

トカマクの捕捉粒子配位における電子サイクロトロン加熱補助オーミック  
立ち上げ特性の運動論的解析

**Kinetic analysis of the characteristics of electron cyclotron heating  
assisted Ohmic start-up in the trapped particle configuration of a  
tokamak**

辻井直人, 山田巖, 高竜太, 江尻晶, 篠原孝司, 渡邊理, ジャンソウォン, 彭翹, 岩崎光太郎,  
林彥廷, 白澤唯汰, 飛田野太一, 田一鳴, 安立史弥

Naoto Tsujii, Iwao Yamada, Yongtae Ko, Akira Ejiri, Koji Shinohara, Osamu Watanabe,  
Seowon Jang, Yi Peng, Kotaro Iwasaki, Yuting Lin, Yuita Shirasawa, Taichi Hidano,  
Yiming Tian and Fumiya Adachi

東京大学

The University of Tokyo

## 1 導入

トカマク中の電子サイクロトロン加熱 (ECH: Electron Cyclotron Heating) を用いた非誘導プラズマ立ち上げにおいては、高 EC 電力ではブレークダウンしにくくなることが知られている。この時、ポロイダル磁場配位として、捕捉粒子配位と呼ばれる正曲率の垂直磁場配位を用いることで、高 EC 電力でも安定にブレークダウンさせられるようになる [1]。JT-60SA や ITER のような超伝導センターソレノイド (CS: Central Solenoid) を用いる装置においては、生成できる周回電場が低いため、オーミック立ち上げを ECH によって補助することが検討されている。純粋なオーミック立ち上げにおいては、ブレークダウンに十分なヌル領域の生成が必要であり、ECH 補助を持ちいる場合でも同様の磁場配位を用いるのが主流である。しかし、ECH 補助はヌル磁場配位を必要とせず、ECH 補助オーミック運転においては数 mT の垂直磁場側であっても立ち上げ可能であることがわかっている [2]。さらに近年、非誘導 ECH 立ち上げと同様の捕捉粒子配位を用いることで、ECH 補助オーミック運転においても立ち上げ可能なパラメータ領域が広がることが実験的に示されている [1, 3]。本研究では、捕捉粒子配位の立ち上げ特性を、ECH と誘導電場による無衝突高速電子輸送の観点から解析した。

## 2 軌道平均運動論

トカマクの ECH ブレークダウンにおいては、 $>100$  eV の「高速電子」が生成されるため、無衝突電子軌道が重要となると考えられている。高周波加熱・電流駆動においては、このような高速電子の輸送

は一般に軌道平均運動論方程式によって記述される。軌道平均を行う場合には、当然粒子軌道が閉じていることが前提となるので、軌道平均理論は閉磁気面形成後のプラズマに適用されるのが普通である。しかし、TPC 立ち上げにおいては、正曲率の垂直磁場下で立ち上がり速度が改善する等 [1]、ミラー磁場による粒子捕捉の影響が示唆されており、軌道平均理論によりその特性を捉えられる可能性がある。

そこで、3次元の移流拡散方程式である、電子の軌道平均運動論方程式に基いて、大域的な電子輸送解析を行なった。軌道平均においては有限軌道幅効果も含めた。軌道をラベルする変数としては、運動の保存量であるの運動エネルギー  $\mathcal{E} = m_e v^2/2$ 、ピッチ角  $\Lambda = \mu B_0/\mathcal{E} = (B_0/B)(v_\perp^2/v^2)$ 、トロイダル角運動量  $P_\phi = -e(\psi + (RB_\phi/\Omega_e)v_\parallel)$  を用いた。軌道拡散を駆動する ECH の電場分布は空間的に一様、かつ波数空間で等方的であるとした。これは TST-2 の装置サイズ、ECH 波長においては妥当な仮定である。軌道間の流れを駆動する誘導電場は、エネルギーとピッチ角方向の流れをつくる。トロイダル角運動量成分は軸対称性からゼロである。CS のスイングによるポロイダル磁束の変化は無視したので、関連するウェア・ピンチ等の効果は入っていない。

## 3 ブレークダウン特性の無衝突運動論解析

まず、高 EC 電力時の振る舞いを理解するため、ECH の準線形拡散のみを考えた。20 eV の一様熱的分布から初めて、準定常状態になるまで分布関数の時間発展を計算した。その結果、EC 共鳴層が反射点となるピッチ角  $\Lambda_c = eB_0/(m_e \omega)$  を持つ電子が最も強く加

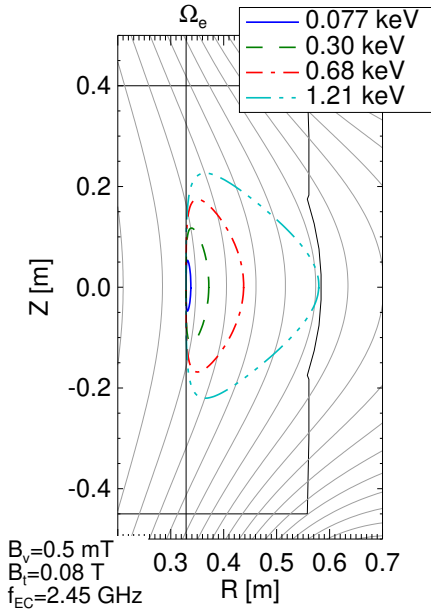


Fig. 1: EC 共鳴が反射点 ( $\Lambda = \Lambda_c$ ) となる電子軌道の例。有限軌道幅効果によりエネルギーが上がると軌道が外側に膨らむ。

速されることがわかった。TST-2 において、 $\Lambda = \Lambda_c$  となる電子のうち、赤道面に反射点を持つものの軌道を図 1 に示す。有限軌道幅効果により、エネルギーが上がると軌道が外側に膨らむことがわかる。垂直磁場 0.5 mT では、 $>1.21$  keV の電子軌道は外側リミターとぶつかるため、これが閉じ込め可能な電子の最大エネルギーとなる。垂直磁場を強くすると、同様の軌道をとる電子のエネルギーが大きくなるため、拡散速度が同じ条件下では高エネルギー限界からの損失が減少する。

推定された電子分布関数から軌道損失率と重水素のイオン化率を求めたところ、重水素ガス圧  $\sim 2$  mPa、ECH 電力密度  $>10$  kW/m<sup>3</sup>、垂直磁場強度  $\sim 2$  mT の領域で、ECH 電力増加と共に ECH の準線形拡散によるリミターからの粒子損失が大きくなる一方、イオン化率はほとんど変わらないため、ブレークダウンしにくくなることがわかった。また、垂直磁場を強くすることで、上述した通り、より大きなエネルギーをもつ高速電子が閉じこまるようになるため、ブレークダウンしやすくなることがわかった。これは非誘導 ECH 立ち上げと同様の特性である [4]。次に、 $\sim 0.3$  V/m の誘導電場による移流項も加えて、同様にパラメータ依存性を調べたところ、ガス圧・ECH 電力・垂直磁場依存性は純粋な ECH ブレークダウンと同様であり、ECH の準線形拡散による軌道の変化が主要な物理機構であることがわかった。

## 4 まとめと今後の展望

ECH 補助オーミック立ち上げにおいては、衝突が弱くなるため、TPC 配位のような無衝突領域における物理を考慮した最適化が有効である。本研究では、従来高周波加熱・電流駆動に用いられてきた軌道平均運動論を、無衝突領域の立ち上げにおける大域的な電子輸送解析に適用した。その結果、捕捉粒子配位における ECH 補助オーミック着火の傾向を再現することができた。本研究では無衝突理論のみを用いて運動論解析を行なったが、特に  $<100$  eV のエネルギーの低い領域では衝突が支配的である。本研究では境界条件として 20 eV の一様分布を仮定したが、より正確な着火条件の予測のためには、低エネルギーの多衝突領域と高エネルギーの無衝突の両方を上手く同時に記述できるモデル化が必要である。本研究は、JT-60SA や ITER におけるプラズマ着火の信頼性向上に寄与するものである。

## References

- [1] Yongtae Ko, Naoto Tsujii, Yuichi Takase, Akira Ejiri, Osamu Watanabe, Hibiki Yamazaki, Kotaro Iwasaki, Peng Yi, James H.P. Rice, Yuki Osawa, Takuma Wakatsuki, Maiko Yoshida, and Hajime Urano. Optimization of poloidal field configuration for electron cyclotron wave assisted low voltage ohmic start-up in tst-2. *Plasma and Fusion Research*, 16:1402056–1402056, 2021.
- [2] YoungHwa An, Jeongwon Lee, JongGab Jo, Bong-Ki Jung, HyunYeong Lee, Kyoung-Jae Chung, Yong-Su Na, T.S. Hahm, and Y.S. Hwang. Efficient ECH-assisted plasma start-up using trapped particle configuration in the versatile experiment spherical torus. *Nuclear Fusion*, 57(1):016001, oct 2016.
- [3] Jeongwon Lee, Jayhyun Kim, YoungHwa An, Min-Gu Yoo, Y.S. Hwang, and Yong-Su Na. Study on ECH-assisted start-up using trapped particle configuration in KSTAR and application to ITER. *Nuclear Fusion*, 57(12):126033, 2017.
- [4] M. Uchida, T. Yoshinaga, H. Tanaka, and T. Maekawa. Rapid current ramp-up by cyclotron-driving electrons beyond runaway velocity. *Phys. Rev. Lett.*, 104:065001, Feb 2010.