

High Power Test on the Accelerator Guide for the High Power CW Electron Linac

Hironori OSHITA, Shin'ichi TŌYAMA, Masahiro NOMURA, Koichiro HIRANO, Hayanori TAKEI, Nobutomo TAKAHASHI, Takashi EMOTO, Y.L.WANG, Isamu SATO*, Masaaki ONO*, Atsushi ENOMOTO*

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation,
Oarai Engineering Center, Technology Development Division

4002 Narita, Oarai - machi, Ibaraki - ken, Japan

*National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki - ken, Japan

Abstract

The accelerator guide under development forms a resonant ring with a recirculating wave guide system. A prototype accelerator guide was manufactured and the high power test was performed by inputting microwave from the klystron. This test includes important RF characteristics and the results shows good agreement with calculations.

大強度CW電子線形加速器用加速管の大電力試験

1. 序

現在動燃で開発中の電子ライナックはLバンド進行波還流型加速管を採用しており、平均電流20mAの電子ビームを10MeVに加速する(表1の基本仕様参照)。

加速管の開発上特に重視すべきことは、大電流加速にともなうBBUを防止することと、加速効率を上げてエネルギーバランスを取ることである。これまでの研究からLバンド加速管はBBUを起こすビーム電流のしきい値が高いことが知られており、ここでは最大電流が100mAの時にBBUが起こらないよう、電界勾配を低くし、加速管長を1.2mとしている。またBBUモードの励起を避けるため、ディスクのアイリス径を下流へ行くに従って絞っていく定電界型としている。また進行波型の加速モードとして加速効率の高い $2\pi/3$ モードを採用し、更に加速管を通り抜けたマイクロ波を再利用するよう還流部を取り付け、加速管と一体としてレゾナントリングとしている(図1参照)。

本試験では、レゾナントリング一式を試作し、クライストロンから大電力マイクロ波を供給して高周波特性試験を行ない、計算結果と比較した。

2. 高周波特性

(1) 電力増幅率

電力増幅率とは、外部から供給されたマイクロ波の電力が還流部で何倍に増幅されるかを表す量で、方向性結合器の結合度Cとレゾナントリングに於ける電界透過率Tによって決まり、

$$|M|^2 = \left(\frac{C}{1 - T\sqrt{1 - C^2}} \right)^2 \quad (1)$$

と表される。Mは電界増幅率で一般には複素数である。

製作後の方向性結合器の結合度は $C=0.2939$ 、レゾナントリングの電界透過率は $T=0.9438$ であった。この値の時の結合度と電力増幅率との関係を図2に示す。これを見ると $C=0.2939$ では電力増幅率は最大値を示していることが分かる。

式(1)に従って電力増幅率を求めると9.06となる。

(2) Q値

Q値は、レゾナントリングの共振状態即ち内部電力の蓄積状態の良好度を表す量で、加速空洞に蓄積されるエネルギーの、マイクロ波1ラジアン

当りのエネルギーロスに対する比で定義される。実際上は、導波管内波長 λ_g 、自由空間波長 λ_0 、光速 c 、加速管内の群速度 v_g 、導波管部分の位相長 ϕ_w 、加速管部分の位相長 ϕ を用いて次の様に表される。

$$Q = \frac{\phi_w \frac{\lambda_g^2}{\lambda_0} + \phi \frac{c}{v_g}}{2 \tan^{-1} \left\{ \frac{4T\sqrt{1-C^2} - T^2(1-C^2) - 1}{2T\sqrt{1-C^2}} \right\}} \quad (2)$$

式(2)に従って値を求めると10797となる。

(3) 電力棄却率

これは、ダミーロードへ捨てられるマイクロ波電力の入力電力に対する比で定義される。これもCとTによって決まり、

$$|N|^2 = \left(\sqrt{1-C^2} - \frac{C^2 T}{1-T\sqrt{1-C^2}} \right)^2 \quad (3)$$

で表される。Nは電界棄却率で一般には複素数である。

式(3)に従って電力棄却率を求めると0.015となる。

(4) 還流部の位相長 ϕ と電界増幅率Mの偏角 θ との関係

θ はクライストロンから還流部内のある定点までの位相長、 ϕ はレゾナントリング1周の位相長を表す、従って $d\theta/d\phi$ は、還流部の位相が何らかの原因で変化した時に、還流部を流れるマイクロ波の電子に対する位相がどれくらいずれるかを表す量で、フェーシング(電子をマイクロ波に同期させる操作)と関係の深い重要なパラメータである。 θ は直接的には電界増幅率の偏角で、還流部を流れるマイクロ波の、測定点に於ける位相であり、

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{-T\sqrt{1-C^2} \sin \phi}{1-T\sqrt{1-C^2} \cos \phi} \right) \quad (4)$$

と表される。

θ の表式に0.2939、0.9438を代入し、 ϕ の関数としてグラフに表したのが図3である。 $\phi=0$ の時の微係数 $d\theta/d\phi$ は9.22である。

(5) 還流部の位相長 ϕ と電界棄却率Nの偏角 ψ との関係

ψ は電界棄却率の偏角で、ダミーロードへ捨てられるマイクロ波の、測定点に於ける位相であり、

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{TCM}(\phi) \sin(\phi + \theta(\phi) - \pi/2)}{\sqrt{1-C^2} - \text{TCM}(\phi) \cos(\phi + \theta(\phi) - \pi/2)} \right\} \quad (5)$$

と表される。Mと θ は ϕ の陰関数である。

ψ の表式に0.2939、0.9438を代入し、 ϕ の関数としてグラフに表したのが図4である。 $\phi=0$ の時の微係数 $d\psi/d\phi$ は68.7である。

3. 特性試験

大電力マイクロ波による試験に先立って、ネットワークアナライザを用いて100mWのマイクロ波で、還流部電力の周波数依存性を測定した。図5がその結果で、画面中央のピークが加速モード($2\pi/3, TM_{01}$)である。

大電力試験はクライストロンから20kW~50kWのマイクロ波を入力して行なった。図6に試験装置を示す。装置には4箇所DC(方向性結合器付き導波管)を取り付け、2に示した各種高周波特性を測定するのに用いた。

大電力投入後は、放電が断続的に起こり、還流部電力が安定しなかったため、エージングが進んで放電が治まるのを待って、徐々にクライストロン出力を上げていった。最高の90kWを入力した時の還流部の電力は800kWに達し、真空度は約 10^{-7} Torrであった。

電力増幅率・Q値の測定にはDC2とDC3、電力棄却率の測定にはDC2とDC4、 $d\theta/d\phi$ の測定にはDC1とDC3、 $d\psi/d\phi$ の測定にはDC1とDC4をそれぞれ用いた。データを表2に示す。これより高周波特性は何れも計算値と実測値が良い一致を示していることが分かる。

次に還流部のスタブチューナを作動させて管内の定在波比(VSWR)を増加させ、電力増幅率がどのように変化するかを調べた。結果を図7に示す。実測値はほぼ計算で予測される曲線に従っている。

4. まとめ

上記の結果より、高周波特性に関する計算値と大電力試験による実測値は良く一致しており、計算で期待される通りの高周波特性が得られることが分かった。

表1 加速器の基本仕様

項目	数値
エネルギー	10MeV
エネルギー分散	5×10^{-3}
最大ビーム電流	100mA
平均ビーム電流	20mA
パルス幅	4msec
パルス繰り返し数	50Hz
デューティ	20%
平均ビーム電力	200kW
加速周波数	1249.135MHz
マイクロ波波長	24cm
加速モード	$2\pi/3$
加速管の本数	8 (1本はバンチャー)
クライストロン出力	1MW
クライストロン数	2
加速器の全長	16m

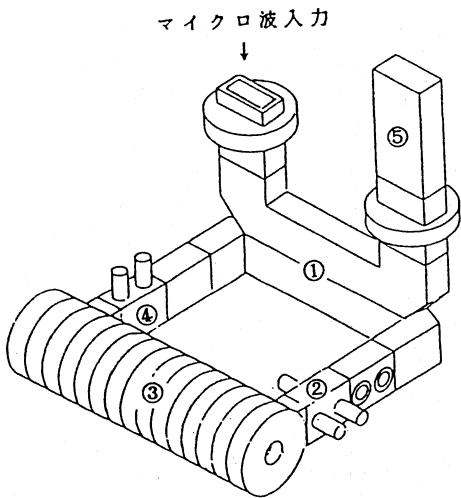


図1 レゾナントリング

- ① 方向性結合器
- ② スタブチューナ
- ③ 加速管
- ④ フェーズシフタ
- ⑤ ダミーロード

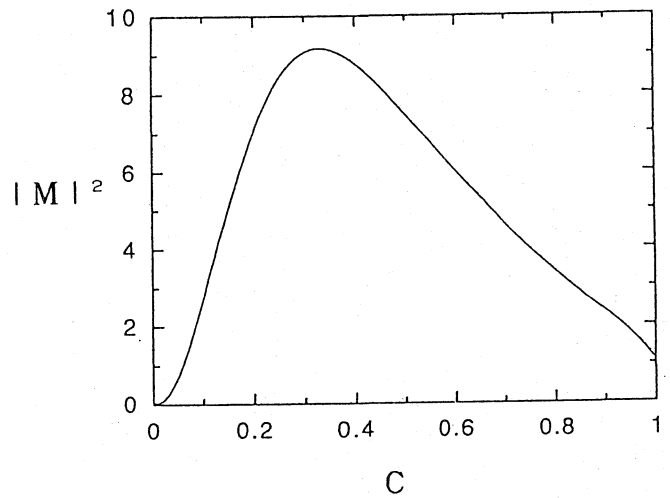


図2 方向性結合器の結合度Cと電力増幅率 $|M|^2$ の関係

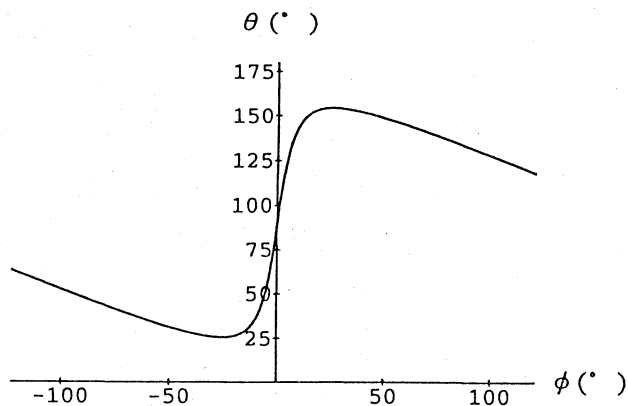


図3 還流部の位相長 ϕ と電界増幅率Mの偏角 θ の関係

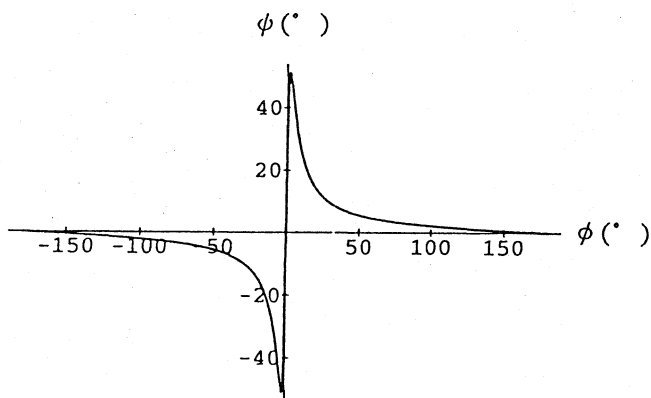


図4 還流部の位相長 ϕ と電界棄却率Nの偏角 ϕ との関係

表2 大電力試験結果1
(各種高周波特性の計算と実測の比較)

	計算	実測
電力増幅率	9.06	9.12
Q値	10797	11478
電力棄却率	0.015	0.016
$d\theta/d\phi$	9.22	9.00
$d\phi/d\phi$	68.7	70.2

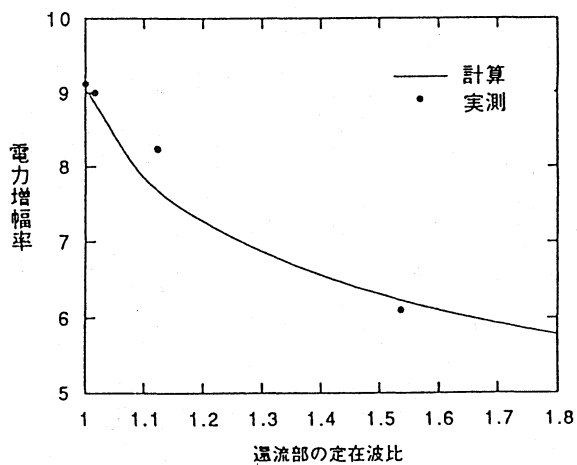


図7 大電力試験結果2
(還流部の定在波比と電力増幅率の関係)

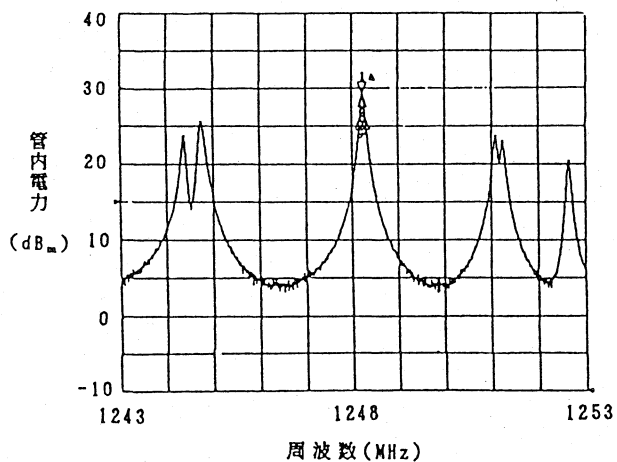


図5 還流部電力の周波数依存性

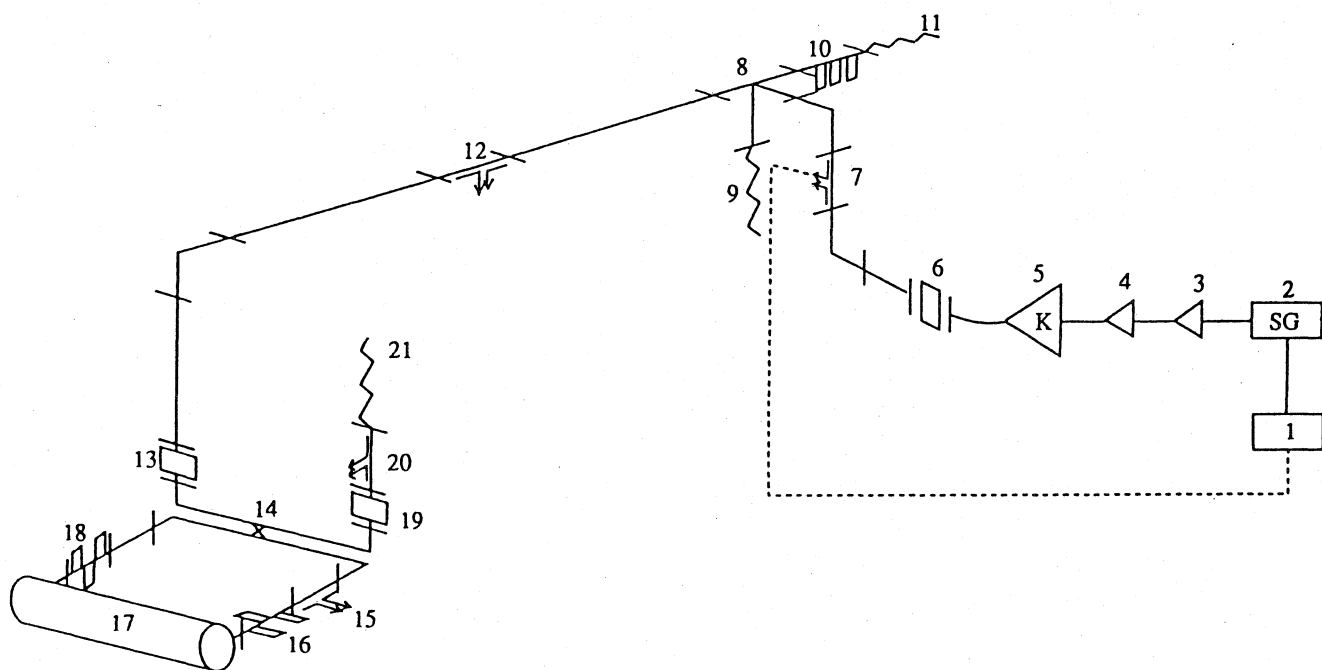


図6 大電力試験装置

1. RFコントローラ
2. シグナル・ジェネレータ
3. 1Wアンプ
4. 25Wアンプ
5. クライストロン
6. RF窓
7. 方向性結合器付き導波管(DC1)
8. マジックT
9. ダミーロード
10. スタブチューナ
11. ダミーロード
12. 方向性結合器付き導波管(DC2)
13. RF窓
14. 方向性結合器
15. 方向性結合器付き導波管(DC3)
16. スタブチューナ
17. 加速管
18. フェーズシフタ
19. RF窓
20. 方向性結合器付き導波管(DC4)
21. ダミーロード