

## 論文の内容の要旨

論文題目 Study of Plasma Current Start-Up by the Lower Hybrid Wave  
Using X-ray Measurements on the TST-2 Spherical Tokamak  
(TST-2 球状トカマクにおける X 線計測を用いた低域混成波による  
プラズマ電流立ち上げの研究)

氏名 山崎 響

現在、エネルギー問題や環境問題の抜本的な解決を目指し、世界各国で核融合エネルギーの研究開発が進められており、低アスペクト比のトカマク型装置である球状トカマク装置を用いることで、核融合プラズマを経済的かつ安定に閉じ込めることができると期待されている。通常、トカマク装置では、中心ソレノイドコイル (CS) の誘導電場でプラズマ中に電流を流すが、低アスペクト比の実現にはこの CS を除去し、別の方法を用いてプラズマ中に電流を流す必要がある。電流を駆動する手法として、低域混成 (LH) 波と呼ばれる高周波 (RF) 波動を用いた方法が研究されており、これまでに、通常のトカマク装置では高い電流駆動効果を実証されてきた一方、LH 波の伝搬特性が大きく異なる ST 装置における電流駆動、立ち上げの過程は未だ確立されていない。

球状トカマク装置 TST-2 では LH 波を用いた電流駆動の実験およびシミュレーションを行っており、これまでに最大 28 kA の電流駆動を達成してきた。装置の外側と上側に設置されている二台のアンテナを用いたプラズマに対して、光線追跡コード GENRAY とフォッカー・プランクコード CQL3D を用いたシミュレーションの結果、上側から LH 波を入射したケースでは、外側から入射したケースよりも高いプラズマ電流が駆動されることが示唆され、実験結果と定性的に一致することが確認された一方、駆動電流の計算値は、実験的に達成された電流値よりも数倍大きく、シミュレーションの妥当性と精度の評価が必要である。

LH 波を用いた電流駆動では、ランダウ減衰によって電子を選択的に加速、生成することでプラズマ電流が駆動される。この過程で生成される高速電子は、イオンや電子との衝突の際の加速度運動で制動 X 線を放射するため、LH 波の伝搬と生成された高速電子の情報を得るうえで、X 線計測が有用である。

本研究では X 線計測を用いて LH 波による電流駆動プラズマを測定することで、LH 波が生成した高速電子のスペクトルを求め、異なる条件のプラズマにおけるスペクトル

の違いを明らかにすることで、これまでに構築された LH 波の伝搬・吸収のモデルの妥当性の評価と、その精度の向上を目的とした。この目的のため、(1) ランダウ減衰が起る 20 keV 以下の X 線に対するマルチエネルギー軟 X 線 (ME-SXR) 検出器によるイメージング計測、(2) 20 keV 程度以上の X 線を対象とした硬 X 線計測、の二種類の計測器について開発を行った。

ME-SXR 計測は、シンクロトロン実験用に開発された CMOS 素子を用いた計測で、近年核融合プラズマを対象とした計測に応用する試みが検討されており、この X 線検出器を用いた計測では、X 線スペクトルの空間分布計測だけでなく、プラズマの電子温度、不純物密度、実効電荷数などの空間分布を高い時間分解能で得ることが可能になると期待されている。しかし、実現可能な分解能は、プラズマからの X 線放射強度、検出器の視野、各ピクセルに設定されるエネルギー閾値の値に依存するため、プラズマからの X 線放射量を計算し、実現可能な分解能を見積もるための計算ツールを開発した。本ツールでは、NIST によって開発された衝突電離計算コード FLYCHK を用いて、複数の元素に対する 100 eV から 20 keV の電子温度のプラズマから放射される発光スペクトルを計算することで、任意の電子温度、密度、不純物密度のプラズマからの X 線発光量を求め、検出器の X 線感度、各ピクセルに設定される電子フィルタの設定値、実際の計測視線の情報を元に、検出器の各ピクセルにおいて想定される信号量を計算する。本ツールを用いて、ウィスコンシン・マディソン大学の MST 装置における信号量の見積もりを行い、計算結果を元に、1 cm の空間分解能で径方向の一次元計測を行う ME-SXR 計測システムを設計した。また MST 装置における PPCD (Pulsed poloidal current drive) プラズマを計測した結果、計算結果と実験結果が良い精度で一致し、本ツールの妥当性が検証された。

同時に、本 X 線検出器の導入が検討されている DIII-D 装置 (General Atomics) に対しても、L モード、H モードそれぞれのプラズマを対象とした不純物輸送の実験を模擬した計算を行った。その結果、L モードプラズマに対してはモリブデンを、H モードプラズマに対してはアルゴンを、それぞれ実効電荷数の増分で  $\Delta Z_{\text{eff}} \sim 0.1$  程度となるように導入することで、非常に強い発光が得られることがわかった。H モードにおけるペDESTAL 構造部を計測する視線における線積分信号量は、 $\sim 50$  photons/pixel/ms となり、0.5 cm/1 ms の分解能を仮定した場合には、十分な精度でペDESTAL 部を含む発光分布を再構成可能であることがわかった。

TST-2 における計測を目的とした設計では、信号量の見積もりからピンホール面積を

0.4 mm<sup>2</sup>とし、装置の水平面上からポロイダル方向にプラズマ全体を計測すると同時に、カメラを 90 度回転させることで、トロイダル方向のイメージングも同時に行うことが可能となる構造を提案した。

TST-2 におけるこれまでの計測から、プラズマの周辺部で加速された高速電子が閉じ込められずに、真空容器の金属構造物に衝突することで、Thick-target X 線を放射している可能性が示唆されていることから、透過率の異なる二枚のフィルタ (Fe : 10 μm、Al : 200 μm) と SBD (surface barrier diode) 検出器を用いた軟 X 線計測によって真空容器の主材料であるステンレス中の鉄に由来する X 線を対象とした計測を行った。また、モンテカルロコード PHITS を用いて、高速電子がステンレスに入射した際に放射される X 線スペクトルをシミュレートし、それぞれのフィルタを透過した信号量の比を計算すると、鉄の特性 X 線が存在するケースでは 18 %程度となるが、ステンレス由来の輝線を含まない連続スペクトルの場合は、60 %程度の信号比となることが予想された。

計測の結果、放電前半の立ち上げ中の信号量の比は 20 %以下となり、ステンレスに由来する制動 X 線の存在を強く示唆する結果となった。また、入射する LH 波に対するパワー変調実験を行ったところ、変調に同期した発光量の変化が得られ、LH 波の入射と同時に鉄由来の発光を示唆する信号比を示す一方、変調が OFF の時刻で計測されるスペクトルは鉄に由来する輝線を含まない、連続スペクトルであることがわかった。

より高いエネルギーをもつ硬 X 線領域に対しては、NaI 結晶および LYSO 結晶を用いたシンチレーション検出器を用いた計測を行った。LYSO は NaI と比べ数倍高速かつ 75 %程度の光量を得られ、高密度のため光電吸収比が大きいという特徴があるが、結晶中に約 2.6 %含まれる放射性元素である <sup>176</sup>Lu が放射する X 線による自己汚染が問題であり、これまでに核融合プラズマから放射される 1 MeV 以下の X 線計測に用いられた例は無かった。本研究では LYSO を用いた時間分解能に優れた検出器を新たに開発し、TST-2 におけるプラズマ計測に適用した。これによって時間分解能の向上と同時に、パルスパイルアップの抑制と最大カウントレートを向上させることに成功した。結晶が含有する放射性物質の自然崩壊に伴う X 線放射量は 3.5 kcps 程度であり、通常のプラズマ計測に対しては 1 %程度の誤差となることがわかった。

これらの検出器は幅広い視野を確保するために真空容器外に設置されており、そのためガラス窓や真空容器による遮蔽によって 100 keV 以下の X 線の計測は困難であったが、X 線透過率に優れた PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) 製フランジを通した視野をもつ検出器を新たに設置したことで、これまでに計測できなかった 100 keV 以下のス

ペクトルの計測に成功した。プラズマ電流の異なる放電についてスペクトルを比較すると、電流値の高い放電において、50 keV 以下の X 線が高いエネルギー流束を示したことから、これらのスペクトルは、ランダウ減衰によって生成された高速電子の分布関数におけるプラトー構造を反映しているものと考えられた。さらに、変調実験によって得られたスペクトルは、プラズマ電流、入射アンテナの依存性を維持したまま、LH 波を入射しない時間帯でエネルギー流束が 1/10 程度まで少なくなることがわかり、Thick-target X 線放射の影響を含まない高速電子のスペクトルが得られたと考えられたと考えられる。この結果は、ST 装置中における LH 波の伝搬を定量的に評価する上で、重要な計測結果となると期待される。

以上のように、本研究では X 線計測器の開発と、TST-2 における LH 波電流駆動プラズマを対象とした測定を行った。ME-SXR 計測システムの開発では、任意の電子温度、密度、不純物密度分布をもつプラズマからの軟 X 線発光量を見積もる計算を行い、このツールを用いてカメラ配位、電子フィルタの設定値、露光時間などの設定を含むシステムの設計・最適化と、その妥当性を検証した。これによって ME-SXR 検出器を用いた計測の設計、最適化があらゆる装置に対して可能になっただけでなく、測定結果から電子温度・密度分布、不純物密度分布および実効電荷分布を再構築することで、核融合プラズマにおいて上記の物理量を同時に計測することが可能となる極めて有用なツールを世界で初めて開発した。

また、TST-2 おいて二枚のフィルタを用いた軟 X 線計測を行ったことで、真空容器のステンレスに由来する X 線放射の同定と時間変化の計測に初めて成功した。さらに、X 線計測の精度向上のために用いた LYSO 結晶による硬 X 線計測は、測定精度、時間分解能に優れていることが実証されたほか、金属構造物を計測視野に含まず、低いエネルギー領域まで計測可能な PEEK 製のフランジを用いた計測システムを新たに設置し計測を行ったことで、これまでに測定できなかった 100 keV 以下の領域を対象とした X 線計測に成功した。これらの計測を用いることによって、幅広いエネルギー帯のスペクトルとエネルギーフラックスの時間変化を得ることができ、球状トカマクにおける LH 波の理解が深化した。このことは、将来の球状トカマクにおける高効率の電流駆動、さらには球状トカマクを用いた経済的な核融合炉の開発における重要な貢献となる。