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

RADIATION DAMAGE MEASUREMENTS OF FET'S USING A RADIATION MONITOR, RADMON FOR LIU

大森千広 *A)、田村文彦 B)、長谷川豪志 A)、吉井正人 *A)、白形政司 *A)、
Mauro PaoluzziC)、Markus BruggerC)、Giovanni SpieziaC)
Chihiro Ohmori* A), Fumihiko TamuraB), Katsushi HasegawaA), Masahito YoshiiA), Masashi ShirakataA),
Mauro PaoluzziC), Markus BruggerC), Giovanni SpieziaC)
A)J-PARC/KEK
B)J-PARC/JAEA
C)CERN

Abstract

RadMon is the radiation monitor which is developed at CERN to measure the radiation dose, neutron flux and high energy particle at the same time. We are collaborating with CERN for the consolidation and upgrade of the CERN PSB RF system which may include the replacement of the present ferrite-base RF accelerating system by the new FT3L magnetic alloy cavity system. The FT3L cavities will be driven by the solid state amplifiers beside of them. To evaluate the radiation damage on the solid state amplifiers in the PSB tunnel, we measured radiation damage on the FET using the J-PARC MR beam. We located the FET's and the radiation monitor, RadMon, downstream of the collimator where the radiation level is the highest in the ring. We measured the variation of bias characteristics of the FET's during the machine operation. The accumulated dose during the experiment became higher than 12 kGy which is much higher than the expected dose in the CERN PSB tunnel. Based on the measurements, we decide the FET for the solid state amplifiers. The beam acceleration test using the amplifiers will be performed in this year.

1． はじめに

現在 CERN で進行中の LIU(LHC Injector Upgrade) は LHC でのルミノシティ向上のために LHC への入射器群（SPS、PS、PSB、Linac）を改良する計画である [1]。LIU は Linac4 と呼ばれる 160MeV の新しい線形加速器の建設、PSB への入射を現状の陽子のから H - 入射へ改造、PSB のエネルギーを現状の 1.5GeV から 2GeV に増強、PS での電子雲対策と結合バンチ不安定性対策、SPS の RF 増強など多岐にわたる。この LIU の一つが PSB（PS ブースター）の RF の強化と性能向上である。J-PARC リング RF グループは 3 年前から、これに必要な FT3L 空洞 [2] と半導体アンプ [3] の開発に協力してきた。FT3L は低損失の金属磁性体であり、J-PARC では加速器の性能向上のため、これを用いた高周波加速空洞の開発を行ってきた [4]。図 1 は現状のフェライト空洞と置き換えを検討している FT3L 金属磁性体空洞である。PSB 加速器は同じ構造の 4 台のシンクロトロンが積み上げられた構造になっており、図 1 の上の写真でわかるように、高周波空洞も 4 台が積み重なっている。フェライト空洞は電源の老朽化が進んでいる他、現状の RF 増幅器のままでは ISOLDE 計画で必要なビーム強度を加速することができないことが分かっている。このため、図 1 の下にあるような、ユニット化した空洞と半導体増幅器の組み合わせにより、これらの問題を解決しようと検討している。FT3L 空洞は試験のため、4 台の PSB 加速器のうち、一番上のリングにのみ設置された。

この FT3L 金属磁性体は現在 J-PARC で開発中の空洞に使われているものと同じ材料であり、高いシャント抵抗値を持つため従来の金属磁性体空洞よりも高い電圧勾配を実現することができる。これまでの開発の結果を踏まえ、J-PARC 側から CERN に高性能の材料として 2011 年に提案したものである。この空洞を駆動する半導体増幅器（図 2）には 18 個の高出力 FET が使われている。PSB では 10^{13} 個の陽子を加速するために、直接フィードバックと LLRF を用いたビーム負荷補償を用意している。直接フィードバックではギャップ電圧と増幅器の間の距離（遅延時間）が性能を制限するため、半導体増幅器は空洞の直近に置かなければならない。PSB では直接フィードバックに加え、J-PARC で採用されたフィードフォワードを用いたビーム負荷補償技術の導入も検討されている。J-PARC MR に PSB 空洞を設置しビーム負荷補償実験に成功している [5]。

半導体増幅器を加速器トンネル内に設置する場合、最も懸念されることは放射線の影響である。特に陽子加速器では、ガンマ線のみならず陽子や中性子など多種類の放射線が影響を与える可能性がある。PSB 加速器ではフェライト空洞を駆動するために真空管増幅器を用いているが、強度の高いビームを加速するために高速のフィードバック回路を組み込んでいる。このフィードバック回路にはハイパワーの FET MRF151 が用いられている。これまでの数十年にわたる PSB 運転では、この FET の動作に問題は発生していない。このため、FT3L 空洞を駆動するために、半導体増幅器を使用できる可能性が考えられたが、このことを確認するためには実際に PSB と同様の放射線環境下で、ハイパワー FET の特性の変化の有無を調べる必要がある。このため、J-PARC では MR のビームを用いて FET の耐放射線試験をおこ

* chihiro.ohmori@kek.jp

なった。

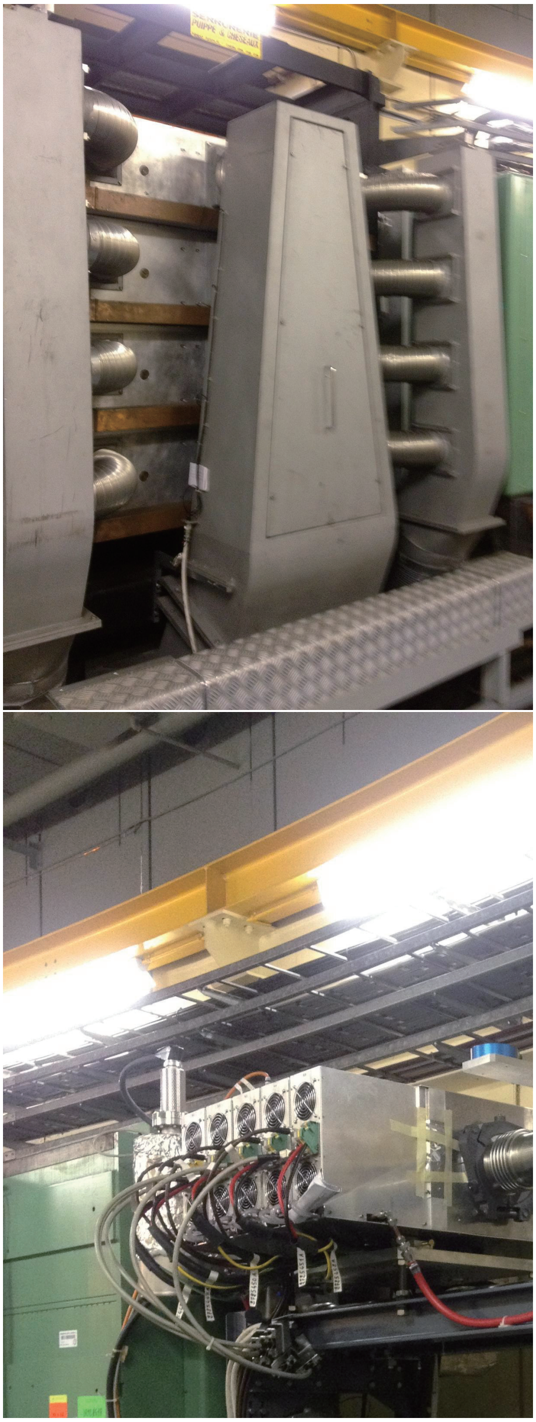

Figure 1: Upper:Ferrite-loaded PSB cavities. Lower:5-gap FT3L cavities for PSB.

2． RADMON

LHC 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 は LHC 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 [6]。このため、RadMon では線量の合計 (Total Ionization Dose, TID)、中性子線量 (1MeV-equivalent)、Single Event Upset を計測することができる

Figure 2: Solid state amplifiers for CERN PSB FT3L cavities.

2.1 TID

RadMon では RadFETs と呼ばれる p 型 MosFETs が使われている。RadFETs の酸化膜に正の電荷がたまることにより、FET の閾値電圧 (Vth) が変化する。ドレイン - ソース間に定電流を流すことにより Vth を測定し、線量の評価に用いることができる。RadMon では酸化膜の厚さを 100 nm、400 nm、1000 nm の異なる FET を用意することで、感度を 3 段階に変えることができる。RadFETs は主に高線量対応の膜厚の薄いものを Deported module と呼ばれる子機に内蔵し (図 3)、低線量対応のものが RadMon 本体に内蔵されている (図 4)

2.2 中性子線量

1MeV 相当の中性子線量を測定するために、RadMon ではシリコンの PIN ダイオードに順方向のバイアスを掛けて使用している。中性子がシリコンと相互作用することでシリコン格子に安定と不安定な欠損が生じ、それらがキャリアの再結合中心として作用する。このため、シリコンで電気抵抗が増えることに加え、PIN ダイオード中の少数キャリアの寿命が短くなるので、PIN ダイオードの順方向閾値電圧が増えることになる。この閾値電圧の変化を定電流を短パルスとして流すことで測定し、中性子線量を測ることができる。なお、この PIN ダイオードは 10^{12} n_{eq} cm^2 までは感度がないため、あらかじめ 4X10^{12} n_{eq} cm^2 の中性子を照射してある。

2.3 シングルイベント

SRAM のメモリーが放射線を照射された時に、メモリー単位の状態を変化させることがある。これは通常、Single Event Upset（SEU）と呼ばれる。SRAM で発生した SEU の数は粒子のフラックスに比例するため、16 Mbit のメモリでの SEU の個数を数えることで高エネルギー粒子の個数を見積もることができる。

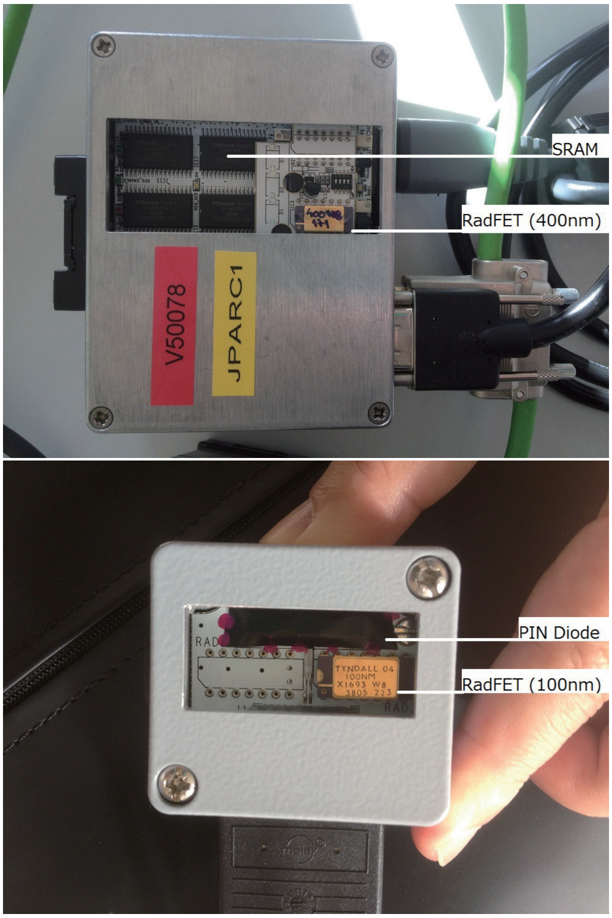

Figure 3: Upper: RadMon. Lower: Deported Module.

Figure 4: Collimator section. The power FETs and RadMon are located on the desk downstream of the beam collimator. The collimator, the desk and quadrupole magnets near the collimator are covered by the movable shielding.

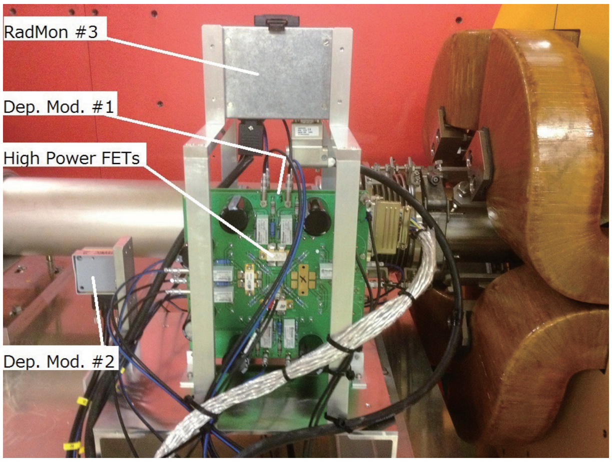

Figure 5: RadMon and deported modules are located near the FETs to measure the radiation. The FETs and Radmon units were located on the table. Two sets of RadMon which control two deported module No. 1 and 2 are located in the subtunnel where the radiation is very low.

3． 実験のセットアップ

本試験では、半導体増幅器に使用可能な高出力 (300 W 級) の FET を 4 種類 14 個用意し、J-PARC MR のコリメーター部に設置した (図 4)。コリメーターの直後には照射試験用にテーブルが用意された。FET はこのテーブルの上に設置され、この周りに RadMon を配置した。RadMon は本体を 1 台、子機を 2 台設置している (図 5)。RadMon 本体は低線量対応の RadFET、中性子測定用の PIN ダイオード、SEU 測定用の SRAM が搭載されている。この本体により、SEU と中性子線量および全線量との相関を測定することができた。子機はコリメーターからの仰角の異なる位置に設置し、少仰角の位置が FET の位置に対応している。

FET には定期的に通電を行いバイアス電圧に対するドレイン電流の変化を測定した。図 6 にバイアス電圧を台形波形とした時の、ドレイン電流を示す。FET の種類によってゲインが異なる他、各 FET そのものにゲインにはばらつきがあることが分かる。

4． RESULTS

4.1 線量測定

図 7 は RadMon 本体によって測定のできる 3 種類の線量のビーム運転中の変化を示している。なお、この本体には高感度と低感度の 2 種類の RadFET が装填されている。この測定により、この場所での SEU と TID の関係は 1.8×10^{3}events/Gy であった。この RadMon 本体は ADC などの内蔵されているエレクトロニクスが故障したため、測定は 20〜30Gy で停止した。これ以降は子機による測定のみとなる。この子機を制御する RadMon 本体はコリメーター部から離れた線量の低いサブトンネルに置かれた。

図 8 は試験中の TID とビーム強度の関係を示したものである。1 月の加速器運転開始から 1 月 19 日までは低強度での加速器運転であった。それ以降（図 8 では 19 日目以降）の J-PARC の加速器運転は安定しており、1 日の陽子総数にして 3.7×10^{18} が供給された。加速器内部のコリメーターでの TID の増加量はコリメーターの最終調整を行った 1 月 24 日前後で様相が異なっており、コリメーターが解放されていた前半ではビームロス

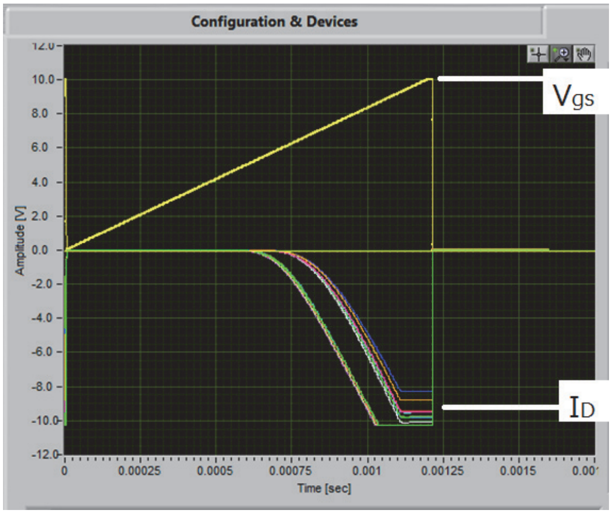

Figure 6: Bias characteristics of FETs. Regularly, V_{G-S} of FETs were excited to measure the variation of characterisitcs of I_D. The voltage between the gate and source of FET is ramped in 1 ms. The currents of FET were measured by the ADC in the local control room of the MR.

がコリメーター部に局所化されておらず、TID の増え方が少ないことが分かる。調整後はコリメーターにより、ビーム損失が局所化されたため、TID の増え方が増加している。これ以降は加速した粒子数とコリメーター部に置いた RadMon の TID は Deported Module 1 および 2 とも比例していることが分かる。今回の RadMon と Deported Module では 4kGy 以上は校正されておらず測定できなかったため、Deported Module 2 が停止する 2 月 6 日以降は、陽子総数から TID を見積もった。試験期間の 2 月 14 日までに約 10kGy が RadFET1 位置で照射されたこととなる。なお、この期間にコリメーターの再調整は行われておらず、コリメーター付近でのビーム損失の量も安定していた。このため、今回の測定結果をもとに RadMon と Deported Module の 4kGy 以上の校正を行うことができたこととなり、更に RadMon の測定範囲が広がったこととなる。

4.2 FET の特性変化

定期的に図 6 の測定を行うことで、放射線と FET のゲイン変化の相関を求めた。図 9 に示すように FET の種類により、特性の変化の様子が大きく異なることが分かる。MRF151 は CERN でこれまで使われてきた FET であるが、特性の変化が早く、比較的早い段階で壊れている。VRF151 も同様の特性を示している。MRFE6VP6300 は J-PARC の半導体アンプに使われている FET で LDMOS と呼ばれる新しいタイプの FET である。これは放射線による特性の変化が少ないことが分かった。しかし、6kGy 程度で劣化し V_{GS} を変化させても I_D が流れなくなった。SD2942 は 12kGy まで劣化することなく試験することができた。

J-PARC での測定結果をもとに CERN PSB では半導体アンプに使用する FET を SD2942 とし、図 2 の量産を行っている。PSB でこの FT3L 空洞を設置する場所

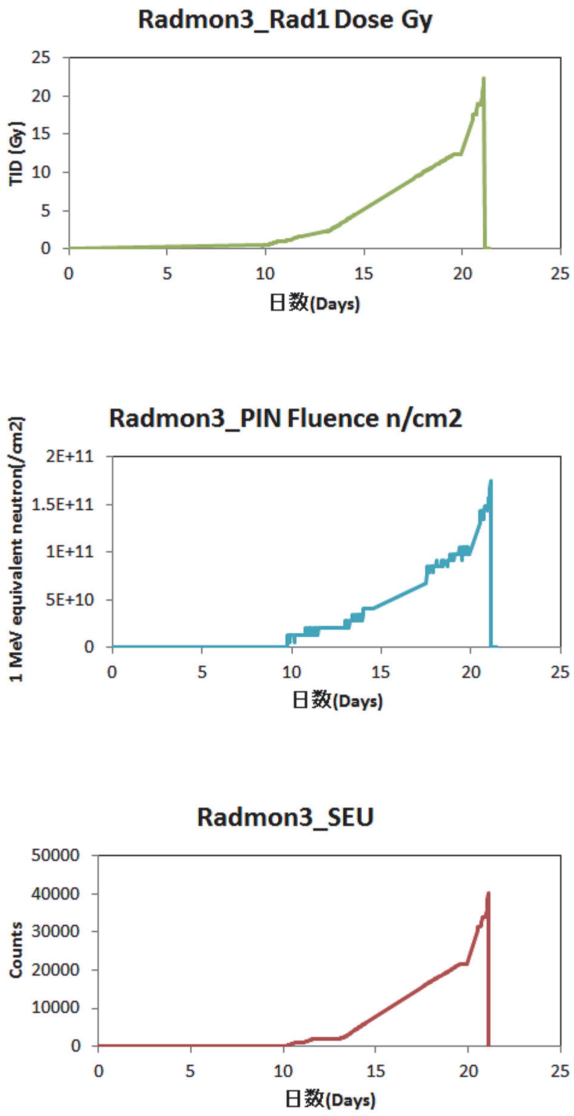

Figure 7: From Top to Bottom, Variations of TID, neutron fluence and SEU measured by a RadMon 3.

は C02、C04、C16 の 3 か所が検討されているが、最近の線量は 1Gy (C04) から 30Gy(C02) であり、放射線による損傷リスクは大きくないことが分かった。

また CERN では同じく FT3L 空洞と半導体増幅器の組み合わせを PS に設置し、縦方向の結合バンチ不安定性のダンパー空洞としての利用を考えている [7]。この場合、PS でのビーム損失は PSB より大きいため、今回の放射線試験の結果から FET を保護する必要性があることがわかった。PS ダンパーでは空洞と半導体増幅器の間を直結せずに同軸ケーブルによって接続し、半導体増幅器を放射線シールドの中で保護する予定である。このダンパー空洞システムも、今年の夏に PS に設置されビーム試験に用いられる予定である。

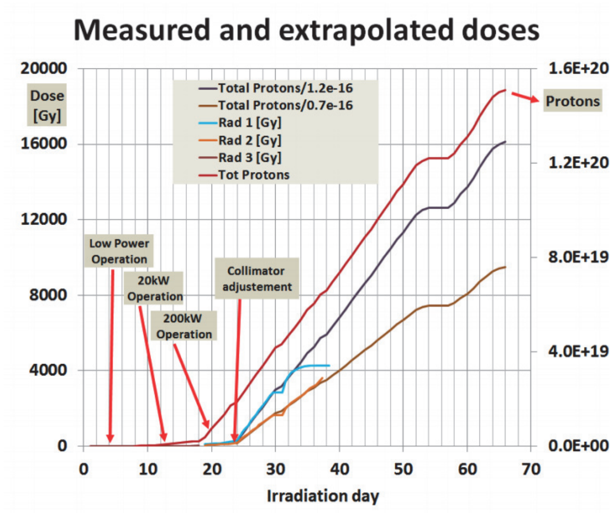

Figure 8: TID and number of delivered proton on target during the FET test. Up to 12 kGy, the measurements were continued.

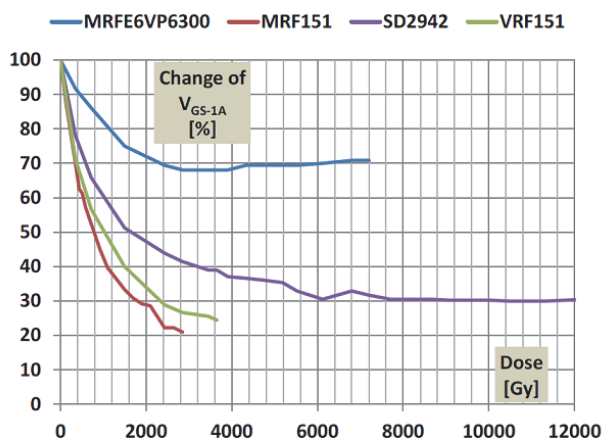

Figure 9: Variation of bias voltage by the irradiation. Four type of FETs were tested.

4.3 Single Event

高エネルギーの放射線によって引き起こされる現象は、前述の SEU の他に、SEL(Single Event Latch-up) と呼ばれる現象がある。これはソフト・エラーと呼ばれ回復可能な SEU に比べ、回路の永久故障となるためハード・エラーと呼ばれる。前述の線量の積算による FET の劣化とは異なる現象であり、半導体でのエネルギー損失が大きな事象が発生した場合に単独の粒子によって素子が損傷する事象である。今回の 12 kGy までの試験では、PSB で使用を予定している SD2942 に関して、このような SEL は観測されなかった。他の FET についても、性能の変化が観測されてから動作が停止していることから Single Event によるものではないと考えている。

5． まとめ

CERN の LHC でのルミノシティ向上のために LIU 計画が進行している。我々は CERN の PSB の加速システムの強化と性能向上のため、FT3L 空洞と半導体増幅器を開発している。この半導体増幅器の PSB トンネル内の放射線環境下での信頼性と寿命を予測するために、J-PARC MR のビームを用いて半導体（FET）の耐放射線試験を行った。このために、CERN で開発した RadMon と呼ばれる放射線モニターシステムを活用し、リアルタイムでの線量および中性子線量の測定をおこなった。この測定結果に基づき半導体増幅器に使用する FET を選定し、量産に向けた取り組みを進めている。

また、放射線測定器としての RadMon はリアルタイムで加速器トンネル内部での各種線量がわかることから、リング内に設置しているモニターカメラ付近での線量測定や今後予定されているコリメータ部での放射線照射試験の線量モニターとして、継続的な導入を予定されており、日本の加速器での活躍が期待されている。

参考文献

[1] R. Garoby et al., Upgrade Plans for the LHC Injector Complex, IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, p. 1010

[2] M. M. Paoluzzi, Design of the PBS wideband RF system, CERN-ACC-NOTE-2013-0030 2013-10-29

[3] M. M. Paoluzzi et al., Studies on a wideband, solid-state driven RF system for the CERN PS Booster, IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, p. 3749

[4] Chihiro Ohmori et al., Development of a high gradient rf system using a nanocrystalline soft magnetic alloy, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 112002, 18 November 2013

[5] F. Tamura et al., BEAM TEST OF THE CERN PSB WIDE-BAND RF SYSTEM PROTOTYPE IN THE J-PARC MR, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany THPME065, p3385.

[6] Spiezia, Giovanni et al., The LHC Radiation Monitoring System - RadMon - PoS RD11 (2011) 024

[7] M. Paoluzzi, H. Damerau, Design of the PS longitudinal damper, CERN-ACC-NOTE-2013-0019 2013-09-09