

## Development of Interdigital-H mode Linac for Laser-Plasma based Proton Accelerator

Y.Mochiduki<sup>A)</sup>, M.Kuwabara<sup>B)</sup>, H.Ito<sup>A)</sup>, N.Yugami<sup>A)</sup>, Y.Nishida<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Utsunomiya University

7-4-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi, 321-8585<sup>B)</sup> Hitachi Kokusai Electric Inc

3-14-20 Higashi-Nakano H, Nakano-ku, Tokyo, 164-8511

### Abstract

We have proposed a compact proton accelerator which employs a transverse electric field of a laser wakefield and  $V_p \times B$  acceleration mechanism.

For proof-of principle experiments of a new compact proton accelerator, the injector including the proton source is needed. We have developed a proton source with energy 30keV. In order to accelerate protons extracted from the proton source up to 1MeV, we have been designing IH (Interdigital-H) linear accelerator as the injector to the final stage of the accelerator using lasers and plasmas.

We redesigned and made the accelerator cavity after measuring the characteristics of the prototype made of a brass. In this article, we report the characteristics of accelerator cavity and our future plan.

## プラズマ利用陽子加速器用IH型線形陽子加速器の開発

### 1. はじめに

プラズマとレーザーを用いた新方式の荷電粒子加速器の研究が盛んに行われている。プラズマを利用すると加速勾配を数千倍大きくできるため、高エネルギー粒子加速器を小型化できる。

本研究では、電子加速のみではなく陽子やイオン等の加速にも適用できる  $V_p \times B$  型加速方式とレーザー励起航跡場の横電場を利用した小型陽子加速器の研究を行う<sup>[1][2]</sup>。今後の研究を行うにあたり1 MeV程度の陽子ビーム源が必要となるので、前段加速器を含めた陽子源の開発を行っている。陽子加速器の構想図を図1に示す。

前段加速器として低エネルギー領域でのイオン加速に対して優れた電力効率・加速勾配を有するため小型化に適したIH型陽子加速器を採用し、設計・製作を行ってきた。

本発表では製作中のIH型線形陽子加速器の現状と今後の計画を報告する。

### 2. 設計、計算

本研究の主な設計パラメーターを表1に示す。

加速器内部をビームが通過するとき、高周波電場によりTransverse方向に次式のような力が働くことが知られている。

$$F_r = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda} \quad (1)$$

一般にビームはLongitudinal方向の安定性が重視されるので、上式の  $\phi$  は負の位相になりTransverse方向には発散力が働く。このためドリフトチューブに4重極磁石を組み込むなどによる収束法が行われている。本研究では設計段階においてコスト及び技術的な問題があるため、加速位相にTransverse方向の収束・発散が起こらない位相 $0^\circ$ を選択した。

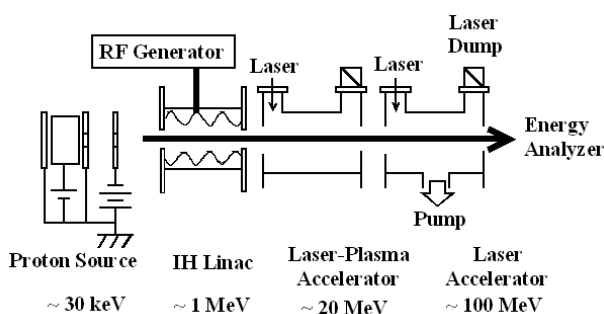


図1 陽子加速器構想図

表1 設計パラメーター

Charge-to-mass ratio (q/A)	H <sup>+</sup> , 1
Input Energy (keV/u)	30
Output Energy (MeV/u)	1
RF Frequency (MHz)	200
RF Power (kW <sub>p</sub> )	60
Synchronous Phase	0°
Number of Cell	16

IH型線形加速器はドリフトチューブの中心から、次のドリフトチューブの中心までを1セルとし、セル長を $L = \lambda/2$  ( $\lambda = v/c$ )とする。これは電源の周波数の半周期で陽子が進む距離であり、粒子が効率よく加速されるための条件である。半研究で使用する電源の周波数が200 MHzと高いため入射側のセルに対してセル長を半周期とするとセル長が短くなってしまい、電場がドリフトチューブの中まで浸透してしまうので、セル長を3/2周期として設計を行った。

設計はMAFIAでドリフトチューブの外径、キャビティの外径を変化させ共振周波数を調整した後、リッジチューナーにより電場分布を平坦になるよう調整した。リッジチューナー $L_{r1} \cdot L_{r2}$ を図2のようにし、 $L_{r1} \cdot L_{r2}$ を変化させたところ、セル長の定義を変えているセルで差が出てしまうが、 $L_{r1} = 80$  mm、 $L_{r2} = 75$  mmで最もフラットな電場分布を得た。結果をモデル器の電場分布と合わせ、図3に示す。

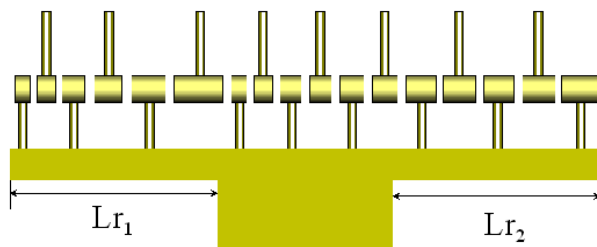


図2 リッジチューナー

### 3. モデル機試験

#### 3.1 電場分布測定

実機製作を行う前に1/1スケールのモデル器を真鍮で製作し、加速空洞の特性を調べた。電場分布の測定系を図4に、結果を図3に示す。

電場分布はビーズプル法によりビーズを1mm間隔で動かし測定を行った。シミュレーションでは $L_{r1} = 80$  mm、 $L_{r2} = 75$  mmの時に最もフラットな電場分布が得られたが、実験では $L_{r1} = 80$  mm、 $L_{r2} = 70$  mm

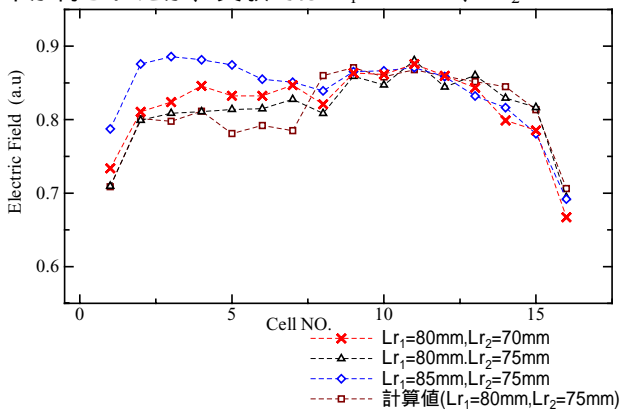


図3 電場分布

の時に最もフラットな電場分布となった。この時の共振周波数は207.72 MHzであり、MAFIAの計算結果199.98 MHzに比べ3.8%大きい値となった。

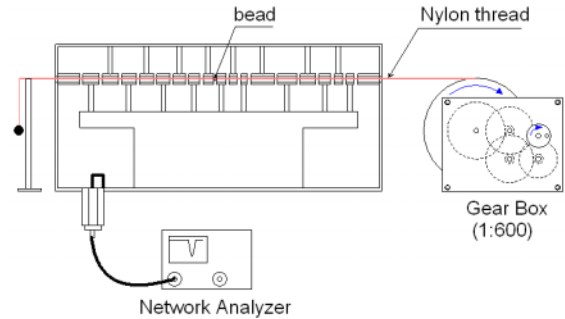


図4 電場分布測定系

#### 3.2 Q値測定

Q値の測定には測定系が単純なため反射法を用いた。測定系を図5に示す。

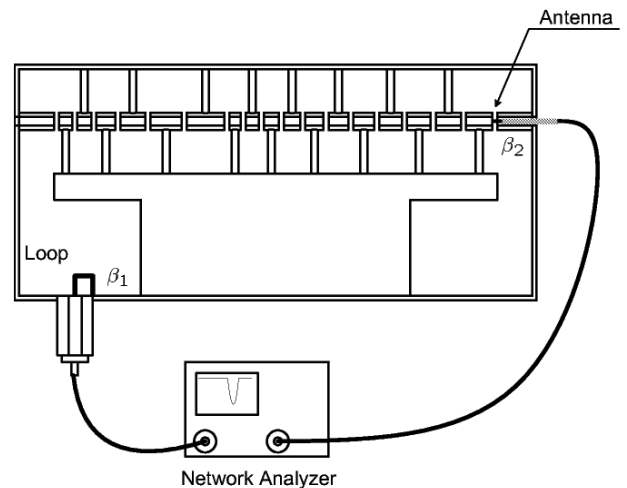


図5 Q値測定系

ループカップラから発振した高周波を、ビームホールから挿入したアンテナによりピックアップする。図中の $\beta_1$ 、 $\beta_2$ はそれぞれループアンテナの結合係数である。この結合係数と透過波の信号強度 $T$ には以下の関係がある。

$$T[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{1}{4} \frac{(\beta_1 + \beta_2 + 1)}{\beta_1 \beta_2} \quad (2)$$

また負荷 $Q$ の $Q_L$ には次の関係がある。

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (3)$$

$Q_0$ は無負荷の $Q$ である。したがって $\beta_1 = \beta_2 = 0$ のとき $Q_L = Q_0$ となり $Q_0$ を測定することが出来る。しかし結合係数が0、カップリングが無い状態での測定は不可能であるため、 $\beta$ を変化させ $Q_L$ を測定し $\beta = 0$ を外挿して $Q_0$ を求めることにした。(2)式において $\beta_1 = \beta_2 = 0$ とすれば

$$T = 10 \log_{10} \frac{1}{4} \frac{(2\beta + 1)^2}{\beta^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{2(10^{T/20} - 1)} \quad (5)$$

となり、 $Q_0$ が算出できる。ループとアンテナのカップリングを等しい状態で $Q_L$ を測定し、カップリングを徐々に小さくした。測定結果を図6に示す。図の実線と右軸との交点が $Q_0$ となり、このモデル器では $Q_0 = 2370$ となった。モデル器は真鍮 (LACS:20%) であるので測定結果を無酸素銅 (LACS:102%) に変換すると $Q_0 = 5350$ となる。これはシミュレーションの値11000の約50%であり一般に加速空洞で計算通りの $Q$ を得られることは無く60%程度得られれば良いので妥当な結果であると言える。

モデル器は真鍮製なので共振空洞の指標に空洞の形状にのみ依存する $R/Q$ を用いる。 $R$ はシャントインピーダンス、ここでの $Q$ は無負荷の $Q$ である。MAFIAでは30 k /mという結果が得られている。電場分布の測定結果からモデル器の $R/Q$ は35.80 k /mとなった。 $Q$ 値が計算値の約半分なのでこの値は小さい、原因としてビーズプル法で使用したビーズが大きく損傷体になっていないと考えられる。

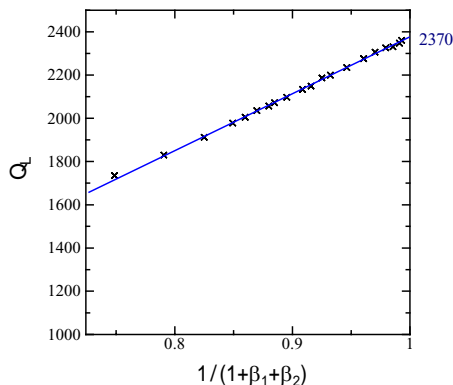


図6 Q値測定結果

### 3.3 周波数変更

電源の周波数が200 MHzなので、加速空洞の共振周波数を一致させなければならない。共振周波数はLCの平方根に反比例するので、共振周波数を変化させるにはキャビティの内径を変えインダクタンスを変化させる、ドリフトチューブの外径、または長さを変え、キャパシタンスを変化させる等の方法がある<sup>[3][4]</sup>。

シミュレーションでキャビティの内径を230 mmから1mm大きくすると共振周波数は0.5 MHz減少し、ドリフトチューブの外径を20 mmから1 mm大きくすると3 MHz減少するとの結果が得られている。

ドリフトチューブを変更するとコストが高くなるためキャビティの外径を230 mmから250 mmに変更した。共振周波数は207.52 MHzから196.99 MHzに減少し、シミュレーションの結果とほぼ一致した。周波数微調整用にリッジとのキャパシタンスを変

化させるCチューナー (S = 90 mm) を製作し、測定の結果より周波数の可変範囲は約0.5%となった。共振周波数200 MHzに対し1 MHz程度変えることが出来る。またCチューナーの混入による電場分布への影響は見られなかった。

## 4. 実機測定結果

実機はモデル器で得られたデータをもとにし共振周波数を200 MHzに一致させるため、キャビティの内径を250 mm、材質を無酸素銅で他はモデル器と同じ形状で製作した。

実機の共振周波数は192.18 MHzとなりモデル器の共振周波数に比べ5 MHz低くなった。

電場分布をモデル器と同様の測定系 (図4) で測定した。結果を図7に示す。モデル器の電場分布と若干の誤差は見られるがほぼ一致し、フラットな電場分布が得られた。

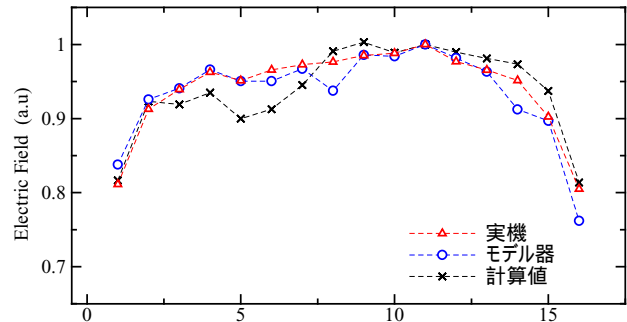


図7 実機電場分布

## 5. まとめ

電場分布に関しては良い結果が得られることが出来たが、共振周波数はモデル器と2.5%のずれが生じた。電場分布を乱さず周波数を高くするためにキャビティの内径を15 mm程度小さくする等の変更をしなければならない。

今後は周波数を合わせ、 $Q$ 値やシャントインピーダンス測定後、イオン源と接続し加速試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] H. Ito, M. Bakhtiari, M. Imai, N. Yugami and Y. Nishida, Proc. of SPIE, **3886**, 533 (1999).
- [2] M. Bakhtiari, H. Ito, M. Imai, N. Yugami and Y. Nishida, Jpn. J. Appl. Phys. **39** pp1097-L1100(2000).
- [3] Y. Arakaki, et al., "A CHANGE OF FREQUENCY OF IH-LINAC FOR RADIOACTIVE NUCLEAR BEAMS" Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference EPAC'02 June 3-7, 2002, Paris, France
- [4] S. Arai, et al., "IHリニアックの周波数変更のための改造と低電力試験" Proceedings of the 28<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan July 30- August 1, 2003, Tokai, Japan