

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560815
 研究課題名（和文） 自動サイクロトロン共鳴による電子ビーム加速と電力変換システムへの
 応用
 研究課題名（英文） Electron beam acceleration by auto-resonance cyclotron maser and
 application to power conversion system
 研究代表者
 坂本 慶司（SAKAMOTO KEISHI）
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主席
 研究者番号：90343904

研究成果の概要：

ミリ波を用いた自動サイクロトロン共鳴加速による電子ビーム加速のシミュレーションを行い、電力変換システムへの応用を考察した。オーバーサイズの導波管を用いることにより、一様磁場中でも自動共鳴が保たれること、ビーム電流を高くすることで、短い相互作用長でミリ波が完全吸収され、簡素なミリ波-DC 電力変換器が可能であることを示した。ミリ波を用いた電力変換システムの概念を提示し、ジャイロトロンを用いた DC-ミリ波変換、長距離伝送系、ミリ波-DC 変換系、それぞれに高効率が得られることを示し、その実現可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2006 年度 | 2,200,000 | 0 | 2,200,000 |
| 2007 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2008 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 390,000 | 3,890,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：プラズマ・核融合、自動サイクロトロン共鳴、ミリ波帯マイクロ波、電子ビーム加速、ジャイロトロン、電力変換

1. 研究開始当初の背景

大電力ミリ波技術は、核融合研究において、プラズマ加熱電流駆動のため開発が続けられ、近年大きな進展を遂げつつある。この技術の電子加速や、エネルギー伝送技術への応用の可能性について研究する。これまで、100GHz 帯大電力ミリ波を用いて加速された単色エネルギーの電子ビームの研究は、低周波数におけるクライストロンやマグネトロンのような大電力電磁波源が存在しなかったため、ほとんど報告されていない。特に、

自動サイクロトロン共鳴は、新しい電子加速器の概念として数 GHz 帯のマイクロ波を対象とした研究が行われているが、ミリ波を用いた研究は報告されていない。一方、エネルギーの遠隔伝送の研究では、電磁波電力から DC 電力への変換が重要であるが、これまでは 2GHz 帯マイクロ波において、レクテナ等の半導体を用いた低、中レベルの電力密度での研究例はあるが、より直進性の高いミリ波を用いた電力変換は未だ報告されていない。

2. 研究の目的

電子の自動サイクロトロン共鳴と、ミリ波を媒介とした電力変換システムについて研究する。ドップラーシフトを考慮した磁場中の電子のサイクロトロン周波数が電磁波の近傍にあるときに、電子は共鳴的に加速される。一般に、電子が加速されエネルギーが高くなると、相対論効果により電子の質量が増加し、サイクロトロン周波数が小さくなるために共鳴条件が外れ減速に転じる。しかし、平面波の場合、サイクロトロン共鳴条件が満たされると、電子エネルギーの増加にかかわらず共鳴が保たれる、いわゆる自動サイクロトロン共鳴が満たされ、電子が高エネルギーレベルまで加速される。研究の目的は、現実の実験系では平面波と異なる条件、すなわち導波管内で電磁波は伝送されるため、この条件における加速特性を明らかにすること、及び電子の運動エネルギーを DC 電力エネルギーへ変換するために適した系の考察を行うことである。

このためには具体的に、大電力ミリ波を媒介とした電力送信システムとして、次の複数のシステムから構成される系を研究する。(1) ジャイロトロンを用いた DC 電力からミリ波への変換系、(2) 導波管あるいは準光学伝送によるミリ波エネルギー伝送系、(3) ミリ波受信系、(4) ミリ波による電子ビーム加速系、(5) 加速された電子ビーム電力の外部回路への電力回収系、である。これらの妥当性について評価することも大きな目的である。

3. 研究の方法

これまで核融合研究の中で得られた大電力ミリ波技術を利用し、電子加速、エネルギー変換に関する研究を行う。まず、自動サイクロトロン共鳴を計算するためのコードを製作し、シミュレーションにて、磁場中のミリ波—電子ビームの相互作用の研究を行う。ここで、自動サイクロトロン共鳴条件、磁場が非一様の場合の加速条件、空洞共振器内での加速条件などについてその特性を評価する。次に、“2.”で述べた各目的につき、それぞれの研究方法を述べる。

(1) これまで我々の研究グループで開発した 170GHz ジャイロトロンを用い、送信側ミリ波源としてその高効率発振特性、安定性につき実験的研究を行う。

(2) この 170GHz ジャイロトロンをエネルギー源とし、導波管を用いてその大電力エネルギー伝送特性の実験を行う。導波管には、内径 63.5mm のコルゲート導波管を用いる。また、導波管終端から放出されるミリ波を、複数のミラーを用いて空間伝送させ、ターゲットに当てその電力分布を測定し、そこから RF ビーム及び導波管内の伝送モードを数値

解析的に同定する。

(3) 準光学伝送されたミリ波ビームを、相互作用系として受信側ジャイロトロンに入射し、ジャイロトロンに内蔵されたミラー系、モード変換器を介して、ミリ波—電子ビームの相互作用部に入射する。ここで、導入するためのミラー系の設計及び製作を行い、大電力ミリ波でその特性を実証する。

(4) 受信側ジャイロトロンに低速の電子ビームを発生させ、ミリ波を入射することにより、その電子とミリ波の相互作用、特に加速の有無を調べる。

(5) 加速された電子ビームの運動エネルギーを、減速電界を印加することにより静電的に回収する外部回路を設計し、シミュレーションによりその挙動を調べる。

4. 研究成果

(1) 電子加速のシミュレーション
自動サイクロトロン共鳴による電子加速のシミュレーションをすすめた。まず、170GHz の TE_{11} モードの電磁波が、直径 10mm の導波管中を伝播しながら電子ビームを加速する例を考察する。導波管径が波長に比べて大きいいため、 TE_{11} モードの管内波長は自由空間波長とほぼ同じであり、自由空間中の平面波とほぼ同じ特性が期待できる。図 1 (a) は、相対論的ファクタ(γ)で表した電子エネルギーと電子ビーム電力の軸方向変化を示している。ここで、初期電子ビームは、エネルギーは 13.1keV の直進ビームで、軸磁場が 4.9T、ビーム電流が 1A、電磁波電力が 50MW である。184mm でエネルギーは 1MeV に達して

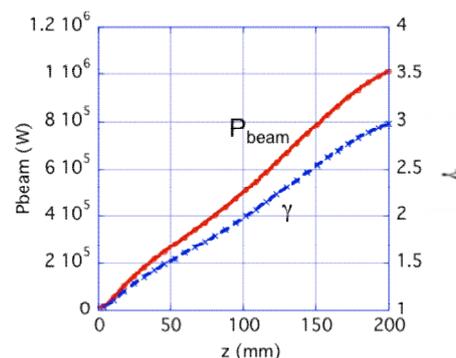


図 1 (a) 電子ビームの軸方向変化のシミュレーション結果。170GHz/50MW の TE_{11} モードのミリ波を直径 10mm の導波管に伝送させた場合。軸磁場は 4.9T、電子ビームの初期エネルギーは 13.1keV、電流 1A。

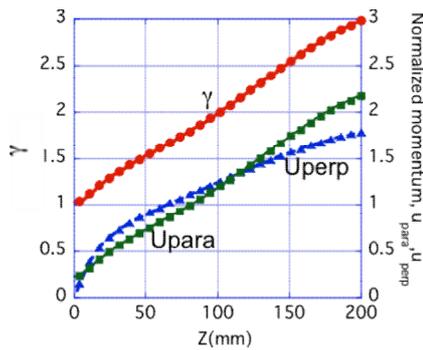


図 1(b) 電子の規格化運動量の軸方向変化。計算条件は(a)と同じ。

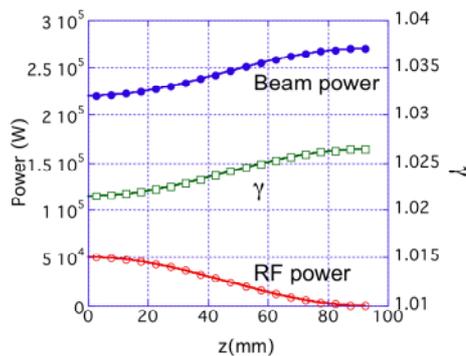


図 2 電子ビームの軸方向変化のシミュレーション結果。170GHz/50kW の TE₁₁ モードのミリ波を直径 10mm の導波管に伝送させた場合。軸磁場は 4.85T、電子ビームの初期エネルギーは 11keV、電流 20A。

いる。相対論ファクタが 1.025 から 3 まで変化しているが、共鳴が持続され加速され続けていることがわかる。初期電子エネルギーに回転成分はないため、一様に加速され、加速後も単色エネルギー分布となる。図 1(b)は、 mc で規格した電子運動量の軸方向 U_{para} 、回転方向成分 U_{perp} である (m : 電子の質量、 c : 光速)。回転方向の運動量とともに、軸方向の運動量も増加し、ピッチファクタ (U_{perp}/U_{para}) はエネルギーの増加とともに下がる様子が分かる。一方、導波管の半径を波長程度に小さくした場合は分散効果により波数は単純な (角周波数/光速) ではなくなる。この場合、共鳴条件を維持させるために電子のエネルギーの増加に対応して軸磁場を電子の進行方向に増加させる必要がある。一様磁場の場合で、共鳴からはずれ、加速には至らない。高いエネルギーまでの加速性能を得るには、

十分な条件設定、すなわち磁場の正確な設定が重要である。

次に、ミリ波をエネルギー変換器に利用する場合について考察した。ポイントとなる事項は、入力電磁波の電力を高い効率で電子ビームのパワーに変換すること、加速された電子のエネルギー分布が小さくできる限り単色であることである。また、加速距離は短いほうがシステムの簡素化、軸磁場の精度確保に有利である。この場合、加速される電子ビームのエネルギーは高い必要はない。電流 I_b の電子ビーム中の電子すべてがエネルギー eV_f まで加速されたとすると、電圧 V_f の逆バイアス電圧を電子ビームに印加することにより 0V まで減速され、原理的にはすべての電子ビームの電力を回収することができるからである。図 2 は、初期電圧 11kV、電流 20A の電子ビームを直径 10mm の導波管中に 170GHz の 50kW の TE₁₁ モードのミリ波で加速した場合の結果である。RF 電力は距離 92mm ですべて吸収され、その結果、電子ビーム電力は 50kW 増加した。合計電力は同一で、RF 電力がすべてビーム電力に変換されたことがわかる。電子ビームは 13.5kV まで加速され、エネルギー変化は 2.5kV の上昇である。相対論ファクタとしては 0.00685 の変化であるため、短距離であれば一様磁場でも共鳴が外れることはなく、特に磁場を軸方向に調整する必要もない。また、加速された電子ビームも単色エネルギーであるため、原理的にほぼ 100% の投入電力が回収できる。このように、電力変換器という視点で電子加速を考えた場合、ある程度電流を大きくし、加速エネルギーを低く押さえる方がシステム設計上、好ましいと考えられる。

(2) 電子ビーム加速、電力回収系のモデル設計

図 3 に全体概念図を示す。電子銃からの直線電子ビームを外部から窓を通じて入射された RF を相互作用系でサイクロトロン共鳴加速し、コレクタと相互作用部に印加された逆バイアスの静電圧で減速する。ミリ波で加速された電子ビームのエネルギー分 V_d と電子ビーム電流 I_b の積が、使用できる電力となる。ここで、電子ビームの初期電圧を V_{gun} 、加速後の電圧を V_{acc} とすると、 $V_d = V_{acc} - V_{gun}$ であり、逆バイアスとして印加できる電圧となる。負荷とのインターフェースは DC/DC コンバーターを用いる。電流 I_b は電子銃で、またエネルギー回収電圧は入力 RF で制御される。

(3) DC 電力—ミリ波電力変換

全体システムを構成する上で、最初のエネルギー源となるミリ波の生成は重要な要素となる。このミリ波は、DC 電力から発振器を用いて生成される必要がある。この DC 電力からミリ波への電力変換器は、現在、変換効率、出力レベル、安定性から考慮して現在

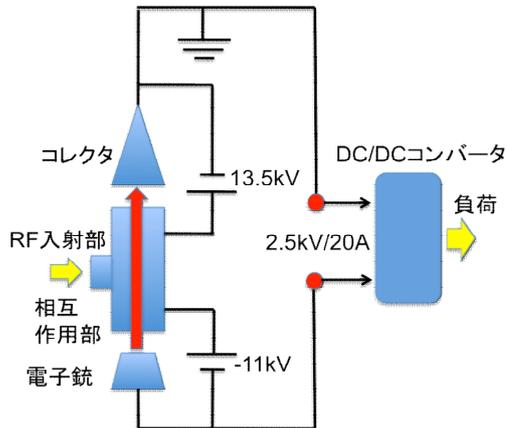


図 3 ミリ波—DC 電力変換器の概念図。初期電子ビームを電子銃から引き出し、11keV に加速して相互作用部において RF(ミリ波)で約 2.5keV 加速する。コレクタ全面のポテンシャルを乗り越え電流が回路に流れる。DC/DC コンバーターでインピーダンス変換し、負荷につなげ電源として機能させる。

ジャイロトロンのみである。今回の実験で使用したジャイロトロンは、我々で開発した高さ約 3m、重量 800kg の電子管である。超伝導コイルに挿入され、ジャイロトロン的心臓部となる共振器部に約 6.6T の軸磁場出力を印加する。加速電圧は約 70kV、電流 50A 以下の回転電子ビームを磁場にそって共振器

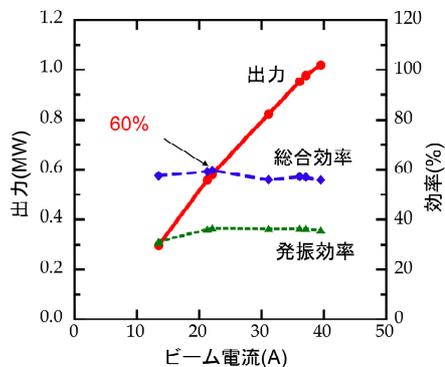


図 4 170GHz ジャイロトロンの出力特性

に打ち込み、電子サイクロトロン共鳴メーザー (CRM) 効果で発振を起こす。発生した電磁波は、ジャイロトロン内でモード変換され、出力窓を通して外部に出力される。図 4 は、RF 出力、及び、DC 入力から RF 出力への変換効率の電子ビーム電流依存性である。出力は約 1MW で総合変換効率は最大 60% (出力 0.6MW 時) を達成した。送信側の RF 電力発生器としての役目は十分担えるレベルである。また、印加磁場を変えることにより、発振モードを変え、発振周波数をステップ状に変え、オペレーション領域を広げることも可能である。また、印加電圧を調整することに

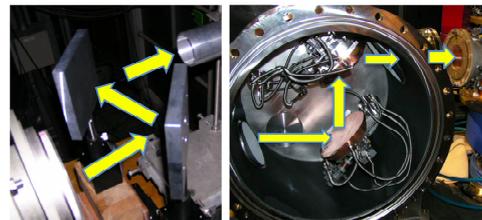


図 5 受信ジャイロトロンへのミリ波入射系。

より、出力調整、周波数の微調整が可能であることを実証した。これらは、電子加速条件の調整に有効である。

(4) ミリ波伝送系

出力されたミリ波電力は、電子加速系まで高効率で伝送されなければならない。これには、導波管を用いる方式と、準光学方式がある。ここでは、ジャイロトロンからの出力を導波管で伝送する方式を議論する。まず、出力窓から直線偏波で出力されたミリ波ビームを準光学整合回路に置いた 2 枚のミラーを用い、コルゲート導波管に結合させる。ミラー表面はミリ波の形状と位相を補正するために、非線形形状を有しており、導波管に HE₁₁ モードが励起される。伝送実験は、方向変換のため 7 個のマイターバンド (準光学方式のミラーで構成される) を有する約 40m のミリ波伝送系で行った。96% のジャイロトロン出力が導波管に導入され、そのうち約 95% が基本モードである HE₁₁ モードに結合されることを実証した。その結果、約 90% のジャイロトロン出力が伝送系終端まで伝送された。

併せて、RF 電力の放射実験 (空間エネルギー伝送) 実験を行った。コルゲート導波管中の HE₁₁ モードは、ガウス型に極めて近い電力分布をしており、そのため導波管からガウス型ビームを放射させることができる。放

射された RF ビームはミラーを介すことにより、放射角度を調整できる。ターゲットに放射された RF ビームによる温度上昇の測定し、ミラー角度の制御によりガウスビームの位置が設計通り移動していることを確認した。さらに、より遠方に伝送させるため、2枚のミラーを用い、断面形状の大きい平行ビームをつくり、放射実験を行った。伝送されたビームは受信用ミラーで集光され、導波管に導入され、遠隔エネルギー伝送を実証した。

(5) 電子ビーム加速系

170GHz帯ミリ波を用いた電子加速の実験システムを構築した。前述のとおり、ジャイロトロンで発振した電磁波を導波管で長距離伝送する。電磁波・電子ビーム相互作用系には、空洞共振器を用いる。具体的には、受信用ジャイロトロンを用いてミリ波電力のビーム電力への変換実験を行う。図5は、RFビームの導入用ミラー系である。ガウス型電磁波ビームを、位相補正鏡を介して出力窓から逆に入力し、受信側ジャイロトロンに内蔵されたモード変換器を介して共振器に共振モードを励起させる。ここに、回転成分の少ない直進電子ビームを入射することにより、低エネルギー電子ビームに電磁波を吸収させ、電子加速を行う。実験では100kW以下のレベルの電磁波(1ミリ秒)を導波管で伝送し、位相補正鏡を用いて直線偏波のまま受信側ジャイロトロンに入射した。送信側のジャイロトロンでアノード・カソード間の電圧制御で発振のタイミング、パルス幅を調整する。受信側ジャイロトロンの電子ビームに入射RFを同期させ、電子加速の特性を調べる。加速の有無は、受信ジャイロトロンの逆加速電圧の深さ、あるいはコレクタ部で発生するX線の変化として表れる。送信側ジャイロトロンのミリ波(1ミリ秒)と受信側ジャイロトン側の電子ビームの同期に成功し、RF吸収特性に受信側ジャイロトロンの明確な磁場依存性を確認した。現在、その実験を続行中である。この研究において、ミリ波を用いたエネルギー伝送・電力変換システムの概念を構築でき、実験システムを構築できたことは今後の研究開発ステップにつながる大きな成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

① K. Sakamoto, A. Kasugai, K. Kajiwara,

K. Takahashi, Y. Oda, K. Hayashi, N. Kobayashi, "Progress of the high power 170GHz gyrotron in JAEA", Nuclear Fusion, 49, 095019 (2009).

② K. Kajiwara, K. Sakamoto, "Long pulse and high power repetitive operation of the 170GHz ITER Gyrotron", Plasma and Fusion Research, 4, p.6-p.8 (2009). 査読有

③ R. W. Callis, J. Doane, H. Grunloh, K. Kajiwara, A. Kasugai, C. Moeller, Y. Oda, R. Olstad, K. Sakamoto, K. Takahashi, "Design and testing of ITER ECH&CD transmission line components", 84, p.526-p.529 (2009). 査読有

④ K. Kajiwara, K. Takahashi, N. Kobayashi, A. Kajiwara, K. Sakamoto, "Design of a high power millimeter wave launcher for EC H&CD system in ITER", Fusion Engineering and Design, 84, p.72-p.77 (2009). 査読有

⑤ T. Kariya, R. Minami, T. Imai, K. Sakamoto, K. Kubo, T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Itoh, T. Mutoh, Y. Mitsunaka, Y. Endo, H. Shidara, N. Murofushi, Y. Sakagoshi, H. Yasutake, Y. Okazaki, "Development of 28GHz and 77GHz 1MW Gyrotron for ECRH of magnetically confined plasma", Fusion Science and Technology, 55, p.91-p.94 (2009). 査読有

⑥ Y. Oda, T. Shibata, K. Komurasaki, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto "Thrust performance of Microwave Rocket under repetitive pulse operation", Journal of Propulsion and Power, 25, pp. 118-122 (2009). 査読有

⑦ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Komurasaki, "In Tube Shock Wave Driven by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma", Japanese Journal of Applied Physics, pp. 118-123 (2009). 査読有

⑧ A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Takahashi, K. Kajiwara, N. Kobayashi, "Steady-state operation of 170GHz 1MW gyrotron for ITER", Nuclear Fusion, 48, 054009 (2008). 査読有

⑨ K. Takahashi, K. Kajiwara, N. Kobayashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, "Improvement design of an ITER equatorial launcher", 48, 054009 (2008). 査読有

⑩ Y. Oda, T. Shibata, K. Komurasaki, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, et al., "A thrust generation model of microwave rocket", J. Space technology and Science", 20, p.30-p.35 (2007). 査読有

⑪ K. Sakamoto, A. Kasugai, K. Takahashi, R. Minami, N. Kobayashi, K. Kajiwara, “Achievement of robust high-efficiency 1MW oscillation in the hard-excitation region by a 170GHz continuous wave gyrotron”, Nature Physics, 3, p.411-414 (2007). 査読有

⑫ A. Kasugai, A. Kajiwara, K. Takahashi, N. Kobayashi, K. Sakamoto, “High power High efficiency operation of 170GHz gyrotron”, Fusion Science and technology”, 51, p.213-216 (2007). 査読有

[学会発表] (計9件)

① K. Sakamoto, K. Kajiwara, A. Kasugai, Y. Oda, K. Takahashi, N. Kobayashi, “Progress of the high power gyrotron development in JAEA (Invited)”, IEEE The 34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, Busan, Korea (2009).

② Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, et al., “Gyrotron beam coupling into corrugate waveguide”, IEEE The 34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, Busan, Korea (2009).

③ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, “Gyrotron Beam Coupling Method into Corrugated Waveguide”, The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Ghent, Belgium (2009).

④ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Komurasaki, “A structure of breakdown plasma by a high power millimeter wave beam”, International Congress on Plasma Physics Karlsruhe, Germany (2008).

⑤ K. Sakamoto, K. Kajiwara, A. Kasugai, T. Kobayashi, Y. Oda, K. Takahashi, N. Kobayashi, S. Moriyama, “High power gyrotron development for fusion application”, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Pasadena, USA (2008).

⑥ K. Takahashi, K. Kajiwara, N. Kobayashi, A. Kasugai, Y. Oda, T. Kobayashi, S. Moriyama, K. Sakamoto, “Development of quasi-optical transmission line for ITER equatorial EC launcher”, 25th Symposium on Fusion Technology, Lostock, Germany (2008).

⑦ A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Takahashi, K. Kajiwara, Y. Oda, N. Kobayashi, “Demonstration of 1MW quasi-CW operation of 170GHz gyrotron and progress of EC technology”, 22nd IAEA Fusion Energy

Conference, Geneva, Switzerland (2008).

⑧ K. Sakamoto, K. Kajiwara, A. Kasugai, Y. Oda, K. Takahashi, T. Kobayashi, A. Isayama, S. Moriyama, “A high-power gyrotron and high-power mm wave technology for Fusion Reactor”, 18th International Toki Conference, Toki, Japan (2008).

⑨ K. Sakamoto, et al., “Demonstration of high efficiency 1MW oscillation by 170GHz CW gyrotron”, Proc. of the joint conference on infrared and mm waves and 15th Int. conf. on terahertz electronics, p.708, Cardiff, UK (2007).

[図書] (計2件)

① K. Sakamoto, et al., “STRONG MICROWAVES: SOURCE AND APPLICATIONS (High power 170GHz gyrotron development in JAEA)”, Russian Academy of Science, pp.7-14.

② K. Kajiwara, (K. Sakamoto), et al., “Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (Calculation of the RF propagation for the ITER equatorial ECH/ECCD launcher)”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, pp.440-445 (2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 慶司 (SAKAMOTO KEISHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門・研究主席
研究者番号: 90343904

(2) 研究分担者

春日井 敦 (KASUGAI ATSUSHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号: 70354636

高橋 幸司 (TAKAHASHI KOJI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門・研究副主幹
研究者番号: 70354644

南 龍太郎 (MINAMI RYUTARO)
国立大学法人 筑波大学プラズマ研究センター・講師
研究者番号: 70370476

(3) 連携研究者

なし。