

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

CONSTRUCTION OF DISASTER PREVENTION SYSTEM BY DEDICATED NETWORK DEVICES AND MOBILE APPLICATION IN J-PARC MR

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

As a disaster prevention system for large-scale accelerator tunnels, we have been developing a disaster prevention system with a positioning function to realize real-time position information of workers and two-way information transmission in an emergency. Its study was adopted by the Ministry of Health, Labor and Welfare as a scientific research fund in FY2019, and is aiming for full operation at J-PARC MR over the next three years. In 2019 30 access points were wired and installed at intervals of about 50 m along the entire circumference of the MR tunnel 1.57 km, and preparation of terminals (smartphones, watch-type wearables) and servers, and installation of applications were completed. After 2020, we plan to start using it for workers, identify issues by feedback, and make the system redundant to improve stability and reliability. The developed disaster prevention system can be used for various transmission and warnings not only at the time of disaster but also in daily life. Magnet operation tests are often fulfilled in MR, and by utilizing this disaster prevention application, we are considering information sharing support on the ground (power supply building) and underground (in the tunnel), and support to warn the workers who enter the tunnel. In addition, since there are places of high residual radiation dose in MR, we think that radiation measurement and this disaster prevention application can be linked with visualization of when and where the radiation was exposed and automatic warning when approaching a high region. This paper also refers to these researches.

1. はじめに

東日本大震災の際の危機的状況下、J-PARC で作業中の職員がトンネル内からの脱出に時間を要したことが本研究開始の発端である。大規模な加速器施設では、施設利用者に対する放射線防護や災害時の安全確保が極めて重要である。通常加速器施設では PPS (Personal Protection System) が適用され[1]、施設入域者の放射線防護を担っている。一方で、施設利用者の位置やその動線に基づく管理、さらに発災時に適正な避難誘導が行え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。しかしながら、地下に建設されることが多い加速器トンネルはあらゆる電波が届かないため、セルラー網による通信や GPS (Global Positioning System) による測位ができず、ICT (Information And Communication Technology) 技術の活用が限定的なものとなっている。これまで筆者らは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発[2, 3]に取り組んできた。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者の位置を特定するとともに、管理者と作業者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

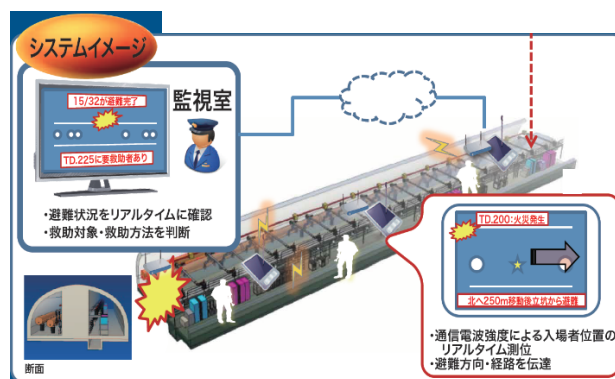


Figure 1: Concept of a disaster management system in ILC.

構築を目指している。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い、放射線環境下における耐久性等の研究[6, 7]を行った。

2019 年度に厚生労働省の科学研究費補助金に採択され、今後 3 年間で J-PARC MR で開発した防災システムの完全運用を目指している[8]。2019 年度は MR トンネル内全周 1.57 km に約 50 m 間隔で 30 か所のアクセスポイントを配線して設置、端末 (スマートフォン、時計型

ウェアラブル)及びサーバーの準備とアプリのインストールを完了した。2020 年度以降は作業による利活用を開始、フィードバックによる課題抽出、安定性・信頼性の高めるためのシステム冗長化を予定している。開発した防災システムは、発災時のみならず日常においても様々な情報発信や警告等に活用できる。MR では頻りに電磁石等の通電試験が行われるが、本防災アプリを活用することで、地上(電源棟)と地下(トンネル内)の情報共有サポートや、トンネル入域者に注意を促すようなサポートを考えている。また MR には残留放射線量が高いところがあるため、いつどこで被爆したかの見える化や高領域に近づいた際の自動警告等が、放射線測定と本防災アプリとの連動で可能と考えている。本稿ではこれらの研究開発についても言及する。

2. 防災システムの概要

開発した防災システムは、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可能にしている。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。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ことを可能にする。また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ことが可能である。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ことになる。大震災時に起こるかもしれない広範囲におけるネットワーク分断の影響を受けることなく、継続的な電力供給に傾注すれば稼働するように本防災システムを構築する。また当たり前だが、防災アプリは有事の際に使用されなければ意味がない。一方で常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て開発を行っている。

3. J-PARC MR における防災システム

3.1 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、その放射線耐性試験等を 2015 年~2018 年にかけて実施した。最初の試験では 1 日も持たずに故障することが実証されたが、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。これまでの研究[6, 7]では、ガンマ線照射施設で実施した試験で 2kGy 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 2kGy 程度まで、使用する

AP の放射線耐性があることを実証した。MR トンネル内の AP 設置場所で放射線量が最も高いコリメータ近傍では、2kGy はおよそ 2 年以上の寿命を持つことに相当する。この実証を受けて、2019 年に AP 電源の ON/OFF が容易な形で電源供給ラインと LAN ケーブルの配線を MRトンネル内全域で行った。どちらも一筆書きで第 3 電源棟の 1 か所から繋がる形で配線を行っている。

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 台を購入して整備した。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してもらう方式を取っている。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邪魔になる場合があると考えられ、時計型の導入も行った。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可能である。

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。スマホアプリは作業者が持つ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。機能として、メッセージの記録と既

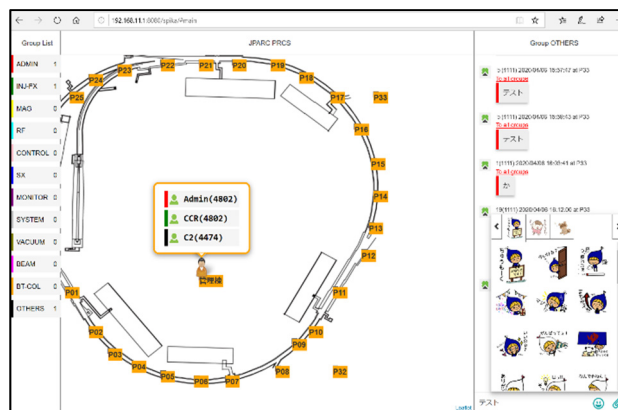


Figure 2: A web screen on the server application.

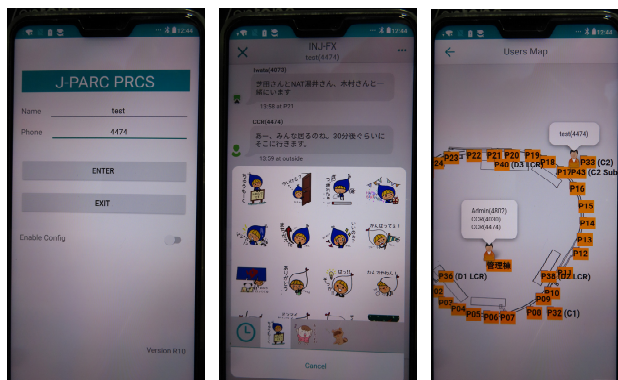


Figure 3: Screen examples on the smartphone application.

読表示等を実装している。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一目で作業者のトンネル内位置を確認できるような画面になっている。また図内左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。

4. 2020 年の開発

4.1 停電時対策と試験

停電時における給電確保は、防災システムにとって重大な課題の一つである。当初、J-PARC の非常発電網を利用することを検討していたが、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、数か所の切り替え機を整備しないといけないことがわかった。さらに発電機が給電を開始するまでの数秒間にサーバーがダウンしてしまう危険性がある。再起動には何らかのトリガー信号が必要のため、適切なタイミングでのサーバー再起動装置を整備しないといけない。これらのことから計画を変更し、自前で UPS (無停電電源装置) を整備することにした。近年、リチウム電池の発達に伴い 3~5 年程度だった寿命が 10 年程度まで延び、また大容量のものも安価に入手できるようになってきた。我々はトンネル内の全 AP を給電する第 3 電源棟 (D3) とサーバーを設置する中央制御棟 (CCR) の 2 ヶ所に用いる UPS として、大容量 6.4kWh のリチウム蓄電池を購入した。また搬入棟などの数個の AP とメディアコンバータ (光-電気ネットワーク変換) を給電するために 700Wh のリチウム蓄電池を準備した。2020 年 7 月 4 日の所内計画停電時において、これらリチウム蓄電池を使用した防災システムの停電時稼働試験を実施した。Figure 4 はその時のセットアップを示す。建屋間は光回線だけで結ばれており、各建屋で蓄電池が必要になる。試験では 700 Wh のリチウム蓄電池を C2 搬入棟に置き、AP2 台とメディアコンバータ 1 台に給電した。サーバーとネットワークは通常通り立ち上げたままにして、スマートフォン端末を CCR、D3、C2 に持って行って防災アプリを立ち上げ、動作を確

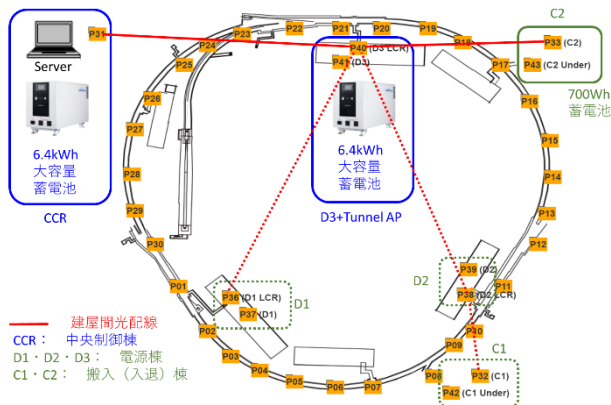


Figure 4: Test setup of Li battery at the power failure.

認した。またトンネル内にもスマートフォン端末を前日から立ち上げたまま放置し、位置測定が出来ていることを確認した。各動作確認は停電が完全に実施された後のおよそ 1 時間後に実施している。また各バッテリーの残量から、現状の電力消費量では 12 時間以上稼働することが確認された。これは例えばバッテリー容量が現状の半分以下に劣化しても、避難に必要な時間は十分に稼働することを示している。

4.2 映像通話機能の追加

日常的な利便性の向上を目指した取り組みとして、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した。Figure 5 に作業支援を実施している様子を示す。現状、多点接続はできておらず 1 対 1 の映像通話となっているが、複数接続は可能なので、写真にあるように違う角度での作業確認も容易である。トンネル内に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する。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捉えている。



Figure 5: A picture of the remote work support.

4.3 放射線測定との連動

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。今回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 6 は加速器グループが所有している 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て比較をしてみた。C12137 は比較的低線量の測定を目的にしたもので有効測定範囲が 0.01~100 $\mu\text{Sv/h}$ であるのに対し、RADIAGEM はかなり高放射線線量領域である 100 mSv/h 程度までの測定が可能である。写真で示されるように、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た。RADIAGEM は J-PARC の放射線グループが持つオンコンタクト用の測定器、空間線量用の測定器とも良い一致が得られているので、C12137 の測定結果はある程度の信頼性を持つものと考えられる。

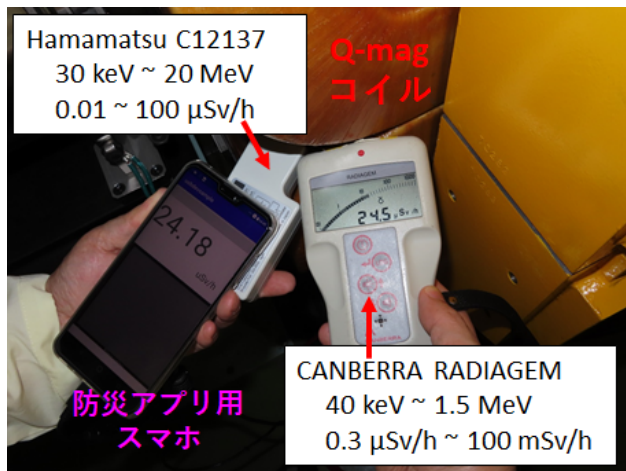


Figure 6: Residual radiation measurement with 2 detectors comparison.

放射線測定器からスマートフォンへの取り込みに成功したので、防災システムと連動させて位置情報と組み合わせを試みた。2020年6月10日遅い取り出し運転期間中のメンテナンス日に、C12137を防災スマートフォン端末に接続し、防災アプリにログインしてJ-PARC MRトンネル内を一周した。その際、取得したデータを Fig. 7 に示す。紫色の線が測定された空間線量を表し、右側の軸で単位は $\mu\text{Sv/h}$ である。水色の線は位置情報を表しており、トンネル内に配置された AP 番号に対応している。P17 は入退城を行った C2 搬入棟に最も近い AP の番号である。トンネル内を反時計回りに移動して、順に P21 の FX 部 (Fast eXtraction: ニュートリノ実験施設への速い取り出し)、P1 の入射部 (コリメータが設置されている)、P11 の SX 部 (Slow eXtraction: ハドロン実験施設への遅い取り出し) を通って P17 から退城している。測定された放射

線量をみると、残留量が高い各直線部で数値が跳ね上がっているのが良く見てとれる。なお Fig. 7 のグラフは web アクセスした際に表示される画面で、別途データをダウンロードして解析等を行うことも可能である。グラフ面積を求めれば所持者の被ばく線量が算出できると考えられる。現状の防災システムの位置精度が粗いため、トンネル内機器の残留測定等には不向きであると考えられるが、QR コード等を活用することで定点観測等の作業省力化が可能になるものと期待している。

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いと考えている。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。

日常利用の利便性向上については、危険区域設定と自動警告機能の導入をまずは検討したい。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、作業員は予めその情報を熟知した上でトンネル入城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城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員にとっても助かる機能と考えられる。また施設側や通電を実施している側にとっても、危険区域の掲示作業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。その他、研究開発を進めたい項目としては、近年流行りの AR

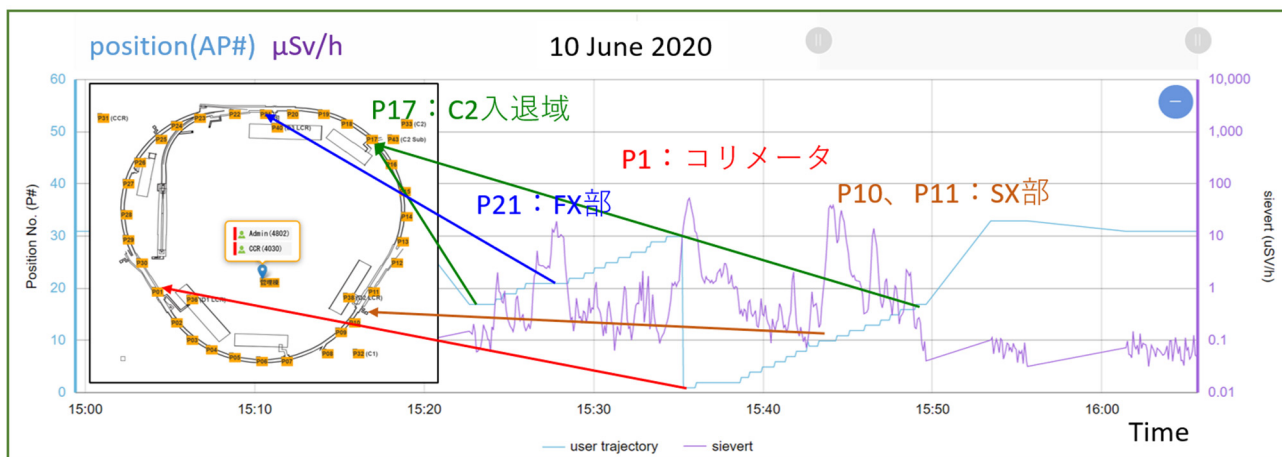


Figure 7: Air dosimetry in J-PARC MR Tunnel.

(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。ゴーグル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線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いるため、ぜひとも前に進めていきたい。

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、かつ災害時に作業者のリ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.