

## ITERにおける核融合燃焼プラズマ計測 Plasma Diagnostics for burning plasma in ITER

石川 正男  
Masao ISHIKAWA

量研機構  
QST

### はじめに

ITERでは、核融合によるエネルギー生産を科学的・技術的に立証することを目的に、重水素と三重水素を燃料とする本格的な核融合による燃焼が行われ、核融合出力500 MW、エネルギー増倍率10を目標としてプラズマ運転が実施される。この中で、ITERのプラズマ計測装置は、「トカマク機器の保護のために必要な計測」、「トカマク・プラズマの基本的な制御に必要な計測」、「先進的なプラズマ制御に必要な計測」、「プラズマ物理研究に必要な計測」を目的として、プラズマの挙動と性能を正確に測定するため、60近くもの計測装置が設置される。現在、これらの計測装置は、ITER参加極（日本、EU、アメリカ、ロシア、中国、韓国及びインド）とITER機構が調達責任を分担して、精力的に詳細設計を進めているところであり、ファーストプラズマ前に設置される一部の計測装置については、実機の製作が進められている。このITER計測装置のうち、日本は5つのプラズマ計測装置と下部ポートのポート統合機器の調達責任を有する[1]。

### ITER計測装置の設置環境

ITERにおけるプラズマ計測の重要課題の一つは、その設置環境である。ITER計測装置は、プラズマによる輻射熱、ディスラプションによる電磁力と振動、電磁ノイズ、機器への放射線影響、核発熱等の負荷に対して健全性を維持する必要がある。さらに、原子力安全の観点から、放射線遮蔽と停止後線量率、事故時のトリチウム閉じ込め境界の維持、原子力規格に基づく構造設計等に関して多岐に渡る厳しい要求を満足しなければならない。このように、計測システムを構築するためには、計測精度の観点だけでなく、構造的、機械的な観点や規制適用などの観点からの広範な設計と研究開発が必要となっており、計測装置の調達責任を有する

担当極は、ITER機構が求める厳格な品質保証計画のもと、設計・開発を進めている。

### ITER計測装置の概要

ITERの計測装置は、大別すると磁気計測系、中性子計測系、光／赤外線計測系、ボロメータ系、分光／中性粒子計測系、マイクロ波計測系、プラズマ対向機器／運転監視計測系から構成される。本項では、それぞれの概要について簡単に説明するとともに、日本が担当する計測装置について紹介する。

#### 磁気計測系

ITERプラズマ運転時の磁気平衡状態の把握、プラズマや構造物に流れる電流の計測、プラズマの蓄積エネルギーの計測とともに、プラズマの形状や位置の制御などに使用される。

#### 中性子計測系

燃焼プラズマで生成される中性子発生量を測定するとともに、核融合出力の評価に用いられる。中性子空間分布は、高エネルギー粒子の輸送研究などにも使われる。

この中で、日本は真空容器に検出器を設置して、プラズマからの全中性子発生量を測定するマイクロフィッションチェンバー計測装置[2]の調達を進めている。

#### 光／赤外線計測系

主にITERプラズマの中心分または周辺部における温度と密度のプロファイルを測定するために使用される。

この中で、日本はプラズマ周辺部の電子密度、温度分布を測定する周辺トムソン散乱計測[3]の調達を担当している。

#### ボロメータ系

真空容器内の各所に設置され、トモグラフィ

一診断を用いて、プラズマ中心とダイバータ領域における放射パワーの空間分布に関する情報などを提供する。

#### 分光／中性粒子計測系

分光技術などを駆使して、不純物の種類と密度、入射粒子束、イオン温度、ヘリウム密度、燃料比、プラズマ回転、電流密度などのプラズマパラメータに関する情報を提供する。

この中で、日本はプラズマの電流密度を測定するポロイダル偏光計測装置[4]、ダイバータ板及びバッフルの一部の温度分布と入熱分布を計測するダイバータIRサーモグラフィ[5]及び、ダイバータプラズマ内の不純物及び水素同位体（トリチウム、重水素、水素）を測定するダイバータ不純物モニタ[6]の調達を担当する。

#### マイクロ波計測系

主にメインプラズマとダイバータ領域のプラズマを測定し、プラズマの位置を確認する計測装置である。

#### プラズマ診断と運転診断プラズマ対向機器／運転監視計測系

装置の保護と運転を円滑に進めるために設置される。プラズマ中心部だけでなくダイバータの状態を監視するために、複数の広角可視・赤外分光システムが設置される（ダイバータのターゲット温度、圧力、残留ガス分析器、エロージョン、ダスト、トリチウムの監視）。

#### **ITER における燃焼プラズマ計測における課題解決に向けた取り組み**

ITER 参加極及び ITER 機構は、調達責任を有する各計測装置の設計を進めているが、その設計は、現在、厳しい設計環境に対していかに健全性を維持するかといった、いわゆる工学的な内容に主眼が置かれている。

一方で、ITER 機構が主催する国際トカマク物理活動 (ITPA) [7] と呼ばれる、各極の専門家が自発的かつ継続的に ITER 計測における物理的課題を中心とする様々な課題の克服に向けた取り組みが進められている。特に、ITPA の計測トピカルグループでは、早急に解決すべき課題として「最重要課題」を抽出し、精力的に課題克服に向けた取り組みを進めている。現在は、「プラズマ対向第一ミラーの寿命の最適化」、「壁反射光の光学計測への影響」、「プラズマ制御システム」、「トモグラフィ手法の開

発」及び「平衡再構成手法の最適化及び検証」が最重要課題として取り上げられている。中でも、「トモグラフィ手法の開発」及び「平衡再構成手法の最適化及び検証」は、燃焼プラズマの理解や制御の重要性が増してきたことを背景に、2021 年に新たに加わった最重要課題であり、前者に関しては、トモグラフィ手法に関するワークショップが開催されるなど、精力的な取り組みが行われている。

また、ITPA の中で進められている取り組みの中で特徴的な取り組みが共同実験である。この共同実験では、一つの物理量（電子温度分布など）を計測する複数の計測装置による計測結果の比較評価を行ない、それぞれの計測装置の信頼性の検証を行なった他、燃焼プラズマを理解する上で重要な物理量の計測を世界各国の実験装置を用いて行う取り組みなどが進められており、これまでに多くの成果が出ている。現在、ITPA では、ガンマ線制動放射分光による逃走電子のエネルギー分布計測に対する共同実験が進められており、イタリア、ドイツ、スイス及び中国の研究チームが共同で実験を進めることとし、制動放射計測に必要な計測装置の設置と計測信号のモデル化の構築を同時に進め、これらをドイツの ASDEX-U、イギリスの JET、アメリカの DIII-D 及び中国の EAST といった世界各国のトカマク装置の実験に適用する計画が進行中である。

#### **おわりに**

本シンポジウムでは、ITER 計測の分野における最近の進捗状況について紹介するとともに、燃焼プラズマの理解に向けて物理的な課題に取り組む ITPA の活動にも触れながら、ITER の計測装置の現在の状況を報告する。

- [1] Y. Kawano et al., Proc. 24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, ITR/P5-35 (2012).
- [2] M. Ishikawa et al., Fusion Eng. Des. 86, 417 (2011).
- [3] E. Yatsuka et al, Fusion Engineering and Design 136 (2018) 1068
- [4] R. Imazawa et al., Proc. 27<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, FIP/P1-14, India (2018)
- [5] M. Takeuchi et al., Plasma Fusion Res. 8, 2402147 (2013).
- [6] T. Maruyama et. al., Plasma Fusion Res. 14, 3405080 (2019)
- [7] <https://www.qst.go.jp/site/jt60/5109.html>