

大型核融合試験施設におけるメガワットミリ波ジャイロトロン発振器周辺の電磁環境調査

著者	TANAKA Masahiro, YOSHIMURA Yasuo, ITO Tetsu, WANG Jianqing, HIRAYAMA Hiroshi, UDA Tatsuhiko, FUJIWARA Osamu
雑誌名	電子情報通信学会論文誌 B
巻	J105 B
号	8
ページ	629-636
発行年	2022-08-01
NAIS	13210
URL	http://hdl.handle.net/10655/00013458

doi: 10.14923/transcomj.2021PEP0007



大型核融合試験施設におけるメガワットミリ波ジャイロトロン 発振器周辺の電磁環境調査

田中 将裕^{†a)} 吉村 泰夫[†] 伊藤 哲^{†*} 王 建青^{††}
平山 裕^{††} 宇田 達彦[†] 藤原 修^{††}

Measurement of Leakage Electromagnetic Field Around Megawatt Millimeter Wave Band Gyrotron Oscillator in a Large Fusion Test Facility

Masahiro TANAKA^{†a)}, Yasuo YOSHIMURA[†], Satoshi ITO^{†*}, Jianqing WANG^{††},
Hiroshi HIRAYAMA^{††}, Tatsuhiko UDA[†], and Osamu FUJIWARA^{††}

あらまし 将来のエネルギー源として開発が進められている磁場閉じ込め方式の核融合研究では、高温プラズマの生成や制御、プラズマ加熱及び計測のために大電力高周波発振器が利用されている。本論文では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置で使用されているメガワットミリ波ジャイロトロン発振器(周波数: 77 GHz, 最大出力: 1~1.5 MW/2 秒)を対象とし、作業従事者の安全管理を目的に、ホーンアンテナを用いて機器周辺での電磁環境を定点調査した。その結果、77 GHz 発振器からおよそ 30 m 離れた場所で観測された漏洩電界の周波数は、77 GHz が最も強く、そこから数 GHz 離れた両側の周波数領域にも微弱なスプリアスペクトルが確認された。また、同じ場所で、数十秒から数百秒の発振運転に伴う漏洩電界(最大実効値: 数 V/m)が観測された。電界の漏洩箇所は、ジャイロトロン発振器を構成する接地電位の電子ビームコレクターと、その他の部位とを電気的に絶縁するために具備された窒化ケイ素製絶縁部と推定された。本研究により、大型核融合試験施設におけるメガワットジャイロトロン発振器周辺のミリ波帯での漏洩電界の実態を初めて明らかにした。

キーワード 大型核融合試験施設, プラズマ加熱装置, ミリ波ジャイロトロン発振器, 電磁環境, 安全管理

1. ま え が き

将来のエネルギー源として、核融合反応を利用する発電システムの研究開発が進められている。核融合システムには幾つかの方式があり、その一つとして外部磁場で数億度に達するプラズマを制御する磁場閉じ込め核融合装置がある。この方式では、装置周辺に強磁場を生成する大型超伝導コイルを配置し、プラズマを高温に加熱する大電力高周波発振器が使用される。このような核融合研究環境下での非電離放射線の生体影響課題や作業従事者の安全管理について、1980年代に

科学研究費補助金で実施された「核融合特別研究」で取り上げられた。1988年から3年間にわたり、核融合研究者と非電離放射線の生体影響研究者が集って課題を議論する研究会が開催された[1]~[3]。その総括は、継続した情報交流・研究活動と、このような研究課題に対する核融合科学研究所(以下、NIFS)の積極的な関与を期待するというものであった。提言を踏まえ、NIFSに建設されたプラズマ中心の最大磁場強度3Tを有する大型ヘリカル装置(以下、LHD)を対象として、大型核融合試験施設における電磁環境研究を開始した。LHDには大型超伝導コイルだけでなく、大電力ビーム入射装置や複数の高周波発振器が使用されている。これまでに、LHD周辺の静磁場環境、超伝導コイル用大電力直流電源周辺の低周波電磁環境、2.45 GHzを用いる電子サイクロトロン共鳴(以下、ECR)型基礎プラズマ実験装置や、大電力ビーム入射装置で使用するフライホイールなどの大型電源機器周辺の電磁環境調査、更にはメガワット級の出力を有するイオンサ

[†] 自然科学研究機構、核融合科学研究所、土岐市
National Institutes of Natural Sciences, National Institute for Fusion Science,
Toki-shi, 509-5202 Japan

^{††} 名古屋工業大学、名古屋市
Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466-8555 Japan

* 現在、ITER Organization, St. Paul-lez-Durance, France

a) E-mail: tanaka.masahiro@nifs.ac.jp
DOI: 10.14923/transcomj.2021PEP0007

マイクロtron共鳴加熱用発振器(周波数帯: 数十 MHz) 周辺の観測を行い, その電磁界強度や分布, 機器運転時の特徴的な放射挙動を明らかにした [4]~[7]. 一方, 数十~数百 GHz 帯の周波数を用いる ECR 加熱用ジャイロtron発振器周辺の電磁環境は明らかになっていない.

本論文では, LHD で使用されているメガワットミリ波ジャイロtron発振器を対象として, 機器周辺のミリ波帯漏洩電磁波の有無とその挙動を定点調査した初期結果を報告する.

2. ジャイロtron発振器と電磁環境測定

2.1 ジャイロtron発振器の構造・発振原理

核融合研究の進展とともに, プラズマ生成や電子の加熱, プラズマ制御を目的として, 数十 GHz から数百 GHz の周波数(ミリ波帯域)で, メガワットクラスのジャイロtron発振器が開発されている [8], [9]. ジャイロtron発振器の概略構成図 [10] と外観を図 1 に示す. 発振器は, 主に真空管, 電子銃, 円筒空洞共振器(キャビティ), 超伝導電磁石, モード変換器, 電子ビームコレクター, 絶縁体, 出力窓, 準光学的結合器, 導波管で構成される. 本システムでは, 大電力ミリ波の長距離伝送を可能とするコルゲート円形導波管が用いられている. これは, 内壁面に 1/4 波長の深さの多数の溝を掘った構造で, 導波管内のアーカ放電が抑えられ, 電力損失が少ないため, 大電力ミリ波の長距離

伝送用導波管として近年多数使用されている [11].

ジャイロtron発振器では, 電子銃から真空中に放出された電子が, 外部磁界や電界中を運動する際に加速度を受けることで, ミリ波を放射する制動放射を利用している. 生成されたミリ波は, モード変換器で直線偏波のガウス分布ミリ波に変換後, 低誘電損失で優れた熱伝導性を併せもつ多結晶人工ダイヤモンド製の出力窓(以下, ダイヤモンド出力窓)から真空管外部に放射される. ダイヤモンド出力窓は, ミリ波の一部を吸収して温度が上昇するため, 周辺部で流体冷却されている. 放射されたミリ波は, ダイヤモンド出力窓付近に設置された準光学的結合器を通じて, コルゲート導波管へ導かれる. この導波管でミリ波を 100 m ほど長距離伝送して, 核融合試験装置(LHD)近傍の準光学ミラーからプラズマへ入射される. 発振に利用した電子ビームは, 減速しながらジャイロtron上部に設置されている水冷式コレクター電極で回収される. ジャイロtron発振器システム及び発振原理の詳細は, 総説 [11] があるのでそちらを参照されたい. 現在, NIFS では 56 GHz, 77 GHz, 154 GHz, 303 GHz のジャイロtron発振器を使用し, LHD のプラズマ生成やその制御, プラズマの電子加熱やプラズマ計測に利用している. 発振器と測定器の配置及び測定状況の写真を図 2 に示す. 77 GHz の 2 台と 154 GHz の 1 台は東向きに, 154 GHz の 2 台と 56 GHz, 303 GHz は西向きにダイヤモンド出力窓が設置されている.

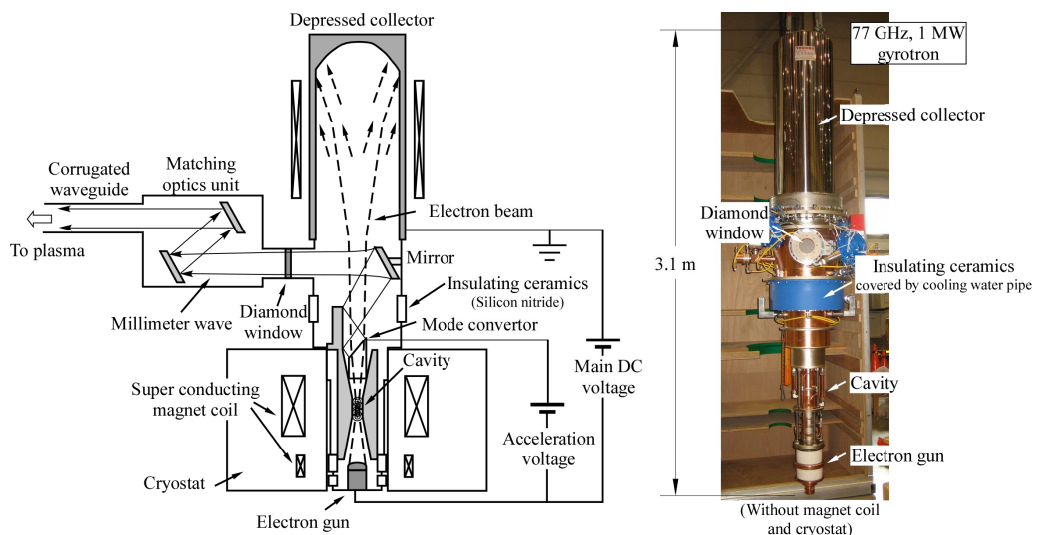


図 1 ジャイロtron発振器の概略構造と外観写真

Fig. 1 Schematic structure of gyrotron oscillator and an exterior photo.

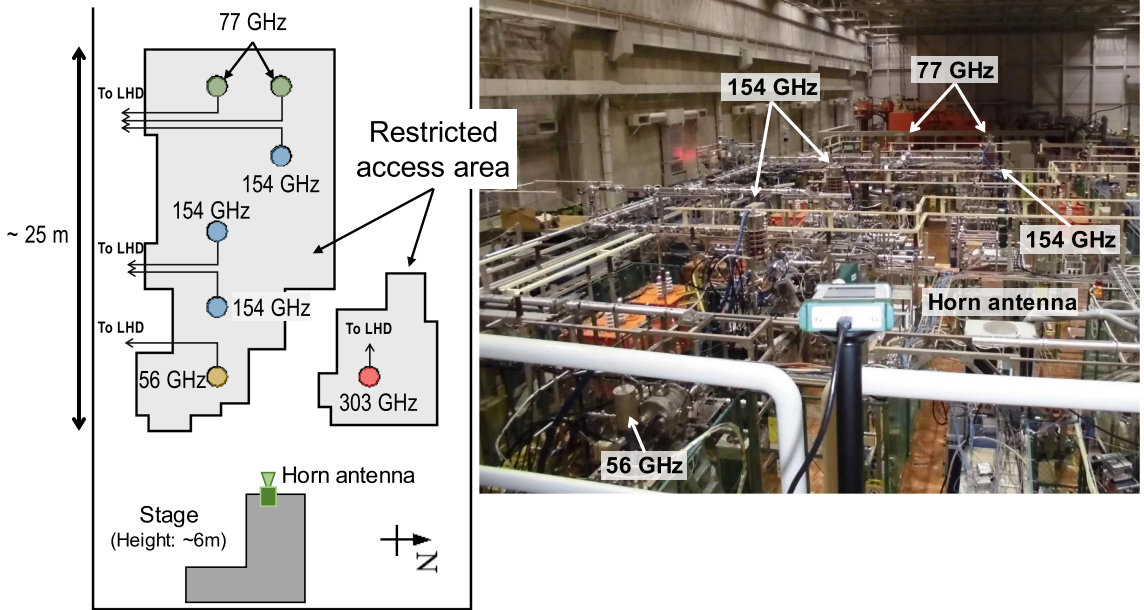


図2 ジャイロトロン発振器と測定機器の全景と機器配置図
 Fig. 2 A photo of the group of gyrotron oscillators, measurement equipment and the layout of gyrotron oscillators.

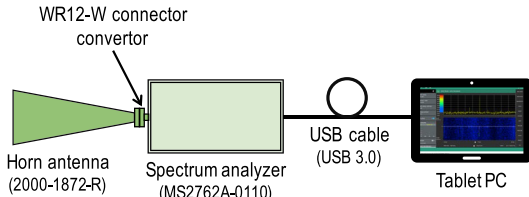


図3 測定機器の構成図
 Fig. 3 Schematic diagram of measurement system.

本論文では、発振周波数 77 GHz のジャイロトロン発振器 (キャノン電子管デバイス株式会社, 型式: E3988, 最大出力: 1~1.5 MW/2 秒, 0.3 MW/CW) を対象として、装置周辺の電磁環境測定を実施した。

2.2 電磁環境測定機器と測定方法

ジャイロトロン発振器はプラズマ実験研究に供することを目的として運転されているため、実験ごとに発振電力が変わることや発振器の運転時間が比較的短時間であることから、本論文では漏洩電界の固定位置での水平偏波を測定の対象とした。測定系の概略機器構成を図3に示す。測定系は、アンリツ製ポータブルスペクトラムアナライザ (型式: MS2762A-0110, 周波数範囲: 6 GHz~110 GHz, 入力コネクタ: W コネクタ (1.0 mm)) に、変換器を介して接続した専用ホーンア

ンテナ (型式: 2000-1872-R, 周波数範囲: 60.5 GHz~92.0 GHz, アンテナ利得 (G): 25 dBi, 開口面積: 28 mm × 21 mm, 入力インピーダンス: 50 Ω, 接続口: WR12) からなる。測定での分解能帯域幅 (RBW) は 1 MHz 若しくは 3 MHz とした。測定器からの出力値は dBm の表示であり、77 GHz における 0 dBm は、31 V/m または 2.6 W/m² (= 31²/120π) に換算される。ここでは、ホーンアンテナの実効開口面積 ($A_e = \lambda^2 G / 4\pi$, λ: 波長, G: アンテナ利得) から電界強度値及び電力密度を求めた。測定時の時間分解能は、スペクトラムアナライザの 1 掃引ごとに収録する設定であるため観測する周波数帯域によって異なり、およそ 0.5 秒から 1.5 秒であった。携帯型パーソナルコンピュータと測定装置を USB ケーブルで接続して、測定器への給電と専用のソフトウェアによる測定条件の設定やデータ収集を行った。

ジャイロトロン発振器は、数 T の磁場を用いること、電子ビームが金属壁に衝突する際に X 線が発生すること、高電圧電源を用いることから、図2で灰色に示した発振器周辺は高さ約 2 m, 網目寸法 56 mm の樹脂被覆菱形金網フェンス (該当箇所フェンス内上面は開放されている) で囲まれており、発振運転中の立ち入りが禁止されている。そのため、電磁環境の測

定では、ホーンアンテナの指向性を鑑みて、装置周辺の高さ 6 m の作業場所 (発振器の東側) から、図 2 の写真で示すようにジャイロトロン発振器設置場所全体を俯瞰するようにホーンアンテナを向けて測定を行った。測定場所から最も遠方の 77 GHz 発振器と測定器との直線距離は約 30 m であった。ここで、Kraus の近似式 [12] によりアンテナ利得から電力半値角を求めると 11.4 度となる。アンテナの設置高さ 6 m を考慮すると、アンテナから 30 m 離れた地点で、横方向に 6.11 m の範囲からの放射は 3 dB の偏差で受信できることとなる。ジャイロトロンはこの範囲の中に位置しており、ジャイロトロン全体からの放射を受信している。

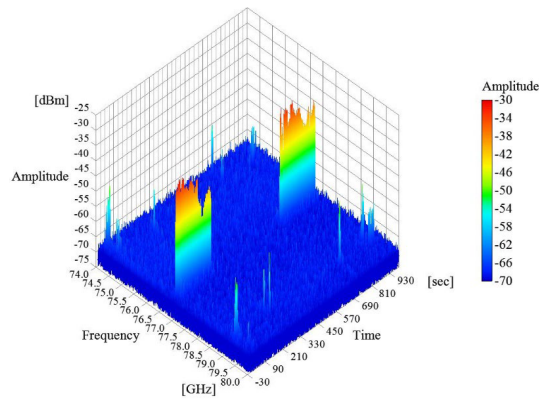
プラズマ実験は数分周期の間欠運転であり、プラズマ放電に同期して発振器が運転された。1 回の運転時間は、数秒から最大で約 240 秒であった。観測を行ったプラズマ実験では、77 GHz の発振器が 2 台、154 GHz の発振器が 2 台使用され、4 台運転時に最大で合計約 1 MW の出力であった。

3. 観測結果と考察

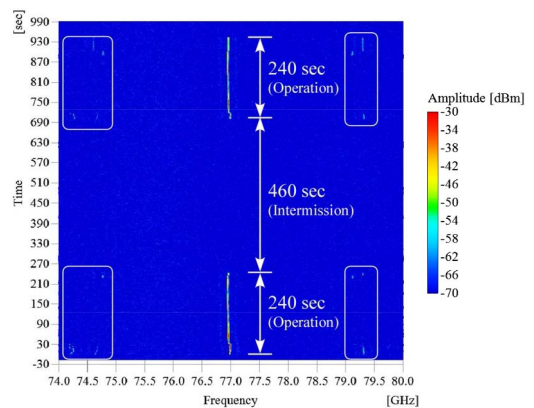
2020 年 12 月 24 日、2021 年 2 月 18 日のプラズマ実験が行われた時間帯に観測を行った。その結果、ジャイロトロン発振器の運転に起因する漏洩電界が観測された。運転により観測された結果の一例を図 4 に示す。ここでは、1 回目のジャイロトロン発振器の運転開始時を 0 秒とした。発振器の運転開始とともに、漏洩電界を観測した。その詳細を以下に示す。

3.1 周波数スペクトル

図 4 に示したように、ジャイロトロンが運転された時間帯で 77 GHz 付近に強い漏洩電界が観測された。運転の開始時には数十秒程度の時定数で 77 GHz 付近の電界強度がわずかに低周波側にシフトしており (図 4 (b)), これはジャイロトロン管内構造の熱膨張に起因すると考えられる。一方、ジャイロトロンの運転開始時と終了時に、白枠で囲った 74~75 GHz と 79~80 GHz の周波数帯域でスペリアスが観測された。図 5 に観測した時間における周波数スペクトルを示す。図 5 (a) は、図 4 の測定データ (放電番号: 166082, RBW: 3 MHz) から周波数スペクトルを抽出した。このときの 77 GHz ジャイロトロンの発振電力は、No.1 が 139 kW, No.2 が 155 kW であった。図 5 (b) は、測定周波数帯を狭めて高分解能で測定したデータ (放電番号: 170006, RBW: 1 MHz) である。図 5 (a) では、中



(a) 3D plot of time, frequency, and amplitude



(b) Spectrogram

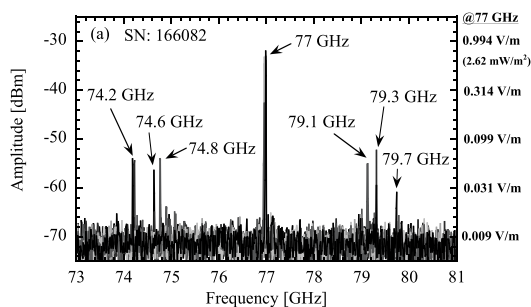
図 4 観測結果の一例

Fig. 4 An example of measurement results.

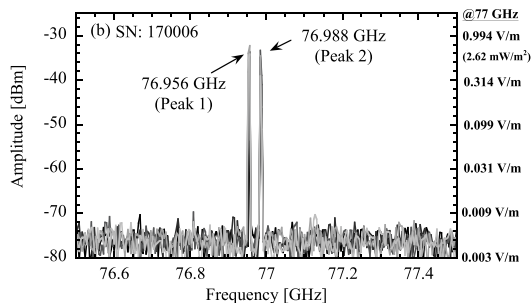
心周波数 77 GHz から 2.2 GHz, 2.4 GHz, 2.8 GHz 離れた周波数帯域でピークが観測された。中心周波数の 77 GHz 帯域では、図 5 (b) に示すようなわずかに周波数が異なる二つのピーク (Peak 1: 76.96 GHz, Peak 2: 76.99 GHz) が観測された。なお、67 GHz から 87 GHz の範囲でスペクトルを測定したが、測定対象となったジャイロトロンの運転条件では、上記以外に有意なピークはなかった。

3.2 電界強度

中心周波数の 77 GHz で、二つのピークが観測された要因を調査するため、ジャイロトロン発振器の発振電力と、観測された漏洩電界の Peak 1 と Peak 2 の時間経過を図 6 に示す。77 GHz ジャイロトロンの発振電力は、No.1 が 139 kW, No.2 が 155 kW であった。



(a) Shot number: 166082



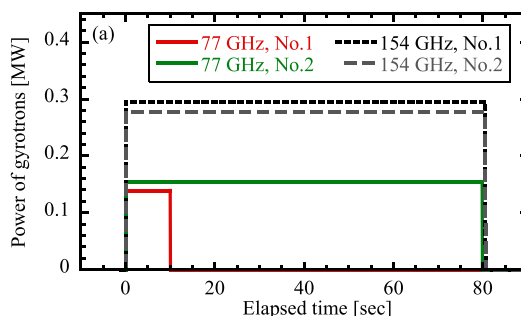
(b) Shot number: 170006

図5 観測された漏洩電界の周波数スペクトル

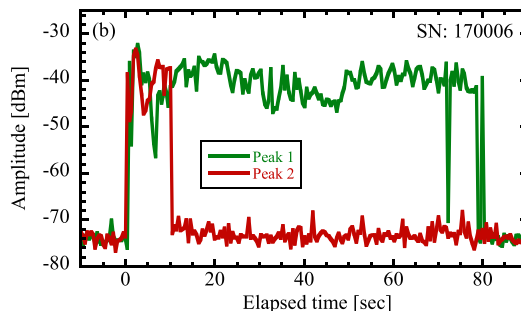
Fig. 5 The frequency spectrum of observed leakage electric field on the gyrotron operation.

No.1 はプラズマ放電開始から 10 秒間のみ、No.2 はプラズマ放電終了 (80 秒間) まで運転された。運転開始と同時に、Peak 1 及び Peak 2 の信号強度が上昇し、Peak 2 は No.1 の運転が終了した 10 秒後からは観測されなかった。このことから、Peak 1 は、No.2 からの漏洩電界と推定される。また、周辺で検知された漏洩電界は、時間変動が観測された。定性的であるが、プラズマに入射されたミリ波の一部が反射し、ジャイロトロン発振器に到達すると、運転状態に影響を与え、ビーム出力が変わるので、漏洩電界が時間的に変動すると考えられる。

プラズマ実験では、154 GHz の 2 台のジャイロトロン発振器も同時に運転された。図 7 に、主に 154 GHz 発振器を運転した場合の観測例を示す。77 GHz 発振器は放電開始直後の 1 秒間だけ、No.1 が 139 kW、No.2 が 155 kW の電力が入射されている。154 GHz ジャイロトロン発振器が単独で運転された時間帯で、77 GHz 周波数帯域の漏洩電界が観測されなかったことから、77 GHz 周波数帯域周辺には、154 GHz ジャイロトロン



(a) The time evaluation of the gyrotrons output power



(b) The intensity of observed electromagnetic field

図6 観測例 1 (放電番号: 170006)

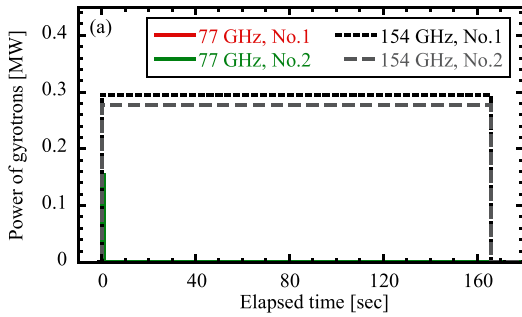
Fig. 6 Example of operation power and observation results (Shot number: 170006).

ン発振器から放射される漏洩電界の影響はないと考えられる。

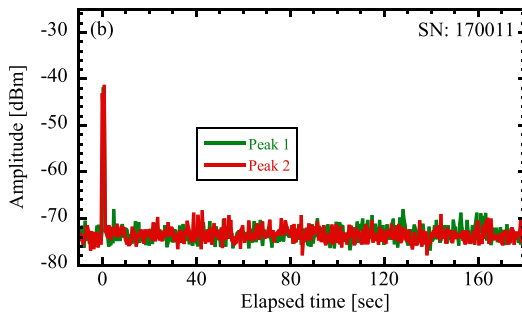
観測地点での各運転条件における電界強度の最大値 (実効値) は $-20 \sim -30$ dBm の範囲にあり、電界に換算すると $1 \sim 3$ V/m、電力密度で $2.6 \sim 26$ mW/m² であった。

3.3 漏洩箇所

図 1 で示すように、ジャイロトロン発振器は、電子ビームを加速する金属製の真空管であり、ダイヤモンド出力窓を通して外部へミリ波を放射する。また、発振器に接続されている準光学的結合器や導波管内は真空状態であり、装置に隙間はない。このような構造から、ダイヤモンド出力窓の温度監視用ポートと真空管に使用されている絶縁部 (後述) がミリ波の漏洩箇所として想定される。ダイヤモンド出力窓は、通過するミリ波エネルギーの一部を吸収するため温度上昇を伴う。ダイヤモンド出力窓の温度上昇を監視するため、図 8 のようにコルゲート導波管の脇に、ダイヤモンド出力窓を見込む直径約 35 mm、面積約 10 cm² の観測



(a) The time evaluation of the gyrotrons output power



(b) The intensity of observed electromagnetic field

図7 観測例2(放電番号: 170011)

Fig. 7 Example of operation power and observation results (Shot number: 170011).

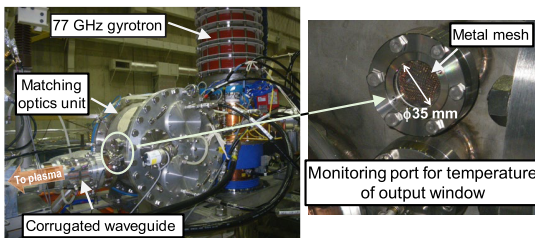


図8 ダイヤモンド出力窓の温度観測ポート

Fig. 8 The photos of monitoring port for temperature of output window.

ポートが設置されている。観測対象とした 77 GHz 発振器では、東向き (ホーンアンテナの方向) に観測ポートが設置されている。観測ポートには金属メッシュ (純銅製, 線径: 0.28 mm, セル密度: 400 CPSI [cell per square inch], セル形状: 約 1 mm × 約 1 mm) が 1 枚張ってある。簡易的な検討として, 最大開口寸法を d [m] とすると, 開口部のカットオフ周波数は

$$f_{cutoff}[\text{MHz}] = \frac{150}{d} \quad (1)$$

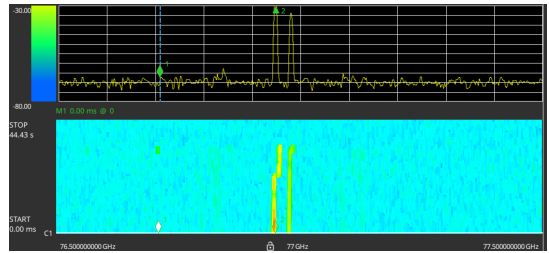


図9 発振器西側で観測した周波数スペクトラム

Fig. 9 The snapshot of spectrogram at west side of gyrotron oscillators.

で表される [13]. 使用した金属メッシュでは最大開口寸法が約 1.4 mm なので, カットオフ周波数は約 110 GHz となる. したがって, 対象とする 77 GHz のミリ波は, 金属メッシュで減衰し, 周辺への漏洩は小さく考えられる. 一方, 図 1 に示すようにジャイロトロン発振器には, 上部に位置し接地電位である電子ビームコレクター部とその他の部位とを電的に絶縁させるため, 窒化ケイ素製セラミック素材を用いた絶縁部 (図 1 写真の青色部分, 絶縁部表面積: 約 1900 cm²) が存在する. 絶縁部周辺は, フッ素系不活性液体により冷却されている. フッ素系不活性液体部には, 絶縁部から漏洩するミリ波を吸収するため, 純水を通水したテフロン配管 (外形: 9.53 mm, 内径: 6.99 mm) が二重に巻かれている. しかし, テフロン配管の巻き付け範囲から外れた領域や, 冷却水配管の厚み (2.54 mm) や配管間の隙間を通してミリ波が周辺環境に漏洩する可能性が考えられる. 実際に, 発振器周辺を移動しながら測定すると, 発振器西側でも 77 GHz のミリ波が検知された. その測定例を図 9 に示す. このことから, 観測ポートなどの開口部から特定の方向へミリ波が放射されているだけでなく, ジャイロトロン発振器の絶縁部から周囲にミリ波が漏洩していると考えられる. 絶縁部表面積は観測ポート開口面積の約 190 倍であることから, 絶縁部の漏洩が主であると考えられる.

4. 今後の展望

核融合研究開発は年々進展しており, 幾つかの大型核融合試験装置が建設されている. 例えば, 日米欧露中印韓の七つの国と地域の協力により, 仏国サン・ポール・レ・デュランスに国際熱核融合実験炉 (ITER, 2020 年代後半に運転開始予定) が建設されている. また, 日欧の協力により茨城県那珂市に建設された JT-60SA

は、2022年以降の運転開始を目標に機器の調整が進められている。

核融合炉を目指した開発研究では、高周波によるプラズマ加熱は欠かすことができない。そのため、大型核融合試験装置では、大電力ジャイロトロン発振器を用いたプラズマ加熱が計画されており、発振器の開発研究が精力的に進められている[8],[14]~[17]。また、適用される周波数は、核融合実験装置の磁場強度に依存するため、必要とされる周波数領域も拡大している。例えば、建設中のITER(プラズマ中心の最大磁場: 5.3 T)では、170 GHzの発振周波数で、大電力(1基あたり1 MW)かつ長時間(3600秒)の連続運転が可能なジャイロトロン発振器の開発が行われている[17]。近年では、このような大電力高周波発振器を有する核融合施設内のミリ波帯電磁環境における作業者防護の必要性が、電離放射線に対する被ばく防護や化学物質のばく露防護とともに認識されており、発振器や周辺機器の適切な遮蔽や電磁環境監視など安全管理手法の確立が望まれている[18]。本研究の成果は、核融合炉開発研究における安全管理手法の検討や、プラズマ加熱を目的としたジャイロトロン発振器システム設計・開発に有益な知見となる。

5. む す び

本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置で使用されているプラズマ加熱用大電力ジャイロトロン発振器(周波数: 77 GHz)周辺のミリ波帯電磁環境を定点調査した。その結果、発振器の運転中に、機器周辺で漏洩電界が検知された。検知された漏洩電界の周波数は、77 GHzを中心として、微弱ながらその周辺周波数帯にもスプリアスペクトルが観測された。漏洩電界の強度は、30 m離れた観測地点で数 V/m以下であった。ジャイロトロン発振器の電界漏洩箇所として、ジャイロトロン発振器を構成するセラミック絶縁部からの電界漏洩が考えられた。初期的な結果であるが、核融合試験装置で用いられる大電力ジャイロトロン発振器周辺のミリ波帯電磁環境を初めて明らかにすることができた。本研究を通じて、核融合炉設計活動における非電離放射線の安全管理や発振器システム的设计に有益なデータが得られた。

謝辞 本研究は、核融合科学研究所一般共同研究(課題番号: NIFS20KLEA045)の支援を受けた。スペクトラムアナライザでの測定にあたり、アンリツ株式会社丸田純一氏の協力を得た。

文 献

- [1] 宮原 昭, “電場・磁場の生体影響,” 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 核融合特別研究総合総括班, 1989.
- [2] 宮原 昭, “電場・磁場の生体影響 [II],” 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 核融合特別研究総合総括班, 1990.
- [3] 宮原 昭, “電場・磁場の生体影響 [III],” 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 核融合特別研究総合総括班, 1991.
- [4] 宇田達彦, 棚橋秀伍, 大林治夫, 中司 等, 伊藤麻理子, “大型プラズマ実験施設における静磁場および極低周波磁場環境の測定,” 保健物理, vol.35, no.1, pp.56-63, Jan. 2000.
- [5] J. Wang, O. Fujiwara, and T. Uda, “New approach to safety evaluation of human exposure to stochastically-varying electromagnetic fields,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.47, no.4, pp.971-976, Nov. 2005.
- [6] M. Tanaka, S. Takami, T. Uda, J. Wang, and O. Fujiwara, “A remote monitoring system of environmental electromagnetic field in magnetic confinement fusion test facilities,” IEEJ Trans. FM, vol.130, no.5, pp.451-456, May 2010.
- [7] M. Tanaka, T. Seki, J. Wang, Y. Kamimura, T. Uda, and O. Fujiwara, “A new wide-area monitoring system of electromagnetic fields around megawatt-class amplifiers for ion cyclotron range of frequency heating at a fusion test facility,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol.49, no.4, pp.1475-1483, April 2021.
- [8] T. Kariya, R. Minami, T. Imai, M. Okada, F. Motoyoshi, T. Numakura, Y. Nakashima, H. Idei, T. Onchi, K. Hanada, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Kubo, Y. Oda, R. Ikeda, K. Sakamoto, M. Ono, K. Nagasaki, T. Eguchi, and Y. Mitsunaka, “Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices,” Nucl. Fusion, vol.59, no.6, 066009, June 2019.
- [9] M. Thumm, “State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers,” J. Infrared Millim. Terahz. Waves, vol.41, no.1, pp.1-140, Jan. 2020.
- [10] 下妻 隆, “百ギガヘルツ帯ミリ波の利用—電子サイクロトロン共鳴加熱装置技術—,” プラズマ・核融合学会誌, vol.82, no.8, pp.506-517, Aug. 2006.
- [11] 武藤 敬, 下妻 隆, “高周波加熱技術ことはじめ,” プラズマ・核融合学会誌, vol.82, no.6, pp.376-390, June 2006.
- [12] J.D. Kraus, Antennas, New York, McGraw-Hill, 1988.
- [13] 荒木庸夫, 電子機器の遮蔽設計—妨害の発生とその対策—, 日刊工業新聞社, 東京, 1970.
- [14] T. Kobayashi, S. Moriyama, K. Yokokura, M. Sawahata, M. Terakado, S. Hiranai, K. Wada, Y. Sato, J. Hinata, K. Hoshino, A. Isamaya, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, and K. Sakamoto, “Gyrotron development for high-power, long-pulse electron cyclotron heating and current drive at two frequencies in JT-60SA and its extension toward operation at three frequencies,” Nucl. Fusion, vol.55, no.6, 063008, June 2015.
- [15] M.K.A. Thumm, G.G. Denisov, K. Sakamoto, and M.Q. Tran, “High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive,” Nucl. Fusion, vol.59, no.7, 073001, June 2019.
- [16] C. Darbos, F. Abajar, T. Bonicelli, G. Carannante, M. Cavinato, F. Cismondì, G. Denisov, D. Farina, M. Gagliardi, F. Gandini, T. Gassmann, T. Goodman, G. Hanson, M.A. Henderson, K. Kajiwara, K. McElhane, R. Nousiainen, Y. Oda, T. Omori, A. Oustinov, D. Parmar, V.L. Popov, D. Purohit, S.L. Rao, D.

Rasmussen, V. Rathod, D.M.S. Ronden, G. Saibene, K. Sakamoto, F. Sartori, T. Scherer, N.P. Singh, D. Strauß, and K. Takahashi, "Status of the ITER electron cyclotron heating and current drive system," J. Infrared Milli. Terahz. Waves, vol.37, no.1, pp.4–20, March 2016.

- [17] Y. Oda, R. Ikeda, K. Kajiwara, T. Kobayashi, K. Hayashi, K. Takahashi, S. Moriyama, K. Sakamoto, T. Eguchi, Y. Kawakami, Y. Mitsunaka, C. Darbos, and M.A. Henderson, "Development of the first ITER gyrotron in QST," Nucl. Fusion, vol.59, no.8, 086014, June 2019.
- [18] L.C. Cadwallader, "Personnel safety at magnetic fusion experiments," IEEE Trans. Plasma Sci., vol.47, no.1, pp.869–873, Jan. 2019.

(2021年10月14日受付, 2022年2月7日再受付,
3月30日早期公開)



田中 将裕

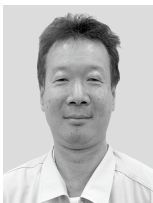
1995 大阪市大・工・応物卒。2005 名大大学院博士後期課程了。同年、博士(工学)学位取得。1997 三菱電機(株), 2000 日本空調サービス(株), 2006 核融合科学研究所助手, 助教を経て, 現在同研究所准教授。水素同位体科学, 核融合安全工学分野に関する研究に従事。

する研究に従事。



吉村 泰夫

1992 京大・理・物理卒。1997 筑波大大学院博士課程了。同年、博士(理学)学位取得。核融合科学研究所助手, 助教を経て, 現在同研究所准教授。プラズマ加熱分野の研究に従事



伊藤 哲

1996 名城大・理工・機械卒。同年、核融合科学研究所技術部採用。プラズマ実験用加熱機器の運転維持開発に従事。



王 建青 (正員:フェロー)

1984 北京理工大・電子卒。1991 東北大大学院博士後期課程了。東北大工学部助手, (株)ソフィアシステムズを経て, 1997 名工大助手, その後, 講師, 助教授を経て, 2005 同大学大学院教授, 現在に至る。生体医療通信, 環境電磁工学の研究に従事。

IEEE フェロー。



平山 裕 (正員)

1998 電通大・電子情報卒。2000 同大大学院博士前期課程了。2003 同大学院博士後期課程了。同年電通大リサーチアソシエイトを経て名工大助手, 2007 同助教, 2013 同准教授, 現在に至る。博士(工学)。アンテナ及び環境電磁工学, 無線電力伝送の研究に従事。

に従事。



宇田 達彦

1970 京大・薬卒, 1972 京大・修士課程修了, 1987 東工大・博士(工学)取得, 1972 日立原研入所, この間日本原研出向を含み原子力, 核融合の安全研究に従事, 1994 核融合研・助教授, 2000 同研教授を経て, 2012 退職。同年核融合研及び総研大名誉教授。

以降核融合における非電離を含む放射線安全に関わる共同研究に従事。



藤原 修 (正員(終身):フェロー)

1971 名工大・工・電子卒。1973 名大大学院修士課程了。同年(株)日立中研入所。1976 年同所退職。1980 名大大学院博士後期了。工博。名大・工・助手, 講師を経て, 1985 名工大・工・助教授。1991-1992 スイス連邦工大客員教授, 1993 名工大・工・教授。

2012 名工大定年退職。同年名工大名誉教授。現在, 電通大・産学官連携センター客員教授。放電雑音, 生体電磁環境, 環境電磁工学に関する研究に従事。電気学会終身フェロー, IEEE life member。