

令和元年6月22日現在

機関番号：82110

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18784

研究課題名（和文）ミュオン加速器の性能を飛躍的に高める超高周波数四重極加速器の基礎研究

研究課題名（英文）Basic study of high frequency RFQ to drastically improve the performance of the muon linac

研究代表者

近藤 恭弘（Kondo, Yasuhiro）

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-PARCセンター・副主任研究員

研究者番号：40354740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオン加速用の、従来の共振周波数にくらべておよそ4倍の共振周波数である1300MHzを持つ非常にコンパクトなRFQを開発した。450mm長の無酸素銅製低電力モデルを製作し、必要な精度を満たして加工できることを実証した。このモデルの周波数測定及び電磁場分布測定を行い、設計通りの電磁場が得られていることを確認した。この周波数帯のRFQの開発は世界初の物である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、1300MHz RFQ開発の前途が拓け、加速器科学に大きなインパクトを与えた。今後は実際にミュオンを加速できる実機製作に向けた研究を行う。このRFQが実現すれば、非常にコンパクトなミュオンリニアックが可能になり、ミュオン異常磁気モーメント測定を通して素粒子物理学の発展に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a 1300-MHz RFQ for muon acceleration. This resonant frequency is about four times higher than conventional RFQs. This 1300-MHz RFQ is a very compact and epoch making one in the accelerator history. We made a cold model of 450 mm length made of oxygen free copper, and proved it can satisfy the machining accuracy. We measured resonant frequency and electro-magnetic field distribution, they are agreed with design values. The RFQ with this frequency range is the world's first one.

研究分野：加速器科学

キーワード：ミュオン加速 リニアック RFQ ミュオンg-2 Lバンド コールドモデル 無酸素銅 ビーズ摂動法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ミュオンは電子の 200 倍の質量をもつレプトンであり、摂動の高次項への影響を通して素粒子標準理論を超えた新しい物理を探索するのに最も有効なプローブの一つである。実際、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) でのミュオン $g-2$ の測定において、標準理論の予言と 3.4 の差異があることが示され、新しい物理を示唆するものとして注目されている。これをさらに探究するため、J-PARC において新たなミュオン $g-2$ 精密測定実験を計画している。従来の実験では、パイオン崩壊で生成したエミッタンスの大きなミュオンビームをそのまま利用していたことが系統誤差の大きな要因であったが、新しい実験では、低エミッタンスミュオンリニアックを開発し、BNL での $g-2$ の測定精度 0.54 ppm から 0.1 ppm に改善することを目標としている。これを実現するため我々は、極低速ミュオン (3 keV/c) を生成し、リニアックによって、エミッタンス増大を極力抑制して 300 MeV/c まで加速する方法を採る。そのため、最も重要な要素技術である極低速ミュオン加速用のリニアックの開発を進めてきた。現状のミュオンリニアックの設計は、現在ある加速空洞を用いるなど、出来るだけ確実に実現できるという観点から設計されており、初段の加速構造として私が中心となって開発した既存の J-PARC リニアック用高周波四重極リニアック (RFQ) を用いる。この RFQ でミュオンを問題なく加速できることはシミュレーション及びビーム試験によって実証済だが、私のこれまでの RFQ 開発の経験から、ミュオン専用これまでの常識を取り払って設計し直せば、画期的な RFQ が可能ではないかとの着想により、本研究を構想した。

史上最高エネルギーの欧州 LHC 加速器に於いても、現在までのところヒッグス粒子以外の新粒子は見つかっておらず、現在の路線の延長として、加速器の大型化や高エネルギー化によっての物理の探求は早晚限界にいたるであろうことはもはや誰の目にも明らかである。一方で、レーザーやプラズマを用いたまったく新しい原理での粒子加速の研究も長年続けられているが、いまだ物理の実験に使える質のビームは実現していない。このような状況に於いて、ミュオンのようなこれまでに加速されたことのない粒子の加速は、加速器を用いた研究及び加速器自体の研究に於ける今後の大きな方向性となり得る。ゼロエネルギーからのミュオン加速は我々のグループ以外では研究されておらず、陽子加速器のような標準的な構成が確立していない。また、加速周波数 1 GHz を超えるような RFQ も存在していない。本研究を端緒に高周波数の RFQ が実現すれば、現状のベースライン設計よりもミュオンリニアックを飛躍的に簡略化出来る可能性があり、素粒子物理学の進展に大きく貢献することが期待される。また、今後のミュオンリニアックにおける一つの標準を確立することとなる。

このような既存加速構造の小型化は、医療や産業への応用に於いても今後増々重要となる。本研究のような、低速粒子の加速構造の小型化への挑戦は、超小型陽子加速器へ繋がる。陽子用としてはもう少し加速周波数を下げる必要があるが、例えば小型のレーザーイオン源などと組み合わせることにより、サイバーナイフのようなロボットアームに搭載可能なサイズの陽子加速器も不可能ではないと思われる。そのような極端な小型化まで及ばないにせよ、加速器の小型化はコストの削減に繋がり、産業用の中性子源などの普及が進むと考えられる。このように、本研究は加速器科学のさらなる進展に繋がる可能性の高い研究である。

2. 研究の目的

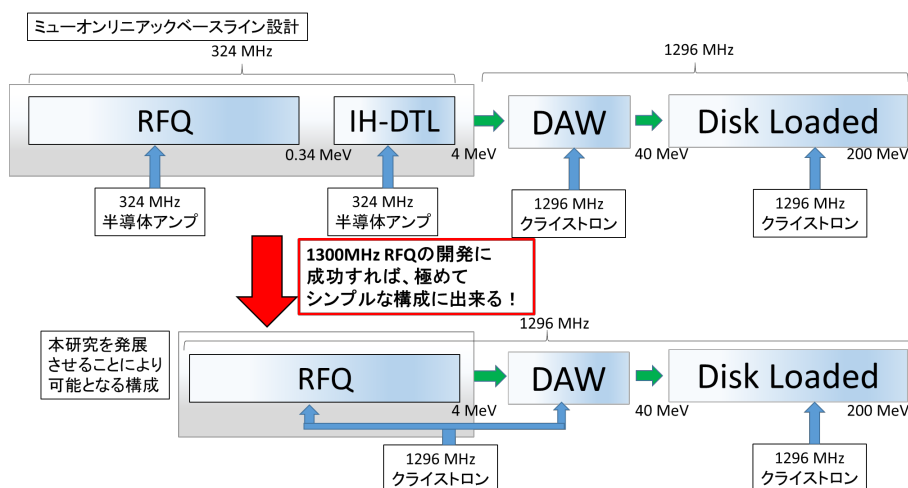


図 1. 1300MHz RFQ が可能となった場合のミュオンリニアックの構成

本研究では、ミュオン加速のための、これまでに類を見ない高い加速周波数の RFQ の実現に向けて、まずは低電力モデルを製作し、性能を検証することを目的とする。

我々は高強度陽子加速器施設 J-PARC のミュオン施設に於いて、新たなミュオン異常磁気モーメント ($g-2$) 精密測定実験を計画しており、この実験の成否を握るミュオンリニアック

クの開発を進めている。競合の実験があるため、出来るだけ早く確実に実験を始めなければならず、ミュオン初期加速にはすでに完成している、加速周波数 324 MHz の J-PARC リニアック用 RFQ の予備品を用いる計画である。ここで私は、これまでの J-PARC リニアック RFQ 開発の経験から、ミュオン加速のためには 324-MHz RFQ は決して最適解ではなく、大きく周波数を上げることでより合理的な設計となる点に着目した。高周波リニアックにおいては、一般に加速効率を高めるためには周波数は高い方が有利である。しかし RFQ の場合、初期の加速周期長により周波数が制限される。これまで RFQ で加速された最も軽い粒子である陽子では、典型的な加速周波数は 300 MHz 帯であり、例えば 1300 MHz にした場合、初期加速周期長が 1 mm となってしまう現実的ではない。しかし、ミュオンの質量ならば、同じエネルギーでも速度が大きいので周波数を 1300 MHz に上げて加速周期は現実的な長さとなる。RFQ は本来あまり加速勾配的には有利な構造ではないが、加速周波数を上げることにより、324 MHz では 0.34 MeV までだったのが、ベースライン設計と同程度の長さ (3 m) で 4 MeV まで加速可能となり、一気に後段の DAW (disk and washer) 結合型空洞に接続可能となる。ミュオン崩壊による損失も、RFQ 後段の交差楕円 H モードドリフトチューブリニアック (IH-DTL) までで 20% だったものが、6% に改善される。

ミュオンリニアックの DAW 以降の加速周波数は 1300 MHz であり、1300 MHz の RFQ が可能なら、図 1 に示すように、計画中のミュオンリニアックにおいて、324 MHz のセクションが無くなり、全て 1300 MHz の加速空洞で構成出来るようになる。その結果、コストのかかる 324 MHz の高周波源が不要になる。また、IH-DTL 自体を省略できるメリットも大きい。この加速器は、通常とは異なり、実験グループが自ら運転維持する必要があるため、システムの簡略化は極めて利点大きい。しかしながら、そのような高い周波数の RFQ では、空洞半径がわずか 3 cm あまりになってしまう。この、これまでの常識から見て極端に小さな RFQ において、必要な精度を満たし設計通りのビーム性能が発揮出来るか、現時点では不確定要素が多い。そのような加速器をミュオンリニアックのベースライン設計として採用するわけにはいかないため、現状の設計では、RFQ の加速周波数として保守的な 324 MHz を採用している。そこで、本研究において、まずは低電力モデルの製作から研究を開始し、不確定要素を一つずつ排除していき、超高周波数 RFQ の実現に繋げる。

3. 研究の方法

通常 300MHz 程度の RFQ の加速周波数を 4 倍にすることで、空洞半径はわずか 3 cm という、これまでの常識では一見不可能と思える大きさとなる。単純に大きさを 1/4 にスケールすると、要求される機械精度も 1/4 である 10 μm 以下となってしまう、RFQ のような複雑な構造では実現が難しい。そこで私は、これまでの RFQ 開発で得た知見を用いてビーム力学設計を工夫し、ミュオン RFQ ならば 1300 MHz にしても 324-MHz RFQ と同様の平均ボア半径を確保する設計が可能なることを見出した。RFQ において最も精度が要求されるのはビーム周辺であり、これにより要求精度は 324 MHz と同等となり現状の機械加工技術で実現可能であると考えられる。また、必要なアクセプタンスも確保される。

本研究では、本研究計画の予算で製作できる長さの低電力モデルを製作する。通常、低電力モデルはアルミ等で制作するが、現在の工作機械の精度ならば必要な寸法精度が得られるのは自明である。RFQ においては、難削材である焼きなまし銅に起因する、切削精度の悪化や加工残留応力による変形などが重大な問題となるため、本研究では銅で低電力モデルを制作する。この低電力モデルは、独立した空洞として成り立つように、到達エネルギー、すなわち長さ以外は実際の RFQ と同じ構造とする。共振周波数や Q 値など、空洞としての基本的な数値は、ベクトルネットワークアナライザで測定する。電磁場分布は、ビーズ摂動法と呼ばれる、空洞内に導体片 (ビーズ) を挿入することにより誘起される周波数変化を挿入位置の関数としてプロットする方法で測定する。1300-MHz RFQ の小さな空洞に適合するビーズ駆動装置は無いので制作する必要がある。これらの測定方法は、RFQ の製作において基本的な物であり、これまでの RFQ 製作において十分に経験を積んできた手法である。これらの測定値が、ビーム力学設計から許容される範囲内に収まっているか評価し、1300-MHz RFQ が実現可能か判断する。

4. 研究成果

1300MHz RFQ のビーム力学設計は汎用の RFQ 設計、シミュレーションコードである RFQGEN を用いて行った。この設計では 324 MHz の RFQ と同等の平均ボア半径を確保し、現状の入射ミュオンを受け入れ可能な設計とした。このため消費電力が大きくなっているが、入射収束系と RFQ との設計の整合と最適化は今後の課題である。RFQGEN による粒子シミュレーション結果では、規格化 rms エミッタンス 0.2 π mm mrad 入射に対して、透過率 100% であり、RFQ 出口での規格化 rms エミッタンスは、横方向 0.26 π mm mrad、縦方向 0.095 π MeV deg であった。この長さの RFQ でのミュオンの崩壊損失は 8% である。

このビーム設計結果に基づき、空洞断面形状の設計を RFQFISH を用いて行った。SUPERFISH による計算値では、Q 値は 6554、電力損失は 3 MW であった。ヴェーンエンドカットの寸法は CST Micro Wave Studio を用いた三次元計算によって決定した。有限長さのモデルに対してヴェーンエンド対面に磁気的境界条件を設定したうえで固有モードを計算し、共振周波数が無限長モデルと同じになるように調整した。

この設計に基づき長さ 450 mm のコールドモデルを製作した。本来、コールドモデルとしてはアルミ製で十分であるが、加工精度を確認するため無酸素銅で製作した。3次元測定機によるヴェン先端の形状測定で、加工精度が $\pm 15 \mu\text{m}$ の範囲内に概ね収まっていることを確認した。全体を組み上げた写真を図2に示す。空洞外径は 135 mm であり非常にコンパクトなのが分かる。

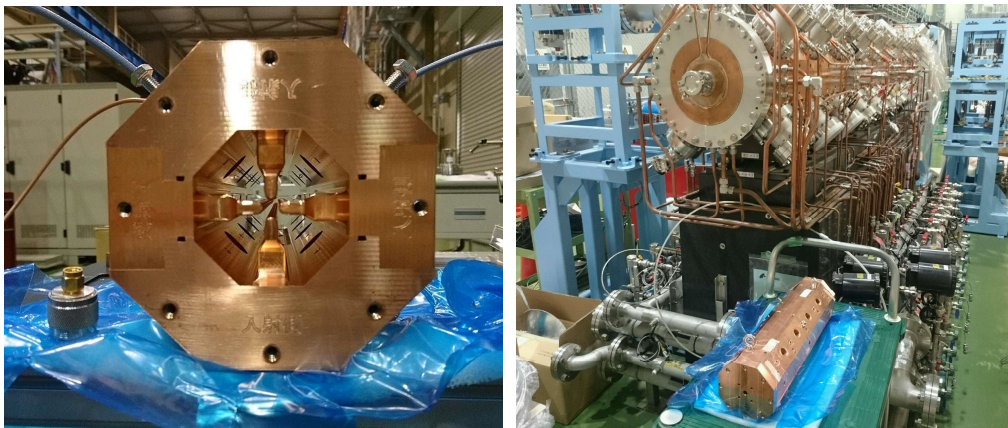


図2 . 1300MHz RFQ コールドモデル。左、断面形状。右、324MHz RFQ との比較

このコールドモデルは、一象限につき 4 つのチューナ、5 つのピックアップポートを備えている。チューナは無酸素銅製のプラグをねじ込む方式とした。完成したコールドモデルの固有状態の周波数をベクトルネットワークアナライザで、電磁場分布をビーズ摂動法でそれぞれ測定した(図3)

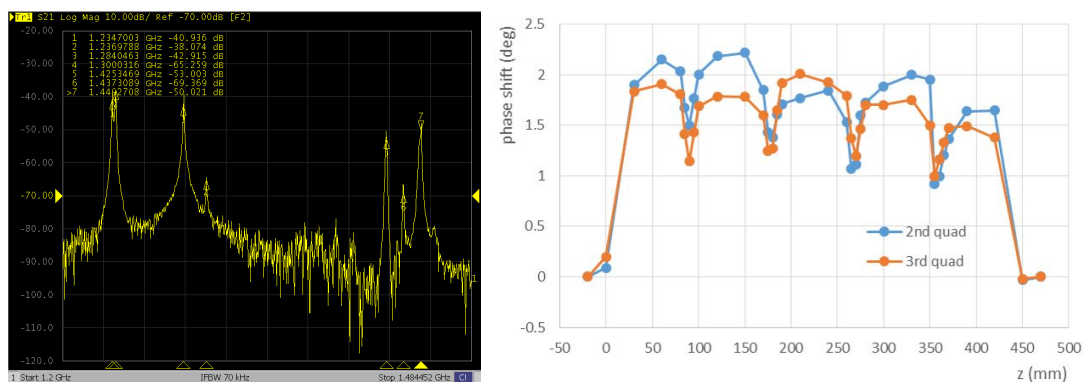


図3 . 1300MHz RFQ コールドモデル測定結果

左の図で 1284 MHz のピークが四重極の基本モードと推定される。この RFQ の電磁場分布を測定するため右の図の電磁場測定プロット中 4 か所のへこみはチューナポートによる磁場の引き込みを示す。ネットワークアナライザの port 1 を第一象限に、port 2 を第四象限のピックアップに接続し、第二象限と第三象限にビーズを挿入した時の S21 パラメータの位相変化を測定した。第二、第三象限ともに同等に長手方向に平坦に励起されており、このモードが TE210 モードであることが同定出来た。以上により、1300MHz RFQ が実際に製作可能であることが実証された。これらの結果を平成 30 年度の国際リニアック会議 (LINAC2018) 及び日本加速器学会年会に於いて報告した(雑誌論文)。

本研究により、1300MHz RFQ 開発の前途が拓け、加速器科学に大きなインパクトを与えた。今後は実際にミュオンを加速できる実機製作に向けた研究を行う。この RFQ が実現すれば、非常にコンパクトなミュオンリニアックが可能になり、ミュオン異常磁気モーメント測定を通して素粒子物理学の発展に寄与することが期待される。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Y. Kondo, T. Morishita, J. Tamura, M. Otani, "Low power measurement of a 1300-MHz RFQ cold model", Proceedings of 29th Linear Accelerator Conference(LINAC2018), 査読無, 2018, p794-797.

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/lina2018/talks/thpo048_talk.pdf#search=%20domain%3Daccelconf%2Eweb%2Ecern%2Ech%20%20%2Bauthor%3A%22Y%2E%20Kondo%22%20%20ur%3Aaccelconf%2Flina2018%20file%20extension%3Dpdf%20%20dur%3Aabstract%20%20dur%3Aaccelconf%2Fjacow

近藤恭弘、森下卓俊、田村潤、大谷将士、「Lバンド RFQ の低電力測定」、Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読無、2018、p421-424.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP047.pdf

〔学会発表〕(計0件)

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。