

ポロイダル平面における高エネルギー粒子電流の分布を考慮した
軸対称平衡解析

**Axisymmetric equilibrium analysis
considering distribution of energetic particle current in the poloidal plane**

藤田隆明
Takaaki Fujita

名大院工
Nagoya Univ

磁気面からずれたドリフト軌道を描く高エネルギー粒子が担う電流を含む平衡計算において、磁気面平均した高エネルギー粒子電流を通常のプラズマ電流に加えて計算する方法が一般的であるが、実際には磁気面上での高エネルギー粒子電流のポロイダル方向分布は通常のプラズマ電流とは異なる。また、高エネルギー粒子電流は最外殻磁気面より外にも存在しうる。本研究では、高エネルギー粒子の軌道計算と高エネルギー粒子電流が作る磁場を含めたバルクプラズマの平衡計算を反復して実施することで、高エネルギー粒子電流を含む軸対称平衡を自己無撞着に解き、ポロイダル平面における高エネルギー粒子電流分布の効果を調べる。

高エネルギー粒子電流密度 $\mathbf{j}_f$ による磁場を考慮したバルクプラズマの電磁流体力学平衡は

$$\mathbf{j}_p \times \mathbf{B} = \nabla p$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{j}_p$ はバルクプラズマの電流密度、 p はバルクプラズマの圧力、 $\mathbf{B}$ は全磁場である。 $\mathbf{B}$ に対応するポロイダル磁束関数は

$$\psi = \psi_p + \psi_f + \psi_{ex}$$

で与えられる。ここで、 ψ_p 、 ψ_f 、 ψ_{ex} は、それぞれ、 $\mathbf{j}_p$ 、 $\mathbf{j}_f$ 、外部コイル電流によるポロイダル磁束関数である。簡単のため、 $\mathbf{j}_f$ によるトロイダル磁束の変化は無視する。

ψ_p はGrad-Shafranov方程式

$$\Delta^* \psi_p = \frac{\partial^2 \psi_p}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi_p}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi_p}{\partial Z^2} = -\mu_0 R j_{\phi p}$$

$$j_{\phi p}(R, \psi) = R \frac{dp}{d\psi} + \frac{F}{\mu_0 R} \frac{dF}{d\psi}$$

を解いて求められる。初期値として ψ_f のない場合あるいは仮定した ψ_f での解 ψ_p を求める。

高エネルギー粒子のクーロン衝突による減速、ピッチ角散乱は無視し、運動エネルギーと磁気モーメントが保存されるとする。軸対称磁場中の荷電粒子（質量 m 、電荷 q ）の運動では正

準角運動量

$$P_\phi = mRv_\phi + q\psi$$

が保存されることを利用し、Grad-Shafranov方程式を解くRZ格子において P_ϕ の等高線を追跡することで高エネルギー粒子の案内中心の軌道を求める。その際、磁気モーメントの保存による粒子の磁力線方向速度 $v_\parallel$ の変化を計算し、 $v_\phi = v_\parallel B_\phi / B$ の関係より v_ϕ に変換する。計算例を図1に示す。

高エネルギー粒子の総数（蓄積エネルギー）を既知として、質量保存則から軌道上の粒子密度分布を求めて $\mathbf{j}_f$ のトロイダル成分 $j_{\phi f}(R, Z)$ を求め、

$$\Delta^* \psi_f = -\mu_0 R j_{\phi f}$$

を解いて ψ_f が求められる。この ψ_f を用いてGrad-Shafranov方程式を解き直す。これを繰り返すことで高エネルギー粒子電流を含む自己無撞着な軸対称平衡が求められる。

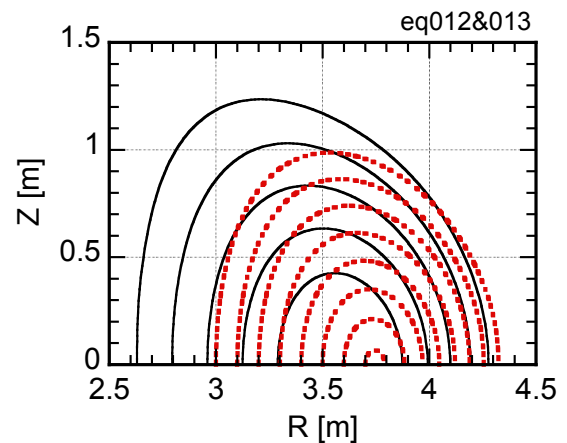


図1 高エネルギー重水素イオンの案内中心軌道の計算例。プラズマ電流 = 1 MA、トロイダル磁場 = 3.67 T、中心安全係数 = 4、粒子エネルギー = 1 MeV。ピッチ角 = 0°（粒子速度は磁力線に平行でプラズマ電流と同じ向き）。細実線は磁気面、太破線は粒子軌道。