

最適化磁場配位研究における新しい新古典輸送の評価方法
**A new neoclassical transport calculation method
 in optimized configuration study**

佐竹真介^{1,2}, 藪本宙², 山口裕之^{1,2}, J. L. Velasco³, 後藤拓也^{1,2}, 市口勝治^{1,2}, 柳 長門^{1,2}
 S. Satake^{1,2}, S. Yabumoto², H. Yamaguchi^{1,2}, J. L. Velasco³, T. Goto^{1,2}, K. Ichiguchi^{1,2}, N. Yanagi^{1,2}

¹核融合研、²総研大、³CIEMAT
¹NIFS、²SOKENDAI、³CIEMAT

我々は現在、連続巻きヘリカルコイルによるヘリカル型核融合炉の実現に向け、最適化磁場配位の探索を進めている。これまでのHeliotron-E、CHS、LHDなどのヘリオトロン方式の磁場閉じ込め装置では、ヘリカルコイルの形状を決める巻き線則はシンプルな関数によって与えていた。最近の研究[1]から、連続巻きでも巻き方の自由度を高くとれば、quasi-isodynamic配位などの新古典最適化配位が作れることが示された。LHDでの実験及び理論研究では、磁気軸を内寄せにすれば新古典輸送が改善されるがMHD安定性が下がり、外寄せでは新古典輸送が悪化しMHD安定性が上がることが知られている[2,3]。我々は、このようなトレードオフ関係から脱することを目指し、ヘリカルコイルの巻き線則をLHDからある程度大きく変化することを許容し、そのコイルが作る磁場配位の新古典輸送およびMHD安定性を目的関数とする多目的最適化問題として配位最適化研究を進めている。このような配位探索を進める際、目的関数の評価は高速に行える必要がある。MHD安定性は平衡計算コードVMEC[4]においてMercier安定性を短時間で評価できる。一方新古典輸送は、ドリフト運動論方程式を解く際の近似の度合いによって計算時間に大きな差が出る。最も厳密な計算法としては、ガイディングセンター軌道の磁気面からのずれ（大域的効果）を含めた計算法（例えばFORTEC-3D[5]）が挙げられるが、スーパーコンピュータでも1ケース数十時間掛かってしまう。DKESコード[6]は局所近似ながら磁場構造の詳細や非捕捉粒子の運動も取り入れた計算が可能だが、低衝突領域の新古典計算に膨大な時間が掛かる。一方、捕捉粒子のバウンス平均ドリフト運動から新古典輸送を評価する方法は計算量が軽く、1ケース10分程度で計算できる。しかしその代表的なコード

であるGSRACE[7]では、バウンス平均化のために磁場構造の表現に大幅な近似が入り、最適化配位探索で扱う多様な配位に対する新古典輸送の依存性を正しく評価できない。

Velascoらが最近開発したKNOSOSコード[8]は、局所近似のバウンス平均コードながら、磁気ドリフトの磁気面接線成分を入れることで大域的計算法に近い計算結果が得られ、かつ高速に実行が可能である。磁気ドリフトの接線成分は、両極性径電場が小さいイオンルート付近での大域的計算と局所近似計算の新古典輸送計算に現れる大きな差の原因である[9]。この効果を含めることで、従来の局所近似計算法で過大評価されていた新古典輸送をより高精度に、かつ磁場配位による捕捉粒子のドリフト軌道の変化を反映させた評価が可能となり、新しい最適化配位の発見につながるものと期待される。本発表では、様々な磁場配位に対していくつかの新古典計算計算法の比較を行い、KNOSOSコードの有用性について示す。

- [1] H. Yamaguchi, Nucl. Fusion **59**, 104002 (2019)
- [2] S. Murakami et al., Fusion Sci. Tech. **51**, 112 (2007)
- [3] Y. Takeiri, IEEE TRANS. PLASMA SCI. **46**, 2348 (2018)
- [4] Hirshman S.P. et al., Phys. Fluids **26**, 3553(1983)
- [5] S. Satake et al., Plasma and Fusion Res **1** 002 (2006)
- [6] S. P. Hirshman et al., Phys. Fluids **29**, 2951 (1986).
- [7] C. D. Beidler and W. D. D'haeseleer, Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 463 (1995).
- [8] J.L. Velasco et al., Nucl. Fusion **61**, 116013 (2021)
- [9] S. Matsuoka et al., Phys. Plasmas **22**, 072511 (2015)