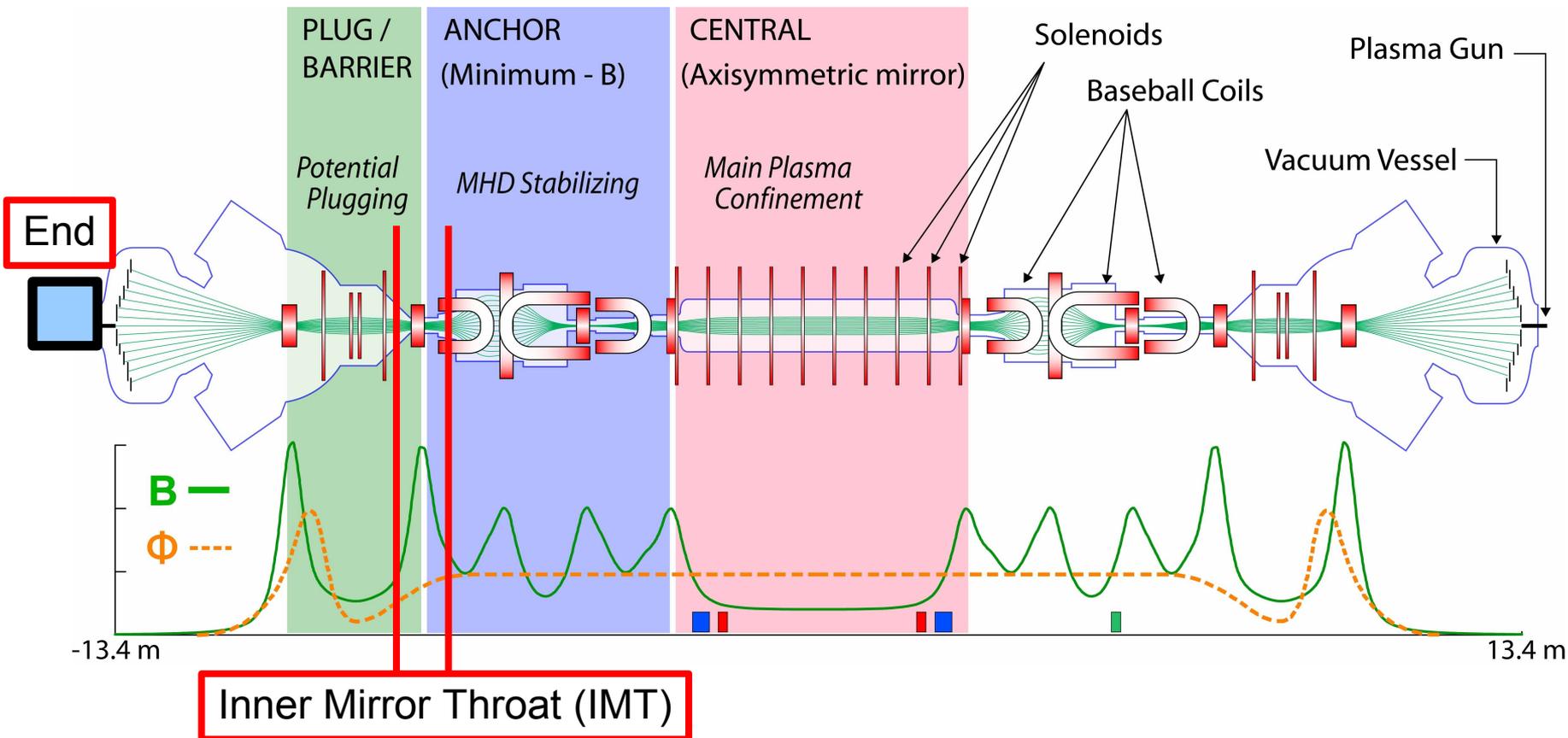


タンデムミラーにおける捕捉、損失イオンの計測

宮田 良明、小島 有志 筑波大学プラズマ研究センター

1. タンデムミラー**GAMMA 10**
2. 研究目的
3. バウンスイオン
4. 各種計測装置
5. **PP&OMT**バウンスイオン計測
6. 今後の展望

GAMMA 10



タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置GAMMA 10は東西に開いた磁力線をもっているため、速度空間内に捕捉領域と損失領域とが存在する。衝突などにより損失領域へと落ち込んだ粒子は端損失粒子として装置端へと流出する。そこで電位形成によって閉じ込めを改善している。プラグバリア部内側ミラースロート(IMT)はGAMMA10で最も磁場が強く、損失境界を決定する場所である。

研究目的

ミラー型プラズマ閉じ込め装置では、粒子の速度空間内に捕捉領域と損失領域が存在する。

ミラー型装置において、捕捉粒子と端損失粒子を測定し、評価することは、プラズマの閉じ込めを議論するうえで非常に重要になる。
損失粒子の研究に比べて、捕捉粒子に対する実験的な研究はそれほど多くなされていない。

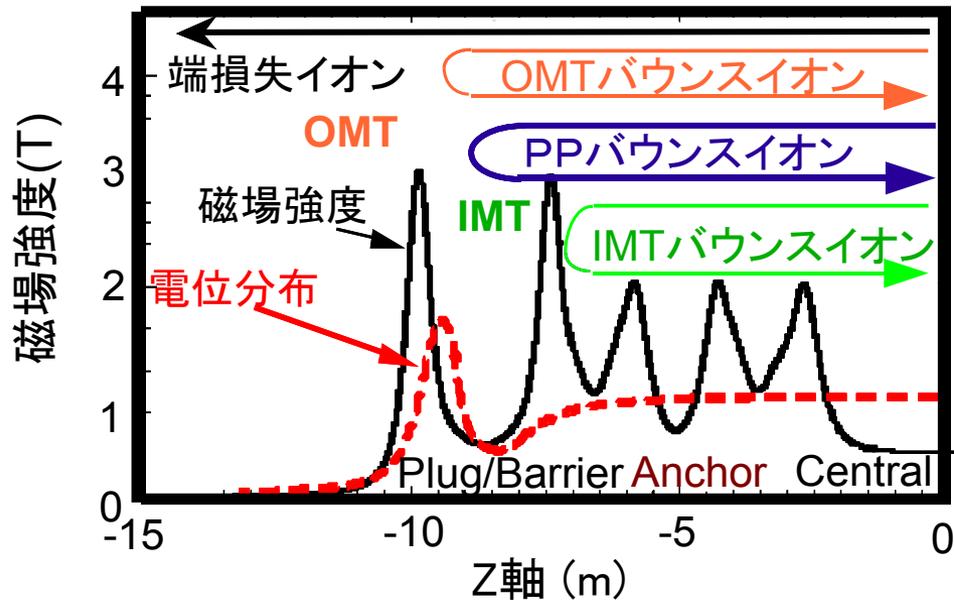
実験目的

本研究では、以前から行われてきた端損失イオンの測定に加えて、ミラー磁場、及び電位によって捕捉されたイオンを選択的に測定できる測定器を開発し、捕捉イオンの直接的な解析を試みる。

バウンスイオン

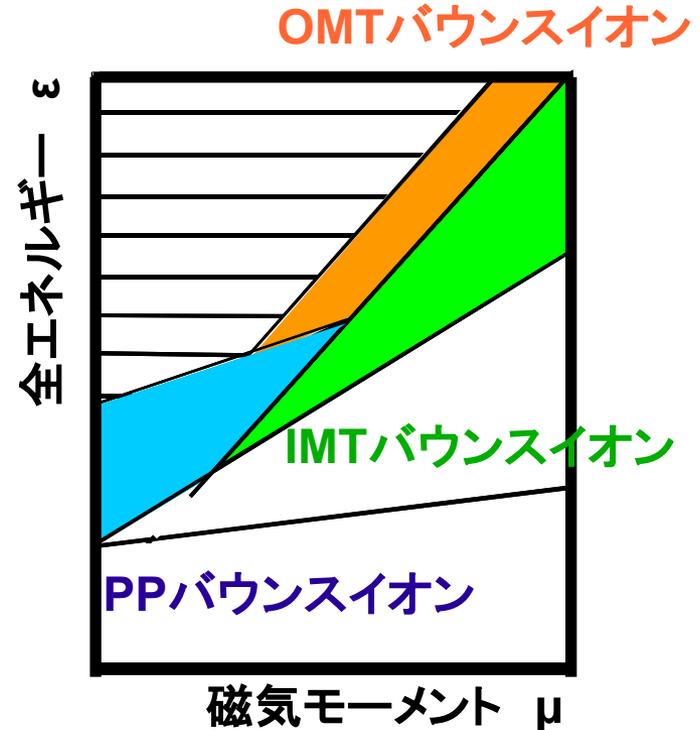
プラグ/バリア部近傍で跳ね返る3種類のバウンスイオンが存在する。

- ・外側ミラースロット(OMT)バウンスイオン
- ・プラグポテンシャル(PP)バウンスイオン
- ・内側ミラースロット(IMT)バウンスイオン



GAMMA 10の磁場強度分布、及び電位分布と各バウンスイオンの概念図

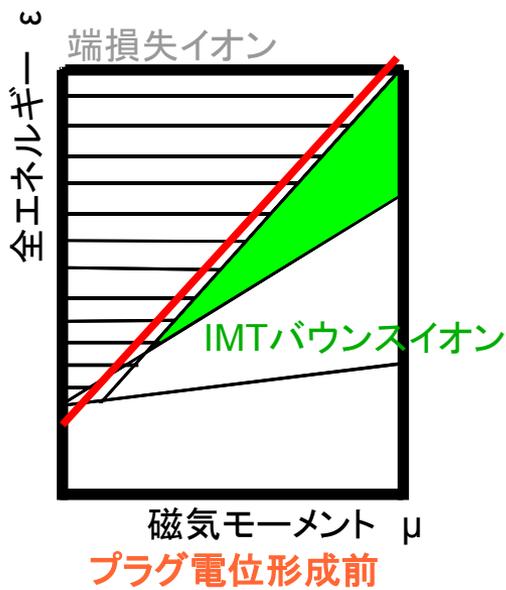
ϵ - μ 空間でのバウンスイオン分布



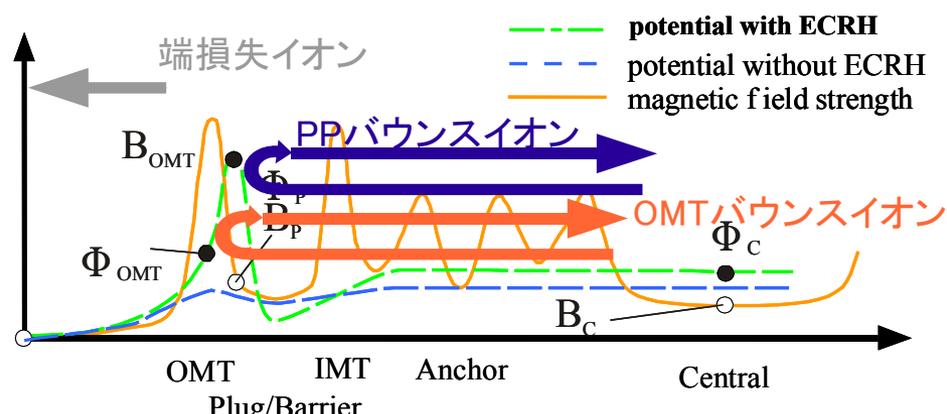
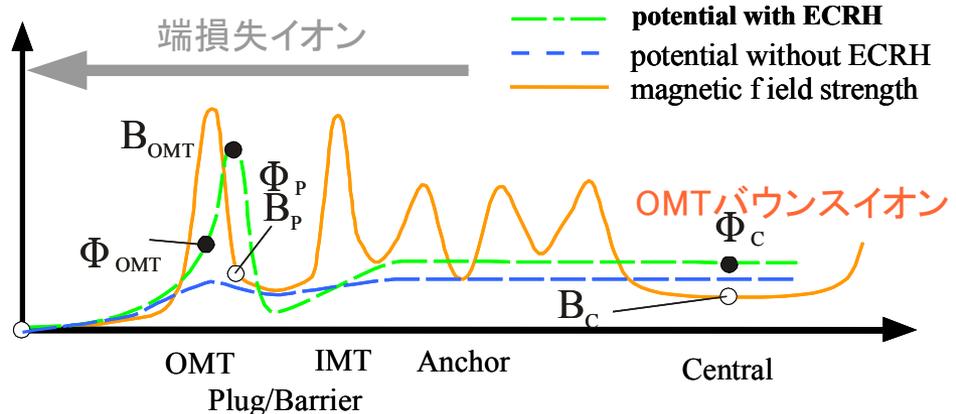
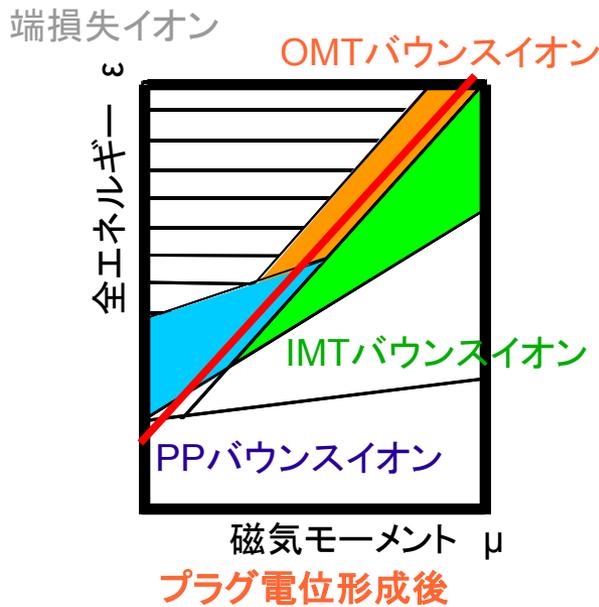
プラグ部にPlug ECRHを印加することで、高電位の壁(プラグ電位)を形成し、IMTバウンスイオンの他、OMTバウンスイオンやPPバウンスイオンが存在する。

バウンスイオン領域

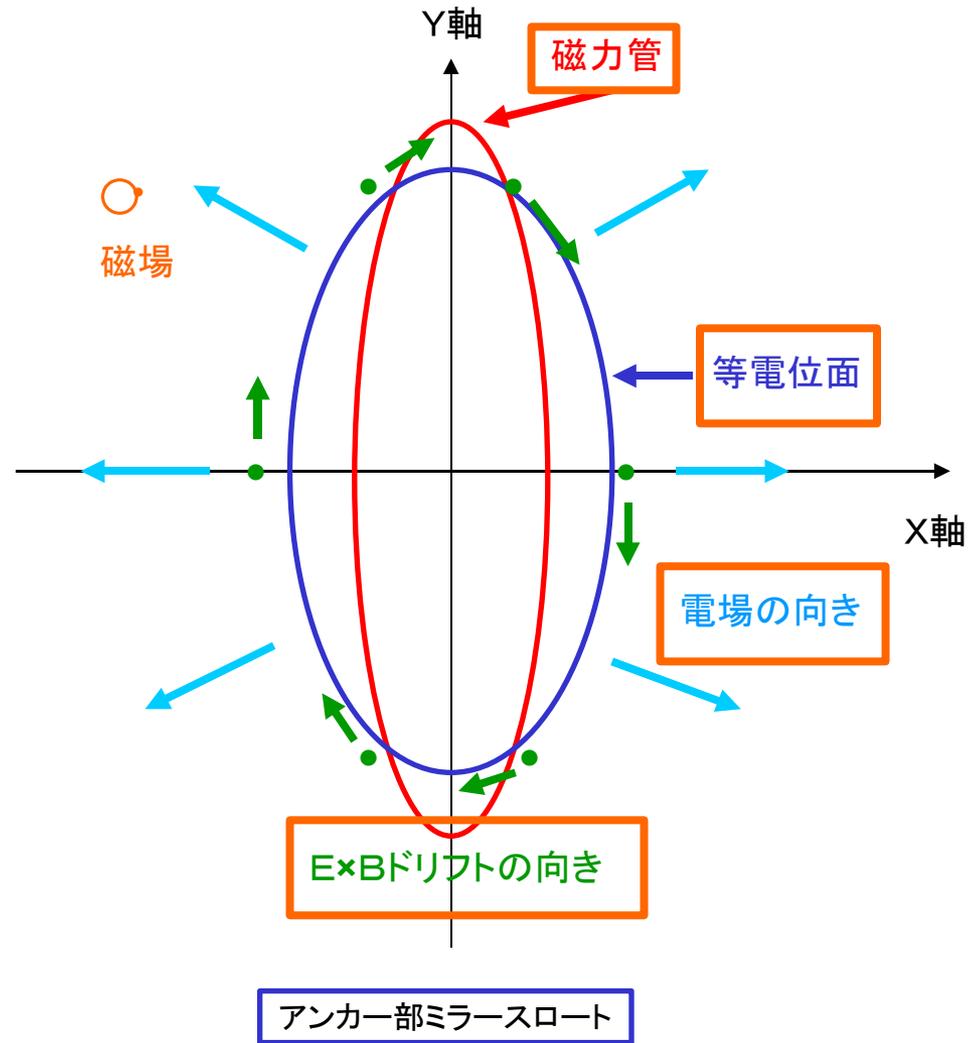
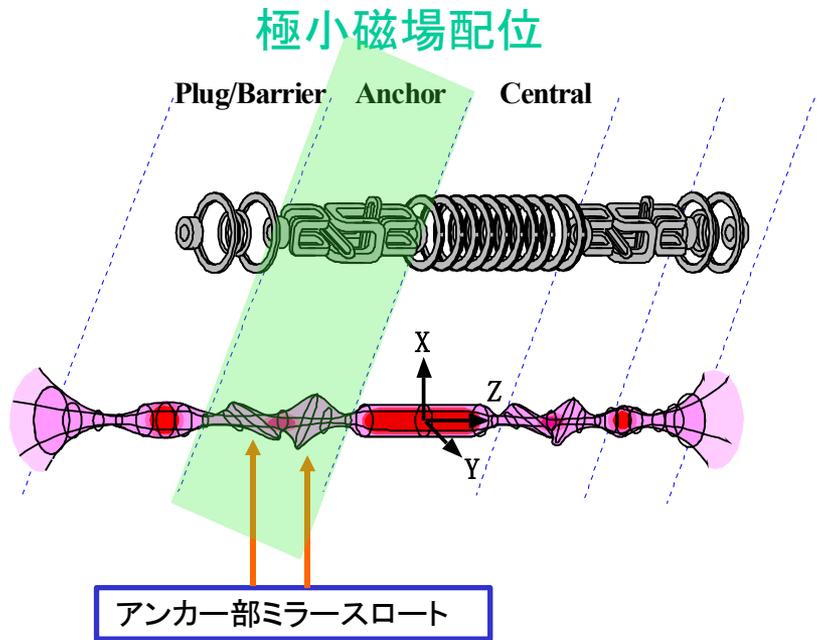
プラグ電位形成前でのバウンスイオン領域



プラグ電位形成後のバウンスイオン領域



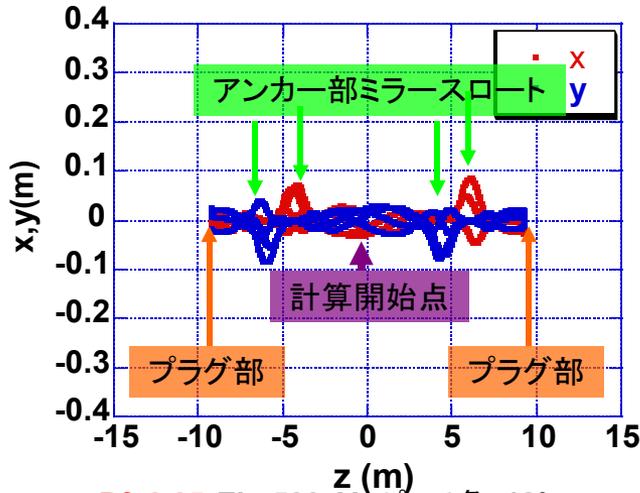
バウンスイオン測定の意味



バウンスイオンはその長い通過路において揺動や、径方向電位分布形状の影響を受け、径方向輸送に強く関連する。磁力管と等電位面とのずれが存在する時、 $E \times B$ ドリフトは等電位面の接線方向に生じる。この $E \times B$ ドリフトは磁力管に対しては、内側、及び外側に生じている。

バウンスイオンの軌道 II

Df=0.0 Eb=500eV, ピッチ角=12°



案内中心計算

$$\frac{dv_{\parallel}}{dt} = -\frac{\mu \nabla B}{m} \cdot \frac{B}{B} + \frac{q}{m} \cdot \frac{E \cdot B}{B}$$

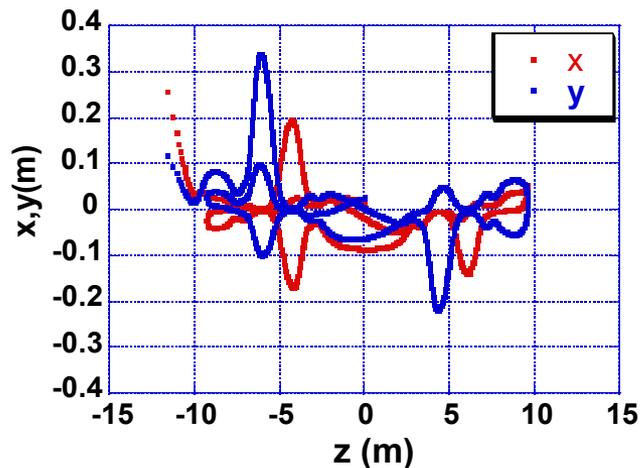
$$v_{\perp} = \frac{E \times B}{B^2} - \frac{\mu \nabla B \times B}{q B^2} + \frac{m v_{\parallel}^2}{q} \cdot \frac{B}{B^2} \times \left(\frac{B}{B} \cdot \nabla \right) \frac{B}{B}$$

$$\mu = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 / B$$

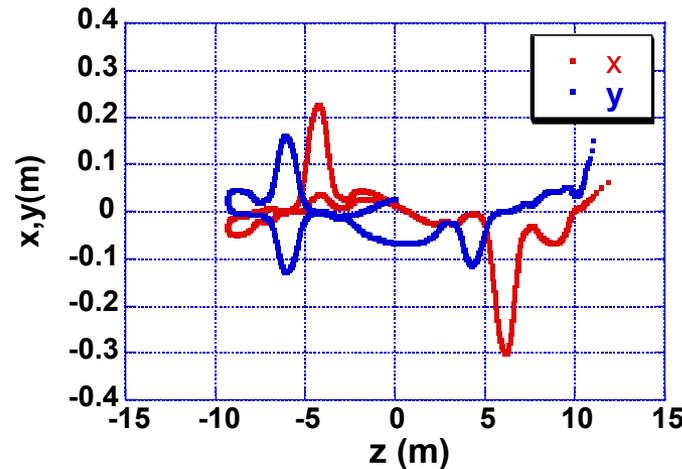
$2r_h(0)$ (半値直径) : 0.14m
(径方向電位分布)

イオンエネルギー : 500 eV
ピッチ角 : 12°
計算開始点 : r=0.03 m

Df=0.05 Eb=500eV, ピッチ角=12°



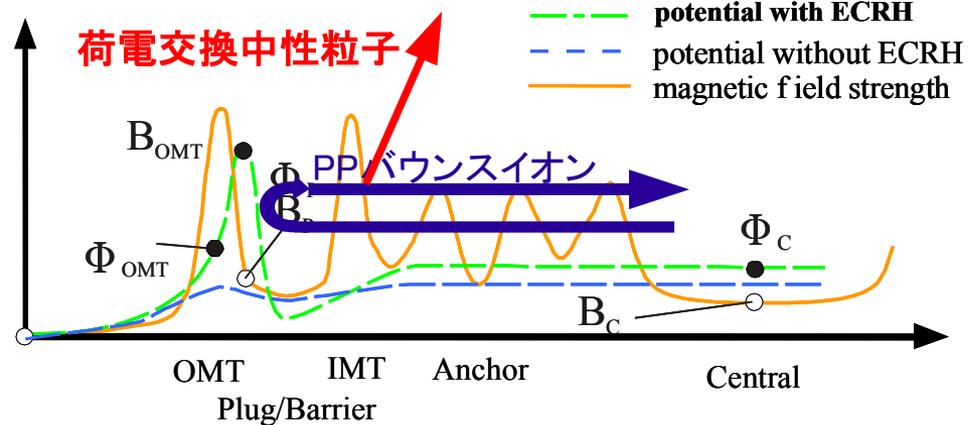
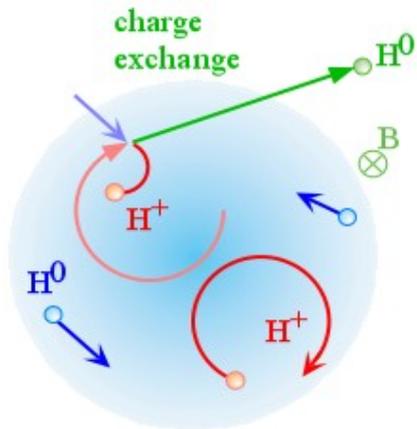
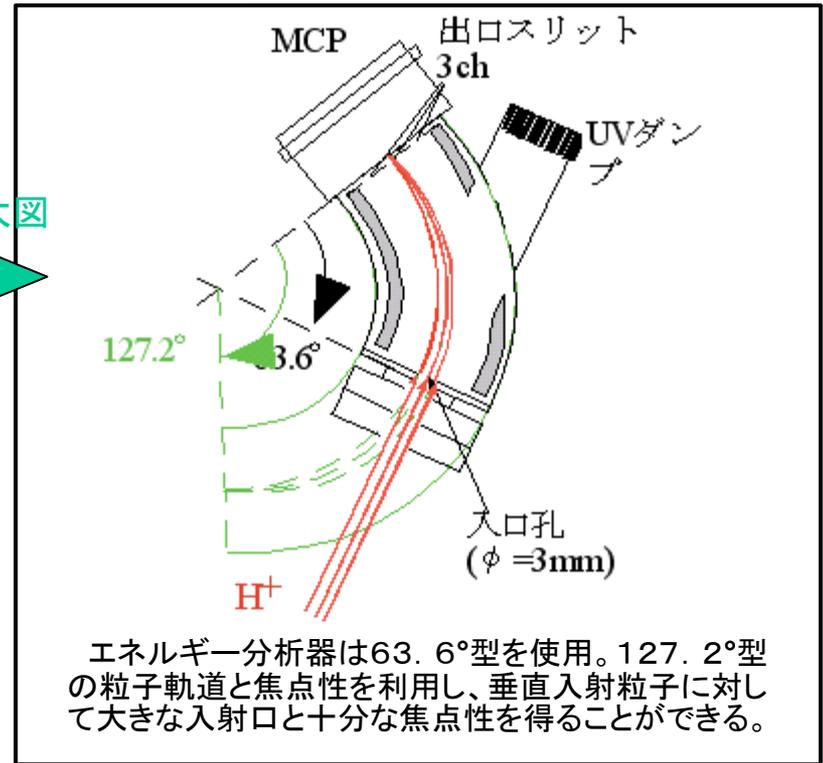
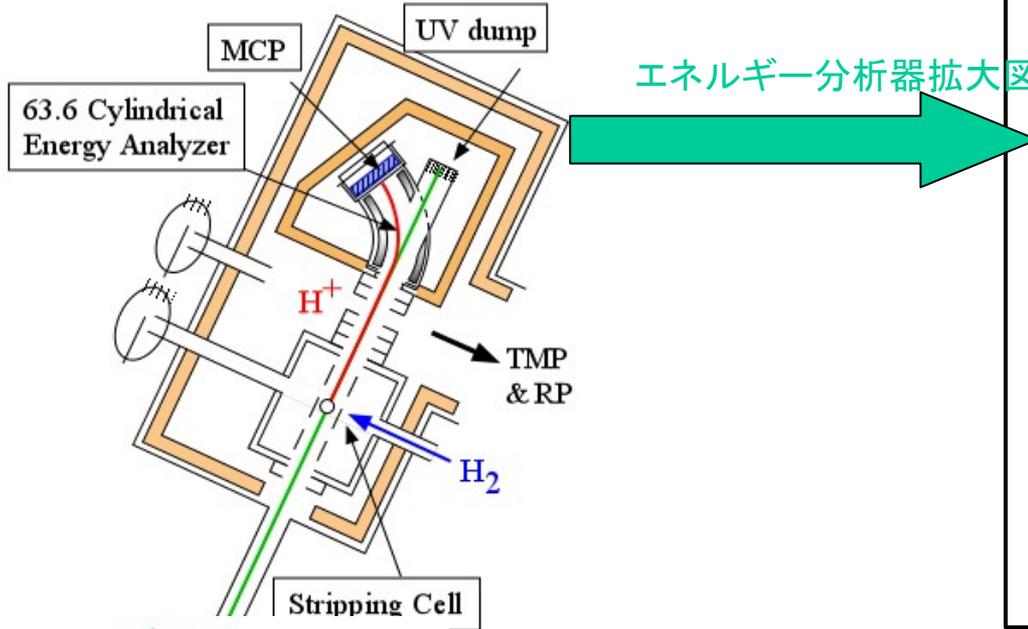
Df=0.1 Eb=500eV, ピッチ角=12°



径方向電位分布形状により、E×Bドリフトにより径方向輸送が起こり、プラグ電位を乗り越えて端損失するPPバウンスイオンの割合が大きくなる可能性がある。

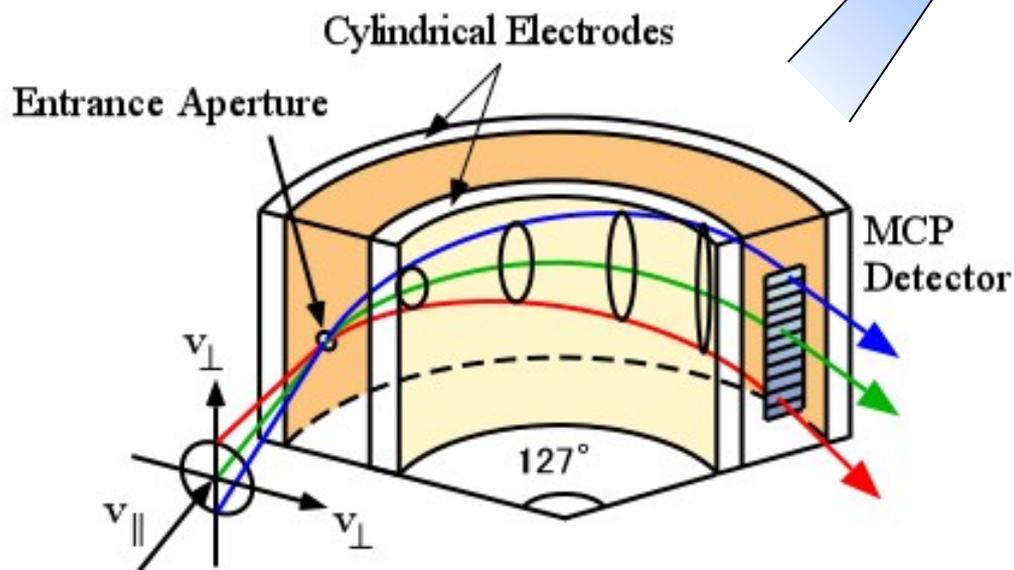
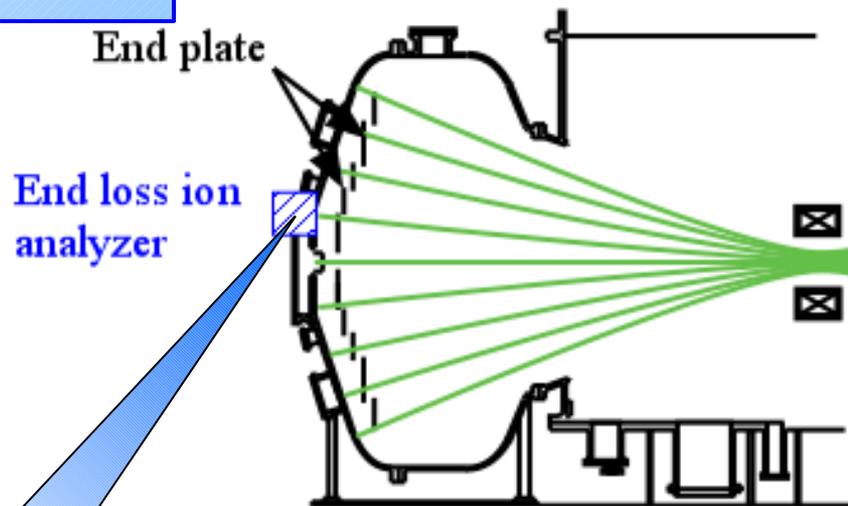
荷電交換バウンスイオン分析器(CX-BIA)

ストリッピングセルとエネルギー分析器より構成されている。



端損失イオン検出器(ELECA)

実験装置端部に測定器を取り付け、
流失してくる粒子を測定。



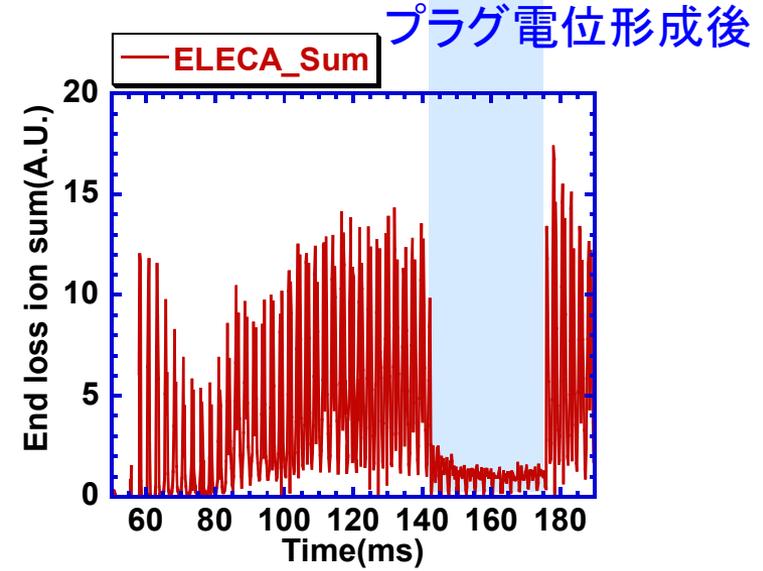
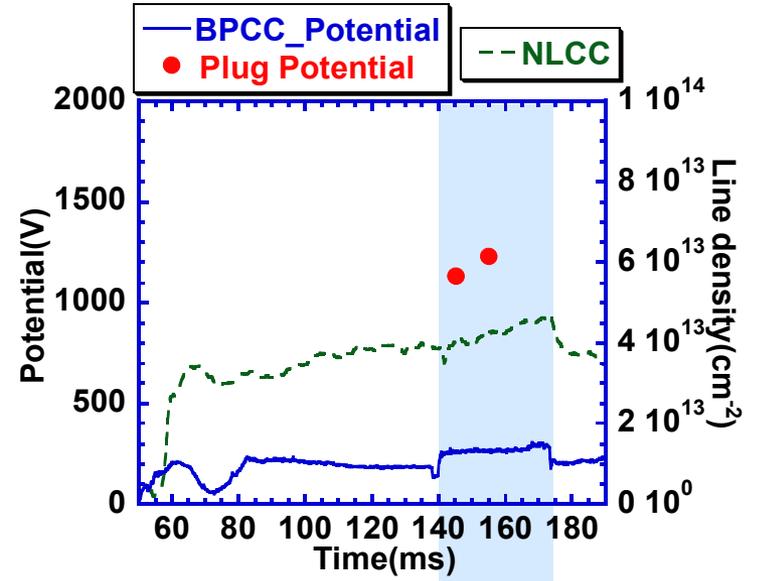
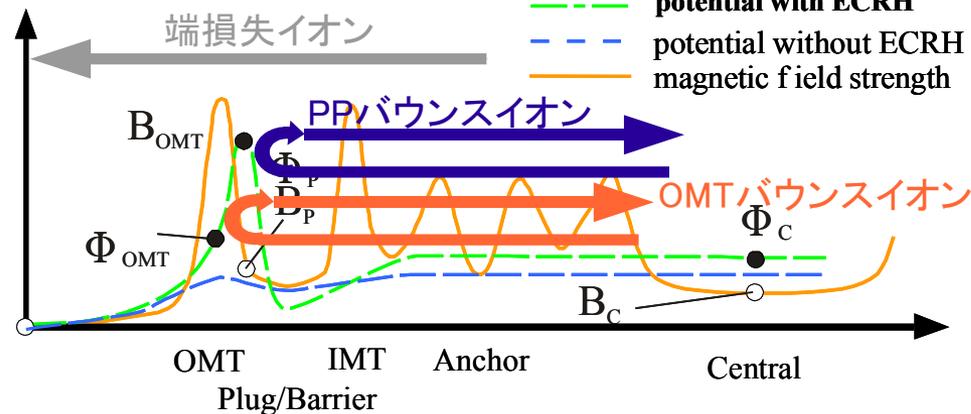
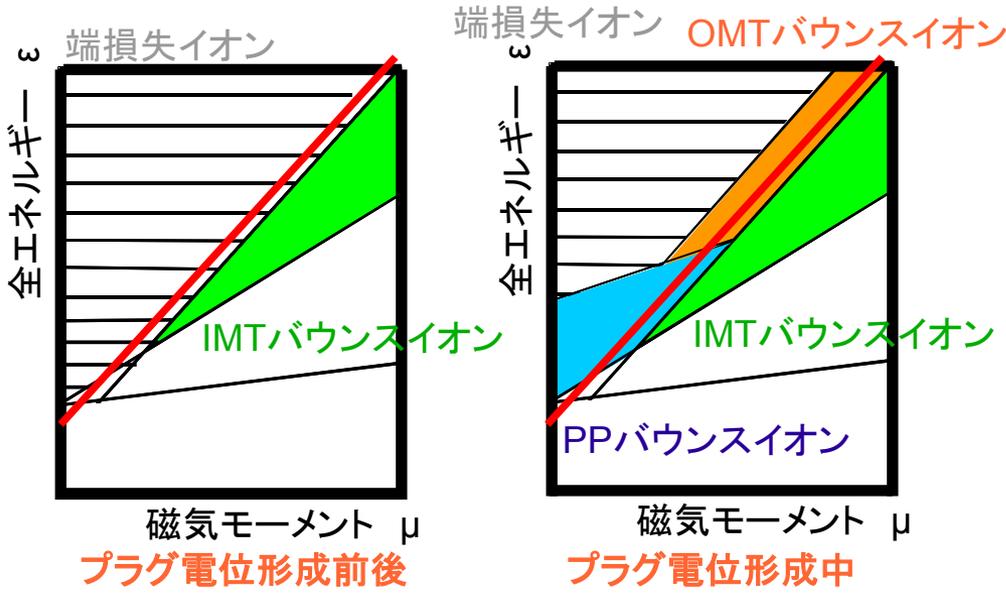
円筒型静電エネルギー分析器

損失イオンのエネルギー分布関数、または、速度分布関数の測定が可能。

PP&OMTバウスイオン測定結果 I

閉じ込め改善実験

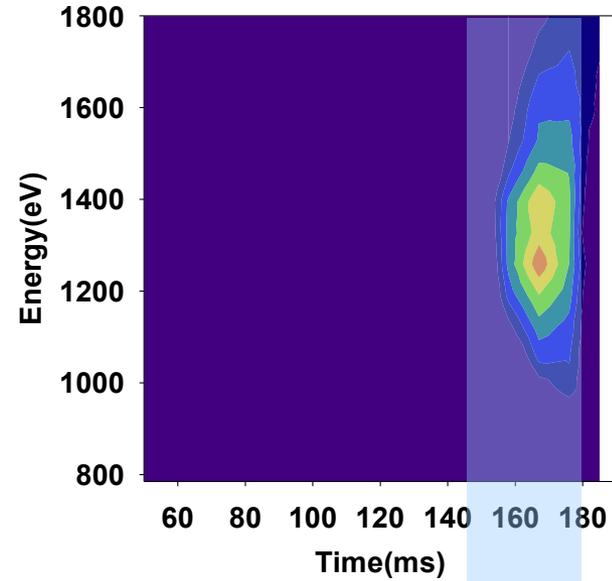
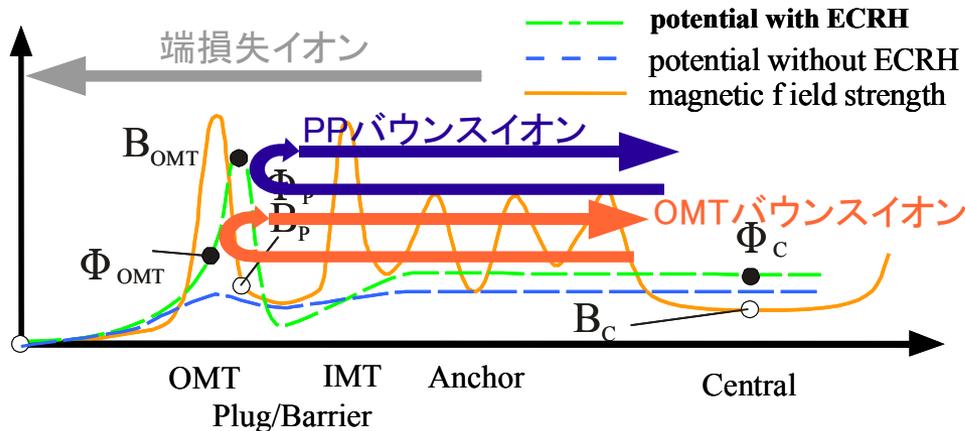
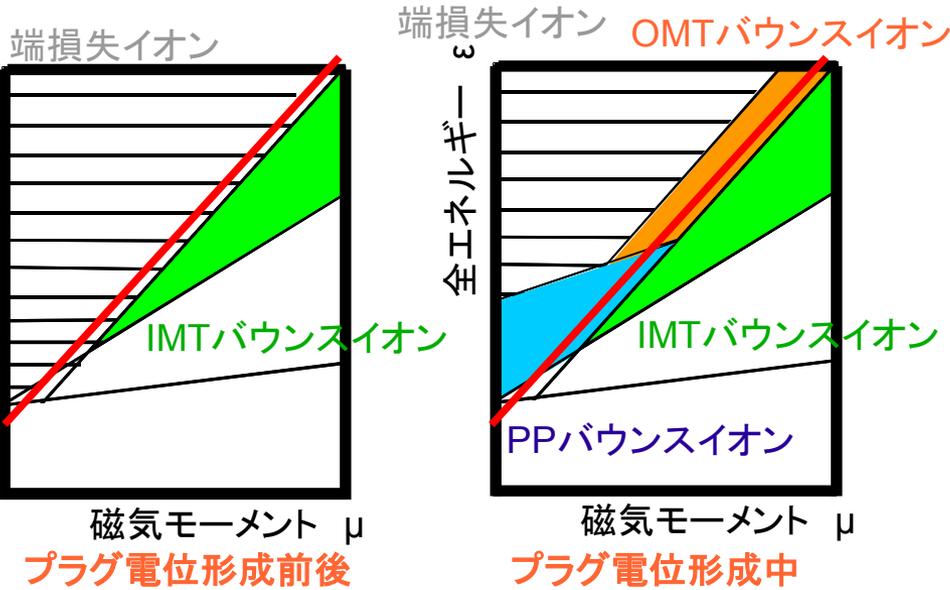
PP&OMTバウスイオン領域



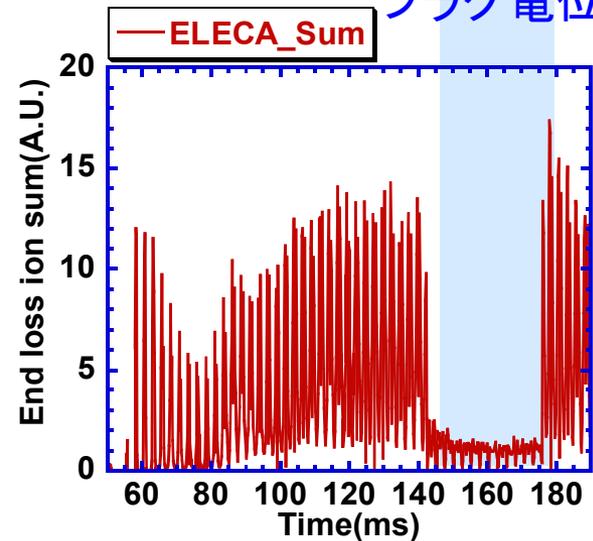
PP&OMTバウンスイオン測定結果Ⅱ

捕捉、及び損失イオンの増減

PP&OMTバウンスイオン領域



プラグ電位形成後



バウンスイオンの検討

$$\begin{cases} \varepsilon = \mu B_p + e\Phi_p \\ \varepsilon = \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_{IMTm}}\right) \mu B_{IMTm} + e\Phi_{IMTm} \end{cases}$$

PPバウンスイオン捕捉領域

CX-IMT測定領域

上の式を変形すると、

$$\varepsilon = \frac{e(\alpha \beta \Phi_p - \Phi_{IMTm})}{\alpha \beta - 1}$$

ここで、

$$\alpha = \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_{IMTm}}\right), \quad \beta = \frac{B_{IMTm}}{B_p}$$

$B_{IMTm} = 2.4(\text{T})$ CX-IMT測定位置における磁場強度

$B_p = 1.0(\text{T})$ プラグ部磁場強度

$\Phi_{IMTm} \cong 250(\text{V})$ CX-IMT測定位置における電位

$\Phi_{IMTm} \cong 1200(\text{V})$ プラグ部電位

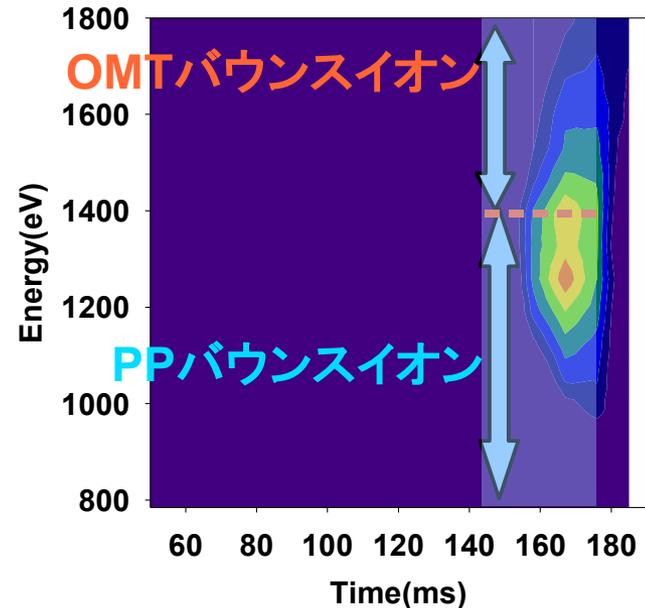
また、先程求めた電位の値を代入すると、

$\varepsilon \cong 1644(\text{eV})$ が求まる。

測定されたプラグポテンシャルバウンスイオンは運動エネルギーにより分析されているので、測定位置の電位を引くことで実験結果と比較できる。

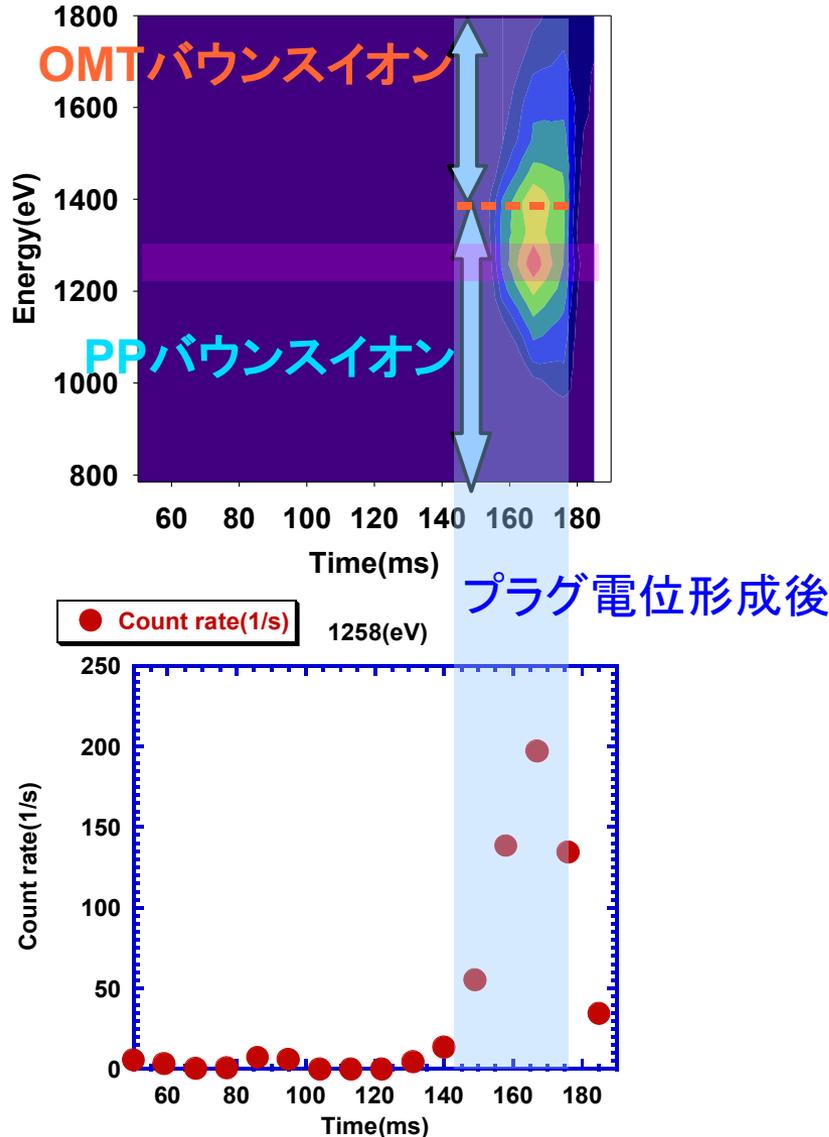
$$E = \varepsilon - e\Phi_{IMTm} = 1644 - 250 = 1394(\text{eV})$$

プラグ電位形成後

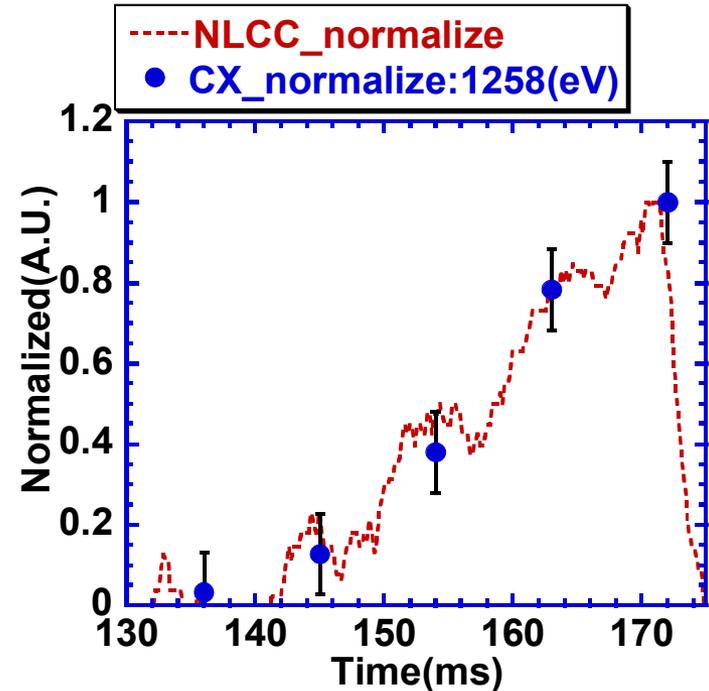


閉じ込め改善効果

バウンスイオン量、及び電子線密度の規格化



バウンスイオン量、及び電子線密度の増減傾向の比較



PPバウンスイオン領域のイオン量増減傾向と電子線密度の増減傾向が一致した。これは、プラグ電位形成中にPPバウンスイオンが増大し、閉じ込めが改善したことで電子線密度も増大したと考えられる。

まとめ

- ・タンデムミラーにおける閉じ込め改善を示す、バウンスイオンの直接測定を捕捉、及び損失側の観点より観測した。
- ・プラグ電位を形成し、閉じ込め改善を行った結果、損失イオンが減少し、捕捉イオンが増加することが荷電交換バウンスイオン分析器を用いて確認された。
- ・プラグ電位形成後のPPバウンスイオンの増加率と電子線密度の増加率を比較した結果、同様な傾向が見られた。これは、閉じ込め改善によりバウンスイオンが増大し、電子線密度も増加したと考えられる。

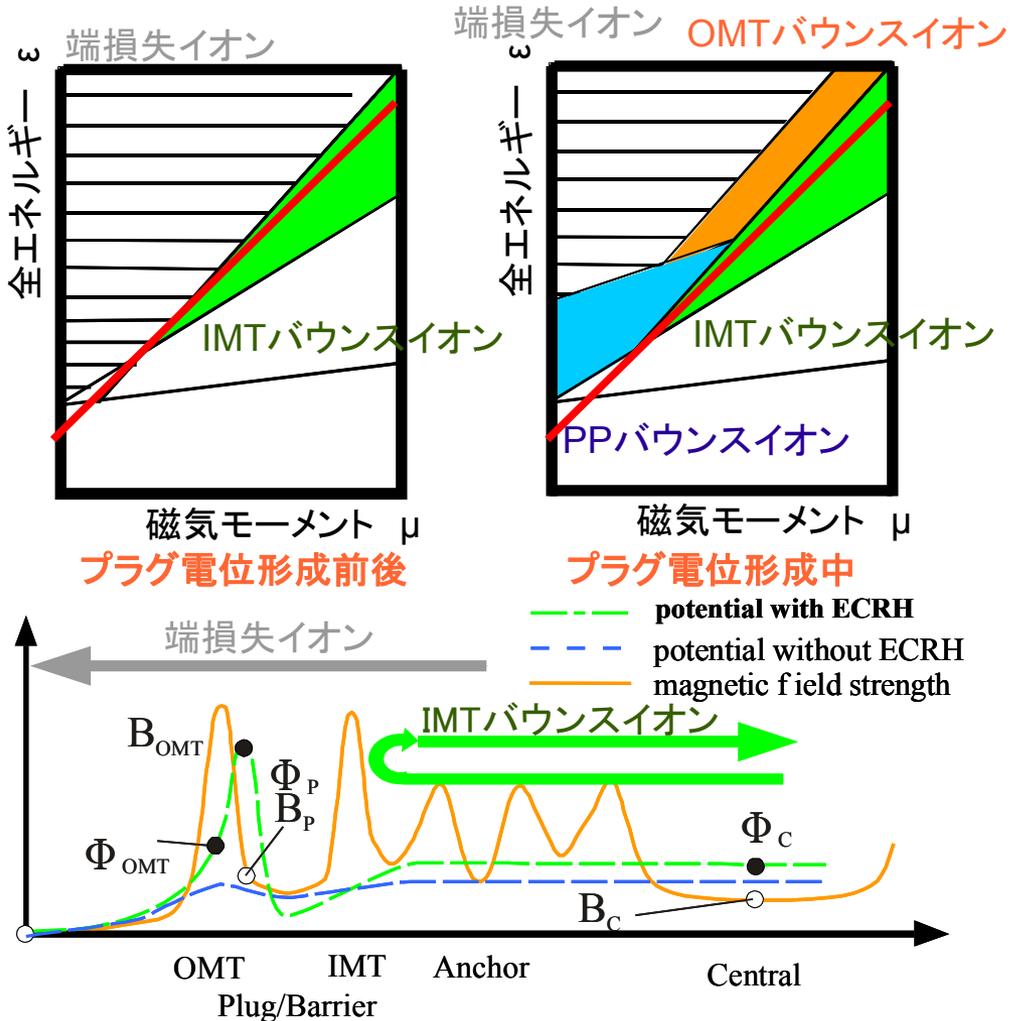
今後の展望

- ・径方向電位分布形状を始め、他のパラメータとバウンスイオン量との関連性の検討する。

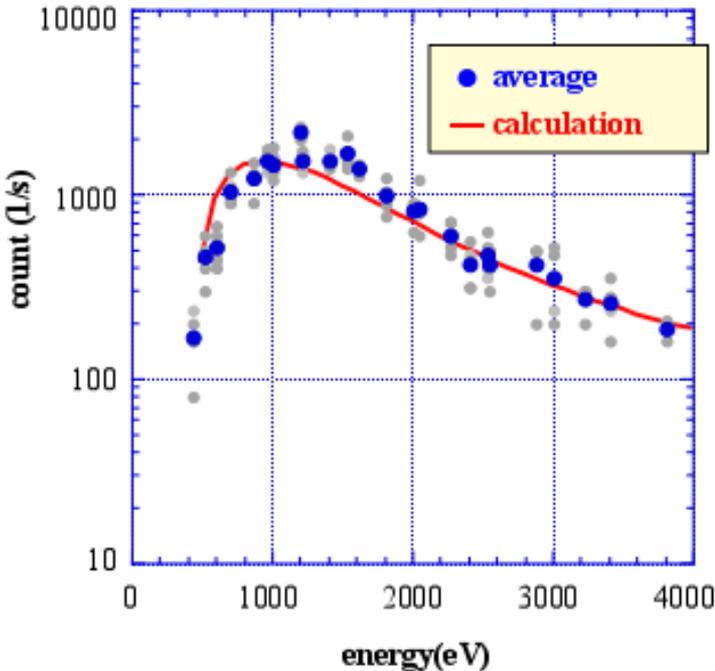
IMTバウンスイオン測定結果 I

IMTバウンスイオン領域

荷電交換バウンスイオン分析器の計数率



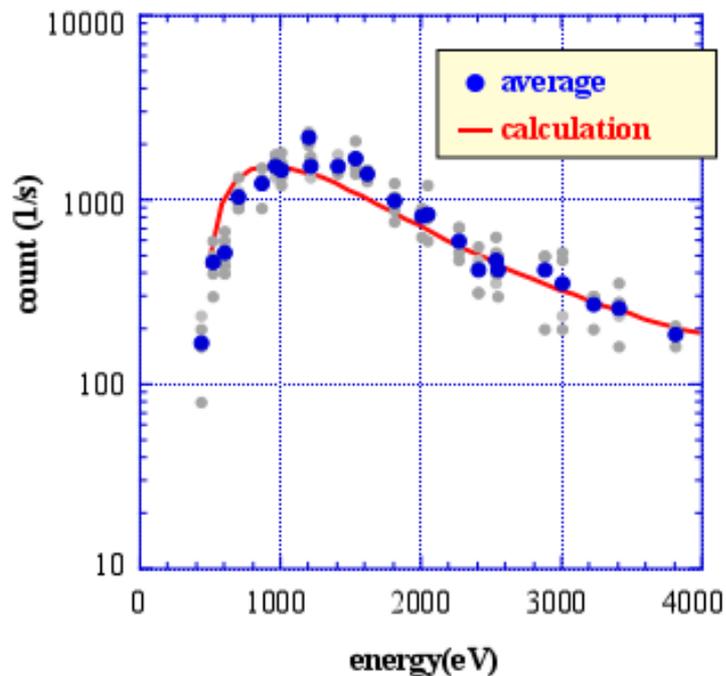
- 中性粒子・イオンのエネルギー・空間分布
- 荷電交換反応断面積
- ストリッピング反応断面積



IMTバウンスイオン測定結果Ⅱ

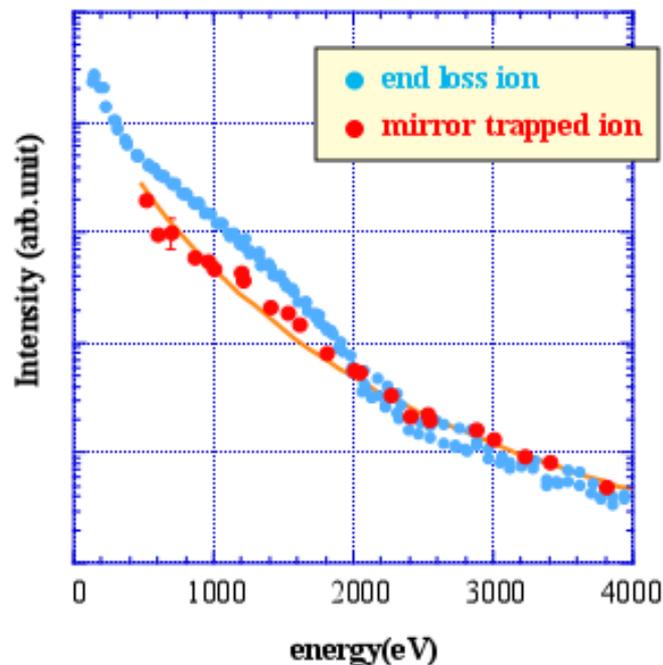
荷電交換バウンスイオン分析器の計数率

- 中性粒子・イオンのエネルギー・空間分布
- 荷電交換反応断面積
- ストリッピング反応断面積



各分布関数の比較

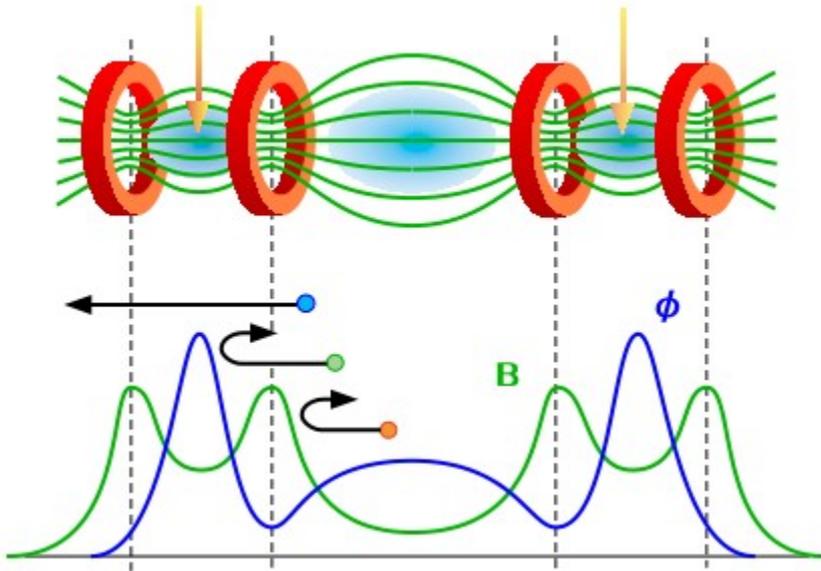
端損失イオン
損失領域近傍の捕捉イオン



タンデムミラー型装置

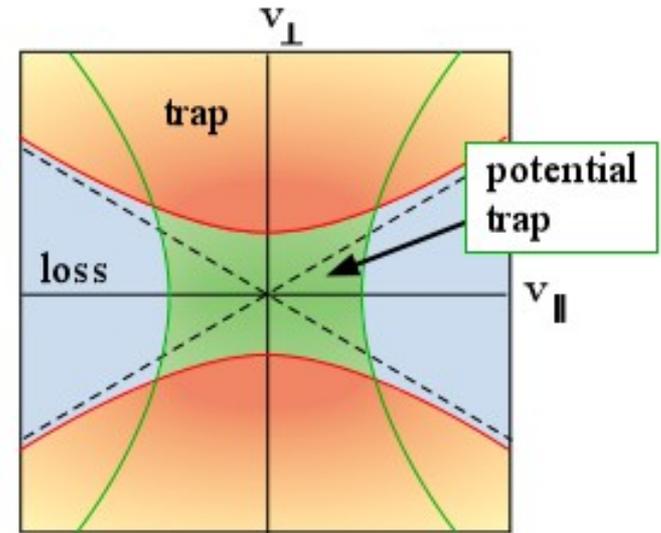
タンデムミラー型装置の磁場・電位分布

μ 波等による加熱



複数個のミラーをつなぎ合わせた形状。
両端のミラーに、高い電位を形成させる。

タンデムミラー型装置における
粒子閉じ込め領域と損失領域



磁場による閉じ込めに加え、電位による閉じ込めを行う。
閉じ込め性能の改善。

核融合炉としての成立条件の達成
は理論的に可能となる。