

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420878

研究課題名(和文) 小型MeVマイクロビーム装置用省電力、低エネルギー及び高輝度イオン源に関する研究

研究課題名(英文) Study of an ion source generating ion beam with low energy and high brightness and consuming small electric power for a compact MeV ion microbeam system

研究代表者

石井 保行 (Ishii, Yasuyuki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・課長(定常)

研究者番号：00343905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：小型MeVイオンマイクロビーム装置への搭載を目的に、この装置に必要な低エネルギー、高輝度及び小エネルギー幅のイオンビームに加えて、小電力、長いメンテナンス間隔のPIGイオンに関する研究開発を行った。特に、本装置では、高輝度が重要であり、電磁石型PIGイオン源を試作し、輝度と磁場強度との関係を調べた。この結果から必要な磁場強度を求めるとともに、この強度を得ながら更に小電力な永久磁石型PIGイオン源を製作した。初歩的な実験で、水素イオンビームを発生させた結果、ほぼ目的の値を満たせる見通しが得られた。

研究成果の概要(英文)：A PIG ion source was developed to be mounted in a compact MeV ion microbeam system. The main performance of the ion source was to generate ion beams with low energy, high brightness, and small energy spread in addition to small electric power consumption and long term maintenance. Especially, the brightness is important for the performance. A prototype of PIG ion source with electric magnets was developed to investigate mainly the relationship between the brightness and the strength of magnetic field. Then a PIG ion source with permanent magnets, which generates the strength of magnetic field to produce the brightness obtained from the investigation, was developed for further reducing the electric power consumption. The preliminary studies that generated hydrogen ion beams indicated that the aimed performance was almost satisfied by the PIG ion source with permanent magnets.

研究分野：イオンマイクロビーム形成技術

キーワード：PIGイオン源 イオンマイクロビーム

1. 研究開始当初の背景

数 100keV から数 MeV のガスイオン(主に、水素イオン)ビームを $1\mu\text{m}$ 径程度に集束したイオンマイクロビーム(以下、マイクロビーム)は、1マイクロメートルレベルの空間分解能で試料を照射できることからこのビームを微量元素の分析技術の PIXE (Particle Induced X-ray Emission) や微細加工技術の PBW (Proton Beam Writing) に利用することで、それぞれ様々な試料内の微量元素の分布を可視化・画像化することやフォトレジスト材料等を二次元、或は 3次元に微細加工することに用いられている。この様にマイクロビームはその有用性が広く認められていることから、更なる応用分野の拡大が期待されている。一方、現在マイクロビームの形成には、大型の加速器、ビームライン及びビーム集束装置で構成される全長 30m にも及ぶ大型の装置群が必要なため、大学の一般的な広さの研究室や工場内の装置の一部にこの装置群を設置することが困難であり、これがマイクロビームを使用した技術の普及や発展を妨げる大きな要因の一つとなっている。この様な状況から、普及型の小型 MeV 級イオンマイクロビーム装置の開発が切望されている。

量研・高崎研では、小型 MeV 級イオンマイクロビーム装置のプロトタイプとして、静電レンズの一種の加速レンズを直列 3 段に配置した小型で高縮小率の 3 段加速レンズ系とこの装置専用のデュオプラズマトロン型イオン源との組合せにより $1 \times 1 \times 1\text{m}^3$ の数 100keV 小型イオンマイクロビーム装置(以下、小型マイクロビーム装置)を構築し、120keV 程度の水素イオンビームで $2.6\mu\text{m}$ 径を形成した。更に、レンズ系への入射方法の検討により、この装置での目標径の $1\mu\text{m}$ を形成できる見通しが得られている。これらの結果から小型マイクロビーム装置を構成している 3 段加速レンズ系とデュオプラズマトロン型イオン源によりマイクロビームを形成できることを実証することができたとともに、このイオン源がマイクロビームの形成に十分に機能していることが分かった。しかし、デュオプラズマトロン型イオン源は高電圧部に設置されているとともに、加熱したフィラメントから出る熱電子を基にプラズマを発生しているため、消費電力が大きく、イオン源が熱くなるため冷却が必要で、しかもフィラメントが 100 時間程度で切断するため、頻繁な交換を必要とする。加えてサイズも小型マイクロビーム装置の中では大きい。今後、本装置の電圧を 1MV レベルに増強する場合、高電圧部で現状と同じ電力の供給と冷却を行うことは困難であり、実用的な小型マイクロビーム装置の開発には、3 段加速レンズ系に適したビームを発生しながら、小電力、長いメンテナンス間隔のイオン源の開発が必須である。

小型で、小電力のイオン源として冷陰極型の PIG (Pending Ionization Gauge) イオン

源(以下、PIG イオン源)が挙げられる。このイオン源は、その構造上フィラメントがなく、比較的大きなビーム電流を、長時間メンテナンス無しで運転することができる。一方、小型マイクロビーム装置では、レンズ系に入射するビームの輝度の高さが重要なパラメータであるが、一般的な PIG イオン源は、比較的大きなプラズマ空間から大きな孔を持つ引き出し電極により、イオンビームを発生しているため、ビームの輝度は低い。更に、小型マイクロビーム装置用のイオン源としては、上記に加えて、低エネルギー及び小エネルギー幅のイオンビームの発生が必要である。そこで、小型マイクロビーム装置に適したビームを発生できる PIG イオン源を開発するため、本研究を開始した。

2. 研究の目的

小型マイクロビーム装置への搭載を目的にして、この装置に必要な、低エネルギー(1keV 以下)、高輝度($20\text{A}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{V})$ 以上)、及び小エネルギー幅(2eV 以下)なビームを発生でき、かつ小電力及び、長いメンテナンス間隔の小型の PIG イオン源を開発する。

3. 研究の方法

小型マイクロビーム装置に必要なイオン源の性能の内、高輝度なビームの発生が一番重要である。これはレンズでのビーム集束に於いて、縮小率の増強と収差の低減のため、コリメータをレンズ前面に設置必要があるが、これによりビーム電流が減少する。しかし、ビームが高輝度であれば、この減少率を抑えることができるため、集束点での小径のビームの形成と照射電流の確保が可能となる。

一方、一般的な PIG イオン源は安定で、比較的大きな電流のイオンビームを発生するため、大きなプラズマからイオンビームを発生しているが、一般的に輝度が低い。そこで、これまでのイオン源開発の経験から、高輝度を実現するには、小空間に高密度プラズマを発生し、ここからビームを小径の孔を通して引き出すことが有効ではないかと考察した。

一般的な PIG イオン源はイオン生成するプラズマを電場と磁場により閉じ込めている。特に、後者の磁場は永久磁石による磁気回路で発生しているため、その強さが固定されており、本研究の主要な目的の一つの磁場の強度とビームの輝度との関係を求めることが困難である。そこで、本研究では、

1) 電磁石型 PIG イオン源の試作

2) 永久磁石型 PIG イオン源の開発

の研究計画により、1) で磁場の強度が可変できるイオン源を開発し、この結果を基に 2) で磁場を固定した PIG イオン源を開発した。

1) 電磁石型 PIG イオン源の試作

小さなプラズマ発生空間に強度が可変で

きる磁場を発生して、この強度と輝度との関係を調べるため、電磁石型 PIG イオン源を以下の手順で試作した。

- ① 電磁石を用いた磁気回路の設計
- ② 電磁石型 PIG イオンの設計・製作
- ③ 水素イオンビームの発生実験、及びその評価

特に③では、小型マイクロビーム装置は主に水素イオンビームを発生するため、このイオン源で、水素イオンビームの発生実験及びその評価を行い、2)の永久磁石型 PIG イオン源の基礎データを取得した。

2) 永久磁石型 PIG イオン源の開発

1)により得られた様々な実験データの内、ビーム輝度が高くなる磁場の強さを基に、下記の手順で永久磁石型の PIG イオン源を開発した。その後、水素イオンビームの発生実験を通して、その性能を評価した。

- ① 永久磁石による磁気回路の設計
- ② 永久磁石型 PIG イオン源の設計・製作
- ③ 水素イオンビームの発生実験及びその評価

本研究のまとめとして、これのイオン源の開発及び実験結果を基に、最終的に、小型マイクロビーム装置への搭載の可能性を評価した。

4. 研究成果

1) 電磁石型 PIG イオン源の試作

初めに、電磁石を用いた磁気回路の設計を行った。プラズマ発生部の小空間に高強度の磁場を発生するため、静磁場計算コードを使用して、種々な形状の磁気回路に対して磁場計算を行った。この計算では、鉄の透磁率を上げるため、電磁軟鉄の透磁率を使用した。また、開発するイオン源は製作の精度の高さと簡便さのため、回転対象とした。このため1/2の形状を計算することで十分磁場の強度を評価することができ、計算時間の短縮化が図れた。この結果を基にプラズマ発生部で強

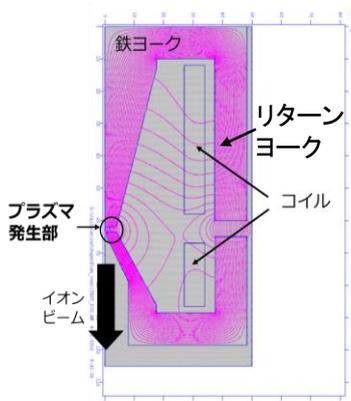


図 1 電磁石型 PIG イオン源の磁気回路の計算例 (半分の形状)

磁場が発生でき、しかも製作可能な磁気回路

の選定を行った。磁気回路の計算の一例を図 1 に示す。この回路設計から、図 1 中に示す様にコイルを二分割にし、鉄のヨークを上下からイオン源内に伸ばした形状が強い磁場を発生できることが分った。上下のコイルに流す総電流量をそれぞれ 800AT と 400AT としたときに、中心部では計算上 1.5T を超える磁場を発生できることが分った。また、プラズマ発生部のすぐ下には引き出し電極を挿入するが、この部分に磁場の漏れがあると、ここに目的外のプラズマが発生してしまうので、磁場の漏れが無視できる強さになる形状とした。この計算結果を基に、最終的に設計した磁気回路を持つ電磁石型 PIG イオン源の概略図を図 2 に示す。

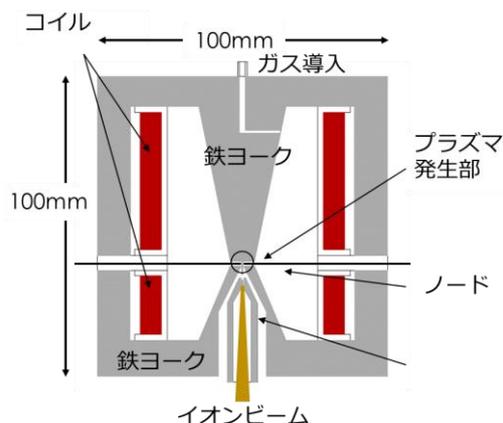


図 2 最終的に設計した電磁石型 PIG イオン源の概略図

プラズマ発生部分は $1\text{mm}\Phi \times 1.5\text{mm}$ とし、これは一般的なものの 1/100 以下の体積である。本イオン源ではプラズマ発生部にプラズマの電場による閉じ込めに必要なアノードを挿入する必要があるが、この発生部が小さいため、アノードを 0.8mm 厚の板とした。また、コイルは通電により発熱するため、鉄ヨークの外側 (磁気回路のリターンヨーク部分) を鉄のロットとし、開口部を作ることで、空冷できる構造とした。実際に製作した電磁石型 PIG イオン源を、ICF203 の真空フランジに取り付けた時の外観の写真を図 3 に示す。

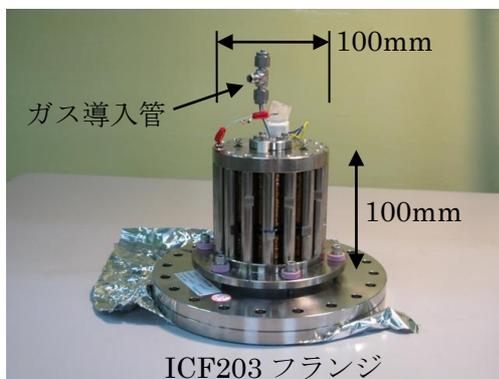


図 3 製作した永久磁石型 PIG イオン源の写真

大きさは $100\Phi\text{mm} \times 100\text{mm}$ で、これは現在使

用しているデュオプラズマトロン型イオン源の約 1/3 である。この大きさであれば、小型 MeV イオンマイクロビーム装置への搭載も可能である。

このイオン源を用いて、水素イオンビームを発生し、イオン源の性能を評価した。磁場強度は 0.5T 程度で、水素イオンビームを発生でき、ビームエネルギー 1.1keV で、消費電力は 30W 程度で、輝度は $80\text{A}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{V})$ 程度であることが分った。この輝度は目標値の約 4 倍であった。また、イオン分析を行ったところ、大半が H_2^+ で、 H^+ と H_3^+ がそれぞれ H_2^+ の約 1/10 であった。 H^+ の割合が少ないが、PIG イオン源の文献から、一般に H_2^+ の発生割合が多いとの報告があるため、本イオン源でも同様の傾向であることが分った。小型マイクロビーム装置では、イオン種の選別は実施していない。これは、加速レンズが静電場のみを用いたレンズであるため、集束力はイオン種や価数に依存しないので、イオン源で発生した水素イオンビームをレンズ系に入射すれば、イオン種に依らず一つの径に集束することができるためである。

以上の結果及び考察から、本研究の目的のイオン源としてプラズマ発生部に一般的な PIG イオン源よりも約 10 倍程度強い 0.5T 程度の磁場を発生すれば良いことが分った。

2) 永久磁石型 PIG イオン源の開発

1) の研究によりプラズマ発生部の磁場の強さを決めることができたので、この値が得られる永久磁石を使った磁気回路の設計を行った。この回路の設計も、電磁石の時と同様に、静磁場用の計算コードを用いて種々な形状の磁気回路で磁場の強度を計算した。計算の一例を図 4 に示す。永久磁石は、プラズマ発生時に、プラズマからの熱で温度が上昇することが考えられる。一方、プラズマ発生時にイオン源内は低真空であるため、ガスの対流による冷却が困難である。また、実用的にも冷却無しで動作できる方が冷却装置を駆動する電力が不要なため、望ましい。そこで、永久磁石は、高温に晒された時の耐久性

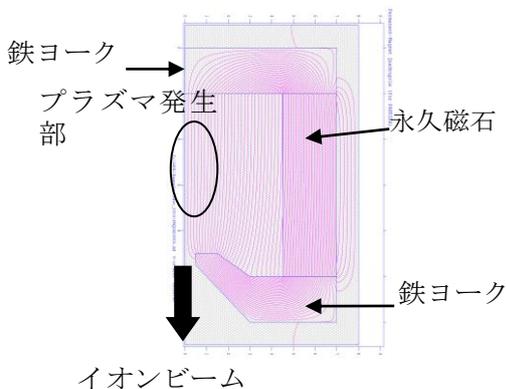


図 4 永久磁石を使った磁気回路の計算例

が高いサマリウムコバルト製のものを使うこととした。この磁石を使用することを基に

最終的に設計したイオン源の概略図を図 5 に示す。設計したイオン源は真空容器の中に納めているが、それでも、全体の大きさは $35\text{mm} \Phi \times 33\text{mm}$ 程度で、電磁石タイプの 1/2 以下である。

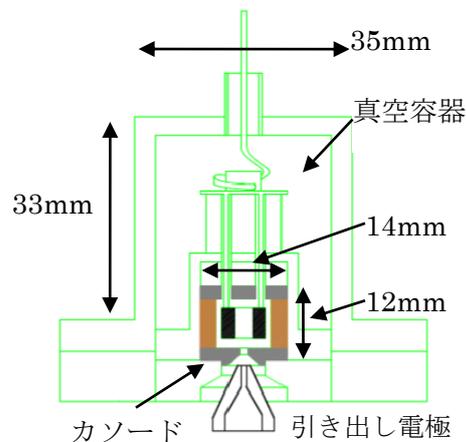


図 5 最終的に設計した永久磁石型 PIG イオン源の概略図

この設計を基に製作した永久磁石型 PIG イオン源を ICF203 の真空フランジに取り付けた時の写真を図 6 に示す。図中に示す様に非常にコンパクトであることが分かる。

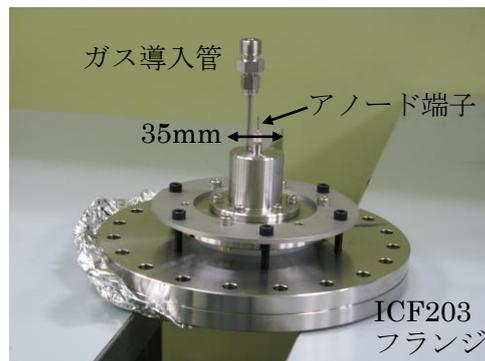


図 6 製作した永久磁石型 PIG イオン源

【初歩的な永久磁石型 PIG イオン源の性能評価実験】

製作した永久磁石型 PIG イオン源を量研・高崎研の所有のテストベンチに設置し、水素イオンビームを発生してこれの初歩的な性能評価実験を行った。放電電圧は 500V~700V 程度で、1W 以下でイオンビームを発生することができた。一方、ビームの輝度は、3.4keV の時、 $38\text{A}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{V})$ で、目的地の約 2 倍程度の値を得ることができた。しかし、ビームエネルギーは、目的の 3 倍で、またビームのエネルギー幅は 10eV 程度であった。輝度は、目標値を超えているが、ビームエネルギー及びビームエネルギー幅は目標値に達していないが、今後、前者は、引き出し電極をカソード電極に近づけることで、低エネルギー化が可能であり、後者に関しては、プラズマの

放電ガス圧とビームエネルギー幅の系統的な実験を行うことで、目標値に近い値が得られると考えている。

このイオン源は、小型マイクロビーム装置に搭載可能であるとともに、現在の装置構成により、1 μ m径の形成は可能であること、ビームエネルギーを約3倍の300keVに上げること及び輝度が高いため入射ビームの発散角を小さくできることから、3段加速レンズ系の縮小率を増強することができ、径100nm程度で、10pAのビームが形成できると見積もられる。

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 2件)

① Y. Ishii, T. Ohkubo, T. Kojima, T. Kamiya,
“Reduction of a beam diameter by decreasing the divergence angle of an incident beam in a compact ion microbeam system producing several-hundred-keV beam”,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 査読有り,
B404 2017 P. 65-68

② Yasuyuki Ishii, Takeru Ohkubo,
Tomihiko Kamiya, Yuichi Saitoh
“Beam size reduction of a several hundred-keV compact ion microbeam system by improving the extraction condition in an ion source”
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 査読有り,
B348 2015, P. 79-82

[学会発表] (計 6件)

① 石井保行、大久保猛、三宅善信、
小型イオンマイクロビーム装置用PIGイオン源の開発、
2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会
2017年3月14日～2017年3月17日、神奈川県横浜市

② T. Ohkubo, Y. Ishii
“Beam diameter reduction by optimization of an extraction condition in a compact ion microbeam system”
24th Conference on Application of Accelerators in Research and Industry 2016
2016/10/30-2016/11/4, USA, Texas

③ 大久保猛、石井保行
「小型イオンマイクロビーム装置の引出条件の改良によるビーム径縮小」
日本原子力学会「2016年秋の大会」、
2016年9月7日～9日、福岡県久留米市

④ Y. Ishii, T. Ohkubo, T. Kamiya,
“Reduction of beam diameter by decreasing a divergence angle of an incident beam in a several hundred keV ion microbeam system”
15th International Conference of Nuclear Microprobe Technology and Applications 2016,
2016/7/31-2016/8/5, China, Lanzhou

⑤ 大久保 猛、石井保行
“小型マイクロビーム装置で形成されるプロトンビーム径の縮小化”
日本原子力学会2014年秋の大会
2014/9/8-2014/9/10, 京都府京都市

⑥ Y. Ishii, T. Ohkubo, T. Kamiya, Y. Saito
“Beam size improvement of several hundred keV compact ion microbeam system by reducing vacuum pressure in extraction space”
14th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications 2014
2014/7/6-2014/7/11, Italy, Padova

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井保行 (ISHII, Yasuyuki)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子科学研究開発部門 放射線高度利用施設部・ビーム技術開発課課長
研究者番号：00343905

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

大久保猛 (OHKUBO, Takeru)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子科学研究開発部門 放射線高度利用施設部・ビーム技術開発課・主幹研究員
研究者番号：40446456