

LIU(LHC 入射器アップグレード)-RF 共同研究の進捗 (3) - 窒化ガリウム半導体アンプの放射線試験 - STATUS OF LIU (LHC INJECTOR UPGRADE) RF COLLABORATION (3) -IRRADIATION TEST OF GaN SOLID-STATE AMPLIFIER-

大森 千広 ^{*A)}, 白形 将司 ^{A)}, 田村 文彦 ^{A)}, 長谷川 豪志 ^{A)}, 杉山 泰之 ^{A)}, 沖田 英史 ^{A)},
吉井 正人 ^{A)}, Paoluzzi Mauro^{B)},
Chihiro Ohmori^{*A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Yasuyuki Sugiyama^{A)},
Hidefumi Okita^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Paoluzzi Mauro^{B)}
^{A)}J-PARC Center
^{B)}CERN

Abstract

J-PARC RF group has been collaborating with CERN to replace ferrite-loaded cavities in the PS Booster by wide-band ones as one item of the LHC Injector Upgrade Project (LIU) for high luminosity LHC (HiLumi). All replacements were completed in the long shut down, LS2. The booster beam energy increased to 2 GeV from 1.4 GeV. Accelerated beam was transferred to SPS after the acceleration to 26 GeV at the PS. We also cooperate to develop Gallium Nitride solid-state amplifier to improve the feedback gain at the PS accelerating cavity system. The solid-state amplifier should be rad-hard because it will be located near the cavity to obtain high feedback gain to compensate a heavy beam loading. Irradiation test of the amplifier was carried out under a mixed-field radiation area downstream of a beam collimator in the J-PARC main ring. Although total dose of 18 kGy (1.8 Mrad) and 2.3×10^{14} n/cm² were irradiated, the amplifier was stable and same amplification gain.

1. はじめに

J-PARC リング RF グループは CERN と 2002 年から広帯域空洞に関してコラボレーションを行ってきた [1]。2012 年からは LIU プロジェクト [2,3] の一環として PS ブースターの全フェライト空洞の金属磁性体ファインメット® [4] を用いた広帯域空洞 [5,6] への置き換えおよび PS の縦方向ビーム不安定性を抑えるためのダンパー空洞に協力してきた [7-10]。この広帯域空洞技術は CERN の反陽子減速にも応用され Antiproton Decelerator (AD) と Extra Low Energy Antiproton ring (ELENA) の減速空洞としても活用されている。Figure 1 に CERN のメイラン地区の加速器とそこに設置されている広帯域空洞を示す。この地区で稼働中のシンクロトロンすべてでこの技術が使われていることがわかる。

PS ブースターの空洞置き換え [11-16] は本共同研究の中心課題であり、費用的にも最もウエイトを占めている。これまで稼働してきたフェライト空洞では必要なビーム強度を得ることが難しく改良する場合も価格的に高額となることから、CERN は高性能な金属磁性体空洞を用いたシステムに全面的に置き換えることを選択した。この決定において J-PARC は空洞技術だけでなく、試験用の空洞を用いてビームローディング試験も行っている [17]。Table 1 に新旧の空洞の比較を示す。このシステムはすでに稼働しビームを PS に供給している [18-20]。さらにそのビームは SPS へと入射されており、LHC 運転再開に

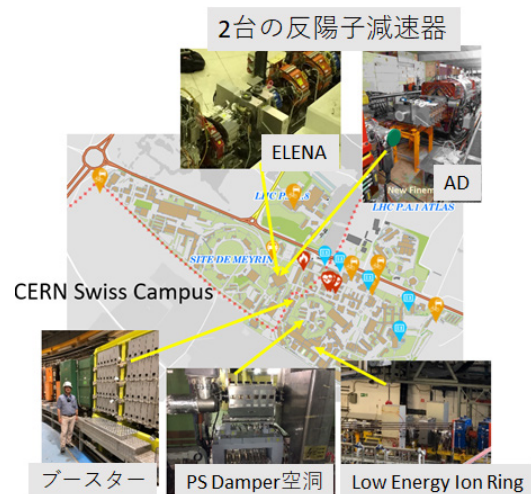


Figure 1: CERN Swiss Campus and wideband RF cavities.

向け順調に準備が進んでいる。ブースターでのビーム運転ではこれまで 8 kV に制限されていた加速電圧が、合計電圧で 24 kV に変わり、より高い電圧でのビーム加速が行われている [21]。

CERN PS は 1959 年から稼働している最も古いシンクロトロンの一つであると同時に LHC 入射器チェーンのカギとなる加速器である。PS ブースター(陽子)と Low Energy Ion Ring (イオン) から来たビームを加速し SPS に送っている他、ビーム実験にも供給している。LHC 入射器として低エミッタンスのビームを供給するために PS ブースターのエネル

* chihiro.ohmori@kek.jp

Table 1: PS Booster RF System

Cavities	ferrite-loaded	Magnetic Alloy loaded
Harmonic number	1, 2, 10	1, 2,...10
RF voltage (H=1)	8 kV	24 kV in total
RF voltage (H=2)	8 kV	
Beam intensity	1×10^{13} ppp	2×10^{13} ppp
Straight sections	4	3
Energy	1.4 GeV	2 GeV

ギーは 1.4 GeV から 2 GeV に増強された。一方 LHC 行きのビームとして縦方向のエミッタンスも小さい必要がある。この際に問題となったのが結合バンチ不安定性であった [22,23]。この対策として、多数の不安定性のモードを抑えるための広帯域ダンパー空洞開発も共同研究のテーマである [24]。ダンパー空洞を Fig. 1 に示す。一方で高次モードである四極振動も観測され、すでに PS にあった 40 MHz の空洞をランダウ空洞として用いて対処している [25,26]。更に、この空洞は LHC 向け運転以外にも使用されている。SPS の遅い取り出し運転では PS のビームを四次共鳴を使いリング内を 5 本のビームが周回する状態をつくりピーク強度を下げたビームを 1 本ずつ SPS に入れている。すなわち周長が PS の 11 倍ある SPS を PS の 2 サイクルで 10/11 周分満たすことができる。この際に問題となるのは PS の取り出しキッカーがビームの一部をけりだしビームロスを起こすことである。このため、ダンパー空洞をバリアバケツ空洞として運用する試みが行われている [27,28]。

ELENA は CERN の最も新しい加速器 (減速器) であり、AD で 5.3 MeV まで減速した反陽子を 100 keV までさらに減速することを目的としている。これにより反水素などの収量が 10 から 100 倍と飛躍的に増加することが期待されている。ELENA において、広帯域空洞が採用された理由は、100kHz の低周波まで出力可能な広帯域と周長わずか 30 m の小型リングのごく短い直線部に必要な減速電圧を得られることである。ELENA の減速空洞を Fig. 1 に示す。ELENA 空洞は長さ 13 cm の小型空洞であり、2013 年に J-PARC MR でビームローディング試験に用いられた空洞と同じ形状となっている。反陽子など特殊なビームの減速は広帯域空洞の新たな応用分野と言える。

2. 耐放射線半導体増幅器の開発

PS ブースター、PS、ELENA、AD の広帯域空洞はすべて半導体増幅器によって駆動されている。PS 以外の空洞では半導体増幅器は空洞の横に設置されている。PS では半導体増幅器は空洞下の鉄シールドの中に設置され、放射線による影響を約 30 分の 1 に減らしている。PS ブースターでは現時点では放射線量は年間数十 Gy 程度であるが、長期的には放射線によるアンプゲインの変化が予想された。このため、この共同研究では耐放射線の半導体増幅器が重要なテーマとなり、国内外の施設を用いて開発が行われてき

た [29,30]。PS ブースターでは通常の Si MOSFET を放射線量に応じてバイアスを調整できる回路を導入しアンプゲインの安定化と長寿命化を実現した [31]。この回路を組み込んだ半導体増幅器はすでにブースターで運転に使われている。

PS では陽子またはイオンビームを 10 MHz 帯のフェライト空洞を用いて加速している。この空洞は真空管増幅器によって駆動されている。ビーム強度に応じて、終段増幅器の筐体内部にある直接フィードバック回路を用いてビームローディングを低減させている。このフィードバック回路は小型の真空管を用いているため、高速なフィードバックと高ゲインが両立しない。最近の回路計算により、高ゲイン高速のフィードバック回路により、ビームローディングをさらに軽減できることがわかっている。我々は当初 LD MOS と呼ばれるタイプの MOSFET がガンマ線照射に対して強いため、フィードバックアンプの候補として検討を進めていた。しかし、CERN での照射試験により中性子を含んだ混合場では Single Event が発生し容易に故障することがわかった [32]。

もう一つの候補として、最近注目されている窒化ガリウム (GaN) 半導体が放射線に強いとの報告があり、高周波増幅器用の半導体も製造され始めたため、500 W 級のアンプユニット (Fig. 2) を製作し耐放射線試験を計画した。アンプユニットは保護装置とダミー負荷を追加した試験装置として J-PARC MR のコリメータ部に設置された (Fig.3)。

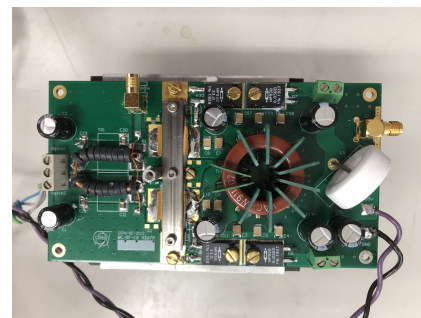


Figure 2: GaN solid-state amplifier for irradiation test.

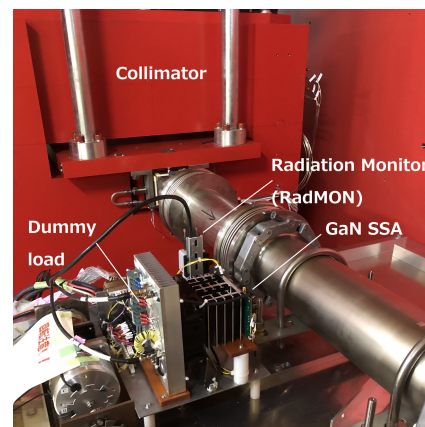


Figure 3: GaN solid-state amplifier in irradiation test area.

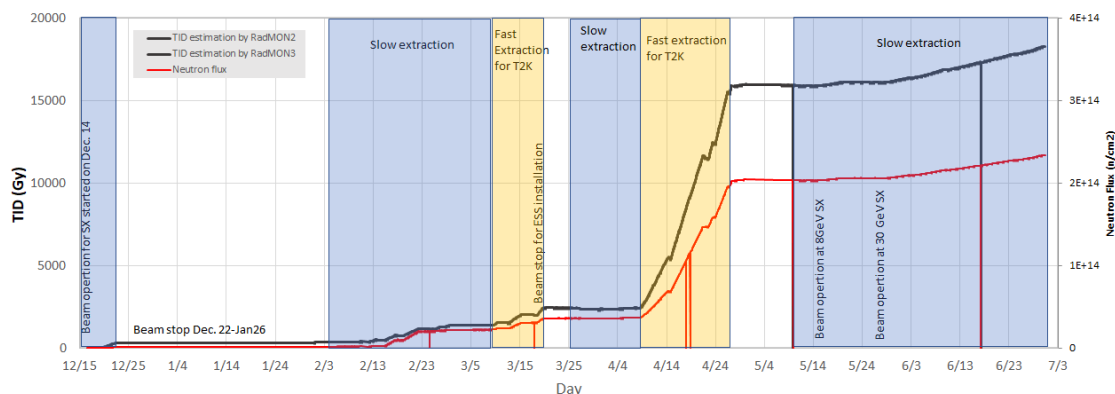


Figure 4: Variation of TID and total neutron flux during irradiation test.

2.1 照射線量

照射線量は Fig. 3 のようにアンプの近くにおかれた放射線センサー (RadMON#1) によって Total ionization dose (TID) と中性子線量が計測された。このセンサーは CERN で開発された放射線計測器 RadMON の最新版 RadMONv6 である [33,34]。今回の試験では照射線量が高いためセンサーの上限値に達することが予想された。このため、補正用にコリメータ部内でアンプから離れた場所に 2 台目のセンサー (RadMON#2)、コリメータ部の外の通路上に RadMON#3 を設置した。これら 2 つのセンサーを使い、今回の照射試験中の TID および中性子線量を求めた。照射試験は 2020 年 12 月から開始し、2021 年 6 月 29 日に終了した。途中冬季休暇などによるビーム停止があったが、TID は 18 kGy、中性子線量は 2.3×10^{14} n/cm² に達した (Fig.4)。

MR の運転においては T2K 実験のために 510 kW の大強度運転を行っている。この期間に照射線量が大きく増加していることがわかる。また、遅い取り出し運転においても 60 kW 運転時には約 1 か月間に 2 kGy 程度増加している。一方で、運転調整中の 8 GeV 運転中はほとんど線量が増加していない。

2.2 GaN アンプ

GaN 半導体は 1MRad のガンマ線、陽子線などによって試験されている。我々は一昨年に予備試験として Qorvo 社の小型 GaN 半導体 QPD1013 単体の試験を行い、30 kGy を照射した。この試験では RF アンプとしての増幅動作は行わずゲート電圧のみをパルス動作させた。この小電力試験ではバイアス電流が変化せず安定した動作が確認できた。この試験結果を踏まえ、今回の試験では同じ Qorvo 社の高出力 GaN 半導体 QPD1016 を 2 個ブッシュブルで使用した半導体アンプを CERN が製作し、RF 増幅動作を行いながらの照射試験を行った。

Table 2 に GaN アンプの試験条件を示す。サイクルタイム 1 秒、Duty30 % で信号発生器で作られた正弦波は地上部にあるプリアンプによって増幅さ

れ 0.5 W 程度の入力信号としてトンネル内の GaN アンプに送られる。この信号レベルは方向性結合器によってモニターされた後検波されデータロガーによって記録される。GaN アンプは約 27 dB のゲインを持ち、約 300W の高周波出力となる。この RF 出力はダミーロードによって吸収されるが、出力レベルは方向性結合器によりモニターされ地上部に送られる。地上部に送られた信号は検波された後データロガーによって記録される。このデータロガーでは GaN 素子やダミー抵抗の温度やドレイン電流が記録されている。検波された RF 信号レベルから求められたアンプ出力を Fig. 5 にしめす。ここで RF 入力は地上部では 0.5 W である。当初、GaN 半導体の温度が高くなったため、ゲート電圧を下げている。さらに 2 度ゲート電圧を調整したため、アンプ出力が変動している。これは GaN アンプとダミーロードが空冷のため、トンネル内の温度変動などの諸要因によって温度が変動し、GaN FET のアイドル電流に変動が生じたためと考えられている。特に今回はゲート電圧を Duty に応じたパルス動作していないため、この変動が大きくなっていた。アンプの入出力から求められたアンプゲインを Fig. 6 にしめす。Figure 7 にドレイン電流を示す。RF 出力時の電流は約 7.6 A である。アイドル時の電流はゲート電圧の調整によりアイドル電流は約 1 A になったが、徐々に低下する傾向が見られている。

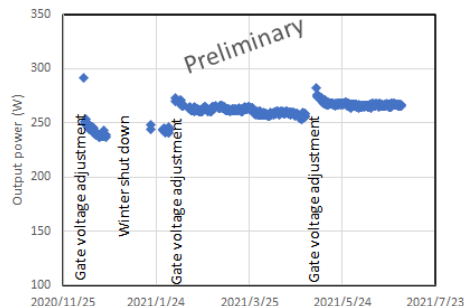


Figure 5: RF output power during irradiation test.

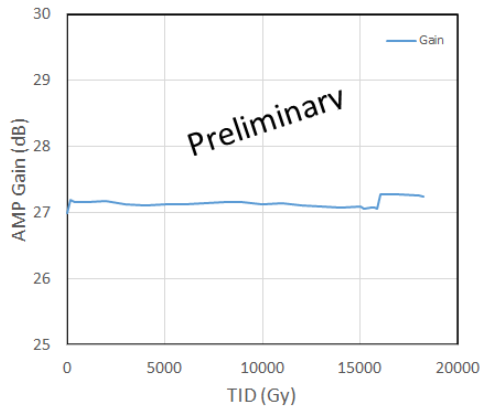


Figure 6: Gain variation of GaN solid-state amplifier during irradiation test. Horizontal axis is total ionization dose.

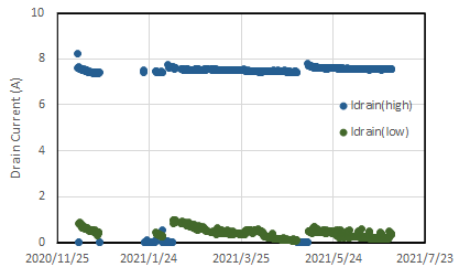


Figure 7: Drain current variation of GaN solid-state amplifier during irradiation test. Drain currents during RF operation (blue) and idling status (green) are shown.

Table 2: Parameters of GaN Amplifier

GaN powre FET	QPD1016
Cycle time	1 s
Duty factor	30 %
RF frequency	1 MHz
RF output	~300 W
RF input	0.5 W
Amplifier gain	27 dB
Drain voltage	52.5 V
Idling current	1 A
Maximum drain current	7.7 A

半導体などの照射試験では素子が損傷することもあるため、下記のように様々な安全対策を行っている。また、この素子ではゲート電圧を負にした状態での動作が求められるため、投入手順およびインターロックもシリコン系のものとは異なった保護をしている。

- ヒューズによる過電流保護動作。

- GaN 素子付近およびダミー抵抗上に取り付けた温度スイッチによる素子の保護。
- ゲート電圧を検出し、負電圧でない場合にドレイン電圧がかからないようにする。

2.3 リニアリティ

照射前後のリニアリティの変化を Fig. 8 に示す。すでに述べたように照射試験中にゲート電圧を変更しているのでは完全には同じ状態ではない。しかしながら、出力は Fig. 5 に示したようにほぼ同じ状態での比較となる。Fig. 8 が示すように、18 kGy の照射前後で大きな変化はないと言える。

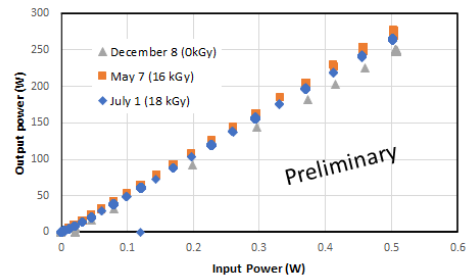


Figure 8: Linearity of GaN amplifier.

3. まとめ

J-PARC RF グループは広帯域空洞に関して CERN と長期にコラボレーションを行っている。LHC 入射器アップグレードプロジェクトの一環で PS ブースターの全空洞の置き換えと PS へのダンパー空洞導入に関して協力してきた。さらに反陽子減速器にもこの技術が導入され、スイス地区内で稼働しているすべてのリングに広帯域空洞技術が使われるようになった。

また、耐放射線半導体増幅器開発を進め、J-PARC MR のコリメータ部の混合照射エリアを用いて TID18 kGy、中性子線量 $2.3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ の照射をおこなった。これにより GaN 半導体が高い放射線下で使用できることを実証した。

本研究は科研費国際共同研究加速基金（国際共同研究強化 (B)）(19KK0078)、基盤研究 (C)（一般）(18K11930) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] R. Garoby *et al.*, Proc. of PAC2005, pp1619-1621(2005).
- [2] M. Meddahi *et al.*, "LIU Technical Design Report - Volume I: Protons", CERN, Geneva, Switzerland, Rep. CERN-ACC2014-0337, 2015.
- [3] M. Meddahi *et al.*, "LHC Injectors Upgrade Project: Towards New Territory Beam Parameters", in Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19), 2019, pp. 3085 - 3090.
- [4] Y. Yoshizawa, S. Oguma and Y. Yamauchi, J. Appl. Phys., **64**. 6044(1988).

- [5] C. Ohmori *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 112002 (2013).
- [6] C. Ohmori *et al.*, Proc. of PAC99, pp413-417 (invited talk).
- [7] 高エネルギーニュース Vol.38 No.1 2019/ 04.05.06, “陽子の加速から電車の加速へ”.
- [8] C. Ohmori *et al.*, “LIU(LHC 入射器アップグレード)-RF の現状と CERN メイラン地区加速器の広帯域化”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan.
- [9] 加速器研究施設トピックス 2012/3/8, 「J-PARC の国際協力について～LHC 入射器アップグレードのための CERN-KEK 共同研究～」; <https://www2.kek.jp/acc1/topics/topics120308.html>
- [10] J-PARC 季刊誌, No. 10(2017), 「加速空洞を知る」.
- [11] M. Paoluzzi *et al.*, “The New 1-18 MHz Wideband RF System for the CERN PS Booster,” Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3063-3065, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPRB107.
- [12] M. Paoluzzi *et al.*, “Design of the new wideband RF system for the CERN PS Booster” , in Proceedings of IPAC16, Busan, Korea, 2016, pp. 441 – 443.
- [13] CERN Courier, vol. 57, No. 6, July/August 2017, p.12, “LHC luminosity upgrade accelerates” .
- [14] Bulletin for the CERN Community, Issue No. 29-30/2017, 18 July, 2017, “A new acceleration system for the PS Booster” .
- [15] Bulletin for the CERN Community, Issue No. 5-6/2019, 29 January, 2019, “LS2 Report: metamorphosis of the Booster” .
- [16] Bulletin for the CERN Community, Issue No. 24-25/2019, 12 June, 2019, “LS2 Report: new components installed in the PS Booster” .
- [17] F. Tamura *et al.*, “Beam Test of the CERN PSB Wide-band RF System Prototype in the J-PARC MR” , Proceedings of IPAC14 conference, (2014), pp. 3385-3387.
- [18] E Benedetto *et al.*, “Machine Development Studies in the CERN PS Booster, in 2016 “, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark pp. 3339-3342.
- [19] M. E. Angoletta *et al.*, “Control and Operation of a Wide-band RF System in CERN PS Booster”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 4050-4053.
- [20] M. E. Angoletta *et al.*, “Operational Experience With the New Digital Low-Level RF System for CERN PS Booster”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 4050-4053.
- [21] S. C. P. Albright *et al.*, “New Longitudinal Beam Production Methods in the CERN Proton Synchrotron Booster”, Proceedings of IPAC21 conference, (2021), THPAB183.
- [22] H. Damerou *et al.*, “Longitudinal Coupled-bunch Instabilities in the CERN PS”, Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, pp. 4180-4182.
- [23] H. Damerou *et al.*, “Longitudinal Coupled-bunch Oscillation Studies in the CERN PS”, International Particle Accelerator Conference, Shanghai, China, 2013, pp. 1808-1810
- [24] M. Paoluzzi *et al.*, “Design of the PS longitudinal damper” , CERNACC-NOTE-2013-0019, 2013.
- [25] H. Damerou *et al.*, “Observation and Damping of Longitudinal Coupled-bunch Oscillations in the CERN PS” , ICFA Mini-Workshop on Impedances and Beam Instabilities in Particle Accelerators, Benevento, Italy, 2017, pp. 33-37.
- [26] H. Damerou *et al.*, “ Study at Transition Crossing With Ion Beams in the CERN PS”, Proceedings of IPAC21 conference, (2021), WEPAB243.
- [27] M. Vadai *et al.*, “Barrier Bucket Studies in the CERN PS”, in Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19), 2019, pp. 1128–1131.
- [28] M. Vadai *et al.*, “Beam Manipulations With Barrier Buckets in the CERN PS”, in Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19), 2019, pp. 1132-1135.
- [29] M. Shirakata, “Estimation and Measurements of Radiation Dose Distribution for the Radiation Test Area in J-PARC Main Ring” , in Proceedings of IPAC17, 2017, pp. 4689 – 4691.
- [30] J. Mekki *et al.*, “CHARM: A Mixed Field Facility at CERN for Radiation Tests in Ground, Atmospheric, Space and Accelerator Representative Environments” , IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 63, no. 4, pp. 2106 – 2114, Aug 2016.
- [31] C. Ohmori and M. Paoluzzi, “Development of Radiation-Hard Solid-State Amplifiers for Kilogray Environments Using COTS Components” , in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 66, no. 10, pp. 2188-2195, Oct. 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2937603.
- [32] M. Paoluzzi *et al.*, “RF Amplifier using VRF151G and BLF 574 Power RF Mosfets” , CHARM Radiation Test Report, 2017.
- [33] G. Spiezia *et al.*, “The LHC Radiation Monitoring System RadMon” , in Proceedings of 10th International Congress on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors, 2011.
- [34] G. Spiezia *et al.*, “A New RadMon Version for the LHC and its Injection Lines” , in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, no. 6, pp. 3424-3431, Dec. 2014, doi: 10.1109/TNS.2014.2365046.