

## 小特集

# 燃焼・高ベータプラズマの実現に向けたプラズマ分布制御の課題

## The Key Issues in Profile Control of a High-Beta Burning Plasma

### 1. はじめに

#### —核融合発電への鍵を握るプラズマ分布制御—

栗原 研一

日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2010年7月29日)

「核融合発電による電力供給が20XX年某月某日YY時ZZ分開始され、ついに人類はエネルギー問題から解放！」このような見出しの号外を夢に描きながら、大勢の人々が様々な形で研究開発を行っています。この目標自体は、核融合開発が世界的に始まった今から半世紀以上前でも変わるものでなかったと思われまふ。しかし、発電に至る道筋やシナリオが今ほど具体的に想像できることは過去にはなかったのではないのでしょうか。核燃焼プラズマを実現する国際熱核融合実験炉ITERが世界の主要7極による共同事業としてすでに南仏で建設を開始し、同時に最初の発電を行うことが想定される原型炉(DEMO炉)の設計やそこに向けた炉工学的な研究開発も日欧協力や国際共同等で本格化することが見込めるようになってきています。さらに並行して、ITERを補完し原型炉に直結する先進的炉心プラズマ研究を担当するサテライトトカマクJT-60SA計画が、日欧共同の幅広いアプローチ(BA)事業の一つとしてすでに始動しています。

このように現状の核融合研究開発を俯瞰したとき、人類にとっては核融合発電に向け実験炉建設に大きく舵が切られたところであり、一方国内に目を移せば、1992年に策定された我が国現行の第三段階核融合研究開発基本計画[1]において、いよいよその完遂に向かって着実に速度を速めているところと言えるでしょう。

大きな考え方の変革を駆動し得る新たな装置の建設時期には、ややもするとハードウェアの設計製作の進捗がより注目される傾向はありますが、完成後の実験の成否を左右する重要な活動が、実験装置のミッション実現策を含む研究計画の立案です。その詳細化の中で物理課題が抽出され、併せて課題を克服する方法(論)が検討されます。これは装置の成功に向けた「仕込み作業」とも言えるもので、

既存の知見を駆使して対策を考案し、必要に応じてシミュレータなどのソフトウェアの中で検証するなどした後、計測装置からアクチュエータに至る実時間フィードバック制御システムへの設計仕様を与えます。この仕様は、原型炉を想定した放射線環境など厳しい条件と整合がとれていることが必須となります。

このような時期に本小特集「燃焼・高ベータプラズマの実現に向けたプラズマ分布制御の課題」が企画されました。燃焼・高ベータプラズマでは一般的には核反応生成物であるアルファ粒子が自己加熱を行う結果、燃焼プラズマは自律性が高く、加熱などの外部からのアクチュエータを操作して状態変化をさせにくいと考えられています。その条件下で、不安定性を回避しプラズマ閉じ込め性能を高めるために、ポロイダル断面内での電流、密度、温度、回転速度などの分布物理量はアクチュエータからどのような応答特性を持ち、どのような実時間制御が有効で、そこに向けた高速実時間データ処理と制御のハードウェアは見通しが得られているか、といった燃焼・高ベータプラズマの定常維持に向けたプラズマ分布制御の課題を紹介することは、レビューとしての重要性に加え、今後の研究開発に道標を提供する意義は大きいと思います。そこでは困難さと同時にテーマの面白さについても紹介します。

本小特集の構成は、次のとおりです。まず、原型炉に要求されるプラズマを定常的に維持するため、自律・複合系を成す燃焼・高ベータプラズマの制御応答特性を理解し、最適なアクチュエータ、被制御量、制御ロジックを選択し制御を実施する必要がありますが、2章では、具体的な研究開発の中身を概観した後、その方向性についてのキーワードは、高度な科学的根拠をもつ簡素化であることを、鎌田裕博士が論説展開します。

次の3章では、核融合炉の経済性を左右する燃焼・高ベータプラズマを実現するためには、分布の最適化によってベータ限界を高めつつ高い燃焼度を得る必要があり、その際の細密な分布制御の応答特性について、実験およびシミュレーション研究によって得られた実例を基に、坂本宜照博士が詳説します。

続く4章では、原型炉で必要とされる実時間制御を明確にするため、それに先駆けてJT-60Uで実施した分布制御を含む実時間制御システムの開発と実験を例として紹介しながら、実時間制御の進展の現状とITERおよびJT-60SAで解決すべき課題、特にプラズマ予測機能の必要性について、鈴木隆博博士が総合的に論じます。

24章でプラズマ側からみた課題の抽出を実施しましたが、5章では、そのような課題を克服するために必須となる実時間制御システムの構築という観点で、実時間データ処理・演算での並列処理・実時間性、データの扱い等、最近になって大きな進展が見られるハードウェアの現状について、出射浩博士がレビュー解説を行います。通常、電

流、圧力、回転および密度計測の実時間再構築データ処理を基に、外部アクチュエータの制御演算を実時間で行うことは最低条件ですが、さらに4章の内容として触れた「予測機能」もプラズマ運転上の要件となります。具体的には、実時間でその瞬間でのプラズマが置かれたマクロの状態の評価（閉じ込め性能やMHD不安定性発生の予兆など）を行い、必要に応じて制御目標の修正演算を行うこととなります。

このようにすべての章は、この分野の専門家によるレビュー解説と課題の抽出結果が記述されています。本小特集を通じて、この研究分野の面白さが多くの学会員に伝わり、さらなる研究の進展に繋がればこの企画の所期の目的は達成したと言えるでしょう。

#### 参考文献

- [1] 原子力委員会策定「第三段階核融合研究開発基本計画」(1992年)

小特集執筆者紹介



くり はら けん いち  
栗原 研一

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット 研究主席。JT-60 の設計段階からプラズマ実時間制御システムの研究開発に従事。主な研究分野は、プラズマ平衡解析、電磁場数理解析、積分器開発など。特に実験への適用やもの作りに繋がる実践的なアプローチを志向。2008年以降は JT-60 の解体と JT-60SA の設計製作に従事。工学博士。趣味の1つは、鉄パイプ等を利用したエクステリア工作で、今のところ家族の評価は良好。



かま だ ゆたか  
鎌田 裕

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 先進プラズマ研究開発ユニット・JT-60 計画調整グループリーダー・研究主席、サテライトトカマク計画日本側プロジェクトマネージャ。専門は高ベータ・先進トカマク運転開発と周辺ベデスタル研究等。大事な言葉はフォア・ザ・チーム。妻と2人の息子あり。趣味はサボテン栽培(44年目)、水彩画(これで結婚)、料理(和洋中)、サッカー(最近ご無沙汰)、大工仕事(最近熱中)。



さか もと よし てる  
坂本 宜照

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究副主幹・理学博士。ITB 研究と先進トカマク開発を10年頑張ったところで JT-60 がシャットダウン。直後に BA-IFERC 事業チームへ異動、原型炉設計の日欧調整役を拝命するが、葛藤と戦いながら1年を過ごし、40歳(不惑)を目前に原型炉概念構築の重要性に目覚める。10年後の天命は如何に、20年後には原型炉が待っている。炉設計はド素人だが、燃焼プラズマ制御のできる範囲で原型炉を構想するを信念に、課題の洗い出しに取り組む。趣味：筋トレ&ジョギング(-10 kg 達成)、娘たちとのデート。



すず き たか ひろ  
鈴木 隆博

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門・JT-60 プラズマ設計グループ 研究副主幹。JT-60 実験に従事し、計測器開発やトカマク・プラズマの定常化に関する研究開発を行ってきた。最近 JT-60SA の制御関係なども担当している。写真は愛娘と近所の笠松運動公園にある遊具「カサマク」(勝手に命名)。



いで い ひろし  
出射 浩

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター准教授。1993年名古屋大学理学研究科博士後期課程単位取得退学。博士(理学)。専門は、ミリ波・高周波による加熱電流駆動・プラズマ計測。最近になってようやく「波」がイメージできるようになりつつあります。趣味は、以前は山行きでしたが、足が遠のいています。強いて言えば、プログラミングで新たな手法への試行。