

Installation of Mass-produced Modulator Power Supplies for XFEL/SPring-8

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

In the XFEL/SPring-8 project, we use about 70 units of the klystron-modulators. The modulators have been installed since July 2009. The procedure of the installation is as follows: 1. Delivery to the test room of the XFEL facility, 2. Mounting the klystron and filling insulation oil, 3. High-voltage test operation, 4. Installation to the klystron gallery. We constructed a storage area, an assembly area, and an operation area in the test room. We prepared the particular carrier for the heavy modulator. The installation proceeds on the schedule.

XFEL/SPring-8用モジュレータ電源の据付作業

1. 背景および目的

XFEL/SPring-8プロジェクトでは、全長約400mの加速器部により電子ビームを8 GeVまで加速する。この加速RF源には、新たに開発した、低ノイズ、コンパクトな一体型モジュレータ電源[1]を70台用いる。この電源は、絶縁油を満たした鋼鉄製の密閉タンクにPFN回路、サイラトロン、パルストランスが収まり、かつクライストロンが取り付けられる。タンクの大きさはL1.7m×W1m×H1.3mであり、従来のモジュレータ電源よりもコンパクトである。また、厚い金属により密閉された筐体であるため、タンク内部でサイラトロンなどが発生する電磁ノイズの、外部への漏洩も低減される[2]。

このモジュレータ電源は、2007年に試験機の開発

を始め、2008年には実機に用いる約60台の量産を開始した。この量産体制では、モジュレータ電源は、工場にて製造、および簡易な高電圧試験を経て、SPring-8に輸送された後、SPring-8内のXFEL施設においてクライストロン等の組込み、最終的な高電圧試験を行い、クライストロンギャラリーに据付けされる。これらの一連の作業を円滑に行うため、XFEL施設内に必要な設備や機器を整えた。本稿は、これらの作業や、設備について述べる。

2. 受入作業概要

モジュレータ電源の受け入れ作業は、以下のような流れで行った。

1. 搬入…トラックで搬入し、組立時まで仮置き



図 1:左) 一体型モジュレータ電源。右) テストスタンド室内における、保管エリア、組立エリア、運転エリアの配置図。

¹ E-mail: ckondo@spring8.or.jp

2. 組立…クライストロンの組み付け、および絶縁油の注入
 3. 試験…高電圧動作試験、8時間連続運転試験
 4. 移動…クライストロンギャラリーへの移動、据付
- 上記の1-3の作業は、XFEL加速器施設のテストスタンド室（図1）に、新たに設置した保管エリア、組立エリア、運転エリアにおいて行った。

3. 作業および設備詳細

3.1 搬入

モジュレータ電源は、ニチコン草津工場において、組立、絶縁油によるフラッシング洗浄、抵抗型模擬抵抗[3]による高電圧試験などを行い、その後、絶縁油を抜きとりSPring-8にトラックにより輸送される。このとき、従来では三極管の一種であるサイラトロンは、電源タンクとは別に、除震対策を施して輸送されてきた。しかし、本電源の場合は、輸送車にエアサス車を使用し、さらに電源本体の重量が大きく輸送中の振動が抑えられるため、サイラトロンは、タンク本体に実装したままトラック輸送を行った。

SPring-8に輸送されたモジュレータ電源は、XFEL加速器棟テストスタンド室の一面に設置された保管エリアに、組立までの間、仮置きされる。

3.2 組立

組立エリア

モジュレータ電源は、組立エリアにおいてクライストロンの取付けと、絶縁油の注入を行う。これらの作業には、タンク内部を開放して油作業を行うことができ、さらに約1500Lの絶縁油（危険物第四類第三石油類）の貯蔵取扱が必要であった。そこで、防油堤として5m×5m四方の囲いを作り、さらに囲いの床面に油の染み出し防止のための耐油塗装を行い、その上に油吸着マットを敷き詰めるなど、絶縁油の

飛散防止の対策を施した区域を設置した。また、この区域の周囲1.5mを保安空地に設定し、物品の保管や設置を禁止した。その後、この区域を少量危険物取扱区域として消防署に届出した。

この区域では、ドラム缶を最大9缶（1800L）保管できる。さらに、油バッファタンク、浄油機も設置され、絶縁油の注入などの油作業全般を行えるようにした。

このテストスタンド室では、加速管などの真空機器の組立作業も行っており、これらを汚染しないように注意を払う必要があった。そこで、真空機器を扱う区域との間に、仕切りを作り、真空機器側に油が拡散しないように対策した。また、組立エリアの近くに換気口を設置し、周囲へ油気が拡散するのを、極力防止した。しかし、実際の作業では、油の飛散はほとんど無く、周囲へ影響を及ぼすような油気の拡散は見られなかった。

クライストロン組込み

組立作業は、最初にクライストロンの取付けを行う。この取付けは、クレーンを用いて行い、その後クライストロンの高電圧線をバルストランスに接続する。このとき、配線の経路が、筐体グラウンドの近くで曲部を持つと、コロナ放電を起こすことがあった。そこで、配線を金属製のコルゲート管に通す対策をとった。これは配線の被覆を保護するだけでなく、配線の曲率を緩和することで電界の集中を防いでいる。

絶縁油注入

クライストロンを取付け後に、絶縁油の注入を行う。まず、新しい絶縁油をドラム缶により搬入する。次に、全ドラム缶の絶縁油を、油ポンプにより一度、油バッファタンクへ移す。その後、バッファタンクより浄油機を通して電源本体に注入する。この浄油機（加藤電気製KLVC-2AXC-II）は、絶縁油を真空槽に通すことで、油中の空気や水分を取り除き（真空脱気）、絶縁耐力を向上させる。絶縁油注入後に電源は8時間ほど静置され、気泡が収まるのを待ってから高電圧試験を行う。この絶縁油の注油作業は、取扱量の法令的な制限のため、1日1台分のみとした。

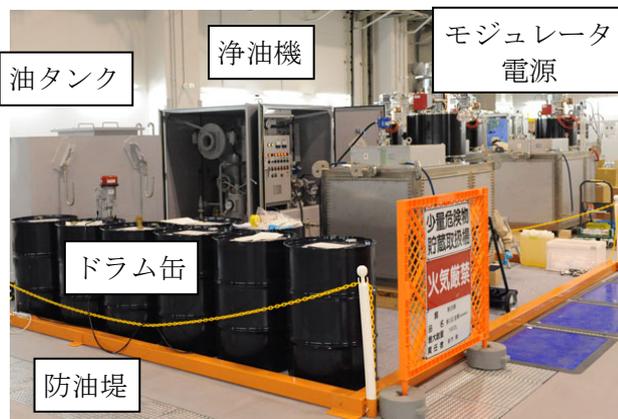


図 2: 組立エリア全景。防油堤内に、モジュレータ電源、浄油機、油タンクが設置される。



図 3: モジュール電源の試験エリア。フェンス内は管理区域に設定され、2 台同時に運転が可能である。

3.3 運転試験

運転試験概要

モジュール電源は、運転エリアに移送後、配線および配管がなされ、以下のような高電圧運転試験が行われる。

1. インターロック試験
2. 高電圧波形測定
3. 8時間連続運転試験

これらの試験で問題の無いことを確認し、クライストロンギャラリーの据付作業に移る。試験詳細は、別途[4]に詳しく述べられている。

試験エリア設備

高電圧試験では、クライストロンに約350 kVの高電圧が印加されるため、クライストロンはX線発生装置とみなされる。そこで、運転区域は入退管理ができるようにフェンスで囲いを作り、管理区域としての届出を行った。

冷却水ヘッダを区域内に設置し、モジュール電源本体、クライストロン、PFN充電器などに冷却水を供給できるようにした。この水ヘッダには、圧縮空気用のポートを備えており、試験後に機器の水抜きが可能となっている。

区域外に、19インチラックが設置され、PFN充電器などの電源や、制御機器、測定機器などを備え付けている。

また、高電圧運転時に、クライストロン内部において自己発振が起らないように、クライストロンの入力および出力ポートにRF用ダミーロードを取り付けた。

3.4 移動・据付

試験後のモジュール電源は、テストスタンド室



図 4:モジュール電源を、運搬車によりクライストロンギャラリーへ移送。

からクライストロンギャラリー内の設置箇所まで移動されるが、この移動を行うために3つの治具および装置を新たに製作した。

吊り治具

クライストロンを装着したモジュール電源をクレーンで安定的に吊るための治具を製作した。モジュール電源は、クライストロンが取り付けられ、絶縁油で満たされることで、総重量は約5トンにもなる。このとき、重心が中心よりもクライストロン側に偏る。そこで、この重量に耐え、さらに重心の偏りに合わせた吊り具を製作した。これを用いることで、モジュール電源をクレーンにより安定して移動できるようにした。

高荷重運搬車

モジュール電源は、テストスタンド室からクライストロンギャラリー内の据付箇所まで、最大400mの距離を移送しなくてはならない。この移送をクレーンにて行おうとした場合、高所作業などの他の作業との干渉が多くなることや、クレーンがレールの継ぎ目を通過するときの振動が装置に悪影響を及ぼすことなど、多くの問題が指摘された。そこで、専用の運搬車による台車輸送で行うこととし、5トンの電源を安定的に積載、運搬できる専用の運搬車を新たに製作した。

この運搬車には、ヨットハーバーで使用されているヨット移動車をモデルとし、電源本体を高荷重用の台車に載せ、それを電動ハンドリフターで牽引する方式を採用した(図4)。運搬車は全体でL3m×W1.5m×H0.4m(積載面)であり、特に車体幅は電源の幅に対して余裕が小さい。これはクライストロンギャラリーの通行幅が約2mに制限されていたためである。そこで、安定性を確保するために、車体高さを低くし、さらに電源タンクをターンバックルなどで台車に固定できるようにした。牽引車には、他チームが保有していた電動ハンドリフターを使用し、ターンテーブルによって台車と接続した。このため



図 5: テストスタンド室からクライストロンギャラリーに通じる扉の段差を超えアルミスロープ。

運搬車はトレーラー方式による牽引および後進が可能である。

なお、後輪のキャスターには、当初は耐久性を考慮し、硬度の高いMCナイロン製ダブルキャスターを用いていたが、運搬中に床面の塗装を傷つけることが分かり、現在はウレタン製ダブルキャスターを用いている。

スロープ

モジュレータを台車移動するとき、テストスタンド室とクライストロンギャラリーの間にある搬入扉において、戸口床フレーム部分が、高さ約25mm程度の段差となっており、これを乗り越える方法が、大きな問題であった。フレームの撤去から専用レールの設置まで様々な方法が検討されたが、汎用性や施設側からの要求などを総合的に考慮し、スロープを設置することにした。

このスロープへの要求は、5トンの荷重に長期間耐えられるだけでなく、なるべく浅い傾斜、人力による脱着が容易な重量に抑えることなどが要求された。そこで、アルミ材を細かいステップ状（段差0, 2mm/3mm）に削り出すことで、耐久性を持たせると同時に、傾斜部において適度な摩擦を持つようにした。また、全体を9つのパーツに分け、個々のパーツは持ち運びが容易な重さとした。

このスロープは、モジュレータ電源の台車移動だけでなく、テストスタンド室とクライストロンギャラリーの間を通る、ハンドリフターや台車などによる一般物品の輸送でも使用されており、据付工事全体において重要な設備の一つとなっている。

据付

モジュレータ電源は、クライストロンギャラリーの各据付箇所にもまで台車輸送されたのち、クレーンにより設置される。設置時に、電源本体の底面に3つのエアパッドを取付け、エアパッドが研削された

床に乗るように置かれる。これは、クライストロンと導波管の締結時に、エアパッドに圧縮空気を加え、モジュレータ電源の微調移動を可能とする[5]。電源設置後、耐震対策として電源本体の四隅からターンバックルにより床面に固定される。その後、配線、配管作業が行われ完了する。

4. 作業経過

モジュレータ電源のSPring-8における組立および試験は、2009年7月より始まった。同10月までは、機器の改良や、実証試験などを繰り返して行い、同11月より本格的に試験、据付が始まった。同12月に、運転ラインを増設し、2ラインにおいて並行して動作試験を行える体制を整えた。この並行運転が可能となると、作業の進捗は急激に早まり、それまで1.5台/週だったものが、順調なときには4台/週となった。そして、2010年5月までに約60台の運転試験および据付作業を、予定通り完了した。

この60台の運転試験を行うなかで、EOLダイオードの絶縁破壊や、信号ラインにのるサイラトロンノイズの増大、パルストランスの放電、クライストロンへの高電圧配線でのコロナ放電など、様々な問題も発生したが、いずれも原因の究明および対策を施している。

5. まとめと今後

モジュレータ電源を受入れ、クライストロンの組み付け、絶縁油の注入、高電圧運転試験、据付を行える体制を整えた。電源の据付作業は、2010年5月に予定通り約60台を完了した。現在、2010年10月からの加速管エージングを目指し、配線や配管、他の機器との動作の調整を行っている。

また、組立や試験用に設置した設備や機器は、今後、予備のモジュレータ電源の作業や、PFN充電器の運転試験、設置済みモジュレータ電源の保守などで使用する予定である。

6. 謝辞

モジュレータ電源の受け入れ作業は、ほぼ全般にわたり、ニチコン(株)の松本氏、川口氏をはじめとする多くの方々に行って頂き、深く感謝いたします。また、各エリアの設置には、共和溶材(株)、オーツカテック、クリハラントをはじめとする多くの業者の協力によりなされおり、これらの方々には深く感謝いたします。また、JASRI安積氏には、設計全般において多くの助言を頂き、大変感謝しています。最後に、配線配管作業において、SPring-8サービスの印道、泰田、石橋、益田、町田、石井氏らの協力に感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., “Compact Klystron Modulator for XFEL/SPring-8” IPAC10, Kyoto, 2010
- [2] C. Kondo, et al., “EMI Noise Suppression in the Klystron Pulse Power Supply for XFEL/SPring-8” IPAC10, Kyoto, 2010
- [3] 近藤、他 “高電圧試験向け抵抗型模擬負荷の開発”
今学会
- [4] 白澤、他. “XFEL/SPring-8 クライストロンモジュ
レータ量産機の性能”, 今学会
- [5] 櫻井、他. “エアーパード機構によるクライストロン
の導波管締結”, 今学会