

# C-band クライストロン用 コンパクト密閉型変調器電源の大電力試験

稲垣 隆宏<sup>1,A)</sup>、馬場 斉<sup>A)</sup>、新竹 積<sup>A)</sup>、渡川 和晃<sup>A)</sup>、尾上 和之<sup>A)</sup>、中田 太志<sup>A)</sup>、  
松本 浩<sup>B)</sup>、高嶋 武雄<sup>C)</sup>、工藤 統吾<sup>C)</sup>、佐伯 学行<sup>A,D)</sup>、徳地 明<sup>E)</sup>、内藤 伸吾<sup>E)</sup>

A) 理化学研究所 播磨研究所 (SPring-8/RIKEN) 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

B) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

C) 高輝度光科学研究センター (SPring-8/JASRI) 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

D) 東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

E) ニチコン株式会社 草津工場 〒525-0053 滋賀県草津市矢倉2-3-1

## 概要

SPring-8において、軟X線FEL計画 (SCSS:SPring-8 Compact SASE Source) が進行している<sup>[1]</sup>。SCSSで使用されるC-band 50 MW 級クライストロンをドライブするために、密閉型の変調器電源を開発している。この変調器電源は、全ての回路構成部品を絶縁オイルの中に入れた密閉構造をしており、従来の変調器電源と比較してコンパクトで、なおかつ信頼性、安定性の高くノイズの少ないものと期待される。

2003年3月に第1号機が完成した。クライストロンに繋いで大電力運転試験を行ない、定格の高電圧パルス (-350 kV) が印加されることを確認した。今後、出力波形の調整、長期安定性の確認等の試験を行なってゆく予定である。

## 1. 開発のねらい

SCSSで目標とするFEL発振は、アンジュレータを通る電子ビームのエネルギー変動に対しいへん敏感である。そのためSCSSでは特に、加速器がパルス運転をするサイクル毎に、加速エネルギーが安定であることが重要である。C-band 加速器において、

RFをパワー、位相の両面で安定にするには、C-band クライストロンに印加する電圧 ( $V_k = -350$  kV) が0.5% 以下で安定している必要がある。そのため特に安定したノイズの少ない変調器電源が必要である。

また、Linear collider をはじめとする次世代の大型加速器や、産業用、医療用の加速器では特に、安価かつコンパクトで信頼性の高い変調器電源が強く望まれている。

そこで、高圧部を絶縁オイル漬けにした密閉型変調器電源を開発することとした。オイル密閉型にすることにより、以下のメリットがある

- ①絶縁距離が短くなり、よりコンパクトになる。
- ②外気の影響 (湿度やほこりなど) を受けにくい。
- ③冷却効率が良い。発熱をまずオイルに逃がし、オイルを冷却水で冷やすことができる。
- ④ステンレスタンクの中に入れ密閉構造にすることにより、電気的なノイズが遮断される。
- ⑤内容物を取り付けたフレーム全体を吊り上げられる構造とする。保守の際にアクセスし易い。

SCSSでは、この密閉型変調器電源をC-band クライストロンだけでなく、パルスHV電子銃<sup>[2]</sup>や入射器部のL-bandクライストロン用のパルス電源としても使用できるように考えている。従って、SCSS全体で10台の同じ変調器電源を使用する予定である。

これまでの開発経過については、文献<sup>[3]</sup>を参照していただきたい。

## 2. 変調器電源の構成

### 2.1 構造

図1に、変調器電源の外観写真を示す。左正面にPFNやサイクロトロン用の納まる変調器電源部タンク、右奥にクライストロンとパルストランスとを収納したタンクがある。写真には写っていないが、手前左隣に外付けのインバータDC電源が置かれる。それぞれのフレームGND間は幅広いアース板で繋がれ、戻り電流によって電位差を生じないようにしている。

変調器電源部のオイルタンクとして、貯水用のステンレスタンクを利用している。外形は1.5 m×1 m



図1：密閉型変調器電源 及び クライストロン

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

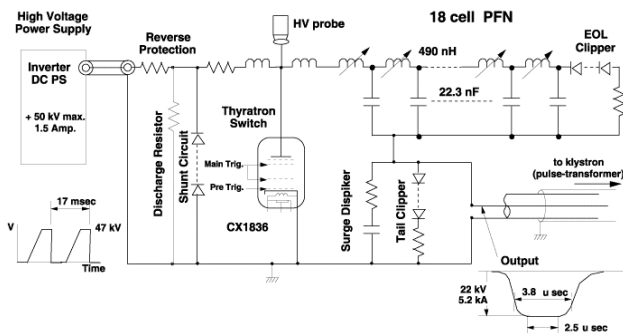


図2：変調器電源の基本回路構成

×1 mで、総重量は絶縁オイルを抜いた状態で約700 kgである。コンパクトなタンクに納まっているため、容易に移動可能である。

## 2.2 構成要素

図2に、変調器電源の基本回路構成を示す。この回路構成は、KEKにてC-bandクライストロン用に開発されたSmart Modulator<sup>[4]</sup>とほぼ同様である。表1に今回開発した変調器電源、及びC-bandクライストロンの仕様をまとめる。

PFNへの充電は、最大出力が50 kV、平均充電電流が1.5 AのインバータDC電源を用いる。東芝電波特機にて今回新たに開発したインバータ電源<sup>[5]</sup>、およびSPring-8加速器グループより借用したインバータ電源(EMI-303L)を用いて運転を行なった。

PFNは、General Atomics社の高電圧用キャパシター(容量22.3nF)と、L可変機構を有するコイルを18段組み合わせた無結合型コイル方式である。コイルのL調整は、タンク上蓋にある作業窓から絶縁ロッドを差し込んで行なう構造で、変調器電源を運転しながら調整ができるようになっている。PFNの電圧( $V_{PFN}$ )をモニターするために、高電圧プローブ(岩通HV-P60、減衰比2000:1)を設置している。

PFNのスイッチ素子として、ダブルギャップ型のサイラトロン(E2V-CX1836)を用いた。メイン

表1：変調器電源 及び クライストロンの仕様

変調器電源 (ニチコン株)	
最大運転繰り返し	60 pps
最大PFN充電電圧 ( $V_{PFN}$ )	50 kV
平均充電速度	30 kJ/sec
PFNへの蓄積エネルギー	475 J
ピーク出力パワー	114 MW
出力電圧の繰り返し安定性	$\pm < 0.5$ %
タイミング ジッタ	$< 5$ nsec
パルストランス	
昇圧比	1:16
パルス持続時間 (70%電圧にて)	3.8 $\mu$ sec
クライストロン (東芝 E3746A)	
運転周波数	5712 MHz
ピーク出力RFパワー	50 MW
RFパルス時間幅	2.5 $\mu$ sec
電子銃電圧 ( $V_k$ )	350 kV
ビーム電流 ( $I_k$ )	317 A

リガの前にプレトリガを与えて管内をイオン化させることにより、スムーズに放電を起こさせ、結果として長寿命を実現している。また、発熱対策としてサイラトロンを囲むようにチムニーを作り、攪拌スクリーを回している。

高電圧パルス発生時、負荷側のインピーダンス不整合や短絡により反射波が生じ、インバータ電源を壊すことのないように、3ヶ所に逆電圧を短絡するダイオードを入れている。EOL clipper 回路、Tail clipper 回路、Shunt 回路である。各回路にはそれぞれ電流モニターが取り付けられており、設定以上の短絡電流が流れるとインターロックが働いて運転を停止するようになっている。

PFNにより生成された高電圧パルスは、9本並列に繋がれた高電圧用同軸ケーブルを通して、パルストランスへ導かれる。パルストランス(昇圧比1:16)により $V_k = -350$  kVまで昇圧され、クライスト

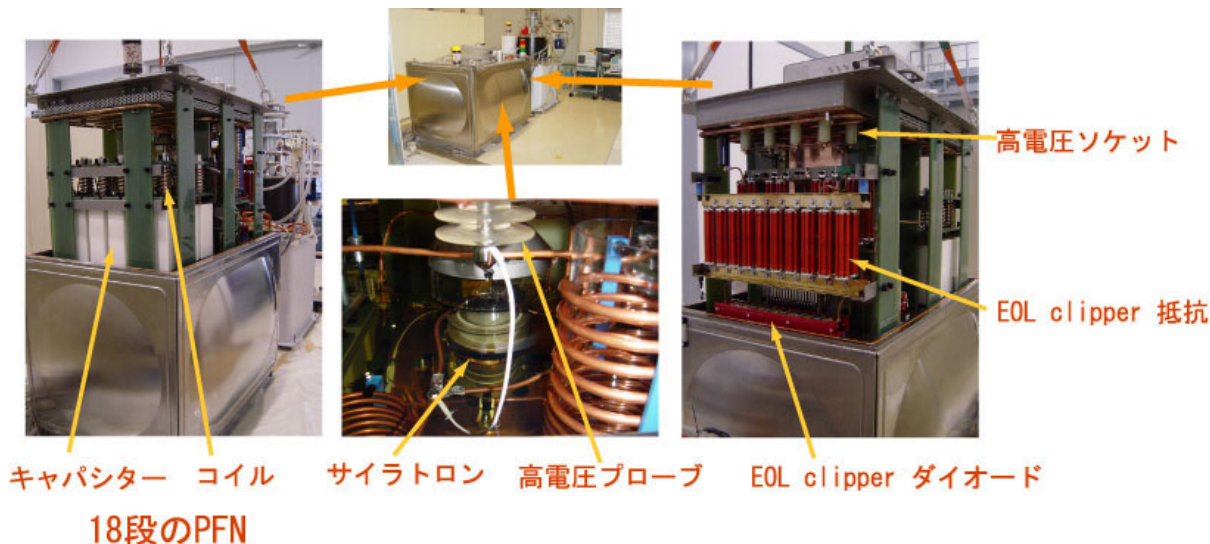


図3：変調器電源内部

ロンのカソードに印加される。トランス2次側の電圧 ( $V_k$ ) をモニタするために、Stangenes社製のCVD (容量性分圧器) が設置されている。CVDの分圧比は、パルサーより送った 130 V の方形波を比較測定することにより校正し、7400:1 という減衰比を得た。また、トランス2次側を流れる電流 ( $I_k$ ) をモニタするために、Pearson社製のカレントモニタ (電圧出力比 1V/10A) が設置されている。

変調器電源の運転開始/停止は、制御ラックに収納されたコントロールボックスのタッチパネルにて操作を行なう。コントロールボックスにはインターロック機構がついており、各機器の故障や、短絡電流の増加などの異常を検知して、直ちにインバータ電源およびサイラトロンを停止するようにになっている。

### 3. 運転試験

密閉型変調器電源の第1号機はニチコン(株)にて2003年3月に完成された。負荷としてクライストロンを繋ぎダイオードモード (クライストロンにRFを入れない) にて運転試験を行なった。 $V_k$ を高くとるために、PFNのコイルはLを最も小さくした状態 (PFNのインピーダンスを下げた状態) にした。

まず、繰り返し 10 pps にて運転を開始した。充電電圧 ( $V_{PFN}$ ) を徐々に上げてゆき、 $V_{PFN} = 45$  kV にて  $V_k = -350$  kV を得た。次に、繰り返しを 20 pps、30 pps、40 pps、50 pps、60 pps に設定し、それぞれの繰り返しで同様に  $V_{PFN} = 45$  kV ( $V_k = 350$  kV) まで電圧を上げた。図4、図5には、1 pps にて  $V_{PFN} = 45$  kV の時の  $V_{PFN}$  波形、及び、 $V_k$  波形・ $I_k$  波形を示す。 $V_k$  波形・ $I_k$  波形は、繰り返しを変えても全く変化しなかった。 $I_k$  波形にはノイズのような振動が乗っているように見える。この振動の原因を調査中である。

60 pps、45 kV にて連続で30分ほど運転を行なったところ、今回開発したインバータ電源が非常停止し、内部のIGBTが破損した。調査の結果、600 V

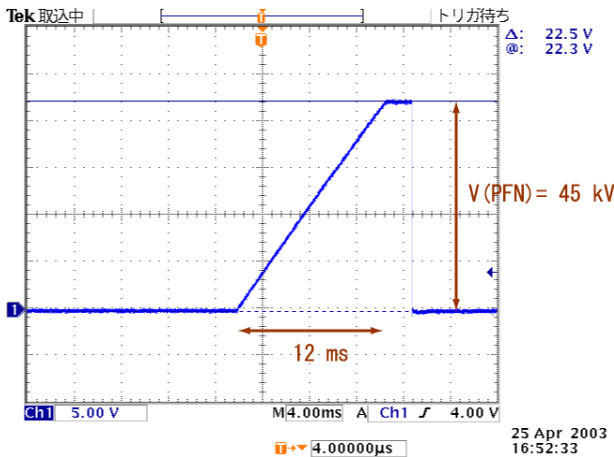


図4：PFNへの充電電圧。変調器電源タンク内に設置した高電圧プローブからの出力波形。1 ppsにて。

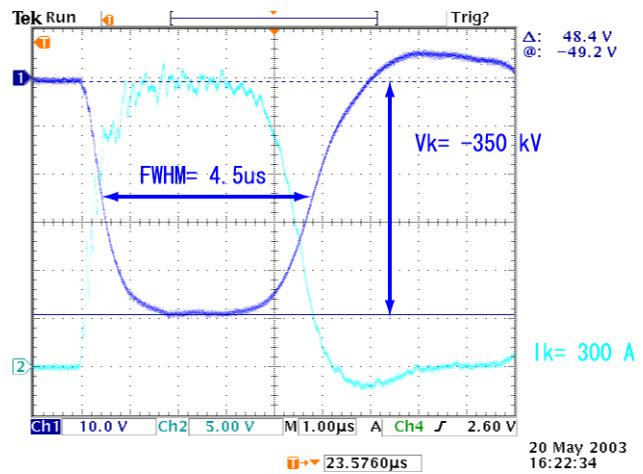


図5：高電圧パルス出力波形。Ch1 (青色) はCVDによる  $V_k$  モニタ波形。Ch2 (水色) はカレントモニタによる  $I_k$  モニタ波形。 $V_{PFN}$ =約 45 kV にて。

整流回路の低電圧側とGND間の静電容量に徐々に蓄電して基板の耐圧を超えたことが判明した。高電圧、大電力装置の開発段階では、この手のトラブルは避けられず、克服することが最も大切なテーマである。その後、EMI社のインバータ電源にて繰り返しを下げて運転試験を行なった。これまでの運転中では、変調器電源本体には大きなトラブルは起きていない。

### 4. まとめ

2003年3月に、密閉型変調器電源の第1号機が完成した。クライストロンに繋いで大電力運転試験を行ない、定格の高電圧パルス ( $V_k = -350$  kV) が印加されることを確認した。

今後、出力波形の調整、長期安定性の確認等の試験を行なってゆく予定である。

### 参考文献

- [1] URL: <http://www.xfel.spring8.or.jp>  
文献[2]~[4]も含めてSCSS、C-band加速器に関連した文献はここで入手できます。
- [2] 渡川和晃 「SPring-8軟X線自由電子レーザー計画に用いるCeB6電子銃の開発」本研究会 (FB-3)
- [3] H. Matsumoto, et. al., "A Closed Compact Modulator For 50 MW C-band (5712 MHz) Klystrons", Proc. of Power Modulator Conf. & High Voltage W.S. (2002);  
馬場齊 「C-band 50-MW クライストロン用コンパクト密閉型変調器電源の開発」第26回リニアック技術研究会 p341-p343, KEK Preprint 2001-56.
- [4] H. Baba, et. al., "Pulsed Modulator For C-band Klystron", Proc. of the APAC98, KEK Preprint 98-33.
- [5] 飯田謙二 「コンデンサ充電用インバータ電源」第26回リニアック技術研究会 p252-p254 (2002)