

Design of Hybrid Single Cavity Linac with Beam Dynamics Simulation

Taku Ito^{1,A)}, Toshiyuki Hattori^{A)}, Noriyosu Hayashizaki^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Lu Liang^{A)}

^{A)} Tokyo Institute of Technology, Research Laboratory for Nuclear Reactors

2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550

Abstract

We study a new hybrid single cavity (HSC) proton linear accelerator (Linac) for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). One of the desired factors for this accelerator is downsizing and electrical power saving so it can be introduced in general therapeutic facilities. In the neutron source for BNCT, we propose new concept of a hybrid single cavity linac with a novel electrode structure. This hybrid type linac combined with radio frequency quadrupole (RFQ) electrodes and drift tube electrodes within a single cavity. We designed an interdigital-H (IH-DT) mode linac with high power efficiency. It is designed to accelerate proton beam from injection energy of 27 keV to acceleration energy of 3 MeV and operate frequency of 100 MHz. Designed concept of the hybrid linac and the result of electromagnetic simulation and beam dynamics simulation will be in this research.

粒子軌道計算による複合加速構造単空洞リニアックの設計

1. はじめに

近年、コンピュータ技術の発展によって、計算速度が飛躍的に向上し、IH リニアックのような対象性の低い加速空洞の電磁場計算ができるようになった。本研究では省電力・小型の加速器システムとして、Radio Frequency Quadrupole (RFQ) 線形加速器とIH型ドリフトチューブ (IH-DT) 線形加速器を一台の空洞内に組み込んだ、RFQ+IH型複合加速構造単空洞 (Hybrid Single Cavity; HSC) リニアックを提案する。現在、加速器は様々な分野の基礎研究用としてだけでなく、医療、工学など幅広い応用が実現されている。今後、医療設備や工場などに導入可能となるためには、建設費や運用費、さらに加速器とその周辺機器のために必要なスペースの確保などが問題となる。しかしながら、加速器は本来、必要となるビームエネルギーに応じて加速空洞は異なり、それぞれの加速器に対して高周波電源などの周辺装置が必要となる。それに対して、HSC リニアックのように加速構造を一つの空洞にまとめることによって、これらの周辺機器もまたひとつに抑えることができるため、加速器自体の小型化、加速システムの簡素化、周辺機器の統合による省スペース化が可能となる。これはスペースに制限のある施設に対し非常に適した加速器となることが期待できる。

この加速器の基本設計については、放射線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) の中性子源として利用できるようなスペックを目標としている。BNCT の中性子源としてはこれまで主に原子炉が用

いられてきた。そして、これに替わる中性子源として加速器の利用が注目されている。加速器中性子源は原子炉と比較し、装置の規模を大幅に縮小できることによる治療施設への設置が容易さ、装置の起動・停止が容易である等の扱いやすさ、治療部位への照射位置の自由度が向上するなどの利点を持つ。

本研究における HSC リニアックは治療施設に設置できる様、可能な限り小型で設計することを目指している。各電極構造の特徴として、IH-DT 電極はドリフトチューブ内に Transverse 方向の収束要素として四重極磁石を挿入する必要を省くため Alternative Phase Focusing (APF) 法による設計を採用した。一方、RFQ 電極についてはインターディジタル型のロッド電極を採用した。これは、IH-DT 電極による加速に必要な共振モードは TE_{111} であり、RFQ 電極も同じ運転周波数で加速される様な

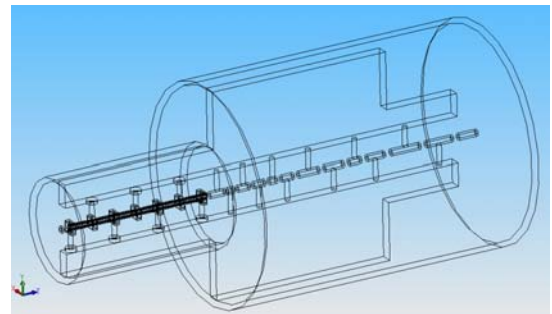


図1 HSC リニアックの概略図

電極構造が必要となるためである。

¹ E-mail: ito.t.ak@m.titech.ac.jp

2. HSC リニアックにおける諸問題

HSC 加速器を実現する上での大きな問題は内部構造の複雑さのために、ビーム加速に必要な電場分布を得ることが困難になることである。そのため、HSC リニアックを設計するための新たなプロトコルが必要となる。本研究では以下の項目について、三次元電磁場シミュレーションを用い、その改善策について検討を行った。①本加速器は等電場分布を発生させる必要がある。一つの空洞内に両構造を取めたとき、仮に入射側から出射側まで同じ空洞径である場合、電極構造の違いから、RFQ 型構造側のキャパシタンスが非常に大きいために、入射側に電場が集中する。②加速に不利になるような共振モードの混成の可能性がある。③両電極間に発生する電場がビームバンチに悪影響を与える。この内、①については以前の加速器学会にて報告し、IH 電極側の空洞径をRFQ 電極側のそれに対し拡大すること、およびエンドリッジチューナーを設け調節を行うことにより、ビーム軸上に等電場を励振させることが可能であることがわかった。また②についても、HSC リニアックに対する各共振モードの周波数の値がどの程度近接しているかについて調べた結果、HSC リニアックでのビーム加速に必要な共振モード TE_{111} と他のモードとの混成の可能性はないことを確認した。ここでは③についての検討を報告する。なお、本研究における電磁場解析には COMSOL Multiphysics の電磁気学モジュールを使用している。

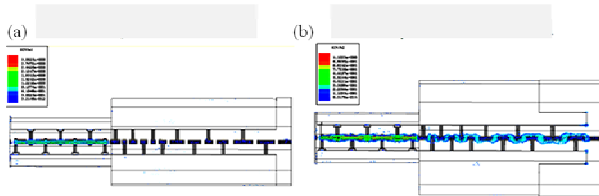


図1 IH空洞径の変化による空洞内部電場分布への影響。いずれも RFQ 電極側の空洞直径は 400 mm、(a) IH-DT 側空洞直径 700 mm、エンドリッジチューナーなし。(b) IH 側空洞直径 900 mm、エンドリッジチューナー 320mm.

2.2. 両電極間に発生する電場の問題

RFQ 側の電極と IH ドリフトチューブ電極とのギャップにおいて、両電極構造の違いから電場が乱れ加速粒子に悪影響、すなわちビームを発散させるような電場が励振される。この問題を解決するために、両電極間に、四重極電磁石 (Q マグネット) を加速器内でアースになるような位置に設置したモデルを設計した。このモデルが、異なる電極間のビーム発散に関わる電場を抑制できる可能性につい

て三次元電磁場シミュレーションにより検討した。このシミュレーションでは Q マグネットのモデルとして、導体のチューブを RFQ ロッド電極とドリフトチューブ電極の間に挿入した。この Q マグネットはアースとなるような位置、本加速空洞ではビーム軸を中心として加速電極のステムから 90° 回転した位置にステムで支持する。図2に示したビーム軸上の電場分布から、RFQ 電極-Q マグネットモデル間および Q マグネットモデルドリフトチューブ電極間のギャップにおいてビームに発散の影響を与えるような電場の発生を抑えることができることを明らかにした。

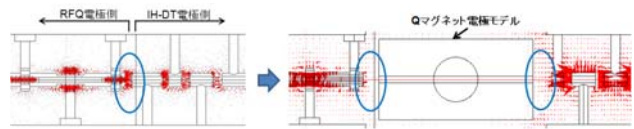


図2 Q マグネットモデル挿入時の電場分布の変化。左は Q マグネットモデル挿入前、右は挿入後の電場 (赤色矢印) の状態を示す。

3. 粒子軌道計算による設計

HSC リニアックは一つの共振空洞内部に異なる電極構造を持つことから、それぞれの加速領域に適した軌道計算コードを用いて基本設計を行なう必要がある。本加速器は前述のとおり陽子加速器であり、運転周波数は 100 MHz、出射エネルギーについては BNCT 用中性子源としての性能を得るために 3 MeV/amu とした。また、容易に施設導入できるサイズを想定して、全長 2 m 以内での設計を目指している。以下に各電極領域の基本設計について述べる。

3.1. RFQ 電極加速領域の基本設計

粒子軌道計算を行う前に粒子加速のためのセルパラメーターを決定するために、モデレーションパラメータージェネレーションコード RFQUICK を用いた。このデータを基に PARMTEQM による三次元粒子軌道計算をおこなった。これらの結果

表1 RFQ 電極の基本パラメーター

加速粒子	H^+
運転周波数	100 MHz
入射エネルギー	27 keV
出射エネルギー	250 keV
ビーム入射電流	10 mA
規格化エミッタンス	$0.02 \pi \text{mm} \text{mrad}$
空洞半径	$\phi 200 \text{ mm}$
電極長さ	634 mm
セル数	42
透過効率	91.3%
同期位相	$-90^\circ \sim -30^\circ$

から決定した RFQ 電極領域の基本パラメーターを表1 に示す。入射エネルギー 27 keV/amu、RFQ 電極領域からの出射エネルギー 250 keV/amu、透過効率 91.3 % で、RFQ ロッド電極の長さを 634 mm に抑えることができた。

3.2. IH-DT 電極加速領域の基本設計

IH-DT 電極領域については、本研究室により作成した APF 線形加速器設計プログラムを用いた。はじめに、加速する粒子の質量数、電荷数、入射エネルギー、運転周波数等のパラメーターから、ドリフトチューブテーブルを作成した後、Transfer Matrix 軌道計算コードを用いて、APF 法が作用するような加速位相の繰り返しパターンおよび加速位相の値について評価した。この結果から、加速位相の繰り返しパターンは、アクセプタンスの値が最も高かった $-35^\circ, -35^\circ, 35^\circ, 35^\circ$ を採用した。この同期位相における IH 電極加速領域の基本パラメーターを表1 に示す。

表1 IH-DT 電極の基本パラメーター

加速粒子	H ⁺
運転周波数	100 MHz
入射エネルギー	250 keV
出射エネルギー	3 MeV
空洞内径	φ450 mm
全セル長	727.8 mm
セル数	8
同期位相	$-35^\circ, -35^\circ, 35^\circ, 35^\circ$

3.3 両電極間のギャップ領域の設計

このビーム輸送系については、収束のためのラティス構成としてトリプレットのQ マグネットを設置する。上記の粒子軌道計算によって得られた RFQ 電極の出射側のエミッタンスおよび IH-DT 電極の入射側のアクセプタンスを考慮した上で設計を行う。現在、シミュレーションプログラムとして TRACE3D を用い、得られるビームエンベロープ解析結果から磁石の磁場強度、サイズおよびギャップ長さについて最適な条件の検討を行っている。

4. まとめ

HSCリニアックについて、その加速構造の複雑さに起因する加速電場を調整する方法を確立した。RFQ 電極領域および IH-DT 電極領域について、粒子軌道計算を行い、両加速電極の長さはおおよそ 1.4 m となった。加速器の全長はおおよそ 2 m 以内での設計を目標としており、加速領域の長さを考慮した上で、500 mm 以内でビーム輸送を設計できる様検討を行っている。1/2 スケールモデルの製作を行い、

シミュレーションとの整合性について検討を行う。

[1] T Ito., “第 31 回リニアック技術研究会・第 3 回加速器学会年会論文投稿要領”Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006