

# 論文の内容の要旨

論文題目 輻射捕獲を考慮したプラズマ中のヘリウム原子に対する分光診断に関する研究

飯田 洋平

## 1. 研究背景

磁場閉じ込め型核融合装置では、プラズマ対向壁への熱負荷の低減、核融合反応後のヘリウム灰の効率的な排気、不純物の制御などを目的として、閉じた磁気面の周辺部に端が開いた磁力線構造を有するダイバータ配位が採用されている[1]. 高熱流にさらされるダイバータ板の寿命を長じめるためには、放射冷却やプラズマ再結合過程を効率的に誘起し熱流低減シナリオに役立たせるのが有効である. そのためにはパラメータ分布を詳細に計測し、支配的な素過程や輸送プロセスを解明することが欠かせない. 一例として、核融合反応の生成物であるために核融合炉の中に元来存在するヘリウム原子からの輝線の強度比を、励起準位の占有密度を記述する衝突輻射 (collisional-radiative : CR) モデル[2,3]と比較することによって電子温度 ( $T_e$ )、電子密度 ( $n_e$ ) を求める輝線強度比法が提案されている[4]. 中性粒子密度が高いダイバータプラズマでは、光学的に薄い場合に無視されてきた基底準位と  $^1P$  準位との間の共鳴吸収による自然放出係数  $A$  の実効的減少の考慮が必要である. 真の  $A$  係数と実効的  $A$  係数の比はオプティカルエスケープファクタ (OEF) と呼ばれる. 既存研究では観測される任意の上準位分布形状に対する OEF の空間分布を計算する手法がなく、輝線強度比法の分布計測としての利用における課題となっていた.

そこで本研究では、OEF の空間分布を計算する式を導出し、従来の CR モデルに組み込み、輝線強度比法を空間分布計測へ拡張することを目的とした.

## 2. 輻射捕獲の空間構造を考慮したヘリウム原子衝突輻射モデルの確立

### 2.1. 輻射捕獲を考慮したヘリウム原子の CR モデル

CR モデルでは、励起準位の占有密度は、各準位からの流出と流入を記述するレート方程式の解として、基底準位密度に比例する電離進行成分とイオン密度に比例する再結合成分の和の形で記述される[2,3].

輻射捕獲の効果を表す OEF は、位置  $r$  における上準位  $q$  と下準位  $p$  の間の遷移に関する OEF は局所的な自然放出、共鳴吸収、誘導放出のバランスとして以下の式により定義される.

$$\Lambda_{qp}(r)A_{qp} = A_{qp} - \frac{4\pi}{c} \left( \frac{n_p(r)}{n_q(r)} \overline{B_{pq}I_{qp}(r)} - \overline{B_{qp}I_{qp}(r)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $A_{qp}$ 、 $B_{pq}$ 、 $B_{qp}$  はそれぞれアインシュタインの自然放出係数、共鳴吸収係数、誘導放出係数、 $n_q(r)$ 、 $n_p(r)$ 、 $I_{qp}(r)$  はそれぞれ位置  $r$  における準位  $q$  と  $p$  の占有密度、 $p$ - $q$  遷移の線スペクトルの分光放射照度であり、 $\overline{B_{pq}I_{qp}(r)}$  と  $\overline{B_{qp}I_{qp}(r)}$  のバーはそれぞれ吸収と発光のスペクトルで重み付けしていることを表す. 大塚はこの式を解析的に解き、円筒型プラズマのプラズマ中心部で利用可能な式を与えている[5].

ダイバータプラズマでは基底準位密度が高いため、基底準位と  $^1P$  系列との共鳴吸収が重要である. 一方、励起準位密度は小さいためこれらの準位による吸収は無視できる.

### 2.2. OEF の空間分布計算[6]

OEF の計算には与えられた上準位と下準位の密度分布に対する局所的な分光放射照度の値を知る必要がある. 本研究では、ダイバータプラズマへの適用を考慮して、次の4点、すなわち、1)上準位密度分布  $n_q(R_N)$  は軸対称の任意形状、2)下準位密度分布  $n_p(R_N)$  は空間一様、3)上準位密度  $n_q(R_N)$  は下準位密度  $n_p$  に対して十分小さく、誘導放出は無視できること、4)自然放出と吸収のスペクトルとしてどちらも空間一様なガウス型プロファイルを仮定した. これらの仮定下では、必要な入力パラメータは以下の3つ、すなわち、1)上準位の温度  $T_q$  及び下準位の温度  $T_p$  との比  $T_q/T_p$ 、2)上準位の密度分布形状  $n_q(R_N)$  及び上準位分布の特性長  $L_q$  (但し、 $R_N=R/L_q$ )、3)吸収スペクトル中心の光学的深さ  $\tau_{pq0}$  に集約される. ここで  $\tau_{pq0}$  は、

$$\tau_{pq0}(n_p, T_p, L_q) = k_{pq0}(n_p, T_p) L_q = \frac{e^2}{4m_e c \epsilon_0} f_{pq} \lambda_{qp} \sqrt{\frac{M}{2\pi k T_p}} \times n_p L_q \quad (2)$$

と表される.  $k_{pq0}$  は吸収スペクトル中心における吸収係数である.

以上を用いて, 無限長円筒プラズマ中の任意の軸対称型上準位分布  $n_q(R_N)$  に対する任意の規格化半径位置  $R_N$  における OEF の計算式を導出すると,

$$\Lambda_{qp} \left( n_q(R_N), \tau_{qp0}, \frac{T_q}{T_p}; R_N \right) = 1 - \frac{2}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{\tau_{qp0}}{n_q(R_N)} \int_0^\pi d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^\infty dx \exp \left[ - \left( 1 + \frac{T_q}{T_p} \right) x^2 \right] \times \int_0^{r_{Nj}} dr'_N \left\{ n_q(R'_N) \exp \left[ - \frac{\tau_{qp0} \cdot r'_N}{\sin \theta} \exp \left( - \frac{T_q}{T_p} x^2 \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

となる. ここで,  $r_{Nj}$ ,  $R'_N$  は, それぞれ,

$$r_{Nj} = \sqrt{K_N^2 - R_N^2 \sin^2 \varphi} - R_N \cos \varphi, \\ R'_N = \sqrt{R_N^2 + r_{Nj}^2 + 2R_N r_{Nj} \cos \varphi}. \quad (4)$$

である.

この式を用いて, 上準位密度分布が一様 (矩形) 分布, 放物型分布, ガウス型分布の場合の OEF の空間分布を計算

した結果を図 1 に示す. OEF の値は空間分布を持ち, 特に上準位分布が放物型やガウス型の場合の周辺部では負の値を取る. 負の OEF は, プラズマ周辺部において局所的に光子の吸収過程が自然放出過程を上回ることを示している. この現象はプラズマ中心のモデルである大塚の式では表現できず, OEF の空間分布を得る必要性を示している.

### 3. 実験装置

実験はダイバータ模擬装置 MAP-II[7]でおこなった. 本装置は,  $\text{LaB}_6$  をカソードに用いて直流アーク放電により定常プラズマを生成し, 8 つの磁場コイルにより形成される約 20 mT の直線磁場によってプラズマを磁力線方向に輸送する. プラズマはドリフト管を用いて結ばれたソースチャンバーおよびターゲットチャンバーと呼ばれる二つのチャンバーへと運ばれて, ターゲット板にて終端する. 各チャンバーには観測窓が取り付けられており, 近紫外～近赤外の分光計測が可能である. ターゲットチャンバーには, 径方向に空間スキャンが可能な静電プローブが取り付けられており, 輝線強度比法との比較に用いた.

### 4. 実験結果

CR モデルにおける OEF の計算に, 従来の大塚の式を用いたものを輻射捕獲中心モデル, 本研究 2 章で導いた式を用いたものを輻射捕獲空間分布モデルと呼び, MAP-II 装置に適用した.

#### 4.1. 輻射捕獲中心モデルの適用[8]

MAP-II 装置のターゲットチャンバー中の電離進行プラズマにおいてヘリウム原子の 6 系列 ( $1^1\text{S}$ ,  $1^1\text{P}$ ,  $1^1\text{D}$ ,  $3^1\text{S}$ ,  $3^1\text{P}$ ,  $3^1\text{D}$ ) に対し一縮退準位あたりの占有密度を分光計測し, 輻射捕獲中心モデルによる計算結果と比較したものを図 2 に示す. OEF の計算では,

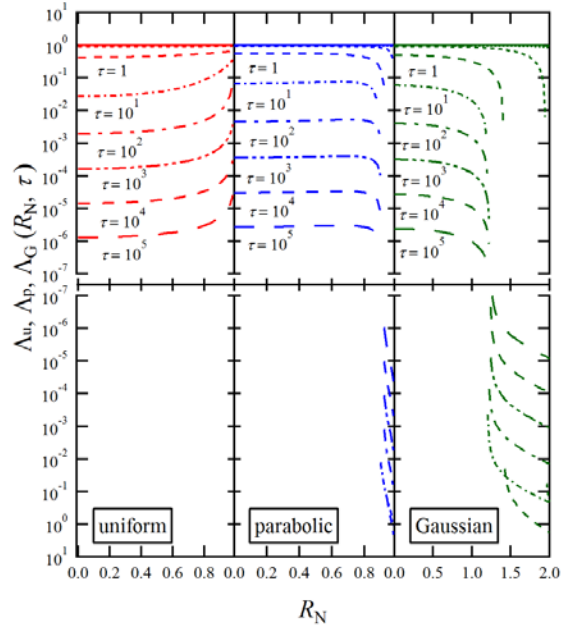


図 1 一様 (矩形) 分布, 放物型分布, ガウス型分布の上準位分布形状における OEF の空間分布計算結果.

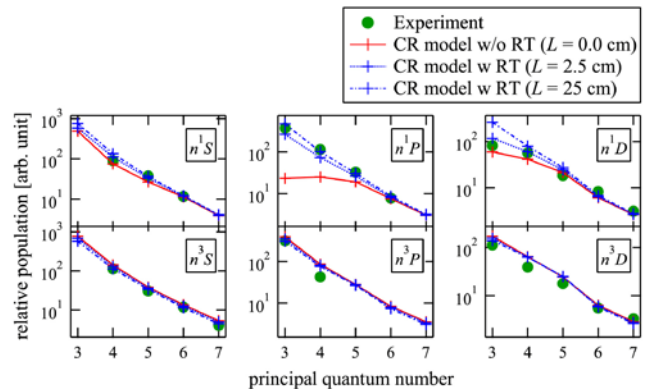


図 2 ヘリウム電離進行プラズマにおける各系列の励起準位密度の分光計測結果 (緑点) と CR モデル計算結果 (輻射捕獲の考慮なし (赤実線), 輻射捕獲を考慮 ( $L_q=2.5$  cm (青点線),  $L_q=25$  cm (青破線)).

表 1 再結合プラズマにおける CR モデルによる  $T_e$ ,  $n_e$  の評価値.

	輻射捕獲なし ( $L_q = 0$ m)	輻射捕獲あり ( $L_q = 0.025$ m)	輻射捕獲あり ( $L_q = 0.25$ m)
$T_e$	0.06 eV	0.06 eV	0.06 eV
$n_e$	$1.62 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	$1.22 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	$1.16 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

特性長  $L_q$  を 0 m (輻射捕獲なし), 0.025 m, 0.25 m として大塚モデルにより計算を行っている.  $T_e$  と  $n_e$  は静電プローブの計測値を用いており, それぞれ 6.1 eV,  $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  である. CR モデルの計算値は主量子数  $n=6$  における各準位の密度の平均値を用いて実験値に規格化した. 図 2 から分かるように, 輻射捕獲を考慮しない CR モデル ( $L_q = 0$  m) で見られる  $^1P$  系列と  $^1D$  系列における実験値との中の大きな相違は, 輻射捕獲を考慮することによって解消される. この結果から, OEF を用いた輻射捕獲の効果の評価法の妥当性が確認された.

MAP-II 装置の純ヘリウム放電プラズマの周辺部において, 放射・三体再結合が支配する, いわゆる電子-イオン再結合(EIR)に特徴的な高励起リドベルグ準位からの発光を観測し, CR モデルを再結合プラズマにおける  $2^3P-n^3D$  遷移に適用して  $T_e$ ,  $n_e$  を求めた. 上準位の特性長  $L_q = 0$  m, 0.025 m, 0.25 m としてそれぞれ計算した CR モデルと比較すると,  $T_e$ ,  $n_e$  のベストフィット値として表 1 の値を得た. リドベルグ準位の占有密度は  $T_e$  に依存性が高いのに対し,  $^3D$  系列の低主量子数準位の占有密度比は電子密度に感受性が高いため,  $T_e$  と  $n_e$  を同時に精度良く決定することができている. 但し, 輻射捕獲の考慮により, 電子密度の評価値は数十%変わることが分かった.

#### 4.2. 輻射捕獲空間分布モデルの適用[9]

図 3 は MAP-II 装置の純ヘリウム電離進行プラズマにおいて計測された  $3^1S$  と  $3^1P$  準位の視線積分密度の空間分布である. MAP-II では, 上準位の線積分密度の空間分布は典型的に中心位置が同じで幅の異なるダブルガウス分布でよくフィットすることができる. 円筒対称性を仮定すると,  $3^1P$  準位の線積分密度の空間分布の計測値は, アーベル逆変換により局所値の半径方向分布に直される. OEF の計算に用いる  $^1P$  準位の分布のうち,  $2^1P$  準位だけは可視分光による計測ができないため, 図 4 に示すように  $3^1P$  準位の広い成分と狭い成分の比を変えた分布として仮定して OEF の計算を行った.

OEF の計算結果を CR モデルに繰り込み, 線スペクトル強度比法を適用することにより  $T_e$  と  $n_e$  の局所値を求めた. フィッティングに用いた線スペクトルは, 471 nm ( $2^3P-4^3S$ ), 501 nm ( $2^1S-3^1P$ ), 587 nm ( $2^3P-3^3D$ ), 667 nm ( $2^1P-3^1D$ ), 706 nm ( $2^3P-3^3S$ ) の 5 本である. 図 5 は,  $2^1P$  準位の OEF の入力パラメータとして (i)~(iv) の分布を用いて輻射捕獲空間分布モデルを適用した場合の  $T_e$ ,  $n_e$  の線スペクトル強度比法の結果と,  $L_q = 0.025$  m として輻射捕獲中心モデルを適用した場合の線スペクトル強度比法の結果を静電プローブ法の結果と併せて示したものである.  $n_e$  に関しては, 線スペクトル強度比法により求めた空間分布形状は, 絶対値に違いはあるものの

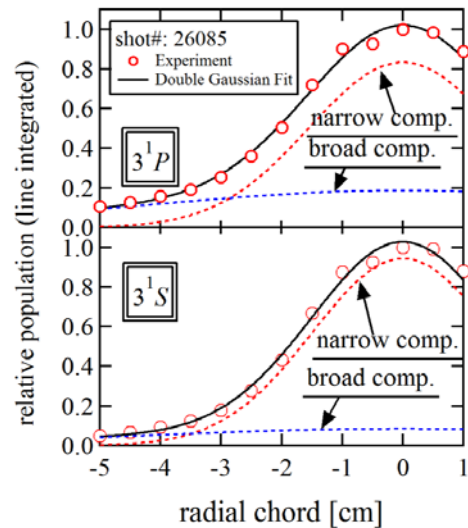


図 3  $3^1P$  準位と  $3^1S$  準位の線積分密度の空間分布計測結果とダブルガウス関数によるフィッティング結果.

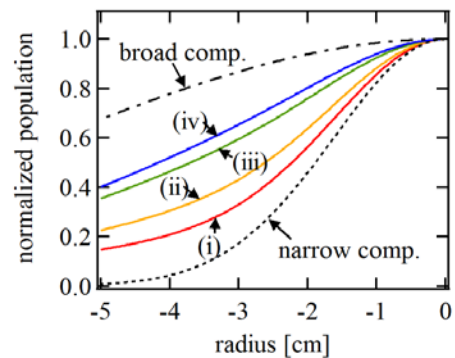


図 4 仮定した  $2^1P$  準位の空間分布. 広い成分と狭い成分の比は, (i)5/12.3, (ii)10/12.3, (iii)30/12.3, (iv)50/12.3 である.

OEF の計算方法によらずプローブ計測による空間分布形状とよく一致している。一方、 $T_e$  については、輻射捕獲中心モデルを用いた場合、線強度比法による結果とプローブ計測による結果との間の誤差が周辺部に向かうにつれて大きくなるという従来の報告[10]を再現する結果となったが、輻射捕獲空間分布モデルを用いた場合、4cm より外側において輝線強度比法による値とプローブ計測値がほぼ一致するという結果を得た。これにより、輝線強度比法が輻射捕獲空間分布を用いることで空間分布計測として利用できる可能性が示唆された。周辺部において(ii), (iii), (iv)の分布の任意性にも関わらず  $T_e$  のフィッティング値に違いに殆ど見られないのは、 $2^1P$  準位の OEF の値が可視領域の線スペクトル強度比にあまり影響を与えないということを示唆している。中心から半径 3cm にかけての  $T_e$  分布の輻射捕獲空間分布モデルによる計測値とプローブ計測値の不一致は、画像計測を用いて、空間分布の詳細計測を行うことにより解消することが期待される。

## 5. 総括

本研究では、OEF の空間分布計算式を導出して既存の CR モデルに組み込み、MAP-II 装置において輝線強度比法を適用した。輻射捕獲中心モデルの適用により輻射捕獲の考慮の必要性を実験的に実証し、再結合プラズマでは  $T_e$  と  $n_e$  を同時に求めた。輻射捕獲空間分布モデルを適用した結果、本手法がパラメータの分布計測に適用できる可能性が示唆された。

今後は、本研究では  $3^1P$  準位の空間分布から仮定した  $2^1P$  準位の空間分布の分布形状を真空紫外分光法や赤外分光法により実際に計測を行い、中性粒子密度の高い領域における輝線強度比法を自己完結した計測法として完成させることが期待される。

## 参考文献

- [1] M. Nagami, *et.al.*, J. Nucl. Mater., **76-77** (1978) 521-527..
- [2] T. Fujimoto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **21**, 439(1979).
- [3] M. Goto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **76**, 331(2003).
- [4] B. Schweer, G. Mank, A. Pospieszczyk, B. Brosda and B. Pohlmeier, J. Nucl. Mater., **196-198**, 174(1992).
- [5] M. Otsuka, *et.al.*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **21**, 41(1979).
- [6] Y. Iida, S. Kado, and S. Tanaka, Phys. Plasmas, **17**, 123301(2010).
- [7] S. Kado, Y. Iida, S. Kajita, D. Yamasaki, A. Okamoto, B. Xiao, T. Shikama, T. Oishi and S. Tanaka, J. Plasma Fusion Res., **81**, 810(2005).
- [8] Y. Iida, S. Kado, A. Okamoto, S. Kajita, T. Shikama, D. Yamasaki and S. Tanaka, J. Plasma Fusion Res. SERIES, **7**, 123(2006).
- [9] Y. Iida, S. Kado, A. Muraki, and S. Tanaka, Rev. Sci. Instrum., **81**, 10E511(2010).
- [10] S. Kajita, N. Ohno, S. Takamura and T. Nakano, Phys. Plasmas, **13**, 013301(2006), **16**, 029901(2009).

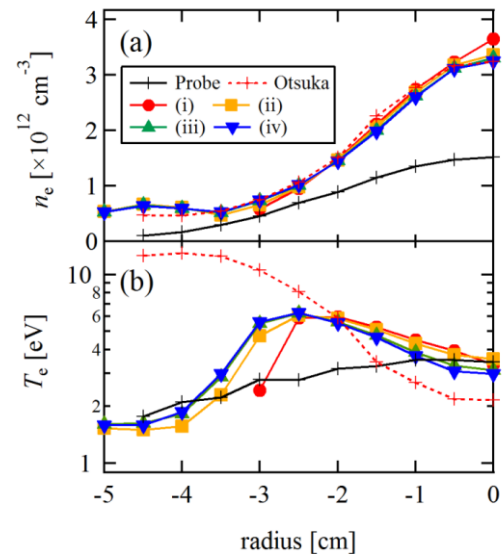


図 5 OEF の空間分布を考慮した線スペクトル強度比法の空間分布計測への適用結果。(a)は  $n_e$ , (b)は  $T_e$  に対応。黒はプローブ計測値、赤の点線は OEF の値として大塚の式を周辺まで用いて線スペクトル強度比法を適用した結果、その他は  $2^1P$  の空間分布を (i)~(iv)の様に仮定して OEF の計算を行い輝線強度比法を適用した結果である。