

JFT-2M における 2 次元高速カメラシステムの開発

鈴木貞明^{A)}、川島寿人^{A)}、西野信博^{B)}、篠原孝司^{A)}、山本正弘^{A)}、草間義紀^{A)}

^{A)}日本原子力研究所 那珂研究所

^{B)}広島大学工学部

概要

JFT-2M では、2 次元高速カメラを用いた簡便でスループットの高い高速分光計測システムを開発した。これは、最高 40,500 フレーム / 秒の高速カメラと光学干渉フィルターを組み合わせ、かつ耐放射線（硬 X 線）石英の光ファイバーを用いることによってカメラ本体を JFT-2M 周辺の放射線環境から分離し、制御室に設置して実時間でモニターできるシステムとした。その初期結果として、1ms 以下の現象であるコンパクトトroid (CT) 入射時やプラズマ周辺部での不安定性 (ELM: Edge localized mode) 発生時の周辺プラズマ / ダイバータ部における D 光などの発光特性を高速で捕らえることに成功し、時間依存性や 2 次元分布特性など新たな知見を得ることができた。

1 はじめに

近年、2 次元カメラの高速化技術の進歩が目覚しく、世界の核融合実験装置で高速カメラが導入され始め、1ms 以下の高速現象が解明されつつある。今回、JFT-2M において高速カメラを用いた簡便でスループットの高い高速分光計測システムを開発し、CT 入射や ELM 発生時の高速現象に応じた D 光などの発光特性を明らかにした。

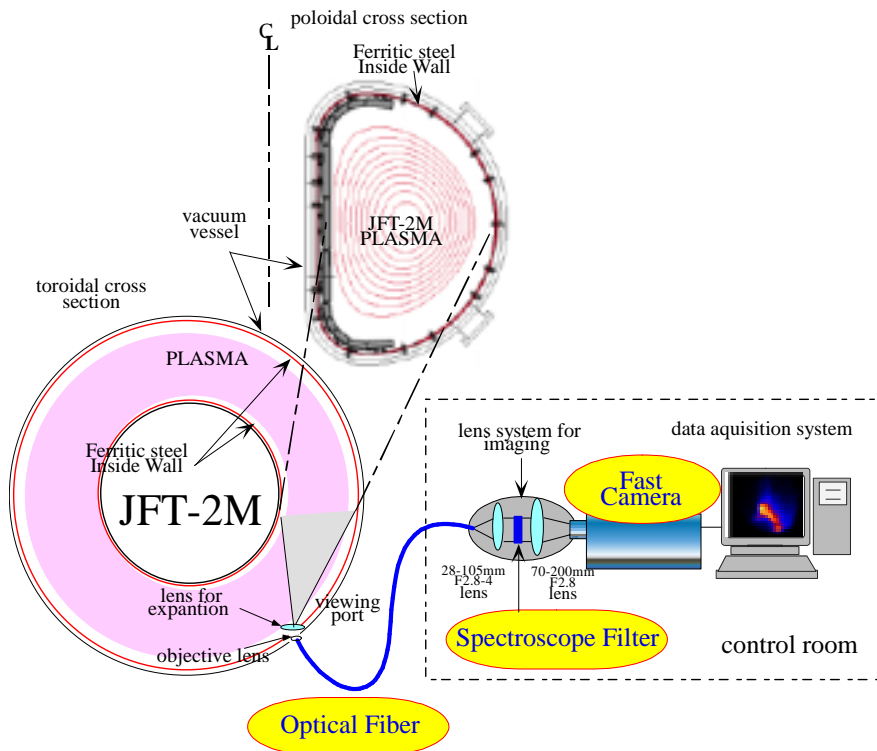


図 1. JFT-2M トカマクに設置した 2 次元高速カメラシステムの概要図

2 高速カメラシステム

図1に開発した2次元高速カメラシステムの概要を示す。高速カメラ、光学干渉フィルター及び光ファイバーが主要部分を構成している。高速カメラの選定に当たっては、高速性、高空間分解能及び輝度調整可能なことを基準に、40,500 フレーム/秒、256×256 ピクセル及び輝度調整利得 1~999 を有する Fast CAM-ultima-II(PHOTRON 社製)を採用した。分光計測のために、光学干渉フィルター(Andover 社製)を用いて光学系を単純化し、実験で対象とするガス種や不純物に合わせてフィルターを交換して計測できるようにした。さらに、核融合炉への適用の見通しを得るため、耐放射線の光ファイバーでプラズマを見込み、その画像を、放射線環境下から遠ざけて設置した高速カメラまで中継して計測することを考慮して、光ファイバーを用いている。今回使用したものは、長さ15m、直径10mmであり、耐放射線の石英ファイバー30,000本が収められ、高い空間分解能を得ている(三菱電線製)。各機器の間は、結像用などのレンズで連結されている。

3 計測結果

3.1 CT 撮像に成功

JFT-2M では先進燃料供給法として、CT 入射の研究を実施している。今回、開発した高速カメラシステムによる分光計測を行い、JFT-2M に入射された CT の挙動の解明を試みた。図2は、この実験のための高速カメラの視野を示している。高速カメラは、P-8 ポートから接線方向に P-3 の CT 入射ポートを見込んでいる。図2右上の撮像図は、真空中(JFT-2M プラズマ無し)に CT が入射された場合の D α 光を 18,000 フレーム/秒(56 マイクロ秒/フレーム)で取得した例を示す。速度~100km/秒の CT が JFT-2M の重水素プラズマに入射され、D 光が発光する様子を捕らえることに成功した。その時の時間変化を図3(a),(b),(c)に示す。図3(a)の撮像図では、CT 入射後 D 光の発光が最も早い応答として捕えられ、II で最も輝度が強まり、IV で消失する。この発光現象は約 200 マイクロ秒で終わる。2 番目に早い現象は、プラズマ周辺の密度の増大であり、CT 入射後約 50 マイクロ秒を経て増大し始めている(図3(b))。最後に、中心部の電子密度が約 200 マイクロ秒遅れて増大し始める(図3(c))。これらは、CT が約 200 マイクロ秒間入射ポート付近からプラズマ周辺に局在した後、主プラズマ密度の増大に寄与していることを明らかにしたものである。この変化の時間ス

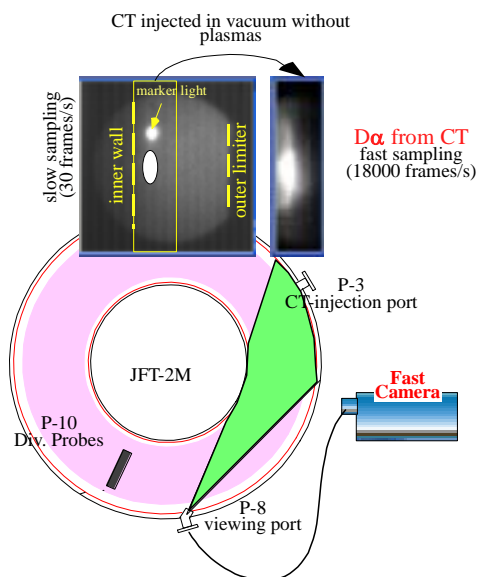


図2 CT 入射ポートを見込む高速カメラの視野

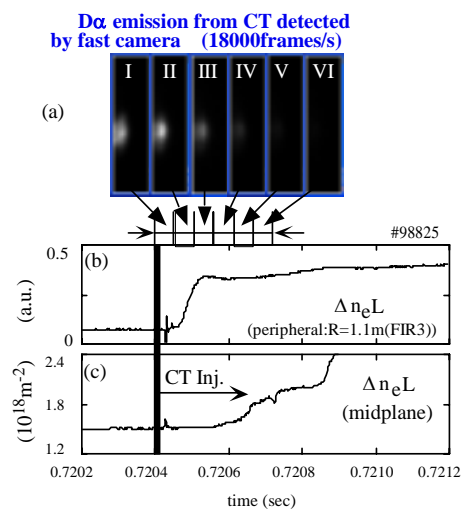


図3 CT 入射時の高速カメラ撮像図及び電子密度の増分(周辺および中心領域)の時間変化

ケールは、CT の速度から予想される時間スケールに比べ非常に遅く、比較的ゆっくり働く物理機構があることを示唆している。

3.2 ELM によるダイバータ部の D 発光特性

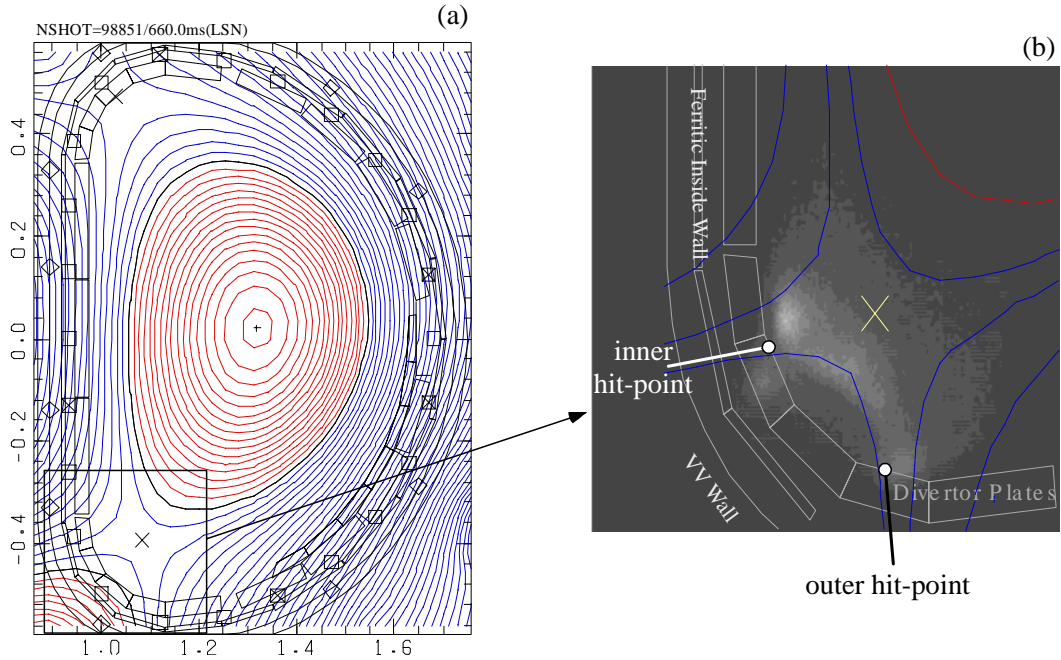


図 4 高速カメラを用いて ELM によるダイバータ部の D 光の発光強度の 2 次元分布を計測するための視野

トカマクの高閉じ込めモード (H モード) 中に間欠的 (JFT-2M では 1 ミリ秒程度以下) に発生する ELM は、通常の 4 倍以上の熱負荷をダイバータ板などに与えるため、その発生機構や構造の研究が進められてい

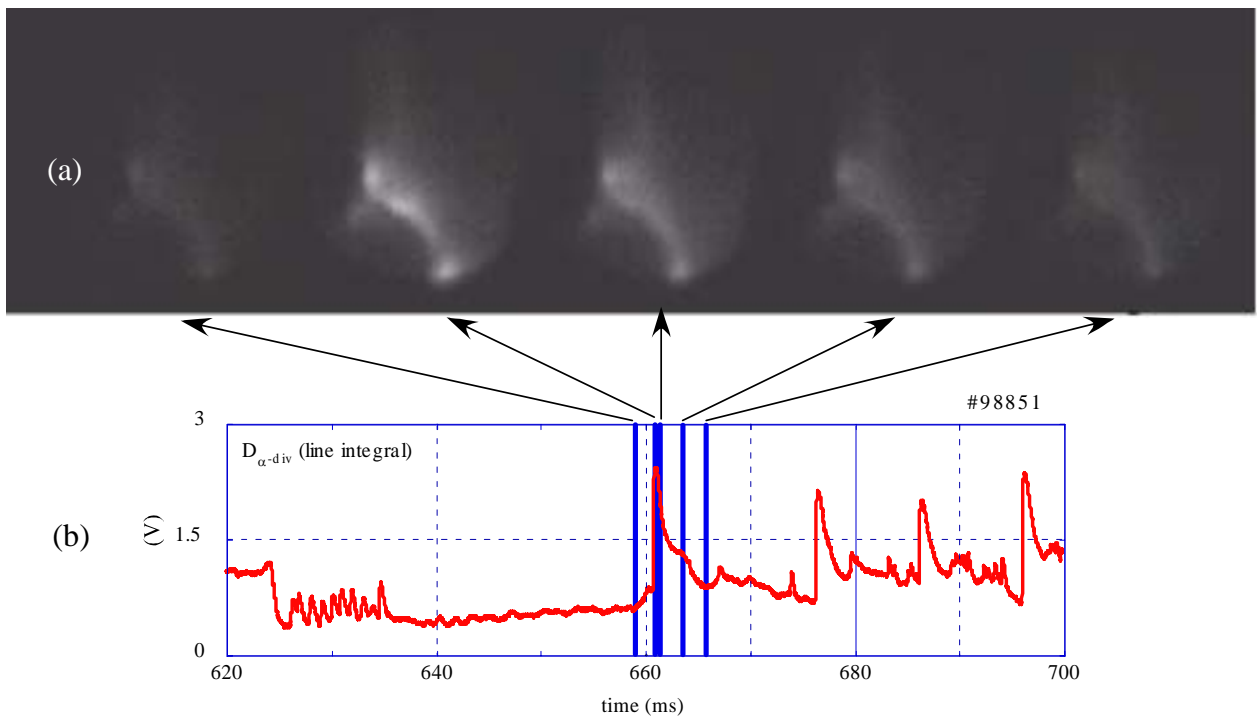


図 5 ELM 発生時の高速カメラによるダイバータ部の D 光分布 (a)およびダイバータ部を見込む線積分計測による D 強度(b)の時間変化

る。しかし、その現象が高速であることから、計測が困難だった。そこで、今回の高速カメラシステムの開発により、ダイバータ部における D 光の 2 次元分布の高速測定が可能となり、ELM 発生時の測定を行った。

この計測のため、高速カメラの視野は図 4 のようにダイバータ部に焦点を絞って観察した。図 4(b)は実際に ELM 発生中に 4,500 フレーム / 秒 (222 マイクロ秒 / フレーム) で取得した 1 フレームを示しており、ダイバータ部では特に D 光の発光が強いことがわかる。

ELM なし H モード状態から ELM が間欠的に発生する状態に変化した時放電 (図 5(b)) において、高速カメラによる撮像図の時間変化を断片的に図 5(a)に示している。ELM 発生前は、全体的に D 光強度は小さいことがわかる。ELM 発生直後、内外ダイバータ板のヒットポイントを挟んだ両側で D 光強度が急激に増大し、熱・粒子束の拡散の急激な増大が推測された。その後は次第に緩和する。このような一連の現象を鮮明に捉えられたことができたのは初めてであり、現在このデータの定量解析を遂行中である。

4 まとめ

JFT-2M トカマクにおいて、最高 40,500 フレーム / 秒の 2 次元高速カメラを用いた簡便でスループットの高い高速分光システムを開発した。

初期結果として、CT 入射時や ELM 発生時のプラズマを高速で捕らえられ、時間依存性や 2 次元分布特性など新たな知見を得ることができた。CT 入射実験観測では、速度 ~ 100km/秒程度の CT 入射直後では、プラズマ周辺に CT が滞在し、その後、予想された時間スケールより遅く中心部に浸透することが本システムを用いて初めて観測できた。また、ELM 発生時にダイバータ部の D 光 2 次元分布を高速で捕らえ、熱・粒子の輸送の解明に寄与する貴重なデータを取得できた。

今後、プラズマ中の粒子の異常輸送に係わる中性粒子の集合運動や帯状流などの高速現象を検出することを試み、その形成機構などを解析していく予定である。

参考文献

- [1] 川島 寿人、他、“JFT-2M における CT 入射及び ELM 発生時の高速カメラによる 2 次元分光計測”, 第 20 回プラズマ・核融合学会年会, 平成 15 年 11 月, P242