

希塩酸による加速空洞内表面の洗浄作業

新井 宇宙[#]

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

J-PARC 加速器群の中で、リニアックは初段に位置する線形加速器施設である。リニアックではイオン源 (IS) で生成した負水素イオンを 400 MeV まで加速している。リニアックは 4 種類の加速器で構成されており、上流から高周波四重極線形加速器 (RFQ)、ドリフトチューブ型線形加速器 (DTL)、機能分離型 DTL (SDTL)、環状結合型線形加速器 (ACS) である。2011 年の東日本大震災の復旧後に、複数の SDTL 空洞で、定格運転電力付近の電圧定在波比が増加する事象が発生した。調査の結果、真空ポンプからのオイルの逆流などによる空洞内表面の汚れ付着が原因であることが判明した。有機溶剤や希塩酸による洗浄を行うことで問題を解決するに至った。本報告書では、筆者が参加した 2020 年及び 2021 年の夏期メンテナンスに行った作業を中心に、SDTL の空洞内表面洗浄の工程および運転復旧までの作業について報告する。

1. SDTL

機能分離型ドリフトチューブ型線形加速器 (図 1) は、ビームを加速する空洞とビームを収束する四極電磁石で構成されている。SDTL 空洞は合計 36 台設置されており、A 空洞と B 空洞の 2 種類を 1 組とし、上流側から SDTL01A、SDTL01B、… SDTL16A、SDTL16B と呼称している。図 2 に空洞に取り付けられている主要な部品を示す。空洞の内表面や図 2 に示す部品の一部は PR (Periodic Reverse) 法を用いた銅電鍍後に電解研磨で仕上げられている [1]。PR 法とは電鍍時に印加する電圧の極性を周期的に反転する電鍍である。これにより不純物含有量が少なく、無酸素銅と同等の電気伝導度を持った電鍍を行うことができる [2]。

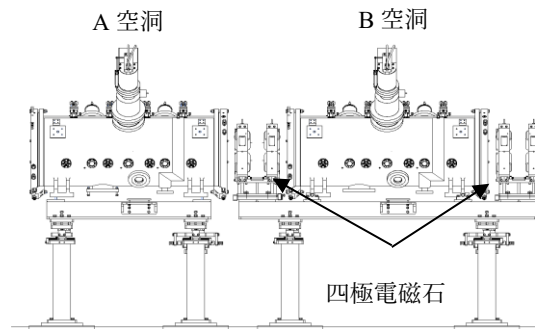


図 1. SDTL 外観 [1]

2. 洗浄作業の経緯

2011 年の東日本大震災後の復旧以降、複数の SDTL 空洞にて設計時の定格運転電力付近で VSWR が増加して、空洞内へ適切な電力を投入できない事象が発生した。本報告書では、この反射及び VSWR が増加する電力領域を不安定領域と呼ぶ。調査の結果、震災後に空洞内表面が長時間にわたり高湿度の大気にさらされたことや、粗引き用ポンプとして使用していたロータリーポンプからのオイル (油分) などが空洞内表面に付着し汚れたことにより、電力を投入した際にマルチパクタが発生して不安定領域が発生・拡大した原因となっている可能性が示唆された。

不安定領域の拡大は SDTL05A、SDTL05B、SDTL06A の 3 空洞で顕著に見られ、そのほかに SDTL04A、SDTL 04B、SDTL06B などでも同様の不具合が確認された。真空ポンプ増強、真空配管交換および真空ポンプのオイルフリー化 (ロータリーポンプからスクロールポンプへ交換) 等の対策を行った結果、一時的に不具合症状の改善 (不安定領域の縮小) がみられたが、時間経過とともに再拡大するなど根

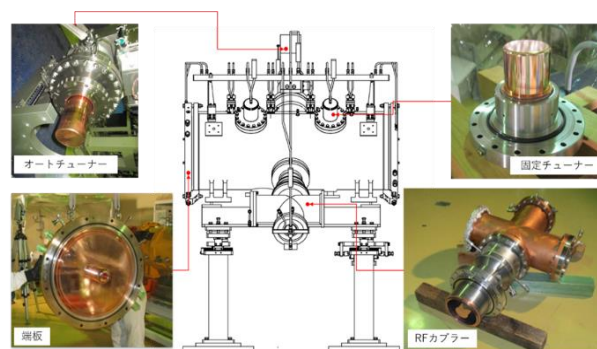


図 2. SDTL の主要構成部品 [1]

本的な解決には至らなかった。そこで空洞内表面に付着していると思われるオイルを除去できれば不具合症状が改善するのではないか、との検討から空洞洗浄を実施することとなった [1]。

表1. SDTL 空洞の洗浄作業履歴

年	SDTL04A	SDTL04B	SDTL05A	SDTL05B	SDTL06A	SDTL06B
2015				アセトン洗浄 不安定領域消失		
2016			アセトン洗浄 2か月で再拡大		アセトン洗浄 不安定領域消失	アセトン洗浄 不安定領域消失
2017	アセトン洗浄 2か月で再拡大	アセトン洗浄 2か月で再拡大	アセトン洗浄 2か月で再拡大			
2018						
2019			アセトン洗浄 2か月で再拡大			
2020			希硫酸洗浄 6か月で再拡大			
2021			希硫酸洗浄 不安定領域消失			
2022	希塩酸洗浄 不安定領域消失	希塩酸洗浄 不安定領域消失				

3. 洗浄に用いた薬品

3.1 アセトンによる洗浄

洗浄作業を行った履歴を表1に示す。初めの洗浄作業はSDTL05Bに対して行われた。使用された薬品はアセトンである。良好な結果が得られたため他の空洞でも同様に実施した。しかし、SDTL04A、SDTL04B、SDTL05Aでは一時的に不安定領域が消失したが、約2か月間で再拡大した。その後も2017年と2019年の夏期メンテナンスでSDTL05Aをアセトンで洗浄したが同様の結果となった。不安定領域が再拡大した理由は、空洞内表面に汚れが残っていたためと考えられる。

3.2 希硫酸による洗浄

2020年の夏期メンテナンス期間に希硫酸による洗浄をSDTL05Aに行った。希硫酸を用いた理由は、アセトンでは除去できなかった汚れを、希硫酸を用いることで酸化被膜と共に除去できないかと考えたからである。銅はイオン化傾向が水素より小さいため希硫酸と反応しない。しかし、酸化銅は希硫酸で溶かすことができる。つまり、表層面の酸化被膜のみを溶かすことが可能であり、酸化被膜に付着している汚れも浮かすことができると考えられる。洗浄作業後は一時的に不安定領域が消失した後に再拡大してしまっただが、拡大までの時間が約6か月と緩やかになった。

3.3 希塩酸による洗浄

SDTL05Aに2021年の夏期メンテナンス期間で希塩酸による洗浄を行った。希硫酸による洗浄では洗浄作業後に硫酸が残留することが懸念される。希塩酸であれば塩酸は揮発性が高いため残留の懸念が払拭できる。洗浄作業後は不安定領域が消失し、再拡大も発生しなかった。2022年の夏期メンテナンス機関ではSDTL04AおよびSDTL04Bに希塩酸による洗浄を行い、同様の結果を得ることができた。

4. 洗浄作業の手順と注意点

4.1 洗浄作業の全体手順

洗浄作業の全体手順は大別して以下のようになる。

① 加速器トンネル内への物品搬入

加速空洞は放射化しているため地下の加速器トンネル内から持ち出すことができない。そのため洗浄作業はトンネル内に物品を持ち込み行われる。

② 簡易クリーンブースの設置

洗浄作業時に空洞内へ埃などが入るのを防ぐために簡易的クリーンブースを使用する。また、簡易クリーンブース内は吸煙器により排気を行う。吸煙器は活性炭を含むフィルターを通して排気を行うことで、酸性ガスがブース外に放出されるのを防いでいる。

③ 共振周波数測定

洗浄作業完了後に空洞をビームラインに再設置した際に元の状態に戻すために洗浄前に測定を行う。

④ 空洞付属機器の取り外し

四極電磁石、冷却水配管、真空排気装置、RFカプラー、オートチューナーなどの機器を取り外し、空洞を移動可能な状態にする。

⑤ 空洞の移動

空洞を架台から切り離し、天井クレーンを使用し簡易クリーンブースを設置した場所まで移動する。

⑥ 空洞内表面の洗浄

4.3で後述する。

⑦ 空洞の移動

洗浄した空洞を元のビームライン上に移動する。

⑧ 空洞付属機器の取り付け

④で取り外した機器を取り付ける。

⑨ 空洞付属機器の立ち上げ

冷却水、真空排気装置、計器類を立ち上げる。

⑩ 共振周波数測定

③で測定した数値と一致するようにRFカプラーの調整を行う。

⑪ アライメント

空洞および四極電磁石の中心がビームラインと一致するようにアライメントを行う。アライメント目標精度は四極電磁石 ± 0.1 mm、空洞 ± 0.3 mmである。

⑫ 加速器トンネルからの物品搬出

洗浄作業に使用した物品の線量測定を行う。搬出可能であれば加速器トンネルから搬出し作業を完了する。

4.2 防護具

空洞内部の洗浄作業は防護具を身に付け手作業で行う。防護具の種類を下記に記す。

- ・安全眼鏡
- ・ヘルメット
- ・安全靴
- ・防毒マスク（直結式小型）
- ・ポリエチレン手袋
- ・ポリエチレンエプロン

手袋やエプロンにポリエチレンを選択した理由は洗浄作業に使用する希塩酸、アセトンなどに対して薬品耐性を考慮したからである。また、防毒マスクに取り付ける吸収缶は使用する薬品ごとに酸性ガス用、有機ガス用を使い分け、破過時間に注意する必要がある。

4.3 空洞内部の洗浄作業

空洞内表面の洗浄作業は、クリーンルーム作業に適したワイピングクロスであるマイクロスター（図3）に薬品および精製水を染み込ませ、手作業で行う。但し、空洞中心のドリフトチューブはアライメントがずれることを懸念し洗浄作業は行わなかった。2021年の希塩酸を使用した洗浄作業は以下の流れで行った。

- ① 希塩酸を染み込ませたクロスで拭く。
- ② 精製水を染み込ませたクロスで水拭きする。
- ③ 水分がなくなるまで乾拭きをする。
- ④ エタノールを染み込ませたクロスで拭く。

希塩酸は2 mol/Lを精製水で4倍に希釈して使用した。また、④のエタノールは水を置換乾燥させるために行った。注意点として、一度に全体を拭くのではなく、範囲を区切り少しずつ作業を行う。その際に①の希塩酸で拭いた後に、即座に②の水拭きを行う必要がある。理由は、酸と酸化した金属が反応した場合スマットと呼ばれる微粒子が発生し、このスマットが乾燥してしまうと金属の表面から非常に取れにくくなるからである。また、ウエスにスマットなどの汚れが付着するため、ウエスはこまめに取り換えながら作業を行う。

洗浄作業前の空洞内部の様子を図4に、洗浄作業後の空洞内部の様子を図5に示す。図4に示すように、洗浄作業前は壁面に酸化銅と思われる黒褐色の



図3. ミクロスター(帝人フロンティア製)[1]

跡が付着していた。図5の洗浄作業後では全体が均一な銅色になっている。しかし、純度の高い銅は傷つ

きやすく、ウエスで拭いたことにより擦り傷がついており、光が乱反射して曇って見える箇所がある。

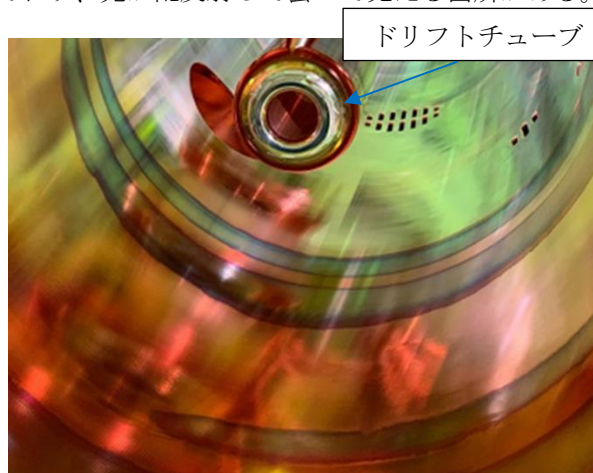


図4. 空洞内表面の様子（洗浄前）[1]



図5. 空洞内表面の様子（洗浄後）[1]

5. コンディショニング

洗浄作業後に始めて高周波電力を印加した際には多量のガス放出が発生する。そのためコンディショニング作業は低い印加電力から始め、圧力が低下したところで少しずつ印加電力を上昇させる。SDTL04とSDTL05のコンディショニングでは 1.0×10^{-5} Paを圧力の上限とした。コンディショニングにはリニアックRFグループが作成したオートコンディショニングシステムを用いることで、24時間体制で行うことができる。これにより約5日間で十分なコンディショニングを行うことができた。

6. 洗浄の結果

SDTL05A空洞の不安定領域について、洗浄前に測定した結果を図6に、洗浄後に測定した結果を図7に示す。縦軸は電圧定在波比（VSWR）、横軸はクライストロン出力である。洗浄前はクライストロンの出力が約600 kWから800 kWの領域で不安定領域が確認されたが、洗浄後は全域にわたって不安定領域が消失している。これにより安定した電力の印加が

可能となった。

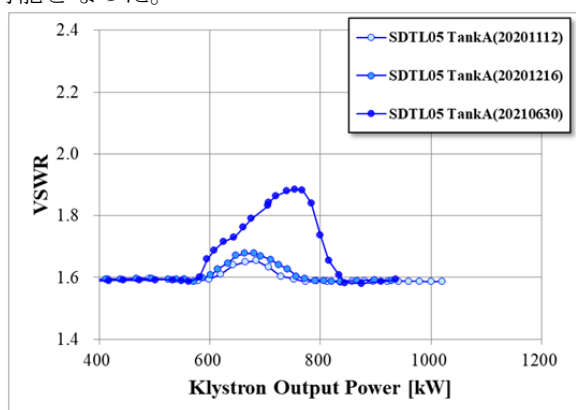


図 6. SDDL05A の不安定領域測定 (洗浄前)[1]

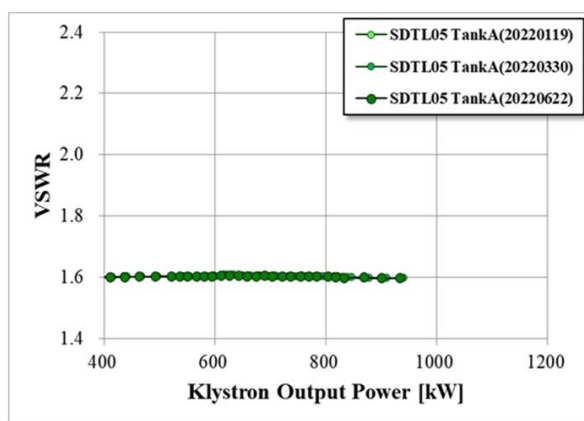


図 7. SDDL05A の不安定領域測定 (洗浄後)[1]

7. 考察

酸を用いた洗浄により SDDL04A、SDDL04B、SDDL05A 空洞は不安定領域を解消するに至った。しかし、SDDL05B、SDDL06A、SDDL06B はアセトンによる洗浄で不安定領域を解消している。アセトンによる洗浄では黒褐色の変色は残ったままであった。つまり、空洞内表面の酸化銅を除去することが重要ではないことがわかる。おそらく空洞内表面に付着した油分などを除去することが重要であると考えられる。

上記の内容から他の洗浄作業に適した薬品として水系の洗浄剤が考えられる。特にアルカリ性の水系洗浄剤は研磨粉や潤滑油の洗浄性に優れており、界面活性剤の効果も期待できる。また、金属の表面処理では洗浄工程で複数の薬品を用いて洗浄することが推奨されており、例えばアセトンによる溶剤洗浄、アルカリ性の水系洗浄剤による洗浄、酸による洗浄の三段階に分けて洗浄を行っていることが多い。これにより様々な汚染を確実に除去している。今回のような事象は汚染状況に不明な点が多く、その原因が特定できていないが、このような場合複数の洗浄方法を行うことが良いのではないかと考えられる。

8. まとめ

空洞内部の汚染が原因と考えられる不安定領域の発生、増大はアセトンや酸を用いた洗浄により解決した。しかし、空洞により使用する薬品の効果に差が出た。理由は空洞内部の汚染状況に差があったためではないかと考えられる。より洗浄効果を高めるために複数の薬品を用いて洗浄を行えばより良い結果が得られたのではないかと考えられる。

謝辞

洗浄作業に参加させていただくにあたり、J-PARC リニアックの伊藤研究副主幹をはじめとした空洞グループの皆様には多くのご指導を賜りました。また、コンディショニング作業では RF グループの皆様におきましては多大なご協力をいただきました。この紙面を借りて深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 新井 宇宙、他、“希塩酸を用いた機能分離型ドリフトチューブリニアック内面の洗浄”、JAEA-Technology 2023-009.
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2023-009.pdf>
- [2] H. Ino *et al.*, “ADVANCED COPPER LINING FOR ACCELERATOR COMPONENTS”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 12-14, 2000, Himeji, Japan.
<https://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/PDF/13P-10.pdf>