

理研重イオン超伝導線形加速器の超伝導空洞性能の劣化と回復 DEGRADATION AND RECOVERY OF CAVITY PERFORMANCE IN THE SRILAC CRYOMODULES AT RIBF

坂本 成彦*, 上垣外 修一, 大関 和貴, 須田 健嗣, 山田 一成

Naruhiko Sakamoto *, Osamu Kamigaito, Kazutaka Ozeki, Kenji Suda, Kazunari Yamada
RIKEN Nishina Center

Abstract

The RIKEN superconducting (SC) heavy-ion linear accelerator (SRILAC) has been providing beam supply for super-heavy elements synthesis experiments since its commissioning in January 2020. However, the long-term operation of SC radio-frequency (RF) cavities leads to an increase in the X-ray levels caused by field emissions resulting from changes in the inner surface conditions. More than half of the ten SC 1/4 wavelength resonators (SC-QWRs) of SRILAC, operating at a frequency of 73 MHz, have experienced an increase in X-ray levels, thus, requiring adjustments to the acceleration voltage for continuous operation. While several conditioning methods have been employed for SC cavities, a fully established technique is yet to be determined. To address this situation, a relatively simple conditioning method was implemented at RIKEN. The proposed method uses high-voltage pulsed power and imposes a low load on the cavities.

1. はじめに

理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリー (Fig. 1) [1] では、ニホニウムに続く新元素合成実験を遂行するため、理研重イオン線形加速器 (RILAC) のアップグレード ([2]) を 2020 年に完成させた [3]。アップグレードの目標性能は、質量電荷比 6 のイオンを核子あたり 6.5 メガ電子ボルトまで加速する電圧を実現すること、供給ビーム電流をニホニウム実験時の 5 倍の 2.5 pμA に増やすことである。そのため、従来の常伝導ドリフトチューブ加速タンク 12 台のうち後段の 4 台を高い加速電圧を実現する超伝導線形加速器に置き換え、新たに 28 GHz の RF 源を用いた超伝導 ECR イオン源を導入した。新イオン源については参考文献 [4] を参照されたい。理研重イオン超伝導線形加速器 (SRILAC) は 3 台のクライオモジュールからなり、そこに合計 10 台の超伝導空洞が収納され 4.5 K まで冷却される。超伝導空洞は四分の一波長型の TEM 空洞 (SC-QWR) で、高純度ニオブ板材から製作し、表面処理により高い性能 (高加速勾配、低高周波損失) が実現される。超伝導空洞は非常に繊細な装置で、長年の使用による性能劣化 (おもに高周波面の汚れ等によるフィールドエミッション (FE) の増加とそれに起因する Q 値の低下) が長期運用における懸案事項である。SRILAC も例外ではなく、空洞組み立て時には FE は観測されなかったものの、その後のジャケット取り付け、クライオモジュールへの組み込み、3 年半のビーム供給を経て徐々に FE の増加が起きている。当初 FE 増加発生時には、空洞性能への影響を心配して FE 増加が起きた空洞の加速電圧を下げて運転することにより対応していた。FE の強度を減らすには、空洞表面を再処理し付着した“汚れ”を落とすことが決定打となるが、空洞をクライオモジュールから取り出して再設置の工程は半年から 1 年かかると見込まれ、長時間ビーム供給が止まってしまう。いち早く新元素合成を成功させるためユーザー

へのビーム供給の中断は最小限とすることが重要で、そのためにはビームラインに設置したまま空洞内面の状態を改善させるのが理想的であるが、空洞の形状や周波数、冷却温度、電力カプラーのカップリングなどの使用状態にその効果が依存することから決定的な手法は確立しておらず各加速器施設で様々な方法が試されているのが現状である。いくつかある方法の中から、理研においてこの事態を開閉するため高工研のコンパクト ERL の入射器で成功しているパルス大電力高周波によるコンディショニング手法 [5] を実施した。以下、その実施方法と確認された効果について報告する。

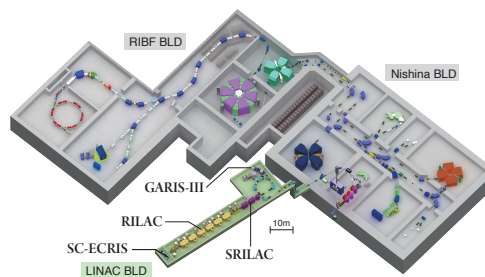


Figure 1: Birds-eye view of the RIBF accelerators.

2. 理研重イオン超伝導線形加速器概要

SRILAC SC-QWR の諸元を Table 1 に示す。SRILAC は 3 台のクライオモジュール、CM1、CM2、CM3 とそれぞれを接続する中間エネルギービームラインで構成される。CM1、2 の概略図を Fig. 2 に示す。図のように、CM1、CM2 は 4 台の SC-QWR を収める。CM3 の構造は CM1、CM2 と共通で全長が短く収容する SC-QWR の数が 2 台となる。SRILAC のクライオモジュールの構造で特徴的なのは 4 K 被冷却体 (以下、コールドマス) が上蓋に懸下される構造ではなく底板と呼ばれる頑丈なベース板の上に設置されていることである (グラム

* nsakamot@ribf.riken.jp

Table 1: SRILAC Design Parameters

Parameters	
Frequency (MHz)	73.0 (CW)
Maximum operation gap voltage (MV)	2.4
Synchronous phase ($^{\circ}$)	-25
β_{opt}	0.078
R_{sh}/Q_0 (Ω)	579
G	22.4
E_{acc} (MV/m)	6.8
E_{peak}/E_{acc}	6.2
B_{peak}/E_{acc} (mT/(MV/m))	9.6
Operating temperature (K)	4.5
Target Q_0	1×10^9
Q_{ext}	$1-4.5 \times 10^6$
Amplifier output (kW)	7.5

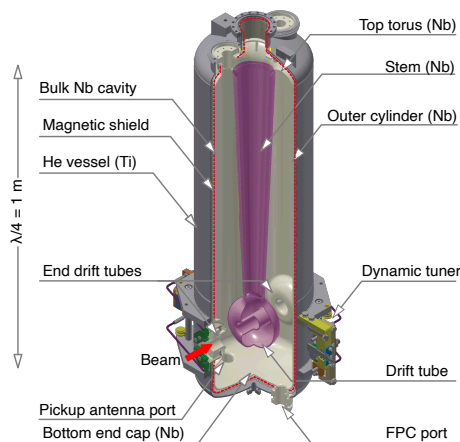


Figure 3: Schematic of the SC-QWR with a helium vessel and a tuner.

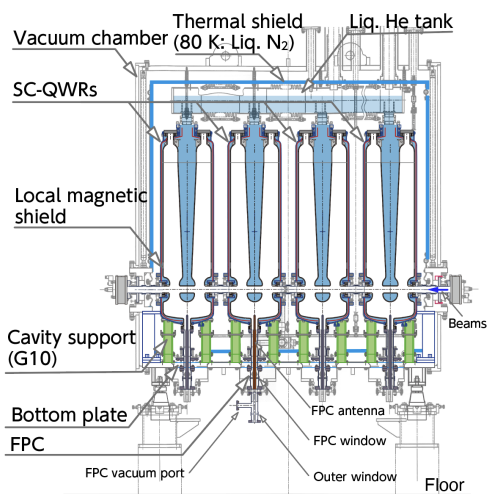


Figure 2: Schematic of the CM1 and CM2.

シェル構造)。コールドマスは、SC-QWR のほかに、ヘリウム容器、局所磁気シールド、電力カプラー (FPC) と周波数調整機構 (チューナー) からなり (Fig. 3 参照)、液体窒素による熱シールドを備えた鉄製の真空容器に収められている。

クライオモジュール設置後、最初の RF 励振試験で測定したギャップ電圧に対する X 線の強度を Fig. 4 に示す。SC05 については初期冷却の際に発生した FPC の真空窓のトラブルのため励振できなかった。初回の測定はクライオモジュール組み込み後、上流・下流のゲートバルブ (GV) を最初に開く前に行った (つまり、GV の開閉で発生する微粒子や上流下流からの“汚れ”の流入がない状態)。ほとんどの空洞において FE が始まるオンセット電圧は 1 MV がそれ以上であった。空洞の性能低下、具体的には高周波損失の増加と FE オンセット電圧の降下による運転電圧での FE の増加のひとつの原因として上流下流の室温セクションからの異物の流入が考えられるが、これを防ぐため SRILAC には三段階の差動排気セクションをその上流・下流に設けてある [6]。一組の差動排気セクションに挟まれた SRILAC

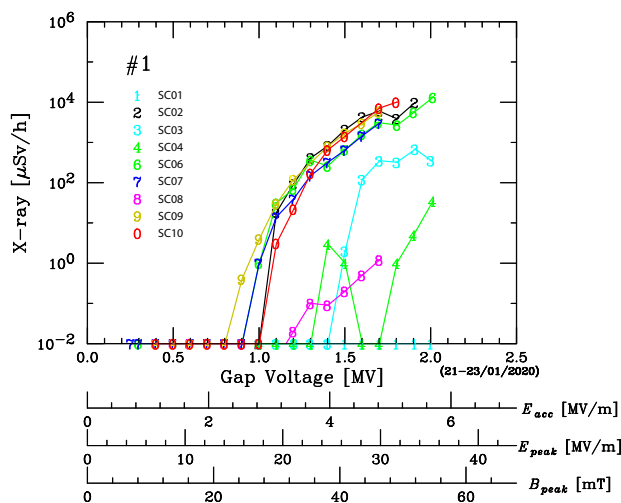


Figure 4: The X-ray levels measured in the first power test at January 2020. The symbols indicate the number of the SC-QWRs.

セクションの真空度は 1×10^{-8} Pa 台であるのに対しこの差動排気セクションを挟んで真空度 1×10^{-5} Pa の室温セクションが接続される。

空洞性能低下を防ぐためには、もうひとつの主たる原因とされているビーム損失による異物の発生を押さえることが重要である。SRILAC セクションでは従来のワイヤスキャナーやファラデーカップの代わりに非破壊モニタの BEPM (Beam Energy and Position Monitor) を用いてビーム重心、波高、タイミングを測定する。低速度重イオンビームの損失による空洞性能への影響は未知数であるが、SRILAC セクションのビーム損失を入り側と出側のファラデーカップの読みで比較して、損失が 1% 以下になるようにビーム供給を行ってきた [7]。

以上の対策を施したにも関わらず、ビーム供給開始 3 年半で半数以上の空洞において FE が急に上昇する現象が起きた。

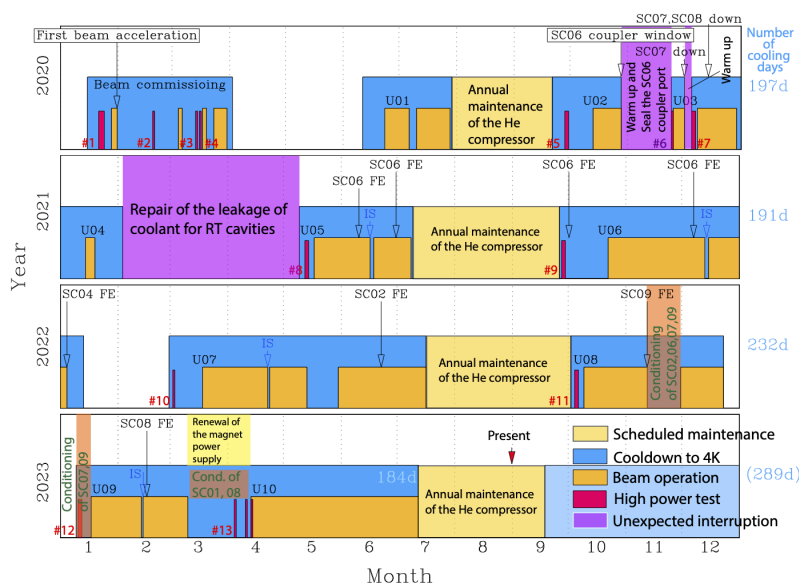


Figure 5: Overview of an operation history of the SRILAC.

3. 超伝導空洞の性能劣化

2020年のファーストビーム以来の運転履歴を Fig. 5 に示す。この図では空洞が4 Kに冷却されている期間を青いブロックで、ビーム加速を行っている期間を橙色のブロックで示してある。2021年の途中から夏のヘリウム冷凍機・圧縮器のメンテナンスと年末・正月の中断を除いて、冷却を維持し実験へのビーム供給を継続的に行う段階に入った。

最初の1年半は予期せぬトラブルによる大きな中断が2回あった。最初はSRILAC、CM2の真空トラブルで、2020年10月ビーム供給中にCM2の空洞真空が突然悪化した。ビーム供給を直ちに停止して昇温。調査によりSC06のカプラー窓からリークが発生したことがわかった。これは、常温で使用することを想定していた窓が零度以下になり、同軸管内部に結露が発生しセラミックのメタライズした部分がもろくなったということが原因である推定されるが、カプラーを取り外してみるまでは正確な原因は不明である。当面SC05同様、カプラーポートの同軸ケーブルを取り外し真空引き用の部品を取り付けて真空に引くことにより空洞内部へのリーク量を最小限にする対策を施して、再冷却、SC05、SC06を除く8台の超伝導空洞でビーム供給を再開した。再開後、間もなくCM2に収納されるSC07、SC08についてマルチパクタ(MP)によりギャップ電圧を保てない現象が起こるようになった。ビーム供給を停止し、温度上昇による改善を試みたが効果がなく、電圧低下が起こらない電圧まで下げて運転することにした。

2つ目の大きな中断はRILACの常伝導ドリフトチューブ加速タンクに関するものであり、詳細は省略するがこの問題を解決するのに約4ヶ月の期間を要した。その間、結露して傷んでいるであろう真空窓のロー付け部の保護のためすべてのカプラーに同軸構造の外窓を取り付け、2つの窓の間の空間を真空引きする改造を

行った(Fig. 2参照)。これにより、窓の結露を防ぎ、大気圧によりかかる力を軽減することができる。2021年5月、建設以来初めて超伝導空洞10台によるビーム加速を開始することができた[3]。

順調にビーム供給を続ける中、報告[8]にあるように、超伝導空洞の性能劣化が断続的に起きている。再冷却時に毎回FEの状況を確認する測定を行っているがそのたびに徐々にFEのオンセット電圧が少しずつ低くなり、加速電圧でのX線量の増加、つまりFEの強度の増加が観測されている。しかしながら、その変化はわずかで運転に大きな影響を与えるものではなかった。ビーム供給時も常時X線レベルをモニターしているが(Fig. 2の赤丸がモニターの位置)、一方でビーム供給中にFEによるX線のレベルが急に上昇する事象が繰り返し発生するようになった。当面の措置として、X線レベルが下がるところまで該当する空洞の加速電圧を落として、その分他の空洞の電圧を上げて運転を再開してきた。

具体例を2022年6月21日に発生したX線レベル急上昇の現象について示す。Figure 6にはギャップ電圧を緑線、ビーム強度を水色線、X線レベルを赤線で示してある。この日、順調にビーム供給を続けていたが17時1分頃からX線レベルが徐々に上がり始め120 $\mu\text{Sv/h}$ に達した。ビーム損失の増加を疑いビームを止めて様子を見たがX線レベルに変化がなく、一方、ギャップ電圧を下げるによりX線レベルが低下することがわかった。発生直後は1300 kVまで下げればX増加前のX線レベルまで下がったが、ビーム供給再開後すぐ17時57分にX線レベルが350 $\mu\text{Sv/h}$ まで上昇した。結局このときは空洞の電圧を900 kVまで下げて運転せざるを得なくなった。

同様の事象発生例をTable 2にまとめた。2022年10月に実施したX線レベルの測定(Fig. 7)の結果を見るとインストール直後の状態(Fig. 4)に比べてオンセット電圧が全体的に低くなっていることがわかる。2022

Table 2: Events Related to SC-QWRs

Date	Events
10/27/2020	SC06 Vacuum leak
12/1/2020	SC07 down
12/7/2020	SC08 FE increase
12/13/2020	SC07, SC08 down
5/10/2021	10 QWRs operation
6/9/2021	SC06 FE increase
6/29/2021	SC08 FE increase
9/30/2021	SC06 FE increase
12/6/2021	SC06 FE increase
1/3/2022	SC04 FE increase
6/21/2022	SC02 FE increase
11/14/2022	SC09 FE increase
2/15/2023	SC08 FE increase
7/3/2023	SC02 FE increase

年 11 月には、SC09 の FE が極端に悪化し許容される運転電圧が 1 MV よりも低くなった。この状況を受けて、根本的な対策、具体的には RIBF の常伝導高周波加速空洞についてルーティンとして行っている MP のコンディショニングのような手法を模索して、実際に試すことになった。

4. 高電圧 RF パルスコンディショニング

超伝導空洞を運用している加速器施設において、劣化した空洞の性能を復元するいくつかの試みが様々な形状の様々な運転条件の空洞において試されている中で未だその手法が確立していないのが現状である。特にユーザーへのビーム供給を行っている加速器では空洞を取り外すことなく設置された状態で安全に、つまり性能劣化を悪化させることのないよう回復させることが強く求められる。そこで、我々はいくつかある手法の中で空洞やカップラー窓への負荷が小さい高電圧 RF パルスコンディショニングを試すことにした。この方法は高エ研コンパクト ERL の入射器で成功例が報告さ

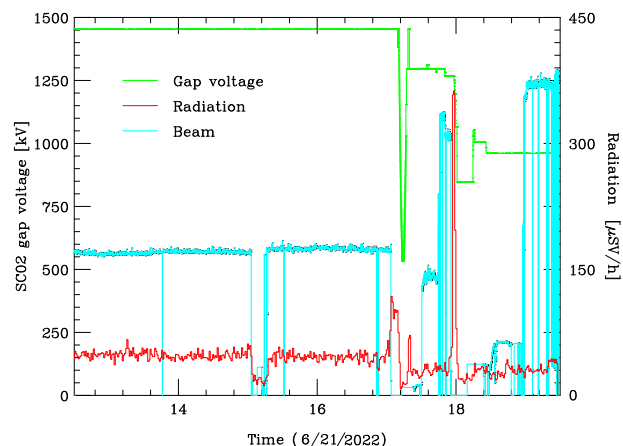


Figure 6: Observation of a sudden increase of X-ray level with SC02.

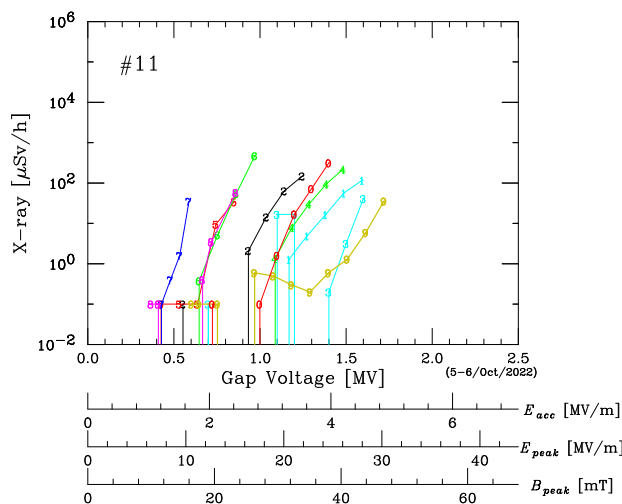


Figure 7: X-ray levels measured in October 2022.

れている再現性の高い方法である [5]。

SRILAC 用の LLRF システムがパルス励振に非対応であるため、外部信号発生器を用いてパルス励振を行った。しかしながら、カップラー保護回路 (カップラーに仕掛けられた電子ピックアップで窓近傍での MP を検出する) などの LLRF の一部の保護機能を活かして実施した。コンディショニングのセットアップを Fig. 8 に示す。空洞を励振する入力パルスは信号発生器の振幅変

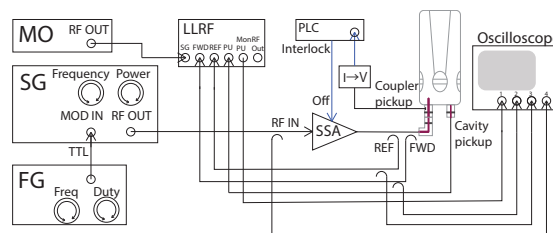


Figure 8: Block diagram for the pulsed RF power conditioning.

調モードを使用。振幅変調の周波数は 0.5 Hz、デューティを 1% として、時間幅 20 ms のパルスを作った。時間幅 20 ms は、周波数のずれ 50 Hz を考慮しても定常空洞電圧の 90% に到達するのに十分な長さである (Fig. 9)。周波数の同調は空洞信号の振幅が最大になるべく信号発生器の周波数を調整することで実現した。ここで重要なのは、パルス励振の時に誘発される MP を止めるために、パルスとパルスの間の入力高周波電力を完全にゼロにしておくことである。セットアップによっては、パルスとパルスの間にわずかに高周波電力が供給され続けていて継続的に MP が起こり、正常なパルスが励振されないことがあった。コンディショニングは X 線レベル、真空度、カップラーピックアップ電流などを常に確認しながら慎重にその電圧を上げて実施、その前後での X 線レベルを比較することにより効果を確認する手順で行った。

最初にコンディショニング実施した時に測定した X 線の強度の遷移をギャップ電圧と並べて Fig. 10 に示

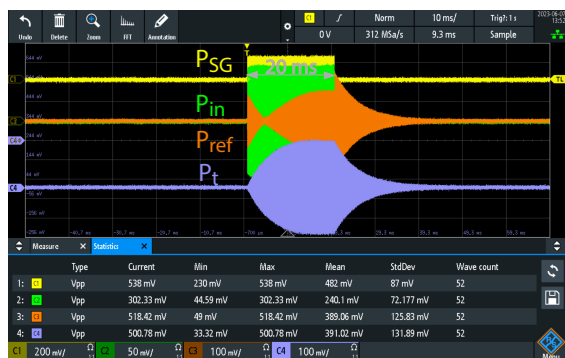


Figure 9: RF signals observed during the pulsed RF power conditioning. P_{SG} , P_{in} , P_{ref} , and P_t , are the input pulse from SG, the forward signal from the directional coupler, the reflected signal, and the signal from the cavity pickup, respectively.

す。最初にギャップ電圧 0.65 MV で X 線強度 170 $\mu\text{Sv/h}$

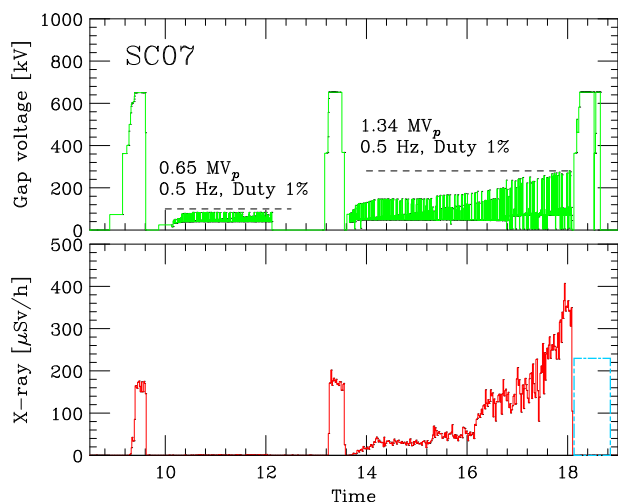


Figure 10: X-ray observed during conditioning.

を測定。続いて、ピーク電圧 0.65 MV のパルス励振に切り替え 2 時間保持した。その後、再度 X 線強度を測定したがこのときは変化はなかった。続いてギャップ電圧を上げてのコンディショニングを試してみた。徐々に電圧を上げるにつれて X 線量の増加が見られたが、18 時すぎ 1.34 MV に到達したときに急に X 線の強度が下がった。CW 励振に戻し、0.65 MV まで電圧を当てたところ X 線の発生がなくなっており、コンディショニングに成功したことがわかった。

これまで実施した RF パルスコンディショニングを Table 3 にまとめた。いずれの場合も X 線量がバックグラウンドレベルになるか、劇的に少なくすることに成功している。

その中でこれまで 3 度コンディショニングを実施している SC09 について詳しく見てみる。3 度のコンディショニングはその最大パルス電圧を上げながら実施している。Figure 11 に示すようにオンセット電圧は徐々に上昇しクライオモジュール設置直後の状態 (Fig. 4)

Table 3: History of the pulsed RF power conditioning. Here V_p^{\max} is a maximum pulsed voltage of the SC-QWRs.

Date	Cavity	Duration	V_p^{\max} [MV]
11/22/2022	SC07	7h37m	1.34
11/24/2022	SC06	4h05m	1.52
11/28/2022	SC09	1h14m	1.57
11/29/2022	SC02	0h37m	1.98
1/12/2023	SC07	0h54m	1.55
1/13/2023	SC09	1h44m	1.99
3/29/2023	SC08	2h35m	1.80
4/13/2023	SC01	0h40m	2.23
6/7/2023	SC09	1h13m	2.54
7/3/2023	SC02	1h53m	2.98

よりも改善されている。2023 年 6 月に実施した 3 回目

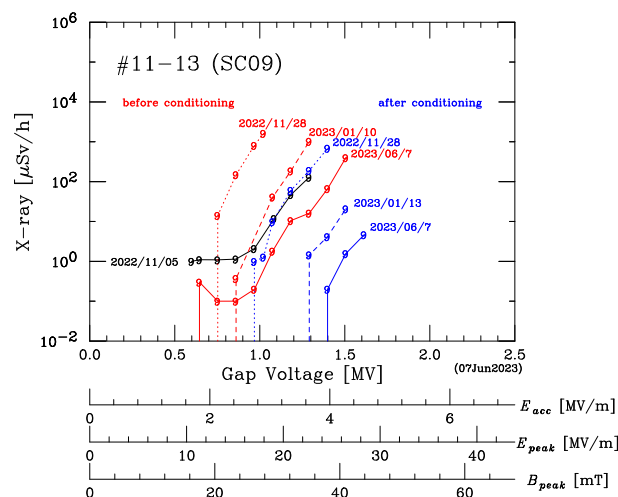


Figure 11: X-ray levels before and after conditioning.

のコンディショニングの際、FE と MP の関連性を示唆する現象を記録した。以前のプロトタイプでの経験から低い電圧レベルの MP が加速ギャップ付近で起きていることがわかっている [9]。Figure 12 には、ギャップ電圧、X 線レベルとともに隣接するビーム輸送系の真空度をプロットしてある。パルス励振中のピーク電圧は、LLRF がパルス励振に対応していないため実際の電圧を反映していないことに注意されたい。図に MP と示したようにコンディショニング開始前の X 線測定で電圧が急に低下し、MP とおぼしき事象がおきた。この MP は、直近のビーム輸送系の真空度が悪化したことからビームパイプ付近で起きていることがわかる。また、図からわかるように類似の事象がパルス励振中にも観察されている。コンディショニング中、空洞に励起される電圧をオシロスコープで観察しているが、時に空洞電圧がランプアップの途中で急に低下し (Fig. 13)、その際、同様にビーム輸送系の真空度が悪化した (Fig. 12)。このときも、X 線レベルが急に 1/4 に下がる事象が観察され、CW 励振での X 線レベルは 1/50 以下に改善した (Fig. 12)。その上、コンディショニング完了後は MP も

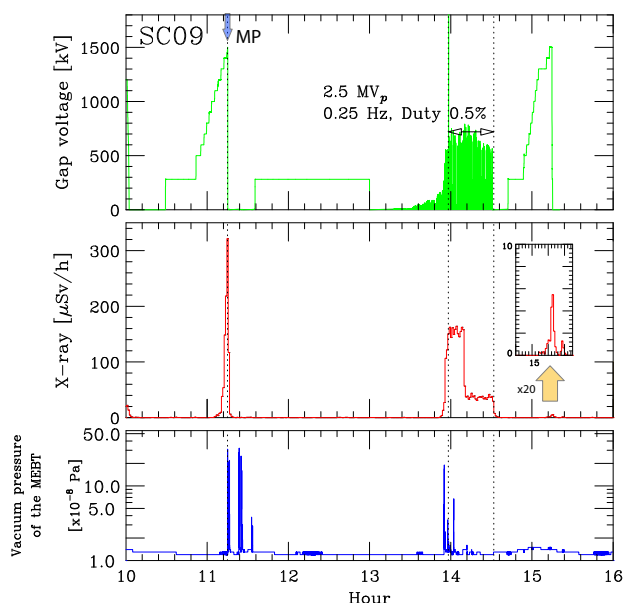


Figure 12: Gap voltage, X-ray level, and the vacuum pressure of the MEBT observed during the conditioning of SC09.

起きなくなった。



Figure 13: RF signals observed during pulsed rf power conditioning.

以上の状況から、SRILACのビーム供給を中断するFEの急増、MPの頻発は加速ギャップ付近で起きていると考えられる。この理解は高電圧RFパルスコンディショニングがSRILACの空洞のFEとMPの状況を改善することが効果的であることを示唆する。FEやMPが加速ギャップ、つまりビームパイプの付近で起きていることから常温部分からのガス流入あるいはビームに乗って不純物が運ばれ加速ギャップ付近のニオブ表面に付着していることが空洞性能悪化のメカニズムの一つとして類推される。しかしながらクライオモジュール中程の空洞においても性能劣化が発生していることから、その他からの不純物の流入に起因することも否定できない。明確な説明はできないが、現状SRILACでは高電圧RFパルスコンディショニングが有効であり、電圧が高いほどオンセット電圧を押し上げることがわかった。SC09においては初期の状態より改善されており、また、カプラー窓からのリークが主要因と思われる

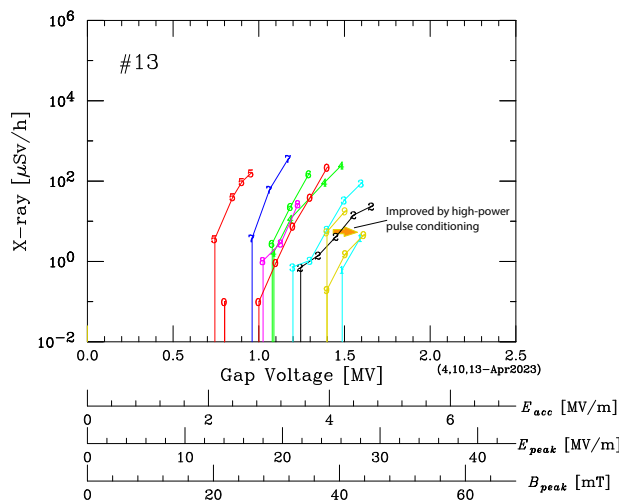


Figure 14: X-ray levels measured in April 2023.

SC06においても効果があることから実際に何が起きているかについての結論を得るためには、コンディショニング時に発生するガスの成分や、実際に空洞表面を詳細に観察することが必要である。

5. まとめと展望

理研重イオン超伝導線形加速器は、ビーム供給開始後4年目に入った。その間、カプラー窓の真空トラブルによりビーム供給を中断せざるを得ないトラブルに見舞われたが、カプラーに外窓を設けることにより10台での運転が可能となった。ビーム供給を続ける中で超伝導空洞を用いた他の加速器と同様、SRILAC用の空洞もFE増加やMPによる電圧低下の頻度増など性能劣化が顕在化してきた。空洞性能を回復させるため、高電圧RFパルスコンディショニングを試したが、初期の空洞性能を超えて回復する空洞もあり、効果的であることがわかった。2023年4月現在のX線発生の様子をFig. 14に示す。現在は、高電圧励振による放電などでの空洞性能のさらなる劣化を回避するため最低限のピーク電圧でのコンディショニングで済ませているが、将来的にはさらに電圧を上げて改善の度合いを確認することを検討している。

謝辞

SRILACの空洞のコンディショニング実施に関して高工研の阪井教授、ミシガン州立大学のProf. Saitoに事前の議論に参加していただき、情報を提供いただいたことに感謝いたします。また、オペレーションで頻繁に起きるトラブルにおいて我慢強く対応してビーム供給を可能な限り続けることに注力していただいた住重加速器サービスの加速器オペレータのみなさまに心より感謝します。

参考文献

[1] H. Okuno *et al.*, “Progress of RIBF Accelerators”

- Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp. 03C002, 2012.
doi:10.1093/ptep/pts046
- [2] H. Sakai *et al.*, “Facility Upgrade for Superheavy-Element Research at RIKEN”, *Eur. Phys. J. A*, vol. 58. pp.238, 2022.
doi:10.1140/epja/s10050-022-00888-3
- [3] K. Yamada *et al.*, “Successful Beam Commissioning of Heavy-Ion Superconducting Linac at RIKEN”, in *Proc. SRF’21*, East Lansing, MI, USA, Jun.-Jul. 2021, pp. 167.
doi:10.18429/JACoW-SRF2021-M00FAV01
- [4] T. Nagatomo *et al.*, “High intensity vanadium beam for synthesis of new superheavy elements with well-controlled emittance by using ‘slit triplet’”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 91, pp. 023318, 2020. doi:10.1063/1.5130431
- [5] E. Kako *et al.*, “Degradation and Recovery of Cavity Performances in Compact-ERL Injector Cryomodule”, in *Proc. SRF’17*, Lanzhou, China, Jul. 2017, pp. 289–293.
doi:10.18429/JACoW-SRF2017-M0PB097
- [6] H. Imao *et al.*, “Non-Evaporative Getter-Based Differential Pumping System for SRILAC at RIBF”, in *Proc. SRF’19*, Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, pp. 419–423.
doi:10.18429/JACoW-SRF2019-TUP013
- [7] T. Nishi *et al.*, “Development of Non-Destructive Beam Envelope Measurements in SRILAC with Low Beta Heavy Ion Beams Using BPMs” presented at the SRF’23, Grand Rapids, MI, USA, Jun. 2023, paper MOPMB086, SRF2023.
- [8] N. Sakamoto *et al.*, “Operation Experience of the Superconducting Linac at RIKEN RIBF”, in *Proc. SRF’21*, East Lansing, MI, USA, Jun.-Jul. 2021, pp. 315.
doi:10.18429/JACoW-SRF2021-M0PFAV005
- [9] N. Sakamoto *et al.*, “Construction and Performance Tests of Prototype Quarter-wave Resonator and Its Cryomodule at RIKEN”, in *Proc. SRF’17*, Lanzhou, China, Jul. 2017, pp. 681–685. doi:10.18429/JACoW-SRF2017-WEYA02