

論文題目 Non-Inductive Plasma Current Ramp-up on the TST-2 Spherical Tokamak Using the Lower Hybrid Wave

(TST-2 球状トカマクにおける低域混成波を用いた非誘導電流立ち上げ)

氏名 新屋 貴浩

1. 導入

核融合炉を実現するためには高温・高密度のプラズマを長時間閉じ込める必要があるが、外部コイルとプラズマ電流 (I_p) が生成する合成磁場を用いてプラズマを閉じ込めるトカマク方式が有力視されている (図 1 (a)) [1]。トカマクのなかでも特に、高効率・小型化を目指した球状トカマク (ST) が注目されている[2]。ST とは、装置中心からプラズマ中心までの距離 (大半径、 R_0) とプラズマの半径 (小半径、 a) の比であるアスペクト比 (A) が 2 程度以下の装置である (図 1 (b))。従来型トカマクでは、中心ソレノイド (CS) によって誘起された電場で I_p を立ち上げるが、ST 炉では装置中心に CS を設置するのは非現実的なので、CS に代わる I_p 立ち上げ法を開発する必要がある[3-4]。

従来型トカマク JT-60U で行われた I_p 立ち上げ実験では、CS ではなく外側コイルで生成したプラズマに低域混成波 (LHW) を入射して I_p を立ち上げることに成功している[5]。本研究では LHW による I_p 立ち上げ法を ST でも実証することを目的とし、TST-2 球状トカマクで 200 MHz の LHW を用いた I_p 立ち上げ実験を行った。LHW は、高周波波動の中で最も高い電流駆動効率を持つことが従来型トカマクの実験で示されているが、ST ではこの手法は使えないと考えられてきた。本研究で得られた成果は ST 炉の実現に大きく貢献するものである。

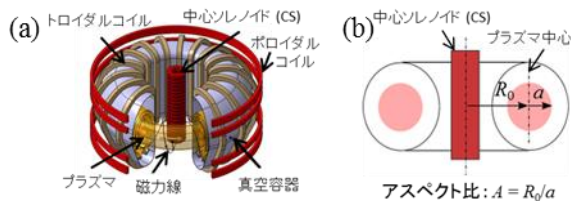


図 1 (a) トカマクの概念図[3]。 (b) アスペクト比の定義。

2. 低域混成波 (LHW)

LHWは静電波であり、磁力線方向の速度がその方向の位相速度 ($v_{ph,\parallel} = c/N_{\parallel}$) と同じ電子にランダウ共鳴によりエネルギー及び運動量を受け渡す[6]。ここで N_{\parallel} は LHW に対するプラズマの屈折率の磁力線方向成分である。LHW を励起する際、衝突周波数が低い高速電子の加速を狙うことで、高い電流駆動効率が得られる[7]。

プラズマ中を伝播する波の振る舞いを表す分散関係はよく知られている[6]。プラズマパラメータによっては遅波 (SW) と速波 (FW) の 2 つの解が存在する。LHW の周波数帯は $\Omega_i \ll \omega \ll \Omega_e$ の領域にあり、SW 解が高密度プラズマ中心付近で静電波として振る舞う LHW である[6]。LHW は低密度側のカットオフ密度と高密度側のモード変換密度の間でのみ伝搬可能である。更に $\omega \leq 2\omega_{LH}$

(ω_{LH} : LH 共鳴周波数) の領域では非線形過程による損失が顕著になることが知られているため、共鳴周波数よりも十分高い周波数を使う必要がある。

3. TST-2 球状トカマク

TST-2 は $R_0 = 0.36\sim 0.38$ m、 $a = 0.23\sim 0.25$ m ($A = 1.5\sim 1.6$) の ST であり (図 2 (a))、200 MHz の高周波を 100 kW 出力可能なシステムが 4 台設置されている (図 2 (b))。実験は $R = R_0$ におけるトロイダル磁場が約 0.12 T で行われ、プラズマ密度は $10^{17}\sim 10^{18}$ m⁻³、中心電子温度は 10~30 eV であった。LHW アンテナ前面にある最外殻磁気面 (LCFS) 付近の密度は $10^{15}\sim 10^{16}$ m⁻³ である。磁場及び密度に対して LHW の伝播領域を示したのが図 3 である。200 MHz の LHW に対するカットオフ密度 (青点線、約 5×10^{14} m⁻³)、 $N_{\parallel} = -2, -5, -10$ のモード変換密度 (黒実線)、 $\omega = 2\omega_{LH}$ (赤点線) が示されている。これよりアンテナ前面の密度はカ

ットオフ密度以上であること、 $|N_{||}| \geq 5$ であればプラズマ中心部まで到達可能であること、非線形過程による損失顕著ではないことがわかる。

TST-2 で LHW を入射するため、従来型トカマクで多くの実績があるグリルアンテナが 200 MHz 用に開発された [8, 9]。これを用いた実験から、 $-6 \leq N_{||,0} \leq -2$ が電流駆動に適した入射 $N_{||,0}$ であることがわかった [9]。一方、200 MHz で使うため導波管にアルミナを充填したため、高い反射率 (20%~60%) 及びアンテナ前面でのアークが観測され、100 kW 以上の入力は困難であった。高 I_p 実験を行うには、200 MHz でも低い反射率で LHW を励起できるアンテナの開発が必要とされた。

以前、TST-2 で試験的に用いられていた誘電結合型コムラインアンテナ (ICC アンテナ) は FW を励起するためプラズマとの結合度が 40% 程度とあまりよくなかったが、入力インピーダンスを 50 Ω にできることから、反射率は 10% 以下であった。そこで、コムライン型の LHW 励起アンテナを開発することで、低い反射率・高い結合度を得ることを目標とした。

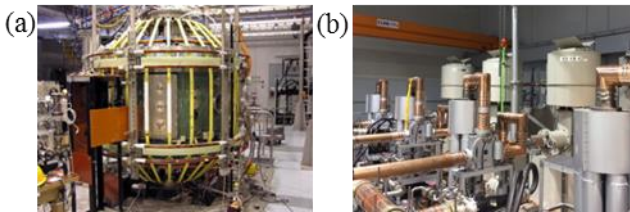


図2 (a) TST-2 球状トカマク。(b) 200 MHz 高周波増幅システム。

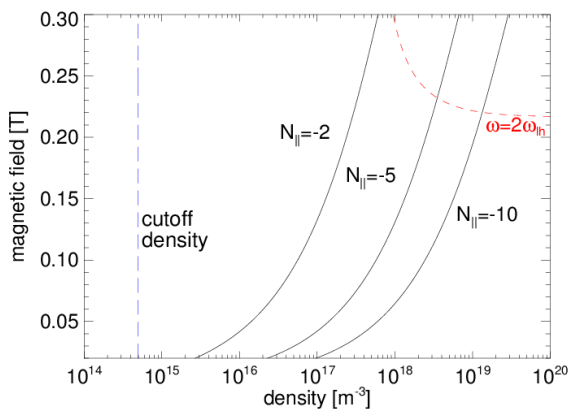


図3 プラズマ密度と磁場に対する LHW (200 MHz)

の伝播領域。カットオフ密度 (青点線)、 $N_{||} = -2, -5, -10$ のモード変換密度 (黒実線)、 $\omega = 2\omega_{LH}$ (赤点線) が表示されている。

4. LHW アンテナの開発

200 MHz でも低い反射率・高い結合度で LHW を入射するため、静電結合型コムラインアンテナ (CCC アンテナ) を米国ジェネラルアトミックス社と共同で開発した (図 4) [10]。CCC アンテナは、200 MHz で半波長共鳴する 13 本のエレメントから構成され、静電結合により隣のエレメントを励起する。CCC アンテナの整合調整を行ったところ、反射パワーを 0.1% 以下に抑えることに成功した (図 4、赤実線)。透過パワー (図 4、青点線) は約 82% で、残りの 18% にはアンテナの抵抗損失や真空中への電磁波放出等の損失が含まれる。プラズマ実験では、使用したフィードスルーからの反射が約 10% あるが、実験上問題ない大きさである。入射 $N_{||}$ ($N_{||,0}$) は -5.5 に調整した。

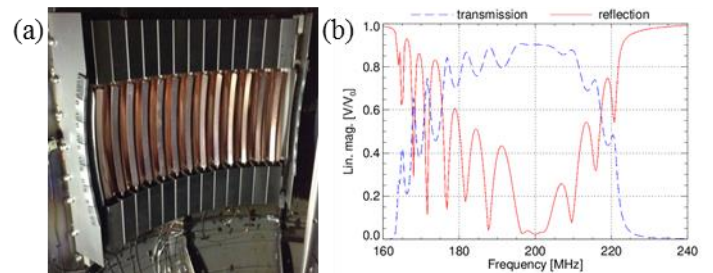


図4 (a) CCC アンテナ。(b) CCC アンテナの周波数特性。透過 (青点線) と反射 (赤実線) が示されている。

5. 非誘導電流立ち上げ実験

アンテナ開発の目的であった低い反射率 ($\leq 10\%$) と高い結合度 ($\sim 100\%$) が CCC アンテナを用いた I_p 立ち上げ実験で実証され、これまでで最も高い電流値 ($I_p \sim 20$ kA) が得られた (表 1)。プラズマとの結合度はアンテナリミター位置を調整することで行った。

実験結果から、これまでに TST-2 で用いられてきたアンテナと比べて 2~3 倍高い電流駆動効率

($\eta_{CD} \equiv \bar{n}_e R_0 I_p / P_{RF} [\text{Am}^{-2}/\text{W}]$, \bar{n}_e : 線平均電子密度、 P_{RF} : 高周波パワー) が得られた (表 1)。

表 1 TST-2 で用いられた三種類のアンテナで比較

	CCC	グリル	ICC
偏波	LHW	LHW	FW
反射率	$\leq 10\%$	20%-60%	$\leq 10\%$
結合度	100%	40-80%	80 \rightarrow 40%
最大 I_p	20 kA	10 kA	13 kA
$\eta_{CD} [10^{16}]$	≤ 15	≤ 5	≤ 5

CCC アンテナの開発が高 I_p 実験を可能にしたことで、 I_p 上昇を制限するプラズマパラメーターが明らかになった。まず、トロイダル磁場 (B_t) と垂直磁場 (B_v) が I_p の最大値と比例関係にあることがわかった (B_t 限界 \cdot B_v 限界)。 B_v はプラズマの平衡を保つために必要で、この比例関係は良く知られている。しかし、 B_t 限界は過去の文献からは明らかではない。理論的には B_t の増加は LHW のプラズマ中心部への近接条件を緩和することがわかっている。

また、密度にも I_p が制限されていることがわかった (密度限界)。2 種類の密度限界が観測され、それは上下リミター ($z = \pm 0.45 \text{ m}$) の有無で分類される。上下リミターが無い場合は、密度がある一定値を超えると I_p が減少し始めた。一方、上下リミターが有る場合は、モード変換密度と相関がある密度限界が観測された。つまり、上下リミターが有る場合は、 B_t の増加で密度限界が緩和され、高 I_p を得ることができた。

これについて詳しく調べるため、上リミターに静電プローブを取り付けた。計測結果から、LHWLCFS ($z = 0.3 \text{ m}$) から 0.15 m も離れた上リミター ($z = 0.45 \text{ m}$) まで到達していることがわかった。これまで、LCFS の外側 (SOL) への伝播は考慮されていなかったため、重要な発見となった。以上の結果から、上下リミターの存在により LHW が上下の壁付近で損失するのを防いだと考えられ

る。

トムソン散乱計測から、 $10 \sim 30 \text{ eV}$ の中心電子温度が得られたが、これに対して入射した波の位相速度が速すぎるため、プラズマ中で $N_{||}$ のアップシフトが起きていると考えられる。光線追跡計算を行った結果、プラズマ上側からの反射が顕著な $N_{||}$ アップシフトをもたらすことがわかった。これは、上リミターの存在が LHW の損失を軽減したという予想と矛盾しない。興味深いことに、内壁に近づくと温度が高くなる傾向が観測された。これは、内壁付近で起きるアップシフトが原因の一つであることを示唆する。しかし内壁付近での吸収が電流駆動を担うとは考えづらく、損失となっている可能性が高い。

6. 考察

実験結果から予想された損失パターンは図 5 のようにまとめることができる。損失を解消するには上側入射が有効であることが、光線追跡の結果から明らかになった。上側入射の場合、高密度でもプラズマ中心付近まで伝播し、その経路に沿って $N_{||}$ がアップシフトする。最適な上側入射位置を計算から求め、その位置に導入可能な上側アンテナを設計した。

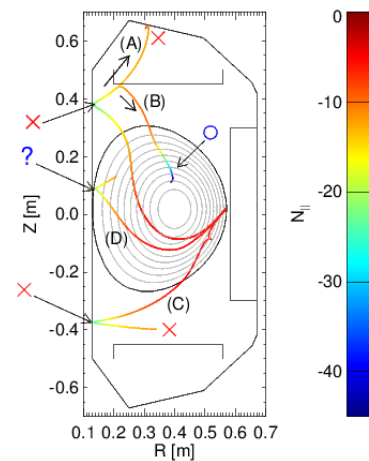


図 5 実験結果から予想される LHW の伝播パターン。(A) 上側の壁付近まで伝播 (損失、上リミターなし)。(B) 上リミターの位置で反射 (電流駆動、上リミターあり)。(C) モード変換による反射

(損失)。(D) 内壁付近で吸収 (損失の可能性が高い)。

7. 結論

LHW による I_p 立ち上げ法を ST で実証することを目的に、TST-2 で 200 MHz の LHW を用いた I_p 立ち上げ実験を行った。LHW アンテナの開発を行い、課題であった 200 MHz でも低い反射率 ($\leq 10\%$)・高い結合度 ($\sim 100\%$) が CCC アンテナによって達成され、これまでに TST-2 で用いられてきたアンテナと比べて 2~3 倍高い電流駆動効率、及び最も高い 20 kA を超える電流値が得られた。更に I_p を制限するプラズマパラメーター及び LHW の損失パターンが実験から明らかになった。LHW の損失は上側から入射することで回避可能なことが光線追跡の結果から明らかになった。

- [1] J. Wesson, *Tokamaks* (Oxford University Press, New York, 2011) .
- [2] Y. K. M. Peng, *Phys. Plasma* **7**, 1681 (2000) .
- [3] M. Kikuchi, K. Lackner and M. Q. Tran, *FUSION PHYSICS* (IAEA, Vienna, 2012) .
- [4] L.A. El-Guebaly, *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **51**, 325 (2000) .
- [5] Y. Takase, *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **78**, 8 (2002) .
- [6] T. H. Stix, *Waves in plasmas* (Springer-Verlag, New York, 1992) .
- [7] N. J. Fisch, *Rev. Mod. Phys.* **59**, 1 (1987) .
- [8] M. Brambilla, *Nucl. Fusion* **16**, 47 (1976) .
- [9] T. Wakatsuki, *et al.*, *Nucl. Fusion* **54**, 14 (2014) .
- [10] T. Shinya, *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 8 (2015) .