

# EMI SUPPRESSION OF KLYSTRON PULSE POWER SUPPLY FOR XFEL/SPring-8

Chikara Kondo<sup>1</sup>, Takahiro Inagaki, Katsutoshi Shirasawa, Tatsuyuki Sakurai, Tsumoru Shintake

SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

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

## Abstract (英語)

The klystron modulator power source of XFEL/SPring-8 is requested the low electro-magnetic interference (EMI), in order to realize the high stable beam by the feedback loops of high-precision beam monitors. We suppressed the EMI-noise by monocoque structure of the solid iron chassis, the eliminating the DC core bias circuit for the pulse transformer, and the co-axial pare noise filter. To estimate the effect of the noise filter, we measured the conducted noise on the heater power line. The thyatron noise was suppressed to about 10Vpk-pk, and would not interfere to the beam monitor.

## XFEL/SPring-8向けクライストロン用パルス電源のノイズ対策

### 1. 背景

XFEL/SPring-8においては、安定的なFEL光を得るため、従来よりも高品質、高安定度の電子ビームが必要となる。そのためには、ビームモニターなどが高い精度の測定性能を発揮し、それらを各運転パラメーターにフィードバックすることが必要となる。そのためには、測定器を低ノイズの環境下で動作させることが重要である。このような低ノイズな環境を作るには、従来、大きなノイズ源の一つであった、モジュレーター電源の低ノイズ化が必要とされる。

そこで、ノイズ対策を施したクライストロン用パルス電源を本プロジェクト用に開発した。本電源装置の動作仕様は、表1に示しているように、主に50MW級C-bandクライストロン(TOSHIBA E37202)を

表1. モジュレーター電源の動作仕様

PFN コンデンサー	29.3nF × 16 段
PFN 定格充電電圧	45kV
サイラトロン	e2v CX1836
パルストランス1次側 電圧,電流	約 23kV, 5kA
2次側 電圧,電流	約-350kV, 310A
クライストロン出カピーク電力	110MW
最大繰返し	60pps
パルス幅(ピーク 70%の幅)	4.2 μs

動作対象としている。また、本電源の大きな特徴としては、従来のモジュレーター部とクライストロン部を、一つの堅牢な鋼鉄製タンクにまとめている点にある。他にも、多くの点で新技術の導入を行っているが、詳細は以前の発表<sup>[1]</sup>に委ね、本発表ではノイズ対策と、対策後のノイズ測定について述べる。

### 2. モジュレーター電源からのノイズ

モジュレーター電源が発するノイズとして、大きく分けて2つあり、一つはサイラトロンのスイッチングノイズ、もうひとつは、大電流が通る閉ループから発する放射ノイズである。

前者は、放電管であるサイラトロンにより、アノード側に印加されていた約45kVもの高電圧が、サイラトロン内部で放電することで、1μs以下で接地電位まで降下し、立ち上がりの速い大電力パルスを生じることができる。このとき、サイラトロンからは大きな電磁ノイズが発生する。このノイズは、周囲の空間へ放射ノイズとしてや、配線を通じた伝導ノイズとして周辺機器に影響を及ぼす。

後者は、PFNとクライストロン間で流れる大電流が引き起す電磁誘導であり、電流経路のループ面積

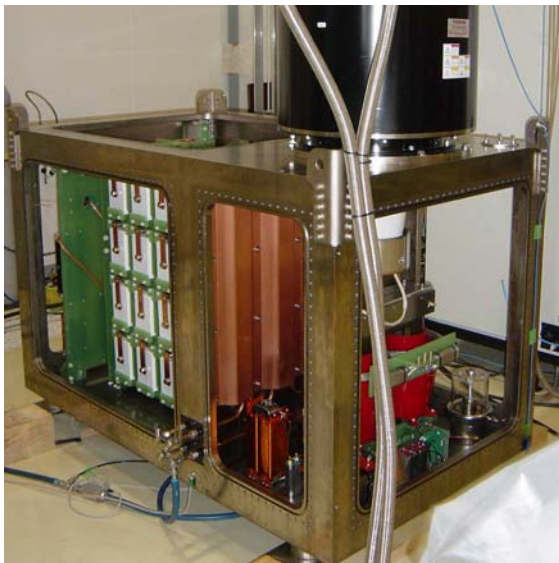


図1. モジュレーター電源外観

<sup>1</sup> E-mail: ckondo@spring8.or.jp

が大きい場合などには無視できなくなる。

これらのノイズは、時として周辺機器の誤作動を引き起こしており、検出器に対しては測定精度を悪化させる要因になりうる。

これらのノイズを抑えるため、これまでも多くのノイズ対策が行われてきたが、従来のラック設置型のモジュレーター電源では、モジュレーター電源とクライストロンを繋ぐ大電流経路や、筐体の密閉の不完全さなどにより、大きな漏洩ノイズがあるなどの問題があった<sup>[2]</sup>。

そこで、今回、電源の構造から改良を加え、抜本的なノイズ対策を行った。

### 3. ノイズ低減設計

#### 3.1 クライストロン一体型構造

XFEL/SPring-8で用いるモジュレーター電源は、PFN、サイラトロン、クライストロンらを、一つの堅牢な鋼鉄製のタンクに納めた、一体型構造を採用している。従来のモジュレーター部とクライストロン部が分離された方式に比べ、大電流経路が全て一つの筐体内に収まり、全体が厚さ6mm以上の金属筐体で囲われることになる。そのため、電流経路から放出される電磁ノイズや、サイラトロンが発する放射ノイズは、筐体のシールド効果により、外部に漏れ出すことが無くなる。

さらに、防錆用として筐体全体に無電解ニッケルメッキを施しているため、筐体表面の導通が向上し、筐体自体が良いグラウンドになる。そのため、内部のヒーター線やモニター線を筐体に沿わせることで、各ラインの耐ノイズ性が向上する。

#### 3.2 パルストランス用DCバイアス回路の省略

従来、昇圧用のパルストランスには、コアの磁束飽和を避けるため、パルストランスの1次側にDC電流を流す必要があった。これには、バイアス電流の供給ラインにはLC回路を挿入し、高電圧の短パルスがバイアス電源に回りこみを抑えていた。しかし、僅かに漏洩するパルス電流や、回路の不平衡がノイズ源となり、外部に影響を及ぼす恐れがあった。

今回、パルストランスのコアに、スーパーE材を用いることで、飽和磁束の問題を避けることができるようになった<sup>[3]</sup>。そこで、このバイアス回路を省き、これらの上記の問題を解決した。

#### 3.3 ヒーターラインのノイズ対策

筐体のシールド効果が優れているが、実際はクライストロンやサイラトロンのヒーター線が筐体を貫通しており、これらのラインを通じてノイズが外部に漏洩する。特に、サイラトロンのカソードヒーターは、配線がサイラトロン内部に通じているため、内部のノイズが伝わりやすい。

そこで、各ヒーターライン（サイラトロン・リザーバー、サイラトロン・カソード、クライストロ

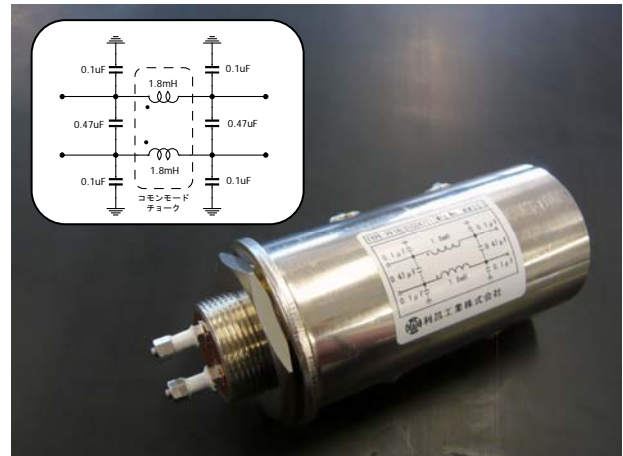


図2：同軸ペア型ノイズフィルターの外観および回路図

ン・カソード)には、筐体内部に、電圧のステップダウンを兼ねた絶縁トランスを挿入し、さらに筐体貫通部に、ノイズフィルターを挿入することにした。

このノイズフィルターに要求されるは、数Aの電流が流れる電力ラインに挿入できる、ペア線の貫通型フィルターであり、さらに筐体内の絶縁油を密封できる構造をもつことも要求される。このような要求に見合う適切なフィルターが、市販のものには見つからなかったため、新たにフィルターを設計し、製作を利昌工業に行って頂いた。

図2に、フィルターの外観および回路図を示す。フィルターの構造は、装置との固定部には密封用のOリングを備え、またフィルター内部にはエポキシ含浸を施している。フィルター回路は、ライン間を橋渡しするコンデンサーでノーマルノイズを打ち消し、さらに、 $\pi$ 型に接続されたコモンチョークと接地間コンデンサーによりコモンノイズを防ぐ。このフィルターは、60Hzのヒーター電力はほとんど影響を及ぼすことなく透過させ、10kHz以上のノイズに対してはフィルターとして働く。

### 4. 伝導ノイズ測定

#### 4.1 同軸ペアフィルターの評価試験

実際のノイズに対し、ノイズフィルターによる効果を測定するため、試作モジュレーター電源において、フィルターの有無で伝導ノイズの違いを測定した。

図3のように、サイラトロン・ヒーターラインに、一時的なセットアップで取り付け、定格運転時における、ヒーターラインにのるノイズ波形を測定した。

まず、フィルター



図3：ノイズフィルターの評価試験風景

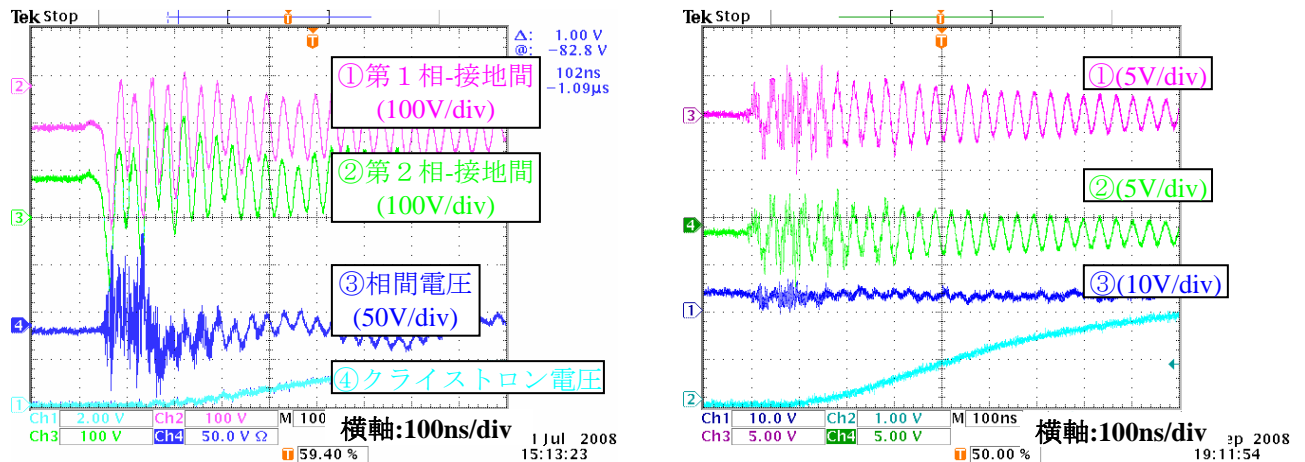


図4：サイラトロン・カソード・ヒーターラインに乗る、サイラトロンノイズの波形。サイラトロンがファイア直後の、約 $1\mu\text{s}$ の範囲を示す。左) ノイズフィルターが無い場合。右) ノイズフィルターを通した場合。①赤線、②緑線は、それぞれ単相AC200Vラインの第1相、第2相の対地間電圧、③青線は相間の電圧。④水色は、クライストロン印加電圧である。

が無い場合のヒーターラインに乗るサイラトロンノイズを図3(左)に示す。測定した波形は、サイラトロンヒーターライン(単相AC200V)における、①第1相の対地間電圧、②第2相の対地間電圧、③相間電圧、④クライストロン印加電圧である。①、②は、ノーマルノイズとコモンノイズの和を測定しており、③相間のノーマルノイズを測定していることになる。また④は、サイラトロンの動作するタイミングを見えており、トリガーとして用いている。

測定された波形は、サイラトロン・ファイア後、③のノーマルノイズで約150Vpk-pkのノイズが見られる。また対地間電圧の①、②では、約300Vpk-pkという大きな波形が、同じ形として見られており、このラインに乗る主なノイズはコモンノイズであることが分かる。これらのノイズは、ヒーター電圧がAC200Vであることを考えると、大きなノイズとなっていることが分かる。

次に、フィルターを通した場合を図3(右)に示す。これらの波形から分かるように、相間電圧、対地間電圧ともノイズ波高は約10Vpk-pkであり、ラインにのるノーマルノイズ、コモンノイズとも、フィルターにより約1/15~1/30に減少していること

がわかった。

#### 4.2 量産機におけるノイズ

2009年7月より、一体型モジュレーター電源の据付が開始された。このとき、据付前に受入検査として、SPring-8にて動作試験を行っており、この試験に合わせて、量産機における伝導ノイズの測定も行った。

このときのサイラトロン・カソードの典型的なノイズ波形を図5に示す。ノイズの波高は10Vpk-pk前後であり、フィルターの評価試験時と同様の結果が得られている。さらに、これらのサイラトロンノイズは、クライストロン印加電圧が立ち上がるまでの約 $1\mu\text{s}$ 以内で無視できるほどに減衰していることがわかる。このため、更に数 $\mu\text{s}$ 後の電子ビームが加速される時間帯では、サイラトロンノイズは無く、計測系に影響を及ぼすことは無いと考えられる。

また、他のヒーターラインにおけるノイズも、サイラトロン・カソードとほぼ同じであった。

### 5. まとめ

XFEL/SPring-8向けクライストロン用パルス電源は、サイラトロン・ファイア時に発生する電磁ノイズを抑えるために、数々のノイズ対策を施した。主な対策としては、電源筐体を堅牢な鋼鉄製タンクとし、クライストロンとの一体化による大電流経路の密閉化や、タンクによる電磁ノイズのシールド効果、DCバイアス回路の廃止、そして同軸ペアフィルターを用いたヒーターラインの伝導ノイズ除去である。これらの対策を施し、ヒーターラインに乗る伝導ノイズを測定したところ、コモンノイズ、ノーマルノイズとも約10Vpk-pkであり、漏洩ノイズが抑えられていることを確認した。

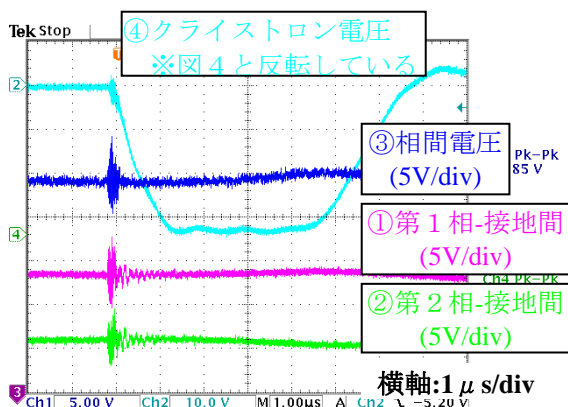


図5：量産機のサイラトロン・カソード・ラインのノイズ

## 謝辞

本研究を行うにあたり、同軸ペアフィルターの  
また、測定を行うにあたり協力を頂いた、寿鉄工(株)、  
ニチコン(株)の関係諸氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 近藤, 他, “XFEL/SPring-8 向けクライストロン用  
パルス電源の開発”, 第5回加速器学会, 東広島,  
2008
- [2] 近藤, *Internal information*.
- [3] 白澤, 他, “ “XFEL/SPring-8用6.5%ケイ素鋼板を使用  
したエポキシ含浸型パルストランスの開発” 第5回  
加速器学会, 東広島, 2008