

電気ペネトレーションの電線接続部の耐久性に関する
ATENAへの質問への回答について

2023年 7月 6日

北海道電力(株) 東北電力(株) 東京電力HD(株) 中部電力(株) 北陸電力(株) 関西電力(株)
中国電力(株) 四国電力(株) 九州電力(株) 日本原子力発電(株) 電源開発(株)
原子力エネルギー協議会

御質問1

<御質問>

○電気ペネトレーションの電線接続部の不具合事例を教えてください。

現時点では以下の2件について把握しています。

- ・NUCIA通番9030 報告書番号2007-東京-S025「東京電力株式会社 東京電力株式会社 福島第一発電所3号 誤警報の発生について」
- ・NUCIA通番2725 報告書番号2004-東京-M054「東京電力株式会社 東京電力株式会社 福島第一発電所3号 起動領域中性子束モニタの指示変動について」

<回答>

○御質問背景にある令和5年1月30日に発生した高浜発電所4号機のケーブル接続部導通不良事象は、電気ペネトレーション内部のはんだ付け部が剥離したことが原因により発生したのですが、同様の不具合事象は他プラントにおいて確認出来ませんでした。なお、例示2件の不具合事象についても、福島第一発電所3号の電気ペネトレーションの電線接続部は圧着施工であり、はんだ付け部の不具合により発生した事象ではないことを確認しています。

御質問2

<御質問>

- 電気ペネトレーションの電線接続部の長期的な耐久性に関する技術情報を教えてください。
例えば、加速劣化試験結果等。

<回答>

- はんだ材料は無機物で基本的には劣化するものではなく、導通不良となる故障モードとしては、はく離が考えられます。要因として、はんだの経年劣化・施工不良・荷重影響があげられます。

・経年劣化

はんだ材料は鉛と錫の合金で構成された無機物であり劣化の進展はほとんどありません。

経年劣化の評価としては、はんだ部に熱ストレスや応力がかかり損傷に至る熱機械的特性と水分等による化学変化で腐食等によって損傷に至る電気化学的特性が考えられますが、電気ペネトレーションのはんだ部の使用状況は、はんだ部の熱疲労が発生する温度ではないこと、一定応力が継続的にかかる状態にはないこと、湿潤環境にないこと等から、はんだの経年劣化による破壊に至る懸念は無いと評価されます。（スライド3～5参照）

・施工不良

はんだ部の施工は、メーカーの社内認定を保有する技術者が、材料・工具をメーカー基準により適切に選定し、施工と確認を実施することで、適切な施工管理がなされています。（スライド6参照）

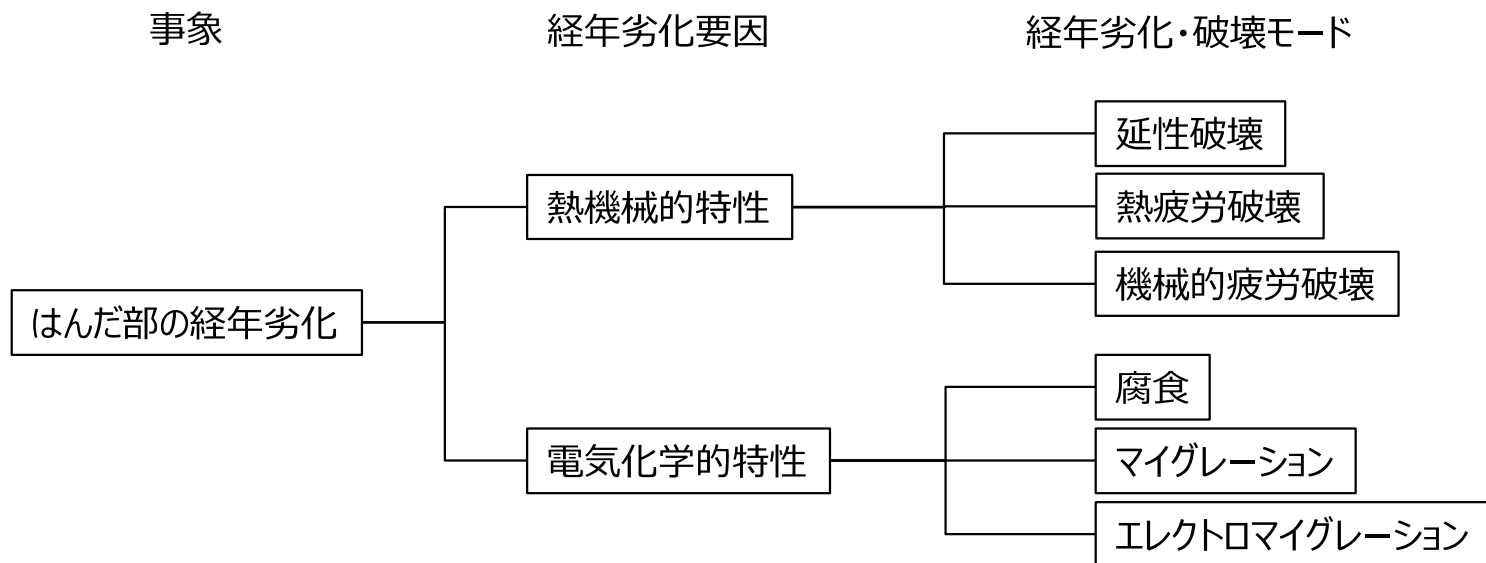
・荷重影響

高浜4号機 原子炉自動停止事象の際の電気ペネトレーション部のはんだ接続部の検証結果より、約1,000N以上の荷重がかからないと、はんだのはく離は発生しないことから、外部荷重がない状態での通常のケーブル自重（約100N以下）レベルの荷重ではく離が生じることはありません。

- 上記の評価より、はんだ接続部に過大な荷重がかかっていない場合は、はんだのはく離は発生しませんが、はんだの健全性については、定期的な点検（導通抵抗測定、絶縁抵抗測定、機器動作・指示値確認）によって確認できます。（スライド7参照）

御質問2 補足 はんだ接合部の経年劣化要因と影響評価(1/3)

- はんだ接合部の経年劣化としては一般的に熱機械的特性と電気化学的特性に分類される。次頁以降に熱機械的特性と電気化学的特性の経年変化・破壊モードに対して調査と評価。
- 熱機械的特性：はんだ部に熱ストレスや荷重によりはんだ部にひずみが発生し、損傷に至る。
- 電気化学的特性：水・イオン・電子によって化学変化が発生し、損傷に至る。



御質問2 補足 はんだ接合部の経年劣化要因と影響評価(2/3)

○熱機械的特性

- 機械的特性は「延性破壊」、「熱疲労破壊」及び「機械的疲労破壊」に分類。
- 電気ペネの通常の据付・運用を考慮すると、いずれの経年劣化・破壊モードにおいても、はんだの経年劣化による熱機械的特性の変化や破壊に至る懸念は無いと評価する。

経年劣化・破壊モード	詳細	電気ペネにおける評価
延性破壊	引張やせん断応力が荷重されたことにより発生する破壊	電気ペネにはリード線の自重(10N～100N程度)以外に大きな荷重が掛かることはなく、その荷重は樹脂充填部(引張強度200N程度、本事象におけるメーカ実験値)によって支持され、接続部に引張やせん断応力が負荷されるような据付状態になっていないため、はんだの延性破壊に至る懸念は無い。また、接続部に引張やせん断応力が負荷されるような据付状態になっていない限り、クリープ変形による延性破壊も発生しない。
熱疲労破壊	通電時(ON/OFF等)に構成材料の熱膨張係数差による熱応力(ひずみ)が繰返すことで発生する破壊	熱的な疲労について一般に試験が実施されており、-55℃～125℃、1,400～2,100の熱サイクル等が評価寿命となっている。(*①、②)当該電気ペネの接続部は高く見積もっても10～20℃程度の温度上昇であり、かつ連続通電状態で温度変化がないことから、温度の熱疲労破壊が発生する温度ではないため、はんだの熱疲労破壊に至る懸念は無い。
機械的疲労破壊	輸送や装置の振動などの繰返しの機械応力により発生する破壊	輸送では過度な荷重が電気ペネ接続部にかからないように梱包している。また、CV壁に据付けられることからポンプ等機器の振動のような大きな繰返し荷重も発生しない。CVリークレートテストにおける変位については電気ペネリード線の余長と可とう性による発生応力の抑制により樹脂充填部による支持が維持されることから、はんだの機械的疲労破壊に至る懸念は無い。

*：参考文献

①はんだ接合部の劣化・寿命診断方法の開発(東芝レビューVol.56 No.12 (2001)) P62～63 3.3項

②電子部品はんだ接合部の熱疲労寿命解析(豊田中央研究所R&DLレビューVol.31 No.4(1996.12)) P52

御質問2 補足 はんだ接合部の経年劣化要因と影響評価(3/3)

○電気化学的特性

- 電気化学的特性は「腐食」、「マイグレーション」、「エレクトロマイグレーション」に分類される。
- 電気ペネの据付・運用を考慮するといずれの経年劣化・破壊モードにおいて、はんだの経年劣化による電気化学的特性の変化や破壊に至る懸念は無いと評価する。

経年劣化・破壊モード	詳細	電気ペネにおける評価
腐食	はんだが腐食し炭酸鉛や酸化鉛となることではんだの崩壊が進展	電気ペネの製作工程において、はんだ接続時フラックス※を洗浄しており、はんだの腐食を排除しているため、はんだの腐食に至る懸念は無い。 屋外や湿潤な環境においては、腐食(*③)が発生する可能性があるが、当該部は格納容器内であり、腐食環境にはない。
マイグレーション (イオンマイグレーション)	水や吸湿により化学反応で断線等が発生	マイグレーションは水・湿気によりイオンの移動により発生する。(*④)電気ペネの接続部周辺はシリコン樹脂を充填しており、水・湿分が浸入しないため、はんだのマイグレーションに至る懸念は無い。
エレクトロマイグレーション	電流を流すことで電子が移動し、移動した部位にボイドが発生し、断線。 高温・電流密度が高い場合に起こりやすい。	エレクトロマイグレーションが発生する電流密度のしきい値は一般的に100A/mm ² (*⑤、⑥)であり、当該電気ペネの電流密度はしきい値以下(8sq(mm ²)のケーブルに流れるコイル電流は最大8A、1A/mm ² =8A/8mm ²)であるため、はんだのエレクトロマイグレーションに至る懸念は無い。

※：フラックスとははんだ付け促進剤の役割をもつ物質であり、はんだと母材の金属表面の酸化被膜や表面被膜を除去し、はんだが付く状態とするものである。

参考文献

③電子装置の腐食抑制技術(材料と環境(2016) P229)

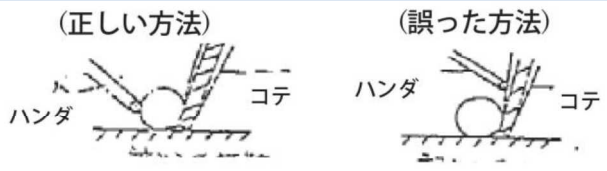
④プリント回路板の絶縁劣化要因としてのイオンマイグレーション -その発生メカニズムと抑制策-(回路実装学会誌10(2) 1995 P80)

⑤金属接合部のエレクトロマイグレーション発生メカニズムの基礎と信頼性課題(第28回エレクトロニクス実装学会春季講演大会依頼講演資料 P308)

⑥信頼性ハンドブック(Rev.2.50 ルネサスエレクトロニクス2017.01) P3-9 3.2.4項(10⁴~10⁵A/cm²→10²~10³A/mm²)

御質問2 参考資料(1/2) はんだの施工管理について

- 電気ペネトレーションのはんだ接続部の施工管理は以下のとおり。
以下の表は一般的なはんだ作業要領であるが、電気ペネトレーションのはんだ作業要領も同様となる。

手順	作業項目		作業内容	
1	準備	材料	はんだ材料は接合対象に適した材料を準備	
		工具	はんだゴテは接合対象に適した熱容量とゴテ先の形状を準備	
		作業前点検	外観チェック	本体とゴテ先のぐらつき、コードの焼けやこげ、ゴテ先の酸化・浸食有無
			清掃	ゴテ先が酸化していれば清掃 接合先の材料が汚れていればアルコールなどで清掃
温度測定	電源投入後、安定した時のゴテ先の温度が判定値以内であること			
2	作業	はんだ	コテの当て方 コテに直接はんだを当ててはならない 	
		予備はんだ	はんだのなじみを良くするために、はんだを行う部分に予備はんだを実施すること	
		コテの離し方	はんだが接合部に十分拡散するのを待ってコテを離す	
3	点検	作業後点検	外観チェック はんだに光沢がある、はんだ量に不足がない、はんだが十分なじんでいる、端子・穴の開いているものは埋まっている、表面が荒れていないなど 状態確認 はんだ接合部を引っ張り動かないこと	

➤ はんだ部や接続部、ケーブルなどの電路に対する一般的な点検方法を以下に示す。

項目	点検方法	目的
導通抵抗測定	回路計（テスター）にてケーブル両端の導体抵抗を測定する。	導体であるケーブル等の電気回路の導通状態（断線、接触不良）を確認する。
絶縁抵抗測定	絶縁抵抗計にてケーブルの導体部と対地間の抵抗を測定する。	絶縁物の絶縁性能を確認する。 絶縁抵抗が低下すると漏電が発生し、導体に流れる電流量が減少するため。
機器動作確認	機器の試運転にて動作状態・試運転データ（動作時間、動作電流、動作電圧、動作時間・運転データ）により機器の動作状態を確認する。	機器の動作状態を確認する。 抵抗の変化により、機器の動作状態および試運転データに影響を及ぼすため。
指示値確認	機器の連続運転にて指示計の指示および警報等のパラメータ変化により機器の動作状態を確認する。	機器の動作状態を確認する。 抵抗の変化により、パラメータ等が変化するため。

高浜4号自動停止の事例のように、接続部に過大な荷重がかかるような特殊事情がない限り、一般的な保全の継続により長期的な健全性を確保できる。

御質問3

<御質問>

- 電気ペネトレーションを交換することがある場合、その理由（交換の理由が電気ペネトレーションの電線接続部の健全性に関係ない場合も含む。）と交換基準を教えてください。

<回答>

- 状況毎に異なるため交換基準は一律ではありませんが、電気ペネトレーションを一式交換した実績としては以下の様な例があります。
- ・電気ペネトレーション部に不具合が生じ、交換が合理的な場合
 - ・将来に亘る通常運転時環境と事故時環境を考慮した耐環境性能に関する信頼性向上の観点から、交換が合理的な場合

御質問4

<御質問>

- 通電波形観測は、電気ペネトレーションの電線接続部の健全性を確認するために行うという理解でよいか。
よい場合、通電波形観測とはどのようなもので、なぜ健全性が分かるのか仕組みを教えてください。

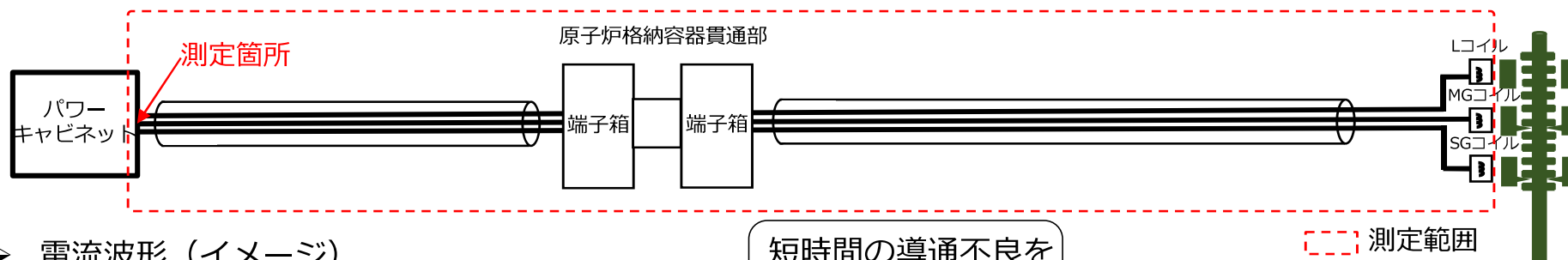
<回答>

- 接続部の健全性は、通常、導通抵抗測定や絶縁抵抗測定により確認できています。
- 他方、短時間の導通不良がランダムに発生した場合、従来の瞬時測定では確認できませんでした。
- そこで当該事象を経験した関西電力では、念の為制御棒駆動装置の制御電路の定期検査中の保全活動に対して、連続測定による波形観測を追加します。

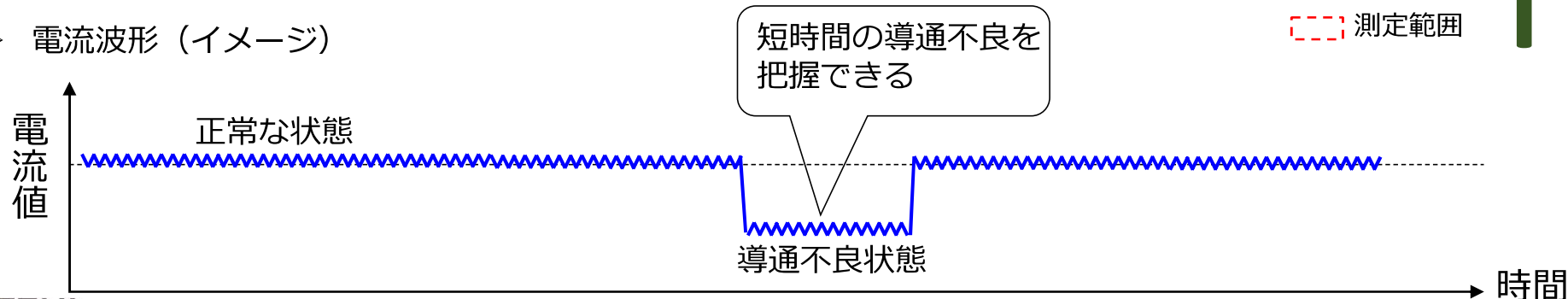
➤ 通電波形観測

- 従来の導通確認は、作業員が計量器（テスター等）にて導通状態を確認。（瞬時測定）
- 通電波形観測は、計量器（波形計測機器）を測定箇所へ接続し、連続測定により電流波形の変化を確認。（連続測定）

➤ 測定範囲



➤ 電流波形（イメージ）



參考資料

参考資料：御質問3補足 電気ペネトレーション一式取替実績

回答3における具体例は以下のとおり。なお、今回の御質問背景であるはんだ付け部が要因である取替実績は無い（福島第一1～3号の電線接続部は圧着施工であり、はんだ付け部は無い）。

○電気ペネトレーション部に不具合が生じ、交換が合理的な場合の例※

会社	プラント	時期	補足
東京	福島第一1号	第17回定検（1993年度）	不具合対応（電気特性低下） キャニスター ⇒ モジュール
		第17回定検（1993年度） 第19回定検（1996年度）	不具合対応（微小リーク） キャニスター ⇒ モジュール
	福島第一2号	第9回定検（1987年度）	不具合対応（電気特性低下） キャニスター ⇒ モジュール
	福島第一3号	第22回定検（2007年度） 第24回定検（2010年度）	不具合対応（電気特性低下）ならびに耐環境性能の向上 キャニスター ⇒ モジュール
中部	浜岡2号	第18回定検（2001年度）	不具合対応（微小リーク） モジュール（溶接タイプ） ⇒ モジュール

○将来に亘る通常運転時環境と事故時環境を考慮した耐環境性能に関する信頼性向上の観点から、交換が合理的な場合の例※

会社	プラント	時期	補足
関西	美浜3号	第26回定検（2021-2022）	キャニスター ⇒ モジュール
関西	高浜1/2号	第27回定検（実施中）	キャニスター ⇒ モジュール
原電	東海第二	第25回定検（実施中）	モジュール（溶接タイプ） ⇒ モジュール（溶接タイプ）