

# SKEKB 加速器 2022ab までにおける MR 大電力高周波源の状況

## CURRENT STATUS OF THE HIGH POWER RF SYSTEM OF MR FOR THE OPERATION UNTIL 2022AB IN SKEKB

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>

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

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The high power rf system installed in the power supply buildings has the role of supplying RF power to the ARES cavities and the superconducting rf cavities to operate the SuperKEKB accelerator. This report will be reported on the status of operation of high power rf system and renewal of aging components during the period up to 2022ab.

### 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[1]。2018 年 2 月から SuperKEKB 加速器 Phase2 の運転が開始され、加速器建設後、長期運転を行う初めての機会となった。2019 年初旬から Phase3 の運転が開始され、本格的な営業運転モードとなった[2]。本報告では、Phase3 開始後の 2019 年初旬から 2022 年 6 月までの運転報告および 2022 年 7 月から 2023 年 10 月のロングシャットダウン (LS1) 期間中の対応についてまとめる。

### 2. Phase3 の運転状況

#### 2.1 運転状況

Phase3 開始後の 2019 年初旬から 2022 年 6 月までの運転状況について報告する (大きなトラブルについてまとめる)。

2019ab の期間 (2019 年 2 月から 7 月) では、DR 用クライストロン電源の故障が発生した。その原因調査と対応のため数日間、運転が不安定となった。原因はアノード電源内の制御基板の問題であることが判ったが、早急な修理が不可能であると判断、アノード電源をシステムから切り離し、アノードへの電圧印加方法を効率は若干落ちるが抵抗分割方式に変えることで運転を再開した。

2019c および 2020ab の期間 (2019 年 10 月から冬季保守期間を挟み 2020 年 7 月) では、D5-B に設置されたクライストロンにて Ia Negative Spike の発生が疑われる急な RF 出力の増大が発生した。運転時の安定性を考慮し予備の球へ交換した。当該クライストロンは、テストステーションへ移動し、現象の再現性、発生原因の調査を進めている。また、建屋の老朽化が原因の雨漏りがクライストロン電源の高圧部にかかる事態が相次いで発生した。応急処置として 2019 年 10 月に D5-EF、2020 年 4

月に D11-CD、D5-CD の計 3 か所に対し、クライストロン電源上方に雨樋を設置した。以降、クライストロン電源の重故障に発展する前に数年かける形となるが、当該建屋の外壁塗装補修工事を進めている。

2020c の期間 (2020 年 10 月~12 月) では、12 月 16 日の早朝に外気温の急激な低下に伴い、D10 電源棟のクライストロン冷却用の空冷塔内の配管が凍結、冷却系の温度異常が発生した。凍結した配管は同日の午前中に解凍でき、空冷塔の冷却能力を調整することで運転を再開した。他にも各電源棟屋上に設置されている同空冷塔の構造体自体の老朽化が進み、特にここ数年で急速に金属部分の腐食が進行した。このため駆動用モーターを内包する軸流ファンユニット自体の落下が懸念され、人身事故といった重大事故を引き起こす恐れがあることから、腐食の激しい箇所を優先して当該ファンユニットの補強工事を実施した。2022 年 3 月時点で、MR に設置された空冷塔すべてに対する補強工事が完了した。

2021ab の期間では (2021 年 2 月~7 月)、老朽化が原因の計器類の故障が数回、冷却系の配管からの軽微な水漏れがあった程度であり、安定運転を達成した。

2021c の期間 (2021 年 10 月~12 月) では、立体回路まわりでトラブルが頻発した。直下型の地震が引き金となり、D4-A に設置された大電力用ウォーターロードの高周波窓が破損、立体回路への水漏れが発生した。その対応として、2019 年に新規製造した予備のウォーターロードに交換したが、高周波窓の接続フランジの接続部付近で異常発熱が発生、この予備機に初期不良があったことが判明した (後日の調査で RF コンタクト部分の接触不良があったことが判明している)。最終的には耐電力は下がるが 400kW 仕様のウォーターロードに置き換え、運転を再開した。また、D10 電源棟のクライストロン冷却用空冷塔にて、軸流ファンユニット 2 台のうち、1 台の駆動用モーターが地絡を起こし故障した。モーターはトリスタン建設時から使用しているものであり、老朽化が地絡の原因であった。幸いにして冬季運転期間であったことから、軸流ファン 1 台のみで冷却が可能と判断、故障対応は冬季休止期間中にするという方針で運転を再開した。次いで、富士地区では施設側から供給される未処理水系のポンプ 2 台のうち 1 台が故障し、運転が一時停止し

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

た。ポンプ故障によりシステムの冷却水流量が減り、運転継続が危ぶまれたが、各部の流量を必要最低限に抑えるように調整を行い対応した(2022年3月に復旧した)。

直近の 2022ab の期間(2022年2月~6月)では、D7-C のクライストロン用ヒーター電源が故障、早期の修理が難しいことから4月中旬に運転から切り離れた。また、D8電源棟では、建屋空調設備の故障と今夏の猛暑影響で電源棟室内の室温が上昇、これに起因し、一部の温度インターロックモジュールの誤動作が頻発した。対応として、常時搬入用シャッターを開とし、外気を通すことで室温を下げることを行った。空調設備の修理は LS 期間中に行う予定である。

その他にも Phase3 開始後の運転では、特定のクライストロン電源のクローバー回路の誤動作が KEKB 時代より継続して発生している。様々な対応を行っているが、今のところ決め手はない。LS1 期間中にモニター類の追加設置など原因調査のための改造を進めている。

## 2.2 クライストロン

運転期間中の 2020ab にて、D5-B に設置されたクライストロンで Ia Negative Spike の発生が疑われる急な RF 出力の増大が発生した。加速器運転時の安定性が考慮されるため、その対応として D5-B の球を予備へ交換した。ここで交換した球は、高周波窓のベンダー変更に伴い、出力窓の性能試験を兼ね、2018 年度に E3732 仕様に変更されたものである。改修に使用した球は T46 (E3786 仕様)であり、トリスタン時に製造されたものである。2022ab 終了時点で運転時間は 8600 時間となっている。今のところ問題は発生せず、安定に動作している。

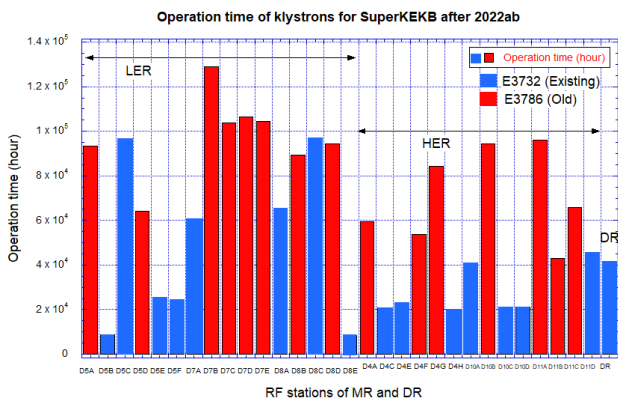


Figure 1: Operation time of klystrons after 2022ab.

Figure 1 に 2022ab 運転終了時における RF ステーションに設置されている各クライストロンの運転時間をまとめる。MR (30)、DR(1)、AR (2)と予備 (10)を含めた平均総運転時間は 52,373 時間で 5 万時間を超えた。総運転時間が 10 万時間を超えた球は 4 本あり、最長は T27 の 129,096 時間である。総運転時間が 10 万時間を超えた 4 本(T27, T37, T47A, T53)の  $\mu$ GP の経年変化を調査すると、明らかに減少している球はない。但し、データは、1999 年~2022 年の期間で比較が容易な条件としてアノード電圧が 40kV ( $I_b \sim 10A$ )程度のものを使用して算出している。このため、大電流の運転においてエミッションの減少が発生しているかは不明である。正し

く評価するには陰極効率 ( $V_k$  72kV、 $V_a$  55kV、 $I_b$  max.16A)の測定が必要である。

## 2.3 クライストロン電源

2019ab の運転時に DR のアノード電源が故障、ビーム電流の制御が不可能となり、運転が一時停止した。調査の結果、アノード電圧発生に使用するコッククロフト・ウォルトン回路への入力信号の系統に異常があることまで判明したが、基盤の交換にあたり各種調整が必要なことから、早期の復旧は難しいと判断した。対応として、アノード電源自体を回路から物理的に切り離し、カソード電圧 ( $V_k$ )に対して、アノードに印加される電圧 ( $V_a$ )の割合を抵抗分割方式にて固定することで必要なビーム電流 ( $I_b$ )を担保した。Figure 2 にアノード電源まわりにおける高圧ケーブルおよび各種抵抗の接続の様子を示す。

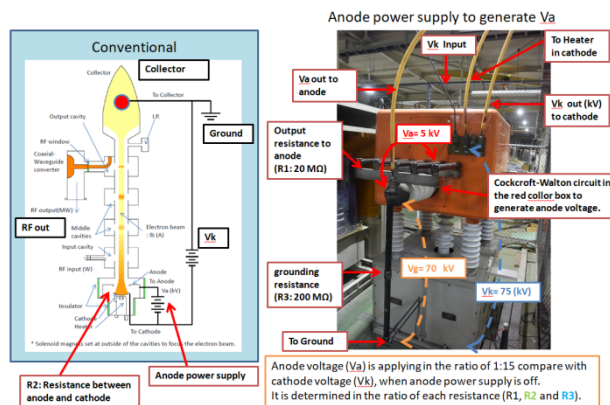


Figure 2: Anode power supply.

Figure3 に抵抗分割方式に変更後の運転の状況をまとめる。まず初めにアノード電源内部の配線を変更することで、コッククロフト・ウォルトン回路を系統から物理的に切り離した。次いで、クライストロン (抵抗:  $R_2$ )の抵抗を約  $60M\Omega$ と仮定した上で、並列に抵抗 ( $R_1$ )を配置、接地抵抗を  $R_3$ とし、 $R_1$ 、 $R_3$ の抵抗値を調整することで、 $V_k$ に対する  $V_a$ の割合を DR のクライストロンの運転に合わせた。運転再開後、 $V_a$ 、 $I_b$ が安定するまでに3時間ほどを要したが、DR 空洞の運転に必要な RF 出力 125kW を引き出すための必要なビーム電流が得られた。

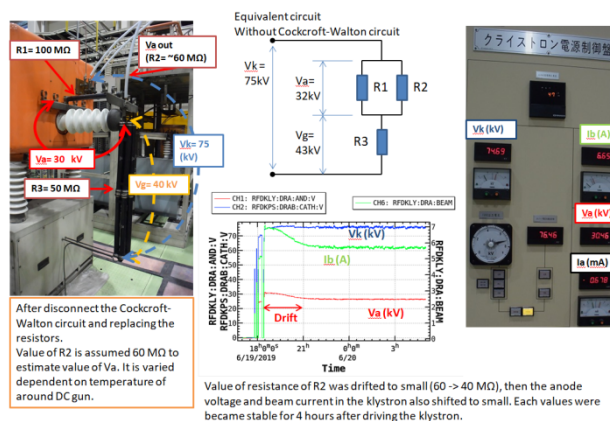


Figure 3: Anode Voltage divides replacing by resistors after disconnecting the Cockcroft-Walton circuit.



一方で、2019ab から 2022ab においても特定のクライストロン電源によるクローバー動作(誤動作)が不定期に発生している。Figure 4 に 2022ab において発生したクローバー動作の履歴をまとめる。特に問題となっている D7-AB のクライストロン電源では、運転時の V<sub>k</sub> が高いほど発生頻度が増える傾向が確認されており、また、比較的短期間に集中して発生、その後はしばらく発生しないという傾向も見られている。LS1 期間中にクローバー回路の再点検をすると共に原因究明のための改造(モニター系の追加設置)を行う予定である。

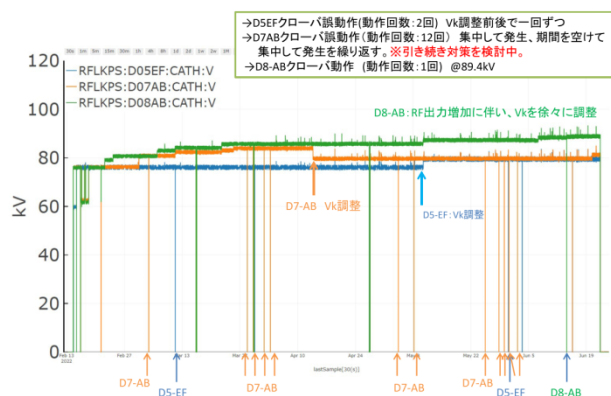


Figure 4: History of crowbar work of Klystron Power Supply during 2022ab.

大電源棟建屋からの雨漏り対策として、漏洩元となっている外壁および天井の補修工事が進められている。工事は順調に進められ、2024 年度までに一通り完了する予定である。

その他として、老朽化対策の一環として AC 6.6 kV を受電する VCB の更新も 2020 年度から年 3 台ほどのペースで進めている。クライストロン電源のシーケンス制御用 PLC の老朽化対策も 2022 年度から開始した。

## 2.4 立体回路

立体回路では大電力用ウォーターロードまわりで多くのトラブルが発生した。まず、2020c の期間に D10-D のサーキュレーター第 3 ポートに設置された矩形導波管型ウォーターロード[3]のフランジ部の温度異常が発生した。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 RF コンタクト部分で放電が発生し、これが原因で RF ロスが生じ、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、これが原因で隙間が生じたものと思われる。分解したロードのは修理を行い、修理後に D2-ET テストステーションにて最大 900kW の RF を投入し大電力試験を実施、このとき各種ボルトの締め込み具合や整合素子の再調整を行い、漏洩電波や当該部分の温度異常が発生していないことを確認した。2021c の期間では、度重なる直下型の地震による振動が起因で、D4-A に設置した円筒導波管型ウォーターロード[4]の高周波窓が割れ、立体回路内への水漏れが発生した。2016 年の運転開始から約 6 年の経過した時点で円筒導波管型 12 台中内 3 台で高周波窓の割れが生じた状況にある。高周波窓の割れが

原因の水漏れが検知される時は、必ずその直下に直下型の震度 4 クラスの地震が発生している。Figure 5 に割れた高周波窓の様子をまとめる。いずれも高周波窓の下側からクラックが発生したことが確認されており、冷却水の水圧が高く圧力負荷がかかる場所から割れることが判っている。



Figure 5: Broken RF window with water leak.

高周波窓が損傷した D4-A に対して、一部立体回路を組み替えた上で矩形導波管型ウォーターロード(予備機)に交換して対応した。そのときの様子を Fig. 6 にまとめる。しかしながら、運転再開した後まもなく、異常発熱のトラブルが発生した。この予備機は 2019 年に製造した新品であるが、同機種の製造としては最終製造ロットから数え 12 年ぶりに新規製造したロードである。新規製造をしていない期間では、SuperKEKB 建設のために既存のロードの保守・修理を実施しており、長期安定運転を目的としてメタルシールの耐食性の問題解決を中心に各種改造を進めてきた。この辺りの改造に起因する公差の問題や本機に対し、大電力まで投入する受け入れ試験を省いたこともあり、後日の調査で判明したが、高周波窓接続フランジの締め付け管理が甘くなり、結果、電気的接触不良が起こり、異常発熱の原因となったことが判った。同種の温度異常のトラブルは 2021 年夏季保守期間中に実施した D11 電源棟に設置されたウォーターロード 3 台中 2 台および 2019 年以降にも製造したロード 2 台に対しても発生した。2021c 後の冬季保守期間中にこれらロードに対し、大電力試験を実施し、締め付け不良に対する手当、温度異常が現れる電波漏洩のレベルといった発生条件およびそのときの温度分布の調査などを実施した[5]。

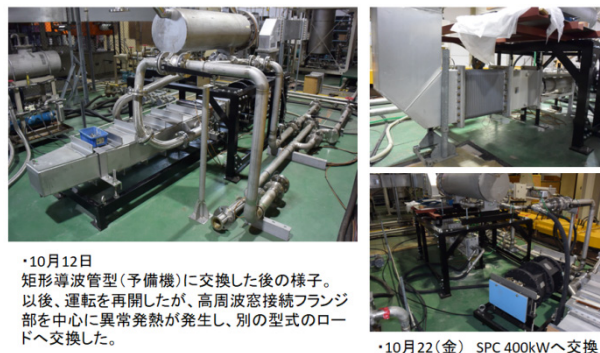


Figure 6: Water loads after replacement at D4-A.

Figure 7 に締め付け不良時における高周波窓周りの温度分布の例をまとめる。本試験では、高周波窓接続フランジからの電波漏洩による電界強度レベルを 800kW 投入時で 1 V/m 以下とするように新たに基準を設け、締め込みを行った。締め込みは各入力レベルで電界強度測定を行い、基準値以下となるように締め込みを繰り返した。ちなみに試験開始時では、100W ほどの投入電力で百数十 V/m の電界強度レベルが検知された。このような水を吸収体としたロードでは、水に対するシール性を確保しつつ、漏洩電波対策も行わなければならない、両立させるために必要な機械的設計を再考する必要性を改めて理解した。

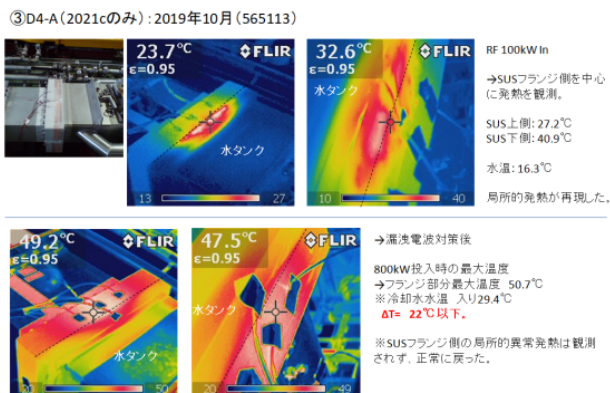


Figure 7: Temperature distribution on surface of the water load.

大電力投入時の高周波窓周りの温度分布であるが、電波漏洩大のときには、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試験より判明した。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判った。Figure 8 に漏洩電波対策を実施したロードに対する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。試験中、高周波窓接続フランジ周りおよび上流の導波管らに温度センサーを設置し、通常の伝送線路表面との比較も行った。測定では、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、800kW 入力時で約 50°Cを下回る結果となった。

サーキュレーター周りでは、移相器に使用されるフェライトの接着状況が現状で最大の懸念事項となっている。今後、修理するサーキュレーターは移相器からフェライトを剥離、適切な洗浄工程を経て、再利用することで、従来の方針であった冷却水路補修を主とした対応から、移相器自体を製作する方針に変更した。これに際し、2019年から2021年の3年に渡り、廃棄したサーキュレーター(試作初号機 1983年製)の移相器を用いて、フェライト剥離に関する試験を実施した。このとき、剥離したフェライトの磁気的および機械的特性を測定し、新品との比較を行った。その結果、製作から30年以上を経

過、かつ、長期間に亘り大電力環境下で使用されてきたフェライトの性能は、新品と遜色のないものであることが示された。これより、既存のサーキュレーターからフェライトを磁気的、機械的特性を損なわずに剥離する方法が確立された。サーキュレーターの製造にあたり、フェライトの調達のみで、その費用の約半分を占める。このように経年劣化が確認されない材料を再利用することで、新規製造と同等の性能のものを約6~7割の価格で調達することが可能となった。

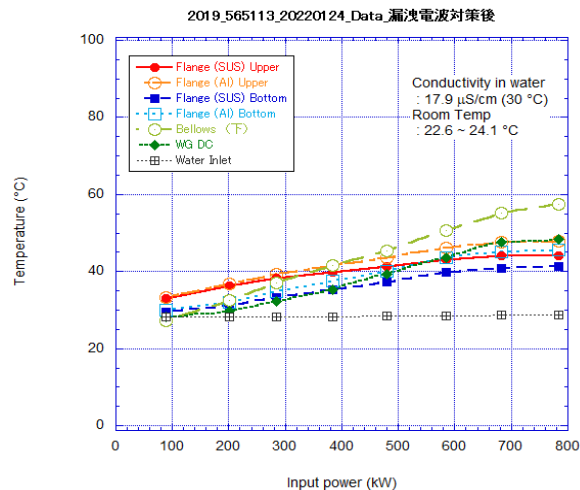


Figure 8: Measured temperature on the surface around flanges of waveguide with RF window.

## 2.5 冷却系

冷却系まわりではトリスタン時に建設した蒸気冷却系の老朽化が問題となっている。Figure 9 は大電源棟屋上に設置されたクライストロンのコレクターからの排熱を大気へ放出するための空冷塔における老朽化の現状とその対策をまとめたものである。この空冷塔は昭和 61 年に建設され、以降、令和 4 年現在も稼働し続けている。構造体には亜鉛メッキ仕様の鋼材を用いているが、30 年以上かつ屋外での運用となると、耐食性を担保することが難しく、ここ数年で一気に腐食が進行した。このため、空冷塔にあるファンユニット自体が落下、人身事故を含めた重大事故に発展する恐れが生じたため、MR に設置され全空冷塔(計 8 基)に対し、補強工事を実施した。今後は冷却能力の担保のため、ファンフードの補修工事を計画している。

このほかにも空冷塔のファンユニットを駆動するモーターの地絡事故、冷却能力調整用ルーバーの駆動系の故障などが発生しており、老朽化した構成部品の更新が急がれる状況にある。空冷塔制御用のインバーター電源も 1980 年代当時のものが未だ使用されている。他制御機器へのノイズ源となっている事例もあることから、現行モデルへの置き換えを進めている。

## 3. LS1 期間中の取り組み

LS1 期間中は、通常 1 期で行う定期保守作業を 2023 年度夏季保守期間を含めた 2 期に分けて実施していくことになっている。一方で、今以上に長期安定運転を達



成するための改造も進めている。特に特定のクライストロン電源で発生するクローバー動作(誤動作)に対し、原因究明のためにモニター系の改造を行うことが重要となっている。また、電波漏洩が原因の異常発熱が検知されたロードでは、RF コンタクト面に放電が発生、機械加工を必要とするほどのダメージを受けていたものが 2 台出た。これらの修理と受け入れ試験を実施、健全な予備機確保を進めていく予定である。



Figure 9: AFC severely damaged by corrosion.

#### 4. まとめ

本報告では SuperKEKB 加速器 Phase3 の運転開始後の 2019ab から 2022ab の期間における大電力高周波源の状況について述べた。特に冷却系においては老朽化が起因の故障、事故が増えつつある状況になっている。例として、トリストラン時から使用を続けるファン駆動用モーターといった設備の耐圧劣化による地絡、その構成部品の破損などが見られ、未更新のモーター全数を交換する必要が出てきた。多くの機器は、今後 2~5 年ほどかけて更新を進めていく計画を立てている。

#### 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] K. Watanabe *et al.*, “Current status of the high-power rf systems during phase2 operation in SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC19, Melbourne, Australia, 2019, pp.619-621, MOPRB022.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K. Watanabe *et al.*, “Survey and analysis of the actual condition of the rectangular-type water load for high power rf system in MR of SKEKB”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct., 2022, THPT004.