

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06992

研究課題名(和文)異常波モードEC波によるトカマク炉における1千万度プラズマ非誘導初期形成の提案

研究課題名(英文)Non inductive buildup of keV plasma using X-wave in fusion tokamak

研究代表者

前川 孝(MAEKAWA, Takashi)

京都大学・エネルギー科学研究科・名誉教授

研究者番号：20127137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：電子サイクロトロン(EC)加熱・電流駆動による高温プラズマの非誘導形成法を提案した。まずO波モードでの斜め入射を行う。O波は無吸収でEC共鳴層を通過し、内壁での反射によりX波に変換され、再びEC共鳴層に近接し、今度は完全に吸収され、プラズマ圧力を高め、初期開磁場で圧力に比例したトロイダル電流を生じさせ、初期磁気面を形成する。この段階に至れば電子温度は100eVを超え、X波モードでの斜め入射によるEC電流駆動を行う。すなわち、X波はサイクロトロン遮断層に至る前にドップラー効果により吸収され高効率電流駆動が実現する。ITERにおいては4MWの電力で130kA、1keVのプラズマを生成できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トカマク炉においてはプラズマ電流 $I_p$ の起動と立ち上げが不可欠である。電子サイクロトロン(EC)加熱・電流駆動により非誘導的に $I_p \sim 100$ kAまで立ち上げ、1千万度( $\sim 1$ keV)の電子温度を得れば、抵抗が大幅に下がり、その後、低い一周誘導電圧 $V_L$ で $I_p$ を燃焼プラズマ保持に必要な値まで立ち上げ得る。すなわち、 $V_L$ を $I_p$ の起動のために高める必要がなくなり、中心ソレノイド(CS)を取り巻く炉中心部の設計、およびCS駆動電源の諸条件を緩和できる。本研究成果はトカマク炉の性能を高め(学術的意義)、加えて、トカマク炉の初期建設経費の低減に資する(社会的意義)。

研究成果の概要(英文)：Non-inductive buildup of a hot plasma using Electron Cyclotron Heating and Current Drive is theoretically proposed. There are two wave injection methods. The first is oblique X-wave injection referred to as DX method. For the low density start-up plasma, the wave damps away via cyclotron resonance absorption before encountering the cyclotron cutoff layer when the electron temperature is  $T_e > 100$ eV and realize an efficiency ECCD. Another is oblique O-wave injection, referred to as OX method. The waves pass through the EC resonance layer and are mode-converted into oblique X-waves upon reflection on the inboard wall. Then the X-waves propagate toward the ECR layer and cyclotron-damp away even when  $T_e$  is very low. The OX method is appropriate for the initial stage of the build-up discharge where  $T_e$  is low, while the DX method is appropriate for latter half of the discharge where  $T_e > 100$ eV. The analyses show that the plasma with 130kA and 1keV is realized by 4MW of wave power.

研究分野：プラズマ核融合

キーワード：ECH/ECCD トカマク 非誘導立ち上げ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) トカマク炉においてはプラズマ電流  $I_p$  の起動と立ち上げが不可欠である。電子サイクロトロン加熱・電流駆動(ECH/ECCD)により非誘導的に  $I_p \sim 100\text{kA}$  まで立ち上げ、1千万度 ( $\sim 1\text{keV}$ ) の電子温度を得れば、抵抗が大幅に下がり、その後、低い一周誘導電圧  $V_L$  で  $I_p$  を燃焼プラズマ保持に必要な値まで立ち上げ得る。すなわち、 $V_L$  を  $I_p$  の起動のために高める必要が無くなり、中心ソレノイド (CS) を取り巻く炉中心部の設計の諸条件を緩和できる。
- (2) ECH/ECCD システムはプラズマ近傍に構造物を要せず、炉工学的に好都合である。
- (3) 燃焼プラズマのテアリングモードの抑制に用意される ECH/ECCD 電力を有効利用できる。

## 2. 研究の目的

立ち上げ初期プラズマは低温低密度であり、通常用いられる正常波モードの波動は電子サイクロトロン吸収が低すぎて使えないが、斜め伝播異常波モードの波動は立ち上げ初期プラズマでも非常に強い吸収が期待できる。本研究は、1千万度プラズマの非誘導初期形成を目指し、異常波による高効率 ECH/ECCD ためのミリ波の入射法とその適用結果を数値解析により明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 異状波伝播と吸収：トカマクプラズマに向かって外側から異常波 (X波) あるいは正常波 (O波) を入射した場合の波動伝播軌道を冷たいプラズマ近似で調べる。準線形拡散により波動は電子サイクロトロン吸収される。準線形拡散の大きさを求めるに際して、正確な波動の偏波が必要になるが、温度効果を取り込んだ分散式から偏波をもとめ、サイクロトロン吸収の大きさをもとめる。電子温度が  $2\text{keV}$  を超えた領域では、相対論効果を正確に取り込んだ分散式より偏波をもとめ、準線形拡散による吸収の大きさを求める。
- (2) アジョイント法による駆動電流の算定：トカマクプラズマにおける上記の準線形拡散に伴う駆動電流を、磁気面上を走る共鳴電子に対するトロイダル効果を考慮したアジョイント法により算定する。
- (3) プラズマ成長に伴う最適法の探求：放電初期の開磁場下での電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) 法と磁気面形成後の ECH/ECCD 法について、プラズマパラメータの上昇とプラズマ平衡の発展の両者を考慮して、それぞれ最適案をもとめる。

## 4. 研究成果

### (1) 緒言

目標である1千万度(1keV)プラズマの非誘導初期形成が達成される放電の時間発展を考えてみよう(図1参照)。トロイダル磁場コイルにより発生した強力なトロイダル磁場  $B_t$  の下で電子サイクロトロン加熱 (ECH) によりプラズマを起動して放電を開始する。この初期プラズマを真空容器内に維持するために、強いトロイダル磁場に加え、垂直磁場コイルによる弱い外部垂直磁場  $B_v$  を重畳する。プラズマが生じるとその圧力に比例したプラズマ電流  $I_p$  がトロイダル方向に流れる。プラズマ電流とプラズマ圧力によるフープ力がプラズマ大半径方向に生じるが、この外向きの力が内向きの  $I_p \times B_v$  の力により抑えられ、プラズマが真空容器内に維持される。トカマクにおいては、プラズマ電流はゼロから立ち上げることになるので、放電初期においてプラズ

マ電流は小さく、プラズマ電流による自己磁場は外部垂直磁場よりも小さく、プラズマは開磁場下にある。ECHによりプラズマ圧力と  $I_p$  が上昇し、やがて、小さな初期磁気面が生じるが、プラズマの大部分は開磁場領域にあり、小さな閉磁場領域を取り囲んでいる。開磁場段階からプラズマの大部分が閉磁場領域に納まるトカマク段階に至る遷移段階の始まりである。閉磁場領域内での電子サイクロトロン電流駆動によるプラズマ電流の増大に伴い閉磁場領域が拡大し、開磁場領域が縮小して、遷移段階が終了し、トカマク段階に至る。

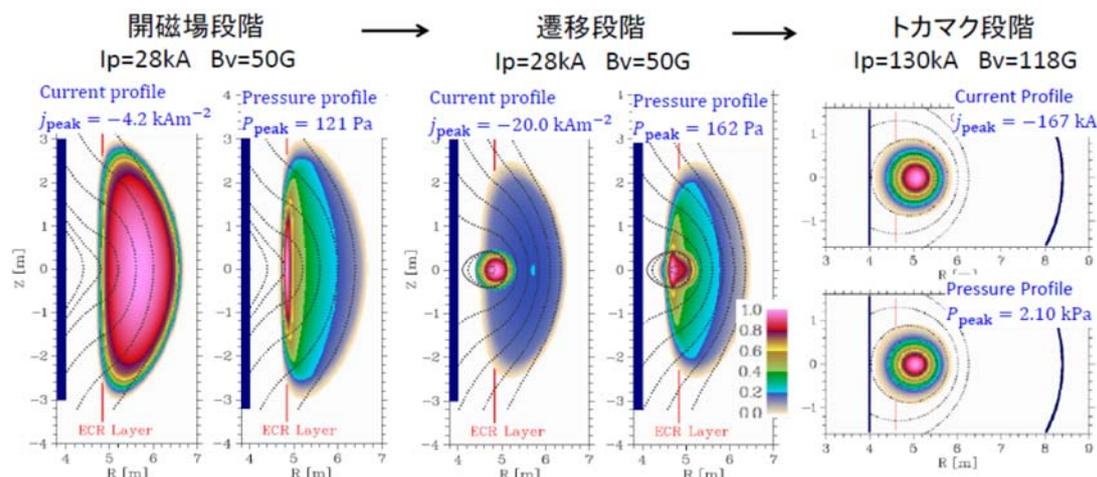


図1 ECH/ECCD非誘導立上げプラズマの発展

すでに幾つかの大型トカマク装置において、ECH/ECCDによるトカマク起動実験が行われた[1-4]。KSTAR装置における実験においては、炉工学的に都合の良い弱磁場側からのECH/ECCD用ミリ波入射により初期磁気面が形成されたが[4]、現状は1千万度(1keV)プラズマの非誘導初期形成の目標からは遠い。最重要な課題は開磁場段階からトカマク段階に至る各段階において、如何に高効率のECH/ECCDを実現するかである。

開磁場段階におけるプラズマ電流はプラズマ圧力によって駆動される、一種の、平衡維持電流である。従って、この段階においてはプラズマ圧力を高めるための高効率ECHが必要である。一方、遷移段階やトカマク段階における閉磁場領域内(磁気面内)のプラズマ電流を増大させるためにはこの領域での高効率ECCDが必要である。磁気面内においてはプラズマ圧力を高めるだけでは不十分である。

立ち上げプラズマは低温低密度でありO波のEC吸収は微弱で使えない。一方、斜め伝播のX波の偏波は磁場の向きに対して左手向き回転の円偏波が主成分となり、基本共鳴帯では、このようなプラズマにおいても非常に強く吸収される。弱磁場側からEC共鳴層にX波が近づくときドップラー効果で、磁場に平行方向の速さが熱速度  $v_t = (2T_e/m)^{1/2}$  の2~3倍の共鳴電子にサイクロトロン吸収されるので、高効率で電流を駆動する。炉工学的に有利な弱磁場側からのミリ波入射により斜めX波によるECH/ECCDを実現するために、X波モードでの斜め入射(DX法)とO波モードでの斜め入射(OX法)の二つの入射法がある。ITERプラズマを対象として、(2)においてOX法およびDX法によるECH/ECCDの詳細を述べる。加えて、核融合温度に至るランプアッププラズマにおけるX波ECCDの性能を(3)で示す。

## (2) OX法及びDX法によるECH/ECCD [5]

OX法を用いた場合の光線軌道の例が図2に示されている。周波数190GHzのミリ波がO波モー

ドで弱磁場側から斜め入射されている。O波はEC共鳴(ECR)層を電力吸収無しに通り抜け、内側の容器壁に衝突し、反射される。大きな入射角での反射に際し、O波電力の大部分はX波にモード変換される ([5]の(14)式)。このX波は弱磁側に向かって進み、図2の低温( $T_e=7\text{eV}$ )の場合でもECR層前面で完全に吸収される。

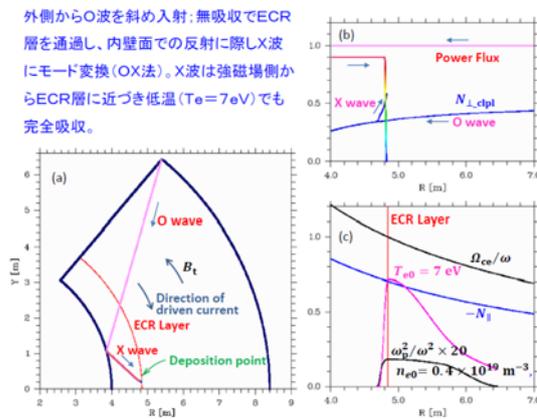


図2 O X法 ( $T_e=7\text{eV}$ , Freq.=190 GHz)

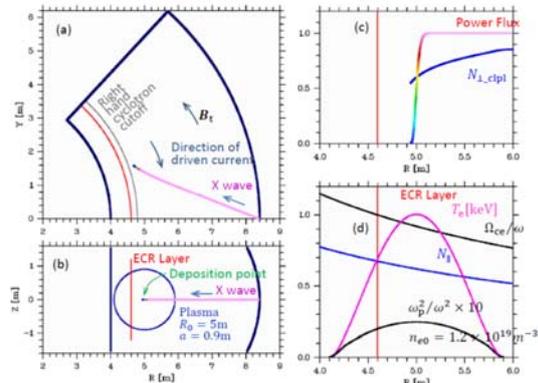


図3 D X法 ( $T_e=1\text{keV}$ , Freq.=200 GHz)

D X法においては図3に示す様にミリ波を直接X波モードで弱磁場側から斜め入射する。X波はECR層に向かって伝播し、十分電子温度が高い場合、右手サイクロトロン遮断層に至る前にドップラー効果により完全に吸収される。低いと遮断層で反射され、吸収は無い。吸収が実現する温度条件は[5]の(1)式で与えられ、図3の条件では170eV以上であれば完全に吸収される。プラズマループの平衡の観点からは図3のプラズマの平衡を維持するためにはプラズマ電流  $I_p=142\text{kA}$  及び外部垂直磁場  $B_v=133\text{G}$  が必要である。アジョイント法[6]による解析では図3の場合の電流駆動効率は35 kA/MWなので4 MWの入射電力を要する。トカマクプラズマのLモード閉じ込め経験則[7]によると、この電力はこのプラズマ温度を維持するのに十分である。同様の解析を図1に示した様々な発展段階のプラズマに行った結果、4 MWの電力により、 $I_p=205\text{kA}$ ,  $n_{e0}=1.2 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ ,  $T_{e0}=2\text{keV}$  までプラズマを非誘導立ち上げ出来ることが分かった。

### (3) ランプアッププラズマにおけるX波 ECCD [8]

初期立ち上げから核融合温度に至る広い範囲の温度のITERプラズマに対するO波とX波の吸収率と電流駆動効率を調べた。計算パラメータは  $B_v=5.3\text{T}$  and  $N_{\perp}=0.6$  at  $R=6.2\text{m}$ ,  $\text{freq}=170\text{ GHz}$ ,  $Z_{\text{eff}}=2$  である。

低密度の立ち上げプラズマにおいては、サイクロトロン遮断層はECR層に近接して、電子温度が高くなると、弱磁場側からECR層に向かって入射されたX波はサイクロトロン遮断層に至る前にドップラー効果によりサイクロトロン吸収される。主に、熱速度  $v_t=(2T_e/m)^{1/2}$  の2倍を超える高速電子に共鳴吸収されるので電流駆動効率が高い。立ち上げプラズマの広いパラメータ範囲(電子温度  $T_{e0}=0.01\text{-}20\text{ keV}$ , 密度  $n_{e0}=1.0\text{-}3.0 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ )において、基本周波数帯である170GHzの領域で弱磁場側から入射したO波とX波の電流駆動効率を比較し、図4に示すように、X波がはるかに優れていることを示した。この高効率X波ECCDをITERプラズマの立ち上げ用いた場合のプラズマ電流ループの振る舞いを、回路方程式を用いて解析した。密度は  $n_e=1.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  に固定し、電子温度はLモード則に従うとした。外部垂直磁場を  $B_v=160\text{ Gauss}$  から650 Gaussにランプし、入射電力を  $P_{\text{rf}}=3\text{MW}$  から9 MWへランプすれば、電子温度は1.1keVから5 keVに上昇し、プラズマ電流は  $I_p=0.1\text{MA}$  から1 MAに上昇して9

Vsec の磁束を生み出せることが分かった

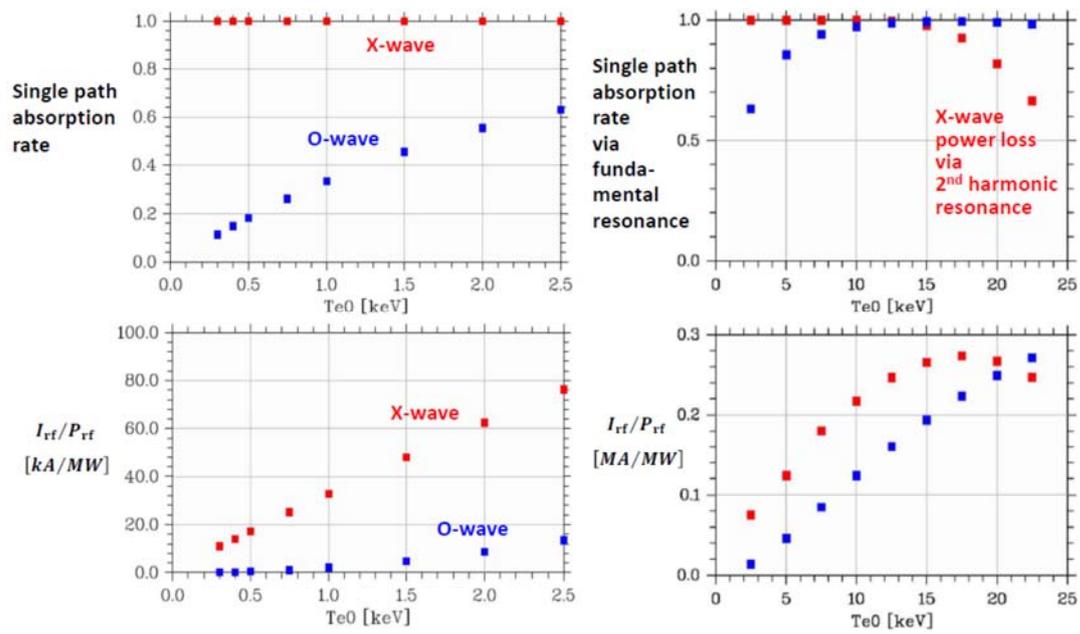


図4 ランプアッププラズマにおける吸収率と電流駆動効率 ( $n_{e0}=1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ )

<引用文献>

- [1] C.B. Forest et al., Phys. Plasmas 1 (1994)1568.
- [2] M. Uchida et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 063031.
- [3] G.L. Jackson et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 083015.
- [4] H. Tanaka et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 046003.
- [5] T. Maekawa et al., Nucl. Fusion 58(2018) 016037.
- [6] Y.R. Lin-Liu et al., Phys. Plasmas 10 (2003)4064.
- [7] S.M. Kaye et al., Nucl. Fusion 37 (1997) 1303.
- [8] T. Maekawa, Nucl. Fusion 58(2018) 106020.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Maekawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Performance of X-wave ECH/ECCD on current ramp-up plasmas in fusion tokamaks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106020(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aad4c7">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aad4c7</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Maekawa, M. Uchida, H. Tanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Non inductive current start-up and ramp-up by X-wave ECCD in fusion tokamaks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 45th EPS Conference on Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 P5.1046(4pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Maekawa, M. Uchida and H. Tanaka	4. 巻 58
2. 論文標題 Non-inductive build-up of a hot plasma by X-wave ECH/ECCD to remove initial high loop -voltage from start-up of fusion tokamaks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016037 (18pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa9586">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa9586</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前川孝、打田正樹、田中仁
2. 発表標題 X波ECCDによる核融合トカマクプラズマの立ち上げ支援
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会、2018年12月3 - 6日、大阪大学吹田キャンパス内コンベンションセンター、口頭発表(4Ba04)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Maekawa, M. Uchida, H. Tanaka
2. 発表標題 Non inductive current start-up and ramp-up by X-wave ECCD in fusion tokamaks
3. 学会等名 45th EPS Conference on Plasma Physics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川孝, 田中仁, 打田正樹
2. 発表標題 異常波ECH/ECCDによる核融合トカマクの非誘導立ち上げ
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 仁  (TANAKA Hitoshi)  (90183863)	京都大学・エネルギー科学研究科・教授   (14301)	
研究分担者	打田 正樹  (UCHIDA Masaki)  (90322164)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授   (14301)	