

## 半導体パルスモジュレータの運転試験と高効率化に向けた検討

### HIGH POWER TEST OF A SOLID-STATE PULSE MODULATOR AND STUDY FOR HIGHER EFFICIENCY

稲垣隆宏<sup>#, A, B)</sup>, 近藤力<sup>B, A)</sup>, 前坂比呂和<sup>A, B)</sup>, 湯城磨<sup>C)</sup>

Takahiro Inagaki<sup>#, A, B)</sup>, Chikara Kondo<sup>B, A)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A, B)</sup>, Osamu Yushiro<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>C)</sup> ScandiNova Systems K. K.

#### Abstract

A semiconductor pulse modulator from ScandiNova was installed and tested at soft-X-ray free electron laser facility SACLA-BL1. It was operated with the C-band klystron as the load at the rated voltage of 350 kV and 310 A. The voltage jitter was confirmed to be 60 ppm and the timing jitter to be less than 1 ns. The power efficiency was also confirmed to be about 80%, which is comparable to that of the conventional modulator at SACLA. It was found that the leakage inductance of the pulse transformer was the biggest factor in determining the pulse rise time of 1.1  $\mu$ s and pulse fall time of 1.6  $\mu$ s, and that improvement was necessary to achieve higher speeds and shorter pulses for pulse power supplies in the future.

#### 1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA の将来計画として、SASE のパルス性能と電力使用量を保ったままパルスの繰り返しを 60 Hz から 10 倍上げること考えている [1]。巨大な冷凍機設備が必要となる超伝導空洞を使わず、常伝導空洞にてパルスの繰り返しを上げるには、高周波空洞や高周波源、パルス電源の電力効率を上げ、従来よりも 1 桁少ない電力で同等の加速エネルギーを得る必要がある。鍵を握る技術のひとつは、高周波空洞の周波数を上げることで、現在の C バンド (5.7 GHz) 加速器の一部を X バンド (11.4 GHz) 加速器に置き換えることを検討している。もうひとつの鍵を握る技術は、パルス電源であるクライストロンモジュレータの高効率化である。SACLA の C バンド加速器で使われているモジュレータ [2] は、FWHM で 5  $\mu$ s の高電圧パルスを生成してクライストロンに印加しており、このうち平坦部の 2.5  $\mu$ s の時間幅だけが RF 出力に利用されている。高電圧の立上り約 1  $\mu$ s と立下り 1.5  $\mu$ s は無駄な電力となっているので、この立上りと立下りを短縮することは、とても重要である。

SACLA のモジュレータでは、高電圧のスイッチ素子としてサイラトロンを使用しているが、このサイラトロンは使用時の性能劣化が早く、平均して 3 年から 4 年で交換をしている [3]。使用中の性能劣化に伴い、サージの増大やトリガ回路の故障、不発、自爆の増加などの不具合を起こし、しばしば SACLA の運転を中断することも問題となっている。また、交換のため毎年 20 台から 30 台のサイラトロンを購入する必要があることも、大きな負担となっている。このような理由から、スイッチ素子の半導体化を検討し、試験を行ってきた [4, 5]。但し、サイラトロン代替となる高電圧大電流の半導体は特殊で、素子が製造中止になることも多く、継続的な運用が難しい状況であった。

近年、ScandiNova 社の開発した半導体タイプのモジュレータ [6] が、世界の加速器施設で使われるようになってきている。このモジュレータは、高速 IGBT を用いたスイッチングユニットにて 900 V, 2 kA 程度のパルス電力を出力し、これを多数集めてパルストランスで合成してクライストロンに必要な高電圧パルス電力を得る設計となっている。スイッチング部は比較的低電力なので、放電の心配も少なく保守も容易である。ユニット構成になっており、故障時にはユニット単位での交換が可能である。こうした信頼性、保守性の高さが大きな利点となっている。

また、IGBT のゲート時間を変えることで出力の時間幅を簡単に変更することができるのも利点のひとつである。必要なだけの時間幅にすることで、無駄な電力消費を減らすことができる。この点も、SACLA の将来計画で想定する高周波源の短パルス化、高効率化に向いている。

私達は、将来のモジュレータの半導体化も念頭に、まずは 50 MW の C バンド・クライストロン用の ScandiNova モジュレータ K-300 を SACLA-BL1/SCSS+加速器 [7] の増設部に試験導入し、運転性能や安定性、信頼性を評価することにした。本報告では、SACLA への導入後に行った運転試験の結果や、将来の短パルス化に向けた考察について報告する。

#### 2. 半導体モジュレータの構成

Figure 1 に半導体モジュレータ K-300 の外観写真を、Fig. 2 に回路構成を示す。モジュレータの主回路は、充電電源 (CCPS)、スイッチユニット、パルストランスにより構成されている。

充電電源は、スイッチユニット内のキャパシタに最大 1.2 kV まで充電をする。充電の電圧を調整することにより、クライストロンに印加される電圧を変えることができる。

スイッチユニットは、高速かつ大電流を導通可能な IGBT、キャパシタ、およびパルス終端時の励磁電流を流

<sup>#</sup> inagaki@spring8.or.jp

すためのダイオードなどから構成されている。K-300 では、6 つのスイッチ回路がおさめられたユニットを 8 台搭載し、クライストロン動作に必要な 110 MW の電力を出力できるように設計されている。各スイッチユニットの IGBT が導通すると、キャパシタから約 2 kA のパルス電流が出力される。各回路から出力されたパルス電流は、パルストランスで重畳され、昇圧されて、定格-350 kV、310 A のパルス電力となってクライストロンに供給される。

パルストランスでのパルス電流の重畳においては、ScandiNova 社独自のスプリットコア技術[6]が用いられており、1 台のトランスで多数の電流を効率よく足し上げている。スイッチユニットとパルストランスの途中には、インダクタンス  $L$  と抵抗  $R$  で構成された補償回路が設けられており、 $L$  や  $R$  の大きさを調整してオーバーシュートを抑え、パルス波形を整えている。パルストランスの 2 次側には、電圧モニタ (CVD) と電流モニタ (CT) が設けられ、クライストロンへの出力電圧と電流をモニタしている。パルストランスには、コアの磁束飽和を防ぎ有効範囲を拡大するためバイアス電流を流す回路が付加されている。また、クライストロンのカソードヒータへは、パルストランスの 2 本の 2 次巻線を通じて通電されている。SACLA で使用するクライストロンは、ヒータトランスをカソード側に抱かせた構成であるので、これに合わせてヒータ回路はスライダックとトランスを組み合わせた AC 電源に変更した。

パルストランスや付帯回路は、電気絶縁油を満たしたオイルタンクの中に収められる。クライストロンと集束コイルは、オイルタンクに取り付ける構造となっている。オイ

ルタンクには送油ポンプと水冷の冷却器が附属しており、発生した熱を冷却水に排出している。

これらの機器を制御する制御ユニットには、ローカル制御画面 (GUI) が設けられ、充電電圧やパルスの時間幅、単独運転時の繰り返しなどの運転条件が設定できるようになっている。また、各種付帯電源の制御や状態監視、インターロック機構も設けられている。更に出力電圧や電流については、モニタ信号が制御ユニットに取り込まれ、ピーク値と波形が GUI 画面上に表示される。そして制御ユニットは、Modbus-TCP 規格にて上位の制御システムと通信し、遠隔制御やデータベースへの記録ができるようになっている。



Figure 1: Photograph of the ScandiNova modulator. The C-band klystron is attached to the socket.

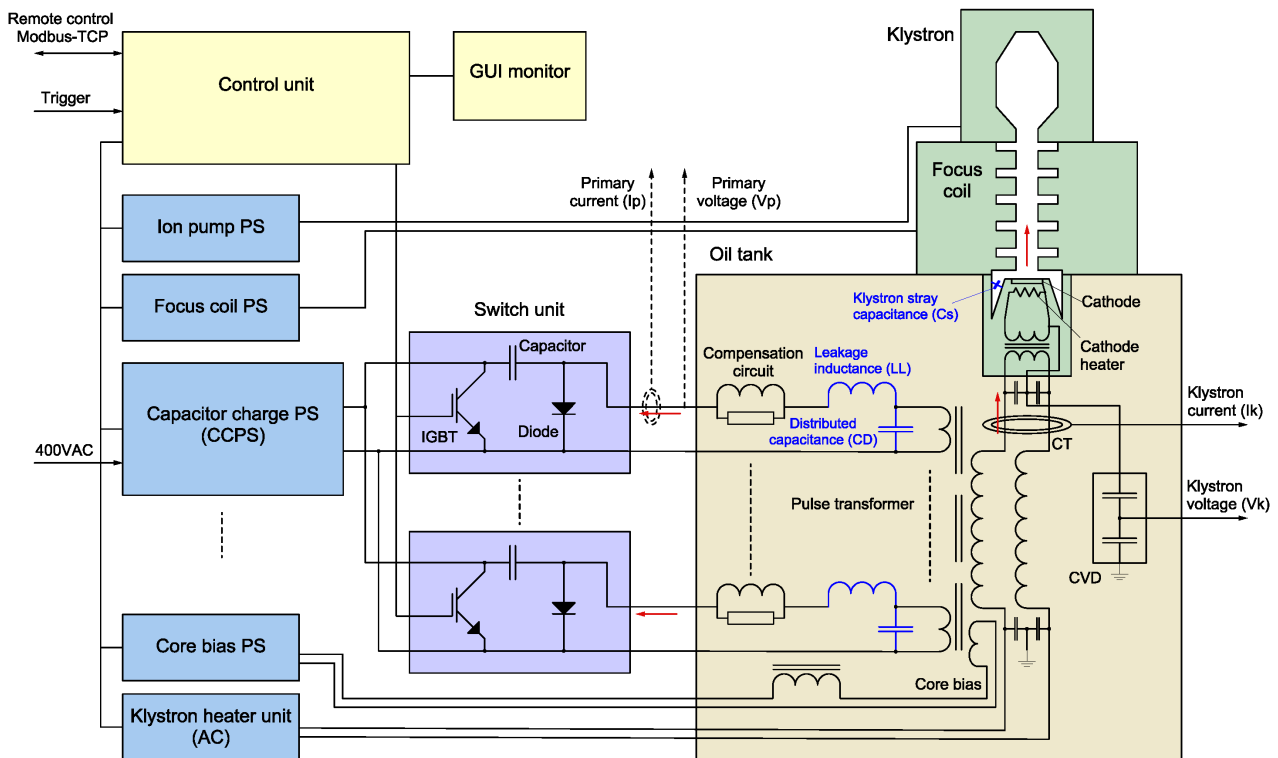


Figure 2: Schematic of the ScandiNova modulator. L and C, written in blue, are the equivalent inductance and capacitance distributed in the equipment and discussed in section 3.2.

### 3. 運転性能

#### 3.1 SACLA での運転試験とパルス波形

理研で購入した半導体モジュレータは、ScandiNova 社にてクライストロンを接続しての運転試験まで行ったあと、2024年3月に納入された。SACLA-BL1/SCSS+加速器[7]の増設部(CB2-3)に設置し、電気配線や冷却水配管を整備したあと、6月より運転を開始した。接続している負荷はCバンドの50 MW パルスクライストロン E37202 である。当面はRFを出力せず、高電圧出力までの運転にて、運転性能や安定性、信頼性を確認している。

Table 1 に、クライストロンの定格運転条件で半導体モジュレータを運転した時の設定値と測定値をまとめる。また、Fig. 3 に、クライストロンの電圧(Vk)と電流(Ik)の波形を示す。比較のため、SACLA の従来型モジュレータで同様の運転をした時の波形も示している。充電電圧設定 1.2 kV で、-350 kV、310 A の定格電力をクライストロンに印加している。パルス電圧の立ち上がり速度は約 1  $\mu$ s で、これは SACLA のモジュレータと同程度である。一方、電圧の立ち下がり、半導体モジュレータのほうが早く、末尾のリングングも見られない。半導体モジュレータは、パルス中央の電圧の平坦性が良く 2.5  $\mu$ s の時間幅に渡って全幅で 0.8%以内にとまっている。平坦性が良いと RF 出力時に位相が一定しているためパルス圧縮器(SLED)を使うときに有利である。なお、SACLA のモジュレータで電圧の末尾にリングングが生じているのは、パルストランスのコアが少し飽和しているからである。また、電流については、SACLA のモジュレータは平坦部でリングングが見られるが、これはトランスの1次側を測定しているためである。

電圧のショット毎安定性については、モニタ信号にオフセット電圧を掛けて差分を拡大したものを、オシロスコープで拡大して測定した。測定系の精度と同程度の 60-ppm (sdev)のショット毎安定性が確認されている。また、

Table 1: Nominal operating conditions and measured performances. Values in ( ) are GUI displayed values.

Charging voltage (set value)	1.2 kV
Pulse width (set value)	5 $\mu$ s
Flat top	2.5 $\mu$ s
Pulse repetition rate	60 Hz
Klystron voltage (Vk)	-364 kV (-354 kV)
Klystron current (Ik)	312 A (300 A)
Vk voltage flatness during 2.5 $\mu$ s	0.8% (peak to peak)
Vk voltage jitter	~60 ppm (sdev.)
Ik timing jitter	< 1 ns (sdev.)
Peak output power	114 MW
Pulse width (FWHM of Vk)	5.0 $\mu$ s
Pulse energy	492 J
Power efficiency	80 %

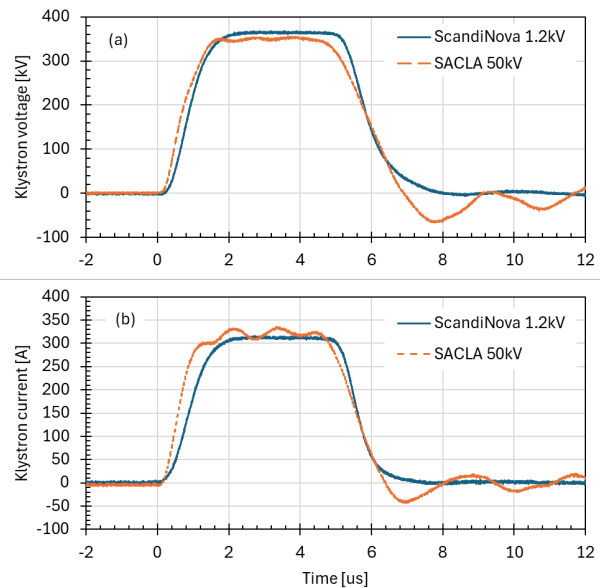


Figure 3: Typical pulse waveforms of the klystron voltage (a) and the current (b). The blue solid line shows the waveform of the ScandiNova modulator, and the orange dashed line shows the waveform of SACLA's standard modulator.

時間ジッタについても 1 ns (sdev)以下で安定であることが確認された。

クライストロンの電圧と電流を掛けたものが、出力パルス電力になる。ピーク電力は 114 MW となり、時間積分をしたパルスエネルギーは 492 J となった。電力効率については、3.3 節で述べる。

これらの結果から、半導体モジュレータは、Cバンド・クライストロンの動作に十分な性能と精度を持ち、SACLA の加速器で使用可能であることがわかった。

#### 3.2 トランス 1 次側の電圧と電流波形

パルスの立ち上りの遅れが生じる原因を判別するため、ある 1 台のスイッチユニットからパルストランスへの配線の途中に差動プローブとログスキーコイルを設置して、電圧と電流を測定した。Figure 4 に、充電電圧 1200 V で運転したときの、トランス 1 次側電圧(Vp)と電流(Ip)を示す。1 台のスイッチ回路から、2.15 kA のパルス電流が出力されている。なお、1 次側電圧(Vp)は、Fig. 4 ではプラスの電圧で示されているが、実際は接地に対してマイナスの電圧である。

パルスの立ち上がり部分について、トランス 1 次側の電圧と電流、およびクライストロンの電圧と電流を規格化し重ねたものを Fig. 5 に示す。また、立ち上がり時間と立ち下り時間を Table 2 にまとめる。1 次側電圧の立ち上がりは約 400 ns の時間がかかっており、これは主に IGBT のターンオン速度によるものである。電圧の立ち上がりに対して電流が遅れるのは、回路にインダクタンスがあることを示唆しており、これは Fig. 2 の回路に書かれた、補償回路のインダクタンスと、パルストランスの漏れインダクタンス(L<sub>L</sub>)が、合わせて 500 nH 程度あるためだと考えている。また 1 次側電流に比べて 2 次側のクライストロン電流が遅れるのは、トランス等の分布静電容量(C<sub>D</sub>)が 500 nF 程度あり、ここに充

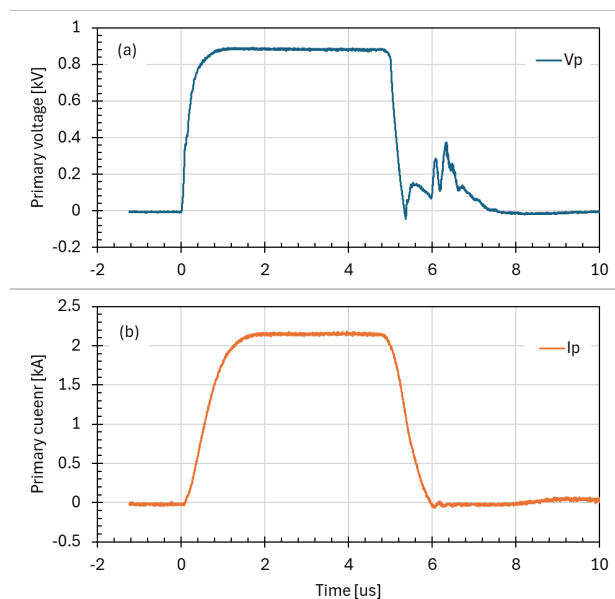


Figure 4: Waveforms of the primary voltage (a) and primary current (b) of the pulse transformer.

電/放電されるためと考えられる。クライストロンの電流に比べてクライストロン電圧の立下りが遅れるのは、クライストロンの寄生静電容量( $C_s$ )が 130 pF 程度あるためと考えられる。これらがパルスの立上りや立下りを遅らせる要因となっている。

今後、同種の半導体モジュレータを開発し、パルスの立上り、立下りの時間を短縮し、短パルスでの運転を目指すためには、これらのインダクタンス、キャパシタンスを低減する必要があることがわかった。例えば、以下のような改善策が挙げられる。今後、具体的に検討をする。

(1) 半導体スイッチ素子の高速化

SiC 半導体や GaO 半導体を利用し、ターンオンを早め、損失も減らす

(2) スイッチユニットの高電圧化

パルストランスの 2 次側にある静電容量やインダクタンスを 1 次側に換算する場合、昇圧比  $n$  の 2 乗に比例する。昇圧比が小さくなればパルス電流が少なくなり、インダクタンスの影響を受けにくくなる。

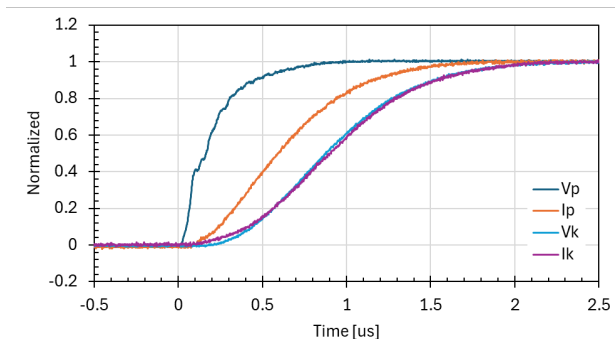


Figure 5: Enlarged view of the rising part of the primary voltage (Vp), the primary current (Ip), the klystron voltage (Vk) and the klystron current (Ik). Each plot is normalized so that the flat top area is 1.

Table 2: Rise time ( $T_r$ ) and fall time ( $T_f$ ) of each pulse. The rise and fall times are tabulated as the time taken for the voltage and current to reach 10% to 90% of the peak.

Signal	Rise time ( $T_r$ )	Fall time ( $T_f$ )
Primary voltage (Vp)	408 ns	272 ns
Primary current (Ip)	934 ns	726 ns
Klystron voltage (Vk)	1094 ns	1556 ns
Klystron current (Ik)	1112 ns	1036 ns

(3) パルストランスの小型化

トランスの漏れインダクタンスや分布静電容量はトランスの空間配置により決まるので、小型化することによりこれらを減らすことができる。

(4) クライストロンの改良による低電圧化、高効率化

(2)と同様、トランスの昇圧比を下げ、インダクタンスや静電容量の影響を軽減できる。また、パルストランスの絶縁距離を短縮し、(3)のトランスの小型化を助ける。

(5) 補償回路の除去

補償回路の代わりにスイッチユニットの点弧タイミングを変えてオーバーシュートを緩和する。パルスの平坦性の悪化による RF 位相の変化は、低電力高周波にて位相変調を行って補償をする。

3.3 電力効率

半導体モジュレータの供給 AC 電圧と電流の波形から使用電力を求め、電力効率を計算した。充電電圧 1210 V、パルス幅 5  $\mu$ s、パルス繰り返し 60 Hz にて半導体モジュレータを運転した時、主電力を供給する 3 $\phi$ AC420V ラインで測定した相間電圧と相電流を、Fig. 6 に示す。モジュレータはパルス運転をするので、タイミングによって相電流は大きくなったり小さくなったりし、力率は低下する。1 サイクルでの使用電力を、以下の式によって算出した。T は 1 サイクルの時間幅(=16.7 ms)である。この式は U 相と V 層の相電流から計算をしているが、他の 2 組の相電流でも、同様の結果となる。

$$P = \frac{\int_0^T (-I_u * V_{wu} + I_v * V_{vw}) dt}{T}$$

但し、この AC 電力には、クライストロンの集束コイル電源等を使用する電力も含まれている。これはパルス運転をしていない時の使用電力から 5.5 kW と見積もり、これを差し引く。パルスの繰り返しを変えた時の使用電力と力率を Fig. 7 にまとめる。前述の 5.5 kW を差し引くと使用電力と繰り返しは比例し、また繰り返し周波数が高くなるほど力率も良くなっているのがわかる。60 Hz 運転時の使用電力は、42.8 kW から 5.5 kW を引いて 37.3 kW となる。一方、クライストロンへの出力電力は Table 1 に示すように 1 ショットあたり 492 J である(但し、充電電圧 1200 V の時)。充電電圧の違いは  $V^2$  に比例するとして補正すると、電力効率は以下ようになる。

$$\eta = \frac{492 \text{ J} * 60 \text{ Hz}}{37.3 \text{ kW} * \left(\frac{1200\text{V}}{1210\text{V}}\right)^2} = 80.4\%$$

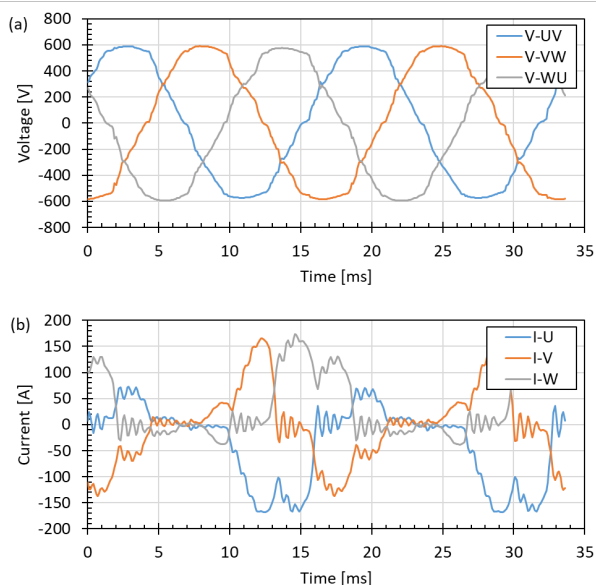


Figure 6: Waveforms of transmission line phase-to-phase voltages (a) and phase currents (b) in the ScandiNova modulator operating at rated voltage, 60 Hz.

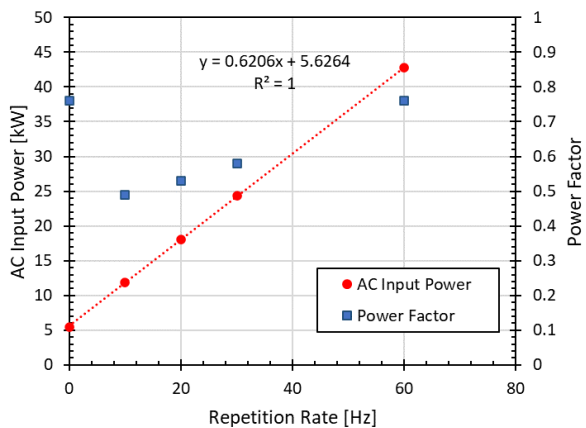


Figure 7: Electrical power used and power factor at different pulse repetition rate.

一方、60 Hz で連続運転を行い熱平衡に達した時の冷却水の温度上昇からも、電力効率を算出した。半導体モジュレータの主回路を冷却する冷却水の流量は 24.1 L/min、入口と出口の温度差は 4.1 K で、これから計算した発熱量は 6.9 kW であった。この発熱量には、別系統から電力を供給しているクライストロンヒータ 0.4 kW が含まれているので、主回路の発熱量は 6.5 kW となる。上記より使用電力 37.3 kW と発熱量から電力効率を計算

すると、82.6%となった。電力の測定には、それぞれ数%の測定誤差があることを考えると、両者の測定はおおむね一致している。また、この電力効率は、SACLA の従来型モジュレータおよび高電圧充電電源の電力効率とも同程度である。

#### 4. まとめ

ScandiNova 社の半導体モジュレータに、C バンド・クライストロンを接続し実運転での性能を確認した。クライストロンに定格-350 kV、310 A のパルス電力が供給され、電圧の安定度も 60 ppm で時間ジッタも 1 ns 以下であることを確認した。供給 AC 電源からクライストロン印加電力までの電力効率も約 80%で、SACLA の従来型モジュレータと同程度であることが確認できた。パルスの立上り時間 1.1 μs、立下り時間 1.6 μs を決める最大の要因はパルストランスの漏れインダクタンスで、今後パルス電源の高速化、短パルス化を目指すにはトランスのパルス特性を向上させる必要があることがわかった。

#### 謝辞

本件は、石川放射光科学研究センター長、田中副センター長の提案と予算措置のお陰で始められました。SACLA での設置や運転の際は、理研/JASRI の福井氏、細田氏、スプリングエイトサービスの中澤氏、山田氏、渡邊氏、田中信一郎氏など多くの方々にご協力いただきました。電源の製作と試験の際は、ScandiNova 社の Vice President Mikael Lindholm 氏、担当の Siar Cicek 氏ほかの方々にご協力いただきました。これらの方々へ感謝します。

#### 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Green oriented upgrade of accelerator complex at the SPring-8 campus”, Proceedings of 14<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC’23), Venice, Italy, May 2023.
- [2] T. Inagaki *et al.*, “High-gradient C-band linac for a compact x-ray free-electron laser facility”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702, 2014.
- [3] S. Nakazawa *et al.*, “Countermeasure of thyatron related trouble at SACLA”, Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017), Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 1000-1004.
- [4] C. Kondo *et al.*, “Switching characteristics of high voltage solid-state switch”, Proc. 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2015), Tsuruga, Japan, Aug. 2015, pp. 625-629.
- [5] T. Inagaki *et al.*, “Development of a 50 kV solid-state switch for an oil-filled klystron modulator in SACLA”, Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017), Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 40-44.
- [6] <https://scandinovasystems.com/scandinova-japan/>
- [7] S. Owada *et al.*, “A soft X-ray free-electron laser beamline at SACLA: the light source, photon beamline and experimental station”, J. Synchrotron. Rad. 25, 282-288, 2018.