

定常運転原型炉プラズマにおける
不純物入射によるダイバータ熱負荷低減シナリオの検討
Study on operation scenario with reduced divertor heat load
by impurity injection in steady-state demo plasma

藤田隆明
Takaaki Fujita

名古屋大学
Nagoya Univ.

1. はじめに

原型炉においてダイバータ熱負荷を許容値以下に抑えるためアルゴン等の不純物をダイバータ領域に注入することが予定されているが、コアプラズマへの不純物の侵入・蓄積による燃料の希釈や中心部からの放射パワーの増大が懸念される。一方、キセノン等のより高い原子番号の不純物によるコアプラズマからの放射パワーでダイバータ熱負荷を下げるシナリオも検討されている。しかしながら、不純物輸送と定常運転のための非誘導電流駆動のコンシステントな解析はほとんどなされていない。

本研究では、中性粒子ビーム入射電流駆動(NBCD)解析モジュールを実装した統合輸送コードTOTALを用いて、トカマク型原型炉プラズマにおいて核融合出力および定常運転のための完全非誘導電流駆動状態を維持しつつ不純物入射によりダイバータ熱負荷をどこまで低減できるかを検討する。

2. シミュレーションモデル

コア部の異常熱輸送についてはMixed Bohm/gyro-Bohmモデルを用いた。燃料イオンおよびヘリウムイオンの異常粒子輸送については、異常熱輸送係数に基づく拡散係数とピンチを用いた。コア部、ペDESTAL部で異常熱拡散係数、異常粒子拡散係数にそれぞれ係数をかけて小さくすることで、内部輸送障壁等によるコア部閉じ込め改善やHモード輸送障壁を模擬した。

アルゴン (Ar) イオンの輸送計算においても、新古典輸送に加えて、異常輸送による拡散係数 D^{AN} を考慮した。その値については、JT-60Uにおける結果 [1]から、 D^{AN} とイオンの熱拡散係数 χ_i の比が0.06-1の範囲にあると評価し、シミュレーションにおける χ_i が1-3 m²/s程度であるこ

とから、 $D^{AN} \geq 0.05$ m²/sと想定した。Arは最外殻閉磁気面LCFSから中性原子として時間一定で入射し、その量はLCFSでのAr密度の値が所定の値となるように調整した。中性粒子ビーム入射電流駆動については、2次元フォッカープランク方程式の高速解法 [2]を用いて計算した。粒子補給は強磁場側赤道面からのDTペレット (DT比 50:50) 入射で行った。ペレット入射量を用いて線平均電子密度を帰還制御した。

3. 結果

原型炉 (JA DEMO 2014) の定常運転プラズマのパラメータ[3]を用いて、完全非誘導電流駆動状態でのAr輸送の解析を行った。LCFSにおける電子密度 (2.4e19 m⁻³)、電子温度、イオン温度、Arイオン密度は、SONICコードによる原型炉プラズマシミュレーション[4]の結果に合わせた。そのシミュレーションでは、セパトトリクス通過パワー約240 MWにおいて、LCFSでのArイオン密度が1.2e17 m⁻³ (電子密度の0.5%) のときダイバータターゲットへの熱負荷を許容値 (約50 MW) 以下にできると評価されている。燃料イオンに対してピンチ速度を導入し、高自発電流割合・高閉じ込めのために必要と思われるピーキングした電子密度分布 ($n_e(0)/\langle n_e \rangle \sim 1.5$) を模擬した。加熱・電流駆動としては、エネルギー 1 MeV, パワー 90 MW (on-axis 72 MW, off-axis 18 MW) の重水素の中性粒子ビームを想定した。設計値 (電子密度の7%) と同程度のヘリウムを含んでいる。

$D^{AN} = 0.05$ m²/sの場合の計算結果の一例を図1と図2に示す。図1は各種パワー、電子密度、各種電流、Arイオン密度の時間変化である。DTペレット入射により線平均密度を一定 (0.83e20 m⁻³, グリーンワルド密度の1.24倍) に保った条件で、核融合出力1.5 GW (アルファ加熱パワー 0.3 GW) を達成するようにコア部の熱拡散係数を

調整した結果、規格化ベータ値 $\beta_N = 3.9$ 、Hファクター $H_{98y2} = 1.48$ となった。これらは設計値($\beta_N = 3.4$ 、 $H_{98y2} = 1.31$)より若干高い。一方非誘導駆動電流はプラズマ電流を超え、いわゆるオーバードライブの状態となっている(図1(b))。電流駆動の観点からはNBパワーを設計値(83.7 MW)まで下げることが可能と思われるが、必要なHファクターはさらに上がってしまう。プラズマ電流(設計値12.3 MA)を上げることも考えられる。

時刻200秒までにAr密度はほぼ定常に達しているが主プラズマからの放射パワー P_{rad} の上昇は小さい。Arの蓄積による燃料希釈の影響で核融合出力は10%程度低下している。電子密度、イオン密度、電子温度、イオン温度、Ar密度の径方向分布を図2に示す。Ar密度はややピーキングしているが、電子密度と比べるとその割合は小さく、電子密度に対する割合は中心で $n_{Ar}(0)/n_e(0) = 0.21\%$ 、体積平均で $\langle n_{Ar} \rangle / \langle n_e \rangle =$

0.20%に留まり、表面での割合0.5%より低く、設計値(0.23%)と同程度であった。ただし、セパトリティクス通過パワー P_{sep} は330 MW程度となり(図1(a))、ダイバータシミュレーションで想定された値(約240 MW)をかなり上回っている。これは P_{rad} が60 MW程度に留まった(図1(a))からである。 P_{rad} を増やすために、主プラズマへさらに不純物を注入することが考えられる。またダイバータターゲット等からのタングステンの混入も想定される。講演では、Arに加えて、希ガス(クリプトン、キセノン)あるいはタングステンを入射した場合の結果についても報告する予定である。

- [1] H. Takenaga et al., NF **43**, 1235 (2003).
- [2] R. Funabashi, et al., PFR **15**, 2401071 (2020).
- [3] Y. Sakamoto et al., IAEA-FEC 2018 (FIP3-2).
- [4] N. Asakura et al., NF **57**, 126050 (2017).

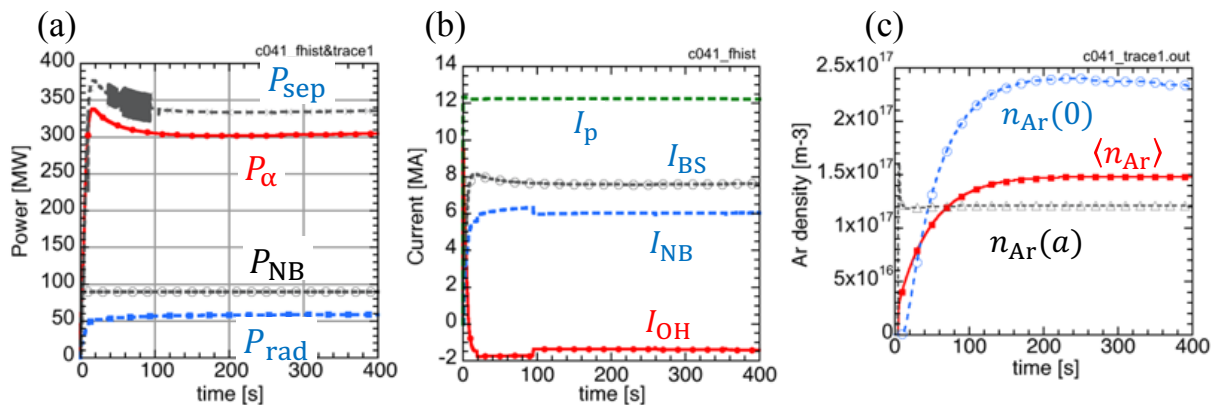


図1 (a) セパトリティクス通過パワー P_{sep} 、アルファ加熱パワー P_α 、NBパワー P_{NB} 、主プラズマ放射パワー P_{rad} 、(b) プラズマ電流 I_p 、自発電流 I_{BS} 、NB駆動電流 I_{NB} 、誘導電流 I_{OH} 、(c) 中心Arイオン密度 $n_{Ar}(0)$ 、表面Arイオン密度 $n_{Ar}(a)$ 、体積平均Arイオン密度 $\langle n_{Ar} \rangle$ の時間変化。

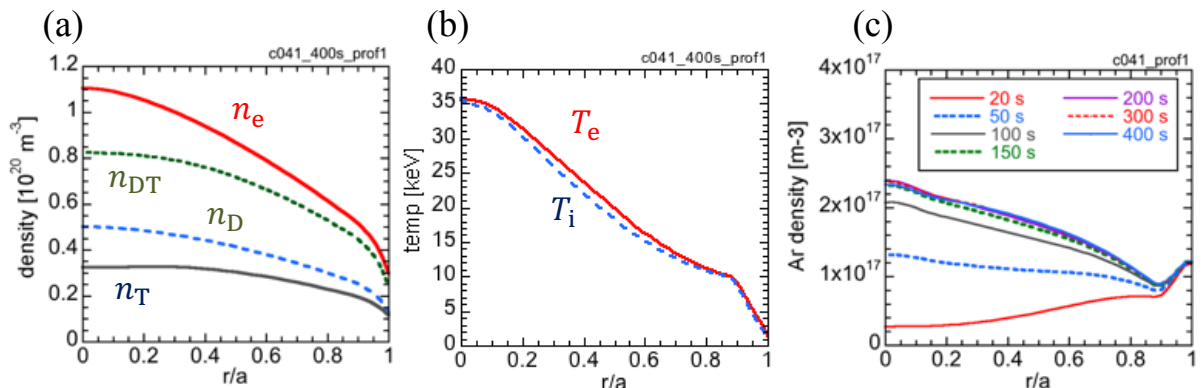


図2 時刻400秒における、(a) 電子密度 n_e 、重水素イオン密度 n_D 、トリチウムイオン密度 n_T 、 n_D と n_T の和 n_{DT} 、(b)電子温度 T_e 、イオン温度 T_i の径方向分布。(c) Arイオン密度の径方向分布の時間発展。