

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11924

研究課題名（和文）粒子線がん治療装置のスポットスキャンニング照射のための高速ビーム取出し制御の研究

研究課題名（英文）Study on high-speed beam extraction control for spot scanning irradiation of ion cancer therapy equipment

研究代表者

中西 哲也（NAKANISHI, Tetsuya）

日本大学・生産工学部・特任教授

研究者番号：50440037

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）：シンクロトロンを使ったスポットスキャンニング照射への適用を目的にマルチバンドRFKOシステムを開発し、若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンを使って原理実証試験に成功した。この方法は、シンクロトロンを周回するビームをバンチングさせることなくスピルを時間的に一様にでき、更に、バンチしないことによりビーム出射制御のビームoff時間が短時間で達成できる。実験結果はRFKO信号に含まれるバンド数を増やすにともないスピル強度の時間変動は小さくなり、ビームシミュレーションで予想された結果と同様の結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シンクロトロンを使った粒子線がん治療装置において、ビーム照射方法として最も効果的な方法の一つであるスポットスキャンニング照射が実用的な照射時間で実施でき、その結果、より信頼性の高い線量分布を患部全体に与える治療が行えると考えられる。また、開発したマルチバンドRFKO取出しは、スピル強度の変動を容易に低減でき、ビーム出射のon/offを高速で制御できるため、原子核・素粒子実験においても有効と考える。

研究成果の概要（英文）：We developed a multiband RFKO system for application to spot scanning irradiation using a synchrotron, and successfully conducted a proof-of-principle test using the synchrotron at the Wakasa Bay Energy Research Center. This method can make the spill uniform in time without bunching a beam circulating the synchrotron, and furthermore, by not bunching, the beam off time for beam extraction control can be achieved in a short time. The experimental results showed that as the number of bands included in the RFKO signal was increased, the time fluctuation of the spill intensity became smaller, and the results were similar to those predicted by beam simulation.

研究分野：加速器科学

キーワード：シンクロトロン ビーム取出し RFKO マルチバンドRFKO スポットスキャンニング 粒子線がん治療

1. 研究開始当初の背景

粒子線がん治療における患部へのビーム照射に最も適した方法の一つとしてスポットスキャンニング照射法がある。この方法は患部全体に均一に線量を与えるために患部を数千から数万ブロックに分割し、それぞれのスポットに予め計画された線量を照射する方法である。照射は呼吸にともなう患部の動きを考慮して、数回繰り返される。この方法を数分で実施するためには、スポット数×照射回数が非常に大きいためシンクロトロンからのビーム取出し制御を高速で行う必要がある。更に、出射ビーム(スピル)強度は、各スポットへの照射線量誤差を低減するために時間的に一定にする必要がある。一スポットへの照射時間は、照射ビーム量を測定するための線量モニタの時間応答が 70 μs 程度であるため、照射誤差を 1% 以下にするために 7 ms 程度になる(図1)。

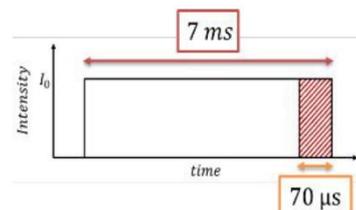


図1. 一スポットの照射ビーム

シンクロトロンからのビーム取出しを高速で制御する方法として、Radio Frequency Knockout (RFKO) 法がいくつかの施設で用いられている[1]。この方法は、粒子の位相面上での安定領域境界であるセパラトリクスを一定にして周回ビームにその進行方向と垂直方向に高周波電界を与え共鳴状態にして拡散し、セパラトリクスからはみ出した粒子が取り出されるというものである。RFKO の高周波信号は粒子のベータトロン振動数に一致させる必要があるが、ベータトロン振動数はその振幅に関係するため、シンクロトロン内を周回するビームの振動数はある幅を持つ。そのため、高周波信号もそれに応じた周波数幅を持つ必要がある。そのため、その周波数成分を有するノイズ信号(以後カロードノイズ(CN)と呼ぶ)を用いる方法や正弦波の周波数を掃引する FM 方式などが使われている。しかし、これらの方法では取出しビーム強度は時間的に大きく変動する問題がある。そのため、スピル強度を一定にするためにビーム進行方向にも加速装置で高周波電界を与えて周回ビームをバンチングしている。しかし、これによりビーム出射を停止するために RFKO 信号を off しても粒子のシンクロトロン振動の一周期にわたってビーム出射が続くため、ビーム出射の ON/OFF の応答時間は 1ms のオーダーとされている[2]。このため、これまで実施されている類似の照射方法は、ビーム照射は患部深さ方向の各層は連続的に行い、各スポットでの照射時間を予め決めた時間とするなどの方法が用いられている[3]。この方法では、各層を連続的に照射した後の線量しか測定することができないため、各スポットの線量を正確には把握できない。

このため、シンクロトロンを使ってスポットスキャンニング照射を実施する場合、スピル強度が一樣で且つ所定の線量が照射されれば即時出射を停止できる出射方式の開発が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、シンクロトロンを使ったスポットスキャンニング照射において、各スポットへの照射線量を正確に測定しながら照射できるビーム取出し法を開発するものである。これにより治療計画で決めた最良の線量分布を実現できる。そのために、スポット間のビーム移動の際には完全にビーム出射を停止する。そのためにはビームをバンチングすることなく RFKO だけで一定のスピル強度を得る必要があるが、RFKO の高周波信号として広帯域スペクトルを使用することで実現できることを筆者らは見出した。図2はスペクトルに含まれる共鳴周波数帯が1の場合と10の場合のビーム出射シミュレーション結果であるが、後者のスペクトルによりスピルが一樣になっていることが明らかに分かる。本研究の目的は、この方式を実際のシンクロトロンを用いてビーム実験を行い実証することである。

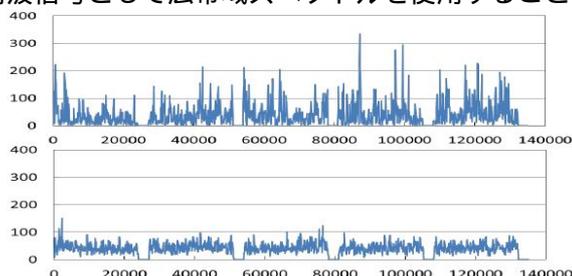


図2. 共鳴周波数帯を1つだけ含んだスペクトルによるスピル(上)と10含んだ場合のスピル(下)。横軸は回転数。

広帯域スペクトルを実際に実現しようとすると、高周波アンプの負担が大きくなる問題が生じる。この問題を解決するためにビーム拡散に寄与する周波数を検討した結果、ビームの拡散に寄与する周波数帯は共鳴周波数付近だけであることを見出し、RFKO 信号として図3に示すようなマルチバンドスペクトルの CN 信号を提案した。これは、全ての共鳴周波数付近で周波数幅はベータトロン振動数幅に相当するスペクトルとしたもので、放射線医学総合所(NIRS)で設計された普及型重粒子線シンクロトロンの場合、その周波数幅は約 80 kHz となる。同シンクロトロンでは 1/3 共鳴を使うが、10 個の共鳴周波数帯を含むスペクトルにすると、最低周波数は 1.1 MHz、最高周波数は 16.3

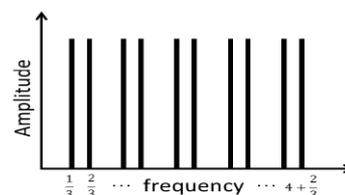


図3. 共鳴周波数帯を10含んだマルチバンドスペクトル

MHz となり、その間の周波数成分全てを増幅しようとする大きな電力が必要になるが、マルチバンド方式とするとアンプの負担は 6%程度に低減できる。

一方、このような狭帯域のバンドの集まりを作り出そうとすると、バンドパスフィルタでは高周波側で実現が難しい。そこで、筆者らはデジタル - アナログ変換器 (DAC) を使う方式を提案し、実証した。この方式は、マルチバンドスペクトルを逆フーリエ変換し、AD 変換して DA 変換器に記憶させ、外部クロックに同期して出力させる方法である。また、広帯域化に関しては、RFKO 電極に全ての周波数にわたって一定の電圧を印加することが難しくなる。一般に、ある帯域幅で一定の電圧を掛けるためには、図 4 に示すような APN (全通過回路網) が用いられる。更に、APN での消費電力を低減するために入力抵抗を高くする必要があるが、そのためには高周波インピーダンス変換器 (IT) が必要となる。このような広帯域のハイパワー RFKO システムを開発することも本研究の重要な目的の一つである。

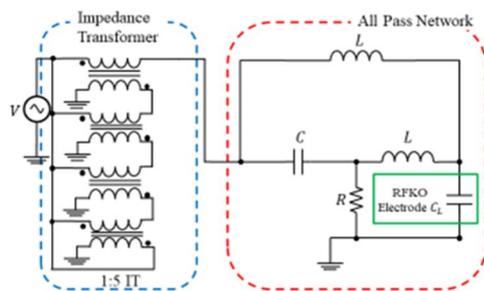


図 4 . IT+APN 回路

上記マルチバンド方式が実用化できれば、ビーム取出しの制御対象は RFKO システムだけとなるため任意のスピル構造を比較的容易に実現できると考えられる。それにより照射時間を短縮できる。一スポットの照射時間は、線量満了になった後にも続く照射によって決まるが、図 5 に示すような階段状のスピル構造にすると、線量モニタの応答時間が問題となる最後の方では通常の強度とし、それよりも前の領域でスピル強度を高めることで、その分照射時間を短くできる。これにより全体の照射時間を大幅に短縮できる。

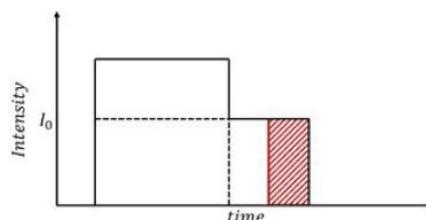


図 5 . 階段状スピル

本研究により、シンクロトロンを使ってスポットスキニング照射が可能になるだけでなく、物理実験等で遅い取出しを行う全てのシンクロトロンにおいてビーム取出し制御が簡単になる。

3 . 研究の方法

(1) 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター (WERC) のシンクロトロンを使ってビーム実証試験を行い、マルチバンド RFKO 法の有用性を実証する。マルチバンド RFKO 法を用いたビーム取出しのビームシミュレーション研究は、研究室で開発したシミュレーションプログラムを用いて WERC シンクロトロンのラティスで行い、ビーム実験に必要な諸パラメータを決める。ビーム実験で使用する RFKO システムに関しては、WERC で使われている RFKO 電極と類似の電極を試作し、ハイパワー用の IT と APN を開発し、大学の研究室でシステムを構築し、所定の性能が得られることを確認して WERC に持ち込む。ちなみに、RFKO システムの設計・試作は基本的には炭素線 400MeV/u に対して行うが、WERC シンクロトロンの炭素イオンの最大加速エネルギーは 55 MeV/u なので、高周波アンプと APN の抵抗については、このスペックで購入、設計・試作を行う。これにより予算を低減でき、また原理実証が目的であるので問題ないとする。

(2) 照射時間を短くするための階段状スピルの検討については、ビームシミュレーションによる研究とする。シミュレーションプログラムを任意の回転数ごとに出射粒子をカウントして CN 強度を変えられるように改造する。CN 強度の変更のタイミングは線量モニタの時間応答を考慮して行う。また、この方法では CN 強度をフィードバック制御できるため、バンド数を減らしてもスピル強度の変動をある程度抑えることができるため、バンド数を減らしても本方式が適用できることを確認する。

4 . 研究成果

(1) 研究室で開発したマルチバンド RFKO システムを WERC シンクロトロンの RFKO 電極に接続して、ビーム取出しの原理実証試験を行い、シミュレーションで予想された結果と同様の結果を得ることができた。更に、本方式のもう一つの大きな特長であるビーム出射制御のビーム off が短時間で達成できることも実証した。

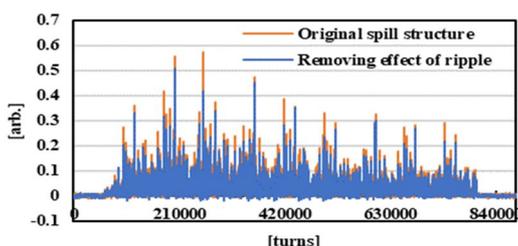


図 6 . バンド数 1 のときのスピル

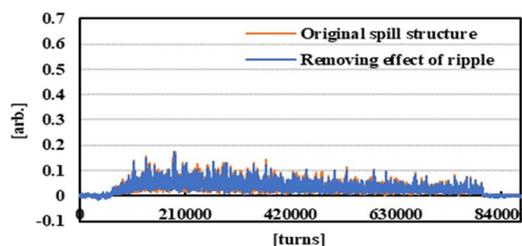


図 7 . バンド数 10 のときのスピル

バンド数 1 の CN で取出しを行ったときのスピルを図 6 に示す。測定は出射ビーム輸送ラインに設置された線量モニターで行い、オシロスコープに取り込んだ 1 ショットのデータをフーリエ変換し、ビーム信号とは無関係の電気ノイズ成分を取り除いた結果（オレンジ色）と、更にシンクロトロン四極電磁石等の電流リプルによる成分を取り除いた結果（青色）である。シミュレーションでは電流リプルの影響は考慮していないため、シミュレーションとの比較には後者の結果が必要となる。図 7 は同様の処理を行ったバンド数 10 の結果である。図 8 はこれらの結果のスピル強度の変動の標準偏差をその平均値で割った値をバンド数に対してプロットしたものである。バンド数に対する変化は計算値とほぼ同じ傾向であり、電流リプルの影響を取り除くことで、絶対値もより計算値に近づくことが分かる。ここで、加速用の高周波電圧（RF 電圧）は、完全にゼロにすると周回ビームが高周波空洞に電磁場を誘起して制御を不安定にするため、わずかに電圧をかけており、そのためわずかな粒子はバンチしている。

図 9 はバンチングのための高周波電圧に対するスピル強度の変動の標準偏差をその平均値で割った値である。2 回の測定結果を示す。バンチングすることでバンド数が 1 でも 10 と同様に変動は小さいことがわかる。しかし、バンチングすることで RFKO を off してもビーム出射が ms のオーダーで継続することが図 10 から分かる。同図の矩形波（青）は RFKO が on している時間を表し、それ以外は RF 電圧に対するスピル信号である。RFKO を off した後、60 μ s 出射が続いた後に、80 μ s かけて急激に減少し、その後 RF 電圧に関係した時間（ms のオーダー）で徐々に減少する。この減少する時間はシンクロトロン振動の一周期に一致することが分かった。また、off 後に一定の出射が続いた後、急激に減少する現象については、セパトリクス枝の部分にいた粒子の出射とセパトリクス周辺にいた粒子の出射によるものと思われる、その信号が線量モニタの応答速度に関係して長くなっていると考えられるが、それらから推測できる値よりも実験結果は長く、詳細は不明である。

(2) 図 11 は開発したマルチバンド RFKO システムを WERC シンクロトロンの RFKO 電極に接続した写真で、図 12 は高周波アンプを通さずに試作した電極に接続して電極電圧を測定した結果である。高周波プローブを電極に接続するとプローブの静電容量が電極の静電容量に並列に接続される状態となるため、周波数特性は同図青と橙色で示すように高周波側で悪くなる。そのためプローブを電極から少し離して電位を測定した。その結果を同図黄、灰色で示すが、高周波側で減少することなく平坦な特性が得られている。測定範囲は WERC シンクロトロンで必要とされる周波数範囲である。

(3) 図 13 は WERC シンクロトロンのラティスで照射時間を短縮するための階段状スピルが得られるように 6 バンドでシミュレーション結果である。線量モニタの応答時間を 100 μ s (300 ターン) と仮定して、取出し粒子数から CN 強度を変えるタイミングを 300 ターン後とした。スピル強度を下げるタイミングは 10 バンドの場合は目標照射ビーム量の 86%、6 バンドでは 84% に達した時点とし、CN 強度をその直前の 45% (ビーム強度で 20%) に低減している。CN 強度はスピル強度が一定となるようにフィードバック制御しており、300 ター

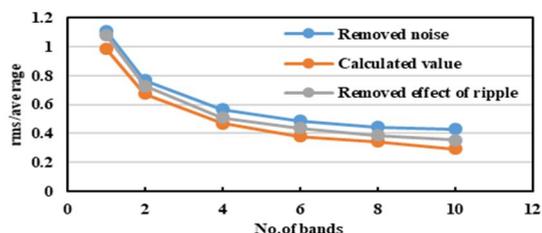


図 8 . バンド数対スピル強度の変動

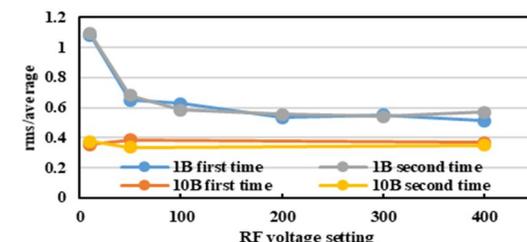


図 9 . バンチング用高周波電圧に対するスピル強度の変動

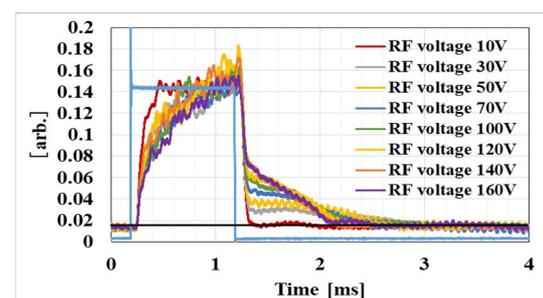


図 10 . バンチング用高周波電圧に対する RFKO-off 後のスピル強度の変化



図 11 . WERC シンクロトロンの RFKO 電極に接続したマルチバンド RFKO システム。

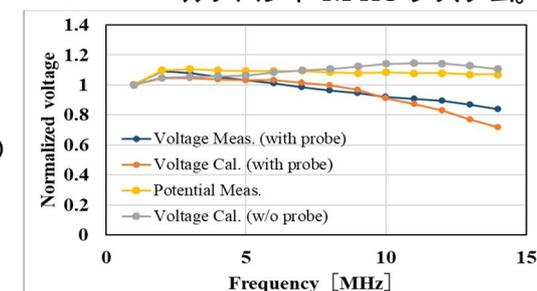


図 12 . 高周波アンプを通さずに試作電極に接続した IT+APN の周波数特性。

ンの遅れを考慮している。また、線量満了後から次の出射開始までは 1300 ターンの出射停止区間を設けている。

シミュレーションは 95 万ターン行い、図 13 は 20 万ターンまでの結果を示した。また、図 14 は各スポットの取出しの粒子数の目標値に対する比をプロットしたもので、誤差は 1%以下であることが分かる。また、6 バンドの場合、10 バンドに比べて一回の出射時間を長くする必要があるので、取出し回数は少ないことが分かる。図 15 はバンド数に対する誤差 1%以下にするための一スポットあたりの出射時間で、周回周波数を 2.97MHz としたときの値である。バンド数 10 の場合、1 回の出射時間は平均 2.3ms であり、平坦な強度分布でスピル強度を下げない方式に対して 1/4.3 できる。バンド数 1 でも 9ms 程度であり、スピル強度分布が平坦な場合と同程度の照射時間となる。

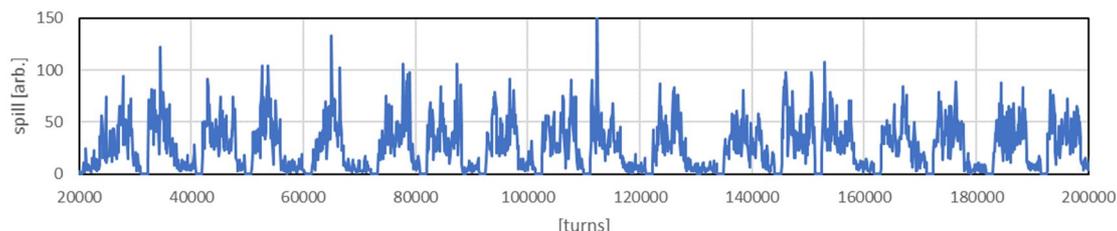


図 13. 階段状スピル構造のシミュレーション結果。バンド数は 6 である。

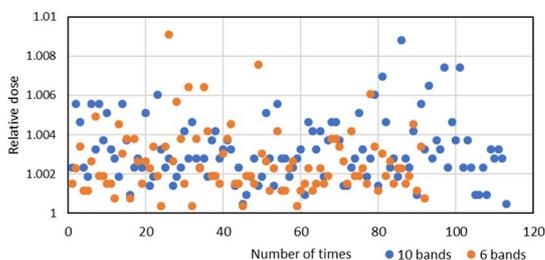


図 14 . 各スポットの取出しの粒子数の目標値に対する比。横軸は照射回数、つまりスポット番号に相当する。

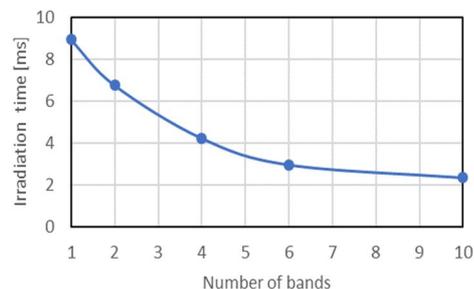


図 15 . バンド数に対する誤差 1%以下にするための一スポットの出射時間。

< 引用文献 >

- [1] L. Falbo, Proc. of HIAT 2012, Chicago, IL USA, pp. 156-162.
- [2] T. Furukawa, et al., Nucl. Instrum. Methods A 503 (2003) 485-495.
- [3] T. Inaniwa et al., Med. Phys. 34(8), August 2007 3302-3311.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Shiokawa, Y. Okugawa, T. Kurita, and T. Nakanishi	4. 巻 A 1010 165560
2. 論文標題 Slow beam extraction method from synchrotron for uniform spill and fast beam switching using an RF knockout method of multi-band colored noise signal, - POP Experiment and Simulation -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165560	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamaguchi, Y. Okugawa, T. Shiokawa, T. Kurita, T. Nakanishi	4. 巻 462
2. 論文標題 Slow beam extraction from a synchrotron using a radio frequency knockout system with a broadband colored noise signal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B	6. 最初と最後の頁 177-181
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 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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中西哲也
2. 発表標題 シンクロトロンからの取出しビームの一樣化に関する研究
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中西哲也, 奥川雄太郎, 塩川智也, 栗田哲郎
2. 発表標題 一樣なスピルでかつ高速ビームON/OFF ができるマルチバンドRFKO による遅い ビーム取出し
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西哲也
2. 発表標題 RFKOシステム用APNの提案
3. 学会等名 日本大学生産工学部第54回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥川雄太郎, 栗田哲郎, 中西哲也
2. 発表標題 シンクロトロンからの遅いビーム取り出しにおけるスピル増加のためのカラードノイズデータの変更
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩川智也, 奥川雄太郎, 山口輝人, 栗田哲郎, 中西哲也
2. 発表標題 遅いビーム取り出しにおける高速ビーム制御とビーム取出し量を増やすためのマルチバンドRFKOシステムに関する研究
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.Yamaguchi, Y.Okugawa, T.Shiokawa, T.Kurita, T.Nakanishi
2. 発表標題 Slow beam extraction from a synchrotron using a radio frequency knockout system with a broadband colored noise
3. 学会等名 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩川智也, 奥川雄太郎, 山口輝人, 中西哲也
2. 発表標題 マルチバンドRFKO システムのプロトタイプの開発
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 輝人, 奥川 雄太郎, 塩川 智也, 栗田 哲郎, 中西 哲也
2. 発表標題 マルチバンドRFKO電界による遅いビーム取り出しの原理実証実験
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥川 雄太郎, 山口 輝人, 中西 哲也
2. 発表標題 マルチバンドRFKO電界による遅いビーム取り出しの原理実証試験のためのビームシミュレーション研究
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Nakanishi, Ryosuke Nishihara, Teruto Yamaguchi, Hisaaki Kato, Daijiro Kobayashi, Tomoya Shiokawa
2. 発表標題 Development of a very wideband RF-knockout system for spot scannig irradiation
3. 学会等名 25th Conference on Application of Accelerators in Research and Industry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口輝人、西原亮輔、加藤久暁、小林大二朗、塩川智也、中西哲也
2. 発表標題 一様スピルを得るための広帯域RFKOシステム用APNの試作
3. 学会等名 日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Yamaguchi, Y.Okugawa, T.Shiokawa, T.Kurita,T.Nakanishi
2. 発表標題 Slow beam extraction form a synchrotron using a radio frequency knockout system with a broadband
3. 学会等名 The 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------