

## 同時位置 3 波長測定可能な分光計測系と CT 再構成法の開発

### Development of the triple-channel optical system and the image reconstruction by computer tomography

○渡邊洋貴<sup>1</sup>, 高橋努<sup>2</sup>

\*Hiroki Watanabe<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: We developed the triple-channel optical system and the image reconstruction by visible light CT to research MHD instability of FRC plasma. Cormack's method and Fourier-Bessel expansions (Nagayama's method) are utilized as mathematical techniques for visible light CT. And, the optical system is possible to observe radiations divided into three-wavelength from FRC plasma, such as bremsstrahlung, spectrum (H,D,He), at the same time and position.

#### 1. はじめに

プラズマを閉じ込める磁場閉じ込め方式の中に磁場反転配位(Field-Reversed Configuration : FRC)という閉じ込め方式がある。この方法により生成されたFRCプラズマは、非常に高い $\beta$ 値( $\sim 1$ )を有しており、D-<sup>3</sup>He核融合炉の炉心プラズマとして注目され、日本と米国を中心に研究されている。また、Fig.1に示すように単連結構造であることから、磁力線に沿って軸方向への移動(移送)が可能である。

しかし、FRCプラズマは電磁流体力学的(Magneto-hydro-dynamics:MHD)不安定性のひとつである回転不安定性の成長により、急速に崩壊してしまう。D-<sup>3</sup>He核融合炉心プラズマとして使用するためには閉じ込め性能の向上が必須である。[1]

プラズマの診断法は様々であるが、1980年頃からComputer Tomography(CT)をプラズマ研究に生かす試みが為されてきた。この方法で、プラズマのMHD不安定性や、内部構造などの研究が数多く行われている。[2]

本発表では、FRCプラズマのMHD不安定性の様子を調べるため、可視光CTを用いた像再構成法の開発と、それに付随して、新たな分光計測系の開発の2点について発表を行う。

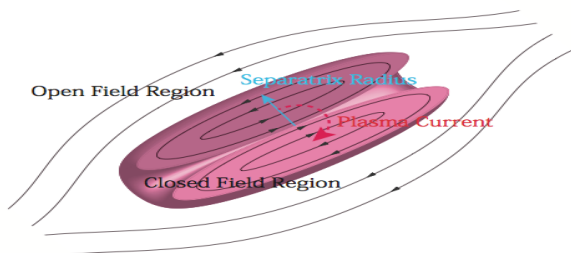


Fig. 1 Schematic view of Field-Reversed Configuration plasma

#### 2. 実験装置

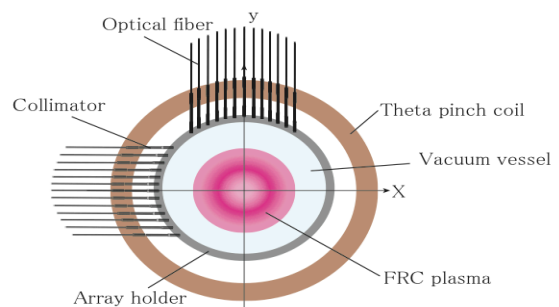


Fig. 2 Cross section (x-y direction) of device

Fig. 2に実験装置の断面図を示す。コリメーターはx, y方向ともに-7.8cm~7.8cmの間に1.2cm間隔で14本ずつ設置されており、干渉フィルタを選択することで制動放射光や重水素スペクトル等を観測している。

現段階の装置では、光ファイバーの導波路が1本であるため、観測された光を波長ごとに比較するために状態の似たプラズマで比較する必要がある。

そこで今回開発した光ファイバーは導波路を途中から3分岐させ、同時刻、同位置で3つの波長の光を観測することができる。これにより、FRCプラズマの挙動を波長ごとに見ることができるだけでなく、電子、重水素、He等、異種の粒子の挙動を同時に観測することも可能になると思われる。

#### 3. 可視光 CT

##### 1)可視光 CT の原理

CTは外部からの観測情報を拘束条件とし、内部構造を再構成するという手法である。発光強度の2次元分布 $f(p, \phi)$ はLに沿った線積分値となるため発光強度分布 $g(r, \theta)$ を用いて以下の式で表される。dsはLに沿う線素片である。

$$f(p, \phi) = \int_L g(r, \theta) ds \quad (1)$$

$f(\rho, \phi)$ は実験により得られたデータであり,この積分方程式を  $g(r, \theta)$ について解くことで発光強度分布が求まる.

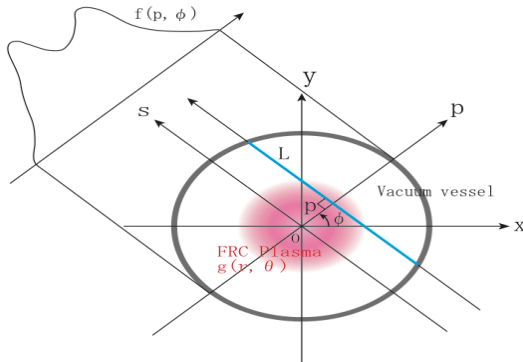


Fig. 3 Schematic view of visible light CT

2)数学的手法

そのまま方程式を解こうとすると,検出ポート数の制約のためデータ欠損が生じ,アーチファクト(偽の像)が出てしまう.その欠損を補う手法として,本研究では Cormack 法と Fourier-Bessel 級数展開法(長山法)を用いて解析を行っている. [3]

4. 剛体回転モデルによる発光強度分布の算出

平衡状態において, 磁気面上では, 電子の温度, 密度が一定である. FRC プラズマは以下に示す剛体回転モデルで密度, 磁場分布を仮定する場合がよくある[4]

$$K = \tanh^{-1} B_i / B_0 \quad (2)$$

$$n = n_m \sec h^2 K(r^2 / R^2 - 1) \quad (3)$$

$$B = B_0 \tanh K(r^2 / R^2 - 1) \quad (4)$$

ここで,  $B_0, B_i$  はそれぞれ外部磁場中心軸上の磁場の大きさ,  $n_m$  は磁気軸上の電子数密度,  $r$  は中心軸からの距離,  $R$  は磁気軸半径と呼ばれる磁場  $B(r)$  の値が 0 になる点である. [5]

プラズマは巨視的にみて中性であるから  $n_i \approx n_e = n$  として, 制動放射光強度は

$$I(\nu) d\nu \propto n^2 \sqrt{k_B T_e} \exp(-h\nu / k_B T) \quad (5)$$

で表される.[6]

Fig. 4, Fig. 5に  $n, B, I$ の径方向分布を示すFig. 5の○印は再構成した像の値である.今回は, Fourier-Bessel 級数展開法を用いて再構成を行った. 展開項として2項目までを採用した. なお, 両グラフ共に最大値が1になるように規格化してある.

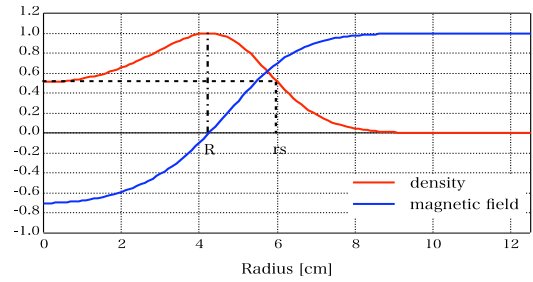


Fig. 4 A rigid rotor radial density profile with constant particle temperature and magnetic field at mid-point.

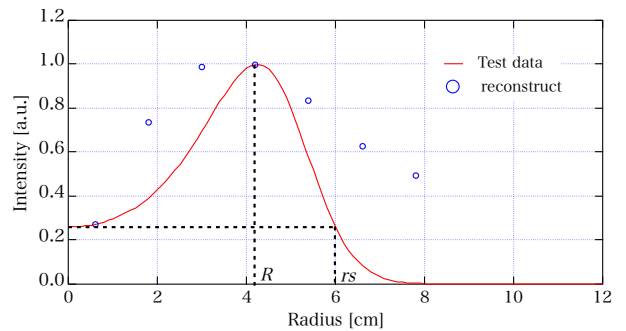


Fig. 5 A rigid rotor radial emission profile (-) and reconstructed radial profile(O)

再構成する際に, 適切な項数を採用しなければ像がぼやけたり, 実際にはない像が出てしまうので項数の最適化が必要である.

実験で得られたデータを再構成し 結果を剛体回転モデルと比較, さらに, 再構成像よりMHD不安定性の様子を調べる.

この研究は, 平成25年度理工学部応用科学研究助成金の支援を受けている

5. 参考文献

[1] 浅井朋彦ほか, プラズマ・核融合学会誌, Vol.84, No.8, pp489-510, 2008  
 [2] 長山好夫, 核融合研究, Vol.62, No.6, pp427-42,(1989), T.Asai et.al, Phys.Plasmas.13,072508 (2006)  
 [3] 長山好夫, プラズマ・核融合学会誌, Vol.74, No.10, pp1158-1163, (1998)  
 [4] Y. Nagayama, Rev. Sci. Instrum., Vol. 65, No.11, pp3415,1994  
 [5] W.T.Armstrong et.al, Phys. Fluids, Vol.24, No.11, pp2084-2089, 1981  
 [6] 木原太郎, 核融合研究, Vol.5, No.1, pp16-20,196