

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00166

研究課題名（和文）シングルエンド励振方式加速空洞によるビーム強度増大化

研究課題名（英文）Beam power upgrade by single-ended rf acceleration cavity

研究代表者

山本 昌亘（Yamamoto, Masanobu）

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・研究主幹

研究者番号：30354749

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,600,000円

研究成果の概要（和文）： J-PARC 3GeVシンクロトロン加速器において、設計値の倍となる2MWビーム出力を達成する加速空洞の設計・製作を行った。従来の常識とされていたプッシュプル励振方式よりもシングルエンド励振方式の加速空洞の方が大強度ビーム加速には有利であることを計算により示し、シングルエンド励振方式のプロトタイプ機の製作を完了した。プロトタイプ機を加速器トンネルにインストールし、現状の最大ビーム出力である1MWによる加速試験を行った。その結果、予想通りプッシュプル励振方式よりも4割低い電力でビームを安定に加速できることが確認された。これにより2MWビームを加速可能なことが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大の学術的意義は、電源、増幅器は既存のものを使用したまま、負荷である加速空洞をシングルエンド励振方式に変更するだけで、設計値の倍である2MWビーム加速が達成可能なことを示したことにある。これは従来プッシュプル励振方式がとされていた高周波加速システムの常識を覆す画期的な成果である。これにより、加速器から物質生命科学や素粒子・原子核実験に供給されるビーム強度を増強することができ、これらの分野における国際的な競争力を高める技術を手にしたことになる。

また社会的意義としては、同じビーム出力を達成するのに4割低い電力で済むことになり、SDGsにも貢献する成果と言える。

研究成果の概要（英文）： We have designed and fabricated an acceleration cavity in J-PARC 3-GeV synchrotron to achieve a beam power of 2 MW, which is twice the design value. The calculation shows that a single-ended acceleration cavity is more advantageous for high intensity beam acceleration than a push-pull acceleration cavity, which is considered to be the conventional method. We have completed the fabrication of a prototype single-ended acceleration cavity. The prototype was installed in the accelerator tunnel and was tested with a 1 MW beam, which is the maximum beam power in the current status. As a result, it was demonstrated that the beam can be stably accelerated with 40% less power than the push-pull acceleration cavity, which is expected value by the calculation. This means the single-ended acceleration cavity has an ability to accelerate 2 MW beam.

研究分野： 加速器科学

キーワード： 陽子シンクロトロン 高周波加速

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) J - P A R C 3 GeVシンクロトロン加速器は、当初の設計値である1 MWビーム加速を達成した。ビームを加速する高周波加速システムは、1 MWビームを加速する前提で設計されており、電源、増幅器類はその定格容量の限界に達していた。

(2) 3 GeVシンクロトロン加速器から取り出されたビームは、物質・生命科学実験施設や素粒子・原子核実験施設へと導かれ様々な研究成果を創出しているが、物質・生命科学実験施設における2 ndターゲット計画やミュオンビームの高輝度化、素粒子実験における長基線ニュートリノ振動実験での実験精度向上など、激しい国際競争に打ち勝つためにビーム強度の増強が渴望されていた。

2. 研究の目的

10年以上に及ぶ大強度ビーム加速試験による知見の蓄積から、3 GeVシンクロトロン加速器には高周波加速システムを除いて2 MWビーム出力を実現できる潜在能力があることが示唆されている。このため、設計値である1 MWの倍となる2 MWビーム出力を達成する加速空洞を設計・製作し、実際にビーム加速試験を行ってその原理を実証することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 加速空洞筐体の設計・製作

シングルエンド励振方式加速空洞の設計を行う。既設のプッシュプル励振方式加速空洞との置き換えを考慮して、同等のサイズ、同等の加速電圧を発生できるようにする。また、加速電極あたりの電圧増加を考慮して、装荷する金属磁性体の特性改善も行う。設計に基づき、プロトタイプ機を製作する。

(2) テストベンチでの高周波特性測定及び大電力試験

製作したプロトタイプ機を高周波加速システムのテストベンチに設置して、高周波特性測定を行い、所要の特性が得られていることを確認する。その後、真空管増幅器と電源にプロトタイプ機を接続して大電力高周波を投入し、連続通電試験を行って耐久性を確認する。

(3) 加速器トンネルに設置したビーム加速試験

プロトタイプ機を3 GeVシンクロトロン加速器トンネルに設置し、ビーム加速試験を行う。現状加速可能な最大ビーム出力である1 MWビームにおいて電源の電流値を測定し、事前の予想との比較を行って、2 MWビーム加速可能な性能を持っていることを検証する。

4. 研究成果

(1) まず、シングルエンド励振方式高周波加速空洞の設計を行った。設計値については、現在3 GeVシンクロトロン加速器で使用されているプッシュプル励振方式高周波加速空洞と同等の性能を目指すため、2 mの長さで36 kVの加速電圧を発生できることを目標とした。プッシュプル励振方式では6つの加速電極で36 kVを発生させていたため、一つの加速電極あたり6 kVで済んでいた。これに対してシングルエンド励振方式では、2 mの長さに空洞長さを納めるためには、加速電極は最大でも4つしか設けることができず(図1)、一つの加速電極あたり9 kVを発生させる必要があった。

陽子シンクロトロン加速器においては、広い周波数帯域にわたって加速電圧を発生させるために磁性体を装荷している。J - P A R Cにおいては、高い加速電場勾配を達成するために金属磁性体を採用し、それを水タンクに入れて純水で冷やす直接冷却方式を採用してきたが、その基本的な構造設計については既存のものを踏襲することとした。ただ

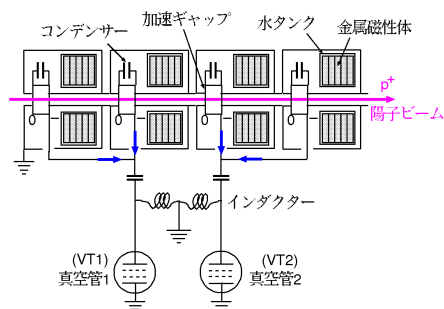


図 1: シングルエンド励振方式概要図

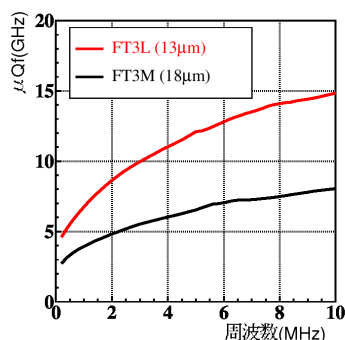


図 2: 金属磁性体の特性

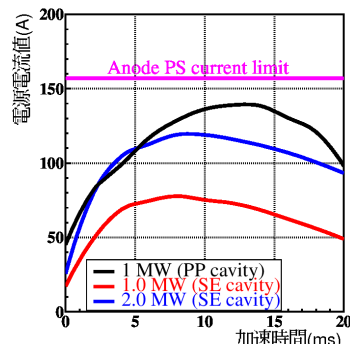


図 3: 加速中の電源電流値見込み

し、金属磁性体の水タンク中での発熱は、電圧 V と金属磁性体のインピーダンス R により $V^2/(2R)$ で求められるので、 V が 6 kV から 9 kV へ 1.5 倍増えるということは、 R が同一の場合発熱が 2.25 倍増えることを意味する。そのまま使用すると金属磁性体が損傷する恐れがあるため、 R を増やすべく金属磁性体を既設のものに対して 8 割増しの性能を持つ新型に置き換えることを検討した(図 2)。さらに、冷却水流量を 4 割増しとすることで、冷却能力としては既設のものと同色ないレベルを確保する設計を行った。

上記の設計を行ったシングルエンド励振方式加速空洞について、真空管の動作特性解析を行い予想される電源の電流値の見積もりを行った(図 3)。その結果、現状の電源の最大定格である 157 A よりも低い 140 A 程度で 2 MW ビームを加速することが可能であることが予想された(青線)。また、 3 GeV シンクロトロン of 現状の最大ビーム出力である 1 MW ビームでの計算を行ったところ、プッシュプル励振方式に比べて 4 割程度低い電力でビーム加速可能なことが示唆された(赤線)。

(2)設計を行ったシングルエンド励振方式加速空洞について、実際にプロトタイプ製作に着手した。水タンクやビームパイプなどの基本的な構造体については、既存のプッシュプル型で培ったノウハウを生かし、大きな改変なく製作を進めた。また、金属磁性体についても純水中に設置するための防錆コーティングについては、既存の手法を踏襲している。大きく変わったのは励振方式がプッシュプル型からシングルエンド型に変更になったという点である。製作したプロトタイプを図 4 に示す。

製作したプロトタイプ機を高周波加速システム用テストベンチに設置して、高周波特性測定を行った。既存のプッシュプル励振方式は共振点 1.7 MHz 、 Q 値 1.7 程度であったが、シングルエンド励振方式では金属磁性体を新型のものに置き換えたため、パラレルインダクターとコンデンサー(図 1 参照)の値を調整して既存の値に近づけることを試みた。その結果、共振点を 1.7 MHz としたときに Q 値を 2.5 程度まで下げることができたため(図 5)、その値を採用することとした。

高周波特性を決めることができた後、プロトタイプ機を真空管増幅器と電源に接続して、実際に大電力高周波を投入する試験を行った。加速電極あたり 9 kV を発生させ、 1000 時間に及ぶ連続通電試験を行い耐久性の確認をした。その結果、連続通電試験の前後でインピーダンスの測定値に変化がなく、プロトタイプ機の健全性を確認することができた。

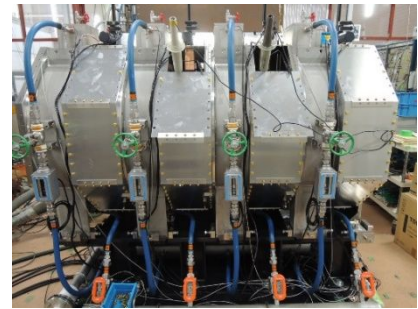


図 4: プロトタイプ機

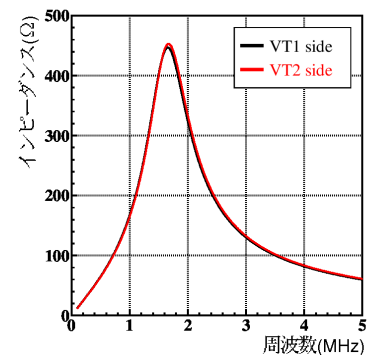


図 5: インピーダンス測定結果

(3)テストベンチにおいて連続通電試験で健全性を確認した後、実際に 3 GeV シンクロトロン加速器のトンネル内にプロトタイプ機を設置した。 3 GeV シンクロトロン加速器には加速空洞が 12 台設置されており、既存のプッシュプル励振方式の加速空洞を一台撤去し、同じ

場所にシングルエンド励振方式の加速空洞を設置した(図 6)。そして、現状の 3 GeV シンクロトロン加速器の最大ビーム出力である 1 MW ビームの加速試験を行った(図 7)。その結果、事前の見積もり(図 3 赤線)通り、プッシュプル励振方式(図 7 赤線)に比べて遥かに低い電流値(図 7 青線)でビームを

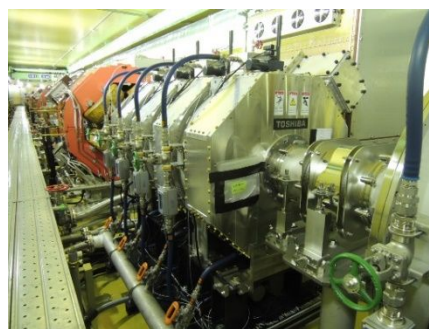


図 6: トンネル内に設置したプロトタイプ機

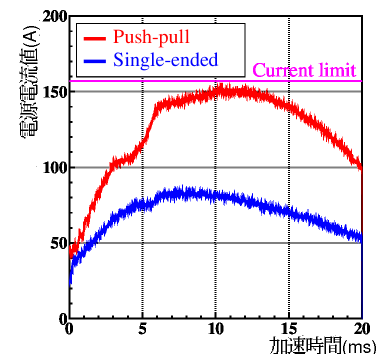


図 7: ビーム加速試験結果

加速できることが確認された。電源電流値からビーム加速に要した電力を算出すると、既存のプッシュプル励振方式では 842 kW 消費していたのに対して、シングルエンド励振方式では 420 kW しか消費しておらず、 4 割の電力削減を実現できることを実証した。

現状では、加速器の能力として 1 MW までのビーム出力しか検証できないが、事前の見積もりと 1 MW ビーム加速時の電流値の測定値がよく一致していることから、シングルエンド励振方式の加速空洞を使用すれば、 2 MW ビームが加速可能であることを間接的に検証することができると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------