



JASRI



SPring-8-IIにおけるビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバックの設計

Design of Bunch-by-Bunch Feedback for Suppressing Beam Instability at SPring-8-II

講演番号：THO706

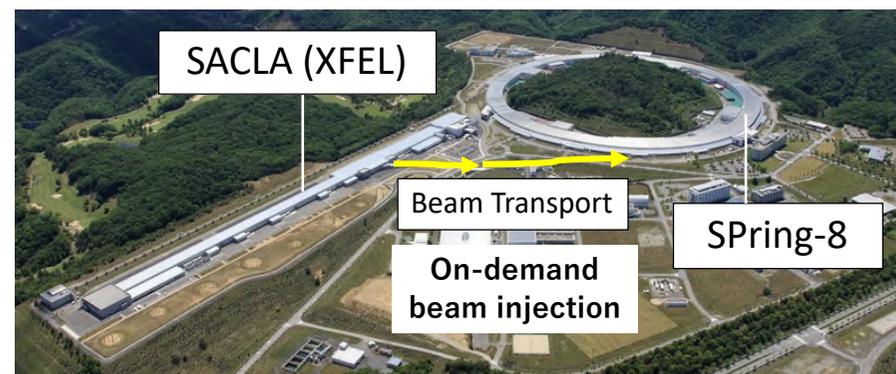
正木満博¹、前坂比呂和^{2,1}、阿部利徳¹、出羽英紀¹、高野史郎^{1,2}

1. (公財)高輝度光科学研究センター(JASRI)
2. 理研SPring-8センター(RSC)

SPring-8-II プロジェクト

- 硬X線領域で現SPring-8より2桁近く高輝度化 → 100 pm.rad以下の超低エミッタンス
- ビームエネルギーを8 GeVから6 GeVに低減、蓄積電流を100 mAから200 mAに増強
- 5-bendラティス、小ボア径・高勾配の多極磁石配列

	Current SPring-8	SPring-8-II
Beam energy (GeV)	8	6
Stored current (mA)	100	200
Circumference (m)	1435.95	1435.43
Cells, Lattice	44 2-bend-arc cells + 4 straight cells	44 5-bend-arc cells + 4 straight cells
Emittance (pm.rad)	2400	< 100



- 入射器アップデート
 - SACLAからSPring-8蓄積リングへの入射(2021年完了)
- 蓄積リングアップデート
 - 2027年夏に現蓄積リングをシャットダウン
 - 約1年半かけ、新しい蓄積リングにリニューアル

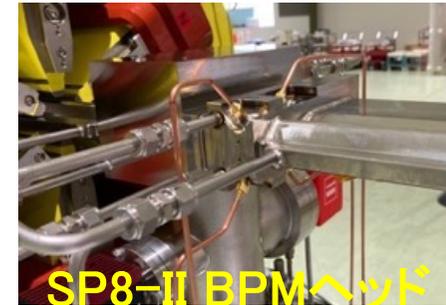
SPring-8-IIにおけるビーム診断&制御の主な課題

➤ エミッタンスの高精度診断

- ・ X線ピンホールカメラ、X線フレネル回折

高分解能、高精度で10 μm 以下のビームサイズ測定

M. Masaki, *et.al.* PRST-AB,18,042802 (2015)



➤ 光軸の安定化

- ・ ビーム位置モニター(BPM)

マイクロオーダーの長期安定性

→ BPMヘッドの低発熱設計、MTCA.4回路の温度安定化等

開発成果をナノテラスに展開 第20回年会 THOA6 “ナノテラス蓄積リング用ビーム位置モニタシステムの構築と立ち上げ”

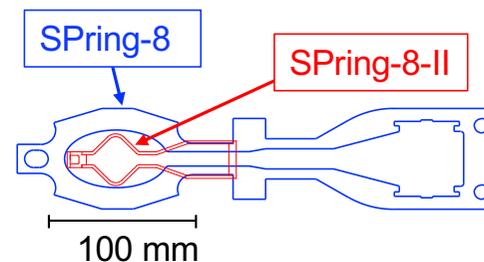
SPring-8-IIに向けた開発の進捗 第21回年会 FRP005 “SPring-8-II蓄積リング用BPMシステムの開発状況”

➤ ビーム不安定性の抑制

- ・ Bunch-by-Bunch Feedback (BBF)

横方向不安定性に対して、現SPring-8よりも一桁程度強力な抑制が必要。

蓄積電流増加に伴い、新たに縦方向の不安定性抑制装置も導入する。



超高真空チャンバーの狭小化

口径比: 約1/1.4

材質変更: アルミ合金 → SUS
(電気抵抗率 約30倍)

横方向(Transverse)の壁抵抗性インピーダンスが、
現SP8の約15倍 (この内、ID部の寄与は全体の1/4程度)

横方向結合バンチ不安定性

主たる要因は、壁抵抗性インピーダンス → Transverse Coupled Bunch Instability (TCBI)

$$\text{横方向壁抵抗性インピーダンス} \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad f: \text{周波数}$$

→ 低い周波数ほど、インピーダンスが大きくなる。

最低次のモード周波数 $f_{lowest} = (1 - \Delta v_{\beta}) f_{rev}$ Δv_{β} : fractional part of betatron tune

最低次モードの不安定性成長率 $\frac{1}{\tau_{g,RW}} \sim \frac{I_b f_{rev} \langle \beta \rangle}{2E/e} \text{Re}Z_{t,RW}(f_{lowest})$ @クロマティシテイ ゼロ

	垂直方向 CBI 成長率 $1/\tau_{g,RW}$ (ms^{-1})	E (GeV)	I_b (mA)	f_{rev} (kHz)	v_y	f_{lowest} (kHz)	$\langle \beta_y \rangle * \text{Re}Z_{y,rw}(f_{lowest})$ (M Ω) @ all ID gaps=8 mm
SP8-II	4.2	6	200	208.85	42.58	87.7	1212
現SP8	~0.5	8	100	208.78	19.325	140.9	~400
N.T. (参考)	4.1	3	400	859.39	9.23	661.7	71

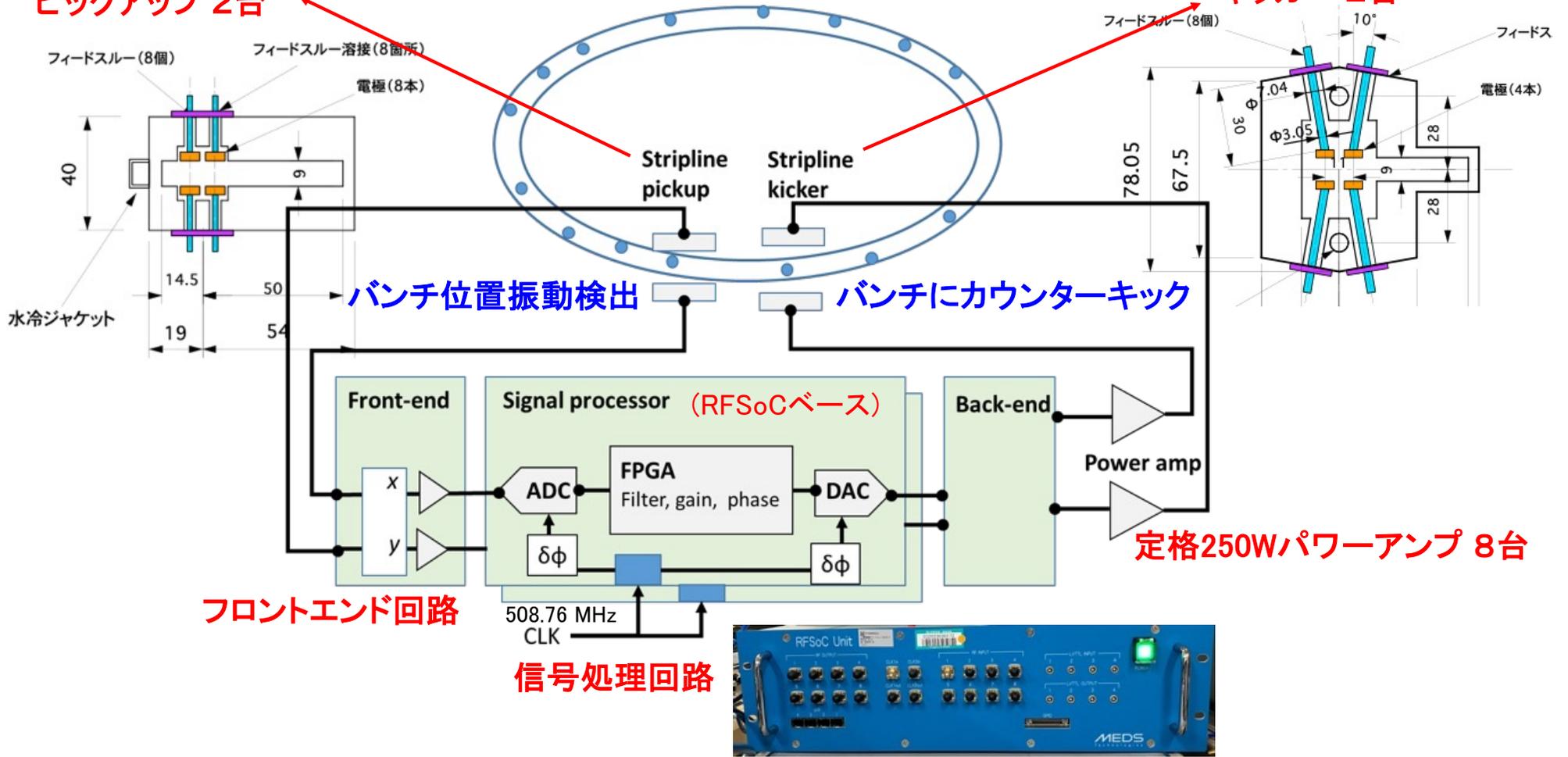
SP8-IIにおける垂直方向結合バンチ不安定性の成長率は現SP8の約10倍

SP8-II用の横方向BBFで必要な減衰率は10 (ms^{-1}) 以上 → 2倍以上の余裕を持たせる

横方向BBFの構成

短絡型4cmストリップライン
ピックアップ 2台

30cmストリップライン
キッカー 2台



横方向BBFの減衰率 $1/\tau_{FB}$ 、フィードバックゲイン G_{FB}

$$\frac{1}{\tau_{FB}} = \frac{f_{rev} \sqrt{\beta_{pickup} \beta_{kicker}}}{2} G_{FB},$$
$$G_{FB} = \frac{e V_{kick}}{E \Delta y} \text{ (}\mu\text{rad}/\mu\text{m)}$$

フィードバックゲイン G_{FB} : 1 μm のビーム位置変位検出時にビームに与えるキック角

- f_{rev} : 周回周波数 (208.85 kHz)
- β_{pickup} : ビーム位置検出ピックアップでのベータ関数 ($\beta_y \sim 3.2 \text{ m}$)
- β_{kicker} : キッカーでのベータ関数 ($\beta_y \sim 3.2 \text{ m}$)
- V_{kick} : キッカーにおけるキック電圧
- Δy : ピックアップにおけるビーム位置変位
- E : ビームエネルギー (6 GeV)

SP8-IIで必要なBBF減衰率 $1/\tau_{FB} > 10 \text{ ms}^{-1}$

→ フィードバックゲイン $G_{FB} > 0.03 \text{ (}\mu\text{rad}/\mu\text{m)}$

SP8-II BBFキッカーに必要な最大キック角

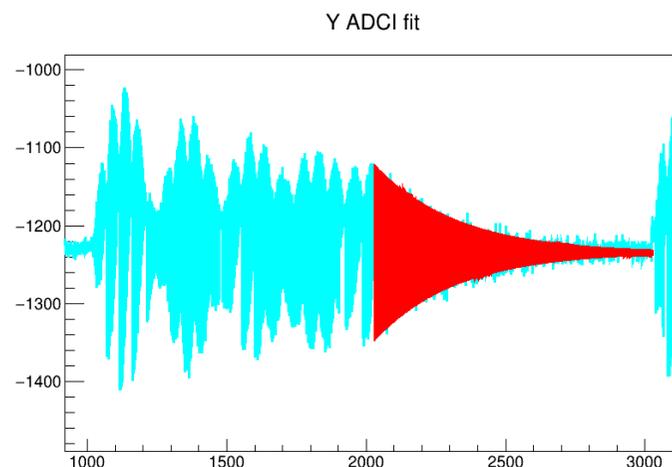
この情報を得るために、SP8-II用信号処理回路RFSocで得られるBBF減衰率を実測

条件：現SP8のBBFキッカー・ピックアップ(垂直方向電極間40 mm), 250 Wアンプ(2台)

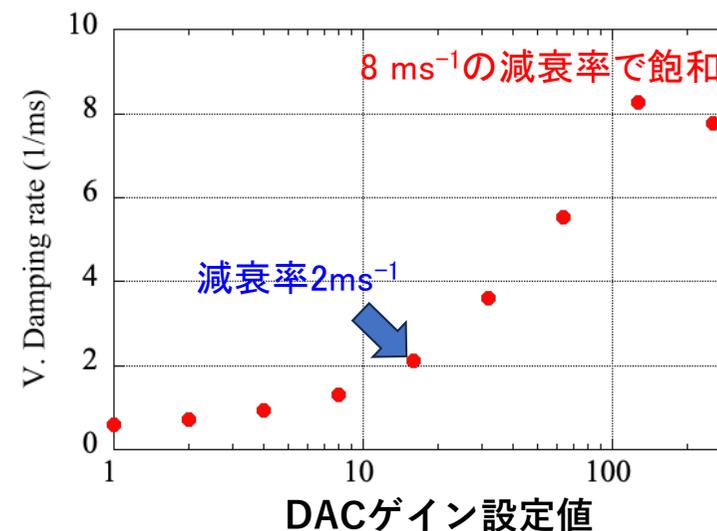
現SP8のキッカー断面



Grow-Damp測定(垂直方向)



DACゲイン vs. 減衰率



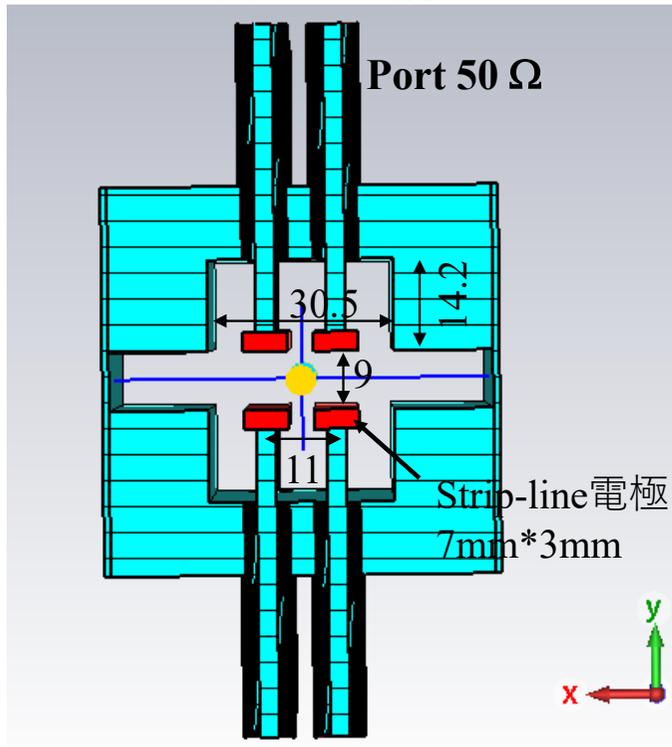
DACゲインの上げしろも考慮し、減衰率2 ms^{-1} 程度のゲイン設定を想定すると、フィードバックゲイン G_{FB} 換算で0.00375 ($\mu\text{rad}/\mu\text{m}$) 相当、SP8-IIに必要な G_{FB} の1/8

→ SP8-IIに必要な最大キック角 0.43 $\mu\text{rad}/\text{turn}$ * 8倍 ~ 3.4 $\mu\text{rad}/\text{turn}$ 程度@垂直

30 cmストリップラインキッカー

$f_{RF}=508.76$ MHzの繰り返しでバンチ毎に蹴り分ける最適な長さ

キッカー一断面



キッカーインピーダンス

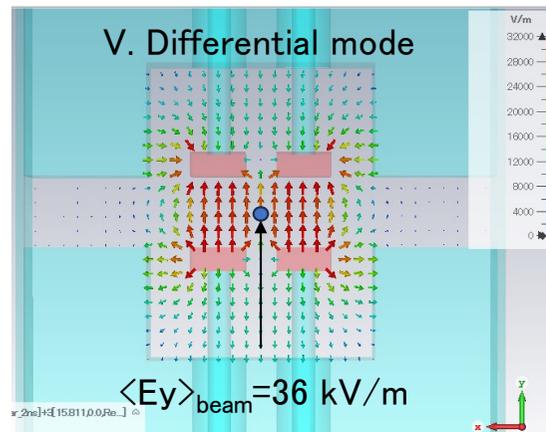
V. differential mode 85 Ω

H. differential mode 64 Ω

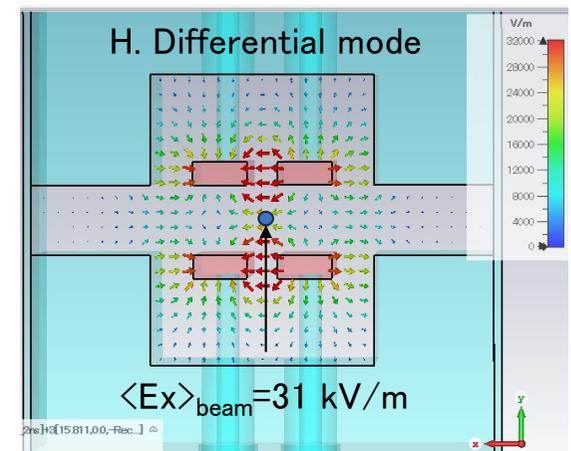
* キック電圧を稼ぐため、敢えて50 Ωにマッチングさせるのをやめた

$$\text{キック角: } \theta_{kick} = eV_{kick}/E_{beam} = 2eE_{y,x}L/E_{beam} : L=0.3 \text{ m (電極長)}$$

電場分布@パワーアンプ 250 W/port



$$\theta_y = 3.6 \text{ } \mu\text{rad/turn}$$



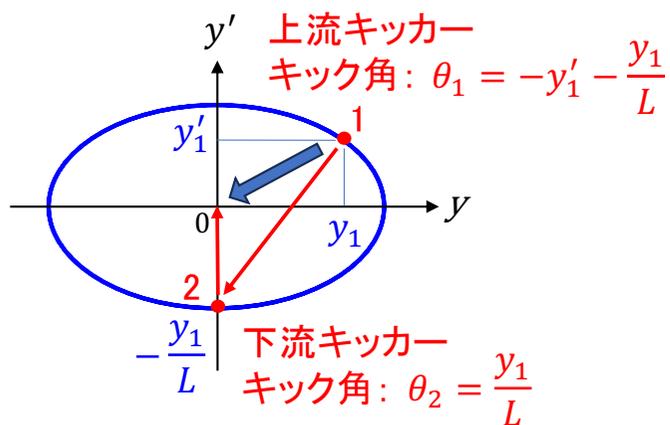
$$\theta_x = 3.1 \text{ } \mu\text{rad/turn}$$

SP8-II 横BBFの将来オプションと機器配置上の工夫

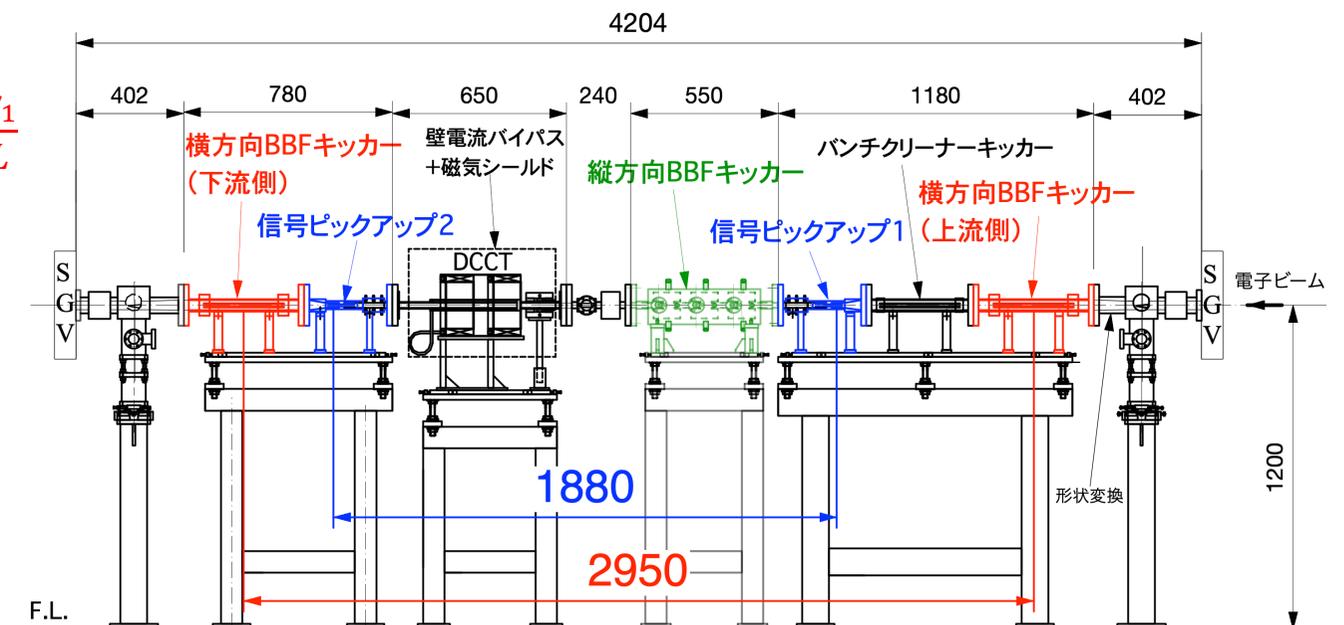
横方向BBFキッカー及び信号ピックアップは、**敢えて距離を離して2台ずつ配置**

将来のゲイン増強のためのオプション:

- ・ 2台のピックアップで、ビーム位置変位に加え角度変位の検出も可能 → **位相空間情報**
- ・ 2台のキッカーで、位置変位と角度変位を戻すようにキック → **複素カウンターキック**
- ・ 原理的には、1ターン前の情報だけでキック可能(タップ数1)



2台のキッカーで
複素カウンターキック



縦方向BBF (LBFF)

- RF空洞のHOM(TM011モード)がメインソースの縦方向結合バンチ不安定性(LCBI)の抑制
- 現SPring-8では、縦方向不安定性の閾値電流が100 mA以上のためLBFFは不要
- SPring-8-IIでは、200 mAで閾値を超える可能性がある。

➤ 縦方向不安定性の成長率 $1/\tau_{L,g}$

$$\frac{1}{\tau_{L,g}} = \frac{e\alpha_c I_b f_{rev} f_{HOM} R_{sh,HOM}}{4E_0 f_s} < 1/11 \text{ (ms}^{-1}\text{)} \quad \begin{array}{l} \text{TM011モード } f_{HOM} \sim 900 \text{ MHz} \\ R_{sh,HOM} < 1 \text{ M}\Omega \end{array}$$

斗米貴人 WEO703: SPring-8-IIへ向けた加速空洞高次モードによる不安定性の抑制

➤ 実効的な成長率 $1/\tau_{g,eff}$

縦方向の放射減衰時間 $\tau_s = 13.5 \text{ (ms)}$ による減衰率との合成

$$1/\tau_{g,eff} = 1/\tau_{L,g} - 1/\tau_s < 1/60 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$$

2倍程度の余裕を持たせるとして、
LBFFで必要な減衰率 $1/\tau_{L,damp}$ は、 $1/30 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ もあれば十分

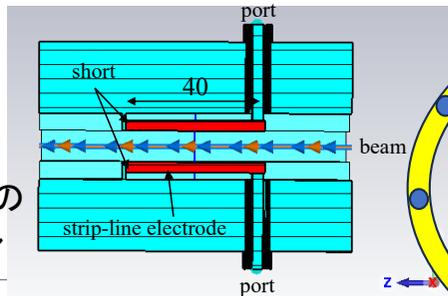
➤ 縦方向BBFの減衰率 $1/\tau_{L,damp}$

$$\frac{1}{\tau_{L,damp}} = \frac{\alpha_c f_{rev}}{4\pi E_0 f_s} \frac{e\Delta V_{L,kick}}{\Delta t} > 1/30 \text{ (ms}^{-1}\text{)} \rightarrow \text{必要なフィードバックゲイン } G_{LBFF} = \frac{e\Delta V_{L,kick}}{\Delta t} > 200 \text{ (eV/ps)}$$

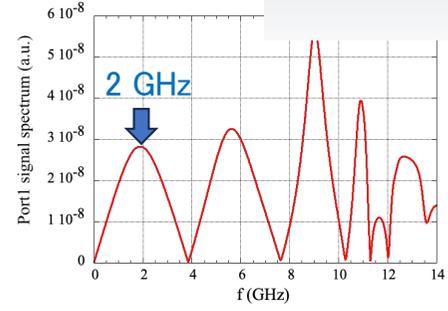
parameters	SP8-II, 4st.
E_0 (GeV)	6
f_s (kHz)	0.7034
τ_s (ms)	13.543
α_c	4.125e-5
f_{HOM} (MHz)	900
f_{rev} (kHz)	208.85
max. I_b (mA)	200

縦方向BBFの構成

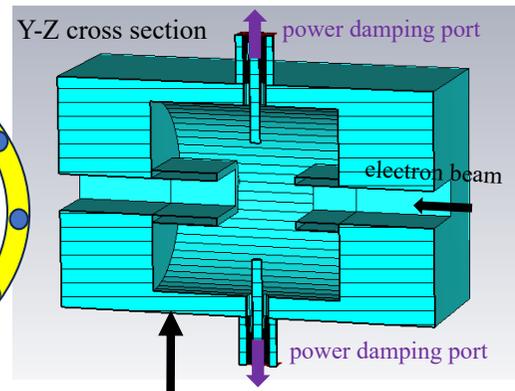
ビーム位相検出用
ピックアップ
- 4cmストリップライン



ピックアップ信号の
周波数スペクトル



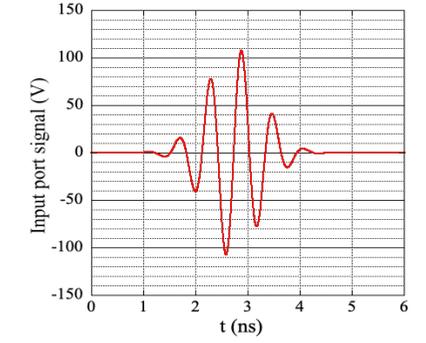
縦方向キッカー
- 低Q空洞*3 cell



共振周波数:
 $(3+1/4)*f_{RF}$
 $= 1.65 \text{ GHz}$
Q値: ~ 4

この空洞を3つタンデム配置した3空洞構成
1空洞あたり定格250Wパワーアンプで駆動

パワーアンプの出力波形(例)

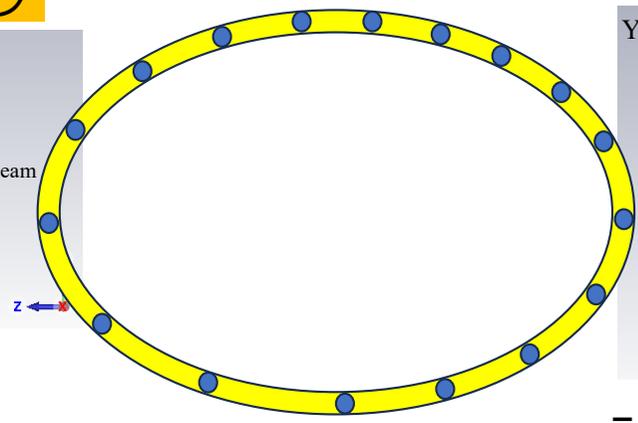


フロントエンド回路
- 4電極信号SUM
- 2GHz検波
- 位相シフト検出

信号処理回路
(RFSoc)
- ADC
- FPGA (FIR filter, Gain, Phase)
- DAC

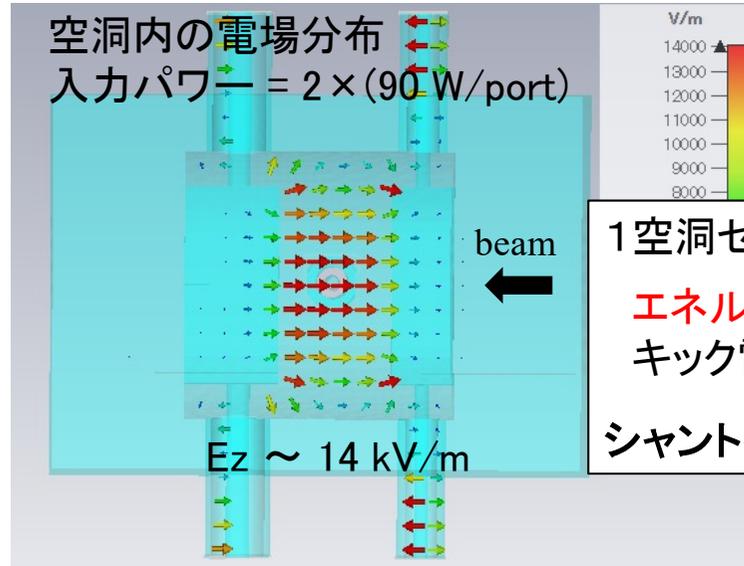
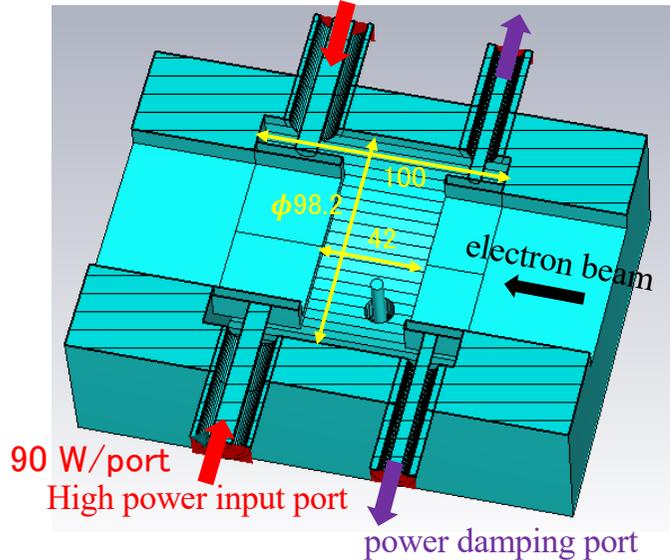
パワーアンプ
定格250 W
3台

508.76 MHzクロック



縦方向BBFキッカー

90 W/port X-Z cross section
High power input port



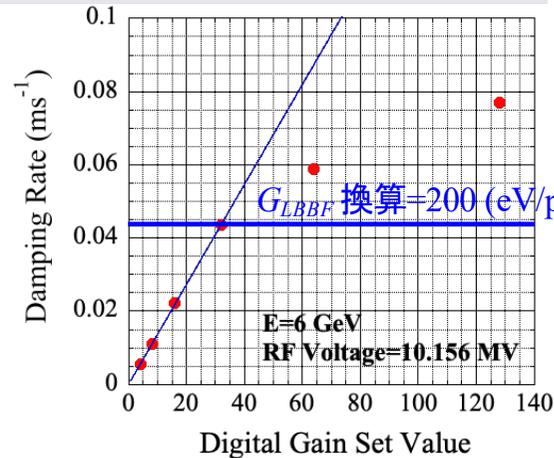
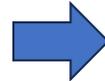
1空洞セル当たり @シミュレーション
エネルギーキック: $\Delta E_0 / E_0 \sim 1e-7$
キック電圧: $\Delta V_{L, kick} \sim 600 \text{ V}$
シャントインピーダンス: $R_{sh} \sim 1 \text{ k}\Omega$

200 eV/psのF.B.ゲインは達成可能か？

現SPring-8にて、類似構造の縦キッカー
($R_{sh} \sim 1 \text{ k}\Omega / \text{cell}$)

Proceedings of IBIC2013, Oxford,
TUPC18, M. Masaki, *et al.*

を用いて減衰率を実測した。



200 (eV/ps) 以上に
到達実績あり

まとめ

- SPring-8-IIでは、真空チェンバーの狭小化及び材質のアルミからSUSへの変更により、壁抵抗性インピーダンスが現SPring-8に比べ1桁以上大きくなるため、横方向ビーム不安定性が圧倒的に強くなる。
- ビームエネルギーを下げ、かつビーム電流の増強により、縦方向ビーム不安定性の対策も必要である。
- 蓄積電流200 mAでの安定運転を実現するため、横方向及び縦方向のビーム不安定性を抑制するBunch-by-Bunch Feedback (BBF)に必要な性能を定量的に見積もった。
- 現SPring-8でのビーム試験等で得られた知見も活かし、必要性能を実現できるBBFキッカー及び信号ピックアップを設計した。これらは今後、順次製作に入る。
- 回路部分(フロントエンド、RFSoc、バックエンド等)の詳細仕様検討も、現在、同時進行で進めている。