



## プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

### 8. ITER 計測装置の開発

#### 8. Development of Diagnostics for ITER

伊丹 潔, 河野康則, 波多江仰紀, 杉江達夫<sup>1)</sup>, 小川宏明, 石川正男, 北澤真一, 今澤良太, 谷塚英一, 小野武博, 竹内正樹, 山本剛史, 嶋田恭彦, 丸山敏征, 太田 彰  
 ITAMI Kiyoshi, KAWANO Yasunori, HATAE Takaki, SUGIE Tatsuo, OGAWA Hiroaki, ISHIKAWA Masao,  
 KITAZAWA Sin-iti, IMAZAWA Ryota, YATSUKA Eiichi, ONO Takehiro, TAKEUCHI Masaki,  
 YAMAMOTO Tsuyoshi, SHIMADA Takahiko, MARUYAMA Toshiyuki and OHTA Akira

\* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, (株)日本アドバンステクノロジー<sup>1)</sup>

(原稿受付: 2016年3月8日)

日本が開発を進めている5つのITER計測装置は, 設置ポートの設計統合を担当するITER機構, EU及び米国と連携をとりながら, ITER全体の工程に従って詳細設計を進めている。先行して調達取決めを締結したマイクロフィッションチェンバーの真空容器内機器は, 詳細設計を終えて最終設計段階に進み, ITERに設置される計測機器として初めて真空容器内信号ケーブルの製作を開始した。ポロイダル偏光計は2015年11月に予備設計レビューを行い, 周辺トムソン散乱計測, ダイバータ不純物モニター, ダイバータ赤外サーモグラフィーについても, 2016年に予備設計レビューを開催する予定である。

#### Keywords:

ITER, Fusion Plasma, Plasma Diagnostics, Port Plug

#### 8.1 はじめに

ITER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, 58の計測システムが設置される。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。

ITER計測装置は, トカマク建屋 (Tokamak Building) 内にトラスを取り囲む形で, 上部ポート, 水平ポート及び下部ポートに対応する3階層 (L2, L1, B1レベル) に設置される。図1に, トカマク建屋 (点線の右) と計測建屋 (点線の左) のL1レベル平面図を示す。水平ポート (EQ#1) から反時計廻りに番号が付けられている。レーザー計測装置, 中性粒子計測及び真空紫外分光計測装置は, 計測建屋側のポートに割り当てられている。

プラズマを見込む計測機器は, 中性子遮蔽機能を有するとともに真空及びトリチウム境界を構成するポートプラグに組込まれる。真空窓と生体遮蔽 (Bio Shield) の間のインタースペース (Interspace) では, 建屋からの張り出しステージ上に中間計測機器が設置される。生体遮蔽の外側のポートセル (Port Cell) と呼ばれる小部屋には, 計測制御機器や検出器が設置される。

ポートプラグ内の計測機器のメンテナンスやリモートハンドリング機器を設置する際にポートプラグを引き抜く場合, ポートセル後部の扉からギャラリー (Gallery) に, ポートセル内の計測機器, インタースペースの計測機器を順次引き出す。その後キャスクをインタースペースに挿入し, ポートプラグを引き抜き, キャスク内に収納する。ポートプラグを収納したキャスクはギャラリーを経てホットセル建屋に運ばれ, メンテナンスを受ける。

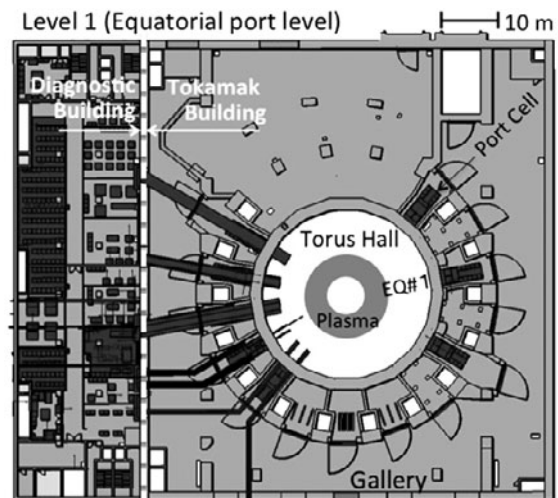


図1 水平ポート階層のトカマク建屋と計測建屋平面図。

\* 現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

corresponding author's e-mail: itami.kiyoshi@qst.go.jp

計測建屋 (Diagnostic Building) の計測室 (Diagnostic Hall) には、レーザーや分光器等の大型計測機器及び信号処理・データ収集用のキュービクル (ITER 用計装制御盤) が設置される。収集された計測データは、中央制御・データ収集・情報通信設備 (CODAC: Control, Data Acquisition and Communication) に転送され、プラズマの実時間制御に利用されるとともにデータベース化される。

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だけでなく、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。そのため ITER 計測装置は、厳格な品質保証計画により詳細設計、最終設計を行い、それぞれの設計段階の終わりに ITER 機構の予備設計レビュー (PDR: Preliminary Design Review)、最終設計レビュー (FDR: Final Design Review) を受ける。さらに実機の製作前には、製作準備レビュー (MRR: Manufacturing Readiness Review) を受け、承認された設計に基づいて製作が行われる。

日本は、ITER 計測装置のうち工学設計活動開始時の価値 (クレジットという) で 15.4% に相当する 5 つのプラズマ計測装置と上部ポート及び下部ポートのポート統合機器の調達責任を有する [1]。マイクロフィッションチェンバーについては ITER 機構との調達取決めを 2012 年 4 月に締結し、詳細設計を開始した。このうち真空容器内機器については最終設計段階にある。ポロイダル偏光計、周辺トムソン散乱計測装置、ダイバータ不純物モニター、ダイバータ IR サーモグラフィについては、2013 年 8 月に調達取決めを締結し、詳細設計段階である。ポロイダル偏光計に関しては、2015 年 11 月に予備設計レビューを開催した。残る 3 つの計測装置についても 2016 年以内に予備設計レビューを開催する予定である。これに加えて、日本はポロイダル偏光計を設置する上部ポート #10 及びダイバータ不純物モニターを設置する下部ポート #2 の統合設計及び上部ポートプラグ及び下部ポート計測支持構造体の製作を含む調達取決めを 2017 年に締結する予定である。

ITER 全体スケジュールでは、大半の計測装置の詳細設計が 2017 年までに、最終設計が 2019 年までに終わる予定になっており、日本の計測装置もそのスケジュールに沿って設計が行われている。本章では、日本が調達を分担している計測装置の開発の現状を報告する。

## 8.2 マイクロフィッションチェンバー

ITER 計画が目標とする核融合出力 500 MW の燃焼プラズマの制御に最も重要な計測装置として、マイクロフィッションチェンバーを含めて 6 種類の中性子計測装置が設置される。

マイクロフィッションチェンバー (MFC: Micro Fission Chamber) は、小型の U235 核分裂計数管 ( $\phi 14 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ) を MFC 検出器として、ブランケットモジュールと真空容器の間の空間に、トロイダル方向 2 箇所、ポロイ

ダル方向上下 2 箇所に設置する。検出器を除いて、MFC の真空容器内機器は、真空容器の組立直後に設置されるため、他の計測装置に先駆けて詳細設計を進めている (図 2 参照)。

MFC 検出器は真空容器内に恒久的に設置されるため、冗長性を確保する観点から 1 箇所につき 2 本の検出器が設置される。また、信号参照用として U235 を含まないダミー検出器が 1 本設置される。MFC 検出器は、真空容器による減衰を受けることなく中性子の計測が可能のため、真空容器外に設置する他の計測装置よりも精度よく中性子計測が可能であるという長所がある。検出器は、軽水炉で使用されてきた小型の U235 核分裂計数管を設計の基本とするが、真空容器温度の上昇に伴う第一壁ブランケット間の間隔の変化により熱中性子スペクトルが変化し、測定誤差が大きくなることが解析により明らかになった。そこで熱中性子を吸収する 1 mm 厚のカドミウムを検出器に巻いて、高速中性子を主に計測する設計改良を行った [2]。

検出器の信号は、検出器から上部ポートの真空導入端子までは、粉末状及び繊維状の酸化ケイ素 ( $\text{SiO}_2$ ) を絶縁材とし、内皮にアルゴンガスを封入した 2 重絶縁構造の 3 軸 MI (Mineral Insulated) ケーブルで伝送される。真空容器外は、3 軸ケーブルでポートセルに設置した前置増幅器を経て、計測室のデータ収集系に伝送される。なお、検出器はファーストプラズマ後に接続部で既設ケーブルと接続される。

MFC 真空容器内機器の詳細設計とは、大きく以下の四つに分けられる。第一に ITER 機構によるケーブル敷設を可能にするための設置ルートの設定、ケーブル固定方法の設計。第二に、敷設したケーブルが、ディスラプションによる電磁力と振動、核発熱による高温等、ITER の過酷な使用環境に耐える構造設計。第三に、ITER の過酷な使用環境でも MI ケーブルが長期的に絶縁耐圧特性、真空特性、インピーダンス特性等を維持できることを実証するための熱サイクル試験、振動試験、高温試験、また検出器から前置増幅器までのシステム全体のノイズ耐性を実証するためのノイズ試験等の各種試験。第四に、信号を真空容器外に取り出す真空導入端子の設計である。真空導入端子は、ITER の真空境界であるだけでなく、放射性物質であるト

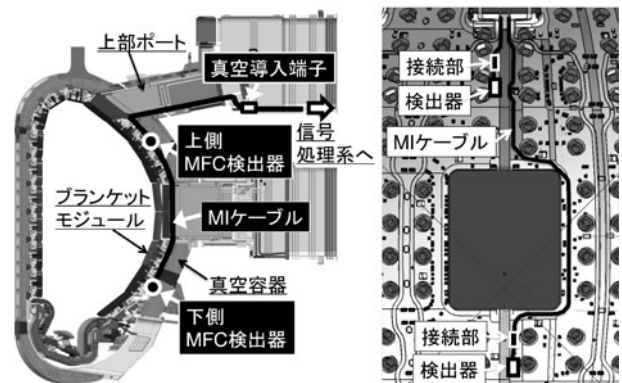


図 2 (a) MFC 検出器の位置. (b) 真空容器内における信号ケーブルの配置.

リチウムの閉じ込め境界を形成するため、ITERの安全重要機器に指定されている。この要求を満足するために、真空導入端子周囲に二重の境界を設け、第一境界で真空漏洩度の要求基準を、第二境界において、真空境界及び冷却水の漏洩や火災時の温度上昇等の事故発生時にもトリチウム閉じ込めを維持する設計を考案した。

2014年の予備設計レビューにおいて上記の詳細設計が承認され、MFCの真空容器内機器[3]の開発は最終設計フェーズに移行した。このうちMIケーブルについては、最終設計レビュー、製作準備レビューが承認され、ITERに設置される計測装置として初めて、実機の製作が開始された。

### 8.3 周辺トムソン散乱計測装置

周辺トムソン散乱計測装置 (ETS: Edge Thomson Scattering) は、水平ポート#10に設置され、小半径  $r/a = 0.85$  より外側のベDESTALからスクレイプオフ層の領域における電子温度、電子密度を5 mmの位置分解能、10 msの時間分解能で計測する。トムソン散乱計測では、レーザー光の電子による散乱スペクトルの計測であり、散乱断面積が非常に小さい。そのためプラズマへの大強度のYAGレーザー ( $\lambda = 1064$  nm) 光の入射、迷光の最小化及び大口徑の光学系による散乱光の集光が必須である。

これまで2系統レーザーの同時入射によるエネルギー7.66 J、繰り返し100 Hz、パルス幅30 nsの原型YAGレーザーを開発した[4]。日韓協定により、韓国KSTARにおいて原型YAGレーザーを用いてトムソン散乱計測を行い(図3(a))、このレーザーの信頼性を確認した。ITER用YAGレーザーの最新の設計では、1系統あたり5 J、50 Hzのレーザー光を交互に入射して、10 msの時間分解能を実現する2系統の構成としている。1系統のレーザーが故障した場合でも残りの1系統のレーザーで運転できる冗長性を確保するためである。第一壁からの反射による迷光を時間差で排除するため、レーザーパルスを4 ns程度にすることを目標に開発を進めている。2系統のレーザー光の合成は、それぞれ垂直偏光させたビームと水平偏光させたビームを、各レーザーパルスと同期して回転する半波長板を用いて同軸化することで行う(図3(b)) [5]。

各プラズマ計測装置の先端部光学系が設置されるポートプラグは、文字通りポートを塞いで、中性子遮蔽する役割がある。そのため、先端部光学系は、迷路構造を形成する複数の曲面ミラーと平面ミラーで構成されるミラー光学系であり、それ以外のスペースには遮蔽体を組み込み、必要な遮蔽性能を得る設計である。閉止フランジ背面において炉停止10<sup>6</sup>秒後の線量率を100  $\mu$ Sv/h以下にするため、それぞれの計測装置の寄与としては、15  $\mu$ Sv/h以下を目標に3次元モンテカルロコードであるMCNPを用いた遮蔽設計を行っている。大口徑の光学系を必要とするトムソン散乱計測では、特に設計条件が厳しくなる[6]。

550 nm から 1100 nm までの波長領域においてプラズマ周辺部で5 mmの空間分解能をほぼ満足する光学設計に基づく、ポートプラグ内の光路を図4(a)に示す。本章ではプラズマに近いミラーから順番にM1, M2, M3...と番号をつ

ける。M1はプラズマに対面する第一ミラーであり、ガス駆動方式のシャッターにより保護される。M3とM5はトロイダルミラーであり、M1からM4までは、水冷する必要がある。M6までのミラーは、計測遮蔽体 (Diagnostic Shield Module) に固定される。(図4(b)参照) 一つの水平ポートプラグには、3つの計測遮蔽体が収納される。計測遮蔽体の前面には、計測第一壁 (Diagnostic First Wall) が取付けられ、その開口部を通してプラズマを計測する。計測遮蔽モジュールの光路以外の部分は、核発熱を除去する水冷パイプを埋め込んだ中性子遮蔽体である。ETSの運転停止後の線量率への寄与は、15  $\mu$ Sv/hを大きく下回る。

集光された信号は、真空窓を経てインタースペースで光ファイバー束の端面に集光され、計測室のポリクロメーターで分光計測される。トムソン散乱計測装置の標準的な較正手法であるレーリー散乱の機会に限定されるため、メンテナンス時に、シャッターの裏面に較正用の光を照射して、集光光学機器と分光光学機器の較正を行う。加えて、ルビーレーザー ( $\lambda = 694.3$  nm) をYAGレーザーと同軸に入射して、ショット中にスペクトルチャンネル間の較正を行う[7]。

### 8.4 ポロイダル偏光計

ITERにおける電流分布計測には、先進的プラズマの実時間制御の観点から、プラズマ安全係数  $q = 1.5$ , 2及びプラズマ安全係数極小値の規格化半径位置、プラズマ物理研究の観点から  $q$  分布を10%の精度で計測することが、ポロイダル偏光計とモーショナル・シュタルク効果計測 (米国) に求められている。

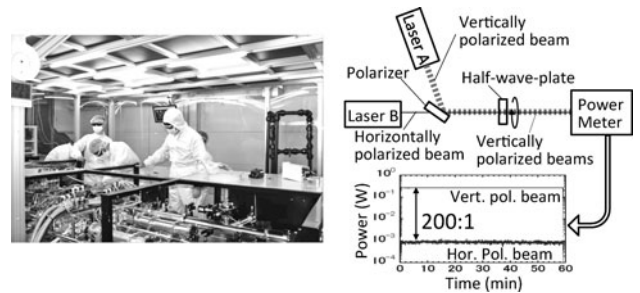


図3 (a)KSTARでのYAGレーザー運転。(b)ビーム合成の基礎実験結果。200:1の純度の偏光が得られた。

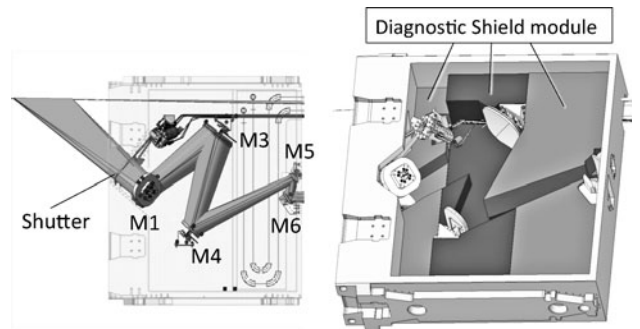


図4 (a)ポートプラグ内集光光学系のミラーとシャッターの配置。(b)遮蔽の配置。M1に対面するM2は隠れている。

ポロイダル偏光計(PoPola: Poloidal Polarimeter)では、上部ポート#10及び水平ポート#10から、10視線の遠赤外レーザー光をプラズマに入射し、第一壁に埋め込まれた回帰反射鏡で反射して戻って来たレーザー光の偏光状態の方位角 $\theta$ と楕円率角 $\epsilon$ を計測し、トモグラフィの原理で磁場分布を再構築し安全係数分布を求める[8,9].

偏光計測用のレーザーは、プラズマによる偏光状態の変化が大きいこと、50ミクロン帯に比べ伝送路の水蒸気による吸収が小さいこと、高速の検出器が利用できること等から、実績が豊富な波長119 $\mu\text{m}$ 波長の遠赤外レーザーの開発を進めている。

上部ポート階層(L2レベル)の計測室に設置した2本の遠赤外レーザー装置から、それぞれ上部ポート測定用の4ビームと水平ポート測定用の6ビームが分岐される。各レーザービームは、伝送ミラー機器(ポートセル)、入射ミラー機器(インタースペース)、真空窓、先端ミラー機器(ポートプラグ内)を経てプラズマ中に入射される。レーザービームはプラズマ第一壁に設置した回帰反射鏡で反射して逆の経路で、計測室に戻る(図5参照)。レーザー光軸の調整は、遠赤外レーザーと同軸の可視あるいはCO<sub>2</sub>レーザー光を用い、ポートセルの可動ミラー(M6)とインタースペースの可動ミラー(M3)及び真空窓の外枠に設置した光軸調整用回帰反射鏡により、真空窓の中心にレーザー光を調整する。さらに、計測室に戻ってくるレーザー光の信号が最大になるようにM3とM6を調整することで、レーザー光を回帰反射鏡の中心に入射する。

上記の光学設計及び中性子遮蔽設計を基に、ITERで想定される、核発熱、放射熱、ディスラプション時の電磁応力等の負荷条件を満足する光学機器の機械設計を行った。図6に、真空容器内ミラー光学機器設計を示す[6].

光軸調整が正しく行われるとともに、窓の厚みや光学伝送路内の湿度が設計通り実現されれば、計測室の検出器には各視線あたり175 $\mu\text{W}$ のパワーが検出される。

従来は、Faraday効果による方位角の変化 $\Delta\theta$

$$\Delta\theta \propto \int n_e B_{\parallel} dz$$

Cotton-Mouton効果による楕円率角の変化 $\Delta\epsilon$

$$\Delta\epsilon \propto \int n_e B_{\perp}^2 dz$$

をそれぞれ独立に計測してきたが、ITERの測定条件では独立ではなく、厳密には、 $\theta$ と $\epsilon$ の間にストークス方程式で表されるカップリングが存在するため、プラズマによる偏光状態の変化はプラズマ入射前の偏光状態に依存する。PoPolaでは、プラズマ入射前の偏光面を、Cotton-Mouton効果が最大となる $\theta=45^\circ$ 、 $\epsilon=0^\circ$ になるように調整し、検出器では方位角 $\theta$ と楕円率角 $\epsilon$ の絶対値を計測する。厳密解を用いる利点は、安全係数の計測精度の向上だけでなく、ITERあるいは原型炉のような高温プラズマにおいて、カップリング項の相対論効果による電子温度依存性を利用して、電流分布や密度分布に加えて、電子温度分布の再構

築が可能になることであり[10]、原型炉に向けた計測としても期待される計測手法である。偏光計測方式について、JETにおいて干渉計をベースとした実績があるが、ITERではポートプラグ内の先端ミラー光学機器の精密な光路調整を常時行うことは困難であるため、干渉の原理を用いない回転波長板方式を採用して、開発試験を行っている[11].

ITER機構で2015年11月に開催された予備設計レビューでは、上記の詳細設計に基づき、10本の視線で、 $\theta$ と $\epsilon$ をそれぞれ、0.5°と0.7°の精度で計測することにより、標準シナリオにおいて、ITERポロイダル偏光計だけで、10%の精度で安全係数分布が計測できることが示された(図7参照)。

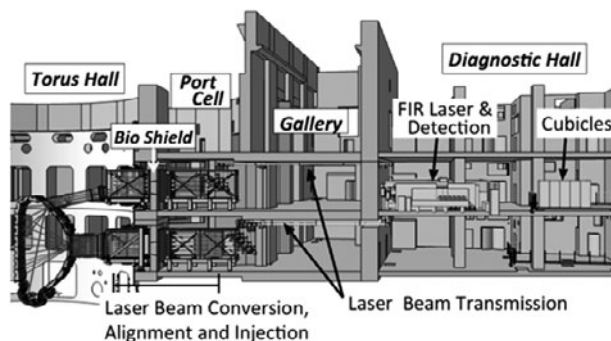


図5 ポロイダル偏光計の機器構成。

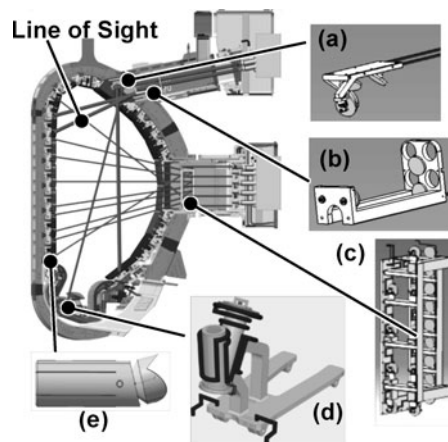


図6 (a)~(c)はポートプラグ内に設置するミラー。(d)はダイバータに、(e)はブランケットに設置する回帰反射鏡。将来の拡張性のため、最大13視線分用意。

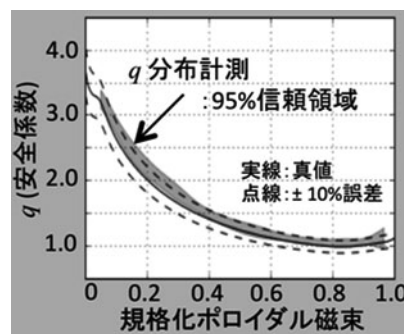


図7 q分布計測と計測精度。

### 8.5 ダイバータ不純物モニター

ダイバータ不純物モニター (DIM: Divertor Impurity Monitor) は、分光的な手法でダイバータプラズマを2次元的に高空間分解能で計測する。ダイバータ不純物モニターは、金属不純物 (Be や W 等), 注入ガス不純物 (Ar や Ne 等), 燃料比, ヘリウム排気, イオン温度, 電離フロント位置 (Ionization Front) の計測を通じ, プラズマ運転やダイバータプラズマ制御に重要な役割を果たすとともに, ダイバータプラズマ物理研究に大きく貢献する。

ダイバータ不純物モニターは, 上部ポート#1, 水平ポート#1, 下部ポート#2の3つの光学システムにより, プラズマを観測する。Da 分布のシミュレーション計算に, 3つの光学システムの視線を重ねたものを図8 (a)に, ドーム下光学系の視線方向の信号強度分布を図8 (b)に示す[12]。

上部ポート光学システムは, ダイバータを見下ろす光学系 (71視線) を有する。水平ポートシステムはトロイダル接線方向を向いた光学系 (71視線) を有する。下部ポートシステムは, ダイバータカセットの隙間からプラズマを見込む2つの光学系 (142視線) とダイバータドーム下から内外ダイバータターゲットを見込む光学系 (80視線) を有する。各光学系で集光された光のうち紫外光 (200 nm - 450 nm) はポートセル内の紫外分光器で, 可視・近赤外光 (400 nm - 1000 nm) は光ファイバーで計測建屋内の計測室に伝送され可視分光器で波長分解能 0.01 - 1 nm, 時間分解能 1 ms - 10 ms で測定される。

各ポートの光学系は, 視野角と方向, 他の計測機器との取合いによる利用可能空間の制限が異なるので, 光学機器構成は大きく異なるが, 基本的に先端部光学系, リレー光学系, 結像光学系の3つで構成される。ファイバー結像面からの光線追跡では, 各ポートの光学系においてダイバータ付近で2-10 mmの像となり, 要求される空間分解能 (20-40 mm) より十分に良い性能が確保できる[13]。また, ベーキングによる測定系の移動量とITERへの設置に関わる組立手順の検討から, 光軸調整方法の検討を行った。

一例として, 上部ポートの光学機器配置を図9に示す。ポートプラグ先端部に固定された4枚の金属ミラーにより, ダイバータ付近の像を光路上に投影する。このうちM1とM2は平面ミラー。M3は軸対称の非球面ミラー, M4はトロイダルミラーである。入射瞳近傍に第一ミラー (M1) を保護するガス圧駆動シャッターを設置する。プラズマからの光は, この先端部光学系から真空窓を通して, 6枚の金属ミラーと色収差補正のための2群のレンズから構成されるリレー光学系に送られる。リレー光学系ではチルト機構, R (大半径) 方向のシフト機構及びZ (垂直) 方向のシフト機構を有する可動ミラー群を駆使して光軸調整を行う。また結像光学系では, ファイバー結像面をR方向に移動して焦点調節を行う。金属ミラーの材質は, 第一ミラーは中性粒子によるスパッタリングに強いモリブデン, それ以外は反射率特性の良いアルミニウムを用いる。

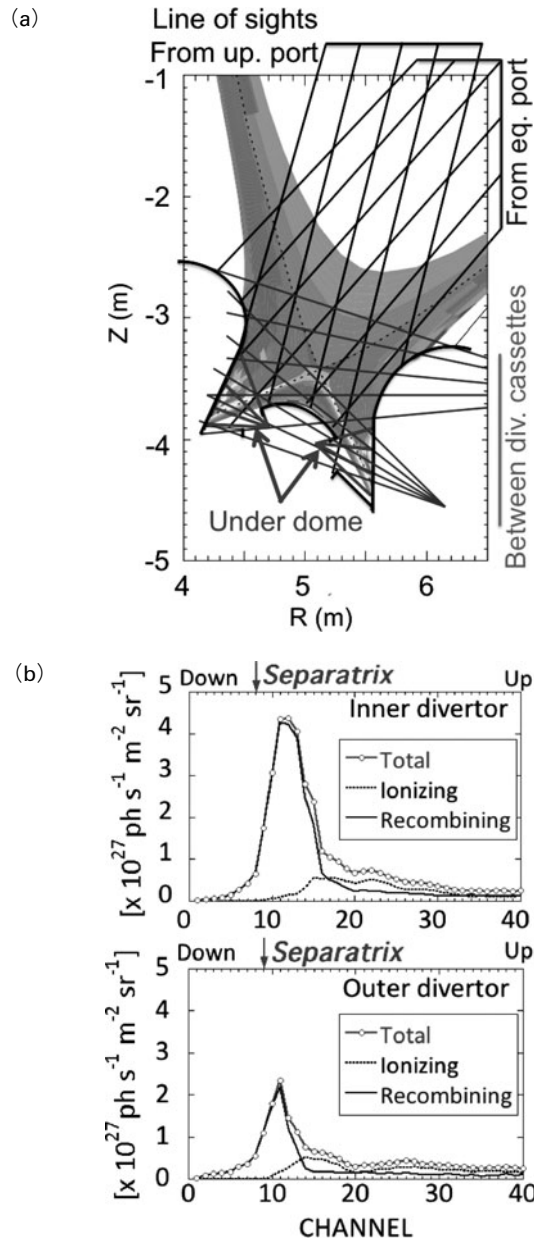


図8 (a) プラズマの  $D\alpha$  発光分布と視線。 (b) ドーム下光学系の視線方向の  $D\alpha$  発光分布 (電離と再結合の寄与)。

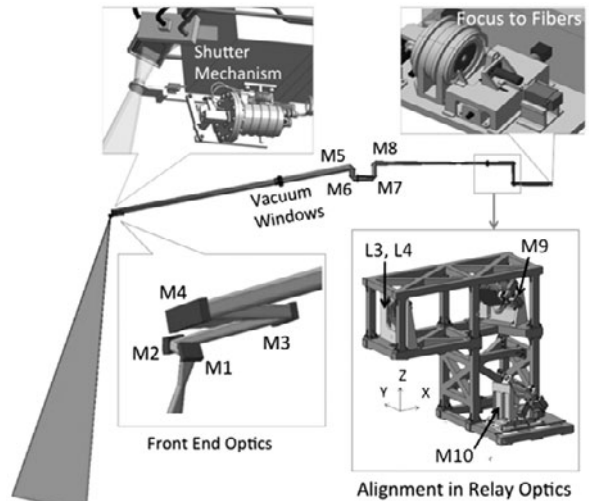


図9 上部ポート光学系の光学機器配置。



## 8.6 ダイバータ IR サーモグラフィー

複数のトロイダル箇所から広角カメラでプラズマ対向壁全域を監視する水平ポート赤外/可視カメラ (EU) 及び上部ポート赤外/可視カメラ (米国) 計測システムとともに、ダイバータ IR サーモグラフィー (IRTh: IR Thermography) [14] は、ダイバータターゲットの温度分布と熱流束分布を測定する主要計測システムである。ダイバータ IR サーモグラフィーは、内側及び外側ダイバータの限定された領域を、ターゲット上で 3 mm という高い空間分解能で、200℃ から 1000℃ の表面温度分布 (0.1–2.5 MW/m<sup>2</sup> の定常熱流束分布) を時間分解能 2 ms, 1000℃ から 3600℃ の表面温度分布 (0.02–0.5 GW/m<sup>2</sup> の非定常熱流束分布) を時間分解能 20 μs で計測することが求められている。ディスラプション及び ELM の物理研究への貢献が期待される。

ダイバータ IR サーモグラフィーは、水平ポート #17 からトロイダル右方向に外側ダイバータを見込む外側ダイバータ光学系と内側ダイバータ光学系の 2 つの光学系を有する (図 10 参照)。それぞれの光学系は、ポートプラグ先端部光学系、真空容器外のリレー光学系、ポートセル内の検出光学系から構成される。このうち、ポートプラグ先端部光学系とリレー光学系は全て金属ミラーで構成される。ポートプラグ先端部光学系先端部には、透過率較正用の熱源を内蔵したシャッターとミラークリーニングシステムを設置する。光軸調整は、リレー光学系のクランク構造部分の可動ミラーを用いて行う。リレー光学系によりポートセルに伝送された光束は、検出光学系のカセグレンミラー光学系で結像され、検出系の 3 μm 帯赤外カメラ、5 μm 帯赤外カメラ及び赤外分光カメラの 3 つの赤外カメラ (640×512 ピクセル) により計測される。

ダイバータターゲットの赤外カメラによる温度計測を行う上で最も重要な課題は、ターゲット材 (タングステン) の放射率の評価である。プラズマ壁相互作用により ITER プラズマ運転とともに、表面状態が変化することが予測されるため、実験運転期間でも放射率の較正が欠かせない。予め、放射率の比率を較正值として持ち、放射率が変化しても比率が一定であるとすれば、3 μm 帯赤外カメラと 5 μm 帯赤外カメラの信号比を測定することにより、正確な温度計測が出来る。赤外分光カメラは、プリズム分光器により、視野内の代表的な 100 点について波長スペクトルを測定する。この測定データにより、放射率の空間依存性と波長依存性を補正した温度分布の計測が可能となる。

詳細設計と並行した基礎実験により、表面粗さが異なるタングステン材について、0.1–0.2 μm 幅のバンドパスフィルターを用いた赤外カメラ計測と熱電対計測により波長 3 μm から 4.7 μm における放射率の波長依存性を、400℃ から 1000℃ の温度領域で測定を行った。その結果、放射率の波長依存性は小さいが、表面粗さが 0.3 μm から 5.9 μm まで変化すると、放射率が 0.2 から 0.6 に変化することがわかった。また、赤外レーザー (波長 3.2 μm) によるその場較正実験では、赤外レーザーの赤外カメラと同視線で入射した赤外レーザーの後方散乱光を計測することにより、ダイバータ

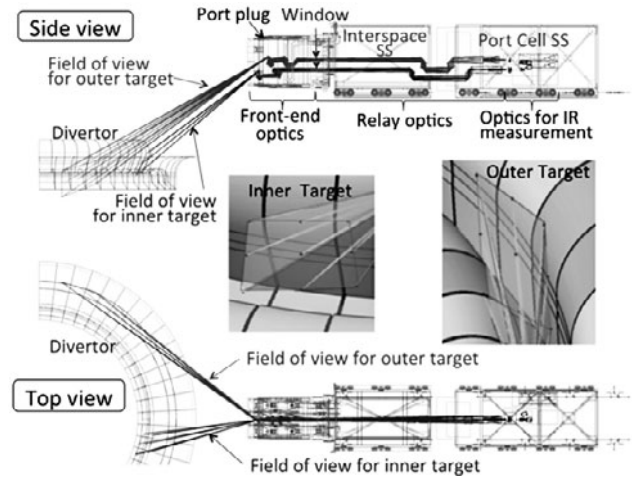


図 10 ダイバータ IR サーモグラフィーの光学系の側面図、上面図及び内側及びダイバータを見込む赤外カメラ視野。

IR サーモグラフィーにおいてその場較正が可能であることが明らかになった [15]。

## 8.7 ポート統合設計と計装制御

一つの計測用ポートには、最大で 3 つの ITER 参加極が調達する 7 種類の計測装置が組込まれる。そのため、ポートプラグ (下部ポートでは支持構造体)、インタースペース、ポートセルにおける各計測装置間及び ITER 他設備との空間取合い、機械設計、遮蔽設計等のポート統合設計は、原則としてそのポートで主要な計測装置を調達する参加極がポートマスターとして担当する。また、ポート統合設計に基づいてポートプラグ (下部ポートの場合は計測支持構造体) と計測遮蔽体の調達を行う。日本は、ポートマスター (Port Master) である EU, 米国, ITER 機構と連携をとりながらテナント (Tenant) であるポートの計測装置の詳細設計を行っている。一方、下部ポート #2 のポートマスターとして、ロシア、中国と空間取合いの検討を開始した [16]。

ITER の運転においては、各設備、装置をプラントシステムの集合体として、CODAC、中央インターロックシステム及び中央安全システムの 3 つの独立した計装制御系が各プラントシステムの機能を統括制御する。日本の計測装置も、それぞれ独立したプラントシステムとして、各計装制御系を PCDH (Plant Control Design Handbook) に準拠して設計することが求められる。このうち計測機器の制御、監視、データ収集等の大部分の機能は、CODAC との通信により実現される。計測用レーザー発振時の入室管理に関わる機能及び安全境界を貫通するレーザー光路上のシャッターバルブ開閉操作時の原子力安全に関わる機能は、中央安全システムにより統括制御される。日本の計測装置の開発にあたっては、ITER 機構と密接に連携しつつ計装制御系の設計及び試作試験を進めており、ダイバータ IR サーモグラフィーでは、ITER 機構から貸与されたキュービクル (ITER 用計装制御盤) を使い、赤外 TV カメラの制御及びデータ収集を行う CODAC 計装制御ソフトウェアを開発した。

## 8.8 まとめ

ITER 計画において日本が調達を分担している計測装置の開発の現状を述べてきた。ITER 計測装置における開発の方法論は、従来の核融合プラズマ実験装置におけるそれと、大きく異なっている。ITER 計測装置の性能の根拠となる計測要求 (Measurement Requirement) は核融合プラズマ研究の観点から定義されたが、核融合実験炉の 1 システムとして ITER 計測装置を機能させるため、プラズマ計測性能だけでなく、機器の健全性、信頼性、安全性、冗長性等について原子力機器としての品質保証が求められるからである。そのため、段階的な設計レビューにより、多角的な観点からの設計検証が行われ、厳密な品質管理の元で ITER 計測装置の製作が行われる。このプロセスに則って、日本はマイクロフィッションチャンバーの真空容器内機器である信号ケーブルの製作を開始した。ポロイダル偏光計は2015年11月に予備設計レビューを行った。その他、周辺トムソン散乱計測、ダイバータ不純物モニター、ダイバータ IR サーモグラフィーについても、順次予備設計レビューを開催する。

## 参考文献

- [ 1 ] Y. Kawano *et al.*, *Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference*, ITR/P5-35 (2012).
- [ 2 ] M. Ishikawa *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **86**, 417 (2011).
- [ 3 ] M. Ishikawa *et al.*, *Plasma Fusion Res.* (2016), *in press*.
- [ 4 ] T. Hatae *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 10E344 (2012).
- [ 5 ] E. Yatsuka *et al.*, *JINST* **11**, C01006 (2016).
- [ 6 ] E. Yatsuka *et al.*, *JINST* **8**, C12001 (2013).
- [ 7 ] E. Yatsuka *et al.*, *J. Plasma Fusion Res. SERIES* **9**, 12 (2010).
- [ 8 ] R. Imazawa *et al.*, *Nucl. Fusion* **51**, 113022 (2011).
- [ 9 ] 今澤良太 他：プラズマ・核融合学会誌 **90**, 743 (2014).
- [10] R. Imazawa *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 123507 (2012).
- [11] R. Imazawa *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 013503 (2016).
- [12] A. Iwamae *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 045005 (2011).
- [13] S. Kitazawa *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **101**, 209 (2015).
- [14] M. Takeuchi *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **8**, 2402147 (2013).
- [15] M. Takeuchi *et al.*, *Fusion Sci. Tech.* **69**, 655 (2016).
- [16] S. Kitazawa *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **10**, 3402044 (2015).