

研究課題：JT-60におけるタングステン不純物の発生と蓄積過程のシミュレーション研究

研究代表者：畑山明聖（慶應義塾大学）

原子力機構担当者：井手俊介

研究協力者：本間裕貴（慶應義塾大学）， 矢本昌平（慶應義塾大学）， 藤間光徳（慶應義塾大学）， 澤田悠（慶應義塾大学）， 星野一生（原子力機構）， 清水勝宏（原子力機構）， 仲野友英（原子力機構）， 滝塚知典（大阪大学）， 上田良夫（大阪大学）， 福田武司（大阪大学）

研究期間：平成24年度-26年度

1. 研究目的・意義

ITER およびそれに続く原型炉では、タングステンがダイバータ板および第一壁候補材になっている。したがって、タングステンのような高Z材料の周辺プラズマでの輸送過程およびコアプラズマへの混入過程の理解とその制御手法の確立は、ITER および原型炉設計、ひいては、核融合実用化にとって必須の課題と考えられる。

そこで、本研究では、JT-60SAでのダイバータ板、第一壁のタングステン化を想定し、i) JT-60SAでの今後の実験・運転計画に資すること、及び、ii) タングステン実験解析のためのモデリング基盤の構築を目的とし、主として、以下の2点について検討を進めてきた：(1) 高Z不純物であるタングステン輸送シミュレーションモデルの高度化、(2) (1)に基くJT-60U体系での輸送シミュレーションの実施とJT-60SA実験におけるコアへの不純物浸入及びコアでの不純物蓄積過程に対する知見の蓄積。

2. 研究成果

(1) タングステン輸送シミュレーションモデルの高度化（論文1, 3, 5, 6, 7, 9）

従来の運動論的不純物輸送シミュレーションコードのほとんどが、旋回中心近似に基づいている。我々はタングステンなど高Z不純物で重要となるプロンプト・リディポジションやセルフスパッタリングの効果をより正しく評価するために、旋回中心近似を用いない運動論的粒子コード（IMPGYRO）の開発を行ってきた。

さらに、本研究では背景プラズマと不純物とのクーロン衝突をモンテカルロ2体衝突モデルにより模擬する新しい不純物輸送モデルの開発を進めてきた。モデルの特徴は、背景プラズマに温度勾配及び密度勾配が存在する場合に生じる背景プラズマの速度分布関数のゆがみを考慮し、モンテカルロ2体衝突モデルを適用した点にある。この新しいモデルにより、以下の効果を正確に考慮することが可能となった：1) 磁力線平行方向の熱力、2) 磁力線を横切る方向の古典/新古典輸送の効果。

前者1)は、不純物粒子をスクレイプ・オフ層（SOL）上流側に輸送する効果として重要である。また、後者2)の効果は、コアの不純物輸送解析では、温度遮蔽効果（TSE）及びインワードピンチ効果（IWP）として議論されてきたが、SOL/ダイバータプラズマを対象とした従来の運動論的不純物輸送解析では全く無視されてきた。これらの効果の理解、特に、セパトリックス近傍の急峻な温度・密度勾配が存在する領域でのこれらの効果の体系的な理解は、コアへの不純物浸入を考える上で極めて重要と考えられる。

我々は、TSE および IWP による輸送速度が理論的に計算可能なスラブ体系、円形トカマク体系に開発した運動論的テスト粒子モデルを適用し、テストシミュレーションを行い、段階的にその妥当性の検証を行ってきた。その結果、いわゆる Pfirsch-Schluter 領域における輸送係数および速度の理論値とシミュレーション結果は、良く一致した。さらに、不純物電荷数、安全係数、不純物の種類、背景プラズマの温度・密度の特性長など、多数のパラメータを幅広く変化させ、その依存性が正しく再現されることを確かめた。現在、さらに衝突領域をプラトー領域、バナナ領域へと拡張している。

以上のように、本研究のモデル高度化により、1) 磁力線平行方向、及び、2) 磁力線を横切る方向、いずれについても、従来に比較して、より正確な輸送計算が可能な新しい不純物輸送シミュレーションモデルの構築が、ほぼ、終了した。JT-60SA など将来装置の周辺プラズマに対して、コアへの不純物輸送の体系的な理解、特に、従来、SOL/ダイバータプラズマの運動論的シミュレーションでは、全く考慮されてこなかった磁力線垂直方向の古典・新古典輸送による不純物輸送の体系的な理解を行うためのモデリング基盤が、ほぼ整備されたと考えられる。

(2) JT-60U 体系での輸送シミュレーション（論文2, 4, 8, 10）

成果(1)に基づき、IMPGYRO コードに磁力線平行方向の運動論的熱力の効果を導入し、JT-60U 体系での不純物輸送シミュレーションを行った。JT-60U のタングスタニル実験(#49540)における磁場

配位を対象とし、SOL/ダイバータプラズマ-中性粒子輸送コード SOLPS を用いて背景プラズマ分布の計算を行った。計算にあたっては、背景プラズマの特徴的な運転領域である高リサイクリング状態、部分デタッチ状態を得るために、背景プラズマのコア境界密度を $n_{D^+} = 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とし、以下の2種類の入力パワー(Q_i, Q_e : 各々イオンおよび電子系への入力パワー)について、それぞれ計算を行った。

Case A : $Q_e = Q_i = 5 \text{ MW}$ (高リサイクリング状態)

Case B : $Q_e = Q_i = 1.5 \text{ MW}$ (部分デタッチ状態)

得られた2種類の典型的な背景プラズマ状態に対して、IMPGYRO コードによる不純物輸送シミュレーションを行った。JT-60U タングステンタイル実験でのタイル位置を想定し、外側ダイバータ板のセパトリスより外側 1.4 cm の点からタングステン不純物を発生させた。さらに詳細な計算条件は、添付成果リストの論文 10 に示した。

Case A, Case B の背景プラズマに対する不純物密度分布の計算結果を Fig. 1, Fig. 2 にそれぞれ示す。いずれも、JT-60U のポロイダル断面における2次元空間分布を示している。Case A の背景プラズマが高リサイクリング状態である時は、外側ダイバータ板から発生した不純物粒子は、SOL 上流へと輸送され、コアへと浸入した。一方、Case B の部分デタッチ状態では、不純物粒子はダイバータ板近傍に留まり、コアへの浸入はみられなかった。このため、Case B の場合は、ダイバータ板およびバッフル板近傍のプラズマ領域を拡大して示している。

これら結果の違いについて、外側ダイバータ板近傍での熱力・摩擦力のバランスが大きく関連していることがわかった。Case A では外側ダイバータ板近傍に急峻な背景イオン温度勾配(10 eV/m 以上)が存在し、熱力が強く働いた結果、不純物粒子は SOL 上流へと輸送された。一方で、Case B では、Case A に比べて外側ダイバータ板近傍での背景イオン温度勾配が 4 eV/m 程度と緩やかで、熱力よりも摩擦力が強く働き、結果として板近傍に不純物粒子が滞留した。

以上のことから、コアへのタングステン不純物の浸入量は、ダイバータプラズマの運転モードに大きく依存することが示唆される。より具体的には、ダイバータプラズマが低温の部分デタッチ状態にある場合には、タングステン不純物が発生したとしても、コアへの浸入は問題にならないと考えられる。一方で、ダイバータプラズマが比較的高温な高リサイクリング状態にあり、急峻な温度勾配がダイバータ板近傍に存在する場合には、タングステン不純物のコアへの浸入が懸念されるため、より詳細な解析が必要である。

今後、成果(1)に基づき、IMPGYRO コードへ、さらに、磁力線垂直方向の古典・新古典輸送モデルも導入し、実験との詳細な比較を進めていく。

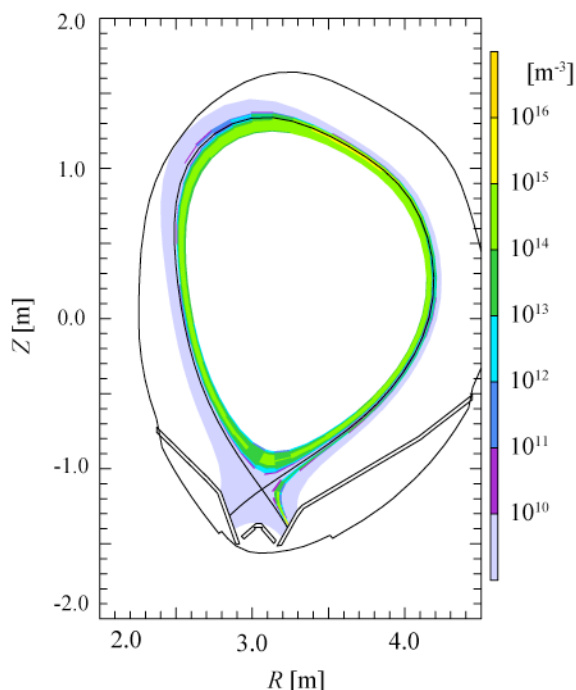


Fig. 1 高リサイクリング状態での
タングステン不純物密度分布

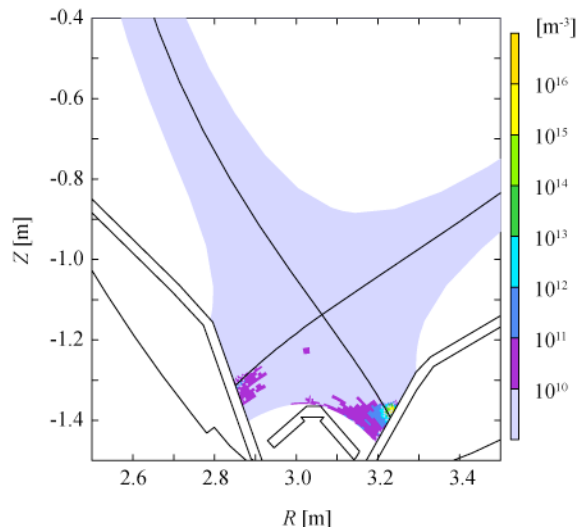


Fig. 2 部分デタッチ状態での
タングステン不純物密度分布

全研究期間中の成果リスト（口頭発表含む）

論文

1. “Numerical modeling of thermal force in a plasma for test-ion transport simulation based upon Monte Carlo Binary Collision Model”, Y. Homma and A. Hatayama, *Journal of Computational Physics*, **231** (2012) 3211-3227. 査読有
2. “Development of coupled IMPGYRO-SOLPS codes for analyzing tokamak plasmas with tungsten impurities”, M. Toma, X. Bonnin, K. Hoshino, A. Hatayama, R. Schneider, D.P. Coster, *Contrib. Plasma Phys.*, **52** (2012) 450-454. 査読有
3. “Test Simulations of the Kinetic Model for the Thermal Force based on the Monte Carlo Binary Collision Model”, Y. Homma and A. Hatayama, *Contrib. Plasma Phys.*, **52** (2012) 505-511. 査読有
4. “Comparison of kinetic and fluid models for tungsten impurity transport using IMPGYRO and SOLPS”, M. Toma, X. Bonnin, Y. Sawada, Y. Homma, A. Hatayama, K. Hoshino, D. Coster, R. Schneider, *Journal of Nuclear Materials*, **438** (2013) S620-S622. 査読有
5. “Modeling of Impurity Classical/Neoclassical Transport by Monte-Carlo Binary Collision Model”, Y. Sawada, M. Toma, Y. Homma, W. Sato, T. Furuta, S. Yamamoto, and A. Hatayama, *Transactions of Fusion Science and Technology*, **63** (2013)1T, 352-354. 査読有
6. “Numerical modeling of the thermal force in a plasma for test-ion transport simulation based on a Monte Carlo Binary Collision Model (II) -- Thermal forces due to temperature gradients parallel and perpendicular to the magnetic field --”, Y. Homma and A. Hatayama, *Journal of Computational Physics*, **250** (2013) 206-223, 査読有
7. “Numerical modeling of the thermal force for the kinetic test-ion transport simulation based on the Fokker-Planck collision operator”, Y. Homma and A. Hatayama, *Contribution to Plasma Physics*, **54** (2014) 394-398. 査読有
8. “Systematic Study of Tungsten Impurity Transport in Representative Regimes of Divertor Plasma”, S. Yamoto, K. Hoshino, M. Toma, Y. Homma, A. Hatayama, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider, *Contribution to Plasma Physics*, **54** (2014) 421-425. 査読有
9. “Test Simulations of Temperature Screening Effect by using Kinetic Monte Carlo Model”, Y. Homma and A. Hatayama, Y. Sawada, S. Yamoto, *Plasma and Fusion Research*, **9**(2014)140395. 査読有
10. “Effects of Background Plasma Characteristics on Tungsten Impurity Transport in the SOL/Divertor Region using IMPGYRO code”, S. Yamoto, Y. Homma, K. Hoshino, Y. Sawada, A. Hatayama, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider, *Journal of Nuclear Materials*, (2014 in press). 査読有

口頭発表

1. 本間裕貴, 畑山明聖, 澤田悠, 矢本昌平,
「モンテカルロ二体衝突モデルを用いた新しい熱力モデルによる核融合プラズマ中のテスト不純物粒子輸送シミュレーション」,
第30回プラズマ核融合学会年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013年.
(招待講演)
2. “Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas”, Y. Homma, A. Hatayama, *The 2nd IFERC-CSC Review Meeting*, (International Fusion Energy Research Center, Rokkasho, Aomori, Japan, 2014. (依頼講演)
3. 本間裕貴, 畑山明聖,
「核融合プラズマ中の不純物輸送に関する熱力の数値モデリング」,
平成25年度 核融合科学研究所一般共同研究理論B 「原型炉に向けた周辺・炉心プラズマ統合モデリングによるダイバータ熱・粒子制御研究」研究作業会,
核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2014年.
4. 矢本昌平, 本間裕貴, 畑山明聖, 星野一生, Xavier Bonnin, David Coster, Ralf Schneider,
“Systematic Study of Tungsten Impurity Transport in Representative Regimes of Divertor Plasma”,

平成 25 年度 核融合科学研究所一般共同研究理論 B 「原型炉に向けた周辺・炉心プラズマ統合モデリングによるダイバータ熱・粒子制御研究」研究作業会,
核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2014 年.

5. 畑山明聖

「ダイバータと負イオン源のマルチスケールシミュレーション研究」,
シンポジウム V : 発電実証に向けた核融合研究の進展 III
第 10 回核融合エネルギー連合講演会—発電実証に向けた核融合研究の進展と拡がり—
つくば国際会議場,茨城県つくば市, 2014 年. (依頼講演)

6. “Physics of SOL/divertor plasmas in magnetic fusion”, A. Hatayama, Y. Homma,
S. Yamoto, H. Inoue, K. Takahara, T. Shibata, Plasma2014, 朱鷺メッセ, Niigata,
2014 年. (依頼講演)

国際会議

1. “Modeling of impurity classical/neoclassical transport by Monte-Carlo Binary Collision”, Y. Sawada, M. Toma, Y. Homma, W. Sato, T. Furuta, S. Yamoto, A. Hatayama, Proc. Of OS2012 & PMIF2012, Tukuba, Japan , 2012 .
2. “Numerical modeling of the thermal force for the kinetic test-ion transport simulation based on the Fokker-Planck collision operator”, Y. Homma and A. Hatayama, 14th *International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices*, Cracow, Poland, 2013.
3. “Systematic Study of Tungsten Impurity Transport in Representative Regimes of Divertor Plasma”, S. Yamoto, K. Hoshino, M. Toma, Y. Homma, A. Hatayama, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider, 14th *International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices*, Cracow, Poland, 2013.
4. “Effects of Background Plasma Characteristics on Tungsten Impurity Transport in the SOL/Divertor Region using IMPGYRO code”, S. Yamoto, Y. Homma, K. Hoshino, Y. Sawada, A. Hatayama, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider, 21th PSI, Kanazawa, Japan, 2014 .
5. “Kinetic Modeling of Classical and Neo-Classical Transport for High-Z Impurities in Fusion SOL/Divertor Plasmas Using Binary Collision Method”, Y. Homma, H. Inoue, Y. Sawada, A. Hatayama, FEC-2014, 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russian Federation, 2014.

国内会議

1. 澤田悠, 本間裕貴, 井上春如, 矢本昌平, 畑山明聖,
「モンテカルロ 2 体衝突モデルによるトカマクプラズマ中での不純物古典/新古典輸送のモデリング」
第 30 回プラズマ核融合学会年会, 東京工業大学, 大岡山キャンパス, 2013 年.
2. 矢本昌平, 星野一生, 本間裕貴, 畑山明聖, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider,
「3 つの特徴的なダイバータプラズマ温度領域でのタングステン不純物輸送の系統的評価」
第 30 回プラズマ核融合学会年会, 東京工業大学, 大岡山キャンパス, 2013 年.
3. 矢本昌平, 本間裕貴, 星野一生, 澤田悠, 畑山明聖, X. Bonnin, D. Coster, R. Schneider,
「核融合境界層プラズマ中の不純物に働く熱力のモデリング-熱力の運動論的モデルと流体近似モデルの比較」
エネルギー連合講演会, つくば, 2014 年.
4. 本間裕貴, 矢本昌平, 井上春如, 畑山明聖,
「トカマク型核融合炉における不純物の温度遮蔽効果及びインワードピンチの新古典輸送モデリング」
Plasma2014, 新潟, 朱鷺メッセ, 2014 年.
5. 井上春如, 本間裕貴, 矢本昌平, 高原啓輔,
「トカマク型核融合炉における不純物の新古典輸送のモデリング」
Plasma2014, 新潟, 朱鷺メッセ, 2014 年.