

計測器のリスト List of Diagnostics

四竈泰一¹, 大館暁², 徳澤季彦²
Taiichi Shikama¹, Satoshi Ohdachi², Tokihiko Tokuzawa²

¹京都大学大学院工学研究科, ²核融合科学研究所

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²National Institute for Fusion Science

背景

原型炉の計測制御については 2012 年から SlimCS を想定した検討が行われ, ITER の計測制御[1]をベースとしながら, 原型炉特有の条件を考慮して計測器が選定された[2, 3]. 本発表では, 今回新たに JA DEMO[4]を想定して選定した計測器候補について報告する. 現時点における目的は, ITER 及び JT-60SA の延長線上で考えることが難しい計測や, 原型炉特有の条件で生じると考えられる計測上の課題を挙げ, 解決に向けた研究開発を喚起することである.

方法

JA DEMO で必要となる計測を以下の 2 段階の手順で検討した.

【第一段階】計測制御を炉心プラズマ平衡制御, 燃焼制御, ダイバーター制御の 3 種類に分け, 被制御量, 計測手段, 制御手段 (アクチュエーター) をリストした.

【第二段階】計測を原型炉運転初期の試験運転期間のみに用いるもの (試験運転期間用) と定格運転時にも用いるもの (常時型) に分類し, 後者についてより詳しい仕様を決めた.

第一段階では, ITER 及び JT-60SA での技術確立を期待しつつ, ITER では装置保護・基本制御に割り当てられているが原型炉では実装が難しいと思われる計測, ITER では先進制御や物理研究に割り当てられているが原型炉でも実装した方が良いと思われる計測, を考えた. 考慮した原型炉特有の条件を以下に挙げる.

- 高速中性子と γ 線による放射線環境
フラックスは ITER と同程度, フルエンスは ITER より約 1 桁増加する. 多くの計測器を屈曲構造の後方に設置することが必要となる.
- ブランケット設置
トリチウム増殖比を確保するために, 計測に利用可能なポート面積が全炉壁面積の 1%以下 (10 m²未満) に減少する. また,

ブランケット背面の磁気計測が渦電流 (減衰時定数 10–100 ms) の影響を受ける.

- 保守性と冗長性
ダイバーター及びブランケットモジュールを交換する際の利便性を考慮して, 計測器はできるだけ水平ポートに集約することが望ましい. また, 2年毎の保守を想定して計測器の冗長性確保が必要となる.
- プラズマパラメータと寸法
JA DEMOの炉心は, 高 β ・密度・閉じ込め・自発電流駆動割合で設計されており, 安定性の裕度に注意を要する. また, 中性粒子ビーム (NB) のエネルギー増加による荷電交換断面積の減少 (荷電交換分光の困難), 計測器-プラズマ間の距離が遠くなることによる集光立体角の減少 (トムソン散乱の困難), 密度増加による高速原子の増加 (第一ミラー損傷) が予想される.

試験運転期間は, いわゆるコミッショニング期間であり, 常時型計測と統合コードの性能検証, 機械学習を利用する場合のデータセット構築, ITER 及び JT-60SA からの外挿が単純ではないと思われる物理現象 (例えば, RWM, ELM, ディスラプションの抑制方法, HL 遷移閾パワー, グリーンワールド密度限界, 等) の確認に利用することを想定した.

グループ討議と専門家インタビューによる検討を経て, 最終的に常時型で 19 種の計測 (11 種類の計測器) を選定した. アクチュエーターの詳細仕様は WG の範疇を超えるため考えないこととした.

結果

選定した計測器のリストを表に記す. 必要な炉壁面積は 5.4 m²となった. 選定結果の概要を以下に述べるが, 詳細な検討内容と今後の課題については報告書 (準備中) を参照されたい.

【平衡制御】プラズマ位置形状と電流の制御を行う. シーケンス制御, 不安定性やアクシデン

トの制御も対象とした。被制御量として、最外殻磁気面と第一壁のギャップ [反射計, 磁気計測], プラズマ電流 [磁気計測] を選定した ([]内は計測器)。ギャップ制御は、速い制御は導体壁の安定化効果に期待し、遅い制御のアクチュエーターにPFコイル電流を用いる。プラズマ電流制御のアクチュエーターには電流駆動 [誘導, ブーストラップ, NB, EC] を用いる。

シーケンス制御の中で、特に着火条件については装置固有の最適化が必要な可能性があり、試験運転期間にデータ収集することとした。この目的には、カメラによる発光計測を利用する (ただし故障覚悟)。

選定した計測器のうち、磁気計測の各種センサーはITER及びJT-60SAの延長線上で考えることができるが、放射線フルエンスが増加する影響の確認、ブランケット構造体に生じる渦電流の時定数を考慮した高周波数センサー設置位置の検討が必要である。反射計による等密度面計測はITERでの採用が見送られたため、他の大型装置での制御実証が必要である。

【燃焼制御】温度、密度、電流分布等を指令値に維持し、不安定性を回避しつつ完全非誘導電流駆動で核融合出力を定格値に保つことを目的とする。

被制御量として、電子、イオンの温度・密度 [ECE, 干渉計, 反射計, X線分光], 不純物密度 [分光], 安全係数 [偏光計], DT比・中性子発生率 [中性子スペクトロメーター] を選定した。アクチュエーターは、燃料ペレット, 放射冷却用の不純物ガスパフ, NB, EC, 低エネルギーNB (トロイダルトルク入射), 3次元磁場を利用することとした。

トロイダル回転は計測法に不確定性があるため、試験運転期間に可能な条件で荷電交換分光により調べることを被制御量から除いた。また、各計測で放射線環境とポート制限により分布計測が難しい場合は、試験運転期間に機械学習を利用して視線積分値と分布値の対応付けを行うことが必要かもしれない。

課題として、トムソン散乱と荷電交換分光が、それぞれ集光立体角の減少、荷電交換反応の断面積減少で難しくなる可能性がある。代替計測として、前者はECE, 干渉計, 偏光計, 後者はX線分光 (ドップラー広がり・シフト) が考えられるが、トムソン散乱と荷電交換分光を実現する方法や、新規手法の開発についての継続検討が必要である。また、各種不安定性, ELM,

ディスラプションについては、抑制方法がITER及びJT-60SAで開発済みであると仮定したが、これらについても継続検討が必要である。

【ダイバーター制御】デタッチメントプラズマの実時間制御が重要課題であり、被制御量としてターゲット板前面 T_e , n_e [可視分光], 放射ピーク位置 [ボロメータ, 可視分光], ターゲット板表面温度 [IRサーモグラフィ] を選定した。アクチュエーターにはガスパフを利用し、ダイバーターへの予期しない熱流入イベントが発生した場合は、ターゲット板の損傷を防ぐためのストライク点位置掃引を併用する。

試験運転期間に統合コードベンチマークを行うために中性粒子密度 [圧力計, 可視分光] とリサイクリング率 [可視分光] を計測する。

選定した計測器はITER及びJT-60SAの延長線上にあるが、光計測 (可視分光, ボロメータ, IR) の観測方向と視野 (視線数) が大幅に制限される課題がある。これは、できるだけ水平ポートを利用する前提に加え、高速原子による第一ミラー損耗を防止するために、細長いダクト後方に第一ミラーを設置する必要性が生じる [5] と考えられるためである。この結果、トモグラフィ法等による分布計測が難しくなり、視線積分量による制御や新しい分布計測法の開発が必要となると考えられる。

表. 選定した常時型計測器と被制御量のリスト

計測器	被制御量
マイクロ波反射計	LCFS-FWギャップ分布, n_e 分布
磁気計測	LCFS-FWギャップ分布, プラズマ電流
ECE	T_e 分布
マイクロ波干渉計	n_e 分布
X線分光	T_i 分布, 不純物密度
VUV分光	不純物密度
FIRレーザー偏光計	安全係数分布, $T_e \cdot n_e$ 分布
中性子スペクトロメーター	DT比, 中性子発生率分布
可視分光	Z_{eff} , 不純物密度, ターゲット板前面 $T_e \cdot n_e$ 分布, 放射ピーク位置
ボロメータ	放射ピーク位置, 放射パワー
IRサーモグラフィ	ターゲット板・第一壁表面温度分布

参考文献

- [1] A. J. H. Donné, *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, S337 (2007).
- [2] 松田慎三郎, 他「原型炉の計装制御」NIFS-MEMO-68 (2014).
- [3] 松田慎三郎, 他「核融合原型炉の運転制御」NIFS-MEMO-80 (2017).
- [4] K. Tobita, *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **75**, 372 (2019).
- [5] W. Biel, *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **146**, 465 (2019).