

The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy (II)

T.Hattori, K.Isokawa,, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, S.Majima, N.Sakamoto, T.Yoshida, S.Yamada^{A)} and S.Yamaki^{B)}

Research Laboratory for Nuclear Reactors Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152, Japan

A) National Institute of Radiological Sciences

B) Japan Steel Works, Ltd.

Abstract

We are studying a heavy-ion IH linear accelerator for injector of cancer therapy. The IH (IHQ) linac was designed to accelerate C^{4+} ion from 70 (50) keV/u to 3 (2) MeV/u with an operation frequency of 95 (80) MHz. The half-scale model was made of brass. According to tuning of ridge tuner at the injection side and extraction side and diameter of cavity, we made a success of flat tuning of acceleration voltage at the model test. After adjustment, the result of model test was like the following. Operation frequency was 196.5MHz for IH type of APF focusing, was 172.3MHz for IHQ type of RFQ focusing. We know that the diameters of each real size are about 68cm and 70cm respectively.

ガン治療用入射重イオン線形加速器の研究 (II)

1.はじめに

放医研の癌治療用重イオン加速器が、世界に先駆けて稼働を開始した。その入射用線形加速器システムは、研究用としては適当であるものの実用機としては大型である[1]。

医療用の実用機には安定性が最も必要とされるが、小型、省電力型なども重要な要素とされ、これらの要求を満足する加速構造としてはIH型構造が考えられる。この加速構造は低・中エネルギー領域で高い電力効率を有し、アルバレ型やRFQ型の5～10倍という実績をもつ。

そこで小型化に必要とされる高い加速率を実現する入射器として、IH型線形加速器について検討することにした。そしてこのたび設計が終了し、2種類の1/2スケールモデルを製作して高周波電場測定を行ったので報告する。

2.入射線形加速器の設計

加速粒子としては、小型ECRイオン源で生成される C^{4+} ($q/A=1/3$) を考え、これを70keV/uで入射、3MeV/uで出射するものとした。そしてこれらの性能を全長約3mのIH型線形加速器で実現できるように設計および粒子軌道計算を行った。表-1に設計パラメータを示す。

粒子の収束方法としては、まず①APF収束について検討し、さらにIH型加速構造においてRFQ収束を行うことも考えて、ドリフトチューブにフィンガーを取り付けた②IHQ型についても検討を行った。それぞれの検討結果を以下に述べる。

①APF収束の場合

ドリフトチューブ設計の自由度を高めるためにAPF収束を採用したため、ドリフトチューブの外

径、内径、全長、ギャップ面の曲率等を変化させることによって加速電力効率の向上や、ギャップ間の放電を抑制することが可能となった。

安定性を重視して加速ギャップ間電圧をKilpatrick限界程度として軌道計算を行った結果、比較的満足できる位相シーケンスとして -45° , 0° , 45° の組合せが得られた。そして安定位相振動中で $-55^\circ \sim -25^\circ$ の約 30° がエネルギー幅1%以内に入ることが分かった。トランスバースアクセプタンスは $55 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ で、これはイオン源からのビームを十分アクセプトできる値である[2]。また空間電荷効果を考慮した粒子軌道計算において、ビームは1mA程度までは加速可能であるが、数mA以上では発散してしまうことが分かった。

②IHQ型 (RFQ収束) の場合

計算パラメータは、APF収束IH型加速器の1/2スケールモデルと合わせるために、加速周波数を30

表-1 IH型およびIHQ型入射用線形加速機の設計パラメータ

	IH	IHQ
Acceleration Particle (q/A)	p, He, C ⁴⁺ $\geq 1/3$	
Input Energy	70	50keV/u
Output Energy	3	2.15MeV/u
Operation Frequency	95	80MHz
Synchronous Phase	$-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$	-30°
Number of Cell	34	34
Cavity Length	288	288 cm
Cavity Diameter	68	70cm
Focusing Sequence	$-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$	RFQ
Transverse Acceptance	55	$100 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
Longitudinal Acceptance	30°	30°
Transmission	66(50) % by Buncher	
Acceleration Voltage/Gap	335	148kV
Acceleration Rate	3	1.94 MV/m

MHz、入射エネルギーを50keV/u、出射エネルギーを2.15MeV/uとした。また低エネルギー領域ではギャップが狭すぎてフィンガー取り付けの余裕がないため、最初の5セルはフィンガー無とした。

計算結果より、同期位相を -30° 、エネルギー幅を約1%とした場合、位相アクセプタンスが約 30° 、トランスバースアクセプタンスが約 $100 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ となることが分かった。これはバンチャーを挿入して、イオン源からの粒子を十分アクセプトできる値である。そして空間電荷効果を考慮した計算では、10mAまでアクセプタンスが劣化しないことが分かった。

フィンガーギャップ間の電界は231kV/cmとなった。これはKilpatrick限界の2.3倍であるため、安定性において不安が残るが、周波数と入射エネルギーを大きくすれば解決する。また加速周波数を100MHz、入射エネルギーを65keV/u、出射エネルギーを2MeV/uとした場合にはギャップ間電圧は148kVとなった。この場合の加速率は若干低下して1.94MV/mであるが、Kilpatrick限界の1.4倍となるため、十分安定動作する入射器になることが予測される。

3. 1/2スケールモデル空洞による高周波電場特性の測定

各種検討によって得られた設計パラメータをもとに、加速電圧分布を平坦化するために空洞径を3段階に変化させて[3]、1/2スケールの真鍮製IH型モデル空洞を製作した。またこれをRFQ収束のIHQ型モデル（実機では80MHz、50keV/u → 2.15MeV/u）にするためにフィンガー取り付け改造を行い、高周波特性を測定した。図1にIHQ型に改造した1/2スケールモデル空洞の写真を示す。

製作したモデル空洞を用いて高周波電場特性を測定した結果、空洞直径の調節と入・出射側のエンドリッジの切り欠きの調整によって加速電圧を平坦化することに成功した。加速電圧平坦化時のAPF収束IH型の1/2スケールモデルの共振周波数は

196.5MHz で、実機空洞では直径68cmである。またIHQ型の1/2スケールモデルの共振周波数は172.3MHz で、これは80MHzの実機空洞においては直径70cmである。図2にIHQ型構造時の電圧調整後の加速電圧分布を示す（実線が実測値、点線が設計値）。

4. まとめ

重イオン癌治療用の小型、省エネルギー型IH線形加速器を設計し、APF収束のIH型、RFQ収束のIHQ型の1/2スケールモデルを製作した。そしてモデル空洞を用いた高周波電場特性測定において、空洞径の調整と入・出射側エンドリッジの切り欠きの調整によって、加速電圧の平坦化に成功した。この

結果より、IH型とIHQ型ともに実機製作の見通しが得られ、特にIH型については実機製作にすぐに取りかかることが可能となった。

参考文献

- 1) S.Yamada, T.Hattori, et al.; Proc. 1990 Intn. Conf. on Linear Accelerator, Albuquerque, NM, USA, LA-12004-C1990, pp.593-595
- 2) T.Hattori, K.Isokawa, H.Schubert, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, S.Majima, S.Yamada and S.Yamaki; Proc. LA. M 21(1996)278-280.
- 3) T.Hattori, M.Okamura, Y.Oguri, K.Sasa, T.Ito, M.Okada, T.Nakamura, H.Schubert, H.Morinaga, D.Dudu, G.Pascovici, E.Ivanof, S.Ymaki, Y.Shida, T.Fujisawa, S.Seki and K.Furono, Nucl. Instrum. Methos B99 (1995) 807-809.

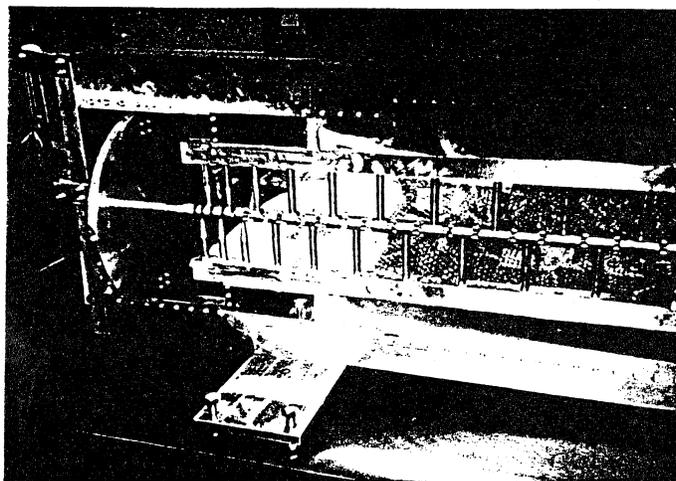


図1 IHQ型1/2スケールモデル空洞写真

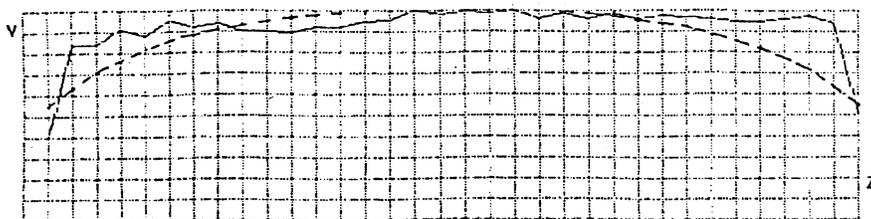


図2 調整後のIHQ型構造の加速電圧分布