

# S-Band 大電力マイクロ波モニターの製作

福 島 敏 孝

東 條 栄 喜

吉 田 勝 英

1975.6.27.

東京大学原子核研究所

## S-Band High Power Microwave Monitor

T. Fukushima, E. Tojyo and K. Yoshida

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

### Abstract

A high power microwave monitor has been designed and fabricated for use at INS 15 MeV injector linac, which is fed with the microwave of 6 MW peak power. The signals is picked up through two-hall directional coupler which is composed of the main and the auxiliary rectangular-waveguides and of current transformer from waveguide to coaxial cable. The monitors are installed upstream and downstream the accelerator structure and serve to detect the input, reflected and output power levels and pulse forms.

## 目 次

§ 1 序 .....	1
§ 2 方向性結合器 .....	1
§ 3 同軸導波管変換器 .....	5
§ 4 方向性結合器の性能 .....	9
§ 5 LINACに装着したモニター波形 .....	13

## § 1 序

原子核研究所の1.3 GeV電子シンクロトロンの入射器として用いられているLINAC（電子線型加速器）は13年余に及ぶ連続稼働の結果老朽化し、加速管その他の更新が行われた。新しいLINACのエネルギーは、従来9 MeV（設計値は6 MeV）であったのに対し、15 MeVとされた。これに伴い、公称ピークパワー5.5 MWのクライストロン出力を若干増強し、そのモニターシステムを新しくすることになった。従来は加速管出口側に電界結合型のモニターが設置されていたが、導波管内を高真空状態にして使用しているため、真空シール、放電防止等について、製作上の困難があった。そこで、今回は、結合方式として、磁界結合を選び、真空シールも主導波管の壁面を避けて、副導波管で行うことにした。この場合には、副導波管を伝わる信号を同軸ケーブルへ伝送するための、いわゆる同軸導波管変換器で真空シールを行うことが必要になり、かつ、そこでμ波の反射も、出来る限り、低くしなければならない。

以上のような要請を満たすべく、種々のモデルテストを行い、ほぼ満足なモニターを作ることが出来た。主導波管とは2結合孔方向性結合器を構成しているので、このモニターは、進行波、反射波を分離して観測できる上、使用周波数（2758 MHz）近傍での周波数特性もよい。そこで、結合度の少し異なる二台のモニターを製作して、加速管の出口側の他、入口側にも設置した。出口側のモニターは、加速管でのビーム負荷のかかり方が観測され、入口側のモニターでは、加速管への入力電力、波形の他、加速管からの反射波も観測される。従って、加速管の動的なμ波特性、即ち、大電力μ波で実際に電子ビームを加速する際の特性を測定する上で、種々の興味ある情報を与えることが期待される。

## § 2 方向性結合器

WRJ-3方形導波管で構成した方向性結合器を写真1に示した。この結合器は、隣接させた導波管のH面に、 $\frac{\lambda_g}{4}$ （ $\lambda_g$ :管内波長）の間隔で二つの結合孔を設けた2結合孔方向性結合器である。その方向性結合器の動作原理を図1に示す。図において主導波管のマイクロ波（ $P_1$ ）の一部は、結合孔Q、Rを通過して副導波管（ $P_3$ - $P_4$ ）へ同量づつ結合する。Z<sub>2</sub>の位置に於て、Q、Rから結合波は等しい経路長を経ているため同位相となり重畳し、P<sub>4</sub>に伝送する。一方Z<sub>1</sub>の位置に於て、Rからの結合波は、Qからの結合波より $\frac{\lambda_g}{4}$ 長い経路を

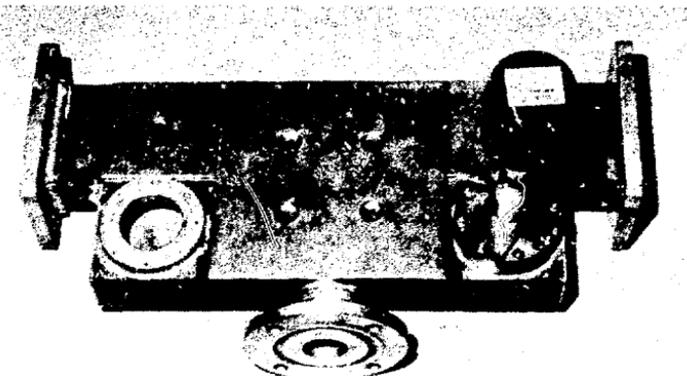


写真1 2結合孔方向性結合器

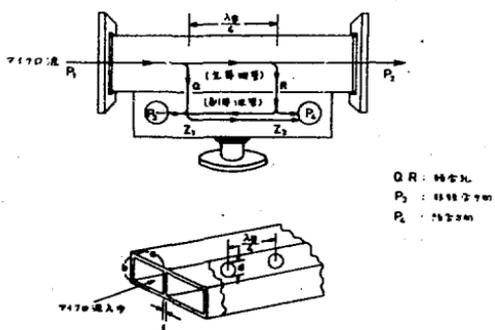


図 1

経ているため逆位相となり打ち消し合う。この動作に可逆性があるため、入射波、反射波が精度よく分離できるのである。

図1のように構成された結合器の結合度Cは、つぎの式で与えられる。(文献1)

$$C = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi d^3 \lambda_g}{6 a^3 b} \right) - 32.0 \left[ 1 - \left( \frac{1.77 d}{\lambda_0} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{t}{d} \quad (2-1)$$

ここで a : 導波管内径の長辺  
 b : 導波管内径の短辺  
 d : 円形結合孔の直径  
 t : 結合孔部の導波管板厚  
 $\lambda_g$  : 管内波長  
 $\lambda_0$  : 自由空間波長

a). 方向性結合器結合孔の大きさ

(2-1)式から明らかのように、方向性結合器の結合度は、結合孔の大きさで決まる。我々の場合、計算により求めた3種類の大きさの結合孔に対するそれぞれの結合度の実測を行ない、計算値と比較検討した。その結果を図2に示した。

結合度測定は次の方法で行なった。

Two-Holeを切った model Directional Coupler (図3参照) にマイクロ波信号源 (Stabilized Signal Generator: S.G.) からの信号 ( $P_1$ ) をつなぎ、結合器出力電力 ( $P_4$ ) をパワーメータで測定する、結合度は ( $P_1$ ) と ( $P_4$ ) の比から求められる。

尚結合孔の大きさは、主導波管に注目して考え、結合度に対する孔をそこに切り、副導波管の孔はそれより直径で3mm大きくした。これは主副導波管に同じ大きさの孔を切った場合、二つの孔を精度よく合わせる事がむずかしいのと、ロウ付けの際のロウの逃げ場所を設けるためである。

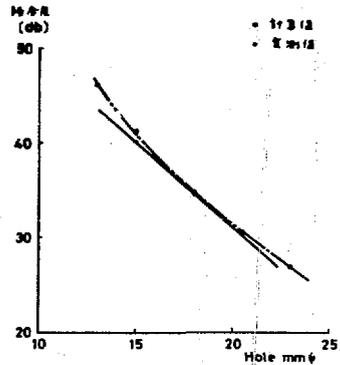


図 2

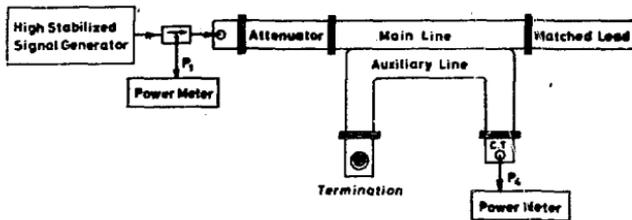


図 3

b). 真空排気孔が導波管に与える影響

前述した方向性結合器の真空排気は、排気孔を副導波管側に設けて行なうことにした。排気孔の大きさは、導波管のVSWR（電圧定在波比）を大きくしない範囲内で可能なかぎり大きくして、真空排気の効率を良くする必要がある。

VSWRは次の式で与えられる。

$$VSWR = S = \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

ここで、 $E_{max}$ 、 $E_{min}$  は電圧定在波の最大値、最小値である。

反射係数( $\rho$ )との関係では、

$$|\rho| = \frac{S-1}{S+1}$$

で表わされる。従ってVSWRが例えば1.1以下であれば、反射電力は入射電力の3%以下になる。従って形状、大きさ等を考慮してVSWR=1.1以下が実現できれば、導波管に与える影響は無視できる。我々の場合(8.9φ×3の長孔)その値は、1.1以下と突測された。

排気孔を切った導波管VSWRの測定は、モデルセットを作り次の方法で行なった。まず排気孔の無い導波管をマイクロ波測定に用いられる有溝線路定在波検出装置(図4参照)に組み込みVSWRの値を求める。次に排気孔を導波管H面の中心、続いて中心に対して上下1ヶづつ孔を切り進んで(図4中の点線)それぞれの条件で同様な測定を行なう。尚測定装置に使用したマイクロ波部品(Matched Load: 無反射終端)のVSWR=1.03~1.08を

前もって実測した。

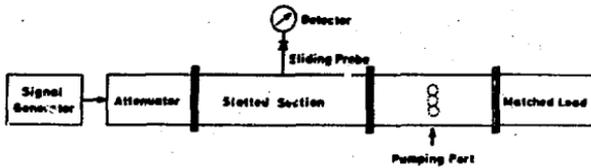


図 4

### § 3 同軸導波管変換器

同軸導波管変換器は、我々の場合、導波管で構成された方向性結合器から同軸線型検出器 (Power meter) への変換、及びシンクロトロンコントロールルームまで検出信号を送るケーブルへの変換に必要である。その性能上の条件として、変換器の VSWR が小さいこと、大電力マイクロ波に耐えること。構造上の条件として、真空用でなければならない。

これらの条件を満たすため大電力クライストロンのギャビティの coupler に用いられる N 形コネクタ (写真 2) を改造して次に述べるプローブ結合型の変換器を製作した。

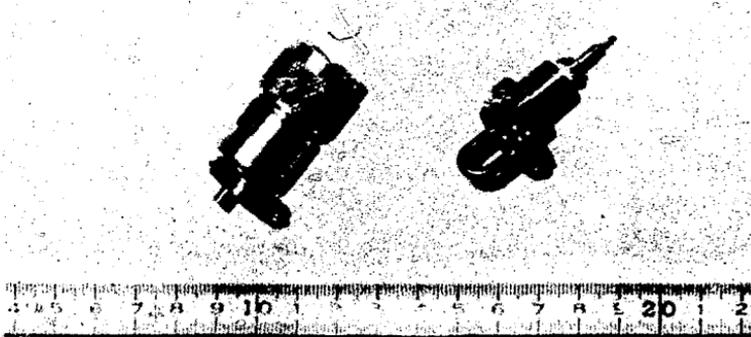


写真 2

プローブ結合型変換器は、同軸内導体を導波管内へ延長したプローブ(P)と導波管内に設けた短絡板(S) (図5参照)による結合器である。その周波数特性は狭帯域だが構造が簡単である。(文献2) 我々の場合  $f_0 = 2758\text{MHz}$  に対してバンド幅は、 $\pm 1\text{MHz}$  あれば充分であるからこの構造のものを選んだ。

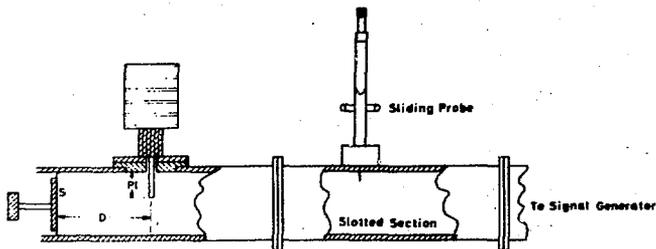


図 5

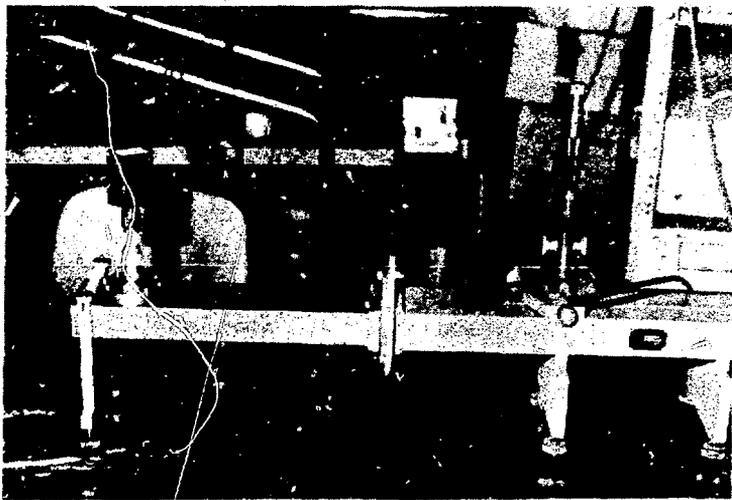


写真3 同軸導波管変換器 Test Bench

前述した条件を満たす変換器（写真4）の構造を図6に示した。その性能チェックは、次の方法で行なった。

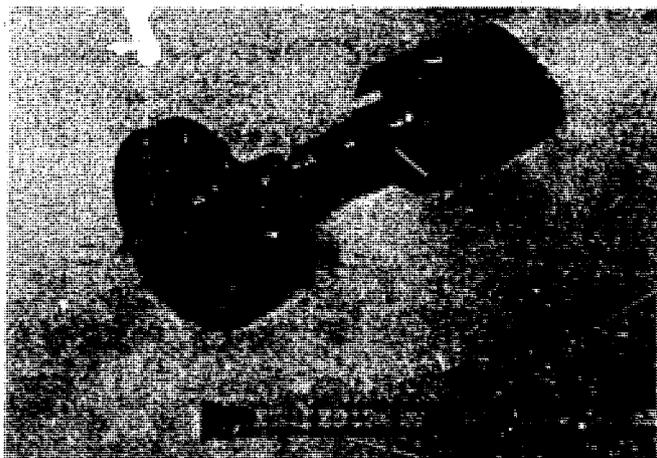


写真4 同軸導波管変換器

Test Bench（図5、写真3参照）に改造したコネクタを組み込み、ショートプランジャー（S）の位置を変化させプローブセンターからのショート位置（D）に対するVSWRの値を測定する。

この測定をプローブの長さ（P）を変化させてくりかえし行いVSWRの最小値を探すという方法である。

結果を図7、図8に示した。図において横軸は、プローブ（P）からショート板（S）までの距離（D）であり、縦軸はVSWRの値を示す。二つの図から明らかなようにコネクタ個々に多少特性の違いがある。これらの結果より最適値を、 $P=20\text{mm}$ 、 $D=21\text{mm}$ とした。

以上のテストを行なった後にコネクタは、真空用同軸導波管変換器フランジに熔接される。フランジへの熔接後のチェックも同様なテストを行なった。

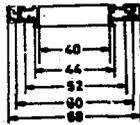
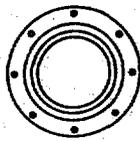
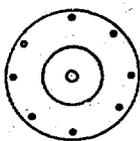
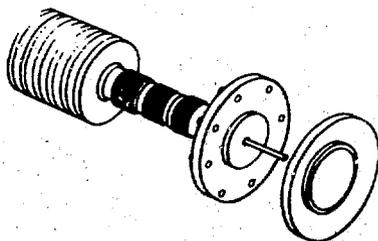


图 6

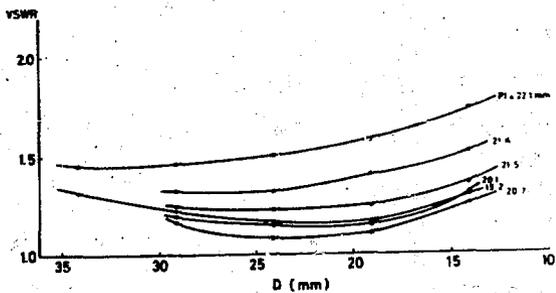


图 7

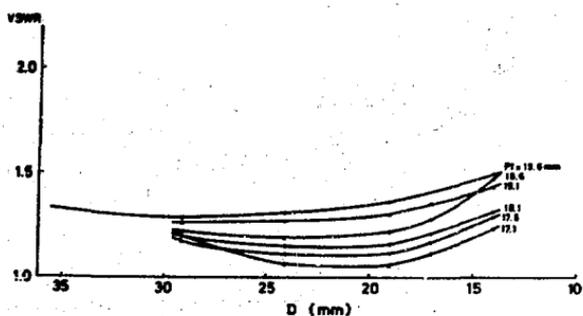


図 8

加速管出口側

$P_3$  用 coupler VSWR = 1.18

$P_4$  用 coupler VSWR = 1.05

加速管入口側

$P_3$  用 coupler VSWR = 1.16

$P_4$  用 coupler VSWR = 1.06

ここで coupler それぞれの VSWR の違いは、コネクタ個々の性質と工作のエラーによるものであると思われる。

#### § 4 方向性結合器の性能

方向性結合器の各寸法を図 9 に示した。 $P_3$  coupler,  $P_4$  coupler の VSWR が決められる副導波管ショート的位置は、先に述べた測定結果により coupler frange 中心から 21 mm とした。そして coupler probe は、frange の中心より 3 mm off center にして、VSWR

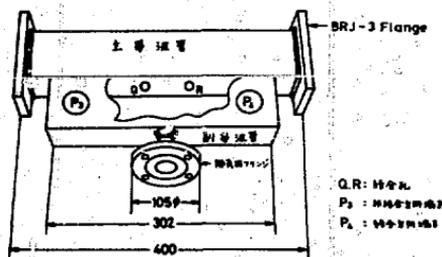


図 9

の最小値に probe を調整できるように考慮した。

結合度の設計値は、加速管出口用 28dB、入口用 40dB である。

その結合度、較正、及びパルス特性測定は、加速管出口側で行なった。

#### 4-1 結合度の測定

測定は、図 10 のように接続し、次のようにして行なった。まず  $P_4$  の coupling Power を測り、次に較正された減衰器 (calibrated variable attenuator) を調整して  $P_5$  の値を  $P_4$  と同一に合わせる。このときの減衰器目盛り結合度を求めた。この結果は 28.1 dB で、設計値とはほぼ一致した。

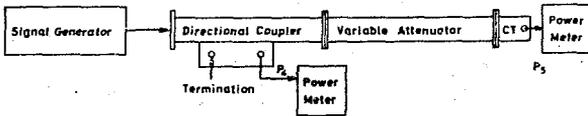


図 10

#### 4-2 結合器のパルスに対する特性

LINAC マイクロ波は、大電力パルスである。そのモニターとしては、波形とパワーの両方を観視しなければならない。従って方向性結合器のパルスに対する特性を調べておく必要がある。その特性測定は、次のようにして行なう。図 11 に示した LINAC マイクロ波系の TWT 出力を加速管に伝送する。その理由は、マイクロ波測定用の較正された減衰器が使用できる電力で測定を行なうということである。この測定ブロックダイアグラムを図 12 に示した。測定はまず方向性結合器の結合波形を、SCOPE 1 で観測する。この観測波形を写真 5 に示した。

次に結合器の結合度に等しい較正された減衰器を通した波形を SCOPE 2 (SCOPE 1 と同一のもの) で観測する。この観測波形を写真 6 に示した。写真 5, 6 両パルス波形は、極めてよく一致していて、我々の検出系の周波数特性に問題のないことを示している。そしてこの写真には加速管のマイクロ波に関する特性 (反射, filling time 等) が現われている。

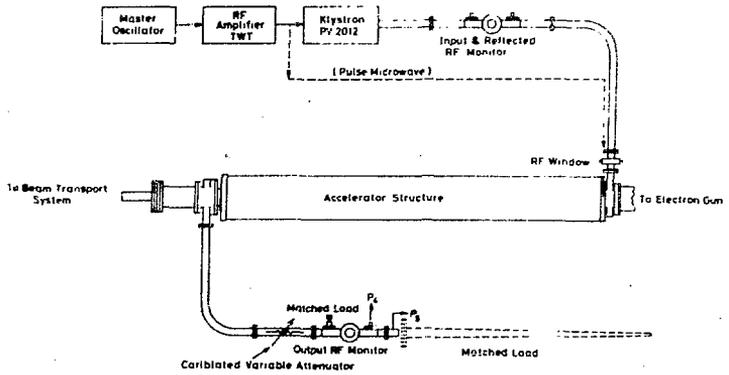


图 11

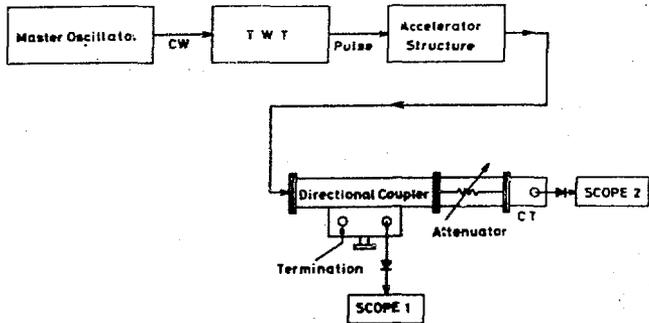
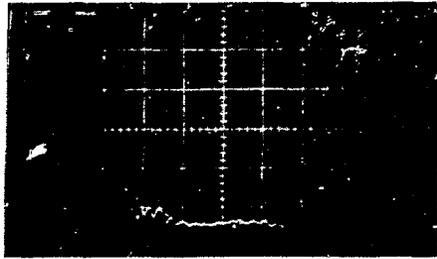


图 12



1  $\mu$ sec/div

写真 5



1  $\mu$ sec/div

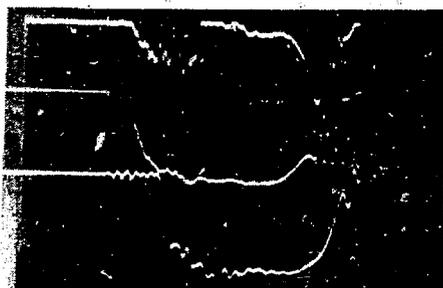
写真 6

#### 4-3 結合度校正

結合器検出信号は、RG-8 Uケーブルによりコントロール室まで送る。その伝送系の減衰量は約 12 dB である。従ってコントロール室におけるモニター結合度は 40 dB となる。以上の諸特性は、加速管出口側に組みこむ結合器の場合である。入口側結合器については、結合器の結合度を 40 dB とし、出口側結合器と同一テストを行なった。コントロール室における結合度は、50 dB に調整した。

### § 5 LINACに装着した結合器モニター波形

大電力マイクロ波モニター波形を写真7に示した。ここで三つの波形は、加速管の反射波、入口側進行波、出口側進行波をそれぞれ示している。



加速管入口でのマイクロ波反射波

加速管入口のマイクロ波進行波

加速管出口マイクロ波

1  $\mu$ sec/div

写真 7

次にシンクロトロン運転時のモニター波形を写真8に示す。ここで三つの波形は、LINACで加速された電子ビームモニター、マイクロ波モニター、シンクロトロンで加速された電子ビームモニターのそれぞれを示している。マイクロ波モニター波形には、加速管の Beam loading の模様が観測される。



1  $\mu$ sec/div

写真 8

この2結合孔方向性結合器は、L I N A Cのマイクロ波検出器として使用され、15MeV L I N A Cの諸特性の測定に役立てられた。その後、シンクロトロン of 運転用モニターとして機能を発揮している。

結合器を製作するに当って高エネルギー物理学研究所田中治郎教授には、多くの有益な御指導を頂いた。また高エネルギー部佐藤句子、小松山澄雄両氏には、図面作成に御協力頂いた。ここで厚く感謝致します。

文献1

R. L. KYHL : Directional Couplers p.873~879  
M. I. T. series : 11

文献2

G. L. RAGAN : Microwave Transmission Circuits p.341~346  
M. I. T. series : 9

M. I. T. : MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
RADIATION LABORATORY SERIES  
(McGraw - Hill Book COMPANY)