

SACLA のアンジュレータ・四極磁石駆動用モータ制御異常の原因調査と対策

MOTOR DRIVER TROUBLES IN THE SACLA UNDULATOR-HALL

松原伸一^{#, A)}, 糸賀俊朗^{A)}, 福井達^{B)}, 前坂比呂和^{B)}, 稲垣隆宏^{A, B)}
Shinichi Matsubara^{#, A)}, Toshiro Itoga^{A)}, Toru Fukui^{B)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Takahiro Inagaki^{A, B)}
A)^{A)}JASRI, B)^{B)}RIKEN SPring-8 Center

Abstract

SACLA has been operated for user experiments since 2012. In SACLA, about 200 motor drivers are used to drive stepping motors attached to undulators and movable stages of focus magnets for XFEL beamlines. Malfunctions of the motor drivers have occurred about five times by a year since about 2016. The failures were temporary, and recovered when the power was turned back on. We assumed the failures were caused by radiation effects on the control circuit. In order to confirm our assumption, we performed a radiation test for the motor drivers. We found similar failures with a radiation dose of about 130 Gy. Based on these results, we will add lead shields of 6 mm thickness for 19-inch racks, in which installed the motor drivers in the undulator-hall of SACLA. We estimate that the dose for the motor drivers will be reduced from 5 Gy/year to 0.5 Gy/year. In addition, we will install network AC-power-line rebooters in order to reboot the motor drivers remotely in case of the failures.

1. はじめに

X線自由電子レーザーSACLA[1]では2012年の供用開始以来、利用機会を増やすための高度化が続いている。ビーム繰り返しは当初の10 Hzから2016年までに60 Hzへ上げた。2014年には、2本目のX線XFELビームラインBL2が増設された。また、軟X線FELビームラインBL1に800 MeVの専用加速器SCSS+を設置して、SACLAとは独立した利用運転が2016年よりされている[2]。更に、2016年にキッカー電磁石を更新して、2017年より2本のビームラインBL2とBL3は、60Hzのビームをショット毎に振り分けて同時に利用している[3]。そして現在は、SACLAからSPring-8蓄積リングへのトップアップ入射がされている。

このようにSACLAの利用機会が増える中で、2016年頃から、ステップングモータを駆動するモータドライバが急に制御不能になる不具合が発生するようになった。現在の発生頻度は年間5回程度であるが、SACLAやSPring-8の安定運転を行ううえで大きな障害となっており、対策が求められている。

SACLAでは、このモータドライバを約200台使用して

いる。SACLAの配置とモータドライバの設置台数についてFig. 1に示す。故障したモータドライバの多くは、アンジュレータ収納ホールのビームライン制御のために使用されている。具体的には、約40台の真空封止型アンジュレータと、そのアンジュレータ間に設置された移相器と電子集束用四極磁石の位置を制御している。真空封止型アンジュレータの磁石列は、ステップングモータを用いて遠隔制御がされており、運転条件に応じて磁極間隔や高さを調整する。また、移動ステージに載せた四極磁石も、遠隔制御により磁場中心を電子ビーム軸に調整する。このステップングモータを制御するモータドライバの不具合が続いている。アンジュレータ収納ホール内で使用しているモータドライバの数は約150台である。

モータドライバが停止するとビームラインの調整が不能となり、SACLAの利用運転に支障を来す。本発表では、このモータドライバの不具合の状況と、調査、原因究明のための放射線照射試験、および現在計画されている対策について報告する。

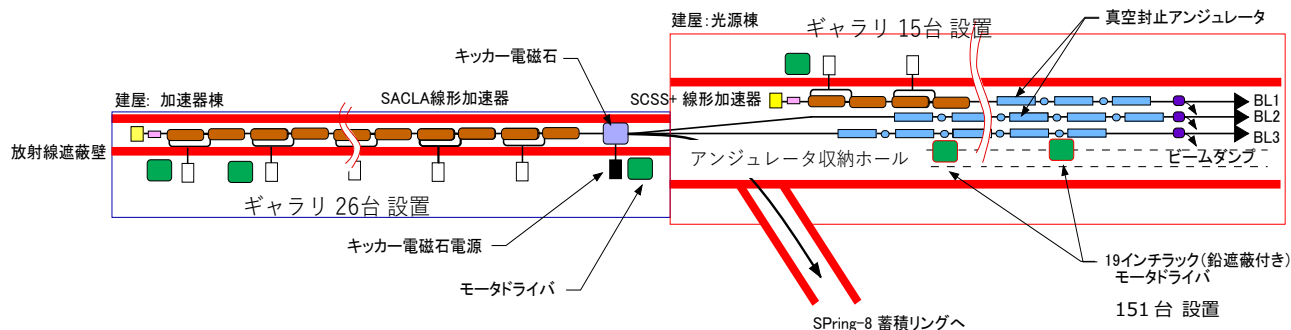


Figure 1: Layout of SACLA accelerator and location of motor drivers (green box).

2. モータドライバの構成と不具合状況

2.1 モータドライバの構成と設置状況

SACLA で使用するモータドライバは、レゾルバを備えたステッピングモータを制御駆動することができる。レゾルバによる絶対アドレス位置管理を行う。この絶対アドレス位置は、モータドライバの電源が切れる際にメモリに保存される。そして、電源再投入時に機械原点復帰することなく、位置情報を再現することができる。レゾルバ信号がアナログ信号であるため、制御ケーブル長に 10 m の制限がある。モータドライバはこの制限範囲内で設置し、上位制御系と繋がる PLC と DeviceNet で接続され、モータ駆動や位置、設定を制御・管理している[4]。SACLA で使用しているモータドライバのシステム構成を Fig. 2 に示す。

SACLA 線形加速器部では、モータ制御ケーブル長の制限以内で配線し、放射線遮蔽壁の外側にモータドライバを設置している。一方、アンジュレータ収納ホールでは、モータドライバは、遮蔽壁の内側に設置している。

アンジュレータ収納ホールでは 1 つの遮蔽ホール内に 5 本のビームラインを配置する計画がされており、現在までに 3 本のビームラインが造られている。アンジュレータ収納ホールの幅は 20 m あり、ビームライン機器の駆動に使用するステッピングモータから遮蔽壁の外側まで最短でも 10 m 以上離れている。このためビームライン部で使用するモータドライバは、前述したケーブル長の制限により、遮蔽壁の外側に設置することができない。従って、アンジュレータ収納ホール内ではモータドライバなどの制御機器は、ビームライン横に設置した 19 インチラック内に納めた。この 19 インチラックは側面板に厚さ 2 mm の鉛遮蔽を備えている。SACLA 建設時の見積りにより、モータドライバなどの制御機器への放射線ダメージによる故障をこの鉛遮蔽により抑えられると考えた。

2.2 モータドライバの不具合状況

SACLA で発生しているモータドライバの不具合は機器の完全な故障ではなく、電源の再投入による再起動により正常に復旧する一時的な不具合が大半である。モータドライバが停止した場合は、SACLA の FEL の調整に支障を来すため、必要に応じて、アンジュレータ収納ホールに入室して復旧作業を行っている。電源の再

投入により直ちに復旧しない場合は、モータドライバの交換を行っている。また、直ちに復旧しない場合でも、数日経つと正常になることがあり、原因の調査が困難であった。2020 年までに、このモータドライバの不具合は、26 回発生している。モータドライバの交換は 6 回行っており、その中で完全な故障は 2 回であった。

モータドライバ異常時に発生している具体的なエラー項目は以下である。DeviceNet 通信異常、本体パネル表示異常、ステッピングモータの脱調検出、レゾルバによる現在位置情報の突然変化である。そして、モータドライバの動作、制御が停止している。これらの症状は MPU (Micro-processing unit) の状態異常によるものと考えられる。

不具合が発生したモータドライバの殆どが、アンジュレータ収納ホール内に設置したものである。しかし、不具合が発生し始めた 2016 年に 1 台、放射線遮蔽壁外の個体でも同様な不具合が発生した。2016 年にキッカー電磁石・パルス電源を更新しており、パルス電源側に設置したモータドライバで不具合が発生した。モータドライバの電源再投入により不具合は一度解消されたが、同じ不具合が再発生した。また、アンジュレータ収納ホール内に設置された SCSS+ の運転時間が 2016 年には増えて環境ノイズが増えている。このため、モータドライバで発生している全ての不具合の原因をノイズによる影響だと考えた。

そこで、モータドライバのノイズ試験を行い、SACLA で発生している不具合が再現することを確認した。この試験で、アナログ信号のレゾルバ・ラインに大きなノイズが入るとモータドライバの動作が停止した。そして、電源の再投入による再起動により正常に復旧した。

以上の理由で、キッカー・パルス電源及び、モータドライバのノイズ対策を行った。モータドライバは、レゾルバ・ライン、電源ラインにフェライトコアを追加した。これにより、キッカー・パルス電源側でのモータドライバでの不具合はその後発生していない。しかし、モータドライバへのノイズ対策を行ったにも関わらず、アンジュレータ収納ホール内のモータドライバでは、同様な発生頻度で不具合が発生し続けている。

3. 不具合調査と対策

3.1 放射線照射試験

モータドライバのノイズ対策を実施してもアンジュレータ収納ホール内での不具合は改善されなかった。このため、アンジュレータ収納ホール内での不具合には、遮蔽壁の外で発生した不具合とは違う原因もあると考えられる。そこで、アンジュレータ収納ホール内での不具合は、放射線の影響を疑った。今回、モータドライバに対して⁶⁰Co によるγ線放射線照射試験[5]を行った。

6 台のモータドライバにおいて放射線照射試験を行った。放射線照射試験の結果を Table 1 に示す。放射線照射試験において、全てのモータドライバで MPU の状態異常が発生した。この MPU の状態異常は、SACLA で発生している不具合と酷似している。発生した MPU の状態異常は、モータドライバの通信、制御が行えない状態であり、再起動により状態異常は解消される。ただし、高線量の放射線ダメージにより、完全な故障が発生した箇

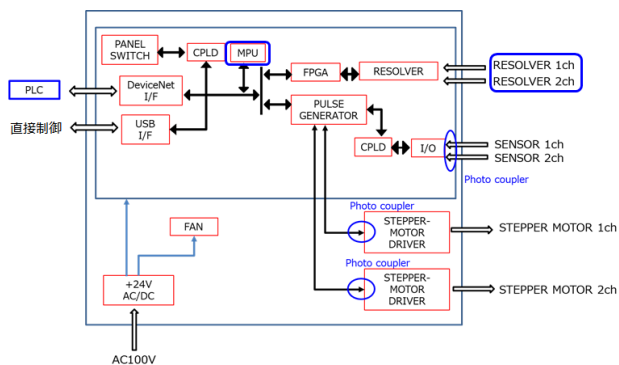


Figure 2: System configuration of the motor-drivers for SACLA.

Table 1: Result of Radiation Test of the Motor Drivers

	照射線量率	照射時間	積算線量	症状・状態
		分	Gy	
NO.1	1.5 kGy/h	4	100	パネル表示エラー ・ MPU の状態異常 ・ DeviceNet I/F 故障
NO.2	1.5 kGy/h	4	100	パネル表示エラー ・ MPU の状態異常 ・ DeviceNet I/F 故障
NO.3	130 Gy/h	54	117	パネル表示エラー ・ MPU の状態異常 → 直ぐの再起動後は、不安定な状態 → 1日後、正常に復旧
NO.4	130 Gy/h	48	104	MPU の状態異常 ・ STEPPER-MOTOR DRIVER 故障
NO.5	130 Gy/h	90 + α	237	MPU の状態異常 ・ FPGA故障
NO.6	130 Gy/h	40 + α	129	MPU の状態発生 → 再起動により正常に復旧した ・ 追加照射
		+ 5	139	MPU の状態発生 → 再起動により正常に復旧した
		平均	131	

所もあった。

今回の放射線試験では、MPU の状態異常について再起動により直ちに復旧されない個体もあった。放射線照射試験後、放射線の影響がない環境で再起動を行い正常に起動することを確認したが、正常と不具合が繰り返される不安定な状態があった。翌日、常に正常動作するように復旧していた。同様なことが、SACLA の不具合でも発生することがある。

放射線照射試験において、故障箇所が現れている個体もあるが、全ての試験で 130 Gy 程度の線量により MPU の状態異常が現れた。2020 年にアンジュレータ収納ホール内で放射線量を測定したところ、モータドライバが 1 年間で受ける放射線量は 5 Gy 程度であった。以上の条件から確率的にこの不具合が発生すると考えると、151 台のモータドライバを使用する場合、1 年間に 6 回程度の発生頻度が見積もられる。これは、実際の SACLA で発生している不具合の発生頻度と一致する。放射線照射試験で確認した不具合状況、放射線量から、SACLA で発生しているモータドライバの不具合は放射線による影響であると考えられる。また、SACLA の 3 ビームラインの利用が本格化した 2016 年頃と、モータドライバの不具合の発生時期が一致しており、この頃からアンジュレータ収納ホール内の放射線量が増えて、モータドライバの不具合が発生したと考えられる。

3.2 放射線対策

アンジュレータ収納ホール内のモータドライバを納めている 19 インチラックは、放射線を極力避けるため石架台に隠れる位置に配置するとともに、厚さ 2 mm の鉛遮蔽を備えている。しかしながら、これでは放射線の遮蔽が不十分であったと思われる。

そこで、19 インチラックの鉛遮蔽を増強する。既存の 2 mm 厚の鉛に加えて、6 mm 厚の鉛遮蔽を整備する。これにより、モータドライバが受ける放射線量を 1/10 の 0.5 Gy/年にできる見込みである。初期の鉛板は、19 インチラックの側面板に備えている。この側面板は取り外して作業することがあり、重量を考慮すると 2 mm 厚の鉛が適している。そのため、6 mm 厚の鉛は、19 インチラックに直

接固定することとした。

また、放射線試験でもあったように、放射線ダメージにより完全な故障が考えられる。19 インチラックに納めている他の制御機器でも、放射線ダメージが原因と考えられる故障が発生している。19 インチラックの放射線遮蔽を増強して、積算線量を抑えることにより、モータドライバや他の制御機器の寿命も延ばすことができる。総合的な不具合を少なくするために、放射線の遮蔽を増やすことは有効な手段である。そして、モータドライバの一時的な不具合の発生頻度は 1 年間に 1 回以下にできると考えている。

鉛遮蔽を増強しても、放射線を完全に遮蔽することはできない。そこで、モータドライバをネットワークにより遠隔再起動できるリブーター（明京電機社製：WATCH BOOT L-zero）を整備した。19 インチラックには、モータドライバ以外の制御機器も設置されている。そして、1 台の 19 インチラックに複数台のモータドライバが設置されている。このリブーターにより、他の制御機器とは独立して、複数のモータドライバを独立に制御室から再起動することができる。一時的な不具合が発生しても、SACLA の運転を続けながら所望のモータドライバを再起動し復旧ができる。

SACLA で発生しているモータドライバモータの不具合に対して、以上の対策を行っている。モータドライバの受ける放射線量を抑えることで不具合の発生頻度を少なくする。もし、不具合が発生した場合は、リブーターにより SACLA の運転を維持したまま復旧を行う。

4. まとめ

SACLA の利用機会が増えた 2016 年頃より、使用しているモータドライバの一時的な不具合が発生するようになった。2016 年に SACLA のキッカー電磁石が更新され、アンジュレータ収納ホール内に設置した BL1 専用線形加速器 SCSS+の運転時間が増えた。この一時的な不具合では、MPU の状態異常が発生している。はじめに、モータドライバの不具合原因をノイズによるものと考えて対策を行ったところ、キッカー・パルス電源近傍のモータドライバの不具合はなくなった。しかし、その後も年間 5 回程度の頻度でアンジュレータ収納ホール内に設置したモータドライバで一時的な不具合が続いている。

この不具合の原因が放射線によるものと考えて試験を行った。⁶⁰Co による放射線照射試験において、モータドライバの MPU の状態異常が再現することを確認した。MPU の状態異常は 130 Gy 程度の積算線量で発生した。アンジュレータ収納ホール内のモータドライバの受ける放射線量は約 5 Gy/年である。MPU の状態異常が放射線により確率的に発生すると、151 台のモータドライバにおいて年間 6 回程度の頻度と見積もられる。これは、現状の SACLA での不具合の発生頻度と同等である。

そこで、放射線による不具合の発生を抑制するため、モータドライバを納める 19 インチラックの鉛遮蔽を増強する。しかし、放射線量が多くなる場所によっては不具合が残る可能性があるため、不具合が発生した場合に備えて、ネットワークによる遠隔リブーターを整備した。不具合の発生を抑制し、発生時には直ちに対処する。これにより、利用機会が増える SACLA の運転を維持することが

できると考えている。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region”, *Nature Photonics* **6**, 540 (2012).
- [2] T. Inagaki *et al.*, “SACLA BL1 における軟 X 線 FEL の発振と調整の状況”, *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, Japan, pp. 286-290.
- [3] C. Kondo *et al.*, “A stable pulsed power supply for multi-beamline XFEL operations”, *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 064704 (2018).
- [4] K. Kurogi *et al.*, “SACLA-BL1 アンジュレータ制御システムの改修”, *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014, Japan, pp. 752-754.
- [5] <https://www.atox.co.jp/index.html>