

Development of Alternating-Phase-Focused IH-DTL

Y. Iwata^{1,A)}, S. Yamada^{A)}, T. Murakami^{A)}, T. Fujimoto^{B)}, K. Yamamoto^{A)}, N. Miyahara^{A)}, H. Ogawa^{A)},
T. Fujisawa^{A)}, S. Hojo^{A)}, Y. Sakamoto^{A)}, T. Takeuchi^{B)}, M. Muramatsu^{A)},
T. Mitsumoto^{C)}, H. Tsutsui^{C)}, T. Watanabe^{C)}, T. Ueda^{C)}

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

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

^{C)} Sumitomo Heavy Industries Ltd. (SHI), 9-11 Kita-Shinagawa 5, Shinagawa, Tokyo 141-8686, Japan.

Abstract

A compact injector, designed for a heavy-ion medical accelerator complex, was developed. It consists of an Electron-Cyclotron-Resonance Ion-Source (ECRIS) and two linacs, which are a Radio-Frequency-Quadrupole (RFQ) linac and an Alternating-Phase-Focused Interdigital H-mode Drift-Tube-Linac (APF IH-DTL) having the same operating frequency of 200 MHz. The compact injector can accelerate carbon ions of $^{12}\text{C}^{4+}$ up to 4.0 MeV/u. The APF IH-DTL uses the APF method for beam focusing and the IH structure for the cavity. Use of the APF IH-DTL enabled us to design the compact injector; the total length of the two linacs is approximately 6 m. The compact injector was constructed, beam acceleration tests were performed. We have succeeded to accelerate carbon ions with satisfactory performance. An overview of the APF IH-DTL as well as results of the beam acceleration tests is described.

APF方式IH型線形加速器の開発

1. はじめに

放医研では重粒子がん治療装置 (HIMAC) から得られる核子当たり数百MeVの高エネルギー炭素ビームを用いてがん治療を行っている。1994年に開始された臨床試験は良好な成績を収め、現在では3千症例以上を数えるに至った。十年以上にも及ぶ優れた臨床実績から同治療の全国的な普及が望まれている。しかしながら既存の装置は大型であることから、更なる普及を進める上で装置全体の小型化・低コスト化が必要とされてきた。そのため、我々は平成16年度から2カ年計画で加速器システムをはじめとした装置全体の小型化、ならびに低コスト化に関する研究開発を進めてきた。

装置小型化において、特に既存の Radio-Frequency-Quadrupole線形加速器 (RFQ) とアルバレ型ドリフトチューブ線形加速器は大型であるため、小型線形加速器の開発は建屋を含む装置全体の小型化、更には低コスト化の鍵を握る。そのため、我々は永久磁石ECRイオン源と、200 MHzの共振周波数を有する小型RFQ、ならびにAPF方式IH型ドリフトチューブ線形加速器 (APF方式IH型DTL) から構成される高効率小型入射器の開発を進めてきた (図1)。特に後段のAPF方式IH型DTLは高周波電場のみでビームの加速と収束を同時に行う Alternating-Phase-Focusing方式^[1]と、高シャント抵抗が得られる Interdigital H-mode型共振器^[2]を組み合わせた小型で高効率な線形加速器である。APF方式IH型DTLを採用したことで、2台の線形加速器の全長は約6 mと既

存入射器の約1/7と大幅な小型化が実現可能となった。この高効率小型入射器により4価の炭素イオン ($^{12}\text{C}^{4+}$) を4 MeV/uまで加速することができる。

APF方式IH型DTLは共振器内に四極磁石などの収束要素を全く必要とせず、また小型かつ高効率であるなど多くの魅力的特徴を有するが、APF方式を採用した線形加速器は世界的にみても実用例がない。そのため、高効率小型入射器の設計においては、特にAPF方式IH型DTLの開発に重点がおかれた。以下では、主にAPF方式IH型DTL開発の概要を述べる。

2. モデル共振器

APF方式では正負の同期位相を選ぶことで高周波加速電場によりビーム加速と収束を行うことから、ビーム軌道は各ギャップの同期位相 ϕ の取り方により全て決定される。最も単純な同期位相の並びとしては、各ギャップで $\phi \sim \pm\pi/6$ を選ぶことであるが、

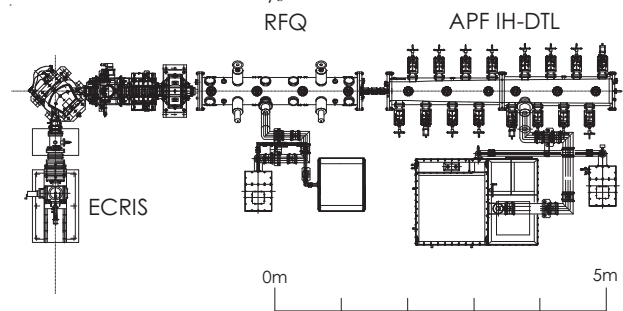


図1 高効率小型入射器のレイアウト。

¹ E-mail: y_iwata@nirs.go.jp

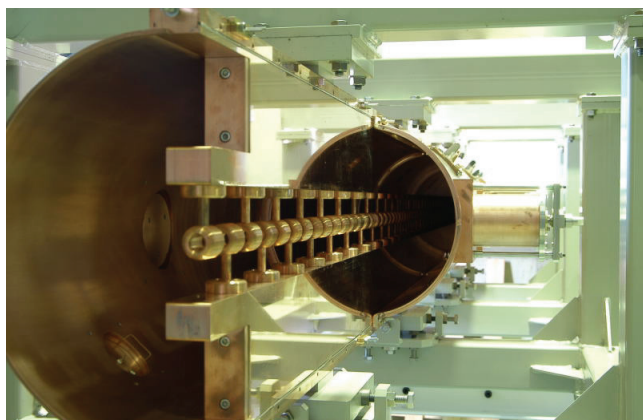


図 2 APF方式IH型共振器フルスケールモデル。

ビームの β 変化が大きい場合、安定領域が β 変化に伴い変化することから、十分なビーム透過率が得られない。そこで我々は、 $|\phi| < \pi/2$ の領域でなだらかに変化する正弦波形状の関数形を用いて同期位相の並びを最適化し、軌道計算においてRFQからのビームをほぼ全て透過するという結果を得ることに成功した。

前述の通り高周波電場により全てのビーム軌道が決定されることから、共振器に求められる高周波電圧（電場）の誤差は全ギャップに渡り $\Delta V/V = \pm 2\%$ 以内と非常に厳しい。この許容誤差範囲内で電圧分布が制御できるか、APF方式IH型共振器フルスケールモデルの製作を行った（図 2）。モデル設計においては前述の同期位相の並びに基づき生成したセルテーブルを用いている。また共振器の設計においては、三次元電磁場計算コード（Micro Wave Studio）を用いて軌道計算で必要とされる電圧分布が得られ、かつ高いシャント抵抗が得られるようドリフトチューブやリッジ形状の最適化を行った。製作したモデル共振器の電場分布を摂動法により測定し、更にチューナーにより調整した結果、必要とされる誤差範囲内で電場分布を制御できることがわかった^[3]。

3. APF方式IH型共振器の実機

モデル共振器の設計から測定で得られた知見に基づき、APF方式IH型共振器実機の設計・製作を行った。

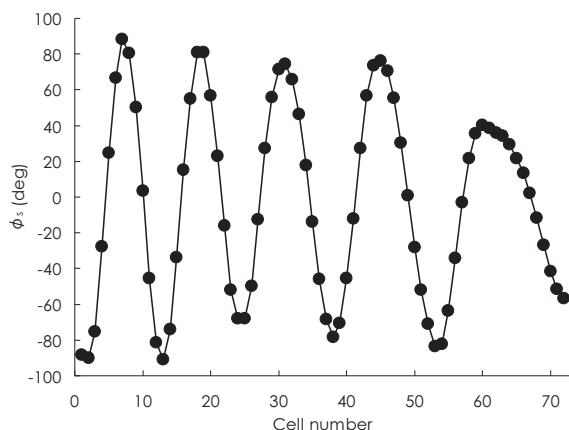


図 3 最適化された各ギャップの同期位相。

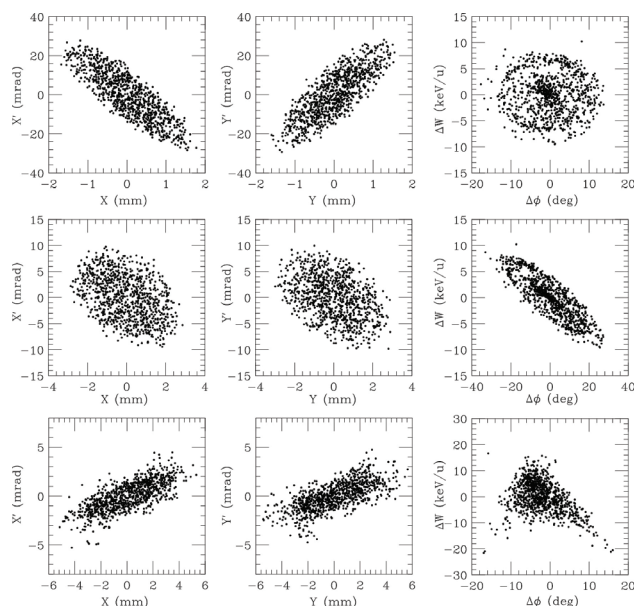


図 4 軌道計算で得られたRFQ出口（上段）、APF方式IH型DTL入口（中段）、APF方式IH型DTL出口（下段）における位相空間分布。

設計においては、1) 共振器の三次元電磁場計算で求めた電圧分布を用いて軌道計算を行い、2) 高い透過率を保ちつつ、出射ビームエミッタンスやエネルギー分散が最小となるように同期位相の並びを改善し、更に3) 改善した同期位相の並びから再度、電磁場計算を行い、電圧分布を求めた。上記の計算を繰り返すことで、最終的なセルテーブルや共振器形状を決定した。求めた各ギャップにおける同期位相を図 3に示す。全72ギャップでRFQから得られる608 MeV/uの $^{12}\text{C}^{4+}$ を4.0 MeV/uまで加速する。また、軌道計算で求めたRFQ出口、APF方式IH型DTL入口、APF方式IH型DTL出口における位相空間分布を図 4にプロットした。計算で得られたAPF方式IH型DTLのビーム透過率はほぼ100%であり、またエネルギー分散も $\Delta E/E = \pm 0.4\%$ と良好な結果が得られた。製作したAPF方式IH型DTL実機の写真を図 5に示す。

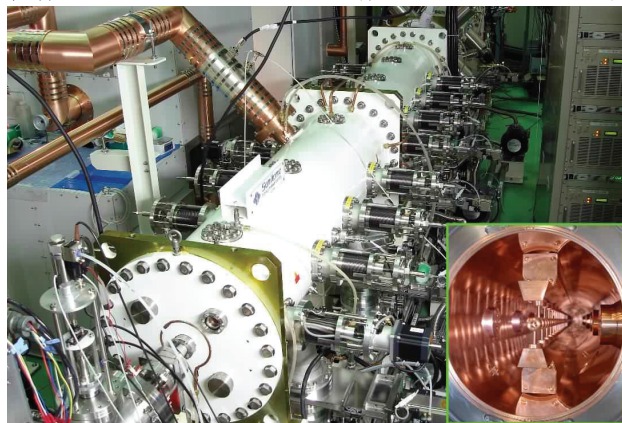


図 5 完成したAPF方式IH型DTL実機の写真。

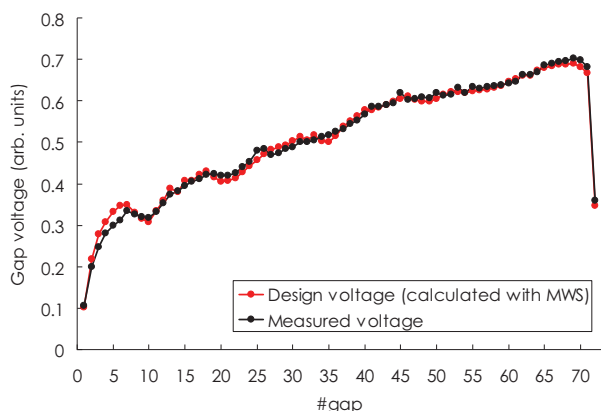


図 6 設計と測定されたギャップ電圧分布。

APF方式IH型DTL実機の電場分布をモデル共振器同様に摂動法により測定し、得られた電場分布を積分することでギャップ電圧分布を求めた^[4]。チューナーによる調整を行った後、最終的に得た電圧分布を図 6 に示す。比較のため、設計電圧分布も同時にプロットしてある。図に示した通り、両分布は良く一致しており、所期の電圧分布を得ることが出来た。また、測定された無負荷 Q は12,000と、計算の80%の値を得た。APF方式IH型DTLの主要パラメータを表 1 に示す。

4. ビーム加速試験

永久磁石ECRイオン源、RFQ、APF方式IH型DTLから構成される高効率小型入射器の他、ECR-RFQ間の入射ラインと出射ビーム分析ラインを製作し、ビーム加速試験を行った^[5]。図 7左はAPF方式IH型DTLのピックアップ電圧と直下流のビーム電流(FCN2)、分析後のビーム電流(FCN3)、並びにビーム透過率の関係を示したグラフである。31.2V付近のピックアップ電圧でビーム電流はピークを迎え、そのときの $^{12}\text{C}^{4+}$ ビーム電流値は $I_{\text{FCN2}} \sim I_{\text{FCN3}} = 380$

表 1 APF方式IH型DTLの主要パラメータ。

Parameters	Value	Units
Injection energy	608	keV/u
Extraction energy	4.0	MeV/u
Operating frequency	200	MHz
Charge-to-mass ratio	1/3	-
Number of unit cells	72	-
Cavity length	3.44	m
Cavity inner diameter	0.283-0.364	m
Cavity outer diameter	0.40-0.44	m
Maximum gap voltage	350	kV
Maximum surface field	23.6	MV/m
Kilpatrick value	1.6	-
Calculated unloaded Q	15,000	-
Measured unloaded Q	12,000	-
Required power	360	kW
Energy spread ($\Delta E/E$)	± 0.4	%
Maximum duty	0.4	%

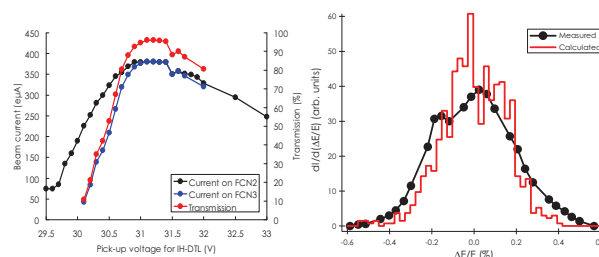


図 7 APF方式IH型DTLのピックアップ電圧とビーム電流及び透過率の関係(右図)。ビーム試験・軌道計算で得られたエネルギー広がり分布(左図)。

μA であった。また、APF方式IH型DTLの透過率は約96%と見積もられ、ほぼ軌道計算通りの値を得た。

出射ビームを分析することでビームエネルギーを測定した結果、エネルギー分布の中心値は設計通り $E_{\text{ave}} = 4.0 \text{ MeV/u}$ であった。測定されたエネルギー分布から求めたエネルギー分散 ($\Delta E/E$) の分布を図 7 右に示す。比較のため、軌道計算で得られたエネルギー分散の分布もヒストグラムでプロットした。図から、測定と軌道計算で得た両分布は良い一致を示していることがわかる。その他、出射ビーム分析ラインに組み込まれているエミッタンスモニターを用いて横方向の位相空間分布を測定した。その結果、規格化90%エミッタンスはX、Y共に約 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 1.0 \text{ } \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ とほぼ設計通りの値を得た。

5. まとめ

重粒子線がん治療装置の普及に向けた装置小型化に関する研究開発の一環として、高効率小型入射器の開発を行ってきた。アルバレ型DTLにかわりAPF方式IH型DTLを新たに採用することで、2台の線形加速器の全長は6 mと既存入射器に比べて約1/7の大幅な小型化を実現した。高効率小型入射器の実証機を製作し、ビーム加速試験を行った結果、ビーム透過率をはじめとした測定量全ては軌道計算結果を再現するものであり、設計通りのビーム品質が得られた。

このRFQ及びAPF方式IH型DTLは高周波加速電場のみで加速・収束を全て行うため、安定したビームが得られる。特にAPF方式IH型DTLは小型で高効率であり、医療用入射器として多くの魅力的特徴を有する。また、ビーム加速成功を通じAPF方式の有用性が実証されたことで、今後のAPF方式を採用した線形加速器の発展が期待される。

参考文献

- [1] M. L. Good, Phys. Rev. 92 (1953) 538.
- [2] J. P. Blewett, CERN Symposium, 159 (1956).
- [3] Y. Iwata, *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A 566 (2006) 256.
- [4] Y. Iwata, *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A 569 (2006) 685.
- [5] Y. Iwata, *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A 572 (2007) 1007.