

ケーブル絶縁材の健全性診断に向けた非破壊検査システム開発（2）

Development of nondestructive inspection system for soundness diagnosis of cable insulating material (2)

原子燃料工業(株)	石井 元武	Motomu Ishii	Member
原子燃料工業(株)	藤吉 宏彰	Hiroaki FUJIYOSHI	Member
原子燃料工業(株)	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
関西電子ビーム(株)	川島 崇利	Takatoshi KAWASHIMA	
関西電力(株)	浦島 千裕	Chihiro URASHIMA	
関西電力(株)	岡 隆之	Takayuki OKA	
関西電力(株)	鈎 忠志	Tadashi MAGARI	

Abstract

We reported previously the deterioration tendency of cable insulation materials used in nuclear power plants due to irradiation and the applicability of AE (Acoustic Emission) digital hammering inspection to detect the deterioration nondestructively by comparing the natural frequencies before and after the irradiation.

In this study, we selected two kinds of triple core cables which are often utilized in nuclear power plants. The natural peak frequency increased due to the increase of irradiation dose, and showed the same tendency as the single core cable in our previous report. Moreover, we carried out the tensile test on the insulation and confirmed that the amount of change in the peak frequency and Young's modulus had positive correlation. It was therefore suggested that the deterioration of the cable insulation can be detected by AE hammering inspection for even more complex triple core cables.

Keywords: hammering test, AE sensor, non-destructive inspection, cable, insulating material

1. はじめに

原子力発電所で使用されるケーブルの多くは電気絶縁性の高い高分子が利用されているが、高分子は熱や放射線により次第に絶縁性能が低下する¹。

ケーブルの絶縁性能については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定する非破壊劣化診断技術の開発が進められている²。例えばIM法は破断伸びと高い相関性があり、絶縁材の劣化診断における有用性が示されているが、架橋ポリエチレンなど一部の絶縁材については十分な相関がみられていないものがある³。

そこで筆者らは複数種類のケーブルに対して、AEセンサを用いて、放射線による絶縁材の劣化の非破壊的検出を進めている。

2. 経緯

著者らは原子力発電所で使用されているケーブル絶縁材の放射線照射による劣化傾向の把握、およびAEセンサを用いた非破壊検査手法（以下、「AE打音検査」）の適用性確認を目的とした調査を行った⁴。その結果、ケーブルへのAE打音検査によって得られる固有周波数につい

て、照射前後の固有周波数を比較することで放射線照射による絶縁材の劣化を検出できる見込みを得た。Table 1に先行研究において用いた3種類のケーブルの仕様、Fig. 1に外観、Fig. 2にC-1ケーブルの照射による評価ピーク周波数の変化量をそれぞれ示す。

原子力発電所の経年劣化評価対象となっているケーブルは、絶縁材および被覆材（シース）の複数の組み合わせがあり、先行研究では3種類のケーブルを対象に調査した。本報では上記3種類以外のケーブルについて調査する。

Table 1 Specification of samples

Sample name	Material	Size(mm)
C-1	Insulation : XLPE Sheath : vinyl	φ : 41 Length : 300
C-2	Insulation : EPM Sheath : CR	φ : 38.2 Length : 300
C-3	Insulation : XLPE	φ : 20 Length : 300

(XLPE : Cross-linked polyethylene,
EPM : Ethylene propylene rubber, CR : Chloroprene rubber)



Fig. 1 Cable samples

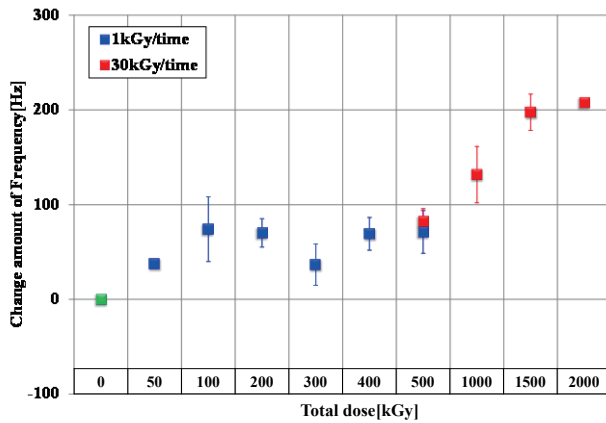


Fig. 2 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-1

3. 試験体の選定

過去の研究で対象としたケーブルは3種とも単心ケーブルであったが、本報では多心ケーブルの劣化傾向を調査すべく原子力発電所における絶縁低下の評価対象となっている3心ケーブル⁵のうち、2種類を選定した。試験体の外観を Fig. 3 に、仕様を Table 2 にそれぞれ示す。

なお、C-4 は芯線を覆う絶縁材と被覆の間に介在が充填されている。また、C-5 は絶縁材が被覆に直接覆われている。

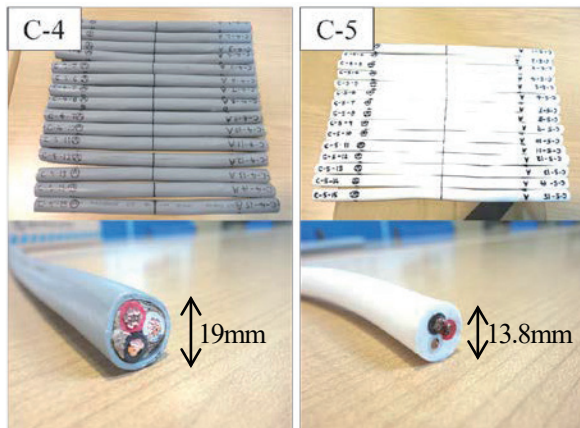


Fig. 3 Irradiation samples

Table 2 Specification of samples

Sample	Material	Size(mm)
C-4	Insulation, Sheath : vinyl	φ19, Length:300
C-5	Insulation, Sheath : silicon rubber	φ13.8, Length:300

4. 放射線照射

前章で示した試験体について、関西電子ビーム(株)が所有する 10MeV 電子線照射施設を用いて、電子線を照射した。本照射施設は、透過性、均一性に優れ、商用として国内最高の 10MeV 電子線照射が可能である⁶。

実機のケーブル布設環境を考慮すると劣化要因となる放射線はγ線が主と考えられる。

ケーブル絶縁材のような高分子材料において、γ線と電子線は吸収線量が同じであれば本質的には同じ効果を与える(二次電子による励起やイオン化の発生、それによるラジカルの生成)ことから⁷、本研究ではγ線と比較して短時間での照射が可能な電子線を用いて実機環境を想定した絶縁材の劣化を評価する。

4.1 照射条件

電子線照射条件を Table 3 に示す。試験体ごとのばらつきを考慮し各照射条件において試験体3体ずつ照射した。

電子線照射は通常運転時の原子炉格納容器内ケーブル布設箇所周囲の平均線量率の最大実測値(0.29Gy/h)⁸を考慮し、5kGyを照射1回あたりの吸収線量(ここでは水の吸収線量相当。以降、「集積線量」という)とし、目標線量に達するまで繰り返し照射した。

なお、絶縁材全周に均一に照射するため、試験体を回転させながら電子線を照射した。

Table 3 Irradiation conditions

Integrated irradiation dose	5kGy/time
Current value	8.66mA
Transport speed	15.00m/min
Scan width	1,100mm
Total dose (kGy)	Number of irradiation
0	0
250	67
500	134
1,000	267
2,000	534

4.2 照射試験体の温度計測

照射による温度上昇に伴う絶縁材の劣化調査を目的として、温度計測用サンプルを用いた照射中のシース表面および芯線の温度計測を行った。5回照射時の温度計測結果を Table 4 に示す。また、照射1回あたりの温度上昇は最大10℃程度であり、C-4、C-5の耐熱試験温度より十分低くなるように照射を行った。以上から、以降は放射線そのものによる劣化について評価する。

Table 4 Temperature measurement results

Sample	heart resisting temperature		Position	Measured temperature [°C]
	[°C]	Time[h]		
C-4	100	48	surface	37.2
			core wire	45.6
C-5	180	-	surface	35.5
			core wire	41.1

5. ケーブルおよび樹脂の劣化評価

ケーブルおよび樹脂の放射線照射による劣化評価として、AE センサを用いた打音検査装置、および絶縁材の引張試験を行った。

5.1 AE 打音検査による劣化評価

AE センサを用いた固有周波数解析は、AE センサが取り付けられた検査対象の状態（重量や形状など）と周囲から受ける拘束の変化を検出し、検査対象の施工状態や健全性を評価する手法である⁹。AE 打音検査装置を Fig. 4 に示す。

AE 打音検査要領を Fig. 5 に示す。Fig. 5 における各計測点において、それぞれ5回ずつ打撃して得られる信号波形を高速フーリエ変換 (FFT) し、平均化処理することで周波数分布を得る。ケーブルへの打音検査より得られる周波数分布を Fig. 6 に示す。



Fig. 4 AE Hammering Inspection system

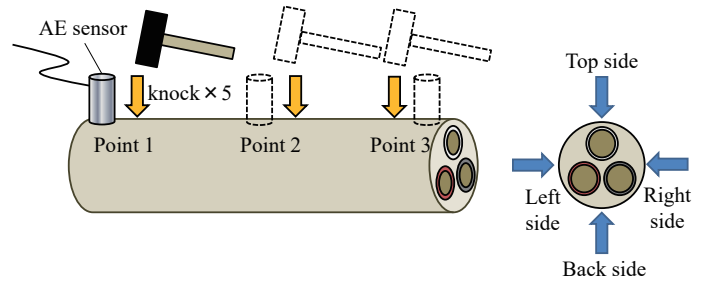


Fig. 5 AE hammering inspection method

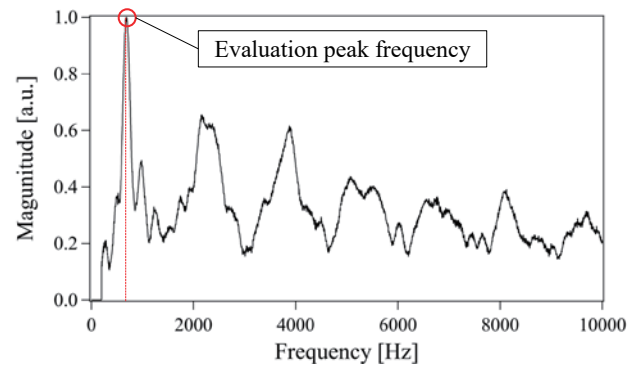


Fig. 6 Frequency distribution (C-4: before irradiation)

5.1.1 AE 打音検査による計測

照射前のケーブル (C-4) における AE 打音検査結果を Fig. 7 に示す。いずれの試験体も 600-800Hz に分布している。

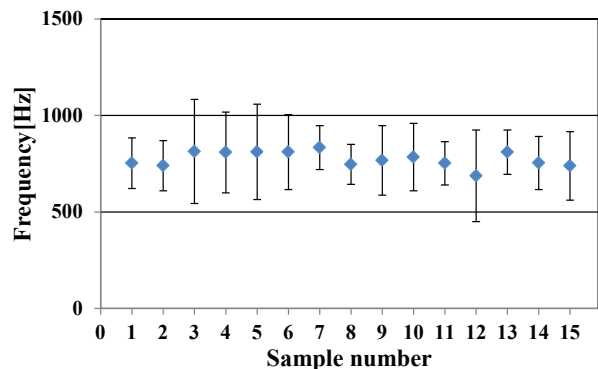


Fig. 7 Peak frequency (C-4, before irradiation)

5.1.2 AE 打音検査結果

各照射条件 (試験体3体ずつ) の評価ピーク周波数変化量 (照射後-照射前) をとった結果を Fig. 8、Fig. 9 に示す。C-4、C-5 のどちらも、照射後は照射前と比較して評価ピーク周波数は概ね上昇した。これは、電子線照射により試験体が硬化したためと考えられる。

絶縁材料は機械的特性の低下が放射線照射に敏感であり、電気的特性の低下は機械的特性が相当低下した後に

現れることが多いことがこれまでの研究で明らかになっている¹⁰。

以上から、AE 打音検査により絶縁材の機械的特性劣化を非破壊的に検出することで、電気的特性の低下を事前に検出可能であることを確認した。

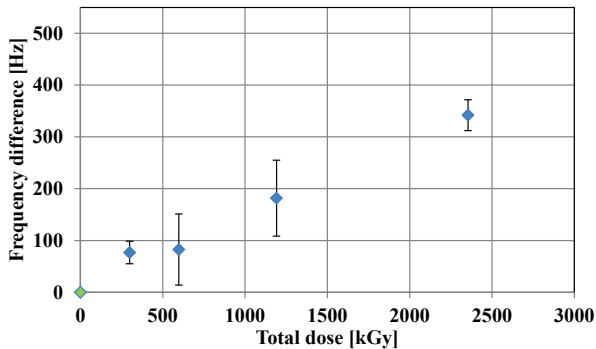


Fig. 8 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-4

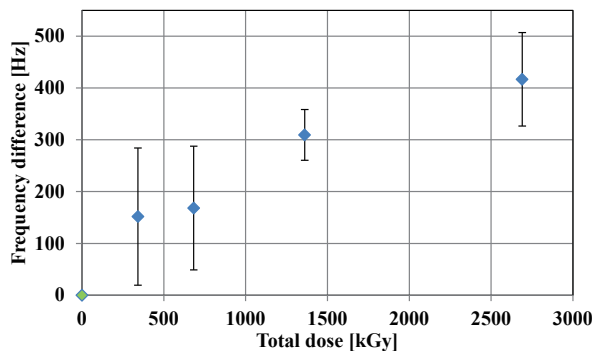


Fig. 9 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-5

5.2 引張試験による劣化評価

ケーブル絶縁材の劣化の一般的な指標として、シース材や絶縁材の「引張強さ」、「破断伸び」、「絶縁抵抗」、「交流破壊電圧」などが用いられるが、これらのうち「破断伸び」などの機械的特性の低下は、「絶縁抵抗」などの電気的特性に比べて経時的に良く変化し、かつ劣化初期から低下が検出できるため、予防保全的にケーブルの劣化を初期段階からモニターするためには「破断伸び」を劣化指標とすることが望ましい¹¹。

そこで、照射後のケーブル絶縁材への引張試験を行い、放射線照射による絶縁材の機械的特性（伸び）への影響を調査した。

引張試験は「JIS C 3005 4.16 絶縁体及びシースの引張り」に基づき、未照射を含む照射済ケーブルから、それぞれ3心を抜き取り試験した。

I. 試験片の作成

JIS C 3005 4.16 では絶縁材の内径が5mm未満の場合は管状の試験片、それ以外のはダンベル状試験片とすることを規定している。今回選定したケーブル絶縁材内径はどちらも5mm未満のため、管状試験片とした（C-4 内径:4.4mm、C-5 内径:2.5mm）。

II. 試験要領

ケーブル試験体について、ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法JIS C 3005:2014に準拠した方法で引張試験を実施した。試験条件を Table 5 に示す。

Table 5 Conditions of tensile tests

Sample	C-4-1~15 : 45samples C-5-1~12 : 36samples
Test condition	<ul style="list-style-type: none"> • test specimen : tubular • stress rate : 500mm/min • inter-marker length : 50mm • test temperature : 23±2°C

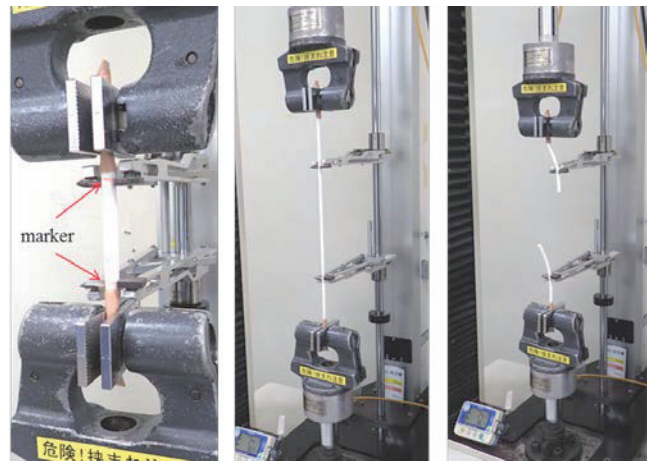


Fig. 10 Operating tensile test

5.2.1 引張試験結果

引張試験結果を Table 6 および Table 7 に示す。C-5 ケーブルにおいて、試験体番号 13~15 (2,000kGy 照射試験体) はシース材と絶縁材の固着により、試験片作成が不可能なほど劣化していることが確認された。

AE 打音検査結果との関係を調査するため、引張試験で得られた引張強さ、伸び (%) から縦弾性係数（ヤング率）を算出する。

材料の縦弾性係数（ヤング率）は応力-ひずみ曲線における「傾き」に相当し、次式で算出される。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

E : ヤング率 (MPa)、 σ : 引張強さ (MPa)、 ε : ひずみ

上式を用い、引張試験で得られた応力（ここでは引張強さ）、ひずみ（ここでは伸び（%）を100で除した値）から導出したヤング率（各照射条件3体ずつの平均値）と、照射線量との関係を Fig. 11、Fig. 12 に示す。

Fig. 11 の結果から、C-4 は 500kGy までヤング率は緩やかに上昇し、1,000kGy 照射で初期値の約2倍、2,000kGy 照射で初期値の約4倍上昇した。

また、Fig. 12 の結果から、C-5 は 250kGy 照射で、初期値の約6倍上昇し、以降も緩やかに上昇し続け、1,000kGy 照射で初期値の約8倍上昇した。

引張試験結果から、C-4、C-5 どちらも照射線量の増加に伴い、ヤング率は上昇し、C-4 と比較して C-5 は照射による影響に敏感であることが確認された。

Table 6 Tensile test results (C-4, after irradiation)

Sample number	Tensile strength(Mpa)	Elongation(%)
1	14.1	225
2	14.2	219
3	14.4	213
4	14.2	225
5	14.2	232
6	14.3	229
7	16	212
8	15.8	219
9	15.4	217
10	17	155
11	16.7	152
12	17.3	154
13	17.8	75
14	18.3	78
15	19	76

Table 7 Tensile test results (C-5, after irradiation)

Sample number	Tensile strength(Mpa)	Elongation(%)
1	8.6	223
2	8.8	230
3	8.2	219
4	3.2	15
5	3.1	13
6	3.2	15
7	2.3	7
8	2.3	8
9	2	7
10	0.9	4
11	1.4	3
12	1.5	5
13		
14		
15		

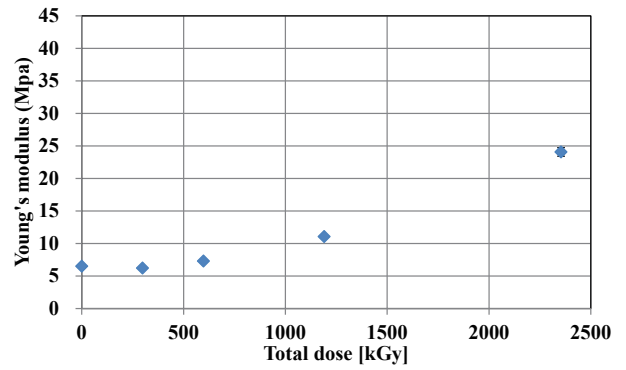


Fig. 11 Influence of irradiation dose on Young's modulus, C-4

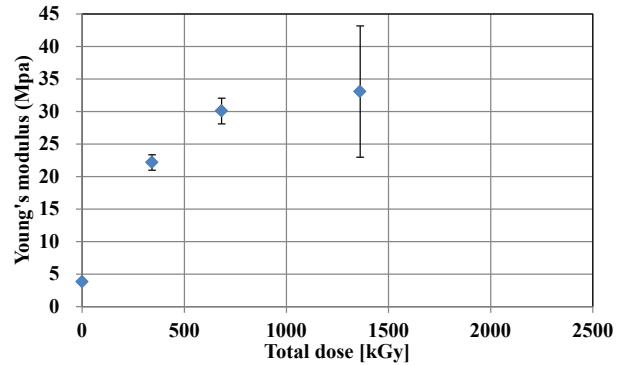


Fig. 12 Influence of irradiation dose on Young's modulus, C-5

5.2.2 AE 打音検査との比較

AE 打音検査で得られた「評価ピーク周波数（照射後）」と引張試験結果から算出した「ヤング率」の関係を Fig. 13 に示す。緑点線で囲ったものは未照射試験体を示す。また、横軸の値、縦軸の値が大きい試験体ほど、照射線量が大きくなる。

ケーブル試験体を梁とみなした場合、その曲げ振動の周波数 f_n は次式で示す通り、ヤング率 E に比例する¹²。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_n^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

n : 振動系のモード次数、 ℓ : ケーブル長(m)、 λ : 境界条件、 E : ヤング率(MPa)、 I : 断面2次モーメント(m⁴)、 ρ : 密度(kg/m³)、 A : 断面積(m²)

上式から、ヤング率は周波数の2乗に比例するため、2次の多項式により近似した結果を Fig. 13 の実線 (C-4)、破線 (C-5) で示す。C-5 の 1,000kGy 照射試験体においてばらつきが大きいのは、照射による試験体の劣化が著しく、引張試験機のつかみ部他で容易に破損してしまい、適切な引張試験の実施が困難であったためと考えられる。

そこで、C-5 における引張試験結果のばらつきの大きい 1,000kGy を除く 0-500kGy の範囲で近似すると、相関係数

(R2 値) は 0.87 となり、評価ピーク周波数とヤング率の正の相関が認められた。

評価ピーク周波数とヤング率の近似式から、C-4 は 0～2,000kGy の範囲、C-5 は 1,000kGy 未満であれば、AE 打音検査を用いた放射線による絶縁材の機械的特性（ここではヤング率）の低下度合いの推定が可能であることを確認した。

今回の調査対象以外のケーブルについても、照射線量に対応した評価ピーク周波数およびヤング率の相関関係のデータベースを構築することで、AE 打音検査を用いたケーブル絶縁材の放射線による機械的特性の低下度合いの推定が可能と考えられる。

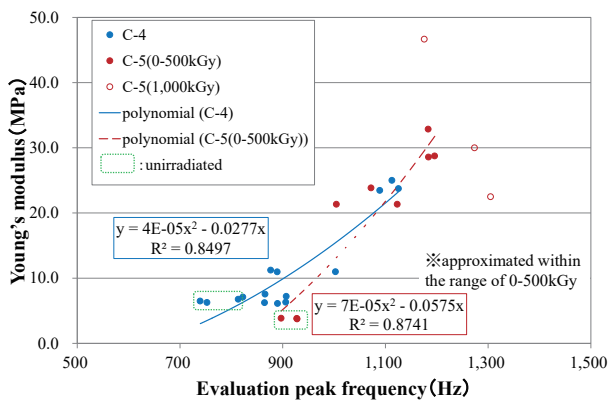


Fig. 13 Relation between Evaluation peak frequency (after irradiation) and Young's modulus

6. まとめ

AE 打音検査で得られる評価ピーク周波数は照射線量の増加にともない上昇し、前報における単心ケーブルと同じ傾向を示した。また、引張試験から評価ピーク周波数の変化量とヤング率には正の相関が確認され、本開発結果から構造がより複雑な三心ケーブルにおいても、AE 打音検査によるケーブル絶縁材の劣化検出が可能であることを確認した。

本開発において得られた知見を以下に整理する。

- ① 絶縁材の引張試験から、C-4（ビニル絶縁）は照射線量の増加にともない、引張強さは上昇し、伸び（%）は低下した。一方で C-5（シリコンゴム絶縁）は照射線量の増加にともない、引張強さ、伸び（%）ともに低下する傾向が得られた。
- ② AE 打音検査および引張試験から、照射による評価ピーク周波数、およびヤング率の上昇傾向は、梁の曲げ振動理論式における周波数とヤング率の関係と一致し、

実験的手法と理論的手法の両面から、絶縁材の劣化傾向を確認できた。

- ③ AE 打音検査で得られた評価ピーク周波数（照射後）と引張試験結果から算出したヤング率の関係から、照射による絶縁材の機械的特性（ここではヤング率）の低下度合いを推定可能である。なお、C-5 については 1,000kGy 未満の範囲であるものの、推定可能である。

参考文献

- [1] “ケーブル絶縁材料の経年劣化研究” JAEA-Review 2012-027
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2012-027.pdf>
- [2] “原子力発電所の低圧ケーブル非破壊劣化診断技術” 三宅悟
http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/1998_5J098_107.pdf
- [3] “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” INSS JOURNAL Vol. 23 2016 R-2
http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/2016_23J160_167.pdf
- [4] “ケーブル絶縁材の健全性診断に向けた非破壊検査システム開発” 藤吉宏彰 他 日本保全学会第 15 回学術講演会
- [5] “高浜発電所 1,2 号炉の劣化状況評価（電気・計装品の絶縁低下）” 平成 27 年 12 月 10 日
<http://www.nsr.go.jp/data/000132661.pdf>
- [6] “10MeV 電子線の特徴” 関西電子ビーム(株)
<http://www.kbeam.co.jp/kenkyu/#TOKUCHO>
- [7] “電子線照射技術の工業利用” 中井康二 他 日新電機技報 Vol.54, No.2 (2009.10)
- [8] “高浜発電所 1 号炉ケーブルの技術評価書”
<http://www.nsr.go.jp/data/000032350.pdf>
- [9] “AE センサを用いた打音検査によるボルトの健全性、施工品質点検システムの開発” 匂坂充行 他日本原子力学会 2017 年秋の大会
- [10] “高分子系材料の耐放射線特性とデータ集” 日本原子力研究所 2003 年 9 月
- [11] “原子力発電所での低圧ケーブルの劣化診断” 山本ら
<http://www.mitsubishi-cable.co.jp/jihou/pdf/97/10.pdf>
- [12] 末岡淳男, 金光陽一, 近藤孝広: 機械振動学, pp122-127, 朝倉書店, 2000