

第3回意見交換会の説明依頼事項への回答 (資料2-2回答③④)の補足説明 (SAケーブル知見)

2020年6月1日
原子力エネルギー協議会

【PWRの三重同軸ケーブル試験結果】

1. 試験の目的、時期、体制
2. 試験方法
3. 試験結果
4. まとめ

【BWRのMIケーブル試験結果】

5. 試験の目的、時期、体制
6. 試験方法
7. 試験結果
8. まとめ

1. 試験の目的、時期、体制 (PWR)

● 目的

SA時の監視パラメータとして原子炉格納容器内に設置している放射線監視モニタについて、電離箱検出器に接続している三重同軸（架橋ポリエチレン絶縁）ケーブルや三重同軸コネクタを含めて、SA時の高温・高湿環境下においても監視機能が健全であることを確認する。

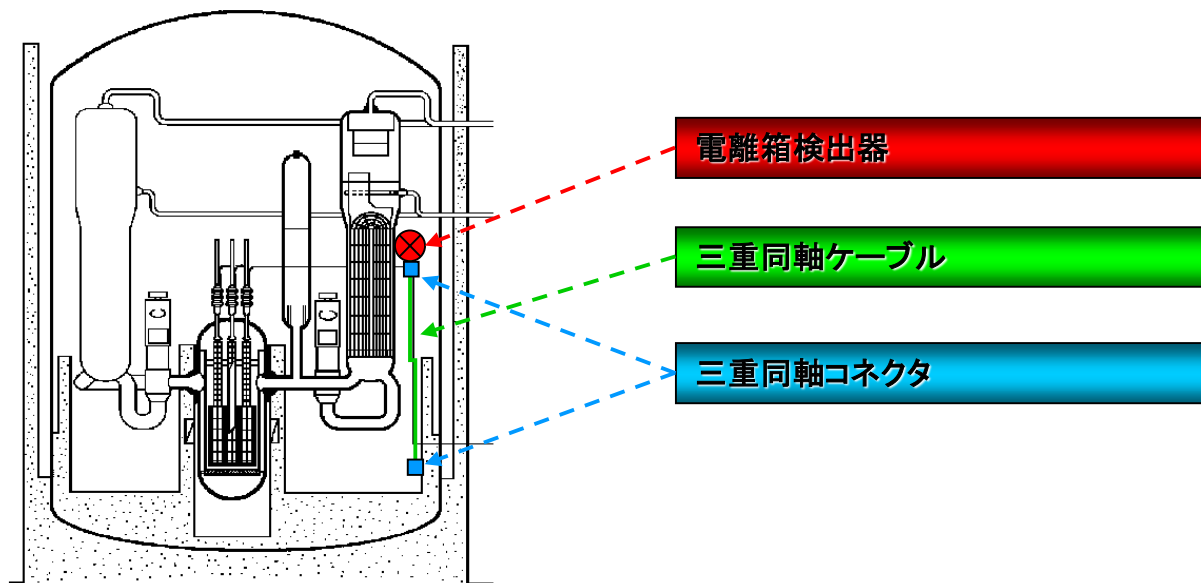


図 原子炉格納容器内の設備イメージ

● 時期

2013年9月～2014年5月

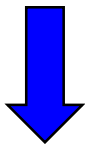
● 体制

PWR 5 電力および三菱電機によるPWR電力共同研究

2. 試験方法 (1/2) (PWR)

手順 1. 加速劣化試験 (試験場：三菱電線工業 (現：ラジエ工業)、ラジエ工業)

プラント通常運転中の原子炉格納容器内における熱及び放射線環境を試験装置内にて模擬 (加速劣化条件を設定し、実機より短時間で試験供試体を作成) し、電離箱検出器、三重同軸ケーブル及び三重同軸コネクタに熱及び放射線の照射試験を実施。



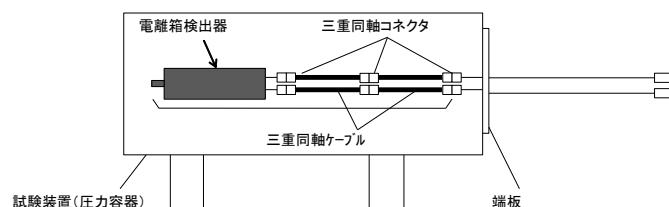
手順 2. 放射線照射試験 (試験場：ラジエ工業)

原子炉格納容器内におけるSA時の放射線環境を試験装置内にて模擬し、電離箱検出器、三重同軸ケーブル及び三重同軸コネクタに放射線の照射試験を実施。



手順 3. 蒸気暴露試験 (試験場：三菱電線工業 (現：ラジエ工業))

原子炉格納容器内におけるSA時の蒸気環境を試験装置内にて模擬し、測定回路全体の健全性を確認するため、実機と同様に電離箱検出器、三重同軸ケーブル及び三重同軸コネクタを接続し試験を実施。



試験装置概要



2. 試験方法 (2/2) (PWR)

・試験条件

前頁の試験手順毎に、事業者の試験条件とその設定の考え方を下表に示す。手順 1 及び 2 の試験後の機能確認では、ケーブルに絶縁低下がなく健全であったことを確認しており、蒸気暴露試験中に絶縁低下が起こるとい知見に対しては、手順 3 の試験による影響が支配的であると考えられる。

参考までにNRA殿試験条件を下表に示す。

試験	事業者試験条件 (三重同軸ケーブル)	今回の知見を踏まえた事業者の試験条件の設定の考え方	NRA殿試験条件 (難燃EPゴム)
手順1. 加速劣化試験	熱加速劣化 113°C-255h (55°C-60年)*1 放射線加速劣化 0.75MGy(10kGy/h以下)(60年)	蒸気暴露試験中に絶縁低下が起こるとい知見に対して、経年劣化の有無は影響しないと考えられ、劣化手法の相違は試験結果に影響しないと考えられるため、事業者試験条件で妥当である。(NRA殿試験では、経年劣化の有無両方の供試体で試験を実施し、蒸気暴露試験中は同程度の絶縁抵抗値の低下が起こっていることから、三重同軸ケーブルの絶縁抵抗値低下の要因としては、経年劣化よりも蒸気暴露試験中の高温・高湿環境下にさらされることによる急激な変化が支配的と考えられる。)	熱放射線同時加速劣化 100°C-100Gy/h-4003h (50°C-0.3Gy/h-39年)*2
手順2. 放射線照射試験	500kGy	既許認可や既PLM評価では外部支援までの7日間の積算線量(500kGy)で評価を実施しているため、事業者試験条件で妥当である。	1000kGy
手順3. 蒸気暴露試験	150°C 0.5MPa(飽和蒸気温度約158°C) 7日間	温度・圧力については、PWRプラントの既許認可におけるSA環境条件(最高温度、最高圧力)を包絡する条件で実施している。また、蒸気暴露試験期間については、既許認可や既PLM評価では外部支援までの7日間で評価を実施している。以上より、事業者試験条件で妥当である。	155°C 0.44MPa 14日間

* 1: アレニウス則に基づく設定

* 2: JNES-SS-0903記載の時間依存データの重ね合わせ手法に基づく設定

・準用規格

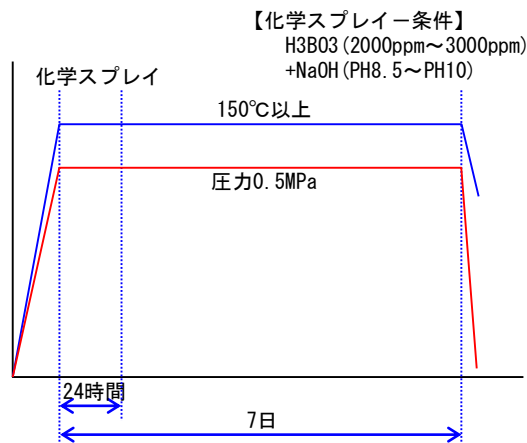
上記の各試験については、以下の民間指針に準じて実施。

・JEAG4623-2008「原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針」

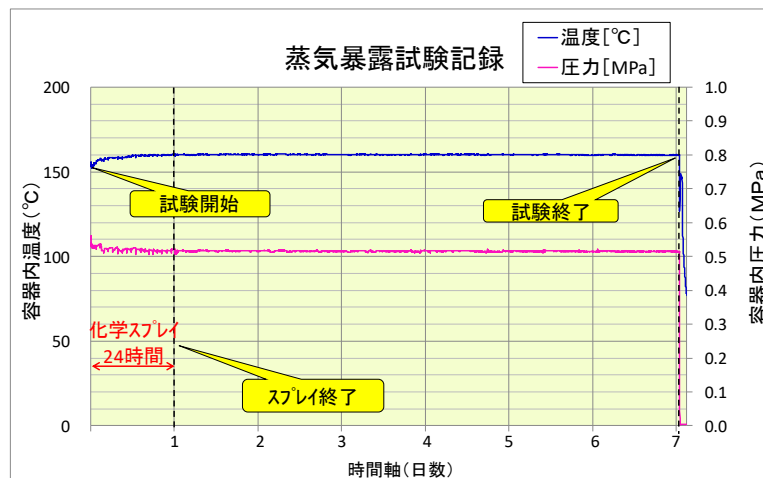
3. 試験結果 (PWR)

・蒸気暴露試験の試験条件と測定結果

既許認可における原子炉格納容器内のSA時の環境条件に基づき蒸気暴露試験プロファイル（試験条件）を設定し、試験装置内の温度・圧力を測定し、**測定データが試験条件を上回るとともに、温度・圧力が安定していることを確認。**



蒸気暴露試験プロファイル（試験条件）



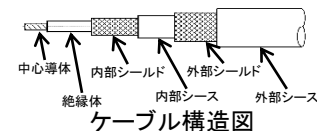
項目 時間	最低温度 (°C)*	最低圧力 (MPa)*
1日目	152.2	0.505
2日目	159.4	0.506
3日目	159.9	0.512
4日目	159.8	0.511
5日目	159.9	0.511
6日目	159.8	0.511
7日目	159.6	0.512

蒸気暴露試験の測定結果

* : 当該日の最低値を示す。

・蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定結果

蒸気暴露試験中の三重同軸ケーブルの絶縁抵抗測定結果について下表のとおり示す。1日1回の絶縁抵抗測定を実施*1し、時間が経過するとともに絶縁抵抗値が徐々に低下。



蒸気暴露試験中の三重同軸ケーブルの絶縁抵抗*2測定結果

	試験前	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	試験後
絶縁抵抗値 (Ωm)*3	1.7×10^{13}	6.2×10^{11}	4.5×10^{10}	4.0×10^{10}	3.0×10^{10}	2.8×10^{10}	2.6×10^{10}	2.4×10^{10}	9.5×10^{11}

*1: 試験中の温度・圧力は安定しており、絶縁抵抗が急激に変化することはない(NRA殿試験結果でも同様の傾向)ため、1日1回の測定が適切と考えられる。

*2: 蒸気暴露試験中に、中心導体-内部シールドに課電し回路の健全性を確認。

絶縁抵抗測定結果には、電離箱検出器及び三重同軸コネクタの絶縁抵抗も含まれるが、本評価では、保守的に、絶縁抵抗測定結果をケーブルでの絶縁抵抗と想定し、供試ケーブル長(約1m)で換算している。

*3: 蒸気暴露試験1日目に絶縁抵抗が低下しているのは、高温、高湿環境によるものと考えられる。

その後、絶縁抵抗値が徐々に低下しているが、高温、高湿環境にケーブルがさらされることにより徐々に湿分が内部に侵入したことが一因と考えられる。

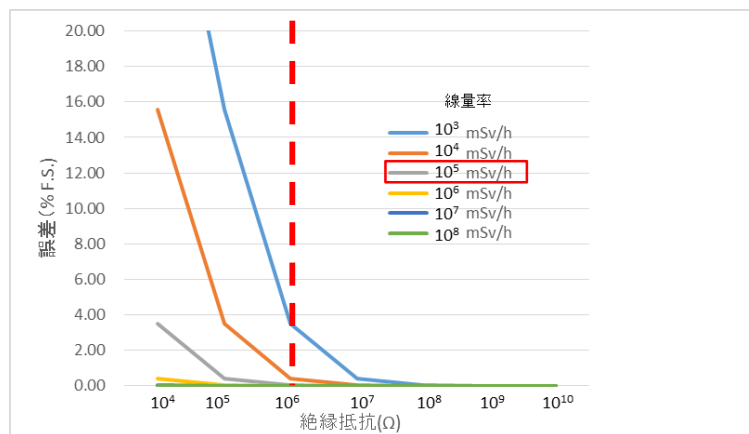
4. まとめ (PWR) (影響確認結果の再掲)

三重同軸ケーブルの試験結果を踏まえた影響確認結果

・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 $2.0 \times 10^{10} \Omega m$ 以上あることを確認した。PWRプラントの最長ケーブル長を200mとしても $10^8 \Omega$ オーダーとなる。

・三重同軸ケーブルを使用している放射線監視モニタについては、**SA時に必要なレンジは下図の通り $10^5 mSv/h$ 付近**であり、絶縁抵抗と測定誤差の関係より、 **$10^6 \Omega$ オーダー**までは計器誤差への影響は非常に小さい。

・PWRプラントのSA環境下において、三重同軸ケーブルは $10^8 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を有していることから、**放射線監視モニタに対する測定誤差の影響は小さく、問題ないことを確認した。**



放射線監視モニタ回路の
絶縁抵抗と測定誤差の関係 (例)

5. 試験の目的、時期、体制 (BWR)

● 目的

SA時の監視パラメータとして原子炉格納容器内に設置している水素濃度計について、水素濃度検出器に接続しているMIケーブルや中間接続部を含めて、SA時の高温・高湿環境下においても監視機能が健全であることを確認する。

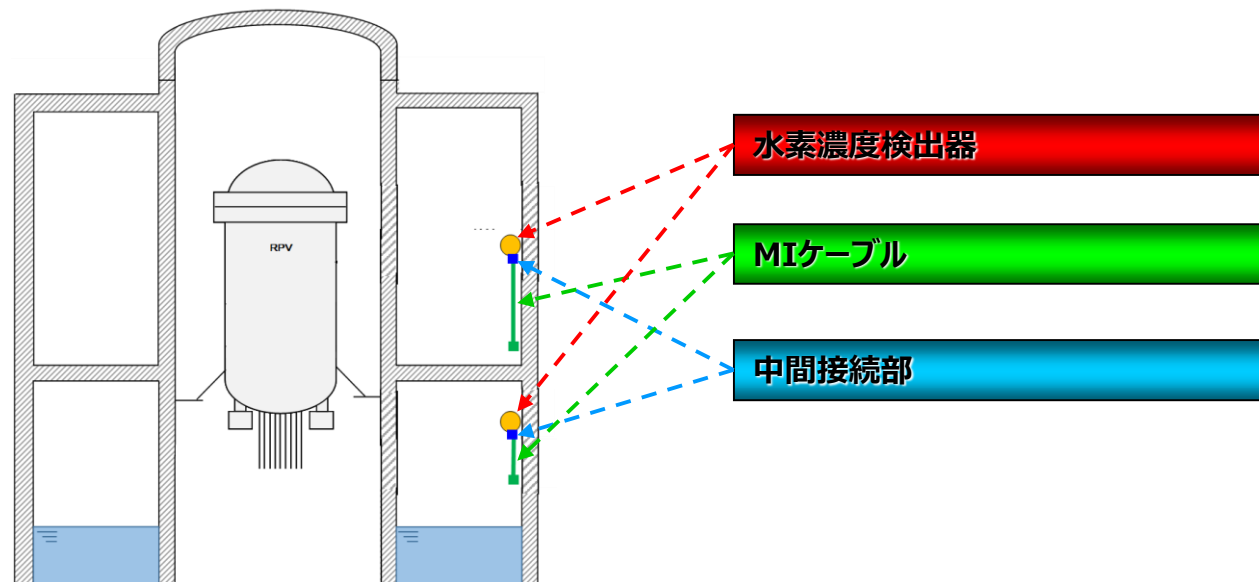


図 原子炉格納容器内の設備イメージ

● 時期

2014年10月～2015年4月

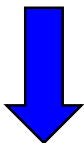
● 体制

代表プラント電力自社研究

6. 試験方法 (1/2) (BWR)

手順 1. 加速劣化試験

MIケーブルは無機材で構成されており、熱、放射線による絶縁特性への影響は軽微のため省略。



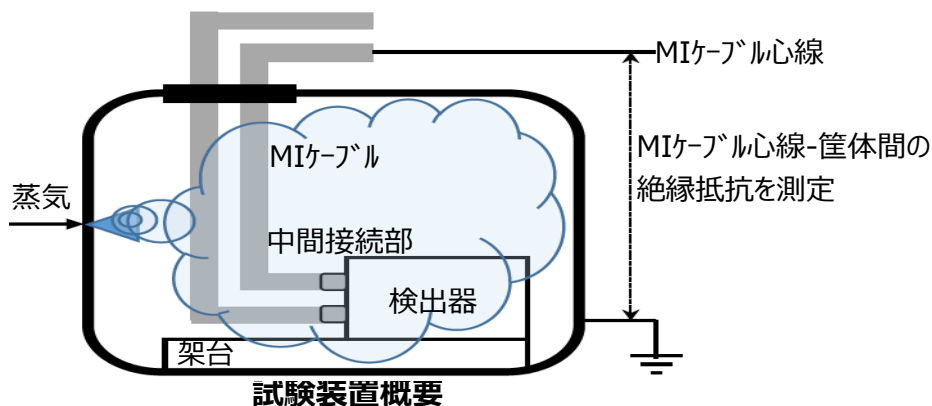
手順 2. 放射線照射試験

MIケーブルは無機材で構成されており、熱、放射線による絶縁特性への影響は軽微のため省略。



手順 3. 蒸気暴露試験 (試験場：日立金属株式会社)

原子炉格納容器内におけるSA時の蒸気環境を試験装置内にて模擬し、測定回路全体の健全性を確認するため、実機と同様に水素濃度検出器、MIケーブル及び中間接続部を接続し試験を実施。



試験装置写真

6. 試験方法 (2/2) (BWR)

・試験条件

前頁の試験手順毎に、事業者の試験条件とその設定の考え方を下表に示す。手順 1 及び 2 の試験については、MIケーブルの絶縁特性への影響は軽微なため省略し、手順 3 の試験による影響評価を行っている。

参考までにNRA殿試験条件を下表に示す。

試験	事業者試験条件 (MIケーブル)	今回の知見を踏まえた事業者の試験条件の設定の考え方	NRA殿試験条件 (難燃EPゴム)
手順 1. 加速劣化試験	-	無機物で構成されており、熱、放射線による絶縁特性への影響は軽微のため省略。 蒸気暴露試験中に絶縁低下が起こるとい知見に対して、経年劣化の有無の影響は支配的ではなく、劣化手法の相違は試験結果に影響ないと考えられる。	熱放射線同時加速劣化 100℃-100Gy/h-6990h (50℃-0.3Gy/h-57年)* 1
手順 2. 放射線照射試験	-		800kGy
手順 3. 蒸気暴露試験	213℃-0.62MPa-5分 200℃-0.62MPa-168時間	温度・圧力については、BWR代表プラントにおけるSA環境条件（最高温度、最高圧力）を包絡する条件で、実施しており、妥当である。	200℃ 0.62MPa 168時間

* 1 : JNES-SS-0903記載の時間依存データの重ね合わせ手法に基づく設定

・準用規格

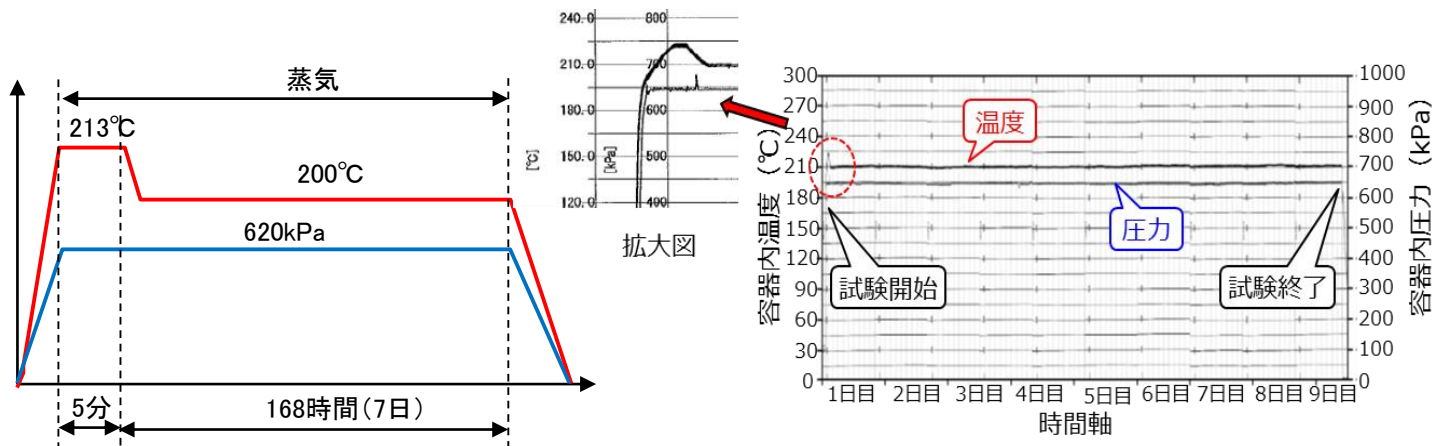
上記の各試験については、以下の民間指針に準じて実施。

・JEAG4623-2008「原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針」

7. 試験結果 (BWR)

・蒸気暴露試験の試験条件と測定結果

代表プラントにおける原子炉格納容器内のSA時の環境条件に基づき蒸気暴露試験プロファイル（試験条件）を設定し、試験装置内の温度・圧力を測定し、**測定データが試験条件を上回るとともに、温度・圧力が安定していることを確認。**



項目	最低温度 (°C) *	最低圧力 (kPa) *
5分	221.6	647
1日目	208.1	645
4日目	209.5	642
5日目	209.4	645
6日目	210.5	643
7日目	210.8	645
8日目	211.3	644
9日目	210.7	649

* : 当該日の最低値を示す。

・蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定結果

蒸気暴露試験中のMIケーブルの絶縁抵抗測定結果について下表のとおり示す。試験期間中に7回の絶縁抵抗測定を実施*¹し、 $10^8\Omega\text{m}$ オーダーの低下が見られたが、試験期間中は $10^8\Omega\text{m}$ オーダーで安定しており、有意な変化はないと考える。

蒸気暴露試験中のMIケーブルの絶縁抵抗*²測定結果

	試験前	1日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	試験後
絶縁抵抗値 (Ωm)	5.7×10^9	3.15×10^8	5.85×10^8	6.0×10^8	6.18×10^8	6.18×10^8	6.69×10^8	6.09×10^8	6.0×10^9 以上

* 1 : 試験中の温度・圧力は安定しており、絶縁抵抗が急激に変化することはない（N R A殿試験結果でも同様の傾向）ため、1日1回程度の測定が適切と考えられる。

* 2 : 蒸気暴露試験中に、MIケーブル芯線-筐体に課電し回路の健全性を確認。

絶縁測定結果には、水素検出器及び中間接続部の絶縁抵抗も含まれるが、本評価では、保守的に、絶縁抵抗測定結果をケーブルでの絶縁抵抗を想定し、供試ケーブル長（約3m）で換算している。

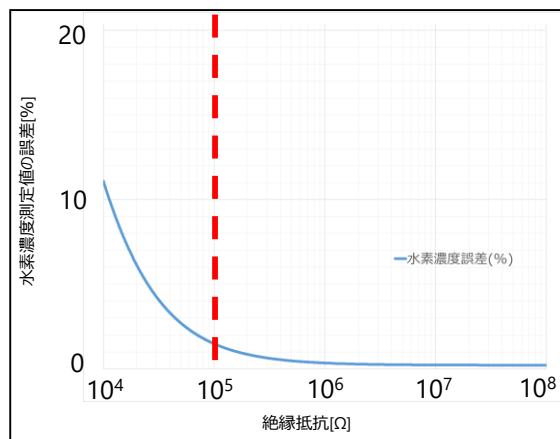
8. まとめ（BWR）（影響確認結果の再掲）

MIケーブルの試験結果を踏まえた影響確認結果

・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た。BWRプラントの最長ケーブル長を100mとしても $10^6 \Omega$ オーダーとなる。

・MIケーブルを使用している水素濃度計については、絶縁抵抗と測定誤差の関係図より、 $10^5 \Omega$ オーダーまでは計器誤差への影響は非常に小さい。

・BWRプラントのSA環境下において、MIケーブルは $10^6 \Omega$ オーダーの絶縁抵抗を有していることから、水素濃度計に対する測定誤差の影響は小さく、問題ないことを確認した。



水素濃度計測回路の
絶縁抵抗と測定誤差の関係（例）