

## Cancer therapy facility of C<sup>6+</sup> ion Injector linac by direct injection method

T.Hattori, H.Kashiwagi, N.Hayashizaki, Y.Takahashi, T.Hata, K.Yamamoto, S.Ueda,  
J.Takano, A.Takano, K. Sakakibara and M.Okamura<sup>A)</sup>

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

<sup>A)</sup>The Institute of Physical and Chemical Research

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198

### Abstract

In order to verify direct injection method, an acceleration test was carried out using Titech RFQ linac and CO<sub>2</sub> laser heavy-ion source. The accelerated C<sup>4+</sup> beam was observed successfully and the obtained current was much 10 times higher than designed currents. Using this method for C<sup>6+</sup>, We studied design of a very compact injector linac of Heavy-ion cancer therapy. The compact linac is APF-IH type cavity with high acceleration and power efficiency. The synchrotron of 1turn injection for cancer therapy has compact size and high efficiency. Total size and cost are increased by direct injection method.

## 炭素6+イオン直接入射線形加速器によるガン治療装置

### 1. はじめに

YAGレーザーで数百mJを投入したレーザーイオン源では50%近くのC<sup>6+</sup>イオンを数十mA発生させることができることを見いだしたため、ガン治療用入射線形加速器に利用することを検討した。重イオンガン治療用シンクロトロンの入射線形加速器のエネルギーは、炭素イオンがストリッパフォイルで十分にC<sup>6+</sup>イオンを発生する6~7MeV/uに選ばれている。しかし、入射線形加速器からC<sup>6+</sup>イオンを加速すれば、エネルギーを2~3MeV/uに低減することが可能となる。そこで前述のYAGレーザーイオン源によるC<sup>6+</sup>イオン直接入射法を用いることにより、RFQ型やAPF-IH型線形加速器で6mAを加速する小型ガン治療装置を検討したので報告する。

### 2. レーザーイオン源

レーザーイオン源による直接入射RFQ線形加速器の実験は、東工大で8JのCO<sub>2</sub>レーザーを使用しておこない、PARMTEQプログラムによるデザイン値よりC<sup>4+</sup>イオンを~10倍程度高い19mA加速するのに成功した<sup>[1-4]</sup>。CO<sub>2</sub>レーザーイオン源は最大強度を示すのはC<sup>4+</sup>イオンで100mA以上を発生することができる。一方600mJのYAGレーザーイオン源は短パルスレーザーのため、多価イオンを発生可能であり、炭素ターゲットでC<sup>6+</sup>イオンを40cmのところ、4.4mm穴で約70mA出すことが可能であった。これらのビームを入射線形加速器に直接入射する。

### 3. 高強度C<sup>6+</sup>イオン加速線形加速器

高強度C<sup>6+</sup>イオン加速線形加速器は、低エネルギーから高強度を加速可能なRFQ型線形加速器と、加速電力効率が格段に優れたAPF-IH型から構成される。各加速器の検討状況を以下に述べる。

#### RFQ型線形加速器

ガン治療用シンクロトロン1ターン入射用線形加速器のビーム強度は6mAで十分である。しかし、RFQ型線形加速器だけでは、入射エネルギーを2MeV/uとしても必要な加速電圧は4MVで線形加速器の全長は4~5mになるため、それほど小型とはいにくい。そこで加速電力効率の格段に優れたIH型線形加速器と組み合わせると、1.5mのRFQ型線形加速器で300keV/uに加速後、1mのIH型線形加速器で2MeV/uまで加速することが可能である。したがって、2台の線形加速器で2.5mの小型入射器システムが可能である。この実証のために現在、理研、放医研、ゲーテ大学と共同でC<sup>4+</sup>イオンで100mA、C<sup>6+</sup>イオンで60mAを加速する4rod-RFQ型線形加速器を製作し、ビーム加速試験中である。

#### APF-IH型線形加速器<sup>[5-11]</sup>

加速電力効率の格段に優れたIH型加速空洞について、これまで各種の収束構造を検討してきた。そのなかで低エネルギーからの加速に適した、APF (Alternating Phase Focusing) 構造を採用した超小型のガン治療入射器について検討を進めている。詳細は次項以降に述べる。

### 4. 超小型重イオンガン治療用入射線形加速器

#### C<sup>6+</sup>イオン源

ビーム幅が1~3μsでC<sup>6+</sup>イオンを70mA発生するYAGレーザーイオン源を入射器のイオン源として採用する。

#### 2MeV/u APF-IH型線形加速器

40keV/uのC<sup>6+</sup>イオンを入射し2MeV/uまで約1mで加速可能であるのがAPF-IH型線形加速器である。

服部研究室が製作してきた、ガン治療入射器の $C^{4+}$ 加速 $2\text{MeV/u}$ テスト機のデータにより概算を行った。ここでは、運転周波数が $100\text{MHz}$ の入射器を採用すると、 $40\text{keV/u}$ 入射、 $2\text{MeV/u}$ 出射の線形加速器を検討した。以下に超小型入射線形加速器の主要パラメータを表1に、普及型ガン治療装置内での配置を図1に示す。全長 $1.3\text{m}$ で内径は $56\text{cm}$ の加速空洞で十分な超小型の入射器が設計可能となる。

イオン源から $70\text{mA}$ 入射すれば、バンチャーなしで、位相アクセプタンスが $30$ 度あることで、十分に $6\text{mA}$ アクセプトし加速できる。APFの収束効果は小さいのでビームの空間電荷効果が大きい大電流では加速出来ないが、予備的空間電荷効果を含んだ軌道シミュレーションでは $2\sim 3\text{mA}$ のビームは十分に透過することが分かった。今後、空間電荷効果を含んだ軌道シミュレーションを予定している。

表1 APF-IH型線形加速器の主要パラメータ

Charge to mass ratio	$1/2 (C^{6+})$
Operation frequency	$100\text{ MHz}$
Input energy	$40\text{ keV/u}$
Output energy	$2\text{ MeV/u}$
Synchronous phase	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Number of Cell	22
Cavity Length	$1.3\text{ m}$
Focusing Sequence	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Longitudinal Acceptance	$30^\circ$
Transverse Acceptance	$100\text{ mm mrad}$
Acceleration average Voltage	$60\text{ kV/cm}$
RF Power	$70\text{ kW}$
Acceleration Rate	$3.0\text{ MV/m}$

## 5. ガン治療用重イオンシンクロトロンの入射条件

現在世界に有る4台（日本の千葉県と兵庫県の2台は運転中、ドイツのハイデルベルグは建設中、日本の放医研の普及型重イオンガン治療装置はデザイン中）のガン治療用重イオンシンクロトロンでは、 $C^{4+}$ イオンをECRイオン源で発生させ、線形加速器で $5\sim 7\text{MeV/u}$ に加速後、 $C^{4+}$ イオンを炭素ストリッパにより荷電変換して $C^{6+}$ とし、これをシンクロトロンにマルチターン入射法で強度を上げて入射することで、必要な高エネルギーまで加速している。本研究の、パルスレーザーイオン源による $C^{6+}$ 高強度入射を以下に検討する。

### $C^{6+}$ イオン入射による効果

$C^{6+}$ イオンの直接入射のため炭素ストリッパによる荷電変換および同装置が不要となる。

- ・  $C^{4+}$ イオンから $C^{6+}$ イオンへの荷電変換時のビーム減衰が無くなる
- ・ シンクロトロンの入射エネルギーが、これまでの $5\sim 7\text{MeV/u}$ から $2\sim 3\text{MeV/u}$ に下げられる
- ・ 炭素ストリッパによるエネルギーロス、ストラグリングによるエネルギーの拡がり、ビーム

の拡がりが無くなる

- ・ 炭素ストリッパの膜の厚さ及び、照射効果による膜厚の変動が無いいため、加速器の運転条件の調整が不要

### 高強度ビームによる効果

重イオンシンクロトロンに1ターン入射が可能なビーム強度を入射できれば、マルチターン入射は必要無くなる。

- ・ 1ターン入射であるので、マルチターン入射に必要な装置類やシステムが不要
- ・ シンクロトロンの各種の電磁石はマルチターン入射のために、大きなアクセプタンスを持つよう磁極幅を大きくしてあるが、これを小さくすることができ、磁石の小型化や省電力化が可能となる（ $20\sim 30\%$ ）

以上のことより、入射器の性能は核子当たり $2\text{MeV/u}$ の $C^{6+}$ イオンを発生させることで十分である。そして重イオンシンクロトロン電磁石類の軌道アクセプタンスは入射エネルギーの低下を考慮しても、 $1/5\sim 1/10$ となり、電磁石の小型化、省電力化が実現する。普及型ガン治療装置の計画例を図1に、検討したシンクロトロンの主要パラメータを表2に示す。

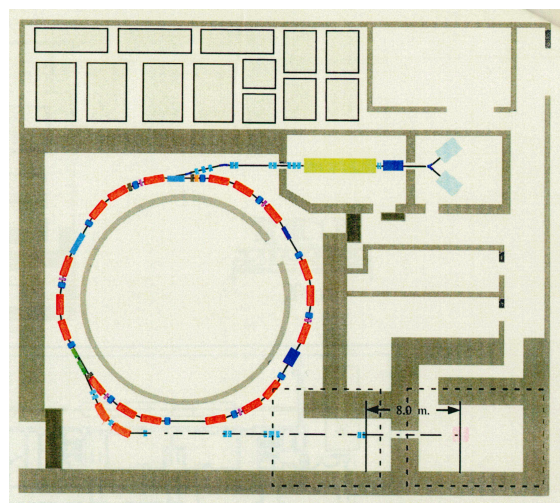


図1 普及型ガン治療装置

表2 小型シンクロトロンの主要パラメータ

Particles	Proton and Carbon
Injection Energy	$2\text{ MeV/u}$
Extraction Maximum Energy	$250\text{ MeV(proton)}$ $400\text{ MeV/u(carbon)}$
Circumference	$62.8\text{ m}$
Beam Intensity	$5 \times 10^{10}\text{ ppp(proton)}$ $4 \times 10^9\text{ ppp(carbon)}$
Maximum Bending Field	$1.27\text{ T}$
Bending Magnet Radius	$5\text{ m}$
Synchrotron Mean Radius	$10\text{ m}$
1 Turn Injection Time	$3.2\mu\text{s}$
Maximum Repetition Rate	$0.5\text{ Hz (carbon)}$

## 6 . まとめと将来計画

レーザーイオン源を使用して $C^{6+}$ イオンを直接入射法により6mA以上加速する、長さ1.3mのAPF-IH型線形加速器は重イオンガン治療装置の超小型入射器として、十分可能性があることが分かった。今後は既存の2MeV/u APF-IH型線形加速器を使って $C^{6+}$ イオン直接入射の加速試験を行う予定である。

また、RFQ型線形加速器については、理研、放医研、ゲーテ大と共同で $C^{4+}$ イオンを100mA、 $C^{6+}$ イオンを60mA加速する4rod-RFQ型線形加速器を製作した。これは放医研において現在加速試験中で、予備的に30mAのビーム加速に成功した。

## 参考文献

- [1] M.Okamura, T.Hattori, et al., Review of Scientific Instruments, 73(2002)761-763.
- [2] T.Takeuchi, M.Okamura, T.Hattori, et.al. Review of Scientific Instruments, 73(2002)764-766.
- [3] M.Okamura, T.Katayama, T.Hattori et al., Nucl. Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)216-230.
- [4] T.Takeuchi, M.Okamura, T.Hattori et al. Nucl, Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)233-237.
- [5] T.Hattori, H.Kashiwagi et al., Nucl, Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)221-224.
- [6] T.Hata,T.Hattori, et al., Nucl, Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)238-242.
- [7] K.Yamamoto, T.Hattori, et al., Nucl, Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)229-232.
- [8] H.Kashiwagi, T.Hattori, et al., Nucl, Inst. and Meth., in Physics Research B188(2002)225-228.
- [9] H.Kashiwagi, T.Hattori, et al., Review of Scientific Instruments, 73(2002)583-585.
- [10] M.Muramatsu, T.Hattori et al., Review of Scientific Instruments, 73(2002)573-575.
- [11] K.Yamamoto, T.Hattori, et al., Proc. of 4th Symp. on Accelerator and Related Technology for Application, 4(2001) 27-30.