

構造形成・持続性ユニット 質疑応答

『構造形成・持続性ユニット 2025年度成果全体報告』（高橋裕己）

『ベイズ最適化を用いた閉じ込め磁場配位の多目的最適化』（佐竹真介）

Q：LHDでの多目的最適化探索について、実際のLHD実験では、 $R_{ax}=3.60$ 近辺で最も閉じ込めのよいプラズマとなった。配位探索ではより内寄せ配位でMHDと新古典の両方がよい配位が見つかったというが、圧力分布を固定していたからでは？

A：圧力分布は確かに固定していたので、その影響はある。ただし、圧力分布のピーキング具合などをコイル電流値の他に可変な入力パラメータとして与え、それに対して機械学習を行えば分布に対する依存性はモデル化可能と考える。また、配位探索においてはLHD実験で通常使われていた条件もよりかなり広範にコイル電流を変えており、 γ や B_q が通常とは大きく異なる配位において多目的最適解が見つかったことや、最外殻磁気面が真空容器に当たらないかのチェックまではできていない点は注意すべきである。

Q：乱流最適化に関して、磁力線測地線曲率だけでなく、good-curvature, bad-curvatureに直接関係のある法線方向曲率もパラメータとした、乱流最適化の代理モデルを検討したいということだが、実際にCHD-Uの配位検討における乱流シミュレーションで、磁場配位の違いによる法線曲率の違いが、乱流のモード構造の違いに現れるという結果が見えているので、そのような研究を進めてほしい。

A：CHD-Uに関しても広範な磁場配位スキャンを行い、教師データの生成と解析を行いたいと考えているので、ぜひジャイロ運動論に詳しい方々に助力をいただきたい。

Q：乱流の磁場配位依存性に関して、kinetic electronの効果は考量しているのか？

A：現時点ではadiabatic electronであり、考慮されていない。ジャイロ運動論の専門家からも、測地線曲率によるゾーナルフロー増大による乱流抑制効果は、ITGはともかくETGやTEM乱流の抑制には不十分では、との指摘もいただいており、将来的にはそうした効果も評価関数に入りたい。ガウス過程回帰とベイズ最適化によるパレート最適配位の探索モデルは原理実証できたので、あとは計算量との勝負だけだと考えている。

Q：自由境界MHD平衡計算について、VMECの自由境界計算で出てくる最外殻磁気面と、実際の磁力線構造が一致するかどうか確認できるのか？

A：今まさにそれを検証する方法を開発中である。

『CHD-U検討の進展』（山口裕之）

Q：対称性がなく、（磁気面上の）磁場等高線が閉じていないミラー配位の閉じ込めが良いとは思えない。

A：等高線が一部閉じていなくても新古典輸送が良好な磁場配位の存在は知られているとおり。近年では、対称性も準等力学性も持たずに低い新古典輸送を示すpiece-wise omnigenousという配位概念も提唱されている。現設計案の準等力学的ミラー配位は磁場等

高線が閉じておらず完全な準等力学配位ではないが、新古典拡散自体は小さいことを確認している。

Q：新古典輸送が小さいほど帯状流が大きくなるのではないのか？ 新古典輸送が小さい準軸対称配位モードの方が準等力学的配位モードより帯状流が弱いというのは信用できない。理論的な根拠を示してほしい。

A：新古典輸送が小さいほど帯状流が大きいとは限らないが、準軸対称配位の方が帯状流が弱い理論的根拠は現時点では明確ではない。準等力学・準ヘリカル対称配位の方が準軸対称配位よりも帯状流が強く励起され輸送フラックスも小さいという結果は、大域的ジャイロ運動論シミュレーションに基づく先行研究でも報告されているところである。

Q：発表の中でブートストラップ電流と回転変換分布について言及があった。トカマクではECH、低域混成波、NBI等の加熱を駆使して制御を行なっている。ブートストラップ電流と、加熱についてはどう考えているか？

A：回転変換分布制御は、負磁気シアや反転磁気シアなどのトカマク高性能放電と関連する条件が準軸対称配位でどのようなインパクトを持つかなど、重要なテーマと考えている。自己無撞着なブートストラップ電流とMHD平衡についてはまさに解析へ向けて動き出しているところ。準備研究として、電流分布を固定して電流値とベータ値をスキャンしたMHD平衡解析を2025年度に行ない、プラ核学会で報告した。ECH, NBIについては、電流分布制御を意識した配置案を昨年度策定した。現実的な放電時間の中で回転変換分布をどの程度まで制御できるかが重要であり、磁場拡散と輸送シミュレーションも連結して詳細に検討していく。

Q：この装置は核融合炉を直接目指すのではなく、磁場配位を柔軟に変化させてプラズマのミクロ集団現象を研究する装置と理解したが、それでよいのか？

A：その通りである。

Q：海外のスタートアップ等では乱流輸送の最小化を目指して最適化された装置が検討されている。それに対して、CHD-Uとしては最初から乱流が最小化された配位を設計するのではなく、様々な磁場配位から乱流が最小となる配位を探ることができる装置を検討しているということか？

A：その通りである。磁場配位と乱流輸送の関係、乱流輸送が抑制される方向の探索は、この装置における大きなテーマの一つとなると考えている。

C：LHDとの比較計算も示していただけると良い。

A：そのようにする。