

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14685

研究課題名（和文）新電極配位におけるCHIプラズマ発展の理論解明

研究課題名（英文）Clarification of plasma evolution on new electrode configuration

研究代表者

黒田 賢剛（Kuroda, Kengoh）

九州大学・応用力学研究所・学術研究員

研究者番号：40795035

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本件では国内最大の球状トカマク装置QUESTにおいてCHI手法によるプラズマ立ち上げ研究を実施した。CHIは真空容器内の円環状の電極から電流をプラズマ中に入射することによりプラズマを発生させて閉じ込め配位を形成させる。一つ目の成果は、入射電流とプラズマ発展の理論的な解明が為されたことである。二つ目の成果としてその解明された理論に基づき試作電極を再設計して常設電極として改造を施し、期待通りの性能が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の核融合発電炉に球状トカマク型の炉が適用出来れば建設コストの大幅な削減が見積もられ、その為の有効なプラズマ立ち上げ手法の研究がQUESTで実施されている。本件ではCHI手法の新たな理論的知見が得られ、QUESTへの導入実績は様々な装置への展開による更なる研究の発展を示唆する。今後QUESTでは新たに導入された本手法を活用してRF加熱などの他の手法と組み合わせることで様々な立ち上げシナリオの検討と評価が行われる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we researched CHI plasma start-up on the largest spherical tokamak device in Japan, QUEST. In CHI, the current is injected into the plasma from a circular electrode in a vacuum vessel, and the plasma evolves and confinement flux configuration is formed. The first achievement was the theoretical elucidation of relation between the injector current and plasma evolution. As a second result, the prototype electrode was redesigned based on the elucidated theory and modified as a permanent electrode, and the expected performance was obtained.

研究分野：核融合プラズマ研究

キーワード：球状トカマク プラズマ立ち上げ 核融合発電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来のエネルギー問題を解消する核融合発電を経済性の高い球状トカマク型の炉で実現させるためには、従来のプラズマ立ち上げ手法であるオーミック加熱のためのソレノイドコイルを取り除く必要があり、オーミック加熱に頼らない立ち上げ手法を確立させなくてはならない。国内最大の球状トカマク装置 QUEST では波動パワーをプラズマに吸収させて加熱を行う RF 入射加熱研究で大きな成果が挙げられている。この手法は RF 波動を装置の外から装置窓より入射すればよく、導入が容易であるため球状トカマクの加熱に適している。近年 QUEST では、RF 加熱では達成が困難な高密度化を実現させるために米国の球状トカマク装置 NSTX で開発された同軸ヘリシティ入射(CHI)手法を新に導入した。CHI は装置容器壁を 2 枚の電極板として構成し、電圧印加により強力にプラズマを立ち上げる手法である。電極構成が複雑な CHI は核融合炉への導入が困難となるが QUEST ではこれを容易にする簡易型の新設計電極が導入された。本研究において、この簡易電極を用いた CHI 立ち上げを QUEST で実証できれば CHI で立ち上げた高密度プラズマを RF で加熱する条件を模索出来る。

2. 研究の目的

従来電極での CHI 立ち上げの有効性は米国の装置 NSTX で示されているが、プラズマの閉じ込め配位(閉磁気面)に至る発展機構はあまり明確にされておらず、電極形状の異なる QUEST 簡易電極での CHI 立ち上げは条件も異なり、導入運用が難航していた。ドーナツ型の真空容器の中心側容器壁と外周側容器壁をセラミックで絶縁して両者に電圧を印加する従来電極構成(論文 [1] fig. 1a 参照)に対し、QUEST では真空容器内の下面にセラミックを敷いてその上に円環状の電極を設置し、真空容器全体に対してこの円環電極に電圧を印加する。本件では CHI での、電圧印加によるプラズマ着火、プラズマ生成後の絶縁破壊による電極からの電流入射、電流入射によるプラズマ(磁束)発展、自発的な閉磁気面の形成、の一連の現象を QUEST の新電極を用いて理論的に解明し、それに基づく電極構成の最適化を施して電流が最大に駆動する条件において閉磁気面を形成、及びその形状を制御する。

3. 研究の方法

簡素化された電極構成を活かし、試験電極を用いて様々な構成での CHI 立ち上げを評価する。電極構成は主に最初のプラズマ着火と電流入射の発生条件に大きく影響する。CHI では論文 [1] の fig. 1a で示される 2 つの電極板の端が近接する入射(injector)領域に 2 つの電極を連結する入射磁束を形成する。その入射領域にガスを導入して電圧印加により電極間放電を生じさせ、入射磁束に沿って流れる入射電流の駆動によりプラズマは容器内へと噴出される。この時入射領域と対極に位置する吸収(absorber)領域でも電流が流れてしまうとプラズマは噴出されず逆に吸収されてしまうので CHI では吸収領域での放電(absorber 放電)を出来るだけ生じさせないようにする。特に従来電極に比べて簡易電極では入射領域と吸収領域の位置が近くなってしまうため absorber 放電を生じない電極構成の模索が必須である。導入の容易さ以外での簡易電極の有利な点として、狭い円環電極上で電流の入射される領域が制限されることで電流分布が予想し易くなり詳細なプラズマ制御が可能になると考える。本研究では電流がプラズマ中においてほぼ磁力線に沿って流れる force-free モデルを仮定してプラズマ発展を予測し、観測結果との定量的な比較を行う。様々な磁場条件での評価の際には簡易的なコイルを増設して柔軟に対応する。試験電極を用いた上記の評価データの収集後、最終的な電極構成を設計し、大規模改造により QUEST に導入して評価を行う。

4. 研究成果

試験電極を用いた評価成果は主に論文 [2], [3] に纏められる。論文 [2] では、円環電極と外側容器壁間を入射領域とする弱磁場側入射方式と、電極と内側容器壁間を入射領域とする強磁場側入射方式の比較結果を報告している。本件計画時は弱磁場側入射方式が採られていた。この方式の場合、QUEST 装置のコイル配置を変更せずに十分な入射磁束を外側の入射領域に形成することが可能で、またプラズマ着火のためのガス導入機構の設置も容易であった。しかしこの方式では弱磁場側に接続する磁束の脚が磁束発展と共に入射領域から離れてしまい、球形状に磁束を発展させることが出来ず閉磁気面が形成されなかった。その後強磁場側入射方式に変更して比較が行われた。論文 [2] の fig. 1 の a と b で示されるように、a の弱磁場側入射に対して b の強磁場側入射では電極及び容器壁に接続する 2 本の磁束の脚が入射領域近傍固定され、球形状に磁束が発展する様子が観測された。これは弱磁場側入射の場合では容器壁側の磁束の脚の位置する外側領域で磁束は磁束密度の低い外側に広がり易く、強磁場側入射の場合では容器壁側の磁束の脚の位置する内側領域で磁束密度が高くなり磁束が固定されるためである。またこの比較では強磁場側入射の方が低い入射電流値で高い増倍率のトロイダル電流がプラズマ中を流れ、磁束は大きく発展して閉じ込め配位の形成に寄与した。この比較結果より強磁場側入射方式の方が QUEST に適していると判断し、論文 [2] の fig. 2 に示すよう

に電極構成を変更して評価を行った。一つ目の変更点は内側の入射領域に十分な入射磁束を形成させるための簡易コイルを真空容器内に設置した。コイルはポリイミドフィルムで被膜された 2×20 mm 角形の銅導体を12巻して制作され、プラズマから遮蔽するためにステンレスケースに収められた。通常 QUEST では金属以外の材料を容器内に導入しないが、短パルスの CHI 放電の評価のために一時的に導入された。二つ目に円環電極に垂直の円筒板を設置して入射領域に集中して入射磁束を形成出来るようにした。三つ目に吸収領域となる電極と外側容器壁間において absorber 放電を防止するためのアルミナのセラミック板を設置した。この変更電極において論文[2]の fig. 3 に示す2つのプラズマ発展が観測された。ショット No.42640 では比較的磁束の低い条件で放電が実施され、円筒板内側の入射領域での絶縁破壊の発生後、急峻にプラズマは真空容器内全体に広がった。そして電極からの入射電流の供給が0になった後も容器中心部で閉じ込められたプラズマが持続した。ショット No.42826 では磁束条件が上げられ、同様の入射領域からのプラズマ発展が観測された。この放電では入射電流が足りなかったため容器中域付近で発展が止まってしまったが、十分な入射電流が供給されていればより多くのトロイダル電流がプラズマ中を駆動して明確な閉磁気面の形成に至ったと推測される。ただしこの評価では入射領域でのプラズマ着火の成功率が悪く、ガスの導入方法が課題として挙げられた。

強磁場側入射でのプラズマ着火性能は論文[3]の fig. 1 の b,c に示すガス導入機構を導入することで改善された。そのガス導入機構では電極の円筒板からの距離6 cm 及び20 cm の内側の円周にガスマニホールドパイプを設置してそのパイプの8箇所ノズル穴から円筒板に向かってガスを噴出させた。プラズマ着火条件は電極間の磁束の磁力線長、ガス圧、電極電圧でのパッシェンの法則に依存する。磁力線長は入射領域よりも円筒板外側領域の方が長さが長く、以前のガス導入方法では外側領域で条件を満たして着火が生じてしまった。このガス導入方式では高圧ガスを内側から円筒板に吹き付けることで磁力線長の短い入射領域でも着火条件を満たすことが出来るようになった。実験では円筒板との距離6 cm のガスマニホールドから高圧ガスを吹き付けた場合に入射領域での安定なプラズマ着火が得られた。距離20 cm のガスマニホールドから吹き付けた場合ではガスが拡散してしまい、外側領域でプラズマ着火が生じてしまった。論文[3]の fig. 2,3 にプラズマ着火が入射領域で生じた場合と外側領域で生じた場合の放電の様子を示す。入射領域でプラズマ着火が生じるとその後激しい発光と共に絶縁破壊が生じて電極と容器壁間の狭いギャップ(円筒板とガスマニホールドの6 cm の隙間に相当するギャップ)に流れる入射電流が急増する。これをきっかけに磁束は容器内に球形状に拡大してトロイダル電流値が上昇した。これに対して外側領域でプラズマ着火が生じると入射電流は電極と容器上面間を連結する磁力線の経路に流れ、その後磁束はそのまま外側に広がって absorber 放電に至ってしまった。トロイダル電流値は同レベルだが入射領域でプラズマ着火が生じた放電では入射磁束量が1/3程度の条件でこの電流値に達した。この実験では磁力発展の理論モデルの定量的な検証を行った。磁束発展が force-free モデルで近似出来るのであれば磁束量の条件に応じて、 I_{in}^2 の二乗に比例する入射電流により磁束は同じ発展を生じて広がり、 I_{in} に比例するトロイダル電流が駆動するはずである。検証では、的確な磁束発展が得られた入射磁束配位に対して、各磁場コイル電流値を全体的に同じ比率で上げることで、磁束配位形状を維持したまま相対的に磁束量を上昇させた。その結果論文[3]の fig. 5 に示すように駆動電流は予想通りの関係で上昇し、入射磁束量8 mWb の条件で43 kA のトロイダル電流の駆動を観測した。

以上の試作電極での評価後最終的な電極構成の設計を実施した。その設計構想は論文[4]に纏められている。論文の構成と実際に導入された構成で若干異なる部分もあるが、大まかに次の3点について議論された。一つ目は内側の強磁場領域に十分な入射磁束を形成する方法である。試作電極での評価時は真空容器内にコイルを導入することで対処したが、最終案では真空容器の下部構成の改造により、中心柱の周りに幅15 cm、深さ15 cm ほどの溝を形成し、その溝に垂直下方向に下ろした電極板と中心柱との間を入射領域とした。これにより入射領域と容器下の磁場コイルとの距離が短くなり、20 mWb 以上の入射磁束の形成が可能になる。更にプラズマ立ち上げ時にのみパルス的に磁場コイルを使用するのであれば磁場強度を現状の2倍まで上げることが出来る。二つ目に米国の装置 NSTX と同様のガスマニホールド機構を入射領域に設置した。磁束条件を上げた場合、磁束の磁力線長が短くなる入射領域において着実にプラズマ着火を生じさせなくてはならない。この機構では入射領域下部の電極壁で囲われた領域内にガスが噴出され、着火によりその領域内で高密度プラズマが生成されて絶縁破壊に至る。三つ目に absorber 放電を防止するため、外側領域での電極と容器壁間のギャップについて議論され、最終案では20 cm 程のギャップ間距離が取られた。ただしこの距離は装置構造上の理由が主な決定要因となっており、今後の実験結果に応じて変更若しくは別の処置を検討する余地がある。この最終設計案の電極は2021年11月に導入され、本件の最終年(2022年)度にその評価が行われた。その評価結果において、入射磁束量23 mWb の条件で安定に着火したプラズマは的確な磁束発展を生じて135 kA のトロイダル電流の駆動を達成した。カメラ映像では明確な閉磁気面の形成が観測され、密度値は $2 \times 10^{19}/\text{m}^3$ (従来からの5倍)を達成した。以上により QUEST での新電極を用いた CHI 立ち上げの実証において本件の主要目的が達成された。

[1] R. Raman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, (2006) **97** 175002.

[2] Kuroda K. *et al.*, *Plasma. Fusion. Res.*, (2021) **16** 2402048

[3] K. Kuroda *et al.*, *J. Fusion Energy* **41** (2022) 25

[4] R. Raman *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, (2022) **50** (11) 4171

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kengoh KURODA, Roger RAMAN et al.	4. 巻 16
2. 論文標題 Initial Results from High-Field-Side Transient CHI Start-Up on QUEST	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402048-1, -5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2402048	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Kuroda K., Raman R., Hasegawa M., Onchi T., Hanada K., Ono M., Nelson B. A., Rogers J., Ikezoe R., Idei H., Ido T., Mitarai O., Nagata M., Kawasaki S., Nagata T., Higashijima A., Shimabukuro S., Niiya I., Sekiya I., Kojima S., Nakamura K., Takase Y., Murakami S.	4. 巻 41
2. 論文標題 Improvements to the High-Field-Side Transient CHI System on QUEST	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fusion Energy	6. 最初と最後の頁 25-1, -13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10894-022-00338-4	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 黒田 賢剛, Roger Raman, 他
2. 発表標題 QUESTにおけるトランジエントCHIシステムの設計改善
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田 賢剛, Roger Raman, 他
2. 発表標題 QUESTにおけるT-CHIプラズマの発展磁束の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kengoh KURODA, Roger RAMAN et al.
2. 発表標題 Initial results from high-field-side Transient CHI start-up on QUEST
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengoh KURODA, Roger RAMAN, Makoto HASEGAWA, Takumi ONCHI, Osamu MITARAI, Kazuaki HANADA, Masayuki ONO, et al.
2. 発表標題 T-CHI current start up by a simple configuration electrode in QUEST
3. 学会等名 20th International Spherical Torus Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Raman, F. Ebrahimi, S.C. Jardin, K. Kuroda
2. 発表標題 Transient CHI start-up of low inductance plasma for advanced ST scenarios
3. 学会等名 20th International Spherical Torus Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田賢剛, Roger RAMAN, 長谷川真, 恩地拓己, 御手洗修, 花田和明, 小野雅之, 他
2. 発表標題 ダイバーター電極配位における内側壁放電でのCHI生成電流の発展
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengoh KURODA, Roger RAMAN, Makoto HASEGAWA, Takumi ONCHI, Osamu MITARAI, Kazuaki HANADA, Masayuki ONO, et al.
2. 発表標題 CHI Experiment in QUEST
3. 学会等名 8th RF Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------