

## 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

### STATUS OF LIU (LHC INJECTOR UPGRADE) RF COLLABORATION AND WIDEBAND CAVITIES IN CERN MEYLAN CAMPUS ACCELERATORS

大森千広<sup>#,A)</sup>, Mauro Paoluzzi<sup>B)</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 Poluzzi<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>C)</sup>,

Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC/KEK

<sup>B)</sup> CERN

<sup>C)</sup> J-PARC/JAEA

#### Abstract

We collaborate from 2012 for the LIU-LHC Injector Upgrade Project which is required for the HiLumi LHC. This paper summarizes the status of LIU-RF collaboration based on a wideband cavity loaded with a magnetic alloy material. And, the wideband cavity technology is also used in the other accelerators in CERN and Europe.

#### 1. はじめに

LIU (LHC Injector Upgrade)はLHCのルミノシティ向上計画-HiLumi LHCのための、LHCの入射器であるLinac, PSB, PS, SPSの各加速器の性能と信頼性の向上を目的としたプロジェクトである[1]。この中には新しい線形加速器 Linac4 の建設も含まれている。2019-2020年の長期停止期間LS2以降はLinac4で加速された負水素素ビームはPSB(PSブースター)に入射される。これまでPSBには50MeVの陽子ビームが入射されていたがLS2期間中に161MeVを荷電変換入射できるように大がかりな改造が行われる。同時に電磁石電源が更新され取り出しエネルギーは1.5GeVから2GeVへと増強される。それに伴い、RFシステムの更新が課題となり、LIU-RFに関しCERNとの間で共同研究が始まった。これはJ-PARCで開発された低損失な金属磁性体を装填した広帯域空洞[2]を、老朽化し更新が必要になったフェライト空洞システムの代わりに用いるものである[3-5]。

PSBのエネルギーが2GeVになることに伴い、PS(Proton Synchrotron)ではより強度の高い低エミッタンスのビームをLHCのために加速することが可能になる。ただし、このためには、PSで問題となっている縦方向の結合バンチ不安定性(Longitudinal Coupled Bunch Instability)の対策不可欠である。この不安定性を引き起こしているインピーダンスの元は10MHz帯の加速空洞であることがわかっており、フィードバック系の増強が行われている。こうした不安定性の原因そのものに対する対策と同時に、積極的に不安定性を抑え込む方法が試験された。これはビーム不安定性の主要なモードに対策に調整した予備のフェライト空洞を用いて試験され、動作が実証された。しかし、この方法ではバンチ強度が増え対策しなければならないモードが多数になると対応できない。このためPSBと同様な広帯域空洞を用いて結

<sup>#</sup> chihiro.ohmori@kek.jp

合バンチ不安定性を誘起しているモードのすべてを個別に抑えるという新しい手法が提案され、共同研究の柱の一つとなった[6,7]。

これまで2014年の加速器学会において、CERNの広帯域空洞に必要な広帯域半導体増幅器に求められる耐放射線特性、2015年の加速器学会ではPSBとPSでの試験結果と検討の状況について報告した。本報告ではLS2を再来年に控え、PSBのRF更新の本計画として採用された広帯域空洞システムとその量産状況について報告する。また、ビーム試験の進んだPSでのビーム不安定性対策についても述べる。

#### 2. 低損失な金属磁性体ファイナメット®FT3Lの大型コアの開発

ナノ結晶構造をもつような金属磁性体は高磁場中で熱処理することで、磁区の向きを制御することができることがわかっている。しかし、我々が空洞開発を始めた時点では、この磁場中熱処理による効果は限定的であった。これは、金属磁性材料の高周波損失が磁性特性による損失(鉄損)のみでなく金属薄膜内で生じる渦電流損失(銅損)によるためである。2005年ごろに厚さ13 $\mu$ mの薄膜が日立金属(株)で製造できるようになったことで、磁場中熱処理を行った金属磁性体コアの性能は飛躍的に向上した。しかし、加速器用の大型磁性体リングコアを製造できる装置は存在せず、この技術を応用できる見通しが存在しなかった。このため、我々はKEKの素粒子原子核研究所から大型の電磁石を借り、新たに制作したオープンを組み込んで磁場中熱処理による加速器用大型磁性体コアの製造に成功した。さらに次のステップとして、別大型の電磁石をオープンが組み込めるように改造し、量産装置として完成された(図1)[2]。

この量産装置を用いて、J-PARC MR用の金属磁性体コア280枚の製造をおこない、すべての空洞がすでに高加速勾配を持つFT3L空洞に交換されている(図2)。

これにより 2019 年に予定されている MR 電源の更新後は MR の繰り返しを 1.3 秒にすることで 750kW のビーム供給が可能になり、同時に陽極電源の増強と 2 次高調波空洞を用いることにより、1.3MW のビーム供給を目指している。この磁場中熱処理装置を用いて CERN 向けの金属磁性体コアの量産が行われた。



Figure 1: Magnetic annealing oven for the mass production.

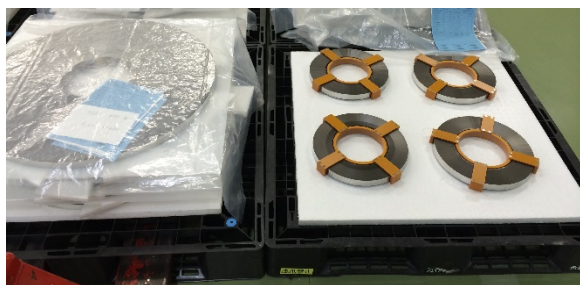


Figure 2: Magnetic alloy cores for J-PARC MR (left) and CERN PSB (right).

### 3. Beam Test Results of PSB Cavity

2014-2015 年に CERN PSB に図 3 のような FT3L コアを装填した加速空洞を設置し、PSB での様々なビーム条件に合わせたビーム試験が行われた。この空洞は図 4 のように空洞に直結した半導体アンプによって駆動される。

以下にビーム試験の概要をまとめる

- 加速空洞(基本波)としての高強度ビームの加速試験
- 2 次高調波空洞としての高強度ビームの加速試験
- ISOLDE 向けの高強度ビーム運転を利用した長期信頼性確認試験
- LHC 向けの低強度高品質のビーム試験
- LHC 向けビームを用いた短期信頼性確認試験

これらのビーム試験により、広帯域な RF システムについて十分な信頼性が確認できた他、広帯域システムのビームに対する影響について理論計算、シミュレーションが並行して行われ、問題がないことが分かった。これを

受けて、CERN により、広帯域システムを PSB のフェライト空洞システムと交換することが決定した。



Figure 3: 10-Cell FT3L cavity for the beam test.

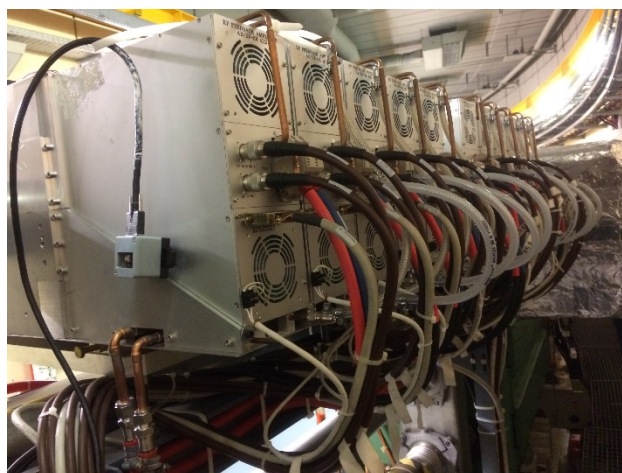


Figure 4: Solid State Amplifiers to drive the wideband cavities.

### 4. Mass Production of PSB Cavity for LIU

#### 4.1 PSB Cavity

CERN PSB は PS のちょうど 4 分の 1 の長 157m の管長である。この加速器のユニークな特徴は 4 階建ての構造になっている点であり、同時にビームを加速することができる。建設当初は複数のバンチを加速していたが、現在は H=1 の RF を用いて強度の高い単バンチの加速を行っている。例えば LHC 行きのビームの場合、PS では H=9 の RF で待ち受けているところに 4 つの PSB リングから 4 バンチを入射したのち、PSB の次のサイクルで 4 バンチを加速し、入射する。H=9 に対し合計 8 バンチとなったところで H=9 から H=14 に Batch Compression でハーモニクスを変え、Merging で H=14 を H=7 としたのち Splitting により H=21 の 10MHz 帯の空洞で加速することでルミノシティが向上した。なお、PS のフラットトップでは SPS の RF に合わせるためにバンチを 20MHz または 40MHz 帯の空洞を用いてさらに分割している。



図 5 に PSB でのフェライト空洞の配置を示す。PSB は 16 回対称のリングであり、16 か所の短い直線部のうち 4 か所を高周波システムに使用している。PSB では加速に使用する C02 帯空洞、2 次高調波に相当する C04 空洞、加速中にエミッタンスを制御しながら増加されるための C16 空洞の 3 種類の空洞が設置されている。これらのフェライト空洞は 2019 年の長期停止期間中に取り外され、3 か所の直線部に FT3L 空洞が設置される予定である。FT3L 空洞システムは広帯域であるため、この 3 つのフェライト空洞の帯域を 1 台の空洞で賄うことができる。図 6 に RF システム 1 セットのゲイン特性を示す。フィードバックループを閉じることにより、さらに広い帯域をとることができている。なお、試験用に設置した空洞は #6 に設置されている。この空洞は長期停止期間に取り出され AD において反陽子の減速に使用される予定である。

PSB リングの直線部 #5、#7、#13 には 2 台の空洞が設置される。図 7 のように各空洞は 6 セル構造となっており、セル当たり 2 枚の FT3L コアが入っている。各セルは 1 台の半導体アンプによって駆動され、セルまたは半導体アンプを使用しない場合には各アンプ内にあるリレースイッチを用いてギャップショートを行い、ビームが使用していない空洞やアンプによって影響を受けないようにすることができる。

PSB 空洞の 1 号機が今年 6 月に完成し、詳細が CERN Courier に掲載される予定である。PSB は 4 階立ての加速器であるため、図 8 のように加速空洞も 4 階建て構造となる。予備の加速空洞も含め 28 台の加速空洞が 2017 年中に用意される予定である。これらの加速空洞は 2018 年に長時間の試験運転の後、4 階建て構造としてくみ上げられ、2019 年からの長期停止期間に PSB トンネルに設置される。

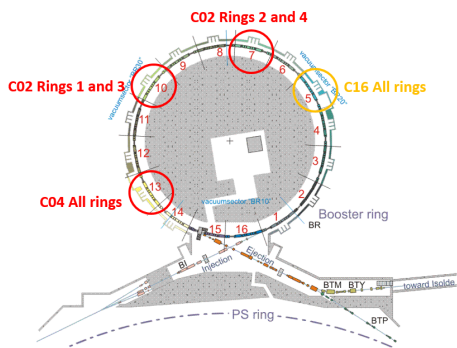


Figure 5: Present Ferrite Cavities in the PSB. #5, #7 and #11 will be used for new cavities.

#### 4.2 Mass Production of PSB cores

図 9 に量産 1 号のコアの写真を示す。リングコアの形状は外径 330 mm、内径 192 mm、厚さ 25 mm である。この量産では図 1 の磁場中熱処理装置が用いられた。この装置で処理されたものと別の装置によるものの比較を図 10 に示す。より少ない高周波損失は磁性体コアの冷却の点から望ましいため、この装置により 342 枚のコアが量産された。量産初期に品質のばらつきがあったものの、安定した性能が維持されていることが図 11 からわかる。

なお、342 枚のうち 132 枚は KEK からの貢献である。

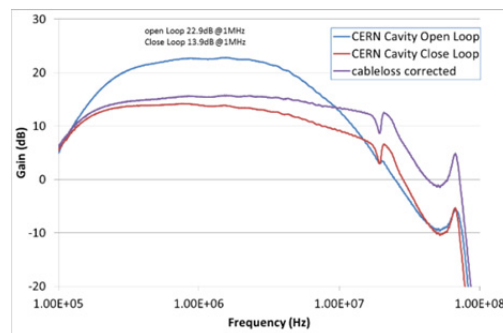


Figure 6: Open and Close loop gain of wideband system.

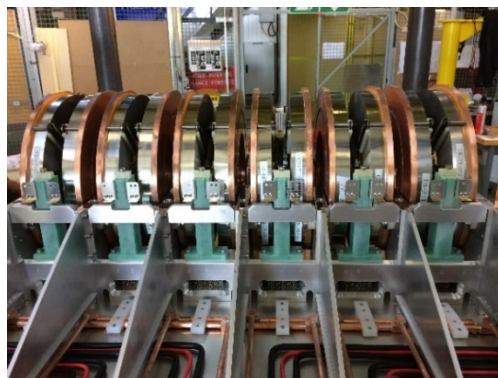


Figure 7: 6-cell cavity.

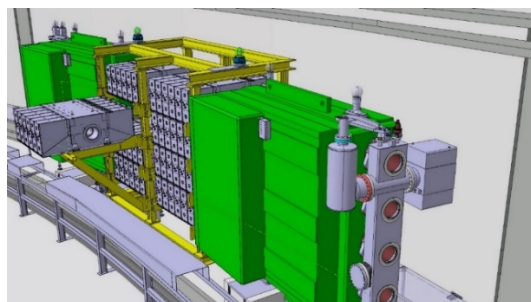


Figure 8: Assembly of Cavities.

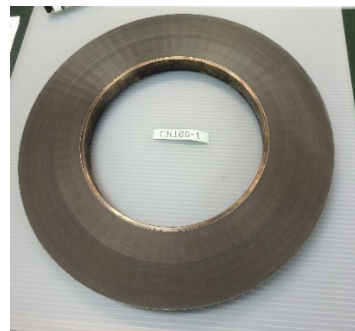


Figure 9: The first FT3L cores.

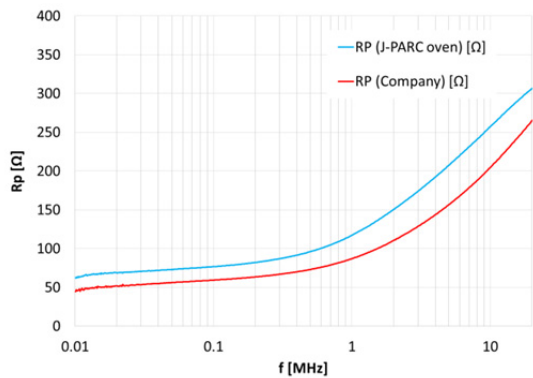


Figure 10: Comparison of FT3L core impedances produced by two different magnetic annealing ovens.

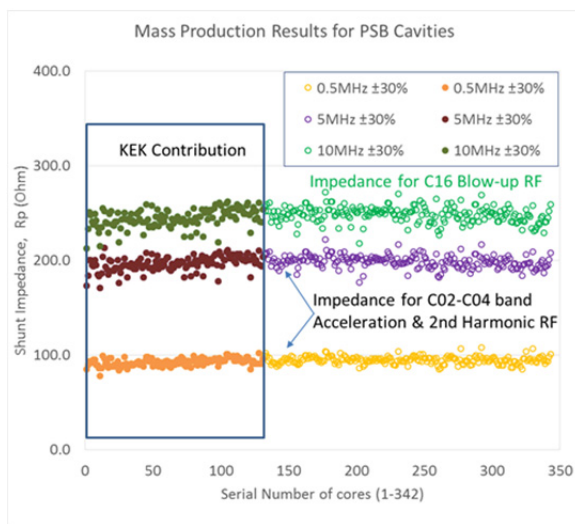


Figure 11: Results of the mass production of FT3L cores. The impedances are higher than the specification for all cores.

## 5. Damper Cavity

PSB でのビーム試験と並行して、PS では縦方向の結合バンチ不安定性対策として広帯域空洞を使ったビーム試験が行われた。PS では加速中にガンマトランジションを通過した後、結合バンチ不安定性が観測されている。これに対し、不安定性を誘起する多数のモードを同時に抑える試みとして広帯域空洞が導入された。PS は PSB にくらべ、ビーム損失が大きいため広帯域空洞を駆動する半導体アンプは空洞下の鉄のシールドボックスの中に収納されている(図 12-左)。図は保守期間のもののため、半導体アンプはすべて取り出されている。半導体アンプの写真は図 12-右に示されている。2016 年の試験では LHC 向けのバンチ強度として  $2 \times 10^{11}$ ppb の陽子を 72 バンチ 25ns 間隔として SPS に入射した。これまでの  $1.3 \times 10^{11}$ ppb に比べ大幅に強度が増えており、HiLumi で要求されている  $2.6 \times 10^{11}$ ppb に近づいた。

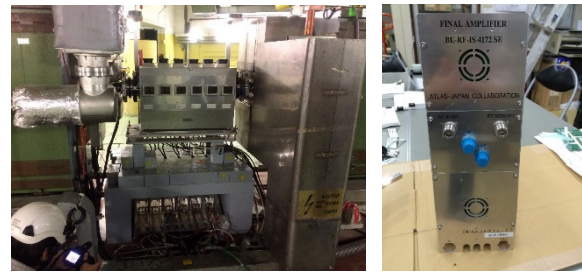


Figure 12: PS Damper Cavity during the maintenance (left) and solid state amplifier to drive (right).

## 6. Solid State Amplifiers

PSB、PS ともに高強度の加速器であるため、空洞を駆動する半導体アンプは空洞の近くに置く必要がある。このため、半導体アンプに対する放射線の影響もこの共同研究の柱の一つである。下記の照射試験を実施または実施予定である。

- 2013 年 J-PARC のコリメータ部に複数の半導体素子を置き、特性の比較を行った[8]
- 2014 年以降 PS と PSB に設置された半導体アンプを用いた放射線の影響の測定
- 2016 年 実際のアンプ動作に近い条件でのコバルト 60 照射試験(図 13)
- 2017 年 QST 高崎研究所において実際にアンプ動作状態でのコバルト照射試験
- 2017 年 CERN の照射施設 CHARM において PS の陽子ビームを使ったアンプ動作状態での照射試験を 10 月に予定

これらの一連の試験により、下記の点が明らかになった。

- Single Event と呼ばれる 1 つの粒子によってシステムが故障するまたは動作が変化する事象は、我々が使用する MOSFET については観測されていない。すなわち、頻度は少ないといえる。
- MOSFET の特性の変化は主に Total Ionization Dose に依存している。

2016 年に ATOX(株)の照射施設においておこなった試験結果を図 14 に示す。この試験では半導体のゲート電圧特性が、Cold の状態と Hot-ドレインに電流が流れ発熱している状態での差を見ている。Cold の状態に比べ、Hot な状態では放射線による影響が大きいことがわかる。また、Hot な状態でも半導体そのものは動作しており、2kGy 以上でも故障していない。異なる線量率、100Gy/H、20Gy/H、2Gy/H について測定をおこない、特性の変化は合計の線量に依存し、この範囲の線量率では差がないことがわかった。

PSB はビーム運転時の線量が低いことがわかっているが、さらに広帯域空洞を設置可能な 4 か所のうち線量の低い 3 か所(~40Gy/yr)を選んで設置することで、故障のリスクは大きくないことが期待できる。なお、2017 年に QST 高崎で行った試験の結果は CERN CHARM での試験と合わせて別の機会に報告する予定である。



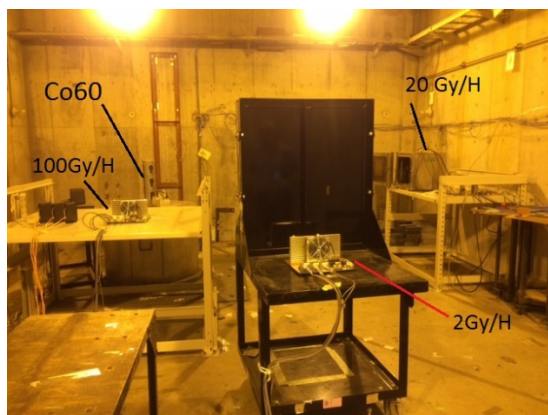


Figure 13: Radiation test of MOSFETs in Japan.

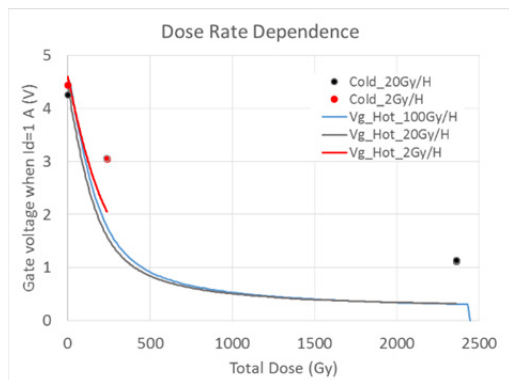


Figure 14: Radiation test results.

## 7. Other Activity

PSB と PS のために開発した広帯域空洞と半導体アンブ技術は、CERN の新しい反陽子減速リング - ELENA (Extra Low ENergy Anti-proton) リング (図 15) に使われている。図 16 は ELENA の 1 セル空洞である[9]。ELENA では AD で 5.3MeV まで減速した反陽子を途中所々で電子冷却し 100keV まで減速し、ユーザーに供給する。できるだけ低いエネルギーすなわち低い RF 周波数まで減速することが RF システムに求められたため広帯域空洞が採用された。

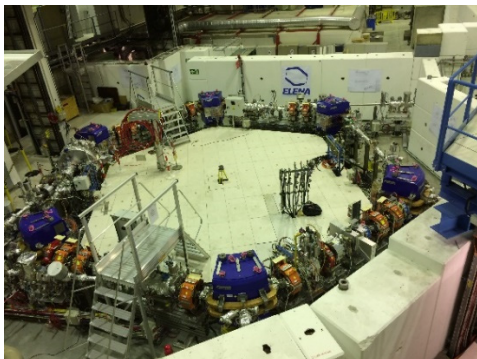


Figure 15: ELENA ring.

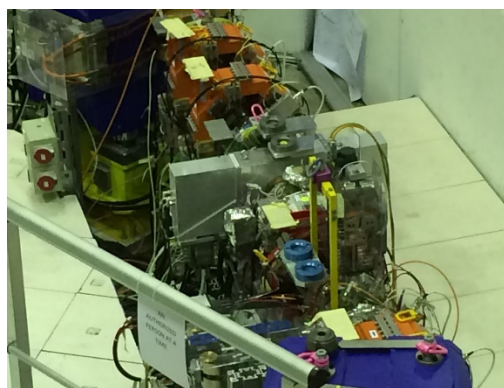


Figure 16: 1-cell cavity in ELENA.

## 8. Summary

CERN との LIU-RF コラボレーションの進捗状況について報告した。PSB の空洞置き換えは LS2 に向け順調に進んでいる。PS のダンパー空洞では LHC 向けビームとして  $2 \times 10^{11}$  ppb を SPS に入射した。LIU 以外にも CERN の Meyrin 地区にある反陽子減速リング ELENA や AD でも金属磁性体を用いた広帯域空洞の導入が進んでいる。

## 参考文献

- [1] K. Hanke *et al.*, “The LHC Injectors Upgrade (LIU) Project at CERN: Proton Injector Chain”, Proceedings of the IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 2017, WEPVA036.
- [2] C. 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.
- [3] C. Ohmori *et al.*, “International Collaboration on CERN PSB RF Upgrade and PS Damper Cavity for LHC Injector Upgrade”, SAST15, Fukui, Japan 2015 (in Japanese).
- [4] M. M. Paoluzzi, “Design of the New Wideband RF System for the CERN PS Booster”, Proceedings of the IPAC’16, Busan, Korea, May 2016, MOPMW024.
- [5] F. Tamura *et al.*, “Beam Test of the CERN PSB Wideband RF System Prototype in the J-PARC MR” Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany THPME065, p3385.
- [6] H. Damerau *et al.*, “Upgrades of the RF Systems in the LHC Injector Complex”, HB2014, East-Lansing, MI, USA.
- [7] M. Paoluzzi and H. Damerau, “Design of the PS longitudinal Damper”, CERN-ACC-NOTE-2013-0019 2013-09-09.
- [8] C. Ohmori *et al.*, “Radiation Damage Measurements of FET’s using Radiation Monitor, RADMON for LIU”, SAST14, Aomori, Japan 2014 (in Japanese).
- [9] M.-E. Angoletta *et al.*, “Initial beam results of CERN ELENA’s digital low-level RF system”, Proceedings of the IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 2017, THPAB142.