

LHC入射器アップグレードのためのPSB空洞とダンパー空洞の国際共同研究 INTERNATIONAL COLLABORATION ON CERN PSB RF UPGRADE AND PS DAMPER CAVITY FOR LHC INJECTOR UPGRADE

大森千広^{*A)}、田村文彦^{B)}、長谷川豪志^{A)}、Mauro Paoluzzi^{C)}

Chihiro Ohmori^{*A)}、Fumihiko Tamura^{B)}、Katsushi Hasegawa^{A)}、Mauro Paoluzzi^{C)}

^{A)}J-PARC/KEK ^{B)}J-PARC/JAEA ^{C)}CERN

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, PSB, PS, SPS and heavy ion chains. J-PARC is 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. A 10-cell cavity system has been installed in the PSB and has been used for the acceleration of high intensity beam. The collaboration also includes the developments of the wideband damper cavity system for the longitudinal coupled bunch instabilities. This paper summarizes the status of the collaboration including the beam loading test at the J-PARC MR, radiation damage tests of FETs for the amplifiers and the beam acceleration at the CERN PSB.

1. はじめに

J-PARC リング RF グループと CERN RF グループは、2002年に始まった重イオン加速器 LEIR (Low Energy Ion Ring^{[1],[2]})での鉛ビーム加速以来、10年以上に渡り協力関係を続けている。この LEIR は LHC での重イオン衝突実験のために反陽子リング-LEAR を改造したシンクロトロンである (図 1 参照)。LHC への入射器チェーンの 1 つであり、故障による停止時間を如何に減らすため、1 台のバックアップを含む 2 台の加速システムが設置されている。限られたスペースに複数台を設置するには、フェライト空洞では加速勾配が低すぎ、我々の開発してきた金属磁性体空洞が必要となったことが共同研究の始まりである。この金属磁性体空洞により、2 次高調波を混合してビームの性能を向上させることも可能となった。同時に、この共同研究は J-PARC 側にも大きな恩恵をもたらした。当時、開発が遅れていた駆動段増幅器に CERN で開発した故障が少なく大きな負荷変動にも対応できる 1 kW 出力の半導体アンプユニットの技術を提供を受けたことである。J-PARC ではこれを組み合わせ、8 kW(RCS) と 4 kW(MR) の駆動段増幅器を構成している。初期に見つかったいくつかの弱点を強化した結果、これまで約 150 台のユニットを製造したが、ユニットを原因とした加速器運転に支障のある故障は発生していない。この駆動段増幅器の導入は J-PARC の RF システムに別の恩恵をもたらした。これまで、大型の真空管を駆動する場合は入力回路に同調回路を含むことで真空管を駆動する電力を減らしていた。しかし、広帯域で高出力の駆動段増幅器が実現できたため、J-PARC の RF システムの特徴の高勾配と同時に、受動的 (または広帯域) なハイパワー系を実現したことである。従来のフェライト空洞ではチューニング回路が不可欠であり、能動的なフィードバックがハイパワー系にも含まれていた。またフェライト空洞自体のインピーダンスも高周波電圧によって変化する性質がある。さらに、終段増幅器の内部にも、同調回路が含まれていた。これ

らの能動的な回路は大強度のビームを加速する際に不安定性の原因となり、複雑な制御が必要となっている。こうした回路を一切使わずに、受動的な負荷として高周波空洞と増幅器を扱えることも、J-PARC で大強度のビームを安定して加速することに成功した一因と言えよう。

最初の共同研究によって 2005 年に設置した LEIR 空洞は順調に稼働し、現在もビーム加速に使われている。この LEIR 空洞は CERN の LLRF グループにある知見をもたらした。それは、受動的な負荷である LEIR 空洞の制御がフェライト空洞に比べて、格段に容易である点である。この金属磁性体空洞のビーム加速における高い制御性能が、2011 年に始まった LHC 入射器アップグレード (LHC Injector Upgrade-LIU^{[3],[4]}) のための PSB (PS booster) 空洞として現状のフェライト空洞の代わりとして金属磁性体空洞導入の検討^[5,6,7,8,9]を始める動機の一つとなった。この PSB は CERN の陽子ビームチェーンの中で Linac2 からのビームを加速して PS に送る初段の加速器である (図 1 参照)。この検討では日本側から、その年に加速器用に大型のものができるようになったファイナメント FT3L を提案した。この材料を使うことで空洞のインピーダンスを倍化し、加速電圧を増やすことができるためである。この FT3L を用いた加速システムは 2013 年に PSB に設置され、基礎的な動作の検証とビーム試験が行われた。PSB は 4 台の加速器を縦に積み上げた構造の世界で唯一の加速器である。このため、高さ方向のスペースが 40 cm 程度に限られている。このため、空洞に使われる磁性体コア 1 枚あたりのインピーダンスはそれほど大きくできず、反射に強い増幅器であれば駆動することができる。つまり、2 枚の FT3L コアを装荷した加速空洞 1 セルを 1 台の半導体増幅器で直接駆動することが可能である。この構成を使い余裕のある加速空洞セル数を用意することで、1 部の故障時にも残りの加速空洞セルを用いてビーム運転を継続できる。2013 年に設置された空洞は 5 セル分であり、加速に必要な電圧の半分以下であったが、空洞の基本動作およびフェライト空洞と組み合わせての加速試験などを行うことができた^[7]。しかし、その後 CERN の

* chihiro.ohmori@kek.jp

加速器運転計画で2014年の長期シャットダウンLS1が予定されていたため、2013年にJ-PARC MRにPSBと同じ空洞1セル分すなわち空洞と半導体増幅器各1台を設置し、LS1前にできなかった懸案のビーム負荷試験を行い目標である 1.4×10^{13} ppbを補償することに成功した^[10]。また、このビーム試験とは別に、半導体増幅器に使用するMOSFETの放射線効果に関してビームを用いた測定を行った^[7]。こうした知見をもとに、改良がなされLS1期間中にPSBに更に5台の加速空洞が設置され、合計10台となった(図2)。現在、PSBの高周波システムを、次の長期停止期間-LS2の際にFT3L空洞システムに置き換えることを主な計画として検討が進められている。

PSBの空洞置き換えとは別に、PS(図1)ではLHC行きのビームが縦方向の結合バンチ不安定性を起す問題がある。この不安定性は加速に使用されている10MHz帯の加速空洞をインピーダンス源とし、加速中のガンマトランジション後とフラットトップでのバンチ分割の際に発生している。この不安定性は現状の 1.8×10^{11} ppbでは、フェライト空洞の1台をダンパー空洞にすることで、制御することが可能である。しかし、LS2期間に予定している性能向上により粒子数が 2.7×10^{11} 程度となった場合、不十分となることが分かっている。このため、結合バンチ不安定性のモードを一度に多数ダンプさせるために、広帯域のFT3L空洞を使う試みが始まっている。



Figure 2: FT3L cavities were installed in PSB.

LIUによってビーム電流が増強され加速エネルギーも増加するため、現行の老朽化したPSBのRFシステムの増強が問題となっている。特に真空管アンプのための電源の更新、フェライト空洞のバイアス電源の更新、2次高調波空洞の真空管増幅器の改造など大掛かりな更新・改造が必要な時期に来ている。当初、RFシステムの増強はこのようなフェライト空洞システムの増強をベースとし並行しており、金属磁性体空洞システムの検討を平行して行うという位置づけであった。しかし、4年間のR&Dとビーム試験の結果、金属磁性体空洞システムを基本計画することとなったが、フェライト空洞とは異なるシステムとなるため慎重に検討を進めている。最終的な判断は9月の国際レビュー委員会の後、年内に決定される予定である。

2.1 RF Cavity

PSBの金属磁性体空洞は2枚のFT3Lコアを装荷した単純な構造をとっている^[5]。加速ギャップは2枚のコアの間位置し、プッシュプル動作の半導体アンプ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直結されるが、将来ビーム増強が進んだ場合は空洞の両側に2台半導体増幅器を配置できる構造となっている。図3は5セル空洞である。コアは片面にシリコングリースが塗布され冷却銅板により冷却されている。放電防止のため、薄いカプトンシートが間に挟まれている。加速電圧は700Vであり、加速に必要な8kVを得るためには1リングあたり12セルが必要となる。PSBは4階建て構造のため、加速には48セルを必要とする。更にバックアップと2次高調波を考慮すると、PSB全体で100セル近い空洞が必要になる。従来はフェライト空洞8台で基本波と2次高調波を賄っており、空洞台数として考えると10倍以上になることとなる。しかし、最終段の高周波増幅器であるため故障率が低く、また故障時にもバックアップ空洞があるため、CERNの加速器運転に支障がでる可能性を減らすことができると考えている。バックアップを持たない従来のフェライト空洞システムとの大きな違いである。

PSBの空洞はJ-PARCの空洞と同様に金属磁性体を用いているが、空洞の帯域という点で若干違いがある。J-PARC RCSでは外部インダクターをつけることで空洞の帯域を加速と2次高調波に必要な最小限の範囲($Q \sim 2$

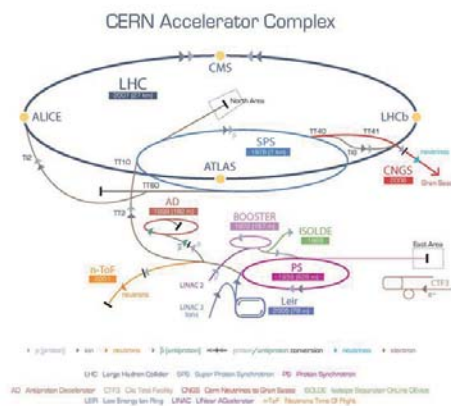


Figure 1: CERN Accelerator Complex.

2. PSB UPGRADE

PSBは周長157mのリングで前述のように4階建て構造となっている。現在Linac2から50MeVの陽子ビームが入射され1.4GeVまで加速、PSとISOLDEにビームを供給している。LIUでは次の改造を予定している^[3, 4]。

- Linac4による160MeV入射
- H⁻入射の導入。
- 1.4GeVから2GeVへの加速エネルギーの変更。
- 1.4×10^{13} ppbの加速。

PASJ2015 THOL01

に制御し、ビームローディングの影響を最小限にとどめる設計を選んだ。また、ビームローディングを減らす効果のある直接フィードバックに必要な帯域が大型真空管を用いた終段増幅器ではとることができないため、フィードフォワードを用いてビームローディング効果を打ち消している。一方 CERN PSB 空洞は半導体増幅器によって駆動されるため、直接フィードバックにより 10 dB 以上ビームローディングを軽減することができている^[8]。もちろん、これだけでは不十分なため、LLRF によって 4 つのハーモニック成分についてビームローディングは補償されている。

PSB 空洞に使用する磁性体はファインメット FT3L であるが、磁場中熱処理炉の形状、性能の違いから磁性体コアの性能にも違いが見られる。図 4 はメーカーと J-PARC の磁場中熱処理炉により製造した FT3L の性能の違いを示したものである^[11]。これらのコア単体の違いが空洞として組んだ場合 2 割以上の違いとなるため、LS2 で金属磁性体空洞を入れ替える際には J-PARC の磁場中熱処理炉 (図 5) を用いることが考えられている。

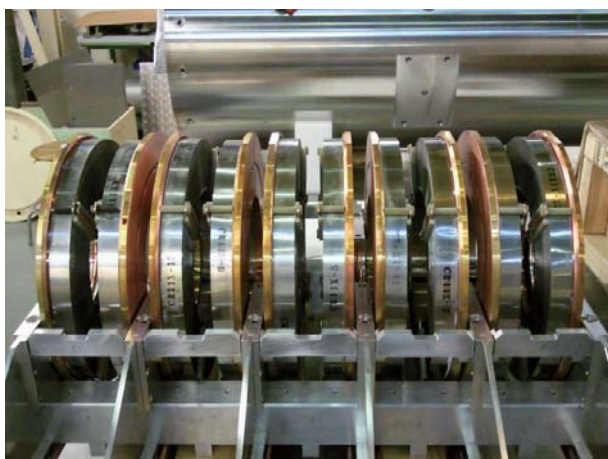


Figure 3: 5 cell cavities for CERN PS Booster.

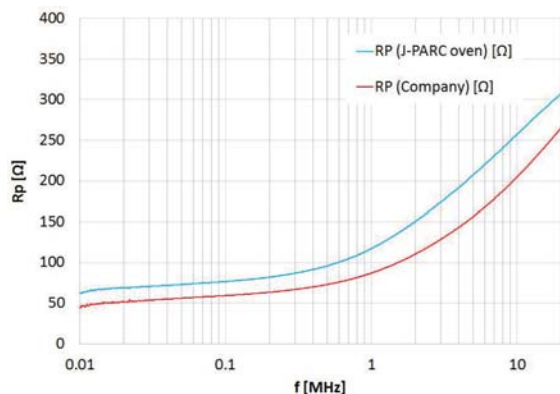


Figure 4: Characteristics of FT3L cores made by two different magnetic annealing systems.

2.2 Solid State Amplifier

図 6 は PSB の金属磁性体空洞を駆動するための半導体増幅器である^[8]。この半導体増幅器には 300 W 出力

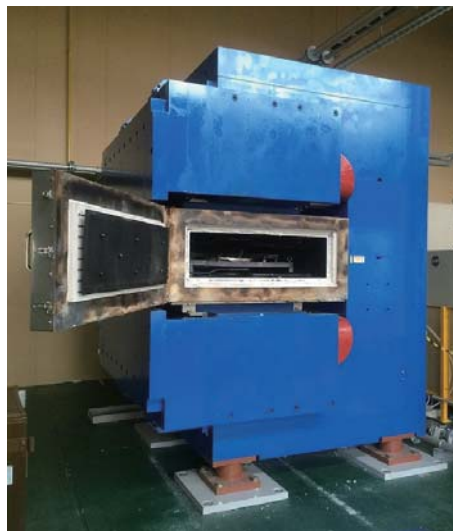


Figure 5: Magnetic annealing system for FT3L production. The system was used for the mass production of 280 FT3L large cores of the J-PARC MR.

の MOSFET が 18 個使われている。このうち、1 個はプリアンプとして、もう 1 個は放射線によるバイアス特性の変化を補正するために検出用である。残り 16 個が最終段のプッシュプル動作 (2 組 X 8 個) に使われている。半導体増幅器を加速器トンネル内で使用する場合、半導体の耐放射線性、半導体の故障、冷却水のトラブル等が考えられる。

耐放射線性については、J-PARC MR のビームを用いて照射試験を行った^[12, 7]。図 7 にしめすように初期故障を除き全ての MOSFET は 2 kGy まで故障しなかった。現在の運転状態では RF 空洞の設置予定地の線量は低いため大きな制限とはならないことが分かった。このため、サンプル数が多くかつ、ドレイン-ゲート間の耐電圧の高い MOSFET を使用する予定である。ただし、初期の 2 kGy 程度の照射によって MOSFET のバイアス特性が変化するため、増幅器の内部に放射線モニター用の MOSFET を置き、自動的にバイアス電圧を変えて増幅器としての利得を安定化できる回路を導入している (図 8)。なお、MOSFET をあらかじめ X 線を照射することで、ゲインの変化を減らすアイデアも提案されている。

放射線損傷以外の半導体の故障は、確率的に発生するが、この増幅器では 8 個の MOSFET を並列に一度に結合し、MOSFET が故障した場合でも継続して半導体増幅器を動作させることができるようになっている。また、冷却水についても、配管を単純化し増幅器内部での接続箇所をなくし、内部での冷却水漏えいが原理的に起きないように改良した。

2.3 ビーム試験

CERN PSB は 2013 年からの長期シャットダウン (LS1) により 1 年以上停止した。この間に J-PARC MR のビームを用いて空洞と半導体増幅器の動作、ビームローディングの効果とその補償について実験を行った^[10]。この試験ではバンチあたり 1.4×10^{13} 個の陽子のビームローディングを補償できることを示すことができ



Figure 6: Solid State Amplifiers for CERN PS Booster.

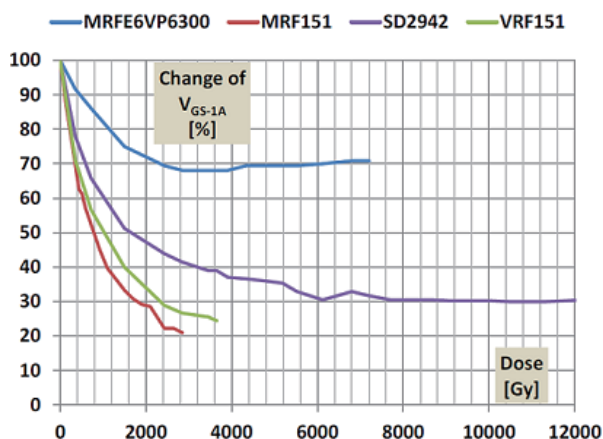


Figure 7: Variations of bias characteristics of different MOSFETs.

た。長期シャットダウン-LS1 後に PSB では 10 台の金属磁性体空洞を用いてビーム加速試験を行っている。PSB のこの直線部で使用できる直線部 1 か所では 10 台が限界のため、通常の加速電圧 8 kV に対し 7 kV を金属磁性体空洞のみで出力してビーム加速した結果を図 9 に示す。ここでは金属磁性体空洞を H=1 (加速)、フェライト空洞を H=2 (2 次高調波) に使い、 8×10^{12} ppp を加速している^[13]。また、電圧不足分をフェライト空洞で補うことで 9.6×10^{12} ppp まで加速できることが分かっている。現在、金属磁性体空洞システムの安定性を確認するため、ユーザーへのビーム供給に 2 次高調波空洞として使用している。こうしたビーム試験の結果から、3 年後の長期シャットダウン-LS2 では現状のフェライト空洞を金属磁性体空洞に置き換えることの検討が進められている。

3. PS DAMPER CAVITY

CERN PS ではガンマトランジションを通過した後とフラットトップにおいて縦方向の結合バンチ不安定性が観測されている^[14, 15, 16, 9]。このビーム不安定性は特に LHC 行きのビームにおいて深刻なため、加速空洞のうちの 1 台の共振周波数を変え、結合バンチ不安定性

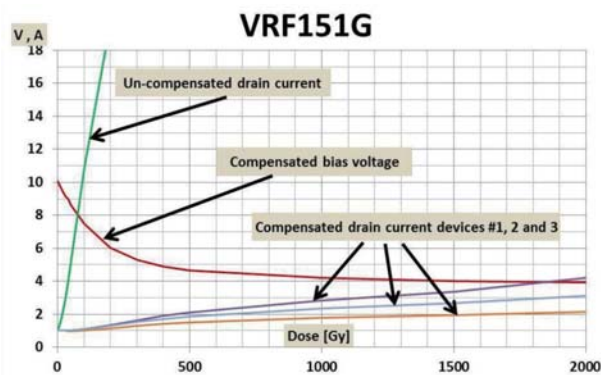


Figure 8: Results of the radiation effects compensation. Light blue line shows the drift of the bias characteristics without the compensation. Purple, blue and brown lines show the variation with the compensation. It shows the compensation works well.

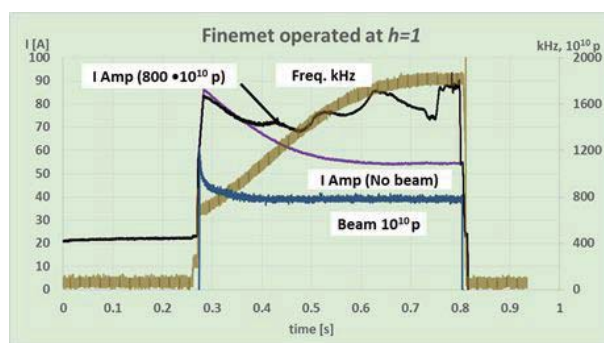


Figure 9: Beam acceleration at PSB using Magnetic Alloy cavity. Blue and brown lines show beam current in the ring and RF frequency, respectively. Black line is DC current to drive the solid state amplifier during acceleration. The purple line is the reference without beam.

を起す主なモードの一つをダンピングすることで、ビームの供給を行っている。次の長期シャットダウン-LS2 により入射エネルギーが 2 GeV となり空間電荷効果が減るためビームのエミッタンスが改良されることにより、バンチあたりの粒子数を増やそうとしている。しかし、この場合より結合バンチ不安定性が深刻になることが予想され、複数をモードをダンピングすることが必要となっている。

これに対し、数年前に PSB で導入した広帯域の金属磁性体空洞システムを使って同時に複数のモードをダンピングするダンパー空洞システムを作る提案が CERN からなされた^[16]。PSB 空洞と半導体増幅器は改良され長期シャットダウン-LS1 期間中に PS に設置された (図 10,11)。PS は PSB に比べ、放射線レベルが高いため、半導体増幅器を空洞の横に設置せず、空洞下の鉄遮蔽体の中に収納している。現在、試験的に半導体増幅器の一部のみを使って試験を行っているが、来年度日本で作った半導体増幅器を使って、より本格的な試験が行われる予定である。



Figure 10: Damper cavity in CERN PS.



Figure 11: Cavity measurement before installation.

4. MEYRIN 地区の他の加速器への応用

金属磁性体 FT3L を使った PSB 空洞は、広帯域かつ高強度にも対応できるため、ユニバーサルな加速空洞として広範囲に応用できる。すでに、ほぼ同じ設計の空洞がオーストリアの医療用加速器 MedAustron に使われている。また、セルンの Meyrin 地区で現在建設中の反陽子の減速リング ELENA (Extra Low Energy Antiproton Ring) は AD(Antiproton Decelerator) リングで減速した反陽子を 5.3 MeV から 5 keV まで減速するもので広帯域が必要となる。さらに AD リングにも、この空洞を設置し減速に使用することが検討されている。

5. まとめ

J-PARC RF グループは CERN の RF グループと 10 年以上に渡り、広帯域空洞や半導体増幅器について相互に協力してきた。LHC のルミノシティ増強のための入射器アップグレード計画において、J-PARC で開発した FT3L 空洞技術は CERN の PSB 空洞入れ替えと PS の縦方向結合バンチ不安定性ダンパー空洞の開発に使われようとしている。J-PARC では空洞技術だけでなく、J-PARC の大強度ビームを使った PSB 空洞の試験や MOSFET の放射線試験などによっても LHC 入射器アップグレードに貢献している。PSB 空洞と PS ダンパー空洞の経験か

ら、現在建設中の反陽子減速リング ELENA にも同じ広帯域空洞が減速空洞として用いられる。さらに、PS の陽子ビームによって生成した反陽子を最初に捕獲、減速するリング AD にも広帯域空洞が用いられようとしている。また最近、この共同研究で得られた半導体増幅器の技術は J-PARC RF 空洞の直接フィードバックを用いたビーム補償にも用いられる可能性がでてきた。お互いの持つ優れた技術を取り入れ加速器の性能向上を図るために、J-PARC と CERN の協力は大いに役立っている。

参考文献

- [1] R. Garoby et al., "The LEIR RF System", PAC05, Knoxville, 2005, p 1619-1621.
- [2] M. Chanel et al., "LEIR: TOWARDS THE NOMINAL LEAD ION BEAM", APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology(RRCAT), Indore, India
- [3] R. Garoby et al., Upgrade Plans for the LHC Injector Complex, IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, p. 1010.
- [4] K. Hanke et al., "Status and Plans for the Upgrade of the CERN PS Booster", IPAC2015, Richmond, USA (2015).
- [5] M. M. Paoluzzi, "Design of the PSB wideband RF system", CERN-ACC-NOTE-2013-0030, Geneva, Switzerland, 2013.
- [6] M. M. Paoluzzi et al., "Studies on a wideband, solidstate driven RF system for the CERN PS Booster", IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, p. 3749.
- [7] M.M. Paoluzzi et al., "BEAM TESTS AND PLANS FOR THE CERN PS BOOSTER WIDEBAND RF SYSTEM", IPAC2013, Shanghai, China.
- [8] 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
- [9] H. Damerau et al., "UPGRADES OF THE RF SYSTEMS IN THE LHC INJECTOR COMPLEX", HB2014, East-Lansing, MI, USA.
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] C. Ohmori et al., RADIATION DAMAGE MEASUREMENTS OF FET'S USING A RADIATION MONITOR, RADMON FOR LIU, SAST14, Aomori, Japan 2014 (in Japanese)
- [13] M. Paoluzzi, et al., Beam Tests Using a Wide Band RF System Prototype in the CERN PS Booster, IPAC2015, Richmond, USA, 2015, WEPHA015
- [14] H. Damerau et al., "Longitudinal Coupled-Bunch Oscillation Studies in the CERN PS", IPAC2013, Shanghai, China (2013).
- [15] S. S. Gilardoni et al., "THE PS UPGRADE PROGRAMME: RECENT ADVANCES" Shanghai, China (2013).
- [16] M. Paoluzzi, H. Damerau, Design of the PS longitudinal damper, CERN-ACC-NOTE-2013-0019 2013-09-09