。これまで2段ガス加速方式で使われていた金属製ピストンでは、1回のペレット射出ごとにピストンを交換することは不可能かつ非効率であり、この新しい方法を採用すれば、ピストンの摩耗の心配は解消され、信頼性かつ高稼働に適応した2段ガス加速方式を製作することができる。本研究成果は、ペレット入射装置の高速化研究に大きなインパクトを与え、将来の核融合炉における有力なペレット加速法として提起することができる。また、2段ガス加速により安定的に入射できる高速のペレットを用いてプラズマ実験を行うことにより、ペレット燃料吸収位置を、これまでよりも大きく変化させて実験を行うことができ、ペレット溶発理論の検証、ひいては、ペレット燃料吸収過程の核融合炉に向けた精度ある予測に貢献することができる。さらには、航空宇宙工学の宇宙ステーションとスペースデブリ衝突における衝撃波研究にも貢献できると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究では、主に(1)大流量の高速射出弁の製作および(2)アイスピストンを用いた加速ガスの圧縮化に関して研究を進めた。(1)については、必要な流量の検討および実際の製作、(2)については、アイスピストンの生成、さらには加速するための装置の設計および製作を行った。具体的な研究結果を以下に示す。

### 4. 研究成果

#### (1) 大流量高速射出弁の開発

アイスピストンを駆動させるためには高流量かつ高速の射出弁が必要である。繰り返しの稼働を必要としなければ破裂弁を使うこともできるが、本研究では、繰り返しの稼働を可能とすべく、アイスピストンを駆動するための大流量の高速射出弁を製作した。アイスピストンのサイズを20mmの円筒形と仮定した場合、アイスピストンの加速に必要な加速ガス流量は約4000 Pa m<sup>3</sup>であり、その流量を満たす高速射出弁を製作した。アイスピストンの加速ガスはヘリウムとし、最大使用ガス圧力(P)を4-8 MPaに設定した。また圧力上昇度 dP/dt は13-27 MPa/msとしたほか、最大圧力への到達時間が約0.3 msとなるようにした。製作はPelin社に依頼し、製作後、高速射出弁のガス流量試験を行い、上記の仕様を満たしていることを確認した(図3)。

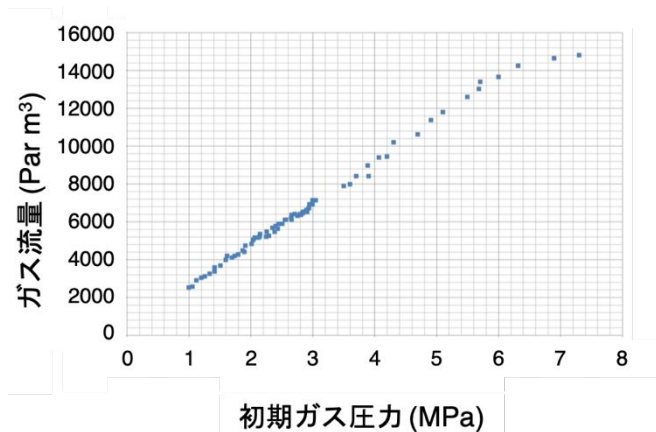


図3：高速射出弁の初期ガス圧力とガス流量の関係。

#### (2) アイスピストンを用いた加速ガスの圧縮化

大流量高速射出弁を製作した後、アイスピストンを生成するための装置を作成した。本装置では、高速射出弁、低温冷凍装置のほか、アイスピストンのガイド用のチューブから構成されている(図4)。本研究ではアイスピストンにより加速ガスを圧縮化できることを検証することを目的とし、アイスピストンのチューブ端部は閉止して実験を行った。

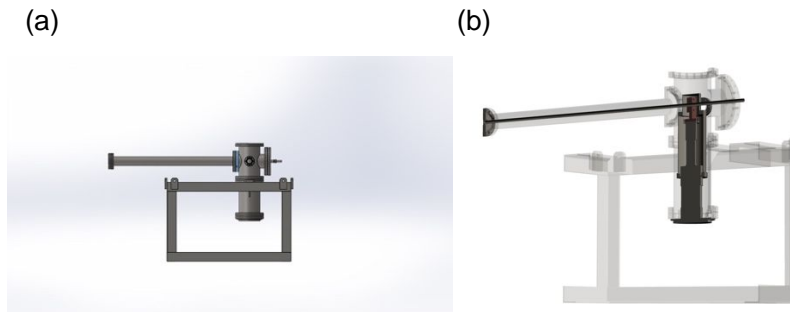


図4：試験装置(a)外観、(b)内部構造。

圧縮ガスとして三重点が比較的高い、窒素を用いた。冷凍機のスイッチを入れてから2時間程度で、ヒートシンクが常温から20 K程度まで冷却された。温度の測定にはセルノックスを用い、ヒートシンク部にボルトで締結した。冷却された後、窒素ガスを200 kPa 充填し、窒素が固化するまで数時間その状態を保持した。その後、1.5-2 MPa のヘリウムを加速ガスとして用いて、高速射出弁によりアイスピストンの射出を行い、圧力上昇を圧力計により測定した。圧力計は米国 PCB 社の圧力センサを使用した。圧力計で測定した結果、200 kPa に充填されていた窒素ガスが瞬間値として30 MPa 程度まで上昇した(図5)。30 MPa に上昇するまでに要した時間は5 msec 程度であった。本研究結果は、本研究課題であったアイスピストンにより高圧縮化が可能になったことを示している。100 MPa までは到達できず、初期ガス圧力を変えるなどして、高圧縮に最適な実験条件を探し出す必要がある。

本研究では、フォトダイオードを用いたアイスピストンの速度計測やシャドウグラフによるペレットサイズの計測はしなかった。アイスピストンの材料として、今回は三重点の比較的高い窒素を用いたこともあり、窒素が固化しきれていない可能性があるほか、想定よりヒートシンクの温度が高くなっていたこともあり、アイスピストンの強度が低かった可能性がある。三重点の低い水素をアイスピストンとして用いるほか、ヒートシンクの温度を想定よりも上昇させている原因を究明してさらに冷却温度を下げれば、さらなる圧縮化が可能であると考えられる。また、アイスピストンを用いて実際に固体水素を射出することが今後の課題として挙げられる。

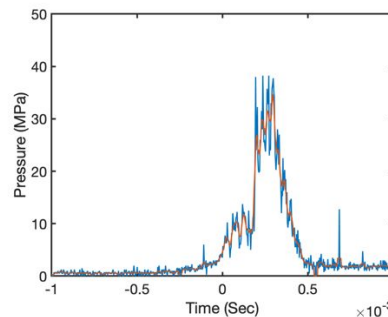


図5：チューブ内の圧力時間発展。

## 5．主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Gen Motojima et al., “High-density experiments with hydrogen ice pellet injection and analysis of pellet penetration depth in Heliotron J”, Plasma Physics and Controlled Fusion in Press.

### 〔学会発表〕(計2件)

G. Motojima et al., “High-density experiments with pellet injection and analysis of pellet penetration depth in Heliotron J”, 19th Coordinated Working Group Meeting, 2019

G. Motojima et al., “Pellet injection to high density plasmas on Heliotron J”, 18th Coordinated Working Group Meeting, 2018