

## Present Status of High Power CW Electron Linac in PNC

S. Tōyama, T. Emoto, M. Nomura, H. Oshita, K. Hirano, N. Takahashi, H. Takei, Y. L. Wang

PNC, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

4002 Narita, Oarai-machi, Ibaraki-ken, 311-13

I. Sato, A. Enomoto, M. Ono

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

### ABSTRACT

PNC is developing a high power electron linac for various applications. The electron beam is accelerated in CW operation to get maximum beam current of 100mA and energy of 10MeV. Crucial components such as a high power L-band klystron and a high power traveling wave resonant ring(TWRR) accelerator guides were designed and fabricated to check their performance.

### 大強度CW電子線形加速器の開発の現状

#### 1. はじめに

動燃事業団では核変換技術開発の一環として高エネルギー物理学研究所と共同で、既存の加速器よりも2桁高い電流の電子ビームを加速するために、表1に示す仕様または開発目標を持つ大電流CW電子線形加速器の要素開発<sup>1,2)</sup>を行っている。このような大強度のライナックの開発のため、その要素機器の設計研究を行い、その結果に基づき加速管とクライストロンの試作及び性能試験等を行ってきた。レゾナントリング(進行波加速管+還流器)には200kW(デューティファクタ20%)のRFが投入され、内部では増幅され800kWに達するため、この電力値に近い状態での試験が必要である。クライストロンについては、1.2MW(CW)のRFが出力されるため、これまでの開発で課題となっていたセラミック製RF出力窓の過度な発熱防止のための改良設計が必要となり、これを今回の大電力RF試験によって確認した。

試験は、高エネルギー物理学研究所に大電力RF試験用の体系を構築して行った。

#### 2. 大電力RF試験の結果

##### 2.1 クライストロン出力確認

大電力RF試験のRF発生源として使用する試作クライストロンの出力確認試験を、前年度のメーカー工場試験に引き続いて行った。測定結果を図1に示す。RF出力が330kW以上では、セラミック製の出力窓温度が設計上は許容出来る温度上昇幅に近い50℃を越したため、それ以上の出力上昇は行わなかった。クライストロンの効率は、今回はエージングにより前年度よりも若干向上した。

##### 2.2 進行波還流型加速管

試験はエージングを行いながらRF出力を上昇させて実施した。試験中に、管内電力を35kWまで上昇させた時に、還流器内の移相器に異常発熱が生じた。移相器は3台の移相器ユニットから成り、異常発熱を起こした移相器(A)と正常なもの(C)の駆動棒付根の温度変化を図2に示す。移相器は冷却水で約40℃に温度制御されていたが、移相器ユニットAは還流系内部のRF電力が30kWを越すと急激な温度上昇を示している。移相器の過度な温度上昇のため、以降の試験は移相器の設置箇所を直管の導波管と置き換えて行った。取り除いた移相器の検査等から、異常発熱の原因は移相器のスタブとシリンダー間の短絡導体(フィンガストリップ)の電磁的接触不良であることが判明した。直線導波管に交換した後は、管内電力を4日かけて上昇させ、放電や過度な熱変形すること無く、最高で800kWまでのRFを印加させることに成功した。なお、RF電力上昇の際の加速管の管内電力に対する加速管の外表面温度変化を図3に示す。還流型加速管のRF減衰から求めた計算値は実測と良く一致している。Q値も設計通りの値であった。測定データから次の値が得られた。

RF電力当たりの周波数変化 -50.1kHz/100kW  
RF電力当たりの温度変化 2.1℃/100kW  
温度当たりの周波数変化 -23.4kHz/℃

温度当たりの周波数変化については低電力試験で冷却水温度を変化させて測定した周波数変化値-25.3kHz/℃とほぼ一致している。この他に、クライストロンの出力RF周波数を変えることより還流系内のRF周波数を変化させた時の試験も行った。図4に、RF周波数を1247.436MHzから1MHz上昇させながら管内のRFの順方向RFと逆方向RFや還流系の電力増幅率Mを測定した結果を示

す。図4から電界増幅率はほぼ3.0であった。ここで、逆方向還流電力はMの減少と加速に寄与しない管内定在波エネルギーの増大の原因となるので、 $\Gamma$  (反射係数) が0.01以下になるように調整する必要がある。

### 2. 3 クライストロン窓

試験のために3種のビルボックス窓を製作した。各窓はセラミックの材質と共にセラミックを固定するビルボックスの寸法を変化させたものである。これらの電気特性を表2に示す。表2で、No.1の「ベリリアショート窓」とは、クライストロンの試作品に既に取り付けてあるものと同一材料・同一構造で、過度な温度上昇を起こしたものである。この窓は他との比較試験のために製作した。No.2、No.3の「アルミナロング窓」と「ベリリアロング窓」とは、ビルボックス全長をこれまでの約2倍に製作し、セラミックをRFが透過する際にセラミック付近に誘起される電界強度を減少させて、セラミック内の発熱量を抑制するために製作したものである。これらのセラミック窓の解析コードにはHFSSコードを用いた。

試験はCW耐電力試験とパルス耐電力試験の2種類を行った。まずCW耐電力試験の結果をセラミック窓を透過させたRF電力に対するセラミック窓の温度上昇幅で図5に示す。ベリリアロング窓に対しては、CWエージングや1MW以上での5~20%パルスエージングを併用し行った結果、目標を越える1.7MWまでのCWのRF印加に成功した。最大のRFを印加した時のセラミック窓の温度上昇幅は、図から明らかのように、ただか48℃であり、マルチバクタリングによる発光も観測されず、窓の破壊も生じなかった。

ベリリアショート窓は500kW付近からRF印加とともにセラミック表面から弱いマルチバクタリングと思われる青白い発光現象がみられた。発光は数分で消えたが、RFはセラミックの全体温度が安定する15分程度の間隔をおいて上昇させた。ベリリアショート窓は1.4MWまでのRF印加に成功した。アルミナロング窓は460kWまでのRF印

表1 加速器基本仕様

エネルギー	(MeV)	10
エネルギー分散	(%)	$5 \times 10^{-3}$
最大ビーム電流	(mA)	100
平均ビーム電流	(mA)	20
パルス幅	(ms)	4
繰り返し数	(Hz)	50
デューティ	(%)	20
平均ビーム出力	(kW)	200
<hr/>		
加速周波数	(MHz)	1249.135
マイクロ波波長	(cm)	24.0
加速モード		$2\pi/3$
加速管の本数		8
加速ユニット数		2
クライストロン数		2
クライストロン出力	(MW)	1.0
加速器の全長	(m)	16.0

1.加を行ったが、温度上昇幅が139℃と最も大きく、500kWで窓の破壊に至った。このような温度上昇の原因は、他の窓よりも高いVSWRにより、試験体系の窓セラミック位置の電界強度が大きくなったためと推定される。

次のパルス耐電力試験は、ベリリアロング窓だけを使用し、2ms、4msパルスモードの繰り返し50Hzで4.5MWのRF出力まで行った。結果を図6に示す。RFのデューティファクタは10%と20%であるが、4MWまではマルチバクタリングは観測されなかった。ただし、4.25MWを越えると窓表面周辺部に寿命数分程度の青白い発光が生じ、4.5MWではセラミックの表面の温度変化率の上昇が生じた。

### 3. まとめ

加速管に対しては、放電や熱変形を生じることなく、ほぼ開発の最終目標の最高800kWまでの大電力RFの印加に成功した。また、ビームローディング時の加速管熱負荷領域での共鳴周波数・位相変化の電力・温度に対する変化率が、大電力RFを用いて実験的に得られた。温度特性は低電力試験のデータにほぼ一致することが分かった。ただし、レゾナントリングの還流系に設置した移相器が30kW以上で異常発熱を生じたことから、今後その改良設計を進める予定である。

クライストロンのRF出力窓であるセラミック窓については、改良設計及びその効果を確認する試験によって、マルチバクタリングが無視出来、CWモードでは1.7MWまでの、パルスモードではデューティファクタ10、20%の時に4.5MWまでのRF電力の透過に耐える窓構造の開発に成功した。

### 参考文献

- 1) 遠山 他、Proceedings of 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 1989
- 1) 王 他、Proceedings of 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 1989

表2 試作窓の設計値及び測定値

	設計値	HFSS		測定値	
	VSWR	VSWR	位相長 (°)	VSWR	位相長 (°)
ベリリアショート窓	1.0002	1.02	417	1.04	462.1
アルミナロング窓	1.2962	1.37	706	1.30	777.8
ベリリアロング窓	1.0010	1.07	720	1.03	751.6

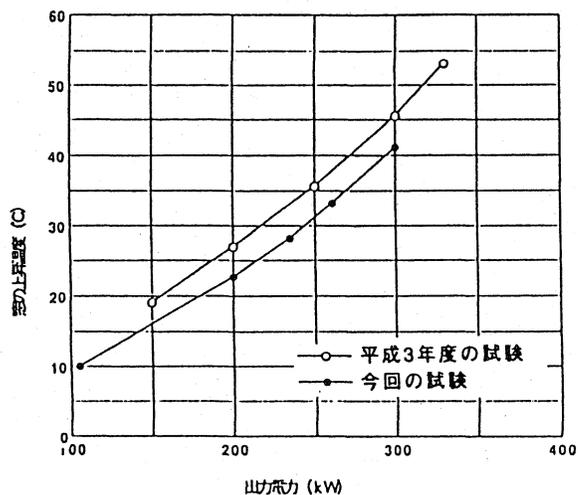


図1 出力電力に対する出力窓の温度上昇

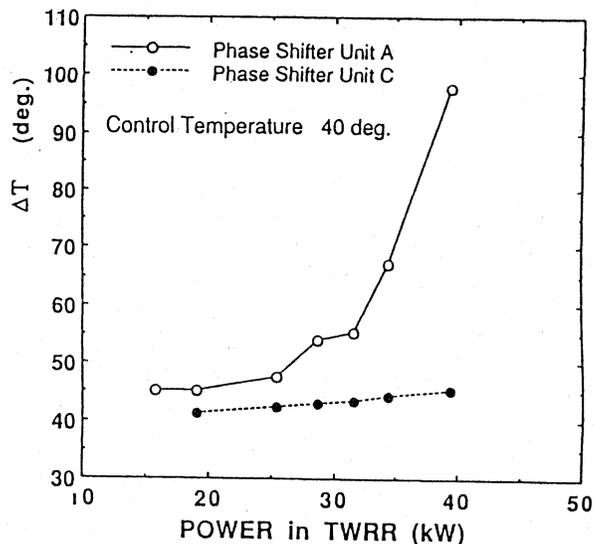


図2 移相器の温度上昇

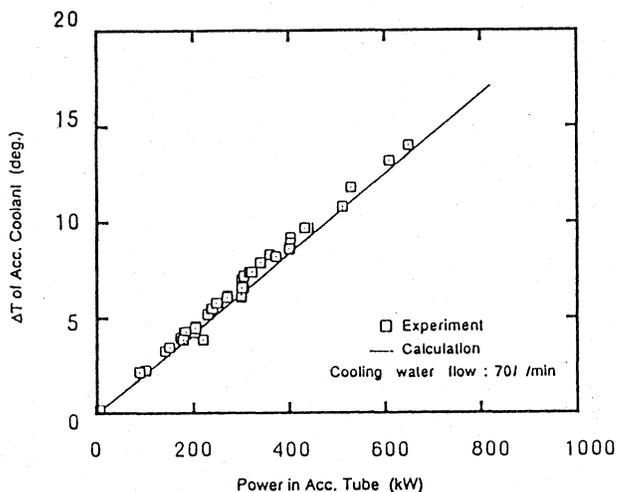


図3 加速管冷却水温の上昇

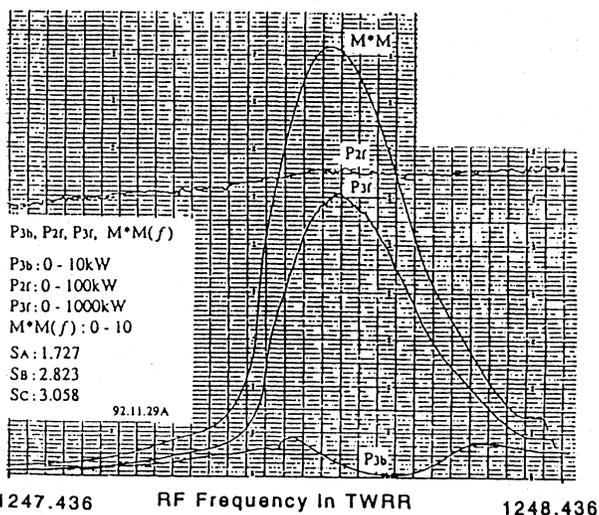


図4 遠流系電力の周波数依存性

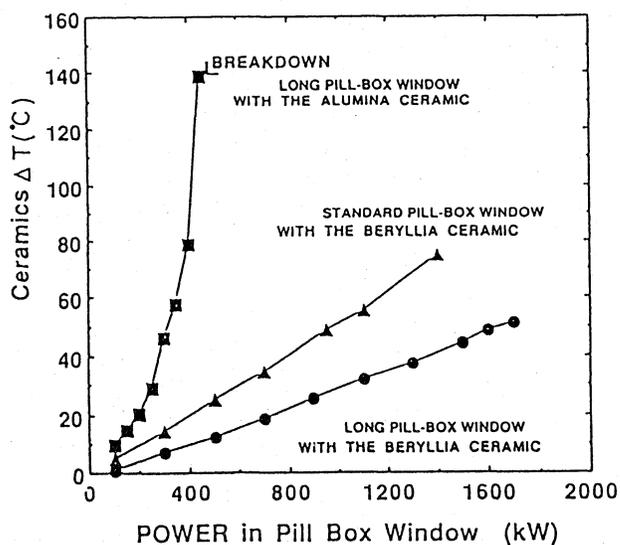


図5 試作クライストロン窓の温度上昇

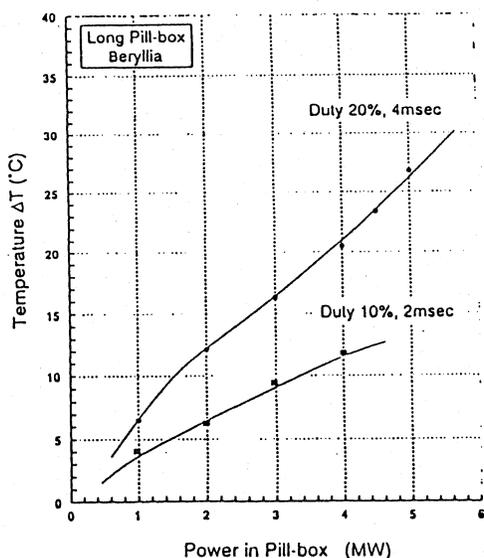


図6 試作クライストロン窓のパルス試験