

ビームブローアップ現象の測定

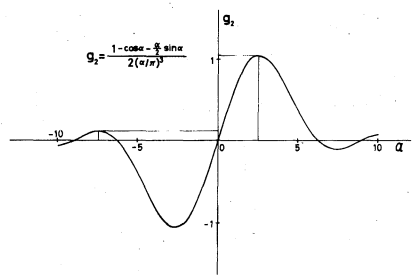
小山田正幸, 今野収, 浦澤茂一, 一戸隆, 栗奈亮, 根本重伸, 柴崎義信, 鳥塚賢治 (東北大核理研)
佐藤勇, 稲垣慈見, 松本浩, 福田茂樹 (高工研)

§1. はじめに

大電流電子リニアックの開発の歴史に於て, 加速の電流を大きくしていた時, ある値を越えると, 電流パルスの後縁から欠けはじめ, パルス幅が殺々せぼまり, ついには出力電流のほとんどが加速途中で失われてしまうという現象が観測された^{1) 2) 3)}. この現象はパルス幅がせぼまるので *Pulse Shortening* 又はビームが加速途中で失われることから *Beam Blow-up (BBU)* と呼ばれている. この現象が起る加速電流の閾値には色々なパラメータが複雑に関連しているが, 特に加速管の電氣的構造及び加速電流のパルス幅が密接に関連している事が早くから気付かれていた. BBU発振の電流閾値は加速の周波数の二乗に逆比例する経験則⁴⁾を利用してLバンド(約1300MHz)の大電流電子リニアックがイェール大学, レンセラー大学, NBS等に建設されて成功をおさめた. 一オBBUは加速管の中で加速電流とHEM₁₁モードのマイクロ波との相互作用により *Backward Wave Oscillation (BWO)* を起すと考えられたので⁴⁾, 加速管のモードとしてはそれまで一般的に用いられてきた $\pi/2$ モードよりは $2\pi/3$ モードの方が有利であり^{4) 5)}, その後のSバンドの加速管は $2\pi/3$ モードを採用するものが大多数を占めるようになってきた. 更に定勾配型 (*Constant Gradient*) はHEM₁₁モードと電子流との作用距離が短くなるのでBBUの防止に効果があると考えている. 又定インピーダンス型でもHEM₁₁モードに対してモードサプレッサーを付加することによりBBUを防止した例がある⁶⁾.

§2. 東北大核理研300 MeV電子リニアックの加速管パラメータの選定

核理研の電子リニアックは基本的には多用途型として設計を行なった⁷⁾. リニアックは大別して大電流加速部(A部, 1m加速管8本)と高エネルギー加速部(B部, 2m加速管12本)から出来ている. この規模のリニアックで定勾配型加速管を採用する事はコスト上無理であったので, $2\pi/3$ モード定インピーダンス型を採用した. BWO理論に基づくWilsonの考え⁸⁾によればHEM₁₁モードと電子流の結合度を表わす係数 g_2 は電子とマイクロ波との位相のずれを示すSlip parameter ($\alpha = \beta l(1 - v_p/c)$)の関数として $\alpha = 2.65$ の時最大値となり, この時の周波数が最も発振し易いことになる. (オ1図参照) 核理研の加速管は比較的にインピーダンスが高く, すなわち加速管のディスクの孔径が小さいので $v_p = c$ の線はHEM₁₁モードの $v_g < 0$ の部分($\alpha > 0$)とは交叉しない. しかしオ1図から解るように $\alpha < 0$ の領域の周波数でも $g_2 > 0$ となる部分があり, やはりBBUを起す可能性がある^{8) 9)}.



第1図 ビームとTM₁₁(HEM₁₁)モードの結合係数 g_2 . 横軸はスリップパラメータ α .

BBUの発振電流の閾値は加速管の長さ(電子とHEM₁₁モードの相互作用する距離)の三乗に逆比例するので、一本の加速管を2つのインピーダンスの違った部分に分けることにより実効的な長さを短くすることをほかった。更に共通のパスバンドにある周波数でも発振の閾値が大きくなるように孔径の関係を選んだ⁸⁾⁹⁾。表1表に加速管の基本パラメータを示す。表2図には

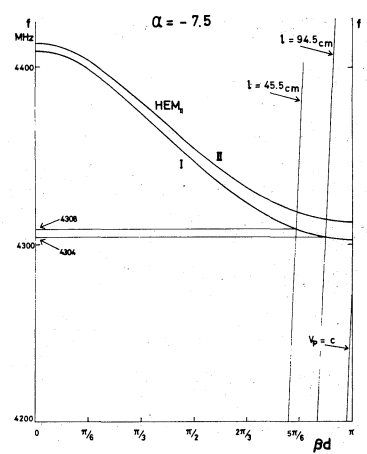
第1表 2段定インピーダンス型加速管のパラメータ

	I 部	II 部
$2a$	21.082 mm	20.726 mm
d	5.842 "	5.842 "
D	34.990 "	34.990 "
$2b$	82.051 "	81.978 "
Q	13,000 以上	13,000 以上
v_g	0.0091 c	0.0085 c
f	0.253 neper / m	0.271 neper / m
r	58.2 M Ω / m	60.3 M Ω / m

TM₁₁モードの周波数

0	4408.70 MHz	4413.17 MHz
$\pi/6$	4398.59 "	4403.58 "
$\pi/3$	4373.71 "	4380.37 "
$\pi/2$	4345.78 "	4353.84 "
$2\pi/3$	4322.46 "	4331.51 "
$5\pi/6$	4307.70 "	4317.13 "
π	4302.35 "	4312.30 "

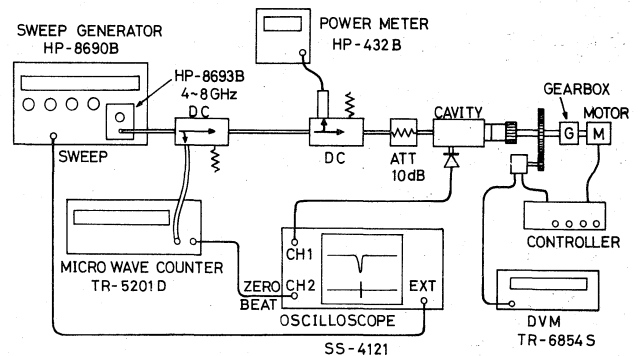
加速管のI部(前段), II部(後段)のHEM₁₁(TM₁₁)モードの分散特性を示す。図から明かなように $v_p=c$ の線は $\beta d \leq \pi$ では分散曲線とは交叉しない。 $\alpha < 0$ となる周波数でのBBU発振の閾値電流の計算結果は核理研リニアックの加速電流仕様値以上である。しかしビーム加速テストの結果,パルス幅3 μ s,ピーク電流値110 mA以上でBBUが観測された⁷⁾¹⁰⁾。同じ時期にスタンフォードの2マイル加速器の試運転の結果もBBUを発生し,このBBUは従来のBWO理論で説明出来る型のものではなく,長い電子リニアックに特有のBBUであることが解,た¹¹⁾。この型のBBUを防止するにはQ電磁石を増強してビームの収束を良くすることが効果的であることがスタンフォードで実証された。核理研の場合も同じ型のBBUと考えられたので,Q電磁石を加速管列に増強して加速電流の増加に効果があると認められた¹⁰⁾。又BBUの発振が行,た場合には出カビームに4301MHzと4266MHzの周波数成分が検出された¹⁰⁾。



第2図 加速管の分散特性(TM₁₁モードのみ)とBBU発振周波数との関係

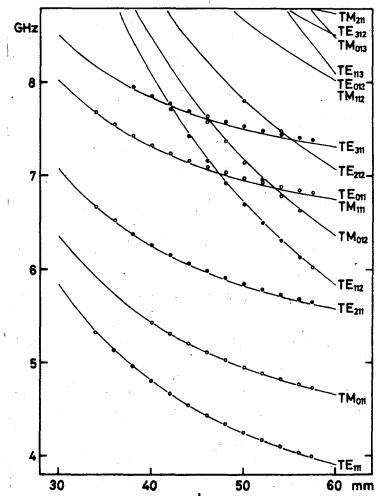
3. 核理研リニアックのBBU発振周波数の再測定

BBUの現象を深く解明することは現在のリニアックの性能向上に非常に役立つと同様に将来建設されるリニアックの設計上ぜひ必要な事である。我々は今回核理研リニアックを用いてBBUの研究を開始した。先ず最も重要な手がかりであるBBU発振周波数の測定から始めた。リニアックはパルス的に加速を行い,BBUも又パルス的に発振するので,この周波数を測定する最も基本的な方法として空洞波長計を用いた。この波長計はリバーシアルモータによりリモートコントロール出来るようにしてある。空洞の目盛りの位置を知るために10回転式のポテンショメータをギアで接続してデジタルボルトメータで読みとることが出来る。空洞長(lmm)とデジタルの読み(XV)との関係は実験的に $l = 58.444 - 2.5081X$ で表わされ,直線性は非常に良い。次に空洞長に対する共振周



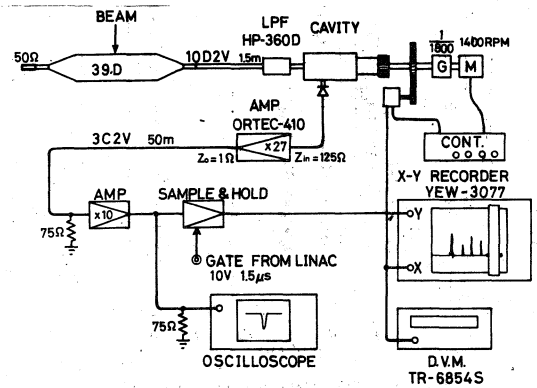
第3図 空洞波長計を較正するためのブロック図

波数の校正をオ3図のアロウフ図の構成で行った。結果をオ4図に示す。実線はTE₁₁₁, TM₀₁₁モードに最も良く合うような空洞半径($a = 29.2\text{ mm}$)での計算値を表わしている。図からも解るように基本モードTE₁₁₁の他にかなりの共振モードが観測された。計算では13 GHzまで50本近い共振曲線が求められている。BBUの発振周波数の測定はオ5図により行った。リニアックからの電子ビームを同軸管39Dの中央に照射することにより誘起されるマイクロ波を空洞波長計に導き周波数を測定する。連続的な記録にはX-Yレコーダを用いた。ローパスフィルター(LPF)を用いない場合は周波数の高い成分(主に加速の周波数 $f_0 = 2856\text{ MHz}$ の高調波)と空洞波長計の高次共振モードによるピークが多数観測されるのでBBUの発振周波数の測定時はLPFを用いて不用な高い周波数成分をカットした。オ1回目の測定はA部+B部、すなわち全加速管を用いた加速時のBBUを測定した。測定結果はBBU発振周波数は $f_B = 4303.2 \sim 4304.25\text{ MHz}$ である¹²⁾¹³⁾。この周波数はBBUの発振が前記の $\alpha = -7.5$ で発振しているとするオ2図に示すように1 m加速管, 2 m加速管の前段の長さ45.5 cm, 94.5 cmに対応する線との交点から2 m加速管での発振であることが解る。1 m加速管なら4308 MHzと推定される¹²⁾。そこでオ2回目の測定



第4図 空洞波長計の長さ(l mm)と各モードの共振周波数との関係。実測(○印)は1つの共振、●印は接近した2つの共振を示すと計算値。

を1 m加速管だけからなるA部で行った。BBU発振周波数の精密決定には加速の周波数(f_0)とBBUの周波数(f_B)の高調波同志のビートを利用する巧妙な方法を考案して用いた¹³⁾。測定結果は $f_B = 4302.5 \sim 4302.9\text{ MHz}$ である。この周波数はオ1回目の測定値のようにオ2図を使えば説明出来ない。核理研リニアック建設後のBBU対策としてQ電磁石の増設の他にマルチセクション型のBBUを防止する意味でA部加速管(1 m)の1部, A3とA5の加速管のパラメータを基本パラメータと違ったものを再製作して用いている。記録によれば夫々の前段のディスクの孔径($2a$)は22.809, 21.946 mmである。 $\beta d = \pi$ のカットオフ周波数は夫々4244, 4272 MHzと推定される。4302.7 \pm 0.2 MHzはこれらの2本の加速管では前段, 後段共通パスバンドに入っており, これら2本の加速管のHEM₁₁モードについての詳しいデータが無い現段階では細い議論は出来ない。オ3回目の測定はオ1回目の測定と同様に全加速管を用いて行った。BBUの発振周波数は $f_B = 4302.6\text{ MHz}$ で, オ2回目の1 m加速管だけを用いた場合の結果と良く一致した。オ1回目の測定時にはコアモニターの出力は60 mVであったがオ3回目の測定ではBBUは100 mVから発生し始めた。3回の測定を矛盾なく説明するには, オ1回目は2 m加速管での発振で, オ2回, オ3回の測定は1 m加速管での発振と考えれば良い。



第5図 BBU発振周波数測定のプロック図

を1 m加速管だけからなるA部で行った。BBU発振周波数の精密決定には加速の周波数(f_0)とBBUの周波数(f_B)の高調波同志のビートを利用する巧妙な方法を考案して用いた¹³⁾。測定結果は $f_B = 4302.5 \sim 4302.9\text{ MHz}$ である。この周波数はオ1回目の測定値のようにオ2図を使えば説明出来ない。核理研リニアック建設後のBBU対策としてQ電磁石の増設の他にマルチセクション型のBBUを防止する意味でA部加速管(1 m)の1部, A3とA5の加速管のパラメータを基本パラメータと違ったものを再製作して用いている。記録によれば夫々の前段のディスクの孔径($2a$)は22.809, 21.946 mmである。 $\beta d = \pi$ のカットオフ周波数は夫々4244, 4272 MHzと推定される。4302.7 \pm 0.2 MHzはこれらの2本の加速管では前段, 後段共通パスバンドに入っており, これら2本の加速管のHEM₁₁モードについての詳しいデータが無い現段階では細い議論は出来ない。オ3回目の測定はオ1回目の測定と同様に全加速管を用いて行った。BBUの発振周波数は $f_B = 4302.6\text{ MHz}$ で, オ2回目の1 m加速管だけを用いた場合の結果と良く一致した。オ1回目の測定時にはコアモニターの出力は60 mVであったがオ3回目の測定ではBBUは100 mVから発生し始めた。3回の測定を矛盾なく説明するには, オ1回目は2 m加速管での発振で, オ2回, オ3回の測定は1 m加速管での発振と考えれば良い。

§4. まとめ

一連の測定を通じて強く感じられた事はBBUは不安定な現象であり、数多くのパラメータが複雑に絡み合、てBBU発振の電流閾値及び周波数を決めている事である。リニアックの調整によってBBUの発生の様子がまるで変、てくるのは経験的に知られており、どのパラメータがどのように効くのかを知るにはBBUの測定を迅速に精度良く行う手段が必要である。現在核理研のリニアックで起、ているBBUのメカニズムとしてはBWOの他に加速管の中に定在波が立ち、これがビルドアップする型があるので¹⁴⁾、実際の加速管の中での定在波の共振周波数を測る必要がある。予備的測定ではドア)型モード変換器付(大部分)ではBBU発振周波数付近で入口から見た場合のVSWRは約70で全反射に近い。逆にいえば中のマイクロ波は外に出にくい。一オスタンフォードの空洞型モード変換器の例ではVSWRは4以下になるので入口からVSWRを測ることにより共振の周波数が測定出来て、中でビルドアップする電場の周波数と一致しており、BBUの観測で得られた周波数と全く一致している¹⁴⁾。この様なメカニズムで解析することにより現在核理研で測定されているBBU発振の合理的説明が得られることが期待される。

参考文献

- 1) M. G. Kelliker and R. Beadle : *Nature* 187 (1960) 1099.
- 2) J. C. Nygaard R. F. Post : *Nucl. Instr.* 11 (1961) 126.
- 3) M. C. Crowley-Milling et al. : *Nature* 191 (1961) 483.
- 4) P. B. Wilson : *Stanford High Energy Physics Laboratory report* HEPL-297 (1963)
- 5) 平川浩正 : *Japan J. Appl. Phys.* 3 (1964) 27.
- 6) 戸田哲雄, 入江浩一, 根本幸昭, 上富勇, 美濃和芳文 : *三菱電機技報* 42 (1968) 355.
- 7) 鳥塚賀治, 小島融三, 浦澤茂一 : *応用物理* 37 (1968) 690.
- 8) 小山田正幸 : *unpublished* (1963).
- 9) 小島融三, 小山田正幸 : *T.L-Report* 102 (1963).
- 10) 後藤正幸, 秋葉稔光, 入江浩一, 上田孝 : *三菱電機技報* 42 (1968) 320.
- 11) R. B. Neal : *Phys. Today* 20 No. 4, (1967) 27.
- 12) 小山田正幸 他 : *核理研報告* 10 (1977) 159.
- 13) 小山田正幸 他 : *核理研報告* 10 (1977) to be published.
- 14) R. H. Helm, G. A. Loew and W. K. H. Panafsky : *The Stanford Two-Mile Accelerator* ed. R. B. Neal (W. A. Benjamin, New York, 1968) P. 163.