

Connection of the klystron and wave-guide using an air-pad system

Tatsuyuki Sakurai^{A,B)}, Takahiro Inagaki^{A,B)}, Katsutoshi Shirasawa^{A,B)}, Chikara Kondo^{A,B)}, Noriyoshi Azumi^{B)},
Hiroaki Kimura^{A)} Tsumoru Shintake^{B)}

^{A)} XFEL/JASRI

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} XFEL/RIKEN

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

We report on connection of the klystron wave-guide using an air-pad system. XFEL/SPring-8 LINAC uses 71 klystrons to send high power RF to a lot of accelerator. We developed the klystron modulator that combined the pulse transformer with the high-power modulator. But total weight of modulator reached 5000 kg. The air-pad system is developed to move the heavy components. We optimized the air-pad design and developed the alignment base to guide the klystron motion during the waveguide connection.

エアパッド機構によるクライストロンの導波管接続

1. はじめに

我々は波長 0.1 nm 以下の X 線レーザーを発生させる X 線自由電子レーザー (XFEL) の開発を SPring-8 サイトで行っている。2010 年 8 月の時点で加速器部の据付はほぼ終了し、10 月からは加速器のエイジング運転を実施する予定である^[1]。

XFEL 線型加速器は全長 400 m と非常に長く、多くの加速管を使用して電子ビームを 8 GeV まで加速させる。そのためのマイクロ波源として 3 種類 71 台のパルスクライストロンを用いて、加速管にマイクロ波を供給している。これらのクライストロンを動かす為に、我々は一体型モジュレータを開発した。図 1 は一体型モジュレータ初号機の試験の様子である。

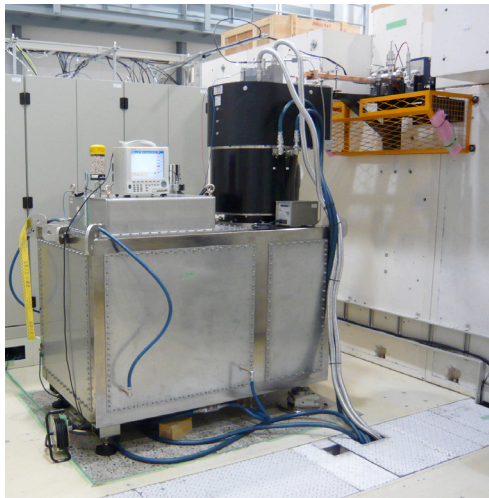


図 1 一体型モジュレータ初号機 (XFEL テストスタンドでの大電力試験時)

この電源はパルストランスと大電力モジュレータを 1 つの鉄のタンクにまとめ、内部を絶縁油で満たしている。これにより電源のコンパクト化と耐ノイズ性能が向上した^[2]。しかしクライストロンや X 線シールドを取り付けたタンクの総重量が約 5000 kg となった。クライストロンは加速管と繋がっている導波管に接続する必要があるため、一体型モジュレータを動かして導波管の位置に合わせて接続する必要がある。

我々はこれまでにクライストロンと導波管を接続する方法として、エアパッド機構と床研削装置を用いた接続方法を開発し、SCSS 試験加速器のパルストランスタンクの据付に威力を発揮した^[3]。我々は XFEL 向けモジュレータでもこの機構が使えるように、エアパッドの構造の最適化を行った。

2. エアパッド機構

2.1 エアパッドの原理

エアパッドから発生する浮力 F [kg] はパスカルの原理に従い、

$$F = PS \quad (1)$$

で求められる。ここで P は圧縮空気の圧力 [kg/cm²]、 S はパッド部の底面積 [cm²] である。設計したパッドの直径は 32 cm で面積 804 cm²、圧縮空気の圧力を 5 kg/cm² とした場合、浮力は約 4000 kg となる。しかし実際はパッドが浮上した際に隙間ができ空気が漏れるため、パッド底面の空気圧は不均一となる。そのため実測の F は計算値よりも小さい値となる。

t-sakura@spring8.or.jp

2.2 エアーパッドのコンセプト

一体型モジュレータ用エアーパッドの設計をするにあたり、以下の点を考慮して行った。

第一にエアーパッドの浮上高さを小さくすることである。導波管を接続する際、モジュレータはエアーパッドにより浮上しており、接続後はエアーの供給を止めることで停止する。その際モジュレータの高さが大きく変化すると、導波管の真空フランジに負荷がかかり、真空リークや破損の原因となりえるため浮上高さは小さくすることが望ましい。

第二に6つの自由度（水平方向2軸、垂直方向1軸およびそれらの軸方向の回転（ヨー角、ピッチ角、ロール角））を独立に動作可能であることである。作業は加速管側からの導波管の位置に合わせる必要があるため、モジュレータ電源側が自由に動作するように作ることが要求される。

第三に垂直方向の調整幅を±10mm 確保する構造にすること。これは建設中である加速器建屋の床面コンクリートの収縮によって床面が数mm変化してしまうことを想定し、エアーパッドに高さ調整機構を有する様に設計する。

2.3 エアーパッドの仕様

一体型モジュレータ用に開発したエアーパッドを図1に示す。材質は鉄（SS400）で無電解ニッケルメッキを施している。パッドのサイズは直径320mm 厚さ30mmである。パッド側面2ヶ所からφ8mmの孔を開け、圧縮空気の流路としている。また底面には5ヶ所（パッド中心に1ヶ所、中心から100mm 外側に4ヶ所）にφ2mmの噴出孔を開けている。更に底面は研磨を施し、床面と密着するような構造とした。さらに底面は中心から150mmまでの部分を50μm ザグリを施してある。これはパッド底面に空気たまりを作り、底面圧力が均一になるように工夫している。

モジュレータの高さ方向の調整はパッド上部に取り付けたレベリングブロック（株倉敷化工製 HW-S1717）と厚さ9mmのスペーサーで行なう。最初はレベリングブロックの調整範囲±6mmで行い、もし調整幅が足りなくなった場合は、スペーサーを抜くもしくは追加して補うことで高さ調整を行う。

エアーパッドはモジュレータに3個取り付ける。4点支持の場合、エアーパッドと床面の間に隙き間が出来やすく、圧縮空気を入れた際にその隙き間からの空気漏れによって全体の圧縮空気圧力の低下を引き起こし、エアーパッドが動作しない。3点支持はエアーパッドが必ず床面と接するため、圧力が均等に掛かりエアーパッドは動作しやすくなる。

2.4 モジュレータ誘導架台

XFEL 実機においてクライストロン接続作業をする際、壁から伸びる導波管フランジの位置に合わせてモジュレータをガイドして動かす為の装置が必要である。そのために我々は図3のような誘導架台

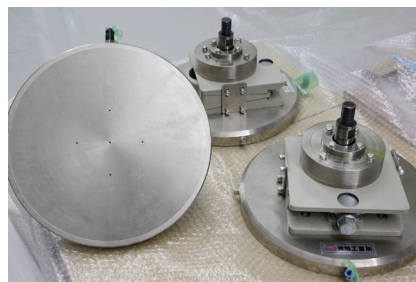


図2 モジュレータ向けエアーパッド

を1台製作し、据付時にモジュレータに取り付けて締結作業を行う。

この装置はフレーム自身を床面に固定し、台形ねじを切ったシャフト両端の金具をモジュレータタンクに固定して使用する。フランジの角度と左右の位置を2つの小さなハンドルで合わせ、シャフトにつけた大きなハンドルで、壁の導波管にゆっくりスムーズに近づけることができる。

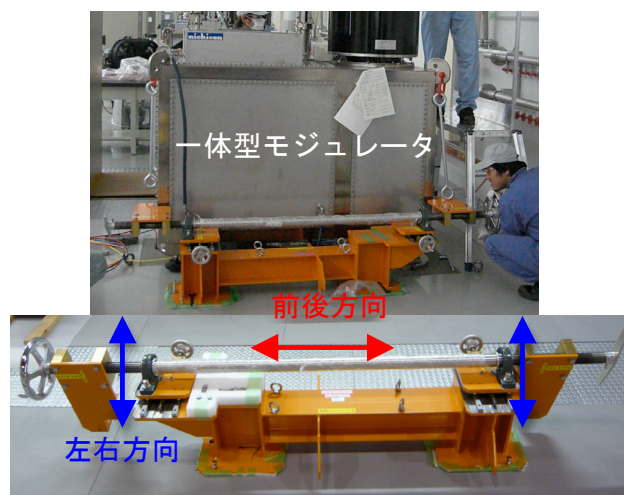


図3 (上) 誘導架台設置時の様子
(下) モジュレータ誘導架台

3. 床研削装置「ゆかとけんさく」

クライストロン締結作業時は導波管に負荷をかけることなく接続することが要求されるため、エアーパッドによる浮上高さは非常にわずかにすることが求められる。しかし建屋床面の塗り床は数mmのたわみがあることが普通であるため、エアーパッドは動くことができない。そのために我々はコンクリート床面を平らに削り出す装置を開発した[4]。図4左は床研削装置「ゆかとけんさく」である。この装置は角鋼のフレームにx、y、z方向に動くリニアガイドとモーターを装備し、研削砥石の位置をPLCで制御している。図4右に床研削装置で使用する研削砥石を示す。これはダイヤモンド粒子の入ったダイヤモンドホイールである。研削時は砥石の冷却と研削部分に堆積した研削粉を流す為、水を流しながら研削作業を行う。

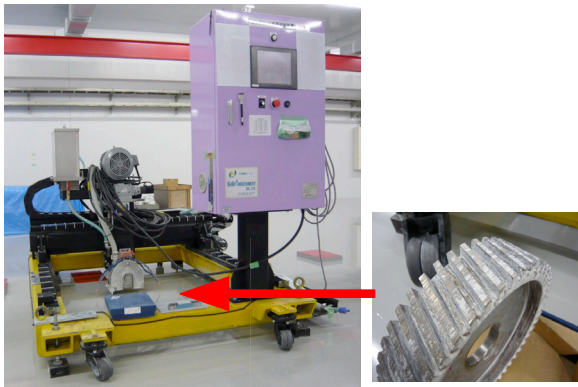


図4 床研削装置「ゆかとけんさく」 左：全体像 右：ダイヤモンド砥石

4. XFELでのモジュレータの据付作業

4.1 準備作業

XFELで使用するモジュレータ全部で71台ある。それらにはエアパッドが3つつ取り付けられ、その総数は213カ所にもなる。そして設置する床面にはエアパッドと同数の研削面が必要となる。XFEL加速器建屋は2009年4月1日に竣工し、その直後よりクライストロンギャラリーのモジュレータ設置箇所の床研削位置の測量・ケガキが行われた。

次に3カ所あるケガキ部分の床面高さの測量を行う。図5は研削面の測量風景を示す。これは1つの研削面の中で最も床面が高い部分を探す為である。ダイヤモンド砥石での1回の切り込み深さは、超荒砥石で1mm(仕上げ砥石で0.2mm)であるので、床面が最も高いところに合わせて最初の刃の高さを決定して研削を開始する。

4.2 研削作業

研削エリアで最も床面が高い部分から、「ゆかとけんさく」を用いて床面の研削を行う。実際の塗装皮膜の厚さはわからないので、研削面全面のコンクリート表面が研削できたところで(低いところの塗装皮膜は厚い)研削を終了する。3カ所ある研削面の絶対高さは異なるが、それぞれが水平になるように研削し、モジュレータを水平移動しても高さや傾きが変化しないようにしている。

図6に床研削作業の様子を示す。床研削面積は500×550mmで「ゆかとけんさく」は1面当たり約1時間で削り出すことができる。我々は2台の床研削機を使用して225カ所の研削を行った。我々は「ゆかとけんさく」2台を使用して1日平均9面を削り、実働23日間で終了した。図7は各研削面内の5点の高さを測量し、5点の最大と最低値の差を研削面の高低差としてプロットしたものである。225カ所の研削面の高低差の最大は0.23mm、最小は0.02mmで、平均値は0.09mmであった。

研削面はそのままではコンクリートが風化して表面からコンクリートの粉が吹き出す。そのため表面にコーティング材を塗る必要がある。しかし厚く

コーティング材を塗ってしまうと、研削した意味がなくなってしまう。そのため我々は研削面の平坦度を崩さないコーティング材として株式会社D&Dで開発された封孔剤パーミエイトHS-300^[5]を使用した。パーミエイトHS-300はコンクリート表面にある微細孔を塞ぐことで、水や炭酸ガス、塩化物の侵入を遮断し、コンクリートの劣化を防ぐ。そして施行方法によっては表面に塗膜を作らないことも可能であり、床研削面の平坦度を悪化させることなくコンクリートの保護ができる。またシンナー等の溶材を含まないため臭いもない。我々はこの封孔剤を研削面に塗布し研削面の平坦度を測定した所、塗布前の床面と同程度であった。



図

床面高さの測量風景

5

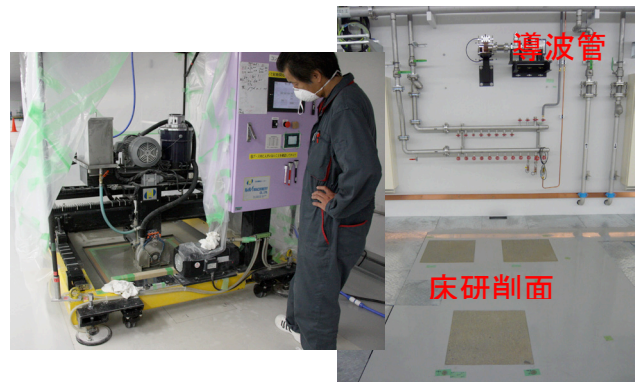


図6 左 床研削作業の様子 右 モジュレータ設置前の床面

4.3 クライストロン締結作業

モジュレータは納入後、連続運転試験を行い、合格したものを専用台車に積載して移動し^[6]、定位置に据付けた後、クライストロンと導波管の締結を行う。締結の際には前述の誘導架台と空気圧縮機を使用する。エアパッドが動く為に必要な圧縮空気の圧力は5kg/cm²以上である。エアパッドが浮上している間、底面より圧縮空気が吹き出すため、圧縮空気圧力が低下する。作業時は30秒程度経過したらエアの供給を停止し、圧力が回復するのを待ってから作業を再開するようにしている。図8は締結

作業の様子を示す。締結作業は準備から撤収までの間、

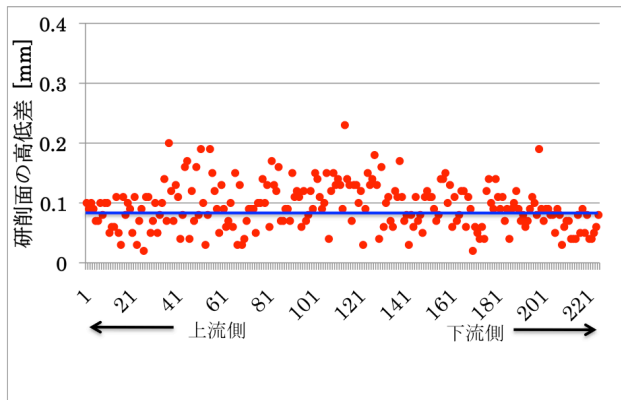


図7 床研削面の225カ所の高低差分布

モジュレータ1台当たり約2時間で接続している。現在56台のモジュレータが据付けられ、すべて真空リークすることなく締結が行われた。



図8 クライストロン締結の様子

まとめ

XFEL/SPring-8ではクライストロンと導波管を締結する為に、一体型モジュレータ向けのエアーパーッド機構の開発・実装した。現在では一体型モジュレータ56台の据付けが完了し、締結部分からの真空リークは起こっていない。今後、残りのモジュレータの据付けを行い、10月からのエイジング運転に向けて準備を進める。

謝辞

この報告を行うまでに多くの研究者・業者の方にお世話になった。旭工業所の平田善規氏にはエアーパーッドの開発から量産まで大変お世話になった。床研削機の製作は株式会社原マシナリーに行っていた。XFEL実機での床研削作業は株式会社クリハラントに行っていた。クライストロン締結の現地作業

はIHI検査計測株式会社に行って頂いた。各メーカーの方々に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T.Shintake.et.al,"Compact Klystron Modulator for XFEL/SPring-8", Proceeding of the IPAC10, Kyoto,2010.
- [2] C.Kondo et al. "EMI Noise Suppression in the Klystron Pulse Power Supply for XFEL/SPring-8" Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan. 2010.
- [3] K. Togawa. et. al 「重量物の精密位置決め用エアーパーッドの開発」第2回日本加速器学会年会 鳥栖 2005年
- [4] T. Shintake. et. al 「床面研削装置の開発」第二回日本加速器学会年会 鳥栖 2005年
- [5] <http://www.ddcorp.co.jp/introduction/index.html>
- [6] 近藤力他 「XFEL/SPring-8用モジュレータ電源の運転試験および据付作業」本学会