

シンクロトロン周波数測定による超伝導空洞電圧較正

CALIBRATION OF SUPERCONDUCTING CAVITY VOLTAGE BY MEASURING SYNCHROTRON FREQUENCY

西脇みちる^{#, A, B)}, 赤井和憲^{A)}, 小林鉄也^{A), B)}, 古屋貴章^{A)}, 光延信二^{A)}, 森田欣之^{A), B)}
Michiru Nishiwaki^{#, A, B)}, Kazunori Akai^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A, B)}, Takaaki Furuya^{A)}, Shinji Mitsunobu^{A)}, Yoshiyuki Morita^{A, B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

The Phase-3 commissioning of SuperKEKB accelerator has been started. In the electron ring of SuperKEKB, eight superconducting cavities (SCC) developed for KEKB accelerator are operating. All SCCs almost reproduced the performances of Q_0 and the maximum cavity voltage of Phase-2 without degradation. In the operation of SCC, the cavity voltage is calculated using the monitor power by the cavity pickup port and the external Q value (Q_{ext}) of the pickup port obtained in vertical test of the cavity cell before assembling in cryostat. The cavity voltage is also gotten from the input power and the loaded Q value (Q_L) of cavity assembled in cryostat. In several cavities, there are differences between the cavity voltages calculated using Q_{ext} and using Q_L . In the Phase-3 spring run 2019, calibration study of the individual cavity voltage by the synchrotron frequency measurement of the beam was performed. From the results of the study, we obtained the individual calibration factors of cavity voltage for each SCC.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器 [1] は、 8×10^{35} /cm²/s という KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目標とした電子・陽電子衝突型加速器である。2016 年の Phase-1 コミッショニング運転 [2] の後、Belle II 測定器のロールイン、ダンピングリングの立ち上げを経て、2018 年に Phase-2 運転を開始し、4 月には Belle II にて最初のビーム衝突イベントが確認された [3-5]。2019 年 3 月からは本格的な衝突実験 (Phase-3) が開始され [6]、ピークルミノシティとして 1.2×10^{34} /cm²/s を記録して 7 月 1 日に今期の運転 (Phase-3 第 1 期、spring run 2019) を終えた [7]。

7 GeV の電子リング (High Energy Ring, HER) には、超伝導加速空洞 (SCC) が 8 台、常伝導加速空洞 (ARES) [8] が 8 台導入されている。SCC は、KEKB 加速器に向けて開発された高調波減衰型空洞 [9-12] であり、長期間運用されているが、横型高圧水洗浄 [13-14] や定期的なエージングにより安定な運転を維持している。Phase-3 第 1 期の最大蓄積電流は 940 mA に達したが、3 ヶ月の運転を通じて空洞を原因とするビームアポルトは 1 度だけであった。

SCC の空洞電圧 V_c は、1.35 MV/cavity を維持して運転した。RF 制御では、空洞のピックアップポートでのモニター電力と縦測定で得られるピックアップポートの external Q 値を使って算出した V_c を使っている。一方、クライオスタットに組み込んだ状態で測定した負荷 Q 値と空洞入力電力からも V_c は算出できる。空洞によっては、この両者に無視できない不一致がみられる。そこで、ビームのシンクロトロン周波数測定による個々の空洞の V_c 較正を実施し、

空洞電圧の較正值を得ることができた。

本稿では、この V_c 較正について報告するとともに、SCC の運転状況、ピエゾチューナー問題 [15] についても報告する。

2. SCC の運転状況

Figure 1 に SuperKEKB の SCC の断面図を示す。SCC は、509 MHz の単セル高調波減衰型ニオブ空洞である。空洞両側の室温部ビームパイプにはそれぞれ、フェライト製 HOM ダンパー [12] を備えている。RF 電力の入力結合器は、同軸アンテナ型である。空洞電圧はピックアップポートでモニタしている。Table 1 に SCC の運転パラメータを示す。Phase-3 第 1 期における最大値あるいは測定値と SuperKEKB の設計値である。

2019 年 2 月の性能試験では、各空洞の 1.5 MV における Q_0 と到達空洞電圧 (クエンチやフィールドエ

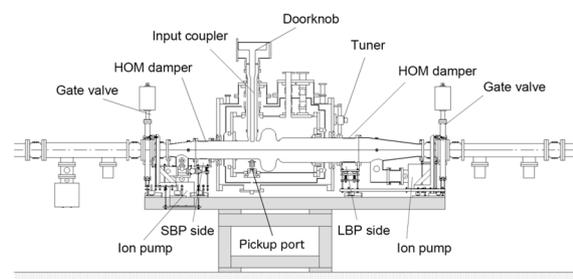


Figure 1: Cross-sectional view of the superconducting cavity module of SuperKEKB. The cavity is made of niobium. The input coupler is a coaxial type antenna. The cavity voltage is monitored by a pickup port.

[#]michiru.nishiwaki@kek.jp

ミッションでリミットされる最大値 V_c .limit) は、8 台全てで $Q_0 > 1E+9$ 、 V_c .limit > 2 MV であった。Phase-2 の報告[15]において、新規設置した SiC 製 HOM ダンパーが空洞性能低下の原因の可能性を示唆したが、その後 V_c 測定系の RF 検出器の異常が原因であることが判明した。修復後の空洞性能は低下前の状態に回復し、空洞も SiC ダンパーも問題ないことが確認できた。

Table 1: SCC-related Parameters

Parameters	spring run 2019 (maximum or measured)	SuperKEKB (design)
Number of SC cavities	8	8
Loaded Q (Q_L)	$4.6 - 7.2 \times 10^4$	5×10^4
Q_0 at 1.5 MV	$1.0 - 2.8 \times 10^9$	1×10^9
V_c .limit [MV]	2.0 - 2.5 MV	-
Beam current [A]	0.94	2.6
Bunch number	1576	2500
Beam power [kW/cavity]	210	400
RF voltage [MV/cavity]	1.35	1.5

Phase-3 第 1 期においては、最大 940 mA の蓄積ビーム電流であった。空洞電圧は、1.35 MV を維持して運転した。SCC に関連するビームアポートは約 3 ヶ月の運転で合計 5 回であった。その中で空洞の原因とするものは、空洞内のマルチパッキングによると思われる quench が 1 度だけであった。空洞は、定期的なエージングにより非常に安定な運転状態を維持している。残り 4 回のうち 3 回は後で述べるピエゾチューナーの絶縁不良によるもの、1 回は冷却水チラーの老朽化による故障によるものであった。引き続き周辺機器の点検や老朽化機器の故障対策を進める。

3. シンクロトロン周波数測定による空洞電圧較正

3.1 RF 制御での空洞電圧 V_c の測定

超伝導空洞の空洞電圧 V_c は、

$$|V_c| = \sqrt{R_{sh} P_c} = \sqrt{\frac{R}{Q} Q_0 P_c} = \sqrt{\frac{R}{Q} Q_{ext} P_{pickup}} \quad (1)$$

で定義される。ここで R_{sh} : シェントインピーダンス、 P_c : 空洞での消費電力、 Q_0 : 無負荷の Q 値、 Q_{ext} : ピックアップポートの結合度に相当する external Q 値、 P_{pickup} : ピックアップポートでのモニター電力である。Equation (1)から、 R/Q と Q_{ext} は既知であるのでピックアップポートの電力を測定すれば

V_c を得ることができる。RF 制御系での電力測定には RF 検出器を用いているので、検出電圧を V_d 、パワーへの換算係数 A 、RF 制御系までのケーブルや制御機器のロス OFS [dB] とすれば、 P_{pickup} は

$$P_{pickup} = (A \times V_d^2) \times 10^{\frac{OFS}{10}} \quad (2)$$

となるので、

$$V_c = V_d \sqrt{A \times 10^{\frac{OFS}{10}} \frac{R}{Q} Q_{ext}} \quad (3)$$

で V_c が得られる。

ケーブルおよび制御系のロスは、SuperKEKB の立ち上げ前に測定した値を使用している。 Q_{ext} は、空洞をクライオスタットに組み込む前の空洞単体の性能試験である縦測定でのみ測定可能である。そのため、KEKB 建設時に測定された値を使用している。SuperKEKB の RF 制御では、ここで得られた V_c をフィードバック制御の Reference 電圧として使用している。

3.2 V_c 測定の一貫性

SCC は結合度 $\beta \gg 1$ であるから、空洞電圧 V_c は、蓄積ビームがないときには空洞の負荷 Q 値 (loaded Q , Q_L) と空洞入力電力 P_{in} より

$$V_c = \sqrt{4P_{in}} \sqrt{\frac{R}{Q} Q_L} \quad (4)$$

でも得られる。 P_{in} は、Eq. (2) と同様に RF 検出器の検出電圧と OFS から得る。ケーブルおよび測定系のロスはピックアップ同様に実測値を用いている。 OFS には、導波管方向性結合器の結合度も含まれるが、結合度はメーカー出荷時測定値を使用している。 Q_L は、長期メンテナンス後の空洞立ち上げ時に空洞反射電力の decay の時定数から測定している。

P_{pickup} と Q_{ext} 、 P_{in} と Q_L 、それぞれの組み合わせから得た V_c を比較すると、不一致が見られる空洞がある。Table 2 に 1 台を例として示す。 $P_{in} = 50$ kW の時、 P_{pickup} と Q_{ext} からは $V_c = 0.84$ MV、 P_{in} と Q_L からは $V_c = 0.92$ MV が得られた。 V_c には 10% の差があり、測定系の誤差を考慮しても無視できない差異である。もし、 P_{in} と Q_L から得た V_c が正しいとすると、この空洞の実際の V_c は 10% 高く、他の空洞と比べて余裕のない状態で運転していることになる。

このような不一致の原因は明確ではないが、前項で述べたピックアップポートの Q_{ext} が何らかの理由で変化したことも考えられる。しかし、 Q_{ext} は再測定できない。また、空洞入力電力のようなハイパワー RF の高精度の測定は一般的に難しく、5% 程度の誤差が含まれると考えられる。

そこで、蓄積ビームのシンクロトロン周波数測定による個別の超伝導空洞の V_c 較正を実施した。ビームを使った較正法であり、 Q_{ext} に依存せず、ハイパワー測定の不確実性も排除できるため、より正確な V_c が得られると期待出来る。ビームを使った

Vc 較正としては空洞のビーム誘起電圧から Vc を得る方法[16]や空洞の位相を揃える目的でシンクロトロン周波数を測定した例[17]などの報告がある。

Table 2: Example of Difference of Vc

Parameters	Vc calculated from	
	Pickup port power and Q _{ext}	Input power and Q _L
R/Q [Ω]	92.9	
Input Power [kW]	50	
Q _{ext} of pickup port / Q _L	Q _{ext} : 4.63 × 10 ¹⁰	Q _L : 4.60 × 10 ⁴
Calculated Vc [MV]	0.84	0.92

3.3 較正方法

シンクロトロン周波数の測定は、ビームローディングおよび結合バンチ等の影響をできるだけ排除するために、単バンチで行った。

シンクロトロン周波数 f_s は、

$$2\pi f_s = \sqrt{\frac{\alpha f_{rev}}{E_0} e V_{c,tot} 2\pi f_{rf} \sin \phi_s} \quad (5)$$

$$\phi_s = \arccos\left(\frac{U_0}{e V_{c,tot}}\right) \quad (6)$$

から得られる。ここで、 α : momentum compaction factor、 f_{rev} : 周回周波数、 E_0 : ビームエネルギー、 $V_{c,tot}$: 全空洞電圧、 f_{rf} : RF 周波数、 ϕ_s : 同期位相、 U_0 : 放射損失エネルギーである。Table 3 にビーム運転パラメータを示す。Vc.tot 以外はビーム運転パラメータで決まる値であるので、 f_s が精度よく測定できれば、Vc.tot を得ることができる。Vc.tot への誤差としては、ビームの Parasitic energy loss と α の設計値からのずれ等の寄与が考えられるが、それぞれ 1~2%程度と見積もられる。 E_0 はエネルギースキャンにより、ビームの重心系エネルギーが設計通りであることが Belle II にて確認されている[7]。

Table 3: SuperKEKB HER Operation Parameters

Parameters	SuperKEKB HER (design)
E_0 [GeV]	7.007
circumference [m]	3016.31
f_{rev} [kHz]	99.39
f_{rf} [MHz]	508.88
harmonic number	5120
α	4.54 × 10 ⁻⁴
U_0 [MeV]	2.43

HER では、SCC 8 台と ARES 8 台が運用されているが、今回の較正は SCC のみを対象としている。そのため ARES は全て RF OFF とし待機状態とした。蓄積ビームは単バンチ (~ 0.5 mA) とし、空洞電圧

を以下のように設定して f_s 測定を実施した。 f_s は進行方向バンチフィードバックシステムで、バンチ位相をデジタルフィルター(iGp12)内で FFT 解析して測定している[18]。Figure 2 に、設定した空洞電圧と ϕ_s の関係を示す。図中 $V_0 = U_0/e$ である。まず、較正対象空洞以外の 4 台の空洞で BaseVc を作る。残り 3 台は RF Off し待機させる。この時の f_s を測定する。較正対象空洞電圧を Vc と設定して Vc.tot を作る。この時、BaseVc に対する Vc の比率ができるだけ大きくなり、かつ、 U_0 に対して常に Vc.tot > 4 MV となるように、BaseVc = 6 MV、較正対象空洞 Vc = 1.8 MV に設定した。そして、較正対象空洞の RF 位相をスキャンして $f_{s,max}$ を測定(Fig.2(a))し、さらに約 180 度逆転させて $f_{s,min}$ も測定(Fig.2(b))する。原理的には $f_{s,max}$ の測定のみでも Vc を得られるが、位相をほぼ 180 度動かすことで、Vc.tot の変化量を 2 倍、すなわち f_s の変化量も 2 倍にし、測定精度を上げることができる。この条件で、各 Vc 設定値が正しいと仮定した場合、それぞれの状態における ϕ_s , f_s は、Table 4 の通り計算される。

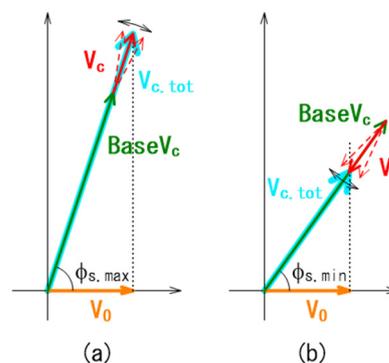


Figure 2: Schematic view of Vc calibration method by measurement of f_s . BaseVc is vector sum of 4 cavities. The Vc is a cavity voltage of a target cavity of the calibration. Vc.tot is vector sum of BaseVc and Vc. The change of f_s is enlarged by changing RF phase of Vc in around 180 degrees.

Table 4: Vc Setting and Calculated f_s

Parameters	Set Vc [MV]	Set Vc.tot [MV]	calc. ϕ_s [deg.]	calc. f_s [kHz]
BaseVc (4 cavities)	6.0	6.0	66.1	1.69
+ Vc (at accel. phase)	1.8	7.8	71.8	1.97 ($f_{s,max}$)
- Vc (rot. 180 deg.)	1.8	4.2	54.6	1.34 ($f_{s,min}$)

3.4 測定

前項の条件にそって、8 台の空洞について 4 台ずつ 2 回に分けて、 f_s 測定による較正実験を実施した。以下は、1 回目の実験における測定値である。BaseVc における f_s は 1.632 kHz であった。この f_s から

BaseVc = 5.657 MV が得られ、この後の計算に使用した。Figure 3 に 1 台の空洞の $f_{s,max}$ と $f_{s,min}$ の測定例を示す。X1 軸は位相変更で使用した移相器の目盛り値、X2 軸は X1 = 0 を 0 度として位相に変換した値である。 f_s 測定値のばらつきは、 ± 1 Hz 程度であった。 $f_{s,max}$, $f_{s,min}$ の値は fit 結果から得た。Table 5 に Fig. 3 の空洞における $f_{s,max}$, $f_{s,min}$ および f_s から得られた Vc.tot, Vc を示す。

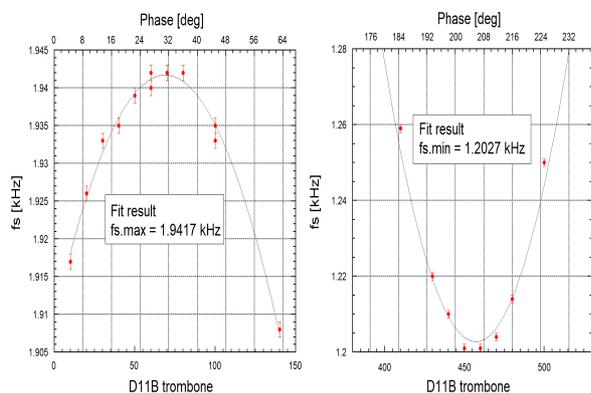


Figure 3: Example of measured f_s as a function of RF phase of the cavity voltage Vc. $f_{s,max}$ and $f_{s,min}$ were obtained from fit results.

Table 5: Measured f_s and Obtained Vc

Parameters	f_s [kHz]	Vc.tot [MV]	Vc [MV]	Vc / set Vc
BaseVc (4 cavities)	1.632	5.657	-	-
+ Vc (accel. phase)	1.942 ($f_{s,max}$)	7.625	1.97	1.094
- Vc (rot. 180 deg.)	1.203 ($f_{s,min}$)	3.688	1.97	1.094

$f_{s,max}$, $f_{s,min}$ それぞれから得た Vc.tot と BaseVc との差分に矛盾はなく、この空洞の真の空洞電圧 Vc = 1.97 MV が得られた。またこの空洞では Set Vc との比は 1.094 と実は 9% 以上も高い Vc であることも分かった。実際の運用においては、この比がピックアップから得た Vc の補正係数となり、Vc の較正值を得ることができる。

同様の測定を 4 台ずつ 2 回に分けて、全 8 空洞について実施し、各空洞の Vc の補正係数を得た。Table 6 に 8 台の空洞の補正係数と Phase-3 第 1 期での設定 Vc、補正後の Vc を示す。Table 5 で示した空洞以外の補正係数は 1 以下であり、今期の運転では SCC の Total Vc は設定より 5% 程度低かったことになる。次期の運転からは、この補正係数を反映する。この f_s 測定により、個々の空洞の Vc を精度よく較正することができた。今後、空洞の入れ替えも予定されているが、入れ替え後にはこの方法により Vc 較正を実施する。

4. ピエゾアクチュエータの絶縁破壊

周波数チューナーとして使用しているピエゾアクチュエータの絶縁破壊の問題については、これまでも報告した[13,14]。Phase-2 では制御系の LPF の時定数や印加電圧の制限など運転条件の最適化を施すことで故障頻度は減少したが、絶縁破壊を完全に防ぐことはできなかった。そこで、絶縁不良の原因調査のため、ピエゾアクチュエータ単体の種々の環境への曝露実験を実施した。真空、乾燥窒素、大気、放射線（放射光の照射）のそれぞれの環境において、ピエゾアクチュエータへの電圧印加を維持し、漏れ電流を測定した。その結果、大気中の湿度の影響が非常に大きいことが判明した。Figure 4(a)に大気曝露実験における漏れ電流の変化を示す。大気中にて定電圧を印加していたピエゾアクチュエータをビニール袋にシリカゲルとともに封入したところ、劇的な電流減少が観測された。この結果から、空洞に取り付けられている稼働中のピエゾチューナーにも試験的にシリカゲルを巻きつけたところ、漏れ電流の増加が止まり、効果が確認できた(Fig. 4(b))。現在、実際のピエゾチューナーへの実用的で効率的な湿気対策を検討中である。

5. まとめ

SuperKEKB の Phase-3 ビームコミッションングが 2019 年 3 月から開始された。ピークルミノシティとして $1.2 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ を記録して Phase-3 第 1 期の運転を終えた。SCC は、8 台が HER に設置され、引き続き安定して運用している。Phase-1 から課題となっているピエゾアクチュエータの絶縁不良は、空気中の湿気が主な原因であることが判明し、実機における対策を検討している。

Table 6: Summary of Calibration Factors Obtained by f_s Measurement and Calibrated Vc

Cavity ID	D10A	D10B	D10C	D10D	D11A	D11B	D11C	D11D	Total Vc [MV]
Calibration Factor	0.977	0.910	0.998	0.946	0.894	1.094	0.878	0.934	-
Set Vc [MV] @Phase 3 spring run 2019	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	10.8
Calibrated Vc [MV]	1.32	1.23	1.35	1.28	1.21	1.48	1.19	1.26	10.3

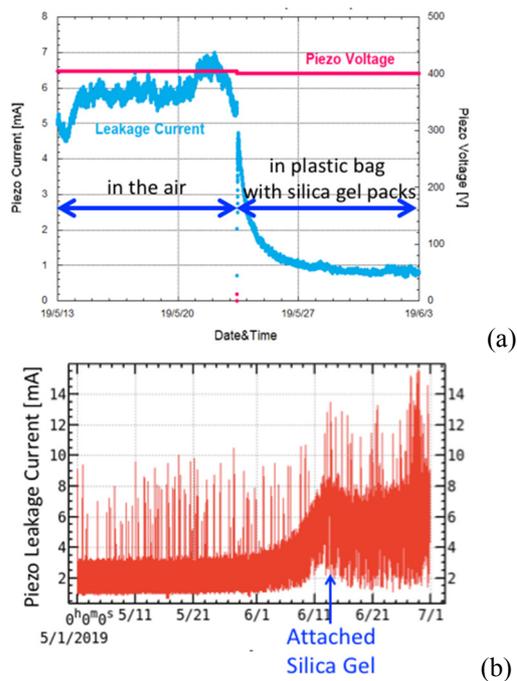


Figure 4: Leakage current of piezo actuator. (a) Unit test of piezo actuator in the Air with/without silica gel, (b) Trial of attaching silica gel to piezo tuner in the tunnel. Drying is effective to reduce leakage current.

空洞電圧 V_c はピックアップポートのモニター電力とその Q_{ext} から得ているが、空洞入力電力と Q_L から求めた値と一致しない空洞が見られる。そこで、ビームのシンクロトロン周波数 f_s 測定による空洞電圧較正を実施した。ベースとなる空洞電圧に対して較正対象の空洞位相を加速位相およびほぼ 180 度逆位相にしてそれぞれの f_s 測定値から対象空洞の V_c を得る較正法である。この測定により、個々の空洞の V_c 補正係数を得ることができた。この補正係数を適用することで、空洞の運転電圧のばらつきを抑制することができる。

次期の運転は今秋から予定されている。今後のビーム電流増強に備え、安定した運転のために空洞の性能維持と周辺機器の老朽化や故障への対策を進める。

参考文献

[1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2013, no. 3, p. 03A011, Mar. 2013; <https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>

[2] Y. Funakoshi, "SuperKEKB Phase 1 Beam Commissioning", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 24-28; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOOL/MOOL02.pdf

[3] Y. Ohnishi, "Report on SuperKEKB Phase 2 Commissioning", Proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, 2018, Pre-Release MOXGB1; <http://ipac2018.vrws.de/papers/moxgb1.pdf>

[4] A. Morita, "Status of SuperKEKB phase-2 commissioning", ICHEP2018, Korea; https://indico.cern.ch/event/686555/contributions/2962552/attachments/1681111/2700857/ichep2018_KEK_A.Morita.pdf

[5] K. Akai, "SuperKEKB / Belle II status", ICHEP2018, Korea; https://indico.cern.ch/event/686555/contributions/3028068/attachments/1683219/2705296/3-2_ICHEP18_SuperKEKB_Akai.pdf

[6] A. Morita, "Status of Early SuperKEKB Phase-3 Commissioning", Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, Pre-Release WEYYPLM1; <https://ipac2019.vrws.de/papers/weyyplm1.pdf>

[7] Y. Ohnishi, "Start of Phase 3 Commissioning at SuperKEKB", to be presented in these Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31-August 4, 2019, Kyoto, Japan, FSPH008.

[8] T. Kageyama *et al.*, "Development of High-Power ARES Cavities", Proceedings of PAC97, p. 2902 (1997); <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac97/papers/pdf/9C006.PDF>

[9] T. Furuya *et al.*, "Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory", Proceedings of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF95/papers/srf95f35.pdf>

[10] S. Mitsunobu *et al.*, "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity", Proceedings of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 735; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF95/papers/srf95f36.pdf>

[11] Y. Morita *et al.*, "Status of KEKB Superconducting Cavities and Study for Future SuperKEKB", Proceedings of SRF2009, Berlin, Germany, 2009, p. 236-238; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2009/papers/tuppo022.pdf>

[12] T. Tajima, "Development of Higher-Order-Mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities", KEK Report 2000-10 (2000).

[13] M. Nishiwaki *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity and Development of SiC Damper for SuperKEKB", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, p. 914-918; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP037.pdf

[14] Y. Morita *et al.*, "Developments of Horizontal High Pressure Rinsing for SuperKEKB SRF Cavities", Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p. 443-447; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2015/papers/mopb116.pdf>

[15] M. Nishiwaki *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity at SuperKEKB Phase-2 Operation", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, p. 428; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP049.pdf

[16] S. Wilke, "Calibrating the Cavity Voltage", 21st ESLS-RF meeting, 15-16 Nov. 2017, Kraków, Poland; https://www.cells.es/en/media/workshops/european-synchrotron-rf-meetings/42-esls2017krakau_wilke.pdf

[17] B. Bravo *et al.*, "Calibration of the Acceleration Voltage of Six Normal Conducting Cavities at ALBA", Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015, p. 3036-3038; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/wepmn049.pdf>

[18] M. Tobiyama, J. Flanagan and A. Drago, "Bunch by Bunch Feedback Systems for SuperKEKB Rings", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, TUOM06, p. 144; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOM/TUOM06.pdf