

ヘリオトロンJにおける高エネルギー粒子の生成・閉じ込めに関する実験的研究

金子 昌司¹⁾、小林 進二²⁾、鈴木 康浩¹⁾、水内 亨²⁾、長崎 百伸²⁾、岡田 浩之²⁾、
中村 祐司¹⁾、花谷 清²⁾、村上 定義³⁾、近藤 克己¹⁾、佐野 史道²⁾
¹⁾京大院工ネ科、²⁾京大工ネ理研、³⁾京大院工

研究背景と目的

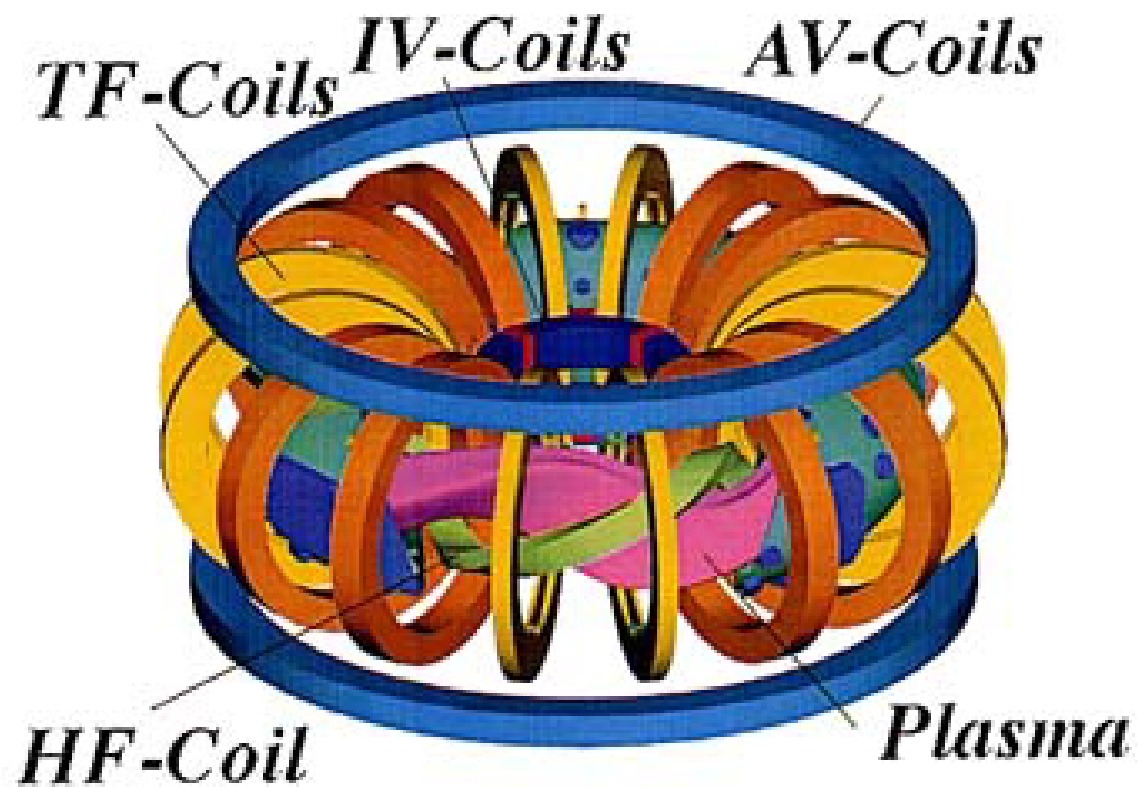
ヘリオトロンJ装置の目的の一つに、良好な粒子閉じ込めとMHD安定性を両立し、ヘリカル軸ヘリオトロン配位の最適化の方策を探ることが挙げられる。そのためには、プラズマ中における高エネルギー粒子の挙動を明らかにすることが重要である。

本研究では、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH)、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱プラズマにおいて、荷電交換中性粒子分析器 (CX-NPA) を用いて、高エネルギー粒子の振る舞いを調べた。

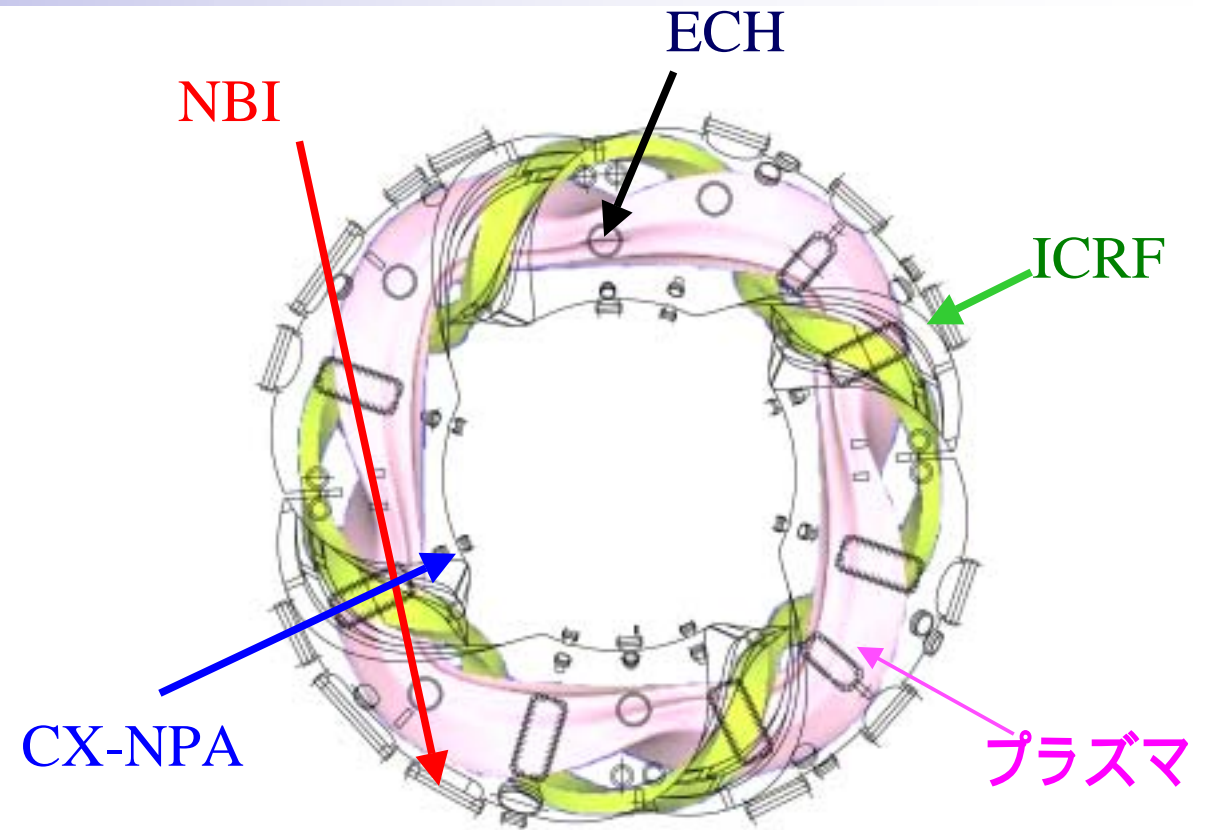
また、粒子閉じ込めに与える効果が大きいと考えられている、磁場のフーリエ成分 (バンピー成分) に対する効果を明らかにする事を目的として、ヘリオトロンJ装置の特徴である配位の自由度の広さを活かし、粒子閉じこめの配位に対する効果を調べた。

最近、イオン加熱、高エネルギー粒子の生成を目的として、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱実験が開始された。

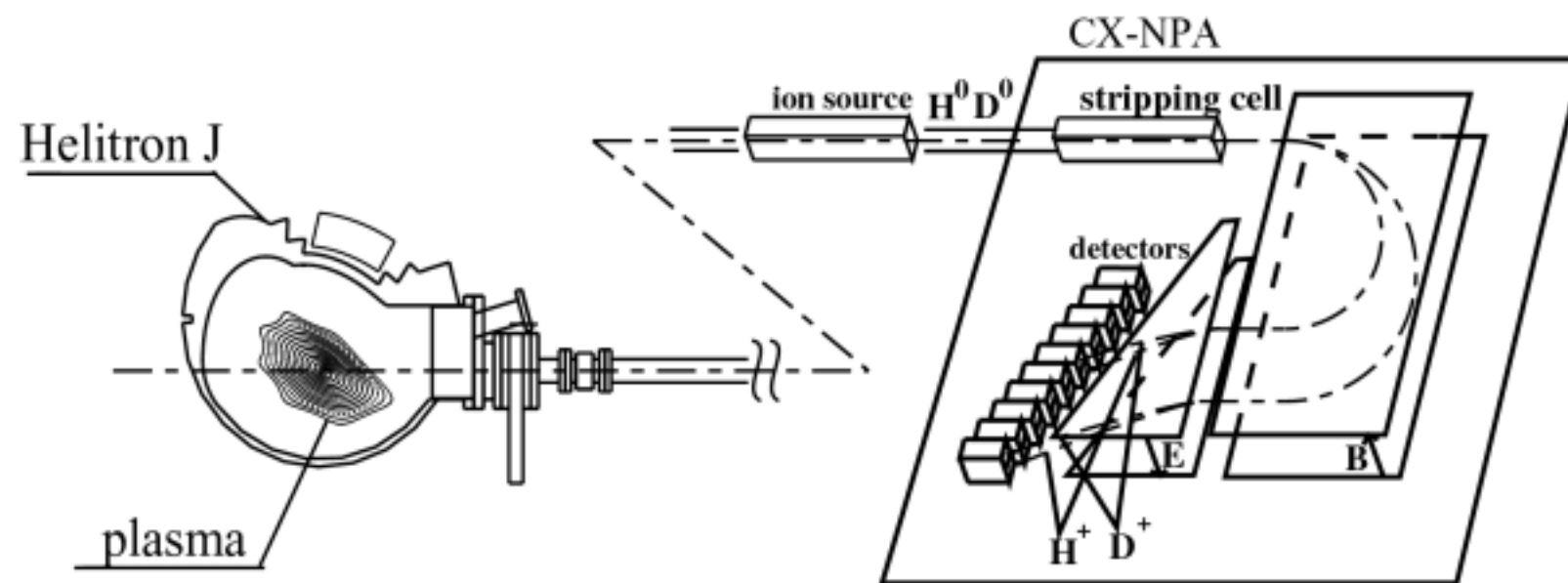
実験装置



ヘリオトロンJ装置。



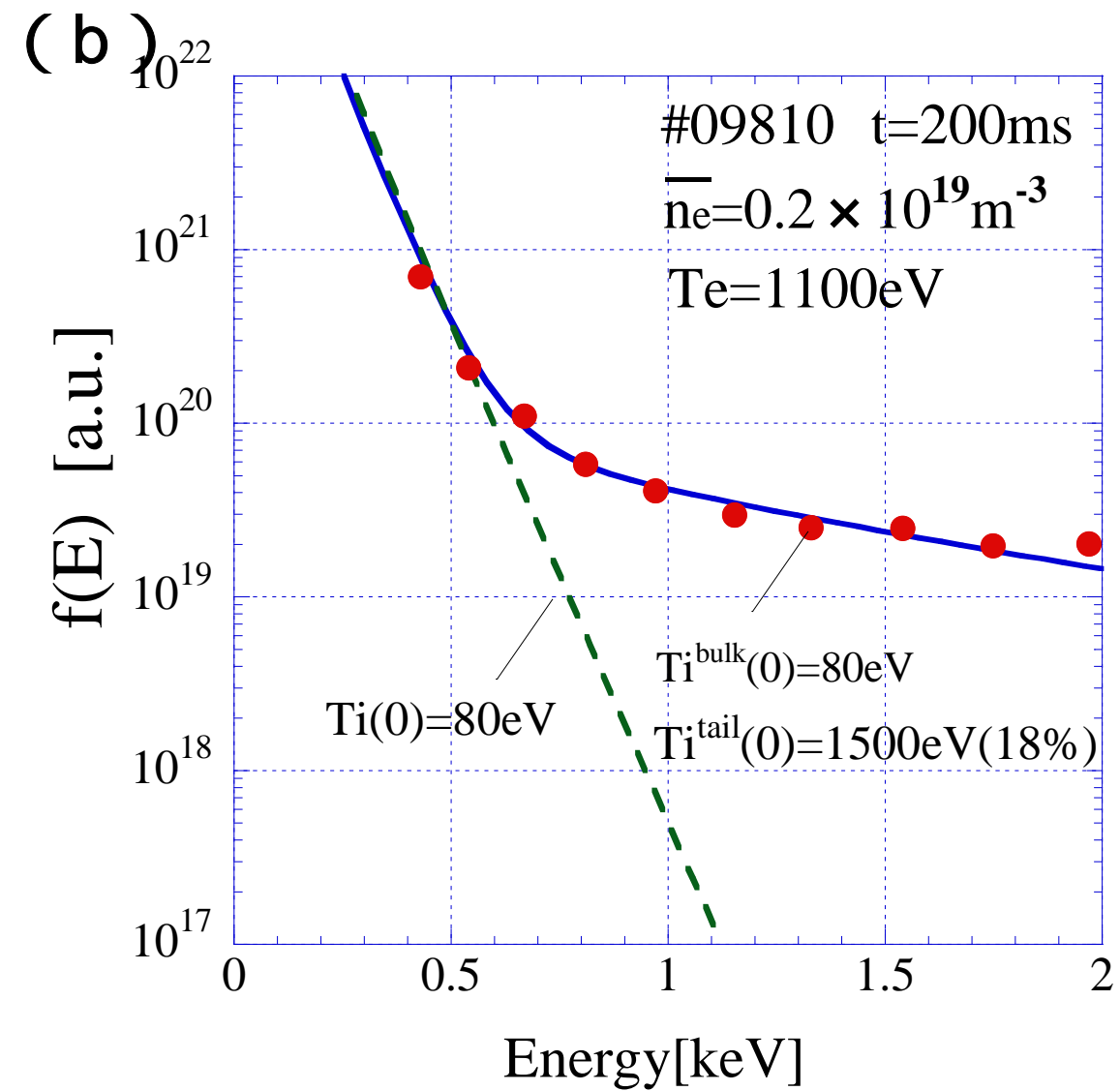
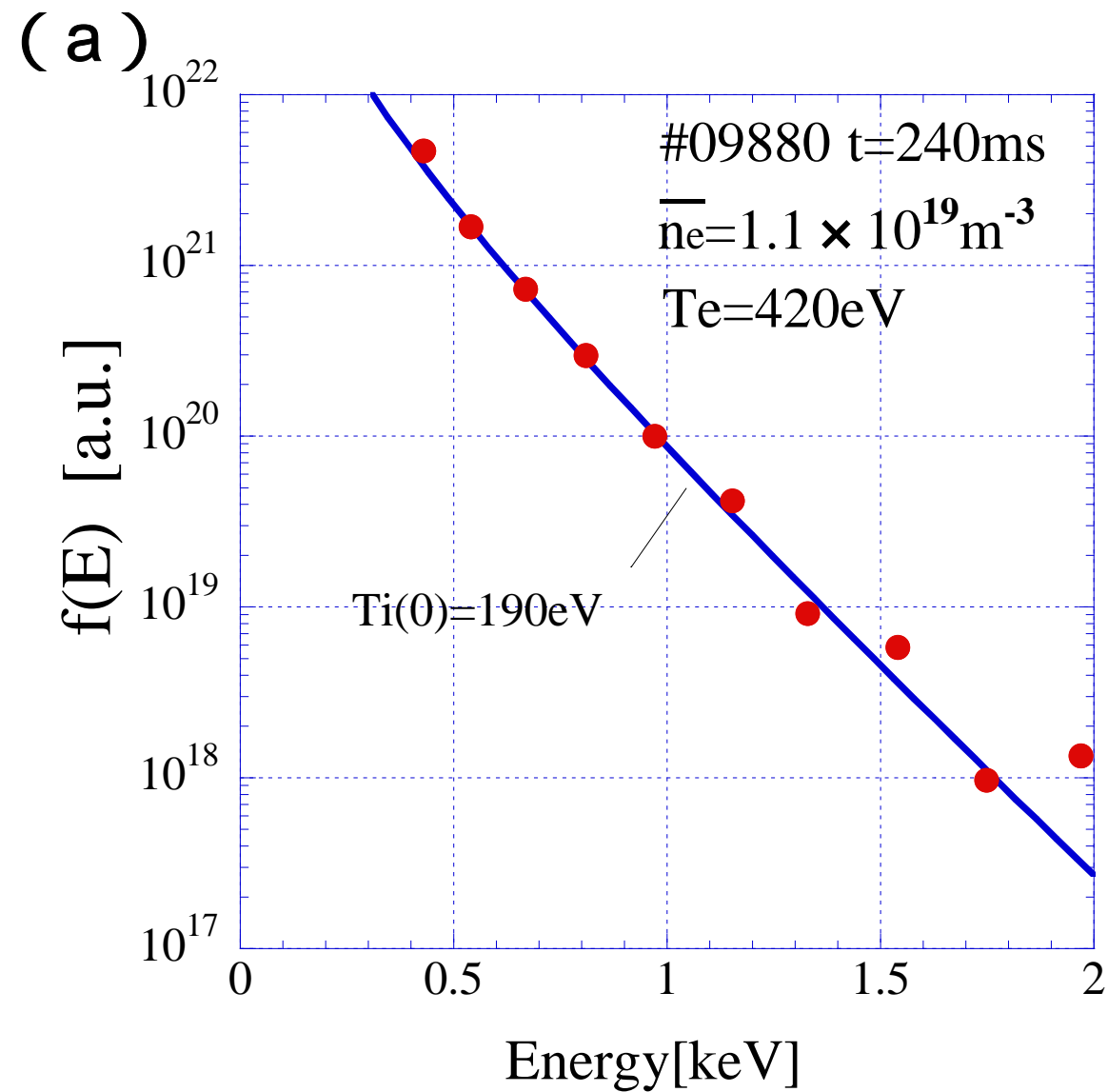
加熱系、及びCX-NPAの配置図。



CX-NPAシステム概要。

ECH	周波数: 70GHz 入射パワー < 0.5MW
NBI	最大加速電圧: 30kV 入射パワー < 1.5MW
ICRF	周波数: 19MHz 入射パワー < 2.5MW
CX-NPA	測定可能エネルギー領域 0.4-80keV(H)、0.2-40keV(D)

ECHプラズマにおけるエネルギースペクトル

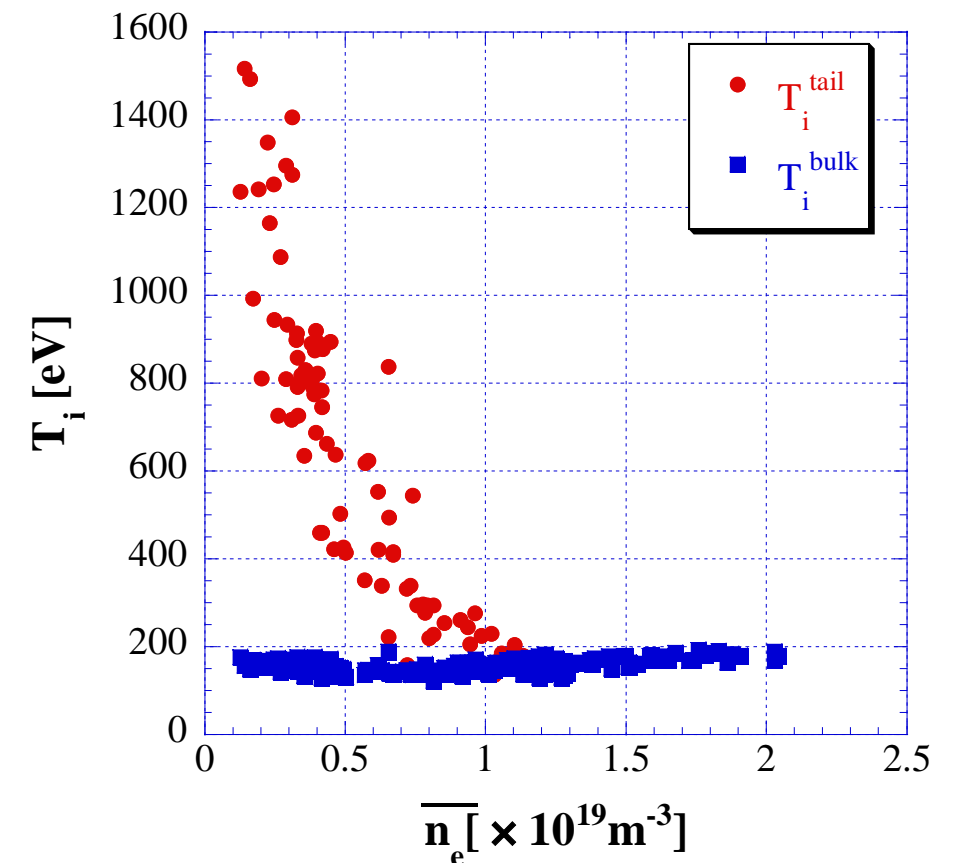
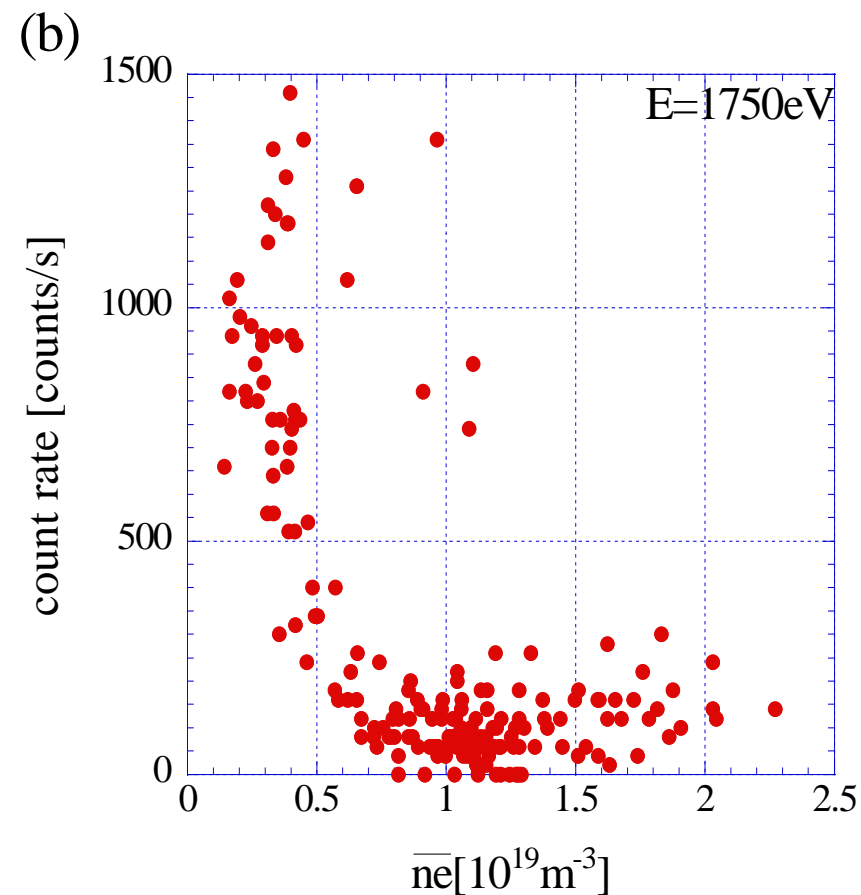
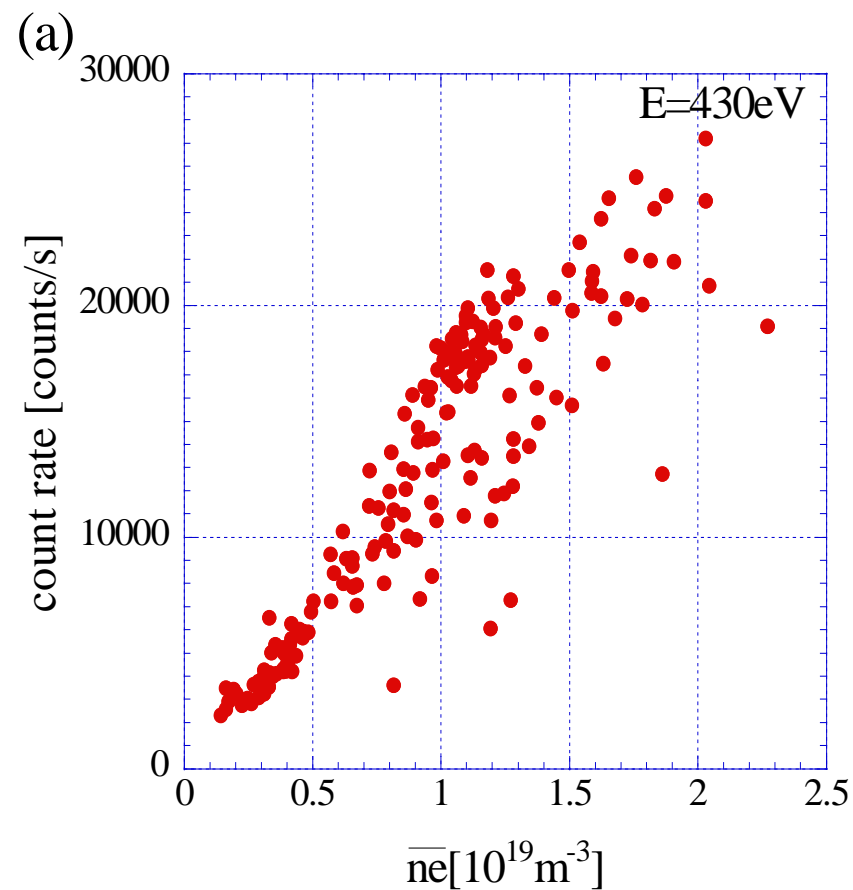


ECHプラズマにおいて観測されたエネルギースペクトル。
(a) 中密度の場合、(b) 低密度の場合

$\bar{n}_e = 1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$. . . エネルギースペクトルはほぼ単一Maxwell分布。

$\bar{n}_e = 0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$. . . エネルギースペクトルに高エネルギーテール成分が見られた。

高エネルギーイオンの特性



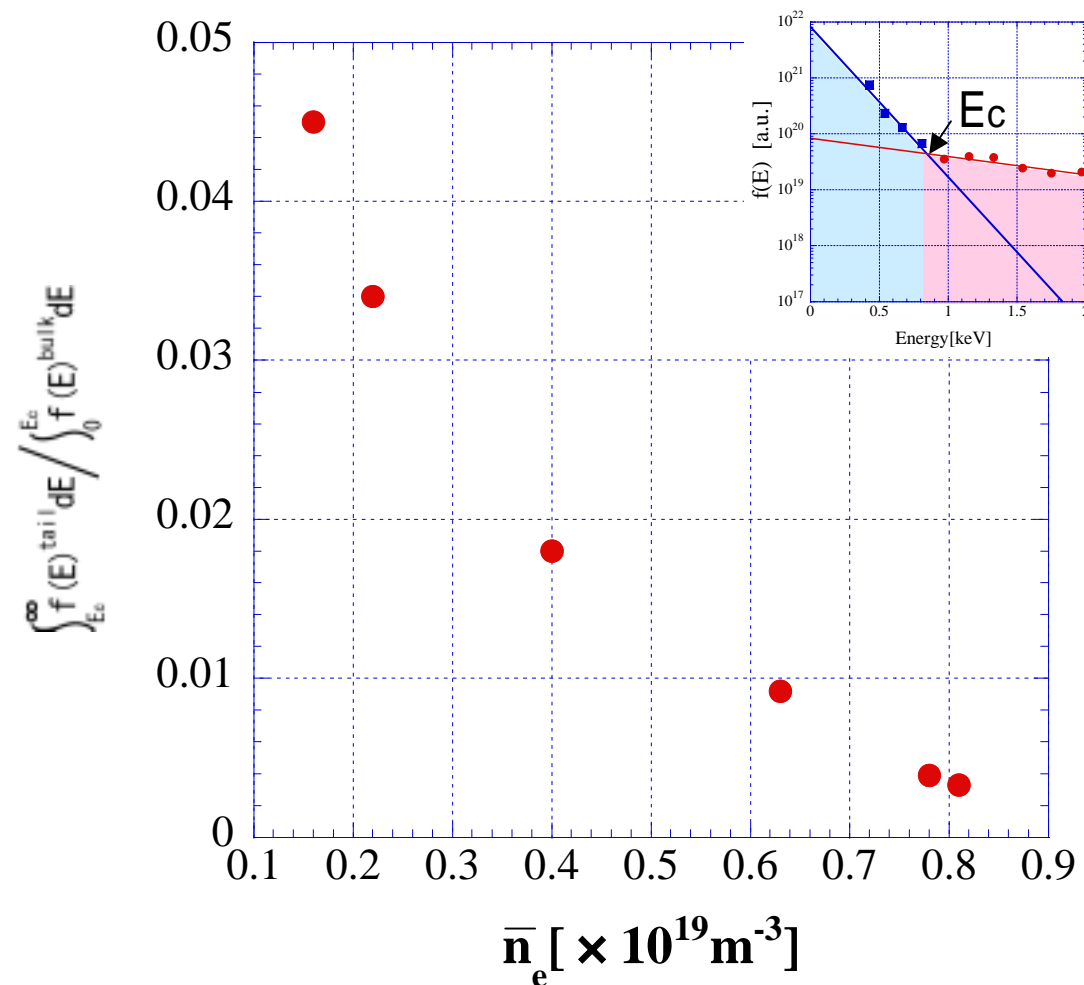
CX粒子の計数率の密度依存性
(a) 0.43keV、(b) 1.75keVの場合。

スペクトルの傾きより求めた見かけの温度の密度依存性。

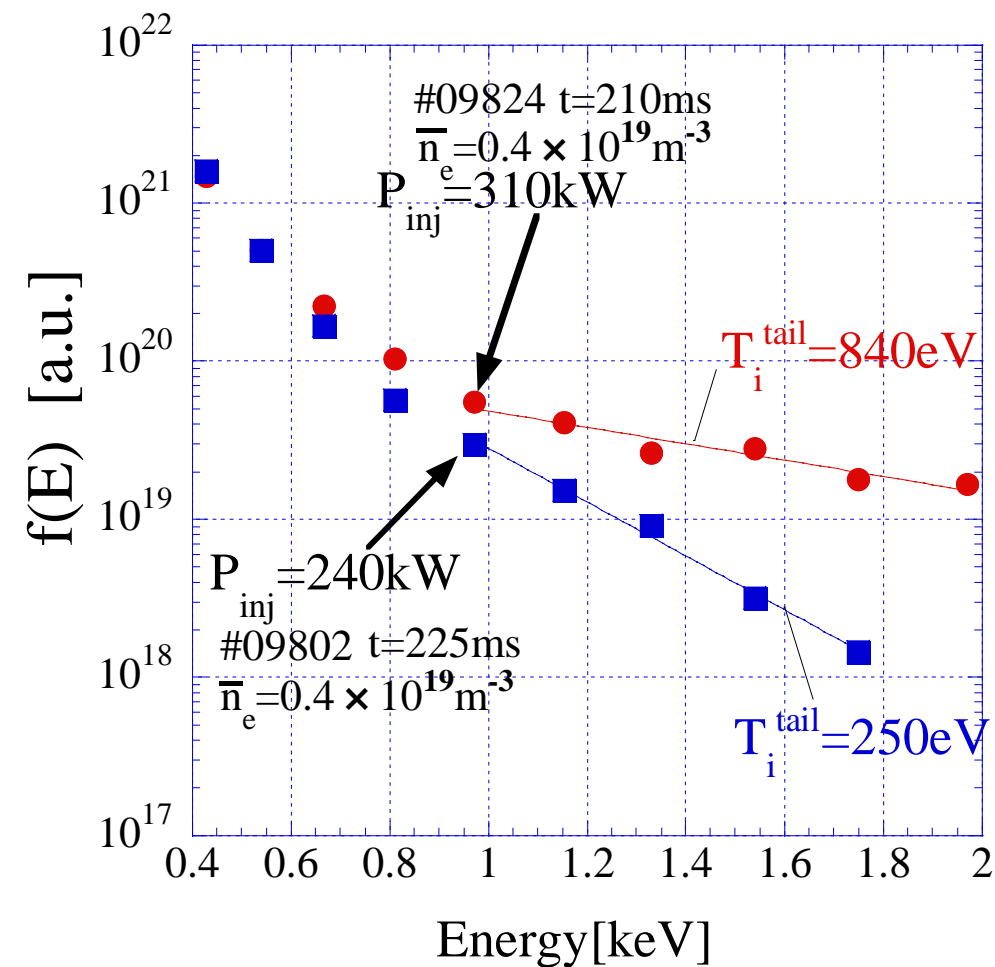
低エネルギー（430eV）のCX粒子のカウント数は、電子密度が減少するにつれて減少する。高エネルギー（1750eV）の場合は、 $\bar{n}_e = 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以下の密度領域において、電子密度が減少すると、急激にカウント数が増加する。

テール成分の傾きから求めた見かけの温度 (T_i^{tail}) は、密度の減少につれて高くなる。一方でバルクのイオン温度 (T_i^{bulk}) は、ほぼ一定となっている。

高エネルギーイオンの特性



テール成分とバルク成分の比の密度依存性。



ECH入射パワーが310 kW、240 kWの場合のエネルギースペクトル

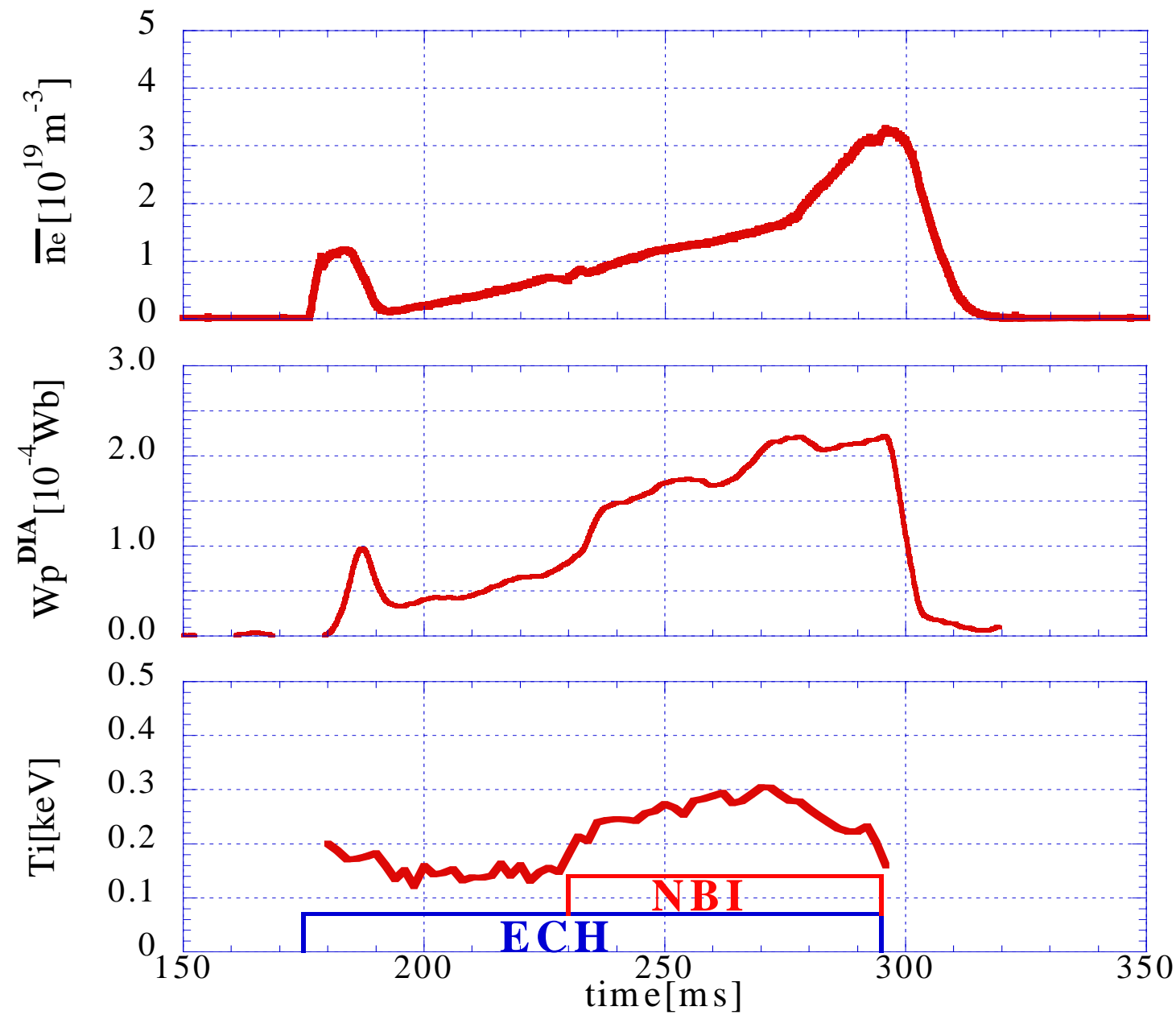
バルク成分に対するテール成分の比は、密度が減少すると大きくなる。
テール成分に、明らかなECH入射パワー依存性が見られた。

他の実験装置でも、ECH/ECCDプラズマ中における高エネルギーイオンの生成が確認されており、波とイオンのカップリングと関連付けて議論されている^{[1][2]}。

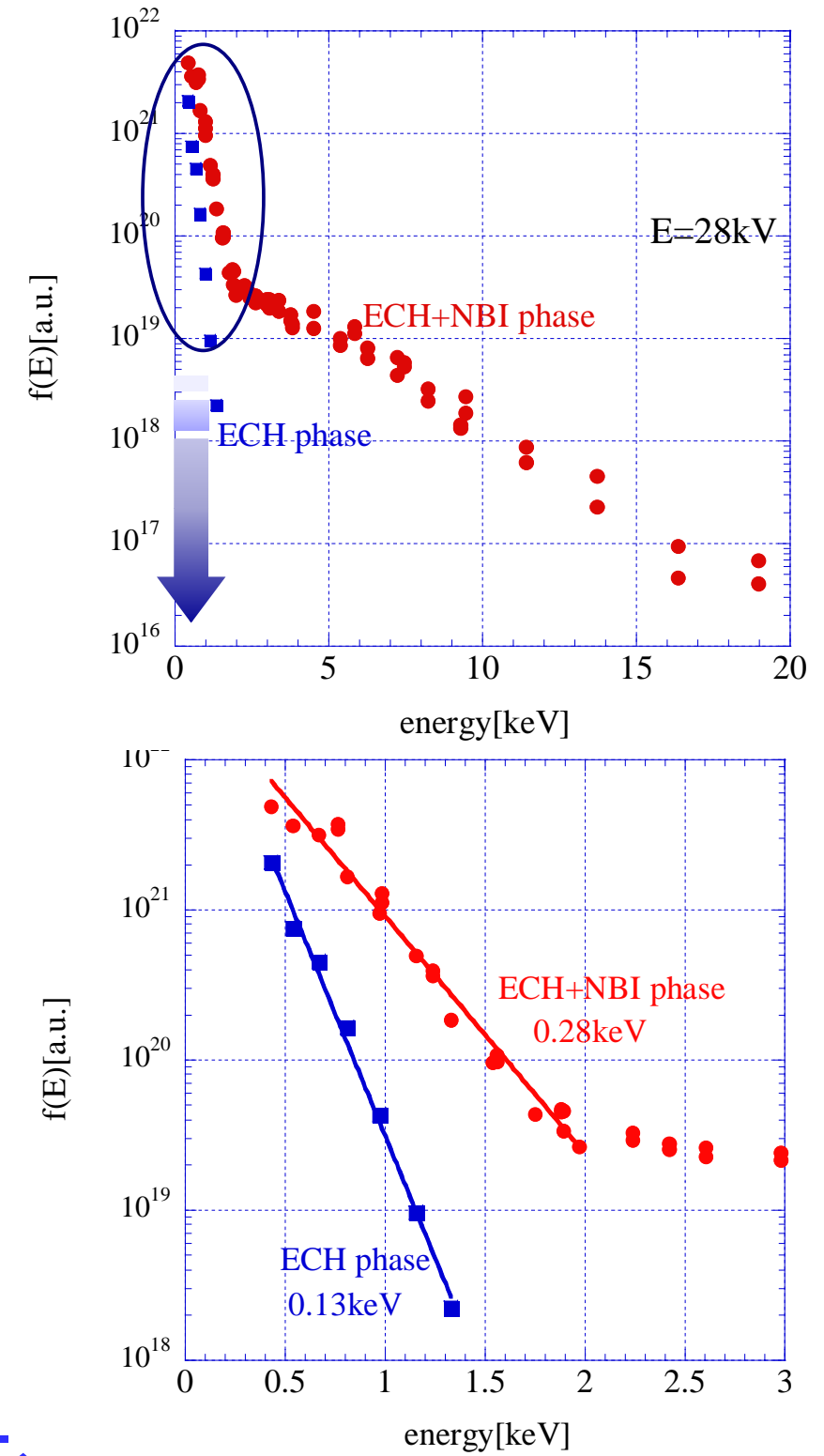
[1] V.Erckmann and U.Gasparino, Plasma Phys. Control. Fusion 36(1994) 1896

[2] Z.A.Pietrzyk, A.Pochelon, et al., Nucl. Fusion 33(1993) 197

NBI実験



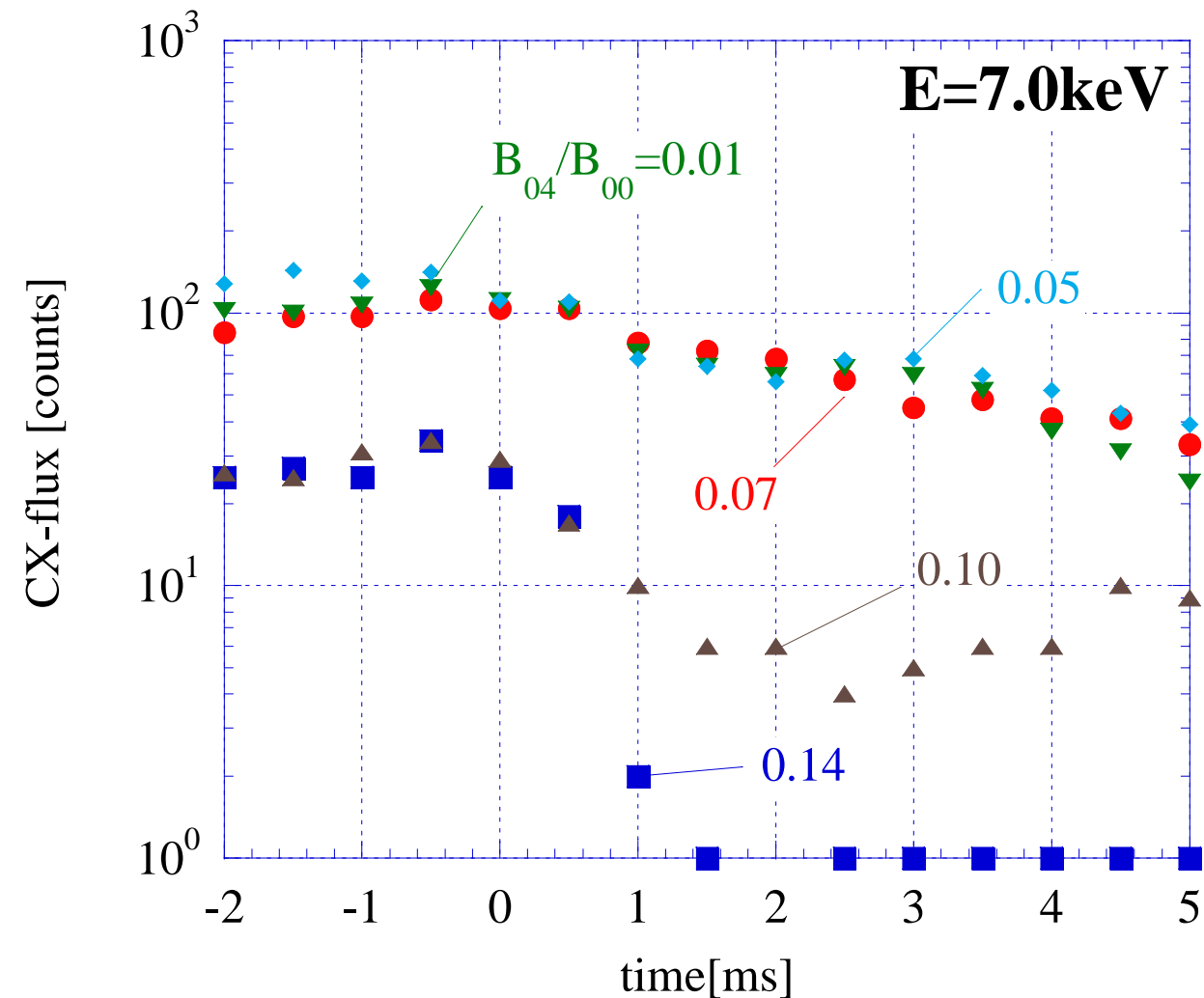
NBI加熱実験における、電子密度、蓄積エネルギー、及びイオン温度の時間発展。



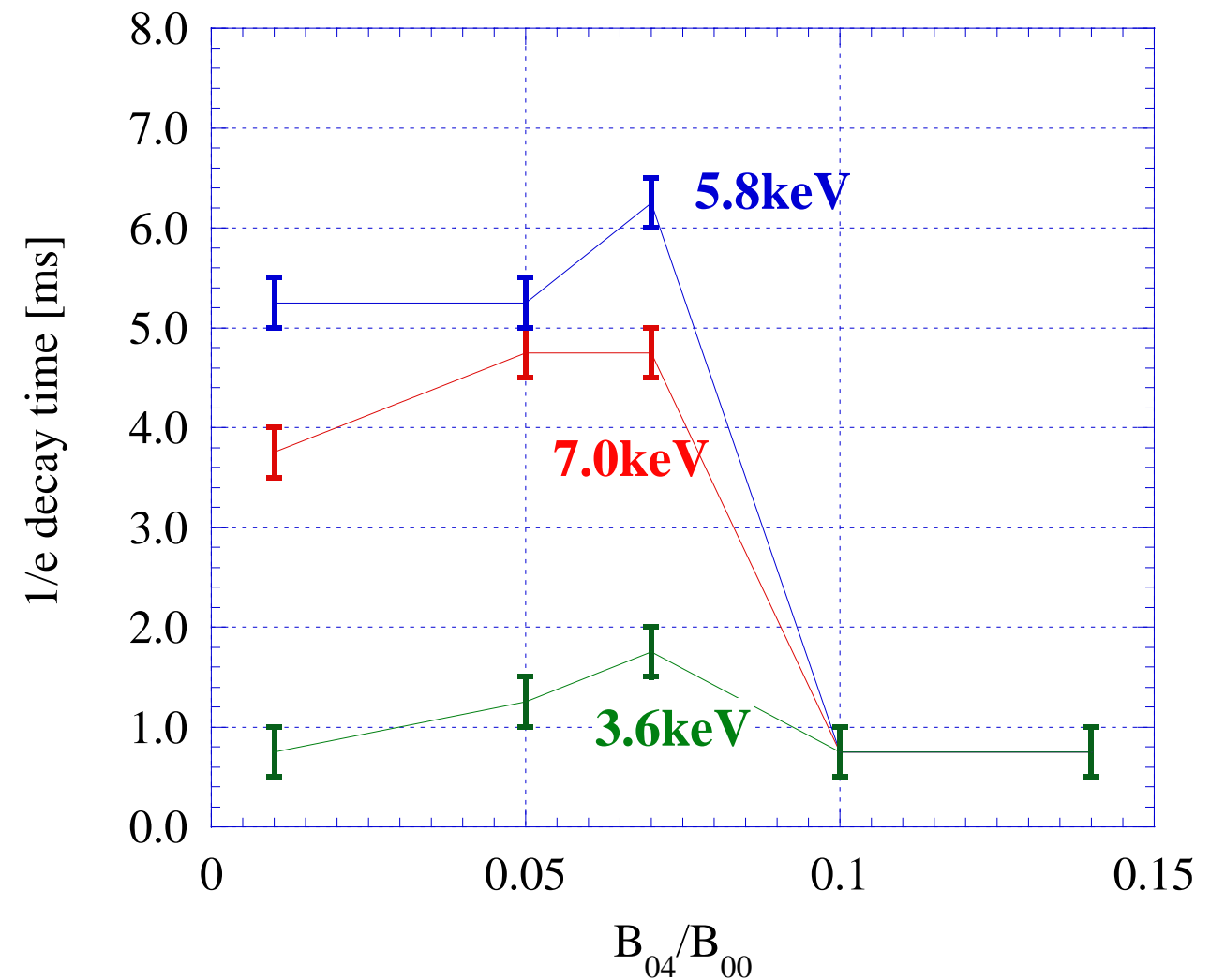
NBI加熱実験におけるエネルギースペクトル。

バンピー成分制御実験

磁場配位が粒子閉じ込めに与える影響調べるため、磁場のバンピー成分 (B_{04}/B_{00}) を変化させて、CX粒子束の振る舞いを調べた。



バンピー成分を変化させた場合のCX粒子束 (7.0keV) の時間変化。

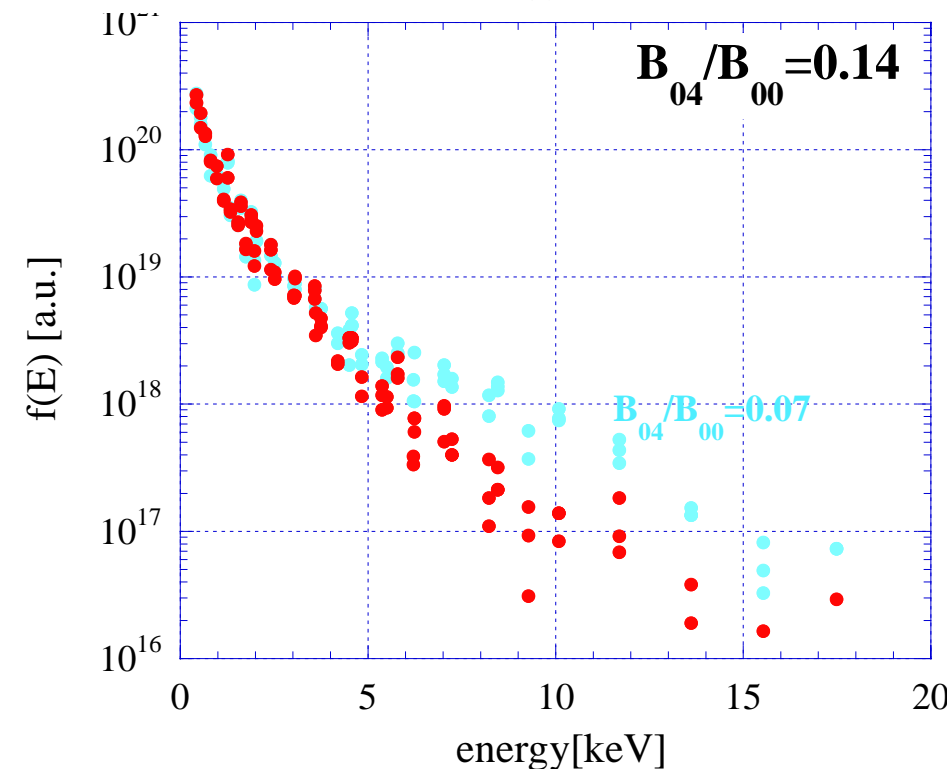
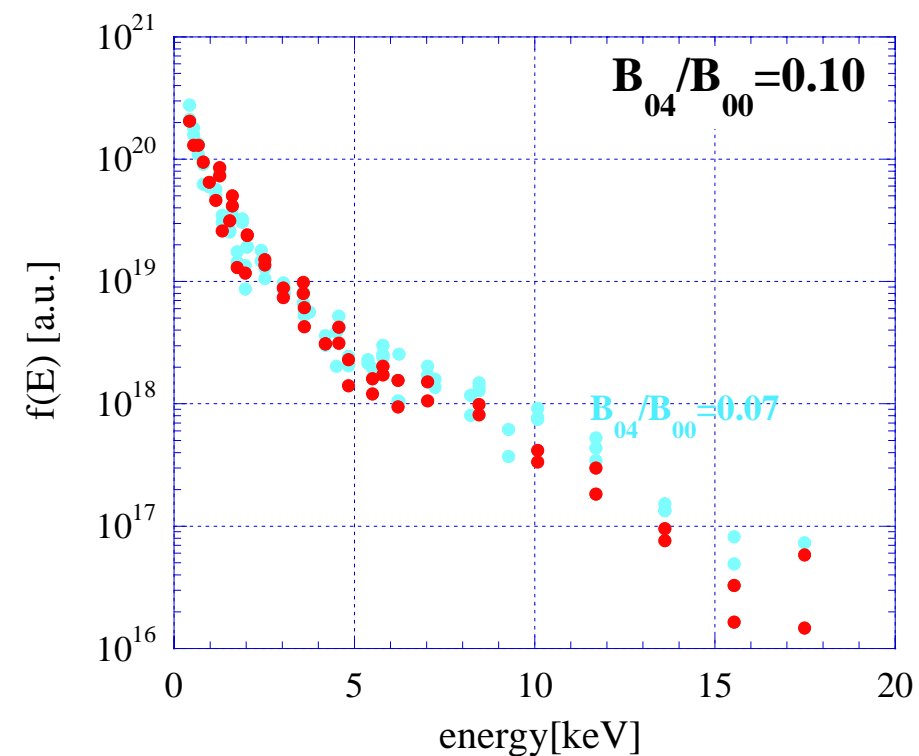
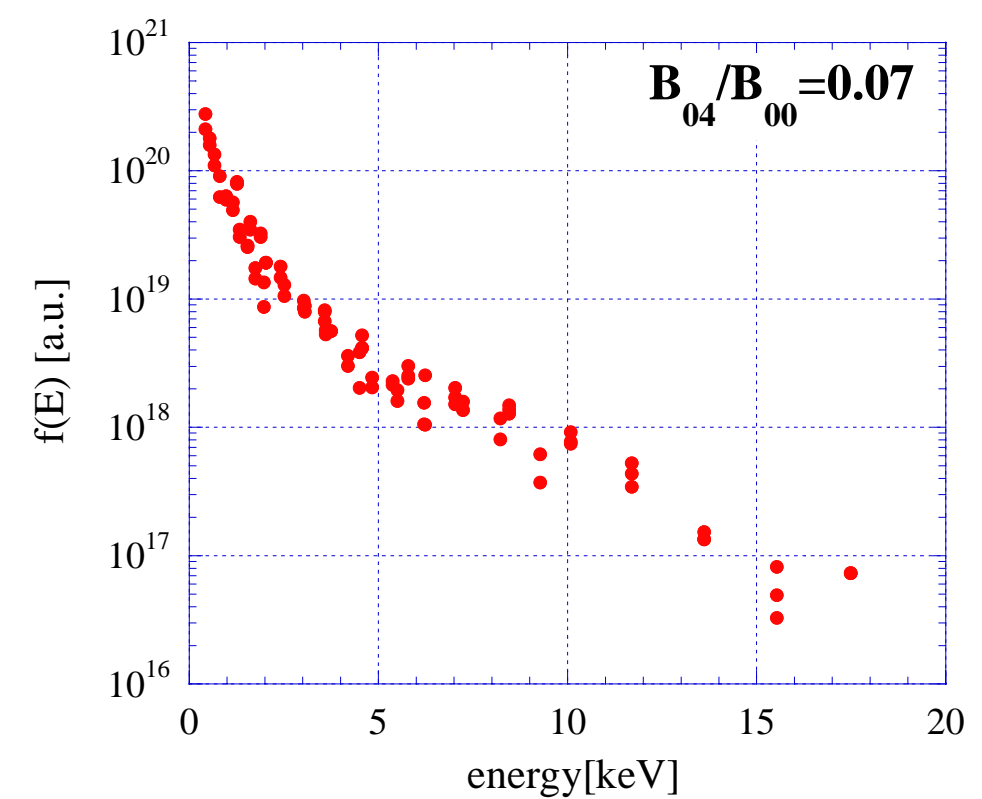
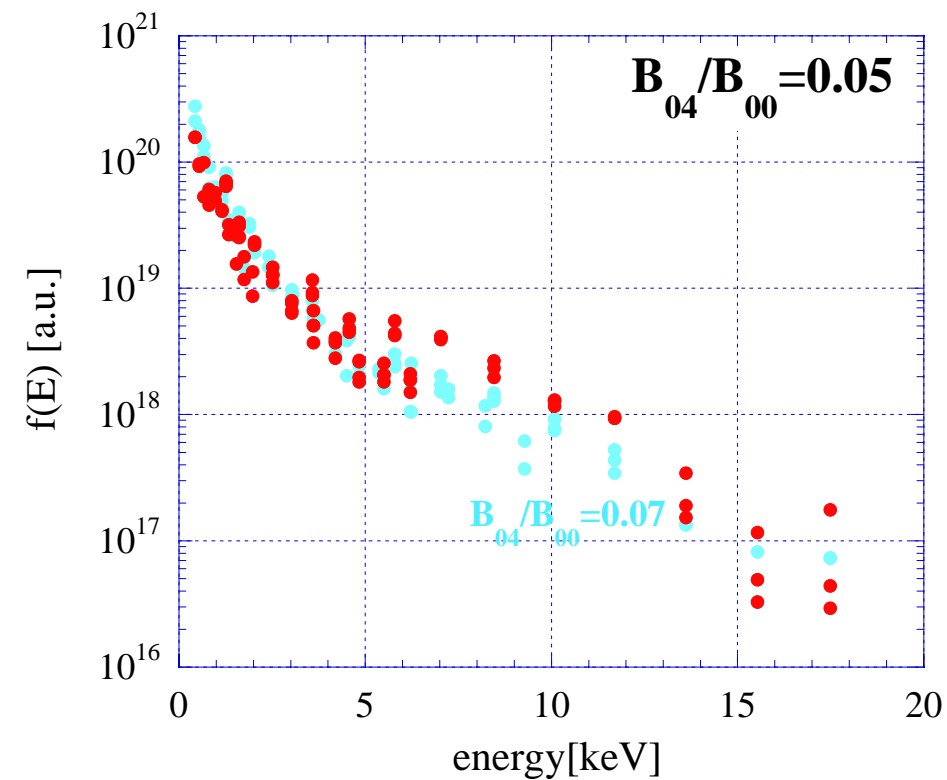
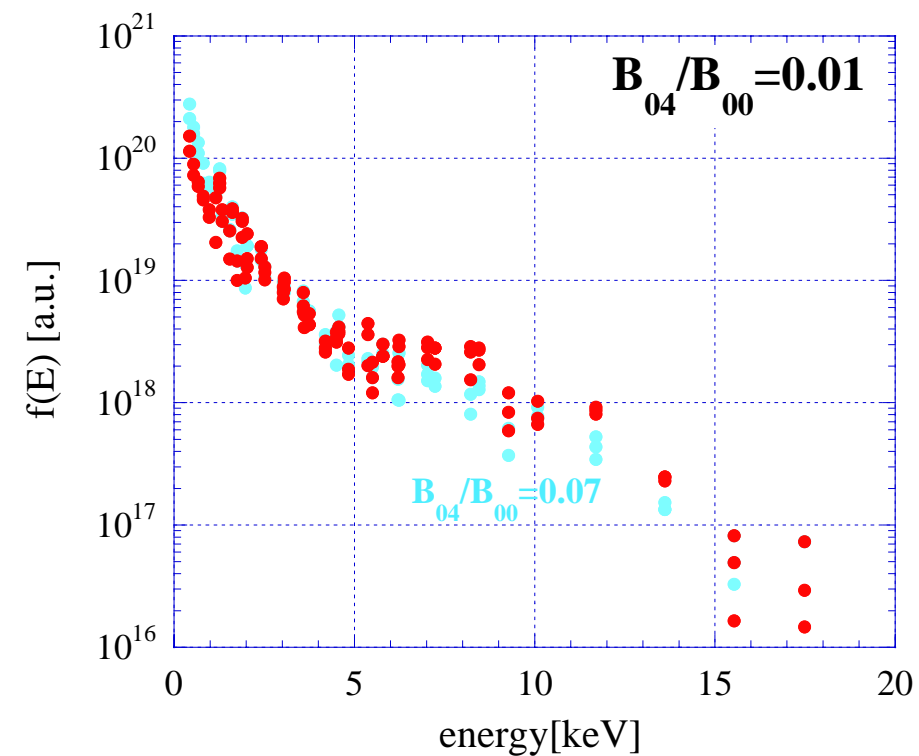


7.0keV 、 5.8keV 、 3.6keV のCX粒子束の $1/e$ 減衰時間のバンピー成分依存性。

NB切断時のCX粒子束を1として、CX粒子束が $1/e$ まで減衰する時間を $1/e$ 減衰時間とした。

CX粒子束の $1/e$ 減衰時間は $B_{04}/B_{00}=0.07$ より、バンピー成分を小さくするとやや短くなる。一方、バンピー成分を $B_{04}/B_{00}=0.07$ より大きくすると減衰時間は極端に短くなる。

バンピー成分制御実験



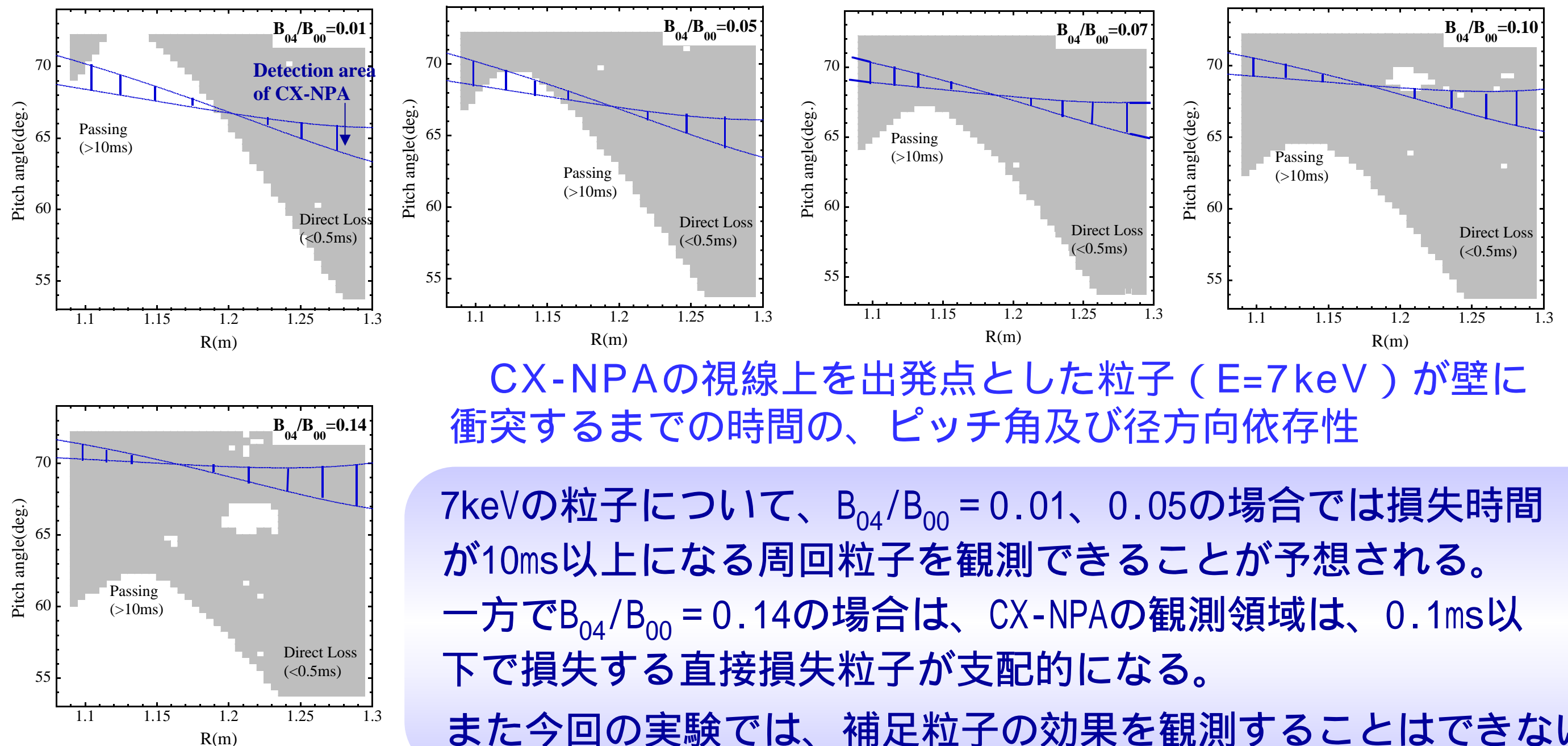
各磁場配位におけるNB入射中のエネルギースペクトル。

5keV以上のエネルギー領域において、配位ごとの差が見られる。 $B_{04}/B_{00} = 0.01$ において、5-10keVのエネルギー領域に肩が見られる。一方、 $B_{04}/B_{00} = 0.14$ の場合は、極端に高エネルギー成分が少ない。

案内中心軌道計算

無衝突イオンの案内中心軌道計算を行った。CX-NPAの視線から出発させた粒子が壁に衝突するまでの時間の、出発点の径方向及びピッチ角に対する依存性を調べた。

計算には、実座標系（円柱座標系）においてドリフト軌道方程式を計算するKGCRコードを用いた。実座標系を用いることにより、最外殻磁気面より外側の粒子の案内中心軌道を計算することができる。

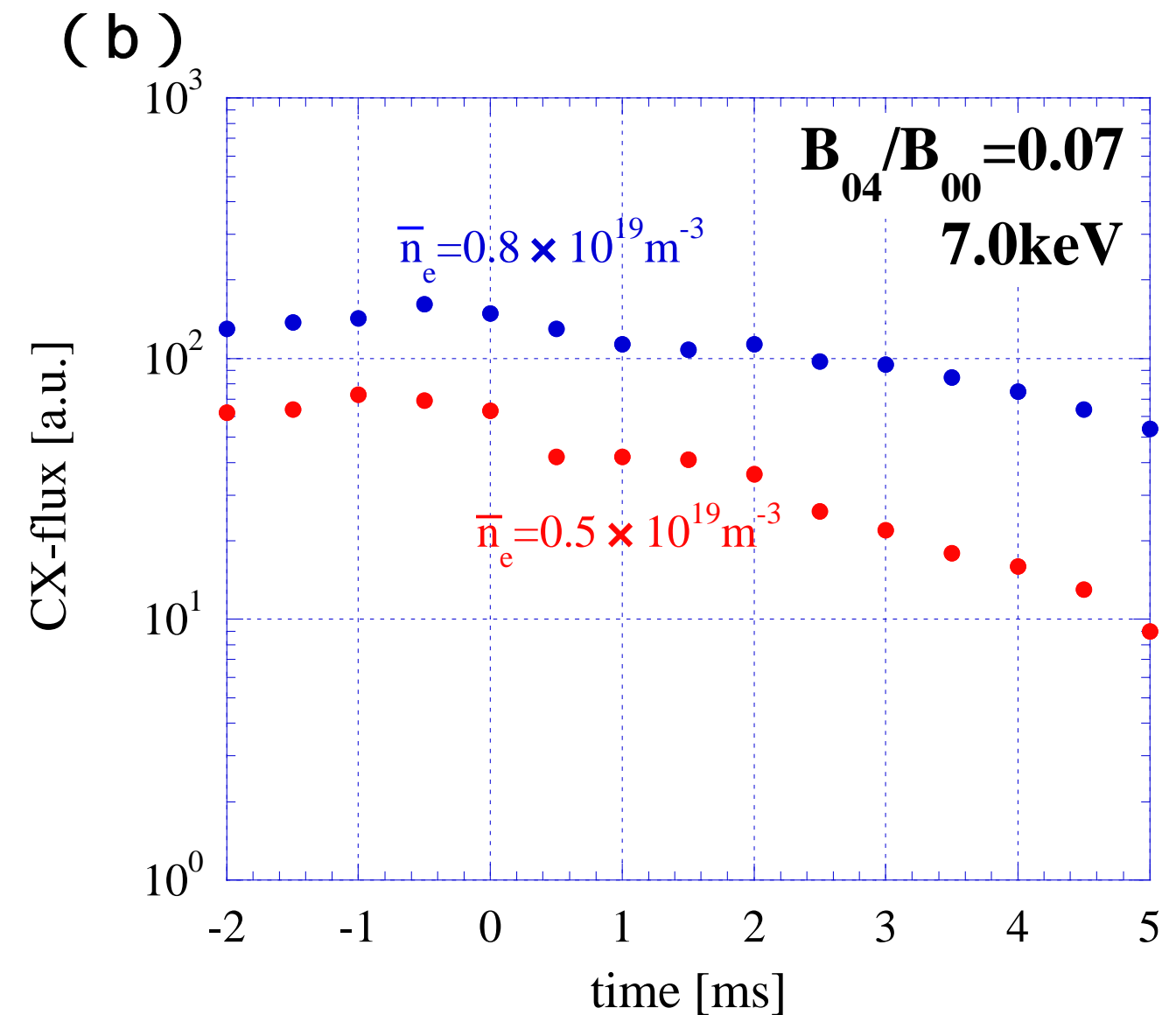
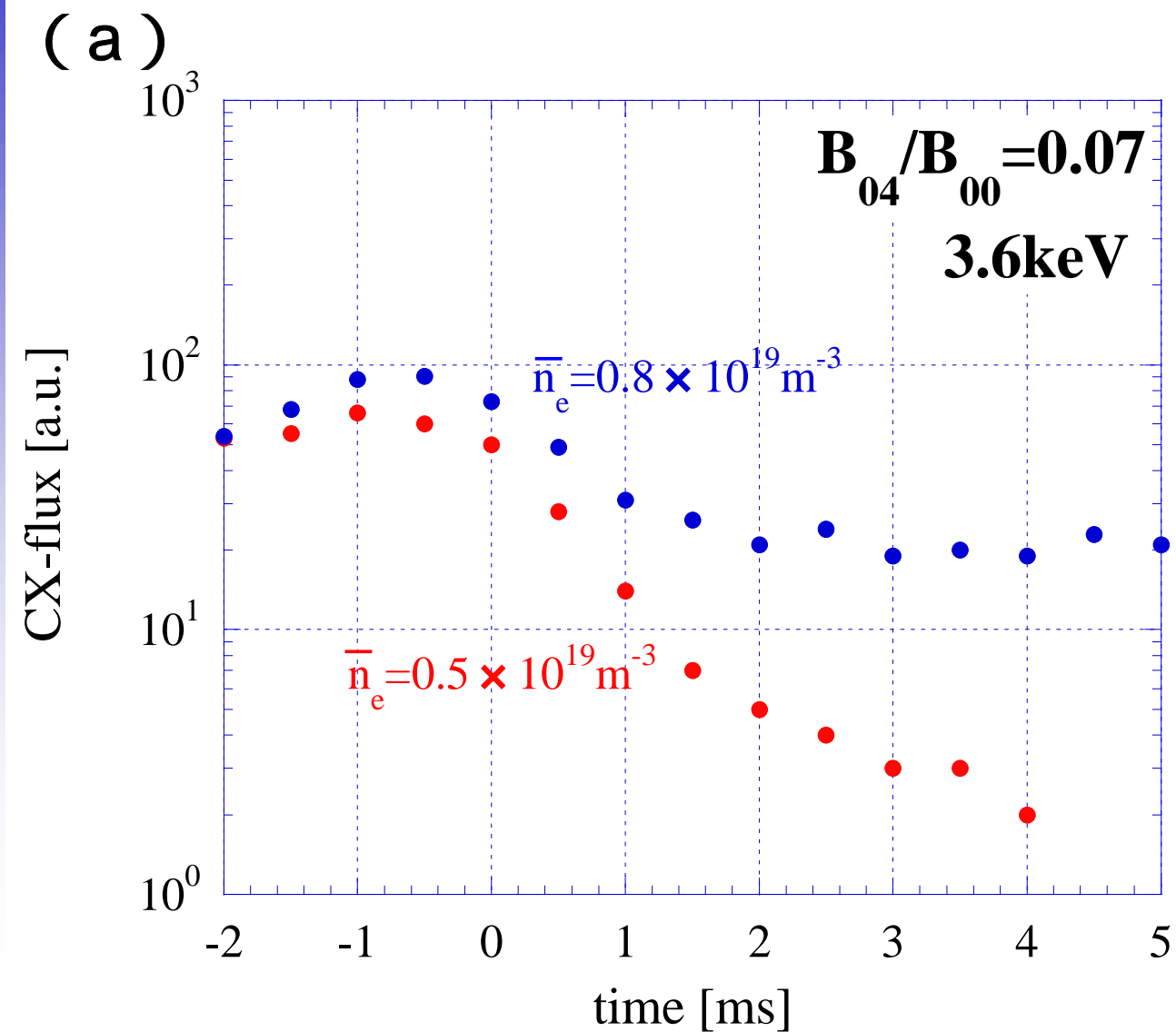


CX-NPAの視線を出発点とした粒子 ($E=7\text{keV}$) が壁に衝突するまでの時間の、ピッチ角及び径方向依存性

7keVの粒子について、 $B_{04}/B_{00} = 0.01$ 、 0.05 の場合では損失時間が10ms以上になる周回粒子を観測できることが予想される。一方で $B_{04}/B_{00} = 0.14$ の場合は、CX-NPAの観測領域は、0.1ms以下で損失する直接損失粒子が支配的になる。

また今回の実験では、補足粒子の効果を観測することはできない。

減衰時間の密度依存性

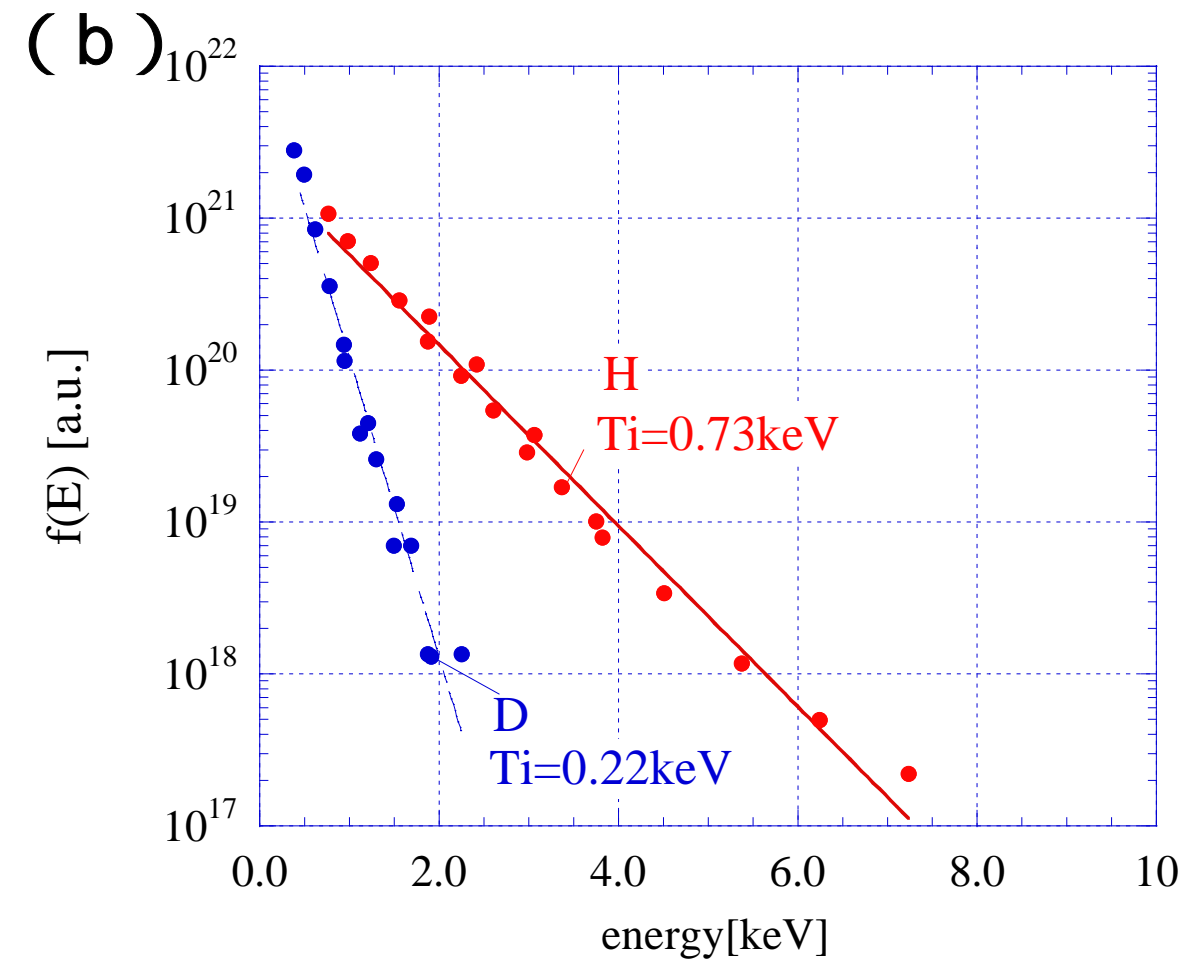
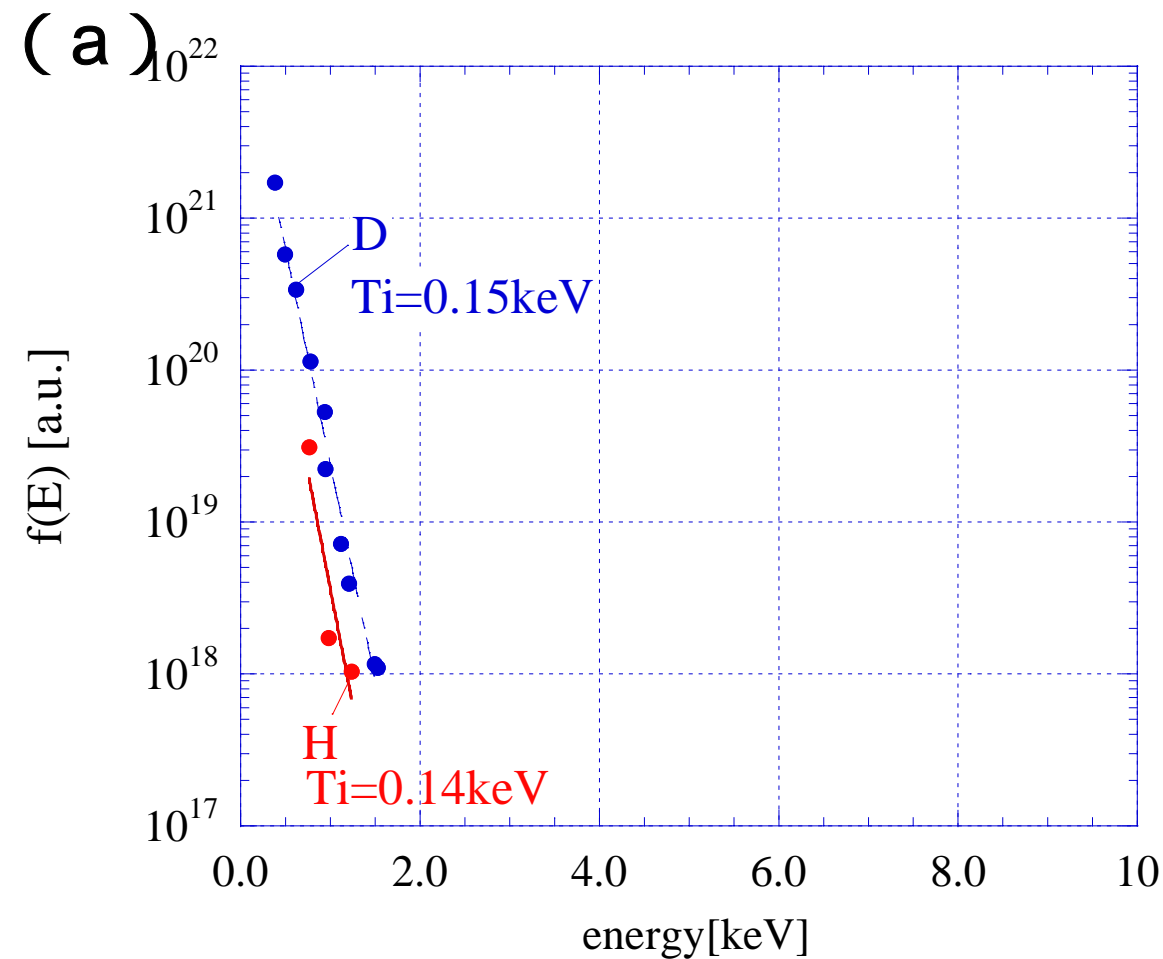


$\bar{n}_e=0.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の場合のCX粒子束の時間変化。
(a) 3.6keV (b) 7.0keVの場合。

$\bar{n}_e=0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ に比べて、 $\bar{n}_e=0.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の方が減衰時間が長い。
減衰時間の密度依存性を説明するためには、ピッチ角散乱の効果を検討に入れた解析が必要である。

ICRF実験

プラズマ加熱機構の解明、及び高エネルギー粒子の振る舞いを調べることを目的として、主プラズマ（重水素）に対する少数イオン（水素）をイオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）により加熱する実験を行った。



ICRF加熱実験におけるエネルギースペクトル。

(a) ICRF印加前（ECHプラズマ） (b) ICRF印加中。

ICRF加熱により、約7keVまでの高エネルギーの水素イオンが生成された。
バルクの重水素の温度は、0.15keVから0.22keVまで上昇した。

まとめ

ECHプラズマ

$\bar{n}_e > 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の密度領域では、イオンのエネルギー分布はほぼ単一Maxwell分布を示す。しかし、 $\bar{n}_e < 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の密度領域では、バルクイオン温度の数倍のエネルギーを持つ高エネルギーの粒子束が増加し、エネルギースペクトルに高エネルギーテール成分が見られた。高エネルギーテール成分は、密度が低くなるほどより顕著に観測された。高エネルギーイオンの生成機構は調査中だが、高速電子とイオンのカップリングや、波とイオンのカップリングなどが考えられる。

NBIプラズマ

NB入射により、バルクのイオン温度は0.3keV程度まで上昇し、エネルギースペクトルに約20keVまでのテール成分が観測された。一方、E、E/2、E/3といったビーム成分は観測されなかった。これは、入射される粒子とCX-NPAで観測される粒子のピッチ角が異なっているためだと考えられる。

磁場配位が粒子閉じ込めに与える影響調べるため、磁場のバンピー成分 (B_{04}/B_{00}) を変化させて、CX粒子束の振る舞いを調べた。その結果、CX粒子束の1/e減衰時間は $B_{04}/B_{00}=0.07$ より、バンピー成分を小さくするとやや短くなる。一方、バンピー成分を $B_{04}/B_{00}=0.07$ より大きくすると減衰時間は極端に短くなる。

無衝突のイオンの軌道計算より、CX-NPAは、 $B_{04}/B_{00} = 0.01$ 、 0.05 の場合では損失時間が10ms以上になる周回粒子を観測できるが、 $B_{04}/B_{00} = 0.10$ の場合は、0.1ms以下で損失する直接損失粒子が支配的になることがわかった。これより減衰時間のバンピー成分に対する依存性は、ロスコーン形状の変化に起因すると考えられる。

ピッチ角散乱の効果を考慮に入れた解析が今後の課題である。

ICRFプラズマ

ICRF加熱により、約7keVまでの高エネルギーイオンが生成された。バルクの重水素の温度は、0.15keVから0.22keVまで上昇した。