

[24]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/4763148>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 24, 2021-03. Research Institute for Applied Mechanics,
Kyushu University

バージョン：

権利関係：



QUEST 配位における CHI 磁束発展の解明と最適電極形状の評価

九州大学 応用力学研究所 黒田 賢剛

球状トカマク型の核融合炉が可能になれば、炉の建設コストの削減やプラズマの安定化が期待出来、そのためには球状トカマク装置での堅固な電流駆動手法の確立が必要である。同軸ヘリシティ入射(CHI)法は米国の球状トカマク装置 HIT-II や NSTX で研究されている有望な電流駆動手法の1つである。両者の装置では真空容器の上下部に埋め込まれた円環状のセラミックにより容器の内側壁と外側壁が絶縁されており、これら容器壁による2枚の電極が構成される。CHI では外部磁場コイルによりこの電極間に連結磁束(入射磁束)を形成して高電圧を印加する。これによりまず電極間においてプラズマが着火し、プラズマ形成後は入射磁束に沿って入射電流が流れる。この入射電流がプラズマを周回しながら流れるためトロイダル電流が駆動し、電流と磁場の相互作用によりプラズマは入射磁束と共に真空容器内へと拡大する。米国の両装置ではこの手法により真空容器内に入射された磁束は電極から切り離されて再接続し、形成された閉じた磁気面内において安定な電流閉じ込めが達成された。

現在九州大学の球状トカマク装置 QUEST では簡易型の新設計電極を用いた CHI 電流立ち上げ実験を米国の CHI 研究者と共に実施している。この新設計電極配位においては装置の下部ダイバーター上にセラミックを挟んで設置されたバイアス電極に高電圧を真空容器(グラウンド)に対して印加させる。従来のセラミックが真空を維持する容器壁の一部を構成する設計と異なり、本設計では核融合炉への CHI 導入を容易化出来ると考える。また QUEST においても新しく強力な電流駆動手法である CHI が導入されれば形成プラズマの性能は大きく向上し、そして QUEST の電子サイクロトロン加熱(ECH)システムと CHI を組み合わせた新たな立ち上げ手法の評価が可能となる。

QUEST の CHI 実験の大きな課題はポロイダル磁場(PF)コイルと CHI 電極の距離が離れており適切な磁束発展を生じさせるための制御が難解ということである。本件ではこの課題に対して、入射磁束を発展させる磁場 B_{ext} と入射電流 j_{inj} が常に $B_{ext} \times j_{inj} \sim 0$ の関係を維持すると推測し、適切な磁束発展形状を予測することでそのための PF コイル制御配位を見出した。さらに磁束発展予想に基づく CHI のための装置改造配位において閉じた磁気面形成に至るための明確な改善が観測された。

従来の真空容器自体が大きな2枚の電極を構成する設計と異なり、QUEST 電極設計では入射電流がバイアス電極面内に制限される。この特徴は磁束の発展をし難くする要因となるが、不確定な要因により大きく変動する電極上の入射電流分布が狭い範囲に特定されることで磁束発展予想はし易くなる(予想通りの制御が可能になる)。図1に CHI 初期実験における放電結果と算出された磁束発展予想を示す。実験当初は入射磁束が比較的形成し易い弱磁場側からの入射方式が試された。入射磁束は主に PF5-2 のコイルによりバイアス電極と外側容器壁間に形成され、この弱磁場側において磁束は比較的安定に算出予想に近い形状に発展した。しかし磁束の繋ぎ替えを経た閉じた磁気面の形成に至るには、2つの電極(QUEST 電極配位においてはバイアス電極と真空容器壁)に接続される磁束の両脚を狭い領域に維持(狭い Footprint を維持)した状態で磁束を発展させる必要がある。この入射では磁束を大きく発展させようとすると真空容器壁に接続される片方の磁束の脚が大きくバイアス電極から離れてしまい狭い Footprint の維持が困難であった。したがって QUEST において CHI 電流駆動を行うためには高磁場側から磁束を入射する必要がある、その磁束発展条件の評価を行った。図2に高磁場入射による放電結果と算出予想を示す。高磁場入射の場合、高磁場領域に位置する真空容器壁側の磁束の脚は移動し難くなり、適切な

磁場条件において狭い Footprint を維持した磁束発展が観測された。更に入射磁束の磁力線長が長くなることで不必要に高い入射電流の駆動が抑えられ、高い増倍率(I_{tor}/I_{inj})でのトロイダル電流の駆動と放電時間の長パルス化が達成された。しかし明確な電流閉じ込めまでには至らず、高磁場側入射放電のための装置改造の必要性を示唆する課題が見受けられた。ひとつは当初から懸念されていたように電極から距離がある QUEST の PF コイルの配置では形成可能な入射磁束が大きく制限された。また期待する磁束発展に達するには入射磁束量をかなり下げなくてはならず、十分な入射磁束量において磁束の繋ぎ替えを経た閉じた磁気面の形成まで達成させるにはプラズマ着火の容易化と磁束発展を阻害してしまうアブソーバー領域での放電の防止が不可欠であった。

図 3 は装置改造を想定した評価実験の様子である。まずこの実験では真空容器内の電極近傍に簡易試作コイル(角形のカプトン被膜導体を 12 巻して製作)を導入し、そしてバイアス電極に高さ 20cm の円筒板を設置した。試作コイルにより近接する入射領域に重点的に磁束を形成出来るようになり、バイアス電極の円筒板により内側容器壁との間に入射電流の主要経路が形成されると期待された。図 4 に示す 2 ショットでの放電結果で両者とも初めは円筒板の外側で着火してしまったが、その後円筒板内側にもプラズマが誘発すると期待通りの閉じた磁気面形成に適した磁束発展を遂げた。入射磁束量の低い #42640 のショットでプラズマは即座に大きく拡大し、その後入射電流の減少に伴い収縮するが容器中心部において容器から切り離されたプラズマが入射電流の駆動が終了しても僅かに持続している様子が観測された。この結果は閉じた磁気面の形成によりプラズマが閉じ込められていることを示している。数百 A 程度のトロイダル電流の閉じ込めも期待されたが、残念ながら同時に発生したアブソーバー領域での放電の影響でログスキーコイルでの正確な電流計測が出来なかった。入射磁束量を増やした #42826 のショットではこれまでの高磁場側入射での最大駆動電流値を大きく上回るトロイダル電流(18kA $\Rightarrow$ 35kA)が観測された。この円筒電極内側からの放電発展の様子は NSTX での初期実験の放電とよく似ており、もし

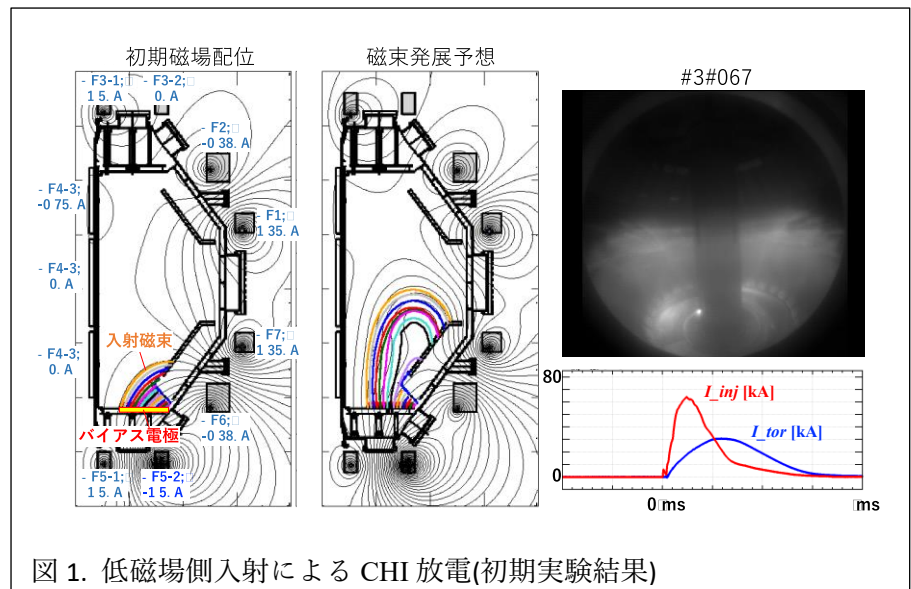


図 1. 低磁場側入射による CHI 放電(初期実験結果)

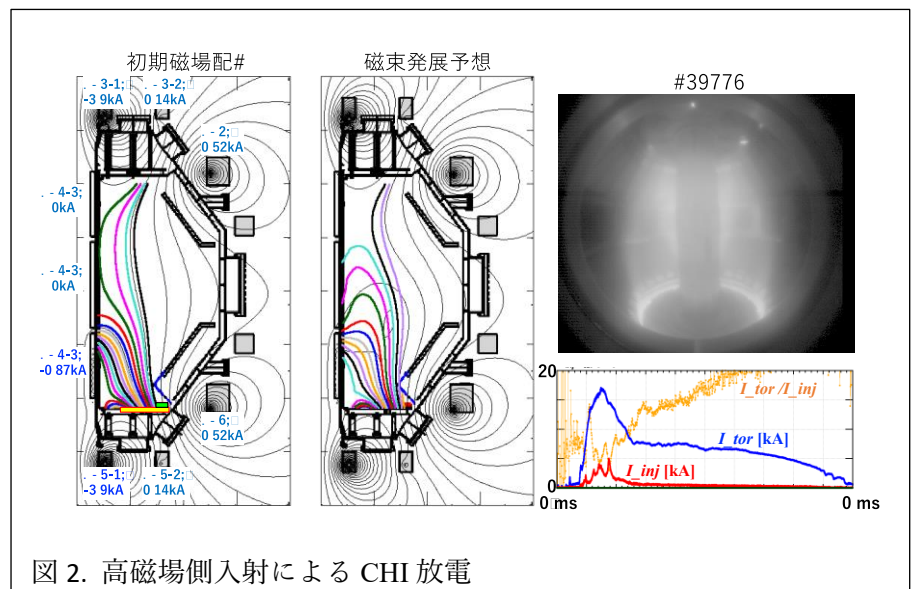


図 2. 高磁場側入射による CHI 放電

#42826 のショットにおいて放電が完全に真空容器全体に広がるまで発展していれば高い値のトロイダル電流が閉じ込められた明確な磁気面が形成されたと期待される。この評価実験結果より、電極近傍コイルを用いた入射磁束配位において円筒電極内側でのプラズマ着火以降はその内側領域に主要電流経路が形成されて外側のアブソーバー領域での放電を生じさせずに閉じた磁気面形成に至る適切な磁束発展が可能であることが示された。

残る課題はプラズマ着火の容易化である。図5に現在設計中のガス導入システムの改造案を示す。これまでは図3のように下部ダイバーターの2箇所

の穴から上方向にガスを噴出させていた。これに対して改造システムでは次の3つの改善点によりプラズマ着火の容易化が達成され则认为。まず1つ目に真空容器(グラウンド)に設置された噴出口が円筒バイアス電極に向かってガスを吹き付けるように設計されている。2つ目に噴出口が装置円周方向均等に8箇所設置される。3つ目に円筒バイアス電極に近接して向かい合う円筒グラウンド板に取り付けられたガス配管1、電極から少し離れた内側容器壁に取り付けられたガス配管2の2系統のガス噴出配管が設置される。8箇所に噴出口が設置されたグラウンド部と円筒バイアス電極との間の円周領域において電圧印加時に

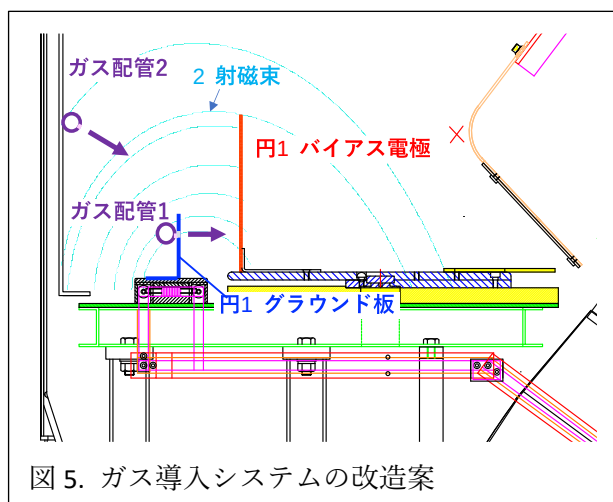


図5. ガス導入システムの改造案

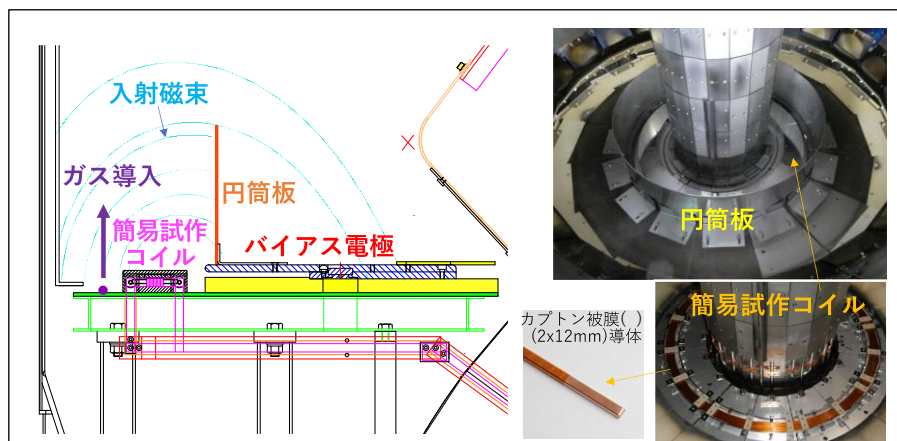


図3. CHI 高磁場側入射放電のための装置改造配位

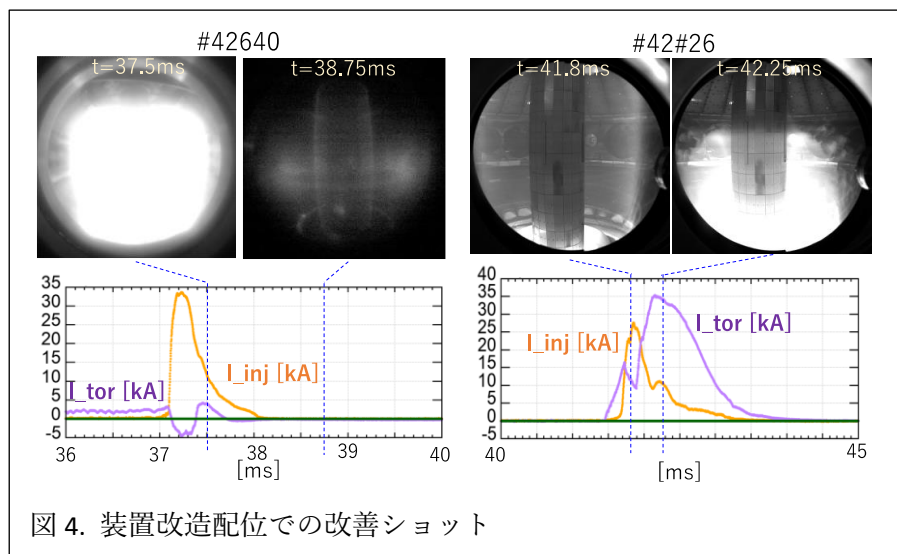


図4. 装置改造配位での改善ショット

パッシェンの放電条件を満たすように高圧噴出ガスを充填させ、まずガス配管1からの噴出ガスにより着実に着火を生じさせてガス配管2からの噴出ガスによりそれを入射領域全域に誘起させる。2系統のガス噴出量を調整することで最適なプラズマ着火条件を得ることが出来ると予想する。今年度末にこのガス導入システムを用いたプラズマ着火実験を実施する予定である。確実に円筒電極内側のみにプラズマ着火を生じさせることが出来れば、入射磁束は的確に発展してその磁束量に応じた磁気面の形成と電流閉じ込めが可能になる。

以上の成果は、国際会議 20th International ST Workshop, October 18-31, 2019, Frascati (ポスター発表)、
29th International Toki Conference, October 27-30, 2020, Toki (ポスター発表)、国内学会 第 36 回 プラズ
マ・核融合学会 年会 2019.11.29 (口頭発表)、及び論文 Plasma and Fusion Research **16**, 2402048 (2021)
において発表されている。