

Study of a Double Gapped Buncher for Proton LINAC

Hideki Dewa, Masanori Ikegami, Makoto Inoue, Yoshihisa Iwashita,
Hiromi Okamoto, Shigeru Kakigi, Toshiyuki Shirai,
Akira Noda, and Hirokazu Fujita

Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokanoshou, Uji-shi, Kyoto-fu 611, Japan

ABSTRACT

A double gapped buncher for a beam matching section between RFQ linac and Alvarez linac was studied. The buncher is a 433MHz quarter wave length resonant cavity. Using approximated axially symmetric calculation, the optimization of the cavity was studied. The shunt impedance of the cavity was $2.2M\Omega$ per gap. The designed voltage of 90kV were generated in two gaps when the peak RF power of 3.6 kW was supplied.

陽子線形加速器用ダブルギャップバンチャーの研究

1.序

京都大学化学研究所7MeV陽子線形加速器は周波数が433MHzの2MeVの高周波四重極(RFQ)型リニアックと7MeVのアルパレ型ドリフトチューブリニアック(DTL)で構成されている。RFQとDTLの間隔は約58cmあり、ここに横方向の収束のための永久磁石を用いた四重極磁石レンズ(Permanent Magnetic Quadrupole lens: PMQ)と、バンチャーを入れることによりビームマッチングを行なう。

バンチャーがない場合DTL入口でのビームの位相拡がり $\pm 8.4^\circ$ になり、PARMILAによるシミュレーションではDTLで約20%のビームが位相安定領域から外れて加速されなくなる。バンチャーの高周波電場によりDTL入口での位相拡がりを狭くし全てのビームを加速できるようにすることがバンチャーを入れる目的である。バンチャーの設計においては、横方向のマッチングのためのPMQと両立できる小型のサイズであること、出力が7kW程度の高周波増幅器で必要な電圧を発生できることの2点を考慮した。以下バンチャーの設計方法、コールドモデル実験、バンチャーの製作実験について述べる。

2.ビームマッチングセクションの設計

RFQとDTLの間のビームマッチングセクションに配置するPMQの位置、PMQの磁場勾配の大きさ、バンチャーの位置、電圧の大きさを計算機コードTRACE3-Dで最適化した。図1に4個のPMQを用いた設計を示す。バンチャーの前後にPMQをそれぞれ2個ずつ置くデザインで、ビーム径がやや大きくなる欠点があるが、PMQの数が少なくて済むのでバンチャー外径を大きく取ることができる。

表1に各収束要素のスペックを示す。PARMILAによるシミュレーションではこの構成でRFQからのビーム電流20mAで100%のトランスミッションが得られている。

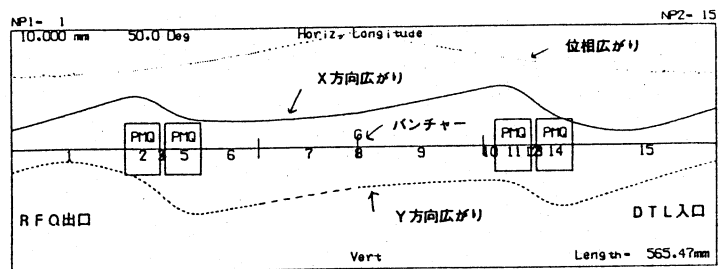


図1 TRACE 3-Dによるビーム軌道計算

表1 収束要素のパラメータ

PMQ	材質	Ne-Fe-B
	内径	11mm
	外径	28mm
	長さ	28.8mm
	磁場勾配	16.5~17.7kG/cm
バンチャー	ギャップ電圧	90×2 kV

3. バンチャーの設計方法

バンチャーの前後はPMQが入るので十分なスペースがない。またバンチャーのための高周波増幅器はできるだけ低出力のものにしたい。そこでできるだけ小型で高い電力効率を得られるような空洞ということでバンチャーの形式を $\lambda/4$ 共振器型のダブルギャップバンチャーとした。図2にバンチャーの断面図を示す。ギャップが2つあることで約2倍の有効ギャップ電圧が得られることが特徴である。

このようなバンチャーを設計する場合、通常計算機コードを使って電磁場を計算するが、このバ

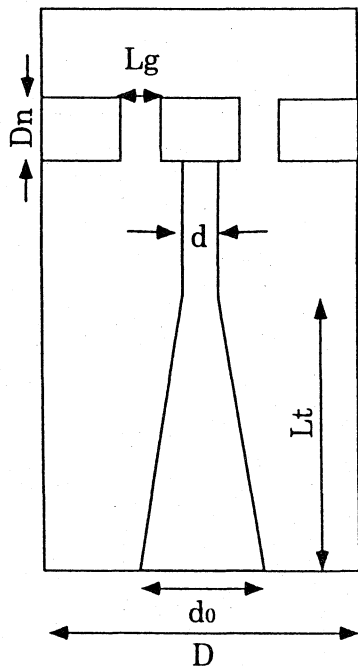


図2 バンチャーのデザインパラメータ

ンチャーは軸対称ではないので3次元計算を行なう必要がある。しかし中心導体長や外導体径などの多くのデザインパラメータを調べようとすると、膨大な計算時間が必要となる。そこでバンチャーの形を図3のようなギャップが1つで軸対称な形に変えて計算した。

このようにできる理由はダブルギャップバンチャーは近似的にキャパシタンスが2個並列に入ったLCR共振回路と見なすことができる。一方ギャップが1つの場合にはキャパシタンスが1個のLCR共振回路と見なすことができるので、2個のキャパシタンスの合成が1個のキャパシタンスと同じになるようにしておけば、等価回路となる。したがってギャップの長さを半分にしたギャップが1つの空洞の電磁場を計算すればよい。この形は軸対称なので計算機コードSUPERFISHを使って短時間で計算できる。計算で変化させるパラメータはD、d、Lt、do、Dn、Lg、および中心導体の長さである。これらのパラメータの値を変えて空洞の計算を行ない、電力効率が高いすなわちシャントインピーダンスZが大きくなる条件を求めた。

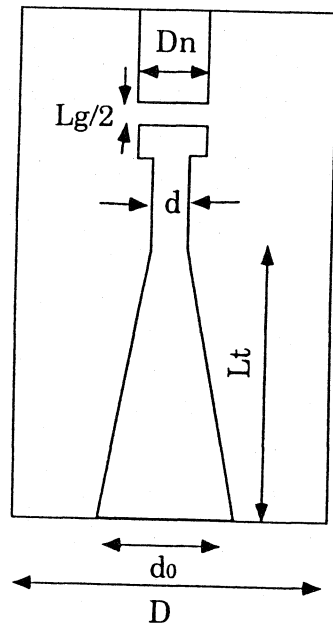


図3 軸対称な等価モデル

計算の結果、外導体径を大きく、中心導体径を小さく、ノーズの径を細長くすることでシャントインピーダンスを高くできることがわかった。また中心導体にテーパーを付けることでシャントインピーダンスは高くなり、その形状はテーパーの長さ底板での中心導体径の組み合わせで最適化できる。ギャップ間隔を長くした方がシャントインピーダンスは高いがトランジットタイムファクターTは小さくなるため、有効シャントインピーダンス ZT^2 が最大となる値を求めた。

4. バンチャーコールドモデル実験

バンチャーをつくる前に2種類のコールドモデルを製作した。一つは外導体径が $\phi 160$ のもの、もう一つが $\phi 99.2$ のものをつくった。それぞれのデザインパラメータを表2に示す。共振周波数とQ値をネットワークアナライザで測定した。またZ/Qをビーズプル測定法を用いて測定した。表3に結果を示す。 $\phi 160$ の空洞の共振周波数が計算値と大きくずれているのは工作の精度が悪く計算値よりもギャップ間隔が小さくなっているためである。 $\phi 99.2$ のものは中心導体の長さを計算値よりも2mmだけ短く調整することにより周波数を433MHzに合わせることができた。計算との長さの違いは2パーセント以下であり、これは周波数の計算では近似計算が有効であることを示している。

Q値については計算値の78%及び89%の値となった。Z/Qは $\phi 160$ では計算値の78%とややずれが大きい、 $\phi 99.2$ では計算値の1

03%とよく一致している。さらにシャントインピーダンスZは $\phi 160$ が2.7M Ω 、 $\phi 99.2$ が1.7M Ω であり、ビームをバンチさせるのに必要な電力はそれぞれ3.0kW、4.8kWと用意した高周波アンプの出力と比べて十分小さいことを確認した。

表3 空洞のRF特性

	周波数 [MHz]	Q値	Z/Q [Ω] *
$\phi 160$ 計算値	433.3	11000	355
$\phi 160$ 実験値	413.1	9800	276
$\phi 99.2$ 計算値	433.3	7400	284
$\phi 99.2$ 実験値	433.6	5800	293

*1ギャップ当りの値

5. 実機バンチャーの製作

コールドモデルの結果から外導体の直径が $\phi 100$ 程度でも十分な電圧が得られることがわかった。しかしサイズが小さいと中心導体の冷却やカップラーやチューナーの取り付けが難しいことから実際のバンチャーは外導体の内径を $\phi 142$ とやや大きくした。バンチャーの断面図を図4に示す。SUPERFISHによる計算で得られたQ値は9700であり、Z/Qは320 Ω であった。この構造ではチューナ以外では周波数を合わせられないので、最初に中心導体の長さを変えられる外筒を作っておき、共振周波数が433MHzになるように中心導体の長さを決めてから再加工をすることで周波数を合わせた。多数箇所の銀ろうづけ、半田づけは熱変形をおこしたり、固定用の治具を必要としたりするなど製作が困難なのでできるだけねじやボルトで接合できるように設計した。

中心導体と底板の間は中心導体にエッジを設けておき六角ナットで締めるようにしてRFコンタクトをとれるようにしており、またこの部分にOリングを入れることで真空もこの部分で切れるよ

表2 コールドモデル及び実機バンチャーのデザインパラメータ

	D	d	Lt	d0	Dn	Lg
$\phi 160$ (モデル)	160	14	94	60	20	5
$\phi 99.2$ (モデル)	99.2	12	88	40	20	5
$\phi 142$ (実機)	142	12	104.3*	40	20	5

*底板側直線部分19.3mmとテーパー部分85mmの合計 (単位mm)

うにしている。また中心導体の中心に $\phi 8$ の穴をくりぬき、しきり板を入れて水を往復させて冷却している。ノーズの部分もエッジを作っておき、ねじどめでRFコンタクトがとれるようにしている。 $\phi 28 \times 35$ の円柱型のチューナは30mm動かして共振周波数を2MHz程度変えられる設計としている。コンタクトフィンガーを半田づけしてある銅のリングを底板に冷しばめすることで、チューナと底板とのRFコンタクトをとっている。図にはないが、ループカップラーはカップリングを調節できるようにOリングのついた真空ポートから差し込んで回転できるようにしている。材質をりん青銅にして接触部分を先割にして曲げ、底板と接するようにしてRFコンタクトをとっている。また外導体の冷却のため外導体のまわりに3/8インチの銅管を半田付けしている。

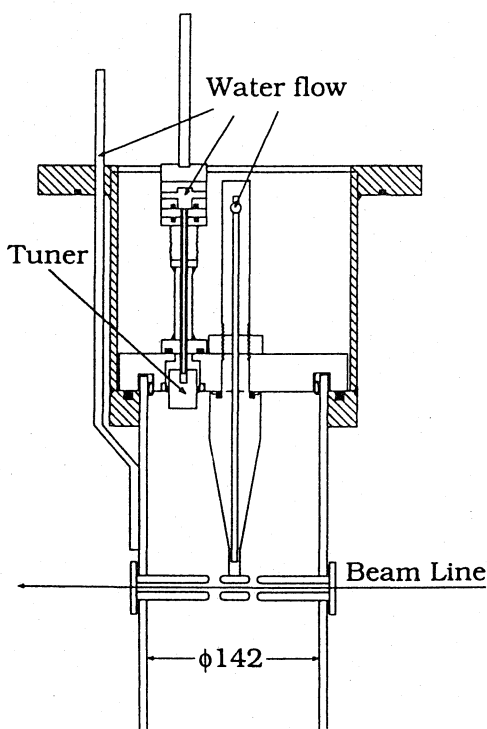


図4 バンチャーの断面図

6. バンチャーの特性評価

バンチャーのQ値、 Z/Q 、トランジットタイムファクター、共振周波数の調節範囲をローパワーで測定した。Q値は7400、 Z/Q は297 Ω 、トランジットタイムファクターは0.85、共振周波数は430.75から433.90MHzまで

およそ5kHzの精度でチューニングできた。 Z は2.2M Ω となり、3.7kWのパワーで90kVのギャップ電圧を得ることができる計算となる。

次に空洞にハイパワーを入れるテストをした。RFの増幅系を図5に示す。最終段のHenry Radio社製真空管増幅器3004-8938は3004の標準真空管Eimac社製8877を8938に変えた改造版でデューティーが低いところでは約7kWの出力がある。パワーを入れると空洞内でマルチバクタリング放電や火花放電が発生した。エージングの最初の段階では放電が起こるとパワーを下げてしばらくおいてからまたパワーを上げる方法をとっていたが、この方法ではエージングが進まずパワーがなかなか入らなかった。そこで放電がおきてもパワーをそのままにして放電が終るのを待つようにしたところエージングが進んだ。5時間のエージングで増幅器のフルパワーを入れることができた。

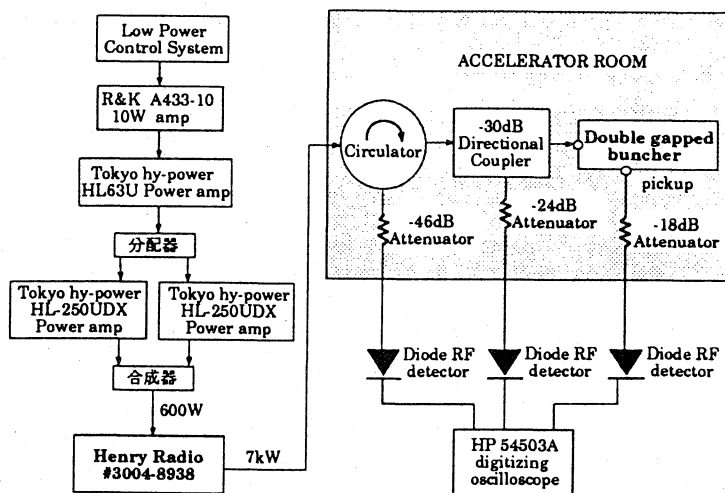


図5 RF増幅回路

パワーを入れる前の温度が30℃であったとき、アンプの最大出力、パルス周波数180pps、パルス幅120 μ sのパルス運転で約10℃の温度上昇があった。このときおよそ80kHz周波数が下がるが、チューナーを動かすことで周波数の調整を行うことができる。現時点ではチューナーのそばにあるモーターのスイッチをON、OFFすることで調整しているが、今後コントロール室から調整できるようにし、さらに自動制御を行

えるようにしていく。

さらにギャップで加速された電子の制動放射で発生したX線のエネルギーを測定し、これからギャップ電圧を評価した。X線のエネルギーは25 mmのガラス窓を通してゲルマニウムディテクタで測定した。X線は途中銅やガラスで散乱されてエネルギーを失うが、全く散乱されなかったX線はそのままX線ディテクターに入る。X線のエネルギー分布の高エネルギー側の端をギャップ電圧と見なした。空洞に入ったパワーとX線の測定から推定したギャップ電圧の関係を図6に示す。これからシャントインピーダンスを求めると $2.2 \pm 0.1 \text{ M}\Omega$ であり、ローパワーでの測定結果とよくあっている。

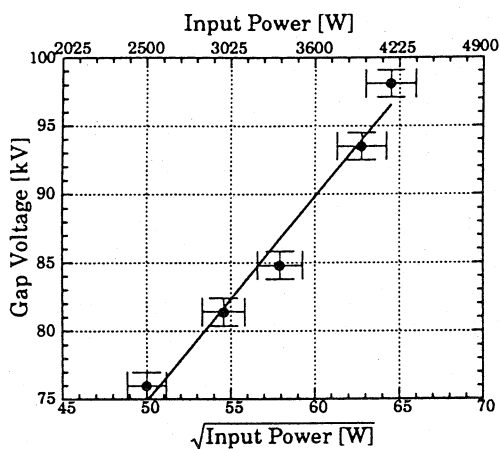


図6 入力パワーとギャップ電圧の関係

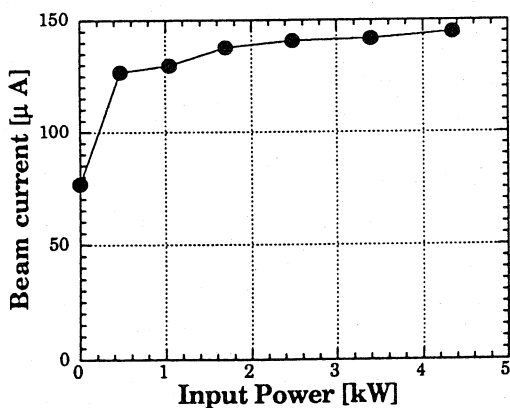


図7 入力パワーとビーム電流の関係

7. ビーム実験

DTLの後ろにファラデーカップをおいて、RFQとDTLの間にバンチャーを入れたときのビーム電流を測定した。RFのパワーを変えたときのビーム電流の変化を図7に示す。バンチャーの電圧を大きくすることでビーム電流が増加した。

8. まとめと今後の課題

陽子加速用のRFQとDTLとのビームマッチングのためのダブルギャップバンチャーを開発し、テストを行なった。マッチングのために必要な90 kV以上のギャップ電圧を発生させることができた。またバンチャーのトランスミッションに対する効果を確認した。

今回のバンチャーのデザインで行なったSUPERFISHによる近似計算ではシャントインピーダンスの絶対値までは合わないが、空洞の定性的な傾向を容易に調べることができ、共振周波数が良く合うことから有効な方法であるといえる。計算結果から $\lambda/4$ 共振器では細いノーズをドリフトチューブ的に使うことがシャントインピーダンスを高くする上で、最も効果的であると考えられる。

現状ではPMQによる横方向のマッチングが取れていないためトランスミッションがおよそ50%と低い点が問題であるが、PMQをマッチングのとれるものと置き換えることにより、解決できると考えている。

今後PMQを改良しトランスミッションを良くしたうえで、DTLの後方で運動量分布を測定し、バンチャーのビームマッチングに対する効果を調べていく予定である。

参考文献

H.Dewa et al.; "Design Study of a Beam Matching Section for the ICR Proton Linac", Bull.Inst.Chem. Res.Kyoto Univ., Vol.70, No.1, 89-98, 1992.