

インデントモジュラス (IM) 法のケーブル状態監視 ラウンドロビン試験結果の評価について

Evaluation of the indenter modulus (IM) method in the international round robin test about the cable condition monitoring.

梶村 雄作 (Yuusaku Kajimura) *¹

要約 原子力発電所の安全性と信頼性を確保する上で、ケーブルの経年劣化の診断は重要である。原子力安全システム研究所では、十数年余り前からインデントモジュラス法（以下、IM法）に取り組んできた。その有用性は、旧原子力安全基盤機構「原子力発電所のケーブル経年変化評価技術調査研究」事業により実証されている。さらに、国際原子力機関（IAEA）の国際共同研究プロジェクト（CRP：Coordinated Research Project）に参加し、これまでIM値測定を実施していなかった新規材料の絶縁材および絶縁材とジャケットの一体化したケーブルを測定した。得られた結果は以下のとおりである。(1)従来の材料に加えて新規材料(XLPO材(架橋ポリオレフィン材)等)に対してもIM法は有用である。(2)絶縁材とジャケットの一体化したケーブル材(CSPE材(クロロスルホン化ポリエチレン材)等)にもIM法は適用可能である。以上から、未劣化状態からIM値が高く、硬度の経年変化の小さい材料(PEEK材(ポリエーテルエーテルケトン樹脂材)等)を除いてほとんどの材料に適用可能な状態監視手法であるとの評価を得た。

キーワード 低電圧ケーブル、インデントモジュラス、ラウンドロビン、状態監視

Abstract In order to ensure the reliability and safety of nuclear power plants, the diagnosis of cable aging is important. The Institute of Nuclear Safety System(INSS)has been developing the indenter modulus(IM)method for more than a dozen years. Its usefulness was demonstrated in the research project "Assessment of cable aging for nuclear power plant" by the Japan Nuclear Energy Safety Organization in 2009. Furthermore, INSS participated in the IAEA Coordinated Research Project in 2013 to 2015, measuring and acquiring data of insulation materials of cables and cable jackets with insulation which had been never measured before by INSS. The main results are as follows. (1)The IM method is useful for new materials(for example,crosslinked polyolefins)which had never been measured before by INSS. (2)The IM method is also applicable to evaluation of cable jackets with insulation made of such materials as chlorosulfonated polyethylene. Therefore, the IM method is evaluated to be useful and applicable for most cable materials except those which have a high IM value initially and which have a small change in IM value during aging.

Keywords Low voltage cable, indenter modulus, round robin, condition monitoring

1. はじめに

原子力発電所で使用されている電気ケーブルは、全長1,000～2,000kmにおよび電動機等の機器へ電力を供給する機能と機器の監視・制御信号を伝達する機能を有している。

これら電気ケーブルは、熱や放射線環境において、酸化等により徐々に絶縁材の材質の変化等が生じ、絶縁性能低下などの経年劣化が進行する。特に、原

子炉格納容器内の安全系に属する電気ケーブルは、設計想定事故時の高温水蒸気と高放射線量の過酷な環境においても機能を維持することが要求される。

原子力発電所用ケーブルのうち90%以上を占める電圧600V以下の低圧ケーブルについて、現在では定期的な絶縁抵抗測定やループ試験、機器の動作確認により健全性確認が行なわれているが、劣化度の評価が困難である。このため、その性能を損なうことなく、ケーブルを敷設状態のまま劣化度を測

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

定する非破壊劣化診断技術の開発が進められ^{(1)~(3)}、また電力会社でも高経年化対策の観点から超音波伝搬速度法による評価等が試みられていた⁽⁴⁾。

原子力安全システム研究所（以下、INSS）は、平成9年から低圧電力ケーブルと制御ケーブルの難燃性エチレンプロピレンゴム絶縁材を対象に原子力発電所で適用できる低圧ケーブルの非破壊劣化診断技術の確立に向け研究に取り組んだ。低圧ケーブルの非破壊劣化診断技術として、酸化誘導時間・温度測定試験、熱重量分析、超音波伝搬速度測定法、誘電正接試験およびIM法を候補として、放射線照射と熱による劣化度合いと各試験、手法による測定値との相関を求めた。その結果IM法が最も良い相関を示し、原子力発電所の低圧ケーブルの非破壊劣化診断技術として最適な手法であると評価した⁽⁵⁾。

そこで、平成17年度国の「原子力発電所のケーブル経年変化評価技術調査研究」事業の「ケーブル非破壊劣化診断技術の実機適用性調査」に参加し、その結果、INSSのIM法は実機適用可能で優れているとの評価を得た⁽⁶⁾。

その後、現場持込が容易になることを含め更なる操作性の向上と小型化を図った測定装置により国際原子力機関（IAEA）が主催するケーブル状態監視の国際ラウンドロビン試験に参加し、これまでIM値測定をしていなかった新規材料の低圧ケーブルの絶縁材およびこれまで測定対象としていなかった絶縁材とジャケットを一体とした対象ケーブルを測定し、これらへの適用性の拡大とデータベースの拡充を行なうこととした。本報告では、その試験結果についてIAEAによる報告書をもとにとりまとめた⁽⁷⁾。

2. 国際ラウンドロビン試験の概要

2.1 目的

国際原子力機関（IAEA）は、国際共同研究プロジェクト（Coordinated Research Project：以下、CRP）の一部として、2012年に「原子力発電所における低圧ケーブルの高経年化の状態監視と管理」としてラウンドロビン試験^{*2}を開始した。

この試験は、熱・放射線によるケーブル上の局部損傷箇所の位置を同定する技術を主に電気的手法で

試験すること、およびケーブルの経年劣化を検出する技術を主に機械的または化学的手法で試験すること、これらにより原子力発電所における低圧ケーブルの状態監視に関する管理プログラムを確立することを目的としている。

2.2 実施期間

2012年度から2016年度までの4年間で試験サンプルの作成、試験および評価が実施された。INSSはその内2013年から2015年の間に回送された試験サンプルのIM値を測定し、そのデータを提供した。

2.3 参加国および機関

アルゼンチン、ベルギー、カナダ、中国、チェコ、フランス、ハンガリー、韓国、スロバキア、スウェーデン、イタリア、イギリス、アメリカ、日本の14カ国から企業、大学等の19機関がそれぞれの試験手法で参加した。日本からはINSSを含め3機関が参加した。

2.4 対象とする測定手法

現状のケーブル状態監視は絶縁抵抗測定、ループ試験、機器の動作試験が保全策として適用されている。しかし、絶縁抵抗試験等は経年劣化状態を時間的オーダーで正確に損傷経過を判断することは困難であることから、破断伸び試験によりケーブルがどの程度の劣化状態であるかを確認する方法が考えられる。但し、破断伸び試験は破壊試験であり、実機適用は不可能であるため、試験サンプルで得た劣化を表す破断伸び試験結果と他の非破壊検査手法との相関関係により実機適用の有用性を評価することとし、今回のラウンドロビン試験では、破断伸び試験と状態監視手法の相関を検討・評価するために、機械的・化学的手法として、IM法、回復時間測定法、酸化誘導時間・温度測定試験、熱重量分析、フーリエ変換赤外分光法、密度測定法、超音波伝播速度測定法、電気的手法として、時間・周波数領域反射率測定法、誘電正接試験、誘電分光法、絶縁抵抗試験の13種類の手法が測定試験に用いられた。このうち、INSSはIM法により測定した。

*2 原子力発電所におけるケーブルの状態監視手法のベンチマーク試験

2.5 試験の方法

熱劣化および放射線劣化された試験サンプルが各国、各機関に回送され、それぞれの機関のそれぞれの手法により測定され、その測定データは国際共同プロジェクトへ提出された。

2.6 試験サンプル

表1に試験サンプルの一覧を、図1にその外観写真の一例を示す。現在の発電所で用いられているものまたは新規プラントで今後使用される可能性のある世界中の製造メーカーのケーブルが本プログラムの試験サンプルとされた。

試験サンプルは絶縁材とジャケットが一体となった実際のケーブル状態のサンプルと絶縁材のみのサンプルの2種類がある。

また、絶縁材とジャケットが一体となったサンプルには約15mm径および約10mm径の異なる2種類の試験サンプルがあり、機械的・化学的手法には約15mm径、電気的手法には約10mm径のケーブルが適用された。

なお、INSSは機械的・化学的手法のIM法により絶縁材とジャケットが一体となった約15mm径のサンプルの測定および絶縁材のみの試験サンプルの両方について測定した。

2.7 試験サンプルの劣化条件

表2に試験サンプルの劣化条件を示す。熱劣化については、7段階の劣化条件とし、劣化温度はそれ

表1 試験サンプル一覧

No.	絶縁材※/ジャケット※
1	PEEK/XLPO
2	EPR/EVA
3	SiR/SiR
4	XLPE/CSPE
5	EPR/EPR
6	XLPO/XLPO

※ PEEK: ポリエーテルエーテルケトン樹脂 (プラスチック)
 XLPO: 架橋ポリオレフィン
 EPR: エチレンプロピレンゴム
 EVA: エチレン・酢酸ビニル共重合樹脂
 SiR: シリコン樹脂
 XLPE: 架橋ポリエチレン
 CSPE: クロロスルホン化ポリエチレン

ぞれのケーブル材料の活性化エネルギーから算出され、最大劣化時間は試験サンプルの破断伸びが約50%低下するまでに要する時間としている。

放射線劣化については、5段階の劣化条件とし、その線量および時間の設定は、ガンマセルの273Gy/hの照射線量において、試験サンプルの破断伸びが50~100%に達するのに必要なそれぞれの材料に対する照射時間としている。なお、照射施設の時間的制限からすべての条件が達成されず結果的に4段階の劣化条件となっている。

3. IM測定装置の概要

図2にINSSが使用したIM測定装置を、図3に測定方法を示す。測定方法は、供試体を保持治具で押さえ、押針を一定速度で供試体に押し込んだ時の押し込み量と荷重から硬さの指標としてのIM値を求めるものである。

$$\text{IM 値 (N/mm)} = \text{荷重 (N)} / \text{押針の変位 (mm)}$$



図1 試験サンプル外観

写真左より

絶縁材 (PEEK)

絶縁材 (EPR)

絶縁材 (EPR)

絶縁材 (XLPO)

絶縁材 (XLPE)

ジャケット (XLPO)

ジャケット (CSPE)

ジャケット (EPR)

ジャケット (EVA)

ジャケット (XLPO)

表2 試験サンプル劣化条件

No.	材料	部位	未劣化(h)	放射線劣化				熱劣化								
				照射線量(Gy/h)	照射時間(h)				温度(°C)	熱劣化時間(h)						
					1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7
1	PEEK	絶縁材	0	273	1454	2908	4362	5568	190	1800	2400	3600	4200	4800	5400	6000
	XLPO	ジャケット	0	273	1454	2908	4362	5568	135	1800	2400	3600	4200	4800	5400	6000
2	EPR	絶縁材	0	273	873	1745	3492	4395	135	1950	2600	3900	4550	5200	5850	6500
	EVA	ジャケット	0	273	727	1454	2908	3663	120	2100	2800	4200	4900	5600	6300	7000
3	SiR	絶縁材	0	273	586	1172	1758	2344	190	1500	2006	2006	2506	3017	3507	4018
	SiR	ジャケット	0	273	586	1172	1758	2344	190	1500	2006	2006	2506	3017	3507	4018
4	XLPE	絶縁材	0	273	1454	2908	4362	5568	135	1800	2400	3600	4200	4800	5400	6000
	CSPE	ジャケット	0	273	291	582	1164	1465	120	540	720	1080	1260	1440	1620	1800
5	EPR	絶縁材	0	273	873	1745	3492	4395	135	1950	2600	3900	4550	5200	5850	6500
	EPR	ジャケット	0	273	873	1745	3492	4395	135	1950	2600	3600	4550	5200	5850	6500
6	XLPO	絶縁材	0	273	1454	2908	4362	5568	135	1800	2400	3900	4200	4800	5400	6000
	XLPO	ジャケット	0	273	1454	2908	4362	5568	135	1800	2400	3600	4200	4800	5400	6000

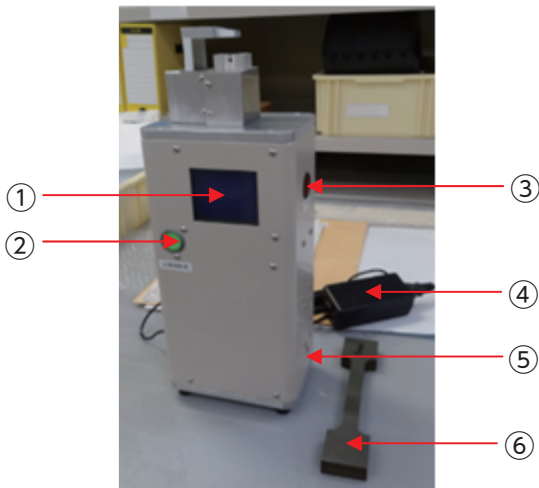
PEEK: ポリエーテルエーテルケトン樹脂(プラスチック)
 XLPO: 架橋ポリオレフィン
 EPR: エチレンプロピレンゴム
 EVA: エチレン・酢酸ビニル共重合樹脂
 SiR: シリコン樹脂
 XLPE: 架橋ポリエチレン
 CSPE: クロロスルホン化ポリエチレン

◻: サンプルが作成されなかったものを示す。
 ◻: INSSにサンプルが回送されIM測定したものを示す。

4. ラウンドロビン試験結果

4.1 状態監視手法の有用性評価

前記2.6項の試験サンプルを用い13種類の状態監視手法による測定試験を行ない、破断伸びとの相関により状態監視手法としての有用性の検討がなされ、その有用性についてCRPにより評価された。表3にその評価結果を示す。



- ①: タッチ操作・表示パネル
- ②: 測定開始スイッチ
- ③: 電源スイッチ
- ④: AC電源アダプタ
- ⑤: データ書き込み用USBメモリー挿入口
- ⑥: 校正用基準錘

図2 IM測定装置

INSSが参加したIM法について、各材料に最大6機関が測定に参加し、INSSは10材料を測定した。

IM法による測定結果は、破断伸びと高い相関性がありその有用性が示された。

有用と評価された材料の測定結果の代表例を図4に示す。EPR(エチレンプロピレンゴム)材、CSPE(クロロスルホン化ポリエチレン)材、SiR(シリコン樹脂)材および一部XLPO(架橋ポリオレフィン)材から得られたデータは、劣化度の大きい15%未満の破断伸びに対してIM値の大きな増加を示しており、劣化に伴うIM値の上昇が有り、有用性が認められた。しかし、劣化プロセスの初期段階の破断伸び150%以上ではIM値の増加は小さく、材料劣化の早期発見の状態監視手法として十分なものではないとも評価された。

図5に破断伸びと相関が認められなかった代表例を示す。高硬度のPEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹脂)材やXLPE/O(架橋ポリエチレン/架橋ポリオレフィン)材は、IM値が未劣化材前から高く、劣化によるIM値はほとんど増加しない傾向にあり、破断伸びとの相関はなく、これらの材料にはIM値を用いた劣化評価は適さないことが示された。

しかし、IM法と類似の圧子による試験サンプルのくぼみの回復時間を測定し、試験サンプルの劣化状況を評価する回復時間測定(Recovery time)法はXLPE/O(架橋ポリエチレン/架橋ポリオレフィン)材に対し有用性が示されている。このことから、IM法との相互補完により当該材料の劣化状況を把握することは有効であると考えられる。

なお、PEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹脂)

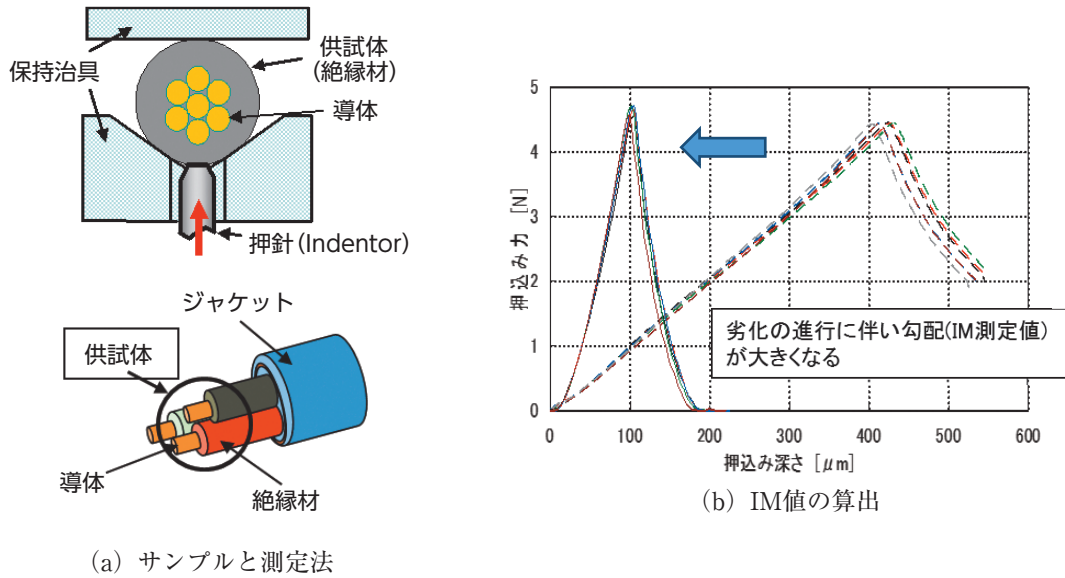


図3 IM測定方法

表3 状態監視 (CM) 方法の有用性

No.	材料	部位	CM法													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
			EAB	IM	Recovery	OIT	OITP	TGA	Density	FTIR	Ultra-sonic	Tan δ	Dielec. Spec.	IR	FDR	TDR
1	PEEK	絶縁材	■	■2				■	■	■		■	■			
	XLPO	ジャケット	■	■5	■		■	■	■	■	■	■				
2	EPR	絶縁材	■	■4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	EVA	ジャケット	■	■6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Sir	絶縁材	■	■2										■	■	■
	Sir	ジャケット	■	■2												
4	XLPE	絶縁材	■	■2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	CSPE	ジャケット	■	■5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	EPR	絶縁材	■	■4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	EPR	ジャケット	■	■5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	XLPO	絶縁材	■	■4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	XLPO	ジャケット	■	■5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

『表中の色説明』

非常に有用	■	各ラボ間の変動も少なく劣化と良好な相関関係有り。
有用	■	いくつかのラボ間の変動はあるものの劣化に伴う一貫性のある相関関係有り。
有用な可能性有り	■	劣化に伴う中程度の相関関係有り。
有用性なし	■	劣化との相関関係なし。
データなし	■	このプログラムでの試験方法によるデータ無し。
潜在的に有用	■	放射線劣化が唯一中程度の相関関係有り。

*IM欄表中に記載の数値は測定機関数を示す。
 ■ 黒太枠はINSSが測定したものを示す

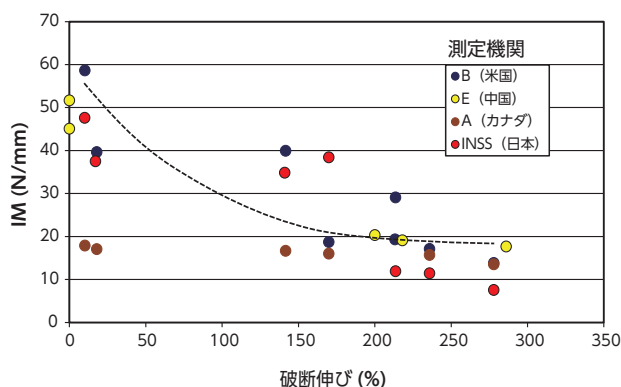
- EAB；破断伸び試験
- IM；インデントモジュラス法
- Recovery；回復時間測定
- OIT；酸化誘導時間測定試験
- OITP；酸化誘導温度測定試験
- TGA；熱重量分析
- Density；密度測定法
- FTIR；フーリエ変換赤外分光法
- Ultrasonic；超音波伝播速度測定法
- Tan δ；誘電正接試験
- Dielec.Spec.；誘電分光法
- IR；絶縁抵抗試験
- FDR；周波数領域反射率測定法
- TDR；時間領域反射率測定法

材はIM法以外のどの手法においても有用性があるとの評価は得られなかった。

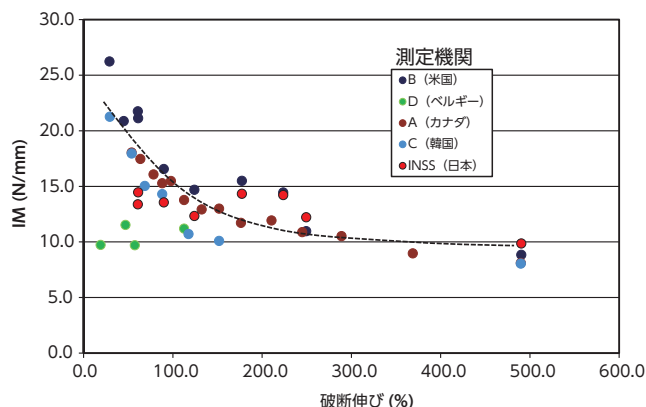
また、電気的手法の一部の手法で有用なものが認められたが、ケーブル全長にわたって劣化状況を評価するには十分ではない結果となっているものも認められた。

5. IM測定手法の改良点等 ラウンドロビン試験報告書からの提言

今回まとめられたラウンドロビン試験報告書に記載の状態監視試験方法のうちIM測定手法に関して、以下の改良点等が提言された。

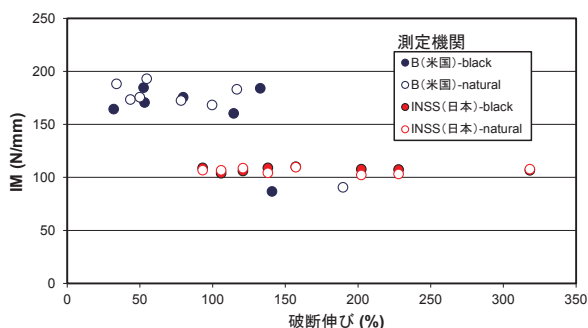


(a) XLPO (絶縁材)



(b) CSPE (ジャケット)

図4 破断伸び-IM測定結果の例



(a) 相関のない例 (PEEK(絶縁材))

図5 破断伸び-IM測定結果の例

(1) IM測定装置のプロブ形状

測定されたIM値は、プロブの先端形状および寸法に依存するため、基本的にはIM測定装置での状態監視手法に関する国際電気標準IEC/IEEE62582-2に記載のプロブ形状(17.5°の円錐角と0.56mmの円形の先端径を持つ円錐台)を適用する必要がある。表4に示すとおりプロブの仕様が異なる各機関のデータを比較する場合には装置のプロブ形状の相違に注目し、必要に応じIM値を補正する必要がある。なお、ラウンド

表4 各機関の試験条件

Test lab	Indentor model	Probe diameter (mm)	Probe speed (mm/min)	force range for analysis
A	AECL PPT	0.54	5.09	1-4N
B	IPAM4	0.56	5.08	1-4N
INSS	INSS model	0.79	4.8	1.5-3.5N
C	KHNP model	0.56	5.1	1-4N
D	IPAM4	0.56	5.04	1-4N
E	IPAM4	0.56	5.1	1.25-3.75N

ロビン試験報告書ではIM値の補正が行なわれ、各機関のデータの比較がなされ評価されている。

(2) IM測定装置のクランプ力

各機関のIM値について、類似した傾向を示しているが、IM値の大きさが異なるのは試験サンプルを挟みこみ固定する際のクランプ力による可能性がある。例えば、クランプ力が大きい場合、IM値は高い結果を示す。このようなことから、クランプ力は適正なデータを保障するために再現性がある必要がある。クランプ力が制御されることにより操作者によるデータのばらつきの排除が可能である。

(3) 測定環境温度

ケーブル材料として使用されるほとんどの高分子材料の弾性率は温度環境によって変化することから測定環境温度の平準化に留意する必要がある。具体的には国際電気標準IEC/IEEE62582-2に記載のとおり、実験室で試験サンプルを測定する場合は室温20±5℃であることおよび試験サンプルが測定環境温度と平衡状態になるまでの時間を考慮することである。

6. ラウンドロビン試験報告書からの提言等に対する対応

(1) IM測定装置のプロブ形状

今回のラウンドロビン試験でのプロブ先端形状の相違に伴い補正が行なわれた。補正は「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術研究に関する最終報告書 (JNES-SS-0903, 2009年7月)」で使用したサンプルにおけるIM値 (INSS測定) とAMS (米国の分析・計測サービス会社)

のIPAM4を用いてアイオワ大学が試験した結果の相関から補正値を算出する式が与えられた。このことから異なる仕様のIM値と比較することは可能とされた。

INSSにおけるIM測定装置のプロープ先端形状は他の機関と異なり、35°の円錐角と0.79mmの円形の先端径を持つ円錐台である。これは、国際電気標準IEC/IEEEの規格修正前の仕様に従っていたからである。INSSはこれまでにこのプロープ形状で一貫したデータを採取し、その相関カーブを得ていることから今後の現場での保全の活用上問題となることはない。

(2) IM測定装置のクランプ力

INSSのIM値測定装置のクランプは試験サンプルをセットし、測定開始ボタンを押すことにより自動で機械的に材料を挟み固定する機構であり、クランプ力は操作者に依存するものではなく再現性のあるデータを採取することができることから、クランプ力の影響はないと考えられる。

(3) 測定環境温度

今回の測定試験の温度環境は、温度管理された室内であり、影響はないと考えられる。しかし、実機の場合測定部位の環境と異なるため、環境温度のIM値への影響を確認する必要がある。

7. まとめ

「原子力発電所における低圧ケーブルの高経年化の状態監視と管理」として実施されたラウンドロビン試験に14カ国19機関が参加した。試験手法は機械的・化学的手法および電気的手法の14種類で試験がなされ、それぞれの機関がそれぞれの手法で参加した。このうちINSSはIM法により参加した。

その中で、IM法による状態監視手法は、EPR（エチレンプロピレンゴム）材、CSPE（クロロスルホン化ポリエチレン）材、SiR（シリコン樹脂）材および一部のXLPO（架橋ポリエチレン）材を含むほとんどの試験サンプル材料に関して破断伸びとIM値とは有用な相関関係が得られているとの評価を得た。

また、初期に非常に高いIM値を示すPEEK（ポリエーテルエーテルケトン樹脂）材とXLPE/O（架橋ポリエチレン／架橋ポリオレフィン）材については、劣化プロセス中にIM値が顕著には増加せず状態監視ができないことからIM法には適さない

と評価された。しかし、回復時間測定（Recovery time）法はXLPE/O（架橋ポリエチレン／架橋ポリオレフィン）材に対し破断伸びとの相関に有用性が示されていることから、IM法との相互補完により当該材料の劣化状態を把握することは有効であると考えられる。

なお、今回のラウンドロビン試験への参加により、これまでIM値を測定していなかった新規材料の低圧ケーブルの絶縁材およびこれまで測定対象としていなかった絶縁材とジャケットを一体とした対象ケーブルの測定ができた。

今後、ケーブルの状態監視に当たり、今回のラウンドロビン試験で採取した各ケーブル材料のデータ整備を行ない、ケーブル劣化診断の実機適用に向け環境温度に対するIM値の影響も含め検討して行く。

文献

- (1) 庄司弘志, 竹澤由高, 片桐純一, “低圧ケーブル材料の経年劣化に対する光診断手法の開発,” 火力原子力発電技術協会誌, H16大会論文集, pp.263-267 (2005).
- (2) 森本敬三他, “原子力発電所での低圧ケーブルの劣化診断,” (社)電気学会 電線・ケーブル研究会資料EC-02-7 (2002).
- (3) 神村誠二他, “応力-歪応答による電線・ケーブル劣化診断法の開発(第2報),” (社)電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料DEI-91-131 (1991).
- (4) Yasunobu Nishida, “Non-destructive Diagnosis Technique for Aging of Cables Used at Nuclear Power Plants” Nuclear Engineering and Design, Vol.207, No.3, pp.317-325 (2001).
- (5) 三宅 悟, “原子力発電所の低圧ケーブル非破壊劣化診断技術,” INSS JOURNAL, Vol.5 P.98 (1998).
- (6) 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 (JNESS-0903), 独立行政法人原子力基盤機構, (2009).
- (7) Ki-Sig Kang, H.M.Hashemian, Sue Burnay, “Condition Monitoring and Management of Ageing of Low Voltage Cable in Nuclear

Power Plants, " IAEA Coordinated Research Project – Participant Report, Benchmark Data and Analysis for CRP Participants (2015).