

Linac および RCS におけるステッピングモータ制御系の標準化 STANDARDIZATION OF STEPPING MOTOR CONTROL SYSTEM IN J-PARC LINAC AND RCS

高橋博樹^{#, A)}, 澤邊祐希^{A)}, 鈴木康夫^{B)}, 鈴木隆洋^{C)}, 川瀬雅人^{C)}

Hiroki Takahashi^{#, A)}, Yuki Sawabe^{A)}, Yasuo Suzuki^{B)}, Takahiro Suzuki^{C)}, Masato Kawase^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Total Support Systems Co., Ltd.

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

J-PARC Linac and RCS Profile Monitor (Wire Scanner), RCS Collimator, etc. are devices consisting of moving parts (wire of profile monitor, absorber / scatterer of collimator) and driving part. In these devices, the movable portion is moved to an appropriate position by the driving portion, and the movable portion is brought into contact with the beam, thereby measuring the beam shape and reducing the beam loss. Therefore, in order to move the movable part to an appropriate position without damaging it, proper control of the stepping motor used for the driving part is important.

Many of the control system hardware of these drive units are used since the early days of J-PARC operation, and there is concern about malfunctions due to aging. In addition, since both VME and PLC are used as controllers, it is necessary to prepare spare parts of both control equipment in maintenance and management. Besides, the control logic differs depending on the kind of controller, VME or PLC. Therefore, maintainability of both hardware and software is an important issue. Then, we decided to proceed with updating the drive unit control system which standardized control system hardware and software. In this paper, the standardization of stepping motor control system in Linac and RCS is detailed.

1. はじめに

J-PARC Linac と RCS には、プロファイルモニタやコリメータなど、ステッピングモータを駆動系に使用した機器が複数ある。これらの制御器は J-PARC 稼働初期から使用されているものが多いため、経年化対策が必要となっている。さらに、ビームパワーの増強に伴い、放射線によると思われる制御系不具合の対策が重要と考えられ初めている。そして、RCS のコリメータにおいて、真空リークを伴う損傷が伴う不具合が発生した[1]。この原因は明確になっていないが、ステッピングモータ制御系の不具合が原因の一つと考えられている。これをきっかけとして、不具合が発生した場合においても機器の安全を確保する(機器を損傷させない)機能を有する、ステッピングモータ制御系の開発を開始した。

一方、ステッピングモータの既存制御器には VME と PLC が使用されているため、維持管理において両方の予備品を準備する必要がある。また、ソフトウェアにおいては、各機器の固有動作だけでなく、ほぼ同じである基本動作においてもロジックが大きく異なっている。このように、既存制御系においては、ハードウェアおよびソフトウェアの両方について、メンテナンス性に問題があった。

そこで、ステッピングモータ制御系の経年化対策と安全性の向上に合わせて、制御系の標準化(共通化)を進めることとした。本件では、標準化したステッピングモータ制御系について報告する。

2. 既存ステッピングモータ制御系

既存ステッピングモータ制御系において、制御器が VME の構成を Figure 1 に示す。VME はステッピングモータドライバおよび駆動部のリミットスイッチのみと接続している。ステッピングモータの電磁ブレーキとは接続しておらず、その ON/OFF 操作は未実装となっている。そのため、停電等によりモータドライバへの電源供給が停止した場合、コリメータの遮蔽体、プロファイルモニタのワイヤ部分など、機器の筐体がビームラインの中央方向に引き込まれるということが問題となっていた。

この様な VME を制御器とした RCS コリメータにおいて、2016 年春、ステッピングモータ制御系において遠隔制御が正常に行えないという不具合が発生した。この不具合は、動作やデータログから、制御器である VME CPU ボードの経年化が原因の一つと考えられた。しかしながら、RCS コリメータのステッピングモータ制御系を模擬したテストベンチを、この CPU ボードを使用して構成し

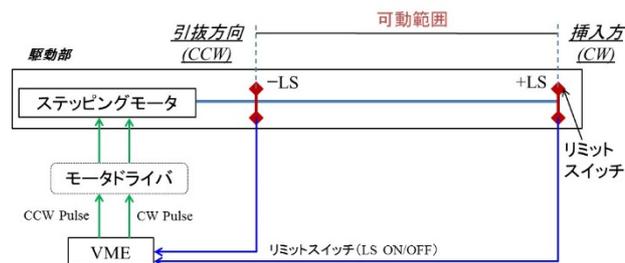


Figure 1: Configuration of existing stepping motor control system.

て再現試験を行ったが、不具合の発生は確認できなかった。これより、現時点では、経年化に加え、放射線（低エネルギーの中性子線）による半導体素子の異常（シングルイベント）により、VME 制御系の不具合が発生したのではないかと考えている。

3. 制御系ハードウェアの標準化

3.1 ハードウェア設計方針

J-PARC Linac と RCS におけるプロファイルモニタ等の、ステッピングモータによる駆動部を有する機器の不具合動作は、ビームロスを生じさせるものであり、避けることが必須である。

一方、制御器の不具合は、コンデンサーや半導体素子の経年化や、シングルイベントによる半導体素子の異常によるものと考えられる。このような半導体起因の不具合は、機器が停止するだけでなく、想定外の動作を生じさせる可能性がある。よって、その対策は非常に重要である。

そこで、想定外の動作が生じた場合においても安全を確保する（機器を損傷させない）機能を有する、ステッピングモータ制御系を開発することとした。そして、シングルイベントなどの放射線による誤動作を排除するため、半導体素子を使用しない、リレーなどを用いたハードウェアの安全機構と制御器を組み合わせた制御系を提案・設計し、開発を行った。

3.2 ハードウェア構成の標準化

まず、改良後のステッピングモータ制御系のキーとなる

- (i) 可動範囲両端のリミットスイッチにより、モータを停止させる駆動部停止機構

を開発した。停止機構は、半導体素子を使用しない回路構成とした。これにより、放射線による停止機構の誤動作を排除する。次に、制御器としては

- (ii) 信頼性の高い FA 仕様の PLC (Programmable Logic Controller、横河製 FA-M3)

を採用することとした。採用した PLC は、モジュール等に異常が発生した場合、Run 状態から Standby 状態（制御系としては停止状態）に移行させることが可能である。これにより、異常時はステッピングモータが動作しない状態

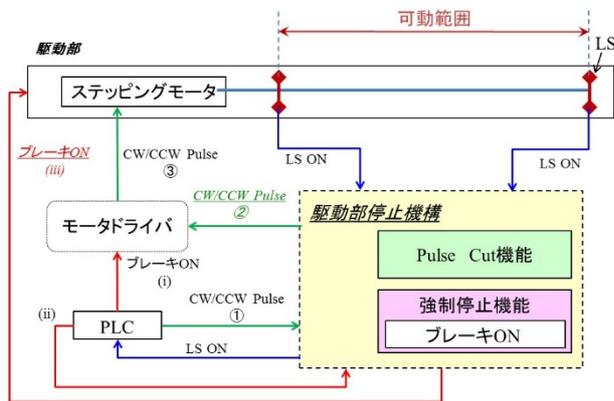


Figure 2: Configuration of standardized stepping motor control system.

になり、機器の安全が担保されることとなる。

この様に、(i) 駆動部停止機構と(ii) PLC を組み合わせることにより、放射線環境下においても安全性を損なわない制御系を構築した[2]。そして、Linac と RCS におけるステッピングモータ制御系の標準ハードウェア構成とした (Figure 2)。

4. 制御系ソフトウェアの標準化

4.1 ソフトウェア設計方針

Linac と RCS のプロファイルモニタ、コリメータ等において、動作を可動範囲内に制限するハードウェアはリミットスイッチ (LS) のみである。そのため、LS に不具合が生じた場合は、機器保護の機能が喪失することとなる。そのため、ソフトウェアのロジックに、安全機能を持たせることが重要である。

次に、既存の制御系ソフトウェアは機器により異なったロジックとなっているため、ソフトウェアとして多種のものが存在している。これが、維持管理を難しい（面倒な）ものとしている。そこで、各機器特有のものを除き、基本的な動作については共通化して、複数機器で使用可能とすることで、メンテナンス性を高める必要がある。

以上より、ソフトウェアの標準化においては、ソフトウェアに安全機能を実装するとともに、基本機能を共通化することとした。またソフトウェアの標準化（共通化）においては、駆動部停止機構との連係動作を十分に考慮した設計・開発を行うこととした。

4.2 ソフトウェアの標準化

設計方針に従い、

- (1) ソフトリミットの実装
- (2) 回転方向、リミットスイッチ、原点に関係した動作のパターン化
- (3) センターリミット対応

を標準化したソフトウェアに組み込むこととした。以下にそれぞれの詳細を示す。

(1) ソフトリミットの実装

Linac と RCS のプロファイルモニタなどにおいては、可動範囲の制限を示すリミットスイッチ (LS) として、一方向と+方向にそれぞれ+LS と-LLS が設置されている。LS に異常が生じた場合、モータが停止せず、モータの故障や機器の損傷を引き起こしかねない。そこで、PLC ソフトウェア内部に、(-LS と+LS 間)に仮想的可動範囲を定義するソフトリミット(-SLS、+SLS)を設定する (Figure 3)。ソフトリミットを実装することにより、実際操作のための可動制限 (-SLS、+SLS) と機器保護のための可動制限 (-LS、+LS) の、2 重の制限を有する安全性の高いシステムを実現した。

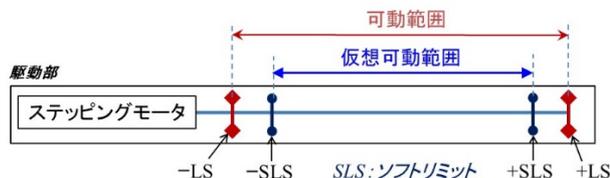


Figure 3: Virtual movement range and soft limits.

(2) 回転方向、リミットスイッチ、原点に関連した動作のパターン化

ステッピングモータの回転方向 (CCW, CW) と、リミットスイッチ (+方向: +LS, -方向: -LS)、および、上位ソフトウェアにて使用される各機器の原点 (0 点) の組合せを Figure 4 および Table 1 に示す。

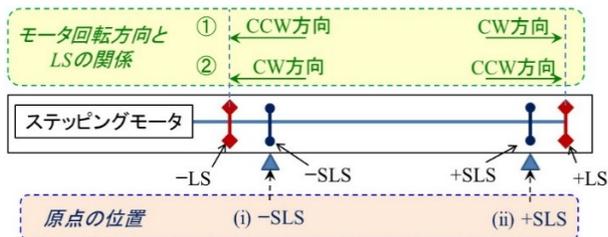


Figure 4: Relation of direction of rotation, limit switch and origin point.

Table 1: Patterns of Direction of Rotation, Limit Switch and Origin Point

パターン	回転方向と LS*		アプリケーションの原点 (0 点)
	CCW	CW	
A	-LS	+LS	-SLS
B	-LS	+LS	+SLS
C	+LS	-LS	-SLS
D	+LS	-LS	+SLS

*ステッピングモータが CCW (または CW) で回転し続けた際に、叩く LS (-LS または +LS) を示す

例えば、パターン A はモータが CCW 方向に回転することで、-SLS 方向に筐体 (ワイヤなど) が移動する動作であり、モータと LS の方向が一致している。また、上位アプリケーションにおける原点 (0 点) と制御系ソフトウェアの原点 (-SLS) が一致している。よって、アプリケーションにおける +方向は、実機 (ハードウェア) においては +SLS 方向 (CW 回転方向) となる。つまり、パターン A は、回転方向と LS および上位アプリケーションの原点の両方が一致している系である。この場合、アプリケーション上における移動先 α の設定に対して、モータは移動先 α となる動作を行う。

一方、パターン B は、回転方向と LS は一致しているが、上位アプリケーションとソフトウェアの原点が逆 (アプリケーションの原点 = +SLS) である。この場合、アプリケーションとモータが整合する動作 (位置) とするためには、アプリケーション上における移動先 α の設定に対して、「モータの移動先 $\beta = +SLS - \alpha$ 」という変換を行う必要がある。

C, D については回転方向と LS を一致させる変換も必要になることから、このような変換はより複雑になる。これらの変換を機器毎に PLC ソフトウェア (ラダー) に組み込むことは、ソフトウェアの種類を増やすことになり、以後のメンテナンスにおいてヒューマンエラー等による不具合発生の可能性を高めることとなる。そこで、4 種類のパ

ターンに対応した動作 (変換) ロジックを、予め PLC ソフトウェアに実装しておき、それらを選択することで各機器に対応して動作を行うこととした。ここで、各機器が A~D のどのパターンであるかは、前述した「駆動部停止機構」に設置した DipSW にて設定することとし、この設定情報を外部信号として PLC に認識させることにより、PLC ソフトウェアでのパターン設定を不要とした。このようにして、回転方向、LS、原点について実機 (ハードウェア) および上位アプリにおけるミスマッチを排除することが可能となった。

また、DipSW においてパターン選択としたことにより、回転方向、LS および原点の関係については、配線後に機器に合わせて設定することが可能となった。そのため、機器設置や制御系更新時の配線に際しては、ステッピングモータの動作にのみみ合致するように CW/CCW および -LS/+LS の接続をすれば良いこととなる。これは、配線時の回転方向と LS の関係の確認や再配線が、不要であることを意味する。実際、現在進めているステッピングモータ制御系の更新においては、これにより効率的に作業を進めることができています。

(3) センターリミット対応

Linac のプロファイルモニタにおいては、可動制限の LS だけでなく、可動範囲のほぼ中央にセンターリミット (CLS) を有するものがある (Figure 5)。CLS は共用運転時におけるプロファイルモニタの待機位置を示すものである。既存の制御系においては、CLS の有無を考慮しない動作となっており、CLS 前後で減速しないロジックである。そのため、筐体が LS に減速することなく当たり、それを繰り返すことで CLS が破損することが問題となっていた。そこで、CLS を保護するために、CLS 前後で減速させる機能を実装した (CLS 無の機器については減速しない動作となる)。CLS の有無は、パターン選択と同様に、「駆動部停止機構」の DipSW にて設定することとし、PLC ソフトウェアにおける設定は不要とした。

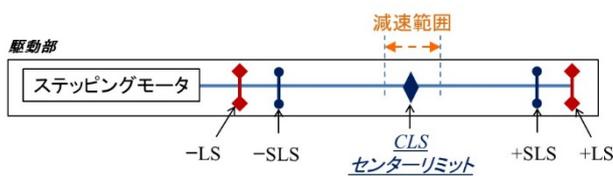


Figure 5: Position of center limit switch.

上述した(1)~(3)の他、初期化シーケンス等の基本動作も共通化し、全ての機器を同一のソフトウェアで動作させること (標準化) を実現した。

5. 標準化ステッピングモータ制御系の性能

5.1 安全性

現在、標準化した制御系は RCS コリメータ、Linac および RCS のプロファイルモニタ (6 軸 + 6 軸) に実装されている。大きな不具合は発生していないが、PLC のモーターコントロールモジュールの初期不良もしくはシングルイベントによると推測される異常が、計 2 回確認されている。何れの時も、PLC は Standby 状態に遷移し、異常発

生時に安全な状態を確保することが確認できた。また、標準化した制御系のプロファイルモニタにおいては、実装後(約 1 年)、センターリミットの破損は生じていない。このことから、機器保護の観点でも本件の制御系は有効であったと考えているが、さらに運用を続けて評価したいと考えている。

5.2 操作性

Linac ではビーム調整の際に、上位アプリケーションとステップモータ制御系が LAN 経由で通信し、プロファイルの計測を行う仕組みとなっている。既存の VME 制御系においては「上位計算機-VME (IOC 兼、制御器)」の通信のみであるが、標準化した制御系においては「上位計算機-VME (IOC) - PLC (制御器)」となっており、VME (IOC) と PLC 間の通信がさらに必要となっている。当初、この通信の最適化が行われていなかったために、既存システムでは 3 分で完了する計測に、3 分 30 秒かかっていた。そこで、PLC のスキャン周期や EPICS ドライバ動作周期の調整を行った結果、ほぼ同じ計測(3 分数秒程度)とすることができている。このように、標準化した制御系において、既存制御系と殆ど違いがない操作性(反応速度など)を実現している。

6. まとめ

Linac および RCS におけるステップモータを使用する機器(プロファイルモニタ、コリメータ等)の動作を調査し、制御系の標準化(共通化)を進めた。

標準化制御系のハードウェア構成として、駆動部停止機構と PLC を組み合わせた制御系を提案し、開発を行った。ソフトウェアについては、回転方向とリミットスイッチ(LS)の関連性、センターリミット(CLS)の有無など、機器による差違に対応可能とする設計、開発を行った。そして、全ての機器を同一のソフトウェアで動作させることに成功した。

本件の、標準化したステップモータ制御系は、既存制御系よりも安全性が高く、J-PARC のパワー増強において、その有効性がより明確になることが期待できる。今後は、より安全で安定した共用運転のために、Linac と RCS の既存ステップモータ制御系について、標準化制御系への更新を進めていく予定である。

参考文献

- [1] K. Okabe *et al.*, “A Failure Investigation of the Beam Collimator System in the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, 2017, pp 853-857.
- [2] H. Takahashi *et al.*, “Improvement of Motor Control System in J-PARC Linac and RCS”, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (Busan, Korea), 2018, pp 999-1003.