

O-4

制動放射光計測による磁場反転配位の巨視的運動の評価

Evaluation of the wobble motion on field-reversed configuration of optical diagnostic

○小林大樹¹, 永田昌基², 関口純一³, 浅井朋彦³, 高橋努³*Daiki Kobayashi¹, Masaki Nagata², Junichi Sekiguchi³, Tomohiko Asai³, Tsutomu Takahashi³

Abstract: To identify a macroscopic motion of a translating field reversed configuration, a time evolution of a line integrated profile of a visible bremsstrahlung and a translation velocity are observed. From these two profiles, 2D (r,z)- bremsstrahlung profile is estimated. Characteristics of the profile with and without the macroscopic motion are clarified by the model calculation using a familiar Solov'ev magnetic flux function (elongated Hill's vortices)[2]. Intensity of bremsstrahlung is proportional to the square of an electron density and plasma pressure, assumed that an electron temperature is uniform. From the Solosov's solution, B_r and B_z profiles and the magnetic pressures profile are calculated. Combined the radial force balance, the plasma pressure, the electron density, and the square of the electron density (bremsstrahlung) profiles are calculated. Comparing with the observed profile and the calculated one, for example, an axial symmetry and a motion of symmetric axis, the macroscopic motion of the translated FRC plasma are identified.

1. 研究背景・目的

中性子を出さず、エネルギー効率の高い核融合炉の実現を目指す基礎研究として、2つのコンパクトトロイド(Compact Toroid :CT)を衝突させて磁場反転配位(Field Reversed Configuration :FRC)プラズマを生成する実験を行っている。FRCプラズマは閉じた磁力線と開いた磁力線によって構成される。逆磁場テーパピンチ法によって生成された2つのCTは磁気圧差によって移送され、準定常的な閉じ込め磁場を張った金属容器内で衝突し、反平衡な磁力線同士のつなぎ変わりが起き、合体しプラズマ半径の大きな長寿命のFRCが生成される。

FRCの巨視的運動の例として、トロイダルモード数 $n=1$ モードの Wobble 運動や傾斜運動が挙げられる。衝突合体時において、このような巨視的運動はCT同士の正面衝突を妨げ、理想的な衝突合体を困難にする可能性がある。(Fig1)

移送中のFRCプラズマの巨視的運動を計測するために、閉じ込め領域直前にある放電管が露出した領域に光計測器を設置する。そしてプラズマ中の電子が放出する制動放射光の分布測定を行うことでプラズマ巨

視的運動を観測する。巨視的運動が生じることによって発生する制動放射光の x (y) 方向の線積分分布および移送速度の時間発展から、制動放射光の線積分値の2D(x,z)分布が推定される。この制動放射光の2D分布の変動から巨視的運動を同定することが可能になる。

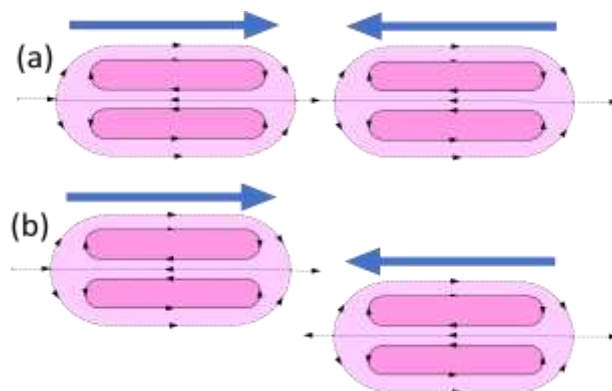


Fig.1 Magnetic field line structure of FRC when just before (a) head-on, (b) off-set.

2. 巨視的運動観測の原理

FRCプラズマの制動放射光分布から巨視的運動を推定する方法を以下のように考える。制動放射光強度 $I(\lambda)$ は(1)式で表すことができる。

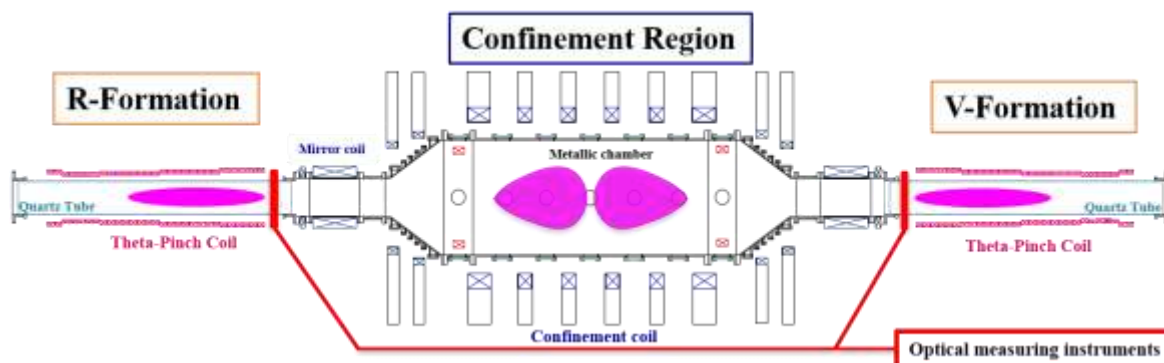


Fig.2 Schematic diagram of FAT-CM

$$I(\lambda) \propto n_e^2 Z_{eff} T_e^{-1/2} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda T_e}\right) \bar{g}_s d\lambda \quad (1)$$

ただし n_e は電子密度, Z_{eff} は有効電荷, T_e は電子温度, h はプランク定数, c は光速, \bar{g}_s はガウント因子をそれぞれ表す. プラズマ内の電子温度分布を一様と仮定すると, 制動放射光は電子密度の二乗に比例するので, この分布から電子密度の分布を求めることができる. また $P = nkT$ より, 密度分布 $n_e(r)$ からプラズマ内の圧力分布 $P(r)$ が求まる. ここで k はボルツマン定数を表す. このようにして制動放射光分布からプラズマの圧力分布を見積もることが可能となる. また, 式(2)に示す径方向の圧力分布と磁束密度の関係を用いると磁束密度分布を求めることができる.

$$P_{Max} = P(r) + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

FRC プラズマの典型的な磁束関数を表す解析解である Solov'ev 解を用いて[2], プラズマ内の温度を一定と仮定して制動放射光分布(密度の二乗分布)を求める. 用いる磁束関数を円筒座標系で記述した式を以下に示す.

$$\Psi = \frac{1}{2} B_{z0} r^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} - \frac{z^2}{z_s^2}\right) \quad (3)$$

ここで B_{z0} は定数, r_s はセパトトリックス半径, z_s はプラズマ長の半値を表す. (3)式を軸対称を仮定して解くことで B_r と B_z が求まる.

$$B_r = -B_{z0} \frac{rz}{z_s^2} \quad (4)$$

$$B_z = -B_{z0} \left(1 - \frac{2r^2}{r_s^2} - \frac{z^2}{z_s^2}\right) \quad (5)$$

プラズマの平衡の関係式 $\nabla \left(P + \frac{B^2}{2\mu_0}\right) = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla)$ に

(4), (5)式を代入し, 両辺を 0 から r まで積分するとプラズマ圧力を以下のように表せる.

$$P(r) - P(0) = -\frac{B_z^2}{2\mu_0} \left\{ \left(1 - \frac{2r^2}{r_s^2} - \frac{z^2}{z_s^2}\right)^2 - \left(1 - \frac{z^2}{z_s^2}\right)^2 - \left(\frac{r^2}{2z_s^2} - \frac{r^4}{2r_s^2 z_s^2} - \frac{r^2 z^2}{2z_s^4}\right) \right\} \quad (6)$$

(6)式は, 電子密度の分布 $n(r)$ も表しているのので, (6)式の二乗を求め, $x = x_0$ あるいは $y = y_0$ のインパクトパラメータに沿った線積分値を求めることによって 2D の線積分制動放射光分布を求めることができ

る. Fig.3 に 2D- $n_e^2(r, z)$ および $z = z_0$ における 2D- $n_e^2(x, y, z_0)$ の等高線図, 同じく $z = z_0$ における線積分制動放射光分布を示す. 例えば wobble 運動をしている 2D 分布を考える場合には, 分布全体の中心軸をシフトさせることにより近似的な分布を推定できる. 同様に傾斜運動している 2D 分布を考える場合には, 分布の中心軸を傾斜させることで推定できる.

また, 移送 FRC プラズマのように B_θ 磁場を持つ場合には,

$$B_\theta = B_{\theta 0} \frac{r}{r_s} \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} - \frac{z^2}{z_s^2}\right) \quad (7)$$

を用いて磁気圧に B_θ 成分を考慮した圧力分布を求めることができる. これらのモデル化した分布の軸方向および断面内の対称性の特徴を基に巨視的運動を同定する.

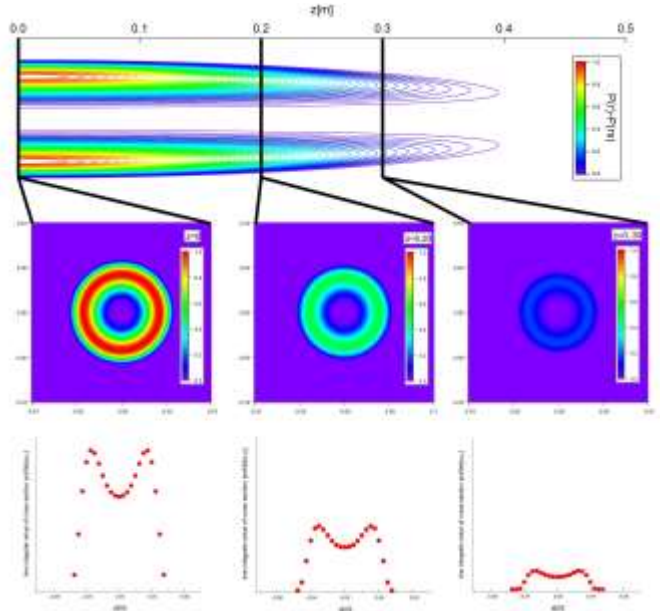


Fig.3 Contour plot of FRC's bremsstrahlung profile $P(r, z)^2$ (electron density profile $n_e^2(r, z)$), cross section profiles of $n_e^2(x, y, z_0)$ and line integrated electron density $\int n_e^2(x, y, z_0) dy$ profiles at $z_0 = 0, z_0 = 2z_s/5, z_0 = 4z_s/5$.

参考文献

- [1] T. Takahashi, et al., "Multichannel optical diagnostic system for field-reversed configuration plasmas", Review of Scientific Instruments **75**, 5205 (2004)
- [2] L. Steinhauer, et al., "Modeling of field-reversed configuration experiment with large safety factor" Physics of Plasma **13** 056119 (2006)