

統合コード TASK による炉心プラズマ立ち上げシミュレーション
 Burning plasma start-up simulation by the integrated code TASK

永井一輝, 福山淳, 奴賀秀男

Kazuki NAGAI, Atsushi FUKUYAMA, Hideo NUGA

京都大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

核融合炉心プラズマ立ち上げ時における NBI および ICRF による外部加熱から α 粒子加熱への移行過程を定量的に解析するためには、高速イオンの生成と核融合反応率を正確に評価することが必要である。速度分布関数解析コード TASK/FP による燃焼プラズマ立ち上げシミュレーションを高速化するため、核融合反応率の計算に Legendre 展開を新たに導入し、ITER プラズマ立ち上げ時の時間発展を解析した。

核融合反応の反応率を計算するために、運動量空間における積分を行う必要がある。各粒子種 a, b について、運動量 p_a, p_b 、ピッチ角 θ_a, θ_b 、運動量分布関数 $f_a(p_a, \theta_a), f_b(p_b, \theta_b)$ 、核融合反応断面積 σ_T 、粒子の相対速度 v' を用いると、核融合反応率は、

$$R = \iint f_a(p_a, \theta_a) f_b(p_b, \theta_b) \sigma_T v' d\mathbf{p}_a d\mathbf{p}_b \quad (1)$$

$$= 4\pi^2 \iiint f_a(p_a, \theta_a) f_b(p_b, \theta_b) \langle \sigma_T v' \rangle(p_a, p_b, \theta_a, \theta_b) p_a^2 p_b^2 \sin \theta_a \sin \theta_b dp_a dp_b d\theta_a d\theta_b \quad (2)$$

と表される。 $\langle \sigma_T v' \rangle(p_a, p_b, \theta_a, \theta_b)$ は、 $\sigma_T v'$ をジャイロ位相 ϕ_a, ϕ_b について平均化したものである。これまでの TASK/FP では、運動量空間における 4 次元積分を数値的に行っていたため、核融合反応率の計算に、運動量分布関数の時間発展と同程度の計算時間を要していた。本研究では、これを高速化するために、まず、Legendre 関数 $P_l(\cos \theta)$ を用いて、

$$f_a(p, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} f^{(al)}(p) P_l(\cos \theta) \quad (3)$$

$$\langle \sigma_T v' \rangle_{lk}(p_a, p_b) = \frac{2l+1}{2} \frac{2k+1}{2} \iint \langle \sigma_T v' \rangle(p_a, p_b, \theta_a, \theta_b) P_l(\cos \theta_a) P_k(\cos \theta_b) \sin \theta_a \sin \theta_b d\theta_a d\theta_b \quad (4)$$

のように、運動量分布関数と $\langle \sigma_T v' \rangle$ を Legendre 展開する。これによって、Legendre 関数の直交性を用いることにより核融合反応率を、

$$R = 4\pi^2 \sum_l \sum_k \frac{2}{2l+1} \frac{2}{2k+1} \iint dp_a dp_b f_{al}(p_a) f_{bk}(p_b) \langle \sigma_T v' \rangle_{lk}(p_a, p_b) p_a^2 p_b^2 \quad (5)$$

と表すことができる。この表式を用いることにより、 θ 方向 1 次元の積分で、 f_{al}, f_{bk} を求め、 p_a, p_b の 2 次元の積分により R を求めることができるので、核融合反応率の計算を高速化できる。

これを行うモジュールを実装し、ITER プラズマの立ち上げシミュレーションを行った結果を報告する。