

QUESTにおける高速電子が関与する高周波波動の励起機構とその効果

池添, 竜也
九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター

<https://hdl.handle.net/2324/7172199>

出版情報 : 2024-01-30
バージョン :
権利関係 :



【表紙】

研究課題名：QUESTにおける高速電子が関与する高周波波動の励起機構とその効果
研究代表者所属（大学の場合は学部・研究所名等を略さずに記入）・氏名（役職不要） 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター・池添竜也
国際会議発表（会議名、登壇者、発表題目、発表区分（招待、口頭、ポスター、等）、受賞（獲得した場合）） ・ 29 th IAEA-FEC, R. Ikezoe, "DYNAMICS OF FAST ELECTRONS AND KINETIC MODES IN THE ELECTRON CYCLOTRON HEATED QUEST SPHERICAL TOKAMAK", Poster. ・ AAPS-DPP, R. Ikezoe, "Diagnosing fast electrons interacted with kinetic waves on spherical tokamak", Invited.
国内学会発表（会議名、登壇者、発表題目、発表区分（招待、口頭、ポスター、等）、受賞（獲得した場合）） ・ 第40回プラズマ・核融合学会年会, 池添竜也, "QUESTにおける高速電子の直接検出", 口頭
発表論文（著者は第1著者のみ記載、未出版の場合、受理、投稿中の区分を記載） ・ R. Ikezoe <i>et al.</i> , Nucl. Fusion 投稿中, "Observation of high-frequency kinetic modes and associated oscillation of fast electrons on the electron cyclotron heated QUEST spherical tokamak". ・
共同研究に関連して本年度内に学位を取得した学生の人数（本年度内取得見込も含む） 修士 0名 ・ 博士 0名
共同研究に関連して獲得した競争的資金 ・ 科研費基盤 C, 21K03511, 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, R1-3. ・
関係するプロジェクト（複数選択可） 1. 大型ヘリカル装置計画、 2. 数値実験炉研究、 3. 核融合工学研究 (4. 無し)
その他の成果（発明, 社会貢献, 新たな共同研究の開始） ・ ・
共同研究への提案・要望

表紙記載にあたっての注意事項

- ・核融合研究共同研究（一般共同研究）の「研究会」は上表中「国際会議発表」以降の記載は不要です。
- ・表中の発表成果等は、本共同研究に関係する本年度発表分だけを記載してください。
- ・成果の概要は次ページ以降に、フォーマットに従って作成してください。

目的

球状トカマク装置 QUEST における電子サイクロトロン(EC)波を用いたプラズマ電流立上げでは、生成される高速電子が波動エネルギーの吸収とプラズマ電流の駆動および電流分布に支配的な影響を与えており、この高速電子を上手く利用できれば EC 波のみによる高効率なプラズマ電流立上げが可能となる。これまでの研究から高速電子が卓越して硬 X 線放射強度が高い時間帯ではイオンサイクロトロン周波数からホイッスラー周波数帯にかけて多様な高周波波動が励起されていることがわかった。これら波動は高速電子と相互作用できることから高速電子の制御手法としての観点からも重要である。本研究では高速電子の速度分布や実空間分布に影響を及ぼしている可能性のあるこれら自発励起高周波波動の特性を調べると共に、高速電子の位相空間の計測手法を確立してそれらを実験的に調べることで、そして波動励起とその効果を含めた高速電子のダイナミクスを明らかにすることを目的とする。

高エネルギー荷電粒子プローブの高速回転機構

昨年度に原理実証された高エネルギー荷電粒子プローブ (Energetic Particle Probe) の回転シャフトに中空回転導入機とステッピングモーターを取り付け、プラズマ放電中の高速回転を試みた。EPP の大気側構造と中空回転導入機、ステッピングモーターの写真を図 1 に示す。応用力学研究所の技術職員に支援を頂いて実験に合わせて柔軟な運転が可能のように制御システムを構築した。プローブシャフト端には先端部温度モニター用の熱電対が 2 組と冷却水の出入り口、そしてシンチレータからの光を伝送する光ファイバーが 2 本付いており、それらケーブルの捩じれを考慮して回転動作は 360°までとし、一度回転させた後は逆方向に回転させて捩じれを戻すこととした。ステッピングモーター側には操作ミスによる捩じれ過ぎ防止のための 720°幅のインターロックを設定した。ケーブルは直線状に長めに配線することで捩じれの影響を小さくすると共に、回転時にはライブモニターでケーブルの様子を監視した。回転速度はモーター仕様の上限に近いところまで順次試験し、最速 50000 ステップ毎秒(500°/s)まで実施した。回転し始めと停止直前はあらかじめ設定した加速度範囲内に収まるよう自動で制御され、ケーブルやシャフト内の構造物に過度な衝撃が加わることを抑制している。

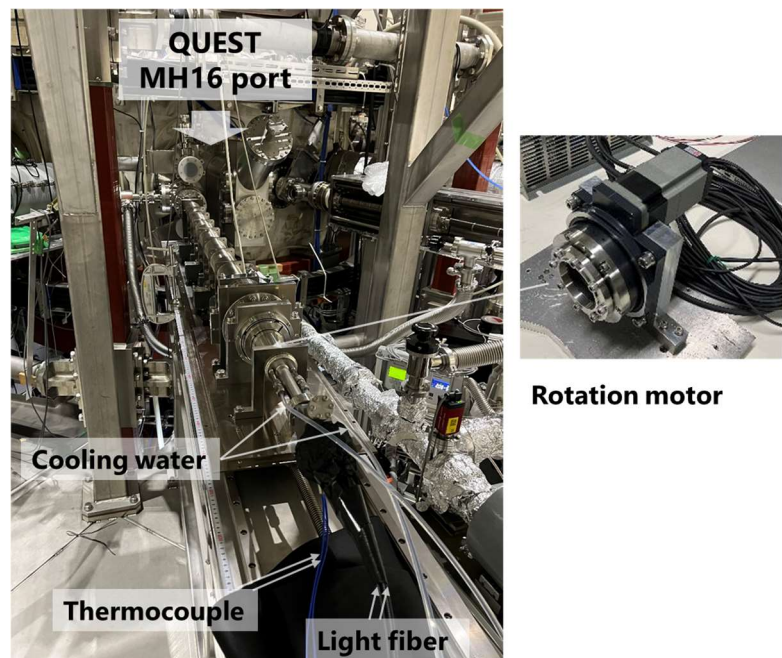


図 1 高エネルギー荷電粒子プローブ (EPP) の大気側構造写真。

実際のプラズマ放電での回転試験を経て、回転動作に起因するノイズなどの障害が発生しないことを確認した。この回転機構の導入により、プラズマが定常と見なせる時間帯においては高速電子のピッチ角分布が 1 放電で得られるようになり、またカウント数とのトレードオフにはなるが細かいピッチ角分布を取得できるようになった。十分なカウント数が得られる条件であれば、プローブ先端部の構造で決まるピッチ角分解能 $<1^\circ$ での非常に細かい分布が得られる。一方、一回転に必要な 0.72 秒は EC プラズマ電流立上げの特徴的な時定数よりも長いので、プラズマ電流立上げ中の高速電子のピッチ角分布の時間発展を測定するためには、この回転機構を使用したとしても条件固定での複数回放電が必要である。

高エネルギー荷電粒子プローブの高速回転実験

EPP の先端部を大半径 $R=1.275$ m に挿入し、EPP の初期角度を放電毎に変化させながら EC プラズマ電流立上げ

のタイミングに合わせて高速回転させる実験を実施した。8.2 GHz EC 波によるプラズマ生成後, 28 GHz 2nd EC 波入射により 2.1 s あたりからプラズマ電流が立上り, 3 s まで維持している。ステップモーターの角度は通信している Raspberry Pi が ~1 ms 毎にタイムスタンプと共にファイルに保存する。取り出したモーター角度の時間変化を図 2 に示す。モーターは回転し始め直後と停止直前を除いて, 指令値通りの一定の回転速度で 360°回転している。但し, 狙いの 2.1 s からでなく数秒遅れて回転を始める放電があり, また 2.1 s 付近でも細かい時間のジッターが存在することが分かった。操作条件を設定して Raspberry Pi に送る Labview 制御部での時間ジッターに加え, モーターと通信する Raspberry Pi と Labview の組み合わせによる指令スキーム上に問題点があることが後でわかり, その対策を進めた。

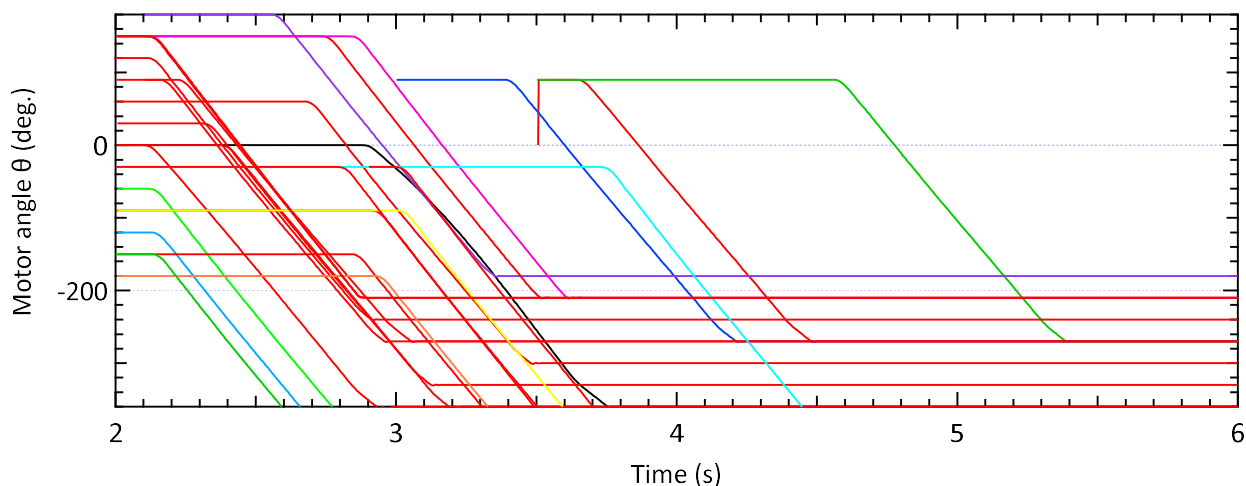


図 2. EC プラズマ電流立上げ放電における EPP の高速回転実験. 曲線は EPP 角度の時間経過を示し, 多数の放電から得られた曲線を重ねてプロットしている. 色の違いは見やすくするために特に意味はない。

図 2 と同じ放電中に EPP を高速回転させた際に検出された総カウント率の時間発展, およびエネルギースペクトルに対応する縦軸をデジタルパルスプロセッサの channel 番号にしたグラフを図 3 に示す。2 段目パネルの点線(右軸)は粒子検出のためのスリット位置の角度を表しており, 0°はプラズマ電流と反対方向にトロイダル磁場に沿って平行に走る電子が検出される角度である。ポロイダル磁場が無視できる場合には電子のピッチ角に対応するが, ポロイダル磁場が大きい場合には EPP ヘッド部の磁力線の傾きを考慮してピッチ角に変換する必要がある。EPP ヘッドには 2 つの高速シンチレータがあり, スリットサイドに配置されている方を EPP1, 反対側に配置されていてヘッドの Mo ブロックを透過した硬 X 線のみを測定している方を EPP2 としている。統計的に高速電子の寄与と考えられる 2 つ検出器間の差のカウント数の発展を見ると, プラズマ電流がある程度上昇し, プラズマサイズが大きくなってから増加し始めている。これは EPP ヘッド位置が外側にあることと, ある程度高いエネルギー(>100 keV)の電子が増えないと検出されないことが共に寄与していると考えられる。計測可能な高速電子の最低エネルギーは測定位置の磁場強度とヘッドの幾何学構造に依存する。

プラズマ電流があまり変化していない 2.2-2.6 s の間においてカウント率が顕著に変化しており, プローブ回転の影響が捉えられていることがわかる。2.4 s 前後では対称に変化しており, これは測定している EPP ヘッド部の高速電子流のピッチ角分布が 0°近傍でほぼ正負対称であることを表している。また, 2.5 s 前のピッチ角が 45-90°あたりで特徴的な変化が表れている。初期角度を変えた別の放電において, 2.6-3.0 s の後半時間帯でピッチ角 45-90°を測った際にも同様な変化が見られた。昨年度の EPP 初期実験時に複数放電を用いて得た高速電子のピッチ角分布においても 45-90°に特徴的な変化が見られていたが, それが放電毎の再現性の問題でなく, 実際のピッチ角分布を反映したものであることが今回の回転実験によって確かめられた。今後, 高速電子のピッチ角毎の軌道と, QUEST 真空容器構造物とを考慮に入れて検討を進める。

図 3 下部に EPP1,2 それぞれのエネルギースペクトルの時間発展に対応するカラーマップを示す。赤色部はカウント数が高いことを, 紫色部はカウント数が少なくバックグラウンドレベルであることを示す。EPP2 のスペクトルは低 ch(低エネルギー)側をピークとして高 ch(高エネルギー)に向けてなだらかに減少する通常の X 線スペクトル形状であるのに対し, EPP1 では間のエネルギー帯にピークが存在する。またそのピーク位置はピッチ角に応じて変化している。従って, 今回の実験条件では EPP1 の総カウント数における高速電子の寄与が硬 X 線の寄与よりも十分に大きく, 1. EPP1 において高速電子のエネルギースペクトルに対応するものが得られたこと, そして 2. 遠 SOL に存在する高速電子流のピッ

チ角とエネルギーには強い相関があり、速度空間において比較的狭い領域の電子が主であることが示唆された。

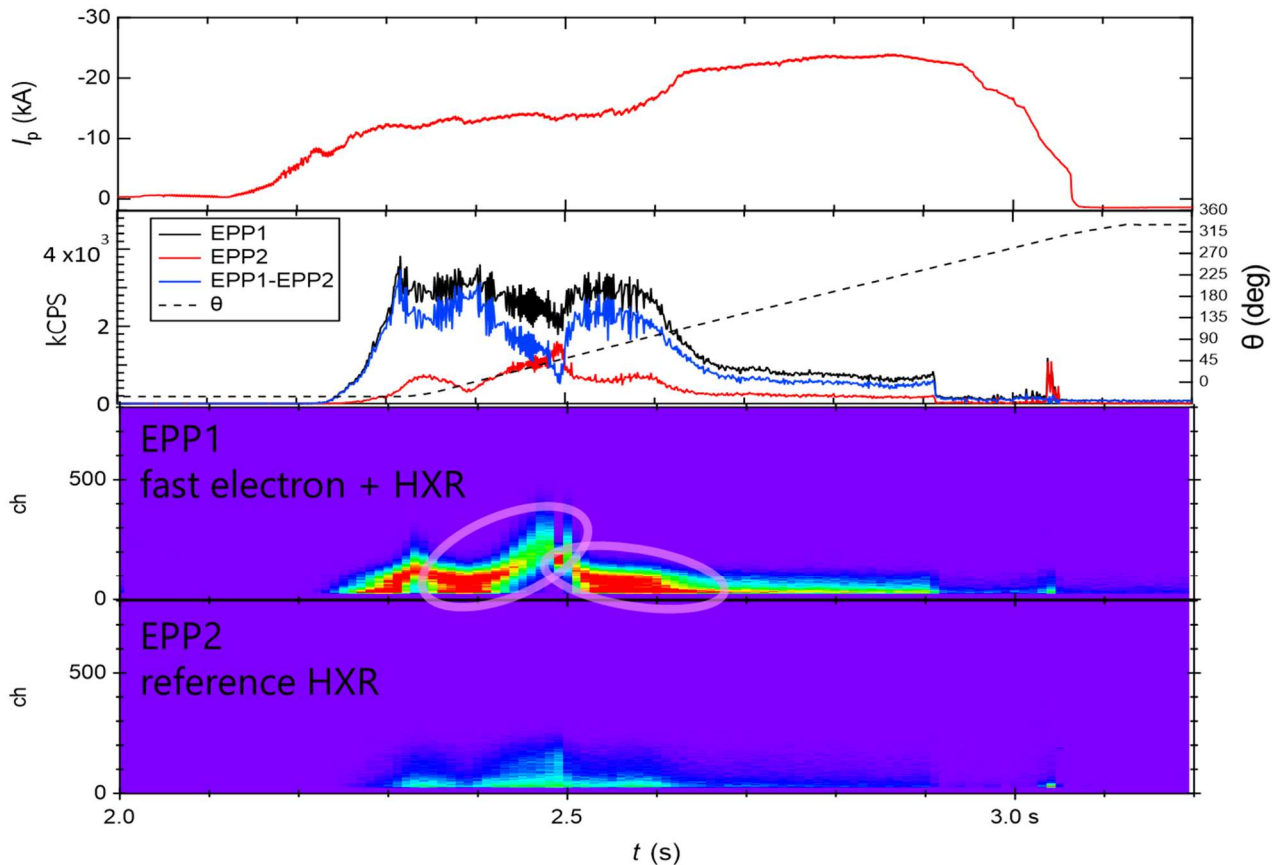


図 3. EC プラズマ電流立上げ放電において EPP で検出された総カウント率とスペクトル形状の時間発展。

まとめと今後

高エネルギー荷電粒子プローブに回転駆動機構を整備し、単一放電中における $500^\circ/\text{s}$ の回転速度を活かしたピッチ角分布計測を実現し、 $45\text{--}90^\circ$ に存在する特徴的な変化を捉えた。また、ピッチ角と強い相関を持つスペクトル形状が得られ、測定した遠 SOL 領域では速度分布上の比較的狭い領域の電子が到達していることが示唆された。

昨年度の実験よりも硬 X 線の寄与が相対的に小さくなっており、挿入位置を以前よりも外側に設定したことが功を奏している可能性がある。薄いシンチレータでは X 線の計数効率はずっとエネルギーを落とす電子と比べてもともと低い一方、プローブヘッドに衝突する高速電子が放射する制動 X 線の強度が非常に高いと推測される。デジタルパルスプロセッサと 2 枚のシンチレータによる統計的な X 線ノイズ除去はできているものの、昨年度発見された高速電子流の高周波揺らぎの研究を進める上ではオシロスコープでの計測となることから、例えばピッチ角毎の揺動の差異などを調べていく上で X 線信号の寄与を下げることに大きなメリットがあるため、今後プローブヘッド位置やプラズマを変えながら、揺動計測に良い条件を探す。また、ピッチ角とエネルギーとに強い相関が今回見られたこともあり、難航しているシンチレータのエネルギー校正を行うことを進める。