

測位センサネットワークシステムの放射線環境下（J-PARC）における耐久性の検証報告

REPORT OF THE RADIATION DAMAGE STUDY OF THE POSITIONING SENSOR NETWORK SYSTEM IN HIGH RADIATION ENVIRONMENT (IN J-PARC)

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)}, 吉岡正和^{D)}

Yasuo Kawabata^{#,A)}, Hiroaki Matsuda^{A)}, Kazunobu Matsumoto^{A)}, Shigeaki Tagashira^{B)},

Koji Ishii^{C)}, Masakazu Yoshioka^{C)}

^{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 wave noise and on the durability of the receiver (AP) according to the radiation, during accelerator operation.

This year, under a high radiation environment in the MR of J-PARC, to investigate the impact of the device and the communication situation. At the time of the beam operation, it was established to choose the location where the maximum radiation dose of about 100Gy / month (neutrons, protons, γ -rays, etc.) is irradiated. As an additional, in the γ -ray irradiation facilities by cobalt-60, it was carried out irradiation test about 1kGy, to the device. This paper reports on the results of these experiments.

1. はじめに

東日本大震災の際の危機的状況の中で、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]、トンネル入城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]}に取り組んでいる。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、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。

既に、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ー (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。

一方で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、加速器稼働時の電波ノイズの通信精度への影響、測位センサ基地局の放射線に対する耐久性を考慮した装置設計が必要である。例えば、ILC の加速器装置周辺では、 γ 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。

本研究開発では、J-PARC, 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 γ 線照射施設での放射線照射試験によって、通信装置の耐久性及び通信状況への影響を検証した。本編では、これら検証結果を報告する。

2. 実験計画と結果

本実験では、どの程度の放射線量でシステム (通信測位システム, 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。J-PARC では、加速器の稼働中に高いレベルの γ 線, 中性子線が放射され、さらに停止中にも一定の γ 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。但し、J-PARC 内の実験では放射線量が調整できないため、別途、 γ 線照射施設での放射線照射試験を実施し、稼働状況を確認した。

[#] Yasuo_Kawabata@tobishima.co.jp

Table 1: Experimental Outline

種類	試験条件並びに試験方法
Test 1 / 加速器停止中の残留放射線に対する影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・ 期間 / 夏期メンテ期間中 (2015. 7~9 月) ・ 装置位置 / コリメータ部に基地局 ・ 照射量 / 最大 1 Gy 程度 ・ 観測方法 / 監視用 PC による動作状況の常時監視
Test 2 / 加速器運転ノイズの影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・ 9 月頃の主電磁石・電源全台試験時をねらって稼働試験 ・ ノイズ環境下での動作状況の確認
Test 3 / 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 受信器を RadMon 近傍に設置して試験 (放射線量のモニター) ・ 照射量 / 最大 1kGy 程度 ・ 観測方法 / 監視用 PC による動作状況の常時監視

2.1 J-PARC の MR 加速器トンネル内の実験

1) 実験概要

J-PARC の 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が稼働中であり、そこに測位センサの基地局を配置して、放射線の種類・量をモニターしながら測位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

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 程度を想定している。

3) 設置機器と配置計画

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、Photo1 に示す無線 LAN のアクセスポイント (AP) と今後活用を想定している Bluetooth Low Energy (BLE) の Beacon 発信機器を計画している。現段階では、放射線対策機器は適用せず、市販品での耐久性の程度を検証する。



測位機能付き AP

市販 AP



BLE 機器

Photo 1: View of the AP and BLE.

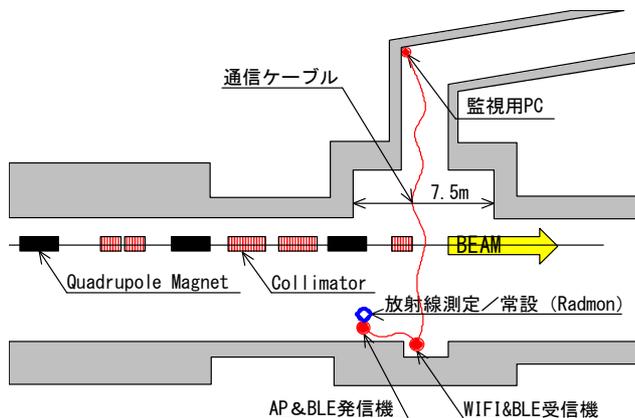


Figure 1: The arrangement of the system on measuring position (Test 3).

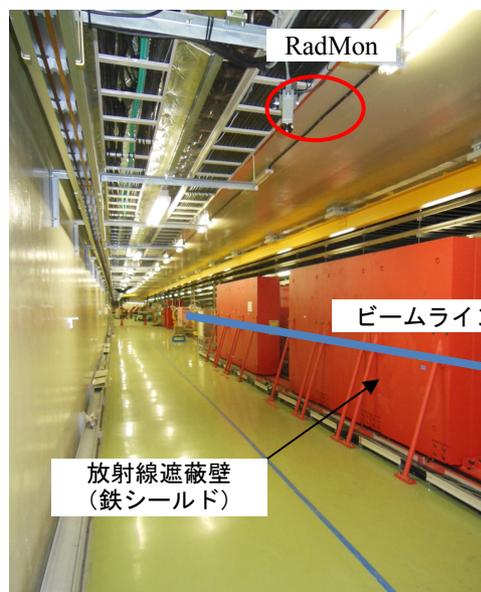


Photo 2: View of the measuring position.



Photo 3: The equipment near the beam duct pipe (Test 1).



Photo 4: The monitoring system (Test 1).

Table1 の「Test 3 /稼働中試験」における機器配置、測定区域の状況を Figure 1, Photo2 に示す。AP と BLE を常設の放射線モニター (RadMon) の近傍に設置し、これと電波通信ができる AP を設置、この AP とシステムを管理するパソコンをケーブルで接続し、稼働状況を監視する。パソコンは、直接放射線の影響を受けない位置に装置した。

Table1 の「Test 1 /停止中試験」における機器配置状況と監視用 PC を Photo3,4 に示す。

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。

2014 年 10 月下旬から年末にかけ、速い取り出し運転 (FX Operation) 約 240kW の出力で、ニュートリノ実験施設へのビーム供給を実施した。この期間、MR トンネル内のコリメータ部に常設された RadMon によると、その地点での放射線量はおよそ 2 ヶ月で 200Gy であった。現在の速い取り出し運転での出力は約 350kW と向上しているが、コリメータ部でのロスほとんど変化しない (許容限界程度)。このため常設 RadMon 近傍での放射線量はおよそ 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、測位 LAN 基地局等を常設 RadMon 近傍に設置して試験を実施した。

5)試験結果

Table2 に試験結果の概要を示す。Test 1 では残留線量 1mSv/h の環境下で 67 日間の試験を実施した。これは照射線量として γ 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。Test 2 では加速器が稼働している状況と同じ、全機器一斉通電下での通信状況を確認した。特段のノイズ対策も実施しなかったが、こちらも通信状況の異常等は見られなかった。

Test 3 ではビーム運転を開始して間もなく、通信が不能となった。3 ヶ月以上の夏期メンテナンス直後で、まだビーム調整段階での故障であり、放射線量は RadMon での測定レベルに達していなかった。ロス量との関係から、放射線量は 0.04Gy 程度以下と推定している。各機器の損傷時期と推定されるビーム数との関係を Figure 2 に示す。黄色で着色し

Table 2: The Experimental Results

実験の種類	実際の試験条件	試験結果
Test 1 / 加速器停止中の残留放射線に対する影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MeV 以下の γ 線照射約 • 1 mSv / h (\approx 1 mGy / h) で 67 日間 • 推定 1.6 Gy の γ 線照射 	<ul style="list-style-type: none"> • 故障無し
Test 2 / 加速器運転ノイズの影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> • 主電磁石・電源全台試験時稼働試験 • ノイズ環境下での動作状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> • ノイズによる影響無し
Test 3 / 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	<ul style="list-style-type: none"> • 1 GeV 以下の中性子・陽子・ガンマ線 	<ul style="list-style-type: none"> • 運転開始後、2~5 日程度で故障 • RadMon 測定精度以下

日時	機器の種類	ビーム状況
2015/10/15 22:28	Beacon4	HD supply
2015/10/17 0:54	Beacon3	HD supply
2015/10/17 1:55	AP4 (wireless)	HD supply
2015/10/17 5:33	AP3 (wire & wireless)	HD supply
2015/10/17 9:04	AP1 (wire & wireless)	HD supply
2015/10/17 19:53	AP2 (wire) & AP4 (wire)	SX study
2015/10/19 18:05	Beacon2	HD supply
2015/10/20 0:44	Beacon1	HD supply
2015/10/26 22:00 (PC OFF)	AP2 (wireless)	SX study ⇒ HD supply

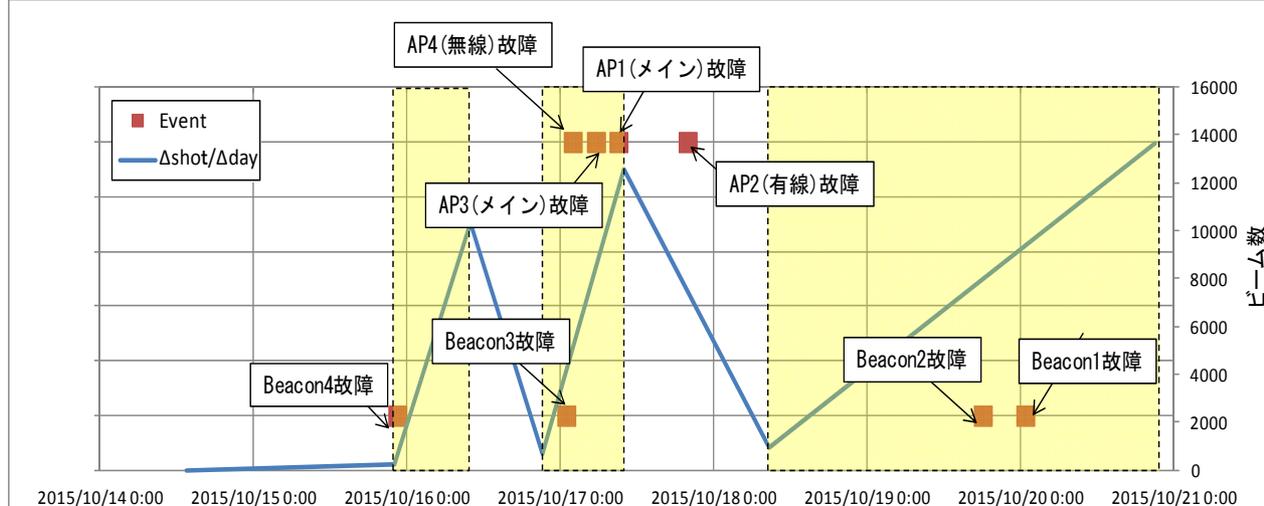


Figure 2: The equipment failure time (in the Test 3).

ているところが加速器の稼働時間帯である。次々と通信不能になっている状況を確認できる。

ビーム停止時に破損状況を詳細確認した。BLEは全く稼働せずに完全に破損していた。一方APは電源、通信機器、ケーブルと不具合箇所は様々であった。またしばらく非放射線環境下で放置した後で再確認したところ、APについてはいずれの機能も回復し、通信が可能であることが判明した。

Test 1とTest 3を比較し、 γ 線では1.6Gy程度以上の放射線耐性があるのに対し、中性子等を含む照射では0.04Gyでも故障が発生することがわかった。このことから今回の故障は累積量ではなく、1個の粒子が入射して電離作用を引き起こし、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）が起きたと推察される。

6)電源 OFF 状態の追加試験の実施

シングルイベント効果によるものと仮定すると、照射時に電源 OFF 状態であると放射線耐性が向上する可能性が考えられる。実際の加速器運転中では通信機器は必ずしも ON 状態である必要はない。またアンテナだけを放射線環境下に晒し、通信機器は可

能な限り直達の放射線が照射されないような位置に設置することも可能である。このような加速器稼働中での通信装置の運用状況に則した、①通信装置の電源を OFF 状態、さらに②放射線環境下では通信装置のアンテナだけ装置した状態、2つの状態での試験を追試した。試験では、無線と有線の両方を確認している。

Figure 3に試験時の放射線環境条件、Table 3に試験結果を示す。累積で100Gy程度の照射量以下では、①の電源 OFF 状態では故障が発生せず、安定した状態で使用できることを確認した。また②のアンテナ方式も問題なく使用できることを確認した。

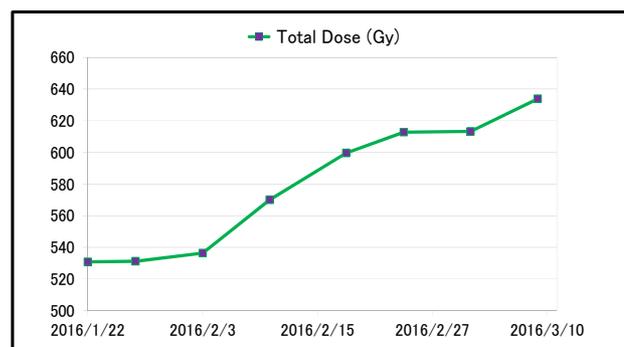


Figure 3: The radiation environment conditions.

Table 3: The Experimental Results

試験条件	電源OFFで設置				アンテナ延長で遠方に設置	
	GF04B		GF156		WAPS-AG300H	
	Wired	WiFi	Wired	WiFi	Wired	WiFi
装置名						
装置日	2016/1/14					
確認日	2016/2/3	○(健全)	○	○	○	○
確認日	2016/3/9	○	○	○	○	○

2.2 Co60 γ 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ーの照射施設において、Co60 γ 線照射による耐久性試験を実施した。



Photo 5: The radiation irradiation facility.

Test 1 より 1.6 Gy 程度は耐性があることがわかっていたため、1kGy 規模の放射線量とし、有線と無線の両方を確認した。いずれも約 1 時間の照射を実施し、放射線量は線源からの距離で調整している。

Table 3: Experimental Conditions

NO.	放射線量	照射時間
1	1.0 Gy/h	9:17 start 10:17 stop
2	10 Gy/h	10:36 start 11:36 stop
3	100 Gy/h	11:54 start 12:54 stop
4	1.0kGy/h	13:14 start 14:14 stop

2) 試験結果

Table 4 に示すように、放射線量 1~100Gy/h では、照射期間中、電源が ON, OFF であっても、通信機能に不具合は生じなかった。また Table 5 に示すように 1.0kGy/h の照射量では、電源が ON の状態では電源、有線、無線ともに不具合が生ずることが確認された。 γ 線照射試験においても電源 OFF による放射線耐性の向上が確認されたが、Test 3 で確認された一時故障(復旧)は確認されていない。 γ 線照射での故障はシングルイベント効果での故障とは違う可能性が考えられる。累積線量効果やはじき出し損傷についても電源 OFF が有効であるかは定かではない。電源 OFF での積算限界値や低線量下での積算限界等、さらなる試験が必要と考えている。

Table 4: The Experimental Results (on 1~100Gy/h)

No.	電源状態	MAC	Power	WiFi	Wired
①	ON	7F18	○	○	○
②	ON	0800	○	○	○
③	ON	84F0	○	○	○
④	OFF	EE70	○	○	○
⑤	OFF	9848	○	○	○
⑥	OFF	9560	○	○	○

Table 5: The Experimental Results (on 1.0kGy/h)

No.	電源状態	MAC	Power	WiFi	Wired
①	ON	7F18	×	×	×
②	ON	0800	×	×	×
③	ON	84F0	×	×	×
④	OFF	EE70	○	○	○
⑤	OFF	9848	○	○	○
⑥	OFF	9560	○	○	○

3. おわりに

本論文では、高放射線環境下での装置及び通信状況への影響を把握するための実験計画とその結果を示した。当初、想定していた放射線による通信装置への影響が確認されたが、加速器稼働時には、①電源を OFF にした状態にする、さらに②アンテナのみを配置するなどの対策を採れば、現有装置でも機能することが確認できた。

今後は、J-PARC の MR の中で模擬的に位置管理ができる通信環境を創設し、入坑時には実際に位置情報を管理しつつ、長期間健全性が維持されることを実証する予定である。

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.