

Development of compact heavy-ion injectors for medical accelerators

Y. Iwata^{*A)}, T. Fujisawa^{A)}, T. Furukawa^{A)}, T. Kanai^{A)}, M. Kanazawa^{A)}, N. Kanematsu^{A)}, M. Komori^{A)}, S. Minohara^{A)}, T. Murakami^{A)}, M. Muramatsu^{A)}, K. Noda^{A)}, M. Torikoshi^{A)}, S. Yamada^{A)}, H. Ogawa^{B)}, T. Fujimoto^{B)}, V. Kapin^{C)}, T. Mitsumoto^{D)}, H. Tsutsui^{D)}, Y. Fujii^{D)},

^{A)} Department of Accelerator Physics and Engineering, 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, 263-8555, Japan

^{C)} Radiative Acceleration Center, Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI)
Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia.

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

Abstract

A preliminary design of compact heavy-ion injectors of medical accelerators was presented. The compact injector consists of Radio-Frequency-Quadrupole (RFQ) and Interdigital H-mode (IH) Drift-Tube-Linac (DTL). For the IH-DTL, the Alternating-Phase-Focusing (APF) method will be employed. The distribution of electric fields in the IH cavity was calculated with a 3-dimensional code and used for calculations of the beam dynamics. By performing the iterative calculations of the electric field and beam dynamics, the cell table and cavity structure of the IH-DTL were determined. The compact injector will be constructed, and a beam test will be performed by the end of FY2005.

医療用小型重イオン線形加速器の開発

1. はじめに

放射線医学総合研究所・重粒子線がん治療装置 (HIMAC) は対がん10カ年総合戦略の一環として平成5年に建設された。HIMACにより得られる高エネルギー炭素線をういたがん治療の臨床試行は10年を迎え、昨年末には高度先進医療の承認を得るに至った。これまで得られた臨床実績から炭素線がん治療の有効性が認められ、炭素線がん治療装置の普及が世界的に進められている。がん治療用重イオン加速器に求められるスペックは、水中飛程25cm以上を得るため炭素線を核子あたり400MeVまで加速する必要がある。しかしながら、これを満足する既存の重イオン加速器は大型であるため、重粒子線治療の更なる普及を進めるにあたり加速器を含めた治療装置の小型化ならびに低コスト化が必要となる。そのため、我々は小型重粒子線がん治療装置の開発および施設全体の設計を進めている。

がん治療用加速器は主にイオン源、入射器、主加速器により構成され、炭素イオンを治療に必要なエネルギーまで加速する。このうちHIMACで用いられている入射器システムはRadio-Frequency-Quadrupole (RFQ) およびAlvarez型Drift-Tube-Linac (DTL) から構成されるが、RFQは直径60cm、全長7.3mであり、またAlvarez型DTLは直径2.2m、全長24mと大型である。これら線形加速器のサイズは加

速器自身の建設費のみならず施設全体の建設費にも大きく影響するため、小型入射器システムの開発はがん治療施設全体の小型化および低コスト化の鍵を握ると考えられる。現在、イオン源、主加速器、照射装置等の装置全般について小型化の研究が進められているが、ここでは小型入射器開発の現状に関して紹介する

2. 小型線形加速器システム構成

小型線形加速器システムは図1に示したようにRFQ線形加速器とDTLにより構成される。ECRイオン源により生成された4価の炭素イオンは24kVに印加された高圧デッキにより引き出され、RFQに入射される。次に8keV/uの炭素イオンはRFQにより600keV/uまで加速される。RFQの共振器構造は実績豊富な4ペイン型が採用され、その共振周波数は200MHzである。共振器の全長は約2mで、内径は約32cmと小型である。RFQにより加速およびバンチされた炭素イオンは、マッチングセクションを経た後DTLに入射され、最終的に4MeV/uまで加速される。DTLの共振器は小型化のためInterdigital H-mode (IH) が採用される。またIH型DTLは一般にシャント抵抗が高いことが知られおり、高効率線形加速器として近年注目を浴びている。

* E-mail: y_iwata@nirs.go.jp

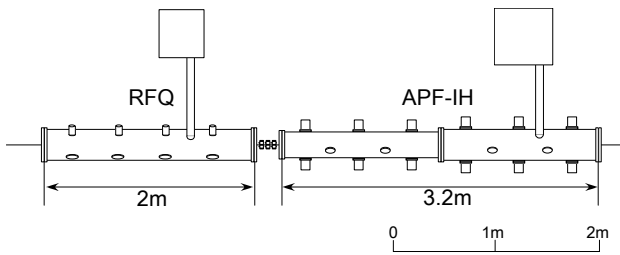


図 1 小型線形加速器システム概略図。

IH型DTLの共振周波数はRFQと同じ200MHzが選ばれる。共振器長は約3.2mである。IH型DTLの収束方式は加速電場のみでの収束を可能にするAlternating-Phase-Focusing (APF) が採用される。これによりドリフトチューブ内にQ電磁石などの収束要素を埋め込む必要がなくなるため、建設コスト削減につながる。小型線形加速器システムのパラメータを表 1にまとめた。

Parameter	RFQ	IH型DTL	Units
入射エネルギー	0.008	0.6	MeV/u
出射エネルギー	0.6	4.0	MeV/u
共振周波数	200	200	MHz
タンク全長	~2.0	~3.2	m
タンク直径	~35	~35	cm
q/m	1/3	1/3	-
最大表面電界	23.6	23.6	MV/m
キルパトリック値	1.6	1.6	-

表 1 小型線形加速器システムのパラメータ。

3. 設計

3.1 ビーム軌道計算

RFQ軌道計算コードGENRFQにより得られたRFQ出射点での位相空間およびX-Y分布を図 2に示す[1]。粒子の中心エネルギーは0.604 keV/uである。RFQ出射後、粒子はマッチングセクションを通過し、IH型DTLに入射される。マッチングセクションは3連Q磁石により構成され、その全長はおよそ35cmである。X-X', Y-Y', Δφ-ΔW空間の規格化されたエミッタンスはそれぞれ0.408 π·mm·mrad, 0.431 π·mm·mrad, 1.27 π·ns·keV/uであった。

APF方式では同期位相の符号を正負交互に選ぶことで、横方向と縦方向の収束を加速電場のみで行う。そのためAPF方式を用いた場合、ビームの運動は同期位相の選び方に強く依存する。最も単純な同期位相の取り方は $\phi_s = +\phi_0, -\phi_0$ であり、この場合の同期位相の周期は1である。この周期は収束力に関係し、周期を上げることで強い収束力を得ることが出来る。加速と共に収束力を強める必要があるため、粒子速度の増加に伴い同期位相の周期を大きく取る必要がある。しかしながら加速途中で周期を急に変わると

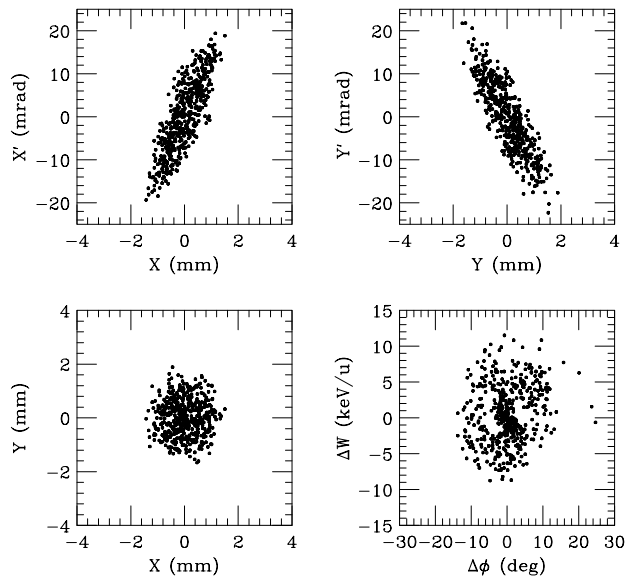


図 2 RFQ出射点における位相空間及びX-Y分布。

ミスマッチが起こり、エミッタンス増大に繋がってしまう[2]。加速と共に周期をなめらかに変えるため、我々は以下の関数を用いて同期位相の並びをパラメータ化した。

$$\phi_s(n) = \phi_0 \exp(-a \cdot n) \sin \left[\frac{n - n_0}{b \exp(c \cdot n)} \right]$$

ここでnはセル番号であり、a、b、c、 ϕ_0 、 n_0 はフリーパラメータである。上記5つのパラメータにより同期位相の並びを記述する。パラメータの最適値は以下のように決定した。まずパラメータを与えると同期位相の並びが決まり、セルテーブルが生成できる。次にIH型DTL入口での粒子の位相空間分布を用いてビーム軌道計算を行い、粒子の透過率や出射時のエミッタンスを計算する。上記計算を繰り返すことで、透過率が高くかつ、エミッタンス増大が最も小さくなるようなパラメータをサーチした。

3.2 共振器の設計

IH型共振器では容量成分がドリフトチューブ間に集中しているため、電場分布はセルテーブルを含め共振器トータルの構造に大きく依存する。そのため、3次元電磁場計算コードMicroWave Studio(MWS)を用いて電場分布等の計算を行った。入射から出射までギャップ長が約3倍と大きく変化するため、何ら電磁場分布の調整を行わない場合、電場分布は入射側に大きく偏った分布となる。共振器全体にわたり一様な電場分布を得るために、共振器径を4段階に変化させ、電場分布の調整を行った。また出射端で落ち込む電場分布を補正するため、リッジに切りかきを加えて調整を行った。計算の結果、タンク径を285~344mmの範囲で変化させることにより、一様な電場分布が得られ、また設計値である200MHzに近い共振周波数となることがわかった。

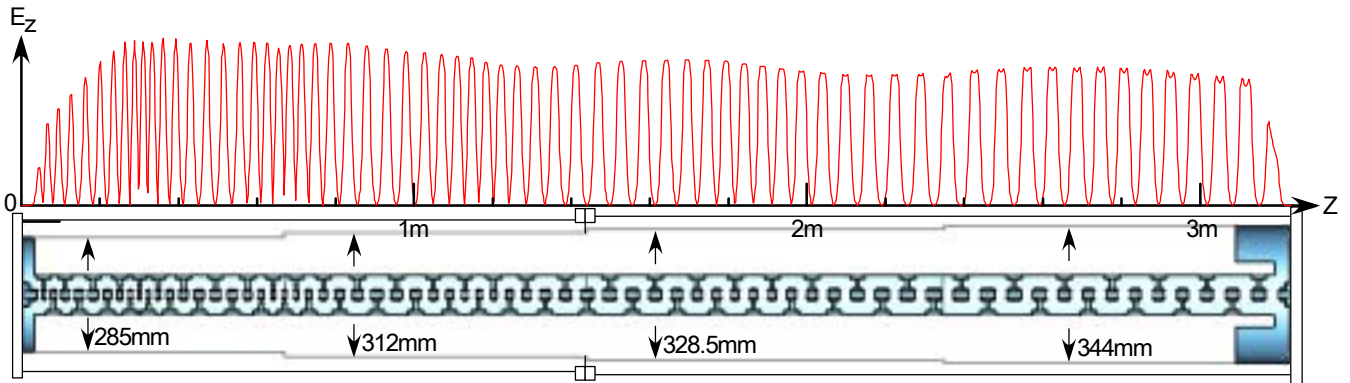


図 3 IH共振器の断面図および3次元電場計算により得られたビーム軸方向の電場分布。

3.3 イタレーション

ビーム軌道計算により得られたセルテーブルを用いて共振器の3次元電磁場計算を行った。次に共振器の計算で得られた電場分布を用いてビーム軌道計算のパラメータサーチを再び行い、セルテーブルに修正を加える。上記計算のイタレーションを行い、最終的なセルテーブルおよび共振器の構造を決定した。2回のイタレーションにより計算は収束し、それにより得られた電場分布を図 3にプロットした。同期位相の並びに関するパラメータは $a=0.00688$ 、 $b=1.38$ 、 $c=0.00483$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 、 $n_0=-13.0$ が得られ、このときギャップ数は68で、全長は3.2mである。また、IH型DTLの透過率は約98%であった。IH型DTL出射点での位相空間及びX-Y分布を図 4に示す。横方向のエミッタンス増大は約50%で、エネルギーの広がりは約 $\pm 0.38\%$ であった。これはAPFに関する近年の計算結果と同程度である[3]。共振器の計算では実効シャント抵抗は107M Ω /mで、所要RF電力は70%のQを仮定して430kW程度であった。これは既存の線形加速器に比べ高効率であると言える。IH型DTLの主要パラメータを表 2にまとめた。

Parameter	Value	Unit
Number of gaps	68	-
Tank length	3.20	m
Inner radius of drift tubes	7	mm
Outer radius of drift tubes	14-15	mm
Maximum gap voltage	365	kV
Transmission	98	%
Normalized X-X' emittance	0.600	π -mm-mrad
emittance growth	50.4	%
Normalized Y-Y' emittance	0.620	π -mm-mrad
emittance growth	45.9	%
$\Delta\phi$ - ΔW emittance	1.31	π -ns-keV/u
emittance growth	6.89	%
Shunt impedance	347	M Ω /m
Effective shunt impedance	107	M Ω /m
Total RF power (70% Q)	430	kW

表 2 IH型DTL主要パラメータのまとめ。

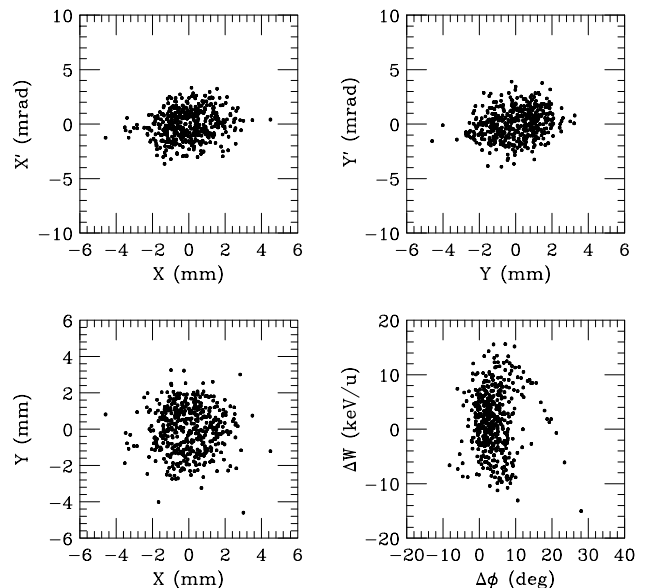


図 4 IH-DTL出射点での位相空間及びX-Y分布。

4. まとめ

炭素線がん治療装置の普及を推進するため、小型重イオン線形加速器システムの開発を行っている。ビーム軌道計算と3次元電場計算のイタレーションによりセルテーブルおよび共振器の構造を決定した。これにより満足のゆくエミッタンス及びアクセプタンスが得られた。今後、今年度はRFQ実機の制作およびIH型DTLのモデル制作を行い、測定を行う。更に平成17年度末までにIH型DTLの実機制作およびビーム加速試験を行う予定である。

参考文献

- [1] S. Yamada, Proc. of 1981 Linear Accelerator Conf., p. 316, (1981).
- [2] W. H. Cheng *et al.*, Proc. of 1992 Liner Accelerator Conf., **Vol. 1**, p. 193 (1992).
- [3] S. Minaev, *et al*, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, New York, p. 3555 (1999).