

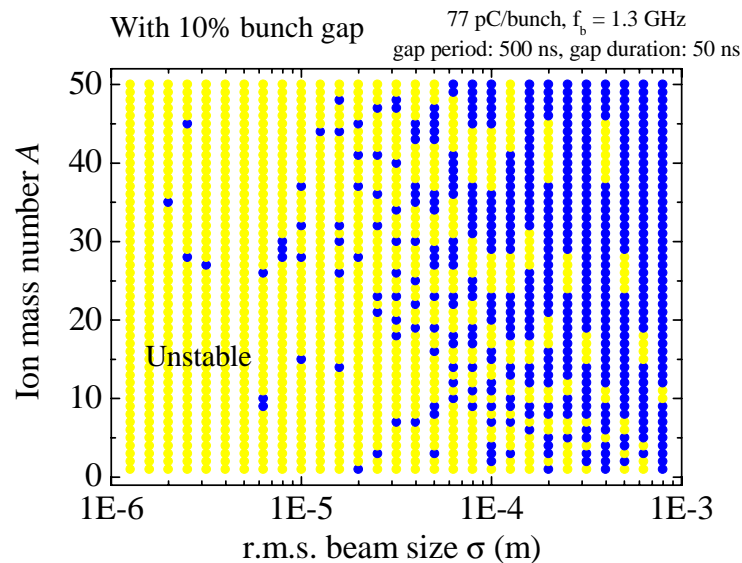
Bunch gap による過渡的電圧変化

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
物質構造科学研究所 坂中章悟

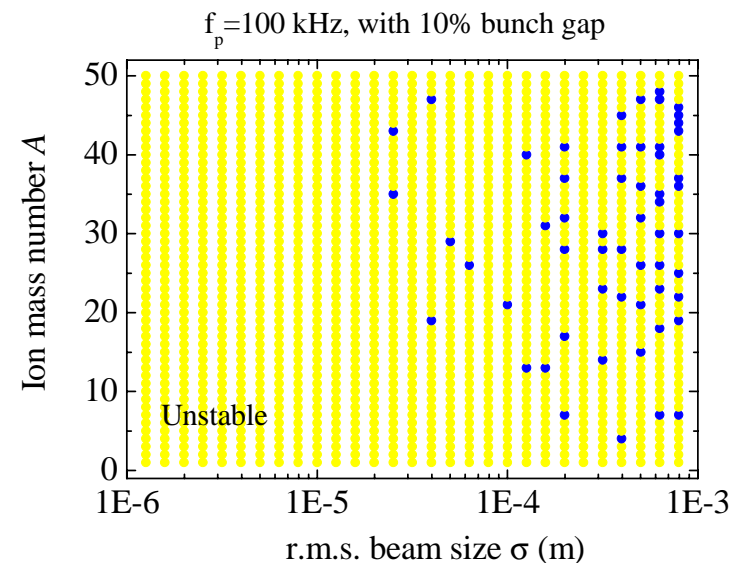
2007/01/19 第10回ERLビームダイナミクスWGミーティング

前回のまとめ

- 5-10 %のバンチギャップがイオン捕獲を部分的に抑制するために有効。
- 繰り返し周波数は低い(~ 100 kHz)方が非常に有効であるが、高い場合(~ 2 MHz)でもかなり効果がある。
- Bunch gap によって引き起こされる、入射器空洞でのRF電圧変動が問題である。



繰り返し 2 MHz



繰り返し 100 kHz

10% bunch gap 導入時のイオンの安定性

(参考)KEKB におけるバンチギャップの現状

- 電子リング(HER)、陽電子リング(LER)共に 5% のバンチギャップを入れている。(数年前に10% → 5% とした)。各リング内に1箇所ずつ。
- バンチギャップの第1の目的は、アボートキッカーの立ち上がり時間を確保するため。第2の目的は、電子リングでの ion clearing のため。
- Bunch gap transient を補正するための feedforward は当初検討されたが、今のところルミノシティへの影響は(ほぼ)無いようなので、用いていない。
- 両リングにバンチギャップを入れることで、gap transient によるバンチ位置シフトの効果はある程度相殺する。また蓄積エネルギーの大きな、貯蔵空洞付き加速空洞または超伝導空洞を用いているので、PEP-II に比べて gap transient は小さい。
- ローレベルRF系のフォードバック系の帯域は、transient電圧変調の周波数(100 kHz = 周回周波数)よりかなり低いため、フィードバック系による安定化効果はない。

KEKB RFグループの赤井和憲氏による。

数年前の状況については、K. Akai *et al*, Nucl. Instrum. Methods A **499** (2003) 45 を参照。³

入射器空洞のパラメータ(仮)

仮定: (2セル空洞) × 5台、空洞当たり $R_{sh}/Q \approx 200 \Omega$ (定義: $P_c = V_c^2/R_{sh}$)。
 ビーム電流 $I_0 = 100 \text{ mA}$ 、合計加速電圧 5 ~ 10 MV。On crest 加速 ($\phi = 0$)。

	合計 5 MV	合計 10 MV
Cavity voltage/cavity: V_c	1 MV	2 MV
Accelerating phase: $\phi = \text{Cos}^{-1}(V_a/V_c)$	0 radian	0 radian
Beam power/cavity : $P_b = I_0 V_c \cos \phi$	100 kW	200 kW
Optimum external-Q: $(Q_{ext})_{opt} = \frac{Q_0}{\beta_{opt}} \approx \frac{V_c^2}{(R_{sh}/Q)P_b}$	5×10^4	1×10^5
Cavity external-Q: Q_{ext}	$= (Q_{ext})_{opt}$	$= (Q_{ext})_{opt}$
Cavity filling time: $T_f = 2Q_L/\omega_{res}$	12 μs	24 μs
Cavity tuning angle (= optimum tuning): ψ	0	0
Beam induced voltage at resonance: V_{br}	1 MV	2 MV
Generator voltage at resonance: V_{gr}	2 MV	4 MV
Generator power per cavity : P_g	100 kW	200 kW

(注) 空洞1台当たり

入射器空洞内RF電圧のベクトル図

仮定：入射器空洞、合計RF電圧 $V_c = 5$ MV、on crest 加速 ($\phi = 0$)、tuning angle $\psi = 0$ 。

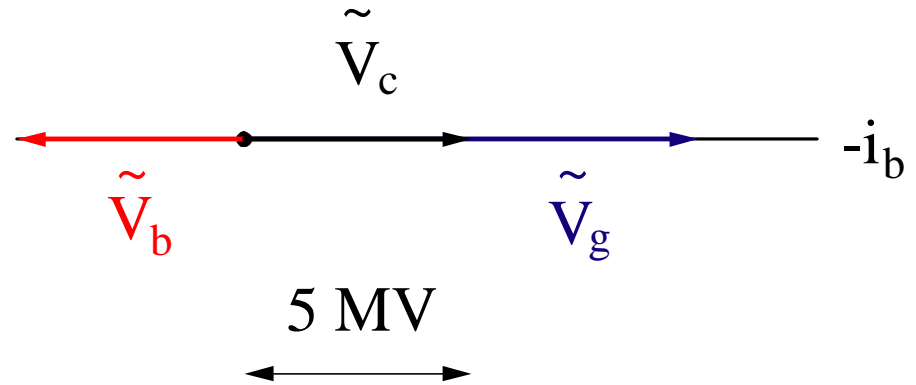
$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_g + \tilde{V}_b$$

$$\tilde{V}_g = V_{gr} \cos \psi e^{j\psi}$$

$$\tilde{V}_b = V_{br} \cos \psi e^{j\psi}$$

$$V_{br} = \frac{I_0 R_{sh}}{1 + \beta} \quad (\text{定常的な場合})$$

$$V_{gr} = \frac{2\sqrt{\beta}}{1 + \beta} \sqrt{R_{sh} P_g}$$



空洞内電圧(合計)のベクトル図
(phasor diagram)

(参考) P.B. Wilson, AIP Conference Proceedings No. 87, p. 450.

赤井和憲、高エネルギー加速器セミナー OHO'94 テキスト、p. II-1.

Bunch gap による過渡的な空洞電圧の変動

Beam induced voltage が変動する → ビームが空洞内に誘起する電圧が変動する。

- ・ 蓄積リングの場合： 電圧変動の結果、バンチの縦方向位置がずれる。
- ・ リニアックの場合： バンチ位置は入射ビームの間隔で決まっており一定。

基本事項： (P.B. Wilson, AIP Conference Proceedings No. 87, p. 450.)

(1) 電荷 q_b のバンチが通過すると、空洞内電圧は $-V_{b0} = -2k_0q_b$ だけ変化する。

(空洞電圧は phasor 表示)。

(2) はじめ(複素)空洞電圧が $\tilde{V}(0)$ であった時、時間 t 後の電圧は、

$$\tilde{V}(t) = \tilde{V}(0) \exp\left(-\frac{t}{T_f}\right) \exp\left(j \frac{\tan \psi}{T_t} t\right)$$

で与えられる。ここで、 T_f は filling time、 ψ は tuning angle:

$$\tan \psi = 2Q_L \frac{f_{res} - f_{rf}}{f_{rf}}$$

Bunch gap による過渡的な空洞電圧の変動

Beam induced voltages: $(\tau = T_b / T_f)$

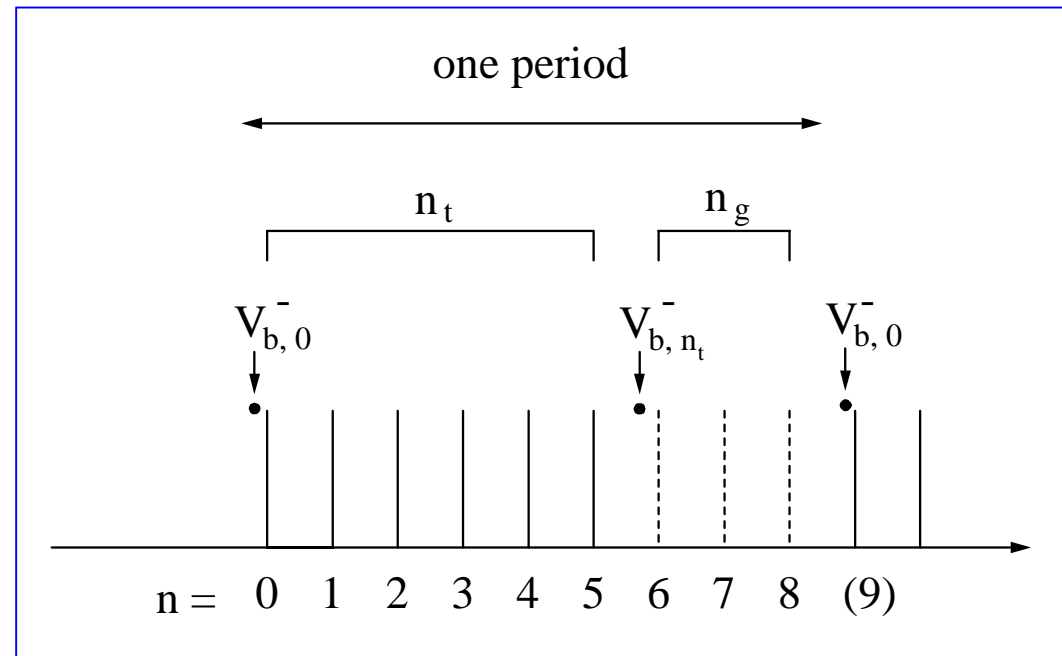
$$V_{b,n_t}^- = V_{b,0}^- e^{-n_t \tau} + V_{b,0}^- (e^{-\tau} + e^{-2\tau} + \dots + e^{-n_t \tau}) = V_{b,0}^- e^{-n_t \tau} + V_{b,0}^- \frac{1 - e^{-n_t \tau}}{e^\tau - 1}$$

$$V_{b,0}^- = V_{b,n_t}^- e^{-n_g \tau}$$

↓

$$V_{b,0}^- = V_{b,0}^- \frac{1 - e^{-n_t \tau}}{(e^{n_g \tau} - e^{-n_t \tau})(e^\tau - 1)}$$

$$V_{b,0}^- = -2k_0 q_b \quad k_0 = \frac{\omega_{res}}{4} \frac{R_{sh}}{Q}$$



バンチギャップの模式図。

バンチトレインのバンチ数: $n_t = 6$

ギャップのバケット数: $n_g = 3$

Bunch gap による過渡的な空洞電圧の変動

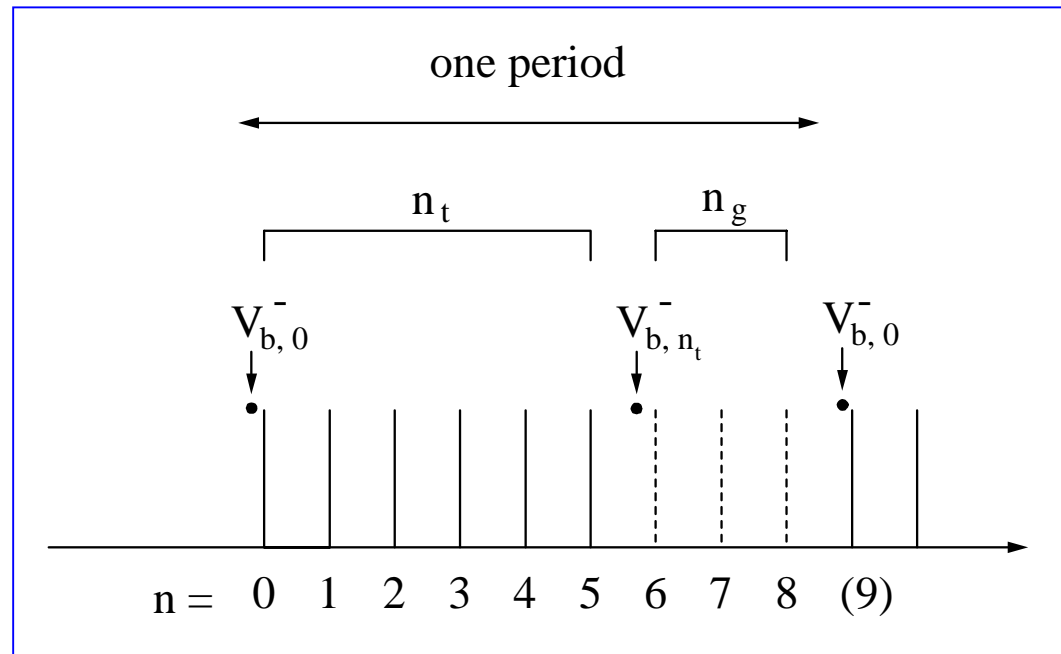
Beam induced voltages (n バケット目):

$$V_{b,n}^- = V_{b,0}^- e^{-n\tau} + V_{b0} \frac{1 - e^{-n\tau}}{e^\tau - 1} \quad (0 \leq n \leq n_t)$$

$$V_{b,n}^- = V_{b,n_t}^- e^{-(n-n_t)\tau} \quad (n_t \leq n < n_t + n_g)$$

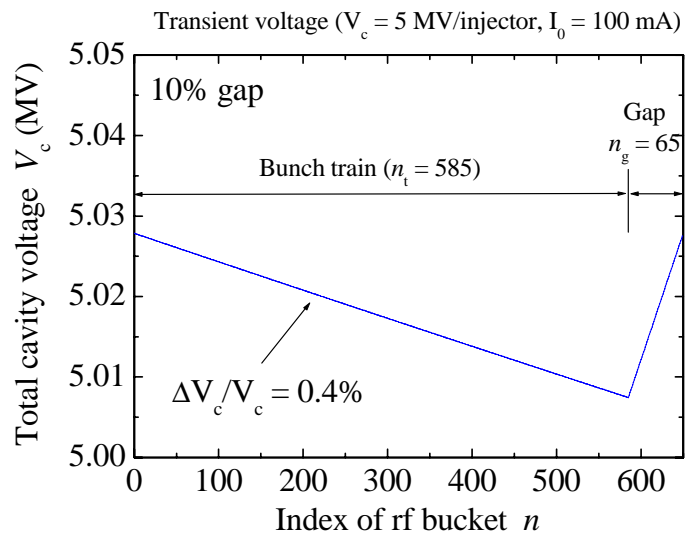
ただし、

$$V_{b,0}^- = V_{b0} \frac{1 - e^{-n_t\tau}}{(e^{n_g\tau} - e^{-n_t\tau})(e^\tau - 1)}$$

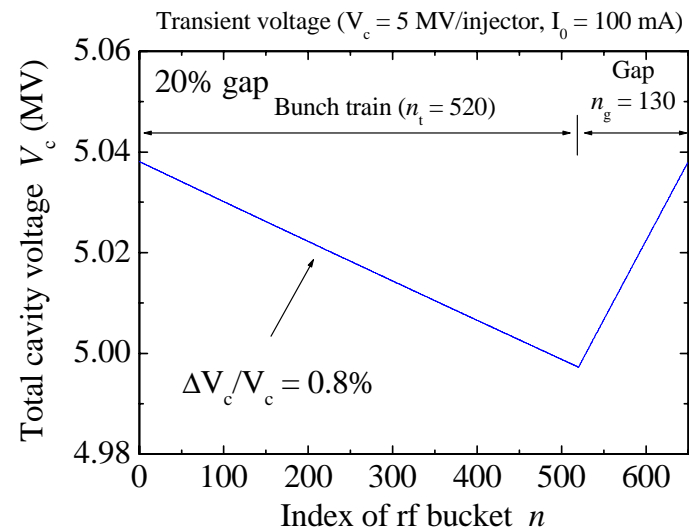


Bunch gap transient (計算例)

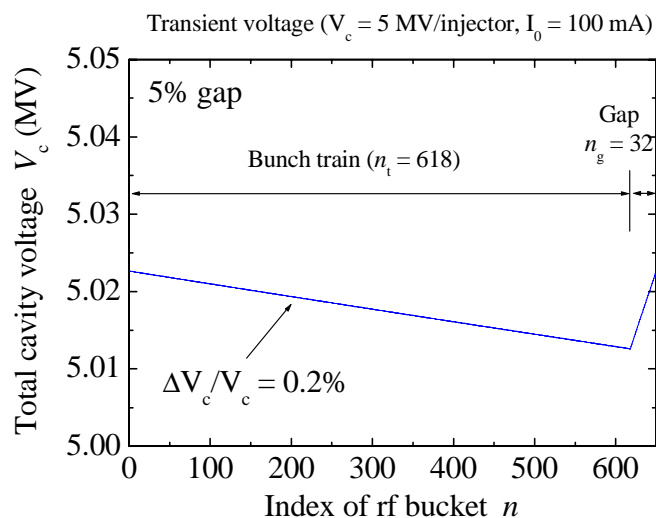
合計空洞電圧 5 MV を仮定



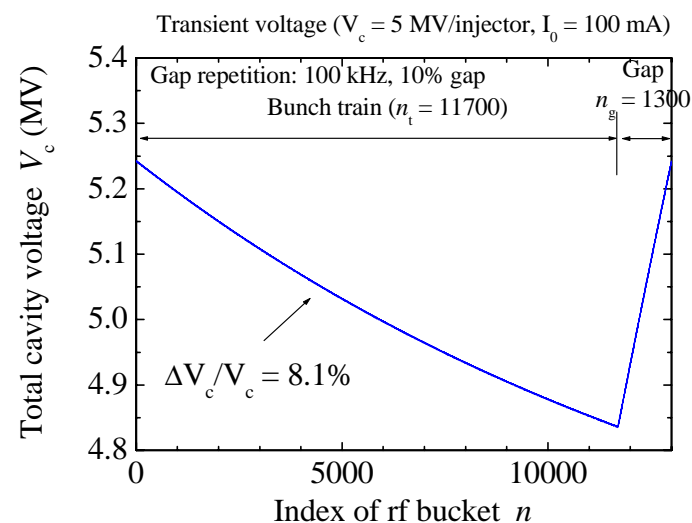
(a) $n_p = 650, n_g = 65$



(b) $n_p = 650, n_g = 130$



(c) $n_p = 650, n_g = 32$



(d) $n_p = 13000, n_g = 1300$

Bunch gap transient(近似式)

$$n_g, n_t \ll 1/\tau (\approx 16000) \text{ の時、 } V_{b,0}^- \approx V_{b0} \frac{n_t}{n_p \tau} \quad V_{b,n_t}^- \approx (1 + n_g \tau) V_{b,0}^-$$

$$\frac{\Delta V_c}{V_c} = \frac{|V_{b,0}^- - V_{b,n_t}^-|}{V_c} \approx \frac{n_t n_g}{n_p} \frac{|V_{b0}|}{V_c} = \frac{\omega_{res} (R_{sh} / Q) q_b}{2V_c} \frac{n_t n_g}{n_p}$$

- ギャップの繰返し周期が一定で、ギャップ比が小さい場合、電圧変動はギャップ幅 n_g にほぼ比例する。
- ギャップ比率 n_g/n_p が一定の場合、電圧変動はバンチトレインのバンチ数 n_t に比例する。
- R_{sh}/Q が低く、 V_c が高いと電圧変動が小さい。

(注意)バンチャー空洞では入射器空洞よりも gap transient が大きくなると考えられる。場合によっては特別な空洞(貯蔵空洞付き空洞など)が必要となる可能性がある。

まとめ

- 入射器用の超伝導空洞において、バンチギャップにより誘起される過渡的電圧変動の大きさを見積もった。
 - バンチギャップ10%、繰り返し 2 MHz → $\Delta V_c/V_c \sim 0.4\%$
 - バンチギャップ10%、繰り返し 100 kHz → $\Delta V_c/V_c \sim 8\%$
- 繰り返しが高い場合なら、フィードフォワードによる電圧補償(→検討事項)を用いることで、実用的に問題ない電圧変動($\sim 10^{-4} \sim 10^{-5}$?)まで安定化できるであろう。
- ギャップ繰り返しが低い(~ 100 kHz)場合は、イオン捕獲抑制には極めて効果的であるが、電圧変動が許容出来ないと思われる(コーネルの結論と同じ)。
- バンチャー空洞(off crest、常伝導空洞)では、gap transientがより大きいと予想されるので、いずれ検討が必要である。