

Design of Hybrid Single IH Cavity Linac for BNCT

Toshiyuki Hattori, Taku Itou, Liang Lu, Noriyosu Hayashizaki, Takuya Ishibashi, Jun Tamura,
Tatuya Inoue, Hironobu Iwnami, Kazuhito Oka, Yoshiki Shimaya
Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
N1-25, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo

Abstract

We present a study of the compact proton linac for boron neutron capture therapy (BNCT) by using the nuclear reaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. 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 interdigitated-H (IH) mode linac with high power efficiency to accelerate proton beam from an injection energy of 27 keV to an acceleration energy of 3 MeV and an operation frequency of 100 MHz. The resonance frequency and electromagnetic fields were optimized by simulation. As a result, we were able to design cavity lengths of less than 2 m.

BNCT 用複合加速構造単空洞線形加速器の設計

1. はじめに

低中エネルギー領域で格段に加速電力効率の良いIH型線形加速器は対称性が悪いため、空洞の電磁場シミュレーションができなかった。近年計算機とソフトの進歩でIH型空洞の3次元電磁場シミュレーションができる様になった。そのため3次元電場分布シミュレーションによって設計、製作し加速テストを行った小型の原理実証機が成功し、電場分布、共振周波数ともに非常に良くシミュレーションと一致した。

そこでBeターゲットによるBNCT用で3MeVの陽子を10mA発生する線形加速器の設計を計画した。又IH型加速空洞に低エネルギーで収束力の良いRFQ加速構造を中エネルギーでは加速率の良いドリフト・チューブ加速構造を挿入する、複合加速構造単空洞 (Hybrid Single Cavity-HSC-) 線形加速器を3次元シミュレーションを駆使して設計した。この線形加速器の目標はRFQとDT加速構造を1台の電力加速効率の良いIH型加速空洞に入れ、CW運転を可能とし、低電力パワーで、運転、制御系を簡素化して、小型の加速器システムを構築することである。それを都市型病院に設置してBNCTがん治療を可能にすることである。

2. 加速空洞設計の指針

単空洞に2加速構造を挿入する複合加速構造単空洞 (HSC) は非常に複雑な構造のため、3次元電磁場シミュレーションが出来なければ、設計出来なかった加速器である。2008年に3次元電磁場シミュレーションを行い設計、製作、加速テストを行った原理実証機の成功及びHSC高周波モデルによる検証の良結果に基づいてBNCTがん治療用線形加速器を設計する。

BNCTがん治療装置の条件として、出射3MeV陽子10mA加速で、空洞長2m以内として設計する。最初にCWで100kWのRF電源を考え、空洞共振周波数は100MHzとした。

またDTセル長が可能な様にRFQ加速構造は出射250keV以上として、RFQの軌道計算にRFQUICKとPARMTEQ-Mを使用して行い10mA加速できるパラメータを決定する。次に250keVから3MeVまでのDT線形加速器の粒子計算を服部研で開発したPMLOCを使って行う。DTテーブルを決定しHSCの3次元電磁場シミュレーションをMW-SとCOMSOL MULTIPHYSICSのソフトを使って最初の予定に近い電圧分布に成るようなIH空洞のデザインを行う。

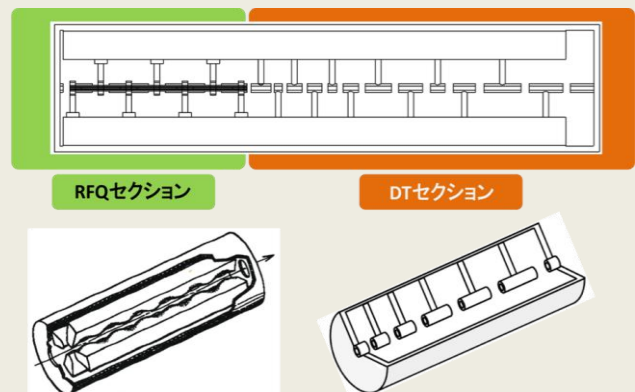


図-1 HSC 線形加速器空洞のRFQとDT領域

3. HSC加速空洞の設計

3.1 RFQとDT領域の加速電圧分布調整

RFQとDT領域の容量(C)が極端にRFQ側に偏るためDTの誘導量(L)を増加することで、すなわちRFQ側の空洞直径を小さく、DT側の空洞直径を大きくすることで、RFQ、DT領域の共振周波数を一

致させることで、図-2に示す様にL,Cの調整を行った。又図-2に示す様なDT領域のリッジのエンドをカットすることで、Lを大きくして加速電圧の低下を押さえる様に調整した。

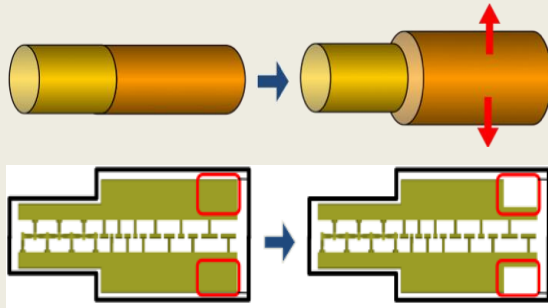


図-2 加速電圧分布調整方法

エンドリッジのカットとRFQ、DTギャップ間の電界強度を示したのが図-3である。ほぼ同じになる320mmをカット量に採用した。

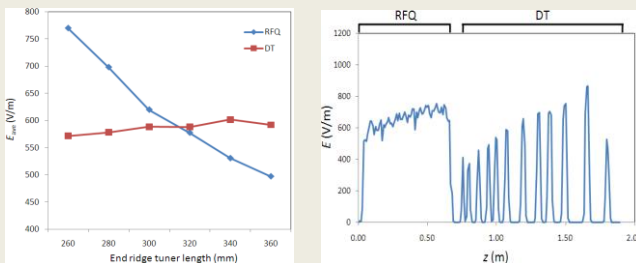


図-3 カット量とRFQ、DT領域の電界分布

3.2 RFQ電極とDT電極間の調整

RFQ電極とDT電極間で不正電場が発生することが分かった。そこでRFQとDT系の4ロッドとDTを支えるステムとは90度(図-4の水平方向)異なる方向のステム様の支えで大きな円柱を挿入した。するとRFQとこの円柱間にはほとんど電場が発生しなくなった。DTのこの円柱間には電場が少し発生するので積極的に加速電場に変えようとして、DT様電極を取り付けた。図-4に円柱電極挿入したHSC空洞の図を示す。

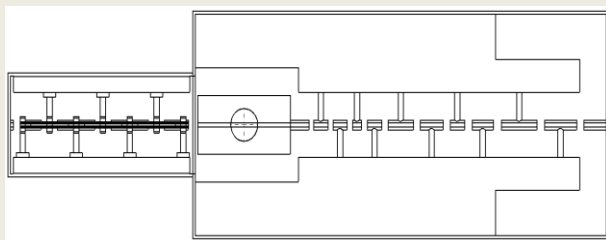


図-4 円柱電極挿入したHSC空洞の図

4. 各領域の軌道計算

4.1 RFQ加速の軌道計算

加速周波数100MHzで、出射250keVでRFQの軌道計算をRFQUICKとPARMTEQ-Mを使用して行った。加速電圧はコルパトリック・リミットの1.8倍で加速透過率92%を得た主要パラメータを表-1に示す。

表-1 RFQ線形加速器の主要パラメータ

運転周波数 [MHz]	100
入射エネルギー [keV/amu]	27
出射エネルギー [keV/amu]	250
ビーム電流 [mA]	10
セル数	47
電極長さ [cm]	69.78
最小ボア半径 [cm]	0.3812
最大モジュレーション因子 m_{max}	3.01
収束強度 B	12.2694
最大発散力 $ \Delta_f $	0.1159
同期位相 ϕ_s [degree]	-90→-30
透過効率 [%]	92.0

PARMTEQ-Mの計算結果を図-5に示す。横軸が加速セル数に対するビーム・エンベロップ、位相、エネルギー幅を示す。

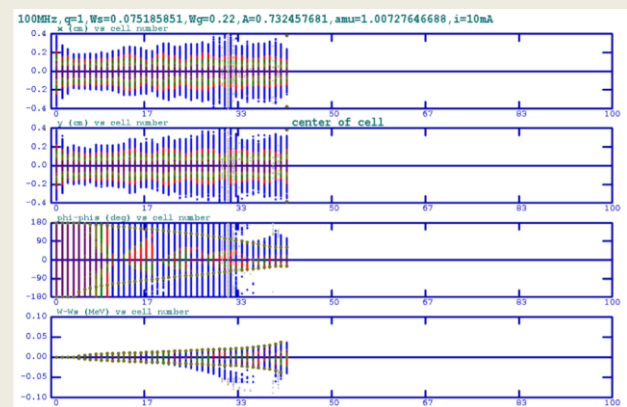


図-5 PARMTEQ-Mの計算結果

4.2 DT加速領域と両加速領域間の軌道計算

DT線形加速器のDTテーブルは空間電荷効果を考慮しないPMLOCで計算し、その結果を基に、DT線形加速器のアクセプタンスにRFQ出射のビーム・エミッタンスを合わせる様にTRACE-3Dを使用して、3台の四十極磁石でマッチングを取った。図-6にビーム・マッチングセクションの簡略図を示す。

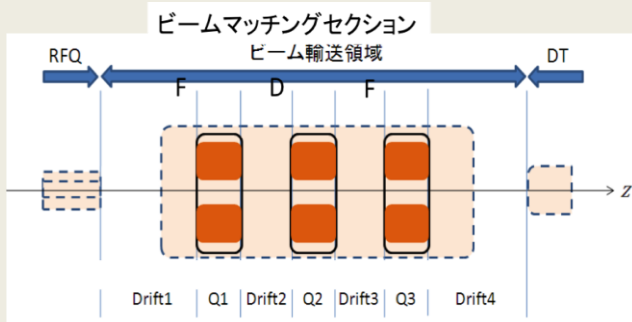


図-6 ビーム・マッチングセクションの簡略図

その後DT線形加速器中の空間電荷効果を含んだ計算をTRACE-3Dで使用して行った。ほぼ透過加速される解を見つけた。その結果のビーム・エンベロップを図-7に示す。左側の3個の四角が四十極電磁石で数値かドリフト・チューブの位置である。

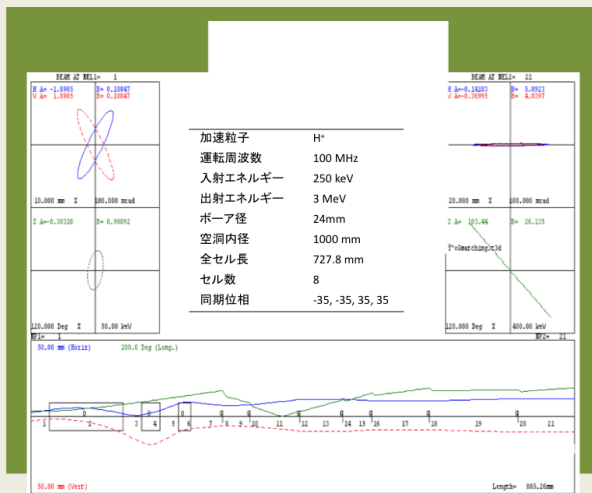


図-7 マッチングセクションとDT領域のビーム・エンベロップ

5. BNCT用HSC線形加速器のデザイン

3. HSC加速空洞の設計と4. 各加速領域の起動計算をそれぞれ何度か繰り返すことで、精度を上げ、最終デザインを完成させる。今回は1.5回程度で止まっているが、その結果を表-2に示す。全長1898mmで陽子を3MeV、約9mA加速する1台の空洞による線形加速器が完成した。その加速空洞の3次元CADの図を図-8に示す。ビームパワーも含んで、約100kWの高周波電力が必要であることが分かった。

	RFQ	BMS	DT
共振周波数(MHz)			100
電極長さ(mm)	698	—	727
セクション長さ(mm)	—	313	—
ビーム電流(mA)			10
空洞径(mm)	400	1000	1000
入射エネルギー(keV)			27
出射エネルギー(MeV)			3
消費電力(kW)			100

表-3 BNCT用HSC線形加速器の主要パラメータ

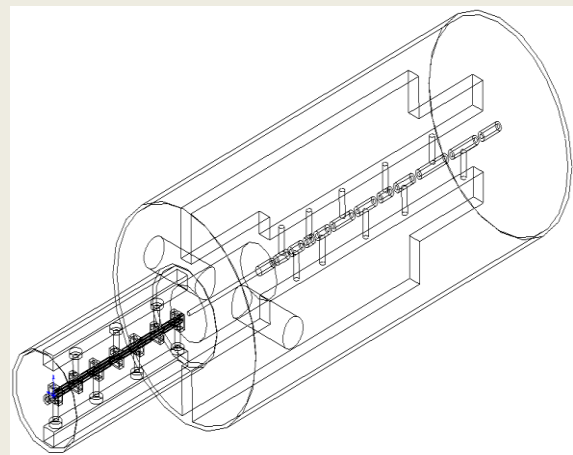


図-8 BNCT用HSC線形加速器の3次元CAD画像

5. まとめ

BNCT用3MeV陽子発生複合加速構造単空洞(HSC)線形加速器の各領域に適当な加速電圧を発生する、IH型加速空洞を3次元電磁場ソフトを使って設計した。またRFQ、ビーム・マッチング、DT領域での粒子の軌道計算を各種のソフトを使って計算し、27keVから3MeVまで9mA加速するデザインを行った。この中で最も複雑なRFQ領域と同じ構造を持つ重イオンRFQ-IH型線形加速器を現在建設中である。その結果を検討後計画を進めようとしている。

