

Y. TORIZUKA

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku  
University, Sendai 982

ABSTRACT

The improvement of the structure for traveling wave (TW) and standing wave (SW) is discussed. The energy gain between the TW and SW structures is compared. Scaling formulas for the starting currents of the beam blowup (BBU) of the accelerating structure at the initial, intermediate and stationary states are presented. Formulas are useful to explain the observed data and to interpret the design value.

I はじめに

自由電子レーザーの発振がリニア・コライダーまで、電子加速器に寄せられた関心はかつてない多様な時代を迎えている。ビームに対する期待は次のような広範囲になっている。

- |           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| 1) エネルギー  | MeV ~ TeV                       |
| 2) 電流     | 100 $\mu$ A ~ MA                |
| 3) エネルギー幅 | 2 ~ 20%                         |
| 4) エミッション | 10 ~ 0.02 mm $\cdot$ mrad       |
| 5) パルス幅   | ps, ns, $\mu$ s, ms, $\mu$ s CW |

これらに対応する加速器には、大電流を扱うものとしてパルス・ラインライナック、磁気誘導ライナックが、RFライナックにもさまざまな目的のものがある。いずれの場合も、加速ビーム電流の限界を決めているのが、Beam Blowup (BBU)の発生によるビーム消滅である。

今回はこのなかで、最近のRFライナックの加速管構造について取り上げ、進行波(TW)と定在波(SW)の加速管について議論し、両者の得失について明らかにする。BBUについては、その開始電流を初期段階、中間段階、定常状態に分け、それぞれについてスケールアップの式を導き、実験の結果と比較する。

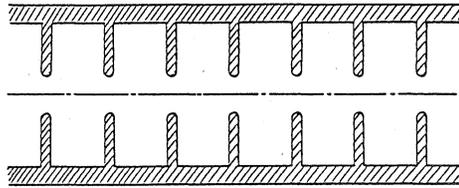
2 加速管構造とエネルギー・ゲイン

ライナックの加速管構造には進行波(TW)と定在波(SW)とがある。図-1にTW型加速管の例を示した。従来のディスク・スーパー- $2\pi/3$ モードのシャント抵抗は50~55 M $\Omega$ /m、(b)の改良型は70~75 M $\Omega$ /m、(c)の1-スコーン型はシャント抵抗を最大にするように設計したもので、85 M $\Omega$ /m程度が期待できよう。

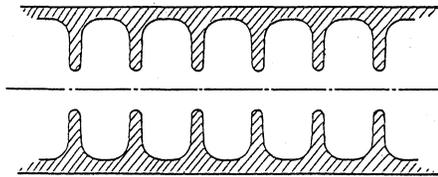
SWの空洞は $\pi/2$ モードが $\pi$ モードより特殊な場合を除けばすべての点で優れている。但し、シャント抵抗をあげるために種々の工夫がなされた。加速空洞に対して

零電場の結合空洞は最小<sup>のサイズ</sup>になっている。図-2にこれらの例を示した、空洞のシャント抵抗は大体  $5\text{M}\Omega/\text{m}$  程度でこれらの間で殆んど差はない。DISK AND WASHER 型は空洞間の結合係数が66%と大きく、ON-AXIS-COUPLEDの場合は15%、SIDE-COUPLEDは5%位である。製作の容易さ、BBU対策を考慮すると ON-AXIS-COUPLED が優れている。

a) ディスク・スペーサー  $2\pi/3$  モード



b) 改良型ディスク・スペーサー  $2\pi/3$  モード



c) ノーズコーン  $7\pi/8$  モード

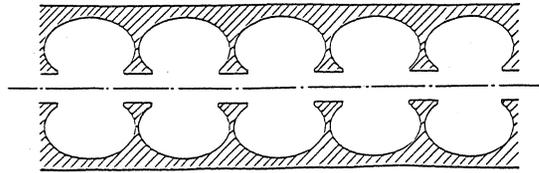


図-1 進行波(TW)加速管構造のいくつかの例

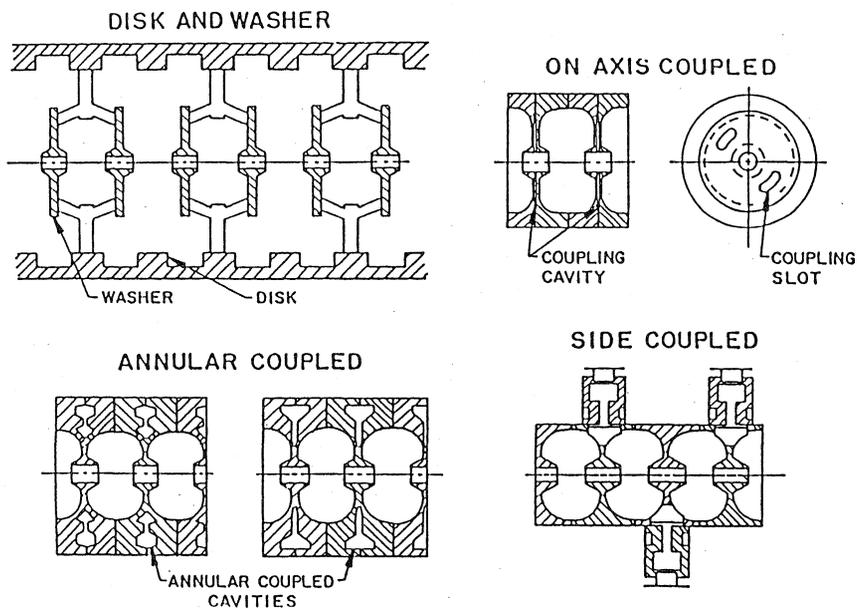


図-2 定在波(SW)加速管構造のいくつかの例

次にTWとSWの加速管のエネルギー・ゲインを比較する。先づ、TWの場合は、

$$V_{TW} = (1 - e^{-2\tau})^{1/2} (Pr_0 L)^{1/2} - \frac{Lr_0 L}{2} \left(1 - \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}}\right) \quad (1)$$

$P$  = 全RF電力

$\tau$  = attenuation constant (ネーパ)

$r_0$  = シャント抵抗

$L$  = 加速管長

$P = 25 \text{ MW}$ ,  $r_0 = 73 \text{ M}\Omega/\text{m}$ , 加速管長  $2\text{m} \times 4 = 8\text{m}$  対する  $\tau = 0.97$  ネーパ および  $\tau = 1$  ネーパの場合のエネルギー・電流特性を図-3に示した。  $\tau$  が大きい方が負荷に吸収されるRF電力が少い。

SWの場合は

$$V_{SW} = \frac{2(\beta P r_0 L)^{1/2}}{1 + \beta} - \frac{Lr_0 L}{1 + \beta} \quad (2)$$

$\beta$  = RF電源と空洞との結合係数

上記のTWの場合と同じ条件の電力、シャントインピーダンス、加速管長を用いて、SWのエネルギー・電流特性を計算し、図-3に示した。  $\beta = 1$  では電流  $\sim 0$  で、  $\beta = 2$  では  $200 \text{ mA}$  付近で整合がとれている。TWとSWのいつれを選択するかは慎重に決めなければならぬ。

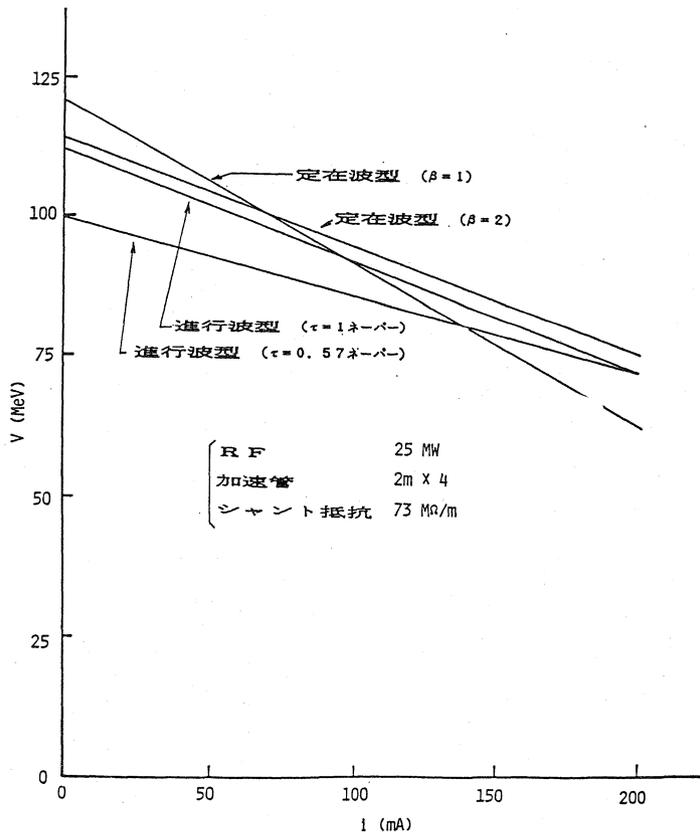


図-3 進行波TWと定在波SWのエネルギー・電流特性

### 3 BBUのスケール則

Beam Blower (BBU) の開始電流のスケール則をその初期状態、中間状態、定常状態に分けて考えることとしよう。cumulative な BBU について取り上げ、regenerative な BBU の穿ちは小さいものとする。先づ、定常状態から始める。

#### 1) 定常状態 — CWビーム —

平均電流  $I$  のビームによって誘起される電磁場  $U$  は

$$U = -I r_L L \quad (3)$$

であらわされる。  $r_L$  は BBU モードに対する空洞のチャート抵抗、  $L$  は加速管長である。一方、電磁場からは

$$U = \frac{c}{e} \Delta p \quad (4)$$

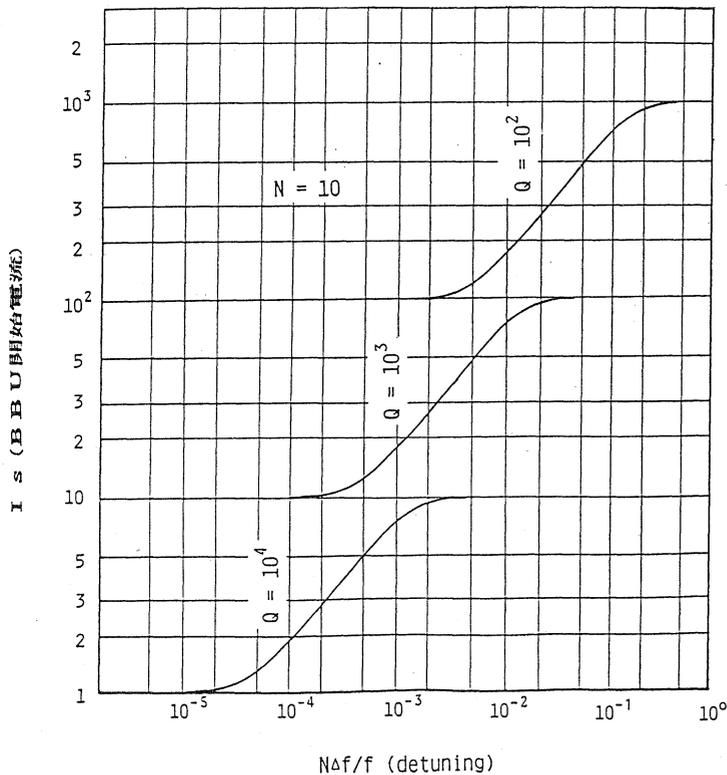
のエネルギーがビームに与えられる。  $\Delta p$  は移行する運動量である。

(3) と (4) 式の左辺が等しくなった時の電流が BBU 開始電流  $I_s$  である。

$$I_s \propto \frac{1}{r_L L} \sim \frac{1}{Q \frac{r_L}{Q} N L} \sim \frac{1}{Q N} \quad (5)$$

$Q$  は空洞の quality factor で、  $r_L/Q$  は結合チャート抵抗、  $N$  はセル数 (空洞) 数、  $L$  はその長さである。

(5) 式に従って  $N$  個の空洞を  $\Delta f$  の等間隔に detune した場合の効果を考える。 detune によって誘起される電場の向きは  $\psi$  が変化し、



$$\tan \psi = 2Q \frac{\Delta f}{f} \quad (6)$$

$N$  個の空洞の detune によって  $I_s$  の増加率  $M$  は

$$M = N / \left[ 1 + \sum_{n=1}^{n=N} 2 (\cos \tan^{-1} 2Q \frac{n \Delta f}{f})^2 \right]$$

$$\pi = 0.12 \dots N-1$$

$$\dots \quad (7)$$

$N=10$  で  $Q$  が変の場合の detuning による  $I_s$  の増加はおよそ  $Q$  による影響について図-4 に示した。

図-4 detuningによる  $I_s$  の変化、空洞数  $N=10$  の場合

2) 初期状態 — nsec パルス —

誘起電圧の立ち上りは

$$U = -I_{RL} (1 - e^{-\omega t/2Q}) = -I_{RL} \frac{\omega L}{2Q} \quad (8)$$

$$\omega t/2Q \ll 1$$

$I_s$  の代りの電荷  $(It)_s$  を用いる。

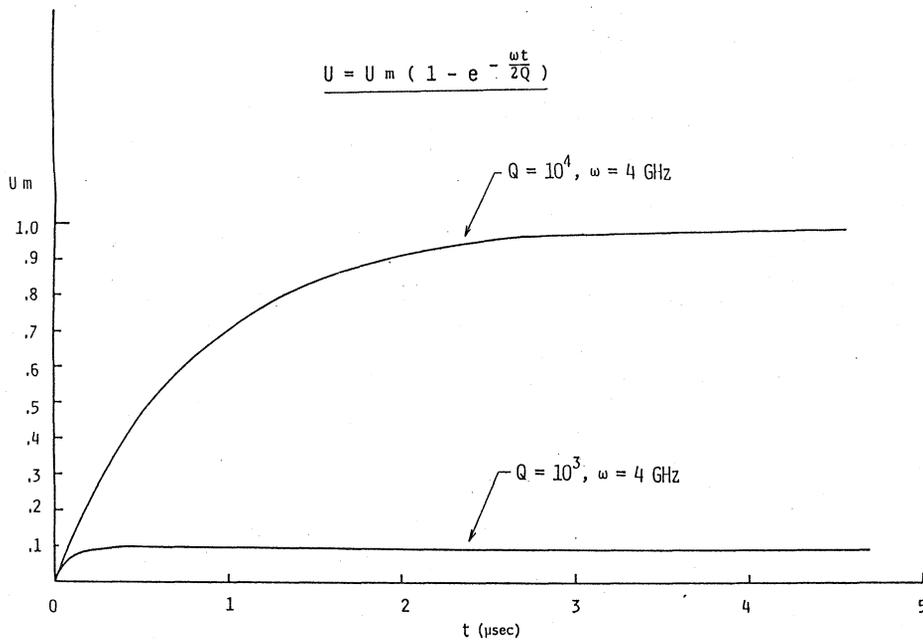
$$(It)_s \propto \frac{Q}{\omega R N} \sim \frac{1}{\frac{R}{Q} \cdot N} \quad (9)$$

$(It)_s$  は  $Q$  に依存する。その様子は図-5によって理解される。

3) 中間状態 —  $\mu$ s パルス —

中間状態では (5) 式によらずに (10) 式で成り立つと考えられる。

$$(It)_s \propto \frac{1}{N Q} \quad (10)$$



4 実測値との比較

次にBBUの実測値を求め、(10)式の関係をあてはめる。

型式	電流 I (mA)	パルス幅 t ( $\mu$ s)	$It$	セグメント数 N	$ItN$
東北 定抵抗	70	3	210	20	4200
原研 定分配	600	2	1200	6	7200
KEK "	320	1.6	500	160	80000
SLAC "	40~80	1.6	60~120	960	60000~120000

KEKとSLACの結果は大体(10)式で説明できる。東北と原研のdataには regenerative なBBUが含まれていると思われる。