

# LIPAc Phase-B+の RFQ/SRF 用 RF 増幅系における RF ノイズとリークの問題

## RF NOISE AND LEAKAGE ISSUE IN RF POWER AMPLIFIER CHAINS FOR DRIVING RFQ AND SRF CAVITIES IN THE PHASE-B+ OF LIPAc

廣澤航輝<sup>#,A)</sup>, 久保直也<sup>A)</sup>, 春日井敦<sup>A)</sup>, マルチェナ アルバロ<sup>B)</sup>, モヤ イバン<sup>C)</sup>, 斎藤健二<sup>A,D)</sup>, 小林仁<sup>E)</sup>  
Kouki Hiroswa<sup>#,A)</sup>, Naoya Kubo<sup>A)</sup>, Atsushi Kasugai<sup>A)</sup>, Alvaro Marchena<sup>B)</sup>, Ivan Moya<sup>C)</sup>, Kenji Saito<sup>A,D)</sup>,  
Hitoshi Kobayashi<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology (QST), Japan

<sup>B)</sup> BROAD TELECOM S.A. (BTESA), Spain

<sup>C)</sup> Fusion for Energy (F4E), Germany

<sup>D)</sup> National Institute for Fusion Science (NIFS), Japan

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Japan

### Abstract

LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) is a EU-JA collaboration 9 MeV and 125 mA CW hadron linac that aims to validate the technology will be used in the IFMIF accelerator (40 MeV, 2 x 125 mA CW). The RF accelerating system of LIPAc consists of three types of components: RFQ cavity, buncher cavities, and superconducting half wave resonators (SRF). The RF control system of LIPAc is designed to optimized CW operation, and 8 high power RF amplifier chain is used for each RFQ cavity and SRF cavities, individually. After amplification by tetrodes, a Y-stripline ferrite circulator controls RF with nominal output power 220kW for RFQ and 105kW for SRF. During the Phase-B+ beam commissioning and RFQ conditioning campaign started from FY2021, strong RF signal with similar pulse shape for set RF parameters had been detected by using spectrum analyzer. The RF leak can make noise floor and unexpected malfunctions for each diagnostic. By measuring the noise from the cables and free space, we could find one of critical sources of RF leakage. In this report, measurement and analyzation results, ideas to fix them, and discussion about other candidate of the large RF leakage is summarized.

### 1. イントロダクション

LIPAc (Linear IFMIF Proto-type Accelerator) の RF 加速制御システム (RF システム) は加速周波数 175 MHz の RF で RFQ 空洞、Re-Buncher 空洞、SRF 空洞を励振し、加速とバンチング制御を行う。デザイン上の出力電力は  $P(\text{RFQ}) < 250 \text{ kW-CW}$ 、 $P(\text{SRF}) < 150 \text{ kW-CW}$ 、 $P(\text{Re-Buncher}) < 20 \text{ kW-CW}$ [1] であり、パルスから段階的にデューティーを上げていき、CW へ到達する計画である[2, 3]。

我々の RF システムのキーポイントの一つは、White Rabbit システム[4]による同期の構築である。特に RF 制御系 (LLRF) と一部のビーム計測システム (ビーム位置位相モニタと残留ガス方式のバンチ長モニタ) は、直接 White Rabbit 同期回路によって駆動しており、ビームを介して一連の同期マップを構成している[5]。

LIPAc は 2021 年の 7 月から Phase-B+ ビーム試運転が開始され、メンテナンス期間を挟んで、12 月ビーム試験を行った。ビーム試験にて実際に加速制御機器とビーム診断機器が同時に稼働する場面になって、本報告で取り上げるノイズの影響が顕著に表れ始めた。RF システム単体でも、ノイズの問題は常に確認されていた。電源のスイッチングノイズや、空冷機器用インバータのノイズ等である。コモンモードノイズは避けられないもの、回路構成の見直しやフェライトコア等の対策で、その影響を抑止してきた。ビーム試験において、ビーム位置位相モニタのノイズフロアやビームロスモニタ等にも Fake trigger

を誘発し、ビーム診断機器のパフォーマンス低下が発生しうることが判明したため、広範にわたって影響を及ぼすノイズ源の探査を開始した。

本報告では、サーキュレータに焦点を当てて議論を行っている。事前の空間サーベイで、サーキュレータからのノイズが他のノイズよりはるかに大きいことが判明し、同じ測定機器の構成 (減衰器、アンテナ等) で測定できる範囲に、他の位置からのノイズ源が同定できなかった。そこで、まずはサーキュレータのノイズ漏れを抑制することに焦点を絞り、解決の後に次のノイズ発生源の調査に進むことが出来ると考えた。

測定は 3 つの計測機器を以て行った。空間へ漏れ電磁波のピックアップは、単芯  $N=1$  直径 3 cm または 1 cm のループアンテナ[6]を用いた。一つは、ベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータ測定から見えるノイズ漏れの周波数特性。続いて、スペクトラムアナライザを用いた周波数解析とノイズレベルの確認。そして、オシロスコープを用いた支配的なモード間の位相関係の測定である。本報告では、ベクトルネットワークアナライザによる低電力試験と RF 増幅系 1 系統の最大出力である 200 kW-CW での大電力試験にて、対策前後の比較を行った結果と、RF 漏れ対策の考察についてまとめた。

### 2. LIPAc - RF システムの構成

LIPAc の RF システムは、Fig. 1 に示すように、LLRF、半導体増幅器 (Pre driver amplifier)  $\leq 300 \text{ W}$ 、中段電力増幅四極管 (Driver Tetrode)  $\leq 16 \text{ kW}$ 、終段電力増幅四極管 (Final Tetrode)  $\leq 250 \text{ kW}$ 、UHF サーキュレータ、200 kW 水冷ダミーロードから構成される[2,3,7,8]。

<sup>#</sup>hirosawa.koki@qst.go.jp

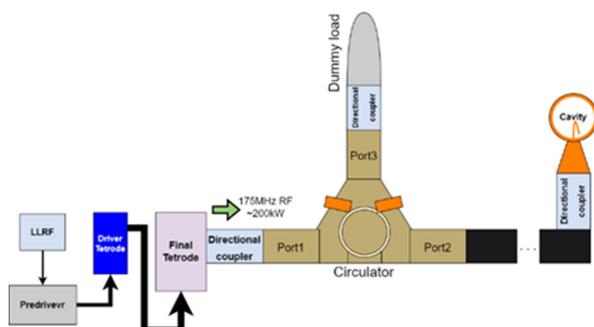


Figure 1: Configuration of the RF amplification chain for RFQ.

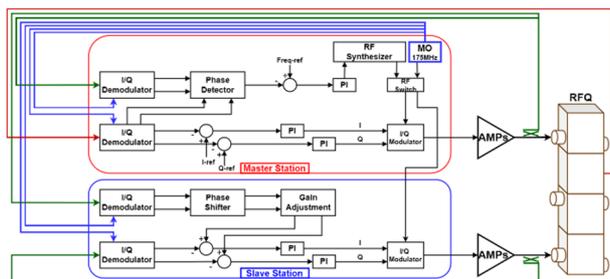


Figure 2: Master and slave control schematic for driving RFQ cavity of LIPAc.

RFQは9.8 mの空洞本体を8系統並列のRF増幅システムを用いて駆動する。8系統の序列は空洞の最も上流に接続したRF源をMaster stationとしてRFの自立制御を行い、他7系統がSlave stationとして、Master stationの制御に追従する形態をとる。Figure 2にRFQのMaster-Slave制御システム図を示す。Buncher空洞とSRF空洞は、空洞本体とRF源が一对一であるため、全てMasterとして駆動する自立のRF Stationが採用されている。各系統の初期位相キャリブレーションは、ビームライン上流から継行的に行うため、RFQのRF源としての安定性は、試験Phaseが進むにつれより重要となる。

Figure 2に示すように、RF系統の制御機構は系統間で信号経路が繋がっているため[9]、ノイズによる影響が制御系統に現れる場合、非常に込み入った現象となりうる。Master-Slaveフィードバック用ケーブルを二重シールドの低ノイズ仕様に変え、これまで頻繁に確認されていた電圧急上昇現象を抑制できた。これは、8チェーン間のパルス開始タイミングの微妙なずれが原因で、SlaveのMaster追従用PI制御[10]が正しく動作した結果と考えている。その他、対症療法的にフェライトコアでノイズに対応しているインターロック系統も多くあり、冷却水流量計の0 mA - 20 mAの電流系統もノイズで跳ねる問題がある。低電力から大電力まで同じフレーム上にあるという我々の機器構成で、ノイズへの対策はより一層神経質にならざるを得ない状況となっている。

### 3. 低電力試験とRF漏れ対策

本報告においては、空間中を伝搬するノイズに着目して測定を行った。本節では、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いた、低電力での測定結果(Cold Test)をノイズ対策前後でまとめた。続く小節で、測定機器の構

成、RF漏れ対策、VNA測定結果とその比較を順に述べる。

#### 3.1 VNAを用いたRF漏れ測定テストの構成

VNAを用いた測定は、事前サーベイにて信号強度の高かったサーキュレータに集中して行った。Table 1にサーキュレータの主な仕様を示す[11]。要求仕様は、175 MHz基本モードにのみ集中していて、通倍波、特に350 MHzに関して基本的な考察やテストが行われておらず、この点が後々問題となってくる可能性がある。いずれにせよ、今回の報告は、175 MHzと350 MHzに注目しているため、高次高調波に対する議論は今後の課題である。Table 1に示す設計値から考えても、少なくとも175 MHz±1.2 MHzの範囲では、事前に十分な考察がなされているべきである。

今回のVNA測定におけるセットアップは、VNAのPort1をサーキュレータのPort1に接続し、VNAのPort2をループアンテナに接続し、漏れRFの通過率( $S_{21}$ )を評価する方法を選択した。サーキュレータのPort2とPort3には、DC-3GHz帯の50 W RFダミーロードを接続し、測定に反射の影響がないようにした。Figure 3に測定の構成、Fig. 4とFig. 5に写真を示す。本測定では、ループアンテナは、単芯の直径3 cmの市販品を使用した。

Table 1: Design Value of the Circulator for RFQ Chains

Parameters	Values
Center Frequency	175MHz
Bandwidth	1.2MHz
Forward Power	250kW in CW
Reverse Power	100% at any phase
Insertion Loss	0.15dB max
Return Loss at center freq.	26dB min
Isolation at center freq.	26dB min

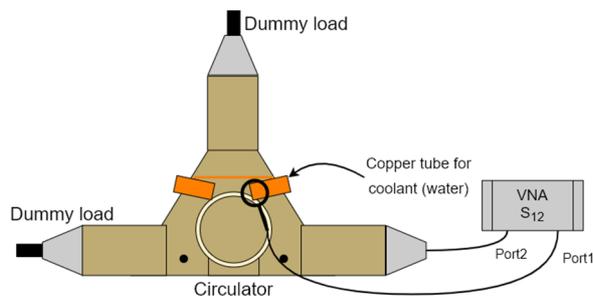


Figure 3: VNA measurement setup for RF leakage from the circulator.



Figure 4: Appearance photo of a circulator.



Figure 5: A loop antenna we used and largest leakage source in the circulator.

### 3.2 RF leak の原因と漏洩対策

最も大きな RF leak の原因は、サーキュレータの水冷配管が通っているフレームの穴であった。Figure 6 に示す写真に穴の形状が確認できるが、あたかも水冷配管が内導体でフレームが外導体の同軸構造になっているように見える。配管の素材が銅であることも、良くなかったと考えられる。

我々はこの漏れの原因が同軸構造にあると考え、同軸構造を消すためにアルミホイルを間に詰めた。その結果、多少の効果はあったものの十分な減衰が見られず、依然同様の周波数特性を持っていたため。更に銅テープによってフレームと銅の水冷配管を接地した。Figure 7 にその対策結果の写真を示す。また、銅テープの代わりに導線でフレーム-銅パイプ間を接続する方法も試行したが、銅テープより大きな効果は得られなかった。



Figure 6: Photo of circulator hole where a copper pipe penetrates to circulate coolant near Ferrite material and Y-stripline.



Figure 7: Circulator hole sealed by copper tape.

### 3.3 対策前後の VNA 測定結果比較

VNA での測定位置は Fig. 8 に示す、9 つの位置・アンテナ角度の組み合わせで行った。前後のキャプチャを全て載せることは出来ないので、Fig. 9 に代表的に最も検出値が大きかった、9 番目のアンテナ配置の VNA 測定値のスクリーンショットを示す。VNA を用いた結果として、最も漏れ検出が大きな位置で、アルミホイルによる穴埋めの効果は 20 dB 以上の減衰、銅テープによる接地の効果は更に 10 dB 以上の減衰があることが分かった。合わせると、35 dB 程度の減衰が見込め、低電力試験においては概ね検出のバックグラウンドレベルに落とせること分かった。他の位置については、Table 2 に 175 MHz と 350 MHz の  $S_{12}$  の値をまとめた。なお、通過の S パラメータが  $S_{12}$  であるのは、配線の都合でサーキュレータへの入力を VNA の Port2 としたためである。

位置、角度によって強く検出される周波数は異なるように見えるが、いずれも比較的高レベルに見られる位置は、水冷配管がサーキュレータ内外を出入りする穴付近であることが判明した。この結果から、同軸のような構造が原因の一つであると考え、上記の対策を講じた。

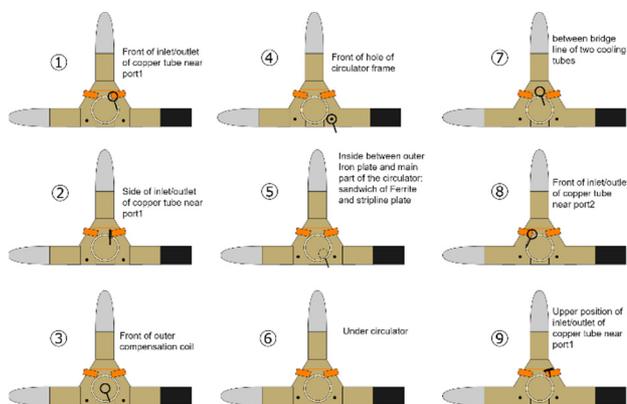


Figure 8: Positions for VNA measurement to see RF leakage from the circulator.

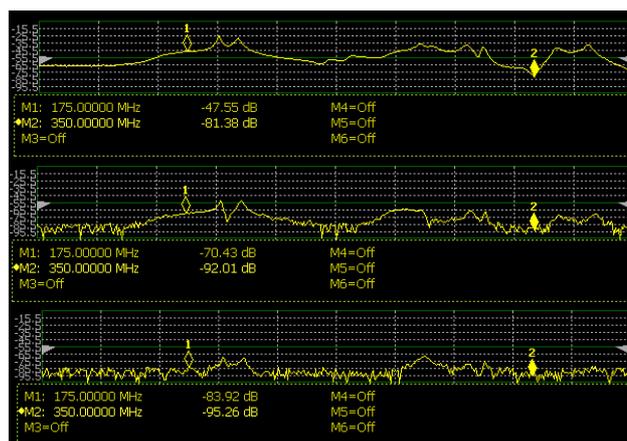


Figure 9: Screenshot of VNA measurement of position-9, without any sealing.

Table 2: Measured Values by VNA for the Circulator RF Leakage at Each Position Explained in Fig. 8

Position (Fig.8)	175MHz	350MHz
#1	-65.41 dB	-68.31 dB
#2	-62.78 dB	-81.55 dB
#3	-87.31 dB	-91.86 dB
#4	-89.82 dB	-93.05 dB
#5	-84.51 dB	-81.99 dB
#6	-88.50 dB	-94.31 dB
#7	-89.51 dB	-88.11 dB
#8	-76.55 dB	-96.26 dB
#9	-47.55 dB	-81.38 dB
Background	~100.8 dB	~97.32 dB

## 4. 200 kW-CW 試験

### 4.1 大電力試験の構成

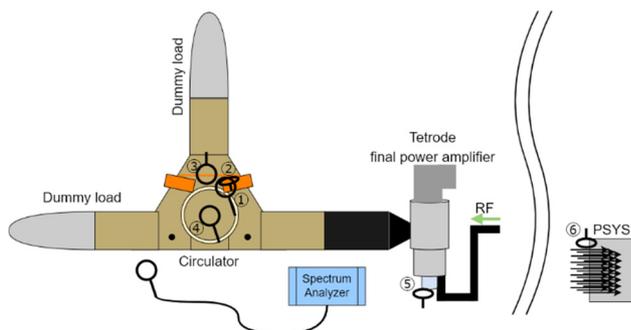


Figure 10: Setup to measure RF leakage from the circulator with injecting 200kW-CW RF to dummy loads.

サーキュレータの本来の運転状況で確かめるには、大電力試験が必須であるため、前述の対策の効果を、RF システムのデザイン値まで駆動し検証した。RF システム単体試験のため、サーキュレータの Port2 と Port3 には、ダミーロードを接続し、LLRF を独立駆動モードで立ち上げ、終段増幅器の出力を 200 kW-CW まで上げた。出力の測定は、LLRF の測定値に加えて、パワーメータを用いてクロスチェックを行った。測定の構成と、測定時のループアンテナ位置を Fig. 10 に示す。測定の都合で、VNA 試験とは異なる RF モジュールで試験を行った。

### 4.2 スペクトラムアナライザによる測定結果の比較

スペクトラムアナライザによる測定で最も検出レベルが高かったのは、VNA の時と同様の位置であった。Figure 11 に、例として Position-2 (Fig. 10) の時のスクリーンショットを示し、比較を Table 3 にまとめる。この時、スペクトラムアナライザの入力には 20 dB のアッテネータを使用した。漏れ対策前の測定オフセットは +30 dB であったため、生信号の強度に +~10 dB の値として表示されている。

結果的に、シール後の値は大電力試験では 20 dB 程度の減衰しか見られなかったが、これはサーキュレータの個体差か対策の出来の問題かはいまだ不明である。今までの測定と同様に、水冷配管から離れるほど、検出

レベルが低下することが判明した。

Position-5 は、終段増幅器のフィラメントと RF の入力点の近傍であるが、電源ケーブル類がむき出しのため、四極管で増幅された RF によって電位が揺れている可能性を考え、測定を行った。Position-6 は、protection system (PSYS) へ各診断用ケーブルを入力している点であるが、入力直前の同軸グラウンドに意図的にギャップが設けられ PSYS 本体から浮いている。このギャップから RF 漏れがある可能性も考慮して、測定を行った。若干の 175 MHz/350 MHz のピークが見られたが、サーキュレータ付近と比較すると無視できるほど小さかった。いずれにせよ、レベルの大きいものから対策していかなければ、他は隠されてしまい詳細に検出できないため、より大きな RF 漏れを対策してから再度評価を行う。

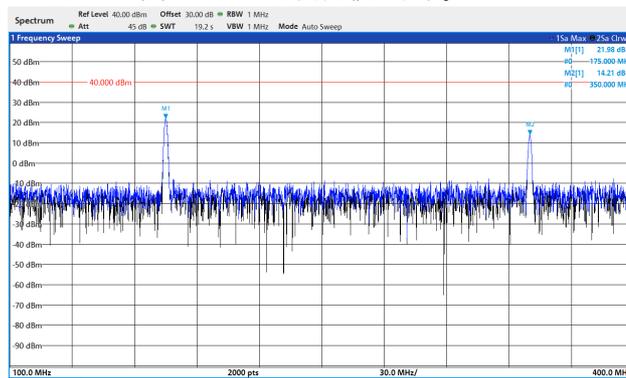


Figure 11: Plot of the spectrum analyzer measurement for position-2 of Figure 12 with inserting 20 dB attenuator, before sealed.

Table 3: List of the Results in High Power Test at 200 kW-CW by Using a Spectrum Analyzer

Position (Fig.10)	175MHz	350MHz
#1	9.65 dBm	-6.02 dBm
#2	11.98 dBm	4.21 dBm
#3	-3.12 dBm	3.61 dBm
#4	-14.26 dBm	-21.87 dBm
#5	-13.57 dBm	-25.21 dBm
#6	-8.57 dBm	-18.28 dBm
#2 after seal	-10.30 dBm	-29.56 dBm

## 5. 他のノイズ源

サーキュレータからの最大の RF 漏れを対策した後、他の RF 漏れ箇所が見られるようになってきた。特に、RF のレベルを考慮し、終段増幅器より下流に着目して調査した結果、2 種類の位置での RF 漏れを発見した。

### 5.1 終段電力増幅器直後のフランジ

同軸導波管の繋ぎ目は以前より怪しい箇所として調査の対象となっていたが、サーキュレータ水冷配管穴からの漏れが大きく、位置の特定が困難であった。最大の漏れ源を対策したことで、少し離れた位置での検出レベルが十分に低下し、アンテナ角度依存性や詳細な位置スキャンも出来るようになった。そこで、再度 RF モジュール全体をスキャンしていった結果、終段電力増幅四極管出力のフランジ (Fig. 12) から RF ノイズが確認された。

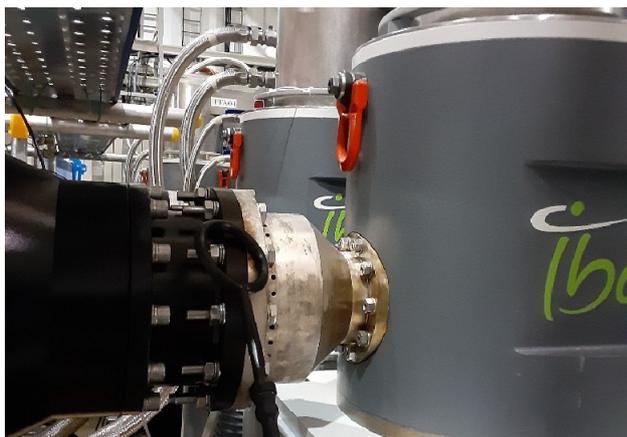


Figure 12: RF leak source at the output flange of the final power amplifier.

Table 4 に測定の結果を示す。強度には、角度依存性があることが確認された。銅テープでフランジ面を覆い、減衰効果を確認したが、予想に反してほとんど減衰が見られなかった。Skin depth: Eq. (1) から考えると、 $1/e = -8.7$  dBなので、銅テープの基底部厚み $\sim 0.03$  mm では 50 dB 以上は減衰するはずだが、3 dB 程度しか得られなかった。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_r\mu_0 f_{RF}}} \cong \sqrt{\frac{1.678 \times 10^{-8}}{\pi^2 \times 4 \times 10^{-7}}} = 4.93 \mu\text{m} \quad (1)$$

Table 4: Antenna Angle Dependency of RF Leakage from Flange Line at Output of Final Tetrode Cavity

Antenna angle	175 MHz	350 MHz
~ 0 Deg. (max)	-9.29 dBm	-32.84 dBm
~ 20 Deg.	-10.28 dBm	-33.60 dBm
~ 45 Deg.	-17.70 dBm	-36.87 dBm
~ 70 Deg.	-20.12 dBm	-36.35 dBm
~ 90 Deg.	-28.12 dBm	-39.37 dBm
~ 0 Deg. after seal	-12.65 dBm	-35.56 dBm

本当にフランジ接続面から漏れていることを確認するために、3 cm 径のループアンテナから 1 cm 径のループアンテナに変更したが、フランジの接続境界面から磁束が出ていることが、検出角度からもスポットで確認できた。今後、漏洩箇所が異なるという可能性も含めて、理論的に RF 漏洩のモデルを考察し、適切な方法で電磁遮蔽を行い、ノイズ抑制を進めていく。

## 5.2 サーキュレータフレーム上のボルト穴

サーキュレータのフレームには穴が開いている箇所がいくつかあるが、Nコネクタ程度の穴が開いている箇所であっても、正面からは漏れ信号が得られなかった。一方、フレームを構築している角のボルトに欠落があった場合、ボルト穴の正面ではなく側面に対して垂直な方向に磁束が貫いていることが分かった。この漏れは、ボルト穴をタップで切りなおして全て留めることで、十分にバックグラウンドレベルまで抑制できた。

## 6. まとめと今後

今回のサーキュレータに着目した一連の測定にて、我々 LIPAc を悩ませていた、RF ノイズの原因となりうる RF 漏れの尻尾を掴むことができ、いくつかの対策を講じることが出来た。完全に抑制するとはいかないまでも、大電力試験で 20 dB 程度の減衰が確認でき、今まで現れていたノイズ起因の問題の内いくつかは、2 桁インターロック閾値等に余裕が出来ると期待できる。もちろんノイズ全体として考えると、自由空間を伝播するノイズは、発生源からの距離に応じて著しく減衰するため、今までも本現象が原因であったものが多いとは考えにくく、万事解決とはならないだろうが、今後もスタディを続けていく。

今後は、空間伝播ノイズが対策できたため、グラウンドラインの銅板やシャーシを伝わるノイズの測定に移ることを考えている。また、パルス負荷時の電源の制御状態に起因するノイズも確認されているため、DC を上げていきながらノイズの挙動に注視したい。

## 参考文献

- [1] M. Weber *et al.*, “LIPAc RF Power System Engineering Design Report” (Internal).
- [2] M. Weber *et al.*, “Functional Overview of the RF Power System for the LIPAc RFQ,” in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 49, no. 9, pp. 2987-2996, Sept. 2021; doi:10.1109/TPS.2021.3102840
- [3] T. Shinya *et al.*, “Integration of 175-MHz LIPAc RF System and RFQ Linac for Beam Commissioning,” in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 48, no. 6, pp. 1489-1495, June 2020; doi: 10.1109/TPS.2020.2985020
- [4] Tomasz Wlostowski, “Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network”, Thesis: Master of Science, Warsaw University Technology, 2011.
- [5] Ivan Moya, “LIPAc Master Oscillator and RF integration” (Internal).
- [6] Electro-Magnetic antenna probes, ETS-LINDGREN.
- [7] R.G. Carter, “RF power generation”, arXiv:1112.3209 [physics.acc-ph], 2011.
- [8] H. Bosma, “On the principle of stripline circulation”, *The Institution of Electrical Engineers*, pp137-146,1962.
- [9] C. de la Morena *et al.*, “Fully Digital and White Rabbit-Synchronized Low-Level RF System for LIPAc”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, no. 1, pp. 514-522, Jan. 2018.
- [10] LLRF Users Manual, SevenSolutions (現 Orolia) (Internal).
- [11] UHF Circulator Technical Specifications (Internal).