

配位最適化研究が拓く先進ヘリカルプラズマの展望 Prospects in helical plasma research based on advanced optimizations

仲田 資季
NAKATA Motoki

自然科学研究機構 核融合科学研究所, 総合研究大学院大学
National Institute for Fusion Science/National Institutes for Natural Sciences,
SOKENDAI

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) を用いた研究により、ヘリオトロン装置の磁場配位依存性を明らかにしてきた。粒子閉じ込めや MHD 安定性など、パラメータによっては相反する配位依存性を有するが、内寄せ磁場配位において総合性能に優れたプラズマを生成できることが確認されている。そこでは高エネルギー粒子軌道、MHD 不安定性、新古典・乱流輸送の物理過程が複合的に関連し合うことがこれまでの LHD 研究で明らかになっており、これらの最適化によってプラズマ性能のさらなる高性能化を引き出すことが可能となる。

LHD 後の次期計画では、上述の物理過程を最適化した先進的ヘリカルプラズマ実験装置を用いた研究を推進し、乱流輸送改善と MHD 安定性などが両立した先進的な最適化配位を実証する。この研究により、核融合炉の工学的制約を大幅に緩和させてその実現性を向上させるとともに、自己点火炉の設計を先導する。

2. 最適化次期装置のベースとなるLHDの成果

LHD を中核とするヘリカルプラズマ研究の推進によって、多くの学術的成果が創出されてきた。炉心プラズマの高温・高密度化といった将来の核融合炉を見据えた運転領域の拡大とともに、柔軟性の高い磁場配位制御を活かして、熱輸送障壁や高エネルギー粒子の閉じ込め改善現象、不純物ホール形成などの顕著な物理特性も明らかになった。特に、捕捉粒子軌道が改善する磁場構造をもつ内寄せ磁場配位では、良好な高エネルギー粒子閉じ込めによる高効率加熱が実証され、輸送改善も確認されている。さらに、設計当時の理論予測を超える高ベータ化も確認されている。大規模計算機を活用した理論・シミュレーション研究も進展し、環状プラズマの学理の探求とその体系化に貢献して

いる。良好なプラズマ閉じ込め性能の実証は、LHD の相似外挿に基づく原型炉設計研究の進展にも繋がっている。

LHD の内寄せ磁場配位は、準等磁場構造と呼ばれる広義の対称性を持つ特別な磁場構造とも共通する性質を示す。W7-X や Heliotron-J はこの準等磁場構造に基づいて設計されており、MHD 安定性や新古典輸送の最適化が検証されている。一方、ヘリカル・トカマク系に共通して、乱流輸送現象は輸送・閉じ込め特性の大部分を支配しており、乱流の抑制・制御のための最適化は重要課題に位置づけられている。

3. 自己点火炉の実現に必須となる炉心最適化

自己点火に至る核融合炉心条件を見据えた時、将来解決すべき代表的な理工学課題として、

- 乱流輸送低減・高エネルギー粒子閉じ込め・MHD 安定性が両立する配位の確立
- 高性能かつ安定なダイバータの確立
- 強磁場超伝導コイル・高機能炉材料の開発が挙げられ、炉心プラズマの物理特性に基づいた配位最適化と工学研究の両方の進展が鍵となっている。

現在、既存装置からの外挿をベースとした原型炉設計が進められている。幾つかのバリエーションがあるが、最新の原型炉設計においてはトカマク方式・ヘリカル方式ともに核融合利得が $Q=10\sim 20$ の定常運転が想定されている [1-3]。例えば最近のトカマク原型炉設計 (DEMO Model 2014) においては、対向機器の熱負荷抑制等の観点から核融合出力が 1.42GW、 $Q=17.5$ [1,2] と評価している。しかしながら循環電力などを加味すると、現状では正味の電気出力は低い設計となっている。したがって、乱流輸送などに関する配位最適化によって炉心プラズマの閉じ込め改善特性をさらに向上をさせることは、対向機器への熱負荷や必要な

磁場強度、装置の大型化の抑制に繋がるとともに、自己点火(Q=∞)を見据えた高利得の炉設計の可能性を大きく拡大させると期待される。

4. ヘリカルプラズマの先進最適化

W7-XやHSXに代表されるような、三次元磁場の準対称性等に基づく既存の最適化プラズマの設計手法は、主に線形の新古典輸送計算とMHD安定性計算で構成されている[4]。しかしながら、静的な磁場の下で特定のβ領域(W7-X:高β領域、HSX:低β領域)に制限された限定的な最適化となっており、プラズマをどのように最適状態まで導くか、あるいは逸脱させないかが重大な課題となる。また、乱流抑制や高エネルギー粒子閉じ込め、安定なダイバータ構造とも共存する最適化が組み入れられたプラズマは未だ実現されていない。

「乱流輸送低減・高エネルギー粒子閉じ込め・高ベータ領域におけるMHD安定性」が共存する磁場配位の確立は、革新的な閉じ込め改善をもたらす。特定のベータ領域で乱流輸送を最適化する試み[5]も始められているが、他の最適特性との共存性や最適β領域の拡大については検討されていない。したがって、3次元磁場構造の多様性や柔軟性を最大限に活用し、非線形性やプラズマの動的応答、さらには周辺磁場構造に関する概念を新たに導入した先進的な配位最適化研究を理論・実験・工学の三位一体で推進することは、自己点火を伴う核融合炉の実現へ向けて新たな展望を拓くとともに、プラズマ科学としての国際的な学術研究基盤の拡大に繋がる(図1)。

5. 物理検討と工学設計の共創連携

一般にヘリカルプラズマの物理特性の最適化は、磁場コイルや真空容器の設計とは分離して行われる。そのため、工学的限界や実験施設と関連した境界条件との整合性を改めて検証する必要がある。配位最適化次期装置の検討活動においては、物理的最適化の新概念の検討・要素研究の活動と工学的検討・評価の活動を並行させ、創案の初期段階から互いに緊密な連携をとることで、実験装置としての実現性や利便性を考慮した総合的な設計を進めることが重要となる。現在、乱流最適化モデルの拡張やダイバータ磁場の引き出し、新古典粘性の抑制を介した平衡シア流の促進など、新たな最適化因子導入に向けた要素研究活動とともに、既存の最適化プラズマをベースにした、配位選択・コ

イル計算・真空容器・支持構造などの一連の工学的検討を行う活動(図2)を進めている。

6. まとめ

自己点火定常核融合炉の実現に向けた炉心プラズマのさらなる閉じ込め改善のためには「乱流輸送低減・高エネルギー粒子閉じ込め・高ベータ領域におけるMHD安定性」が共存し、また、安定なダイバータ構造を有するヘリカルプラズマを見出す配位最適化が不可欠となる。3次元高温超伝導コイルの適用による強磁場化の検討と並行して、これまでのLHDなどの知見を最大限に活用し、新たなアイデアを組み込んだ先進的な配位最適化研究を推進することで、核融合炉の高利得化に必須となる新たなヘリカルプラズマ装置の実現可能性が拓かれ、実験・理論・工学研究に関する国際的な共通研究基盤を与えることが期待される。

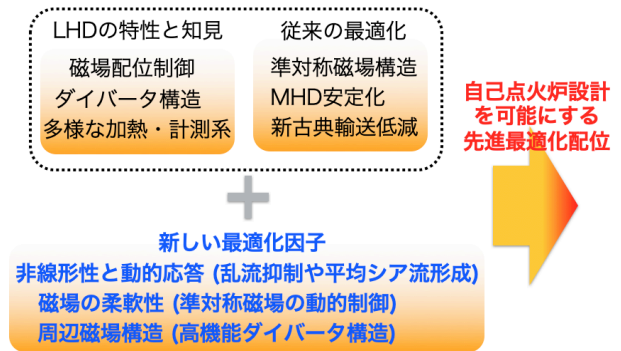


図1: 先進最適化で目指す自己点火炉心プラズマ

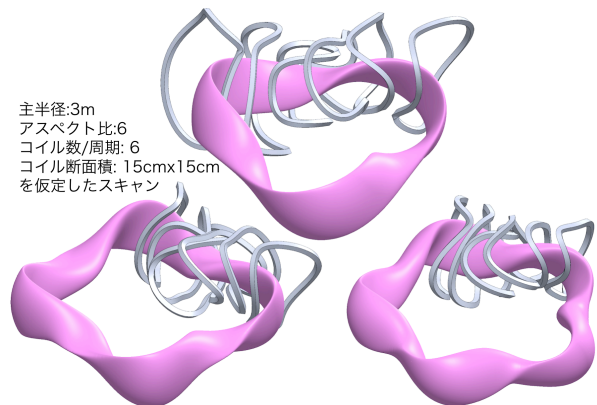


図2: 3次元コイルに関する工学的検討の例: 磁場周期3~5におけるコイル配置のスキャン

[1] K. Okano et al., J. Fusion Energy (2018)
 [2] K. Tobita et al., Fusion Sci. Technol. 72, 537 (2017)
 [3] T. Goto et al., Nucl. Fusion 57 066011 (2017)
 [4] A. Dinklage et al., Nat. Phys. 14, 855 (2018)
 [5] P. Xanthopoulos et al., Phys. Rev. Lett. 113, 155001 (2014)