

FRP の健全性診断に向けた非破壊検査システム開発

Development of nondestructive inspection system for soundness diagnosis of FRP

原子燃料工業(株)	藤吉 宏彰	Hiroaki FUJIYOSHI	Member
原子燃料工業(株)	石井 元武	Motomu ISHII	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)	鉤 忠志	Tadashi MAGARI	

Abstract

Fiber reinforced plastic (FRP) is used in a wide range of applications due to its light weight, high strength, excellent corrosion resistance and flexible processability. Although nuclear power plants may have a chance to use FRP as structural and equipment materials in the future, its radiation effect is not well known so far. Thus, we tried to evaluate its radiation degradation non-destructively using "AE (Acoustic Emission) digital hammering inspection". Two types of FRP test specimens of glass fiber and carbon fiber using PEEK resin as a base material were irradiated with electron beam at maximum 2,000kGy. The natural frequency of FRP with glass fiber obtained by the inspection tended to decrease with the irradiation, indicating a potential to detect the radiation deterioration by AE hammering inspection.

Keywords: hammering test, AE sensor, non-destructive inspection, FRP

1. はじめに

繊維強化プラスチック (FRP) は軽量かつ高強度であり、耐食性、加工性に優れ、幅広い用途に使用されている。FRPの劣化事象としては、例えば、酸やアルカリ水溶液環境における加水分解、空気中の酸素による酸化反応、高分子の切断による機械強度の低下などがあるが、金属やコンクリートと比較して歴史が浅く、その劣化挙動は未だ分かっていないことが多い。また、複合材料特有の劣化形態とメカニズムの把握が必要である¹。

今後、原子力発電所においてもFRPの使用が考えられるものの、放射線による影響(劣化)の知見は十分とは言えない。FRP診断技術としては、電子線やCo-60 γ 線を照射した試験体の劣化を曲げ強度により評価²しているほか、最大300MGyの電子線照射劣化を引張試験により評価³したものなど、試験体の破壊を伴う評価方法がある。一方、非破壊検査としては超音波を用い、繊維-母材樹脂の剥離に伴って生じるエコーを捉えることで剥離検出を試みた例⁴のほか、FRP材料内部の変形や割れに伴い放出される弾性波(AE波)の検出波形を解析し、破壊現象と対応させる手法が用いられてきた⁵。

超音波検査の特徴の一つに、対象の表面状態の影響

響が大きいことが挙げられる。そのため筆者らは、表面状態の影響を受けにくいAEセンサを用いた打音検査(以下、「AE打音検査」という)により、放射線によるFRPの劣化検出を非破壊的に試みた。

2. 試験体の選定

FRP試験体は、代表的なガラス繊維(GF)、およびガラス繊維と比較して耐放射線性に優れる炭素繊維(CF)の2種類の繊維材とし、母材樹脂はPEEK(ポリエーテルエーテルケトン)とした。FRP試験体の仕様をTable 1に示す。

Table 1 Specification of samples

Sample	Fiber	Matrix	Size(mm)
GF	glass	PEEK	ϕ 16
CF	carbon		L:200

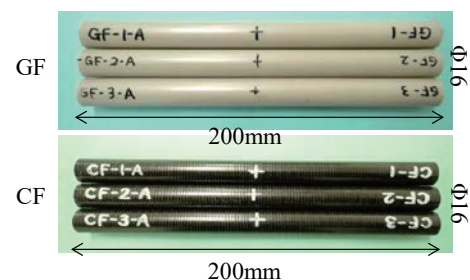


Fig. 1 FRP samples

3. 放射線照射

FRP 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。

実機における FRP 使用環境を考慮すると、劣化要因となる放射線は γ 線が主と考えられる。

FRP 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照射可能な電子線を用い、実機環境を想定した FRP の劣化を評価する。

3.1 照射条件

電子線照射条件を Table 2 に示す。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ループ室内の平均線量率の最大実測値(0.29Gy/h)⁸を参考とし、1kGy 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）として、目標線量に達するまで繰り返し照射した。また、1kGy/回に加えて、SA 時等の過酷な環境を想定し、30kGy/回の 2 通りの照射条件を設定した。

Table 2 Irradiation condition

Irradiation dose per time	1kGy	30kGy
Current value	1.73mA	10mA
Transport speed	14.98m/min	2.89m/min
Scan width	110mm	
Total dose (kGy)	Number of irradiation	
0	—	—
100	100	—
200	200	—
500	500	17
1,000	—	34
1,500	—	50
2,000	—	67

3.2 照射試験体の温度計測

電子線照射に伴う温度上昇による FRP への影響調査のため、温度計測用サンプルを用いて照射中の

FRP 試験体の温度計測を行った。GF、CF それぞれの試験体表面および内部の温度計測結果を Table 3 に示す。1kGy/回は 50 回ずつ、30kGy/回は 4 回ずつ照射した後、自然冷却した。ここで、1kGy 照射における 1 回照射あたりの温度上昇は最大 1.5°C 程度であり、ガラス転移温度以下となるように照射条件を設定した。

上記から、以降は放射線そのものによる劣化について評価する。

Table 3 Temperature measurement on irradiation

Sample	Upper temperature limit(°C)*	Measurement point	Measurement temperature	
			1kGy	30kGy
GF	147	surface	17.4	74.6
		inside	17.7	87.2
CF	147	surface	17.5	75.3
		inside	17.6	80.2

*Glass-transition temperature

4. FRP の劣化評価

AE 打音検査、およびシュミットハンマを用いて、FRP 試験体の放射線照射による劣化を評価した。

4.1 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. 2 に示す。

AE 打音検査要領を Fig. 4 に示す。Fig. 4 における各計測点において、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。

なお、FRP 試験体の破損防止のため、プラスチック製の棒（ ϕ 8mm、長さ 140mm）で軽く打撃することにより信号取得した。

FRP の AE 打音検査で得られる周波数分布の例を Fig. 5 に示す。



Fig. 3 AE Hammering inspection system

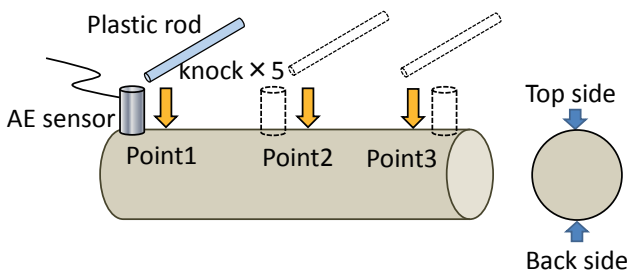


Fig. 4 AE hammering inspection to FRP

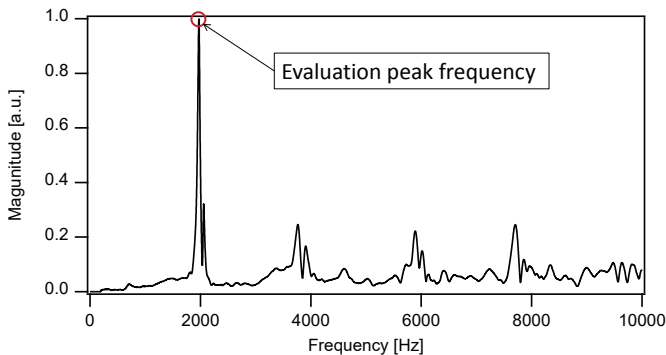


Fig. 5 Frequency distribution (GF)

4.1.1 AE 打音検査による計測

照射前のFRP試験体のAE打音検査結果をFig. 6に示す。評価ピーク周波数はGFで2,000Hz付近、CFで2,500Hz付近に分布している。両者の違いは、繊維材(GF、CF)の物性(特にヤング率)の違いによるものと考えられる。

Fig. 6から計測点におけるばらつき(図中の誤差棒)は十分小さく、以降は各試験体における照射前後の評価ピーク周波数の差をとることで、照射による影響を評価する。

ここで、FRP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¹⁰。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_n^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (\text{式1})$$

n : 振動系のモード次数、 ℓ : 長さ(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)。

式1およびFRPメーカーカタログ値を用いて、GF、CFのそれぞれの周波数 f_n を算出した結果をTable 4に示す。AE打音検査結果と最も周波数に近い2次の振動モードを計測していると推定される。

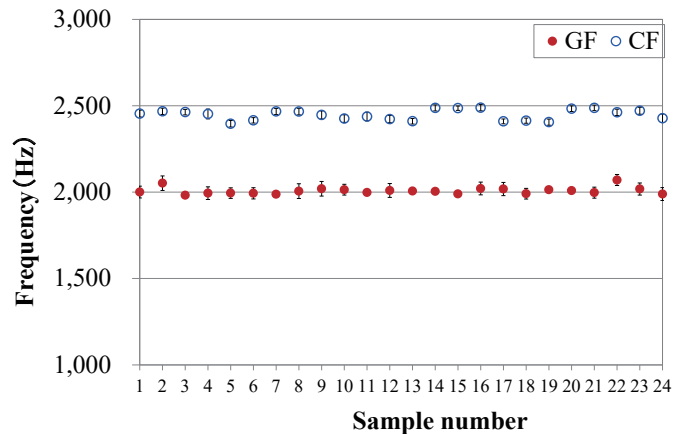


Fig. 6 Peak frequency (before irradiation)

Table 4 Frequency from theory and experiment

mode : n	Boundary conditions : λ	GF			CF			
		**Young modulus (MPa)	**density (g/cm ³)	Frequency calculated from equation : f_n (Hz)	**Young modulus (MPa)	**density (g/cm ³)	Frequency calculated from equation : f_n (Hz)	
1	4.73	6,300	1.53	723	about 2,000	6,000	1.38	742
2	7.85			1,991				2,046
3	10.1			3,907				4,015
Evaluation peak frequency (Hz)								
about 2,500								

※物性値(ヤング率、密度)はメーカーカタログ値から引用

4.1.2 AE 打音検査結果

各照射条件（試験体3体の平均）における評価ピーク周波数変化量（照射後－照射前）のプロットを Fig. 7 に示す。なお、各照射条件における試験体3体の計測値のばらつきを誤差棒で示す。

CF は 200-2,000kGy の照射範囲では明確な変化傾向は見られない。

一方、GF は照射線量の増加に伴い、評価ピーク周波数の明確な低下傾向が確認され、CF と比較して放射線による影響を受けやすいことが分かった。

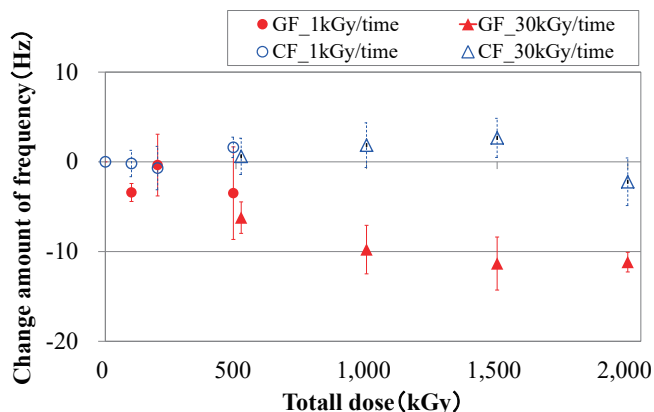


Fig. 7 Influence of dose on peak frequency

4.1.3 照射による影響評価

一般的に、FRP の耐放射線性は主に母材樹脂の耐放射線性に依存することが知られており、母材樹脂が同じでも、耐放射線性は GFRP の方が CFRP より低いのが一般的である。その理由としては、繊維と樹脂の界面における接着が CFRP より GFRP の方が弱いためと解釈されている。すなわち、CFRP では母材樹脂のアンカー効果による物理的寄与が大きいのにに対し、GFRP はガラス繊維表面のシランカップリング処理などの化学的修飾だけが界面の接着を支配し、これが容易に放射線による剥離を招くためとされている。GFRP の界面層の構造モデルを Fig. 8 に示す¹¹。

GF において放射線照射によりガラス繊維と樹脂の界面における剥離が生じることでヤング率が低下した結果、式 1 で示すように、AE 打音検査で得られる評価ピーク周波数が低下したと考えられる。

一方、CF においては上記の傾向が認められず、最大 2,000kGy 照射においても劣化（繊維と樹脂の界面の剥離）に起因するヤング率の低下は生じないと考えられる。

また、500kGy 照射時の 1kGy/回と 30kGy/回において、GF、CF のどちらも周波数変化量に明確な差は見られず、本照射条件において、放射線による影響は照射線量の総量に依存し、1 回あたりの照射線量（1kGy または 30kGy）には依存しないことが分かった。

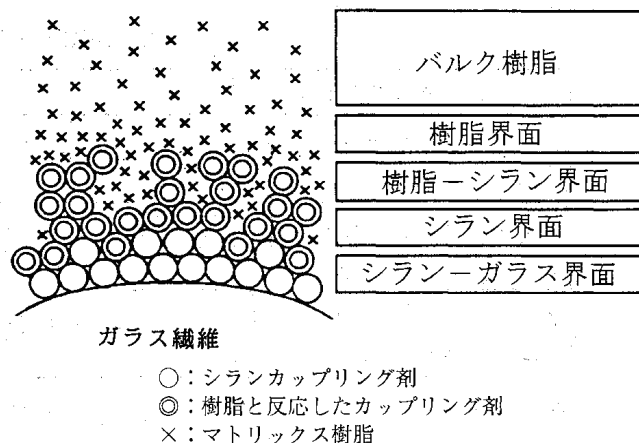


Fig. 8 Structural model of the interface layer of GFRP

4.2 シュミットハンマによる劣化評価

シュミットハンマは非破壊的にコンクリートの圧縮強度が測定できる計測器である。シュミットハンマに内蔵されているハンマがバネの力でコンクリート表面を打撃し、その反発度によりコンクリート圧縮強度の推定が可能である¹²。ここでは、FRP 試験体の放射線照射による劣化の定量評価に用いた。

シュミットハンマの計測は Fig. 9 に示すとおり試験体側面から実施した。なお、打撃時のばらつきを考慮し、各試験体において 5 回計測の平均値をとった。

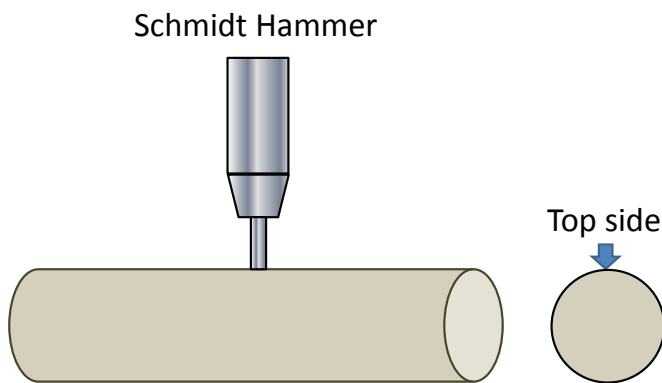


Fig. 9 Schmidt hammer measurement to FRP

4.2.1 シュミットハンマ計測結果

各照射条件における圧縮強度推定値の変化量（試験体3体の平均値）を Fig. 10 に示す。なお、試験体3体ごとのばらつきを图中的誤差棒で示す。

GF、CF ともに各照射線量における圧縮強度推定値はいずれも計測誤差範囲内であり、照射線量と圧縮強度推定値に明確な関係は見られない。

前述の通り、GF において放射線照射によりガラス繊維と樹脂の界面における剥離が生じることで AE 打音検査結果は変化したと推定しているが、この剥離はシュミットハンマーによる圧縮強度測定では検出できなかったと考えられる。

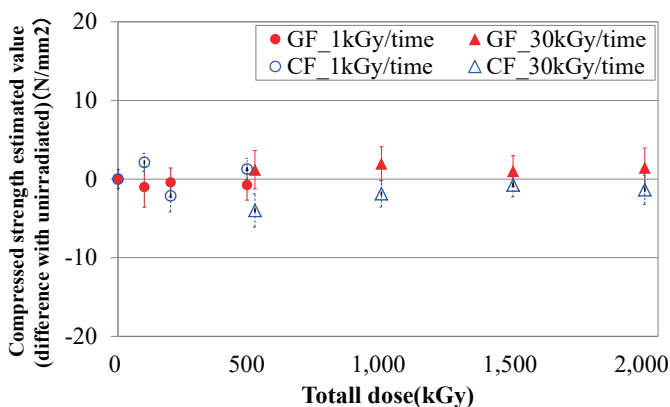


Fig. 10 Influence of dose on Compressive strength

4.2.2 ポリエチレン板材との比較

ケーブルの放射線による劣化調査¹²において、FRP と同様、高分子材料であるポリエチレン板材（100mm×100mm×t10mm）を対象として、AE 打音検査およびシュミットハンマ計測を実施した。計測要領を Fig. 11 に示す。

AE 打音検査で得られた各照射線量において、照射前後の評価ピーク周波数の差（照射後－照射前）をとったグラフを Fig. 12 に示す。照射前は約 1,400～1,500Hz に分布し、2,000kGy 照射で 100Hz 程度上昇しており、照射により 7%程度上昇した。

一方、FRP 試験体は Fig. 7 から 2,000kGy 照射した GFRP 試験体で 10Hz 程度低下し、照射により 0.5%程度低下した。

次に、ポリエチレン板材における圧縮強度推定値（未照射試験体との差分）と照射線量の関係を Fig. 13 に示す。Fig. 13 において、200kGy 以上照射したものは明確に上昇しており、照射による圧縮強度への影響が確認された。

以上から、本開発で選定した FRP 試験体は GF、CF ともポリエチレンと比較して放射線による影響を受けにくいことを確認した。

ポリエチレン板材と FRP の AE 打音検査結果の傾向が異なる要因として、劣化メカニズムの違いが挙げられる。すなわちポリエチレン板材は照射により架橋が発生することでヤング率の上昇するのに対し、FRP は照射により樹脂-繊維材が剥離するにより、ヤング率が低下したためと考えられる。

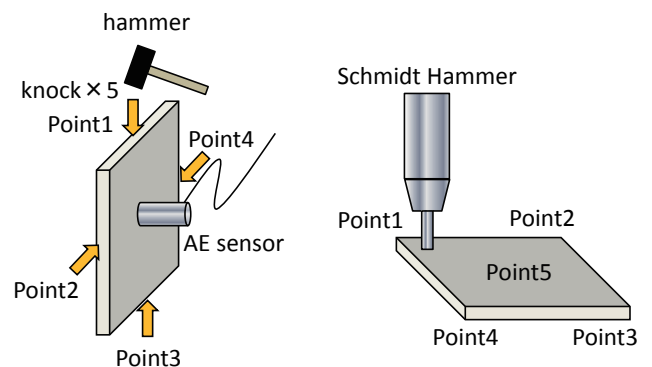


Fig. 11 AE hammering inspection and Schmidt hammer measurement to PE plate

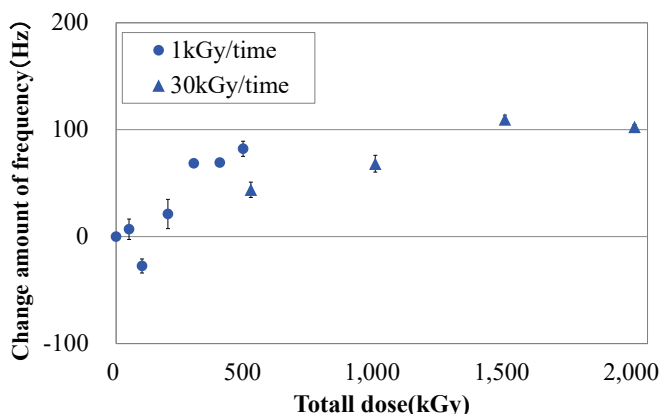


Fig. 12 Influence of dose on peak frequency: PE

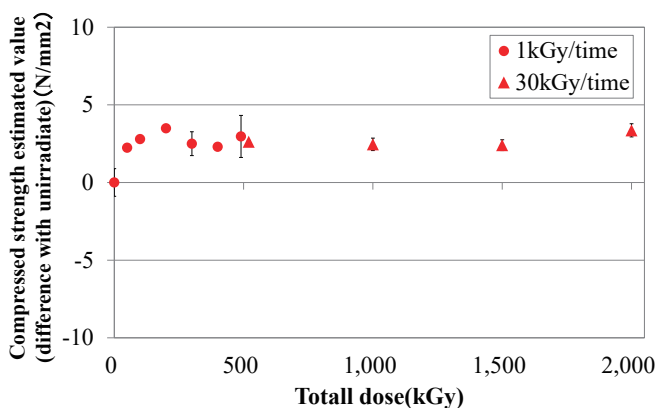


Fig. 13 Influence of dose on compressive strength: PE

5. まとめ

PEEK樹脂を母材としたガラス繊維 (GF)、炭素繊維 (CF) の2種類のFRP試験体において、最大2,000kGy照射し、劣化傾向を調査した。

AE打音検査結果から、GFは照射線量の増加にともない、評価ピーク周波数の減少傾向が得られた。これは樹脂-繊維の界面の剥離によるヤング率の低下に起因するものと考えられる。一方、CFは上記のような傾向は見られなかった。これはGFとCFの繊維-樹脂間の接着性の違いに起因するものであり、CFの方がGFよりも放射線の影響を受けにくいとする研究結果と一致した。

本開発で選定したPEEK樹脂はスーパーエンジニアリングプラスチックに分類され、機械的特性、耐熱・耐薬品性、耐放射線性に優れた特徴を持つ¹⁴。

上記PEEK樹脂を母材としたFRPにおいて、AE打音検査による健全性診断の有効性が確認できた。

参考文献

- [1] “FRPの耐食性と耐久性” 久保内昌敏, 危険物保安技術協会 Safety & Tomorrow No.157 (2014.9)
- [2] “繊維強化プラスチックの放射線劣化に及ぼす繊維の影響” 宇田川昂, 高分子論文集, Vol. 49, No.6, pp.551-553(Jun., 1992)
- [3] “耐放射線性の向上” 瀬口忠男, 日本複合材料学会誌, 15, 2(1989), 49-55
- [4] “超音波によるFRP劣化診断技術の開発” 勝又健一 他, 海上技術安全研究所報告 第4巻 第5号 (平成16年度) 総合報告 19
- [5] “FRPのAEによる評価” 岸輝雄 他, 日本複合材料学会誌, 12, 6(1986), 241-250
- [6] “10MeV電子線の特徴” 関西電子ビーム株式会社 URL:<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号炉劣化状況評価書” 平成27年4月 関西電力株式会社 URL:<http://www.nsr.go.jp/data/000105718.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] 末岡淳男, 金光陽一, 近藤孝広: 機械振動学, pp122-127, 朝倉書店, 2000
- [11] “FRPにおける界面層とその化学適制御” 「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol.45, No.12, pp.1307-1315, Dec. 1996
- [12] “シュミットハンマー取扱説明書” 富士物産株式会社 URL:http://www.eg.aktio.co.jp/product_pdf/torisetsu_03_8-1_NR.pdf
- [13] “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 予稿集, pp471-476
- [14] “エンズインガーのTECAPEEK” URL:<https://www.ensingerplastics.com/ja-jp/shapes/high-performance-plastics/peek>