

アルファ粒子計測のための高速中性 ヘリウムビーム開発

岡本敦、木崎雅志、ほか
東北大学大学院工学研究科

発表内容

- (1) 大電流強集束正イオン源の
開発
- (2) ヘリウム負イオンビームの
生成 および自発脱離による
中性化の実証
- (3) 高速中性ヘリウムビーム中
の準安定状態/基底状態占
有密度比診断手法の開発

共同研究者

磯野剛大、岩崎圭介、菊池政寛、菅原大志、
高橋宏幸、竹内崇、田中のぞみ、津川夏一、
寺井健祐、長村隆行、西内嗣浩
北島純男、笹尾眞實子(東北大)

金子修、小淵隆、津守克嘉、西浦正樹
(NIFS)、神藤勝啓(JAEA)、和田元(同志社
大)、榊田創、木山学、平野洋一(AIST)

本研究は科研費特定領域研究「プラズマ燃焼
のための先進計測」(2004-2009年度)におけ
る計画研究の一部として実施されました

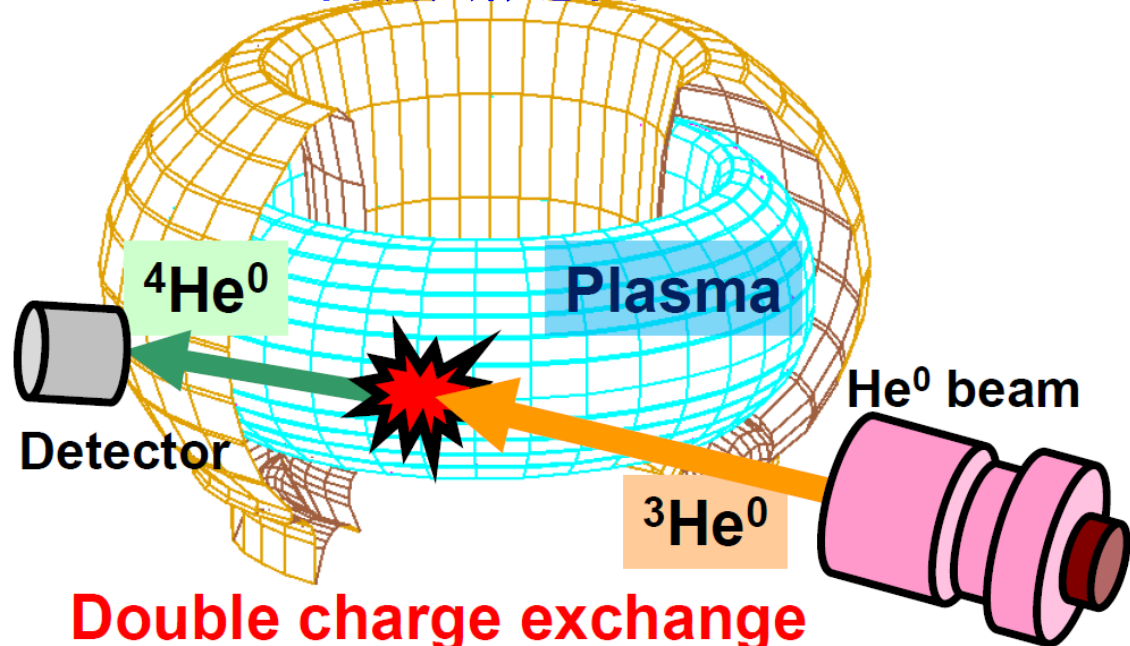
0. 燃焼プラズマのアルファ粒子計測

- 燃焼プラズマ実験で初めて必要となる計測
- 閉じ込め磁気面内部のアルファ粒子エネルギー分布・空間分布
 - DT核融合反応で生成 (3.5MeV)
 - プラズマにエネルギーを付与し減速
- アルファ粒子生成・減速過程の診断 → 燃焼プラズマ制御へ
- アルファ粒子を模擬する高エネルギーイオンのエネルギー分布・空間分布計測
- 荷電交換によるアルファ粒子 (模擬イオン) の中性化
 - 計測ビーム/ペレット/不純物
- 共同トムソン散乱



0. ビーム入射中性化によるアルファ粒子計測

計測法概念図



Double charge exchange

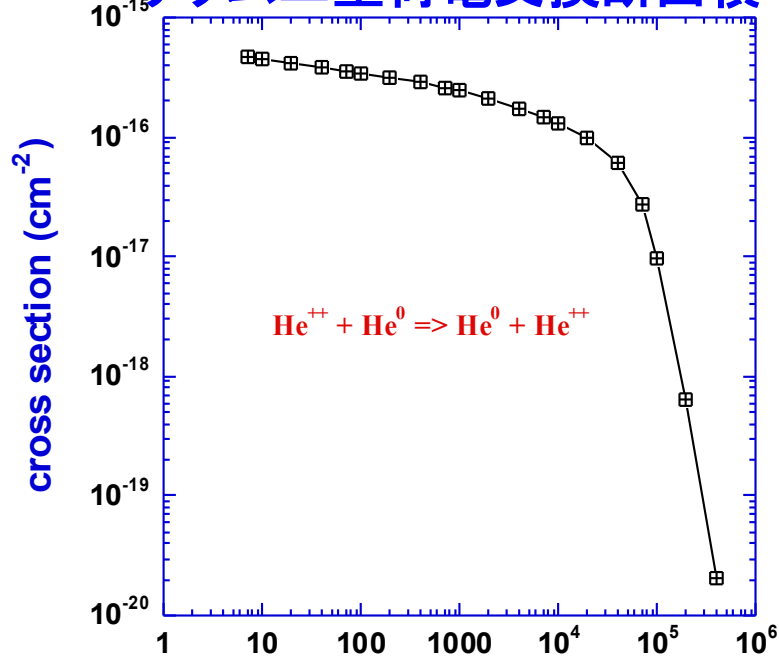


高速中性ヘリウムビームに要求される性能

- 接線入射
- ビームエネルギー 1-2MeV
- ビーム強度 10mA for ITER

- 磁気軸近傍を計測
- 高い貫通能力(中性ビーム)
- 二重荷電交換を利用
- He, Li, ...
- アルファ粒子との相対速度を低減して反応断面積を稼ぐ

ヘリウム二重荷電交換断面積



0. 高速ヘリウム中性粒子ビームの開発にむけて

- 正イオン-加速-中性化 の手法はMeV領域の中性化効率が低い
- **He負イオン生成 - 加速 - 自発脱離中性化** (中性粒子は基底状態のみ)

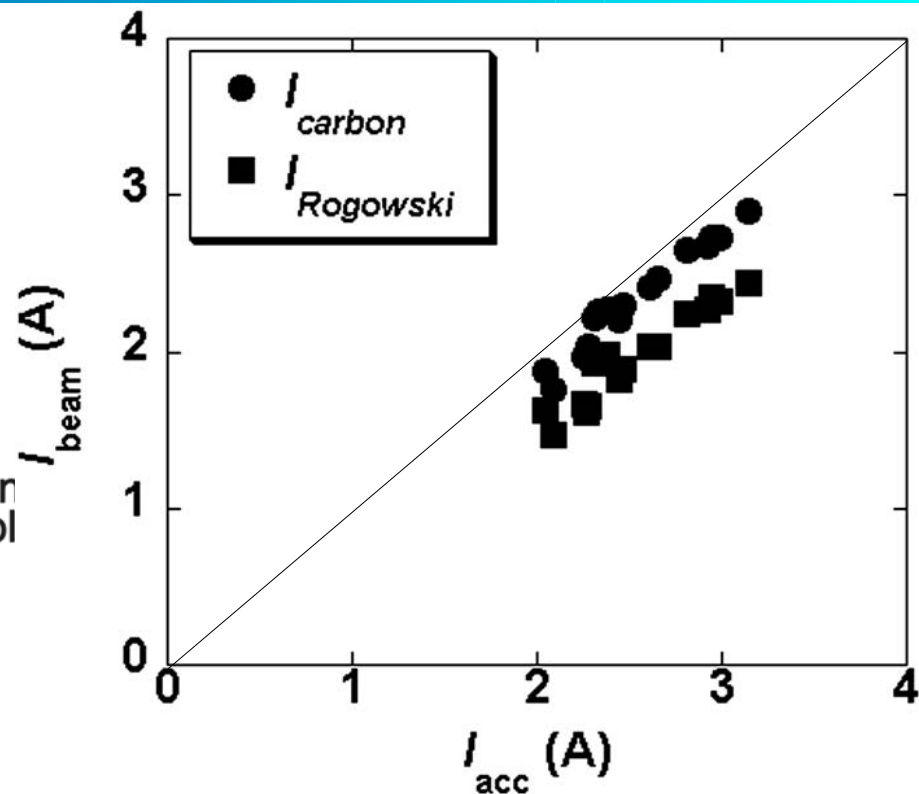
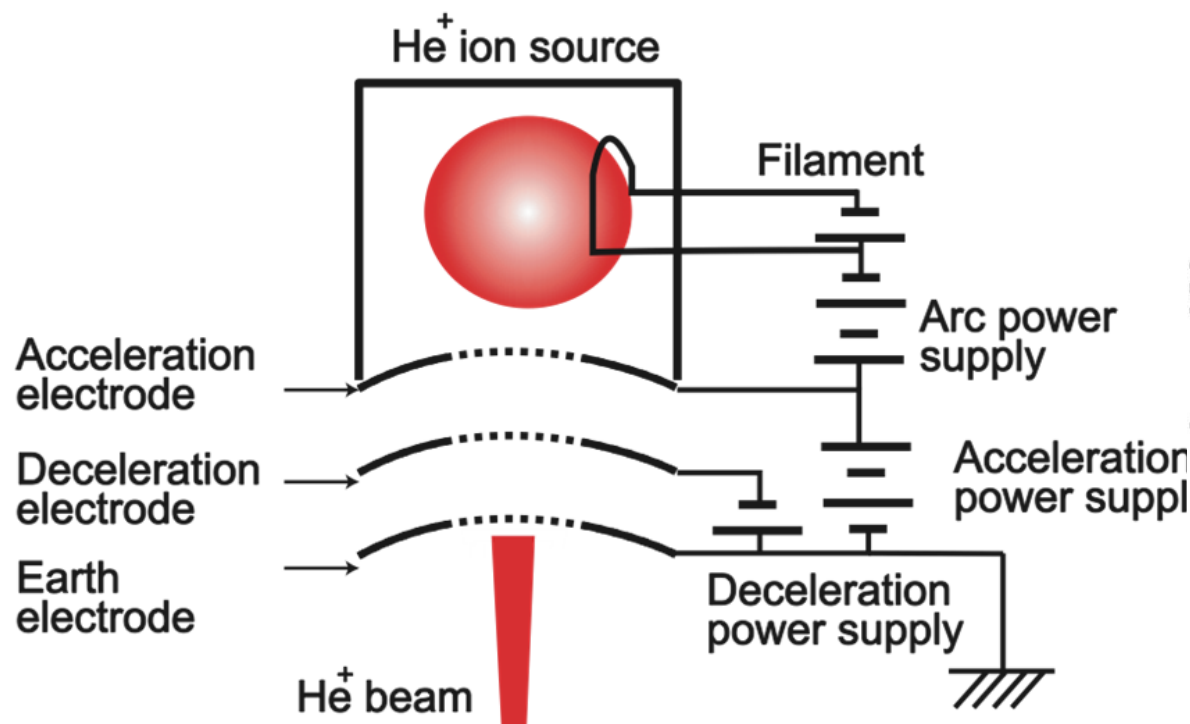


- 荷電変換セル(狭開口)が必須
正イオン → 負イオン
 - 大電流(2-3 A)正イオンビーム集束入射
- 実機サイズ中性ビーム装置へのスケールアップ
 - 各過程の効率の検証
 - 主加速器負荷の低減
- 基底状態ビームの実証

- (1)大電流強集束正イオン源の開発
- (2)ヘリウム負イオンビームの生成と自発脱離による中性化の実証
- (3)高速中性ヘリウムビーム中の準安定状態/基底状態占有密度比診断手法の開発

- 実機サイズ中性ビームの開発と大型装置における実証実験
- (進行中: 検出器・配置)

1. 大電流強集束イオン源の開発



- イオン源サイズ $\phi 0.3\text{m} \times 0.28\text{m}$
- 多孔 300x $\phi 4\text{mm}$, 湾曲 ($r=0.75\text{m}$) 電極
- 三次元空間ビームプロファイル (可動ターゲット板のIRイメージ)
- NIFS-NBIテストスタンドを利用

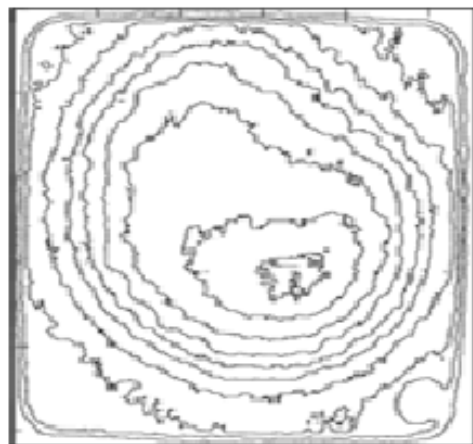
- ビーム電流は、ターゲット板電流、ロゴスキーコイル、加速電源電流から評価

- 3A(定格) He⁺ビーム引き出しに成功

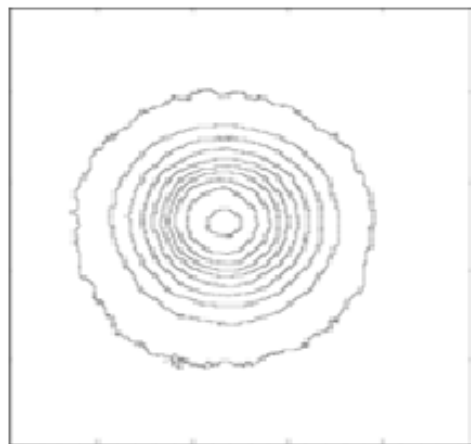
Kisaki 2008



1. 大電流強集束イオンビームの特性

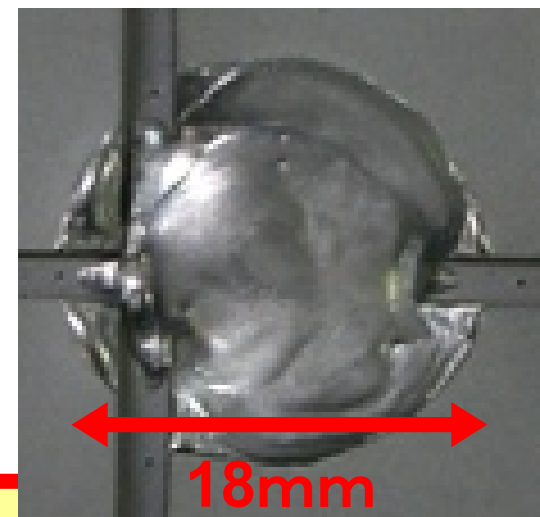


old



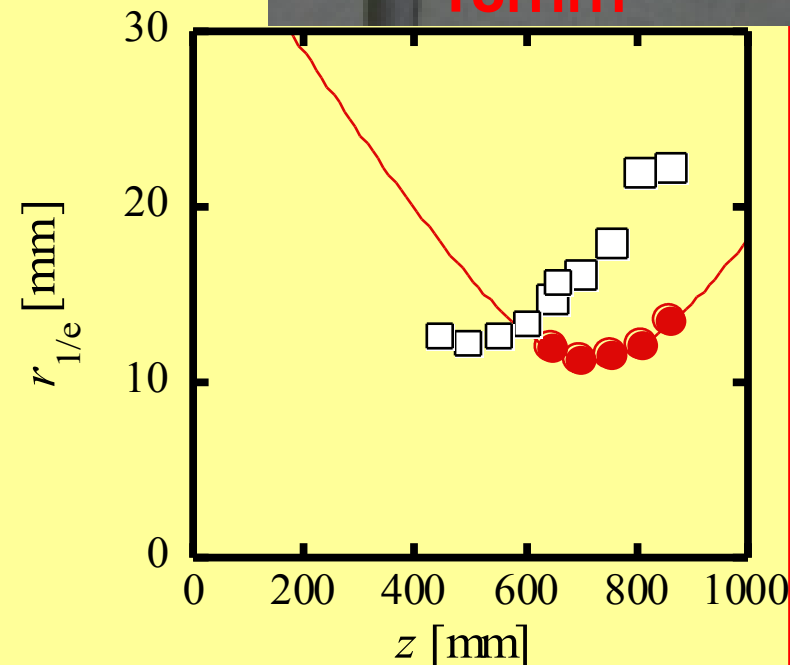
new

- SUS板への
ビーム照射
パターン



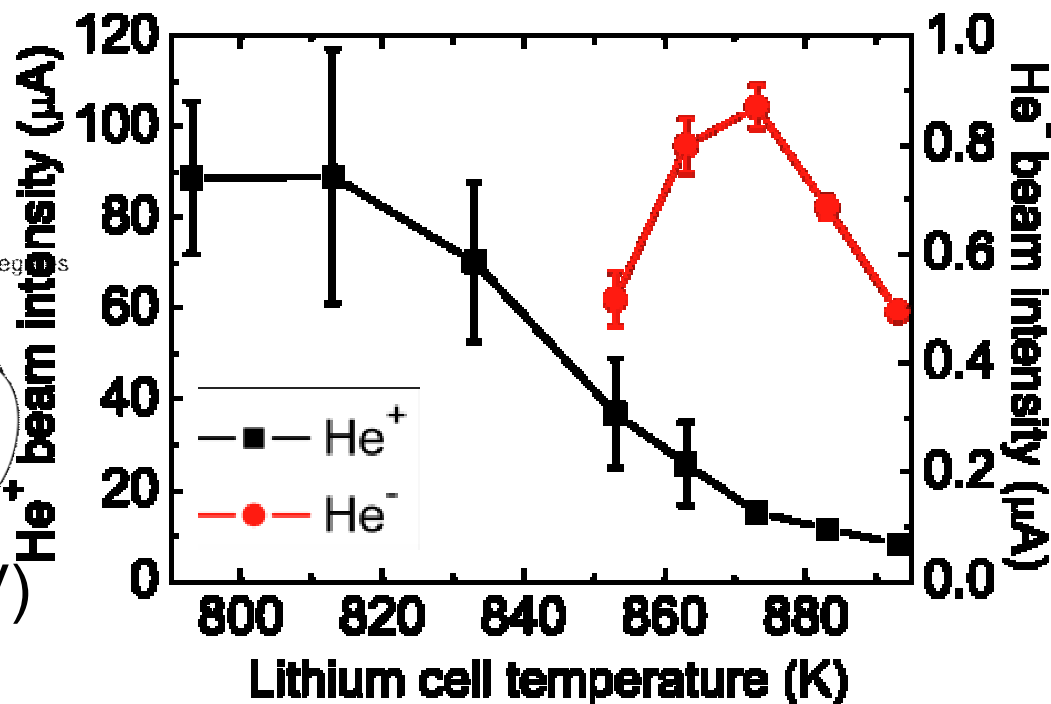
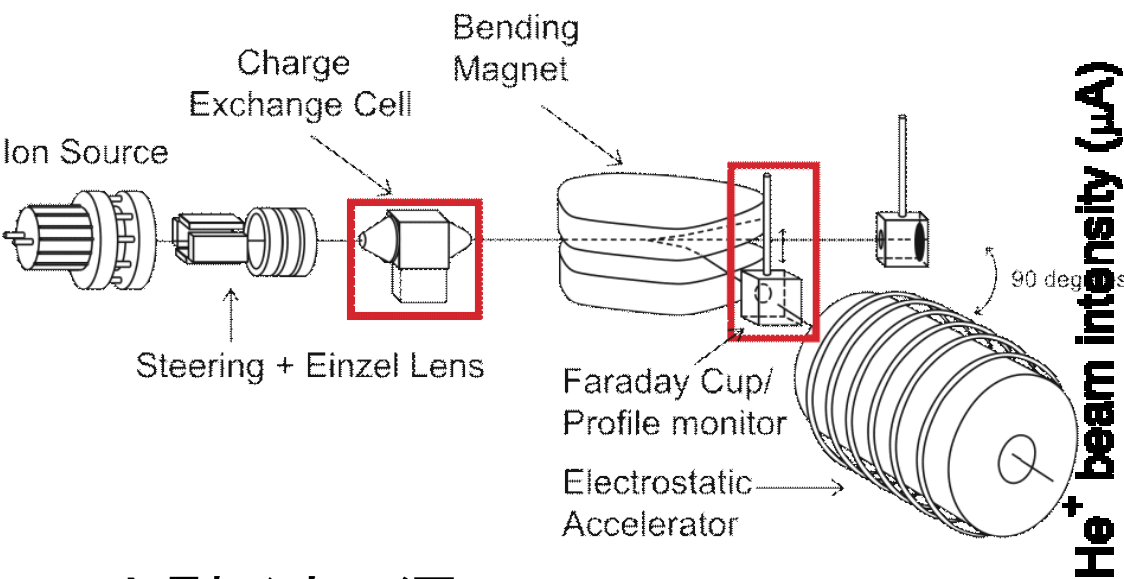
18mm

- 旧電極では歪んだビームプロファイルを観測
 - アーク投入電力超過による電極の熱歪
- 新電極への交換とともに投入アーク電力の管理を徹底
 - 軸対称なプロファイルのビーム引き出しに成功



- 新電極ではほぼ曲率半径の位置でビームが10mmにまで集束

2. ヘリウム負イオンビーム生成



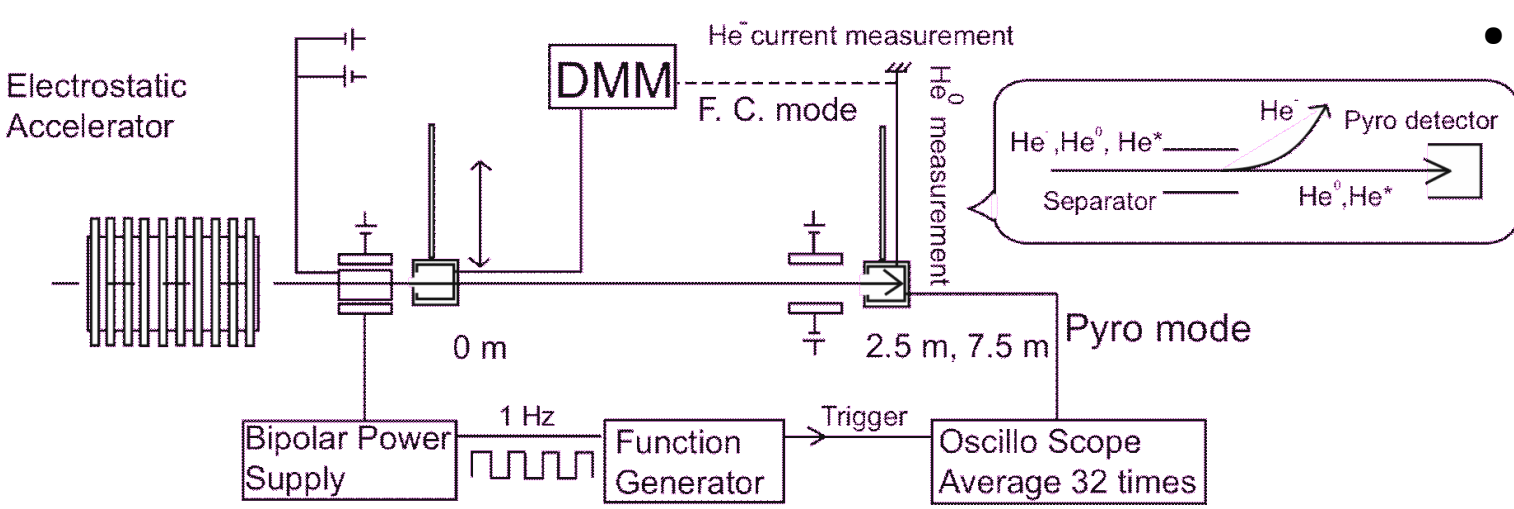
- 小型イオン源(He⁺ 1mA, 10-15 keV)
- アルカリ金属ガスセル
リチウムによる負イオン生成
- 偏向電磁石によるイオン選択
ガスセル中心一加速管入口を結像
- 150kV静電加速管の高圧側に全ての機器を収納・遠隔操作

- リチウム線積分密度(セル温度)を変化させ、偏向電磁石の下流でHe⁺/He⁻ビーム電流を計測
- Li増加によりHe⁺ビーム減少、He⁻ビーム電流は極大値を持つ

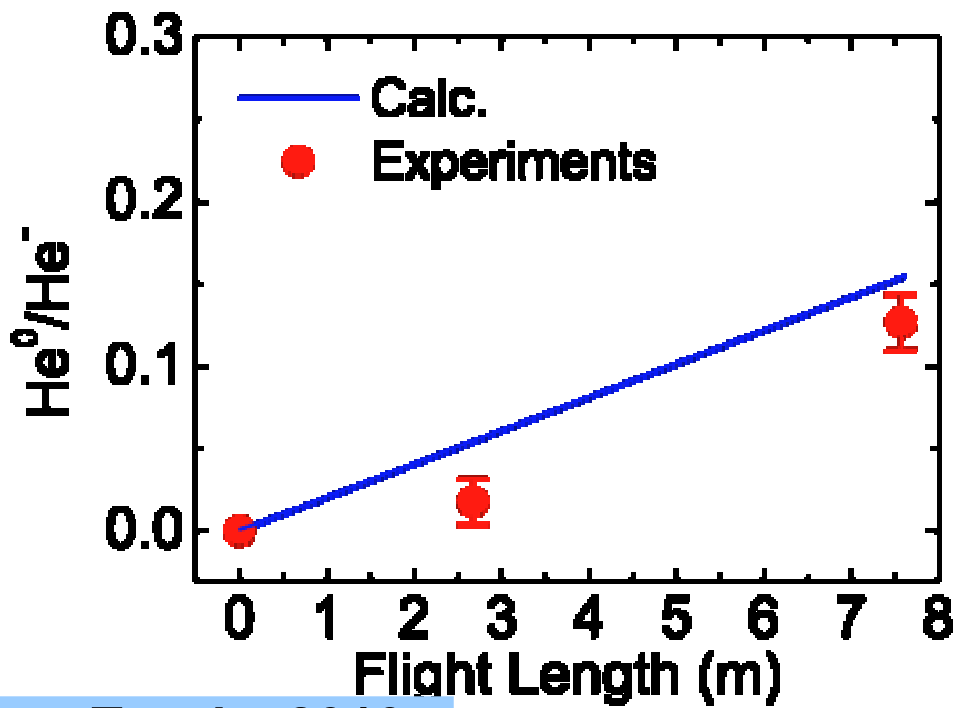
• 最大1%程度のHe⁻ビーム生成 (He⁺-Li反応断面積を初めて導出)



2. ヘリウム負イオンの自発脱離中性化



- 加速管直後および下流2箇所での位置でHe⁰ビームを計測 (パイロエレクトリック検出器)

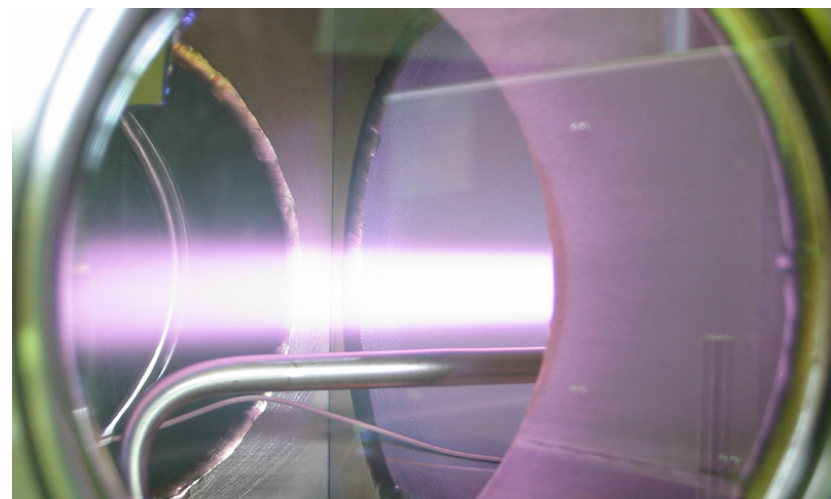
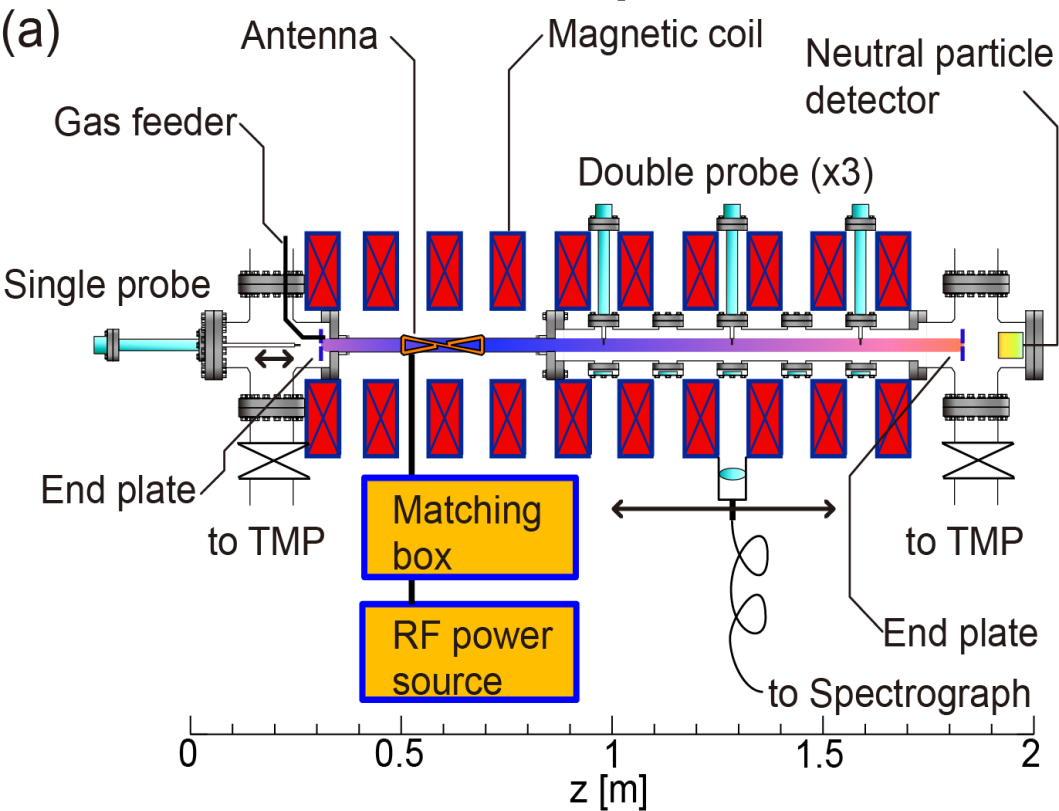


- 飛行距離によるHe⁰量の増加を確認
- 飛行距離7.5 mにおいて40 nA相当以上のHe⁰ビームが計測された
- 負イオン寿命(10us)および残留ガス衝突(無視できる)を考慮した中性化率計算は実験結果をよく説明する

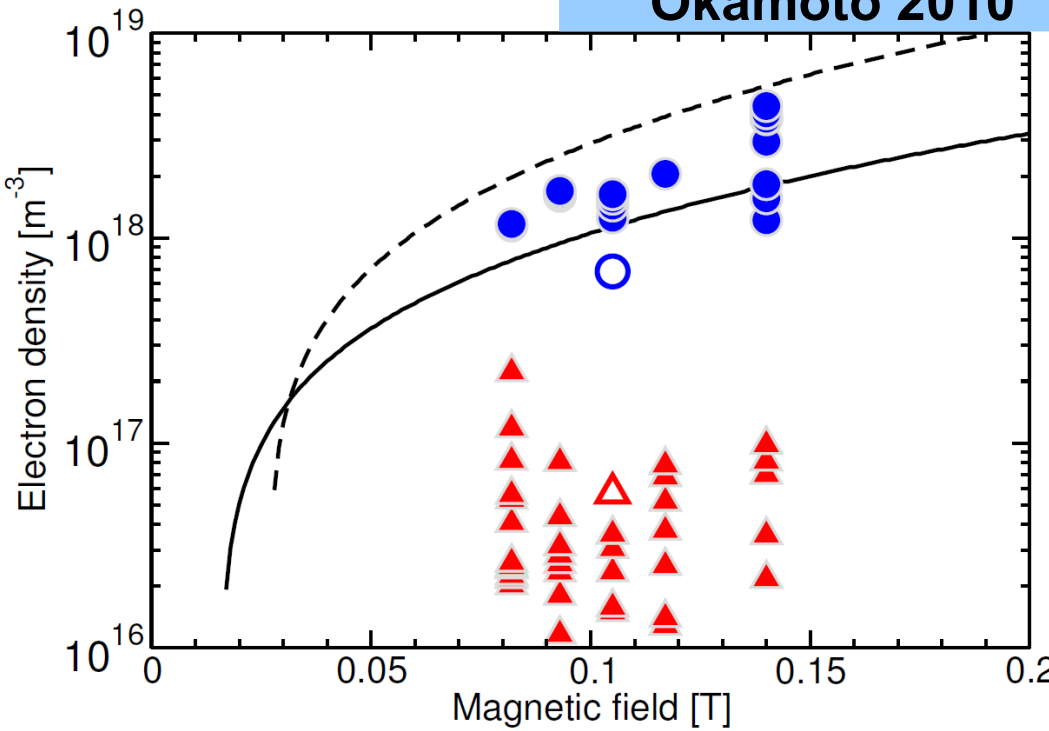
$$I^- / I_0^- = \sum_i^2 (f_i e^{-(\sigma n L + L / v \tau_i)})$$

ヘリウム負イオンビームの自発脱離による中性化を実証した

3. ビーム減衰による占有密度比計測 — 標的プラズマ源の開発 —



Okamoto 2010

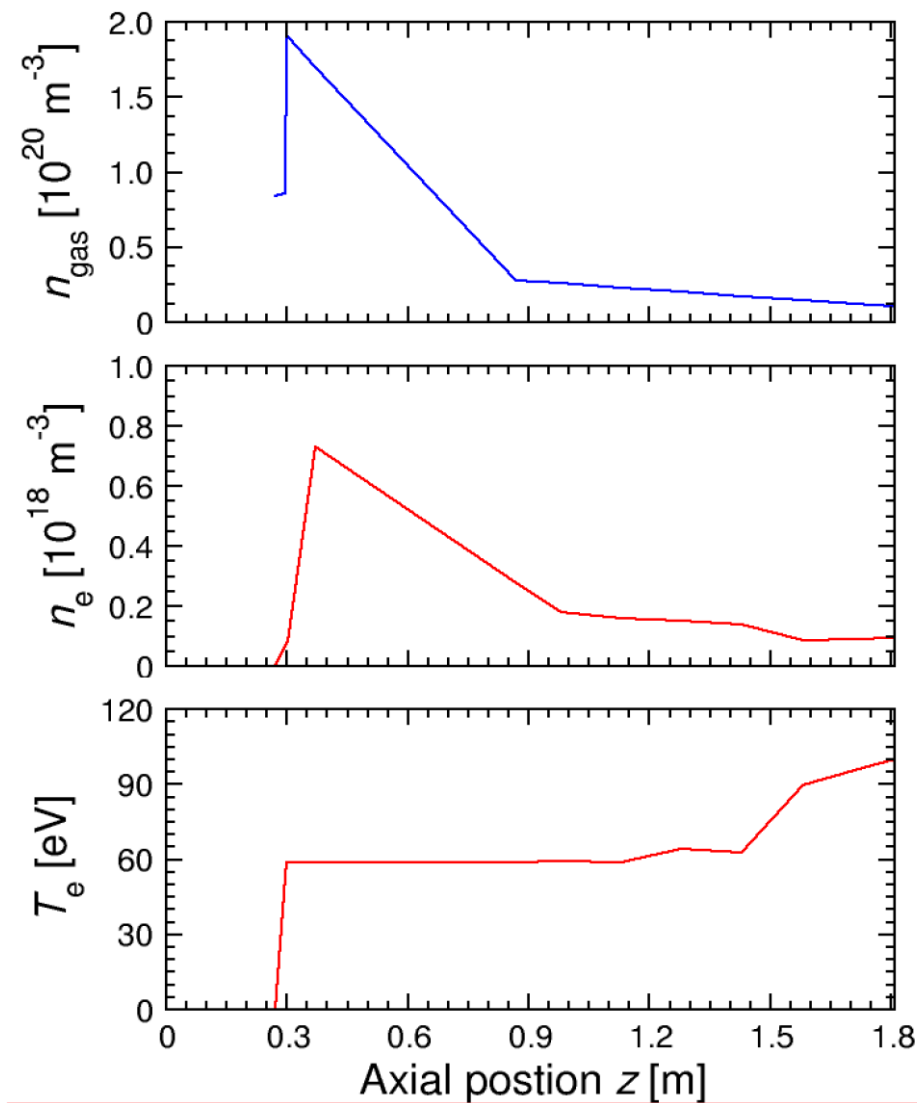


- ビーム入射標的となる直線型プラズマ源(DT-ALPHA)を開発
- **ヘリコン波放電による高密度ヘリウムプラズマ生成に成功**
- ビーム減衰量から He^*/He^0 占有密度比を計測

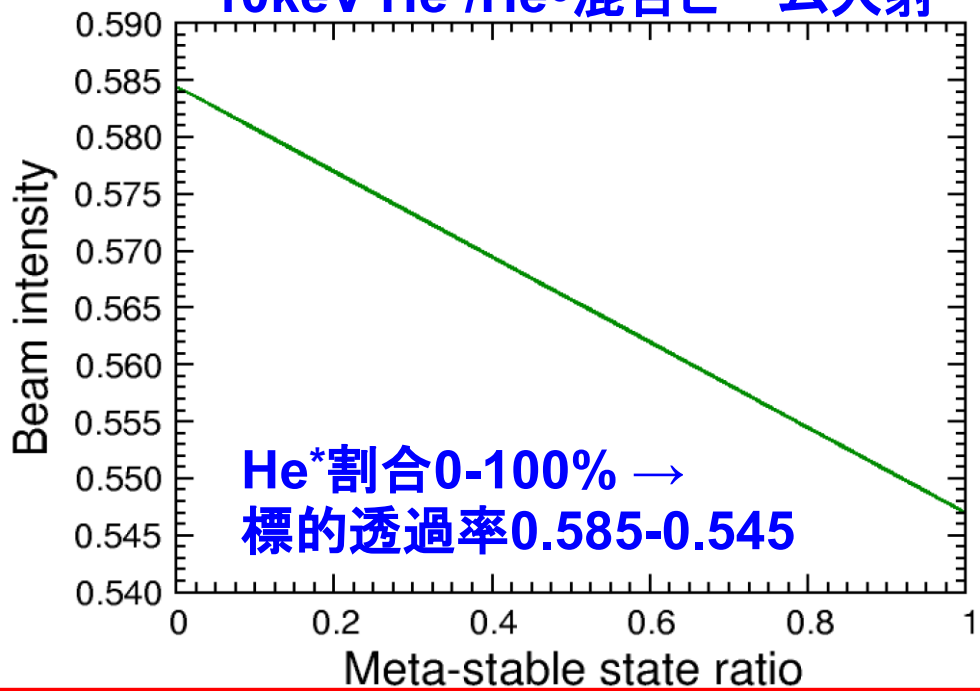


3. ビーム減衰による占有密度比計測 — プラズマ衝突によるビーム減衰量の計算 —

- 実験で得られた $n_{\text{gas}}(z)$, $n_e(z)$, $T_e(z)$ 分布を基にビーム減衰量を計算
 - 電子/イオン/中性粒子との衝突
 - 荷電交換/電離/励起/弾性散乱過程



10keV He*/He⁰混合ビーム入射

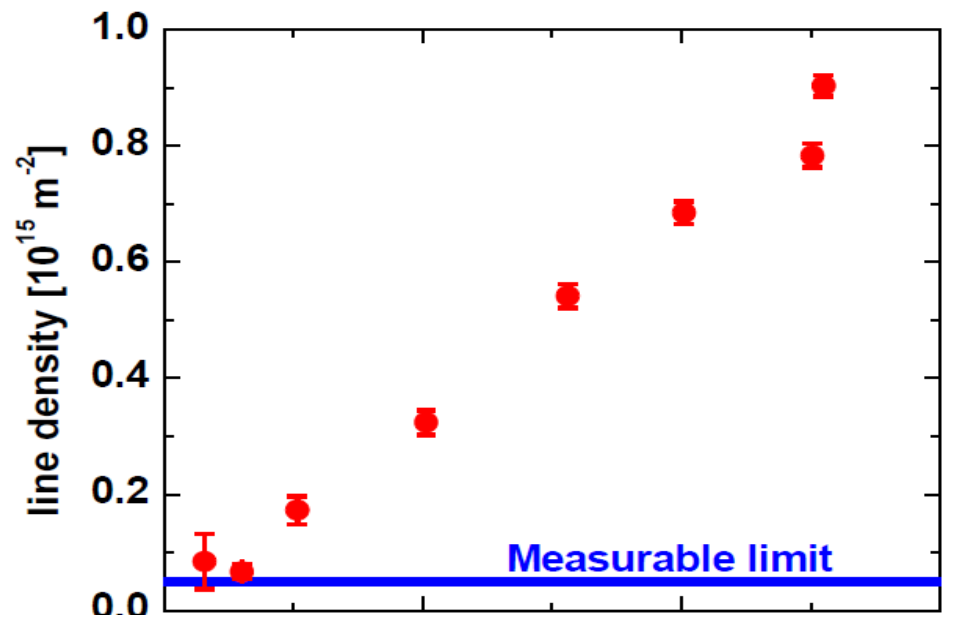
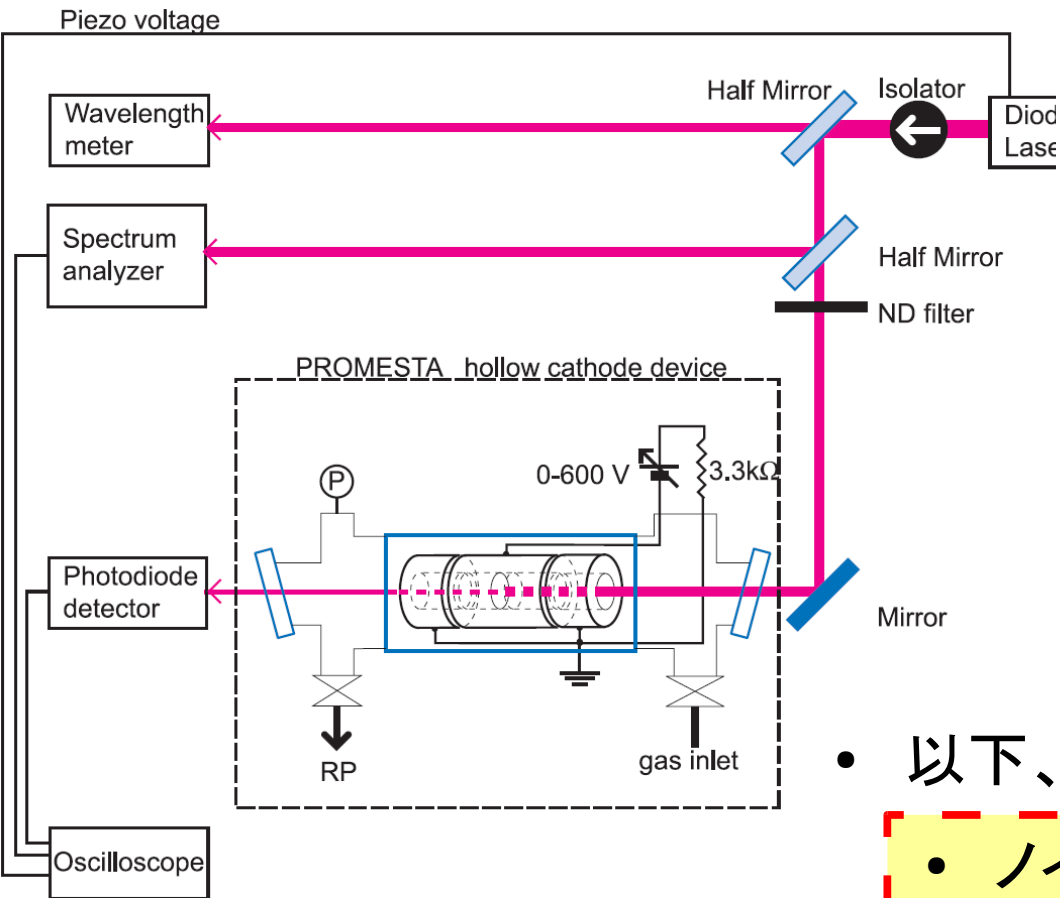


- 透過率精度2桁で20%のHe*割合を計測可能
- この計算コードをもとにプラズマ密度分布制御による最適化をおこなう

3. レーザー吸収分光による準安定原子密度計測

- ビーム中のHe準安定原子密度を直接計測
- 外部共振器型半導体レーザー吸収分光システム
 - 準安定原子密度の計測下限を評価($5 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$)

Okamoto 2007



- 以下、進行中(2010年初期データ取得か?)
 - ノイズ低減による計測下限性能の向上
 - 多重反射光学系をビームラインへ設置



まとめと今後の課題/展望

- 大電流強集束正イオン源の開発を行い、3Aビーム引き出し、 $\phi 20\text{mm}$ 集束に成功した
- ヘリウム負イオンビーム生成装置を開発し、負イオン生成割合を実験により決定した(Liガスでは初めて)
- 負イオンビームの自発脱離によるヘリウム中性粒子ビーム生成を実証した
- 準安定原子割合を計測するための標的プラズマと計算コードを開発した
- ビーム中の準安定原子密度を直接計測するレーザー吸収分光システムを開発し性能向上を行っている

- 高速ヘリウム中性ビームに混在する準安定原子割合の評価
- 大電流強集束イオン源を用いた高速ヘリウム中性ビーム入射装置の開発
- 大型装置(LHD, JT-60SA)を用いた実証実験の検討(検出器・配置など)

アルファ粒子計測に適用可能な高速中性ヘリウムビームの要素開発が進展し、実機における計測ビームとしてより現実的な提案が可能になった