

KEKB 入射器におけるビーム位置モニターの出力信号異常現象

諏訪田 剛¹、加速器研究施設、高エネルギー加速器研究機構
平 雅文、放射線科学センター、高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

2001 年度の冬期保守前に、運転に使用している全てのビーム位置モニター (BPM) の出力信号波形の調査を行った。調査の結果、一部の BPM について異常な信号波形を出していたことがわかった。これは、BPM 信号出力部の SMA 真空フィードスルーの中心導体がフッ素ガスにより腐食していること、また、このフッ素ガスの発生原因は、ケーブル側の SMA 端子の誘電体物質に起因することが化学分析により判明した。本報告は、BPM の出力信号異常について調査を行い、その現象の観測と分析結果をまとめたものである。

1. はじめに

KEKB 入射器[1]では、総計 90 台のストリップライン型ビーム位置モニター (BPM) [2]を設置し、蓄積リング (KEKB/PF/PF-AR) への安定な入射を行うために常時運転に使用している。BPM は、KEKB 運転に向けて新たに開発したもので、最初の実用機製作を 1994 年に行い、その後、PF 運転と KEBB への増強改造を交互に行いながら 1998 年 3 月、全台数の BPM の設置を終了した。1997 年 10 月には、部分的なビームコミッシュニングが開始し、1998 年 4 月には、8 GeV 電子ビームの加速に初めて成功している。この時間的経緯から、2001 年度冬期保守時で、BPM は、4 年程度運転 (コミッシュニングを含む) に使用していることになる。今回、冬期保守前に、全ての BPM の出力信号波形 (信号は、デジタルオシロスコープにより処理される) を確認したところ、4 台の BPM に対し、それぞれ、4 電極中 1 または 2 電極が異常信号を出していることが確認された。4 台の BPM は、陽電子標的下流すぐ (SP-23-24, SP-23-43)、2 セクター終端 (SP-28-4)、3 セクター入口 (SP-32-4) であり、いずれもビームロスを伴いやすく放射線レベルの高い所にある BPM であった。BPM の出力信号波形異常とは、ストリップライン型特有のバイポーラ波形とは異なり、あたかも信号ケーブルの接続不良、或いは、何らかの反射波形を伴っていると思われる信号波形のことをいう。図 1 に観測した BPM 出力信号の異常波形を示す。各 BPM からの出力信号は、水平 (X) 方向に 2 信号、垂直 (Y) 方向に 2 信号が出力する。信号処理は、平均 10 台分の BPM から出力した信号を RF コン

バイナーにより合成し、X/Y 方向の信号をそれぞれ 1 本の同軸ケーブルに重畳し、オシロスコープに接続し、各パルス波高をデジタル化した後、計算機によりビーム位置が算出される。図 1 は、180 度アーク部に設置している 2 台の BPM 信号波形を示したもので、信号トレース上段は X 方向を、下段は Y 方向の信号列を示し、上下段の 4 つの信号の組みが、1 台の BPM が検出した信号である。この図では、右側の信号列は、下流に位置する BPM の Y 方向の 2 信号が異常波形を示していることがわかる。

冬期保守時に陽電子標的直後のビームラインに対し、陽電子ビーム輸送の透過率を大きくするために、口径の大きいビームダクト及び BPM へと置き換える作業を行った。この作業後、高放射線レベル下で使用した BPM を初めてビームラインから取り出すことができたので、この際、異常波形の原因を突き止めるべく調査を行うことにした (なお、この BPM に関しては、異常波形は見られていない)。

2. BPM 出力信号異常の観測

2.1 BPM 信号出力端子

図 2 にビームラインに設置している典型的な BPM を示す。BPM の信号出力端子は、市販 (日立原町製) の SMA 真空フィードスルー (50W) をチェンバーに溶接されており、電流導入端子は、ストリップライン電極に直接ティグ溶接により固定される。また、真空は、SMA 端子内部でセラミックにより封じられている。電流導入端子の材質は、ニッケル、コバルト及び鉄の合金でニッケルメッキがなされている。この端子は、機械的強度が勝るとのことでオスを使用した。この結果、BPM 端子側は、ピンが突き出ている、信号取出用同軸ケーブルとは、SMA 端子 (メス) と接続することにより電氣的導通を確保している。

2.2 観測の経過

この問題は、実は 2000 年度に 180 度アーク部の特定の BPM (2 台) に対し、この現象を見つけていた。BPM 側の SMA 端子の中心導体を目視すると明らかに粉末状の物質が付着していて、信号ケーブル側の SMA 端子には損傷が無いように見えた。この付着物をマイクロドライバーで掻きだ

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

し、圧搾空気で吹き飛ばしたら信号が正常に戻ったので、高放射線下での酸化による腐食物が形成されたのだろうと考えていた。しかしながら、当初は、ビームラインから BPM をむやみに取り外すことは困難であること、SMA 端子の中心導体を丹念に掃除したら、この現象が無くなったこと等によりその原因追及をこれ以上行わなかった。何れにしても、信号波形異常が生じる BPM の設置場所は、ビームロスの伴いやすい放射線環境の厳しいところであることがわかっていた。

3. BPM出力信号異常の分析

3.1 腐食物の化学分析

今回、信号波形異常は起こしていないが、長期に亘って高放射線下にさらされた BPM を取出すことが出来たので、BPM 端子の付着物を化学分析することにした。SMA 端子の中心導体に付着している粉末状の物質を試料としてスパチュラにより丹念に掻き取り試料にした。その後、端子内部を純水約 1.5ml で洗い流して、これも溶液試料として採取した。図3に掻き取った粉末状の試料を示す。試料は、掻き取ると粉末状の小さな破片となったが、これを顕微鏡で観測したのが、図4である。図4(a)結晶状の物と(b)黒く見える塊状の物が確認された。大きさは、どちらも約 200 μ m 前後であった。この試料を KBr 錠剤上にプレスして固定し、蛍光 X線分析法により元素分析を行った。原子番号 5 以上で、ベースプレートに含まれる K、Br を省いたコネクタ材の構成元素である重元素 Fe、Ni、Co の他に、軽元素 Ca、S、F、Cl、Si、O が検出された。特に、重元素は、明らかな X線のピークをもち SMA 中心導体によるものであることがわかる(図5)。一方、軽元素の方は、フッ素及び酸素が検出されたことから、酸化或いはフッ化の可能性が疑われた。ただし、酸素による X線強度は、バックグラウンドとの差が優位ではなく、フッ素の方が優位であった。次に、溶液試料を 0.22 μ m フィルタでろ過した後、イオンクロマトグラフ法により、溶液中に含まれる陽・陰イオンの分析を行った。その結果、陽イオンとしては、Na⁺、K⁺、Mg²⁺ の他、不明な 2 成分が観測された。この後者の 2 成分は、さらに、ICP (誘導結合プラズマ) 発光分光分析により、鉄及びコバルトによるフッ化物錯イオンであることが示唆された。一方、陰イオンの方は、F⁻、Cl⁻、NO³⁻、SO⁴²⁻ が確認された(図6)。この中で、F⁻ は明らかに強いピークをもち他の陰イオンの 50 倍もの濃度を示した。ここに至り、フッ素ガスによる腐食が原因であることが強く推論された。

3.2 ケーブル端子の化学分析

溶液試料から多量のフッ素イオンが検出されたことから、フッ素樹脂に放射線が照射されフッ素ガスが発生した可能性が考えられた。ケーブル側

の SMA 端子は樹脂を使用しているため、この樹脂の定性化学分析を行った。端子内部の誘電体を薄くスライスし、1 回反射 ATR (Attenuated Total Reflection) 法により、赤外線吸収スペクトルを測定したところ、1200~1100 cm^{-1} の波長領域で強い吸収が見られた。これは、C-F の伸縮振動に由来する特徴的な吸収と考えられ参考試料として同時測定したポリテトラフルオロチレン (PTFE、通称テフロン) とよく一致していることを確認した。また、この試料を蛍光 X線分析によりその元素特定を行ったところ、明らかにフッ素が存在することも確認した。これらの一連の化学分析により、ケーブル側の SMA 端子の誘電体物質は、PTFE であることを特定した。

4. まとめ

入射器で運転に使用しているビーム位置モニターの出力信号波形が異常になるという現象を 2000 年に初めて観測した(それ以前は余り注意して見ていなかった)。この現象は、BPM 側の SMA 端子の中心導体は何らかの原因で腐食した結果、同軸ケーブル側の SMA 端子との間で導通不良を起こし出力信号が異常になっていたことがわかった。2001 年度の冬期シャットダウン時にその原因特定を行うべく腐食物質の化学分析を行った結果、ケーブル側端子内部の誘電体にテフロン樹脂が使われていたことが判明した。これは、ビームロスに伴う高放射線の照射により誘電体からフッ素ガスが放出し、BPM 側の SMA 端子の中心導体を腐食させたものと考えられる。対策としては、今後、同軸ケーブルの SMA 端子誘電体をポリエチレンやセラミック等の材質に置き換える予定である。

今回の問題は、そもそも同軸ケーブルの SMA 端子の選定に関し、余り注意を払わずにその材質を確認しなかったことにある。異常波形を観測した当初は、放射線によりオゾンが発生しこれが原因となり酸化物が生成したのだろうと一方的に思い込んで(所内でこの問題を議論したことがある)、まさかフッ素ガスによるものとは考えていなかった。今回の件を良い教訓として生かしたいと考えている。

参考文献

- [1] I.Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, 1996.
- [2] T. Suwada, et al., "Stripline-type beam-position-monitor system for single-bunch electron/positron beams", Nucl. Instrum. & Methods. A 440 No.2 (2000) pp.307-319.



図1：オシロスコープにより観測したBPM出力信号波形の異常。右下の2波形が異常となっている。

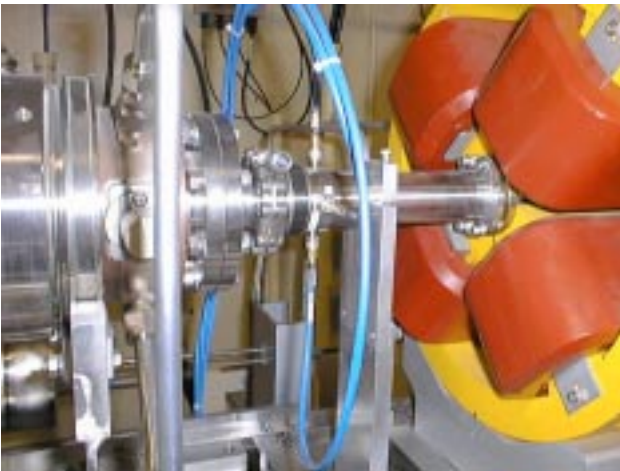


図2：4電極ストリップライン型BPM。3.5m長の同軸ケーブルが、SMA端子を介して接続される。

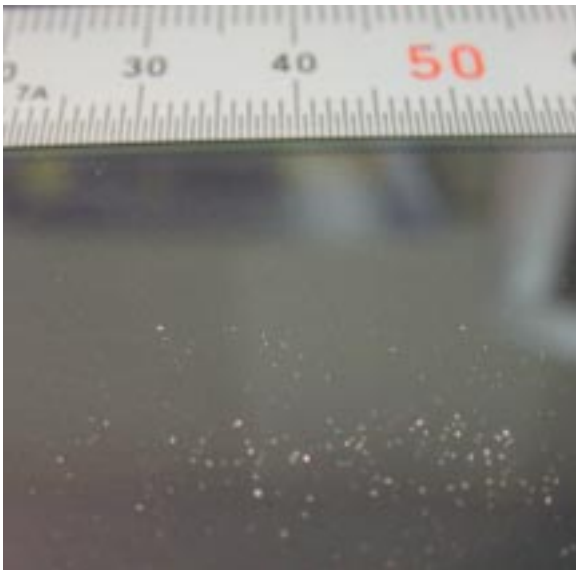


図3：SMAピンから掻き取った試料（ガラス上）。

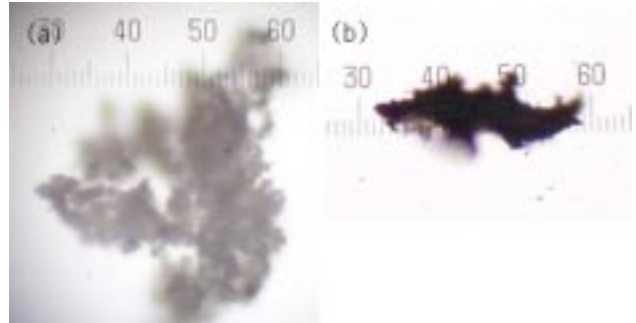


図4：試料の顕微鏡写真（視野内スケールの最小目盛りは約5mm）(a) 結晶状の物質と(b) 塊状の物質。

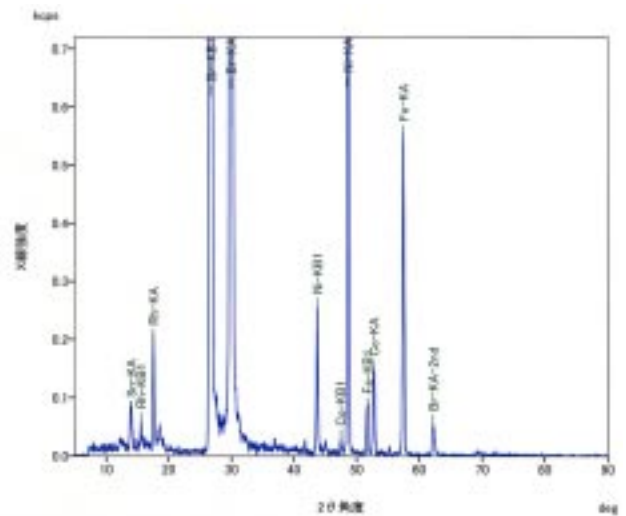


図5：蛍光X線分析法による粉末試料中の重元素分析結果。

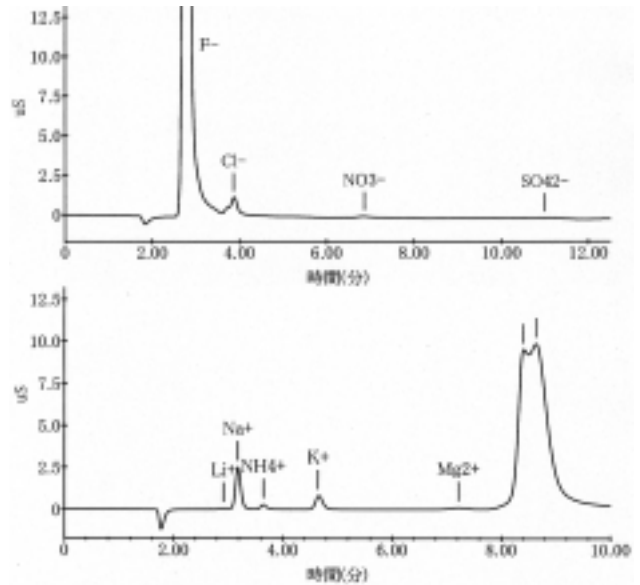


図6：イオンクロマトグラフ法による溶液試料中の陰イオン（上図）・陽イオン（下図）分析結果。