

PF-AR チタンサブレーションポンプ端子の老朽化対策の検討 CONSIDERATION OF DETERIORATION FOR PF-AR TITANIUM SUBLIMATION PUMPS TERMINALS

田中窓香^{*}、内山隆司、
Madoka Tanaka^{*}、Takashi Uchiyama
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A vacuum leak occurred on the atmospheric side of the terminal of a titanium sublimation pump (TSP) at KEK PF-AR. The leaking terminal had developed verdigris. This is thought to be the cause of the leak. This prompted us to check the terminals of all TSPs. Verdigris was found in eight locations and cable damage in 23 locations. Most TSPs are located outside the bending magnets, making them susceptible to synchrotron radiation, which is thought to have had a significant impact on cable hardening and verdigris formation. The terminals are protected by stainless steel covers, which have long been thought to be the cause of cable damage. Other issues included densely packed cables and poor ventilation, leading to discussions about the need for remanufacturing. In order to consider the effects of radiation when producing new covers, a radiation survey was conducted using radiochromic film. The results are reported here. In addition, as a countermeasure against cable damage, we are also in the process of replacing multi-core cables with single-core cables. We are also currently in the process of replacing the TSPs themselves, and we will also report on the progress of this work. In addition, to prevent cable damage, multi-core cables were replaced with single-core cables, and the TSP units are currently being replaced. The progress of this work is also described.

1. PF-AR チタン蒸発型ポンプ概要

KEK の PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) はビームエネルギー 6.5 GeV、周長 377 m の放射光源加速器である。リングは 360 度を 56 分割した偏向部とそれらを繋ぐ直線部の繰り返しを基本とし、東西南北に長い直線部を持つ (うち東西は RF 空洞部)。真空は概ね 10^{-7} Pa に保たれており、PF-AR の高輝度運転を支えている [1,2]。PF-AR の高真空を保つ構成のひとつに、チタンサブレーションポンプ (TSP) がある。フィラメント状のチタンを加熱することで昇華させ、壁面に薄い活性膜をつくり、気体分子を吸着させる。吸着面が飽和してしまっても繰り返し活性化することで新たな膜を生成することができるが、寿命がある。PF-AR は元々トリスタン計画のブースターリングとして建設され、トリスタン計画終了後は放射光源として運用されていたが、高度化を実現するため、2001 年に大改造が行われた [1,2]。真空系も一新され、TSP も大改造により新たに設置された真空ポンプのひとつである。排気速度はあくまで目安であるが偏向電磁石部で 600 L/s、アーク直線部で 240 L/s と見積もられている。基本的に、全ての偏向電磁石に対し、実効的な排気速度を大きく取るために、外周コイル間のチェンバーに 2 台ずつ、磁極外に 1 台の 3 台 1 セットとして設置されており、電源は 1 つの変圧器から 3 つに分岐させている。運転中に作動させることをふまえ、電磁石外の TSP を mode1、電磁石内上流側を mode2、下流側を mode3 とし、電磁石内の TSP を誤って運転中に活性化させないように区別している。mode1 はほぼビーム直下 200~300 mm ほどの位置に取り付けられているものが多い。現在は電磁石以外の場所も含め全部で 184 台稼働させている (故障等で動かないものも含む)。チェンバーに

は Fig. 1 の通り銅合金でできた放射光アブソーバが設けられており、放射光から TSP を保護する構造となっている [1]。TSP には故障時に切替られるように蒸発源としてのフィラメントが 3 つあり (Fig. 2)、グラウンドも含め端子部は 4 つの端子から構成される。端子部は外部からの接触を避けるためのステンレス製のカバーが取り付けられている (Fig. 3)。

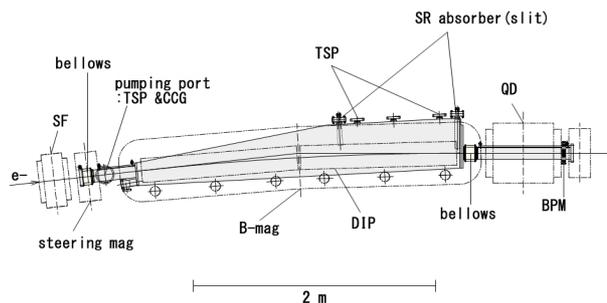


Figure 1: The schematic view of an arc-chamber [1].



Figure 2: A unused titanium sublimation pump of PF-AR. It has three filaments and a ground, and four terminals outside the vacuum.

^{*} madokat@post.kek.jp



Figure 3: TSP terminals cover. Radiochromic film in blackout bag is attached to the right side (upstream side).

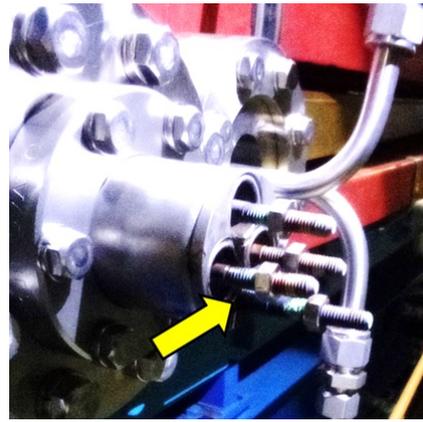


Figure 4: A TSP with a vacuum leak. The leak occurred at the ground terminal at the bottom center. Verdigris has formed.

2. 端子部の真空リークと損傷調査

2024年10月に、西側RF空洞近くの偏向電磁石内にあるTSPの端子部分に於いて真空リークが発生した。リーク部には緑青の発生が見られた (Fig. 4)。加速器運転中であったため、VacSealの塗布で真空を封じ、次回長期メンテナンスで交換する方針とし、その後はリークすることなく夏まで運転を続けることが出来た。

この真空リークをきっかけに、2024年12月の運転停止後、全TSPの端子部の調査を行った。端子部のカバー (Fig. 3) を外し、ケーブルの損傷具合や緑青の発生の有無の確認を行った。その結果、23ヶ所でケーブルの損傷を、8ヶ所で緑青の発生を確認した。Figure 5に損傷したケーブルの例を載せる。ケーブルの損傷は、放射線によるケーブルの硬化によるひび割れだけでなく、熱による溶けや、端子カバーによる傷が見られた。ケーブルが太く (4芯×8mm²) 取り回しがしづらいため、ケーブルに無理な力をかけてしまったことも損傷の原因として考えられる。また損傷が起きていた場所を Fig. 6 に載せる。損傷の起きている位置に特徴はないように見えるが、緑青の発生箇所は北西部に集中している。Figure 5 からわかるように、端子同士は距離が近く、端子やケーブルが密接している上、ステンレスのカバーで密閉されている。スパッタイオンポンプの高圧コネクタ部では、比較的放射線量の高いところで腐食が発生することがある [3]。原因のひとつとして、コネクタ内の密閉空間にある空気が放射線により活性化され、腐食性のNO_xやオゾンが生成されることが考えられる。また印加電圧を下げると改善することからコロナ放電との相関も考えられる。これと同じような現象がTSPの端子でも起きていると考え、端子部分の保護をしつつ、通気性の良いものに変える必要があると考えた。

3. 放射線測定

新しい保護カバーの製作に先立って、ケーブルの損傷が見られたTSPを中心にガフクロミックフィルムによる放射線測定を行った。使用したフィルムはAshland社製のHD-V2というフィルムで、測定範囲はおおよそ10~1000 Gyである [4,5]。測定場所はケーブルの損傷

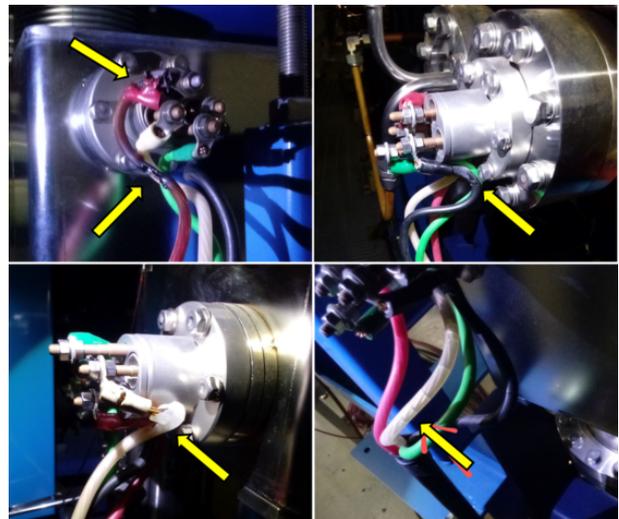


Figure 5: Photos of damaged cables. Yellow arrows indicate the locations of the damage. Top left photo is burnt, right top is damaged by the cover, left bottom is burnt and melted, and right bottom shows cracks.

や緑青の発生箇所から選び、端子カバーの上、放射線量の高いと考えられる上流面に遮光袋に入れた状態で貼り付けた [5] (Fig. 3)。またうち1台は、カバー全体を包むように貼り付けた上、遮光シートで覆いをした。2024年III期運転中 (2025/3/3~24) の測定結果を Fig. 7 に示す。主に mode3 のTSP に於いて放射光と思われる変色が見られた。

この結果を踏まえ、2回目の測定を2025年I期運転中 (2025/5/13~6/30) に行った。2回目では、ケーブルに損傷のあったTSPを含む電磁石1台に対する1セット3台のTSPにフィルムを貼り付けた。そのため、1回目と重複する箇所がある。1回目の測定ではカバー全体にフィルムを巻いたカバーは mode1 のみだったため、1セット分3台のカバー全体にフィルムを巻いた。結果を Fig. 8 に示す。1回目の測定と同様、多くの mode3 のフィルムに放射光と思われる変色が見られたが、すべてのフィルムではなかった。mode2 にも放射

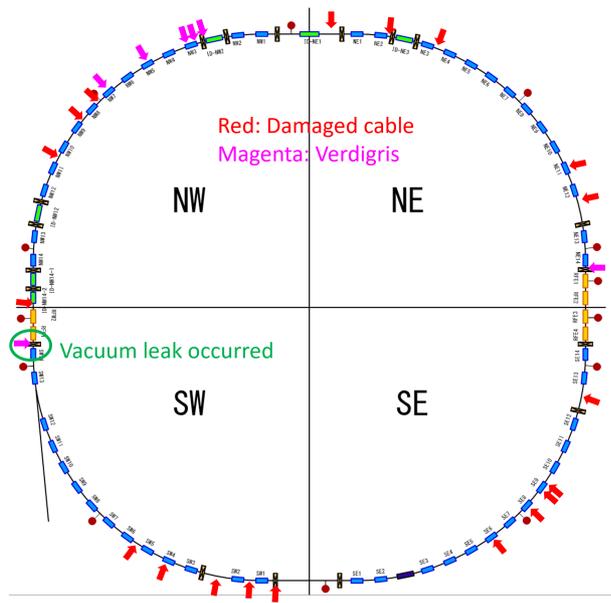


Figure 6: Locations of TSPs with damaged terminals or cables. Red arrows point cable damage, magenta arrows indicate verdigris formation. Green circle indicates the location of the vacuum leak.

光と見られる線が入ったものがあつた。1セットのうち、ビームラインより低いところにある mode 1 が一番線量が高い場所が多かつた。縦に濃い線の入つた場所が2箇所あつたが、これらの原因は今のところ不明である。カバー全体に貼り付けたフィルム (Fig. 9) を見ると、予想通り、ビームに垂直な面の放射線量が高いことがわかつた。mode2 でも放射光のようなものが見られ、mode3 では上流側のみで見られるのに対し、下流側にも見えている。さらに、端子の形状がくつきりと見えることから、多くの放射線が端子に当たつてることがわかつた。

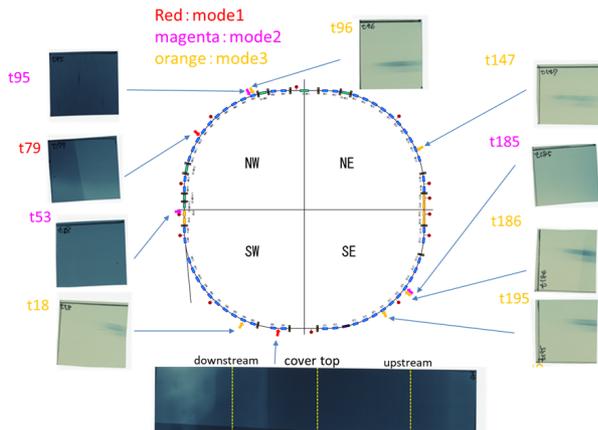


Figure 7: Results of the first radiation measurement (2025/3/3-3/24) using film HD-V2.

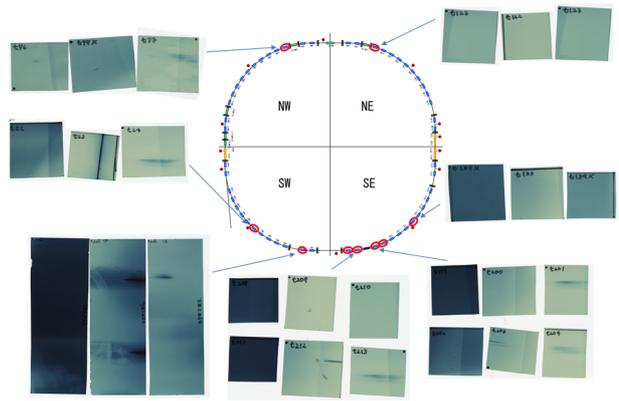


Figure 8: Results of the second radiation measurement (2025/5/13-6/30) using film HD-V2.

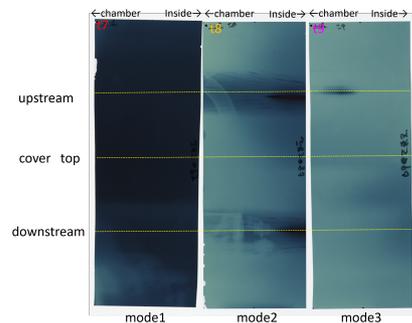


Figure 9: Radiochromic films showing the amount of radiation received by the TSP terminals during accelerator operation. TSP installed in the SW02 magnet, from left: mode1, mode2, mode3.

4. 交換作業

端子部での真空リークを期に、10年近く、または10年以上交換が行われていない TSP の交換作業を 2025 年に行っている (継続中)。2025 年 7 月末現在、91 台の交換を行った。今夏はあと 10 台程度を交換予定である。交換作業中、チタンの膜がゴミのように付着しているものが見られた。これらのほとんどは mode2 であつた。掃除機で吸い取り除去した。また、チタンのフィラメント同士が接触してショート状態になってしまつている TSP も数台見られた (Fig. 10)。また南直線部に近い場所ではフィラメントが切れてしまつていたものも 3 台あり、そのうち 1 台は 2 ケ所で切れてしまつていチェンバー内に落下してしまつていた (Fig. 11)。先述の通り、チェンバー内の TSP は放射線アブソーバで保護されているため、放射光が当たつてしまつたとは考えにくい。フィラメントが切れた TSP は南南西部に限られており、この付近でのみ、フィラメントに損傷を与える何らかの現象が起きてしまつていると考えられるが、原因は定かではない。また東付近で交換した TSP に、フィラメント両端近くが黒く変色しているものも見られた。

同時に、傷が見られたケーブルの交換を随時進めて

いる。従来のケーブルは4芯線なため太く硬く、取り回しが容易ではなかったこと、端子部が4本あることで密集状態になってしまっていたことを鑑みて、単芯線を用い、使用する端子も1chとグラウンドの2本とし、端子部の通気性を上げるようにした (Fig. 12)。トンネル外にあるコントローラ側でフィラメントの切り替えは出来なくなるが、フィラメントが不調となった場合はトンネル内の配線を付け替える方針とした。また、端子が焼けたような跡が見られる場所があったため、伝導性をあげるため、銅ワッシャを利用した (Fig. 12)。

5. 今後の方針

まだカバーの製作に着手できていないが、以下の様なカバーの製作を考えている。まず、通気性を良くするため、円筒状のカバーの底面はつけない。近辺の作業者が通っても端子に触れる危険のないように、高さは十分に取る。すでに通気性を上げるためにケーブルを接続する端子を4本から2本に減らし、スペースに余裕ができたため、端子同士が短絡しないよう、端子間にも絶縁体素材で仕切る。また、ケーブルに傷をつけないような素材、厚みのものを検討する。

損傷調査や交換作業の結果、様々な問題が見られたが、原因をはっきりと特定できないものも多かった。今後も10年程度での交換作業を行っていくのが適切だと考えられる。



Figure 10: A TSP with filaments touching each other.



Figure 11: A TSP filament burned out and fell off.

6. まとめ

KEK PF-AR のチタンサブレーションポンプの端子部分で真空リークが発生したのをきっかけに、全 TSP の端子部分の損傷の確認を行った結果、23ヶ所でケーブルの損傷が、リーク箇所含む8ヶ所で緑青の発生が認められた。ケーブルの損傷は端子カバーによる傷や、放射線の影響と思われる硬化によるひび割れ、それらの傷を起因とした焼損と考えられる。緑青の発生も、高圧を印加したことによる腐食性の NO_x やオゾンの生成が原因と考えられるため、端子カバーを新規製作し、ケーブルを4芯線から単芯線へ交換することにし

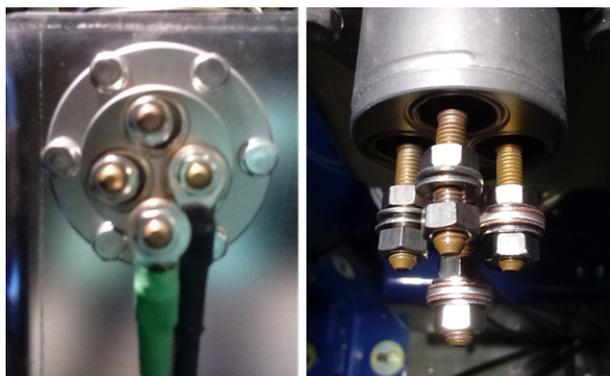


Figure 12: Photos of the terminals part after replacing the cable.

た。それに先立って問題の見つかった TSP を中心にガフクロミックフィルムを用いて端子部の放射線測定を行った。その結果、主に電磁石の外側に設置された TSP の放射線量が高く、また偏向電磁石のチェンバー内に設置されたものの端子部も、多くの放射線を浴びていることがわかった。新しいカバーを製作にする際には、通気性を良くすること、放射線からなるべく保護をすること、安全性を保つこと、ケーブルを傷つけない素材にすることとして、検討を進めている。また、緑青の発生があった TSP を交換するのに併せて、10年近く交換をしていない TSP の交換作業も行った。取り外した TSP を確認したところ、高熱が原因と見られるフィラメントの短絡や、フィラメントが溶けて切断されているものが主に南南西部で見つかった。TSP はチェンバー内にあるアブソーバで保護されているため、放射線が当たったためとは考えにくく、原因は定かではない。以上より、損傷等の原因がはっきりしなくとも、設置から10年を超えたものは異常が多く、今後も10年程度での交換を進めていくのが望ましいと考える。

謝辞

非常に作業性の悪い環境で、TSP 端子部の損傷調査及び本体とケーブル交換作業にご協力いただいた、三菱電機システムサービス株式会社の飯島寛昭氏、大和田光晴氏、廣藤直也氏、加藤聡一郎氏、高エネルギー加速器研究機構羽入智文氏への感謝の意をここに記します。

参考文献

- [1] T. Uchiyama *et al.*, "Improvement of Vacuum System for the Synchrotron Light Source PF-AR Upgrading", *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 46, 193(2003). doi.10.3131/jvsj.46.193
- [2] Y. Tanimoto *et al.*, "Vacuum Control System of the Synchrotron Light Source PF-AR and Progress of the Accelerator Commissioning.", *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 46, 441-444(2003). doi.10.3131/jvsj.46.441
- [3] Y. Tanimoto, OHO2015, http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2015/12_Tanimoto_Yasunori_2.pdf
- [4] gafchromic hd-v2 films, https://www.ashland.com/file_source/Ashland/Documents/PHA21-008_

Gafchromic%20HD-V2%20Protocol.pdf

[5] M. Tanaka *et al.*, "Investigation of Radiation Effects Assessment of KEK Accelerator using Gafchromic Film.", 21st An-

nual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Aug. 2024, FRP066.