

論文の内容の要旨

論文題目 : Verification and application of electron energization process during spherical tokamak merging start-up

(球状トカマク合体立ち上げにおける電子エネルギー付与過程の検証と応用)

氏名 : 牛木 知彦

1. 背景

球状トカマク[1]は高い閉じ込め性能とベータ値を両立しうることから、コンパクトで経済的な次世代の核融合炉として期待されるが、通常のトカマクと異なりトーラス容器中央部のスペースが狭いことから、初期プラズマの立ち上げに中心ソレノイドコイルを使用することが困難である。現在、中心ソレノイドコイルを用いない様々なプラズマ立ち上げ・電流駆動法の研究が行われているが、本研究室ではその中でも球状トカマク合体による立ち上げ法[2-6]を確立するための実験研究を行っている。

球状トカマク合体立ち上げ法はポロイダル磁場コイルの誘導により真空容器上下に2つの初期球状トカマクを生成し合体させることで磁気リコネクションおよび断熱圧縮による急速加熱を伴った高ベータ球状トカマクの生成を目指す独創的な手法であり、東京大学のTS-3/TS-4[2]、カラム研究所のSTART/MAST装置[3]で研究された他、Tokamak Energy Ltd.のST40装置[4]でその手法が採用され近年注目が高まっている。

本手法の最大の利点である磁気リコネクションを通じたイオン加熱に関しては、近年までに実験的な検証が進んでおり、合体過程ではリコネクションの際に磁気エネルギーが流出したイオンの運動エネルギーに変換され、やがて下流域でイオン加熱が起こることが明らかになっている[7]。しかしその一方、電子の挙動に関しては数値実験/室内実験を通して研究途上にある。近年の粒子シミュレーション研究では、球状トカマク合体のような高ガイド磁場（トロイダル磁場）の存在下でのリコネクションでは、トロイダル方向のリコネクション電場によって電子が効率的に加速され、X点近傍で非熱的な高速電子が生成されることが示唆されており[8, 9]、このような高速電子の存在はリコネクションの局所構造のみならず電子へのエネルギー変換効率にも影響を及ぼす可能性があるため実験的な検証が必要である。そこで本論文ではUTST装置[6]を主に対象とし球状トカマク合体立ち上げにおけるリコネクション電場による電子加速を通じたエネルギー付与過程の検証とその電子加速を有効に活用し、高電子温度の球状トカマクを立ち上げるために必要となる非接触磁場計測の開発を行った。

2. 球状トカマク合体中の電子加速機構の検証

上記のような非熱的な高速電子の存在の検証はトムソン散乱計測をはじめとした電子温度計測では困難である事から、本研究では軟X線領域の電子の制動放射光を観測することによりその検証を行った。合体中のX点を見込むように配置されたSBDによる軟X線計測系からは合体中のみバルクの電子温度からは予測されない高エネルギーの軟X線バーストが観測された。図1は条件を変えた複数放電における軟X線強度と実効電

場 $E_t (B_t/B_p)$ の関係性を示したものであり、軟X線発光強度は実効電場への強い依存性を持っていることがわかる[10]。このことからPICシミュレーションによる予測と同様に合体中のリコネクション電場によるX点近傍の磁力線に沿った電子加速機構の存在が示唆される。

さらにMicro channel plate (MCP) と高速度カメラを用いた軟X線イメージングシステムを開発・運用しこの加速電子の詳細な空間構造を明らかにした。水平視線から観測された軟X線 (>100eV) 像をアーベル逆変換により再構成して得られた軟X線の二次元発光分布とX点付近

でのポロイダル磁束、トロイダル電場の時間発展を図2に示す。リコネクションの最初期に径方向内側下流域においてやや広範な領域で観測される発光は、リコネクションが進行するにつれX点を中心としたセパトトリクスに沿った局所構造をとり、最終的に径方向外側で局在する。トロイダル電場が十分に成長 (>約100V/m) した9520.5 μ secで見られるセパトトリクスの右上と左下のブランチに沿った構造はリコネクション電場による電子の加速方向と一致している。

さらに磁気プローブアレイにより計測された磁場分布に基づき初期粒子を配置し、トロイダル方向の誘導電場によって磁力線方向へ加速される電子の軌道計算を行ったところ、軟X線イメージングシステムで観測される100eV以上に加速された電子は、軟X線計測で観測されたものと同様にリコネクション最初期に径方向内側下流域で広範囲に広がり、リコネクション電場が十分に成長した発光後半の時刻ではX点を中心としたセパトトリクスに沿った構造をとることが分かった。シミュレーション研究などでよく扱われるような定常状態のリコネクションを考えた場合、

リコネクション下流域においてトロイダル方向の誘導電場によりつくられる磁力線方向の電場は、荷電分離（ガイド磁場リコネクションにおける電子とイオンの異なるフローパターンによって引き起こされる）によって生じるポロイダル面内電場によって抑制されるため、計算により得られたような下流域での顕著な磁力線方向への加速は存在しない。しかし、それにも関わらずリコネクション最初期には広範囲な軟X線発光が広がることから、定常に到達する前のリコネクション最初期においてははまだ下流域で荷電分離が十分に進んでおらず磁力線方向の電場

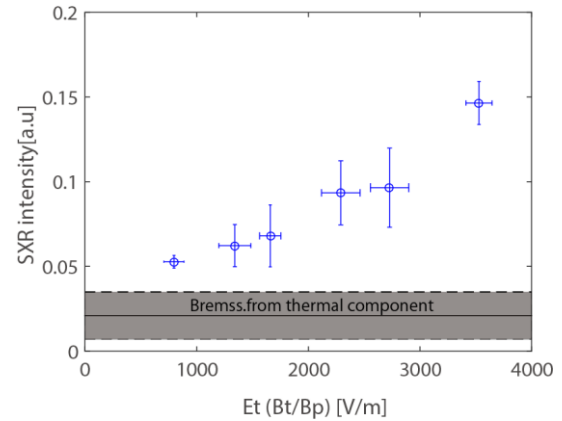


図1：合体中の軟X線発光強度と実効電場の関係性 [10]

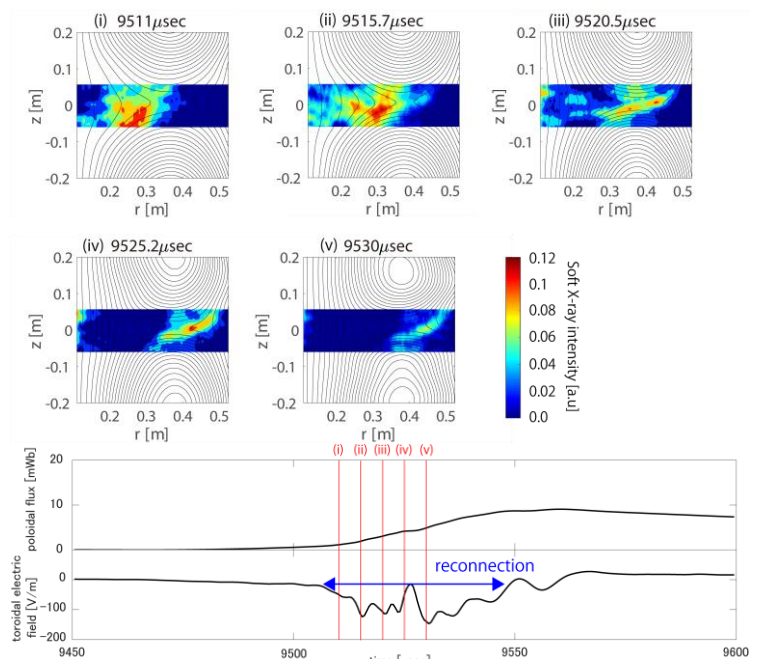


図2：アーベル逆変換により得られた軟X線の二次元発光分布とX点付近でのポロイダル磁束、トロイダル電場の時間発展

が広範囲に存在することが予測される。

これらの結果からUTSTでの球状トカマク合体立ち上げにおいては、X点近傍でリコネクション電場による磁力線方向への加速が顕著に発生しており、磁力線に平行な速度成分が大きな電子が生成され、特に合体後の球状トカマクの外側の磁気面に多く存在していると考えられる。このようなリコネクション電子加速の効率を高め加熱につなげるためには、強烈な電場は必要なくむしろ定常に達する前のリコネクション最初期のような条件をリコネクション電場の大きさや持続時間を適切に制御することにより維持し、最適なプラズマ合体条件を実現する必要がある。

3. 修正コーシー条件面 (CCS) 法を用いた球状トカマク合体中の非接触磁場計測の開発

これまで UTST 装置では合体立ち上げの際のプラズマ位置形状をプラズマ内部に挿入された磁気プローブアレイにより直接計測して同定してきた。しかし、最近の軟 X 線計測から内部に挿入された磁気プローブアレイの存在が、合体後の電子温度の上昇の大きな妨げになっている事がわかっている。そのため、これまでに検証してきた合体中に生成される高速電子が、その後速度空間で緩和し、最終的に電子加熱効率に与える影響を定性的に評価するためには、接触計測に頼らずにプラズマ外部に設置された磁気センサーに基づく非接触磁場計測が不可欠となる。これは合体による電子加熱の最適化を行う際にも重要な技術となる。

しかし、球状トカマク合体法ではポロイダル磁場コイルの誘導により初期プラズマを生成することに加え、プラズマ電流および位置形状がその過程で劇的に変化することから、導体壁に流れる渦電流が磁場分布に与える影響を無視することができず、合体中の磁気面再構成は困難とされてきた。そのため本研究では合体中のプラズマの位置形状をプラズマ外部に配置された磁気センサーのみから同定するために、コーシー条件面

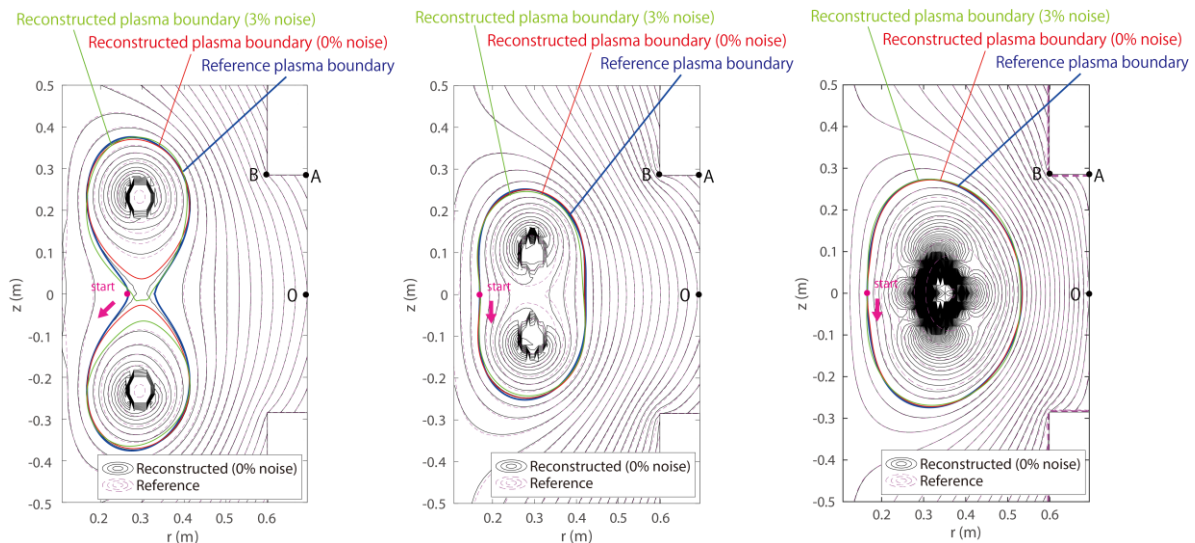


図 3 : UTST 装置における修正 CCS 法による再構成結果 (テスト計算) [13]

(CCS) 法[11]に基づき、さらに導体壁を流れる渦電流も未知量として加えた新手法である修正 CCS 法[12]を採用した。

本研究ではこの修正 CCS 法のコードに独自の改造を施すことで、合体中の複数の磁気軸が存在する場合でも再構成可能なコードを整備した。解析的に得られた合体中の特徴的な3つの磁束分布に基づくテスト計算による再構成結果を図3に示す。このテスト計算では3%のセンサーノイズを付加した場合でも良好な再構成解が得られており[13]、UTST 実機への実装に向けた見通しを得た。

また、この手法の有用性は Tokamak Energy Ltd. の ST40 装置の合体を対象に行われた応用でも示されてい

る。ST40 の立ち上げシナリオを作成する際に用いられた Fiesta + RZIP code により計算されたシミュレーション結果に基づくテスト計算結果を図 4 に示す。本解析においては UTST に比べ複雑な真空容器壁形状を持つ ST40 装置に対応するため、真空容器以外の複数の導体部にも渦電流計算節点を配置できるようにコードを改

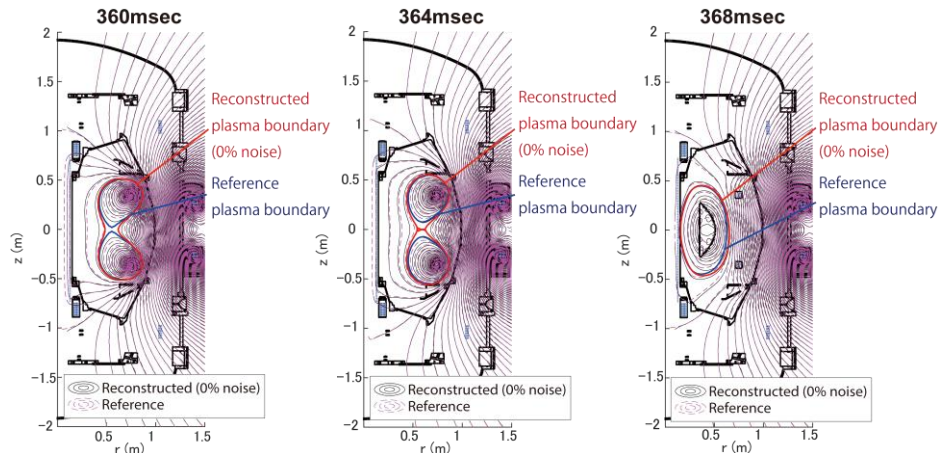


図 4 : ST40 装置における修正 CCS 法による再構成結果 (テスト計算)

良し、真空容器外部の磁束センサーを再構成に有効に用いることで UTST での解析と同等の精度を得られるようになった。

4. 結論

球状トカマク合体立ち上げにおける電子エネルギー付与過程の検証と電子加熱を実現するために必要となる非接触磁場計測の開発を行った。

軟 X 線領域の電子の制動放射を観測することで合体中のみバルクの電子温度からは予測されない高エネルギーの軟 X 線バーストを観測した。この軟 X 線の発光強度がトロイダル磁場およびトロイダル電場に依存することから、リコネクション電場によって磁力線方向に加速された高速電子の存在を示唆する成果を得た。さらに軟 X 線イメージングシステムを開発することでその詳細な空間分布を明らかにした。

修正 CCS 法の解析コードに独自の改良を施し UTST 装置、ST40 装置を対象としたテスト計算により球状トカマク合体過程での非接触磁場計測の導入の見通しを得た。この手法はプラズマの立ち上げ時に誘起される強烈な渦電流、複雑な導体形状といった条件下でも高精度な再構成が実現できるため、一般的な軸対称トラスプラズマに有効であることに加え、特に合体立ち上げにも十分適用できることを初めて示した。

参考文献

- [1] Y. -K. M. Peng, Phys. Plasmas 7 (2000) 1681
- [2] Y. Ono et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 789
- [3] M. Gryaznevich, V. Shevchenko and A. Sykes, Nucl. Fusion 46 (2006) S573
- [4] M.P. Gryaznevich and A. Sykes, Nucl. Fusion 57 (2017) 072003
- [5] P.F. Buxton, M.P. Gryaznevich and Tokamak Energy Ltd. team, Fusion Eng. Des 51-52 (2017) 1049
- [6] M. Inomoto et al., Nucl. Fusion 95 (2015) 033013
- [7] Y. Ono et al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 185001
- [8] P. Ricci et al., Phys. Plasmas 11 (2004) 4102
- [9] P. L. Pritchett et al., J. Geophys. Res. 109 (2004) A01220
- [10] T. Ushiki et al., Plasma Fusion Res 11 (2016) 2402100
- [11] K. Kurihara, Fusion Eng. Des 51-52 (2000) 1049
- [12] M. Itagaki, A. Sanpei, S. Masamune, and K. Watanabe, Plasma Fusion Res 9 (2014) 1402046
- [13] T. Ushiki, M. Inomoto and M. Itagaki, Fusion Eng. Des 122 (2017) 35-41