

3-1 SACLA加速器

3-1-1 運転概要

2013年度のSACLAの運転は、大きなトラブルもなく年間を通して概ね順調に行われた。表1に運転統計データをまとめる。初年度同様計画した7000時間の年間総運転時間をクリアし、施設稼働率97.5%が得られた。平均レーザー利用率は初年度と同様に92%を上回った。全利用運転時間におけるFault回数は6080回、平均Fault間隔は約34分であった。2012年度に比べFault回数が増加しているのは、年度内にレーザー繰り返しを30 Hzまで引き上げた事による。2013年度の利用実験時間として2012年度比10%増の3300時間を計画したが、実験並びに調整手順の効率化と加速器運転の合理化を進め無事達成できた。

実施された実験課題の内訳を図1に示す。2012年度とカテゴリー分けが変わっているので直接の比較はできない

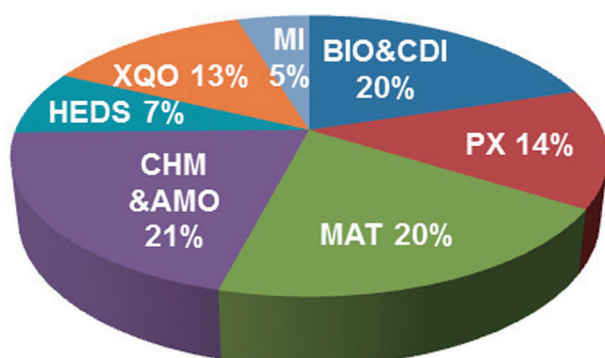


図1 2013年度の利用実験内訳。BIO: Imaging biology (イメージング生物学); CDI: Coherent diffraction imaging (コヒーレントイメージング); PX: Protein crystallography (タンパク質結晶構造解析); MAT: Ultrafast materials science (超高速物質科学); CHM: Ultrafast chemistry (超高速化学); AMO: AMO science (原子分子光科学); HEDS: High energy density science (高エネルギー密度科学); XQO: X-ray quantum optics (X線量子光学); MI: Methods and instrumentation (手法・装置)。

が、SACLAの高いピークパワーを活かした高エネルギー密度科学、X線量子光学分野、並びに超高速現象計測への利活用が広がったように見える。実験装置廻りのシステム構築は順調に進展し、特に、ポンプ・プローブ実験用高精度(～100 fs) タイミング・モニターの開発と整備^[1]、ショット毎に強度とスペクトルが変動するSASEレーザーを利用したシングルショットX線吸収分光法^[2]の開発と汎用化は、高速現象の観測の高精度化と効率化に大きく貢献した。また、常温並びに極低温非結晶サンプルのコヒーレント回折イメージング(CDI)による構造解析装置の開発と実用化^[3, 4]、サブミリからサブミクロンサイズに亘る様々な形態の結晶を回折により高分解能で構造解析を行う装置^[5, 6]の開発と実用化もイメージング生物学とタンパク質の結晶構造解析の実験効率向上に大きく貢献している。

2013年度のレーザー性能を表2に示す。10 keVにおけるレーザーパルスエネルギーは2013年秋に0.6 mJ/pulse(初年度の約2倍)まで引き上げられた。この改善は電子ビームのレーザー増幅部の電流値を極限まで高めた事による。ゲインカーブの実測値から増幅部のビーム電流は9 kAを超えると評価され、設計値3.4 kAのおよそ3倍に達した。この高ピーク電流運転を可能にしたのはSACLAの加速器の安定性である。図2は10 keVの光子エネルギーでのレーザー強度の安定性を示す。規格化強度変動は約10% (標準偏差) とこれまでの安定性が維持されている。一方、利用運転初年度10 Hzであったレーザーの繰り返しは、図3に示すように段階的に引き上げられ、2014年の運転開始からレーザーの繰り返しは最大30 Hzまで利用可能になった。繰り返しを引き上げる際に問題となるのは、レーザーのトリップ頻度である。一般にトリップは加速管や高出力パルス機器の放電、サイラトロン(高圧スイッチ)のミスファイアにより発生し、その頻度は繰り返しに比例する。このため、繰り返しを上げるには、このトリ

表1 SACLAの運転統計

	FY2013
Total Operation Time per Fiscal Year (Achieved / Planned)	7017 / 7197 hr
Operation Rate	～97.5%
Machine Tuning Time	860 hr
BL Tuning, Preparation & R&D Time	2698 hr
User Experimental Time	3459 hr
Downtime in User Experiments	252 hr
Laser Availability	～92.7%

表2 SACLAのレーザー性能

Pulse Energy	0.6 mJ @10 keV
Available Photon Energy Range	4 ～ 15 keV
Laser Pulse Duration	< 10 fs (FWHM)
Spatial Coherence	Nearly full
Repetition Rate	30 Hz
Stability Intensity $\sigma_{\delta I}/I$	≤ 10%
Pointing $\sigma_{\delta z}/z$ (FWHM)	3 ～ 7%
Wavelength $\sigma_{\delta \lambda}/\lambda$	～0.1%

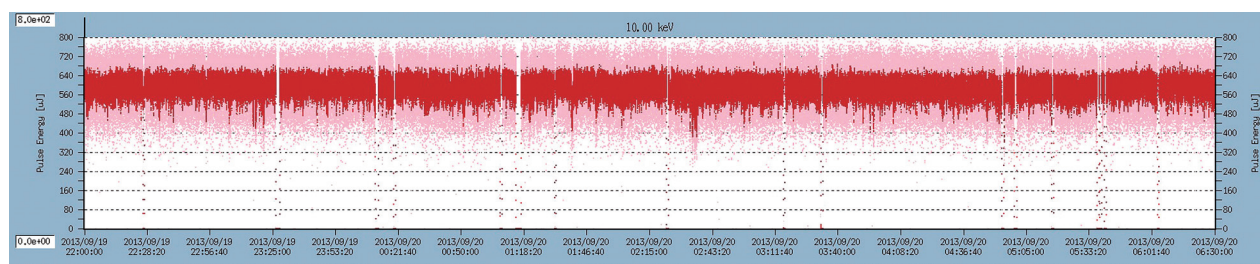


図2 2013年9月中旬の10 keVでのレーザーの強度変動。図中の白実線は0.6 mJ/pulseを示す。

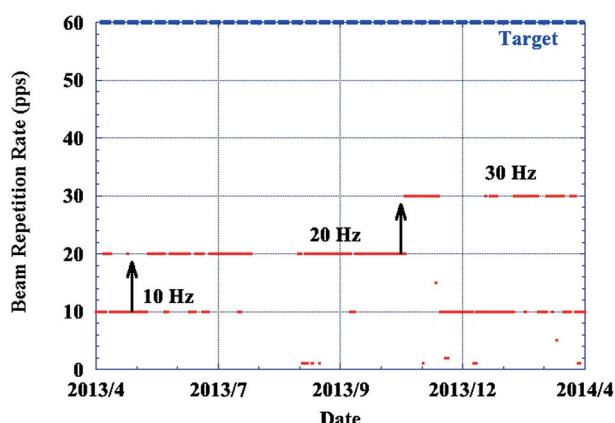


図3 レーザー繰り返しの段階的引き上げ

ップ頻度の低減が必須となる。SACLAでは、長時間に亘る加速システムのコンディショニングとサイラトロンの機器インターロックの適正化により30 Hzの繰り返しにおいて、安定なレーザー運転、即ち、許容範囲内のトリップ頻度、レーザーの安定性と再現性を実現した。レーザーの光子エネルギー範囲は、ユーザーの要望により低エネルギー側に若干広がり、4 keVまで利用可能となった。

SACLAの高度化は、ユーザー実験と並行し以下のように進展している。(1) 自己シード化の導入：BL3における自己シード化の試験では、スペクトルの狭帯域化による3～4倍の輝度向上が実験的に得られている。実用化へ向けて克服すべき問題は、高品質のシードレーザーが安定に得られるパラメータと再現化手順の確立である。現状では、自己シードが得られる条件の探索に時間がかかる上に、利用できる高性能のシードレーザーの長期間の維持が難しい。(2) 新しいSASE XFELビームラインBL2の建設：2014年夏に予定されているBL2の建設は、夏期点検調整期間に限られている上に作業量が多く、そのスケジュールは非常に厳しい。このため可能な作業を2013年冬の点検調整期間に前倒しで実施した。さらにユーザー運転と並行して実施可能なギャラリーでの設置・調整作業も進めている。(3) BL1広帯域ビームラインの高度化：BL1は2012年3月から短パルス自発放射の利用が可能になった。BL1のSASE FEL化とSACLA全体の運転合理化を考え、

SCSS試験加速器をBL1の専用電子加速器として、アンジュレータホールBL1の上流部へ移設する事を計画している。第一段階では、2015年秋に20 nm程度の最短波長を生成する事を目標に試験加速器の段階的移設とCバンド加速システム増強の準備を進めている。(4) 加速器の安定化：SACLAではパラメータデータベースが利用できる世界初の線型加速器を目指し、加速器システムの安定化を進めてきた。現在、トリガータイミングのドリフトを抑制するため、温度並びに湿度変化によるリファレンス信号のドリフトを補正し高精度で維持する、干渉計とファイバーストレッチャーを組み合わせたフィードバックシステムの開発を行っている。このシステムは2014年秋に導入される予定である。(5) パルス毎のレーザー振り分け：2015年夏のパルス毎のレーザー振り分け運転導入を目指し、コンポーネント開発を継続している。ビームスイッチャーの主構成機器である高精度パルス電源とスイッチング電磁石の性能評価等を実施した。

XFEL研究開発部門

田中 均

3-1-2 運転・ビーム制御の高度化

SACLAでは増加するユーザー実験に対応するため、2014年度夏期点検調整期間に2本目のアンジュレータビームラインBL2を設置する。XFELは電子加速器として線型加速器を用いているため、複数ビームラインに同時に電子ビームを供給することはできない。しかしながら電子ビームをバンチ毎に振り分けることで、擬似的な複数ビームラインの同時運用は可能で、実質的なユーザー数を増やし施設稼働効率を向上させることができる。

BL2とBL3間のビームラインの切り替えは、2014年秋のBL2立ち上げ期間中は線型加速器終端にあるDC偏向電磁石を用いて行い、その後2015年1月に電子バンチ振り分けのためのキッカー電磁石及びDCツイーンセプトム電磁石を設置する予定である。2013年度はDCツイーンセプトム電磁石の設計を完了し、2012年度製作したキッカー電磁石及びパルス電源の評価試験を行った^[7, 8]。

キッカー用パルス電源は、FET 8ユニットを並列接続したPWMタイプの電源で、最大60 Hzの台形電流波形を出

力する（図4）。共振タイプの電源ではないため、電子ビームエネルギーや振り分けパターンに応じて台形の極性や波高を任意に設定することができ、電子ビームエネルギーをバンチ毎に制御するマルチエネルギー運転への対応が可能である。DCCTによる電流測定及びゲート型NMRを用いたパルス磁場測定の結果、パルス磁場の安定度が30 ppm (peak to peak) 以下であることを確認し、要求安定度を達成した^[7]。今後2015年度の電子バンチ振り分けによる2本のビームラインの同時運用開始に向け、これら電磁石の設置や加速器調整等を進めていく。

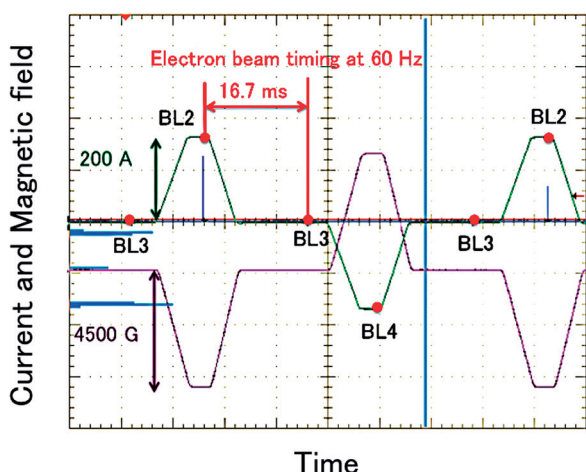


図4 キッカー電磁石及びパルス電源を用いて測定した電流波形（緑線）と磁場波形（紫線）。赤丸は実際に60 Hzの電子バンチが通過するタイミングを示す。

XFEL研究開発部門
加速器研究開発グループ
先端ビームチーム

原 徹

3-1-3 RF及びビームモニターの高度化

2013年度は、主にSACLAの新規X線ビームラインであるBL2の建設やSCSSの光源棟への移設に伴う機器の製作、2012年度に引き続いてX線レーザーの安定化作業を行った。それらは、高周波機器、ビームモニター機器、タイミング・モニター機器の整備である。新規開発機器の中で代表的なものは、Cバンド高電界定勾配型加速管^[9]、クライストロンモジュレータ用インバータ電源^[10]である。またSACLAの安定化のためには、光高周波・タイミング伝送ラインの環境温湿度変化に伴う基準時間変動を低減するために、光ファイバー長制御システム^[11]の実機開発及び製作を進めた。

図5には、開発したCバンドの $2\pi/3$ モード定勾配型加速管用の大電力試験の機器構成を示す。この加速管は、現状のSACLAの加速管より機能を削いで、構造を簡単にして製造コストを下げ、より高い加速電界を得るために開

発したものである。特に高い加速電界を得るためには、空洞内の加速間隙の内面形状を工夫した。この加速管は、SACLAの大電力高周波テストスタンドに於いて試験された。大電力試験を行うためには、クライストロンで駆動された高周波パルス電力圧縮機器（SLED）の出力を供試体である1本の加速管に直接入力した。この試験では、370時間のコンディショニング後に、図6に示すようにSACLAの標準的な加速電界の37 MV/mを超える50 MV/mの加速電界の生成をした。そのためのパルス高周波電力は、110 MWで500 ns幅、120 ppsの繰り返しであり、それを8時間の間に安定に入力して問題のない事確かめた。加速管の管内放電によるトリップも、60 ppsでの運転に於いて、12時間で15回程度であり実用上問題ない。ちなみに、開発した加速管は、移設する試験加速器のCバンド加速ユニットに使用予定である。この場合の想定する最大発生加速電界は、SACLAと同じようにSLEDの出力を2本の加速管に入力する形式なので、47 MV/mになる。

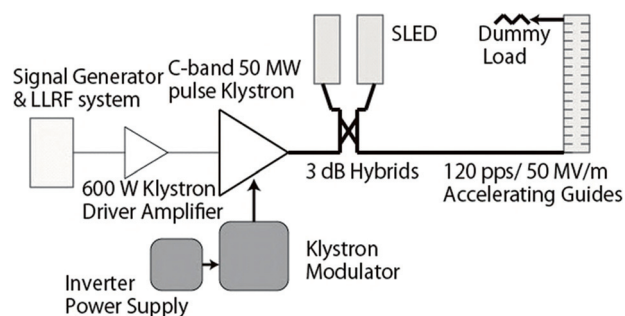


図5 Cバンド $2\pi/3$ モード定勾配型加速管の大電力高周波試験装置の構成

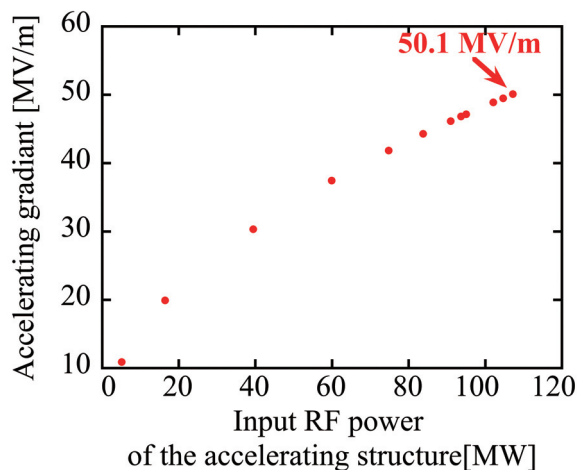


図6 Cバンド $2\pi/3$ モード定勾配型加速管に於ける入力高周波電力対発生加速電界

XFEL研究開発部門
加速器研究開発グループ
基盤光源チーム

大竹 雄次

3-1-4 光源の高度化

3-1-4-1 BL2用アンジュレータの建設

SACLAで建設中のX線レーザービームラインBL2には、稼働中のBL3と同じ仕様のアンジュレータが総計で18台設置される予定である。全アンジュレータの建設完了までに許される期間は1年程度であり、BL3のアンジュレータ建設に要した期間の半分程度しかない。このような厳しいスケジュールで必要数のアンジュレータを製造するためには、従来の製造工程を見直し、より効率的な手法へ改善する必要がある、このためには、各種工程の並列化が重要な課題となる。特に、アンジュレータ製造の最終工程である、磁石列の磁場調整作業は専用の測定施設を必要とするため、従来の手法では大規模な並列化が困難な状況であった。さらに、重量物であるアンジュレータ架台の測定施設への搬入と、測定機器との位置関係を修正するためのアラインメント作業など、磁場調整作業とは直接関係が無い（ただし、従来の手法では必要な）作業に多大な時間を必要としていた。これらの問題を解決するため、以下で説明する新たな手法に基づく磁場調整を試みた。

受注業者の工場で製造が完了したアンジュレータ架台は、別途製造された磁石列の調整作業を行うためにSPRing-8内の専用測定施設に搬入され、アラインメントが行われる。通常の工程では、磁場調整が完了した後、架台は磁石列とともに別の場所に移設され、空いた測定場所に次の架台が搬入される。今回の調整では、最初に製造された架台を測定施設に搬入した後は一切動かさず、磁場調整作業に専用の架台として利用した。即ち、調整される磁石列のみを交換することによって、架台の搬入やアラインメントなど、磁場調整に本来必要の無い作業を省略し、磁場調整作業の時間短縮を試みた。

本手法は、磁石列の調整作業を行うための架台と、これを実際に設置しアンジュレータとして利用するための架台とが異なるため、磁場性能を左右するギャップの均一性が担保されないという潜在的な問題を抱えている。この問題は、製造された駆動架台の機械性能が均一でない場合より深刻になるが、本手法の適用可能性について予め受注業者と議論した結果、機械性能の不均一性が、レーザー増幅過程に影響を与えるほど磁場性能を劣化させる可能性は少ないことを確認した。実際、製造されたアンジュレータの最終的な磁場性能には架台の相違による大幅な劣化は見られず、本手法が同じ仕様を持つアンジュレータの大量生産に有用であることが確認された。

3-1-4-2 シード型XFELコミッションング

セルフシード法によるシード型XFELを実現するために、シリコン単結晶並びにこれを保持・制御するための真空槽や、回折光の強度や空間分布を測定するための計測機器がアンジュレータシケイン部に設置され、コミッ

ショニングが開始された。

コミッションングの初期段階において、アンジュレータ前半部で生成されたSASE光と結晶との位置関係の確認、回折光の空間分布や強度の測定が行われ、設置した各種機器が正常に動作していることが確認された。次いでシリコン結晶を透過した、シード光として機能するSASE光のスペクトルを単一ショットスペクトロメーターで測定した結果、予測通り結晶のブラッグ角に相当するエネルギーにおいてディップを持つスペクトルが観測された。この後、後半部のアンジュレータのギャップを適切な値まで閉じたところ、上記のエネルギーにおける光のフラックスがSASE光のそれを上回ることで、即ちシードの効果が確認された。図7に二結晶分光器で測定された100ショットでの平均スペクトルを示す。バンド幅(FWHM)は約5 eVであり、SASE光のそれ(約50 eV)よりも十分に狭いものの、予測される値(1 eV以下)よりもかなり広い上、シードが機能する電子ビームの条件が極めて限定的かつ非常に不安定であることが確認された。今後、これらの問題を解決し、シード型XFELをユーザーに供するためにコミッションングが継続して行われる予定である。

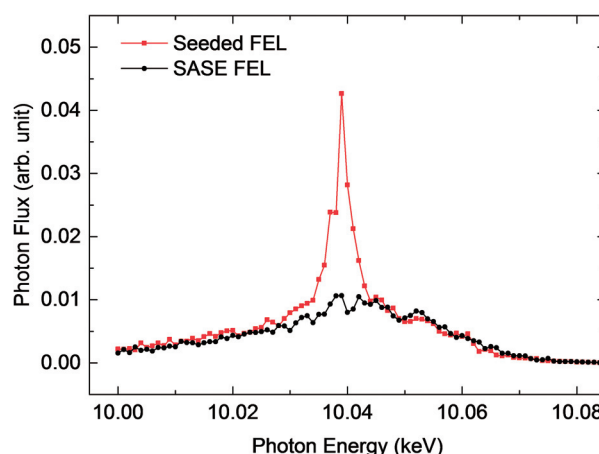


図7 シード型FELとSASE型FELのエネルギースペクトル(実測値)

XFEL研究開発部門
加速器研究開発グループ
光源物理チーム

田中 隆次

3-1-5 加速器制御系の高度化

2013年度はBL2制御系の整備とレーザー発振を阻害する要因となっている不安定要素をいち早く検知するための高精度化を安定性向上とともに行うことを目指した。

3-1-5-1 データ収集システム

2012年度に開発を行ったビームに同期して収集された

データとSybaseに収集されている非同期のデータを同一のライブラリーで使用できるデータベースアクセス関数を夏期点検調整期間に導入した。このライブラリー及びWebアクセスと組み合わせて同期データと非同期データの相関を取りやすくするため、同期データを間引いてアーカイブに格納する際に同期データのイベント番号が同じになるように選別して同一ショットのデータがアーカイブされるように設定した。

3-1-5-2 機器制御

・測温抵抗体読み出しモジュール

2012年度から開発を行っている温度読み出しユニットをPLCに搭載できる形で製作した。BL1及びBL3のID磁石温度測定で使用している温度計測ユニットが製造中止になっているため、PLC上で動くLinuxと温度読み出しユニットを組み合わせ、BL2 ID磁石温度測定の温度計測ユニットとして使用するための環境の整備を行った。事前のテストとしてLバンド加速空洞温度の読み出しに使用して想定通りの性能が得られることが確認できた。

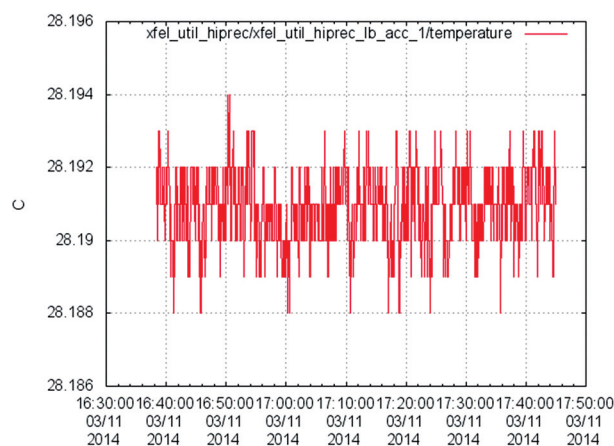


図8 Lバンド加速空洞の温度測定：平均値 28.19093℃ 標準偏差 0.00097℃

・高周波加速系の波形読み出しシステム系

LowLevel RFで使用しているADCの異常波形検出機能を使用して基準波形から外れた波形を検出して保存するシステムの開発を行った。2013年度は波形を収集してファイルに保存する所までを行い、ビームスタディ時にテスト運用を行い正常に動作することを確認した。2014年度にはデータベースシステムと組み合わせて検索等ができることを予定している。

・ネットワークシステム

サーバ計算機系運用の安定化と広帯域化を目指して、XFELコントロール室周りの基幹ネットワークを10 G化した。メインのサーバ計算機系に加えてバックアップ系に

も10 Gのネットワークを供給することでバックアップ切替え時に性能の劣化が起きにくい環境を整えた。

先端光源開発研究部門
制御系研究開発グループ

福井 達

参考文献

- [1] T. Sato et al.: to be published elsewhere.
- [2] T. Katayama et al.: *Appl. Phys. Lett.* **103**, (2013) 131105.
- [3] M. Nakasako et al.: *Rev. Sci. Instrum.* **84**, (2013) 093705.
- [4] T. Kimura et al.: *Nature Communications* **5**, (2013) Article number: 3052.
- [5] C. Song et al.: *J. Appl. Cryst.* **47**, (2014) 188-197.
- [6] K. Tono et al.: to be published elsewhere.
- [7] H. Takebe et al.: “SACLA 電子バンチ振り分けの為にキッカー電磁石用高精度パルス電源の開発とNMRパルス磁場測定”, *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, (2014) pp.95-100.
- [8] T. Hara et al.: “SACLA 加速器における電子バンチ振り分けシステムの開発”, *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, (2014) pp.21-24.
- [9] T. Sakurai et al.: Design of C-band disk-loaded type accelerating structure for a higher pulse repetition rate in the SACLA accelerator, *Proc. of LINAC12*, Tel-Aviv, Israel, (2012) pp.372-374.
- [10] C. Kondo et al.: “PWM制御を用いた高電圧充電器の開発”, *Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagoya, (2013) pp.615-620.
- [11] E. Haraguchi, et al.: “High phase stabilized RF signal distribution over optical fiber based on optical heterodyne detection”, *IEICE Tech. Rep.*, **vol. 113**, no. 144, MWP2013-29 (2013) 137-142.