ITER 計測系

山本 新, 的場 徹

(日本原子力研究所)

(1991年3月20日受理)

ITER Diagnostics

Shin Yamamoto and Tohru Matoba

(Received March 20, 1991)

Abstract

During the ITER Conceptual Design Activity (CDA), overall design study of diagnostic systems for the next generation machine was performed for the first time. Three Workshops on Plasma Diagnostics were held. Starting from reviews of operating experience with diagnostics on currently operating devices and early concepts of the requirements for plasma measurements, a set of diagnostics for the full operation of ITER has been developed. This report summarizes the results of these design activities and design integration efforts in trying to accommodate these diagnostics into overall ITER concept. In addition, the principal tasks of Diagnostic R & D are also described.

Keywords:

ITER, diagnostic system, diagnostic access, diagnostic requirement, diagnostic R & D.

1. はじめに

ITER^{1,2)}計測計画の全体目的は、物理フェーズと工学フェーズを通じたITERの全運転期間中に必要とされる計測機器を提供することにある。計測機器は物理フェーズにおいてはプラズマ性能を完全に理解するのに必要なデータを提供できる能力を備えるべきであり、また、工学フェーズでは高中性子束や高フルーエンス場の環境において制御とモニタリングのために使用可能でなければならない。ITERでの計測を検討するために3回の計測ワークショップが概念設計活動期間中に開催された。JT-60, JETやTFTR等の大型トカマク装置で計測にたずさわっている専門家を含め70名近い研究者が参加した。まず、現在のトカマクでの計測機器の運転経験に基づいて各計測機器の信頼性評価を行うために、機器の故障の頻度やその原因を明らかにする作業を行った。続いて、ITERでの計測に対する要求項目を検討すると共に、それらに基づいて必要な計測機器の選

定をした。最も基本的と考えられる計測機器に関しては、概念検討を行うと共に、ITER 装置概念との整合性を取るために、それらの機器のトカマク本体への組み込みに関する検討作業を行った。現在運転されている機器に対するものよりは非常に厳しい環境において ITER の計測目的を達成するためには多くの R & D を必要とするが、ITER の建設終了までに10年以上の年月があり、効果的な R & D を行う事により ITER での要求を満たす計測機器の開発は充分可能であると考えられる。ここでは、ITER 計測設計活動の概念³⁾について述べる。

2. ITER における計測の役割

核融合実験炉は現在稼働中の大型トカマク装置と、発電を実証するための原型炉との中間ステップに位置する装置で、実燃料による核燃焼プラズマの長時間運転制御の確立と、動力炉に必要な主要機器技術を初めて総合的に実証・開発することを目的とするものである。そこでの計測の役割は、次のように分類することができる。

i) プラズマ特性解明及び性能把握用計測機器：

大型トカマク装置を含む現在の実験装置にとっても、最も基本的なものであり、ITER においても、ITER プラズマを完全に理解するのに必要なデータを提供できる能力を備えるべきものである。

ii) プラズマ性能改善のためのプラズマ制御用計測機器：

ダイバータ・プラズマ制御、ヘリウム灰排気を含む不純物制御、電流分布制御等のプラズマ閉じ込め性能改善に関連したものであり、ITER のミッション達成のために重要な役割を果たす。

iii) 装置健全性保持のためのプラズマ制御用計測機器：

プラズマ位置・形状制御、ダイバータ板を含む第一壁への流入熱制御、ディスラプション制御、燃焼制御等プラズマと装置との相互作用の大きな項目に関連したものであり、ITER のミッション達成のために重要な役割を果たす。

iv) 安全性確保のためのモニタリング：

真空境界の破壊に伴うトリチウム漏洩、装置歪の測定、構造材の健全性モニターなどを含む。他の設計グループとの調整が必要であり、今後検討が必要なものである。

v) 本体構成機器改善のためのデータ蓄積用計測機器：

ブランケット試験用計測等を含む。ブランケット試験用計測に関しては計測グループにより初期的な検討がなされたがまだ核工学グループとの議論はされていない。

以上計測機器の役割について述べたが、それぞれの役割は互いに関連しており、一般的に、1つの計測機器が複数の役割を担うことができる。

ITER において現在採用が予定されている計測機器を測定方法に従って分類したものを表1に示す。これらの計測機器は、ITER 運転の全期間を通して使用される予定である。プラズマの性能評価や最適化のため

表1. ITERにおいて現在採用が予定されている安全、制御及びプラズマ特性解明用計測機器

プラズマ・パラメータ	計測機器候補	注
1) プラズマ電流	磁気計測	要：定常磁場測定法の開発 上記参照
2) プラズマ位置・形状	磁気計測 中性子カメラ	要：精度評価 Ii (t) : 上記参照
3) q (r) (電流密度)	磁気計測 運動性シュタルク効果 ファラディ回転 反射計	要：計測用中性粒子ビーム 厳しい利用空間制限
4) 電子密度	干渉計 トムソン散乱 反射計	要：可能性証明のための R & D 線平均 ; 視線数制限 ne (r) ; 測定時間点制限 ne (r) ; 課題：密度揺動測定 DT フェーズの主プラズマ ($r < 2a/3$)
5) イオン/電子 温度	中性子分光 中性粒子解析 (NPA) CHERS トムソン散乱 ECE	要：計測用中性粒子ビーム ; プラズマ境界 要：計測用中性粒子ビームと耐放射線性光学素子 Te (r) ; 測定時間点制限 Te 計測に適す ; 課題：高調波重なりと準熱幅射 境界プラズマ ; 中性子ビームによる改善 主プラズマ ; 課題：DD 中性子の S/N 境界プラズマ ; 要：耐放射線性光学素子
6) D/T 密度	中性子解析 (NPA) 中性子分光 可視分光	要：較正法の開発 要：現存トカマクでの有効性確認 要：1.5THz 輻射源の開発 要：計測用中性粒子ビーム 要：計測用中性粒子ビーム 要：可能性証明のための R & D 遅い時間応答性
7) 核融合出力	中性子発生モニター	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 要：可能性証明のための R & D 厳しいエロージョン問題 複雑なプラズマ形状
8) 捕捉 α 粒子	協同トムソン散乱	要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：専用の中性粒子ビーム プラズマ中での He 密度との関連が不確定 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
9) 損失 α 粒子	CHERS 中性粒子解析 (NPA) γ -分光 熱電対 ファラディ・カップ ボロメーター	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
10) ダイバータ・ プラズマ	可視分光 レーザー誘起蛍光 (LIF) ラングミュアー・プローブ 反射計	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
11) エロージョン率	可視分光 タイル・マーカー	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
12) 熱負荷	熱電対 IR/撮像カメラ (第一壁) IR/撮像カメラ (ダイバータ)	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
13) ヘリウム蓄積	CHERS/NPA 残留ガス分析器 ボロメーター	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
14) 輻射損失	VUV 分光 X-線分光 可視分光	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
15) 不純物密度	ECE	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
16) 逃走電子	X-線モニター	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
17) ディスラプション 前駆現象	磁気計測 ECE 中性子カメラ ボロメーター	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性
18) 境界局在集中モード (ELMs)	D (T) -光モニター 反射計 ラングミュアー・プローブ 磁気プローブ	要：可能性証明のための R & D 要：可能性証明のための R & D 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：耐放射線性光学素子 ; 厳しい利用空間制限 要：計測用中性粒子ビーム ; 厳しい利用空間制限 ; 低い S/N 比 ダイバータ部視野 ; 近接性に問題 課題：結晶の耐放射線性

表 2. ITER 計測機器性能仕様

項目	パラメータ範囲	時間分解能	空間分解能	変化率	精度
プラズマ 位置制御	<u>位置／形状</u> Rin, Rout (セバトロックス位置) R _x , Z _x (x 点位置) Z ₀ (プラズマ中心位置)	100 μs 100 μs 100 μs		1 cms ⁻¹ ※ 1 cms ⁻¹ ※ 1 cms ⁻¹ ※ ※正常運転	1 cm 1 cm 0.25cm
プラズマ電流	<u>電流値範囲</u> : 0.1-28MA	100 μs		5 × 10 ⁵ As ⁻¹ ※ < 1 × 10 ⁹ As ⁻¹ * ※正常運転 *電流クエンチ時	1 % ~30%
プラズマ ベータ値	<u>ベータ値範囲</u> : 0.01 < β < 3	100 μs		0.05s ⁻¹ ※ < 1 × 10 ⁶ s ⁻¹ * ※正常運転 *電流クエンチ時	3 % (β _p ~ 1) ~30%
電子密度	<u>密度範囲</u> 主プラズマ 1 × 10 ¹⁹ -1 × 10 ²⁰ m ⁻³ 境界プラズマ 1 × 10 ¹⁷ -1 × 10 ¹⁹ m ⁻³ X-点 1 × 10 ¹⁸ -1 × 10 ²¹ m ⁻³	1 ms 1 ms 1 ms	50mm 3mm 10mm		10% 10% 10%
電子温度	<u>温度範囲</u> 主プラズマ 0.5-40keV 境界プラズマ 5-500eV X-点 5-200eV	10ms※ 10ms 10ms	50mm 3mm 10mm	※揺動測定にはさらに 良い分解能が必要	10% 10% 10%
イオン温度	<u>温度範囲</u> 主プラズマ 0.5-50keV X-点 0.2- 2keV	1 ms 1 ms	0.15m 10mm		10% 10%
不純物制御 燃料希釈及び 輻射パワー	Zeff 低 Z 不純物 高 Z 不純物 全輻射 n _D /n _T n _{He} /n _D	1ms 10ms 100ms 10ms 100ms 100ms	10cm 10cm 20cm 10cm - -		20% 20%※ 20%※ 20% 20% 20% ※不純物量に依存
qφ (r) (プラズマ 電流密度)	<u>qφ (r) 範囲</u> : 0.6 < qφ (r) < 5	10ms	0.15m		10%
核反応生成物	全中性子束 1 × 10 ¹¹ -1 × 10 ²¹ ns ⁻¹ 核融合出力 1-3 × 10 ³ MW 中性子フルーエンス 多くの放射化膜設置 アルファ発生 D- ³ He 損失 α 粒子アレイ* 保持 α 粒子計測 1 < Eα < 3.5MeV, 2 点 * 物理フェーズのみ	100ms 100ms - 100ms 100ms 10 μs 1 s	a/10 a/10		未定
揺動	<u>揺動パラメータ</u> MHD 最大周波数 境界 MHD >60kHz 密度揺動 >60kHz		10cm (T _e , T _i) - 10cm		10% 30% 10%
境界, ダイバータ, 第一壁	表面温度 T ≥ 200°C, エロージョン研究 未定 圧力測定 未定, 分圧	10ms※ ※立ち上がり時間	5 cm		

のいくつかの計測機器は物理フェーズでのみ使用され、工学フェーズの開始前に撤去される。物理フェーズ初期での低放射化放電時においてはトカマク装置へ近づくことは容易である。それゆえ、全ての計測機器は物理フェーズの後期や工学フェーズでの高放射化フェーズに入る前に、建設を終わり、ITER に組み込まれ、試験されねばならない。

測定されねばならない基本的なプラズマパラメータについて与えられた仕様を表2に示す。この表は幾分単純化されているが、ITER に対する計測要求を確立するのに役に立つであろう。ITER においてはプラズマ制御においてプラズマ・パラメータの計測測定値を用いることが以前の装置より特に強調されている。この要求は長時間運転、局所非誘導電流駆動の広範囲にわたる使用、ディスラプション回避の必要性、燃焼時の運転点の安定化等に基づいている。しかしながら、要求される情報の性質を、計測機器設計のかなり初期の段階で特定するのは容易ではない。それゆえ、ここに述べられた仕様は、主として、現存の装置性能について知り得る計測専門家の経験、適切な装置性能の推定との組合せにより与えられており、今後の制御アルゴリズムの進展とともに見直しが必要となる。

3. 計測ポート数と配置

計測視線と機器との相互干渉を理解するために ITER の概念図を図1に示す。ITER 装置の概要に関しては既に他の筆者によって書かれているので、各コンポーネントの役割については他の文献^{4,5)}を参照していただきたい。ITER 物理フェーズで採用が計画されている計測機器のトカマク本体まわりへの配置を図2に示す。必要と予想される計測機器の取り付けには、#2, 8, 9, 10と14セクションにある5箇所の水平ポート、#2, 10と14セクションにある3つの垂直ポート、#3と15セクションにある2つの排気ダクト及び LH や ECH の加熱装置用の水平ポートでの空き空間を利用する。そのうち#14ポート及び#2ポートはペレット入射装置と核工学試験装置とでそれぞれ共同分割使用する必要がある。#2セクションは、NBI 接続ポートと径方向保守ポートに挟まれて、非常に使いにくい空間となっている。計測機器と他のシステムとのポートの詳しい取り合いやポートへの組み込みに関する調整はまだ終了

図1. 国際熱核融合実験炉 (ITER)

図2. ITER 物理フェーズで採用が計画されている計測機器の配置図
(ITER 赤道面への投影図)

していない。例えば、後ほど詳しく述べるが、垂直視線用の貫通孔に関連して #2, 10, 14 セクションにある 3 つの上部増殖ブランケット・センター・モジュールと #10 セクションにある下部増殖ブランケット・センター・モジュールを計測専用の遮蔽ブランケットに交換することを提案している。これにより起こる増殖比の低下は約 3 % である。#10 セクションには物理フェーズと工学フェーズでの ITER 運転の全期間を通じて使用される計測機器を取り付ける計測専用ポートがありプラズマに対する径方向と接線方向視野が確保できる構造となっている。そのポート設計の前提条件として、直径約 4 m の巨大ベローズの使用が必要であり、EC と日本において巨大ベローズに対する R & D プログラムが開始されている。工学フェーズでは、前述の上部ポートや排気ダクトからの測定とともに、3 つの径方向ポート（#2, 10 と 14）が必要である。

4. 計測機器の概念設計

ITER への計測機器の適応性を検討するため計測機器に関する概念検討を行った。以下に、幾種類かの代表的な計測機器の概念設計の検討結果を示す。ITER のような核融合装置で計測機器を考える場合の最も重要な関心事は、それらの機器の ITER の放射線環境場での耐久性や、信頼性や遠隔保守作業性についてで

ある。ITER 装置は現存の大型トカマク装置に比較して装置規模が大きく計測機器に必要な遮蔽構造の採用が比較的容易であり、炉近傍での半導体の使用も場合によれば可能である。また、鏡と窓の放射線に対する耐性や過渡現象に関するデータ蓄積がなされれば遮蔽厚の軽減や設置場所の選択の自由度が増し、それにより計測視線の選択の自由度が増大する。多くの計測機器はクライオスタットと生体遮蔽の間に置かれる。その領域には放電中は人が近づくことができない。それゆえ、利用可能空間で遠隔保守修理が可能のように考えておくべきである。また、計測機器はクライオスタットか真空容器にボルト締結することができるが、熱膨張（1 - 2 cm）や機械振動を考慮に入れる必要がある。ITER での計測機器の設計をする場合の参考にするため ITER での中性子束とガンマ束とフルーエンスに関する事柄を付録 A に示す。

4.1. 磁気計測

磁気計測はトカマクにおける最も基本的な計測手段である。表 3 に ITER で使用される、磁気プローブ類の設置個数、設置場所、有効測定面積等を示す。図 3（a）に設置のポロイダル断面での磁気計測用プローブの設置場所を示す。ディアマグ・プローブとログスキー・コイルは真空壁上をポロイダル方向に一周して

表 3. 磁気センサー仕様

センサー名	個数	場所		NA
		選択 1	選択 2	
2 方向（接線，垂線） 磁気プローブ	32×8 ポロイダル×トロイダル	真空容器	—	1 m ² ターン
2 方向（接線，垂線） 回転／振動プローブ	32×8	真空容器	真空容器	0.2 m ² ターン
MHD プローブ （ミルノフ・コイル）	32×16	ブランケット	ブランケット	0.2 m ² ターン
サドル・ループ （径方向フラックス）	32×16	真空容器	ブランケット	1 m ² ターン
ラディアル・ループ （ポロイダル・フラックス）	32×16	—	ブランケット	1 m ² ターン
電圧ループ	> 5	真空容器	真空容器	1 ターン
ログスキー・コイル	1×16	真空容器	真空容器	5 m ² ターン
ディアマグネティック・ ループ	1×16	真空容器	真空容器	1 ターン
超電導ディアマグネティック・ ループ	1×4	TF コイル・ケース	TF コイル・ケース	1 ターン
スクレープ・オフ層 電流モニター	1×16	未定	未定	未定

図3. (a) 装置のポロイダル断面での磁気計測用プローブの設置場所, (b) ブランケット・モジュール側壁のMHDプローブ, (c) ブランケット・モジュール及び真空容器に設置されたフラックス・ループ

いる。MHD 揺動測定 of 周波数特性を上げるため図3 (b) に示すように薄肉パイプをブランケットのサイド・モジュール側壁に設置し、そこにミルノフ・コイルを納める。フラックス・ループやワンターン・ループは図3 (c) に示すように真空壁上をトロイダル方向に一周している。小型のフラックス・ループが各々のブランケットを囲む様に設置される。同じく小型のフラックス・ループが第一壁近傍のブランケット表面に設置されている。磁気プローブの信号線は、冷却管に沿って外部に引き出される。磁気プローブの信号線としては、核分裂炉において $1 \text{ MW} \cdot \text{a} / \text{m}^2$ クラスのフルーエンスに対して実績のある MI (Mineral Insulated) ケーブルの使用を考えている。ブランケット背後の真空容器壁上にあるプローブはフルーエンスや中性子負荷を考慮した場合、炉寿命中は交換不要と考えられる。

長時間及び定常運転時のプラズマ制御のため2方向の磁場成分が測定可能な回転プローブか振動プローブを真空容器内に設けたボイド内に設置する。同じく長時間及び定常運転時のデリアマグ計測のために超電導線を用いる事も検討している。その他、最近ディスラプション時に問題となっているダイバータ近傍のスクレープ・オフ層に流れる電流のモニター用の磁気プローブの設置も考えている。

4.2. 0.1-1000nm の波長領域の分光

すべてのプラズマ構成元素を測定し、モニターできる分光機器はITER の全運転期間中重要な役割を果たす。ITER では広範囲な温度領域のため装置構成材に起因する不純物や、試験用に注入される不純物のすべての電離段階からの輻射を測定できるという要求を満たすためには、異なった手法を必要とする。

可視分光器システムのITER での概念を図4 に示す。中性子及びガンマ線遮蔽用の迷路と鏡との組合せを

図4. 遮蔽迷路を通る視線を持った可視分光器システムの概念設計

図5. (a) 可視分光用の主プラズマと上下ダイバータ・プラズマ観測視線及びVUV/XUV, X線分光用の赤道面内視線 (b) VUV/XUV用5m斜入射分光器

用いることにより窓、レンズ、光ファイバー等が直接プラズマを見込まない設計になっている。放物面1次鏡を用い広範囲のプラズマ断面からの光を平行光にし、遮蔽用迷路に納められた平面鏡を用いて伝送する。視線は生体遮蔽を通して真空窓が設置されている容器に達する。トリチウム封じ用に、2重真空境界構造とするため2重真空窓となっている。2次真空境界にある窓を光が通過した後ビーム・スプリッターでそれら

の光を望遠集光光学系及び分光器アレイに分配する。

図5 (a) には, 主プラズマと上下ダイバータ部を見込む視線を持った可視分光器, 赤道面を見込む VUV/XUV と結晶分光器を #8 ポートに組み込んだ場合を示す。図に示す様に VUV/XUV 輻射は回折角が 0.5° 以上の単一の反射鏡を用いプラズマを見込む回折格子分光器により分析される。楕円鏡であるこの反射鏡は遮蔽された測定素子が直接プラズマを見ないようにしている。プラズマ水平面を観測する1本の視線としては, 生体遮蔽にはほんの小さな断面の貫通孔 (例えば, $5 \times 10 \text{ cm}^2$) があればよい。図5 (b) に示す様に回折装置としては, 焦点面内に多チャンネル検出器を備えた5 m ローランド円を用い, そのローランド円回折素子からの0次光を第2の平面焦点分光器により分光する。

4.3. LIDAR

飛行時間差法によるレーザー計測である LIDAR による電子温度, 電子密度の空間分布の測定は, 通常の 90° 散乱装置に比較して; (i) 約700ps の非常に短い積分時間の結果, 制動輻射によるバックグラウンドを低減できる.; (ii) 光学設定や機械的安定性に対して厳しさが軽減される.; (iii) 全空間点に対して1組の受光素子で対応できる.; (iv) 全空間点からの信号を1本の管を通して伝送できるので生体遮蔽より遠くにある受光システムへの集束光の転送が容易である等, 多くの利点を有する。

図6. (a) 接線ポート付き計測専用ポート, (b) 接線方向 LIDAR 用ポートの垂直断面, (c) 接線方向 LIDAR システムの視線 (実線) とダイバータ・プラズマ用 LIDAR システムの視線 (破線)

LIDAR は図2 及び図6 (a) に示すように #10 セクションに設置されている。視線のうちの1 本は赤道面内でトラス内側真空容器壁近傍を通過しており、主プラズマの電子温度、電子密度の空間分布の測定のみならず、トラス内側真空容器壁近傍のスクレイプ・オフ層プラズマの空間分布は径方向に1 cm 程度の高精度で測定が可能である。上で述べた視線を含め LIDAR には図6 (b) に示すように赤道面に対して上下方向に $\sim 15^\circ$, 0° , $\sim -15^\circ$ のそれぞれ直径600 から800 mm の貫通孔の軸に沿った3 本の視線がある。レーザー光がプラズマを2 度通過することを考慮すると図6 (c) に示すようにポロイダル断面上で5 つの線上のプラズマの空間分布を測定することができる。

図7 は、レーザー光入射及び受光のための光学機器の配置を示す。この配置では鏡は直接プラズマを見込まないようにしている。それを可能にするために、スペクトルに関して広帯域の受光用と高出力レーザー光用の2 つの 90° 反射鏡を第一真空境界内に設置してある。これらの要素への照射損傷の可能性の把握は重大な問題であり、優先準位の高い R & D 項目である。第一真空境界の終端にある真空容器に納められたもう1 つの球面鏡によって真空境界にある窓上にプラズマ中心の像を結ぶ。これにより直径約10 cm の小さな窓とすることができるとともに比較的大きな受光角を確保している。これらの光学鏡を納めている直径1 m の真空容器はトカマク本体真空容器にベローにより結合され、床面に置かれている。

図7. 接線方向 LIDAR システムの光学構成

4.4. 核反応生成物測定

DT 燃焼を行う ITER において核反応生成物測定は最も重要な計測項目である。ITER で提案されている全ての機器は核分裂炉や加速器または現在運転されている大型トカマク装置において実用化されている技術及びその発展型に基づいている。それゆえ同じ計測を計測できる機種を選択においては物理関連の研究内容以上に ITER 計測環境を考慮する必要がある。図8 は中性子とガンマ線放射の2 次元空間分布測定を行うための機器配置を示す。2 次元中性子カメラ及び2 次元ガンマ線カメラはそれぞれ、計測用遮蔽プラグや遮蔽ブランケットがある #2 セクションと #14 セクションに設置される。それぞれの垂直視野に対しては、幅広の扇形の空隙と上部ブランケット中にかなり広い自由空間か、或は、プラグの中に組み込まれた直径100 mm の少なくとも15本の管(管は

図8. 中性子とガンマ線放射の2次元空間分布測定用計測機器装置

正確に機械加工されねばならない) が用いられる。コリメータはプラグの構造の一部である。組み込まれたステンレス製の真空窓の厚みは5mm以下でなければならない。測定部はブランケットの貫通孔からの中性子やガンマ線ストリーミングから守るために厚い遮蔽構造で囲まれている。

マイクロ・フィッション・チェンバーが#3, 7, 11, 15セクションに設置される。第一壁近傍のブランケット中でその側壁近傍にポロイダル方向に配置された3つの小さなチェンバー(直径13mm, 長さ140mm)と、それらのためのガイドチューブ(断面積=トロイダル方向×径方向 $\sim 40 \times 150 \text{mm}^2$)が必要であ

る。もう1つのチェンバーは内側ブランケットにあり、赤道面に達するガイドチューブに納められている。ガイドチューブの引出し口は、冷却配管の間にある小さな垂直ポートにある。

n_D/n_T 比測定のための接線中性子スペクトロメータが接線ポート付き計測専用ポートがある#10セクションに設置されている。視線の対向面はボイドになっている必要があるため、ボイドとしてNBIダクトを利用する。

流体(或は、気体)流動放射化システムのためには、正確な流量制御ができる単体の連続液体流路ループが必要であり、それは、たぶん、第一壁の全ポロイダル・セグメントに既にある冷却配管を使うことになる。場所としては、トロイダル方向の4箇所を考えている。

その他、損失アルファ粒子研究は可動プローブか組み込んだ壁試料上のシンチレータを用いることが好ましい。前方散乱系が高エネルギー閉じ込め粒子に対して使用される予定である。(関連した計測ビームを用いた)荷電交換再結合分光は閉じ込め粒子の減速過程の研究に使用される。(変調1MW, 100keVヘリウム中性粒子ビームを用いた)中性粒子解析はプラズマの周辺部($r/a > 0.5$)に存在する1.5MeVまでのエネルギーを持ったアルファ粒子に対して使用される。

4.5. 境界プラズマ及びダイバータ・プラズマ計測

境界プラズマ及びダイバータ・プラズマの特性把握及びその制御の必要性については既に他の文献⁶⁾でなされているのでここでは述べない。ここではITERでの境界プラズマ及びダイバータ・プラズマ用計測機器について述べる。トラス内側境界プラズマのLIDARによる計測についてはすでに4.2節で述べた。ダイバータ部での電子温度と電子密度の空間分布測定用のLIDARの配置図を図9に示す。計測用貫通孔として#15セクションにある排気ダクトを利用する。レーザー発信部と受光系はともに生体遮蔽のずっと後にある。150-300ps/10Jのfrequency doubled Ndレーザーと受光系としてストリーク・カメラを用いれば既に図6(c)の点線で示した約1mの径路に沿って10cmの空間分解を得ることができる。

排気ダクトを利用する計測機器としては、LIDARと同じ#15セクションにレーザー誘起蛍光法(LIF)、#3セクションにVUV, XUVと可視分光、#9セクションにVUV, XUV分光がある。本体排気ポンプとの空間取り合いの調整が済めば、それらの機器は、物理及び工学の両フェーズにわたって占有することが可能である。

ダイバータ部輻射損失測定は#2と10セクションにおいて、現在JT-60等で用いられている金属ボロメータ素子を用いて行われる。図10にダイバータ・プラズマ用と主プラズマ測定用のボロメータ計測の配置を示す。ダイバータ部の輻射損失測定のためには上下の計測用の遮蔽ブランケット・センター・モジュールの側面に約20mm幅のスリットが必要である。

同じく、ダイバータ・プラズマ計測のために、上下ブランケット・センター・モジュールの側面に約20mm

図9. ダイバータ・プラズマ計測用 LIDAR

幅のスリットと水平ポート内に置かれた鏡とが必要な計測システムは、ダイバータ板の温度の実時間測定のために#6と14セクションに置かれた遠赤外感熱測定システムと既に図5(a)に示した可視分光システムである。装置の安全性の観点からは、上下のダイバータ板をトロイダル方向の360°

の全領域にわたって遠赤外線熱測定システムによりダイバータ表面温度が測定できることが望ましいが、現在のところ、装置と両立できる計測システム配位はまだ確立されていない。さらに、熱測定として、ダイバータ用熱電対が、#2, 5, 9, 10, 11, 14と16セクションに設置される。また、掃引可能なダイバータ・プローブも#2, 5, 10と14セクションに設置することが提案されており、その場合、下側ダイバータの下のブランケット・モジュール内に掃引可能なダイバータ・プローブを納めるための直径150mm, 深さ300mmの空洞が必要となる。熱電対とともにそれらのケーブルは冷却管に沿って引き出されるがそれらをまとめる小さなケーブル・ダクトが必要である。

その他、ラングミュアー・プローブとカロリメータ・プローブを組み込んだ第一壁タイルの2

組の完全なトロイダル方向のアレイが#3と11セクションに設置されている。エロージョンは特定のタイルに組み込まれたマーカーを分光的に測定する。圧力計と質量分析器を排気ダクトの終端部に設置するが、それぞれ磁気シールドとして外形 $500 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$ が必要である。第一壁近傍に設置される計測要素は、 0.15 MW/m^2 の熱負荷に耐えられるように設計すべきである。損失アルファ粒子により局所最大値は 0.6 MW/m^2 となり、プラズマ近くの核発熱はスチール中で 16 W/m^3 に達する。

4.5. その他の計測機器

以上、幾つかの計測システムの概要について述べたが、ここでは、ITERに設置予定のその他の計測機器について簡単に述べる。

- (1) 反射計は#14に設置される。図11に示す様にトロイダル方向×径方向 $\sim 40 \times 50 \text{ mm}^2$ の断面積を持った10本の導波管をブランケット側壁に蝋付けする。水平ポートより導入された導波管は外側ブランケット部でまず垂直方向に進み、その後、各々がプラズマ中心を見るように、径方向に進む。また、内側ブランケット内では上方より赤道面まで達する1本の導波管を用いる。
- (2) 電子サイクロトロン輻射 (ECE) システムは#2, 5, 14セクションに設置される。反射計と同じ断面積を持った9本の導波管をブランケット側壁に蝋付けする。また、内側ブランケット内に1本の導

図10. ボロメータ測定概念図

図11. 反射計用導波管とアンテナの真空容器内配置

波管を有する。水平ポートより導入された導波管は外側ブランケット部でまず垂直方向に進み、その後、各々がプラズマを見るように、水平方向に進む。

- (3) 接線干渉計のために直径100mmの6本の直管が#10セクションに設置されている(図6(a)参照)。そのうちの3本は同じセクターにあるLIDARの密度の校正に用いるためLIDARの視線と同一方向にある。他の3本のうちの1本がプラズマ中心軸に接し、他は、内側の第一壁に接しているように、赤道面に設置される。接線干渉計の入射ビーム対向面に鏡(コーナー・キューブ、 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$)をブランケット内に設置する必要がある。

- (4) 垂直干渉計/偏光計は#10セクションに設置される。計測専用上部遮蔽プラグ及び遮蔽ブランケットを通る5本の直線の管(トロイダル方向×径方向 $\approx 70 \times 150 \text{ mm}^2$)と、対向面の下側ダイバータ・モジュールの底近傍にあるそれぞれの管の終端にコーナー・キューブがある。垂直干渉計/偏光計は、現在の設計では、プラズマ中心付近を見込むことができない。これらの問題はEDAの早い段階で処理する必要がある。
- (5) 協同トムソン散乱計測のためには、遠赤外レーザービーム(直径 $\geq 500 \text{ mm}$)の入射用接線ポート、そして他の場所に前方散乱光集光用接線ポートが必要である。現在の設計では2本の接線視線が許されているが、#15セクションで入射中性粒子ビームのインボード、#10セクションで散乱光集光器等と他の機器と大きな干渉がある。さらに、ビームダンプを#10セクションに、ビューイング・ダンプを#15セクションに置く必要がある。これらの問題もEDAの早い段階で再検討することが必要である。

5. 計測 R & D

以上ITERで使用が予定されている計測機器について述べたが、物理フェーズにおいては現状の機器の改良で充分使用可能であることがわかった。ただし、数種の本質的な計測機器が特に工学フェーズ中にITERで使用する事ができるよう、すなわち、それによりITERのミッションが達成できるように研究が行われねばならない。例えば、計測機器要素の放射線による影響の研究や満足すべき磁場分布測定の研究である。

表4はITERでの今後6年間にわたる工学設計活動中に行うべきR & D項目の主要なものをまとめたもの

表 4. ITER 長期計測 R & D 項目

1. 計測要素の照射効果
①計測用真空窓の開発
②計測用反射鏡の開発
③セラミックスの照射感受性
④光ファイバーの照射特性
⑤信号ケーブルの耐放射線性試験
⑥耐放射線性のある分散及び反射法の開発
⑦特定の計測機器の照射感受性
⑧高照射場での計測要素のデータベースの蓄積
2. 新原理に基づく計測機器の開発（現存の機器の著しい改良を含む）
①新核反応生成物測定
②電子密度と磁場分布測定用双方向（正常波，異常波偏光反射計
③高速イオン測定のための協同散乱用発信源
3. 新校正法の確立
①14MeV 中性子のその場校正法の開発
②ECE 計測用高温校正源の開発
4. 新計測要素の開発
①LIDAR トムソン散乱システム用の多パルス・レーザー
②プローブ用高真空内使用可能高信頼性高速回転，振動駆動源
③磁気センサー開発
④XUV 波長域での酸素及び炭素線測定用のフィルター・スコープ検出器
⑤流体放射化測定系
⑥荷電交換中性粒子反応に基づく計測手段のための原子反応断面積の測定
⑦真空内設置反射鏡表面付着カーボン除去法
⑧アルファ粒子計測用紫外域ヘリウム線測定用高分分光器
⑨大多数の基底準位中性原子を含む計測用ヘリウム中性ビーム（～100keV）
5. 開発計測機器の現存の核融合装置での試験
6. 計測用計算コードの開発
①中性子輸送コード
②平衡制御用磁場計測解析コード
③計測データ解析用コード
7. 実時間データ処理計算手法の確立
8. 現在稼働中の計測機器の信頼性研究

である。

窓，反射鏡，セラミックス，光ファイバーや信号伝送ケーブル等の照射効果実験及びそれに基づいた要素開発結果は計測機器システム配置や保守思想に大きな影響を与えるため ITER 計測 R & D の中でも最優先の課題である。照射効果実験においてはフルーエンスの効果とともに透過率の変化や蛍光等の過渡現象効果を明らかにするために，その場測定が必要となる。

VUV/XUV 分光計測においては検出器へのストリーミング放射線の直接流入を防ぐため耐放射線性のある分散素子や人工結晶や層構造制御型微小構造物（layered synthetic microstructures）の開発が必要である。また，結晶のアニーリング手法を確立する必要がある。また，ITER での設計によれば，ボロメータによる輻射損失測定のための最も最適化された配置においてさえ $S/N \sim 1$ である。ボロメータ計測時の遮蔽

構造を実験的におさえる必要がある。

照射実験を効果的に進めるためには現在までに蓄積された照射データベースの集積・評価及び実験による更新が必要である。

現存の計測機器の著しい改良を含む新原理に基づく計測機器の開発のうち、核反応生成物計測が従来のトカマク装置に比べて ITER の工学フェーズにおいて大きな役割を演ずる。14MeV 中性子用のスペクトロメータがイオン温度測定に必要である。核融合装置第一壁近傍に設置されるマイクロ・フィッション・チェンバー(これは既に核分裂炉で実績がある)は大きな動作範囲を確保出来るように開発する必要がある。D³He 核反応15MeV ガンマ線と DT 核反応17MeV ガンマ線用のガンマ線カメラは低エネルギー・バックグランド・ガンマ線への感度が低くなるようなものでなければならない。

反射計により電子密度と磁場分布計測を同時に測定するためには現在の反射計において i) 弱磁場方向と強磁場方向の電磁波ビームに対して正常波、異常波のカット・オフ層の位置測定が可能のように多チャンネル・ビームの双方向偏光 (Dual-polarization) システムとする。ii) パルス・レーダー反射計の可能性を実証するため短パルスの伝播を研究すること。iii) アンテナー導波管-窓配置のシステム性能を研究すること。iv) 低損失オーバーサイズ導波管を用いた広帯域掃引可能なパルス・レーダー反射計とすること。等のかんりの改良が必要である。

閉じ込めアルファ粒子や他の加速された高速イオンの研究のためには協同散乱装置用発信源として繰り返し周波数が約20kHz、発振時間が100ns、出力が約200MW である発信周波数約1.5THz のレーザー源が必要である。

新較正法の代表的なものとしては、10%以上の測定精度を確保するための14MeV 中性子計測その場較正法と ECE 用の高温較正源の開発がある。この高温較正源は100°C の真空容器内において遠隔操作する必要がある。

表4に示された以外にも計測要素の開発が必要なものとしては、i) 耐放射線性及び遠隔操作可能真空導入端子、ii) ベレットを用いた高速アルファ粒子測定の開発、iii) 長時間用アナログ-デジタル積分器の開発、iv) 10μm 干渉計実時間制御、v) 高磁場対応ガス圧測定、vi) 長波長用多層回析素子、vii) 0.001-5 MeV 領域での輻射非感受性粒子計測素子等の開発がある。

計測関連計算コードとしては、計測機器への遮蔽構造の決定やバックグランド・ノイズの推定のための中性子輸送コード、磁気センサー設定場所決定のためのプラズマ位置・形状制御コード、計測データ解析コードがある。

ITER での計算機器類の仕様決定に先だって計算機のハードウェア、ソフトウェア及び放電中での実時間データ処理を含むデータ処理手法の最適化のために人間工学的研究をする必要がある。

現在稼働中の計測機器の信頼性研究は、ITER での計測機器の稼働状況の推定及び保守手順の考察に有効である。

計測機器に関する R & D プログラムは, 世界的に多くのトカマクで実行されつつある物理 R & D プログラムに密接に関連しており, 要求を変更するための情報をそれらの物理 R & D プログラムから引き出すことが必要である.

5. おわりに

ITER 概念設計活動中における計測設計活動について述べた. 数多くの計測システムの ITER への適用性が調べられ, 物理フェーズにおいては現状の機器の改良で十分に使用が可能であることが明かとなった. 計測機器はトカマク装置の全ての主たるシステムとインターフェイスを持っており, 今回の概念設計活動に引き続き 6 年間の予定で行われる工学設計活動 (EDA) 中での計測インターフェイス設計は非常に徹底的で, 反復の多い作業となるであろう. その場合, トカマク運転や遮蔽に悪影響を及ぼさない範囲において計測の能力を最適化できるように他のシステムの設計と調整を行うことが必要である. ITER で提案された R & D について今後具体化が必要である. 窓, 鏡, 磁気コイルのセラミックス材, 光伝送系と分光の分散要素等への中性子とガンマ線の影響をさらに良く理解することが, 計測機器の使用可能性に関する最終判定をする前に必要である. そのためには, 照射効果に関する R & D プログラムは直ちに始められるべきであり, ITER 共同設計作業, 計測専門家及び照射専門家による議論とそれをふまえた共通の基盤と認識の上に立った R & D の推進が必要がある. ITER の物理フェーズ後半及び工学フェーズまでは, まだ 10 年以上の年月があるため, 有効な R & D を行う事により ITER での要求を満たす計測機器の開発は充分可能であると考えられる. ITER 用の計測システムの開発においては原研, 大学を含む国立研究機関及びメーカーを含めた組織が有効に働くことが必要である. 皆様がたの御協力をお願いします.

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎: “核融合開発と ITER 計画” 核融合研究 65 (1991) 25.
- 2) 苦米地 顕: “国際概念設計活動報告” 核融合研究 65 (1991) 32.
- 3) The ITER Diagnostics Conceptual Design Report (ITER Diagnostics, ITER Documentation Series, No.33, IAEA, Vienna, 1991).
- 4) 多田栄介 他: “ITER 工学設計概要” 核融合研究 65 (1991) 167.
- 5) 高津英幸 他: “ITER: 工学設計 (核工学)” 核融合研究 65 (1991) 323.
- 6) 藤沢登: “長期物理 R & D 計画” 核融合研究 65 (1991) 39.

付録 A. ITER の放射線場

ITER の放射環境において現存の計測原理に基づいた機器を活用するためには, 耐放射線性を持った要素の開発が重要ではあるが, 一方, それらの要素に適切な遮蔽設計を行うことにより要素に要求される耐放射線性能を軽減することができる. ここでは, ITER での計測機器の設計をする場合の参考にするため ITER

での中性子束とガンマ線束とフルーエンスに関する事柄について述べる。

ITER での標準設計においては中性子出力は1100MW, 平均中性子負荷は 1 MW/m^2 である。中性子負荷はポロイダル方向に分布しており赤道面上においてトーラス外側の第一壁面上での中性子負荷は約 1.6 MW/m^2 であり, トーラス内側の第一壁面上での中性子負荷は約 1.2 MW/m^2 である。また, 上下のダイバータ領域では約 0.5 MW/m^2 である。中性子束とガンマ線束はブランケットと遮蔽を通過すると急激に減少する。第一壁とクライオスタット位置での中性子束とガンマ線束及びフルーエンスを表 A-1 に示す。図 A-1 (a) はトーラス外側第一壁の背後での径方向に沿っての高速中性子束, 全中性子束及び全ガンマ線束の分布を示す。ガンマ線の平均エネルギーは $0.1-1 \text{ MeV}$ の範囲にある。図 A-1 (b) は径方向に対する平均核発熱を示す。遮蔽の中の種々の計測用配位での貫通孔に対してなされた中性子束の計算を表 A-2 に示す。それぞれは, 直径10cm の水平な直管に対する中性子束値, 装置上部での垂直な直径4 cm の直管の軸上での中性子束値及び装置上部にあり $R = 6 \text{ m}$ に中心を持つ幅2 cm で長さが400cm のスリット状の貫通孔での中性子束値に対応する。図 A-2 に示した130cm 厚の遮蔽の中にあるいろいろな形の貫通孔の出口での中性子束 ($E > 0.1 \text{ MeV}$) と全線積分率を表 A-3 に与える。直円管による軸方向の中性子束の減衰のその直径に対する依存性を図 A-3 に示す。また, トカマク装置の詳細設計ができていないし, 材質も決められていないのでここ

表 A-1 第一壁とクライオスタット位置での中性子束とガンマ線束及びフルーエンス

位置	中性子束 ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	ガンマ線束 ($\gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	中性子フルーエンス ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$)	
			物理フェーズ	工学フェーズ
第一壁	2.5×10^{14}	2.0×10^{14}	2.0×10^{20}	2.0×10^{22}
クライオスタット	2.0×10^5	2.0×10^6	1.5×10^{11}	1.8×10^{13}

図 A-1. (a) トーラス外側第一壁の背後での径方向に沿っての高速中性子束, 全中性子束及び全ガンマ線束の分布。(ガンマ線の平均エネルギー: $0.1-1 \text{ MeV}$) (b) 径方向に対する平均核発熱

表 A-2 遮蔽の中の種々の計測用配位での貫通孔に対してなされた中性子束の計測値

	入口からの 距離 (cm)	中性子束 $E_n \sim 14 \text{ MeV}$ ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	中性子束 $E_n > 0.1 \text{ MeV}$ ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	全中性子束 ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
水平直円管 ($d=4\text{cm}; R=6\text{cm}$)	0	8×10^{13}	2.2×10^{14}	3.5×10^{14}
	160	4×10^{10}	1.0×10^{11}	1.5×10^{11}
垂直直円管 ($d=4\text{cm}; R=6\text{m}$)	0	4×10^{13}		1.7×10^{14}
	200	2×10^9		7.0×10^9
	400	5×10^8		-
スリット状垂直短型管 ($w=2\text{cm}, H=400\text{cm}; R=6\text{m}$)	0	4×10^{13}	1.1×10^{14}	1.7×10^{14}
	200	2×10^{10}	2.9×10^{10}	3.4×10^{10}
	400	1×10^{10}	1.4×10^{10}	-

図 A-2. 130cm 厚の遮蔽の中にあるいろいろな形の貫通孔

図 A-3. 直円管による軸方向の中性子束の減衰の直径に対する依存性

表 A-3 図 A-2に示した130cm厚の遮蔽の中にあるいろいろな形の貫通孔の出口での中性子束 ($E > 0.1 \text{ MeV}$) と全積分率

管型 (図 A-2; $d=10\text{cm}$)	管軸上		管軸より30cm離れた場所	
	中性子束 ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	線積分率 (rads^{-1})	中性子束 ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	線積分率 (rads^{-1})
(1) 直円管	1.5×10^{11}	1×10^3	2×10^8	2×10^{-1}
(2) 屈折円管 ($\alpha=30^\circ; l=65\text{cm}$)	2.0×10^9	2	2×10^7	2×10^{-2}
(3) 屈折円管 ($h=30\text{cm}; L=65\text{cm}$)	8.0×10^7	1×10^{-1}	3×10^6	3×10^{-3}
(4) 局所遮蔽付き直円管	5.5×10^{11}	5×10^2	4×10^{10}	4×10^1

に述べた数値は暫定的なものである。フルーエンスは近似的には、物理フェーズに対しては上述した中性子束に 1×10^6 秒を掛けることにより、また、工学フェーズに対しては 1×10^8 秒を掛けることにより求めることができる。吸収線量 (rad) は中性子束に 10^{-9} を掛けることにより得ることができる。