

3D ELECTROMAGNETIC SIMULATION OF C⁶⁺ HYBRID SINGLE CAVITY LINAC FOR CANCER THERAP

○ LU Liang ^A, Toshiyuki Hattori ^A, Noriyosu Hayashizaki ^A
Takuya Ishibashi ^A, Tamura Jun ^A

^{A)} Tokyo Institute of Technology

2-12-1-N1-25, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

Abstract

A new type Linac, hybrid single cavity linac, which configuration combines RFQ accelerating structure and DT accelerating structure is being designed and simulated now. This linac design had adopted advanced power-efficiency-conformation, APF-IH structure, which acceleration efficiency is extremely strong in the low-middle energy region, and had also adopted most advanced computer simulation technology to evaluate cavity electromagnetic distribution. In DT section, APF system had chosen to focus beam to obtain higher transmission, and a special unique structure adopting double bunch was designed in the initial two cells. We are using PERMTEQ and PMLOC as simulation soft to calculate orbit computation, and using MICROWAVE STADIO to simulate electromagnetic field distribution.

がん治療用C⁶⁺イオン複合加速構造単空洞線形加速器の 三次元電磁場シミュレーション

1. はじめに

本研究はがん治療用C⁶⁺イオン加速器の新しい構造として、複合加速構造型単空洞 (Hybrid Single Cavity: HSC) 線形加速器の開発研究を目的としている。これはRFQ型およびIHドリフトチューブ型 (DT) の加速電極構造を一台の空洞内に組み込んだ加速器である。

近年、粒子線を用いたがん治療が盛んでおり、世界中に注目を浴びている。しかし、現在運行中及び企画中の粒子線がん治療施設はいずれにも大きいである事が現状である。日本代表的なHIMACでは総合建設費用が444億円で、建設面積が2960m²となっている。こういった施設が現行な病院施設への導入は非常に難しいである。

そこでは、本研究となったHSC線形加速器では、本来の各加速器それぞれに必要なであった高周波電源等の周辺機器が、これらの加速電極を一つの空洞内に収める為、加速器自体の小型化だけでなく周辺機器の統合による省スペース化が可能となり、スペースに制限のある領域に適した加速器となると考えられる。

更に、本HSC線形加速器の加速構造は低・中エネルギー領域において加速効率格段高いIH加速構造を採用したため、省パワーで済むことも期待できる。

2. デザインとシミュレーション

HSC単空洞複合加速構造線形加速器では、一つの空洞にRFQとDT二つの加速構造が入っているため、

空洞の構造が複雑となる。それに伴い、空洞のデザインと電場分布の調節も難しくなり、高速コンピューターを使って加速空洞の三次元電磁場分布をシミュレーション必要がある。

HSC線形加速器のデザインでは、RFQセクションがPARMTEQ、DTセクションが粒子軌道計算ソフトPMLOCを用いた。

2.1-1 RFQ セクションデザイン

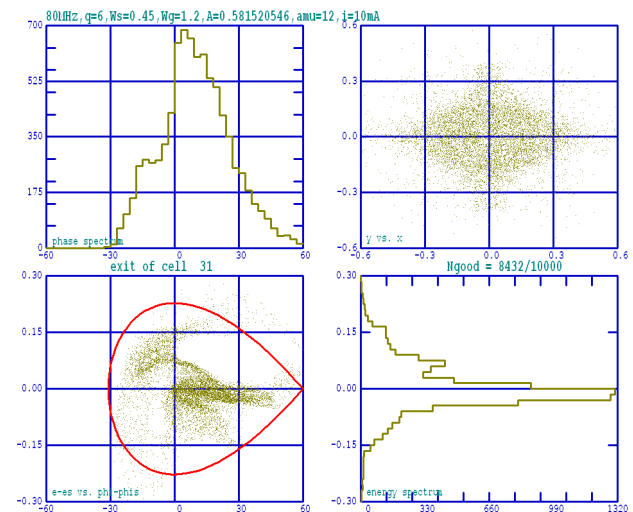


Fig.1: RFQ最終セルのエネルギー様子

RFQ加速構造は低・中エネルギー領域において加速効率が良い他、加速と共に収束効果も持っている。本研究では、モジュレーション付きの4rod型の電極を採用した。

PARMTEQを用いたRFQ設計では、Fig. 1 に示したようにC⁶⁺イオンを25KeV/uの入射と220KeV/uの出射した場合は、31セルで透過率は84.3%となった。

2.1-2 DT & BMS (beam matching section) セクションデザイン

IH-DT型加速構造は他の線形加速構造と比べると、投入したパワーが同じの場合はIH-DT型の方加速電圧は2~5倍高くなり、加速効率を示すシャンとインピーダンスが格段高いのは特徴である。

本研究では、軌道計算ソフトPMLOCを用いてDT加速電極の設計を行った。PMLOC 軌道計算コードは thin lens 近似の原理により本研究室で開発され、実行してきたソフトである。このPMLOC軌道計算ソフトを通して、繰り返し位相パターンごとのドリフトチューブテーブルを作成し、バンチ位相幅を求め、そのバンチ内粒子の横方向アクセプタンス量を求めた。本研究では、加速方向と横方向が共にアクセプタンスの大きい最適位相 $\pm 30^{\circ}$ を選択した上に、最初2セルをダブルバンチャー(double buncher)構造を採用した。位相変化の様子をFig.2に示す。

BMSはRFQ最終セルの9倍長と定め、RFQとDTの両側に発散電場を立ちさせない為、BMSのステムを水平に伸ばすように設計した。DT側の収束はAPF法を採用した。

2.1-3 設計パラメータ

軌道計算ソフトPARMTEQとPMLOCの計算した元に、本HSC線形加速器の空洞設計を行った。HSC加速器では、全長が2257.04mmとなり、25KeV/u入射したC⁶⁺イオンを2MeV/uまで加速できる。BMSは全長367mmとなり、入射と出射のエネルギーが一定のRFQ出射エネルギー220KeV/uに設計した。DT側がAPF法を採用し、ギャップ通過する粒子は-90, -30, 30, 30のフェーズと設計した。

設計したHSC線形加速器の様子と具体的な設計パラメータはFig.3 と Table.1 に示す。

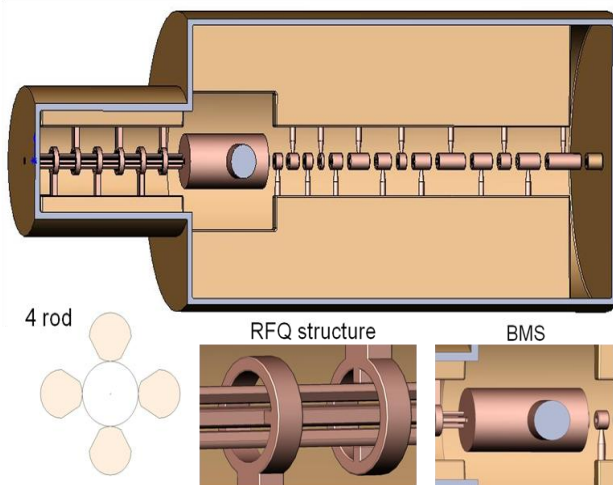


Fig.3: HSC線形加速器の様子

Main Parameter			
Coordinate	RFQ	BMS	DT
Operation Frequency	80MHz		
Particle	C ⁶⁺		
Radius	9mm		
Length of Electrode(mm)	586.77	367	1303.27
Diameter (mm)	400	900	900
Cell Numbers	31	9	15
			-90,-30,30,30
W _{in} (KeV)	25	220	220
W _{out} (KeV)	220	220	2000
Beam Current	10mA		
Power	<100KW		

Table.1: HSC線形加速器の設計パラメータ

2.2 シミュレーション

IH型線形加速器の場合は特に加速ギャップに発生する電場形状に非対称成分が発生するため、三次元電磁場解析ソフトMicrowave Studioを用いてこの非対称成分を評価する方法を考えた。

空洞電磁場シミュレーションソフトはPARMTEQ、とPMLOCの粒子軌道計算の元で、HSC加速器の空洞設計を行っていった。この設計の元で、SolidWorksを使って加速器の構造部品それぞれをデザインし、最後に各部品をアセンブリした。このアセンブリした加速器の入射エネルギー、周波数などの入射条件を設定した上で、Microwave Studioを使って加速器の軸方向に沿う電場分布をシミュレーションを行った。加速軸方向の電場分布のシミュレーション例をFig.4に示している。

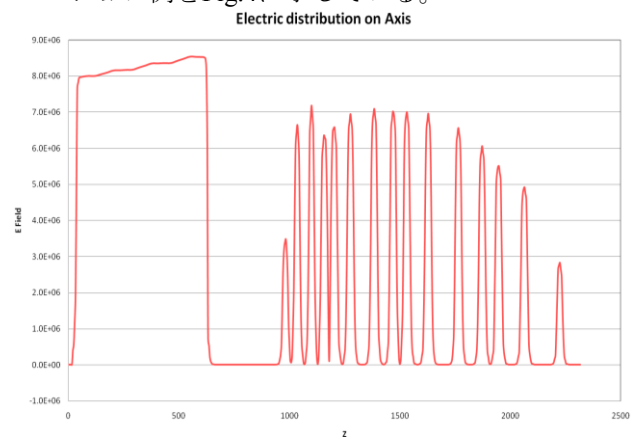


Fig.4: シミュレーションによる軸上の電場分布

3. 考察

本研究のデザインとシミュレーションは全てソフトに基づいて開発を行ったため、シミュレーションソフトについての考察が必要である。この考察については、二つの設計例(一つ実機設計含む)を挙げる。

3.1 Microwave Studioの設計例1: 9セルAPF-IH線形加

速器の設計とシミュレーション

昨年度、我々は軌道計算ソフトPARMILA、とPMLOC、三次元シミュレーションソフトMicrowave Studio を用いて9セルのAPF収束法採用したIH型線形加速器を設計と開発を行った。その線形加速器はデザインの元に、NC機械で世界初めての一体構造の加速構造加速器を製作した。その特性実験また、He+イオンの加速実験結果では、空胴の電場分布、周波数、パワーまたQ値ともほぼシミュレーション値と一致した。Fig.5には空胴電場分布のシミュレーション値と測定値がほぼ同じであることを示している。

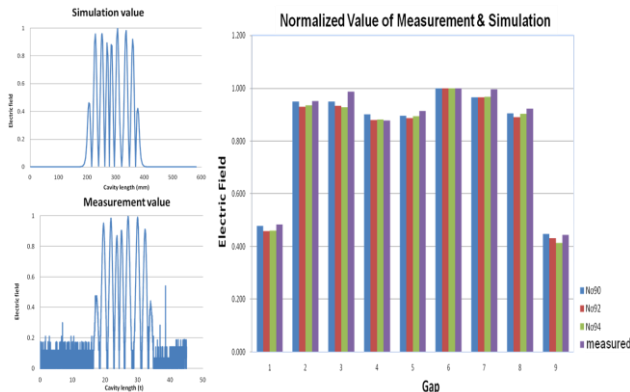


Fig.5: 9セルAPF-IH線形加速器の空胴電場分布とシミュレーション値と測定値

このAPF-IH線形加速器の設計については去年の広島加速器学会にも発表した。その設計と実験結果からみると、Microwave Studioは設計した加速器の周波数や電場分布などをそのまま再現でき、かなりの信頼できる三次元電磁場解析ソフトだと思われる。

3.2 Microwave Studioの設計例2：HSCコールドモデルの設計とシミュレーション

然し、HSC線形加速器の加速構造があまりに複雑すぎて、念のために、研究室に既存のIH型線形加速器パーツを利用して、HSCコールドモデルを製作し、特性実験を行った。Microwave Studioシミュレーションによるコールドモデルの空胴電場分布と周波数は特性実験の結果とほぼ一致した。Fig.6には電場分布のシミュレーション値と測定値を示す。

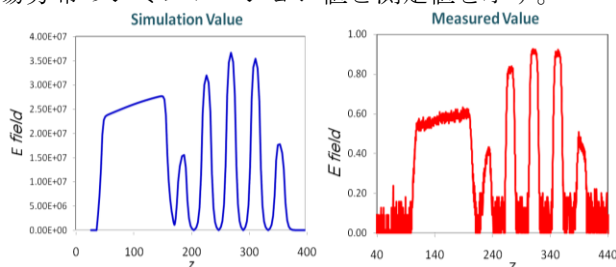


Fig.6: HSCコールドモデルの空胴電場分布とシミュレーション値と測定値

以上2つのMicrowave Studioを用いた設計例のシ

ミュレーションとモデルの特性実験結果からみると、Microwave Studioによる三次元電磁場シミュレーションは実機に非常に近いである事が分かる。

4. 将来計画

本研究では、100kW以内の加速電パワーを用いて、複合加速構造で25KeV/uで入射したC⁶⁺イオンを2MeV/uまでの加速設計と計画した。然し、シミュレーションによると、磁石内臓したBMS方法では製作が難しいであるほか、9セルの長さとなり、HSC加速器全体の長さも長くなり、パワー効率にはふさわしくない設計である。このため、HSC線形加速器の加速構造を再設計しなければならない。一つの案としては、BMSの磁石内臓式収束方法の変わりに自己収束できるDTF (drift tube finger) 収束方式を採用できる。DTF 収束方式の設計は既に完了し、次にはMicrowave Studioを用いて新しいモデルのシミュレーションをする予定である。DTF 収束方式の構造様子はFig.7に示す。

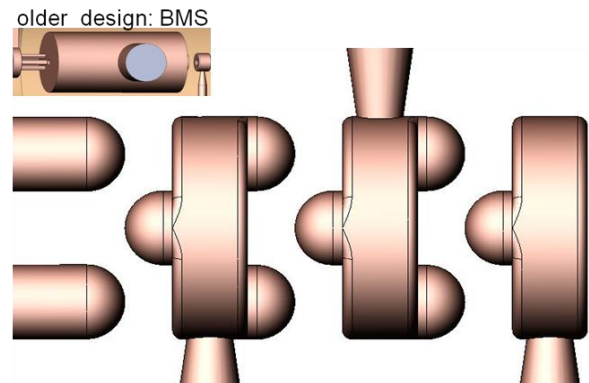


Fig.7: DTF収束構造の様子

こういったDTF収束設計を利用すると、HSC線形加速器全長が短くなり、パワー効率が上がると共に、省スペース効果でもある。また、DTF収束構造が粒子の加速もあると予想できるので、更にパワー効率を上げる事ができる。

将来計画としては、上述のDTF収束方式を用いたHSC線形加速器を再設計し、設計したHSC線形加速器をMicrowave Studioによる空胴の三次元シミュレーションを行う予定である。その後、最適なDTF方式HSC線形加速器モデルが来年度に実機化し、レーザーイオン源を用いた直接プラズマ入射法でC⁶⁺イオンの加速実験を行う予定である。

参考文献

[1] S. Yamada, T. Hattori, T. Fujino, T. Fukushima, T. Murakami, E. Tojyo, and K. Yoshida, "IH LINAC DEVELOPMENT AT INS", INS-NUMA-57 (1985)
 [2] L. LU, et al, "C⁶⁺ Ion Hybrid Single Cavity Linac with Direct Plasma Injection Scheme for Cancer Therapy", G30, 2009 Spring Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Tokyo, Mar. 23-25, 2009