

M. Oyamada, O. Konno, S. Urasawa, T. Ichinohe,
 A. Kurihara, S. Nemoto, Y. Shibazaki and Y. Torizuka
 Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
 I. Sato and K. Mittag
 National Laboratory for High Energy Physics

Abstract

This paper describes the various kind of approaches to the beam blow-up phenomenon in the Tohoku Linac. The RF characters between door-knob type coupler and cavity type one was compared around the beam blow-up frequency. The Brillouin diagram for the HEM_{11} modes of the buncher was obtained. The beam blow-up frequencies for the many temperature combinations of the accelerating tubes were measured.

§1. 加速管—導波管 モード変換器(カブラー)と BBU について

電子リニアックでは大電力のクライストロン又はマグネトロンからのRF出力を方形導波管を用いて加速管まで導く。結合部には導波管のモード(TE)と加速管のモード(TM)とのモード変換器が必要である。これには大別してドアノブ型と空洞型が用いられている。核理研の300MeV電子リニアックでは建設時及びその後数年間の補修品を含めてドアノブ型を採用していたが、最近4~5年発注した加速管では空洞型を採用している。今回はこのモード変換器のRF特性とBBUの関連を調べた。定性的に考えれば、BBU発振周波数に相当するマイクロ波が加速管内に存在した場合(4.3GHzバンド)モード変換器部で反射すれば加速管内部の電界が強くなり後進波型BBUであれば、増幅型(マルチセクション)であれば、それだけBBUを起し易くなる。BBUの周波数帯(HEM₁₁モード)のマイクロ波は出来るだけ速く加速管外に出すことが、ビームと

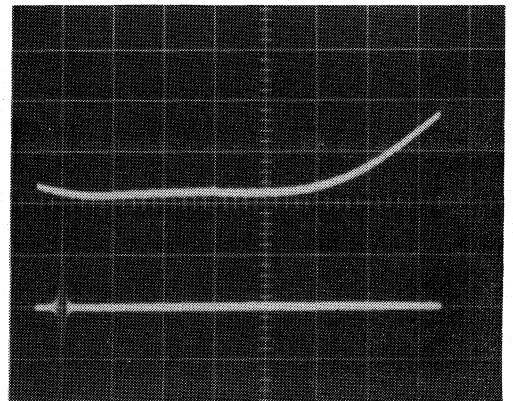


写真1 ドアノブ型変換器のRF特性(4.3GHzバンド)

BBUのマイクロ波との相互作用インピーダンスを低くすることになる。現在核理研で用いている加速管のモード変換器についてRF特性を測定した。写真1はドアノブ型、写真2は空洞型である。横軸は共に5MHz/divでマーカー周波数は4300MHzである。又ベースラインは共に上から1div目である。測定用の導波管類はWRJ-4を用いて4.3GHz帯での測定確度を上げるように考慮を払った。写真1から判ること

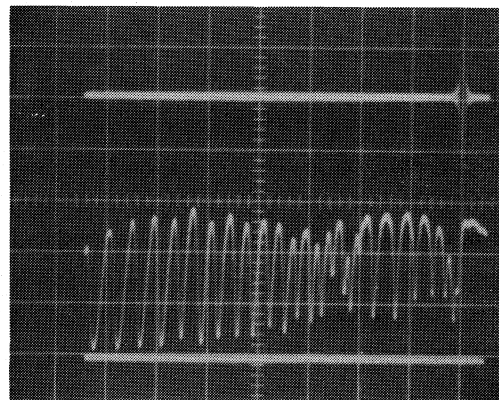
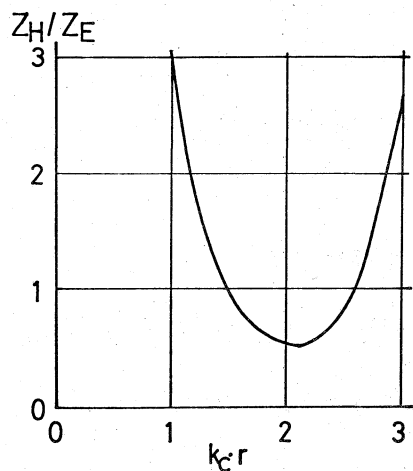


写真2 空洞型変換器のRF特性(4.3GHzバンド)

は4.3GHz帯のマイクロ波はドアノブのところではほとんど反射(VSWRでは約70)されてしまうことである。逆に内側の加速管内を伝わってきたものは入口のドアノブで反射されてしまう。出入口の変換器で反射されたマイクロ波は加速管の中でビルドアップすることになる。これに対して写真2から判ることは、空洞型の変換器ではHEM₁₁モードの周波数帯でもVSWRはそれほど悪化せずにマイクロ波は容易に通過することが出来ることである。この場合にはBBUのマイクロ波のビルドアップはそれだけ小さく(遅く)なりBBUに対する寄与は少くなる。

そこで我々はドアノブ型モード変換器のHEM₁₁モード周波数帯での特性の改善を試みた。まず最初にドアノブの導波管と加速管のオ1空洞の間のディスクに90°間隔で13mm中(最大限度)の孔を開けて4.3GHzでの結合を大きくすることを企てたが改善度は非常に小さく、この方式では無理であることが判った。計算(K.M.)によれば90°対称に4個の孔を開けるのは結合度がキャンセルされて弱くなることが判った。そこで90°間隔で2個の孔を開ける場合について磁氣的結合インピーダンスと電氣的結合インピーダンスの比を計算したものをオ1図に示す。この図からは電氣的結合よりは磁氣的結合の方が有利であり、孔は出来るだけ空洞の外縁部にとればよいことが判った。



オ1図
磁氣及び電氣的結合インピーダンスの比

ディスクの外縁に沿って出来るだけ大きな結合用切欠きを付けたもの（パンマの眼と呼ぶ）を作って加速管に装着した時のRF特性を写真3に示した。横軸は15 MHz/divで、ベースラインは上から1 div目である。これから判ることは結合度は或程度は改善されたが、空洞型のモード変換器の場合とは格段の差があることである。又加速の周波数(2856MHz)でのVSWRは未調整とはいえ約7ぐらいあり、ドアノブ型のモード変換器で2つの周波数帯でマッチングをとることの難しさを改めて教えられた。長大な電子リニアックでドアノブ型の変換器を採用する場合は、ヨーロッパ型のほとんど空洞型に近いものにするか、又は4.3GHz帯成分だけと別個の結合器でとり出せる方式を考えなければならない。

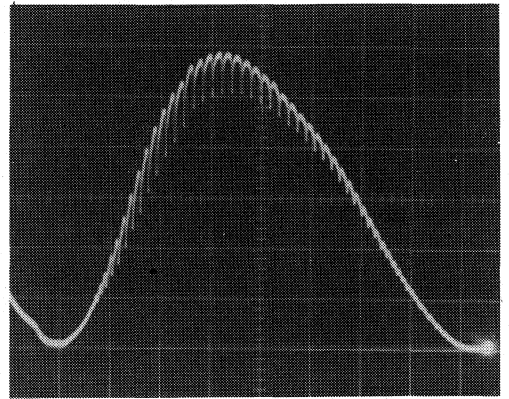
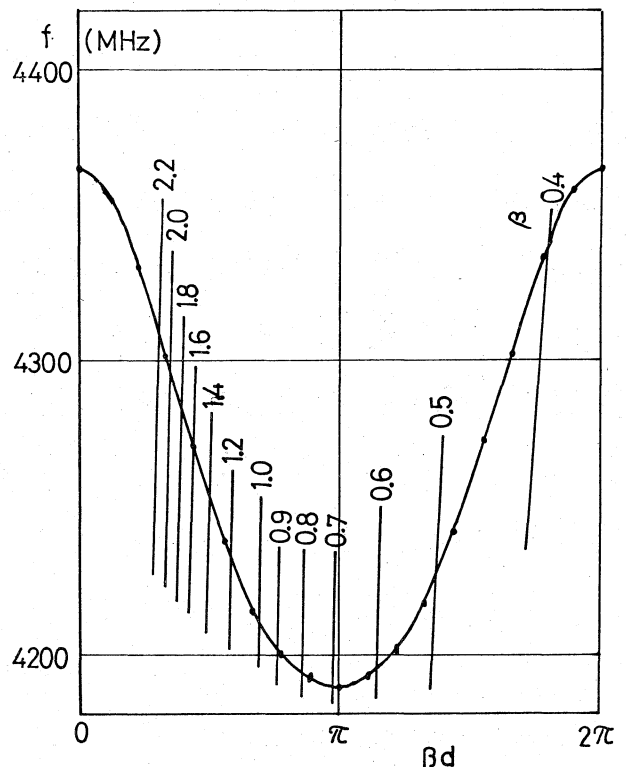


写真3
改良されたドアノブ型変換器のRF特性(+.3GHzバンド)

§2. バンチャーのRF構造とBBUについて

BBUがある特定の加速管で後進波発振(BWO)のメカニズムで発振するとすれば、相互作用の長い加速管ほど起り易い事が知られている。1) 又同じ長さの加速管ならば、電子のエネルギーの低い方が起り易い。核理研のりニアックの場合、1mの加速管が12本(A部)、2mの加速管が12本(B部)と、プリバンチャー、バンチャー、ECS用加速管から構成されている。上述のメカニズムを考えるならB部の最初の加速管、A部の最初の加速管又はバンチャーがその候補として挙げられる。ここでバンチャーをとり上げて検討した。核理研のバンチャーはモード変



オ2図
バンチャーのHEM₁₁モードの分散特性

換器は空洞型で、加速空洞は定インピーダンス型であり、空洞数は出入口のモード変換部まで含めて9個である。このバンチャーのHEM₁₁モードの分散特性の測定結果をオ2図に示す。10個の共振周波数の内6個しか実測出来なかつたが、最小二乗法で共振周波数を求めた。

用いた式は $f = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(\beta d) + \alpha_2 \cos(2\beta d) + \dots$ であるが誤差を考えると α_2 までで十分であった。得られた結果は $\alpha_0 = 4266.031 \pm 0.217 \text{ MHz}$

$\alpha_1 = 88.241 \pm 0.355 \text{ MHz}$ $\alpha_2 = 11.971 \pm 0.351 \text{ MHz}$ である。加速の周波数 2856 MHz で $2\pi/3$ モードでの位相速度は 0.70 に選んであり、HEM₁₁ モードの位相速度もオ2図に示した。

電子銃からの入射電圧は 80 kV ($\beta = 0.50$) である。後進波の領域 $0 < \beta d < \pi$ でBBUの周波数 $f_B = 4302.5 \text{ MHz}$ では位相速度が 2.1 にもなり、バンチャー全長に亘る電子との位相のズレ(スリッピングファクター)は $\alpha = \frac{2\pi l}{\beta \lambda_0} (1 - \frac{\beta}{\beta_e}) \approx -30$ となる。

BW0理論でBBUの発振電流を計算すると $g_2(\alpha) = (1 - \cos \alpha - \frac{1}{2} \alpha \sin \alpha) / 2(\alpha/\pi)^3 = -0.0044 < 0$ となり、BBU発振の条件 $g_2(\alpha) > 0$ の条件を満たしていない。

$f_B = 4302.5 \text{ MHz}$ でモード変換器が完全反射であれば、バンチャー内には定在波が発生する。この定在波とビームの相互作用でBBUが起る条件式は文献2にあるように

$$\frac{P_b}{P_s} = \frac{2l^2}{\pi^2 \beta_e \lambda_0} \cdot \frac{2}{\gamma(\gamma+1)} \cdot \frac{I_0}{V_0(1+\beta)} \left\{ Z_A g_2(\alpha) + Z_B g_2(\alpha+m) + \sqrt{Z_A Z_B} g_3(\alpha, m) \right\} > 1$$

で与えられる。ここで Z_A, Z_B はそれぞれの空間高調波でのインピーダンスである。

$$g_3(\alpha) = \frac{\pi^3}{2} \left\{ (1 - \cos \alpha) \frac{2\alpha + m}{\alpha^2(\alpha+m)^2} - \frac{\sin \alpha}{\alpha(\alpha+m)} \right\} \text{ であり、我々の場合は } m = 12\pi \text{ である。}$$

P_b/P_s を与える式の $\{ \}$ の中は $\{-0.0044 Z_A - 0.0172 Z_B + 0.03 \sqrt{Z_A Z_B}\}$ なので Z_A, Z_B しいだけではプラスになり得る。 Z_A, Z_B は実験的に合せるパラメータであり、現在は我々はこれに関する知識を持っていない。

もしBBUがバンチャー内で発生しているとすれば何らかの方法でバンチャーのRF構造を変えてやればBBUの発振周波数に変化があるにちがいない。我々はバンチャーの温度を変化させて周波数の変化を測定した。材料のOFHCの温度係数 $1.68 \times 10^{-5} / \text{deg}$ からバンチャーの温度を $\pm 5^\circ \text{C}$ 変化させてやればオ1近似では

$1.68 \times 10^{-5} \times 5 \times 4302 \text{ MHz} = 360 \text{ kHz}$ だけ変化するのはずであるが、実験の結果誤差の範囲 ($\pm 100 \text{ kHz}$) 以上の変化は見られなかった。

以上により BBU はバンチャー 単独による発振ではないと結論される。

§3. 加速管の温度と BBU 発振周波数の関係

前章で述べたようにバンチャーの温度を $40 \pm 5^\circ\text{C}$ と変化させても BBU の発振周波数は変化しなかった。次に A 部の最初の加速管 (A_1) が BBU を発振している可能性があるので、残りの加速管 ($A_2 \sim B_{12}$) の温度を 40°C 一定にしたまま、バンチャーと A_1 加速管の温度を $40 \pm 5^\circ\text{C}$ と変化させて BBU の周波数を測定したが、これでも変化は見られなかった。BBU の発振周波数が加速管の温度の変化 (ディメンジョンの変化) に伴って変化することを確認するため、バンチャーの温度を 40°C 一定とし、加速管全部の温度を $40 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲内で変化させた時の BBU 周波数を示す図に示す。この図から

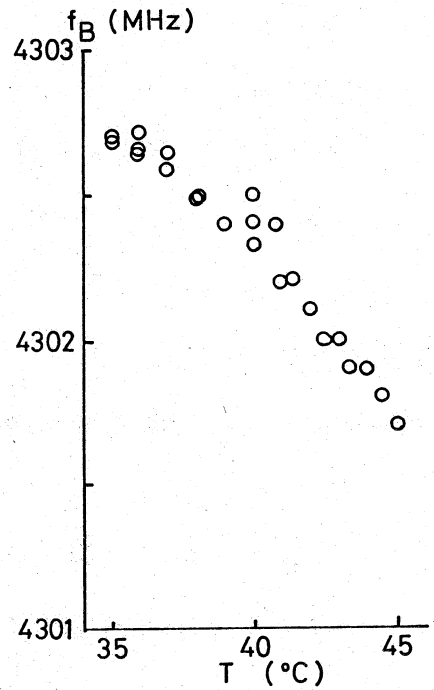


図3 加速管の温度と BBU 周波数

OFHC の線膨張率から計算した温度特性 $-72 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ にほぼ一致することがわかる。これを利用すれば加速器のどの部分の加速管が BBU を発振しているかをつきとめることが出来ると考えて、加速管をクライストロン毎に 4 本ずつの 5 組に分離して、特定の組の冷却水のバルブを締めて、残りの加速管の温度を $+5^\circ\text{C}$ 又は -5°C 変化させて BBU の発振周波数を計った。結果を表 1 に示す。B5 ~ B8 の組は更に 1 本ずつ細分して測定を行った。この測定はリニアックの RF のデューティを小さくとり、短時間の測定中はバルブを締めた加速管の温度はほとんど変化しないと考えてある。表中 H は 40°C L は 35°C を意味し、周波数の方は H は $> 4302.6 \text{ MHz}$ 、L は $< 4302.5 \text{ MHz}$ を意味する。又 HL のアンダーラインはバルブを締めてあることを示している。

BBU が加速管 20 本中 1 本だけ発振していると考えらるならば、表 1 は 20 入力 1 出力の論理回路の真理値表と見なすことが出来る。この場合はどれか 1 つの入力がインバータ

一を通して出力につながっていることに相当する。測定結果から $B_5 \sim B_8$ の附近が最もBBUの発振周波数に対する寄与が大きいらしいが、どれか1本には特定出来なかった。以上の実験結果と日常の運転時の初期調整によつてBBU発振開始の電流値がかなり変化することから、ビームサイズ、ビームポジションが関係している可能性が強いので、今後Qマグネット、ステアリング等との関連についても追求していく必要がある。

| # | A_1-A_4 | A_5-A_8 | B_1-B_4 | B_5-B_8 | B_9-B_{12} | f_B (MHz) | |
|----|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------|-------------|----|
| 57 | <u>L</u> | L | L | L | L | 4302.8 | H |
| 58 | <u>L</u> | H | H | H | H | 4302.3 | L |
| 60 | H | <u>H</u> | H | H | H | 4302.3 | L |
| 61 | L | <u>H</u> | L | L | L | 4302.8 | H |
| 62 | L | <u>H</u> | L | L | L | 4302.8 | H |
| 65 | L | L | <u>L</u> | L | L | 4302.8 | H |
| 66 | H | H | <u>L</u> | H | H | 4302.4 | L |
| 68 | H | H | H | <u>H</u> | H | 4302.3 | L |
| 69 | H | H | H | <u>H</u> | H | 4302.5 | L? |
| 70 | L | L | L | <u>H</u> | L | 4302.5 | L? |
| 72 | L | L | L | L | <u>L</u> | 4302.8 | H |
| 73 | H | H | H | H | <u>L</u> | 4302.3 | L |
| 75 | H | H | H | H | H | 4302.3 | L |
| 76 | L | L | L | <u>HHHH</u> | L | 4302.4 | L |
| 77 | L | L | L | <u>LLHH</u> | L | 4302.7 | H |
| 78 | L | L | L | <u>LLLL</u> | L | 4302.7 | H |
| 79 | H | H | H | H | H | 4302.3 | L |
| 80 | H | H | H | H | H | 4302.3 | L |
| 81 | H | H | H | <u>HHHH</u> | H | 4302.3 | L |
| 82 | L | L | L | <u>HHHH</u> | L | 4302.6 | H? |
| 83 | L | L | L | <u>HLLL</u> | L | 4302.7 | H |
| 84 | H | H | H | <u>HHHH</u> | H | 4302.3 | L |
| 85 | H | H | H | <u>HHHH</u> | H | 4302.3 | L |
| 86 | L | L | L | <u>LLHL</u> | L | 4302.7 | H |
| 87 | L | L | L | <u>LLLL</u> | L | 4302.7 | H |
| 88 | H | H | H | <u>HHHL</u> | H | 4302.3 | L |

表1

加速管の温度の組合せと
BBU発振周波数

参考文献

- 1) P.B. Wilson: Stanford High Energy Physics Laboratory report HEPL-297 (1963).
- 2) K. Mittag et al.: Nucl. Instr. Meth. 76 (1969) 245.