

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：63902
研究種目：若手研究
研究期間：2021～2023
課題番号：21K13904
研究課題名（和文）外部電流系を变量とした最適化によるヘリカル閉じ込め方式の新領域開拓と課題解決

研究課題名（英文）Development of a new regime of helical confinement system by optimization of external coils

研究代表者
山口 裕之（Yamaguchi, Hiroyuki）
核融合科学研究所・研究部・准教授

研究者番号：90797101
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：外部コイル形状と電流値を变量として核融合炉のプラズマ閉じ込め磁場を数値的に最適化する手法を新たに開発し、ヘリカル型核融合炉の課題である閉じ込め改善と電磁流体的（MHD）安定性の両立、そしてダイバータ配位を実現するコイルおよび磁場配位の探求を行なった。連続ヘリカルコイルの形状を3次B-spline曲線で表現し最適化することにより、新古典輸送とMHD安定性の改善された先進的磁場配位において、ダイバータレグ状の磁力線構造を生成可能であることを示した。また、最外殻磁気面外側の磁力線構造を最適化に取り入れ、ブランケットスペースを確保しつつ新古典輸送および安定性を改善するヘリカルコイルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、核融合炉の設計は少数のコイル形状パラメータの調整あるいは磁気面フリーモードの数値最適化によって行われていた。本研究ではコイル形状を最適化の直接の变量とすることで、これまでの核融合炉設計手法では不可能であった、工学特性と物理特性の同時最適化を世界で初めて可能とした。また、遺伝的アルゴリズムを応用した核融合炉設計の有効性を示した。その成果として得られた新たなコイル形状は、将来の核融合炉で必須となる高性能プラズマの閉じ込め、熱・粒子制御、燃料生産の同時達成という挑戦に向けた新たな経路を開くものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a new method to numerically optimize the plasma confinement magnetic field of a fusion reactor by varying the external coil shape and current value, and explored coil and magnetic field configurations that can achieve both improved confinement and magnetohydrodynamic (MHD) stability, which are issues in helical-type fusion reactors, and realize a divertor configuration. By expressing and optimizing the shape of a continuous helical coil using a cubic B-spline curve, we have shown that it is possible to generate a divertor-leg-shaped magnetic field line structure in an advanced magnetic field configuration with improved neoclassical transport and MHD stability. By incorporating the magnetic field line structure outside the outermost magnetic surface into the optimization, we have constructed a helical coil that can secure blanket space while also showing good neoclassical confinement and providing MHD stability.

研究分野：核融合学、プラズマ物理

キーワード：核融合 ヘリカル方式 最適化 遺伝的アルゴリズム ダイバータ配位 自由曲線

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉の方式の一つであるヘリカル型装置は、外部コイルのみで閉じ込め磁場を生成・維持でき、プラズマ閉じ込めの基盤である電磁流体力学 (MHD) 平衡を成り立たせる上でプラズマ電流を必要としないという特長を有する。このため、ヘリカル型装置は、プラズマ電流の消失に伴う突発的な閉じ込め崩壊のリスクが存在せず、また、本質的に定常運転が可能であることから、将来の核融合炉の有望な候補の一つである。一方で、ヘリカル型装置の磁場配位は幾何的な軸対称性を持つことがないため、粒子の角運動量が保存されず、軌道閉じ込めは必ずしも良好とはならない。また、MHD 安定性や乱流輸送についても、磁場配位によって特性が異なる。加えて、熱・粒子制御に必須となるダイバータ配位の性質も磁場配位やコイル方式によって大きく異なる。ヘリオトロン配位を持つ大型ヘリカル装置 (LHD) では、連続ヘリカルコイルに巻きつく磁力線が自然とダイバータ配位を形成するが、コア領域の MHD 安定性と粒子軌道閉じ込めの間にトレードオフ関係がある。ヘリカル方式に基づく経済的な核融合炉を実現するためには、3次元磁場配位を最適化することで、これらの課題を解決することが必要である。

3次元磁場配位を数値的に最適化する手法としては、Nührenberg 博士らの開発した手法が普及しており、Wendelstein 7-X (W7X) などの先進ステラレータ装置の設計に適用されてきている。従来の最適化手法は、最外殻磁気面の形状を表す有限個のフーリエモードを最適化するものであり、プラズマの物理特性は、固定境界条件で求めた3次元 MHD 平衡の近似解に基づいて評価される。このようにして最適化された磁場配位を実現するための外部コイルは、別の最適化問題として後から設計される。コイル形状にとらわれずにプラズマの物理特性を考察し最適化できるという点で、新しい磁場配位の探求において従来手法は力を発揮する。一方、現実的なコイル形状でその磁場配位を実現できるかどうかや、ダイバータ配位の成立性といった工学的に重要な性能は、従来手法では最適化に組み込むことができない。また、従来手法で設計されるヘリカル型装置のコイルのほとんどは、トロイダル方向に分割された所謂モジュラーコイルであり、LHD と同様のダイバータ配位は実現できない。モジュラーコイル装置である W7X では磁気島ダイバータが採用されているが、その制御には課題が残っている。これらの課題を解決するためには、具体的な外部コイルと電流値によって実際に生成される磁場構造を考慮した数値的最適化を行うことが必要であるが、そのような手法は開発されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プラズマ閉じ込めにおける高い経済性と安定性、良好な粒子閉じ込めという従来の最適化条件を満たしつつ、これらとの両立方法が未だ確立されていないロバストなダイバータ配位を有する、新しい定常核融合炉の具体形を示すことである。この目的を達成するために、先進ステラレータとヘリオトロン方式の両方、その中間、そして外側に広がる定常核融合炉の解空間を広く探索することのできる数値的最適化コードを開発する。モジュラー型や螺旋型といったコイルの方式を問わず、それらの自由な組み合わせを取り扱い可能とする。

このコードには、外部電流系が作る真空磁場を出発点として、磁気流体平衡を通じてプラズマの物理特性を評価するという新しいスキームを採用する。外部コイル形状の表現には3次 B-spline を用いた自由曲線を採用し、モジュラー型や螺旋型といったコイルの方式を問わず、それらの自由な組み合わせを取り扱い可能とする。評価関数には、従来から用いられている安定性、拡散係数、粒子軌道閉じ込めといった指標だけでなく、コイル近傍の磁力線構造を取り入れる。その他、有限プラズマ圧力下での自由境界平衡を最適化ループの中を組み込むなど、従来の最適化手法では実施不可能な最適化を行う。有限圧力平衡、磁気流体的安定性、高エネルギー粒子軌道閉じ込め、衝突性拡散、そしてダイバータの総合的な最適化配位を構築する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、磁場閉じ込め核融合装置のコイル形状および電流値を変量とする新たな最適化スキームおよび数値計算コード OPTHECS の開発を行う。真空磁場計算、磁力線追跡、磁力線点列データからトラス面データの生成といった基盤となる機能を持つコード群、および、必要なスキンの制御と非線形計画アルゴリズムを実行するコードの主要部分は準備ができています。3次元 MHD 平衡計算および粒子軌道等の物理解析に必要な Boozer 座標の構築のために、従来型の最適化ツールである STELLOPT から、VMEC コードおよび BOOZ_XFORM コードを導入する。従来型の最外殻磁気面フーリエモードを用いた最適化も行うことのできる包括的な最適化システムを構築する。このために、最外殻磁気面形状から外部コイルを逆算するツールが必要となる。これには、遺伝的アルゴリズムを用いるコード GOSPEL を整備して用いる。コイル形状の表現方法としては、フーリエ級数が広く用いられている。比較的単純なヘリカルコイルの表現にはフーリエ級数表現は十分であるが、より柔軟な形状表現を行うためには、自由曲線が望ましい。このため、3次 B-spline 曲線によるコイル形状表現を取り入れる。開発したコードの動作を検証した上で、従来はモジュラーコイルで設計される最適化

磁場配位をヘリカルコイルで実現する方式、および、LHD 型のヘリカルコイルを出発点とする方式の 2 系統の最適化を行い、ヘリカル方式の課題解決を目指す。

4. 研究成果

本研究課題を推進する上で核心をなす新しい最適化コード OPTHECS の開発に成功した。OPTHECS の開発実行環境として、112 スレッド並列計算が可能なワークステーションを導入し計算環境を構築し、非線形計画法として実装している Levenberg-Marquardt 法と遺伝的アルゴリズムをそれぞれ用いて、LHD のコイル配位を対象に、コイル電流のみを変数として新古典拡散係数を最小化する最適化を行った。この結果、どちらのアルゴリズムもほぼ同じ最適解に適切に収束することを確認した。また、OPTHECS のスーパーコンピュータ（核融合科学研究所：プラズマシミュレータ）への移植を完了させた。

最外殻磁気面フリーエモードを用いる最適化手法のベンチマークとして、STELLOPT との比較のため、プラズマ体積全域にわたる磁気井戸を有する周期数 2、アスペクト比 4.15 の新しい準軸対称磁場配位を OPTHECS を用いて構築した。この配位は、現在建設が進められている準軸対称配位の実験装置 CFQS に比べて極めて高い軸対称性を示すことがわかった。また、この準軸対称配位とほぼ同じアスペクト比で、より高い体積平均ベータ、および、より広い体積領域にわたって Mercier 安定な、別の準軸対称配位を得た。この配位における軸対称性を破る磁場フリーエモードの最大値、および実効ヘリカルリップルは、CFQS の物理設計に比べて 70% 程度低減されている。また、STELLOPT を用いた先行研究で得られている準軸対称配位と比べても、非軸対称磁場成分の最大値は同レベル、磁気軸近傍においてはより小さい値に抑えられている。これら結果は、OPTHECS による最適化が正しくかつ良好に動作していることを示している。

次に、従来型の最外殻磁気面フリーエモードの最適化との接続のため、固定された磁気面形状をターゲットとして外部コイル形状と電流値を逆算し、誤差磁場の最小化等を考慮して最適化するために開発した新しい手法を開発しその有効性を検証した。この手法ではコイル形状を 3 次 B-spline 自由曲線で表現し、遺伝的アルゴリズムによってコイル形状と電流値を最適化するものである。この手法に基づく新たなコード GOSPEL を開発した。GOSPEL コードを OPTHECS に組み込むことで、磁気面形状の最適化、外部コイルの逆算、外部コイルを変数とする最適化という、自己完結した一連の最適化プロセスを完成させた。

GOSPEL コードを用いて、準軸対称配位である CFQS および新古典輸送最適化装置である W7X の磁場を再現する外部コイルの最適化を実施した。3 次 B-spline 自由曲線と遺伝的アルゴリズムの組み合わせにより、これらの最適化磁場配位を良好に再現するモジュラーコイルが得られることを示すことができた。また、従来はモジュラーコイルによって実現されるこれらの磁場配位に対して、3 本という比較的小数本のヘリカルコイルと垂直磁場コイルの組み合わせによっても磁場配位を再現できることが明らかとなった。さらに、ヘリカルコイルを用いた場合、ターゲット磁気面の外側にダイバータレグ構造が作られることが明らかとなった。最外殻磁気面の最適化で得られた準軸対称配位について、GOSPEL によってモジュラーコイルを設計し、VMEC コードにより自由境界 MHD 平衡の特性を調査した結果、体積平均ベータ値 3% 程度でも Mercier 安定条件を満たすことも確認された。また、GOSPEL と OPTHECS を連結させた最適化により、連続ヘリカルコイルに基づく新しい準ヘリカル対称配位（図 1）を構築した。この配位においても、W7X や CFQS とヘリカルコイルで実現した場合と同様に、最外殻磁気面外側の磁力線接続長分布がダイバータレグ構造を持つことが明らかとなった。

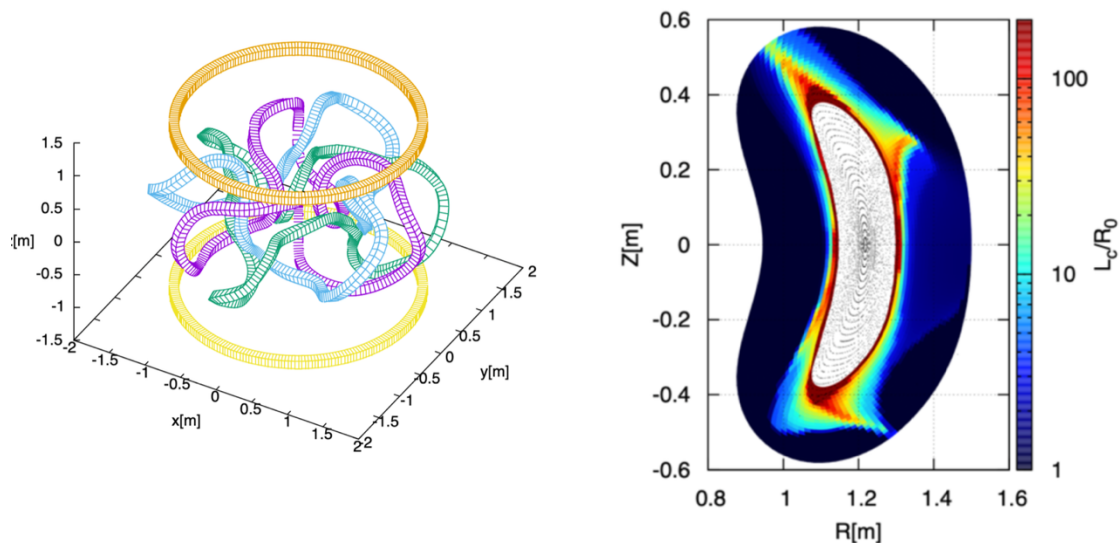


図 1. (左) OPTHECS により設計した準ヘリカル対称配位を実現する連続ヘリカルコイルと、(右) あるポロイダル断面における磁力線ポアンカレプロットおよび磁力線接続長の分布。

LHD 型の連続ヘリカルコイルに基づく磁場配位については、ブランケット設置スペースの拡張とプラズマ閉じ込め改善の 2 つの方向性で最適化を進めた。ブランケット設置スペースを評価するために、磁力線が統計的に振る舞う領域であるエルゴディック層の厚みを磁力線追跡によって評価するコードを開発した。このコードは、最外殻磁気面外側の磁力線を追跡し、仮想的な真空容器までの磁力線長、および磁力線フットプリントの空間分布を評価する。エルゴディック層の厚みは、磁力線接続長が急激に短くなる地点によって自動的に評価する。このルーチンを OPTHECS に組み込み、プラズマ領域とコイル中心との距離を増大させる最適化を B-spline 自由曲線コイルに対して実施した。その結果、ブランケット設置スペースを初期値から 10%程度増大させた配位を構築することに成功した (図 2)。この結果は、エルゴディック層厚みの評価が正しく機能し、最適化に組み込まれたことを示している。LHD 型コイル配位のもう 1 つの方向性の最適化として、有限ベータ効果を考慮した自由境界平衡に基づき、新古典輸送の低減と MHD 安定性の改善を図る最適化を進めた。MHD 安定性の指標には回転変換が 1 となる有理面における規格化された Mercier index D_i を用いた。この結果、中心ベータ 3%において MHD 安定性を LHD と同程度に保ちつつ、新古典輸送を改善した配位が得られることがわかった。

ダイバータ配位、ブランケット設置スペースに加えて、有限ベータプラズマの安定性および閉じ込めを改善した総合的な最適化配位を探索するため、補助ヘリカルコイルの付加による LHD 型連続ヘリカルコイルの配位特性改善を試みた。ヘリカルコイルの表現を、これまでのシングルフィラメント電流モデルから、コイル断面を近似可能なマルチフィラメント電流モデルへと改良することで、現実のコイルに近い最外殻磁気面形状および磁力線の回転変換分布の評価を可能とした。結果として、プラズマ体積の大きさ、MHD 安定性、新古典輸送が改善された磁場配位を構築した。この配位のブランケット設置スペースについては、大きな改善には至らなかったが、従来の LHD 型配位程度の領域は保たれることがわかった。また、ヘリカルコイル断面のピッチ変調および断面形状の変形が真空磁気面に与える影響について OPTHECS を用いて検討し、これらの影響が軽微であることを確認した。

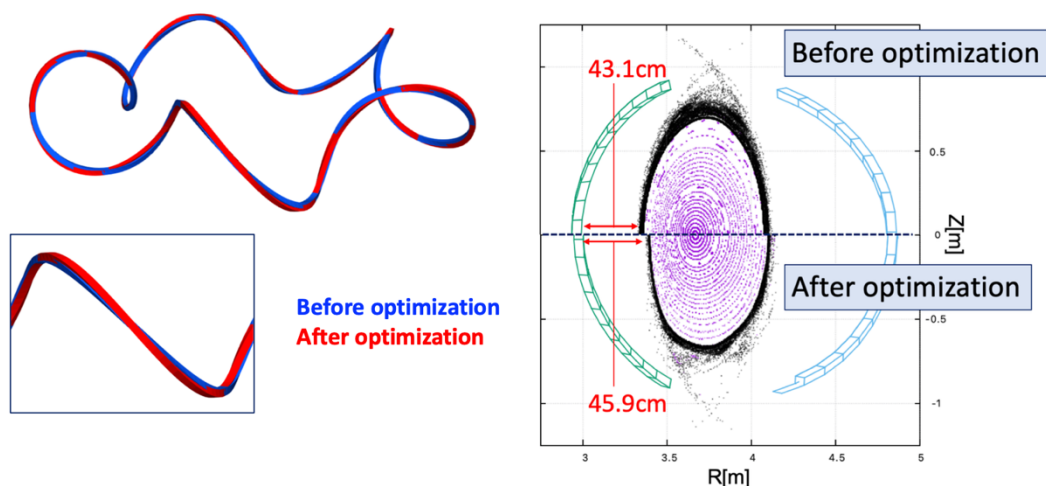


図 2. LHD 型のヘリカルコイルの最適化により、ブランケット設置スペースを拡大させた例。
(左) 最適化前後のヘリカルコイル 3 次元形状の比較、(右) 磁力線ポアンカレプロットとヘリカルコイル。

まとめると、本研究課題を通じて、遺伝的アルゴリズムと B-spline 曲線による外部コイル設計手法を開発し、また、外部コイル形状と電流値を変量とする全く新しい閉じ込め配位最適化コード・OPTHECS の開発に成功した。OPTHECS の適用によって、連続ヘリカルコイル配位として LHD 改良型配位、および、従来はモジュラーコイルでしか実現されてこなかった先進的磁場配位がヘリカルコイルでも生成可能であることが明らかとなった。また、軸対称性と Mercier 安定性の改善した新しい準軸対称磁場配位の構築に至った。最外殻磁気面より外側の磁力線構造を考慮してブランケット設置スペースを組み込んだ最適化を可能にしたこと、および、ヘリカルコイルを用いてモジュラーコイル方式の最適化磁場配位を生成した場合にモジュラーコイルとは異なるダイバータレグ状の磁力線構造が現れるという発見は、磁場配位の最適化と熱・粒子制御の両立を図る上で重要な知見である。世界的にも初の成果であり、本課題の特筆すべき成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamaguchi Hiroyuki, Satake Shinsuke, Nakata Motoki, Shimizu Akihiro, Suzuki Yasuhiro, W7-X Team the	4. 巻 61
2. 論文標題 Optimization of modular and helical coils applying genetic algorithm and fully-three-dimensional B-spline curves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106004 ~ 106004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac1ae2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 後藤拓也、山口裕之、市口勝治、佐竹真介、田村仁、宮澤順一、柳長門
2. 発表標題 早期発電実証炉設計を目指したヘリオトロン方式核融合炉コイル形状最適化
3. 学会等名 第14会核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村仁、山口裕之、後藤拓也、柳長門、佐竹真介、市口勝治
2. 発表標題 磁場配位最適化ヘリカルコイルの電磁力と機械的挙動
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村仁、山口裕之、後藤拓也、柳長門、佐竹真介、市口勝治
2. 発表標題 ヘリカル型核融合炉における磁場配位最適化コイルの電磁力と応力挙動
3. 学会等名 2022年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. YAMAGUCHI, T. GOTO, S. SATAKE, K. ICHIGUCHI, N. YANAGI, H. TAMURA
2. 発表標題 Development of a coil-shaping-based optimization code for magnetic fusion device
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口裕之、清水昭博、高橋裕己、市口勝治、佐竹真介、西村伸、小川国大、長壁正樹、磯部光孝
2. 発表標題 磁場の準対称性を幅広く制御可能なハイブリッド・ステラレータの検討
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Yamaguchi
2. 発表標題 Development of coil-shaping-based optimization code and its application to helical coil stellarator
3. 学会等名 23rd International Stellarator-Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamaguchi Hiroyuki
2. 発表標題 Optimization of helical configuration using the OPTHECS code
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口裕之
2. 発表標題 外部コイル形状を变量とする磁場配位最適化コードの開発
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Yamaguchi, Katsuji Ichiguchi, Shinsuke Satake, Mitsutaka Isobe, Akihiro Shimizu, Hiromi Takahashi, Kunihiro Ogawa, and Masaki Osakabe
2. 発表標題 Quasi-axisymmetric magnetic configurations with magnetic well and improved symmetry at low aspect ratio
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山口裕之、「遺伝的アルゴリズムによる電磁石配位設計」、日本シミュレーション学会学会誌「シミュレーション」Vol.41 No.2、小特集「プラズマ・核融合シミュレーション研究の最近の進展」（2022年12月）

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------