

IH型加速空洞に関する研究

山本 和男^{A)}、服部 俊幸^{A)}、岡村 昌宏^{B)}、片山 武司^{B)}、山田 聡^{C)}

林崎 規託^{A)}、柏木 啓次^{A)}、高橋 康之^{A)}、畑 寿起^{A)}

^{A)} 東京工業大学 原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

^{B)} 理化学研究所

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

^{C)} 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

概要

加速器を用いたガン治療施設の普及のためには、より省電力で小型の加速器が必要となる。そこで、従来の入射器に変わる新しい加速空洞として加速効率が格段に高いIH型加速空洞の研究開発を行っている。IH型加速空洞は、同じドリフトチューブ型加速空洞のアルバレ型とは電磁場の発生モードが異なり、これのために空洞解析の研究は行われてこなかった。しかし、最近のコンピュータの進歩により、今回、電磁場解析ソフトにより加速空洞内の電場分布・共振周波数を求め、その値を用いた軌道計算プログラムを開発した。また、マトリックス法により設計した加速空洞の製作状況についても報告する。

1. はじめに

近年、放射線医学総合研究所（HIMAC）や兵庫県立粒子線医療センターにみられるように、いままでは原子核・素粒子分野で活躍してきた加速器を用いた医療用加速器施設が普及している。しかし、より一般的な医療装置としての幅広い普及のために、加速器の低電力化・小型化が必須の条件となる。そこで、われわれはシンクロトロン入射器として、加速効率の高いIH型加速空洞に収束要素を必要としないAPF(Alternating Phase Focus)構造を取り入れたAPF-IH型線形加速器の研究を行っているが、いままで加速空洞内で発生する電場分布はその空洞の非対称性、セル数の多さからモデルを製作し電場測定するしか知りようがなかった。しかし、ここ数年のコンピュータの進歩によりいままで単純な空洞構造でしか行えなかった数値解析が可能となり、ここにOPERA3Dを用いた電磁場解析を行い、実際に製作したモデル空洞を用いた電場測定結果との比較を行った。（比較に用いた加速空洞は、C4+イオンを加速する全長約1.3m、空洞径約0.6m、セル数22、運転周波数100MHz、核子あたり40keVから2MeVまで加速可能に設計された加速空洞の1/2スケールである図1参照）。そして、この電磁場解析により求められた加速空洞内の電磁場分布を用いて粒子の軌道計算プログラムの開発を行った。

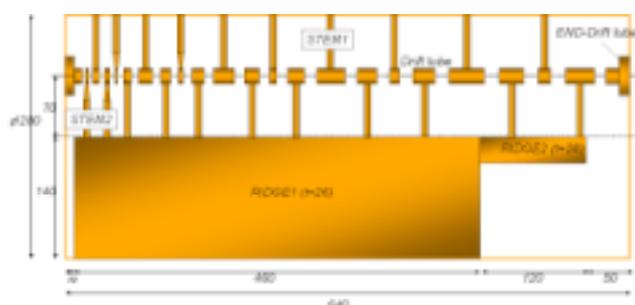


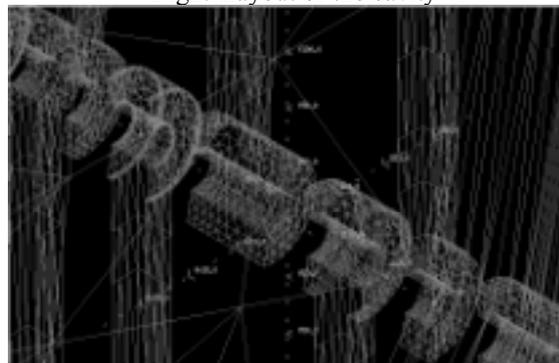
Fig1. Layout of a reference cavity

2. 電磁場解析

2.1 電磁場解析

電磁場解析ソフトとして、今回はOPERA-3Dを使用した。OPERA3DではPre-processorにより求めたい対象構造物を製作し、メッシュを切り有限要素法により計算させ、post-processorにより計算結果を評価する。ここで、対称構造物は最初に2次元で平面図を書き、それを奥行きに引き伸ばして3次元を描くために、ドリフトチューブを支えるステムの形状を円柱から四角柱に置き換えて作成した。メッシュ間隔はドリフトチューブ間が5等分以上、ドリフトチューブの内径が10等分以上になるように切った。

Fig2. Layout of the cavity



after the optimization with OPERA3D

¹ E-mail: 02d19092@nr.titech.ac.jp

2.2 モデル空洞測定

2MeV/uまで加速可能なAPF-IH型線形加速器の1/2スケールモデルを製作した。その共振周波数は200MHzを予定している。モデルによる電場測定には摂動法を用い、ステッピングモータにより直径1mmのアルミ球を順次ギャップに送り込み、そのときの共振周波数のずれをネットワークアナライザにより測定し、各ギャップでの電場強度を求めた。

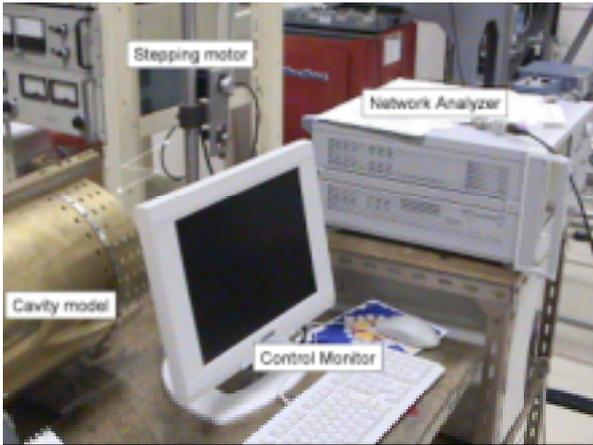


Fig3. Photograph of the measurement

2.3 比較

1/2スケール空洞の共振周波数は、数値解析によるものは187MHz、モデル測定によるものは206MHzと約1割の誤差が発生した。また、図4に示した電圧分布の比較により、シミュレーションによる電圧分布のほうが入射側付近で高く、その代わりに出射部分で低くなっていることがわかる。この両者の原因は、ドリフトチューブを支えるステムに依存しており、今回OPERA3Dに用いたステム形状は図2に示すように実際の円柱ではなく四角柱で代用しているため、ギャップ間隔の狭い入射側付近で電気容量Cが増加したため電圧が集中し、また共振周波数が低下したと考えられる。したがって、今後はステム形状を円柱に近づける必要がある。

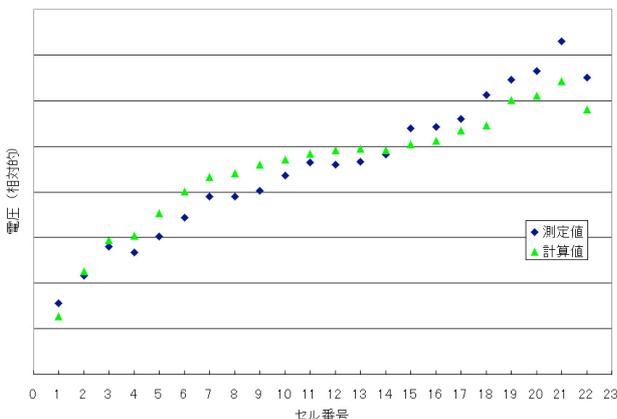


Fig4. Comparison of Voltage distribution

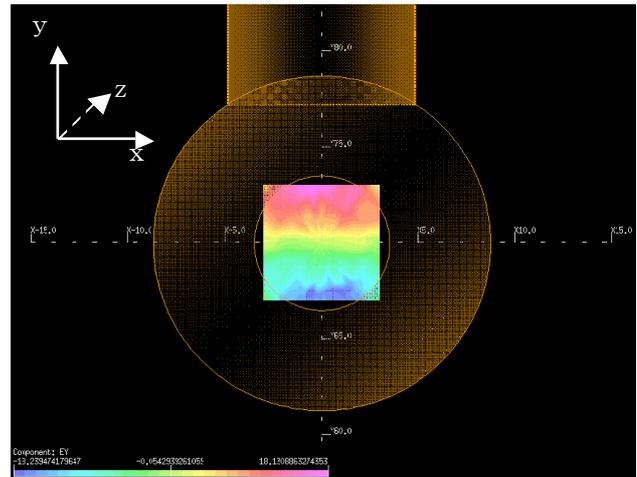


Fig5. Figure of dipole components of E_y in Output region

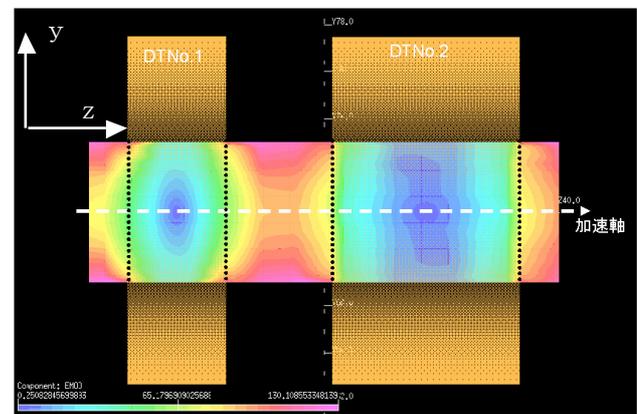


Fig6. Figure of EMOD in Input region

一方、図5に出射側にある20番目のドリフトチューブに入る直前のTransverse方向の電場のy成分を示す。ギャップ間隔の広がる出射側では、ドリフトチューブ長とステム径の比率により、ステムによるdipole成分が加速軸近傍電場に影響を与えることがわかった。今回はステムを円柱から四角柱にしたせいもあるが、さらに高エネルギーまで加速する場合を想定すると、この影響を考慮に入れる必要がある。また、逆にドリフトチューブ間の狭い入射側付近には電場のドリフトチューブ内へのしみこみが見られた。図6にドリフトチューブ内にしみこむ電場(強度)を示す。従来のIH型加速空洞の軌道計算はマトリクス計算で行われてきた。一般的な定電場型ドリフトチューブ加速器内の粒子の運動を計算する場合、その加速域は前段加速が行われたのちで、電場のドリフトチューブへのしみこみの影響が、またステムによるdipole成分の影響が関係ないぐらい十分なドリフトチューブ長があった。しかし、これにAPF構造を取り入れ、前段加速が必要としない低エネルギー領域からの加速になると、これらの加速軸近傍の電場に与える影響が無視できなくなることがわかる。

3. 粒子軌道計算プログラムの開発

電磁場解析とモデル電場測定結果との比較により、今後低エネルギー入射から高エネルギー ($\beta < 0.15$) まで加速する定電場IH型加速空洞を製作する場合、ドリフトチューブ間の狭い低エネルギー側では電場のドリフトチューブ内へのしみこみが、また、ドリフトチューブ間の広い出射側付近ではSTEMが加速軸近傍の電場に与える影響が無視できないことが懸念される。今現在IH型Linacの粒子軌道計算プログラムはマトリックス計算により行われているが、電磁場解析ソフトにより3次元マップで電場ベクトルの値を求めることができるので、この値を使った軌道計算プログラムの開発を行っている。

まず、電磁場解析ソフトOPERA3Dにより求められる電場強度は相対的であるので、設計値の出射エネルギーまで加速するようにこれらの値を決める。そして、加速軸上に傾き0で入射するビーム群(360度)を入れてLongitudinal Acceptanceを求め、同期粒子(と思われる)のTransverse Acceptanceを求めるプログラムを作成した。なお、医療用入射器として使用することを考えているので、いまのところ空間電荷効果は考慮に入れていない。

4. 加速器製作の現在状況

粒子軌道計算をマトリックス計算により行い設計を行ったC4+イオンを40keV/uから2MeV/uまで加速可能なAPF-IH型線形加速器の製作を行っている。表にこの加速器の特性を示す。この加速器は空洞径560、全長1280内に、電場調整用のリッジと、セル数22のドリフトチューブとステムから構成される。ドリフトチューブとステムの材質は無酸素銅でそれらはお互いに銀ロウ付けされている。空洞は上タンク、下タンクで中間板を挟む三枚おろし構造で、ステンレスで加工した後0.1mm銅メッキを行う。ドリフトチューブのアライメントは、径方向は中心にロッドを通し、軸方向にはギャップ長のスペーサーを挟み込み行う。なお、表中のアクセプタンス値はともに、マトリックス計算による算出した値である。

Table1 Main Parameter of the LINAC

Acceleration Particle	$q/A > 1/3$
Input Energy	42 keV/u
Output Energy	2.0 MeV/u
Operation Frequency	102.7 MHz
Synchronous Phase	-30, -30, +30, +30
Number of Cell	22
Cavity Length	1280 mm
Diameter of Cavity	560 mm
Focusing Sequence	-30, -30, +30, +30
Transverse Acceptance	99.5π mmmrad
Longitudinal Acceptance	30°
Transmission	65% by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	120-560 kV



Fig7. Photograph of the manufacturing cavity
Fig8. Photograph of Drift tube and stem

5. まとめと今後の予定

OPERAを用いた数値軌道計算により低エネルギーからの加速ではマトリックス計算による粒子軌道計算では誤差が生じる可能性が無視できないと危惧される。そこで、今後はマトリックス計算により製作した加速器と、新たに開発するプログラムとを比較してこの問題に対応していく予定である。

文献

- [1] T. Hattori, et. al.; Proceeding 23rd Linear Accelerator Meeting, 23(1998)352-354
- [2] S. Matsui, et. al.; Proceeding 24th Linear Accelerator Meeting, 24(1999)149-151
- [3] T. Hattori, et. al.; Proceeding 25th Linear Accelerator Meeting, 25(2000)294-296
- [4] K. Yamamoto, et. al.; Proceeding 26th Linear Accelerator Meeting, 26(2001)189-191
- [5] K. Yamamoto, et. al.; Proceeding 4th Symp. on Accelerator and Related Technology for Application, 4(2001)27-30
- [6] K. Yamamoto, et. al.; Proceeding 27th Linear Accelerator Meeting, 27(2002)66-68
- [7] K. Yamamoto, et. al.; Nucl. Inst. and Meth., in Physics Research, B188(2002)229-232