

ITER計測装置の開発の進展 Progress on Development of ITER Diagnostic system

石川正男、谷塚英一、今澤良太、牛木知彦、野尻訓平、田中優、寺澤充水、波多江仰紀、布谷嘉彦
ISHIKAWA Masao, YATSUKA Eiichi, IMAZAWA Ryota, USHIKI Tomohiko, NOJIRI Kunpei, TANAKA Suguru, TERASAWA Atsumi, HATAE Takaki, NUNOYA Yoshihiko

量研那珂
QST-Naka

ITERでは、燃焼プラズマの特性を理解し、適切に制御を行うために、70以上の計測装置を用いて100以上のパラメータを測定する計画である。ITERでの計測装置の開発は、これまでの実験装置におけるそれとは大きく異なり、次のような様々な困難を克服する必要がある。

- ・ 原子力施設としての厳格な安全性の担保、品質保証が必要なこと、
- ・ 既存装置と比較して桁違いの負荷（中性子・ガンマ線、熱、電磁力等）のもと、同様以上の計測性能が求められること
- ・ 保守作業が極めて困難なため、高い信頼性及び稼働率が必要なこと

こうした背景のもと、日本は表1に示す5つの計測装置と、計測装置を格納する下部ポート2番のポート統合機器の調達取り決めに締結し、ITERの厳しい要求事項を満足する計測装置の開発を進め、詳細設計及び実機製作を進めてきた。

マイクロフィッションチェンバー[1]は小型の核分裂計数管を真空容器の中に設置して、プラズマからの中性子発生量を測定する計測装置である。開発において、プラズマ加熱用電子サイクロトロン加熱に用いられるマイクロ波の一部が金属製ケーブル(MIケーブル)を過熱し、損傷を招くことが大きな課題であることが判明した。これを克服するため、マイクロ波の過熱を低減できる銅めっきを信号ケーブル表面全長にわたって精度よく均一に薄膜(5ミクロン $\pm$ 1ミクロン)めっきす

る技術を開発し、銅をめっきすることで増大する電磁力に影響も同時に抑えることで、ITER運転中の健全性を示すことに成功した(図1参照)。これにより、真空容器に設置する信号ケーブル等の機器の最終設計レビューを通過し、製作設計レビューをへて実機製作を完了し、2022年7月にITER機構へ空輸による初の実機の輸送を実現した。

ポロイダル偏光計[2]は、複数の遠赤外線レーザーをプラズマに入射し、プラズマとの相互作用で生じた偏光状態の変化を測定する。偏光状態の変化の測定値と他の計測装置で測定した磁場・電子密度などのデータも合わせて平衡再構成を行うことで、プラズマ内部の磁場分布を得ることができる。現在、調達活動は設計の最終フェーズにあ

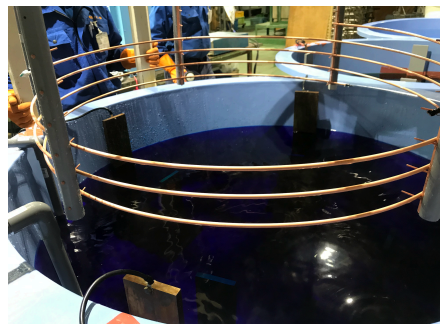


図1. MIケーブルに対する銅めっき時の様子

表1. 日本が調達を進める計測装置の概要と現在の調達状況

装置名	計測パラメーター	現在の調達状況
マイクロフィッションチェンバー	総中性子発生量及び核融合出力	真空容器内機器: 輸送完了 その他機器: 最終設計/詳細設計
ポロイダル偏光計	プラズマの電流分布(安全係数分布)	レトリフレクター: 製作設計 その他機器: 最終設計
周辺トムソン散乱計測	周辺プラズマの電子温度分布及び密度分布	全構成機器: 最終設計
ダイバータ赤外サーモグラフィ	ダイバータ板及びバッフルの温度分布	全構成機器: 最終設計
ダイバータ不純物モニタ	ダイバータプラズマの不純物及び水素同位体	全構成機器: 詳細設計
下部ポート2番統合機器	計測機器の搭載と放射線遮蔽の役割を有する支持構造物	真空容器内機器: 最終設計 真空容器外機器: 詳細設計

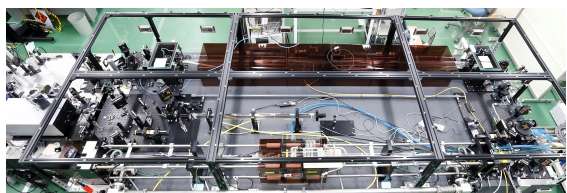


図2-1 ポロイダル偏光計用プロトタイプレーザー外観

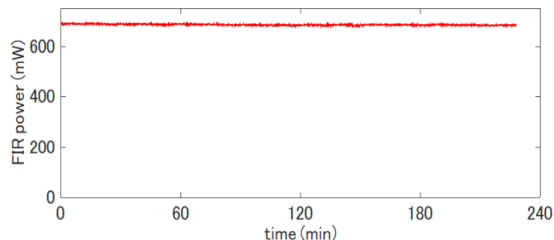


図 2-2 プロトタイプレーザーの出力

り、一部機器は実機の製作を開始している。プロトタイプレーザー（図2-1）を開発し、遠赤外線レーザーの出力は最大で0.81 Wを得た。図2-2は3.8時間連続で発振したときの遠赤外線レーザーの出力を示している。687 mWの出力で出力変動はpeak-to-peakで3.59%であり、ITERの要求を満たすことに成功した。また、レーザーを折り返して計測室に戻すために、タングステン製のレトロリフレクターを真空容器内に設置する。現在、実機製作のための工場認証試験を進めている。実機に適用する製法でプロトタイプを製作したところ、レーザー反射面の角度は十分な精度で製作できることを実証し、ITERの計測要求を満足する結果を得た。

周辺トムソン散乱計測装置 [3]は、プラズマ中にレーザー光を入射し、電子による散乱のスペクトルから電子温度及び密度を求める計測装置である。光学機器の開発においては、高放射線環境下で高い信頼性及び高性能な計測が成立することを示すことが課題であり、これを実証するため、光学素子にガンマ線 (10 MGy) 及び中性子照射 ($6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$) を行い、性能変化を調べる試験を行った。集光光学系用の光学素子は、耐放射線性が高い合成石英の他に、色収差補正用ガラス4種類にガンマ線及び中性子を照射し、分光透過率の変化を調べる試験を行った。その結果、図3に示すように、酸化セリウムを添加した重フリントガラスSF6G05は、中性子照射後も周辺トムソン散乱計測装置で波長600-1100 nmにおいて分光透過率を維持できることを明らかにした。

ダイバータIRサーモグラフィ[4]は、中赤外線領域 ($1.5 \mu\text{m}$ - $4.5 \mu\text{m}$) の光を分光測定することにより、ダイバータターゲット表面及びバッフル表面の温度 (200°C ~ 3600°C) 分布及び入熱パワー分布を測定する計測装置である。ITERの結像光学系ではプラズマ運転中の真空容器の熱伸びにより、

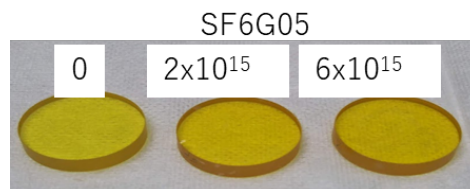


図3-1 SF6G05の中性子照射試験写真 (数値は高速中性子フルエンス)

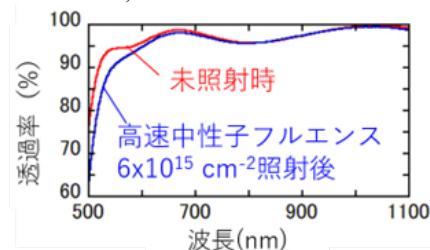


図 3-2 SF6G05 の照射前後の分光透過率

真空容器内光学系と真空容器外光学系の光軸にずれが生じることが課題であった。この度、運転中の光軸ずれ及び光路長を検知し、遠隔で能動的に調整する光軸調整手法の開発を行った。この結果、真空窓位置における光軸ずれを角度にして $\pm 0.05^\circ$ 、位置にして $\pm 1\text{mm}$ 以下程度の高精度で調整できることを実証した。

ダイバータ不純物モニター [5]は、ダイバータプラズマの不純物及び水素同位体を計測する光学装置である。ディスラプション時に光学ミラーなどを格納するミラーユニットに働く大きな応力に耐えうる設計の実現が急務であったが、機器を固定するボルトの最適化を進め、さらに嵌め込み構造を採用することで、ITERの運転時発生するあらゆる応力に耐えられる光学機器が設計できる見通しを得た。

下部ポート2番のポート統合機器は、計測機器の搭載と放射線遮蔽の役割を有する支持構造物である。計測機器を搭載するため、計測支持構造体の固定機構にはポート内に高精度に設置され、ITERにおける荷重条件に耐える強度が要求されている。しかし、遠隔保守によるインストール、周辺構造物（ポート及びダイバータ関連機器）との温度差による熱膨張差の許容などの課題がある。本研究では、簡便な遠隔保守で、高設置位置精度を得ることができ、十分な強度を有する固定機構を考案した。

本発表では、上記計測装置及びポート統合機器の開発状況の詳細のほか、ITERの計測装置の開発の現状も報告する。

- [1] M. Ishikawa et al., Fus. Eng. Design 109–111, 1399 (2016)
- [2] R. Imazawa. et al., Fus. Eng. Design, 192, 113607 (2023)
- [3] E. Yatsuka *et al.*, Fus. Eng. Design, 136, 1068 (2018).
- [4] T. Ushiki. et al., Review of Scientific Instruments, 93, 084905 (2022)
- [5] T. Maruyama et al., Plasma Fusion Res., 14 (2019) 3405080
- [6] M. Tanaka. et al., Fusion Eng. Des. 193, 113808 (2023)