

次世代光源において過渡的ビーム負荷 補償を行うためのキッカー空洞の検討

内藤大地*^{A)}、坂中章悟^{A)}、山本尚人^{A)}、高橋毅^{A)}、山口孝明^{B)}

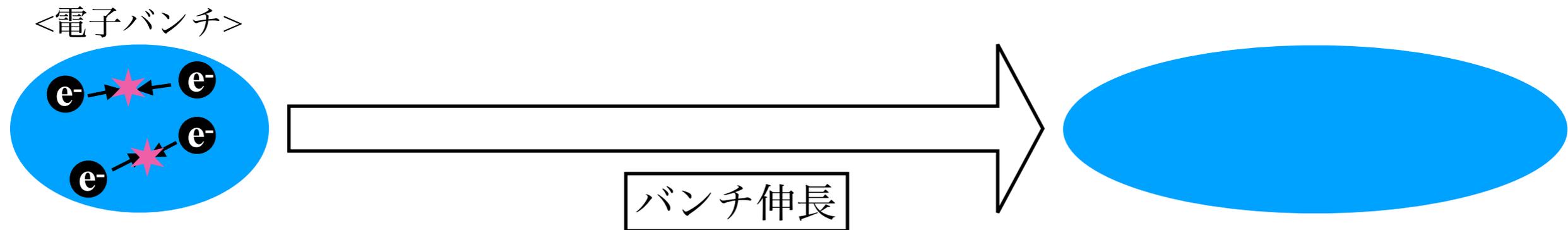
A) KEK、B) 総研大

Contents

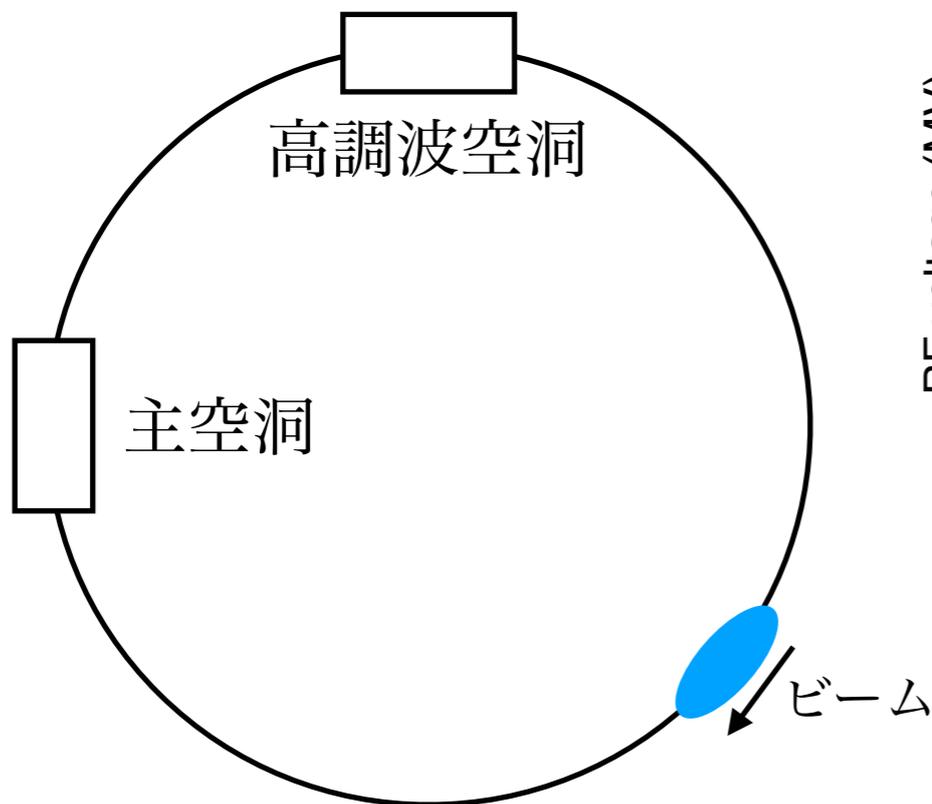
- イントロダクション
 - 次世代光源での課題
 - キッカー空洞による過渡的ビーム負荷補償
- キッカー空洞の具体的検討
 - 空洞パラメータの検討
 - キッカー空洞のデザイン
- まとめ

次世代光源での課題1

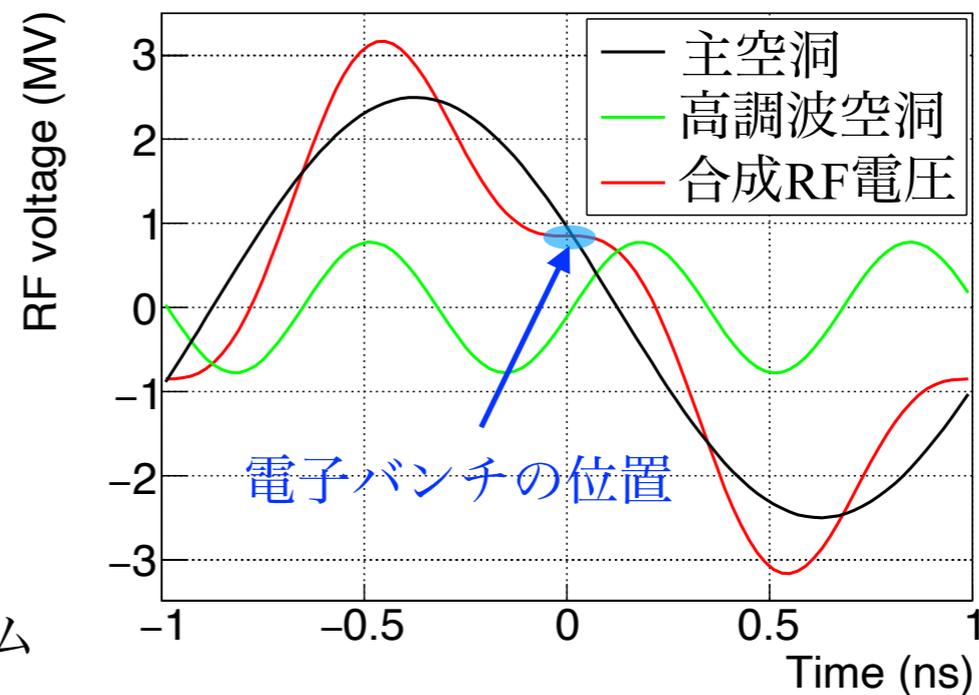
- 次世代光源：極低エミッタンスの達成 ($\epsilon \ll 1$ nm-rad)
- 3GeVクラスの次世代光源の課題：バンチ内散乱の抑制



- エミッタンス増加
- Touschekビーム寿命の減少



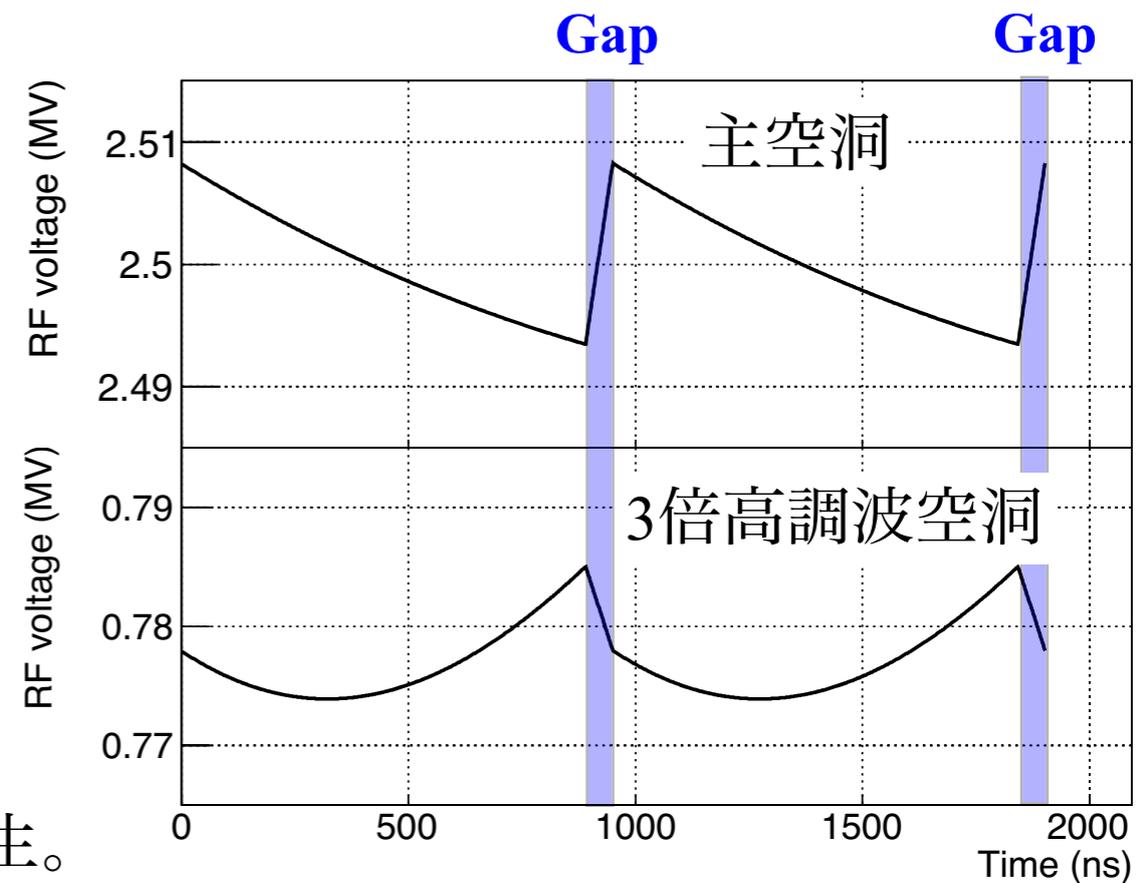
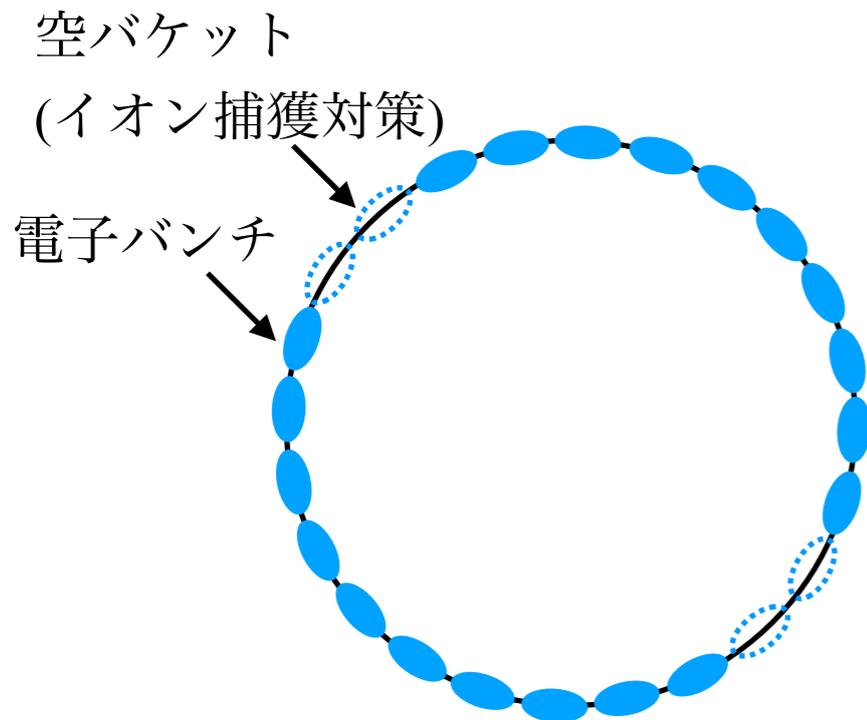
<3倍高調波を使ったバンチ伸長>



常伝導の主空洞と高調波空洞を使ってバンチ長を伸ばし、バンチ内散乱を抑制。

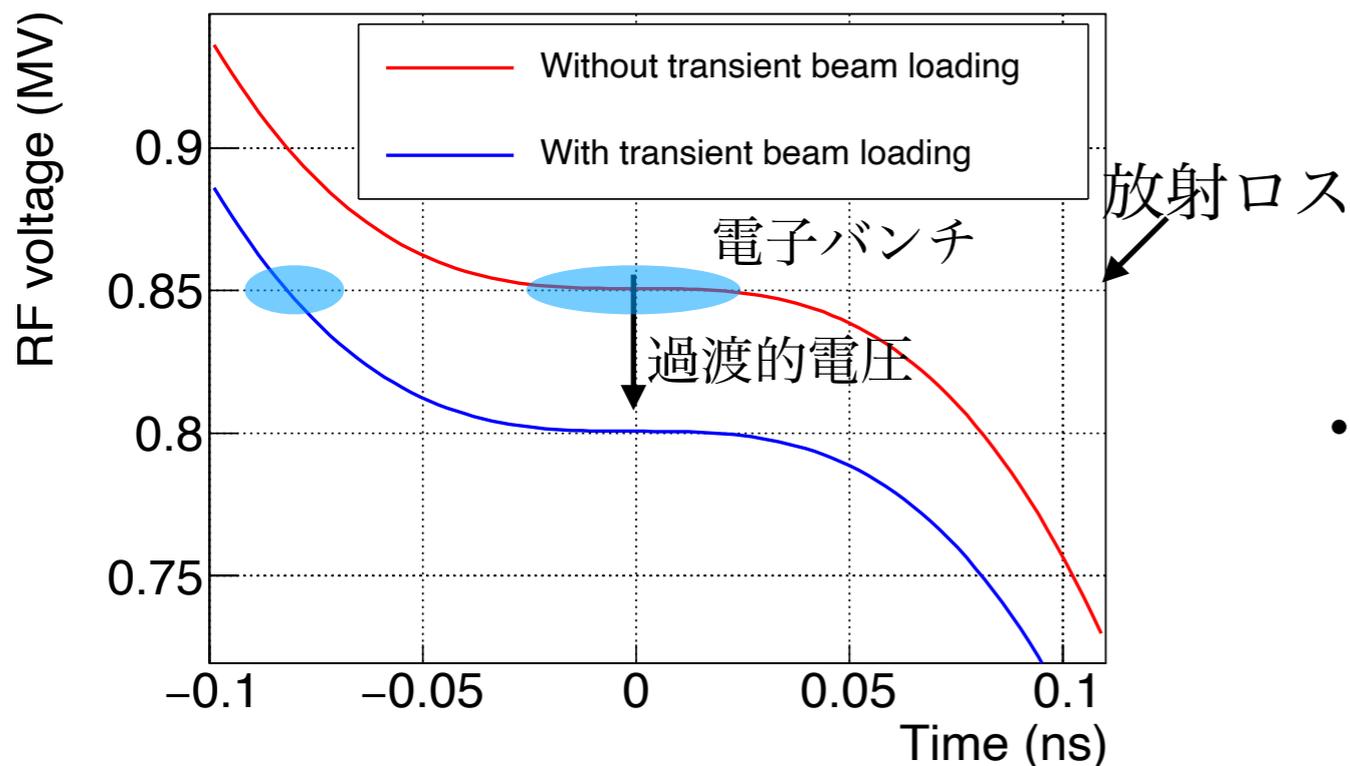
次世代光源での課題2

<各空洞電圧の例>



バンチギャップによる過渡的ビーム負荷が発生。

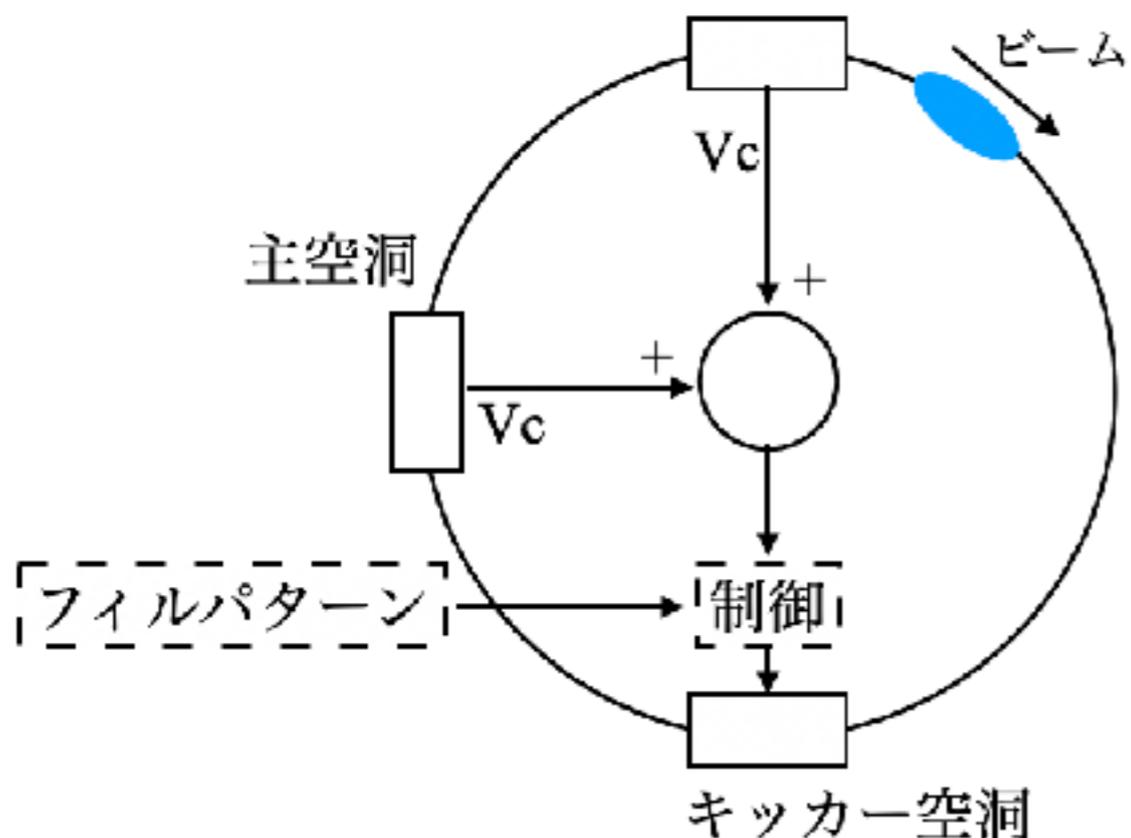
<加速電圧の変化>



- 過渡的負荷により、バンチ伸長が抑制されてしまう。

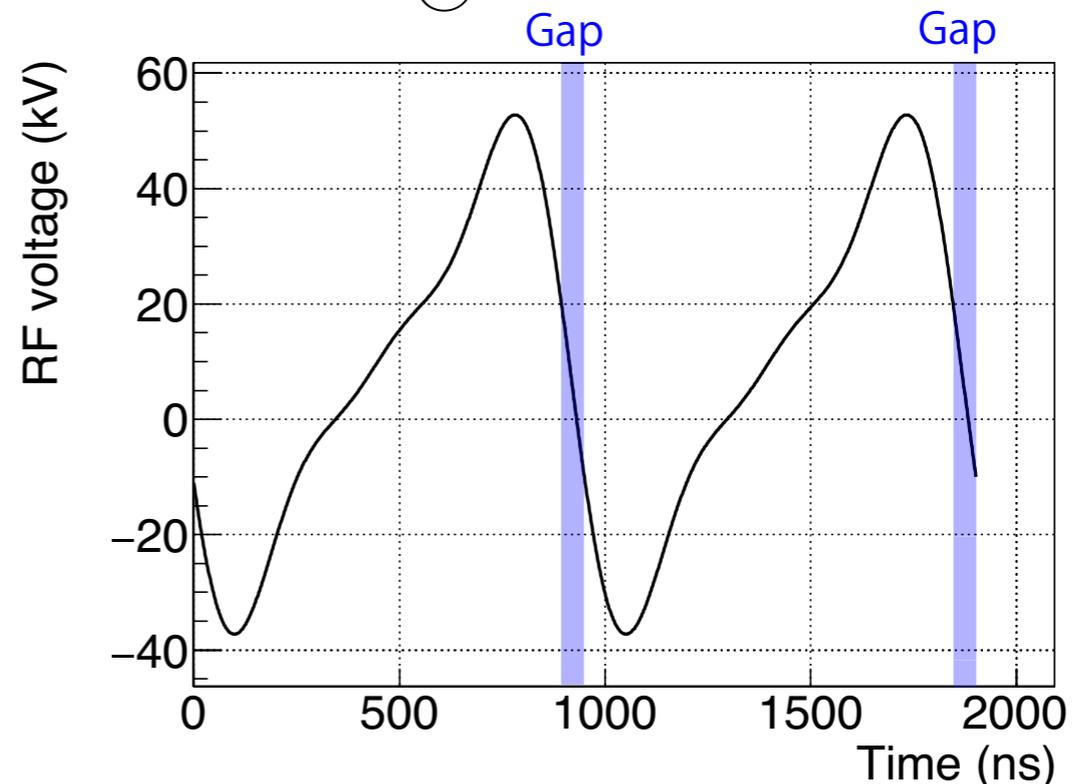
キッカー空洞によるビームローディング補償

3倍高調波空洞



キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)

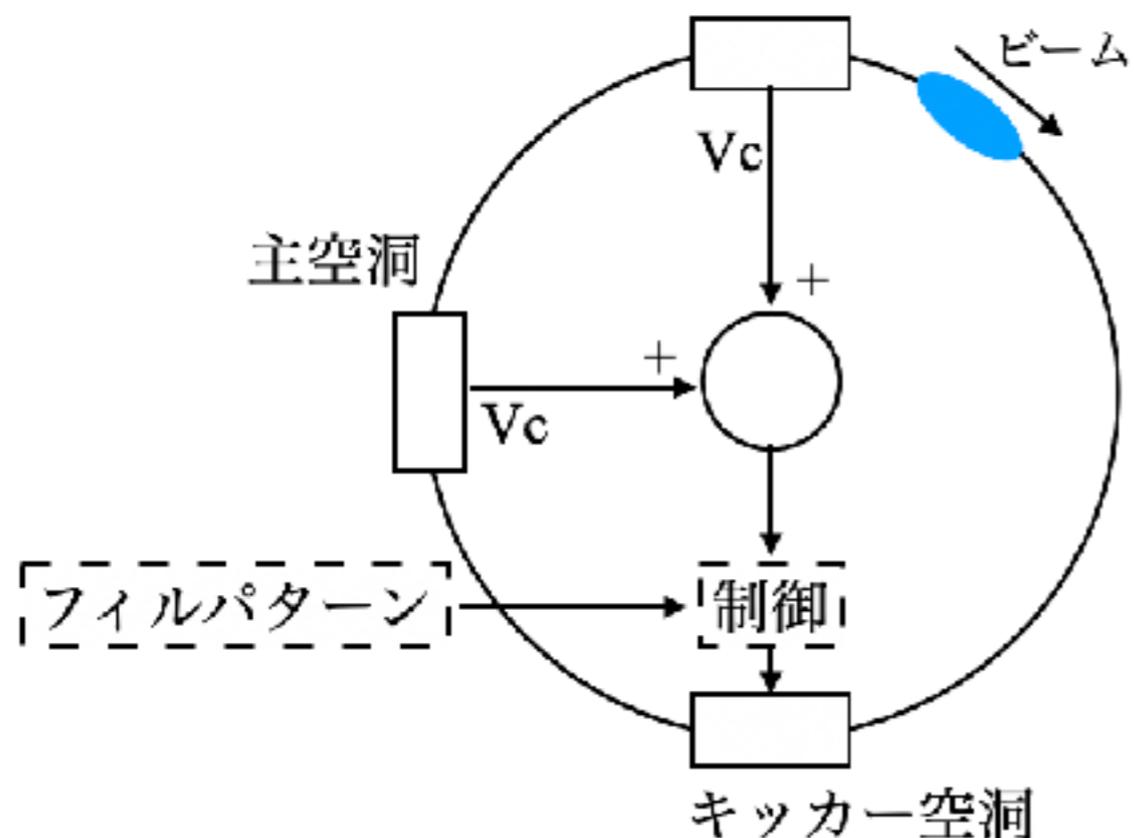
@ KEK-LS



広帯域の常伝導キッカー空洞でバンチ毎に異なる電圧を与え、主空洞と高調波空洞に発生する過渡的電圧変動を補償する。

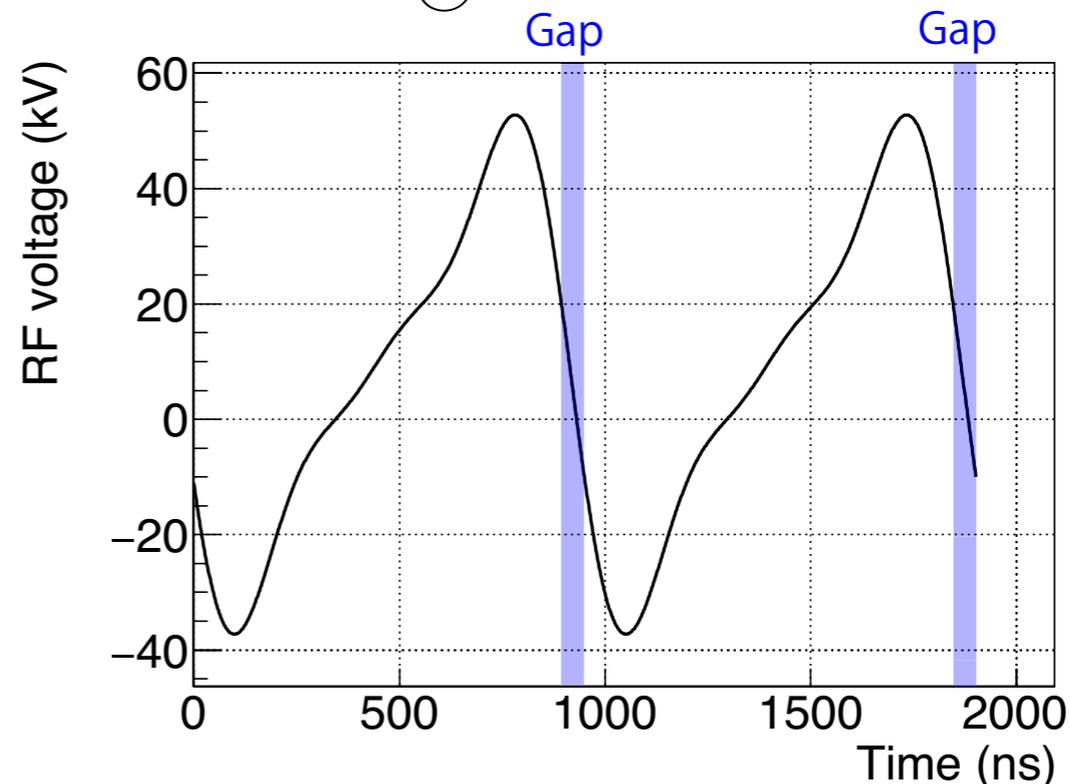
キッカー空洞によるビームローディング補償

3倍高調波空洞



キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)

@ KEK-LS



<KEK-LS(PFの次期計画の1つ)を仮定した時のバンチ伸長[1]>

| 条件 | バンチ長 |
|----------------|----------------|
| 3倍高調波空洞なし | 9.5 ps |
| 3倍高調波空洞あり | 30.5 ps |
| 3倍高調波空洞+キッカー空洞 | 40.9 ps |
| バンチギャップなし | 42.5 ps |

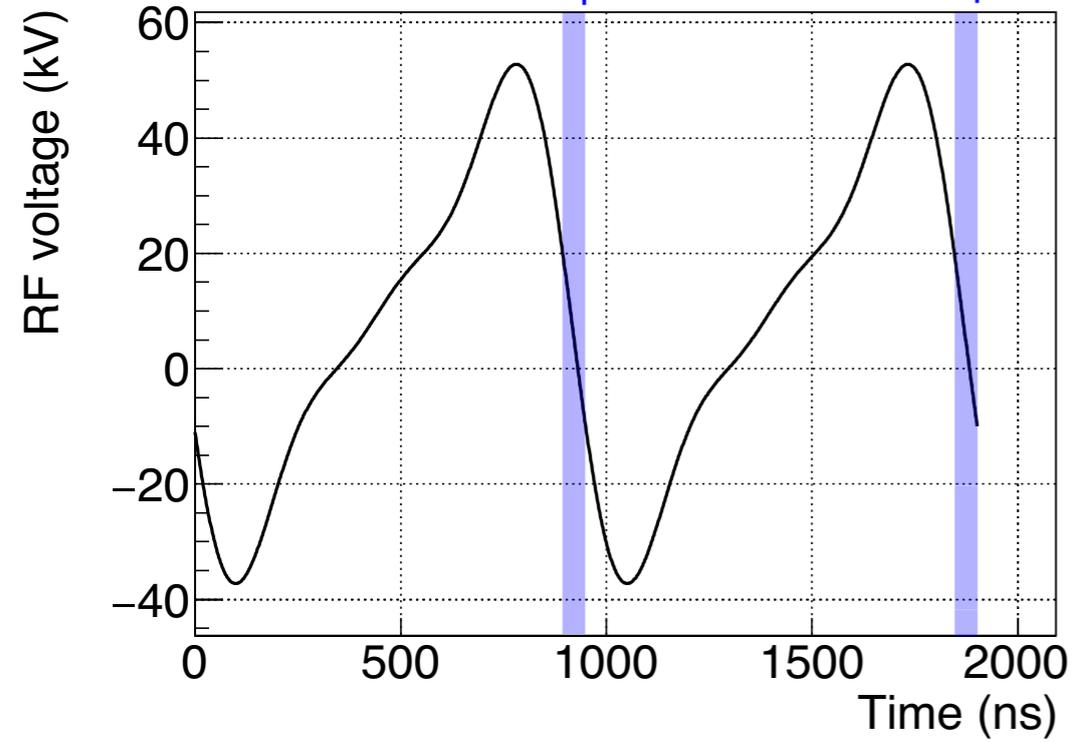
**キッカー空洞を導入することで
十分な補正を達成。**

[1]N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, "Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources", Physical Review Accelerators and Beams **21** (1) (2018) 012001.

キッカー空洞の具体的検討

キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)

@ KEK-LS



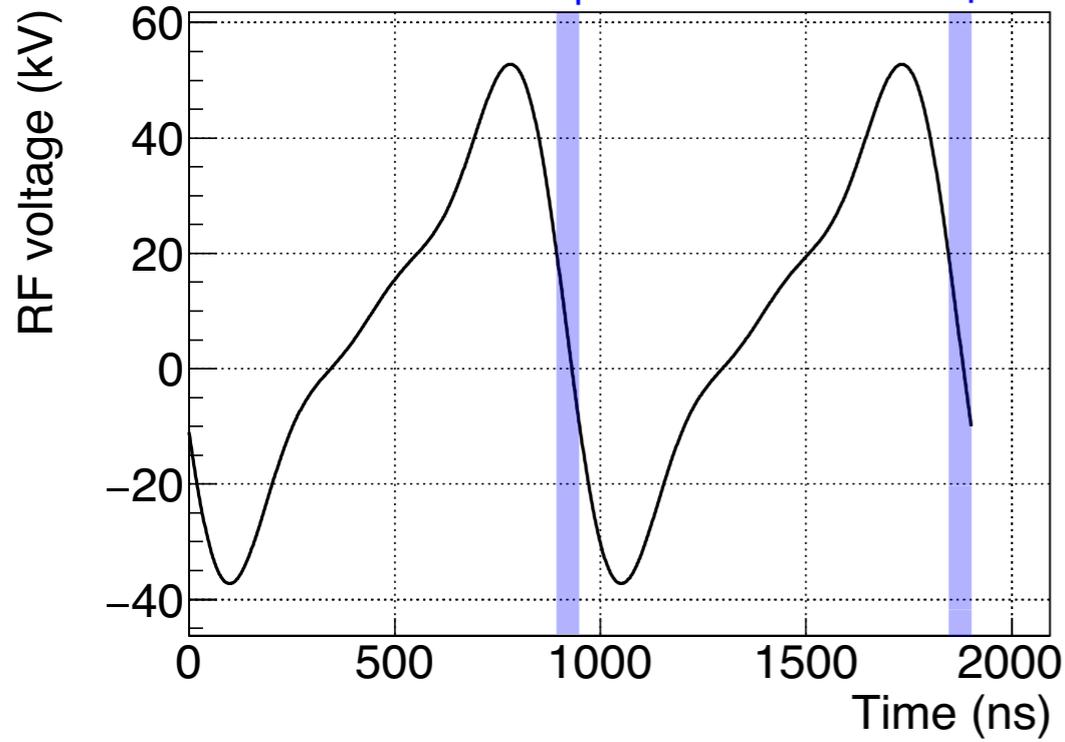
先行研究で仮定された
キッカー空洞のパラメータ

| 変数 | 値 |
|---------------|--------------|
| -3dB 幅 | 5 MHz |
| 空洞電圧(V_g) | 50 kV |
| 共振周波数 | 500 MHz |
| R/Q | 175 Ω |

キッカー空洞の具体的検討

キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)

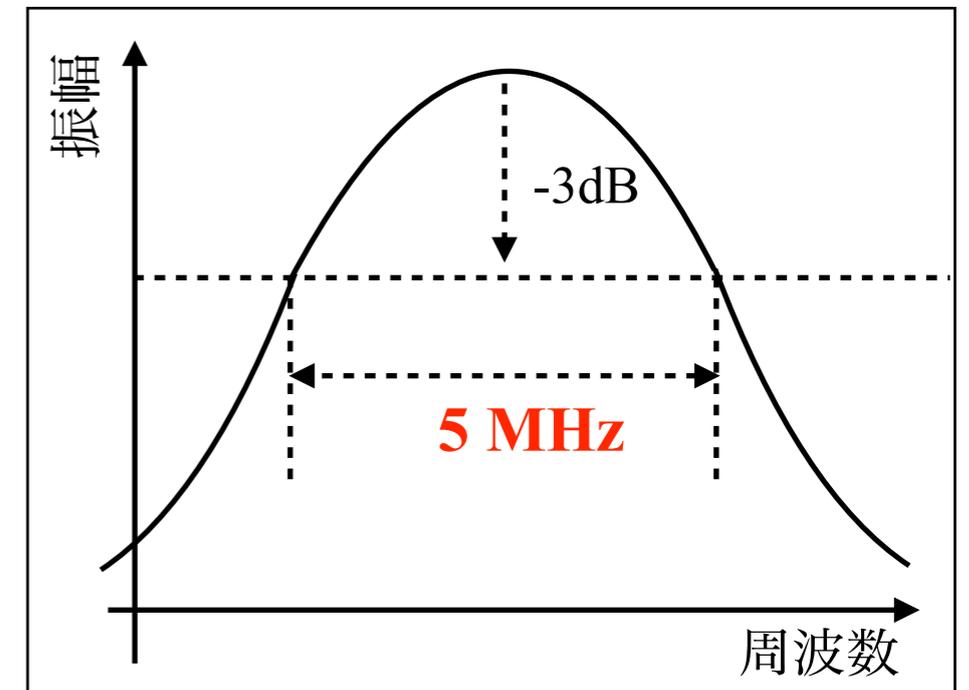
@ KEK-LS



先行研究で仮定された
キッカー空洞のパラメータ

| 変数 | 値 |
|-----------------|--------------|
| -3dB 幅 | 5 MHz |
| 空洞電圧(V_g) | 50 kV |
| 共振周波数 | 500 MHz |
| R/Q | 175 Ω |
| β (RF結合度) | 399 |

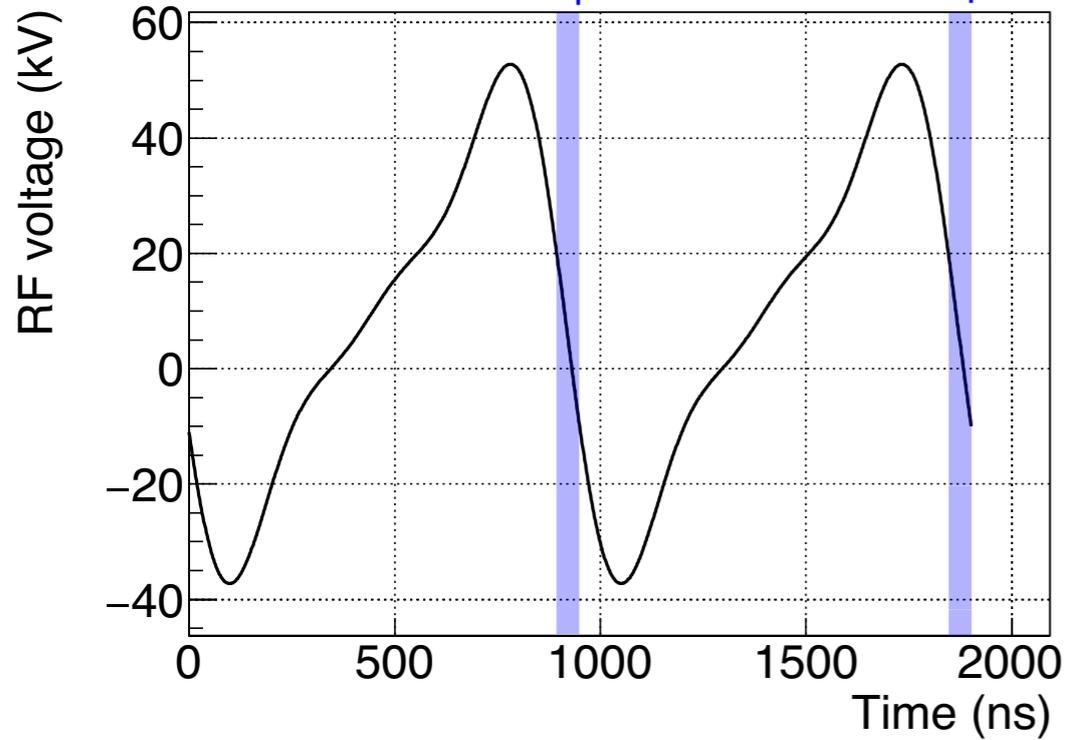
キッカー空洞のRF応答



キッカー空洞の具体的検討

キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)

@ KEK-LS



先行研究で仮定された
キッカー空洞のパラメータ

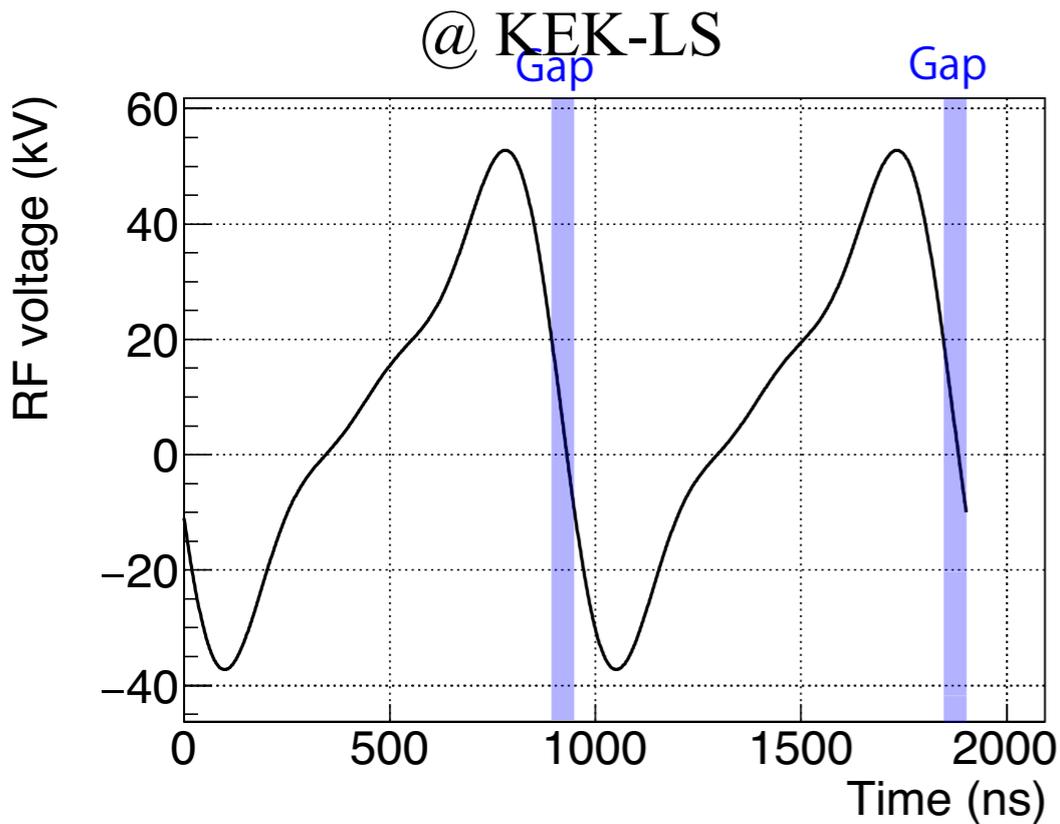
| 変数 | 値 |
|-----------------|--------------|
| -3dB 幅 | 5 MHz |
| 空洞電圧(V_0) | 50 kV |
| 共振周波数 | 500 MHz |
| R/Q | 175 Ω |
| β (RF結合度) | 399 |

過渡的電圧変動の補償に
必要なパラメータ

具体的には未検討

キッカー空洞の具体的検討

キッカー空洞で発生すべき補償用電圧(V_g)



先行研究で仮定された
キッカー空洞のパラメータ

| 変数 | 値 |
|-----------------|--------------|
| -3dB 幅 | 5 MHz |
| 空洞電圧(V_0) | 50 kV |
| 共振周波数 | 500 MHz |
| R/Q | 175 Ω |
| β (RF結合度) | 399 |

過渡的電圧変動の補償に
必要なパラメータ

具体的には未検討

検討すべき課題

1. キッカー空洞での過渡的電圧変動
2. キッカー空洞への入力電力
3. キッカー空洞の加速モードによる結合バンチ不安定性

3つの観点から最適なパラメータを検討した。

1. キッカー空洞での過渡的電圧変動(1)

- 補償電圧 = $\overline{V}_g + \overline{V}_b$ (空洞電圧+ビームにより発生する電圧)
 - V_b 一定=>問題なし。
 - V_b の変動大=>電圧変動の補償に影響が出る。
- バンチギャップによりキッカー空洞に発生する過渡的な電圧変動を計算。
- ビームによってN番目のバケットに発生する電圧 $V_b(N)$ は

$$V_b(N+1) = A[V_b(N) + \frac{V_{b0}}{2}] + \frac{V_{b0}}{2}$$
$$V_{b0} = \pi f_a \frac{R}{Q} q \quad (\text{ギャップ中は0})$$

<先行研究でのパラメータ>

| シンボル | パラメータ | 値 |
|----------------|----------------------|---------|
| A | バンチ間隔とバンド幅で決定 | 0.97 |
| q | バンチ電荷 | 1nC |
| f _a | 共振周波数 | 0.5 GHz |
| R/Q | shunt impedance/無負荷Q | 175 Ω |

1. キッカー空洞での過渡的電圧変動(1)

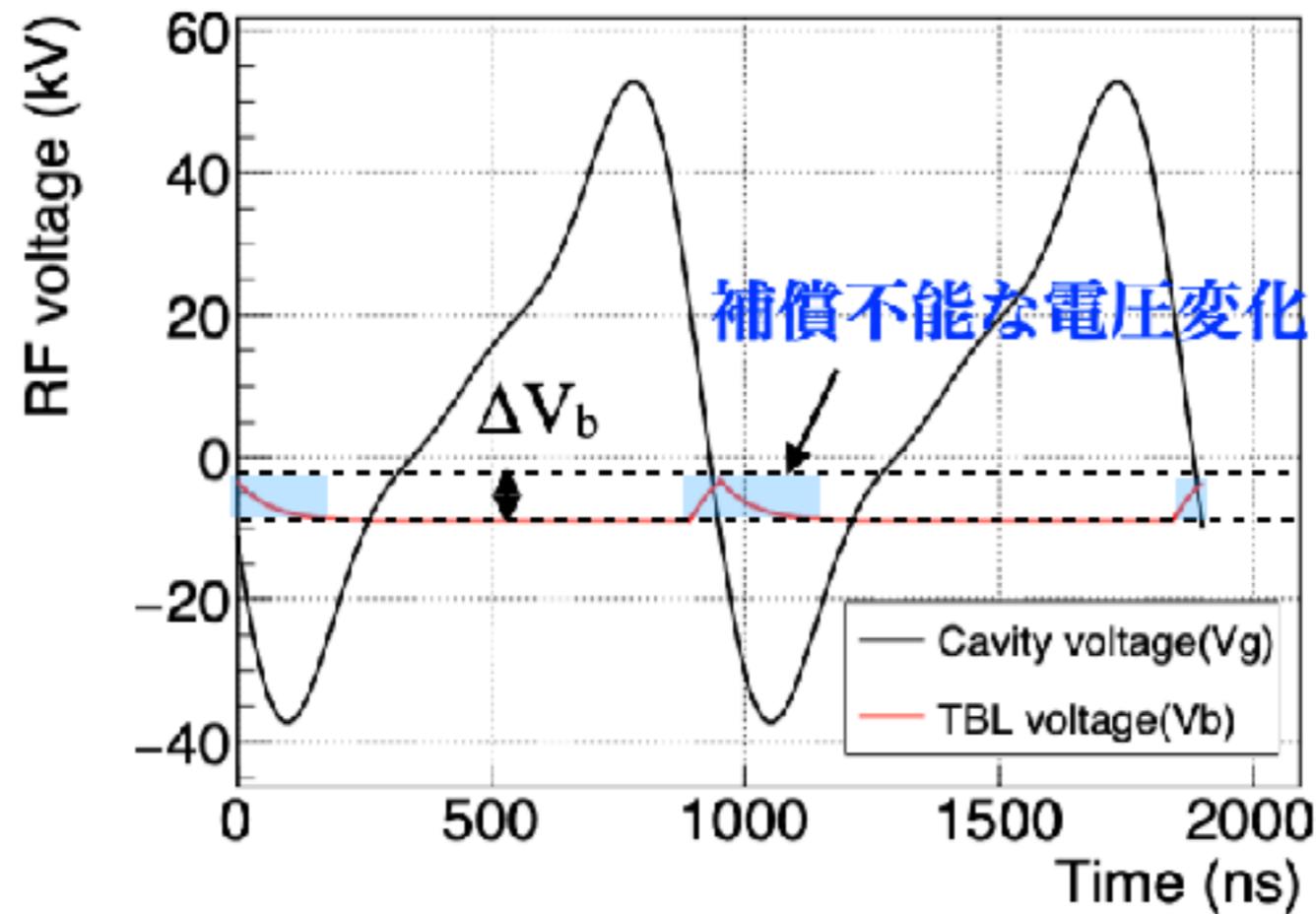
<先行研究でのパラメータ>

$$V_b(N+1) = A[V_b(N) + \frac{V_{b0}}{2}] + \frac{V_{b0}}{2}$$

$$V_{b0} = \pi f_a \frac{R}{Q} q \quad (\text{ギャップ中は0})$$

| シンボル | パラメータ | 値 |
|----------------|----------------------|---------|
| A | バンチ間隔とバンド幅で決定 | 0.97 |
| q | バンチ電荷 | 1nC |
| f _a | 共振周波数 | 0.5 GHz |
| R/Q | shunt impedance/無負荷Q | 175 Ω |

<先行研究での空洞電圧(V_g)と過渡的電圧変動>



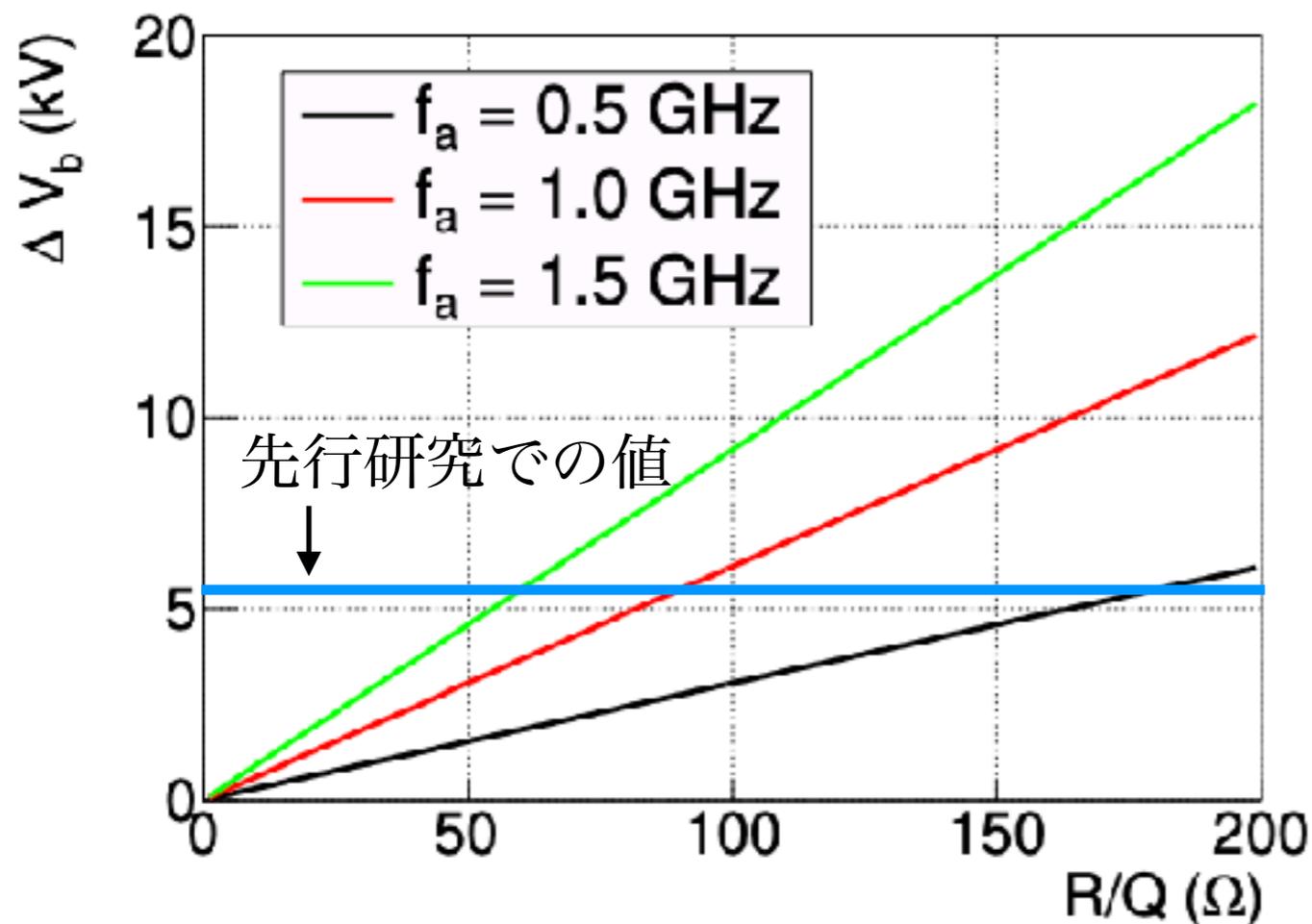
先行研究での過渡的電圧補償を実現するには $\Delta V_b < 5.5 \text{ kV}$ が必要。

1. キッカー空洞での過渡的電圧変動(2)

- 前ページの式から平衡状態の電圧変化を計算する。

$$\Delta V_b = f_a \frac{R}{Q} C \quad C: \text{バンド幅、バンチ数、バンチ電荷、バンチ幅から決まる定数}$$

- キッカー空洞共振周波数として主RF周波数、2倍高調波、3倍高調波を検討。



先行研究での ΔV_b になるR/Q

| Resonance frequency | R/Q (Ω) |
|---------------------|------------------|
| 500 MHz | 175 |
| 1.0 GHz | 88 |
| 1.5 GHz | 58 |

5 MHzのバンド幅の際に、各共振周波数で満たすべきR/Qの上限値を算出。

$$\Rightarrow f_a \times R/Q < 87.5 \text{ (GHz} \cdot \Omega)$$

2. キッカー空洞への入力電力

- キッカー空洞への入力電力(P_g)を計算。

$$P_g = \frac{(1 + \beta)^2}{4\beta R} V_g^2 \sim \frac{\Delta f}{4f_a} \frac{1}{R/Q} V_g^2 \quad (\beta \gg 1 \text{ を考慮})$$

β : RF結合度

V_g : 入力電圧

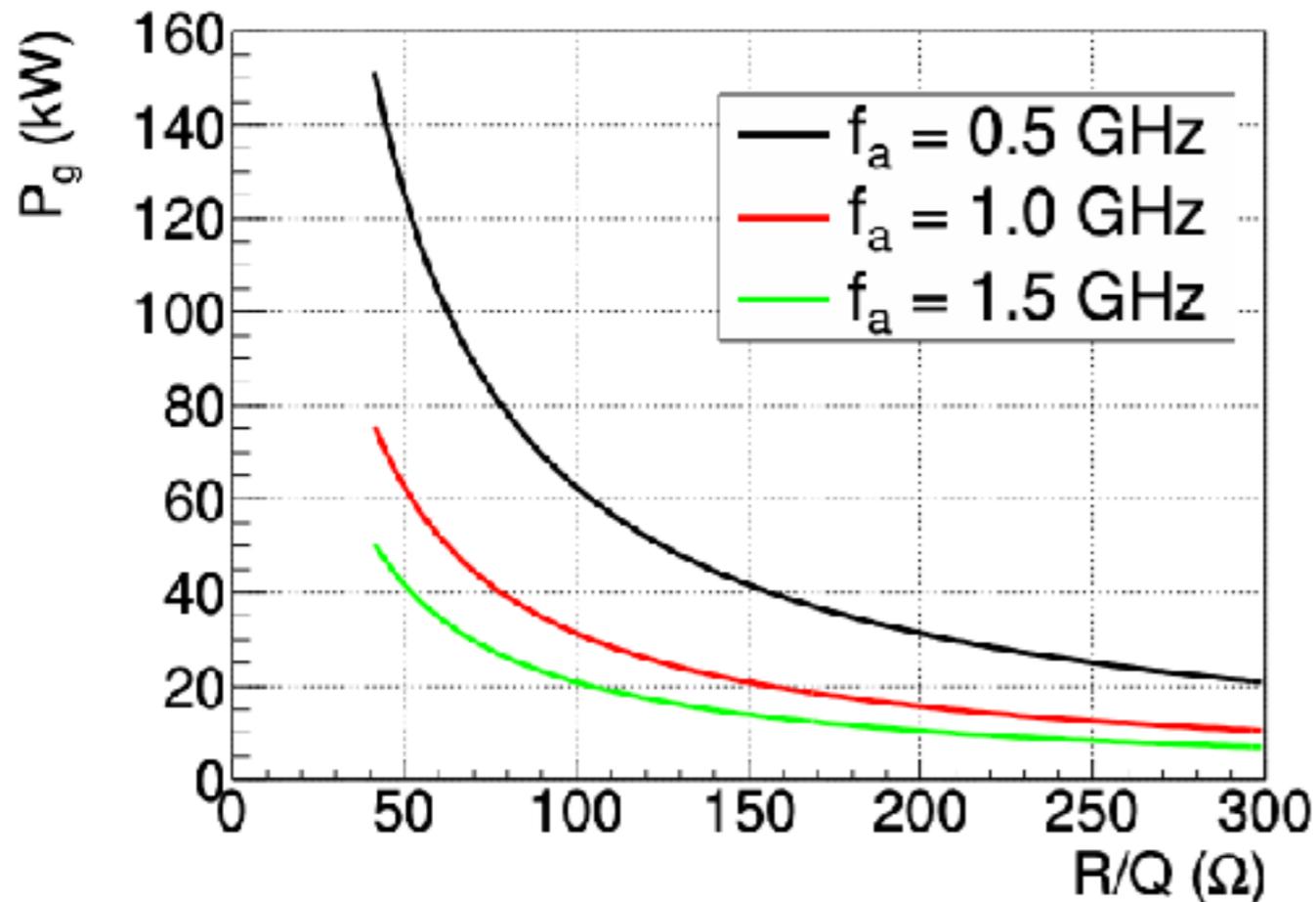
R : シャントインピーダンス

Q : 無負荷 Q

Δf : -3 dBバンド幅

f_a : 共振周波数

< $V_g=50\text{kV}$, $\Delta f=5\text{ MHz}$ の時の相関>



入力電力を最小化 : $f_a R/Q \uparrow$

過渡的電圧変動を最小化 : $f_a R/Q \downarrow$

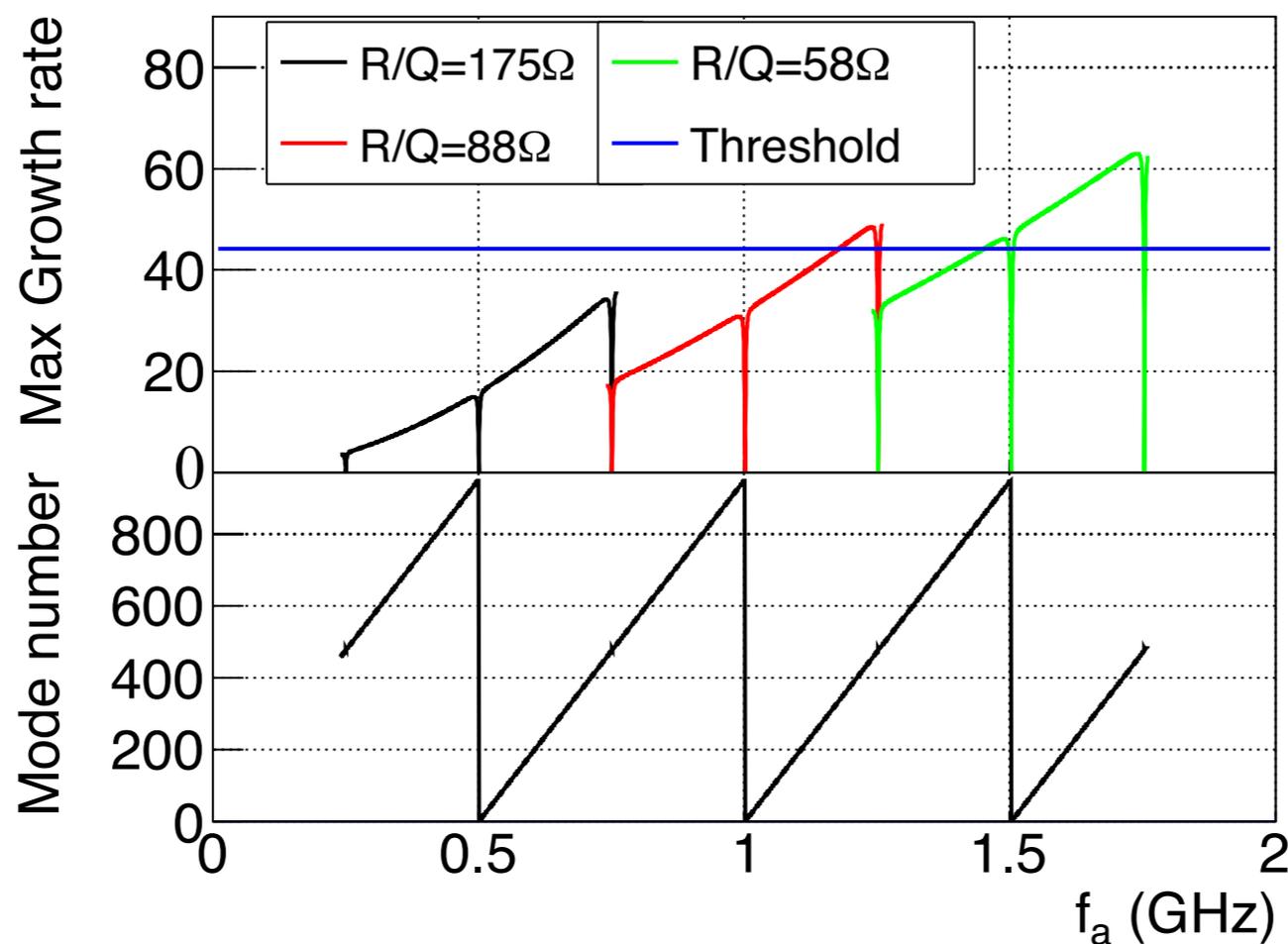
$f_a R/Q$ は前ページで求めた上限値が適切。

$$f_a R/Q = 87.5 \text{ (GHz} \cdot \Omega\text{)}$$

3. キッカーの加速モードによる結合バンチ不安定性

- キッカー空洞を使用しない場合に、共振周波数をずらしておく事が可能かを計算。
- 0.5 GHz、1 GHz、1.5 GHzのそれぞれに最適なR/Qで共振周波数を変えていき、結合バンチ不安定性のモード毎のgrowth rateをそれぞれ計算。

<Growth rateと共振周波数の相関>

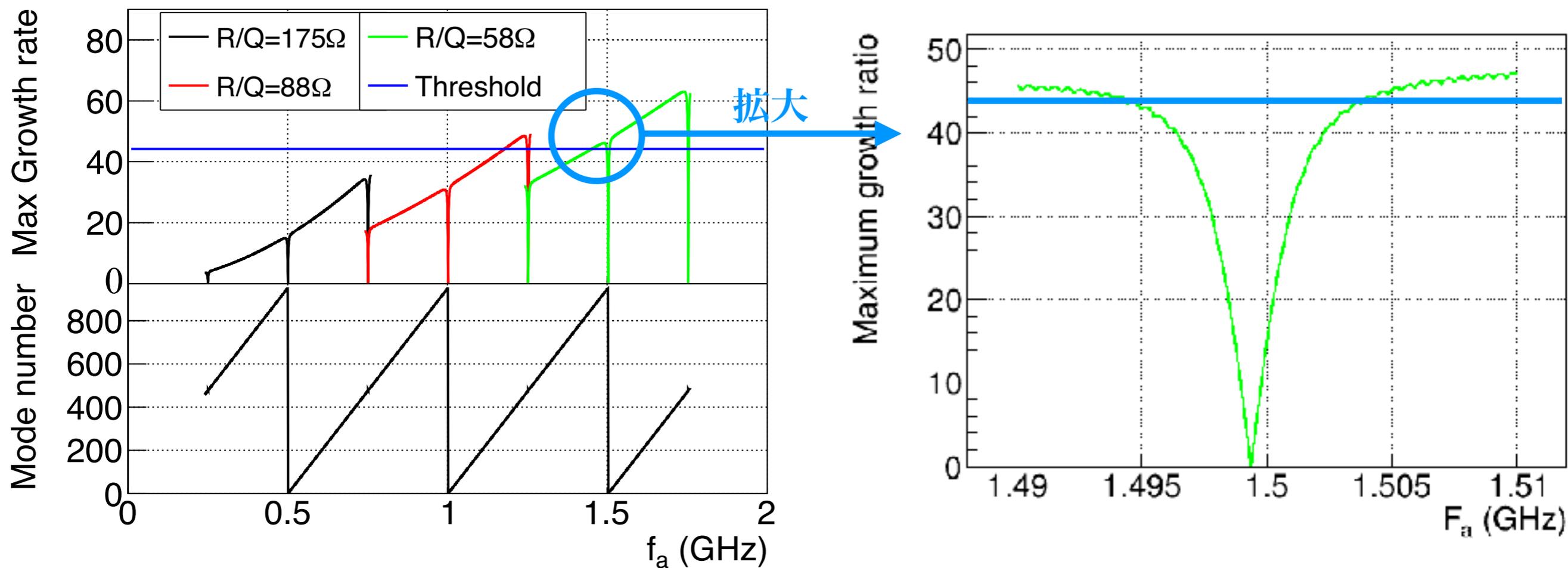


- 共振周波数が0.5又は1.0 GHz : 大きく共振周波数をずらせる。

3. キッカーの加速モードによる結合バンチ不安定性

- キッカー空洞を使用しない場合に、共振周波数をずらしておく事が可能かを計算。
- 0.5 GHz、1 GHz、1.5 GHzのそれぞれに最適なR/Qで共振周波数を変えていき、結合バンチ不安定性のモード毎のgrowth rateをそれぞれ計算。

<Growth rateと共振周波数の相関>



- 共振周波数が0.5又は1.0 GHz : 大きく共振周波数をずらせる。
- 共振周波数が1.5 GHz : 共振周波数は ± 5 MHzしかずらせない。

要求値のまとめ

- ・ 検討の結果、どの周波数でも実現可能な事を確認。

| Parameter | 0.5 GHz | 1 GHz | 1.5 GHz |
|--------------------|---------|-------|---------|
| R/Q (Ω) | 175 | 88 | 58 |
| ΔV_b (kV) | 5.4 | 5.4 | 5.3 |
| P_g (kW) | 35.7 | 35.5 | 35.9 |
| De-tune | Yes | Yes | No |

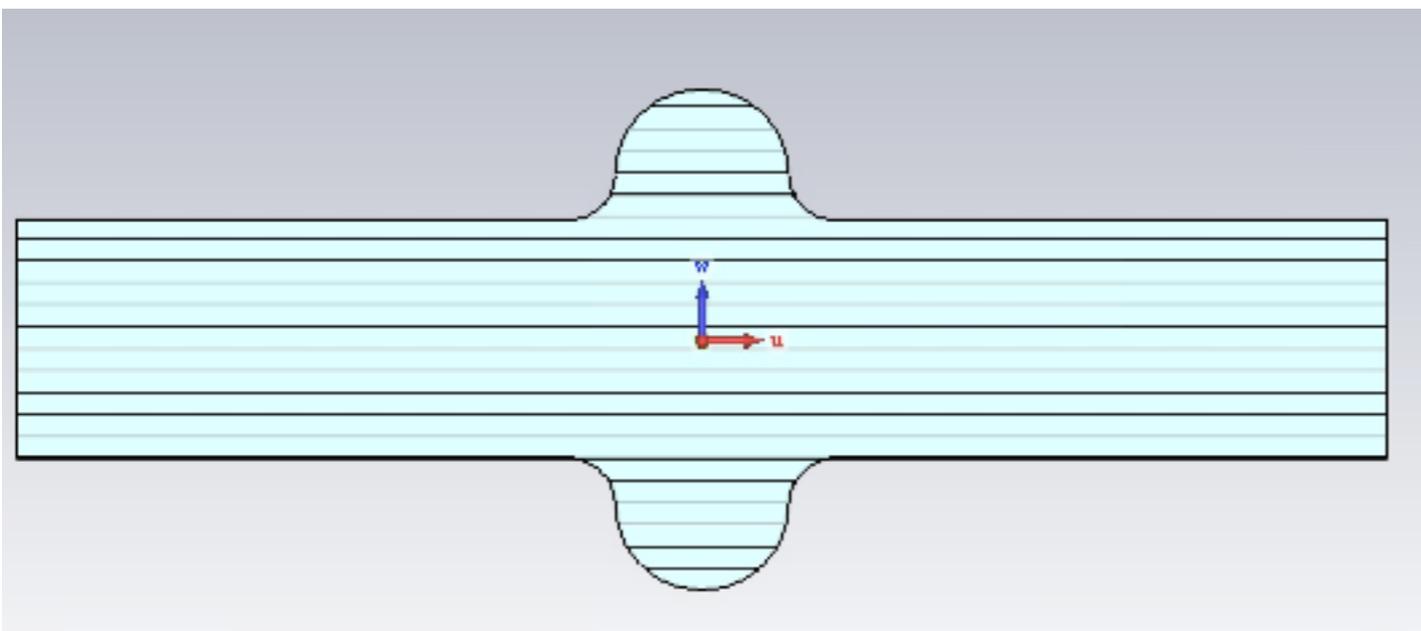
- ・ 空洞半径は共振周波数に反比例。
- ・ 1.5 GHzはR/Qが低く、**single mode cavity**により高次モードが減衰可能。



**1.5 GHzが一番
省スペース**

Single mode cavity : 空洞半径に対しビームダクトが大きくR/Qが小さい(<80 Ω)。

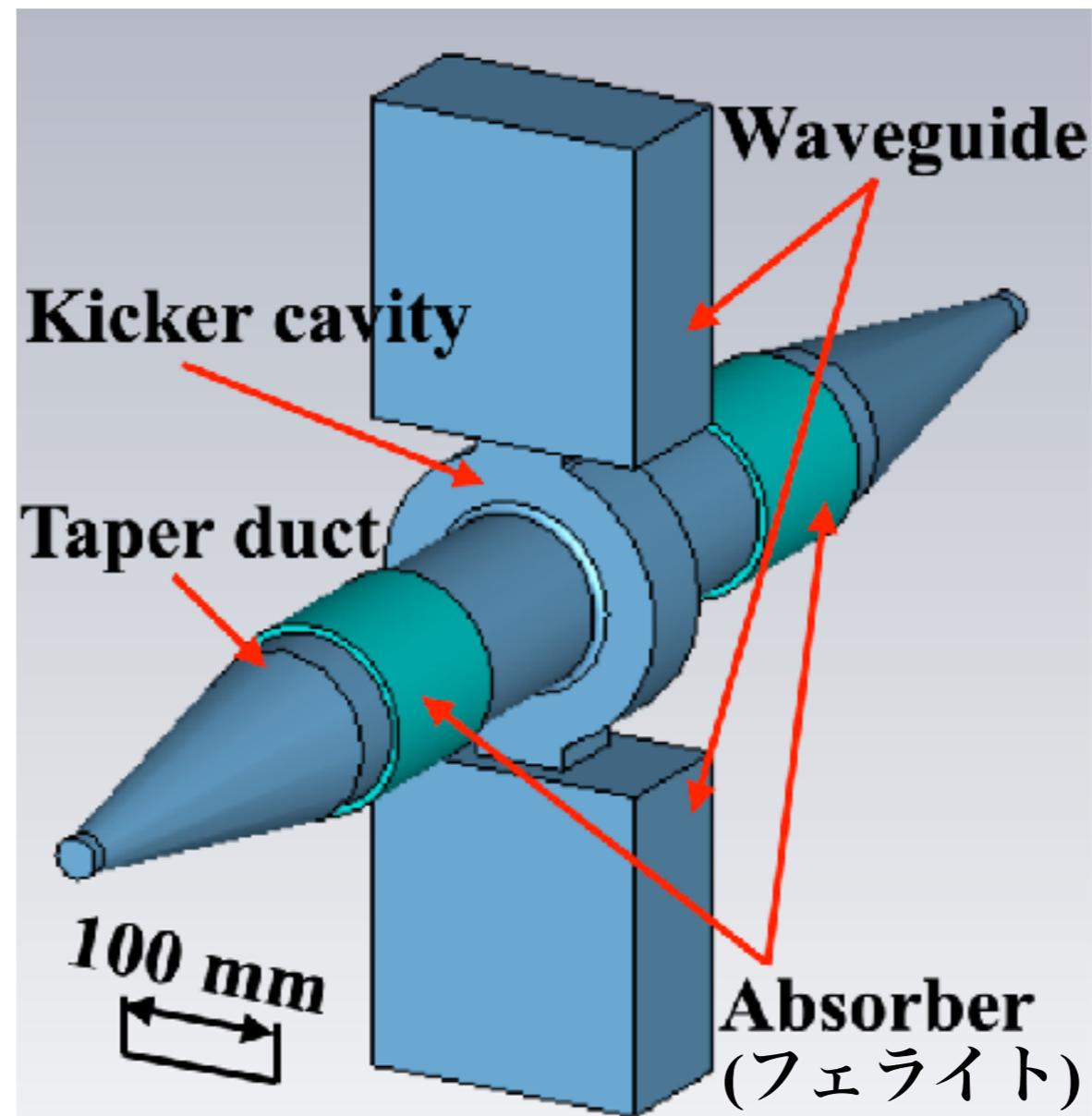
高次モードがビームパイプへ伝播するので空洞本体にダンパーが不要。



1.5 GHzのsingle mode cavityをキッカー空洞として提案。

キッカー空洞の具体的デザイン

- ・ 空洞本体、2本の導波管型RF入力、2個のマイクロ波吸収体、テーパ管から構成。



1. 空洞パラメータの実現。
2. 高次モードによる結合バンチ不安定性の抑制。
=>電磁場シミュレーションコード(CST)を使って各コンポーネントを最適化。

1. 空洞パラメータの実現 (1)

- 空洞パラメータを満たすデザイン設計。

=>Eigenmode solver+ frequency domain solverで最適化。

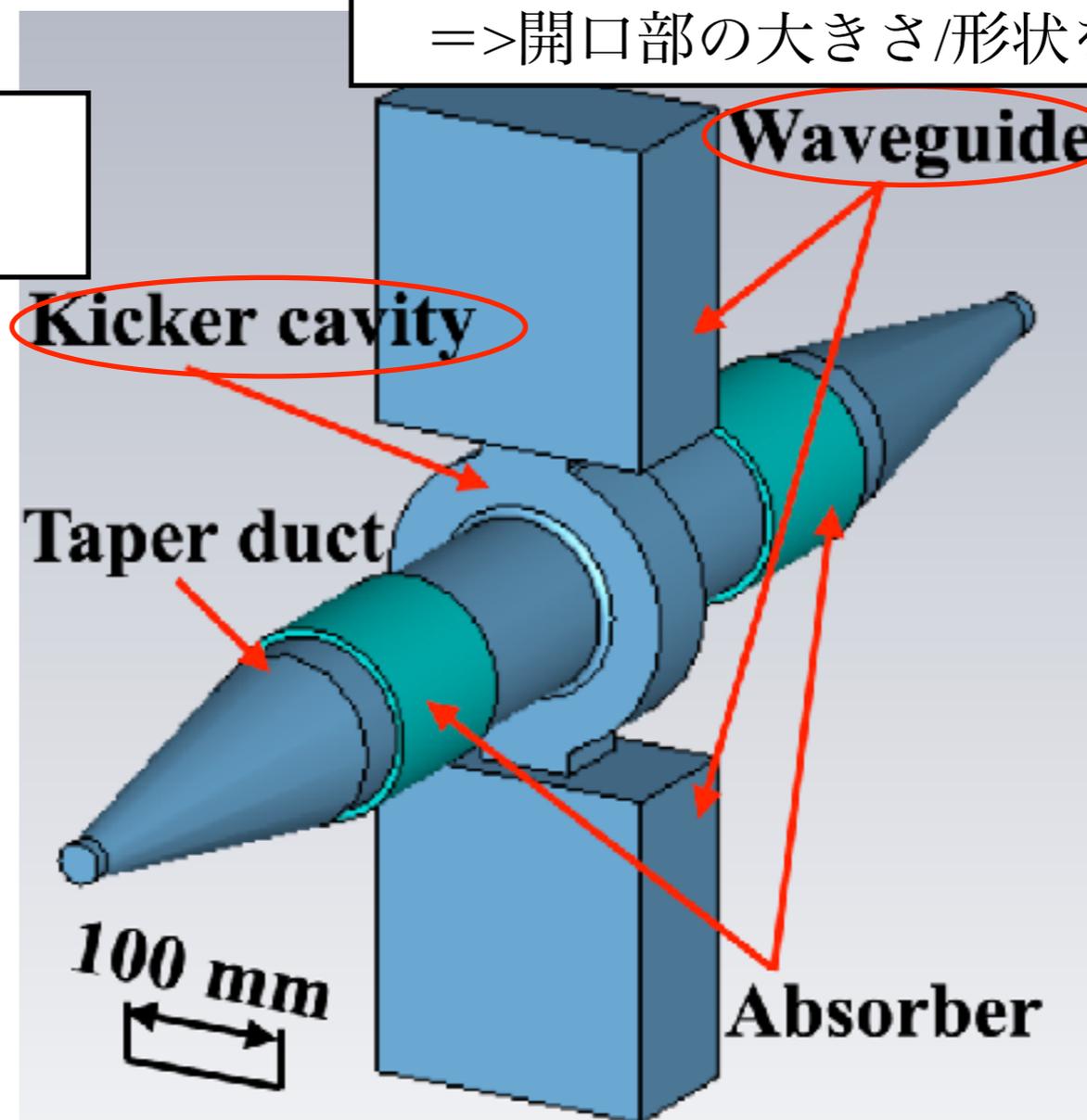
- 低いR/Qの達成。

=>空洞外径形状の最適化。

- -3dB帯域幅が5 MHz=>負荷Q値を300以下。

- 接続部での発熱を許容範囲に。

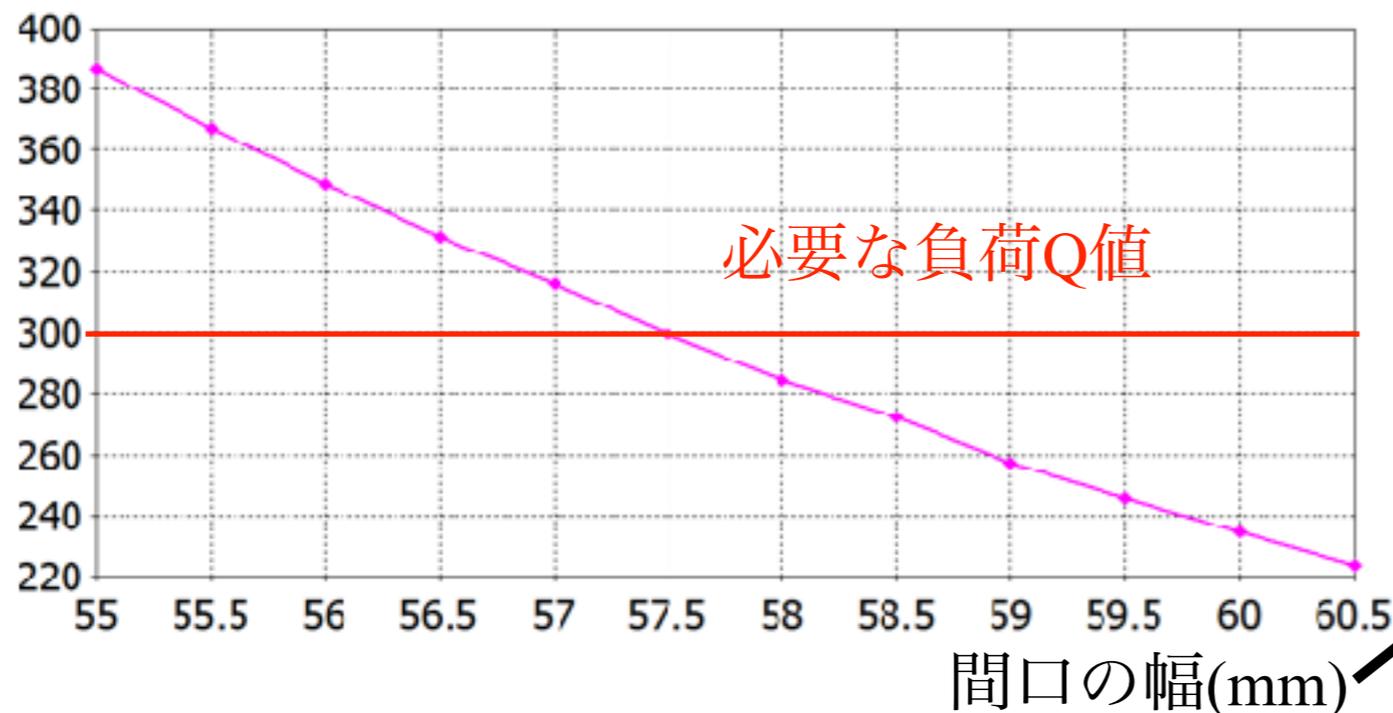
=>開口部の大きさ/形状を最適化。



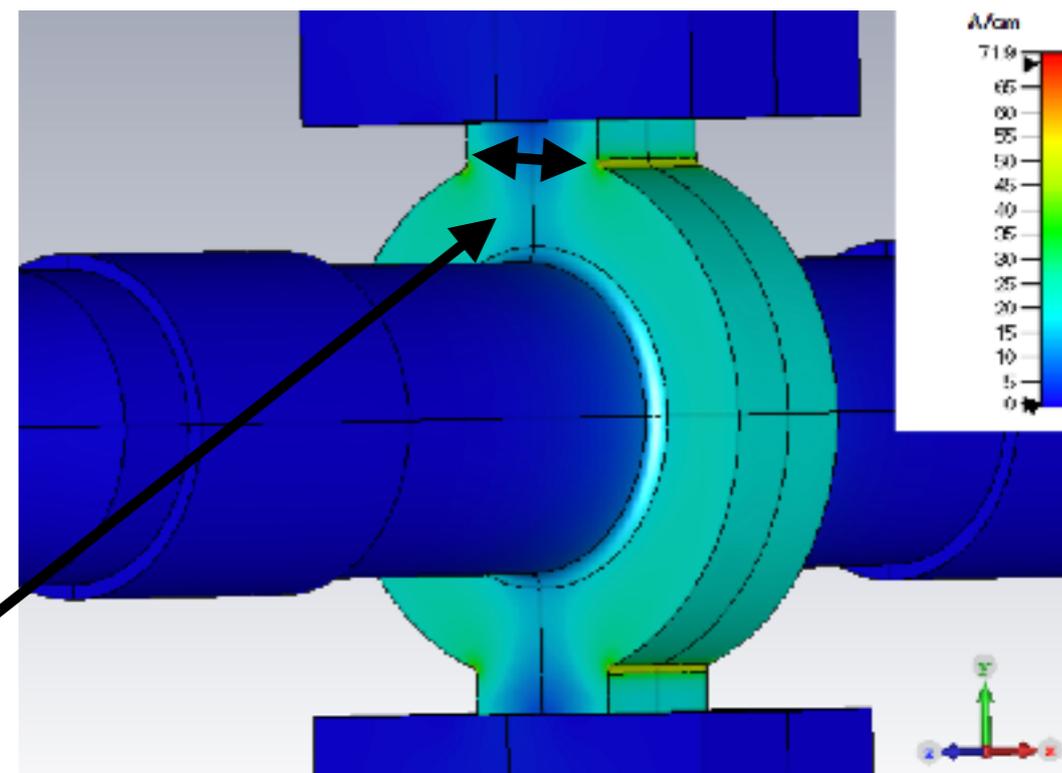
1. 空洞パラメータの実現 (2)

<開口部の最適化の例>

必要な負荷Q値



<V_g=50 kVの時の表面電流分布>



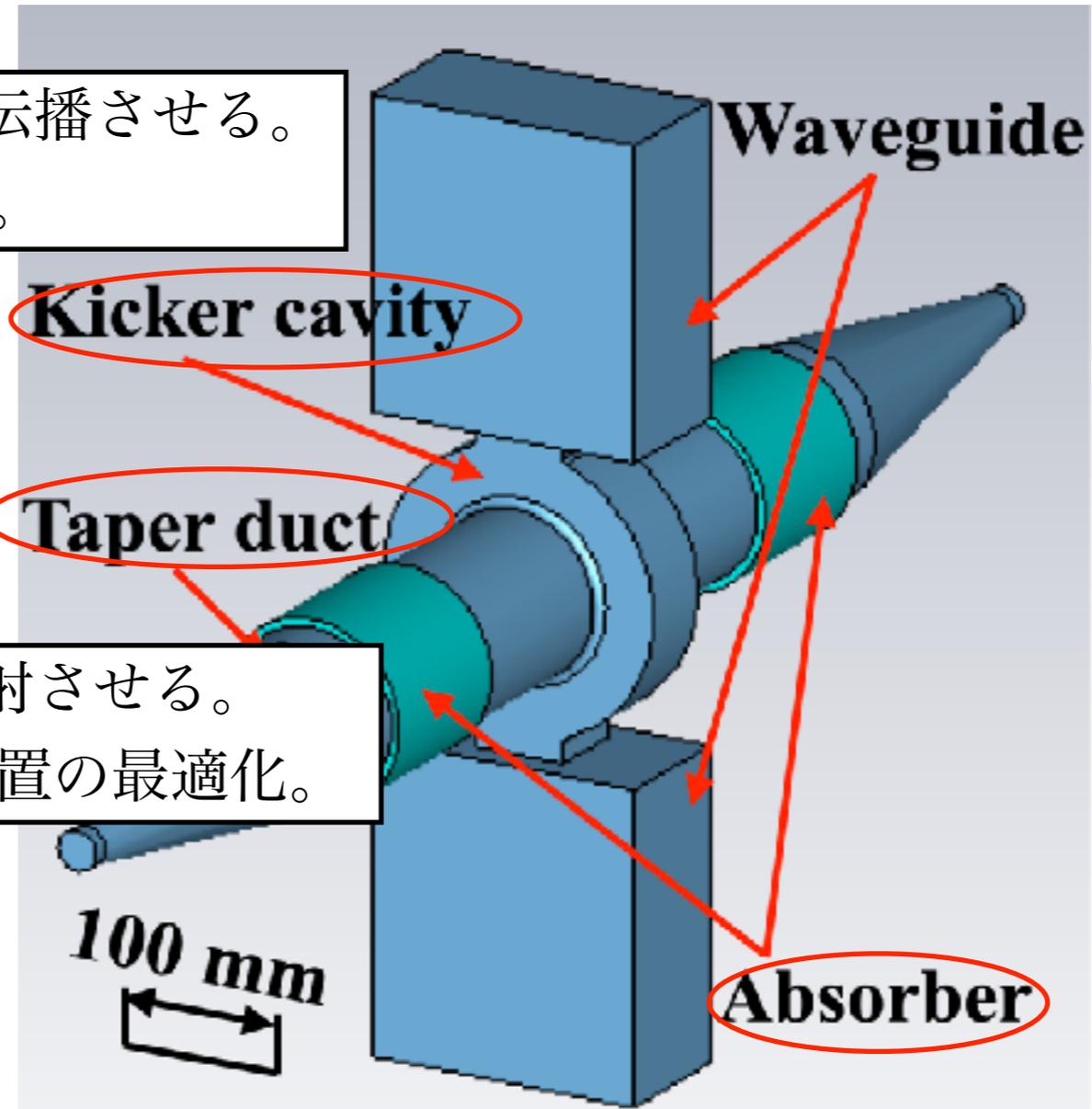
- 最適化後にCSTの二つのsolverで計算(V_g=50 kVを仮定)、計算結果の妥当性を担保。
=>よく一致しており、要求を満たす性能を達成。

| Parameter | Eigenmode | Frequency domain |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| Frequency | 1.50001 GHz | 1.50003 GHz |
| R/Q | 59.23 Ω | 59.54 Ω |
| Q | 16853 | 16814 |
| Q_L | 296 | 291 |
| P_c | 2.52 kW | 2.53 kW |
| Max power density | 26.6 W/cm ² | 25.1 W/cm ² |

2. 高次モードによる結合バンチ不安定性の抑制 (1)

- 高次モードの結合インピーダンスを最小化。
=>Wake field solverで最適化。

- 高次モードをビームダクトに伝播させる。
=>ダクト接続部形状の最適化。



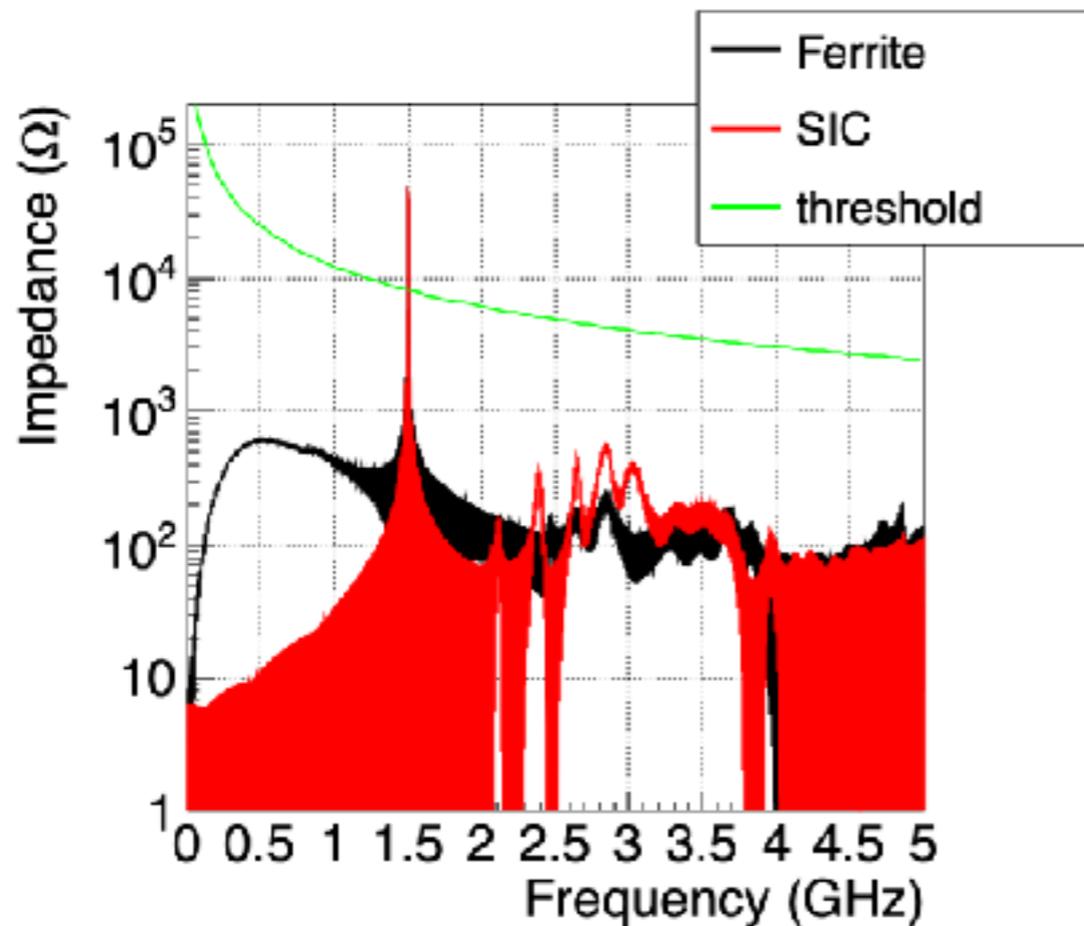
- 高次モードをテーパー部で反射させる。
=>ダクト径、テーパー開始位置の最適化。

- 材質の選定=>フェライト (IB004)に決定。
- 位置と幅を最適化。

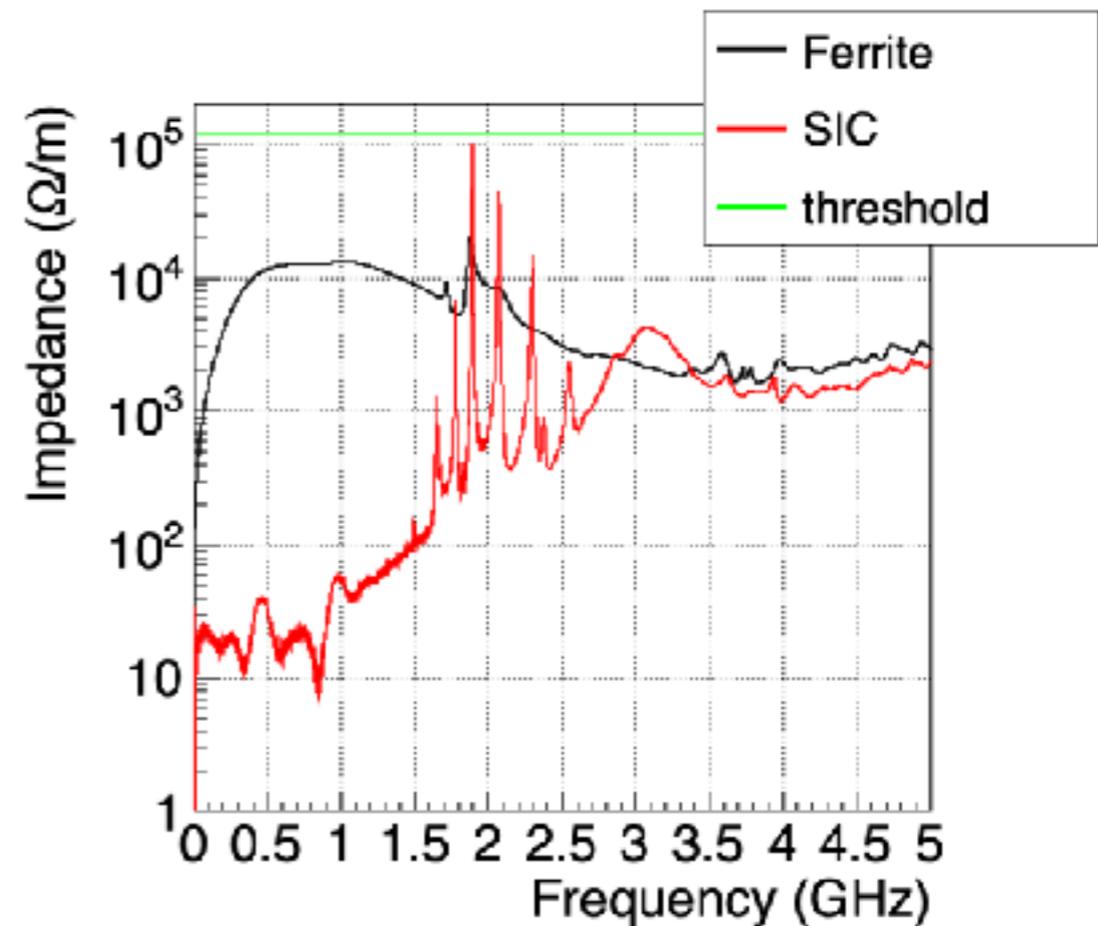
2. 高次モードによる結合バンチ不安定性の抑制 (2)

<吸収体の違いによる結合インピーダンスの変化>

縦方向の結合インピーダンス



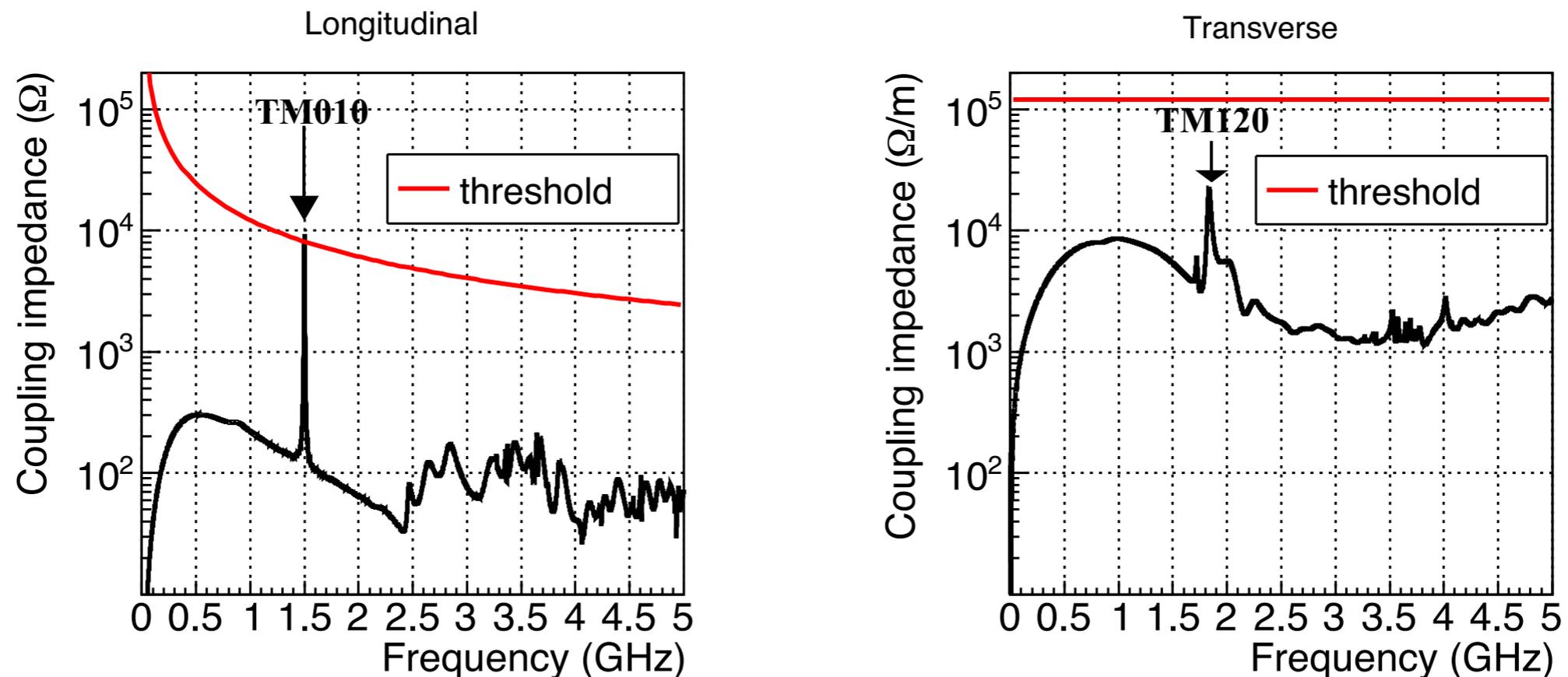
横方向の結合インピーダンス



SIC→フェライトで最大の結合インピーダンスが1/4に。

2. 高次モードによる結合バンチ不安定性の抑制 (2)

<最適化後の結合インピーダンス>



- 縦手方向：TM010モードのピークが存在=>growth rateはほぼゼロになるので問題なし。
- 横方向：TM120モードのピークが存在=>閾値の1/4以下で問題なし。

過渡的ビーム負荷 補償用空洞の具体的なデザインを世界で初めて実現。

まとめと今後

- 次世代光源で問題となる、ダブルRFシステムの過渡的電圧変動を補償するためのキッカー空洞の具体的デザイン検討を行った。
 - 過渡的ビームローディング、入力電圧、結合バンチ不安定性の観点から共振周波数とR/Qの値を再検討。
 - **1.5 GHzのsingle mode cavityを具体的デザインとして提案。**
- キッカー空洞デザインの最適化
 - 電磁場シミュレーションコード(CST)で各要素の最適化を行なった。
 - **過渡的電圧変動補償用空洞の具体的なデザインを世界で初めて実現。**
- 今後
 - キッカー空洞のコールドモデル製作。
 - 補正手法/回路の具体的な設計。