

KEK 電子陽電子入射器の安全系システム

KEK e-/e+ INJECTOR LINAC SAFETY SYSTEM

佐藤政則^{#, A, B)}, 佐武いつか^{A)}, 白川明広^{A)}, 久積 啓一^{C)}

Masanori Satoh^{#, A, B)}, Itsuka Satake^{A)}, Akihiro Shirakawa^{A)}, Keiichi Hisazumi^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Organization (KEK), Accelerator Laboratory

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Accelerator Science Program

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

Abstract

In the KEK e-/e+ injector LINAC, the simultaneous top-up injection to four independent rings has been successfully conducted since May 2019. For the long-term stable beam operation under such complex operational scheme, the high availability of control system is very important. The reliable safety system is also important to prevent the personnel radiation accidents and protect the machine components. In the KEK LINAC, the control system has been developed with EPICS framework widely used in the accelerator science community. However, the safety system was originally developed without EPICS framework. To enhance the compatibility between the control system and the safety system, EPICS IOC of the safety system was developed with the netDev device support. Furthermore, it is possible to quickly identify the causes of invalid LINAC operational conditions by using a newly developed beam operation logic status GUI. In this paper, we report the recent improvement of the KEK LINAC safety system in detail.

1. はじめに

KEK の電子陽電子入射器(入射器)は 1982 年に PF リング専用入射器として稼働を始め、その後、TRISTAN、PF-AR、KEKB などの異なるエネルギーのリングへ電子・陽電子ビームを供給してきた。当初、各リングへのビーム入射は、定時刻入射に基づくタイムシェアリング方式が採用されていた。しかしながら、第 3 世代放射光源で一般化しつつあったトップアップ入射の要望が PF ユーザーから高まり、また、積分ルミノシティ向上のため KEKB リングからもトップアップ入射の要求が強くなっていった。このような状況を鑑みて、2004 年に全リング同時トップアップを目指したプロジェクトチームを立ち上げ、2009 年 4 月に、KEKB 電子・陽電子・PF リングへの 3 リング同時トップアップ入射を実現した。その後、2012 年に PF-AR 専用入射路を建設した後、2019 年 5 月、SuperKEKB 電子・陽電子・PF リング、および PF-AR への 4 リング同時トップアップ入射を実現した[1]。現在、最大 50 Hz で生成される入射器の電子・陽電子ビームは、あらかじめ設定したパターンに基づいて任意のリングへ入射することができる。

同時トップアップ入射を実現するため、イベントタイミングシステム[2]、レーザー光陰極低エミッタンス RF 電子銃[3]、陽電子捕獲用フラックスコンセントレータ[4]、高精度ビーム位置モニタ[5]、パルス電磁石システム[6, 7]などが開発、導入されてきた。現在、放射光源および SuperKEKB リングへの入射効率向上のため、種々の改造を進めている[8]。入射器のビーム運転が複雑化すると共に、ビーム制御システムの高度化も進められてきた。このような複雑化した運転形態のもと、入射器および下流リングの人的、機器的安全性を担保するためには、安全系システムの堅牢性がますます重要性を帯びてくる。安全系システムは制御システムとは独立に構築されてい

るが、ビーム運転条件のロジックが複雑化するにともない、ビーム運転条件が不成立になった場合、その原因を即座に同定し、解決することが下流リングの運転可用性向上のために重要である。このため、入射器では、安全系システムと制御システムの親和性を高め、制御システムの枠組みの中から安全系システムの情報を読み出すことを可能としている。これと平行して、老朽化した機器の更新や利便性を高めるための改善をおこなっている。

2. 入射器安全系システム

一般的に、加速器の安全系システムは、人的保護を目的とする Personnel Protection System (PPS)と機器保護を目的とする Machine Protection System (MPS) に大別される。電子および陽電子ビームを加速する入射器運転において、放射線発生装置である加速器本体が設置されたトンネル内では、人体への被ばく許容量を超える放射線が発生する。そのため、入射器運転の必要条件は PPS の条件が確立することであり、これにより人的安全が保証されている。

人的安全が保障され、入射器運転が可能となった状態を「LINAC READY」状態と呼んでいる。これは、入射器のみならず、下流の全てのリングの PPS 条件が入射器

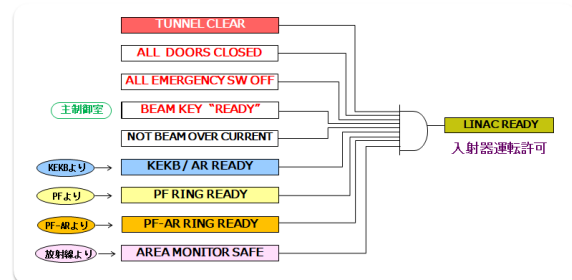


Figure 1: Block diagram of LINAC safety system interlock signal logic.

[#] masanori.satoh@kek.jp

運転を許可する状態を表している。

Figure 1 に、入射器運転のための安全系インタロック信号論理を示した。入射器内の PPS 条件として、下記条件の成立が必要となる。

- 加速器トンネル内が無入である。
- インタロックにかかわる全ての扉が閉じている。
- 緊急停止スイッチが押されていない。
- 安全系制御卓にあるビームキーが「READY」状態になっている。
- ビーム電荷量の積算値が制限値を超えていない。

これらの条件が成立しつつ、全下流リングからの「READY」信号が配信されている、さらに放射線モニタが非発報状態である、という条件が全て成立した状態で初めて入射器運転が可能になる。

安全系に関する実信号の送受信およびロジック判断には、Programmable Logic Controller (PLC) を用いている。PLC はリレー回路の代替装置として開発された制御装置であり、シーケンサとも呼ばれている。リレー回路を使用するよりも柔軟なロジック変更が可能であり、入射器では真空システム、電磁石システムなど他のサブシステムの制御にも使用してきた。

入射器の安全系システムでは、YOKOGAWA のラダーPLC を使用しており、入射器主制御室にメイン PLC として 1 台、ABC 副制御室にサブ PLC として 2 台、合計 3 台の PLC を用いてシステムを構築している。これらの PLC には、約 300 点の安全系信号が入力されている。これらの信号は前述したとおり、下流リングからの READY 状態、建屋や高電圧電源筐体のドア開閉状態、非常停止信号発報などの条件成立の可否を表している。これらの信号は PLC の DIO モジュールで読み出され、安全系ロジック処理が施された後、約 200 点の信号として出力される。出力された信号は、トリガ許可信号や高圧電源出力許可信号などとして使用されている。3 台ある PLC 間の情報伝達は、DC 24 V の接点信号を用いておこなっている。

上述した 3 台の PLC 以外に、通信専用 PLC が 2 台運用されており、制御ネットワーク上の計算機に安全系システムの情報を送るためのゲートウェイとして使用している。制御ネットワークに障害が起きた場合、安全系システムには影響が及ばぬよう、制御ネットワーク上の計算機からは PLC 情報の読み出しのみを許可している。Figure 2 に安全系 PLC、制御ネットワークの接続図を示

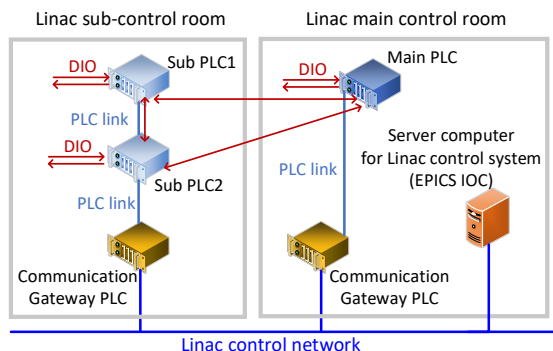


Figure 2: Block diagram of LINAC safety system using PLC and LINAC control network.

す。

Figure 3 は、安全系システムのインタロック状態表示 GUI を示している。本 GUI は、当初 Microsoft Visual Basic 6.0 で開発されたが、その後、サポート期限切れの問題から Visual Basic .NET に移植して運用している。安全系 PLC の状態を通信専用 PLC から読み出し、各リングの READY 信号の有無や PPS に組み込まれているドアの開閉状態を一瞥することができる。全ての状態表示が緑色表示であれば入射器の運転が可能となる。PPS の条件不足で入射器の運転が開始できない場合は、本 GUI 上で赤色表示の項目を確認することにより、運転条件を満たしていない原因を迅速に特定することができる。

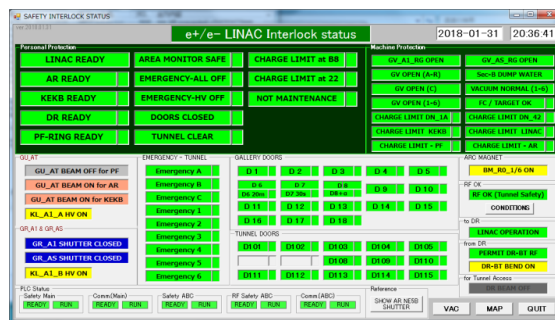


Figure 3: Interlock status GUI of LINAC safety system developed with Microsoft Visual Basic .NET.

3. 入射器安全系システムの更新

3.1 個人鍵システムの更新

入射器では、トンネル内入室前に個人鍵を抜き、携帯することにより入室が可能になる。トンネル内からの退室時に個人鍵を返却し、個人鍵システムの全鍵が返却されている条件下においてのみ、入射器の運転を開始することが可能となる。Figure 4 に個人鍵システムの写真を示す。本個人鍵システムは、入射器建設当初より運用が開始され、約 20 年前に大規模な改造をおこなった。この改造では、個人鍵の個数を 50 個まで増やし、レイアウトの

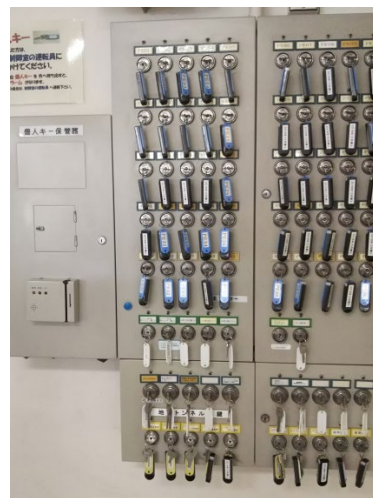


Figure 4: Photograph of exterior view of personnel key system.

変更をおこなったが、基盤システムはそのまま流用している。そのため、内部の制御基盤や鍵シリンダ背後にあるリミットスイッチなど基盤部品の経年劣化が深刻な状態にある。個人鍵システムの障害が発生すると、鍵が抜けなくなりトンネル内に入室できない、あるいは入射器を運転状態に移行できなくなる可能性がある。そのため、個人鍵システムの更新は急務である。

しかしながら、システムの完全刷新には多額の費用が必要になるため、現在のシステムを流用しつつ、重要な基盤部品のみ更新することにした。Figure 5 に、現在使用している個人鍵システム内にある制御ボードの写真を示した。写真にあるとおり非常に古い専用制御ボードを使い続けており、同等品の入手は不可能である。そのため、本制御ボードの機能を PLC に置き換えることを検討しており、2024 年夏期保守期間中に実施する予定である。



Figure 5: Photograph of personnel key system control board.

3.2 入射器制御システムとの親和性向上

入射器の制御システムは、全面的に EPICS フレームワーク使用して構築している[9]。各機器の制御に使用している EPICS IOC を始めとして、CSS アラームやアーカイバなどを基盤とした統括的な運用をおこなっている。従来の入射器安全系システムは、制御システムとは独立したラダーPLC、I/O モジュール、および機械式リレーなどから構成され、状態表示用 GUI や状態遷移記録などのシステムも独立に開発、維持されてきた。制御システムとの親和性を高め、データアーカイバやアラームなどの仕組みを共通化することによる保守性の向上を目的として、安全系システムの情報を EPICS PV として読み出すための実装をおこなった。安全系システムには YOKOGAWA のラダーPLC が使用されているため、EPICS IOC の構築には、すでに入射器制御システムでも広く利用されている EPICS デバイスサポートである netDev を使用した[10]。EPICS PV 化された信号点数は約 1200 にのぼり、すべてアーカイバに記録されている。安全系システム用 EPICS IOC は、制御システム用 EPICS IOC と同じく、Fig. 2 にある制御システム用計算機サーバ上で動作させている。

Figure 6 に、入射器ビーム運転条件成立のための論理図および各信号の状態を示す GUI を示す。本 GUI には、熱電子銃からビームを出力するために必要な信号の状態および論理図が示されている。本 GUI を使用することにより、ビーム運転が開始できない場合に、どの運転必要条件が不成立であるかを迅速に特定することが可能となる。同様の GUI が、RF 電子銃運転用、主タイミングステーション運転用にも準備されている。これらの GUI を用いることにより、長期保守後の立ち上げ時、迅速にビーム運転を開始することができるようになった。

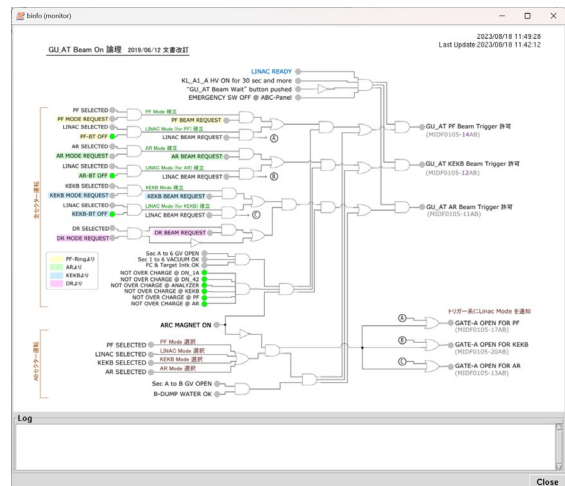


Figure 6: Example of LINAC beam operation logic status GUI developed with Python.

3.3 鍵の貸し出し管理

入射器では、個人鍵システム以外に搬入口扉やクレーン電源盤用のものなど、約 100 個の鍵を壁掛け型の鍵収納箱にて管理している。従来、鍵の貸し借りにかする記録はノートに記入することで管理してきた。しかしながら、煩雑な名称の鍵が多い、貸出履歴にある鍵は高頻度で貸し出されているものが多い、などの理由から鍵管理記録の電子化をおこない、運用の効率化を図った。具体的には、鍵のタグに貼付された QR コードをタブレットなどで読み込み、その後表示される Fig. 7 のような鍵管理用 Web ページに必要事項を記入する。本システムにより、特に夏期保守期間中などの長期保守期間中に見られる頻繁な鍵の貸し出し、返却に対応する手間が大幅に削減できた。

貸出中の鍵リスト	返却済みの履歴																																																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>名称</th> <th>貸し出し日時</th> <th>戻却日時</th> <th>使用費</th> <th>対応者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>電子錠入口</td> <td>2023/09/15 16:06</td> <td>test01 test02</td> <td></td> <td>test02</td> </tr> <tr> <td>97</td> <td>運転/保守用 - F 運転用</td> <td>2023/06/20 08:50</td> <td>白川 白川</td> <td></td> <td>白川</td> </tr> </tbody> </table>	番号	名称	貸し出し日時	戻却日時	使用費	対応者	2	電子錠入口	2023/09/15 16:06	test01 test02		test02	97	運転/保守用 - F 運転用	2023/06/20 08:50	白川 白川		白川	<table border="1"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>名称</th> <th>貸し出し日時</th> <th>戻却日時</th> <th>使用費</th> <th>対応者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>電子錠入口</td> <td>09/15 16:06</td> <td></td> <td>test01</td> <td>test02</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>電子錠入口</td> <td>09/15 15:53</td> <td>09/15 15:59</td> <td>test01</td> <td>test02</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>電子錠入口</td> <td>09/15 15:08</td> <td>09/15 15:33</td> <td>MELSC</td> <td>豊野 志保</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>電子錠入口</td> <td>09/15 14:35</td> <td>09/15 15:07</td> <td>test01</td> <td>test02</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>AI 地上線 - 電子錠 (F) 1 番</td> <td>09/04 07:33</td> <td>09/04 17:35</td> <td>MSC 木村</td> <td>久藤 一博</td> </tr> <tr> <td>91</td> <td>カニクレーン 鍵</td> <td>09/14 08:40</td> <td>09/14 10:41</td> <td>三菱電 木村</td> <td>木村 謙一</td> </tr> <tr> <td>47</td> <td>トンネルクレーン 電源盤</td> <td>09/12 08:25</td> <td>09/12 16:25</td> <td>三菱電 木村</td> <td>木村 謙一</td> </tr> <tr> <td>91</td> <td>カニクレーン 鍵</td> <td>09/11 08:41</td> <td>09/11 17:08</td> <td>三菱電 木村</td> <td>三菱電 木村</td> </tr> <tr> <td>47</td> <td>トンネルクレーン 電源盤</td> <td>09/11 08:40</td> <td>09/11 17:09</td> <td>三菱電 木村</td> <td>三菱電 木村</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>第 5 セクター 搬入口 (D17)</td> <td>09/11 08:40</td> <td>09/11 10:18</td> <td>カニ工業</td> <td>木村 謙一</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>ALL LINAC SAFETY KEY</td> <td>09/08 14:44</td> <td>09/08 17:05</td> <td>白川 白川</td> <td>白川 隆之</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>第 5 セクター 搬入口 (D17)</td> <td>09/08 08:40</td> <td>09/08 14:46</td> <td>カニ工業 吉守</td> <td>藤原 誠之</td> </tr> <tr> <td>47</td> <td>トンネルクレーン 電源盤</td> <td>09/08 08:34</td> <td>09/08 14:54</td> <td>三菱電 木村</td> <td>三菱電 木村</td> </tr> </tbody> </table>	番号	名称	貸し出し日時	戻却日時	使用費	対応者	2	電子錠入口	09/15 16:06		test01	test02	2	電子錠入口	09/15 15:53	09/15 15:59	test01	test02	2	電子錠入口	09/15 15:08	09/15 15:33	MELSC	豊野 志保	2	電子錠入口	09/15 14:35	09/15 15:07	test01	test02	26	AI 地上線 - 電子錠 (F) 1 番	09/04 07:33	09/04 17:35	MSC 木村	久藤 一博	91	カニクレーン 鍵	09/14 08:40	09/14 10:41	三菱電 木村	木村 謙一	47	トンネルクレーン 電源盤	09/12 08:25	09/12 16:25	三菱電 木村	木村 謙一	91	カニクレーン 鍵	09/11 08:41	09/11 17:08	三菱電 木村	三菱電 木村	47	トンネルクレーン 電源盤	09/11 08:40	09/11 17:09	三菱電 木村	三菱電 木村	35	第 5 セクター 搬入口 (D17)	09/11 08:40	09/11 10:18	カニ工業	木村 謙一	6	ALL LINAC SAFETY KEY	09/08 14:44	09/08 17:05	白川 白川	白川 隆之	35	第 5 セクター 搬入口 (D17)	09/08 08:40	09/08 14:46	カニ工業 吉守	藤原 誠之	47	トンネルクレーン 電源盤	09/08 08:34	09/08 14:54	三菱電 木村	三菱電 木村
番号	名称	貸し出し日時	戻却日時	使用費	対応者																																																																																																		
2	電子錠入口	2023/09/15 16:06	test01 test02		test02																																																																																																		
97	運転/保守用 - F 運転用	2023/06/20 08:50	白川 白川		白川																																																																																																		
番号	名称	貸し出し日時	戻却日時	使用費	対応者																																																																																																		
2	電子錠入口	09/15 16:06		test01	test02																																																																																																		
2	電子錠入口	09/15 15:53	09/15 15:59	test01	test02																																																																																																		
2	電子錠入口	09/15 15:08	09/15 15:33	MELSC	豊野 志保																																																																																																		
2	電子錠入口	09/15 14:35	09/15 15:07	test01	test02																																																																																																		
26	AI 地上線 - 電子錠 (F) 1 番	09/04 07:33	09/04 17:35	MSC 木村	久藤 一博																																																																																																		
91	カニクレーン 鍵	09/14 08:40	09/14 10:41	三菱電 木村	木村 謙一																																																																																																		
47	トンネルクレーン 電源盤	09/12 08:25	09/12 16:25	三菱電 木村	木村 謙一																																																																																																		
91	カニクレーン 鍵	09/11 08:41	09/11 17:08	三菱電 木村	三菱電 木村																																																																																																		
47	トンネルクレーン 電源盤	09/11 08:40	09/11 17:09	三菱電 木村	三菱電 木村																																																																																																		
35	第 5 セクター 搬入口 (D17)	09/11 08:40	09/11 10:18	カニ工業	木村 謙一																																																																																																		
6	ALL LINAC SAFETY KEY	09/08 14:44	09/08 17:05	白川 白川	白川 隆之																																																																																																		
35	第 5 セクター 搬入口 (D17)	09/08 08:40	09/08 14:46	カニ工業 吉守	藤原 誠之																																																																																																		
47	トンネルクレーン 電源盤	09/08 08:34	09/08 14:54	三菱電 木村	三菱電 木村																																																																																																		

Figure 7: Snapshot of key management webpage.

3.4 放射線発生装置使用記録の電子化

入射器は放射線発生装置であるため、シフトごとに放射線発生装置使用記録(使用記録)を作成、印刷し、当該シフトに安全シフトとして従事した職員が署名を施した後、保管してきた。使用記録には、使用場所、最大ビーム出力および最大ビームエネルギーなどの性能や使用目的などが詳細に記されている。長年の運転により、使用記録の印刷ファイルが大量に書棚を占拠することになり、また安全シフト職員の自署忘れなど管理の負担も小さくない。

放射線科学センタの担当者と協議した結果、安全シフト勤務者の自署は必ずしも必要なく、書類に示す内容も再考の余地があることが判明した。自署が不要であることがわかったため、印刷物は残さずに完全に電子化して管理することにした。Figure 8 に、新旧の使用記録例を示す。従来の使用記録は、Fig. 8 の左図のように、1シフト分(8時間)の記録が1ページにまとめられている。5年ごとにある放射線定期検査のさいに閲覧しやすくするため、新しい使用記録では1ページに1日分(3シフト)の記録を記すことにした。Figure 8 の右図は、新しい使用記録の例を示している。2024年4月より新しい使用記録の運用を開始しており、全ての使用記録はWebページから簡単にアクセス可能である。安全シフト勤務者は、従来の自署の代わりにWebページ上で当該シフトの使用記録を確認し、規定値を超えている項目がないことを確認している。これにより、業務を簡略化しつつ安全性を担保している。

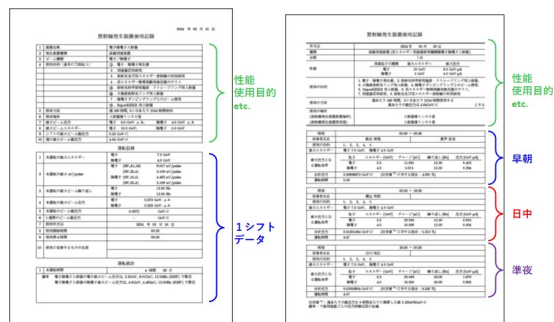


Figure 8: Image of original (left) and new (right) radiation generating device record document.

4. まとめ

KEKの電子陽電子入射器では、4つのリングへ同時ト

ップアップ入射をおこなっており、長期間安定な運転を実現している。このように複雑な運転形態は、PLCを基盤とした堅牢な安全系システムにより安全性が担保されている。しかしながら、長年の運用によりシステムに使用している基盤部品の経年劣化から、運転ができなくなる可能性をはらんでいる。そのため、老朽化した機器の更新を進めている。また、複雑な運転条件の成立可否状態を把握するためのGUIを整備し、運転状態に移行できない場合の迅速な原因特定を可能とした。さらに、鍵の貸し出し記録および放射線発生装置記録など、従来紙ベースで管理してきたものを電子化し、業務効率の向上を実現した。

参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “Achievement of 200,000 Hours of Operation at KEK 7-GeV Electron 4-GeV Positron Injector Linac”, in Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 12-17, 2022, pp. 2465-2468.
- [2] Di Wang *et al.*, “Analysis and stabilization of AC line synchronized timing system for SuperKEKB”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 1015, 165766 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165766>
- [3] R. Zhang *et al.*, “Laser system for SuperKEKB RF gun in phase III commissioning”, in Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, June 12-17, 2022, pp. 2914-2916.
- [4] K. Enomoto *et al.*, “A New Flux Concentrator Made of Cu Alloy for the SuperKEKB Positron Source”, in Proc. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil, May 23-28, 2021, pp. 2954-2956.
- [5] F. Miyahara *et al.*, “High position resolution BPM readout system with calibration pulse generators for KEK e+/e-linac”, in Proc IBIC2015, Melbourne, Australia, September 13-17, 2015, pp. 369-372.
- [6] Y. Enomoto *et al.*, “Pulse-to-pulse beam modulation for 4 storage rings with 64 pulsed magnets”, in Proc. LINAC2018, Beijing, China, Sept. 16-21, 2018, pp. 609-614.
- [7] Y. Enomoto *et al.*, “Pulsed magnet control system using COTS PXIe devices and LabVIEW”, in Proc. ICALEPCS2019, New York, NY, USA, Oct. 5-11, 2019, pp. 946-949.
- [8] H. Ego *et al.*, “SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul. 30-Aug. 2, 2024, THP023, this meeting.
- [9] EPICS. <https://epics.anl.gov/>
<https://epics-controls.org/>
- [10] <https://github.com/shuei/netDev/>