

美浜発電所3号炉 特別点検
(原子炉格納容器)

補足説明資料

平成28年3月10日

関西電力株式会社

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 要求事項	1
3. 点検方法	1
4. 点検結果	12
5. 考察	13
6. 経年劣化を考慮した原子炉格納容器鋼板内面塗装の事故時性能について	16
7. まとめ	26
別紙 1～9	
別紙 1. 半球部外面のうちダクト近傍における、高浜 1,2 号炉と美浜 3 号炉の 点検手法の違いについて	29
別紙 2. 試験機材のうち特に照明器具における、高浜 1,2 号炉と美浜 3 号炉の 違いについて	31
別紙 3. 非破壊試験(VT-4)記録が、適切な方法等により得られた結果であること を示す記録（要員の力量、試験条件、詳細記録等）について	32
別紙 4. 美浜 3 号炉 実機 CV 鋼板内面塗装に対する付着性試験結果	38
別紙 5. 塗装時の施工が塗装の性能に与える影響について	43
別紙 6. 原子炉格納容器の塗装点検に対する力量管理（ASTM 要件との比較）	45
別紙 7. 美浜 3 号炉 CV 再循環シナリオの概略系統図・CV 内温度推移	48
別紙 8. エポキシ樹脂塗料の耐熱性について	52
別紙 9. 中破断 LOCA 時の塗装異物量評価について	54

1. はじめに

本資料は、美浜発電所3号炉で実施した原子炉格納容器の特別点検について、実施した内容を取りまとめたものである。

2. 要求事項

対象の機器・構造物、その対象の部位、着目する劣化事象及び点検方法は、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」（以下、運用ガイドという）に定められている。

表2. 1 要求事項の概要

対象の機器・構造物	対象の部位	着目する劣化事象	点検方法／点検項目
原子炉格納容器	原子炉格納容器鋼板(接近できる点検可能範囲の全て)	腐食	目視試験(VT-4)による塗膜状態の確認

3. 点検方法

3. 1 点検の概要

原子炉格納容器鋼板の炭素鋼は、腐食防止の観点から内外表面に防食塗装を施工している。塗装が健全であれば、金属表面が容易に大気に曝されることはないため、日常保全として塗装の目視点検を実施するとともに、必要に応じて塗裝修繕を実施し、塗膜の健全性を維持している。

加圧水型原子炉格納容器（PWR）の原子炉格納容器鋼板は水に接していないため、供用期間中検査に用いる「発電用原子力設備規格 維持規格（2008年版）」（JSME S NA1-2008、以下「維持規格」）では原子炉格納容器表面に対する定期的な検査要求はない。しかし、日常的な機器点検時や原子炉格納容器のバウンダリ機能の健全性を定期的に確認する原子炉格納容器漏えい率試験時に、原子炉格納容器鋼板の目視点検を実施している（以下、「従来の点検」という）。

従来の点検では、原子炉格納容器内のフロアや機器架台、原子炉格納容器内外に設置された恒設足場を用いて直接点検が可能な範囲については直接目視を実施するとともに、高所については機器架台・ポーラクレーン等の上から双眼鏡等を用いて目視点検を実施している。これらの点検により塗膜に異常が確認された場合は計画的に塗裝修繕を実施することで、原子炉格納容器鋼板の健全性を維持してきた。

しかし、従来の点検では、原子炉格納容器鋼板塗膜の大部分を点検可能ではあるものの、機器架台・足場等から離れた位置にある干渉物裏、原子炉格納容器外面円筒部（アニュラス内）の高所等、一部に確認が容易でない範囲があった。

今回の特別点検では、従来の点検では確認が容易でなかった範囲についても、仮設足場や搭乗設備、点検用治具を用いることで可能な限り点検対象に含め、接近できる点検

可能範囲の全ての鋼板に対して、視認性を実証できる形で塗膜状態の目視点検（VT-4）を実施した。

目視点検では、照度・距離を確保し、グレーカード（18%中性灰色カード）上の幅 0.8mm の黒線が識別できることを確認する直接目視手法及びグレーカードの幅 0.8mm の黒線が識別できる条件の検証を行った遠隔目視手法を用いて、点検を実施した。

3. 2 点検方法の妥当性

今回の特別点検では、目視点検（VT-4）に際して、グレーカード上の幅 0.8mm の黒線が識別できる条件で、接近可能な範囲は直接目視、容易に接近できない範囲はカメラによる遠隔目視を行った。表 3. 1 に従来の点検方法との違いを示す。

表 3. 1 従来の点検方法との違い

	原子炉格納容器漏えい率試験時の点検 (従来の点検)	特別点検 (今回の点検)
点検部位 (範囲)	原子炉格納容器鋼板 (円筒部内面上部の干渉物裏等を除く)	原子炉格納容器鋼板 (接近できる点検可能範囲の全て)
点検方法	目視点検 ・高所は双眼鏡を用いた点検 ・点検時の照度、グレーカードの確認等なし	目視点検(VT-4) ・高所は高倍率のカメラ等を使用 ・点検時の照度、グレーカードの確認・検証あり

なお、点検手法が定義されている維持規格において、VT-4 に対する要求事項 (IA-2524) ではグレーカードの識別要求はないが、目視試験の一般要求事項 (IA-2520) についても考慮して、点検の実施にあたってグレーカードの識別を行うこととした。

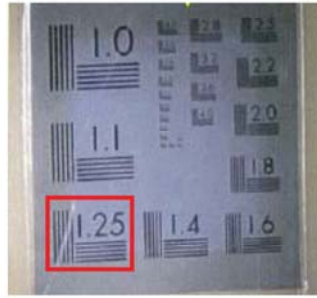
3. 3 具体的な点検方法

3. 3. 1 直接目視試験での点検方法

直接目視試験では、点検対象となる鋼板 1 枚ごとに、点検の際に最遠となる位置に置いたグレーカードを確認し、その距離よりも近い位置で点検を実施した。

脚立や仮設足場・搭乗設備を用いて接近可能な箇所についても、鋼板 1 枚ごとに最遠位置に置いたグレーカードを確認し、その距離よりも近い距離で点検を実施した。

確認したグレーカードを図 3. 1 に示す。



グレーカード (18%中性灰色カード)
 の幅 0.8mm の黒線部 ($1.25 = 1/0.8$)
 識別を確認しながら点検を実施

図 3. 1 グレーカード

3. 3. 2 遠隔目視試験での点検方法 (原子炉格納容器内面)

ビデオカメラでグレーカードが識別できる条件 (距離、倍率、照度、角度) を検証し、検証結果に基づく点検条件で遠隔目視試験を実施した。グレーカードの検証結果を以下に示す。

(1) 距離とビデオカメラ倍率の関係

一定の照度下において、1 m 間隔で距離を変動させ、グレーカードが識別可能なビデオカメラの倍率を決定した。図 3. 2 に距離と倍率の検証方法のイメージ図、表 3. 2 に倍率表を示す。

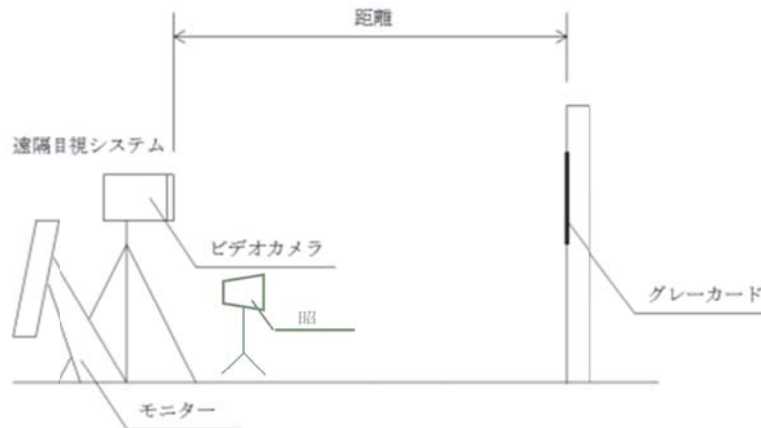


図 3. 2 検証方法 (距離と倍率の関係) のイメージ図

表 3. 2 倍率表 (距離と倍率の関係)

検証した距離	照度		照度	
	確認結果	ビデオカメラ倍率(倍)	確認結果	ビデオカメラ倍率(倍)
2m				
3m				
4m				
5m				
6m				
7m				
8m				
9m				
10m				
11m				
12m				
13m				
14m				
15m				
16m				
17m				
18m				
19m				
20m				
21m				
22m				
23m				
24m				
25m				
26m				
27m				
28m				
29m				
30m				

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 対象物に対する角度による影響

角度による影響も考慮し、距離に応じてグレーカードを識別可能な限界の角度の検証を行った。図3.3に角度による影響検証のイメージ図、表3.3に倍率表を示す。

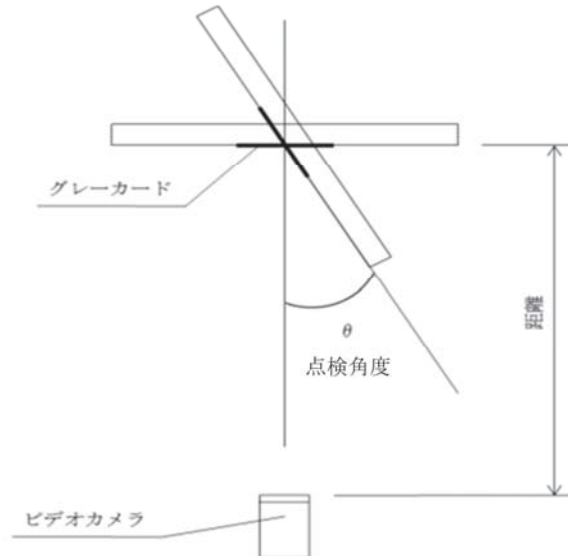


図3.3 検証方法（角度による影響）のイメージ図

表3.3 倍率表（角度による影響）

距離 \ 角度 (θ)	10m	15m	20m
40°			
35°			
30°			
25°			
20°			
撮影条件			
ビデオカメラ			
倍率			
照度			

(3) その他

上記の条件で実施が困難と考えられる箇所（リングガード内部）については、実機を用いてグレーカードが確認できる条件を検証した。

a. リングガード内部

カメラ用一脚にビデオカメラと照明を取付け、ビデオカメラ倍率1倍でグレーカードが識別可能であることを確認した。

3. 3. 3 遠隔目視試験での点検方法（原子炉格納容器円筒部外面）

(1) 高浜1, 2号炉との点検方法の違い

美浜3号炉は円筒部外面上部に歩廊が全周に設置されており、点検用治具を吊り下げることが可能であったため、点検用治具を用いて遠隔目視を実施した。一方、高浜1, 2号炉は原子炉格納容器円筒部外面上部に全周の歩廊がなく、歩廊に点検用治具を吊り下げて全周の遠隔目視を行うことが困難であったことから、仮設足場を用いて直接目視を実施した。概略図を図3. 4に示す。

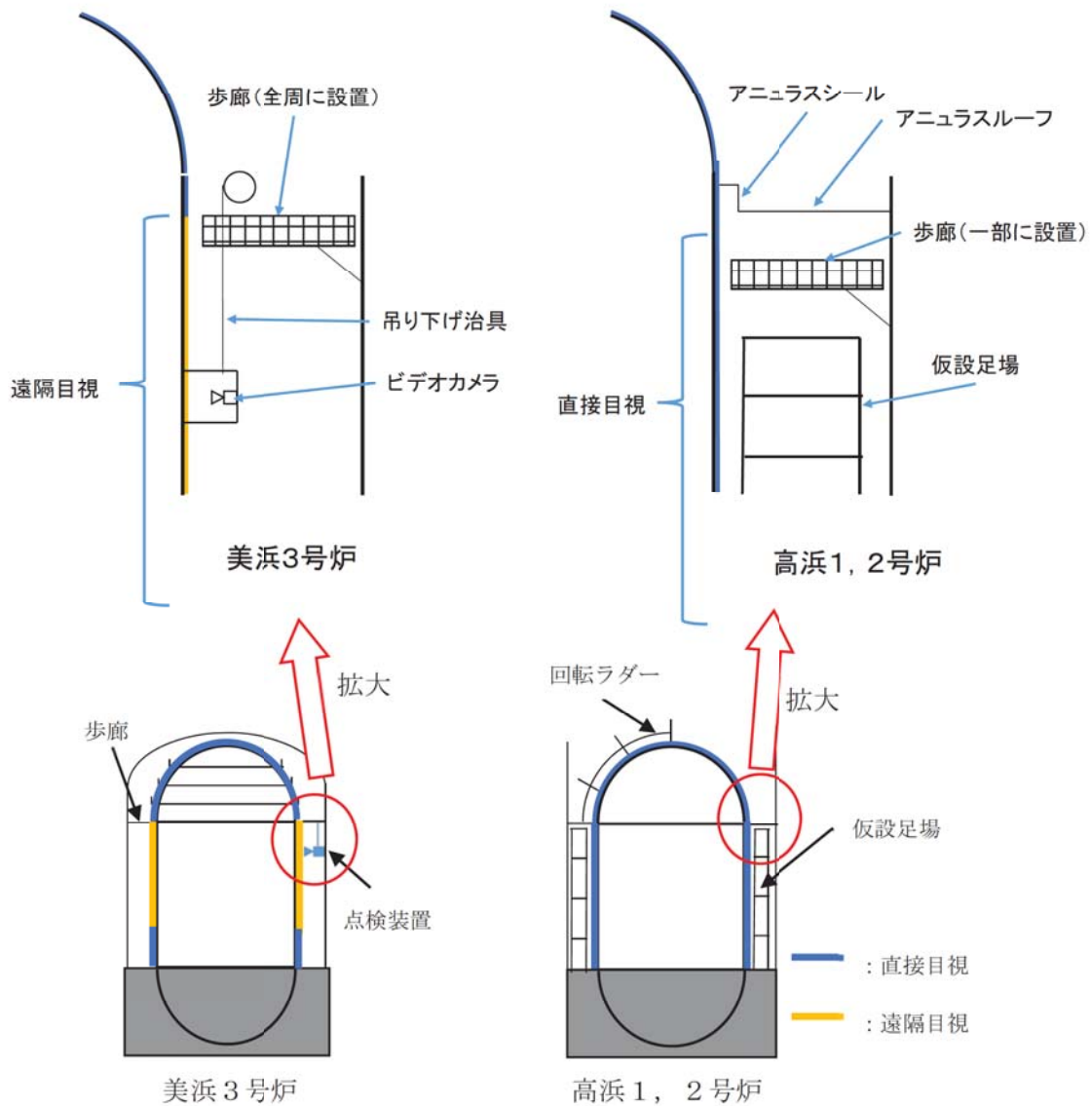


図3. 4 遠隔目視試験（円筒部外面）概略図

(2) 点検方法

3. 3. 2項で記載した原子炉格納容器内面での遠隔目視試験では、点検対象の鋼板と点検場所の間に距離があり直接グレーカードの識別ができないことから、事前にグレーカードが識別できる条件を検証し、検証結果に基づき、設定した照明器具及び距離に応じたビデオカメラ倍率の設定により精度を確保して点検を実施した。

一方、原子炉格納容器円筒部外面点検では、点検用治具を吊り下げ、点検距離を一定に保ちながら一列ごとに点検を実施することとしたため、直接目視点検と同様に、点検時、一列毎にグレーカードがモニター上で識別できることを確認した上で、点検を実施した。

この点検用治具を用いた点検では、点検範囲に漏れが生じないように、各列の点検時にビデオカメラ視野がラップするように点検を実施するとともに、点検範囲内に配管等の干渉物が存在する場合は、ビデオカメラ角度を調整して可能な限り点検不可範囲を小さくするよう点検を実施した。なお、ビデオカメラ角度を調整する等、ビデオカメラと点検対象部位の距離が変化する場合、その都度グレーカードの確認を行い点検を実施した。

遠隔目視点検に用いた治具の一例を図3. 5に示す。



図3. 5 円筒部外面 遠隔目視用点検装置

3. 4 試験員の力量

運用ガイド及び「発電用原子炉設備規格 設計・建設規格」(JSME S NC-1-2005/2007)に基づき、特別点検に係る教育訓練を受けた適切な視力を有する試験員が作業を実施しており、点検着手前に力量を確認した。

3. 5 点検範囲

半球部内外面及び円筒部内外面の原子炉格納容器鋼板（接近できる点検可能範囲の全て）を点検範囲とする。図3. 6～図3. 9に点検方法の内訳（直接／遠隔）を含めた点検範囲図を示す。

なお、原子炉格納容器貫通部については特別点検の対象範囲外としているが、鋼板と同様の目視点検を実施した。

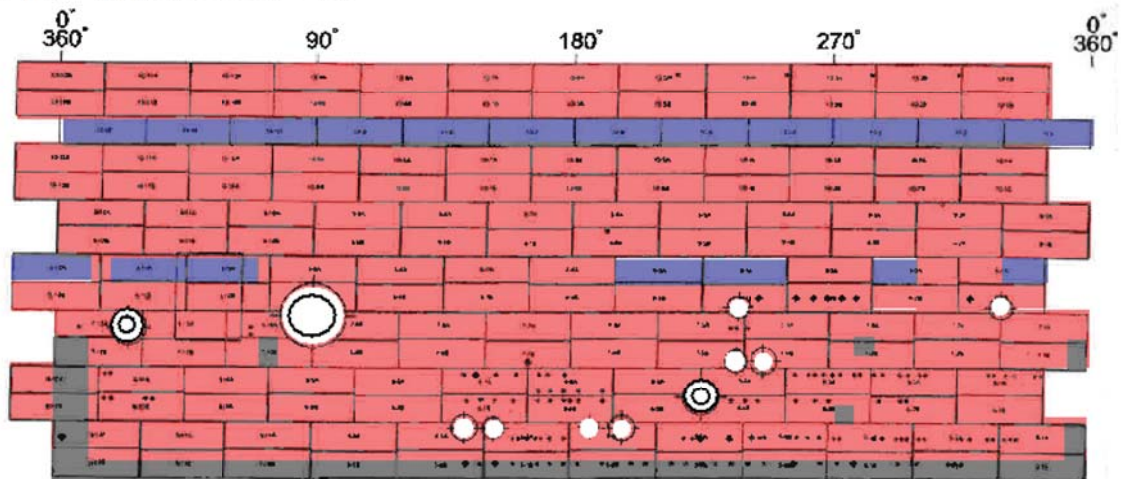


図3. 6 円筒部内面

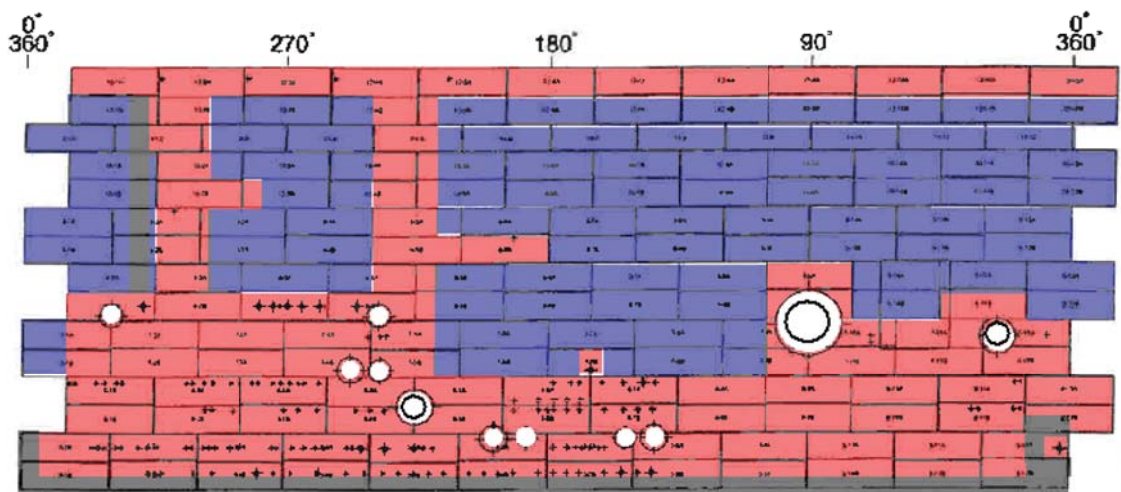


図3. 7 円筒部外面



(注) 埋設部、ダクトや電線管等の移動に切断を要する干渉物が近接する鋼板等を点検不可範囲としている。

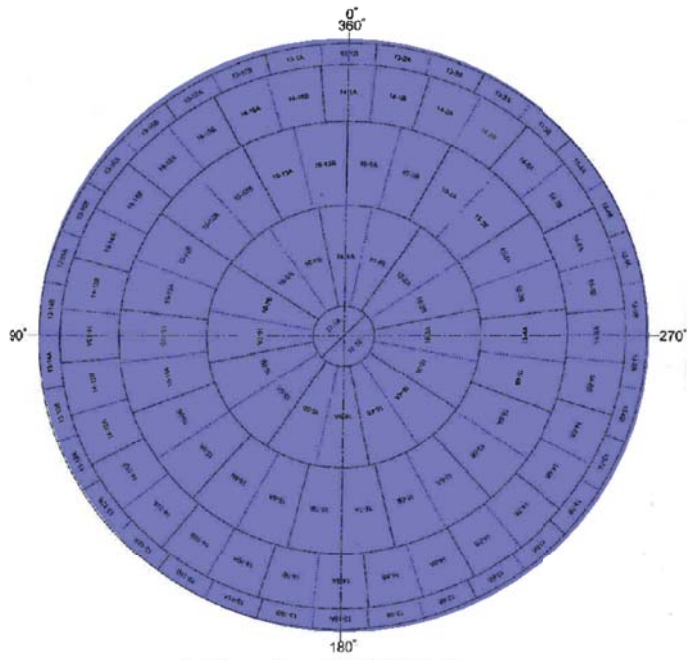


图 3. 8 半球部内面

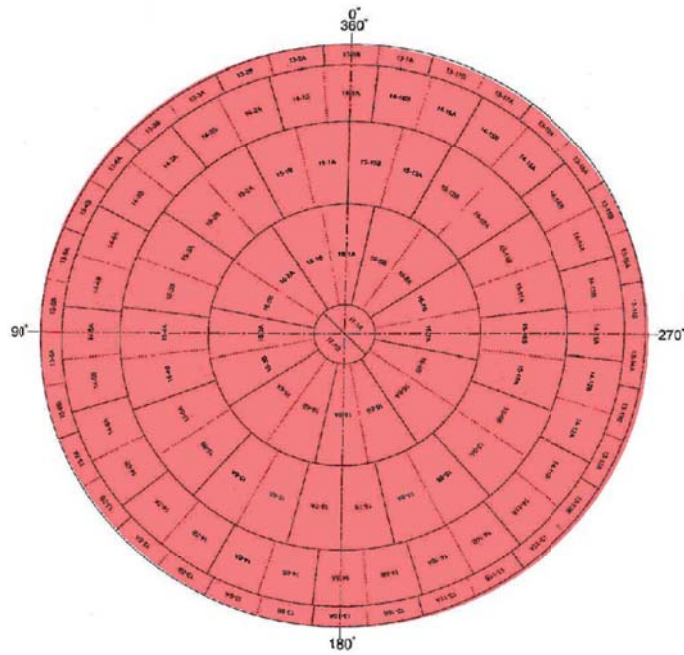


图 3. 9 半球部外面

直接目視試験
 遠隔目視試験

(1) 従来の点検にて確認が容易でない範囲のうち特別点検で確認した範囲

従来の点検では、原子炉格納容器内面高所の干渉物裏（ダクト・配管等の裏）について、フロア上・架台上から双眼鏡等を使用した目視点検を実施しているが、フロア・架台のある範囲が限定されるため、照度・角度の観点から確認が容易でない。

特別点検では仮設足場、搭乗設備及び点検用治具を利用して可能な限り点検不可範囲を低減させる手法を選択して点検を実施した。図3. 10に一例を示す。

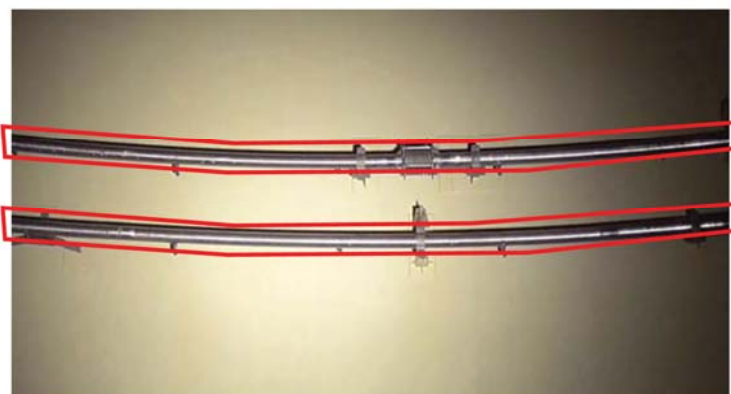


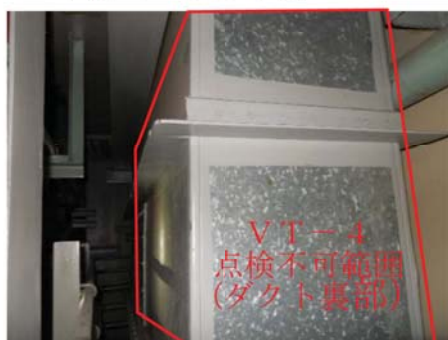
図3. 10 従来の点検で確認が容易でない範囲（内面高所の干渉物裏）

(2) 特別点検における代表的な点検不可範囲

特別点検の実施にあたり、移動可能な仮置物は撤去した状態で、点検可能な全ての範囲について点検を実施した。原子炉格納容器鋼板前面に設置された干渉物（支持部材、ケーブルトレイ、換気空調用ダクト）など、切断等の手法に拠らなければ移動できない干渉物については撤去を行わず、VT-4手法で点検可能な範囲での点検を実施した。

特別点検における点検不可範囲としては以下のものがあつたが、特別点検において点検不可とした範囲においても、接近可能な範囲は日常保全として可視可能範囲での点検・補修を実施している。点検不可範囲の例を図3. 11に示す。

- ・ 接近可能だがVT-4の要求条件が確保できない範囲
- ・ 高所等で接近が困難でありVT-4の要求条件が確保できない範囲



干渉物裏（ダクト裏）



干渉物裏（支持部材）

図3. 11 点検不可範囲の例

3. 6 判定方法

塗膜に割れ、欠け、剥がれ及び膨れの有無、下塗りの健全性、母材の発錆の有無等を確認することで、構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある塗膜の劣化や腐食がないかを判断した。図3. 12に点検フローを示す。

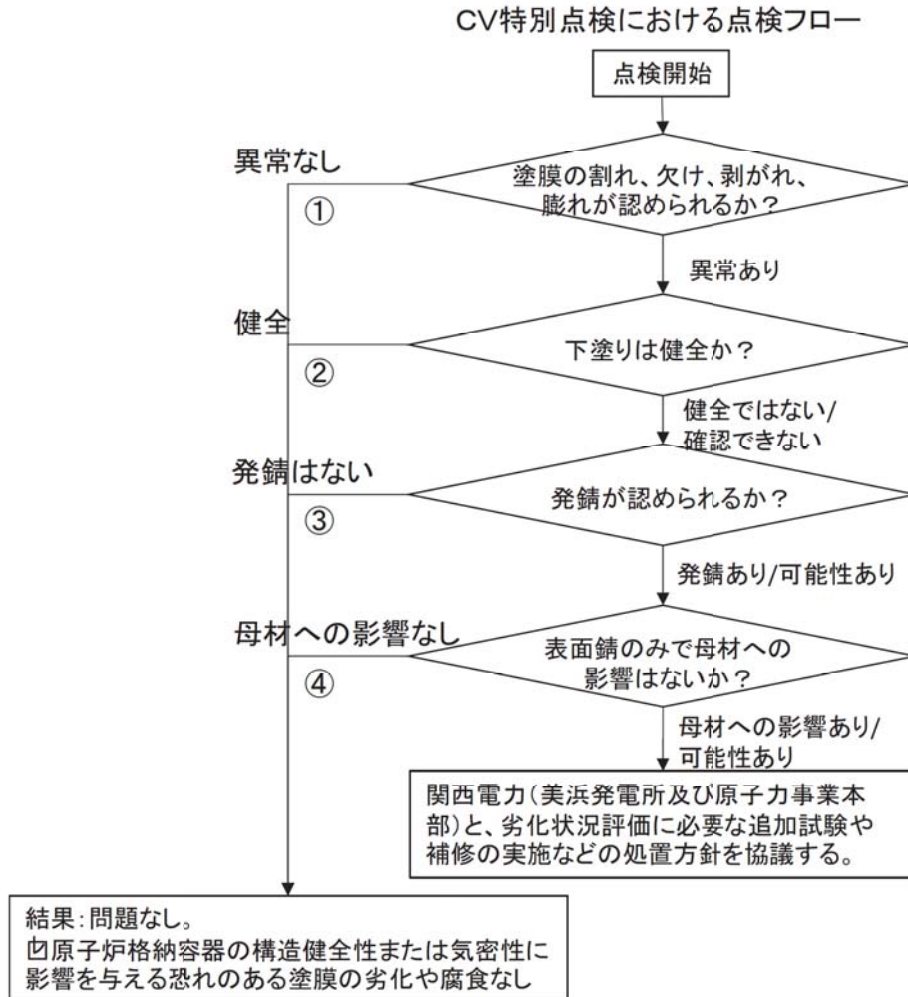


図3. 12 特別点検における点検フロー

【点検フローの考え方】

- ① 塗膜の劣化がないと判断。
- ② 下塗りが健全で金属表面が大気にさらされないことから、原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える塗膜の劣化はないと判断。
- ③ 発錆が認められなければ、原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある腐食ではないと判断。
- ④ 表面錆が確認されたとしても、侵食されて母材板厚が変わるほどの影響がなければ、構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある腐食ではないと判断。

4. 点検結果

全ての点検範囲について原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える塗膜の劣化や腐食は認められなかった。表4. 1に点検結果を示す。

点検年月日： 2015.5.16 ～ 2015.8.11

表4. 1 点検結果

	直接目視	遠隔目視
半球部外面	○	—
半球部内面	○	○
円筒部外面	○	○
円筒部内面	○	○

○：原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある塗膜の劣化や腐食なし

—：対象なし

なお、今回の特別点検において「原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある塗膜の劣化や腐食」に至らない塗膜の軽微な劣化（図3. 12のフロー②、③）が一部認められたため、合わせて塗裝修繕を実施した。特別点検実施中に確認した軽微な塗膜の劣化の例を図4. 1に示す。



フロー②と判断した塗膜の劣化



フロー③と判断した塗膜の劣化

図4. 1 軽微な塗膜の劣化の例

5. 考察

5. 1 保全管理に対する考察

(1) 従来点検にて確認が容易でない範囲

特別点検の範囲のうち、従来点検における点検不可範囲についても、今回の特別点検で塗膜の健全性が確認されたことに加え、劣化が少ない屋内環境であること、またこれまで必要に応じて塗装修繕を実施してきたことから、今後も現状の保全管理を継続することで、当該部の原子炉格納容器鋼板の健全性を維持することができると考える。

今回の特別点検で点検した範囲については塗膜の劣化も少なく、確認された塗膜劣化についても都度塗装修繕を行い塗膜の健全性を確保した。従来点検における点検不可範囲についても環境条件が同様な周囲の鋼板は点検可能であり、塗装修繕の要否は点検可能範囲から判断できることから、現状保全を継続することで今後の運転延長期間における原子炉格納容器鋼板の健全性が保たれる。

5. 2 特別点検における点検不可範囲に対する考察

特別点検における点検不可範囲については、以下の通り現状保全で塗膜の健全性を維持していること、劣化が少ない屋内環境であることから、今後も現状保全を継続することで原子炉格納容器鋼板の健全性を維持することができると考える。

(1) 接近可能だがVT-4の要求条件が確保できない範囲

VT-4精度ではないものの従来の点検で点検が実施できており、塗膜の健全性が維持されていることを確認していることから、現状保全を継続することで今後の運転延長期間における原子炉格納容器鋼板の健全性が保たれる。図5.1に不可範囲の代表例を示す。



図5.1 VT-4の要求条件が確保できない箇所の例

(2) 高所等で接近が困難でありVT-4の要求条件が確保できない範囲

干渉物裏の極めて限定された範囲のみが点検不可範囲であり、周辺の鋼板は現状保全でも点検可能な範囲である。環境条件は周囲の鋼板と同じであり、周辺を塗裝修繕する際は干渉物裏についても合わせて塗装していることから、現状保全を継続することで今後の運転延長期間における原子炉格納容器鋼板の健全性が保たれる。不可範囲の例を図5.2に示す。



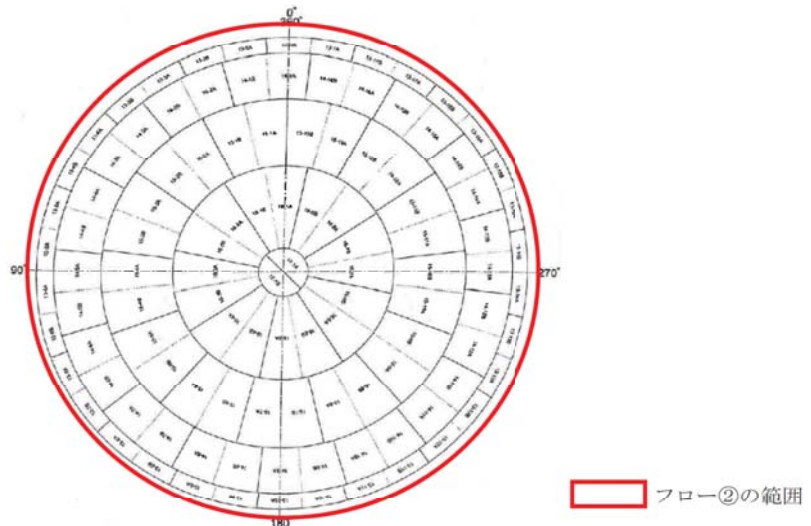
図5.2 高所等で接近が困難でありVT-4の要求条件が確保できない範囲

5.3 特別点検で確認した軽微な塗膜の劣化について

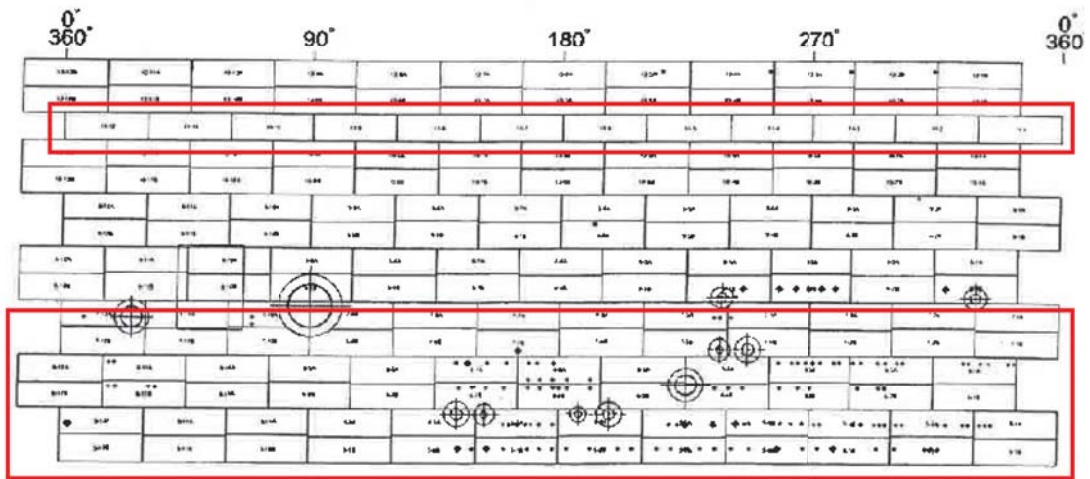
特別点検で軽微な塗膜の劣化（フロー②）が確認された範囲は、フロア・恒設足場が設置されている範囲が大半であった。また、円筒部内面のリングガード下部においては、上下の鋼板と比較して、軽微な塗膜の劣化が多い箇所が見られた。軽微な劣化が確認された範囲を図5.3に示す。

上記箇所のうち、フロア・恒設足場が設置されている箇所については、従来の点検で点検可能な範囲であり、これまでも必要に応じて塗装を実施しているため、今後も現状の保全管理を継続することで原子炉格納容器鋼板の健全性を維持することができると考える。一方、円筒部内面のリングガード内部については、従来の点検の際にポーラクレーン上から点検を実施しているが、ポーラクレーン上から確認しづらい箇所であるため、今後は確認しづらい箇所を低減するべく点検手法を改善する。

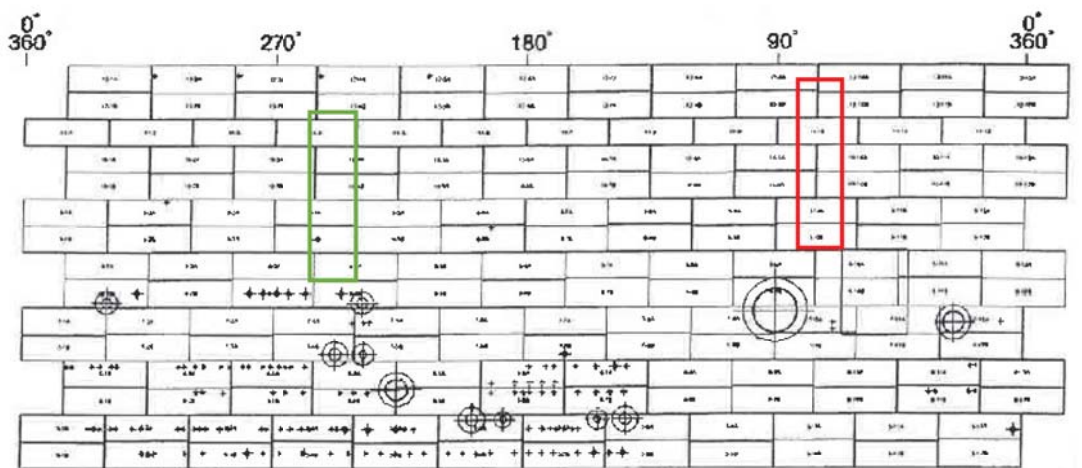
なお、円筒部外面で下塗りの剥がれ（フロー③）が確認されたが、当該の劣化は縦のラインに沿って認められている。この劣化の要因として、当該箇所は原子炉格納容器外面の塗裝修繕を実施する際、上部にウインチを設置してゴンドラの吊り上げ・吊り下げを実施していた箇所であり、ウインチからワイヤの送り出し・回収を行う際、ワイヤ先端が鋼板に接触することで、塗膜の剥がれが発生したものと考えられる。今後はワイヤの送り出し・回収の際に先端を養生するとともに先端を下部からロープ等で保持し、原子炉格納容器鋼板にワイヤが接触しないよう対策を取る。



半球部外面



円筒部内面



円筒部外面

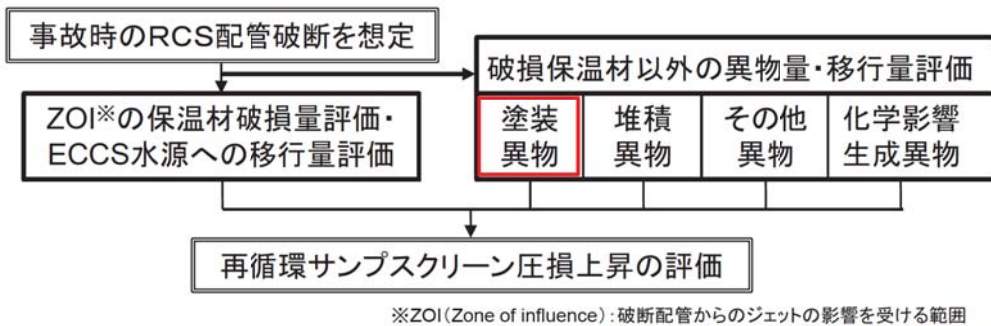
図 5. 3 軽微な劣化が確認された範囲

6. 経年劣化を考慮した原子炉格納容器鋼板内面塗装の事故時性能について

6. 1 塗装に必要な事故時性能

原子炉格納容器（CV）の塗装は、通常時には炭素鋼製であるCV鋼板の防食機能を担うものであるが、事故時には物理的・化学的影響により鋼板表面から剥離して異物（デブリ）化する可能性があることから、事故時の格納容器再循環サンプスクリーン性能評価の中で、格納容器再循環サンプスクリーン圧損を上昇させる要因として評価する対象となっている。

事故時の格納容器再循環サンプスクリーン性能評価としては、保温材異物・塗装異物・堆積異物等、異物の種類毎に発生異物量・格納容器再循環サンプスクリーンへの移行異物量を評価し、それら各種異物の影響を合わせて圧損上昇の評価を行う。



※ZOI(Zone of influence):破断配管からのジェットの影響を受ける範囲

図6. 1 事故時の格納容器再循環サンプスクリーン性能評価概要

このうち、「塗装異物」の発生については

- ① 配管破断口近傍の塗装が高温高压の2相流ジェットの影響により剥離するケース
- ② CV内の温度・圧力等環境条件により塗料が劣化して剥離するケース

が考えられるが、①については10D（D：破断想定配管の直径）の球形ZOI（ZOI：Zone of influence）表面積相当を異物量として評価すること、②についてはDBA試験により、耐DBA仕様であることが認められた塗装は異物量とせず、非DBA仕様塗装は当該塗料が異物となるものとして評価することが、「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（内規）」（平成20・02・12原院第5号）において定められている。

美浜3号炉のCV内面塗装は、試験により耐DBA仕様であることが確認されている⁽¹⁾ことから、上記②のケースによる剥離を想定していないものであるが、経年劣化を考慮した場合においても事故時に異物とならないことを本資料で確認する。

6. 2 経年劣化と保守管理

C V鋼板の塗装は経年劣化の影響を受け、その影響は一般的に塗膜の割れ・欠け・膨れ・剥がれといった兆候として現れる。C V鋼板塗装の保守管理としては、保全指針に基づき定期点検毎に目視点検を実施しており、確認された塗装の劣化に対しては計画的に塗裝修繕を実施している。

経年劣化に対する点検手法（目視点検）の有効性については、米国におけるC V鋼板塗装の点検手法に対する議論経緯も踏まえて以下の通り整理を行った。

6. 2. 1 米国におけるC V塗装点検についての議論

現在、米国におけるC V塗装に対する点検要求は、Regulatory Guide 1.54 Rev.2 および GALL 報告書 (NUREG-1801, Rev.2) において、ASTM 規格 (ASTM D5163 他) に基づく目視点検を妥当なものとして位置づけている。

但し、ここに至るまでの間、米国 NRC と米国事業者 (NEI) の間で塗装点検方法についての議論^(2,4)が行われており、また、EPRI によって実機 PWR プラントでの付着性試験⁽⁵⁾が行われている。

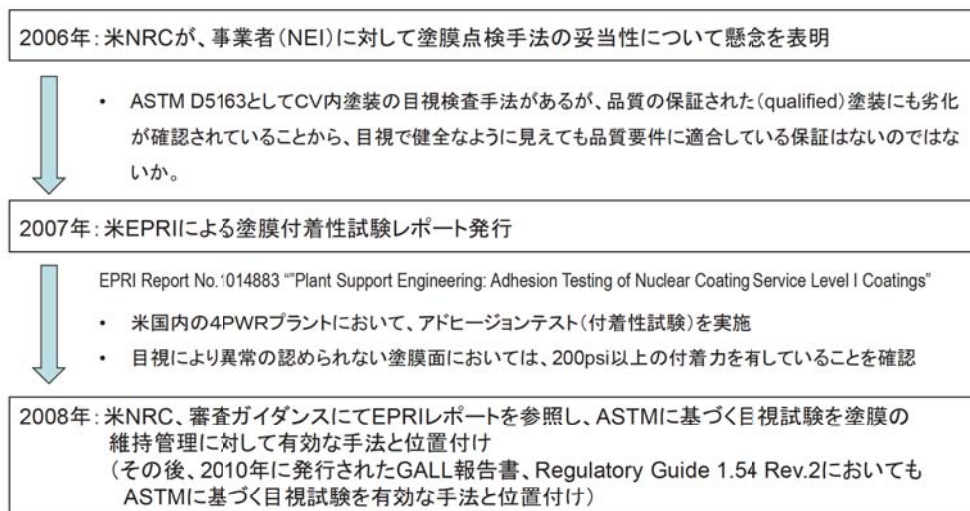


図6. 2 米国におけるC V塗装点検に係る議論経緯

この中で、EPRIによって行われた実機 PWR プラントでの付着性試験では、米国内の 4PWR プラント (San Onofre Nuclear Generating Station Unit3, Waterford Unit3, McGuire Unit1, Oconee Unit2) を対象として行われ、実機C V鋼板等の塗装面に対して ASTM D 4541-02 に基づく引張力試験、ASTM D 6677-01 に基づく X カット試験が実施された。

試験では、目視により健全と判断される塗装及び劣化箇所付近の塗装に対する試験が行われ、いずれの箇所においても塗装当時の規格 (200psi (=約 1.4MPa) , ANSI

による) 以上の付着力を有していることが確認され、これらの結果から、ASTM D 5163 により目視試験でCV塗装を管理する方法が有効であると結論付けられている。

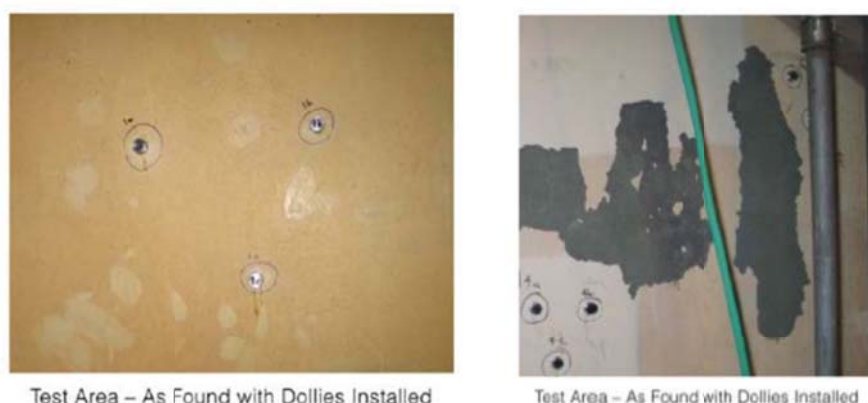


図6. 3 健全な塗膜(左)及び劣化箇所付近の塗膜(右)に対する試験片貼り付けの様子(Waterford Unit3)⁽⁵⁾

6. 2. 2 美浜3号炉における保守管理の検討

米国においては、前述の通り実機プラントでの付着性試験結果を踏まえて、目視点検(ASTM D 5163)手法の妥当性を確認してきたことから、美浜3号炉におけるCV塗装点検手法の妥当性について、(1) EPRI 試験結果の適用性、(2) 美浜3号炉実機塗装の劣化傾向、(3) 塗装施工の差異による影響の確認、(4) 米国における点検状況との比較の4つの観点から検討を行った。

(1) EPRI 試験結果の適用性

EPRI により試験が行われた米国 4PWR プラントのうち、Waterford Unit3, Oconee Unit2 についてはCV鋼板塗装に美浜3号炉と同種の塗料であるエポキシ樹脂系塗料を使用している⁽⁵⁾。この塗料は美浜1号炉建設当初の塗料と同一のものであるが、美浜3号炉建設時に、CV内面塗装選定のため、メーカーにより下図の通り付着性試験が実施されている。

美浜3号炉用塗装の試験結果については、ともに Waterford Unit3, Oconee Unit2 で使用された塗装の付着力を上回っていることから、美浜3号炉用の塗装は EPRI により付着性試験が実施された塗膜と同等以上の付着力を有するものと考えられる。

EPRIによる塗膜付着性試験

・San Onofre Nuclear Generating Station Unit3

・Waterford Unit3

・McGuire Unit1

・Oconee Unit2

鋼材面塗装に高浜1, 2号炉と同種の塗料であるエポキシ樹脂系塗料^{注1)}を使用

注1) Waterford Unit3 及びOconee Unit2で使用された塗料は美浜1号炉建設当初の塗料と同じ塗料

メーカーによる国内試験での塗膜付着性試験

	美浜3号炉用塗装	Waterford Unit3, Oconee Unit2 使用塗装 (美浜1号炉用塗装と同じ)
試験結果	引張強さ ^{注2)} 条件は左記に同じ	引張強さ 条件は左記に同じ

注2) 試験結果は2回の平均値

図6. 4 EPRI 試験と国内試験の関係

(2) 美浜3号炉実機塗装の劣化傾向

美浜3号炉実機においても2016年にCV鋼板内面塗装に対する付着性試験を実施した。試験の詳細は別紙-4「美浜3号炉 実機CV鋼板内面塗装に対する付着性試験結果」の通りであるが、平均4.7MPaの付着力を有しており、美浜3号炉のCV鋼板内面塗装は定期的な目視点検や塗装修繕等の保全活動を続けてきたことにより、塗装直後の試験結果（建設時にメーカーにて実施した付着性試験結果）と比較して大きな劣化は認められないことが確認できた。

(3) 塗装施工の差異による影響の確認

一般的に、塗装の性能は、塗料自体の性能に加えてその施工による影響も受けるものであるが、塗装方法については塗料の仕様書等で指定されているものであり、この指定通りに施工することで適切な塗装性能が確保されることから、施工が塗装性能に影響を及ぼすものではないと考えられる。

従来より、CV鋼板塗装に劣化が確認された際には塗装修繕を実施しており、(2)の美浜3号炉 実機CV鋼板内面塗装に対する付着性試験においても塗装修繕実績のある範囲を含めて試験を実施した。この試験結果でも、塗装修繕箇所を含めて全ての試験箇所ではEPRI試験の判定基準(200psi=約1.4MPa)を上回っており、施工による影響を考慮しても必要な塗装性能が確保されていることが確認できる。

これに加え、参考として塗装施工者による影響を確認した結果、施工者の違いによる有意な差異も認められなかった。確認試験の内容について、別紙-5「塗装時の施工が塗装の性能に与える影響について」に示す。

(4) 米国における点検状況との比較

前述の通り、米国では EPRI による実機 PWR プラントでの付着性試験の結果を踏まえ、ASTM D 5163 による目視試験が C V 塗装の管理方法として有効であるとされている。

C V 鋼板塗装の保守管理について、米国における議論経緯も参考にして検討を行っていることから、ASTM D 5163 に規定される内容と美浜 3 号炉で「現状保全」として実施している定期検査毎の点検手法について下表の通り比較を行った⁽⁶⁾。

この表の中で「力量」に係る事項の比較検討結果については別紙－6「原子炉格納容器の塗装点検実施者に対する力量管理（ASTM 要件との比較）」に示しているが、美浜 3 号炉の「現状保全」と ASTM D 5163 に基づく点検手法に大きな差はないことを確認した。

表 6. 1 美浜 3 号炉「現状保全」と米国における点検状況の比較⁽⁶⁾

		美浜3号炉 現状保全	米国における点検 (ASTM D5163-08)	(参考) 美浜3号炉 特別点検
点検 頻度		定検毎	事業者が決定 (定検毎の点検を推奨)	—
記録		点検結果を記録	同左	同左
点 検 方 法	範囲	・接近できる点検可能範囲を目視点検 ・寄り付き困難な場所は双眼鏡を用いた点検	・接近可能な塗膜表面を巡回し目視検査 ・必要に応じ照明、双眼鏡等の機材を用いる	・接近できる点検可能範囲の全てを目視点検 ・寄り付き困難な場所は高倍率のカメラ等を用いて点検
	精度	・点検時の照度、グレーカードの確認等の要求なし	・点検時の照度、グレーカードの確認等の要求なし	・点検時の照度、グレーカードの確認・検証あり
	力量	・試験実施者との作業計画書の読み合わせを実施し点検範囲や方法の周知 ・作業責任者には同種工事の実務経験を有した者の中から選定	・試験実施者は原子力の塗膜の専門家もしくは専門家により検査能力が認められた者とする。	・事業者が、試験実施者との作業計画書(特別点検の要領書含む)の読み合わせを実施し点検範囲や方法の周知 ・試験実施者は教育を受講し、適切な力量を有する者
	異常 発見時	・試験実施者から事業者に連絡するよう要領書にて要求 ・補修計画等の対処方法について事業者にて検討	・劣化が疑われる塗膜表面は塗膜厚測定、アドヒージョンテスト(付着性試験)等を実施 ・劣化した塗膜の場所及び今定検での修繕が必須であるかを記録	・試験実施者から事象者に連絡するよう要領書にて要求 ・補修計画等の対処方法について事象者にて検討

以上の検討より、美浜 3 号炉において現状実施している保守管理（目視点検、劣化確認時の修繕）方法は妥当であり、今後も現状保全を継続することで C V 鋼板塗装の性能が維持されると考えられる。

6. 3 事故時性能についての検討

前節（6. 2）の通り、C V鋼板の塗装には定期的な目視点検と劣化確認時の修繕を実施していることから、劣化箇所は適宜除去され、付着性試験結果からも付着力の大きな劣化は認められないことが確認できた。

本節では、設計基準事故時と重大事故等時のそれぞれにおいて、C V鋼板の塗装が必要な性能を有していることを説明する。

6. 3. 1 設計基準事故時の性能

設計基準事故（DBA）時のC V鋼板内面の塗装性能については、PWR プラントのDBA-LOCA 事象を包絡した条件（具体的には米国基準 ASTM D3911 等）によるDBA 試験を行い、試験結果に基づき、塗装の剥落有無により耐DBA 仕様／非DBA 仕様の確認を行なった。この試験結果については「格納容器再循環サンプスクリーン閉塞事象に関する報告書」（平成 18 年 8 月）^①として報告しており、美浜 3 号炉のC V鋼板内面に使用している塗装については耐DBA 仕様であることが確認されている。

以上のことから、DBA 時のC V鋼板内面の塗装は、環境条件により剥落して異物となることはない。

6. 3. 2 重大事故等時の性能

前述の通り、C V鋼板内面の塗装はDBA-LOCA 条件を考慮した試験を行い、健全性が確保されることを確認している。重大事故等時（SA 時）においてもC V内の温度等環境条件はDBA 試験と同程度、又はDBA 試験条件の方が一部過酷と考えられるが、再循環サンプスクリーンの機能に期待する有効性評価の各シナリオに対して、以下の通りC V鋼板内面塗装の健全性について検討を行った。

- ① SA 時対策の有効性評価において、C V再循環を行うシナリオ（再循環サンプスクリーン機能に期待するシナリオ）を抽出
- ② C V再循環を行うシナリオに対して、C V内の温度等推移を確認
- ③ 各シナリオのC V内温度等条件に対し、SA 時のC V鋼板内面塗装の健全性を評価

検討①

美浜 3 号炉のSA 有効性評価シナリオのうち、C V再循環を行うシナリオを下表の通り抽出した。

表 6. 2 美浜 3 号炉 S A 有効性評価において C V 再循環を行うシナリオ

再循環のあるシナリオ	CV スプレー	RCS 破断形態	塗装の DBA 試験条件からの評価
ECCS 注水機能喪失	あり	中小破断	○事故時の温度条件が DBA 時の環境を下回る。
ECCS 再循環機能喪失	あり	大破断	○事故時の温度条件が塗装の DBA 試験条件内にある。
全交流動力電源喪失	なし	破断 なし	○DBA 試験の最高温度 (153°C) は SA 時の最高温度 (110°C) を包含している。 ○事故発生 96 時間までの DBA 試験温度 (121°C) は SA 時温度を包含している。 ○96 時間以降 7 日までの DBA 試験温度 (93°C) は、SA 時温度 (約 100~110°C 程度) を若干下回っているもの、概ね同等。
原子炉格納容器の除熱機能喪失	なし	中小 破断	○DBA 試験の最高温度 (153°C) は SA 時の最高温度 (129°C) を包含している。 ○事故発生 96 時間までの DBA 試験温度 (121°C) は、SA 時温度 (約 129~110°C) を一部で若干下回っているもの、概ね同等である。 ○96 時間以降 7 日までの DBA 試験温度 (93°C) は、SA 時温度 (約 110°C~100°C) を若干下回っているもの、概ね同等。

検討②

各シナリオの概略系統図・C V 内温度推移は別紙-7 「美浜 3 号炉 C V 再循環シナリオの概略系統図・C V 内温度推移」の通りである。C V スプレーがある「ECCS 再循環機能喪失」については、別紙-7 に示す通り事故時の温度条件が DBA 試験条件に包含されている。

C V スプレーがないシナリオ（全交流動力電源喪失、原子炉格納容器の除熱機能喪失）については、一部の時間帯で C V 内温度が DBA 試験を上回るものの、そのシナリオにおける最高温度 129°C は DBA 試験条件の最高温度 153°C に十分包含されるものであり、以降の温度についても DBA 試験条件と概ね同程度の推移となっている。下図に一例として「原子炉格納容器の除熱機能喪失」シナリオの C V 内温度推移を示す。

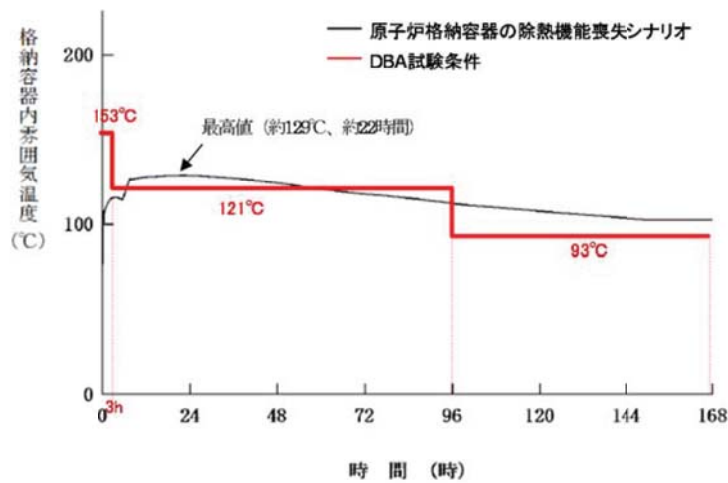


図 6. 5 「原子炉格納容器の除熱機能喪失」シナリオの C V 内温度推移

検討③

DBA 試験に用いた温度圧力履歴は上図赤線の通りであるが、この試験では大破断 LOCA を想定するため、試験初期に蒸気噴霧により急激な温度過渡を与えている。一方、CV スプレーがないシナリオ（全交流動力電源喪失、原子炉格納容器の除熱機能喪失）では RCS 破断形態が「中小破断」又は「破断なし」であり、大破断 LOCA を想定する DBA 試験と比較して、初期の温度過渡が緩やかな状況となる。

また、DBA 試験では CV 鋼板内面塗装にスプレー水が吹き付けられる状況も模擬しているが、スプレー水を直接受ける面（表側）と受けない面（裏側）では塗装の剥落程度に差が生じており⁽⁷⁾、CV スプレーの有無が塗装の剥落有無に影響を与えるものと考えられる。

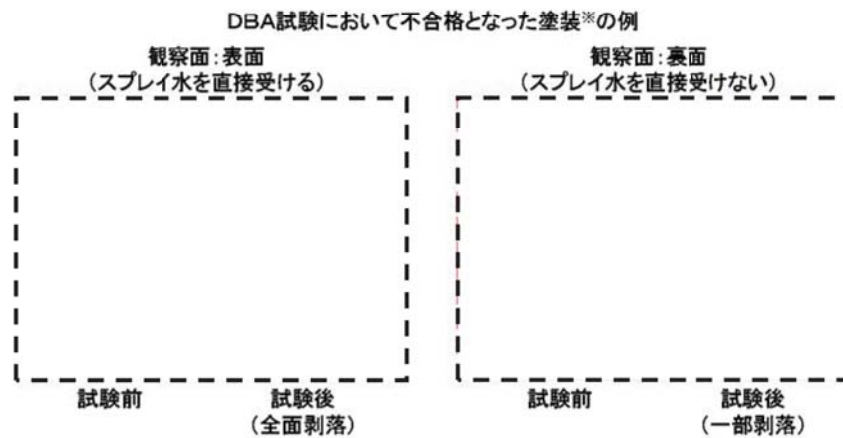


図 6. 6 スプレー水を受ける面・受けない面での塗装剥落程度差異

美浜 3 号炉 CV 鋼板内面で使用している塗装はこのような DBA 試験に対して合格しているものであり、試験後の観察結果では、環境条件として厳しいスプレー水を直接受ける面（表側）でも塗装の剥落、また剥落の要因となりうる塗装の異常についても確認されていない⁽⁷⁾。

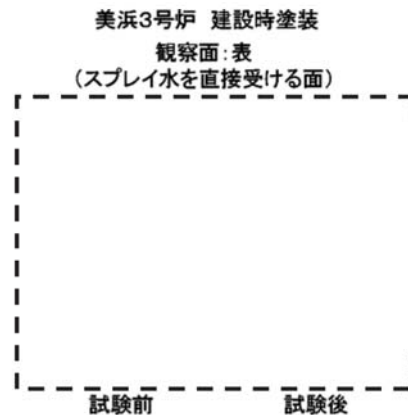


図 6. 7 美浜 3 号炉 CV 鋼板内面用塗装の DBA 試験結果

加えて、美浜3号炉CV鋼板内面で使用している塗料（エポキシ樹脂塗料）に対しては長期間の使用を想定した耐熱温度が120℃との知見がある⁽⁸⁾こと、また、美浜3号炉建設時塗装（美浜3号炉における修繕時塗装仕様と同一）については200℃・10時間×4サイクルの耐熱試験を実施しても剥落が生じず、付着力が低下しなかった知見があることから、当該塗装はSA時のCV内環境に耐えうるものであると考えられる。（耐熱性評価についての詳細を別紙-8「エポキシ樹脂塗料の耐熱性について」に示す）

以上①～③の検討より、SA時のCV内環境を考慮してもCV鋼板塗装に剥落の要因となりうる異常や剥落が生じることは考え難く、SA時においても塗装は健全であると考えられる。

但し、SA有効性評価シナリオによっては一部の時間帯でDBA試験条件を上回っていることから、SA時のCV鋼板内面塗装の健全性実証について中長期的な知見拡充として引き続き取り組んでいく。

なお、再循環サンプスクリーンの異物付着による圧損上昇については、SA時に使用するポンプのNPSH評価で考慮しており、SA時の塗装異物量はDBA時の塗装異物量と同一としている。

DBA時の塗装異物量は、大破断LOCAを想定しCV内の最大口径配管であるクロスオーバーレグの直径を基に配管破断による直接的な影響を受ける範囲を考慮して算出している。一方、上記のCVスプレイがないシナリオ（全交流動力電源喪失、原子炉格納容器の除熱機能喪失）ではRCS配管の破断を想定しない、もしくは中小破断を想定しており、配管破断による直接的な影響を受ける範囲はDBA時より小さくなるが、SA時の塗装異物量はDBA時と同一とすることで塗装異物量を保守的に評価している。なお、SA時に仮に再循環水が溜まるエリア（CV再下層フロアの床面）の塗装が全て剥落して再循環サンプスクリーンへ至ったとしても、中破断LOCAによる塗装異物量との合計はDBA時の塗装異物量評価に包含される。（評価の詳細を別紙-9「中破断LOCA時の塗装異物量評価について」に示す）

また、仮にCV鋼板塗装に剥落が生じた場合を想定しても、CVスプレイのない環境においてはオペレーションフロア等のCV内上層階から再循環サンプスクリーンへ至るスプレイ水の流れが生じないことから、CV鋼板塗装の大部分は剥落を想定してもその場へ留まり、再循環サンプスクリーンの異物とならないことが想定される。

6. 4 C V鋼板内面塗装の事故時性能のまとめ

美浜3号炉の原子炉格納容器鋼板内面の塗装（DBA試験に合格した仕様のもの）について、重大事故等時（SA時）の温度等環境下での性能を検討するため、格納容器再循環サンプスクリーン機能を期待するシナリオを抽出した。

抽出したシナリオのうち、格納容器スプレイありのシナリオについては、SA時の温度条件がDBA試験に用いた条件内にあることを確認した。また、格納容器スプレイなしのシナリオについては、一部の時間帯で温度がDBA試験を上回るものの試験条件と概ね同程度であることを確認した。

これに加えて、DBA試験の条件は、C Vスプレイを考慮しないSAシナリオと比較して過酷な設定（温度過渡、スプレイ水の模擬）となっている。

以上より、DBA試験に合格した塗装はSA時のC V内環境下においても大きな剥落が生じることはなく、事故時に期待される性能が維持できるものと考えられる。

なお、SA時のC V鋼板内面塗装の健全性実証については中長期的な知見拡充として引き続き取り組んでいく。

7. まとめ

原子炉格納容器の特別点検においては、従来の点検方法では確認が容易でなかった範囲についても点検対象に含め、接近できる点検可能範囲の全ての鋼板に対して、視認性を実証できる形で塗膜の状態を目視点検した。一部の鋼板において塗膜の割れ等が確認されたが、全ての点検範囲について原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える塗膜の劣化は認められなかった。特別点検における点検不可範囲、従来の点検方法における点検不可範囲はそれぞれ存在するものの、塗膜の健全性を維持していること、劣化が少ない屋内環境であることから、今後も現状の保全管理を継続することで原子炉格納容器鋼板の健全性を維持できると考える。

特別点検で塗膜の割れ等が比較的多く確認された範囲は、従来の点検手法で点検可能な範囲であるため、今後も現状の保全管理を継続することで原子炉格納容器鋼板の健全性を維持できると考える。

また、今回点検を実施した原子炉格納容器鋼板塗装のうち、内面の塗装については経年劣化を考慮しても事故時に期待される性能が維持できるものであることを確認した。

参考文献

- (1) 関西電力株式会社 「格納容器再循環サンプスクリーン閉塞事象に係る対応に関する報告書」平成 18 年 8 月
- (2) NRC Letter to NEI, “Qualified Coatings Assessments”, January 16, 2006
- (3) NEI Letter to NRC, “Qualified Coatings Assessments”, March 31, 2006
- (4) NRC Letter to NEI, “Qualified Coatings Assessments”, April 26, 2006
- (5) EPRI, Report No.1014883 “Plant Support Engineering: Adhesion Testing of Nuclear Coating Service Level I Coatings”, August, 2007
- (6) ASTM D 5163-08 : Standard Guide for Establishing a Program for Condition Assessment of Coating Service Level I Coating Systems in Nuclear Power Plants
- (7) 委託調査報告書「再循環サンプスクリーン閉塞対策の最適化検討」平成 17 年度（最終報告書）
- (8) 一般社団法人 日本塗料工業会 「重防食塗料ガイドブック 第4版」2013 年 3 月

別紙

- 別紙 1. 半球部外面のうちダクト近傍における、高浜 1, 2 号炉と美浜 3 号炉の点検手法の違いについて
- 別紙 2. 試験機材のうち特に照明器具における、高浜 1, 2 号炉と美浜 3 号炉の違いについて
- 別紙 3. 非破壊試験(VT-4)記録が、適切な方法等により得られた結果であることを示す記録(要員の力量、試験条件、詳細記録等)について
- 別紙 4. 美浜 3 号炉 実機 CV 鋼板内面塗装に対する付着性試験結果
- 別紙 5. 塗装時の施工が塗装の性能に与える影響について
- 別紙 6. 原子炉格納容器の塗装点検に対する力量管理 (ASTM 要件との比較)
- 別紙 7. 美浜 3 号炉 CV 再循環シナリオの概略系統図・CV 内温度推移
- 別紙 8. エポキシ樹脂塗料の耐熱性について
- 別紙 9. 中破断 LOCA 時の塗装異物量評価について

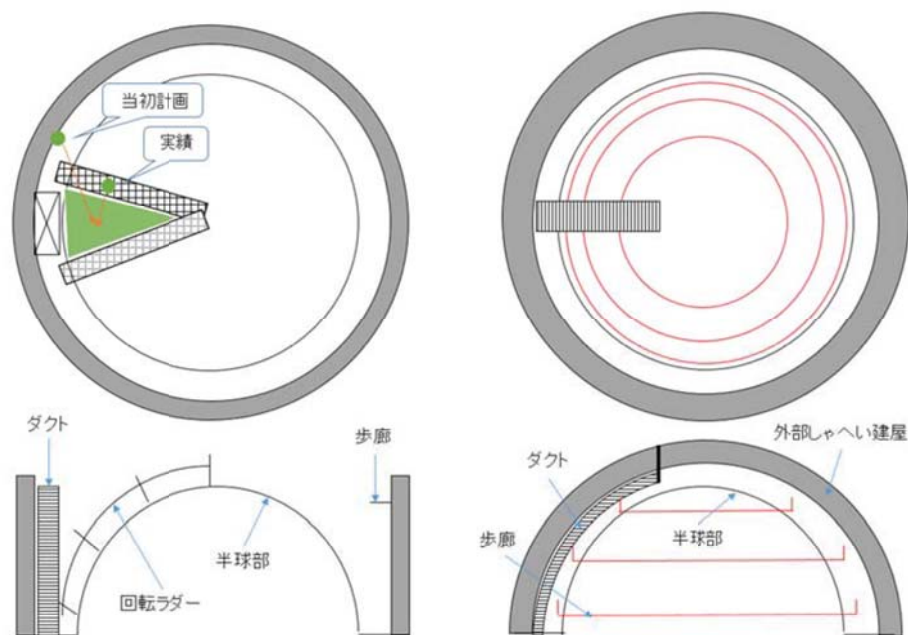
半球部外面のうちダクト近傍における、高浜 1,2 号炉と美浜 3 号炉の
点検手法の違いについて

高浜 1,2 号炉と美浜 3 号炉の半球部外面の設備の相違として、高浜 1,2 号炉は回転ラダー、美浜 3 号炉は半球部外面に直接歩廊が設置されている。

高浜 1,2 号炉についてはヒアリング回答「No.高浜 1 - 特別点検 (原子炉格納容器) - 6」に示す通り、当初計画ではダクト近傍について半球部外面から離れた箇所に設置されている歩廊から遠隔目視を実施予定であったが、回転ラダーでの近接が可能であったため、回転ラダーより直接目視を実施した。

美浜 3 号炉については、半球部外面に近接可能な箇所に歩廊が設置されていることから、歩廊より直接目視を計画・実施した。

参考に半球部外面の状況を添付に示す。



高浜 1,2 号炉

美浜 3 号炉

半球部外面 点検状況




高浜1号炉 半球部外面



美浜3号炉 半球部外面

試験機材のうち特に照明器具における、高浜1，2号炉と美浜3号炉の違いについて

円筒部外面について、高浜1，2号炉は直接目視により実施した。美浜3号炉は、点検用治具を吊り下げて遠隔目視により実施したため、点検治具に取付可能な照明器具が必要であった。

よって、高浜1，2号炉の実績に対して美浜3号炉は照明器具を追加している。(追加照明機器は「」及びLED投光器。)

追加の照明器具の使用にあたっては、点検用治具と組み合わせてグレーカード上の幅0.8mmの黒線が識別可能なことを確認しているため、他の試験部位と同等の試験条件で点検を実施している。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

非破壊試験（VT-4）記録が、適切な方法等により得られた結果であることを示す記録
（要員の力量、試験条件、詳細記録等）について

特別点検を実施するにあたり、実用発電用原子炉運転期間延長申請に係る運用ガイド及び「発電用原子炉設備規格 設計・建設規格」（JSME S NC-1-2005/2007）（以下「設計・建設規格」という）に基づき、特別点検における試験員に対して、次のとおり特別点検に係る教育訓練と視力を要求事項とした（添付1参照）。

【特別点検に係る教育訓練に関する事項】

工事前に、特別点検実施前教育を受講していること。

【視力に関する事項】（設計・建設規格「GTN8130 試験技術者」より抜粋）

- ・近距離視力確認用の標準ジャガー式チャートの J-1 文字を読み取ることができるか、または同様な近距離視力試験で同等の視力を確認すること。なお、視力の測定は、裸眼またはコンタクトレンズ等による矯正のいずれでもよいが、矯正により要求を満足した場合は、実際の試験においても矯正した視力で行うこと。
- ・色の判定が要求される目視試験を行う場合は、必要とする色についての色覚が正常であること。

試験条件を含んだ詳細記録については、格納容器鋼板1枚毎に記録を作成しており、その代表例を添付2に示す。

(抜粋)

				承認	審査	担当
実施日	自)平成27年 5月 11日	教育・訓練 時間	1.0時間	[Redacted]		
	至)平成27年 5月 11日					
教育・訓練名 内容	特別点検に係わる教育・訓練			実施場所	美浜事務所	
				講師名	[Redacted]	
教育テキスト 資料名等の名称	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実用発電用原子炉の運転期間延長許可承認申請に係わる運用ガイド ・ 発電用原子力設備規格 維持規格 (抜粋) 					
部署名	氏名	部署名	氏名			
若狭事業部	[Redacted]	若狭事業部	[Redacted]	/		
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
大阪事業本部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
神戸事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
若狭事業部	[Redacted]					
【評価】						
よく理解した				[Redacted]		

(抜粋)

美浜3号機 原子炉格納容器特別点検工事 視力確認表(1/)

No.	氏名	実施日	近方視力検査		色覚検査		実施者
			使用する検査表	検査結果	使用する検査表	検査結果	
1		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
2		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
3		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
4		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
5		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
6		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
7		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
8		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
9		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
10		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
11		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
12		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	否	
13		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
14		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	
15		入) H27.5.15 退)	JaegerChart:J1	良	石原色覚 検査表 II	良	

非破壊試験記録 (/ /110)

確認年月日 平成27年6月17日

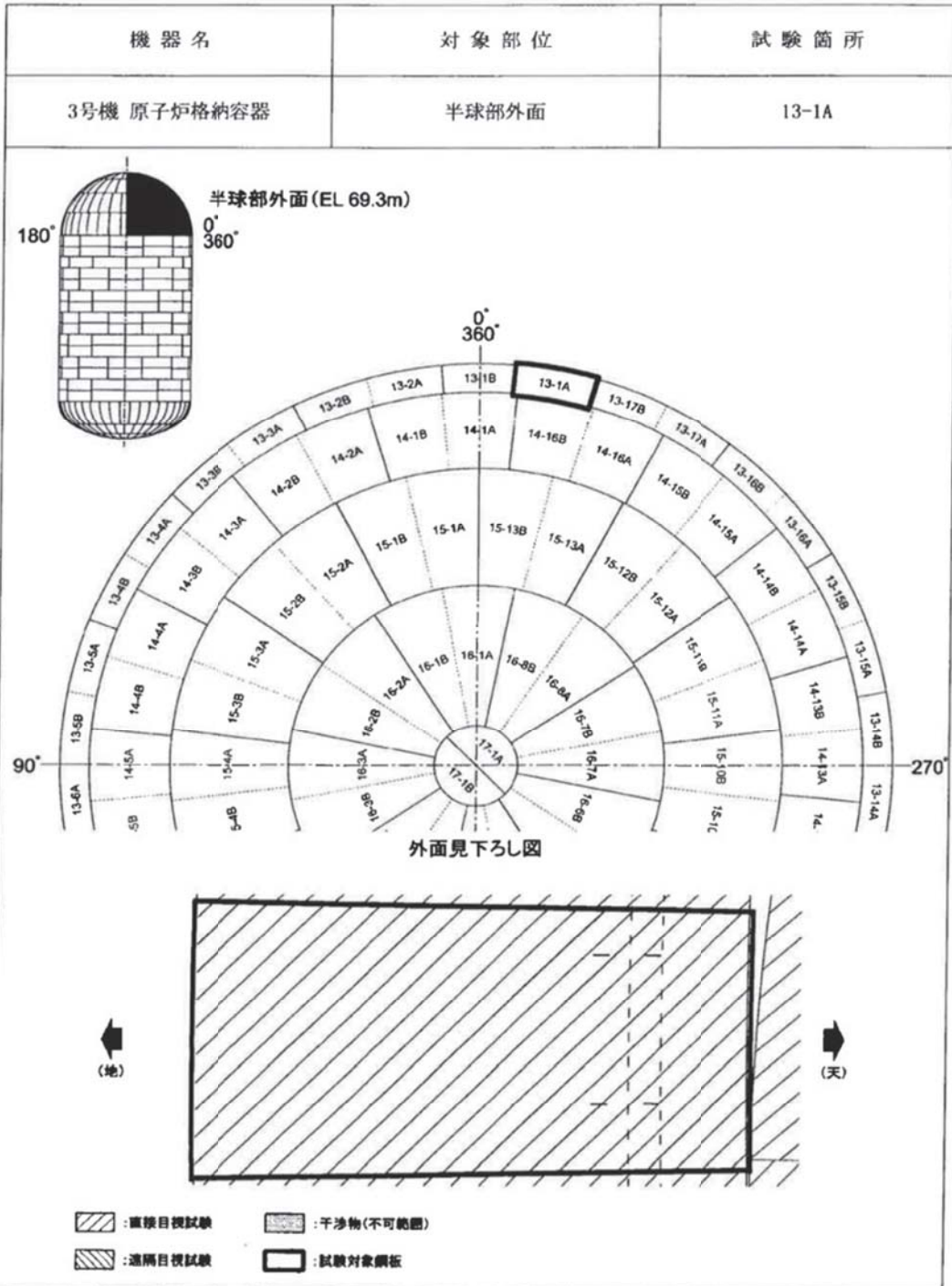
確認者

機器名		対象部位	試験箇所
3号機 原子炉格納容器		半球部外面	13-1A
試験実施内容	目視試験	① 直接目視試験 (VT-4) 2. 遠隔目視試験 (VT-4、ビデオカメラ)	
試験実施結果	結 果		
	<input checked="" type="checkbox"/> 原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある塗膜の劣化や腐食なし		
	<input type="checkbox"/> 原子炉格納容器の構造健全性または気密性に影響を与える恐れのある塗膜の劣化や腐食あり		
<p><u>備 考</u></p> <p>注) 試験範囲について次頁に示す。</p>			
<p>試験実施日: 平成27年6月1日</p> <p>試験実施者: </p>			

試験範囲図 (1/110)

確認年月日 平成27年6月17日

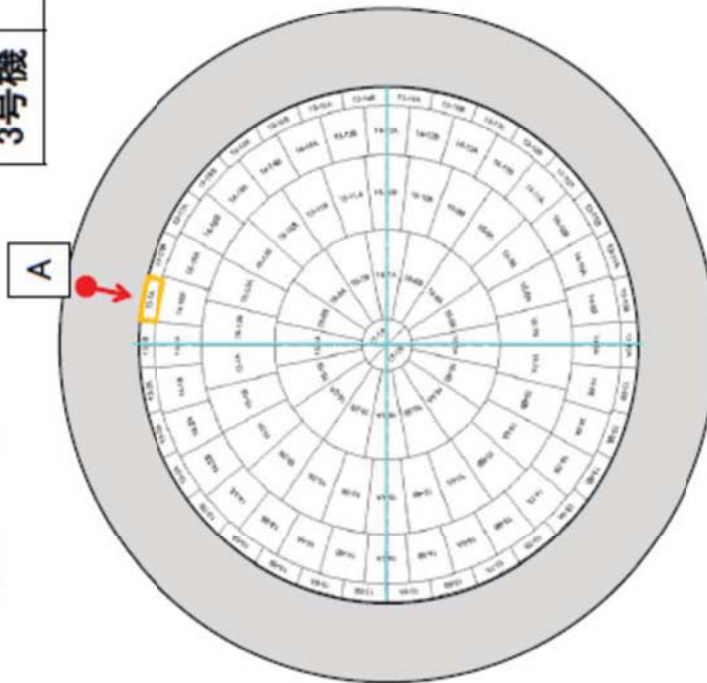
確認者 XXXXXXXXXX



関西電力株式会社 美浜発電所 3号機
原子炉格納容器特別点検工事

目視試験条件

ユニット	部位	板番号
3号機	半球部外面	13-1A



試験位置	EL (m)	試験手法	使用照度	倍率 (Xn)	最長距離(m)	最短距離(m)	$30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$	グレーカード確認	試験実施日	試験室番号	備考
A	69.3	直接	---	---	---	---	---	O	2015/6/1	---	---
B	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
C	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
D	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
E	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

美浜3号炉 実機CV鋼板内面塗装に対する付着性試験結果

美浜3号炉それぞれの原子炉格納容器鋼板内面塗装に対して、至近に塗装実績のない箇所及び至近に塗装実績のある箇所を各々2部位選定し、JIS K 5600-5-6:1999「付着性（クロスカット法）」及びJIS K 5600-5-7:1999「付着性（プルオフ法）」に基づき付着性試験を実施した。各試験の概要及び試験結果は以下の通り。

(1) クロスカット法

「クロスカット法」は、塗装面に対して碁盤目状に素地まで貫通する切りこみを入れ、その上から貼り付けた付着テープを引き剥がすことで、剥離に対する塗膜の耐性を6段階（最もよい分類0から悪い分類5まで）で評価する試験方法である。

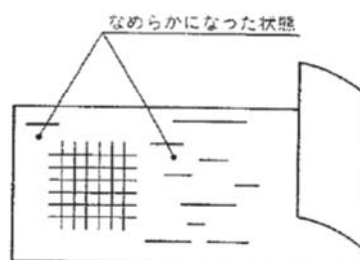


図 切りこみと付着テープの貼り付け（JIS K 5600-5-6:1999 より引用）

クロスカット法による試験結果は以下の通り。なお、JIS K 5600-5-6:1999 では、一般目的に適合する範囲が「分類 0～2」であるとしており、結果はこれに合致するものであった。

部位	評価分類
至近に塗装実績のない箇所	1,2 (6点)
至近に塗装実績のある箇所	0～2 (6点)

(2) プルオフ法

「プルオフ法」は、ドリーと呼ばれる円筒形の引張端を塗膜に接着剤で固着し、接着剤が乾いた後ドリーを引っ張り、塗膜が剥がれるのに必要な最小の張力を測定する方法であり、塗膜の付着性能を具体的な数値で表すことができる。



図 プルオフ法の試験機材
(左：付着性試験器、中：ドリルカッター、右：ドリリー)

プルオフ法により測定された破壊強さ（付着力）は以下の通り。

部位	平均値	最大／最小
至近に塗装実績のない箇所	5.0 MPa (6 点)	6.2 / 2.0 MPa
至近に塗装実績のある箇所	4.3 MPa (6 点)	7.0 / 2.8 MPa
全試験箇所平均	4.7MPa (12 点)	

また、建設時にメーカーにて実施された付着性試験の結果は以下の通り。

引張り強さ	(S I 単位換算値)

以上の結果より、美浜3号炉の原子炉格納容器鋼板内面塗装は塗装直後の試験結果（建設時にメーカーにて実施した付着性試験結果）と比較して大きな劣化は認められないことが確認できる。

また、EPRIにより実施された付着性試験のうち、美浜3号炉と同種の原子炉格納容器鋼板内面塗装（エポキシ樹脂系塗装）の試験結果は下表の通りである。この試験ではANSI N5.12-1972より200psi（約1.4MPa）を判定基準としていたが、今回の試験結果はこの判定基準も満足するものであった。

表 EPRI 試験結果 (エポキシ樹脂系塗料)

プラント	Test Area Type* (Test Area Number)	Data	Data	Data
		Test A	Test B	Test C
Waterford Unit3	Sound steel liner	290 psi (約 2.0MPa)	330 psi (約 2.3MPa)	310 psi (約 2.1MPa)
	Degraded steel liner	300 psi (約 2.1MPa)	200 psi (約 1.4MPa)	200 psi (約 1.4MPa)
Oconee Unit2	Sound steel liner	370 psi (約 2.6MPa)	600 psi (約 4.1MPa)	440 psi (約 3.0MPa)
	Degraded steel liner	400 psi (約 2.8MPa)	840 psi (約 5.8MPa)	450 psi (約 3.1MPa)

* A degraded Test Area Type refers to a sound coating adjacent to a visually degraded coating.

1 psi = 6.9 kPa





本表は EPRI, Report No.1014883 “Plant Support Engineering: Adhesion Testing of Nuclear Coating Service Level I Coatings”からの引用。但し、表中の MPa 表記は関西電力による。

付着性試験結果 (クロスカット法及びプルオフ法)



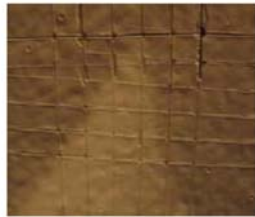

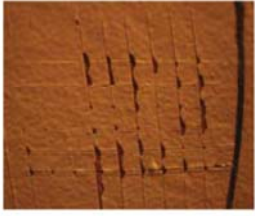

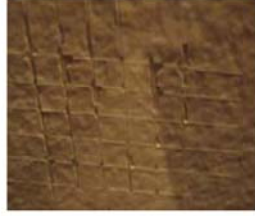





調査部位	クロスカット法 (評価分類) ※	プルオフ法 (N/mm ²)	鋼板名
至近に塗装実績の ない箇所	2	6.0	鋼板 7-9A
	2	6.0	
	1	6.2	
	2	4.0	鋼板 7-4A
	1	2.0	
	1	5.8	
至近に塗装実績の ある箇所	1	4.2	鋼板 7-9A
	2	2.0	
	2	6.0	
	0	4.2	鋼板 7-4A
	0	2.5	
	0	7<	

試験結果の分類 (JIS K 5600-5-6:1999 表 1 より引用)

表 1 試験結果の分類

分類	説明	はく離 (はがれ) が生じている クロスカット部分の 表面の状態 (6種の並行カットの例)
0	カットの縁が完全に滑らかで、どの格子の目にもはがれがない。	—
1	カットの交差点における塗膜の小さなはがれ。 クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に 5%を上回ることはない。	
2	塗膜がカットの縁に沿って、及び/又は交差点においてはがれている。クロス カット部分で影響を受けるのは明確に 5%を超えるが 15%を上回ることはない。	
3	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び /又は目のいろいろな部分が、部分的又は全面的にはがれている。クロスカッ ト部分で影響を受けるのは、明確に 15%を超えるが 35%を上回ることはない。	
4	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び /又は数か所の目が部分的又は全面的にはがれている。クロスカット部分で影 響を受けるのは、明確に 35%を上回ることはない。	
5	分類 4 でも分類できないはがれ程度のいずれか。	

クロスカット法状況写真

至近に塗装実績のない箇所		至近に塗装実績のある箇所	
鋼板 7-9A	鋼板 7-4A	鋼板 7-9A	鋼板 7-4A
			
			
			

塗装時の施工が塗装の性能に与える影響について

1. 塗装施工において管理すべき項目について

塗装施工の一般的な流れ及び各工程の目的は以下の通りであり、この中の「塗装」工程では、防錆効果としての遮断機能が正常に発揮されるために、均一な塗膜がプラントメーカー指定の厚さで形成できるように施工する必要がある。

工程		工程の目的
素地調整		鉄鋼面の表面さび・付着物を除去し、表面粗さを均一化して塗膜の付着性を高める
塗 装	下塗り	塗装系全体の付着性を中心とする性能を発揮し、素地の求める保護機能（さび止め）も有する塗膜を形成する
	上塗り	透湿性のコントロールにより塗膜に要求される防錆性能を発揮するとともに、塗装系に耐久性を与える (CV鋼板塗装としては汚染除去性も与える)

塗装の性能は、塗料自体の性能に加えてその施工による影響も受けうるものではあるが、各塗料の塗装方法については塗料メーカーの発行する仕様書等において指定されており、塗装施工時にはそれらのカタログ等に従って施工することで、適切な性能を有する塗膜が得られるものとする。

【塗料カタログに記載されている項目（例）】

- ・主剤・硬化剤混合比
- ・適正塗装方法（スプレー、はけ等）
- ・塗装環境条件（温度・湿度）
- ・使用可能時間（ポットライフ）
- ・乾燥時間
- ・塗装間隔

2. 塗装施工者による影響の確認結果について

上記の通り、塗装施工においては仕様書等に従って施工することで施工による塗装性能への影響は小さいと考えられるものの、参考として、塗装施工者の違いについて以下の通り確認試験を実施した。

2. 1 確認試験の方法

原子炉格納容器鋼板内面用の塗料を用いて、2名の塗装施工者がそれぞれ同様の試

験片へ塗装を実施した。塗装施工においては、塗料カタログ指定の事項（主剤・硬化剤混合比等）に従うとともに、施工者以外の条件は同等とした。

その後、各試験片に対してプルオフ法による付着性試験を実施し、塗装施工者の差異による影響を確認した。

【試験片仕様】

- ・試験片材質：SS400
- ・下地処理：サンドブラスト
- ・塗装仕様：美浜3号炉 原子炉格納容器鋼板内面用塗装仕様
(下塗り 100 μ m、上塗り 100 μ m)

【塗装施工者】

- A：塗装工事経験年数 18年
- B：塗装工事経験年数 1年

2.2 試験結果

試験結果は下表の通りであり、塗装施工者の違いによる有意な差は認められなかった。

各試験片に対する付着性試験結果

付着性試験結果	塗装施工者	
	A（経験18年）	B（経験1年）
測定値	3.3 / 3.3 / 3.7MPa	4.0 / 3.3 / 4.0MPa
3点平均値	3.4MPa	3.8MPa

付着性試験の状況



原子炉格納容器の塗装点検に対する力量管理（ASTM 要件との比較）

C V 鋼板塗装の保守管理について、美浜3号炉で実施している現状保全と米国 ASTM D 5163 に規定される内容を比較した結果は下表の通りである。この中の「力量」について、比較検討を行った。

表 美浜3号炉「現状保全」と米国における点検状況の比較

		美浜3号炉 現状保全	米国における点検 (ASTM D5163-08)	(参考) 美浜3号炉 特別点検
点検 頻度		定検毎	事業者が決定 (定検毎の点検を推奨)	—
記録		点検結果を記録	同左	同左
点 検 方 法	範 囲	・接近できる点検可能範囲を目視点検 ・寄り付き困難な場所は双眼鏡を用いた点検	・接近可能な塗膜表面を巡回し目視検査 ・必要に応じ照明、双眼鏡等の機材を用いる	・接近できる点検可能範囲の全てを目視点検 ・寄り付き困難な場所は高倍率のカメラ等を用いて点検
	精 度	・点検時の照度、グレーカードの確認等の要求なし	・点検時の照度、グレーカードの確認等の要求なし	・点検時の照度、グレーカードの確認・検証あり
	力 量	・試験実施者との作業計画書の読み合わせを実施し点検範囲や方法の周知 ・作業責任者には同種工事の実務経験を有した者の中から選定	・試験実施者は原子力の塗膜の専門家もしくは専門家により検査能力が認められた者とする。	・事業者が、試験実施者との作業計画書(特別点検の要領書含む)の読み合わせを実施し点検範囲や方法の周知 ・試験実施者は教育を受講し、適切な力量を有する者
	異 常 発 見 時	・試験実施者から事業者に連絡するよう要領書にて要求 ・補修計画等の対処方法について事業者にて検討	・劣化が疑われる塗膜表面は塗膜厚測定、アドヒージョンテスト(付着性試験)等を実施 ・劣化した塗膜の場所及び今定検での修繕が必須であるかを記録	・試験実施者から事象者に連絡するよう要領書にて要求 ・補修計画等の対処方法について事象者にて検討

(1) ASTM における専門家・点検実施者の力量管理

ASTM D5163 では、点検に係る者の力量について、「目視による評価や塗膜状態の評価は専門家 (Nuclear Coating Specialist) 又は専門家により妥当と判断された要員が実施すべき」と規定されている。この専門家 (Nuclear Coating Specialist) については、ASTM D 7108 “Standard Guide for Establishing Qualifications for a Nuclear Coatings Specialist” があり、このガイドでは下記のような事項が規定されている。

規定の項目	規定の内容 (例示)
Nuclear Coating Specialist の一般的な義務と責任	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗装の検査基準の策定・維持 ・ 点検データの整理、評価報告書の作成 ・ 塗装に異常が確認された場合の処置 ・ 塗装の点検実施者の承認 等
資格者の教育、訓練、経験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 4年生大学卒者で訓練及び3年の実務経験を有する者 ・ 高卒者で訓練及び7年の実務経験を有する者 等
資格の維持	資格を継続するため、4年毎に Nuclear Coating Specialist としての業務や教育実績を示す必要がある

ASTMにおけるNuclear Coating Specialistの役割は「検査基準の策定」「塗装に異常が確認された場合の処置」等、点検の実施以外にも幅広いものとなっている一方、Nuclear Coating Specialistが点検実施者を指名する場合、点検実施者に対して特に規定はない。(米国での運用例として、Nuclear Coating Specialistは業務経験等を考慮して点検実施者を選定するとともに、検査前ミーティング等で点検内容の説明、劣化が疑われる場合はNuclear Coating Specialistへ報告することの指示等を行う)

(2) 美浜3号炉における点検に係る者の力量管理

美浜3号炉における保全活動では、(1)で述べた役割を事業者及び点検を実施する協力会社が協業して担っている。ASTMと美浜3号炉における点検に係る者の役割と求められる力量を比較したものが下表の通りである。

表 点検に係る役割と力量要件の比較

ASTM D 5163-08		高浜1, 2号炉における点検	
専門家 (Nuclear Coating Specialist)	<p>【役割】塗装の点検及び評価を行う。もしくは、点検実施及び評価を行うにあたって妥当な要員を選定する。</p> <p>【力量】ASTM D 7108に、目安となる学歴や実務経験(大学卒(高校卒)で実務経験3年(7年)を有する等)が規定されている。</p>	関西電力 (点検担当課)	<p>【役割】協力会社へQMS含めた調達要求を実施。点検工事を管理し、塗装の評価・承認を行う。</p> <p>【力量】業務経験・教育受講歴等を基に、原子炉格納容器に関する力量を有すると評価された者が担当者として従事している。</p>
		協力会社 (作業責任者)	<p>【役割】点検実施者を指揮して現場での塗装点検・評価を行う。</p> <p>【力量】調達要求文書において同種工事の実務経験等を要件とするとともに、技能認定制度で認定(所定時間の講習受講や実務経験等が認定条件)された者を要件としている。</p>
点検実施者	<p>【役割】専門家の指示の下、塗装の点検及び評価を行う。</p> <p>【力量】特段の規定なし。(例として、業務経験等を考慮して選定される)</p>	協力会社 (点検実施者)	<p>【役割】作業責任者の指揮の下、塗装の点検及び評価を行う。</p> <p>【力量】特段の規定なし。(実態として、発電所での機器点検や保修経験が長いメンバーを中心に構成されている)</p>

美浜3号炉におけるCV塗装点検では、当社品質マネジメントシステム(QMS)に基づく調達管理により、点検を実施する会社に品質マネジメントシステム(協力会社QMS)を要求し、その中で、作業員については点検を実施する会社が必要な力量を明確にし、必要な力量に到達することができるように教育訓練を行うことを求めている。この協力会社QMSに対して、当社は品質監査という形でその有効性を確認している。

点検作業の調達要求は事業者(点検担当課)によって行われるが、その際、業務経験・教育受講歴等を基に、「原子炉格納容器に関する力量を有する」と(上司に)評価された者が担当者として従事するとともに、点検担当課の役職者に対しても、「担当業務に関して品質目標達成のために計画の立案、実施、管理および評価ができる」と評価された者が従事している。

ASTM における Nuclear Coating Specialist の役割のうち、例として「塗装に異常が確認された場合の処置」については、点検で異常を確認した協力会社（作業責任者）は事業者（点検担当課）へ連絡を行うことを調達要求として指示おり、連絡を受けた点検担当課は作業責任者と共に状況確認・処置内容を検討することとなるが、この場合も上記の通り力量を管理された点検担当課の要員が対応することとなる。

このように、美浜3号炉の場合、塗装の点検に係る Nuclear Coating Specialist の役割を事業者及び点検を実施する協力会社が協業して担っている。

次に、協力会社が点検を実施するにあたっては、作業責任者が点検実施者を指揮して点検作業を行うこととなる。

当社が調達する工事において、作業責任者へは同種工事の実務経験（4回を目安）等を要件としているとともに、定検時のCV塗装点検作業については当社の技能認定制度で認定された者が作業責任者となるよう調達要求している。この技能認定制度では、所定時間の講習受講や実務経験等が認定条件となっており、講習内容には認定対象となる定検工事作業の要領（CV塗装の点検も含まれる）や点検対象機器の機能・構造といった科目が含まれている。

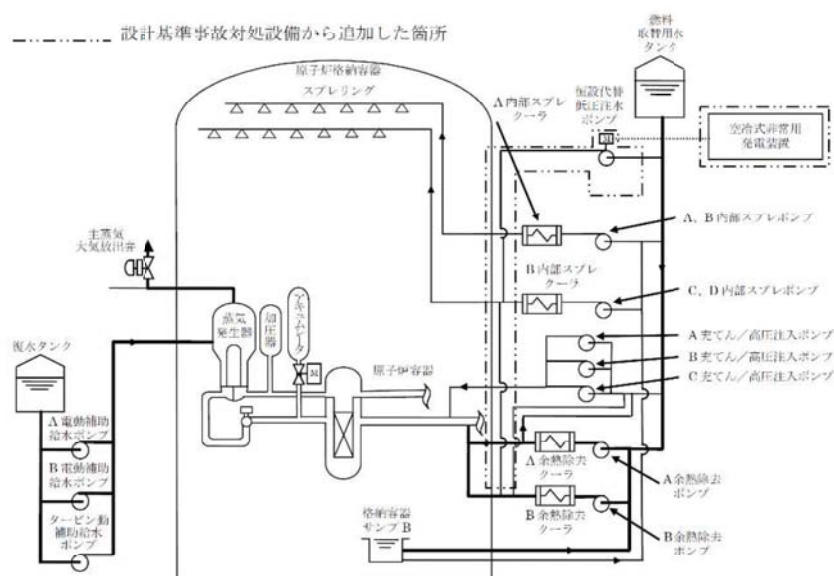
実際の点検作業では、上記の作業責任者が点検実施者に対して、工事着手前に作業内容の教育を行い、日々のTBM（ツールボックスミーティング：当日の作業内容に関する作業前ミーティング）においても作業内容の確認を行った上で点検作業を行っている。この際、同種工事の実務経験を有する作業責任者はもとより、点検実施者についても各発電所での機器点検や保修経験が長いメンバーを中心に実施されている。

以上の通り、美浜3号炉におけるCV塗装の点検（現状保全）とASTM D 5163に基づく米国での点検には力量管理の面でも大きな差はなく、CV塗装の点検は必要な力量を有した要員により実施できている。

美浜 3 号炉 CV再循環シナリオの概略系統図・CV内温度推移

美浜 3 号炉の SA 有効性評価シナリオのうち、CV 再循環を行うシナリオの概略系統図・CV 内温度推移を以下に示す。なお、有効性評価シナリオのうち「ECCS 注水機能喪失」シナリオについては SA 有効性評価の中で CV 内環境条件が DBA 時の環境を下回ることが評価されている。

(1) ECCS 注水機能喪失



<事象進展>

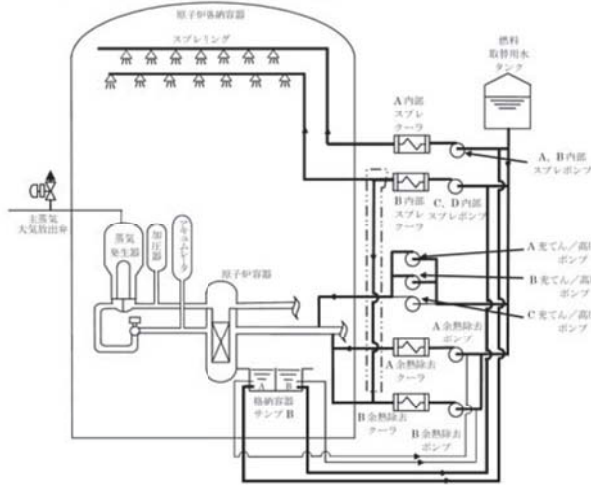
- ・中破断 LOCA 発生後、高圧注入機能が喪失するものの、2 次冷却系強制冷却及び蓄圧注入によって 1 次冷却系保有水量の減少を抑制し、その後、低圧注入が開始されることで 1 次冷却系保有水量は回復する。
- ・破断口径によっては一時的に炉心が露出するものの、燃料被覆管の最高温度は 1,200℃ 以下、酸化量は 15% 以下となる。
- ・中破断 LOCA 発生後、原子炉格納容器圧力及び温度は上昇するものの、原子炉格納容器スプレイ設備により上昇を抑制し、原子炉格納容器の健全性は確保される。

概略系統図・事象進展概要

本シナリオについては、SA 有効性評価の中で CV 内環境条件が DBA 時の環境を下回ることが評価されている。

(2) ECCS再循環機能喪失

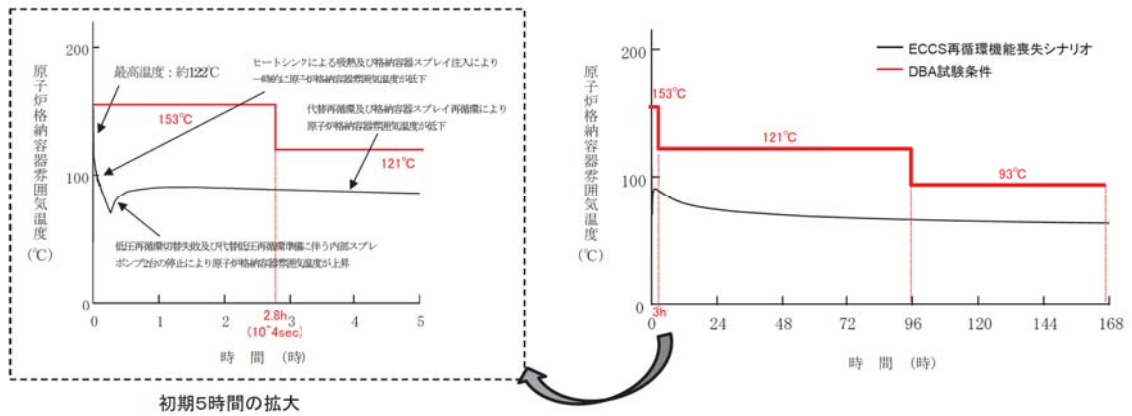
----- 設計基準事故対処設備から追加した箇所



<事象進展>

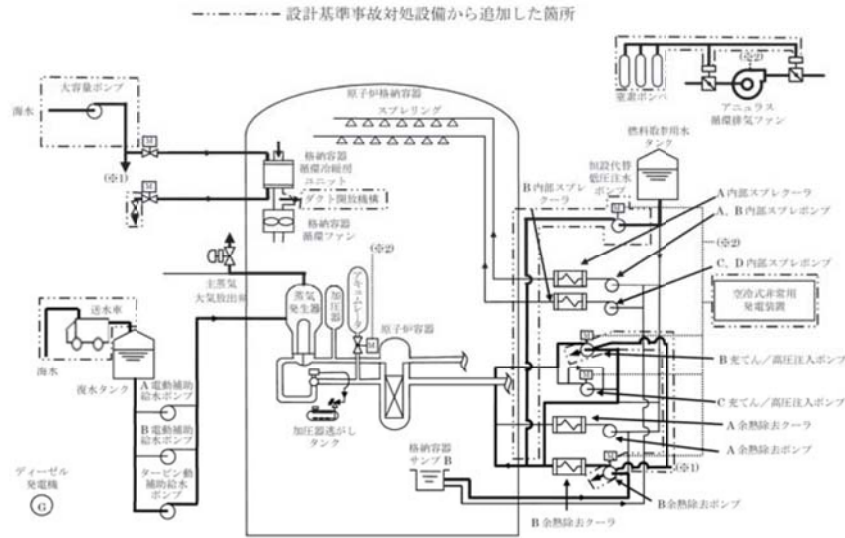
- ・大破断LOCA発生後、ECCSが正常に動作して炉心は再冠水するが、その後ECCS再循環切替に失敗する。
- ・ECCS再循環切替失敗の15分後に内部スプレポンプを用いた代替再循環運転を実施することで炉心水位は回復し、炉心損傷は回避できる。
- ・ECCS再循環切替失敗後も、格納容器スプレ系1系列によるスプレ再循環は継続されることから、原子炉格納容器圧力は低く推移し、原子炉格納容器の健全性は確保される。

概略系統図・事象進展概要



CV内温度推移

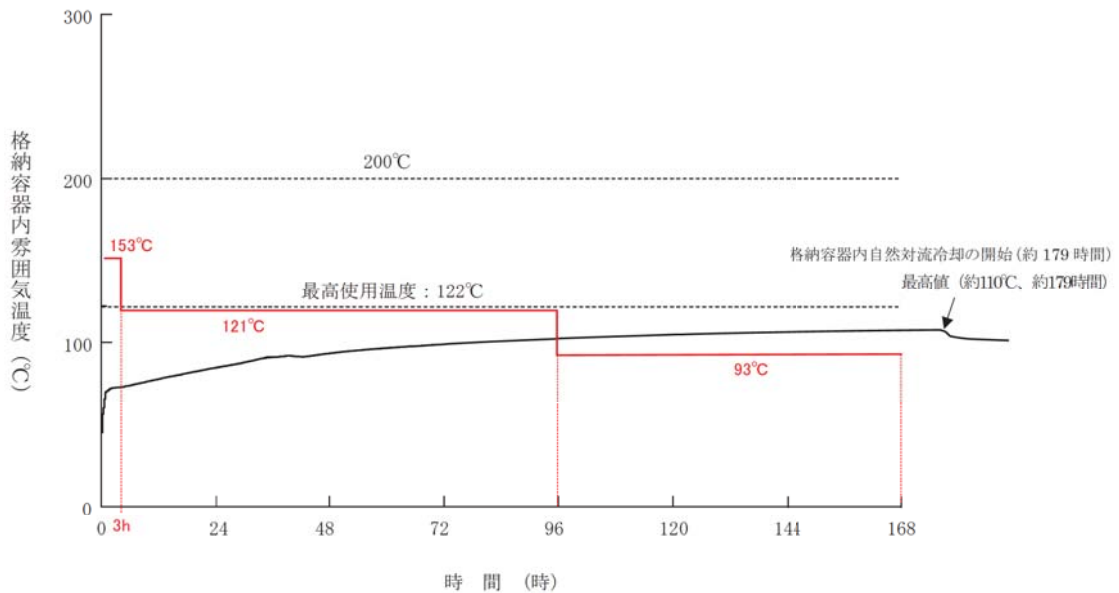
(3) 全交流動力電源喪失



<事象進展>

- ・全交流動力電源喪失及びRCPシールLOCA発生後、1次冷却系保有水量は減少していくが、蓄圧注入及び2次冷却系強制冷却により1次冷却系を減温、減圧することで1次冷却系保有水量の減少を抑制する。
- ・その後、1次冷却材圧力が0.7MPaに到達した後、恒設代替低圧注水ポンプ（空冷式非常用発電装置から給電）を用いた炉心注水を実施することにより1次冷却系保有水量は回復する。
- ・RCPシール部からの漏えいに伴って原子炉格納容器圧力は上昇するが、原子炉格納容器雰囲気温度110℃到達後に格納容器循環冷却ファンユニットのダクト開放機構が動作して格納容器内自然対流冷却を開始することにより、原子炉格納容器圧力は低く推移し、原子炉格納容器の健全性は確保される。

概略系統図・事象進展概要



CV内温度推移

エポキシ樹脂塗料の耐熱性について

美浜3号炉のCV鋼板内面で使用している塗料は以下の通りであり、ともに「エポキシ樹脂塗料」に分類される塗料であるが、エポキシ樹脂塗料については、下表の通り長期間の使用を想定した耐熱温度が120℃との知見がある。

表 美浜3号炉CV鋼板内面で使用している塗料

	使用塗料
美浜3号炉建設時	

表 塗料の硬化機構と代表的な塗料の例^{※1}

硬化の種類	硬化機構	塗料の例	
(1) 蒸発硬化	塗膜中の溶剤や水分が蒸発後、塗膜が硬化する。化学反応を伴わない物理的な硬化で、蒸発した溶剤と同じ溶剤が接触すると硬化塗膜は溶解する。	セラックニス ラッカー アクリルラッカー 塩化ビニル樹脂塗料 塩化ゴム系塗料	
(2) 融着硬化	溶剤や水分が蒸発すると、分散していた樹脂粒子が接触・融着して連続塗膜となる。蒸発した溶剤や水が再接触しても溶解しない。	酢酸ビニル樹脂エマルジョン塗料 アクリル樹脂エマルジョン塗料 NAD（非水分散形）塗料	
(3) 融解冷却硬化	加熱によって融解した塗膜が冷却によって硬化する。	ホットメルト塗料 溶融型路面表示塗料	
(4) 酸化重合硬化	塗膜が空気中の酸素を吸収して酸化し、さらに重合を伴って硬化する。酸素が塗膜内部まで吸収されにくいのであまり厚く塗装すると、表面のみの硬化で内部が硬化しなかったり、表面にしわが生じたりする事がある。	ボイル油・油性ペイント 合成樹脂調合ペイント 油アニス・エナメル フェノール樹脂ワニス・エナメル アルキド樹脂ワニス・エナメル	
(5) 重合乾燥	(5-1) 加熱重合硬化	加熱によって樹脂が重合して硬化する。	熱硬化アミノアルキド樹脂塗料 熱硬化アクリル樹脂塗料 一般焼付塗料 工業用焼付塗料(粉末塗料・電着塗料)
	(5-2) 付加重合硬化	触媒・硬化剤によって樹脂が重合して硬化する。主剤と硬化剤・触媒が反応して硬化塗膜を形成するため塗膜表面だけでなく内部も含めて平均的に硬化する。厚く塗装しても内部硬化が不良となることはない。	エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料 ふっ素樹脂塗料 ビニルエステル樹脂塗料 不飽和ポリエステル樹脂塗料 アクリルシリコン樹脂塗料
	(5-3) 縮合重合硬化	反応過程で重合しながらアルコールや水などを生成し、それが揮発して硬化塗膜を形成する。	無機ジシランリッチペイント
	(5-4) 電子線重合硬化	電子線を照射して、活性ラジカルを生成させて重合・硬化する。	電子線硬化塗料
	(5-5) 光重合硬化	有効波長の紫外線の照射で重合・硬化する。	紫外線硬化塗料

※1…「重防食塗料ガイドブック 第4版」表 1.1 より引用

表 エポキシ樹脂塗料の塗膜性能^{※2}

塗料の種類	耐食性	耐水性	耐酸性	耐アルカリ性	耐候性	耐熱性(℃)
エポキシ樹脂塗料 (一般外部用)	◎	◎～○	◎～○	◎～○	△～×	120

評価の基準

◎：非常に良い ○：良い △：やや劣る ×：劣る

耐熱性

耐熱性は一般外面における比較的長期使用条件での耐用温度を示す。

没水環境や薬品浸漬条件におけるものではない。

※2…「重防食塗料ガイドブック 第4版」表 5.1 より引用 (抜粋)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

また、美浜3号炉建設時塗装（修繕時塗装仕様も同一）に対しては、塗料メーカーにおいて200℃・10時間×4サイクルの耐熱試験を実施しており、以下の通り剥落が生じず、付着力が低下しなかった知見があることから、当該塗装はS A時のC V内環境に耐えうるものであると考えられる。

【塗料メーカーにおける耐熱性試験結果】



中破断 LOCA 時の塗装異物量評価について

SA 時及び DBA 時において、LOCA 時の対応に再循環サンプを水源として格納容器再循環運転を行う事象については、事象進展に係る最も厳しい初期条件としていずれも 1 次冷却材管の両端破断による大破断 LOCA を想定しており、1 次冷却材管の破断形態は同等であるため、SA 時の保温材等の破損影響範囲（ZOI）及び配管破断による保温材等の異物発生量は DBA 時より拡大することはない。

したがって、塗装異物量についても、「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について(内規)」（平成 20・02・12 原院第 5 号(平成 20 年 2 月 27 日原子力安全・保安院制定))にしたがい、最大配管口径であるクロスオーバーレグを選定し、10D の球の表面積を算出し、格納容器内の最大塗膜厚であるコンクリート床面の塗膜厚さを乗じて算出している。

一方、「原子炉格納容器の除熱機能喪失」は大破断 LOCA を想定しておらず、配管破断による直接的な影響は、クロスオーバーレグを選定して算出した塗装異物量より小さい。ここで、1 次冷却材管につながる枝管のうち最大配管口径の加圧器サージラインの全周破断を中破断 LOCA の破断形態とした場合、塗装異物量は、大破断 LOCA（クロスオーバーレグの破断を想定）の約 13%と想定でき、既認可で想定している塗装異物量に対して非常に少ないものとなる。

なお、再循環水が溜まるエリア（CV 最下層フロア床面）の塗装面積は 10D 範囲に対して 60%弱であり、仮にこの範囲の塗装が全て剥落してサンプスクリーンに至ったとしても、上記中破断 LOCA による塗装異物量との合計値は、既認可の評価に包含される。

以上のとおり、既認可の塗装異物量の評価は、SA シナリオにおいて温度条件が最も厳しい「原子炉格納容器の除熱機能喪失」に対して十分保守的な評価となっている。

(参考)

中破断 LOCA を想定した塗装異物量の考え方について

美浜3号炉の SA シナリオのうち「原子炉格納容器の除熱機能喪失」においては RCS の破損形態として中小破断を想定している。ここで、1次冷却材管につながる枝管のうち最大配管口径の加圧器サージラインの全周破断を中破断 LOCA の破断形態とした場合、NISA 内規に基づき算定する塗装異物量は以下の通りとなる。

○塗装異物量の算定

(1) NISA 内規における塗装異物量の規定

「PWR プラントにおいて、耐 DBA 仕様塗装を用いている場合、
半径 10D の球形 ZOI の表面積に塗膜厚さを乗じた値」
但し、D：破断を想定した配管の口径

(2) 中破断 LOCA (加圧器サージラインの破断) を想定した場合

加圧器サージラインの配管口径：0.2842m

10D-ZOI の球の表面積： $4 \times \pi \times (10 \times 0.2842)^2 = 101.5 \text{ m}^2$

$$\begin{array}{l} \text{塗装異物発生量} = 101.5 \times \text{塗膜厚さ} \\ \text{塗膜厚さ} = \text{既工認評価と同値} \\ \text{塗装異物発生量} = 101.5 \times \text{既工認評価と同値} \end{array}$$

(3) 既工認評価：大破断 LOCA を想定した場合

クロスオーバレグの配管口径：0.7874m

10D-ZOI の球の表面積： $4 \times \pi \times (10 \times 0.7874)^2 = 778.7 \text{ m}^2$

$$\begin{array}{l} \text{塗装異物発生量} = 778.7 \times \text{塗膜厚さ} \\ \text{塗膜厚さ} = \text{既工認評価と同値} \\ \text{塗装異物発生量} = 778.7 \times \text{既工認評価と同値} \end{array}$$

以上より、中破断 LOCA を想定した場合の塗装異物発生量は、大破断 LOCA を想定した場合と比較して約 13% と想定できる。