

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03512

研究課題名（和文）核融合炉に燃料を高速安定供給するための燃料姿勢制御の研究

研究課題名（英文）Research on fuel attitude control for fast and stable fuel supply to fusion reactors

研究代表者

古賀 麻由子（KOGA, Mayuko）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40403969

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）：慣性核融合炉では100 m/s以上という高速での燃料供給が必要とされている。さらに高速点火方式で用いられる燃料は非対称の複雑な形をしており、これを正確に所定の姿勢でレーザー照射点に供給するための射出技術が求められている。本研究では電磁石コイルの磁力を用いて燃料を射出する装置を製作、電磁石コイルに電流を印加するタイミングを最適化することで、効率的に燃料を加速できることが確認された。また、射出後のターゲットの飛行姿勢を高速度カメラで撮影し、加速方法、減速方法の最適化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、電磁石コイルを用いた燃料射出装置の原理実証が成された。また効率的に燃料を加速するためには電流パルスの波形と印加タイミングを制御することが必要であることが明らかとなった。これらの結果により将来の慣性核融合炉に必要な射出装置の設計指針が得られた。保護容器を用いる本方式は燃料の形状によらず射出することが可能であるため、本研究で得られた知見は其他方式の核融合装置にも貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：In an inertial confinement fusion reactor, fuel must be supplied at a high speed of over 100 m/s. Furthermore, the fuel used in the fast ignition has a complex asymmetric shape, requiring injection technology that can accurately deliver the fuel to the laser irradiation point in the correct orientation. In this study, a device was developed to inject fuel using the magnetic force of electromagnetic coils. By optimizing the timing of the current applied to the electromagnetic coils, the fuel could be efficiently accelerated. Additionally, the flight posture of the target after injection was captured with a high-speed camera, and the acceleration and deceleration methods were optimized.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合 高速点火 インジェクション

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合の手法の1つである高速点火核融合では直径 500 ミクロン程度の燃料球に、コーンと言われる長さ 1 ミリ、開口角 30 度～45 度程度の円錐形部品を取り付けたターゲットを用いる。爆縮レーザーを燃料球に照射して圧縮し、爆縮コアプラズマを生成した後、追加熱レーザーをコーン内部に照射し、コーン先端からの高速電子により爆縮コアプラズマを追加熱することで核融合反応を起こさせる。これまで、炉心としての爆縮コアプラズマの研究は盛んに行われてきているが、多くは大型レーザーを用いたシングルショットベース、つまり数時間に1回のペースでの実験である。将来の発電炉ではこのようなペースでは到底発電が間に合わない。高速点火核融合発電プラント KOYO-Fast では1秒間に2回のペースで燃料へのレーザー照射が想定されている (J. Plasma Fusion Res. 82, 819-822 (2006))。燃料の入射速度は 100m/s、射出後 10m の位置で方向精度±10mm、コーン軸のずれは±2度以内が許容範囲とされている。しかしながら、如何にしてそのような高速、高繰り返しでターゲットを供給するかという研究は非常に少なく、実験炉と発電炉の間を埋める技術開発が急務とされている。

### 2. 研究の目的

本研究では高速点火核融合発電炉に向けた安定した高速繰り返しターゲット射出技術を開発することを目的としている。保護容器を用いる本方式 (図1参照) は燃料の形状に寄らず射出することが可能であるため、本研究により得られる知見は高速点火核融合に留まらず其他方式の核融合装置にも貢献しうるものである。

### 3. 研究の方法

図1にあるようにターゲット (燃料) はホルダーに入れられ、さらに円筒形のサボーに収められ加速管に入れられる。加速管に取り付けられた電磁石コイルに電流パルスを加えると磁力が発生し、サボーを加速するが、サボーがコイル中心に来たタイミングで電流パルスが減衰すると、サボーは慣性によりコイルから飛び出すことになる。射出されたサボーは永久磁石で構成される減速部を通る際、誘導電流と外部磁場によるローレンツ力で減速される。ホルダーとサボーはねじ込みで一体化しているが、ターゲットはホルダーに収められているだけで固定されていないため、慣性力によってホルダーから分離し、慣性力によってホルダーから分離し、観測チャンバーまで飛んでいく。加速管、分離時、観測チャンバーでの飛行速度は赤外線センサおよび高速度カメラで計測する。

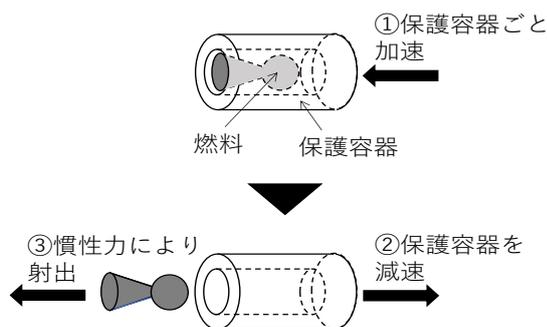


図1 保護容器を使用した燃料射出方式

ホルダーとターゲットが分離する際にホルダーとターゲットの一部が衝突することで軌道が乱れる可能性があると考えた。そこでホルダーとの接触をなるべく減らすよう、ホルダー部、ターゲット部をそれぞれ研磨して実験を行った。その結果、研磨したターゲット、ホルダーは未研磨よりも姿勢の乱れが小さくなることがわかった。

### 4. 研究成果

#### (1) 射出時の姿勢擾乱の原因

ホルダーとターゲットが分離する際にホルダーとターゲットの一部が衝突することで軌道が乱れる可能性があると考えた。そこでホルダーとの接触をなるべく減らすよう、ホルダー部、ターゲット部をそれぞれ研磨して実験を行った。その結果、研磨したターゲット、ホルダーは未研磨よりも姿勢の乱れが小さくなることがわかった。

#### (2) 電磁石コイルの発生する誘導磁場解析

φ0.8mm のエナメル線を用いて内径 19mm、外径 34.4mm、長さ 50mm の 500 巻ソレノイドコイルを作製し、0～1.6A の直流電流を印加した際のコイル中心における誘導磁場をガウスメーターで測定した。その結果、印加電流 I と誘導磁場 B は  $B=11.45I-0.045$  [mT] の近似式で表されることがわかった。次に、内径 10mm、長さ 21mm、22 巻のピックアップコイルを作製し、1kΩ 抵抗を接続して、電磁石コイルにパルス電流を印加した際の誘導磁場波形を測定した。図2に示されるように、直流電流で発生する磁場とほぼ同じ大きさの磁場が電流パルスにより発生していることが確認できた。

### (3) 赤外線センサによるフィードバック多段加速

複数の電磁石コイルを用いた多段階加速の場合、予め設定したタイミングで電流印加を行っていた。しかし、外的要因により加速中のターゲット位置がずれると電流印加のタイミングがずれ、射出速度が低下してしまう。そこで、赤外線 LED とフォトトランジスタを用いてターゲットが特定の位置に到達した瞬間に電流を印加することで、位置の微小なずれをフィードバックする機構を構築した。これにより、ターゲットの安定した多段階加速が可能となった。

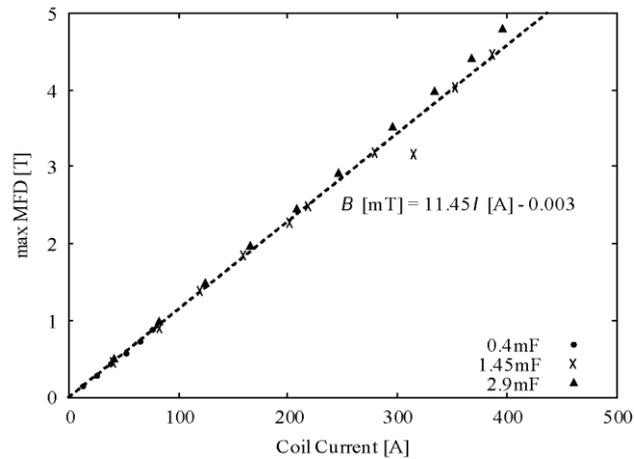


図2 電流パルスの最大値と発生した誘導磁場

### (4) 電子負荷装置を用いた加速コイル電流の制御

加速コイルの中心にターゲットが到達した後も電流パルスが存在していると、進行方向とは逆向きの引力が加わるため速度が減少してしまう可能性がある。電子負荷装置(EL)の定電流動作を用いて加速コイルへの電流印加時間を変化させ、射出速度への影響を調べた。300V に充電した 400  $\mu$ F コンデンサを電流源として、1 段目から 3 段目までのコイルには通常の電流パルスを印加し、4 段目のコイルに電子負荷装置を直列接続し、制御シーケンスにおける各ステップの電流値及び動作時間を変化させて図3のような各電流を加速コイルに印加した。その結果、電子負荷装置を用いて電流を 2.9ms の時点で遮断した場合が最も射出速度が速く、21.6m/s となった。電流制御を行わない場合に比べ速度が 0.7m/s が増加していることから、通常の電流パルス印加では逆向きの引力によって速度が減少していると考えられる。

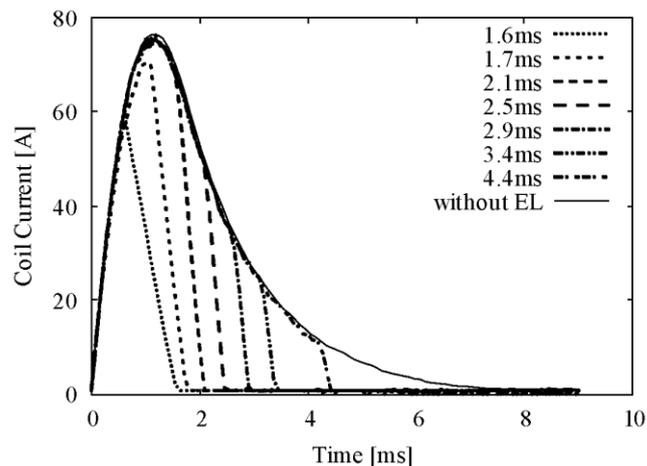


図3 電子負荷装置により制御した加速コイル電流

### (5) 電源の改良による射出速度の向上

全波整流型のコッククロフトウォルトン回路を 6 段使用し、コンデンサの最大充電電圧を 1680V まで昇圧できるよう改良した。また電流源として使用するコンデンサを 400  $\mu$ F  $\times$  3 個から 1450  $\mu$ F  $\times$  2 個に変更し、より大電流パルスを印加できるようにした。その結果、これまで 4 段階の加速を経て到達していた 20 m/s 以上の速度に 1 段階の加速で到達することに成功し、大幅な射出速度の向上が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 KOGA Mayuko, UCHINO Sotaro, MAEDA Eiki, YAMANOI Kohei, IWAMOTO Akifumi	4. 巻 17
2. 論文標題 Behavior of Gas Injected Fast Ignition Targets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2404052 ~ 2404052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.17.2404052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 KOGA Mayuko, UCHINO Sotaro, MAEDA Eiki	4. 巻 18
2. 論文標題 Development of Target Injection System by Using Electromagnetic Coils	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2404060 ~ 2404060
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.2404060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Mayuko Koga
2. 発表標題 Development of Target Injection System by Using Electromagnetic Coils
3. 学会等名 31th International Toki Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀麻由子
2. 発表標題 高速点火核融合炉用ターゲットインジェクションシステムの開発
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀麻由子
2. 発表標題 ガス射出高速点火核融合ターゲットの振る舞いについて
3. 学会等名 第42回レーザー学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mayuko Koga
2. 発表標題 Behavior of Gas Injected Fast Ignition Targets
3. 学会等名 30th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀麻由子
2. 発表標題 電磁力を用いた慣性核融合燃料射出システムの開発
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古賀麻由子
2. 発表標題 高速点火核融合炉に向けたガスインジェクション装置の開発
3. 学会等名 第15回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果により核融合ベンチャー企業EXFusionとの共同研究を開始することになった

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------