

DESIGN OF HYBRID SINGLE CAVITY LINAC

Taku Ito, Noriyosu Hayashizaki, Naoko Matsunaga, Takuya Ishibashi, Jun Tamura, Liang Lu, Toshiyuki Hattori
Tokyo Institute of Technology, Research Laboratory for Nuclear Reactors
2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo

Abstract

We study the compact proton linear accelerator (linac) for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) by using the nuclear reaction ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$. In order to downsize the linac system, we propose a hybrid type linac combined with radio frequency quadrupole (RFQ) electrodes and drift tube electrodes in a single cavity. We designed an interdigital-H (IH) mode linac with high power efficiency. It is designed to accelerate proton beams from an injection energy of 40 keV to an acceleration energy of 3 MeV and an operation frequency of 80 MHz. The resonance frequencies and electromagnetic fields of this were optimized by simulation. As a result, we were able to design cavity lengths of less than 2m in the simulation model. For this purpose, high frequency property was carried out the electromagnetic simulation. Designed concept of the hybrid linac and the result of electromagnetic simulation will be in this report.

複合加速構造型単空洞リニアックの設計

1. 研究目的

本研究は低エネルギー用のイオンリニアックを小型化する新しい構造として、複合加速構造型単空洞リニアックの開発を目的としている。低エネルギー用リニアックである高周波四重極 (RFQ) およびインターディジタル型ドリフトチューブ (IH) の加速電極構造を一台の空洞内に組み込んだ加速器である。本来、各加速器それぞれに必要であった高周波電源などの周辺機器および各加速器間のビームラインなどが必要であるが、これらの加速電極を一つの空洞内に収めることによって、加速器自体の小型化のみならず周辺機器の統合による省スペース化が可能となり、医療分野などスペースに制限のある領域に適した加速器であると考えられる。本加速器については、がん治療法の一つである、ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) における中性子源に利用できるような、プロトン加速器を想定した。BNCTは安定同位体である ${}^{10}\text{B}$ 化合物を選択的にがん細胞内に取り込ませた後、熱 (あるいは熱外) 中性子を照射することでがん細胞を選択的に破壊する方法である^[1]。

前回、このような複雑な構造を持つ加速空洞においてビーム加速に適切な電場分布を励振させることが実現可能であるか、三次元電磁場シミュレーション

によりその高周波特性について検討した。その結果、加速空洞の構造を改変することにより加速に必要な等電場分布を達成させることが可能であることを明らかとした。本報告では、加速器設計を行なう上で必要な基本パラメーターを決定し、さらに加速器としての性能を評価するために実効シャントインピーダンスの算出を行った。また、電磁場シミュレーションによる設計において、計算精度に配慮しなければならない。そこで、過去に等価回路解析を用いて設計されたIH型リニアックについて、新しく電磁場シミュレーションをおこない、実測データと比較することで精度評価したので報告する。

2. 基本パラメーターの設定

このような複合型加速器を開発する上で問題となる点は、加速器内部構造の複雑化である。本加速器は空洞内に電磁場を励振させることによってビーム加速を行なうが、ビーム軸方向において等電場分布である必要がある。しかし、一つの共振空洞内に、RFQ電極およびIH電極のような異なる構造の加速電極が存在することによって、電磁場に偏りが生じる。特に本加速器構造では、RFQ電極構造側のキャパシタンスが比較的大きいため電磁場は入射側に集中する。前回の報告で、このような複雑な構造を持つ加速空洞においてビーム加速に適切な等電場分布を励振させることが実現可能であるか三次元電磁場シミュレーションにより検討を行ない、空洞径の変更およびエンドリッジチューナーによる調整により等電場分布の達成が可能であることを示した。これらの結果から、本加速器空洞のパラメーターを以下のように設定した。

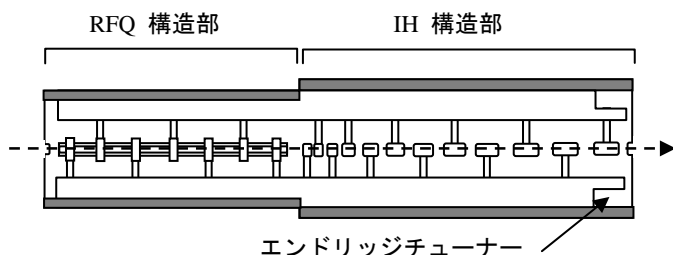


図1 複合加速単空洞リニアック内部構造の簡略図

表1 複合加速単空洞の基本パラメーター

	RFQ部	IH部
入射エネルギー (MeV/amu)	0.5	0.25
出射エネルギー (MeV/amu)	0.25	3
キャビティー長 (m)	0.68	1.18
キャビティー半径 (mm)	400	900
ボーア半径 (mm)	5	7
共振周波数 (MHz)		77.2
投入電力 (kW)		31.3

3. 本加速空洞構造の性能検証

加速により有利な構造を決定するために、実効シャントインピーダンス Z_{eff} による構造の評価を行った。 Z_{eff} は以下の式から導かれる。

$$Z_{eff} = ZT^2 = V^2 / PL \quad (1)$$

①式から、本加速空洞モデルのRFQ 構造部の Z_{eff} は 754 MΩ/m となった。一方、IH ドリフトチューブ型リニアックのシャントインピーダンスについては、経験則から次のような近似式が導かれている^[4]。

$$Z_{eff} = C\beta^{-2}D^3f^{3.5} \quad (2)$$

②式から、IH 構造部の実効シャントインピーダンスは、360 kΩ/m となった。図4 は各線形加速器のビーム速度と実効シャントインピーダンスとの関係を示している^[4]。上述の実効シャントインピーダンスから、本加速空洞は RFQ 構造部および IH 構造部共に加速器としての性能を満たしていると考えられる。

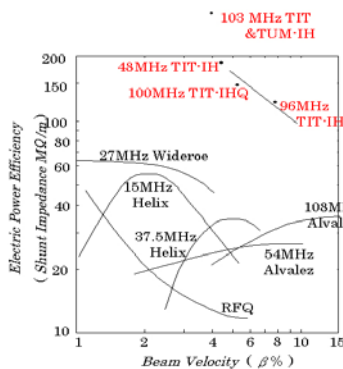


図2 粒子速度 β と実効シャントインピーダンス

4. 精度評価

シミュレーションによって、上記のようなパラメーターが得られたが、この計算精度についても検討を行なう必要がある。そこで、過去に等価回路解析を用いて設計された IH 型リニアックについて、新たに電磁場シミュレーションし、実測データと比較して評価をおこなった。IH 型ドリフトチューブ

リニアックのコールドモデルを用いた共振周波数およびギャップ電圧の実測値については東京大学旧原子核研究所にて行なわれたデータ^[2]をベースにした。これと同様のタンクをモデリングし、加速空洞の共振周波数やその電場強度を算出し、これらのパラメーターと実測値の比較を行なった。複合加速構造型単空洞リニアックの設計においてより性能の高い構造について検討するために、リッジリッジ間距離 d_r について、その長さの変化における共振周波数の実測値および計算値を図 3 に示す。

本加速器では低次の共振周波数で発生するTE₁₁₁モードを利用するが、図 3 の共振周波数 f_1 において実測値の計算値からの相対誤差はおおよそ1.74%となった。今後、この誤差を考慮した上で、本加速器の設計を行なう。

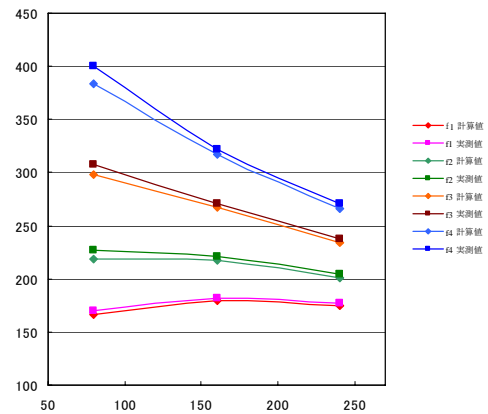


図3 リッジリッジ間距離 d_r の変化における共振周波数の実測値および計算値

5. まとめ

今回得られた複合加速単空洞の基本パラメーターから、加速器としての性能を評価するためシャントインピーダンスによる検討を行なった。また、シミュレーションの精度については、過疎空洞の共振周波数についてその実測値と計算値の誤差を求めたが、今後リッジリッジ間距離だけでなく、セル数や電極のステム構造などを改変した際についても検討を行ない、これらの誤差を考慮した上で本加速器の設計を行なう予定である。

参考文献

^[1]古林 徹 他、小型陽子加速器による病院併設型 BNCT 照射システム、21 世紀連合シンポジウム、東京、Nov. 23-25、2002
^[2]S. Yamada, T. Hattori, T. Fujino, T. Fukushima, T. Murakami, E. Tojyo, and K. Yoshida, "IH LINAC DEVELOPMENT AT INS", INS-NUMA-57 (1985)