

J-PARC ハドロン実験施設の電磁石電源のための新制御システム

NEW CONTROL SYSTEM FOR THE MAGNET POWER SUPPLIES IN HADRON EXPERIMENTAL FACILITY AT J-PARC

里 嘉典[#], 青木 和也, 上利 恵三, 秋山 裕信, 家入 正治, 加藤 洋二, 倉崎 るり, 小松 雄哉,
澤田 真也, 白壁 義久, 高橋 仁, 田中 万博, 豊田 晃久, 広瀬 恵里奈, 皆川 道文,
武藤 史真, 森野 雄平, 山野井 豊, 渡辺 丈晃

Yoshinori Sato [#], Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Masaharu Ieiri, Yohji Kato,
Ruri Kurasaki, Yusuke Komatsu, Shin'ya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Hitoshi Takahashi,
Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Fumimasa Muto, Yuhei Morino,
Yutaka Yamanoi, and Hiroaki Watanabe

Institute for Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new control system for magnet power supplies has been developed for the new primary beam line in Hadron Experimental Facility at J-PARC. The new system is comprised of programmable logic controllers for logic signals, multi-channel scanners to measure output DC voltage and current, and digital-to-analog converters for analog signals to control output DC current of the power supplies. All signals can be remotely controlled via Ethernet in the framework on Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS). In the present article, hardware and software configurations of the new control system and future plans are reported in detail.

1. 概要

J-PARC ハドロン実験施設では、50 GeV 陽子シンクロトロン(MR)において最大 30 GeV まで加速された陽子を、遅い取り出し法によってリングから取り出し、輸送ビームライン(スイッチヤード)を経由してハドロン実験ホールに輸送し、様々な原子核・素粒子の実験的研究を行っている[1]。ハドロン実験ホールに輸送された陽子ビームは、二次粒子生成標的(T1)に照射され、T1 標的で発生した K 中間子等の二次ビームを中間子ビーム実験エリア(現在 K1.8BR、K1.8、及び KL の 3 箇所)に輸送し、実験に使用している。

2020 年 5 月から、スイッチヤードトンネル内に設置した Lambertson 電磁石によって 30 GeV 陽子ビームのごく一部(0.01 %以下)を分離してハドロン実験ホール南側に輸送し、30 GeV 陽子を直接物理実験に使用するための新たなビームライン(B ライン)が運用を開始した[2]。2021 年 6 月末時点において、T1 標的へ安定供給された陽子ビーム強度の実績は最大 30 GeV-65 kW (7.0×10^{13} 個 / 5.2 秒サイクル)であり、B ラインへ安定供給された陽子ビーム強度は最大 30 GeV-11 W (1.2×10^{10} 個 / 5.2 秒サイクル)であった。

スイッチヤード及びハドロン実験ホールには、一次陽子ビームライン、二次ビームラインを合わせて合計 108 台の電磁石が設置されており、電磁石を励磁するための高安定化直流電源 115 台を用いて各ビームラインの運転を行っている。Figure 1 に各ビームラインの場所と使用している電源の台数を示す。一次ビームライン及び二次ビームラインでは、実験の内容に応じて様々なビーム光学上の要請に応えるため、多種多様な定格の電源を使

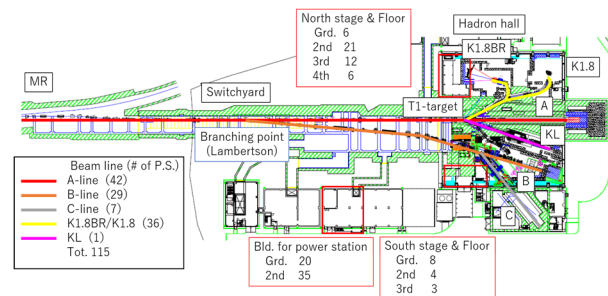


Figure 1: Schematic drawing of the beam lines in Hadron Experimental Facility.

用している。電源の出力については数 kW の小型電源から、500 kW 電源を 3 台ないし 4 台直並列接続し、定格 1MW を超える大型スペクトロメータ電磁石を駆動するなど、使い方も様々である。実験の要請によって新たに電磁石を追加・配置変更する場合や、ビーム運転中に電源が故障した場合の置き換え等にもある程度柔軟に対応できるように電源システムを構成している。これら多数の電磁石電源を遠隔で操作・運転し、また運転中の電源の状態を監視・記録するための電源制御システムは施設の安定な運転において非常に重要である。

ハドロン実験施設における電源制御システムは、KEK つくばキャンパスで 2005 年まで運用されていた 12 GeV 陽子シンクロトロン施設の一次・二次ビームラインで用いられていた制御システム(PSCX8)がベースとなっている[3]。Figure 2 に現行の電源制御システムの概略を示す。PSCX8 は、電源 8 台を 1 組として制御できるカスタム GP-IB コントローラ(STD/IEE961-BUS クレートに Z80-CPU、リレー入出力、アナログ入出力を内蔵)であり、複数台の

[#] yoshinori.sato@kek.jp

コントローラを GP-IB エクステンダでデジタイゼーション接続して、マスターコントローラとなる Windows-PC 上の Keysight-VEE を用いて作成されたソフトウェアで電源を統一的に制御する。

一方、J-PARC 加速器・ビームラインの制御で汎用的に使用されている制御ミドルウェア EPICS[4]の環境下でシームレスに制御するため、各電磁石電源のステータス (ON/OFF、REM/LOC、READY/FAULT、電流・電圧状態等)の一覧表を Windows-PC 上の MySQL データベースを用いて構築し、Linux 上から mysql クライアントを通じてデータベース上のテーブルを EPICS レコードに変換するソフトウェア[5]を使用している。

従来の電源制御システムは、2009 年のハドロン実験施設運転開始以来、長年安定して動作しているが、以下のような課題もある。

- 電源制御コントローラのハードウェアは経年のため、入手・製造が困難な部品がある。
- Windows-PC と商用ソフトウェアを使用しているため、OS 等がサポート対象外となった場合等にアップデート対応が必要となる。
- カスタム製コントローラのため、制御ロジックの追加・修正が難しい。
- 制御システムが直接 EPICS Channel Access (CA) に対応していないため、別途 Input-Output Controller (IOC) 用の Linux サーバを運用する必要がある。

著者らは B ラインを建設するにあたり、電磁石電源の制御については従来のシステムと互換性を備えた新しい制御システムを開発することとした。開発に当たり念頭に置いたのは以下の点である。

1. 既存の電源との I/O インターフェースを保つこと。
2. 各電源は、直接 EPICS/CA で制御できること。
3. ある程度長期間、汎用的に入手可能な機器から構成されていること。
4. ソフトウェアは可能な限り容易に理解できること。

Figure 3 に、新電源制御システムの概略を示す。電源コントローラが直接 EPICS/CA で制御できるようになると、GP-IB や Windows-PC は不要となり管理が容易になる。

2. 新制御システムのハードウェア構成

Figure 4 に、今回構築した B ライン用電磁石制御システムの構成を示す。ビームラインに設置された電磁石と電源は、低圧用電力ケーブルで接続されている。各電磁石には異常検知用のコイル温度スイッチ及び冷却水差圧スイッチが取り付けられており、電磁石インターロックボックス (Magnet ILC Box) を経由して電磁石インターロック制御箱 (MAG-Interlock I/F box) に接続される。各電磁石電源は、電磁石インターロック制御箱及び電源インターフェース制御箱 (PS-control I/F box) と接続される。

電磁石インターロック制御箱と電源インターフェース制御箱は、1 ユニットに 8 台分の電磁石または電源が接続可能であり、接点信号はプログラマブルコントローラ (PLC) のデジタル入出力モジュール (トランジスタ接点) に接続される。PLC に装着されたシーケンス CPU 内のラダープログラムによって、インターロック、電源の ON/OFF、電源の極性転極操作等の制御ロジックを構築している。

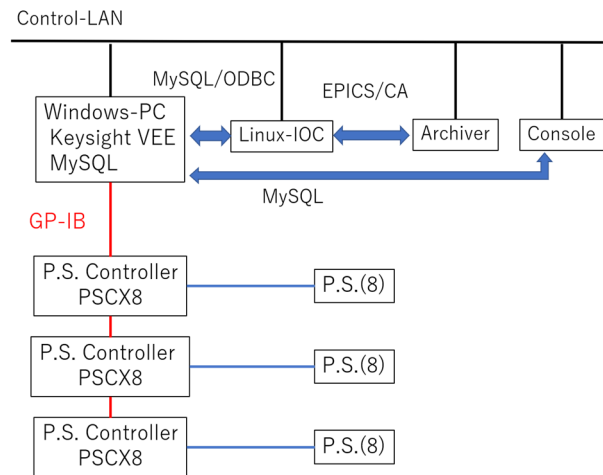


Figure 2: Schematic drawing of the current control system for magnet power supplies with GP-IB and customized controller (PSCX8).

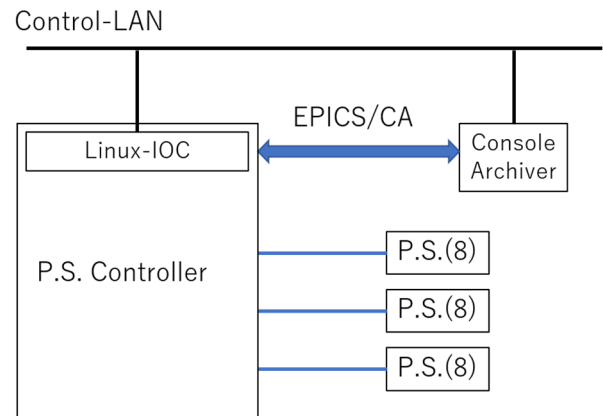


Figure 3: Schematic drawing of the new control system for the magnet power supplies in B-line.

Table 1 に電磁石インターロックボックス及び電源制御信号の信号リストを示す。

従来のシステムでは電磁石インターロック制御箱と電源が直接接続されており、複数台の電磁石または電源を組み合わせる場合には、ハードウェア的にリレー回路等を別途増設する作業が必要であった。新システムでは、PLC を用いることによって配線が接続されていればラダープログラム上で複数台の電磁石及び電源を制御するロジックを容易に構築・改変することが可能になっている。また、PLC に外部の接点信号を追加接続して、システムに接続している電源全数をシャットダウンする等、多数の電源全体に対して制御をかけることも容易に行える。なお、電源インターフェース制御箱だけを用いて既存の電源制御システムを置き換えることも可能である。

電磁石電源の出力電流及び出力電圧は、電源の仕様により、0~100%出力が 0~10 V に相当するアナログ信号を計測する必要がある。電源インターフェース制御箱からは、Fast と Slow の 2 系統のアナログ信号を分岐し

て出力し、Keysight 34980A マルチスキャナで計測する。Slow 用マルチスキャナでは、出力電圧及び電流値を精度よく計測するため、各チャンネルは 1 PLC (20 ms @ 50 Hz)の積分時間で A/D 変換され、制御用の GUI 等で現在状態の表示に用いられる。Fast 用マルチスキャナでは、各電源の出力電流信号をより高速(0.02 または 0.2 PLC)に A/D 変換し、電流値が瞬間的に変動して設定範囲を超えた場合にはマルチスキャナからインターロック信号を出力し、加速器からのビーム取り出しを停止する役目を担っている。

電源の出力電流の制御もアナログ 0~10V 信号で行う必要があるため、従来の STD-BUS クレートで使用されていた 16 ビット D/A コンバータの回路を VME 6U の基板上に移植した D/A ボードを新たに製作した。この VME D/A ボードは 4 ch のそれぞれ絶縁された 0~10 V の 16 bit アナログ電圧出力を持ち、VME-CPU から VME バスを通じて各チャンネルのアナログ信号出力を制御することが可能である。

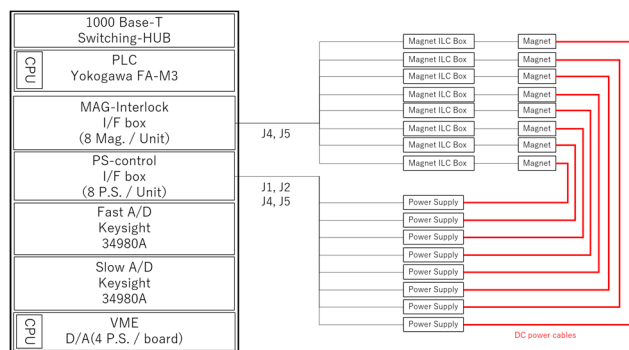


Figure 4: Schematic drawing of the new control system for the magnet power supplies in B-line. Red solid lines are the D.C. power cables for the magnets, and black solid lines are signal cables.

PLC、マルチスキャナ、VME-CPU は、Ethernet ケーブルで J-PARC 加速器制御ネットワークに接続されている。これら電源制御用のハードウェアは、EIA 規格の 19 インチラックに収納されている。Figure 5 に、システム実装後の写真を示す。Figure 5 では、ハドロン電源棟内の B ライン用電源 20 台からの信号ケーブルおよび制御システムが 1 台の 19 インチラック(幅 700 mm×高さ 2000 mm×



Figure 5: Photos of the new control system for B-line magnet power supplies.

奥行 900 mm)に収納されている。配線密度からは、1 つの 19 インチラックに概ね電源 20 台分の配線を収納するのが適切と考えられる。

Table 1: List of I/O Signals for Magnet Control System

Magnet ILC Signals (J4, J5)	AC100V	Power line
		Power line when DC-ON
	DI	Magnet Ready
		Temperature Ready
		Water pressure Ready
Analog signals (J1)	AI	DC current (0-10V)
		DC voltage (0-10V)
	AO	DC control (0-10V)
Digital signals (J2)	DO	Reset
		DC-ON
		DC-OFF
		Polarity change
	DI	Polarity
		DC Over current
		P.S. Fault
		Water leak
		Remote / Local
		P.S. Ready
		DC-ON
Magnet Ready		

3. 新制御システムのソフトウェア

新制御システムのソフトウェアは、EPICS を全面的に使用して構築している。PLC は横河電機製の FA-M3[6]を採用し、シーケンス CPU に隣接して Linux 対応 CPU モジュール(F3RP71-2L)を装着する。Linux 対応 CPU 上でオープンソース開発された EPICS デバイスドライバサポート[7]を組み込んだ EPICS IOC を走らせ、シーケンス CPU とのデータ通信、EPICS Channel Access による外部の IOC や GUI との通信、及び PLC モジュールの制御等を行っている。PLC 用の IOC では、主として接点入出力に対応した binary input / output record (bi/bo) を作成している。

VME クレータの D/A ボードを VME バス経由で制御するためには、VME クレータの Master スロットに CPU ボードを装着する必要がある。VME CPU ボードは、これまでハドロン実験施設のビームプロファイルモニタ等の制御で使用され実績のある V7768 (Abaco Systems) [8]を使用している。V7768 自体はストレージを搭載しない

Diskless システムとし、ネットワークブート(PXI)に対応するようにコンパイルした Linux カーネル(kernel-2.6.32)及びブートに必要な initramfs を TFTP 経由でサーバからダウンロードし、その後各 CPU ボード共通の rootfs (CentOS 6.10)環境を NFS マウントしてブートするように環境を構築した。CentOS 6.10 を選定した理由は、このディストリビューションが CentOS で i386 環境をサポートする最後のリリースとなっていることによる。各 VME ボードは Diskless のため、VME クレークの電源をいつでも遮断・投入でき、ファイルシステムに起因するハードウェア障害を低減できる。さらにファイルシステムを共通化することでソフトウェア環境の変更や更新を行う場合に作業がまとめることができる。VME D/A 変換ボードは、V7768 上の VME バス制御用の Universe II チップ及びソフトウェア BSP を用いて出力電流を制御するための analog output (ao)及び longout (lo)レコードのサポートソフトウェアを作成した。

Keysight 34980A マルチスキャナ[9]は LAN ポートに備え VXI-11 プロトコルに対応しており、EPICS からは AsynDriver [10]と StreamDevice [11]を使用して容易に制御することが可能である。各電源の出力電圧、出力電流に対応した analog input (ai)レコードを作成している。また、Keysight 34980A は外部アラーム出力可能な TTL 信号を最大 4 個定義でき、各チャンネルに上限及び下限のアラームを設定することが可能である。マルチスキャナで計測して常時更新される電流値が設定範囲を外れた場合には TTL アラーム信号を Low レベルとして、MR からの次ショットのビーム取り出しを停止するインターロック(MR Inhibit)に使用している。マルチスキャナを制御するための IOC は、VME CPU 上で動作させている。

各電源の入出力信号に相当する基本的な bi/bo レコード及び ai/ao レコードを用いて、電源の ON/OFF 操作、電流値の ramp up/down、及び転極といった操作を実現するため、EPICS sequencer [12]を用いた状態遷移プログラムを作成した。Figure 6 に電源制御のための状態遷移図を示す。電源の状態を大きく「Not ready」「Ready」「DC OFF」「DC ON」「Ramping」「Operating」「Change polarity」等の状態を State Notation Language (SNL)で定義し、遠隔操作の GUI 等から運転電流値が設定されると電源のリセット、立ち上げ、運転電流までのランプ動作、また設定値によって転極が必要な場合は自動的に転極操作を行って運転電流まで立ち上げる自動制御を実現している。EPICS sequencer プログラムは、転極器の有無により 2 種類用意し、転極器が取り付けられている電源(一次ビームラインのステアリング電磁石用電源及び二次ビームライン用電源の大部分)では、転極操作の状態遷移シーケンスが追加されている。実装上は、各電源に1つの EPICS sequencer プログラムを VME CPU の Linux-I/O 上で複数走らせている。

ハドロン実験施設の運転全体を管理する運転管理室や、各ビームラインの実験データを収集する制御棟においては、ビームライン電磁石の状態が一覧となっており、また電磁石の運転電流を変更できる GUI を使用している。Figure 7 に GUI 画面の一例を示す。この GUI は python-tkinter を用いて作成されており、既存の電源制御システムと新しく構築した EPICS ベースのシステムが

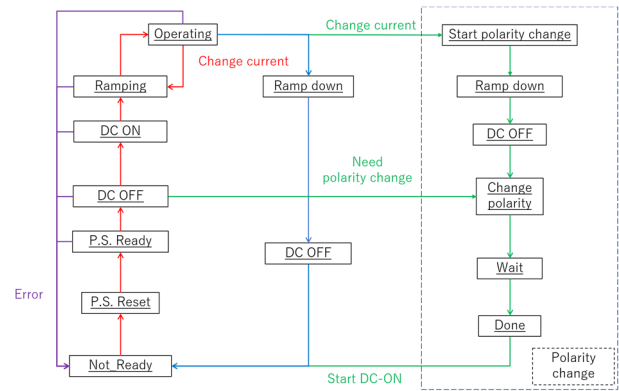


Figure 6: Diagram of transitions of states to control magnet power supplies with EPICS Sequencer.

MAGNET STATUS [hadron-B]													
name	setd	min	max	cset	dac	cmom	vmom	pol	ON	Ready	Remote	time	
SM1	1453.0	0.0	1530.0	1453.0	1453.0	1454.4	81.7	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
SM2	3846.0	0.0	4040.0	3846.0	3846.0	3839.3	61.8	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
SM3	4129.0	0.0	4340.0	4129.0	4129.0	4108.1	100.1	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q23	528.0	0.0	560.0	528.0	528.0	528.1	26.3	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
v21	457.0	-500.0	500.0	457.0	457.0	457.1	18.7	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q24	276.0	0.0	300.0	276.0	276.0	276.2	17.4	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h22	1301.0	0.0	1400.0	1301.0	1301.0	1301.3	109.2	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q25	790.0	0.0	900.0	790.0	790.0	790.0	33.3	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q26	1062.0	0.0	1300.0	1062.0	1062.0	1062.2	44.1	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
v23	2225.0	0.0	2300.0	2225.0	2225.0	2224.4	95.7	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h24	1359.0	0.0	1500.0	1359.0	1359.0	1358.7	104.8	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q27	1105.0	0.0	1200.0	1105.0	1105.0	1106.8	47.9	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q28	792.0	0.0	900.0	792.0	792.0	792.2	33.0	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h25-27	2245.0	0.0	2450.0	2245.0	2245.0	2253.1	143.4	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q2A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	+	OFF	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q2B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	-0.0	+	OFF	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h28	2246.0	0.0	2400.0	2246.0	2246.0	2243.3	93.3	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h29	2249.0	0.0	2400.0	2249.0	2249.0	2248.3	101.1	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q2C	214.0	0.0	300.0	214.0	214.0	214.2	8.5	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h2A	1542.0	0.0	1700.0	1542.0	1542.0	1542.8	103.5	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
h2B	909.0	-1300.0	1300.0	909.0	909.0	909.6	53.9	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q2E	926.0	0.0	1000.0	926.0	926.0	926.2	58.9	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
v2C	54.0	-180.0	180.0	54.0	54.0	54.2	8.5	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
q2F	1136.0	0.0	1200.0	1136.0	1136.0	1136.5	79.7	+	ON	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	
FM	0.0	-2450.0	2450.0	0.0	0.0	25.7	1.2	+	OFF	Ready	Remote	2021-06-01 17:58:00	

Figure 7: Graphical User Interface for the magnet power supplies in B-line.

混在している環境でも、1つのソフトウェアで全てのビームラインを統一的に制御できるようになっている。また、電源担当者が調査を行う場合等に簡易的に使用できるコマンドインタープリタ(python Cmd ライブラリ使用)も作成した。ハドロン運転管理室では、EPICS レコード化された各電磁石電流の運転中の推移を監視するため、Striptool を用いて 3 時間トレンド、3 日間トレンド等を表示している。電源の状態や出力電圧・電流値等は、EPICS Archiver Appliance[13] で記録される。

2020 年 5 月末に B ラインへ 30 GeV 陽子ビームを初めて輸送し、ビーム調整を開始した。6 月 22 日付けで原子力安全技術センターによる施設検査に合格し、利用運転を開始した。その後、2021 年の 2 月と 6 月にもビーム運転を行い、新しい制御システムは安定に動作し目立った不具合は見られなかった。

4. まとめと今後の計画

B ラインの電磁石電源制御システムを新しく構築し、実際のビーム運転で良好に動作することがわかったので、今後は従来の制御システムで運用されている A ラインや

二次ビームラインの電源制御システムを順次置き換えていくことを計画している。

また、新システムでは VME-CPU ボードと PLC の Linux-CPU ボードを用いて VME D/A ボードの制御を行っているが、VME CPU ボードの代わりに BeeBeans 社の VME-GbE ボード[14]によって TCP ソケット通信で VME バスを制御することができれば、VME CPU ボードをなくして PLC の Linux-CPU だけで全ての電源制御を行える。これによって VME バスを制御するためのソフトウェアライブラリへの依存をなくすることができるので、さらにシステムがシンプルになり管理が容易になる。今後、処理性能等の評価を行っていく。

参考文献

- [1] K. Agari *et al.*, “Primary proton beam line at the J-PARC hadron experimental facility”, Prog. Theor. Phys. 2012, 02B008.
- [2] Y. Komatsu *et al.*, “Beam commissioning of new primary proton beam line at J-PARC Hadron Experimental Facility”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 485-489.
- [3] Y. Suzuki *et al.*, “The neutrino beam line control system”, Proceedings of ICALEPCS 1999, the 7th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, Italy, Oct. 4-8, pp. 182-184.
- [4] <https://epics.anl.gov/>
- [5] <http://www-online.kek.jp/~nakayosi/JPARC/sqlrep.html>
- [6] <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-platforms/control-system/programmable-logic-controller/>
- [7] <https://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [8] <https://www.abaco.com/products/v7768-vme-sbc>
- [9] <https://www.keysight.com/jp/ja/products/modular/data-acquisition-daq/digital-acquisition-benchtop-system/34980a-multifunction-switch-measure-mainframe-and-modules.html>
- [10] <https://epics.anl.gov/modules/soft/asyn/>
- [11] <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>
- [12] <https://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/>
- [13] https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/
- [14] <https://www.bbtech.co.jp/products/vme-gbe/>