



研究最前線

核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発

Development of High Power Gyrotron for Nuclear Fusion Reactor

假家 強, 今井 剛, 南龍太郎, 津村康平, 江橋優斗, 岡田麻希,
中嶋洋輔, 出射 浩¹⁾, 花田和明¹⁾, 下妻 隆²⁾, 久保 伸²⁾,
小田靖久³⁾, 池田亮介³⁾, 坂本慶司³⁾, 小野雅之⁴⁾

KARIYA Tsuyoshi, IMAI Tsuyoshi, MINAMI Ryutaro, TSUMURA Kohei, EBASHI Yuto,
OKADA Maki, NAKASHIMA Yosuke, IDEI Hiroshi¹⁾, HANADA Kazuaki¹⁾, SHIMOZUMA Takashi²⁾,
KUBO Shin²⁾, ODA Yasuhisa³⁾, IKEDA Ryosuke³⁾, SAKAMOTO Keishi³⁾ and ONO Masayuki⁴⁾

筑波大学プラズマ研究センター, ¹⁾九州大学応用力学研究所, ²⁾核融合科学研究所,

³⁾量子科学技術開発機構, ⁴⁾プリンストン大学プラズマ物理研究所

(原稿受付: 2016年12月22日)

Keywords: gyrotron, ECH, ECCD, EBW

1. はじめに

筑波大学プラズマ研究センターでは、核融合プラズマ加熱研究のための多様な大電力ジャイロトロンの開発を進めている。ジャイロトロンは、数10～数100GHzの周波数においてMWレベルの電磁波を発振可能な大型電子管で、電子サイクロトロン加熱/電流駆動 (Electron Cyclotron Heating: ECH/Electron Cyclotron Current Drive: ECCD), 電子バーンシュタイン波 (Electron Bernstein Wave: EBW) 加熱等を行う上で重要な電力源である。

これまでに、筑波大学プラズマ研究センターのGAMMA 10/PDX (Potential control and Divertor simulator eXperiments) 装置用に28 GHz-1 MW ジャイロトロンを開発し、最大出力1.38 MW, 長パルス運転で0.6 MW-2 sを達成した[1]。本ジャイロトロンは、双方向型共同研究におけるセンター間連携研究として、九州大学のQUEST (Q-shu University Experimental with Steady-State Spherical Tokamak) 装置に適用され、70 kAのプラズマ電流立上や、8.2 GHzのカットオフ密度より高い $1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ を超えるオーバードーププラズマの生成等の成果を得た[2, 3]。

また核融合科学研究所 (NIFS) と筑波大学間のジャイロトロン開発共同研究により、2014年度までに開発した3機の77 GHz ジャイロトロンと2機の154 GHz ジャイロトロンは、NIFSのLHD (Large Helical Device) 実験に供されている。全入力電力は5.4 MWに達し、高密度での高電子温度達成 (10 keV, $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$), 39分の定常プラズマ保持 (2.5 keV, $1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$), 電子系内部輸送障壁の研究の進展等に大きく貢献している[4-7]。

一方、核融合発電に向け、原型炉 DEMO (DEMONstration power plant) の開発が検討されている。DEMOでは、高磁場中において高密度プラズマを加熱する必要がある、

サブ・テラヘルツ帯のジャイロトロンが必要とされ、量子科学技術開発機構 (QST) と筑波大学間の共同研究として、DEMO用300 GHz帯ジャイロトロンの開発を開始した。

現在、筑波大学では、これまでのジャイロトロン開発と開発したジャイロトロンを用いたプラズマ加熱研究への貢献実績に基づき、28/35 GHz 2周波数ジャイロトロン、154/116 GHz 2周波数ジャイロトロン、サブ・テラヘルツ帯300 GHz ジャイロトロンの開発を精力的に進めている[1, 8-11]。

2. 28/35 GHz 2周波数ジャイロトロンの開発

筑波大学のGAMMA10/PDXにおけるダイバート模実験において、より高い熱流束を生成するために新型ジャイロトロンの開発を進めている。本ジャイロトロンは、共同研究を有効に進めるため、九州大学のQUEST装置、プリンストンプラズマ物理研究所 (Princeton Plasma Physics Laboratory: PPPL) のNSTX-U (National Spherical Torus Experiment Upgrade) 装置、京都大学のHeliotron J装置で必要とされる性能 (28 GHz-2 MW-3 s, 28 GHz-0.4 MW-連続波 (Continuous Wave: CW), 35 GHz-1 MW-3 s) を1機のジャイロトロンで達成することをめざした28 GHzと35 GHzの両周波数で動作可能な2周波数ジャイロトロンである。表1に28/35 GHz 2周波数ジャイロトロンの設計目標仕様、図1にジャイロトロンの構造断面図(a)と製作を完了したジャイロトロンの写真(b)を示す。電子銃 (Magnetron Injection Gun: MIG) は、発振に必要な電子ビームのピッチファクタ α (電子ビームの磁場に垂直な速度/平行な速度) が制御できる様に3極型である。電子銃のカソードより放射される熱電子は、アノード電極とボディ電極に印加される電圧により加速され、超伝導電磁石 (Supercon-

表1 28/35 GHz 2周波数ジャイロトロン設計仕様.

28/35 GHz 2周波数ジャイロトロン		
周波数	28 GHz	34.77 GHz
出力	2 MW 0.4 MW	1 MW
パルス幅	3 s CW	3 s
総合効率	50% (with CPD)	50% (with CPD)
ビーム電圧	80 kV 70 kV	80 kV
ビーム電流	70 A 20 A	40 A
電子銃	3 極型 (MIG)	
発振モード	TE _{8,5}	TE _{10,6}
出力モード	ガウス状ビーム	
出力窓	サファイア製ダブルディスク	
コレクタ	電位降下型 (CPD) 電場掃引コイル	

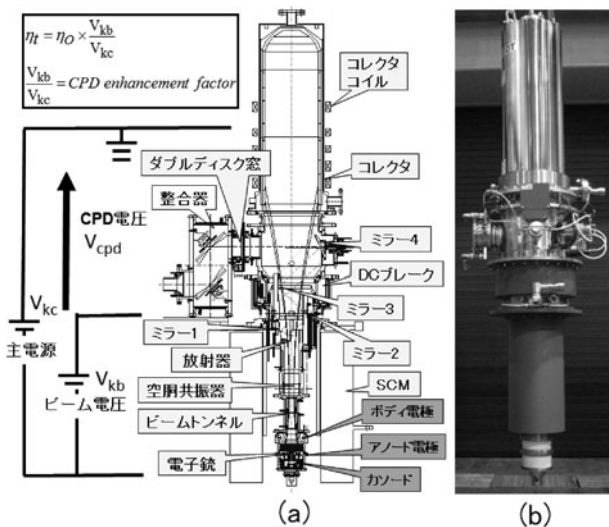


図1 28/35 GHz 2周波数ジャイロトロンの(a)構造断面図, (b)完成写真.

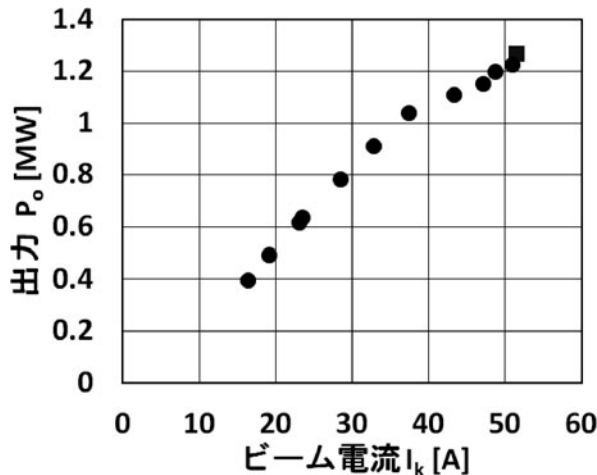
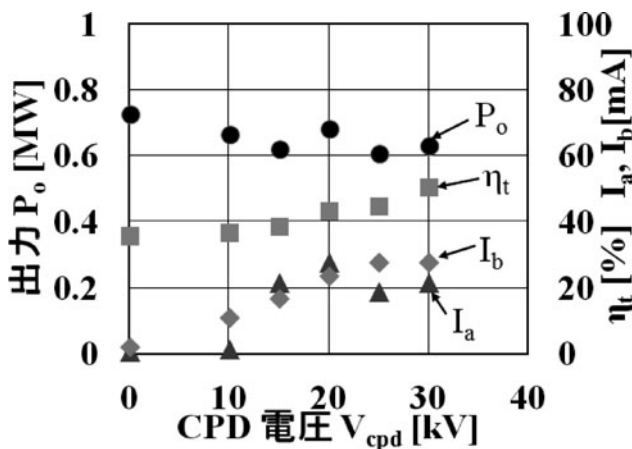
ducting Magnet: SCM) により形成する外部磁場に沿って, 単一円筒型の空洞共振器に入射される. 空洞共振器では, 電子ビームのエネルギーが電磁波のエネルギーに変換され, 円形導波管モードの電磁波 (TE_{m,n}) が発振する. TE_{m,n} モード電磁波は, モード変換器によりガウス状ビームに変換され4枚の内蔵ミラーにより伝送, 出力窓より射出される. 相互作用を終えた電子ビームはコレクタにより捕集される. コレクタとボディ電位部 (ビームトンネル, 空洞共振器, 放射器, ミラー1~3) 間に, 絶縁セラミックスで構成されるDCブレーク部を設け, コレクターボディ間に発振相互作用を終えた後の電子ビーム (スペントビーム) を減速する電圧を印加することで電子ビームのエネルギーを回収する (電位降下型コレクタ (Collector Potential Depression: CPD)). CPD により, コレクタの熱負荷が軽減される. 更に, CPD 印加時の, 電源入力電力に対する電磁波出力電力で定義する総合効率 η_t は, CPDを印加しない場合の電磁波出力効率 η_0 (空洞発振効率×電磁波伝送効率) に対し, V_{kb}/V_{kc} ($V_{kc} = V_{kb} - V_{cpd}$) 倍だけ改善される. ここで, V_{kb} はカソード-ボディ間に印加される空洞共振器に入射する電子の加速電圧, V_{kc} はカソード-コレクタ間の電圧を供給する主電源電圧, V_{cpd} はボディ-コレ

クタ間の CPD 電圧である. 更に外部掃引コイルを付加し, 電子ビーム補修位置を時間的に変えることで, 熱負荷の低減を行う.

28 GHz と 35 GHz 近傍の両周波数に対し, 同一電子銃で良い電子ビームパラメータが得られ, 同一空洞共振器で発振可能で, 同一放射器で同じ放射角を持ち, 同一出力窓で整合が取れ, 同一コレクタで低熱負荷運転が可能な空洞発振モードの組み合わせを検討し, 28 GHz で TE_{8,5} モード, 34.77 GHz で TE_{10,6} モードを採択した. 出力窓は, CW 動作における誘電損失に起因する窓温度上昇を抑制するため, 平行に配置した2枚のサファイア・セラミックス板の間に低誘電損失流体であるフルオロカーボンを通し, 冷却効率を上げるダブルディスク窓を採用した.

ダブルディスク窓の周波数帯域特性は, 3体の誘電体層における電磁波の伝播特性として計算されるが, 誘電体の厚みや誘電率の違い, 組立精度により組立構造体の反射率は設計とずれる可能性がある. そこで, ジャイロトロンへの搭載前, 及び搭載後に, 冷却媒体流路厚の最適化を行い, 窓での電磁波反射率を2%程度に調整した. 得られた反射率には, 冷却媒体での吸収 (計算値は1%以下), サファイア板厚み精度等の製造精度, 組立・調整制度等に起因する反射, 測定誤差が含まれる. 窓での反射波は, 数秒程度の動作では問題無いが, CW 動作の場合, ジャイロトロン管内の不要加熱を引き起こす可能性がある. パルス幅伸長, 出力窓性能評価の際は, 電磁波伝送系からの反射も含め, 留意して試験を進める必要がある.

28 GHz 帯の2号管となる2周波数ジャイロトロンは, 2016年6月に製作を完了, 試験を開始した. 図2に出力窓に取付けた短パルス用 SiC ダミーロードにより測定した, ビーム電圧 $V_k = 80$ kV における電磁波出力とビーム電流依存性を示す. 図中“●”印は, 繰返し運転時における, ダミー冷却水の飽和温度より算出した電力, “■”印は, 1ショット発振時のダミー冷却水温度変化の時間積分より算出した電力である. 周波数 28.045 GHz において 1.27 MW のガウス状ビーム出力が得られた. 又, 34.83 GHz において, 0.48 MW のガウス状ビーム出力を確認した. 電磁波出力ビーム位置は, 28 GHz 出力と同様に窓中心にあり, 電磁波伝送系に問題が無いことが確認された. 更に 28 GHz 発振における, 電磁波出力の空洞共振器磁場強度に対する依存性, 電磁波出力のアノード電圧に対する依存性を得られ, 大きな問題が無いことを確認した. 図3に CPD 電圧特性を示す. 図中 I_a はアノード電極に流入する電流, I_b はボディ電位部に流入する電流である. CPD 電圧 V_{cpd} の増加とともに総合効率 η_t は増加し, $V_{cpd} = 30$ kV において, 目標の50%を達成した. しかし, V_{cpd} が高くなるほど, 出力 P_0 は減少し, I_a と I_b は増加した. この原因としては, 電子ビームのピッチファクタの分散 $\Delta a/a$ が悪いいため, 一部の電子のエネルギーが空洞発振後, 小さくなりすぎ, V_{cpd} により反射され, ボディ電位部やアノードに流入, 空洞発振にも影響したものと考えられる. 長パルス~CW 動作を行う場合には, I_a , I_b を下げるために, $\Delta a/a$ を改善する必要がある. $\Delta a/a$ の改善は, 発振効率の改善にもつなが

図2 28 GHz 出力のビーム電流依存性 ($V_k = 80$ kV).図3 28 GHz 発振における出力 (P_o), 総合効率 (η_t), アノード電流 (I_a), ボディ電流 (I_b) の CPD 電圧依存性 ($V_{kb} = 80$ kV, $I_k = 25.5$ A).

り、目標の 1.5~2 MW 出力達成にも必要である。 $\Delta a/a$ 劣化の 1 つの要因として、ジャイロトン軸と SCM 磁気軸のズレが考えられる。

今後、ダブルディスク窓の性能評価のための長パルス化エージングを進め、電磁波出力、冷却媒体流速に対する窓温度上昇データを取得する予定である。更に、ジャイロトンと SCM 磁場間のアライメントの再調整を行ったうえ、ビーム電流を上げ、1.5 MW 以上の出力調整を行う予定である。

3. 154/116 GHz 2 周波数ジャイロトローンの設計

筑波大学と NIFS 間のジャイロトン開発共同研究により、これまでに開発した 77 GHz ジャイロトンと 154 GHz ジャイロトンの最新の達成値を表 2 に示す。表中、斜体文字は、電源電圧、ビーム電流、空間電荷効果等、動作条件がある程度定常になった段階で出力が最大となる様に、発振開始時はアノード電圧を低くし安定に立上げ、主動作時間帯でアノード電圧を上げ高出力を得る、アノード 2 段立上シーケンスでの達成値である。次のステップとして、LHD におけるプラズマ実験領域拡大のため、154 GHz と 115.5 GHz 近傍の両方の周波数で動作可能な 2 周波数ジャ

表 2 LHD 用ジャイロトローンの動作実績。

管 No.	短パルス運転	長パルス運転
	アノード2段立上	
77 GHz 1号管	1.40 MW 2.0 s	0.13 MW 935 s
77 GHz 2号管	1.30 MW 2.2 s	0.24 MW 1800 s
77 GHz 3号管	1.87 MW 0.1 s	0.30 MW 1800 s
	1.78 MW 1.0 s	
154 GHz 1号管	1.16 MW 1.4 s	0.35 MW 1800 s
154 GHz 2号管	1.20 MW 1.4 s	0.20 MW 1800 s

イロトンの設計を開始した。電子ビームパラメータ、放射器の放射角、出力窓の整合、コレクタの熱負荷を検討し、TE_{28,9} モードで 154 GHz 発振、TE_{21,7} モードで 116 GHz 発振の設計を進めることとした。

空胴共振器の電気設計においては、154 GHz と 116 GHz の両周波数において、ビーム電流 $I_k = 70$ A で、1.5 MW 以上の発振が期待される結果が得られた。電子銃の電気設計においては、154 GHz 1 号管と同一構造の電子銃で、両周波数の動作に対し、電子ビームのピッチファクタ $\alpha \geq 1$ が、高効率発振を得る 1 つの指標である $\Delta a/a < 5\%$ の低分散で得られた。このことは、部品の共通化の上で大きなメリットである。4 枚の内蔵ミラーによる出力窓までの電磁波伝送効率は、154 GHz において 97.8%、116 GHz において 98.1% である。コレクタは、CPD 型とし、外部掃引コイルを付加している。同一のコレクタコイルでの動作において、2.4 MW のスペントビーム入射に対するコレクタの平均熱負荷分布の計算結果は、両周波数に対し 0.5 kW/cm² 以下となり、熱応力計算や電力管の動作実績より、出力 1 MW で CW 動作が可能であると考えられる。

4. 300 GHz 帯ジャイロトローンの開発

QST との共同研究として、DEMO 用 300 GHz 帯ジャイロトローンの開発を進めている。発振試験用ジャイロトン 1 号管では、周波数 300 GHz において、500 kW・数 ms の出力を目標とした。空胴共振器内壁面の平均熱負荷は、周波数の 2.5 乗に比例して大きくなる上、同じ発振モードに対して、周波数が高く（波長 λ が短く）なるほど空胴共振器径は小さくする必要がある。空胴共振器の熱負荷をいかに低く抑えるかが大電力・高周波数ジャイロトン開発の 1 つの課題である。更に、空胴共振器における入射電子ビーム半径 R_e も小さくする必要がある。電流密度が高くなることによる空間電荷効果の影響やカソード・ローディング等が問題となる。半径 r_c の空胴共振器において TE_{m,n} モードの発振を行う場合、 r_c と R_e は、

$$r_c = \frac{\chi_{m,n}}{2\pi} \lambda$$

$$R_e = \frac{\chi_{m-1,1}}{2\pi} \lambda$$

で与えられる。ここで $\chi_{m,n}$ は、ベッセル関数の根である。よって、 $\chi_{m,n}$ の大きい高次モードを選択することで、 r_c と R_e を大きくすることができ、空胴共振器熱負荷と電子ビーム電流密度を下げるができる。本ジャイロトン

の空洞共振器の発振モードは、将来の MW 発振における熱負荷を考慮し、空洞共振器内部壁面でのジュール損失電力の小さい高次モード $TE_{32,18}$ を採用した。図 4 に 300 GHz ジャイロトロンの構造断面図(a), 写真(b)を示す。13 T-SCMのボア径 ($\phi 110$) の制限により、電子銃は 2 極電子銃を用い、モード変換器を内蔵しない構造である。空洞共振器で発振した、円形導波管モード $TE_{32,18}$ の電磁波は、電子ビームを補収するコレクタを兼ねた伝送路を伝播し、サファイア製の出力窓より出力される。

動作性能試験は、筑波大学の試験装置において実施した。ビーム電流 36.8 A において、所要モード $TE_{32,18}$ (299.84 GHz) が、出力 522 kW で得られた。また、 $TE_{31,18}$ モード (296 GHz) で 542 kW、 $TE_{30,19}$ モード (301.8 GHz) で 528 kW の発振が主モードと同程度の効率で得られた。周波数測定は、ハーモニックミキサ出力を高速フレームオシロスコープで記録する方式で行った[10]。高次モードの発振では、 $\chi_{m,n}$ の値に近い根が多くなるため、発振モードのモード競合が厳しくなる。300 GHz 帯における 500 kW を超える ms オーダーの発振が、単純な円筒型共振器で成功したことは、DEMO に向けた 300 GHz-MW-CW ジャイロトン開発に向けての大きなステップである。

更に、240 GHz 近傍の発振試験を実施し、磁場調整範囲において 300 kW 程度の 7 つの発振モードを確認した。1 つのモードを除き、6 つのモードに対しては、空洞磁場強度、電子ビーム入射位置、電磁波出力の電力ピーク半径／回転方向より発振モードを同定することで、発振周波数は 226~254 GHz であると推定され (図 5)、サブミリ波領域での周波数可変ジャイロトロンの基礎となる多周波数の発振を確認した。

今後の開発方針としては、電子ビームパラメータ制御のため 3 極型電子銃の採用、出力電磁波伝送に適したガウスビームへの変換と電子ビームと電磁波伝送路を分離しコレクタを大型化し熱負荷を低減するため放射器の内蔵、大電力・長パルス運転のためダイヤモンド窓と CPD 型コレクタの採用等が上げられる。

5. おわりに

筑波大学では、各大学、研究機関との共同研究により、大電力マイクロ波発振管であるジャイロトロンの研究、開発を行っている。その第一の目的は、核融合研究への適用と貢献である。ジャイロトン出力の電磁波で電力を伝送する無線電力伝送 (宇宙太陽光発電、ロケット[12]／飛行機推進等) やレーダーへの適用も考えられ、今後、その用途が広がることを期待したい。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご助力いただいた、東芝電子管デバイス株式会社、株式会社IDX、九州大学応用力学研究所、核融合科学研究所、量子科学技術開発機構、筑波大学プラズマ研究センターの関係各位に感謝いたします。

本研究は、NIFS 双方向型共同研究 (NIFS13KUGM080, NIFS16KUGM106: 筑波大-九大間センター連携研究、及

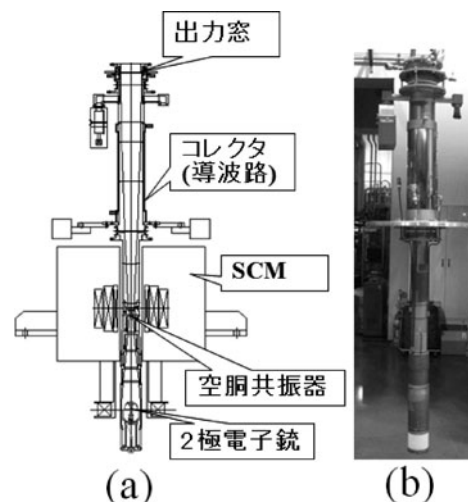


図 4 300 GHz ジャイロトロンの (a) 構造断面図, (b) 概観写真。

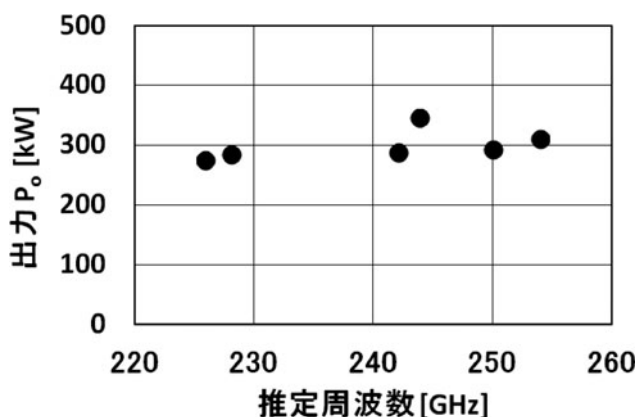


図 5 300 GHz ジャイロトンにおける 220~260 GHz 帯発振試験 ($V_k = 70$ kV, $I_k = 21.6$ A)。

び NIFS14KUGM095, NIFS14KUGM086), NIFS - 筑波大間ジャイロトン開発共同研究 (COD27077), 科研費補助金 (26249141, 15H05770, 25249135) による。

参考文献

- [1] T. Kariya *et al.*, Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conf. FIP1-6Rc (2016).
- [2] H. Idei *et al.*, Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conf. EX/P1-38 (2014).
- [3] H. Idei *et al.*, Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conf. EX/P4-491 (2016).
- [4] T. Kariya *et al.*, Trans. Fusion Sci. Tech. **55**, 91 (2009).
- [5] H. Takahashi *et al.*, Trans. Fusion Sci. Tech. **57**, 19 (2010).
- [6] R. Minami *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 063003 (2013).
- [7] H. Takahashi *et al.*, Phys. Plasmas **21**, 061506 (2014).
- [8] T. Imai *et al.*, Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conf. FIP/2-2Rc (2014).
- [9] T. Kariya *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 093009 (2015).
- [10] Y. Oda *et al.*, Int. Conf. on Inf. Mill. Tera. Waves, Aug.23-28 (Hong Kong)/ TS-68 (2015).
- [11] T. Kariya *et al.*, AIP Conf. Proc. **1771**, 030020 (2016).
- [12] 山口敏和 他: プラズマ応用科学 **23**, 1 (2016).