

数値実験炉研究プロジェクト

洲 鎌 英 雄

核融合反応が起こるような超高温プラズマの中では、膨大な数のイオンや電子が、電磁場を介して互いに影響を及ぼし合いながら高速度で飛び交っており、様々な現象を引き起こします。このように複雑な核融合プラズマの振る舞いのメカニズムを理解し、また予測し、将来の核融合発電炉の設計に役立てるため、数値実験炉研究プロジェクトでは、大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクトや核融合工学研究プロジェクトと連携しながら、先端的な理論モデルとスーパーコンピュータを駆使した大規模なシミュレーション研究を行っています。ここでは、最近の研究成果を2件ご紹介します。

核融合科学研究所のLHDでは、プラズマの更なる性能向上を目指し、平成29年3月7日から重水素ガスを用いたプラズマ実験が開始されましたが、世界各国で行われている多くのプラズマ実験では、通常の水素(軽水素)イオンの2倍の質量を持つ重水素イオンを用いることで、熱や粒子の閉じ込めが改善する現象が観測されています。ところが、その詳しい物理メカニズムは分かっておらず、核融合研究における重要な未解決問題の一つとなっています。数値実験炉研究プロジェクトでは、磁力線に沿って往復運動する電子によって引き起こされる不安定性とそこから発達する乱流の詳しい解析を、本研究所の「プラズマシミュレータ」や、理化学研究所の「京」といった最新鋭のスーパーコンピュータを駆使したシミュレーションによって実現しました。その結果、図1が示すように、電子とイオンの衝突頻度が高いプラズマにおいて、プラズマの不安定性と熱損失の抑制が、軽水素よりも重水素において顕著に起こることを発見し、その物理メカニズムを解明しました。また、このメカニズムがLHDをはじめとするヘリカル型装置のみならず、現在フランスで建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)に代表されるトカマク型装置にも共通して存在し得ることも確認し、核融合プ

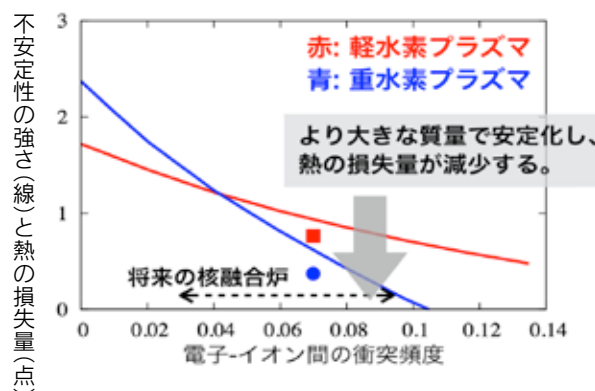


図1 軽水素プラズマと重水素プラズマに対するシミュレーションから得られた不安定性の強さ(線)が電子-イオン間の衝突頻度の増加に伴って減少する様子。将来の核融合炉で想定される衝突頻度の範囲で、不安定性の強さと熱の損失量(点)の抑制が軽水素よりも重水素で顕著になり得ることが分かります。

ラズマの高性能化の研究の進展に大きく貢献することが期待されています。

核融合反応によって発生する高速のアルファ粒子(ヘリウムイオン)は、プラズマを加熱して核融合反応に必要な高温状態を保持する重要な役割を担いますが、一方でプラズマの振動を発生させ、プラズマの閉じ込め性能に大きな影響を及ぼす可能性があります。数値実験炉研究プロジェクトでは、高

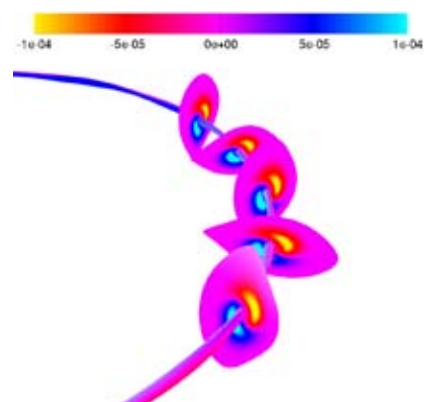


図2 シミュレーションで得られたLHDプラズマ振動現象における圧力変化の断面図。チューブ状の曲面はプラズマ中心部分の等圧面、カラーバーの青色と赤色は圧力の増加と減少をそれぞれ表しています。

速粒子とプラズマの振動との相互作用を詳しく調べることができるシミュレーションプログラムを開発しました。図2に示すシミュレーション結果は、LHDにおける高速粒子が引き起こすプラズマの振動の実験データをよく再現するとともに、実験では計測が困難な振動の詳しい振動の様子や、振動を増幅させる高速粒子と振動の相互作用を明らかにしました。このシミュレーションプログラムはLHDの他にも国内外の核融合プラズマ実験装置に適用され、実験結果との比較により、その信頼性が確認

されています。今回、LHDの実験を再現できたことで、世界各国の核融合プラズマ実験装置や将来の核融合炉において高速粒子が引き起こすプラズマ振動現象に対して、高精度のシミュレーション解析や予測が可能となりました。
(数値実験炉研究研究総主幹 / 核融合理論シミュレーション研究系 教授)

核融合工学研究プロジェクト

室賀 健夫

本プロジェクトでは、将来のヘリカル方式の核融合炉を想定した概念設計と、その開発に必要な工学研究を行っています。また、国内外の共同研究と併せて、最先端の研究を進めるとともに、基礎となる様々な専門分野における連携研究を進めています。以下に平成28年度の主な成果を紹介します。

炉設計では、物理計算を組み合わせた炉心解析が更に進展し、今後のLHD実験でのプラズマ性能向上に応じて、実現が見通せる核融合炉の設計がどのように変わるかがより明らかになりました。また、付加ヘリカルコイルの設置によりヘリカルコイルとプラズマの間の空間を広げ、より小さなサイズの装置において同程度の厚さのブランケット^{*1}を設置するスペースを確保する案など、複数の新しい概念が提案され、これらと上述の炉心解析を統合した、よりコンパクトな装置の設計提案も進められています。さらに、単純な動作で設置・交換が可能なカートリッジ方式のブランケットモジュールの概念が提案されるなど、安全性や保守性に優れた概念設計が進んでいます。

マグネット工学関連では、共同研究として中心ソレノイド (CS) モジュールコイルの性能評価試験を、超

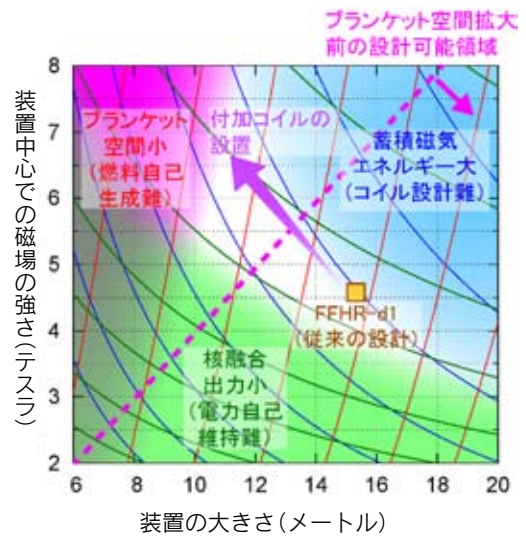


図1 核融合炉の設計領域解析の例。達成可能な装置サイズと磁場の強さは工学・物理双方の条件で制限されます(赤、青、緑の線はそれぞれブランケット空間、蓄積磁気エネルギー^{*2}、核融合出力の等高線を表し、それぞれの色が付いた領域は設計が難しいことを意味します)。付加コイルの効果により、ブランケット空間で制限される領域(もともとは破線の位置)が装置サイズの小さい側へとシフトし、よりコンパクトな炉設計への見通しが開けました。

伝導マグネット研究棟の大型超伝導試験設備を活用して実施しました。これは量子科学技術研究開発機構(QST:茨城県那珂市)で建設中の核融合実験装置

JT-60SA用に開発されたコイルで、重量20トン、直径2m、高さ1.6mの大型コイルを直接試験する設備を核融合科学研究所が有することから委託された研究です。コイルをマイナス269℃まで冷却して最大1万アンペアまで通電し、設計仕様を満たしていることが実証され、JT-60SAで運用できることが確認されました。

ブランケット研究では、京大・功刀研との共同研究により、強磁場下で屈曲管中を流れる液体リチウム鉛の電磁流体力学的(MHD)圧力損失(電磁ブレーキ効果)が流量に比例することを世界で初めて実証しました。この流れの予測には複雑な数値計算が必要ですが、実験結果を用いて計算の正確さを検証することができます。これにより核融合ブランケットのより正確な設計検討が可能となります。



図2 CSモジュールコイルの試験クライオスタットへの組み込み作業



図3 熱・物質流動ループ装置Orosshi-2を用い、流動直交磁場としては世界最強の3テスラの均一磁場下での液体リチウム鉛のMHD圧力損失測定に成功しました。

一方、ブランケット構造材料研究では、低放射化材料として研究開発されたバナジウム合金と一般工業材料であるニッケル合金との溶接による異材接合の技術開発が進展しました。溶接部に銅を加えることで、これらの合金の高強度の異材接合が可能になりました。

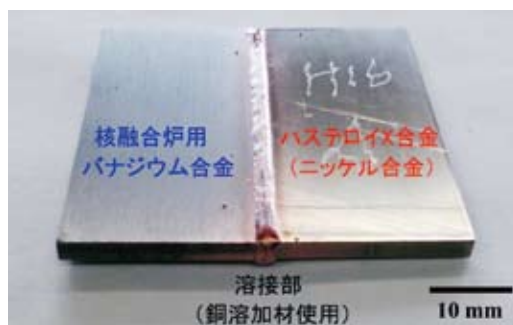


図4 バナジウム合金とニッケル合金の溶接サンプル

また、溶かしたスズなどの液体金属の噴流をシャワー状に並べ、超高熱のプラズマを受け止めるという新概念のダイバータ^{*3}が考案されました。従来型のタングステンなど固体金属ダイバータよりも高い熱除去効率が期待されることに加えて、プラズマとの接触面が常にリフレッシュされ、長寿命化が期待されることも重要な特長です。現在、有効性の実証に向けた研究を進めています。



図5 溶かしたハンダを用いた噴流実験の様子。噴流の安定化のため、噴流内にボールチェーンを入れています。

(核融合工学研究研究総主幹/核融合システム研究系 教授)

- *1 ブランケット：核融合炉のプラズマを取り囲むように設置される分厚い壁構造。プラズマからの熱エネルギーの取り出し、燃料の自己生産、外側にある極低温の超伝導コイルの保護、の3つの役割を担う。
- *2 蓄積磁気エネルギー：プラズマを閉じ込める磁場を発生する超伝導コイル(磁石)が持つ総エネルギー。一般にこれが高いほどコイルにかかる電磁力が大きくなり、また局所的な超伝導状態の消失(クエンチ)が起きた時のコイルの保護に必要なシステムが大型化し、設計が難しくなる。
- *3 ダイバータ：プラズマ中の不純物を取り除くために設置される排気装置。プラズマをガスに戻すために直接プラズマを当てる部分があり、非常に高い熱負荷に耐える性能が求められる(本誌233号研究最前線に関連記事)。