

J-PARC MR 防災システムの進展

PROGRESS OF J-PARC MR DISASTER PREVENTION SYSTEM

川端康夫^{#, A)}、松田浩朗^{A)}、松元和伸^{A)}、田頭茂明^{B)}、石井恒次^{C)}、山本 昇^{C)}、別所 光太郎^{C)}、吉岡正和^{D)}
Yasuo Kawabata^{#, A)}, Hiroaki Matsuda^{A)}, Kazunobu Matsumoto^{A)}, Shigeaki Tagashira^{B)},
Koji Ishii^{C)}, Noboru Yamamoto^{C)}, Kotaro Bessho^{C)}, Masakazu Yoshioka^{D)}
^{A)} TOBISHIMA Corp., ^{B)} Kansai Univ., ^{C)} KEK, ^{D)} Tohoku Univ., Iwate Univ.

Abstract

In 2019 operation of disaster prevention system was started at J-PARC MR accelerator tunnel. In the same year, it was adopted as a scientific research grant from the Ministry of Health, Labour and Welfare, aiming for full operation at J-PARC MR in the three years until 2021. In 2020 we connected a LAN to the power supply building on the ground to enable this system with improving convenience. In order to improve the radiation resistance of the 30 APs installed in the tunnel, it is necessary to turn off the AP power during beam operation, and we introduced a device that automatically turns AP on and off. In addition, a 360-degree camera can be connected so that it can be used as a monitor for equipment in the tunnel. Also, we introduced a function to automatically read the radiation measurement value and location by scanning the QR code. Aiming to increase the number of users, we are working on development to improve the convenience of daily use and to enhance the disaster prevention. In addition to reporting on the progress of these disaster prevention systems, we also mention the potential of this system related to future research and development.

1. はじめに

トンネル内で火災等の事故が起きた際、避難経路の選択は生死に直結する。東日本大震災では J-PARC MR トンネル内で作業者が被災したが、適切な脱出経路が用いられなかった。100 m 以内に脱出棟があったにもかかわらず、500 m 以上離れた入域箇所から避難をしたのである。幸い津波は J-PARC を襲わなかったが、避難誘導という観点からは大きな課題が残ってしまった。作業者の安全確保は防災システム上、極めて重要なテーマである。作業者がトンネル内のどこに居るのか、どの方向へ逃げているのか、あるいは動けなくて助けを求めているのか、リアルタイムでの作業員位置情報がキーポイントとなる。

これまでの加速器施設では放射線防護の観点から、入退域管理と被ばく管理が主眼となってきた。前者は PPS (Personal Protection System) [1] と呼ばれ、鍵管理により入域時(鍵が抜き取られた状態)には加速器運転が不可の状態になる。後者はフィルムバッジとアラーム線量計を併用し、個人の被ばく総線量とリアルタイム線量を管理している。これらに加え作業員の位置や動線がわかるシステムが実現できれば、病気や事故、災害時の安全性が大いに高まるものと期待される。問題はトンネル内では GPS (Global Positioning System) による測位が出来ず、新たな測位網の構築が必要となっている。

近年 ICT (Information and Communication Technology) を活用した DX (Digital transformation) 技術の飛躍的な進歩が見られる中、GPS が届かない屋内空間における測位も格段の進歩を遂げてきた。筆者らも、モバイル端末を利用した屋内向け測位センサネットワーク技術の開

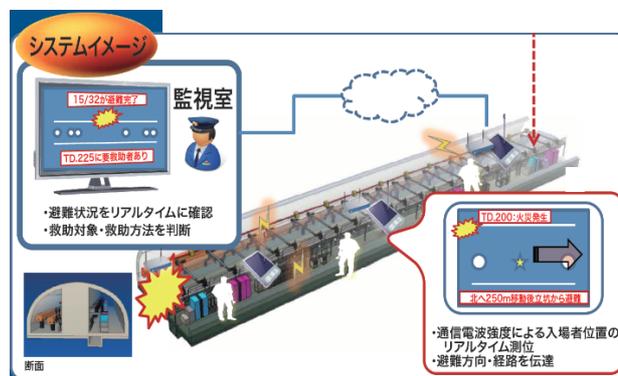


Figure 1: Concept of a disaster management system in ILC.

発 [2, 3] に取り組んでいる。Figure 1 は ILC のような大規模な地下の加速器施設での防災システムの概念を示している。閉鎖空間である大規模な加速器トンネルでの運用において、緊急時にモバイル端末を活用して作業員の位置を特定するとともに、管理者と作業員が効率よくコミュニケーションがとれる防災システムの構築を目指す。これまでの研究では開発したシステムを加速器施設等で試験し、実用化に向けた使用性や精度の検証 [4, 5] を行ってきた。また J-PARC MR の一部区間に通信装置 (AP: アクセスポイント) を複数台配置してシステムの実証検証を行った。J-PARC は陽子加速器であるため、中性子を含んだ放射線環境下における耐久性等の研究 [6, 7] が必須である。実証の目途が立ったため厚生労働省の科学研究費補助金に申請して採択、2019 年度より 3 年間で J-PARC MR に開発した防災システムを導入 [8]、完全運用を目指すこととなった。本年はこの科研費の最終年度にあたっている。

[#] yasuo_kawabata@tobishima.co.jp

2. 防災システム開発のコンセプト

本防災システムは、加速器トンネルで使用されることを念頭に、特に閉空間にいるユーザーとの連絡等を円滑に行うことを目指している。技術選択としては、双方向コミュニケーションが容易な Wi-Fi を用いた環境構築を行った。以下に開発のコンセプトを示す。

- ① Wi-Fi を用いることで単なるユーザー位置情報取得だけでなく、リアルタイムで同時多数のユーザーに必要な情報を伝達して共有する。
- ② 完全に独立したネットワーク網を構築し、その閉じられた中でアプリが完全に稼働する仕組みにした。これは高度なセキュリティ環境を提供するだけではなく、発災時においても完全に稼働する防災システムを構築する。
- ③ アプリ開発の観点からは昨今のクラウド環境等を活用したほうが容易ではあるが、外部の状況によってはハングアップする危険性を内包する。大震災時に起こるかもしれない広範囲のネットワーク分断の影響を受けることなく、継続的な電力供給が行えれば稼働するよう防災システムを目指した。
- ④ 防災アプリは有事の際に使用されなければ意味がない。一方で日頃からアプリを使用していないと有事の際には活用されない。発災時に初めてアプリを立ち上げてみているようでは意味を成さないと考え、日常的に活躍できるアプリ機能を持たせることを意識した。

2020 年より本格運用を開始しているが、2021 年度は利用者数の増加を目指し、災害時対策の充実に加えて日常使用の利便性を向上する方向で開発に取り組んでいる。

3. J-PARC MR における防災システム

3.1 耐放射線性を有する Wi-Fi ネットワーク

J-PARC トンネル内にシステムを構築する際、最も懸念される課題の一つにネットワーク機器に対する放射線耐性が挙げられる。J-PARC は陽子加速器であり、運転中は中性子を含む放射線が大量にトンネル内を飛び交う。我々のシステムはトンネル内の通路に沿って AP (アクセスポイント) と呼ばれる装置を少なくとも 30 台程度設置する必要があり、その放射線に対する耐久性の確保が必須であった。2015~2018 年にかけて実施した研究[6, 7]により、ビーム運転中は AP の電源を OFF することで実用できることがわかってきた。ガンマ線照射施設で実施した試験で 2 kGy 程度、中性子線を含んだ J-PARC MR トンネル内で実施した試験でも同様の 2 kGy 程度まで、使用する AP の放射線耐性があることを実証し、およそ 2 年以上の寿命を持つことが検証できた。この結果[8]を受けて、2019 年度に MR 全周 1.57 km に約 50 m 間隔で 30 か所のアクセスポイントを設置、AP 電源の ON/OFF が容易な形で電源供給ラインと LAN ケーブルの電気配線を実施、トンネル-地上間も有線で繋ぎ、地上の建物間は光配線を行ってネットワーク網を完成させた。

3.2 モバイル端末

スマートフォン端末と時計型ウェアラブルについても、2019 年にそれぞれ 20 台を用意した。アプリ管理の観点からだけでなく入退管理の観点も含め、各自が持っているスマートフォンに防災アプリを入れて使用するのではなく、こちらで準備したスマートフォン端末を使用する方式を取っている。時計型ウェアラブルについてはスマートフォン端末とペアで紐付けを行い、文字情報を表示させる機能を持っている。作業する際、スマートフォン端末は作業の邪魔になると考え、時計型端末の導入も行った。将来的にはトンネル内作業者の体温・脈拍等の体調管理にも使用できる。

3.3 防災アプリ

防災アプリはサーバーアプリとスマホアプリから成り立っている。サーバーアプリは閉空間に設置されたサーバー上で動作し、スマホアプリからの要求を処理する。スマホアプリは専用のスマートフォン上で動作し、サーバーとのメッセージ送受信、作業者の位置管理や活動管理などを行う。ベースとなる機能として、ユーザーの現在位置の取得機能、同時に複数のユーザー間でのメッセージの送受信機能、メッセージの送信場所の記録機能、メッセージの既読機能、ユーザーが活動しているかどうかを管理するユーザーの状態監視機能がある。

サーバーに web アクセスした際の表示画面を Fig. 2 に示す。地上に居る管理者がトンネル内の作業者の位置

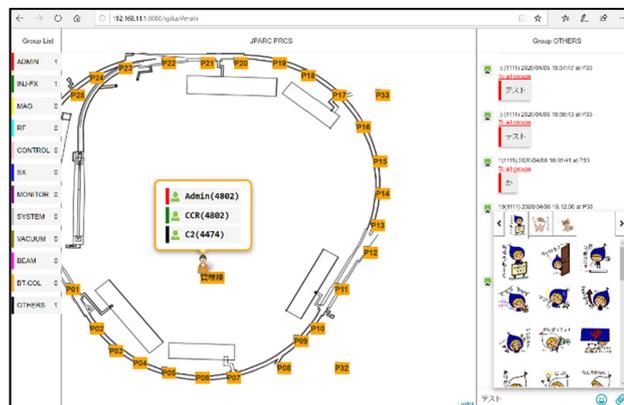


Figure 2: A web screen on the server application.

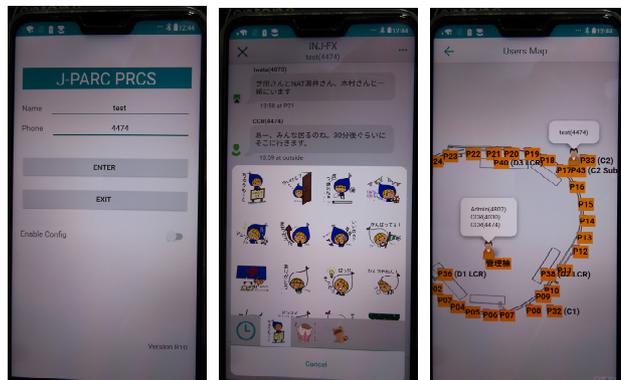


Figure 3: Screen examples on the smartphone application.

を確認できるような画面になっている。また図内右側にはグループ内でのメッセージが時系列で表示されている。Figure 3 は作業者が持つスマートフォン端末の画面を示す。スマートフォンを持つ作業者についてもトンネル内入域者が一目でわかるような画面を準備している。またメッセージについてもスタンプを準備し、素早く簡単にメッセージを配信できるような工夫も施した。

3.4 停電時対策

停電時における給電確保として、当初 J-PARC の非常発電網を利用することを検討していた。しかしながら停電が起こった際、一般給電ラインから非常発電ラインの切り替えが必要な上に、タイムラグの間にサーバーがダウンしてしまうことが判明した。再起動には何らかのトリガー信号が必要なため、適切なタイミングでのサーバー再起動装置を整備する必要もある。近年、耐久性と容量の向上が目まぐるしい Li バッテリーを用いたシームレスな給電網を構築したほうが安価なため、2019 年に UPS (無停電電源装置) を整備 [9] した。また計画停電時において防災システムの動作検証を行い、停電後 8 時間以上の稼働を確認した。

3.5 放射線測定

2020 年度において、防災アプリに放射線測定機能を組み込みどこの位置でどれぐらいの線量があるかを自動記録するシステムを構築 [9] した。ハンディな放射線測定器の多くは測定線量が表示されるだけで、測定値を外部に出力するような端子は付いていない。このことが紙に記録する等の残留放射線量測定における作業を煩雑にしている。使用した放射線測定器 Hamamatsu C12137 は USB で接続され、電源供給とデジタルデータの出力が可能になっている。これを防災スマートフォン端末と繋ぎ、放射線測定値の取り込みを行った。Figure 4 は常用している CANBERRA RADIAGEM 測定器との比較を行っている写真である。2 つの測定器を用い、MR トンネル内にある 4 極電磁石 (Q-mag) の真空ダクト近傍のコイルをオンコンタクト測定し、比較を試みた。写真で示さ

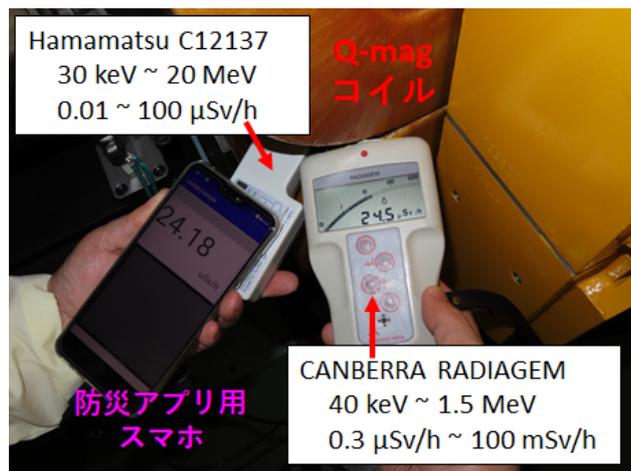


Figure 4: Residual radiation measurement with 2 detectors comparison.

れるように、数 10 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の Q-mag コイルオンコンタクト残留線量測定では良い一致が得られた。また通路における数 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の空間線量測定でも良い一致が観測されている。

防災スマホによる放射線の同時測定が可能になったことで、放射線の測定と位置情報の組み合わせが可能になっている。Figure 5 はメンテナンス時に防災スマホに C12137 放射線測定器を接続して MR トンネル内を 1 周した際の位置と放射線量のデータを示す。水色が位置情報 (左軸 AP 番号)、オレンジ色が放射線量 (右軸 log 表示) となっており、トンネル内の高残留線量との良い一致が見られている。

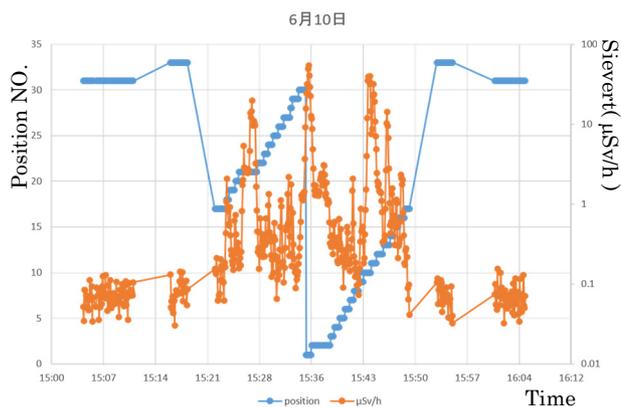


Figure 5: Air dosimetry in J-PARC MR Tunnel.

4. 防災システムの進展

2020 年度に一般作業による本格運用を開始、フィードバックによる課題抽出、安定性や信頼性を高めるためのシステム冗長化に取り組んでいる。MR ではトンネル内で実に様々なメンテナンス作業が行われているため、日常使用の利便性を向上して利用者数の増加を図る。また安定した稼働を強く意識した自動化について取り組んでいる。以下に最近の進展、追加した機能等について言及する。

4.1 QR コードを活用した放射線測定値の自動記録

2021 年度に QR コード等を活用することで定点観測等作業の省力化を行う機能を追加した。MR の主要な位置に QR コード貼り付け、その位置で QR コードを読み取ることで、自動的に位置情報と放射線測定を行う (Fig. 6)。現状の位置情報はおよそ 50 m 程度と粗いが、この QR コードを活用することで詳細な場所特定も可能となる。モバイル端末で読み取ったデータは、自動的にサーバーで集計し、リアルタイムに一覧表化、または図化し、以後の作業管理に活用する。また、定点の放射線測定値の変遷を把握することもできる。MR の中で、BM96 台 (上中下流)、QM216 台 (上下流)、SM72 台 (上下流)、計 864 ヶ所、さらに個別に必要な箇所に登録済みの QR コードを貼り付けることを予定している (Fig. 7)。



Figure 6: Perform location information and radiation measurement by scanning the QR code.



Figure 7: Listing and plotting of radiation measurement results.

4.2 AP 電源自動 ON/OFF 装置

耐放射線性を向上するために、ビーム運転時の AP 電源 OFF が必要になるが、ビーム運転に同期して自動で ON/OFF する装置の導入を行った。加速器稼働時に MR エリアが組み込まれ、ビーム運転が稼働可能状態 (IN) になるが、その情報を用い、自動で AP 電源を OFF 操作し、停止状態 (OUT) で ON 操作する。Figure 8 は PLC を用いて構築した装置写真とその操作



Figure 8: AP power line ON / OFF Controller.

画面を示す。本装置により、緊急メンテ時のトンネル内入域にも対応でき、信頼度の高い運用が可能となっている。

4.3 映像による作業支援機能

2020 年に映像通話を可能にし、遠隔で作業支援を実施できる機能を追加 [9] した。映像通話ではスマホのカメラを使用した、無人環境での通電監視等の監視作業にはカメラ視線を変えることができず、使い勝手が悪い。MR トンネルでは監視作業も多くあるため、360° カメラの導入も行った。360° カメラ、複数のモバイルカメラの同時撮影により、あらゆるアングルからの作業検証が実施できる。トンネル内は残留放射線が高い領域も存在しているので、遠隔作業支援により被爆抑制にも貢献するものと期待している。コロナ禍に対応した作業形態でもあり、働き方改革への第一歩になると考えている。Figure 9 はトンネル内と C1 で同時に作業が行われている際の作業支援の様子を表している。



Figure 9: A picture of the remote work support.

4.4 注意喚起機能

2021 年度において、予め高放射線領域や通電試験等が実施されている箇所を設定することで、該当する日時と場所に近づくと、音とバイブレーションで注意を促し、モバイル端末で詳細が確認できる機能を追加した。トンネル内には残留放射線量が高い区域や、通電中の電磁石が存在する区域がある。現状、作業者は予めその情報を熟知した上でトンネル入域を行うことになっているが、危険区域に近づいた際に自動で警告を発して詳細な情報を防災スマートフォン端末から入手できる仕組みにすれば入域前の準備が大幅に軽減される。トンネル内作業に慣れていない、理解度が不十分な作業者にとっても助かる機能であると考えられる。また施設側や通電中のトンネル内現場監視員の低減に繋がるものと期待できる。Figure 10 は注意喚起を設定した際に現れるマップ上の表示である。画面右側には注意内容の詳細が表示されており、当日の注意すべき作業がリストされるようになっている。

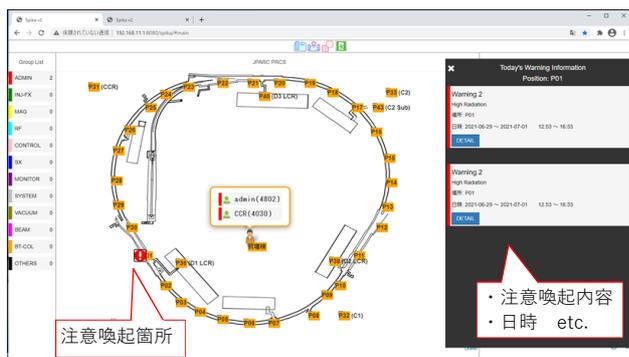


Figure 10: Function to push notifications such as high radiation areas and magnet operation tests.

5. 今後の研究開発

今後の研究開発の方針としては、災害時対策の強化、日常使用の利便性向上、他施設への展開の3本柱を念頭に活動を行っていきたくと考えている。災害時対策の強化は防災システムとしての本筋の開発である。現状でも最低限の対策は講じられているが、強化したい課題がいくつか残っている。地震や津波情報の自動取得とトンネル内作業員への自動配信は実現しておきたい。完全に独立したネットワークシステムを構築したため、情報取得のルートはどう構築するか議論の余地がある。またトンネル内アナウンスの自動文字化とその配信も検討に値する。トンネル内は冷却水等の騒音でアナウンスが聴こえにくい箇所が多くある。重要なものは繰り返しアナウンスされるが限界があり、聞き逃すことも十分考えられる。自動で文字化されて配信されれば、トンネル内作業員により安全で安心な作業環境を提供することができる。

その他、近年流行りのDX技術、AR (Augmented Reality) や VR (Virtual Reality) の活用を検討している。ARの活用としては残留放射線量の見える化が考えられる。Google型のウェアラブルを用い、トンネル内機器を測定した放射線量を作業現場で重ね合わせて見ることが可能となる。またVRの活用としては高放射化環境下での作業効率の改善が考えられる。VRを使って地上で模擬作業を実施、作業の無駄を省き、無用な被爆線量を削減できるものと考えている。AR/VRの活用案は、他にもあると考えられ、予期せぬ方向に研究開発が育っていく可能性も孕んでおり、是非、前に進めていきたい。

さらに、従来、ビーム停止後において”人の立ち入り”によりトンネル内の安全を確認していたものを映像、熱赤外線、放射線量などのセンサを利用して、トンネル内全体を自動または遠隔で確認できるロボット技術を開発したい。自走するドローンカートに基地を作り、近くまではカートが自走し、そこから詳細調査が必要な時にドローンを飛ばす。(J-PARC DX-SSRobotcs 2.0)

最後に他施設への展開について言及する。本防災システムは加速器研究施設に留まらず様々な施設での活用が可能と考える。各施設の要望に合わせた機能を付加して日常的な利用を促進し、かつ災害時に作業員の

アルタイム位置表示を避難等に活用すれば、どの施設でも有効な防災システムとなりえるだろう。我々はJ-PARCのMR加速器トンネルで本防災システムを導入、開発研究を継続中である。ぜひとも他施設でも同様のシステム開発・導入を検討して頂き、切磋琢磨して研究開発を推進していきたい。願わくは本論文を読んで興味を持たれた方は、我々にぜひともコンタクトして頂きたい。これまで研究開発してきた経験を共有したいと考えている。

参考文献

- [1] F. Hiroki, H. Yoshikawa, Y. Takeuchi, and K. Kubo, "PERSONAL PROTECTION SYSTEM IN J-PARC LINAC", 第1回日本加速器学会年会, 2004, 8.
- [2] 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, "無線LAN測位の測位精度に関する研究", 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, pp.549-550, 2012.
- [3] S. Tagashira, Y. Kanekiyo, Y. Arakawa, T. Kitasuka, and A. Fukuda, "Collaborative Filtering for Position Estimation Error Correction in WLAN Positioning Systems," IEICE Trans. on Communications, Vol. E94-B, No.03, pp. 649-657, 2011.
- [4] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 小林薫, 田頭茂明, 大場俊幸, 吉岡正和, "加速器施設における測位センサネットワークに基づく放射線管理・防災システムの開発", 第11回日本加速器学会年会, 2013, 8.
- [5] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 田村琢之, 小林薫, 田頭茂明, 山本祐輔, 前田修, 大場俊幸, 吉岡正和, "測位センサネットワークによる加速器施設の防災・放射線管理のための位置管理システムの開発", 第12回日本加速器学会年会, 2014, 8.
- [6] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, 石井恒, 大森千広, 芝田達伸, 吉岡正和, "放射線環境下(J-PARC)における測位センサネットワークシステムの耐久性と防災用アプリの適用計画", 第15回日本加速器学会年会, 2017, 8.
- [7] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, 石井恒, 大森千広, 芝田達伸, 吉岡正和, "J-PARCにおける測位センサネットワークシステムの装置と防災用アプリの試験適用", 第16回日本加速器学会年会, 2018, 8.
- [8] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, 石井恒, 大森千広, 吉岡正和, "J-PARC MRにおける測位センサネットワーク装置と防災用アプリの全域実装", 第17回日本加速器学会年会, 2019, 8.
- [9] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, 石井恒, 大森千広, 吉岡正和, "J-PARC MRにおける専用ネットワーク装置とモバイルアプリによる防災システムの構築", 第18回日本加速器学会年会, 2020, 8.