

原子力規制庁技術報告「重大事故環境下におけるケーブル の絶縁特性の分析」に対する電気事業者の対応状況

2020年5月22日
原子力エネルギー協議会

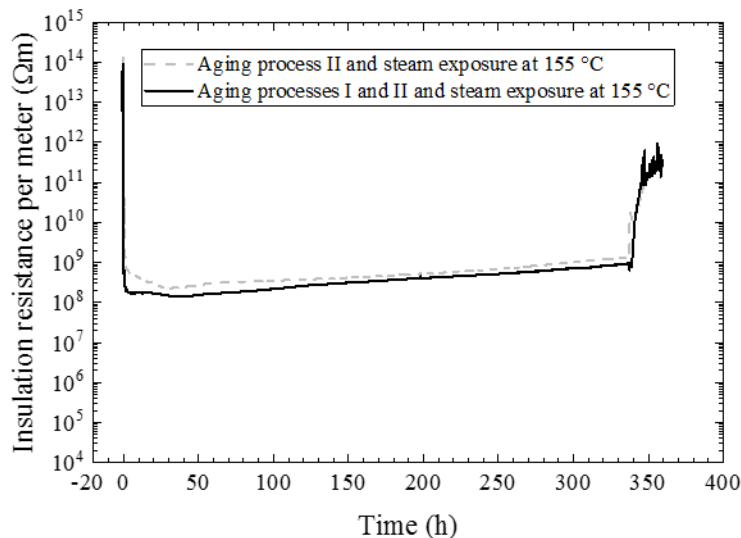
1. 今回の議論の背景
2. 知見概要
3. 電気事業者の対応について
4. NRA技術報告対象以外のケーブル接続機器に対する検討
5. 各プラントのSA対象ケーブル使用状況
6. 各プラントの影響確認結果

1. 今回の議論の背景

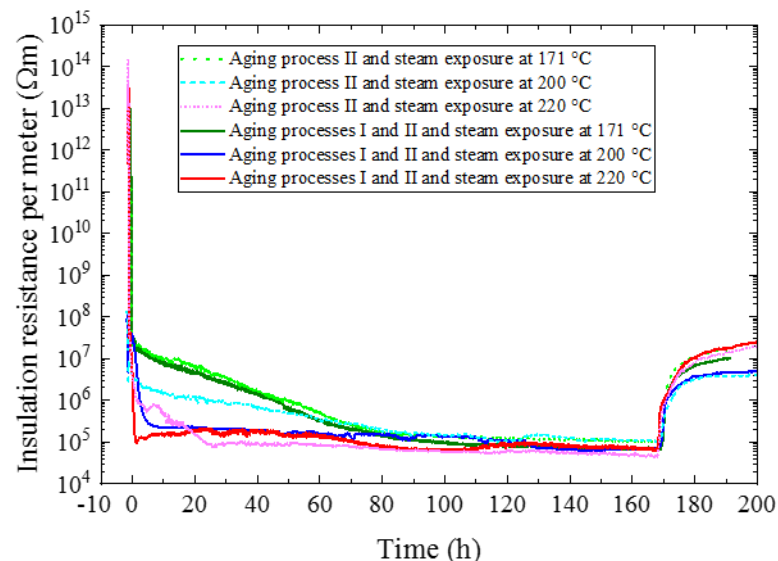
- NRA技術報告「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」（NTEC-2019-1002）（令和元年11月公表）において、重大事故環境（以下、SA環境という）を模擬した蒸気暴露試験中のケーブルの絶縁低下が計器誤差に与える影響についての報告があった。
- 本日は、本知見に対し、事業者の技術的見解をフィードバックすることを目的として、試験中に見られた絶縁低下の影響確認が必要とされている伝送器、熱電対（温度計）といったSA環境下において機能要求の有る機器に接続されるケーブルについて、PWR、BWRそれぞれで、各プラントの敷設状況・計器誤差への影響確認等の現状整理を行った結果をご報告させていただきます。

2. 知見概要

- SA環境下で機能が要求される代表ケーブルに対して、経年劣化を踏まえたSA環境下での健全性確認を実施。
- SA環境を模擬した蒸気暴露試験中の絶縁抵抗値を測定したところ、有意な絶縁低下が確認された。（蒸気暴露試験後の健全性は担保可）



国内PWRで用いられている難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの蒸気暴露中のケーブル長さ1 m当たりの絶縁抵抗値の変化



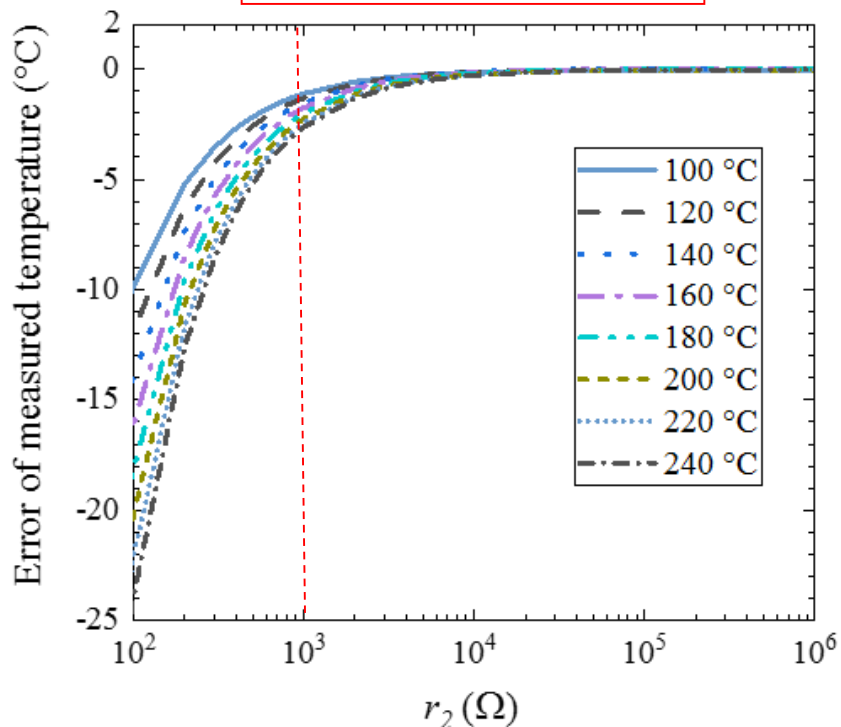
国内BWRで用いられている難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの蒸気暴露中のケーブル長さ1 m当たりの絶縁抵抗値の変化

※NRA技術報告「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」（NTEC-2019-1002）（令和元年11月公表）より引用

2. 知見概要

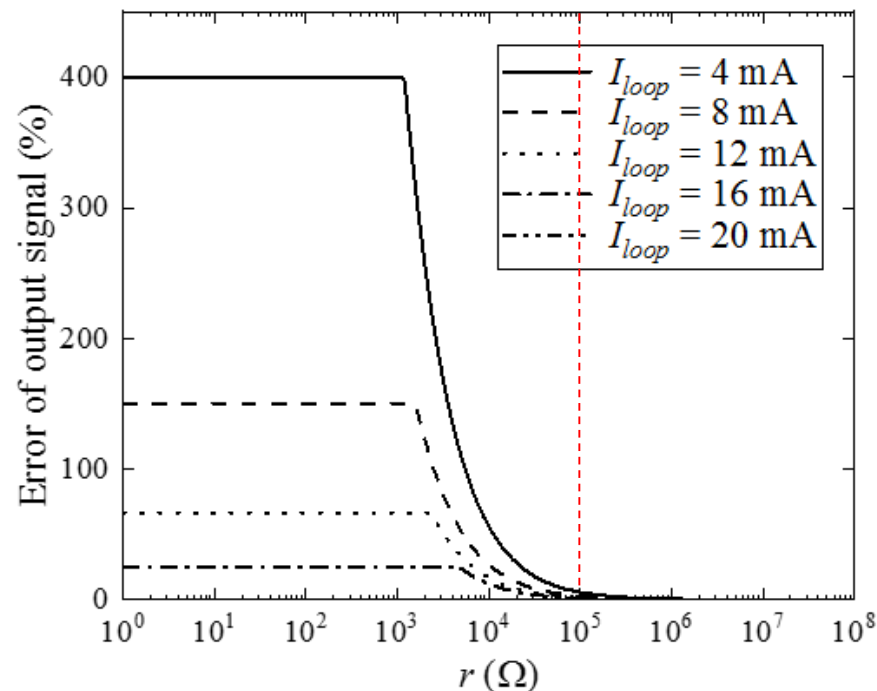
一般知見を踏まえ、蒸気暴露試験中のケーブルの絶縁低下に伴い、対象ケーブルに接続されている計器（熱電対、伝送器）に与える影響（計器誤差）について考慮が必要である。

絶縁抵抗値約 $10^3 \Omega$ から
計器誤差の懸念あり。



熱電対回路の絶縁抵抗と測定温度の誤差の関係

絶縁抵抗値約 $10^5 \Omega$ から
計器誤差の懸念あり。



伝送器回路の絶縁抵抗と出力信号の誤差の関係

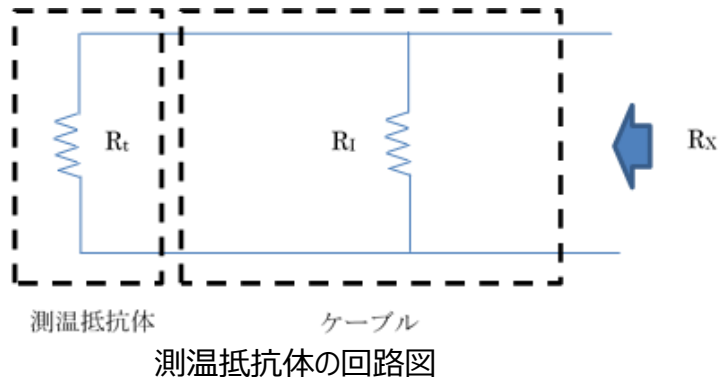
※NRA技術報告「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」(NTEC-2019-1002) (令和元年11月公表)より引用

3. 電気事業者の対応について

- ① ケーブルについては、高温、高湿になれば絶縁抵抗が低下するのは、これまでも確認されていた一般的な知見である。
- ② これまでのケーブルの事故時環境に対する健全性確認については、これまでの高経年化技術評価の際に電気学会推奨案※に基づいた健全性評価により実施してきた。
※（社）電気学会技術報告Ⅱ部第139号「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼性試験方法に関する推奨案」の略称
- ③ 電気学会推奨案に基づくケーブルの試験は、課電した状態で蒸気暴露試験を実施し、蒸気暴露試験後に耐電圧試験に合格することが判定基準となっており、蒸気暴露試験中に課電できていれば、問題ないと考えており、これまでの高経年化技術評価においてNRA殿に評価結果をご確認いただいている。
- ④ 今回のNRA殿の研究成果は、上述の知見に対して、これまでの評価に問題ないものの、蒸気曝露試験中における計器誤差への影響を定量的にお示しいただいたと認識しており、示されたデータに対して、対象機器に接続されるケーブルの使用状況等を踏まえた影響確認を次項以降にて事業者が行った結果を示す。
- ⑤ 上記のとおり現在実機に適用するケーブルについて問題ないことを確認した。プラント毎の評価については、今後、新検査制度における検査時、安全性向上評価の報告時又は高経年化技術評価の審査時等にてご確認いただくことができる。

4. NRA技術報告対象以外のケーブル接続機器に対する検討

影響確認に必要な各機器の絶縁抵抗と測定誤差の関係図の作成の流れについては、NRA技術報告書と同様の流れで実施。（測温抵抗体を例にご説明）



上記回路図から測温抵抗体の指示抵抗値は下式で求められる。

$$R_X = \frac{R_I \times R_t}{R_I + R_t}$$

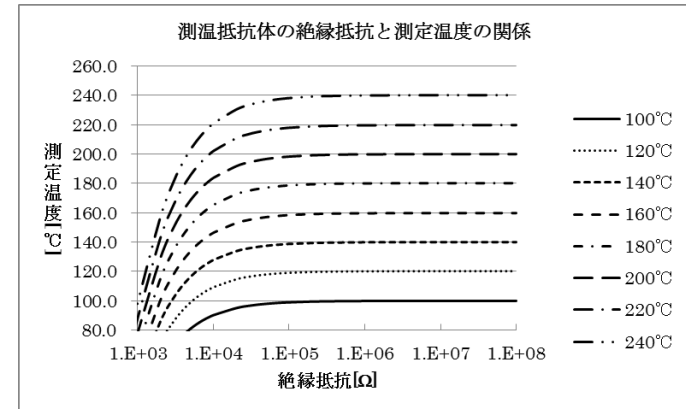
R_t : $t^{\circ}\text{C}$ における測温抵抗体の抵抗値(Ω)

R_I : ケーブルの絶縁抵抗値(Ω)

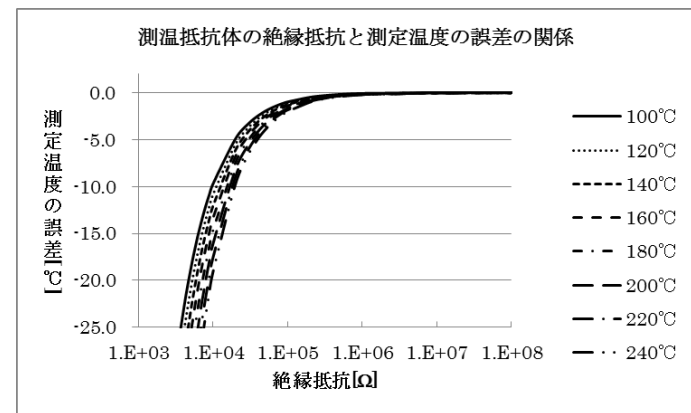
R_X : 測温抵抗体（ケーブル含む）の指示抵抗値(Ω)

ここで、測温抵抗体の抵抗値と温度の関係はメーカー規定している換算表があり、測温抵抗体の抵抗値が決まれば対応する温度が求まる。ケーブルの絶縁抵抗値と測定温度の関係図は右上図の通りとなる。

同様な手順で、その他の機器についても回路図から絶縁抵抗値と計測値の誤差の関係図を作成し、検討した。



上記グラフから、基準温度と測定温度の誤差をグラフ化したものを以下に示す。



4. NRA技術報告対象以外のケーブル接続機器に対する検討

今回のNRA技術報告を踏まえ、熱電対・伝送器以外にSA環境下において機能要求の有るケーブル接続機器を抽出し、その影響確認を行った。

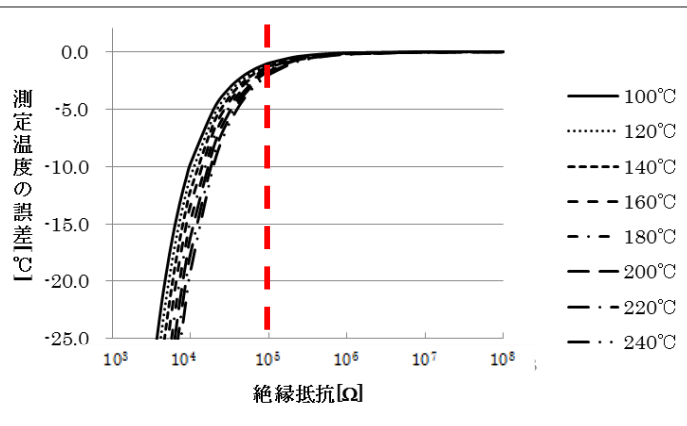
PWR：測温抵抗体(例: 1次冷却材温度)、放射線監視モニタ(例: 格納容器内高レンジエリアモニタ)、電極式水位計(例: 格納容器水位)

BWR：測温抵抗体(例: サプレッションチェンバプール水温度)、水素濃度計、電極式水位計(例: 格納容器下部水位)

ここで、測温抵抗体、放射線監視モニタ及び水素濃度計の絶縁抵抗値と計器誤差の関係は下図のとおり。

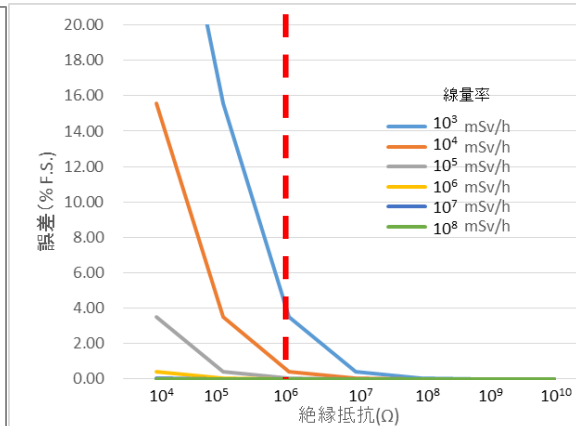
- ✓ 測温抵抗体は、下記（左）グラフより約 $10^5\Omega$ から計器誤差の懸念がある。
- ✓ 放射線監視モニタは、下記（中央）グラフより $10^6\Omega$ から計器誤差の懸念がある。
- ✓ 水素濃度計は、下記（右）グラフより $10^5\Omega$ から計器誤差の懸念がある。
- ✓ 電極式水位計は、BWRで $10^4\Omega$ オーダー(水中)～ $10^6\Omega$ オーダー(気中)、PWRで $10^4\Omega$ オーダー(水中)～ $10^5\Omega$ オーダー(気中)の検知が必要。

約 $10^5\Omega$ から計器誤差の懸念あり



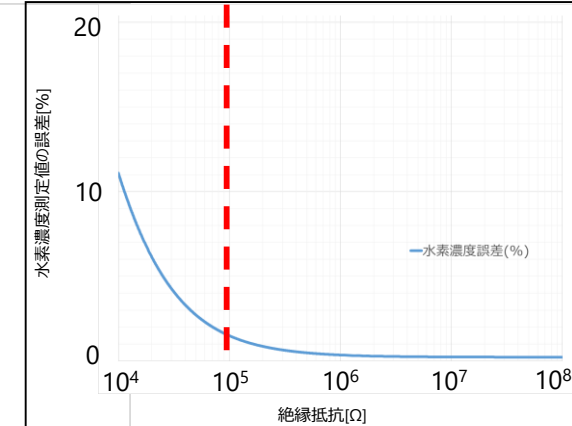
測温抵抗体回路の
絶縁抵抗と測定誤差の関係（例）

約 $10^6\Omega$ から計器誤差の懸念あり



放射線監視モニタ回路の
絶縁抵抗と測定誤差の関係（例）

約 $10^5\Omega$ から計器誤差の懸念あり



水素濃度計測回路の
絶縁抵抗と測定誤差の関係（例）

5. 各プラントのSA対象ケーブル使用状況

- ・今回のNRA技術報告を踏まえてSA環境下において機能要求があり、ケーブル絶縁低下に伴う計器誤差の懸念がある計器に係るケーブルを対象として影響確認を実施した。
- ・NRA技術報告対象のケーブルがSA環境下で使用される状況にあるかどうかを確認した。
- ・NRA技術報告対象以外のケーブルも含めた現時点で実機プラントに敷設されている対象ケーブル種別については下表のとおり。

表. SA環境下でケーブル絶縁低下に伴う計器誤差の懸念がある計器のケーブル種別整理表

| ケーブル種別 | PWR電力 | | BWR電力 | |
|------------|---------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| 難燃EPゴム絶縁 | ○ (熱電対、測温抵抗体、 伝送器、電極式水位計) | ⇒ 10 | ○ (熱電対、測温抵抗体) | ⇒ 11 |
| シリコンゴム絶縁 | ○ (測温抵抗体、伝送器) | ⇒ 10 | - | - |
| 架橋ポリエチレン絶縁 | ○ (放射線監視モニタ) | ⇒ 10 | - | - |
| MI | - | - | ○ (熱電対、測温抵抗体、 水素濃度計、電極式水位 計) | ⇒ 11 |

○ : 確認対象ケーブル有り - : 確認対象ケーブル無し

 : NRA技術報告対象ケーブル

6. 各プラントの影響確認結果（PWRプラント）

NRA技術報告対象のケーブル接続機器影響確認結果

- ✓ NRA技術報告対象のケーブルがSA環境で使用される状況にあることを確認。
- ✓ 対象ケーブルに接続されている計装機器としては、熱電対、測温抵抗体、伝送器、電極式水位計があることを確認。
- ✓ PWRプラントにおける対象ケーブルの最長は約200mであることを確認。
- ✓ NRA技術報告（PWRのSA環境試験中のケーブルの絶縁抵抗値： $10^8\Omega\text{m}$ ）を踏まえても、実際の絶縁抵抗値は $5\times 10^5\Omega$ 以上と計算される。

⇒P5の熱電対、伝送器及びP8の測温抵抗体の関係図より、実機プラントにおける計装設備のケーブル絶縁低下に伴う計器誤差への影響は非常に小さい。なお、誤差が数%程度あったとしても、SA環境におけるパラメータ監視は、傾向監視を主体としていることから、操作判断に大きな支障となる誤差ではなく問題ない。また、電極式水位計については $10^4\Omega$ オーダー（水中）～ $10^5\Omega$ オーダー（気中）を検知することとなっており、不検知、誤検知の懸念はない。

NRA技術報告対象以外のケーブル接続機器影響確認結果

難燃三重同軸（架橋ポリエチレン絶縁）ケーブル（計装ケーブル）（放射線監視モニタ用）

- ✓ SA環境を模擬した蒸気暴露試験において試験中に実測した絶縁抵抗値は $2.0\times 10^{10}\Omega\text{m}$ 以上あることを確認しており、PWRプラントの最長ケーブル長200mとしても $10^8\Omega$ オーダーとなる。

⇒P8の放射線監視モニタの関係図より、計器誤差への影響は非常に小さい。なお、実際の判断を必要とするレンジ（ 10^5mSv/h 付近）での誤差は極めて小さいことから問題となることはない。

6. 各プラントの影響確認結果（BWRプラント）

NRA技術報告対象のケーブル接続機器影響確認結果

- ✓ NRA技術報告対象のケーブルについては、熱電対、測温抵抗体があるが、P5の熱電対及び P8の測温抵抗体の関係図より、計器誤差に影響が出ることが懸念される。但し、再稼働までに環境影響の少ないMIケーブル等に交換する予定である。
 - ✓ BWRプラントにおける対象ケーブルの最長は約100mであることを確認。
 - ✓ MIケーブルについては、SA環境を模擬した蒸気暴露試験において試験中に実測した絶縁抵抗値は $3.0 \times 10^8 \Omega m$ 以上あることを確認しており、PCV内ケーブル長約100mの場合 $10^6 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を満足することから、高温環境下での影響は小さい。
- ⇒MIケーブルとすることで実機プラントにおける計装設備の測定誤差への影響は小さく、問題となることはない。

NRA技術報告対象以外のケーブル接続機器影響確認結果

MIケーブル（計装ケーブル：熱電対、測温抵抗体、水素濃度計、電極式水位計用）

- ✓ 金属被覆であり蒸気吸湿による影響がなく、内部の絶縁物（酸化マグネシウム等）を吸湿させない接続が確立している。
- ✓ SA環境を模擬した蒸気暴露試験において試験中に実測した絶縁抵抗値は $10^8 \Omega m$ 程度あることを確認しており、PCV内ケーブル長約100mの場合 $10^6 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を満足することから、高温環境下での影響は小さい。
- ✓ P5の熱電対及び P8の測温抵抗体、水素濃度計の関係図より、熱電対は $10^3 \Omega$ 、測温抵抗体は $10^5 \Omega$ 、水素濃度計は $10^5 \Omega$ 程度から計器誤差の懸念があるが、MIケーブルを使用した場合 $10^6 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を有していることから、各計器に対する計器誤差の懸念はない。
- ✓ 電極式水位計は、 $10^4 \Omega$ オーダー（水中）～ $10^6 \Omega$ オーダー（気中）を検知する必要があるが、MIケーブルを使用した場合 $10^6 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を有していることから、不検知・誤検知の懸念はない。
- ✓ 以上より、**実機プラントにおける計装設備の測定誤差への影響は小さく、問題となることはない。**

ケーブルに係る技術開発

- 産業界においては、高経年化対策に係る技術開発課題への取り組みを効率的に推進するための組織として、2007年にPLM研究推進会議及びその下にPLM研究総括検討会を設置しており、電力会社、電力中央研究所、メーカー等が主体となって活動している。PLM研究総括検討会には各経年劣化事象を個別に扱うサブグループが設置され、個別の技術開発課題に対する研究方針や具体的な研究計画の検討が行われており、その研究成果は発電所の保全活動や高経年化技術評価に反映され、原子力発電所の長期運転に対する信頼性が向上される。
- 本日NRA技術報告への対応状況をご説明するケーブルに関しても、以下の取り組みを実施しているところであり、NRA技術報告も踏まえながら、引き続き、長期運転に向けた自主的な安全性向上への取り組みを推進していく。

<ケーブルに係る技術開発テーマ>

- 電気・計装設備の重大事故時環境試験
- 状態監視技術の高度化