

SuperKEKB Phase2 における超伝導空洞の運転状況

STATUS OF SUPERCONDUCTING ACCELERATING CAVITY AT SuperKEKB PHASE-2 OPERATION

西脇みちる^{#, A), B)}, 赤井和憲^{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), 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 SuperKEKB accelerator aims at 40 times the luminosity of the KEKB accelerator. The Phase-2 commissioning operation with Belle-II detector has been performed from March to July 17, 2018. In the electron ring, eight superconducting higher-order-modes (HOM) damped cavities (SCC) developed for KEKB are operating. The horizontal high pressure rinse (HHPR) system was developed to recover the degraded cavity performance. Performance of three cavities were successfully recovered. First and second recovered cavities have been operated in SuperKEKB stably. Third one is kept as a spare cavity. The HOM power excited in a SCC module will be twice higher than that of KEKB due to the design beam current of 2.6 A and become a load to the downstream SCC. The additional SiC dampers have been installed to a SCC module as a measure against the HOM power. We found that the load of the downstream SCC reduced by the SiC damper in the beam tests in Phase-2. Although the electrical breakdown of the piezo-actuators for the frequency tuner have been improved by adjustment of operating conditions, the problems still remain in Phase-2. We will maintain the performance of cavities and prepare for the higher beam current operation in the Phase-3.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、7 GeV の電子リング (High Energy Ring, HER) と 4 GeV の陽電子リング (Low Energy Ring, LER) からなる非対称衝突型円形加速器である[1]。8×10³⁵ /cm²/s という KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目標として、2016 年に最初のビームコミッショニング運転 (Phase-1)を実施した[2]。その後、Belle II 測定器のロールイン、ダンピングリング (DR) のコミッショニング運転を経て、2018 年 3 月から 7 月まで Phase-2 コミッショニング運転を実施した。4 月 26 日には Belle II により最初のビーム衝突イベントが確認され、本格的な衝突実験に向けた一歩を踏み出した[3-5]。

超伝導加速空洞 (SCC) は、KEKB 加速器に向けて開発された高調波減衰型空洞であり、HER に 8 台が導入されている。KEKB からの長期間の運転により性能劣化が認められる空洞もあるため、空洞性能回復の手段として横型高圧水洗浄法を開発した。3 台の空洞で性能回復に成功している。SuperKEKB ではルミノシティ向上のため低エミッタンス化とともにビーム電流は KEKB の 2 倍 (HER; 2.6 A, LER; 3.6 A) に設計されている[1]。SCC では、電流増加に伴う高調波モード (HOM) パワーの増大が課題となる。対策として SiC 製 HOM ダンパーを製作し、Phase-2 運転でビーム試験を実施した。また Phase-1 運転時に周波数チューナーであるピエゾアクチュエータの絶縁破壊が発生し、Phase-2 までに対策を施したが完全な解決には至っていない。今後も原因追求と対策が必要である。

2. SuperKEKB の超伝導加速空洞

Figure 1 に SuperKEKB の超伝導加速空洞 (SCC) の断面図を示す。SCC は、KEKB 加速器のために開発された 509 MHz の単セル高調波減衰型ニオブ空洞である[6-8]。空洞両側の Small Beam Pipe (SBP), Large Beam Pipe (LBP) の室温部にはそれぞれ、フェライト製 HOM ダンパー[9]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。SuperKEKB では、HER に 8 台の SCC が設置されており、8 台の常伝導加速空洞 (ARES) とともにビーム運転に用いられている。

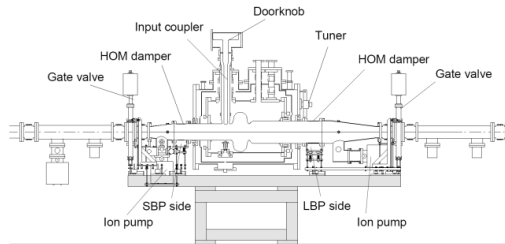


Figure 1: Cross-sectional drawing of the superconducting cavity module of KEKB. The cavity is made of niobium. Cavity shape parameters are as below: cell diameter of 526 mm, gap length of 243 mm, iris diameter of 220 mm, SBP diameter of 220 mm and LBP diameter of 300 mm. The cavity is equipped with a pair of ferrite HOM dampers at SBP and LBP.

[#]michiru.nishiwaki@kek.jp

Table 1 に SCC に関連する RF パラメータを示す。KEKB は最大蓄積電流である 1.4 A での実績値[8, 10]、SuperKEKB は設計電流である 2.6 A での計算値である。SuperKEKB における SCC の主な課題は、空洞性能の劣化と 2 倍に増加する HOM パワーである。性能劣化した空洞に対しては、横型高圧水洗浄 (HHPR) を施し、性能の回復に成功している。HOM 対策としては、SiC 製ダンパーの追加を検討し、Phase-2 運転前に試験機を導入した[11]。

Table 1: SCC-related Parameters in HER

Parameters	KEKB (operation)	SuperKEKB (design)
Energy [GeV]	8.0	7.0
Beam current [A]	1.4	2.6
Number of bunches	1585	2500
Bunch length [mm]	6	5
Total beam power* [MW]	~5	8.0
Total RF voltage* [MV]	15.0	15.8
Number of SC cavities	8	8
Beam power [kW/cavity]	400	400
RF voltage [MV/cavity]	1.5	1.5
HOM power [kW/cavity]	16	37

*Total of SCC and ARES cavities

3. Phase-2 での SCC 運転概況

Phase-2 運転に向けて、入力カプラのエージングを 2017 年 11 月に開始し、制御系、ハイパワー RF 系の調整を経て、2018 年 1 月から空洞を冷却し、2 月に空洞エージングを実施した。すべての空洞で SuperKEKB の設計空洞電圧である 1.5 MV を安定に保持することができた。

Phase-2 HER のビーム運転は、2018 年 3 月 20 日に開始され、7 月 17 日に終了した。HER の最高蓄積ビーム電流は 800 mA であった。ビーム電流がまだ低いと、必要とされる空洞電圧もまだ低く、Phase-2 では 1.35 MV が最高であった。

3.1 空洞性能

Phase-1 立ち上げ時に 1 台の空洞で真空トラブルが発生し性能が劣化していた[11]。この空洞は、Phase-1 終了後に予備機と交換した。その結果、Phase-2 立ち上げ時の性能試験では、各空洞の 1.5 MV における Q_0 値と到達空洞電圧 (クエンチやフィールドエミッションでリミットされる最大値 V_c .limit) は、8 台中 6 台で $Q_0 > 1E+9$ 、 V_c .limit > 2 MV であった。残る 2 台は、 $Q_0 \sim 6-8E+8 @ 1.5$ MV、 V_c .limit $\sim 1.9-2$ MV であり、ともに低下が見られるものの、Phase-2 での空洞電圧 1.35 MV では安定に運転することができた。

ビーム運転期間中は、2 週毎の保守日に空洞エージングを実施している。エージング時には、空洞に取りつけられている PIN ダイオードを用いた放射線センサーにより、空洞内でのフィールドエミッションの強度を観察し、継続的な空洞性能の監視を行っている。性能劣化を早期に検知でき、今後の空洞交換計画の判断材料にもなる。

性能低下が確認された 2 台のうち 1 台の空洞は、Phase-2 運転期間中にも $Q_0: 6E+8 \rightarrow 3E+8 @ 1.5$ MV、 V_c .limit: $1.98 \rightarrow 1.75$ MV と低下、フィールドエミッションの増加およびオンセット電圧の低下など、性能のさらなる劣化が見られた。原因として、空洞に隣接して設置された SiC 製ダンパーからのガスが空洞表面に吸着した可能性が考えられる。今後も注意深い監視が必要である。

3.2 トリップとその他の問題

SCC に関連するビームアポルトは、約 4 ヶ月の運転で合計 5 回であった。その中で空洞を原因とするものは、入力カプラの放電に起因する真空圧力上昇によるインターロック、1 回のみであった。保守日に実施する定期的なエージングによりトリップを抑制できていると考えられる。KEKB (ビーム電流 1.1 A) 当時[8]や Phase-1 でのトリップレート[11] (いずれも 0.1 回/日/8 空洞) と比較して、非常に安定な運転であった。

残る 4 回のビームアポルトは、温度計の断線や温度監視レコーダーの故障など周辺機器を原因とするものであった。予防策として、これまでも機器の点検や老朽化機器の交換を順次行っているが、今後も引き続き対策を進める。

Phase-1 で問題となった周波数チューナーであるピエゾアクチュエータの絶縁破壊[11]は、Phase-2 でも 1 本で発生した。また他の 7 本でも完全な破壊に至らない絶縁不良は起こっていた。Phase-1 後に運転条件の変更を実施したが完全な解決には至っておらず、今後も原因を追求する。詳細は 6 章で述べる。

4. 横型高圧水洗浄 (HHPR)

SCC は KEBB 加速器のために開発され、10 年以上にわたりビーム運転に用いられている。そのため、何台かの空洞ではフィールドエミッションを伴う Q_0 値の低下が見られている。この劣化は真空リークや入力カプラのガスケット交換などの真空作業時の表面汚染が原因と考えられる。現段階の劣化の程度は、運転条件の許容範囲内ではあるが、さらなる劣化はトリップの増加や冷凍機の負荷の増加にもつながる。今後の安定した長期運転のためには、空洞性能を回復することが必須である。

性能回復を目的として横型高圧水洗浄 (Horizontal High Pressure Rinse, HHPR) 法を確立し[12]、Phase-1 までに 2 台の空洞の性能回復に成功した[11]。2 台共すでに SuperKEKB リングにインストールされ Phase-1、Phase-2 で安定に運転している。3 台目として、真空トラブルにより性能劣化した空洞[11]に対し HHPR を実施した。Figure 2 に HHPR 前後の Q_0 値

を示す。これまでの2台同様、2 MVの Q_0 値が $1E+9$ 以上となり、性能回復に成功した。この空洞は、予備機として保管している。

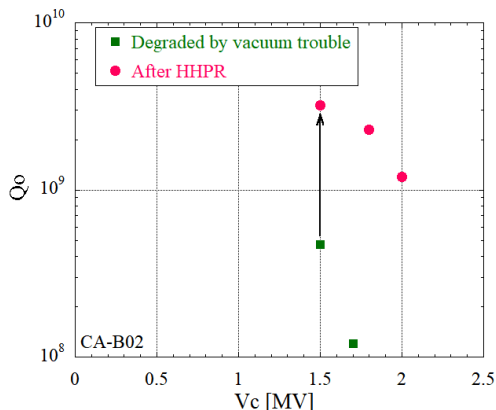


Figure 2: Q_0 measurement results of degraded cavities after HHPR. The Q_0 values of the cavity was recovered successfully. The cavity is kept as a spare.

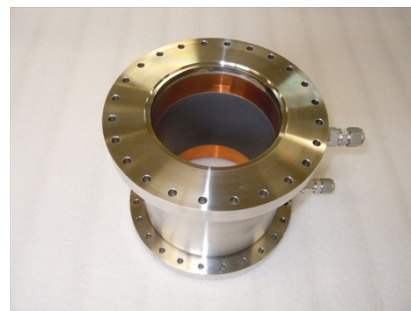
5. SiC 製 HOM ダンパー

SuperKEKB の設計運転条件においては、SCC モジュールで合計 37 kW 以上の HOM パワーが励起されると推測されている。そのうち 15 kW は LBP からビーム下流方向へ放出され、下流の空洞の負荷となると考えられる。対策として、LBP のゲートバルブ下流に新たに HOM ダンパーを設置することにより、下流へ放出されるパワーは 4 分の 1 程度に減少すると予測されている（ここまで CST Particle Studio: wakefield solver の計算による）[11, 13-14]。そこで、Fig. 3(a)に示す SiC 製プロトタイプダンパー2 台を製作し、ハイパワー試験によるパワー吸収性能の確認後、Fig. 3(b)に示す通り 1 台の空洞下流に設置し[11]、Phase-2 運転によるビーム試験を実施した。

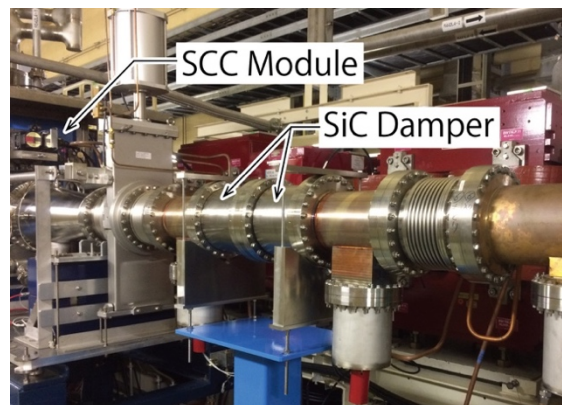
Figure 4 に Phase-1 (SiC ダンパー無し)、Phase-2 (SiC ダンパー有り)における各空洞の HOM 吸収パワーを示す。SBP, LBP のフェライトダンパーの合算値である。横軸の D10D, D10C などは空洞名である。ビーム運転条件は、Phase-1, Phase-2 でほぼ同じであり、蓄積電流は約 760 mA、バンチ電流は約 0.5 mA であった。バンチ長は 6-7 mm 程度と推測される。ビーム進行方向は、プロット左から右である。

Figure 4(a)では、全体的に Phase-1 が Phase-2 より 5%程度大きな吸収パワーを示している。これらの吸収パワーは、ダンパー冷却水温の上昇から算出しているため、温度や流量測定 of 誤差を含んでいる。吸収パワー算出には、一定時間の平均水温を使用した。Phase-2 では大電流ビームでの継続保持時間が最長 40 分程度と短かった。そのため、水温データ抽出開始までの電流保持時間は Phase-1 では 5.5 時間であったのに対し、Phase-2 では 15 分と短い。このため、Phase-1 と Phase-2 の間で吸収パワー評価に

システマティックな差が現れた可能性がある。以上を考慮して、Phase-2 の吸収パワーに補正係数 1.05 を掛けた補正值を Fig. 4(b)に示し議論する。



(a) Prototype of SiC damper



(b) SiC dampers installed downstream of one SCC

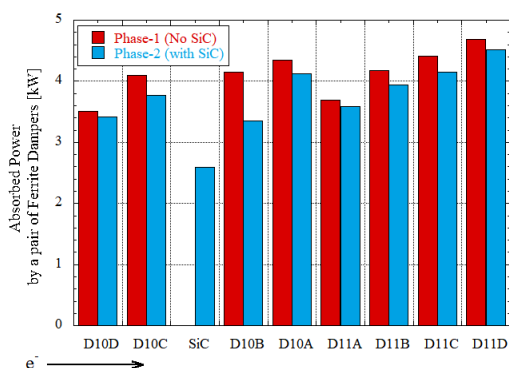
Figure 3: Prototype of SiC dampers. The length of SiC of a damper is 120 mm. A pair of dampers was installed downstream of one SCC module. Total SiC length is 240 mm.

Phase-1, Phase-2 とともに、ビーム下流へ向かって吸収パワーが増加している。計算による予測通り、上流の空洞から放出されるパワーが下流空洞の負荷となっていることを示している。一方 D11A のパワーは上流の D10A より減少し最上流の D10D と同等である。実際の SCC のレイアウトは、D10A と D11A の間が約 60 m 離れている（他の空洞間は 5.7 m）ため、D10A から放出されたパワーが減衰したと思われる。

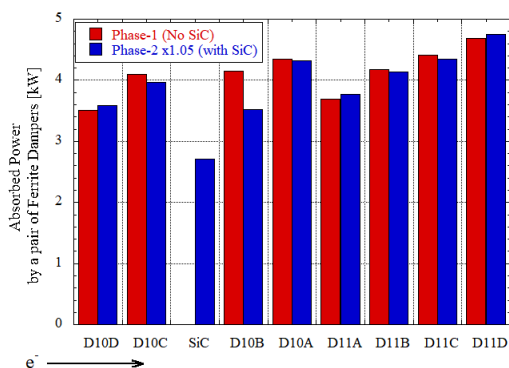
Phase-2 では、SiC ダンパー下流にあたる D10B の吸収パワーは Phase-1 と比較して 2 割程度減少している。SiC ダンパーが D10C からの放出パワーを吸収した効果と考えられる。すなわち、SiC ダンパーにより上流の空洞から放出されるパワーが吸収され、下流の空洞の負荷を低減できることが実証された。今後、ビーム電流増強に備え、SiC ダンパーの製作・設置を進める。

Figure 4 で示した吸収パワーの値は、CST による計算と傾向はよく合っている。ただし SiC ダンパーでの吸収パワーは計算値が測定値の 2 倍程度大きい

ため、ロスファクターの再検証など、大電流運転にむけて HOM パワーの再評価を実施する。



(a) Absorbed HOM power



(b) Corrected absorbed HOM power

Figure 4: Absorbed HOM power by a pair of ferrite dampers of each cavity. (a),(b) Red: Phase-1 (No SiC damper), (a)Light blue: Phase-2 (with SiC damper), (b)Blue: Phase-2 with correction factor (1.05). D10D, D10C and etc on horizontal axis are the cavity name. The beam operation conditions were almost same, the current was around 760 mA. The beam direction is from left to right of the plot. The HOM power of D10B was remarkably decreased by the SiC damper at downstream of D10C in Phase-2.

一方、SiC ダンパーを設置した D10C 空洞では、 Q_c 値の低下、 V_c limit の低下、低い空洞電圧でのフィールドエミッションなどがみられ、空洞性能の劣化が確認されている。SiC からの放出ガスが空洞表面に吸着したことが劣化の原因の一つと考えられる。SiC ダンパーは、ビームライン設置前にプリベーキングを実施しているが、今後は設置後にも再度ベーキングを実施するなど、空洞への影響を低減する必要がある。

6. ピエゾアクチュエータの絶縁破壊

ピエゾアクチュエータは周波数チューナーとして使用している。KEKB で使用していた機種種の製造中止に伴い、SuperKEKB 立ち上げ時にメーカー、機種を変更した。しかし Phase-1 運転中に新しいピエゾアクチュエータの絶縁破壊が頻繁におこり、計 6 本

が故障した。このピエゾアクチュエータは KEKB で使用していたものと比較して速い電圧変化に弱いことが判明した[11]。そこで、Phase-1 後に速い電圧変化に対する耐久試験を実施した。Table 2 に耐久試験の条件と結果を示す。試験では制御系の Low Pass Filter (LPF) の時定数と印加電圧をパラメータとした。LPF の時定数を 20, 100, 200 ms、最大印加電圧を 560, 800 V、電圧印加の On/Off を 1 サイクルとして 1000, 10000 サイクル実施し、ピエゾアクチュエータの漏れ電流を観察した。試験の結果、LPF の時定数 20 ms、印加電圧 800 V では 130 mA の漏れ電流が観測された。この条件は、ピエゾアクチュエータの許容電圧変化速度の上限を超えており、またピエゾドライバの電流上限値も上回っているため、条件として適さない。一方、LPF の時定数 200 ms、最大電圧 560 V の組み合わせでは 10000 サイクルの試験でも漏れ電流は 11 mA と非常に安定であった。空洞で使用中のピエゾアクチュエータでは、速い電圧変化は RF On/Off 時に起こる。1000 サイクルの電圧 On/Off は、KEKB 運転での 10 年分の RF On/Off 回数に相当する。SuperKEKB では大電流化に伴い運転中の RF On/Off の頻度が増加すると仮定しても、10000 サイクルの試験は十分な回数と言える。この結果から、すべての空洞に対して LPF の時定数 200 ms、最大印加電圧 560 V を設定し、Phase-2 運転を実施した。

Table 2: Endurance Test of Piezo Actuator

Time constant of LPF [ms]	Voltage [V]	Cycles (On/Off)	Leak Current [mA]
20	800	1000	±130
100	800	1000	±36
200	800	1000	±19
200	560	1000	±15
200	800	12000	±69
200	560	10000	±11

しかし、運転開始から 3 ヶ月経過後に 8 本中 1 本で絶縁破壊が発生した。調査の結果、運転時間の経過とともにピエゾアクチュエータ内の漏れ電流が増加し、徐々に絶縁不良が進んでいたことが分かった。残る 7 本も完全な破壊は免れたものの同様に漏れ電流の増加が見られ、絶縁不良が進んでいたことも確認された。実際のビーム運転中は、RF Off を伴わないビームアポート時にも、位相の速い変化に追従するため、速い電圧変化が起こっていた。まだ初期のコミッショニング中であるためビームアポートの頻度は高く、Phase-2 の 4 ヶ月の運転でも 1300 回に達していた。このため、今後の運転では年間 4000 サイクル程度を想定して準備する必要がある。

また、絶縁不良の進行速度は、ピエゾアクチュエータへの鉛シールドの有無にも依存していることがわかった。偏向電磁石に近い空洞 4 台では、放射

線対策としてピエゾアクチュエータに鉛シールドを設置していた。しかし、残り 4 台の空洞では鉛シールドはなく、絶縁不良の進行も速かった。完全に破壊された 1 本にも鉛シールドは設置されていなかった。以上から、原因として放射線による絶縁部分の損傷が疑われる。運転時間の経過とともに漏れ電流が増加していることも傍証としてあげられる。この他にも湿度やピエゾ素子内の不純物によるダメージなども原因として考えられるため、現段階では放射線による損傷が原因であると断定はできないが、Phase-3 の運転に向けた対策として放射線シールドの強化を実施する。さらに試験と検証を重ね、絶縁破壊の原因追求し対策を検討する必要がある。

7. まとめ

SuperKEKB の Phase-2 ビームコミッショニングが 2018 年 3 月から 7 月まで実施された。4 月 26 日には Belle II により最初のビーム衝突イベントが確認され、順調に衝突実験を進めた。SCC は 8 台が HER に設置され、安定に空洞性能を発揮した。SuperKEKB における SCC の課題として、長期運転による空洞性能の劣化、大電流ビーム運転での HOM パワーが挙げられる。空洞性能回復には独自に開発した HHPR が有効であり、劣化した空洞に順次適用している。また、定期的なエージングと継続的な性能の把握により今後の長期運転に備える。HOM 対策として、SiC 製 HOM ダンパーの試験機を 1 台の空洞に設置し、ビーム運転で試験した。予測通り下流の空洞の負荷が減少し、SiC ダンパーの有効性が実証された。今後、順次製作・設置を進める。一方で SiC ダンパーからのガス放出が空洞の性能劣化の原因となる可能性も認められたため、今後は設置後にもベークするなどの対策を施す。Phase-1 運転時に発生したピエゾアクチュエータの絶縁破壊問題は、運転条件の最適化だけでは絶縁不良を防止できず、他にも原因があることが明らかとなった。原因として放射線による損傷が疑われる。今後も原因追求と対策を進める。

Phase-3 ビームコミッショニングは、2019 年初めの運転開始を予定している。ビーム電流増強に備え、空洞の性能維持と周辺機器の準備を進める。

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.
- [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] T. Furuya *et al.*, "Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [7] S. Mitsunobu *et al.*, "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 735.
- [8] Y. Morita *et al.*, "Status of KEKB Superconducting Cavities and Study for Future SuperKEKB", Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, 2009, p.236-238.
- [9] T. Tajima, "Development of Higher-Order-Mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities", KEK Report 2000-10 (2000).
- [10] Y. Morita *et al.*, "KEKB Superconducting Accelerating Cavities and Beam Studies for Super-KEKB", Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010, p.1536-1538.
- [11] 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.
- [12] Y. Morita *et al.*, "Developments of Horizontal High Pressure Rinsing for SuperKEKB SRF Cavities", Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p.443-447.
- [13] M. Nishiwaki *et al.*, "Developments of HOM Dampers for SuperKEKB Superconducting Cavity", Proc. of SRF2013, Paris, France, 2013, p.1058-1060.
- [14] M. Nishiwaki *et al.*, "Developments of SiC Damper for SuperKEKB Superconducting Cavity", Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p.1289-1292.