

# 多重極磁場を用いた裾無し小径イオンビーム形成の研究 (共同研究)

Study on Small-sized Tailless Beam Formation using Multipole Magnetic Field (Joint Research)

> 横田 涉 百合 庸介 渡邊 伸一 大城 幸光 久保野 茂

Watalu YOKOTA, Yosuke YURI, Shin-ichi WATANABE, Yukimitsu OHSHIRO and Shigeru KUBONO

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

Department of Advanced Radiation Technology Takasaki Advanced Radiation Research Institute Sector of Nuclear Science Research

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

# 多重極磁場を用いた裾無し小径イオンビーム形成の研究 (共同研究)

# 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

横田 涉、百合 庸介、渡邊 伸一\*1、大城 幸光\*1、久保野 茂\*1

(2016年1月20日受理)

東京大学原子核科学研究センター(CNS)では、理化学研究所のAVFサイクロトロンに設置された低エネルギー不安定核ビーム分離器(CNS Radio-Isotope Beam Separator: CRIB)を用いて原子 核物理学研究を実施している。一方、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所(高崎研究所) は同様規模のAVFサイクロトロンを有し、材料科学・バイオ技術の研究開発にビームを利用して いる。両者はビーム利用者からの要請により、サイクロトロンで加速したビームのターゲットに おける強度を高め、実験の効率を向上させるという共通の課題を持っている。これを解決するた めの技術開発を、CRIBを対象として2008から2013年度にかけて共同研究の下に実施した。

特に、CRIBにおける大強度の重イオンビームによる不安定核2次ビーム生成では、金属膜など が破損するため、同生成ガスターゲットを窓無し型にする必要がある。しかし、通常、サイクロ トロンから得られる重イオンビームは、進行方向に垂直な面内のビーム強度分布に大きな裾を持 つため、窓無しガスターゲットのオリフィス(直径6 mm)を損失無く通過することができない。 一方、高崎研究所では、一様な強度分布を持つ面積100 cm<sup>2</sup>程度のビームを形成する技術を開発し ている。この技術では、裾を八極磁場で内側に折畳むため、裾の殆ど無いビームを生成すること に成功しており、上記窓無しガスターゲットを使う場合の重イオンビーム形成に有望な技術と考 えられる。

本共同研究ではサイクロトロンからの通常ビームを、特に CRIB のターゲット位置で、裾無し で、しかも小径のビームに形成する技術検討を行った。その結果、裾を折畳むためには八極磁場 が有効であること、現在のビームラインに八極電磁石を入れてガスターゲット位置で約 10 mm 径 のビームが形成できることが分った。しかし、現在のビームラインの制限の中で目標の 6 mm 径 に近づけるためには、更に電磁石を導入するとともにサイクロトロンからのビームのエミッタン スを小さくする必要があることが明らかになった。また、ターゲットまでのビームパスレングス とレンズ系の組合せが自由に選べれば目標を達成できる可能性があることも分った。

本報告書は、上記ビーム光学系研究課題の各検討段階の結果と最終結論を纏めたものである。

本研究は日本原子力研究開発機構と東京大学との共同研究に基づいて実施したものである。 高崎量子応用研究所: 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町1233

\*1 東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター

i

# Study on Small-sized Tailless Beam Formation using Multipole Magnetic Field (Joint Research)

Watalu YOKOTA, Yosuke YURI, Shin-ichi WATANABE<sup>\*1</sup>, Yukimitsu OHSHIRO<sup>\*1</sup> and Shigeru KUBONO<sup>\*1</sup>

Department of Advanced Radiation Technology, Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 20, 2016)

The Center for Nuclear Study (CNS), the University of Tokyo, conducts the research on nuclear physics using CNS Radio-Isotope Beam Separator (CRIB) installed at the RIKEN AVF cyclotron. Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Research Institute (JAEA Takasaki) has an AVF cyclotron of similar scale and supplies beams to R&D of materials science and biotechnology. They have a common subject to increase cyclotron beam intensity at a target and improve efficiency of experiments according to beam users' requirements. An R&D was carried out to find the solution of the subject for CRIB under joint research from fiscal 2008 to 2013.

Especially, the gas target of CRIB for unstable nuclear beam production should be windowless because metallic foil is damaged by a high intensity heavy ion beam. A cyclotron beam, however, usually has a large tail in transverse intensity distribution and does not pass the target orifice (6 mm diameter) without loss. While, in JAEA Takasaki, a technology to form large-area uniform beam over 100 cm<sup>2</sup> is being developed using an octupole magnetic field. The non-linear force of the field folds the tail inside, therefore a tailless beam can be formed. The technology is expected to be a promising method for the windowless gas target.

It was examined to form a usual cyclotron beam into small and tailless distribution at the gas target in this joint research. As a result, it has been found that the octupole magnetic field is effective in tail-folding and a 10 mm diameter beam can be formed with octupole magnets added in the present beam line. It has been also found that additional magnets need to be installed and the beam emittance should reduce in order to achieve the objective beam size of 6 mm within the limitation of the beam line. Moreover, if the beam path length and configuration of the magnetic lens system are freely chosen, the objective may be attained.

This report describes the results of the examination on these subjects at each stage and the conclusion.

Keywords: Octupole Magnetic Field, Tail-folding, Small-sized Beam, Emittance, Heavy Ion Beam, Cyclotron

This work was performed as joint research between JAEA and the University of Tokyo.

<sup>\*1</sup> Center for Nuclear Study, Graduate School of Science, the University of Tokyo.

# 目次

1. はじめに	1
2. 理研 AVF サイクロトロン、ビーム輸送系、CRIB、ガスターゲット及び予備検討	3
2.1 理研 AVF サイクロトロンとビーム輸送系の概要	3
2.2 ガスターゲットの概要とビームに求められる条件	3
<ol> <li>5.3 折畳み方式の採用に至るまでの検討</li> </ol>	4
3. 研究の内容	6
3.1 目的	6
3.2 研究方法	6
4. 多重極磁場による折畳み	7
4.1 理論	7
4.2 シミュレーション1(多重極磁場が大面積均一ビーム形成に有効であることの例)	7
4.3 シミュレーション 2(仮定エミッタンスを用いた CRIB でのビーム形成)	9
5. エミッタンスの測定と得られたデータを用いた小径ビーム形成のシミュレーション	11
5.1 エミッタンスモニタとデータ	11
5.2 初期条件の設定とビーム光学系の設計	13
5.3 トラッキングシミュレーションの結果	17
6. 結論	19
謝辞	19
参考文献	20
付録 共同研究参加者一覧	21

# Contents

1. Introduction	1
2. RIKEN AVF Cyclotron, Beam Transport System, CRIB, Gas Target and Preliminary Study	3
2.1 Outline of RIKEN AVF Cyclotron and Beam Transport System	3
2.2 Outline of Gas Target and Condition Required for Beam Quality	3
2.3 Study before Decision to Adopt Tail-folding Method	4
3. Details of Research	6
3.1 Objective of Research	6
3.2 Process of Research	6
4. Tail-folding by Multipole Magnetic Field	7
4.1 Theory	7
4.2 Simulation 1 (Example of Folding Effectiveness for Large-area Uniform Beam Formation)	7
4.3 Simulation 2 (Small Beam Formation at CRIB using Assumed Emittance)	9
5. Emittance Measurement and Simulation of Small Beam Formation using Obtained Data	11
5.1 Emittance Monitor and Data	11
5.2 Initial Conditions and Beam Optics Design	13
5.3 Tracking Simulation Results	17
6. Conclusion	19
Acknowledgement	19
References	20
Appendix Participants of Joint Research	21

## 1. はじめに

AVF サイクロトロンのビームは原子核物理学研究や放射線を利用した様々な分野で用いられて いる。イオン種やビームエネルギーの範囲は非常に広く、ビームのエネルギー範囲の拡大と強度 の増強が利用研究の進展に伴って進められる傾向にある。その結果、加速ハーモニクスの拡張に よるエネルギーの広域化、ビームの大強度化の手法の開発とともに、これに伴い増大する機器の 放射化やハロービームを低減させることが課題となっている。東京大学原子核科学研究センター

(Center for Nuclear Study: CNS) と日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所(高崎研究所) は、それぞれサイクロトロンビームの利用者と提供者としてこれらの課題を有している。

CNSでは、理化学研究所(以下、理研)のAVFサイクロトロン(住友重機械工業(株)製715型。以下、理研AVFサイクロトロン)を用いて原子核物理学研究を実施しており、そのビームラインに設置した低エネルギー不安定核ビーム分離器(CRIB: CNS Radio-Isotope Beam Separator)<sup>1)</sup>において、2次ビームを用いた原子核反応研究を行っている。ここでは、十分な強度の2次ビームを得るために、6 MeV/u-N など 10 eµA 程度の1 次ビームをターゲットに輸送することを目標とし、1)イオン源においてビーム強度を増大すること、2)ビームを加速するハーモニクス2の初期加速におけるビーム透過効率を改善すること、及び、3)CRIB に輸送されたビームが窓なしガスターゲットのオリフィスを低損失でターゲットを通過する小さなビームを形成することの3 点が課題となっていた。

1)については、CNS が ECR イオン源(HYPER ECR)を用いて行っている調整方法の検討や技術開発により、ビーム強度の増強が進んだ。一方、2)では、サイクロトロンの中心領域におけるビーム軌道を解析することにより、インフレクターにビームが当たることを回避する運転パラメータとインフレクターの RF シールド等の構造を明らかにすることが想定され、3)では、ハローを含めた全ビームをターゲット入口でその直径である6mm(φ6mm)より小さいビームを形成するビーム輸送技術の開発が想定されたが、ともに解決の目途が立っていなかった。

一方、高崎研究所では、同研究所 TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application)のサイクロトロン(住友重機械工業(株)製930型)により加速したビームをバイオ 及び材料科学分野の多様な研究開発課題に広範囲のイオン種、エネルギー及び特徴を持ったビームを提供している。特徴的なビームにマイクロビームと大面積均一ビームがある。前者は直径が約1µmのビームスポットであり、これを実現するために、フラットトップ加速を導入する<sup>2)</sup>とともにその加速電圧のフラットトップ位相領域(14°RF)にビームを投入するための中心領域の改造を行い<sup>3)</sup>、サイクロトロンの大きなビームエネルギー幅ΔE(ΔE/E~0.2%)を約1/10に狭めて色 収差の影響を低減した。後者は、ビームの横方向分布の裾を八極磁場で内側に折畳むことにより 10 cm×10 cm 程度の領域内で5%程度の均一度を持つ分布に形成したもので、その技術開発に2005年に着手し、このために構築したビーム光学理論<sup>4)</sup>に基づいて八極電磁石、ビーム計測用チェンバーを製作・設置してビーム形成実験を行い、目標とする均一ビームを実現した<sup>5)</sup>。

これらの過程で得られた中心領域におけるビーム軌道の解析手法及びガウス様ビーム分布の裾 を折畳む理論に基づいたシミュレーション手法をそれぞれ駆使することで2)及び3)の解決を試み るために、CNS と高崎研究所は共同研究を2008 年度10月に開始した。 中心領域のビーム軌道を解析する環境の整備と並行して、理研 AVF サイクロトロンにおけるビ ームのエネルギー拡大と透過率向上を目的として理研が中心となって 3 次元ビーム軌道解析を実 施し、初期加速においてビームが RF シールド等に当ることが明らかになった。これに基づき、理 研が RF シールド及び Dee 電極の構造を改良した結果、ビーム強度の増加についても改善が得ら れた<sup>67)</sup>ことから、2)の課題を 2010 年度末に共同研究から削除した。八極磁場を用いてビーム裾を 折畳むことにより小さなビームを形成する 1)の課題の研究は継続して進め、その過程で、理研 AVF サイクロトロンで加速したビームの実際のエミッタンスが必要であることが判明し、2011 年度に CNS が理研の協力の下にサイクロトロンの直下流にビームエミッタンスモニタを設置することを 決定した。エミッタンス測定は 2012 年度に開始され、その実データを用いたシミュレーションの 結果、目的の CRIB の 2 次ビーム生成ターゲット上の大きさは、裾無しビームとして約 10 mm 径 程度が可能であることが明らかになった。更に、目標の ¢6 mm 径のビーム形成のための手法も明 らかとなった。

以下、第2章では理研 AVF サイクロトロンビーム輸送系と CRIB の詳細、CRIB による研究内 容、ガスターゲットからビームに課される条件など、本課題の背景及び前提となる事項を説明す る。3章では目的と達成のための方法を明確にする。4章では光学理論の概要を、第5章でエミッ タンス測定装置と得られたデータによる解析結果をそれぞれ説明し、第5章で結果と評価を纏め る。 2. 理研 AVF サイクロトロン、ビーム輸送系、CRIB、ガスターゲット及び予備検討

# 2.1 理研 AVF サイクロトロンとビーム輸送系の概要

本サイクロトロンは K 値 70MeV を有し、ECR イオン源及び偏極イオン源からのビームを上部 から入射して加速する。理研リングサイクロトロン (RRC)の入射器として使われるほか、単独 運転でビームを照射実験に供するビームラインがある。CRIB はその一つで、理研 AVF サイクロ トロンの下階に設置されている。Fig. 2.1 に理研 AVF サイクロトロン及び CRIB までのビームライ ンの構成を示す。サイクロトロンから引出されたビームは 3 連四重極電磁石 (QTC01)、2 連四重 極電磁石 (QDC02)、2 連四重極電磁石 (QDC11)及び 4 連四重極電磁石 (QT7A1)の磁気レンズ により集束を制御されるとともに、双極電磁石 (DMC1)で階下に偏向され、DM7C により再び水 平に戻される。ビームラインは CM7C で図 2.1 の紙面手前に 0.18 rad 回転されるが、本研究のシ ミュレーションではこの回転は無視されている。サイクロトロン出口からターゲットの焦点位置 (F0)までの軌道長は約 15 m である。

# 2.2 ガスターゲットの概要とビームに求められる条件

CRIB は、天体物理学的に重要な p-捕獲反応、α-捕獲反応(例えば <sup>4</sup>He(<sup>12</sup>C,<sup>16</sup>O)γ) などを調べる ために、重イオンである 1 次ビームを He などのガス状の軽原子核に衝突させて逆運動学により 放射性の 2 次ビームを生成するためのガスターゲットと、目的の 2 次ビームを選別するセパレー タから成る。このガスターゲットの原型は、九州大学の相良らが従来の金属膜を有する窓付きガ スターゲットを改良して開発した「窓無し吹き込み型ガスターゲット」<sup>8)</sup>である。ターゲットガス を充填するガスターゲット室の長さは 4cm で、ターゲット原子核以外による核反応を起こさない ため、ターゲットとビームラインの真空を仕切る窓材は無く、代りに多段の差動排気を用いてい る。この構造を基に、理研の岸田らは二次ビーム生成用にガスターゲット室の長さが 10cm のガス ターゲットを開発した<sup>9</sup> (Fig. 2.2)。ターゲット室の長さとガス圧で決まるターゲットの実効厚が



Fig. 2.1 Schematic view of the beam line from the RIKEN AVF cyclotron to the CRIB. The part downstream of the DMC7 rotates by 0.18 rad this side.

1 mg/cm<sup>2</sup> 程度に調整できるように 設計されている。ガスターゲット 室はメカニカルブースターポンプ やターボ分子ポンプ (TMP) で差動 排気するための四つのチェンバー に覆われ、ガスターゲット室のガ ス圧力が 6.7×10<sup>3</sup>Pa (50 Torr) のと きに、ビーム輸送系に接続する最外 チェンバーの内部圧力は 8.0×10-4 Pa (6.0×10<sup>-6</sup> Torr) である。Fig. 2.2 に示すようにビーム入口の径は ↓ 6mm、ビーム出口はターゲットガ スによるビームエミッタンスの増 大を見込んで \$ 6 mm、 \$ 8 mm、 \$ 10 mm と下流に行くほど広げてあ る。最外チャンバーのビームの入 口と出口の距離は約35 cm である。

CNSでは岸田らが開発したガス ターゲットを CRIB コースに設置 し、二次ビーム生成による実験を 計画した。ここで求められるのは、 二次ビーム生成頻度をできるだけ 高くするとともに、ノイズとなる 核反応を発生させないために、一 次ビームがターゲットチェンバー 及び差動排気チェンバーの全ての 穴を衝突すること無く通過するこ とである。このため、最も小さい 穴径 6 mm より小さな一次ビーム を形成することが必須条件であ る。



Vacuum Pump

Fig. 2.2 Schematic illustration of the CRIB gas target. P1 describes a chamber filled with target gas (roughly at  $6.7 \times 10^3$  Pa), P2-P4 show the chambers for differential pumping, which keep the pressure in P5 at roughly  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa. The diameter of holes for primary or secondary beam passage, P4 entrance to P2 exit, is  $\phi 6$  mm, those of P3 and P4 exits are  $\phi 8$  mm and  $\phi 10$  mm, respectively.



Fig. 2.3 Beam envelope simulation result for <sup>14</sup>N<sup>6+</sup> beam from the RIKEN AVF cyclotron exit to CRIB, obtained by WinAGILE4. The circles and the arrows show QT7A1 and F0, respectively.

# 2.3 折畳み方式の採用に至るまでの検討

理研 AVF サイクロトロンから CRIB までのビーム輸送系は Fig. 2.1 に示すように 2 階に分かれ ており、サイクロトロンの設置階(Floor1)から 2 台の 90° 偏向電磁石を使って階下(Floor2)の CRIB のターゲットに導かれている。CRIB の階では床にセパレータを載せた半径が約 3 m の回転 台が設置されており、4 連四重極電磁石(QT7A1)とターゲットと(F0)との間のビームラインの 架台との干渉を避けるため、この間は 4 m ものドリフト空間になっている。 このようなビーム輸送系で折畳みによるビーム品質の改善(平行度の向上とビーム密度の均一化)が可能なのかを検証するため、初歩的なビームシミュレーションを WinAGILE4<sup>10)</sup>を用いて実施した。ビームは 6.4 MeV/u-<sup>14</sup>N<sup>6+</sup>、強度は 10 eµA (ピーク)で、スペースチャージ効果があるとし、サイクロトロンの出口のビーム分布はガウス形、出射エミッタンス $\epsilon_h$ ,  $\epsilon_v=6\pi$  mm·mrad、全運動量幅  $\Delta p/p=0.1\%$ として CRIB ターゲットの焦点位置である F0 までを計算した。

Fig.2.3 が得られたビームエンベロープの計算結果である。上段が水平方向、下段が垂直方向で ある。図全体で黒のブロックは四重極電磁石や偏向電磁石を表している。楕円の中は4連四重極 電磁石(QT7A1)で、ビームの焦点(F0)は矢印で示されている。

F0 における <sup>14</sup>N<sup>6+</sup>の rms ビーム半径は  $\sigma_x=2.7$  mm,  $\sigma_y=2.6$  mm であり、そのプロジェクション の半値幅は 6 mm である。これでは  $\phi$  6mm のガスターゲット入口で損失するばかりでなく、存在 が予想されるハローも入口を通過させることができない。これの解決には、八極磁場によりビー ム分布の裾を折り畳む方法が有効であると考えた。

# 3. 研究の内容

## 3.1 目的

CRIB の集束点である F0 (Fig. 2.3) に設置された \$6 mm ガスターゲット入口を高い効率で通過 するビーム輸送が可能なビーム光学系を設計する。サイクロトロンで加速されたビームの進行方 向に垂直な面内の強度分布や大きさはサイクロトロン等の調整により異なり、強度分布のピーク (以下、ピーク)から離れた場所にまで長い裾を引くハローを伴うことがある。本研究では、ハ ローも損失させることなくガスターゲットに入射させることを基本方針とする。

# 3.2 研究方法

加速されたビームを低損失で入口の狭いターゲット中に輸送するためには、ビームプロファイ ルやビーム強度分布を積極的に制御することが必要である。ビーム集束には四重極磁場が用いら れるが、これだけでは制御の自由度が限られることから、更に高次の多重極磁場を用いることで、 よりピークから離れたハローを含むビームをより強く集束できると考えられる。そこで、八極磁 場による裾の折畳み技術を本研究で採用した。

高崎研究所で開発している折畳み技術は 10 cm × 10 cm 程度の範囲で強度分布が均一な領域を 持つビームを形成することを目的としており、このために定式化した多重極磁場によるビーム形 成理論とこれに基づくビーム輸送シミュレーションプログラムを駆使して、このように大きな均 ービームの形成技術を確立した。また、多重極磁場により均一ビームに形成できるのは強度分布 がガウス分布のビームであることから、複雑な強度分布を持つサイクロトロンのビームについて は、金属薄膜でビームを散乱させてガウス分布に近づける(ガウス様分布を形成する)システム を TIARA のビームライン上に構築した。このようにシミュレーションと実ビームにおいてプロフ ァイルの初期値をガウス分布としたことで、両結果の比較・評価が的確にできるようになり、この 技術開発が迅速に進んだ。

一方、本研究では、ビーム損失を避けるためにビームの価数変化と大きさの増大を伴う散乱体 を用いたガウス様分布ビームの形成ができないことから、シミュレーションにおいては実際に即 したプロファイルの初期値を仮定しなければならない。仮定した初期値を用いてシミュレーショ ンにより目的のビームができたとしても、その初期値が調整等により得られなければ、目的のビ ームが実際に形成できるかどうかを判断するのは難しい。また、�6mm以下の小さいビームの形 成についても、大面積を目的とした高崎研究所の技術開発には無かった問題が生じる可能性があ る。このため、実際のビームのエミッタンスの詳細(位相空間平面内での粒子分布)が重要であ ると考えた。そこで、理研 AVF サイクロトロンで加速したビームのエミッタンスの実測データを 基に、目的のビーム形成ができる光学系をシミュレーションにより設計した。ビーム光学系は現 在使われている CRIB に至るビームラインが基本だが、CRIB 付近においては、四重極電磁石の位 置を移動して八極電磁石を設置する空間を確保し、それぞれの適した位置と磁場強度を探索する ところまでを本研究の範囲とした。

#### 4. 多重極磁場による折畳み

## 4.1 理論

多重極電磁石を用いたビームプロファイルの制御は、その非線形力によってビームの横方向位 相空間形状を変形することで、実空間分布が変換されることに基づいている。従って、結果とし て生じるプロファイルは元のビーム特性(エミッタンス)やビーム光学系(ベータ関数などの Twiss パラメータやベータトロン振動の位相進度)に強く依存する。ガウス型の強度分布で楕円形状の 位相空間分布を持つ理想的なビームを八極電磁石で集束する場合を考えると、中心からの距離の 3 乗に比例した集束力をイオンが受けるために、位相空間形状はビームの進行とともに、アルフ ァベットの"S"や"Z"のような形へと変形される(Fig. 4.4 を参照)。実空間で見ると、ガウス分布の 裾が徐々に内側に折り畳まれ、あるところでほぼ均一化される。このとき必要な八極磁場勾配 Kocr 及び形成される均一領域の全幅 W は以下のように表される<sup>4</sup>:

$$K_{\rm OCT} L_{\rm OCT} \approx \frac{1}{\varepsilon \beta_0^2 \tan \phi}$$
 (1)

$$W \approx \sqrt{2\pi} \sqrt{\varepsilon \beta_{\rm t}} \left| \cos \phi \right| \tag{2}$$

ただし、L<sub>OCT</sub>は八極電磁石の磁極長、εはビームの二乗平均(rms)エミッタンス、βο及びβιは八 極電磁石の位置及びターゲット位置におけるベータ関数、φは八極電磁石からターゲットまでのベ ータトロン位相進度である。

実際には、多重極電磁石によるビーム集束によって、水平・鉛直方向のベータトロン振動の結 合が不可避的に生じ、均一化を阻害する。理想的にビームを集束し裾を折り畳むためには、水平、 鉛直の 2 方向間に生じるベータトロン結合を弱める必要があり、そのためには、それぞれのビー ムエンベロープのウエストの位置に多重極電磁石を配置する必要がある。つまり、水平方向に折 りたたむためには鉛直方向のウエストの位置に水平方向集束用の八極電磁石を、鉛直方向に折り たたむためには水平方向のウエストの位置に鉛直方向集束用の八極電磁石を置く。一方、直径数 mmの細いビームを形成することが目的である本研究では、必然的にビームが F0 でウエストとな るような光学系が対象となる。すなわち、ターゲットでのビームは位相空間内で有限の広がりを 有し、ほぼ縦長に直立する(理想的には縦長の楕円形となる)。Ref.4のビーム均一化の理論解析 では、ビームはターゲットではウエストではなく拡大されていることが前提となっており、ビー ムがウエストに近い場合には、式(1)及び(2)をそのまま適用できない可能性がある。また、サイズ が極小化されたビームを八極電磁石等の非線形磁場で集束し、位相空間の楕円形状を変形させる とビームサイズは逆に大きくなることも考えられる。さらに、本研究において対象とするビーム は、ガウス分布のように一般性のあるものではなく、サイクロトロンの運転条件等によって異な ると考えられる。そこで、本研究では、実測に基づく現実的な初期条件を採用したトラッキング シミュレーションによるビーム光学系の設計研究を行う。

4.2 シミュレーション1(多重極磁場が大面積均一ビーム形成に有効であることの例) 本節では、TIARA で行った多重極電磁石を用いた非線形ビーム集束の例として、大面積均一化 の単粒子トラッキングシミュレーション結果を示す。この計算に使用したシミュレーションコー ドは、TIARAの大面積均一ビーム形成のために開発した<sup>4)</sup>もので、ビーム輸送系に任意に配列し た電磁石の位置を 5 mm 程度の精度で入力できる。また、偏向電磁石ではエッジ集束及びフリン ジ磁場の効果を取入れ、六極から十二極までの多重極電磁石についてはべき乗で表される理想的 な非線形磁場分布を用いることができる。更に、進行方向の運動量偏差(*Δp/p*)を取入れた 3 次元の トラッキング及び粒子間クーロン相互作用の計算も可能である。運動方程式の積分には、数値誤 差が蓄積しないシンプレクティック法を採用した。

シミュレーションでは、TIARA のサイクロトロンから引出されたビームを LB コースへ輸送し、 多重極電磁石を用いてターゲットにおいて均一化する場合を想定した。Fig. 4.1 に TIARA サイク ロトロン加速器施設の見取り図を示す。ビームの初期条件は、サイクロトロンの出口において、 強度分布が位相空間及び実空間でガウス型であり、rms エミッタンスが 10π mm・mrad であるとし た。簡単のため、横方向の 1 次元のみを取扱った。Fig. 4.2 にシミュレーションによって得られた ターゲット上のビームプロファイルを示す。(a)は多重極電磁石が励磁されていない場合である。 初期分布がガウス分布であるため、ターゲットで形成される分布もガウス分布である。(b)八極電



Fig. 4.1 Schematic view of the cyclotron facility of TIARA.



Fig. 4.2 On-target real-space intensity distributions obtained by single-particle tracking simulations under three different multipole focusing strengths. (a) No multipole force is applied. (b) An octupole magnet is excited at a gradient of 600 m<sup>-4</sup>. (c) An octupole and dodecapole magnets are excited at gradients of 700 m<sup>-4</sup> and -33000 m<sup>-6</sup>, respectively.

磁石を励磁することにより、ガ ウス分布の裾野が折畳まれ、中 央の全幅約 40 mm にわたって 強度分布が均一化されたこと がわかる。両端の高強度部は、 ガウス分布の裾がオーバーシ ュートされて形成される。(c)に 示すように、八極電磁石の近傍 において十二極電磁石で集束 することによって、この高強度 部を低減し、ビーム全体を均一 化することができる。ビームの 半値全幅は約7 cm であり、式 (2)から予測される均一領域幅 7.2 cm によく一致する。このと き、中心の6 cm 幅の均一領域 の RMS 均一度は 1%以下であ る。



Fig. 4.3 Layout of the magnets and the designed beta functions around the end of the CRIB beam line in the RIKEN AVF cyclotron facility. Two octupole magnets are used for tail-folding. The waist position is slightly shifted from the target so that the phase-space ellipse of the beam can be folded into an S-shape and thus the tail can be shortened on the target. The effect of the beam axis rotation, introduced to achromatically switch the beam for another experimental line is ignored for brevity.

4.3 シミュレーション2(仮定エミッタンスを用いた CRIB でのビーム形成)

40 mm 四方の均一な強度分布のビームが形成できた前節のシミュレーション結果と対照的に、 細く集束されたスポット状ビームを八極電磁石を用いて裾を折畳んで形成する方法を、理研 AVF サイクロトロンから CRIB のターゲット位置(F0)までの輸送系(Fig. 2.1)を対象として検討し た<sup>11)</sup>。Fig. 4.3 に最終直線部のビーム光学系を示す。上述のとおり、実際には、Floor1 と Floor2 間 の鉛直ビームラインで横方向断面の中心軸が 0.18 rad 回転しているが、ここでは簡単のため、こ れを無視した。また、既存ビームラインの電磁石配置はそのままとし、折畳みのための八極電磁石は、最終4連四重極電磁石(QT7A1)の前後に1台ずつ設置することを想定した。横方向の2自由度の運動の結合を抑えるため、上流の八極電磁石位置では、水平方向のビームサイズを鉛直方向のそれよりも十分大きくし、下流の八極電磁石位置では、その逆とした。ターゲットでビームスポットがウエストとなる光学系では、ビームの横方向強度分布が理想的なガウス分布の場合、八極電磁石でビームを集束することによって逆にビームサイズが大きくなる。そこでこれを低減するため、意図的に厳密なウエスト条件( $\alpha$ =0)からずらし、 $\alpha_x$ =-2.2及び $\alpha_y$ =-4.3とした。ビームの rms エミッタンスは2方向とも、 $6\pi$  mm·mradで、ガウス分布を仮定した。トラッキングに用いる粒子数は 10<sup>5</sup> 個とした。

Fig. 4.4 にターゲットでの鉛直方向のビーム強度分布及び位相空間分布を示す。八極磁場を励磁することによって、ビームの裾が内側に折りたたまれ、端部が急峻になった。rms ビームサイズは 20%以上減少し、中心付近のピーク強度が 20%以上増加した。位相空間分布は、元々細長い楕円形状であったものが、八極電磁石の集束により、アルファベットの"Z"のように変形した。

以上のように、ビームの横方向強度分布が理想的なガウス分布でエミッタンスの大きさが 6π mm・mrad の場合は、四重極磁場のみによる集束よりも、八極磁場を加えることで更に小さいビームを形成できることが分った。



Fig. 4.4 Real-space and phase-space distributions of the beam on the target at 18 m of Fig. 4.3 obtained by single-particle tracking based on the beam optics in the figure.

5. エミッタンスの測定と得られたデータを用いた小径ビーム形成のシミュレーション

5.1 エミッタンスモニタとデータ

測定データに基づいたシミュレーションを行うために、エミッタンスを実測するモニタを理研 AVF サイクロトロンの直下流にある 3 連四重極電磁石及びその下流にある 2 連四重極電磁石の間 に設置した(Fig. 5.1)。このエミッタンスモニタ(EMC01)はスリット部(SL)と、309 mm 下流 のプロファイルモニタ部(PF)から成る。SLには 1 枚の金属板に長さ 42 mm の 2 本のスリット が水平及び鉛直方向に刻まれ、45° 方向に 116 mm 移動する(各方向 82 mm)。PF は 3 線式プロフ



Fig. 5.1 Arrangement of the emittance monitor. From left to right between the triplet quadrupole nearest the cyclotron QTC01 and doublet quadrupole QDC02, two beam profile monitors PF\_C01a and PF\_C01b, the emittance monitor EMC01 comprised of slit SL and profile monitor PF are also installed.

Table 5.1 Relation between the slit position (x,y) and observable angle of the emittance monitor.

	Horizontal Direction	Vertical Direction
Positional range (mm)	$x = -38.2 \sim 43.8$	y= -15.6∼66.5
Angular range (mrad)	(-25.5-x)/0.309~(25.5-x)/0.309	(-25.5-y)/0.309~(25.5-y)/0.309



Fig. 5.2 Observed emittance (phase space distribution) of a 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup> beam.

ァイルモニタと同様で、水平及び鉛直方向に張られた2本のワイヤを45°方向に36 mm移動(各 方向25.5 mm)することで、スリットの各位置におけるビーム強度分布を測定する。角度の測定範 囲はスリットの位置に依存し、これをTable 5.1 に示す。



Fig. 5.3 Comparison of beam profiles observed by the profile monitors of PF\_C01a, b and PF\_C02 (blue lines) and those calculated by transformation of the observed emittance to each profile monitor position (red lines). The abscissa and the ordinate describe the position (mm) and the beam intensity (arbitrary), respectively.

本エミッタンスモニタを用いて測定した 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup>ビームのデータを Fig. 5.2 に示 す。測定及びデータ処理の妥当性を確認する ために、このデータから Fig. 5.1 の PF\_C01a、 PF\_C01b、PF 及び PF\_C02 におけるプロファイ ルを計算し、それぞれ実測と比較した。計算に は、測定時の 3 連及び 2 連の四重極電磁石の 励磁データから求めた輸送行列を用いた。結 果を Fig. 5.3 に示す。一部に位置のずれが見ら れるが、プロファイルの形と幅は良く一致し



Fig. 5.4 Definition of 95% emittance.

ており、測定及び評価方法に誤りが無いことが確認できた。

なお、本報告ではエミッタンスの大きさを Fig. 5.4 のように定義した(95%エミッタンス、以下  $\epsilon_{95}$ )。つまり、x、x'及びビーム強度の3次元分布におけるビーム強度の強い 95%体積に相当する x、x'の面積をエミッタンスとする。y 方向についても同じである。上述の 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup>の  $\epsilon_{95}$  は、34.0  $\pi$  mm·mrad (x 方向)及び 29.7  $\pi$  mm·mrad (y 方向)であった。

6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup>の他に、次の3種類のビームのエミッタンスデータを取得した(Fig. 5.5): (1) 11.2 MeV/u-<sup>6</sup>Li<sup>3+</sup> ( $\epsilon_{95,x}$ =18.7、 $\epsilon_{95,y}$ =36.9π mm·mrad)、(2) 6.8 MeV/u -<sup>16</sup>O<sup>6+</sup> ( $\epsilon_{95,x}$ =19.8、 $\epsilon_{95,y}$ =29.3π mm·mrad)、(3) 5.6 MeV/u-<sup>7</sup>Li<sup>2+</sup> ( $\epsilon_{95,x}$ =52.4、 $\epsilon_{95,y}$ =25.4π mm·mrad)。(2)の水平方向が集束に向かっている ほかは、水平及び鉛直方向で発散しているとともに、強いハローは見られない点で、Fig. 5.2 の 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup>と同様の特徴を持っている。

5.2 初期条件の設定とビーム光学系の設計

WnAGILE4 等の汎用的 なビームシミュレーショ ンコードでは、初期ビー ム条件を自由に選んでシ ミュレーションを行うに は限界がある。そこで、以 下では、4.2 節で説明した 自作のシミュレーション コードを使用した。

エミッタンスモニタで 実測された位相空間分布 データ(位置、角度、強度) から初期粒子分布を生成 するため、全計測領域の ノイズを除いた積分強度 をトラッキングに用いる



Fig. 5.5 Observed emittances (phase space distribution) of three different ion beams other than a 6.1 MeV/ $u^{-22}Ne^{7+}$  beam.

総粒子数に対応させるとともに、各微小グリッド(*dx=0.79 mm、dx*'=1.0 mrad)内では粒子はラン ダムで均一に分布させた。また、八極電磁石の集束による水平方向と鉛直方向の運動の結合を考 慮に入れるため、両方向をランダムに対応付けることとした。実際には、5.1節のエミッタンスモ ニタでは、1方向ずつがそれぞれ独立に測定されるため、水平方向と鉛直方向の関係は測定データ からは求められない(例えば、ビーム断面の2次元的な形状や強度分布は、本エミッタンス計測 データからは推定できないため、本シミュレーションではこれらについて議論しない)。

エミッタンスモニタで実測された前節の 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup> (Fig. 5.2)の水平・鉛直 2 方向の位相 空間分布データ(位置、角度、強度)から生成された初期分布を Fig. 5.6 に示す。このビームの水 平方向及び鉛直方向の rms エミッタンスは、それぞれ 8.1 $\pi$  mm.mrad 及び 7.1 $\pi$  mm.mrad である。 この位相空間分布によって決まるエミッタンスモニタ位置でのビームの Twiss パラメータは、以 下のとおりである:

水平方向:  $\alpha = -5.42$ ,  $\beta = 3.01$  m,  $\gamma = 10.1$  m<sup>-1</sup>,

鉛直方向:  $\alpha = -0.86$ ,  $\beta = 3.26$  m,  $\gamma = 0.53$  m<sup>-1</sup>。

他方、設計上の Twiss パラメータは、以下のとおりである:

水平方向:  $\alpha = -3.8$ ,  $\beta = 1.6$ m,  $\gamma = 9.7$  m<sup>-1</sup>、

鉛直方向:  $\alpha = -3.9$ ,  $\beta = 4.1$  m,  $\gamma = 4.0$ m<sup>-1</sup>。

このように両者に大きな違いがあることが分り、4.3節で用いた光学系では八極電磁石位置で のベータトロン振動の結合抑制が困難となることが容易に予測された。そこで Fig. 5.6 のビームか ら決まるビーム光学条件を基にビームラインを再設計することとした。上記のパラメータを用い て、CRIB ターゲット (F0) において、スポットビームを形成する光学系及び八極電磁石を用いた 非線形集束のための光学系をそれぞれ検討/再設計した。Fig. 5.7、Table 5.2 及び Fig. 5.8、Table 5.3 にその結果をそれぞれ示す。前者の場合、F0 での最小ベータ関数は 0.4 m が達成可能であったが、 上記のエミッタンスではビームサイズは全幅で約 10 mm となり、ビーム全体を目標であった 6 mm 以内に集束することはできない。また、最終直線部の 4 連四極電磁石の 3 台目 (QT7A1c) でビー ムサイズが極端に大きくなるため、ビームダクトや電磁石の口径を拡大する必要がある。後者に



Fig. 5.6 Initial beam distribution generated from the measured emittance data of a 6.1 MeV/u-<sup>22</sup>Ne<sup>7+</sup> beam. (a) Horizontal phase-space distribution. (b) Vertical phase-space distribution. (c) Real-space distribution.

対しては、八極電磁石の設置位置をより自由に設定するとともに、F0でのビームサイズを小さするため、QT7A1の配置を見直し、下流へ移動させた。



Betatron amplitude functions [m] versus distance [m]

Fig. 5.7 Designed beam optics for the spot beam formation. The origin of the abscissa is set at the location of the emittance monitor. The ordinates are the beta (upper) and dispersion (lower) functions. The configuration of existing magnets is maintained without octupole magnets. The beam waist is attained at the F0 target, where the beta function is 0.4 m both in the horizontal and vertical directions. The vertical dispersion is 4.6 m at F0, induced by the two bending magnets.

Table 5.2 Gradients and excitation currents of eight quadrupole magnets from the emittance monitor to F0 in the beam optics of Fig. 5.7. The positive value of the gradient means focusing in the horizontal direction. The field gradient per unit excitation current of the quadrupole magnet is 0.105 T/(m·A).

Quadrupole Magnet	QDC02		QDC11		QT7A1			
Quadrupole Magnet	А	В	а	b	а	b	с	d
Gradient [m <sup>-2</sup> ]	-7.48	9.54	-9.29	10.18	1.08	2.15	-8.44	5.91
Excitation current [A] of the magnet for the beam with magnetic rigidity of 1.1 Tm	78	100	97	107	11	23	88	62



Betatron amplitude functions [m] versus distance [m]

Fig. 5.8 Designed beam optics for octupole focusing. The origin of the abscissa is set at the location of the emittance monitor. The ordinates are the beta (upper) and dispersion (lower) functions. The final four magnets (QT7A1) were relocated for a small beta function and octupole focusing: QT7A1a and b were moved 2.6 m downward, and QT7A1c and d were moved 3.3 m downward. One octupole magnet for horizontal folding was assumed after the second bending magnet and another for vertical folding between QT7A1b and c. The beam waist is attained at the F0 target, at which the beta function is 0.5 m in the horizontal and 0.7 m in the vertical directions. The vertical dispersion is 3.8 m at F0.

Table 5.3 Gradients and excitation currents of eight quadrupole magnets from the emittance monitor to F0 in the beam optics of Fig. 5.8. The positive value of the gradient means focusing in the horizontal direction. The field gradient per unit excitation current of the quadrupole magnet is 0.105 T/(m·A).

Ouedmuste Meanet	QDC02		QDC11		QT7A1			
Quadrupole Magnet	Α	В	а	b	а	b	с	d
Gradient [m <sup>-2</sup> ]	-10.8	10.7	-13.3	9.21	6.30	-7.56	1.56	8.92
Excitation current [A] of the magnet for the beam with magnetic rigidity of 1.1 Tm	113	112	139	96	66	79	16	93

5.3 トラッキングシミュレーションの結果

Fig. 5.8 の光学系において、八極電磁石を用いた裾の折畳みのトラッキングシミュレーションを 行った。簡単のため、本シミュレーションでは 4.3 節と同様に、Floor1 と Floor2 間の鉛直ビーム ラインにあるビーム軸の回転は無視した。また、ビーム電流はマイクロアンペア程度であり、粒 子間クーロン相互作用は十分小さいため取扱わなかった。粒子数は 10<sup>4</sup> 個とした。

これにより CRIB ターゲット上で得られたビームの強度分布を Fig. 5.9 及び Fig. 5.10 にプロットした。また、F0 におけるビームスポットの rms 半径の八極磁場強度依存性を Fig. 5.11 に纏めた。 これらの図から分るように、八極磁場を励磁しない場合に比べて、6%のビームサイズの縮小とそれに伴うピーク強度の増大が可能であった。しかし、最小 1.8 mm の rms 半径は、Fig. 5.10 に示すように全幅約 10 mm に対応し、八極電磁石を用いても目標の 6 mm 以内に集束することは不可能



Fig. 5.9 (a)Horizontal and (b) vertical particle distributions at F0. Singleparticle tracking simulation of  $10^4$  ions was performed using the initial distribution in Fig. 5.6 and the beam optics in Fig. 5.8. The octupole magnets were not excited.

Fig. 5.10 (a) Horizontal and (b) vertical particle distributions at F0. The same simulation parameters as in Fig. 5.9 was assumed except that the two octupole magnets were excited with gradients of 150 m<sup>-4</sup> and 100 m<sup>-4</sup>. Single-particle tracking simulation of  $10^4$  ions was performed using the initial distribution in Fig. 5.6 and the beam optics in Fig. 5.8.

であった。

なお、Fig. 2.1 に示されるように、階下(Floor2)にある CRIB ターゲットへのビーム輸送のため、ビームラインには 2 台の鉛直方向用偏向電磁石がある。光学系はアクロマティックにならないため、ビームの縦方向運動量広がりの影響も併せて調べた。⊿p/p=0.1%オーダーを仮定すると、 鉛直方向のビームサイズは数 mm 大きくなる。



Fig. 5.11 Dependence of the rms beam radii at F0 on the octupole strength  $K_{oct}$  for the octupole-1 (upstream) and the octupole-2 (downstream). The octupole-2 (octupole-1) is turned off in the left (right) graph. It should be noted that the octupole gradient on the order of 100 m<sup>-4</sup> corresponds to the magnetic field of several tens of 10 Gauss at the bore radius of 50 mm for the beam with a magnetic rigidity of 1.1 Tm. This gradient is technically well attainable.

## 6. 結論

本研究では、理研 AVF サイクロトロンから CRIB ターゲットにイオンビームを高い効率で輸送 するためのビーム光学系の設計研究を行った。より実際に即した設計を行うため、サイクロトロ ンから引き出されたビームのエミッタンスを計測し、その特性を明らかにした。ハローを含むビ ーム全体を細く集束するために、八極電磁石と四重極電磁石を組み合わせた非線形ビーム光学系 を設計し、実測データを初期条件とした粒子トラッキングシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果、最下流の4 連四重極電磁石のみの位置を変えて八極電磁石を設置し た配置では、測定したエミッタンスに対して全幅約10mm のビーム形成ができることを確認した。 八極磁場で集束することでビームのピーク強度を高めることはできたが、ビームサイズについて は八極磁場を用いない場合のスポットビームよりも有意に小さくすることはできなかった。その 理由は、八極磁場の集束効果により位相空間内でのビーム形状が曲げられることで一部の粒子、 つまり最も強い八極磁場の力を受けるベータトロン振幅の大きいイオンがオーバーフォーカスさ れたためと考えられ、また、エミッタンスの大きいことがオーバーフォーカスの要因になってい る。エミッタンスが小さければ、オーバーフォーカスされる粒子は減るとともに、八極磁場の集 束によって横方向強度分布の端部がより急峻であるビームを形成できる。

一方、Fig. 5.5 に示した実測エミッタンスを持つ他のビームについては、シミュレーションを実施しなかったが、エミッタンスの値や形状の特徴、ハロー状のものが見られないことなどが Fig. 5.2 と同様であることから、F0 において 6 mm 以内に集束することは困難であると考えられる。

更なるビーム縮小には、F0 において、運動量分散関数がゼロかつベータ関数をより小さくでき るよう、より長いビームラインでさらに自由に電磁石の台数や配置を見直すことが必要と考えら れる。さらに、イオン源で生成されるビームのエミッタンスを縮小することも必要である。

#### 謝辞

本共同研究を進めるに当り、住重加速器サービス(株)の小高康照氏\*1にエミッタンスモニタ の設置、エミッタンスの測定及びそのデータの解析など多大なご協力を頂きました。理化学研究 所の後藤彰氏\*2、加瀬昌之氏、大阪大学の畑中吉治氏はデータの解析及び評価の妥当性について 議論や助言をしてくださいました。エミッタンスデータは理化学研究所仁科加速器研究センター より提供して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

現所属:\*1 東京大学原子核科学研究センター、 \*2 山形大学

# 参考文献

- Y. Yanagisawa, S. Kubono, T. Teranishib, K. Ue, S. Michimasa, M. Notani, J.J. He, Y. Ohshiro, S. Shimoura, S. Watanabe, N. Yamazaki, H. Iwasaki, S. Kato, T. Kishida, T. Morikawa, Y. Mizoia, "Lowenergy radioisotope beamseparator CRIB", Nucl. Instrum. Meth. A 539 (2005) 74.
- S. Kurashima, S. Miyawaki, S. Okumura, I. Ishibori, T. Nara, T. Agematsu, K. Yoshida, W. Yokota, Y. Nakamura, K. Arakawa, M. Fukuda, "Single-turn extraction from a K110 AVF cyclotron by flat-top acceleration", Rev. Sci. Instrum. 80 (2009) 033302.
- N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, H. Kashiwagi, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, Y. Nakamura, K. Arakawa, T. Kamiya, "Realization of a phase bunching effect for minimization of beam phase width in a central region of an AVF cyclotron", Nucl. Instrum. Meth. A 636 (2011) 410.
- Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa and M. Fukuda, "Uniformization of the transverse beam profile by means of nonlinear focusing method", Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, "Transformation of the Beam Intensity Distribution and Formation of a Uniform Ion Beam by Means of Nonlinear Focusing", Plasma and Fusion Research, 9 (2014) 4406106.
- A. Goto, S. B. Vorozhtsov, E. E. Perepelkin, A. S. Vorozhtsov, S. Watanabe, S. Kubono, and M. Kase, "Renovation of the central region of RIKEN AVF cyclotron and results of beam acceleration test", RIKEN Accel. Prog. Rep. 43 (2010) 127.
- 7) S. B. Vorozhtsov, V.L. Smirnov and A. Goto, "Modification of the central region of RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the first harmonic (h = 1)", RIKEN Accel. Prog. Rep. 44 (2011) 105.
- K. Sagara, A. Motoshima, T. Fujita, H. Akiyoshi, N. Nishimori, "A blow-in windowless gas target", Nucl. Instrum. Meth. A 378 (1996) 392.
- T. Kishida, Y. Gono, M. Shibata, H. Watanabe, T. Tsutsumi, S. Motomura, E. Ideguchi, X.H. Zhou, T. Morikawa, T. Kubo, M. Ishihara, "A windowless gas target for secondary beam production", Nucl. Instrum. Meth. A 438 (1999) 70.
- 10) P. J. Bryant, WinAgile (WINdows Alternating Gradient Interactive Lattice dEsign) USER'S GUIDE, Ver.4.0, Release 9, January 2013.
- 11) Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, S. Okumura, I. Ishibori, W. Yokota, S. Watanabe, S. Kubono and Y. Ohshiro, "Formation of a Uniform Ion Beam Using Multipole Magnets", Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 2009, p. 3895.

# 付録

# 共同研究参加者一覧

日本原子力研究開発機構

高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部

- 横田 涉 原子力機構側総括 2008年10月~2014年3月
- 百合 庸介 多重極磁場によるビーム輸送系の設計研究 2008 年 10 月~2014 年 3 月
   透過率向上の評価 2012 年 4 月~2014 年 3 月
- 湯山 貴裕 多重極磁場によるビーム輸送系の設計研究 2008 年 10 月~2014 年 3 月 透過率向上の評価 2012 年 3 月~2014 年 3 月
- 倉島俊 サイクロトロンの中心領域の軌道計算と設計研究 2008年10月~2011年3月
   多重極磁場によるビーム輸送系の設計研究
   透過率向上の評価 2008年10月~2014年3月
- 宮脇 信正 サイクロトロンの中心領域の軌道計算と設計研究 2008年10月~2011年3月

東京大学原子核科学研究センター

- 久保野 茂 東京大学側総括 2008年10月~2012年3月
- 渡邊 伸一 サイクロトロンの中心領域の設計研究 2008年10月~2011年3月 ビーム輸送系の設計研究 2011年4月~2014年4月
- 大城 幸光 サイクロトロンのビーム入射系の光学検討研究 2008年10月~2011年3月 ビーム特性の計測と評価 2008年10月~2014年3月 透過率向上の評価 2012年4月~2014年3月
- 下浦 享 東京大学側総括 2012 年 4 月 ~ 2014 年 3 月
- 山口 英斉 ビーム特性の計測と評価、透過率向上の評価 2012年4月~2014年3月

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
盔半里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立	単位の例
an de La SI 組立単位	<u>f</u>
名称	記号
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度,質量密度キログラム毎立方メート/	
面積密度キログラム毎平方メート/	$\nu$ kg/m <sup>2</sup>
比体積 立方メートル毎キログラ」	m <sup>3</sup> /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	$\nu$ A/m <sup>2</sup>
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度 キログラム毎立方メート/	
輝 度 カンデラ毎平方メート/	$\nu$ cd/m <sup>2</sup>
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野-	では物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI租工申位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 隹	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (в)	m/m
立 体 催	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>·1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
压力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは高頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。で本シウス度とケルビンの
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
$10^{24}$	э 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с	
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р	
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^{3}$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а	
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z	
$10^1$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60 s				
時	h	1 h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	٥	1°=(π/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=( π/648 000) rad				
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>				
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>				
トン	t	$1 \pm 10^3 \text{ kg}$				

# 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの							
名称			記号	SI 単位で表される数値			
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J			
ダル	ŀ	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg			
統一原于	子質量単	单位	u	1 u=1 Da			
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m			

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa	
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa	
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m	
海 里	М	1 M=1852m	
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$	
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は	
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。	
デシベル	dB -		

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx			
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>			
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」					

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例							
名称				記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq	
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy	
$\scriptstyle  u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv	
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$	
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m	
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg	
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	