

# SuperKEKB 加速器 MR における大電力高周波源の進捗状況

## CURRENT STATUS OF THE HIGH-POWER RF SYSTEMS IN MR FOR SUPER-KEKB

渡邊謙<sup>#, A)</sup>, 吉田正人<sup>A)</sup>, 吉本伸一<sup>A)</sup>, 丸塚勝美<sup>A)</sup>, 小野正明<sup>A)</sup>

Ken Watanabe<sup>#, A)</sup>, Masato Yoshida<sup>A)</sup>, Shin-ichi Yoshimoto<sup>A)</sup>, Katsumi Marutsuka<sup>A)</sup>, Masaaki Ono<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK

### Abstract

The commissioning of the SuperKEKB is planning in early 2016. In order to correspond to the large beam current and high beam power, the high-power rf system in the main ring to drive the ARES cavities and the superconducting rf cavities was reinforced. Reinforcement of the high-power rf system necessary to T = 0 has been completed mostly until July 2015. Progress of 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: Main Ring) では現在 2016 年初頭のコミッショニング開始に備え各種機器の立ち上げを行っている。主リング地上部大電源棟に設置される大電力高周波源は SuperKEKB 加速器へのアップグレードに伴い、KEKB 運転終了後からクライストロン、クライストロン電源、1MW サーキュレーター、WR-1500 立体回路システム、大電力用ウォーターロードおよび各種冷却系の増強・オーバーホールを行ってきた。本報告では主リング地上部大電源棟に増強された大電力高周波源の進捗状況について報告する。

### 2. 大電力高周波源の構成

SuperKEKB 加速器全体の大電力高周波源の構成と現状を図 1、図 2、図 3、図 4 および表 1 に示す。主リングでは大穂、富士、日光地区にある計 6 つの大電源棟内に大電力高周波源が分散して設置され、計 30 RF ステーションを運転する。DR (Damping ring) には 1 RF ステーションが新規に設置される。クライストロンに対する空洞数はほとんどが 1 対 1 であるが、D4、D7、D8 および DR にある計 9 ステーションは 1 対 2 である。将来的に MR における RF ステーション数は 34 となり、1 対 2 の構成は D7、D8 にある 4 ステーションのみとなる予定である。

2015 年 8 月現在、コミッショニング開始 (T=0) までに要求された大電力高周波源の増強および動作試験はほぼ完了した。運転開始前までは各種点検・メンテナンスを実施していくことになる [1]。

#### 2.1 クライストロンとクライストロン電源

クライストロンは KEBK 運転終了まで一部のステーションで使用されていた Valvo 製 YK1303[2] (D10 : 4 台) を廃止し、MR の全 RF ステーションを Toshiba 製 E3732 [2] に更新した。D4、D5 では新規に各 1 RF ステーションを設置した。

クライストロン電源は D5、D7 に設置されている 2 台の B 型電源を A 型へ改造することを実施した。

<sup>#</sup> kenw@post.kek.jp

DR 用クライストロン電源は D4-C として機能していた B 型電源を新規製作した電源制御盤と共に移設することで対応する。このため、D4 では B 型電源の改造ではなく A 型電源 1 台を新規製作した。また、D4、D5 ではトリストラン時に建設し、KEKB 運転時には休眠中であった A 型電源[2] (2 台) の復旧・立ち上げを行った。

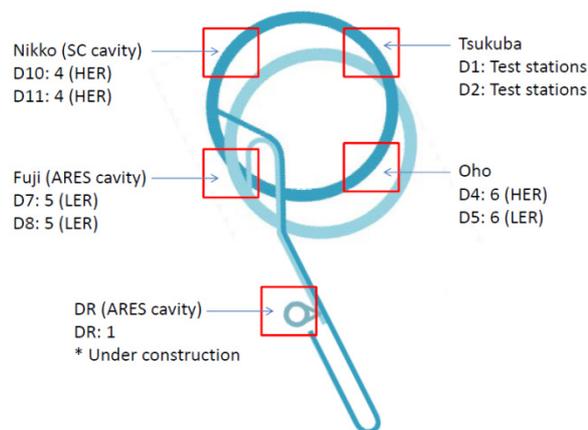


Figure 1: Number of the rf stations for SuperKEKB. (at T = 0).

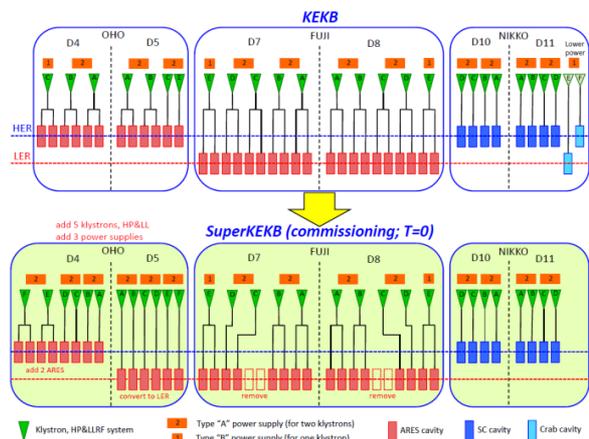


Figure 2: Structure of the rf stations from KEBK to SuperKEKB (T = 0).

## 2.2 立体回路

地下トンネル内の空洞位置およびクライストロンあたりの空洞数に変更されたことから、D4、D5では大規模の立体回路の組み替え・新規配管が行われた。D7、D8については、トンネル内の空洞数が減り、このため各2RFステーションにおいてクライストロンあたりの空洞数が1対2から1対1へ変更された。変更されたRFステーションのみ小規模の組み替えを行った。クライストロン直下に設置される1MW-UHFサーキュレーター[2]はPF-ARも含め計40台保有している。その内32台は1984-1987年に製造されたものであり、損耗状況に応じて修理しながら使用を続けている。残り8台は2005-2013年に調達した新しいものであるが、KEKB運転終了後に内6台を調達した。2010年以降実施した修理作業は7台に対して行った。Phase2に向けて修理を必要とするサーキュレーターは現時点で3台あり、2017年までに実施する予定である。

Table 1: Status of High-power RF Stations for T = 0

Frequency	508.9 MHz
Operation	CW
Number of klystron (Toshiba E3732)	Fuji: 10 (12)* Nikko: 8 (10)* Oho: 12 (14)* DR: 1
Number of 1 MW-UHF circulator	Total 31 (37)*
Number of 1.2 MW water load	Rectangular: 18 (22)* Cylindrical: 12 (15)*
Number of 400 kW water load	Waveguide-type: 9 (5)* (for 1:2 and DR)
Number of 30-80 kW dummy load	Total 32 (37)*
Waveguide	WR-1500
Number of driven cavity	ARES cavity: 30 (MR) 2 (3)* (DR) SC cavity: 8 (10)*
Number of KPS	Type-A: 15 (17)* Type-B: 2 (1)*

()\*: in the future.

## 2.3 ダミーロード、ウォーターロード

KEKB運転時までは1986-1991年に一括調達した40-80 kW同軸ダミーロードとVarian製250 kW同軸型ウォーターロード、1997-2005年に調達した1.2 MW矩形導波管型ウォーターロード[3]、2005-2009年に調達した400 kW矩形導波管型ウォーターロード[4]を修理しながら使用してきた。

SuperKEKB加速器建設にあたり2012-2014年にかけてこれらロードの健全性の調査を行った。結果を以下にまとめる。

40-80 kW同軸ダミーロードではO-ringの劣化などに起因する水漏れおよびメッキの剥離などが発見され、ほぼ全数が修理しても安全に使用することが難しい状況であることが分かった。同軸ダミーロードの新規調達にあたっては、これらロードに用いられていたベリリア製抵抗体用素管は再生利用することを検討した。再生した素管を用いた間接水冷方式同軸ダミーロードを2013年に試作、2014年に必要最低限の数を調達した。

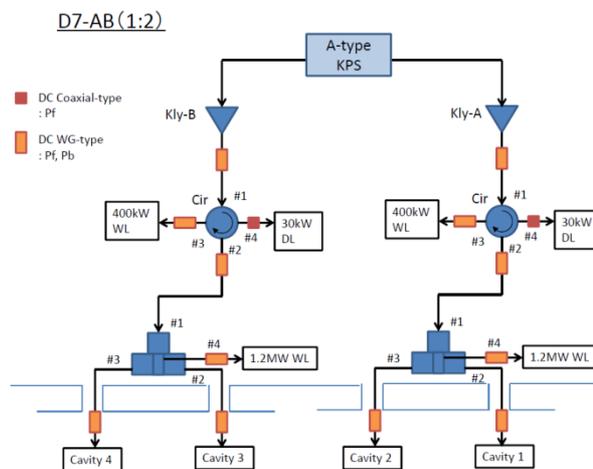


Figure 3: Setup of the high-power components for 1:2.

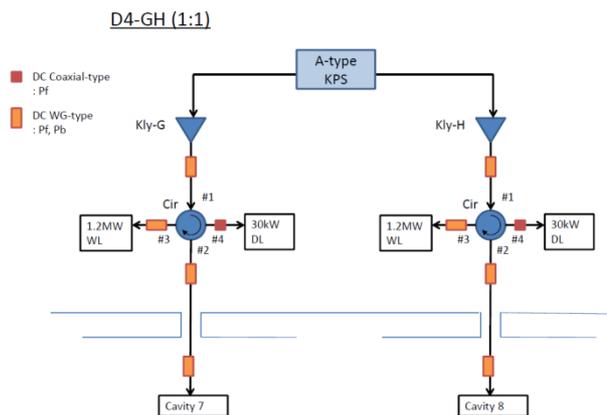


Figure 4: Setup of the high-power components for 1:1.

1.2 MW矩形導波管型ウォーターロードでは金属製シールの外皮の腐食が原因で水漏れが発生、導波管側(大気)まで浸入していたものが、D7、D8、D10にある10RFステーションで検出された。このため、2013-2014年に保有する矩形導波管型ウォーターロード19台すべてに対し修理を実施した。この際、金属製シール表面に錫メッキを施し、耐食性とシール性を上げた[5]。

1対2のRFステーションでは、KEKB運転時サーキュレーター第3ポートにVarian製250 kW同軸型ウォーターロードが設置されていた。今回、これを400 kW矩形導波管型ウォーターロードに全数更新した。

D4、D5ではRFの増強に伴い、新規に1.2 MWウォーターロードの調達が必要となった。矩形導波

管型では高周波窓近傍の表面温度が高くなる問題などがあり、その問題の解決のため、2012年に円筒導波管型冷却水タンクを採用したウォーターロードを試作した。試作後に行った大電力試験、温水における耐水圧特性改善のために金属製シールの改良などを実施後、2014年までに試作機を含め計12台の円筒導波管型ウォーターロード[6]を製作・設置した。

### 3. 大電力高周波源の立ち上げ状況

2016年初頭のコミッショニング開始、その前に実施する空洞エージングに備え、2015年5月から7月にかけてMR大電源棟に設置された30RFステーションすべてに対し、大電力RF出力試験を実施した。大電力RF出力試験では地上部立体回路内(位相器もしくはMagic-T直前)にショート板を設置、RF出力300kW全反射の条件でクライストロンの調整および地上部立体回路のRF通過区間に対して健全性を調査した。図5に大電力RF出力試験のセットアップの一例を示す。導波管導入口以下地下トンネル内に設置された立体回路の健全性調査は2015年秋から冬にかけて行われる空洞エージング時に実施する。試験は富士地区D7、D8、日光地区D10、D11、大穂地区D4、D5の順に行われた。現在設置されているクライストロンの運転時間はLV on 時間換算となるが平均で4.5万時間である。最も短いものは、KEKB運転後に調達したものであり、約140時間、最も長いものは約10万時間である。

立ち上げ手順は以下の通りである。

- (1) 立体回路接続部の健全性調査、冷却水の調整
- (2) 各種インターロックの動作試験
- (3) LV on (カソードからのガス出し)
- (4) HV on (クライストロン真空をモニターしながらの高圧DCエージング)
- (5) カソード電圧88kVの耐圧試験
- (6) クライストロンあたりのコレクターロス (CL) 500kWにおける蒸気冷却系の動作試験 (CL = 2.5MW、~24時間)
- (7) 10kW RF出力試験 (LLRFの調整、電波漏れの測定など)
- (8) クライストロンのRFエージング
- (9) 300kW RF出力試験 (LLRFの調整、電波漏れの測定など)

#### 3.1 富士地区

富士地区D7、D8の立ち上げは2015年5月に行われた。高圧の立ち上げでは高圧DCエージングに時間を要したクライストロンは2本あり、それぞれD7-A (T-62) に5時間、D8-D (T-43) に1.5日を要した。大電力RF出力試験ではクライストロン出力10kWにてLLRFを含めたシステムの健全性の調査を行い、合わせて立体回路の電波漏れ測定、その後、クライストロンの真空を確認しながら出力を上げ、RF出力300kWまで上げた。この状態で電波漏れを測定し、異常の有無を調査した。導波管のフランジ

の一部に、RF出力300kWにて~10V/mの電波漏れが検出された。増し締めや導波管内部の接触面を確保するための薄肉のスペーサーの追加などで電波漏れ対策を行った。

#### 3.2 日光地区

日光地区D10、D11の立ち上げは2015年6月に行われた。立ち上げ手順は3.1に記したものと同じである。高圧DCエージングに時間を要したクライストロンは1本であり、D11-C (T-28) に対して4日かかった。D11-Cでは通常のセットアップで印加できる最低電圧 (Vk 47kV、Va 3.3kV) においてもHV onにて真空悪化によるインターロックがかかる状態であった。この対応策として、ヒーター・アノード電源に設置されている接地抵抗を外し、さらにヒーター電流を下げビーム電流を絞った状態のように高圧を印加することができた。T-28はRFエージングでも1.5日かかり、クライストロンが立ち上がるまでに1週間に要した。立体回路からの電波漏れに対しては必要に応じて増し締めを行い、<2V/m以下とした。

#### 3.3 大穂地区

大穂地区D4、D5の立ち上げは2015年7月に行われた。D4では将来的に8台のクライストロンを運転することから、蒸気冷却系の増強が行われた地区である。高圧DCエージングに時間を要したクライストロンは1本であり、D5-B (T-52) に対し、1日を要した。立体回路の電波漏れ測定では導波管のフランジ連結用ボルト上(2箇所)から、RF出力300kWにて~30V/mの電波漏れが検出された。増し締めでは電圧レベルにほとんど変化が見られなかったため、内面の接触面を確保するための追加加工を施した薄肉のスペーサーの挿入で電波漏れ対策を行った。スペーサー挿入後は<2V/mとなった。

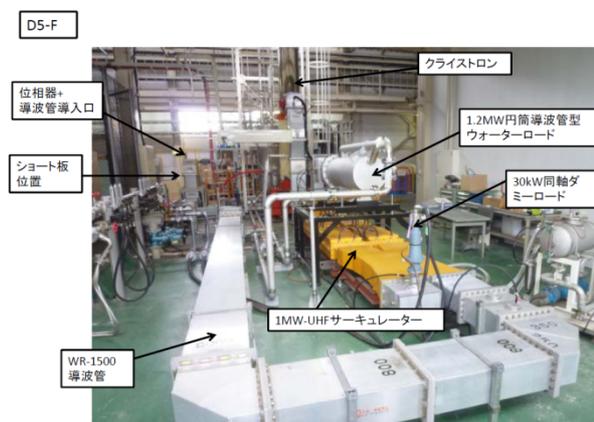


Figure 5: Setup of the high-power test for start-up (D5-F).

## 4. 今後の予定

2015年秋から開始される空洞エージングに備え、今後は2015年5月から7月にかけて行われた大電力RF出力試験にて発見された不具合の修正、各種定期点検・保守を実施していく予定である。また、老朽

化している各種冷却ユニットに対する手当も順次行っていく考えである。営業運転開始に向け不備がないように準備を進めていく。

### 参考文献

- [1] K. Akai, “RF system for SuperKEKB”, proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug 2010, WESH05 (in Japanese).
- [2] M. Ono et al., “TRISTAN RF SYSTEM WITH NORMAL CONDUCTING CAVITY”, KEKInternal 87-6, December 1987.
- [3] K. Ebihara et al., “RF High Power Water-Load for KEKB”, proceedings of the APAC01, Beijing, China, 2001.
- [4] N. Kai et al., “High power rf water-load”, proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Japan, Aug, 2006.
- [5] K. Watanabe et al., “Maintenance of the high-power water loads at MR for SuperKEKB”, proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug, 2014.
- [6] K. Watanabe et al., THPFI013, proceedings of IPAC13, Shanghai, China, 2013.