

[F18p14]

The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy (III) (Design of Compact IH Linac and Prototype Linac for Test of APF focus and Acceleration)

T.Hattori, K.Isokawa^{A)}, S.Matsui, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, N.Sakamoto,
T.Yoshida, S.Yamada^{B)}, S.Yamaki^{C)}, E.Osvath^{D)}, D.Dudu^{D)} and H.Schubert^{E)}

Research Laboratory for Nuclear Reactors Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152, Japan

A) Toshiba, Ltd., B) National Institute of Radiological Sciences C) Japan Steel Works, Ltd.,
D) Institute of Physics and Nuclear Engineering, Romania, E) HSI Comp., Germany

Abstract

We are studying a heavy-ion IH linear accelerator for injector of cancer therapy. The compact IH linac was designed to accelerate C^{4+} ion from 65 keV/u to 6 MeV/u with an APF focusing and an operation frequency of 100 MHz. The geometrical dimension of the cavity is 68 cm in inner diameter and 3.1 m in length.

A prototype APF-IH linac was planned in order to demonstrate APF(Alternative Phase Focusing) structure. The APF-IH type linac was designed to accelerate $\epsilon=1/16$ ion from 12.5 keV/u to 100 keV/u with operation frequency of 70 MHz. The linac tank is 52 cm in length. Based on result of numerical calculation of beam orbit. A 1/1 scale model resonator was made of brass.

ガン治療用入射重イオンIH型線形加速器の研究 (III) (小型IH線形加速器の設計とAPF収束用プロト機)

1.はじめに

世界に先駆けて稼働を開始した放医研の重イオンガン治療装置は順調に治療を行っている。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、小型、省電力が重要な要素とされ、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[2,3]。

2.小型高効率入射器へのアプローチ

重イオンガン治療シンクロトロン入射器は放医研や兵庫県の施設の例の様にRFQ線形加速器プラスアルバレ型加速器の2台の長大な線形加速器系である。しかし実用機として普

及するためには1台で小型の入射器が理想的である。

そこで低中エネルギー領域で電力効率の良いIH構造は従来型と同じ程度のRFパワーを投入することで高電力を発生することができ、高加速率の入射器を実現できる。現在東工大では1.12 mで実効加速率5.5 MV/mのテスト機空胴を製作して試験中である[4-6]。この電界強度はキルパトリック限界の2倍を採用している。

一方アルバレ型やIH型ではトランスバース収束のために収束Q磁石が必要である。しかし実用機として複雑なQ電磁石の無い方がより適当でかつ電力高率を上げることが出来る。

そこでガン治療用の入射器のビーム強度が C^{4+} で数100 μA であることから、APF収束のIH構造による加速を検討しはじめた。その結果 C^{4+} イオンを65keV/uから6MeV/uまで十分に加速できることが粒子シミュレーションの結果判明した。

医療用実用機としての安定、確実性を考慮し

て、低エネルギーからAPF収束で十分な量のイオンを加速出来るかをテストするプロトタイプ機を検討した。軌道計算後1/1スケールモデルを製作し現在電磁場測定中である。以上2つの実験結果を基に長さ1m程度で2MeV/u程度まで加速する実用機の前1/3程度の実験機を製作し加速特性を研究する予定にしている。その後最終的に3~4mでC⁴⁺を6MeV/uまで加速する実用機建設へのアプローチを考えている。

表-1 IH型入射用線形加速器及びAPFプロット機的设计パラメータ

	IH-Injector	APF-IH
Acceleration Particle (q/A)	p,He,C ⁴⁺ ≥ 1/3	1/16
Input Energy	65	12.5 keV/u
Output Energy	6	0.1 MeV/u
Operation Frequency	100	70MHz
Synchronous Phase	-90°, -30°, 30°, 30°, -30°, -30°	
Number of Cell	31	16
Cavity Length	310	52 cm
Cavity Diameter	68	60cm
Focusing Sequence	-30°, -30°, 30°, 30°	
Transverse Acceptance	102	270 π mm·mrad
Longitudinal Acceptance	30°	60°
Transmission	70 % by Buncher	
Acceleration Voltage/Gap	100-1297	49-247kV
Acceleration Rate	5.9	2.7MV/m

3. 小型入射IH線形加速器

高加速率IH線形加速器と同じ設計方法で、C⁴⁺, ε=1/3のイオンを65 keV/uから6MeV/uまで加速する小型の線形加速器を設計した。

設計方法は

- ①粒子収束はAPFを使って軌道計算を行う。
- ②加速電圧はセル長に従って電圧が増加する電圧傾斜型の電圧分布を採用した。
- ③ガン治療用入射器では安定性を重視して加速電界をキルパトリック限界の1.5倍（高加速率IH線形加速器の場合は2倍）に押さえた設計とした。

軌道計算の結果の位相振動を図1に示す。図2に-5°から-100°までのトランスバース・アクセプタンスを示す。これらの計算より位相アクセプタンスは30°、トランスバース・アクセプタンスは102π mm·mradであった。トランスバースはイオン源の規格エミッタンス

を0.6π πmm·mradとすれば、51πであり十分アクセプト可能である。又バンチャーを付けることで十分な位相アクアエプタンスに上げることが可能である。主要パラメータを表1に示す。

実際の加速空洞は3.1mと予想され、現在の放医研のHIMACに使われている入射線形加速器の31.3m比べて、加速電荷/質量数の比が異なるとは言え十分の一に抑えることが可能となる。現行ではRFQ型とAlvarez型線形加速器の2段階で加速されることを考えると、加速空洞が3m程度の1つの加速器でシンクロトロンに入射できるメリットは大きい。又必要高周波電力800kW程度で現在の放医研のRFQ型に300kW、Alvarez型に1MW級3台を必要とするのに、1台の800kW電源で良いことが分かる。

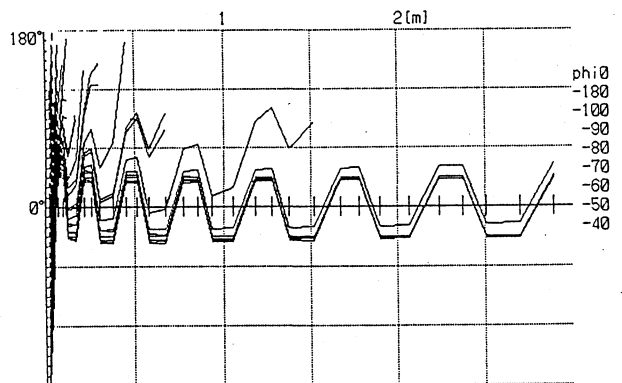


図1 Phase Acceptance

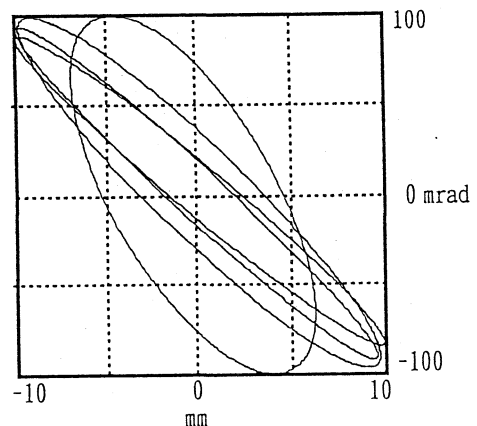


図2 Transverse Acceptance of Phase

4. プロトタイプAPF-IH線形加速器

低エネルギーから十分な量のビームを加速できるかテストするAPF収束テスト用IH線形加速器を小型入射IH線形加速器と同じ方法で設計を行った。実験室、既設装置の都合で $e=1/16$ 以上の粒子を 12.5keV/u から 100keV/uまで加速するテスト機を考えた。軌道計算の結果図3に粒子の位相振動を図4に-130°から-70°までのトランスバース・アクセプタンスを示す。その結果位相アクセプタンスは60°, トランスバース・アクセプタンスは270 μ m \cdot mmで十分加速可能なものとなった。主要パラメータを表1に示す。

加速空洞は全長52 cm で直径60 cm が予想される。加速電圧分布と空洞径を決定するために真鍮製の1/1スケールモデルを製作し、電磁場特性を測定中である。

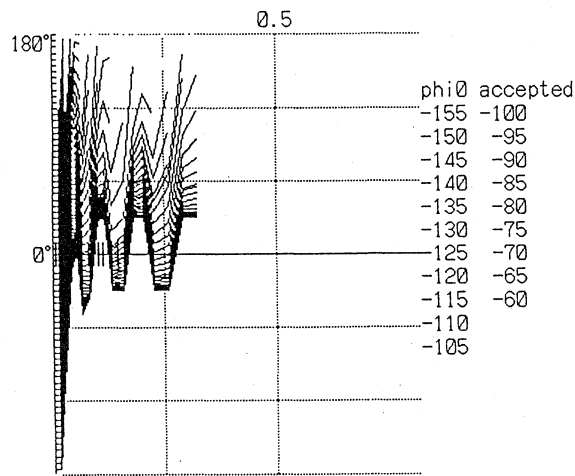


図3 Phase Acceptance

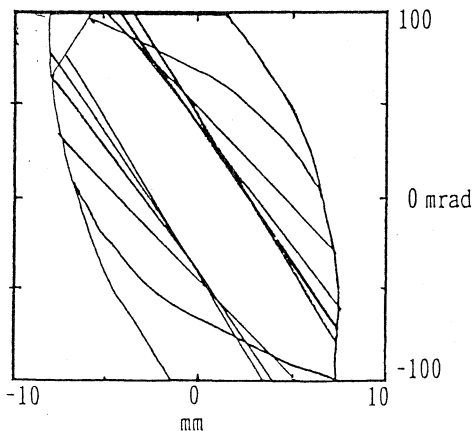


図4 Transverse Acceptance of Phase

5. まとめと将来計画

C^{4+} イオンを6 MeV/uまで加速するガン治療用シンクロトロンの入射器としてAPF収束の小型IH線形加速器を設計した。加速空洞長は3.1 mで最大加速電界はキルパトリック限界の1.5倍で実効加速率は5.9 MV/mであった。実用機としての安定、確実性をチェックするために、12.5 keV/uから100 keV/uまで加速するAPF収束の限界をテストするプロトタイプAPF-IH線形加速器を設計し、1/1スケールモデルの電磁特性を測定中である。加速電圧の測定調整後、実機を設計製作し、加速試験をする予定にしている。

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, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, S.Majima, S.Yamada and S.Yamaki: Proc. 21st Linear Accelerator Meeting, 21(1996)278-280.
- [3] T.Hattori, K.Isokawa, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, S.Majima, N.Sakamoto, S.Yamada and S.Yamaki: Proc. 22nd Linear Accelerator Meeting, 22(1997)22-24.
- [4] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada: Proc. 21st Linear Accelerator Meeting, 21(1996)281-283.
- [5] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada: Proc. 22nd Linear Accelerator Meeting, 22(1997)302-304.
- [6] K.Isokawa, T.Hattori, T.Ito, N.Hayashizaki, S.Majima and S.Yamada: Nucl. Inst. and Meth., A(1998) in printing.