

SACLA 油密閉型モジュレータに用いる 50 kV 半導体スイッチの開発

DEVELOPMENT OF A 50 KV SOLID-STATE SWITCH FOR AN OIL-FILLED KLYSTRON MODULATOR IN SACLA

稲垣隆宏^{#, A)}, 近藤力^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 大竹雄次^{A)}, 益田邦和^{B)}, 徳地明^{C)}, 天神薫^{C)}, 木田保雄^{C)}
Takahiro Inagaki^{#, A)}, Chikara Kondo^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Yuji Otake^{A)}, Kunikazu Masuda^{B)},
Akira Tokuchi^{C)}, Akira Tokuchi^{C)}, Kaoru Tenjin^{C)}, Yasuo Bokuda^{C)}
^{A)} RIKEN SPring-8 Center
^{B)} SPring-8 Services Co. Ltd.,
^{C)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.,

Abstract

In the X-ray free electron laser facility SACLA (Spring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr), 79 klystron modulators are operated as high-power rf sources for an electron linac. Since the typical lifetime of a thyatron is short for about 4 years, its high-maintenance cost is serious problem. In order to overcome this problem, we have developed a solid-state high voltage switch having a long lifetime for thyatron replacement. The high-voltage switch device of our modulator should run at a 60 pps repetition rate and conducts a large current of 5 kA with a 5 μ s pulse width from a pulse forming network circuit charged at 50 kV in maximum. We employ the static-induction (SI) thyristor as the high-voltage switch, because it has suitable characteristics for the thyatron replacement; a high off-state voltage, large pulse current capacity, a fast switching time, and a low conduction loss. In total, 192 SI-thyristors (24 series, 8 parallel) are used for a 50 kV switch module. Since our modulator is filled with an insulation-oil, water-cooling of the device is not so easy. Hence, we attach the SI-thyristors on aluminum heat sinks forcibly cooled by oil circulation. Performance check in high-voltage operation for the high-voltage switch was carried out by installing it in to the actual klystron modulator. The switch stably run at a 50 kV charging voltage, a 5 kA pulse current and a 60 pps repetition rate. A temperature rise of the SI-thyristor installed in the high-voltage switch is about 7 degree, which is low enough and corresponding to the acceptable power loss. Validity of employing the module for the high-voltage switching is well confirmed.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA[1]では、クライストロンの高電圧パルス電源として、出力 110 MW の油密閉型モジュレータ[2]を 79 台使用している。Pulse Forming Network (PFN) 回路のコンデンサに最大 50 kV まで充電された電力を 60 pps の繰り返しで出力するためのスイッチ素子として、現在は水素ガスの放電を利用したサイラトロンを用いている。このサイラトロンは、加速器のなかで最も耐用寿命の短い機器であり、使用開始後 2 年ほど経つと、カソードの劣化による導通不良やサージの増大、内部の汚染による放電の頻発などの障害が発生する。そして平均して 3 年から 4 年で使えなくなる。SACLA では毎年 15 本から 20 本のサイラトロンを購入しており、また毎月のように交換を行う必要があることが、大きな問題となっている。[3] このような維持にかかる費用や、加速器の運転を妨げるリスクを減らすため、長寿命な半導体による高電圧スイッチを開発し、サイラトロン の代替として使用することを計画した。

サイラトロン の半導体化は、近年のパワー半導体素子の進展と共に各国の加速器施設[4, 5]やメーカー[6, 7]で開発が進められているテーマのひとつである。我々は、耐電圧が高く、高速かつ大電流のスイッチングが可能な SI サイリスタをスイッチ素子とした阪大産研の半導体スイッチ[4]を参考に、絶縁油密閉型の SACLA モジュレー

タにて使用できるものを開発した。阪大産研のスイッチは定格電圧が 25 kV でパルスの繰り返しも 10 pps である。これに対し SACLA では電圧が 50 kV で繰り返しも 60 pps であり、熱負荷が一桁大きい。従って、スイッチの構成や冷却方法について、サイリスタ素子の実測性能をもとに再設計を行った。また、SACLA の小型モジュレータ・タンク内で使用できるスペースは限られ、高さ 800 mm、幅 700 mm 以内におさめる必要があるため、絶縁油の優れた絶縁性能を頼りに大幅な小型化を図った。こうして完成した半導体スイッチを、モジュレータに接続して大電力試験を行った。最大定格である 50 kV、60 pps の繰り返しにて問題なく動作し、要求通りの性能を確認した。

本プロシーディングスでは、この半導体スイッチの設計と構成、および大電力試験の結果について報告する。

2. 半導体スイッチの設計と製作

2.1 必要な性能

SACLA で使用するモジュレータ[2]の回路図を Figure 1 に示す。SACLA の主加速部で使用する C バンド・クライストロンと S バンド・クライストロンの場合は、PFN 回路からの出力電流はピーク 5 kA、パルス幅 5 μ s であり、入射部で使用する L バンド・クライストロンの場合はピーク 3 kA、パルス幅 8 μ s である。モジュレータの大部分は共通なので、今回開発する半導体スイッチも、両方のモジュレータで使用できるものとした。

[#] inagaki@spring8.or.jp

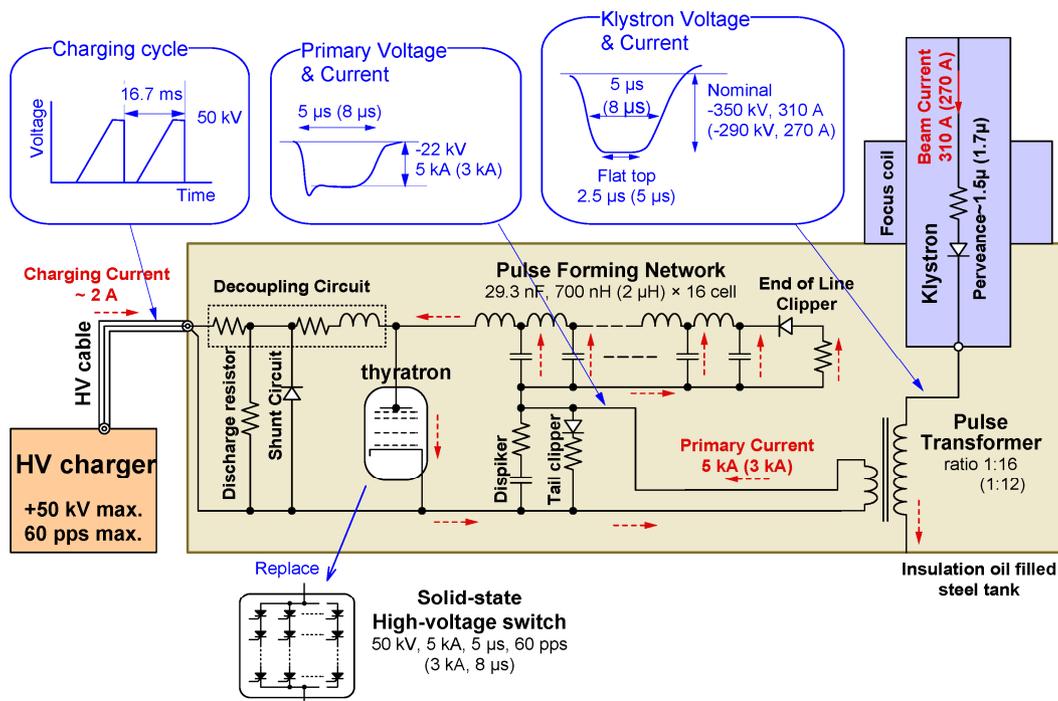


Figure 1: Circuit schematic of the klystron modulator at SACLA. The numbers written in the bracket (...) are the values for the L-band klystron and the others are for the C-band and S-band klystrons.

Table 1: Specification and Measured Performance of the Solid-state Switch for the SACLA Modulator

	Requirement	Measurement
Charging Voltage	Max. 50 kV	50 kV
Pulse Current	5 kA, 5 μs, 3 kA, 8 μs	5.2 kA, 5.0 μs, 3.2 kA, 7.8 μs
Pulse Repetition rate	Max. 60 pps.	60 pps
Switching Time	< 500 ns	200 ns
Timing Jitter (rms.)	< 3 ns	0.3 ns
Current stability (rms.)	< 100 ppm	16 ppm
Heat dissipation (60 pps)	< 3.8 kW	3.7 kW
Temperature	< 60 °C	< 40 °C
Cooling method	Forced oil circulation	
Size (W×D×H)	700×260×800 mm	

SACLA で使用する半導体スイッチの要求仕様を、Table 1 にまとめる。SACLA では、クライストロン高周波出力の微小変動が自由電子レーザーの発振に大きな影響を与えるため、モジュレータで発生させる高電圧パルスについても非常に安定でなければならない。そのため、タイミングジッタについては、3 ns 以下が、パルス電圧と電流については 100 ppm 以下が要求される。

SACLA のモジュレータは、コンパクトな鉄製タンクに高電圧回路一式を納めるため、タンクの内部は絶縁油で満たされている。タンク側面開口部から取り付けができ

るよう、高さは 800 mm 以内とし、幅や奥行きもコンパクトなものとする必要がある。また、絶縁油中では、冷却水配管からの水漏れの心配があるため高電圧部品の直接水冷は難しく、絶縁油による間接冷却を行っている。半導体スイッチも同様に、絶縁油を介しての間接冷却を行うこととした。高温での絶縁油の変質を避けるため、回路素子および絶縁油の温度は 60°C 以下に抑える必要がある。スイッチの電力損失は油の温度上昇を招き、また電力出力を低下するので、極力減らす必要がある。定格の出力電力 (38 kW) の 10% である 3.8 kW 以下を電力損失の上限とした。

2.2 使用する半導体素子

パワー半導体として一般的な IGBT は、通常はスイッチング周波数が数 10 kHz であり、500 ns 以下のターンオン時間で使用するのは損失が大きく困難である。また、FET は通過電流が小さく、並列数が多くなり過ぎ現実的でない。今回採用した静電誘導型 (Static Induction: SI) サイリスタ[8]は、耐電圧が高く、高速で大電流のスイッチングが可能というモジュレータ用途に適した半導体素子である。SI サイリスタは、PIN 構造のダイオードにキャリア制御用のゲートを埋め込んだ構造をしている。OFF 時にはゲートからキャリアが排出されゲートの周囲に大きな空乏層が形成されるため、耐電圧を高く取ることができる。ターンオン時には、ゲートから空乏層に直接キャリアが注入され、高速なターンオン制御が可能である。ON 時には PIN ダイオードと同様に導電率が非常に高く、大電流を低損失で通過できる。今回使用する SI サイリスタ素子は、新電元工業 (株) の開発したサンプル品 (KSI50PA40T1) で、これは先に述べた阪大産研の半導体スイッチ[4]や、長岡技科大、KEK でのパルス電源の

試作実績[9]があり、1 素子あたり 1 kA 以上の大電流を通過できることが確認されている。また、SOT-227 樹脂ケースに封入されており、絶縁油中でも使用可能である。なお、この SI サイリスタ素子は、今回の開発の途中で新電元工業での開発製造が中止となり、残念ながら現在は入手できない。

2.3 SI サイリスタ素子の特性試験と素子数の決定

今回の半導体スイッチでは、60 pps の繰り返しで 5 kA の大電流を通過させて使用するため、電力損失 (= 発熱) の見積もりが重要である。半導体の通過損失は、おおよそ通過電流の 2 乗に比例するため、素子の並列数を増やすほどスイッチ全体の損失は少なくなるがサイズやコストは増える。また、半導体素子を長期間安定に使用するためには、素子の最大定格に対して十分なデレーティング (通常 1/2 から 2/3 程度) をして使用電圧や電流を決める必要がある。そこで SI サイリスタ素子について特性を実測し、素子の直列数と並列数を決めた。

まず SI サイリスタ素子の直列数を決めるため、SI サイリスタ素子に最大耐電圧である 3.2 kV までの高電圧を印加し漏れ電流の測定を行った。Figure 2 に測定結果を示す。素子により個体差はあるが、印加電圧が 2.7 kV を超えると漏れ電流が増加することがわかった。また、素子の温度が 60°C を超えると、漏れ電流が増加することもわかった。これらの結果より、50 kV 半導体スイッチは素子 24 直列とし、素子の使用電圧は最大耐電圧の 2/3 である 2.1 kV とした。

次に、素子の並列数を決めるために、素子単体でのパルス試験を行った。0.1 μ F の高電圧コンデンサと 0.3 μ H の空芯コイルで PFN 回路を組み、2 kV に充電して 400 A、1.5 μ s のパルス電流を流し、ターンオン速度とオン抵抗を測定した。結果を Figure 3 に示す。印加電圧が 1 kV を超えるとターンオン時間は 300 ns 程度となり、スイッチング損失よりもオン抵抗による通過損失が主となる。SI サイリスタ素子 1 個あたりのオン抵抗は、400 A の電流に対して 0.17 Ω であった。このオン抵抗を仮定し、5 kA、5 μ s あるいは 3 kA、8 μ s の電流を流した時の電力損失の計算値を Table 2 にまとめる。この電力損失を Table 1 に示した上限以内に収めるため、8 並列とした。この時の 1 素子当りの通過電流は約 600 A となる。これは阪大産研などの実績 (約 1 kA/素子) の 60% であり、デレーティングも十分である。

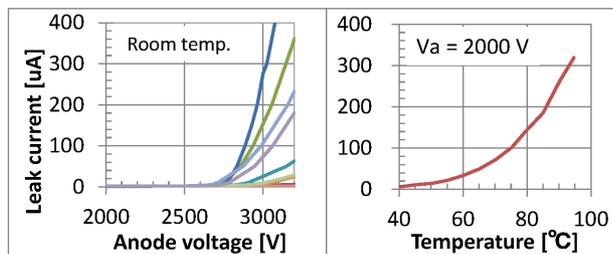


Figure 2: (Left) Leak current of the 10 SI-thyristor elements. (Right) Temperature dependence of the leak current.

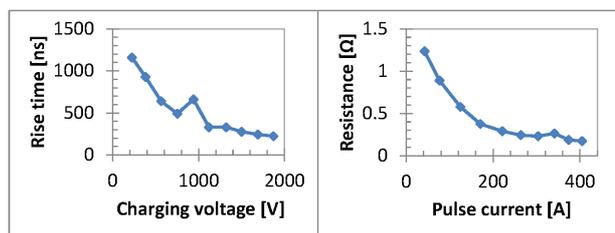


Figure 3: Pulse test results of the SI-thyristor element. (left) Turn-on rise time. (right) On-state resistance.

Table 2: Estimated heat dissipations P_{diss} of the solid state switch with various number of parallel connections N_p . A number of series connection is $N_s = 24$, and an on-state resistance is estimated to be 0.17 Ω .

N_p	P_{diss} (C-band Mod.)	P_{diss} (L-band Mod.)
	5 kA, 5 μ s, 60 pps	3 kA, 8 μ s, 60 pps
6	5.1 kW	2.9 kW
8	3.8 kW	2.2 kW
10	3.1 kW	1.8 kW

2.4 機器の構成

今回開発した半導体スイッチの構成と写真を Figure 4 に示す。機器の構成については、昨年度の加速器学会プロシーディングス[10]で詳しく報告しているので、今回は概要を記す。

最も発熱の多い SI サイリスタ素子は、放熱性を高めるため高さ 55 mm のアルミ製ヒートシンクに密着させた。スイッチの全高を抑えるため 2 直列 8 並列をひとつのヒートシンクの両面に配置している。SI サイリスタの外側に、Free Wheel ダイオードとスナバ回路、および分圧抵抗が乗った基板を配置した。更に外側に SI サイリスタ用のゲート回路が乗った基板を 2 層設け、最外層は電磁ノイズ遮蔽用のアルミ板で覆った。これを 1 ステージとして、厚さ 6 mm のベークライト絶縁材を挟んで 12 ステージを縦に重ね、全高を 800 mm 以内におさめた。ヒートシンクの内側は絶縁油を循環させる油道となっており、多数のフィンを介して絶縁油に放熱している。絶縁油は外付けのオイルクーラーによって強制循環され冷却される。

各ステージでは過電圧、温度異常、制御電圧不足などを検知し、上位制御系に異常ステータスを発報するとともに、LED を点灯させて表示する。トリガパルスとステータス信号は、双方向通信可能な光ファイバーを用いた通信モジュールにて、トリガ IO 部と各ステージ間を伝送している。どこかのステージで異常ステータスが発報した場合は、即座に全ステージのトリガを停止し、また異常ステータス信号をモジュレータの制御部に送り、次の充電動作を停止するインターロック機構を設けている。ゲート回路駆動用の電力は、100kHz の高周波を高電圧ケーブルで伝送し、各ステージに用意されたトランスで絶縁し、ステージ毎に整流して使用している。

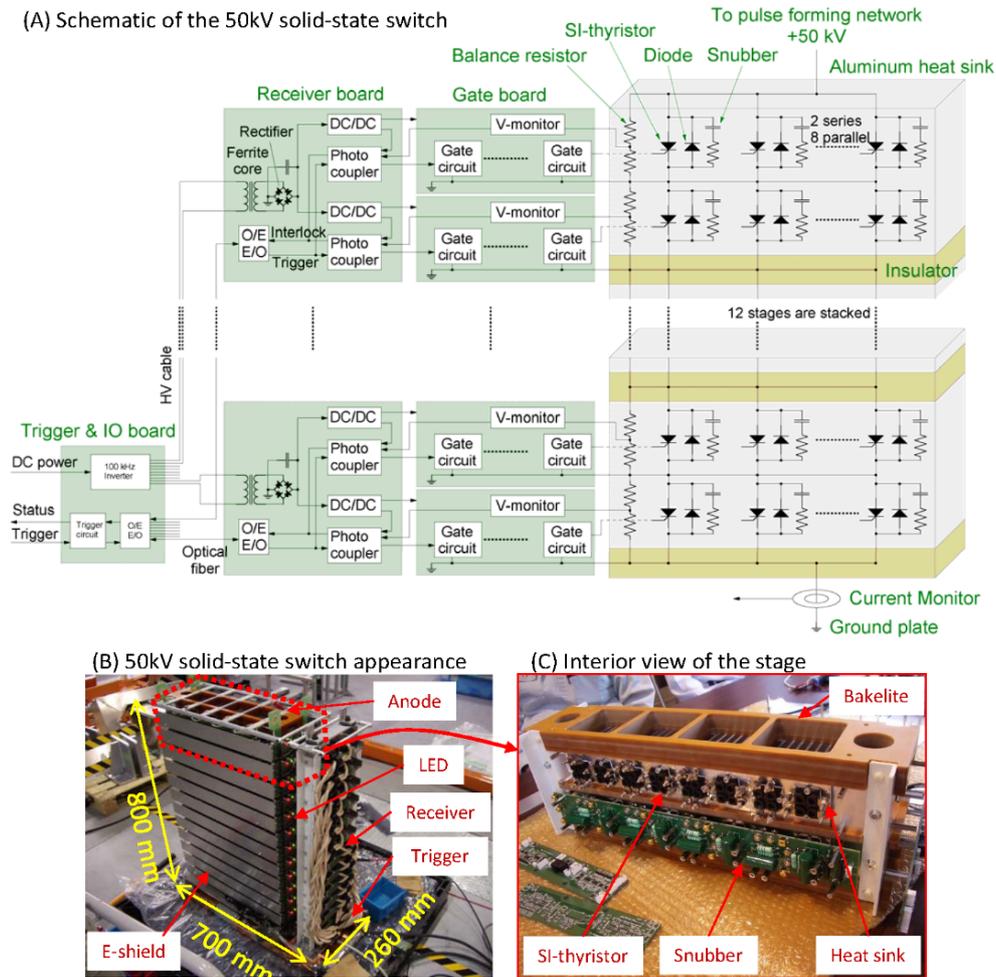


Figure 4: Schematic and photograph of the 50-kV solid state switch.

3. 大電力運転試験

3.1 運転試験の経過

完成した半導体スイッチは、まずメーカー (PPJ 社) にて 50 kV を印加し、単発にて 6 kA までのパルス出力試験 [10] を行った後、理研にて 2 種類のモジュレータに接続しての連続動作試験を行った。

はじめに、C バンド・クライストロン用モジュレータ (以下、C バンドモジュレータ) に半導体スイッチを接続し、運転試験を行った。仮設の試験であったので、半導体スイッチは小型の油タンクに収納し、モジュレータとは約 2 m の高電圧ケーブルで接続した。オイルクーラーで 25°C に冷却した絶縁油を半導体スイッチのヒートシンク下部から流し、上部から吸入する強制対流による循環冷却をした。半導体スイッチは想定通りの動作をし、50 kV の充電電圧にて、5.2 kA、5 μ s のパルス電流を出力し、クライストロンを定格電圧で運転することができた。60 pps にて 13 時間の運転を行い、サイリスタ素子の温度も 32°C (初期温度 +7°C) と問題のないことを確認した。

次に、L バンド・クライストロン用モジュレータの予備機を本格的に改造し、半導体スイッチを内部に実装しての長期運転試験を行った。最大定格である充電電圧 50

kV、パルス電流 3.2 kA、7.8 μ s、繰り返し 60 pps にて 24 時間の連続運転を行い問題のないことを確認した。このモジュレータはその後、3 月より L バンド高周波機器の大電力運転試験に使用され、60 pps の繰り返しにて連続運転を行っている。現在まで 1800 時間以上の運転を行っているが、トラブルも無く安定に運転を続けている。

3.2 パルス波形と通過損失

それぞれのモジュレータでの最大定格運転時の波形を、Figure 5、Figure 6 に示す。C バンドモジュレータでの試験 (Figure 5) にて、パルス電流波形の平坦部が少し右肩上がりになっているのは、接続に用いた高電圧ケーブルのインピーダンスによるものである。アノード電圧の立下り時間 (ピーク電圧の 80% から 20% までの時間で規定) は 200 ns で十分な速さであった。5.2 kA 通過時のスイッチ全体のオン電圧は約 2 kV ($R_{on}=0.4 \Omega$) で、ほぼ想定通りであった。アノード電圧とパルス電流を掛けたものを損失と考え、60 pps 繰り返しで 3.7 kW の電力損失に相当する。L バンド・クライストロン用モジュレータでの試験 (Figure 6) では、パルス電流 3.2 kA 通過時のオン電圧は約 800 V で、電力損失は 2.1 kW であった。これらは Table 2 に示した設計値と良く一致している。

L バンドモジュレータの連続運転時、高精度のオシロ

スコープに1分間の波形を蓄積し、ショット毎のタイミング変動、振幅変動を測定した。タイミング変動に関しては、クライストロン電圧の立上りタイミングの測定から、変動幅は0.3 ns (rms.)であった。振幅に関しては、クライストロン電圧の変動幅は29 ppm(rms.)、半導体スイッチ通過電流の変動幅は16 ppm(rms.)であった。いずれも、要求性能(<3 ns、<100 ppm)を十分に満足していることを確認した。

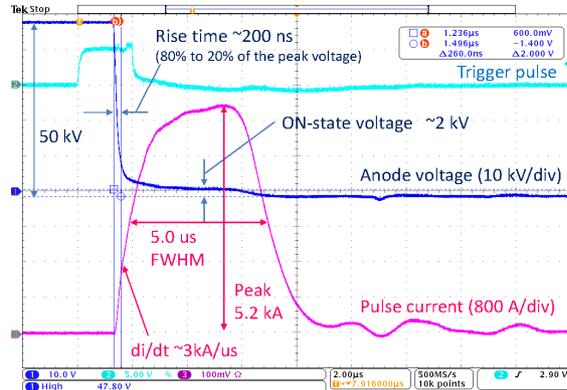


Figure 5: Output waveform of a C-band klystron modulator at the 5 kA, 5 μs pulse.

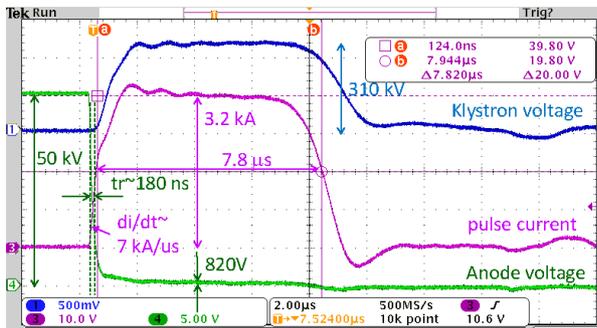


Figure 6: Output waveform of an L-band klystron modulator at the 3 kA, 8 μs pulse.

3.3 温度上昇と発熱量の見積もり

Lバンドモジュールを60 pps、50 kVの最大定格にて24時間連続運転した時の、各部の温度をFigure 7に示す。モジュール・タンク内の絶縁油は自然対流によって冷却されるので時定数が長く、約8時間かけて温度が上昇し38.5°Cとなった。一方、半導体スイッチのヒートシンク部は、25°Cに冷却された絶縁油が常時循環しているので、温度は約27°Cでほぼ一定である。SIサイリスタは底面をヒートシンクで冷却されつつもケース側は周囲の絶縁油によって温められ、その中間の温度となっている。いずれにしても、温度は40°C以下であり問題はない。

連続運転中の、オイルクーラー吐出時と戻り時の絶縁油の温度差はCバンド最大定格運転時に3.3°C、Lバンド最大定格運転時に3.1°Cであった。絶縁油の循環流量はCバンド試験時は36 L/min、Lバンド試験時は26 L/minと見積もられ、数L/minの不定性はあるが、この流量と油の温度上昇から見積もられる発熱量は、Cバンドで3.4 kW、Lバンドで2.1 kWであり、前出の波形からの算出や、Table 2の損失設計とも一致している。

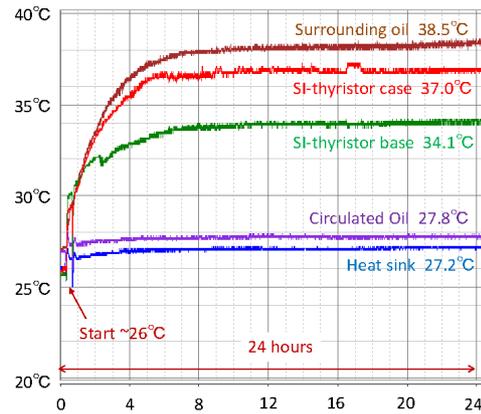


Figure 7: Temperature trends of the solid-state switch during its continuous operation at 60 pps, 50 kV.

4. まとめ

SACLAの油密閉型モジュールにて、短寿命サイリスタを置き換えるべく、半導体スイッチの開発を行った。半導体スイッチの最大使用条件は、50 kV、パルス電流5 kA、5 μs および3 kA、8 μs、パルス繰り返し60 ppsである。スイッチ素子としては高速・大電流のスイッチングに適したSIサイリスタを用い、これを8並列24直列で構成した。数kWとなる発熱を効率的に排熱するため、サイリスタ素子をつけたヒートシンクの中に絶縁油を循環させた。ヒートシンクを小型化して全高を800mmにおさめ、モジュール内に設置できるようにした。

完成した半導体スイッチは、2種類のモジュールに接続して運転試験を行った。最大定格である50 kV、60 ppsにて連続運転を行い、想定通りの動作を確認した。電圧の立下り時間も200 nsと十分な速さで、タイミング変動0.3 ns、電流変動16 ppmと、安定性の面でも要求性能を満足することを確認した。更に、最大定格で運転時の電力損失は3.7 kWで、サイリスタ素子の温度も40°C以下であり、問題がないことを確認した。

半導体スイッチを実装したモジュールは、テストスタンドにて1800時間の運転を行っており、これまで問題は生じてない。今後は、SACLAの実機にて使用することも検討している。また、SIサイリスタ素子については、メーカーでの製造が中止となっているので、今後は他の半導体素子を用いた高電圧スイッチを開発する予定である。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics 2012.141, (2012).
- [2] T. Inagaki *et al.*, PRST-AB 17, 080702, (2014).
- [3] 益田邦和 他, 第11回日本加速器学会 (2014). 中澤伸侯 他, 本学会年会 (2017).
- [4] A. Tokuchi *et al.*, NIM-A 769, 72-78 (2015).
- [5] C. Burkhart *et al.*, Proceedings of Pulsed Power Conference 2013.
- [6] 原田瞬 他, 第12回日本加速器学会 (2015).
- [7] Applied Pulsed Power; <http://www.appliedpulsedpower.com/> Diversified Technologies, Inc.; <http://www.divtecs.com/>
- [8] J. Nishizawa and K. Nakajima, Revue de Physique Appliquée. Vol13, No.12, 725-728 (1978).
- [9] 田中利樹 他, 電気学会パルスパワー研究会資料 (2012).
- [10] 天神薫 他, 第13回日本加速器学会 (2016).