

Development of Resistor-type Dummy Load for High-voltage Test Operation

Chikara Kondo^{1 A)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Tsumoru Shintake^{B)}

^{A)} SPring-8 Joint Project for XFEL/JASRI

^{B)} SPring-8 Joint Project for XFEL/RIKEN

1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo Japan

Abstract

We developed the resistor-type dummy load as a substitute for the klystron used in the factory test of the modulator. The dummy load can be used with 350 kV applied voltage, and 460 W input power in insulation oil. Compared to the klystron, the output waveforms are nearly same. Therefore, the dummy load has been used for the evaluation of the electrical characteristic of the modulator. The resistance value depends on the applied voltage, and varies secularly.

高電圧試験向け抵抗型模擬負荷の開発

1. 背景

XFEL/SPring-8プロジェクトでは、線形加速器により電子ビームを8GeVに加速し、挿入光源において自己増幅(SASE)によりX線自由電子レーザー(XFEL)を得る。SASE型のFEL光は、電子ビームのエネルギーやバンチ形状に敏感であるため、安定したFEL光を得るにはRF源の安定化が重要である。そこで、本プロジェクトでは、コンパクトかつ低ノイズな、一体型モジュレータを行ってきた[1]。

このモジュレータ電源の量産は、ニチコン(株)草津工場において、約60台分について2008年より始まっている。この量産において、高電圧試験を製造工場において行うようにしている。これは、初期不良が生産現場において早期に発見されることにより、改修が早急になされるだけでなく、問題点が生産工程に直接フィードバックされ、生産全体が効率的になるなどの利点が多いためである。

この電源の高電圧試験では、高電圧かつ大電力の出力を吸収できる負荷が必要である。しかし、負荷にクライストロンを用いる場合、X線発生装置としての管理区域の設定が必要となることや、高価なクライストロンを消耗させるなどの問題があった。そこで、安価で、取扱いが容易な抵抗型模擬負荷を開発した。本稿では、この模擬負荷の仕様や、高電圧試験の結果、および抵抗体の特性について述べる。

2. 仕様

模擬負荷は、一体型モジュレータ電源に取り付

けるC-bandクライストロン(TOSHIBA E37202)の代わりとなるように設計した。そこで、図1のように、模擬負荷全体がクライストロンの油中部分(φ420mm×深さ370mmの円筒の範囲内)に収まるようにした。

模擬負荷の電氣的仕様は、C-bandクライストロンの仕様に準じて、抵抗値は1.11kΩとし、印加電圧350kV、消費電力460W(1pps運転時)で用いる

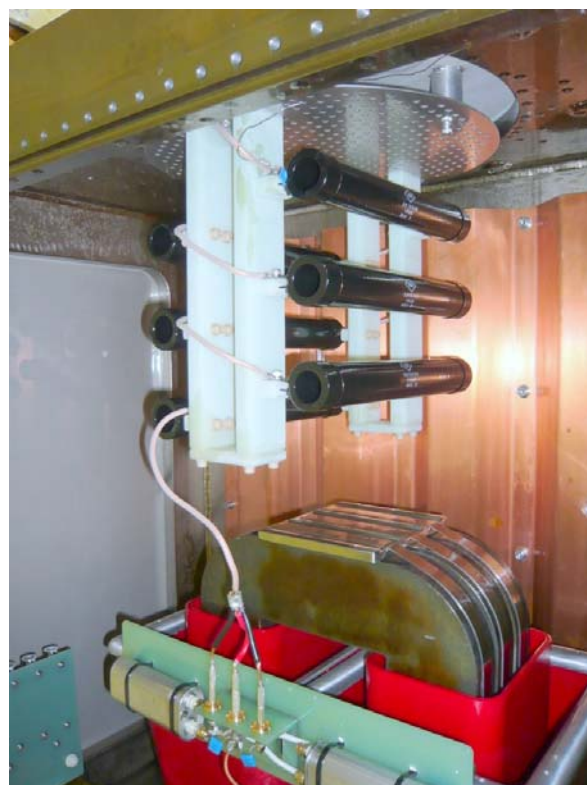


図1: 抵抗型模擬負荷を一体型モジュレータ電源に取り付けた様子。パルストランスの上側に、クライストロンの代わりに設置される。

¹ E-mail: ckondo@spring8.or.jp

ものとした。

使用する抵抗体には東海高熱製のエレマ抵抗体 (ER150AS) を選定した。この抵抗体は、カーボンとアルミナを主成分としたセラミック抵抗体であり、1本あたりの耐電圧100kV、電力容量150Wである[2]。さらに、抵抗体には耐油塗装を施し、絶縁油中で使用できるようにしている。この塗装は表面温度を80℃以下で使用する必要がある。この抵抗体の短所としては、抵抗値が経年変化や電圧特性を持ち、抵抗値を精度良く決めることが難しい点がある。

この抵抗体の仕様を元に、長期的に使用することを考慮し、運転負荷に対して余裕のある設計を行った。まず、耐電圧、電力容量より約190Ωの抵抗を6本直列で用いるものとした。抵抗体の配置は、放電を起こさないように、絶縁距離を十分に確保するように決定した。耐電圧が最も厳しいところでも、直線距離で2.5kV/mm以下となるように設計しており、これは一般的な絶縁油の耐電圧距離、約40kV/2.5mm(球体間)よりも十分に余裕を持たせている。また、抵抗を支えるサポートには絶縁破壊に強い脱泡FRPを用いている。

模擬負荷の仕様を表1に示す。なお最大印加電圧や電力容量は、抵抗体の仕様値だけでなく他の要因も総合的に考慮して設定してある。

表1. 抵抗型模擬負荷の主な仕様

抵抗体	AS 抵抗(ER150AS) 6直列
抵抗値(製造時)	1.12 kΩ
使用雰囲気	絶縁油(耐油塗装)
最大印加電圧	400 kV
電力容量(長時間運転)	500 W
(短時間バースト時)	45 kJ
上限表面温度	80 °C
定格入力パルス (想定値)	350kV (パルス幅 4.2 μs) 460J/pulse

3. 高電圧試験

3.1 出力波形

図2に、負荷にクライストロンと模擬負荷を用いた場合の、負荷にかかる電圧および電流の波形を示す。抵抗値の若干の違いにより、波高に差異が見られるが、立ち上がりやピーク部でのリングングなど

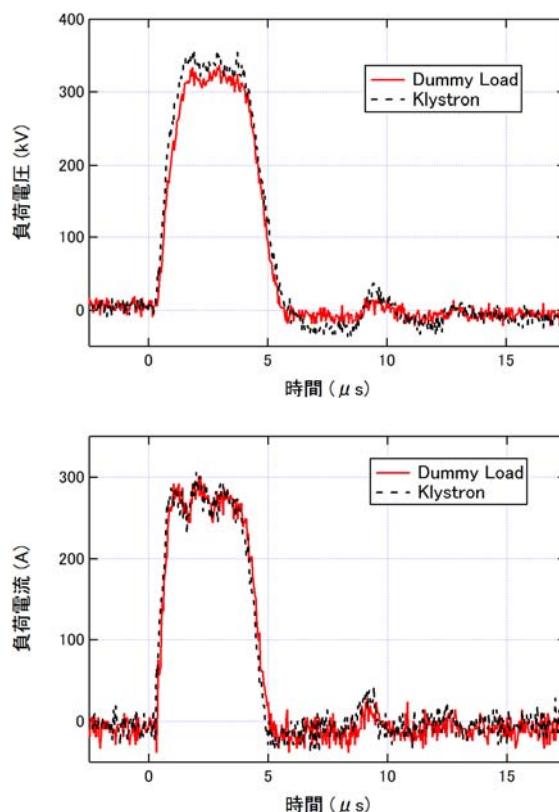


図2: 模擬負荷とクライストロンを使用したときの、負荷にかかる電圧(上)および電流波形(下)。

の概形はほぼ同じであった。これより、模擬負荷はモジュレータ電源の出力波形の立ち上がりや平坦度などを定量的に評価する場合でも、クライストロンの代わりとして用いることが可能であることが分かった。

モジュレータ電源の保護回路 (EOL回路、Shunt回路) に流れる電流波形も、模擬負荷とクライストロンで、ピーク強度や概形などはほぼ同じであったが(図3)、負荷の特性による違いも見られた。一例としては図3のShunt回路の電流波形において、クライストロン負荷の場合に見られたピークが、模擬負荷では極端に小さくなる点があげられる。このような違いは、抵抗値の違い以外にも、クライストロンが持つダイオード効果が、模擬負荷に無いために生じると考えられる。すなわち高電圧パルス出力後に、負荷に生じる逆電圧に対し、クライストロンではダイオード効果によって電流は流れない。一方、模擬負荷では逆電圧に応じた電流が流れることができるため、保護回路に流れる電流に差異ができる。このような傾向は、回路シミュレーションでも見られている。

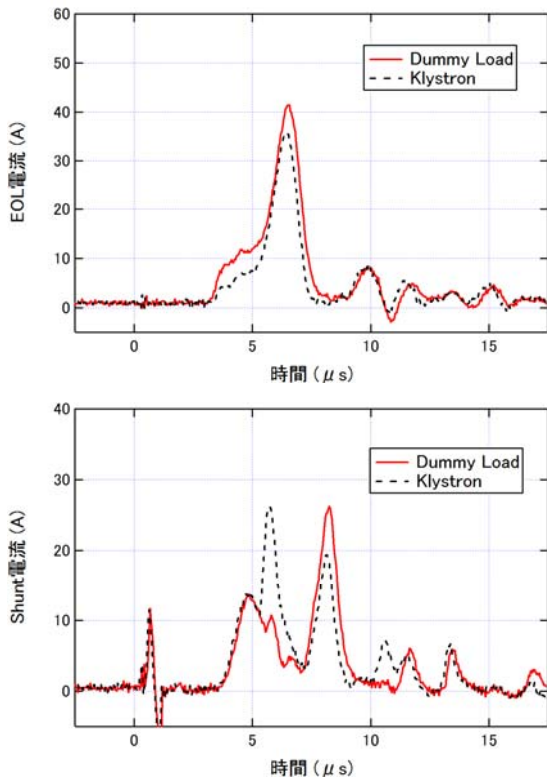


図 3: EOL 回路(上)および Shunt 回路(下)に流れる電流波形の比較。

3.3 電圧特性

図4に模擬負荷の印加電圧と抵抗値の関係を示す。なお、抵抗値は、電流、電圧のパルス波形の平坦部の中心値から算出した。負荷の電圧を上げていくと、抵抗値は減少する傾向が見られる。印加電圧100kVでは約1.16kΩだった抵抗値が、印加電圧350kVでは約1.12kΩとなり、約4%の減少が見られた。抵抗値の変化を、直線近似して求めた変

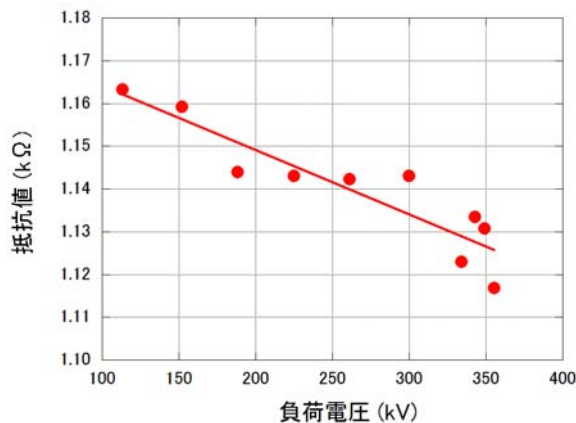


図 4: 模擬負荷の抵抗値と印加電圧の関係
化率は-0.015%/kVであった。

3.4 連続運転試験

高電圧試験が安定的に行えることを確認するため、印加電圧350kV、繰返し1ppsで約30分間、連続運転を行った。この連続運転において、放電等のトラブルや、抵抗体の特性の変化は見られなかった。

また、このときの油面付近の絶縁油の温度、および抵抗体(端子部)の温度を図5に示す。油面付近の絶縁油温度は、約30分間の高電圧運転により、33°Cから35°Cに上昇した。また、抵抗体表面温度は、電極付近において33°Cから37°C付近まで上昇している。抵抗体中央部の表面温度は、他の測定[3]から端子部より約20°C程度高いと推測されており、温度は57°C程度と推定される。さらに、この温度上昇の傾向から、より長時間の高電圧運転においても、抵抗体の表面温度は、使用上限温度80°C以下であることが推測でき、長時間運転を安定的に行えることを確認した。

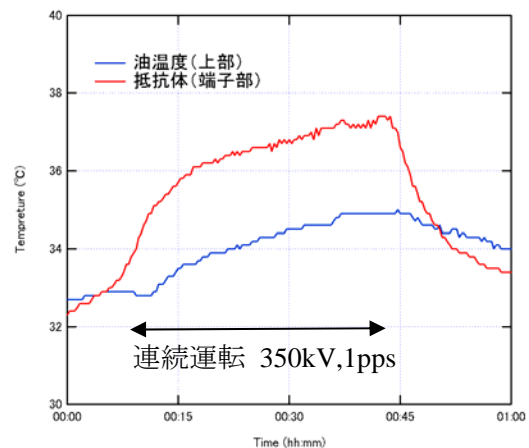


図 5: 連続運転時の油温と抵抗体表面温度の時間変化。

4. 抵抗体の経年変化

この抵抗体は、時間が経たつと抵抗値が上昇する傾向がある。今回の抵抗体の抵抗値は、製作時に1.12kΩであったが、半年ほど保管した後では1.15kΩとなり、0.03kΩの上昇が見られた。

製造会社による説明では、この抵抗値の経年変化は、抵抗体の炭素成分が大気中の水分を吸収するため起こる[4]。そのため、使用の有無にかかわらず、数カ月～1年ほどの間でゆっくりと数%程度上昇する。

5. まとめ

C-bandクライストロンの代わりとして、モジュレータ電源の高電圧試験に使用できる、抵抗型模擬負荷を開発した。これは、印加電圧350kV、繰返し1ppsの連続運転が可能である。このときの応答波形は、クライストロン負荷の場合とほぼ同等であり、この模擬抵抗はモジュレータ電源の性能評価にも使用できることが分かった。この抵抗体の抵抗値は電圧特性があり、350kVの高電圧印加時には、抵抗値が低電圧時よりも約4%減少した。また、経年変化により、半年間で抵抗値は約3%増加した。

現在、この模擬負荷はニチコン(株)草津工場において、モジュレータ電源やPFN充電器の高電圧試験に使用されている。

6. 謝辞

本実験を行うにあたり、スプリングエイトサービスの印道、中島氏らに装置の組立などを行って頂き、感謝いたします。また、東海高熱(株)の飯塚、山崎氏には技術的なご助言を頂き、感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "Compact Klystron Modulator for XFEL/SPring-8" IPAC10, Kyoto, 2010
- [2] 東海高熱(株)HP
http://www.tokaikonetsu.co.jp/products/ceramics_fr.html
- [3] 近藤、他 Internal information
- [4] 山崎、飯塚 Private communication