

## DEVELOPMENT 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

XFEL project at SPring-8 requires a pulse power supply which equips highly stable high voltage, and a compact size body. To meet the request, we have developed the compact oil-filled power supply in which the high voltage components are stored in the insulation oil. The shell of the tank is composed of thick steel plates, which enhances the stiffness of the body (monocoque structure). The steel plate shields the EMI noise emission generated by the high power pulse current. The power supply is designed for easy maintenance, and equips the maintenance-free cooling system. Since Nov. 2007, the power supply has worked well.

## XFEL/SPring-8向けクライストロン用パルス電源の開発

### 1. 概要

XFEL/SPring-8では、高品質の電子ビームによるSASE型自由電子レーザーの発振を目指しており、これには従来よりも安定動作する高電圧パルス電源が必要となる<sup>[1]</sup>。また、8GeVの電子ビームエネルギーを約400mの線形加速器で加速するため、C-band加速管を使用するが、高電界であるために、電源側の機器密度が高く、コンパクトなRF電源装置が必要となった。そこで、2003年に「絶縁油密閉型モジュレーター電源」<sup>[2]</sup>を開発したが、更なるコンパクト化、メンテナンス性の向上、漏洩ノイズ対策などが要求されていた。そこでPFNコンデンサー、スイッチングデバイス（サイラトロン）、パルストランス、クライストロンなどの高電圧部品を一つの油タンクに収めた「一体型モジュレーター電源」を2007年に提案した<sup>[3]</sup>。そして、メーカーの協力のもと試作機が完成したので、ここに報告する。

### 2. 設計概念

まず、本電源の構造図と動作仕様を図1および表1に示す。PFN充電器により、約15msかけ、PFNのコンデンサーを定格45kVまで充電する。そして、サイラトロンの放電スイッチングにより、出力ピーク 23kV, 5kA, パルス幅約4 $\mu$ sの大電力パルスをパルストランス(昇圧比 1:16)に送り、350kVに昇圧し、クライストロンを駆動する。クライストロンにおいて増幅された約50MWの大電力RFを、導波管を通じて加速管に送り、そこで電子ビームの加速を行う。

XFEL/SPring-8で必要とされる電子ビームの安定加速には、パルス電源の出力安定度100ppm以下という、高い安定度が要求される。これは主にインバータ方式の高電圧充電器を安定化することが重要であるが、モジュレーターの絶縁油の温度を安定化することや、PFNコンデンサーの充電電圧をフィードバックする高精度な高電圧プローブをモジュレー

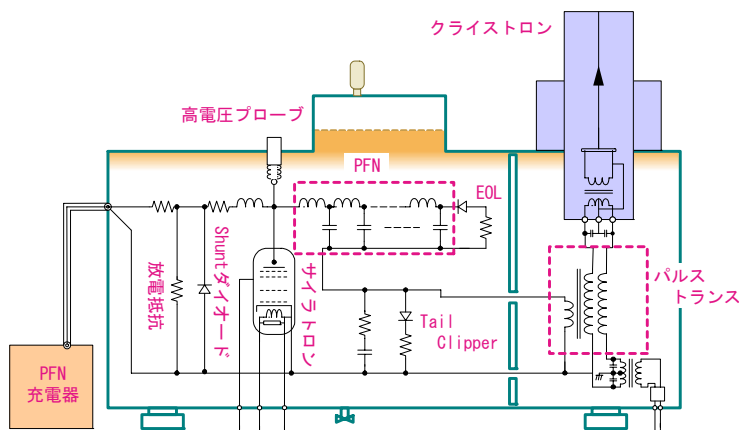


図1. パルス電源の回路図 (概略)

|                  |               |
|------------------|---------------|
| PFN コンデンサー       | 29.3nF × 16 段 |
| PFN 特性インピーダンス    | 4.3 $\Omega$  |
| 定格充電電圧           | 45kV          |
| パルストランス出力電圧      | 350kV         |
| パルストランス出力電流      | 310A          |
| 出力ピーク電力          | 110MW         |
| 最大繰り返し           | 60pps         |
| 充電電圧安定度          | <100ppm       |
| パルス幅 (ピーク 70%の幅) | 4.2 $\mu$ s   |

表1. パルス電源の動作仕様

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



図2. 一体型モジュレーター電源外観

ターに直接取り付け、ノイズの少ない環境を作ることも重要である。

本パルス電源は、従来のモジュレーター電源に対して、以下のような特徴をもっている。

1. 絶縁油密封方式により、高電圧装置をコンパクトに収納し、また空気中の埃や湿度などの環境に絶縁性能が左右されない。
2. 厚さ25mmのSS鋼板の壁材によりタンクの強度を形成するモノコック構造とし、重量1.2トンのクライストロンとソレノイドを安定に支持する。
3. 高電圧パルス発生時の電流経路を、厚い金属内で閉じることで、漏洩ノイズを低減する。
4. 側面および上面に開口部を持ち、内部における作業性を確保することで、量産性、メンテナンス性を向上する。
5. 各モジュールをユニット化し、メンテナンス性を高める。
6. パルストランスに、コア材に高周波用電磁鋼材を用い、また巻き線にモールド化を施すことで、低騒音、耐放電性を実現する<sup>[4]</sup>。
7. フロリナート充填型高電圧プローブにより、充電電圧を高速・高精度フィードバックして、安定化する<sup>[5,6]</sup>。
8. 自然対流を利用したメンテナンスフリーな冷却機構により、絶縁油を冷却する<sup>[7]</sup>。
9. 絶縁油を真空脱気装置に通してから、電源タンクに注入することで、注入後の真空脱気過程を省略する。
10. クライストロンと導波管の接続を容易にするため、重量約5トンのタンクを可動化する高重量用エアパッドを装備<sup>[8]</sup>する。

本発表では上記のうち、タンクの構造、ノイズ漏洩対策、および冷却機構について述べ、パルストランス、高電圧プローブ、エアパッドの詳細については他発表<sup>[4-8]</sup>に委ねる。

なお、今回のパルス電源試作機の製作・調整は日本高周波㈱にて行い、また絶縁油タンクの製造は寿

鉄工(相生)にて行った。

### 3. 各部詳細

#### 3.1 絶縁油タンク

絶縁油タンク(図2)のサイズはL1.7m×W1m×H1.05mであり、厚さ25mmのSS鋼を溶接して製作されている。また、内部に厚さ19mmのSS鋼による仕切りを入れ、高電圧発生部と充電部を分けている。このような厚い鋼板を溶接にて組み合わせた構造にすることで、

- 外殻により強度を持たせるモノコック構造とすることで、約1.2トンのクライストロンの荷重による変形を抑える。またトラック輸送時の振動によるタンクの変形も抑えられるため、装置の組立を工場にて行え、製造効率が向上する。
- 筐体自体が大きな導体であるため、内部の高電圧パルス回路に対して全面アースを取ることができる。また、電磁シールド効果により放射ノイズを低減できる。

といった利点がある。

表面は無電解ニッケルメッキを施し、防錆性および導電性を持たせている。開口部は、上部にクライストロン用開口部および油バッファ付天板用開口部を持ち、側面には6つの開口部をもつ。各開口部は、厚さ6mmのSUS板により密封する。この密封にはOリングにより密封する。この時、Oリングの接触面が密封の可否を左右するため、表面の保護には十分に気を配った。絶縁油の密封にはOリング以外にもゴムパッキンがよく用いられるが、ゴムパッキンでは長期信頼性や漏洩ノイズのシールド性が劣るため、Oリング方式を選択した。なお密封検査は、内部にHeガスを加圧し外部からHeリーク検出装置でチェックする手法を用いた。

また、装置のメンテナンス性にも配慮して設計しており、タンクに開口部を多くすることによる内部での作業効率の向上や、内部装置をモジュール化し脱着を容易とするなどの工夫を加えている。また、絶縁油の注入に真空脱気装置(加藤電機製作)を用いることで、絶縁油注入後の真空脱気を省略し、また定期的な絶縁油のメンテナンスもできるようにした。

#### 3.2 冷却機構

電源内部では、クライストロンやサイクロトロンヒーター電力として約1 kW、高電圧パルス発生時の電力損失に約2kW(定格運転時:充電電圧45kV、繰り返し60pps)の合計3kWの発熱がある。この発熱を筐体から大気への自然放熱のみで行うと、絶縁油の温度は90℃近くまで上がり、絶縁油の劣化や装置の損傷を招く。また、大きな放熱は室温を不安定にし、

制御機器の動作に悪影響も与える。そのため、冷却水を用いて絶縁油を積極的に冷却する必要があるが、絶縁油を攪拌プロペラにより強制的に対流を起こすことは、メンテナンス性を考えて行わず、代わりに発熱によって生まれる油の自然対流を最大限に利用することで、メンテナンスフリーの冷却機構を目指した。

この冷却機構には、粘性が大きい絶縁油の対流を最大限に利用すること、また高電圧部位を避けるために限定されたスペースに収めることが必要であった。そこで、数種類の冷却機構を製作前に試験し、そこで得られた冷却能力および知見を基に設計を行った<sup>[7]</sup>。

本機における冷却機構は、冷却配管と銅板をロウ付けで組み合わせた冷却板を絶縁油内に取り付けるタイプで、銅板により絶縁油との接触面積を増やし、効率的に冷却水に熱を伝える(図3)。このような冷却板を、タンクの側面部、中仕切り板部、そして天板部に計5つ配置している。

この冷却機構に水温26℃、流量9L/minの冷却水を流し、電源の定格運転を行い、絶縁油の温度変化を測定した。絶縁油温度は8時間程度の連続運転でほぼ上限に達し、油面付近で最大約43℃であった。また、発熱の大きいサイラトロン、EOL抵抗などの表面温度を測定したところ、大部分は絶縁油の劣化を促進する温度である70℃を下回っていたが、サイラトロンのヒーター部のみ、80℃にまで達することが確認された。この箇所においては、放熱機構を増強する予定である。なお、冷却水は冷却機構を通して約4.5℃温度上昇しており、この冷却機構が吸収する熱量は約2.8kWであることが分かる。これより、全体の発熱量(約3kW)の大部分は冷却水に伝わり、残りの大気への放熱量は小さいことがわかる。



図3. 冷却板。側面開口部の蓋板に取り付けるタイプ。写真ではゴムパッキンを使用しているが、後の試験で油リークを生じたため、現在はすべてOリングのみを使用している。

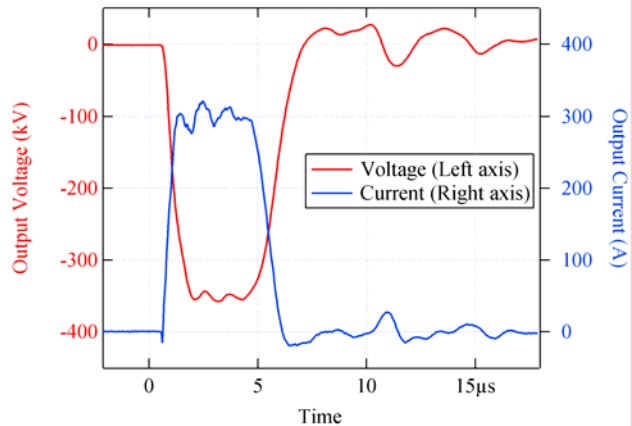


図4. パルストランスの出力電圧波形(赤)および電流波形(青)

### 3.3 漏洩ノイズ対策

本電源では、PFNコンデンサーからパルストランス、クライストロンまでを一つのタンクに収納されている。そのため、大電流パルスが通る経路のループ面積を狭くすることができノイズの発生を抑えることができる。さらに、周りが厚い金属で囲われているため、電磁ノイズはシールドされて放射されないようにしている。また、堅牢な筐体が全面アースの役割を果たしており、高周波ノイズに対する接地効果も高い。

一方、サイラトロンやクライストロンのヒーターライン、電流・電圧モニターなどの信号ラインのように、外部と接続を持つラインに対しては、ノイズフィルターを用いることで、伝導ノイズを閉じ込める工夫を施している。

これらの対策を施すことで、放射ノイズは抑えられているが、ヒーターラインにおいては、サイラトロンのスイッチング時に、10-100MHzの領域に大きな伝導ノイズが観測されている。今後、ヒーターライン用ノイズフィルターの開発を行い、ノイズ低減を図る。

## 4. 動作試験

図4に、パルストランスの出力電圧波形および電流波形を示す。ピーク電圧350kV、パルス幅4.2μsの高電圧パルス出力を達成した。今後、PFNコイルの調整により、ピーク部の平坦度を改善する予定である。

また、充電器にニチコン製高精度充電器<sup>[6]</sup>を用いて充電電圧の安定度を測定したところ、45kVの充電電圧に対し、50-60ppmという安定度を達成した。これは、目標としている安定度100ppmを上回る結果であり、XFEL/SPring-8プロジェクトで要求される加速器の性能を満たせることを示している。

本電源は、2007年10月より運転を開始し、2008年

7月末時点において、約500時間の運転を行い、油漏れや故障等のトラブルも起こらずに、安定な運転を実現している。

## 5. まとめ、および今後

XFEL/Spring-8プロジェクトに向け、コンパクトな高電圧パルス電源を開発した。現在、長時間の運転を行い、安定的な運転を実現している。今後は、量産に向け、ノイズフィルターの強化などに改良を加えていく。なお、今秋からプロジェクトの完成予定である2010年にむけ、量産を始める予定である。

## 謝辞

本電源の設計、製作、調整を行って頂いた、佐藤和之氏をはじめとする(株)日本高周波の方々、またタンクの設計、製作を行って頂いた、太田正之氏、竹谷昌久氏をはじめとする(株)寿鉄工(相生)の方々に深く感謝いたします。その他、各装置の開発・製作に協力して頂いた、各メーカーの方々に深く感謝いたします。最後に、本電源の据付から実験に至るまで、様々なサポートとして頂いたスプリングエイトサービスの印道征一氏、中嶋一馬氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 田中均,他 “XFEL/Spring-8のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価”,第4回加速器学会, TP66, 2003年, 和光
- [2] T. Inagaki, et. al., “A Compact Oil-filled Modulator for C-band Klystrons”, IEEE Pulsed Power Conf.'05.
- [3] 新竹積,他 “FEL向け高安定高周波電源について”,第4回加速器学会, TP41, 2003年, 和光
- [4] 白澤克年,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”, 本学会 WP109
- [5] 岡田幸一,他 “XFEL/Spring-8向けフロリナート充填型高電圧プローブ”, 本学会 WP108
- [6] 川崎敦志,他 “XFEL/Spring-8向け高電圧充電器の開発”, 本学会, WP111
- [7] 近藤カ,他 “クライストロン電源における絶縁油の冷却効率の向上”, 第4回加速器学会, TP42, 2003年, 和光
- [8] 櫻井辰幸,他 “XFELクライストロン用モジュレータ電源の位置調整エアパッドの開発”, 本学会 WP110