

核融合原型炉における粒子制御シミュレーション研究

Simulation study of fuel particle control in fusion DEMO reactor

量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所
徳永 晋介

キーワード：核融合、原型炉、トカマク、炉設計、粒子制御

核融合発電実用化を目指した技術実証炉ITERの次のステップとして、発電実証や経済的実現性実証を目的とする核融合原型炉の概念設計活動が進められている。トカマク型核融合原型炉の燃料粒子循環系の設計は核融合出力、密度限界、非接触ダイバータなど多様な物理と関連し、それら全てと整合する炉内の粒子循環を実現するような供給・排気系をデザインする必要がある。これらを満足するための制御ノブの検討、核融合出力制御に必要な燃料ペレット入射系の概念設計、およびダイバータ排気性能の検討の進捗状況について報告する。

1. 核融合原型炉と粒子制御

核融合エネルギー開発における技術実証炉ITERの次のステップとして、発電実証と経済的実現性実証を目的とする原型炉の概念検討が進められている。日本国内ではオールジャパンの研究体制である原型炉設計合同特別チーム（特別チーム）を中心とした戦略的な研究開発が国の指針 [1] に沿って活発に進められている。核融合原型炉はITERと同様にトカマク方式であり、その性能として 1. 数十万kWを超える定常かつ安定した電気出力、2. 実用に供し得る稼働率、3. 燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖、を同時に実現することが条件として課せられている。トカマクでは特に、これら3つの条件を実現するための設計要素同士が互いにトレードオフの関係で現れるため、テーマ個別の検討に終始するのではなく、物理もコードも幅広い範囲にまたがる複数の設計課題検討を相互の条件整合性を保ちつつ進め、全体で最適となるパラメータの検討を行う必要がある。

図1にトカマク原型炉の主な構造を示す。

図1 (5) の赤く塗られている領域にトーラス型のプラズマが保持される。ITERや原型炉では最も低い温度で起こせるDT核融合反応を利用するため、重水素DとトリチウムT、および核融合反応により生成されるHeが主成分の混合プラズマである。

核融合出力の大きい原型炉では、プラズマ表面からゆっくりと漏れ出てくるプラズマの熱流束を受け止めて処理するダイバータにもこれまでにない高い性能が要求される。

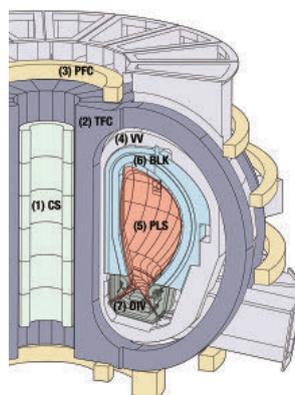


図1 トカマク原型炉の主な構造

(1) センターソレノイド (CS)、(2) トロイダル磁場コイル (TFC)、(3) ポロイダル磁場コイル (PFC)、(4) 真空容器 (VV)、(5) 核融合プラズマ (PLS)、(6) 増殖ブランケット (BLK)、(7) ダイバータ (DIV)

図1 (7) のダイバータに当たっているプラズマの脚のような部分へ磁力線に沿ったプラズマ流に乗ってくる強大な熱流を受け止めるには、ダイバータの非接触化と呼ばれる構造形成現象 [2] を利用する必要がある。非接触ダイバータでは、プラズマがダイバータ板に当たって起こる表面再結合およびプラズマ温度が下がることにより促進される体積再結合により発生する中性原子・分子が、プラズマに衝突して運動エネルギーを奪うことで、プラズマが急速に冷却されて壁まで届かなくなり、ダイバータ板への熱負荷を大幅に低減できる。このような構造形成を起こし維持するためには、上流から来る熱流束に対して十分高い周辺領域での粒子密度が必要となる。

しかしトカマクプラズマにはGreenwald密度限界 [3] と呼ばれるプラズマ粒子密度の経験的に知られている上限があり、これに近づくとプラズマの熱閉じ込め性能（冷めにくさ）が劣化する、またはディスラプションを引き起こす。したがって原型炉では、核融合の燃料としてのコアでの密度、主にプラズマ境界付近の密度が問題となるGreenwald密度限界、強大な熱流束に耐える非接触ダイバータ形成のためのダイバータ領域での粒子密度といった、互いに関連した異なる領域の複数の密度条件を同時に満足する粒子制御が必要となる。

2. 原型炉における粒子制御が満たすべき諸条件の検討

2.1 核融合出力制御に必要な燃料供給位置の研究

発電装置である原型炉にとって重要な核融合出力は、燃料である重水素DとトリチウムTの密度 (n_D , n_T) の積と、温度の関数である反応率で決まる。

$$P_{\text{fus}} = eE_{\text{fus}} \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{T_i} dV$$

ここで e は素電荷、 E_{fus} はDT核融合反応

1回で発生するエネルギー（定数）で17.6MeV（中性子：14.1MeV、 α 粒子：3.5MeV）。

制御ノブは、イオン温度 T_i に依存する反応率 $\langle \sigma v \rangle_{T_i}$ 、そして n_D と n_T であるが、ネット出力が得られるほど経済効率の高い核融合炉では、プラズマ温度を支える加熱の8割近くが核融合で発生する3.5MeVの α 粒子による自己加熱であるため、温度は強い自律性を持ち直接制御が困難である。そのため燃料粒子供給による燃料密度の制御が核融合出力の制御ノブとして最も有望視されている。

燃料供給による出力制御を行うために必要な粒子ソースの大きさや深さについて検討するため、1次元（小半径方向）のプラズマ磁気面平均量の輸送計算と、2次元（ポロイダル平面）の平衡計算を組み合わせた1.5次元輸送コードを用いて核融合出力制御シミュレーション研究を行った。今回、炉設計への適用を目的に開発が進んでいた1.5次元輸送コードATLASに燃料ペレットによる粒子ソース項を与えるペレットモジュール、およびその制御ロジックモジュールを追加した。プラズマ表面へ入射されたペレットによる粒子ソース分布は、図2に示すプラズマ中心側にテールを持たないレイリー分布関数で模擬し、中性子計測に基づくフィードバック制御により核融合出力を目標値に維持する燃料粒子供給を行う。

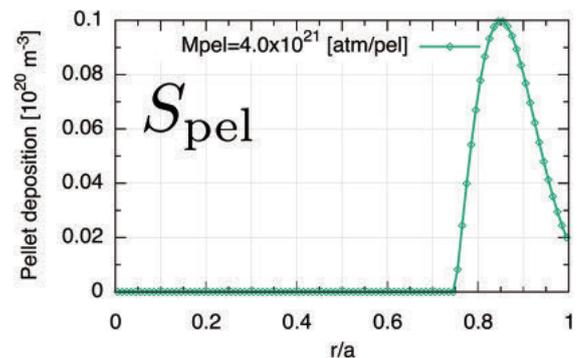


図2 燃料ペレット粒子ソース分布
（ペレットサイズ： 4.0×10^{21} [atom/pellet]、
分布ピーク位置： $r/a=0.85$ の場合）

核融合出力にはプラズマの温度分布と密度分布が非常に大きく影響するため、適切な輸送モデルを検討する必要がある。またシステムコード（炉設計活動の最初に炉の概形を決める、簡易0次元モデルにより種々の炉設計要素間のトレードオフを検討するコード）で仮定されたパラメータ [4] を再現しなければ炉設計検討の一部にならない。温度分布に関しては、システムコードで仮定したエネルギー閉じ込め改善度を再現する必要がある。ITER Physics Basisに示されたエネルギー閉じ込め時間の経験則IPB98 (y, 2) スケーリング [5] からの予測値に、炉設計値である閉じ込め改善度を掛けた閉じ込め性能を再現するように輸送モデルを与えるため、同様に経験的な輸送モデルであるBohm/gyro-Bohmモデル [6, 7] を採用した。出力への影響の大きいプラズマ表面に形成されるペDESTAL（外部輸送障壁）による温度上昇を考慮するため、経験的なL-H遷移条件を超えるとBohm項の勾配スケール長が連続なステップ関数（sigmoid関数）状にプラズマ小半径からイオンラマ半径のオーダーにシュリンクしてgyro-Bohm的になりペDESTALが形成される簡易モデルを用いた。ペDESTAL高さや厚さは、ペDESTAL stored energyに関するCordeyスケーリング [8] と、EPED1モデル [9] により調整・検証を行った。

密度分布は粒子拡散と内向きの対流による粒子則（ピンチ） [10] によって密度ピーキング率 $n_{ax}/\langle n \rangle$ が決まり、これも出力制御に強い影響を与える。ここで n_{ax} は磁気軸での密度、 $\langle n \rangle$ は体積平均密度。粒子の乱流輸送は、拡散についてはBohm/gyro-Bohmモデルの表式に従い、粒子ピンチはシステムコードで仮定されたピーキング率1.3に近い分布になるよう与えている。

また輸送コードではスクレイプオフ層やダイバータ領域を解いていないので、粒子排気

効率も仮定する必要がある。排気効率はプラズマ表面から出て行った粒子のうちダイバータで排気されて戻って来ない粒子の比率であり通常たかだか数%である。排気されなかった粒子はリサイクリングフラックスとしてコアへ還流する。以下の検討では、燃料DT粒子の排気効率は3%、核融合反応で発生するHe粒子は水素同位体と違い単原子分子として排気されるため、排気効率は半分の1.5%とする比較的保守的な仮定を置いた。核融合反応で発生するHe粒子ソースの体積積分値は核融合出力要件から既に決まっている。このHe灰によるコアプラズマの燃料希釈を設計値（7%以下）に抑えるためには、核融合出力に比例するHe粒子ソースに対して粒子閉じ込め時間を十分に小さくする、すなわち密度に対して粒子スループットを大きくする必要がある。

上記のように炉設計パラメータと整合する輸送パラメータを与えた出力制御シミュレーションを実施した [11]。

図3は輸送コードを用いた核融合出力制御シミュレーションの時系列プロットである。(A)はプラズマに流れるトロイダル電流各成分（電磁誘導、外部駆動、自発電流）の時系列変化、(B)はペレットによるDとTの粒子ソース、(C)は電子e、D、T、Heの体積平均密度、(D)は核融合出力の時間変化を表している。

(A)の電流は図1(1)のCSに流す電流を変化させ電磁誘導により立ち上げた(Ohmic)電流(緑)、D中性粒子ビーム(NBI)入射による外部駆動電流成分(紫)と、プラズマ圧力分布に依存して流れる自発電流(Bootstrap)成分(水色)の時系列が示されている。330秒以降Ohmic電流がゼロになるようにNBIがフィードバック制御されている(ただし現状では積分値が0になっているだけである)。(B)はペレットによる粒子ソースで、420秒以降プラズマ密度のDT比率が

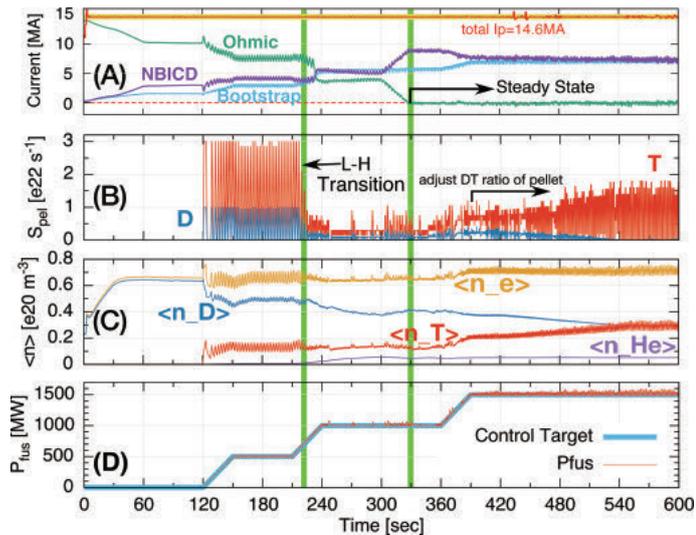


図3 燃料粒子制御による核融合出力制御シミュレーションの例

50:50になるよう徐々にペレット組成のDT比率を変化させており、最終的にほぼTペレットになっている。これは周辺に供給されるTよりも、NBIによりプラズマ中心へ供給されるD粒子の粒子閉じ込め時間が長いことや、重水素100%のガスパフの存在が影響している。(C)はD、T、Heと電子eの密度である。プラズマ境界近傍で密度限界の8割程度になるようにフィードバック制御されたDガスパフによりまずD100%のプラズマを立ち上げて、その後ペレットによりTが供給されると核融合反応が始まる制御シナリオとなっている。プラズマ密度のDT比率を50:50で固定して核融合出力を制御しようとすると全体の密度を変化させることになるが、燃焼立ち上げ時に密度が不足して非接触ダイバータを形成できずダイバータが熱負荷に耐えられない懸念が大きい。出力を目標値にするコアの密度条件、プラズマエッジでの密度限界、非接触ダイバータのための密度条件の内、DT比率が影響するのは出力条件のみであることに着目し、プラズマエッジやダイバータの密度を変えずに、DT比率の変化で核融合出力を制御し得ることを示したシミュレーション結果となっている。密度を維持したまま徐々にDTペレットによりT比率を上げ、ダイバ

ータにとってセーフティな運転領域側（高密度低出力）から運転点にアプローチしている。Ohmic成分をゼロにする（定常放電）ための外部駆動電流のNBIによるフィードバック制御により温度も変動するが、(D)の核融合出力に示す通り、燃料ペレットによる出力制御は温度変動の核融合出力への影響を抑制した安定な出力制御を実現している。DT比率の自由度を制御ノブとして利用することにより、安定したエッジ粒子密度の維持、外部電流駆動による定常放電維持と、ペレットによる核融合出力制御、およびダイバータにとってセーフティな燃焼立ち上げ、等の条件を満足させる制御が可能であることを示した。このケースでは示していないが、出力を下げることも問題なくできる。

このような出力制御ロジックが、核燃焼プラズマ（電子加熱が主）の輸送特性の不確実性に対してどの程度まで対応できるか、粒子ピンチ項の強さを変えて密度ピーキング率を変化させたケースで同様の制御ロジックを用いたシミュレーションを行った。図4は粒子ピンチを変えて密度ピーキング率を変化させた時の結果である。横軸はピーキング率であり、1.1（フラットな分布）から1.6近くまでの全ケースで核融合出力の目標値を達成して

いる。しかしピーキング率~1.1のフラットな密度分布のケースでは、この燃料ペレット

粒子ソースの深さではエッジ密度がGreenwald密度限界を超えることがわかった。

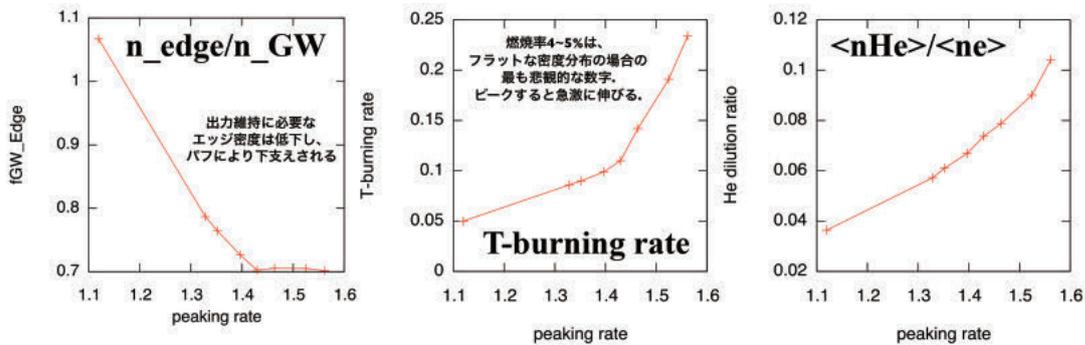


図4 密度ピーキング率を変化させた場合の運転点における (左) エッジ密度の密度限界に対する比率、(中) トリチウム燃焼率、(右) コアHe希釈率

図4では、密度ピーキング率が高くなるほど、燃焼効率も上がるが、He希釈率も上がってシステムコードの設計点から外れてゆく様子が示されている。輸送コードはまだ発展過程にあり、異なる装置に跨ってあらゆるパラメータ領域で定量的に輸送特性を予測することは難しいため、原型炉設計の観点では、特定の輸送モデルやコードに依存して設計するというより、予測の不確かさを制御でどの程度までカバーするかという視点でのシミュレーション解析が炉設計研究では重要である。

ペレット燃料供給シミュレーションでは、ペレット粒子ソースのデポジション深さに対するパラメータスキャンも行った。幅広い輸送パラメータに対応して、エッジ密度の拘束条件のもとで核融合出力の制御性を確保するには、ペレット粒子ソース分布のピーク位置が $r/a \sim 0.85$ より深いことが望ましいという結論が得られた。

2.2 燃料ペレット供給系の概念設計

前節で得られた $r/a \sim 0.85$ の燃料供給深さ目標を実現するためのペレット入射装置の概念設計を行った。ペレットの溶発深さの経験則であるNGSスケールング [12]

$$\lambda/a = 0.079 \times M_{\text{pel}}^{5/27} V_{\text{pel}}^{1/3} n_e^{-1/9} T_e^{-5/9}$$

(λ :侵入深さ、 a :プラズマ小半径、 M_{pel} :ペレット質量、 V_{pel} :ペレット速度、 n_e :中心電子密度、 T_e :中心電子温度) を用いてペレットの溶発位置を見積もると、高温な原型炉プラズマではペレットクラウドのドリフト現象 [13] を利用しなければ $r/a \sim 0.85$ に到達できないことがわかる。ペレットクラウドのドリフトは高磁場側から低磁場側、すなわち大半径方向 [14] であるため、ドリフトにより深い位置へ燃料をデポジションさせるためには、炉のインボード側からの入射が必要との結論がただちに導かれる。トカマクの内側はトロイダル磁場コイルの内脚で閉じておりペレットをインボード側赤道面付近から入射することは不可能であるから、ペレットはインボード側上下どちらかから入射する必要がある。原型炉のプラズマ平衡は下側のダイバータに十分な空間を割くために、トロイダル磁場コイル赤道面よりも上側に寄っているため、インボード側上方からの入射が最も合理的である。そこで、インボード側上方からの入射を想定して、 $r/a \sim 0.85$ へのデポジションを実現するために必要なペレット入射速度・角度、またペDESTAL温度などに関するペレット溶発・ドリフトコードHPI2 [14] を用いたパラメータスキャンを行った。

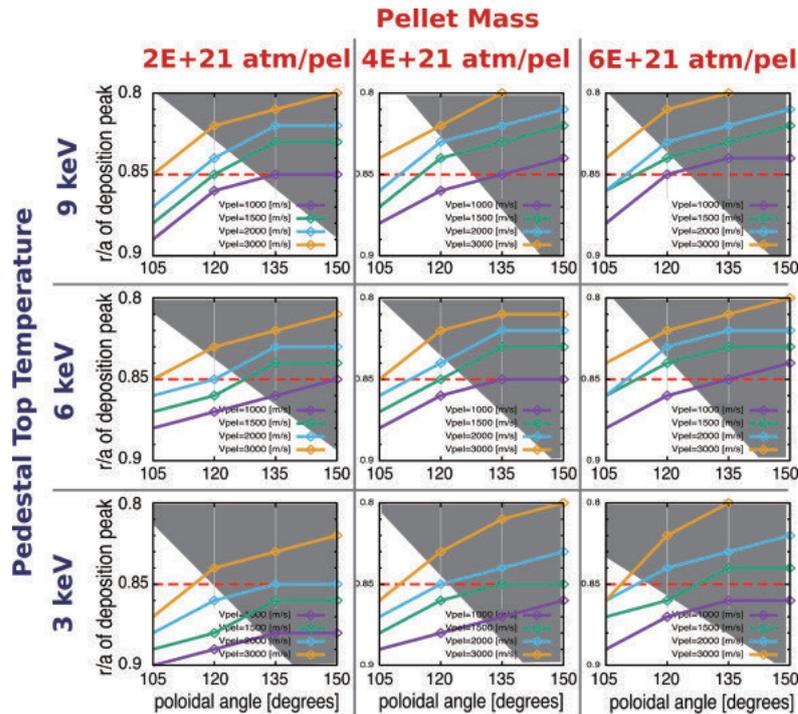


図5 HPI2を用いたペレット入射条件のスキャン計算

図5に、144点のHPI2スキャンシミュレーションの結果を示す。横軸が入射ポロイダル角度、縦軸は燃料デポジション深さ、色が異なる線は異なる入射速度を示している。グレーでハッチされているエリアは、ペレットが破碎する限界の速度とペレットガイド管の曲率半径との関係に関する経験式AUG calibrated relation [14]

$$v_c [\text{m/s}] = 1150 \sqrt{\frac{R [\text{m}]}{L [\text{mm}]}}$$

(ただし、 R はペレットガイド管の最小曲率半径、 L はペレットの長さ)を考慮して、原型炉ジオメトリのもとで、ペレットが破碎されて実現できない入射速度と角度に対応する点を指している。このスキャン結果から、ペレット速度2000 m/s、角度120度以上であれば、ほとんどの条件に対処できることが示されている。またこれを実現するために必要な入射管の設計条件として曲率半径10 m以上を原型炉ペレット入射装置要求仕様として策定

した。入射ルートは図6に示すように、インボード側上方より16本のトロイダル磁場コイルの間を通る。ペレットクラウドのドリフト方向を考慮して $r/a=0.8$ の磁気面上端を水平に見込めるプラズマ表面位置へと入射する[6]。ただしトロイダル磁場コイルは超電導状態維持のために極低温なので、入射管とコイルの間には熱遮蔽が必要である。

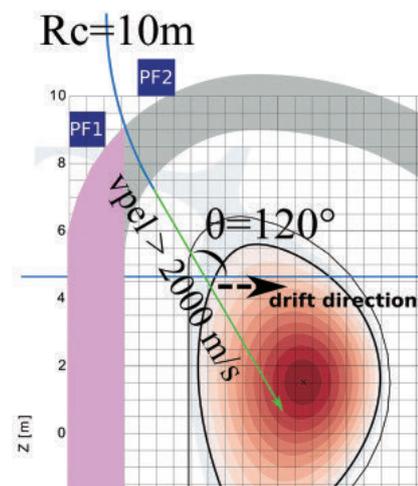


図6 原型炉燃料ペレット入射系要求仕様

2.3 原型炉ダイバータにおける排気特性解析

2.2節で燃料供給系に要求される粒子スループットの評価が、ダイバータにおける排気効率に依存することは述べた。原型炉では完全非接触ダイバータが必要と考えられ、そのような高リサイクリング領域における燃料粒子排気効率とHe灰の排気効率の予測が必要である。

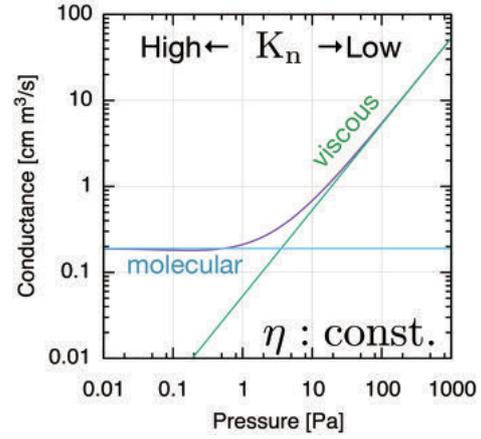


図7 円筒直管における粒子コンダクタンスの分子流から粘性流への遷移

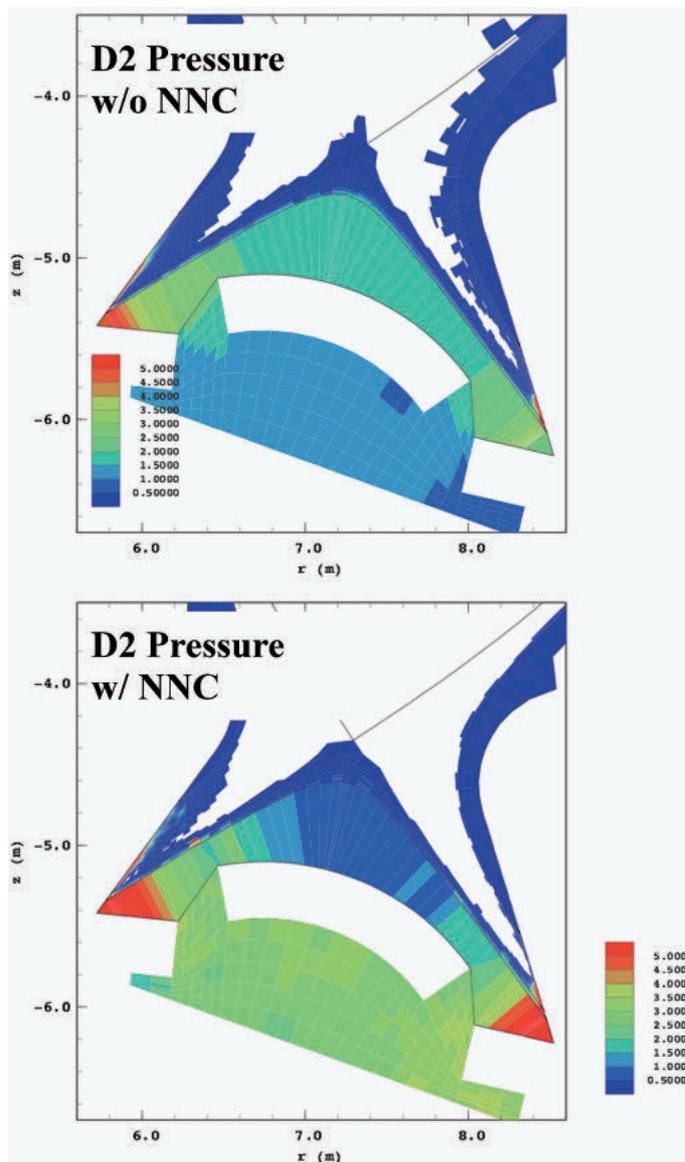


図8 サブダイバータ領域のD2分子圧力に対する中性粒子間衝突の効果

SOLダイバータシミュレーションコード：SONIC [15] による原型炉非接触ダイバータ解析結果に基づき、非接触化した領域の中性ガスのクヌーセン数（中性粒子間弾性散乱の平均自由行程とシステムサイズの比）を計算すると、分子流から粘性流への遷移領域に相当する。粘性流になると、図7に示すように粒子コンダクタンスの圧力依存性は質的に変化する。そのため粒子排気効率を定量的に評価し、設計検討に繋げるには、排気スロット部などダイバータ近傍のコンダクタンスを評価するために中性粒子同士の衝突効果を考慮する必要がある。KrsticによるD-D2およびD-Dの弾性散乱断面積 [16]、PhelpsによるH₂-H₂の散乱断面積データ [17] に基づき、Chapman-Enskog理論 [18] に基づき計算、多項式近似で関数化した分子間衝突レートをSONIC内の中性粒子拳動計算コードNEUT2Dに新規に実装した [19]。図8は中性粒子間衝突（NNC）を無視した時（上）と考慮した時（下）のD2分子圧力分布等高線である。ダイバータの先端部分や、ダイバータのドーム下領域で、分子圧力が大幅に上がっている様子が示されている。中性粒子間衝突により中性粒子の平均自由行程が縮小し、ダイバータ先端部、排気スロット側の圧力が上昇し、サブダイバータ領域の圧力が3 Pa程度まで上昇した。ほぼ排気ポンプ仕様として想定している値が得られた。これは背景プラズマを固定してNEUT2D計算のみを行った結果であるため、今後はプラズマと中性粒子の相互作用を解いて、非接触ダイバータの熱処理性能と排気性能両方の要求を満足するダイバータ幾何形状の検討を進める。

3. まとめ

核融合原型炉における出力制御、密度限界、非接触ダイバータそれぞれの条件を同時に満足するグローバルな粒子制御について検討を進めている。まず原型炉燃料ペレット入

射系の概念設計を行った。輸送コードを用いた出力制御シミュレーションにより、コアの出力条件とエッジの密度条件を個別に満足するための自由度としてD/T密度比を変化させる制御を提案し、シミュレーションでその有効性を確認した。核融合出力の制御性確保のために燃料粒子ソースに求められる条件としてデポジションピーク位置 $r/a \sim 0.85$ より内側という要求を決めた。ペレット溶発・ドリフトコードHPI2を用いたパラメータサーベイ、およびAUG calibrated relationを用いて、要求される燃料ペレットデポジション深さを達成するために必要なペレット入射系要求仕様を決定した。またダイバータの粒子排気性能評価に向けた中性粒子間衝突効果の実装を行った。次に粒子排気性能と非接触ダイバータの整合性検討に向けて、非接触ダイバータのパラメータレンジで無視できない中性粒子間の弾性散乱効果をダイバータコードSONICに実装し、その影響のテスト計算を行った。今後、非接触化によるダイバータ熱負荷低減と、コアと整合する排気効率を両立するダイバータ幾何形状の検討を進める予定である。

参考文献

- [1] “核融合原型炉開発に向けた新推進方策・ロードマップの策定にあたり”，松浦重和他，J. Plasma Fusion Res. 94, (2018) 575–582.
- [2] “境界領域プラズマ理工学の基礎”，高村秀一，森北出版 (2010).
- [3] “Density limits in toroidal plasmas”，M. Greenwald, Plasma Phys. Control. Fusion 44 (2002) R27.
- [4] “DEMO Concept Development and Assessment of Relevant Technologies”，Y. Sakamoto, et al., 25th IAEA Int. Conf. on Fusion Energy (St. Petersburg, Russia,

- 2014) FIP/3-4Rb.
- [5] “ITER Physics Basis, Chapter 2”, ITER Physics Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modeling and Database, Nucl. Fusion 39 (1999) 2175.
- [6] “Validation of a new mixed Bohm/Gyro-Bohm model for electron and ion heat transport against the ITER, TORE SUPRA and START database discharges”, M. Erba, et al., Nucl. Fusion 38 (1998) 1013.
- [7] “Fully predictive time-dependent transport simulations of ITB plasmas in JET, JT-60U and DIII-D”, T. Tala, et al., Nucl. Fusion 46 (2006) 548-561.
- [8] “A two-term model of the confinement in Elmy H-modes using the global confinement and pedestal databases”, J.G. Cordey, et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 670-674.
- [9] “Development and validation of a predictive model for the pedestal height”, P.B. Snyder, et al., Phys. Plasmas 16 (2009) 056118.
- [10] “トロイダルプラズマ輸送解析の基礎 4. 粒子輸送解析”, 竹永秀信, プラズマ核融合学会誌 79 (2003) 790-804.
- [11] “Conceptual design study of pellet fueling system for DEMO”, S. Tokunaga, et al., Fus. Eng. Des. 123 (2017) 620-623.
- [12] “Effect of transonic flow in the ablation cloud on the lifetime of a solid hydrogen pellet in a plasma”, P.B. Parks, et al., Phys. Fluids 21 (1978) 1735.
- [13] “Pellet injection experiments and modeling”, B. Pegourie, Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) R87.
- [14] “Considerations on the DEMO pellet fuelling system”, P.T. Lang, et al., Fus. Eng. Des. 96-97 (2015) 123-128.
- [15] “Kinetic modelling of impurity transport in detached plasma for integrated divertor simulation with SONIC(SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY)”, K. Shimizu, et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 068028.
- [16] “Elastic and Related Transport Cross Sections for Collisions among Isotopomers of H⁺⁺H, H⁺⁺H₂, H⁺⁺He, H+H, and H+H₂”, P.S. Krstic and D.R. Schultz, Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion Vol.8 (IAEA, Vienna, 1998).
- [17] “Cross Sections and Swarm Coefficients for H⁺, H₂⁺, H₃⁺, H, H₂, and H⁻ in H₂ for Energies from 0.1 eV to 10 keV”, A.V. Phelps, J. Phys. Chem. Ref. Data 19 (1990) 653.
- [18] “The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases”, S. Chapman and T.G. Cowling, (Cambridge University Press. 1970)
- [19] “Neutral-neutral elastic scattering effect on 2D structure of full-detached divertor in DEMO”, S. Tokunaga, et al., PSI2016, Rome, (2016), P.3.105.