

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03993

研究課題名（和文）革新的な非破壊型遅いビーム取り出し装置の開発

研究課題名（英文）Development of inovative device with non-destructive type for the slow extraction

研究代表者

下川 哲司（Shimogawa, Tetsushi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：30837399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：加速したビームを「遅い取り出し」では、周回するビームを広げながら、静電セプタムと呼ばれる装置に近づけ、徐々に削りながらビームを周回側と取り出し側に分離し、ビームを取り出している。そのため、周回側と取り出し側の境界に設置している電極やワイヤー等へのビームの衝突を原理的に避けることができず、取り出し効率の限界や、装置の損傷や放射化によるビーム出力の制限が生じている。本研究では、取り出し境界に物質を配置しない静電セプタムの開発を行った。小型試験機による試験において基礎特性の試験、計算モデルの研鑽を行った結果、ビーム分離能力を有するビーム非破壊型静電セプタムの開発の可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビーム非破壊型静電セプタムの小型試験機による試験において基礎特性の試験、計算モデルの研鑽を行い、十分なビーム分離能力を有すること、研鑽したモデルを用いてビームシミュレーションを行い、ビームロスの低減が可能であることが示唆された。これは国内に限らず、世界の粒子加速器における遅い取り出し手法におけるビーム出力の制限および機器の故障、放射化のリスクの低減に対しての革新的なブレイクスルーとなる。

研究成果の概要（英文）：In the "slow extraction", the accelerated beam is spread out and close to a device called an electrostatic septum, which separates the beam into the circumferential and extraction sides while gradually shaving the circumferential side. Therefore, in principle, it is impossible to avoid collisions of the beam with electrodes and wires installed at the boundary between the circumferential and extraction sides, which limits the extraction efficiency and limits the beam output due to damage to the device and activation of the device. In this study, we developed an electrostatic septum that does not place any material at the extraction boundary. As a result of testing the basic characteristics and tuning the calculation model in a test using a small test machine, we found the possibility of developing a beam non-destructive electrostatic septum with beam separation.

研究分野：陽子加速器

キーワード：陽子加速器 遅い取り出し ビームロス 静電セプタム ビーム非破壊

1. 研究開始当初の背景

粒子加速器で加速されたビームは、原子核・素粒子実験等の学術研究や放射線がん治療等の医療応用に利用されており、世界中で科学技術の基盤の一つとなっている。リング型粒子加速器に貯め込み、周回しながら加速されたビームは、「速い取り出し」と「遅い取り出し」のどちらかによって下流側の実験・治療施設へ供給されている。その「遅い取り出し」では、周回するビームを広げながら、静電セプタムと呼ばれる装置に近づけ、徐々に削りながらビームを取り出している。既存の手法では、周回側と取り出し側の境界に設置している電極やワイヤー等へのビームの衝突を原理的に避けることができず、取り出し効率の限界や、装置の損傷や放射化によるビーム出力の制限が生じている。本研究では、世界の粒子加速器における遅い取り出し手法を制限しているこの学術的「問い」に対して、革新的なブレイクスルーを与えるため、独自に考案した新たな静電セプタムの開発を目指すものである。本研究は、量子ビーム科学技術の大いなる進展に加え、医療用加速器への応用等、社会への波及効果が非常に高い研究課題である。

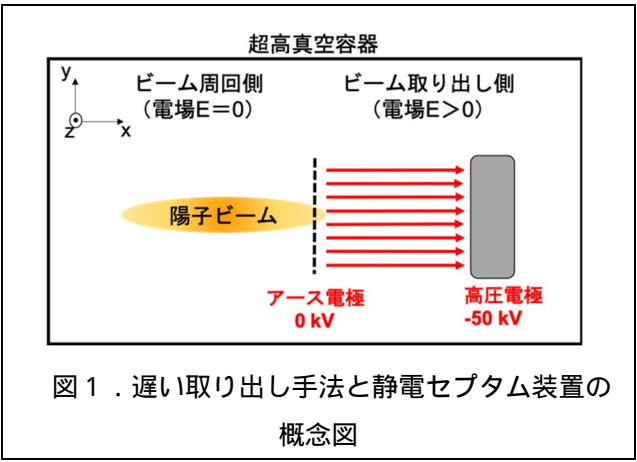


図1. 遅い取り出し手法と静電セプタム装置の概念図

リング型粒子加速器であるシンクロトロン加速器では、リング内にビームを貯め込み、周回しながら加速されたビームを徐々に取り出しながら実施する「遅い取り出し」技術によって最先端の物理実験や放射線がん治療を実現している。それは、周回するビームを広げながら、静電セプタムと呼ばれる装置に近づけ、かんなの“刃”で木材の表面を削るように徐々にビームを削りながら取り出す手法である。

陽子ビームの場合の概念図を図1に示す。静電セプタムとは、超高真空容器内でビーム周回側と取り出し側の境界面に配置したアース電極と、取り出し側に配置した高圧印加電極で構成される。境界面を超え、取り出し側まで広がったビームは、電極間で作り出される高電場によって力を受け、取り出される。境界面であるアース電極に衝突したビームは、ビームロスとなるため、従来主に2つの手法にて、ロス低減を目指してきた。1つ目は、共鳴法やRFノックアウト法等によって周回毎のビームの広がる速度を上げ、1周回で境界面を超える確率を上げる手法である。しかし、1周回で取り出される粒子数も同時に変化してしまう。2つ目は、境界面の電極を薄くする、もしくは細いワイヤーを採用することで、境界面に衝突する確率を下げる手法である。しかし、衝突した際の熱負荷によってワイヤーが破損する可能性が高くなってしまった。実際に、大強度陽子加速器施設 J-PARC の主リングシンクロトロン (MR) では、原子核・素粒子実験を行うハドロン実験施設への遅い取り出し時に静電セプタムの境界面のワイヤー(アース電極)にビームが衝突し、ワイヤーが破損した事によりビーム供給の長期停止を余儀なくされた経験を持ち、さらにビーム取り出し部における高放射化が現在大きな問題となっており解決の目処がたっていない。そのため MR では、設計時 750kW の出力目標を 100kW へと変更し、現在は 50kW に制限されている。国内に限らず、世界の粒子加速器における遅い取り出し手法におけるビーム出力を制限している静電セプタムの境界面でのビームロスの低減が、本研究の研究課題の核心をなす学術的「問い」である。また、この研究課題の推進により、サイクロトロン加速器の取り出しへの応用や、遅い取り出し手法でビーム供給を行っ

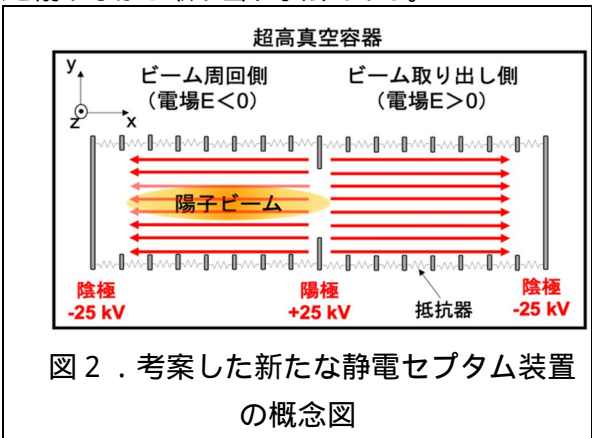


図2. 考案した新たな静電セプタム装置の概念図

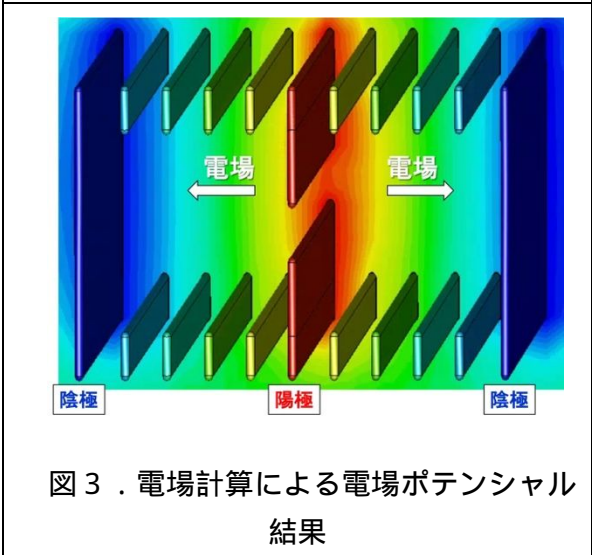


図3. 電場計算による電場ポテンシャル結果

ている医療用加速器への応用が期待され、学術や社会の双方への波及効果も非常に高いと言える。

## 2. 研究の目的

リング型粒子加速器の遅い取り出しにおける学術的「問い」に対して、静電セプタムの境界面でのビームロスの低減を目指し、革新的なブレイクスルーを与えるため、独自に考案した新たな静電セプタムの実用化が本研究の大目標である。そして、その実用化に向け、新たな静電セプタムの原理実証が本研究計画の目的である。

この静電セプタムの概念図を図2に示す。図で示すようにビーム周回側と取り出し側の境界面にビームが衝突しないように物質を配置せず、境界面に陽極、その反対の両側にそれぞれ陰極を配置し、境界面から外側に電場がかかるようにする。さらに平行電場や電場勾配を制御すべく、陽陰極間にガイド電極を並べて抵抗器により接続する。これにより、図中の矢印のような電場を作り、境界面を境に周回側と取り出し側に力を与え、境界面でビームが従来のセプタム面のような物質に衝突することなく、非破壊に分離可能となる。図3に電場計算による電場ポテンシャル結果を示す。境界面を境に逆方向の電場が発生している。また、ガイド電極によって境界面近傍以外では平行電場が発生できている。取り出し時以外でも周回ビームに影響を与え続けるため、上下流の他の電磁石で影響を容易に補正するためにも、平行電場にすることが重要となる。そのために、ガイド電極の数量や間隔、接続した抵抗器による印加電圧の分配率の最適化が重要である。

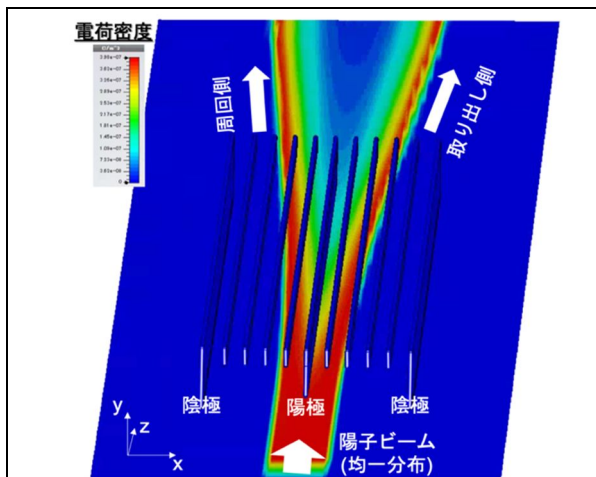


図4. 電場計算による粒子飛跡計算結果

この電場分布で水平面(x)に陽子ビームの均一分布を配置し、粒子飛跡計算を行った結果を図4

に示す。境界面である陽極を境にビーム周回側と取り出し側にビームが分離している。周回側のビーム軌道は、下流に設置している軌道補正電磁石で容易に補正することが可能である。従来の静電セプタムの上流に本装置を設置した場合には、従来の境界面の電極に衝突するビームを1桁以上低減できる可能性が高い。本研究は、原理的に発生する課題を独自に考案した新たな手法でブレイクスルーするものであり、学術的独自性や創造性は非常に高いと言える。また、大目標である実用化の暁には、本装置は遅い取り出し手法を用いたリング型粒子加速器における「国際標準」となる可能性が高い。

## 3. 研究の方法

本研究では小型の実証用試験装置を製作し、上述した新たな静電セプタムの実用化に向け、計画期間内で本装置の原理実証、電場分布の最適化、技術課題の明確化を行う。

本装置の原理実証(2020年度、2021、2022年度)

電場計算に基づき、小型の実証用試験装置の詳細設計を行い、真空容器、印加用電極一式、電子ビーム走査用電極一式を製作する。小型の実証用試験装置の製作後、真空容器内で電子銃から射出される電子ビームの軌道を走査用電極で変化させながら、検出器を用いて始点・中点・終点で測定し、電極への印加有り無しのデータから電場分布を測定する。境界面を境にビーム軌道が分離することの実証、想定電場分布であることの確認を目指す。

電場分布の最適化(2022年度、2023年度)

測定した電場分布を評価し計算モデルの高度化を行う。そのモデルを用いて、再製作による電極形状の最適化、抵抗器で制御する電場ポテンシャルの最適化を行い、よりビーム軌道の分離が可能な電場分布の最適化(特に境界面近傍)を目指す。

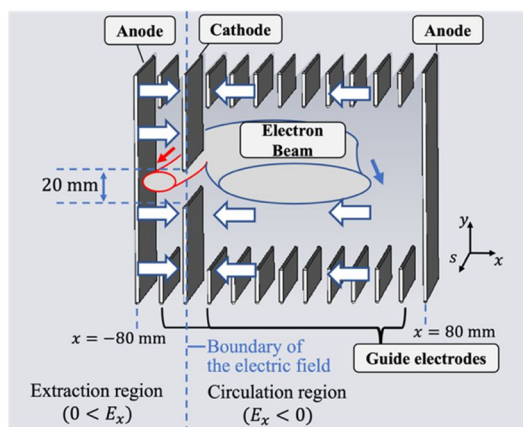
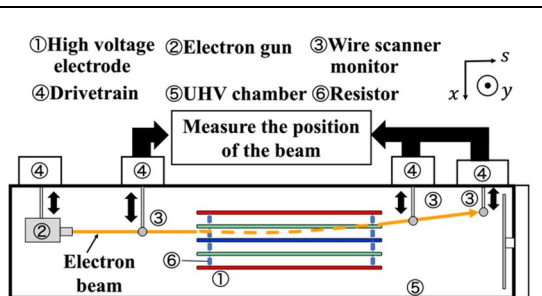


図5. 開発した非破壊ビーム分離試験装置の概略図(上)、非破壊型静電セプタムの概略図(下)

境界面を境にビーム軌道が分離することの実証、想定電場分布であることの確認を目指す。

#### 技術課題の明確化（2023 年度）

実用化に向け、実証用試験装置の製作に関わる真空表面処理技術や電場分布測定技術などの技術課題の明確化を目指す。また、最適化し測定した電場分布を用いたリング型加速器における周回時や遅い取り出し時のビームシミュレーション（多粒子飛跡計算）を行い、ビーム力学的課題の明確化を目指す。

#### 4. 研究成果

図 2、3 の電場計算を元に開発した非破壊ビーム分離試験装置の概略図を図 5. に示す。非破壊型静電セプタムの厚み(図中 s 方向)は、50mm とした。本試験装置を用いて、上記 3 つの課題を検証した。しかし、電場は直接測定が出来ないため、本試験装置では非破壊型静電セプタムの電場の影響を受けた電子ビームの軌道を測定することで、電場分布の間接的な評価を行う。本試験では、5 keV の電子ビームを照射する電子銃を使用した。真空チャンバには、図 2 の x 方向(静電セプタムでビームにキックを与える方向)に対して動作する駆動機が、電子銃用とモニター用の合計 4 台設置されている。チャンバ最上流部の駆動機には電子銃を設置し、電子銃本体の位置を駆動機によって x 方向にスキャンすることができる。残り 3 機の駆動機にはワイヤスキャナモニタが設置されており、それぞれの設置位置でのビームの x 方向分布を測定することができる。電子銃に近い上流のモニタで小型試験機へのビームの入射位置、下流の 2 台のモニタで電子ビームの曲げ角の測定を行う。非破壊型静電セプタムの電場が ON/OFF であるときのビーム軌道を、ビーム分離試験装置を用いて測定し、両者の比較を行うことで試験機の電場のビームへの影響を評価した。

本試験装置を使用して測定した電子ビームの軌道測定結果を図.6、7 に示す。図.6 は電場 ON/OFF 時の電子ビームの軌道をモニタ 3 台で測定した結果である。x=-55 mm に設定したセプタム境界に対して、逆方向に蹴られていることがわかる。このとき、電場 ON 時には、試験装置の陽極-陰極間に 150V の電圧を印加している。さらに、図.7 は測定した軌道から算出した曲げ角を粒子トラッキングシミュレーションと比較した結果である。測定結果がシミュレーションにより非常によく再現できており、シミュレーションモデルおよび、電極印加電圧による形成される電場の計算モデルを確立した。しかしながら、本試験装置が形成する電場は、取り出し・周回領域における一様な電場分布や、セプタム境界における急峻な電場勾配の形成などのビーム分離に理想的な要素を持ち合わせていない。

そこで、確立したモデルを用いて電場形状の最適化を行ったところ以下の知見を得た。

より階段関数に近い電場分布を形成するために、垂直方向の電極間距離をできる限り狭くする。

電場をより細かく制御するために、水平方向の電極の数をできる限り増加する。

隣り合う電極の垂直方向の間隔は緩やかに変化させる。(電極間の放電対策)

改良設計した電極モデルおよび電極印加電圧、電場マップを図.8、9 に示す。試験装置と同様に x 方向正の方向が周回ビーム側、負の方向が取り出しビーム側、セプタム境界を x=-55mm に設定している。垂直方向の電極間距離は、J-PARC Main Ring のフィジカルアパーチャにあわせて取り出し側は狭く、周回側は広く設定した。電極の印加電圧は、最大 180 V とした。試験機と同様に 5 keV 電子ビームを照射した場合の蹴り角を粒子トラッキングシミュレーションにより算

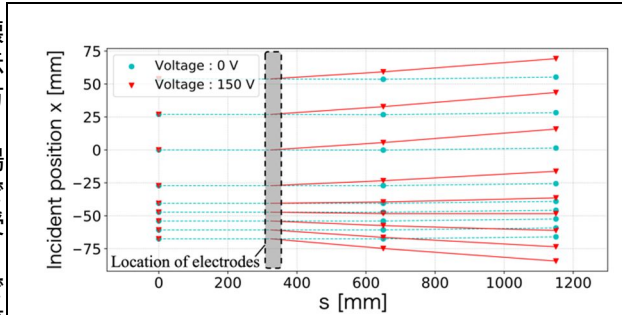


図 6. 電場 ON/OFF 時の電子ビーム軌道の測定結果

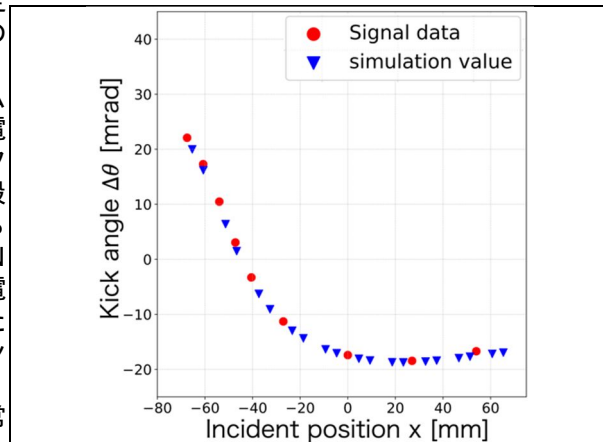


図 7. 電子ビームの蹴り角の測定値とシミュレーションの比較

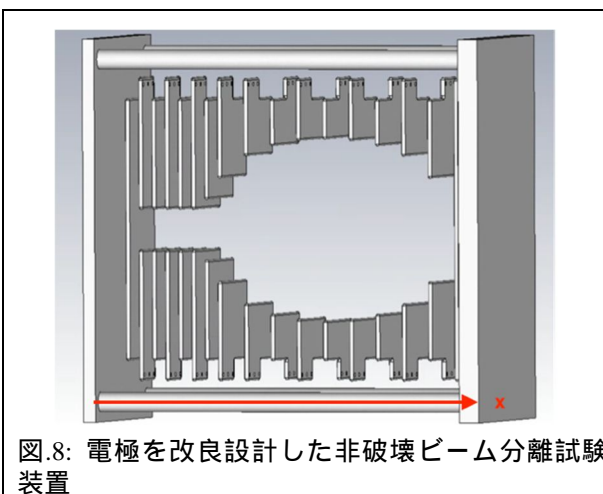


図 8: 電極を改良設計した非破壊ビーム分離試験装置

出した結果を図.10 に示す。セプトラム境界の左右で 60 mrad の蹴り角が得られかつ、周回ビーム側 ( $x > -55\text{mm}$ )、取り出しビーム側 ( $x < -55\text{mm}$ ) の蹴り角が一樣となっている。この結果から、非破壊静電セプトラムのビーム方向の長さ、電極最大印加電圧をそれぞれ 1.5 m、50 kV に設定すれば、J-PARC Main Ring の遅い取り出しで現在使用されている静電セプトラムと同等の蹴り角 (0.2 mrad) を達成できることが示唆された。また、本装置を組込んだ J-PARC Main Ring 遅い取り出しのビームシミュレーションを行ったところ、この非破壊ビーム分離試験装置単体では取り出しにおけるビームロスが増加してしまうが、現行使用している 2 台の静電セプトラムのうち、上流側の 1 台のみを本装置に置き換えた場合、20 % 以上のビームロス低下が見込まれることがわかった。50 % のビームロス低減を実現できればビーム強度を 2 倍にできるため、さらなる電極形状の最適化およびビーム光学系の最適化をすすめる必要がある。(ビーム力学的な課題)

電極への 50 kV 以上の高圧印加試験が未実施のため、放電の懸念が残る。電極表面の電解研磨処理やコーティングなどの最適化を今後行っていく必要がある。(技術・光学的な課題)

また、本研究において以下の特許を所得したので記載する。

[産業財産権]

取得状況(1 件)

名称: 荷電粒子ビーム操作装置、荷電粒子ビーム加速装置、及び荷電粒子ビーム操作方法

発明者: 原田寛之

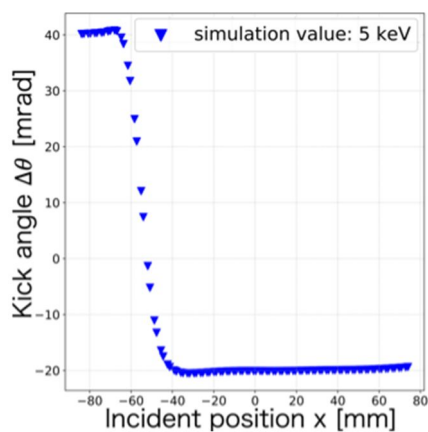
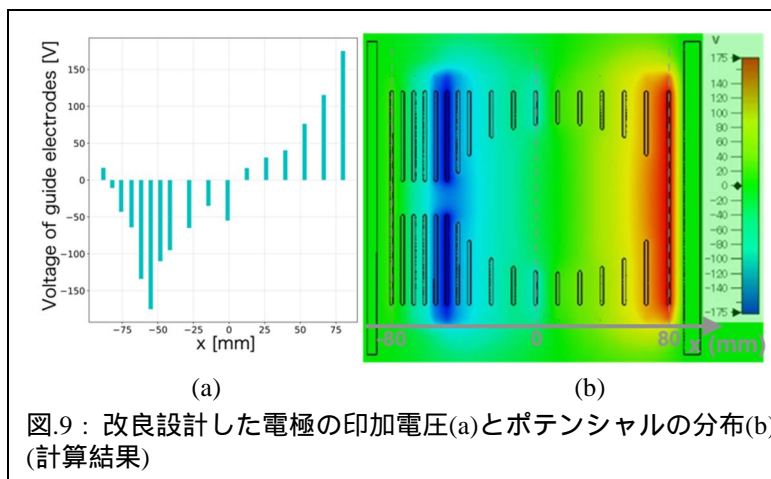
権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第 7207712 号

取得年月日: 2023 年 1 月 10 日

国内外の別: 国内



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shimogawa Tetsushi、Harada Hiroyuki	4. 巻 33
2. 論文標題 Proposal of Non-destructive Device for Slow Extraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11036
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 下川哲司、原田寛之、山本風海、佐藤篤	4. 巻 1
2. 論文標題 非破壊型遅いビーム取り出し装置の開発状況	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan September 2-4, 2020, Online	6. 最初と最後の頁 875-878
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 永山 晶大、原田 寛之、下川 哲司、山田 逸平、地村 幹、山本 風海、金正 倫計	4. 巻 1
2. 論文標題 粒子加速器における非破壊での遅いビーム取り出し手法の研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18-21, 2022, Online (Kyusyu University)	6. 最初と最後の頁 503-507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 永山晶大、原田寛之、下川哲司、佐藤篤、山田逸平、地村幹、小島邦洸、山本風海、金正倫計	4. 巻 1
2. 論文標題 非破壊型静電セプトラム試験機によるビーム分離実験と装置改良の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 - September 1, 2023, Funabashi	6. 最初と最後の頁 526-530
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永山晶大
2. 発表標題 非破壊型静電セプトラム試験機によるビーム分離実験と装置改良の検討
3. 学会等名 日本加速器学会 第20会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永山晶大
2. 発表標題 大強度陽子加速器における遅い取り出しのための非破壊ビーム分離装置の開発
3. 学会等名 2023年度ビーム物理研究会・若手の会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 永山晶大
2. 発表標題 粒子加速器における非破壊での遅いビーム取り出し手法の研究
3. 学会等名 日本加速器学会 第19会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永山晶大
2. 発表標題 大強度陽子加速器における遅い取り出しのための非破壊ビーム分離に関する研究
3. 学会等名 2022年度ビーム物理研究会、若手の会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 下川哲司
2. 発表標題 非破壊型遅いビーム取り出し装置の開発状況
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 荷電粒子ビーム操作装置、荷電粒子ビーム加速装置、及び荷電粒子ビーム操作	発明者 原田寛之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7207712号	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	原田 寛之  (Harada Hiroyuki)  (30601174)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 J - P A R C センター・副主任研究員   (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------