

## LIU(LHC 入射器アップグレード)-RF 共同研究の進捗 (2) - 耐放射線性半導体アンプの開発 -

### STATUS OF LIU (LHC INJECTOR UPGRADE) RF COLLABORATION -DEVELOPMENTS OF RAD-HARD SOLID-STATE AMPLIFIER-

大森千広 <sup>\*A)</sup>、Mauro Paoluzzi<sup>B)</sup>、白形政司 <sup>A)</sup>、田村文彦 <sup>C)</sup>、長谷川豪志 <sup>A)</sup>、杉山泰之 <sup>A)</sup>、吉井正人 <sup>A)</sup>  
Chihiro Ohmori<sup>\*†A)</sup>、Mauro Paoluzzi<sup>B)</sup>、Masashi Shirakata<sup>A)</sup>、Fumihiko Tamura<sup>C)</sup>、Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>  
Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>、Masahito Yoshii<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>KEK/J-PARC  
<sup>B)</sup>CERN  
<sup>C)</sup>JAEA/J-PARC

#### Abstract

The LHC Injector Upgrade (LIU) aims to improve and to consolidate the injector chain of the LHC for reaching the goals of the HL-LHC. It includes Linac, PS Booster, PS, SPS and heavy ion chains. J-PARC is collaborating with CERN for the replacement of the ferrite-base RF system by new wideband cavity ones in the PS Booster. The installation of the cavity systems has started in the long shutdown, LS2. The wideband cavities are driven solid-state amplifiers and the collaboration also includes the developments of radiation-hard amplifiers. This paper summarizes the status of the collaboration including radiation damage tests of the amplifiers using a radiation test facility in CERN and a beam collimator in the J-PARC MR.

#### 1. はじめに

2002年に重イオン加速器 LEIR の加速空洞 [1] と J-PARC のための半導体増幅器の開発で始まった CERN と J-PARC RF との国際協力は途中中断の後、2012年から LIU [2,3]-RF のアップグレードを目的として再開した [4,5]。この共同研究では LHC 入射器群の PS ブースターのフェライト空洞からファインメット<sup>®</sup> [6] を用いた広帯域空洞 [7,8] への置き換えおよび PS 加速器のビーム不安定性対策のための広帯域ダンパー空洞の導入、更にこれらを直接駆動するための耐放射線性半導体増幅器開発を目的とした [9,10]。この7年間の共同研究で確立された技術は反陽子減速器 Antiproton Decelerator (AD) と Extra Low Energy Antiproton ring (ELENA)、医療用加速器 MedAustron にも応用されている。この間の共同研究の進捗、特に耐放射線性半導体増幅器開発について述べる。なお、昨年末から始まった CERN 加速器の長期停止期間に AD に広帯域空洞が設置され、スイスキャンパス内にあるすべてのリングに広帯域空洞が設置されることとなった。

#### 2. PS ブースター空洞

PS ブースターは世界唯一の4階立て構造の加速器である [11,12]。リングとリングの間の距離が少ないため、設置できる空洞の大きさが制限される。空洞内に設置されている磁性体コアは直径 330 mm の、J-PARC に比べ小型のものである。この磁性体コア

は薄いカプトンシートを挟んで冷却銅板に固定されている。一つの加速セルあたり2枚のコアが向き合う形で設置され、700 V の加速電圧を出力する。一か所の直線部には12セルが設置されている (Fig. 1)。フェライト空洞ではリング内の4か所が使用されていたが、広帯域空洞では3か所のみを使用している。バックアップも含め320枚の磁性体コアが製造され、空洞に組み込まれている。Figure 2 に量産したコアの性能を示す。PS ブースターで使用する周波数に対応し、0.5、5、10 MHz の3点について磁性体コアのシャント抵抗を示す。量産の初期に条件の最適化を行っているため、若干のバラツキが大きくなっているが、全体を通して安定した製造ができていくことが分かる。この量産では J-PARC で開発した日立金属鳥取工場に貸し出している磁場中熱処理炉が用いられている。Figure 2 では KEK からのコア132枚の貢献を枠で囲っている。製造されたコアは日立金属における抜き取り検査として、高周波電力を実際にコア内で消費させ、コア表面での温度上昇を確認している。その後、すべてのコアは CERN に送られ、空洞に組み込む前に特性と高周波を使った発熱試験が行われた。空洞内部の様子はリファレンス [13-16] に掲載されている。この空洞は広帯域であり、これまで3種類のフェライト空洞がカバーしていた3つの異なる周波数帯域を同時にカバーすることができる。すなわち、加速周波数、2次高調波、10次高調波である。一方でビームによるビームローディングも多周波数となるが、高性能な LLRF 系により補償することができる [17-21]。この空洞は半導体増幅器によって駆動される。空洞1セルに対し1台の半導体増幅器が設置される (Fig. 1 左図)。なお、ビーム強度が予定よりも増加した場合には Fig. 1 の左図のように2台まで半導体増幅器を接続することが可能

\* chihiro.ohmori@kek.jp

† The work is supported by JSPS KAKENHI Grant Number, JP18K11930

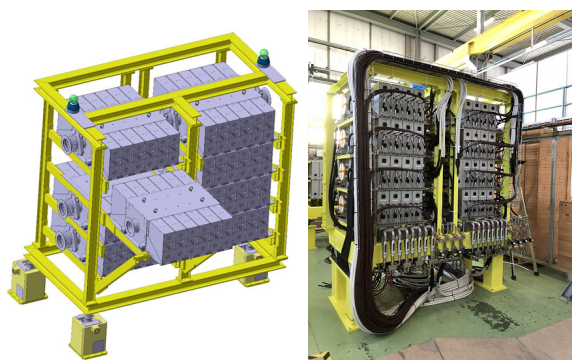


Figure 1: CERN PSB cavities and Solid-State amplifiers. Because the booster consists of 4 superposed accelerator ring, each RF system can be taken out as shown in left figure.

な構造となっている。現在空洞設置作業が進行している [15,16]。

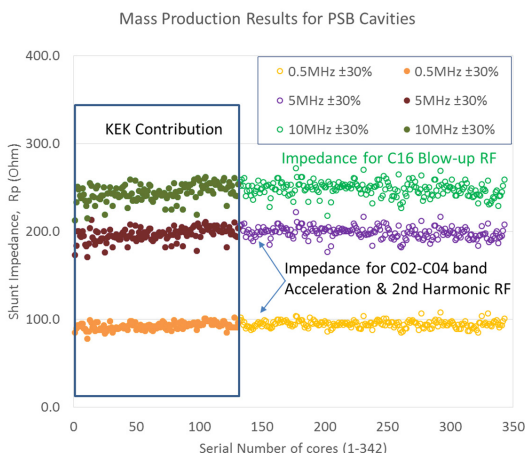


Figure 2: Finemet core impedance at different frequencies during mass production.

### 3. PS ダンパー空洞

LHC の高輝度化 (HL-LHC) にむけ、CERN PS において縦方向の結合バンチ不安定性が問題となっていた。このビーム不安定は加速に用いられているフェライト空洞をインピーダンス源とし、加速の後半にトランジションエネルギーを通過した後に観測されている。不安定性の主要なモードを抑えるためにフェライト空洞の1台がダンパー空洞として機能しており、これにより昨年までの運転に必要な  $1.3 \times 10^{11}$  ppb のビーム強度を実現している。HL-LHC ではこの2倍の粒子数が必要となり、抑えるべきモードが多数となる。この試験のため、Fig. 3 のように同時に多数のモードに対応できる広帯域空洞が2013年に導入された [22-25]。この空洞により  $2 \times 10^{11}$  ppb を超える強度を実現したところで、新たに四極振動モードがあることが分かった (Fig. 4)。このモードを

PS 内にあった 40 MHz の空洞をランダウ空洞として使うことで抑えることに成功し [26]、Fig. 4 のように目標である  $2.6 \times 10^{11}$  ppb を実現することに成功した [3]。HL-LHC では同時に PS の入射エネルギー (PS ブースターの取り出しエネルギー) を 2 GeV にすることで、空間電荷効果を緩和し小さなビームエミッタンスを実現する必要があるため、実際の運転への導入は来年の運転再開以降となるが、すでに SPS への入射試験で使われている。なお、このダンパー空洞は LHC 行きのビームに使われているが、SPS の遅い取り出しビームユーザー向けにバリアバケツ空洞 [27,28] としての運用も検討されている。

このダンパー空洞も PS ブースター同様に半導体増幅器によって直接駆動される。しかし、PS 加速器はブースターに比べ、放射線量が高いため鉄シールドの中に半導体増幅器を設置して運転に使用している。PS 加速器では年間の線量は 1 kGy を超えるが、鉄シールドにより約 50 分の 1 に減らすことができた。

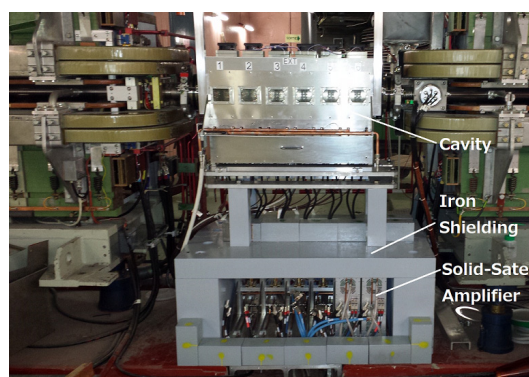


Figure 3: Damper cavities and solid-state amplifiers in PS.

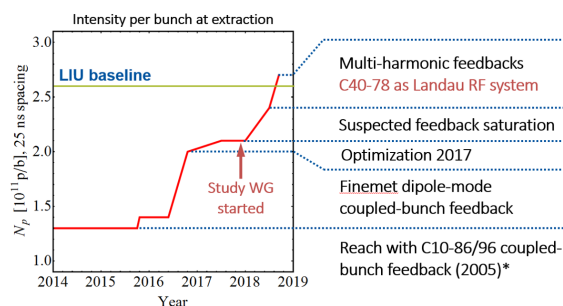


Figure 4: Improvement history of PS beam intensity for the HL-LHC.

### 4. 耐放射線性半導体増幅器の開発

#### 4.1 加速器トンネル内での半導体アンプの使用

Figure 1 に示すように、PS ブースターの広帯域空洞は半導体増幅器によって駆動される。半導体増幅器は放射線により影響を受けることが知られており、この対策のため共同研究を継続している。CERN、J-PARC [29] および国内外の照射施設を用い



て、耐放射線性半導体増幅器の開発を行っている。Figure 5 では CERN にある照射施設 CHARM [30] における試験装置をしめす。CHARM では試験装置はラック上に設置され、遠隔操作できる台車によって照射位置に設置される。混合照射前後でアンプゲインが使用する周波数帯域において大きく低下せず、約 1 dB の範囲で安定化することができた。アンプ出力は 100 W である。また昨年、量研機構高崎研においてコバルト 60 を用いた  $\gamma$  線照射をおこない、1 週間の間に積算 8.8 kGy を照射した。この試験でもアンプを実際に 100 W で動作をさせながらガンマ線を照射した。このアンプに使われている Microsemi 社の VRF151 は市販品で容易に入手可能なハイパワー MOSFET の中からドレイン-ソース間耐電圧が高い点とある程度の耐放射線性があること [5] から選んだ。CHARM における試験時の中性子 (1 MeV 相当) の強度は  $1.1 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> であった。中性子や高エネルギー粒子を含む混合場とガンマ線照射において MOSFET の特性の変化に大きな差はなかった。CHARM 試験の際の線量は CERN が開発した検出器 RadMON [31] を用いて測定した [32]。この 1.9 kGy の線量は PS ブースター加速器内部で空洞設置箇所の線量にして 100 年分に相当する。来年まで CERN の長期停止期間により CHARM 施設が使用できないため、PS での応用を視野に約 10 kGy を目指した照射試験を J-PARC において計画中である (Fig. 6)。

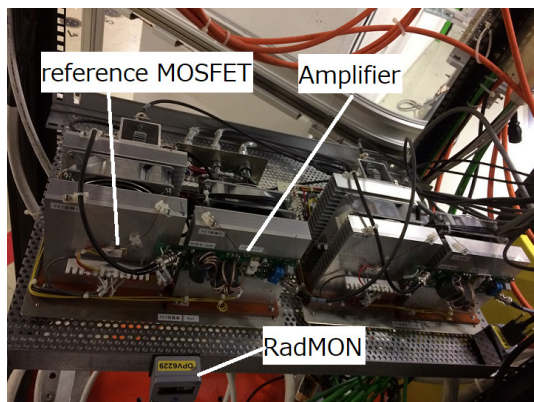


Figure 5: Radiation test setup at CHARM.

#### 4.2 放射線による影響の簡便な補償

通常ガンマ線や混合照射により半導体アンプの特性は大きく変化する。これはアンプに用いられている MOSFET の特性が変化するためである。この変化は MOSFET の絶縁層にホールが蓄積しおこると考えられている。この変化は主に MOSFET のゲートバイアス特性が低い電圧の方向にシフトするものである。この際、バイアス特性の曲線は形状を保ったまま移動しているため、ゲート電圧を下げることでドレイン電流を一定にできれば、MOSFET のトランスコンダクタンスは大きく変化しない。我々は必要となるゲート電圧変化を求めるため、Fig. 5 のようにリファレンスとなる MOSFET をアンプの近くに設置し、補償回路を構成した。すなわちリファレンスア

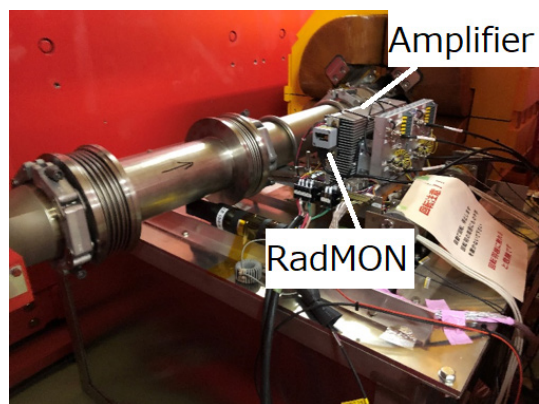


Figure 6: Radiation test set up of Rad-Hard Solid-State amplifiers in the collimator section of J-PARC MR. The amplifiers are located near the beam pipe. The radiation is measured by RadMON.

ンプ MOSFET が定電流になるように、ゲート電圧を調整し、そのゲート電圧をアンプに使用している MOSFET にも供給するものである。

しかしながら、実際のアンプは複数個の MOSFET を使用し、その位置はリファレンスとなる MOSFET から離れることになる。このため、MOSFET の位置により、補償する量に過不足が生じる。また、個々のアンプ用 MOSFET に 1 個のリファレンス MOSFET を使用することも現実的ではない。このため、リファレンス MOSFET を用いず、より効率的な補償方法を PS ブースターのために開発した。これは加速器の運転サイクルを考慮し、ビームがない時間を利用して補償する方式である。この方式ではビーム取り出し後の時間を利用してすべての MOSFET のドレイン電流を測定し、それぞれのゲート電圧を調整することでアンプの安定化を図ることができる。

## 5. CONCLUSION

CERN との LHC 入射器アップグレードに関する共同研究の進捗について報告した。CERN は現在長期停止期間中であり、新しい広帯域空洞を用いたブースター高周波システムの設置が進んでいる。PS ではすでにダンパー空洞とランダウ空洞を併用することで LHC 高輝度化に必要なビーム強度を実現している。またブースターの高周波システムに使用する耐放射線性半導体アンプの開発に成功した。更にこの技術を用いて、より放射線環境の厳しい PS の高周波空洞のフィードバックアンプを半導体化し、PS の性能を向上するための開発にも着手している。

LIU のための国際共同研究の成果として、陽子・イオン加速のためのユニバーサルな空洞ができた。J-PARC のような非常に強度の高い加速器を除き、反陽子の減速も含め、ほとんどの中低エネルギー加速器に適用できる汎用性のある加速システムである。

## 謝辞

空洞ビーム試験では J-PARC MR の方々に協力をいただきました [21]。半導体増幅器の耐放射線試験では量子科学技術研究開発機構の施設共用制度(課題番号: 2018A-C29), PSI および CERN CHARM 施設, J-PARC MR コリメータ部を利用しました。また科研費 18K11930 により現在の照射試験を進めています。

## 参考文献

- [1] R. Garoby *et al.*, Proc. of PAC2005, pp. 1619-1621 (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] 高エネルギーニュース, “陽子の加速から電車の加速へ”, Vol.38 No.1 2019/04.05.06.
- [5] 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.
- [6] Y. Yoshizawa, S. Oguma and Y. Yamauchi, J. Appl. Phys., **64** 6044 (1988).
- [7] C. Ohmori *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16** 112002 (2013).
- [8] C. Ohmori *et al.*, Proc. of PAC99, pp. 413-417 (invited talk).
- [9] “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～”, 加速器研究施設トピックス 2012/3/8.
- [10] “加速空洞を知る”, J-PARC 季刊誌 No. 10 (2017).
- [11] M. Paoluzzi *et al.*, “The New 1-18 MHz Wideband RF System for the CERN PS Booster”, in Proceedings of IPAC19, 2019, pp. 3063-3065.
- [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] “LHC luminosity upgrade accelerates”, CERN Courier, vol. 57, No. 6, July/August 2017, p.12.
- [14] “A new acceleration system for the PS Booster”, Bulletin for the CERN Community, Issue No. 29-30/2017, 18 July, 2017.
- [15] “LS2 Report: metamorphosis of the Booster”, Bulletin for the CERN Community, Issue No. 5-6/2019, 29 January, 2019.
- [16] “LS2 Report: new components installed in the PS Booster”, Bulletin for the CERN Community, Issue No. 24-25/2019, 12 June, 2019.
- [17] M. E. Angoletta *et al.*, “Upgrade of CERN’s PSB Digital Low-Level RF System”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 3958-3961.
- [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] 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.
- [22] H. Damerau, *et al.*, “Longitudinal Coupled-bunch Instabilities in the CERN PS”, Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, pp. 4180-4182.
- [23] M. Paoluzzi *et al.*, “Design of the PS longitudinal damper”, CERNACC-NOTE-2013-0019, 2013.
- [24] H. Damerau, *et al.*, “Longitudinal Coupled-bunch Oscillation Studies in the CERN PS”, International Particle Accelerator Conference, Shanghai, China, 2013, pp. 1808-1810.
- [25] H. Damerau *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. Damerau *et al.*, “Higher-Harmonic RF System for Landau Damping in the CERN PS”, IPAC18, Vancouver, Canada, 2018, pp. 728-731.
- [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] 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.
- [32] M. Paoluzzi *et al.*, “RF Amplifier using VRF151G and BLF 574 Power RF Mosfets”, CHARM Radiation Test Report, 2017.