

[F17p32]

Application of Ridged RF Cavity Resonator for Electron Accelerator

N. Hayashizaki, T. Hattori, M. Odera, T. Fujisawa*

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

*Denki Kogyo Co., Ltd.,

4052-1 Nakatsu-sakuradai, Aikawa-machi, Aikou-gun, Kanagawa 243-0300, Japan

Abstract

The new CW electron accelerator Ridgetron with a ridged RF cavity resonator is proposed. It has been planned to accelerate the continuous electron beams of 1-25 kW in the 0.5-10 MeV range for industrial electron irradiation. Ridgetron is composed of a cylindrical cavity equipped with two hollow ridges and bending magnets at its periphery. The accelerating beams pass through the cavity in the radial direction and are deflected with bending magnets for recirculating acceleration. A prototype of a final energy of 2.5 MeV has been studied to confirm the feasibility at present. The general concept and beam simulation are described in this paper.

リッジ付高周波キャビティの電子加速器への応用

1 はじめに

各種開発研究, 塗料キュアリング, 滅菌などの分野で利用されている電子線照射プロセスは, 実用産業技術として順調に発展を続けてきている。照射プロセスに用いる電子ビームを必要なエネルギーまで加速する装置として電子加速器が使用されているが, 被照射物質が放射化してしまう問題を回避するために, その加速エネルギーは基本的に 10 MeV が上限とされている。

電子加速器は加速構造によって多くの種類が存在するが, 照射プロセスに使用されるものは加速エネルギーに応じて次の3つに大別される。

- ① 150~300 keV (低エネルギー領域)
…シングルギャップ型
- ② 300 keV~5 MeV (中エネルギー領域)
…静電型
- ③ 5~10 MeV (高エネルギー領域)

…電子線形加速器あるいはマイクロトロンなどのマイクロ波型

そしてこれまでは, パルス運転のためにビーム電力は数 kW と小さいもの高エネルギーを必要とする場合にはマイクロ波型が, 大ビーム電力を必要とする場合には静電型が用いられてきた^[1]。

しかしながら近年の傾向としては照射効率の向上などを目的として, 照射施設新設の場合では加速エネルギー10 MeV, ビーム電力10~100 kWの加速器の設置が主流となっている。特に大ビーム電力の実現については, CW型加速器であることが不可欠であるが, 現時点では同軸型高周波キャビティを用いたロードトロン(10 MeV, 150 kW)が実用化されているにすぎない^[2]。

我々が照射プロセス用に開発を進めている電子加速器は, イオン線形加速器として多くの利点が証明されてきたリッジ付高周波キャビティを加速空洞に採用し, CW運転可能なものとなっている。本稿ではその概要と軌道計算の結果について述べる。

2 加速器概要

2.1 開発方針

リッジ付高周波キャビティはリッジを持たない通常のキャビティと比較して, 共振周波数が低いという特徴がある。またリッジ間隔の最適化をおこなうことで, 高シャントインピーダンスを実現することも可能である。これらの特性は加速器のデザインにおいて大きな利点となるため, これまでに RFQ型や IH型などのイオン線形加速器として使用されてきたが, 電子加速器としては本加速器が最初の応用例となる。

本加速器の開発にあたっては, 加速エネルギー10 MeV, ビーム電力25 kWを目標性能とし, かつ照射プロセス用ということで, 省電力, 省スペースの実現を目指している。またリサーキューレーティング構造としたことで, ビーム加速回数が可変となっており, 広範囲のエネルギーに対応できるものとなっている。運転周波数については, 既存のマイクロ波型加速器ではクライストロンを使用するものが多かったが, CW運転をおこなう本加速器では格子制御管を利用可能とするために VHF帯とした。

そして現在, 本加速器の有効性を実証するために, 加速エネルギー2.5 MeV, ビーム電力6.5 kWのプロトタイプ機の開発がおこなわれている。

2.2 構成

本加速器はリッジ付高周波キャビティと、その外周部に設置された複数の偏向磁石から構成される(図1)。高周波キャビティの2つのリッジには、RFQ型の加速ヴェインのようなモジュレーションや、IH型のドリフトチューブのような加速電極は存在しない。そのかわりリッジ内部はビーム通過のために中空となっている。電子ビームはキャビティの径方向に進行し、リッジ間を加速ギャップとして加速される。そして偏向磁石によって180 degreeの偏向を受けることで、連続加速を可能としている。

加速に用いられる高周波電場はTE₁₁₀モードで、キャビティに高周波電力を投入することにより励振される。このモードにおいて、キャビティ中の電場の大部分はリッジ間に集中し、磁場は2つのリッジを結ぶ中心線上で0となる。したがってビームの軌道中心からの変位が小さい限り、磁場による偏向は問題とならない。また任意の偏向磁石を無磁場とすることで、最終エネルギー到達前にビームを取り出すことも可能である。なお加速はπモードで行われる。

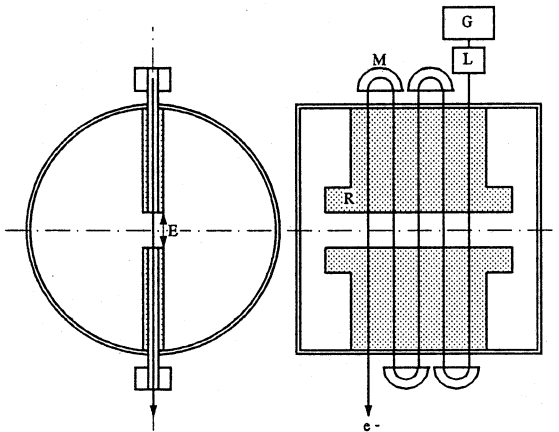


図1 全体構成図 (E: 加速電場, G: 電子銃, L: ソレノイドレンズ, M: 偏向磁石, R: リッジ)

2.3 プロトタイプ設計

高周波キャビティの電気的特性解析は、計算コードMAFIAおよび1/4スケールモデルを用いておこなわれた。共振周波数は、高周波電力とキャビティ寸法の適正化によって100 MHzと決定した。加速電圧分布の平坦化は、ギャップ長とリッジのエンドスペース部の切り欠きを調整することでなされた。調整後の電圧分布を図2に示す。このときのギャップ間電圧は約0.5 MVである。したがってプロトタイプ機の加速エネルギーである2.5 MeVを実現するには4個の偏向磁石を必要とし、加速ギャップを5回通過しなければならない。偏向磁石の曲率半径

は全長を抑えるために65 mmと小さい。

以上より得られた設計パラメータを表1に示す。結果的にプロトタイプ機の設置面積は1.5×1 mとなった。10 MeV機に適用した場合は1.5×3 m程度と予想される。また電力損失については検討を重ねた結果、リッジ形状を変化させることで、さらに30%程度低減可能であることが分かった。

ビーム加速位相は第1~5ギャップについてそれぞれ-10, 8, 10, 10, 10 degreeに設定した。第1ギャップが負位相であるのは、ビームエネルギーがトランジションエネルギーよりも小さいことを考慮した結果である。

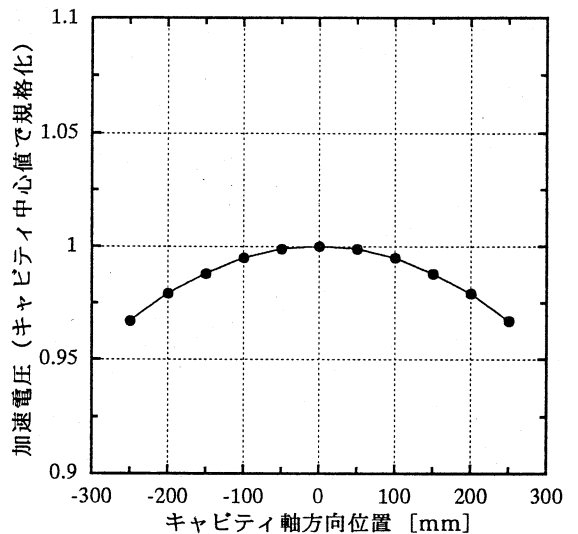


図2 プロトタイプ機の電圧分布

Operating frequency	100	[MHz]
Input energy	0.02	[MeV]
Output energy	2.5	[MeV]
Beam power	6.5	[kW]
Maximum gap voltage	0.5	[MV]
Cavity inner diameter	964	[mm]
Cavity inner length	980	[mm]
Gap length	140	[mm]
Ridge width	80	[mm]
Quality factor	27000	
Shunt impedance	5.9	[MΩ]
RF power loss	42	[kW]

表1 プロトタイプ機の設計パラメータ

本加速器におけるビーム収束は、水平・垂直方向ともに偏向磁石およびそのエッジ収束作用を利用している。そして効果的な垂直方向収束作用を実現するために、偏向磁石本体とは逆極性の磁場を発生させる補助コイルを備えたActive Field Clampを導

入した。電子銃については、陰極材料として $\phi 4$ mm の LaB₆ を用い、グリッドパルサーによる電流制御を予定している。

3 軌道計算

本加速器においてビームが安定に加速されることを確認するために、設計パラメータにもとづいて軌道計算をおこなった。使用した計算コードは、ビームエンベロップの計算をおこなう Power Trace である。ただし電子銃の部分については、別途に計算コード EGUN2e を用いて電極形状の最適化と電子軌道計算をおこない、引出電圧 20 kV、ピーク電流 50 mA、ビームエミッタンス 2.3 π mm \cdot mrad の結果が得られた。そしてこれらの数値は、軌道計算におけるビーム初期条件の基礎データとされた。

軌道計算の重点は偏向磁石の Fringing Field の考慮と安定収束の実現におかれた。特に問題となるのは偏向磁石の曲率半径が小さい場合に、その Fringing Field が垂直方向のエッジ収束力を減少させてしまうことである^[3]。この作用は偏向磁石の曲率半径が非常に小さく、かつエッジ集束のみを用いて垂直方向収束をおこなう本加速器では大きな問題となる。したがって Fringing Field を抑制する構造が不可欠となるが、一般的な Field Clamp では強磁性体を用いて磁場の遮断をおこなうだけである。そこで我々は Fringing Field を効果的に抑制し、かつその効果を制御可能な構造として、偏向磁石本体とは逆極性の磁場を発生させる補助コイルを備えた Active Field Clamp を導入した。逆磁場の部分でビームは基準進路に対して逆方向に偏向を受けるが影響は小さい。そしてさらに偏向磁石のエッジ角を入出射ともに負方向（垂直方向収束）にしておくことで、全体的には水平・垂直方向ともに収束効

果が得られることが分かった。また計算において Fringing Field はセグメント分割され、小さな理想二極磁場の連続集合として近似された。

以上の計算結果を図 3 に示す。この結果における偏向磁石のエッジ角およびビームの Fringing Field への入射角は -3 degree である。ビームは水平・垂直両方向ともに ± 10 mm 以内で安定に加速されていくことが分かる。同様の結果は 10 MeV 機の場合についても得られた。

4 まとめと今後の予定

リッジ付高周波キャビティを用いた、CW 運転可能な電子加速器の開発がおこなわれており、2.5 MeV のプロトタイプ機について各種検討がなされてきた。そして結果的に、本加速器が必要とする設置面積は 10 MeV 機の場合でも 1.5×3 m 程度となった。電力損失も 42 kW と比較的小さく、またさらなる低減も可能である。そして軌道計算の結果は、電子ビームが最終エネルギーまで安定に加速されることを示した。以上より、本加速器は照射プロセス用に実用化可能なものと思われる。

プロトタイプ機本体については今秋完成を予定している。そして各種試験とともに、レイトレースを用いた軌道計算をおこない、総合的な性能評価および 10 MeV 機開発への指針をまとめる予定である。

5 参考文献

- [1] 小寺正俊, 放射線と産業, 47(1990)14-22
- [2] J. Pottier, Nucl. Instrum. and Meth., B40/41(1989) 943-945
- [3] K. G. Steffen, High-Energy Beam Optics, John Wiley and Sons, (1965)97-101

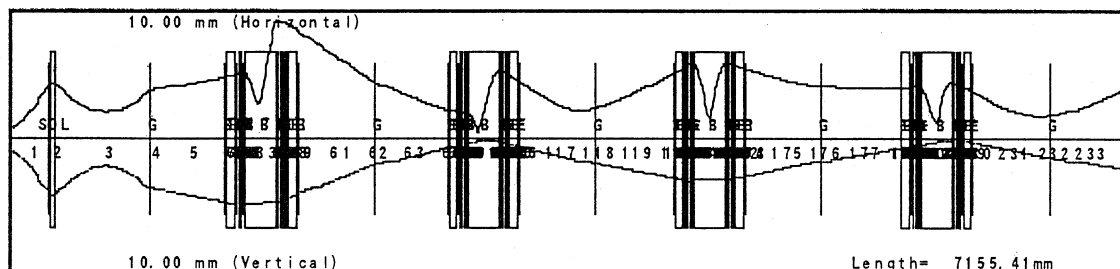


図 3 軌道計算結果

上下中央より上半分が水平方向，下半分が垂直方向，四角形の集合はそれぞれ偏向磁石と前後の Fringing Field の領域を示す。