

## 産業用 100 mA 級マイクロ波イオン源の開発

### DEVELOPMENT OF A 100 mA-CLASS MICROWAVE DISCHARGE ION SOURCE FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

村瀬龍#, 村田裕彦, 高橋伸明, 横山一博

Ryu Murase#, Hirohiko Murata, Nobuaki Takahashi, Kazuhiro Yokoyama

Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

#### Abstract

Industrial accelerators are utilized in a variety of fields, including semiconductor manufacturing and medicine. In recent years, there has been an increasing need to enhance the irradiation throughput of industrial accelerators. To address this need, development of high-current ion sources is required. We have developed a 2.45 GHz off-resonance 100 mA-class microwave discharge ion source for proton beam that can be integrated into an industrial accelerator. The plasma chamber and the matching transformer, which matches the impedance between the waveguide and the plasma chamber, were designed using analytical methods and the finite element method. The beam extraction system, which consists of three single-hole electrodes operating in acceleration and deceleration modes, was designed using beam orbit calculations that take into account space-charge effect. A prototype of the ion source has been fabricated and beam tests have been performed. The target beam current of 120 mA was successfully achieved, and a stable beam was extracted for a duration of 30 minutes.

#### 1. 背景と開発目標

現在、イオン加速器は学術研究目的だけではなく、陽子線・重粒子線治療、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)、RI 薬剤合成といった医療応用や、半導体製造装置、中性子ラジオグラフィなどの産業応用の分野において盛んに利用が行われている。近年、上記の応用において照射スループットを向上させる必要性が高まっており、これに対応するためには、大電流のビームを発生させることのできるイオン源の開発が必要となる。当社では、産業用イオン加速器に組み込むことを目標として、CWビームが生成できる大電流イオン源の開発を行った。

Table 1 に、本開発における開発目標を示す。今回は、産業用加速器で広く用いられている陽子ビーム生成用のイオン源の開発を行った。今回の開発目標は、低価数の大電流イオンビームを生成することであるため、その用途に適したイオン源として、2.45 GHz のマイクロ波で駆動する、マイクロ波放電型イオン源 (以下、マイクロ波イオン源) を採用した。

Table 1: Target Performance of the Ion Source

Ion species	H <sup>+</sup>
Extraction voltage	45 kV
Beam current	120 mA <
Operation mode	CW

#### 2. マイクロ波イオン源の設計

Figure 1 に設計したマイクロ波イオン源の概要を示す。マイクロ波イオン源を構成する主なコンポーネントは、①

# ryu.murase@shi-g.com

H<sub>2</sub> ガスを電離させてプラズマを発生させるプラズマチャンバ、②マイクロ波電力を効率よくプラズマチャンバに導入するマッチングセクション、③高密度プラズマを生成するための磁場を発生させるソレノイドコイル、④プラズマから陽子をビーム状にして引き出すビーム引出系、の 4 つである。以下では、マイクロ波イオン源の各コンポーネントの設計について詳細に述べる。

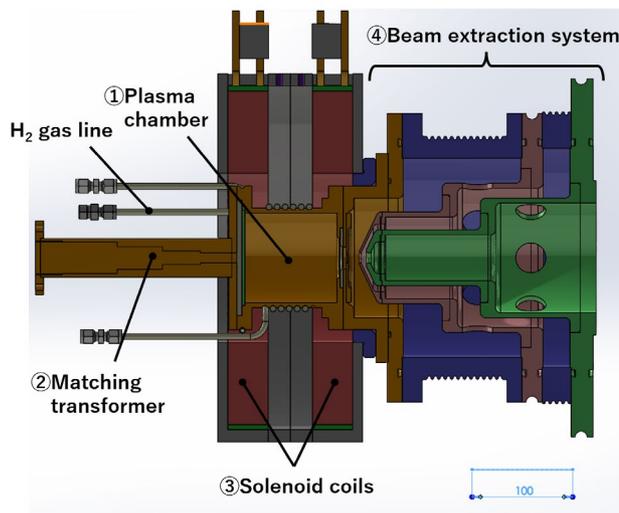


Figure 1: Overview of the designed microwave discharge ion source.

##### 2.1 プラズマチャンバ・マッチングセクション設計

マイクロ波イオン源では、プラズマを生成するためにマイクロ波電源から導波管を通じてプラズマチャンバにマイクロ波による電力を供給する。その際、通常は導波管とプラズマチャンバのインピーダンスが大きく異なるため、導波管をそのままプラズマチャンバに接続しても、接続部でマイクロ波が反射してしまい、プラズマへ効率的に

電力を供給することができない。マッチングセクションは、両者のインピーダンスを少しずつ近づけていき、反射波を低減させるための機器である。今回は、同じく2.45 GHzのマイクロ波イオン源で陽子ビームの生成に成功している Misra *et al.* [1] によって述べられている方法を参考に、導波管の内側の上下に高さ異なる数段の階段状のリッジ(ダブルリッジ)を設けた構造を持つマッチングセクションの設計を行った。この階段状の構造における長さおよびギャップを最適化することで、反射波を低減させることができた。

一方で、プラズマチャンバのインピーダンスはチャンバの寸法によって決まるため、マッチングセクションの設計と併せてプラズマチャンバの設計も行う必要がある。プラズマチャンバは直径  $D$ 、長さ  $L$  の円筒形をした金属製の容器であり、その片方の底面にマッチングセクションが接続される。プラズマチャンバはマイクロ波共振器として動作し、マイクロ波によってチャンバ内に形成される電場の強さは、チャンバの寸法に大きく影響を受ける。設計では、マイクロ波によってチャンバ内に発生する電場の強度がなるべく高くなるように、寸法(直径  $D$  および長さ  $L$ )の最適化を行った。プラズマを生成する際には、プラズマチャンバ内に伝搬するモードが、基本モードである  $TE_{11}$  モードのみであることが望ましい。そのため直径  $D$  については、マイクロ波周波数  $f_0 = 2.45$  GHz において  $TE_{11}$  モードが伝搬し、その次のモードである  $TM_{01}$  モードが伝搬しなくなるという条件と、使用する導波管(WR284: 幅 72.1 mm、高さ 34.0 mm)が接続できる大きさであるという条件から  $D = 90$  mm とした。

次に長さ  $L$  については、プラズマチャンバを直径  $D$ 、長さ  $L$  の円筒形の空洞共振器と考えたとき、このチャンバの  $TE_{mnp}$  モードでの共振周波数  $f$  は、

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2\rho'_{mn}}{D}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{L}\right)^2} \quad (1)$$

となる[2]。ここで  $c_0$  は真空中の光速、 $m, n, p$  はモードナンバーである。今回使用する共振モードは  $TE_{111}$  であり、 $m = n = p = 1$  となる。 $\rho'_{mn}$  は、第一種  $m$  次 Bessel 関数  $J_m(\rho)$  の導関数  $J'_m(\rho)$  についての方程式  $J'_m(\rho) = 0$  の第  $n$  番目の解であり、 $\rho'_{11} = 1.841$  である。 $c_0 = 2.998 \times 10^8$  m/s、 $f = 2.45$  GHz、 $D = 90$  mm を式(1)に代入すると、 $L = 101.2$  mm と求まる。

上記で解析的に求めた  $L$  を出発点として、前述のマッチングセクションと接続した場合について高周波電磁場の3D 計算機シミュレーションを行い、チャンバ寸法の最適化を行った。シミュレーションには、Dassault Systèmes社の電磁場解析ツール CST Studio Suite[3]に付属の Microwave Studio (CST MWS)の周波数ドメインソルバを用いた。計算は、マッチングセクションをチャンバに接続した体系を用いて行った。チャンバの直径を  $D = 90$  mm に固定してチャンバ長さ  $L$  を振り、2.45 GHz でチャンバ内部の  $TE_{111}$  モード電場が最大となるような最適な  $L$  を求めたところ、 $L = 105.6$  mm となることがわかった。Figure 2 に、最適なチャンバ長さ  $L$  での電場強度分布の計算結果を示す。

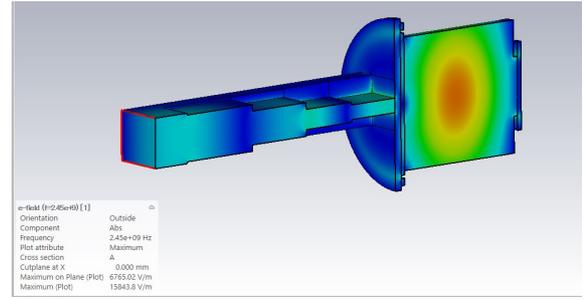


Figure 2: MW electric field simulation of a plasma chamber and a matching transformer.

## 2.2 ソレノイドコイル磁場設計

マイクロ波をプラズマに入射させると、プラズマ密度が低い時は吸収されるが、一定の密度以上になると吸収されずにプラズマ境界で反射されるようになる。具体的には以下の式(2)で計算されるプラズマ振動数  $f$  と入射させるマイクロ波の周波数との大小関係によって決まり、プラズマ振動数  $f$  がマイクロ波の周波数  $f_0$  より大きくなる場合にマイクロ波は反射される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{ne^2}{m\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで  $n$  はプラズマ密度、 $e$  は素電荷、 $m$  は電子の質量、 $\epsilon_0$  は真空中の誘電率である。マイクロ波が反射されるときのプラズマ密度はカットオフ密度と呼ばれている。 $f_0 = 2.45$  GHz のマイクロ波を用いてプラズマを生成する場合、カットオフ密度は  $7.4 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup> である。プラズマ密度がカットオフ密度に達すると、マイクロ波は反射されてプラズマにエネルギーを供給することができなくなるため、プラズマの密度をカットオフ密度以上にすることができなくなる。そのため、 $f_0 = 2.45$  GHz のマイクロ波を用いて達成できるプラズマ密度の上限は  $7.4 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup> となる。一方で、今回の開発目標であるビーム電流 120 mA 以上を達成するには、 $10^{12}$  cm<sup>-3</sup> オーダーのプラズマを生成することが必要となるため、この状態では原理的に目標のビーム電流量を達成することは不可能である。

以上の問題を解決し、プラズマ密度をカットオフ密度よりも高くする方法として、プラズマに対してマイクロ波の進行方向と同じ向きの静磁場を印加する方法が知られている。いくつかの文献において、高密度のプラズマを生成するための最適な磁場分布が紹介されている。それらによると、プラズマチャンバ中心軸上の磁場強度について、

- I. プラズマチャンバの両端で電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 磁場  $B_{ECR}$  となること ( $f_0 = 2.45$  GHz の場合、 $B_{ECR} = 87.5$  mT)
- II. プラズマチャンバ内部における磁場強度  $B$  について、 $B_{ECR} \leq B \leq 1.3 B_{ECR}$  となること

という2つの条件を満たしたときに高密度のプラズマが生成される[4, 5]。上記のような磁場分布を持つイオン源は off-resonance 型と呼ばれる。本開発でも上記の磁場分

布の形成を目指して、ソレノイドコイルの設計を行った。

一方で、上記の磁場分布を形成すると、後述のプラズマ電極と引出電極との間に磁場が漏れ出す。プラズマ電極と引出電極の間にはビームを引き出すために高強度の電場が印加されているため、両電極間において放電が起こる可能性がある。その際、放電領域に磁場が強く漏れ出していると、放電が促進されてしまうおそれがある。そこで、引出電極の一部を磁性体で構成して磁気シールドとすることで、ビーム引き出し領域への漏れ磁場を低減させた。また、コイルの外周についても磁性体のヨークで囲うことで漏れ磁場を抑制し、効率よく磁場分布を形成できるようにした。

静磁場の計算には、2D 有限要素解析ソフト FEMM 4.2[6]を用いた。コイルの起磁力を適切に調整したときの2D 磁場分布の計算結果の一例を Fig. 3 の上図に示す。Figure 3 の下図は2D 磁場分布における中心軸(z 軸)上の磁場強度分布を示している。下図における灰色の2本の縦線はプラズマチャンバの両端を示しており、赤い横線は  $B_{ECR}$  と  $1.3 B_{ECR}$  を示している。図から、コイルの起磁力を適切に設定することで、高密度プラズマの生成に適した条件を満たすような磁場分布を形成できることがわかる。また、ビーム引出領域への漏れ磁場についても、磁気シールドによって格段に低減される。さらに、2つのソレノイドコイルの間の距離を変えたときの計算結果についても Fig. 3 の下図に示している。(上図の2D 磁場分布は、コイル間距離が 44 mm のときの結果を代表して示している。)コイル間距離を変えることで、前述の I、II の条件を満たしながら、磁場分布を変化させることができる

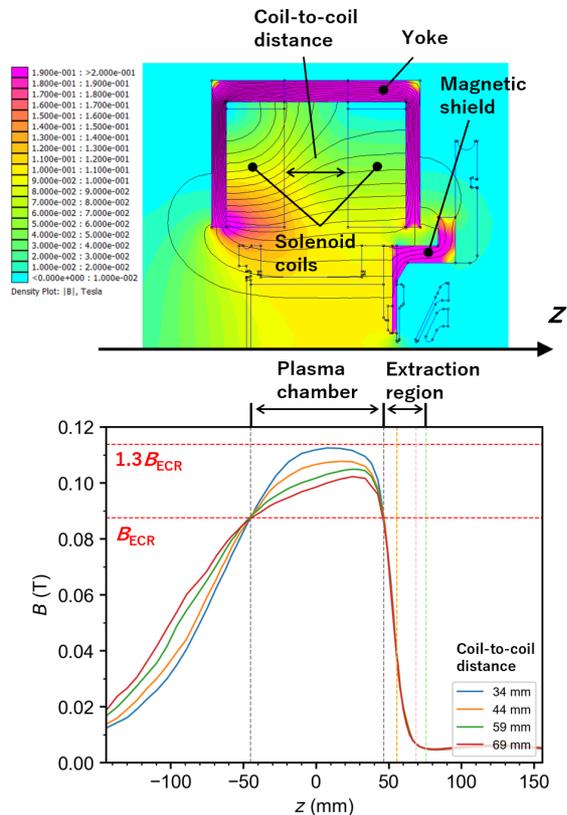


Figure 3: Magnetic field simulation of the plasma chamber.

ことがわかる。

### 2.3 引出電極設計

本節ではマイクロ波イオン源の引出電極の設計内容について述べる。イオン源から引き出されるビーム電流は以下の式(3)で示す空間電荷制限電流  $I_{si}$  に制限されている[7]。

$$I_{si} = 4.3 \times 10^{-5} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot V_0^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{2a}{d}\right)^2 \quad (\text{mA}) \quad (3)$$

ここで  $M$  は amu 単位で表されたイオンの質量(今回の場合、 $M = 1$ )、 $V_0$  は V 単位で表された引出電極に印加される電圧、 $a$  は引出開口の半径、 $d$  は引出電極間のギャップである。式(3)からわかる通り、 $I_{si}$  は印加電圧  $V_0$  と、開口径  $2a$  と引出電極間のギャップ  $d$  との比  $2a/d$  (アスペクト比)によって決まるため、引出電極の設計は目的のビーム電流を得るうえで非常に重要となる。式(3)で  $I_{si}$  の下限を 150 mA とすると、アスペクト比  $2a/d > 0.6$  となる必要がある。ここで  $I_{si}$  の下限を 150 mA としたのは、水素プラズマから引き出されたビームのうちの約 20% の成分は  $H^+$  ではなく  $H_2^+$  などの分子イオンであると言われており、目標である陽子ビーム 120 mA を達成するためには、合計で  $120 \text{ mA} / 0.8 = 150 \text{ mA}$  のビーム引き出しが必要となるためである[8]。以上の条件に留意して、引出電極の設計を行った。

引出電極の詳細な形状は、引き出したビームの軌道計算の結果から求めたビームサイズ、発散角および rms 規格化エミッタンスの振舞いを見ながら決定した。ビーム軌道計算には、CST Studio Suite に組み込まれている Tracking Solver を用いた。今回開発した大電流ビームのイオン源では、ビーム引出の際に空間電荷効果がビームの軌道に顕著に影響する。ビームの空間電荷効果を考慮してビームの軌道計算を行うため、Tracking Solver のうちの "Gun Iteration" 機能を用いた反復計算を実施した。

Figure 4 にビーム引出し計算の結果の一例を示す。今回は 3 枚の電極による単孔ビーム引出系を採用した。1 枚目の電極はプラズマ電極と呼ばれ、プラズマチャンバと同電位である +45 kV に昇圧される。2 枚目の引出電極はプラズマ電極と対向する位置に置かれ、-15 kV に昇圧される。負電位に昇圧するのは、①下流側でビームが残留ガスと衝突することによって生成した電子がプラズマチャンバへ逆流することを防ぐ、②大きな電位差により収束されたビームを引き出す、といった理由のためである。3 枚目の電極は接地されており、最終的に陽子は +45 keV の加速エネルギーで引き出される。引出電極の開口の直径は 10 mm とした。

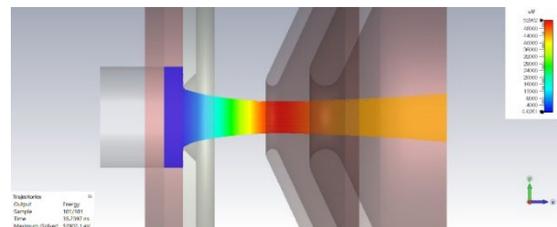


Figure 4: Beam extraction simulation.

### 3. ビーム引出試験

引き出されたビーム電流は、下流に設けられたビームダンプに流れる電流あるいはプラズマチャンバに流れる電流と引出電極に流れる電流の差分から見積もった。まず、ビーム電流のソレノイドコイル電流依存性について調べた結果を示す。Figure 5 はソレノイドコイルの上流側と下流側の電流を変化させたときの、ビーム電流の変化をカラースケールで示している。グラフから、ある起磁力の組み合わせの時に共鳴的にビーム電流が高くなることがわかる。また、ビーム電流を最大化するような最適な下流コイル電流は、上流コイル電流ごとに異なり、上流コイル電流に対して単調に減少することがわかった。このことは、磁場強度分布が2.2節で述べた高密度プラズマを生成する磁場の条件から外れると、急激にプラズマの密度が減少することを示している。以降では、ビーム電流が極大になる領域にソレノイドコイル電流を固定して、マイクロ波パワーやガス流量を調整した結果を示す。

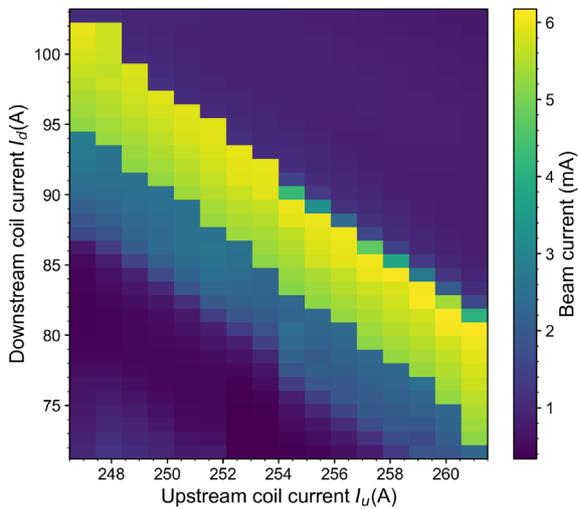


Figure 5: Coil (upstream and downstream) current dependence of beam current.

Figure 6 は、マイクロ波パワーを変化させたときのビーム電流の変化を、異なるコイル間距離ごとに示している。H<sub>2</sub> ガス流量については、それぞれのマイクロ波パワーにおいてビーム電流が最大となるように3 ~ 6 sccm の間で

都度調整を行った。図から、いずれのコイル間距離においてもビーム電流は入力されるマイクロ波パワーに対して、単調に増加している。また、同じマイクロ波パワーを入力した場合、コイル間距離が広い方がビーム電流が高くなることがわかった。この傾向は、先行研究[8]とも一致している。このような傾向がみられる要因としては、コイル間距離を広くすることで、ECR 磁場付近での磁場分布の傾きが緩やかになり、マイクロ波を共鳴吸収する領域の体積が増えることによって、より多くの電子がエネルギーを吸収するためであると推定される。Figure 6 の結果から、コイル間距離を 69 mm としてマイクロ波パワーを 2600 W 投入した時に、目標となる全ビーム電流 150 mA (うち H<sup>+</sup>成分は 80%の 120 mA と推定) が得られることがわかった。なお、この時の H<sub>2</sub> ガス流量は 4.6 sccm であった。

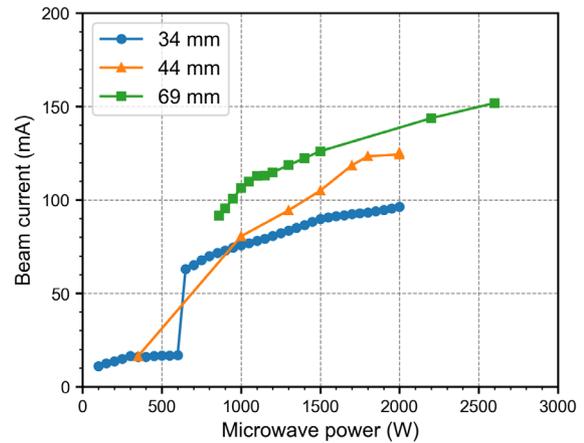


Figure 6: Microwave power dependence of beam current by coil-to-coil distance.

ビーム電流が 150 mA の状態で運転し続けたときのビーム電流の安定性についても調べた。Figure 7 は、運転時間に対するビーム電流の変動を示したグラフである。開始から約 6 分までは、イオン源の立ち上げ・調整を行った。図から、約 30 分間の運転中ビーム電流は安定しており、引出系の放電は見られないことがわかる。グラフ中の 6 ~ 38 分におけるビーム電流の変動は、1 $\sigma$   $\pm$  0.7 mA であり、安定したビームを得ることができた。

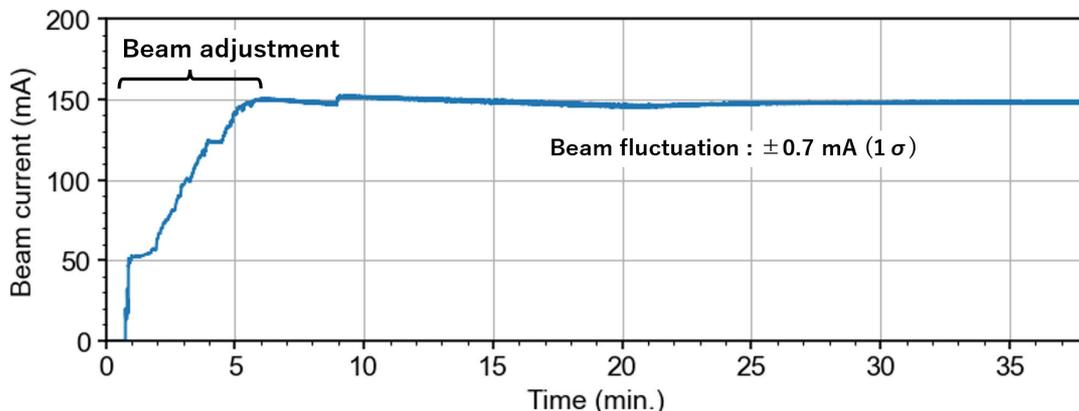


Figure 7: Stability of beam current.

#### 4. まとめ

産業用加速器への適用を目指して、2.45 GHz のマイクロ波で駆動する off-resonance 型大電流イオン源の開発を行った。プラズマチャンバに効率的にマイクロ波パワーを供給できるように、解析的手法および数値シミュレーションを用いて、プラズマチャンバとマッチングセクションの設計を行った。高密度プラズマ生成に必要な磁場分布を形成するため、2D 磁場計算を用いてソレノイドコイル磁場の設計を実施した。ヨークと磁気シールドを用いることで、必要な磁場分布を形成し、かつビーム引出領域への漏れ磁場を低減することができた。ビーム引出電極を設計するため、空間電荷効果を考慮に入れたビーム軌道計算を実施した。実際にイオン源の試作機を製作してビーム引出試験を実施し、各運転パラメータに対するビーム電流の依存性を調べた。引出電圧 45 kV、ガス流量 4.6 sccm、マイクロ波パワー2600 W の条件で、目標としたビーム電流 150 mA (うち H<sup>+</sup>が 120 mA と推定) が達成された。150 mA の条件でビーム電流の安定性を調べたところ、30 分間無放電で安定したビームを得るこ

とができた。

#### 参考文献

- [1] A. Misra, and V. S. Pandit, “Studies on the coupling transformer to improve the performance of microwave ion source”, *Rev. Sci. Instrum.* 85 (2014) 063301.
- [2] 岡田文明, “マイクロ波工学-基礎と応用”, 学献社(1993).
- [3] <https://www.3ds.com/ja/products/simulia/cst-studio-suite>
- [4] T. Taylor, and J. S. C. Wills, “A high-current low-emittance dc ECR proton source”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 309 (1991) 37-42.
- [5] S. Gammino *et al.*, “Review on high current 2.45 GHz electron cyclotron resonance sources (invited)”, *Rev. Sci. Instrum.* 81 (2010) 02B313.
- [6] <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [7] 石川順三, “イオン源工学”, アイオニクス株式会社(1986).
- [8] T. Taylor, and J. F. Mouris, “An advanced high-current low-emittance dc microwave proton source”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 336 (1993) 1-5.