

第12回 若手科学者によるプラズマ研究会
2009年3月16-18日
原子力機構那珂核融合研究所



磁場反転配位プラズマにおける 中性粒子数密度計測

松澤芳樹, 田邨尚郎, 山本直樹, 高尾昂平,
日吉まゆ, 浅井朋彦, 高橋努
日大理工

磁場反転配位(FRC)プラズマ

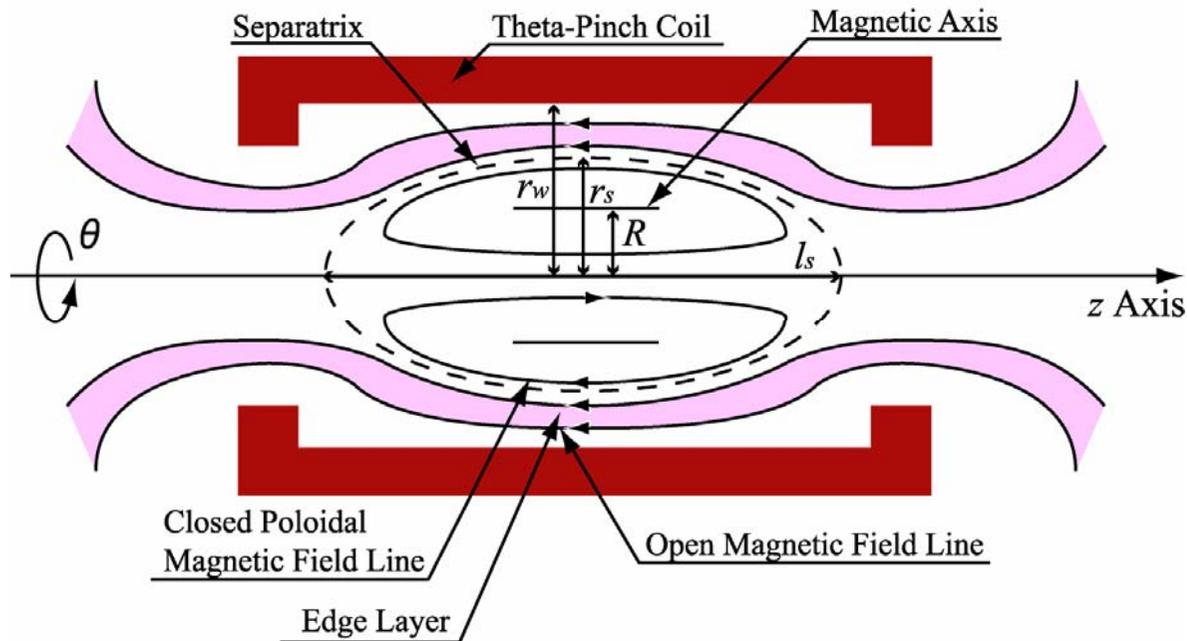
コンパクト・トーラス (CT) 小型で閉じ込め効率が良い

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) CTの一種

β 値が高い (~1) 閉じ込め磁場の勾配に沿って移動 (移送) 可能

生成部と燃焼部の分離が可能

高効率で構造が単純な核融合炉建設が期待される



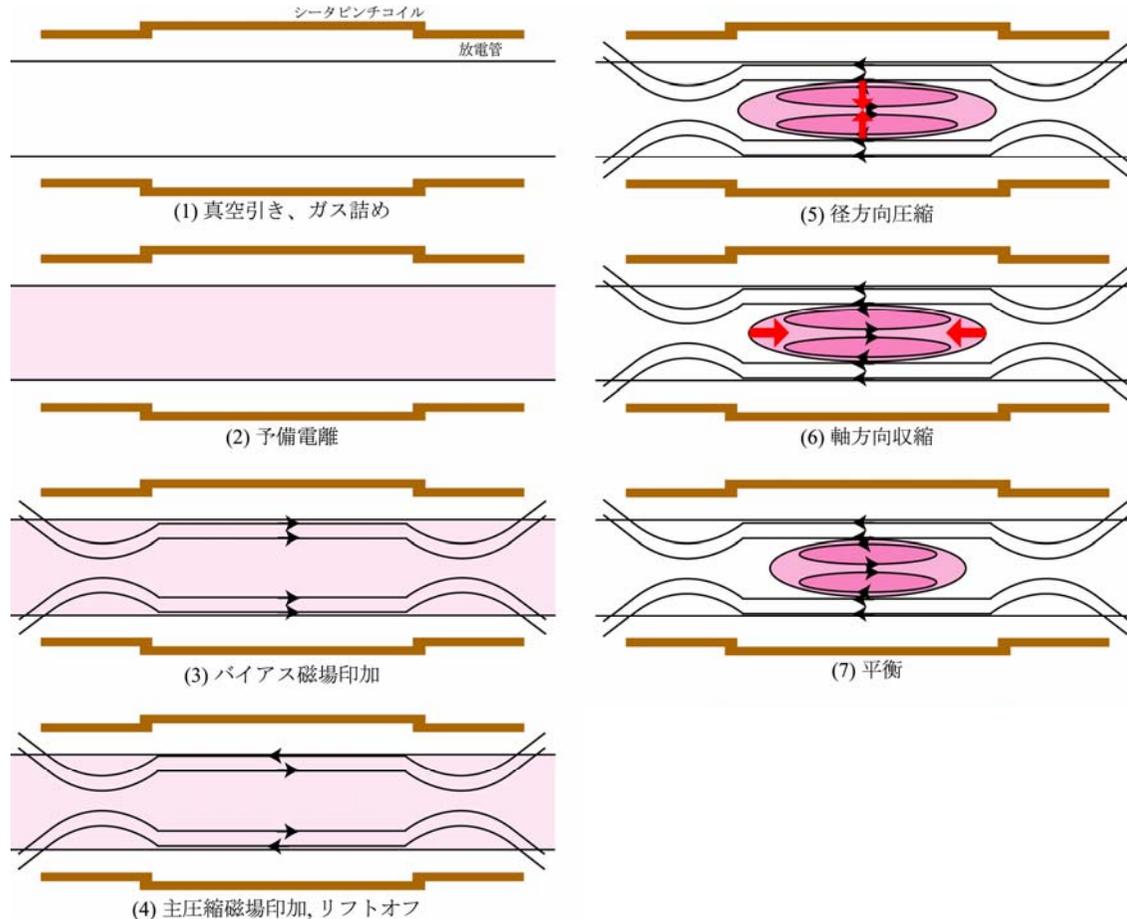
FRCプラズマの磁場構造

FRCプラズマには
閉じた磁力線領域
開いた磁力線領域
がある。

閉じた磁力線領域は
高温のプラズマが閉じ
込められている。

開いた磁力線領域に
は低温のプラズマと中
性粒子が存在している。

F RTP法によるFRCプラズマの生成過程



FRCプラズマ生成過程

- (1) 真空容器内部を高真空にした後、動作ガスを封入する
- (2) Z放電によって予備電離プラズマを生成する。
- (3) バイアス磁場を印加し、強度が最大になるタイミングで主圧縮磁場を印加する。
- (4) 主圧縮磁場が印加され径方向圧縮される。
- (5) 装置両端部のミラーコイル付近で磁気再結合が起こり、閉じた磁力線配位が形成される。
- (6) 軸方向に圧縮される（軸方向圧縮）。
- (7) プラズマの圧力と外部磁気圧が釣り合うまで、径方向、軸方向に膨張・収縮を繰り返し、圧力平衡状態に達する。

背景

これまで、磁場反転配位（field-reversed configuration : FRC）プラズマ研究において中性粒子との相互作用はほとんど研究されていなかった。その理由として、FRCプラズマの閉じ込め特性が悪く配位持続時間が短いため、中性粒子のリサイクリングを考慮する必要がなかったことなどが挙げられる[1]。しかしながら近年、回転磁場（rotating magnetic field : RMF）による生成・維持による長寿命化[2]、また、接線方向からの中性粒子ビーム入射（tangential neutral beam injection : TNBI）による維持・加熱の際、FRCプラズマ周辺の中性粒子がパワー付与率に影響を与えるというシミュレーション結果が得られている[3]など、FRC研究において中性粒子の存在が重要になっている。

[1] D. J. Rei, Pro. of 6th US-Japan workshop, 214, (1984)

[2] H. Y. Guo *et al.*, Phys. Plasmas **15**, 056101 (2008)

[3] T. Takahashi *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Vol.**82**, No.11 (2006) 775

目的

本研究では、重水素スペクトル（バルマー系列：Da, Db, Dg, Dd）の計測と衝突輻射（collisional-radiative：CR）モデルを用いて、FRCプラズマ周辺の中性粒子数密度の見積もりを行う。

中性粒子数の定量的な評価方法

(1) 重水素スペクトル (バルマー系列: $D_\alpha, D_\beta, D_\gamma, D_\delta$) の絶対放射光強度の計測

線積分量の x 分布計測

連続光 (制動放射光) の除去

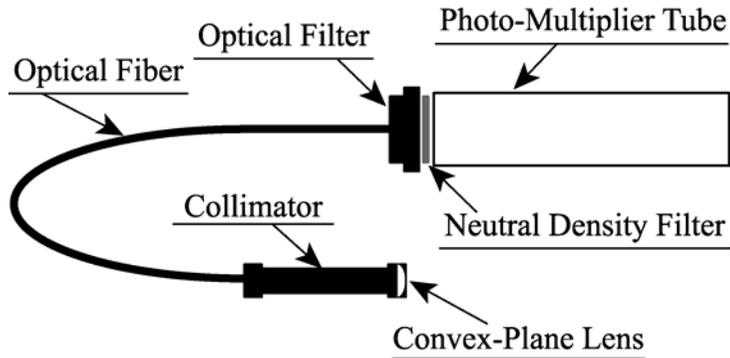
アーベル変換による放射係数の導出

放射係数から励起状態の占有密度 (ポピュレーション) を導出

(2) 衝突輻射モデルを用いたポピュレーションの計算

実験データと計算結果の比較

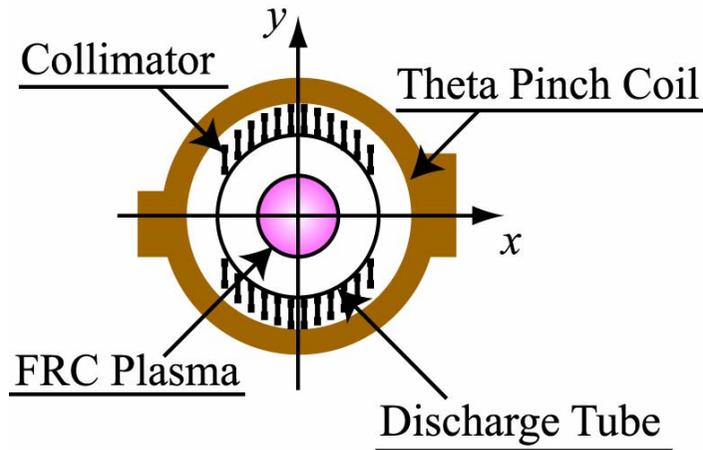
絶対放射光強度の計測システム



絶対放射強度計測の光学系

Band pass filter
(optical filter)
wavelength
 $\lambda=550 \pm 5\text{nm}$
 $656 \pm 5\text{nm}$
 $485 \pm 5\text{nm}$
 $436 \pm 5\text{nm}$
 $410 \pm 5\text{nm}$

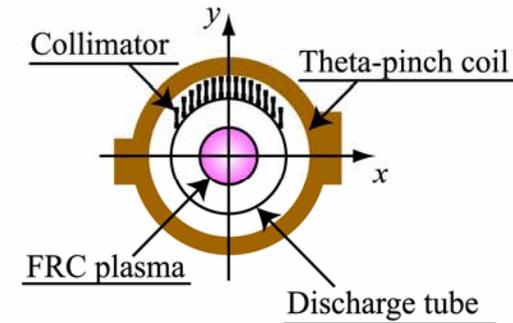
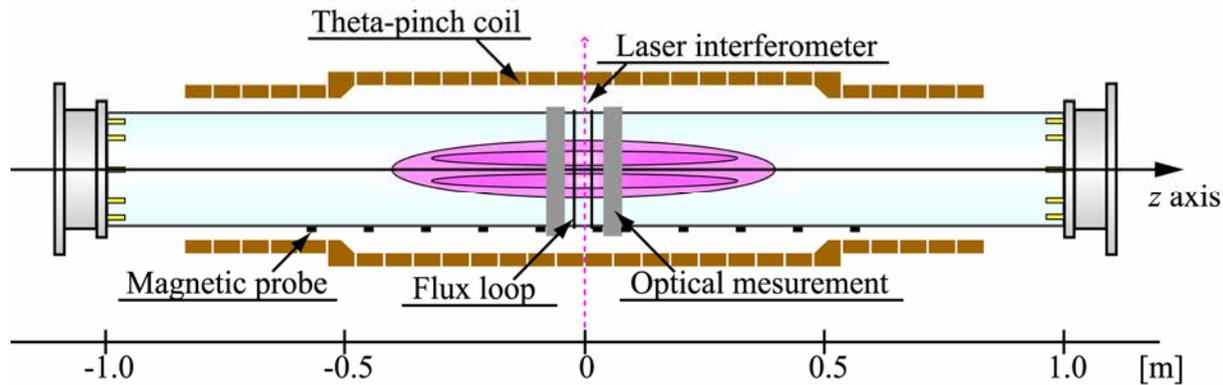
光学計測にはコリメータ、光ファイバー、光電子増倍管、波長選択用のバンドパスフィルター（Bremsstrahlung : $550 \pm 5\text{nm}$, $D\alpha : 656 \pm 5\text{nm}$, $D\beta : 486 \pm 5\text{nm}$, $D\gamma : 436 \pm 5\text{nm}$, $D\delta : 410 \pm 5\text{nm}$ ）から成る光学測定系60組(12組×5 set)を用いている。



x分布計測の測定器配置

波長選択用のバンドパスフィルターに波長幅があるため連続光（制動放射光）が入る。

実験装置NUCTE-III



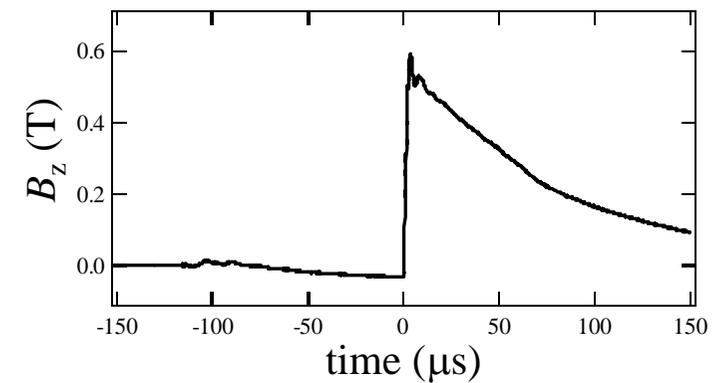
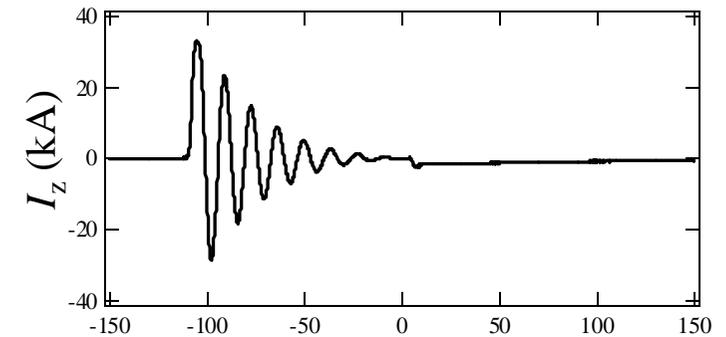
NUCTE-III

計測器

磁気プローブ, 磁束ループ ⇒ プラズマ半径

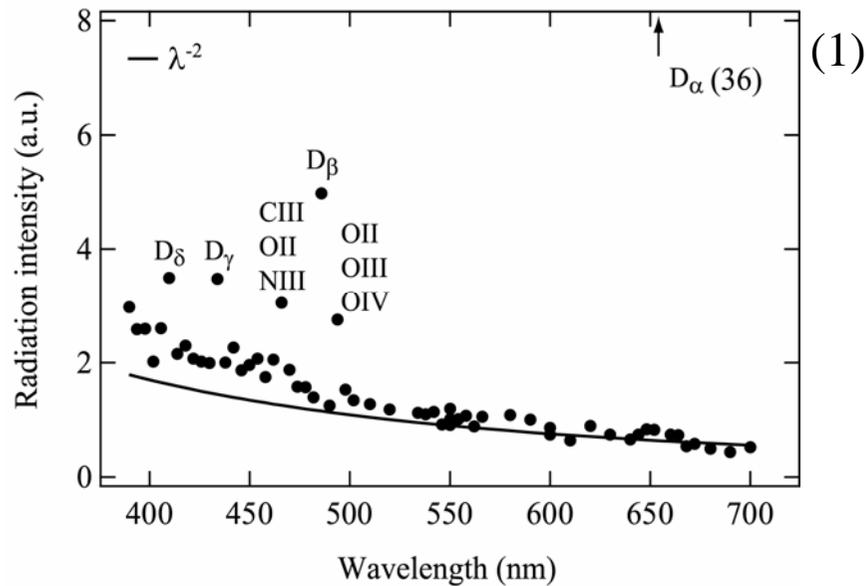
レーザー干渉計 ⇒ 電子密度

光学系 (放射光強度計測) ⇒ 中性粒子数の評価



放電のタイムシーケンス

光強度のx分布の計測、制動放射光の除去

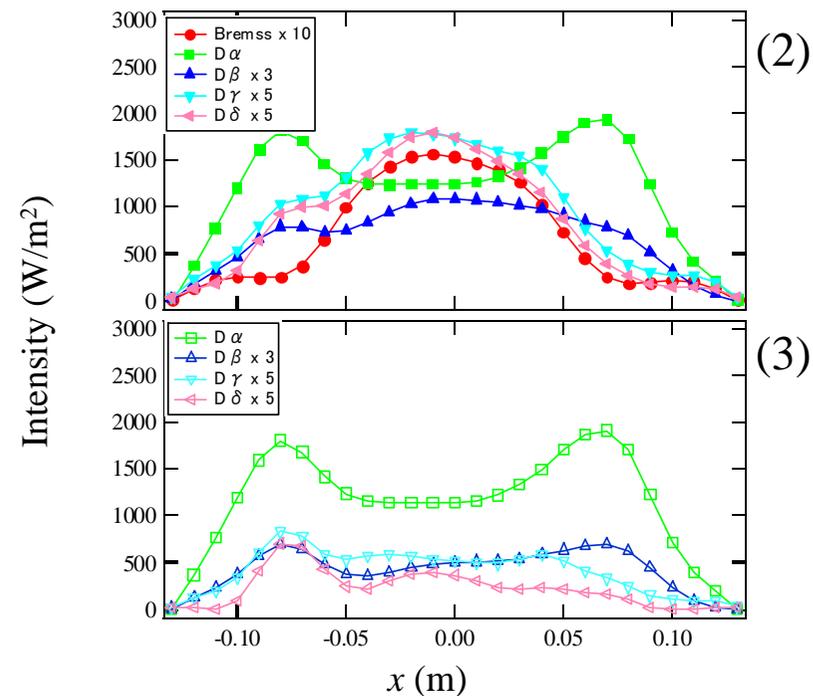


プラズマ放射光の波長依存性
(連続光と線スペクトルからなる)

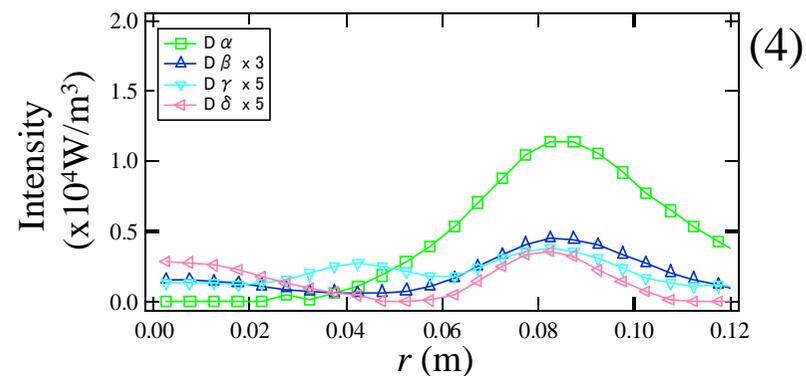
$$I_{Bremss}(\lambda) \propto \frac{n_e n_i}{\sqrt{T_e}} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{Z_{eff} n_e^2}{\sqrt{T_e}} \frac{1}{\lambda^2}$$

$$I_{j(w./o.Bremss)} = I_j - \left\{ \left(\frac{\lambda_{Bremss}}{\lambda_j} \right)^2 I_{Bremss} \right\}$$

(j = α, β, γ ...)



放射光の線積分強度のx分布



放射係数のr分布

衝突輻射(Collisssional Radiative:CR)モデルの原子過程とレート方程式

考慮される原子過程

$C(p,q)$: 電子衝突励起速度係数

$A(p,q)$: 自然放射遷移確率

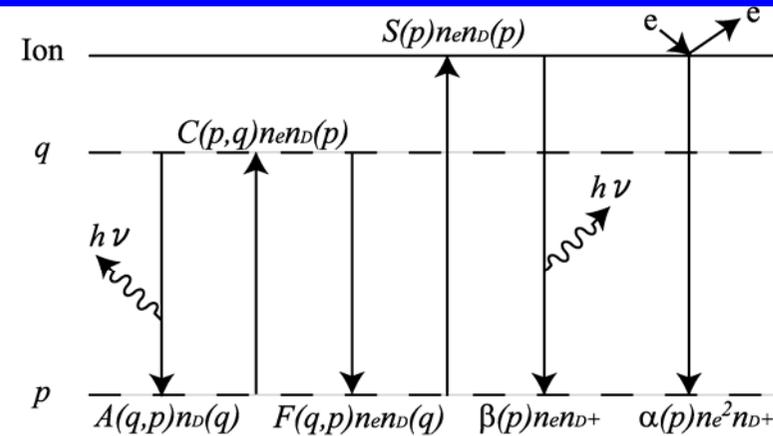
$F(p,q)$: 電子衝突脱励起速度係数

$S(p)$: 電子衝突電離速度係数

$\alpha(p)$: 三体再結合速度係数

$\beta(p)$: 放射再結合速度係数

※光学的に薄い



CR モデル

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n_D(p) = & \sum_{q < p} C(q,p) n_e n_D(q) \\ & - \left[\left\{ \sum_{q < p} F(p,q) + \sum_{q > p} C(p,q) + S(p) \right\} n_e + \sum_{q < p} A(p,q) \right] n_D(p) \\ & + \sum_{q > p} [F(q,p) n_e + A(q,p)] n_D(q) \\ & + [\alpha(p) n_e + \beta(p)] n_e n_{D^+} \end{aligned}$$

$n_D(p)$: 準位 p のポピュレーション

n_e : 電子密度

n_{D^+} : イオン密度

準定常近似

(Quasi-Steady-State : QSS)

$$\frac{dn_D(p)}{dt} = 0 \quad (\text{※ } p \geq 2)$$

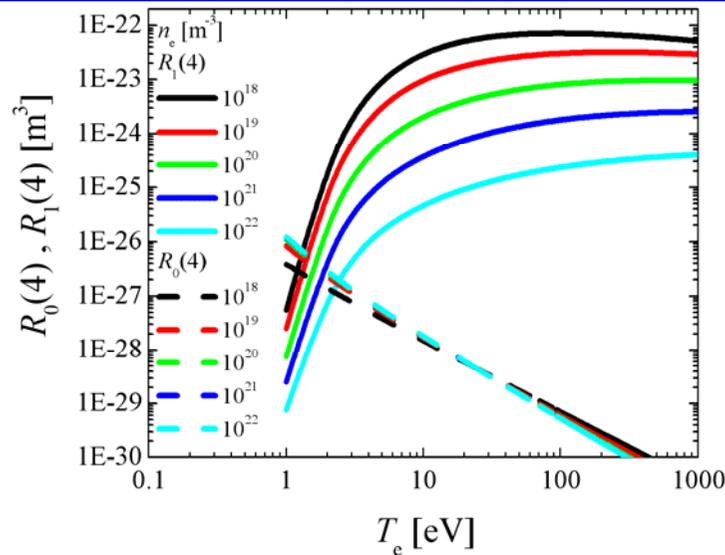
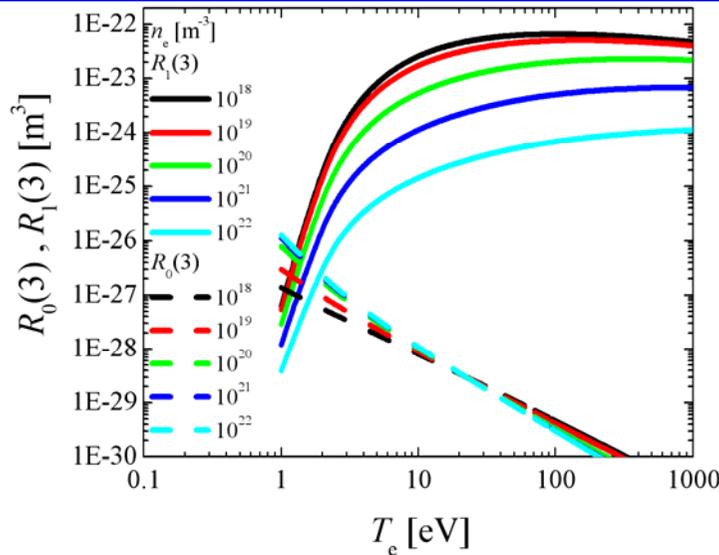
レート方程式の解

$$n_D(p) = \underbrace{R_0(p)}_{\text{再結合成分}} n_e n_{D^+} + \underbrace{R_1(p)}_{\text{電離進行成分}} n_e n_D(1)$$

再結合成分 電離進行成分

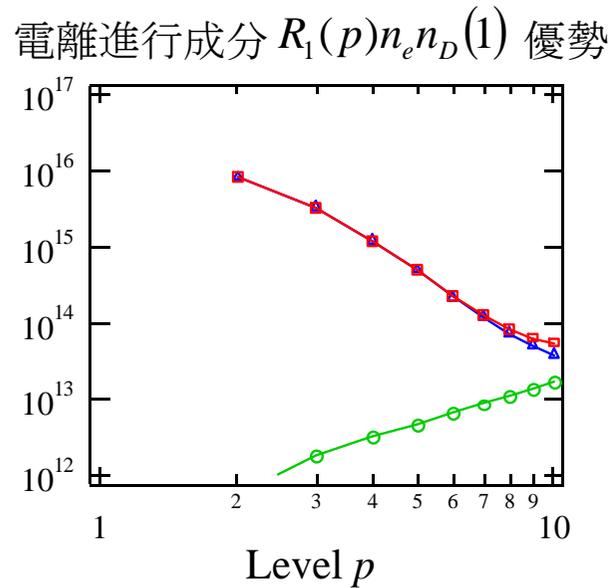
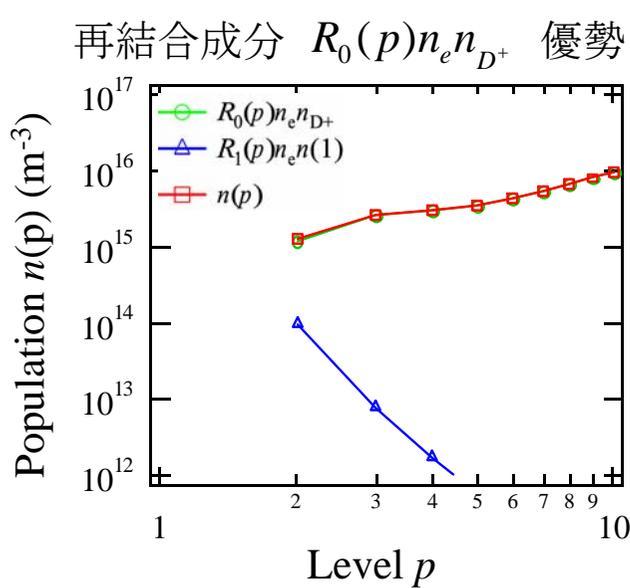
※ R_0, R_1 : ポピュレーション係数と呼ばれる n_e と T_e の関数

ポピュレーション係数とポピュレーション分布

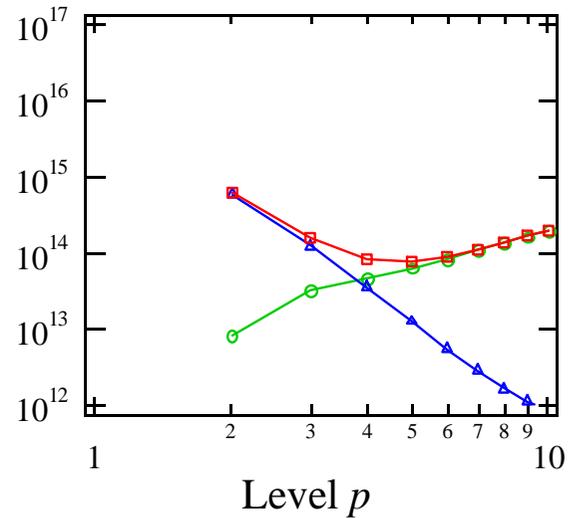


準位ごとに T_e, n_e の
依存性が異なる

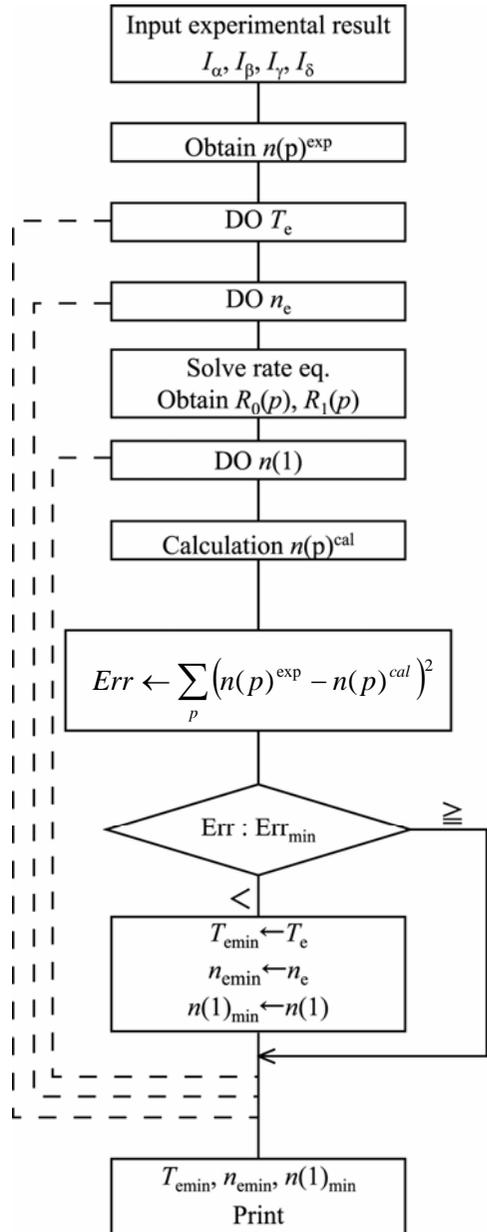
ポピュレーション係数の電子温度、電子密度依存性



両方の成分が混在



解析結果の評価方法(フローチャート)



(1) 実験結果 I_j から実験値 $n_D(p)^{\text{exp}}$ を求める。

$$n_D(p)^{\text{exp}} = I_j / h\nu_{p,2} A_{p,2} \quad (p = 3, 4, 5 \dots) \quad (j = \alpha, \beta, \gamma \dots)$$

(2) T_e, n_e を与え、 $R_0(p), R_1(p)$ を求める。

(3) $n_D(1)$ と $n_{D+} (=n_e)$ を与え、計算値 $n_D(p)^{\text{cal}}$ を求める。

$$n_D(p)^{\text{cal}} = R_0(p)n_en_{D+} + R_1(p)n_en_D(1)$$

(4) $n_D(p)^{\text{cal}}$ と $n_D(p)^{\text{exp}}$ を比較する。

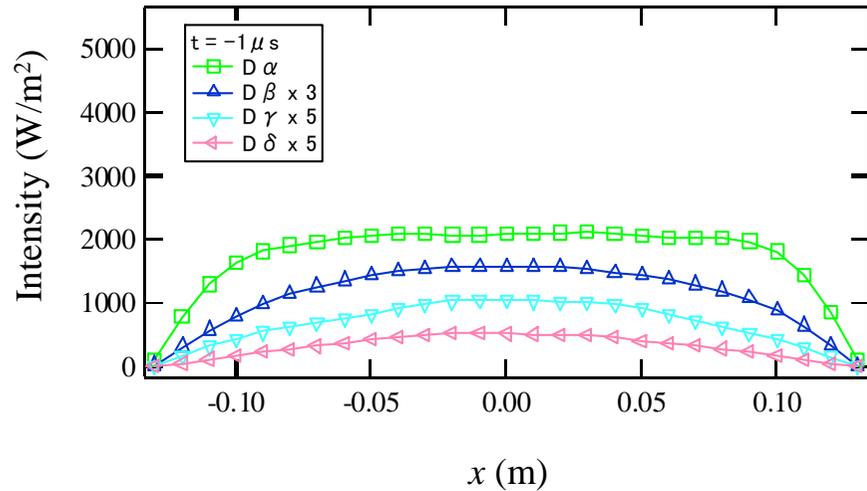
(5) 2~4を繰り返し、誤差が最小になる $T_e, n_e, n_{D+}, n_D(1)$ の組み合わせを探す。

中性粒子密度について

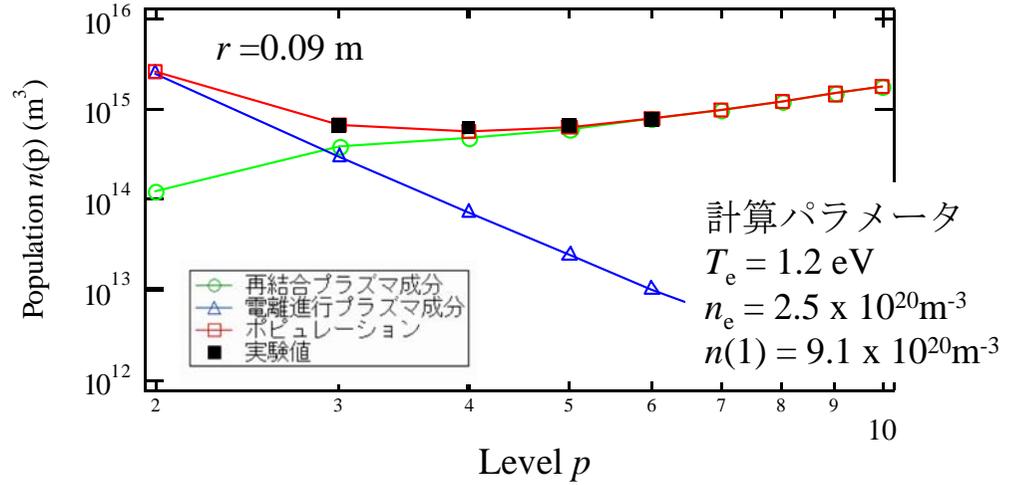
$$n_D(1) \gg n_D(p) \quad (p \geq 2)$$

$$n_D \approx n_D(1)$$

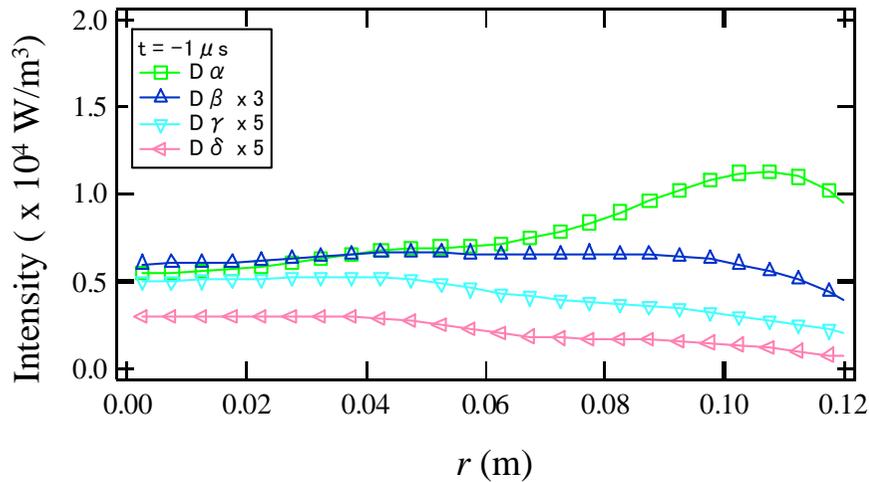
実験値と計算結果の比較(予備電離プラズマ)



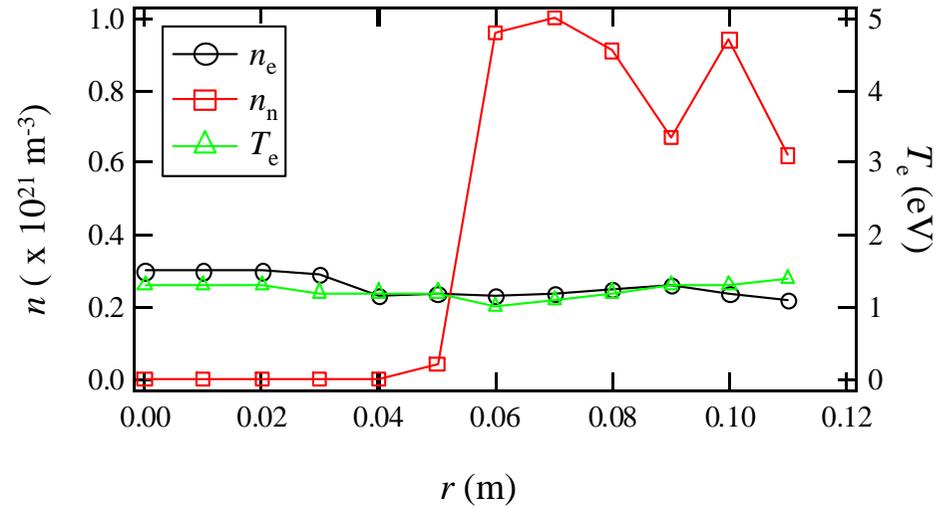
放射光強度の線積分量のx分布



ポピュレーション分布

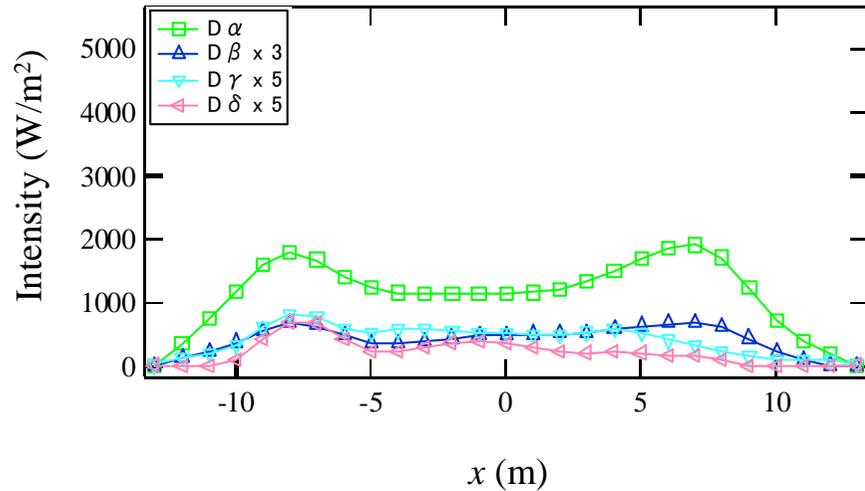


放射係数分布

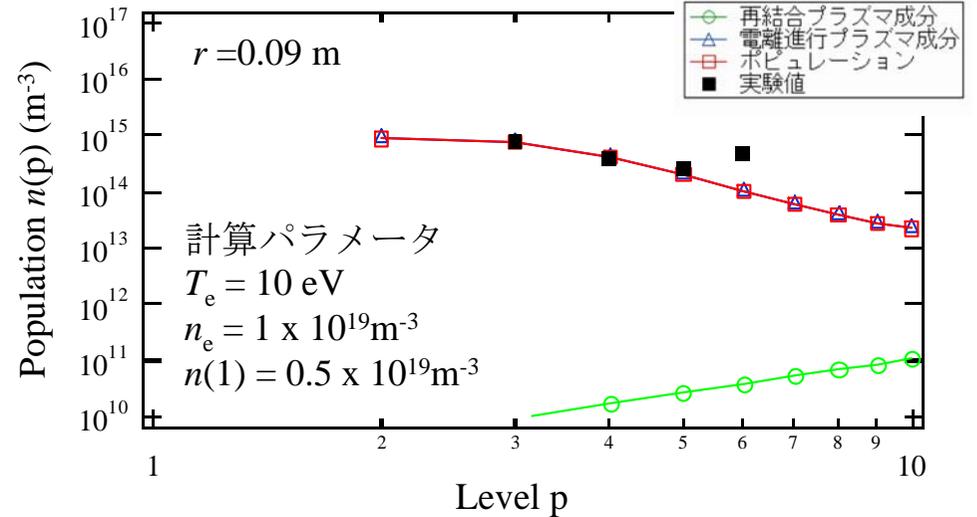


粒子密度、電子温度の分布

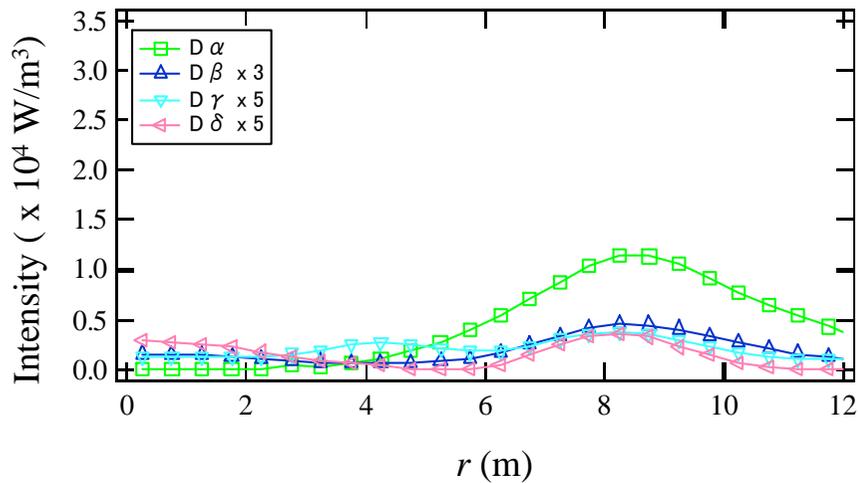
実験値と計算結果の比較の例 (FRCプラズマ平衡時)



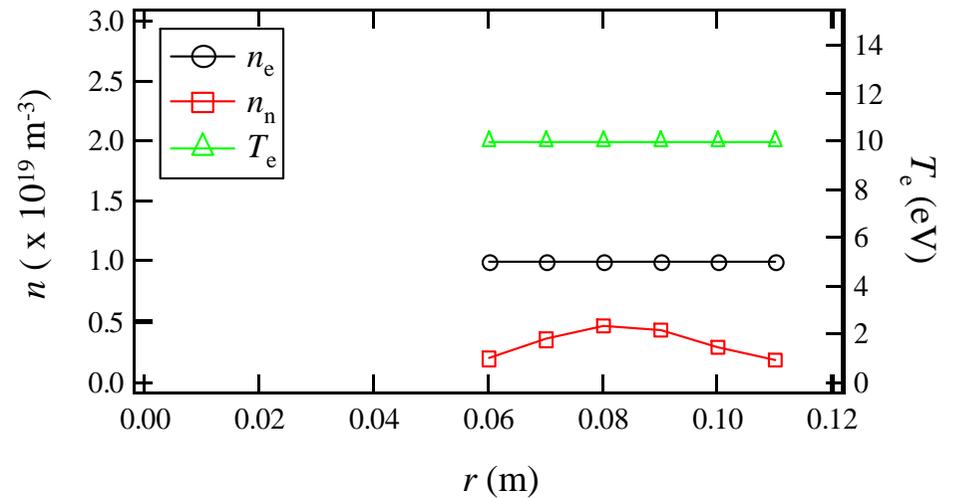
放射光強度の線積分量のx分布



ポピュレーション分布



放射係数分布



粒子密度、電子温度の分布

まとめ

重水素スペクトルの絶対放射強度計測と、CRモデルによる計算を用いて、中性粒子数を定量的に評価を行った。

FRCプラズマの生成において

予備電離プラズマ、中性粒子密度 $10^{20}\sim 10^{21}\text{m}^{-3}$

FRCプラズマ生成後、中性粒子密度 $10^{18}\sim 10^{19}\text{m}^{-3}$

程度に減少する結果が得られた。

生成の前後で中性粒子が電離され、磁場に捕捉されることが実験的に示された。