

# 頭の融合で“夢の火”を ～プラズマの統合数値解析から核融合発電プラズマの予測へ～

横山 雅之

「頭の融合で“夢の火”（核融合）を」。私の恩師である故若谷誠宏先生が1981年の新聞インタビューで挙げられたキーワードです。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において、まさに多くの頭脳を結集して、核融合エネルギーの実現に向けた様々な研究が大いに進展を遂げていることは、これまでの研究最前線などからご存知のことと思います。

今回の研究最前線では、LHDにおける実験研究とともに進めている理論・シミュレーション研究の中から、核融合発電プラズマの性能予測を目指した統合数値解析の研究についてご紹介いたします。様々な物理過程が複雑に絡み合う高温プラズマの振る舞いを、それぞれの過程に対応したコンピュータプログラムを統合することによって再現して理解を深め、さらに予測できるようにするという構想です。まさに、コンピュータ上で「頭の融合」を行って、今後のLHDプラズマや将来の核融合発電プラズマの性能予測へとつなげていくものです。

非常に大きな構想ですので、こつこつと積み上げていくところですが、プラズマの加熱条件に応じた到達温度の予測に関する「頭の融合」ができつつあります。プラズマの加熱方法の一つに、高速の水素中性粒子をプラズマ中に入射する方法があり、LHDにおける主力加熱源となっています。どのくらいのパワーを入射したらプラズマがどのくらいの温度になるのか、正確に予測できれば研究の進展もさらに加速させることができます。しかし、実際には、そう簡単にはいきません。プラズマ粒子同士の衝突や、プラズマの乱流状態によって発生する熱の伝わり、プラズマの状態の変化に伴って生じる閉じ込め磁場構造の変化、それがまた引き起こすプラズマ状態や加熱効率の変化など、枚挙に暇がない

ほどの物理過程が複雑に絡み合って、到達温度は決まっています。ですが「とても複雑です」と言っているだけで手をこまねいては予測すらできません。そこで、高温プラズマを記述する理論体系や物理モデル、あるいは、大規模シミュレーションから得られる数値データなどを融合して、少しでも予測を可能にし、さらに予測の精度を上げようと試みています。

図1にその流れ図を示します。四角で囲まれたアルファベット名のものが、コンピュータプログラムの名前です。それぞれ異なる物理過程を計算するものです。プラズマと閉じ込め磁場構造の状態の計算(VMEC,BOOZER)、高速中性粒子入射によるプラズマ加熱分布の計算(FIT3D)、熱の伝わり方を与える計算(プラズマ粒子同士の衝突によるものは数値データベースDGN/LHD、プラズマの乱流(理論モデル、大規模シミュレーションの数値データなど)関連研究の最新の成果も取り込み)の計算(TR)などに対応しています。これらのコンピュータプログラムは、国内外の研究者によって開発されてプラズマの数値解析に応用されてきています。それぞれの物理過程

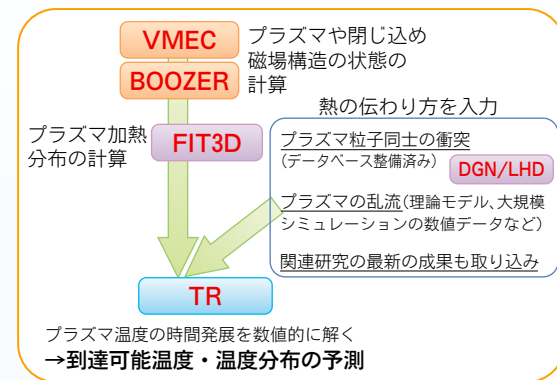


図1 コンピュータプログラム(四角で囲まれたアルファベット名のもの)の統合パッケージの概念図

を専門に研究する研究者が必要な計算を行うことが多かったのですが、「頭の融合」によって全体を統合して計算できるようにしたのが、図1のパッケージです。それぞれのプログラムは、それぞれの研究者の使い勝手がよいように改良されたり、また、異なるコンピュータ環境で使われたりしてきています。また、何より、それぞれの物理過程を理解した上で統合を行わないと、物理的に正しい計算を行うことができません。ですから、一言で「統合する」と言っても、それぞれの計算から必要な情報を取り出して別のプログラムの必要な場所に正確に受け渡す、それも、その都度人手を必要としたり、専門の人に計算を依頼するようでは統合数値解析の加速につながらない、ということで、計算の中身である物理過程の相互理解とともに、実験データを取り込んだり計算データを扱ったりする技術も必要となります。核融合科学研究所の研究者や国内外の共同研究者が持つ幅広い専門性と高度なスキルでこの統合作業を進めることができます。

ただし、残念ながら、図1は完成版ではありません。今は、上から下への一方向の計算になっていますが、プラズマ加熱によってプラズマ状態の変化が起こると、閉じ込め磁場構造も変化しますので、その状況に応じたプラズマや閉じ込め磁場構造の状態を再計算する必要があります。それによって加熱分布も変わります。それぞれの物理過程の特徴的な時間スケールを考慮しながら、状況に応じて、同じコンピュータプログラムを何度も動かす必要があるのです。基本的な統合を進めながら、常に、このような「融合の高度化」も行っています。

図2に、結果の一例として、この統合パッケージによって計算された到達温度予測(実線)と、その計算で仮定した加熱条件やプラズマ密度で行ったLHD実験(検証実験)で観測されたイオン・電子温度分布(データ点)を示します。赤色の電子温度の方は、プラズマの中心部から周辺部まで、予測と実験結果がほぼ一致していて、計算に与えた熱の伝わり方がほぼ妥当であると言えます。しかし、青色のイオン温度の方は、中心部で実験結果の方が高く、周辺部では逆に予測の

方が高い、という状況になっています。イオンの熱の伝わり方として入力した情報が、現実のものとは異なっていて再考が必要であることを示しています。このように、LHDプラズマ実験データを活用しながら、計算に入力する「熱の伝わり方」を工夫することで、LHDプラズマにおける熱の伝わり方を精度よく把握することができます。そのような理解を深めることで、未到達の温度領域への予測精度を向上させていきます。

今回は、プラズマの温度を解析対象として、コンピュータ上で「頭の融合」を行っている研究についてご紹介しました。「頭の融合」の高度化や、LHDにおける検証実験を積み重ねて予測の精度を上げることで、核融合エネルギー実現を見込むために不可欠なプラズマ温度1億度のLHDにおける早期実現や、将来の核融合発電プラズマの性能予測を効率的に進める牽引役になることを目指しています。読者の皆さんの中からも、この構想を支えてくださる方が現れていただくと、さらに研究を加速できます。コンピュータプログラムを作成したり、それらをつなげて計算したりすることに興味がおありの方、その力を、“夢の火”核融合を、夢でなく現実のものにするために活かしてみませんか。

(核融合理論シミュレーション研究系 准教授)

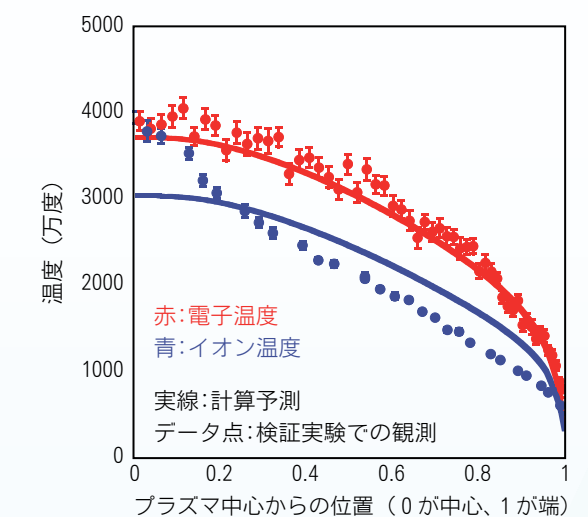


図2 統合パッケージによって計算された到達温度予測(実線)と、その計算で仮定した加熱条件やプラズマ密度で行った検証実験で観測された温度分布(データ点)との比較