



Bunch gap による 過渡的電圧変化の補正

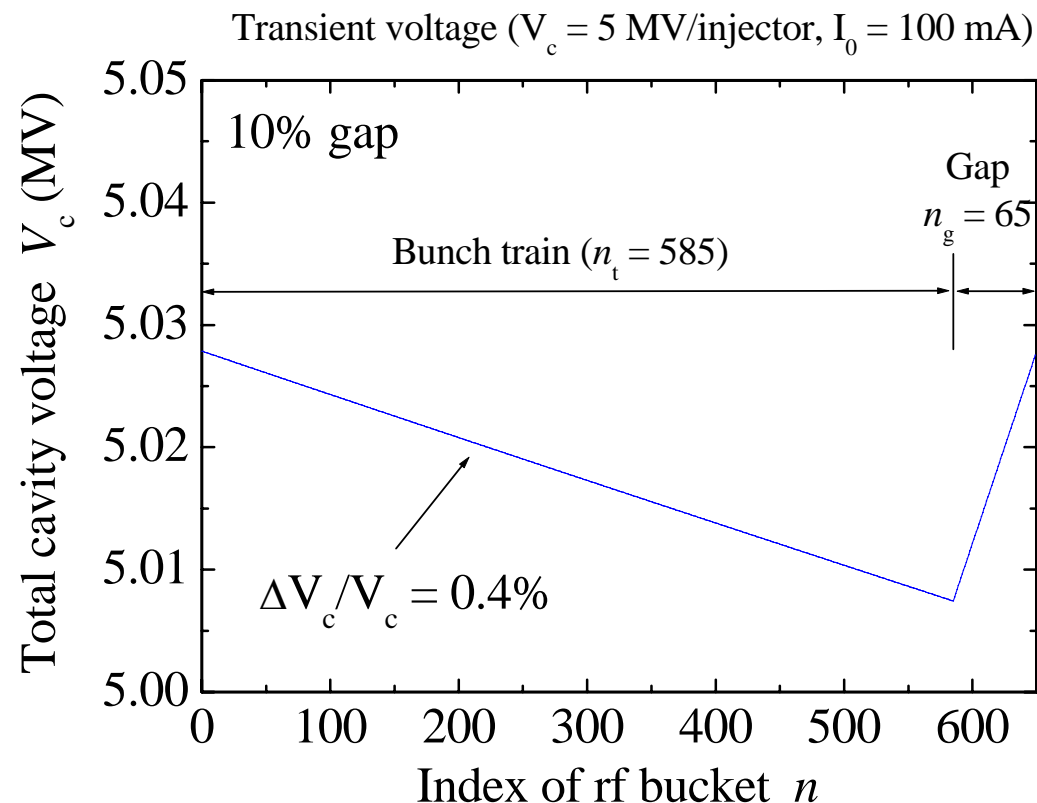
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
物質構造科学研究所 坂中章悟

2007/02/21 第11回ERLビームダイナミクスWGミーティング

前回のまとめ

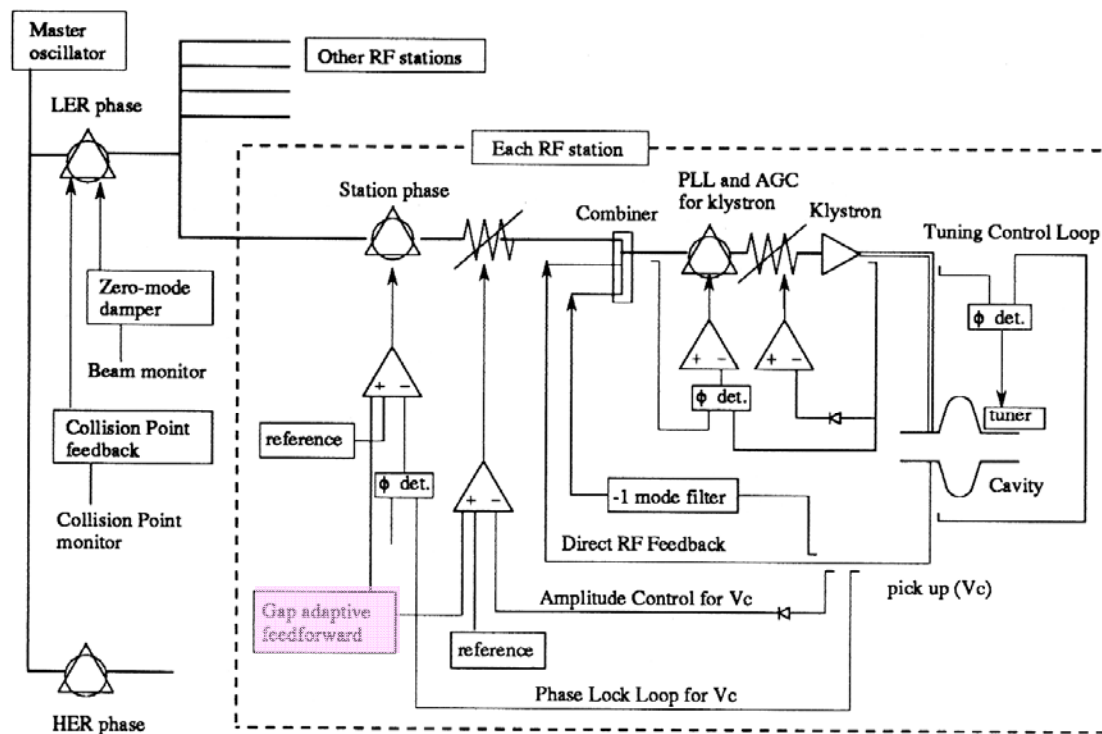
- イオン捕獲を妨げるためのバンチギャップを導入した場合、入射器空洞で過渡的な電圧変化が生ずる。
- 繰り返し2 MHz、10% のバンチギャップで、空洞電圧 5 MV/(空洞5台) の場合の例:

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



過渡的な電圧変化を補正できるか？

- フィードフォワードによる補正を考える。
- 必要なクライストロンパワーの上乗せ分と周波数帯域。
- 現実的なパラメータで可能か？



KEKB について検討した案
(この場合、位相・振幅)。

K. Akai, in Physics and Engineering of High-Performance Electron Storage Rings, World Scientific, 2002, p. 148 より引用。

Figure 23. Feedback control loops for KEKB RF system.

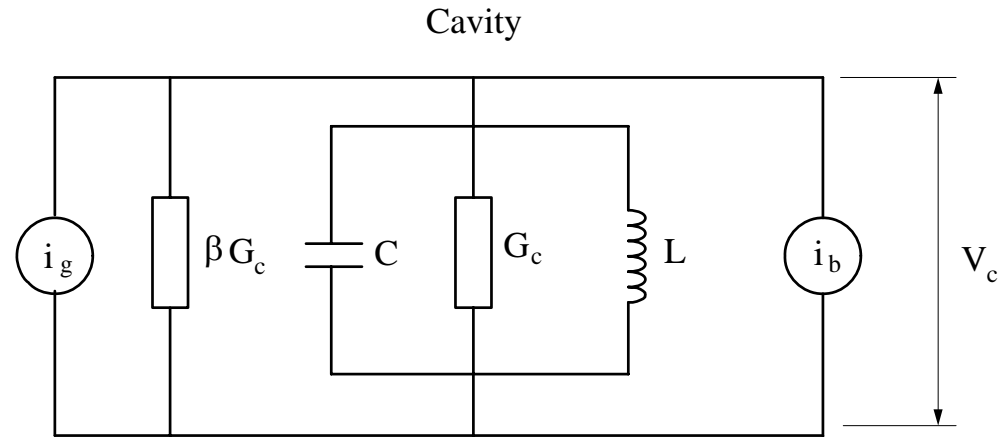
空洞の等価回路と方程式

空洞の等価回路:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q_0 \equiv \frac{\omega_0 W}{P_c} = \frac{\omega_0 C}{G_c}$$

$$G_c = \frac{2}{R_{sh}} \quad Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta} \quad P_g = \frac{1}{8} \frac{i_g^2}{\beta G_c}$$

$$\tan \psi = -Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \approx -2Q_L \delta, \quad (\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0})$$



i_g : generator current
 i_b : beam current

空洞内電圧の方程式:

$$\frac{d^2 V}{dt^2} + 2\lambda \frac{dV}{dt} + \omega_0^2 V = 2k_0 \frac{di}{dt}$$

$$i = i_g + i_b$$

$$\frac{1}{C} = \frac{\omega_0}{G_c Q_0} = \frac{\omega_0}{2} \frac{R_{sh}}{Q_0} = 2k_0 \quad k_0 \equiv \frac{\omega_0}{4} \frac{R_{sh}}{Q} \quad \lambda \equiv \frac{1}{T_f} = \frac{\omega_0}{2Q_L}$$

(i_g, i_b によって誘起される電圧をそれぞれ V_g, V_b とする)

ドライブ電流の変化に対する空洞電圧の応答

右の方程式の解として次の形を仮定:

$$\frac{d^2V}{dt^2} + 2\lambda \frac{dV}{dt} + \omega_0^2 V = 2k_0 \frac{di}{dt}$$

$$V(t) = \tilde{V}(t)e^{i\omega t} \quad i(t) = \tilde{i}(t)e^{i\omega t}$$

$\tilde{V}(t), \tilde{i}(t)$ は、周波数 ω に比べてゆっくり変化すると仮定。また、 $\lambda \ll \omega$, $\frac{d\tilde{i}}{dt} \ll \omega \cdot \tilde{i}$

$$k_0 \tilde{i}(t) = \frac{d\tilde{V}(t)}{dt} + \lambda(1 - i \tan \psi) \tilde{V}(t)$$

(複素振幅の従うべき方程式)

$$k_0 \tilde{i}(t) = \frac{d\tilde{V}(t)}{dt} + \lambda \tilde{V}(t)$$

(tuning angle: $\psi = 0$ の場合)

バンチギャップを導入した場合、空洞電圧を一定に保つために必要な generator voltage V_g :

$$\tilde{V}_g = V_{c0} - \tilde{V}_b$$



必要な generator current :

$$\tilde{i}_g(t) = \frac{d\tilde{V}_g(t)}{dt} + \lambda \tilde{V}_g(t)$$

必要な generator power:

$$P_g(t) = \frac{R_{sh}}{16\beta} |\tilde{i}_g(t)|^2 = \frac{Q_{ex}}{16} \frac{R_{sh}}{Q} |\tilde{i}_g(t)|^2$$

入射器空洞の仮パラメータ(前回と同じ)

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 ($\phi = 0$)。

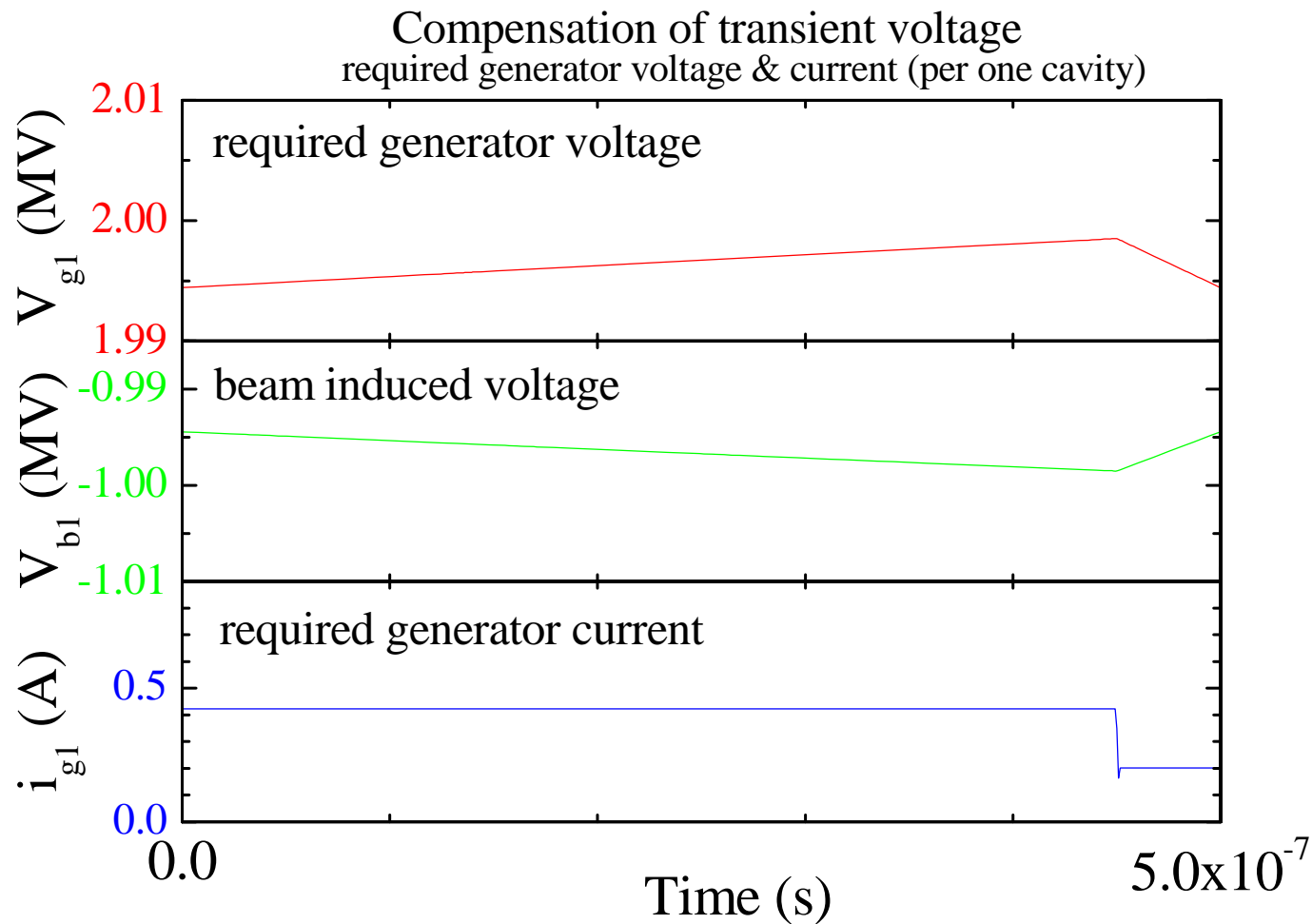
	合計 5 MV	合計 10 MV
Cavity voltage/cavity: V_c	1 MV	2 MV
Accelerating phase: $\phi = \text{Cos}^{-1}(V_a/V_c)$	0 radian	0 radian
Beam power/cavity : $P_b = I_0 V_c \cos \phi$	100 kW	200 kW
Optimum external-Q: $(Q_{ext})_{opt} = \frac{Q_0}{\beta_{opt}} \approx \frac{V_c^2}{(R_{sh}/Q)P_b}$	5×10^4	1×10^5
Cavity 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

電圧補正に必要な V_g, i_g

合計電圧 $V_c = 5$ MV、ビーム電流 100 mA、Gap: $n_p = 650, n_g = 65$ を仮定。

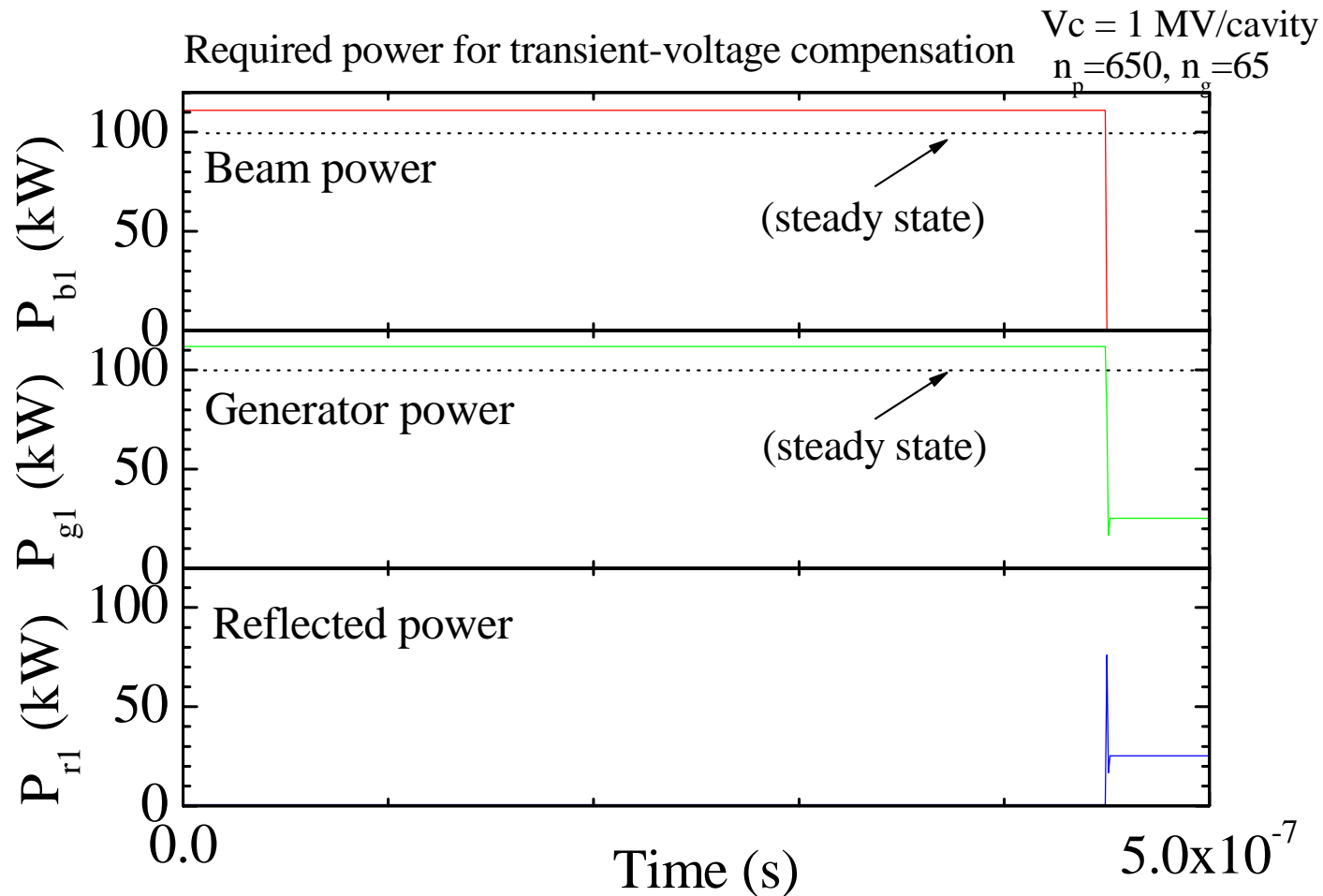
(空洞1台当たり)



電圧補正に必要な P_g および反射パワー

合計電圧 $V_c = 5$ MV、ビーム電流 100 mA、Gap: $n_p = 650$, $n_g = 65$ を仮定。

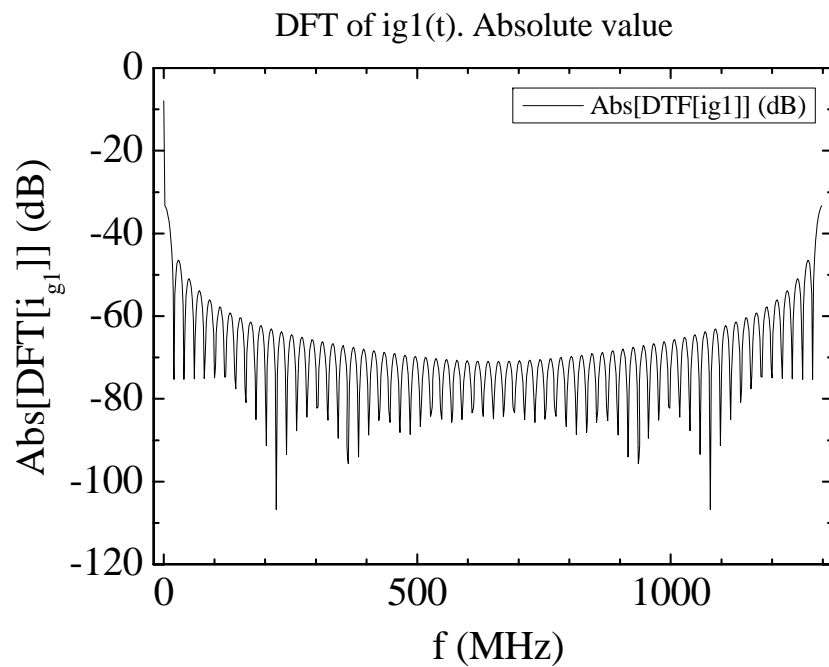
(空洞1台当たり)



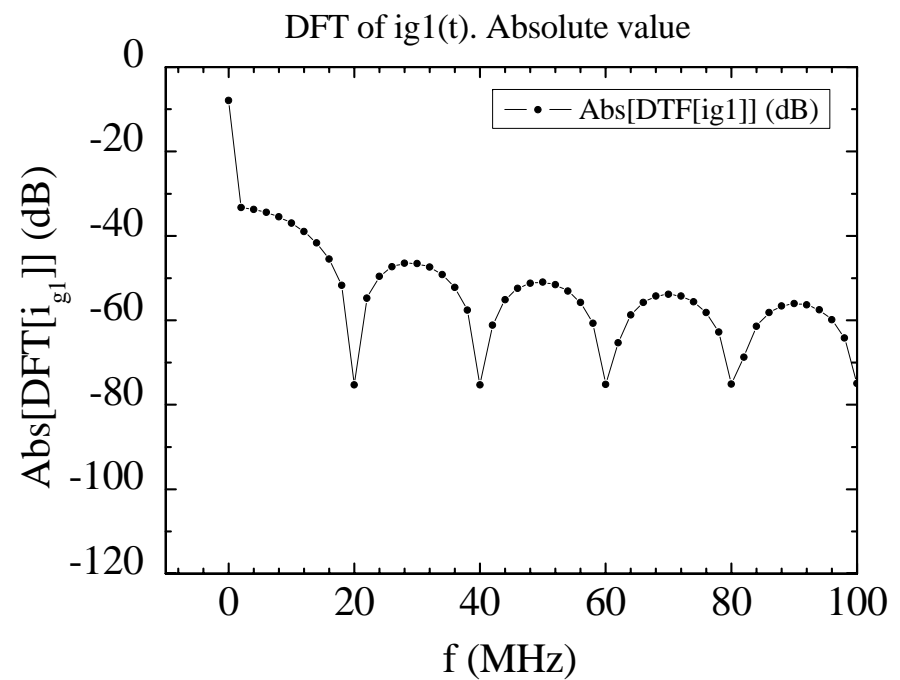
Generator current i_g のスペクトル

$$c_n = \frac{1}{n_p} \sum_{r=0}^{n_p-1} i_{g1}(r \cdot T_b) \exp\left(i \frac{2\pi n r}{n_p}\right), \quad (n = 0, \dots, n_p - 1)$$

$i_g(t)$ のフーリエ係数(近似)の絶対値 $|c_n|$ をデシベル単位で表示



周波数範囲: 0 - 1.3 GHz

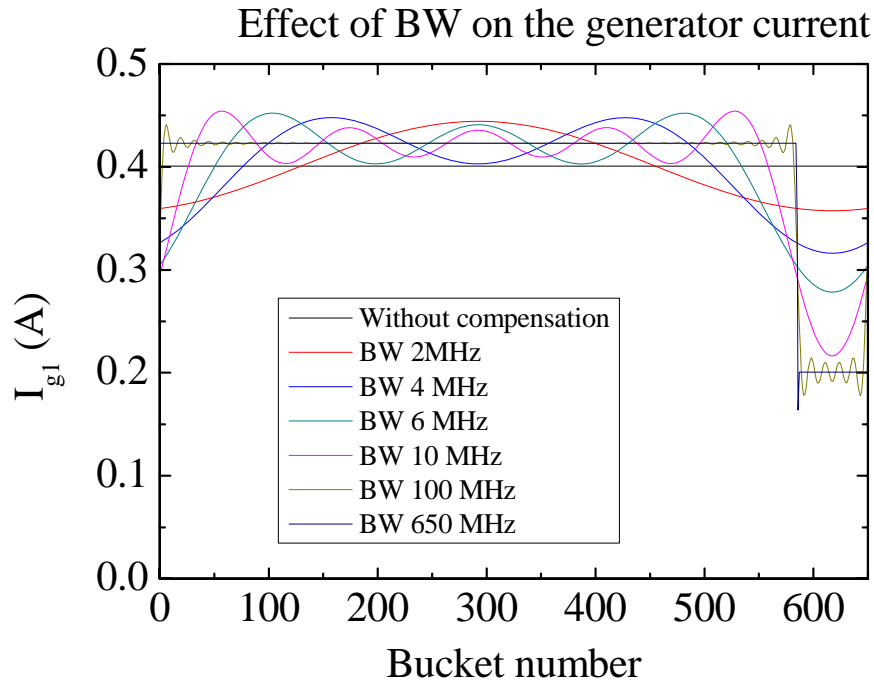


周波数範囲: 0 - 100 MHz

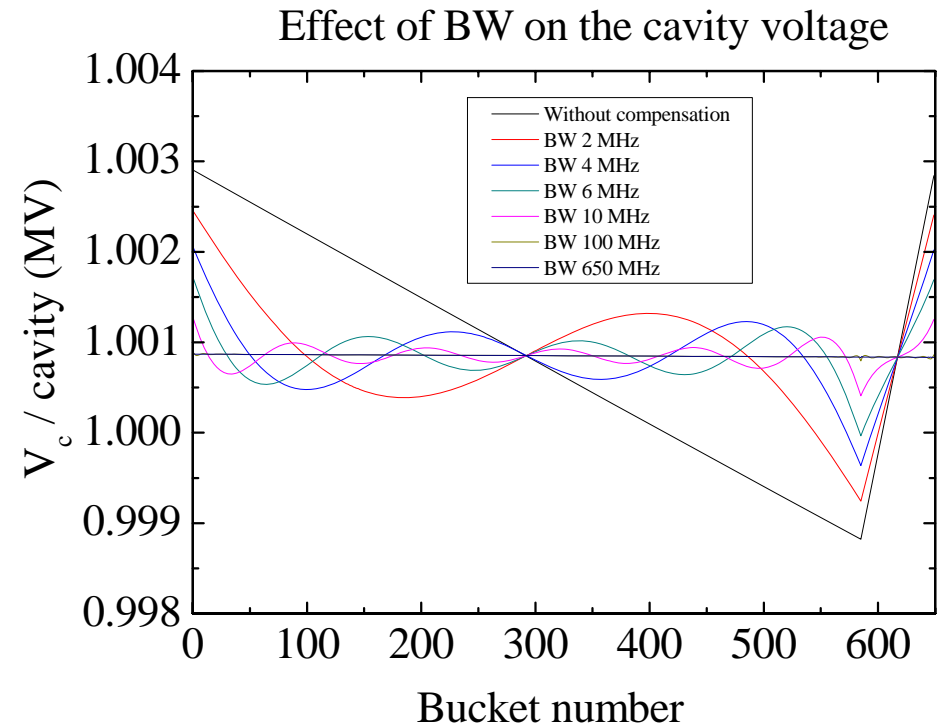
Generator の帯域制限の影響

フーリエ展開を適当な n_c でカットオフした場合:

$$i_g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n_p/2} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad \rightarrow \quad i_{g,\text{Approx}}(t) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n_c} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t)$$



Generator current: $i_g(t)$ (空洞1台当たり)



Cavity voltage: $V_c(t)/\text{cavity}$ ¹⁰

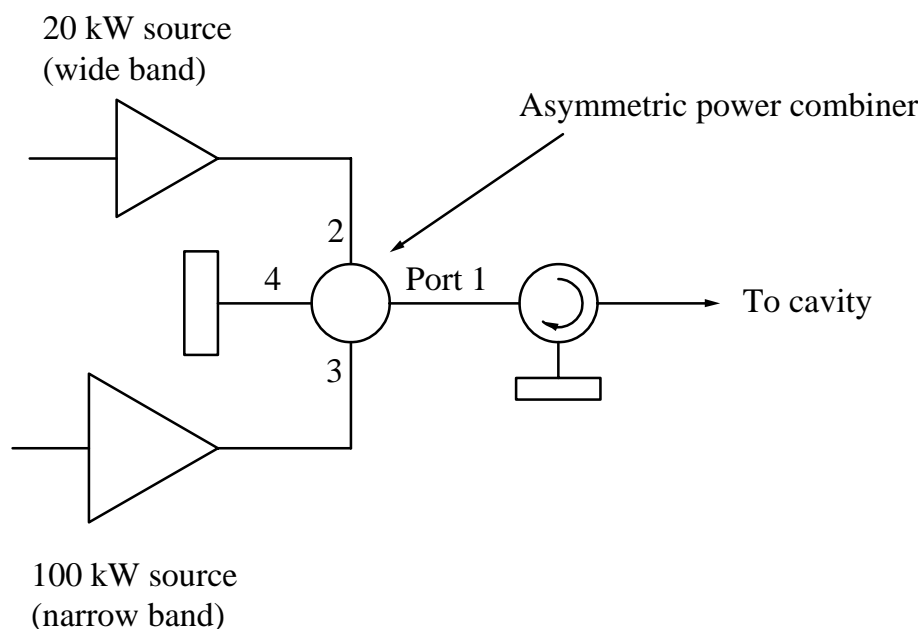
まとめ: 電圧補正のために必要なgeneratorの性能

- 650 バケットおきに 65 バケットのギャップを導入した場合について検討。ビーム電流: 100 mA (85.4 pC/bunch)。
- 空洞当たりの入力パワー: 100 kW (ギャップなし) → 112 kW 程度
- 周波数帯域は広いほど良いが、4 - 10 MHz 程度で可。
- RF源への要求は少し上がるが、現実的なパラメータで電圧補正は可能だろう。

補足：パワーソースのオプション

- 一般に、大電力クライストロンは、広帯域化が難しい(と思われる)。
- 狭い帯域の大電力クライストロンと、広帯域の中電力RF源を組み合わせることも可能だろう。

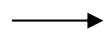
可能なパワーソースの構成



非対称パワー合成器のS行列

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{1}{5}} & \sqrt{\frac{4}{5}} & 0 \\ \sqrt{\frac{1}{5}} & 0 & 0 & \sqrt{\frac{4}{5}} \\ \sqrt{\frac{4}{5}} & 0 & 0 & -\sqrt{\frac{1}{5}} \\ 0 & \sqrt{\frac{4}{5}} & -\sqrt{\frac{1}{5}} & 0 \end{pmatrix}$$

S行列が対称かつユニタリ行列



可逆、無損失素子で実現可能

同様な素子の例(1:2 パワー分配器)

1592

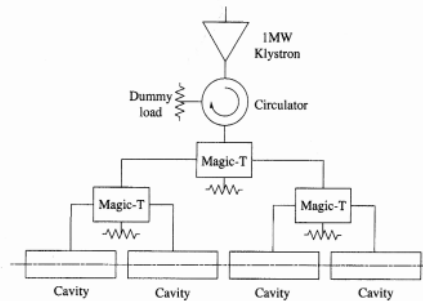
IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, AUGUST 2001

Development of an Asymmetric Power Divider for a High-Power RF Distribution System

Takeshi Takahashi, Shogo Sakanaka, and Masaki Izawa

Abstract—We have developed a radio-frequency (RF) power divider that is used for an RF distribution system in high-energy electron storage rings. This power divider has four waveguide ports, and it can split a high RF power by a ratio of 1:2 at an operating frequency of about 508.6 MHz. Since other properties are very similar to those of a magic-T, it is very suitable for accelerator applications. By combining this device with a conventional magic-T, one can design an RF distribution system in which three cavities are driven by a single klystron. The design procedure of the power divider, a low-power measurement, and a high-power test result are presented in this paper.

Index Terms—Electron storage ring, magic-T, power divider, RF system, *S*-parameter.



- クライストロン1台で空洞3台を駆動するために使用した。
- 周波数 508.6 MHz用。
- 外形は magit-T と互換。

