

## ドリフトチューブ線形加速器の省電力化に関する要素技術開発 (II)

### COMPONENT TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR ELECTRIC POWER SAVING WITH A DRIFT-TUBE LINAC (II)

山本和男<sup>#</sup>, 川崎定博, 安藤保人

Kazuo Yamamoto<sup>#</sup>, Sadahiro Kawasaki, Yasuto Ando  
Mitsubishi Electric Corporation

#### Abstract

A drift-tube linac has been employed for a low energy region of a hadron accelerator, and the application diverges into many branches from investigation to an industrial use. One of the biggest problems of this system is enlargement of a power supply system for it needs several hundred kW at a peak to operate. The power consumption of a drift-tube linac is estimated as sum of a wall loss, which is proportional to a cavity surface resistance including contact regions, and a beam loading. Therefore we tried to reduce the contact regions between electrodes or tuners and the cavity. We manufactured a prototype drift-tube cavity, consisting 24 electrodes, and applied a tuner-less tuning methods. Then the Q-factor, which is inversely related with wall loss, was measured. The prototype cavity which has tuned an electric field distribution and a resonant frequency shows over 90 % compared to a calculated Q-factor.

In this paper, we report the tuner-less tuning methods and the test results of the Q-factor.

#### 1. はじめに

ドリフトチューブ線形加速器 (Drift Tube Linear accelerator; DTL) は、低エネルギー領域における加速器として、陽子線のみならず炭素線などの重粒子線を加速する装置として、研究用途から産業用途まで幅広く採用されている。

DTL は共振モードによって、たとえば Alvarez 型に代表されるビーム加速軸方向 (以下、Z 軸方向) に電場を発生させる TM モード共振空洞を用いたものと、たとえば Interdigital-H (IH) 型に代表される Z 軸方向に磁場を発生させる TE モード共振器を用いたものに大別される。昨今では加速効率がよく小型化が可能な上記 IH 型にビーム収束用電磁石を用いない自己収束 (Alternating Phase Focusing; APF) 法を取り入れた APF-IH 型 DTL が開発され、医療用シンクロトロン向け入射器として採用されている<sup>[1, 2]</sup>。しかし、産業用途として更に多岐にわたる普及のためには、現状数百 kW を有している IH 型 DTL の消費電力低減が課題である。

上記消費電力は、主に DTL を構成する共振空洞と共振空洞に内蔵される数十本からなる加速電極と少なくとも 2 台以上からなる共振空洞外付けチューナの、表面抵抗と各々間の接触抵抗に起因する。そこで本研究では、①上記表面抵抗低減として、低温状態で物質の抵抗値が減少する物理現象を適用した極低温 DTL の要素技術検討<sup>[3]</sup>と、②上記接触抵抗低減として、IH 型 DTL を構成する機器点数を削減する要素技術検討を行い、消費電力を低減することを目的とする。

IH 型 DTL は、共振周波数と電圧分布をチューニングするために、少なくとも 2 台以上からなる共振空洞外付けチューナを有する必要がある<sup>[4]</sup>、接触抵抗発生要因の一つである。そこで、上記外付けチューナに代わり、共振空洞内壁面寸法を調整加工する新しいチューニング方式を開発し、消費電力に反比例する Q 値を理想値と比較し 90 %以上 (従来最高水準は 80 %<sup>[4]</sup>) にすることを目標とする。

本発表では、上記調整加工によるチューニング手法の原理について述べ、原理検証機による共振周波数と電圧分布のチューニング結果と、測定された Q 値について報告する。

#### 2. 原理

共振周波数と電圧分布測定結果に基づき、共振空洞内壁面の調整加工によるチューニング手法を取り入れるためには、IH 型 DTL の共振空洞は、組立と解体が容易に出来る必要がある。そのため、図 1 に示す通り、加速電極を搭載したセンタープレートを、1 対の半円共振空洞シェルで挟み込む構造を採用した。

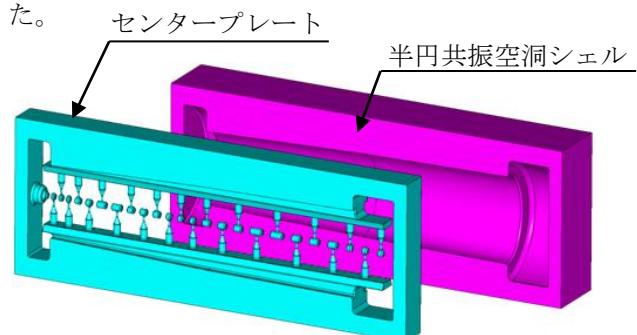


Figure 1: Schematic drawing of the Cavity.

<sup>#</sup> Yamamoto.Kazuo@bc.MitsubishiElectric.co.jp

センタープレートは、一枚のブロックから加速電極、加速電極を支持するステム、ステムを配列するリッジ以外を切り出して、上記らが残るように製作する。つぎに、半円共振空洞シェルを1個のブロックから削りだしにて製作する。センタープレートと半円共振空洞シェルは、ピンにより位置決めされた後、RF コンタクト、O リングを介してねじ止めされる。

共振空洞が形成された後、摂動法等を用いて加速電極間に発生する電界分布と共振周波数を測定する。そして、加速電極間に発生する電界分布を積分して、電圧を算出し、各加速電極間にて得られる電圧分布と、共振空洞の共振周波数を設計値と比較する。

共振周波数と電圧分布は、おもに加速電極同士による静電容量  $C$  と、共振空洞内のインダクタンス  $L$  により決定される。共振周波数  $F$  に関する関係式を、(1)式に示す。

$$F = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

インダクタンス  $L$  は、コイルに電流を流した電流により発生するコイルに鎖交する磁束と電流に比例し、その比例定数を自己インダクタンスと呼ぶが、その関係式が共振空洞にも適用できる。つまり、磁束が直交する面積  $S$  (共振空洞の断面積に相当する) と、磁束密度  $B$ 、共振空洞の内壁面に流れる電流  $I$  の関係は、(2)式の関係となる。

$$L = BS/I \quad (2)$$

共振空洞の内部には加速電極等の構造物があり、正確に(2)式の関係式を求めることは困難であるが、基本的な考え方に違いはない。つまり、共振空洞の内径を大きくすれば上記面積  $S$  は大きくなり、(2)式より  $L$  も大きくなる。その結果、(1)式より共振空洞の共振周波数  $F$  は小さくなる。

次に、加速電極間に発生する電界強度の関係式を、(3)式に示す。

$$\int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

ここに、 $B$  は共振空洞内の磁束密度であり、(3)式の  $B$  の上部に付したドットは時間微分を表す。 $S$  は共振空洞の断面積である。そして、上記(3)式の左辺は、加速電極と他の加速電極との間に発生する電圧となり、右辺はその領域での共振空洞の断面積  $S$  内の磁場の時間変化である。

したがって、共振空洞の内径を大きくすると(3)式の右辺が大きくなり、(3)式の左辺、つまり加速電極と他の加速電極との間に発生する電圧は増加する。

ある加速電極と他の加速電極との間に発生する電圧を増加させる場合、(3)式より加速電極と他の加速電極との間の  $Z$  軸方向の位置である  $z$  位置における

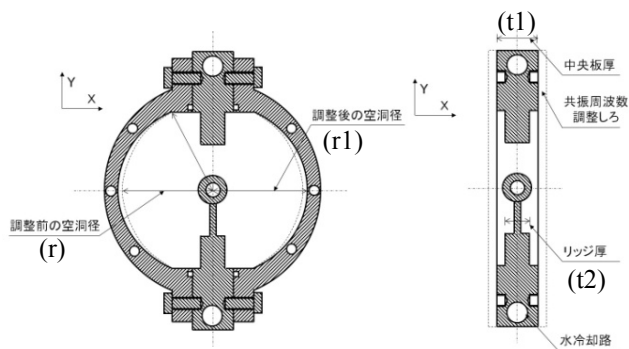
半円共振空洞シェルの内径を拡大する。そのさい、 $Y$  軸方向の半円共振空洞シェルはセンタープレートとの係合構造があるため、 $Y$  軸方向の形状は加工せずに、 $X$  軸方向の形状を加工する。共振空洞に発生する電界強度は、たとえば、入射側の電界強度を増加させるために入射側の半円共振空洞シェルの内径を上記の方法で  $X$  軸方向のみ拡大すると、出射側の電界強度は逆に低下する。そのとき、共振周波数  $F$  は(1)式より入射側の半円共振空洞シェルの内径を拡大したことで低下する。したがって、設計段階において設計共振周波数より高めになるように半円共振空洞シェルの内壁形状を決定し、実測値にあわせて  $X$  軸方向のみ拡大するように半円共振空洞シェルの内壁を楕円形に削っていく。

図 2a に、半円共振空洞シェルの内壁を楕円形に削っていく前後の共振空洞を示す。点線で示した半円共振空洞シェルの内壁は、本電圧分布をチューニングする前の半円共振空洞シェルの内壁である。実線で示した半円共振空洞シェルは、調整加工後のものである。加工前における半円共振空洞シェルにおいて、センタープレートとの係合構造がある接合部以外の胴部は、ビーム加速中心軸から半円共振空洞シェルの内壁までの寸法が  $r$  である。調整加工後における半円共振空洞シェルの胴部と接合部との境界では、ビーム加速中心軸から半円共振空洞シェルの内壁までの寸法が  $r$  であるが、 $X$  軸方向ではビーム加速中心軸から半円共振空洞シェルの内壁までの寸法が  $r$  よりも長い  $r_1$  である。すなわち、調整加工後における半円共振空洞シェルの胴部の形状は、ビーム加速中心軸から内壁までの寸法が  $r$  から  $r_1$  に変化し、また  $r$  に戻るような楕円形状となる。

まず、電圧分布が設計値と一致するように半円共振空洞シェルの内径を、NCマシン等を用いて  $X$  軸方向のみを拡大するように、楕円形に加工する。

つぎに、共振周波数を設計値にあわす。半円共振空洞シェルは、設計値に対する加工しろのため意図的に内径が小さく製作されており、電圧分布を達成するために上記のように加工した。上記の加工によりインダクタンス  $L$  が変化し、共振周波数も変化する。仮に、それでも共振周波数が高い場合は、さらに上記の半円共振空洞シェルの加工する方向で、電圧分布が設計値と変化しないように削り続ければよい。一方、電圧分布を設計値にあわせた時点で共振周波数が設計値に対し低い場合、センタープレートの板厚  $t_1$  ( $X$  軸方向のセンタープレートの幅) を加工する。共振周波数を調整するため、センタープレートの板厚  $t_1$  とリッジの板厚  $t_2$  は同一ではなく、センタープレートの板厚  $t_1$  のほうがリッジの板厚  $t_2$  よりも大きくしておくことが好ましい。また、アルミや鉄、ステンレスで加工された半円共振空洞シェルの内面には、銅めっきを施工するため、銅めっきの厚さによる共振周波数の変化分考慮しておく必要

がある。センタープレートには、ねじを取付けるねじ穴が設けられる。図 2b において、破線で示した長方形は、センタープレートに調整加工前の原板である。



(a) Field distribution tuning. (b) Frequency tuning.

Figure 2: Explanatory drawings of the tuning methods.

### 3. 実証

共振周波数と電圧分布測定結果に基づき、共振空洞内壁面の調整加工によるチューニング手法を実証するため、図 1 および図 2 構成の IH 型 DTL として、電極数 24 本からなる全長約 1.8 m の原理検証機を試作した。図 3 に原理検証機全体写真を、図 4 にセンタープレート写真を示す。

3次元電磁界解析ソフト Micro-Wave Studio<sup>[5]</sup>を用いた固有値計算により、共振周波数は 200 MHz、理想 Q 値は 15500 である。

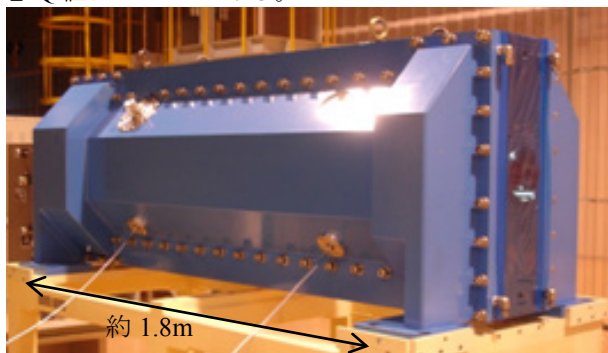


Figure 3: General view of the prototype cavity.

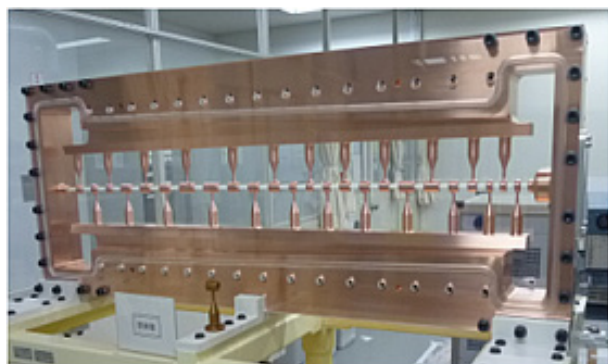


Figure 4: Photograph of the Center Plate.

図 5 に製作直後および調整加工後の電圧分布を設計電圧との差異 (%) にて示す。製作直後は最大 15 %程あった差異が、調整加工により  $\pm 4\%$  以下にチューニング出来たことを示している。

また、チューニング後の共振周波数は 199.99 MHz (真空引き後: 200.06 MHz)、測定 Q 値は 15100 と理想 Q 値と比較し 97 %であり、90 %以上の目標を達成した。

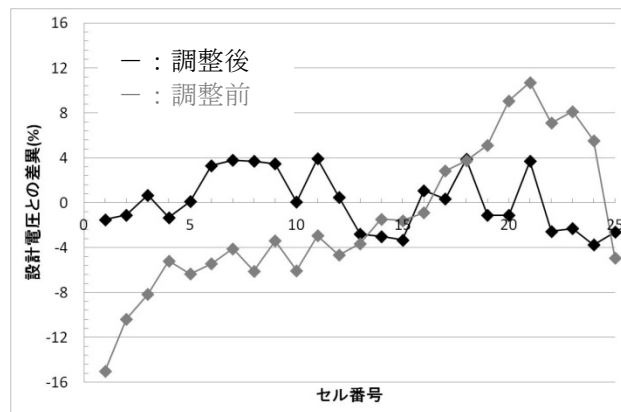


Figure 5: Measurement results of the field distribution.

### 5. まとめ

IH 型 DTL の省電力化を目的とし、理論値との比較 Q 値を 90%以上に改善することを目標とし、共振空洞内の接触抵抗を削減する手法を検討した。従来使用していた共振空洞外付けチューナを用いず、共振空洞内壁面を調整加工する手法を考案した。原理検証機を用いた共振周波数と電圧分布のチューニングの結果、電圧分布は設計値と比較し  $\pm 4\%$  以下、共振周波数は設計値に対し  $\pm 0.05$  MHz 以下、そして Q 値は Micro-Wave Studio にて算出される理論値と比較し 90 %以上を達成した。

### 参考文献

- [1] Y. Iwata, et. al., "Performance of a compact injector for a heavy-ion medical accelerators" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 1007-1021.
- [2] K. Yamamoto, et. al., "Experimental verification of an APF linac for a proton therapy facility" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 269 (2011) 2875-2878.
- [3] K. Yamamoto, et. al., "Component technology development for electric power saving with a drift-tube linac" Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SAP058, August 2-6, 2013, Nagoya, Japan
- [4] Y. Iwata, et. al., "Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 569 (2006) 685-696.
- [5] CST MW-Studio, CST, GmbH, Darmstadt, Germany: <http://www.cst.de>.