

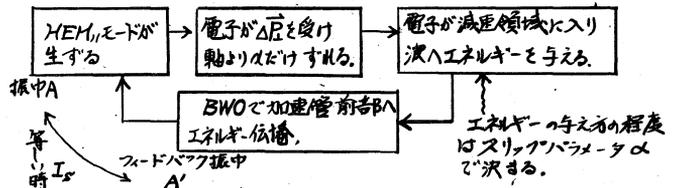
福田茂樹, 佐藤 勇, 松本 若, 稲垣慈見 (高工研) 小山田正幸, 今野 収, 清沢茂一, 一テ隆, 栗原 亮, 根本重伸, 柴崎義信, 鳥塚賢治 (東北大核理研)

§1 序

東北大核理研 300 MeV 電子線型加速器を用いて, 高工研と共同でビームグローアップ現象 (BBU) の実験が行われ, 今回の報告集に載っている. BBU を抑制するためにはある程度現象の理解が必要と思われるので, BBU に関する二つのモデル — Wilson の発振型 BBU 理論, 及び Panofsky の増幅型 BBU 理論に簡単に触れ, 若干それらを応用して見る.

§2 発振型 BBU の理論<sup>1)</sup>

Wilson は, 右図のダイアグラムの様に, 一本の加速管内で発生した HEM<sub>11</sub> モードが電子からエネルギーをもらい, BWO (後進波振動) で加速管前部へフィードバックされ, 遂に BBU が生ずると考える.



それによる結果は

(a) 初期電流 
$$I_0 = \frac{V_0}{K} \left( \frac{\pi}{\beta l} \right)^3 \left( \frac{\beta b}{3.84} \right) \left( \frac{1}{g_1^2 g_2} \right) F \left( \frac{V_0}{V_0} \right) \quad <1>$$

但し  $V_0$ : 入射エネルギー (MeV),  $\beta$ : 伝播定数,  $l$ : 相互作用長,  $b$ : 加速管外径,  $g_2 = (1 - \cos \alpha - \frac{1}{2} \alpha \sin \alpha) / 2 (\alpha / \pi)^2$ ,  $\alpha = \beta l (1 - v_p / v_e)$ ; スリップパラメータ

(b) build-up time ( $T_B > T_F$ ;  $T_F$  はマイクロ波の充満時間)

$$I = I_0 \exp(A/T_B) \quad <2>$$

(c) 発振周波数 —  $\beta - \omega$  ダイアグラムで HEM<sub>11</sub> モードと  $g_2$  因子極大値を取る線, 即ち

$$f = \frac{\beta c}{2\pi} - \frac{\alpha c}{2\pi l} \quad <3>$$

との交点から求まる.  $g_2$  が極大値を持つのは,  $\alpha = 2.65, -\pi, \dots$  である.

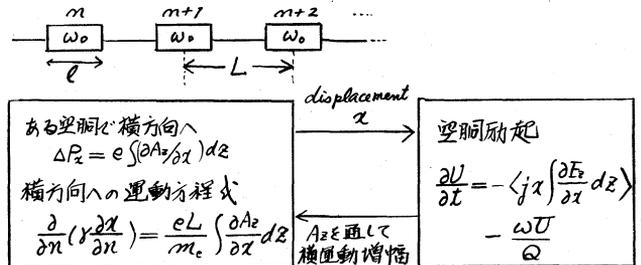
この型の BBU の特徴は, 相互作用長  $l$  の 3 乗に逆比例する事である.

§3 増幅型 BBU の理論<sup>2)</sup>

増幅型 BBU の取扱いは複雑で, 一般には数値計算を必要とする. Panofsky によれば, 一定加速, Q 磁石等による束束がない場合の解析的近似解が存在する.<sup>2) 3)</sup>

即ち 
$$C = \frac{e}{m_e c} \left( \frac{V_0 l}{Q} \right) \frac{1}{L} \frac{2\pi^2}{\lambda^2}$$

として



(BBU の build-up は  $\omega_0$  に比べてゆっくりである.)

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{C I t z}{dr/dz} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\omega_0}{2Q} t - \frac{1}{4} \log \frac{\gamma}{\gamma_0} \right\} \simeq \alpha_0 \exp \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{C I t z}{dr/dz} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad \langle 4 \rangle$$

但し、 $\gamma$ : 横方向シフト抵抗,  $\lambda_0$ : BBU周波数の波長,  $I$ : 電流,  $t$ : 時間,  $z$ : 長さ,

$\alpha_0$ : 最初の偏位,  $m_0 c^2 (dr/dz)$ : 単位長当りの加速エネルギー

$\langle 4 \rangle$ 式に於いて、 $\alpha = a$  ( $2a$ は加速管の内径,  $a \sim 1\text{cm}$ ぐらい) になると、BBUが観測される。

この型のBBUは加速管の最初の方のセクションでの微小の偏位 $\alpha_0$ が、次第に増幅されてゆくもので (Stanfordで約  $e^{20} = 10^{6\sim 8}$  倍), 著しい特徴は加速管後部から生ずる事である。又 $\langle 4 \rangle$ 式からスケーリング法則が成立する。<sup>4)</sup> 即ち

$$\left( \frac{C I t z}{dr/dz} \right) \sim \text{constant} \quad \langle 5 \rangle$$

周波数 $\omega_0$ は、仮定されている、各加速管の固有の性質で決まるものである。

### §4 東北大学核理研のBBUに関する簡単な検討

核理研の加速管の構造は2段になっており、前半と後半がHEM<sub>11</sub>モードの $\beta-\omega$ ダイアグラムは異なる。実験から判明したBBU周波数は約430kHzであり、後半の構造に対しては遮断周波数領域となる。<sup>6)</sup> 又 $\omega_p = C$ のラインがHEM<sub>11</sub>モードと交差しないうえに、 $\alpha \simeq -7.5$ の時にBBUが生じ、結合係数は $g_c = 0.1$ と小さい。通常の $\pi/2$ モード、定インピーダンス型に比べると、実効的 $K$ が半分,  $1/g_c$ が10倍, 又430kHzでBBUが生じているとして $\beta-\omega$ ダイアグラムから $\omega_p^{\text{HEM}}$ を求めると約0.1Cとなり、相互作用インピーダンスも約5倍程度となり、総合的 $K$ が80~400倍、スタート電流が上がり、BBUが生じにくい設計となっている。Wilsonの式 $\langle 1 \rangle$ を核理研線型加速器のA部、及びB部へ応用する。(但しバンチャー部は考えない。) 最も $I_0$ が低くなるように計算すると、各部が一番目の加速管が一番生じやすく

$$\text{A部} \text{ 1 加速管で } I_0 \sim 2.6 \text{ A} \quad (V_0 \sim 450 \text{ KeV}, 10 \text{ MeV 加速}, F(V_0/V_0) \sim \frac{1}{2}, l \sim 0.45 \text{ m})$$

$$\text{B部} \text{ 1 加速管で } I_0 \sim \text{数} 10 \text{ A} \quad (V_0 \sim 50 \text{ MeV}, 10 \text{ MeV 加速}, l \sim 0.95 \text{ m})$$

となり、現実のスタート電流よりかなり高い値を示す。BBU周波数は、小島田氏の解析によると<sup>5) 6)</sup> Wilsonの理論で大体示されるが、初期電流等も相当食い違いが存在する。

増幅型BBUに関しては、Stanford大学で、詳細に実験され、前記のスケーリング法則等が確かめられている。<sup>4)</sup> 東北大学核理研でも建設当初この型と思われるBBUが発生し、Q値等による集束 $K$ より、これを抑制したという報告がある。<sup>7)</sup> この時のデータにスケーリングを応用すると $\langle 5 \rangle$ 式より、 $I(\text{mA}) = a t^{-2} (\mu\text{sec}^{-1})$ となり、 $t = 3 \mu\text{sec}$ を規格化すると、良一致が見られる。(図1) 図1の0印は集束 $K$ の場合である。次に $\langle 4 \rangle$ 式にある増幅率(指数部)に $\gamma$ と $\alpha$ を量的に計算すると、

$$\text{A部: } \exp \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{C I t z}{dr/dz} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \simeq e^{10} \simeq 10^8 \quad (10 \text{ MeV/m 加速}, I \sim 250 \text{ mA}, t = 3 \mu\text{sec})$$

$$z \sim 8 \text{ m}, l \sim 0.45 \text{ m}, L \sim 1 \text{ m}, (r_0 l / Q) \sim 450 \Omega$$

$$\text{B部: } \exp \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{C I t z}{dr/dz} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \simeq e^{16} \simeq 10^7 \quad (10 \text{ MeV/m 加速}, I \sim 30 \text{ mA}, t = 3 \mu\text{sec})$$

$$z \sim 24 \text{ m}, l \sim 0.95 \text{ m}, L \sim 2 \text{ m}, (r_0 l / Q) \sim 950 \Omega$$

となり、増幅型BBUが生じた時の電流値 $I$ を代入すると、増幅係数はStanfordの場合の値と同程度となる。 $r_0/Q$ の値をSLACと同じ $K$ 取、 $K$ 事等、上記計算に不確定性はあがるが、定インピーダンス型の相互作用長が長い加速管が、同じく $K$ で並んだ $K$ のため、比較的短くてもBBUが生じやすい

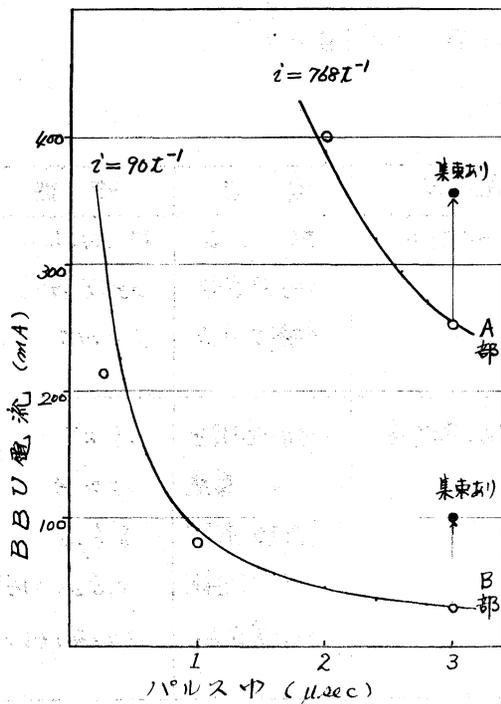
結果に反するものと思われる。

現在某東系を除外し、A部 350 mA、B部 100 mA ぐらいの電流値は増加しているが、現在実験中のBBU現象に、何らかの形で増幅型BBUが影響しているのではないかと考えられる。

今後の課題としては、某東効果も含めた増幅型BBUの定量的理解を深める事、実験上としては、BBU発生箇所、初期電流 $I_0$ と時間 $t_0$ の関係等と明らかにする事、具体的にBBUを抑制する手段を考える事等である。又今回の事から匂付いた事として、今後加速管製作の際、HEM/E-ドの $\beta$ - $\omega$ ダイアグラムが重要であり、必ず測定される必要があると思われる。特に炭電界型の加速管の場合数値計算等の資料として必要と思われる。 文責(内容も含め) 福岡茂樹

### 参考文献

- 1) P.B. Wilson ; HEP L-297 (1963)
- 2) W.K.H. Panofsky and M. Bander ; SLAC-PUB-342 (1967)
- 3) E.V. Fainholt et al. ; SLAC-PUB-350 (1967)
- 4) O.H. Altermueller et al. ; Proc. 1966 Linear Accelerator Conf., Los Alamos, (1966) 267
- 5) 小山田正幸 et al. ; 核研研報告 Vol 10-1 (1977) 159
- 6) 小山田正幸 et al. ; 本報告集中 図2
- 7) 後藤正久 et al. ; 三菱電気技報 Vol 42, No.2 (1968) 322



(図1)