

SKEKB 加速器 LS1 中における大電力高周波源の状況

CURRENT STATUS OF THE HIGH POWER RF SYSTEM FOR SKEKB MR IN LS1

渡邊謙 #, 吉田正人, 吉本伸一, 丸塚勝美, 池野孝

Ken Watanabe #, Masato Yoshida, Shin-ichi Yoshimoto, Katsumi Marutsuka, Takashi Ikeno

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The high power rf system installed in the power supply buildings has the role of supplying RF power to the ARES cavities and the superconducting rf cavities to operate the SuperKEKB accelerator. This report will report on the current status of high power rf system and renewal of aging components during the period up to LS1 from July 2022.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器主リング (MR) および陽電子用ダンプリングリング (DR) 地上部にある大電源棟に設置される大電力高周波源は、地下トンネルに配置された常伝導型 ARES 空洞、単セル型超伝導加速空洞および DR 空洞へ RF パワーを供給する役割を持つ[1]。2019 年初旬から Phase3 という位置づけで物理実験のための運転が開始され、本格的な営業運転モードとなった[2]。その後、2022 年 6 月まで約 3 年にわたり通常運転が行われた[3]。2022 年 7 月からは加速器および Belle-II 検出器の改造を行うため、2023 年 12 月まで続くロングシャットダウン期間 (LS1) が設けられた。本報告では、この LS1 中の状況についてまとめる。

2. LS1 中の状況

LS1 期間中においては、入力カプラの交換を行った ARES 空洞 (D8-C、D8-D) および予備空洞と入れ替えた D5-A (ARES 空洞) の 3 ステーションに対し、大電力試験のための計 3 週間の運転を行った。この運転では保守後、10 年を経過した制御モジュールの動作不良などいくつかの軽故障が発生した。これらは予備モジュールと交換するなどの対応で対処した。

各種冷却系においては、特にクライストロン冷却系で使用される空冷塔 (AFC) の老朽化が進んでおり、その対応として、その補修作業を急ピッチで実施している。

立体回路周りでは、大電力用ウォーターロードの保守を中心に作業を実施している。SuperKEKB 加速器建設時に製造・修繕した各種大電力用ウォーターロードも、運用開始からすでに 10 年を経過した。損耗状況を経過観察しながら長寿命化に向けた開発を継続している。

2.1 クライストロンおよびクライストロン電源

LS1 中にクライストロンに対して実施した作業は、定期保守のみである。前述の大電力試験など必要に応じてクライストロンを運転しているが、クライストロン本体に対して特に問題は発生しておらず、現状を維持している。

一方、クライストロン電源は LS1 中の 2022 年夏季と 2023 年夏季の 2 期に分けて、富士地区を中心に定期保守を実施している。他にも老朽化対策の一環として AC

6.6 kV を受電する受電盤内の VCB の更新も適宜進めている。対象はテストステーションを除く 15 台であり、2020~2022 年度の間に合計 9 台の更新が完了した。今後も継続して更新を進める。次いで、設置から 20 年を経過したクライストロン電源制御用 PLC の更新も本格的に開始した。2023 年度は PLC の調達に充て、2024 年度から順次更新を進めていく計画である。

2.2 立体回路

立体回路周りでは、大電力用ウォーターロード (連続波 1.2 MW 仕様、 $f_0=508.9$ MHz) の保守を中心に実施している。SuperKEKB 加速器 MR のリング RF で使用するウォーターロードは 2 種あり、30 ステーションすべてに設置される[4, 5]。Figure 1 にウォーターロードの高周波窓周辺の断面構造を示す。導波管の規格は WR-1500 である。想定される運用に対し、十分な吸収特性とウォーターロードを含む冷却系全体の寿命を考慮し、純水に市水を混ぜた混合水を吸収体として使用している。水質は導電率で管理し、5~20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で運用している。ウォーターロード設計に際し、U タイプシールを用いた水に対するシール、アルミ製導波管とステンレス製水タンクの接触面で機能させる RF に対するシールド機能を両立させることが求められる。

直近の状況として、D5-A で使用される円筒導波管型ウォーターロードで発生した事例を報告する。このロードは、2022ab の運転までに高周波窓接続フランジから冷



Figure 1: Cross section of water load around RF window.

却水の微少リークが発見され、また同箇所からの電波漏洩の増大が検出された。2023 年 5 月にその原因調査の

kenw@post.kek.jp

ためのロードの分解作業を実施したところ、アルミ導波管の接触面に沿った形で高周波窓の割れが発見された。一方でこの高周波窓と U タイツシールとの接触面においては、ごく一部にシール面を跨ぐようなクラックが検出されたが、状況から割れの起点ではないと判断した。また、ヘリコ溝内には、溝加工に起因したシール面を跨ぐわずかな段差が検出された。微少リークの主要因としてヘリコ溝の加工の問題と推測している。この冷却水のリークにより、RFシールドとして機能させていたアルミ製導波管が腐食した(水酸化アルミとなる)。アルミ部分が導体から誘電体へ変質したことで、電磁波に対する遮蔽効果が弱くなったと判断している。本機に対しては、高周波窓の交換と新たな仕様の U タイツシールを採用することを計画している。Figure 2 および Fig. 3 に分解後の高周波窓、導波管および水タンクの様子を示す。

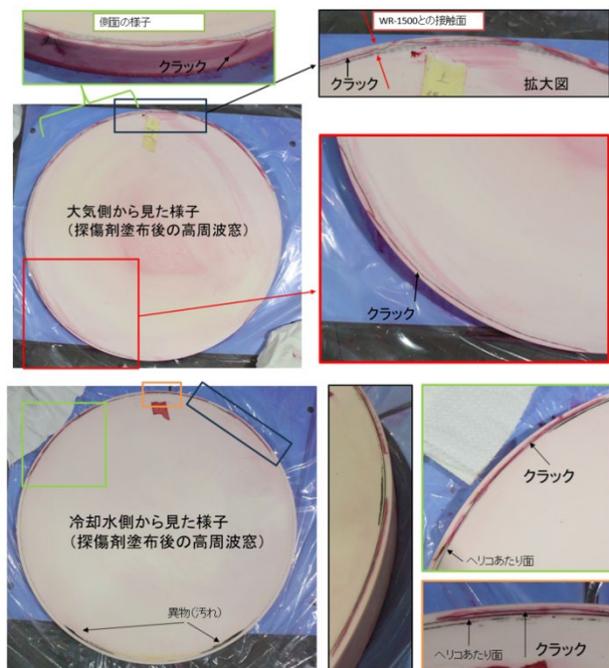


Figure 2: RF window after disassembly of D5-A.

2.3 円筒型ウォーターロードの運用および開発状況

円筒導波管型ウォーターロードは、KEKB 建設当初 1998 年に開発された矩形導波管型ウォーターロードの後継機に相当するものである。開発の経緯に高周波窓周辺の発熱の抑制と小型化が挙げられ、KEKB の運転終了後の 2010 年から開発がスタートし、2012 年 3 月に試作機が完成した。2013 年 3 月に 3 台、その後 2014 年 3 月までに 8 台の計 12 台を製作した。これらのロードは大徳地区 (D4、D5) に設置される大電力高周波源に全数が組み込まれ SuperKEKB 加速器の運転に用いられている。Table 1 に円筒型ウォーターロードの運用と開発履歴をまとめる。試作機および初期ロードの 3 台を含む計 4 台に対し、最大入力 1 MW の大電力試験を実施し、製作後に行う受入れ試験では、高周波窓周辺の発熱が抑えられ、RF シールドの機能が仕様を満たすことを確認している。しかしながら、開発当初の設計方針では、KEKB を超える運転期間が想定される SuperKEKB 加

速器において、特に寿命という観点で高周波窓周辺の構造に問題があることが受入れ試験後の運用で判ってきた。以降、U タイツシールの状況にフォーカスして述べる。

D5-A で使用するロードは 2013 年 3 月にまでに製作された初期ロード 3 台のうちの 1 台である。製作後、受入れ試験の一環として、加圧試験を行う。このとき、加速器へ組み込んだときの状況を想定し、常温 (~30 °C) および温水 (35~40 °C) の環境下で試験した。加速器運転時に接続する冷却水システムの水圧(入)は、開放系のため最大で 0.15 MPa となる。この圧力環境において想定される水温の変化に対しリークしない設計が求められる。試作機を含む製作初期の U タイツシールの仕様は、矩形導波管型のものを踏襲した(外皮:銅、表面処理なし)。初期ロード 3 台に対して行われた加圧試験では、3 台すべてにおいて温水環境下においてリークが確認された。

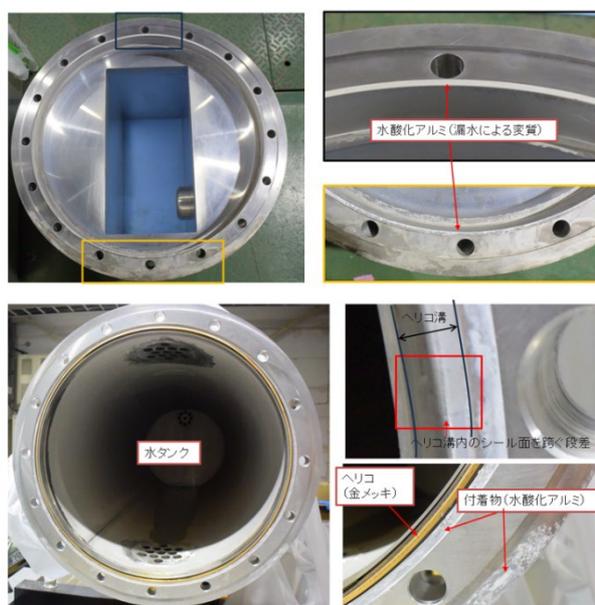


Figure 3: Waveguide and water tank after disassembly of D5-A.

当時、加圧試験の際に用いた水は低電力試験の実施も兼ね市水としていた。リークの状況を把握するため、4 台すべてのロードに対して、加圧・加温のサイクル試験を実施した。いずれもサイクル試験の回数と共にリークの状況に変化が見られ、3 サイクル目の加圧試験では温水環境下においてもリークは検出されなくなった。このとき試験に要した期間は 1 週間である。試験後、U タイツシールの状況確認のため、分解調査を行ったところ、外皮の銅表面の腐食を検知、また、配管内の異物および腐食により生成された物質がシール周辺に堆積していた。これによる目詰まりがシール性向上の原因となったと推測した。同時に初期に発生したリークが原因でアルミ製導波管側の RF シールド部分も大きく腐食したことも確認した。Figure 4 に分解調査の様子をまとめる。なお、試作機に対してもサイクル試験を実施したが、製作から約 1 年半経過した段階での試験ということもあり、温水環境下でもリークは検出されなかった。当時、試作機は納品後、

受入れ試験のため約1ヵ月の期間に亘って水張り、試験後は水抜きをして保管していた。後日実施した分解調査では、初期ロッド3台と同様にUタイトシールに腐食が検出された[6]。

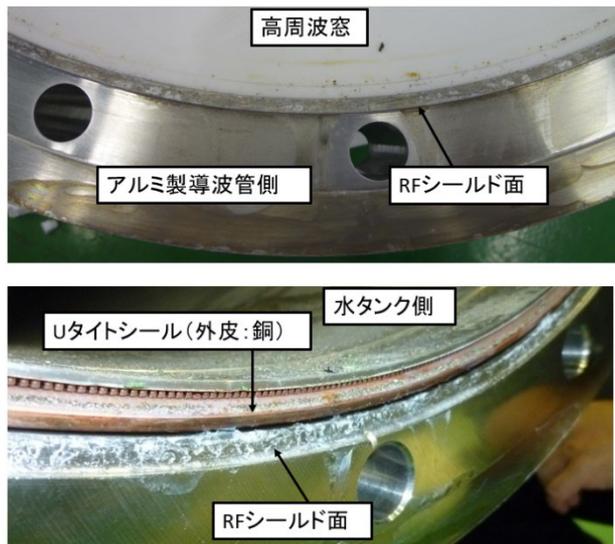


Figure 4: Damage on the surface of U-tight seal cause by tap-water.

Uタイトシールのシール性および耐食性の向上を目的に、シール最表面にメッキ処理を施すことを検討した。2013年6月に外皮の表面にスズをメッキしたUタイトシールを用意し、初期ロッド3台に対し、シールの交換作業を実施した(高周波窓:ダメージなし。再使用した)。交換後に実施した加圧試験では飛躍的なシール性の改善が見られ、温水かつ1.0 MPaの環境下においてもリークは検出されなかった。続いて行った大電力試験でも、正常な動作を示した(吸収体:市水)。シール性の改善が確認された後、この仕様を反映させた8台を2014年3月までに製作した。この8台は納品後、直に大穂地区の立体回路へ組み込んだ。

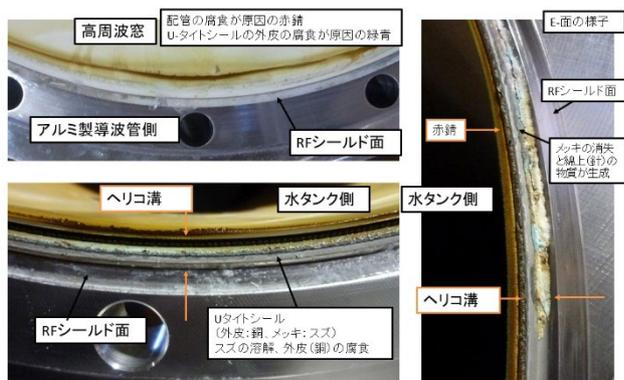


Figure 5: Corrosion of the U-tight seal with tin coating.

Table 1: History of Operation for the Cylindrical Waveguide Type Water Loads

Mar 2012	Fabrication of a proto-type water-load. High-power test (1MW) was done.
Mar 2013	Fabrication of three water-loads (1st). Water leak appeared during a pressure test by hot water. Disassembly work for failure diagnosis.
June 2013	Prepared a U-tight seal with tin coating. Assembly work with new U-tight seal (2 nd ver). A pressure test by water got through (Max 1.0 MPa). High-power test (1MW) was done.
Aug 2014	Water cooling system for D4 and D5 was built. 12 water loads set to the RF stations. Started the operation with tap water.
Oct 2015	Detected corrosion from the cooling pipe of water-loads. Water quality was changed from tap water (~350 μS/cm) to mixed water (~20 μS/cm). E-field level from flanges of RF window was increased due to unknown factor.
Aug 2016	Failure diagnosis was done for 12 water-loads. Then, small water leak due to corrosion of tin coating part and a damage of RF shield on the waveguide were detected for all water loads.
Dec 2016	Prepared a U-tight seal with Ag+Au coating. Assembly work with new U-tight seal (3 rd ver) for one station. A pressure test by water got through (~0.3 MPa).
Nov 2017	Assembly work with new U-tight seal (3 rd ver) for all other stations.
Apr 2018	A large water leak from D4-G occurred due to a crack in the RF window (**).
June 2018	Install a water leak detection system for all water loads of MR and DR.
July 2018	A large water leak from D5-C occurred due to a crack in the RF window (**).
June 2020	A small water leak from D5-A and D5-E detected by visual inspection. E-field level from flanges of RF window also was increased due to this water leak.
Oct 2021	A large water leak from D4-A occurred due to a crack in the RF window (**).
July 2023	Disassembly work for D5-A to check cause of microwave and water leaks.

** It was detected several days after an epicenter earthquake with a seismic intensity of 4 of higher occurred.

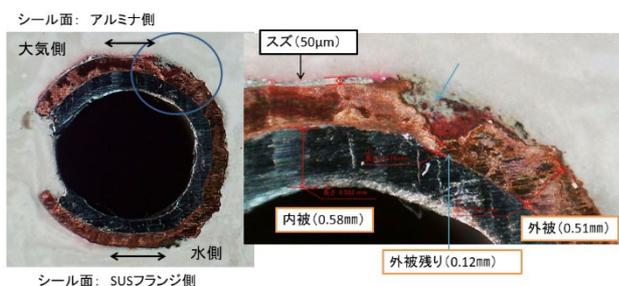


Figure 6: Cross section of U-tight seal with tin coating after disassembly at Oct 2016.

ウォーターロードの実質的な運用は、2014年10月から開始した。2014年8月までにD4、D5に冷却水循環装置を製作し、次いで配管系の製作・繋ぎこみを行った。ウォーターロード側に通水する系は閉回路とし、熱交換用の冷却水は施設供給の未処理水を利用する構成とした。配管材質はSUS304相当を採用した。運用開始当時は、市水を吸収体として採用した。以後、Phase1開始(2016年)までにリングRFの立ち上げを進めていった。

運用開始から約1年経過した2015年8月にウォーターロード本体および冷却水系の配管溶接部から腐食による水漏れが検出された。外観検査で検出した溶接部の腐食以外にも接続フランジ周りにおいてもパッキンフランジ間において隙間腐食が発生していた。腐食の原因は循環水の水質によるものと判明し、吸収体の水質の変更の必要性が生じた。水質変更にあたり、各ウォーターロードの電気的特性に対する水質・水温依存性を調査した[7]。円筒型ウォーターロードは、水タンク部分の全長が矩形導波管型より短いこともあり、純水を吸収体として採用した場合、35°Cを超える温水環境下において、十分な吸収特性を有しないことが測定より確認された。

一方で、一般にSUS相当で構成される配管系において10年を超える期間の運用を考慮した場合、貯水する水質は純水に近いほどよい傾向がある。ここで水質依存の調査では、市水を純水で希釈し、その割合を導電率で評価した混合水を吸収体の候補として考え、その特性を測定した。その結果、導電率5~20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (市水割合2~5%)の混合水であれば、想定される水温変動の範囲において十分な吸収特性を有することが確認された。以後、2015年10月から現在に至るまで、混合水を吸収体として使用している。水質の管理は冷却水配管系に挿入された導電率計で常時モニタリングし、必要に応じて、市水又は純水を給水することで対応している。

2016年夏季の運転では、高周波窓接続フランジ周りから電波漏洩の増大が検出され、その原因調査のために同年8月にウォーターロードの分解調査を実施した。そのときの様子をFig. 5にまとめる。分解調査では、Uタイトシールまわりに冷却水配管で発生した赤錆が堆積しており、赤錆が起因と思われるメッキおよび外皮の腐食が確認された。また、他の原因の一つに冷却系立ち上げ時に採用した市水の影響もあったと推測する。Uタイトシールに発生した腐食の分布を観察すると、RF入力時の電磁界分布に依存する形で腐食の進行に有意な差が見られた。Figure 6に分解調査で外したスズメッキ仕様のUタイトシール断面の様子を示す。水と接触していた

スズメッキ部分が完全に無くなり、外皮も侵食を受けたことが確認された。また、堆積物が蓄積しやすい隙間部分で腐食の進行が早い傾向が見られた。

立ち上げから2年後の2016年時点で長期運転に際し、その保守性に対し多くの問題が発覚した。この対策としてUタイトシールの耐食性の向上を再考し、最表面を金でコーティングする方針とした。ただし、外皮の上に金(~5 μm)のみのメッキでは、メッキの隙間(孔)から外皮が侵食される可能性が考えられたため、外皮と金の間に50 μm の銀メッキを挟む2層構造とした。2016年12月にD4-Eのウォーターロード1台を用いて、上記仕様のUタイトシールの性能試験を行った。本試験では初期仕様のメッキなしのシールと比較してシール性の向上が確認された。1年後の2017年11月に残るすべてのウォーターロードに対し、上記仕様のUタイトシールの交換を実施した。このとき外した高周波窓に対し、ダメージチェックを行ったが、割れ・欠けといった機械的な欠損は検出されなかった。このため、高周波窓に対しては、付着した赤錆などの汚れの除去を目的に洗浄を行うのみにとどめ、再利用する方針とした。組立後に行った加圧試験では、常温および温水環境下で0.3 MPa、30分保持でリークなしを確認した(ただし、規定トルクでの組立では、微少リークが検出された固体があり、対応として増し締めをしたロードもある)。ここで、スズメッキ仕様のUタイトシールは、前述のように規定トルクの締結において1.0 MPaの耐水圧性能を示した。一方で耐食性を考慮した銀、金の2層構造では、適用する数量が多くなると思うようにシール性能をコントロールできず、シール性能に関しては後退した結果となった。Figure 7に銀+金2層のメッキを施したUタイトシールの断面観察の様子を示す。

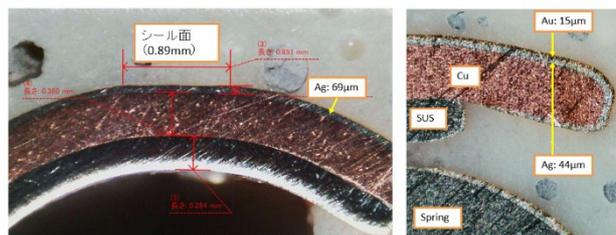


Figure 7: Cross section of U-tight seal with Ag + Au coating after disassembly at June 2018.

2層構造のUタイトシールへ交換した後の2018年4月、7月、2021年10月に高周波窓の割れが原因による水漏れが発生した。いずれも割れの起点は、アルミ製導波管側とのあたり面であり、また、この割れはUタイトシールのシール面を跨ぐ形に成長していた[8]。この水漏れが検出される数日前には震度4を超える直下型の地震が発生しており、その振動が高周波窓の割れの引き金になった可能性も考えられる。このときUタイトシール表面の状況もチェックしたが、シール表面に対して腐食は一切検出されなかった。表面材質を金とすることにより耐食性が向上することが確認された。高周波窓が割れたウォーターロード3台に対する修理は、アルミ製導波管の機械加工による補修、高周波窓およびUタイトシールの交換で対応した。直近の状況は2.2に示す通りである。現状、冷却水まわりの配管系の腐食は、吸収体の水質

を市水から純水に近い混合水に変更したことにより進行が止まり、良好な状態を維持している。今後も5~20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の混合水での運用を継続する方針である。U タイツシールについては、シール性と耐食性を両立させたコーティングについて再検討する必要がある。銀+金メッキ仕様の U タイツシールのシール性の問題は、富士、日光地区で使用する矩形導波管型のウォーターロードでも確認されている[2, 9]。矩形導波管型では、微小リークの状態には個体差が見られ、リークが発生していないロードも存在する。一方で、スズメッキ仕様では、矩形導波管型でも円筒型導波管型と同様に非常に良いシール性を示している。また、矩形導波管型ウォーターロードで使用しているスズメッキ仕様の U タイツシールは混合水環境下の長期間の使用において、8 年以上の使用に耐えうるデータが定期検査の結果から得られている。同時にこれまでの運用の経験から、市水環境下では 10 年を超える長期間の運転に適さないことも判明している。これらの調査結果から、U タイツシールのコーティングとして、外皮の銅を保護するための金に加え、シール性の向上を目的とした層として、スズを採用した 2 層構造を検討している。2023 年度に実施する D5-A のウォーターロードの修理に合わせて、新シールの試験を計画している。

2.4 インフラ周り

インフラ周りでは、トリスタン時に建設し、現在も引き続き運用している蒸気冷却系の老朽化対策を進めている。2022 年~2025 年にかけて腐食している空冷塔の通風口まわりの補強工事を行う計画を立てている。2023 年度までに MR の運転に使用される 6 台の空冷塔のうち半数の 3 台に対し、工事を行う予定である。また、ファン用モーターの更新も適宜実施しており、現時点で負荷の大きい商用側 (50 Hz 固定) の更新が完了している。その他には、ファンの運転に使用するインバータユニットの更新も進めており、老朽化が原因の突然の故障を想定し、LS1 中に 1980 年代のユニットすべての入替を計画している (Fig. 8)。



Figure 8: Update of INV for klystron cooling unit.

3. まとめ

本報告では SuperKEKB 加速器 2022ab 終了後に開始した LS1 期間中における大電力高周波源の状況と円筒導波管型ウォーターロードの開発状況について述べ

た。LS1 中は、主としてクライストロン冷却系の老朽化対策を中心に作業を計画、空冷塔の補強・補修工事およびファン用モーターの更新を進めた。同時にファン駆動用のインバーターおよび電磁開閉器など制御盤まわりの更新も進めた。

立体回路では、大電力用ウォーターロードの損耗調査とその診断結果を元に性能向上を目的とした開発を進めている。現状では、耐食性とシール性の両方を兼ね備えた U タイツシールの開発を中心にスタディを進めている。

今後も継続する運転のために予備機の調達を行いつつ、各種老朽化対策を進めていく。

参考文献

- [1] Y. Funakoshi, "The SuperKEKB has broken the world record of the luminosity", Proceedings of the IPAC22, Bangkok, Thailand, 2022, pp. 1-5. MOPLXGD1.
- [2] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power rf systems during phase2 operation in SuperKEKB", Proceedings of the IPAC19, Melbourne, Australia, 2019, pp. 619-621. MOPRB022.
- [3] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power rf system of MR for the operation until 2022ab in SuperKEKB", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 -21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 652-656, PASJ2022 WEP047.
- [4] K. Ebihara *et al.*, "RF HIGH POWER WATER-LOADS FOR KEKB", Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001, pp. 633-635.
- [5] K. Watanabe *et al.*, "Development of cylindrical type 1.2 MW high power water-load for SuperKEKB", Proceedings of the IPAC13, Shanghai, China, May. 12-17, 2013, pp. 3318-3320.
- [6] K. Watanabe *et al.*, "Maintenance of the high-power water loads at MR for SuperKEKB", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, pp. 1007-1011, PASJ2014 SUP052.
- [7] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power RF systems in SuperKEKB for phase2", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, pp. 975-977, PASJ2017 WEP055.
- [8] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power RF systems during phase2 operation in SuperKEKB", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, pp. 464-467, PASJ2018 WEP057.
- [9] K. Watanabe *et al.*, "Survey and analysis of the actual condition of the rectangular-type water load for high power rf system in MR of SKEKB", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 464-468, PASJ2022 TUP054.