

# 大型タンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬の為の大熱流束プラズマの発生と非接触プラズマ実現に向けた研究の進展

## Development of High Heat-flux Generation and the Research toward the Realization of Detached Plasma Using a Large Tandem Mirror Device

中嶋洋輔<sup>1</sup>, 坂本瑞樹<sup>1</sup>, 市村 真<sup>1</sup>, 今井 剛<sup>1</sup>, 片沼伊佐夫<sup>1</sup>, 假家 強<sup>1</sup>, 小波蔵純子<sup>1</sup>, 沼倉友晴<sup>1</sup>, 平田真史<sup>1</sup>, 南 龍太郎<sup>1</sup>, 吉川正志<sup>1</sup>, 池添竜也<sup>1</sup>, 大木健輔<sup>1</sup>, 武田寿人<sup>1</sup>, 市村和也<sup>1</sup>, 細井克洋<sup>1</sup>, 岩元美樹<sup>1</sup>, 細田甚成<sup>1</sup>, 飯田洋平<sup>1</sup>, 永田晋二<sup>2</sup>, 四竈樹男<sup>2</sup>, 庄司 主<sup>3</sup>, 松浦寛人<sup>4</sup>, 赤羽泰央<sup>1</sup>, 木暮 諭<sup>1</sup>, 高橋樹仁<sup>1</sup>, 長塚 優<sup>1</sup>, 大川和夫<sup>1</sup>

NAKASHIMA Yousuke, SAKAMOTO Mizuki, ICHIMURA Makoto, IMAI Tsuyoshi, et al.

<sup>1</sup>筑波大プラズマ, <sup>2</sup>東北大金材研, <sup>3</sup>核融合研, <sup>4</sup>大府大放射線研究セ

<sup>1</sup> PRC Univ. Tsukuba, <sup>2</sup>IMR Tohoku Univ., <sup>3</sup>NIFS, <sup>4</sup>RRC Osaka Pref. Univ.

筑波大学プラズマ研究センターでは、ダイバータ模擬を一つの大きな柱とした研究計画に基づき研究を進めている。本計画では、タンデムミラー装置 GAMMA10/PDX を用いて、ミラー端部を利用した高熱粒子束のプラズマ流を生成し、ITER や原型炉におけるダイバータ開発の急務な課題の解決に貢献することを目指している[1,2]。GAMMA10/PDX 装置では、高周波やマイクロ波、中性粒子ビームといった、現在の核融合実験装置と同じ規模のプラズマ生成・加熱装置を用いて高温プラズマを生成している。これらの大電力プラズマ加熱装置を活用することにより、端部ミラー出口において、従来の直線型装置によるダイバータ模擬実験装置では真似の出来ない、高温プラズマ、高熱流束を、高磁場環境において、より炉心プラズマに近い条件下での模擬実験が精力的に進行中である。Fig.1 は GAMMA10/PDX 装置の概

略図と西エンド部に設置されたダイバータ模擬実験の設備を示す。

これまでに、ICRF によって生成したミラー閉じ込めプラズマにおいて大電力の ECH (380kW, 5ms) を印加することにより、端部ミラー出口において、ITER ダイバータ板の熱負荷に匹敵する 10MW/m<sup>2</sup> を超える熱流束の発生に成功し、ECH のパワーと共に増大することを確認した。また、端部から流出するイオンのエネルギーが、従来のダイバータ模擬装置に比べ、数 100eV と桁違いに高いことを、端部に設置したイオンエネルギー分析器を用いた直接測定により確認し、その温度が ICRF 波動の電力によって 100eV~400eV の範囲で容易に制御できることが判った。さらにセントラル部に隣接する極小磁場アンカー部における ICRF 波動加熱により、ミラー端部の粒子束密度を大幅に増加させることに成功した[3-6]。

Fig.2(a)は、様々な実験条件下において測定

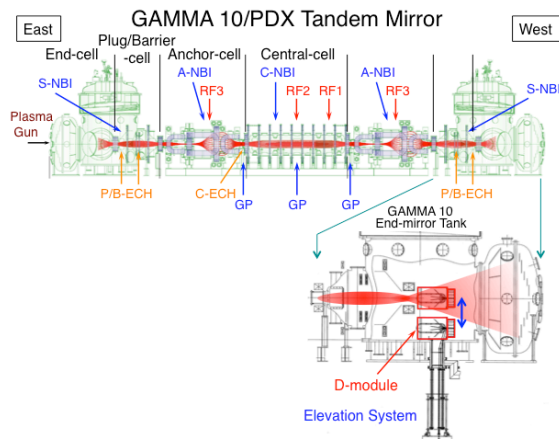


Fig.1 Schematic view of the GAMMA 10/PDX tandem mirror devices.

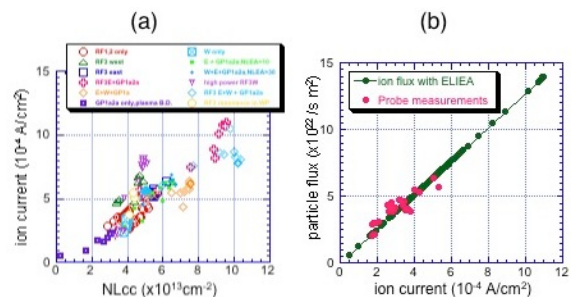


Fig.2 Relationship between end-loss ion current and central-cell plasma line-density (a). Correlation between end-loss ion current and particle flux measured at the end-mirror exit (b).

された端損失イオン流のセントラル部プラズマ線密度に対するプロットを示す。実験条件によるバラツキはあるものの、密度にほぼ比例して端損失粒子が増加していることが判る。Fig.2(b)はこれらの結果に基づいて求められた端部ミラー出口での粒子束密度を示す。端損失イオン流のスケーリングから求めたミラー出口の粒子密度は、西アンカー部におけるICRF加熱により、端部粒子束密度が  $10^{23}$  個/m<sup>2</sup> sec 台に到達していると考えられる。

一方、昨年春に西ミラー端部への設置が完了した大型ダイバータ模擬実験装置(D-モジュール)を用いて、本格的なダイバータ模擬実験を開始した。Fig.3 は、装置の全景と真空容器内部に設置した実験モジュール、及びモジュール内蔵するV字型タングステンターゲット板を示している。これまでに、ターゲット板上の熱流・粒子束の計測、プラズマ流とターゲット板との相互作用に起因する輻射光の高速カメラによる可視光観測や分光計測が行われている。その結果、クローズド化したモジュール内におけるターゲット板のV字角度に対する依存性から中性粒子の圧縮効果、及び水素ガス及び不純物ガス導入によるリサイクリング増強と放射冷却との関連を示唆する興味深い結果が得られている[6,7]。

今年度は、D-モジュール内への静電プローブや同部を観測する高性能分光器が増設され、ガス導入系の強化に伴う水素及び希ガス入射による密度上昇・不純物放射冷却実験におけるプローブ計測[10]、及び熱流計測や詳細な分光計測[11]が始められている。引き続いてターゲッ

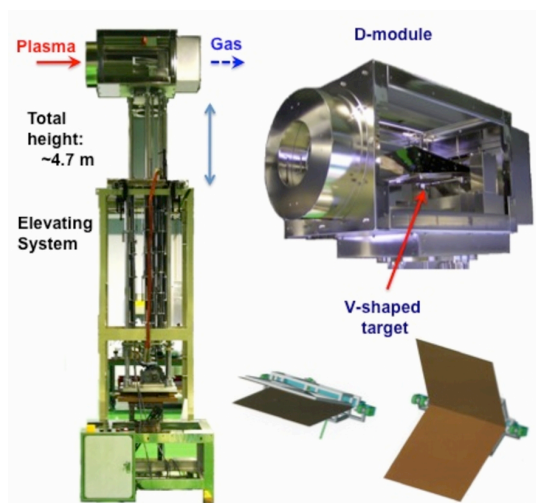


Fig.3 Photograph of D-module and schematic view of V-shaped target

ト板の高温化実験など、ダイバータ模擬プラズマの計測系の充実と様々な実験が予定されており、効果的な放射冷却、非接触プラズマ実現に向けた、より詳細なダイバータ模擬実験結果が期待されている。

また、ダイバータ模擬に関連する数値シミュレーション研究では、流体コードに基づくミラー端部背景プラズマの数値計算[8]が開始されており、中性粒子の効果を考慮した計算が、双方向型共同研究をベースに筑波大と慶応大で精力的に進められている[12]。

一方、材料照射・PWI 実験として、長期設置試料のTEM観測や、高フルエンス下での照射試料の東北大との共同研究による加速器を用いた表面分析[9]が進められ、その他にはMPDプラズマジェットによるプラズモイド入射実験や端部ミラーでのICRF加熱予備実験、端部リサイクリング実験等[13]が開始された。

講演では、端部における高熱流束生成実験における最新の成果、及び昨年度から開始したダイバータ模擬実験モジュールを用いた最新の結果、並びに今後の研究の展望について報告する。

#### <参考文献>

- [1] Y. Nakashima *et al.*, Fusion Eng. Design Volume **85** issue 6 (2010) 956-962.
- [2] 今井, 他 プロジェクトレビュー J. Plasma and Fusion Res. **87** (2011) pp.752-786.
- [3] Y. Nakashima *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. **59** No.1T (2011) 61-66.
- [4] Y. Nakashima *et al.*, J. Nucl. Mater. **415** (2011) S996-S1000.
- [5] Y. Nakashima *et al.*, Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conf. (Oct. 8-13, 2012, San Diego USA) IAEA-CN-197 FTP/P1-11.
- [6] Y. Nakashima *et al.*, Journal Nucl. Mater. **438** (2013) S738-S741.
- [7] Y. Nakashima *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. **63** No.1T (2013) 100-105.
- [8] H. Takeda *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. **63** No.1T (2013) 414-416.
- [9] S. Nagata *et al.*, J. Alloys and Compounds **446-447** (2007) 558.

#### <関連する本会講演>

- [10] 大木/長塚/吉川 ポスター講演 05pE41P / 05pE47P / 05aE44P.
- [11] 岩元/細田 同上 05aE45P / 05pE44P.
- [12] 武田/古田 同上 05aE46P / 04aE51P.
- [13] 市村/齋藤/野原 同上 05aE38P / 03aE66P / 05pE45P.