

SuperKEKB 加速器 MR における大電力用ウォーターロードのメンテナンス状況 MAINTENANCE OF THE HIGH POWER WATER LOADS AT MR FOR SUPER KEKB

渡邊謙^{#A)}, 丸塚勝美^{A)}, 海老原清一^{A)}, 三浦厚^{B)}, 奥山恒幸^{B)}

Ken Watanabe^{#A)}, Katsumi Marutsuka^{A)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Atsushi Miura^{B)}, Tsuneyuki Okuyama^{B)}

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

^{B)} Nihon Koshuha Co. Ltd

Abstract

A 1.2 MW CW high power water-loads (UHF: 508 MHz) were used to protect the klystrons from large reflected power when happen a cavity trip and beam abort in the main ring of SuperKEKB. The water-loads were worked at long-time from 1998 to 2014, within or without maintenance after fabrication. Water-leaks were happen to inside of the waveguide from the water-tank in water-load. It was due to the corrode of metal seal which set on between the rf window and the water-tank. We were checked progress on the corroded of metal seal for the 19 rectangular-type water-loads. It was pointed to dependence of the input power and properties of water. The status of maintenance for the rectangular-type high-power water-load will be reported.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器主リング地上部大電源棟では空洞トリップおよびビームアボ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が設置される [1], [2]。主リング (MR) で使用されるウォーターロードの約 6 割は KEKB 加速器建設時に製作された矩形導波管型であり、最長 16 年間使用し (通水) 続けてきたものである。現在、SuperKEKB 加速器の建設にあたり、MR 立体回路全体の健全性調査を行っており、調査の結果、多くのウォーターロードから導波管内 (大気側) への水漏れが検出された。水漏れの原因を調査した結果、U-タイトシールの腐食が主であることが分かり、腐食の傾向として水温 (定常負荷の大きさなどが起因) と冷却水の種類に対し依存性が見られた。また、水漏れの原因にはなっていないが、高周波窓の欠けも一部のロードに対して検出された。

本報告では大電力用ウォーターロードの経年劣化およびメンテナンス状況について報告する。

2. ウォーターロードの構成

今回調査を行ったウォーターロードは矩形導波管型であり、KEKB 加速器建設・運転時に計 19 台製作されたものである [3]。これは SuperKEKB 加速器においても引き続き継続して使用される。また、SuperKEKB 加速器建設において行われる RF 増強に合わせて、円形導波管型も新規設計、2014 年 3 月までに計 12 台製作した [4]。図 1 にウォーターロードの外観を示す。ウォーターロードは主に 3 つのパーツで構成され、それぞれ入力導波管 (WR-1500、アルミ製、大気)、アルミナ製高周波窓および

SUS304 製冷却水タンクである。周波数帯域は 508.9 ± 5 MHz、耐電力特性 1.2 MW (連続波) である。シール材には U-タイトシールを用いており、高周波窓と SUS 製冷却水タンク間でシールし、冷却水側と大気側の分離をしている。シール材は内被 SUS 外皮 Cu の組み合わせのものを使用していた。



Figure 1: High-power water-loads (upper: cylindrical-type, under: rectangular-type).

3. 分解調査

3.1 市水使用環境化の場合 (矩形導波管型)

立体回路内への水漏れ、腐食したシール材の様子を図 2~4 に示す。図 2~4 は D10 電源棟内に設置されている B ステーション (D10-B) に設置されていたロードであり、腐食が最も進んでいたものである。図 2a は導波管側から観察した様子である。高周波窓の端部から水酸化アルミ (白色) の形となって水漏れの痕が検出された。水酸化アルミはパウダー状となっており、染み出し自体は生成物による目詰まりにより収まったことが窺える。図 2b は水漏れ箇所拡大図である。ロード正面から観察して左下角から大気側へ染み出していたことが分かる。図 3a は水タンク内の様子である。水タンク自身に対し、腐食によるダメージは一切検出されなかった。シール材外側に見られる白色の物体は、水酸化アルミで

[#] kenw@post.kek.jp

ある。分解調査時にはペースト状として検出された。シール材内側に沿って見られる緑色の物体は緑青（硫酸銅が主成分）であり、使用していた冷却水（市水）に含まれる硫酸イオンとシール材の外皮（銅）との反応によって生成されたものである。図 3b は取り外したシール材の拡大図である。外皮が完全に腐食・剥離しており、その隙間から冷却水がリークしていた。図 4 は高周波窓を冷却水側から見た様子である。高周波窓はアルミ製導波管中にはめ込まれている。窓上にはシール面に沿って緑青が堆積していた。また、高周波窓の角にはクラックが起因の欠けが検出された。アルミ製導波管の RF コンタクト部（段差になっている部分）は腐食により、深い虫食い状態となっている箇所が多く見られた。これは微小の隙間となり、局所的な放電の誘発や電波漏れの原因となりうる。

腐食の進行具合には冷却水の水温依存性、ロードへの投入電力の大きさに依存性が見られ、冷却水の水温が低く、かつ、投入電力の小さいステーションに設置したロードでは、シール材の腐食が軽微で水漏れも検出されなかった。このロードについては、今後も十分に使用可能と判断できるものであった。

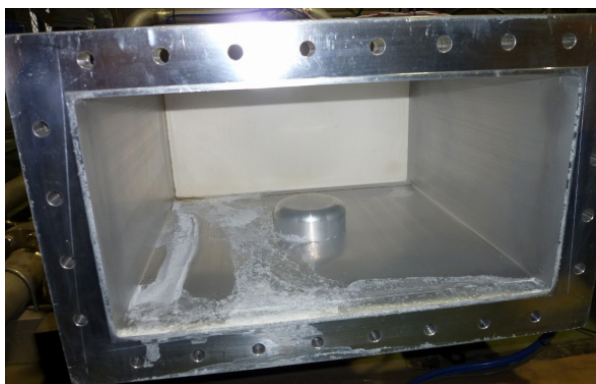


Figure 2a: Water-leak happened to waveguide (D10-B).



Figure 2b: Closeup of a location of water-leak (D10-B).

ウォーターロードの冷却系は一つのポンプユニットから複数のロードへ冷却水を供給する方式を取っており、2 並列 2 又は 3 直列の形で接続されている。当然、後段のウォーターロードに供給される冷却水の水温は ΔT 分だけ前段のものより高くなる。実際

にロードの配置が後段になるにつれ、腐食および水漏れの頻度が増す傾向が見られた。

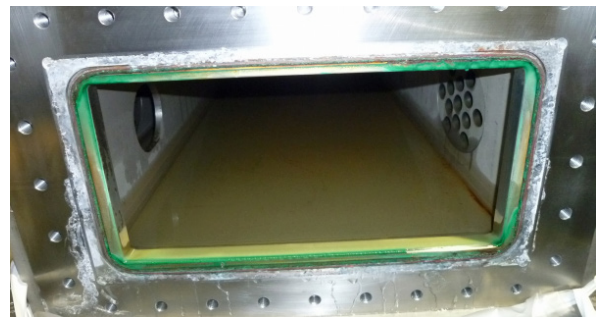


Figure 3a: Inside water tank made of SUS304 (D10-B, tap water).



Figure 3b: Corrode of metal seal (D10-B, tap water).

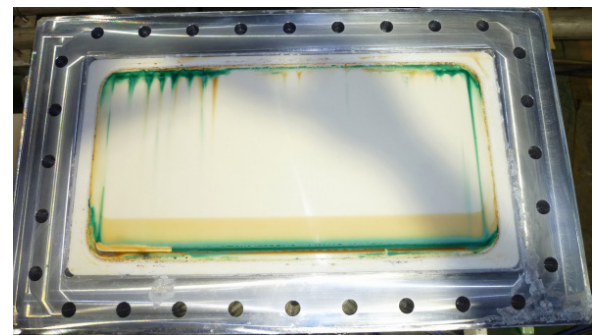


Figure 4: RF window with waveguide (D10-B, tap water).

3.2 純水使用の環境下の場合（矩形導波管型）

一方、純水を冷却水として使用していた環境化では、市水使用環境化と比べ、腐食の傾向が異なっていた。後述するが、市水環境下では外皮の芯まで酸化反応が進行していたが、純水の場合には、表面に緑青が見られるものの、それは外皮表面のみに留まり、外皮の剥離ではなく減肉のみという状態であった。純水環境下では約 7 年通水を行っていたが、大気側への水漏れには至っていなかった。図 5a, b に水タンクおよびシール材の様子を示す。市水と同様に水タンク自体に腐食および緑青の堆積物も無く、非常にきれいな状態であった。

3.3 シール材の断面観察と生成物の組成分析

シール材の腐食の浸食度を確認するために、シール材を丁寧にロードから取り外した後、樹脂系の

モールド材を用いて、断面観察用のサンプルを作成した。図 6 にシール材周辺の構造と生成物の一覧をまとめる。これは市水環境下にて矩形導波管の E-面に配置された部位の断面である。シール材の構成は内側からインコネルのバネ、内被および外皮からとなる。シール材は高周波窓-水タンク間に設置、電気的な接触は図の下側のアルミ製導波管-水タンク間で確保している。冷却水の漏れが起こると、アルミ-SUS 間で隙間腐食（湿式、電食）が生じ、結果アルミ部分のみが腐食していく。

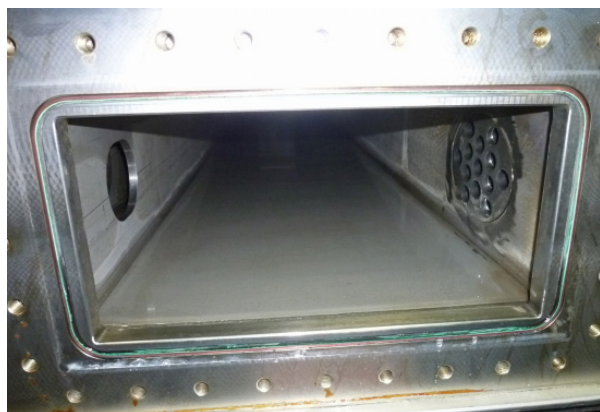


Figure 5a: Water tank made of SUS304 (D11-E, pure water).

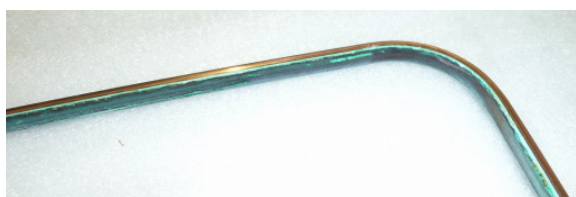


Figure 5b: Corroded of metal seal (D11-E, pure water).

腐食した銅の成分分析を行った結果、3 タイプの組成が検出された。それぞれ、酸化銅、塩基性炭酸銅、塩基性硫酸銅であった。これらが生成された原因には冷却水中に含まれる溶存酸素、炭酸、硫酸イオンが挙げられる。表面の様子を詳しく見ると、冷却水に面している銅部分は最深部まで酸化していることが分かる。外皮の剥離については、酸化銅および塩基性炭酸銅の部分の組成の一部が浸食されるような形で塩基性硫酸銅に変化することで、外皮の剥離が生じたものと推測する。

剥離した外皮のほとんどは最終的に硫酸銅に変化し、水タンクおよび高周波窓部分に堆積していた。母材の温度に依存して、炭酸銅から硫酸銅といったように組成が変化するというデータがあり、そのデータからシール材表面の温度がある程度推測できる。今後、シール材が到達した最大温度について検討していく考えである。図 7a, b は D10-B で使用したシール材の E-面および H-面の断面観察の結果である。腐食の状況は先に述べた通りであるが、RF 投入時に流れる表面電流の大きい E-面の方が H-面の部分と比べ腐食の進行が速い傾向が見られた。H-面では E-面と異なり、酸化が外皮の深部まで至って

おらず、金属部分が残っていた。



Figure 6: Example of a cross section of the metal seal and the structure around metal seal.

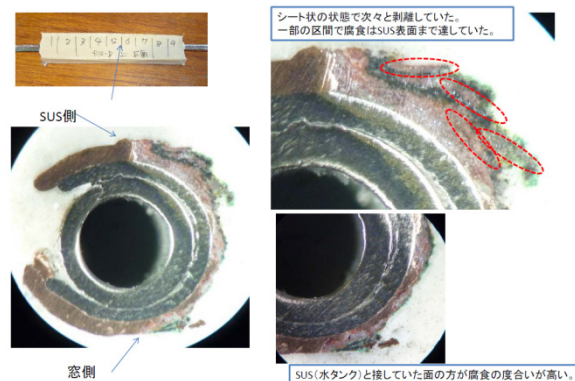


Figure 7a: Cross section of a corrode of metal seal (D10-B, tap water, E-plane).

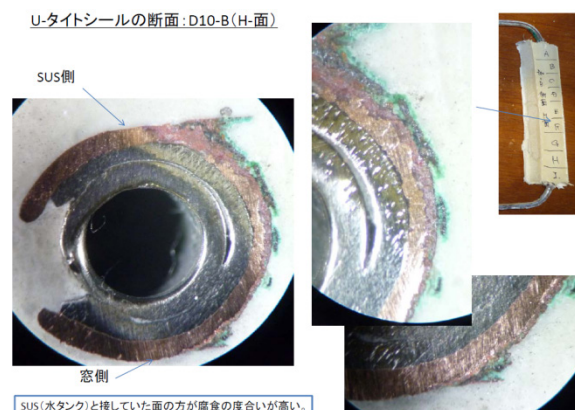


Figure 7b: Cross section of a corrode of metal seal (D10-B, tap water, H-plane).

図 7c は D11-E、純水環境下で使用していたものである。同冷却水系統にはアルミ製水タンクを用いたタイタンベータ社製ウォーターロードが接続されており、その関係から純水を使用していた[5]。断面を見ると市水とは異なり、腐食が外皮内部まで達しておらず表層のみであることが分かる。ただし、外皮

は減肉しており、元の 0.5mm から約 0.3mm まで厚みが減っていた。このままの状態で使用した場合、近い将来リークが発生することが予想された。



Figure 7c: Cross section of a corroded metal seal (D11-E, pure water, E-plane).

4. 電磁界・熱流体解析

4.1 電磁界解析

図 8 は損傷の様子から推測した水漏れ位置を図示したものである。図中の赤線はシール材の腐食の進行が速い部位を示している。ロード正面から見て左下を中心としてダメージを受けているものが多く見られた。

図 9 は矩形導波管型ウォーターロードの大電力試験時に測定した表面温度の分布である。表面温度の値は 880 kW に到達してから 20 分後に測定した値である。高周波窓の上部 (Window T) と下部 (Window B) を比較すると、下部の方が 5°C 高い結果となった。また、左右 (Window L、Window R) とでは 10°C 以上高くなることが分かった。

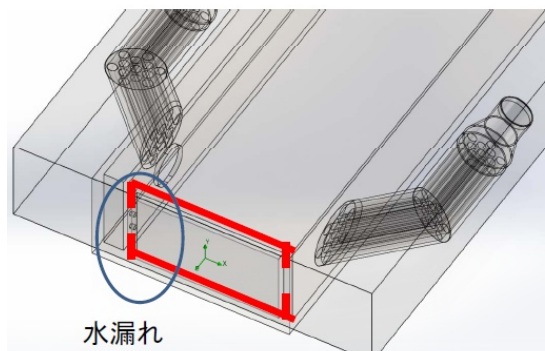


Figure 8: Schematic of a location of water leak and heavy corrode.

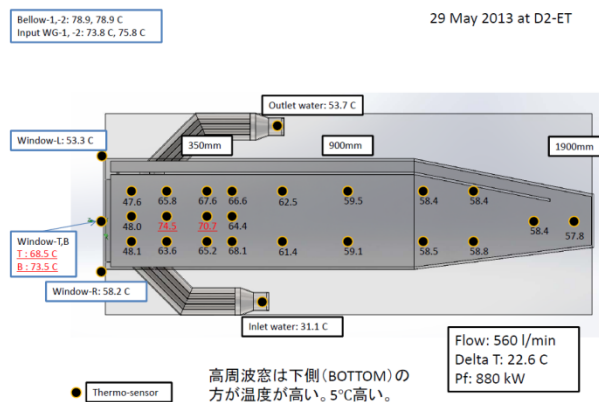


Figure 9: Result of high-power test for rectangular-type.

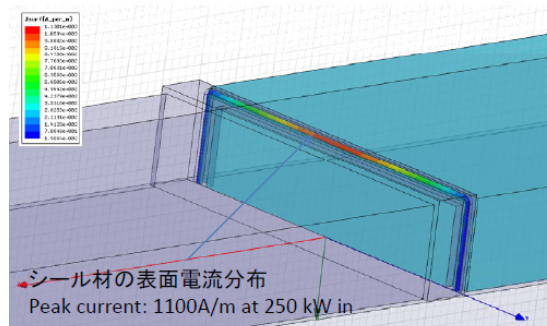


Figure 10: Surface current on the metal seal calculated by HFSS.

図 10 は RF 投入時におけるシール材外皮表面の電流分布を計算した結果である (1/2 モデル)。ウォーターロードの伝搬モードは矩形 TE₁₀ モードであり、高周波窓通過時においてもモード変換されずにそのままのモードで水タンク内を伝搬する。このため表面電流は E-面の中心で最大となり、250 kW 投入時に 1100 A/m となる。この結果は高周波窓上部、下部 (E-面) の表面温度が側面 (H-面) と比較して高いという実測値と辻褃が合う。

4.2 熱流体解析

図 11 は疑似負荷を用いた熱流体解析の結果である。高周波窓全面から 250 kW の熱負荷が均等に入射、冷却水流量を 460 l/min とした場合を計算した。水タンク外壁は断熱壁とし、入射した熱負荷はすべて冷却水に吸収される。また、計算には重力の効果を含めており、Y 軸に -9.8m/s² とした。図 11 の上図はロード断面の水温度分布である。正面から見て左側の水温が高くなっていることが分かる。高周波窓近傍の水温度分布は局所的な腐食を抑制する観点から均等になる方がよい。水タンクの構造は今後検討すべき課題の一つである。図 11 の下図は正面からの様子である。冷却水の流れの関係から左下隅の冷却が悪く水温が高いことが分かる。また、高周波窓の中心はよく冷却されているが、シール材近傍に対しては効率よく冷却されていない様子が見られた。

これらの測定、計算結果と分解調査で検出された

水漏れ箇所およびシール材のダメージ分布を比較すると、辻褃が合いよい一致を示していると考えられる。

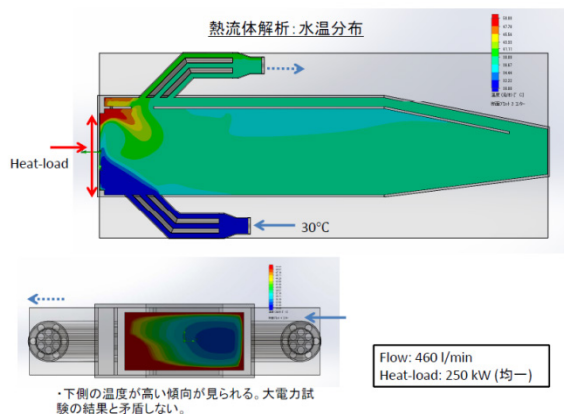


Figure 11: Distribution of water-temperature in water-tank calculated by Solid Works Flow simulation.

5. 水漏れ対策

5.1 耐圧試験 (円形導波管型)

ウォーターロードの製造後の検査の一つに耐圧試験がある。通常、常温 (15-25°C) にて 1 MPa の水圧で実施されるが、実際には 30-50°C の範囲で使用される。今回、水温 40°C にて耐圧試験を行ったところ、加圧後、15-20 分でスローリークが発生した。なお、常温における試験ではスローリークは検出されていない。耐圧の水温依存性を 2012 年度に製作した 4 台すべてにおいて調査した。内 1 台の結果を図 12 に示す。水温 30°C まではリークは検出されなかったが、それ以上の水温では数分を待たずにしてリークが検出された。42°C 以上では大気圧環境化でもリークが発生した。水温 60°C の時点でリークが止まった。

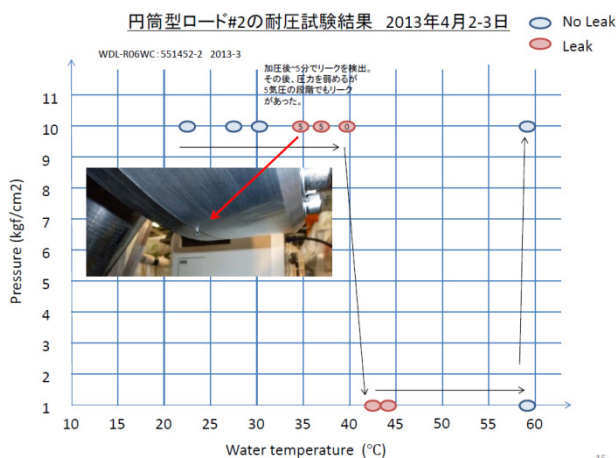


Figure 12: Result of pressure test with hot water.

リークの再現性を確認するために、サイクル試験を実施したが、試験ごとにリーク位置などが変化した。計 4 回実施したが 3 回目の試験からリークが止

まった。このときの通水期間は合計で約 2 週間であった。

図 13 は大電力試験後を実施した試作機の分解検査時の様子である。RF 投入時間の合計は 14 時間、最大電力は 1 MW (1 MW は 20 分のみ保持) である。試験後は冷却水 (市水) を張ったまま約 1 月保管していた。試作機では温水による耐圧試験を行っておらず、温水による初期リークの認識が無いまま大電力試験を行っており、初期リークが起因すると思われる腐食が RF コンタクト部に見られた。また、シール材外皮表面は酸化により変色していたが、緑青の発生には至っていなかった。

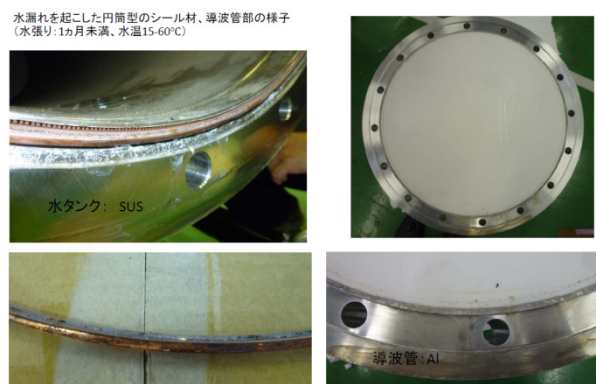


Figure 13: Disassembly of a cylindrical-type after high-power test to check a water-leak.

5.2 水漏れ対策

水漏れ対策を行うにあたり、シール材の改良が必要である。改良方針として、外皮に錫メッキを施すことを行った。錫メッキは銅製給水管の耐食性向上のために用いられるものであり、今回適用した。シール材改良の結果、温水環境化における耐圧試験ではいずれの温度でも水漏れは検出されなくなった。

5. まとめ

- 主リングで用いるすべての大電力用ウォーターロードについて、製作時およびオーバーホール時に錫メッキ仕様のシール材に変更した。今後は定期的にサンプル調査 (分解調査) を行い、ウォーターロードの経年劣化を調査して行くことを考えている。

参考文献

- [1] SuperKEKB, URL: <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] K. Akai, "RF system for SuperKEKB", proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug 2010, WESH05 (in Japanese).
- [3] Y. Arizumi et al., "Development of 1.2 MW High Power Water Load", proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Japan, 1999.
- [4] K. Watanabe et al., THPF1013, proceedings of IPAC13, Shanghai, China, 2013.
- [5] K. Ebihara et al., "RF High Power Water-Load for KEKB", proceedings of the APAC01, Beijing, China, 2001.