

## SACLA における大電力 RF 機器の高繰り返し化

### DEVELOPMENT OF A HIGH REPETITION RF SOURCE IN SACLA

近藤 力<sup>#, A)</sup>, 稲垣 隆宏<sup>A)</sup>, 櫻井 辰幸<sup>A)</sup>, 恵郷 博文<sup>B)</sup>, 大島 隆<sup>A)</sup>, 大竹 雄次<sup>A)</sup>,  
Chikara Kondo<sup>#, A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>A)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>, Takashi Oshima<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> JASRI

#### Abstract

In SPring-8 Aungstrom Compact LAsEr (SACLA), to meet an increase of the number of experiments in the future, we have been considered a development plan of a high-repetition linac. As a part of the plan, we have developed a high-power rf system with a 120 pps repetition rate. For the high repetition system, we newly developed a PFN charger, a modulator, a klystron, and an accelerating structure. The PFN charger was required not only the high stability of a charging voltage, but also short settling time, because the interval between the RF pulses decreases by half from the present 60 pps. To realize the fast stabilization, we introduce a digital control for the mode switching between coarse charging and precise charging, and also introduced a pulse width modulation in a feedback control system for the charging. In the modulator, we developed a highly efficient heat exchanger to suppress the temperature increase of insulation oil filled in the modulator tank. This development of the heat exchanger is to meet increase from 60 pps to 120 pps. As a result, the oil temperature was suppressed under 48 degree Celsius at 120 pps operation. We also developed a disk-load type C-band accelerating structure. A high accelerator gradient of 50 MV/m, with a 120 pps repetition rate are realized in the structure. We succeeded the continuous operation of the high-power rf system for more than 8 hours at 120 pps.

#### 1. はじめに

SPring-8 の X 線自由電子レーザー施設(SACLA)では、2012 年の供用開始以降、X 線自由電子レーザー(XFEL)を用いた多くの先端放射光実験が行われており、将来、より多くの利用実験の需要が見込まれている。このような利用実験の増加への対応として、ビームラインの増設や、電子ビームの高速振り分けを行う計画が進行している<sup>[1]</sup>。しかし、X 線レーザーは、電子ビーム 1 バンチ毎に 1 パルスしか生成できないため、使用ビームラインが増加しても、ビームの繰り返し数(現状最大 60 pps)を増やさない限り、ビームライン当たりでの X 線レーザーの照射頻度が減少することになる。そこで、ビームライン当たりの照射頻度を保持するため、ビーム繰り返しを増加させることも、将来の選択肢として検討している。

我々は、ビーム繰り返しの増加させる上で、特に消費電力が大きい C-band 用 RF システムについて、繰り返しが既存の倍である 120 pps 運転が可能なシステムの開発を行ってきた<sup>[2,3]</sup>。これは将来の更なる高繰り返しシステムに向けた予備的な開発であり、現在の技術的に確実に開発できる繰り返し数を選択した。このような高繰り返し RF システムは、開発後には SACLA の RF システムの予備品として有効的に活用できるようにするため、既存のシステムと互換性を持つものとした。そのため、120 pps 運転時でも、加速 RF の強度や位相に対する高い安定度といった基本性能は維持もしくは向上している必要

があり、加えて既存ユニットが設置されているスペースに収められる事も要求される。

このような要求を基とした RF システムの高繰り返し化では、機器内での熱損失の増大に対し、熱損失の抑制や、放熱・冷却の強化といった熱対策が重要となる。また、加速管における放電頻度の抑制や、PFN 充電器におけるフィードバック制御の速応化など、各機器特有の課題もある。そこで、我々は、これらの問題に対策を施した機器の設計および製作、更に動作試験を行い、120 pps 運転が可能な RF 加速システムの実証を目指した。

本稿では、120 pps 運転用に開発したシステムの各機器について、概要や高繰り返し化する上での設計思想を中心に述べ、個々の機器詳細は別発表<sup>[4,5]</sup>に譲るものとする。また、SACLA 加速器棟テストスタンド室において、RF システムを組合せた統合試験の結果について述べる。

#### 2. 機器設計

##### 2.1 設計方針

本高繰り返し RF システムは、既存の SACLA のシステムに設置し運転できる事が前提であり、性能の向上や維持だけでなく、機器毎の互換性も重要となる。そこで、下記の設計方針を採った。

- 1) 全体構成は既存の構成を踏襲し、各機器に対しては、高繰り返し運転が可能であり、かつ既存機器との互換性があるものとした。
- 2) 加速 RF の安定性や、加速管の加速電界といった XFEL 用加速器として重要な性能は、

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

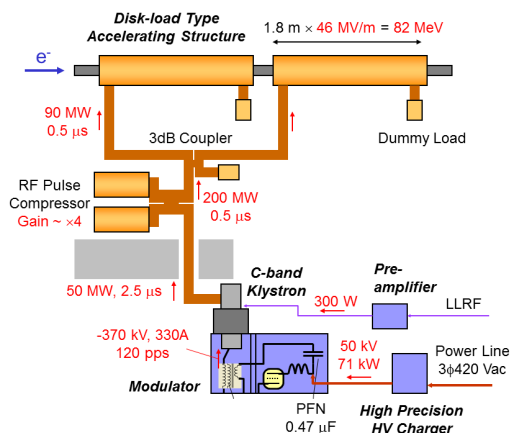


Figure 1: Schematic layout of the C-band accelerating RF system and nominal specifications at 120pps operation.

既存の要求<sup>[6]</sup>以上を達成しているものとした。特に、加速電界は既存の 40 MV/m を超える 50 MV/m 以上を目指した。

- 3) SACL A の建物のスペースに設置可能な大きさとした。そのため、電源機器は 19 インチラック内か、または長さ 4m×幅 1.2m の床スペースに収まる大きさとした。

本 RF システムの構成を、Figure.1 に示す。まず、インバーター型の PFN 充電器とライン型モジュレータ電源によって高電圧パルスを生成し、クライストロンを駆動する。このクライストロンによって、約 48 MW, 5712 MHz のマイクロ波を生成し、これを SLED 型パルスコンプレッサによってピーク電力 (200 MW) を増加させ、2 本の進行波加速管に投入し、電子ビームを加速する。

既存の RF システムの基本構成を用いて、120 pps 運転に対応できるものとするには、PFN 充電器、モジュレータ電源、クライストロンおよび加速管について、高繰り返し化の検討が必要だと思われた。

クライストロン駆動用 500 W 半導体 RF アンプでは、バイアス電圧をパルスで印加するため、これを 120 pps で運転した場合でも熱負荷の増大は問題にならず、既存機に対して制御プログラムを一部変更し、使用することで対応した。

RF システム全体の動作制御を行う PLC 制御システムにおいては、高繰り返し化に合わせて制御の処理の高速化が必要で、それに対応した高速の CPU モジュール(横河電機 F3SP76-7S)を用いる方針とした。

導波管や SLED、LLRF 機器などは、熱負荷の増大は大きくなく、既存の 60 pps 用 RF 機器を使用することとした。

下記に、高繰り返し化に向けて開発を行った、PFN 充電器、モジュレータ電源、クライストロン、加速管について、検討事項と機器概略を述べる。

## 2.2 PFN 充電器

PFN 充電器は、施設電源ライン(400 Vac)の電力

Table 1: Specifications of the high Voltage Inverter Charger

H	470 nF
Charging Voltage (max)	50 kV
Output power (max)	71 kW
Pulse repetition (max.)	120 pps
Pulse-to-pulse stability (50kV)	<100 ppm (peak-peak)

を用いて、モジュレータ電源内の PFN コンデンサ (470 nF)に最大 50 kV まで充電する高電圧電源である。本 PFN 充電器の主要な仕様を Table 1 に示す。PFN コンデンサへの充電電圧は、クライストロンの RF 強度や位相に直接影響するため、充電電圧の安定度には 100 ppm(pk-pk)もの高い精度が要求される。この要求を達成するために、既存の PFN 充電器では、フィードバック制御を用いて充電電圧の安定化を行っている。このとき、最後の約 2%分の充電および整定に、充電時間 15 ms の内の約 2.5 ms の時間が費やされている<sup>[7]</sup>。120 pps 運転では充電時間が約 7.5ms と短くなるため、この整定時間を短縮する必要がある。そこで、スムーズな電圧整定を実現できる制御システムの開発を行った。一方で、高出力化に伴い増大する熱損失にも対応する必要があり、電力変換の効率化や、冷却系の強化を目指した。このような高電圧高精度電源を、日本高周波株式会社において製造した<sup>[5]</sup>。

充電器の基本回路構成を Figure 3 に示す。急速充電ラインと精密充電ラインの 2 種類の充電ラインを組み合わせた構成となった。急速充電ラインは、共振型インバーターラインを 2 系統同時に動作させることで、急速な充電(10 kV/ms)を行う。この急速充電ラインによって目標電圧の直前まで充電した後、精密充電ラインによって高精度な電圧整定を行う。この電圧整定では、充電電圧のモニタを精密充電ラインにフィードバックし、IGBT のゲート幅をパルス幅変調方式(PWM)によって制御して、出力電流を調整し、高精度かつ高速な電圧整定を実現する。

本充電器は、コンデンサ充電を行うがために、制御特性を速めて電圧整定を高速化していくと、オー

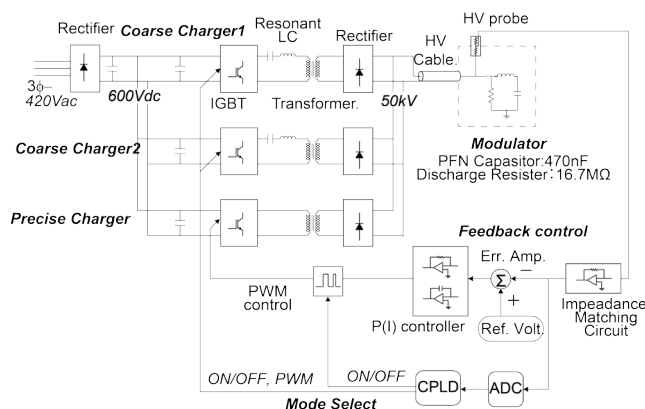


Figure 2: Block diagram of the high precision PFN charger.



バーシュートが発生し易くなる<sup>[2]</sup>。更に、出力部に整流ダイオードを備えているため、充電中にオーバーシュートが起こると、電圧整定には高抵抗による長い時定数の電圧降下を待たねばならない。そのため、電圧整定の高速化には、充電速度をなるべく落とさずに目標電圧に近くまで充電し、更にオーバーシュートを起こさせずに精密充電に切替える制御が必要となる。これを実現するため、精密充電への切換直前に、急速充電ラインの IGBT に対しても PWM 制御によって出力を抑え、充電電圧を切換閾値までゆっくりと昇圧するようにし、オーバーシュートを抑える。この急速充電ラインの PWM 制御は、CPLD によるデジタル制御によって行うことで、切換閾値やパルス幅などの制御パラメータ設定に対し柔軟性を持たせ、調整を効率的に行えるようにしている。

高繰り返し運転では、機器内のトランスやスイッチング素子、整流ダイオードなどにおける熱損失が増大し、電源内の絶縁油も高温となる。そこで、設計段階にて、トランスの鉄損や銅損を詳細に検討し、余裕のあるコア容量や太い配線を用いることで、熱損失を抑制した。また、整流ダイオードの熱損失を実測し、ヒートシンクを取付けた場合の冷却効果を実証するなどの放熱対策も行った。一方、高電圧発

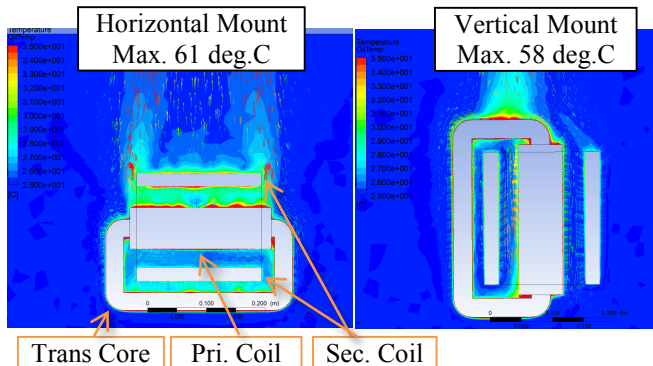


Figure 3 : Cross-sectional views of the stimulated flow (vector) and temperature (color counter) of insulation oil around the transformer. The left figure is a horizontally mounted case, and the right figure is a vertically mounted case.

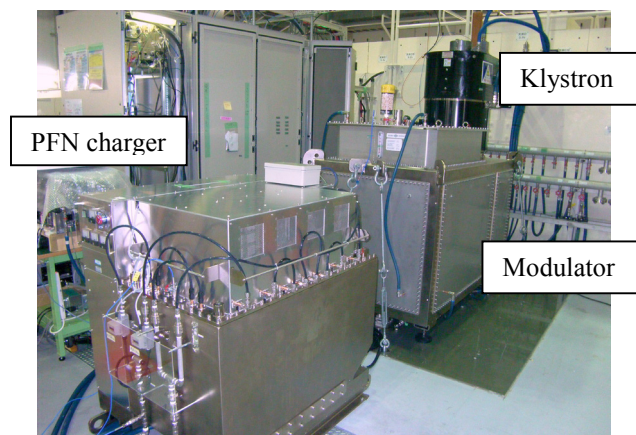


Figure 4: Photograph of the PFN charger, and the modulator power supply equipping the klystron in the test stand.

生部では、内部機器は絶縁油の自然対流によって冷却されている。このため、機器や絶縁油の温度上昇を抑えるには油の滞留を極力無くすることが重要となる。そこで、有限要素法による流体シミュレーション<sup>[8]</sup>を用い、対流が促進されるような配置を検討した。Figure 3 に、その一例として、油中機器の主な発熱素子の一つであるトランスについて、縦置きと横置きの配置の違いによる対流をシミュレーションした結果を示す。この結果から、トランスを縦置きにした方が、1次巻線と2次巻線間の絶縁油の対流がスムーズとなり、トランス表面の最高温度も3℃程度下げられることが期待される。

以上のような熱設計を踏まえて製作した電源の機器サイズは、ほぼ1 m 立方の大きさとなり、モジュレータ電源に並べる床設置とした(Figure 4)。

### 2.3 モジュレータ電源

本モジュレータ電源は、既存の一体型モジュレータ<sup>[9]</sup>と同様に、PFN バンク、サイラトロン、パルストランスおよび保護回路が、鋼板を厚板溶接した油タンクに収納されており、これにクライストロンを挿入する構造とした。

モジュレータ電源を繰り返し 120 pps に対応とするには、電源内部における発熱量の増大と、それに伴う絶縁油の温度上昇が懸念された。モジュレータ電源で使用している鉱油系絶縁油は、油温度が 70℃ 以上になると劣化が促進されるため、この温度以下での使用が推奨されている。そこで、本電源の設計に先立ち、既存の電源による各 부품の温度を測定し、そこから 120pps 運転時における各機器の温度を推定した。その結果では、電源内の EOL 抵抗の表面温度が 100℃ 以上になると推定され、放熱強化が必要と判断された。また絶縁油も上面付近で 60℃ 程度まで上昇すると推定された。この絶縁油の温度が上昇すると、内部機器全般の温度が上昇するため、既存のモジュレータ電源と同程度の 50℃ 以下を目指し、冷却機構の強化を行った。

発熱量が大きい EOL 抵抗については、既存の抵抗ユニット(定格 140 W×6 本)に対し、抵抗の本数を

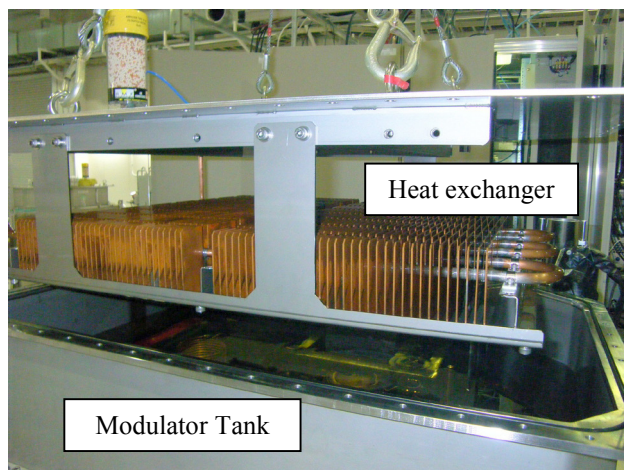


Figure 5 : The oil and water heat-exchanger placed at the top of the modulator tank.

倍の 12 本の構成とすることで、発熱を分散させ温度上昇を抑えるものとした。

また、絶縁油の冷却能力の増強のため、フィン付きの大型冷却板(Figure 5)を開発し、タンクの天板部に設置した。この冷却板は、シームレスな冷却水配管に銅フィンをハンダ接合しており、冷却面積を増やすことで、冷却能力を高めている。この冷却板を導入により、冷却能力を既存の一体型モジュレータの倍程度に強化できることが見込まれ、絶縁油温度は 45°C 程度に抑えられると予想された。

以上のような、発熱部での放熱対策や、効率的な絶縁油の冷却機構の導入により、モジュレータ電源のサイズは長さ 1.8 m×幅 1 m×高さ 1.2 m となり、既存のモジュレータに対し長さや高さが約 0.1 m 増えたのみで、既存機の設置スペースに収まるサイズとなった。

#### 2.4 クライストロン

クライストロンは、東芝電子管にて 120 pps 対応の C-band 用パルスクライストロン(E37214)を新規製作してもらった。このクライストロンは、既存の C-band クライストロン E37202 と出力部までの設計は同一のままコレクタを大型化し、熱負荷の増大に耐えられるものである。

#### 2.5 ディスクロード型高電界加速管

加速管を高繰り返し化するにあたり、従来のチョークモード構造からディスクロード構造にすることにした。この変更により、マルチバンチ加速には不利となるが、シャントインピーダンスを高くすることができ、より高い加速電界を得やすくなる。

また、温度変化によるセルの熱変形も小さくなるため、共振周波数のズレも小さくなる。そのため、高繰り返し運転によって空洞温度が上昇しても、加速効率の低下を抑えることができる。

一方で、高電界・高繰り返し運転を安定に行うにあたり、空洞内における放電頻度を軽減する必要がある。放電頻度を抑えるには、空洞表面の特に電界が集中しやすいアイリス部の表面電界を下げるこ

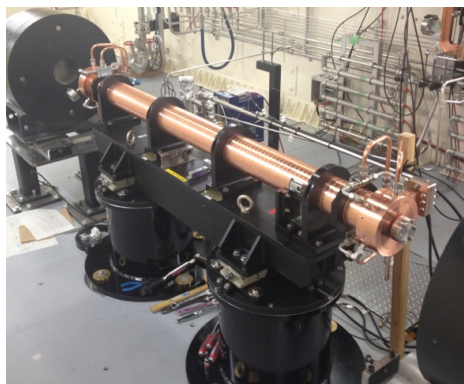


Figure 6: Experiment. al., set-up of the disk-load C-band accelerating structure in an RF test stand.

が重要である。そこで、アイリス断面を従来の円状から楕円状に変更することで、表面電界を約 20% 下げている<sup>[3]</sup>。

本加速管は、2013 年に試作空洞による低電力試験において良好な結果が得られており<sup>[3]</sup>、今回、三菱重工業において計 6 本の製作を行い、そのうちの 2 本に対し SACLA にて動作試験を行った (Figure 6)。

### 3. 動作試験

以上に述べた開発した機器を用いて、120 pps 運転の動作確認および長期安定性を確認する必要がある。このため、SACLA 加速器棟テストスタンド室に設置された遮蔽シールド内とその周辺において、電源機器および RF システムを組合せての運転試験を行った。

試験は電源試験と RF 試験の 2 段階で行った。電源試験では、PFN 充電器、モジュレータ電源、およびクライストロンの電源機器の動作評価をおこなった。この試験では、電源の 120 pps における PFN 充電の速応性や充電電圧の安定度、機器の温度性能などが要求を満足しているかを確認した。RF 試験では、電源システムに加速管などの RF システムも加えた動作試験を行い、加速管などの評価と共に、RF コンディショニングを行った。これにより、新規加速管の 50 MV/m 以上の加速電界の確認と 120 pps での冷却特性の確認を行った。

#### 3.1 電源動作試験

Figure 7 に、充電電圧 50 kV、繰り返し 120 pps にて運転したときの充電電圧と出力電流の典型的な波形を示す。また、同図下に、充電モードの切換時における充電波形の拡大図を示す。これらより、充電電圧は、目標電圧の直前において、急速充電の PWM モードに切り替わり、更に精密充電による電圧整定に、スムーズに切り替わっていることが分かる。これらの充電電圧の波形から、充電開始から約 7.0 ms で電圧整定が完了しており、120 pps 運転による短い充電時間でも、電圧整定を完了していることを確認した。整定電圧の安定度は、充電完了後での評価で約 20 ppm(pk-pk) であり<sup>[5]</sup>、要求の 100 ppm(pk-pk) 以下を十分に達成していることを確認している。

また、繰り返し 120 pps による高電圧運転を 24 時間連続で行い、PFN 充電器、モジュレータ電源、クライストロンの長時間の動作確認を行った。途中、PFN 充電器とモジュレータ間の高電圧ケーブルにおいて放電トラブルが発生したが、ケーブル交換後は問題無く運転を再開でき、PFN 充電器やモジュレータ電源、クライストロンは長時間の連続運転でも問題なく動作することを確認した。

このとき PFN 充電器と、モジュレータ電源のそれぞれの内部絶縁油について、上面付近の温度の測定結果を Figure 8 に示す。この結果から、120 pps 運転においても、PFN 充電器の絶縁油温度は油面付近で 60°C 程度と、既存機の 60 pps 運転時と同程度であった。またモジュレータ電源の絶縁油温度も 48°C 程度



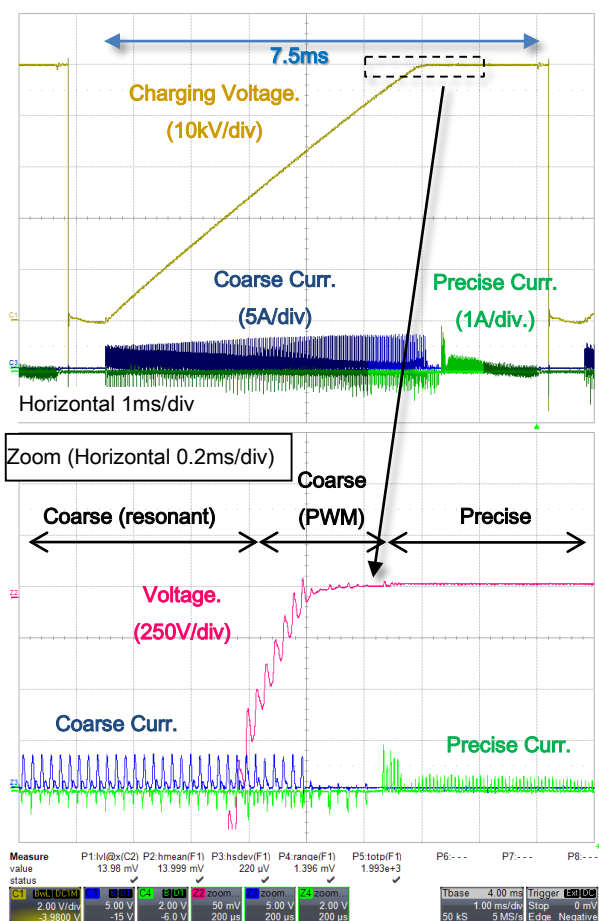


Figure 7: (Top) Waveforms of a charging voltage (yellow) and the output currents of the main-charger (blue line) and the sub-charger (green line) at a 50 kV charging and a 120 pps repetition. (Bottom) Zoomed waveform of the charging voltage (red line) at the mode switching from the coarse charging to the precise charging.

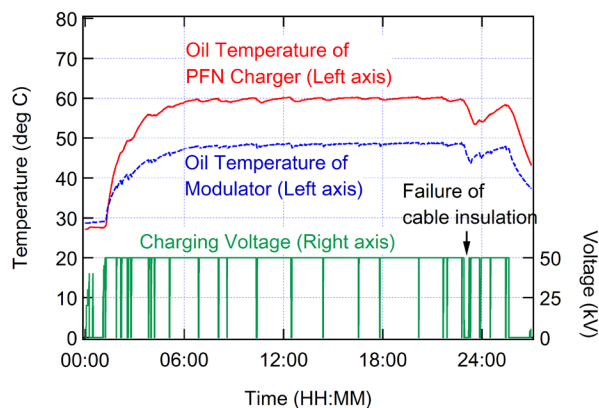


Figure 8: Trends of insulation-oil temperatures inside of the PFN charger (red line) and the modulator (blue line), and the charging voltage (green line) at 120 pps operation.

であり、予想温度よりは 3°C程度高いが、目標とした 50°C以下に抑えることができた。

### 3.2 RF 試験

クライストロンに導波管や SLED、加速管を接続し、大電力 RF を用いた動作試験を行った。今回は、実機での構成(Figure 1)とは異なり、SLED で圧縮した RF 電力を加速管 1 本のみ投入し、想定使用電界を超えた高電界 RF 運転での動作確認、および放電頻度の測定を行った。この結果、加速管における平均加速電界が約 50 MV/m においても定常的に運転できることを確認している<sup>[4]</sup>。これより、加速管 2 本構成で想定している加速電界 46 MV/m においても安定に使用できることを確認した。また、高繰り返し運転時における RF 位相のシフトや放電頻度も、チョークモード型加速管に比べて少なくなっている事を確認した。

更に、120 pps による RF 連続運転を約 8 時間行い、高繰り返し化した RF 加速システムが健全に動作することを確認した。

## 4. まとめ

我々は、SACLA の RF 加速システムと互換性を持たちながら、120 pps での高繰り返し運転が可能な RF 加速システムを開発した。このシステムでは、特に熱損失の大きな、PFN 充電器、モジュレータ電源、クライストロン、加速管について、新規に開発を行った。それぞれでは、高繰り返し化による発熱の増大に対応できるようにするため、シミュレーションも活用した熱対策を施した。また、PFN 充電器では、デジタル制御による充電ラインの切換や、PWM 制御によるフィードバック制御を導入することで、50 kV の充電電圧に対し整定完了が 7.0 ms 程度、かつ電圧安定度 20 ppm(pk-pk)という高速、高安定な PFN 充電器を実現した。また、モジュレータ電源では、大型冷却板を導入し、内部絶縁油の温度上昇を 48°Cに抑えた。加速管は、ディスクロード構造とし、加速管の高電界化を目指すと同時に、高繰り返し運転時における RF 位相シフトを抑え、また楕円状アイリスによって放電頻度を軽減した。これらの機器を統合して連続運転を行い、120 pps 運転においても連続運転が可能な事を確認した。

今回試験したシステムのうち、PFN 充電器と加速管は、現在建設中の極紫外 FEL 用加速器<sup>[12]</sup>に設置し、繰り返しは 60 pps ではあるが、コンディショニング運転やビーム運転に使用する予定である。

## 謝辞

本システムの開発では、各機器の開発企業の技術者の尽力で成功したものであり、深く感謝します。特に、PFN 充電器およびモジュレータ電源の開発では、日本高周波の田中豊氏、中津悟氏、三宅克馬氏、山田洋人氏を始めとする多くの方々には、機器細部に至るまで調査および調整をして頂き、感謝します。

更に、ディスクロード型加速管の開発では、鈴木大輔氏と三浦禎雄氏を始めとする三菱重工の方々にご尽力を頂き、感謝します。最後に、試験エリアにおいて、機器の搬入から組立、および運転試験まで協力頂いた、スプリングエイトサービスの運転員の方々、特に、益田邦和氏、中澤伸候氏、木村健氏に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 原徹, et. al., “SACLA 加速器と光源性能の高度化に向けて”, 第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, 2013
- [2] 近藤力, et. al., “PWM 制御を用いた高電圧充電器の開発”, 第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, 2013
- [3] 櫻井辰幸, et. al., “C バンドディスクロード型加速管の開発に向けた試作空洞の RF 特性測定”, 第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, 2013
- [4] 櫻井辰幸, et. al., “C バンドディスクロード型加速管の大電力 RF 試験”, 第 11 回加速器学会プロシーディングス, 青森, 2014
- [5] 田中豊, et. al., “高精度充電器の開発”, 第 11 回加速器学会プロシーディングス, 青森, 2014
- [6] 田中均, 他, “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能におよぼす RF 機器変動の影響評価”, 第 4 回加速器学会, 和光, 2007
- [7] C.Kondo, et. al., “High Precision Inverter Power Supply for Klystron Modulator of SACLA”, EAPPC/BEAMS2012, Karlsruhe, 2012
- [8] ANSYS CFX, <http://www.ansys.com/>
- [9] 近藤力, et. al., “XFEL/SPring-8 向けクライストロン用パルス電源の開発”, 第 5 回加速器学会プロシーディングス, 東広島, 2008
- [10] T.Shintake, et. al., “HOM-Free Linear Accelerating Structure for e+e- Linear Collider at C-Band”, PAC’95, KEK-Preprint 95-48 (1995);
- [11] T.Inagaki, et. al., “The high-gradient C-band linac for the compact X-ray FEL”, *accepted (2014)*.
- [12] 稲垣隆宏, et. al., “SACLA における極紫外線 FEL 整備計画”, 第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, 2013