

SuperKEKB における超伝導空洞の運転状況と SiC ダンパーの開発

STATUS OF SUPERCONDUCTING ACCELERATING CAVITY AND DEVELOPMENT OF SiC DAMPER FOR SuperKEKB

西脇みちる[#], 赤井和憲, 可部農志, 古屋貴章, 光延信二, 森田欣之

Michiru Nishiwaki[#], Kazunori Akai, Atsushi Kabe, Takaaki Furuya, Shinji Mitsunobu, Yoshiyuki Morita
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The commissioning operation of SuperKEKB (Phase-1) was performed from February to the end of June 2016. The commissioning has been successfully done with the achievement of beam currents of 870 mA in an electron ring and 1010 mA in a positron ring. In the electron ring, eight superconducting accelerating cavities (SCC) are operating. SRF system including cryogenics which were operated in KEKB are re-used for SuperKEKB. The two degraded cavities recovered their performance by horizontal high pressure rinsing in a period of upgrade for SuperKEKB from July 2010. Before commissioning operation, input coupler aging at room temperature were done in Nov. 2015 and the cavities were cool down in Feb. 2016 for the first time in five years. During commissioning operation for four months, the SCC systems were operated stably. Although renewed piezo actuators of the frequency tuners broke several times, the number of beam aborts caused by SCC was only nine.

We are planning to install the additional SiC dampers to downstream of SCC modules as a measure against HOM power more than twice the power of KEKB due to a design beam current of 2.6 A. The first set of SiC dampers will be tested in Phase-2 beam commissioning operation. In this report, operation status of SCC in Phase-1 and development of SiC damper will be presented.

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り、前身である KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティ 8×10^{35} /cm²/s を目標としている。2010 年からのアップグレード作業を終え、最初のビームコミッショニング運転 (Phase-1) が 2016 年 2 月から 6 月末まで実施され、無事に終了した[1][2]。コミッショニングは順調に進み、蓄積電流は HER で 870 mA、LER で 1010 mA を達成した。超伝導加速空洞(SCC)は、HER に 8 台が導入されており、冷凍機システムを含め、KEKB で使用されたシステムの再利用であるが、大きな問題はなく、安定して運転できた。

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[3]。SCC では、電流増加にともなう高調波モード(HOM)パワーの増大が最も大きな課題となる。また、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、今後の安定した運転を実現するためには空洞性能の回復も必須となる。

2. SuperKEKB の超伝導加速空洞の概要

SuperKEKB の超伝導加速空洞 (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空洞である[4][5][6]。Figure 1 に断面図を示す。直径 526 mm のニオブ製セルの両側に直径 220 mm の大口径アイリスを持ち、ビームパイプ径は 220 mm (SBP)、300 mm (LBP)である。SBP、LBP それぞれの室温部には、

フェライト製 HOM ダンパー、ビームパイプ径 150 mm へのテーパーパイプ、イオンポンプ、ゲートバルブを備えている。空洞への RF 電力の入力結合器は同軸アンテナ型である。SuperKEKB では、8 台の SCC が 8 台の常伝導加速空洞 (ARES) とともに HER に設置されている。

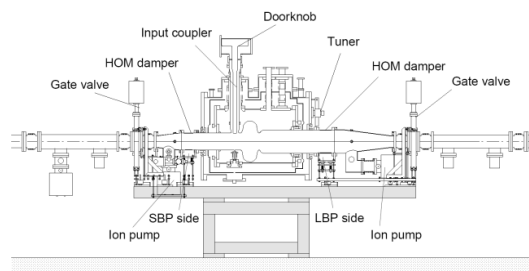


Figure 1: Cross-sectional drawing of the superconducting cavity module of KEKB.

Table 1 に HER の SCC に関する RF パラメータを示す。KEKB は最大電流である 1.4 A 時の実績値、SuperKEKB は設計電流である 2.6 A での計算値である。電流増強により全ビームパワーは 1.5 倍に増加するが、ARES との分担により SCC 1 台あたりのビームパワーは KEKB と同程度に保つことができる。RF 電圧も同様である。一方、HOM パワーは 2 倍以上に増加し、既存のフェライト製ダンパーでは対応できないことが予測される。そこで我々は、CST Particle Studio を用いた新しい計算法を用い、HOM 負荷を検証し、新たに SiC 製ダンパーを追加することとした。また、何台かの空洞では、空洞性能の劣化が見られる。今後の SuperKEKB での長期にわた

[#] michiru.nishiwaki@kek.jp

る安定した運転のためには、性能の回復が課題となる。

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

3. 横型高圧水洗浄による空洞性能回復

KEKB での長期間の運転を経て、何台かの空洞では空洞電圧 2 MV においてフィールドエミッションを伴う Q_0 値の低下が見られた。この空洞性能の劣化は、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汚染が原因と考えられる。SuperKEKB のデザインでは、空洞電圧の設定値は 1.5 MV であるため、現段階の空洞性能劣化の程度は許容範囲内である。しかし、さらに劣化が進めば、冷凍機の負荷にもつながり、安定して運転できなくなる可能性もある。このため、空洞性能回復は今後の安定的かつ長期の運転には必須である。

そこで、我々は、新たに空洞の横型高圧水洗浄法 (HHPR) を確立した [7]。超伝導空洞の表面洗浄方法と

して一般的である高圧水洗浄 (HPR) をクライオモジュールに組み込んだままの劣化した空洞に適応したもので、クライオモジュールの分解・再組み立て工程を排除できるため、リスクを減らすことができる。HHPR の模式図を Figure 2 に、パラメータを Table 2 に示す。

この HHPR を性能が劣化した 2 台の空洞に実施した。HHPR 前後の Q_0 値を Figure 3 に示す。いずれの空洞も、2 MV の Q_0 値が 1×10^9 以上となり、性能が回復したことが確認できた。このうち 1 台の空洞は、Phase-1 で運転に用い、安定に性能を發揮した。また、もう 1 台は Phase-2 から運転に用いるため、後述の圧力トラブルが発生した空洞と交換し、すでにトンネル内に設置した。

Table 2: HHPR Parameters

Water pressure	7 MPa
Nozzle	Martensitic stainless steel, φ0.54 mm in dia., 6 holes
Driving speed	1 mm/sec.
Rotation speed	6 degrees/sec.
Rinsing time	15 min.

4. 空洞立ち上げと Phase-1 での運転状況

前述の通り、SCC モジュールは、KEKB のために開発され、1998 年から 2000 年にかけて設置され、2010 年まで 10 年にわたり運転を続けてきた。Phase-1 立ち上げ前には、真空計やイオンポンプのコントローラなど周辺機器のメンテナンスを実施した。また、周波数チューナーは、ステッピングモーター、ピエゾアクチュエータともに製造中止となっていたため、それぞれのドライバーも合わせて更新した。制御関連機器の更新や調整も実施した [8]。

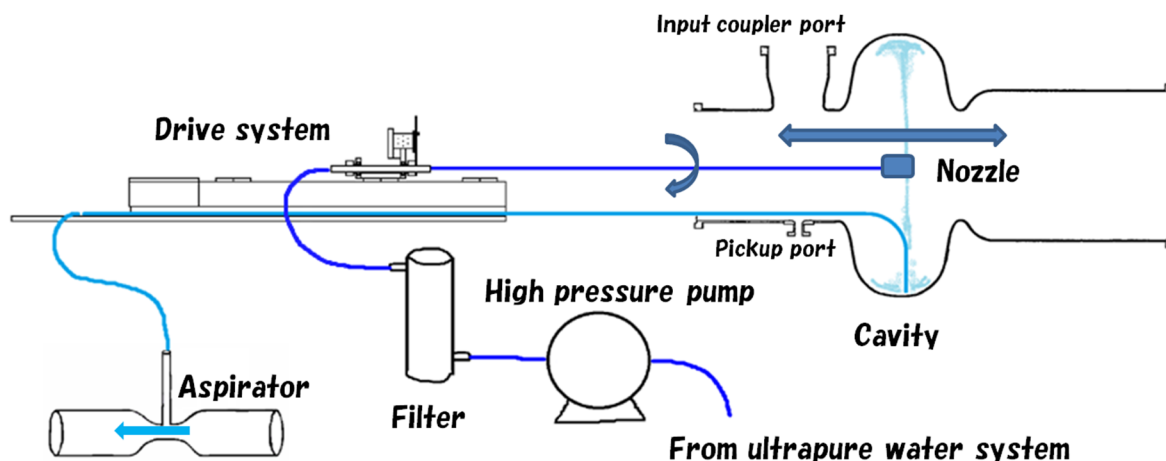


Figure 2: Schematic view of Horizontal HPR system.

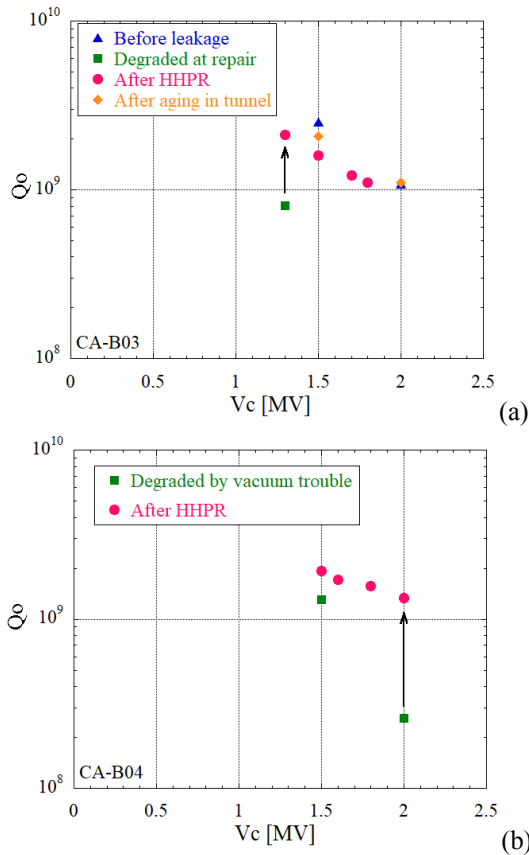


Figure 3: Q_0 measurement results of degraded cavities after HHPR. (a) CA-B03 was degraded at repair work. (b) CA-B04 was degraded by vacuum trouble. The Q_0 values of both cavities were recovered successfully. CA-B03 is operating in Phase-1.

入力カップラの常温エージングは 2015 年 11 月から開始した。1 台の空洞で操作ミスが原因と思われる圧力上昇が発生するトラブルがあったが、大気リークは見つからなかったため、そのままエージングを継続した。2016 年 2 月に空洞を冷却し、空洞エージングを行った。HHPR 後に横測定を実施した 2 空洞を除いて、2010 年の運転停止から約 5 年半ぶりの冷却であったが、ヘリウムリークなどの大きなトラブルはなく、無事に冷却を完了できた。空洞エージングでは、上述の圧力トラブルが発生した空洞と以前から性能劣化があった空洞を除いて、8 台中 6 台の空洞で 2 MV の空洞電圧に到達した。運転電圧である 1.5 MV は、すべての空洞で安定に保持することができた。運転停止中の準備が功を奏したのはもちろんだが、空洞やクライオモジュールには東日本大震災による大きな被害がなかったことは非常に幸運だった。

Phase-1 のビームコミッショニングは LER から開始され、HER は 2016 年 2 月 26 日から RF 加速を行い、順調にビーム蓄積に成功した。SCC は、コミッショニング開始時には、電力節約のため、8 台中 4 台の空洞を停止 (detune) させていた。Phase-1 の後期には電流増加に伴い、全空洞を運転に投入した。

Phase-1 運転中、空洞そのものを原因とするビームア

ポートは 8 台の空洞で合計 9 回 (クエンチ 5 回、放電 4 回) であった。KEKB (ビーム電流 1.1 A) 当時のトリップレート (0.1 回 / 日 / 8 空洞) [6] と同程度であり、全体としては安定な運転であった。また、これらのトリップは、保守日に実施する定期的なエージングで抑制することができる。一方、更新した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。新しいピエゾアクチュエータは、RF On/Off 時に電極間に約 100 mA の電流が観測され、KEKB で使用していた物と比較して速い電圧変化に弱いことがわかった。この速い電圧変化を避けるため、制御系で使用している Low Pass Filter (LPF) の時定数を長くする、ドライバーの出力電圧を制限するなどの対策を実施し、効果が得られている。絶縁破壊の根本的な原因は、湿気や不純物によるダメージ、あるいは機械的な衝撃によりピエゾ素子の電極間に起電力がそのまま帯電することによるダメージなどが考えられる。現在、運転時と同様の速い電圧変化による破壊試験を実施中である。

5. SiC 製 HOM ダンパーの開発

Figure 4 にフェライト製 HOM ダンパーを示す。KEKB-SCC のため開発されたダンパーで、フェライトは銅パイプ内表面に HIP 処理にて焼結され、厚みは 4 mm である [9]。一対のフェライト製ダンパーが空洞の上・下流の室温部の SBP、LBP に設置されている。Table 1 で示した通り、KEKB 運転 (1.4 A、1400 バンチ、バンチ長 6 mm) 時には、一対で最大 16 kW の HOM パワーを吸収した。



Figure 4: A KEKB type LBP damper with 4-mm thickness of ferrite, $\phi 300$ mm, length of 150 mm.

SuperKEKB の電流増強に備え、HOM 負荷の分布をより詳細に評価するために、CST Particle Studio: wakefield solver を用いた新しい計算法を確立した [10]。Figure 5 に示すように、ダンパー表面やビームパイプ端部のポインティングベクトルをモニターし、面積および時間積分することで、ダンパーに吸収、あるいはパイプを通り抜けるエネルギーを見積もった。この方法で得られた空洞内の貯蔵エネルギーを含む全エネルギーは、ロスファクターから計算されたエネルギーとよく一致している。Table 3 に各部のエネルギーの比から得た、等価ロスファクターと HOM 負荷の計算値を示す。ビーム条件は、2.6 A、2500 バンチ、バンチ長 5 mm である。ビームパイプ端部 (Inlet, Outlet ポート) から放出されるパワーは、隣接す

る空洞のフェライトダンパーの負荷になることを考慮し、Inlet, Outlet, SBP, LBP damper の負荷の合計を評価する。この結果から、既存の SCC モジュールでは、合計 37 kW 以上の HOM パワーとなり、特に Outlet ポートから下流へ放出されるパワーが 15 kW と大きいことが明らかとなった。

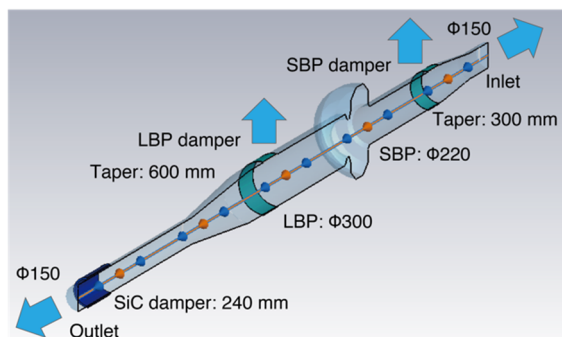


Figure 5: Calculation model of the SCC module. Bunched beam comes from inlet port. Monitors of pointing vector are set at SBP and LBP ferrite dampers, additional SiC damper and both ends of beam pipes (inlet and outlet port).

Table 3: Summary of Equivalent Loss Factors (Eq.LF) and HOM Loads at 2.6-A Beam Operation

Part	SCC module		With 240-mm SiC	
	Eq.LF [V/pC]	HOM Load [kW]	Eq.LF [V/pC]	HOM Load [kW]
Inlet	0.05	1.3	0.05	1.4
Outlet	0.58	15.7	0.15	4.0
SBP damper	0.32	8.6	0.35	9.5
LBP damper	0.43	11.7	0.47	12.8
Total	1.38	37.4	1.02	27.7
SiC damper	-	-	0.97	26.1

対策として、Outlet ポートのゲートバルブ下流に SiC 製の HOM ダンパーの追加を検討し、同じ計算法で評価した。SiC 製ダンパーは、以前より KEK で研究され KEKB-ARES[11]や KEKB-Crab 空洞[12]などで実用化されており、技術が確立されている。装置に依存して形は様々だが、我々は円筒型の SiC ダンパーを検討した。Figure 6 に SiC ダンパーの等価ロスファクターと下流への放出パワーの SiC の長さ依存性を示す。SiC が長いほど放出パワーは減少する結果が得られた。我々の冷却能力の観点から SiC での負荷を 30 kW (ロスファクター 1.1) 以下にする必要があるため、240 mm とした。Table 3 に示したように、240 mm の SiC 追加によって、下流への放出パワーは 4 kW、合計パワーは 28 kW 以下に減少し、SiC ダンパーの追加が効果的であるという結果が得られた。

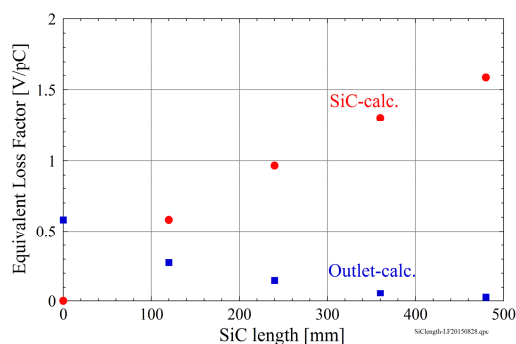


Figure 6: Equivalent loss factors of SiC damper (red) and the emitted out to the next cavity (blue). The length of 240 mm is suitable for the practical condition.

SCC モジュール全体のロスファクターを下げて HOM 負荷を減少させることを目的として、テーパを緩やかにして Inlet, Outlet ポートのビームパイプ径を 150 mm から 200 mm に変更したモデルも同様に検討した。結果を Table 4 に示す。推定通りロスファクターは下がり、全体の HOM パワーは 31 kW 以下まで減少する結果が得られたが、SiC 追加の場合より 10%大きい。また、ビームパイプを大口径にする場合には、空洞内表面を大気曝露する必要があり、空洞を汚染し性能劣化させるリスクが大きい。さらに、空洞間の既存のビームパイプや 4 極電磁石のボア径を 200 mm タイプに変更する必要があり、周辺への影響が大きい。一方、SiC ダンパーは、空洞のゲートバルブの外側に追加可能であり、空洞内を汚染するリスクがなく、周辺への影響も小さい。以上を考慮して、HOM 対策として SiC 製ダンパーを追加する方法を採用した。

Table 4: Summary of Eq.LF and HOM Loads at 2.6-A Beam Operation in Large Beam Pipe Model

Part	Beam pipe of 200 mm dia.	
	Eq.LF [V/pC]	HOM Load [kW]
Inlet	0.06	1.7
Outlet	0.25	6.7
SBP damper	0.37	9.9
LBP damper	0.46	12.3
Total	1.14	30.7

実際の冷却条件を考慮し、120 mm の SiC ダンパー 2 台を組み合わせて設置することとした。材料試験として長さ 120 mm のテストダンパーを製作し、ハイパワー試験を実施した。その結果、12 kW の吸収パワーを達成し、また加速器運転を模した繰り返し試験でも安定してパワーを吸収できた。

この結果をもとに、Figure 7 に示す SiC プロトタイプダンパー 2 台を製作した。SiC の長さ 120 mm、厚さ 10 mm、内径 150 mm、ダクト全長 220 mm である。外周は、ジャケットタイプの冷却水チャンネルがあり、チラーにより水冷される。このプロトタイプダンパーのハイパワー試験を実施

した。15 L/min.で冷却した際の吸収パワーの結果を Figure 8 に示す。いずれのダンパーも 18 kW の吸収パワーを達成した。つまり、1 組の SiC ダンパーで計算値の 1.3 倍のパワーを吸収可能であり、十分なマージンがあるといえる。18 kW 吸収時の SiC 表面温度は最高で 80°C であった。ハイパワー試験後の顕微鏡による内表面観察では、クラック等は発見されなかった。

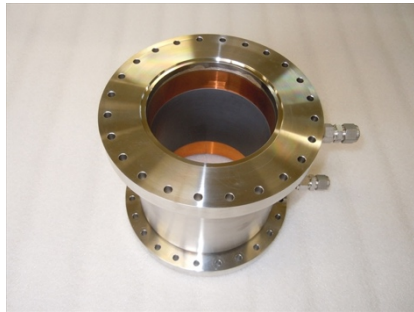


Figure 7: Prototype of SiC damper. The length of SiC is 120 mm. Two dampers will be installed to one SCC module.

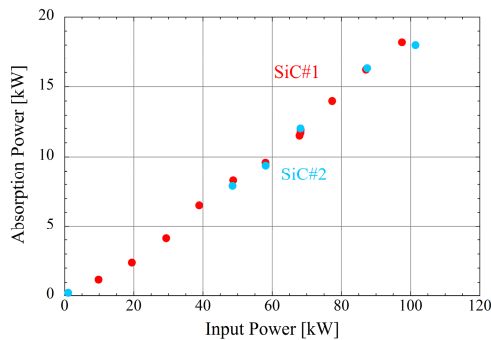


Figure 8: High power RF test results of the prototype of SiC dampers. The absorption powers of 18 kW were achieved by both dampers under the water flow rate of 15 L/min.

実用に向けた試験として、プロトタイプダンパー2 台を組み合わせ、SCC 下流に設置し、2018 年 1 月からの Phase-2 運転にてビーム試験を実施する。Figure 9 にトンネル内に設置した SiC ダンパーを示す。ビーム試験により計算手法と SiC ダンパーの効果を検証する。

6. まとめ

SuperKEKB の Phase-1 ビームコミッショニングが 2016 年 2 月から 6 月末まで実施され、目標の蓄積電流をほぼ達成し、順調に運転を終えた。HER に設置されている SCC 8 台は、KEKB からの再利用であり、性能が劣化した空洞の HHPR による性能回復、周波数チューナーの更新、老朽化機器のメンテナンスなどを経て Phase-1 に臨んだ。立ち上げは概ね順調であり、すべての空洞が運転電圧である 1.5 MV を安定に保持できた。Phase-1 では、チューナーであるピエゾアクチュエータに絶縁破壊

が発生し、ビームアボートの原因となったが、空洞そのものには大きな問題はなく安定に運転できており、放電やクエンチによるトリップレートも KEKB 運転当時と同等であった。今後の電流増強に備え、HOM パワー対策として新たに SiC ダンパーを開発した。1 セットを SCC 下流に設置し、Phase-2 運転にてビーム試験を実施する。

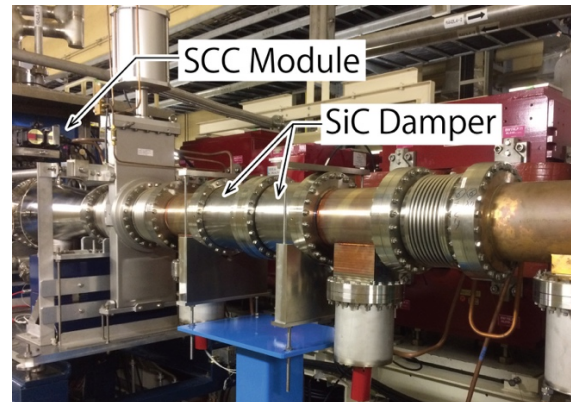


Figure 9: Two SiC dampers with beam ducts installed downstream of one SCC module. Total SiC length is 240 mm.

参考文献

- [1] H. Koiso, "Commissioning Status of High Luminosity Collider Rings for SuperKEKB", Proc. of IPAC17, 2017, pp. 1275-1280.
- [2] Y. Funakoshi, "SuperKEKB Phase 1 Beam Commissioning", Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 24-28.
- [3] Preliminary version of Technical Design Report of SuperKEKB; <https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>
- [4] T. Furuya *et al.*, "Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factory", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [5] S. Mitsunobu *et al.*, "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity", Proc. of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 735.
- [6] Y. Morita *et al.*, "Status of KEKB Superconducting Cavities and Study for Future SuperKEKB", Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, 2009, p.236-238.
- [7] Y. Morita *et al.*, "Developments of Horizontal High Pressure Rinsing for SuperKEKB SRF Cavities", Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p.443-447.
- [8] T. Kobayashi *et al.*, "Operation Status of LLRF Control System for SuperKEKB Commissioning", Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, p.836-840.
- [9] T. Tajima, "Development of Higher-Order-Mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities", KEK Report 2000-10 (2000).
- [10] M. Nishiwaki, "Developments of SiC Damper for SuperKEKB Superconducting Cavity", Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p.1289-1292.
- [11] T. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A006.
- [12] Y. Morita *et al.*, "HOM Dampers for KEKB Crab Cavity", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010, p.537-540.