

原型炉不純物輸送シミュレーションの精度改善を実現する拡張熱力モデル開発

Development of an extended thermal force model to improve impurity transport simulation in DEMO plasmas

本間裕貴、星野一生¹、徳永晋介、朝倉伸幸、坂本宜照、飛田健次、
原型炉設計合同特別チーム

Yuki HOMMA, K. Hoshino¹, S. Tokunaga, N. Asakura, Y. Sakamoto, K. Tobita and
Joint Special Design Team for Fusion DEMO

量研、¹慶大理工
QST、¹Keio Univ.

本研究の目的はプラズマ衝突度の効果を考慮できる拡張熱力モデルを開発し、衝突度が不純物輸送へ及ぼす影響を評価することである。シミュレーションの結果、低衝突度の原型炉トカマクSOL上流では不純物混入が減少し、コアプラズマ周辺部の燃料希釈が抑制されることが示された。

プラズマ中の磁力線に沿った不純物輸送は背景イオンとのクーロン衝突に由来する摩擦力と、イオン温度勾配 (i.e.熱流束) に起因する熱力に大きく影響される。熱力は一般に高温のSOL上流へ向かって働く。これまでの原型炉シミュレーションでは高温のSOL上流で不純物密度の増加傾向が見られた。原因の一つとして、プラズマ衝突度の低下による運動論効果が考慮されず過大評価された熱力が考えられた。

不純物イオンへの熱力 F^{VT} はプラズマイオン熱伝導流束 \mathbf{q} に比例する ($F^{VT} \propto \mathbf{q}$)。衝突度を考慮した熱流束式を用いれば、熱力に衝突度効果を導入できる。本研究では次の熱流束式を用いる: Free streaming エネルギー流束の定数倍 $\alpha^{FL} n_i T_i v_{thi}$ を上限に熱流束を制限する熱流束リミタモデル

$$\mathbf{q}_{\parallel}^{FL} := \left(1 + \frac{|\kappa_i \nabla_{\parallel} T_i|}{\alpha^{FL} n_i T_i v_{thi}} \right)^{-1} \times (-\kappa_i \nabla_{\parallel} T_i)$$

図1にリミタモデルを用いた場合の熱力の大きさと、プラズマイオン密度すなわち衝突度との関係を示す。熱流束リミタ無しの場合ではプラズマ衝突度の変動が考慮されない一方、リミタモデルを用いた熱力は衝突度の減少に従って減衰する。ただし、リミタモデルが含む数係数 α^{FL} に起因する不確実性が含まれる。

今回は新たに、この熱流束リミタモデルを用いた拡張熱力モデルを統合SOLダイバータコードSONIC[1]に実装した。プラズマ衝突度の減少が熱力と不純物輸送へ及ぼす影響を評価するため、原型炉設計合同特別チームで検討が進め

られている標準的な原型炉プラズマ[2]を想定したシミュレーションを行った。

拡張熱力モデルを用いた場合、特に温度の高いSOL領域において熱力が減衰し、衝突度効果を考慮しない場合 (図2左) と比較して、SOL上流の放射不純物(Ar)密度が大きく減少した (図2右)。熱力への衝突度効果が、これまでのシミュレーションで見られた、SOL上流不純物密度の増加傾向を抑えることが示された。

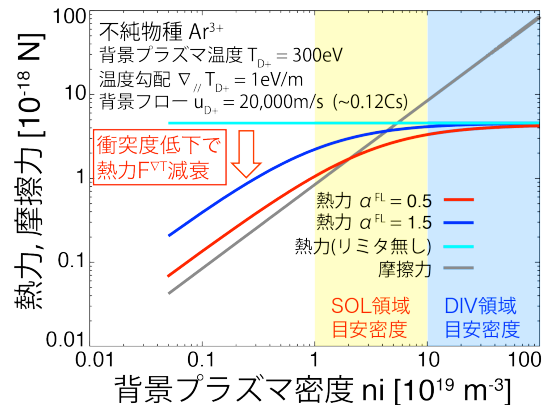


図1. 背景プラズマ密度に対する熱力の変化

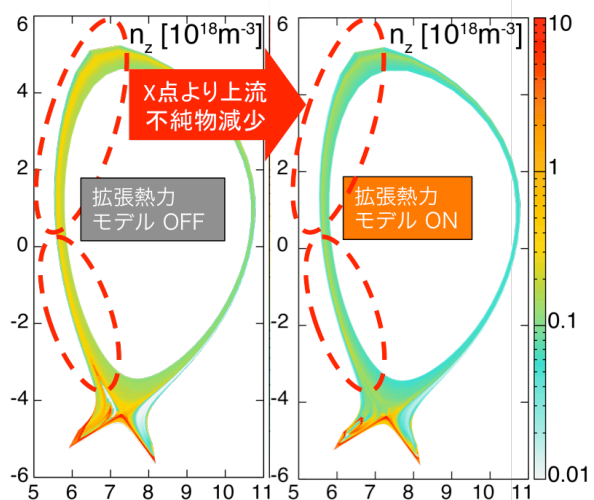


図2. Ar不純物密度分布

[1] H. Kawashima, et al., *PFR* 1 (2006) 031; [2] N. Asakura, K. Hoshino, S. Suzuki et al., *Nucl. Fusion* 57 (2017) 126050.