

熱輸送解析を含む原型炉燃焼プラズマ運転シナリオ検討 Feasibility study and transport analysis of operation scenarios for burning plasmas in JA-DEMO

本多 充¹
HONDA Mitsuru¹
京大工¹
Kyoto Univ.¹

ITER や DEMO では、重水素・三重水素核融合反応によって生じるアルファ粒子加熱が主体となるため、外部装置による追加加熱が主体であった従来のプラズマ実験とは様相が大きく異なる。これまではプラズマの外部制御装置として追加加熱は有効であったが、自律的な核燃焼プラズマでは追加加熱の寄与は相対的にかなり小さなものとなり、従来の手法の延長線上に定常状態の安定的実現を見通せるかどうかは必ずしも自明ではない。なお、本稿で言う定常状態とは、プラズマ電流や温度と主要なパラメータがフラットトップフェーズにおいて時間的にほぼ一定である状態のことを指し、完全非誘導電流状態のことを指すわけではないことに注意する。

3.5MeV で生成するアルファ粒子は、熱化するまでのほとんどの過程でそのエネルギーを電子に与えるため、電子主体の加熱となる。また、制動放射、不純物線放射、サイクロトロン放射といった放射損失もまた電子のみに生じるため、燃焼プラズマは加熱と冷却の主たる過程はほぼ電子にのみ生じ、イオンは電子との衝突による等温化過程で加熱されることになる。一方、核融合反応断面積はイオン温度と共に増加することから、核融合反応の持続には高いイオン温度も必要となる。このように高い自律性を持つ燃焼プラズマの安定運転点を見つけるのは容易ではなく、核融合発電炉の実現可能性について議論した文献 [1] の図 7 に示されているとおり、初期状態から巧みに不安定点を避けながら定常な安定運転点へと到達するのはかなりの困難を伴う。

大域的最適化手法を用いて輸送方程式を解き定常解を見つける定常輸送ソルバ GOTRESS[2] は、直接定常状態の解を探索するため、経路に依らず安定に定常解を発見できる能力を有する。燃焼プラズマへ適用するために、アルファ加熱と放射損失を考慮に入れた上で、安定に求解できるアルゴリズムを実装した。GOTRESS を核とする統合モデル GOTRESS+[3] は

燃焼プラズマにおいても輸送、加熱、平衡、ペデスタル幅の全てが整合する解を、磁気軸から最外殻磁気面まで求めることができる。また、ポスト処理において理想 MHD 安定性を検査することが可能である。GOTRESS+ シミュレーションは図 1 に示された流れに沿って実行される。

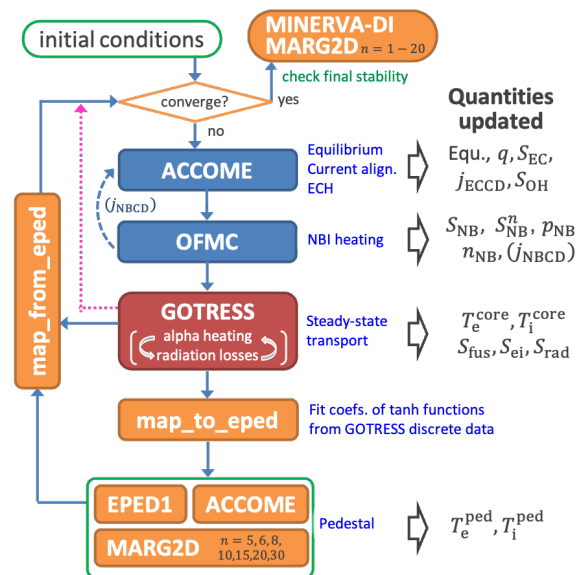


Fig. 1: GOTRESS+ シミュレーションのフローチャート。EPED1 の使用の有無で大きな分岐がある。

日本の原型炉設計の一つである JA-DEMO[4] は主半径 $R_0 = 8.5$ m, 小半径 $a = 2.42$ m, 95% 磁気面での楕円度 $\kappa_{95} = 1.65$ ・三角度 $\delta_{95} = 0.33$, プラズマ電流 $I_p = 12.3$ MA, トロイダル磁場 $B_T = 5.94$ T の装置であり、2 時間運転のパルス運転シナリオで目標とする数値は、 $HH_{98y2} = 1.13$, $\beta_N = 2.6$, $P_{fus} = 1.085$ GW, $Q = 13$, $f_{BS} = 0.46$, $f_{GW} = 1.2$ である。これらの量は順に ITER 98y2 スケーリングで予測される H モードプラズマを 1 としたときの閉じ込め性能、規格化ベータ値、核融合出力、自発電流割合、グリーンワルド密度比である。JA-DEMO で想定されるプラズマパラメータを元に統合モデルによってシミュレーション

を行い、目標とする諸量を満たすプラズマが予測できるかどうかを確認する。GOTRESS+ シミュレーションでは現在、密度分布は任意で設定し固定しているため、グリーンワルド密度比については目標となる値を満たすような分布を与える事とする。輸送モデルには、CDBM[5]を用いる。

電子サイクロトロン加熱 (ECH) のみを追加熱とする定常プラズマ予測を行う [6]。ECH は加熱の位置と幅、電流駆動方向、入射角などを制御しやすく、中性粒子ビーム加熱と異なり局所加熱が可能である。そのため局所的に磁気シアを減少させるような電流分布の調整が可能であり、内部輸送障壁 (ITB) の形成を促すことができる。ここでは、極力少ない ECH パワーで目標値を達成するため、発振周波数、入射ポロイダル・トロイダル角を変更してパラメータサーベイを行った。なお、パラメータサーベイの単純化のため、EC 波は一つのランチャーから出力されていると仮定した。

図 2 は GOTRESS+ シミュレーションの結果である。8 回のイタレーションでほぼ収束しているが、図 2 は計算終了の 15 回目のイタレーションの結果を示している。185 GHz, 90 MW の ECH を $(R, Z) = (11.5, 0.9)$ からトロイダル角 150 度、ポロイダル角 25 度で入射した。EC 波は $\rho = 0.5$ を中心に幅 ± 0.2 の局在した領域に吸収され、2.9 MA の電流駆動を行っている。結果、吸収ピークの近傍で負磁気シアとなり、その領域で乱流輸送が低減され ITB が形成されている。シミュレーションで得られた性能指数は、 $HH_{98y2} = 1.31$, $\beta_N = 3.24$, $P_{fus} = 1.254$ GW, $Q = 13.9$, $f_{BS} = 0.51$, $f_{GW} = 1.26$ となり、全てのパラメータで目標値を達成できていることが分かった。

一方で、このプラズマは理想 MHD 安定ではないことが分かっている。導体壁をプラズマ境界近傍まで近づけ、イオン反磁性ドリフト効果を考慮したとしても、 $n = 1, \dots, 30$ の複数のモードで不安定になっている。 $Q = 13$ と $P_{fus} = 1.085$ GW という目標値を満たそうとすれば最小の加熱パワーは 70 MW 強となるが、そこまで ECH パワーを落としてもやはり MHD 不安定であったため、NB を用いた電流駆動で非誘導電流割合を高めたり、EC のランチャーを複数組み合わせる電流密度分布を調整するなどの必要があり、MHD 安定性との両立は今後の課題となっている。

謝辞

本研究は QST 原型炉研究開発共同研究の助成を受けたものであり、QST 相羽信行氏、京大 成田絵美氏、鳥取大 昌元悠幸氏、古川勝氏と共同で実施された。また京大 大谷凜太郎氏にシミュレーションの実行補助を行ってもらっている。

References

- [1] A. W. Morris, et al. *Plasma Phys. Control. Fusion*, Vol. 64, p. 064002, 2022.
- [2] M. Honda and E. Narita. *Phys. Plasmas*, Vol. 26, p. 102307, 2019.
- [3] M. Honda, et al. *Nucl. Fusion*, Vol. 61, p. 116029, 2022.
- [4] Y. Sakamoto, et al. Development of physics and engineering designs for Japan's DEMO concept. In *IAEA 27th Fusion Energy Conf., FIP/3-2*, Gandhinagar, India, 2018.
- [5] M. Honda and A. Fukuyama. *Nucl. Fusion*, Vol. 46, p. 580, 2006.
- [6] M. Honda, N. Aiba, E. Narita, Y. Masamoto, and M. Furukawa. Self-consistent predictions and assessment of core plasma performance in the flat top phase of burning plasmas by GOTRESS+. In *IAEA 29th Fusion Energy Conf., TH-C/1655*, London, United Kingdom, 2023.

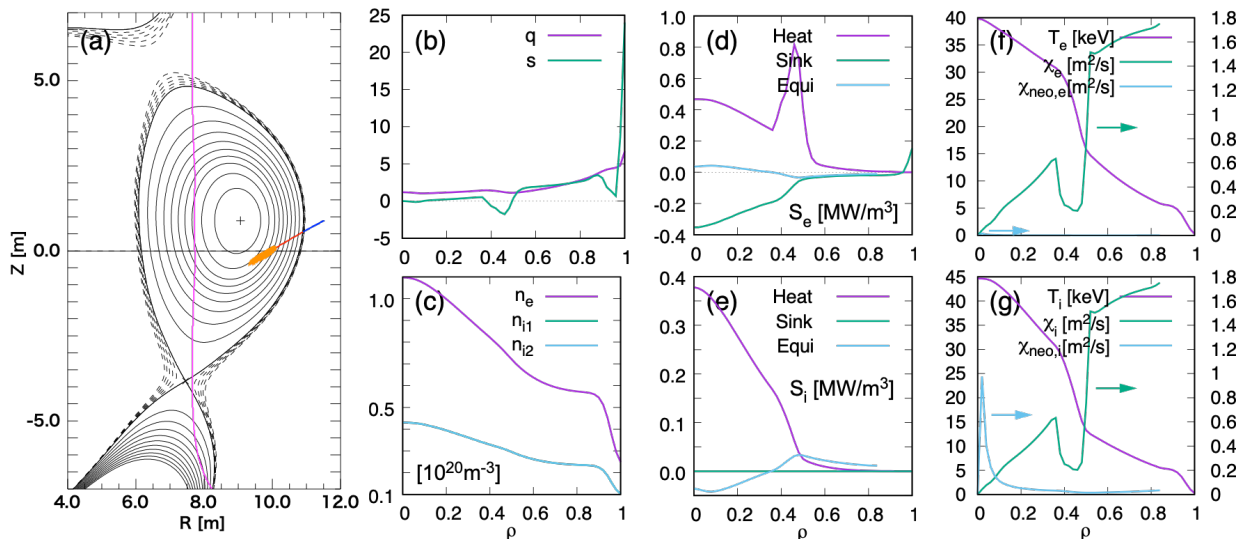


Fig. 2: GOTRESS+ による ECH のみの JA-DEMO 定常プラズマ予測。(a) 平衡と EC 波動軌跡、(b) 安全係数と磁気シア、(c) 密度、(d)(e) 電子とイオンの加熱、(f)(g) 電子とイオンの温度と拡散係数。