

# マイクロ波エンジンによるビームドモビリティの実現

## Beamed mobility engineering by the microwave engine

研究代表者 東京都立大学航空宇宙システム工学科 准教授 嶋村耕平<sup>※</sup>

Kohei Shimamura

To realize wireless power transfer with high energy density, cyclotron wave converter (CWC) capable of high-power output were aimed to be used as millimeter-wave rectifiers. There have been no studies on the design of the CWC at higher frequencies, and the issue is whether each component of the CWC can operate in the millimeter-wave band. In this paper, the technical feasibility of the power supply circuit, external magnetic field, and main body at millimeter wave were discussed from a technical point of view. Finally, the cavity efficiency reduction of the CWC is limited to 5%, compared to a controllable center frequency of 0.02% on the oscillator side in the millimeter wave band. Although resonance with the oscillator becomes difficult at frequencies above the millimeter wave band, it was found that high-efficiency operation is possible up to the millimeter wave band.

### 要旨

本研究では、ビームド・モビリティ工学の確立を目指し、最も困難であるマイクロ波エンジン部の設計・要素技術開発を通じて、分野の開拓を目的とする。また今後の研究においてマイクロ波発振器（マグネトロン）を使用した世界初のビームド・モビリティの実飛行試験に繋がる設計指針を取得することを目指すものである。

#### 1. まえがき

マイクロ波エンジンの核となる技術は、電子サイクロトロン型レクテナである。マイクロ波を直流に変換するために必要な超高出力デバイスが必要であるが、既存のダイオードベースの回路では到底不可能な領域である。今回新たに開発する電子サイクロトロン型レクテナは、原理的には粒子加速器と同じである。このため、投入できる電力に上限はなく電子の運動を介してマイクロ波を直流に変換することができ、原動機と合わせて出力重量比 5kW/kg 以上の高密度マイクロ波給電にも容易に対応可能である。

現状のワイヤレス給電分野の研究の主流では、磁界共鳴方式による車やバスへの大電力給電が実現している。しかし原理上送電距離は 1 m 未満で応用先は限られる。また比較的長距離送電が期待できる、マイクロ波を利用した方式では IoT やエネルギーハーベスティング向けの低電力半導体回路の高効率化及び省電力化である。このように、昨今エネルギーハーベスティング研究が主流であり、電子サイクロトロン型レクテナの研究は 70 年代旧ソ連で提唱以

降途絶えたが、近年脱化石燃料に向けた新たな技術として注目されている。中国では PIC 法の電子サイクロトロン型レクテナ設計を行い、10kW 級送電網のコンセプト論文を発表した。またロシアでは共振器や電子銃に関する設計例があり、日本では京都大篠原らが PIC 法での設計、旧原研坂本らが簡易的な実験(2000)を行った。しかし実機開発の報告例は申請者の知る限り国内外で存在しない。本研究は電子サイクロトロン型レクテナの設計のみでなく開発・評価まで行う部分に、既存研究にはない大きな進歩がある

#### 2. マイクロ波変換器について

本研究は、マイクロ波増幅管として高い周波数の大電力動作に実績のある真空管を高い周波数動作の整流器として使用することを着想した。具体的には、Watson らによって提唱されたサイクロトロンマイクロ波変換器 (Cyclotron Wave Converter (CWC)) に着目した<sup>1)</sup>。この変換器は、電子加速技術を用いることで理論的に kW 級の電力を高効率で整流可能と言われており、これまで理論研究と実機評価が数件行われた。CWC を構成するのは、Fig.1 に示すように直流電源、電子銃、本体部分、永久磁石、負荷抵抗である。本体部分は、電子のエネルギー授受の様子から、共振器、運動方向変換領域、コレクターに分割して考えられる。

CWC の理論効率は Vanke らによって数式的に与えられ、共振器の等価回路理論による共振器効率及

※ 筑波大学 システム情報系 助教

び運動方向変換領域における磁場形状や効率の関係、速度分散を考慮したコレクター効率が検討された<sup>12)</sup>。また、実機評価では、10kW から 20kW 入力電力に対して効率 60-80%を達成した<sup>13)</sup>。

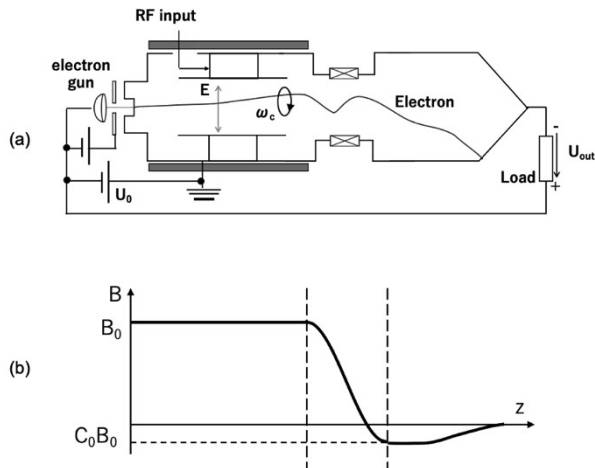


図1 Overview of the CWC. (a) Schematic diagram. (b) Magnetic flux density distribution.

更なる大電力化を目指し、周波数 2.45GHz の入力電力 875kW でマイクロ波が入射する共振器領域の Particle-In-Cell 法 (PIC) の数値解析が行われ、95%の変換が可能であると報告された<sup>14)</sup>。また、マグネトロン、CWC、パラボラを用いた 10km のワイヤレス送電を想定した実験計画では、周波数 2.45GHz、8.5kW の DC 出力電力、1%のトータル DC-DC 効率が想定された<sup>15)</sup>。このように CWC の大電力化及び高効率化の研究がなされてきた。一方で、90 年代以降の CWC 研究に関しては、ワイヤレス給電研究の主流がエネルギーハーベスティングなどの低出力用途であるダイオードを用いた整流器に置き換わった。従って、指向性の高いミリ波帯など既存の 2.45GHz よりも高い周波帯でのワイヤレス給電はごく最近のトピックであり、CWC 設計に関する知見はない。

ミリ波帯での CWC を設計する上での課題は、CWC の各コンポーネントがミリ波帯で動作するかである。特に共振器において、高い周波数の入力マイクロ波が、CWC の動作周波数と共振するかどうか課題となる。

入力マイクロ波とマイクロ波共振器の共鳴現象を利用する CWC は、鋭い周波数応答を持つ。また同時にビーミング伝送の大電力発振源として一般的

に用いられるマイクロ波増幅管にもそれぞれ特徴的な周波数スペクトルが存在する。更に、発振器毎に僅かに中心周波数が異なる。そのため、CWC の設計周波数によって共振出来るかの許容性が異なり、高い周波数になるほど厳しくなると考えられる。

マグネトロンには発振周波数と位相の不安定性、発振周波数帯域幅の広さという欠点がある。そのため、注入同期法や Phase-Locked Loop (PLL) などを用いて周波数スペクトルの改善が研究されてきた。周波数の狭帯域化により、Q 値が 8200 から 120000 まで (帯域幅 300kHz から 20kHz まで) 改善されたという報告もある<sup>16)</sup>。また、中心周波数 5MHz 程度の差 (0.1%) で周波数制御を行うことが可能である<sup>17)</sup>。<sup>18)</sup>。振動スペクトル幅が約 400kHz のジャイロトロンに対しても、PLL によって 10kHz 程まで狭まると言われている<sup>19)</sup>。内部の電磁波のモードによって発振周波数が決定しており<sup>20)</sup>、<sup>21)</sup>、注入同期法によって中心周波数 28GHz で 5MHz (0.017%)、100GHz では 20-40MHz (0.02%)まで周波数制御が可能と報告された<sup>22)</sup>、<sup>23)</sup>。

一方、誘電率測定に使用される空洞共振器などは、周波数 3GHz に対して約 300kHz の 8GHz で約 1MHz の帯域幅を持ち、高い周波数になるほど広がる<sup>24)</sup>。

そこで本論文では、まず CWC の基本原理を簡単に記述したのち、外部磁場を含めた基本的な構成要素の技術的な成立性を検討する。その後、先行研究の等価回路理論をもとに、CWC の高い周波数に対する共振条件を検討する。運動方向変換領域は電子ビームの中心の運動を、コレクター領域は Vanke らの先行研究を考慮することで、それぞれの領域のミリ波帯での高効率動作の可能性を検討した。

### 3. 印加磁場による周波数上限

CWC の構造は人工衛星等に使用される真空管型マイクロ波増幅管である進行波管に類似している。前述した 3つの領域のうち共振器で電子が電子銃から供給され、マイクロ波のエネルギーが回転エネルギーとして電子に吸収される。この時、印加した磁場  $B_0$  に依存するサイクロトロン周波数  $f_c = eB_0/m$  と入射マイクロ波電磁界  $f$  が一致する時に吸収が生じる。そのため、CWC の動作周波数が高くなると必

要磁場も大きくなる。運動方向変換領域では、軸方向磁束密度に勾配を与え、半径方向磁束密度によるローレンツ力を利用して電子の回転エネルギーを直線運動エネルギーに変換する。そして電位降下コレクターで電子を回収し、負荷抵抗から直流電力を取り出す。

本体部分以外の構成要素である直流電源及び電子銃、負荷抵抗、外部磁場に関する技術的成立を検討する。Figure 2 に示すように、電源は電子銃のカソードから熱電子を引き出すためのヒーター電源と、電子加速用電源が必要になる。また、コレクターでの逆流電子を抑制するために多段コレクターを採用する場合には、コレクター電位を印加する必要がある<sup>25)</sup>。実際に印加する電位分布を検討するためには粒子計算が必要となる<sup>26)</sup>。電子銃から引出される電子ビームは、軸方向速度が優勢にしてピッチファクタを非常に小さくする必要がある。同様の Pierce 型電子銃を採用している Ka バンドの進行波管では、グリッドを用いて直線状の電子ビームを引き出せる電子銃を設計した<sup>27)</sup>。これら電源や電子銃はミリ波帯真空管で実用され、技術的に成立している。

また、CWC の印加磁場は前述した通り動作周波数に依存する。単純に円筒形の磁力の強いネオジム磁石を仮定すると、市販のもので 600mT ほどであり、周波数にして 17GHz になる。マイクロ波増幅管であり外部磁場で電子集束を行う TWT でも、永久磁石による周波数向上が試みられ、periodic permanent-magnet (PPM) 磁石を用いて 34GHz や 30GHz の装置が評価された<sup>28,29)</sup>。TWT のように PPM 磁石が適応出来る場合には、周波数 35GHz 程度まで電力を使用せずに磁場が印加できる。それ以上の周波数になると電磁石を使用する必要がある。そのため、どのタイプの永久磁石が CWC に適切かは詳細な検討が必要になるが、以降は特に 17GHz や 35GHz を目安に、ミリ波 CWC の動作可能性に関して検討していく。

### 3. マイクロ波電子相互作用部の周波数共振

Cuccia らに提案された平行平板共振器を用いる<sup>30)</sup>。共振器内では、Fig.3 に示すように外部磁石による軸方向一定磁場  $B_0$  が印加される。

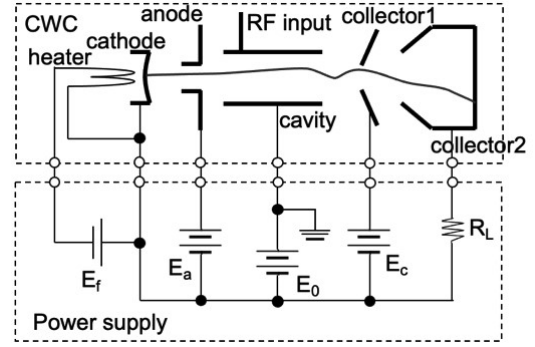


図 2 Solid state power supply for CWC.

平板間には軸に垂直な電場  $E_y$  が励起される。ここで、共振器に電子が突入する時刻を  $t_0$  とし、 $x$  と  $y$  方向の速度及び加速度は 0 であるとする。電場の角周波数  $\omega$  と電子のサイクロトロン角周波数  $\omega_c$  として電子の速度は

$$v_x = -\frac{e}{2m} E_0 \frac{j(e^{j(\omega_c - \omega)(t - t_0)} - 1)}{\omega_c - \omega} e^{j\omega c t} \quad (3)$$

となる。 $y$  方向については  $x$  方向と位相が  $\pi/2$  ずれる。電場との共振で得られる電力  $P$  によって、回転速度  $v_x$  を持つと考えられるため、ビーム電流  $I_0$  を持つとき、以下のように表せる。

$$P = \frac{1}{2} m v_x^2 \frac{I_0}{e} \quad (4)$$

ここで、電子が領域を通過する時間  $t - t_0$  は、理想的に  $v_{z0}$  が一定とすると、共振領域長さ  $L$  に  $v_{z0}$  で簡単に表せるため、電子ビーム抵抗  $R_0$  が導かれる<sup>29)</sup>。

$$R_0 = \frac{8 \left[ \frac{d}{L} \right]^2 I_0}{U_0} \quad (5)$$

また、平行平板共振器は Fig.4 に示す等価回路で表せる<sup>31)</sup>。図中の外部電源は共振器に入射するマイクロ波を、添字  $c$  が共振器、 $e$  が電子ビームに関する諸量を表す。等価回路中のそれぞれの物理量を以下に示す。 $\beta$  は単位長さあたりに進む回転角、 $\theta$  は共振器を通過する間の積算ずれ角周波数、 $G_0$  は角周波数の差がない状態で電子が電力を吸収した際の電子のコンダクタンスを示す。

$$\beta_e = \frac{\omega}{v_{z0}}, \beta_c = \frac{\omega_c}{v_{z0}}, \theta = \frac{(\beta_e - \beta)L}{2} \quad (6)$$

$$G_e = G_0 \left( \frac{\sin\theta}{\theta} \right)^2, B_e = -2G_0 \frac{2\theta - \sin 2\theta}{(2\theta)^2} \quad (7)$$

図中  $G_s$  は外部信号源のコンダクタンスを表す。共振器の電子ビームとマイクロ波の電力授受を表す共振器効率  $\eta_{cav}$  は、外部から挿入されるマイクロ波のうち共振器内に導かれる電力分が  $G_s$  で消費される効率と、 $G_e$  で消費される電力分の効率の積として表される。

$$\eta_{cav} = \frac{I_{ss}V_s}{\frac{1}{2}I_sV_s} \times \frac{I_{se}V_s}{\frac{1}{2}I_sV_s} = \frac{4G_sG_e}{|Y_{tot}|^2} \quad (8)$$

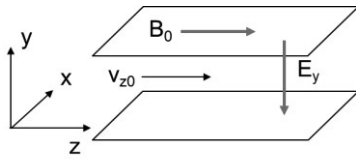


図3 Electric and magnetic field in Cuccia coupler.

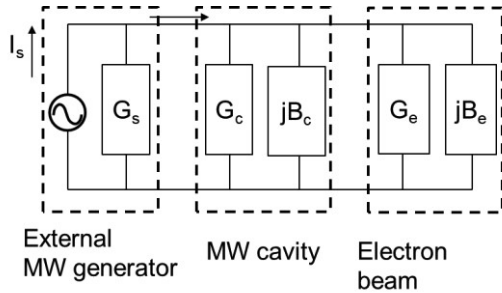


図4 Equivalent circuit of the cavity.

$I_{ss}$  は  $G_s$  を流れる電流、 $I_{se}$  は電子ビームのコンダクタンスを流れる電流を表し、 $Y_{tot}$  は各要素のアドミタンスの和である。マイクロ波信号源から電子ビームまで効率よく電力を送る条件は、アドミタンスが発振側と共振器側で複素共役の関係にある必要があるので、以下で表される。

$$\eta_{cav} = \frac{G_e}{G_s} = 1 - \frac{G_c}{G_s} \quad (9)$$

いま、共振器の設計周波数  $f_c$  においてサイクロトロン共鳴が理想的に 100% になる共振器、すなわち  $G_e = G_e$  であり  $B_c = G_c = 0$  の場合を考える。更に、発振側の帯域幅は理想的に十分狭い 0.001% 以下とした。この時、共振器の設計周波数  $f_c$  と入力マイクロ波周波数  $f$  との差が生じた際の共振器効率の低下

を検討し、ワイヤレス給電の受電側装置として発振器の周波数変動にどの程度対応できるかを検討した。共振器の設計周波数  $f_c$  ごとに共振器効率をプロットしたものを Fig.5 に示す。共振器設計周波数  $f_c$  と発振器のマイクロ波周波数  $f$  の差  $\Delta f$  に関しては、 $\Delta f = |f_c - f|/f_c$  として、0.01%、0.02%、0.05%、0.1% の 4 通りに対して計算を行った。特に低い周波数においては入力マイクロ波周波数との差が 0.2% 程度であれば共振器効率低下は 2% と十分周波数共振が可能であり、発振側の中心周波数設定の精度と合わせて考えると高効率を実現可能であると分かる。共振器の設計周波数が上昇すると、入力マイクロ波との周波数の差に対して共振効率が低下することがわかる。共振器効率が 5% 低下するのは、共振器設計周波数 17GHz では 0.05%、共振器設計周波数 35GHz では 0.02% で、これらはミリ波帯ジャイロトロンを中心周波数で制御可能な 0.017% と同等であり、周波数共振が可能であるとわかる。一方、更に高い周波数で設計しようとする、100GHz では共振器設計周波数と発振器周波数が発振側の中心周波数が 0.01% の差で共振効率が 10% 低下する。この周波数帯での発振器の中心周波数の制御は 0.02% の精度であり、この場合には CWC の共振は難しくなる。ミリ波帯では発振器側の中心周波数の制御と共振可能な周波数が同じ精度をもつので、共振が可能である。

#### 4. 運動方向変換部とコレクターの周波数依存

この章では、まずビーム中心の運動方向変換領域における理論効率を数式で表し、周波数依存性に関して論じる。続いて Vanke らの定義を元にコレクター部のミリ波成立性に言及する。

最終的に CWC から直流電力を取り出す際、コレクター電位とカソード電位の差が大きい程大電力が取得出来る。そのためには電子の軸方向速度が大きい必要があり、運動方向変換領域でマイクロ波から得たエネルギーを電子の軸方向エネルギーに効率よく変換することが求められる。

運動方向変換領域における磁場分布は、共振器外部の永久磁石端部に鉄部材を取り付け、所望の磁気回路を生成させることで制御する<sup>32)</sup>。理想的な磁束密度の分布と電子の運動の様子を Fig.6 に示す。軸方向磁束密度  $B_z$  が  $z$  軸に沿って緩やかに減少するこ

とで半径方向磁場  $B_r$  が生じ、そのローレンツ力によって電子の回転方向速度の減速と軸方向速度の加速が生じるため、螺旋を描くようにして徐々に半径を広げながら出口に向かう。

運動方向変換領域では、現実には共振器からの漏れ電場があると考えられるが、ここでは簡単のため電場が存在しないものとし、電子の運動エネルギーは保存すると仮定する。領域内の磁場を近似的に以下の数式で表す<sup>33)</sup>。磁場反転係数  $C_0$  は領域入り口の磁場強度  $B_0$  に対しての領域出口での磁場強度を表し、 $L_{con}$  は運動方向変換領域長さを表す。

$$B_z = \frac{B_0}{2} \left( 1 + C_0 + (1 - C_0) \cos\left(\frac{z\pi}{L_{con}}\right) \right) \quad (10)$$

運動方向変換領域の効率  $\eta_{con}$  は、回転方向運動エネルギーがどれほど軸方向運動エネルギーに変換できたかを表し、以下の数式で定義される<sup>11)</sup>。ただし、 $v_{z0}$  と  $v_{\perp 0}$  は運動方向変換領域入り口での軸方向速度と回転速度を、 $\langle v_z \rangle$  は領域出口での電子ビームの平均軸方向速度を表す。

$$\eta_{con} = \frac{\frac{1}{2} m \langle v_z \rangle^2 - \frac{1}{2} m v_{z0}^2}{\frac{1}{2} m v_{\perp 0}^2} = \frac{\langle v_z \rangle^2 - v_{z0}^2}{v_{\perp 0}^2} \quad (11)$$

運動方向変換領域での磁場は軸対称であり、ベクトルポテンシャル  $\theta$  方向成分のみを持ち、 $A_\theta = \frac{r}{2} B_z$  で近似できる。角運動量保存則より、運動方向変換領域の回転方向速度は以下のように表せ、領域長さ  $L_{con}$ 、磁場反転係数  $C_0$ 、回転半径  $r$  に依存する。 $p_0$  は初期角運動量を表す。

$$v_{\perp} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{p_0}{r} + \frac{er}{4} B_0 \left[ 1 + C_0 + (1 - C_0) \cos\left(\frac{z}{L_{con}} \pi\right) \right] \right\} \quad (12)$$

また、運動エネルギー保存から軸方向速度を算出できる。

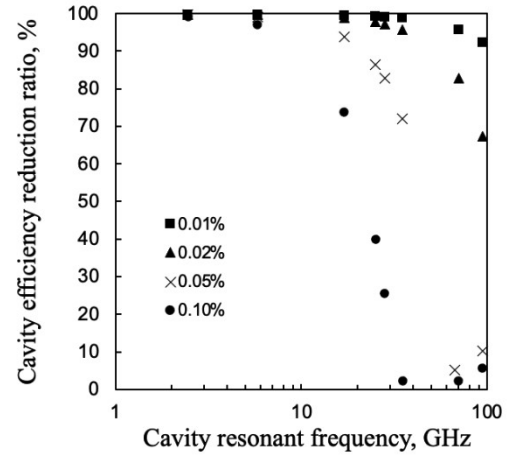


図 5 Cavity efficiency reduction rate variation with respect to the design frequency and input frequency.

これらを先ほど定義した運動方向変換領域の効率の式(11)に代入する。

$$\eta_{con} = 1 - \frac{1}{v_{\perp 0}^2} \left( \frac{p_0}{mr} + \frac{e}{m} r \frac{B_z}{2} \right) \quad (13)$$

ここでさらに運動方向変換領域入り口の回転半径  $r_0$  と出口の回転半径  $r$  との比で書き下す。

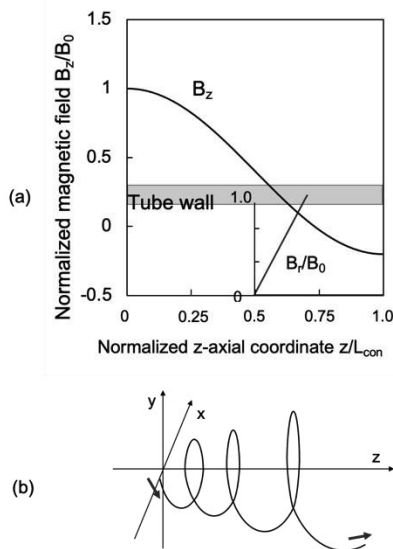
$$\eta_{con} = 1 - \frac{1}{4} \frac{r_0^2}{r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{r_0^2} C_0 \right)^2 \quad (14)$$

式(14)より、理論効率上では運動方向変換領域の効率が周波数に依存しないことがわかる。磁場反転効率の回転半径比  $r/r_0$  と磁場反転係数  $C_0$  に対する関係をプロットしたものを Fig.7 に示す。

どの初期及び出口の回転半径比  $r/r_0$  においても最大効率を達成するのは  $C_0 = -0.2$  付近であることがわかる。しかし、実際には電子ビーム内でかかるローレンツ力が異なることから、速度変換に僅かに差が生じ、その分効率が低下すると考えられる。そのため、実際には効率 100% を達成することは難しく、その影響は詳細な数値計算が必要である。我々の数値解析によると、2.45GHz の CWC で粒子の速度分散によって 6% ほどの効率低下が生じうる<sup>34)</sup>。ミリ波帯であればこの分散はより顕著になるであろう。

運動方向変換領域で軸方向運動を持った電子群はコレクターで回収される。この際、低電位コレクターを採用することにより、熱損失になる分を直流電力として取り出せる。コレクター電位を電子ビームの速度に合わせ印加し、電子ビームエネルギーの回収を行うことは、ジャイロトロンが発振効率を高

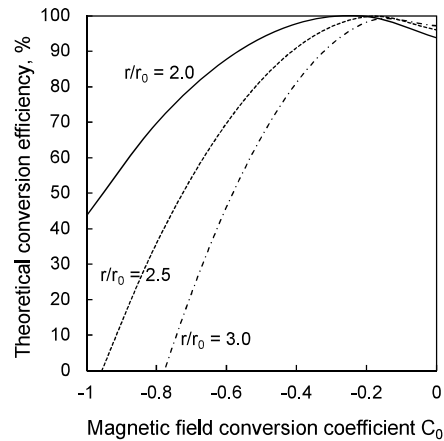
めるために研究されている<sup>35)</sup>。コレクター電位がカソードと同電位である場合、電子は速度を持ったままコレクターに突入し、熱損失になる。そこでコレクターに負荷を接続することで、電子が到達した際にコレクター電流によってコレクター電位が押し下げられる。その際コレクターとカソードに電位差が生じ、本来熱として消費される電子のエネルギーを負荷抵抗から DC 電力として取り出せる。一方で、運動方向変換領域で電子ビームの軸方向速度に分散が生じ、最小速度の電子に合わせてコレクター電位を決定するため、それより速度の高い電子は損失となる。速度分散によるコレクター損失を考慮すると、電子捕集効率は以下のように表せるため<sup>11)</sup>、特に周波数依存性は考慮しなくて良い。



**Fig.6** Distribution of the magnetic flux density and the diagram of the electron beam orbit in the conversion region. (a) Distribution in the z-axial and radial magnetic flux density with respect to normalized axial coordinates in the magnetic field. (b) Image of the electron orbit.

将来的には運動方向変換領域で生じる速度分散も考慮した上で、コレクター内の電位分布も含めた数値解析を行う必要がある。

$$\eta_{coll} = \frac{v_{z,min}^2 - v_{z0}^2}{\langle v_z \rangle^2 - v_{z0}^2} \quad (15)$$



**Fig.7** Theoretical conversion efficiency of the conversion region versus rotational radius ratio and magnetic field reversal coefficient  $C_0$ .

## 5. 結言

ミリ波帯 CWC の設計を目指し、技術的成立性の検討を行った。運動方向変換領域の効率とコレクター効率は、将来的にビーム半径も含めた詳細数値解析が必要ではあるものの、大きく周波数に関わるファクターは見受けられなかった。共振器領域においては、入力マイクロ波周波数と共振器設計周波数の差に対する応答に着目し、周波数共振条件を検討した。2.45GHz や 5.8GHz といった共振器設計周波数においては、0.2%の差に対し共振器効率の低下はほとんどなかった。35GHz では発振器と約 0.02%の周波数差であれば共振器効率の低下は 5%に抑えられる。これは発振器側の中心周波数として制御可能であり、ミリ波帯の CWC は動作可能である。一方、それ以上の CWC 設計周波数になると発振器側の中心周波数との差が論文で報告されている制御可能な周波数より小さく、共振が困難になることが分かった。今後は特に共振器や運動変換領域の設計のため粒子法による数値計算を進める。

## 発表論文

- [1] 松倉真帆, 嶋村耕平, 横田茂, サイクロトロン波変換器のミリ波帯における技術成立性, プラズマ応用科学, Vol. 30, No. 1, 2022 年 6 月

口頭発表、受賞等

1. M. Matasukura, K. Shimamura, S. Yokota, Numerical Calculation of 1kW Cyclotron wave Converter for High-Density Power Transfer, 2022 Wireless power week (WPW), France, Sep. 2022.

## 参考文献

- (1) D. C. Watson, R. W. Grow and C. C. Johnson; A Cyclotron-wave Rectifier for S-band and X-band, IEEE Trans. Electron., Vol. ED-18(1), 1971, pp.3-11.
- (2) Vanke, H. Matsumoto, N. Shinohara and A. Kita; Cyclotron Wave Converter of Microwave into DC," IEICE Trans. Electron., Vol. E81-C(7), 1998.
- (3) V. A. Vanke, V. L. Savvin, I. A. Boudzinski, S. V. Bykovski; Development of cyclotron wave converter, Abstracts of The Second International WPTC'95, Japan.
- (4) X. Zhao, X. Tuo, Q. Ge, and Y. Peng; Research on the High power Cyclotron-Wave Rectifier, Phys. Plasma, Vol.24(7), 2017.
- (5) B. Hu, H. Li, T. Li, H. Wang, Y. Zhou, X. Zhao, X. Hu, X. Du, Y. Zhao, X. Li, T. Qi, "A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier," Energy Reports, 2020.
- (6) T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto; Improvement of frequency spectrum generated from microwave oven magnetrons for microwave power transmission, IEICE Technical Report of Ieice SPS2002-18 (2003-03) (in Japanese).
- (7) C. Liu, H. Huang, Z. Liu, F. Huo, and K. Huang, "Experimental Study on Microwave Power Combining Based on Injection-Locked 15-kW S-Band Continuous-Wave Magnetrons," in IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.44(8), pp. 1291-1297, 2016.
- (8) X. Chen, B. Yang, N. Shinohara, and C. Liu, "A High-Efficiency Microwave Power Combining System Based on Frequency-Tuning Injection-Locked Magnetrons," in IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.67(10), pp.4447-4452, 2020.
- (9) G. Yu. Golubiatnikov, A. F. Krupnov, L. V Lubyako, A. G. Luchinin, A. B. Pavelyev, M. I. Petelin, and A. Fernandez Curto; Gyrotron frequency control by a phase lock system, Technical Physics Letters, 2006, Vol.32(8), pp.650-652.
- (10) B. G. Danly, W. J. Mulligan, and R. J. Temkin, "High-power second harmonic emission and frequency locking in a 28-GHz gyrotron," Appl. Phys. Lett. 46, 728, 1998
- (11) T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, etc., "Development of gyrotrons for fusion with power exceeding 1 MW over a wide frequency range," IAEA Nuclear Fusion, Vol.55(9), 2015.
- (12) B. G. Danly, W. J. Mulligan, and R. J. Temkin; High-power second harmonic emission and frequency locking in a 28-GHz gyrotron, Appl. Phys. Lett. 46, pp.728-730 (1985).
- (13) N. S. Ginzburg, A. S. Sergeev, and I. V. Zotova; Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators, Physics of Plasmas 22, 033101 (2015).
- (14) H. Nakai, Y. Kobayashi, and Z. Ma; Measurements of complex permittivity of a square bar using multi-modes TM<sub>00</sub> of a circular cavity, The 23th JIEP Annual Meeting, 2009.
- (15) K. Sugimori, K. Oosaki, and Y. Ueda; RF to DC energy converter electron tube for SPS system application (part 2) -comparison with the simulation results-, Memoirs of National Institute of Technology Kurume College, Vol.15(1), 1999, pp.5-10 (in Japanese).
- (16) L. Zhang, W. He, A. W. Cross, A. D. R. Phelps, K. Ronald and C. G. Whyte, "Numerical optimization of a multistage depressed collector with secondary electron emission for an X-band gyro-BWO, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 37(12), pp. 2328-2334, 2009.
- (17) P. Livreri, R. Badalamenti and A. Muratore; Optimum design and performance of an electron gun for a Ka-band TWT," IEEE Trans. Electron Devices, Vol.66(9), 2019, pp. 4036-4041.
- (18) X. Shi et al.; Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM system in staggered double vane TWT, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.62(12), pp.4258-4264, 2015.
- (19) J. R. Legarra, J. Cusick, R. Begum, P. Kolda and M. Cascone, "A 500-W coupled-cavity TWT for Ka-band communication," in IEEE Transactions on Electron Devices,

- Vol. 52(5), pp. 665-668, 2005.
- (20) C. L. Cuccia: The electron coupler –a developmental tube for amplitude modulation and power control at ultra-high frequencies,” *RCA Rev.* 10(2), 270, 1949
  - (21) W. M. Manheimer and G. W. Ewell, “Cyclotron Wave Electrostatic and Parametric Amplifiers,” *IEEE Trans. On Plasma Science*, 26(4), pp. 1282-1296, 1998.
  - (22) N. Makino, M. Mishima, “Design of Permanent Magnet (3),” Vol. 6(6), 1956, (In Japanese)
  - (23) X. Zhao, Y. Fang, H. Wang, and X. Tuo, “Analysis of the effect of field non-uniformity on energy conversion efficiency in a cyclotron-wave rectifier,” *Physics of Plasma*, Vol. 25(11), 2018.
  - (24) M. Matsukura, K. Shimamura, and S. Yokota; Theoretical efficiency and numerical calculation of a 1 kW RF-DC cyclotron rectifier, AWPT2021, conference, S2-04.
  - (25) B. Piończyk, C. T. Iatrou, G. Danmertz and M. Thumm, “Single-stage depressed collectors for gyrotrons,” in *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 24(3), pp. 579-585, 1996.