電子サイクロトロン共鳴の効率化と近接条件
Enhancement of ECR Efficiency and Accessibility Conditions on ECRIS

阪大院工，°加藤裕史，大森貴之，奥村一起，久保渉，針﨑修平
Osaka Univ., °Yushi Kato, Takayuki Omori, Kazuki Okumura, Wataru Kubo, and Shuhei Harisaki
E-mail: kato@eei.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance: ECR)を利用したイオン源(ECRIS)は近年益々利用分野が広がっている．加速器科学，重粒子線がん治療，そして宇宙推進など多岐にわたる分野である．また，バイオナノマテリアル領域への適用として原子内包フラーレン生成が注目を集めている.[1] 本研究グループではこれまでECRによる様々なプラズマ源やイオンビーム源開発に取り組んできた．特に 2013 年 11 月に本学における初ビーム以来，多価イオンビーム生成における ECR の効率化に関する実験的研究を推進している．これらの過程で得たECRIS における ECR の効率化や電磁波伝搬の近接条件に対する考察の概略等を報告して，ECRIS プラズマで発生していると考えられる新たな共鳴現象に関する知見を紹介する．

【実験方法】阪大タンデム型 ECRIS[2]は第 1 ステージがオールマグネットの大口径 ECRIS で，第２ステージは電磁石によるミラー磁場に多極磁場を重畳している．第２ステージの ECR プラズマは，大型ミラーコイル A，B と補助コイル C，および八極磁石で形成した磁場配位中へマイクロ波を導入することで ECR プラズマを生成する．引き出し電極に通常は 10kV を印加してイオンビームを引き出し，分析磁石で質量／電荷分離を行った後ファラデーカップで捕集してイオンビームの価数分布(Charge state distribution: CSD)を取得する．第２ステージの共鳴点である ECR ゾーンはミラーボトム付近に形成し，その形状はミラー磁場強度ごとにコイル C の電流 I_C で調整される．

【実験結果】Fig.1(a)に ECRIS から引き出した全イオン電流 I_{FC1} の I_C 電流依存性を赤で示す．I_d, $I_{E1,E2}$ はドレイン電流と引出電極電流である．Fig.1(b)は，I_C=8, 0, -30A の場合の軸方向から撮影したプラズマ画像である．引出イオン電流は，I_C=8～10A で ECR 共鳴点がミラーボトム付近に比較的小さいときにしばしば不安定であるが，最大値をとる．そして I_C=8～-10A にかけて，共鳴点形状が大きくなるに従って電流値は減少する．これらの電流量の振る舞いは，ECR の効率の観点からある程度説明可能である．しかし，電流値 I_C を更に減少させた場合に再び増加に転じる点は従来説明が付かなかった．そこで，磁場の変化に応じたプラズマの電子密度分布を測定して，磁場配位と密度変化に対応するプラズマ中での電磁波伝搬に対する近接条件を CMA(Clemmow–Mullaly–Allis)ダイアグラム上等で解析を行ったところ，ECRIS 中では ECR の他に磁界と密度に関係する異常波モード(Extra-ordinary(X) mode)による新たな共鳴現象，すなわち高域混成周波数共鳴(Upper-Hybrid Resonance: UHR)による加熱の可能性が示唆された．本講演ではこれらの経緯，実験結果と考察の詳細について報告する．

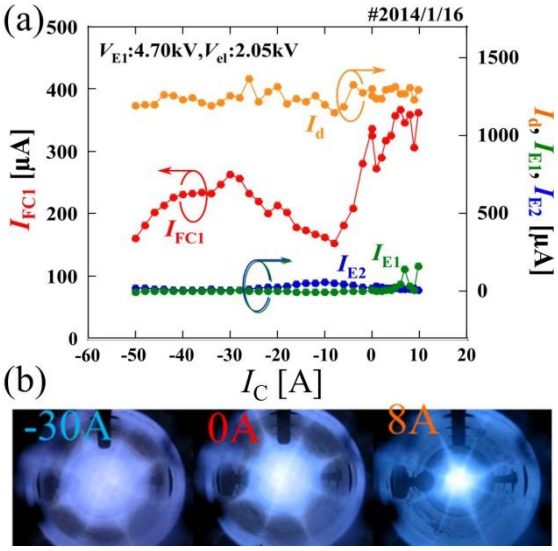

Fig.1 代表的なビーム電流のコイル電流 I_c 依存性(a)と画像(b).

【経緯説明/謝辞】本装置の主要部分は筆者(加藤)が 2005(H17)年 4 月に阪大着任に当たって富山県及び富山県立大学関係者の厚意によって移設し実験的研究の推進が可能になった．また，2016(H28)年 1 月末の本学内での移動再構築，更に 2018(H30)年 6 月 18 日大阪北部地震の震災復旧に於いては，本学関係者の尽力によるところが大きい．これらの方々並びに共同研究者各位に感謝の意を表する．又，本グループに所属し本研究に寄与して頂いたすべての卒業生に感謝する．

[1]加藤裕史他，応用物理学会春季学術講演会(東工大)9p-W323-14(2019).
[2] Yushi Kato, *et.al*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A950-1-3(2014).