

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20246133
 研究課題名（和文） 超伝導トカマク起動のためのECHによる無誘導磁気面形成法の研究
 研究課題名（英文） Study of non-inductive formation of magnetic surface by ECH for start-up of super conducting tokamaks

研究代表者
 前川 孝（MAEKAWA TAKASHI）
 京都大学・エネルギー科学研究科・教授
 研究者番号：20127137

研究成果の概要（和文）：ITERのような超伝導トカマクを起動する場合、ECHによる無誘導磁気面形成はきわめて有用である。低アスペクト比の幾つかの装置においてこれが可能であることが示されているが、通常のアスペクト比（ $R/a=3$ ）の場合の実験はほとんど無かった。低アスペクト比実験装置において、可動リミターによりプラズマのアスペクト比を1.3から始めて最大3まで設定した一連の実験を行った。その結果、垂直磁場の径方向減衰係数を増大すれば $R/a=3$ においても磁気面形成が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：For start-up of future superconducting tokamaks such as ITER, non inductive formation of initial closed flux surfaces by electron cyclotron heating is quite beneficial. While this was possible in low aspect ratio devices, there were few experiments at a conventional aspect ratio of $R/a=3$. In the Low Aspect ratioTorus Experiment device a series of experiments has been done by using a movable limiter to adjust the aspect ratio of plasmas up to $R/a=3$. The results show that the formation of closed flux surfaces is still possible up to $R/a=3$ while higher decay indexes of vertical field are required as the aspect ratio increases.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	22,300,000	6,690,000	28,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ、無誘導立ち上げ、ECH、トカマク起動

1. 研究開始当初の背景

(1)次期大型装置 JT60-SA、ITER は超伝導コイルの運用により長時間運転を目指している。しかし、超伝導であってもセンターソレノイド (CS) の磁束量は増加せず、印加できるループ電圧(誘導電圧) V_L も低くなる。ITERでは $V_L=15V$ 以下での放電開始が求められていて、真空容器外壁部に近い位置に高精度のヌル(ポロイダル磁場のゼロ)領域を確保し電子サイクロトロン加熱 (ECH) による予備電離を行った後、プラズマ電流立ち上げを図

る計画である[参考文献1]。

(2)これには次の短所がある。

- ①170GHz、20MWの主ECHシステム以外に立ち上げ補助専用のECHシステムを要す。
- ② $|B_v| < 1mT$ であるヌル領域を確保するためにコイル電流に関して微妙な制御を要す。本来ポロイダルコイル系の主任務は燃焼実験のための $|B_v| \sim 1T$ での制御である。
- (3)一方、小型の低アスペクト比装置での実験で、弱い垂直磁場 B_v 下でのECH放電プラズマにおいてプラズマ電流が自発的に生じ、

さらには増大して磁気面が形成されることが分かって来た[参考文献 2]。この方式を ITER に適用できれば、以下の利点を得る。

- ①大電力の 170GHz 主 ECH システムを用いるので、立ち上げ補助 ECH システムが不要。
- ②トロイダルコイル系の微妙な制御が不要になり、コイル電源への要求を緩和できる。
- ③磁気面が既にあるので適度な V_L によりプラズマ電流と電子温度が速やかに上昇し、CS 磁束の抵抗損を最小限にできる。必要 V_L の低下により電源への要求を緩和できる。
- (4)このような状況において申請者のグループは京都大学の低アスペクトトーラス実験 (LATE) 装置において、定常垂直磁場 B_v のもとで ECH により自発的にプラズマ電流が生じ、電流ジャンプを経て磁気面が形成されることを見出した[2]。しかしながら、これらはすべて、低アスペクト比 $R_0/a=1.3\sim 1.6$ での成果であった。一方、通常アスペクト比 $R_0/a\sim 3$ の JT-60U においても実験を試み、 $B_v\sim 8\text{mT}$ で 110GHz, 1 MW の電力により $I_p=17\text{kA}$ の電流を得たが、磁気面形成に至らなかった。電流ジャンプも観測されなかった。

2. 研究の目的

低アスペクト比での成果をもとに、通常アスペクト比 ($R_0/a\sim 3$) での ECH による磁気面形成の原理実証を LATE 装置において行い、磁気面形成のためのプラズマ制御法の要点を明らかにすることが目的である。

磁気面形成は、電流生成、磁気構造および平衡の三者が関与する複雑な過程であり、多数の試行錯誤を要するが、機動性の高い小型装置を用いれば成功の可能性が高い。

アスペクト比はトロイダルプラズマを特徴づける最重要パラメータである。 $R_0/a=1.3\sim 3$ の広範囲のアスペクト比での結果を比較すればトロイダルプラズマ形成維持の理解が深まる。

3. 研究の方法

図 1 に示すように LATE 装置において新たに製作した可動リミターによりアスペクト比を最大 $R_0/a=3$ まで設定する。マイクロ波源は 5GHz (0.06sec, 160kW) と 2.45GHz (2sec, 20kW) の 2 式あるが、より低磁場で ECH が行え、かつパルス幅の長い 2.45GHz を選択する。 $R_0/a=3$ の場合は低アスペクト比の場合に較べて、2.5 倍のトロイダル磁場強度を要する。現状の電源でこの磁場強度では、パルス幅は 0.2 秒とれる。

マイクロ波入射後磁気面形成に至る時間は入射電力の増大とともに短くなるのが分かっていたので、初年度新たに 20kW マグネトロンを導入して最大 40kW が入射可能とし (図 1)、上記 0.2 秒のトロイダル磁場維持時間内での磁気面形成を目指した。

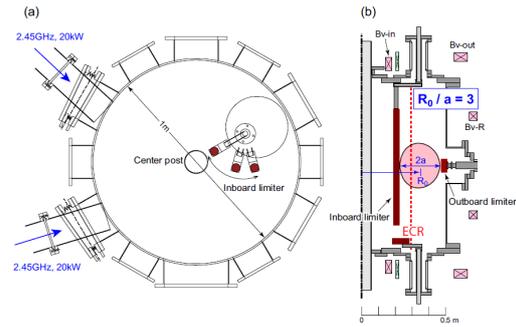


図 1 LATE 装置マイクロ波入射系と可動リミター

4. 研究成果

(1) $R_0/a=3$ での磁気面形成実験

図 2 に示すように、最初、トロイダル磁場と垂直磁場を立ち上げて定常にし、さらに水素を注入した後マイクロ波を入射する。電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 加熱により放電が即座に開始される。放電開始とともにプラズマ電流 I_p も流れ始め、水素ガス圧力の減少とともにゆっくりと増大する。電流が $I_p=0.5\text{kA}$ に到達すると突然急速に $I_p=0.9\text{kA}$ まで増大し (電流ジャンプと呼ぶ)、以降この値を保つ。図 2(j) (m) に示されるようにこの電流ジャンプに際して磁気面が形成される。このとき垂直磁場は定常であり、この結果は、以前の低アスペクト比の場合だけでなく、通常のアスペクト比 $R_0/a=3$ の場合においても ECR 加熱により磁気面が自発的に形成されることを示している。

図 2 (h-j) は磁気解析によって得られたプラズマ電流の時間発展を示している。電流は最初容器外壁の近くで縦長の形状で流れ始め、 I_p の増加とともに内側に向かって広がり、電流ジャンプの直前においては ECR 層の近くまで分布が広がる。電流分布だけでなく、 $R=37\text{cm}$ と $R=27\text{cm}$ の二つの垂直コードでの線密度、XUV 分布およびプラズマ可視光像の時間発展はいずれもプラズマ電流の増大とともにプラズマが ECR 層に向かって広がることを示している。

特に、ECR 層よりやや外側での XUV の分布の増大はこの領域でのバルク電子温度の上昇によるものである。電流ジャンプ前の開いた磁場構造下でのプラズマ電流はバルク電子の圧力によって駆動される平衡電流と推定される[発表論文⑨]。プラズマ圧力の増大によりこの平衡電流が大きくなると、その自己場により順方向高速電子の一部は開磁場下にもかかわらず閉じた通過軌道を取り得るようになる。通過電子数の増加に正のフィードバックが働き、プラズマ電流が急速に増大し電流ジャンプが生じる[2]。一旦磁気面が形成されると EC 電流駆動による高速電子テイルが形成され電流が保たれる。

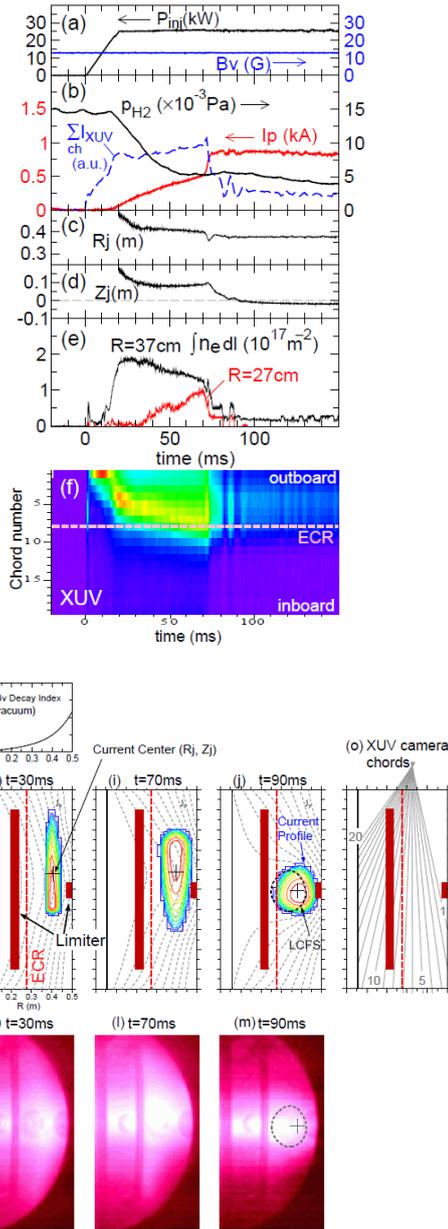


図2 アスペクト比 $R_0/a=3$ での磁気面形成実験。
(a-f) 放電波形, (g) 垂直磁場減衰係数の径分布、
(h-j) プラズマ電流分布、(k-m) 可視光像。(c)、(d) は
それぞれプラズマ電流中心の R 、 Z 位置を示す。

(2) 磁気面形成における B_v 減衰係数依存性

電流ジャンプによる自発的磁気面形成は強く B_v 減衰係数 $n = -(R/B_v)(\partial B_v / \partial R)$ に依存している。図3に様々なアスペクト比におけるプラズマ電流の発展を減衰係数の関数としてプロットした。低アスペクト比 $R_0/a=1.3$ の場合は n が極めて小さい場合でも電流ジャンプが生じ磁気面が形成されるが、 $R_0/a=2, 3$ と大きくなるとともに磁気面形成には大きな減衰係数が必要になる。

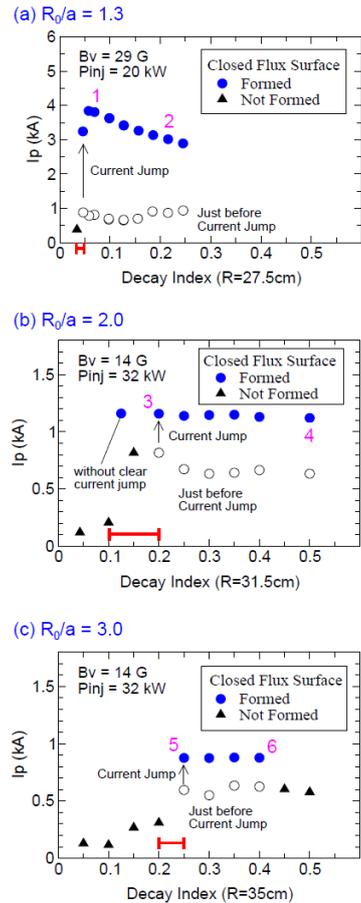


図3 アスペクト比 R_0/a が增大すると垂直磁場の減衰係数が大きい領域で磁気面が得られる。

垂直磁場の減衰係数は磁力線に沿ったミラー比に関連していて、以上の結果は電流ジャンプによる磁気面形成には ECR 加熱を受ける電子のミラー閉じ込めが重要であることを示唆している。アスペクト比が増大するとき一定のミラー比を確保するためには減衰係数を増大させる必要があることが以下のように示される。

赤道面上を $R=R_0$ で横切る外部磁場による磁力線について考える (図4参照)。この磁力線上の $z=a$ での磁場強度の赤道面上での磁場強度に対する比(ミラー比)は次の近似式で与えられる。

$$\frac{B_z(z=a)}{B_z(z=0)} \approx \exp\left(\frac{n(R=R_0) a^2}{2 R_0^2}\right)$$

この式はアスペクト比を変えるときミラー比を一定に保つためには、減衰係数をアスペクト比の2乗に比例して変える必要があることを示している。図5は図3の結果を整理したものであり、電流ジャンプが観測された

減衰係数の下限がアスペクト比に対して

$$n \propto (R_0/a)^2$$

に従って増加していることを示している。

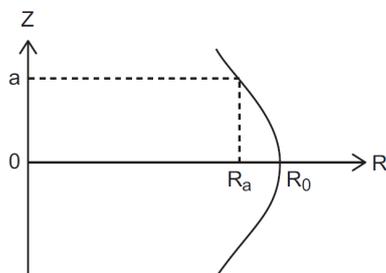


図4 磁力線のポロイダル断面への投影

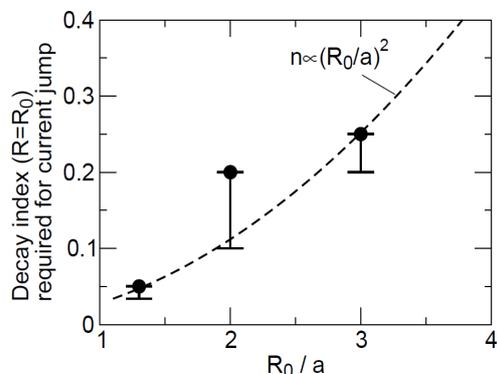


図5 電流ジャンプに必要な Bv 減衰係数の下限。図3のデータを用いて再プロット。

(3) 磁気面形成後の電流値と分布

電流ジャンプによる磁気面形成後は、電流は図2(b)に示す様にほぼ一定に保たれるが、その値は、低アスペクト比の場合は図3(a)のように Bv の減衰係数の増大とともに減少する。これは図5の1と2に示す様に電流分布の断面積の減少に対応している。すなわち、低い減衰係数の場合は楕円度が非常に大きい。一方 $R_0/a=2$ および 3 の場合は減衰係数に対する依存性はほとんど無い。この場合は電流分布の断面形状は円に近くその断面積は減衰係数にほとんど依存しない。

電流値そのものはアスペクト比の増大とともに下がる。これは、今の場合リミターにより強制的に電流が流れる許容断面をしばりこんでいる特殊条件によるものである。

最後に、最終電流値に対する電流ジャンプの割合はアスペクト比の増加とともに小さくなっていくことに注意したい。 $R_0/a=1.3$ では60-80%に達するが、 $R_0/a=3$ では~30%に減少する。

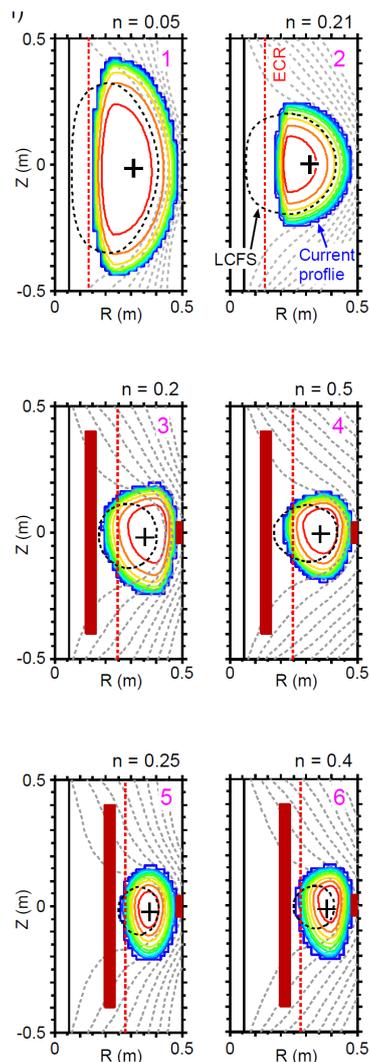


図5 電流ジャンプ後のプラズマ電流分布と磁気面形状。番号1-6は、それぞれ、図3の番号1-6に対応。

参考文献：

- [1] Y. Gribov et al., Nuclear Fusion **47** s385-s403 (2007)
- [2] T. Yoshinaga et al., Phys. Rev. Letters, **96** 125005 -1~4 (2006)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① H. Tanaka, T. Maekawa, M. Uchida, T. Yoshinaga, S. Nishi, Y. Kawazu, K. Kurata, T. Takeuchi, Non-Solenoidal Formation of

- Spherical Torus by ECH/ECCD in LATE, Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, EX/P6-8 (8p) (2008) (査読有)
- ② M. Uchida, H. Tanaka and T. Maekawa, Start-up and Formation of Spherical Torus Plasma by Electron Cyclotron Heating and Current Drive, 36th EPS Conference on Plasma Phys., ECA 33E, P5-156 (査読無)
- ③ M. Uchida, H. Tanaka and T. Maekawa, Non-inductive Start-up and Formation of Spherical Torus by Using Electron Cyclotron Range of Frequency on LATE, Proc. 18th Topical Conf. on RF Power in Plasmas, Gent, Belgium, ECA 33E, P5-156, (2009) (査読無)
- ④ 前川 孝、田中 仁、打田正樹、電子バーンスタイン波によるプラズマ電流立ち上げ、電気学会論文誌 A IEEJ Trans. FM, Vol.129, pp.618-619 (2009) (査読有)
- ⑤ T. Maekawa, H. Tanaka and M. Uchida, Current Ramp-up by Microwave Power in the LATE device, Plasma Science and Technology Vol.11 pp394-396 (2009) (査読有)
- ⑥ M. Uchida, T. Yoshinaga, H. Tanaka and T. Maekawa, Rapid Current Ramp-up by Cyclotron-Driving Electrons beyond Runaway Velocity, Phys. Rev. Letters Vol.104 065001(4p) (2010) (査読有)
- ⑦ S. Nishi, T. Sakabe, M. Uchida, H. Tanaka and T. Maekawa, Observation of Vertical Charge-Separation Current in an Electron-Cyclotron-Heated Toroidal plasma, Plasma Phys. Control. Fusion Vol.52 065011(9p) (2010) (査読有)
- ⑧ M. Uchida, T. Maekawa, H. Tanaka, S. Ide, Y. Takase, F. Watanabe and S. Nishi, Generation of Initial Closed Flux Surface by ECH at Conventional Aspect Ratio of $R/a \sim 3$; Experiments on the LATE device and JT-60U Tokamak, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, EXW/P2-12 (8p), (2010) (査読有)
- ⑨ S. Nishi, T. Sakabe, M. Uchida, H. Tanaka and T. Maekawa, Current Circulation and Equilibrium in Toroidal ECR Plasmas in the LATE Device Plasma Phys. Control. Fusion Vol.52 125004(32p)(2010)(査読有)

[学会発表] (計7件)

- ① H. Tanaka, T. Maekawa, M. Uchida, S. Nishi, T. Yoshinaga, Recent Results on Formation of Spherical Torus by ECH/ECCD in the LATE Device, Joint Meeting of the 4th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 14th

- International Workshop on Spherical Torus October 7 – 10, 2008, Frascati, Italy
- ② M. Uchida, T. Maekawa, H. Tanaka, T. Yoshinaga, S. Nishi, Solenoid-Free Formation of Spherical Torus by ECH/ECCD in the Low Aspect Ratio Torus Experiment Device, ICPP2008, Fukuoka, JAPAN, Sep. 8-12, 2008
- ③ T. Maekawa, H. Tanaka, M. Uchida and the LATE group, Equilibrium analysis of current ramp-up plasma in the LATE device, 15th International Workshop on Spherical Torus, U. Wisconsin Madison, October 22-24, 2009
- ④ 前川孝、西誠司、坂部智久、打田正樹、田中仁、トロイダル ECR プラズマにおける垂直荷電分離電流の循環 I、日本物理学会 26pQJ-2、大阪府立大学、2010年9月26日
- ⑤ 前川孝、西誠司、坂部智久、打田正樹、田中仁、トロイダル ECR プラズマにおける垂直荷電分離電流の循環 II、日本物理学会 26pQJ-3、大阪府立大学、2010年9月26日
- ⑥ 打田正樹、渡辺文武、野口悠人、逢見翔太、黒田賢剛、山本ゆりえ、田中仁、前川孝、電子バーンスタイン波による遮断密度を超越した電子密度領域での球状トカマク形成、第7回プラズマ・核融合学会年会、北海道大学学術交流会館、2010年12月2日
- ⑦ 渡辺文武、打田正樹、野口悠人、山本ゆりえ、逢見翔太、黒田賢剛、田中仁、前川孝、マイクロ波球状トカマク装置 LATE における外部摂動磁場印加の影響、第7回プラズマ・核融合学会年会、北海道大学学術交流会館、2010年12月2日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 孝 (MAEKAWA TAKASHI)
京都大学・エネルギー科学研究科・教授
研究者番号：20127137

(2) 研究分担者

田中 仁 (TANAKA HITOSHI)
京都大学・エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号：90183863
打田 正樹 (UCHIDA MASDAKI)
京都大学・エネルギー科学研究科・助教
研究者番号：90322164

(3) 連携研究者

無し