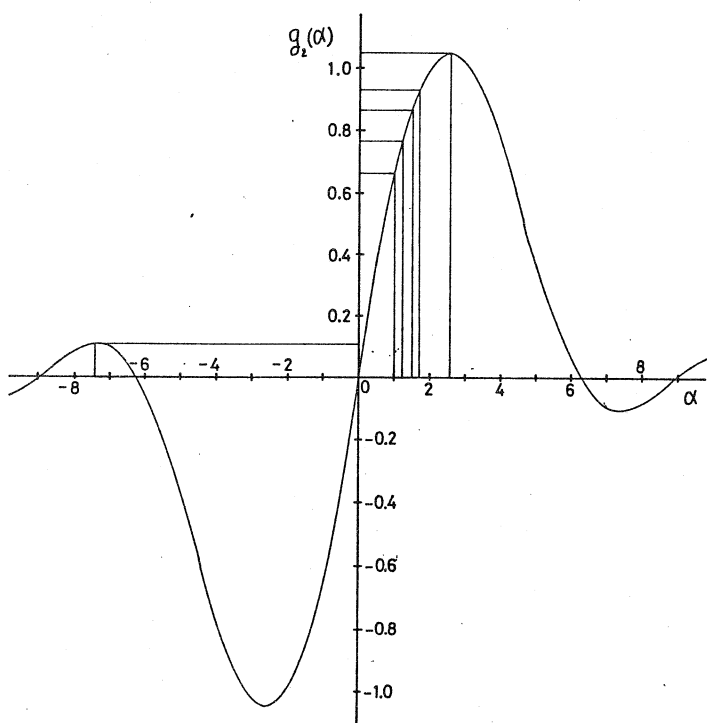


## 電子リニアックにおけるビームブローアップ

東北大学核理工学 小山田正幸

## §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ったとき、ある値を越えると、電流パルスの後縁から欠けはじめ、パルス幅が段々せばまり、ついには加速電流のほとんどが途中で失われてしまうという現象が観測された<sup>1)2)3)</sup>。この現象はパルス幅がせばまるので *Pulse Shortening* 又はビームが加速途中で失われることから *Beam Blow-up, Beam Break-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こと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<sup>1)</sup>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。一方BBUは加速管の中で加速電流とHEM<sub>11</sub>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<sup>4)</sup>、加速管のモ



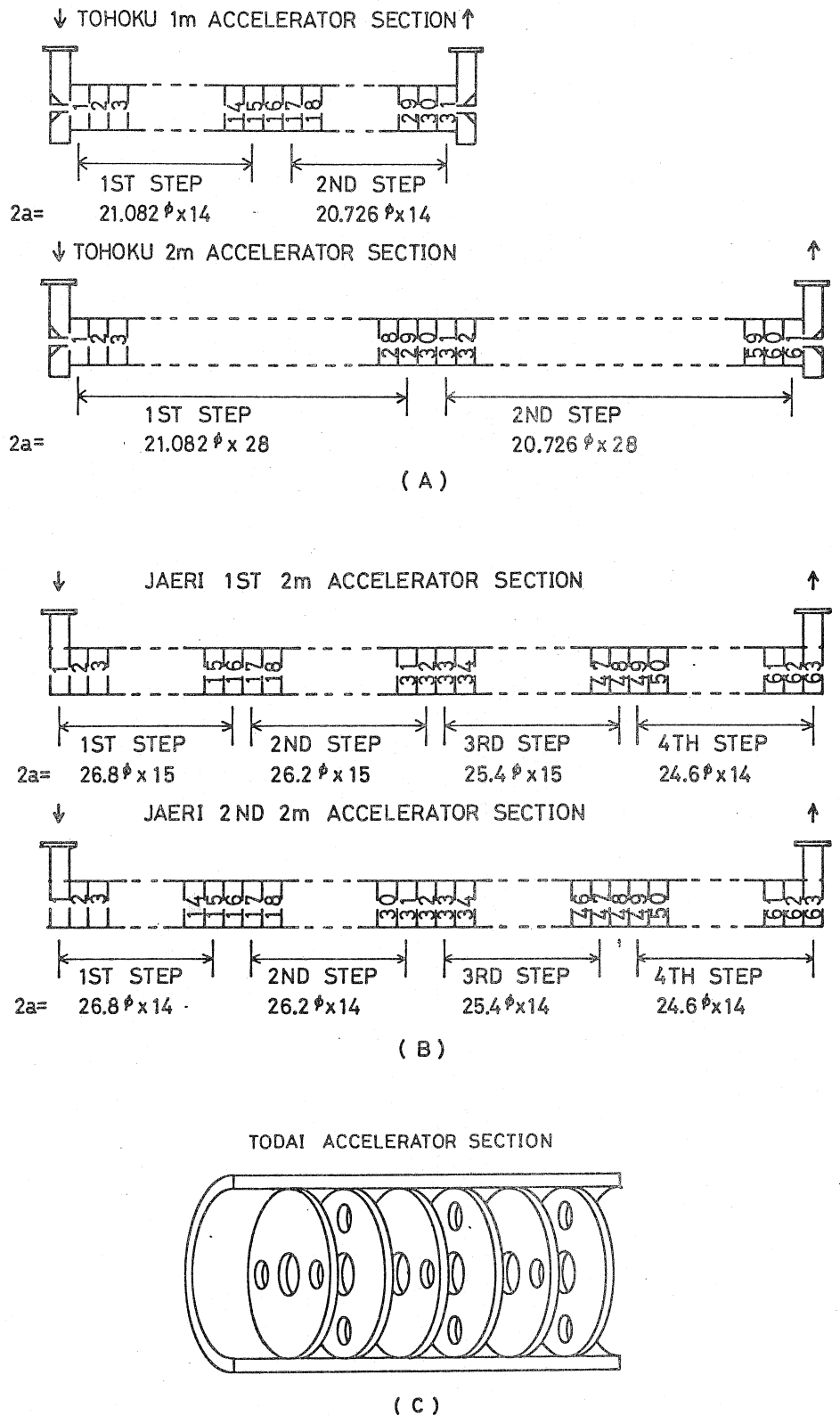
第 1 図

ードとしてはこ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<sup>4)5)</sup>、又の後の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HEM<sub>11</sub>モードと電子流との作用距離が短くなるのでBBUに効果があると考えられている。又定インピーダンス型であってもHEM<sub>11</sub>モードに対してモードサプレッサを付加することによりBBU防止に効果を上げた例がある<sup>6)</sup>。

筆者等は近年  
 東北大300 MeV電子  
 リニアック, 原研の  
 新しいリニアック,  
 及び東大35 MeV  
 電子リニアックのB  
 BUを測定する機会  
 が得られたので,  
 今回は特にBBU発  
 振周波数と加速管の  
 構造との関連につい  
 て報告する。

§ 2. 東北大300 MeVリニアック

このリニアック  
 は基本的には多用途  
 型として設計を行っ  
 た。リニアック  
 は大電流加速部(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。当時この規  
 模のリニアックで定  
 勾配型加速管を採用  
 することは無理で  
 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の考え方によれば

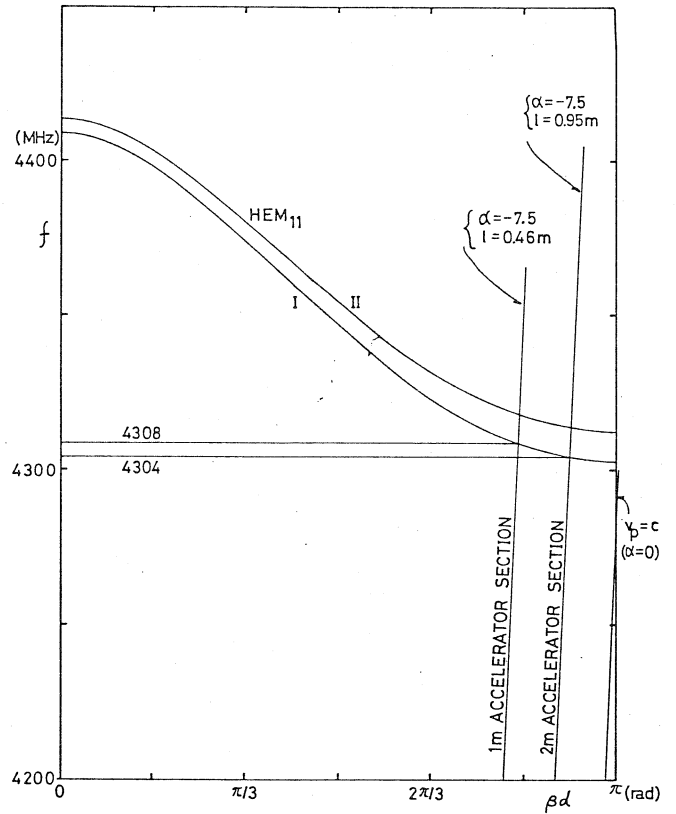


第 2 図

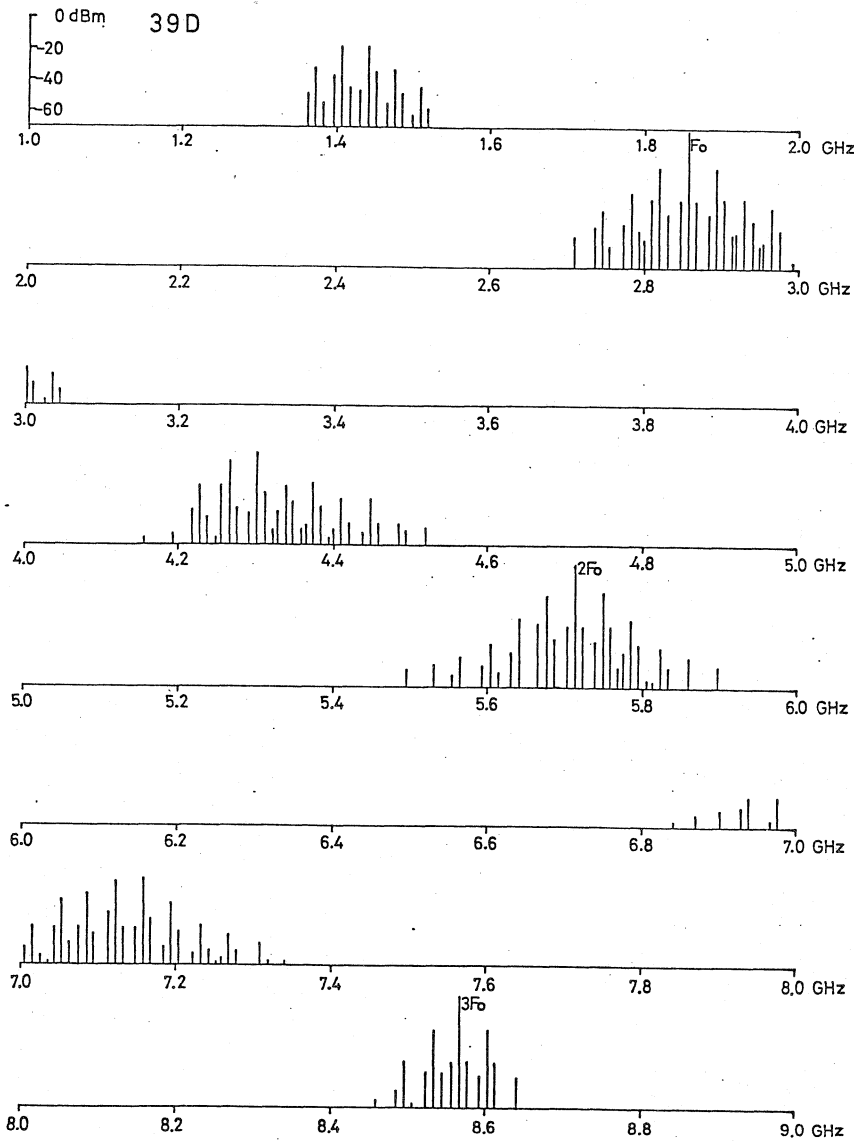
HEM<sub>11</sub>モードと電子流の結合度を表わす係数 $g_2(\alpha)$ は電子とマイクロ波との位相のずれを示すパラメータ $\alpha = \beta l(1 - v_p/c)$ の関数として $\alpha = 2.65$ の時最大となり、この時の周波数が最も発振し易いことになる。(第1図参照) 東北大リニアックの加速管のインピーダンスを比較的高めにしすなわち加速管のディスクの孔径を小さくしたので、(第2図(A)及び第3図参照)  $v_p = c$ の線はHEM<sub>11</sub>モードの $v_g < 0$ の部分( $\alpha > 0$ )とは交叉しない。しかし第1図からも解るように $\alpha < 0$ の領域の周波数でも $g_2 > 0$ となる部分があり、やはりBBUを発振する可能性があることを指摘した<sup>9)9)</sup>。

BBUの発振電流の閾値は電子とHEM<sub>11</sub>モードが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距離を短くするをはかった。 $\alpha < 0$ となる周波数でのBBU発振の閾値電流の計算結果は仕様値以上であったが、ビーム加速テストの結果、パルス幅3 $\mu$ 秒、ピーク電流値110mA以上でBBUが観測された<sup>7)10)</sup>。同じ時期にSLAC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1本の加速管によるBWO型ではなく、長いリニアック特有の増幅型であることが解った<sup>11)</sup>。この型のBBUを防止するにはQ電磁石の増強と、加速管入口の数空洞をバラバラにデチューンすることが加速電流の増加に効果があることを実証した<sup>11)12)</sup>。東北大リニアックではQ電磁石を加速管列に増強して加速電流の増加をはかった<sup>10)</sup>。

A部+B部の加速でBBUを発振した場合にビームに含まれている周波数成分を同軸管39Dでとらえ、スペクトルアナライザーで分析した結果を第4図に示す。加速の周波数を変化させたり、加速管の温度を変えて測定することにより、この図に示した複雑なスペクトルは、加速の周波数2856MHzとBBU発振周波数4304MHzの夫々の高調波同士の混合として説明出来ることが解った。このBBU発振周波数は第3図から予想されたものと良く一致していて、これらの加速管が再生気味の増幅器として働いているこ



第 3 図



第 4 図

第 1 表 (\*は 14), \*\*は 15)による

実測周波数(MHz)	強度(dBm)	計算周波数(MHz)	$\alpha$
$f_1$ 4114.5	-42	4114*	1.76*
$f_2$ 4134.2	-54	4134*	1.55*
$f_3$ 4143	-62	4140 (SLAC)**	
$f_4$ 4161	-48	4161*	1.28*
$f_5$ 4188	-73	4187*	1.01*

とが解った。

§3. 原研リニアック

原研リニアックの構成はバンチャーの後に第2図(B)に示した2本の2m加速管があり更にその後にはARCO製のSLAC型加速管が3本続く。このリニアックでは600mA以上の電流を加速してもBBUは発生しない。このリニアックについて東北大リニアックでの測定と同じ方法で周波数成分の測定を行った。ビームパルス幅0.6μ秒では加速の周波数とえの高調波以外の成分は測定出来なかった。パルス幅を2μ秒にした時、BBUの発振周波数と考えられる成分を5本観測した。結果を第1表に示す。2m加速管は4段ステップで、

これらのHEM<sub>11</sub>モードの分散特性を第5図に示す。図から解るように $v_p = c$ の線は4本のHEM<sub>11</sub>モードの曲線と交わっておりスリッパパラメータは $\beta d = \pi$ で第1表に示した数値となる。この数値を第1図に書き

入れてみると  $g_2(\omega)$ の値はかなり大きな値となり、BBUを発振する可能性を示している。BBUの発振周波数を計算してみると(第1表)、実測周波数に驚く程良く一致している。原研リニアックに於てビームパルス幅を2μ秒より更に長くすれば、これらの周波数

でBBU発振を起しビームパルスが欠けるのが観測されるであろう。

§ 4. 東大リニアック

このリニアックの加速管は定インピーダンス型ではあるが第2図(C)に示したようにHEM<sub>11</sub>モードを抑制する為の孔が交互に直角になるようにあけてある<sup>6)</sup>。このリニアックではビーム幅45 μ秒で280 mA以上の電流加速でBBUが観測される。この時ビームに含まれる周波数成分を測定したものが第6図である。東北大の場合(第4図)と様子がかなり異っている。加速の周波数を変化させる方法で調べた結果、BBU発振の主な周波数成分は6280.0 MHzであり、他はこの周波数と加速の周波数の成分の高調波同士の混合として説明される。このBBUはHEM<sub>11</sub>モード

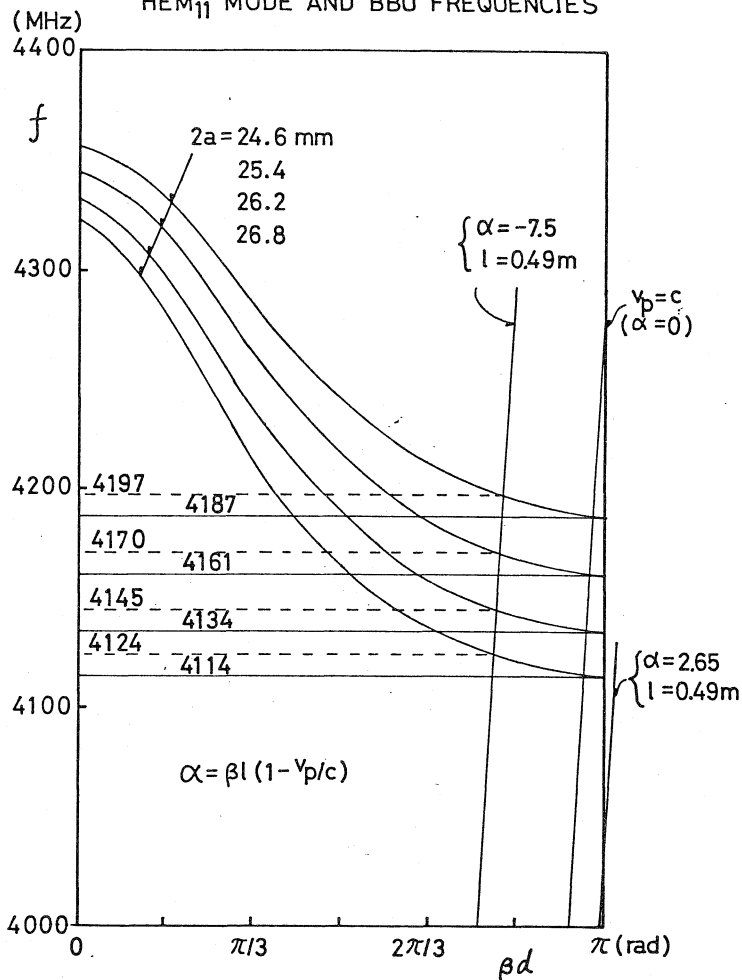
ではなく、更に高次のモードによるものと考えられる。

通常のHEM<sub>11</sub>モードのBBU成分は弱いながらも第6図に小さく見えており、HEM<sub>11</sub>モード抑制孔は、元の意味では役割りを果しているとは結論できる。

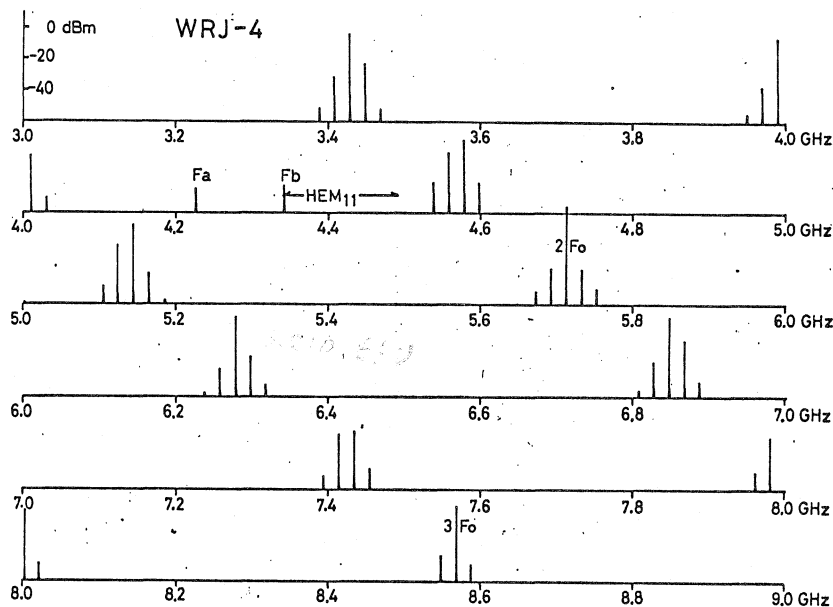
§ 5 その他

現在世界各地で電子加速器のデューティサイクルを上げる試みが行われている。これらの加速器の運転がCWに近う

JAERI 2m ACCELERATOR SECTION  
HEM<sub>11</sub> MODE AND BBU FREQUENCIES



第 5 図



第 6 図

く事や、マイクロトロンのようにビームが同じ加速管の中を何度も通ることになるとBBUの問題が大きく浮び上がってきた。このような未来型の電子加速器のBBUについて、実験や計算例が文献16にかなりのスペースをさいて報告されている。

この報告は東北大核理研, 高工研, 東大工, 原研及び三菱電機の関係者の協力のもとに行った実験の成果にもとづいている。

### 参考文献

- 1) M. G. Kelliker et al. : *Nature* 187 (1960) 1099
- 2) J. C. Nygaard et al. : *Nucl. Instr. Meth.* 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 他 : 電子通信学会電子装置研究会資料 資料番号 ED67-38(1967-12)  
三菱電機技報 42 (1968) 355
- 7) 鳥塚 賀治 他 : *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 : *TL-Report* 102 (1963)
- 10) 後藤 正幸 他 : 三菱電機技報 42 (1968) 320
- 11) R. B. Neal : *Phys. Today* 20 No. 4 (1967) 27
- 12) G. A. Loew et al. : *Proc. VIIth Int. Conf. High Energy Accel.* 2 (1969) <sub>229</sub>
- 13) 小山田正幸 他 : 核理研研究報告 10 (1977) 159  
小山田正幸 他 : 10 (1977) 303
- 14) 家喜 洋司 : 私信
- 15) G. A. Loew : *The Stanford Two Mile Accelerator* (ed. by R. B. Neal, 1968  
W.A. Benjamin, Inc. New-York) 217
- 16) H. Euteneuer : *Proc. Conf. Future Possibilities for Electron Accel.* P  
A. O. Hanson : *ibid* Q  
A. M. Vetter : *ibid* R  
H. Herminghaus : *ibid* S  
G. Saxon : *ibid* T