

令和 3 年 4 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11930

研究課題名(和文)高耐放射線性能を持つ高出力半導体アンプの開発研究

研究課題名(英文)Development of Rad-Hard High Power Solid State Amplifiers

研究代表者

大森 千広 (OHMORI, CHIHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：50213872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：半導体を用いた高周波増幅器は加速器のみならず社会の様々な用途に使われている。しかし、放射線により特性が変化するほか、場合によっては損傷することが知られている。申請者はスイス・CERNの研究者と大型加速器LHCの高輝度化のための共同研究として耐放射線性の高出力半導体増幅器を開発することで加速器群の性能向上に貢献した。研究成果はIEEE TNSに発表済みであり、CERNのブースター加速器の加速空洞システムにはその技術が採用され加速器運転を行っている。さらに我々は、より高強度用に窒化ガリウム増幅器の試験をおこなった。この結果は論文発表の上CERNのPS加速器に応用される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた技術はすでにCERNのPSブースター加速器において実用化され、2020年末からのビーム運転で使用されている。また窒化ガリウム素子を用いた高出力の半導体増幅器についても良好な結果が得られている。この技術は同じくCERNのPS加速器のフィードバックアンプに使うことでLHCのビームの品質向上に貢献するが期待されている。

我々の行った試験はガンマ線、荷電粒子、中性子など各種の粒子を同時に照射するもので、実際の加速器だけでなく原子力関連施設の環境にも近い。こうした環境下で安定に動作する装置の研究は今後ますます重要になっていくと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Solid-state amplifiers were used for many applications including particle accelerators. However, it is also known that the amplifiers were degraded or damaged by radiations. Our collaboration with CERN has contributed to High Luminosity LHC project as a part of LHC Injector Upgrade by developing radiation-hard amplifiers. The results were reported in IEEE TNS and developed technique is adopted for CERN PS Booster for beam acceleration. We also develop even stronger amplifier using GaN devices. The results was excellent and will be submitted for publication. This devices will be able to be used for feedback amplifiers in CERN PS accelerator.

研究分野：加速器物理

キーワード：陽子加速器 半導体増幅器 放射線損傷 中性子線量 Total Ionization Dose 窒化ガリウム半導体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

CERNとJ-PARCのRFグループは2002年から、高周波加速システムについて共同研究を行ってきた。LHCでのHiggs粒子の発見の後CERNはLHCをさらに高輝度化することでHiggsなどの素粒子研究を推し進めようとしていた。このため、LHC高輝度化プロジェクト(Hilumi-LHC)が開始された。これに必要なLHCの入射器群を強化するLHC入射器アップグレード(LIU)プロジェクトの一環として、PSブースター加速器の高周波システムの全面改修とPS加速器でのビーム品質の向上を目的として研究を進めていた。我々は2012年に協定を結びLIUに参加していた。PSブースターではこれまで使用してきたフェライト空洞すべてを取り出し、J-PARCで用いられている金属磁性体を用いた空洞に置き換えることとなった。この空洞は半導体増幅器で駆動されるため、放射線の影響を評価することが必要であった。一般に半導体増幅器は放射線の影響を受けやすく、懸念がもたれていた。我々はCERNと協力し、半導体増幅器をトンネル内で使用するため、放射線の影響を低減する補償回路の試験を進めていた。

### 2. 研究の目的

本研究の第一の目的は補償回路を用いた半導体増幅器の放射線耐性を試験することであった。第二の目的はさらに強力な耐放射線性を持つ半導体増幅器の開発である。

### 3. 研究の方法

補償回路方式の半導体増幅器を試験するため我々はJ-PARCやCERN加速器、量研機構のコバルト照射施設を用いて半導体増幅器の照射試験をおこなった。CERNにはCHARMと呼ばれる陽子ビームを標的に当て2次粒子を照射に用いる施設があり、本研究費を用いて2018年度に出張し実験をおこなった。また照射に用いる半導体増幅器を製作したほか、J-PARC加速器内で照射するための環境整備をおこなった。特に本研究では半導体増幅器を稼働状態で照射するため、J-PARCで使用するケーブルを購入し敷設した。照射線量をリアルタイムで測定するためにCERNで開発した放射線計測器を用いたが、そのデータ取得のためのPCを本研究費により準備した。本研究によりPSブースター加速器で使用する上で十分な耐放射線性を持つことが確認できた。この結果はIEEE TNS [2]で発表している。さらに最終年度にはごく最近入手可能になった窒化ガリウム半導体を用いた半導体増幅器の試験をJ-PARC加速器でおこない、さらに良い結果が得られている。

### 4. 研究成果

本研究の最大の成果は高線量で使用できる半導体増幅器を開発し、J-PARCおよび量研機構において照射試験によって安定な動作を実証したことである。この補償回路を組み込んだ半導体増幅器192台が現在CERNのPSブースター加速器でビーム加速に用いられている[1, 3, 4]。この半導体増幅器はコンパクトでありながら高出力であり、LIUで求められているPSブースター加速器のビームエネルギーを1.4GeVから2GeVにすることができた。さらにビーム強度も2倍となる予定である。なお、補償回路を組み込んだ半導体増幅器の照射試験結果はすでにIEEE TNS [2]に掲載されている。

もう一つの成果は窒化ガリウム半導体を用いた半導体増幅器を製作し、J-PARC加速器で照射試験を行っている点である。この結果を分析し、PS加速器のフィードバックアンプへの応用について、今後検討を進める予定である。また、この結果をまとめ、投稿論文とする予定である。

この半導体増幅器の開発を含むPSブースター加速器への貢献はCERNで高く評価され、2019年に数年ぶりに開催された一般公開(Open Days)の紹介動画の中でも日本が加速システムに貢献していることが協調されている(<https://twitter.com/CERN/status/1246832972155826178>)。

[1] C. Ohmori, M. Paoluzzi, F. Tamura, K. Hasegawa, Y. Sugiyama, M. Shirakata and M. Yoshii, "J-PARC Contributions to the LHC Injector Upgrade (LIU) Project" JPS Conf. Proc., 011006 (2021) <https://doi.org/10.7566/JSPSC.33.011006> (査読あり)

[2] C. Ohmori, M. Paoluzzi, "Development of Radiation-Hard Solid-State Amplifiers for kilo-Gray Environments using COTS components", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 66, NO. 10, OCTOBER 2019, p. 2188-2195, DOI:10.1109/tns.2019.2937603 (査読あり)

[3] M. M. Paoluzzi, J. Daricou, M. Haase, C. Rossi, L. Arnaudon, V. Bretin, Y. Cuvet,

S. Energico, A. J. Jones, D. Landre, C. Ohmori, "The New 1-18 MHz Wideband RF System for the CERN PS Booster", Proceedings of IPAC'19, Melbourne, Australia, May 2019, WEPRB107 国際共著論文.

[4] 大森千広, Mauro Paoluzzi, 白形政司, 田村文彦, 長谷川豪志, 杉山泰之, 吉井正人, "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", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, p232-235.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ohmori Chihiro, Paoluzzi Mauro	4. 巻 66
2. 論文標題 Development of Radiation-Hard Solid-State Amplifiers for Kilogray Environments Using COTS Components	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 2188 ~ 2195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2019.2937603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 M. M. Paoluzzi, L. Arnaudon, V. Bretin, Y Cuvet, J. Daricou, S. Energico, M. Haase, A. J. Jones, D. Landr&eacute;, C. Rossi, C. Ohmori,	4. 巻 -
2. 論文標題 THE NEW 1-18 MHz WIDEBAND RF SYSTEM FOR THE CERN PS BOOSTER	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 10thInt. ParticleAcceleratorConf. IPAC2019	6. 最初と最後の頁 3063 ~ 3065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPRB107	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 大森千広	4. 巻 Vol.38, No.1
2. 論文標題 陽子の加速から電車の加速へ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 大森千広、Mauro Paoluzz、白形政司、田村文彦、長谷川豪志、杉山泰之、吉井正人	4. 巻 -
2. 論文標題 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-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 232 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chihiro Ohmori, Mauro Paoluzzi, Fumihiko Tamura, Katsushi Hasegawa, Yasuyuki Sugiyama, Masashi Shirakata and Masahito Yoshii	4. 巻 -
2. 論文標題 J-PARC Contributions to the LHC Injector Upgrade (LIU) Project	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of J-PARC2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大森 千広, 白形 政司, 長谷川 豪志, 杉山 泰之, 吉井 正人, 田村 文彦, Paoluzzi Mauro
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森千広、Mauro PaoluzziA, 長谷川豪志, 田村文彦
2. 発表標題 LHCの高輝度化計画に向けたLHC入射器RFアップグレードへの日本の貢献(1)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>CERNオープンディOD19紹介動画  <a href="https://www.youtube.com/watch?time_continue=4640&amp;v=U3vutvLlo-8">https://www.youtube.com/watch?time_continue=4640&amp;v=U3vutvLlo-8</a>  CERNオープンディOD19紹介動画 (PSブースター)  <a href="https://twitter.com/i/status/1246832972155826178">https://twitter.com/i/status/1246832972155826178</a>  KEK-CERN Collaboration for new PS Booster Cavities  <a href="http://cds.cern.ch/record/2289024">http://cds.cern.ch/record/2289024</a>  " LS2 Report: metamorphosis of the Booster "  <a href="http://bulletinserv.cern.ch/emails/archive/438/">http://bulletinserv.cern.ch/emails/archive/438/</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	CERN			