

# 重大事故模擬環境下における 原子力発電所用安全系ケーブルの絶縁性能

Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants  
under Simulated Severe Accident Conditions

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ /早稲田大学	皆川 武史	Takefumi MINAKAWA	Non-member
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ /早稲田大学	池田 雅昭	Masaaki IKEDA	Non-member
早稲田大学	平井 直志	Naoshi HIRAI	Non-member
早稲田大学	大木 義路	Yoshimichi OHKI	Non-member

To examine electrical insulation behavior of cables under severe accident environments, safety-related low voltage cables used as “severe accident management equipment” were subjected to the test at 155 °C, which simulated highest assumed temperature when proper accident management measures are taken. In addition, insulation resistance was measured for the cables during steam exposure in the test. As a result, all the cables passed the acceptance criteria of voltage withstand test prescribed in the JNES Guide. The minimum resistivity of the cables during the test at 155 °C was around  $10^8 \Omega\text{m}$ , confirming that the cables have a sufficient insulation performance.

**Keywords:** nuclear power plant, severe accident, silicone rubber, ethylene propylene diene rubber, electrical resistivity

## 1. はじめに

原子力発電所で使用されているケーブルは、機器へ電力を供給する機能や機器の監視・制御信号を伝達する機能を有する。このうち、安全系低圧ケーブル（以下「安全系ケーブル」）は、供用期間中の設計基準事故（冷却材喪失事故等。以下「DBA」）を含む設計で想定される全ての環境条件下において機能を維持することが必要となる[1, 2]。

2013年に日本において施行された新規制基準においては、重大事故（以下「SA」）対策が要求事項となり[3, 4]、万一、原子力発電所が DBA を超える SA に至った場合においても、原子炉圧力容器内の温度、圧力等の事故対応に必要となるパラメータが計測可能であることが必要である。安全系ケーブルは、この目的のための重大事故等

対処設備として使用されていることから、通常運転時の使用条件による経年劣化を考慮しても、SA 環境下において絶縁性能を維持することが必要である[5]。

本研究では、重大事故等対処設備として使用されているケーブルの SA 環境下における絶縁性能を検証することを目的として、主要なケーブル種類に対し、SA 環境を模擬する試験を実施するとともに、試験の蒸気暴露試験中に絶縁抵抗を測定した。

## 2. 試験の実施方針

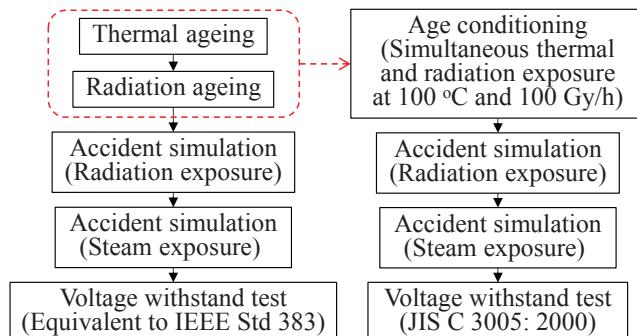
ケーブルの絶縁体には高分子材料が使用されており、主に通常運転時の熱及び放射線により経年劣化が進行するとともに、DBA 時には高温水蒸気と高線量率・大線量の放射線に曝される。このため、これらのケーブルについてでは、米国電気電子学会規格 IEEE Std 383-1974 [6]に基づき作成された電気学会推奨案 [7]に基づき、実プラントで使用されているものと同型式の新品未劣化ケーブルを供試体として通常運転時相当の劣化を付与した後、DBA

連絡先：皆川武史、〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ  
E-mail: takefumi\_minakawa@nsr.go.jp

を模擬する環境条件に曝して要求機能を満たすことを検証する型式試験により、供用期間中の健全性が評価される。

一方、著者らは、これまでに実施した DBA を想定した型式試験に関する試験研究[8]に基づき、「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド」(以下「JNES ガイド」)[9]を策定した。この JNES ガイドは、原子力発電所の安全系ケーブルの DBA を考慮した健全性評価で用いられている。IEEE Std 383-1974 と JNES ガイドの型式試験の主な試験項目及び試験の流れを Fig. 1 に示す。通常運転時相当の熱及び放射線による劣化の付与を、IEEE 383-1974 では逐次又は同時のいずれかとしているのに対し、JNES ガイドでは熱・放射線による同時劣化処理で行うこととしていることが両者の主な違いである。

本研究では、JNES ガイドに準じて SA 環境を模擬する試験を実施することとした。具体的には、Fig. 1(b)に示す試験の手順において、事故時環境の模擬として SA 環境を模擬する放射線暴露及び蒸気暴露試験を実施する。また、蒸気暴露試験中にケーブルの絶縁抵抗を継続的に測定することとした。



(a) IEEJ Recommendation [6] (b) JNES Guide [9]

Fig. 1 Comparison of cable type test procedures between the IEEJ Recommendation and the JNES Guide.

### 3. 試験方法

#### 3.1 試料

国内の加圧水型原子炉（以下「PWR」）においては、安全系ケーブルのシリコーンゴム絶縁難燃シリコーンゴムシースケーブル（以下「FR-SiR ケーブル」）及び難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁難燃クロロスルホン化ポリエチレンシースケーブル（以下「FR-EPDM ケーブル」）が重大事故等対処設備として事故時計装用に使用されている[10]。本研究では、Table 1 に示すように、FR-SiR ケーブルと絶縁材料が同等であるシリコーンゴム絶縁シリコーンゴムシースケーブル（以下「SiR ケーブル」）及び FR-EPDM ケーブルの新品未劣化ケーブルを試料として用いた。ケーブル試料の構造の概要や長さも Table 1 に付記した。

ケーブルの通常運転時の熱及び放射線による経年劣化を模擬するため、新品未劣化ケーブルをガンマ線照射施設内に設置した恒温槽に入れ、100°C で Table 2 に示す期間加熱しながら、<sup>60</sup>Co ガンマ線 100 Gy/h を照射することにより劣化処理ケーブルを製作した。この劣化処理時間は、先行研究において JNES ガイドと同一の試験方法に基づく DBA を模擬する型式試験に合格したケーブルの最長劣化処理時間とした[8]。なお、事前劣化処理前後には JNES ガイドに従い機能試験として絶縁抵抗測定を実施し、有意な絶縁低下の無いことを確認している。また、本研究では、比較参照用として、事前劣化処理を行わない新品未劣化ケーブルについても以降に示す 3.2.2～3.2.4 の試験を実施した。

Table 1 Names, materials, structures, sizes, and length of the tested cables

Name	Insulation	Nominal external diameter (mm)	Nominal conductor size (mm <sup>2</sup> )	Number of cores	Nominal insulation thickness (mm)	Length (m)
	Jacket					
SiR cable	Silicone rubber	12	1.25	3	0.76	2.5
	Silicone rubber					
FR-EPDM cable	Flame-retardant ethylene propylene diene rubber	11.5	2	3	0.8	2.5
	Chlorosulfonated polyethylene					

#### 3.2 試験方法

##### 3.2.1 事前劣化処理

ケーブルの通常運転時の熱及び放射線による経年劣化を模擬するため、新品未劣化ケーブルをガンマ線照射施設内に設置した恒温槽に入れ、100°C で Table 2 に示す期間加熱しながら、<sup>60</sup>Co ガンマ線 100 Gy/h を照射することにより劣化処理ケーブルを製作した。この劣化処理時間は、先行研究において JNES ガイドと同一の試験方法に基づく DBA を模擬する型式試験に合格したケーブルの最長劣化処理時間とした[8]。なお、事前劣化処理前後には JNES ガイドに従い機能試験として絶縁抵抗測定を実施し、有意な絶縁低下の無いことを確認している。また、本研究では、比較参照用として、事前劣化処理を行わない新品未劣化ケーブルについても以降に示す 3.2.2～3.2.4 の試験を実施した。

##### 3.2.2 重大事故環境の模擬試験

SA 時の放射線劣化を模擬する照射試験（以下「事故時照射試験」）及び蒸気暴露試験を実施した。試験条件は、

SA シナリオに対し事故対策が実施された場合に想定される原子炉格納容器内の温度・圧力条件[11]に基づいた。SA 対策の有効性評価において少なくとも 7 日間（168 時間）評価することが要求されていること[4]を踏まえ、より長期間 SA が継続した場合における健全性を調査するため、14 日間（336 時間）の事故時環境を模擬した。なお、過去の研究において、事故時照射試験の後に蒸気暴露試験を実施する方が事故時照射試験と蒸気暴露試験を同時に実施するよりも厳しいとの報告[12]があることからこれに従った。事故時照射試験及び蒸気暴露試験の条

**Table 2 Conditions of pre-aging and accident test, and results of insulation performance test**

Cable name	Pre-aging period (h)	Radiation dose (kGy)	Accident simulation (steam exposure)	Test time (h)	Chemical spray (0-24 h)	Minimum resistivity to pass the test ( $\Omega\text{m}$ )	Voltage withstand test result
SiR cable	0	1,000	155 °C, 0.444 MPaG	336	Applied	$1.3 \times 10^8$	Passed
	5,549	1,000	155 °C, 0.444 MPaG	336	Applied	$2.6 \times 10^8$	Passed
FR-EPDM cable	0	1,000	155 °C, 0.444 MPaG	336	Applied	$1.9 \times 10^8$	Passed
	4,003	1,000	155 °C, 0.444 MPaG	336	Applied	$1.3 \times 10^8$	Passed

件を以下に示す。

#### (1) 事故時照射試験

事前劣化ケーブル及び未劣化ケーブルを対象として、室温において $^{60}\text{Co}$  ガンマ線線量率 10 kGy/h で照射試験を行った。前述のとおり、想定する事故期間は 14 日間である。また、国内 PWR の運転期間延長認可申請の劣化状況評価書では、事故発生後 7 日間の積算線量は 500 kGy とされている[10]。これらを踏まえ、2 倍の線量として総線量を 1,000 kGy とした。

#### (2) 蒸気暴露試験

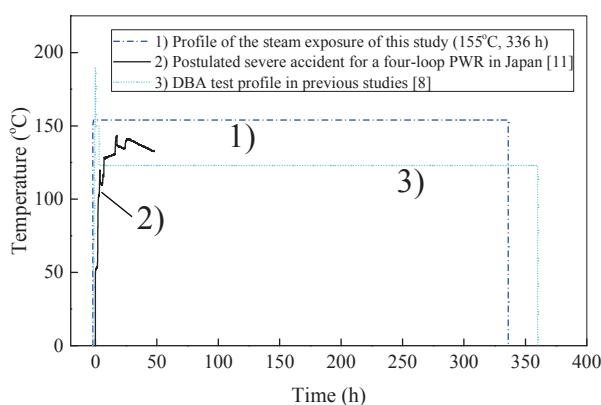
事故時照射試験を実施後、ケーブルを蒸気暴露試験装置に両端を引き出して設置し、SA 時の放射線を除く環境条件を模擬するため、蒸気暴露試験を実施した。日本国内の 4 ループ PWR では、SA 時の原子炉格納容器内の最高温度は 144°C、最大圧力は 0.444 MPaG である[11]。これらの条件を包含する試験として、温度 155°C、圧力 0.444 MPaG の飽和蒸気による蒸気暴露試

験を 14 日間実施した。蒸気暴露試験の温度プロファイル、日本国内の 4 ループ PWR の SA 時の原子炉格納容器内の温度プロファイル[11]及び先行研究において実施した DBA を模擬する試験の温度プロファイル[8]を Fig. 2 に示す。試験容器内の温度が設定温度 155°C に到達後の最初の 24 時間は化学スプレーを噴霧した。噴霧した化学スプレー液は、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  を 0.3 重量%、 $\text{NaOH}$  を添加して  $\text{pH}$  8.5~10.5 となるように調整したものである[6]。蒸気暴露試験前にケーブルを試験装置に設置した状況を Fig. 3 に示す。

#### 3.2.3 蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定

日本工業規格「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」(JIS C 3005: 2000、4.7.1 項) [13]を参考として、3.2.2(2) の蒸気暴露試験中にケーブルの絶縁抵抗測定を実施した。蒸気暴露試験装置から引き出して設置したケーブルの絶縁芯線 3 本のうち 2 本を短絡させた上で、他の 1 本との間に直流電圧 100 V を継続的に印加し、漏洩電流を 2 分ごとに測定した。印加電圧値を漏洩電流値で除すことによってケーブルの絶縁抵抗を算出した。絶縁抵抗にケーブル長さを乗じることにより体積抵抗率を算出した。

#### 3.2.4 耐電圧試験



**Fig. 2 Various temperature profiles; 1) steam exposure of this study, 2) in a pressure containment vessel under the postulated severe accident for a four-loop PWR in Japan (profile is provided only for 0 - 48 h in [11]) (—), 3) type test simulating DBA used in previous studies (---).**



**Fig. 3 SiR and FR-EPDM cables and a steam exposure chamber before the steam exposure of condition 1 (155 °C, 0.444 MPaG, 336 h).**

蒸気暴露試験終了後、日本工業規格「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」(JIS C 3005: 2000、4.6(a)項)に基づき、水中で交流 1,500 V (電圧は実効値。商用周波数)、1 分間の耐電圧試験を実施した[13-15]。判定基準は「耐電圧試験において供試ケーブルに絶縁破壊が生じないこと」である。

## 4. 試験結果

### 4.1 JNES ガイドに準じた試験

本研究で供試した全ての SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルは、JNES ガイドに規定された健全性判定試験である耐電圧試験に合格した。

### 4.2 蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定

155°C、0.444 MPaG、14 日間におけるケーブルの体積抵抗率の推移を Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 では、蒸気暴露試験装置内の温度及び圧力が 155 °C、0.444 MPaG 以上となった時点を試験開始時間 (0 h) として図示した。ケーブルの体積抵抗率は、蒸気暴露試験開始後に、蒸気注入による温度上昇とともに低下し、試験容器内の温度が 155°C に到達した時点においては、 $10^8 \sim 10^9 \Omega\text{m}$  程度となった。試験開始後 30 時間付近において下限値の  $10^8 \Omega\text{m}$  程度となった後、時間の経過とともに緩やかに上昇して蒸気暴露試験を終了した。Table 2 に各ケーブルの体積抵抗率の下限値を示す。体積抵抗率はケーブル種類及び事前劣化の有無にかかわらず、いずれも上記のような挙動を示した。

## 5. 考察

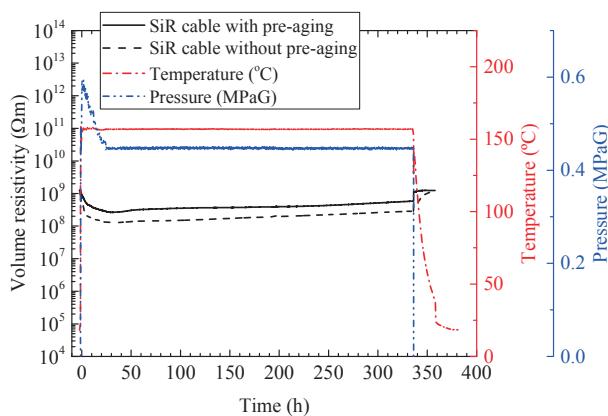
JNES ガイドに準じ、155°C、0.444 MPaG、14 日間の SA 環境を模擬する試験において、供試した全ての SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルは、JNES ガイドに規定された健全性判定試験である耐電圧試験に合格した。

また、蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定結果から、いずれのケーブルについてもケーブルの体積抵抗率の下限値は  $10^8 \Omega\text{m}$  程度であった。一般的に、実プラントにおける安全系ケーブルの原子炉格納容器内の長さは数 10 m 程度である。保守的に長さ 100 m と仮定した場合、ケーブル全体の絶縁抵抗値は  $10^6 \Omega$  となる。このことから、SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルは、155°C、0.444 MPaG、14 日間の SA 環境において十分な絶縁性能を有していると考えられる。

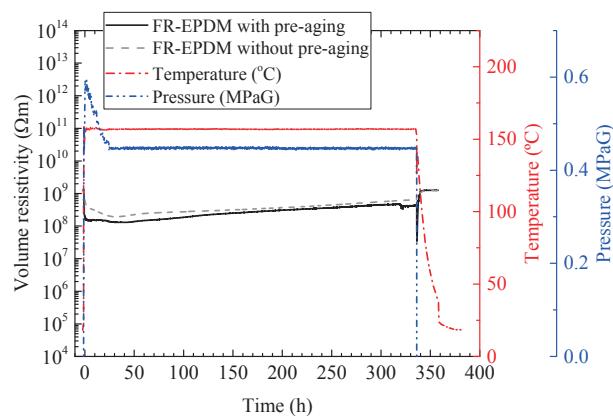
今後、本研究よりも厳しい試験条件 (200 °C、0.43 MPaG、7 日間) における試験結果についても取りまとめる予定である。また、本研究に供試したケーブルについて機械的特性や固体構造に係る分析等を行い、SA 環境における絶縁体積抵抗率の変化の要因について検討する予定である。

## 6. まとめ

重大事故等対処設備として使用されているケーブルの SA 環境下における絶縁性能を検証することを目的として、SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルに対し、JNES ガイドに準じて SA 環境を模擬する試験を実施するとともに、試験の蒸気暴露試験中にケーブルの絶縁抵抗を測定し、以下の結果を得た。



(a) SiR cable with and without pre-aging



(b) FR-EPDM cable with and without pre-aging

Fig. 4. Electrical resistivity as a function of time, measured under the steam exposure environment of condition 1 with temperature (---) and pressure (----) profiles shown in each graph (155 °C and 0.444 MPaG for 336 h).

(1) JNES ガイドに準じて、155°C、0.444 MPaG、14 日間の SA 環境を模擬した試験では、SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルは、JNES ガイドに規定された健全性判定試験である耐電圧試験に合格した。

(2) SiR ケーブル及び FE-EPDM ケーブルにおいて、JNES ガイドに準じた試験の蒸気暴露試験中の絶縁抵抗測定における体積抵抗率の下限値は、 $10^8 \Omega\text{m}$  程度となることが確かめられた。

(3) 以上から、SiR ケーブル及び FR-EPDM ケーブルは、155°C、0.444 MPaG、14 日間の SA 環境においては十分な絶縁性能を有していると考えられる。

## 参考文献

- [1] 原子力規制委員会 “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第十二条第三項)”, 平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号、2013.
- [2] United States Nuclear Regulatory Commission, “General Design Criteria for Nuclear Power Plants - Criterion 4”, 10 CFR Part 50 Appendix A, 2015.
- [3] 原子力規制委員会 “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第三十七条第二項)”, 平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号、2013.
- [4] 原子力規制委員会 “実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド(2.2.1 項(4)及び 3.2.1 項(4))”, 平成 25 年 6 月 19 日原規技発第 13061915 号、2013, pp. 3、14.
- [5] 原子力規制委員会 “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(第四十三条)”, 平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号、2013.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations”, IEEE Std 383-1974, 1974, pp. 10-12.
- [7] 電気学会 “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”, 電気学会技術報告 (II 部) 第 139 号、1982.
- [8] 原子力安全基盤機構 “原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する最終報告書”, JNES-SS-0903、2009、pp. 39-124、179-245.
- [9] 原子力安全基盤機構 “原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド”, JNES-RE-2013-2049、2014.
- [10] 関西電力 “高浜発電所運転期間延長認可申請書 (2 号発電用原子炉施設の運転の期間の延長) の一部補正について (添付書類二：高浜発電所 2 号炉劣化状況評価書)”, 関原発第 111 号、2016.
- [11] 九州電力 “玄海原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書 (3 号及び 4 号発電用原子炉施設の変更) 添付書類十”, 平成 25 年 7 月 12 日、2013, pp. 10(3)-5-44、47、111.
- [12] Brookhaven National Laboratory, “Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cables”, NUREG/CR-6384, 1996, p. 2-17.
- [13] 日本工業規格 “ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法”, JIS C 3005: 2000、2000.
- [14] 日本工業規格 “600V けい素ゴム絶縁電線”, JIS C 3323: 2012、2012.
- [15] 日本工業規格 “600VEP ゴム絶縁ケーブル”, JIS C 3621: 2000、2000.