

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03511

研究課題名（和文）トカマクプラズマ中の高エネルギー電子とホイッスラー波動との相互作用

研究課題名（英文）Interaction between high-energy electron and whistler wave in tokamak plasma

研究代表者

池添 竜也（Ikezoe, Ryuya）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：70582849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電子サイクロトロン加熱により高エネルギー電子を生成できる球状トカマク装置 QUEST に優れた高周波波動計測環境を整備し、高エネルギー電子が駆動する MHz 帯の高周波波動の発生条件や特性を詳細に調べた。また、挑戦的な高エネルギー粒子プローブを開発することで、プラズマ電流立ち上げやディスラプションでの逃走電子ビーム形成過程で重要となる高エネルギー電子の位相空間情報を引き出すことに成功した。さらに大強度の硬 X 線を超高速に計測した副産物として、硬 X 線を放射している高エネルギー電子束自体が高周波波動と共に揺らいでいることが発見され、高エネルギー電子とそれが励起する波動間の相互作用が決定付けられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トカマクプラズマにおける高エネルギー電子の位相空間情報を高精度に取得する手法が初めて開拓された。これにより磁気圏プラズマ研究とも課題を共有する波動粒子相互作用の非線形発展等の未解明物理に対し、今後実験室プラズマでの精緻な研究展開が期待できる。また、フュージョンエネルギー開発で注目される球状トカマク型コンパクト炉の実現に向けて、高エネルギー電子を活用した超高効率プラズマ電流立ち上げは非常に魅力的であり、その制御手法としての波動活用およびディスラプション対策として波動応用に向けた知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：An excellent high-frequency wave measurement environment has been constructed on the QUEST spherical tokamak, where abundant high-energy electrons are generated through electron cyclotron heating, and the conditions and characteristics of high-frequency waves in the MHz band driven by high-energy electrons were investigated in detail. In addition, by developing a challenging high-energy particle probe, we succeeded in extracting phase-space information of high-energy electrons, which is important in plasma current start-up and runaway electron beam formation processes during disruption. Furthermore, as a by-product of ultra-high-speed measurement of high-intensity hard X-rays, it was discovered that the high-energy electron flux itself that emits hard X-rays fluctuates with the high-frequency waves, providing evidence for the existence of interactions between high-energy electrons and the waves they excite.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：高エネルギー電子 硬 X 線 荷電粒子計測 高周波モード 波動粒子相互作用 電子サイクロトロン加熱  
ピッチ角散乱 位相空間

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高温プラズマのトーラス型磁場閉じ込めでは、大部分のプラズマが熱緩和状態にあっても加熱や核融合反応生成イオン等に起因して一部の高エネルギーのイオンや電子が熱緩和せずに閉じ込められて強い非等方性を引き起こす。α粒子の閉じ込めの観点から、高エネルギーイオンが駆動する種々の不安定性についての研究が長年行われてきた。一方で、これまで注目されてこなかった高エネルギー電子も電子サイクロトロン(EC)波による非誘導プラズマ電流立上げや強いトロイダル電場加速の状況下において顕著な影響を及ぼしていることが明らかになってきた。ECスタートアップを行う球状トカマク装置 QUEST では高速電子に強く結合させる EC 波入射により高効率のプラズマ電流立上げが可能となったが、生成される高速電子割合が高い場合にはバルク電子の EC 加熱を阻害することが実験・波動解析から示された。高速電子はバルクプラズマとの衝突頻度が低いことから独自のダイナミクスを有し、またわずかな量でも大きなプラズマ電流を担えることから高速電子の軌道と閉じ込めがトカマク配位の形成ならびにその後の発展に影響する。また、高エネルギー電子が駆動するホイッスラー波が大型トカマク装置のディスラプション時に観測され、実効的なアバランチ閾値電場を押し上げている可能性のあるピッチ角散乱の効果について議論されている。

### 2. 研究の目的

位相空間での非線形ダイナミクスが介在する波動と高エネルギー電子の相互作用の解明が、EC プラズマ電流スタートアップ研究の質的進化ならびにディスラプション時の逃走電子ビーム生成過程の理解とその制御に対して重要である。本研究では、トカマクプラズマ中に励起されるホイッスラー波の詳細計測と高エネルギー電子のピッチ角分布の挑戦的な計測を通して、世界に先駆けて自発励起波動の効果を含めたトカマクプラズマ中の高エネルギー電子のダイナミクスを解明することを目指す。

### 3. 研究の方法

- 大型装置では困難なユニークな高周波計測環境の構築；  
球状トカマク装置 QUEST (九州大学) において、ホイッスラー周波数帯の高周波電磁揺動計測のための高周波コイルを作成し、高磁場側のセンターポストに設置する。高周波コイルは複数用意し、単なる多点計測のみでなく、偏波、上下対称性、ポロイダル方向とトロイダル方向波数計測、電磁・静電成分の弁別、等を行うことができるよう実機の取り付け可能なスペースを勘案しながら配置する。データ取得に用いる高速オシロスコープのメモリを増設し、プラズマパラメータが変化する時間スケールにわたっての高周波信号を一放電で取得できるよう整備し、実験効率の改善を図る。  
弱磁場側には高速駆動プローブを据え付け、その先端部に3軸の高周波コイルを設置し、大半径方向分布を測定可能にする。先端部には併せて2対の低周波用3軸磁気コイルも設置し、揺動・乱流計測に加え、精度の良いピッチ角同定に求められる周辺部の平衡磁場計測を実現する。
- 新しい高エネルギー荷電粒子プローブの開発；  
直接計測による高精度な荷電粒子の速度分布情報の取得を行う。従来の端損失イオン検出器とは異なり、主な計測対象を高エネルギー電子プローブとし、またプローブとして挿入することで損失軌道でない粒子をその場で局所的に測定できるようにする。そのために新たに考案した硬 X 線との弁別が可能で、超高計数率環境で波高分析が可能なシンチレータ2組からなる高エネルギー荷電粒子プローブを製作する。
- EC スタートアップおよびディスラプション時における波動・粒子の同時計測；  
EC 波による磁力線に対して垂直方向電子加熱とセンターソレノイドコイルで発生させる正・負トロイダル電場による水平方向電子加速の二つの制御ノブや不純物入射等を用いながら、高エネルギー電子が励起する波動ならびにそのピッチ角散乱強度の変化と共に発展する高速電子のダイナミクスを詳細に調べる。

### 4. 研究成果

#### 4-1. 球状トカマクにおける高速電子駆動の多彩なモードの検出

EC プラズマ電流立上げで高エネルギー電子を比較的生成しやすい QUEST 装置において、研究方法にあげた強磁場側と弱磁場側の両方での高周波波動計測環境を構築し、以下を見出した。

- プラズマ崩壊時のプラズマ電流の速い減衰時間帯に広い周波数範囲 (<250MHz) にわたり多

数のモードがバースト様に同時発生し、その他の時間帯は $<50$  MHz の低周波モードが支配的に出現する。

- モード毎に大半径方向内側と外側の強度比に違いがあり、トカマク中のホイッスラー周波数帯波動の大半径方向分布が実験で初めて評価された。
- バースト様の多数モード励起は強磁場側で最初に発生し、弱磁場側へ領域が広がる。
- プラズマ中心領域では比較的長い時間スケール (sec) でモードアクティビティが持続している。
- 波動周波数のアップとダウンチャープへの分岐 (位相空間ダイナミクス) が複数同時に異なる周波数バンドで発生しており、同じ場所の速度分布の変化で説明できないことから、波動の発生位置が周波数 (モード) 毎に異なることが暗に示唆された。
- 捕捉軌道の高エネルギー電子が大量に発生する内側ポロイダルヌル磁場配位では、トロイダル電場がない状況でも放電中 3-13 MHz にダウンチャープするモードが発生・消滅を繰り返しながら準定常的に発生する。モードの立たない周波数ギャップも確認され、アルフベン固有モードとの関連が示唆された。

#### 4-2. 高エネルギー荷電粒子プローブの開発

高エネルギー電子のピッチ角分布を高精度に得るため、粒子を直接検出する挿入プローブ型の荷電粒子検出器を開発した。図1に完成した高エネルギー粒子プローブ (EPP) の概略構成と装置写真を示す。EPP はプラズマ周辺部に設置し、高エネルギー電子の大きいラーモア巡回軌道を利用してスリットで入射粒子のピッチ角を限定し、シンチレータで入射粒子を測定する。プローブヘッド内部には二つの等価なシンチレータを設置しており、粒子が入射されるスリットは片側のみに設けられている。粒子はスリット側の検出器のみで計数され、硬 X 線は二つの検出器に統計的に同数計数される。その差分から高エネルギー電子の寄与分を評価する。 $10^6$  cps オーダーの高計数率が見込まれるため、シンチレーション光の減衰時間が極めて短い (2 ns) プラシンを使用している。シンチレーション光はファイバーで伝送し、光電子増倍管で電流パルスに変換した後、高速 (1 GHz) デジタルパルスプロセッサで時間と波高を保存する。

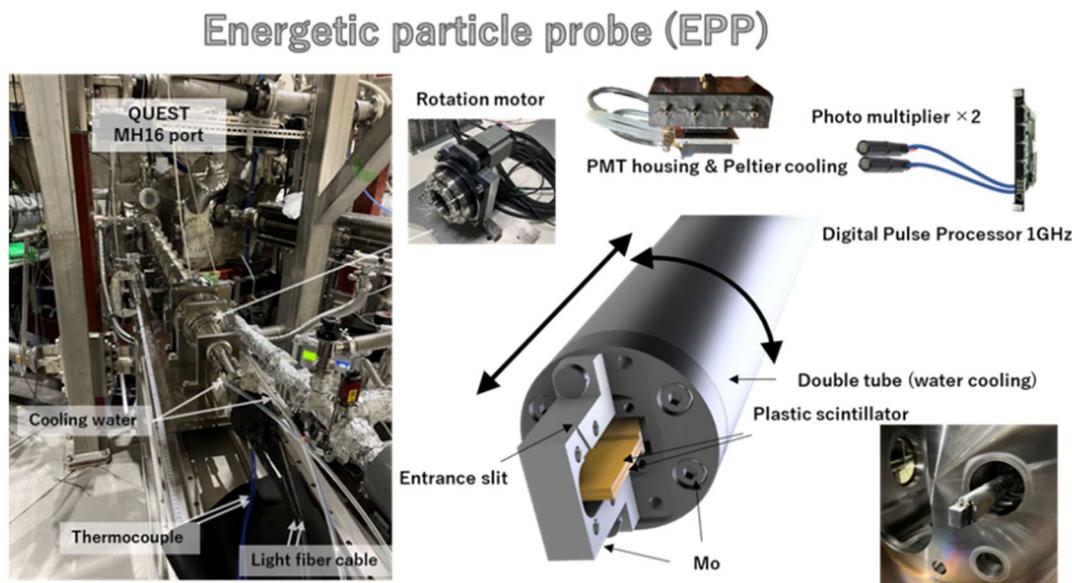


図1. 高エネルギー荷電粒子プローブ (EPP)

EPP の原理検証実験において大半径方向位置やピッチ角を繰り返し放電で掃引して計測を行った。高速電子が存在せず硬 X 線のみが測定される位置では二つの等価なシンチレータに統計的に同数のカウントが得られ、またピッチ角依存性がないことが確かめられた。そして EPP を高エネルギー電子が存在する領域まで挿入するとスリット側のシンチレータのカウント数が参照側よりも有意に上昇し、そのカウント数は EPP の回転角度 (ピッチ角) に応じて変化したことから狙い通りの高エネルギー電子の直接検出が可能なることが実証された。

EPP で得られたカウント数の大半径方向分布から、外側局所リミッターを大きく超えた位置まで高エネルギー電子が存在していること、QUEST 装置における到達限界は上下コニカル部の構造物 (高温壁) が決定していることなどが明らかになった。

EPP を挿入するとプローブヘッドに衝突する高エネルギー電子が発生させる制動硬 X 線が急激に増加する。その領域ではプラズマ全領域からの硬 X 線放射よりもセンサー直前のヘッド部で発生する硬 X 線が支配的なため、局所的な高エネルギー電子束の指標としてスリットがない側の参照 EPP センサーが有用なことが示された。これにより高エネルギー電子束の大半径方向分布を推定することができた。

#### 4-3. トカマクプラズマ中の高エネルギー電子の詳細ピッチ角分布の世界初の実験的評価

原理実証を終えた後、EPP に中空回転モーターを取り付けることで放電中の高速回転 (500 度/s) が実現され、詳細なピッチ角分布の測定が可能になった。図 2 に 28GHz の第 2 高調波 EC 波で立ち上げたプラズマ放電中に EPP を高速回転させ、硬 X 線寄与分を除去して得た高エネルギー電子のエネルギースペクトルのピッチ角依存を示す。プラズマ電流を駆動する方向に非常に強い非対称性が形成されていることが確認されると共にピッチ角が 45-90 度に特異な分布が存在していることがわかった。またエネルギースペクトルは急峻でエネルギーとピッチ角との間に強い相関が存在することがわかり、測定した SOL 領域では速度空間中の比較的狭い領域を占める高エネルギー電子のみが閉じ込められていることが明らかになった。

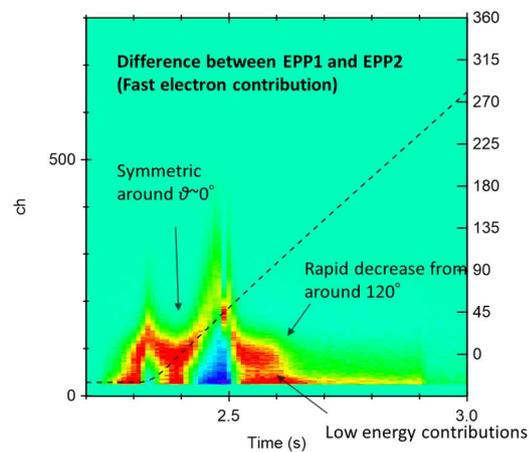


図 2. QUEST EC プラズマ電流上げ放電における SOL 高エネルギー電子のエネルギースペクトルのピッチ角依存

#### 4-4. 高エネルギー電子束の高周波揺らぎの発見

高速応答の EPP で高エネルギー電子由来の大強度硬 X 線を測れたことで、さらにその速い時間変化を計測できることが明らかになった。デジタルパルスプロセッサの代わりに高速オシロスコープで光電子増倍管の出力信号を 500 MHz でサンプリングし、高周波コイルで高速電子駆動モードの振る舞いを同時に計測したところ、高周波コイルに自発励起の高周波モードが検出されている際に硬 X 線フラックスも同じ周波数で揺れていることが明らかになった。図 3 にその例を示す。間接的ではあるが、高エネルギー電子束が時間的に揺らいでいることが世界で初めて見出された。通常の高周波コイルが波動の分散媒体であるバルクプラズマ自体の電磁揺動を測っているのに対し、硬 X 線は高周波モードを駆動する高エネルギー電子束の時間揺らぎを測っていることから、高エネルギー電子がその高周波モードと相互作用をしている確かな証拠が磁場閉じ込め高温プラズマにおいて得られた。

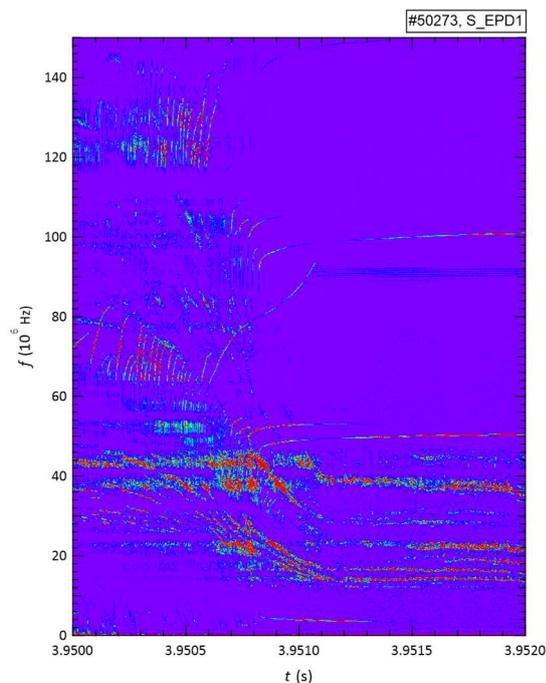


図 3. EPP で捉えた高エネルギー電子由来の硬 X 線フラックスの高周波揺らぎ。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 IKEZOE Ryuya, TAKEDA Kosuke, KURODA Kengoh, ONCHI Takumi, NAGATA Takahiro, SEKIYA Izumi, IDEI Hiroshi, ZENNIFA Fadilla, ZHANG Yifan, SAKAI Seiya, MIYATA Rikuya, YAMAGUCHI Takahiro, HASEGAWA Makoto, NAGASHIMA Yoshihiko, IDO Takeshi, HANADA Kazuaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Sudden Change Events of Plasma Current during Electron-Cyclotron Current Start-Up on the QUEST Spherical Tokamak	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402066 ~ 2402066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.2402066	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 R. IKEZOE, H. IDEI, T. ONCHI, K. KURODA, M. HASEGAWA, Y. NAGASHIMA, K. HANADA, T. IDO, F. ZENNIFA, T. YAMAGUCHI, R. MIYATA, Y. WANG, A. EJIRI, S. MURAKAMI	4. 巻 -
2. 論文標題 DYNAMICS OF FAST ELECTRONS AND KINETIC MODES IN THE ELECTRON CYCLOTRON HEATED QUEST SPHERICAL TOKAMAK	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 29th IAEA FEC proceedings	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 R. IKEZOE, H. IDEI, T. ONCHI, K. KURODA, M. HASEGAWA, Y. NAGASHIMA, K. HANADA, T. IDO, F. ZENNIFA, T. YAMAGUCHI, R. MIYATA, Y. WANG, A. EJIRI, S. MURAKAMI
2. 発表標題 DYNAMICS OF FAST ELECTRONS AND KINETIC MODES IN THE ELECTRON CYCLOTRON HEATED QUEST SPHERICAL TOKAMAK
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Ryuya IKEZOE
2. 発表標題 Diagnosing fast electrons interacted with kinetic waves on spherical tokamak
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Ryuya IKEZOE
2. 発表標題 Studies of fast electrons and corresponding kinetic modes on QUEST
3. 学会等名 12th Int. QUEST Workshop “ RF startup and sustainment in Spherical Tokamak ”
4. 発表年 2024年～2025年

1. 発表者名 池添竜也, 出射 浩, 恩地拓己, 長谷川真, 永島芳彦, 花田和明, 井戸 毅, Zennifa Fadilla, 山口貴大, 宮田陸矢, 白井祐大, 田井紗也香, 王 雲飛
2. 発表標題 QUESTにおける高速電子の直接検出
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 池添竜也, 出射 浩, 恩地拓己, 黒田賢剛, 王 洋, 張 逸凡, 坂井聖也, 宮田陸矢, 山口貴大, ZENNIFA Fadilla, 関谷 泉, 長谷川 真, 永島芳彦, 井戸 毅, 花田和明
2. 発表標題 球状トカマク装置QUESTにおける高周波モードと高エネルギー電子ダイナミクスのプローピングに向けた進展
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 王 洋, 恩地拓己, 花田和明, 張 逸凡, 関谷 泉, 池添竜也, 出射 浩
2. 発表標題 球状トカマク中の高エネルギー電子観測用 二次元硬X線計測器開発と初期結果
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 R. Ikezoe, K. Takeda, K. Kuroda, T. Onchi, T. Nagata, I. Sekiya, H. Idei, F. Zennifa, Y. Zhang, S. Sakai, R. Miyata, T. Yamaguchi, M. Hasegawa, Y. Nagashima, T. Ido, K. Hanada
2. 発表標題 Sudden change events of plasma current during electron-cyclotron current start-up on the QUEST spherical tokamak
3. 学会等名 31st Int. Toki Conf. (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Ryuya IKEZOE
2. 発表標題 Probing of fast electrons and corresponding kinetic modes on QUEST
3. 学会等名 11th Int. QUEST WS "RF startup and sustainment in Spherical Tokamak"
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 池添竜也, 武田康佑, 恩地拓己, 黒田賢剛, 出射浩, 福山雅治, 張逸凡, 坂井聖也, ZENNIFA Fadilla, 長谷川真, 井戸毅, 花田和明
2. 発表標題 非誘導立上げQUESTプラズマ中に自発励起される高周波モードの振る舞い
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 池添竜也, 武田康佑, 恩地拓己, 黒田賢剛, 出射浩, 福山雅治, 張逸凡, 坂井聖也, ZENNIFA Fadilla, 長谷川真, 井戸毅, 花田和明
2. 発表標題 球状トカマクQUESTにおける ホイッスラー周波数帯の波動励起の観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 池添竜也
2. 発表標題 実験室ミラー磁場配位における速度空間歪みとエネルギー移送
3. 学会等名 日本物理学会第77回年会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 池添竜也, 武田康佑, 恩地拓己, 黒田賢剛, 出射浩, 福山雅治, Yifan Zhang, 坂井聖也, Fadilla Zennifa, 長谷川真, 永島芳彦, 井戸毅, 花田和明
2. 発表標題 QUEST内側ポロイダルヌル放電における高周波の準周期的励起の観測
3. 学会等名 第10回ICRF加熱研究会「ICRF加熱装置の高性能化と将来応用」
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 池添竜也
2. 発表標題 QUESTにおける波動粒子相互作用の観測
3. 学会等名 第17回QUEST研究会
4. 発表年 2021年～2022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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------