

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	材構 02 <u>R 1</u>
提出年月日	<u>令和4年7月5日</u>

設工認に係る補足説明資料

材料及び構造に係る設計上の考慮事項の抽出について

1. 文章中の下線部は、R 0 から R 1 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 1）は、4月21日に提示した
「低サイクル疲労の取り扱いについて R 0」に対し、自主的に記載
内容を見直したものである。

なお、本資料は、2021年7月14日に提示した「共通11「既設の設備機器等に係る健全性の評価等も含めた使用前事業者検査の実施方針」（R 2）」に対する10月25日の面談コメントを踏まえて、補足説明資料として取りまとめたものである。

目次

1. 概要	1
2. 再処理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項	2
2.1 発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項に対する確認	2
2.1.1 発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項	3
2.1.2 確認結果	3
2.2 再処理施設及び発電炉における経年劣化事象に対する確認	7
2.2.1 再処理施設及び発電炉における経年劣化事象	7
2.2.2 確認結果	8
3. まとめ	12

1. 概要

本資料は、再処理施設の第1回設工認申請のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「V-1 強度計算の基本方針」

上記添付書類において、基本設計方針にて示した材料及び構造に係る設計上の考慮事項である機械的強度及び化学的成分、延性破断の防止等に対する設計方針に従い「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））＜第1編軽水炉規格＞JSME S NC1-2005/2007」（日本機械学会）（以下「設計・建設規格」という。）等に準拠した弾性設計を実施する方針としている内容について、本資料では、材料及び構造に係る設計上の考慮事項以外の考慮すべき事項がないか整理した結果について示す。

なお、本資料で示す材料及び構造に係る設計上の考慮事項については、再処理施設以外のMOX燃料加工施設、廃棄物管理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項に対しても適用するものである。

2. 再処理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項

再処理施設における材料及び構造に係る設計にあたっては、再処理施設の技術基準規則における材料及び構造に係る要求事項を踏まえ基本設計方針にて示した以下の項目に対する設計方針に従い、設計・建設規格等に準拠した弾性設計を実施することとしている。

なお、材料及び構造に係る要求事項のうち容器等の主要な溶接部並びに耐圧試験及び漏えい試験については、上記設計を踏まえ使用前事業者検査にて確認する事項であることから、ここでは対象外とする。

- a. 機械的強度及び化学的成分
- b. 延性破断の防止
- c. 疲労破壊の防止（伸縮継手に限る。）
- d. 座屈による破壊の防止

上記4項目以外に再処理施設における材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないかの確認として、再処理施設と同様に材料及び構造に係る要求事項が規定された発電炉の技術基準規則における要求事項に対する確認を実施するとともに、再処理施設は設置からすでに長期間経過していることも踏まえ、再処理施設において想定される主な劣化事象及び発電炉における高経年技術対策上着目すべき劣化事象に対する確認を実施する。

2.1 発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項に対する確認

発電炉における材料及び構造に係る設計については、再処理施設同様に設計・建設規格に基づく弾性設計を基本としているものの、より機器の重要度の高いクラス1機器等では構造設計の基本的な考え方の相違*により、起こり得る全ての破壊モードを考慮した評価体系が適用されている。

そのため、発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項に対し、再処理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項との差分があるものについて、再処理施設における材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないか確認を実施する。

注記 *：構造設計の基本的な考え方の相違について以下に示す。

再処理施設や発電炉の構造設計においては、基本的に設計・建設規格等に準拠した設計を行っているが、設計・建設規格等における構造設計の基本的な考え方は「解析による設計（design by analysis）」と「公式による設計（design by rule）」とに大別できる。

「解析による設計」は、圧力・温度条件の厳しく最も安全重要度が高い発電炉のクラス1機器等の評価に適用されており、起こり得る全ての破壊モードを考慮し、応力解析を実施して応力制限等を行う設計となっている。

一方、「公式による設計」は、圧力・温度条件が低い再処理施設や発電炉のクラス3機器等の評価に適用されており、起こり得る全ての破壊モードを考慮するのではなく、引張強さに大きい安全係数を設定した許容値を用いることで、他の破壊モードに対する安全性を確保する設計となっている。

2.1.1 発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項

以下に、発電炉の技術基準規則にて規定された材料及び構造に係る設計上の考慮事項を示す。

なお、発電炉においては、コンクリート製原子炉格納容器の材料及び構造に係る設計上の考慮事項も規定されているが、再処理施設において同様の考慮が必要となる機器はないことから、ここでは対象外とする。

- a. 機械的強度及び化学的成分
- b. 応力腐食割れ
- c. 破壊じん性
- d. 非破壊試験
- e. 延性破断の防止
- f. 進行性変形による破壊の防止
- g. 疲労破壊の防止
- h. 座屈による破壊の防止

2.1.2 確認結果

前述2.1.1項に示す各考慮事項に対して、再処理施設における材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないか確認した結果を以下に示す。

a. 機械的強度及び化学的成分

機械的強度及び化学的成分については、再処理施設では接液する腐食性流体を含めた使用条件に対して適切な材料を使用する設計としており、機械的強度及び化学的成分に係る要求事項に対して適切な考慮を実施することとしていることから、ここでは確認対象外とする。

なお、発電炉のクラス1機器に対する機械的強度及び化学的成分に係る要求事項については、応力腐食割れ発生の抑制の考慮も含まれているが、応力腐食割れについては次項にて別途確認を実施する。

b. 応力腐食割れ

応力腐食割れは、部材に応力が加わった状態で腐食環境におかれた

とき、腐食環境にない場合より急速に亀裂が発生、成長して破断に至る現象であり、材料、応力、環境の3要因が重畳した場合に発生する現象である。

発電炉ではクラス1機器に対して応力腐食割れに係る要求が規定されており、3要因について適切な配慮がなされ応力腐食割れ発生の抑制を考慮した設計となっていることを確認している。

再処理施設では、発電炉におけるクラス3機器相当として設計されているものであり、発電炉のクラス3機器同様に応力腐食割れに係る要求事項は規定されていないものの、再処理施設における耐圧部材は基本的に耐応力腐食割れに優れた材料を採用していること及び常圧で使用するため過大な引張応力が発生しないことから、3要因が重畳する可能性は低いため応力腐食割れの評価は不要と判断している。

なお、再処理施設における使用材料に係る設計上の考慮については、前述2.項における「a.機械的強度及び化学的成分」にて使用条件に対して適切な材料を使用する設計としていることに含まれている。

c. 破壊じん性

破壊じん性とは、材料の脆性破壊に対する抵抗を示す指標である。

発電炉ではクラス1機器等に対して脆性破壊防止のため材料に適切な破壊じん性を要求されていることから、破壊じん性試験が必要となる材料にあつては、衝撃試験及び落重試験により適切な破壊じん性を有していることを確認している。

再処理施設における耐圧部材は、主に耐食性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼及びジルコニウムを使用しており、それら材料は十分延性を有する材料又は非鉄金属であるため設計・建設規格における破壊じん性試験不要となる材料に該当する。また、それ以外の材料として、ダクトにあつては炭素鋼が使用されるものの、薄板のため設計・建設規格における破壊じん性試験不要となる材料に該当する。したがって、再処理施設においては破壊じん性の確認は不要と判断している。

なお、再処理施設における使用材料に係る設計上の考慮については、前述2.項における「a.機械的強度及び化学的成分」にて使用条件に対して適切な材料を使用する設計としていることに含まれている。

d. 非破壊試験

非破壊試験は、対象とする構造物において、きずや欠陥の有無を確認するために実施するものである。

発電炉ではクラス1機器等に対して非破壊試験が要求されており、有害な欠陥がないことを適切な非破壊試験を実施することにより確認している。また、発電炉のクラス3機器に対しては非破壊試験に係る要求は規定されていない。これは「解説 原子力設備の技術基

準」(電力新報社)にて、クラス3機器(第4種機器)は重要度分類からみてクラス1機器(第1種機器)ほど重要でないこと、「公式による設計」を適用し安全率4*で設計されていること、また、耐圧試験を定めていることから非破壊試験を定めなくても材料の健全性を保証できるものとされているためであると解説されている。

再処理施設にあっても、発電炉におけるクラス3機器(第4種機器)相当として設計されているものであり、発電炉同様に安全率4で設計され、適切な耐圧試験を定めていることから、非破壊試験の確認は不要と判断している。

なお、再処理施設における安全率4を用いた構造設計に係る設計上の考慮については、前述2.項における「b.延性破断の防止」にて許容引張応力S値を用いた弾性設計を実施するとしていることに含まれている。

注記 * : 「公式による設計」は許容引張応力S値を用いた評価体系であり、許容引張応力S値は以下に示すとおり設計引張強さSuに対して安全率4が適用されている。

- ・ 材料の引張試験で得られる応力-歪線図から設計降伏点Sy値及び設計引張強さSu値が求められる。
- ・ この設計降伏点Sy値に5/8を乗じた値と設計引張強さSu値に1/4を乗じた値を比較して小さい方を許容引張応力S値とする。

e. 延性破断の防止

延性破断の防止については、再処理施設と発電炉とで構造設計の基本的な考え方の相違に伴う評価体系の相違はあるものの、再処理施設では「公式による設計」を適用し、許容引張応力S値を用いた弾性設計を実施することとしていることから、ここでは確認対象外とする。

f. 進行性変形による破壊の防止

進行性変形(熱応力ラチェット)は、時間的に変動することのない定常応力の作用している部材に、さらに繰り返し塑性変形が重畳負荷されることによって、部材が定常応力の方向に永久変形を生じ、かつそれがしだいに成長する現象である。

発電炉のクラス1機器等は、「解析による設計」を適用し、起こり得る全ての破壊モードを考慮した評価を実施しており、進行性変形による破壊の防止についても、熱応力ラチェットと漸増崩壊の防衛としてプラント起動・停止等の設計過渡条件下において一次応力に二次応力を加えたものの変動値が設計降伏点Sy値の2倍を超えないことを確認するとともに、熱応力ラチェットの評価(一次一般膜応力に繰り返し二次応力が発生する場合の評価)についても確認して

いる。

再処理施設では、「公式による設計」を適用し、引張強さに大きい安全係数を設定した許容引張応力S値（ $5S_y/8$ ）を用いた評価を行うことで、進行性変形が生じないこと（ $2S_y$ を超えないこと）の確認も含めて十分な強度を有することを確認している。

g. 疲労破壊の防止

疲労破壊は、時間的に変動する荷重によって発生した亀裂が、荷重が繰り返し加わることで徐々に進行して破壊に至る現象であり、静的な引張強さや降伏応力よりも低い応力であっても発生するものである。その疲労限度は、一般的に設計引張強さ S_u 値との関係が経験的に次式のような関係にあることが知られている*。

$$\text{疲労限度} \approx S_u/2$$

発電炉のクラス1機器等は、「解析による設計」を適用し、起こり得る全ての破壊モードを考慮した評価を実施しており、疲労破壊についても、プラント起動・停止等の設計過渡条件下に発生するピーク応力から疲労累積係数を評価し、疲労破壊が生じないことを確認している。

再処理施設では、「公式による設計」を適用し、引張強さに大きい安全係数を設定した許容引張応力S値（ $S_u/4$ ）を用いた評価を行うことで、疲労破壊が生じないこと（疲労限度 $\approx S_u/2$ ）の確認も含めて十分な強度を有することを確認している。

注記 *：日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）」（JSME S NJ1-2012）に関する技術評価書による。

h. 座屈による破壊の防止

座屈による破壊の防止については、再処理施設と発電炉とで構造設計の基本的な考え方の相違に伴う評価体系の相違はあるものの、再処理施設では「公式による設計」を適用した設計を実施することとしていることから、ここでは確認対象外とする。

2.2 再処理施設及び発電炉における経年劣化事象に対する確認

再処理施設は設置から長期間経過していることを踏まえ、再処理施設における主な劣化事象のうち材料及び構造に係る要求事項に直接関係する劣化事象に対して、材料及び構造に係る設計上の考慮すべき事項がないか確認を実施する。

また、発電炉における高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象のうち材料及び構造に係る要求事項に直接関係する劣化事象に対して、再処理施設における想定の要否を確認し、想定される事象にあっては材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないか確認を実施する。

2.2.1 再処理施設及び発電炉における経年劣化事象

以下に、再処理施設において想定される主な劣化事象及び高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象を示す。

(1) 再処理施設において想定される主な劣化事象

共通11「既設の設備機器等に係る健全性の評価等も含めた使用前事業者検査の実施方針」における「別紙－2 設備の健全性評価について」にて、経年劣化事象等の考慮については、「運転実績，事故及び故障事例等の運転経験」，「使用環境及び設置環境」，「劣化，故障モード（経年劣化事象）」等を踏まえ抽出し，整理することとしている。

当該整理に基づき抽出した再処理施設において想定される主な劣化事象を以下に示す。

- a. 減肉（摩耗，腐食）
- b. 割れ（疲労割れ，応力腐食割れ）
- c. 絶縁（絶縁特性低下）
- d. 導通（導通不良）
- e. 信号（特性変化）
- f. コンクリートの強度低下

(2) 高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象

発電炉における「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」にて規定された高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象を以下に示す。

- a. 低サイクル疲労
- b. 中性子照射脆化
- c. 照射誘起型応力腐食割れ
- d. 2相ステンレス鋼の熱時効
- e. 電気・計装品の絶縁低下
- f. コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下

2.2.2 確認結果

(1) 再処理施設において想定される主な劣化事象

前述 2.2.1(1)項に示す各劣化事象に対して、再処理施設における材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないか確認した結果を以下に示す。

a. 減肉（摩耗，腐食）

減肉のうち摩耗については、主要回転機器（排風機，ポンプ，ディーゼル発電機等）において、設備の運転及び操作に伴い摺動部における摩耗の進行が想定されるものである。

そのため、摩耗発生部位は取替や点検ができるよう設計時に考慮されており、また保全にて状態維持していくこととしている。

再処理施設における保守・点検及び維持管理については、技術基準規則第十五条（安全上重要な施設）及び第十六条（安全機能を有する施設）における基本設計方針にて、適切な保守及び修理ができる構造とすること並びに保安規定に基づく要領類に従い、施設管理計画における保全プログラムを作成し、設備の維持管理を行うこととしていることに含まれており、新たに設計上考慮すべき事項はない。

減肉のうち腐食については、硝酸系を使用している高濃度硝酸や高温環境下等の機器において腐食の発生が想定されるものである。

そのため、再処理施設における材料及び構造に係る設計において、取り扱う放射性物質の濃度，腐食環境（硝酸濃度，使用温度）等の条件を考慮して定めた「材料選定フロー」に基づき材料選定を行うとともに、腐食性流体を内包する容器等にあつては、使用する環境を考慮した腐食速度を定め、設計寿命に基づく腐食量を設定した腐食代を考慮することとしている。また、腐食については肉厚測定等を行い、保全にて状態維持していくこととしている。

再処理施設における腐食代を含めた使用材料に係る設計上の考慮については、前述2.項における「a. 機械的強度及び化学的成分」にて接

液する腐食性流体を含めた使用条件に対して適切な材料を使用する設計とされていることに含まれており、また、維持管理については、摩耗と同様の維持管理に含まれており、新たに設計上考慮すべき事項はない。

b. 割れ（疲労割れ、応力腐食割れ）

割れのうち疲労割れについては、前述2.1.2項における「g.疲労破壊の防止」に示すとおりであり、新たに設計上考慮すべき事項はない。

また、割れのうち応力腐食割れについても、前述2.1.2項における「b.応力腐食割れ」に示すとおりであり、新たに設計上考慮すべき事項はない。

c. 絶縁（絶縁特性低下）

絶縁（絶縁特性低下）については、再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから、ここでは確認対象外とする。

d. 導通（導通不良）

導通（導通不良）については、再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから、ここでは確認対象外とする。

e. 信号（特性変化）

信号（特性変化）については、再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから、ここでは確認対象外とする。

f. コンクリートの強度低下による破壊の防止

コンクリートの強度低下による破壊の防止については、再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから、ここでは確認対象外とする。

(2) 高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象

前述 2.2.1(2)項に示す各経年劣化事象に対して、再処理施設における材料及び構造に係る設計として考慮すべき事項がないか確認した結果を以下に示す。

a. 低サイクル疲労

低サイクル疲労については、前述2.1.2項における「g.疲労破壊の防止」に示すとおりであり、新たに設計上考慮すべき事項はない。

b. 中性子照射脆化

中性子照射脆化は、中性子照射脆化が想定される材料（低合金鋼とその溶接部）が高い中性子照射量にさらされると鋼材内の原子配列が乱れ、脆化を引き起こす現象である。

発電炉では、 $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 以上*の中性子照射量に晒される低合金鋼とその溶接部を対象とし、事故時の過渡条件で冷水に晒された場合でも脆性破壊が生じないことを確認している。また、運転中の過渡条件に対して脆性破壊が発生しないよう中性子照射脆化を考慮した温度-圧力制限曲線を設定して運転管理している。

再処理施設では、照射脆化が考えられる $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 以上の中性子照射を受ける機器は存在しないため、中性子照射脆化の考慮は不要と判断している。

注記 *：日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008（社団法人 日本原子力学会）による。

c. 照射誘起型応力腐食割れ

照射誘起型応力腐食割れは、オーステナイト系ステンレス鋼において、高い中性子照射量に晒されると応力腐食割れの感受性を有するようになる現象である。

発電炉では、 $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2 (E > 0.1 \text{MeV})$ 以上*の中性子照射量に晒されるオーステナイト系ステンレス鋼製を対象とし、引張応力と中性子照射量により照射誘起型応力腐食割れが生じないことを確認している。

再処理施設では、照射誘起型応力腐食割れの感受性発生が考えられる $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2 (E > 0.1 \text{MeV})$ 以上の中性子照射を受ける機器は存在しないため、照射誘起型応力腐食割れの考慮は不要と判断している。

注記 *：日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008（社団法人 日本原子力学会）による。

d. 2相ステンレス鋼の熱時効

2相ステンレス鋼の熱時効は、オーステナイト相とフェライト相の2相から成る2相ステンレス鋼において、高温状態（475℃で特に顕著）で長時間使用すると、熱時効により材料特性（じん性）が低下する現象である。

発電炉では、250℃以上の2相ステンレス鋼*を使用する機器を対象とし、構造健全性（亀裂の安定性）を確認している。

再処理施設では、250℃以上となる2相ステンレス鋼設備が存在しないため、2相ステンレス鋼の熱時効の評価は不要と判断している。

注記 *：日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基

準：2008（社団法人 日本原子力学会）による。

e. 電気・計装品の絶縁低下

電気・計装品の絶縁低下については，再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから，ここでは確認対象外とする。

f. コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下

コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下については，再処理施設における材料及び構造に係る要求事項に直接関係するものではないことから，ここでは確認対象外とする。

3. まとめ

再処理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項について、新たに考慮すべき事項がないか、発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項並びに劣化事象として再処理施設において想定される主な劣化事象及び発電炉の高経年技術対策上着目すべき経年劣化事象に対する確認を実施した。

確認結果の整理表を第 3-1 表に示す。整理表に示すとおり、発電炉における材料及び構造に係る設計上の考慮事項及び劣化事象は、再処理施設においては想定されない事象又は再処理施設における材料及び構造に係る設計上の考慮事項として列挙した前述 2. 項の a～d に含まれているものに該当し、新たに材料及び構造に係る設計上考慮すべき事項は確認されなかった。

したがって、再処理施設における材料及び構造については、基本設計方針にて示した以下の 4 項目に対する設計方針に従い、設計・建設規格等に準拠した弾性設計を実施する。

- a. 機械的強度及び化学的成分
- b. 延性破断の防止
- c. 疲労破壊の防止（伸縮継手に限る。）
- d. 座屈による破壊の防止

第3-1表 材料及び構造に係る設計上の考慮事項の確認結果整理表

項目	考慮事項 又は 劣化事象	今回の 確認対象	判定 ①：考慮するとしている事項のため確認対象外 ②：材料・構造に直接関係しないため確認対象外 ③：想定されない事象のため新たに考慮不要 ④：他の考慮事項に含まれているため新たに考慮不要（ ）内は関係項目を示す。
材料及び構造 (発電炉)	機械的強度及び化学的成分	—	①
	応力腐食割れ	確認対象	④（機械的強度及び化学的成分）
	破壊じん性	確認対象	④（機械的強度及び化学的成分）
	非破壊試験	確認対象	④（延性破断の防止* ¹ ）
	延性破断の防止	—	①
	進行性変形による破壊の防止	確認対象	④（延性破断の防止）
	疲労破壊の防止	確認対象	④（延性破断の防止）
	座屈による破壊の防止	—	①
主な劣化事象 (再処理)	減肉（摩耗）	確認対象	④（安全機能を有する施設* ² ）
	減肉（腐食）	確認対象	④（機械的強度及び化学的成分）
	割れ（疲労割れ）	確認対象	④（延性破断の防止）
	割れ（応力腐食割れ）	確認対象	④（機械的強度及び化学的成分）
	絶縁（絶縁特性低下）	—	②
	導通（導通不良）	—	②
	信号（特性変化）	—	②
	コンクリートの強度低下	—	②
高経年技術対策 (発電炉)	低サイクル疲労	確認対象	④（延性破断の防止）
	中性子照射脆化	確認対象	③
	照射誘起型応力腐食割れ	確認対象	③
	2相ステンレス鋼の熱時効	確認対象	③
	電気・計装品の絶縁低下	—	②
	コンクリートの強度低下 及び遮蔽能力低下	—	②

注記 *1：耐圧試験による確認も含むものとする。

*2：技術基準規則第十五条（安全上重要な施設）及び第十六条（安全機能を有する施設）における基本設計方針における考慮事項が該当する。