

TST-2 球状トカマクにおける低域混成波増幅系統の独立制御と 硬 X 線計測システムによる電流駆動の研究

2017 年度修了 複雑理工学専攻
47166123 田尻芳之
指導教員 高瀬雄一 教授

キーワード：核融合，球状トカマク，高周波加熱，電流駆動，硬 X 線計測

1 序論

我々は昨今，エネルギーの枯渇問題に対して様々な再生可能エネルギーによって解決を試みているが，有効なエネルギー源の実用化には至っていない。そこで，無尽蔵と言われる重水素を燃料源とした核融合発電の研究が世界的に行われている。核融合反応を効率的に起こすことは，核融合炉の経済性の向上を意味する。そこでプラズマを有限領域に閉じ込める手法としてトカマクと呼ばれる，トーラス状の磁場を螺旋のように捻る磁場配位の研究が盛んに行われている。その中でも球状トカマクとはアスペクト比 $A = R/a$ (R ：大半径， a ：小半径) が低いトカマク装置で，球状を呈している。プラズマの閉じ込め性能を示す β 値はアスペクト比 A と反比例の関係にあると考えられており，球状トカマクは閉じ込め性能が良いと考えられている。そこで当研究室では図 1 に示す TST-2 球状トカマク装置を用いてプラズマ中の高周波による電流駆動等の研究を行っている [1]。

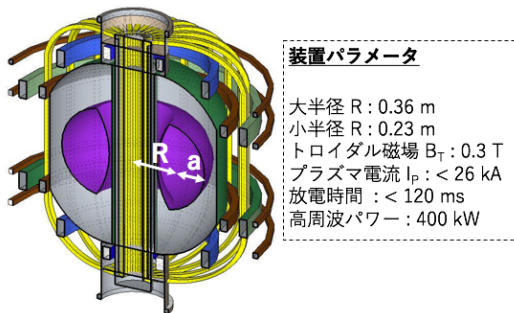


図 1 TST-2 球状トカマク装置の概観図

高周波による電流駆動は常に電流変化が必要な中心ソレノイドコイルによる電流駆動と違い，定常的なプラント運転に適していると考えられている。さらに低アスペクト比の実現の為に中心ソレノイドコイルの除去が必須と考えられており，高周波電流駆動の開発は至上命題とされている。

2 研究目的

TST-2 球状トカマク装置には，高周波による電流駆動を行うために 2 台の低域混成波励起用のアンテナ（外側，上側アンテナ）が実装されている。上側アンテナはプラズマの上部に位置し，外側アンテナは外側に位置している。従来の高周波増幅系統は一つの信号発生器を共有している為，2 台のアンテナ各々からの単独入射及び同時入射のみ可能であった。そこで，もう 1 台の独立な増幅系統を整備し，高周波入射シナリオの自由度を増加させることを第 1 の目的とする。また，自由度増加に伴い，電流駆動効率の高いシナリオの模索及び，シナリオの最適化を第 2 の目的とする。さらに，最適化されたシナリオにおいて，低域混成波がどのように伝搬し，吸収されているかを明らかにすることを第 3 の目的とする。

3 高周波増幅系統の整備

図 2 に従来の増幅器系統と本研究において整備した独立系統の回路図を示す。赤枠の部分は本研究において整備した箇所であり，信号発生器，波形整形器，アンプの増設及び回路変更を行なった。

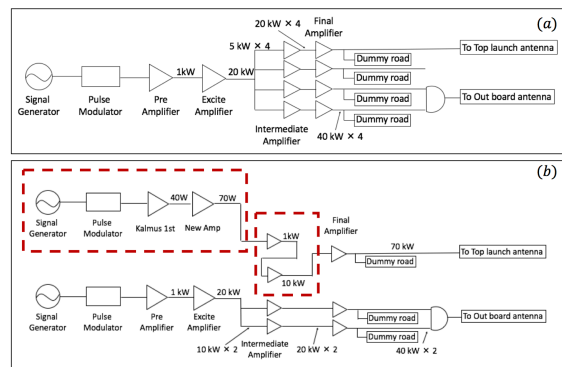


図 2 (a)：従来の増幅系統，(b)：本研究において整備した独立制御系統

4 高周波入射シナリオの最適化

数値計算を行なった結果、外側入射によりプラズマの放電を立ち上げ、その後、上側アンテナの入射に切替え、電流駆動を行うシナリオの電流駆動効率 ($\eta_{CD} = \bar{n}_e I_p R / P_{LH}$) で高いことを示唆された。そこで、従来の増幅系統で可能であった外側単独入射、同時入射と今回可能となった切替入射の電流駆動効率の評価を行った (図3)。切替入射の典型値は 3.3×10^{16} A/Wm², 同時入射は 2.7×10^{16} A/Wm², 切替入射は 4.7×10^{16} A/Wm² であり、切替入射が最も電流駆動効率が良いことを明らかにした。

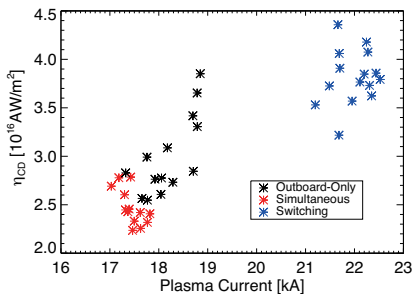


図3 3つのシナリオの電流駆動効率の比較。黒は外側単独入射、赤は同時入射、青は切替入射を示す。

5 硬X線計測

前述の結果から最適なシナリオと考えられる、切替入射について、硬X線計測システムを用いて高速電子の振る舞いを調べた。そのために、上側入射の信号に対して100%、1 kHzの振幅変調をかけ、硬X線のエネルギー束の立ち上がりの時間応答を調べた。さらに、光子のエネルギー領域を100 ~ 150 keV, 150 ~ 200 keV, 200 ~ 250 keVの3つの領域に分けて解析を行なった。解析結果を図4に示す。

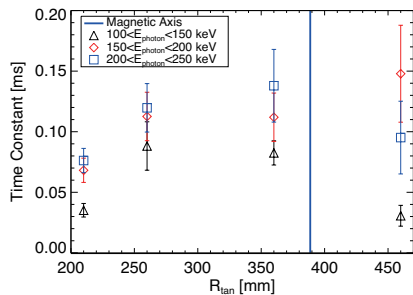


図4 各エネルギー領域における立ち上がり時定数

ただし、図中の横軸 R_{tan} は計測視線と装置中心の最小距離を表す。 $R_{tan} = 210$ mmでは、特に100 ~ 150 keVの領域について、立ち上がり時定数が短い。これは低域混成波が $R_{tan} = 210$ mm近傍で強い吸収を起こしていると考えられる。

6 結論

本研究では主に以下の成果が得られた。

- 波動伝搬の数値計算によって高周波増幅系統の独立制御可能の有効性を明らかにした。
- 従来の高周波増幅系統では、単一の信号発生器を2つのアンテナの増幅系統が共有していた為、2つの増幅系統を独立に制御することが出来なかったが、本研究において新たに信号発生器及びアンプを増設し、整備することにより、独立制御が可能となった。
- 従来の増幅系統においても可能であった外側単独入射及び同時入射、本研究により可能となった切替入射、それぞれの電流駆動効率を評価し、切替入射が最も電流駆動効率が良いことを明らかにした。
- 優位性が示された切替入射のオペレーションについて、さらに最適化を行なった。この結果より、トロイダル磁場と電流駆動効率に正の相関がある事、切替タイミングに最適値があることを明らかにした。
- これらの最適化を行なった結果、最大プラズマ電流は25.0 kAから26.0 kAまで増加した。また、リミターが同じ位置である場合、最大プラズマ電流は20.0 kAから6.0 kA増加した。
- 振幅変調実験における硬X線計測の結果を解析することにより、 $R_{tan} = 210$ mm付近において強い吸収が起きるという数値計算と整合する結果が得られた。

参考文献

- [1] T.Shinya, et al., Nucl.Fusion **57**, 073003 (2015)
- [2] H.Togashi, et al., Plasma and Fusion Research **12**, 1402030 (2017)