

DEVELOPMENT OF A COMPACT HIGH-EFFICIENCY INJECTOR FOR FOR MEDICAL ACCELERATORS (II)

T. Watanabe^{A)}, T. Mitsumoto^{A)}, H. Tsutsui^{A)}, T. Ueda^{A)}, Y. Iwata^{B)}, S. Yamada^{B)}, T. Murakami^{B)},
T. Fujimoto^{C)}, T. Fujisawa^{B)}, H. Ogawa^{B)}, N. Miyahara^{B)}, K. Yamamoto^{B)}, S. Hojo^{B)}, Y. Sakamoto^{B)}, M. Muramatsu^{B)}
and T. Takeuchi^{C)}

^{A)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd. (SHI), 5-2 Soubiraki-cho, Niihama, Ehime 792-8588, Japan.

^{B)} Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences (NIRS),
4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan.

^{C)} Accelerator Engineering Corporation (AEC), 2-13-1 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan.

Abstract

A compact injector was designed for an injector of heavy-ion medical accelerators. The injector has two compact linacs, which are a Radio-Frequency-Quadrupole (RFQ) linac and an Interdigital H-mode Drift-Tube-Linac (IH-DTL). We manufactured the RFQ linac and IH-DTL and performed several tests before accelerating C⁴⁺ ion. In this paper, details and results of the tests of these linacs were described.

高効率小型入射器の開発 (II)

1. はじめに

放射線医学総合研究所などでの10年以上の臨床実績から、近年、粒子線を用いたがん治療の有効性が認められるようになってきた。しかし実際に治療を行っている施設は全国でまだ6施設だけである。そこで粒子線、特に重粒子線を用いたがん治療を普及させるため、我々は2004年度から高効率小型入射器の開発を行ってきた。この入射器では永久磁石ECRイオン源から出た4価の炭素イオンを、RFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLを用いて4.0MeV/uまで加速する。今回は、この入射器で使用するRFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLを製作し、入射器全体でのビーム加速試験に先立って単体試験を実施した。単体試験では、RFQ線形加速器、APF方式IH型DTL共にビーム加速に必要な性能を満たしていることを確認した。以下ではRFQとAPF方式IH型DTLについて、構造の詳細と単体試験の結果について述べる。

2. RFQ線形加速器

RFQ線形加速器は、実績のある4ベイン型とし、共振周波数は200MHzとした。共振器は一本のタンクで構成されており、全長2.5m、内直径は340mmである。RFQは、ECRイオン源から供給される10keV/uの4価の炭素イオンを608keV/uまで加速する。ビームを加速するための高周波電力は、シグナルジェネレーターからの信号を1.5kWトランジスタアンプ、20kW真空管アンプ、200kW真空管アンプの3段のアンプで増幅し、WX-120Dの同軸管を用いてLカップリングでRFQに導入する。RFQには共振器内部の共振周波数と電場を調整するため、計21個のチュー

ナーが取り付けられている。各チューナーはいずれも直径63mm、ストローク70mmである。また、共振器に導入されているRFパワーを検出するために、計8個のピックアップが取り付けられている。

RFQ本体は鉄製のタンクの内側に銅メッキを施して製作した。ベインには無酸素銅の鍛造材を使用した。ベイン先端のモジュールはセルパラメータの計算とビームシミュレーションの結果から求められた形状を2次元加工で整形した。4枚のベインは、シミュレーション通りの電場を発生させるため、共振器内に±50μmの精度で取り付けられている。

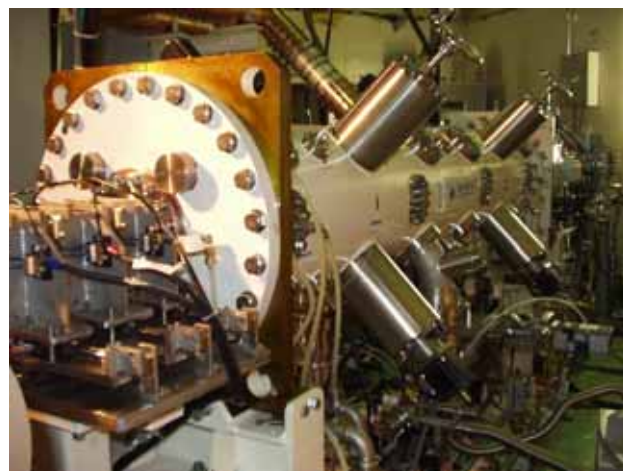


図1: RFQ線形加速器の外観図 (全長2.5m)



図2：RFQ線形加速器の内部構造

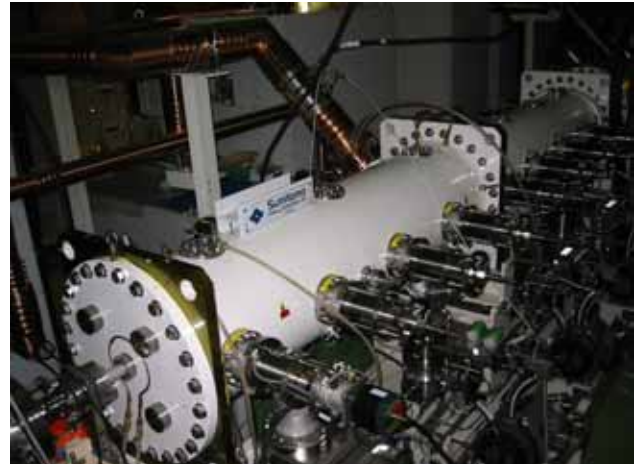


図3：APF方式IH型DTLの外観（全長3.4m）

3．APF方式IH型DTL

APF方式IH型DTLは、電場のみでビームの集束を行うAPF方式と、シャントインピーダンスの高いIH型を組み合わせることにより、従来のアルバレ型DTLに比べ全長で約1/2、加速に必要なパワーで約1/3と大幅な小型化と高効率化に成功した。今回のAPF方式IH型DTLの共振周波数はRFQと同じく200MHzである。共振器は二本のタンクで構成されており、全長3.4m、内直径は最大で364mmである。APF方式IH型DTLではRFQから入射した608keV/uのビームを4.0MeV/uまで加速する。ビームを加速するための高周波電力は、シグナルジェネレーターからの信号を3kWトランジスタンプ、50kW真空管アンプ、500kW真空管アンプの3段のアンプで増幅し、WX-152Dの同軸管を用いてLカップリングでAPF方式IH型DTLに導入する。APF方式IH型DTLには計16個のチューナーが取り付けられている。各チューナーはいずれも直径96mm、ストローク70mmである。また、共振器に導入されているRFパワーを検出するために、計8個のピックアップが取り付けられている。

APF方式IH型DTLの共振器本体は鉄製のタンクの内側に銅メッキを施して製作した。タンク内部はテーパ構造になっており、内直径は入射側で283mm、出射側で364mmである。共振器内部には上下1本ずつのリッジが付き、そこに計71個のドリフトチューブが交互に並んでいる。リッジとドリフトチューブの材料には、いずれも無酸素銅を使用した。粒子の加速と集束に適した電場を形成するために、形状の異なる6種類のドリフトチューブを使用した。これらのドリフトチューブは、内直径14mm、外直径28～38mm、長さ10～36.4mmである。ドリフトチューブはまずリッジ上に取り付ける際にアライメントされ、リッジをタンクに取り付ける際に再度アライメントされる。これにより、各ドリフトチューブは最終的に $\pm 100 \mu\text{m}$ の精度でアライメントされることになる。



図4：APF方式IH型DTLの内部構造

4．単体試験

RFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLについては、入射器全体を用いたビーム加速試験に先立って、単体試験を行った。単体試験では、始めにRFQとAPF方式IH型DTLの共振周波数とQ値を測定した。またQ値の計算値と実測値より C^{4+} の加速に必要なパワーも求めた。この結果を表1に示す。今回のRFQおよびAPF方式IH型DTLの終段アンプの定格出力はそれぞれ200kW、500kWであることから、 C^{4+} の加速に必要なパワーは十分に供給可能であることが確認できた。

表1：共振周波数、Q値測定結果

	RFQ	IH型DTL
共振周波数[MHz]	200	200
無負荷Q	7800	12000
C^{4+} 加速に必要なパワー[kW]	120	360

次にRFQおよびAPF方式IH型DTL内部の電場分布を測定し、ビーム加速に適した分布になるように調整した。RFQ、APF方式IH型DTLともに電場分布の測定には摂動法を用いた。

RFQは4枚のペインで区切られた4つのクオドラントで電場分布が均一になり、かつビーム軸方向にも

平坦になるように調整した。調整は計21個のチューナーの突出量を変えることによって行った。21個のチューナーの内訳は固定チューナーが13個、手動チューナーが4個、自動チューナーが4個である。調整の結果、ビーム軸方向の電場平坦度は $\pm 3.7\%$ 以下、クオドラント間の均一度は $\pm 2.6\%$ 以下となった。調整後のRFQ内部の電場分布を図5に示す。

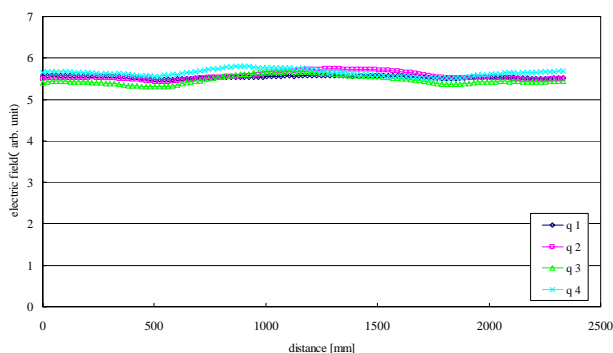


図5：RFQ線形加速器内部の電場分布

APF方式IH型DTLは内部の電場が3次元電磁場計算コードMicro Wave Studio (MWS) で計算した加速に最適な電場と一致するように調整した。調整は計16個のチューナーの突出量と、リッジの出射側端部の切り欠き寸法を変えることによって行った。16個のチューナーの内訳は手動チューナーが13個、自動チューナーが3個である。調整の結果、内部の電場はドリフトチューブ間のギャップにかかる電圧に換算すると、一部のギャップを除きMWSでの計算結果と $\pm 2\%$ の精度で一致した。調整後のAPF方式IH型DTL内部の電場分布をギャップ間電圧に換算したものを図6に示す。

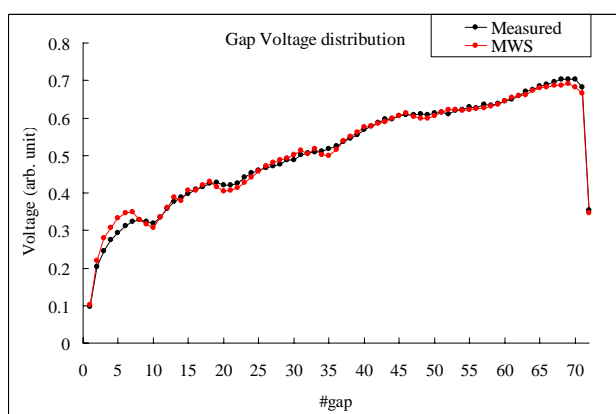


図6：APF方式IH型DTL内部の電場分布

続いて、RFQおよびAPF方式IH型DTLに使用される真空管アンプのダミーロード試験を行った。この試験では、RFQ用の20kWアンプ、200kWアンプ、APF方式IH型DTL用の50kWアンプ、500kWアンプの計4台について、出力パワーを測定した。その結果、4台のアンプ全てで定格以上の出力パワーを確認することができた。また、各アンプの出力パワー

が入力パワーに対して線形になっていることも確認した。

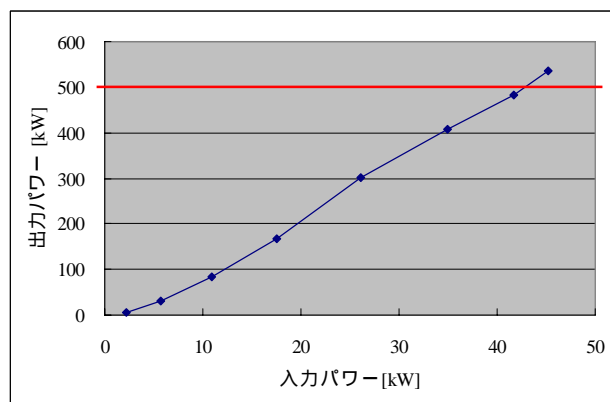


図7：500kWアンプの出力特性

最後にRFQおよびAPF方式IH型DTLへのRFパワー導入試験を行った。この試験ではRFアンプから共振器にパワーを導入し、実際に導入されたパワーを共振器に取り付けられたピックアップで検出し、測定した。その結果、RFパルス幅1msec、繰り返し周波数4Hzの設定でRFQ、APF方式IH型DTL共にビーム加速に必要なパワーが共振器に導入されていることを確認した。

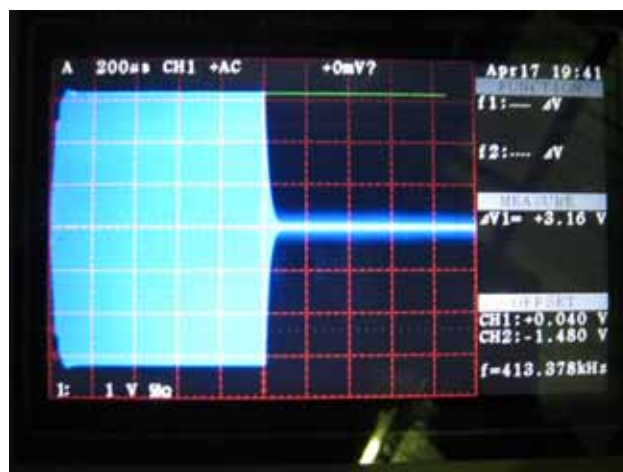


図8：APF方式IH型DTLに導入されたRFパルス
(パルス幅：1msec、パワー：380kW)

以上の単体試験の結果から、RFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLが共に、炭素ビームの加速に必要な性能を満たしていることを確認できた。

5. まとめ

重粒子線を用いたがん治療の普及に向け、高効率小型入射器の開発を行った。この入射器に使用するRFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLを製作し、それぞれ単体試験を行った。単体試験の結果、RFQ線形加速器とAPF方式IH型DTLが共に、炭素ビームの加速に必要な性能を満たしていることを確認した。