

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360453

研究課題名（和文） コンパクトトロイドおよび極超音速ガスジェットの選択的入射と燃料粒子供給過程の研究

研究課題名（英文） Study on selective injection of a compact toroid and a supersonic gas jet, and its fueling process

研究代表者

福本 直之（FUKUMOTO NAOYUKI）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90275305

研究成果の概要（和文）：

磁化同軸プラズマガンであるコンパクトトロイド（CT）入射装置を用いて、CT プラズマを生成・加速し、ガスを注入したセルに入射する実験を行った。これで、荷電交換反応により CT プラズマの中性粒子化を促進させ、高速ガスジェットの生成を試みた。その結果、現状では荷電粒子が一部に残るものの、CT 速度相当の高速ガスジェット生成に成功した。これにより、CT プラズマと極超音速ガスジェットの選択的入射が可能となった。

研究成果の概要（英文）：

We conducted an experiment to inject an accelerated compact torus (CT) plasma into a cell filled with neutral gas by using a CT injector which is a kind of magnetized coaxial plasma gun, and then attempted to promote neutralization of the CT through charge-exchange reaction to produce a high speed gas jet. As a result, a high-speed gas jet comparable to the accelerated CT has been successfully produced, although plasma partially remained. This leads to selective injection of a CT plasma and a super-sonic gas jet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	11,400,000	3,420,000	14,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，核融合学

キーワード：炉心プラズマ，コンパクトトーラス，燃料補給，高速ガス流

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め熱核融合炉における燃料粒子補給は重要な課題であり、これまで、従来からのガスパフによる補給以外に、固体ペレット入射や超音速ガス入射の技術研究開発が行われてきた。トカマクやヘリカル的大型装置では、固体ペレット入射による粒子補給

で良好な実験結果が得られ、重要なツールとしてその優位性が示されている。しかし、ITER 級の炉心プラズマになると、ペレット入射法でも燃焼制御が必要とされる炉心プラズマ中心領域への燃料粒子補給の困難さが指摘されている。そこで、「磁化同軸プラズマガン方式を用いた CT 入射法」が提案さ

れ、日本、米国、カナダで装置開発と入射実験研究が行われてきた。これまでに当研究グループでは、CT 入射装置 (UH-CTI 装置) を開発し、日本原子力研究開発機構との共同研究で、中型高性能トカマク装置 JFT-2M での CT 入射実験を行った。その一連の実験を通して、プラズマの中心領域への CT 入射が確認され、500 μ s 以下の速い密度上昇や最高約 40% の燃料供給効率が得られるなど、良好な結果が得られている。近年では、ロシアにおいて、超音速ガスパフの約 100 倍の速度をもつガスジェット入射装置が開発され、CT 入射だけでなく固体ペレット入射も超える燃料粒子供給法として提案された。そして、同国のスフェリカル・トカマク (ST) 装置 Globus-M において、入射実験が行われた。このガスジェット入射は、小型の同軸プラズマガンで生成・加速した高密度プラズマジェットを再結合により中性粒子化し、極超音速ガスジェットとして入射する技術である。我々は、そのガスジェット入射装置が磁化同軸プラズマガンである CT 入射装置と基本構造が同じであることから、CT 入射装置の運転条件・方法の工夫や装置改造することで極超音速ガスジェットと CT プラズマを選択的に入射可能な装置の開発の着想に至った。そして、CT 入射とともに、ST プラズマへの入射実験を計画した。

2. 研究の目的

本研究では、磁場閉じ込め核融合プラズマの中心領域への燃料粒子補給を主眼において、CT プラズマと最も先進的な極超音速ガスジェットを選択的に入射可能な装置を開発し、両入射法の長所を相補的に組み合わせることで今までにない燃料粒子補給法を確立することを目的とした。また、ST プラズマへ入射実験を通して、CT およびガスジェット入射による燃料粒子供給過程の解明も目指した。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

CT 入射装置は、核融合科学研究所で LHD 用の先進的燃料補給装置として開発研究を行ってきた SPICA (SPheromak Injector using Conical Accelerator) を用いた。本装置は、磁化同軸プラズマガンで、これまで CT 加速性能を重視して CT 生成・加速の二段電極構造および二段電源を採用してきた。ここにきて LHD へ実際の導入を想定して装置の運転および保守が容易な CT 生成・加速部の一段化に取り組み、その運転に成功した。本研究においても CT 生成・加速部を一段化した SPICA 装置を用いて実験を行った。なお、CT 入射装

置から CT 生成の余剰ガスが中性粒子化セルへ流入することによる影響を抑えるため、CT 生成部のガスパフバルブをピエゾタイプから高速ソレノイドタイプに置き換えた。

一段化 SPICA 装置における CT パラメータの達成値は、 $v_{CT} \sim 100$ km/s, $n_{CT} \sim 1 \times 10^{22}$ m $^{-3}$ が得られた。サンプルショットから算出された CT プラズマの運動エネルギー密度は、 $D_{CT} = 34$ kJ/m 3 (水素 CT: $v_{CT} = 76$ km/s, FWHM での平均密度 $n_{CT, FWHMave} = 7.1 \times 10^{21}$ m $^{-3}$) であった。この粒子を全て中性粒子化して入射したとすると入射総粒子数 N_{CT} は約 2×10^{20} 個 (FWHM) と見積もられる。

中性粒子化セルは、真空容器内に移送管を兼ねた直線管 (1.8m, 容積 5.5×10^{-2} m 3) を設置した。そのパイプ内に真空容器の中央部に設置したピエゾバルブから水素ガスを注入した。水素ガスの拡散時間から、CT プラズマが通過する時間におけるガス圧は、約 7×10^{-2} Torr と見積もられる。CT プラズマの中性粒子化の数値計算結果からは、中性粒子化セルのガス圧が 5×10^{-4} Torr 以上で中性粒子化が可能であることが示されており、十分なガス圧を得ている。

(2) 実験方法

本研究では、CT 生成・加速部を一段化した SPICA 装置に中性粒子化セルを接続し、さらにセル終端部にはフラックス・コンサーバ (FC) を接続した。そして、加速 CT プラズマを中性粒子化セルへ入射し、中性粒子フローを生成する実験を行った。実験では、FC および FC 直前のポートにおいて、高速圧力センサーによる計測とイオンゲージのフィラメント発光強度の観測により中性ガス圧変化を調べた。入射装置の加速電極部から FC まで CT 進行方向に沿った 4 ポートには PIN ダイオードを設置し、可視光の発光強度信号から CT プラズマ/高速ガスジェットの速度等を調べた。また、レーザ干渉計を CT 進行方向に沿って移動させ、各点における平均電子密度を調べた。また、CT プラズマ/高速ガスジェットが通過するよりも長い露光時間ではあるが、セル終端部において可視分光計測を行った。

4. 研究成果

(1) CT 入射装置 SPICA を用いた極超音速ガスジェット入射装置開発の研究では、加速 CT プラズマを中性粒子化セルに入射し通過させたとき、高速圧力センサーによる計測とイオンゲージのフィラメント発光強度の観測による中性ガス圧変化から、CT 速度相当の高速ガスジェットが中性粒子化セル終端部およびそれに続くフラックスコンサーバ (FC)

に到達していることが明らかとなった。また、セル末端部におけるレーザ干渉計による平均電子密度計測から、そのピーク値が SPICA 装置 CT 射出部での値の 10% 程度にまで減少していることが分かった。これらの結果から、CT プラズマは完全には中性粒子化されていないが、CT 速度相当の高速ガスジェット生成に成功するに至った。この成果により、SPICA 装置と中性粒子化セルを用いることで CT プラズマと極超音速ガスジェットの選択的入射が可能となり、装置開発としての目標はほぼ達成された。

また、この実験を通して明らかとなった中性粒子化過程の物理現象として、高速の中性ガスジェットの減速がみられた。また、図 1 の様に、発光強度の波形には、ガスジェット先端部に急峻なパルス形状がみられ、その部分は平均電子密度波形と対応していた。その先端部において、荷電交換反応が支配的で中性粒子化が進む状況にありながら、電離が起こっている可能性も示された。また、数値計算による研究から、SPICA の実験に近い条件下で、CT プラズマは荷電交換反応により約 70% が中性粒子化されることが分かった。その内部には磁場が残っており、荷電交換により中性粒子から低速イオンとなった背後の粒子が内部に捕捉されることも示された。その捕捉されたイオンの密度は、中性化された粒子の密度よりも 1 桁小さく、CT プラズマ / ガスジェットの中心軸付近に長さ方向（進行方向）に広く分布することも分かった。この構造は、実験におけるガスジェット先端部に電子密度のピークがみられるものと異なる。本実験のパラメータ領域におけるイオンや中性粒子の種々の反応断面積からは、荷電交換反応が支配的である。このガスジェット先端部における電子密度の高い領域については、セル中におけるイオンと中性粒子の間の流体的な衝撃波や CT プラズマの先端部と後続部との間の電磁流体的な衝撃波の発生とそれによる影響が考えられる。

CT 速度相当の高速ガスジェットの生成には成功しているが、これらセル中での現象を明らかにすることで、さらに効率的な高速ガスジェット生成を可能とする SPICA の運転条件やセル条件の最適化が期待される。

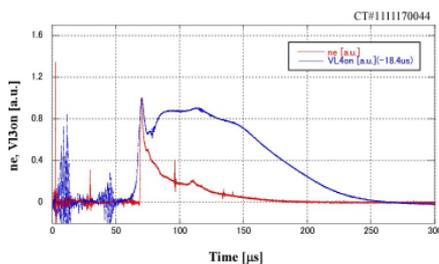


図 1 中性粒子化セル末端部における可視光発光強度信号と平均電子密度信号

(2)CT および極超音速ガスジェットの入射の研究に関しては、九州大学の QUEST 装置を入射対象として実験の準備を進めていた。しかし、QUEST 装置と CT 入射装置接続のための入射装置および電源移設で、当初予定した電源設置方法に対して安全性の観点から耐震強化を図ることになり、補強架台を含めた耐震構造解析や他の設置方法の検討を行った。そのため、装置と電源はより安全性の高い設置方法で移設作業を完了したが、実際の入射実験には至らなかった。ただし、その間も入射実験に向けた研究は続け、SPICA 装置での成果を入射実験に有効的に反映できる様に、CT 入射装置関連機器の開発研究を行った。また、プラズマの電子密度計測に不可欠なレーザ干渉計の測定対象に適応した設計開発も行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

T. Watanabe, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, M. Nagata, Computation of Neutral Gas Flow Generation from a CT Neutralization Fuel-Injector, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, 2405042-1-4, DOI: 10.1585/pfr.7.2405042

N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Kikuchi, T. Takahashi, S. Masamune, T. Asai, J. Miyazawa, M. Goto, H. Yamada, Optimization study of super-high speed neutral particle flow injector for LHD by using CT injection technology, Annual Report of National Institute for Fusion Science, 査読無, p.164 (2011). <http://www.nifs.ac.jp/report/annrep11/pdf/164.pdf>

N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Kikuchi, K. Hanada, Experiments of Fuelling by CT Injection on QUEST, Annual Report of National Institute for Fusion Science, 査読無, p.535 (2011). <http://www.nifs.ac.jp/report/annrep11/pdf/535.pdf>

S. Fujii, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, M. Nagata, Monte Carlo Simulation on a Neutralization Process of an Accelerated Compact Torus Plasma, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 38, pp. 1473-1477 (2010). DOI: 10.1109/TPS.2010.2045397

N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Kikuchi, T. Takahashi, S. Masamune, H. Himura, A.

Sanpei, T. Takahashi, T. Asai, Y. Hirano, M. Inomoto, M. Irie, J. Miyazawa, H. Yamada, Y. Narushima, Optimization study of super-high speed neutral particle flow injector for LHD by using CT injection technology, Annual Report of National Institute for Fusion Science, 査読無, p.103 (2010).

<http://www.nifs.ac.jp/report/annrep10/pdf/103.pdf>

N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Kikuchi, K. Hanada, Deep Fuelling Experiments on QUEST Using CT Injection, Annual Report of National Institute for Fusion Science, 査読無, p.534 (2010).

<http://www.nifs.ac.jp/report/annrep10/pdf/534.pdf>

N. Fukumoto, J. Miyazawa, T. Takahashi, M. Nagata, M. Goto, T. Asai, S. Masamune, Y. Kikuchi, H. Yamada, Development of a neutral particle flow fueling system by using a compact torus plasma injector for LHD, Collection of NIFS Collaboration Research 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 査読無, NIFS-1002, pp.319-324 (Proceedings of 23rd IAEA FEC, FTP/P1-05) (2010).

<http://www.nifs.ac.jp/report/nifs1002.html>

[学会発表](計12件)

T. Watanabe, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, M. Nagata, Computation of Neutral Gas Flow Generation from a CT Neutralization Fuel-Injector, 21st International Toki Conference (ITC-21), 2011.11.28, 岐阜県土岐市(セラトピア土岐).

N. Fukumoto, J. Miyazawa, M. Goto, T. Takahashi, Y. Kikuchi, M. Nagata, T. Asai, S. Masamune, H. Yamada, Change in parameters of a CT passing through a neutralization cell, and its relation to production of a neutral particle flow, Plasma Conference 2011, 2011.11.23, 石川県金沢市(石川県立音楽堂)

福本直之, 加速 CT プラズマを用いた高速中性粒子フロー生成, 平成 23 年度 NIFS 共同研究会「高ベータプラズマにおける自発的フローと三次元構造の形成」, 2011.12.21, 核融合科学研究所

T. Watanabe, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, M. Nagata, Computation of Neutral Gas Flow Generation from a CT Neutralization Fuel-Injector, Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma,

2011.8.18, Seattle, WA, USA.

N. Fukumoto, J. Miyazawa, T. Takahashi, M. Nagata, M. Goto, T. Asai, S. Masamune, Y. Kikuchi, H. Yamada, Development of a neutral particle flow fueling system by using a compact torus plasma injector for LHD, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010.10.12, Daejeon, Korea.

福本直之, 宮澤順一, 後藤基志, 高橋俊樹, 菊池祐介, 永田正義, 浅井朋彦, 政宗貞男, 山田弘司, SPICA 装置を用いた高速 CT プラズマの中性粒子フロー化とその定量的評価, 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 2010.11.30, 北海道札幌市(北海道大学学術交流会館)

N. Fukumoto, J. Miyazawa, Y. Kikuchi and M. Nagata, Development of a highly efficient fueller of fast gas jet using a compact torus injector, 2009 US-Japan Workshop on Innovative confinement concepts based on self-organization and active control, 2009.9.9, Kusatsu, Japan.

T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, and M. Nagata, Effects of the recombination reaction on a neutralization process of an accelerated compact torus plasma, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference, 2009.10.27-30, Aomori, Japan.

S. Fujii, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, M. Nagata, Monte-Carlo simulation on a neutralization process of an accelerated compact torus plasma, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009.10.6, Lisbon, Portugal.

福本直之, 宮澤順一, 菊池祐介, 永田正義, 高橋俊樹, 浅井朋彦, 高橋 努, 政宗貞男, 三瓶明希夫, 井 通暁, 入江 克, SPICA 装置の CT 生成加速部電源一段化と高速中性粒子フロー生成への応用, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会, 2009.12.4, 京都市(京都市国際交流会館).

N. Fukumoto, J. Miyazawa, Y. Kikuchi, M. Nagata, T. Takahashi, T. Asai, T. Takahashi, S. Masamune, A. Sanpei, M. Inomoto and M. Irie, Compact toroid acceleration with a single-stage coaxial electrode and its application to fueling, 19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research, 2009.12.9, 岐阜県土岐市(セラトピア土岐).

福本直之, SPICA における一段 CT 加速実験

とその応用研究の今後の予定，平成 21 年度 NIFS 共同研究会「能動的制御による自己組織化高ベータプラズマの性能改善」，2009.12.25, 核融合科学研究所.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

福本 直之 (FUKUMOTO NAOYUKI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90275305

(2)研究分担者

永田 正義 (NAGATA MASAYOSHI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00192237
菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00433326

(3)連携研究者

花田 和明 (HANADA KAZUAKI)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：30222219
宮澤 順一 (MIYAZAWA JUNICHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
准教授
研究者番号：50300728