

Xバンド SUS430 製渦巻き型ダミーロードの開発

DEVELOPMENT OF THE X-BAND SPIRAL-SHAPED DUMMY LOAD MADE OF SUS430

安留健嗣^{#, A)}, 稲垣隆宏^{A, B)}, 前坂比呂和^{A, B)}, 岩井瑛人^{B, A)}, 近藤力^{B, A)},
大島隆^{B, A)}, 松原伸一^{B)}

Kenji Yasutome^{#, A)}, Takahiro Inagaki^{A, B)}, Hirokazu Maesaka^{A, B)}, Eito Iwai^{B, A)}, Chikara Kondo^{B, A)},
Takashi Ohshima^{B, A)}, Shinichi Matsubara^{B)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

X-band accelerator cavity system is one of the answers to the demand of constructing a compact linear accelerator, or improving accelerating gradient thanks to its efficient acceleration due to higher shunt impedance and shorter filling time. Conventional C-band dummy loads utilize the SiC absorber and a small structure inside for RF attenuation, which are often subject to discharge for a longer pulse. Moreover, it normally takes time to procure a large amount of ceramic material. We have been developing an X-band waveguide-like SUS430 dummy load. We decided on a spiral-shaped load to achieve a shorter length maintaining a sufficiently large attenuation due to its conductor loss, which has been confirmed by low power measurements. Moreover, this is expected to have reliability in terms of stability and vacuum property thanks to its simple structure. The current status is that we performed commissioning with high power, at most a 100 MW power with compressed pulse. The results look promising in terms of vacuum property, voltage down frequency, and temperature increase. In this report, we summarize the design, manufacturing process, and the high-power commissioning results of the dummy load.

1. イントロダクション

常伝導加速管を用いた線形加速器施設においては、SバンドやCバンドの加速管の開発、運用が進められてきた。今後、加速勾配を向上させる目的や、さらなる施設の小型化を目指すために、Xバンドの加速管が注目されている。加速管の加速勾配を決める重要な要素の一つであるシャントインピーダンスは $f^{1/2}$ (f は周波数)に比例し、さらに充填時間は、 $f^{-3/2}$ に比例するため、仮にCバンドの加速管をXバンドの加速管に置き換えた場合の電力効率の利得(ピーク電力×時間)は、およそ4倍である。加速管の長さを同じに保ったまま上記の置き換えのみを行うと、繰り返しを4倍にしても現在と同程度の消費電力で運転が可能である。自由電子レーザー線形加速器施設であるSACLAは、主加速部分はすべてCバンドの加速管で構成されており、レーザーの繰り返しは、60 Hzで運用している。将来的なアップグレードとして、現在と同等の消費電力を維持したまま、レーザーの繰り返しを10倍の600 Hzに向上させることを目指している[1]。このアップグレードのシナリオでは、Xバンド加速システムの導入は欠かせないと考えており、その加速管の開発規模は数百台にも及ぶ。そこで、2年前からXバンドディフレクターの開発を始め、将来のSACLAのアップグレードを睨んだ、Xバンド要素機器のR&Dを進めている[2]。本講演では、加速システムの重要な要素機器の一つである、大電力ダミーロードの開発と、そのコンディショニング結果について報告する。

2. 渦巻き型ダミーロードの設計と製作

従来までSACLAで運用されてきた大電力ダミーロードは、セラミックのRF吸収体[3]や管内にひだのような構造を持たせることで、反射損失を増やす手法を採用している。この方法では、製作に時間とコストがかかる上、大電力時の出すガスが多く、コンディショニングに時間がかかることや放電頻度が高いことが問題となっていた。100 MW程度の大電力にも耐え、30 dB程度の十分な反射損失を保ちつつ、大量生産に向けて比較的安価に製作が可能な構造とするため、導波管をダミーロードとして運用することを検討した。この場合、導波管での高周波の減衰が大きいほど、ダミーロードとしては有効に機能する。金属導波管内での高周波の減衰は、抵抗損失が支配的であり、矩形導波管のTE01モードの場合、下記の式で記述できる[4]。

$$\alpha = \frac{R_s}{a^3 b \beta k \eta} (2b\pi^2 + a^3 k^2), R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (1)$$

ここで、 R_s は導体の表皮抵抗、 a, b は矩形導波管の幅および高さ、 $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$ (k はマイクロ波の波数、 k_c はカットオフ波数)、 η は真空の固有インピーダンスを表す。特に、 R_s は導体の電気伝導度(σ)、透磁率(μ)およびマイクロ波の角周波数(ω)である。また、導体表面の粗さ(s)の表皮深さ(δ_s)に対する割合が大きいほど導体損失は多い。この効果は導体のインピーダンス(g)に対して、下記の補正として働く。

yasutome@spring8.or.jp

$$g = 1 + \exp\left(-\left(\frac{\delta_c}{2s}\right)^{1.6}\right) \quad (2)$$

式 Eq. (1), Eq. (2)を基に、下記のような構造を持つ導波管型ダミーロードを設計した。

- 導波路の形状は渦巻き型とし、中心に近づくにつれて溝の幅、および高さが狭くなるようなテーパ形状とする。式1における a, b が小さくなり、損失係数が大きくなる。ミリング加工の都合上、テーパは直線部分にのみ、つける。渦巻き型のダミーロードはすでに開発例がある[5]。
- 導波路の構造体は、SUS430 とする。Eq. (1)における σ, μ の値、すなわち表面抵抗が大きくなり、損失係数が大きくなる。
- 表面粗度は、Ra1.5 μm 程度とする。滑らかな表面に比べて、Eq. (2)における表面粗度の値が大きくなり、損失係数が大きくなる。

前回の加速器学会 (PASJ2024)において、ダミーロー試作機を用いて、電気伝導度、および表面粗度が既知の状態において、SUS430 の Xバンドでの比透磁率がどの程度であるかを見積もったところ、7.5 程度であることがわかった[2]。すなわち、磁性のないステンレスに比べて、SUS430を使う方が、導体損失としては3倍弱の利得がある。この結果をもとに、十分な反射特性が得られるようにテーパや導波路の全長を設計した。

Figure 1に、設計したダミーロードの外観を示す。全体の重量は、100 kg 程度で、寸法は 430 mm \times 330 mm \times 90 mm である。冷却構造には銅のヒートシンクを用い、SUS430 の構造体と銅とは熱グリスによって接着されている。構造体は、SUS430 の蓋と接合し、厚さ 5 mm の蓋には 200 箇所程度に直径 1.5 mm の空気穴が設けられている。排気穴を通して、真空チェンバーに排気し、導波路を超高真空に保つ設計としてある。設計したダミーロードは、明昌機工株式会社にて製作を依頼し、図面作成を含めて 4 ヶ月程度で製作を完了した。製作工程は下記の通りである。

- $\phi 7$ のミリングカッターにより、SUS430 のブロックから渦巻き型の導波路を切り出す。
- SUS430 の蓋と1の SUS430 ブロックを電子ビーム溶接により接合する。
- Tig 溶接により、真空チェンバーと真空用フランジ

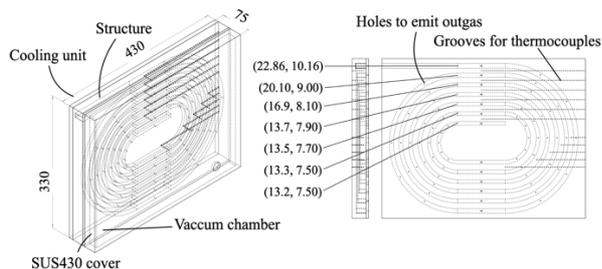


Figure 1: Design of the spiral-shaped dummy load.

を接合する。

- 熱伝導グリスにより、1 のブロックとヒートシンクを接着する。この際、熱電対をブロックの溝に差し込んでおく。

Figure 2 に、上記製作工程をまとめた様子を示す。工程 2 の電子ビーム溶接時には、SUS430 がスパッタされてできる粉が排気穴を通して導波路に入らないように、アルミテープで排気穴を塞いでいる。このように製作した渦巻き型ダミーロードに対して、ネットワークアナライザ (VNA) により S11 の測定を行い、シミュレーションの結果と比較したものを、Fig. 3 に示す。シミュレーションは、ANSYS HFSS を用いて、その減衰特性を評価したものである。7 GHz から 11 GHz 付近に見られる 6 本のピークは、各直線部に設けたテーパの終端部における、カットオフ周波数に対応する高周波の定在波によるものである。それらの共振周波数はおおよそ一致しているが、実機のピークには細かい共振構造も見られる。これは、部分的には溶接時の蓋と構造体との接合の歪みが原因であると思われる。運転周波数付近での反射損失は、実機で -40 dB 程度であり、シミュレーションと比べても大差はなく、十分な反射特性を有することを確認した。

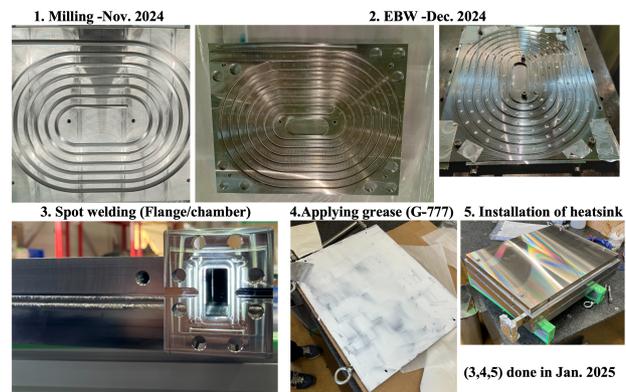


Figure 2: Manufacturing process of the spiral-shaped dummy load.

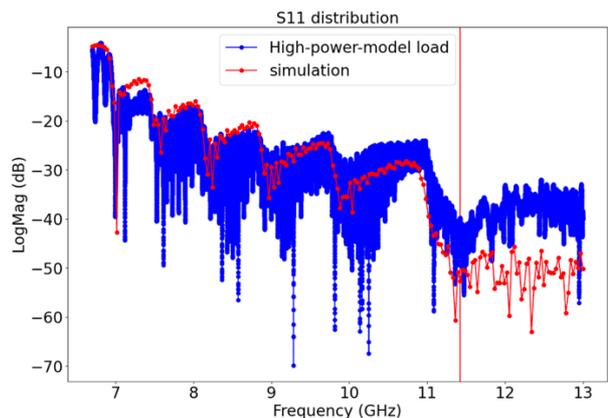


Figure 3: Comparison in reflection property (S11) between high-power model load data (blue) and simulation (red).

3. 大電力コミッショニング

今回のコミッショニングは、我々にとって、初めての X

バンドでのコミッショニング運転であり、2025年5月中旬より開始した。Xバンドの大電力機器やドライブアンプはいずれも新規に開発したものであるが、Low Level RF (LLRF)系やモジュレータについては、CバンドやSバンドのものを流用し、運転している。LLRF系は、Sバンドのものを流用しているため、Xバンドの機器との間では、LLRF入力の際はアップコンバーター、Xバンド機器からの信号を受け取る際は、ダウンコンバーターを用いて、信号の授受を行なった。モジュレータについては、SACLAで使用しているCバンドのモジュレータをXバンド用に改造し、そこから供給される270 kV程度の電圧により、Xバンドのクライストロンを駆動する。クライストロンは、キャノン電子管デバイス社により製作され、仕様値でパルス幅1.5 μ s、定格電力20 MW、最大繰り返し400 pulse per second (pps)の運転が可能である。クライストロン電圧270 kVのときのクライストロン電圧、電流(V_k, I_k)、およびクライストロンの出力RF(FWD)、戻りRF(BWD)の典型的な波形をFig. 4に示す。Figure 4で示したクライストロンの電圧波形は、モジュレータのPulse Forming Network(PFN)を調整する前であり、コミッショニングの後半にPFNの調整を行い、電圧波形の揺らぎを5%程度に抑制して運転を行なっている。

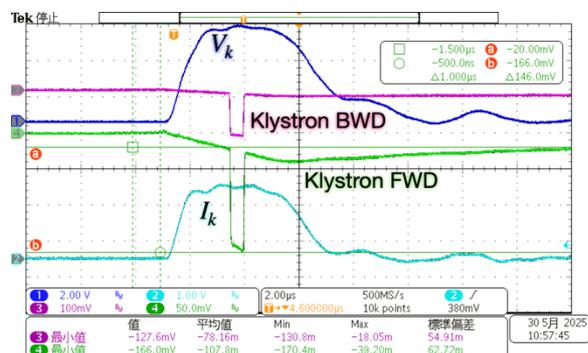


Figure 4: Typical waveforms of klystron voltage (blue) and current (cyan) as well as RF pulse of klystron output (green) and return (magenta).

クライストロンの出力電力について、コミッショニングの初期段階において、クライストロンの入力空洞に損傷を与えてしまい、入出力特性が変化した結果、クライストロンへの入力となるドライブアンプの出力限界(400 W)では、最大で、9 MWの電力しか出力できなくなった。しかし、クライストロンの入力部にアイリスを設けて、新しい共振状態を作り出すことにより、定格通りの20 MWの電力を供給できるようになった。

クライストロンのコンディショニングを終えた後、ダミーロードのコンディショニングを開始した。コンディショニングは、下記の二つのセットアップごとにそれぞれ行った。

- A. クライストロン→導波管立体回路→ダミーロード
- B. クライストロン→導波管立体回路→パルス圧縮器→ダミーロード

上記で述べたクライストロンの故障、およびその対策を講じる時期により、セットアップ A では、クライストロンの最

大出力電力は、9 MW、セットアップ B では、最大出力電力は、20 MW で運転を行なった。

3.1 ダミーロードのコンディショニング(セットアップ A)

製作したダミーロードの耐電力特性、真空特性、および熱的特性を調べるため、ダミーロード単体によるコミッショニングを行った。このときのセットアップをFig. 5に示す。モジュレータの電圧(定格270 kV)でクライストロンを駆動し、入力空洞にドライブされた数100 WのRFを増幅して、大電力(定格20 MW)をダミーロードに供給する。コミッショニング時には、モジュレータの電圧・電流波形、クライストロンの真空圧力、導波管内の真空圧力、クライストロンへの反射、および水温によるインターロックをかけた、パルス幅とクライストロン電圧、およびパルスの繰り返しレートを上げた。真空圧力ゲージは、クライストロンを除くと全部で2つあり、それぞれRF合成前(CCG1)、およびダミーロード直前(CCG2)に取り付けられている。安定して運転が行えているときの真空の圧力は、どの場所においても、 1.0×10^{-6} Pa程度であった。コミッショニングの目標は、クライストロンの最大電力供給時に、パルス幅1.5 μ s、繰り返しレート60 ppsで運転を行うことである。以下の方針により進めた。

1. 繰り返し1 pps、パルス幅100 ns、クライストロン電圧270 kV程度を起点とし、真空度の悪化やRFの反射を監視する。
2. 15分から20分の間に1度も放電による真空悪化が起これなければ、パルス幅を100 nsずつ広げる。
3. パルス幅が1.5 μ sに到達すれば、繰り返しを10、30、60 ppsと増やし、上記1、2を繰り返す。パルス幅1.5 μ s、繰り返しレート60 pps、クライストロン電圧270 kVでの安定運転を目指す。

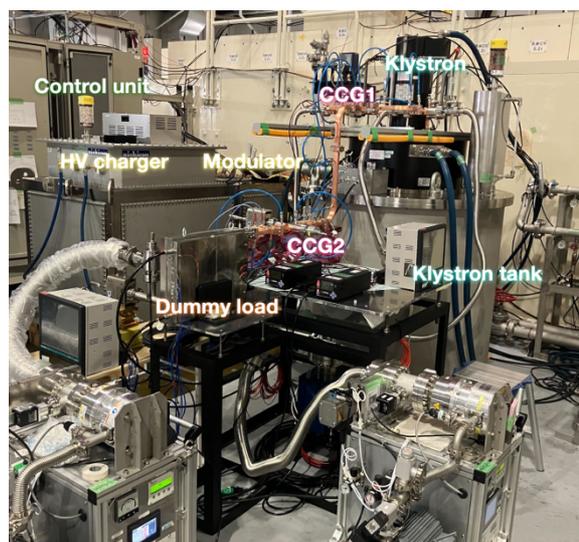


Figure 5: Setup A in the high-power commissioning. The modulator applies about 270 kV voltage to the klystron, which generates 20 MW power at most based on its specification. Four CCGs (CCG1 to CCG2) monitor the vacuum pressures.

本セットアップにおけるコンディショニング時の真空圧力、クライストロン電圧のヒストリーを Fig. 6 に示す。初めての大電力コンディショニングにおいて、大気開放状態から、フルパワー運転において、数時間に 1 回程度の放電が起きる程度までにコンディショニングが進むまでの時間は、およそ 100 時間である。パルス幅 1.5 μs 、繰り返しレート 60 pps、クライストロン電力 9 MW 時におけるダミーロードの空洞付近の構造体の温度上昇は、高々 25 度程度であり、シミュレーションの予測する 15 度程度の上昇よりは大きかったものの、熱的特性としては問題ないことを確認した。シミュレーションとの乖離は、ヒートシンクと熱伝導グリースの間の熱伝導係数が期待よりも小さかったことが原因であると思われる。ダミーロードの真空性能についても、パルス幅および繰り返しを定格値まであげた状態において、 10^{-6} 台の前半で止まっていることから、真空穴とチャンバーとの間のコンダクタンスに大きな問題がないことがわかる。また、ダミーロードの反射特性を、ダミーロードの上流に設置した方向性結合器を用いて調べた。検波器で測定したクライストロンの出力波形、およびクライストロンへの戻り波形の最大測定電圧、および校正された電力を Table 1 に示す。この表の値より、ダミーロードにおける損失は、-34 dB (VSWR1.04)以下と見積もることができ、低電力における VNA 結果と整合する結果が得られた。

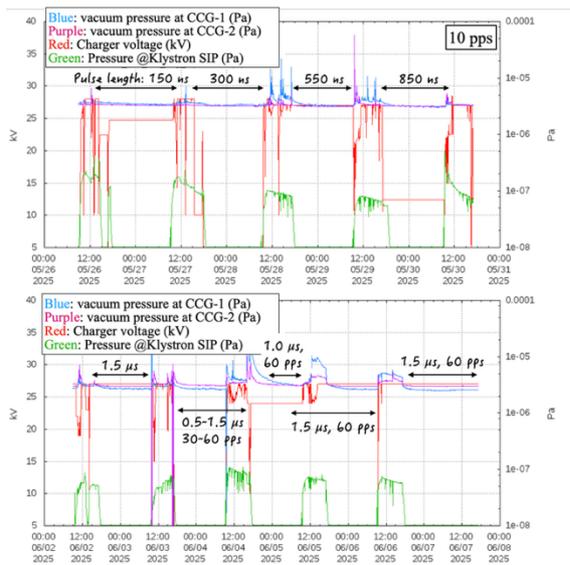


Figure 6: Commissioning history during the dummy load conditioning. (1st(2nd) week in the top (bottom) figures)

Table 1: The Measured Amplitude for the Klystron Forward (FWD) and Backward (BWD)

| | Amplitude (mV) | Attenuator + directional coupler(dB) | Calibrated power (MW) |
|-----|----------------|--------------------------------------|-----------------------|
| FWD | 128 | 82.1 | 6.9 |
| BWD | 22 | 61.4 | 2.6e-3 |

3.2 ダミーロードおよびパルス圧縮器の両方を用いたコンディショニング(セットアップ B)

Figure 7 に、セットアップ B を示す。本セットアップでは、ダミーロードの上流に、X バンドのパルス圧縮器を組み込み、パルス圧縮器の上流および下流に方向性結合器を挿入する。パルス圧縮器は、二空洞式を採用しており、結合度および Q 値は、それぞれ 6.5, 120,000 程度に調整してある[6]。また、真空圧力ゲージは、それぞれ RF 合成前 (CCG1)、SLED 前 (CCG2)、SLED 空洞付近 (CCG3)、およびダミーロード (CCG4) に取り付けられている。ダミーロードと同じく、X バンドのパルス圧縮器も同時期に開発を行い、今回が初めての大電力試験である。パルス圧縮器の圧縮特性を評価したものを Fig. 8 に示す。パルス圧縮器では、位相反転の際にピーク電力が圧縮され、ピークの増倍率は、およそ 4.3 倍である。パルス圧縮器を用いる運転では、クライストロン出力は、定格の 20 MW が出力可能になっていた。20 MW 運転時には、ダミーロードにはピーク値で 85 MW 程度の電力が入力されたことになる。クライストロン出力およそ 18 MW、パルス幅 1.5 μs 、パルス繰り返し 60 pps で数時間運転した時の真空圧力の様子を Fig. 9 に示す。パルス圧縮器に

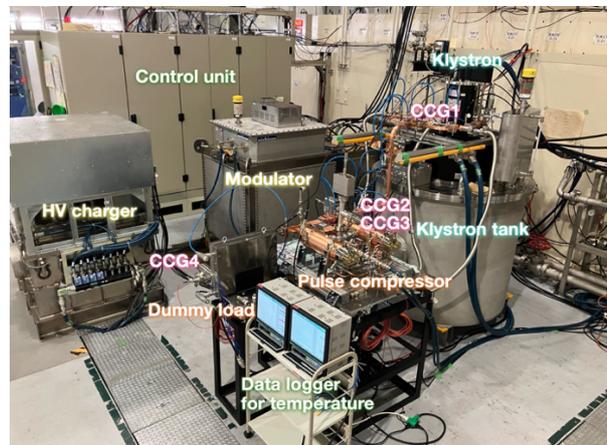


Figure 7: Setup B in the high-power commissioning. The pulse compressor is installed upstream to the dummy load. Two directional couplers are installed upstream and downstream the pulse compressor.

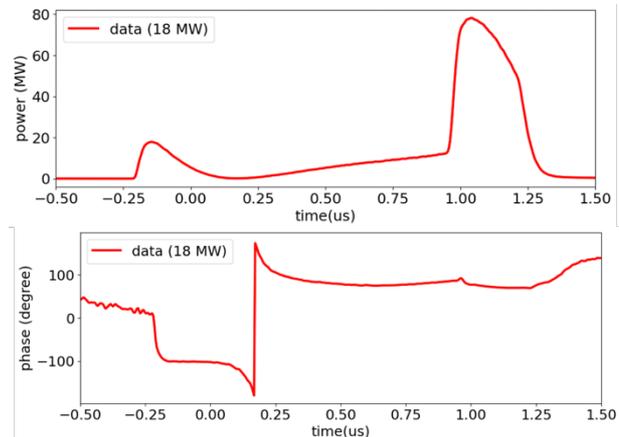


Figure 8: Time variation of the output power (top) and phase (bottom) for the X-band pulse compressor.

位相反転を与える運転を始めたのは、2025 年の 7 月下旬からであり、7/30 の運転では 1 時間に 2 回程度の放電頻度で、ダミーロードを含め、コミショニング運転が可能であることが確認できた。今後、24 時間に数回程度の放電頻度になるように、最大電力でのコンディショニングを進めていく予定である。

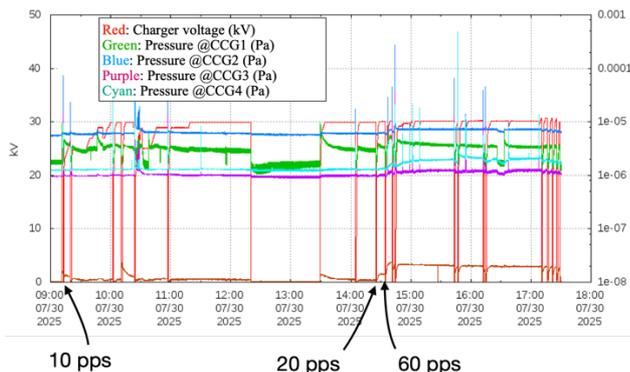


Figure 9: Continuous operation with power of 18 MW, pulse width of 1.5 us, and repetition rate of 10/20/60 pps.

4. まとめと展望

本講演では、X バンドのダミーロードの設計、製作、および大電力によるコミショニングの結果を報告した。コミショニングの結果に基づくと、従来の SiC を用いたダミーロードやひだ付きの構造に比べて、パルス幅が 1.5 μ s と長くなっても顕著な性能劣化が見られず、十分な反射特性 (VSWR 1.04 以下) と熱的特性 (フルパワーで高々 25°C 程度の温度上昇)、および真空性能 (1.0×10^{-6} Pa 程度) を持つことが確認できた。特に、大気解放状態から、9 MW, パルス幅 1.5 μ s, 繰り返しレート 60 pps に到達するまでの時間は、およそ 100 時間であった。また、金属ブロックから切削加工により製作する性質上、比較的安価で、納期も数ヶ月程度で製作が可能であり、大量生産にも十分耐えうるということがわかった。昨年の加速器学会 [2] では、表面粗度、比透磁率が導体損失に与える影響を、ダミーロード試作機とシミュレーションとを比較するこ

とにより測定した。ダミーロード実機は、そのときの結果を基に設計を行っており、低電力、および大電力における反射測定の結果は、シミュレーションで予測したものとおおよそ整合していたため、シミュレーションの妥当性が確認できた。現在では、シミュレーションにより、同じ構造のダミーロードで、テーパーを現状のものより急にすることで、導波路を 1/4 倍に縮小しても、S11 の測定で -30 dB 程度は保つことができることを予測できている。この工夫が可能であれば、現在のダミーロードに比べて、重量を 1/4 倍にすることができ、設置の際の柔軟性が圧改善される。現在、この改善を施したダミーロード 2 号機の製作を進めており、2 号機の完成は 2025 年 9 月を予定している。製作が完了次第、本講演で報告したセットアップと同様のものを用いてコミショニングを行う予定である。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, "Green-oriented upgrade of accelerator complex at the SPring-8 campus", in Proc. IPAC'23, Venice, Italy, May 2023, pp. 2590-2593.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-WEOGA3
- [2] K. Yasutome *et al.*, "Development of a spiral shaped dummy load made of SUS430 for the X-band transverse deflector system", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Jul. 31 to Aug. 3, Yamagata, Japan, 2024, pp. 350-355.
- [3] H. Matsumoto *et al.*, "Experience on the high-power SiC microwave dummy-load using SiC absorber", in Proc. PAC1999, New York, USA, 1999, pp. 842-844.
doi: 10.1109/PAC.1999.795374
- [4] D.B. Pozar, *Microwave engineering*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [5] H. Bursali *et al.*, "X-band RF spiral load optimization for additive manufacturing mass production", in Proc. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil, 2021, pp.1143-1146.
doi: 10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB370
- [6] K. Yasutome *et al.*, "Development of high-power RF components for an X-band transverse deflector system at SACLA", in Proc. IPAC2025, Taipei, Taiwan, 2025, pp.2385-2387.
doi: 10.18429/JACoW-IPAC25-WEPS07