

厚生労働科研費補助金（労働安全衛生総合研究研究事業）

総合研究報告書

加速器トンネルにおける位置情報を活用した防災アプリの開発（19JA1002）

研究代表者 石井 恒次 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 准教授

研究要旨： 加速器トンネルのような巨大な閉空間での使用が可能な防災アプリを開発する。双方向通信により、避難経路指示といったような一方的な情報伝達だけでなく、災害時の情報を関係者で瞬時に共有、トンネル内の全作業員の位置をリアルタイムで把握、災害近傍の作業員からの写真等によるフィードバック等も可能にする。開発した防災アプリを実際に J-PARC MR 加速器トンネルで使用して有用性を実証すると共に、同じような閉空間を持つ施設等への適用を模索する。また放射線測定を付け加えて位置測定と連動させて機能統合するといった、防災アプリの発展性についても研究する。

山本昇：高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設・シニアフェロー

別所光太郎：高エネルギー加速器研究機構  
共通基盤研究施設・准教授

A. 研究目的

東日本大震災で申請者が J-PARC Main Ring (MR) 加速器トンネル内で被災したことが、本研究の発端となっている。残念ながら震災時には、適確な避難誘導が実施されたとは言いがたい。従来からの加速器トンネル入域システムとして、ビーム運転時に入域者がいないことを担保する **Personal Protection System (PPS)** と、放射線防護の為にフィルムバッジとアラーム線量計を携帯するシステムが連携して動作して、安全を担保している。震災以降、これとは別に地上で作業監視員を設け、病気や事故、災害発生時に迅速な対応を取る体制を敷いているが、十分とは言えない。最大の問題点は、1.5 km 以上もの長さを持つ円形トンネル内の、「どこ」に「何人」の作業員が居るかが、地上でリアルタイムに把握できていない点にある。

2015 年より申請者はトンネル内での防災に多くの経験を有する飛島建設と共同研究を行い、地下防災システムにおける無線 LAN 測位システムの耐放射線性能の検証を行ってき

た。本測位システムでは、モバイル端末を測位センサとして利用し、情報通信と同時にモバイル端末の通信位置を特定する。既にトンネル等の建設現場において活用されている技術であるが、加速器トンネルに適用するためには放射線耐性を検証する必要がある。共同研究では、ビーム運転中は測位システムの電源をオフすることでデバイスの寿命を有意に伸ばすことが実証され、放射線環境下での使用に目途が付いた。

本開発研究では労働安全衛生総合研究の方向性である IoT を活用した安全管理システムの開発を行う。システムを MR の加速器トンネル全周に展開し、入域者全員に防災アプリが導入されたモバイル端末を携帯してもらうことで安全性の飛躍的な向上を目指す。多くの作業員に利用してもらってフィードバックをかけ、安全システムの一部として運用可能な領域まで開発を行う。並行して広報活動に努め、国内外の加速器施設はもとより、工場等、同様の閉空間を持つ施設等への適用を提言する。なお大規模加速器施設に限れば、ドイツにある DESY 研究所の European XFEL 研究施設が唯一、位置モニタリングを用いた入域者管理を行っているが、本研究で開発する双方向通信が可能な防災アプリまでの導入は行っていない。J-PARC で導入されれば世界初の事例になるものと考えられる。

## 厚生労働科研費補助金（労働安全衛生総合研究研究事業）

## 総合研究報告書

## B. 研究方法

J-PARC MR 加速器トンネルでは年間に 100 名を超す作業員が入域し、延べ千人日を超える作業が実施されている。この研究施設において位置モニタリングシステムを有した防災アプリの実証実験を行い、開発した安全管理システムの有効性を評価する。本防災アプリの特徴である位置モニタリングシステムと双方向情報伝達システムは災害時において、管理者からの避難指示等を一齐に配信して情報伝達するだけでなく、既読機能による作業員の応答確認、位置モニターによる避難状況の確認が可能である。作業員側から災害現場等を映像撮影して配信することも可能で、地上の管理者を含めた関係者が災害状況の共有を可能にするシステムを導入する。

防災アプリは有事の際に使用されなければ意味がない。東日本大震災の際、筆者は数十メートルの距離にトンネル脱出棟があったにもかかわらず数百メートル先の入域場所から避難した、苦い経験がある。頭には入ってはいても普段使用していないと、咄嗟の際には思いつかない、良い教訓と言える。本防災アプリについても同様なことが言え、管理者と作業員の双方が本アプリを平常時にも活用していることが、有事の際に威力を発揮するものと確信している。早い段階でシステムの運用を開始し、利用者からのフィードバックを得てシステムを段階的に発展させる。また研究発表等を通し、国内外の加速器施設等へシステムの普及活動を行い、他の研究施設への展開を促進することも予定している。

防災アプリの運用開始後は、1) 災害時対策の充実へ向けての研究開発、2) 安全システムへの組み込みに向けての研究開発、3) 日常使用の利便性向上、4) 他施設への展開（広報活動）の 4 本柱で研究を進める。防災システムの完成という観点からは、特に 2) の研究開発が重要となってくる。既存の安全システムは主に放射線防護を念頭に構築されているためとても高度なものとなっている。当初は防災アプリを既存の安全システムに組

み込むことを考えていたが、莫大なコストと安全性の確認に数年程度かかることが判明し、適当な協力会社も見つからないことから、独立した安全システムの構築を目指すことに変更し、研究開発を行った。

## C. 研究結果

初年度（2019 年度）からの運用開始を目標にしていたが、導入前の複数回行った試験のそれぞれで課題が見つかり、次々と新バージョンを導入する事態に陥った。アプリ自身の見た目が毎回かなり変わるため、ユーザが混乱するとの判断から運用開始は 1 年見送り、バージョンを固定しての暫定運用をグループ内の作業員に利用してもらおう形で行った。グループ内作業員からはフィードバックをお願いし、日常使用の利便性向上を図った。また防災に必要な不可欠な停電時対策も並行して整備した。当初計画では非常発電の電気系に組み込むことを考えていたが、トンネル内だけでなく管理者端末やサーバー等、地上建屋の複数個所で組み込み改修をしなければならず、追加工事が高額になることがわかった。そこで近年のリチウム電池の発達に伴い、3～5 年程度だった寿命が 10 年程度まで延びた UPS（無停電電源装置）の利用を検討し、問題なく使用できることを確認した。

ユーザからのフィードバックとして、地上建屋の電源棟での無線 LAN Access Point (AP) 整備が提案された。加速器のメンテナンス中にトンネル内電磁石を地上の電源で通電して試験することが頻繁に行われるが、本アプリを活用すればより安全な通電試験が可能である。通電に関係のない作業員であっても、トンネル入域の際、本アプリが導入された専用のスマホ端末を持っていれば、通電されている電磁石に近づくと端末からバイブレーション等で通電中である旨の警告を発することができ、感電事故の防止に大いに役立つ。そこで電源棟間にある既存の光回線網を利用し、電源棟内の光配線も整備、また注意喚起機能のアプリ拡張開発も開始した。

## 厚生労働科研費補助金（労働安全衛生総合研究研究事業）

## 総合研究報告書

次年度（2020 年度）の 7 月よりユーザ利用の運用を開始した。マニュアル等の整備を行い、トンネル入域者は誰でも防災アプリが導入されたスマホを携帯してトンネル内で活用できる。各電源棟と搬入棟に AP を整備して光配線を開通させ、主要な建屋で防災システムが利用可能にした。また停電時対策としてリチウム蓄電池を地上建屋に配備し、全 AP とサーバーPC に対して蓄電池を介して電源供給するようにした。切り替えしないのでサーバーPC がダウンして防災アプリが使用できないという状況は起こりにくい。2020 年 7 月 4 日の計画停電（J-PARC 地区を含む JAEA 全所停電）では、蓄電池により防災システムが停電後 12 時間以上稼働することを確認した。また AP の放射線耐性に必要なビーム運転時における電源 OFF 行う装置を開発し、運転に同期して自動で AP 電源を ON/OFF することが可能になった。停電時対策と AP 電源自動 ON/OFF を導入できたことで、防災システムとして完成したと考えている。

当初からの予定であった、防災アプリの位置測定と放射線測定との連携も開発を実現して導入した。2020 年 6 月 10 日のメンテナンス日に専用の放射線測定器とスマホを携帯してトンネル内に入域し、通路の残留放射線量測定を行った。測定器とスマホを USB 接続してアプリを立ち上げるだけで、1 分毎に測定された放射線量がサーバーに自動記録される。取得データを表示させるソフトも整備し、既知の残留線量と比較を行った。記録された位置と放射線測定量に乖離等はなく、正確にトンネル内通路の各点での残留放射線量が測定されたことが確認された。なお使用した専用の放射線測定器はきちんと校正された測定器との測定値比較を行い、問題ない範囲で一致することを確認している。また予定になかった映像通信の研究開発も実施した。映像通信は放射線管理区域であるトンネル内作業の遠隔支援を可能にし、無用な被爆を避け、またコロナ時代にマッチした利便性向上ツールとも言える。スマホ付属カメラを活用すること

で、1 対 1 ではあるが複数回線も可能にした映像通話を実現している。2020 年 7 月 31 日に行われた防災訓練では、仮想事故現場にスマホをセットしてライブ配信を行い、事故指揮所で遠隔地である仮想事故現場をモニターすることも行っている。

なお 2020-2021 年はコロナ禍で研究開発が滞った時期でもあった。ここまで記述した研究は主にコロナ禍前に計画・設計したものであり、開発・試験は遅れが多少生じるものの大きな影響は受けていない。問題は開発を協力してもらっている研究者が現場である J-PARC に来所するのが難しい状況が続き、現場状況に即した開発が進まない結果となってしまったことである。防災システムの運用開始後は B. 研究計画で挙げた 4 本柱を念頭に研究開発を行う予定であったが、やむを得ずいくつかの部分で修正を行い、また繰越申請も行って 2022 年度も研究開発を継続し、本防災システムの発展性について展望が見渡せるところまで完成するよう計画を修正した。

2021 年度のコロナ禍状況でも 3) の日常利便性向上は進展することができた。既に過年度に開発した放射線測定との連動だが、さらに QR コードを導入してスキャンすることで位置の精度を上げ、QR コードに紐づけした位置とその時の放射線測定値を自動記録するようにして、作業の利便性を向上させた。また映像通信についても 360° カメラを導入してトンネル内の無人監視や高放射線環境下での作業監督も実現、被爆抑制を含めた作業の省力化を行っている。さらにユーザフィードバックで得られた注意喚起機能を開発して導入した。トンネル内の残留放射線量が高い領域や通電が行われる区域を予めアプリ内で設定できるようにし、危険区域に近づいた場合は自動的に警告を発してスマホ端末携帯者に知らせる機能を防災アプリ付加している。スマホ端末から詳細な情報を得られると共に、トンネル内に不慣れな作業者でも危険に対して注意を促すような仕組みにし、防災システムとしての性能向上を果たした。

## 厚生労働科研費補助金（労働安全衛生総合研究研究事業）

## 総合研究報告書

難題であった 2) の安全システムへの組み込みについては 2021-2022 年度に精力的な研究開発を実施した。B. 研究計画で既に述べたように、独立した安全システムの構築の方向で検討を進めているが、そこで問題になってくるのはスマートフォンの携帯率である。防災アプリを利用するためには専用のスマートフォンを携帯する必要があるが、トンネル内に入域するのに携帯を義務付けることを現状は行っていない。使い勝手の良いように改良を継続しているが、残念ながら携帯率は半分程度に留まっている。この状況を打開するため、我々は自動追尾が可能なロボットの活用に着目した。作業者に追尾するロボットに情報端末を携帯させれば、作業者自身が端末を携帯する必要はなくなる。この他ロボットに見回り巡回させてトンネル内の映像を取得し、自動で映像解析を行って通常と違う異常を検知する試みも開始した。この着想の下、2021 年度にロボットを MR トンネル内に持ち込んで自律走行の試験を行った。またロボットが行くことができない区域をカバーするため、ドローンのトンネル内試験飛行を実施した。ロボットやドローンが取得した映像の解析も行い、自動解析・異常検知の検討も行っている。いくつか技術的な課題が見つかったため 2022 年度も継続して試験等を継続した。特にコスト的な問題を解決すべく、台車ロボットの独自開発を行って試験を実施した。市販の台車ロボットにカメラと LiDAR (Light Detection And Ranging) を搭載し、人検知追随や指定位置自動移動を実現させる試みを行った。また台車ロボットにドローン基地（充電スタンド）を運搬させ、ドローン飛行継続時間の課題解決を図った。ソフト・ハード共に更なる作り込みが必要と考えられる結果となったが、ロボット・ドローン活用の有効性は認められ、展望的に期待が持てる結果となった。

1) の災害時対策の充実はアナウンスの自動文字化や地震情報の自動文字配信等を検討した。技術的には問題ないと考えられるのと、

将来的に音声の自動文字化の技術は飛躍的に進むと考えられるため、我々はより課題の多いロボット・ドローンの開発に専念して研究を推進している。

4) の広報活動については積極的に論文発表を行うと共に、異業種を含めた研究会等に参加する予定であった。しかしながらコロナの影響で会議等は延期やリモート開催となってしまった。本研究は議論が活発な特定主題を取り扱う研究会での発表に適しているものと考えられ、2022 年度になっても発表の機会が少ない状況にある。このような状況下であるが 2019-2022 年度の 4 年間で 8 件の学会発表（内 3 件の国際会議発表）、学会発表に付随する 5 件の論文発表（内 1 件の英語論文）、報道機関に向けたプレスリリース 1 件（J-PARC 会場に 7 社が参加、数社が記事）、そして高エネルギー加速器研究機構の 2021 at KEK Annual Report でも英文で紹介された。学会発表の際に用いたものの抜粋を資料 1、J-PARC プレスリリースを資料 2、KEK Annual Report での該当ページのコピーを資料 3 として添付する。

## D. 考察

早い段階でユーザ利用が開始され、停電時対策等の整備が進んで防災システムとして実証できたことは大変嬉しい。またユーザからのフィードバックを受け、当初予定になかった機能を持たせることに成功したことも大変有意義だったと考えている。一方で利用率は半分程度に留まったため、少しでも作業者が負担を感じるようなものは強制力無しでは難しいと実感した。放射線安全が主目的の現行安全システムに対し、統合ではなく独立の方向性を考え、かつ強制力の必要ないロボット・ドローンの活用に見出し、開発と試験を繰り返して将来の活用に目途を付けた。加速器トンネル等の研究施設や工場等において、災害時の安全を担保する防災システムの在り方に一つの解を示したと考えている。

## 厚生労働科研費補助金（労働安全衛生総合研究研究事業）

## 総合研究報告書

## E. 結論

防災アプリとしては2年以上の期間に渡り安定に稼働しており、完成したと見なすことができる。今後も継続して使用することで、ユーザからのフィードバックを得て、将来の防災システム構築への指針に充てたい。また研究会などの機会を捉えて、J-PARC MR 加速器トンネルで実現した防災システムの宣伝や議論を行い、他研究施設等で採用されるよう働きかけていく所存である。さらに独立した安全システム構築を念頭にロボット・ドローンの活用を視野に入れ、将来、他研究施設等で採用されて導入が実現するよう、継続して努力を行う予定でいる。

## F. 健康危険情報

なし

## G. 研究発表

## 1. 論文発表（5件）

- 1-1. 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、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、*Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, P253-257, 2019.8
- 1-2. 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、山本昇、別所光太郎、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、*Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, P845-849, 2020.9
- 1-3. K. Ishii, N. Yamamoto, K. Bessho, S. Tagashira, Y. Kawabata, H. Matsuda, K. Matsumoto, M. Yoshioka, “DEVELOPMENT OF DISASTER PREVENTION SYSTEM FOR ACCELERATOR TUNNEL”, in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, SP, Brazil, May

2021, pp. 2228–2230.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB315

- 1-4. 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、山本昇、別所光太郎、吉岡正和、J-PARC MR 防災システムの発展、*Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, P18-22, 2021.8
- 1-5. 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、富井洋平、石井恒次、山本昇、別所光太郎、吉岡正和、加速器トンネルでのロボット活用の検証、*Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, P83-87, 2022.10
2. 学会発表（8件）
- 2-1. *International Technical Safety Forum 2019 (ITSF2019)*
- 2-2. 第16回日本加速器学会年会（2019）
- 2-3. 第17回日本加速器学会年会（2020）
- 2-4. *12th International Particle Accelerator Conference (IPAC2021)*
- 2-5. 第18回日本加速器学会年会（2021）
- 2-6. SAT テクノロジー・ショーケース 2022
- 2-7. 第19回日本加速器学会年会（2022）
- 2-8. *International Technical Safety Forum 2022 (ITSF2022)*
3. プレスリリース（1件）
- 3-1. 2022年3月30日 J-PARC にて発表。
- H. 知的財産権の出願・登録状況
1. 特許取得  
なし
2. 実用新案登録  
なし