

iBNCT 加速器における 324 MHz 高周波漏洩対策

COUNTERMEASURES AGAINST LEAKAGE OF 324 MHz RF IN THE iBNCT ACCELERATOR

佐藤将春^{#, A)}, 栗原俊一^{A)}, 小林仁^{A)}, 杉村高志^{A)}, 方志高^{A)},
熊田博明^{B)}, 田中進^{B)}, 大場俊幸^{C)}, 名倉信明^{C)}

Masaharu Sato^{#, A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{A)}, Takashi Sugimura^{A)},
Zhigao Fang^{A)}, Hiroaki Kumada^{B)}, Susumu Tanaka^{B)}, Toshiyuki Ohba^{C)}, Nobuaki Nagura^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} NAT Corporation

Abstract

The iBNCT project aims to realize an accelerator-based boron neutron capture therapy (BNCT) using an 8 MeV proton linac consisting of a radio-frequency quadrupole linac (RFQ) and a drift tube linac (DTL). Each cavity is provided with radio-frequency (RF) by a 324 MHz klystron with a maximum output power of 1.2 MW. Meanwhile, 324 MHz RF noise was observed in the output of a loss monitor in the accelerator room and a photomultiplier in the ion source to observe plasma, which indicates a possibility of the leakage of the RF. In the case of a medical accelerator, in addition to the usual regulations for RF facilities, there are also regulations for medical devices, so it is very important to investigate possible leakage source points. Therefore, an investigation with a loop antenna and countermeasure against leakage were conducted both in the accelerator room and the klystron room. By identifying leakage points and implementing countermeasures, the 324 MHz RF leakage was significantly reduced in the RF system of the iBNCT accelerator facility. This contribution presents countermeasures against leakages of the 324 MHz RF previously observed in the iBNCT accelerator.

1. はじめに

近年注目を集めている加速器ベースのホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) を RFQ (Radio Frequency Quadrupole linac) 及び DTL (Drift Tube Linac) からなる加速管構成により実現を目指す iBNCT (いばらき BNCT) プロジェクトは筑波大学、高エネルギー加速器研究機構、近隣民間企業及び茨城県が協力して発足した産学官連携プロジェクトである[1]。iBNCT プロジェクトでは東海村のいばらき中性子医療研究センター内に陽子を 8 MeV まで加速する上記加速器及びビーム輸送系を設置しており、中性子生成標的として採用したベリリウムに加速した陽子を照射し、 ${}^9\text{Be}(p, n)$ 反応によって生成した高速中性子からモデレータ・コリメータによる減速かつ治療に不要なガンマ線及び高速中性子の除去の後、熱外中性子を得る。必要な熱外中性子束は IAEA によって策定された指針があり[2]、それを実現するために iBNCT 加速器はモデルとされた J-PARC リニアックのそれより高いデューティーファクターが要求される。また iBNCT 加速器では、1 台の最大出力 1.2 MW の周波数 324 MHz クライストロンを用いて性質の異なる RFQ と DTL という 2 つの加速空洞に同時に高周波を供給し励振するのが特徴である[3, 4]。iBNCT プロジェクトではいばらき中性子医療研究センター内にクライストロン及び加速管を含めたすべての設備を配置している。建屋の制限からクライストロン及び立体回路は B1F に、その直下の B2F に RFQ 及び DTL を設置している。

装置概観図に関しては参考文献[3]の Fig. 1 を参照されたい。本稿では iBNCT プロジェクトに於いて実施された 324 MHz 高周波漏洩箇所の調査とその対策に関して報告する。

2. iBNCT 高周波システム

Figure 1 に iBNCT プロジェクトの 324 MHz 高周波加速器システムの概要を示す。iBNCT の LLRF システムは 2016 年に当時 J-PARC リニアックで採用されていた cPCI を用いたシステムをベースに導入された[3-5]。初段の高周波電力は 12 MHz の基準信号を元に 324 MHz の加速周波数が生成され、デジタルフィードバックシステムによりその振幅及び位相を制御され、40 W アンプを介して、クライストロンに入力される。クライストロン出力はサーキュレーターを経由した後、RFQ 及び DTL に供給される。各々の定格は RFQ が 340 kW、DTL が 320 kW であるがビーム電流のピーク値を 30 mA と仮定した場合、ビームローディング補償を含めると、各々 430 kW、470 kW となる。この RF 駆動電力を 1 台のクライストロンから供給し Fig. 1 中の 3 dB ディバイダによって各空洞に高周波を供給する。2 台の空洞を 1 台の RF 源でフィードバック制御する場合、制御対象を RFQ、DTL 各々の空洞タンクレベル、もしくはそれぞれのベクターサムで行うなど考えられる。iBNCT の LLRF 制御システムでは RFQ を基準にフィードバック制御を行っている。

[#] masaharu.sato@kek.jp

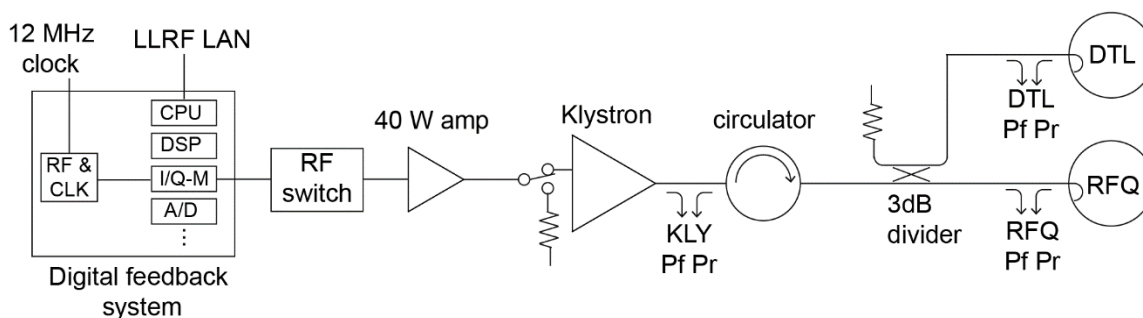


Figure 1: A schematic diagram of the 324 MHz RF system for the iBNCT accelerator. A 324 MHz klystron provides RF both for RFQ and DTL.

3. RF 漏洩問題と対策

3.1 RF 漏洩の影響

Figure 2 に加速器室の DTL 出口付近に設置されたロスモニター (プラスチックシンチレーター: Eljen technology 社製 EJ-200+光電子増倍管:浜松ホトニクス社製 H6612) の出力波形を示す。水色が RF 出力のトリガー信号であり、幅は RF 出力と同じ 990 μ s である。黄色の波形がロスモニター出力であり、RF と同期した大きなノイズが乗っている事が分かる。波形を拡大すると 324 MHz の構造が観測され、加速周波数である 324 MHz の RF 起因のノイズである事は自明であった。同様のノイズはイオン源室内に設置されたプラズマ観察用の光電子増倍管でも観測されており、iBNCT プロジェクト当初からの問題として存在していたが、明確な原因の解明と対策は実施されていない状況が長らく続いていた。

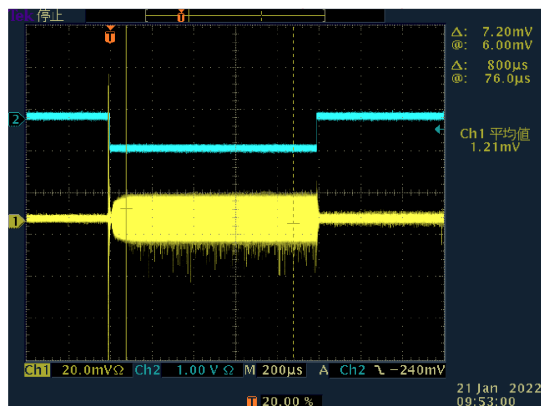


Figure 2: A snapshot of an oscilloscope during an RF operation. It shows an output of a loss monitor inside the accelerator room (yellow) triggered by an RF timing (blue). A large noise synchronized with the RF timing was observed in the loss monitor output.

3.2 広帯域ハイブリッドアンテナによる測定

後述するループアンテナによる測定と並行して建屋 1F 制御室の隅に広帯域ハイブリッドアンテナ (Schaffner 社製 CBL6143、帯域 30 MHz-3 GHz、以後パイログアンテナと表記) を設置した。その様子を Fig. 3 に示す。アン

テナからの出力をミックスドメインオシロスコープ (Tektronix 社製 MDO4054-3) の RF 入力ポートに接続し、RF 運転時に常時測定を行い後述の漏洩対策前後で比較を行った。

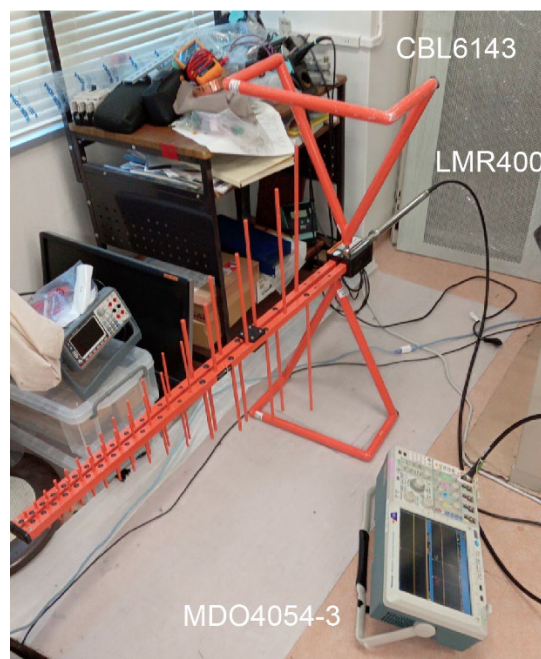


Figure 3: A photograph of the RF measurement by a Bi-Log antenna in the 1F control room.

3.3 ループアンテナによる漏洩箇所の調査

パイログアンテナは移動が容易ではないため、漏洩箇所の特定には不向きである。その為、小型のループアンテナを自作し、それを用いて調査を行った。Figure 4 に使用したループアンテナの写真を示す。この小型のアンテナを用いて、クライストロン電源室及び後述する加速器室でアンテナの出力をオシロスコープ (DRS4 評価ボード[6]、入力 4 チャンネル) を用いて波形を確認しながら漏洩箇所の調査を行った。クライストロン電源室内の DTL 用の同軸導波管の接続部近傍で測定した典型的な波形を Fig. 5 に示す。図中、横軸 1 ディビジョンは 5 ns であり、波状の構造の周期はおよそ 3.1 ns であることから加速周波数の 324 MHz の漏洩を観測していると考え

られる。尚、このループアンテナに関しては漏洩箇所を特定する事が目的であったため、波形の相対的な振幅を比較するのみでアンテナ係数の導出等による漏洩量の絶対値の較正は行っていない。

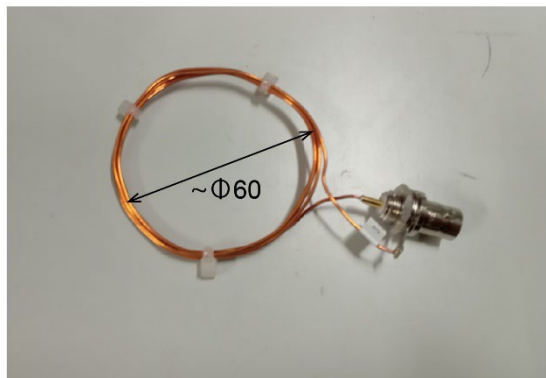


Figure 4: A photograph of a loop antenna used to search for RF leakage source points in the iBNCT facility.

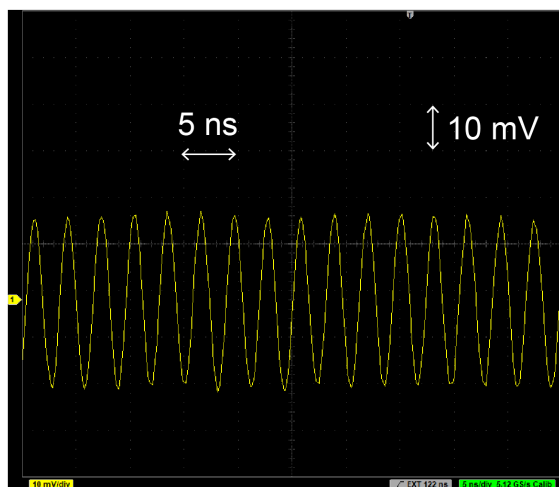


Figure 5: A snapshot of an oscilloscope of a typical output of the loop antenna shown in Fig. 4. Observed oscillation period is approximately 3.1 ns which corresponds to the acceleration frequency of 324 MHz.

3.3.1 クライストロン電源室内の漏洩箇所調査

初めにループアンテナを用いクライストロン電源室内で同軸導波管の接続部を中心に漏洩箇所を探索した。一部の同軸導波管の接続部分で振幅が若干大きくなっていたが、接続部以外でも振幅が観測され、部屋全体でバックグラウンドが高い印象を受けた。その後、探査を継続した結果、クライストロン電源室の隅にあるその直下のB2F 加速器へとつながるケーブル貫通孔付近での振幅が大きい事が判明した。前述したように B1F のクライストロン電源室の直下には加速器室がある事から、この漏洩は加速器室から来ているものだと考えられた。その為、クライストロン電源室内よりまずは加速器室内の漏洩箇所を特定する事が先決であるという結論に至り、調査の対象を加速器室に変更した。

3.3.2 加速器室内の漏洩調査と対策

加速器室は RF 運転時に入室不可能である為、ループアンテナを漏洩箇所付近に近づけて特定する事が出来ないという問題がある。そのため、運転前にループアンテナを加速器室内の適当な場所に設置し、運転時の各場所での振幅を比較する事とした。オシロスコープを前述のクライストロン電源室とのケーブル貫通孔付近に設置し 10 m の BNC ケーブルを貫通孔を経由して加速器室に通して、その先にループアンテナを接続した。その位置を運転前に変えて各位置で測定し、場所による振幅の依存性を比較した。かつ、測定の効率化を図るため、オシロスコープの入力数の最大 4 チャンネルを使用して調査を行った。何度か加速器室内でアンテナの位置を変えて測定した結果、DTL より RFQ 側がより漏洩が大きい事が判明した。一方、ループアンテナを用いた測定では、アンテナの設置位置、アンテナの角度の再現性に問題がある為、前回の測定時に値が高かった場所に再度設置した際に同じ値を再現しない等の問題があった。そこで加速器室内での漏洩箇所の調査では比較的振幅の高かった RFQ の入力カップラー付近にループアンテナを固定し、RFQ 本体や同軸導波管の接続部等の漏洩の可能性がある場所を 324 MHz において高い遮蔽性能を持つ導電布(マック・コーポレーション社製 DW-372 N[7])で覆い変化を見る事とした。RFQ の入力カップラーを中心に、導電布で覆う箇所を徐々に増やしていったが、ループアンテナの振幅は大きくは変化しなかった。その一連の作業の過程で、RFQ のカップラー直前の十字スタブを覆っていた導電布が一部黒く変色しているのが観測された[8]。その部分から RF が漏洩していると考えられたため、一度導電布を取り払い、参考文献[8]の Fig. 7 にあるようにアルミ фольドと銅テープで覆った。結果として近傍に設置していたループアンテナで振幅が-54~-64 dB 程度と大幅に下がり、かつ Fig. 6 に示すように、以前は Fig. 2 で観測されていたようなロスモニターのノイズもほぼ観測されなくなり、バックグラウンドレベルと同程度となった。この対策により大幅に加速器室内での漏洩レベルが下がったが、対策後もループアンテナでは若干の

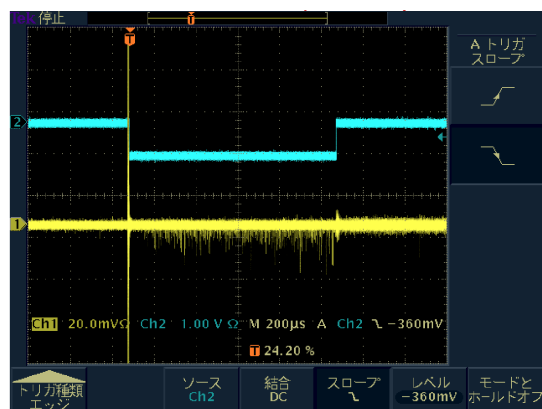


Figure 6: A snapshot of an oscilloscope after countermeasure against RF leakage in the accelerator room. Inputs are same as those in Fig. 2. A large noise observed in the output of loss monitor was almost disappeared.

324 MHz の漏洩が観測されていたため、引き続き加速器室内で対策を行う事とした。同軸導波管の継ぎ目や DTL のカプラー部分でも多少の漏洩があり、同軸導波管の接続部に関しては表面の塗装を落とし、導通を確保した上で、接続箇所を銅テープおよびアルミフイルドで覆い、かつその上から導電布で覆った。同じく漏洩が観測された DTL カプラー部分も同様な手法で接続部分を覆った。その結果、加速器室内で測定した幾つかの場所ではループアンテナでは 324 MHz の RF 構造が観測できないほどに下がった。以上により加速器室内の漏洩対策は完了したと考えている。

3.3.3 クライストロン電源室の漏洩再調査と対策

RFQ 十字スタブでの漏洩対策を行った際に、加速器室内のループアンテナによる測定と 1F 制御室に設置していたパイログアンテナによる測定では減少幅に大きな違いがある事が疑問として残っていた。一つの可能性として 1F にある制御室の直下にある B1F クライストロン電源室に別途漏洩箇所がある可能性が考えられた。そこで加速器室の漏洩調査に引き続いてクライストロン電源室内での漏洩調査を継続して行う事とした。

漏洩の可能性のある同軸導波管の接合部をループア



Figure 7: A photograph of a leakage point of the RF at the connection of the rectangle waveguide at the output of the klystron. The leakage point is indicated by a red arrow.

ンテナを用いて調査を行ったが、加速器室と同程度のレベルで明確に漏洩している箇所は無かった。その為、ループアンテナの振幅が若干大きな接続部について、同軸導管表面の塗料を落とし導通を確保した上で、接合部を銅テープおよびアルミフイルド、導電布で覆った。しかし、対策を行った前後で、制御室内のパイログアンテナでは大きな変化が見られず、クライストロン電源室内での主要な漏洩箇所ではないと考えられた。

また、RFQ の放電時の波形の調査の為、RFQ の ICF70 のピックアップポートから BNC ケーブルによりクライストロン電源室内の波形デジタイザで取り込んでいたが、その BNC ケーブルから漏洩が観測された。対策とし

ては BNC ケーブルをアルミフイルドで覆った所、ケーブル表面では漏洩は観測されなくなったが、前述の対策と同様、制御室内でのパイログアンテナによる計測では変化はほぼ観測されなかった。それ以外でもディバイダーやサーキュレーターの矩形導波管の接続部で同様の漏洩対策を行うも、制御室内でのパイログアンテナでの顕著な減少は見られなかった為、クライストロン電源室内での漏洩箇所調査は暫く進展がない状態が続いた。

3.3.4 クライストロン出力部の導波管接続部での漏洩と対策

クライストロンの出力部周辺は稼働中にコレクターから多量の X 線が発生するため、出力部周辺は鉛の遮蔽体で覆われているが RF 出力部の矩形導波管の周囲は鉛遮蔽体と導波管の間に若干の隙間があり、ループアンテナをその付近に近づけた際、RF が漏洩している事が判明した。その為、運転停止時に一度、鉛遮蔽体を開放して対策を行う事とした。Figure 7 がその対策時に鉛遮蔽体を開放した時の写真で、鉛遮蔽体は上下に分割されており、上部をずらして対策作業を行った。作業としては漏洩が観測された矩形導波管の六角ボルトの増し締めを行い、また導波管表面の塗装を落としした上で、接続箇所を銅テープを張るとともに全体をアルミフイルドで覆った。その後、RF 運転を再開し漏洩を確認した結果、ループアンテナで観測不可能なほど下がるのと同時に、制御室内でのパイログアンテナによる測定では、-55 dBm から -70 dBm へと大幅に下がり、クライストロン電源室内の漏洩箇所のひとつである事が判明した。

3.3.5 クライストロン入力部ケーブルでの漏洩と対策

上記の対策を行った結果、クライストロン電源室内の各箇所ではループアンテナでは漏洩が探査できないほどに下がった。一方、制御室内でのパイログアンテナでは -70 dBm 程度観測されていたため、制御室に設置していたパイログアンテナをクライストロン電源室内に持ち込み複数個所で測定してみる事とした。パイログアンテナでは垂直・水平及び指向性がある為、一概に設置箇所と漏洩箇所との相関に関しては判断できないが、クライストロンの入力部付近で最も高い値を示した。クライストロン電源室内での調査ではクライストロン出力部以降の漏洩を想定していたため、入力部付近での漏洩はあまり考慮していなかった。そこで、再度ループアンテナでクライストロンの RF 入力部周辺を詳細に調査した結果、漏洩箇所が特定された。40 W アンプ出力からの RF 入力ケーブルはクライストロン上部にあるポートで N 形コネクタにより接続されている。この入力ケーブルには二重シールドのケーブルを使用しており、かつ導入初期の段階からアルミフイルドを巻くなど対策が行われていた。一方、入力ポートの N 形コネクタはその直下にクライストロン本体の空洞と接続している短いケーブルがあり一重の編組線からなるシールドの RG タイプのケーブルが使用されていた。Figure 8 にその模式図(上)と実際の写真(下)を示す。このケーブルは Fig. 8 で示すように狭いスペースで上部の N 形コネクタからクライストロン空洞部へと接続しているが、この隙間内でケーブルを小さい曲率半径で曲げるにより、一重のシールド部分に隙間ができ漏洩したものと考えられる。対策として一度ケーブルを取り外しアルミフイルドと銅テープを巻き、更にその上から導電布

で覆った。結果、クライストロンのすぐ横でのバイログアンテナでの測定では対策前の-29 dBm から-71 dBm へと大幅に下がった。また、制御室内でのバイログアンテナでの測定でも-70 dBm から-85 dBm へと同様に大幅に減少した。

以上の結果から、加速器室内での対策に続いてクライストロン電源室内でも大幅に漏洩を抑える事に成功し、iBNCT プロジェクトにおける 324MHz RF 漏洩対策は大幅に進展した。

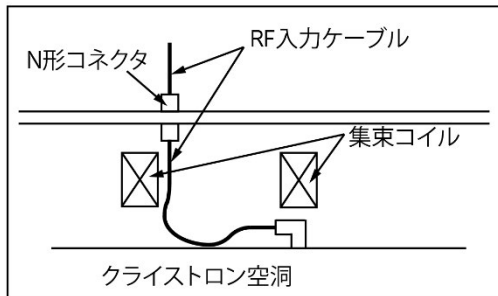


Figure 8: An RF leakage point at the RF inlet of the klystron. A schematic drawing and a photograph are shown in top and bottom, respectively. A leakage was found at a short cable to the klystron cavity as indicated by a red arrow in the bottom.

4. まとめ

iBNCT プロジェクトでは RFQ 及び DTL の加速管構成で加速器ベース BNCT の実現を目指している。プロジェクトを進めていった際に、加速器室内のロスモニターやイオン源プラズマ発光観察用の光電子増倍管の出力に RF に同期した 324 MHz のノイズが観測され、その漏洩が示唆された。そこでループアンテナを用いて漏洩箇所を調査した結果、加速器室及びクライストロン電源室どちらに於いても RF 漏洩が観測された。漏洩箇所を特定し、その対策を行った結果、324 MHz の漏洩は劇的に解消し、上記モニターノイズでは無視できるレベルかつ、ループアンテナでは観測できないレベルにまで下がった。バイログアンテナによる絶対値測定も平行して行い、測定では最大で 30~40 dBm の減衰が観測され、iBNCT 加速器における 324 MHz 高周波の漏洩対策は大幅に

進展したと言える。

謝辞

iBNCT 加速器の研究開発に於いて、ご支援頂いている筑波大学附属病院関係者の皆様はこの場をお借りして感謝を申し上げます。また、KEK 加速器研究施設並びに J-PARC 加速器の関係者の皆様には日頃から iBNCT プロジェクトにご助言・ご協力頂き御礼申し上げます。いばらき中性子医療研究センター内での装置維持管理に関しては茨城県担当者の方々にはご尽力頂き有難うございます。

参考文献

- [1] H. Kumada *et al.*, "Project for the development of the linac based BNCT facility in University of Tsukuba", Applied Radiation and Isotopes, 88, 2014, pp. 211-215.
- [2] International Atomic Energy Agency, "Current status of neutron capture therapy", IAEA-TECDOC-1223, 2001.
- [3] Z. Fang *et al.*, "Overview of LLRF System for iBNCT Accelerator", Proceeding for LLRF 2017/P-10; arXiv:1810.05686.
- [4] Z. Fang *et al.*, "Novel auto-startup technology for two cavities of a medical accelerator with on RF source", Nucl. Instrum. Meth. A922,2019, pp. 193-201.
- [5] S. Anami *et al.*, "Control of the Low Level RF System for the J-PARC Linac", Proceedings of LINAC2004, pp. 739-741.
- [6] DRS4 (Domino Ring Sampler 4) Evaluation Board, <https://www.psi.ch/en/drs/evaluation-board>
- [7] <https://denjiha.macco.co.jp/fabric/>
- [8] T. Sugimura *et al.*, "iBNCT 加速器の現状報告 2022", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Oct. 18-21, 2022, pp. 1148-1151.