

SuperKEKB 加速器 Phase2 に向けた大電力高周波源の状況

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

渡邊謙^{#, A)}, 吉田正人^{A)}, 吉本伸一^{A)}, 丸塚勝美^{A)}

Ken Watanabe^{#, A)}, Masato Yoshida^{A)}, Shin-ichi Yoshimoto^{A)}, Katsumi Marutsuka^{A)},

^{A)} KEK

Abstract

The maintenance of various components for the high-power rf system is being carried out for the SuperKEKB Phase 2. A high-power rf system was also built at the positron damping ring from November 2015 to December 2016 for LER. The current status of high-power rf system for the positron damping ring and the main ring will be reported in this paper.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器 MR 地上部大電源棟に設置されている大電力高周波源では、2016年2月から2016年6月末まで行われた Phase1 運転終了後、Phase2 に向けて各種機器のメンテナンスを行っている。また、2018年初頭に予定されている Phase2 運転開始に向けて、Phase1 運転開始前の2015年11月から2016年12月にかけて、新たに陽電子用ダンピングリング (Positron damping ring) [1] に対する大電力高周波源の建設が行われた。本報告では陽電子用ダンピングリングおよび主リングにおける大電力高周波源の状況について報告する。

2. Phase1 運転時の状況

2.1 運転状況

2016年2月から2016年6月にかけて行われた Phase1 運転時に発生した大電力高周波源における主なトラブルについて以下にまとめる。

クライストロンのコレクター冷却には蒸気冷却システムが使用されるが、その配管系(特に熱水部分)にて機器の動作不良や水漏れが頻繁に発生した。主な内訳は以下の通りであり、サイトグラス10台(66台中)から水漏れ、フレキ管(連通管)4本から水漏れ、給水制御用モーターバルブ2台が故障、リザーブタンク用レベルスイッチ2台の動作不良、AFC 本体フィンチューブ (D7 電源棟)から水漏れ他である。これらの原因は主に老朽化および経年劣化によるものであり、適宜、予備品と交換、または補修工事を行い対応した。

一方、立体回路系では D7-D に設置されたサーキュレーターの冷却水水路からの水漏れが5月中旬に発生、リーク当初のリーク量は微量であったが、経過観察中にリーク量が急激に増加したため5月末に LER の運転から外した。この際、クライストロン-空洞間の導波管は地上部に配管された回路の途中で切り離し、立体回路の空洞側には、同軸ダミーロードを設置、ビーム通過時に発生するローディングをダンプする形とした。同軸ダミーロードへ到達するパワーは LER の蓄積電流が 768 mA のときで 200 W 程度であった。この値は ARES 空洞

のデチューン量に依存する。この水漏れが発生したサーキュレーターは2017年度中に水路の修理を実施する。

加速器運転中、定期的に立体回路からの電波漏れを測定している。今回の運転で電波漏れが検出された箇所は、トリストラン初期に製作された導波管(現行と製作方法やフランジ構造が異なる)とのフランジ間の接続面からが多かった。対策として可能であれば予備品と交換、または導電性テープなどを用いてリーク箇所を封じた。電波漏れ対策の一環として Phase2 に向け、立体回路の一部の更新を計画している。

Table 1: Status of High-power Rf System in DR

Frequency	508.9 MHz
Operation	CW
Klystron	Toshiba E3786 (Repair) *Max output power: 500 kW *Vapor cooling
KPS	Type-B (Moved from D4-C) * Control panel updates to new
Circulator	1 MW UHF, 4 port-type
Loads	400 kW Water-load (MT#4) 250 kW Water-load (Cir#3) 30 kW Dummy load (Cir#4)
Waveguide	WR-1500
Number of cavities	2 (ARES cavity) Input power: 150 kW/ cavity Operation field: Total 1.4 MV

3. Phase2 に向けた取り組み

3.1 陽電子用ダンピングリングにおける大電力高周波源の建設

2015年11月からダンピングリング用大電力高周波源の建設が開始された。建設はクライストロン電源の移設から始まり、次いでクライストロンのコレクター冷却用冷却

[#] kenw@post.kek.jp

塔の設置、クライストロンの移設、蒸気冷却系の建設の順に進められた。Figure 1 にレイアウト、Fig. 2 に建設後の電源棟内の様子を示す。また、表 1 に RF のステータスを示す。クライストロン電源はトリスタン終了後から休止中の D4-C (B 型) を D4 電源棟から移設した。クライストロン電源の更新箇所は電源制御盤のみであり、その他の電源本体(高圧部)については、通常点検を経た上で継続して使用する。クライストロンは KEKB 運転時にクラブ空洞用に使用していた球を D11-E から移設した。このクライストロンは出力カップラーの冷却系を水冷式から風冷式へ改修したものであり、このため最大出力は 500 kW に制限される。ダンピングリングで要求される RF パワーは空洞あたり約 150 kW、Phase2 開始時の空洞数は 2 台であり、現時点で問題になることはない。また、同様にクラブ空洞用に D11-F で使用されていたクライストロンをダンピングリングの予備機として同電源棟内に保管している。

クライストロンのコレクター冷却に用いられる蒸気冷却系 (AFC) の建設では、コレクターから発生した蒸気を凝縮するために使用するバンドルのみ主リングの予備品から流用した。風冷用ファン、制御系など他一式は新たに調達し設置した。

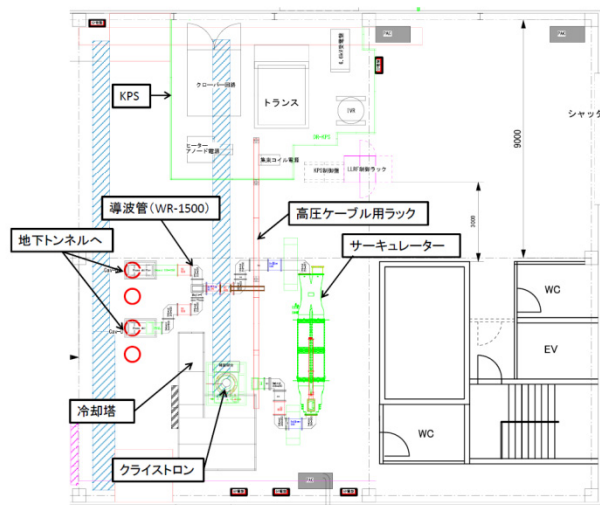


Figure 1: Layout of the high-power rf system for the positron damping ring.

ダンピングリングの RF システムは、クライストロン 1 台で 2 空洞を運転する構成である。このため、サーキュレーター出力以降は Magic-T を介し、高周波電力を 2 分岐する。また、地下トンネルに設置された空洞間の距離に対応した位相差(約 90°)を設けるため、分岐後の各々のラインに全体の線路長を考慮した上で位相器を設置している。サーキュレーター、ダミーロードは主リングの予備品を流用し、導波管(WR-1500)の一部(直管、H ベンド)のみを新規製作という形で建設を進めた。

LLRF 設置後の 2016 年 12 月にサーキュレーター出力直後の箇所にショート板を挿入し、地上部のみにおける RF 出力試験を実施し、蒸気冷却系などの各種システムの動作試験・調整運転を行った。2017 年 5 月から 6 月にかけて ARES 空洞 2 台のコンディショニングが開始された。このとき最大で 354 kW の RF を出力し、加速器運

転で要求される出力が得られることを改めて確認した。



Figure 2: High-power rf system in the building for positron damping ring (PDR).

3.2 主リングにおける各種機器のメンテナンス状況

大電力高周波源で使用されている機器のほとんどはトリスタン時に製造・設置され、未だに使用開始から 30 年を経過したものが多くを占める。これらの更新の一環として、日光地区では大電力用ウォーターロードに用いる純水系冷却水循環装置のポンプおよび制御盤の更新を実施している。他にも富士地区の立体回路の導波管の更新作業を進めている。

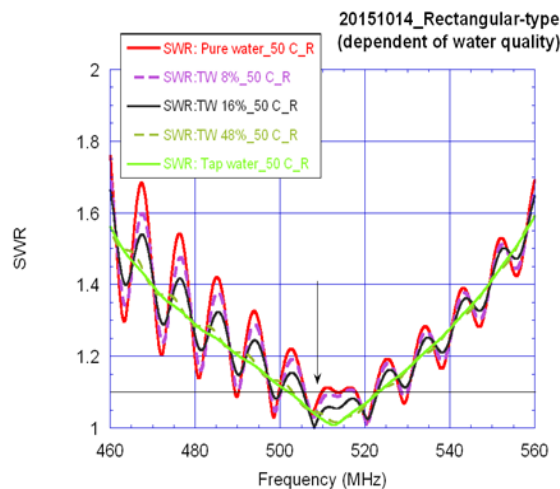


Figure 3: Broadband performance of the Rectangular-type water-load (dependence of water quality at 50 C).

SuperKEKB 用に新規製作した大電力用ウォーターロード[2, 3] の運転にあたり、高周波電力の吸収体として使用する循環水として KEKB 時代と同様に市水を採用していたが、系統に腐食が発生した。長期運転を考慮し、Phase1 運転前までに矩形導波管型、円筒導波管型の 2 種類のウォーターロードに対する電気的特性の水質(導電率)および水温依存性の調査した。市水(Tap-water)の導電率は、採取場所により若干異なるが、300~360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。純水に市水を混ぜ、混合水とし、チラーを用いて水温を制御しつつ測定を実施した。

水温 50°Cにおける測定結果を Fig. 3、Fig. 4 に示す。

双方ともに純水のみの場合が一番特性が悪く、円筒導波管型では 508.9 MHz における SWR は 1.2 を超えた。要求される SWR は 1.2 以下であることから、市水の含有量として 10% (導電率: 約 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 程度は必要となることが分かる。矩形導波管型は、純水とした場合でも要求値 (SWR<1.2) を満たすことを改めて確認した。現在、循環水の導電率は、各電源棟共に 10~25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ として運用している。定期的に循環水の導電率をモニターし、水質の管理も合わせて行っている。また、市水使用時に発生した腐食に対する修理も必要に応じて実施しているところである。

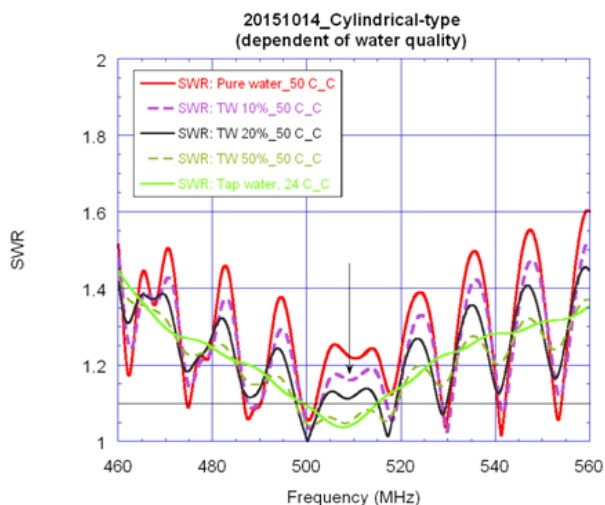


Figure 4: Broadband performance of the Cylindrical-type water-load (dependence of water quality at 50 C).

3.3 クライストロンの状況

SuperKEKB 加速器主リングおよびダンピングリングで使用されるクライストロンはすべて東芝製 E3732、E3786 である[4]。現在、クライストロンの予備機の動作確認試験を通常の保守点検と共に行っている。動作試験を行っている予備機は、トリスタン時に製造し運転に使用、KEKB 運転時には休止していたものであり、運転時間は比較的短い製造より年数が経過している球である。試験は MR 地上部にある D2 電源棟 DT ステーションで行われ、耐電圧、RF 出力特性の確認などが行われている。動作状況に応じて、予備機の改修も検討しているところである。

Figure 5 に SuperKEKB のために保有する全クライストロンの Phase1 終了後における運転時間を示す。対象としたクライストロンは予備機、PF-AR、テストステーションのものを含む計 45 台である。クライストロンの平均運転時間はそれぞれ、E3786 (25 台) で 56,735 時間、E3732 仕様 (20 台) で 18,422 時間である。最大運転時間は、T27 (E3786) の約 11 万時間 (108,843 時間) である。この球は、トリスタン開始直後から使用され続け、KEKB を経て、SuperKEKB Phase1 終了時の現在でもなお稼働しているものである。最小運転時間は、T69 (E3732) の 2,872 時間である。これは KEKB 終了後に SuperKEKB 建設のために調達し、Phase1 の期間のみ運転した球である。また、予備機は 7 台あるが内 4 台は SuperKEKB 建設時に調

達および改修したものであり、運転時間は 1,000 時間未満の球である。

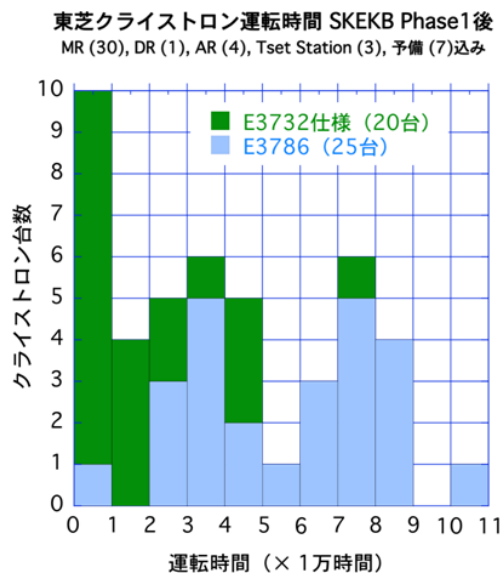


Figure 5: Summary of the operation time of klystrons in MR and PDR for SuperKEKB.

4. まとめと今後の予定

本報告では SuperKEKB 加速器における大電力高周波源の状況について述べた。大電力高周波源の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が未だに数多く使用されており、一般的に要求される使用期間を超えた領域で運転を行わなければいけない。特に多くのクライストロン電源は製造されてから 33 年が経過し、変圧器など高圧機器においては一般に要求される 30 年という期間を超えている。また、小型電源の故障による制御系のトラブルなど、今後、細かなトラブルが頻発することも同時に予想される。このように故障が予想される箇所に対して、予備品の調達など可能な限り準備を行い Phase2 の運転に備えたい。

参考文献

- [1] M. Kikuchi *et al.*, "Design of positron damping ring for Super-KEKB", Proceeding of IPAC10, Kyoto, Japan. May. 23-28, 2010, pp. 1641-1643.
- [2] K. Watanabe *et al.*, "SUP050", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug, 2013.
- [3] K. Watanabe *et al.*, "SUP052", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug, 2014.
- [4] K. Watanabe *et al.*, "WEP065", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug, 2015.