

連続巻きヘリカル核融合炉の最適化配位研究
**Optimized configuration research for continuous-coil
 helical fusion reactor**

著者名 佐竹真介 1,2)、藪本宙 2)、山口裕之 1,2)、市口勝治 1)
 著者名 S. Satake 1,2), S. Yabumoto 2), H. Yamaguchi 1), K. Ichiguchi 1)

所属略称 1) 核融合研 2) 総研大
 所属略称 1) NIFS, 2) SOKENDAI

ステラレータ・ヘリオトロン型の核融合炉は、閉じ込めに必要な磁場と回転変換を外部コイルのみから作るため、定常運転における有意性がある。一方、その平衡磁場の安定性や粒子・エネルギー閉じ込め性能はその3次元磁場の特徴に強く依存するため、より「安定」で「閉じ込め性能のよい」最適化磁場配位の探索研究は過去より現在に至るまで継続的に行われてきた。

これまで一般的に行われてきた最適化配位探索の方法は、最外殻磁気面(LCFS)の形状をパラメータ化して表現し、求められたMHD平衡磁場に対し、最適化の目的関数(例えばMHD安定性や新古典拡散係数、乱流の成長率など)に関する多目的最適化問題として扱われてきた。このため、最適化配位を実現するコイルの巻き方は、LCFS形状が決定した後に、もう1つの最適化問題として別途解かれる。この方法はしかし、工学的な制約(コイルの最大曲率、振率、コイル間距離、コイル-LCFS間距離など)が最適化磁場配位の探索において考慮されず、結果的に複雑で設計上の余裕の少ないコイル配置が最適解として選ばれることにつながる。

我々はこれに対し、LHDのような連続巻きヘリオトロン配位の多目的最適化問題を、ヘリカルコイルの巻き線則のパラメータを広範囲に振ることで探索するという方針をとる。この際、上記のような工学的な制約はパラメータスキャンにおいて始めから考慮されているため、実現可能性を担保しつつ多目的最適化問題を解くことができる。

ヘリカルコイル形状は次式の巻き線則で与える(N はトロイダル方向の対称性の周期、もう1つのコイルはステラレータ対称な位置に配置)。

$$\begin{aligned} R(t) &= R_{ax} + r_{00}\epsilon_r \cos(\phi + \phi_{0r} + \alpha_r \sin \phi) \\ &\quad \times [1 + \epsilon_{2r} \cos(Nt + \phi_b)], \\ Z(t) &= Z_{ax} + r_{00}\epsilon_z \sin(\phi + \phi_{0z} + \alpha_z \sin \phi) \\ &\quad \times [1 + \epsilon_{2b} \cos(Nt + \phi_b)], \\ R_{ax}(t) &= R_{00}(1 + \epsilon_{ax} \cos(\phi)), \\ Z_{ax}(t) &= R_{00}\epsilon_{ax} \sin(\phi), \\ \phi &= Nt. \end{aligned}$$

これはLHDの巻き線則を拡張したもので、これまでの計算から多様な閉じ込め磁場が生成されることが確認された。

しかし、コイル配置をパラメータとして磁場配位を探索する場合、LCFSの同定や、閉じ込め領域内の大きな磁気島の有無などを、自動で判定する必要がある。これを多様なケースについて安定的に行うために、我々は以下の新しい解析手法を開発した。本発表ではそれらについて報告する。

1: 入れ子の磁気面構造の確認。磁力線追跡から得られるポアンカレマッピングにおいて、マッピングの点を最短経路となるように並べるアニーリング法を採用し、点データから面を構築する。その入れ子関係から磁気軸や最外殻磁気面を判定する。

2: 滑らかなLCFSの抽出。LCFS近くにはストキャスティクス磁場領域が現れる。1:で構築した時期面に対し、情報エントロピーを用いた滑らかさの評価指標を用いることで、滑らかな磁気面をLCFSに選択することが可能となった。

3: 磁気島の検出。磁力線追跡において回転変換を評価することで、磁気島を検出することが可能であるが、これでは全てのケースを網羅できないため、別途ポアンカレマッピングの画像診断から磁気島を判定する機械学習を構築している(8P02で発表)。