

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20358

研究課題名（和文）局所ヘリシティ入射法によるプラズマ立ち上げ時の自己組織化過程の解明

研究課題名（英文）Investigation of the self-organization during the tokamak startup by means of local helicity injection

研究代表者

西澤 敬之（Nishizawa, Takashi）

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：00955007

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：中心ソレノイドを用いない経済的なトカマク炉の実現に貢献することを目指し局所ヘリシティ入射法の研究開発を行った。フィラメント状のプラズマを真空容器内に入射することに成功したが研究期間内にトカマクプラズマを生成するには至らなかった。プラズマ銃や電源の改良が必須であることが分かった。一方、本研究課題に関連する設備や手法を応用し誘導方式によるトカマクプラズマの生成、ガウス過程を用いた反転アルゴリズムの開発等の成果を得た。局所ヘリシティ入射に関する研究は若手研究を通じ今後2年間継続する。この期間に従来の目的を達成することを目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局所ヘリシティ入射によるトカマクプラズマの生成という目標は達成できなかったが誘導方式によりトカマクプラズマを立ち上げることに成功した。このプラズマを用いて高温磁化プラズマの研究を開始できるため所属する研究チーム全体として今後プラズマ核融合分野の研究の発展に寄与することが期待される。また自己組織化過程の計測を目的として開発したガウス過程回帰によるトモグラフィ解析手法を干渉計データに応用し電子密度分布およびその微分量を推定することに成功した。この成果は将来の核融合炉内の放射線環境下でのプラズマ内部の実時間モニタリングに活用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This research aimed at developing the local helicity injection technique to achieve an economical tokamak reactor by removing the central solenoid. While plasma filaments have been successfully injected into a vacuum vessel, the tokamak startup through magnetic helicity injection has not been achieved. Drastic improvements of the plasma gun and the power supply system are necessary. On the other hand, tokamak plasmas have been inductively generated, and a Gaussian-process-based inversion technique has been developed by applying the instruments and skills related to this research project. The research on the helicity injection will be continued for two more years through Grant-in-Aid for Early-Career Scientists. An attempt will be made to achieve the original goal over this period.

研究分野：プラズマ・核融合

キーワード：プラズマ 自己組織化 トカマク トモグラフィ ガウス過程

1. 研究開始当初の背景

近年、小型で経済的な装置を用いることで核融合の早期実用化を目指す動きがスタートアップを中心に活発化している。トカマク型炉は ITER 計画にも採用されており、現在最も有望な核融合炉の方式の1つである。高温超伝導体により生成される超高磁場を採用することでトカマク炉を小型化するアプローチが注目を集めている。サイズに加え、トカマク炉の構造の簡素化を進めることができればトカマク炉の経済性をさらに向上させることができ、核融合炉の早期実用化に大きく貢献することが期待される。

トカマク炉ではプラズマを誘導的に立ち上げるために中心にソレノイドコイルが設置されている。この中心ソレノイドは装置の中心の限られた空間に配置されるためトカマク炉の構造の複雑化を招き、トカマク方式の核融合炉を設計する上で大きな制約となっている。中心ソレノイドを用いないトカマクの立ち上げに関して複数の手法の研究開発が進められているが、そのうちの1つに局所ヘリシティ入射法がある。この手法は装置に対して小型のプラズマ銃を挿入し、そこからフィラメント状のプラズマを入射する。プラズマ銃はプラズマの立ち上げ後に装置の外へ出すことができる。このため局所ヘリシティ入射法はコンパクトなシステムにより実現できるといった利点がある。

2. 研究の目的

本研究ではプラズマ銃を用いて磁気ヘリシティを真空容器内に入射し、プラズマの自己組織化を誘発することでトカマクプラズマを立ち上げる。この立ち上げ方式をトカマク炉に応用することができれば中心ソレノイドを炉から取り外すことが可能になるため、トカマク炉の効率化及び核融合の早期実用化に大きく貢献できる。

3. 研究の方法

小型トカマク PLATO 装置にて局所ヘリシティ入射実験を行う。磁気ヘリシティを担うフィラメント状のプラズマが自己組織化過程を経てトカマクプラズマが生成される過程をポロイダル断面トモグラフィシステムにより精密計測する。小型装置を用いた実験ではあるが局所ヘリシティ入射によるトカマク立ち上げに関わる物理過程を観察し、解明することが可能である。大型装置や将来の核融合炉に対し局所ヘリシティ入射法の最適化を行う際の指針を示す。

局所ヘリシティ入射システムは研究代表者が当該研究機関に着任時に既に準備が整っていたがトモグラフィ計測システムは開発段階であった。よって本研究はトモグラフィ計測システムのハードウェアや解析手法の開発も含む。

4. 研究成果

プラズマ銃の絶縁が性能で不十分であり、望まない箇所でアークが生じ十分な磁気ヘリシティを入射することができなかった。図1に示すようにフィラメント状のプラズマは生成できたが自己組織化を誘発するにはプラズマ銃と電源システムの抜本的な改良が必要であると考えられる。

若手研究としても局所ヘリシティ入射に関する研究課題を遂行中であるため、引き続き本研究課題に取り組む。現在、共同研究を行なっているソウル大学で開発された成功実績のあるプラズマ銃を PLATO 装置に導入する準備を進めている。

本研究の遂行期間中に主に従来式の中心ソレノイドを用いたトカマクの誘導立ち上げに取り組んだことも十分な研究成果を上げることができなかった理由である。研究代表者が所属する PLATO 実験グループでは装置の主要部品の組み立てが完了した後も数年に渡りトカマクプラズマを生成することができない状態が続いていた。早急にトカマクプラズマの立ち上げに成功し、停滞している PLATO 実験プロジェクトを進展させることを優先した。誘導立ち上げの成功に必要な磁場配位や電場強度を計算し、それを実現する性能を有する中心ソレノイド、ポロイダル磁場コイル用電源を自作した。これにより図2に示すようにプラズマ電流約 20kA、放電時間 10ms 以上のトカマクプラズマを生成するに至った。コイル用電源開発の

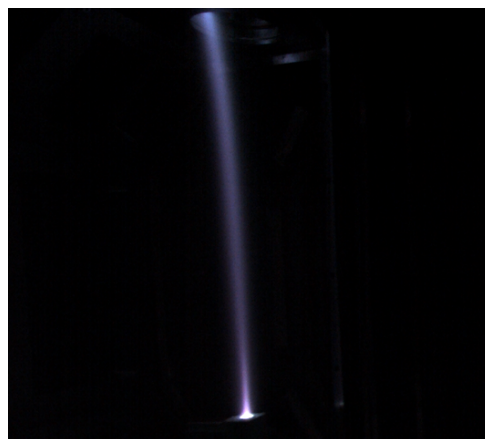


図1 プラズマ銃からフィラメント状のプラズマが噴き出す様子

経験はプラズマ銃の電源開発にも活かすことができる。若手研究ではプラズマ銃用の電源の開発も視野に入れ、局所ヘリシティ入射によるトカマクプラズマの立ち上げの成功を目指す。

トモグラフィ計測システムに関してはハードウェアを設置するには至らなかったが解析手法の開発に取り組んだ。機械学習の分野で用いられているガウス過程回帰によるトモグラフィ解析の知見を深めた。この手法を干渉計による電子密度の積分計測に応用することを思い付き、LHD装置の赤外干渉計データの解析を行なった。トモグラフィ計測で利用する投影行列に相当する行列を使って径方向の感度を表現した上でガウス過程回帰を適用することで、積分計測のデータのみから誤差を含めて電子密度の径方向分布とその微分量を推定することに成功した。この成果はPlasma Physics and Controlled Fusion誌にて発表した[1]。また同内容に関してアジア太平洋プラズマ物理国際会議において招待公演を行なった。

残念ながら研究スタート支援の一年半の期間では期待した成果を上げることはできなかったが電源開発やトモグラフィ計測に関わるスキルを習得することができた。これらを最大限に活用し今後2年間の若手研究の期間内に局所ヘリシティ入射によりトカマクプラズマの生成を成功させる。またその際に生じる自己組織化の過程をトモグラフィシステムにより精密計測することを目指す。

参考文献

- [1]T. Nishizawa, S. Tokuda, et.al, “Estimation of plasma parameter profiles and their derivatives from linear observations by using Gaussian process”, Plasma Physics and Controlled Fusion. 65, 125006 (2023).

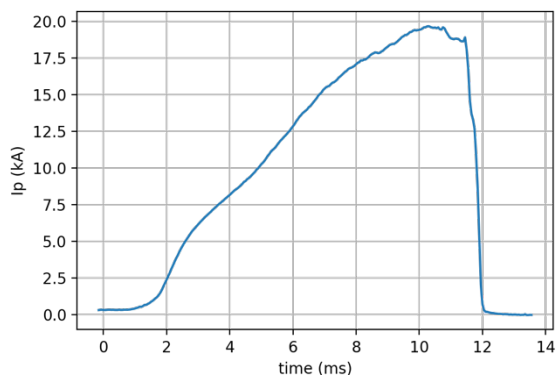


図2 自作電源を利用し誘導立ち上げにより生成したトカマクプラズマの電流

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishizawa T, Tokuda S, Kobayashi T, Tanaka K, Funaba H, Yamada I, Takemura Y, Tokuzawa T, Yasuhara R, Uehara H, Ida K, Takahashi H, Kawachi Y, Inagaki S, Kado S, Sasaki M, Fujisawa A	4. 巻 65
2. 論文標題 Estimation of plasma parameter profiles and their derivatives from linear observations by using Gaussian processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 125006 ~ 125006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6587/ad074a	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西澤敬之
2. 発表標題 ヘリウム線強度比分光を用いた電子密度、温度揺動およびその位相差の計測
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 西澤敬之, 藤澤彰英, 永島芳彦, MOON C., 井戸毅, 山田琢磨, 糟谷直宏, 恩地拓己, 小林大輝, 西村大輝, 末継寅英, 山崎広太郎, 徳沢季彦, 小林達哉, 清水昭博, PARK J., 内藤晋, 宗近洸洋
2. 発表標題 PLATOプロジェクトの現状と今後の展望
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 西澤敬之 (九大 応用力学研), 西澤敬之 (九大 極限プラズマ研究連携セ), 徳田悟 (九大 情報セ), 小林達哉 (核融合研), 小林達哉 (総合研究大学院大), 田中謙治 (核融合研), 船場久芳 (核融合研), 山田一博 (核融合研)
2. 発表標題 ガウス過程回帰に基づく線形観測量を利用した物理パラメータおよびその微分量の空間分布推定
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 T. Nishizawa, S. Tokuda, T. Kobayashi, K. Tanaka, H. Funaba, I. Yamada, Y. Takamura, T. Tokuzawa, R. Yasuhara, U. Uehara, K. Ida, H. Takahashi, Y. Kawachi, S. Inagaki, S. Kado, M. Sasaki, and A. Fujisawa
2. 発表標題 Estimation of parameter profiles and their derivatives from arbitrary linear observations by using Gaussian processes
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------