

令和 6 年 5 月 31 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：21K03510

研究課題名（和文）複数EC高調波による加熱電流駆動で生成される高エネルギー電子の制動放射計測

研究課題名（英文）Bremsstrahlung X-ray measurement of energetic electrons at the current-drive by multiple harmonic electron cyclotron waves

研究代表者

恩地 拓己（Onchi, Takumi）

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：00727216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：球状トカマクではトロイダル磁場の勾配が強く、特定の周波数を選択することで、複数の電子サイクロトロン（EC）高調波共鳴層がプラズマ閉じ込め領域に共存する状態を作り出せる。相対論ドップラー効果によって広いプラズマ領域で数十keVを超える高エネルギー電子にEC波が高調波共鳴してプラズマ電流駆動が起きる。本研究では高エネルギー電子の振る舞いを理解するために制動放射の空間分布を観測できる硬X線二次元観測システムを開発した。球状トカマク装置QUESTにおける実験では電流を担う方向に運動する電子に起因する制動放射X線空間分布が観測された。また高いエネルギーの捕捉電子に起因するリミタ部からの放射も観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年発展が顕著な二次元X線検出器（検出エネルギー200 keV以下）を導入し、球状トカマクに適用して観測データを得た。特に電流を担う高エネルギー電子群によるX線の空間分布観測は新規性があると考えられる。金属構造に対する高エネルギー電子の衝突による放射強度が高く、またプラズマ内部からの制動放射と重なって検出されるため、X線空間分布計測の難易度が高いことが実験的に明らかになった。これらの結果は今後の計測器開発に重要な知見であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In spherical tokamaks, owing to the strong gradient of toroidal field, multiple harmonic resonance layers for electron cyclotron (EC) waves can coexist in plasma confinement region. EC waves resonate with energetic electrons in broad area due to the relativistic Doppler effect. In this research, a two-dimensional hard X-ray (HXR) detector was developed to observe spatial profile of bremsstrahlung radiation from energetic electrons. In the experiment in the QUEST spherical tokamak, HXR patterns, which is attributed to energetic electrons moving the current-drive side, have been observed. Energetic trapped-electrons hit the tungsten limiter so that the strong HXR is also observed from that.

研究分野：核融合学

キーワード：球状トカマク 電子サイクロトロン加熱 制動放射

1. 研究開始当初の背景

電子サイクロトロン(Electron Cyclotron, EC)加熱は高周波 (Radio Frequency, RF) をプラズマ領域外から入射するためアンテナへの熱負荷が低く, 将来の磁場閉じ込め核融合炉において主要加熱方法の一つである. さらに近年の研究進展により EC 加熱を使うことで非誘導もしくは非常に低い周回電圧でプラズマ電流立ち上げ・トカマク形成できることが示され, ITER や STEP など将来の熱核融合実験炉の電流立ち上げ時にもその役割は重要である.

球状トカマクではトロイダル磁場の勾配が強く, 特定の周波数を選択することで, 複数の EC 高調波共鳴層がプラズマ閉じ込め領域に共存する状態を作り出せる. QUEST 実験装置では 28 GHz-RF の第二, 第三, 第四高調波共鳴層を同時につくり, EC 加熱単独では当時世界最高クラスとなる 70 kA 以上のプラズマ電流立ち上げに成功した[Idei *et al.*, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 1149].

EC 加熱・電流駆動では, プラズマ電流を駆動するフォワード (FW) 方向 (電子の磁力線平行方向の速度 $v_{||} > 0$) に動く電子を選択的に加熱することが出来れば, 逆電流駆動するバックワード (BW) 方向 ($v_{||} < 0$) に動く電子を考慮しても正味の電流が流れる. このメカニズムにおいて高エネルギー電子の存在が鍵となる. 図 1 の上面図に示すように入射 RF ビームに角度を加え,

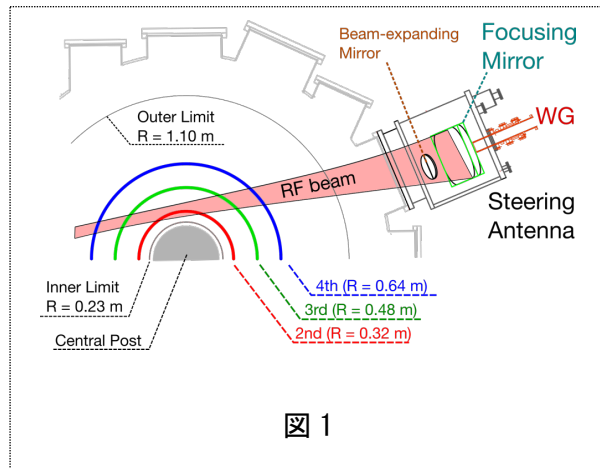


図 1

EC 波の波数ベクトルに磁力線平行成分があつて屈折率 $N_{||}$ が高い場合の共鳴条件を調べると, 数十 keV のエネルギーを持つ電子は相対論ドップラー効果によって共鳴層から充分離れた位置でも波動に共鳴する.

図 2 に QUEST 装置の条件で計算した共鳴電子速度成分比 $v_{||} / v_{\perp}$ の径方向依存性を示す. この図はトロイダル磁場 $B_t = 0.5$ T の第二高調波共鳴層地点 (大半径 $R = 0.32$ m) で $N_{||} = 0.75$ となるよう斜めに入射された EC 波が, 大半径方向のある位置で $v_{||} / v_{\perp}$ の速度成分比を持つ電子と共鳴することを示している. 1 keV 程度の電子の場合, 共鳴層付近で正負両方の $v_{||}$ を持つ電子が共鳴条件を満たす. 10 keV までエネルギーが上がると相対論的ドップラー効果で

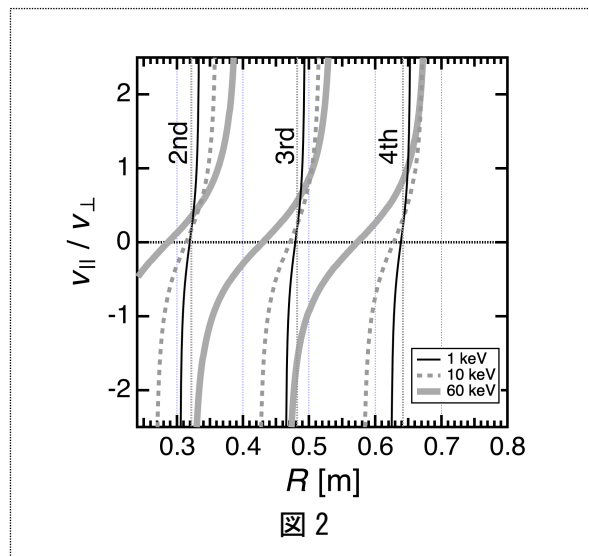


図 2

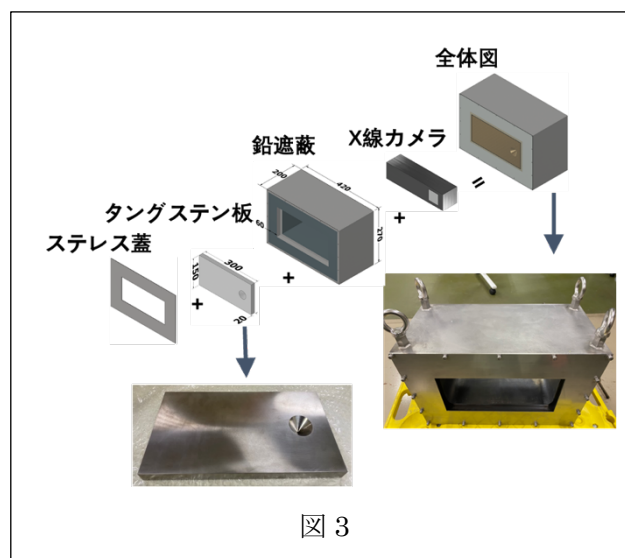
共鳴層周りの高・低磁場側で高い $v_{||} / v_{\perp}$ を持つ電子と EC 波が共鳴する．曲線を見ると高調波共鳴層位置を境におおよそ対称である．しかしさらにエネルギーが上がるとその対称性は強く破れる．第一に，高磁場側のセンターポストによって負の $v_{||}$ の共鳴条件が広い領域で消失する．第二に， n 次高調波と $v_{||} > 0$ (FW) 電子の共鳴領域は， $(n+1)$ 次高調波と $v_{||} < 0$ (BW) 電子の共鳴領域と重なる．Bornatici ら[Nucl. Fusion 23(1983)1153]によると n 次高調波は $(n+1)$ 次高調波よりも吸収が $(c/v_{th})^2$ 倍高いとされ，両者の共鳴条件が重なる領域では n 次高調波の効果が上回ると考えられる．この二つの要因によって共鳴条件が $v_{||}$ の正負で大きく異なり， $v_{||} > 0$ の電子を選択的に加熱して電流駆動することが出来る．また，光線追跡計算を行うと実験で観測された 18 乗台のバルク電子密度，10 eV オーダーの電子温度を仮定した場合に 28 GHz-EC 波の一回吸収は 1% 以下である．一方，トカマク内に 60 keV の電子が 3% 存在すると仮定した計算では，第二高調波共鳴層で $N_{||} = 0.75$ となる EC 波のエネルギーは 30 % 程度が一回吸収されると見積もられた [Onchi *et al.*, Physics of Plasmas 28 (2021) 022505].

2. 研究の目的

近年の実験研究の進展により，球状トカマクにおける EC 加熱電流立ち上げに高エネルギー電子の振る舞いが大きく関係していることが分かった．QUEST 装置における制動放射硬 X 線観測でも 50-200 keV の X 線カウント数はプラズマ電流値と共に上昇し，それらは正の相関関係にある．本研究では硬 X 線計測を発展させ，EC 加熱単独で加熱電流駆動されたトカマクプラズマの制動放射硬 X 線を二次元エネルギー分析し，プラズマ領域全体で高エネルギー電子の振る舞いを理解することを目的とする．そして観測から再構成して高エネルギー電子の空間情報を取得し，その空間分布を基に EC 波がトカマク空間内でどのように伝播・吸収されるか，光線追跡計算を通して解明することを目指す．

3. 研究の方法

球状トカマクの電子サイクロトロン加熱電流立ち上げ実験において，高エネルギー電子に起因する制動放射 X 線の空間分布観測を行う．本研究では広い視野を持つ X 線ピンホールカメラを開発した．検出器は 80×80 の CdTe (カドミウム・テルル) アレイ素子を有する HEXITEC を利用した．この検出器は 5 kHz のフレームレートで 200 keV 以下の X 線スペクトルを取得出来る．ピンホール部は X 線遮蔽効果に優れたタングステン合金 (ヘビーアロイ) 製とし，HEXITEC 検出器の正面に設



効果に優れたタングステン合金 (ヘビーアロイ) 製とし，HEXITEC 検出器の正面に設

置した。視野角は 68° となる。タングステン合金遮へいの厚みは 20 mm とした。このヘビーアロイシールドはピンホール周辺の厚み 2.5 mm の部分でも 200 keV の X 線を 97 %、500 keV の X 線を 48 % 遮蔽できる。また HEXITEC 側面の X 線遮蔽部は鉛製で、厚みは 60 mm である。開発したカメラの概念図及び写真を図 3 に示す。この X 線ピンホールカメラを QUEST 装置に設置し、EC 加熱された高エネルギー電子に起因する制動放射の空間分布を観測する。

4. 研究成果

QUEST 装置における実験では、EC 加熱によって生成されたプラズマ電流 50 kA を超える球状トカマクの観測に開発した X 線ピンホールカメラを適用した。観測領域は図 4 の写真に示すように、真空容器のセンターポスト(CP)を中央領域とする。その左側領域からの制動放射は FW 電子に起因し、右側領域からの放射は BW 電子に起因する。画像解析の結果、EC 加熱パワーの入射中、プラズマからの放射及び高エネルギー電子がプラズマ対向壁やリミタに衝突する際の放射の両方が重なり合った二次元 X 線分布が撮影されていることがわかった。強い放射があるリミタ部の X 線スペクトル上に、材料であるタングステンの特性 X 線($K\alpha$: 59 keV ; $K\beta$: 67 keV)のピークがある。低磁場側のアウターリミタでは 100 keV 以上の X 線カウントが多く、フラット形状のエネルギー Spektrum が観測される。これは 100 keV 以上のエネルギーを持つ捕捉電子群がプラズマ中心からドリフトしてスクレイプオフ層に存在していることを示唆している。

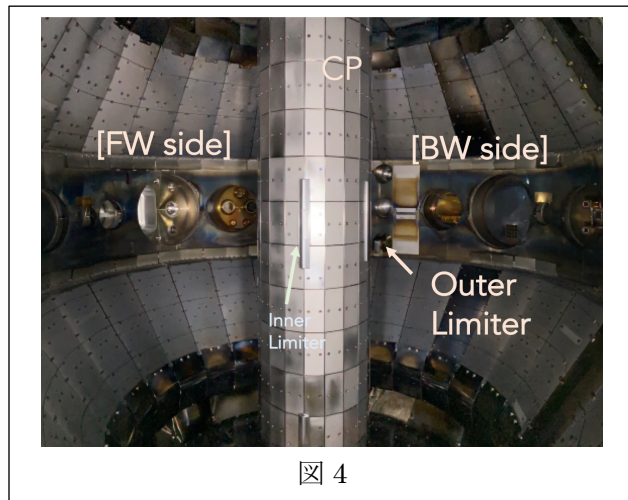


図 4

さらに RF 加熱パワーオフの瞬間にプラズマ対向壁からの制動放射は急減し、FW 方向と BW 方向の放射が非対称である二次元分布が観測された。その X 線画像を図 5 に示す。この形状はトカマクの磁気面構造と類似性がある。撮影時点では加熱パワーはオフ状態であり、逃走電子がトカマク配位に閉じこめられて運動している状態であると推定できる。この分布は高エネルギー電子群がトロイダル方向に非対称に加速されて電流を流していることを示唆している。

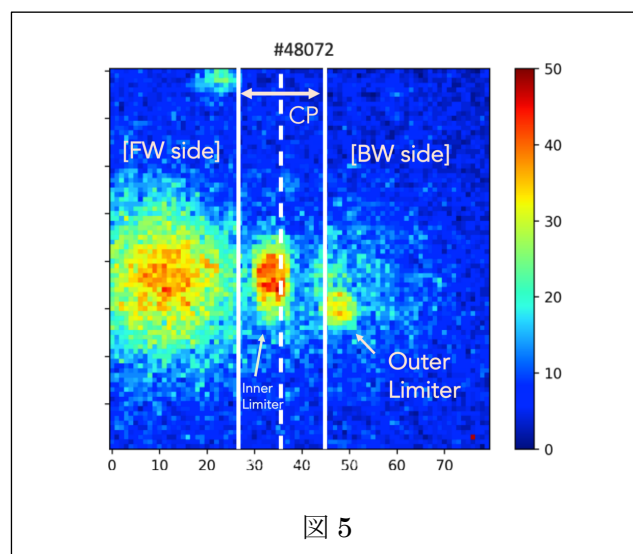


図 5

さらに RF 加熱パワーオフの瞬間にプラズマ対向壁からの制動放射は急減し、FW 方向と BW 方向の放射が非対称である二次元分布が観測された。その X 線画像を図 5 に示す。この形状はトカマクの磁気面構造と類似性がある。撮影時点では加熱パワーはオフ状態であり、逃走電子がトカマク配位に閉じこめられて運動している状態であると推定できる。この分布は高エネルギー電子群がトロイダル方向に非対称に加速されて電流を流していることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kojima S., Hanada K., Idei H., Onchi T., Ikezoe R., Nagashima Y., Hasegawa M., Kuroda K., Nakamura K., Higashijima A., Nagata T., Kawasaki S., Shimabukuro S., Elserafy H., Fukuyama M., Ejiri A., Shikama T., Yoneda N., Yoneda R., Kariya T., Takase Y., Murakami S., Bertelli N., Ono M.	4. 巻 63
2. 論文標題 Observation of second harmonic electron cyclotron resonance heating and current-drive transition during non-inductive plasma start-up experiment in QUEST	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 105002 ~ 105002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac1838	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 該当する
1. 著者名 Takase Y., Ejiri A., Fujita T., Hanada K., Idei H., Nagata M., Onchi T., Ono Y., Tanaka H., Tsujii N., Uchida M., Yasuda K., Kasahara H., Murakami S., Takeiri Y., Todo Y., Tsuji-Iio S., Kamada Y.	4. 巻 62
2. 論文標題 Overview of coordinated spherical tokamak research in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 042011 ~ 042011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac29cf	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 SUZUKI Kosuke, MURAKAMI Sadayoshi, OHDACHI Satoshi, IDEI Hiroshi, KURODA Kengoh, IKEZOE Ryuya, ONCHI Takumi	4. 巻 16
2. 論文標題 MHD Equilibrium Reconstruction Using the Visible Light Tomographic Method with Laplacian Eigenfunction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402090 ~ 2402090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhang Yifan, Onchi Takumi, Nakamura Kazuo, Kidani Akihiro, Yue Qilin, Kuroda Kengoh, Hasegawa Makoto, Ikezoe Ryuya, Idei Hiroshi	4. 巻 168
2. 論文標題 Designing an upgrade of ohmic heating system for the QUEST spherical tokamak	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112362 ~ 112362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112362	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 Onchi T., Idei H., Fukuyama M., Ogata D., Ashida R., Kariya T., Ejiri A., Matsuzaki K., Osawa Y., Peng Y., Kojima S., Watanabe O., Hasegawa M., Nakamura K., Kuroda K., Ikezoe R., Ido T., Hanada K., Bertelli N., Ono M., Fukuyama A.	4. 巻 28
2. 論文標題 Non-inductive plasma current ramp-up through oblique injection of harmonic electron cyclotron waves on the QUEST spherical tokamak	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022505~ 022505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031357	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 該当する

1. 著者名 Idei H., Fukuyama M., Sakai S., Mishra K., Nishimura K., Ikezoe R., Onchi T., Ido T., Hanada K.	4. 巻 93
2. 論文標題 Adaptive Capon beamforming for lensless electron cyclotron emission imaging with high spatial resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 103531~ 103531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101632	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 該当する

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 恩地拓己, 出射浩, 花田和明, 渡邉理, 大塚裕也, 小出悠二, 宮田陸矢, 山口貴大, 河野香, 黒田賢剛, 中村一男, 長谷川真, 池添竜也, 永島芳彦, 井戸毅, 福山淳, 小菅佑輔, 村上定義, 江尻晶
2. 発表標題 球状トカマク型装置QUESTにおける逆電流駆動方向トロイダル電場印加時の電子サイクロトロン加熱
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

1. 発表者名 T. ONCHI, H. IDEI, K. HANADA, O. WATANABE, Y. ZHANG, K. NAKAMURA, R. IKEZOE, M. HASEGAWA, K. KURODA, Y. KOIDE, Y. OTSUKA, A. HIGASHIJIMA, T. NAGATA, I. SEKIYA, S. SHIMABUKURO, I. NIIYA, K. KONO, F. ZENNIFA, Y. NAGASHIMA, T. IDO, T. KARIYA, Y. KOSUGA, S. MURAKAMI, and A. EJIRI
2. 発表標題 Electron Cyclotron Current Start-up with Retarding Electric Field in the QUEST Spherical Tokamak
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2023) (国際学会)
4. 発表年 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

1. 発表者名 ONCHI, Takumi
2. 発表標題 Plasma Current Ramp-Up with 28 Ghz Second Harmonic Electron Cyclotron Wave in the Quest Spherical Tokamak
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 恩地拓己, 出射浩, 福山雅治, 渡邊理, 武田康佑, Y. Zhang, 池添竜也, 長谷川真, 黒田賢剛, 井戸毅, 花田和明, 中村一男, 江尻晶, Y. Peng, 假家強, 福山淳
2. 発表標題 球状トカマクQUESTにおける電子サイクロトロン加熱/電流駆動へのトロイダル電 場の影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 恩地拓己, 出射浩, 福山雅治, 渡邊理, 武田康佑, Y. Zhang, Y. Wang, 池添竜也, 長谷川真, 黒田賢剛, 井戸毅, 花田和明, 中村一男, 江尻晶, Y. Peng, 假家強, 福山淳
2. 発表標題 球状トカマクQUESTにおけるEC高調波加熱/電流駆動へのトロイダル電場の 影響
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

1. 発表者名 王洋, 恩地拓己, 花田和明, 岳其霖, 池添竜也, 出射浩
2. 発表標題 球状トカマクの高エネルギー電子空間分布観測を目指した二次元硬 X 線計測 システムの設計
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第25回 支部大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学－研究者情報 https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K005161/index.html 国立大学法人 九州大学応用力学研究所 高温プラズマ理工学研究センター http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP/index.html
--

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
---------	---------