

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

SUPPRESSION METHODS FOR INSTABILITY INDUCED BY HIGH-ORDER MODES OF ACCELERATING CAVITIES TOWARDS SPring-8-II

斗米貴人 ^{*A)}, 稲垣隆宏 ^{B,A)}, 大島隆 ^{A,B)}, 岩井瑛人 ^{A,B)}, 正木満博 ^{A)}, 安留健嗣 ^{B)}, 山口博史 ^{A)}, 前坂比呂和 ^{B,A)}
Takato Tomai ^{*A)}, Takahiro Inagaki ^{A)}, Takashi Ohshima ^{B)}, Eito Iwai ^{A,B)}, Mitsuhiro Masaki ^{A)}, Kenji Yasutome ^{B)},
Hiroshi Yamaguchi ^{A)}, Hirokazu Maesaka ^{B,A)}
^{A)} JASRI, ^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

SPring-8-II Upgrade Project is underway to achieve 100 times higher brightness than current SPring-8 storage ring. Then, the coupled-bunch instability caused by higher-order modes (HOMs) excited in a cavity will be critical issue to achieve high-current operation at 200 mA. To estimate the effect of HOMs, we performed quality factor measurements for longitudinal and transverse HOMs. As a result, we revealed that the TM₀₁₁ longitudinal mode's loaded quality factor (Q_L) is significantly lower than simulated values. For Transverse modes, we found that several modes have higher quality factors than the instability threshold. That means necessitating mitigation strategies such as cavity selection, detuning, and feedback systems. Additionally, transverse and longitudinal bunch-by-bunch feedback (BBF) systems are proposed to suppress instabilities. These combined approaches ensuring robust high-current operation in SPring-8-II.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 では、高輝度化と省エネルギー化を目指したアップグレード計画 SPring-8-II が進行中である [1]。SPring-8-II では、放射光源の高輝度化のため、電子ビームエネルギーの 8 GeV から 6 GeV への低減、マルチバンドアクロマツト光学系やダンピング・ウィグラーの導入による低エミッタンス化、100 mA から 200 mA への大電流化が行われる。また、ビームエネルギーの低減に伴い、加速電圧が約半分となり、加えて偏向磁石の永久磁石化することにより省エネルギー化(グリーン化)を行う [2]。この際、蓄積リングの各パラメータが変更となることで、加速空洞の高次モード(Higher-order mode: HOM) 起因の結合バンチ不安定性(Coupled-bunch instability: CBI) に関して、現在の蓄積リングよりも厳しい条件となり、不安定性が発生することが懸念される。本発表では、縦方向・横方向の HOM による不安定性のしきい値電流を評価し、SPring-8-II における不安定性抑制方法について述べる。

2. SPring-8 509 MHz ベル型空洞

SPring-8 では、Fig. 1 に示すように、加速空洞として 509 MHz ベル型常伝導空洞を採用し、合計 32 台の空洞を 8 空洞ずつ、A、B、C、D の計 4 ステーションに分散配置し、運転を行っている。ベル型空洞の特徴として、以下が挙げられる。

- 横方向 HOM による不安定性を抑制し、リエントラント型空洞に比べてインピーダンスを最大で半分程度に抑制 [3]
- 縦方向 TM₀₂₀ モードのインピーダンスが 0 Ω となるよう、空洞長を設計 [4]
- 32 台の空洞のうち、半分を横型(H 型)、半分を縦型(V 型)として 90 deg 回転させた配置とし、それぞれの 16 台の空洞について、内面形状に違いを持た

せ、HOM の共振周波数を分散させることで、複数の空洞が結合して HOM が成長することを抑制 [5]

- それぞれの空洞に Acc., HOM と呼ばれる 2 台の可変チューナーを設置し、個別に制御することで加速モード(TM₀₁₀ モード)の共振周波数を保ったまま HOM の共振周波数を離調して不安定性を抑制
- 空洞に流す冷却水の温度を ±0.1 °C 以下の精度で安定化することにより、HOM の共振周波数も安定化

これらの設計により、これまで SPring-8 のユーザー運転開始以来 30 年近くにわたって安定して運転を行ってきた。

SPring-8-II では、現在運転中の加速空洞やクライストロン等の付帯設備をそのまま使用する計画である。必要な加速電圧が 16 MV から 8 MV 程度に半減する一方、空洞を配置する直線部の長さが 6 m から 4.2 m に短縮されることに伴い、加速空洞の台数を現在の 32 台から 16 台へ、半数に削減する。その際、どの空洞を選択し、SPring-8-II で継続して使用するか選定する必要がある。その選定の方針としては、まず H 型、V 型それぞれ 8 台ずつ、全て異なる形状の空洞を選定する必要があるという要件が挙げられる。さらに、同じ形状の空洞のうち、H 型、V 型どちらを選択するかにあたっては、より不安定性を起こしにくい空洞を選定する。

3. HOM による結合バンチ不安定性

蓄積リングを周回する電子バンチは、wakefield により空洞に様々な周波数の HOM を励起する。次にやってくる電子バンチは、HOM の影響により運動量変化を受ける。励起された HOM は、そのモードの負荷 Q 値に従い減衰するが、それが減衰するよりも周回バンチによる増幅が勝る場合に CBI が発生する。CBI は、このようにビームのエミッタンスを増大させ、ビームロスが発生させる場合もあるため、これを抑制することが大電流運転を行うにあたって非常に重要である。

不安定性のしきい値電流は、HOM による振動の成長

* tomai@spring8.or.jp

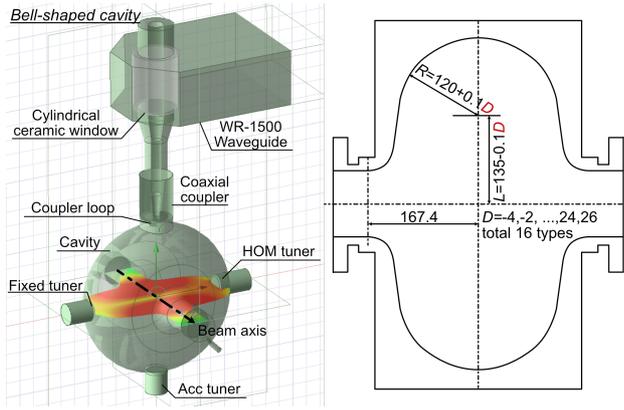


Figure 1: Schematic Drawings of a Bell-shaped Cavity. (Left) The Inner Surface of the Cavity Body, the attached Coupler and Waveguide. Acc., HOM and Fixed Tuners are also shown. (Right) The Variation of Cavity Inner Surface by D .

Table 1: The Designed Parameters for SPring-8-II (New) [2] and SPring-8 (Present) [6]

Parameter	SPring-8-II (New)	SPring-8 (Present)
Beam Energy (GeV)	6	8
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

時間 $\tau_{g,s}$ (縦方向)、 $\tau_{g,x}$ (水平方向) と放射減衰による減衰時間 τ_s, τ_x の大小関係によって決まる。また、ビームが空洞に誘起する周波数は、周回周波数 f_{rev} の整数倍となる。この離散的な誘起周波数と HOM の周波数が一致した場合、最も強い不安定性が起きる。このとき、振動の成長時間は以下のように表される [7]。

$$\tau_{g,s} = \frac{4E f_s}{e \alpha f_{\text{rev}} f_{\text{HOM}} R_{sh} I} \quad (1)$$

$$\tau_{g,x} = \frac{2E}{e \beta_x f_{\text{rev}} R_t I} \quad (2)$$

e は電気素量、 E はビームのエネルギー、 I はビームの蓄積電流、 α は Momentum compaction factor、 β_x は空洞位置での x 方向ベータatron関数、 R_{sh}, R_t はそれぞれ縦方向・横方向のシャントインピーダンス、 $f_s, f_{\text{rev}}, f_{\text{HOM}}$ はそれぞれシンクロトロン周波数、周回周波数、HOM の共振周波数を表す。ここでシャントインピーダンスは、空洞形状によって決まる R/Q と負荷 Q 値 (Q_L) によって決まり、 $R_{sh} = (R/Q) \times Q_L$ で表される。このため、不安定性の評価を行うためには、シミュレーションや測定により R/Q を、また空洞の負荷 Q 値を得る必要がある。

例として、900 MHz の縦方向 TM_{011} モードでは、Table 1 に示す SPring-8-II でのパラメータを用いると、

シャントインピーダンスのしきい値は $0.77 \text{ M}\Omega$ となる。ここで、電磁界シミュレーション [8] により得た $R/Q = 63.2 \Omega$ を用いると、負荷 Q 値のしきい値として 12000 が得られる。

Equation (1)、Eq. (2) に従うと、現在の SPring-8 と比較して、SPring-8-II では縦方向に関して 7 倍、横方向に関して 1.4 倍不安定性の条件が厳しくなる計算になる。これまで行われた検討では、シミュレーションでの無負荷 Q 値の計算の結果 [5] から、不安定性が起きる可能性が指摘されてきた。そこで、実際の運転条件で負荷 Q 値を実測することで、不安定性が発生するしきい値電流や、そのときの条件と抑制方法を検討した。

4. HOM の負荷 Q 値測定試験

本節では、ベル型空洞における HOM の負荷 Q 値の測定により、SPring-8-II での不安定性のしきい値電流を評価する。今回の負荷 Q 値測定では、2 つの測定手法による結果を比較し、測定の妥当性を評価した。

4.1 測定手法

• 低電力高周波での透過係数 S_{21} の測定

ネットワーク・アナライザの 2 チャンネルを空洞入力部の導波管と、空洞のピックアップポートにそれぞれ接続し、透過係数 S_{21} にて HOM の共振ピークを測定する。共振の -3 dB 帯域幅から負荷 Q 値を算出する。簡便な方法であるが、実際の運転条件とは導波管側の終端条件が異なるので注意が必要である。また、導波管とのカップリングが小さいモードは測定できない場合がある。

• ビームによる誘起試験

測定対象の空洞に加速高周波を入れずにシングルバンチ電子ビームを蓄積し、空洞に誘起された信号をスペクトラム・アナライザで解析する。Figure 2 のように共振スペクトルが得られるため、その包絡線の帯域幅から負荷 Q 値を算出する。共振ピークの同定については、共振周波数のチューナー位置依存性を測定することにより行う [9]。また、HOM の同定に関しては、チューナーを動かした時の共振周波数変化をシミュレーションや低電力での測定と比較して行う。この方法では、実際の運転時に近い条件で負荷 Q 値の評価が可能である。しかし、誘起周波数は f_{rev} の整数倍の周波数に離散的に誘起されるため、 Q 値が高く狭い帯域幅のモードを測定することが難しい。そこで、今回はチューナーを動かすことで HOM の共振周波数が変化することに着目して、その誘起信号の強度分布から共振曲線を測定する手法を採った (チューナースキャン法)。

4.2 チューナースキャン法

ビームによる誘起試験を行う際、負荷 Q 値が 10000 以上と高く、帯域幅が狭いモードの測定が必要となった。そこで、共振周波数がチューナー位置に依存することを利用した新たな測定方法により、負荷 Q 値を求めた。ある誘起周波数において、チューナー位置 x を変化させると、共振周波数 $f(x)$ が変化するのに伴い、信号強度 $P(x)$ も変化する。このとき、チューナー位置

Table 2: Loaded quality factor (Q_L) measurement results for TM_{011} transverse mode using single-bunch beam. Red values indicate the Q_L is over threshold for 200 mA operation at SPring-8-II. The typical errors of Q_L are ± 3000 , obtained by Lorentzian fitting.

Cavity	TM_{011} Freq.(MHz)		Q_L value	
	A-st.	B-st.	A-st.	B-st.
#1 (H type)	904.9	—*	7000	—*
#2 (V type)	904.4	—*	8000	—*
#3 (H type)	900.9	903.8	10 000	13 000
#4 (V type)	901.0	903.9	8000	7000
#5 (H type)	897.9	901.0	13 000	8000
#6 (V type)	897.6	901.4	12 000	6000
#7 (H type)	895.0	898.1	4000	12 000
#8 (V type)	894.8	898.3	4000	10 000

*: Not able to identify TM_{011} mode because of other modes' overlapping.

と共振周波数の関係 $x(f)$ を用いると、 $P(x(f))$ により共振周波数と信号強度の関係に変換できる。この方法で、チューナー位置を 1 mm や 0.5 mm ずつ動かして測定することで、狭い帯域幅を持つモードであっても負荷 Q 値を求めることが可能となる。¹

4.3 縦方向モード

不安定性の問題となる縦方向モードは、900 MHz 付近に共振周波数を持つ TM_{011} モードである。B ステーション空洞 6 号機について、低電力測定とチューナー スキャン法の 2 つの測定方法で測定し、ローレンツ関数でフィッティングした結果を Fig. 3 (a) に示す。負荷 Q 値としては低電力試験で $Q_L = 7000 \pm 200$ 、ビーム試験で $Q_L = 6300 \pm 3300$ であり、2 つの測定方法で測定した結果はよく一致した。共振周波数の違いはチューナー位置による違いと考えられる。

Table 1 に示すパラメータで、SPring-8-II において 200 mA のビーム電流を蓄積するためには、 $Q_L = 12000$ 以下である必要がある。Table 2 に、A および B ステーションの各空洞に対する共振周波数と負荷 Q 値を示す。赤字で示した空洞はしきい値を超える負荷 Q 値であり、不安定性を起こす潜在的な要因となりうる事がわかる。

4.4 横方向モード

横方向モードについても同様に負荷 Q 値測定を行った。B ステーション空洞 6 号機について、1077 MHz 付近の TM_{111} モードについて同様に 2 つの測定方法で測定し、ローレンツ関数でフィッティングした結果を Fig. 3 (b) に示す。このモードは Q 値が高く、包絡線を作れなかったり、2 つの誘起周波数の間に共振周波数が入ってしまい、信号が見かけ上消失してしまうことがあった。しかしながら、チューナー スキャン法ではチューナーを 0.2 mm ずつ動かして測定することで、 Q 値測定を行うことができ、 $Q_L = 26300 \pm 5700$ と求めることができた。

¹ なお、チューナーを動かしても共振周波数が変化しないモードでは測定ができない。

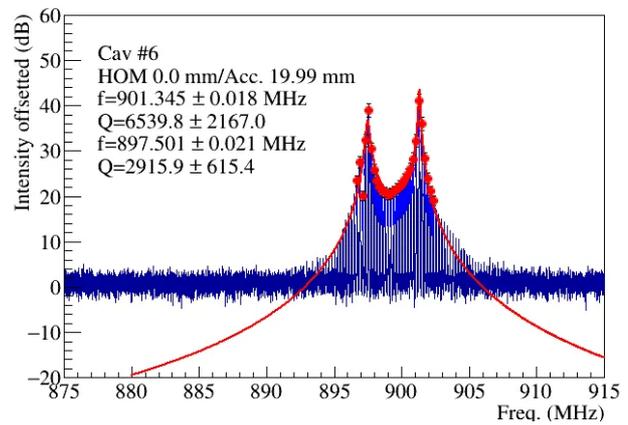


Figure 2: Spectrum measured by a spectrum analyzer from B-st. #6 cavity pickup port. Blue line shows the raw spectrum, and Red circles show the peaks of the spectrum. Red line shows the double Lorentzian fitting result as a envelope line. The left peak is identified as quadrupole TE_{211} mode, and the right peak is identified as longitudinal TM_{011} mode by the tuner dependency.

B ステーション空洞 6 号機について、同様にして他モードの Q 値を 2 つのモードで測定した結果と、低電力測定の結果から見積もった不安定性のしきい値電流値を Table 3 に示す。この結果より、765 MHz 付近の TM_{110} モードと、1078 MHz 付近の TM_{111} モードが特に不安定性のしきい値電流が低く、不安定性を起こす可能性があることが判明した。

5. ビームを使用した不安定性抑制試験

不安定性を抑制するため、これらのモードについて不安定性を誘起し、その上でデチューンすることで抑制する試験を行った。ビーム条件は、マルチバンチ (160 bunch train \times 12) で、B ステーションの RF を OFF とした 3 ステーション運転とした。B ステーション空洞 6 号機のチューナーを 765 MHz TM_{110} モードの不安定条件 (しきい値電流は 35 mA) にチューンし、ビーム電流を蓄積していったときの x 方向ビームサイズを 2 次元干渉計 [10] で測定した。結果を Fig. 4 (a) に示す。この結果から、40 mA を超えたところからビームサイズの増大が出現し、不安定性が発生したことが確認できた。また、この値は低電力測定から見積もったしきい値電流値 35 mA と同程度であった。

次に、チューナーをわずかに変位させ、空洞ピックアップ信号の信号強度の変化を測定し、離調による不安定性の抑制を試験した。その結果を Fig. 4 (b) に示す。HOM チューナーの位置が 7.76 mm のとき、信号強度は最大値であった。7.65 mm 以下、7.9 mm 以上の条件となった時、ピックアップ信号は測定限界を下回り、水平方向のビームサイズも $90 \mu\text{m}$ に戻ったため、不安定性が消失したことが確かめられた。この結果から、チューナーを 0.2 mm 程度デチューンすれば、不安定性を抑制することができる事が判明した。

Table 3: Simulation and low-power measurement results for transverse and longitudinal HOMs. Frequency, R/Q , quality factors obtained by electromagnetic field simulation using HFSS [8] and measurement, shunt impedance and the threshold current for present SPring-8 and SPring-8-II are listed. Each transverse mode has two orthogonal modes, which are horizontal “H” and vertical “V” against the coupler direction. Red value means the threshold current is under the operation current without BBF system [12].

Mode	Frequency (MHz)	R_t/Q (Ω/m) or R/Q (Ω)	Q_0 (Sim.)	Q_L (LP Meas.)	Q_L (Beam Meas.)	I_t (mA) at SP8	I_t (mA) at SP8-II
Transverse modes						<i>x</i> direction	
TE ₁₁₁ -H	709.8	71.0	50 300	24 000	not measured	181	257
TE ₁₁₁ -V	710.8	71.8	51 100	34 000	not measured	126	179
TM ₁₁₀ -V	761.2	194.9	50 500	7 000	below limit	226	321
TM ₁₁₀ -H	765.8	195.1	53 500	45 000	38 000	35	50
TM ₁₁₁ -V	1077.5	311.6	43 100	24 000	below limit	41	58
TM ₁₁₁ -H	1078.6	302.9	43 400	30 700	26 000	33	48
*TE ₁₂₁ -H	1207.4	127.6	56 500	6 200		391	553
*TE ₁₂₁ -V	1207.8	126.5	56 000	18 300	12 000	133	189
Longitudinal modes						<i>s</i> direction	
TM ₀₁₁	905.2	63.2	46 200	7 000	6 000	1266	362
TM ₀₁₂	1445.4	14.0	41 400		not measured		

*: Assuming assignment for these modes since they are very close each other.

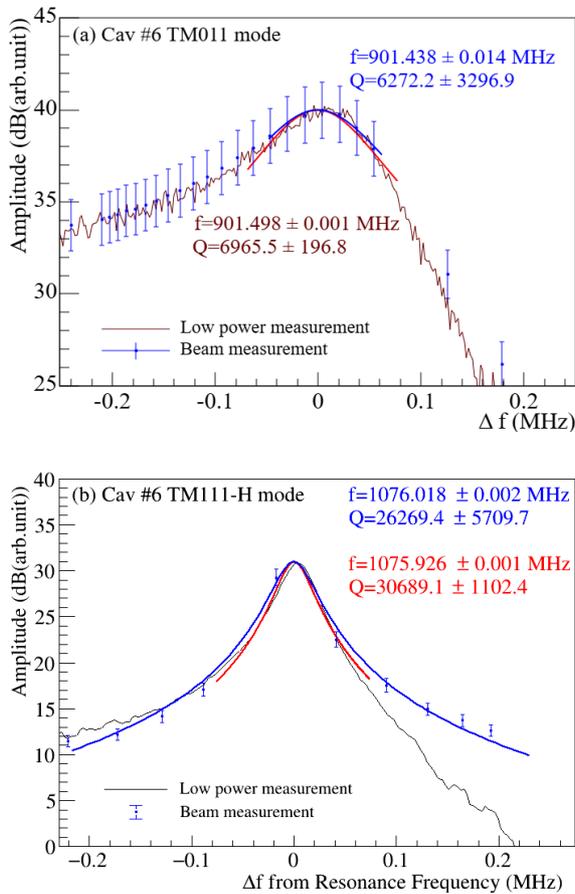


Figure 3: Q -value measurements with different methods. The red solid line shows the spectrum by low power measurement using the network analyzer. The blue data points are measured by tuner-scan method using single bunch beam. (a) TM₀₁₁ longitudinal mode. (b) TM₁₁₁-H transverse mode.

6. HOMによる不安定性の抑制方法

6.1 縦方向モード

まず、縦方向モード TM₀₁₁ モードについて述べる。各空洞によって値は異なるが、Table 2 に示す通り、一部の空洞において Q_L 値は 12 000 のしきい値を超える値となっていて、このような空洞は SPring-8-II において 200 mA 運転を妨げる可能性のある空洞である。空洞の台数を半減させる際には、このような空洞をなるべく避けて選択しなければならない。しかし、空洞形状とカプラー方向が重複しないように選択することから、A ステーション空洞 5 号機と 6 号機のように、同じ形状で Q 値がどちらも高い場合には、いずれかを選択する必要がある。なるべく Q 値の低い空洞、例えば空洞 6 号機 ($Q = 12 000$) を選択し、残りはしきい値を超えない、1 号機、4 号機、7 号機のように選択することで、不安定性が起きる可能性を限りなく下げる。その上で、このようなしきい値を超える空洞について、もし不安定性を起こす条件となった場合でも、共振周波数を数 10 kHz 程度デチューンし、不安定性条件を回避可能であると考えられる。ここまでの対策を行った後、例えば測定が出来ていない別の縦方向モード、例えば TM₀₁₂ モードなどに起因する不安定性が発生した場合に備えて、縦方向 Bunch-by-Bunch Feedback (BBF) システムを導入する予定である。

6.2 横方向モード

横方向モードについては、不安定性のしきい値電流が低く、不安定性を発生させやすいモードがこれまでと同様存在する。モードにもよるが、0.2 mm 程度チューナー位置がずれていれば不安定性は発生しないため、これまでと同様、によって対処することが可能である。また、横方向 BBF システムによる減衰時間は 0.1 ms 程度であるが [11]、これらのモードの成長時間は 4 ms 程

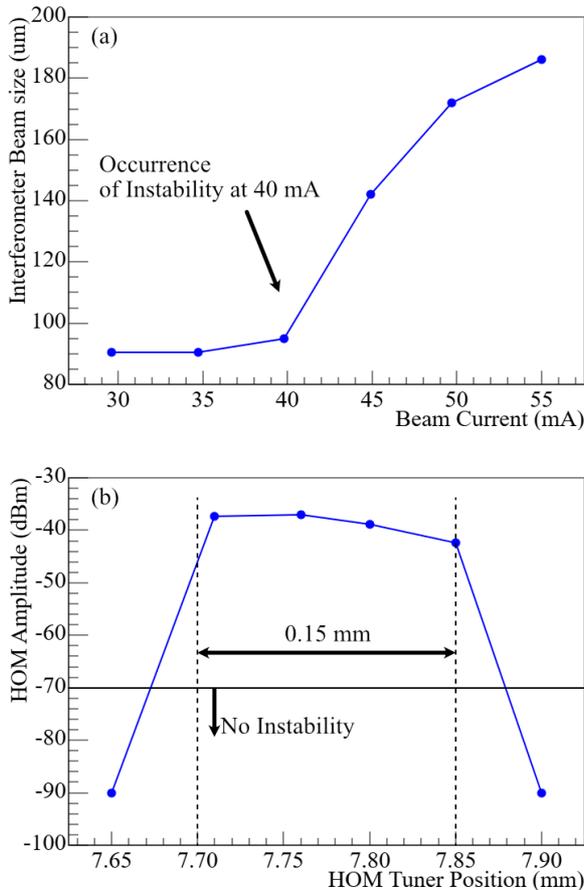


Figure 4: Results of Instability Experiments for 765 MHz TM_{110} mode. (a) Beam Size Measured by Interferometer by Increasing Beam Current. From 40 mA, the Beam Size is Suddenly Increased. (b) HOM Amplitude Measured by a Spectrum Analyzer when Moving the HOM Tuner Position.

度であり、不安定性が発生する条件であっても、BBFによって十分不安定性を抑制することが可能である。

7. まとめ

SPring-8-II へ向けて、HOM に起因する結合バンチ不安定性の評価を行い、抑制方法を検討した。その結果、縦方向については TM_{011} モードの Q 値がシミュレーションよりかなり低いことが判明した。そのため、 Q 値の低い空洞を選択し、SPring-8-II で使用することが可能である。横方向についてはこれまでと同様に、基本的にデチューンによって対処するが、これまでより厳しい条件となるため、空洞の HOM をモニタ

リングし、調整するシステムを構築して対処する予定である。また、バックアップシステムとして、現在導入している横方向 BBF に加えて、縦方向 BBF についても導入する予定である。これらの手法により、縦方向・横方向両方の不安定性を抑制し、SPring-8-II における安定した 200 mA 運転を実現する。

謝辞

低電力測定・ビーム試験を行うにあたり、スプリングエイトサービス株式会社の早賀様、渡邊様、森本様には助力を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] RIKEN SPring-8 Center, “SPring-8-II Conceptual Design Report”, 2014.
<http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [2] H. Tanaka *et al.*, “Greener Upgrading of SPring-8 to Produce Stable, Ultrabright Hard X-ray Beams”, *J. Synchrotron Radiat.*, 31, 2024, 1420-1437.
doi:10.1107/S1600577524008348
- [3] K. Inoue *et al.*, “Design of the RF System for the SPring-8 Storage Ring”, PASJ, 1990, 11p-12. https://www.pasj.jp/web_publish/lam1990/11p-12.pdf
- [4] H. Ego *et al.*, “Higher-order Modes in the Bell-shaped Single-cell Cavity of the SPring-8 Storage Ring”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 383, 1996, pp. 326.
doi:10.1016/S0168-9002(96)00856-X
- [5] “Suppression of the coupled-bunch instability in the SPring-8 storage ring”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 400, 1997, pp. 195–212. doi:10.1016/S0168-9002(97)00926-1
- [6] SPring-8 Webpage “Storage Ring”,
http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/accelerators/storage_ring/
- [7] K. Kubo, “ビーム不安定性”, OHO’91.
<http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOtxt/OHO-1991/txt-1991-%E2%85%A2.pdf>
- [8] Ansys HFSS, <https://www.ansys.com/>
- [9] T. Tomai *et al.*, “SPring-8-II へ向けたベル型加速空洞における高次共振モードの検討”, PASJ’24, 2024, THP042. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/THP0/THP042.pdf
- [10] M. Masaki *et al.*, “Two-dimensional visible synchrotron light interferometry for transverse beam-profile measurement at the SPring-8 storage ring”, *J. Synchrotron Radiat.*, 2003, pp. 295–302. doi:10.1107/s0909049503007106
- [11] M. Masaki *et al.*, “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”, PASJ’25 (this meeting), 2025, THO706.
- [12] T. Tomai *et al.*, “Estimation of coupled-bunch instability induced by high-order modes of bell-shaped cavity in high current operation at SPring-8-II”, IPAC’25, 2025, pp. 2373–2376. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-WEPS063