

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

DURABILITY OF POSITIONING SENSOR NETWORK SYSTEM IN RADIATION ENVIRONMENT (J-PARC) AND APPLICATION PLAN OF DISASTER PREVENTION APP

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)}, 大森千広^{C)}, 芝田達伸^{C)}, 吉岡正和^{D)}

Yasuo Kawabata^{#,A)}, Hiroaki Matsuda^{A)}, Kazunobu Matsumoto^{A)}, Shigeaki Tagashira^{B)},
Koji Ishii^{C)}, Chihiro Oomori^{C)}, atsunobu Shibata^{C)}, asakazu Yoshioka^{D)}

^{A)} TOBISHIMA Corp., ^{B)} Kansai Univ., ^{C)} KEK, ^{D)} Tohoku Univ., Iwate Univ.

Abstract

The authors have developed the location system using a local area network, in order to ensure user's safety during emergency in a long tunnel, such as ILC facility. Although already the location system is a practical level, as future challenges, it is necessary to verify the influence on the communication accuracy due to electrical wave noise, and on the durability of the receiver(AP) according to the radiation, during accelerator operation.

In our previous studies, the durability of the positioning sensor base station against radiation during operation of the equipment was verified. As a result, we confirmed the possibility of continued use of location management and communication function when stopping operation by turning off the power supply during operation.

In 2016-7, we will verify the following two points.

- ① Bring the positioning sensor base station to the private γ -ray irradiation facility, conduct irradiation test up to about 10 kGy at power off state, and verify the usage limit of the equipment.
- ② Build a positioning network system in MR tunnel of J-PARC which is currently in operation. Create for disaster prevention APP and apply it experimentally.

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。加速器施設においては、施設利用者に対する放射線の管理や災害時の安全確保が極めて重要である。従来、大型加速器施設においては、PPS が適用され[1]、トンネル入域者の安全性確保に効果を発揮している。これに加え、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を実装できれば、さらに有効性は高まるものと考えられる。

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。測位センサネットワーク技術とは、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ものである。本技術により、空間内のモバイル端末保有者の所在やその動線等が把握可能となる。本研究は、ILC のような大規模な地下加速器施設の利用者の安全性向上を目的に測位センサネットワーク技術を応用し、加速器施設における位置情報に基づく放射線管理・防災システムを開発するための取り組みの一環である。

本システムの有効性の検証を目的に、いばらき中

性子医療研究センタ（iNMRC）での実験を実施し、モバイル端末を有する人物の所在位置、動線および入退室時刻の管理[4,5]に関し、実現性を検証した。また、ILC を想定した既存の直線状の長大かつ小断面トンネル（神戸ベルトコンベアトンネル）を用いて、無線 LAN の通信速度と同時測位の精度に関する実験を実施し、通信インフラとしての性能、加えて、長大かつ小断面トンネル内における測位精度の誤差は $\pm 2.5\text{m}$ 程度は確保できること[5]を検証した。

さらに稼働している加速器において本システムを導入するには、加速器稼働時の測位センサ基地局の放射線に対する耐久性を考慮したシステム・装置設計が必要である。例えば、ILC の加速器装置周辺では、ガンマ線で 1mSv/h 程度の放射線の放射が想定されており、適用の際には、これらを目標に装置の耐久性を設計する必要がある。また、当該システムの目標には、閉鎖空間である加速器施設内の運用において、モバイル端末を活用し、作業従事者の位置を特定するとともに、緊急時に管理者、作業従事者が効率よくコミュニケーションがとれるシステム（モバイルアプリ）の確立を目指している。

これまで、J-PARC の MR 加速器トンネル内の高放射線環境下での試験稼働、およびガンマ線照射施設での放射線照射試験によって、通信装置の耐久性への影響を検証し、放射線環境下での適用限界並び適用方法が明らかになった。ここでは、これら検証

[#] Yasuo_Kawabata@tobishima.co.jp

結果を報告する。

さらに、閉鎖空間内で作業を実施する際の安全を担保するシステムを開発するために、まずは J-PARC の MR トンネル内での「便利ツール」としてのアプリ開発、その試験運用についての計画を示す。

2. 放射線環境下での通信装置の耐久性

本研究では、どの程度の放射線量でシステム（通信測定システム、装置）の性能劣化（機能停止等）が起こるか、どの箇所がどういった故障をするか、等の把握を目標とする。検証のために、加速器の稼働中に高い放射線が放出される J-PARC の MR トンネル内に、これまでの要素実験で活用してきた汎用的な通信装置を配置し、その耐久性を検証した。さらに J-PARC では、放射線量、照射条件を任意に調整できないため、放射線の照射施設において、Co60 ガンマ線照射による耐久性試験を実施した。

2.1 J-PARC の MR 加速器トンネル内の実験

1)実験概要

J-PARC MR 加速器トンネル内では、加速器の稼働中に高いレベルのガンマ線、中性子線が放射され、さらに停止中にも一定のガンマ線が放射されることから、当該地の放射線量が測定できる位置に通信装置を設置し、その状況をモニタリングした。

MR 加速器トンネル内には放射線の種類・量を監視できる機器（RadMon）が稼働中であり、そこに測定センサの基地局を配置して、放射線の種類・量を計測しながら測定センサネットワークの稼働状況を PC で記録した。PC もトンネル内に設置するが比較的低い放射線環境下に置き、かつ直達の放射線（陽子・中性子）が少ない位置に配置する。基地局と PC は LAN ケーブルでも接続し、無線と有線の両方でネットワーク稼働状況を確認した。

2)測定区域

通信装置は、Figure 1 に示す J-PARC の MR 加速器トンネル内のコリメータ部に装置する。当該過箇所の放射線レベルは、停止期間中で最大 1Gy 程度、稼働期間中で最大 1kGy 程度を想定した。

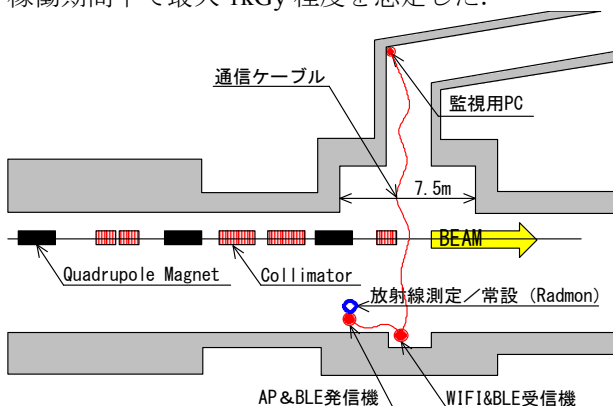


Figure 1 The arrangement of the system on measuring position.

3)設置機器

設置機器は、これまで iNMRC や神戸ベルコントンネルで検証してきた、Figure 2 に示す無線 LAN のアクセスポイント (AP) と今後活用が想定される Bluetooth Low Energy (BLE) の Beacon 発信機器を準備した。現段階では、市販品での耐久性の程度を検証する。今回の試験結果を踏まえ、放射線対策機器の必要性の有無を検証する。

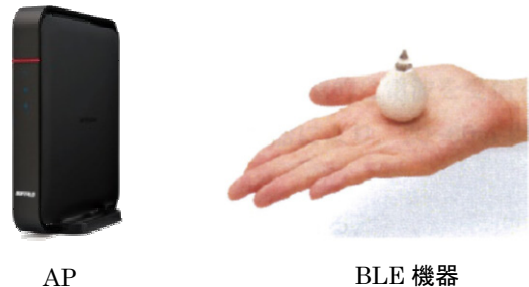


Figure 2: View of the AP and BLE.

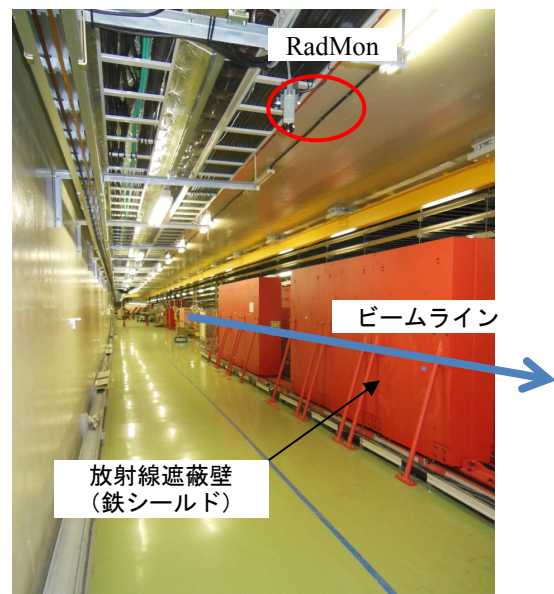


Figure 3: View of the measuring position.

4)放射線測定方法

J-PARC は陽子加速器であるため、トンネル内の放射線環境は複雑であり、異なる種類かつ異なるエネルギーの放射線の影響が混在する。CERN で開発された放射線測定器 RadMon[6]はトンネルの中に置かれた電子回路の放射線効果を測るためのものである。RadMon では線量の合計(Total Ionization Dose, TID)、中性子線量(1MeV-equivalent)を計測することができる。RadMon 近傍での放射線量はおおよそ 100Gy/Month 程度と推定される。この値は本計画を遂行するのに適当な線量であると考えられるため、測定 LAN 基地局等を常設 RadMon 近傍 (Figure 3) に設置して試験を実施した。

5)実験の種類と結果

Table 1 に実験種類、実施時期、実験方法並びに試

験結果の一覧を示す. Case1-1 では, 加速器の稼働停止中の残留放射線の影響を, Case1-2 では, 加速器が稼働中の放射線の影響を検証した. Case1-2 の実験で放射線による故障が生じたため, Case1-3, 1-4 では, 「電源の ON, OFF」や「アンテナの延伸」を実験条件とし, 加速器施設の運用を前提とした放射線の影響を検証した.

Case1-1 では, 照射線量としてガンマ線 1.6Gy の照射に相当する. いずれの AP, BLE についても故障等は見受けられず, 通信状況も正常であった. Case1-2 では, 加速器稼働開始から間もなく, 照射量はかなり少ない段階にも係わらず, 通信不能に陥った. 中性子などの放射線による, 一時的もしくは定常的な故障 (シングルイベント効果) が起きたものと推察される. Case1-3 では, 電源を OFF にすることで, 100Gy 程度の累積放射線量では, 通信機器の故障が生じないことが確認された. Case1-4 では, トータルで 300Gy の照射を受け, 電源アダプタが損傷したが, 通信機器本体に影響はなかった.

Case1-4 では, 照射実験終了後, Figure 4 の位置に AP を配置し, 加速器が停止している状態で, 位置情報管理機能の検証を行った.

400m 間に 9 台の AP を配置, AP1 近傍に管理用の PC を設置した. 通常モバイル (Nexus6p) を 2 台

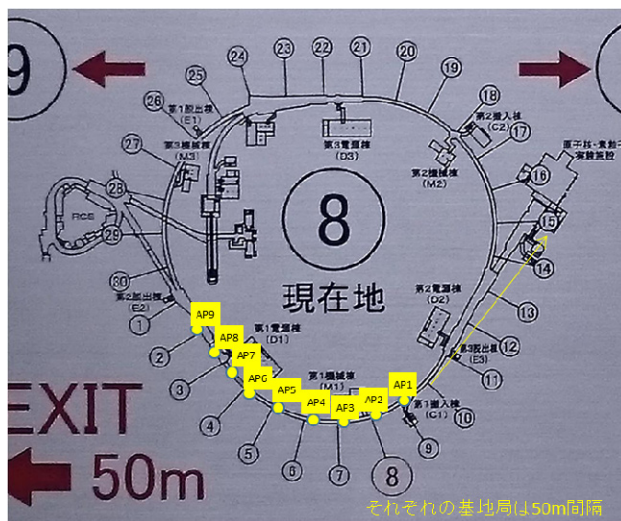


Figure 4: Placement of communication equipment in J-PARC MR Tunnel).

使用し, 400m を 2 往復して, 25m 毎に位置情報を入手した(Figure 5). 全部で 136 点の計測を行ったが, 誤情報は 1 箇所のみ (的中率 99%) であり, 位置情報管理機能にも放射線の影響がないことが確認できた.

Table 1: Experimental Outline and Result

Case	目的	試験条件並びに試験方法	試験結果, 想定原因																				
1-1	加速器停止中の残留放射線に対する影響の把握 [2015.7~9]メンテ中	・装置位置/コリメータ部 ・照射量/残留線量 1mSv/h の環境下で 67 日間. 照射線量としてガンマ線 1.6Gy の照射に相当	・故障無し																				
1-2	加速器稼働中の放射線 (中性子・陽子・ガンマ線等) に対する影響の把握 [2015.10~12] 加速器稼働中	・機器の電源/ON 状態 ・装置位置/受信器をコリメータ部 (RadMon) 近傍に設置 ・観測方法/監視用 PC による動作状況の常時監視 ・照射量/RadMon 測定精度以下 (0.04Gy 以下)	・稼働後, 2~5 日程度で通信不能 (故障) ・BLE/全く稼働せずに完全に破損 ・AP/電源, 通信機器, ケーブルと不具合箇所は様々. 但し, しばらく非放射線環境下で放置した後の再確認で, いずれの機能も回復, 通信が可能となった. ➢累積量ではなく, 中性子などの 1 個の粒子が装置に入射して電離作用を引起し, 高密度の電荷が生成されて半導体中を流れることによる, 一時的もしくは定常的な故障 (シングルイベント効果) が起きたと推察できる.																				
1-3	加速器稼働中での通信装置の運用状況に則した影響の把握 [2016.1~3]	・機器の電源/OFF 状態 ・放射線環境下で, 通信装置のアンテナのみを放射線影響下に置いた状態 ・装置位置/受信器をコリメータ部に設置 ・照射量/累積量 100Gy 程度	・OFF 状態では故障せず, またアンテナ方式も使用できた. <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>設置条件</th> <th>電源 OFF</th> <th colspan="2">アンテナ延長で遠方設置</th> </tr> <tr> <th>通信条件</th> <th>WiFi</th> <th>Wired</th> <th>WiFi</th> <th>Wired</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">稼働期間</td> <td>21day</td> <td>○健全</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>55day</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">※通信条件 WiFi: 無線 Wired: 有線</p> ➢加速器運転時に電源 OFF 状態であれば, 放射線環境下での適用性が高まる.	設置条件	電源 OFF	アンテナ延長で遠方設置		通信条件	WiFi	Wired	WiFi	Wired	稼働期間	21day	○健全	○	○	○	55day	○	○	○	○
設置条件	電源 OFF	アンテナ延長で遠方設置																					
通信条件	WiFi	Wired	WiFi	Wired																			
稼働期間	21day	○健全	○	○	○																		
	55day	○	○	○	○																		
1-4	Case1-3 と同じ [2016.10~2017.6] (250day)	・機器の電源/OFF 状態 ・MR トンネル内に位置情報管理システムを構築 ・装置位置/受信器をコリメータ部から C1 出入口の約 400m 間, 通信装置 9 台@50m ・照射量/累積量 450Gy 程度	・コリメータに最も近い AP の 12V 供給電源装置が故障した. ・AP 本体の WiFi, Wired とともに通信機能は健全																				

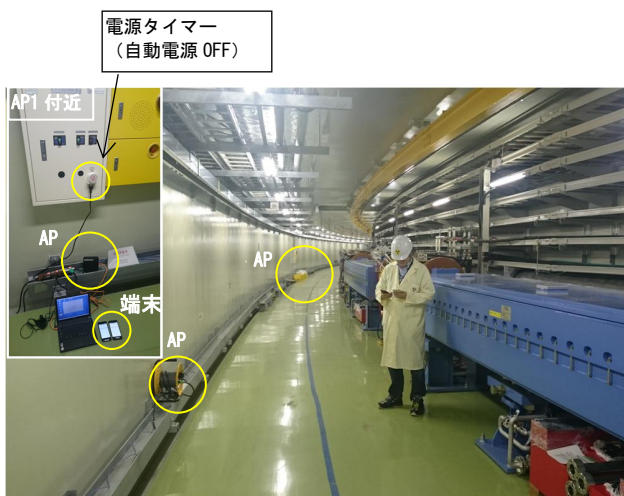


Figure 5: Positioning sensor network system in MR tunnel.

2.2 Co60 ガンマ線照射による耐久性試験

1) 実験概要

J-PARC では、放射線量、照射条件を任意に調整できないため、(株)アトックス技術開発センタ (Figure 6) , (国研) 高崎量子応用研究所(QST) (Figure 7) の各照射施設において、Co60 ガンマ線照射による耐久性試験を実施した。試験は、アトックスで 2 回、QST で 1 回実施している。放射線の照射量は、照射時間と照射源からの距離で調整した。



Figure 6: The Radiation irradiation facility (in ATOX).



Figure 7: The Radiation irradiation facility (inQST).

2) 実験の種類と結果

Case2-1 は、1 時間の照射時間でガンマ線の照射量が 1.0~1000Gy/h の範囲で実施した。Case2-2 は、照射時間を 24 時間とし、照射量を 100, 500 Gy/h の 2 か所で行った。Case2-2 で、AP の故障が生じたが、故障した時間が把握できなかった。Case2-3 では、AP を複数台用意し、照射時間を 165 時間とし、照射量を 1.5~30Gy/h の範囲で実施した。

Table 2 に Case2-1 の試験結果を示す。電源 ON 状態では、照射量が 100 Gy/h を超え、1000 Gy/h の範囲で、電源アダプタ、AP とともに故障することが判明した。一方、電源 OFF では、1000Gy/h までは故障しないことも明らかとなった。

Table 2: Case2-1 Experimental Result (Irradiation time /1hour)

電源状態	照射量 (Gy/h)	Power	Wifi	Wired
OFF	1	○	○	○
	10	○	○	○
	100	○	○	○
	1000	○	○	○
ON	1	○	○	○
	10	○	○	○
	100	○	○	○
	1000	×	×	×

Table 3 に Case2-2 の試験結果を示す。Case2-2 では、電源 OFF 状態での機器の限界を知ることを目的に実験を実施した。

Table 3: Case2-2 Experimental Result (Irradiation time /24hour)

照射量 (Gy/h)	累積照射量 (Gy)	Power	Wifi	Wired
100	70~2150	×	×	×
500	340~10074	×	×	×

結果、全ての機器が故障した。照射開始後、40 分までは機器が稼働していることを確認したが、開始後 24 時間後の 2 回目の測定時に 100, 500 Gy/h ともに故障が発生しており、本実験では、正確な故障時間は把握できなかった。また、開始後 40 分の測定で、照射環境下でスイッチを ON にしており、この通電の影響があった可能性もある。さらに機器に対するダメージは、単位時間当たりの照射量の大きさか、それとも照射時間の長さなのか、この点についても着目する必要がある。

Table 4 に Case2-3 の試験結果を示す。試験 2-1 で OFF 状態であれば、1000Gy/h を、1 時間照射しても各装置類が壊れることがなかった。Case2-3 では、低いレベルの放射線を長時間照射した場合の影響を検証した。単位時間当たりの照射量が少なくても、165 時間の連続照射による累積照射量が 2000Gy を

超える領域では、装置に故障が生ずることが明らかになった。

Table 4: Case2-3 Experimental Result (Irradiation Time /165hour)

照射量 (Gy/h)	累積照射量 (Gy)	Power	Wifi	Wired
1.5	247.5	○	○	○
3	495	○	○	○
4.5	742.5	○	○	○
6	990	○	○	○
9	1485	○	○	○
12	1980	○	○	○
18	2970	○	×	×
30	4950	×	×	×

なお、装置の故障に対し、その後の復旧は確認されていない。

2. 放射線環境下における耐久性について

今回の一連の試験により、測位センサネットワークシステムを構成する機器の放射線に対する耐久性について、以下のことが明らかになった。

- 機器の電源 OFF 状態では、ON 状態に比べ、放射線の影響を受けにくい。また、アンテナを遠方に設置する方法も有効である。
- MR トンネル内、コリメータ付近の高放射線環境下（累積 300Gy の照射量）でも、一時的な故障が生じたが、しばらくすると復帰した。中性子による、一時的もしくは定常的な故障（シングルイベント効果）が起きたものと推察される。
- ガンマ線の照射施設で、累積照射量が 2000Gy 以下の環境の場合、機器が OFF 状態を保てれば、市販の機器でも故障することはない。
- ILC の加速器装置は、ガンマ線で 1mSv/h 程度の放射線が想定されている。今回の実験により、加速器稼働開始に伴い、機器の電源を OFF する仕組みを取り入れれば、稼働中の放射線に十分に耐えられるシステムの構築が可能である。

3. 防災管理システムの構築に先駆けた便利アプリの開発

本研究開発の最終成果では、Figure 8 に示すように、トンネル内での作業の安全を確保するため、施設利用者の位置やその動線の把握、さらに発災時に適正な避難誘導が行えるシステムを構築し、また、そのためのアプリをモバイルに実装させることを目指している。

今年度は、MR トンネル内の Figure 4 に示した位置に配置されている AP を利用し、トンネル内作業を安全に実施することを目標に、Table 5 に示す機能を有する「便利ツール」としてのアプリを開発し、現地で試験的に運用した上で、防災管理システムの基本的課題の抽出を図る予定である。

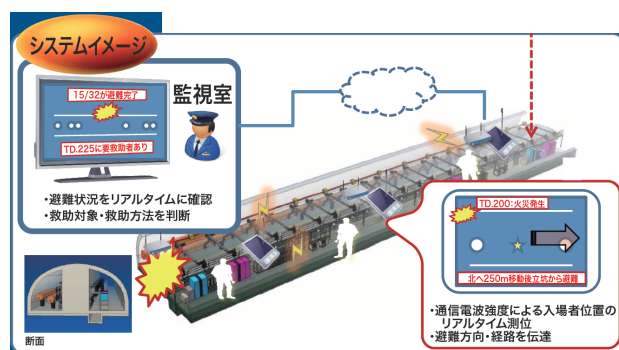


Figure 8: Concept of disaster management system.

Table 5: Development of Convenient App.

目的	管理 PC	モバイル
①作業員の居どころを表示するアプリ	全作業員（モバイル）の位置、動線を表示	・モバイル（トンネル内作業員）は、自身の位置を表示 ・他の作業員の位置の表示
②トンネル内情報を共有・閲覧・書き込みできるアプリ（既読機能必要）	・未読者を検知 ・緊急時行動指示	・既読ボタンを押さないと警告音が止まらない。 ・避難経路の確認

4. おわりに

本論文では、高放射線環境下での機器の耐久性についての検証結果を示した。市販の無線 LAN 基地局であっても、加速器稼働時には、電源を OFF 状態にする対策を採れば、長期的に機器が機能し、システムが維持できることが確認できた。

今後は、J-PARC の MR トンネルの中で、模擬的に位置管理ができる通信環境を創設し、実際に位置情報を管理しつつ、防災管理システムの基本的な課題の抽出を図る。

参考文献

- [1] 榊泰直, 中村直樹, 吉川博, 上田晋司, “J-PARC LINAC 用高速インターロックシステムの設計”, Proceedings of 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.467-469, 2003.
- [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] 大森千広, 田村文彦, 長谷川豪志, 吉井正人, 白形政司, “LHC 入射器アップグレードのためのラドモンを使った半導体の放射線損傷試験”第 12 回日本加速器学会年会, 2014, 8.