

電気技術規程

原子力編

原子炉構造材の監視試験方法

JEAC 4201-2007

 製 日本電気協会

原子力規格委員会

原子炉構造材の監視試験方法

目 次

SA-1000 総 則	1
SA-1100 一 般 事 項	1
SA-1110 適 用 範 囲	1
SA-1120 監視試験の対象	1
SA-1130 監視試験の種類	1
SA-1200 用 語 の 定 義	2
SA-2000 監視試験計画	3
SA-2100 供 試 材	3
SA-2110 供試材の種類	3
SA-2120 供試材の選定	3
SA-2130 供試材の保管	4
SA-2200 監視試験片	4
SA-2210 監視試験片の種類及び形状	4
SA-2220 監視試験片の採取	4
SA-2230 監視試験片の数	5
SA-2231 照射前試験片	5
SA-2232 照射後試験片	5
SA-2240 監視試験片の再生	5
SA-2300 照 射 条 件	5
SA-2310 監視試験片の照射位置	5
SA-2320 中性子ドシメータ	5
SA-2330 温 度 モ ニ タ	6
SA-2340 試験用カプセル	6
SA-2350 試験用カプセルの数	6
SA-2360 試験用カプセルの取り出し時期	6
SA-2361 試験用カプセルの取り出し時期を定める目的	6
SA-2362 標準監視試験計画	7
SA-2363 長期監視試験計画	8
SA-3000 監視試験方法	8
SA-3100 機械的性質の測定	8
SA-3110 引 張 試 験	8

SA-3120	衝 撃 試 験	8
SA-3200	中性子照射量の評価	9
SA-3300	最高温度の測定	9
SA-3400	照射効果の評価	9
SA-3410	引 張 試 験	9
SA-3420	衝 撃 試 験	9
SA-3430	RT_{NDT} 調整値の評価	9
SA-3440	上部棚吸収エネルギーの評価	10
SA-4000	監視試験結果の記録	10
SA-4100	監視試験計画	10
SA-4200	供試材及び監視試験片	10
SA-4300	機械的性質の試験結果	10
SA-4310	引 張 試 験	10
SA-4320	衝 撃 試 験	11
SA-4400	照 射 条 件	11
SA-4500	そ の 他	11

附 属 書 目 次

[附属書 A] 2007 年 12 月 5 日以前に建設された原子炉構造材の監視試験に関する規定

A-1000 総 則	附 A-1
A-1100 適 用 範 囲	附 A-1
A-2000 監視試験計画	附 A-1
A-2100 供 試 材	附 A-1
A-2110 供試材の種類	附 A-1
A-2120 供試材の選定	附 A-1
A-2130 供試材の保管	附 A-2
A-2200 監視試験片	附 A-2
A-2210 監視試験片の種類及び形状	附 A-2
A-2220 監視試験片の採取	附 A-2
A-2230 監視試験片の数	附 A-2
A-2231 照射前試験片	附 A-2
A-2232 照射後試験片	附 A-3
A-2240 監視試験片の再生	附 A-3
A-2300 照 射 条 件	附 A-3
A-2310 監視試験片の照射位置	附 A-3
A-2320 中性子ドシメータ	附 A-3
A-2330 温 度 モ ニ タ	附 A-3
A-2340 試験用カプセル	附 A-4
A-2350 試験用カプセルの数	附 A-4
A-2360 試験用カプセルの取り出し時期	附 A-4
A-3000 監視試験方法	附 A-4
A-4000 監視試験結果の記録	附 A-4

[附属書 B] 中性子照射による関連温度移行量及び上部棚吸収エネルギー減少率の予測

B-1000 適 用	附 B-1
B-2000 関連温度移行量の予測（国内脆化予測法）	附 B-1
B-2100 RT_{NDT} 調整値の算出	附 B-1
B-2200 引 用 文 献	附 B-3
B-3000 上部棚吸収エネルギーの減少率(ΔUSE)の予測（国内 USE 予測式）	附 B-3
B-3100 USE 調整値の算出	附 B-3

B-3200 引 用 文 献	附 B-4
----------------------	-------

[附属書 C] 監視試験片の再生方法

C-1000 適 用	附 C-1
C-1100 適 用 範 囲	附 C-1
C-1200 用 語 の 定 義	附 C-1
C-1300 参 考 図 書	附 C-1
C-2000 試験片の再生に関する要求事項	附 C-2
C-2100 インサート材及びタブ材	附 C-2
C-2110 インサート材の加工履歴	附 C-2
C-2120 インサート材の照射履歴	附 C-2
C-2130 インサート材の試験履歴	附 C-2
C-2140 インサート材の保管	附 C-2
C-2150 タ ブ 材	附 C-2
C-2160 特 記 事 項	附 C-2
C-2200 接 合 方 法	附 C-2
C-2210 接合方法の確認試験方法	附 C-2
C-2220 接合方法の確認試験の数	附 C-3
C-2230 接合方法の確認試験の再試験	附 C-3
C-2240 監視試験片再生の接合	附 C-3
C-2300 寸法に関する要求	附 C-3
C-2310 試験後の試験片の一部からインサート材として使用する範囲	附 C-3
C-2320 インサート材の長さ	附 C-4
C-2330 再生試験片の形状	附 C-4
C-2400 塑 性 域 幅	附 C-4
C-2410 衝 撃 試 験 片	附 C-4
C-2420 破壊靱性試験片 (1/2TCT)	附 C-5
C-2430 破壊靱性試験片 (3 点曲げ)	附 C-5
C-2500 熱 影 響 部 幅	附 C-5
C-2600 熱 回 復 幅	附 C-5
C-2610 熱回復パラメータの算出方法	附 C-5
C-2620 熱 回 復 幅	附 C-6
C-3000 再生試験片を用いた試験	附 C-6
C-3100 衝 撃 試 験	附 C-6
C-3200 破壊靱性試験	附 C-6
C-4000 記 録	附 C-6

まない容器の内表面をいう。

- (14) 中性子照射量：中性子束を時間で積分した値で、 n/cm^2 の単位で表す。

なお、本規程においては、特に断りのない限り中性子エネルギーが1MeVを超える積算値をいう。

- (15) 中性子束：任意の中性子エネルギーの範囲内における中性子照射強度の測定値。中性子密度と速度の積で、 $n/cm^2 \cdot s$ の単位で表す。なお、本規程においては、特に断りのない限り中性子エネルギーが1MeVを超える値をいう。

- (16) 中性子エネルギースペクトル：中性子のエネルギー分布で、核分裂スペクトルを仮定した組合せ箔測定値の解析、又は計算から得られる。

- (17) 監視試験片の再生：試験後の試験片の一部を利用して監視試験に適用する新たな試験片を製作することをいい、再生した監視試験片のことを再生試験片という。

- (18) 標準監視試験計画：相当運転期間における試験用カプセルの取り出し計画。

- (19) 長期監視試験計画：相当運転期間を超えて運転を行う場合の、相当運転期間以降における試験用カプセルの取り出し計画。

SA-2000 監視試験計画

SA-2100 供試材

SA-2110 供試材の種類

- (1) 監視試験片を採取する供試材は、炉心領域にある部材のうち、少なくとも1溶解から製造された母材、並びにその領域に突合せ溶接継手がある場合には、その継手をそれぞれ代表する溶接部とする。
- (2) その領域に長手継手がある場合には、溶接部の供試材はその長手継手のうち1継手を代表する溶接部とする。ただし、その領域に、同一溶解の溶接材料を用いた、同一溶接施工法による長手継手と周継手がある場合は、その周継手を代表する溶接部としてもよい。
- (3) その領域に長手継手がなく、周継手がある場合には、溶接部の供試材はその周継手のうち1継手を代表する溶接部とする。
- (4) 炉心領域が、鍛造品のみで構成される場合は、母材のみを対象とする。

SA-2120 供試材の選定

- (1) 供試材（母材及び溶接部）は、炉心領域に使用したもののうち、照射前の RT_{NDT} と化学成分（Cu, Ni等）の影響を考慮して、附属書BのB-2000に示す手法により予測される相当運転期間末期の RT_{NDT} 調整値が最高となるものを選ぶ。

(解説-SA-2120-1)

- (2) 供試材には、炉心領域が受けた製造履歴と同等な製造履歴を与える。

(解説-SA-2120-2)

- (3) 供試材の母材及び溶接金属に対しては、規格成分のほか、少なくとも Cu の分析を行う。

SA-2130 供試材の保管

少なくとも 2 組分の試験用カプセルに装荷する監視試験片を製作するのに十分な量の供試材（溶接部を含む。）を保管する。（解説-SA-2130-1）

SA-2200 監視試験片

SA-2210 監視試験片の種類及び形状

監視試験片の種類は、引張試験片及び衝撃試験片とし、その形状及び寸法は、次による。ただし、この形状及び寸法の試験片を使用することが困難な場合は、これより小型の試験片としてもよいが、あらかじめ両者の強度、破壊靱性などについて対比を行う。

また、照射前試験片と照射後試験片とは、同一形状・寸法のものとする。

(1) 引張試験片

引張試験片は、日本工業規格 JIS Z 2201 (1998)「金属材料引張試験片」の 10 号試験片による。

(2) 衝撃試験片

衝撃試験片は、日本工業規格 JIS Z 2242 (2005)「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」の標準試験片（V ノッチ、幅 10mm）による。

SA-2220 監視試験片の採取

監視試験片の採取位置及び採取方向は、表-SA-2220-1 による。（解説-SA-2220-1）

表-SA-2220-1 監視試験片の採取位置及び採取方向

供試材の種類	試験片の採取位置	試験片の採取方向		
		引張試験片	衝撃試験片	
		試験片の長手軸の方向	試験片の長手軸の方向	ノッチ深さ方向
母材	(1/4) $t^{(注)1}$	主加工方向に直角 (注)2	主加工方向に直角 (注)2	材料の厚さ方向に直角
溶接部	溶接ルート部及び表面より 13mm 以上離れた位置 ^{(注)4}	溶接線に平行 ^{(注)3}	溶接線に直角	材料の厚さ方向に直角
	溶接熱影響部	—	溶接線に直角	材料の厚さ方向に直角

- (注) 1. t は厚さ
 2. 主加工方向とは、鋼板の場合は主圧延方向、鍛造品の場合は主鍛造方向をいう。
 3. ゲージ長さ部分がすべて溶接金属内部におさまる場合は、溶接線に直角に採取してもよい。（解説図-SA-2220-2 参照）
 4. 溶接ルート部の定義は JIS Z 3001 (1999)「溶接用語」による。

SA-2230 監視試験片の数

SA-2231 照射前試験片

(1) 引張試験片

母材及び溶接金属のそれぞれについて3個以上とする。(解説-SA-2231-1)

(2) 衝撃試験片

母材、溶接金属及び溶接熱影響部のそれぞれについて15個以上とする。

(解説-SA-2231-1)

SA-2232 照射後試験片

(1) 引張試験片

1回に取り出して試験する試験片の数は、母材及び溶接金属のそれぞれについて3個以上とする。

(2) 衝撃試験片

1回に取り出して試験する試験片の数は、母材、溶接金属及び溶接熱影響部のそれぞれについて12個以上とする。

SA-2240 監視試験片の再生

(1) 附属書Cに示す方法により、監視試験片の試験後残材を用いて監視試験片を再生してもよい。(解説-SA-2240-1)

(2) SA-2363に定める長期監視試験計画において再生試験片を用いる場合の監視試験は、引張試験は除外し、衝撃試験を対象とする。なお、以下の条件を満足する場合には、溶接金属、溶接熱影響部の試験片を除外し、母材の試験片で代表してもよい。(解説-SA-2240-2)

a. 溶接熱影響部：監視試験の衝撃試験の吸収エネルギー41Jに対応する温度が母材に比べて溶接熱影響部の方が低い場合。

b. 溶接金属：監視試験の RT_{NDT} 調整値が母材に比べて溶接金属の方が低い場合。

ただし、監視試験の溶接熱影響部又は溶接金属の上部棚吸収エネルギーが102J以下の場合には、上部棚吸収エネルギー確認用の試験片を3個以上準備する。

SA-2300 照射条件

SA-2310 監視試験片の照射位置

監視試験片は、監視を必要とする部材が受ける中性子束、中性子エネルギースペクトル及び温度履歴となるべく等しくなる位置に置き、照射する。(解説-SA-2310-1)

なお、この位置に加えて、別の位置に監視試験片を置き、加速照射を行ってもよい。

SA-2320 中性子ドシメータ

(1) 監視試験片が受ける中性子照射量を監視するために中性子ドシメータを装備す

- る。中性子ドシメータは、Fe, Ni, Co等を使用するとよい。
- (2) 中性子ドシメータは、すべての試験用カプセル内に封入する。
 - (3) (2)のほか、別の位置の照射条件を監視するために試験用カプセルとは別の中性子ドシメータ用カプセルを用意し、適切な位置に置いてよい。

SA-2330 温度 モ ニ タ

- (1) 監視試験片の最高温度を監視するために温度モニタ（低融点共晶合金）を装備する。温度モニタは、予測される最高温度以下で熔融するものとそれを超える温度で熔融するものを少なくともいずれか1種選定する。また、冷却材温度の記録から照射温度を確認する。最高温度をより正確に求めるために融点の異なる温度モニタを追加してもよい。
- (2) 温度モニタは、監視試験片温度が最高となると予測される位置に設置する。試験用カプセル内の温度分布を知るために温度モニタを追加してもよい。

SA-2340 試験用カプセル

- (1) 監視試験片は、照射中、表面の状態を損ねないために、耐食性のある試験用カプセル内に不活性ガスと一緒に封入する。
- (2) 試験用カプセルは、監視試験片の脱落や変形を防止するために、冷却水の水圧や水流によって破損するようなものであってはならない。
- (3) 試験用カプセルは照射後、水中で取り扱う場合、作業員の過大な被ばくを避けるために、浮くようなものであってはならない。
- (4) 試験用カプセルとその取付物の設計にあたっては、試験用カプセルの取り出し後、供用期間中に再び炉内に試験用カプセルを挿入できるように考慮する。

SA-2350 試験用カプセルの数

- (1) 試験用カプセルは、原子炉压力容器における ΔRT_{NDT} 及び上部棚吸収エネルギーの減少率を評価するため十分な数を用意する。(解説-SA-2350-1)
- (2) 最少カプセル数は、相当運転期間における原子炉压力容器内面の最大中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) を見積り、 ΔRT_{NDT} を附属書BのB-2000により予測したうえ、表-SA-2362-1に基づいて定める。
- (3) 試験用カプセルの数は、表-SA-2362-1に示す最少カプセル数に余裕を見込んだ数にするのが望ましい。

SA-2360 試験用カプセルの取り出し時期

SA-2361 試験用カプセルの取り出し時期を定める目的

試験用カプセルの取り出し時期を定める目的は、実際の照射環境下にある部材の照射効果を確認し、原子炉压力容器の圧力・温度要求が妥当であり、かつ、余裕のあることを実証することにある。

SA-2362 標準監視試験計画

標準監視試験計画における試験用カプセルの取り出し時期は次による。

- (1) 原子炉圧力容器（少なくとも内面及び $(1/4)t$ の位置）及び各試験用カプセルが受ける相当運転期間における中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) を見積り、各試験用カプセルのリードファクタを求める。
- (2) (1)により求めたリードファクタ、附属書 B の B-2000 による相当運転期間における ΔRT_{NDT} の予測値を考慮し、表-SA-2362-1 に基づいて試験用カプセルの取り出し時期を定める。(解説-SA-2362-1)

なお、相当運転期間を超えて運転を行う場合には、表-SA-2362-1 に定める最終回時の取り出し時期から SA-2363 の長期監視試験計画に移行する。

表-SA-2362-1 最少カプセル数及び取り出し時期

		相当運転期間における原子炉圧力容器内面の 関連温度移行量の予測値 (ΔRT_{NDT} 予測値) ($^{\circ}\text{C}$)			
		$\Delta RT_{NDT} \leq 28$	$28 < \Delta RT_{NDT} \leq 56$	$56 < \Delta RT_{NDT} \leq 111$	$111 < \Delta RT_{NDT}$
最少カプセル数 (個)		3	3	4	5
取り出し時期 (EFPY) (注)7.	第 1 カプセル	12 ^{(注)1.}	6 ^{(注)2.}	3 ^{(注)2.}	1.5 ^{(注)2.}
	第 2 カプセル	24 ^{(注)3.}	15 ^{(注)3.}	6 ^{(注)4.}	3 ^{(注)5.}
	第 3 カプセル	相当運転期間 ^{(注)5.}	相当運転期間 ^{(注)5.}	15 ^{(注)3.}	6 ^{(注)4.}
	第 4 カプセル	—	—	相当運転期間 ^{(注)5.}	15 ^{(注)3.}
	第 5 カプセル	—	—	—	相当運転期間 ^{(注)5.}

- (注) 1. 本表の時期、又は監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が $5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) を超える時期のうち、いずれか早い方。
2. 本表の時期、又は監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が $5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) を超える時期あるいは最大のリードファクタを示す監視試験片の ΔRT_{NDT} が 28°C と予測される時期のうち、いずれか早い方。
3. 本表の時期、又は監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が、相当運転期間に原子炉圧力容器が内面で受ける中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) に到達する時期のうち、いずれか早い方。
4. 本表の時期、又は監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が、相当運転期間に原子炉圧力容器が $(1/4)t$ の位置で受ける中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) に到達する時期のうち、いずれか早い方。
5. 本表の時期、又は監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が第 1 カプセル及び第 3 カプセルの中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) の中間となる時期。
6. 監視試験片の中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) が、相当運転期間に原子炉圧力容器が内面で受ける中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) の 1 倍以上 2 倍以下であること。ただし、先行試験結果に基づき変更してもよい。
7. 本表の取り出し時期の数値は、定格負荷相当年数 (EFPY) であり、試験用カプセル取り出しは、これらの値に近いプラント停止時期に合わせて行う。

SA-2363 長期監視試験計画

SA-2362 で設定された最終回時のカプセルの取り出しから長期監視試験計画とする。相当運転期間を超えて運転を行う場合、運転計画、試験用カプセルのリードファクタ及び過去の脆化傾向等を考慮して、適切な時期に長期監視試験計画を策定する。(解説-SA-2363-1)

なお、長期監視試験計画の試験用カプセルの取り出し時期は次による。

(解説-SA-2363-2)

- (1) SA-2362 で設定された最終回時のカプセルの取り出し時期にカプセルを取り出す。ただし、相当運転期間における原子炉圧力容器内面の ΔRT_{NDT} 予測値が 28°C 以下の場合には、SA-2362 で設定された最終回時のカプセルの取り出し時期は相当運転期間の1.5倍を超えない時期に変更してもよい。
- (2) (1)で取り出した以降のカプセルについては、その前のカプセルとの中性子照射量の間隔が、SA-2362 で設定された最終回時の取り出しカプセルとその一つ前のカプセルの中性子照射量の差、あるいはそれ以下に相当する定格負荷相当年数の間隔となるようにカプセルを取り出す。ただし、原子炉圧力容器内面での中性子照射量が取り出したカプセルの中性子照射量を下回っている間は、次のカプセルの取り出しを計画する必要はない。
- (3) (2)において定まる間隔は、先行試験の結果、及び附属書BのB-2000により予測される原子炉圧力容器の脆化傾向に基づき変更してもよい。

SA-3000 監視試験方法

SA-3100 機械的性質の測定

SA-3110 引張試験

- (1) 引張試験方法は、日本工業規格 JIS Z 2241 (1998)「金属材料引張試験方法」による。
- (2) 照射前試験における引張試験温度は、強度・延性の温度依存性を把握するため、室温、使用温度及び両者の中間温度とする。
- (3) 照射後試験における引張試験温度は、照射前試験の試験温度のうち一温度を含む。

SA-3120 衝撃試験

- (1) 衝撃試験方法は、日本工業規格 JIS Z 2242 (2005)「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」、あるいは ASTM E23-06 “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials” による。衝撃試験機の衝撃刃については、JIS Z 2242 による場合は半径 2mm、ASTM E23 による場合は半径 8mm を使用する。ただし、照射前後で同じ半径の衝撃刃を使用する。また、横膨出量の測定においては、JEAC 4206-2007 附属書 B を用いる。(解説-SA-3120-1)
- (2) 照射前試験における衝撃試験にあっては、吸収エネルギー、横膨出量、延性破

面率に関する平均の遷移曲線を描き、吸収エネルギー 41 J 及び 68 J, 横膨出量 0.90mm, 延性破面率 50% に対応する温度並びに上部棚吸収エネルギーを求める。(解説-SA-3120-2)

- (3) 照射後試験における衝撃試験にあつては、吸収エネルギー、横膨出量、延性破面率に関する平均の遷移曲線を描き、吸収エネルギー 41 J 及び 68 J, 横膨出量 0.90 mm, 延性破面率 50% に対応する温度並びに上部棚吸収エネルギーを求める。

再生試験片を使用する場合は、附属書 C による。

SA-3200 中性子照射量の評価

- (1) 中性子束、中性子エネルギースペクトル、監視試験片の中性子照射量($E > 1\text{MeV}$)、並びに原子炉压力容器内面及び $(1/4)t$ の位置における中性子照射量の最大値を決定する。(解説-SA-3200-1)

- (2) 中性子照射量は、(1)の計算により決定した中性子束、中性子エネルギースペクトル及び中性子ドシメータによる測定値により決定する。

- (3) 再装荷した試験片については、その照射履歴を考慮した評価を実施する。

(解説-SA-3200-2)

SA-3300 最高温度の測定

SA-2330 の温度モニタを使用して監視試験片の最高温度を求める。(解説-SA-3300-1)

SA-3400 照射効果の評価

SA-3410 引張試験

SA-3110 の規定に基づき実施した照射前及び照射後の試験データを比較することにより、照射による強度・延性の変化を評価する。

SA-3420 衝撃試験

- (1) SA-3120(2)及び(3)で求めた吸収エネルギー 41J 及び 68J, 横膨出量 0.90mm, 延性破面率 50% に対応する温度の照射による移行量を決定する。
- (2) 照射による上部棚吸収エネルギーの減少率を決定する。

SA-3430 RT_{NDT} 調整値の評価

母材、溶接金属及び溶接熱影響部の RT_{NDT} 調整値は、照射前の RT_{NDT} の初期値に照射による ΔRT_{NDT} を加えて求める。この場合、 ΔRT_{NDT} としては、吸収エネルギー 41 J に対応する温度の移行量とする。(解説-SA-3430-1)

更に、附属書 B の B-2000 に示す手法により RT_{NDT} 調整値を予測し、その予測値に対して JEAC 4206-2007 FB-4100 並びに FB-4200 にしたがって破壊靱性評価を行う。(解説-SA-1130-1 及び解説-SA-3430-2)

SA-3440 上部棚吸収エネルギーの評価

母材、溶接金属及び溶接熱影響部の上部棚吸収エネルギーは、附属書 B の B-3000 に示す手法により予測し、その予測値に対して JEAC 4206-2007 FB-4200 (1)a にしたがって評価する。(解説-SA-1130-1 及び解説-SA-3430-2)

ここで、母材においては、試験片の長手軸の方向が主加工方向（主圧延方向又は主鍛造方向）に直角な方向（T 方向）から採取した試験片による上部棚吸収エネルギーで評価する。

なお、試験片の長手軸の方向が主加工方向に平行な方向（L 方向）から採取した試験片による値しかない場合は、その 65% の値を T 方向の値として評価する。

SA-4000 監視試験結果の記録

SA-4100 監視試験計画

監視試験計画については、次の事項を記述すること。

- (1) 監視試験の対象となる原子炉压力容器
- (2) 試験用カプセルと容器、内部構造物、炉心の位置関係
- (3) 監視試験片が受ける中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) と容器の内面及び $(1/4) t$ の位置における最大中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) の間のリードファクタ
- (4) 監視試験供試材の選定
 - a. 炉心領域材料の化学成分、製造履歴、引張試験結果、衝撃試験結果及び落重試験結果
 - b. 監視試験供試材の選定の根拠

SA-4200 供試材及び監視試験片

- (1) 監視試験供試材については、製造方法、製造番号（溶解あるいはロット）及び監視試験供試材と原子炉压力容器に使用された材料の履歴の違いを記述する。
- (2) 供試材からの監視試験片採取位置及び採取方向を記述する。
- (3) 引張試験片、衝撃試験片及び他に用いた試験片の形状、中性子ドシメータ、温度モニタについて記述する。

SA-4300 機械的性質の試験結果

SA-4310 引張試験

引張試験については、少なくとも次の事項を記録する。

- (1) 引張試験機、試験片掴み装置、伸び計、記録計の名称及び型式
- (2) 試験片の温度計測法、試験速度及び測定方法
- (3) 応力-ひずみ曲線又は荷重-変位曲線（もし一群の試験片が類似の曲線を与えるなら、典型的な曲線のみでもよい。）
- (4) 各試験片について次の事項
 - a. 試験温度

- b. 耐力あるいは降伏点及びその定義
- c. 引張強さ
- d. 伸び
- e. 絞り
- f. 試験片記号

SA-4320 衝 撃 試 験

衝撃試験については、少なくとも次の事項を記録する。

- (1) 衝撃試験機の名称及び型式、試験機の容量及び打撃速度、試験片の温度計測法、試験機の検定方法
- (2) 各試験片について次の事項
 - a. 試験温度
 - b. 吸収エネルギー
 - c. 横膨出量
 - d. 延性破面率
 - e. 試験片の破面を示す写真
 - f. 試験片記号
- (3) 衝撃試験結果から得られる次の事項
 - a. 照射前試験及び照射後試験における吸収エネルギー、横膨出量、延性破面率に関する平均の遷移曲線
 - b. 照射前試験及び照射後試験における吸収エネルギー 41J 及び 68J、横膨出量 0.90mm、延性破面率 50%に対応する温度並びにこれらの各温度の照射による移行量
 - c. 照射前後の上部棚吸収エネルギー

SA-4400 照 射 条 件

照射条件（温度及び中性子照射量等の測定）については、次の事項を記録する。

- (1) 温度の測定結果及び試験用カプセルの推定最高温度
- (2) 中性子照射量の測定及び評価結果に関する以下の事項
 - a. 中性子ドシメータの放射化量測定方法、測定装置及び測定値
 - b. 中性子束、中性子エネルギースペクトル及び中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$) 並びにこれらと初期予測値の比較
 - c. 試験片の中性子照射量から外挿した原子炉压力容器内面と $(1/4) t$ の位置における最大中性子照射量 ($E > 1 \text{ MeV}$)

SA-4500 そ の 他

SA-3000 に示される以外の試験を実施した場合には、試験及び試験結果の解析に用いた方法並びに手順を添えて試験結果を記録する。

SA-2240 に示される再生試験片により試験を実施した場合には、附属書 C に規定する記録を記述する。

〔附属書 B〕

中性子照射による関連温度移行量及び上部棚吸収エネルギー減少率の予測

B-1000 適 用

中性子照射による関連温度移行量及び上部棚吸収エネルギー減少率の予測方法を B-2000 及び B-3000 にそれぞれに示す。

B-2000 関連温度移行量の予測（国内脆化予測法）

B-2100 RT_{NDT} 調整値の算出

関連温度移行量の予測値 (ΔRT_{NDT} 予測値) 及び RT_{NDT} 調整値 ($^{\circ}\text{C}$) は次式で与えられる。(解説-附属書 B-2100-1)

$$RT_{NDT} \text{ 調整値} = RT_{NDT} \text{ 初期値} + \Delta RT_{NDT} \text{ 予測値} \cdots (1)$$

$$\Delta RT_{NDT} \text{ 予測値} = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + M_R \cdots (2)$$

① RT_{NDT} 初期値：照射前の試験により決定した RT_{NDT} ($^{\circ}\text{C}$)

ΔRT_{NDT} 予測値： ΔRT_{NDT} の予測値 ($^{\circ}\text{C}$)

② ΔRT_{NDT} 計算値 ($^{\circ}\text{C}$) は附属書表 B-2100-1 又は附属書表 B-2100-2 (B-2200 引用文献(1)より引用) を用いて以下の手順で求める。(解説-附属書 B-2100-2)

ここで、表の中間における ΔRT_{NDT} 計算値は、銅及びニッケルに対しては比例法によって補間する。

- a. 加圧水型原子炉の場合、附属書表 B-2100-1 の中から、計算に使用する照射温度より低く、かつ最も近い公称照射温度の表を選定する。沸騰水型原子炉の場合、附属書表 B-2100-2 を用いる。
- b. 選定した表の中から、計算に使用する中性子束 ϕ_c に最も近い中性子束 ϕ_a 、 ϕ_b (ここで、 $\phi_a \leq \phi_c \leq \phi_b$) の表を選定する。
- c. 両表に対して、計算に使用する EFPY ($EFPY_c$) に最も近い $EFPY_1$ 、 $EFPY_2$ (ここで、 $EFPY_1 \leq EFPY_c \leq EFPY_2$) あるいは中性子照射量 (f_c) に最も近い中性子照射量 f_1 、 f_2 (ここで、 $f_1 \leq f_c \leq f_2$) における ΔRT_{NDT} 計算値を計算する。銅及びニッケルの含有量に対しては比例法で補間して計算する。
- d. $EFPY_1$ 、 $EFPY_2$ あるいは f_1 、 f_2 における中性子束 ϕ_c に対する ΔRT_{NDT} 計算値 ($\Delta RT_{NDT1,c}$ 、 $\Delta RT_{NDT2,c}$) を次式で求める。

$$\Delta RT_{NDTi,c} = \Delta RT_{NDTi,a} + \frac{\Delta RT_{NDTi,b} - \Delta RT_{NDTi,a}}{\log \phi_b - \log \phi_a} (\log \phi_c - \log \phi_a) \cdots (3)$$

ここで、

$\Delta RT_{NDTi,c}$ ： $EFPY_i$ あるいは f_i における中性子束 ϕ_c に対する ΔRT_{NDT} 計算値

$\Delta RT_{NDTi,a}$ ： $EFPY_i$ あるいは f_i における中性子束 ϕ_a に対する ΔRT_{NDT} 計算値

$\Delta RT_{NDTi,b}$ ： $EFPY_i$ あるいは f_i における中性子束 ϕ_b に対する ΔRT_{NDT} 計算値

$i=1, 2$

- e. EFPY ($EFPY_c$) あるいは中性子照射量 (f_c) に対する ΔRT_{NDT} 計算値 (ΔRT_{NDTc}) は次式で求める。

$$\Delta RT_{NDTc} = \Delta RT_{NDT1,c} + \frac{\Delta RT_{NDT2,c} - \Delta RT_{NDT1,c}}{\log EFPY_2 - \log EFPY_1} (\log EFPY_c - \log EFPY_1) \cdots (4)$$

又は,

$$\Delta RT_{NDTc} = \Delta RT_{NDT1,c} + \frac{\Delta RT_{NDT2,c} - \Delta RT_{NDT1,c}}{\log f_2 - \log f_1} (\log f_c - \log f_1) \cdots (5)$$

f : 中性子照射量 ($\times 10^{19}$ n/cm², $E > 1$ MeV)

f は中性子束と時間から次式で定義される。

$$f = \phi \times t \cdots (6)$$

f は, 容器内面からの深さを a (mm) とすると次式で与えられる。

$$f = f_0 \cdot \exp(-0.24a/25.4) \cdots (7)$$

ここで, f_0 : 容器内面での中性子照射量 ($\times 10^{19}$ n/cm², $E > 1$ MeV)。ただし, dpa (displacements per atom, 原子当たりのはじき出し) 評価を行っている場合, 容器内面における dpa と深さ a (mm) での dpa との比を(7)式中の減衰係数 ($\exp(-0.24a/25.4)$) の代わりに用いてもよい。

- ③ M_R はマージン (°C) であり次式で与えられる。

$$M_R = 2\sigma_{\Delta R}$$

$\sigma_{\Delta R}$ は, ΔRT_{NDT} 計算値に関する標準偏差 (°C) であり, 10°Cである。

しかしながら, 監視試験による ΔRT_{NDT} の実測値が(2)式で求まる ΔRT_{NDT} 予測値を上回った場合は実測値を包絡するように M_R を定めなおす。

- ④ 当該の材料に対して2個以上の監視試験による ΔRT_{NDT} の実測値がある場合, そのデータを用いて以下のように ΔRT_{NDT} 予測値を求め, それと(1)式を用いて RT_{NDT} 調整値を求める。

$$\Delta RT_{NDT} \text{ 予測値} = [\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + M_C] + M_R \cdots (8)$$

ΔRT_{NDT} 計算値: ②により求めた ΔRT_{NDT} 計算値 (°C)

M_C : 実測値で補正する場合に用いるマージン (°C) であり, 次式で求める。

ただし, $[\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + M_C]$ が負となる場合は, $[\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + M_C]$ を0とする。

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^n \{(\Delta RT_{NDT} \text{ 実測値})_i - (\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値})_i\}}{n} \cdots (9)$$

ここで,

n : 監視試験データ数

$(\Delta RT_{NDT} \text{ 実測値})_i$: 第 i 回監視試験より得られた ΔRT_{NDT} の実測値 (°C)

$(\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値})_i$: 第 i 回監視試験での照射条件に対して②で求めた ΔRT_{NDT} 計算値 (°C)

この場合、(8)式のマージンは、 $M_R = \sigma_{\Delta R}$ とすることができる。

ただし、監視試験による ΔRT_{NDT} の実測値が(8)式で求まる ΔRT_{NDT} 予測値を上回った場合は実測値を包含するように M_R を定めなおす。

また、監視試験の照射量が附属書表 B-2100-3 に示す適用範囲の上限 10^{20} n/cm² を超える場合は、引用文献(1)による方法を用いて ΔRT_{NDT} 計算値を求め、 M_C を計算する。

⑤ ②の ΔRT_{NDT} 計算値は引用文献の(1)による方法を用いて求めてもよい。

なお、公称照射温度が加圧水型原子炉で 283°C未満の場合及び沸騰水型原子炉で 270°C未満の場合は、引用文献(1)による方法を用いる。

⑥ 適用範囲を附属書表 B-2100-3 に示す。

B-2200 引 用 文 献

- (1) 曾根田他、「軽水炉压力容器鋼材の照射脆化予測法の式化に関する研究－照射脆化予測法の開発－」，電力中央研究所報告 Q06019，(財)電力中央研究所，平成 19 年 4 月

B-3000 上部棚吸収エネルギーの減少率 (ΔUSE) の予測 (国内 USE 予測式)

B-3100 USE 調整値の算出

USE 調整値 (J) は次式で与えられる。

$$USE \text{ 調整値} = USE \text{ 初期値} \times (1 - \Delta USE \text{ 予測値} / 100) \quad \cdots \cdots (10)$$

① USE 初期値：照射前の試験により決定した USE (J)

② ΔUSE 予測値 (%) は以下のとおり。

$$\Delta USE \text{ 予測値} = C_0 + [CF_v] \cdot [FF_v]_{(f)} + M_v \quad \cdots \cdots (11)$$

C_0 : 母材については -0.95，溶接金属については -2.78

$[CF_v]$: 化学成分による係数

$$\begin{aligned} (\text{母 材}) [CF_v] &= 5.23 + 9.36 \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \tanh \\ &\quad \{(Cu - 0.087) / 0.034\}) \times (1 + 0.59 \cdot Ni) \quad \cdots \cdots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{溶接金属}) [CF_v] &= 9.78 + 3.96 \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \tanh \\ &\quad \{(Cu - 0.086) / 0.045\}) \times (1 + 3.63 \cdot Ni) \quad \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

$[FF_v]_{(f)}$: 中性子照射量 f による係数 (\log は常用対数を表す)

$$(\text{母 材}) [FF_v]_{(f)} = f^{(0.349 - 0.068 \log f)} \quad \cdots \cdots (14)$$

$$(\text{溶接金属}) [FF_v]_{(f)} = f^{(0.234 + 0.015 \log f)} \quad \cdots \cdots (15)$$

Cu : 銅の含有量 (mass%)

Ni : ニッケルの含有量 (mass%)

なお、 Cu 及び Ni は材料の測定値 (複数ある場合はその平均) を用いる。

f : 中性子照射量 ($\times 10^{19}$ n/cm², $E > 1$ MeV)

f は、容器内面からの深さを a (mm) とすると次式で与えられる。

$$f = f_0 \cdot \exp(-0.24a / 25.4) \quad \cdots \cdots (16)$$

ここで、 f_0 は容器内面での中性子照射量 ($\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$, $E > 1 \text{ MeV}$)。
 ただし、dpa (displacements per atom, 原子当たりのはじき出し) 評価
 を行っている場合、容器内面における dpa と深さ a (mm) での dpa と
 の比を(16)式中の減衰係数 ($\exp(-0.24a/25.4)$) の代わりに用いてもよ
 い。

M_U : 以下のように設定する。

- 1) 当該の材料に対して監視試験による ΔUSE の実測値が 2 個未満の
 場合

$$M_U = 2\sigma_{\Delta U} \dots\dots\dots(17)$$

$\sigma_{\Delta U}$ は、 ΔUSE に関する標準偏差 (%)。

母材については 6.9%，溶接金属については 7.5%。

ただし、監視試験 (第 1 回) による ΔUSE の実測値が(11)式で求まる
 ΔUSE 予測値を上回った場合は実測値を包含するように M_U を定め
 なおす。

- 2) 当該の材料に対して監視試験による ΔUSE の実測値が 2 個以上の
 場合

$$M_U = \frac{\sum_{i=1}^n \{(\Delta USE \text{ 実測値})_i - (C_0 + [CF_U] \cdot [FF_U]_{90})\}}{n} \dots\dots\dots(18)$$

$(\Delta USE \text{ 実測値})_i$: 第 i 回監視試験より得られた ΔUSE の実測値 (%)

n : 監視試験データ数

ただし、監視試験による最大の ΔUSE の実測値が(11)式で求まる
 ΔUSE 予測値を上回った場合は実測値を包含するように M_U を定め
 なおす。

- ③ 適用範囲を附属書表 B-3100-1 に示す。

B-3200 引 用 文 献

- (1) Sakamoto, K. et al., "Development of Prediction Equations on Charpy
 Upper Shelf Energy for Japanese RPV Steels", ASME PVP Vol.467 (2003),
 PP.9-16