

SACLA でのクライストロンギャラリ湿度変動の抑制

SUPPRESSION OF HUMIDITY VARIATION AT KLYSTRON GALLERY IN SACLA

大島隆^{#,A)}, 前坂比呂和^{A)}, 松原伸一^{B)}, 大竹雄次^{A)}, 飛永隆史^{C)}, 白川謙二^{C)}, 坂田佳広^{C)}, 成重雅彦^{D)}
Takashi Ohshima^{#,A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shin-ichi Matsubara^{B)}, Yuji Otake^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Takashi Tobinaga^{C)},
Kenji Shirakawa^{C)}, Yoshihiro Sakata^{C)} and Masahiko Narisige^{D)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center XFEL Division

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute, XFEL Division

^{C)} SPring-8 Service co. Ltd.

^{D)} RIKEN HARIMA INSTITUTE Research Promotion Division

Abstract

From an experience of the SACLA operation, frequent tuning of the phases of the accelerating cavities in an injector section was needed to keep the high intensity level of an X-ray laser in spring and autumn seasons. We searched for parameters which had correlation to these phase changes. We found the humidity of the klystron gallery had correlation to the phase of the L-band cavity, which was installed at the injector section and had strong influence on the XFEL intensity level. Then we tried to stabilize the humidity of the klystron gallery. First, we reduced the amount of airflows from the outside of SACLA's building to the gallery, for example, by sealing small crevices on building walls. The parameter settings of a humidifier and a dehumidifier were originally set to maintain the humidity within relatively wide range (35 %RH ~ 60 %RH). We adjusted these parameters to suppress variation of the humidity and the variation was kept within 7 %pk-pk. According to these counter measures the stability of the operational parameters was improved.

1. はじめに

Spring-8 Angstrom Compact LAsER (SACLA)は X 線領域での SASE 発振を実現し、高輝度短パルス X 線を用いて原子の 2 光子吸収など非線形過程の観測、非結晶タンパク質の構造解析など様々な実験を行うための施設である^[1]。この装置は、加速器の構成要素の変動に対して非常に敏感で、例えば入射部加速空洞冷却水温の 0.08 度 pk-pk の変動が空洞の位相に影響して、レーザー強度を変動させることがわかっている^[2]。長期にわたって安定なレーザーをユーザーに供給するためには、さまざまな構成要素の安定度を高く保つ必要がある。

SACLA では 2 年を超える運転が行われている。この装置で、レーザー強度変動を自己増幅作用の統計的ふるつきである 10% (rms) 程度以内に保つために、加速器の空洞位相設定値は必要に応じて 8 時間などの間隔で微調整している。この位相調整量が春季および秋季には急激に増加し、頻繁に調整を行わないとレーザー強度が低下する傾向がみられていた。この変動について原因の調査を行ったところ、加速空洞制御ユニットが設置されているクライストロンギャラリの湿度変化と加速空洞の最適位相に相関がみられ、湿度変化がパラメータ変動の要因の 1 つである可能性が考えられた。さらに詳しく変動の要因を調べるため、基準信号の伝送系について調査を行った。高周波基準信号は、加速器上流部に設置されたマスターオシレータ室で光信号に変換され、光ファイバを通して各加速空洞を制御しているユニッ

トへ伝送されている^[3]。この基準信号系において、伝送先の 1 つである、バンチコンプレッサ (BC3) から光信号をマスターオシレータ室へと送り返したところ、返送信号もとの基準信号との位相差の変化が、クライストロンギャラリの湿度変化と相関を持っていることが分かった。このことから、空洞設定位相の変化の要因の一部が基準信号伝送系にあることが分かった。SACLA のレーザー強度をより安定にするためには、この湿度変動による高周波位相変化などを緩和することが重要であり、湿度の安定化を図った。本報告では、SACLA のクライストロンギャラリの湿度制御方式および達成している安定度、加速空洞の位相とクライストロンギャラリの湿度との相関について述べ、湿度安定度の向上を目指して行った対策とその結果について報告を行う

2. 空調設備と加速空洞設定位相

2.1 クライストロンギャラリの空調設備構成

SACLA の建屋は Figure 1 に示すように加速器棟、光源棟および実験棟に大きく分けられる。それぞれの建屋の躯体は独立した構造となっており、空調設備も独立したものとなっている。加速器棟のクライストロンギャラリはつながった広い空間となっているが、L1 から L5 の 5 つのゾーンに分割し、それぞれに空調機を設置している。加速器棟の空調設備のうち 1 つの系統についてのブロック図を Figure 2 に示す。クライストロンギャラリの空調機の湿度に対する当初の要求は 1) 結露しないこと、2) 静電気による電子機器の損傷や高電圧機器の放電を防ぐこと、であり、40%Relative Humidity (RH)から 60%RH

[#] ohshima@spring8.or.jp

の間で安定化することを目標としていた。各空調装置では、ギャラリの天井に1つ設けられた吸気口から空気を取り込み、冷水を通水した熱交換器で除湿する。次に、温水を通水した熱交換器で温度調整を行い、最後に湿ったエレメントを通過することで加湿（気化式加湿器）して、壁際に複数設置された温調空気吹き出し口から吹き出す^[4]。循環空気には、外気を一部取り入れて室内の二酸化炭素濃度の低減を図っている。吹き出し空気の温度制御および除湿の制御はそれぞれ温水、冷水の3方弁の開度調整で行っており、比例制御が可能である。加湿については、加湿器への水の弁の開閉をON/OFFで制御している。除湿、加湿制御は、露点センサの出力を基準として行っており、相対湿度ではなく露点を目標値、読み取り値として制御している。

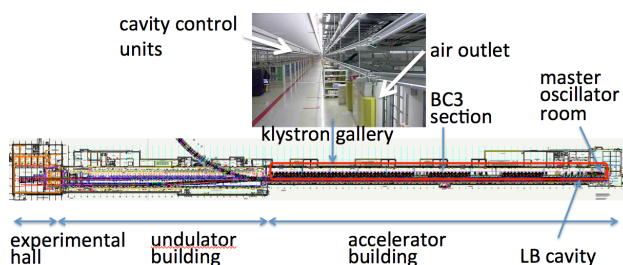


Figure 1: Schematic layout of SACLA.

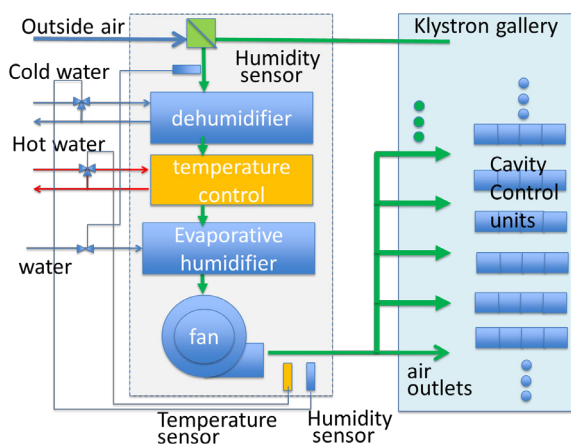


Figure 2: Configuration of the air temperature and humidity control system at SACLA.

2.2 クライストロンギャラリの湿度制御

2013年9月までの空調機の湿度制御パラメータは、年間を通して一定であり、ギャラリの温度は26.0°C、加湿器の動作露点は11°C DewPoint (DP)、除湿器の動作露点は16°C DPであった。加湿器はON/OFF制御であるため、頻繁な弁の動作を防ぐために不感帯となるヒステリシスが設けられており、その設定値は2°C DPであった。2012年の1月から12月までのクライストロンギャラリの湿度の推移をFigure 3に示す。冬期は加湿器により露点がおおよそ12°C DPに、夏期は除湿機により露点がおおよそ17°C DPに保持さ

れていた。冬期の湿度変動量(〜2°C DP)が夏期のそれ(〜0.2°C DP)よりも大きいのは、除湿機は比例制御が行われているのに対して、加湿器は2°C DPの不感帯を持つON/OFF制御を行っているためである。5月半ばからの1か月、9月半ばからの1か月は、露点の変動が5°C DP(湿度でおおよそ20%RH)近く見られていた。これは、加湿器の動作点と除湿機の動作点が5°C DPのずれを持っていることに起因している。

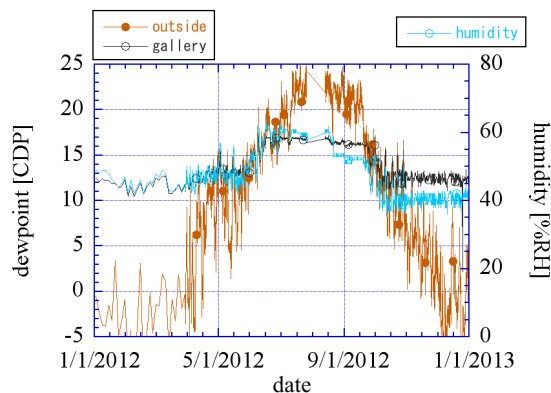


Figure 3: Trend graphs of humidity at the klystron gallery (blue line) and dew point of outside air (Red line) from January to December in 2012.

2.3 ギャラリー湿度と加速器設定位相の相関

前節で5月半ばに湿度変動が大きかったことを述べた。この時期における、加速器入射部Lバンド加速空洞の設定位相(位相は時間の単位に変換している。)の推移を調べた。Lバンド加速管の位相は、現在の加速器のパラメータでは、レーザー強度に対して非常に大きな影響を与え、その位相が0.1度(時間に換算して0.2ps)変化しただけでレーザー強度は1/2に減少する事象が見られている。Figure 4 a)にLバンド加速管の位相の変化を、Figure 4 b)にクライストロンギャラリの湿度と温度の推移を示す。図から、Lバンド加速管の位相とギャラリー湿度には相関が弱い、ギャラリー湿度と位相の間には強い相関がみられた。6月1日には、クライストロンギャラリの湿度が20%RHだけ減少した。このときにレーザー状態を維持するためにLバンドの加速空洞位相が-4ps(位相にして2度)だけ調整により推移していた。このことから位相変動がすべて湿度変化に起因すると仮定した場合には、Lバンド加速管の位相を0.1度以内に納めるためには湿度を2%RHの範囲で安定化する必要が有ることになる。

加速器の構成要素のどの部分が湿度変化の影響を受けているかをさらに調べるために、基準RF信号の伝送部分の変動を調査した。基準RF信号はマスターオシレータ室から光ファイバを用いて各RF制御ラックに送られているが、入射部やS、Cバンド加速部で光基準信号を分配するモジュールの納められた箇所には、基準信号伝送用の光ファイバに加えて、光路長モニタ用の光ファイバが敷設されている。

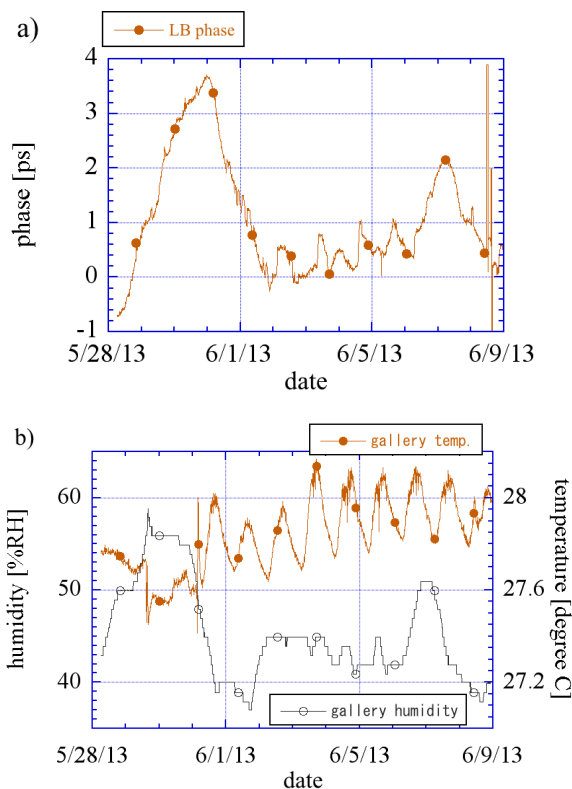


Figure 4: Trend graphs of a) the L-band cavity phase and b) the humidity and temperature of the klystron gallery.

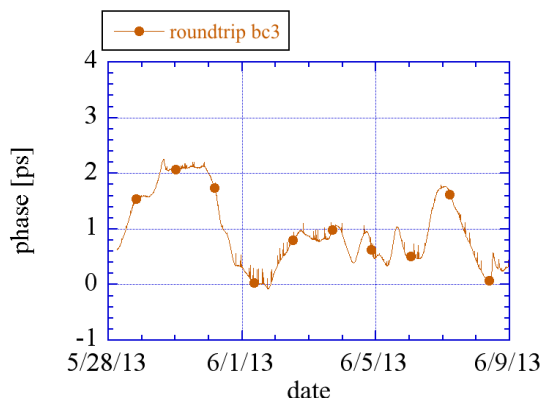


Figure 5: Trend graph of the phase of the C-band reference rf signal made a round-trip from the master oscillator room to BC3 section.

これらのモニタ用ファイバの敷設された箇所 の 1 つである BC3 部分において、マスターオシレータ室から伝送されてきた光信号の一部を送り返し、マスターオシレータ室にて BC3 まで往復した光信号の C バンド (5712MHz) 基準 RF 信号の位相の変動を測定した。結果を Figure 5 に示す。BC3 まで往復した光信号の位相変動も湿度変動に対して強い相関を持つことが分かった。従って L バンドの位相変動の要因の一つとして、基準 RF 信号伝送系の位相変動が影響を与えているといえる。伝送系の湿度による変動が加速器の位相設定に与える影響の割合については、L バンドの位相変化が 4ps (2 度) であるの対

し、基準信号伝送系の C バンドの位相変化が 2ps であった。このことから、基準信号伝送系の湿度による変動が 50%程度の割合で影響を与えている可能性があるが、基準 RF 伝送以外の要因、例えば L バンド空洞の上流にある 238MHz 空洞の位相や電子銃からのビーム切り出しを行うビームチョッパのタイミングなども、加速器パラメータに影響を与えている可能性も考えられる。

3 湿度安定化対策

運転パラメータの安定化のためにクライストロンギャラリーの湿度変化を抑えることが有効であることが分かった。この章では、湿度安定化のために施した対策について述べる。

3.1 外気流入量の抑制

外気の流入量が多いとギャラリー内の湿度は外気の影響を受けることとなる。人や物品の出入りのために生じる外気流入はやむを得ないが、それ以外に外気の流入経路があるかどうかについて確認を行った。SACLA では断熱材を挟み込んだ屋根材、壁材が使用されている。またギャラリーには吊り天井が設置されている。この吊り天井部分や壁部分で空気の流れがあるかどうか煙を用いて調査した。その結果、建屋の南側の壁と腰床の隙間から外気が流入していることが判明し(Figure 6 参照)、隙間を埋める処置を施した。また法律^[5]は、居住空間に対して人間の呼吸のための外気取り入れ量を規定しているが、これを遵守する範囲内で外気取り入れ量を減らした。ギャラリー外部との間に設けられた配線用ピットなどの穴についても施工可能な場所では仕切りを入れるなどの処置を施した。

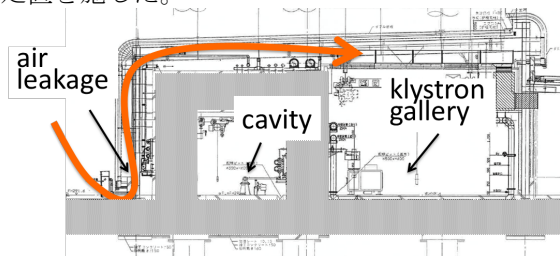


Figure 6: Route of the outside air leakage to the klystron gallery.

3.2 加湿器と除湿機の動作点の見直し

気化式加湿器では、エレメントを湿らせるための水のバルブの開閉を ON/OFF 制御で行っている。極端に短い時間での開閉操作を避けるために露点温度に対するヒステリシスが設けられている。露点がこのヒステリシスの幅の中にある場合、制御が行われないため湿度は成り行きとなる。そこで、加湿器のヒステリシスの幅を 2°C DP から 0.5°C DP に狭めた。また、加湿器と除湿機の動作点に差がある場合も、その間では制御されずに成り行きの湿度となる。従って、両者の動作点は一致させることが望ましい。しかし、空調装置は、加速器機器の冷却に使用する

冷却装置と共通の冷水(13°C)、温水(43°C)を使用しているため、冷水、温水の温度を空調装置単独の最適化のために変更することはできない。そのため、当初の仕様に従って設計された加湿器、除湿機的能力では年間を通して一定の湿度(露点)を保てるだけの能力を持っていないことが分かった。そこで、目標露点として、冬季は露点 11°C DP、夏季は露点 14.5°C DP の 2 段階の湿度設定を行うことを検討した。2013 年 9 月から空調装置のパラメータ調整を開始し、10 月の時点でも露点温度変動は 13°C DP から 15°C DP という 2°C DP の変動量で抑えられた。Figure 7 に 2013 年 9 月から 2014 年 7 月までの L1 系統の湿度変動の様子を示す。冬期の湿度変動も従来の 2°C DP から 0.5°C DP に改善された。これは湿度の変化量としておよそ 2%RH に対応する。季節の変わり目に見られた露点変化についても、加速器の調整期間に計画的に設定値を変更することで、ユーザー運転時の強度変動を抑えることを目指した。2014 年 5 月 28 日から 6 月 9 日までの L バンド空洞位相、ギャラリー湿度、温度のトレンドを Figure 8 に示す。ギャラリーの湿度変動は昨年の 20%pk-pk から 7%pk-pk に改善された。L バンド空洞設定位相の動きは昨年に比べて滑らかになっている様子が見られる。

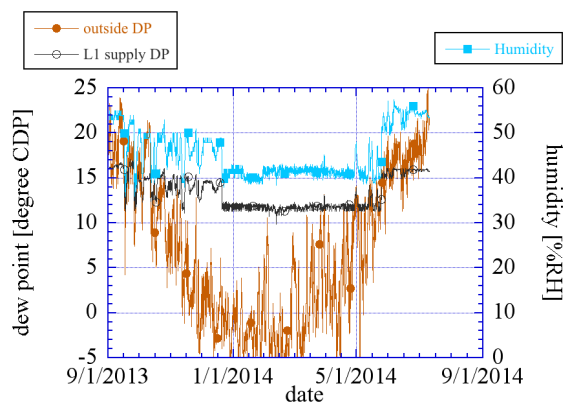


Figure 7: Trend graphs of humidity at the klystron gallery and that of the outside air from September 2013 to July 2014.

3.4 光源棟、実験棟の湿度制御

基準高周波信号とトリガ信号は実験棟の実験ハッチにも送られており、同期レーザーを用いた実験などでタイミング信号の生成に使用されている。従って、光ファイバケーブルの通過経路である光源棟およびレーザーが設置されている実験棟の湿度変化も十分に抑制する必要がある。

光源棟の空調機は内部循環空気 of 積極的な湿度制御はしておらず、取り入れる外気の湿度を制御する方式をとっている。Figure 9 に光源棟北ギャラリーの湿度の変化を 2013 年 9 月から 2014 年 7 月までの範囲で示す。2013 年 10 月までは除湿制御のみで加湿は行っていなかった。このため、外気の露点が低くなると、湿度は成り行きで変化する状況であった。

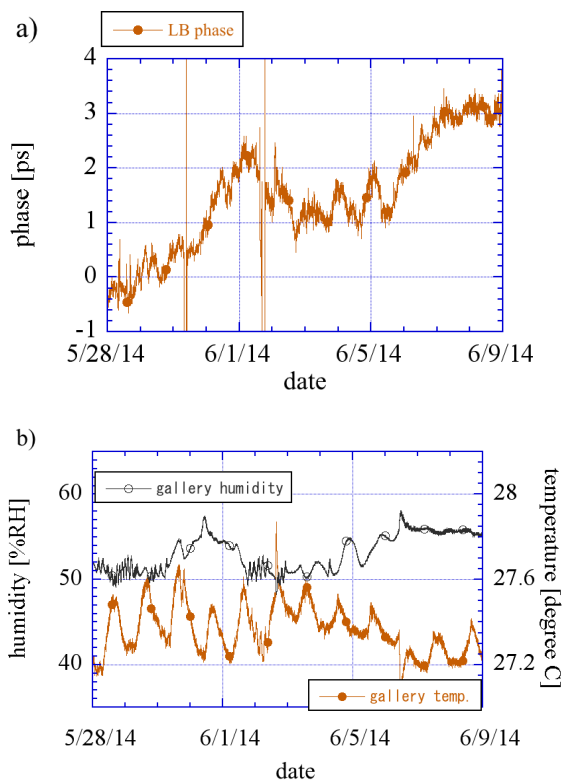


Figure 8: Trend graphs of a) the L band cavity phase and b) gallery humidity and the temperature from 28 May to 9 June 2014. The humidity variation was reduced.

2013 年 11 月から加湿制御を開始し、パラメータの調整を行った。2014 年の 1 月からは加湿器の制御を給気口での露点を元に制御するよう改造し、露点温度は変動幅 1°C DP で安定に保たれ、光源棟ギャラリーの冬季の湿度は 30%RH 近傍で維持されている。クライストロンギャラリーの湿度制御設定値変更に合わせて 5 月末に湿度設定変更を行った。6 月以降は 53%RH 付近で湿度が安定化されている。

実験棟では建屋の建設時に CCD 検出器の環境湿

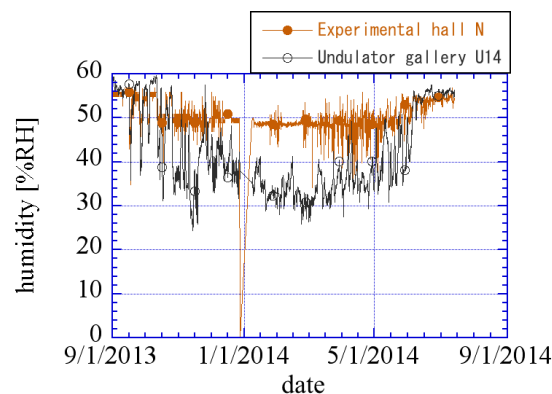


Figure 9: Trends of humidity at the undulator gallery and the experimental hall from September 2013 to July 2014.

度に対して厳しい要求が出されており、初期の段階から蒸気式加湿器が設置されている。環境の湿度は50%RH~57%RHの範囲で維持されている。

4 まとめと今後

XFELの強度を安定に保つためには加速器の加速空洞の位相を微調整する必要があった。特に春季、秋季に頻繁な位相調整が必要となっていた。この設定位相の変化がクライストロンギャラリの湿度変化に相関を持つことが分かった。そこで、湿度がRF位相に影響を与えている可能性が考えられ、ギャラリの湿度を安定にするために、外気流入量の抑制、空調設備である加湿器、除湿機の動作点の最適化などの処置を施した。これにより、湿度に起因すると思われるRF位相変動が低減され、加速器のより安定な運転に貢献できた。RF位相に対して湿度変化の与える影響は他の要因はつきりと区別することが困難であるが、2%RH以内に安定化することが望まれ、冬期および夏期において湿度変動はその範囲内に収めることができた。季節の変わり目に対応する2014年5月末の運転においては7%pk-pkと目標には達しなかったが2013年の20%pk-pkに比べると改善が見られた。

今後は、さらに安定な湿度制御を目指して、現状ではON/OFF制御となっている気化式加湿器を、比例制御の可能なより大きな加湿能力を持つ蒸気式加湿器に交換することを検討している。そのことで、必要な湿度安定度2%RH以内を夏期、冬期について達成できるようにしたい。また、光ファイバの長さを一定に保つフィードバック制御も進められている⁶⁾。さらに基準rf信号を発生し、各装置に伝送するための光送信機の収められたマスターオシレータ室の精密温度湿度制御を行うことや、基準信号伝送系のどの構成要素が湿度変化に対して敏感であるかの調査を行うことなどを検討している。これらの改良によりさらに安定した加速器の運転を目指している。

謝辞

湿度の安定化のための外気流入抑制の実作業に協力いただいた運転チームの田中信一郎氏をはじめとする方々、空調装置の更新計画にご尽力いただいているエンジニアリングチームの藤原嘉朗様、戎謙太郎様、施設管理の方々、加速器安定化のためにご指導くださっている田中均部門長に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region", *Nature Photonics* (2012) doi:10.1038/nphoton.2012.141.
- [2] T. Asaka, et al., "Stability Improvements of SACLA", *Proc. of FEL2012, Nara, Japan* (2012) pp.325-328.
- [3] H. Maesaka, et al., "Development of the Optical Timing and Distribution System for XFEL/SPring-8", *Proc. of FEL08, Gyeongju, Korea* (2008) pp.352-355.
- [4] T. Tobinaga, et al., "X線自由電子レーザー施設 SACLA

の省エネルギー冷却設備", *Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, (2013)* pp 1230-1233.

- [5] 建築基準法第28条「居室の採光および換気」の2. 建築基準法施行令第20条の2のニ. 建築基準法施行令第129条の2の6.
- [6] H. Maesaka, et al., "SACLA光ファイバ光路長制御システムの設計と性能", *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 8-12, (2014)*.