

SKEKB MR 大電力高周波源における矩形導波管型ウォーターロードの現状

SURVEY AND ANALYSIS OF THE ACTUAL CONDITION OF THE RECTANGULAR WAVEGUIDE TYPE WATER LOAD FOR HIGH POWER RF SYSTEM IN MR OF SKEKB

渡邊 謙^{#, A)}, 相澤修一^{B)}, 奥山恒幸^{B)}, 福住直貴^{B)}

Ken Watanabe^{#, A)}, Shuichi Aizawa^{B)}, Tsuneyuki Okuyama^{B)}, Naoki Fukuzumi^{B)}

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

^{B)} Nihon Koshuha Co., Ltd.

Abstract

We have developed and manufactured CW 1.2 MW high power water-load for the SuperKEKB, an electron-positron double-ring collider at KEK. This water load is attached on the #3 port of circulator or #4 port of magic-T to protect a klystron for reflected power from cavities in the waveguide system. The water-load used at the RF stations in the Fuji and Nikko areas is a rectangular waveguide type, and all of them were manufactured at the time of construction of the KEKB accelerator. At the time of construction of SuperKEKB, failure diagnosis conducted for all water-loads, and based on the survey results, proceeded with maintenance while considering modifications to improve performance for long-term operation. In order to secure the spare loads in the main ring, a total of 3 new water-loads were fabricated from 2018 to 2021. The current development status such as problems that occurred during receiving inspection, regular maintenance after fabrication and status of aged deterioration during long-term operation will be reported.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器[1]主リングでは空洞トリップおよびビームアポート時に発生する反射電力からクライストロンを保護することを目的にサーキュレーター第3ポートもしくは Magic-T 第4ポートに大電力用ウォーターロードを設置している。

富士、日光地区の RF ステーションで使用されるウォーターロードは矩形導波管型であり、運転に使用する全数が KEKB 加速器の時代に製作されたものである。SuperKEKB 建設のため、2013 年からこのウォーターロード全数に対し健全性調査を実施し、その調査結果に基づき性能向上のための改造を進めつつ保守を進めた。主リングにおける予備機確保のため、2018 年から 2021 年にかけて約 10 年ぶりに当該ロード計 3 台を新規に製作した。製作後の受け入れ試験や保守時に発生した問題点や長期運転における損耗状況など現在の開発状況を報告する。

2. 大電力用ウォーターロード

2.1 ウォーターロードの種類および構成

SuperKEKB 加速器で現在用いられている大電力用ウォーターロードの外観を Fig. 1 に示す(内部形状の詳細は参考文献[2], [3]を参照のこと)。Figure 1 下に示す矩形導波管型ウォーターロードは、KEKB 建設にあたり、その運転のために開発された。当時、1.2 MW 用のウォーターロードは D8 に建設されたクライストロン開発用のテストステーションにて運用・実用化されていたが[4]、その全長は 5m と長く、取り回しに難があった。このため、

コンパクトな立体回路の建設のためなど、取り回しのよいウォーターロードの開発が必要となった。開発の結果、従来の半分の長さの 2.5 m までサイズを抑えられた本ロードが完成した[2]。その後は、さらに全長の短い(1.5 m)円筒導波管型ウォーターロードが 2012 年に開発・製造され、大穂地区にて運用されている[3]。また、5 m 長のウォーターロードは、D1、D2 電源棟にあるテストステーションにて使用され続けており、製造から 40 年ほど経過した現在もなお 1.2 MW(連続波)の耐電力特性を有している。



Figure 1: High-power water-loads (Upper: Cylindrical-waveguide type, bottom: rectangular waveguide type).

本ロードは、大気側のアルミ製導波管、高周波窓および冷却水タンクの 3 点で構成される。高周波窓はアルミ製導波管に内包され、メタルシールを用いることで大気側と吸収体側を分離し、各部が連結される。開発時の重要項目は、大気側への水漏れ、連結部や吸収体水路からの電波漏洩、大電力入力時の安定性(放電対策)および長寿命化などが挙げられる。

[#] kenw@post.kek.jp

2.2 矩形導波管型における長期運転の状況

KEKB の運転(1998~2010 年)の間、矩形導波管型ウォーターロードは計 19 台製作された。その内 15 台は 2003 年までに製作、MR の運転に組み込まれた。残り 4 台は 2005 年~2007 年に製作され、テストステーション用に 1 台、クラブ空洞用の D11-E、D11-F で 2 台、予備 2 台という体制で KEKB の運転を終えた[5]。当時は、市水を吸収体として使用しており、KEKB 運転後の 2012 年に行ったウォーターロードの健全性調査では、すべてのロードでメタルシールの腐食を確認、運用期間が短いクラブ空洞用の 2 台を除く 17 台でシール性が損なわれていたことが確認され、程度の差はあれども立体回路内部へ水漏れが発生していたことが判った(see Fig. 2)。一方で、クラブ空洞用の 2 台は、都合により純水を吸収体として運用していた。それを分解調査すると、メタルシールの腐食は市水環境下のもものと比べ速度が遅く、運転初期に微少リークした形跡はあるものの、腐食により生成された微粒子が漏水箇所を封止、結果、シール性の向上に寄与したため、水漏れには至っていなかった(see Fig. 3) [6]。

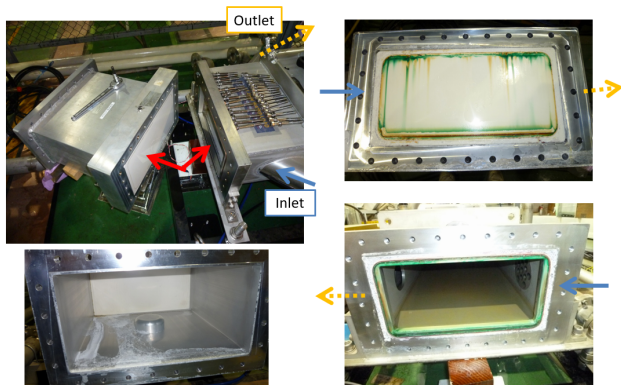


Figure 2: Water leak happened from the joint point cause by corrosion of metal seal.

19 台のウォーターロード修理は、2013 年から 2014 年の 2 年間で実施した。このとき、メタルシールのシール性向上を目的に既存の仕様に追加して、錫メッキを施した。これにより初期リークの問題解決および吸収体の水温変化に対するシール性の向上も確認した[7]。SuperKEKB の運転に際し、運用当初はこれらウォーターロードの高周波電力の吸収体として市水を採用した。しかしながら、数か月といった短期間において新設した配管系にて腐食が検出され、また、KEKB 運転後に検出されたメタルシールの腐食も市水に含まれる成分が主たる原因であることも化学分析により判明したことから、吸収体の水質を変更した。以降、水質の管理基準は導電率で行うとし、想定されるすべての運転環境下にて電氣的性能(VSWR 特性)を満たし、かつ、配管系統の腐食のリスクを下げることのできる水質を検討・調査した。その結果から、KEKB 時代の市水(約 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$)から電源棟ごとに差はあるが純水に市水を混合すること生成する混合水(10~25 $\mu\text{S}/\text{cm}$)とした[8]。以降、2015 年秋から混合水環境下にて運用をしているが、7 年を経過した 2022 年現在でも、電氣的特性にのみ焦点を当てると吸収体の媒

質が原因の異常・トラブルは発生していない。現在は、シール性向上を目的としてメタルシールへ施した錫メッキの耐食性の評価を継続して進めており、現状確認のため、経過年数ごとにサンプル調査を兼ねて定期的にロードを分解、腐食の進行速度を調べている。今のところ、混合水環境下では錫のメッキ層が上手に保護膜となり、約 6 年間の運用に対し、漏水などの問題なく耐えうることが判明している。2023 年時には通水後 10 年を経過する個体が出てくる。

飛躍的な長寿命化と目的として、2018 年からメタルシール表面に銀と金の積層構造を持つメッキに仕様を変え、シール性能を担保しつつ、耐食性の更なる向上を試みている[9]。しかしながら、銀と金の積層構造仕様では、耐食性の向上は確認されつつも、シール性の再現に難があることが判ってきており、更なる検討が必要な状況にある。現在の方針は、メッキの仕様を錫に戻し、今後の調査結果に依存するが、10 年を目途にシール交換を行い、漏水に対し健全性を担保するとしている。

D10-A 使用期間:約13年、市水

D11-F 使用期間:約7年、純水



Figure 3: Comparison of damages dependent on the water quality around metal seal checked after the KEKB operation.

主リングにおける予備機確保を目的に 2018 年から 2021 年にかけて、12 年ぶりに矩形導波管型ウォーターロード 3 台を新規に製作した(メタルシールの仕様:すべて銀と金の積層構造)。次いで経年劣化の調査およびメタルシールの銀+金メッキ仕様への移行を目的に保守作業を計画、適宜、実施している。直近では 2021 年夏季保守時間に実施した。このときの対象は D11 に設置されたウォーターロード 4 台中 3 台であった。その後の 2021c の運転にて、この保守した 3 台のうち 2 台に仕様の 1.2 MW よりはるかに低い入力電力環境下(~100 kW)にて、高周波窓接続フランジ周りに異常な発熱が検知され、また、想定以上の電波漏洩も合わせて検出された。現状では安全に使用することは難しいと判断し、上記の予備機 3 台のうち 2 台と交換して対応した。しかしながら、この 2 台においても程度の差はあれども、同様の異常発

熱、想定以上の漏洩電波が検知された。このとき、残る 1 台も使用してみたが同様の現象が現れ、このロード 3 台すべてで異常が発生した。対応として、同一の入力電力に対し、フランジ周りの温度上昇が少ないロードを選定し、運転に使用した。異常発熱の原因の究明とその対策は、今期運転終了後の 2022ab 前の冬季保守期間に実施するとして、動作異常の原因として様々なことが考えられるが、状況証拠として、①高周波窓接続フランジの増し締めを行ったとき、フランジ面からの漏洩電波レベルに依存した形で温度上昇時の最大値および発熱分布に変化が生じた(電波漏洩大のフランジ面では急激な温度上昇が検知された)、②混合水(吸収体)の混合比率を変えることで導電率を調整して運転してみたところ(誘電率、 $\tan\delta$ が変化、結果、媒質内の管内波長により電磁界分布も変化する。定在波の影響を考慮した。)、同一の運転条件において急激に上昇する温度の最大値に変化が見られたことが挙げられる。これ以前に検知された異常発熱の例を示すと、2020c の運転期間中、D10-D のサーキュレーター第 3 ポートに設置されたウォーターロードにてフランジ部の温度異常によるインターロックが発報した。当時は冷却ファンを追加設置して、温度上昇を抑えたが、後日に分解調査した結果、高周波窓と水タンク間にある RF コンタクト部分で放電が発生し、放電による RF ロスが温度異常に繋がったことが判った。分解作業時に経年変化によるものと思われるボルトの弛みが見られ、これが隙間発生の原因と推測している。

2021c の運転期間中、直下型の地震による振動が原因で D4-A に設置された円筒導波管型ウォーターロードの高周波窓が破損し、立体回路への水漏れが発生した。その対応として、D11 の運転で温度異常を検知したロード(2019 年製)を持ち出し交換した(当時は、吸収体の導電率にも原因があるのではないかと推測していたため、このような判断をした)が、高周波窓接続フランジの接続部付近での異常な発熱が再現した。このときはその原因が吸収体の水質に依存した定在波の影響ではないかと考え、吸収体の導電率を上げてみたところ、フランジ部の最大温度がさらに上昇、より不安定な状況に陥った。そのときの温度変化の様子を Fig. 4 に示す。このロードは RF 入力時に高周波窓接続フランジの隙間から電波漏洩が検知されており、導電性テープをフランジ全周に巻くことで電波漏洩対策をしたものである。運転中、矩形導波管の E 面に設置された温度センサー(上、下)に大きな変動が発生していることが判る。

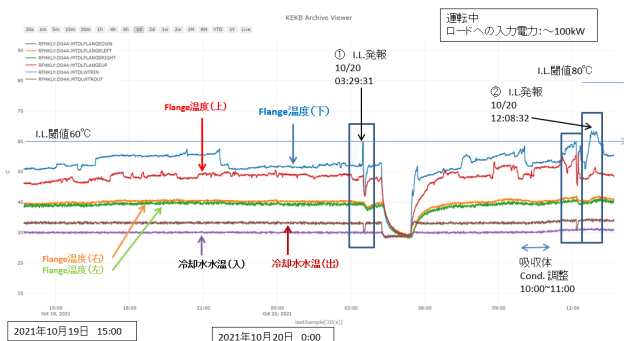


Figure 4: History of temperature rise during operation.

3. 異常発熱の原因調査

2021 年 12 月から翌年 3 月にかけて、大電力入力時に温度異常が検知された 4 台と 2020c 運転時に同種の異常を検知し修理した D10-D で使用されていた 1 台および 2021 年製造の 1 台(受け入れ試験)の計 6 台のロードに対し、異常発熱の再現性の確認とその原因究明のための大電力試験および分解調査を実施した。Table 1 にその内訳を示す。大電力試験は Table 1 の No.の順に進めた。

Table 1: List of the Water Loads to Survey Cause of Abnormal Heating

No.	Status and other
(1) 538856-1 (Mar 2007)	Testing to survey cause of abnormal heating. : Used at D11-B until early of 2021c : Maintenance was done Sep 2021 : Abnormal heating appears in 2021c : Countermeasure for abnormal heating was carried out this high-power test. : Back to D11-B before 2022ab
(2) 568810 (Dec 2021)	Acceptance testing after fabrication : Move to D11-D after this test.
(3) 565113 (Oct 2019)	Testing to survey cause of abnormal heating. : Used at D4-A during early of 2021c : Observed abnormal heating in this run : Countermeasure for abnormal heating was carried out this high-power test. : Move to D10-T (Test station).
(4) 563306 (Dec 2018)	Testing to survey cause of abnormal heating. : Set to D11-B from early of 2021c : Observed abnormal heating in this run : High-power test was done, however a water leak from metal seal was detected. : Go to failure diagnosis. : Go to repair (~ Mar 2023). : High-power test is planning after repair.
(5) 518552 (Aug 1998)	Acceptance testing after repair : Used at D10-D until 2020c : Repair was carried out at Jan 2022. : Move to D2-ET (test station) after this test.
(6) 535025-2 (Aug 2005)	: Used at D11-D until 2021c : Maintenance was done Sep 2021 : Abnormal heating appears in 2021c : Failure diagnosis without testing was done. : Go to repair (~ Mar 2023). : High-power test is planning after repair.

3.1 大電力試験

大電力試験では、Fig. 5 に示すように高周波窓接続フランジの接合面を境界にし、高周波窓を内包するアルミ

製導波管および SUS 製水タンクの両側に温度センサーを設置した。また、そのフランジ周りをマスキングテープで養生することで金属表面の放射係数を校正、サーモビューワによる可視化を試みた。

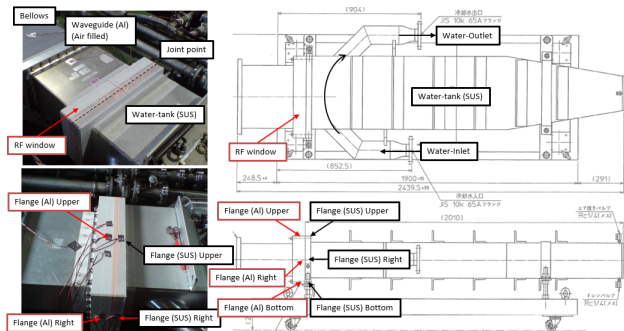


Figure 5: Location of thermos-sensors on the water load at high-power test.

サーモビューワで観測した RF 入力時のフランジ周りの温度分布の一例を Fig. 6 に示す。これは Table 1 で示す (3) のロードの試験時に観測したものである。試験では D4-A に一時的に組み込み運転したときと同じく、100 kW (CW)の入力時点で SUS 製水タンク側の E 面にて局所的な温度上昇が検知され現象が再現した。このロードは、元々高周波窓接続フランジから電波漏洩が検知されており、導電性テープを巻くことで漏洩対策を行っている。一連の試験中、温度異常が現れているフランジ周りの温度分布は、この電波漏洩の分布と相関があることが判り、ハザードメーターを用いて電波漏洩の分布を確認しつつ、フランジを増し締めすることで漏洩対策を行った。対策にあたり、フランジに巻き付けた導電性テープを一旦はがし、基本、電波漏洩による電界強度レベルが人体に影響を与えない(27.5 V/m 以下)ように、入力電力の大きさをコントロールし作業を進めた。Figure 7 に漏洩電波対策前後のフランジ周りで検出された電界強度レベルの一例を示す。

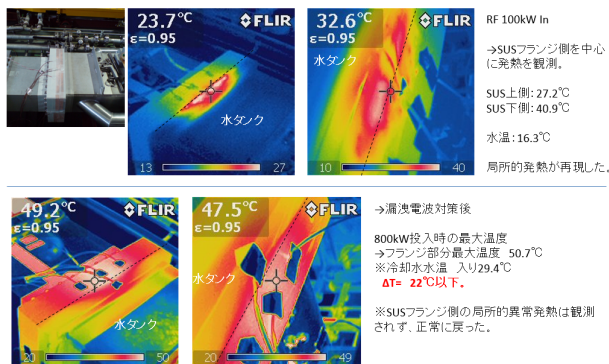


Figure 6: Temperature distribution on surface of the water load.

大電力入力時に電波漏洩が検知されたとき、ほとんどの場合、これまでは必要に応じ導電性テープを重複して巻くことで対処してきた。しかしながら、一連の運転時の温度異常の発生を経験し、その共通点として一定以上の電波漏洩があることが挙げられたことで、導電性

テープによる遮蔽は、人体防護を目的とした電波漏洩抑制の観点では効果的であるが、ウォーターロードの動作異常の対策としては効果が少ないことが改めて判った。

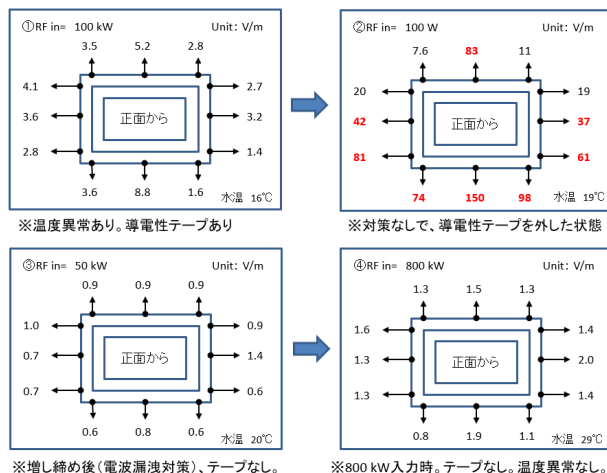


Figure 7: Amount of electric field level cause by RF leakage measured by hazard-meter (Before and after).

Figure 8 に漏洩電波対策後の入力電力に対するフランジ周りの温度上昇の様子を示す。電波漏洩大のときは、高周波窓接続フランジのステンレス側の温度が局所的に上昇することが判明し、一方で、電波漏洩が抑えられた場合、冷却水 (吸収体) に接しないアルミ側のフランジ温度の方が相対的に高くなり、その最大温度は当然冷却水入口の温度および室温に依存することが確認された。高周波窓接続フランジ周りおよび上流の導波管の温度を比較すると、試験中に最大温度を示した箇所は、テストステーションとウォーターロードを連結するベローズ表面の約 60 °Cであった。RF コンタクト部分の電気的接触不良が改善され電波漏洩が抑えられている場合、環境温度および冷却水水温にも依存するが、800 kW 入力時で約 50 °Cを下回る結果となった。今後はこのデータを基準として受入れ試験を行うものとした。

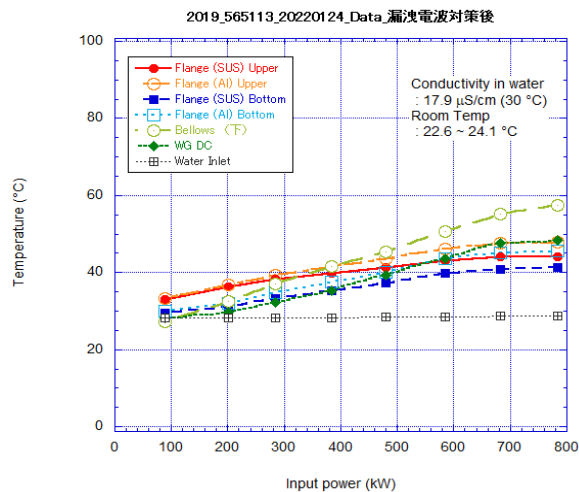


Figure 8: Measured temperature on the surface around flanges of waveguide with RF window.

今回実施した一連の試験および診断結果をまとめる。
 ①ある一定以上の電波漏洩が検知されたロードでは、RF コンタクト面の隙間にて放電が発生、結果、SUS 製水タンク側のフランジ側に局所的かつ極端な温度上昇が生じることが判った。RF コンタクトの電氣的接触不良を改善すると、電波漏洩のレベルの変化に伴い、フランジ周りの温度分布が変化することをサーモビューワにて捉えることに成功した。②Table 1 (4)のロードのように電波漏洩と共に微少の漏水も検知された場合、アルミ導波管側の RF コンタクトが腐食、フランジ締め込みによる隙間管理に限界が生じた。また、漏水した水が漏洩電波により温められたことで正常時とは異なる漏水時特有の温度分布を示すことが判った。③温度異常が検知されたロードをある一定期間以上使用すると、放電によるダメージが蓄積し、特に SUS 側の RF コンタクト面に対し大きなダメージが発生することが判った。このような場合、電氣的接触面の化学的組成は金属から酸化物(誘電体)へ変化し、増し締めにより物理的な接触が出来たととしても、RF 的視点では電氣的隙間が生じたことになる。結果、増し締めでは完全な電波漏洩対策に達することはできず、温度異常を解決することはできないことが改めて確認された (Table 1 (6))。

3.2 水質依存性の調査

Table 1 (1)の試験時に高周波窓接続フランジ周りの温度上昇に対する吸収体の水質依存性を調査した。Figure 9 に結果を示す。このとき入力電力は 100 kW を保持し、媒質の導電率は市水と純水を適宜混合し調整することで対応した。媒質の誘電率は水質に依存し、およそ 70~85 の間で変化する。これにより吸収体内の管内波長が変わり、結果、フランジ間の隙間に入り込みロスする RF の量も変化する事が確認された。これは異常発熱が検知された場所はフランジ下部であるが、水質に依存した形で 50 °C ~90 °C の値を示したことから判る。

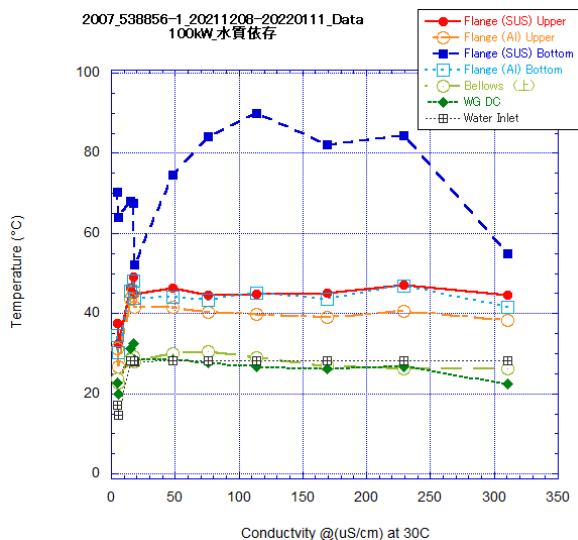


Figure 9: Temperature on the surface around RF window depend on the water quality at 100 kW load.

また、フランジの隙間から検知される漏洩電波の量にも

脈動が見られ、系の状態に依存し、立体回路内の電磁界分布に変化が生じていることがハザードメーターによる測定でも確認された。いずれにせよ、物理的なフランジ間の隙間が存在した状態では、異常発熱を根本的に抑えることはできないことが判った。

4. まとめ

KEKB 加速器運転時から使用されている矩形導波管型ウォーターロードは、SuperKEKB 加速器の運転にも引き続き使用されている。KEKB 運転終了時点ですべてのロードから健全性が失われた状況下から、当時の運用の結果を元に長寿命化を目的とした改善、改良を進めてきた。SuperKEKB 加速器の立ち上げが開始された 2014 年からすでに 8 年が経過したが、この間にも様々な出来事があり、ウォーターロードの製造、運用に対し更なる理解が進んだ。現状ではロードの製造ないし修理後に受入れ試験を確実に実施すると共に、その際のチェック項目の洗い出し、健全性を判断するためのモニター方法および評価基準が改めて確立され、また、媒質の最適化、メタルシールの仕様変更を進めたことで、ほとんどのロードで健全性を維持した状態を保っている。今後も経年劣化の調査を継続して行い、特にメタルシールの仕様をさらに詰めたいと考えている。

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] Y. Arisumi *et al.*, "Development of 1.2 MW High Power Water Load", proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Japan, 1999.
- [3] 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.
- [4] H. Nakanishi *et al.*, "Development of 1 MW waveguide type high power dummy load", Proceedings of the 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, Hokkaido Univ, Sapporo, 1990, pp. 254-256.
- [5] 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.
- [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, Aomori, Japan, Aug 2014, SUP052.
- [7] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power rf systems in MR for SuperKEKB", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Fukui, Japan, Aug 2015, WEP065.
- [8] 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, Sapporo, Japan, Aug 2017, WEP055.
- [9] K. Watanabe *et al.*, "Current status of the high-power rf systems during Phase3 operation in SuperKEKB", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Fukui, Japan, Aug 2018, WEP057.