

UPGRADE OF A PRECISE TEMPERATURE REGULATION SYSTEM FOR THE INJECTOR AT SACLA

Teruaki Hasegawa ^{#,A)}, Takao Asaka^{A)}, Sunao Takahashi^{B)}, Toru Fukui^{B)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)},
Kazuaki Togawa^{A)}, Yuji Otake^{A)}
^{A)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

A precise temperature regulation system for an injector at SACLA is being upgraded. To realize stable user operation of SACLA, it is indispensable to achieve extremely high stability of accelerator components. At beam commissioning, although an existing temperature control system has been able to regulate a cavity temperature within 0.08 K, it has become clear that even a tiny fluctuation in a cooling water temperature, such as 0.1 K, for the RF cavities of the injector significantly influenced lasing stability. This temperature stability is limited by a PLC temperature measurement module, which has non-negligible temperature drift. In addition, it has been found that an ON-OFF alternatively heating method with a pulse width modulation signal generated a laser intensity variation having correlation with this modulation frequency. This is probably due to a tiny-pulsed temperature variation by heater power switching, and small magnetic field leakage from heater current. Therefore, the temperature controller module was replaced by a more precise one with an extremely high temperature resolution of 0.001K and with an excellent stability of 0.01 K. We will also apply continuous level control of a heater with a DC power supply. According to some preliminary experiments, this system will dramatically improve the lasing stability. This paper describes the upgrade of the temperature control scheme and its performance in detail.

SACLA 入射部の精密温度調節装置高度化

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)は、2012年3月7日に供用運転を開始した。効率良く利用実験を行うためには、レーザー強度と位置を長期にわたり安定に維持することが必要である。このためには、特に入射部からバンチ圧縮部にかけての RF の安定化が重要であり、徹底した安定化対策を講じた機器^[1]のもとで、RF 位相・振幅に対して低電力フィードバックを行うことで実現している。各 RF 空洞の温度も一定に管理されており、精密温度調節装置^{[2] [3]}により 0.08K/day(p-p)の安定度を達成している。

しかしながら、ビームコミッショニング以降、Lバンド APS 加速管の RF 変動や、入射部から出力される電子ビームに X 線レーザーの出力変動と同期した 0.5Hz 周期の位置変動が観測され、これらが共に RF 空洞に流れる冷却水のわずかな温度変化と連動していることが明らかになった^[4]。この要因は、PLC 温度モジュールがドリフトしていたことと、PWM による僅かなパルス状の温度変化またはヒータからの微小な漏れ磁場が考えられる。また、レーザー強度を安定化するためには、0.01K 以下の温度安定度が必要である。このため、精密温度調節装置の温度調節計を従来の PLC モジュール型から温度ドリフトが少ない高分解能型(0.001K)に置き換え、さらに DC 電源を用いた連続レベル制御方式に変更す

ることにより、ビーム位置変動量を低減し、レーザー強度を安定化することを計画している。

本システム導入に先立った予備実験で、高分解能温度調節計のみを実機に設置し、その性能を評価したところ、空洞温度は 0.08K/day(p-p) から 0.01K/day(p-p)まで安定化され、良好な結果が得られている。

本稿では、新たに導入する精密温度調節装置の機器構成とその性能の詳細について述べる。

2. 精密温度調節装置

2.1 従来システムの問題点

各 RF 空洞の温度制御に利用する施設冷却水は、ターボ冷凍機から供給される 12℃の冷水を 1 次系、各空洞に供給される純水を 2 次系として構成される。負荷 (RF 空洞) 側より戻ってきた 2 次冷却水は、熱交換器で 1 次冷水と熱交換を行い、26.5±0.2℃に温度調節された後に負荷側に吐出され循環する。現状で我々は、この 2 次冷却水を使用して RF 空洞の 0.1K 以下の高精度温度調節システムを構築している。この温度調節システムでは、2 次冷却水と RF 空洞の温度を测温抵抗体(Pt100, 3ware)と PLC(FA-M3, Yokogawa)を用いて計測し、PID 演算を経て出力される PWM (Pulse Width Modulation/パルス幅変調) 信号に基づき、AC ヒータを ON-OFF することにより冷却水の温度を安定化して、空洞の高精度温度調

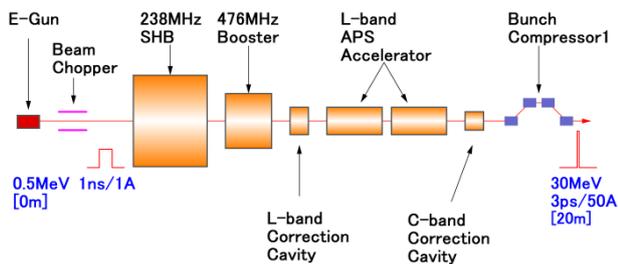


図 1 : SACLA 入射部の機器構成図

節を実現している。

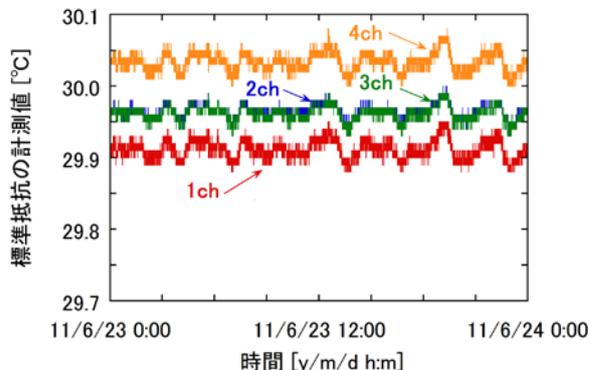
SACLA 入射部の機器構成図を図 1 に示す。0.5MeV 電子銃より発射された電子ビームをチョッパーで 1ns 1A に切りだした後、238MHz SHB、476MHz Booster、Lバンド補正空洞、2本の Lバンド APS 加速管、Cバンド補正加速管で、速度変調によるバンチ圧縮とビーム加速を行い、バンチ長が 3ps でビームエネルギーが 30MeV 電子ビームを生成する。

ビームコミッショニング時に、Lバンド APS 加速管の RF 位相および加速電圧変動によるビーム軌道の変動が観測された。Lバンド加速ユニットでは、1つのクライストロンから2本の APS 加速管を励振している。各加速管は独立に温度制御を行っているため、加速管温度はそれぞれ 0.08K 変化する。この変化による RF 位相のずれは、上流加速管の RF 位相を用いて低電力 RF フィードバックで補正されるが、下流にある加速管はこれと無関係に変動すると考えられる。

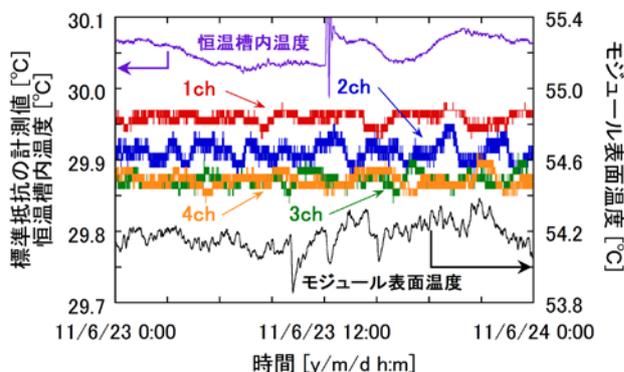
原因調査のため、この装置で使用している 4つの PLC 温度モジュール (4ch/台) に、温度係数の極めて小さい標準抵抗 (MAZ111R670V/111.670 Ω 1ppm/K, アルファエレクトロニクス社) を接続して、恒温槽に入れて 16ch 同時に温度指示値を計測した。その結果を図 2 に示す。図 2(a)は、1台の温度モジュールにある 4チャンネル分の結果である。すべてのチャンネルが連動して変化していることがわかる。1日当たりの変動幅はいずれも 0.08K(p-p)で、変動間隔は数時間程度である。図 2(b)は、異なる温度モジュールの 1チャンネル分を示しており、モジュールごとにその変動傾向は異なる。変動幅は最大で 0.08K(p-p)であった。この変動と恒温槽内の温度およびモジュール表面の温度に相関はなかった。

これらのことから、SACLA 精密温度調節装置の温度安定度は、PLC 温度モジュール自身が持つドリフトで制限されることが分かった。同時に、Lバンド APS 加速管の RF 変動は、この温度安定度の不足から生じていることも分かった。

2つ目の問題として、入射部から出力される電子ビームに X線レーザーの出力変動と同期した 0.5Hz 周期の位置変動が観測された。実機入射部



(a) 温度モジュール 1 台分の温度指示値。赤線, 青線, 緑線, 黄線はそれぞれ 1ch, 2ch, 3ch, 4ch を示す。



(b) 異なる温度モジュール 4 台分の温度指示値。縦軸 (左) の赤線, 青線, 緑線, 黄線はそれぞれモジュール 1, 2, 3, 4 を示す。紫線は恒温槽内温度で後述の高分解能温度調節計で測定した。縦軸 (右) は隣接する PLC 温度モジュールの表面温度を示す。

図 2 : 標準抵抗を接続した PLC 温度モジュールの指示値の変動

(238MHz SHB、476MHz Booster、L-band 補正空洞、2本の L-band APS 加速管、C-band 補正加速管) にある精密温度調節装置の制御周期を 0.5Hz から 1Hz、1.5Hz、2Hz、2.5Hz、3Hz に変更して、ビーム圧縮部(BC1)出口にある BPM の周波数特性を FFT により解析したところ、制御周期と相関のあることが分かった。この変動要因として、PWM によるヒータのスイッチングが、パルス状のわずかな温度変化を誘発し、RF 空洞に影響を与えている、あるいは、このスイッチングにより発生する微小な磁場変化が低エネルギーの電子ビームの軌道に影響を与えている可能性がある。

以上の理由から、SACLA 入射部の更なる安定化のためには、長期にわたって温度計測のドリフトがない高精度な測定系が不可欠で、しかも温度調節にはスイッチングサイクルのない連続加熱方式へとシステムを変更する必要がある。

2.2 高度化した精密温度調節装置

PLC に変わる温度調節器として理化工業社製の高分解能温度調節計 REX-F9000 を採用し、その性能を評価した。この調節計は、0.001K の温度分解能があり、温度調節機能も 2 系統持っている。温度安定度の評価は前述と同様の方法で行い、標準抵抗は MAZ110R894V/110.894Ω を使用した。2 日間の測定結果を図 3 に示す。環境温度が約 1°C 変化する状態も読み取り精度は、0.004K (p-p)、0.0010K(std.) と十分な性能を示した。

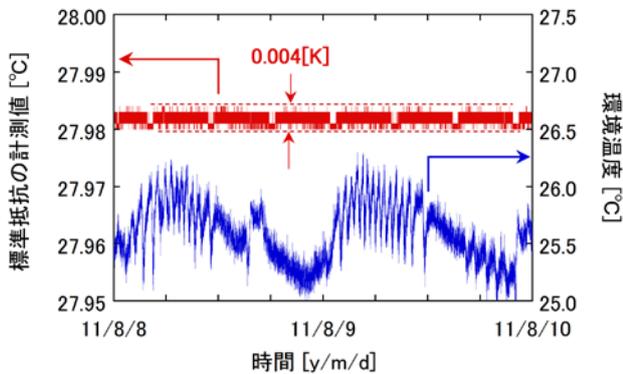


図 3：高分解能温度調節計の測定安定度

高度化した入射部精密温度調節装置の構成図を、L-band APS 加速管を例として図 4 に示す。この装置が持つフィードバックループは、上流の APS 加速管と下流の APS 加速管の 2 系統である。ターゲット温度は加速管入口の冷却水温度 28.000°C とし、この測定に测温抵抗体(Pt100, 4ware)を用いる。加速管本体の温度やその他の水温は、PLC 温度モジュールと测温抵抗体(Pt100, 3ware)で行う。従来のシステムにあったヒータスイッチング用半導体リレー(Solid State Contactor)の代わりに、7kVA(200V/35A)水冷式直流電源を使用する。ヒータは 9.1kW/3φ200V AC ヒータから 6.2kW/1φ200V DC ヒータに変更し、同時にヒータ容量の見直しも行った。各加速管には冷却水 45L/min が流れ、これを渦式流量計で監視する。これらを用いて 1 次系冷却水を加熱し、加速管に流

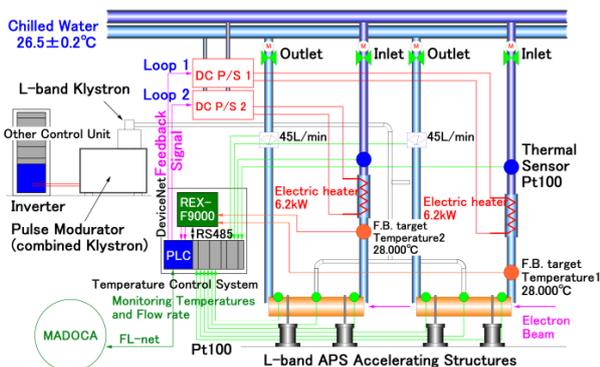
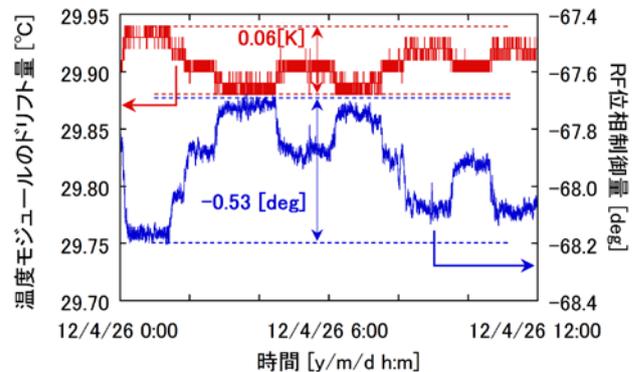


図 4：高度化した入射部精密温度調節装置の構成図 (L-band APS 加速管の例)

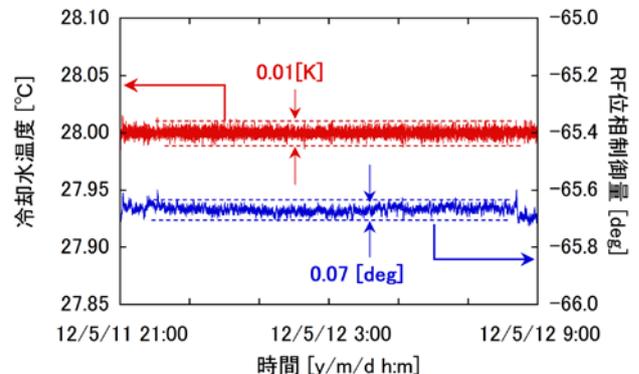
れる冷却水温度を高精度に保つことで加速管温度を安定化する。温度調節のための温度計測と PID 演算は先述の高分解能温度調節計より行う。演算結果を PLC で受信した後、DeviceNet 経由で直流電源へ出力する。加えて、直流電源の状態監視と操作を行う。装置制御は PLC で行い、上位制御系とは FL-net を介して接続し、データ収集及びアラーム監視を行う。

3. 性能評価

本システム導入に先立ち、入射部に高分解能温度調節計のみを導入して、その性能を評価した。図 5 に 238MHz SHB の結果の一例を示す。図 5(a)は、導入前の様子である。利用運転中に精密温度調節装置の温度モジュールの空きチャンネルに標準抵抗を取り付けて、ドリフト量を測定した。温度調節に使用する温度モジュール自身が有するドリフトにより、実際の RF 空洞の温度が変化する。これにより、RF 空洞の共振周波数はずれるが、低電力 RF フィードバックで補正される。この様子を図 5(a)は示している。位相制御量 -0.53deg と空洞位相の感度係数 -12.3deg/K から求めた温度変化量は約 0.043K に相当する。言い換えれば、PLC の温度指示値の変化 0.06K のうち、実際に温度変化した量は 0.043K と推測でき、その値は概ね一致する。図 5(b)は、導入後の様子である。温度調節計の指示値のドリフトが



(a) PLC による温度調節結果 (導入前)



(b) 高分解能温度調節計(REX-F9000, 理化工業)による温度調節結果 (導入後)

図 5：温度調節計の性能比較

PLC の温度モジュールと比べて小さいので、温度安定度は 0.01K (p-p)まで改善されている。この温度安定化に従って、RF 位相制御量が 0.53deg から 0.07deg 低減されている。

4. まとめ

従来の精密温度調節装置は 0.08K/day(p-p)の安定度を達成しているものの、温度モジュール自身を持つドリフトにより、温度安定度が不足していることが判明した。また、ヒータの ON-OFF 制御による周期と X 線レーザー強度に相関がみられたことから、入射部の精密温度調節装置は高分解能温度調節計と直流電源による連続レベル制御方式に変更する必要があることがわかった。試験的に高分解能温度調節計を導入した結果、加速空洞の温度安定度は 0.08K(p-p)から 0.01K(p-p)まで改善され、良好な結果が得られた。

本年 8 月には、直流電源を用いた精密温度調節装置を導入することで、入射部 RF 空洞の温度が安定化され、レーザー強度の安定化が期待できる。

参考文献

- [1] Y. Otake, “Commissioning and Performance of Instruments for XFEL/SPring-8 Accelerator ‘SACLA’”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2011).
- [2] S. Takahashi et al., “Precise Temperature Regulation System for C-band Accelerating Structure”, Proc. of APAC’04, Gyeongju, Korea.
- [3] T. Hasegawa et al., “Status of a Precise Temperature Regulation System for the C-band Accelerator at XFEL/SPring-8”, Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan.
- [4] T. Asaka, et al., “SACLA 加速器のビーム変動解析”, in these proceedings.