

原子力発電所のコンクリート建屋に使用する 耐放射線性塗料に関する性能試験（その1）

喜 田 大 三
住 野 正 博

概 要

原子力発電所の原子炉建屋，タービン建屋，補機建屋の床，壁，天井などのコンクリート部分には，放射線の照射によっても性質が劣化しにくい耐放射線性塗料が塗装されている。この塗料は，放射線・熱水などによって劣化しない性質，ならびに，付着した汚染物質を容易に洗浄除去できる性質を有していなければならない。

さて，現在，耐放射線性塗料として，エポキシ樹脂塗料およびフェノール樹脂塗料，6種類が市販あるいは試作されているので，塗料選択の指針を得るために，これらの塗料について一連の比較試験を行った。その際，コンクリートあるいはモルタルに塗料を塗装し，放射線の照射を行い，照射前後における耐衝撃性，耐摩耗性，密着性の試験を実施した。さらに，照射前における熱水試験（Auto-clave test）を実施した。

その結果，供試塗料間には，かなりの性能差がみられ，その選択について有用な指針を得ることができた。

1. まえがき

近年，わが国においても原子力発電所の建設が盛んになってきている。

この発電所の原子炉建屋，タービン建屋，補機建屋の床，壁，天井などのコンクリート部分には耐放射線性塗料が塗装されている。そして，この塗料には，放射線・熱水などによって劣化しない性質，ならびに，付着した汚染物質を容易に洗浄除去できる性質が要求される。

ところが，今まで建設されてきた原子力発電所の塗装は外国のマニュアルを参考にして行われてきており，また，国産塗料の使用が開始されて日が浅いことも関係して，塗料間の比較研究，コンクリート素地を用いた場合の塗料の各種試験が充分に行われていない。さらに，塗装施工に関係するコンクリート素地の含水率，コンクリート素地の下地処理方法，経済性と塗料性能を考慮にいたした塗り回数ならびに必要な膜厚などについても不明な点が多いのが現状である。

そこで，施工業者として塗料選択の指針を得るために，コンクリート部用の耐放射線性塗料として現在，市販あるいは試作されているエポキシ樹脂塗料，フェノール樹脂塗料を供試して一連の比較試験をすすめている。

本報では，供試塗料に放射線を照射し，その前後において実施した各種試験，ならびに，照射前に実施した熱水試験（Auto-clave test）から得られた資料を発表する。

2. 供試塗料および供試体の作成

2.1. 供試塗料

耐放射線性塗料として現在，市販あるいは試作されているエポキシ樹脂塗料，フェノール樹脂塗料のうち6種類の塗料（A，B，C，D，E，F）を供試した。

2.2. 被塗装体

塗装される供試体すなわち被塗装体はコンクリートブロック，スレート板，モルタル板である。

これらの被塗装体について以下に簡単に説明する。

(1) コンクリートブロック サイズ150×260×100mmの直方体を作成した。その際，材料としてフライアッシュセメントのB種，川砂，粒径20～10mmおよび10～5mmの2種類の碎石と若干の混和剤を用いて，水セメント比59%，砂骨材比47%，スランプ12cm，空気量4%のコンクリートを練り，耐水ベニヤ合板の型枠に打設して前記サイズのブロックを作成した。

なお，このコンクリートブロックは，型枠の脱型後，20日以上室内放置された。その際のブロックの含水率は8～9% pHは11であった。

(2) スレート板 市販のスレート板を用いて，サイズ105×105×4mmの被塗装体を作成した。

(3) モルタル板 配合比がセメント：砂＝1：3であるモルタルを練り，サイズ100×100×12mmの被塗装体を作成した。

2.3. 供試体

塗装は熟練者により刷毛で行われ，それぞれの塗料についてメーカー側が指定する塗装仕様にしたがって

所定量が塗布された。その際の塗料の膜厚を表一に示す。

膜厚	塗料	A	B	C	D	E	F
下塗り膜厚 (μ)		250	100×2	100	200	250	100×2
中塗り膜厚 (μ)		200	100	100×2	200		100
上塗り膜厚 (μ)		200	100	100	200	125	100
合膜厚 (μ)		650	400	400	600	375	400

表一 供試塗料の膜厚

さて、コンクリートブロックではサンドペーパーがけ、つづいてウエスぶきによって素地調整を行った。そして、塗料A, C, D, Eではパテ施工後、下塗り、中塗り、上塗りを行い、塗料B, Fでは捨て塗り、パテ施工、下塗り、中塗り、上塗りを行った。なお、以上の塗装工程では、塗装間隔を1日、1回塗りとした。

一方、スレート板およびモルタル板の塗装はコンクリートブロックの場合に準じて行った。ただし、パテ施工は省略した。

なお、塗装終了後、塗膜の乾燥、硬化を充分に行うため、20日以上放置した後、各種試験に供試した。

3. 試験方法

表一に供試体と実施した試験項目との関係を示し、それぞれの試験法について以下に説明する。

試験項目	放射線照射前後			放射線照射前	
	耐衝撃性試験	密着性試験	耐摩耗性試験	熱試験	水試験
一面塗装のコンクリートブロック	○	○			
一面塗装のスレート板			○		
全面塗装のモルタル板					○

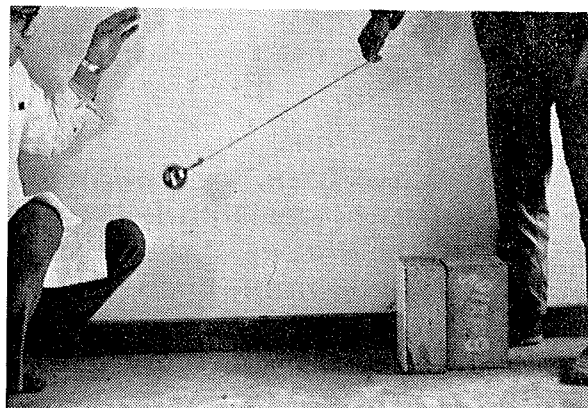
表一 供試体と試験項目一覧表

3.1. 放射線照射前後における各種試験

放射線の照射は、各試験板にむらなくα線照射がなされる条件のもとでコバルト60(⁶⁰Co)線源を用い、空中照射により照射線量率、 1×10^6 R/時間にて合計照射線量が 1×10^6 R, 1×10^7 R, 1×10^8 Rの3通りになるように行う。ただし、 1×10^6 R, 1×10^7 R, 1×10^8 Rは、 1×10^6 R/時間の線量を、それぞれ1時間、10時間、100時間照射した後の合計照射線量をさす。

なお、放射線の照射は日本原子力研究所、高崎研究所で行った。

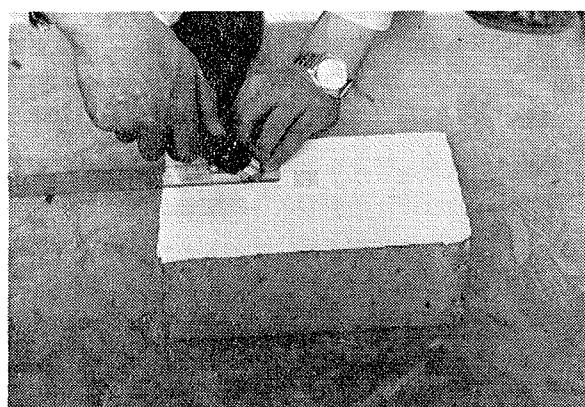
(1) 耐衝撃性試験 径60mm 重さ1000gの鋼球を衝撃球として図一に示した実験法にしたがって行う。その際、ひもの長さは30, 50, 100cmの3種類を用い、塗装したコンクリートブロックに向けて、その鋼球を落下させる。その結果、塗膜に生じるき裂の程度から塗膜の耐衝撃性を判断する。



図一 耐衝撃性試験

(2) 塗膜の密着性試験

(a) ごばん目密着力試験 図二に示した方法にしたがってコンクリート素地に達するまで塗膜を2mm間隔に切り、計100個のごばん目をつくる。そのごばん目の上にセロテープを密着させ、一気にそのセロテープをはがす。そして残ったごばん目の数をかぞえ、残った数/100として塗膜の密着性を判断する。



図二 ごばん目密着力試験

(b) セン断密着力試験 測定器として図三に示したアドヒロ・ゲージ(塗膜せん断密着性測定器)を用いる。

測定にあたっては、まず、塗膜を素地に達するまで 15×15 mmの正方形に切り、その上にステンレス製のピースをエポキシ樹脂接着剤で接着させる。そしてこの接着剤が硬化後、前述した測定器を用いて塗膜のせん断密着力を測定する。その際、結果はkg-cmで表わされ、この数値が大きいほど密着性がよいと判断する。

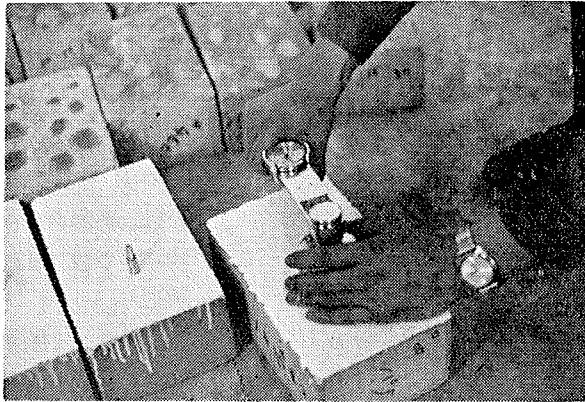


図-3 セン断密着力試験

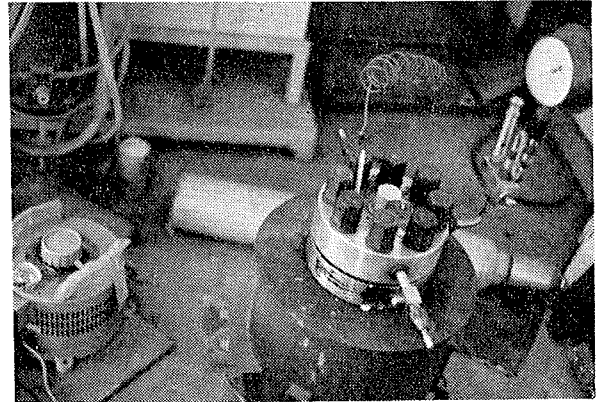


図-5 オートクレーブ装置

(3) 耐摩耗性試験 この試験では図-4に示したテーバー摩耗試験機を用いる。その際の試験条件は、摩耗輪：CS-17 回転数：1000回、荷重：1000gである。

この試験においては、試験前後の供試体重量の差から摩耗減量を求め、この減量が少ないほど塗膜の耐摩耗性がよいと判断する。その際、試験前後の供試体重量の測定には、化学天秤を使用した。

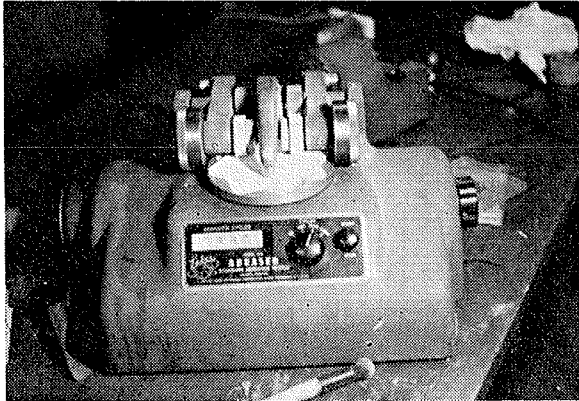


図-4 耐摩耗性試験

3.2. 熱水試験 (Auto-clave test)

この試験に用いるオートクレーブ装置を図-5に示す。

まず、オートクレーブ中に入れた4000ppmの硼酸+0.7%のカセイソーダを含む蒸留水中に、2.3.の方法にしたがって全面塗装したモルタル板を浸漬し、この装置をセットする。その後、手動で室温から160℃まで1時間で一気に昇温させ、その後、2時間かけて140℃まで温度を下げ、つづいて21時間かけて100℃まで温度を下げ、さらに72時間かけて66℃まで温度を下げる。

この温度サイクル終了後、試料の塗膜表面に生じた

ふくれ、はがれ、きれつの程度によって優、良、可と判断する。

4. 試験結果と検討

4.1. はじめに

有機高分子である塗料樹脂が放射線の照射を受けた場合、塗膜におこる現象には架橋型と崩壊型があると、一般にいわれている。すなわち、(1)架橋型とは、放射線の照射を受けたことにより樹脂と硬化剤間および樹脂間などの架橋反応が促進され、その結果、一段と高分子化、三次元的な網目構造化が進み、塗膜が硬くなる場合をさし、(2)崩壊型とは、樹脂と硬化剤間の反応により形成された高分子の鎖が放射線の照射を受けて、切断され、その結果、塗膜組成がより低分子の有機物へと変化する場合をさす。

今回、供試した6種類の塗料では、後述する耐衝撃性試験ならびに耐摩耗性試験の結果から判断すると、明らかに架橋型の反応がおきるようである。

ところで、放射線照射後の塗膜状態を肉眼で観察した結果、 1×10^6 Rの線量では、供試した塗料のいずれにおいても、未照射の場合に比べほとんど変化がなく、 1×10^7 Rの線量では、すべての塗料に、やや黄変化がみられ、 1×10^8 Rの線量では、すべての塗料に弱い褐変化がみられた。しかし、供試したすべての塗料では、放射線の照射を受けた後においても、その塗膜にはふくれ、はがれ、きれつの発生はみられなかった。

4.2. 放射線照射前後における各種試験

放射線照射前後における耐衝撃性試験、密着性試験ならびに耐摩耗性試験の結果を、それぞれ表-3、表-4に示す。以下、これらの表を参考にしながら説明する。

4.2.1. 耐衝撃性試験 塗料の耐衝撃性を表-3から判断すれば、未照射の場合には塗料Dが最も優れ、

塗料Aがそれに次いでよい。そして、その他の塗料の耐衝撃性は同程度であると判断される。

一方、放射線照射後の耐衝撃性は供試したすべての塗料に共通して、未照射の場合に比べ低下している。すなわち、鋼球で塗膜を衝撃した際に、未照射の場合に比べて、塗膜により一層ながいきれつが認められ、また、そのきれつが二重、三重に発生していた。それゆえ、今回供試した塗料では、照射を受けたことによって塗膜が硬くなり、衝撃に対し弱くなる現象がおこったと推定される。

ところで、照射後の耐衝撃性を塗料間で比較した結果、塗料Dが優れており、これ以外の塗料の耐衝撃性は同程度であると判断される。

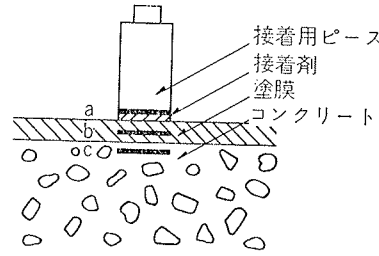
なお、今回実施した耐衝撃性試験では、いずれの塗料においても、塗膜剥離という現象は認められなかった。

4.2.2. 密着性試験

(1) ざばん目密着力試験 試験結果を表示していないけれども、塗料C以外の塗料は放射線の照射前後において、いずれも100/100を示した。

一方、塗料Cではざばん目を作成時に、未照射の供試体においても塗膜間でよくはがれる現象がおき、さらに、照射後の供試体では、ざばん目の作成時にすら塗膜間からすべてはがれるという状態であった。

(2) せん断密着力試験 線量 $1 \times 10^6 R$, $1 \times 10^7 R$, $1 \times 10^8 R$ の放射線を照射した供試体のせん断密着力は他の線量において有意な差が認められなかったので、



注) a (接着剤と接着用ピースの界面)
b (塗膜内部)
c (コンクリート部)

図一6 せん断密着力試験におけるはがれ部分

未照射の場合と $1 \times 10^8 R$ の線量を照射した場合の試験結果を表一4に示した。塗料のせん断密着力を同表から判断すれば、塗料Cを除いた5種類の塗料では、未照射の場合には、いずれも図一6のa部、すなわち接着剤と接着用ピースの界面からはがれ、また、照射後の場合には同図のa, c部、すなわち接着剤とピースの界面ならびにコンクリート部からはがれたので、いずれもよく密着していると判断される。それに反して、塗料Cではb部、すなわち塗膜内部で剥離し、前述のざばん目密着力試験から考えあわせて、塗料Cの密着力は弱いと判定される。なお、放射線の照射は、塗料C以外の塗料の密着性に悪影響をおよぼしていないと判断される。

4.2.3. 耐摩耗性試験 線量 $1 \times 10^6 R$, $1 \times 10^7 R$,

塗料 長さ cm	A			B			C			D			E			F		
	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100
未照射	◎	◎	△	○	△	△	○	△	△	◎	◎	◎	◎	△	△	○	△	△
1×10^6	△	△	△	△	△	△	△	△	△	◎	△	△	△	△	△	△	△	△
1×10^7	△	△	△	△	△	△	△	△	△	◎	◎	△	△	△	△	△	△	△
1×10^8	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

注) 衝撃により生じたへこみの円周上のきれつの状況によって、◎きれつなし、○わずかなきれつ、△明らかなきれつに判別する。

表一3 放射線照射前後における耐衝撃性試験結果

塗料	A		B		C		D		E		F	
	未照射	1×10^8	未照射	1×10^8	未照射	1×10^8	未照射	1×10^8	未照射	1×10^8	未照射	1×10^8
せん断密着力 (kg-cm)	40 ^{a)}	48 ^{a)}	46 ^{a)}	60 ^{a)}	25 ^{b)}	23 ^{b)}	43 ^{a)}	46 ^{a)}	40 ^{a)}	50 ^{c)}	40 ^{a)}	50 ^{a)}
摩耗量 (mg)	525	271	384	264	544	245	383	156	512	236	605	314

注) 密着力(kg-cm)の右上に書かれている記号については図一6の注を参照のこと。

表一4 放射線照射前後におけるせん断密着力、耐摩耗性試験結果

1×10⁸Rの照射を受けた供試体の耐摩耗性は、他の線量において、有意な差が認められなかったため、未照射の場合と1×10⁸Rの線量を照射した場合の試験結果を表一4に示した。この場合、摩耗減量が少ないほど耐摩耗性が優れていることを示している。

さて、同表から塗料の耐摩耗性を判断すれば、未照射の場合には塗料B、Dが明らかに優れており、他の塗料のそれは同程度であると判断される。

一方、照射後の場合には、塗料Dの耐摩耗性が優れており、これ以外の塗料のそれは同程度であると判断される。

ところで、照射後の耐摩耗性は明らかに、供試した塗料のすべてに共通して向上している。このことは逆にいえば、放射線の照射を受けたことにより塗膜が硬くなったことを示していると推定される。

4.2.4. 熱水試験 この試験は塗膜の耐熱水性をみるためのものであり、その試験結果を表一5に示す。その場合の判定基準は試験後、塗膜にきれつがなく、しかも塗膜のふくれ5%以下、はがれ1%以下の場合を優とする。一方、きれつが発生した場合、あるいはふくれ5%以上、はがれ1%以上の場合には、その程度に応じて良、可とした。

同表から明らかなように塗料A、B、C、E、Fが良好な結果を示している。

塗料	A	B	C	D	E	F
判定	良	良	優	可	良	良

表一5 熱水試験結果

5. まとめ

原子力発電所のコンクリート建屋に使用する耐放射線性塗料のうち6種類（A、B、C、D、E、F）を供試して、放射線照射前後における耐衝撃性試験、密着性試験、耐摩耗性試験、さらには照射前における熱水試験を実施して、その性能を比較した結果を要約す

ると次のようである。

(1) 各種試験における塗料間の差異を表一6に示す。

(2) 塗料Cは塗料の基本的な性能として要求される塗膜間の密着性があまりよくないと判定されるので、塗料としては不適當である。

(3) 耐熱水性が要求される原子炉建屋に使用する塗料は、熱水試験の結果も優良でなければいけない。したがって、この建屋に使用する塗料としては表一6の結果から、Aが最も適し、つづいてEがよいと判断される。一方、耐熱水性が要求されないタービン建屋、補機建屋には、耐衝撃性および耐摩耗性が優れているDが最も適し、つづいてAまたはBがよいと判断される。

<u>耐衝撃性試験</u>	
照射前	: D>A>B, C, E, F
照射後	: D>A, B, C, E, F
<u>密着性試験</u>	
照射前	: A, B, D, E, F>C
照射後	: A, B, D, E, F>C
<u>耐摩耗性試験</u>	
照射前	: B, D>A, C, E, F
照射後	: D>A, B, C, E, F
<u>熱水試験</u>	
優	: C 良: A, B, E, F
可	: D

表一6 各種試験のまとめ

(4) 以上の試験結果は、メーカーの指定にしたがって塗装した供試体について実験した結果であり、表一1から明らかなように合計膜厚に差がみられる。この塗膜厚をかえて試験を行った場合、塗料の性能順位が違ってくる可能性もある。

それゆえ、塗膜厚と塗料性能との関係について実験をすすめている。

おわりに、本試験の実施にあたって多大の御協力をたまわった当社の技術研究所、原子力室、現場、ならびに関係塗料メーカーの各位に厚くお礼を申し上げます。