

研究課題：トカマク炉心プラズマにおける不純物輸送、鋸歯状振動、電流ホール平衡に関する研究  
 研究代表者：藤田隆明（名古屋大学）  
 量研機構担当者：林 伸彦  
 研究協力者：清水友介、坂井亮介、林祐太、細川海人、岡本敦（以上名古屋大学）  
 星野一生、仲野友英、本多充、濱松清隆（以上量研機構）

研究期間：平成26年度-28年度

## 1. 研究目的・意義

核融合燃焼プラズマの解析のためには、物理モデルによるシミュレーションが重要な手段となる。そこで本共同研究では、名古屋大学の統合輸送コード TOTAL によるシミュレーション結果と JT-60U 実験結果とを比較検討して、モデルや解析の妥当性を検討し、解析を発展させることを目的とする。特に、核燃焼プラズマ中の不純物輸送、鋸歯状振動、電流ホール平衡に関するモデル開発・改良、解析を進める。

## 2. 研究成果

### 2.1 不純物輸送

量研機構の星野らによって提唱された高 Z イオンに対する PHZ ピンチ、 $E_r$  ピンチモデルについて、TOTAL への実装、モデルの改良及び JT-60U 実験データの解析を行なった。平成 26 年度には、従来のモデルを TOTAL コードへ実装し JT-60U 実験の解析を行った[4, 7, 9, 12]。 $E_r$  ピンチについてはその導出の過程で用いられている条件を満たさず評価できなかったため PHZ ピンチと新古典輸送、異常拡散を考慮した解析を行ったところ、反プラズマ電流方向のトロイダル回転の増大とともにタングステン蓄積（プラズマ中心における電子密度に対するタングステンイオン密度の比）が増大する傾向は再現できたが、その増加率については実験より小さい値となった。

平成 27 年度には、PHZ ピンチ、 $E_r$  ピンチモデルの改良を行なった[5, 15, 16, 19]。従来のモデルでは、高 Z イオンのトロイダル回転速度がその熱速度より十分大きい状況を想定し、全て通過粒子としていたが、実際にはバルクプラズマ（燃料イオン）がトロイダル回転しているため遠心力が作用し捕捉粒子が生じる。円形断面平衡において遠心力の効果を取り入れた旋回中心の運動方程式を数値的に解き、それに基づいて PHZ ピンチ速度及び  $E_r$  ピンチ速度を計算するコードを開発した。熱速度を有する特定のピッチ角のイオンの軌道の磁気面からのずれと大径方向の非対称性（歪み）から PHZ ピンチ、 $E_r$  ピンチを求めそれをピッチ角に対して平均することで、各小径方向位置での高 Z イオンの PHZ ピンチ速度  $\langle V_{PHZ} \rangle$ 、 $E_r$  ピンチ速度  $\langle V_{Er} \rangle$  を求める。JT-60U の実験データを用いて計算したところ、(i) 捕捉粒子の  $V_{PHZ}$ 、 $V_{Er}$  は概ね通過粒子のそれらより大きい、(ii) トロイダル回転速度の増大とともに捕捉粒子が増え、 $\langle V_{PHZ} \rangle$ 、 $\langle V_{Er} \rangle$  が大きくなること分かった。

平成 28 年度には、上記軌道計算コードの修正・改良を行うとともに、TOTAL コードへ導入した[24]。 $\langle V_{PHZ} \rangle$ 、 $\langle V_{Er} \rangle$  の計算のためには多数の粒子に対する軌道計算が必要となるが、現在のところバルクプラズマは固定として不純物の輸送のみを解いているので、軌道計算は輸送計算の前に 1 回行なえば良い。計算により得られたタングステン蓄積のトロイダル回転依存性を図 1 に示す。軌道

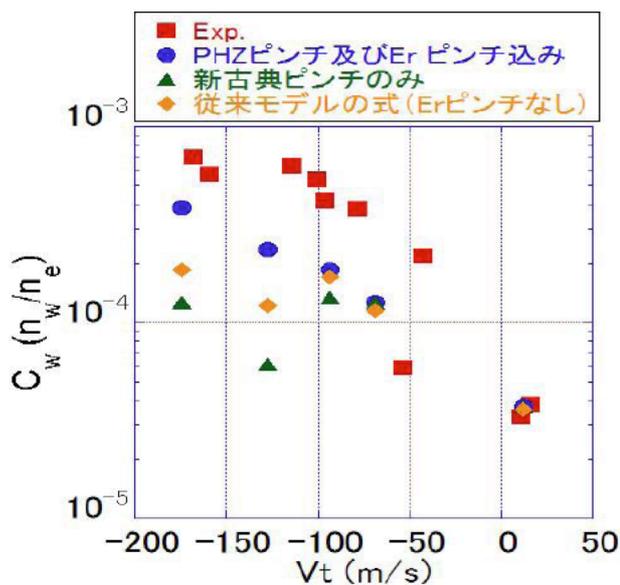


図1 タングステン蓄積のプラズマトロイダル回転依存性。四角は実験値、三角は新古典理論のみの場合の計算値、菱形は従来モデルでの計算値、丸は改良モデルでの計算値を示す。

計算に基づく $\langle V_{PHZ} \rangle$ は従来のモデルより小さくなったが、トロイダル回転が大きい場合には、従来評価できず無視していた $\langle V_{Er} \rangle$ が $\langle V_{PHZ} \rangle$ より大きくなり、その結果、タングステン蓄積が大きくなり実験値に近づいた。ただし、今回の解析では規格化小半径  $r/a$  が 0.1 より小さい領域では軌道計算が不可能となったので  $r/a < 0.1$  の領域では  $r/a = 0.1$  でのピンチ速度が  $r/a$  に比例するとして内挿している。軌道計算が不可能となった原因は、軌道の磁気面からのずれが軌道小半径より小さいという仮定が満たされなくなったため、そのような場合も計算できるよう軌道計算コードを改良する必要がある。また、今回の計算では通過粒子に対して求められた  $V_{Er}$  の式を捕捉粒子に対しても適用しているが、それが成り立つかどうかは別途確認する必要がある。そのため、軌道計算にクーロン衝突の効果をモンテカルロ法で取り入れたコードを作成し、数値的に  $V_{Er}$  を評価してモデルの式と比較することを現在行なっているところである。

## 2. 2 鋸歯状振動

平成 26 年度に TOTAL コードに実装した鋸歯状振動モデル (Porcelli モデル) を用いて、局所的な電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD) による鋸歯状振動周期の短縮による新古典テアリングモード (NTM) の安定化効果について評価した [3, 10, 11]。ITER では ECCD なしでも鋸歯状振動  $\square$ NTM は予想される  $\square$ N より大きく鋸歯状崩壊による NTM は発生しない領域であるが、ECCD に  $\square$ NTM が上昇し、さらに裕度が増えることが示された。

## 2. 3 電流ホール平衡

電流ホールプラズマでは中性粒子ビーム (NB) 入射高速イオンは磁気面から大きくずれた軌道を描くが、通常の平衡解析ではその効果は考慮されていない。平成 28 年度に TOTAL コードの MHD 平衡計算部に高エネルギー粒子の軌道計算ルーチンを組み込み、磁気面からはずれた軌道を描く高エネルギー粒子が担う電流を考慮した平衡計算を行なえるようにし初期的な結果を得た [20, 25]。高エネルギー粒子の運動エネルギーと磁気モーメントが保存されるとして正準角運動量の保存を利用しその案内中心の軌道を求める。軌道上の粒子密度・ピッチ角の分布から高エネルギー粒子の電流密度分布を求め、それによるポロイダル磁束をバルクプラズマの平衡計算に反映させる。これを繰り返すことで自己無撞着な解を得る。最外殻磁気面の形状及び全トロイダル電流 (1MA) を固定して 1MeV の重水素イオン電流がない場合と 0.4MA の場合の平衡を求めた例を図 2 に示す。重水素イオン電流が作る磁場の効果で磁気軸位置が内側に移動していることが分かる。この計算では弱磁気シア配位としているが、今後、対象を電流ホール配位へと拡張していく。

## 3. まとめと今後の展望

不純物輸送研究においては PHZ ピンチモデルと  $E_r$  ピンチモデルの改良を行なった。鋸歯状振動研究では ITER プラズマの解析を行なったが、JT-60U 実験データとの比較までには至らなかった。電流ホール平衡研究においては高エネルギー粒子が担う電流を考慮した平衡計算を開始した。

今後は、モンテカルロ計算による  $E_r$  ピンチの評価を行ない、そのモデル化および TOTAL コードへの導入を行なう。また、高エネルギー粒子の電流を考慮した平衡計算コードの開発を進めて電流ホール平衡の解析を行なう。さらに、電流分布制御手法の研究に向けて、平成 28 年度に開始した NB 駆動電流計算モジュールの開発 [22] を進め、TOTAL コードへ実装する。

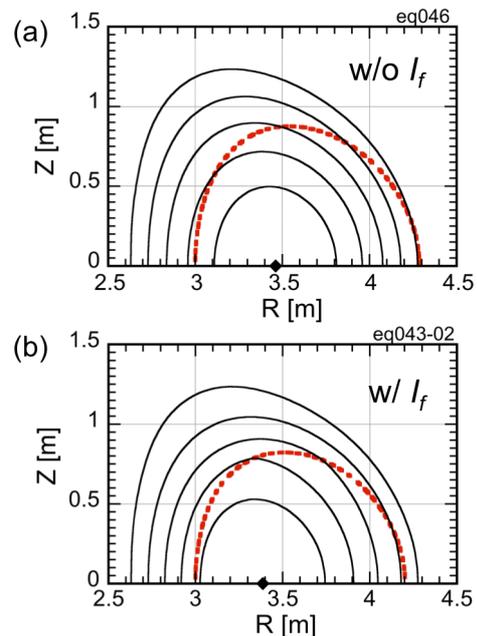


図 2 高速イオン電流を含む平衡。(a)高速イオン電流=0、熱化プラズマ電流=1MA、(b)高速イオン電流=0.4MA、熱化プラズマ電流=0.6MA。実線はポロイダル磁束の等高線、菱形は磁気軸、破線は高速イオンの軌道。

#### 4. 成果リスト

##### 論文

- [1] H. Natsume, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yamazaki, "Simulation of Sawtooth Oscillation in Burning Plasma", Plasma and Fusion Research Vol.9, 3403048 (2014).
- [2] T. Yamakami, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yamazaki, "Effect of Density Control and Impurity Transport on Internal Transport Barrier Formation in Tokamak Plasma", Plasma and Fusion Research Vol.9, 3403091 (2014).
- [3] H. Natsume, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yamazaki, "Simulation of Sawtooth Period Control in Tokamak Plasma", Plasma and Fusion Research Volume 10 (2015) 3403051 (4pp)
- [4] Y. Shimizu, T. Fujita, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", Plasma and Fusion Research Volume 10 (2015) 3403062 (4pp).
- [5] Y. Shimizu, T. Fujita, A. Okamoto, H. Arimoto, N. Hayashi, K. Hoshino, T. Nakano, M. Honda, "Particle pinch model of passing/trapped high-Z impurity with centrifugal force effect ", Plasma and Fusion Research Volume 11 (2016) 2403082 (4pp).

##### 学会発表

- [6] 夏目裕基, 藤田隆明, 有本英樹, 山崎耕造, 「トカマクプラズマにおける鋸歯状振動の磁気シア依存性の解析」, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会 (茨城県つくば市, 2014 年 6 月 19 日~20 日) ポスター 20-011
- [7] 清水友介, 藤田隆明, 有本英樹, 仲野友英, 星野一生, 林伸彦, 「JT -60U プラズマにおけるタンゲステン輸送の解析」, 同上 ポスター 20-012
- [8] 藤田隆明, 濱松清隆, 林伸彦, 「任意の軸対称平衡に適用できる NBCD 高速解析法」, 同上 ポスター 20-013
- [9] Y.Shimizu, T.Fujita, H.Arimoto, T.Nakano, K.Hoshino, N.Hayashi, "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", 24th International Toki Conference (Toki, Nov. 4-7, 2014), Poster P4-3
- [10] H. Natsume, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yamazaki, "Simulation on the sawtooth period control in Tokamak plasma", 24th International Toki Conference (Toki, Nov. 4-7, 2014), Poster P4-77
- [11] H. Natsume, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yamazaki, "Effects of the Sawtooth Period Control in Tokamak Plasma", Plasma Conference 2014 (Niigata, Nov. 18-21, 2014), Poster 20PB-068
- [12] Y.Shimizu, T.Fujita, H.Arimoto, T.Nakano, K.Hoshino, N.Hayashi "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", Plasma Conference 2014 (Niigata, Nov. 18-21, 2014), Poster 20PB-080
- [13] 藤田隆明, 清水友介, 夏目裕基, 「TOTAL コードによるトカマクプラズマにおけるタンゲステン輸送と鋸歯状振動制御のシミュレーション」, 第 12 回統合コード研究会 (九州大学春日キャンパス, 2014 年 12 月 11 日~12 日) 口頭
- [14] 杉山大志, 藤田隆明, 有本英樹, 「ITER 負磁気シアモードにおける外部電流駆動を使った安全係数分布の制御」, 日本原子力学会中部支部第 46 回研究発表会 (名古屋大学東山キャンパス, 2014 年 12 月 17 日~18 日) 口頭 R13
- [15] Y. Shimizu, T. Fujita, A. Okamoto, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, M. Honda, "Particle pinch model of passing/trapped high-Z impurity with centrifugal force effect ", 25th Toki Conference (Toki, Nov. 3-6, 2015), Poster P2-67
- [16] 清水友介, 藤田隆明, 岡本敦, 有本英樹, 林伸彦, 星野一生, 仲野友英, 本多充, 「JT-60U トロイダル回転プラズマにおけるタンゲステン輸送の解析」, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会 (名古屋大学東山キャンパス, 2015 年 11 月 24 日~27 日) ポスター 24pE07P
- [17] 藤田隆明, 清水友介, 「粒子軌道に対するプラズマ回転の効果を取り入れた PHZ ピンチモデ

ルの開発」, 第 13 回統合コード研究会 (九州大学春日キャンパス, 2015 年 12 月 10 日~11 日) 口頭

- [18] 林祐太, 藤田隆明, 岡本敦, 有本英樹, 「燃料及び不純物の入射による核融合出力制御シミュレーション」, 第 11 回核融合エネルギー連合講演会 (九州大学伊都キャンパス, 2016 年 7 月 14 日~15 日) ポスター 15P126
- [19] 藤田隆明, 岡本敦, 清水友介, 松浦圭佑, 林伸彦, 星野一生, 仲野友英, 本多充, 「トカマクプラズマにおける粒子軌道解析に基づく高  $Z$  不純物イオンのピンチ速度の評価」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学角間キャンパス, 2016 年 9 月 13 日~16 日) 口頭 14aKA-8
- [20] 藤田隆明, 「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」, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会 (東北大学青葉山キャンパス, 2016 年 11 月 29 日~12 月 2 日) ポスター 29aP32
- [21] 林祐太, 藤田隆明, 岡本敦, 有本英樹, 「燃料及び不純物の入射による核融合出力と放射損失の制御のシミュレーション」, 同上 ポスター 29aP48
- [22] 細川海人, 藤田隆明, 岡本敦, 有本英樹, 「トカマクプラズマにおける中性粒子ビーム入射加熱・電流駆動の高速解析モジュールの開発」, 同上 ポスター 30pP58
- [23] 藤田隆明 「高エネルギー粒子による磁場を含む軸対称平衡の解析」, 第 14 回統合コード研究会 (九州大学春日キャンパス, 2016 年 12 月 7 日~8 日) 口頭
- [24] 松浦圭佑, 藤田隆明, 岡本敦, 清水友介, 「トカマクプラズマにおけるタングステン輸送モデルの改良」, 日本原子力学会中部支部第 48 回研究発表会 (名古屋大学東山キャンパス, 2016 年 12 月 14 日~15 日) 口頭 R31
- [25] 藤田隆明, 「大きなトロイダルドリフトを有する高エネルギー粒子の電流を含む軸対称平衡の解析」, 日本物理学会 2017 年年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日~20 日) 口頭 18aC34-6