

## The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy (V) (Construction of Prototype APF-IH Linac and acceleration test)

T. Hattori\*, S. Matsui,<sup>A)</sup> N. Hayashizaki, T. Yoshida, T. Hata, Y. Takahashi, K. Kashiwagi, S. Okada, K. Yamamoto, T. Sugita, M. Okamura<sup>B)</sup>, H. Tomizawa<sup>C)</sup>, S. Yamada<sup>D)</sup>, D. Duda<sup>E)</sup>, E. Osvath<sup>E)</sup>

Research Laboratory for Nuclear Reactors Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan  
A) Hamamatsu Photonics, Ltd

B) The Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351-0198, Japan

C) Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8),  
Koto 1-1-1, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

D) National Institute of Radiological Sciences, Inage Chiba 263-8555, Japan

E) National Institute of R&D physics and Nuclear Engineering

### Abstract

We are studying a heavy-ion IH linear accelerator for injector of cancer therapy synchrotron. The compact IH linac accelerates  $C^{4+}$  ion from 65keV/u to 6MeV/u with APF (Alternating Phase Focus) structure was designed for practical use. In this approach, prototype linac which tests whether it can accelerate enough beam current from low energy adopting APF structure was designed. We made real scale model cavity of this linac by numerical orbit calculation and measured its RF characteristics. Using the results of these measurements, conclusive design of this linac is determined. The linac is under construction.

## ガン治療用入射重イオン IH 型線形加速器の研究 ( V ) ( APF-IH 型プロト機の製作と加速試験 )

### 1. はじめに

重イオンガン治療用シンクロトロン入射器は放射線医学総合研究所 [1] や兵庫県の施設の例のように RFQ 線形加速器プラス Alvarez 型加速器の 2 台の長大な線形加速器システムとなっており、研究用としては適当であるが、医療用の実用機として普及するためには小型、省電力が重要な要素とされ、1 台で小型の入射器が理想的である。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 型線形加速器を検討し、幾つかの開発研究を行っている。

### 2. APF-IH 型入射器の検討

IH 構造は低・中エネルギー領域において、Alvarez 型や RFQ 型の 5 ~ 20 倍の電力効率をもつという特長があるため、従来型と同じ程度の RF パワーを投入することで高電圧を発生することができ、小型、

\*T.Hattori,03-5734-3055, thattori@nr.titech.ac.jp

高加速率の入射器を実現できる。

ビームの収束には APF(Alternating Phase Focus) 構造の採用を検討した。

数値計算シミュレーションの結果では、 $C^{4+}$ イオンを 65keV/u から 6MeV/u まで収束に APF を用いても十分に加速できるという予想がついた。実際の加速空洞は 3.1m と予想され、現行の重イオンガン治療装置の線形加速器系と比較して大幅に小型化できる可能性がある。[2]~[7]

そこで今回は最終的な入射器へのアプローチの研究の第 1 段階として、医療実用機として重要な安定性を確かなものとするために、低エネルギーから APF で十分な量のビームを加速できるかをテストする APF 研究用のプロトタイプモデルの設計、製作を行い、加速特性を研究することにした。

第 2 段階として、さらに実際に  $C^{4+}$ イオンを 3 分の 1 のエネルギー 2MeV/u まで加速する 2MeV テスト機を製作し、加速テストを考えている。

### 3. APF-IH 型プロト機の設計製作

軌道計算シミュレーションにより得られたドリフトチューブテーブルを基に 1/1 スケールの真鍮製モデル空洞を製作し、その高周波特性を測定し、一定電界、加速電圧傾斜型の分布に調整した。

測定された電場分布を基に電圧分布を計算し、再度軌道計算をおこない、APF 研究用プロト機の最終パラメータを決定した。軌道計算の結果、アクセプタンスは Transverse 方向で 230 mm・mrad, Longitudinal 方向は-90° から-40° までの 50° となり、空洞長は 53cm, 径は 63cm, Acceleration Rate は 2.6MV/m と成った。表-1 にデザインパラメータを示す。

表-1 APF 研究用プロト機のパラメータ

Acceleration Particle q/A	1/16
Input Energy	12.5keV/u
Output Energy	100keV/u
Operation Frequency	70MHz
Synchronous Phase	-90,-30,30,30,-30,-30,
Number of Cell	16
Cavity Length	530 mm
Cavity Diameter	630 mm
Focusing Sequence	-30,-30,30,30
Transverse Acceptance	230 mm・mrad
Longitudinal Acceptance	50°
Acceleration Voltage /gap	95 ~ 197kV
Acceleration rate	2.6MV/m

プロト機の空洞は SUS 製で内面に 50μm の銅メッキを施した。ドリフトチューブは銅製で冷却水に根元が接触して冷却されている。製作後組み立て、電

場測定が完了した。各パラメータに設計値とは若干のずれが生じたが、実機組立後の共振周波数、電圧分布、DT テーブルを用いて再度軌道計算シミュレーションを行った結果、共振周波数のずれはあるが、アクセプタンスに関しては設計とほぼ同等の値が得られることが判明した。その結果を表-2 に示す。

電圧分布は設計値に比較的良く一致していることが分かった。図-1 に電圧分布の測定値を示す。

表-2 実機と設計の各パラメータ

	設計値	実機測定値
周波数	70MHz	65.3MHz
入射エネルギー	12.5keV/u	10.88keV/u
出射エネルギー	100keV/u	84.2keV/u
Longitudinal アクセ	50°	40°
Transverse アクセプ	230 mm・mrad	250 mm・mrad

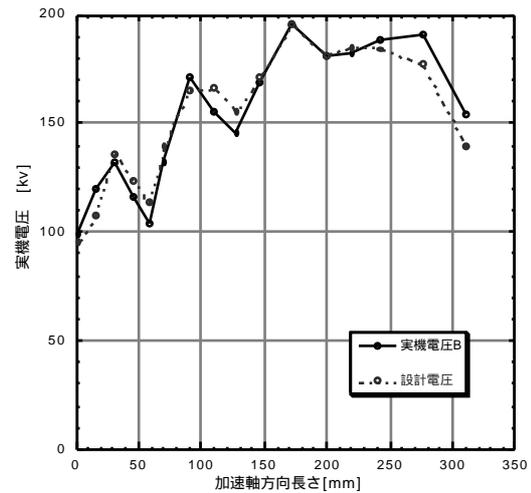


図-1 加速空洞の測定値と設計値の電圧分布

APF-IH 型プロト機の組立後の空洞内部の写真を図-2 に示す。

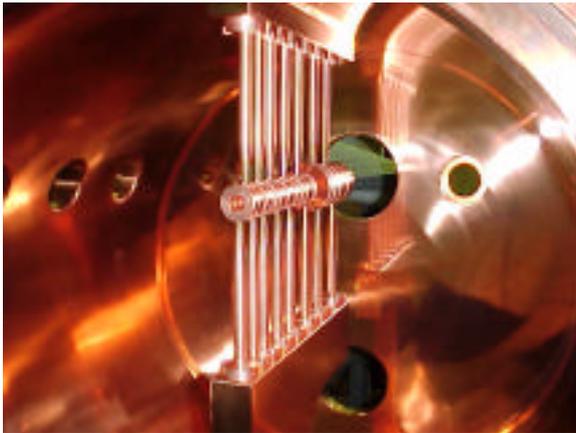


図-2 プロト機組立後の空洞内部の写真

2mm のアルミ球による高周波特性から加速空洞のシャントインピーダンスは  $362\text{M} / \text{m}$  と測定された。これはこれまでの IH 型空洞の経験係数[8]から算出されるシャントインピーダンス  $382\text{M} / \text{m}$  に近い値であった。

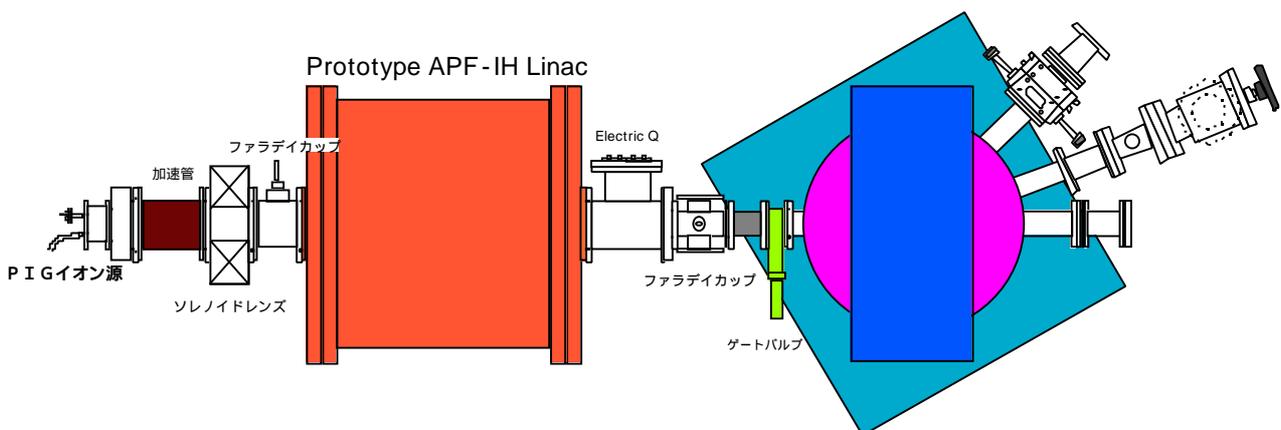
#### 4. 加速試験と将来計画

加速空洞、イオン源、分析電磁石等をセットし、現在真空テスト中である。加速試験装置を図-3 に示す。

また、小型入射器へのアプローチの第2段階として  $2\text{MeV/u}$  まで加速する試作機を検討しており、現在軌道計算をすすめている。

#### 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.21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting,21(1996) 278-280.
- [3] T.Hattori, K.Isokawa, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, S.Majima, N.Sakamoto, S.Yamada and S.Yamaki : Proc.22<sup>nd</sup> Linear Accelerator Meeting,22(1997) 22-24.
- [4] T.Hattori, K.Isokawa, S.Matsui, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, N.Sakamoto, S.Yamada S.Yamaki,E.Osvath, D.Dudu and H.Schubert : Proc.23rd Linear Accelerator Meeting,23(1998) 352-354.
- [5] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada : Proc.21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting,21(1996) 281-283
- [6] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada : Proc.22nd Linear Accelerator Meeting,22(1997) 302-304
- [7] K.Isokawa, T.Hattori, T.Ito, N.Hayashizaki, S.Majima and S.Yamada : Nucl. Inst. and Meth.,A145(1998) 287-290
- [8] T.Hattori, K.Sasa, M.Okamura, T.Ito, H.Tomizawa, T.Katayose, N.Hayashizaki, T.Yoshida, K.Isokawa, M.Aoki, N.Fujita and M.Okada: Fusion Engineering and Design 32-33(1996)359-363.



加速試験セットアップ

図-3 加速試験装置