

電子シンクロトロンに於ける高周波加速空洞と電子ビームの相互作用 (Detuning 効果)

片山武司 福島敏孝 山川達也 (東大核研)

核研の電子シンクロトロンでは高周波加速装置として Re-entrant single cavity を用いている。この空洞の共振周波数は約 138 MHz, 無負荷 Q 値は 12000, シェントインピーダンスは 440 kΩ である。共振周波数は ±400 kHz の範囲内で可変となっている¹⁾。一方向射器としては 15 MeV の LINAC が用いられており, これに使用されるマイクロ波の周波数は 2758 MHz (≈ 20 f_{RF}) である。LINAC からシンクロトロンに打ち込まれたビームは, 最初高周波位相に対して一様に分布しているが, 約 10~20 回転の間にバンチが形成されていく。いまバンチの形成が少しすすんだ時点での空洞とビームの相互作用を考える。良く知られているように, 空洞内には, 外部電源によって励起されている高周波電圧と, ビーム自身によって誘起される電圧が存在する²⁾。空洞の共振周波数を ω₀, RF 周波数を ω, 平均電流を I₀, バンチの中心がのっている高周波位相を φ₀ とすると, 空洞内の電圧は次式で表わされる。

$$V = \left\{ A + B I_0 e^{j(\phi_0 + \frac{2\pi}{\omega_0})} \left(1 - e^{j(\omega_0 - \omega)t - \frac{\omega_0}{2Q_L}t} \right) \right\} e^{j\omega t}$$

第一項は外部電源による電圧, 第二項は transient な解も入れたビーム誘起電圧である。

空洞の time constant τ は τ = 2Q_L/ω₀ より 14 μs であるから, ビームがバンチする位の間では, beam induce field の transient な振舞が重要である。上式から分るように, transient field は δω = ω - ω₀ の正負によって大きく, その様子を變える。Induced field と外部 field との位相差を δφ_t とすると

$$\delta\phi_t = \delta\omega \cdot t$$

で与えられる。

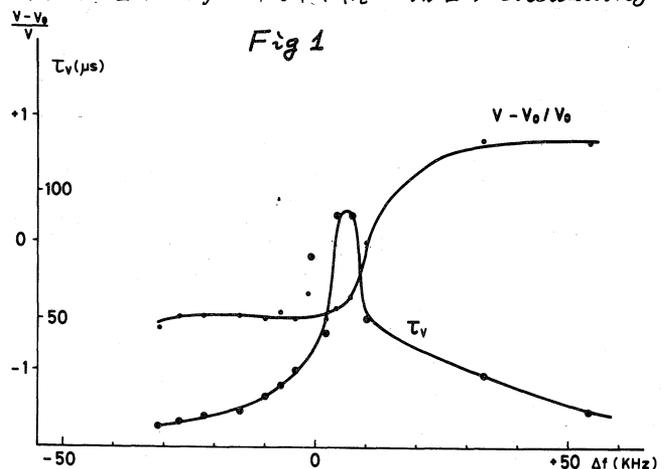
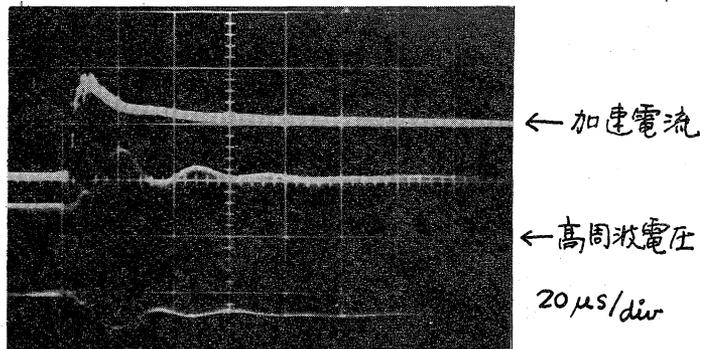
結果として transient field は δω のビート振動を起しており, δω > 0 の場合は振幅が増加, δω < 0 の場合は減少する等を示している。

この事は実験事実と良く一致する。Photo 1 に δf = +54 kHz の場合の Circulating Current と高周波電圧の変化を示す。

図 1 には, ビーム入射前の高周波電圧 V₀ と, 入射後の最初のピーク電圧 V について $\frac{V - V_0}{V_0}$ の量と, 最初のピークになる迄の時間 τ_v を各 δf について示している。図から分る通り, δf = +10 kHz を境として振幅が増大, 減少している。δf = 0 ではなく, δf = +10 kHz を境とする理由は次のように考えられる。

シンクロトロンへの入射時のエネルギーでは

電子の放射損失は無視出来る程小さいが, 磁場の立ち上りが約 1.8 × 10⁵ Gauss/s なので一回転当り



の電子エネルギーの増加は2.6 KeVである。入射時の高周波電圧は5KV~15KVなので、平衡位相 ϕ_s は $50^\circ \sim 80^\circ$ の範囲である。このBeamのReactiveなloadingの為、空洞の共振周波数はずれる。beamが充るにバンテした後での空洞の共振周波数のずれを測定した結果を図2に示す。 $d\phi/dI = +0.38 \text{ KHz/mA}$ の割合で変化することが分る。

図3には各 Δf に対するbeat振動数を測定した結果(f_{obs})と、その時のCirculating Currentで空洞の共振周波数を補正した後の結果(f_{corr})を示した。この補正により

$$f_{beat} = |\Delta f|$$

の式が成立している事は、上述のビームによる空洞の共振周波数の変化が正しい事を2重に証明しているといえる。ところで以上述べてきた事は、beamのCapture efficiencyにどのように影響するだろうか。実験結果を図4に示す。

図中で、 I はCaptured circulating currentを示し、また V_{RF} はCapture efficiency最大になる高周波電圧を示している。 $\Delta f = +50 \text{ KHz}$ の回りで $\Delta f = 0$ のところと比較して約4倍のbeam currentが得られている。LINACからのビームを高周波加速の安定領域(Separatrix)に有効にCaptureするには、高周波電圧が適当に大きい事と、位相変化が適当にある事が望ましい。位相変化を Δf に対してplotすると図5のようになる。図中で τ は位相変化が停止する迄の時間である。

Detuning効果によって電圧、位相変化がbeam Captureにとって有効に行なわれている。

