

Dielectric Breakdown and Measures of the Connectors for Kicker Magnet in J-PARC 3-GeV Synchrotron

Kazuaki Suganuma¹, Masao Watanabe, Osamu Takeda, Michikazu Kinsho
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirane, Shirakata, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

This is a report on the dielectric breakdown at connectors for high-voltage coaxial cables and countermeasures. In March 2010, dielectric breakdown occurred in the polyethylene insulation layer at connector. There were scratches on the surfaces of the polyethylene insulation layers of all cables. These scratches are considered due to electric discharge by air. A connector that can inhibit electric discharge was discussed. As a result, the concentration of electric fields can be prevented by covering the edges of a semiconductive layer with high-dielectric materials.

J-PARC 3 GeVシンクロトロンにおける キッカー電磁石用ケーブルコネクタの絶縁破壊と対策

1. はじめに

J-PARC^[1] 3GeVシンクロトロンにおけるキッカーシステム^[2]は、充電電圧60kV、電磁石印加電圧30kV、パルス幅1.2マイクロ秒、繰返し25Hzのパルス電磁石システムである。3GeVに加速した陽子を50GeV加速器および物質・生命科学実験施設に蹴り出している。2010年3月期の運転において、キッカー電磁石用高電圧同軸ケーブルの端末部であるコネクタでポリエチレン絶縁層が絶縁破壊した。キッカー電磁石に接続している32本すべてのコネクタを目視点検したところ、ポリエチレン絶縁層の表面に傷が多く確認された。傷は空気層での放電によるものと思われる。進行して絶縁破壊に至ると思われる。運転を継続する必要から、応急処置として32本すべてのケーブルコネクタ部分を切断し再施工した。つぎに原因調査のため、汎用ソフトを使いコネクタ部の静電場計算をおこなった。計算出力から、半導電層の端部およびポリエチレン絶縁層が近接する空気層で10kV/mm以上の電界強度が出力された。出力値から空気層でコロナ放電が発生していると思われる。放電を抑制するコネクタ形状を検討した。結果、半導電層端部を高誘電率材で覆うことで電界の集中を抑えた。また、半導電層端部の位置を先端側へ移動させることで、内導体と外導体間での電界強度を緩和させた。これらの改良により放電を抑制したので報告する。

2. 絶縁破壊したコネクタの状況

図1に使用前のコネクタおよび絶縁破壊したコネクタの両写真を示す。使用前のコネクタに比べ、絶縁破壊したコネクタは、ポリエチレンが変色し、半導電層の端部を中心にポリエチレン絶縁層が大きく欠損したような状態になっていた。深さ方向は、ポ

リエチレンがえぐり取られたようになり中心導体が見えていた。また絶縁破壊したポリエチレン表面は黒く炭化していた。外導体および中心導体先端それぞれの表面では銅が腐食し緑青を確認した。つぎに、全32本の点検で記録したコネクタ部の写真を図2に示す。半導電層の端面は、劣化のためボロボロと崩れるものがあつた。また端部に小さな無数の傷を確認した。ポリエチレン表面にも無数の傷を確認した。これらは放電によるものと思われる。

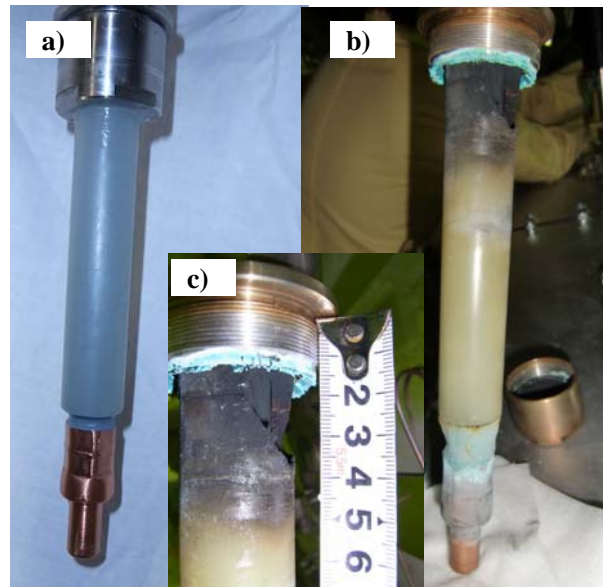


図1：使用前のコネクタおよび絶縁破壊したコネクタの両写真。

a) 使用前のコネクタ, b) 絶縁破壊したコネクタ, c) 絶縁破壊部分の拡大写真。

¹ E-mail: suganuma.kazuaki@jaea.go.jp

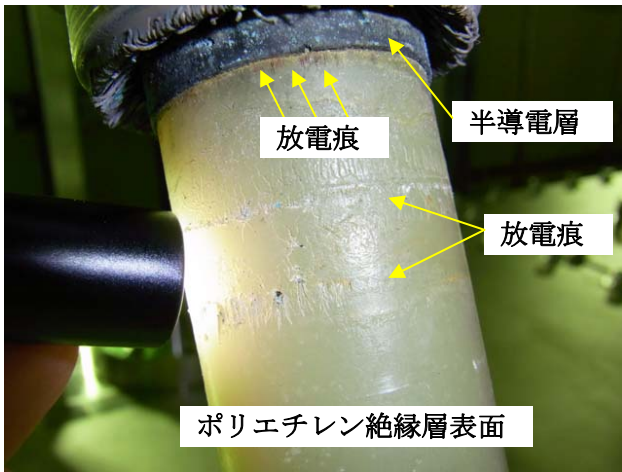


図2：全32本の点検記録からコネクタ部写真。

3. 静電場計算

絶縁破壊の原因を調べるため、汎用ソフトを使い静電場計算をおこなった。図3にコネクタ全体および絶縁破壊した部分を中心とした拡大図を示す。静電場計算に使用したモデルは、図3に示した拡大部分をモデル化し計算している。具体的には、CAD図をDXF形式のファイルで保存し、汎用ソフトに取り込み細かな形状を作図する作業をおこなった後、境界条件を入力し計算をおこなっている。図4に計算出力として電界強度のコンター図を示す。電界強度が最大となるのは、ポリエチレン絶縁層表面と半導電層端面が近接する空気層であり、その値はおよそ13kV/mmであった。その他にも、コネクタ部品（接地電位）とポリエチレン表面が近い距離にあることと、その間が空気層であるため、6 kV/mm程度の電界強度があった。空気層が存在することで、いたるところで放電が起きていると考えられる。

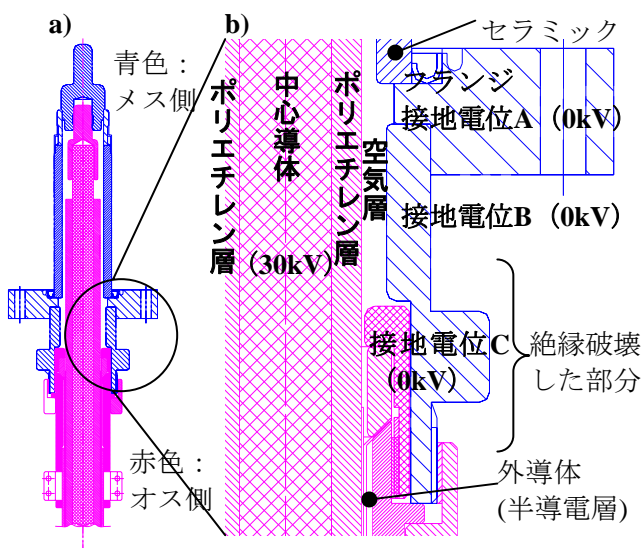


図3：コネクタ全体および絶縁破壊した部分を中心とした拡大図。a)コネクタ全体、b)拡大図。

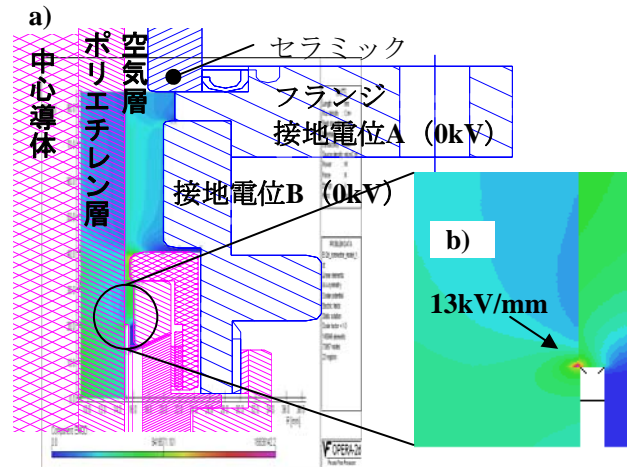


図4：電界強度のコンター図。

a)計算出力全体、b)半導電層端部拡大図。

4. コネクタ改良および放電測定

コネクタを改良するにあたって、まず、絶縁破壊したコネクタ形状の放電測定を実施した。放電を数値化することで、後におこなう改良コネクタとの比較をするを目的とした。図5に放電測定の回路を示す。本放電測定は、JEC-0401（部分放電測定）に準拠している。放電の値は放電電荷量（pC）で表した。放電測定によって得られた値を、図6の各コネクタにおける印加電圧と放電電荷量の関係に示す。まず、絶縁破壊が起こったコネクタ形状での放電測定であるが、印加電圧が、およそ7kVから放電が開始し、1000pC近い放電電荷量が計測された。参考までに、印加電圧を上げ、2000～3000pCを超えると放電音が聞こえた。つぎに、今年3月期以降にケーブル先端を切断して再施工したコネクタ形状での放電測定では、放電開始電圧は、およそ10kVであった。放電が開始する電圧は、絶縁破壊したコネクタよりも上昇している。これは、施工時に空気層の部分にシリコングリスを塗布したことにより空気層で起こっていた放電が、グリス層を塗布したことにより放電開始電圧が上昇したものと考えられる。しかしながら、どちらの放電測定でも運転時の電圧よりも低い電圧で放電は起きており、ポリエチレン絶縁層の劣化が進行し、再び絶縁破壊が起こることが懸念された。話を変えて、運転停止中におこなったコネクタの目視点検について述べる。3月期以降の運転停止期間には、停止期間毎に、コネクタの目視点検をおこなった。運転から1ヶ月経過したコネクタには変化が見られなかったが、運転から2ヶ月経過したコネクタは塗布したグリスが、表面が白から黄色に変色し、少し乾燥したような感じが見受けられた。このグリスの乾燥と放電測定の値から、今年3月期以降にケーブル先端を切断して再施工したコネクタの状態では、絶縁破壊までの延命にはなるものの長期の運転は問題が残った。そこで、放電が起らないコネクタの検討をおこなった。改良にあたっては、ストレスリリーフコーンの採用を検討した。しかし、

ストレスリリーフコーンを採用するには、電界集中を緩和する必要からコネクタの受け側の径を広げるなど、全体の構造変更をしなければならず今夏季休止期間中に実施することは不可能であった。現状の構造で放電を抑えるには、半導電層の切断位置と処理方法、コネクタ受け側の接地電位である内径の狭さが問題となった。そこで、受け側コネクタのセラミックまで半導電層を延長し、端面を高誘電率材で覆った。放電測定で得た値を図6に示す。印加電圧35kVにて、およそ1pCであり、運転電圧30kVに対して十分放電が抑えられている。図7に改良型コネクタの静電場計算を示す。

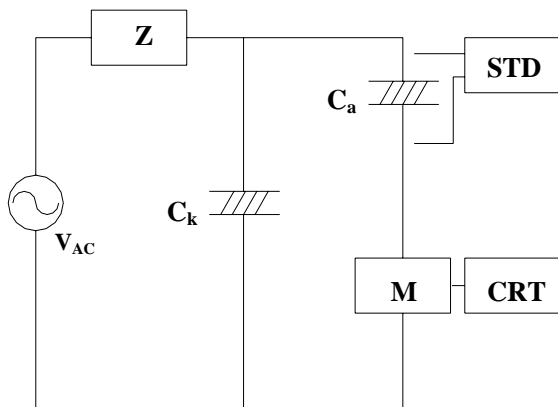


図5：放電測定回路。

V_{ac}：試験電源，Z：インピーダンス，C_k：結合コンデンサ，C_a：供試体，STD：放電校正器，M：測定器，CRT：オシロスコープ。

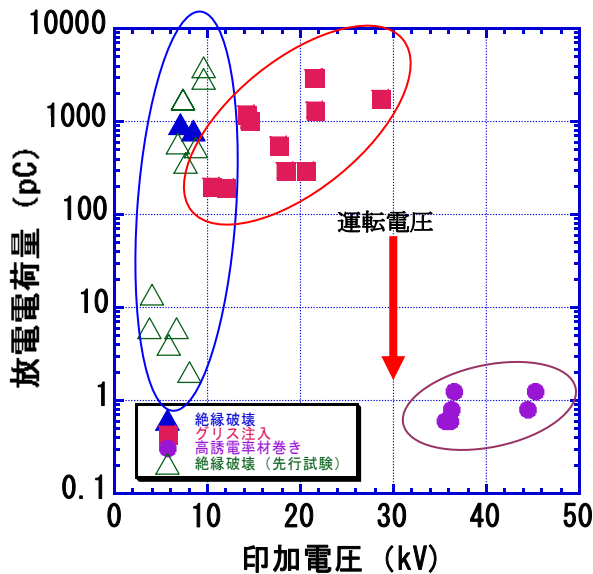


図6：各コネクタにおける印加電圧と放電電荷量の関係。

(▲, △)：絶縁破壊したコネクタ，(■)：グリス注入，(●)：高誘電率材巻き。

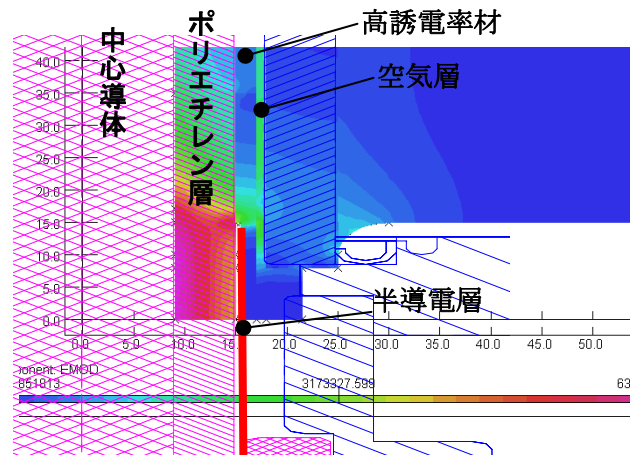


図7：改良型コネクタの静電場計算の計算出力。

5. まとめ

キッカー電磁石用高電圧同軸ケーブルのコネクタ部でポリエチレン絶縁層が絶縁破壊した。運転を継続する必要から、応急処置として32本すべてのケーブルのコネクタ部分を切断し再施工した。原因を調べるため、汎用ソフトを使いコネクタの静電場計算をおこなった。半導電層の端部およびポリエチレン絶縁層が近接する空気層で10kV/mm以上の電界強度が出力された。出力値からコロナ放電が発生していると思われる。放電を抑制するコネクタ形状を検討した。結果、半導電層端部を高誘電率材で覆うことで電界の集中を抑えた。また、内導体と外導体の距離が広がる位置と半導電層端部の位置を同位置にすることで内導体と外導体間での電界強度を緩和させた。これらの改良により放電を抑制した。今夏季の停止期間に放電を抑えた改良型コネクタに施工する予定である。

謝辞

コネクタの改良にあたって、株式会社フジクラ、吉富慶司氏、坂本中氏に多大なご協力を頂きました。御礼申し上げます。絶縁破壊後のケーブルコネクタの復旧作業では、突貫工事にもかかわらず、富樫智人氏、植野智晶氏、佐伯理生二氏、飛田教光氏にご協力いただきました。御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 山崎良成. “Accelerator technical design report for J-PARC”, KEK-report 2002-13(2002).
- [2] M.Watanabe, et al., “Operation of kicker system using thyatron of the 3GeV rapid cycling synchrotron of J-PARC”, Proceedings of the IPAC2010.