



研究論文

ITER ジャイロトロン実現に向けた開発研究および実機の完成

Completion of ITER Gyrotron Development and Manufacturing

池田 亮介, 梶原 健, 中井 拓, 矢嶋 悟, 小林 貴之,
寺門 正之, 高橋 幸司, 森山 伸一, 坂本 慶司

IKEDA Ryosuke, KAJIWARA Ken, NAKAI Taku, YAJIMA Satoru, KOBAYASHI Takayuki,
TERAKADO Masayuki, TAKAHASHI Koji, MORIYAMA Shinichi and SAKAMOTO Keishi

量子科学技術研究開発機構

(原稿受付: 2020年9月5日 / 原稿受理: 2020年12月28日)

量子科学技術研究開発機構では、国際熱核融合実験炉 ITER 用ジャイロトロンの研究開発を進めてきた。ITER で期待される 1 MW 出力での繰り返し連続運転に対して、空洞共振器の熱負荷を低減させた高次数 $TE_{31,11}$ モードのジャイロトロン試作機を開発した。この開発研究では、 $TE_{31,11}$ モードの発振を阻害する不要な周波数の異なるモードの存在が明らかとなり、その発振抑制を実現する運転手法を開発し、安定した 1 MW 出力の定常運転を実証した。この成果をもとに、ITER ジャイロトロン実機の製作を開始し、2 機のジャイロトロンの性能確認試験を完了させた。双方ともに出力 1 MW かつ効率 50% の 300 秒定常運転、0.8 MW 以上の 60 秒間 5 kHz 出力変調運転、出力 1 MW / 300 秒の 20 ショット高繰り返し運転にて運転信頼度 90% 以上を達成し、ITER の要求条件を満足した。

Keywords:

ITER, Gyrotron, ECH, ECCD, Millimeter wave

1. はじめに

1.1 ITER 電子サイクロトロン加熱システム

ITER における 20 MW の電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH&CD) 装置は、プラズマ着火に始まり、プラズマ電流分布制御、新古典ティアリングモード等の不安定性抑制、電子加熱による不純物制御など多岐にわたる高温プラズマ制御を担う。ITER ECH&CD 装置は、ジャイロトロン、高電圧電源、上部/水平ポートランチャー、伝送機器からなり、日本はジャイロトロン 8 機・水平ポートランチャー 1 機を調達する [1]。図 1 に日本が調達するジャイロトロンシステム (8 系統) を示す。ジャイロトロンの他

にコクレータースweepコイル、7 テスラ超伝導マグネット (SCM)、準光学整合器 (MOU)、ジャイロトロン架台、給電付きオイルタンク、冷却マニホールド、アノード電源 (APS) およびボディ電源 (BPS)、各種制御機器が含まれる。ITER ジャイロトロンの性能仕様は、発振周波数 170 GHz、出力 1 MW 以上、総合効率 50% 以上及び連続発振 (最大 1 時間) であり、量子科学技術研究開発機構 (以下、量研機構) は、その ITER ジャイロトロン実現に向けて研究開発を行ってきた。

1.2 ITER ジャイロトロン

量研機構が開発した ITER ジャイロトロンの構成を図 2

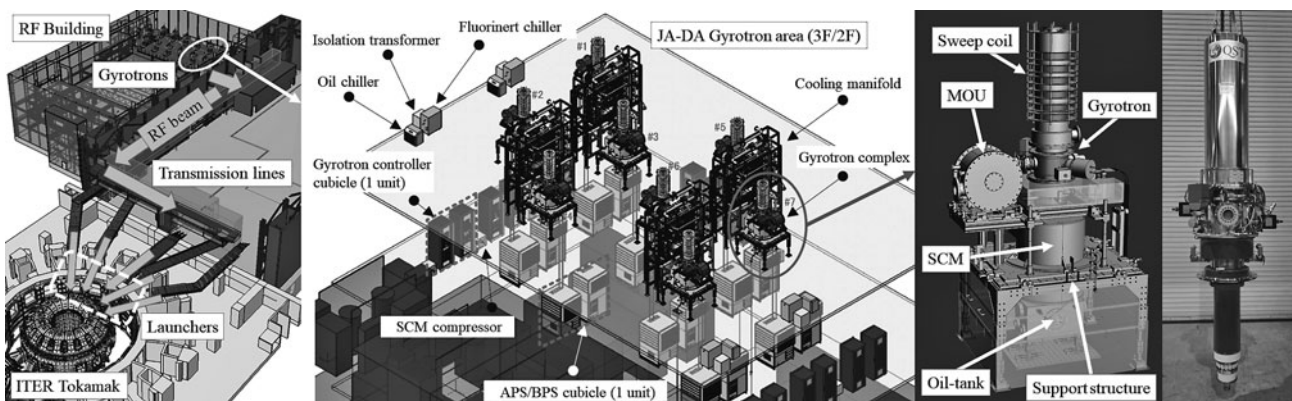


図 1 ITER RF 建屋における日本のジャイロトロンシステムと ITER ジャイロトロン実機の外観写真。

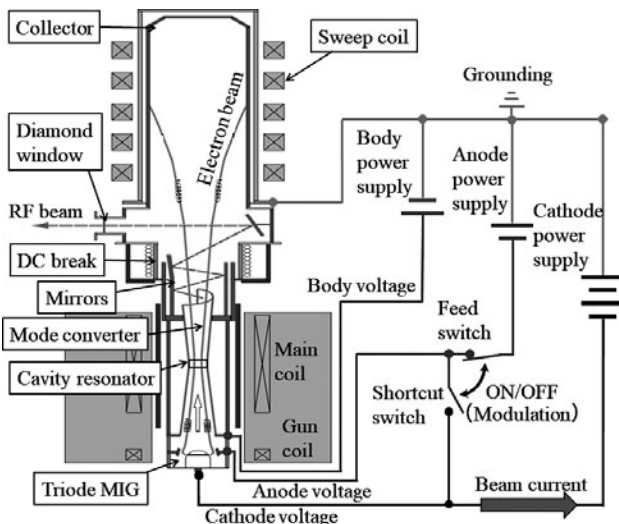


図2 ITER ジャイロトロン構成図。

に示す。ジャイロトロンは、電子サイクロトロンメーザーの原理を利用した発振管であり、その空胴共振器（以下、空胴）は単純な円筒形状であるため大電流の電子ビームを容易に入射でき、ミリ波からサブミリ波領域での高出力発振が可能である。メガワット級ジャイロトロンにおいては、空胴における発振モードは空胴壁の熱負荷を抑えるために、波長に比べ大きい径の空胴を使用して高次数の $TE_{m,n}$ モード発振を狙う。空胴にて発振した $TE_{m,n}$ モードのミリ波は、モード変換器にてガウスビームへと変換され、複数のミラーを介して透過損失の少ない CVD ダイヤモンド窓から放射される。コレクター電位降下 (CPD) により、ジャイロトロン全電力効率、30% から 50% に向上する [2]。その結果、コレクター壁面の熱負荷も大幅に低減でき、X 線の発生も抑えられる。電子ビーム源は、マグネトロン入射型電子銃 (MIG) であり、量研機構ではカソード／アノード／ボディの電極を有する三極管方式を採用している。発振には、磁力線に対して垂直成分の電子速度が寄与するため、平行成分の電子速度との速度比（ピッチファクタ）を緻密に制御することは、発振効率の最適化に効果的である。三極管方式は、カソード電極とボディ電極間に印加されるビーム電圧を変化させずに、カソード電極とアノード電極間のビーム引出電圧を変化させることによりピッチファクタを制御可能な利点を有する。加えて、三極管方式のジャイロトロンは、カソード電極の電子放出帯から引き出される電子ビームをアノード電極とカソード電極の短絡によって即座に停止できるため、給電スイッチ／短絡スイッチの導入によって優れた高速出力変調を可能としている [3]。以上の開発技術が ITER ジャイロトロンに適用されている。

2. ITER ジャイロトロン実機への開発研究

2.1 高次 $TE_{31,11}$ モード発振

量研機構では、 $TE_{31,8}$ モードの高次体積モード発振やエネルギー回収型コレクター、低電子速度分散が期待できる高性能電子銃、モード変換器、ダイヤモンド出力窓などの

大電力長パルス化に必要な要素技術開発を経て、世界で初めて ITER ジャイロトロン性能要求の実証に成功した [4, 5]。さらに、ITER ジャイロトロン実機製作に向け、1 MW 出力時の空胴の熱負荷限界に対して十分な裕度を持たせた高出力ジャイロトロン開発に着手し、ITER の 10 年以上にわたる長期間運転に対しても出力 1 MW の定常動作を安定して繰り返すことが可能なジャイロトロン開発を行ってきた。

ITER 実機向けジャイロトロン開発においては、 $TE_{31,11}$ モードを選択し、空胴半径を 17.9 mm ($TE_{31,8}$ モード) から 20.87 mm ($TE_{31,11}$ モード) に拡張し、空胴の Q 値は 1530 から 1740 となった。図 3 (a) に各モードの空胴における高周波電界分布を示す。図 3 (b) には、空胴での発振出力に対する最大熱負荷密度を示しており、 $TE_{31,8}$ モードの場合では空胴での発振出力が 1.1 MW (ジャイロトロン出力 1.0 MW 相当) で空胴壁の熱負荷制限 (2 kW/cm^2) に達するが、 $TE_{31,11}$ モードを選択することで空胴壁面での電界強度を低減させ、熱負荷密度は約 30% 低減した。その結果、理論的には空胴における発振出力は 1.5 MW までの高出力化が可能となった。

2 つの発振モードに対する空胴における最適電子ビーム半径はともに 9.13 mm であり、 $TE_{31,8}$ モードの開発研究で得た電子銃形状を引き継いだ。また、ジャイロトロン内部のモード変換器と 4 枚のミラーは、新たに最適化設計を行い、モード変換器から出力窓までの RF 伝送効率の設計値は従来の 97.7% から 98.3% に向上させた。また、ジャイロ

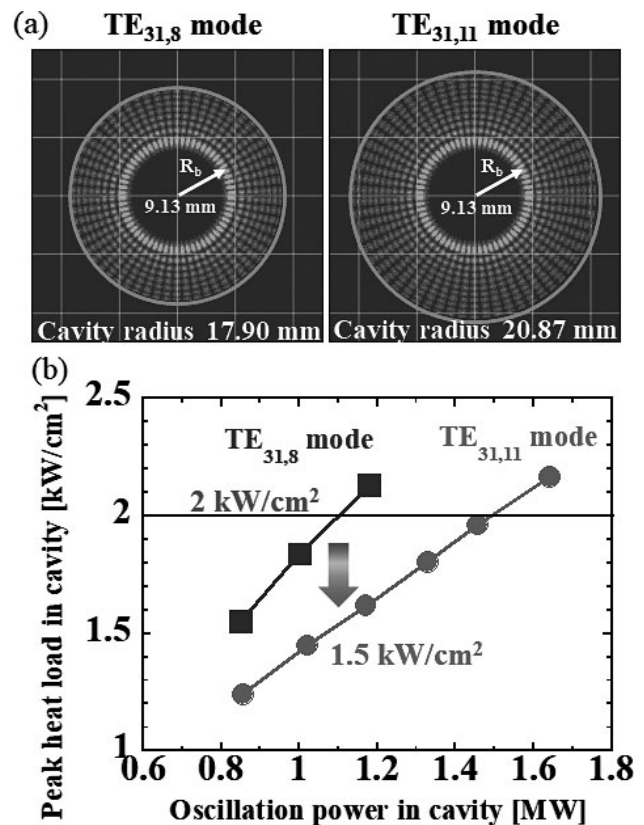


図3 (a)空胴内に励起される $TE_{31,8}$ モードと $TE_{31,11}$ モードの電界分布 (b)空胴内での発振出力に対する最大熱負荷密度。

トロン出力ビームをコルゲート導波管に高結合率で HE_{11} モードに結合させるために、準光学整合器の位相補正ミラーの最適化設計手法を開発し、ITER 性能仕様の HE_{11} モードへの結合率95%も達成可能となった[6].

2.2 モード競合の抑制

$TE_{31,11}$ モードジャイロトロンの 170 GHz 発振の実験的検証において、170 GHz 発振が開始可能な磁場強度範囲は狭く、発振中に $TE_{31,11}$ モードから隣接モードへ遷移してしまうといったモード競合に起因する問題が明らかとなった。電子と同じ方向に回転する高周波電界を有する空洞内の発振モードは順回転 (co-), 反転する発振モードは逆回転 (ctr-) と呼ばれており、特に Ctr- $TE_{29,12}$ モード (172 GHz) と Ctr- $TE_{28,12}$ モード (169.2 GHz) の発振が問題であった。モード変換器は、Co- $TE_{31,11}$ モード (170 GHz) 用に設計されており、これらの逆回転モードはモード変換器でガウスビームに変換されないため、空洞で励起された高出力高周波をジャイロトン内部に拡散し、放電を生じさせ、管内圧力の劣化を引き起こす。さらに、真空窓やセラミック製の DC ブレークなどの真空境界機器を損傷するリスクがあるため、運転を直ちに停止する必要がある。

この問題を解決するために、アノード電圧制御と電子ビーム半径制御を用いた運転手法を開発した[7,8]。2つの逆回転モード発振は、異なる運転フェーズで観察されている。Ctr- $TE_{29,12}$ モードは、図 4 (a) に示すようにカソード電極とボディ電極間に印加されたビーム電圧の上昇中の運転初期のフェーズで励起されている。発振開始時の空洞磁場 (B_c) は一定であるが、ビーム電圧 (V_{beam}) の上昇によって相対論因子 ($\gamma \sim 1 + V_{beam}[\text{keV}]/511$) が増加するため、電子ビームのサイクロトロン周波数 ($f_{cyc} \sim eB_c/2\pi\gamma m_e$) は減少することから、この電子ビームの集団により発振する高周波電界の発振周波数 ($f_{osc} \sim c\chi'_{m,n}/2\pi R_c$) は、より高い周波数の $TE_{m,n}$ モードから順に発振条件を満たしていくことを意味する。ここで、 e は電子の電荷、 m_e は電子の静止質量、 c は光速、 R_c は空洞半径、 $\chi'_{m,n}$ は $TE_{m,n}$ モードに対応する m 次ベッセル関数の 1 階微分の n 番根である。実際に発振するためには、発振開始電流より大きいビーム電流が流れている必要があるが、この発振開始電流はピッチファクタの増大とともに低下する。図 4 (a) に示すとおり、カソード電極とアノード電極間に印加されるビーム引出電圧やビーム電流もビーム電圧の上昇に伴って増大する。これにより、ビーム電圧が 55 kV に達し、サイクロトロン周波数が 172 GHz まで下がる時間において、ピッチファクタが 0.46 まで高められ、Ctr- $TE_{29,12}$ モードに対する発振開始電流が 28.5 A より下がることで Ctr- $TE_{29,12}$ モード発振が生じたと考えられる。これを抑制するために、アノード電圧制御を導入した。図 4 (b) に示すように、ビーム電流の上昇は図 4 (a) と同じままであるが、ピッチファクタと相関するビーム引出電圧を細やかに変化させることにより、ビーム電圧が 55 kV に達しサイクロトロン周波数が 172 GHz となる瞬間のピッチファクタを下げ、Ctr- $TE_{29,12}$ モードに対する発振開始電流を上げ、さらにビーム電流自体も 26.5 A まで下げることで、Ctr- $TE_{29,12}$ モードの発

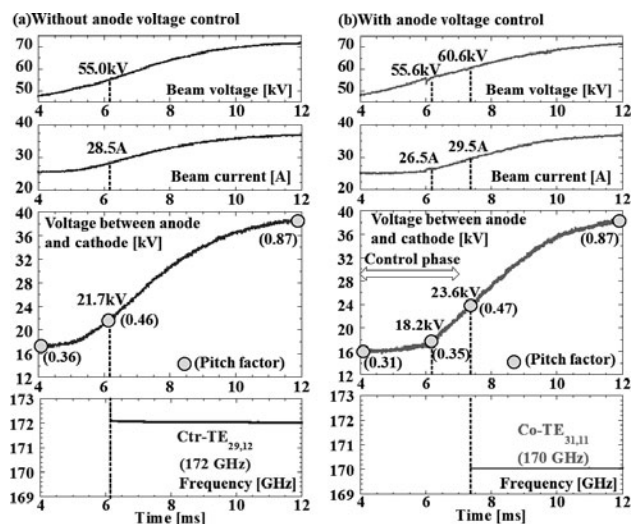


図 4 (a) 通常立ち上げによる競合モード Ctr- $TE_{29,12}$ モード発振 (b) アノード電圧制御 (ビーム引出電圧) を用いた競合モード発振抑制による Co- $TE_{31,11}$ モード発振。

振の抑制に成功している。さらに、ビーム電圧が 60.6 kV に達し、サイクロトロン周波数が 170 GHz まで下がった時に、電子ビームのピッチファクタの上昇量を制御し、ピッチファクタを 0.47 に上昇させ、Co- $TE_{31,11}$ モードに対する発振開始電流を十分下げるとともに、ビーム電流自体も 29.5 A まで上昇させることで、170 GHz の Co- $TE_{31,11}$ モードの発振に成功している。このような、細やかな引き出し電圧の制御により、Ctr- $TE_{29,12}$ 発振を抑制し、Co- $TE_{31,11}$ モードの発振を最初から開始することに成功した。図 4 からわかるように、到達する電圧・電流・ピッチファクタは、アノード電圧制御の有無条件によらず同じとなっている。ここからパルスを伸長させて長パルス運転を行うことになる。この発振技術の開発により、 $TE_{31,11}$ モードの発振可能な磁場強度幅は 0.013 T から 0.12 T に拡大し、 $TE_{31,8}$ モードと遜色ない広い空洞磁場強度において $TE_{31,11}$ モードを発振させることに成功した。

一方、長パルス発振において発振効率の高い空洞磁場領域では、Ctr- $TE_{28,12}$ モード発振が観測された。発振効率は、長パルス動作中に空洞磁場を下げることで改善するが、より高効率の発振は Ctr- $TE_{28,12}$ モードへの遷移により阻害された。高効率発振領域における競合しうる発振モード ($TE_{30,11}$, $TE_{28,12}$) の電子ビーム半径に対する空洞内の電子ビームと高周波電界との結合係数を図 5 (a) に示している。Ctr- $TE_{28,12}$ モード発振の最適なビーム半径は 8.9 mm と Co- $TE_{31,11}$ モード発振の 9.13 mm とは離れているが、図 5 (b) に示すように発振周波数の遷移が生じている。逆回転モード発振の結合係数を低下させ、かつ Co- $TE_{31,11}$ モード発振の高効率発振を実現するために、空洞への電子ビーム半径制御を行った。電子ビーム径は、カソード電子放出帯の磁場強度 (ガン磁場) を強くすることで変化させることができ、発振条件の最適化探索を行った結果、最適ビーム半径は 9.25 mm であることを明らかにした。この結果、図 5 (b) に示すように、Co- $TE_{31,11}$ モード発振の高効率発振領域を拡張することに成功した。なお、図からわかるように、

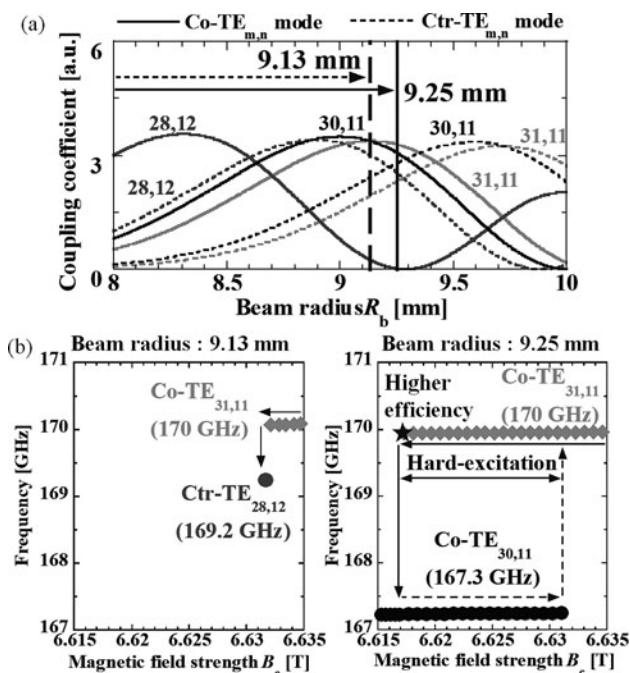


図5 (a)各発振モードの空洞入射ビーム半径に対する高周波電界と電子ビームの結合率 (b)空洞入射ビーム半径 9.13 mm と 9.25 mm における空洞磁場強度を減磁したときモード遷移の比較。

拡張された TE_{31,11} モード (170 GHz) の発振領域は、TE_{30,11} モード (167.3 GHz) の発振領域と重なっているが、この重なっている領域は難発振領域と呼ばれ、TE_{31,11} モードを直接励起させることが出来ない高効率運転領域となっている。この領域の TE_{31,11} モードを励起するためには、電子ビーム入射位置を調整したうえで、空洞磁場を 6.63 T より高くして運転を開始し、その後に空洞磁場を下げる必要がある。この領域での運転は、先行研究[4]である TE_{31,8} モードのジャイロトロンにおいて実証されているが、図 5 (b) に示す結果は同様の運転が TE_{31,11} モードのジャイロトロンにおいても実現できることを示している。

以上の競合モードの発振を阻止する発振技術の開発により実現した 1 MW 出力の 300 秒間の波形を図 6 (a) に示す。発振開始後は、ビーム電流は熱電子放出に伴うカソード冷却効果により減少するため、運転開始 60 秒前からヒーター電圧を上昇させて、ビーム電流の安定化を行っている。発振後 30 秒で、アノード電圧を 1 kV 上昇してピッチファクタを上昇させて、さらに難発振領域での運転を実現するために、空洞磁場を 6.705 T から 6.685 T に減磁して発振効率を向上させることにより、安定した 1 MW 出力を達成した。

以上のように、ジャイロトロン出力 1 MW での連続運転の実証、さらに図 6 (b) に示すように出力 1.23 MW (2 秒) / 総合効率 47%、出力 1.13 MW (10 秒) / 総合効率 49% など、高出力化と総合効率 50% の目度も得た[9]。TE_{31,11} モードの ITER ジャイロトロン試作機の開発成果に基づいて、ITER ジャイロトロン実機設計の最終化を進め、ITER 機構による最終設計レビューを経て 2016 年より実機製作に着手した。

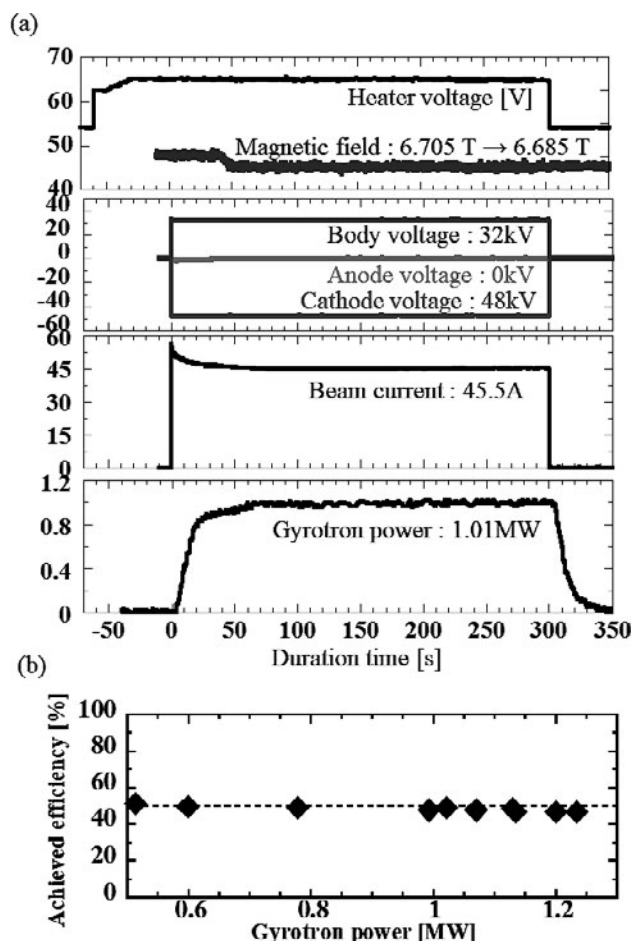


図6 (a)ITER ジャイロトロン試作機での 1 MW 出力/300 秒発振の実証 (b) ジャイロトロン出力に対する達成した総合効率。

3. ITER ジャイロトロン実機の性能確認試験

ITER ジャイロトロン実機 1 機目と 2 機目は、2017 年初頭に製作を完了した。更に 2018 年には 3 機目と 4 機目、2019 年には 5 機目と 6 機目の製作が完了し、量研機構に納められた。ITER ジャイロトロン実機は、ITER サイトへの輸送前に ITER との合意により決定した試験項目について性能確認試験を実施する必要がある。性能確認試験での要求条件は、主に連続運転にて出力 1 MW / 効率 50% / 300 秒、同じく 300 秒発振を 20 分毎に 20 回実施して成功率 90% 以上、出力変調運転にて変調周波数 1 kHz / 3 kHz / 5 kHz にて出力 0.8 MW 以上 / 60 秒間である。ITER ジャイロトロン 1 機目は 2018 年 10 月[10]、2 機目は 2019 年 7 月に性能確認試験を完了した。以下、2 機目の試験結果を主として、両ジャイロトロンの成果について述べる。

3.1 短パルス運転試験

図 7 に 1 機目と 2 機目の短パルス試験結果を示す。どちらもほぼ同じビームパターンおよび発振周波数 (170.065 GHz)、発振効率 (~27%) で 1 MW 出力を確認した。短パルス試験終了後、ジャイロトロンと準光学整合器 (MOU) を接続し、2 m の導波管の接続を行った。MOU は、収束ミラーと位相補正ミラーの 2 枚の金属ミラーを内蔵しており、光軸調整を行った後、導波管出口における

ビームパターン計測を行った。計測したビームパターンを用いて位相再構成処理を行うことにより、図8に示す導波

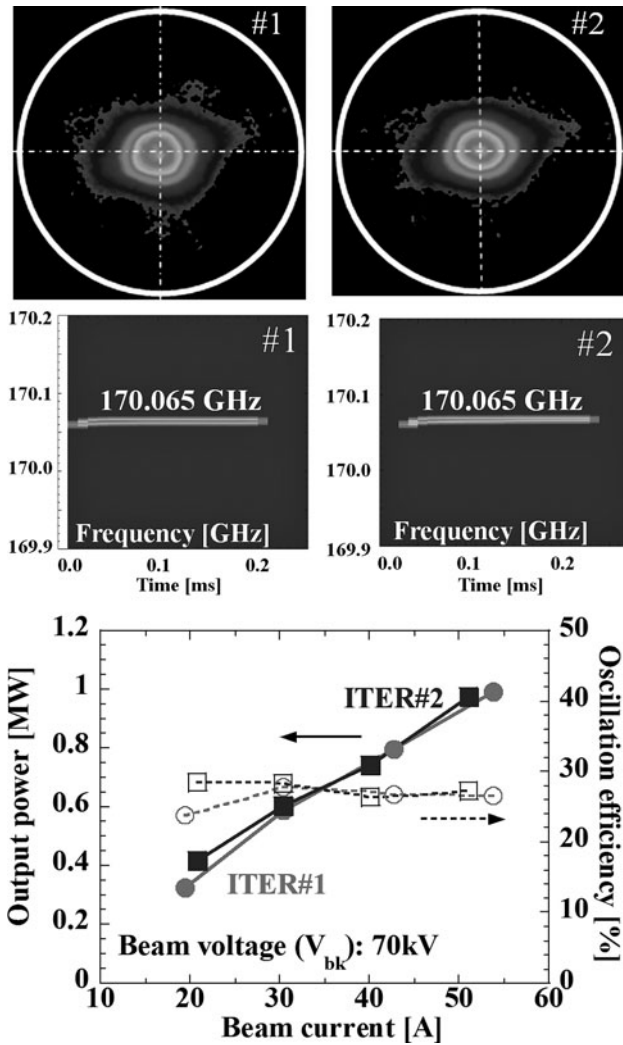


図7 短パルス試験（出力窓のビームパターン、発振周波数、発振出力／発振効率）での1機目と2機目の比較。

管入射端面におけるビーム強度と位相分布を評価した。また、導波管内に励起されるLPモードの成分比を解析し、LP₀₁モード（HE₁₁モード）の純度が1機目において96.9%，2機目では96.5%を得て、ITERジャイロトロン の要求仕様である95%以上を達成した。なお、本試験は、導波管内径63.5mmで行った結果であるが、その後ITER機構により仕様変更があり、導波管内径50.0mmとなったため、内径50.0mm導波管での性能を実証するために、MOUミラーを試作して同様の試験を行った。その結果、内径50.0mmの導波管においても、導波管入口で励起されるHE₁₁モード純度95%を達成し、ITER機構の要求値を満たすことにも成功している。

3.2 1 MW 定常運転試験

図9に示すように、7mの導波管伝送路と大電力ダミー

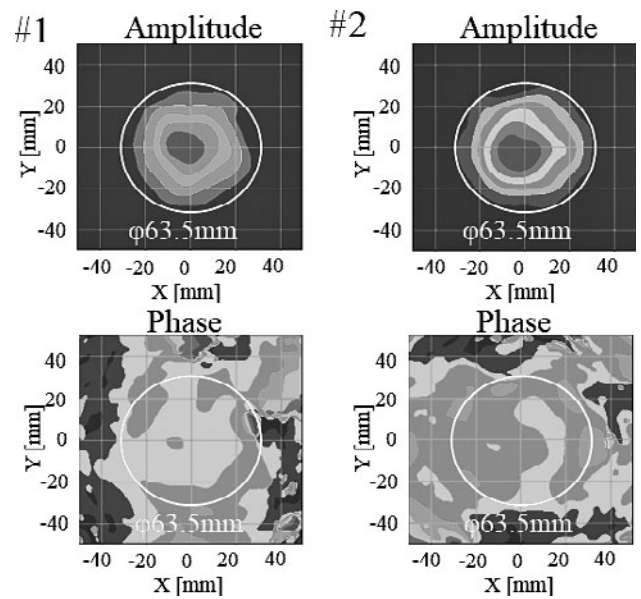


図8 導波管端面におけるビーム強度と電界位相面の1機目と2機目の比較（導波管内径63.5mm）。

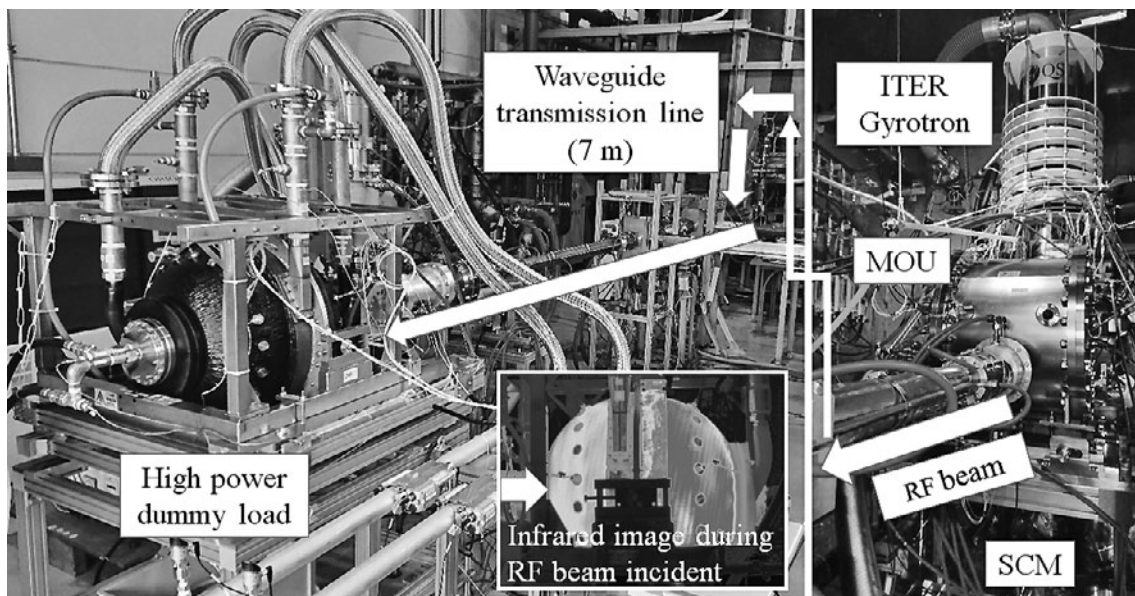


図9 ITER ジャイロトロン長パルス試験装置。

ロードを接続し、長パルス運転に向けたジャイロトロンのコンディショニングを行った。0.3 MW 出力にて、パルス幅数 ms からコンディショニングを開始した。開始直後は電子ビームと散乱 RF によりコレクターと内部機器の表面から大量のガスが放出されるが、ショットを重ねることでガス放出量は減少し、パルス幅を伸長することができる。最終的にはパルス幅300秒に伸長するまでコンディショニングを行った。なお、ジャイロトロンの冷却水の温度上昇は、300秒以内に飽和する。その後、0.6 MW, 0.9 MW と出力を上げ、1 MW 出力での300秒運転が行えるまでコンディショニングを継続した。コンディショニング終了までに、ジャイロトン1機目では約4 GJ、ジャイロトン2機目では約5 GJ の RF エネルギーを出力した。

コンディショニング後、運転条件の最適化を行い、性能確認試験を開始した。ジャイロトン2機目における300秒定常運転の典型的な発振波形を図10に示す。電子ビームの入射位置は、9.25 mm となるようにガン磁場強度を最適化している。カソード電圧は-43.6 kV で一定とし、ボディ電圧は0～2秒で22 kV から32 kV までランプアップさせている。空洞磁場強度は、ビーム電圧（ボディとカソード間電圧）を上昇させた時に、TE_{31,11} モードから TE_{30,11} モードに遷移しないように、少し強磁場側の6.666 T としている。強磁場側で運転を開始することで ctr-TE_{29,12} モードが

発振することを抑制するために、ピッチファクタの上昇を緩やかにすることを目的として、0～2秒の間でアノード電圧を-15 kV から-5 kV にランプアップさせている。さらに、ビーム電流の減少に合わせて運転開始から30秒までは-2 kV になるまで徐々に上昇させて、ピッチファクタの低下を抑制している。ビーム電流の安定化のために、図6と同様にヒーター電圧の制御を行っているが、制御開始は0秒である。これは、ITER でのプラズマへの入射指令と同時にジャイロトロンの運転を開始しても、性能を達成することが可能であることを実証するためである。0秒からのヒーター電圧制御でも、ビーム電流は50秒程度で47 A に飽和している。空洞磁場強度は、難発振領域での運転を実現するために、発振後10秒にて6.666 T から6.648 T まで減少させて発振効率を更に高めている。ジャイロトン出力は、100秒で一定となり、出力1.05 MW、総合効率は51.5% に達した。ジャイロトン内の真空圧力は、発振開始時に上昇するが、50秒程度でガス放出量と排気速度がバランスすることで飽和している。発振周波数は、空洞の熱膨張に伴う1秒程度での遷移の後、運転パラメータ調整が完了する30秒以降は169.84 GHz で安定している。ジャイロトン1機目の試験においても同様の運転手法を行い、カソード電圧-45.6 kV、アノード電圧-2.5 kV、ボディ電圧29.4 kV、ビーム電流45.5 A の運転条件にて、ジャイロトン出力1.06 MW（総合効率51.0%）を達成し、両ジャイロトンともに ITER の試験要件を満足した。

3.3 出力変調運転試験

出力変調運転は、図2に示すアノード電源側の給電スイッチと、アノード電極とカソード電極間の短絡スイッチの2つのスイッチ（以下、アノードスイッチ）を交互に開閉することで出力変調を可能とし、5 kHz 出力変調にて60秒間運転を行った。図11にジャイロトン2機目の60秒間の発振波形と59秒における拡大波形を示す。空洞磁場強度は、図10と同じ6.648 T である。拡大波形に示すようにアノードスイッチが開放されると電子ビームが引き出されて発振を開始し、スイッチが閉じられると発振が停止する。スイッチ開放後、アノード電圧とビーム電流が定格まで上昇するのに26 μ s かかり、その間167 GHz (TE_{30,11} モード) が発振しているが、その後170 GHz (TE_{31,11} モード) が発振し、アノード電圧が一定である95 μ s 間継続している。この時のジャイロトロンの時間平均出力は0.46 MW である。変調波形のデューティー比を調整して1パルス幅を変えた場合、170 GHz 発振の発振時間（出力）は各々74 μ s (0.37 MW)、112 μ s (0.53 MW)、131 μ s (0.63 MW) となった。これらの測定値を用いて定常相当（デューティー比100%）の出力を評価すると、図12のグラフから170 GHz の発振パワーは0.90 MW となる。同様にして、1 kHz にて0.91 MW、3 kHz にて0.96 MW の変調運転にも成功し、各々0.8 MW 以上の試験条件を達成した。なお、1機目においても、1 kHz にて0.88 MW、3 kHz にて0.85 MW、5 kHz にて0.88 MW を達成している。

3.4 高繰り返し運転信頼度試験

300秒定常運転／デューティー比25%（20分毎繰り返し）

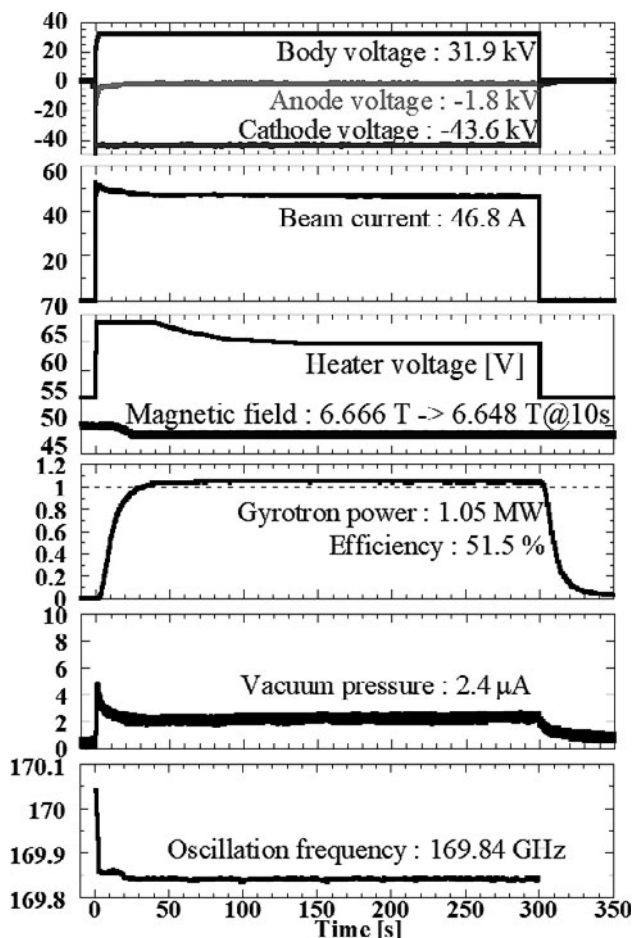


図10 ITER ジャイロトン2機目の性能確認試験における出力1 MW／効率50%／300秒の発振波形。

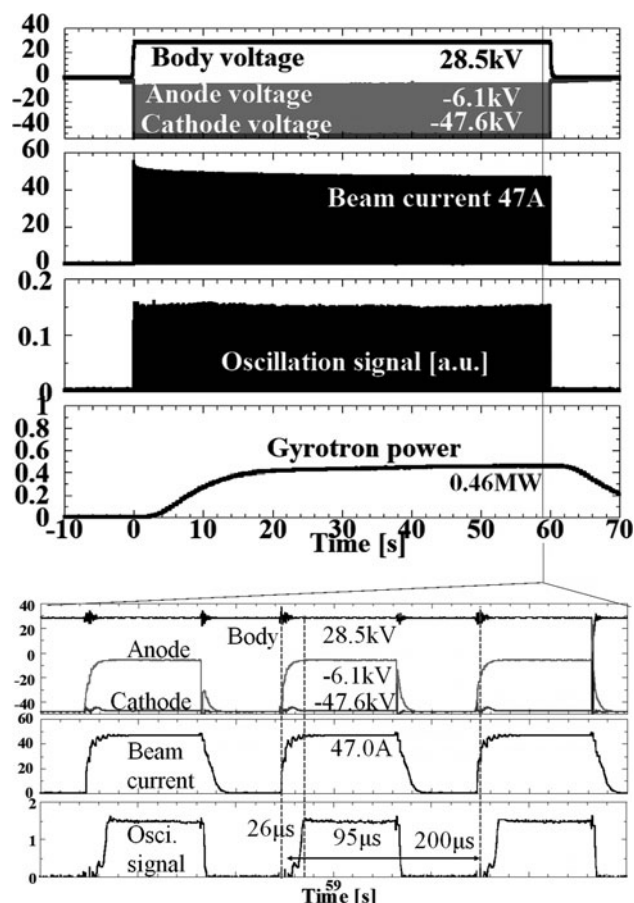


図11 ITER ジャイロトロン 2 機目における 5 kHz 出力変調運転の発振波形と 59 秒の変調波形の拡大図。

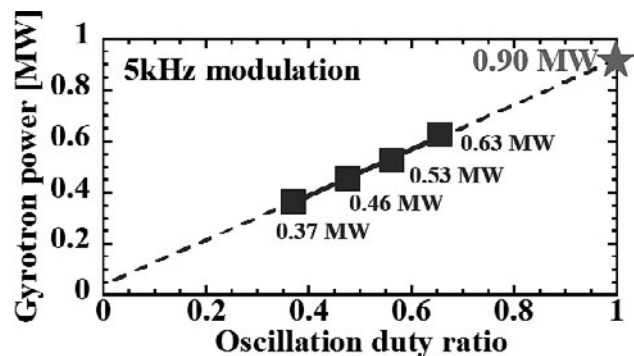


図12 5 kHz 出力変調運転における発振デューティ比に対するジャイロトロン出力。

の連続20ショットによる運転信頼度試験を行った。ジャイロトロン 2 機目における各ショットのカソード／アノード／ボデイ電圧 $V_{kc}/V_{ac}/V_{bc}$ 、ビーム電流 I_c 、ジャイロトロン出力 P_{out} 、総合効率 η_{tot} の全時間平均値および発振終了時の発振周波数 f_{osc} を表 1 に示す。20 ショット中18 ショットに成功し、平均出力 1.05 MW、平均総合効率 50.5% で、運転信頼度 90% を得た。2 ショットは、167 GHz へのモード遷移と電源停止によって運転シーケンスが停止したが、うち 1 ショットは主電源の再起動により運転を再開した。ジャイロトロン 1 機目では、20 ショット中19 ショットに成功して、平均出力 1.04 MW、平均総合効率 50.3% で運転信頼度 95% を達成している。1 機目でもモード遷移により停止し

表 1 ITER ジャイロトロン 2 機目の高繰り返し運転。

No.	V _{kc} [kV]	V _{ac} [kV]	V _{bc} [kV]	I _c [A]	P _{out} [kW]	η_{tot} [%]	f_{osc} [GHz]
1	-43.6	-2.0	31.8	47.4	1042	50.4	169.834
2	-43.6	-2.0	31.9	47.4	1044	50.5	169.840
3	-43.6	-2.0	31.8	47.1	1036	50.4	169.842
4	-43.6	-2.0	31.8	47.0	1040	50.8	169.840
5	-43.6	-2.0	31.8	47.0	1042	50.9	169.842
6	-43.6	-2.0	31.8	47.9	1051	50.3	169.868
7	-43.6	-2.0	31.8	48.4	1068	50.6	169.839
8	-43.6	-2.0	31.8	48.4	1060	50.2	169.839
9	Mode change@127s, Recovery shot for 150s						
10	-43.6	-2.0	31.8	48.3	1060	50.3	169.841
11	Power supply error@103s, Recovery error						
12	-43.6	-2.0	31.8	48.7	1063	50.1	169.841
13	-43.6	-2.0	31.8	48.1	1051	50.1	169.839
14	-43.6	-2.0	31.8	47.8	1052	50.5	169.838
15	-43.6	-2.0	31.8	47.7	1052	50.6	169.843
16	-43.6	-2.0	31.8	47.8	1055	50.6	169.840
17	-43.6	-2.0	31.8	47.8	1057	50.7	169.841
18	-43.6	-2.0	31.8	47.7	1053	50.6	169.841
19	-43.6	-2.0	31.8	47.6	1055	50.8	169.842
20	-43.6	-2.0	31.8	47.5	1054	50.9	169.842
Ave	-43.6	-2.0	31.8	47.8	1052	50.5	169.84

たが、再起動により運転を再開することが出来ている。量研機構の電源システムの機能上、ショット停止後の再起動には約60秒程度を要するが、ITER 用の主電源では高速起動が可能であり、プラズマへの影響を最小限に抑えた運転の再復帰が期待される。

一方で、更に運転信頼度を高める方法として、一時停止・自動復帰機能の開発も行っている。この機能は、ジャイロトロンおよび電源の保護を目的とした監視モニターの信号がインターロックレベルに達した瞬間にアノード短絡スイッチに指令信号を送り、アノードスイッチを閉じることでビーム電流が一時停止して発振を停止し、設定した待機時間の後にスイッチが自動開放されて発振を再開することができる。図13に突発的なボデイ電圧変動に対して一時停止／復帰を行った例を示す。この機能を用いることで、電圧変動や管内放電、モード遷移などに対しても主電源を停止することなく自動復帰することが期待できる。

4. まとめ

ITER にて安定して長期間運用することをめざして、従来よりも空洞熱負荷を低減させた $TE_{31,11}$ モードの ITER ジャイロトロンの開発を行ってきた。その開発過程にて明らかとなった $TE_{31,11}$ モードの発振を阻害する不要な発振モードとの競合を抑制することで、1 MW 出力の定常運転に成功した。その成果をもとに、ITER ジャイロトロン実機を完成させた。2 機の性能確認試験について、試験項目と 1 機目および 2 機目の達成値を表 2 に纏めてあるが、ITER 機構が要求する全ての要件を満たしている。

現在、6 機までの製作が完了しており、最初の 4 機はロシアのジャイロトロン 4 機と合わせて ITER のファーストプラズマを点火する役目を担っている。現在 3 機目の性能

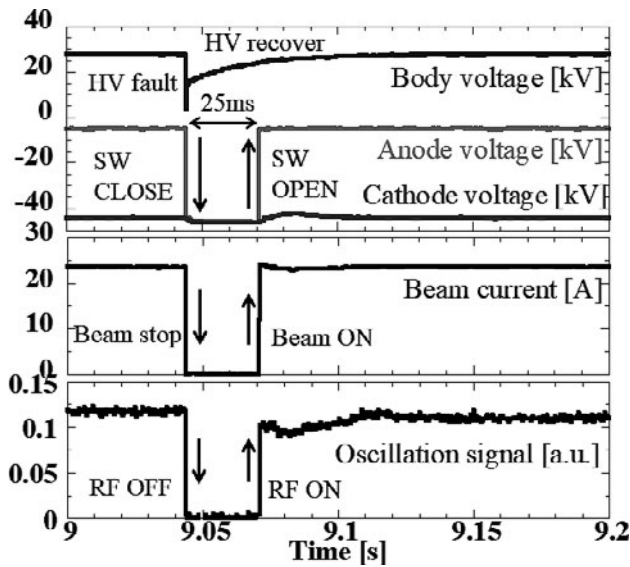


図13 ボディ電圧の異常変動に対するアノードスイッチを用いた発振の一時停止から自動復帰の様子。

表2 性能確認試験の達成値。

Test item	Specification	ITER #1	ITER#2
Frequency	170 ± 0.3 GHz	169.85 GHz	169.85 GHz
CW power	≥ 1.0 MW	1.04 MW	1.05 MW
Total efficiency	$\geq 50\%$	50.3%	50.5%
Duration time	≥ 300 s	300 s	300 s
Reliability (Duty ratio: 25 %)	≥ 90 % (20 shots)	95 %	90 %
Power modulation (On/Off)	1 kHz, 3 kHz, 5 kHz ≥ 0.8 MW ≥ 60 s	1 kHz: 0.88 MW/200s 3 kHz: 0.85 MW/200 s 5 kHz: 0.88 MW/200 s	1 kHz: 0.91 MW/60 s 3 kHz: 0.96 MW/60 s 5 kHz: 0.90 MW/60s
Beam quality (HE ₁₁ mode)	$\geq 95\%$	96.9%	96.5%

確認試験が完了し、さらに4機目の調整を開始した。2020年12月までに試験を完了させ、ITERへ輸送し、ITERサイトにて他極の調達機器である主電源と組み合わせた性能試験を実施する計画である。また、ITER ジャイロトロン7機目および8機目についても製作中であり、2021年7月までには全8機のITER ジャイロトロン実機の製作が完了する予定である。

謝 辞

ジャイロトロンの製作において、多大な協力をいただきましたキャノン電子管デバイス株式会社の関係者に感謝いたします。ITER ジャイロトロンの研究開発および調達計画を支えて頂いた小田靖久先生（現、摂南大学）に感謝いたします。最後に、本論文の基となる第36回プラズマ・核融合学会年会への招待講演を推薦していただきました三枝幹雄先生（茨城大学）に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Henderson *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 021808 (2015).
- [2] K. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3532 (1994).
- [3] K. Kajiwara *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 043013 (2013).
- [4] K. Sakamoto *et al.*, Nat. Phys. **3**, 411 (2007).
- [5] A. Kasugai *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 054009 (2008).
- [6] Y. Oda *et al.*, J. Infrared Milli. Wave **31**, 949 (2010).
- [7] R. Ikeda *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 482 (2015).
- [8] R. Ikeda *et al.*, Fusion Eng. Des. **128**, 23 (2018).
- [9] R. Ikeda *et al.*, IAEA FEC 2016, FIP/1-6Rb (2016).
- [10] Y. Oda *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 086014 (2019).