

外部コイル形状を変量とする磁場配位最適化コードの開発 Development of configuration optimization code based on coil shaping

山口裕之
Hiroyuki YAMAGUCHI

核融合研，総研大
NIFS, SOKENDAI

本文

磁場配位の最適化および外部コイル設計は、核融合炉におけるプラズマの効率的な閉じ込めを追求する上で重要であるだけでなく、粒子制御、装置の保守性の観点からも重要な研究課題となっている。STELLOPT2[1]などのステラレータ最適化コードでは磁気面形状の最適化とコイルの最適化が別のルーチンとなっており、周辺磁場構造や自由境界平衡の考察が別途必要となる。我々は、コイル形状・配置・電流値から計算される真空磁場を出発点として、VMEC[2]コードによる平衡計算を通じて閉じ込めプラズマの物理特性を評価することで、工学的指標と周辺磁場構造、自由境界平衡を同時に最適化に取り込むことのできる新しい配位最適化コードOPTHECS[3,4]の開発を行ってきた。本講演ではOPTHECSを用いた最適化研究の成果および開発の現状について報告する。

OPTHECSは複数の要素コードと、それらを制御し最適化アルゴリズムを実行するメインコードから構成されるモジュール型のコードである。要素コードは真空磁場計算、磁力線追跡、磁気面の構成、コイル形状の評価といったコイル・真空磁場関連のコード群と、VMEC、およびVMEC平衡を利用する物理解析コード群から構成される。要素コードは適宜OpenMPを用いて並列化されている。一方、メインコードはMPIにより並列されている。MPI並列は、最適化アルゴリズムの実行に必要となる、複数の配位に対する評価関数を並列で評価するために用いられる。このため、全体としてハイブリッド並列的な実行となる。評価関数は複数の評価項目に対する和の形で表され、パレート最適化は行っていない。最適化アルゴリズムとしては、Levenberg-Marquardt法および遺伝的アルゴリズムが実装されている。両手法について、大型ヘリカル装置(LHD) [5]のコイル電流の新古典輸送最適化によるベンチマークテストを

行い、所謂「内寄せ配位」への収束を確認した。

OPTHECSを用いて、3次B-spline曲線を用いたヘリカルコイルの最適化を行った。連続巻ヘリカルコイルを用いた磁場閉じ込め核融合炉は、ロバストなダイバータ配位を取れる、ブランケットスペースや保守用ポートを大きく確保できるといった、固有の利点を有する。LHD等の現存の装置で用いられている連続ヘリカルコイルは、比較的シンプルな巻線則に基づいて設計が行われており、この巻線則が磁場配位の自由度を制約している。B-splineを用いることで、より広い自由度のもとでヘリカルコイルの形状が可能となった。

まずは、STELLOPT2と同様の手法に基づいて磁気面形状の最適化を行い、周期数5、アスペクト比8程度の準ヘリカル対称配位を得た。この配位では磁気井戸の形成と、良好な高エネルギー粒子閉じ込めが確認された。次に、得られた磁気面に対して、誤差磁場を最小化するよう遺伝的アルゴリズムを用いてB-splineヘリカルコイルの最適化を行った。得られたB-splineヘリカルコイルを初期値として、磁気面形状最適化と同じ評価関数の元で、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った。B-spline制御点の3次元空間座標とコイル電流を含めて変数は全体で50個程度であった。世代当たりの個体数は120個体とした。最適化の結果、誤差磁場によって劣化したヘリカル対称性と、高エネルギー粒子閉じ込めの改善した配位が得られた。同様の手続きによって、周期数3、アスペクト比4.5程度の準ヘリカル対称配位も得られた。

- [1] D. A. Spong et al., Nucl. Fusion 41, 711 (2001)
- [2] S.P. Hirshman et al., Comput. Phys. Commun. 43 143 (1986)
- [3] H. Yamaguchi, 28th International Toki Conference, O1-4, Toki-city, Gifu, Japan, Nov. 5-8, (2019), <https://www.nifs.ac.jp/itc/itc28/>
- [4] H. Yamaguchi Nucl. Fusion 59 104002 (2019)
- [5] Motojima O. et al Phys. Plasmas 6 1843 (1999)