

Xバンド電子ビーム縦方向診断システムのための SUS430 製渦巻き型ダミーロードの開発

DEVELOPMENT OF A SPIRAL-SHAPED DUMMY LOAD MADE OF SUS430 FOR THE X-BAND TRANSVERSE DEFLECTOR SYSTEM

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)}, 斗米貴人^{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)}, Takato Tomai^{B)}

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

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

Abstract

We have been developing an X-band spiral-shaped high-power dummy load made of stainless steel for a transverse deflector system (TDS) that is also under development at SACLA. In this system, it is essential to terminate the RF power passing through in the deflector cavities properly. To this end, we designed the dummy load made of SUS430. Since the SUS430 has relatively lower electrical conductivity in metals, the dummy load is able to attenuate high power without any additive microwave absorber. In addition, the cost, stability, vacuum and temperature properties of the dummy load are promising. In this presentation, we overview the TDS, explain a design of the dummy load, report the evaluation results of the prototype, and mention the prospect for the full-length production.

1. はじめに

我々は、X線自由電子レーザー線形加速器施設 SACLA の高度化として、現在と同等以下の消費電力により、ビームの繰り返し頻度を 10 倍にすることを計画している[1]。このアップグレードの鍵の一つとなるのは、加速勾配の高効率化による機器システムの縮小化であり、Xバンド加速管の導入が必須であると考えている。加速器制御という観点から見ると、現在までに機械学習を用いた自動調整システムを開発し、ユーザーの望む XFEL を作り出すテラヘルメイドな制御システムを実現したが[2]、さらに高度な加速器制御のためには、電子ビームの 6 次元位相空間分布の理解が必要となる。Xバンド加速器機器の R&D、および電子ビームの位相空間分布を測定するという目的で、我々は Xバンド高周波ディフレクターシステムの開発に着手した。本システムでは、11.424 GHz、20 MW 程度の大電力のマイクロ波を空洞(ディフレクター空洞)に投入し、マイクロ波が励起する電磁場により電子ビームを水平方向に掃引し、蹴られた電子ビーム分布形状をスクリーンモニターで観測することで、電子ビームの時間分布を得ることができる。さらに、偏向磁石によりディフレクター空洞の蹴り角と垂直方向に電子ビームを曲げることで、エネルギーと時間の位相空間分布を同時に得ることが可能となる。SACLA で SASE 発振に寄与している電子パンチの時間幅は FWHM で 6 fs と短く[3]、このような短パルスを安定に作り出せることが SACLA の強みの一つとなっているが、時間分布を測定する Cバンドディフレクターは、パンチ圧縮部 BC3 下流の加速セクションの途中に入っており、ビームを遮っての測定になってしまうので定常的な測定は難しい。また、偏向磁石が無いのでエネルギー情報が得

られない、などの不都合がある。LCLS などの世界の加速器施設では、sub-fs の分解能を持つディフレクターシステムが開発されており、電子ビームの診断および性能向上に活用されている[4, 5]。そこで我々は、1 fs 程度の時間分解能を持つディフレクター空洞を SACLA アンジュレーター部の下流に設置し、時間とエネルギーの二次元分布を測定することで、ビームの XFEL 生成に寄与する部分のみを取り出し、時間幅を含めたビーム性能の向上を目指している。

本システムにおいて、ディフレクター空洞に投入される大電力マイクロ波の一部は通過するため、空洞が正しく終端されていなければ、マイクロ波がクライストロンに反射し、機器を損傷させるリスクがある。我々は、空洞を通過したマイクロ波を出力側で適切に終端する装置として、SUS430 製導波管タイプの渦巻き型ダミーロードの開発を行っている。他の材質における導波管型ダミーロードの開発は既に行われているが[6]、我々の開発のコンセプトは、小型で放電頻度の少ない安価なダミーロードの製作である。SACLA のアップグレードの際、Xバンド加速管を導入することになれば、Xバンドダミーロードも大量生産が必要になるため、本開発において、コストパフォーマンスの高い機器を設計する意義は大きい。現在は、ダミーロード試作機を製作した後、その性能評価を行い、実機の製作を進めている。

本稿では、2章で Xバンドディフレクターシステムの概要を述べ、3章ではダミーロードの設計方針を説明する。4章ではダミーロード試作機の性能評価について報告し、5章において実機のシミュレーションの性能評価に触れ、6章で本稿の内容をまとめる。

2. Xバンド電子ビーム縦方向診断システム

現在の SACLA の機器配置図を Fig. 1 に示す。

[#] yasutome@spring8.or.jp

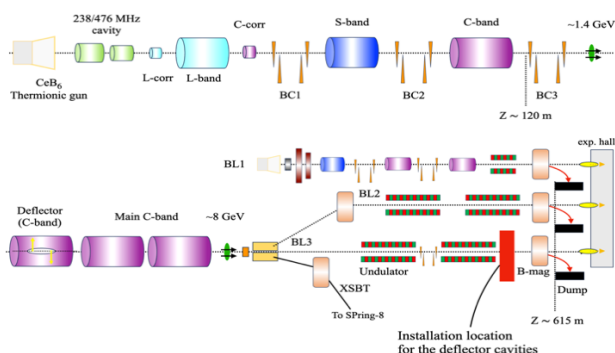


Figure 1: The layout of the SACLA components. The planned installation place for the deflector cavities is indicated by the red rectangular block.

SACLA では、 CeB_6 製カソードを用いた熱電子銃から 1 A 程度の電子ビームを生成し、238/476 MHz の空洞、L, S, C バンドにより前段加速を行いつつ、3 箇所 **Bunch compression chicane (BC)**においてバンチを圧縮する。その後、加速主要部である C バンド加速空洞により電子エネルギーを 8 GeV に加速させる。加速主要部に入る直前には、C バンドのディフレクター空洞[7]が設置されており、ビーム調整時にバンチの時間幅を測定することができる。一方で、ビームタイム中にディフレクターシステムを使うことができないため、リアルタイムにおけるバンチの時間幅の測定はできない。我々の X バンドディフレクターシステムでは、ディフレクター空洞を Fig. 1 の赤いブロックで示されているアンジュレーターの下流に設置し、スクリーンモニターを偏向磁石の下流にあるダンプ内に取り付けることで、リアルタイムに時間・エネルギーの二次元分布を測定する。これにより、XFEL の励振に寄与するバンチの縦方向分布を調べ、磁石の電流値や加速空洞の位相といった加速器のパラメータと、バンチの時間幅との相関をとり、時間幅を制御することが期待できる。

X バンドディフレクターシステムの構成要素を Fig. 2 に示す。X バンドの Pulse klystron を用いて、11.424 GHz の周波数で 20 MW 程度のマイクロ波を供給する。得られ

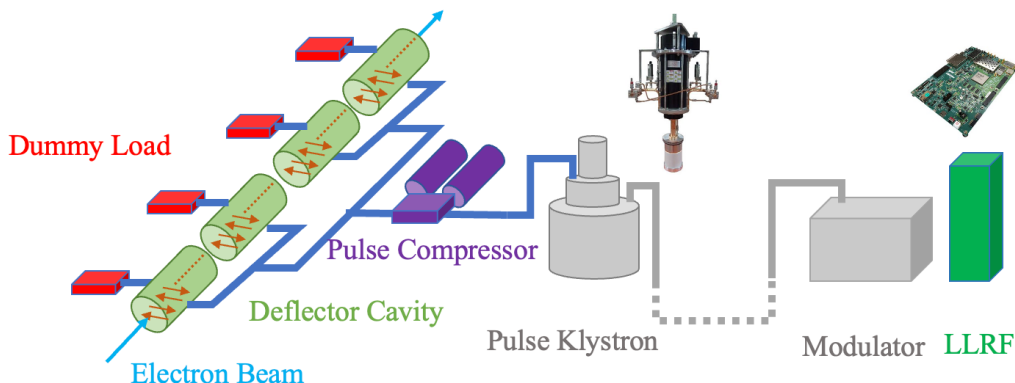


Figure 2: A simple illustration of the components used in the X-band deflector system; LLRF: a control unit for the low-level signal, Modulator: power supply for the pulse klystron, Pulse klystron: X-band (11.424 GHz) power source up to 20 MW, Pulse compressor: amplifier of the klystron power to around 100 MW, Deflector cavity: deflection device with the excited HEM11 mode, Dummy load: terminal to attenuate unused power in the cavities.

たマイクロ波を Pulse compressor で時間的に圧縮し、電力をおよそ 5 倍に増倍させる。増倍された電力は、3 dB 結合器を 3 台用いて 4 分割にし、1 台 1 m 程度のディフレクター空洞 4 台に供給する。空洞は、HEM11 の電磁場を励起し、電場と磁場の両方により電子ビームを横方向に掃引する。電磁場のキックが時間的に大きく変化する位相ゼロのタイミングで電子ビームを入射すると、時間に比例して電子ビームがキックされ、電子ビームが蹴り出される量は縦方向の位置に依存する。ゆえに、電子ビームが蹴り出された像を見ることで、縦方向分布を再構成できる。我々は 80 MV のディフレクション電圧、時間に換算して 1 fs 程度の時間分解能を目標とする。次章からはディフレクターシステムの構成要素の一つであるダミーロードの開発について、試作器の性能評価、および実機製作の展望について報告する。

3. ダミーロードの設計方針

高周波の終端器として利用されるダミーロードには種々の構造がある。SACLA で運用されている C バンド加速管のダミーロードは、銅壁にボタン型の SiC を並べ、マイクロ波吸収体として利用している[8]。我々は、以下の条件を満足するようにダミーロードの設計を行った。

1. X バンド帯域で十分な反射特性 (VSWR1.1 以下)
2. 放電頻度が 1 日 1 回以下の安定性
3. 1.0×10^{-6} Pa の超高真空を保つ
4. 冷却が容易
5. 安価である (1 台 200 万円程度)
6. できるかぎりコンパクト

ボタン型の SiC をマイクロ波吸収体とするダミーロードでは、上記のうち特に放電頻度が高い点が問題となる上、費用の観点からも 1 台あたり 400 万円程度かかり、セラミックの調達には時間がかかる。そこで、放電耐性、真空耐性、冷却効率、および広帯域の減衰特性に強みがある構造として、ステンレス鋼 (SUS430) を利用した導波管型のダミーロードに注目した。また、セラミックとは異なり、SUS は入手がしやすく製造コストが低いという利点がある。

金属導体内を伝播する高周波の減衰は、主に導体損失が支配的である。矩形導波管内を伝播する TE10 モー

ドの導体損失による減衰定数は、以下の式で表せる[9]。

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

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 を導体の電気伝導度(σ)、透磁率(μ)およびマイクロ波の角周波数(ω)を用いて以下のように表す[9]。

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (2)$$

Equation (1), (2)より、導体の材質に着目するならば、電気伝導度が小さく、透磁率が大きいほど表皮抵抗が大きくなり、導体損失が大きくなるのがわかる。ステンレス鋼は金属の中で電気伝導度が比較的小さく、高周波がよく減衰する。さらに、SUS430は低周波においては比透磁率が800程度の強磁性体である。Snoek's limitにより高周波での比透磁率は激減するが[10]、微小でも残っていれば、SUS304やSUS316よりも大きな減衰が期待できる。また、導体の構造に着目するならば Eq. (1)より、カットオフ周波数に到達しない限りで、導体の幅や高さが小さい方が高周波がよく減衰することがわかる。ただし、導波管の入口は、Xバンドの規格であるWR90 ($a = 22.86$ mm, $b = 10.16$ mm)を採用する。そこで我々のダミーロードでは、マイクロ波の進行方向に沿って、幅および深さ方向が小さくなるように勾配をつけることで、より大きな減衰を得ることができる設計とした。ただし、矩形導波管におけるTE10モードのカットオフ周波数 ($\alpha = 1/(2a\sqrt{\mu\epsilon})$, ϵ は誘電率)が、導波路のいたるところで11.424 GHzを十分に下回ることが必要である。

また、導体損失を決める重要な要素として、表面粗度がある。表面粗度(s : Ra)は表皮深さ(δ_s , 11.424 GHzではステンレス鋼で4.0 μ m程度)に対する割合を基に、導体のインピーダンス(Z)を補正するというモデルがあり[11]、その補正ファクター(g)は、以下の式でかける。

$$g = 1 + \exp\left(-\left(\frac{\delta_s}{2s}\right)^{1.6}\right) \quad (3)$$

g により、補正後のインピーダンス(Z_{corr})は、 $Z_{corr} = gZ$ と表せる。ゆえに、導体に表皮深さ程度の表面粗度がある場合には、Eq. (3)により、導体のインピーダンスが大きくなり(電気伝導度が小さくなり)、導体損失が大きくなる。

以上を踏まえ、SUS430製のテーパ付導波管型ダミーロードの設計を行った。Figure 3に、設計したダミーロードの外形図と導波管で構成された内部構造部を示す。外形寸法は、330 mm \times 430 mm \times 75 mm程度であり、導波管を切削している構造体はSUS430ブロックから切り出される。十分な減衰を得るためには、それなりの全長が必要である。できるかぎりコンパクトな構造体とするため、導波管形状を渦巻き型とした。構造体の片面にSUS430の蓋を電子ビーム溶接で接合し、その反対側の面に銅製の冷却系を取り付ける。蓋には100箇所程度に穴を設け、空洞内で発生したガスを真空槽に導き空洞

の真空度を超高真空に保つ。構造体の、冷却系と接合する面には溝を掘り込んでおき、温度測定を行うための熱電対を仕掛けることができるようになっている。十分な減衰が得られる全長、製作可能性を議論するためには、SUS430の実効的な減衰定数、製作可能な表面粗度およびその加工方法を知る必要があったため、試作機を製作し、その性能評価を行った。次章でその結果を述べる。

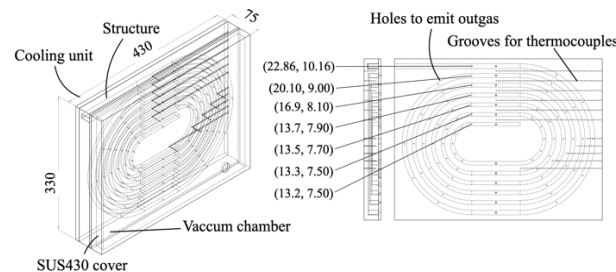


Figure 3: The overall figure of the full-length dummy load (left) and the details of the cavity part (right). The taper dimensions (depth, width) are also shown.

4. 試作機の製作と性能評価

Figure 4に、製作した試作機の概形図と導波管部の詳細を示す。構造は、金属の厚板にフライス加工で溝を掘って蓋に30箇所程度の穴を開け、ねじ止めしてある。材質は、SUS430とアルミの2種類を使用した。実機と同様、導波路の幅と深さを変えるテーパ部は直線部に設けており、円弧部は幅と深さが一定となっている。テーパ部は円弧と20 mmの勾配のない直管を介して接続してある。表面粗度について、テーパ部はRa 0.5 μ m程度、それ以外はRa 3.5 μ m程度である。試作機の製作によりSUS430のブロックを切削する際の加工精度、テーパ部およびつなぎ目の段差といった実機製作に向けて必要な情報を得た。特に、導波管部の切削時には回転速度と送り速度のバランスが重要であり、表面を粗くして減衰効率を上げるため、加工機の刃物の回転速度を下げ、可能な範囲で送り速度を上げて加工を行った。

製作した試作機の反射特性を評価するための、低電力試験のセットアップをFig. 5に示す。ダミーロードの導波路入口と出口にはそれぞれSUS製のフランジを取り付け、フランジには導波管WR-90規格とN型の同軸コ

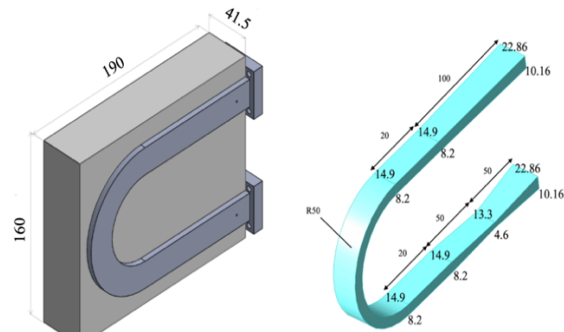


Figure 4: The dummy load prototype made of SUS430 (left) and the dimensions of each part of the waveguide (right).

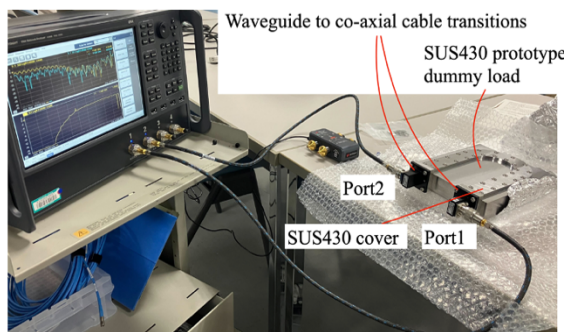


Figure 5: The setup to evaluate the performance of the dummy load prototype.

Table 1: The Simulation Setting for SUS430

Bulk conductivity	1.67×10^6 (S/m)
Relative permeability	7.5
Surface roughness	Ra 2.0 μm

ネクタとを変換する同軸導波管変換器を接続した。同軸導波管変換器に 3.5 mm 同軸コネクタをつないでベクトルネットワークアナライザ (VNA) で S パラメータの測定を行った。VNA の校正は同軸ケーブル端にて ECal を用いて行った。ECal を用いた場合、測定データは同軸導波管部の減衰分を含んでいるため、入口から出口までの S_{21} の測定の際には、同軸導波管を 2 台直接接続して測定された S_{21} の値を差し引くことで、同軸導波管部の補正を行った。測定データと比較するため、HFSS を用いてシミュレーションを行った。その際に仮定した SUS430 の特性を Table 1 に示す。Table 1 にあげたパラメータのうち、マイクロ波の減衰に比較的大きな影響を与える因子は、Bulk conductivity, relative permeability, surface roughness である。Bulk conductivity は SUS430 の代表値[12]を選び、surface roughness は製作後に計測した表面粗度の平均値を採用した。シミュレーションにおける比透磁率は実測値を再現する値に設定した。S パラメータの測定結果は、1-port における S_{11} および 2-port における S_{21} の値である。1-port では、フランジの出口にアルミホイルを貼り、そこで全反射した信号の減衰具合を測定した。このようなセットアップにおける S_{21} , S_{11} の測定データを、シミュレーションと比較したものを Fig. 6 に示す。本システムで運用する 11.424 GHz の周波数における振幅は、Table 1 に記載したように比透磁率が 7.5 と仮定したときによく一致しており、周波数特性も大ききずれがなく整合している。 S_{21} の振幅が 11.424 GHz 以下の周波数の時に減少するのは、勾配により導波路が狭くなり、カットオフに近づいて損失が大きくなったためである。

次に、導波管路の途中にアルミブロックを設置し、その地点でマイクロ波を全反射させて 1-port で S_{11} を測定する。アルミブロックを設置する位置を変えることで、減衰がよく起こる場所の特定や、空洞部と蓋の隙間から高周波が漏れているといった予期しない減衰が起こっていないことを確認する。Figure 7 に、ブロックを設置する位置、およびそれぞれの位置に設置したときの 11.424 GHz に

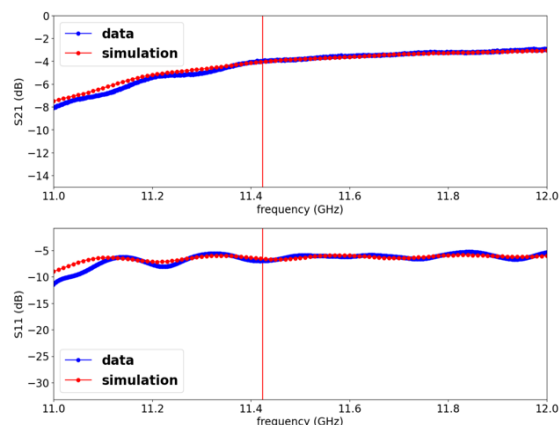


Figure 6: Comparison of S_{21} (top) and S_{11} (bottom) parameters between measurement in blue and simulation in red. The red vertical line refers to 11.424 GHz. The horizontal axis is the signal frequency. S_{11} was measured with a condition that the port 2 was shorted.

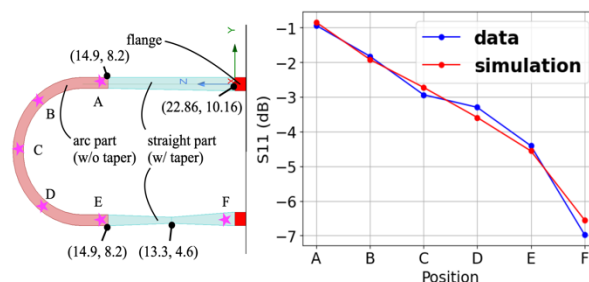


Figure 7: Each position of Al block located (left) and the comparison of S_{11} parameter as a function of the Al block positions between measurement in blue and simulation in red (right). The numbers shown in the left figure are the dimensions (depth, width) in mm. The horizontal axis in the right figure is each position.

おける S_{11} を、測定データとシミュレーションで比較したプロットを示す。実測から得られたデータはシミュレーションとよく一致しており、蓋からの高周波リークや、接触不良による減衰の影響は小さいと考えられる。また、入口から地点 A までの減衰量と地点 E から地点 F までの減衰量を比べると、より大きな勾配のある EF 間で大きな減衰が起こっていることが確認できる。

さらに、材質の違いによる減衰特性の比較を行なった。Figure 8 に、SUS430 製とアルミ製の試作機について、 S_{21} , S_{11} の測定を比較したものを示す。運転周波数である 11.424 GHz で比較すると、 S_{21} は -4.05 dB (SUS430), -1.05 dB (Al) であり、 S_{11} は -7.00 dB (SUS430), -0.88 dB (Al) であった。アルミニウムは電気伝導度について、銅の 60% 程度であることも踏まえると、本ダミーロードの構造において、SUS430 は銅やアルミニウムよりもマイクロ波をよく減衰させることが結論できる。

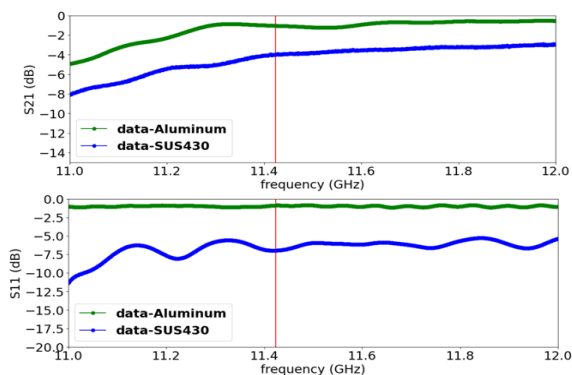


Figure 8: Comparison of S₂₁ (top) and S₁₁ (bottom) parameters between Al in green and SUS430 in blue for the prototype. The horizontal axis is the signal frequency. S₁₁ was measured with a condition that the port 2 was shorted.

5. 実機モデルのシミュレーションによる評価

Table 2 に、ダミーロードの目標仕様値を示す。試作機の性能評価により、製作可能な表面粗度、SUS430 の X バンド帯域における実効的な減衰定数を測定できたため、これらを基に、Table 1 で与えた SUS430 のパラメータを用いて Fig. 3 で示した設計モデルにおける反射特性のシミュレーションを行った。境界条件は、導波路の入口を wave port、および空洞の表面を表面粗度 Ra 2.0 μm の SUS430 を用いた finite conductivity とした。この境界条件により得られた結果を Fig. 9 に示す。運転周波数での S₁₁ パラメータは、およそ -40 dB (VSWR 1.01 程度) であり十分な減衰を得ることが期待できる。また、温度やそれによる歪みの影響を調べるために、HFSS の連成解析

Table 2: Main Specifications of the Dummy Load

Size	330 mm × 430 mm × 75 mm
Input peak power	20 MW
Pulse duration	Around 0.15 μs
Repetition rate	Max 60 Hz
VSWR	Under 1.1
Maximum temperature (2 kW power)	Around 50 degrees
Vacuum pressure	Under 1.0 × 10 ⁻⁶ Pa

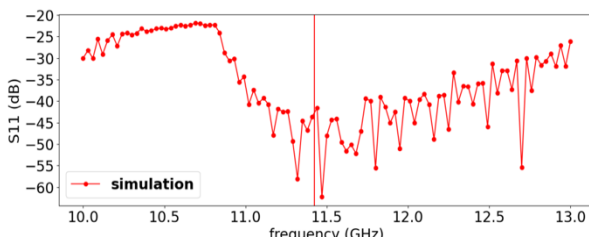


Figure 9: The S₁₁ parameter in the simulation for the full-length load. The horizontal axis is the signal frequency.

を用いて計算を行った。平均熱量は、現状の SACLA のビーム運転に基づく 200 W 程度であるが、10 倍の繰り返しになることを考慮し、2 kW の熱量を想定して温度上昇や歪みを調べた。導波管部周辺の温度分布を Fig. 10 に示す。境界条件は、冷却系の温度を SACLA の標準の冷却水温度である 26.5 度に固定し、structure との境界部分を熱伝導度 5 W/m・K のグリスが一樣に 0.1 mm の厚さで分布していることを課した。構造体の最大温度は 45 度程度であり、十分な冷却が可能である。この温度上昇による歪みの最大量を見積もると、30 μm 程度に収まっており、切削による加工精度を考慮すると問題ない程度の歪みであることが結論できる。真空度については、構造体に穴を開け、合計の排気コンダクタンスがおおよそ 5 L/s となるように設計した。その際の到達圧力は、SUS のガス放出率を 1.0 × 10⁻⁵ Pa・m/s とすると、おおよそ 5.0 × 10⁻⁷ Pa となり、要求仕様値を満たせることを確認した。

Bounding condition: Grease (5 W/m-K) of 0.1 mm thickness

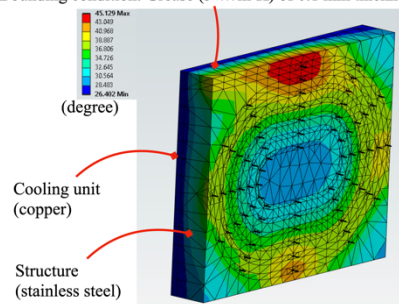


Figure 10: A simulation result of the temperature distribution of the dummy load.

6. まとめと展望

SACLA の高度化計画の一つとして、X バンド高周波を用いた電子ビームバンチ縦方向診断システムの開発に着手した。本稿では、ダミーロード試作機の性能評価および実機製作の展望について報告を行った。試作機の反射特性はシミュレーションの結果とよく整合しており、これを基に実機の設計とシミュレーションによる反射特性の評価を行った。

今後、開発したダミーロードを用いた大電力試験を予定しており、並行して他の RF 機器の開発を進める。来年度にはパルス圧縮器の大電力試験を予定し、さらにディフレクター空洞の試作機の製作や大電力試験を行うことを計画している。そして、2027 年度にシステム全体を本格稼働させることを目指す。

謝辞

ダミーロード試作機の設計・製作、および実機の製作工程については、明昌機工株式会社の赤田氏、笹倉氏に大変お世話になっております。この場を借りて、心より感謝申し上げます。

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] E. Iwai *et al.*, "Spectral-brightness optimization of an X-ray free-electron laser by machine-learning-based tuning", *Journal of Synchrotron Radiation*, 30, 6, Nov. 2023, pp. 1048-1053.
DOI:10.1107/S1600577523007737
- [3] I. Ichiro *et al.*, "X-ray Hanbury Brown-Twiss interferometry for determination of ultrashort electron-bunch duration", *Phys. Rev. AB*, 21, 080704, 2018.
DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.080704
- [4] V.A. Dolgashev *et al.*, "Design and application of multimegawatt X-band deflectors for femtosecond electron beam diagnostics", *Phys. Rev. STAB*, 17, 102801, 2014,
DOI:10.1103/PhysRevSTAB.17.102801
- [5] D. Ranter *et al.*, "Time-resolved imaging of the microbunching instability and energy spread at the Linac Coherent Light Source", *Phys. Rev. STAB*, 18, 030704, 2015. DOI:10.1103/PhysRevSTAB.18.030704
- [6] H. Bursali *et al.*, "X-band RF spiral load optimization for additive manufacturing mass production", *Cambinas, SP, Brazil, IPAC2021, MOPAB370.*
- [7] H. Ego *et al.*, "Transverse C-band deflecting structure for longitudinal electron-bunch-diagnosis in XFEL "SACIA"", *NIM A*, Volume 795, pp. 381-388, 2015.
DOI:10.1016/j.nima.2015.06.018
- [8] H. Matsumoto *et al.*, "Experience on the high-power SiC microwave dummy-load using SiC absorber", *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York Particle accelerator conference, New York, USA, 1999.*
- [9] D.B. Pozar, *Microwave engineering.* Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [10] R. Milership and F.V. Webster, "High Frequency Permeability of Ferromagnetic Materials", *Proceedings of the Physical Society Section B*, Volume 63, Number 10, 783, 1950. DOI:10.1088/0370-1301/63/10/304
- [11] S. Groiss *et al.*, "Parameters of Lossy Cavity Resonators Calculated by the Finite Element Method", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL 32. NO 3, May, 1996. DOI:10.1109/20.497385
- [12] <http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q6/>