

ビーム位置モニター用信号取出し端子の破壊現象 BREAKDOWN PHENOMENON OF SIGNAL EXTRACTION PICKUPS FOR BEAM-POSITION MONITORS

諏訪田剛*, 柿原和久, 宮原房史

Tsuyoshi Suwada*, Kazuhisa Kakihara, Fusashi Miyahara
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

A vacuum leakage was caused due to a pickup breakdown in four pickups of a BPM installed at SY3 in 31/July/2023 during the summer shutdown at the SKEKB injector linac. After investigation of the causes, it was found that the vacuum leakage was due to the mechanical breakdown of ceramic insulator of the pickup. During the summer shutdown, after the damaged pickup was extracted from the BPM and the extracted hole was welded with a SUS plate, the BPM with three pickups was reinstalled back into the original beam line. During this winter shutdown, the damaged BPM was extracted from the beam line, and a new BPM was installed into it. To investigate the reason why one of the pickups was damaged, a mechanical load test was carried out for five pickups, other three pickups extracted from the BPM along with two new pickups for reference. In this report, the load test results are described along with the detailed circumstances up to the breakdown of the BPM pickup.

1. はじめに

KEK 電子・陽電子入射器 (以下入射器) の 2023 年夏期保守期間中の July.31 夕刻、入射器第 3 スイッチヤード (SY3) に設置された陽電子エネルギー圧縮システム (ECS) 中央部のビーム位置モニター (BPM) の信号取出し端子から真空リークが発生した。

幸い保守期間中であつたので、ビームラインから当該 BPM を取出しリーク端子を取外し、その穴に SUS 板を溶接することで真空封じを行った後、三端子 BPM として元に戻すことにした。その後、予備機を至急発注し 2024.Jan 冬期保守時に本来の四端子 BPM として復帰させた。これ以降、本 BPM は問題なく SKEKB 運転に供している。

入射器では同様な 120 台以上もの BPM を運転に使用しているが、これまで初期不良を除き BPM 端子からのリークの経験は無い。原因が端子の構造問題に関わるのであれば、大きな問題に発展する可能性があり、早急の原因究明に取り組むことにした。

端子は SMA セラミック付き真空フィードスルーである。端子内部には絶縁体としてセラミックが挿入されている。その後の調査でリークはセラミックの破壊によるものであることが判明した。破壊要因としては様々な要因が考えられるが、主要因としてセラミック劣化が想定された。このことを想定して当該 BPM のリーク端子以外の他三端子も取外し、さらに別途未使用の端子 (同一ロットのもの) を準備し、端子に対し荷重試験を実施することにした。

セラミック専門家との議論により、真空ページを通してページ毎に端子に激しい振動が加わり、その結果セラミックに耐圧劣化が生じ破壊に至った、との結論が強く示唆された。本報告は、セラミック付き SMA 端子のリークに至るまでの経緯、端子の荷重試験及び端子破壊

Table 1: Summary in the Mechanical Dimensions of SP_61_3 and Standard BPMs in the Linac

パラメータ	SP_61_3	標準 BPM	単位
全長	245	195	[mm]
電極配置	45	90	[deg.]
口径 D	93	37	[mm]
電極長	132.5	132.5	[mm]
電極幅	14.5	15	[mm]
電極厚	1.5	1.5	[mm]
電極開口角	20	60	[deg.]
フランジ型	CF NW100	KFS NW40	

現象に対する一連の調査結果をまとめたものである。

2. BPM 端子破壊に至るまでの経緯

当該 BPM の設置位置を確認するために、SY3 におけるビームラインと真空系を Fig. 1(a) に、当該 BPM の断面図を Fig. 1(b) にそれぞれ示す。

当該 BPM は典型的なストリップライン BPM で、SY3 陽電子ライン ECS 中央部に設置されている。この BPM を用いて陽電子のエネルギーフィードバック ($E_{e^+} = 4$ GeV) が行われる。SY3 はその他、直線部ダンブライン、SKEKB 電子ライン及びビーム診断ラインに分岐される。当該 BPM 付近の真空立上げは、BPM 直ぐと直線部中央、更に診断ライン上流側の計三箇所の排気口 (図中赤字) からターボ分子ポンプの補助ドライポンプ (排気速度 250 L/min) を用いて大気圧からの真空排気が始まる。

当該 BPM を入射器直線部に設置している標準 BPM と比較するために各種機械寸法を表 1 にまとめる。当該 BPM は入射器では最大口径を有し、標準 BPM (90 度型、四電極を水平垂直方向に配置) と比べ口径比は 2.5 倍である。オフエネルギー粒子が直接電極に当たらないように電極配置を 45 度 (四電極を 45 度回転させて配置) と

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

(a) 入射器SY3におけるビームラインと真空系

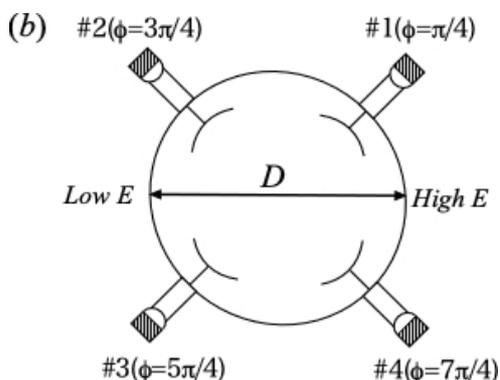
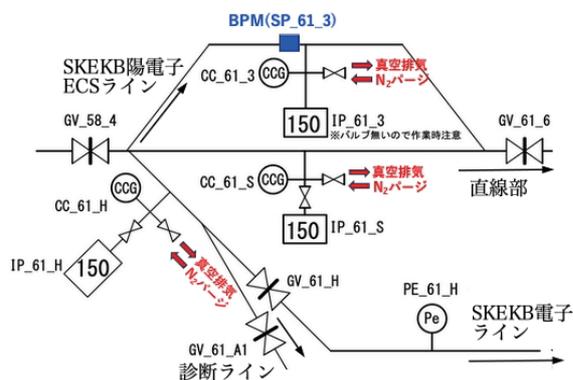


Figure 1: (a) Schematics of the beam line and vacuum system at SY3. (b) Schematic cross section of the damaged BPM (SP_61_3) installed at the ECS center.

している。電極開口角は標準 BPM に比べ異なるが、電極幅と厚さはどちらもほぼ同じである。電子の進行方向である紙面前面から裏面を見て左側が低エネルギー側 (Low E)、右側が高エネルギー側 (High E) となっている (Fig. 1(b) 参照)。今回破壊した端子は#3(Low E) である。

3. 破壊端子の処理と状況確認

Figure 2(a) に破壊端子を取り外した後、SUS 板でその穴を溶接で塞いだ BPM を示す。Figure 2(b) は当該 BPM を内側から見た写真を示す。

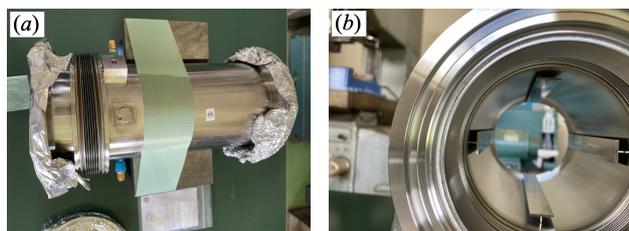


Figure 2: Photographs of (a) the BPM with one damaged and other three pickups, and (b) the inner surface of the BPM viewed from the inside. Note that one electrode port of the damaged pickup is not fixed (or free), while other ports are fixed.

端子の中心ピンは電極の一端に TIG 溶接され、端子は電極にしっかりと固定される。破壊端子が取り外された後、この電極は宙に浮いた状態 (電極他端は固定) であったが、夏期保守時にこの状態でラインに戻した。冬期保守時に入り当該 BPM を新 BPM に交換すると同時に、当該 BPM の他三端子をリユータによる切削除去を行い取り外した。他三端子に対しリークが無いことは確認済みである。しかし他三端子は、破壊に至らなくとも相応の耐圧劣化を起こしていることが推定された。このように、他三端子の劣化程度を計測することは、破壊端子の原因調査をする上で有用な情報を提供すると考えられ、当該 BPM から他三端子を丁寧に取外し端子に対し荷重試験を実施することにした。

ここで端子の内部構造と破壊状況を確認しておくことにしたい。Figure 3(a) に未使用端子を、Fig. 3(b) に端子の内部構造¹を、Fig. 3(c) に破壊端子をそれぞれ示す。端子は、一端に SMA コネクタが付いており、信

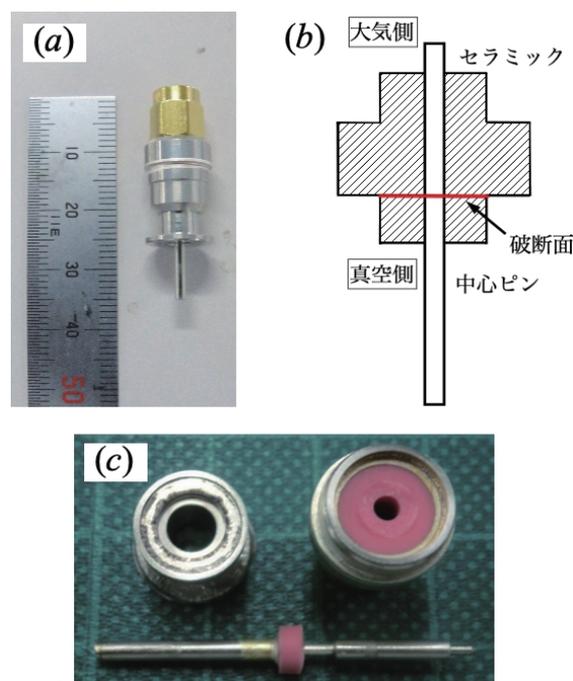


Figure 3: (a) Photograph of a BPM pickup without any damage, (b) schematic of the internal structure, and (c) photograph of the damaged pickup. It was divided into three pieces, and it can be found that the damaged ceramic was clearly fractured into two pieces.

号取出しのための中心ピン (コバルト、直径 1.8mm、全長 34mm) が真空側に突き出た真空フィードスルーである。Figure 3(b) に破断面 (赤線) を示す。今回の破壊はセラミックの下凸部 (真空側) が完全に破断することでリークに至ったことが判明した。Figure 3(c) に3つの部品に分解した端子²を示す。破断面は綺麗に破断してい

¹ 機械図面の詳細については記載することができないのでポンチ絵を記載した。セラミックには 90% 純度アルミナ (Al₂O₃) を用いている。

² セラミック破断面を見やすくするために端子ジャケットを切断している。

ることがわかる。

Figure 4 に破壊端子の光学顕微鏡 (光顕) と走査電子顕微鏡 (SEM) で取得した写真を示す。Figure 4(a)、Fig. 4(b) は破断端子の破断両面の光顕写真を示し、Fig. 4(c)、Fig. 4(d) は破断両面の SEM 写真を示す。

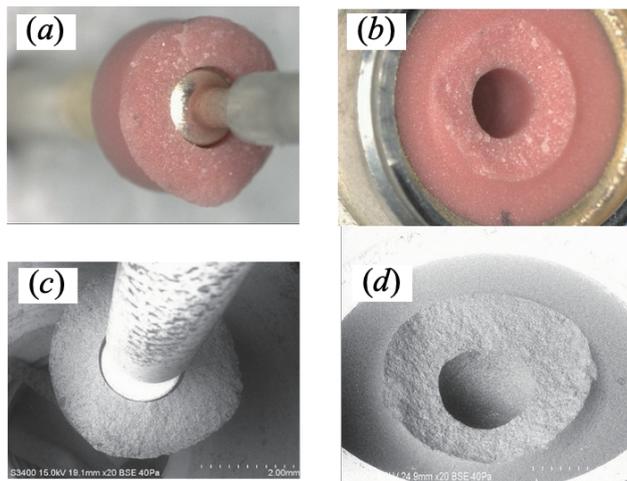


Figure 4: Photographs of both the fractured surfaces of ceramic ((a) separated small piece and (b) another one) obtained with an optical microscope, and those ((c) separated small piece and (d) another one) obtained with a SEM.

セラミックの破断は、金属とは異なり破断限界を越えると一気に破断が進行し、金属によく見られる破断の起点/終点を判別することは難しい。今回の破断も一見ただけではその判別が難しいが、例えば Fig. 4(d) を見ると破断面に向かって右側に起点らしき小さな陥没が見える。さらに左側を見ると破断面がわずかに隆起し、終点らしき小さな陥没が見える。このことは、セラミックに起点から終点に向けた方向に力が作用し、その結果剥離に至った、と考えられる。

4. 想定される三つの要因

ここでは、想定される主要因として三つ仮説を取り上げる。セラミック焼結前では素材の段階で圧力を掛けて欠陥 (ここで言う欠陥とはわずかな間隙のことを指す) を除去する工程が不十分であることが考えられる。この結果、素材の中に比較的大きな欠陥が残存した状態で焼結され、何らかの原因でこの欠陥に力が作用するとここを起点として欠陥が成長し破壊に至った、という仮説である。この仮説を“欠陥残存仮説”と呼んでおく。

焼結後に赤色浸透探傷剤を用いて欠陥を浮き出させることで目視でその有無を確認できる。この工程はカラーテストと呼ばれる。カラーテストで確認できる欠陥の大きさは精々 0.5mm 以下程度なので、これより小さな欠陥はカラーテストでは確認できない。

カラーテストでは、セラミック表面の欠陥の有無は確認できるが、内部に欠陥があるとこれを確認できない、という欠点がある。また、端子とするには中心ピンや金属ジャケットとの接合工程を経なければならないが、この工程後にカラーテストは行われない。従って、この工

程で欠陥が生じる可能性もあり、欠陥の有無はセラミック付き部品の強度に関わる重要事項の一つで慎重な取り扱いが要求される。

カラーテストは焼結後に行われるが、このテストに引っかからない程度の小さな欠陥が多数内部に残存し、何らかの原因でこの欠陥に力が作用することでここを起点として欠陥が成長し破壊に至る、という仮説である。残存欠陥の大きさは $\sim 10 \mu\text{m}$ とも言われている。この仮説を“微小欠陥仮説”と呼ぶ。

陽電子運転時のビーム損失に伴う端子の放射線劣化が考えられる。特に当該 BPM は ECS 中央部でエネルギーフィードバックに利用されるので、ビーム状態によっては他の直線部にある BPM に比べビーム損失は大きいと考えられる。この仮説を“放射線劣化仮説”と呼ぶ。

上記の“欠陥仮説”においてセラミックに働く力はパージ時に働く空気の流れが唯一想定される力の源泉である。ECS ラインの真空立上げのパージ時の空気の流れが BPM 電極を振動させ、電極振動がそのまま端子に伝達されることになる。Figure 1(b) に示すように、端子は BPM 胴体に溶接で固定され、中心ピンは電極に点溶接される。従って、端子は上下でしっかりと固定されるので電極振動が中心ピンの振動となり、最終的にはセラミックの振動に変換されることになる。この振動がセラミックの耐性劣化を引き起こす要因となる。

ANSYS を用いて電極の固有振動を計算すると約 300 Hz であることがわかった。この固有振動数はセラミックにとっては高速振動である。これまでのパージ履歴を調査すると計 3 回であった。その内訳は、2021 年夏期設置後の粗排気 (大気 \rightarrow 真空)、2023 年夏期真空作業前の大気曝露 (真空 \rightarrow 大気)、GV_61_6 交換後の粗排気 (大気 \rightarrow 真空) である。リークは運転時ではなく最後の粗排気時に起こった。この時点でパージがリークに関係していることが強く疑われた。

ここで電極の振動回数総計を見積もってみる。パージ 1 回において空気の流れが生じて電極を振動させる実効時間を 5 分とすると、電極振動は $300 \times 5 \times 60 \times 3 \sim 27 \times 10^4$ 回程度生じた見積もることができる。

次に“放射線劣化仮説”を考えてみる。当該 BPM は、2021 夏期保守時に設置し設置後約 2 年を経てリークに至った。この間、陽電子運転時間は約 10 ヶ月であった。直線部にある最古参の標準 BPM はこれまで 30 年を越えて運転に供しており、放射線劣化に伴う真空リークを経験したことはない。この経験から“放射線劣化仮説”を支持するには運転時間が短かすぎると考える。

従って、想定されるシナリオとしては“欠陥仮説”が強く示唆された。“欠陥残存仮説”を想定する場合、カラーテストによりセラミック表面の欠陥は確認されているので、このシナリオでは内部に欠陥が残存していたことが疑われる。他方、“微小欠陥仮説”を想定する場合、カラーテストでは欠陥を確認できない。“欠陥残存仮説”と“微小欠陥仮説”を見分ける鍵となるのは、前者では内部にある残存欠陥が起点となるので、破断面にその痕跡が残っていれば、これを見分けることが可能であるかもしれない。この痕跡が残っていなければ、“微小欠陥仮説”が強く示唆されるが、いずれの仮説にしても見分けることは難しいことが想定される。このことが、金属とは異なりセラミックの破断原因調査を困難にする要因

の一つだと言える。

ここに至りセラミックの専門家 [1, 2] を交えて議論することにした。以下にその議論内容をまとめる。

- セラミックに振動が加わるとその耐力が低減することが知られている。しかも振動数や振動回数が大きい程低減度合いが大きい。
- 中心ピンとセラミックとの接合ではロウ付けがなされ真空が保持される。この工程をセラミックに加えると温度上昇により欠陥生成を助長する恐れがある。半導体製作において内部の絶縁体(セラミック)と電極との接合にロウ付けを行うと $\sim 10 \mu\text{m}$ 程度の欠陥が入り易い。
- 27 万回という振動回数はセラミックの耐力低減には十分な回数である。

この議論によるとたった3度のページでも電極が受けた振動は、耐力低減を引き起こすには十分な回数に達していると考えられる。入射器直線部に設置された標準BPMと当該BPM付近における素排気系の排気能力を比較してみる。当該BPMはBPM直ぐにある排気口(距離 $\sim 1 \text{ m}$) から補助ドライポンプにより直接素排気される。他方、標準BPMはクライストロンギャラリーに配置された補助ドライポンプ(排気速度 1000 L/s) で素排気される。真空配管は地下の加速ユニット(長さ 9.6 m) に併設された真空マニホールドの下流端に接続される。ここで、補助ドライポンプとマニホールド中間点までの距離は $\sim 6 \text{ m}$ である。4本の加速管の入出口に対し8本の枝管がマニホールドに接続され加速ユニットが素排気される。従って、当該BPMにおける排気能力を標準BPMと比べると12倍以上の排気速度が想定される。

この議論を受けて高速の電極振動 \rightarrow セラミック劣化 \rightarrow 破壊、というシナリオが強く示唆されたので、セラミックに対し準静的な荷重試験を実施することにした。

5. 端子の荷重試験

セラミックの耐力低減を調べるために、端子に対し荷重試験を行うことにした。Figure 5(a) に荷重試験装置を示し、Fig. 5(b) に荷重部拡大図を示す。

端子真空側のジャケットの一部を切断した後、端子胴体を2枚のSUS板で上下方向から挟み込むようにして固定した。中心ピンのほぼ真中の位置に荷重が掛かるように荷重棒先端を配置した。荷重棒の配置はSUS板に対して近接限界である。荷重棒の荷重速度を 0.1 mm/min に設定し、荷重に対する荷重棒の変位を計測した。セラミック破壊は耐力力の大小で決まると言われている。従って、準静的な圧力で応力限界をできるだけ正確に計測したいとの考えでこの速度に設定した。試験に供する端子として、BPM他三端子、未使用端子2個、合計5個に対し荷重試験を行い、その特性の違いを測定した。

Figure 6(a) に荷重試験結果を示す。図中の矢印は最大荷重で各端子が破断したことを示す。ここで、*pu*#1、*pu*#2、*pu*#4 はBPM他三端子(端子番号はFig. 1(b)参照)を示し、*pu* A、*pu* B は未使用端子(他三端子とは同一ロット)のデータを示す。

注意してもらいたいのは、縦軸は荷重棒の変位であること、すなわち中心ピンの曲がり量に相当している。こ

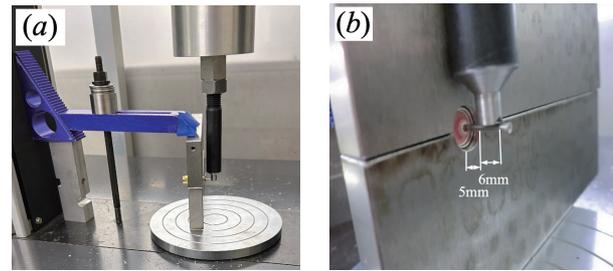


Figure 5: Setup of the load test for pickups, (a) the whole view, and (b) the enlarged view. Note that the pickup body is tightly fixed by holding it with two SUS plates faced each other in the vertical direction. After cutting off a jacket of pickup, the load is mechanically transmitted downward from the rod tip with a diameter of 6 mm to the central conductor of pickup. The attached location of the rod tip is approximately central region of the conductor.

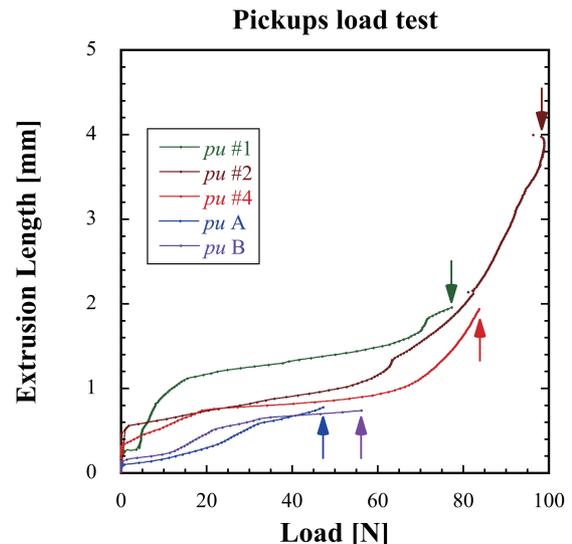


Figure 6: Variations in the extrusion length as a function of the load to pickups. The arrows indicate the fractured load points to ceramic of the pickups.

の変位はセラミックへの荷重とは直接的には関係しない。荷重の立上がりを見ると、未使用端子に比べ他三端子の変位は大きい。このことは他三端子の中心ピンが未使用端子に比べ柔軟性が高いことを示す。また、端子の破壊点を見ると、未使用端子に比べ他三端子の破壊荷重は $1.5 \sim 2$ 倍大きい。特に端子#2 は他に比べ破壊荷重が 1.25 倍大きいことがわかる。

6. 考察

以上が荷重試験結果であるが、これをどのように解釈したら良いのだろうか。まず中心ピンの曲がりの問題であるが、他三端子の曲がりは荷重に対し、最初の段階では弾性変形をしているが、その後塑性変形領域に入ってから破断している。未使用端子は弾性変形領域で破断している。

他三端子は BPM 胴体への取付け時、溶接により固定される。溶接時間は1個当たり3~4分で、この間、溶接部の最高到達温度は1000~1500°C弱に達している。従って、溶接時の高温により中心ピンが焼鈍され軟化したと考えられる。端子取外しは、リユータを用いた機械的な切削除去が行われたので温度上昇はしていない。

端子破壊にはセラミックの段付き角部 (Fig. 3 (b) 参照) に働く応力が重要なパラメータとなるが、ANSYS による計算では中心ピンの軟化具合にほとんど関係なく、荷重 50 N におけるセラミックの段付き角部に働く応力は ~60 MPa 程度であった。未使用端子ではこの荷重で破断に至っているが、他三端子の破断荷重は未使用端子に比べむしろ大きい。このことは、他三端子の耐性は未使用端子に比べ劣化というより逆に耐性が高いことを示す。この結果は、これまで想定していた他三端子の耐性劣化に反駁する結果となった。

このことを確認するために、荷重試験に供した端子の破断面を再度確認することにした。Figure 7 に試供端子の破断面を示す。Figure 7(a)((d)) は他三端子#2(未使用端子 A) の破断面を示し、Fig. 7(b)((e)) は対応する破断小片の断面を示し、Fig. 7(c)((f)) は対応する破断小片の反対側から見た断面を示す。

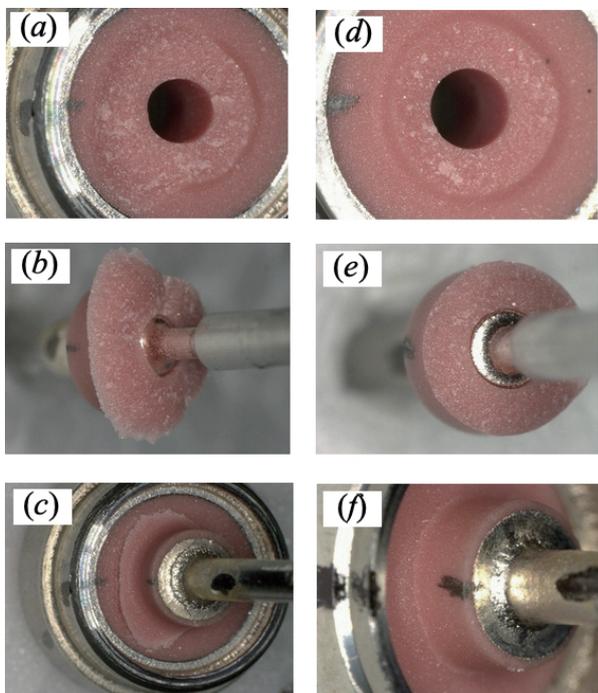


Figure 7: Photographs of both the ceramic surfaces for fractured pickups obtained in the load test, (a)((d)) p.u.#2 (p.u.A), one surface of the fractured piece, (b)((e)) another surface of it, and (c)((f)) another surface viewed from the reversed side obtained with an optical microscope.

Figure 7(c), (f) を見ると明らかなようにセラミックの破断小片の反対側の面をよく観察すると破断面に盛上がった痕が見える。これは粘着性の高い絆創膏を剥がすが如く、中心ピンの曲がりを通してセラミックに力が働き面全体がゆっくりと剥がれた痕のように見える。このような痕跡は破壊端子には見られていない。このこと

は、荷重試験で見られた破壊現象はリーク時のものとは別のメカニズムが働いた結果であることが強く示唆される。

荷重試験結果による他三端子の破壊荷重が未使用端子に比べ大きいことをどのように解釈したら良いのだろうか。これは難しい問題であるが、一つの仮説は端子溶接時に高温によりセラミックがさらに硬化したのではないかと考えられる。いずれにせよ、これまで想定していたページ時の電極振動によるセラミックの劣化を示すデータを本荷重試験で得ることはできなかった。破壊仮説は依然として残ることとなったが、運用上は当該 BPM 付近の真空立上げは、BPM 直ぐのポンプの仕様を停止し、直線部中央にある排気口からドライポンプを用いて排気を行いターボポンプを起動した後、BPM 直ぐのターボポンプ引き口バルブを開ければ今回のような端子破壊を避けることができるだろうと考えている。

7. まとめ

入射器の 2023 年夏期保守期間中の July.31 夕刻、SY3 に設置された ECS 中央部の BPM の信号取出し端子から真空リークが発生した。その後の調査で端子内部のセラミックの破壊であることが判明した。この破壊要因を調査すべく、破壊端子に対するセラミックの破断面の観察、他三端子及び未使用端子に対し荷重試験を実施した。試験に供した端子に対しセラミック断面を観察したところ、破壊端子に対する破断面とは異なる様子が観察された。このことは、準静的な荷重試験で得られた端子破壊とリーク時のそれとでは破壊メカニズムが異なることが明らかになり、リーク時の端子破壊に対する直接的な要因を見出すことができなかった。

リーク時の端子破壊現象に対し、真空ページ時の電極振動によるセラミック劣化を示す仮説が強く示唆されたが、もしこのことが主要因であれば当該 BPM 付近の真空立上げの排気手順を変更することで運用上は避けることが可能であると考えている。

謝辞

物質・材料研究機構 構造材料研究センター 垣澤英樹博士、下田一哉博士、産業技術総合研究所 材料・化学領域マルチマテリアル研究部門 古嶋亮一博士、日向秀樹博士、尾村直樹博士等には議論を通して有益な助言を頂きました。(株)MARUWA 助川圭一様には端子の荷重試験を実施して頂きました。(株)マイテック 遠藤光様には端子取外し作業を行って頂きました。本機構機械工学センター 高富俊和氏、東保男ダイヤモンドフェローには貴重な助言を頂きました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究センター 材料創製分野 セラミックス基複合材料グループとの私信。
- [2] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 材料・化学領域 マルチマテリアル研究部門 軽量金属プロセスグループとの私信。