

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561020

研究課題名(和文)最終集束レンズに加速管を用いたガスイオンナノビーム形成技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on Technique of Gaseous Ion Nonobeam Formation Using Acceleration Tube as a Final Focusing Lens

研究代表者

石井 保行 (Ishii, Yasuyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・研究主幹

研究者番号：00343905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：実験室に設置可能な小型のMeVイオンマイクロビーム形成装置の開発を目標に、MeVへの拡張可能な数100keVのイオンマイクロビームの形成用の加速レンズ系を設計・製作した。具体的には、既存の2段加速レンズに高エネルギー用の強電位勾配型の単一ギャップ第3加速レンズを付加した3段加速レンズ系を開発した。この3段加速レンズを搭載した数100keVイオンマイクロビーム形成装置によりイオンマイクロビームを形成した実験結果から、このエネルギー領域における加速レンズ系の有効性を実証するとともに、MeV領域のイオンマイクロビーム形成のための3段加速レンズ系の基本構造を決めた。

研究成果の概要(英文)：Acceleration lens system for several hundred keV ion microbeams, which is scalable to MeV ones, was designed and manufactured aiming to develop a compact/laboratory-use size MeV ion microbeam system. Specifically, a three-stage acceleration lens system was developed by adding a new single-gap third acceleration lens with high voltage gradient for enhancing beam energy to an existing two-stage acceleration lens. The experimental result on formation of ion microbeams using the several hundred keV microbeam system with this three-stage acceleration lens showed the effectiveness within the energy range of keV, and lead the fundamental structure of the third acceleration lens for formation of MeV ion microbeams.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：単一ギャップ加速速レンズ 3段加速レンズ 小型イオンマイクロビーム形成装置

1. 研究開始当初の背景

MeV 領域のガスイオンマイクロビーム (以下、MeV イオンマイクロビーム) は、マイクロメートルレベルの空間分解能を持つことから様々な試料の元素分布分析に、また、試料中のイオンの残留が少ないという特長から微細加工にそれぞれ用いられ、その有効性から、更なる応用分野の拡大が期待されている。一方、MeV イオンマイクロビームの形成には、大型加速器、長いビームライン及び 4~10m 程度のイオンマイクロビーム形成装置で構成される全長 20m 程度の装置群が現在必要なため、これを所有できる組織が限定され、企業や大学への技術の普及の妨げとなっている。この様な状況から、普及型の小型 MeV イオンマイクロビーム形成装置の開発が切望されている。

原子力機構では、静電レンズの一種の加速レンズを 2 段に配置した小型で高縮小率の 2 段加速レンズ系と専用のプラズマ型イオン源との組合せにより、数 10keV イオンマイクロビーム形成装置を開発し、50keV 程度の水素イオンビームで 170nm 径を得ることに成功して、2 段加速レンズ系のサブマイクロビーム形成の有効性を実証した。

この成果を基に、最終目標である MeV イオンマイクロビーム形成を実現するため、高エネルギー化に関する基礎研究を開始した。

2. 研究の目的

実験室への設置が可能な小型の MeV イオンマイクロビーム形成装置の開発を目標として、先ず、数 100keV ビームのマイクロビーム形成を可能とする加速レンズ系を設計・製作する。これを用いてイオンマイクロビームを形成して、このエネルギー領域における加速レンズ系の有効性を実証するとともに、実験から得られた知見を基に MeV 領域の加速レンズ系の基本構造を決める。

3. 研究の方法

上述の 2 段加速レンズ系より高いビームエネルギーは、後段に加速電圧の高い第 3 加速レンズを配置することで得られるが、一般的な加速管は、縮小率、ワーキングディスタンス及び収差等のレンズとしてのパラメータを考慮していないため、使用することはできない。このため、原子力機構では多段電極第 3 加速レンズを開発したが、縮小率は 2 程度の低い値が限界であった。そこで、本研究では高加速電圧と高縮小率を有する小型の第 3 加速レンズを開発する。この加速レンズはこれまでの第 1 及び第 2 加速レンズ開発の知見から単一ギャップの第 3 加速レンズ (以下、単一ギャップ第 3 加速レンズ) とし、目標値として電位勾配が 40kV/cm であれば、300keV レベルで縮小率が 2 を超えると概略的な計算により予想されたため、このエネルギー領域でサブマイクロ径の形成を目指して、これらの値を開発の目標とした。更に、この電圧及

び電圧勾配を保持するためできるだけ少ない絶縁ガス (SF_6) (温室効果ガス) の使用量で目的の電圧を印加できる絶縁構造を開発した。

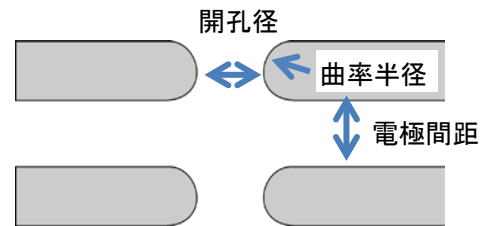


図 1 単一ギャップ第 3 加速レンズ電極形状

単一ギャップ第 3 加速レンズの設計では図 1 に示す電極形状 (電極間距離、電極の開孔径及びこの周囲の曲率半径) を決めるため、色々な電極形状に対して縮小率、ワーキングディスタンス及び色・球面収差の大きさを系統的に求める必要がある。これらのパラメータはそれぞれ相反する関係にあり、次のように最適値 (大きな縮小率、長いワーキングディスタンス及び小さな収差) を求めた。具体的な手順を以下に記す。

- ① 色々な電極形状を考案して有限要素法を用いた計算コード (ANSYS) により電場を計算する。
- ② ①の結果を加速レンズのパラメータ用計算コード (静電レンズ計算用の Munro コードを原子力機構で改良) に入力して、縮小率、ワーキングディスタンス及び色・球面収差を計算する。
- ③ 電極間距離は縮小率とワーキングディスタンスに、開孔の周囲の曲率半径は色・球面収差に大きな依存性を持つことを踏まえて、①②を繰り返して、目標値に適した電極を設計する。
- ④ ③の電極を固定でき、小型で且つ少量の絶縁ガス (SF_6) の使用で目的の電圧を印加できる絶縁構造を開発する。これには既存の多段電極第 3 加速レンズを開発した時の知見を活用する。
- ⑤ 開発した絶縁構造の耐電圧は実際に電圧を印加して評価する。この際、 SF_6 のガス圧を変えて目的の電圧を印加するために必要な最小値を決める。

イオンマイクロビーム形成実験は、2 段加速レンズ系と多段電極第 3 加速レンズ又は単一ギャップ第 3 加速レンズとの組み合わせにより実施した。3 段加速レンズ系のビーム光学では、2 段加速レンズで形成した集束点が第 3 加速レンズの物点となるため、2 段加速レンズまでのパラメータは第 3 加速レンズに依らない。そこで、この実験では 2 段加速レンズ系で形成した物点を第 3 加速レンズによりビーム径測定装置で集束点を形成するためのパラメータを探索した。2 段加速レンズ系と多段電極第 3 加速レンズの組み合わせは低縮小率であるが、ワーキングディスタンスが長く、焦点深度が深いいため、イオンマイク

ロビームの形成が容易である。そこで、先ずこの組み合わせの3段加速レンズでイオン源のガス圧や引き出し電圧及び2段加速レンズの電圧パラメータを決め、次に、多段電極第3加速レンズを単一ギャップ第3加速レンズに替えてイオンマイクロビームを形成できるパラメータを探した。この結果を基に実験及び計算上のイオンビーム径との違いを比較することで、単一ギャップ第3加速レンズを用いた3段加速レンズ系の有効性を評価した。

この結果、最終的に本研究目標を達成できることの見通しを得て、単一ギャップ第3加速レンズを使用した小型MeVイオンマイクロビーム形成装置に拡張可能な3段加速レンズ系の基本構造を決めた。

4. 研究成果

(1) 単一ギャップ第3加速レンズの開発
 前述の①～③により電極形状の設計を行った。この計算結果の一例として、電極間距

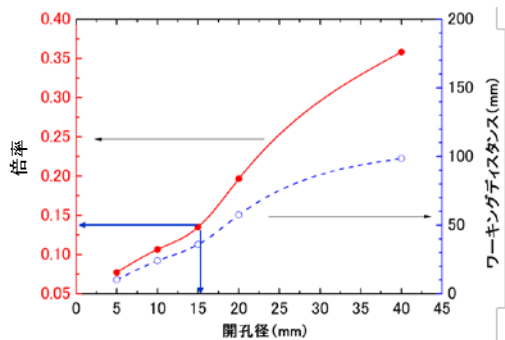


図2 開孔径に対する倍率(1/縮小率)及びワーキングディスタンスの関係

離を15mm、加速レンズへビームが入射する際の入射側及び出射側のそれぞれの電極の電圧を50kV及び250kVとした時の開孔径に対する倍率及びワーキングディスタンスの関係を図2に示す。本レンズの設計では、ワーキングディスタンスの目標値を最低50mm程度とした。この長さを確保できれば、ここにビーム走査用のスキャナーやビーム径評価

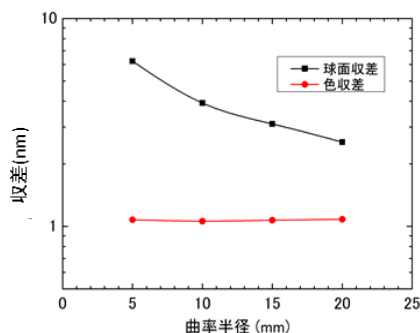


図3 電極の開孔周辺の曲率半径と色・球面収差の関係

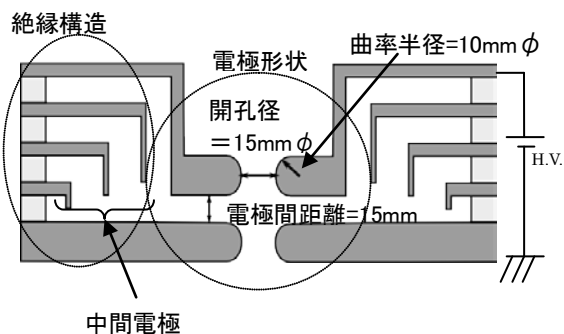


図4 決定した電極形状及び絶縁構造 (アノードとカソードの曲率半径は同じ)

や放射線検出のための測定器を設置できる。また、この時の縮小率が7(倍率が0.14)程度と目標の5を超えていることから、電極の開孔径を15mmとした。

色・球面収差の計算では先に決めた電極間及び開孔径をそれぞれ15mm、また、加速レンズへビームが入射する際の入射側及び出射側のそれぞれの電極の電圧は図2の場合と同じにした。この後、前述の①～③の手順で曲率半径を変数としてこの径に対する色・球面収差の大きさを求めた。この結果を図3に示す。曲率半径を変えても色収差はほとんど変わらないが、球面収差は曲率半径を大きくすると減少する。イオンビーム径に対する収差の値は無視できる値であること、及び電極が厚くなると重みで微小移動が困難となり、組み立て時の高精度な光軸調整が難しくなることから、曲率半径を10mmとした。決定した電極形状を図4に示す。

この電極形状では電極間距離が非常に短いため、一般的な加速管で採用されている耐電圧構造では安定に高電圧を印加できない。そこで、図4に示す様に、高電圧側の中間電極から肉厚の薄い円筒をカソード電極の平板側に突き出した形状とした。これによりアノード電極の先端に電場が集中する部分を作り、ビーム軌道から外れたイオンがレンズ内の電極に当たることで発生した浮遊電子をこの部分で吸着することで、絶縁構造に達

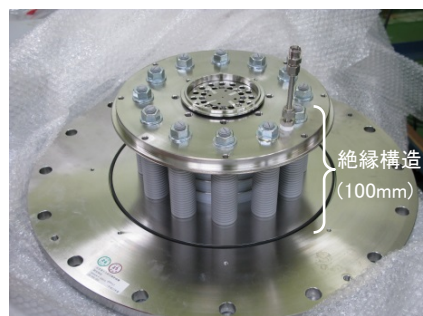


図5 製作した単一ギャップ第3加速レンズの写真

し、沿面放電の引き金となるこの電子を減らせる。これにより絶縁構造の耐電圧の増強が可能とした。これらの絶縁構造を用いた単一

ギャップ第3加速レンズを設計・製作した。その外観を図5に示す。

このレンズの電圧印加実験では、大気側の電極の周囲を SF_6 で覆うため、このガスを沿面放電の耐圧が高い超高分子量ポリエチレン製の筒と電極の間の空間に封入した。解析的にガス圧力と耐電圧との関係を求めることが困難なため、ガス圧を1及び2気圧と変えて耐電圧を測定した。この結果、1気圧では100kV程度であったが、2気圧では200kVを安定に印加できた。実験室の広さからこれ以上の電圧の印加は困難であったが、 $200\text{kV}/15\text{mm} = 133.3\text{kV}/\text{cm}$ の強電位勾配を達成した。これは、目標値を超えるとともに、これまでに報告例のない極めて大きな値である。この結果から、計算上この電極が縮小率を有するイオンビーム用の集束レンズとして機能することが分かったため、この単一ギャップ第3加速レンズの電極構造に関して特許を出願した。また、300kVの単一ギャ

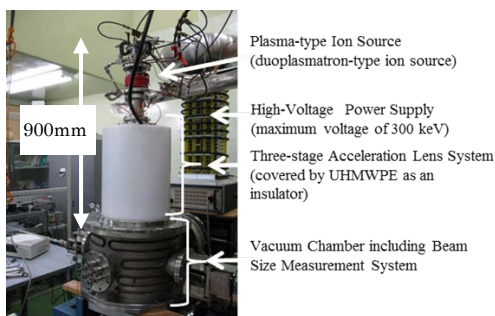


図6 小型イオンマイクロビーム形成装置

ップ第3加速レンズは電極間が15mm、絶縁構造が図5から100mmであるので、印加電圧を1MVに高める場合、それぞれをスケールアップすることで電極間距離が7.5cm、絶縁構造の長さが500mm程度になると見積られ、実現可能な大きさとなることも明らかにした。

(2) イオンマイクロビーム形成実験

まず、プラズマ型イオン源、2段加速レンズ系、多段電極第3加速レンズ及びイオンビーム径測定装置の組み合わせにより図6に示す全長900mm程度の小型イオンマイクロビーム形成装置を構築し、イオンマイクロビーム形成のパラメータを探索した。

イオンビーム径は、鋭いナイフエッジをイオンビームと垂直な方向から移動して、イオンビームを切りながらこの後方のファラデーカップで透過電流を測定し、この電流とナイフエッジの移動距離の関係から求めた。その結果、150keV程度で $19\mu\text{m}$ 径を形成したが、これ以下のイオンビーム径の形成は困難だった。

この原因を明らかにするために、3段加速レンズ系の性能を評価した。具体的には、3段加速レンズ系が持つ「入射及び出射するイオンビームのエネルギーの比（加速比）」が一定の場合、最終のイオンビームエネルギーを

変えても集束点及びイオンビーム径が変わらない」という性質を利用し、加速比を一定に保ったまま、最終イオンビームエネルギーを変えてイオンマイクロビームを形成した。この結果、イオンビーム径及びこの径の形成位置が変わらず、レンズ系が設計通りに機能していることが分かった。これから、前述の原因は、レンズ系以外であることが分かった。

更に、イオンマイクロビーム形成の実験を繰り返す中で、イオンビームの周辺にハロー成分が存在し、これを含んだイオンビーム径が測定されるため、大きな径となっていることが分かった。この原因として、イオン源内のアノードと引き出し電極の間の真空度が悪く、アノード近傍でプラズマから0eVで発生したイオンが数100eVまで加速される間に残留ガスと衝突して、発散角及びエネルギー幅が増大し、ハローとなっていることをつきとめた。この空間の真空度を改善した結果、ハロー成分を小さくすることができた。

また、レンズ系の集束パラメータの探索中に、この値を変えると集束点が移動する問題があったが、これにはイオン源を含めた3つの加速レンズの光軸を高精度に調整することで克服した。

これらの改善により、140kV程度の水素イオンビームで径約 $4\mu\text{m}$ を形成し、縮小率50を得ることができた。

以上の実験によりイオン源から第2加速レンズまでのレンズパラメータの最適値を見いだせたため、多段電極第3加速レンズを単一ギャップ第3加速レンズに替えてイオンマイクロビーム形成実験を行った。この結果、100keV程度で $4\mu\text{m}$ 径程度のビーム径が形成でき、計算値とほぼ一致していることから、単一ギャップ第3加速レンズは設計通りの性能で、この時の縮小率が1.5程度であることが分かった。これは300kVにおける7程度に相当するため、目標である300keVのサブミクロン集束イオンビームを形成できる見通が得られた。

以上から、本研究の目的である小型MeVイオンマイクロビーム形成装置のレンズ系として、2段加速レンズと単一ギャップ第3加速レンズの3段加速レンズ系の構造の設計を完了した。

なお、本研究の最終目標の1MeV級のイオンマイクロビーム形成装置では、前述の様に絶縁構造100mmの単一ギャップ第3加速レンズを長さ方向にスケールアップすることでこの電圧の印加は可能である。この場合、イオン源や2段加速レンズ系も1MVになるため、この部分からの放電を防ぐため、装置全体を SF_6 の圧力タンクの中に設置する。設計したレンズ系は小型のため、このタンクを含めても全長で2m程度になり、目標としていた実験室設置可能な小型MeVイオンマイクロビーム形成装置を実現できる見込みである。

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 2件)

① T. Ohkubo, Y. Ishii, Y. Miyake, T. Kamiya,
“Preliminary study on development of 300 kV compact focused gaseous ion beam system”,
AIP Conference Proceedings, 査読有り,
2013, P.370-374

② Y. Ishii, T. Ohkubo, T. Kojima, T. Kamiya,
“Construction of a 300-keV Compact Ion Microbeam System with a Three-Stage Acceleration Lens”,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 査読有り,
B332 2014, P.156-159

[学会発表] (計 5件)

① Y. Ishii, T. Ohkubo, Y. Miyake, T. Kamiya,
“ Effectiveness of Three-Stage Acceleration Lens used in 300 keV Compact Focused Gaseous Ion Beam System”,
International Conference of Nuclear Microprobe Technology and Applications 2012,
2012/7/22-2012/7/27, Portugal, Lisbon

② T. Ohkubo, Y. Ishii, Y. Miyake, T. Kamiya,
“Preliminary study to form 300keV proton nanobeam on development of compact focused gaseous ion beam system”,
22nd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry,
2012/8/05/~2012/08/09, USA Texas

③ 石井保行、大久保猛、神谷富裕、三宅善信、
300keV小型集束イオンビーム_形成装置の加速管のレンズ効果,
2013年 第60回応用物理学会春季学術講演会
2013年3月27日~2013年3月30日, 神奈川県厚木市

④ 21th International Conference on Ion Beam Analysis (IBA2013),
Construction of 300 keV Compact Ion Microbeam System with Acceleration Lenses,
Yasuyuki Ishii, Takeru Ohkubo, Takuji Kojima, Tomihiro Kamiya, 2013/7/24-7/28, USA Seattle

⑤ 大久保猛、石井保行、斎藤勇一
「300kV 単ギャップ加速管を用いたイオンナ

ノビーム形成小型装置開発」
日本原子力学会「2013年秋の大会」、
1013年9月3日~5日、青森県八戸市

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称：強電場勾配型単一ギャップ加速管
発明者：石井保行、大久保猛、神谷富裕、三宅善信
権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構、
株式会社ビーム精工

種類：特許
番号：特願 2012-197645
出願年月日：2012年7月12日
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[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)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所
放射線高度利用施設部・研究主幹
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)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所
放射線高度利用施設部・研究員
研究者番号：40446456