

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

*斗米貴人, 稲垣隆宏, 大島隆, 岩井瑛人, 正木満博, 安留健嗣,
山口博史, 前坂比呂和

JASRI / SPRING-8, RIKEN SPRING-8 Center

Contents

1. SPring-8-IIアップグレードと結合バンチ不安定性
2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定
3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定
4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

Contents

1. SPring-8-IIアップグレードと結合バンチ不安定性
2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定
3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定
4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

SPring-8-IIアップグレード

大型放射光施設SPring-8では、2029年を目標に

- ・100倍の高輝度化
- ・省電力化(グリーン化)

を達成するアップグレード計画が進行中

ビーム電流	100 mA	→	200 mA
エネルギー	8 GeV	→	6 GeV
エミッタンス	2400 pm rad	→	50 pm rad w/DW
加速電圧	16 MV	→	8 MV
加速空洞	32台	→	16台

空洞HOMに起因する結合バンチ不安定性の評価
不安定性抑制方法の検討



SPring-8-IIでの空洞HOM起因 結合バンチ不安定性

・結合バンチ不安定性

ビームが作るwakefieldが空洞に高次モード(HOM)の共振を誘起し、後続のバンチがコヒーレントに振動 → **成長時間 < 放射減衰時間** のとき発生

縦方向不安定性条件

$$\tau_g = \frac{4Ef_s}{e\alpha f_{\text{rev}} f_{\text{HOM}} R_{sh} I} < \tau_s$$

成長時間 τ_g の式に、 6GeV 、 0.7kHz 、 4.1×10^{-5} 、 200mA 、 14ms の値を代入すると、 $\tau_g < \tau_s$ の条件が満たされ、不安定性が発生する。

※HOMの共振周波数とビームによる励起周波数($m f_{\text{rev}} \pm f_s$)が一致した最悪の場合

→縦方向: **7倍厳しくなる**

900MHz TM011モードでは

$$R_{sh, \text{thre}} = 0.77\text{M}\Omega \rightarrow Q_{L, \text{thre}} = 12000$$

横方向: **1.4倍厳しくなる**

Parameter	SP-8-II	現SP-8
	SPring-8-II (New)	SPring-8 (Present)
Beam Energy (GeV)	6.0	8.0
Stored Current (mA)	200	100
RF Voltage (MV)	up to 8	16
Number of Cavities	16	32
Momentum Compaction Factor	4.13×10^{-5}	1.60×10^{-4}
Betatron Function β_x, β_y at Cavity	8.2, 2.8	31.2, 5.0
Damping Time for s, x, y (ms)	14, 16, 22	4.2, 8, 8
RF Frequency (MHz)	508.764	508.580
Synchrotron Frequency (kHz)	0.7	2.2
Revolution Frequency (kHz)	208.852	208.776

509MHz ベル型空洞

特徴

- 横方向HOMのインピーダンス:
リエントラント型に比べて約半分
- 縦方向 TM020モード(1087MHz)のインピーダンス=0Ω

空洞配置

- 異なる空洞内面形状
→HOMの周波数をずらし、不安定性を抑制する設計
- 16の形状(D) × 90°異なるカップラー2方向(H/V) = 32台

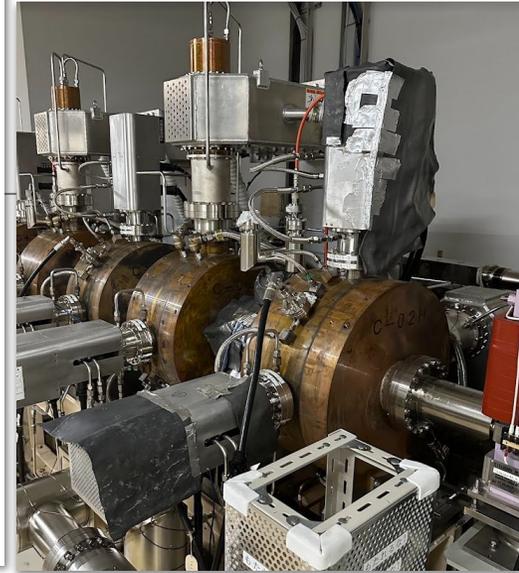
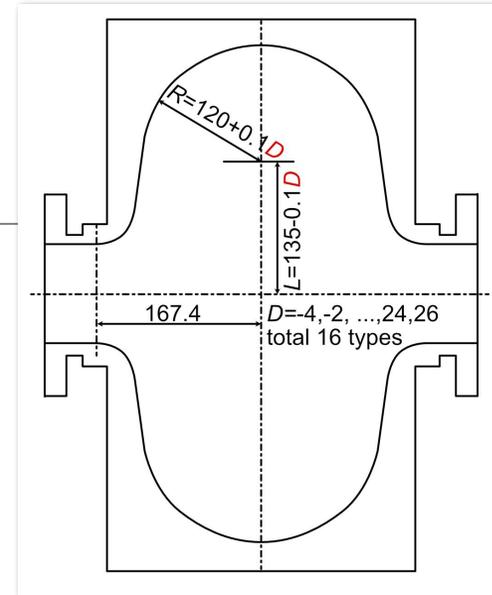
チューナー: 2方向からチューナーを設置

- Accチューナーで509MHzの共振周波数を固定しながら、HOMチューナーでHOM周波数を操作

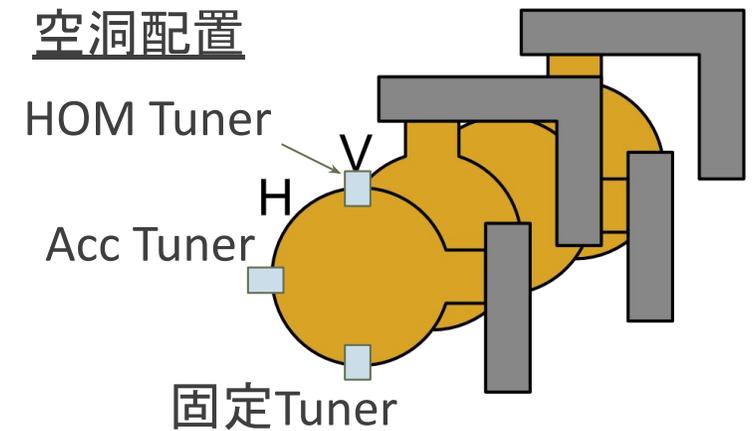
SPring-8-IIでは、32台のうち16台を選択し、再利用

負荷Q値測定により、各空洞の不安定性を評価
→低電力測定、ビーム測定

空洞概形



空洞配置



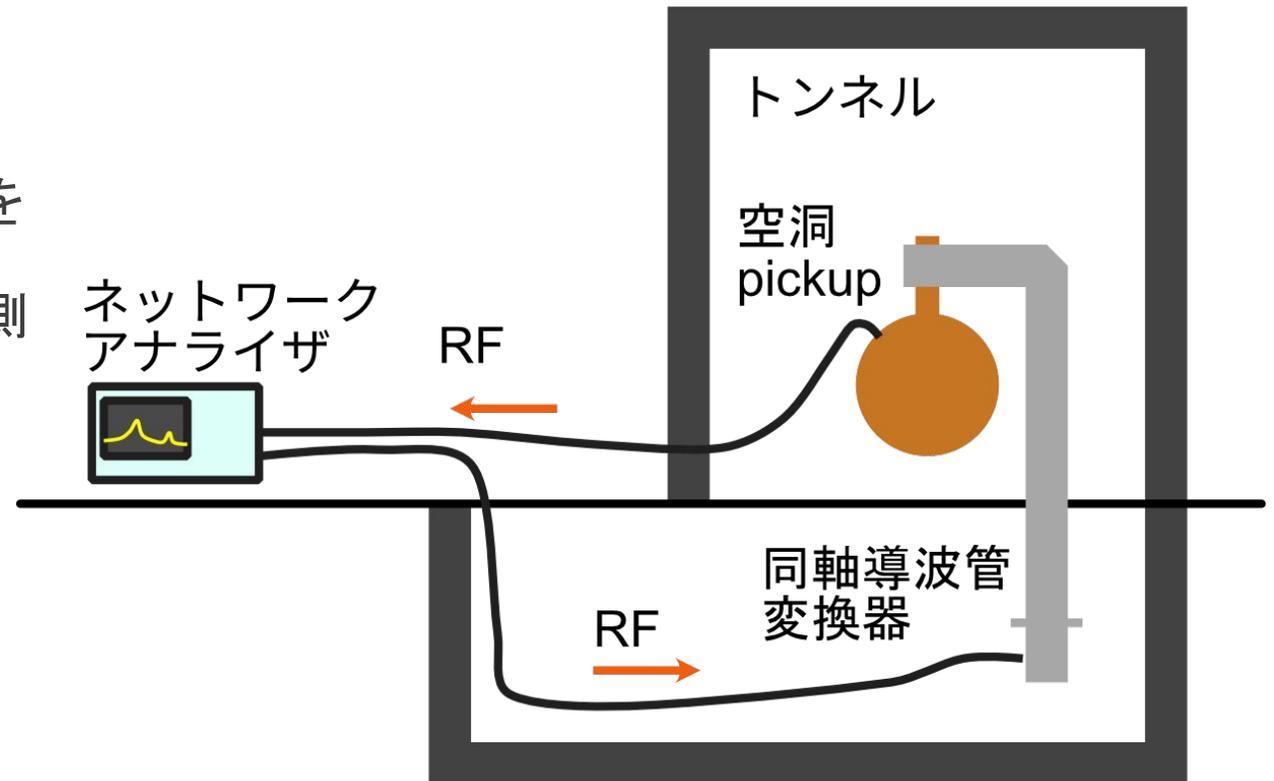
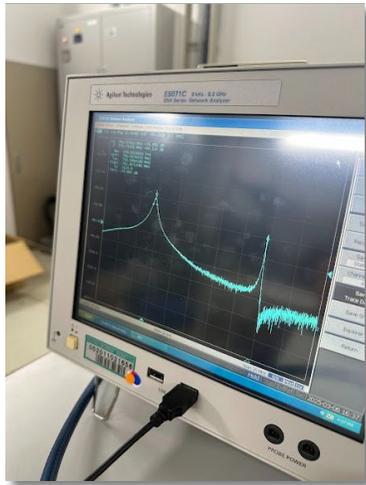
Contents

1. SPring-8-IIアップグレードと結合バンチ不安定性
- 2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定**
3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定
4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

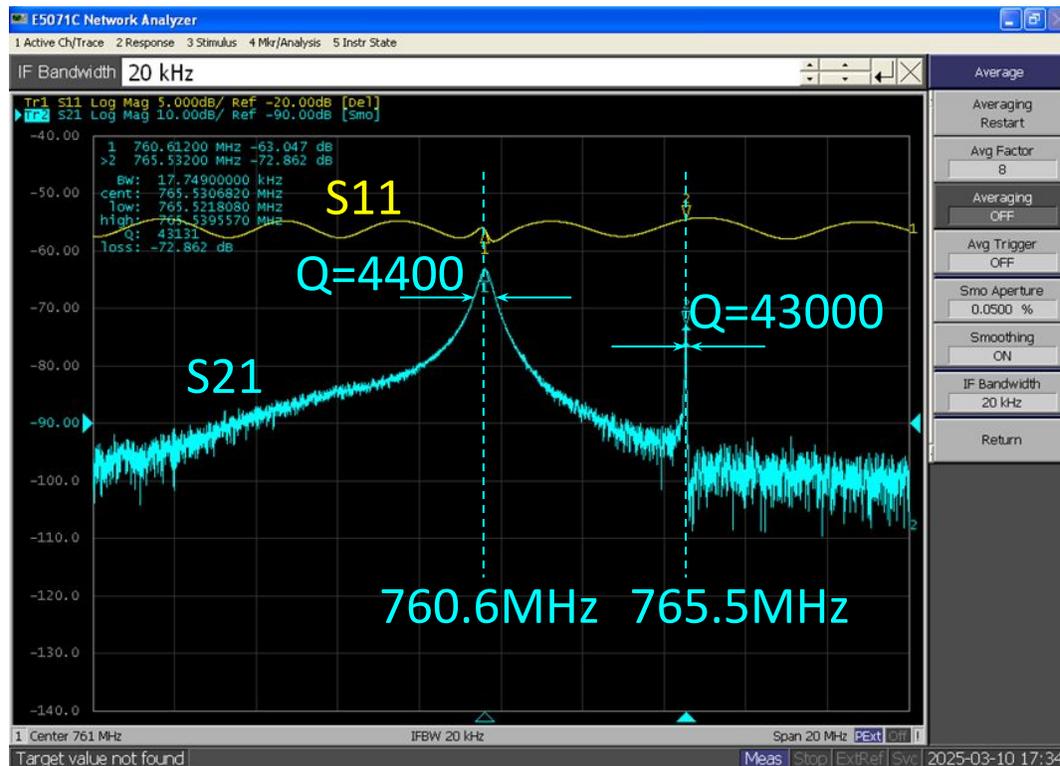
低電力RFによる空洞負荷Q値測定

Bst 空洞5,6を対象に、ネットワーク・アナライザを使用した低電力負荷Q値測定

- クライストロン側に接続されている導波管を取り外し、同軸導波管変換器を設置
- 変換器→Pickup信号の透過係数 S_{21} を測定し、帯域幅からQ値を測定

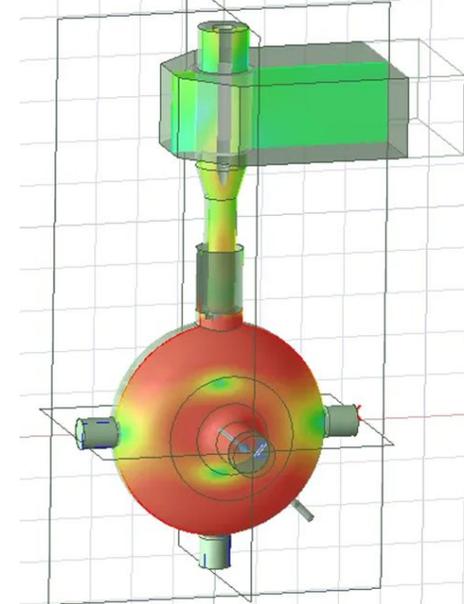


信号例 760MHz TM110モード

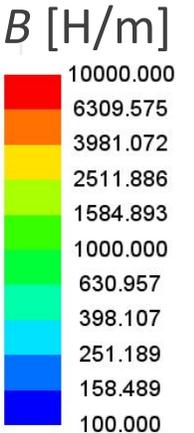
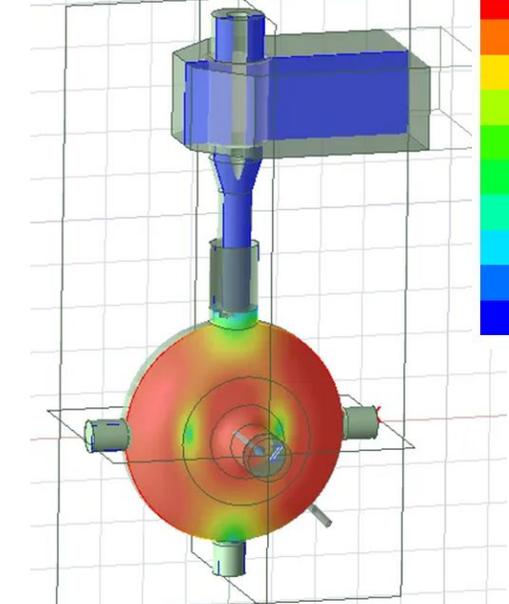


シミュレーションによる再現

760MHz 磁場分布



765MHz 磁場分布



90°向きが異なる縮退モード

カップラーとの結合の違いによりQ値が大きく異なる

765MHzは特にQ値が高い (Sim Q~50000なのでほぼ Q_0 と一致)

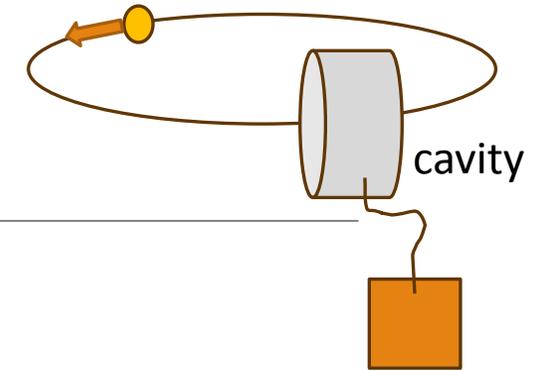
Contents

1. SPring-8-II と結合バンチ不安定性
2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定
- 3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定**
4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

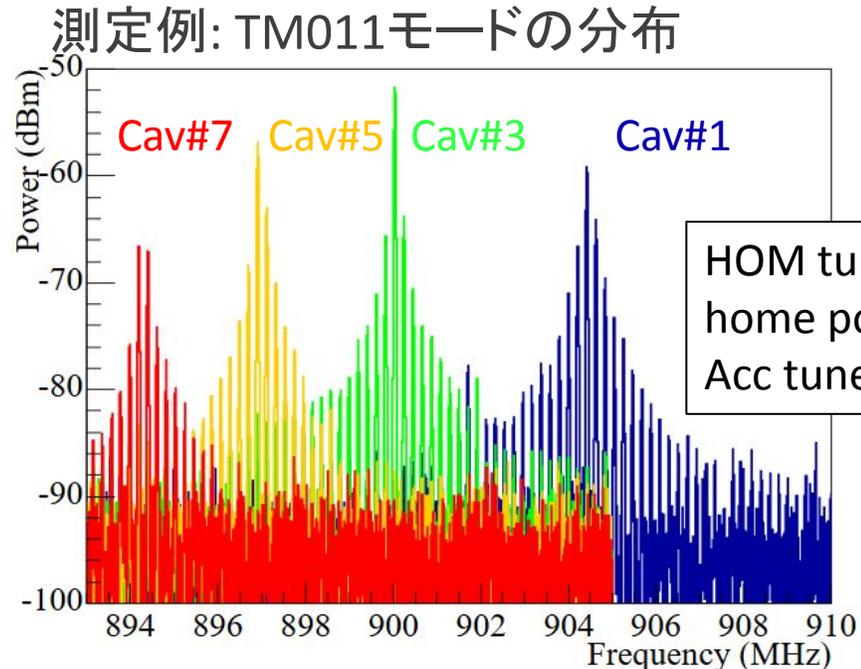
ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定

シングルバンチ1mAを蓄積、AステーションのRFを停止し、各空洞について空洞ピックアップ信号の測定を行った

single bunch beam



Cav #	Freq. at home position (MHz)
1 (D=2, H)	904.9
2 (D=2, V)	904.4
3 (D=10, H)	900.9
4 (D=10, V)	901.0
5 (D=18, H)	897.9
6 (D=18, V)	897.6
7 (D=26, H)	895.0
8 (D=26, V)	894.8

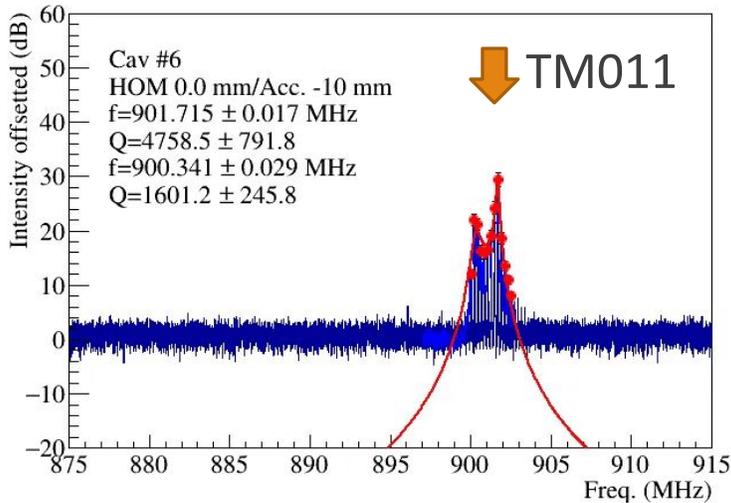


周回周波数 $f_{rev}=209\text{kHz}$ 間隔で誘起
空洞により共振周波数が分散

チューナー スキャン法による TM011モード ビームでの測定

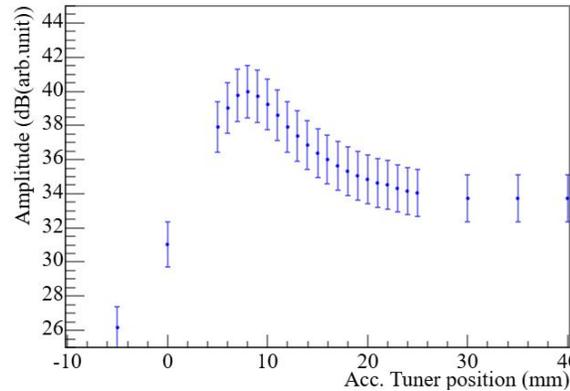
チューナー位置を5mmずつずらした時のスペクトル変化(アニメーション)

Cavity B#6 HOM=0.0mm Acc=-10mm

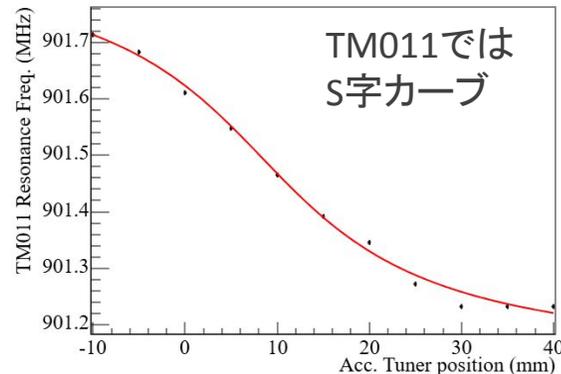


左ピークはTE211で不安定性に関わらないモード

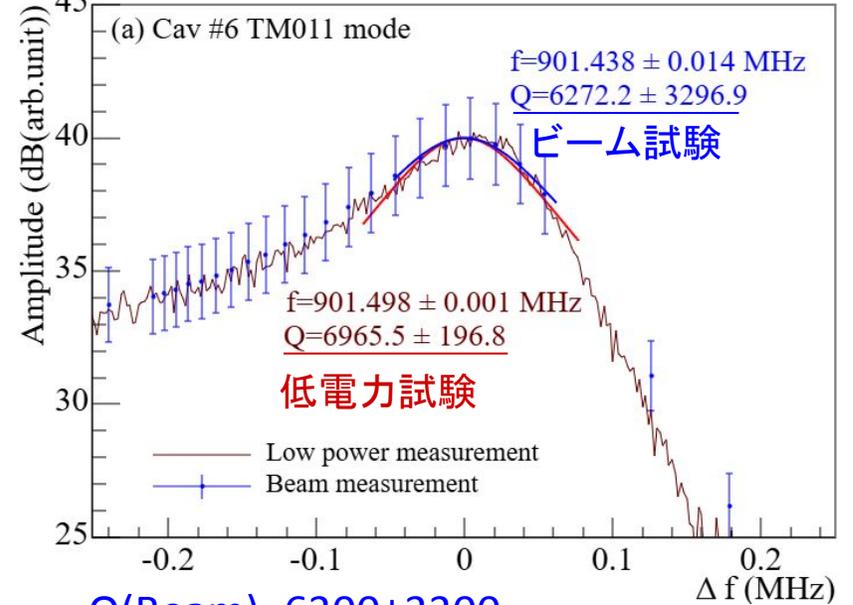
強度変化



共振周波数変化



強度変化 vs 共振周波数



$Q(\text{Beam})=6300 \pm 3300$

$Q(\text{低電力})=7000 \pm 200$

Q値はビーム試験と低電力試験で
コンシステント

縦方向 TM011モード Q値測定

Aステーション Q値測定結果

Cav #	Freq (MHz)	QL
1 (D=2, H)	904.9	7,000
2 (D=2, V)	904.4	8,000
3 (D=10, H)	900.9	10,000
4 (D=10, V)	901.0	8,000
5 (D=18, H)	897.9	13,000
6 (D=18, V)	897.6	12,000
7 (D=26, H)	895.0	4,000
8 (D=26, V)	894.8	4,000
Sim. (D=0)	905	46,200

Bステーション

Cav #	Freq (MHz)	QL
1 (D=-4, H)	-	-
2 (D=-4, V)	-	-
3 (D=4, H)	903.8	13,000
4 (D=4, V)	903.9	7,000
5 (D=12, H)	901.0	8,000
6 (D=12, V)	901.4	8,000
7 (D=20, H)	898.1	12,000
8 (D=20, V)	898.3	10,000
Sim. (D=0)	905	46,200

不安定性の条件
($Q > 12000$)

1. 実機でのQ値測定値はシミュレーションよりかなり低い
2. Q値は空洞によりかなりばらつきがある
3. Ast #5,6, Bst #3,7は不安定性を起こす可能性がある

赤字はSpring-8-IIでの不安定性しきい値を超える空洞

TM011モードを基準とした 空洞の選別

A-st Q値測定結果

Cav #	Freq (MHz)	typ. Q
1 (D=2, H)	904.9	7,000
2 (D=2, V)	904.4	8,000
3 (D=10, H)	900.9	10,000
4 (D=10, V)	901.0	8,000
5 (D=18, H)	897.9	13,000
6 (D=18, V)	897.6	12,000
7 (D=26, H)	895.0	4,000
8 (D=26, V)	894.8	4,000
Sim. (D=0)	905	46,200

B-st

Cav #	Freq (MHz)	typ. Q
1 (D=-4, H)	-	-
2 (D=-4, V)	-	-
3 (D=4, H)	903.8	13,000
4 (D=4, V)	903.9	7,000
5 (D=12, H)	901.0	8,000
6 (D=12, V)	901.4	8,000
7 (D=20, H)	898.1	12,000
8 (D=20, V)	898.3	10,000
Sim. (D=0)	905	46,200

導波管配置の都合上
H-V-H-Vの順で配列

A#1 - A#4 - A#7 - A#8
B#1 - B#4 - B#5 - B#8

他のステーションでも同
様に測定・配置決定

赤字はSpring-8-IIでの不安定性しきい値を
超える空洞

横方向モード測定結果 (Bst 空洞6 低電力&ビーム測定)

シミュレーション		実測値 Bst 空洞6			しきい値電流 予測値 (低電力より)			
mode	f MHz	R/Q Ω/m	Q_0	f MHz	Q_L (低電力)	Q_L (beam)	I_t mA (SP8)	I_t mA (SP8-II)
TE111-H	709.9	71.0	50,300	707.8	24,000	(未測定)	181	257
TE111-V	710.8	71.8	51,100	709.3	34,000	(未測定)	126	179
TM110-V	761.2	194.9	50,500	760.5	7,000	(測定限界以下)	226	321
TM110-H	765.8	195.1	53,500	765.6	45,000	38,000	35	50
TM111-V	1077.5	311.6	43,100	1075.0	24,000	(測定限界以下)	41	58
TM111-H	1078.6	302.9	43,400	1076.2	30,700	22,000	33	48
TE121-H*	1206.7	127.7	56,500	1204.4	6,200	12,000	391	553
TE121-V*	1207.8	126.5	56,000	1205.8	18,300	(同定できない)	133	189
TE122	1584.8	50.0	65,400	同定不可			(sim Q0: 94)	(sim Q0: 134)

赤字はSPring-8-IIでの不安定性しきい値を超えるモード

*は他の横方向モード (TE112 R/Q \sim 2 Ω/m)が重なっているため、同定できないモード

横方向モード測定結果 (Bst 空洞6 低電力&ビーム測定)

シミュレーション		実測値 Bst 空洞6			しきい値電流 予測値 (低電力より)			
mode	f MHz	R/Q Ω/m	Q ₀	f MHz	Q _L (低電力)	Q _L (beam)	I _t mA (SP8)	I _t mA (SP8-II)
TE111-H	709.9	71.0	50,300	707.8	24,000	(未測定)	181	257
TE111-V	710.8	71.0	51,100	709.1	24,000	(未測定)	126	179
TM110-V	761.2	194.9	50,500	760.5	7,000	(測定限界以下)	226	321
TM110-H	765.8	195.1	53,500	765.6	45,000	38,000	35	50
TM111-V	1077.5	211.5	43,400	1075.2	24,000	(測定限界以下)	41	58
TM111-H	1079.6	203.9	42,400	1076.2	30,700	22,000	33	48
TE121-H*	1206.7	127.7	56,500	1204.4	6,200	12,000	391	553
TE121-V*	1207.8	126.5	56,000	1205.8	18,300	(同定できない)	133	189
TE122	1584.8	50.0	65,400		同定不可		(sim Q0: 94)	(sim Q0: 134)

・SPring-8-IIでの不安定性しきい値を超えるモードがいくつか存在

710MHz, 765MHz, 1077MHz, 1208MHz

・共振周波数を誘起周波数から離調し、

不安定性の発生条件を回避する戦略

どれくらいチューナーをずらせばよいか？

赤字はSPring-8-IIでの不安定性しきい値を超えるモード

→ビームを使用した不安定性誘起・回避の試験

*は他の横方向モード (TE112 R/Q~2Ω/m) が重なっているため、同定できないモード

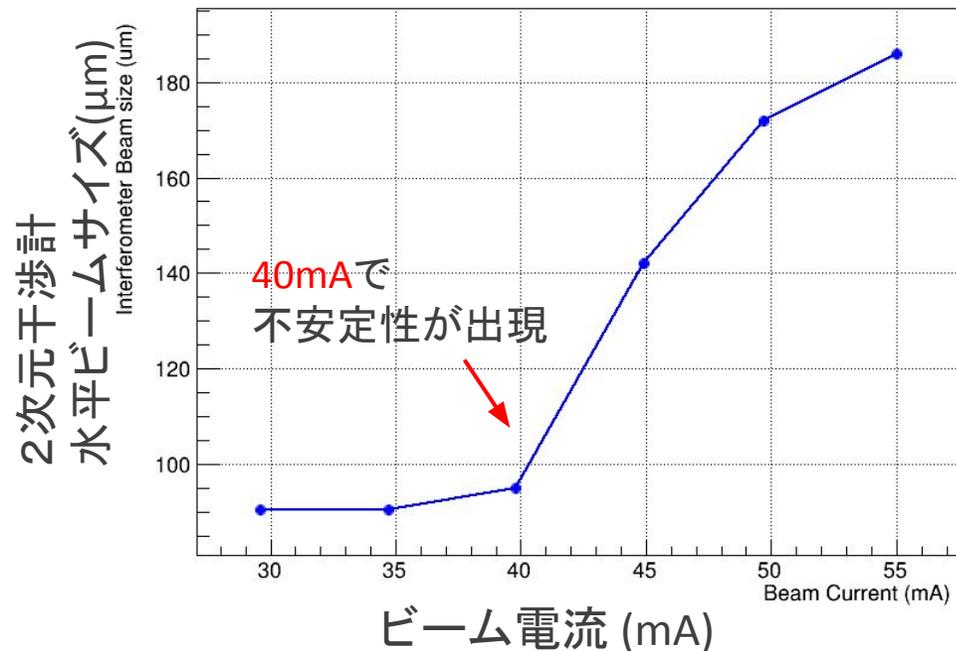
Contents

1. SPring-8-II と結合バンチ不安定性
2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定
3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定
- 4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験**
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

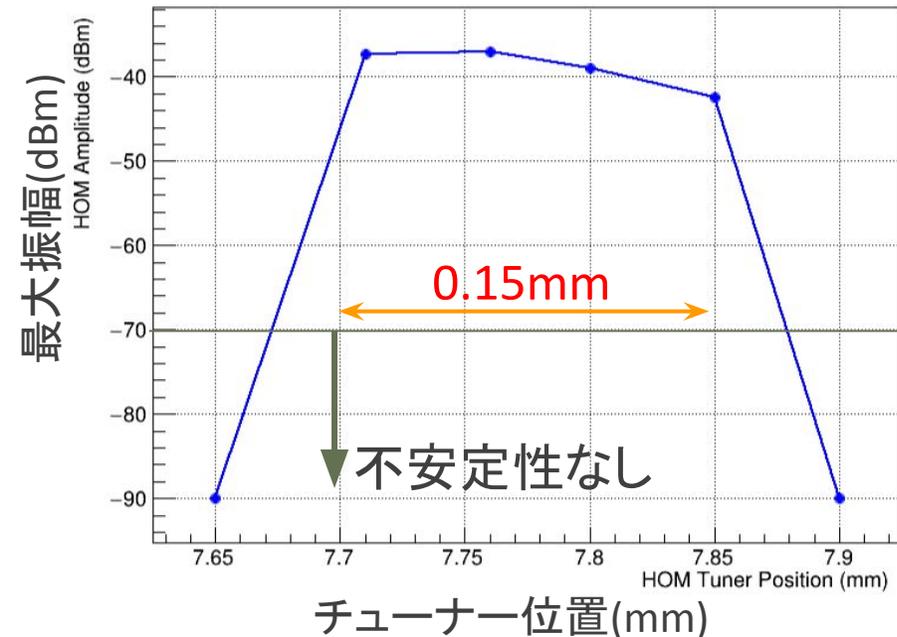
ビームによる不安定性の誘起・回避試験

横方向TM110モード(760MHz): しきい値電流予測値 **35mA**

- 運転条件: マルチバンチ運転モード(160 bunch train ×12)
BステーションのRFをOFFとした3ステーション運転 (12MV)
HOM共振周波数を誘起周波数に合わせた



不安定性発生時、HOMチューナーを振ったときのピックアップ信号の振幅変化



Contents

1. SPring-8-II と結合バンチ不安定性
2. 低電力RFによる空洞の負荷Q値測定
3. ビーム誘起RFによる空洞の負荷Q値測定
4. ビームによる不安定性の誘起・回避試験
5. SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

SPring-8-IIでの不安定性抑制戦略

- SPring-8-IIの200mA大電流運転へ向け、HOM起因の不安定性の検証を行うため、Q値測定としきい値電流の評価を行い、CBIの抑制について検討・検証した
- 縦方向HOMによる不安定性
 - 縦方向(900MHz TM011モード) Q値: 当初の想定・シミュレーションよりかなり低い
 - $Q_L=12000$ を超えない空洞を選択 → 不安定性を回避
 - backup: 縦方向BBFも導入予定 (JASRI正木 THO706)
- 横方向HOMによる不安定性
 - 710MHz, 760MHz, 1075MHzのHOMについては、不安定性が起きる条件となる可能性がある
 - 不安定性が起きた場合 → 0.2mm程度チューナーを調節すれば回避可能
各空洞のPickup信号モニターを設置し、空洞とモードを特定
 - backup: 不安定性が起きる条件であっても現在のBBFで抑制可能
 - SPring-8-II BBFの減衰時間 $\sim 0.1\text{ms}$ に対し、HOMの成長時間は最大 (TM110 or TM111) でも4ms @200mA

SPring-8-IIでの200mA大電流運転へ