

ダイバータへのプラズマ熱流削減を解明する 高精度コンピュータシミュレーションを目指して

Theerasarn Pianpanit, 石黒 静 児

プラズマ磁場閉じ込め実験装置においては、高温のプラズマを磁場の力で容器の壁から離すことによって、プラズマの温度が下がったり、プラズマが装置の壁を傷めたりすることを防いでいますが、僅かな量のプラズマが、内部の揺動やプラズマ粒子同士の衝突などによって外に漏れ出てきます。実際の装置では、磁場の形状を工夫することによって、漏れ出たプラズマが特別に配置されたプラズマ対向壁(ダイバータ板)に当たるようにしています。しかしながら、核融合発電を実現できるような将来の大規模な実験装置では、このプラズマの熱によるダイバータ板の損傷が非常に大きくなるのが予想されており、この熱流をいかにして減らすかが重要な課題となっています。この課題を解決する方法として、低温の中性ガスをダイバータ板の近傍に導入して熱を逃がしてやり、ダイバータ板への熱流を低減する「非接触プラズマ」が提案され、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)でも、生成条件を探る研究が行われています。また、大学の研究室の小規模な実験装置では、詳細な計測を行いやすいという利点を生かして、「非接触プラズマ」生成に関わる様々な条件やその状態に至る物理過程を探る研究が行われています。

私たちは、この「非接触プラズマ」の詳細な物理機構解明を目指した高精度なコンピュータシミュレーションコードの開発を進めています。プラズマは非常に多くの数のプラスの電荷を帯びたイオンとマイナスの電荷を帯びた電子からできており、それらが電氣的に相互作用します。また、非接触プラズマにおいては、これらの荷電粒子が中性ガスの粒子と衝突して起こる中性粒子の電離過程や荷電交換衝突といった物理過程も重要な役割を果たします。そこで、荷電粒子の運動を物理法則に基づいて追跡しつつ、個々の荷電粒子が中性粒子と衝突して反応する過程も追跡する手法を採用しました。これは非常に精密なシミュレーション手法ですが、計算時間が非常に多くかかるため核融合プラズマの研究ではあまり多くは用いられていませ

ん。小規模な直線型装置と同じスケールでシミュレーションすることを最初の目標として、現代の並列実行型スーパーコンピュータを効率よく活用できるように最適化したコードを開発し、これまでに直線型装置全体の約10分の1の大きさのモデルでシミュレーションを行い、ダイバータ板近傍でのプラズマ温度の低下及びダイバータ板への熱流の削減など、非接触プラズマに特徴的な事象を再現することに成功しました。

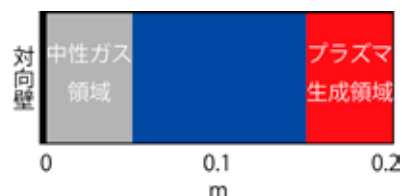


図1 シミュレーションの配位。左側の境界に対向壁(ダイバータ板)を配置しています。赤がプラズマ生成領域、灰色が中性ガス領域になっています。

図1はシミュレーションの配位の模式図です。小型の直線型実験装置に対応した配位を採用しており、左の端にダイバータ板、その前面に中性ガス領域、右側にプラズマ生成領域を配置しています。プラズマ生成領域から左側のプラズマダイバータ板に向かって流れていくイオンと電子は、ダイバータ板の前で中性ガスの粒子と衝突します。なお、中性ガスはプラズマより低い温度となっています。図2はプラズマの電子の温度、イオンの温度及び電子の密度の空間分布が時間の経過とともに変化していく様子を示しています。ダイバータ板から0.02mの領域のイオン温度と電子温度の変化をご覧ください。時間とともにイオン温度は下がっていきませんが、4マイクロ秒では、イオン温度より電子温度がかなり高いことが分かります。なお、シミュレーションは装置内部にプラズマが存在しない状態から始め、時刻0秒でプラズマ生成を開始しています。8マイクロ秒ではイオン温度はさらに低下していますが電子温度の低下はそれより大きく、結果としてイオン温度に近い値となっています。12マイクロ秒では、

電子温度はイオン温度にさらに近づき、ダイバータ板前面でプラズマ生成領域の温度の10分の1以下になっています。その一方で時間とともに上昇したダイバータ板前面の電子密度はプラズマ生成領域の密度の倍以上になっています。このように、急峻な温度と密度の勾配を持つ非接触プラズマが生成されていることが分かります。

非接触プラズマ生成の物理的な過程は以下のとおりです。まず、プラズマ生成領域より流れてきたイオンと中性粒子との間に、中性粒子の電子がイオンに乗り移る荷電交換衝突という物理過程が起こり、そのためにイオン温度が低下します。それは、図2で中性ガス領域の境界である0.05mの近傍でイオン温度がダイバータ板に向かって急激に低下していることに対応しています。次に、2体クーロン衝突というイオンと電子の直接的な相互作用により電子からイオンへのエネルギーの流れが生じ、電子の温度がイオン温度に近づいていきます。この一連の過程は、直線装置で行われた実験及びその実験結果を説明するための流体コードの計算結果と整合しており、それは私たちのシ

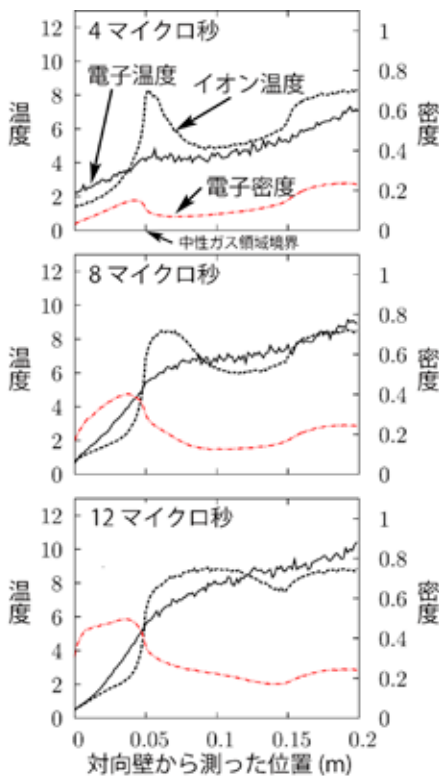


図2 イオン温度、電子温度及び電子の密度の空間分布の時間変化。ここで、温度は電子ボルト単位、密度は1立方メートルあたり千兆個の単位で表示してあります。

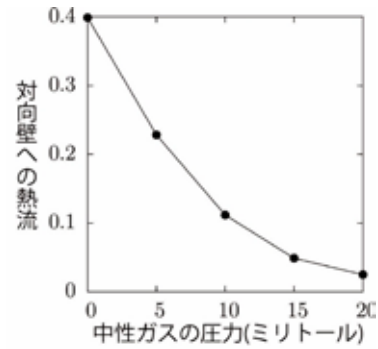


図3 中性ガスの圧力に対するダイバータ板への熱流束。ここで熱流は1平方メートルあたり10万ワットの単位です。

ミュレーションが非接触プラズマを概ね再現していることを示しています。図3は、中性ガスの圧力に対するダイバータ板への熱流を示しています。5ミリトルから20ミリトルへとガスの圧力を上げていくと、熱流は大きく減少します。20ミリトルでは、中性ガスを導入していない場合に比べて、熱流は約10分の1となっており、顕著な熱流削減効果が見られました。なおここで用いているトルは圧力の単位で1トルが133.32パスカルに相当します。

ここで紹介したシミュレーションでは、プラズマの温度が非常に低くなった際に重要となるイオンと電子の再結合過程は組み込まれていません。また、実際の装置よりも小さいモデルを採用しているために一部に調整パラメータを必要としています。現在は再結合過程の導入に向けた検討及びコードをさらに効率的にする研究を行っています。「非接触プラズマ」の研究では装置の大きさ、プラズマの温度、中性ガスの供給方法と種類などの条件により異なった様相が現れており、それらを統一的に理解することはできていません。本シミュレーション研究では、異なった条件をもつ実験を横断的に説明、予測するとともに、その制御方法を提案可能とすることを目標としてコード開発を進めています。

Theerasarn Pianpanit : 総合研究大学院大学 物理科学研究科
核融合科学専攻 5年一貫制博士課程5年
石黒静児 : 基礎物理シミュレーション研究系 研究主幹・教授
総合研究大学院大学 物理科学研究科
核融合科学専攻担当