

SuperKEKB 加速器 Phase2 運転中における大電力高周波源の状況

CURRENT STATUS OF THE HIGH-POWER RF SYSTEMS DURING PHASE2 OPERATION IN SUPERKEKB

渡邊謙#, 吉田正人, 吉本伸一, 丸塚勝美

Ken Watanabe #, Masato Yoshida, Shin-ichi Yoshimoto, Katsumi Marutsuka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The high power rf system installed in the power supply building has the role of supplying RF power to the ARES cavities and the superconducting rf cavities to operate the SuperKEKB accelerator. The commissioning of phase 2 was conducted with damping ring in the positron beam line from February to July 2018. The various troubles of high power rf system were happened during phase 2. The current status and the responses to the phase 3 commissioning for the high power rf system will be reported in this paper.

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 (DR) 地上部大電源棟内に設置されてい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。2018 年 2 月から SuperKEKB 加速器 Phase2 の運転が開始され、DR、HER、LER の順に各リングの順に立ち上げを行い、加速器の運転が進められた[1]。DR の大電力高周波源は 2016 年度に建設され、不定期に短期間の運転のみという稼働状態であった。今回の Phase2 の運転が初めての長期運転を行う機会となった。大電力高周波源においては、クライストロン、クライストロン電源、立体回路および冷却系の各所で運転中、様々なトラブルが発生し、一時的に運転停止させ、加速空洞をデチューンさせる必要が生じた RF ステーションが MR にて数カ所発生した。DR の大電力高周波源は問題を起さず安定に運転できた。2018 年 7 月中旬に Phase2 の運転が終了し、Phase3 のステージに進むことが決定された。現在、Phase2 の運転時に故障した箇所の手当てを進めながら 2019 年初旬に予定されている Phase3 の運転に備えている。本報告では、Phase2 の運転中に発生した各種トラブル、その対応および Phase3 への取り組みについてまとめる。

2. Phase2 の運転状況

2.1 運転状況

Phase2 運転開始前の 2017 年冬に RF システムの動作確認のため、空洞エイジングが行われた。全 RF ステーション (MR:30, DR:1) の動作状況を確認し、経年劣化による冷却系のトラブルはいくつか見られたが、適宜必要な手当てを行い対応した。

2018 年 2 月以降の運転では、長期に亘り加速器を停止するような致命的なトラブルは発生しなかったが、クライストロン電源の動作不良、建屋からの雨漏りおよび大電力用ウォーターロードの高周波窓の割れが原因の水

漏れで一時的に運転から外した RF ステーションが D4-A、D4-C、D4-G、D4-H の 4 箇所あった。また、2018 年 7 月初旬に大電力用ウォーターロードのトラブルが発生した D5-D では代用品のロードへの交換は行わずに運転終了までの約 3 週間、運転から外して対応した。

2018 年 8 月以降、休止期間中に定期メンテナンスを実施する。その他に Phase3 の開始前までに特に大電力用ウォーターロードの水漏れの原因調査および対策 (機械的、電気的設計の再検討) を進めていく。

なお、Phase2 運転期間中におけるクライストロンの LV on (ヒーターオン) の総時間は、3500~3900 時間であった。

2.2 クライストロン

運転期間中に 2 台のクライストロン (D4-C、D11-C) から冷却水の水漏れが発生した。リークした場所は各々バディー冷却系となり、クライストロンのドリフト区間にある各空洞を冷却する配管系であった。これらのステーションは予備のクライストロンへ交換すると共に、水漏れを起こした球は各々水漏れ修理を実施し、修理後は予備機として保管している。Figure 1 に修理の一例として D11-C のクライストロンで検出されたリーク箇所と修理後の様子を示す。SuperKEKB で使用されるクライストロンは Toshiba 製 E3786、E3732 の 2 タイプある。ほとんどの球がトリスタン、KEKB から使用を続けているものである。Phase 2 運転終了時で、E3786 の平均運転約 6 万時間 (運転時間が最長の球: 約 11.2 万時間)、E3732 の平均運転時間は約 2.2 万時間となった (運転時間が最長の球: 約 8 万時間)。



Figure 1: Location of the water leak on the cooling pipe at the klystron installed to D11-C.

kenw@post.kek.jp

2.3 クライストロン電源

運転期間中、5月13日に建屋からの雨漏りにより、D4-GHのクライストロン電源の高圧部の一部で一時的な絶縁不良が生じ、インターロックにより高圧がダウンした。屋内に雨漏り対策を施し、数日以内に復旧した。また、細かなトラブルとして、ヒーター・アノード電源や集束コイル電源に内蔵されたアンプやフィードバック用基板の制御用に用いる小型のDC電源の故障が目立ってきた。このトラブルにより、D4-A、D4-C、D11-Bが数日間運転から外された。小型DC電源の故障によるトラブルは今後、そう遠くない時期に他ステーションでの発生が予想されるため、事前対策として休止期間中に順次更新していく計画を立てている。

2.4 立体回路

立体回路では導波管(接続箇所フランジ面)からの電波漏れ対策を実施し、Phase1にて検出された漏洩箇所に対して、漏洩レベルを低減させた。サーキュレーター第4ポートに設置している間接水冷式同軸ダミーロードは全数、トラブルなく動作した。

一方、サーキュレーターはMR運転開始前までにD8-C、D10-A、D11-Bの3RFステーションに対して、オーバーホール品との交換を実施した。取り外したサーキュレーターは製造メーカーにて順次、分解調査とオーバーホールが実施されている。運転期間中では、D5-A、D8-D、D11-Cの冷却水路から新たにリークが検出された。このうちリーク量が多いサーキュレーターについては、冷却系のリザーブタンクに自動給水機構を設けるなど応急処置で対応し、サーキュレーターからの水漏れが原因で運転から外すことは避けた。これらのサーキュレーターは優先順位を付けて、休止期間中にオーバーホール品と交換する予定である。

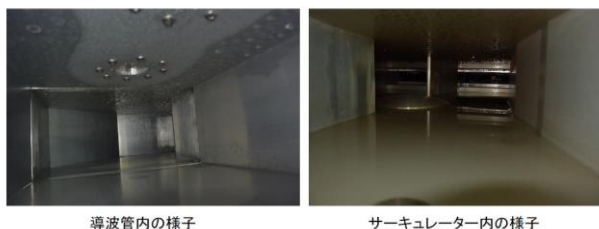


Figure 2: Pictures shows inside of the waveguide and the circulator after water-leak at D4-G.

サーキュレーター#3ポートに設置されている円筒導波管型ウォーターロード2台から水漏れが発生し、一時的にLER、HER各々の運転が停止した。発生したステーションはD4-G、D5-Dの2箇所であり、それぞれ4月4日、7月1日に発生した。D4-Gでは、水漏れ時にその検知を目的として設置した既存のインターロックがうまく働かず、クライストロンと空洞間の位相の変化などRFのモニター値の変動より異常を察知し、現場にて様子を見たところ漏水検出用の穴付スパーサーからのリークを発見した。即座に冷却システムとの配管の切り離しを行ったが、ウォーターロードよりリークした水はすでに立体回路内へ侵入し、サーキュレーターより下流数mのところまで伝わっていた。Figure 2に導波管およびサーキュ

レーター内の様子を示す。立体回路へ水が浸入したあともRFが投入され続けたため、少量ではあるが最下流まで蒸気が到達し、内面に結露が生じていた。サーキュレーター付近の立体回路内部は底面に水と水蒸気に覆われていたが、投入電力200kWの状況下ではアークセンサーは動作しなかった。復旧のための対応として以下のことを順次実施した。立体回路の一部を外し、地上部と地下トンネル内の2系統に分けて送風機を用いて導波管内部を一晩かけて乾燥させた(Fig. 3)。乾燥後は空洞の上流に同軸ダミーロードを設置し、ビーム通過時に空洞から発生するWake fieldをダンプさせる構成へと組み替えた。

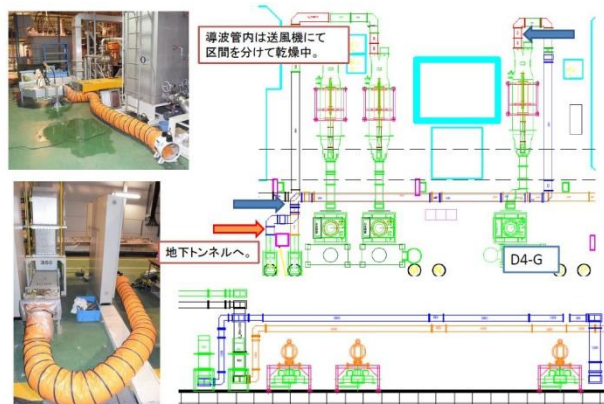


Figure 3: Drying in the waveguide after water leakage.

サーキュレーターについては、内部に蓄積した埃の除去を目的としたクリーニングを行いつつ自然乾燥により乾燥させた。故障したウォーターロードは予備機と交換し、復帰の準備を進め、5月16日にサーキュレーター第2ポートをショートとした状態で300kW全反射の大電力試験を実施し、水没した後に乾燥させたサーキュレーターの動作に異常のないことを確認した。翌日に空洞エージングを行い、定格電圧まで印加出来ることを確認し、LERの運転に復帰させた。

D4-Gにてウォーターロードの水漏れが発生した後、サーモセンサーの取り付け位置の見直しを行った。また、全RFステーションに対して、漏水探知器(OMRON:形K7L-AT50+ポイント型センサー)を設置し、早期に水漏れを検出し、RF OFFとするようにインターロックを追加した。7月1日に発生したD5-Dのウォーターロードからの水漏れ時には、追加した漏水センサーが上手く働き、立体回路内へ水が浸入する前に冷却システムからの切り離しが行えた。D5-Dに関しては、残りの運転期間とウォーターロード予備機の設置作業の工期を考慮して、運転終了の7月17日まで、空洞の上流に同軸ダミーロードを別途接続して、加速空洞はデチューンして運転から外した。

2.5 冷却系

Phase2の運転期間中では、Phase1運転期間中に頻発したサイトグラスの損傷やSUS配管系からの水漏れは発生しなかった。2018年2月からMRの立ち上げの準備として加速空洞のエージングが行われた。このときD5

では、クライストロン冷却用の蒸気冷却系の凝縮水側から繊維状の異物発生し、結果、ストレーナーが頻繁に詰まり給水が追いかない、また、冷却水流量低下のインターロックが頻発するという状況となった。この現象は Phase1 の運転時には検出されておらず、また、D5 の蒸気冷却系は Phase1 以降に配管工事は行っておらず、異物の混入は SuperKEKB へ改造する際に行った配管工事か、それ以前の工事の際に混入したものと推測している。繊維状の異物の量は思いのほか多く、ストレーナー詰まりが完全に解消までに約 1 月掛かった。その他には、給水用のモーターバルブの故障があり、給水停止によりリザーブタンクの水位が低下し、インターロックにより、クライストロンの高圧がダウンするという状況が数回あった。

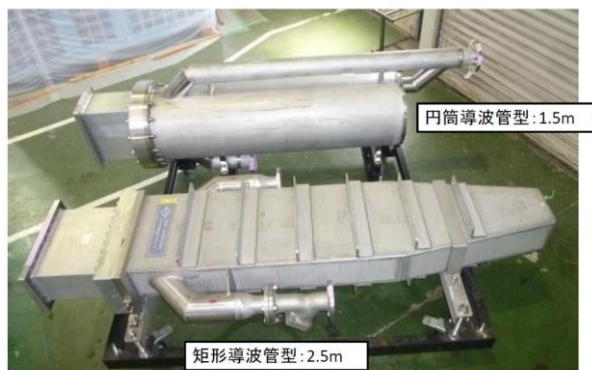


Figure 4: High power water-loads.

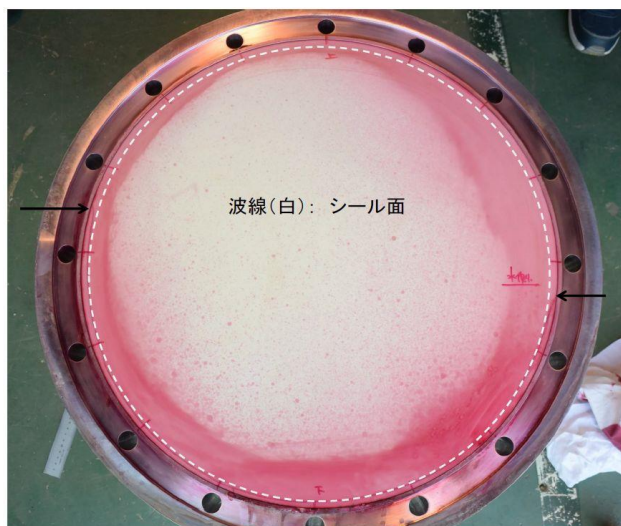


Figure 5: Broken RF window after color check at D5-D (view from water-side).

3. Phase3 に向けた取り組み

3.1 サーキュレーター

Phase2 の運転期間中に新たに 3 台のサーキュレーターの位相器の冷却水水路から水漏れが発生した。いずれも 1980 年代後半に一括製作され、オーバーホール

が未実施のサーキュレーターであった。リークが検出されたサーキュレーターに対しては、閉回路の冷却水系に自動給水装置を組み込むことで対応した。現在、31 台中 5 台からのリークが検出されており、優先順位を付けて、今年度内に完了する修理品 2 台および年度内に完成する新規製作品 1 台との交換を予定している。外したサーキュレーターは順次、修理(オーバーホール)を進める。今後、運転に必要なとされるクライストロン出力は増大する一方であることから、オーバーホール時には特に位相器に用いられるフェライトのダメージに注視して、割れ、欠けが検出されたブロックについては全数交換する方針を取ることにした。現状では新規製作も含め年 2~3 台のペースで、更新を進めている。



Figure 6: Broken RF window after checking cracked area (view from water-side).

3.2 ウォーターロード

1.2MW 用大電力用ウォーターロードとして、日本高周波製の 2 種類を採用している。富士地区(D7、D8)、日光地区(D10、D11)にはそのうち矩形導波管型(1998 年設計[2])を使用、大穂地区(D4、D5)には SuperKEKB 建設時に新規に設計された円筒導波管型(2012 年設計[3])が使用されている。Figure 4 に各々のウォーターロードを示す。

円筒導波管型ウォーターロードは 2012-2014 年の間に計 12 台製造され、D4、D5 の 12 RF ステーションに組み込まれている。通水も含め運用開始は 2014 年からであり、延べ 4 年間水張りされた状態を保持していた。運用当初は KEKB からの運用方法を踏襲し、吸収体に市水を使用していたが、シールの腐食に起因した微量のリークにより、RF シールド面も腐食し、結果、電波漏れの発生を招いていた。このため、2016 年の Phase 1 の終了後に円筒導波管型全数の分解調査を行い、腐食の状況を確認した。復旧時にはシールのメッキを最表面に金メッキを施したタイプに変更し、再組立を行った。再組立前には取り外した高周波窓の外観検査や洗浄を行っているが、この時点ではクラックといった損傷については確認されていない。また、運用時の吸収特性を考慮した

条件で、水質と電気的特性の調査を行い、水質の改善を図っている。

Phase2 の運転中に D4-G、D5-D に設置された円筒導波管型ウォーターロード計 2 台から立体回路内部に水漏れが生じた。水漏れを起こしたウォーターロードの分解調査を実施した結果、水漏れの原因は 2 台とも高周波窓に発生したクラックに起因していたことが分かった。クラックは円筒型のディスクの外周部に沿って発生しており、一部の区間でシール面を跨ぐ形でクラックが成長したために水漏れに至っていた。Figure 5、Fig. 6、Fig. 7 に D5-D で使用されていた高周波窓のカラーチェックの結果を示す。

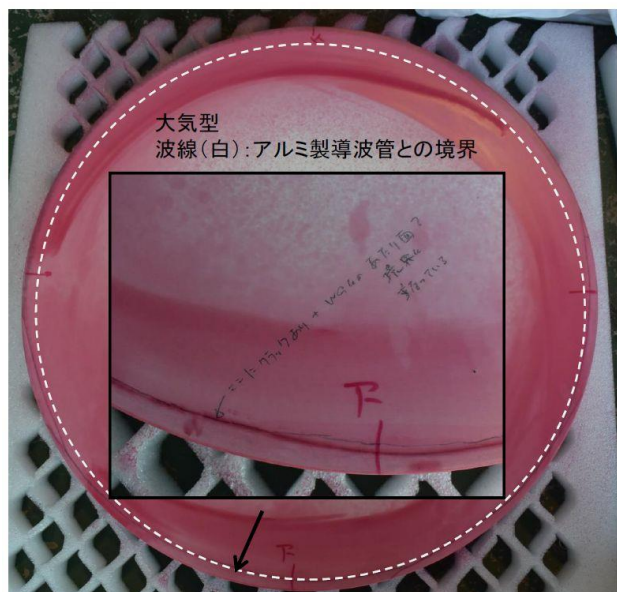


Figure 7: Broken RF window after color check (view from air-side).

高周波窓はアルミ製導波管に詰め込み、ステンレス製水タンクフランジ面にセットされたヘリコフレックスにてシールする構成を取っている。クラックの様子と各部の当たり面を目視にて観察すると、アルミ製導波管下側の当たり面にクラックの起点と推測される箇所が見つかった (Fig. 7、Fig. 8)。ウォーターロードの構成から運転時の応力分布を評価すると、クラックが発生した箇所周辺は水圧による応力が一番高い領域と一致していた。今後はアルミ製導波管側の高周波窓との当たり面の形状測定を行い、応力集中していた領域が無いか調査を進める。また、円筒型ウォーターロードの修理時には、高周波窓との接触箇所の公差に十分注意し、接触面の追加工を実施する方針である。今後も運転中に高周波窓のトラブルが発生すると推測しており、高周波窓周辺の固定方法の再検討が必要である。再検討する上で SUS 製水タンクはできるかぎりそのまま流用し、高周波窓とアルミ製導波管部分の付け替えのみで試験できるような構成を考えている。

一方、矩形導波管型でも 2013-2014 年に行ったオーバーホール時に、ほぼ全数のロードの高周波窓にクラックが発生していることを発見している。ただし、発生し成長したクラックは、シール面を跨ぐようには成長しておら

ず、結果、高周波窓の割れに起因した水漏れは検出されていないことを述べておく。高周波窓の損傷具合については、一部を除き使用期間に依存する傾向が見られた。

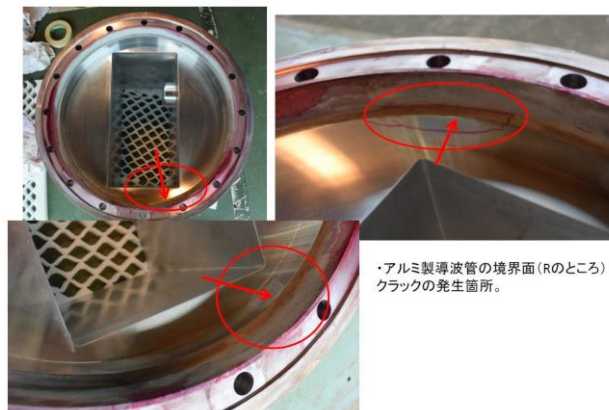


Figure 8: Waveguide to insert the RF window.

4. まとめ

本報告では SuperKEKB 加速器 Phase2 の運転における大電力高周波源の状況について述べた。大電力高周波源を構成するコンポーネントの多くはトリスタン時に調達されたものを未だに数多く使用している。Phase3 以降の運転からはビーム電流の増加に伴い、必要とするクライストロン出力は増加していく。このとき各コンポーネントにかかる負荷も同時に増加するため、定期メンテナンスや老朽化対策を実施しつつ、これまでの運転で見られ想定される故障に対してはできる範囲で予備品の調達を行い、今後の運転に備えたい。また、大電力用ウォーターロードに関しては、当面は高周波窓が割れたら交換するという方針で対応していくが、MR の 1RF ステーションを利用して高周波窓を含むアルミ製導波管部分のみを付け替えることで、高周波窓の割れ対策に関する R&D を進めていきたい。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi, "SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッションングの成果", in this meeting, TUOLS01.
- [2] 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.
- [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.