

# 川内原子力発電所 1, 2号炉の 劣化状況評価結果について (電気・計装品の絶縁低下について)

2023年1月30日

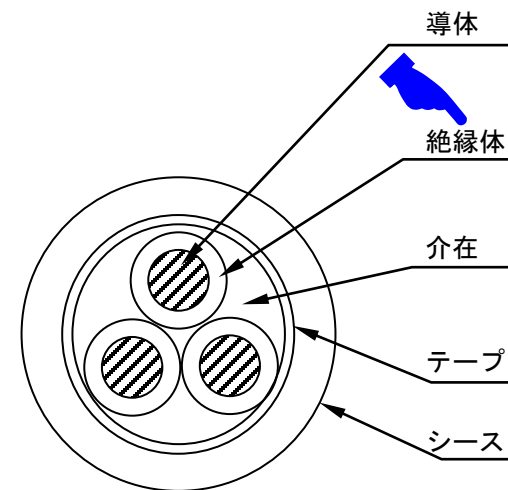
## 目 次

1.	代表機器の選定	2
2.	低圧ケーブル	
2.1	健全性評価	6
2.2	現状保全	13
2.3	総合評価	13
2.4	高経年化への対応	13
3.	高圧ポンプ用電動機	
3.1	健全性評価	14
3.2	現状保全	19
3.3	総合評価	20
3.4	高経年化への対応	20
4.	電気ペネトレーション	
4.1	健全性評価	21
4.2	現状保全	29
4.3	総合評価	29
4.4	高経年化への対応	29
5.	代表機器以外の評価	30

## 1. 代表機器の選定

### ○絶縁低下について

- ・電気・計装品には、絶縁性能を保つために、種々の部位に ゴム、樹脂等の高分子材料及びプロセス油等の有機化合物材料が使用されている。
- ・これらの材料は、環境的（熱・放射線等）、電氣的及び機械的な要因で劣化するため、絶縁性能が低下し、電気・計装品の機能が維持できなくなる可能性がある。



代表的なケーブルの構造

- ・絶縁低下とは、通電部位と大地間、あるいは通電部位と他との通電部位間の電氣的独立性（絶縁性）を確保するための高分子材料が、環境的（熱・放射線等）、電氣的及び機械的な要因で劣化するため、電気抵抗が低下し、絶縁性が確保できなくなる現象である。
- ・さらに絶縁低下には水トリリー劣化がある。これは長期間にわたって水が存在する状態でかつ高い電位に絶縁材料がさらされている場合に、水と局所的な電界集中が原因で絶縁材料中に樹枝状に欠陥が発生する現象であり、高圧ケーブルのみに発生が確認されている。

**【ステップ1】**

絶縁低下の評価では、電気・計装品の機能維持に必要な絶縁性能を考慮すべき設備を評価対象として抽出している。抽出した設備を次頁からの表「評価対象となる電気・計装品」に示す。

抽出された全評価対象機器に対して健全性評価を実施し、現状保全を継続していくことでその健全性を維持できることを確認した。

**【ステップ2】**

高経年化技術評価書では、電圧区分（高圧・低圧）、型式、設置場所（屋内・外）、絶縁材料等に応じグループ化を行っており、設備の重要度（高い）、使用条件（環境温度や定格電圧が高い）等を考慮してグループ内代表機器を選定している。

**【ステップ3】**

グループ内代表機器の中から設備の重要性と評価の共通性を考慮し、以下の観点から代表機器を選定する。

①長期健全性試験結果をもって絶縁性能維持を判断するもの

②長期健全性試験結果と現状保全をもって絶縁性能維持を判断するもの

上記観点から、以下の機器を代表機器として選定し、具体的な評価内容を説明する。なお、その他のグループ内代表機器の評価結果については、「5. 代表機器以外の評価」に示す。

①低圧ケーブル（難燃PHケーブル）、電気ペネトレーション（ピッグテイル型電線貫通部）

設計基準事故及び重大事故等環境下にて機能が要求され、使用条件が最も厳しく、原子炉格納容器内で多く使用されているケーブル及び電気ペネトレーション

②高圧ポンプ用電動機（海水ポンプ用電動機）

通常の使用電圧が高く、屋外に設置され、連続運転している電動機

## 評価対象となる電気・計装品 (1/2)

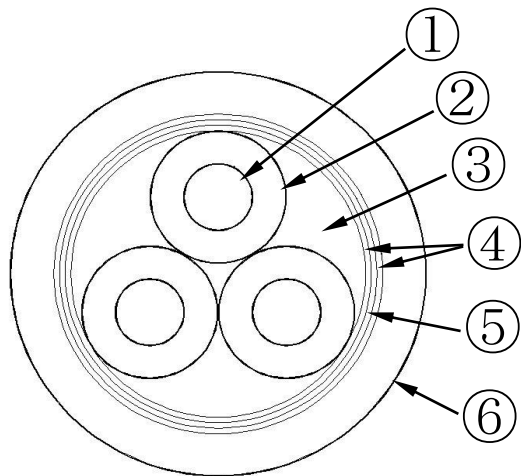
機器・構造物	評価対象設備	評価対象部位	事故時環境が著しく悪化するエリアにおいて機能要求のある機器
ポンプ用電動機	高圧ポンプ用電動機	固定子コイル、口出線他	—
	低圧ポンプ用電動機	固定子コイル、口出線	—
容器	電気ペネトレーション	ポッティング材、外部リード	○
弁	弁電動装置	固定子コイル他	○
ケーブル	高圧ケーブル	絶縁体	—
	低圧ケーブル	絶縁体	○
	同軸ケーブル	絶縁体、内部シース	○
	ケーブル接続部	絶縁物他	○
電気設備	メタルクラッド開閉装置	ばね蓄勢用モータ他	—
	動力変圧器	コイル	—
	パワーセンタ	ばね蓄勢用モータ他	—

## 評価対象となる電気・計装品 (2/2)

機器・構造物	評価対象設備	評価対象部位	事故時環境が著しく悪化するエリアにおいて機能要求のある機器
計測制御設備	制御設備	計器用変圧器他	—
空調設備	電動機	固定子コイル他	—
機械設備	制御用空気圧縮装置	固定子コイル他	—
	燃料取扱設備	変圧器他	—
電源設備	非常用ディーゼル発電設備	固定子コイル他	—
	計器用電源設備	変圧器	—
	制御棒駆動装置用電源設備	ばね蓄勢用モータ	—
	大容量空冷式発電機	固定子巻線他	—

## 2. 低圧ケーブル <難燃PHケーブルの評価例>

### 2.1 健全性評価



代表的な低圧ケーブル構造図

難燃PHケーブル主要部位の使用材料

No.	部 位	材 料
①	導 体	銅（錫メッキ）
②	絶 縁 体	難燃エチレンプロピレンゴム
③	介 在	ジュート
④	テ ー プ	布
⑤	遮へい層	銅テープ（錫メッキ）
⑥	シ ー ス	難燃クロロスルホン化ポリエチレン

難燃PHケーブルの使用条件\*1

	通常運転時	設計基準事故時	重大事故等時
使用環境	原子炉格納容器内		
周囲温度	約50°C*2	約127°C（最高温度）	約138°C（最高温度）
圧 力	約0.0098MPa [gage] 以下	約0.245MPa [gage]（最高圧力）	約0.350MPa [gage]（最高圧力）
放 射 線	0.35Gy/h*3	602kGy（最大集積線量）	500kGy（最大集積線量）

\*1：環境条件が厳しい原子炉格納容器内ケーブルの条件を代表として記載

\*2：通常運転時の原子炉格納容器内難燃PHケーブル周囲温度実測値（平均値の最大値）に余裕を加えた温度

\*3：通常運転時の原子炉格納容器内難燃PHケーブル周囲線量率実測値（平均値の最大値）に余裕を加えた線量率

## (1) 準拠規格等

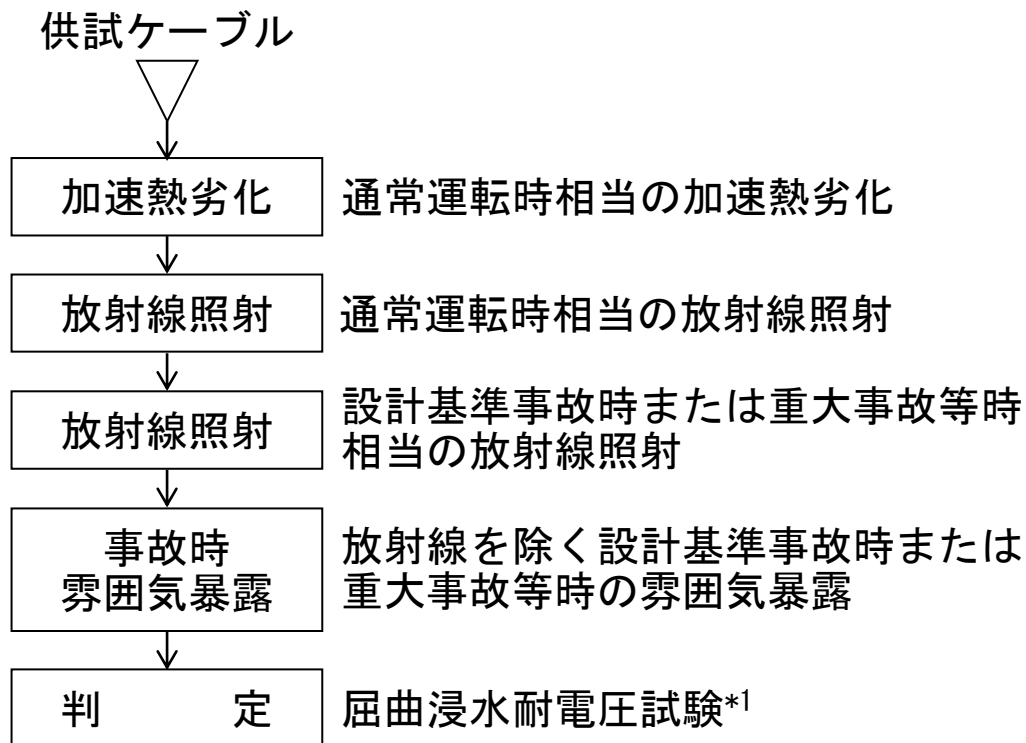
低圧ケーブル（難燃PHケーブル）の健全性評価は以下に示す規格等に準拠した方法により実施した。

- ・ IEEE Std. 323-1974及び383-1974の規格を根幹にした、電気学会技術報告Ⅱ部第139号「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法並びに耐延焼性試験方法に関する推奨案」（以下、「電気学会推奨案」という。）に基づき評価を行う。
- ・ 平成26年2月に、原子力安全基盤機構により取りまとめられた「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド（JNES-RE-2013-2049）」（以下、「ACAガイド」という。）に基づき評価を行う。



## (2) 電気学会推奨案に基づく試験手順、試験項目

事故時雰囲気内で機能要求がある難燃PHケーブルの電気学会推奨案に基づく試験手順及び判定方法を以下に示す。



\*1： 屈曲浸水耐電圧試験の試験手順は以下のとおりである

- ① 直線状に試料を伸ばした後、試料外径の約40倍のマンドレルに巻き付ける
- ② ①の両端部以外を常温の水中に浸し1時間以上放置する
- ③ ②の状態、公称絶縁体厚さに対し交流電圧3.2kV/mmを5分間印加し、絶縁破壊が生じるか否かを調べる

### (3) 電気学会推奨案に基づく試験条件、試験結果

電気学会推奨案に基づく試験条件は、実機環境に基づいて60年間の運転期間及び事故時雰囲気想定した劣化条件を包絡している。難燃PHケーブルの長期健全性試験条件並びに長期健全性試験結果を以下に示す。

長期健全性試験条件（川内1，2号炉）

		試験条件	60年間の通常運転時の使用条件に基づく劣化条件 又は事故時の環境条件	
			設計基準事故時	重大事故等時
相当 通常 運転	温度	140℃-9日	117℃-9日 (=60℃*1-60年)	
	放射線 (集積線量)	500kGy (7.3kGy/h)	185kGy*2	
相当 事故 時 雰囲気	放射線 (集積線量)	1,500kGy (7.3kGy/h)	602kGy	500kGy
	温度	最高温度：190℃	最高温度：約127℃	最高温度：約138℃
	圧力	最高圧力：0.41MPa[gage]	最高圧力：約0.245MPa[gage]	最高圧力：約0.350MPa[gage]

\*1：原子炉格納容器内でのケーブル布設エリアの温度（約42℃）に通電による温度上昇と余裕を加えた温度として設定

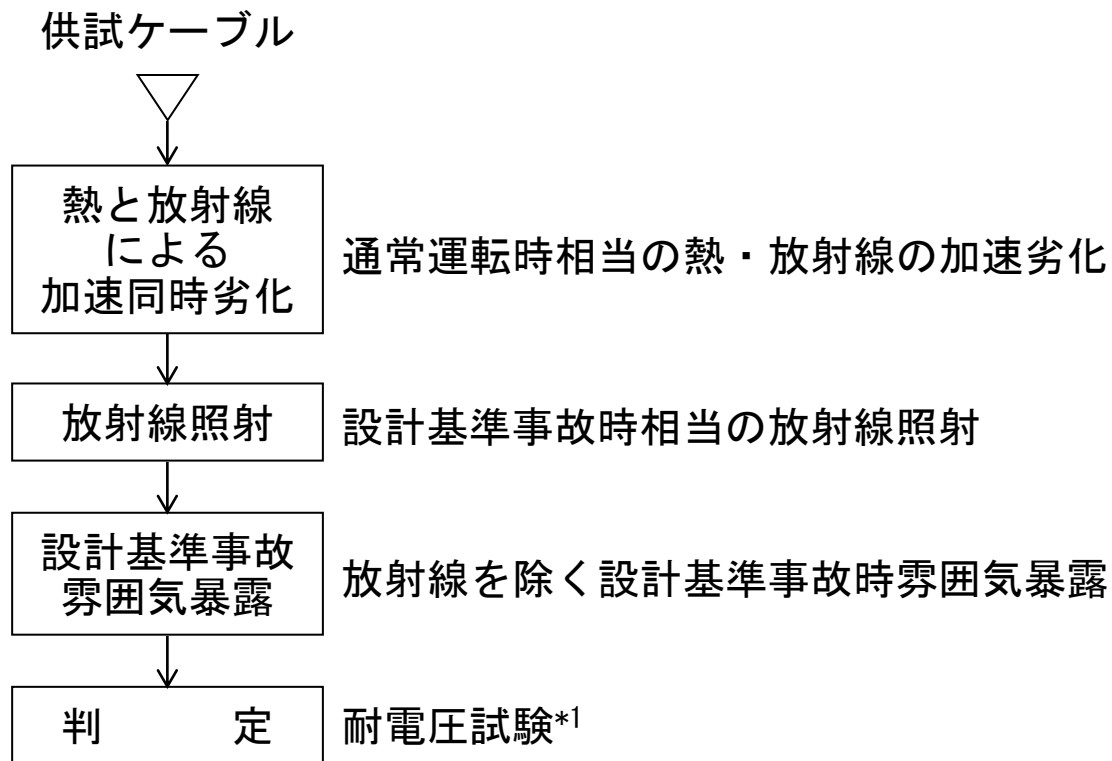
\*2：0.35[Gy/h] × (24 × 365.25) [h/y] × 60[y] = 185kGy

長期健全性試験結果（川内1，2号炉）

項目	試験条件	判定
屈曲浸水 耐電圧試験	供試体外径：11.5mm マンドレル径：400mm 絶縁厚さ：0.8mm 課電電圧：2.6kV/5分間	良

### (4) A C A ガイドに基づく試験手順、試験項目

事故時雰囲気内で機能要求がある難燃 P H ケーブルの A C A ガイドに基づく試験手順及び判定方法を以下に示す。



\*1：耐電圧試験は、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)の試験

### (5) A C Aガイドに基づく試験条件、試験結果

A C Aガイドに基づく試験条件及び試験結果を下表に示す。

なお、評価にあたっては「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レポート）」の試験結果を用いた。

長期健全性試験条件

		試験条件
通常 相当 運転	温度 放射線	100℃－94.8Gy/h－4003h
	放射線 (集積線量)	1,500kGy (10kGy/h以下)
事故時 雰囲気 相当	温度	最高温度：190℃
	圧力	最高圧力：0.41MPa[gage]

長期健全性試験結果

項目	試験条件	判定
耐電圧試験	課電電圧：1500V／1分間	良

## ACAガイドに基づく実布設環境での長期健全性試験評価結果（川内1，2号炉）

布設区分	実布設環境条件		評価期間 [年]*1,2	備考
	温度 [°C]	放射線量率[Gy/h]		
ループ室	45	0.35	45	〔1号炉〕 更新を踏まえた評価期間は60年以上となる。 (更新時期：2018年度～2020年度) 〔2号炉〕 更新を踏まえた評価期間は60年以上となる。 (更新時期：2018年度～2020年度)
加圧器上部	50	0.005	91	
通路部	45	0.005	129	
通路部 ケーブル トレイ内	60*3	0.005	47	〔1号炉〕 更新を踏まえた評価期間は60年以上となる。 (更新時期：2011年度～2015年度) 〔2号炉〕 更新を踏まえた評価期間は60年以上となる。 (更新時期：2011年度～2015年度)
主蒸気管室	45	—	147	

\*1：稼働率100%での評価期間

\*2：時間依存データの重ね合わせ手法により評価

\*3：原子炉格納容器内でのケーブル布設エリアの温度（約42°C）に通電による温度上昇と余裕を加えた温度として設定

## (6) 健全性評価結果

60年間の運転期間を想定した劣化条件を包絡した試験（長期健全性試験）の結果、難燃PHケーブルは運転開始後60年時点において、更新実績も踏まえると絶縁機能を維持できることを確認した。

## 2.2 現状保全

電力用ケーブルについては、定期的に絶縁抵抗測定により許容値以上であることを確認している。また、制御・計装用のケーブルについては、定期的に計測制御系統設備の機能検査等により、系統機器の動作又は計器の指示値等に異常のないことを確認し、絶縁低下による機能低下のないことを確認している。

## 2.3 総合評価

健全性評価結果から判断して、絶縁体の絶縁低下により機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。

絶縁低下は、絶縁抵抗測定、系統機器の動作確認又は計器の指示値確認等で検知可能であり、点検手法として適切である。

## 2.4 高経年化への対応

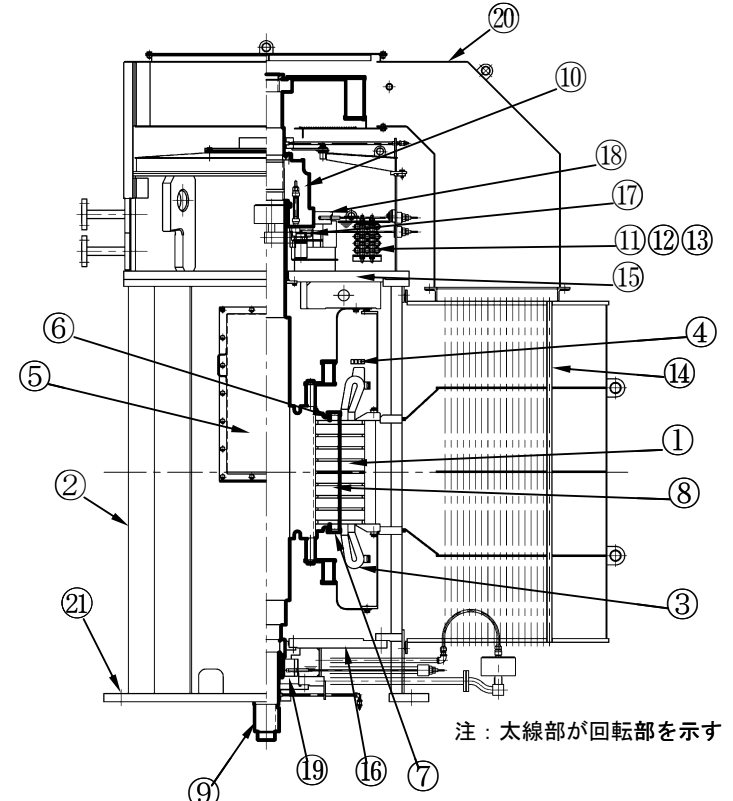
絶縁体の絶縁低下については、現状保全項目に高経年化対策の観点から、追加すべきものはないと判断する。

### 3. 高圧ポンプ用電動機 <海水ポンプ用電動機の評価例>

#### 3.1 健全性評価

	部位	材 料
固定子組立品	① 固定子コア	珪素鋼板
	② フレーム	炭素鋼
	③ 固定子コイル	銅、マイカ、エポキシ樹脂（F種絶縁）
	④ 口出線・接続部品	銅、シリコンゴム、マイカ、エポキシ樹脂（F種絶縁）
	⑤ 端子箱	炭素鋼
回転子組立品	⑥ 回転子棒	銅合金
	⑦ エンドリング	銅合金
	⑧ 回転子コア	珪素鋼板
	⑨ 主軸	炭素鋼
	⑩ ランナー	鋳鉄
冷却器組立品	⑪ 油冷却器伝熱管	チタン合金
	⑫ 油冷却器水室	チタン合金
	⑬ 油冷却器管板	チタン合金
	⑭ 空気冷却器伝熱管	銅合金
軸受組立品	⑮ 上部ブラケット	炭素鋼
	⑯ 下部ブラケット	炭素鋼
	⑰ スラスト軸受（すべり）	消耗品・定期取替品
	⑱ 上部ガイド軸受（すべり）	消耗品・定期取替品
	⑲ 下部ガイド軸受（すべり）	消耗品・定期取替品
カバー組立品	⑳ 外扇カバー	炭素鋼
支持組立品	㉑ 取付ボルト	炭素鋼

海水ポンプ用電動機主要部位の使用材料



海水ポンプ用電動機構造図

定 格 出 力	380kW
周 囲 温 度	約40℃*1
定 格 電 圧	6,600V
定 格 回 転 数	885rpm

海水ポンプ用電動機の使用条件

\* 1  
 通年の屋外の最高温度を考慮した雰囲気温度

## (1) 準拠規格

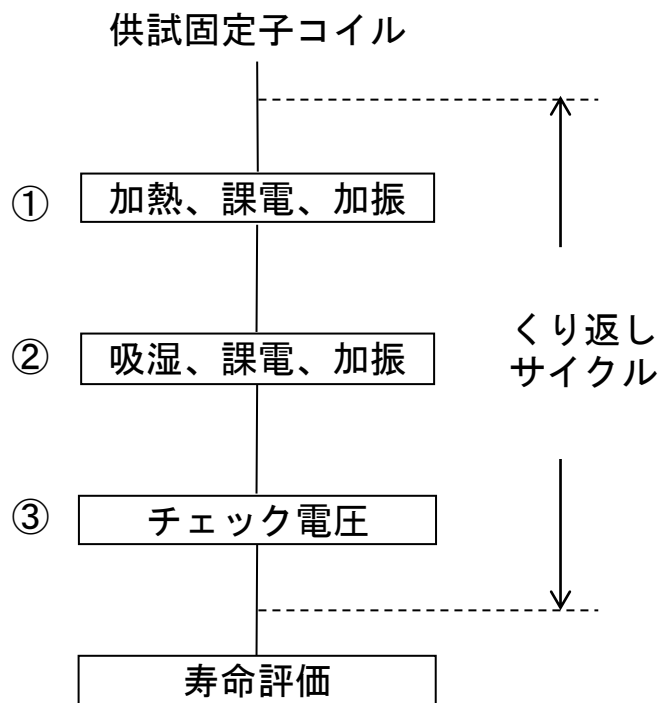
高圧ポンプ用電動機（海水ポンプ用電動機）の健全性評価は以下に示す規格に準拠した方法により実施した。

- ・ 高圧ポンプ用電動機の固定子コイルの健全性評価は、同種の一般的な固定子コイルの絶縁低下に対する評価方法を用いる。ここでは、IEEE Std. 275-1966の規格に準じて実施した評価試験結果より固定子コイルの長期健全性を評価した。
- ・ IEEE Std. 275-1966では、熱、機械、環境及び電気の各劣化要因について個々に試験条件が述べられているが、電動機はこれらの劣化要因が複合するため、複合劣化の試験条件で固定子コイルの長期健全性を評価した。



## (2) 試験手順、試験項目並びに試験条件

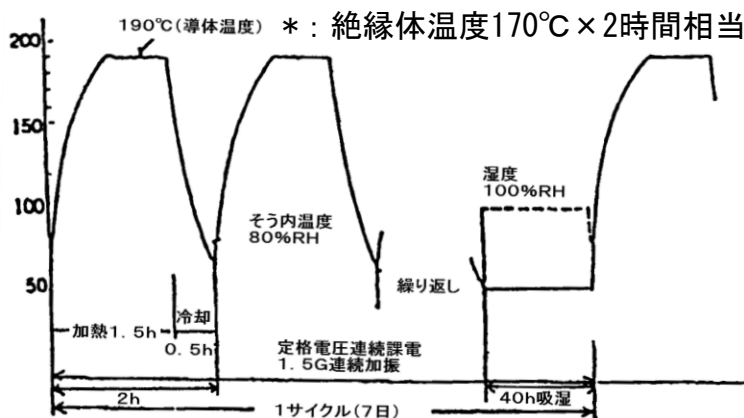
高圧ポンプ用電動機の供試固定子コイルのヒートサイクル方法による評価手順並びに試験条件を以下に示す。



手順	試験項目	試験条件1	試験条件2	実機設計条件
①	温度	170°C×2 時間 (加熱1.5 h、冷却0.5 h、at80% RH)	190°C×2 時間 (加熱1.5 h、冷却0.5 h、at80% RH)	最大145°C
	電圧	6.6kV—常時印加	6.6kV—常時印加	6.6kV
	振動	1.5G—常時加振	1.5G—常時加振	1G以下
②	湿度	100%RH—40時間 (at 50°C)	100%RH—40時間 (at 50°C)	最大100%RH (at 40°C)
	電圧	6.6kV—常時印加	6.6kV—常時印加	6.6kV
	振動	1.5G—常時加振	1.5G—常時加振	1G以下
③	チェック電圧	対地間 1.5×E=9.9kV—1分間 線間 150V—1分間	対地間 1.5×E=9.9kV—1分間 線間 150V—1分間	—

RH: relative humidity (相对湿度)

固定子コイル長期健全性評価手順



ヒートサイクル方法例 (試験条件1)

### (3) ヒートサイクル方法による試験結果

- 高圧ポンプ電動機の固定子コイルについて、試験手順①（64回程度の繰り返し）、②、③を1サイクルとし、コイル絶縁がチェック電圧で破壊するまで繰り返し、試験条件1（170℃）及び試験条件2（190℃）での耐熱寿命を基にアレニウス則\*に基づいて定数A、Bを求め耐熱寿命曲線を得る。

\* アレニウス則 
$$\log Y = -A + \frac{B}{273 + t} \dots\dots\dots (1)$$

Y : 寿命時間 (h)  
 t : 運転温度 (℃)  
 A、B : 定数  
 log Y : 自然対数

- このアレニウス則（1）式に当該電動機の運転温度 t（℃）を代入して、寿命を求める。
- 運転温度は、使用最高温度（周囲温度＋固定子コイルの温度上昇＋測定ポイントとホットスポットとの差（マージン））を用いる。
- これらの結果、固定子コイルの絶縁寿命は、19.95年と判断する。

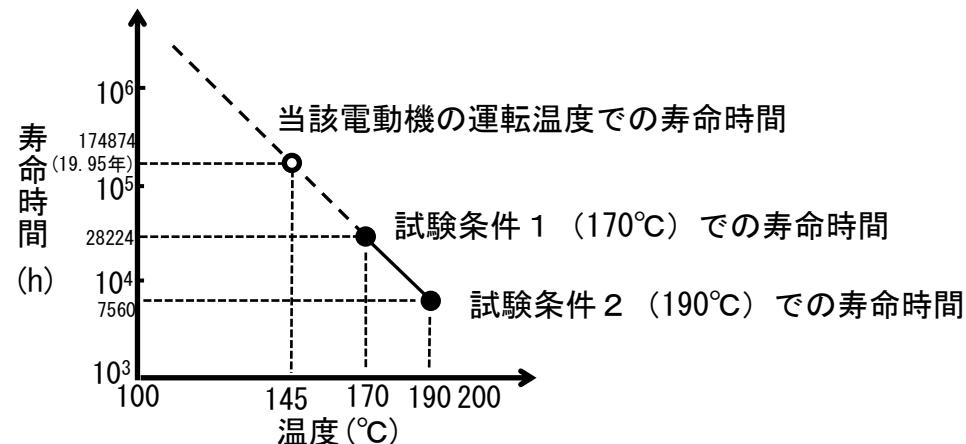


図 耐熱寿命曲線

### (4) 旧機の coils 破壊電圧の測定値評価結果

- 6. 6 kV 級の経年機に使用していた旧機 coils の破壊電圧の測定結果及びその平均値から、稼働率を考慮した運転年数\*1 と絶縁破壊値の関係が下図のように求められる。
- 縦軸の絶縁破壊値は新品の値を 100% として示している。
- この評価から coils 破壊電圧の平均値と 95% 信頼下限が安全運転下限 14.2 kV\*2 に低下するのが 18.5 ~ 24 年となるため、固定子 coils の運転に必要な絶縁耐力を保有する期間は 95% 信頼下限で評価した場合、18.5 年と判断する。

\*1 : 稼働率等を考慮に入れた年数 = 運転時間 (年) + 休止時間 (年) / 休止係数

\*2 : (社) 電気学会 JEC-2100 「回転電気機械一般」 :  $2E + 1 = 2 \times 6.6 [kV] + 1 [kV] = 14.2 [kV]$

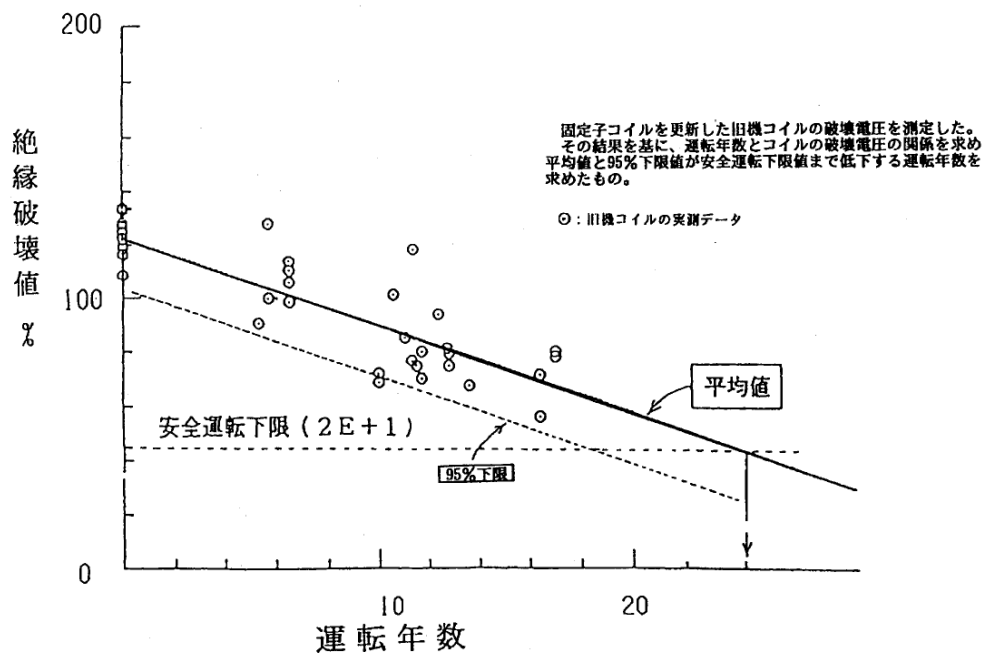


図 運転年数と絶縁破壊値の関係

## (5) 健全性評価結果

ヒートサイクル方法及び旧機のコイル破壊電圧の測定値による評価結果より、高圧ポンプ用電動機固定子コイル及び口出線・接続部品の運転に必要な絶縁耐力を保有する期間は、より厳しい評価結果である旧機のコイル破壊電圧の測定値を評価した結果を採用し、18.5年と判断する。

なお、海水ポンプ用電動機は屋外に設置されているが、IEEE Std. 275-1966の規格に準じて実施した試験において吸湿は厳しい状況下にて実施していること及び旧機のコイルは破壊電圧試験では屋外に設置されていた供試体も含まれていることから、屋内外の設置環境による評価年数に差はないと考える。

## 3.2 現状保全

固定子コイル及び口出線・接続部品の絶縁低下に対しては、定期的な絶縁抵抗測定を行い、許容値以上であることを確認している。さらに、絶縁診断（直流吸収試験、 $\tan \delta$  試験、部分放電試験）により、許容値範囲に収まっていることの確認を行うとともに、傾向管理を行っている。

また、絶縁抵抗測定及び絶縁診断結果に基づき、必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施していく。

なお、海水ポンプ用電動機については、予防保全のため、以下の通り絶縁更新を行っている。

〔1号炉〕 A、B号機：第19回定期検査時、C号機：第20回定期検査時、D号機：第18回定期検査時

〔2号炉〕 A号機：第17回定期検査時、B号機：第19回定期検査時、C号機：第20回定期検査時、D号機：第18回定期検査時

### 3.3 総合評価

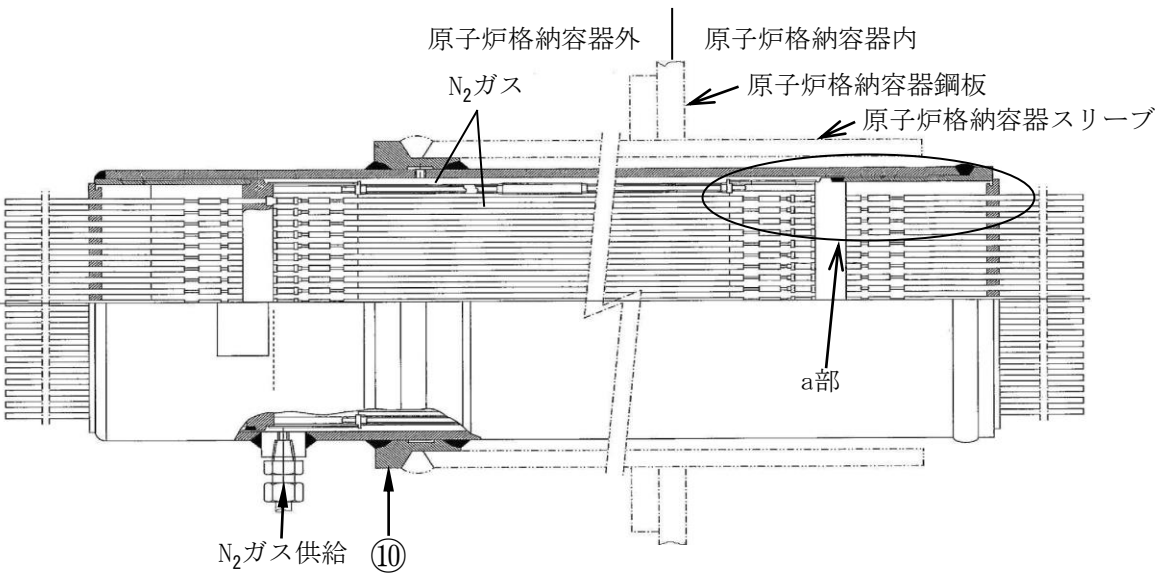
健全性評価結果から判断して、固定子コイル及び口出線・接続部品の絶縁低下については、18. 5年以降において発生の可能性は否定できないが、絶縁低下は、絶縁抵抗測定及び絶縁診断で検知可能であり、点検手法として適切である。よって、現状保全を継続することで、健全性を維持できると考える。

### 3.4 高経年化への対応

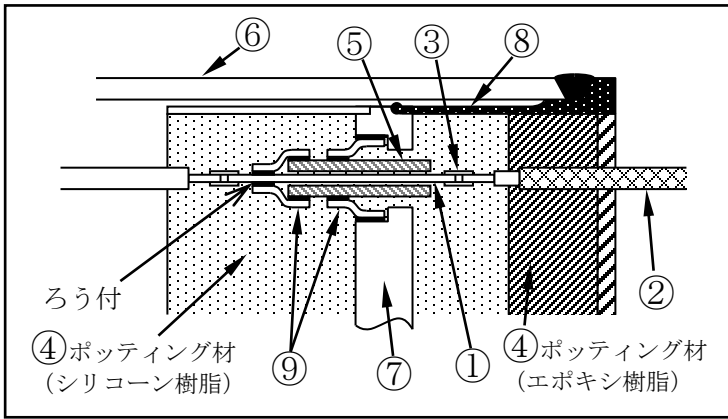
固定子コイル及び口出線・接続部品の絶縁低下については、引き続き定期的な絶縁抵抗測定（毎定期検査）及び絶縁診断（分解点検時：1回／4定期検査）を実施していくとともに、運転年数及び点検結果に基づき必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施していく。

# 4. 電気ペネトレーション <ピッグテイル型電線貫通部の評価例>

## 4.1 健全性評価



構造図



a部詳細図

主要部位の使用材料

No.	部 位	材 料
①	銅棒	銅
②	外部リード	銅、シリコンゴム、ガラス編組
③	接続金具	銅
④	ポッティング材	シリコン樹脂、エポキシ樹脂
⑤	アルミナ磁器	アルミナ
⑥	本体	ステンレス鋼
⑦	端板	ステンレス鋼
⑧	シュラウド	ステンレス鋼
⑨	封着金具	ニッケル合金
⑩	溶接リング	炭素鋼

使用条件

	通常運転時	設計基準事故時	重大事故等時
使用環境	原子炉格納容器内		
周囲温度	約40℃*1	約127℃ (最高温度)	約138℃ (最高温度)
圧 力	約0.0098MPa [gage] 以下	約0.245MPa [gage] (最高圧力)	約0.350MPa [gage] (最高圧力)
放 射 線	5 × 10 <sup>-3</sup> Gy/h*2	602kGy (最大集積線量)	500kGy (最大集積線量)

\*1: 通常運転時の原子炉格納容器内電気ペネトレーション周囲温度実測値 (平均値の最大値) に余裕を加えた温度

\*2: 通常運転時の原子炉格納容器内電気ペネトレーション周囲線量率実測値 (平均値の最大値) に余裕を加えた線量率

## (1) 準拠規格等

電気ペネトレーションの健全性評価は、以下に示す規格等に準拠した方法により実施した。

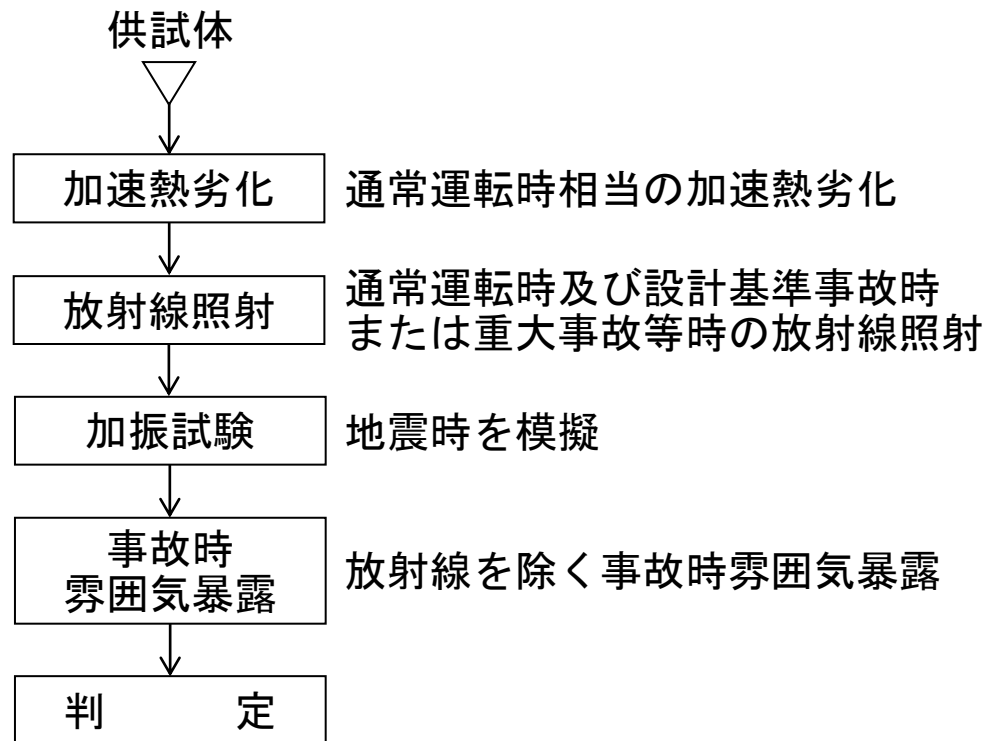
なお、絶縁性能を評価するにあたっては、ピッグテイル型電線貫通部に加えて、外部リード単独での絶縁性能についても評価を実施した。

- ・ピッグテイル型電線貫通部については、IEEE Std. 323-1974に準拠して行う。
- ・外部リードについては、低圧ケーブルと同様に、電気学会推奨案及びA C Aガイドに基づき評価を行う。

## (2) ピッグテイル型電線貫通部の健全性評価

### (a) 試験手順

ピッグテイル型電線貫通部の長期健全性試験手順を以下に示す。





(b) 試験条件及び試験結果

ピッグテイル型電線貫通部の長期健全性試験条件及び試験結果を以下に示す。試験条件は、実機環境に基づいて60年間の運転期間及び事故時雰囲気を選定した劣化条件を包絡している。

長期健全性試験条件（川内1号炉の例）

	試験条件	60年間の通常運転時の使用条件に基づく劣化条件 又は事故時の環境条件	
		設計基準事故時	重大事故等時
加速熱劣化	125°C-10日	原子炉格納容器内の通常雰囲気温度に通電による温度上昇も考慮した温度（約44°C）で60年間の運転期間に相当する条件（91°C-10日間）を包絡している。	
放射線照射	平常時における集積線量と事故時の放射線量を照射 条件： 500kGy（平常時） +1, 500kGy（事故時） （10kGy/h以下）	60年間の運転に予想される集積線量（2.7kGy）に設計基準事故時の線量（602kGy）を加えた線量を包絡している。	60年間の運転に予想される集積線量（2.7kGy）に重大事故等時の線量（500kGy）を加えた線量を包絡している。
加振試験	加速度1.8Gで加振	想定される最大加速度（0.73G）を包絡している。	
事故時雰囲気暴露	最高温度：190°C 最高圧力：0.414MPa 時間：～15日間	設計基準事故時の最大温度（約127°C）、最大圧力（約0.245MPa）を包絡している。	重大事故等時の最大温度（約138°C）、最大圧力（約0.350MPa）を包絡している。

長期健全性試験結果（川内1号炉の例）

	試験後	判定基準	判定
絶縁抵抗	$6.0 \times 10^{10} \Omega$	$1.0 \times 10^8 \Omega$ 以上	良

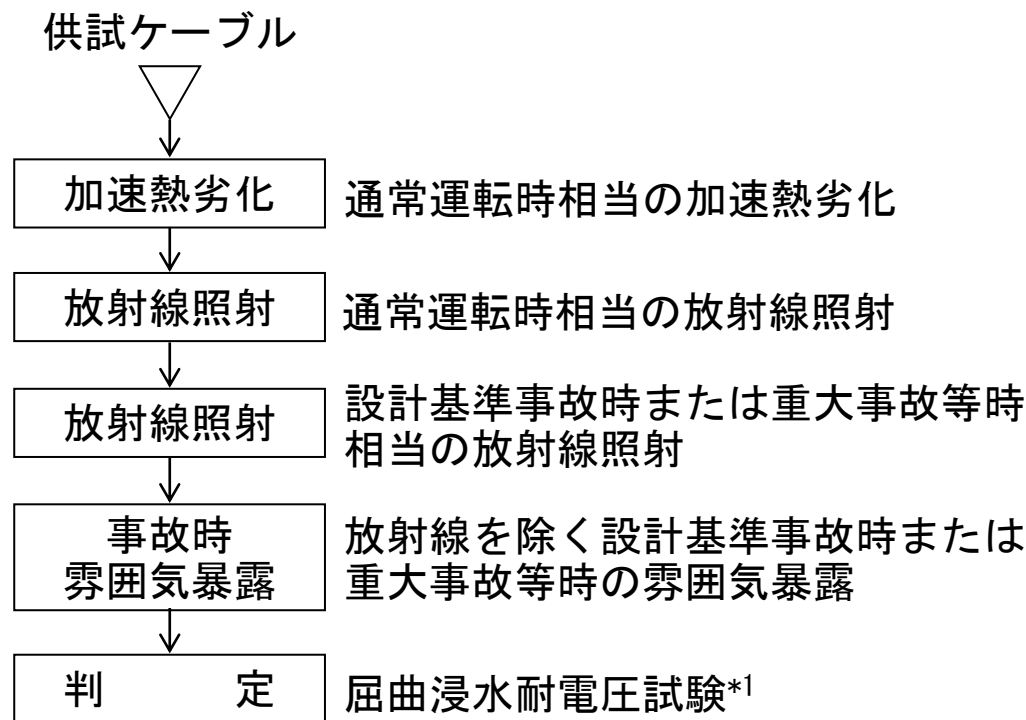
(c) 評価結果

長期健全性試験の結果、運転開始後60年時点においても絶縁機能を維持できると判断する。

### (3) 外部リードの健全性評価

#### (a) 電気学会推奨案に基づく試験手順

外部リードの電気学会推奨案による試験手順及び判定方法を以下に示す。



\*1： 屈曲浸水耐電圧試験の試験手順は以下のとおりである

- ① 直線状に試料を伸ばした後、試料外径の約40倍のマンドレルに巻き付ける
- ② ①の両端部以外を水中におく
- ③ ②の状態、公称絶縁体厚さに対し交流電圧3.2kV/mmを5分間印加し、絶縁破壊が生じるか否かを調べる

(b) 電気学会推奨案に基づく試験条件及び試験結果

外部リードの長期健全性試験条件及び長期健全性試験結果を以下に示す。  
 試験条件は、実機環境に基づいて60年間の運転期間及び事故時雰囲気を想定した劣化条件を包絡している。

長期健全性試験条件（川内1号炉 外部リード1-1の例）

		試験条件	60年間の通常運転時の使用条件に基づく劣化条件 又は事故時の環境条件	
			設計基準事故時	重大事故等時
通常 相当 運転	温度	121°C-7日	105°C-7日 (=46°C*1-60年)	
	放射線 (集積線量)	500kGy (10kGy/h以下)	2.7kGy*2	
事故時 相当 雰囲気	放射線 (集積線量)	1,500kGy (10kGy/h以下)	602kGy	500kGy
	温度	最高温度：190°C	最高温度：約127°C	最高温度：約138°C
	圧力	最高圧力：0.41MPa[gage]	最高圧力：約0.245MPa[gage]	最高圧力：約0.350MPa[gage]

\*1：原子炉格納容器内でのケーブル布設エリアの温度（約40°C）に通電による温度上昇を加えた温度として設定

\*2： $5 \times 10^{-3} [\text{Gy/h}] \times (24 \times 365.25) [\text{h/y}] \times 60 [\text{y}] = 2.7 \text{kGy}$

長期健全性試験結果（川内1号炉 外部リード1-1の例）

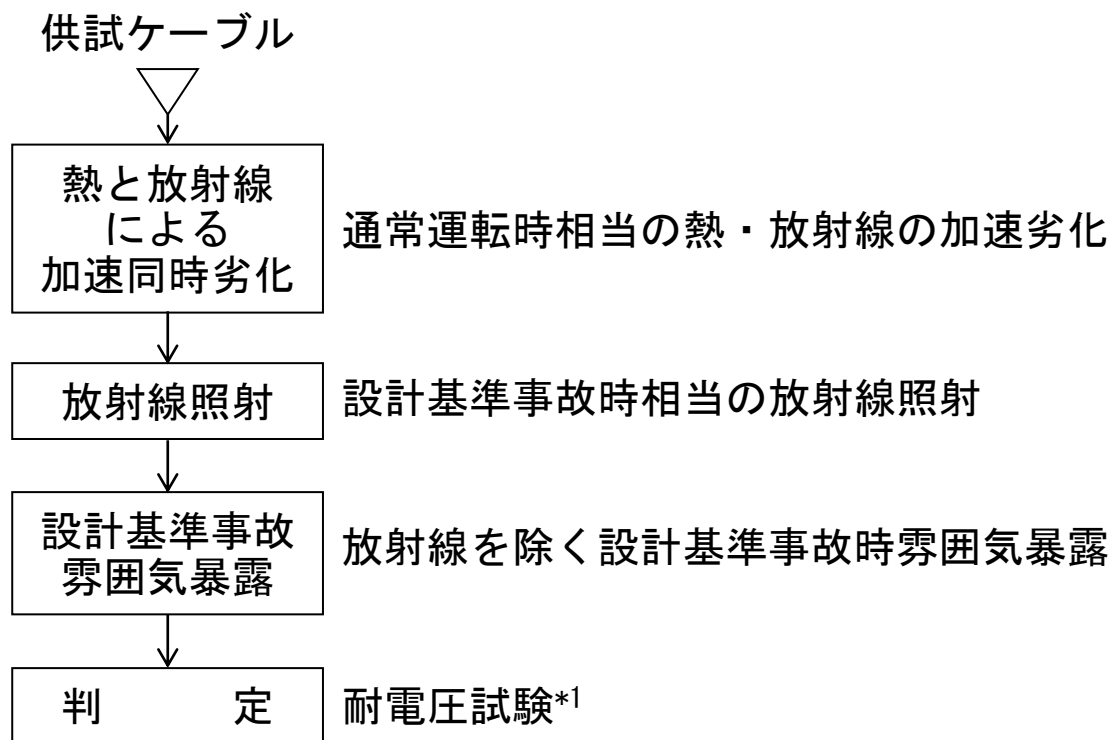
項目	試験条件	判定
屈曲浸水 耐電圧試験	供試体外径：11.5mm マンドレル径：供試体外径の約40倍 絶縁厚さ：0.76mm 課電電圧：2.6kV/5分間	良

(c) 電気学会推奨案に基づく評価結果

長期健全性試験の結果、運転開始後60年時点においても絶縁機能を維持できることを確認した。

## (d) A C Aガイドに基づく試験手順

事故時雰囲気内で機能要求がある外部リードのA C Aガイドに基づく試験手順及び判定方法を以下に示す。



\*1：耐電圧試験は、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）の試験

(e) A C Aガイドに基づく試験条件及び試験結果

外部リードの長期健全性試験条件及び長期健全性試験結果を以下に示す。  
 試験条件は、実機環境に基づいて60年間の運転期間及び事故時雰囲気を選定した劣化条件を包絡している。

長期健全性試験条件（川内1号炉 外部リード1-1の例）

		試験条件*1	60年間の通常運転時の使用条件に基づく劣化条件又は設計基準事故時の環境条件
通常 相当 運転	温度	47°C-21.3年 (=46°C-22年) 175°C-109日 (=46°C-38年)	46°C*2-60年
	放射線（集積線量）	—	2.7kGy*3
事故時 相当 雰囲気	放射線（集積線量）	1,500kGy（10kGy/h以下）	602kGy
	温度	最高温度：190°C	最高温度：約127°C
	圧力	最高圧力：0.41MPa[gage]	最高圧力：約0.245MPa[gage]

\*1：実機環境の線量率が低く、熱による劣化が支配的な領域のため、熱加速劣化のみとした。また、47.0°C-0.2mGy/hの布設環境で21.3年間使用したケーブルを供試体とし、追加で劣化させた条件を示す

\*2：電気ペネトレーション設置エリアの周囲温度（約40°C）に通電による温度上昇を加えた温度として設定

\*3： $5 \times 10^{-3} [\text{Gy/h}] \times (24 \times 365.25) [\text{h/y}] \times 60 [\text{y}] = 2.7 \text{kGy}$

長期健全性試験結果（川内1号炉 外部リード1-1の例）

項目	試験条件	判定
耐電圧試験	課電電圧：1500V/1分間	良

(f) A C Aガイドに基づく評価結果

長期健全性試験の結果、運転開始後60年時点においても絶縁機能を維持できると判断する。

## 4.2 現状保全

ポッティング材の気密性低下による絶縁低下及び外部リードの絶縁低下に対しては、定期的にケーブル及び機器を含め絶縁抵抗測定又は機器の動作確認を実施し、有意な絶縁低下がないことを確認している。

## 4.3 総合評価

健全性評価結果から判断して、ポッティング材の気密性低下による絶縁低下及び外部リードの絶縁低下により機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。

ポッティング材の気密性低下による絶縁低下及び外部リードの絶縁低下は、絶縁抵抗測定又は機器の動作確認で検知可能であり、点検手法として適切である。

## 4.4 高経年化への対応

現状保全項目に高経年化対策の観点から、追加すべきものはないと判断する。

## 5. 代表機器以外の評価

その他のグループ内代表機器の評価結果を以下の「電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧」に示す。

電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧(1/5)

評価対象設備	グループ内代表機器	部位	グループ内代表機器の健全性評価	現状保全	総合評価	高経年化への対応
高圧ポンプ用電動機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 充てん／高圧注入ポンプ用電動機</li> <li>・ 電動補助給水ポンプ用電動機</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固定子コイル</li> <li>・ 口出線・接続部品</li> </ul>	ヒートサイクル試験による絶縁寿命と経年機によるコイル破壊電圧の測定値を評価した絶縁寿命から、絶縁耐力を保有する期間は18.5年と判断	絶縁抵抗測定・絶縁診断を実施 また、現状保全の結果に基づき、必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施	絶縁低下の可能性は否定できないが、絶縁抵抗測定・絶縁診断で検知可能 現状保全を継続することで健全性を維持	絶縁抵抗測定・絶縁診断を実施していくとともに、運転年数及び点検結果に基づき必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施していく
低圧ポンプ用電動機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ほう酸ポンプ用電動機</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固定子コイル他</li> </ul>	ヒートサイクル試験による絶縁寿命と経年機によるコイル破壊電圧の測定値を評価した絶縁寿命から、絶縁耐力を保有する期間は16年と判断	絶縁抵抗測定を実施 また、絶縁抵抗測定結果に基づき、必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施	絶縁低下の可能性は否定できないが、絶縁抵抗測定で検知可能 現状保全を継続することで健全性を維持	絶縁抵抗測定を実施していくとともに、点検結果に基づき必要により洗浄、乾燥、絶縁補修処理もしくは取替えを実施していく
弁電動装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ RHRS入口隔離弁電動装置</li> <li>・ T／DAFWP蒸気入口弁電動装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固定子コイル他</li> </ul>	長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年間の通常運転とその後の設計基準事故後においても、絶縁機能を維持できると判断	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下により機器の健全性に影響を与える可能性はない	現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはない



電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧(2/5)

評価対象設備	グループ内 代表機器	部位	グループ内 代表機器の健全性評価	現状保全	総合評価	高経年化への対応
高圧ケーブル	・難燃高圧 CSHV ケーブル	・絶縁体	長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年時点においても、絶縁機能を維持できると判断	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下による機器の健全性に影響を与える可能性はない 絶縁低下は、絶縁抵抗測定・絶縁診断で検知可能であり、点検手法として適切	現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはない
		・絶縁体 (水トリー劣化)	屋外に布設している当該ケーブルは、長時間浸水する可能性はないが、溜まり水による多湿度環境を考慮すると、水トリー劣化による絶縁低下の可能性は否定できない	絶縁抵抗測定、ケーブル絶縁診断及びトレンチ内の目視確認を実施	絶縁低下（水トリー劣化）の可能性は否定できない。 絶縁低下は絶縁抵抗測定・絶縁診断で、浸水状態は目視確認で検知可能であり、点検手法として適切	絶縁抵抗測定・ケーブル絶縁診断を実施していくとともに、点検結果に基づき必要により取替等を実施していく また、トレンチ内の目視確認を実施していく
低圧ケーブル	・KKケーブル ・難燃SHVVケーブル ・FPETケーブル	・絶縁体	長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年間の通常運転とその後の設計基準事故及び重大事故等においても、絶縁機能を維持できると判断 なお、KKケーブルはACAガイドに従った長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年後の設計基準事故後においても、絶縁機能を維持できると判断	電力用ケーブルについては、絶縁抵抗測定を実施 制御・計装用ケーブルについては、系統機器の動作又は計器の指示値等の確認を実施	絶縁低下により機器の健全性に影響を与える可能性はない 絶縁低下は、絶縁抵抗測定、系統機器の動作確認又は計器の指示値確認等で検知可能であり、点検手法として適切	現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはない



電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧(3/5)

評価対象設備	グループ内 代表機器	部位	グループ内 代表機器の健全性評価	現状保全	総合評価	高経年化への対応
同軸ケーブル	・難燃三重同軸 ケーブル	・絶縁体 ・内部シース	長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年間の通常運転とその後の設計基準事故及び重大事故等においても、絶縁機能を維持できると判断 また、ACAガイドに従った長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年後の設計基準事故後においても、絶縁機能を維持できると判断	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下により機器の健全性に影響を与える可能性はない 絶縁低下は、絶縁抵抗測定で検知可能であり、点検手法として適切	現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはない
ケーブル 接続部	・気密端子箱接続 ・直ジョイント ・高圧コネクタ接続 ・電動弁コネクタ接続 ・三重同軸コネクタ接続	・絶縁体他	長期健全性試験結果に基づき評価した結果、60年間の通常運転とその後の設計基準事故及び重大事故等においても、絶縁機能を維持できると判断	電力用ケーブル接続部については、絶縁抵抗測定を実施 制御・計装用ケーブル接続部については、系統機器の動作又は計器の指示等の確認を実施	絶縁機能を維持できると判断 絶縁低下は、絶縁抵抗測定、系統機器の動作確認又は計器の指示値確認等で検知可能であり、点検手法として適切	現状保全項目に高経年化対策の観点から追加すべきものはない
メタルクラッド開閉装置	・メタクラ (安全系)	・ばね蓄勢用 モータ (低圧モータ)	使用温度に比べて十分余裕のある絶縁種を使用していることから、絶縁低下の発生の可能性は小さいと考えるが、絶縁低下が生じる可能性は否定できない	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下の可能性は否定できないが、絶縁低下は、絶縁抵抗測定で検知可能であり、点検手法として適切 よって、現状保全を継続することで、健全性を維持できる	絶縁抵抗測定を実施していく
パワーセンタ	・パワーセンタ (安全系)					
制御棒駆動装置用電源設備	・原子炉トリップ遮断器盤					

電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧(4/5)

評価対象設備	グループ内 代表機器	部位	グループ内 代表機器の健全性評価	現状保全	総合評価	高経年化への対応
空調設備 電動機	・空調用冷凍機用 電動機	・固定子コイル他	高圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
	・ディーゼル発電機 室給気ファン用電 動機 ・安全補機室排気 ファン用電動機	・固定子コイル他	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
	・緊急時対策所非常 用空気浄化設備電 気加熱コイル入口 電動ダンパ	・固定子コイル他	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
制御用空気圧 縮機装置	・制御用空気圧縮機 用電動機 ・制御用空気除湿装 置送風機用電動機	・固定子コイル他	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
非常用ディー ゼル発電設備	・ディーゼル発電機	・固定子コイル他	高圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
		・回転子コイル他	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
大容量空冷式 発電機	・大容量空冷式 発電機	・固定子巻線他	高圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
		・回転子巻線他	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
燃料取扱設備	・燃料取替クレーン	・固定子コイル	低圧ポンプ用電動機と同様	同左	同左	同左
燃料移送装置	・燃料移送装置					
燃料取扱設備	・燃料取替クレーン	・回転数発電機他	使用温度に比べて十分余裕のある 絶縁種を使用していることから、 絶縁低下の発生の可能性は小さい と考えるが、絶縁低下が生じる可 能性は否定できない	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下の可能性は 否定できないが、絶 縁低下は、絶縁抵抗 測定で検知可能であ り、点検手法として 適切	絶縁抵抗測定を実施 していく
燃料移送装置	・燃料移送装置					

電気・計装品の絶縁低下の評価結果一覧(5/5)

評価対象設備	グループ内 代表機器	部位	グループ内 代表機器の健全性評価	現状保全	総合評価	高経年化への対応
メタルクラッド 開閉装置	・メタクラ (安全系)	・計器用変流器 ・計器用変圧器	長期健全性試験の結果、60年間の 通常運転後においても絶縁性能を維持 できると判断	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下により機器の 健全性に影響を与える 可能性はない 絶縁低下は、絶縁抵抗 測定で検知可能であり、 点検手法として適切	現状保全項目に高経 年化対策の観点から 追加すべきものはな い
制御設備	・ディーゼル 発電機盤					
燃料取扱設備	・燃料取替クレーン	・変圧器	使用温度に比べて十分余裕のある絶 縁種を使用していることから、絶縁 低下の可能性は小さいと考えるが、 絶縁低下が生じる可能性は否定でき ない	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下により機器の 健全性に影響を与える 可能性はない 絶縁低下は、絶縁抵抗 測定で検知可能であり、 点検手法として適切	現状保全項目に高経 年化対策の観点から 追加すべきものはな い
燃料移送装置	・燃料移送装置					
計器用電源設備	・計装用電源装置					
動力変圧器	・動力変圧器 (安全系)	・コイル	熱劣化試験で健全性が確認された変 圧器の銅線と比較した結果、急激な 絶縁低下の可能性は小さいと考える が、絶縁低下の可能性は否定はでき ない	絶縁抵抗測定を実施	絶縁低下は絶縁抵抗測 定で検知可能であり、 点検手法として適切 よって、現状保全を継 続することで、健全性 を維持できる	絶縁抵抗測定を実施 していく
パワーセンタ	・パワーセンタ (安全系)	・保護リレー	同種の保護リレーの試験結果より健 全性を評価した結果、コイル部絶縁 の絶縁破壊電圧が判定基準に達する までの期間は約40年となり、急激 な絶縁低下の可能性は小さいと考 えるが、絶縁低下の可能性は否定でき ない	絶縁抵抗測定を実施 点検結果に基づき、 必要により取替えを 実施	健全性評価結果及び取 替実績から判断して、 絶縁低下により機器の 健全性に影響を与える 可能性はないと考える 絶縁低下は、絶縁抵抗 測定で検知可能であり、 点検手法として適切	絶縁抵抗測定を実施 していくとともに、 点検結果に基づき必 要により取替えを 実施していく
制御設備	・ディーゼル 発電機盤	・励磁装置	過去に実施した精密点検の結果から、 設備の納入後 30年前後より絶縁 抵抗の低下が生じる可能性は小さい と考えられるが、絶縁低下の可能性 は否定できない	絶縁抵抗測定・精密 点検を実施	絶縁低下は、絶縁抵抗 測定及び精密点検で検 知可能であり、点検手 法として適切 よって、現状保全を継 続することで、健全性 を維持できる	絶縁抵抗測定並びに 適切な頻度で精密点 検を実施していく

# 参考資料

## ACAガイドに基づく手法

ACAガイドに基づく手法とは、通常運転期間の劣化を、長時間の低温・低線量の熱と放射線による同時加速劣化させる経年劣化手法である。

### （１）適用範囲

設計基準事故時において、事故の拡大を防止し速やかに収束するための機能が期待される電気・計装品に対し、電力を供給する機能又は監視・制御信号を伝達する機能を有するケーブルのうち、設計基準事故時に環境条件が著しく悪化する区域に布設されているものを対象とする。

### （２）劣化処理

熱と放射線による加速同時劣化によって供試ケーブルに劣化を付与する。

### （３）事故時環境試験

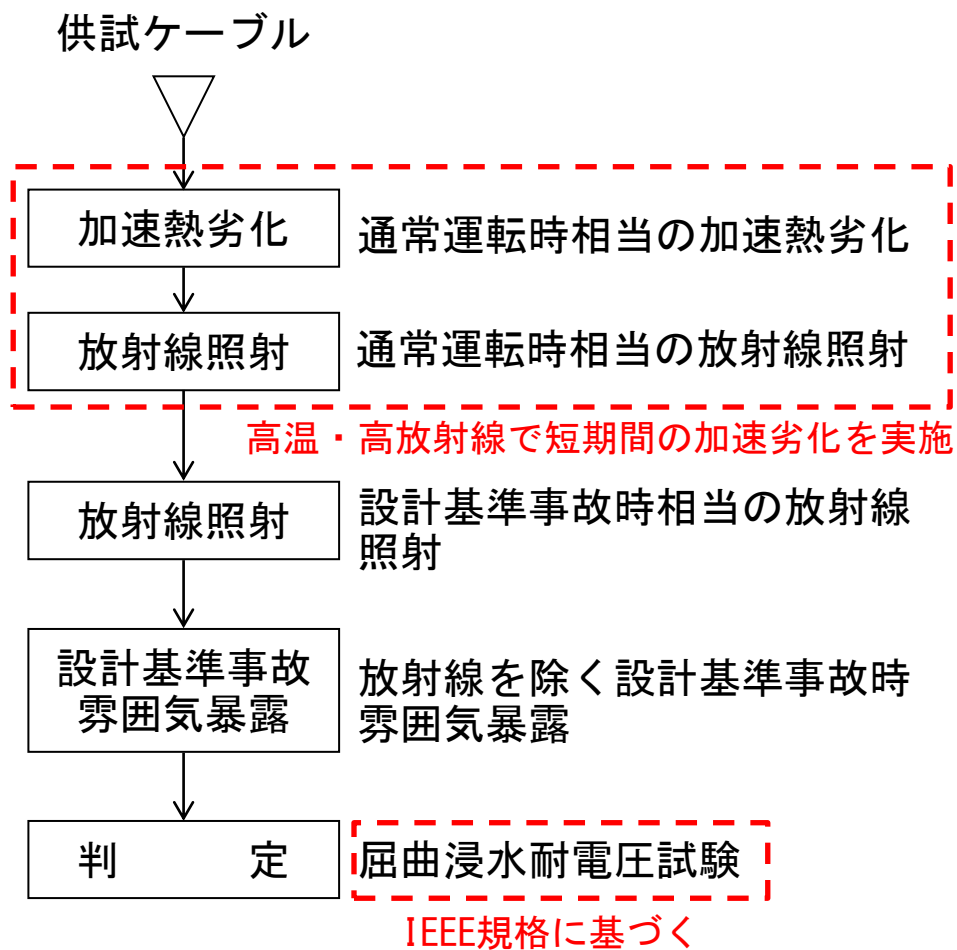
供試ケーブルに設計基準事故時相当の放射線照射を行い、試験用圧力容器にて温度・圧力・湿度条件に曝露させる。

### （４）健全性判定試験

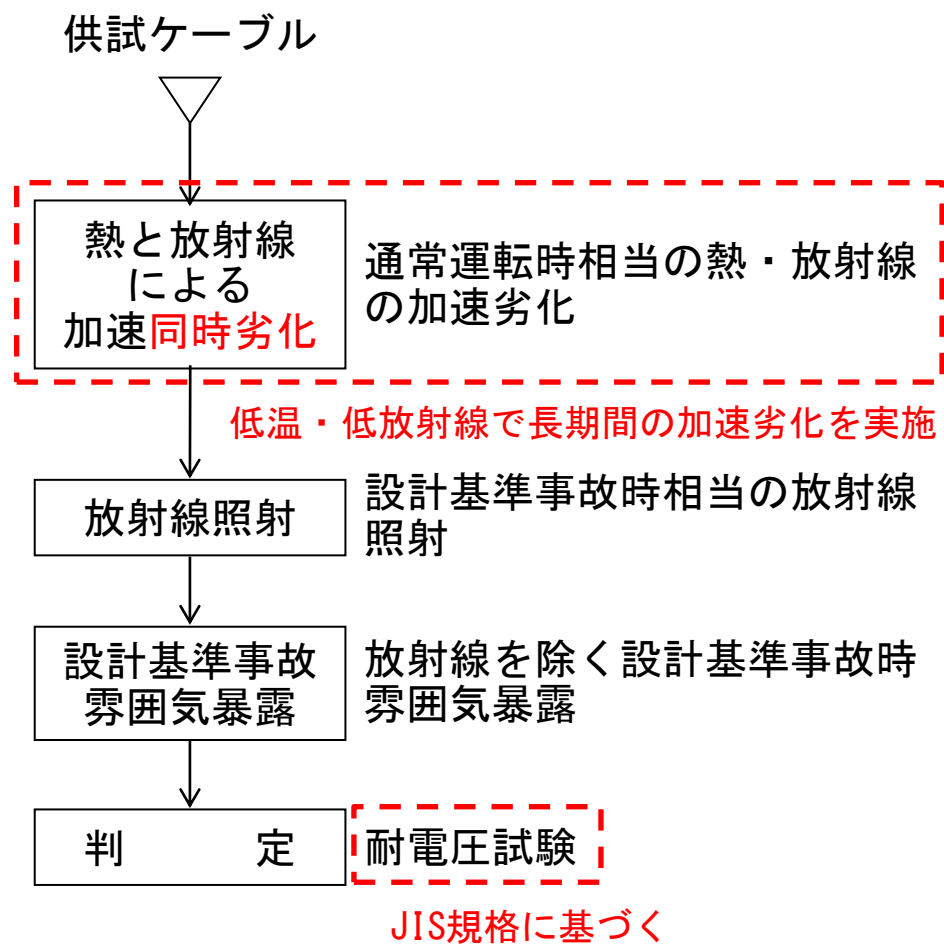
日本工業規格「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」（JIS C 3005:2000）に基づく耐電圧試験を実施し、供試ケーブルに絶縁破壊が生じないことを確認する。

## ACAガイドに基づく評価手法と従来評価手法との比較

従来の評価手法（電気学会推奨案）



ACAガイドに基づく手法



## ACA評価結果について（時間依存データの重ね合わせ手法）（1/2）

ループ室内布設ケーブル(12頁)の実布設環境における評価期間の算出方法を以下に示す。

【試験条件シフトファクター： $a_{exam}$ 】

$$a_{exam} = \exp \left[ \frac{-E}{R} \left( \frac{1}{T_{exam}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \cdot \left\{ 1 + kD^x \exp \left[ \frac{Ex}{R} \left( \frac{1}{T_{exam}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right\}$$

ここで、 $T_{exam} = T_{ref}$  であるため、 $a_{exam}$  は以下となる。

$$a_{exam} = 1 + kD^x$$

$$\Rightarrow a_{exam} = 1 + 92.75 \times 0.02633^{0.6494} \doteq 9.741$$

$T_{ref}$  : 基準温度[K]=100°C

$T_{exam}$  : 試験温度[K]=100°C (ACA 研究報告書p228,229 LOCA 試験に合格した試験条件)

E: 活性化エネルギー=15[kcal/mol] (ACA 研究報告書p208 100°C以下の活性化エネルギー)

R: 気体定数=8.3145[J/(mol・K)]=1.987 × 10<sup>-3</sup>[kcal/(mol・K)] (1cal=4.184J)

D: 評価線量率=94.79[Gy/h]=0.02633[Gy/s]

k、x: モデルパラメータ k=92.75、x=0.6494 (ACA 研究報告書p293 付録-5 劣化特性等の近似値の諸元)

## ACA評価結果について（時間依存データの重ね合わせ手法）（2/2）

【環境条件シフトファクター： $a_{real}$ 】

$$a_{real} = \exp \left[ \frac{-E}{R} \left( \frac{1}{T_{real}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \cdot \left\{ 1 + kD^x \exp \left[ \frac{Ex}{R} \left( \frac{1}{T_{real}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right\}$$

↳  $a_{real} \doteq 0.0976$

【評価期間： $t_{real}$ 】

$$t_m = a_{exam} \times t_{exam} = a_{real} \times t_{real}$$

$$t_{real} = \frac{a_{exam} \times t_{exam}}{a_{real}}$$

↳  $t_{real} = [ 9.741 \times (4003 \div 24 \div 365.25) ] \div 0.0976 = 45.58$   
 $\doteq 45$  (年)

$T_{real}$ : 実機温度[K]=45°C

$T_{ref}$ : 基準温度[K]=100°C

$t_{exam}$ : 試験期間=4003[h] (ACA 研究報告書p228,229 LOCA 試験に合格した試験条件)

$t_m$ : マスターカーブにおける評価期間

E: 活性化エネルギー=15[kcal/mol] (ACA 研究報告書p208 100°C以下の活性化エネルギー)

R: 気体定数=8.3145[J/(mol・K)]=1.987 × 10<sup>-3</sup>[kcal/(mol・K)] (1cal=4.184J)

D: 実機線量率=0.35[Gy/h]

k、x: モデルパラメータ k=92.75、x=0.6494 (ACA 研究報告書p293 付録-5 劣化特性等の近似値の諸元)



## ACA評価結果について（時間依存データの重ね合わせ手法）

### (2) 時間依存データの重ね合わせ手法による加速劣化試験条件の設定

時間依存データの重ね合わせ手法による加速劣化試験条件の設定手順を以下に示す。

① 図 3.2-25 において、実機環境  $T_{real}$  と  $D_{real}$  に対するシフトファクター  $a_{real}$  を算出する。

② 図 3.2-25 において、実機環境での評価期間 60 年をマスターカーブ上にシフトする。

$$60 \times 365.25 \times a_{real} = t_m \text{ (日)}$$

③ 図 3.2-25 において、加速劣化条件  $T_{acc}$  と  $D_{acc}$  に対するシフトファクター  $a_{acc}$  を算出する。

④ 図 3.2-25 において、②の期間を加速劣化条件  $T_{acc}$  と  $D_{acc}$  での期間にシフトする。

$$(60 \times 365.25 \times a_{real}) / a_{acc} = t_{acc} \text{ (日)}$$

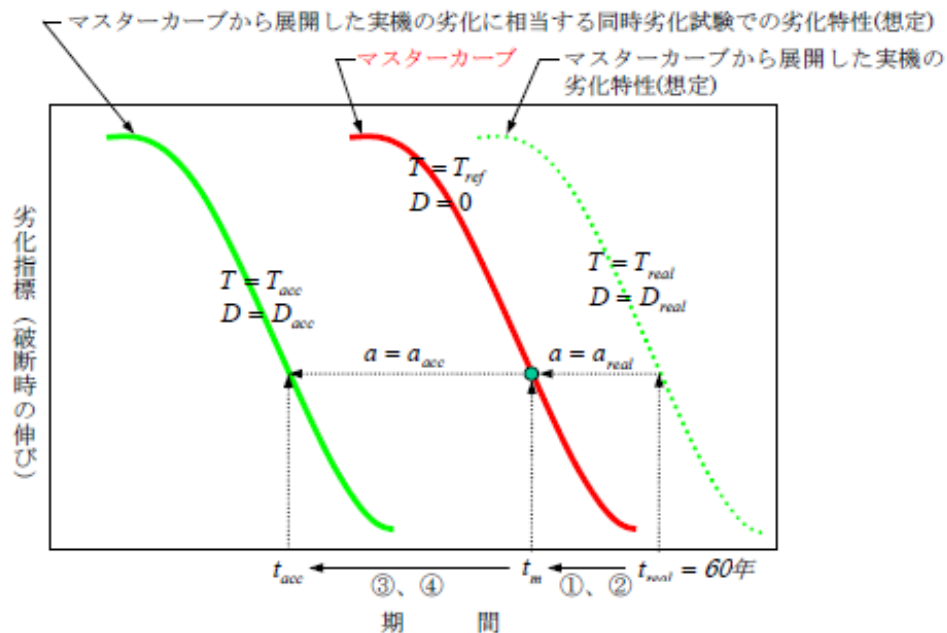


図 3.2-25 時間依存データの重ね合わせ手法による加速劣化試験条件の設定手順

出典: 旧独立行政法人原子力安全基盤機構関連情報

「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レポート-2009年7月)」

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/index.html>