JAERI-Research
2002-027

JP0350001

不要RFの抑制による ジャイロトロンの高性能化

2002年11月

春日井　敦・坂本　慶司・林　健一・高橋　幸司
庄山　裕章*・梶原　健*・池田　佳隆・假家　強*
満仲　義加*・藤井　常幸・今井　剛

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行　　日本原子力研究所

JAERI-Research 2002-027

不要ＲＦの抑制によるジャイロトロンの高性能化

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
春日井　敦・坂本　慶司・林　健一・高橋　幸司・庄山　裕章*1・梶原　健*2
池田　佳隆+・假家　強*3・満仲　義加*3・藤井　常幸+・今井　剛

(2002 年 10 月 4 日 受理)

ジャイロトロン内に発生する不要 RF は、ジャイロトロンの長パルス化あるいは高効率化等の性能向上を妨げている要因の 1 つである。ジャイロトロンの内部に発生する不要 RF には、①ビームトンネルにおける寄生発振、②放射器における寄生発振、③ジャイロトロン内部の散乱 RF がある。ビームトンネルにおける寄生発振は、ビームトンネルの表面に炭化珪素材を適用することで完全に抑制することができた。その結果、ジャイロトロンの空胴共振器における主モードの発振効率を従来の約 20%から 30%以上に改善でき、高効率動作の実現を達成した。放射器の寄生発振については、空胴共振器での発振効率を高めることで軽減できることを明らかにした。ジャイロトロン内部の高周波回路の回折損失に起因する散乱 RF はジャイロトロン出力の 10%以上あることが明らかとなったが、冷却の工夫及び DC ブレークの材質の変更により、動作を制限する要因にはなっていない。以上のように、寄生発振を抑制したこと及び散乱 RF を管外で処理し、散乱 RF に起因する内部加熱に対する冷却の強化により 1MW-10 秒 (0.9MW、9.2 秒) レベルの長パルス動作が可能となった。

那珂研究所：〒311-0193　茨城県那珂郡那珂町向山 801-1
＋ 核融合装置試験部、＊1 現在、豊田工業大学、＊2 現在、ゼネラル・アトミックス社、
＊3 (株) 東芝 DDC 社

Improvement of Gyrotron by Suppression of Undesirable Waves

Atsushi KASUGAI, Keishi SAKAMOTO, Kenichi HAYASHI, Koji TAKAHASHI, Hiroaki SHOYAMA[*1], Ken KAJIWARA[*2], Yoshitaka IKEDA[+], Tsuyoshi KARIYA[*3], Yoshika MITSUNAKA[*3], Tsuneyuki FUJII[+] and Tsuyoshi IMAI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 4, 2002)

Undesirable waves inside a gyrotron are factors that disturb the improvement of performance such as high power, long pulse and high efficiency operations of a gyrotron. It was found that undesirable waves inside the gyrotron were followings, (1) a parasitic oscillation in a beam tunnel, (2) a parasitic oscillation in an RF radiator, (3) stray RF inside of the gyrotron. The Parasitic oscillation in the beam tunnel was suppressed completely by application of SiC to inner surface of the beam tunnel. As a result, improvement of efficiency of main mode oscillation at a cavity from ~20% to >30% was achieved. The parasitic oscillation in the RF radiator was reduced by increasing oscillation efficiency at the cavity. The power of the stray RF due to diffraction loss on mirrors inside of the gyrotron was estimated more than 10% of output power. However, no trouble was observed by extraction of the stray RF through DC break. Long pulse operations such as 1MW-10s level (0.9MW-9.2s) were achieved by suppression of parasitic oscillation, effective extraction of the stray RF to the outside of the gyrotron and reinforcement of the cooling at the inside of the gyrotron which overheat due to the stray RF.

Keywords: Gyrotron, RF, ECH/ECCD, Beam Tunnel, Parasitic Oscillation, Stray RF, ITER, JT-60

+ Department of Fusion Facilities, *1 Present address; Toyota Technical Institute,
*2 Present address; General Atomics, *3 Toshiba Corporation

目 次

１．はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

２．ビームトンネルにおける寄生発振・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
２．１　寄生発振による電子銃部の異常加熱と寄生発振パワーの評価　3
２．２　考えられる寄生発振の原因とメカニズム ・・・・・・・・・・ 5
２．３　炭化珪素材を適用したビームトンネル・・・・・・・・・・・・・ 8
２．４　炭化珪素材による寄生発振の抑制と効率の向上・・・・・・・・10

３．放射器における寄生発振・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
３．１　放射器入口における異常な温度上昇・・・・・・・・・・・・・・14
３．２　放射器における寄生発振の原因 ・・・・・・・・・・・・・・・ 14
３．３　寄生発振を軽減するための方策 ・・・・・・・・・・・・・・・ 15
３．４　放射器の改良及び主モードの発振効率の改善による
寄生発振の軽減・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15

４．ジャイロトロン内における散乱ＲＦ・・・・・・・・・・・・・・・・・18
４．１　散乱ＲＦによるＤＣブレークの加熱と散乱ＲＦパワーの評価 18
４．２　散乱ＲＦの発生原因 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
４．３　散乱ＲＦを逃がす工夫とＤＣブレークの構造 ・・・・・・・・ 20
４．４　散乱ＲＦの処理の効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21

５．ジャイロトロンの高性能化と課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
５．１　達成された性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
５．２　ジャイロトロン内部の局所的異常加熱・・・・・・・・・・・・ 23
５．３　長パルス化に向けた対応策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25

６．まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28

Contents

1. Introduction 1

2. Parasitic Oscillation at Beam Tunnel 3
2.1 Overheat at MIG due to Parasitic Oscillation and Estimation of the Power 3
2.2 Cause and Mechanism of Parasitic Oscillation 5
2.3 Application of SiC to Beam Tunnel 8
2.4 Suppression of Parasitic Oscillation and Improvement of Oscillation Efficiency at Cavity 10

3. Parasitic Oscillation in RF Radiator 14
3.1 Temperature Increase of RF Radiator 14
3.2 Cause of Parasitic Oscillation in RF Radiator 14
3.3 Reduction of Parasitic Oscillation in RF Radiator 15
3.4 Improvement of RF Radiator and Oscillation Efficiency at Cavity 15

4. Stray RF Inside of Gyrotron 18
4.1 Heating of DC Break by Stray RF and Estimation of Stray RF Power 18
4.2 Cause of Stray RF 19
4.3 Structure of DC Break 20
4.4 Effect of Extraction of Stray RF 21

5. Performance of Gyrotron and Issues 23
5.1 Achieved Performance 23
5.2 Local Overheat Inside of Gyrotron 23
5.3 Prospect to Long Pulse Operation 25

6. Summary 27

Acknowledgements 27
References 28

1. はじめに

核融合炉を実現させるためには、磁場で閉じこめたプラズマを 1 億度以上の高温に加熱し、定常化のためにプラズマに電流を流し続けなくてはならない。その方法の１つにミリ波帯の周波数を用いた電子サイクロトロン加熱/電流駆動（ECH/ECCD）がある。現在検討が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)では、電子サイクロトロン加熱/電流駆動および不安定性の抑制や電流分布の制御を行うため、周波数 170GHz、単管出力 1MW、連続動作、効率 50%以上の大電力ミリ波発振源・ジャイロトロンが要求されている[1]。

大電力ジャイロトロンの開発は、各国の大学・研究所及び電子管製造メーカーにおいて精力的に継続され、原研においても ITER に適用する大電力ジャイロトロンの開発を進めている。原研では 1998 年に 170GHz のダイヤモンド出力窓ジャイロトロンを世界で初めて開発し、450kW-8 秒、520kW-6.2 秒の大電力長パルス動作に成功した[2]。これまでジャイロトロンの長パルス動作を制限してきた出力窓での発熱の問題を人工ダイヤモンド窓[3]の採用によって解決した。その後、ダイヤモンド窓ジャイロトロンで得られた成果を基に、170GHz ジャイロトロンの 1MW 長パルス動作を目指した開発と JT-60 電子サイクロトロン加熱用 110GHz ジャイロトロンの開発を進めてきた[4]。

450kW-8 秒発振を達成したジャイロトロンの最大の問題点は発振効率が約 20%と低いことであった。そのためエネルギー回収を行っても 40%程度に留まり、ITER の目標値である 50%以上の効率には及ばなかった。また、出力窓として使用したダイヤモンド材は中品質（$\tan\delta=1.3\times10^{-4}$）であり、1MW 長パルス動作は困難であった。そのため、1MW 長パルスを目標とした新型の 170GHz ジャイロトロン（ITER-J3）を製作し、長パルス動作試験を行った。主な改良点を表１に示す。

新型 170GHz ジャイロトロンでは、出力窓に高品質（$\tan\delta=2\times10^{-5}$）のダイヤモンド材を用い、若干厚みを薄くするとともに大口径化を行い、冷却幅を 2 倍にした。これにより、出力を平坦化ビームからガウス型ビームにすることができ、1MW 透過時もダイヤモンド窓の中心温度の上昇は約 40℃にしかならないことが計算によって明らかにされた。また、一般的にビームトンネルが長いとビームトンネルにおいて、不安定性が生じやすく電子ビームのエネルギー、速度、軌道が乱れやすいと言われており、この電子ビームのエネルギー分散、速度分散、空間分散の増加が主モードの発振効率を劣化させる原因と考えられた。このため従来 650mm であった電子銃のエミッションベルトから空胴中心までの距離を 400mm に短縮し、効率の向上を期待した。さらに長パルス化対策として、コレクターの冷却水量を毎分 400 リットルから 1000 リットルへ

増強し、アウトガス対策としてイオンポンプの増設を行った。

ところが、1MW 長パルス動作を目指した新型ジャイロトロンの試験の過程において、ジャイロトロン内の不要な RF が大電力・高効率動作、及び長パルス動作を制限する要因であることが明らかとなった。図 1 に、ジャイロトロンの電子銃から出力窓の部分までの断面構造の模式図及び発生する不要 RF についてまとめたものを示す。不要 RF としては具体的には、（1）ビームトンネルにおける寄生発振、（2）放射器における寄生発振、（3）ジャイロトロン内の散乱ＲＦ、である。ビームトンネルにおける寄生発振は 170GHz、110GHz ジャイロトロンの両方に共通した問題点であったが、ビームトンネルの表面に炭化珪素材を使用することで寄生発振を完全に抑制することができた。放射器における寄生発振は高周波回路の一部を変更することと、空胴共振器における主モードの発振効率を高めることで軽減することができた。ジャイロトロン内の散乱ＲＦは、空胴で発振した主モードの TE31,8（170GHz ジャイロトロン）を、内蔵された放射器及びミラーから構成される高周波回路において出力モードである直線偏波のガウス型ビームに変換する過程で生じる回折損失に起因し、ジャイロトロン内部で多重反射され、あるいはＤＣブレークなどのセラミックスを透過しジャイロトロンの外へ漏れてくる。この場合ＤＣブレークの過熱が問題となったが、ＤＣブレークの材料をアルミナから窒化珪素材に変え、フロン系冷媒で表面を冷却するとともに、ＤＣブレークを透過する散乱ＲＦをジャイロトロン管外で処理することでＤＣブレークの過熱を抑制した。これらの対策の結果、2000 年に製作したエネルギー回収が可能な短パルス試験管（J3-3）において、最大効率 57%を達成し[5]、2001 年に製作した長パルスジャイロトロン（ITER-J2MD, ITER-J4）において 900kW-9 秒、500kW-30 秒などの大電力長パルス発振を実現した。これまでの開発の流れを図 2 にまとめる。170GHz ジャイロトロンの試験により明らかとなった課題、またその課題に対する対応策を JT-60 用ジャイロトロンにフィードバックすることで、110GHz ジャイロトロンにおいても出力 1.2MW で４秒の発振を達成した[6]。

本論文では、これらの不要ＲＦを抑制する対策と実験結果を中心にまとめ、現象に関する考察を行った。第 2 章ではビームトンネルにおける寄生発振の現象を記述し、原因について考察し、寄生発振の抑制及びその結果得られた効率の向上について考察した。第 3 章では放射器での寄生発振について記述する。第 4 章で、ジャイロトロン内の散乱ＲＦとその処理について記述する。さらに第 5 章ではこれらの不要ＲＦ対策の結果達成されたジャイロトロンの性能と管内散乱 RF が引き起こす問題点について整理する。第 6 章ではまとめを行う。

2．ビームトンネルにおける寄生発振

2．1　寄生発振による電子銃部の異常加熱と寄生発振パワーの評価

新型 170GHz ジャイロトロン及び 110GHz ジャイロトロンの長パルス動作試験の過程で、電子銃部が異常に加熱される現象が見つかった。異常に加熱された結果、ダメージを受けたジャイロトロンの電子銃部のセラミックスと電子銃を包むように取り付けられているソケットの様子を図 3 に示す。電子銃部セラミックスでは、干渉縞のような傷が付いていることから、電界が集中したと考えられる。ソケットの絶縁材料はショットごとに繰り返し加熱され、材料が溶けていた。また、比較的長いパルス幅では電子銃付近から異音が発生した。その異音の原因は、ソケットの絶縁材料が急激に加熱され、溶融・膨張する時に発生しているのではないかと推測できる。

本来は電子銃部からはＲＦはほとんど出てこないはずであるが、電子銃部から漏れてくる RF をダイオード検波器で測定した結果、図４に示すようにビーム動作に同期した比較的強い信号が検出された。

以上の現象から、電子銃から漏れてくるＲＦが非常に強いため、セラミックスや絶縁材が大きな損傷を受けたと考えられた。110GHz ジャイロトロンではこの電子銃から漏れる大きなＲＦによって、電子銃部のセラミックスにクラックが生じ、真空リークが発生した。

電子銃部から漏れるＲＦの周波数をバンドパスフィルター等により分析した結果、170GHz ジャイロトロンでは 113～145GHz の信号、110GHz ジャイロトロンでは 90GHz 近傍の周波数であることが明らかとなった。これらの周波数は空胴において発振した主モードの発振周波数とは異なり、ビームトンネルでの磁場強度に対応するサイクロトロン周波数であることから、ビームトンネルにおける寄生発振であると考えられた。

寄生発振のパワーを評価するため、電子銃のセラミックスの外側にテフロンチューブを巻き付け、その内側に水を流し、電子銃部への漏れＲＦを水に吸収させる方法を用いて、ジャイロトロンの電子銃部への漏れＲＦをカロリメトリックに評価した。テフロンチューブに流れる水の出入口には測温抵抗体が配置され、その温度差から入熱を求めることができる。しかしながらテフロンチューブはセラミックスの全ての部分を覆うようにはなっておらず、またセラミックス自体に吸収されたＲＦまでは検出することができない。すなわちテフロンチューブで測定した漏れＲＦパワーは過小評価となる。そこで電子銃部に配置したテフロンチューブを取り外した状態で、電子銃を冷却しているシリコンオイルの温度上昇を測定し、電子銃から漏れるＲＦの全体のパ

ワーを評価することを並行して行った。

電子銃のセラミックスの外側に配置したテフロンチューブ中に流れる水の温度上昇から、電子銃部から漏れるＲＦは、出力 400kW に対し少なくとも 24kW 以上あることが確認された。一方で、シリコンオイルの温度上昇からは、出力 350kW に対し 70kW 程度の漏れ RF パワーと評価された。すなわち、ジャイロトロンからの出力と比較し、6～20%のパワーが寄生発振のパワーであると評価でき、そのパワーが電子銃部から外へ漏れていたことになる。寄生発振パワーは電子ビームのエネルギーに対しては、0.7%（24kW/(41AX84.5kV)、ITER-J3M3）～2.6%（70kW/(31AX85kV)、ITER-J3M）となる。

ビームトンネルでの寄生発振が生じる条件について検討した。長パルスジャイロトロン（ITER-J3M2）で測定した寄生発振パワーと出力のビーム電流依存性を図 5 に示す。寄生発振パワーは電子銃部へ漏れてきたＲＦパワーと同じであると仮定した。主モードの発振開始電流は約 8A であったのに対し、寄生発振の発振開始電流は約 15A であった。

図 6 に寄生発振パワーとジャイロトロン出力、Ｄ･Ｃブレークからの漏れ RF（散乱 RF パワー）の空胴磁場強度依存性を示す。ジャイロトロンの出力は空胴磁場強度が 6.65T で最も大きくなり、低磁場側に少しずれると出力は急激になくなり、一方高磁場側にずれると徐々に出力が弱くなる。これは通常のジャイロトロン動作の特性である。散乱 RF パワーは、低磁場側にずれたところで急激に増える。これは主モードである TE31,8(-)の発振条件がはずれ、別のモードが発生したため空胴での発振が出力窓からビームとして出力されず、散乱 RF となったことを意味する。一方、電子銃からの漏れ RF、すなわちビームトンネルでの寄生発振パワーは空胴磁場強度に対し明確な依存性を示さなかった。

110GHz ジャイロトロン（JT-D2）の実験結果によると、アノード電圧を下げる、すなわち、電子ビームのピッチ角を小さくすると、電子銃への漏れ RF が小さくなった。すなわち、電子ビームのピッチ角が大きい方が寄生発振を生じやすいという結果が得られた。

ビームトンネルでの寄生発振が生じたジャイロトロンについて、計測された周波数は主モードの周波数が 170GHz のジャイロトロンでは 113GHz～145GHz、主モードの周波数が 110GHz のジャイロトロンでは 90GHz 近傍の周波数であった。周波数はバンドパスフィルターやハイパスフィルターを組み合わせて測定したもので、おおよその発振周波数を求めることはできるが、発振周波数を完全に特定することはできない。そこでスペクトルアナライザー及び空胴周波数計での周波数の同定を試みたが、寄生発振は安定せず、詳細な周波数を同定することはできなかった。

以上の結果からビームトンネルにおける寄生発振は、以下のようにまとめることができる。

（１）ビーム電流に対する依存性があり、主モードよりも発振開始電流が大きい。

（２）空胴磁場強度に対し明確な依存性はない。

（３）散乱 RF との相関はない。

（４）ピッチ角が大きい方が寄生発振が起きやすい。

（５）周波数は 170GHz ジャイロトロンでは 113～145GHz の領域、110GHz ジャイロトロンでは 90GHz 近傍にある。

（６）寄生発振の発振効率は条件にもよるが、0.7～2.6%程度である。

２．２　考えられる寄生発振の原因とメカニズム

ここでは、これまでの実験結果に基づき、ビームトンネルにおける寄生発振の原因とメカニズムの考察を行う。約 15A に寄生発振の発振開始電流があること、ピッチ角を小さくすると寄生発振が弱くなる傾向があることから、空胴共振器よりも下流側（放射器側）の発振がビームトンネルに戻っているのではなく、ビームトンネルにおいて寄生発振をしていると推察できる（ピッチ角が小さいと空胴での主モードの発振効率が低下するため下流側寄生発振が大きくなるはずである）。その機構としてはジャイロ運動を行う電子ビームと導波管モードとの相互作用が考えられ、可能性の１つにビームトンネル内の電子サイクロトロン共鳴発振があげられる。

図 7 に 170GHz ジャイロトロンのビームトンネルにおける磁場強度分布とビームトンネルの位置関係および電子ビームの軌道を示す。110GHz ジャイロトロンも磁場強度が異なるだけでビームトンネル形状や電子ビーム軌道はほぼ同じである。170GHz ジャイロトロンでは 113～145GHz の寄生発振、110GHz ジャイロトロンでは～90GHz の寄生発振であったことから、電子サイクロトロン共鳴とすれば、170GHz ジャイロトロンの寄生発振の場所は、空胴中心位置からおよそ 100mm から 170mm の距離の位置、110GHz ジャイロトロンの場合は、空胴中心位置から 115mm の距離の位置であると推測される。

図 8 にビームトンネルにおける磁場強度の変化率とビーム軌道とビームトンネル内壁面の傾きの差、すなわちビーム軌道とビームトンネル内壁の平行度を示す。ビーム軌道とビームトンネル内壁面の傾きの差が小さいほど電子ビームはビームトンネル内壁に平行であると言える。

電子サイクロトロン発振は、電子サイクロトロンメーザーの原理からその共鳴条件は以下のように表される。

$$\omega - k_{//} v_{//} \cong \omega_{ce} = \frac{eB_0}{m_0 \gamma} \tag{1}$$

ここで、ωは共鳴角周波数を表し、ω_{ce}はサイクロトロン周波数である。$k_{//}$はモードの軸方向波数、$v_{//}$は電子ビームの軸方向速度、e は電子の電荷、B_0は印加磁場強度、m_0は電子の静止質量、γは相対論的係数で、

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \tag{2}$$

ジャイロトロンの場合はドップラーシフトの項 $k_{//}v_{//}$が極めて小さく無視できるが、この共鳴条件を満たすとき発振が生じる。すなわち磁場の勾配が急峻な部分では発振条件から外れやすく、円形導波管の特定のモードに結合するように回転電子ビームを入射することが困難となる。したがって図 8 から言えることは、磁場の勾配から見れば空胴に近い方が発振が起こりやすく、空胴からの距離が約 200mm の場所は磁場の勾配が最も急峻なので共鳴発振が起きにくい。一方、ビームトンネルの内面と電子ビームの軌道が平行に近い方が発振しやすいと言える。この点からは、z=200mm 近傍が発振しやすい。これらの発振条件のトレードオフにより、z=100mm から 170mm 付近で発振条件に近くなると考えられる。さらに、円形導波管モードの特定のモードと結合するには、導波管の特定のモードの電界が強い位置に電子ビームを入射する必要がある。すなわち電子ビームと高周波電界の相互作用が生じる必要がある。図 9 にジャイロトロンの電子ビームの内径とビームトンネルの内径の比を示す。空胴中心位置からの距離が 150mm 近傍の位置で最も電子ビームの径とビームトンネルの内径の比が小さくなり、かつこの部分で変化率も小さくなる。この場所に電子ビームが入射されれば、特定のモードと結合する可能性が最も大きくなる。この位置の磁場強度は、寄生発振の周波数 113GHz～145GHz から逆算されるサイクロトロン共鳴磁場強度とほぼ一致している。表 2 に計測されたビームトンネルにおける寄生発振の周波数及びそれに対応する磁場強度、発振場所の空胴からの距離をまとめた。

ビームトンネルは空胴共振器側がダウンテーパーによって径が狭められているので、電子銃部とビームトンネル全体で電磁波を閉じこめる空胴共振器を形成する可能性がある。通常はビームトンネルの一部の場所が、空胴共振器を形成するとは考えにくいが、仮に何らかの原因でビームトンネル表面に電磁波を反射する要因（傷や段差など）

が存在し、その位置が特定の導波管モードと相互作用するような配位になっていれば、寄生発振を励起する可能性がある。寄生発振が発生したジャイロトロンの場合、空胴共振器を形成する要因が完全に特定できているわけではないが、寄生発振の発振開始電流が比較的大きいことから主モードの発振を行う空胴共振器よりもビームトンネルのQ値あるいは寄生発振のモードとの結合度はかなり低いと考えられる。ビームトンネルの一部が空胴共振器を形成したという考えに立てば、その場所での電子サイクロトロン共鳴が寄生発振の原因ではないかと考えられる。

寄生発振が電子サイクロトロン共鳴とした場合、発振周波数 113GHz 及び 145GHz に対応した磁場強度の場所で発振周波数がカットオフ周波数になっていると考えると、

$$f_c = \frac{\chi_{m,n} c}{2\pi r_w} \tag{3}$$

(f_cはカットオフ周波数、$\chi_{m,n}$は第 1 種 n 次ベッセル関数の m 番目の根、c は光速度、r_wは導波管内径)

からモードの固有値である$\chi_{m,n}$が求められ、電子ビームの径とビームトンネルの内径の比から、以下の TEm,n モードとビームの入射位置 r_e、空胴内径 r_w の関係を示す式

$$\frac{r_e}{r_w} = \frac{\chi_{m\pm1,1}}{\chi_{m,n}} \tag{4}$$

($\chi_{m,n}$は第 1 種 n 次ベッセル関数の m 番目の根、プラス符号は電子の旋回方向と逆回転、マイナス符号は電子の旋回方向と同じ回転を表す。入射位置はモードの第 1 ピークに合わせた。)

を用いて、おおよそのモードを同定することができる。この場合、可能性の 1 つとして 113GHz の発振は空胴からの距離 z=170mm の位置で、TE23,7(+)モードが候補となり、145GHz の発振では z=100mm の位置で、TE28,6(-)あるいは TE25,7(+)モードが寄生発振の候補となる。これらのモードは発振領域でカットオフとなっているので、寄生発振のパワーは全て電子銃方向に反射されることとなる。

２．３　炭化珪素材を適用したビームトンネル

従来のジャイロトロンはビームトンネルの材質として空胴と同じ銅を用いているので、導波管モードが立ちやすく、その結果、電子のサイクロトロン運動と導波管モードとの相互作用によって寄生発振が生じている可能性が高いと考えられる。これを抑制するためには、高周波が立ちにくい、すなわち高周波電流が表面に流れにくくするように、高い電気抵抗を持つ材質をビームトンネルの表面に使用すればよいと考えられる。その材質として炭化珪素材（SiC）を採用した。炭化珪素は、ろう付けができる、電気抵抗が高い（RF 損失が大きい）、高温ベーキングができる等の理由からビームトンネルに組み込む材料としては適当であると考えた。

ビームトンネルでの寄生発振は電子サイクロトロン共鳴の原理に基づいており、z～150mm 付近で比較的高いＱ値を有していると仮定すると、ビームトンネルに抵抗性の素材を用いることが非常に効果的である。その候補として炭化珪素材を選択した。炭化珪素材の電気抵抗は非常に高く銅の約 10^8 倍、すなわち電気伝導度で示すと 10^{-8} 倍となる。銅の電気伝導度は温度に依存するが、室温で約 5.6×10^7[1/Ωm]である。一般に空胴のＱ値は、内部損失によるＱを内部Ｑ（Q_i）、空胴外部へ逃げる損失によるＱを外部Ｑ（Q_{ext}）とすれば、

$$\frac{1}{Q}=\frac{1}{Q_i}+\frac{1}{Q_{ext}} \tag{5}$$

と表される。Q_{ext} は空胴の形状と波長、発振モードから求められ、ジャイロトロンの空胴の場合は数 100～数 1000 となる。内部を真空にした円筒空胴の場合内部損失は空胴壁によるジュール損失だけになるので、そのQ_i値は次のように表すことができる。

$$Q_i \cong \frac{r_w}{\delta(1-m^2/\chi_{mn}^2)} \tag{6}$$

ここで、r_wは空胴の半径、δは表皮厚を表し

$$\delta=\sqrt{2/\mu_0\omega\sigma} \tag{7}$$

ωは角周波数、σは電気伝導率、μ_0は真空の透磁率である。ビームトンネルではZ=170mm で TE23,7、Z=100mm で TE28,6 あるいは TE25,7 のモードの寄生発振があるとすれば、良導体の銅の場合（σ=5.6x10^7[1/Ωm]を仮定）はQ_i～130000 となる。したがって、全体のQとしては外部Q_{ext}とほぼ同じになる。しかし表面材質が炭化珪素材であれば、電気伝導率がσ=10^{-2} [1/Ωm]であり高周波電界に対し非常に大きな損失抵抗となるので（銅に比べ約 10^4 倍）、Q_iとして成り立たなくなり、全Q値は銅の場合に比べ著しく低下する。これはもはや高周波のエネルギーを蓄積できないため、高周波電界が励起されない（寄生発振が起こらない）ことを意味している。

ビームトンネルの構造を考えた場合、海外のジャイロトロンやジャイロクライストロンでは、銅と誘電体を交互に配置したビームトンネル[7]や、炭化珪素（SiC）40%と窒化アルミ（AlN）60% のコンポジット材と銅を交互にサンドイッチ状に重ね合わせたビームトンネル[8]、非多孔質性のテーパーになった炭化珪素 20%と酸化ベリリウム 80%のコンポジット材を積み重ねたビームトンネルを採用しているところもある。しかし、炭化珪素はジャイロトロン内部においてガス源となること、また加熱による剥離のリスクがあり、さらにはそのようなスタック型のビームトンネルは構造が複雑になる。原研においても、空胴で発振したＲＦが下流側のテーパー部などで低次のモードへ変換し電子銃方向に反射されるＲＦや空胴における競合モードの反射によってカソードが加熱されるのを防ぐ目的のために、電波吸収体として炭化珪素のリングを重ね合わせたスタック型のビームトンネルを持つジャイロトロンを開発したこともあったが、効果が薄いと判断し、それ以降原研のジャイロトロンでは採用してこなかった。

従来の考え方はＲＦが電子銃部に逆流しないようにＲＦの吸収体をビームトンネルに付加するという考え方であったが、むしろ寄生発振を抑えるという立場から、大型の炭化珪素のブロックをビームトンネルの表面にろう付けする手法を初めて採用した。炭化珪素材がガス源になるのではないかと懸念があったが、高温ベーキング等の製作上の工夫によりこの問題をクリアした。実際、長パルス動作においても、炭化珪素材のビームトンネルのジャイロトロンの管内ガスが特に多いということは無かった。

170GHz ジャイロトロンに組み込んだ炭化珪素のビームトンネルの構造図を図 10 に示す。ビームトンネルは２つの炭化珪素ブロックから構成される。使用した炭化珪素（CERASIC-B、東芝セラミックス）の特性値を表 3 に示す。使用した炭化珪素材は常温焼結 SiC であり、比較的複雑で大型の形状でも製造可能である。その電気伝導率は銅の約 10^{-8}倍であり、1600℃まで使用可能である。

ビームトンネルに使用した炭化珪素ブロックは、内径が 50mm から 30mm に直線的に変化するテーパー状の中空シリンダー構造をしており、熱ひずみによる応力を緩和す

るため２つのブロックに分けてある。それぞれのブロックは長さが 77mm、厚みが 5-10mm である。それらは銅のシリンダーの内側にろう付けされ、銅のシリンダーを通し周囲を水冷されている。

２．４　炭化珪素材による寄生発振の抑制と効率の向上

炭化珪素材をビームトンネルに適用したジャイロトロンでは、電子銃からの漏れＲＦが検波器やスペクトルアナライザーを用いた測定では観測されなかった。電子銃のセラミックスの外側にテフロンチューブを巻き付けて、通水した水に RF を吸収させる方法で測定した電子銃部への漏れ RF は、900kW の出力に対し測定限界の 200W 以下であった。すなわち、電子銃部へ漏れる RF は完全に抑制された。

一方、ビームトンネルの炭化珪素材の冷却水の温度上昇から、炭化珪素材でのパワーを評価した。450kW のジャイロトロン出力に対し 1.2kW、あるいは 520kW のジャイロトロン出力に対し 1.6kW がビームトンネルの炭化珪素におけるパワーであることが確認された。すなわち、出力の約 0.3%のパワーがビームトンネルにおいて発熱となったと評価できた。表 4 にビームトンネルに炭化珪素材を用いた場合と従来の銅のビームトンネルの場合の、ビームトンネルでの発熱及び電子銃への漏れ RF パワーの比較をまとめる。炭化珪素のビームトンネルの場合、２つに分離した炭化珪素ブロックのうち空胴側のブロックだけに発熱が生じ、電子銃部への漏れ RF がほとんどなかったことから、発熱はビームトンネルにおける寄生発振が原因ではないと考えられる。炭化珪素材での発熱は高周波回路における散乱 RF がビームトンネルへ戻り、炭化珪素材によって損失した可能性が考えられる。

散乱 RF としてビームトンネルに戻る割合を以下の式によって評価した。

$$\text{散乱 RF がビームトンネルに戻る割合} = \frac{\text{散乱 RF パワー}}{\text{ジャイロトロン出力}} \times \frac{\text{放射器カット部断面積}}{\text{放射器カット部断面積+DC ブレーク面積+副窓面積}} \qquad (8)$$

計算上は散乱 RF パワーのジャイロトロン出力に対する割合は 7%程度なので、散乱 RF がビームトンネルに戻る割合は 0.15%となるが、実験から評価された散乱 RF パワー比は 13%なので、ジャイロトロン出力に対しビームトンネルに戻る散乱 RF の比率は

0.27%となる。この値はビームトンネルにおける発熱の計測から得られた割合 0.3%と一致する。

空胴に近い側の炭化珪素ブロックで、1.2kW 全ての入熱があったこと、およびビームトンネルでの発熱は出力に対しほぼ一定の割合で検出され、計算から求められるビームトンネルへ戻る割合と一致したことから、ビームトンネルでの発熱の全てが散乱 RF と評価できる。炭化珪素ブロックの場合その大きな電気抵抗から、高周波の表皮抵抗が銅に比べ 10000 倍以上大きく、高周波が表面で損失し伝搬できないために、空胴側から逆流・伝搬してきたＲＦが炭化珪素材表面ですぐに損失したと考えられる。すなわち、ビームトンネルに炭化珪素材を適用した場合は、ビームトンネルでの寄生発振は無いと結論づけることができる。ビームトンネルの炭化珪素での発熱が 1.2kW 程度であれば、十分許容値であり連続動作であっても問題ない。このように、ビームトンネルに炭化珪素を適用した場合は、著しくビームトンネル及び電子銃部での発熱を減少させることができ、炭化珪素によって完全に寄生発振を抑制できたと考えられる。

炭化珪素をビームトンネルに適用した効果は、まずは長パルス動作においてビーム電流の安定度の面で顕著な改善が見られた。図 11 に JT-60 用 110GHz ジャイロトロンの場合の長パルス動作における代表的な波形の比較を示す[6]。上段の波形はジャイロトロンに印加されるカソード電圧、アノード電圧、ボディ電圧の時間変化を示している。エネルギー回収を行っているので主電源のカソード電圧は約 60kV であり、回収電圧は 25kV である。下段の波形はビーム電流とＲＦ出力波形を、炭化珪素材の有無で比較したものである。炭化珪素材が無い場合は、発振から約 1 秒経過後にビーム電流の急上昇が現れ、そのためビーム過電流のインターロックによりパルス幅を 1.5 秒以上伸ばすことが困難であった。これはビームトンネルにおいて寄生発振が生じ、寄生発振によって生じたＲＦが電子銃のカソード表面を加熱し、ビーム電流が急激に上昇する現象を生じさせたと考えられる。この急激なビーム電流の上昇によって発振ＲＦも安定しなかった。一方、ビームトンネルに炭化珪素材を用いると寄生発振が抑制されたため、カソード表面がＲＦによって加熱されることが無くなったと考えられる。そのため比較的安定なビーム電流を維持することができ、1.2MW で 4 秒の動作を達成することができた。カソード表面が加熱されなくなったことで、逆に電子ビームが引き出されることによって生じるカソードの電子冷却の効果が顕著となり、長パルス時においてビーム電流が徐々に減少した。このため 1.2MW の出力では、４秒以上のパルス幅においては、逆にビーム電流減少のため発振条件からはずれ、発振が維持できない場合も発生し、長パルス動作時においてはビーム電流の制御・維持が大きな課題であると考えられる。

また、炭化珪素材を用いてビームトンネルでの寄生発振を抑制した結果、空胴における主モードの発振効率を大幅に改善することができた。図 12 にビームトンネル以外は全く同一の 170GHz 短パルスジャイロトロン（J3-1 と J3-2）における、出力と発振効率のビーム電流依存性を示す。ビーム電圧は共に約 85kV、各電流値においてアノード・カソード間電圧と空胴磁場は最適化されている。ここで示したデータは発振幅が約 1ms の短パルス試験のデータであり、エネルギー回収を行っていない。炭化珪素材をビームトンネルに用いていないジャイロトロンの出力と効率は、ビーム電流 15A くらいまでは炭化珪素をビームトンネルに用いたジャイロトロンの出力と効率に一致するのに対し、15A 以上では出力と発振効率が徐々に劣化していくことが確認された。すなわち、寄生発振が生じると出力と効率が劣化すると考えられる。

ビームトンネルに炭化珪素材を適用した場合、発振効率として 30%以上が得られ、ビーム電流 45A のときに出力 1.1MW まで達した。一方、炭化珪素材を適用しない場合は、発振効率は約 20%であった。炭化珪素をビームトンネルに適用することでビームトンネルでの寄生発振を抑制し、その結果、電子ビームのエネルギーがビームトンネルで乱されることがなく、非常にエネルギー分散の小さなビームが空胴まで導かれたため、発振効率を約 20%から 30%へ大幅に向上させることができたと考えられる。

寄生発振の抑制が発振効率を向上させるメカニズムは以下のように説明できる。

ジャイロトロンにおいては、電子ビームをある一定電圧で正確に加速させるため、電子ビームのエネルギーは単色になる。従って空胴に入る電子ビームのエネルギーは、空胴における電子ビームの厚みによるエネルギーの差のみが電子ビームのエネルギースペクトルの拡がりとして与えられる。これは最も外側に位置する電子が感じる空間電荷と内側に位置する空間電荷が異なり、その電位降下によりエネルギースペクトルに幅が出るからである。ここで実験に用いたジャイロトロンのビーム厚約 0.3mm から生じる電位降下の差は約 230V となり、エネルギー分散は $\Delta\gamma/\gamma=0.003$ 程度に抑えられる（(2)式の相対論的係数は $\gamma=1+E(kev)/511$ と変形できるので、エネルギーの分散は相対論的係数の分散と等価である）。ところが、ビームトンネルにおいて寄生発振が生じると、空胴に電子ビームが入る前に電子ビームと高周波電界の相互作用が起こり、その相互作用を終えた電子ビームが空胴に入射することとなる。このときは空胴に入る時点でエネルギースペクトルが拡がった電子ビームとなる。ジャイロトロンは電子サイクロトロンメーザーの原理により共鳴発振を行うので、その共鳴条件から、空胴に入る電子ビームのエネルギーのばらつきが大きければ、一部の電子だけ共鳴するので、全体として高い発振効率を得ることは困難となる。図 13 にエネルギースペクトルの拡がりに対する発振効率の低下を計算した一例を示す。ここではビーム電圧 85kV、

ビーム電流 30A、電子のピッチファクタ 1.0 とした。発振効率はエネルギーの分散に強く依存し、エネルギー分散が 2%生じると発振効率は約 3 割も減少することが計算結果により示された。ビームトンネルに炭化珪素材を適用して効率が 20%から 30%に改善した実験結果から、効率の低下がエネルギー分散のみに起因すると仮定すれば、ビームトンネルにおける寄生発振は空胴に入る電子ビームのエネルギー分散を約 2%に劣化させた可能性も考えられる。

以上、ビームトンネルにおける寄生発振の原因と、炭化珪素によって抑制できた理由、及び寄生発振の抑制によって効率の改善がされた理由についての考察を行った。完全に寄生発振の原因の解明を行うためには、ビームトンネルの特定の場所が高周波電界と相互作用を行い寄生発振が生じることを計算機シミュレーションによって明らかにする必要がある。寄生発振を含めたビームの不安定性に関するテーマは、大電力化、高効率化、高周波数化に対する重要な課題でもある。

3. 放射器における寄生発振

3.1 放射器入口における異常な温度上昇

170GHz ジャイロトロンにおいて、長パルス動作時において放射器入口における温度上昇が異常に大きくなる現象が見られた。図 14 に放射器における寄生発振が顕著に現れた例を示す。ビーム電圧 85kV、ビーム電流 31A、出力 500kW のときのデータである（ITER-J2MD)。(A)は放射器入口の温度上昇が比較的小さい例であるが、(B)は(A)と同じパラメータでありながら、あるショットを境に温度上昇が 2～3 倍に増加した例である。その放射器入口温度上昇のきっかけを作ったショットの波形を図 15 に示す。ショット後 1.6 秒のタイミングで空胴において TE31,8 以外のモードが発振し、窓からの出力が減少し、管内ガスが発生したことがわかる。ビーム電流が増加しているのは放射器入口において強い寄生発振が生じ、その反射波がカソードを温めたためと推測できる。放射器温度上昇は主モードの発振効率が上がると小さくなること、周波数は 136 から 150GHz 近傍にあることから、このショット時に放射器内部の表面に熱応力による変形を生じ、放射器内の発振が顕著になったものと考えられる。

3.2 放射器における寄生発振の原因

長パルスジャイロトロンでは、空胴共振器での発振モード TE31,8 を、直線偏波のガウス型ビームに変換し出力窓から取り出すために、放射器及び複数のミラーからなる高周波回路が必要である。空胴で発生した RF を放射器に導くためには、放射器の径まで拡げるアップテーパー導波管が必要となる。ジャイロトロンでは、このアップテーパー及び放射器の内部を、空胴共振器で発振モードの TE31,8 と相互作用を終えた電子ビームが磁力線に沿って通過することとなる。このときこれらの導波管の内部で特定のモードと結合すれば電子サイクロトロン共鳴発振を生じる可能性がある。図 16 にジャイロトロンの空胴から放射器の構造の模式図を示す。放射器入口にはアップテーパーで拡げた TE31,8 モードをスムーズにモード変換させるために直線部分が存在する。この入口部分と放射器の出口部分に熱電対が取り付けられており、温度がモニターできるようになっている。放射器入口の温度が異常に高くなるショットでは、この直線部分で寄生発振が発生していると考えられる。放射器入口温度が上昇したジャイロトロンは出力分布の形状が左右に割れてピーキングを起こす等の異常が現れたものもあ

ったが、分解して放射器を調査すると、放射器の入口から 10mm～20mm の部分にほぼ全周にわたって熱応力によると思われる損傷があった。この放射器入口部分で寄生発振が起こり、熱応力が繰り返されることによって表面の形状が変化したものと考えられる。

３．３　寄生発振を軽減するための方策

放射器の発振は周波数と導波管形状から、放射器入り口付近の直線部における電子サイクロトロン共鳴原理によるものと考えられるので、寄生発振を抑制するには、①発振条件をはずし特定のモードと結合しなくなるようすること、および②空胴共振器で主モードと強く相互作用させ、相互作用を終えたスペントビームのエネルギー分散を大きく乱すことが必要となる。

①について考えれば、放射器に入る TE31,8 モードを乱さないような導波管形状にする必要があるが、放射器をテーパー型にすることを当初試みた。放射器入口での発熱は 1/10 程度に抑制され一定の効果は認められたものの、散乱 RF がやや大きく出力が低くなる結果が得られた（テーパー型にしたこと以外の他の要因も関係している可能性もある)。一方で従来の直線型放射器の入口を 20mm 短くしたものは、すなわち相互作用長を短くすることはＱ値を下げることとなるため、寄生発振は若干あるかもしれないがその大きさは軽減されると期待できた。この直線型放射器の入口を 20mm 短くしたものは短パルス試験において大電力発振、及び長パルス試験において放射器入口の温度上昇が抑えられたという良好な結果を得た。このため現在は、長パルスジャイロトロンには20mm短くした直線型の単らせんモード変換器を採用している。

②について考えれば、空胴共振器において発振効率をできる限り高めることで、スペントビームの速度分散及びエネルギー分散を悪くし、ビームのエネルギーを下げることが寄生発振の抑制には有効である。

３．４　放射器の改良及び主モードの発振効率の改善による寄生発振の軽減

図 17 に放射器の入口を 20mm 短くしたジャイロトロンでの放射器温度上昇と放射器を20mm短くする前のジャイロトロンの違いによる放射器入口温度の上昇を示す。(A)は放射器の温度上昇が顕著であったジャイロトロンにおける場合（ITER-J2MD）であり、出力は 500kW、効率は約 20%（ビーム電圧 85kV、ビーム電流 30A）である。(B)は放射器を改良したもの（ITER-J4）であり出力は 800kW、効率は 27%（ビーム電圧 75kV、ビ

ーム電流 40A）である。(A)のジャイロトロンにおいて、始めは 500kW のパラメータで 1 秒のパルス幅で約 40℃の放射器入口の温度上昇であったものが、特に寄生発振を起こしてからは熱応力により放射器入口の表面の形状が変化したため、温度上昇が約 2 倍に増加したと考えられる。(B)では 800kW の出力にも関わらず、100℃以下のレベルで放射器温度上昇が抑えられている。(B)は放射器入口の直線部の長さが 20mm 短くなっている（直線部をカットした）ことに加え、発振効率も(B)の方が高い。(B)のジャイロトロンであっても空胴磁場強度を少し強め、発振出力・発振効率を劣化させたパラメータを選択すると表 5 に示すように、23.8%から 18.5%へ発振効率が下がっただけで、放射器入口の温度上昇が 57.5℃から約 80℃へ約 4 割も上昇した。さらに放射器の出口側の温度上昇も大きくなった。発振効率が低い状態では、放射器入口側のみならず放射器全体にわたって温度が上昇しているとも言える。すなわち適切なパラメータを選択し発振効率を上げることで、放射器入口温度を軽減できることを示している。逆に発振動作領域から外れてしまった場合は、大幅な放射器温度上昇となり、長パルス動作中に生じた場合は放射器の表面を劣化させる原因にもなりうる。

ビームトンネルに炭化珪素を適用し、発振効率を高めたジャイロトロン（ITER-J5）でも、放射器における発振が確認された。このジャイロトロンは通常の炭化珪素ビームトンネルジャイロトロンの効率である約 30%よりも効率が若干低く 25%であった。散乱 RF のパワーと放射器温度の相関から、放射器入口における寄生発振のパワーを評価した。図 18 に放射器入口温度上昇に対する散乱 RF パワーを示す。それぞれビーム電圧が異なるが、ビーム電流は約 50A であり、ジャイロトロン出力は 850kW～900kW である。もし放射器での寄生発振がない場合でも、TE31,8 モードが円形導波管内を伝送するときに生じる表面での損失がある。導波管内の TEm,n モードの減衰係数αは以下のように表される。

$$\alpha = \frac{R_m\left\{k_c^2/k_0^2 + m^2/(\chi_{mn}^2 - m^2)\right\}}{r_w\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}\sqrt{1-k_c^2/k_0^2}} \qquad (9)$$

ここでR_mは表皮抵抗（$(\pi f \mu_0/\sigma)^{-1/2}$）、$k_c$は固有値（$\chi_{mn}/r_w$）、$k_0$は波数（$\omega/c$）、$r_w$は導波管半径、$\chi_{mn}$は第 1 種 n 次ベッセル関数の m 番目の根を表す。ジュール損失により空胴入口部分では 0.1%程度のパワーの損失があり、それに伴う空胴入口の温度上昇は 10～20℃程度はあると見積もられる。寄生発振が無い場合の放射器入口の温度上昇を 20℃程度と仮定すると、図 18 に示される放射器入口温度上昇が 95℃及び 20℃の時の散乱 RF パワーの差から、放射器による寄生発振のパワーは 20～30kW 程度（放

射器温度が95℃上昇したとき）と評価できる。

一方で、放射器入口における寄生発振の周波数分析を、後進波発振器及びヘテロダイン受信器をもちいたリアルタイム周波数分析器（ELVA-1, DOK Ltd.）によって行った。パラメータを変えた場合の周波数の変化と受信周波数の変化の一例を図 19 に示す。放射器温度上昇によらず、またビーム電圧やビーム電流のパラメータによらず周波数は概ね 152GHz 近傍にあり、ショットにより多少のばらつきがある。ビームトンネルでの発振モードを評価したときと同じように考えると、放射器入口径は 20.7mm であるので、発振周波数とビーム軌道の位置から、発振しているのは TE27,10(+)のモードの可能性がある。

放射器の入口における発振は、軽減することはできても発振自体が消えることはなかった。しかし、空胴共振器での主モードの発振効率を高く維持することで放射器入口の発振を最小化できることも確認できた。したがって、空胴共振器の下流側発振への対応策としては、今のところ電子ビームのエネルギー分散、速度分散を小さくしピッチ角を上げ、空胴での相互作用の最適化を行うこと、すなわち空胴での発振効率を高めることが重要となる。

4. ジャイロトロン内における散乱RF

4.1 散乱RFによるDCブレークの加熱と散乱RFパワーの評価

170GHz ジャイロトロンの長パルス動作時には、DC ブレークの過熱と DC ブレークを囲むように取り付けられた絶縁材料の損傷が発生した。RF 吸収用に DC ブレークの外側に取り付けられているテフロンチューブの巻き枠として使っていた絶縁材料（MC ナイロン）がＲＦを吸収することで溶けた様子を図 20 に示す。原研で開発しているジャイロトロンでは電子ビームのエネルギーを回収するため、電子ビームを加速するための加速電圧が印加されるボディ部と電子ビームを回収するコレクター部の間に最大 50kV の電位を印加できるように大型のセラミックスを挿入しており、その外側にはセラミックスの冷却のため高い絶縁性を有するフロン系冷媒（FX-3300、3M）を流し、さらにＲＦが外へ漏れるのを防ぐため一部テフロンチューブを周りに配置し、内部に通水を行い水でＲＦを吸収させる工夫を行っている。図 21 にＤＣブレークに流したフロン系冷媒の温度上昇とテフロンチューブ中の水の温度上昇の時間変化を示す。これらの２つの温度上昇を積分したものがＤＣブレークへ流入する熱量となるが、およそ出力の 10%にもなり非常に大きな熱量がＤＣブレークに来ていることが測定の結果明らかとなった。またフロン系冷媒の温度がショット後にもなかなか小さくならないことから、ＤＣブレークが加熱され、徐々にフロン系冷媒に熱伝達していると推測した。

ＤＣブレークから漏れるＲＦの周波数を測定したところ、空胴で発振した主モードとおなじ 170GHz であったことから、この漏れＲＦは空胴での発振モード TE31,8 を、内部の放射器及び 7 枚のミラーにおいて出力モードである直線偏波のガウス型ビームに変換する過程で生じる回折損失に起因する散乱ＲＦである。

長パルス実験において、DC ブレークにおけるテフロンチューブに流した水に吸収されたパワー、DC ブレークのセラミックスを冷却しているフロン系冷媒に受かったパワー、散乱 RF を外へ逃がすために設置したサファイアの二重窓から逃げた散乱 RF パワーの測定を行った結果を図 22 に示す。テフロンチューブに流した水に吸収されたパワーからは約 5%、DC ブレークのセラミックスを冷却しているフロン系冷媒に受かったパワーからは約 5%、散乱 RF を外へ逃がすために設置したサファイア窓から逃げた散乱 RF パワーは約 3%であった。したがって、合計でジャイロトロン出力の約 13%は散乱 RF としてジャイロトロン内に存在することとなる。

４．２　散乱 RF の発生原因

長パルスジャイロトロンでは、空胴共振器での発振モード TE31,8 を、ジャイロトロン内部に取り付けた放射器及び 7 枚のミラーによって構成された高周波回路により、直線偏波のガウス型ビームに変換し出力窓から取り出している。図 23 にジャイロトロン内部の高周波回路の模式図を示す。空胴で発振した高次体積モードの TE31,8 は円形のテーパー導波管と直線導波管を介し放射器に導かれる。放射器は単らせん型モード変換器であり、主に周方向だけにミリ波を収束させる特徴がある。ロシアが提案している軸方向にも収束させる二重らせん型モード変換器[9]に比べ、変換効率は若干落ちるものの、熱負荷が小さく、形状が簡単で加工精度を上げることができ、全長を短く制限された場合はミリ波分布のゆがみが少ないという長所を持つ。放射器内部表面は数 10μm 程度の高さの周期的なひずみが付けられており、TE31,8 モードが回転しながら放射器内部を通過するとき、そのひずみにより周方向に徐々に収束させながら放射器先端から放射される。放射された RF は拡がっているので、第 1 ミラーの放物面鏡で放射 RF の光軸を平行に整形する。第 2、第 5 ミラーは位相補正鏡であり、その間に 2 枚の平面鏡を置くことで位相補正鏡間の距離を確保している。さらに出力窓に導くための放物面鏡である第 7 ミラーまでの間に平面鏡をおいて距離を確保している。原理的には直線偏波のガウス型ビームに変換するためには 2 つのミラーで足りるが、超伝導マグネットの長さ、ボアの大きさにより制限され、ミラー間の距離を確保するため平面鏡で反射させるように配置を工夫し、制約を受けた条件の中でミラーの大きさを最大化し、ＲＦの回折損失を最小化している。図 24 に放射器から放射されたビームの距離とミラーの反射に対する回折損失の累積を示す。出力窓から取り出されるのは、計算上は空胴において発振したパワーの 93.8%であり、空胴出力の 6.2%は回折損失となる。特に整形量が最も大きい最初の 3 回の反射による回折損失が全体の回折損失の約 8 割を占めている。

このように発生した回折ＲＦは、出力窓からビームとして取り出されることはなく、管内のいたる場所で多重反射され散乱 RF となり、一部は管内の金属面においてジュール損失となるが、大部分はセラミックスなどの絶縁体に吸収されるか、絶縁体を透過し外へ漏れることとなる。理論的な回折損失をこれ以上に減らすには本質的には、反射回数を減らす、ミラーを大型にする、放射器におけるビームの収束を高める等の放射器及び高周波回路系の改良が必要である。

測定された散乱 RF が計算上の値より大きい原因としては、理論計算から得られ

る設計モードの回折損失以外の損失が存在することが考えられる。具体的には空胴共振器の下流側の寄生発振あるいはモード変換によって、主モードとは別に、比較的パワーの強いサイドロブが形成され、一部はベローズや DC ブレークに直接入っていることも考えられる。測定された散乱 RF が大きいことの原因を特定し、できる限り回折損失を抑える工夫を行うことも必要である。

さらに、散乱 RF はジャイロトロン内部の高周波回路における回折損失に起因するので、発振モードが同じであれば、出力に対しある一定の割合になるはずである。しかしながら、発振モードが変わる、寄生発振が生じるなどの正常の動作領域を外れた場合は、散乱 RF の割合は変化する。既に図 6 で散乱 RF（DC ブレークにおけるテフロンチューブに流した水に吸収されたパワー）の空胴磁場強度依存性を示した。空胴共振器で主モードが発振している間は、散乱 RF の大きさは出力と対応するが、主モードが発振しなかった動作領域では、散乱 RF が大きくなる。これは主モードの発振に合わせるように高周波回路が設計されているため、主モード以外のモードでは回折損失が大きくなるためである。散乱 RF を抑制するためには、目的のモードを発振させることが必要である。

４．３　散乱 RF を逃がす工夫とＤＣブレークの構造

散乱 RF を最も多く受け止めるのは、ジャイロトロンのコレクターとボディ間に挿入された直径約 30cm、高さ 12cm のセラミックス、すなわちＤＣブレークである。このＤＣブレークの役割は、電子ビームのエネルギーを回収するためビーム加速電圧が印加されるボディ部とリターン電位（接地電位）である電子ビームを回収するコレクター部の間に最大 50kV の電位を印加できるように絶縁を確保することである。長パルス実験においては、ＤＣブレークの過熱とそこから外部空間に放出されるＲＦが問題となった。DC ブレークでは絶縁性のナイロン系樹脂（MC ナイロン）によりＤＣブレークを囲うように密閉し、その間を高い絶縁性を有するフロン系冷媒（FX-3300、3M）を流すことでセラミックス表面を冷却している。さらにフロン系冷媒の中にＤＣブレークが隠れるようにテフロンチューブを積み重ね、内部を通水することで水にＲＦを吸収させ、ジャイロトロン管外で散乱 RF を処理するようにした。フロン系冷媒の温度上昇とテフロンチューブに通水した水の温度上昇を測定することで、ＤＣブレークで受け止めた散乱 RF パワーを評価することができる。

図 25 に従来の DC ブレークの構造と改良した DC ブレークの構造の模式図を示す。従来は通水を行うテフロンチューブをナイロン系の絶縁材料を巻き枠として使用し、その外側にテフロンチューブを巻いていたが、巻き枠を使用することを止め、テフロンのサポートを使用することにした。さらにテフロンチューブを 2 層にし透過 RF の吸収性を高めた。

ＤＣブレークセラミックスの材料は、以前はアルミナを使用していたが、長パルスに対応させるため、現在ではアルミナよりも誘電損失が小さく強度に優れた窒化珪素を使用している。

さらに、ダイヤモンド出力窓が開発される以前はジャイロトロンの出力窓として使用されていた、直径 140mm の大口径サファイアの二重窓あるいは窒化珪素の二重窓を、ジャイロトロンの可動調整用ミラー（第 7 ミラー）の近傍に設置することで、散乱 RF をジャイロトロン外へ積極的に逃がす工夫を行っている。これら散乱 RF を処理するために使用されている材料の物性値を表 6 にまとめた。

４．４　散乱 RF の処理の効果

DC ブレーク中のテフロンチューブに流れる水による RF 吸収を高め、ナイロン系樹脂に直接 RF が入らないようにしたためナイロン系樹脂に過度な RF が吸収されることはなくなり溶ける現象は抑制された。

また、DC ブレークをアルミナから窒化珪素に変更したことで、DC ブレークの温度上昇を緩和することができた。図 26 にフロン系冷媒による冷却がない場合に赤外線カメラを用いて測定した 110GHz ジャイロトロンにおけるアルミナ DC ブレークの表面の温度上昇（A)、170GHz ジャイロトロンにおける窒化珪素 DC ブレークの表面の温度上昇（B）を示す。(A) は出力約 1MW、(B) は出力約 0.8MW である。測定したポイントはセラミックスの温度上昇が最も大きいホットスポットの部分であり、(A) については最終ミラーの下付近、(B) については出力窓の下付近であった（可動調整用ミラーの下付近も同様に強いホットスポットがあった)。ホットスポット以外の部分では温度上昇はホットスポットの約 1/2 であった。(A)、(B) のデータは周波数、出力パワーが異なるが、(B)の窒化珪素の温度上昇を誘電損失の周波数依存性（図 27）を考慮し[10]、110GHz が入射した場合の温度上昇に換算（110GHz では 170GHz の場合に比べ約 85%の温度上昇となる）し、出力を 1MW に規格化し比較した場合、アルミナの方が温度上昇幅が約 2 倍大きい。ホットスポットのように局所的な温度上昇が存在するとサーマルランナウェイ現象（誘電損失の温度依存性により、温度上昇が大きくなるとる損失が

急激に増加する現象）が生じ、セラミックの破壊に至ると考えられる。170GHz ジャイロトロンにおいて窒化珪素 DC ブレークにする前はアルミナを使用していたが、このときのジャイロトロン（ITER-J3M5）の試験において、900kW-9 秒のショット後に DC ブレークが破損したことを考えると、アルミナの DC ブレークには約 1MJ のエネルギー容量しかないと言える。一方で窒化珪素の DC ブレークは 750kW の出力で１７秒の動作を達成し、その制限要因は DC ブレークの温度上昇ではないことから、DC ブレークへのエネルギー流入は 1.6MJ 以上となり、アルミナに比べ窒化珪素は少なくとも 1.5 倍は容量が大きいと考えられる。

回折損失による散乱 RF はモード変換器を内蔵している以上は避けられないものである。エネルギー回収電圧を印加するために挿入された大型のＤＣブレークは、散乱 RF を処理する目的でも使用することができる。ジャイロトロン出力の 10%以上が散乱 RF となっている状況下では、散乱 RF を速やかにジャイロトロン管外へ逃がし、ジャイロトロン内部に閉じこめないことが重要であると考えられる。

大型のＤＣブレークには散乱 RF によるジャイロトロン内部全体のセラミックスの発熱密度を下げる効果がある。もしＤＣブレークがなければ、散乱 RF はその他のセラミックスの部分に集中して吸収されることになる。特に電子銃部のセラミックスやビームトンネルでの寄生発振を抑制するために取り付けた炭化珪素材が過度のパワーを吸収すると破損する可能性がある。ビームトンネルに大型の炭化珪素ブロックを入れることができたのも、大型のＤＣブレークが散乱 RF パワーの大部分を管外へ逃がし処理するためであるとも言える。ＤＣブレークの内面の全周方向に金属のシールド板を取り付けた場合は、金属シールド板を取り付けない場合に比べビームトンネルの炭化珪素部ブロックでの吸収パワーが約 2 倍に増加した現象も観測されている。

また、空胴共振器や電子銃、ビームトンネルなどに戻る RF を、できるだけ少なくすることも重要なことと考えられる。空胴共振器での発振効率を高めるためには電子ビームのクオリティを高く維持することが不可欠であり、そのためには空胴共振器で相互作用前に電子ビームが電磁波と相互作用することを避けなければならないと定性的には考えられる。空胴共振器においても反射パワーによる影響で発振効率が劣化するというシミュレーション結果[11]も報告されている。散乱 RF が発振に与える定量的な影響については、慎重に検討されるべきであるが、散乱 RF を空胴共振器の下流側で処理することは重要なことであると考えられる。

5. ジャイロトロンの高性能化と課題

5.1 達成された性能

ビームトンネルでの寄生発振を抑制し、DCブレークの冷却の強化を行った結果、170GHz ジャイロトロンでは、最大発振効率 32%、エネルギー回収を行った場合の最大総合効率は 57%を達成した。また大電力・長パルス動作では、900kW-9.2 秒の動作を行い、ITER/EDA におけるジャイロトロンの開発目標であった 1MW-10 秒-50%をほぼ達成することができた。さらに、DCブレークの材質をアルミナから窒化珪素に変え、パワーを下げた動作では、750kW-17 秒、500kW-30 秒、450kW-47 秒、300kW-60 秒、200kW-133 秒を達成した。一方、110GHz ジャイロトロンでは、出力 1.2MW で 4 秒までの動作を達成し、実際に JT-60 のプラズマ実験に 4 本の 110GHz ジャイロトロンが同時に適用され、4 秒までの安定な動作を確実なものとした。

5.2 ジャイロトロン内部の局所的異常加熱

ジャイロトロンの長パルス実験の結果、空胴やコレクター出力窓等主要コンポーネントの温度は平衡に達しているが、温度平衡に達していない部分があることが明らかとなった。特に問題となるのは、(1)散乱 RF によって加熱される DC ブレークのセラミックスと(2)RF ビームを出力窓に導くためのジャイロトロン最終ミラーの可動調整のために設けられた溶接ベローズである。

(1) DC ブレークの温度上昇

2000 年までに製作されたジャイロトロン（ITER-J3M5 まで）では、DC ブレークの材質としてアルミナが使用されていた。ところが、出力 900kW、パルス幅 9.2 秒において出力窓とは反対側の場所でクラックを生じ、真空リークが発生した。そこでアルミナよりも誘電損失、耐熱衝撃性に優れている窒化珪素を DC ブレークに適用した。アルミナから窒化珪素へ変更したことでエネルギー容量の増加の効果はあったものの、DC ブレークの温度上昇を十分緩和するまでには至っていない。

図 28 に DC ブレークを冷却しているフロン系冷媒の温度上昇を示す。ジャイロトロンの出力は 180kW で、120 秒間の発振を行っているが、フロン系冷媒の温度は飽和することはなく、温度が下がるには非常に長い時定数を持つことがわかった。すなわち、これまで DC ブレークとして使用していたアルミナから窒化珪素に変更しても、散

乱 RF による発熱が大きく、DC ブレークの熱伝導率及びフロン系冷媒への熱伝達係数が小さいため実験範囲内では DC ブレークの温度が平衡に達していない。図 28 よりフロン系冷媒の温度時定数 τ は約 50 秒と評価できる。熱の移動を考慮した窒化珪素材の温度の微分方程式は下記のようになる。

$$\rho c \frac{dT}{dt} = q - \frac{h}{d}(T - T_\infty) \tag{10}$$

ここで ρ は密度、 c は比熱を表す。q は単位体積あたりの発熱量、h は熱伝達係数、d は DC ブレークの厚み、T_∞ は冷媒の温度である。温度上昇を T として t=0 の時 T=0 の境界条件で上記方程式を解き、フロン系冷媒の温度時定数は窒化珪素の DC ブレークの温度時定数と等しいと仮定すれば、窒化珪素材の平均温度上昇は、

$$T = \frac{\tau}{\rho c}(q + hT_\infty) \times (1 - e^{-t/\tau}) \tag{11}$$

となる。フロン系冷媒に奪われた熱は DC ブレークの発熱と等しいと仮定すると、出力 180kW のとき約 5%の 9kW が DC ブレーク全体の発熱になり、パルス幅 120 秒の間に窒化珪素材の温度は平均して約 130℃上昇することになる。もし平均して温度が上昇しているのではなく、局所的に温度上昇の偏りがあるならば、その熱応力により窒化珪素が破壊される恐れがある。長パルスジャイロトロン（ITER-J4）では冷却しない場合の DC ブレークの温度上昇を、2 次元的に赤外線カメラで測定した。その結果、RF ビームを出力窓に導くためのジャイロトロン可動調整用ミラー側の DC ブレーク上部は他の部分よりも約 2 倍温度上昇が大きいことが確認された。この部分はアルミナの DC ブレークが破損したときのクラックが成長した起点の位置にほぼ一致している。アルミナの DC ブレークにクラックが入ったのは DC ブレークの局所的温度上昇が原因ではないかと考えられる。この局所的な温度上昇については、散乱 RF の中でも RF が集中している部分と考え、局所的に金属シールド板を設置し、局所的な温度上昇を抑制する工夫を行った。局所的な金属シールド板の効果については現在実験を進めているところである。

（2）溶接ベローズの加熱

図 29 に RF ビームを出力窓に導くためのジャイロトロン最終ミラーの可動調整の

ために設けられた溶接ベローズの場所と構造を示す。この部分はミラーの背面にあたり RF の回り込みも比較的小さいと考え、積極的な冷却をせず周りの構造材への熱伝導により冷却されることを期待した。ところが、この部分に熱電対を挿入しラフに温度上昇を見たところ、局所的には数 100℃まで加熱される可能性があることが確認された。温度測定の結果を図 30 に示す。ジャイロトロンの出力は約 800kW である。図 31 に示すようにベローズの冷却の温度時定数が約 3 分で非常に長く、冷却が十分ではないのでショット中にはほとんど冷却できない。このスケーリングで温度が上昇すれば、約 14 秒でこのジャイロトロンのベーキング温度である 450℃まで達することとなり、アウトガスを放出する可能性がある。

現在ジャイロトロンのパルス幅は、突然上昇するジャイロトロン内部の真空度により制限されており、ジャイロトロン出力とパルス幅の実績は図 32 のようになっている。それぞれの出力とパルス幅でガスの突然の放出により動作が制限されている。このスケーリングを内挿すると、出力が 800kW の場合は約 15 秒でガスの放出がある計算となり、ベローズの温度上昇と矛盾しない結果となっている。図 33 に出力 180kW の時の管内真空度の時間変化の一例を示す。パルス幅 120 秒のうち、始めの 100 秒間は管内真空度が良好であるが、100 秒を過ぎたあたりから急激に真空度が上昇し設定したインターロックレベルまで達してしまう。この急激なガス放出のタイミングは、ミラー背面の溶接ベローズの温度上昇が 450℃以上になると予測される時間と考えられ、パルス幅を制限しているアウトガスの源は、このベロースであると判断できる。この問題点に対しては、ベローズの構造を変え RF による加熱を防止する構造にするとともに、冷却できる構造への設計変更を現在進めているところである。

溶接ベローズの温度が上昇する場所は、ミラーの背面にあり RF ビームを直接見ているわけではない。しかもベローズの周方向で温度上昇に分布があることから、完全な散乱による RF ではなく、ある程度まとまったパワーが放射器の方向から飛んできていると考えることもできる。ベローズの温度上昇を引き起こす RF がどこから来るのかを明らかにすることが、散乱 RF を軽減する方策への手がかりになるのではないかと考えられる。

5.3 長パルス化に向けた対応策

以上述べたように、長パルス化を制限している原因は散乱 RF によるジャイロトロン内部の局所的加熱、特に可動調整ミラーの背面にある溶接ベローズからのアウトガス放出である。これに対しては、ベローズの構造の変更と冷却の強化を行うことで加

熱を防止できると考えている。またDCブレークの温度が平衡に達していないことから、DC ブレークの局所的な温度上昇に起因した過大な熱応力の発生によるセラミックスの破壊の危険性も長パルス動作時にはある。この DC ブレークの局所的加熱に対しては局所的にRF を反射させる金属シールドの設置により対策を検討中である。

散乱 RF の抑制を行うことは、ジャイロトロンの長パルス化だけでなく、ジャイロトロンからの出力や効率を高めることにも寄与し、今後の重要な課題の 1 つであると考えられる。

6. まとめ

本論文では、ジャイロトロン内に発生する不要ＲＦと、それを抑制する対策と実験結果を中心にまとめた。ジャイロトロンの効率の低下を引き起こしていたビームトンネルにおける寄生発振は、ビームトンネルの表面に炭化珪素材を適用することで完全に抑制された。その結果ジャイロトロンの空胴共振器における主モードの発振効率を従来の約 20%から 30%以上に改善できた。またビームトンネルでの寄生発振はビームトンネルの一部で実効的な空胴を形成したために生じた電子サイクロトロン共鳴によるものであると推察し、炭化珪素材の非常に大きな表面抵抗によって、その空胴のＱ値を大幅に下げ、寄生発振の抑制を実現した。

空胴共振器の下流側放射器入口の寄生発振については、空胴共振器での発振効率を高めることで軽減できることが明らかとなった。発振効率の向上にはビームトンネルでの寄生発振を抑制したことが大きく寄与しているが、ジャイロトロンの動作においても常に最適なパラメータの下（例えば空胴磁場強度の最適化など）で運転することが発振効率の向上には不可欠である。

ジャイロトロン内部の高周波回路の回折損失に起因する散乱 RF はジャイロトロン出力の 10%以上あり、DC ブレークの過熱が問題となったが、材質の変更と冷却の強化により長パルス動作が可能となった。

ビームトンネルでの寄生発振の抑制と下流側寄生発振の軽減を行い、散乱 RF をジャイロトロン外部に速やかに逃がし外で処理を行った結果、長パルス動作として 900kW-9 秒、500kW-30 秒等の大電力長パルス動作を達成することができた。

現在、ジャイロトロンの長パルス動作を制限している要因の１つは、ジャイロトロン内部の散乱 RF に起因すると見られる局所的な加熱が引き起こすアウトガスであり、さらに一層の長パルス化のためには、冷却の強化とともに散乱 RF を減少させることが重要な課題である。

謝辞

実験を進めるにあたり、技術的支援及びジャイロトロンの運転の支援していただきました加熱工学研究室の池田幸治氏、大内仁志氏、並びに核融合装置試験部ＲＦ装置試験室の室員の皆様に感謝いたします。本研究を進めるにあたり、ご支援いただきました関昌弘核融合工学部長、関省吾核融合工学部研究主幹、高津英幸核融合工学部次長、辻博史核融合工学部次長に感謝申し上げます。

参考文献

[1] M. Makowski, ECRF systems for ITER, IEEE Trans. Plasma Sci., vol.24, (1996) 1023.

[2] K. Sakamoto, et al., High power 170GHz gyrotron with synthetic diamond window, *Rew. Sci. Instrum.* **70**, (1999) 208-211.

[3] A. Kasugai, et al., Chemical vapor deposition diamond window for high-power and long pulse millimeter wave transmission, *Rew. Sci. Instrum.* **69**, (1998) 2160-2165.

[4] A.Kasugai, et al., 1MW and long pulse operation of Gaussian beam output gyrotron with CVD diamond window for fusion devices, Fusion Eng. design, **53**.(2001)399-406.

[5] H.Shoyama, et al., High-Efficiency Oscillation of 170GHz High-Power Gyrotron at TE31,8 Mode Using Depressed Collector, Jpn. J. Appl. Phys., **40**.(2001)906-908.

[6] K.Kajiwara, et. al., High power operation of 110GHz Gyrotron at 1.2MW on the JT-60 ECRF system, Fusion Eng. design, (to be published).

[7] M.Pedrozzi, et. al., Electron beam instabilities in gyrotron beam tunnels, Phys. Plasmas, **5**, (1998)2421-2430.

[8] W.Lawson, et. al., Design of a 10-MW, 91.4-GHz Frequency-Doubling Gyroklystron for Advanced Accelerator Applications, IEEE Trans. Plasma Sci., **29**,(2001) 545-558.

[9] G.G.Denisov, et. al., 110GHz gyrotron with a built-in high-efficiency converter, Int. J. Electronics, **72**.(1992)1079-1091.

[10] T.Shimozuma, et. al., A forced gas-cooled single-disk window using silicon nitride composite for high power cw millimeter waves, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, **18**.(1997)1479-1493.

[11] A.Grudiev, et. al., Time-domain analysis of reflections influence on gyrotron operation, Phys. Plasmas, **8**.(2001)2963-2973.

表1：新型170GHzジャイロトロンの主な改良点

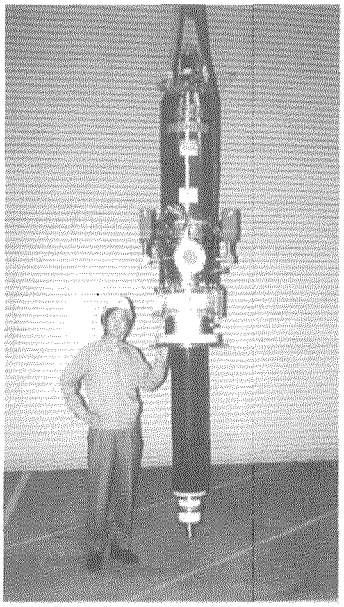
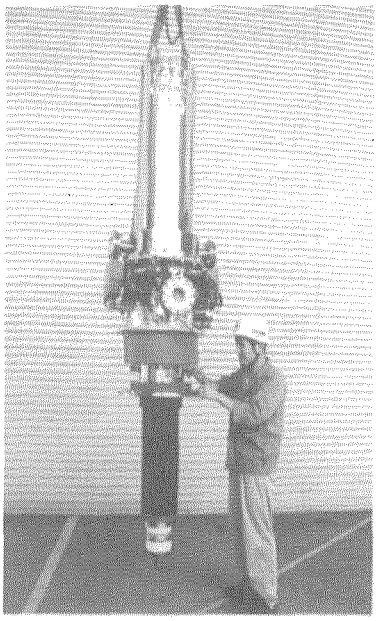
	0.5MW-8sジャイロトロン	新型170GHzジャイロトロン
型式	ITER J2MD	ITER J3
(1)出力窓		
直径	φ96mm	φ100mm
冷却幅	2mm	4mm
厚み	2.23mm	1.85mm
tanδ	1.3×10^{-4}	2×10^{-5}
出力分布	フラット分布	ガウス分布
(2)ビームトンネル エミッションベルトと空胴中心の距離	650mm	400mm
(3)冷却の強化 コレクタ流量	400リットル/分	1000リットル/分
(4)排気の強化 イオンポンプ	8リットル/秒 x 3	8リットル/秒 x 4 20リットル/秒 x 1
(5)外観		

表2：ビームトンネルにおける寄生発振の周波数及び対応する磁場強度と発振場所

ジャイロトロンの型式	主モードの周波数 (GHz)	寄生発振周波数 (GHz)	対応する磁場強度 (T)	発振場所の空胴からの距離 (mm)
ITER J3M1	170	113-145	4.69-6.02	100-167
ITER J3M3	170	140-145	5.81-6.02	100-115
J3-1	170	113-145	4.69-6.02	100-167
JT-D2	110	～90	～3.73	～115

表3：炭化珪素材の特性

密度		(g/cm^3)	3.15
曲げ強さ	室温	(MPa)	450
	1200℃	(MPa)	450
硬度			2500
熱膨張率		($x10^{-6}℃^{-1}$)	4.5
熱伝導率（レーザーフラッシュ法）		(W/mK)	100
耐熱衝撃性		(℃)	450
電気比抵抗		(Ωcm)	10^2

表4：ビームトンネルに炭化珪素材及び銅を用いたジャイロトロンの発熱の比較

	炭化珪素のビームトンネル	銅のビームトンネル
電子銃への漏れRFの周波数	検出されず	113～145GHz
ビームトンネルでの発熱	1.2kW(at P_{rf}=450kW) 1.6kW(at Prf=520kW)	検出されず
電子銃への漏れRFパワー テフロンチューブ水 絶縁油温度上昇	< 200W(at P_{rf}=900kW) 未測定	24kW(at P_{rf}=400kW) < 70kW(at P_{rf}=350kW)
電子銃部及びビームトンネルでの発熱の割合 $\left(\frac{\text{電子銃への漏れRFパワー}}{\text{ジャイロトロン出力}}\right)$	～0.3% [散乱RFによるもの]	6～20% [寄生発振によるもの]
寄生発振パワーの効率 $\left(\frac{\text{寄生発振Fパワー}}{\text{ビーム電圧Xビーム電流}}\right)$	――	0.7～2.6%

P_{rf}：ジャイロトロン出力

表5：発振の最適化による放射器温度上昇の抑制

項目	(単位)	発振を最適磁場に合わせた場合	発振を最適磁場から高くした場合
ビーム電圧	(kV)	75	75
ビーム電流	(A)	48	48
空胴磁場強度	(T)	6.66	6.69
出力	(kW)	820	665
効率	(%)	22.8	18.5
パルス幅	(秒)	1	1
放射器入口温度上昇	(℃)	57.5	75-80
放射器出口温度上昇	(℃)	29	63-80

表6：散乱RFを処理するために使用した材料の物性値

		窒化珪素	サファイア	アルミナ	MCナイロン	フロン系冷媒
				A-473		FX-3300
		コンポジット材	単結晶	多孔質	モノマーキャストナイロン	フロリナート
密度	g/cm^3	3.4	3.97	3.6	1.16	1.77
ヤング率	Gpa	318	470	270		
ポアソン比		0.28	0.3	0.23		
線膨張率	$x10^{-6}/K$	2.4	5.3(//C-Axis) 4.5(_I_C-Axis)	6.9 (40-400℃) 7.7(40-800℃)	90	
熱伝導率	W/mK	59	42	17		0.67
比熱	J/gK	0.63	0.75	0.79		1.09
誘電率		7.9	9.4	9.5	3.7(106Hz)	1.8
誘電損失	$x10^{-4}$	2.4(140GHz)	1.9(140GHz)	8(1MHz)	200(106Hz)	<1(1kHz)
原研で測定した誘電損失	$x10^{-4}$	1.6-2.3(170GHz)	2.6(170GHz)		20以上(170GHz)	
絶縁耐圧	kV/m	18500	48000	10000	20000	20000
曲げ強度	MPa	800	500	3200		
圧縮強度	MPa	5000-6000	2950	23500		
耐熱衝撃性		750℃以上				
最高使用温度	℃		2000	1600	120	102
沸点	℃					102
流動点	℃					-43
臨界温度	℃					229
屈折率						1.271
蒸気圧	torr					28

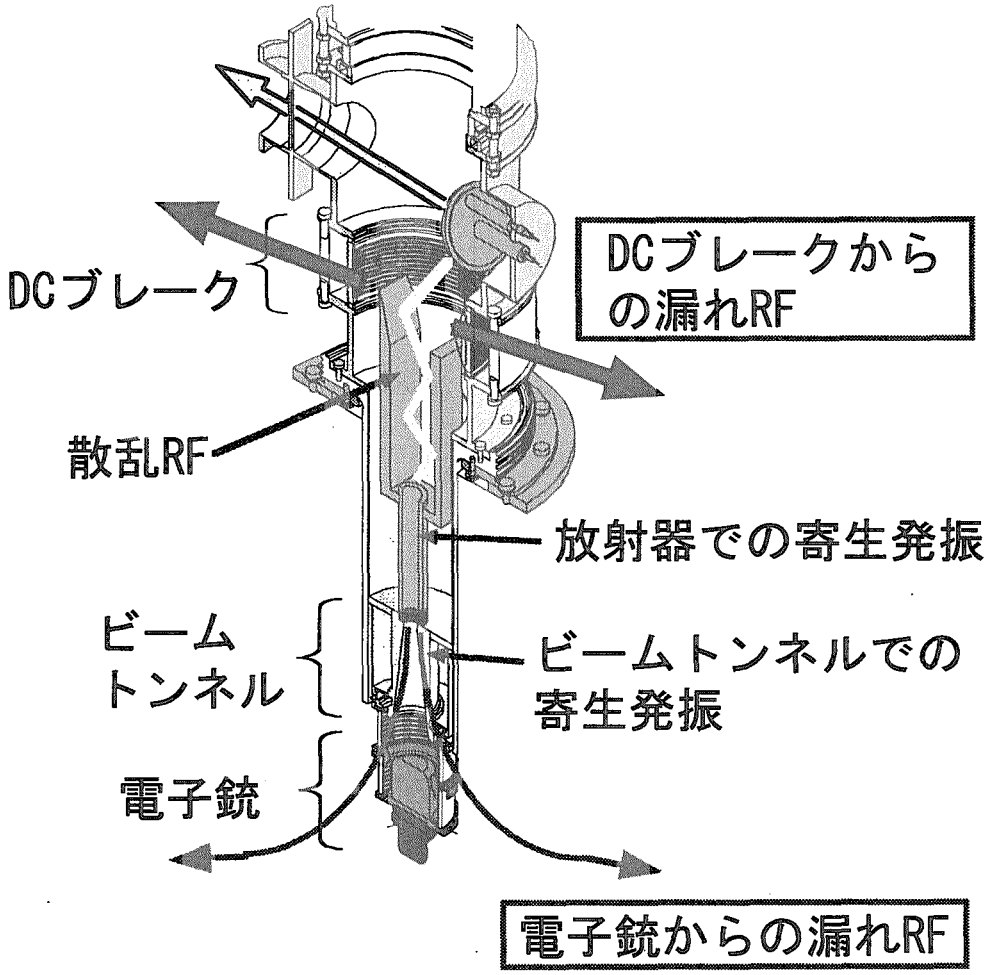


図1：ジャイロトロン内部からの漏れRFの模式図

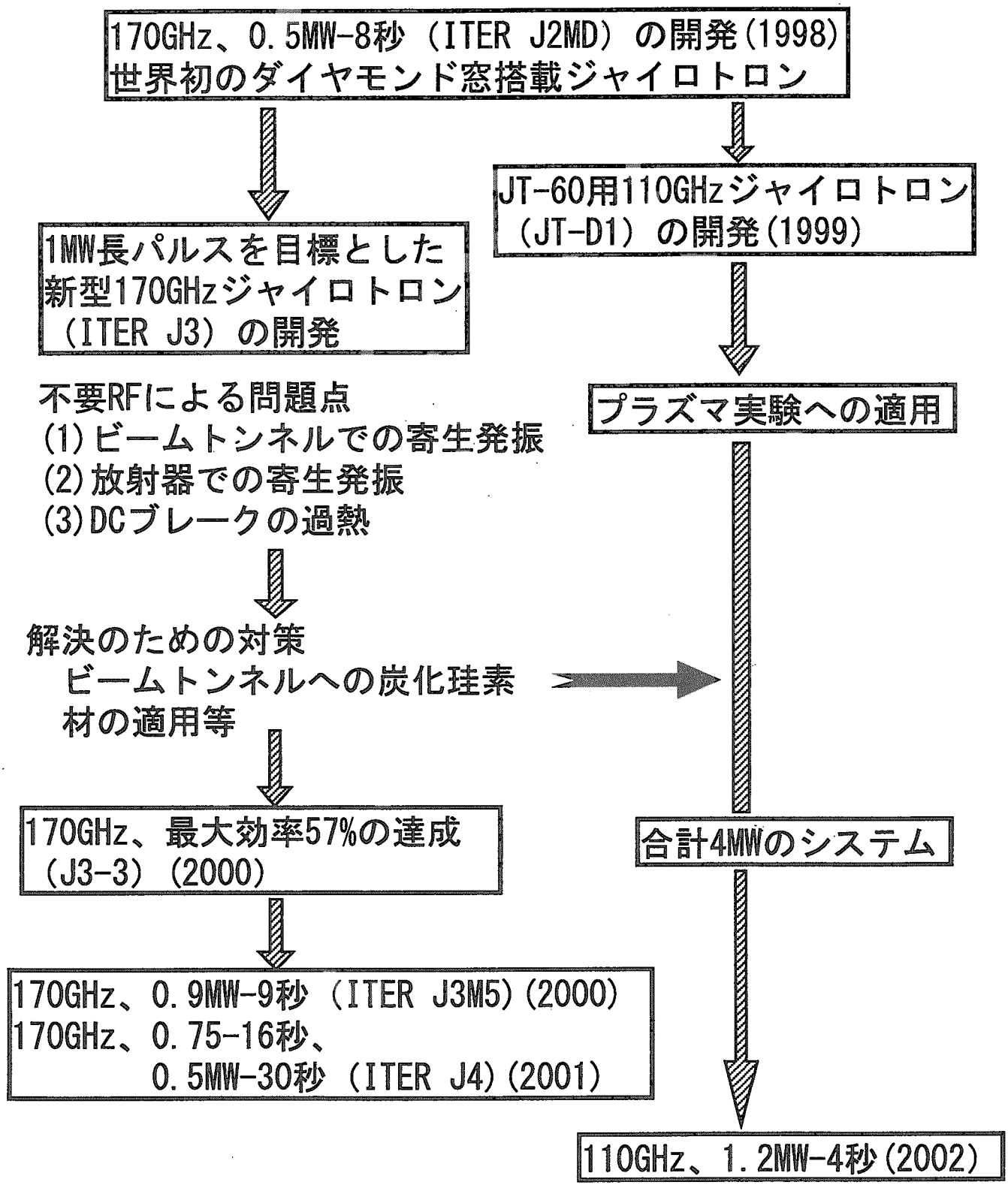
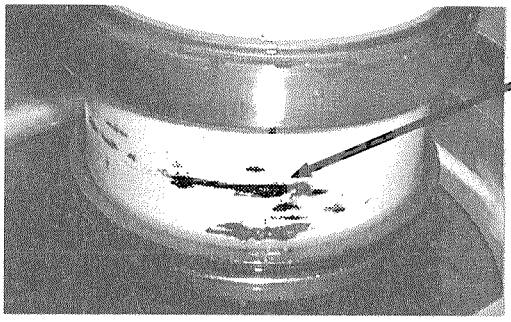

170GHz、0.5MW-8秒（ITER J2MD）の開発(1998)
世界初のダイヤモンド窓搭載ジャイロトロン
JT-60用110GHzジャイロトロン
（JT-D1）の開発(1999)
1MW長パルスを目標とした
新型170GHzジャイロトロン
（ITER J3）の開発
プラズマ実験への適用
不要RFによる問題点
(1)ビームトンネルでの寄生発振
(2)放射器での寄生発振
(3)DCブレークの過熱
解決のための対策
ビームトンネルへの炭化珪素
材の適用等
170GHz、最大効率57%の達成
（J3-3）(2000)
合計4MWのシステム
170GHz、0.9MW-9秒（ITER J3M5)(2000)
170GHz、0.75-16秒、
0.5MW-30秒（ITER J4)(2001)
110GHz、1.2MW-4秒(2002)

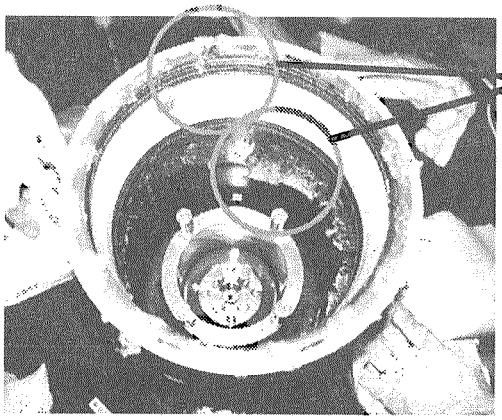
図2：開発の流れ

(a)



セラミックス表面
が削られた痕

(b)



MCナイロンが
溶けた痕

図3：漏れRFによる電子銃部のダメージ
(a)セラミックスのダメージ
(b)ソケットのダメージ

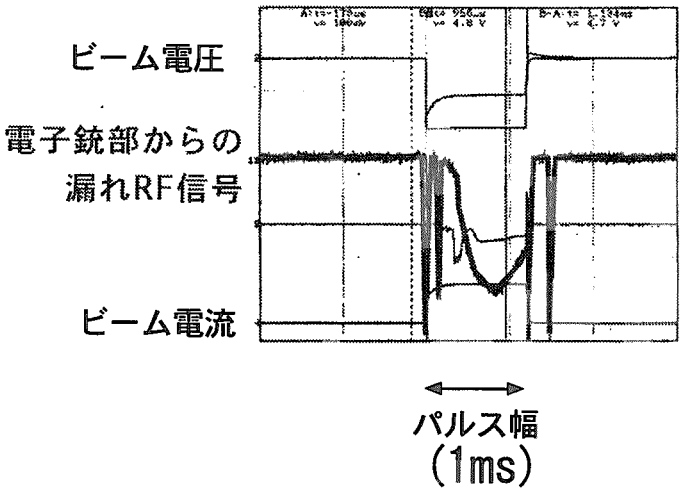


図4:電子銃からの漏れRF
ダイオード検波器によって検出された信号

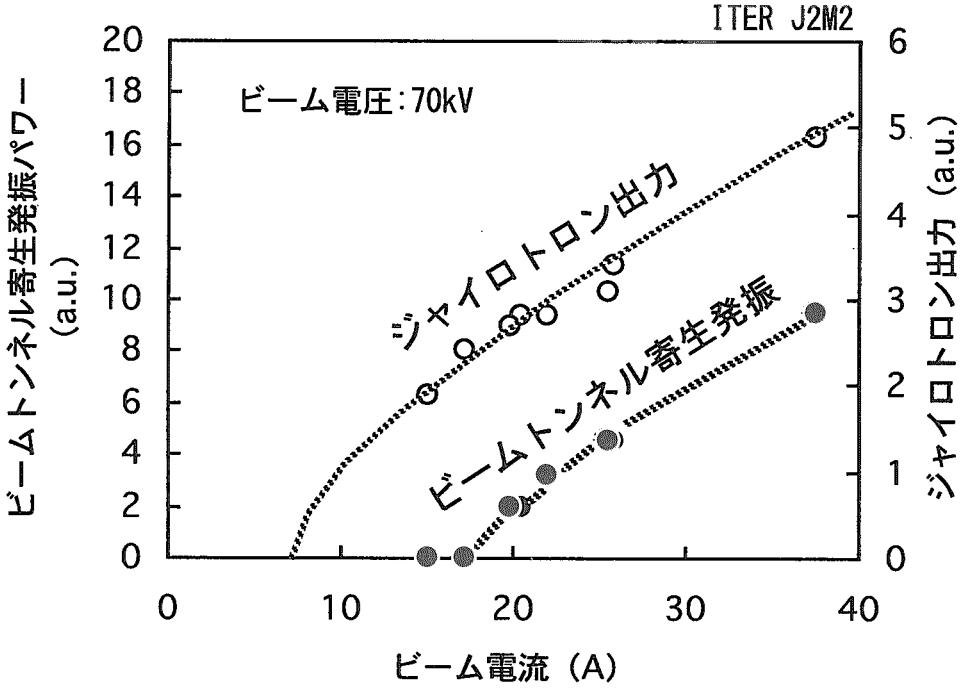


図5:ビームトンネルでの寄生発振パワーと
ジャイロトロンの出力のビーム電流依存性

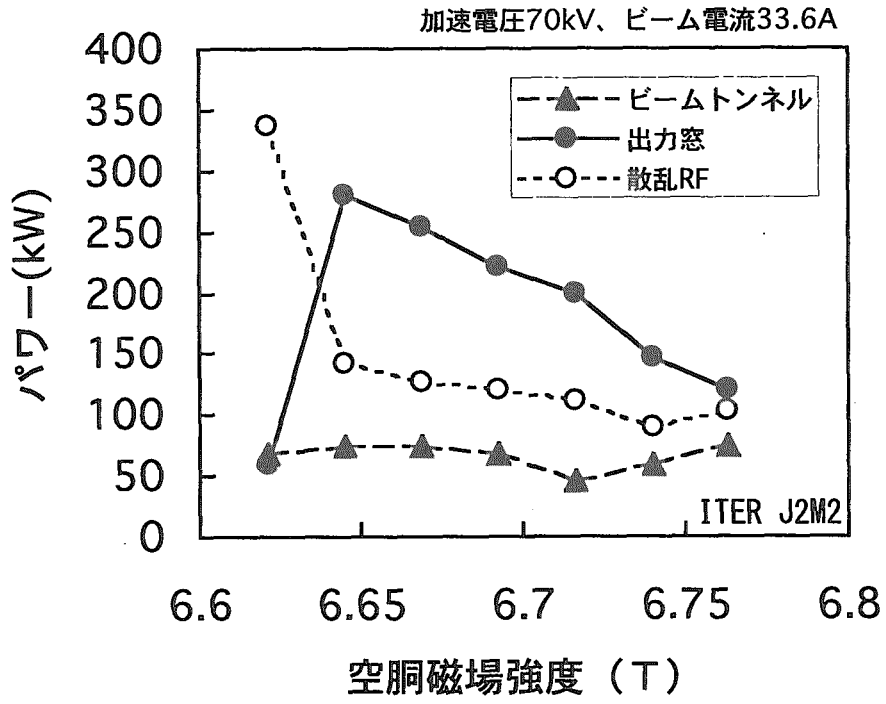


図6：寄生発振パワーとジャイロトロン出力、散乱RFパワーの空胴磁場強度依存性

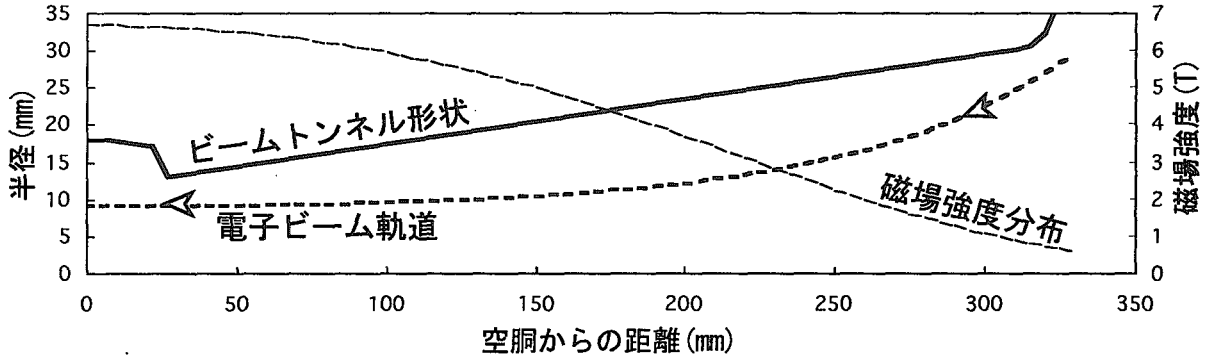


図7：ビームトンネルの形状と電子ビーム軌道及び磁場強度分布

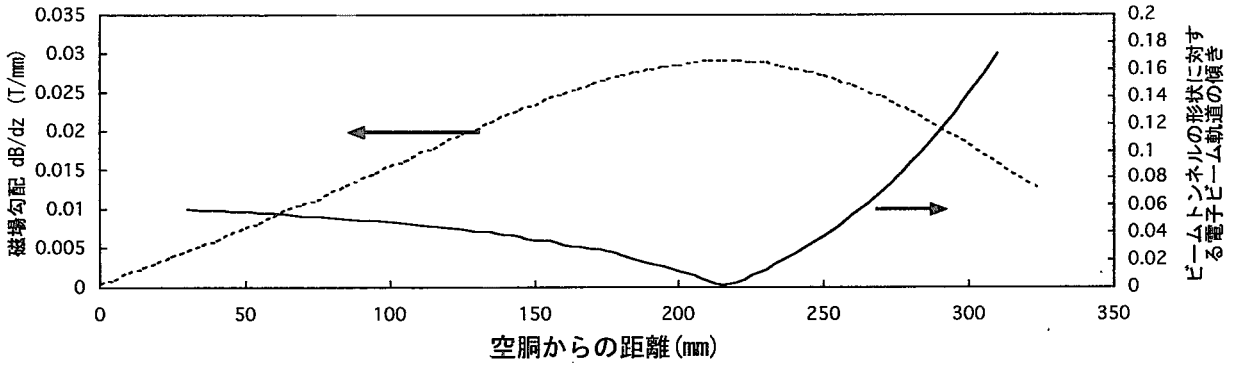


図8：ビームトンネルにおける磁場勾配と
ビームトンネル形状と電子ビーム軌道の平行度

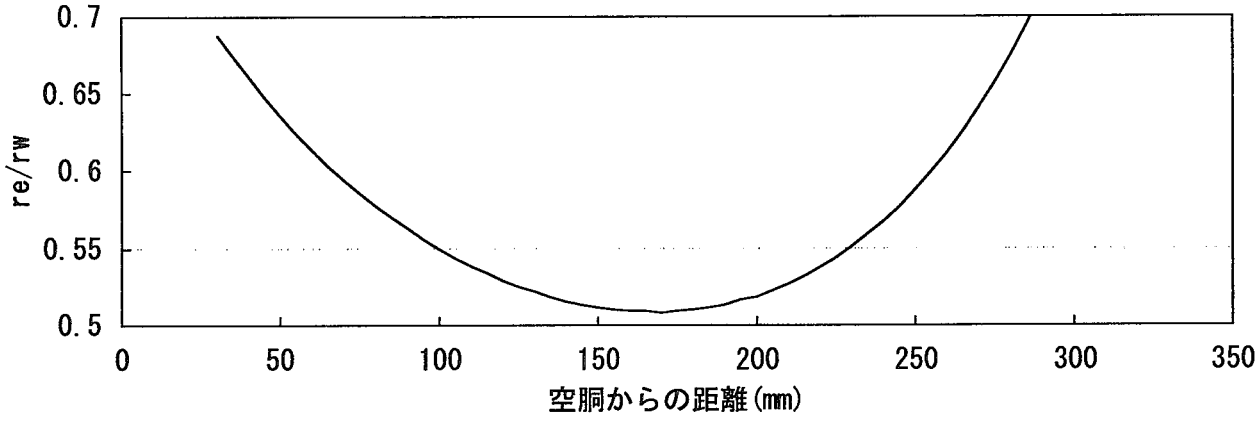


図9：電子ビーム径（r_e）とビームトンネル内径（r_w）の比

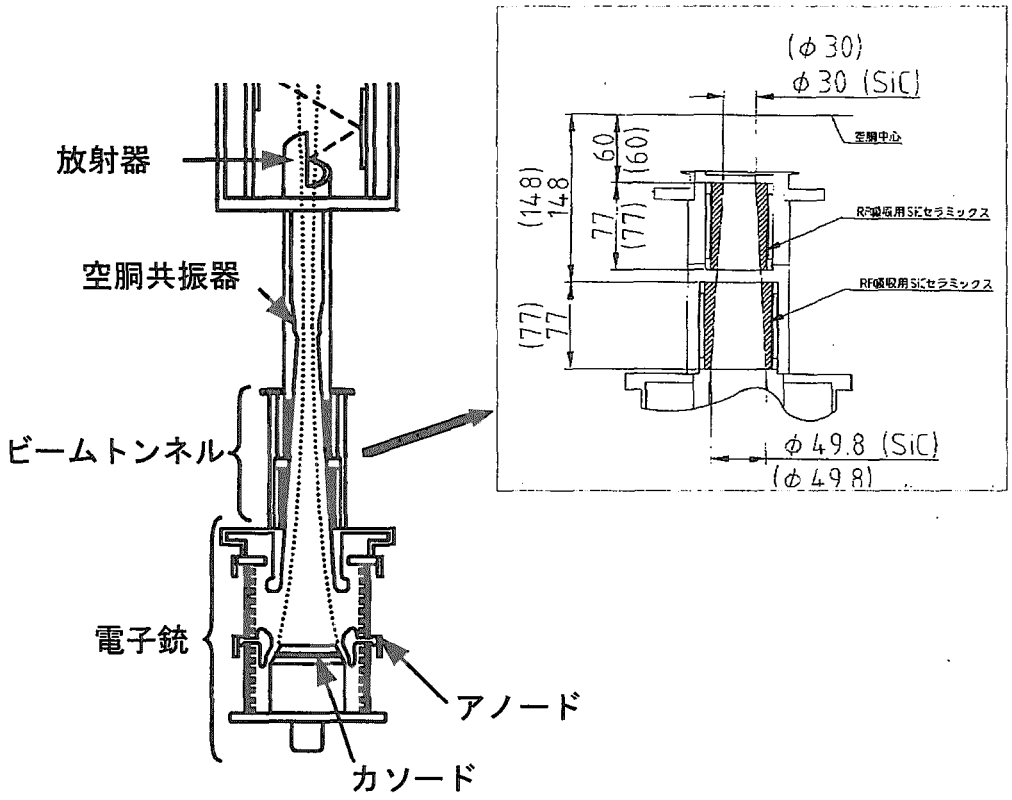


図10：窒化珪素ビームトンネルの模式図

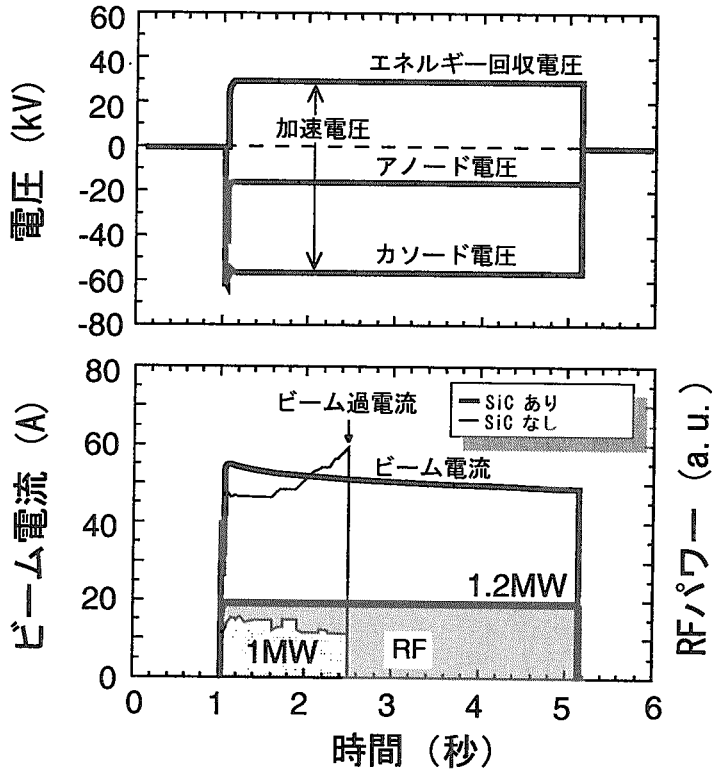


図11：炭化珪素材の適用によって得られた安定な動作

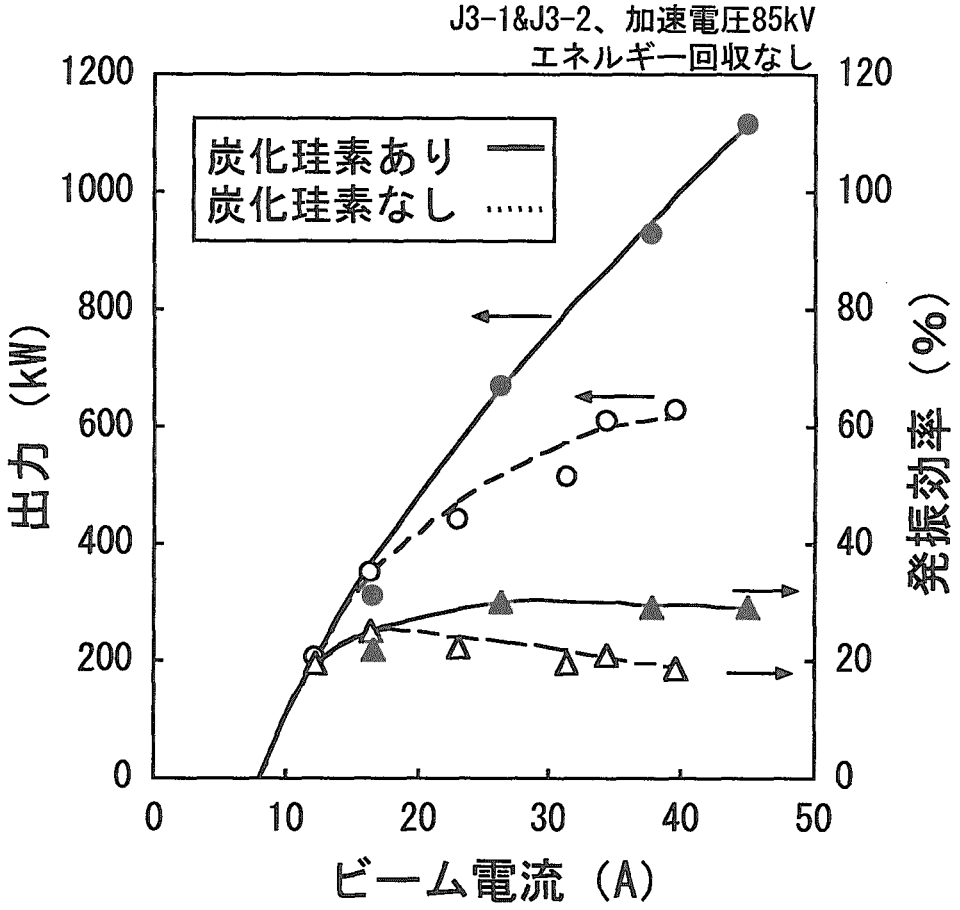


図12：寄生発振があるとき（炭化珪素なし）と寄生発振がないとき（炭化珪素あり）のジャイロトロンの出力と効率の比較

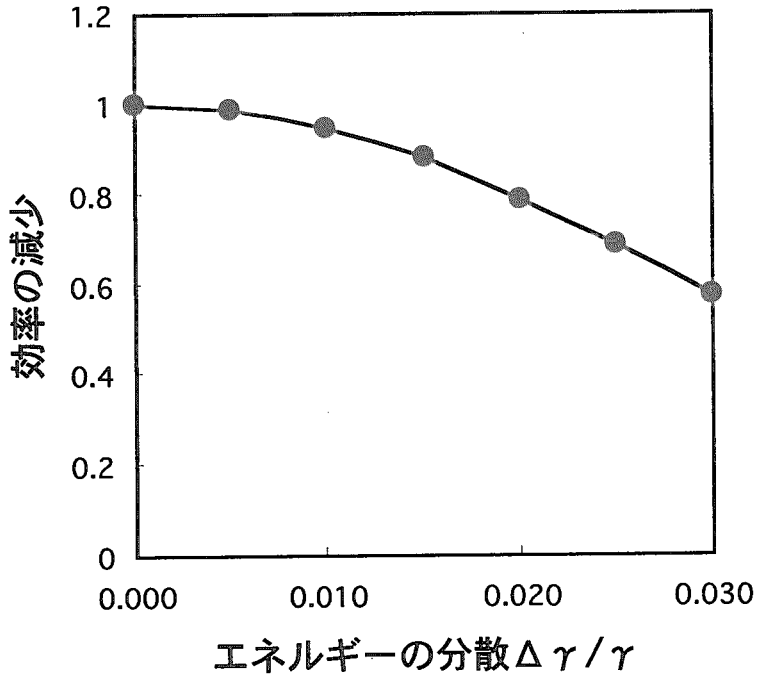


図13：発振効率のエネルギー分散に対する依存性
（計算値）

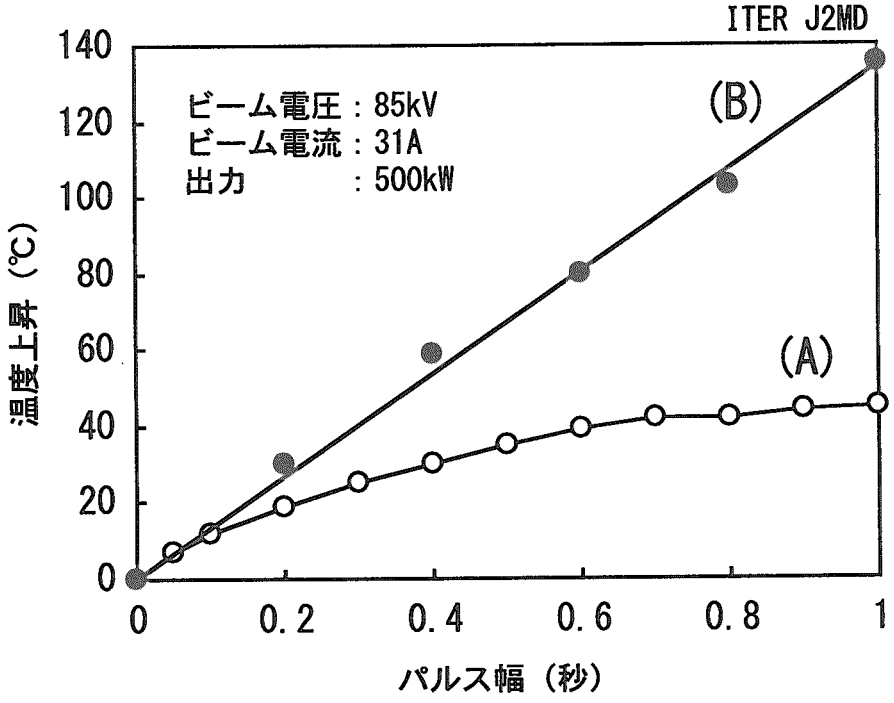


図14：放射器入口の温度上昇が顕著に見られた例
(A)温度上昇が比較的小さい例（寄生発振前）
(B)温度上昇が増加した例(寄生発振後)

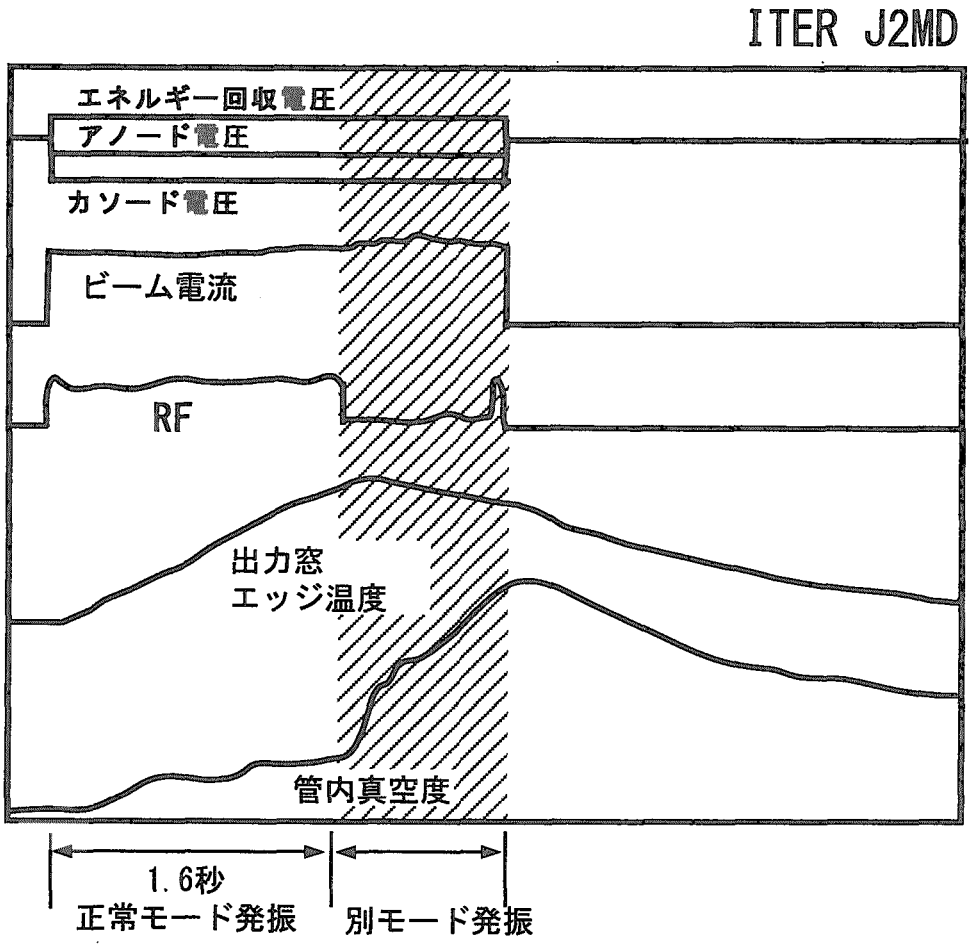


図15：放射器の入口温度上昇のきっかけとなった波形

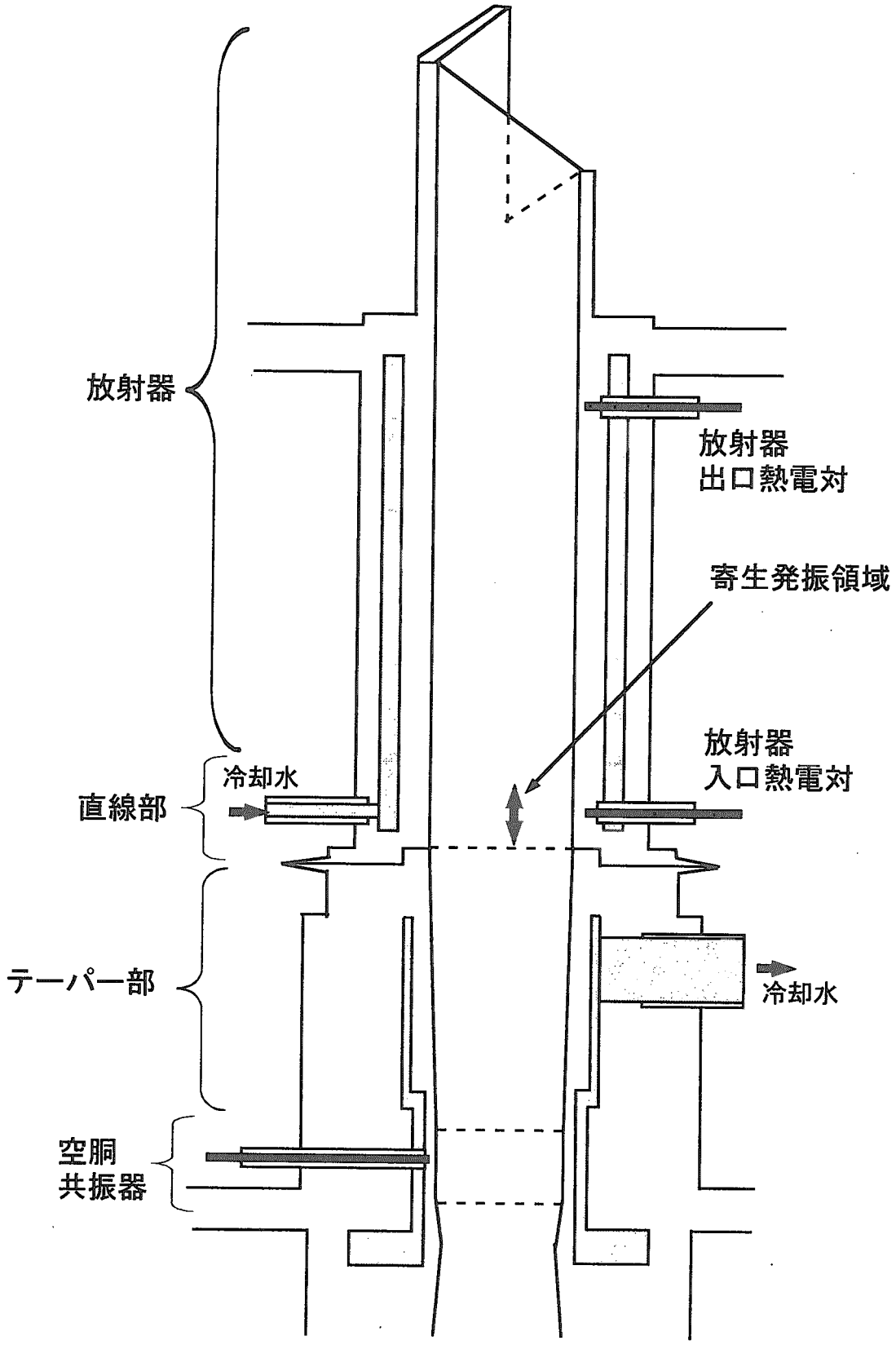


図16：空胴の下流側の構造と発振領域

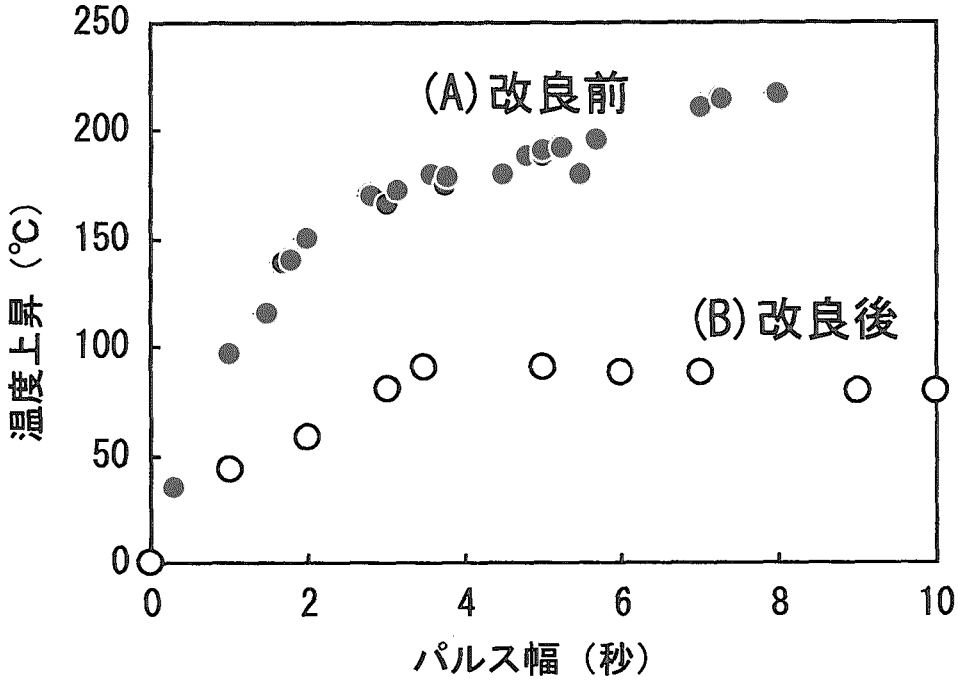


図17：放射器の改良による放射器温度の上昇の改善
(A)500kW-20%（ビーム電圧85kV、ビーム電流30A） (ITER J2MD)
(B)800kW-27%（ビーム電圧75kV、ビーム電流40A） (ITER J4)

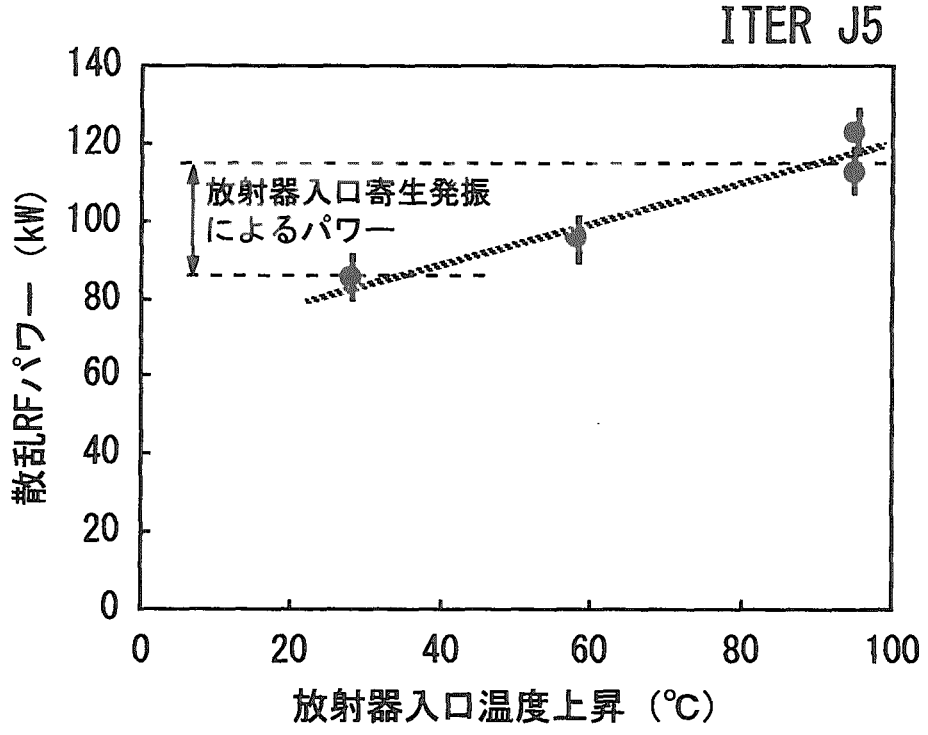


図18：放射器入口温度上昇に対する散乱RFパワー

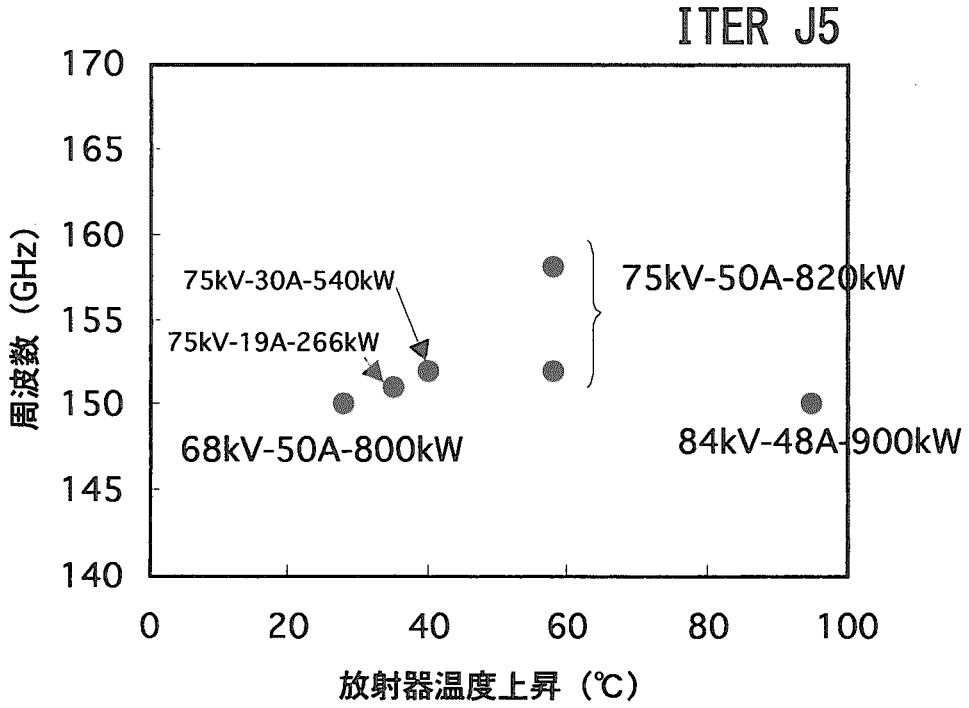


図19：寄生発振の周波数の放射器温度依存性

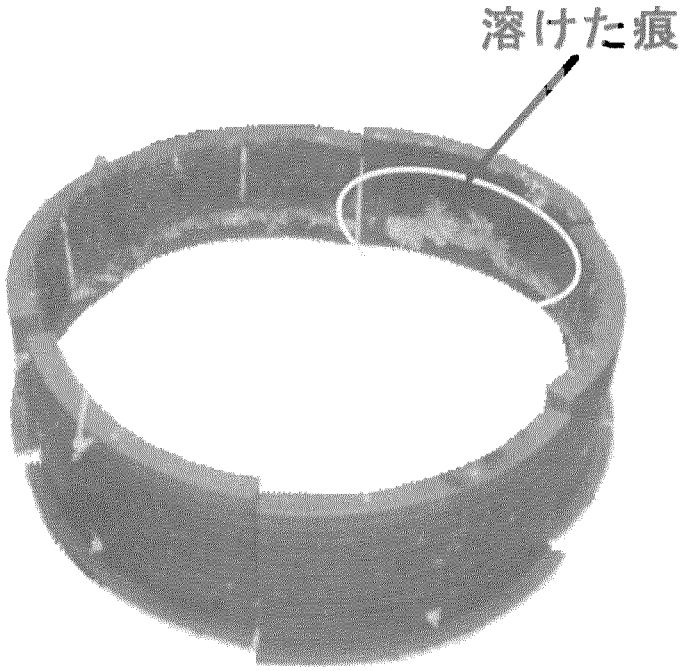


図20：漏れRFによるDCブレーク部の絶縁材料のダメージ

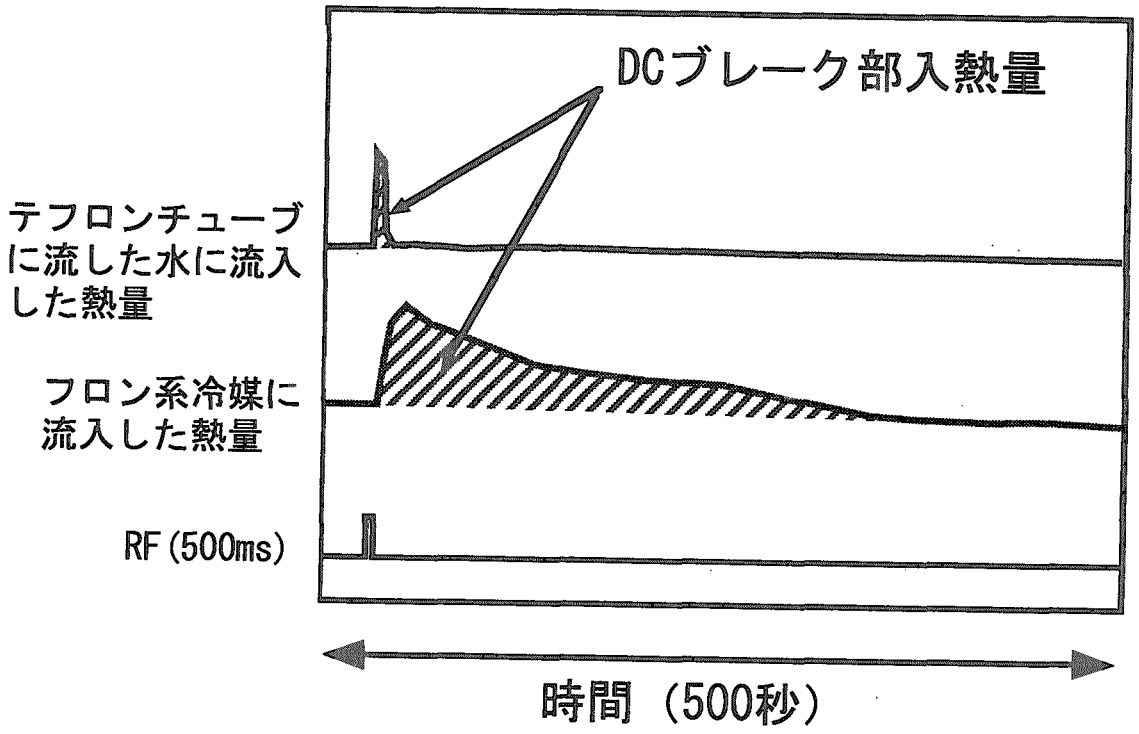


図21：DCブレークへの入熱

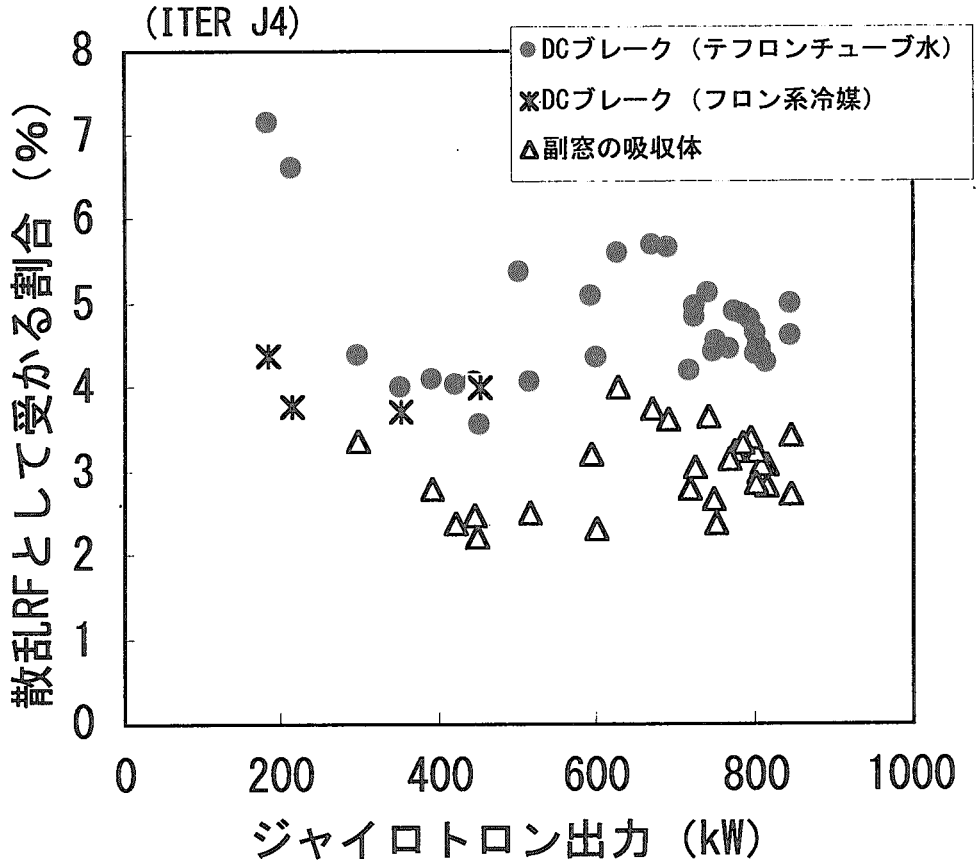


図22：散乱RFのジャイロトロン出力依存性

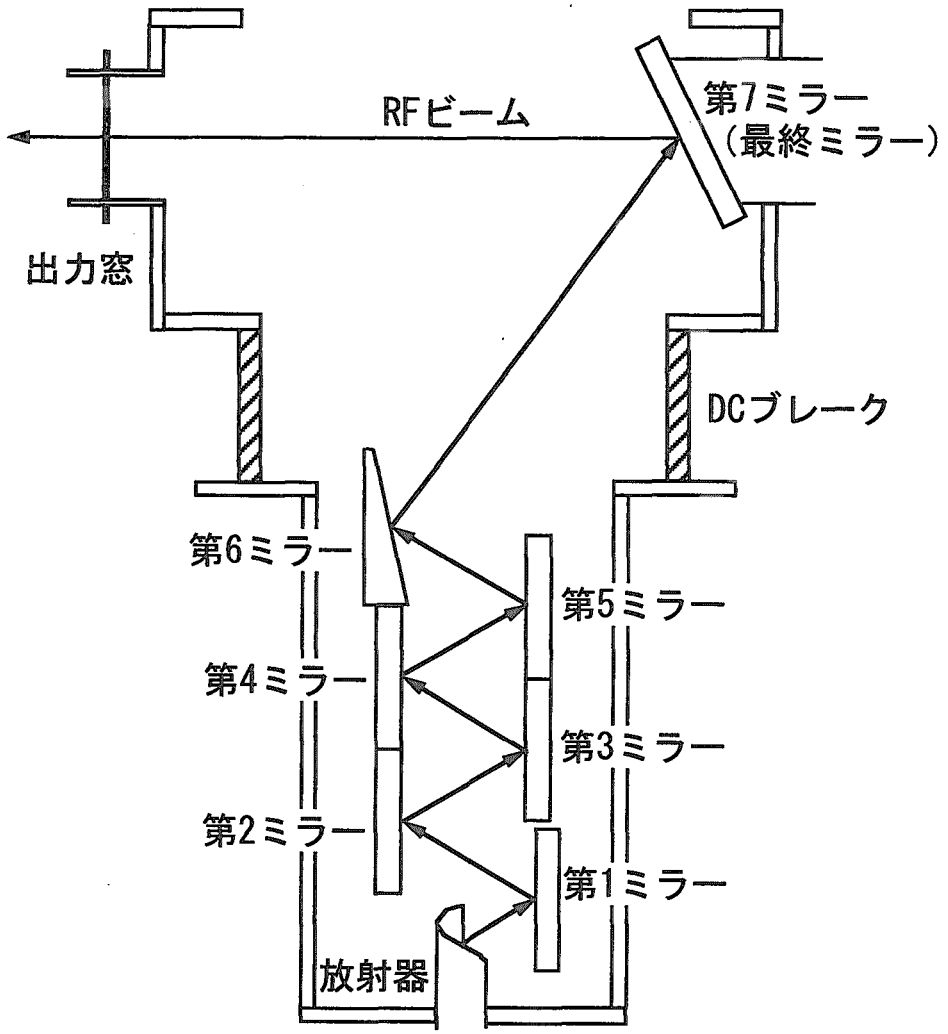


図23：ジャイロトロン内部の高周波回路の構成

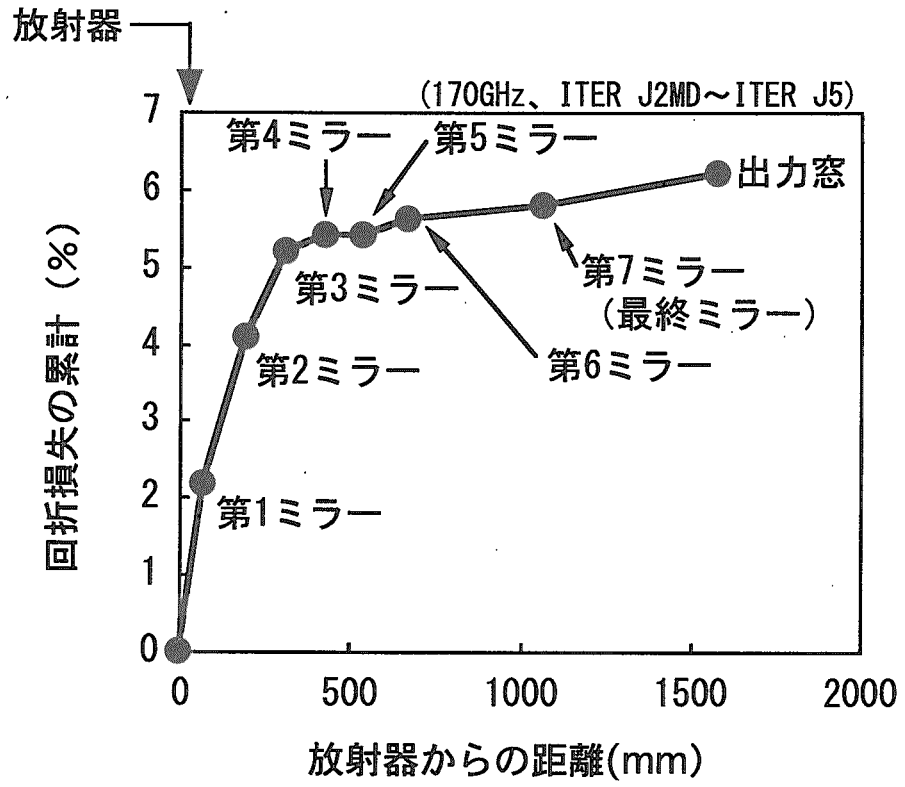


図24：ミラーの反射回数と回折損失の計算値

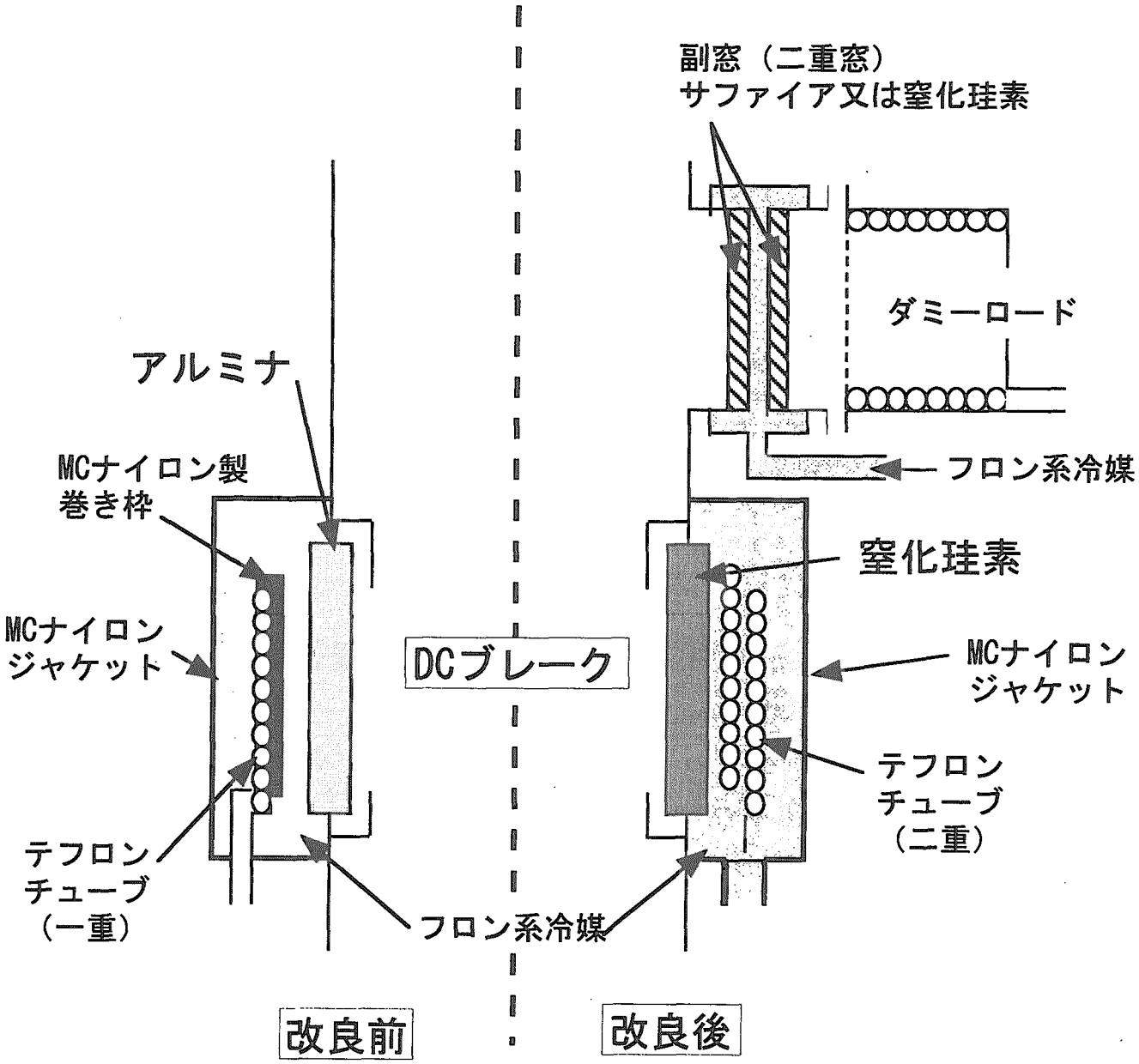


図25：DCブレークの構造と管内散乱RFの処理

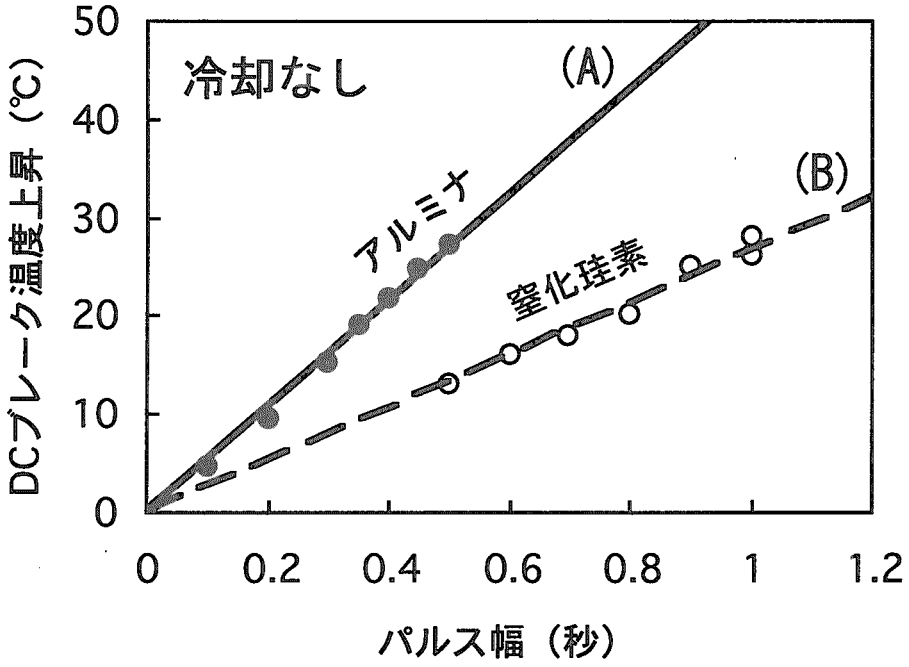


図26：アルミナDCブレークと(A)と窒化珪素DCブレーク(B)の温度上昇
(A)アルミナ、110GHz-1MW出力(JT-D3)
(B)窒化珪素、170GHz-0.8MW出力(ITER J4)

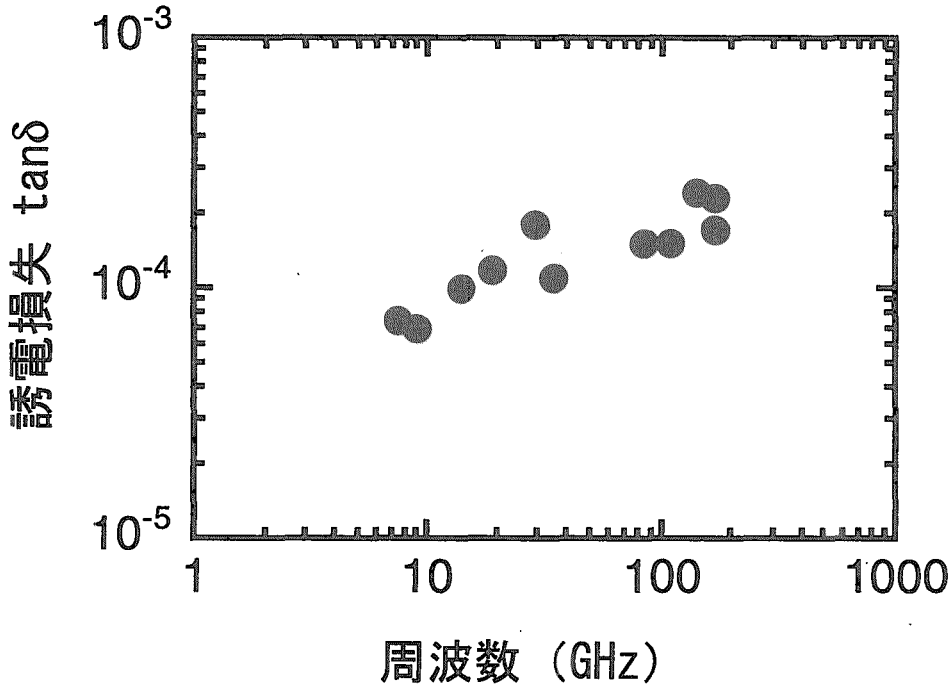


図27：窒化珪素の誘電損失の周波数依存性

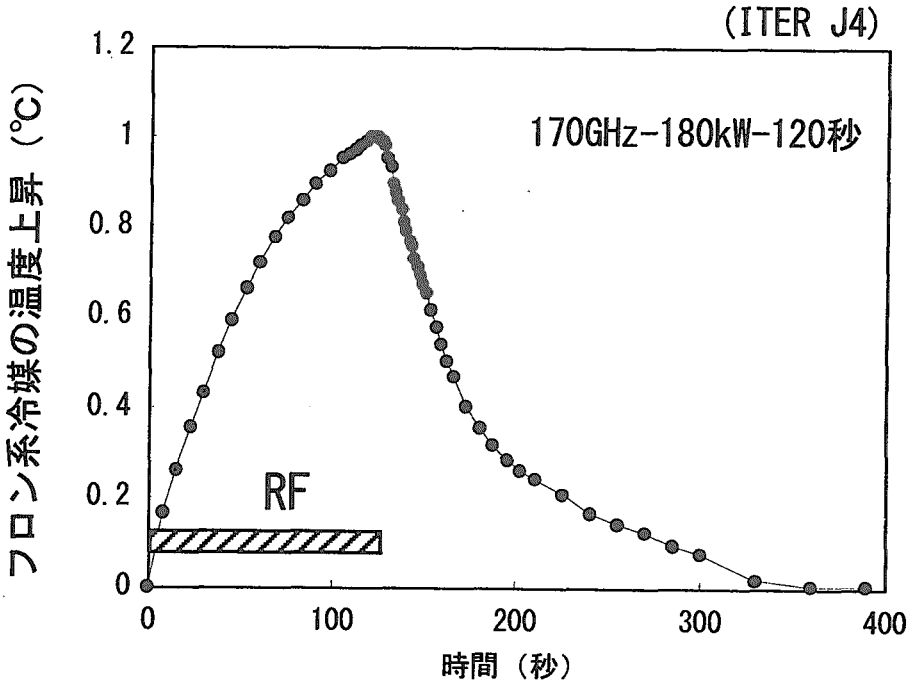


図28：DCブレークを冷却しているフロン系冷媒の温度上昇

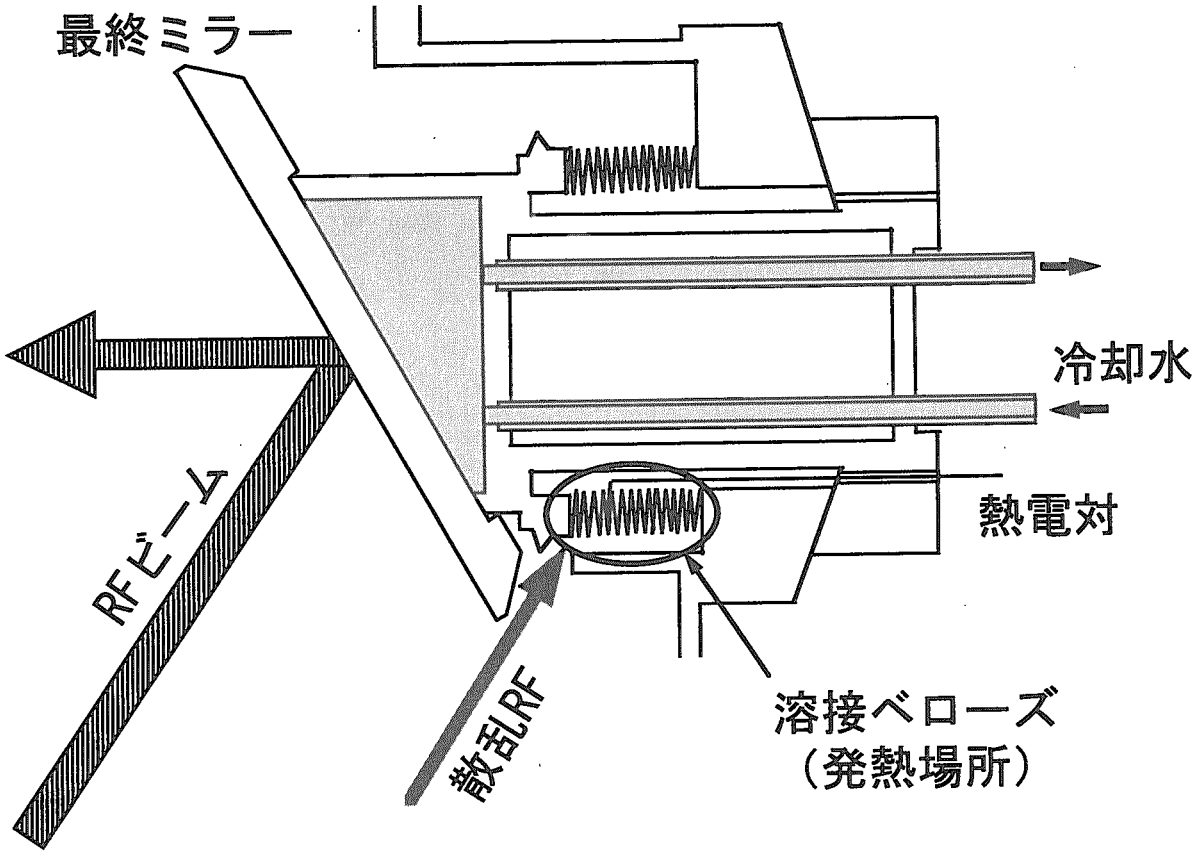


図29：ジャイロトロン最終ミラー可動調整用
ベローズの位置と構造

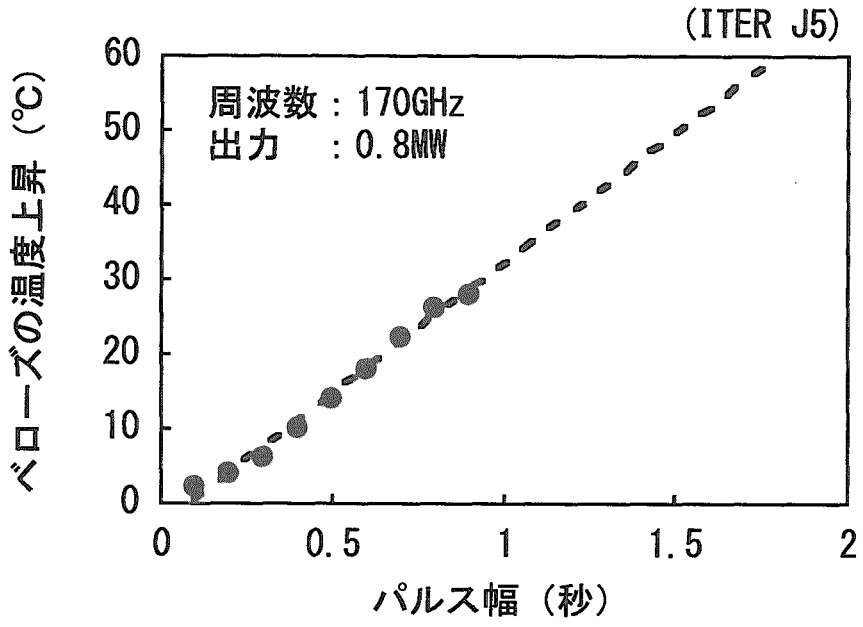


図30：ジャイロトロン最終ミラーの可動調整のための
ベローズの温度上昇

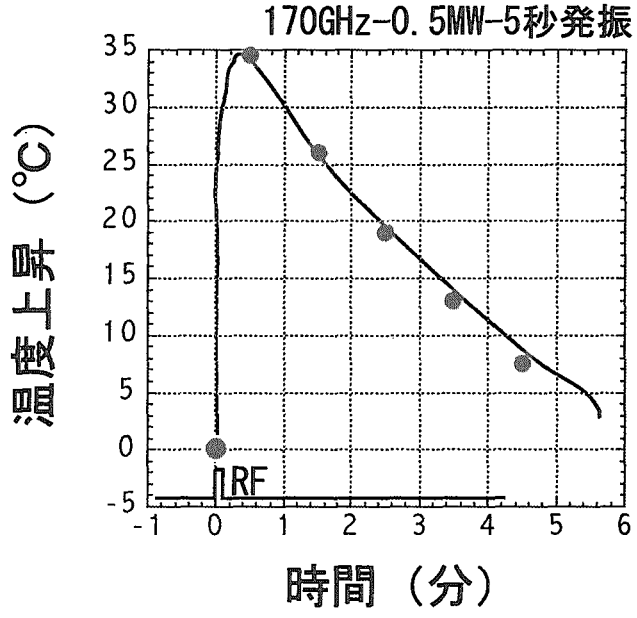


図31：ジャイロトロン最終ミラー可動調整用
ベローズのショット後の温度変化

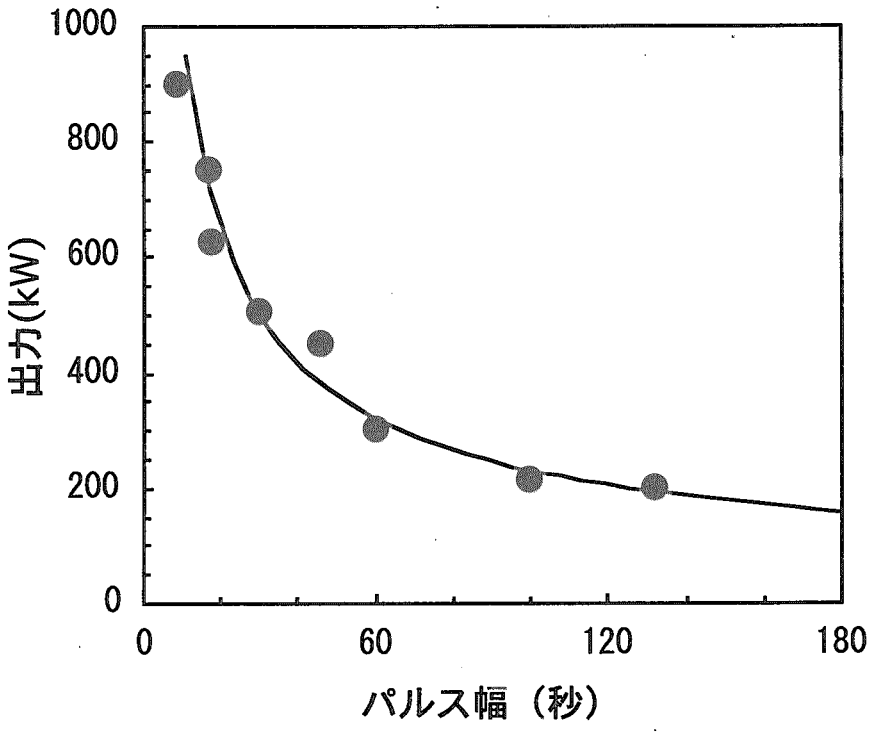


図32：ジャイロトロンの出力とパルス幅の実績

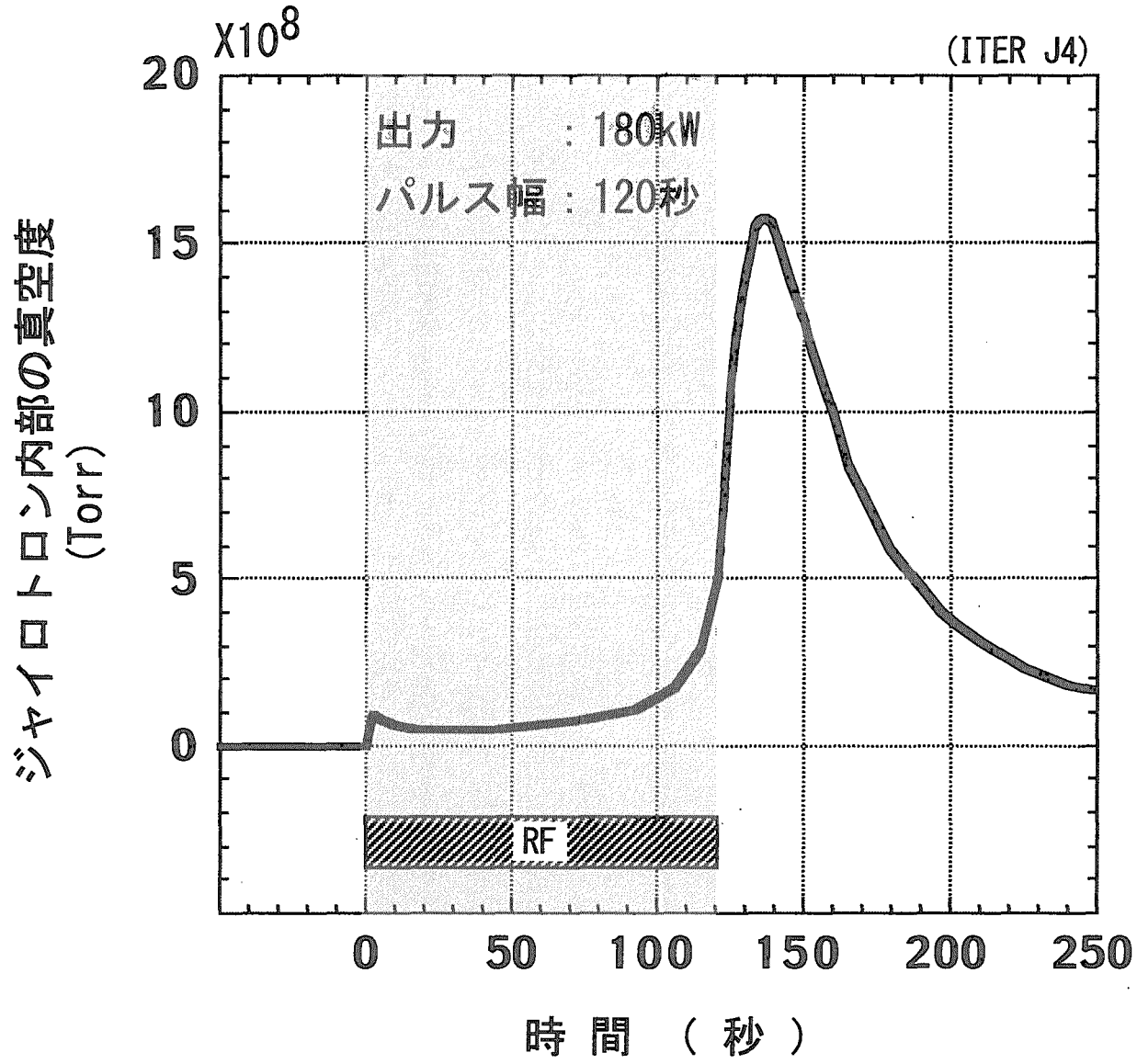


図33：ジャイロトロン内部の真空度の時間変化

This is a blank page.

国際単位系（SI）と換算表

表1　SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2　SIと併用される単位

名称	記号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10^{-19}J

1 u=1.66054×10^{-27}kg

表3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	m·kg/s^2
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4　SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10^{-10}m

1 b=100fm^2=$10^{-28}m^2$

1 bar=0.1MPa=10^5Pa

1 Gal=1cm/s^2=10^{-2}m/s^2

1 Ci=3.7×10^{10}Bq

1 R=2.58×10^{-4}C/kg

1 rad=1cGy=10^{-2}Gy

1 rem=1cSv=10^{-2}Sv

表5　SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

（注）

1．表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2．表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3．barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4．EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10^5dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度　1 Pa·s(N·s/m^2)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1m^2/s=10^4St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10^7 erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal= 4.18605J（計量法）

= 4.184J（熱化学）

= 4.1855J（15℃）

= 4.1868J（国際蒸気表）

仕事率　1 PS(仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

（86年12月26日現在）

不要ＲＦの抑制によるジャイロトロンの高性能化

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています