

6. 1次冷却材管4B加圧器スプレイ管台の耐震評価について

6. 1 概要

本資料は、1次冷却材管4B加圧器スプレイ管台が十分な耐震性を有することを確認するため、設計確認として実施した耐震評価についてまとめたものである。評価の結果、発生値は許容値を満足しており、地震動に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

適用規格は、次のとおりである。

- (1) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME S NC1-2012)
(以下「JSME S NC1」という。)
- (2) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格」(JSME S NJ1-2012)
- (3) 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程」(JEAC4601-2008)
(以下「JEAC4601」という。)
- (4) 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」
(JEAG4601・補-1984)
- (5) 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1987)
- (6) 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1991 追補版)
(以降、「JEAG4601」と記載しているものは上記3指針を指す。)

6. 2 記号の説明

本資料で用いる記号については、次に定義する。

記号	単位	定義
MIN (A、B)	—	A又はBの2つの値のうち小さい方の値
S_m	MPa	設計応力強さ
S_u	MPa	設計引張強さ
D	—	死荷重
P	—	地震と組み合わせべきプラントの運転状態（冷却材喪失事故後の状態は除く）における圧力荷重
M	—	地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態（冷却材喪失事故後の状態は除く）で設備に作用している機械的荷重
P_L	—	冷却材喪失事故直後を除き、その後に生じる圧力荷重
M_L	—	冷却材喪失事故直後を除き、その後に生じる死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重
S_d	—	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力
S_s	—	基準地震動 S_s により定まる地震力
C_s	—	JSME S NC1の供用状態C相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態
D_s	—	JSME S NC1の供用状態D相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態

6. 3 評価方針

4 B加圧器スプレイ管台の評価では、「6. 3. 1 荷重の組合せ及び許容応力」にて設定した荷重の組合せ及び許容限界に基づき、「6. 4 荷重条件」に示す荷重によって発生する応力等が許容限界内に収まることを確認する。

6. 3. 1 荷重の組合せ及び許容応力

荷重の組合せ及び許容応力を第3-1表に示す。また、材料の設計応力強さ及び設計引張強さを第3-2表に示す。なお、地震と組み合わせる運転状態は とし、許容応力の設定に用いる温度は、 時の最高温度とする。

6. 3. 2 内圧による応力

内圧による応力は、有限要素法及び規格式により算出する。有限要素解析モデル図を第3-1図に示す。

6. 3. 3 外荷重による応力

外荷重による応力は、はり理論及びバイラード法により算出する。

6. 3. 4 地震荷重の変動回数

疲労評価に用いる地震荷重の変動回数は、以下のとおりとする。

S_d 地震：300回

S_s 地震：200回

: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。

第3-1表 荷重の組合せ及び許容応力

項目 区分	許容 応力 状態	荷重の組合せ	許 容 限 界			
			一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力
S	C _s	D+P+M+S _d	(注1) 1.2S _m	(注2) 左欄のα倍の値	(注3) 3S _m 〔 S _d 又はS _s 地震動のみ による応力 振幅につい て評価する。 〕	(注4、5) S _d 又はS _s 地震動のみによる 疲労解析を行い、供用状態 A,Bにおける疲労累積係数と の和を1.0以下とする。
	D _s	(注6) D+P _L +M _L +S _d D+P+M+S _s	(注1) MIN (2/3S _u 、2.4S _m)	(注2) 左欄のα倍の値		

(注1) オーステナイト系ステンレス鋼に適用する許容限界を示す。

(注2) αは応力解析における純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は1.5のいずれか小さい方の値とする。

(注3) 3S_mを超えるときは簡易弾塑性解析を行う。

(注4) JSME S NC1 PVB-3140(6)を満たすときは、疲労解析を行うことを要しない。ただし、「応力の全振幅」は「S_d又はS_s地震動による応力の全振幅」と読み替える。

(注5) 供用状態A,Bにおいて疲労解析を要しない場合は、地震動のみによる疲労累積係数が1.0以下とする。

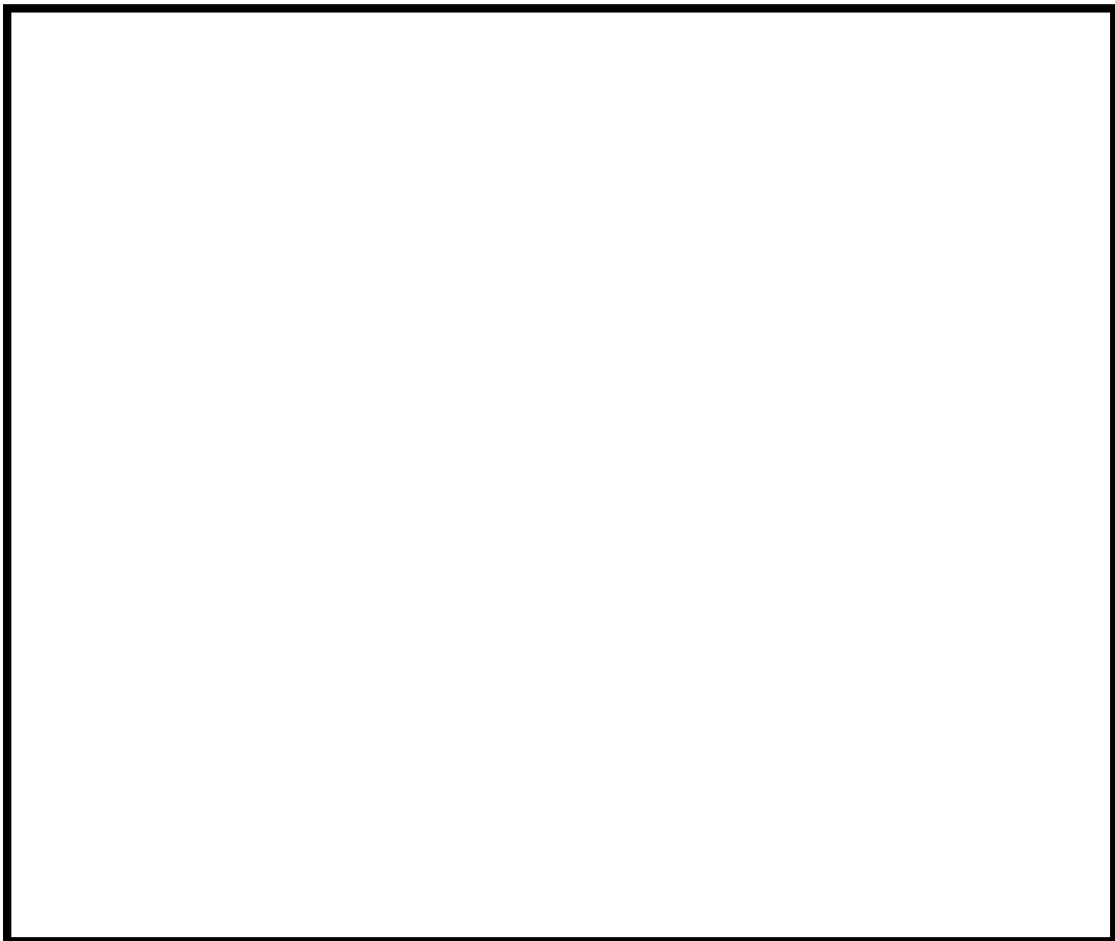
(注6) 冷却材喪失事故後の状態における圧力荷重は、に比べて十分小さいため考慮しない。また、冷却材喪失事故後の状態で設備に作用する機械的荷重はないため考慮しない。

: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。


第3-2表 設計応力強さ及び設計引張強さ

(単位：MPa)

材 料	設計応力強さ等の種類	温度条件	使用箇所
SUSF316	S_m	117	4 B 加圧器スプレイ管台
	S_u	427	
SCS14A	S_m	117	27.5 ^{IN} ID主管 (コールドレグ)
	S_u	420	



第3-1図 有限要素解析モデル図

 :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。

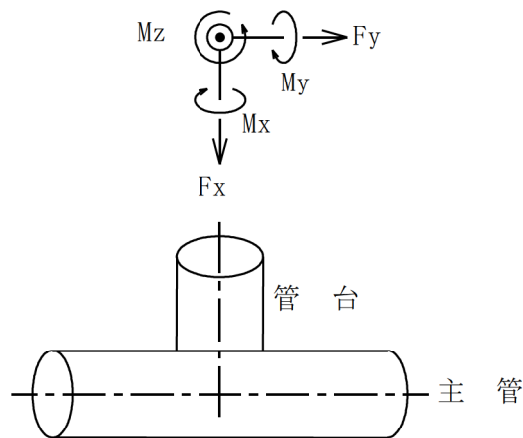
6. 4 荷重条件

管台に作用する荷重として、加圧器スプレイ配管における地震応答解析から得られた反力を第4-1表に示す。

第4-1表 管台に作用する荷重

箇 所	荷重の種 類		軸 力 (kN)			モーメント (kN・m)		
			Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
4B 加圧器 スプレイ管台	自重							
	Ss地震	一次						
		一次+二次						
	Sd地震	一次						
		一次+二次						

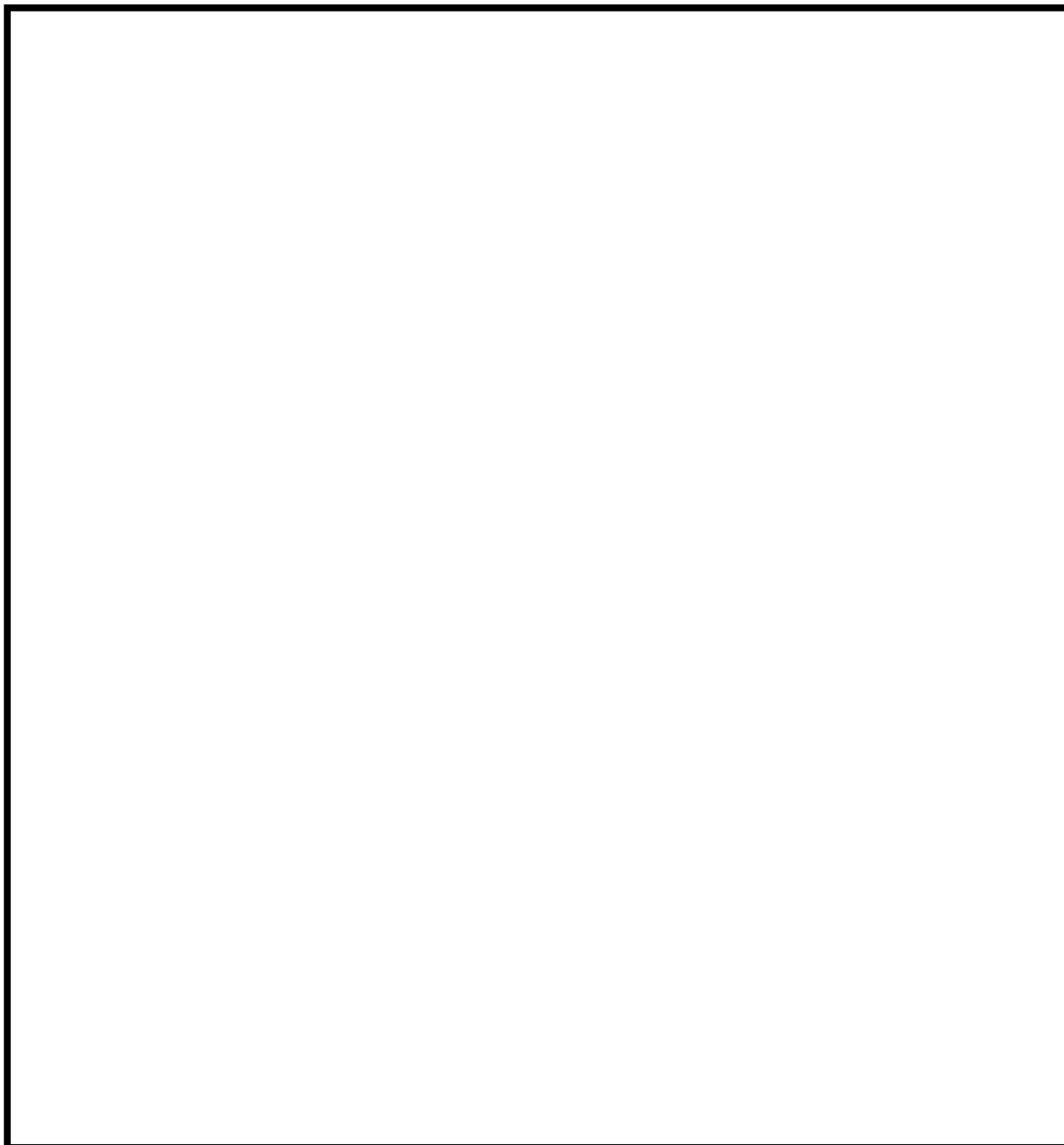
(注) 荷重の方向は以下による。




: 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。

6. 5 評価結果

4 B加圧器スプレイ管台の形状、寸法、材料及び評価点を第5-1図に、評価結果の概要を第5-1表及び第5-2表に示す。発生値は許容値を満足しており、地震動に対して十分な構造強度を有していることを確認した。



第5-1図 形状、寸法、材料及び評価点

: 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。

第5-1表 弾性設計用地震動 S_d による評価結果 (D+P+M+Sd)

評価部位	応力分類	発生値	許容値	備考
4 B加圧器 スプレイ管台	一次一般膜応力強さ (MPa)	118	140	【評価点2, 4】
	一次膜+一次曲げ応力強さ (MPa)	161	196	【評価点4】
	一次+二次応力強さ (MPa)	314	351	【評価点4】
	疲労評価	0.002	1.0	【評価点6】

第5-2表 基準地震動 S_s による評価結果 (D+P+M+Ss)

評価部位	応力分類	発生値	許容値	備考
4 B加圧器 スプレイ管台	一次一般膜応力強さ (MPa)	155	280	【評価点2, 4】
	一次膜+一次曲げ応力強さ (MPa)	214	393	【評価点4】
	一次+二次応力強さ (MPa)	557	351	【評価点4】(注1)
	疲労評価	0.137	1.0	【評価点6】

(注1) 簡易弾塑性解析を実施し、疲労評価により発生値が許容値を満足することを確認している。

6. 6 その他

応力評価の手法については、新規制一括工認における管台の応力評価に適用されているものである。

また、新規制一括工認において、コールドレグの管台である蓄圧タンク注入管台及び充てん管台は、当該管台と同様、一次＋二次応力強さの発生値が許容値を上回っており、簡易弾塑性解析を実施し、疲労評価により発生値が許容値を満足することを確認している。

以上のことから、当該管台の評価は特異なものではないと考える。

7. 原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対する LBB 成立性評価について

原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対する LBB 成立性評価結果に関する説明書において、原子力発電所配管破損防護設計技術指針（以下「JEAG4613」という）に基づき、次ページ以降に記載のとおり、LBB 成立性評価を実施している。

なお、「大飯発電所 3 号機 加圧器スプレイライン配管溶接部での事象への対応について（2 月 12 日 公開会合）」において、今回、加圧器スプレイ配管で見つかった亀裂は、以下の理由から特異な事象であると判断している。

- ▶これまでの ISI で、当社においては 11 プラントの安全上重要な配管に対し、10 年（高経年プラントは 7 年）の周期で、延べ約 3,000 箇所超音波探傷検査を実施してきており、今回の事象を除いて、溶接部近傍の硬化に起因する粒界割れは確認されていない。
- ▶また国内外の PWR プラントにおいても、これまで同様の発生事例の報告はない。
- ▶今回事象を受け、既に大飯 3,4 号機においては、同様の事象の可能性のある部位全て（80 箇所）に対し追加検査を実施し、欠陥がないことを確認している。
- ▶当社プラントの内、最も運転時間の短い大飯 3 号機（約 17 万時間）で生じたものであり、それよりも運転時間の長い美浜 3 号機、高浜 1～4 号機でも、至近 3 定検分の ISI*（109 箇所）及び今定検中における本事象と同じ箇所の検査（10 箇所）において、欠陥がないことを確認している。

※：運転時間で約 20 万時間が経過した以降の検査

上記のとおり、本事象は特異であると判断しているが、メカニズムがすべて明らかにはなっていないため、本事象の原因である「過大な溶接入熱」、「形状による影響」を踏まえ、それぞれについて類似性の高い箇所へ水平展開を行う。

(1)資料6 別添1「原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対するLBB成立性評価結果に関する説明書」(抜粋)

5. LBB成立性評価の前提条件の確認

前章まででLBB成立性評価について記載したが、本章では、LBB概念を適用する前提条件となっている保安規定にて定められた運転管理面及び構造健全性についての要求事項に適合していることを示す。

5.1 運転管理

5.1.1 漏えいを監視する装置

原子炉冷却材圧力バウンダリ配管から原子炉格納容器内への漏えいが生じたときに、 $0.23 \text{ m}^3/\text{h}$ (1 gpm) の漏えいを1時間以内に確実に検出して自動的に警報を発信する目的で以下に示す3種類の漏えいを監視する装置が設置されている。

漏えいを監視する装置の構成並びに計測範囲及び警報動作範囲については、平成29年8月25日付け原規発第1708254号にて認可された工事計画の資料23「原子炉格納容器内の一次冷却材の漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」において説明する。

(1) 凝縮液量測定装置

原子炉冷却材圧力バウンダリ配管からの漏えい水のうち蒸気分の凝縮液を検知する装置

(2) 炉内計装用シングル配管室ドレンピット漏えい検出装置

原子炉冷却材圧力バウンダリ配管からの漏えい水のうち、炉内計装用シングル配管室へ流入する原子炉容器周りからの液体分を検出する装置

(3) 格納容器サンプ水位上昇率測定装置

炉内計装用シングル配管室以外の原子炉容器周り及びループ室の液体分並びに原子炉冷却材圧力バウンダリ配管からの蒸気分の凝縮液を合わせたすべての漏えい水を検知する装置

5.1.2 原子炉冷却材圧力バウンダリの漏えい管理

原子炉運転中、漏えいを監視する装置により原子炉冷却材圧力バウンダリからの漏えい量を監視し、 $0.23 \text{ m}^3/\text{h}$ (1 gpm) を超える漏えいを検知した場合は速やかに通常の原子炉停止操作を行う。

2020年10月20日付け関原発第356号にて申請した
「設計及び工事計画認可申請書」より抜粋

5.2 構造健全性

5.2.1 品質管理

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の品質確保を目的とし、以下のとおり規格・基準に適合した材料の選定、設計、製作、試験、検査を行うことにより、構造健全性を確認する。

(1) 材料の選定

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の材料は、JSME 及び材料規格に適合するよう選定しており、具体的には、SCS14A、SUS316TP 及び SUSF316 を使用している。

(2) 構造設計

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の構造は、JSME のクラス 1 配管に関する規定 (PPB-1000～PPB-5000) に適合するよう設計している。

(3) 製作

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の溶接は、認可された溶接施工法及び昭和 45 年通商産業省令第 81 号、改正昭和 60 年 10 月 31 日通商産業省令第 65 号「電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令」の第 1 種管に関する規定 (第 36 条、第 37 条)、日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」(JSME S NB1-2007) のクラス 1 配管に関する規定 (N-5010～N-5140) 又は日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格 (2012 年版 (2013 年追補を含む。))」(JSME S NB1-2012/2013) のクラス 1 配管に関する規定 (N-5010～N-5130) ^(注 1)に基づき行っている。

(注 1) 今回の申請範囲に適用する。

補-57 参照

(4) 試験・検査

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の供用前及び供用期間中の試験・検査等は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」(JSME S NA1-2008) 又は日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版)」(2013 年追補及び 2014 年追補を含む。) (JSME S NA1-2012/2013/2014) ^(注 1)に基づき実施している。

(注 1) 今回の申請範囲に適用する。

2020 年 10 月 20 日付け関原発第 356 号にて申請した
「設計及び工事計画認可申請書」より抜粋

5.2.2 損傷防止対策

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管については、前述の5.2.1で記載する品質管理、供用前及び供用期間中検査計画に従って製作・保守し、配管の損傷防止対策を講じている。さらに、JEAG4613を適用するためには応力腐食割れ（以下「SCC」という。）及び高サイクル熱成層化現象の発生防止が前提条件となるので、以下にこれらへの適合性を示す。

(1) SCCの発生防止対策

SCCは、材料（材料の鋭敏化）、応力（溶接引張残留応力）、環境（高溶存酸素）の3要因が重畳することにより発生するものであり、SCCの発生防止対策を実施しておりLBB概念適用の前提条件に適合している。

クラス1機器のSCCの発生防止対策については、資料3「クラス1機器及びクラス1支持構造物の応力腐食割れ対策に関する説明書」において説明する。

補-57.58 参照

(2) SCCの損傷防止対策

今回、有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW 溶接^{※1}による過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）と形状による影響が重畳したと考えられることから、今後、溶接時の大入熱の影響又は形状による影響を踏まえ、それぞれについて類似性の高い溶接部に対して、継続的な超音波探傷検査により有意な指示がないことを確認する。

(3) 高サイクル熱成層化現象の発生防止対策

高サイクル熱成層化現象については、原子炉冷却材圧力バウンダリ配管に対して日本機械学会「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」（JSME S 017-2003）を適用し、閉塞分岐管滞留部の熱成層化現象による疲労損傷の可能性がなく、問題ないことを確認しており、LBB概念適用の前提条件に適合している。

配管の高サイクル熱成層化現象に関する評価については、資料7「流体振動又は温度変動による損傷の防止に関する説明書」において説明する。

※1：初層のみTig溶接を行い、以降は被覆アーク溶接を実施する溶接施工方法

2021年2月16日付け関原発第455号にて申請した
「設計及び工事計画認可申請書の一部補正」より抜粋

<LBB 前提条件における検査の整理>

原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対する LBB 成立性評価結果に関する説明書において、品質管理としての試験・検査と損傷防止対策としての継続的な超音波探傷検査の整理について、以下のとおり示す。

JEAG 4613 抜粋

原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管に対する
L B B 成立性評価結果に関する説明書 抜粋

5.2 構造健全性

5.2.1 品質管理

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の品質確保を目的とし、以下のとおり規格・基準に適合した材料の選定、設計、製作、試験、検査を行うことにより、構造健全性を確認する。

(4) 試験・検査

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管の供用前及び供用期間中の試験・検査等は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」(JSME S NA1-2008) 又は日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版)」(2013 年追補及び 2014 年追補を含む。) (JSME S NA1- 2012/2013/2014) (注 1) に基づき実施している。

(注 1) 今回の申請範囲に適用する。

JEAG における前提条件に記載のある品質管理として、維持規格に基づき PSI・ISI を実施している。

5.2.2 損傷防止対策

原子炉冷却材圧力バウンダリに属するステンレス鋼管については、前述の 5.2.1 で記載する品質管理、供用前及び供用期間中検査計画に従って製作・保守し、配管の損傷防止対策を講じている。さらに、JEAG4613 を適用するためには応力腐食割れ (以下「SCC」という。) 及び高サイクル熱成層化現象の発生防止が前提条件となるので、以下にこれらへの適合性を示す。

(2) SCC の損傷防止対策

今回、有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW 溶接※1による過大な溶接入熱 (若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む) と形状による影響が重畳したと考えられることから、今後、溶接時の大入熱の影響又は形状による影響を踏まえ、それぞれについて類似性の高い溶接部に対して、継続的な超音波探傷検査により有意な指示がないことを確認する。

※1: 初層のみ Tig 溶接を行い、以降は被覆アーク溶接を実施する溶接施工方法

本事象の原因である「過大な溶接入熱」、「形状による影響」を踏まえ、それぞれについて類似性の高い箇所に対しては 3 定検の間、毎定検検査を実施し、有意な指示がないことを確認することを損傷防止対策としており、上記の従来から実施している PSI・ISI とは分けて整理している。

☐: 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。

<SCC 損傷防止対策の妥当性>

本申請においては、JEAG4613 における LBB 概念適用の前提条件である「品質管理」としての通常の PSI、ISI に加え、「損傷防止対策」として以下の対応を行う。

本事象の原因である「過大な溶接入熱」、「形状による影響」を踏まえ、類似性の高い箇所（14 箇所）に対して 3 定検の間、毎定検、超音波探傷検査を実施し、今回と同様に判定基準※を満足しない欠陥が検出された場合は、取替を実施する運用とする。なお、検査対象・検査頻度は、知見拡充や研究結果を踏まえ検討していく。

なお、JEAG4613 においては、「LBB 概念の成立性条件として、ISI の効果は考慮しないものとする。」との記載があるが、これは「ISI の効果が期待できないということではなく、評価上保守性を考慮したものである。^{注3}」と記載されており、「注 3 ISI により欠陥がない事を確認されていても、LBB 概念適用に際しては欠陥が存在すると仮定して評価を行う」の記載のとおり、LBB 成立性評価では、ISI により欠陥のないことが確認されていても、その結果に基づき欠陥想定をする（例えば、評価用亀裂を小さくする）ことはしないことを定めたものであり、損傷防止対策として ISI 等検査を前提にすることを認めていないものではない。

また、JEAG4613 においては、損傷防止対策として設備対策（取替、緩和）だけでなく、水質管理といった運用管理が認められており、対象鋼種を拡大した JSME の配管破損防護設計規格（JSME S ND1-2002）では炭素鋼のエロージョン／コロージョンに対して、損傷防止対策として肉厚管理を前提としたものとしている。（参考 1 2）

以上のことから、LBB 概念適用の前提条件となる SCC 損傷防止対策として、上記の検査及び取替えによる運用は妥当と考える。

※：DAC20%以下または DAC20%を超える場合は、その欠陥が割れその他の有害な欠陥でないこと

(2)資料3 「クラス1機器の応力腐食割れ対策に関する説明書」 (抜粋)

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」(以下「技術基準規則」という。)第17条、第18条及びそれらの「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」(以下「解釈」という。)に基づき、クラス1機器及びクラス1支持構造物が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説明するものである。

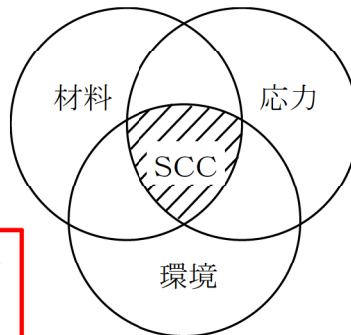
2. 基本方針

申請範囲におけるクラス1機器及びクラス1支持構造物は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME S NC1-2001)及び(JSME S NC1-2005)【事例規格】発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」(NC-CC-002)(以下、「JSME事例規格」という。)に基づき、応力腐食割れ発生環境下に対する適切な耐食性を有する材料の使用、運転中の引張応力を軽減する設計及び製作時の引張残留応力を低減させる工法や発生した引張残留応力の低減対策の実施、並びに保安規定に基づく水質管理等の応力腐食割れ発生の抑制を考慮した設計とする。

3. 応力腐食割れ発生の抑制策について

(1) 応力腐食割れ発生の前提条件について

応力腐食割れ(SCC)は、材料が特定の応力条件と環境条件にさらされたときに割れを生じる現象であり、下図に示すとおり、材料・応力・環境の3要因が重畳した場合に発生する。



また、過大な溶接入熱による材料表層近傍における特異な硬化へ配慮する。

補-61~63 参照

一般的に応力腐食割れを抑制するためには、以下に示すように3要因のうちの1要因以上を取り除く必要がある。

- a. 応力腐食割れ発生環境下において、応力腐食割れ発生の可能性が高い材料の選定を避ける。
- b. 引張応力を軽減する設計と製作時の引張残留応力を低減させる工法や発生した引張残留応力の低減処理技術を採用する。
- c. 応力腐食割れの発生に寄与する腐食環境を緩和する設計と水質管理技術を採用する。

2020年10月20日付け関原発第356号にて申請した
「設計及び工事計画認可申請書」より抜粋

(2) 申請範囲における応力腐食割れ発生の抑制策について

申請範囲におけるクラス1機器及びクラス1支持構造物は、以下を考慮することにより応力腐食割れの発生を抑制している。

a.配管及び弁

(a)材料選定

補-64,65 参照

当該部に使用する材料は、炭素含有量を制限 ($C \leq 0.05\%$) したSUS316系材料であり、応力腐食割れの感受性が低く、これまでもPWRの1次系高温環境下における応力腐食割れ対策材料として多く使用されている。

補-66 参照

今回、有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW溶接^{*1}による過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）と形状による影響が重畳したことで、表層近傍において特異な硬化が生じたものと考えられることから、工事範囲において、過大な初層溶接入熱とならない全層Tig溶接^{*2}を用いる。なお、配管内表面の機械加工として加工硬化の低減を図る加工方法を用いる。

(b) 発生応力

補-67 参照

当該部は、運転中の引張応力が増大する設計及び製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けて設計し、溶接施工に関しては、日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格(JSME S NB1-2012/2013)」に基づき十分な品質管理を行う。

補-66 参照

今回、有意な指示が認められた箇所については、Tig+SMAW溶接^{*1}による過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）により熱影響部に通常よりも大きな引張応力が生じていた可能性が考えられることから、工事範囲において、過大な初層溶接入熱とならない全層Tig溶接^{*2}を用いる。なお、配管内表面の機械加工として加工硬化の低減を図る加工方法を適用できない部分については、引張残留応力の改善を図るバフ研磨を行う。

(c)環境

定格出力運転時の1次冷却材中の溶存酸素及びその他の不純物濃度が十分低くなるよう保安規定に基づく水質管理を行う。

また、塩化物及びフッ化物混入防止対策を行い、塩化物及びフッ化物に起因する応力腐食割れの発生を防止する。

b.支持構造物

当該部の支持構造物については、1次系高温環境に接液しないこと並びに塩化物及びフッ化物混入防止対策を行い、応力腐食割れの発生を防止している。

※1：初層のみTig溶接を行い、以降は被覆アーク溶接を実施する溶接施工方法

※2：全層にわたりTig溶接を実施する溶接施工方法

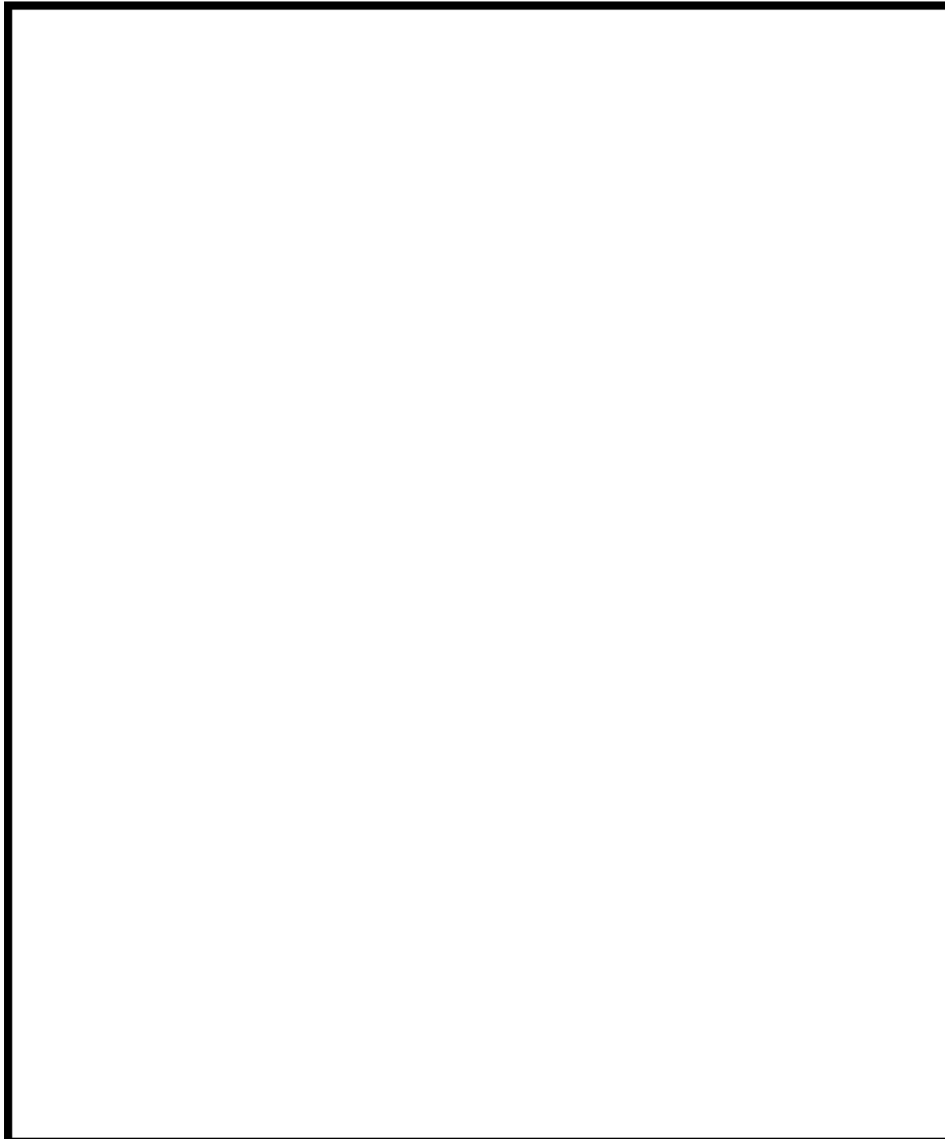
2021年2月16日付け関原発第455号にて申請した
「設計及び工事計画認可申請書の一部補正」より抜粋


〈JSME 事例規格と今回の取替工事における SCC 抑制に対する考慮事項との関連〉

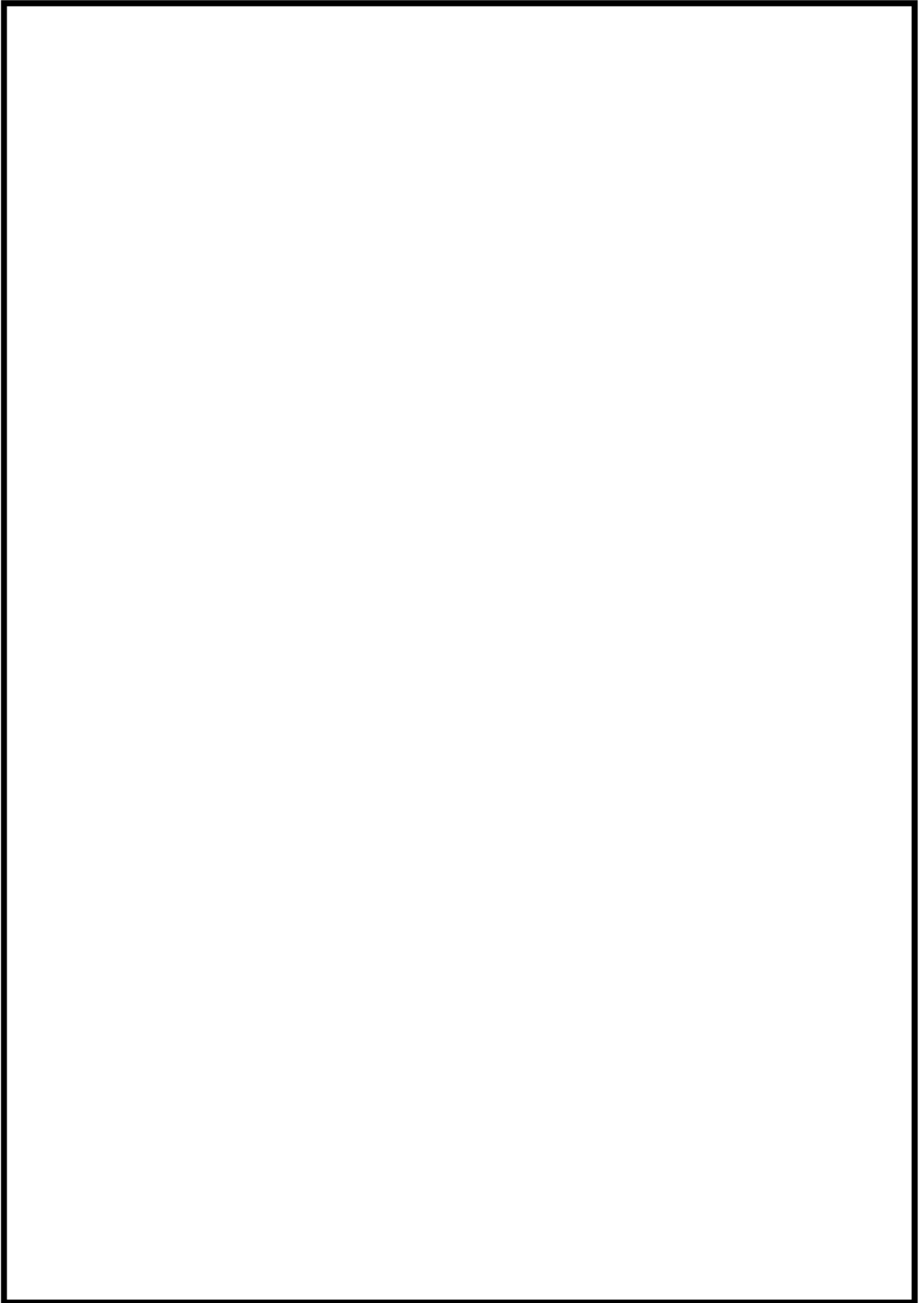
技術基準規則 17 条 (材料及び構造) において、クラス 1 機器又はクラス 1 支持構造物は、「使用中の応力その他の仕様条件に対する適切な耐食性を含む」ことが求められており、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME S NC1-2001) 及び (JSME S NC1-2005) 【事例規格】 発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」(NC-CC-002) によることと規定されている。


JSME 事例規格 付録 2 フローについて、今回の取替工事における SCC 抑制に対し、以降に示すとおり、材料の選定および保安規定に基づく溶存水素濃度の制限 ($15\sim 50\text{cm}^3\text{-STP/kg}\cdot\text{H}_2\text{O}$) を行っており、環境、材料に関する対策を実施していることから、SCC は発生しにくいと考えているが、事例規格に記載の応力低減/改善のうち、当該溶接部に対し合理的に実施可能な対策である低応力設計、冷間加工低減設計、残留応力低減熱処理、強表面加工の回避、低残留応力施工及び表面研磨を採用するものである。

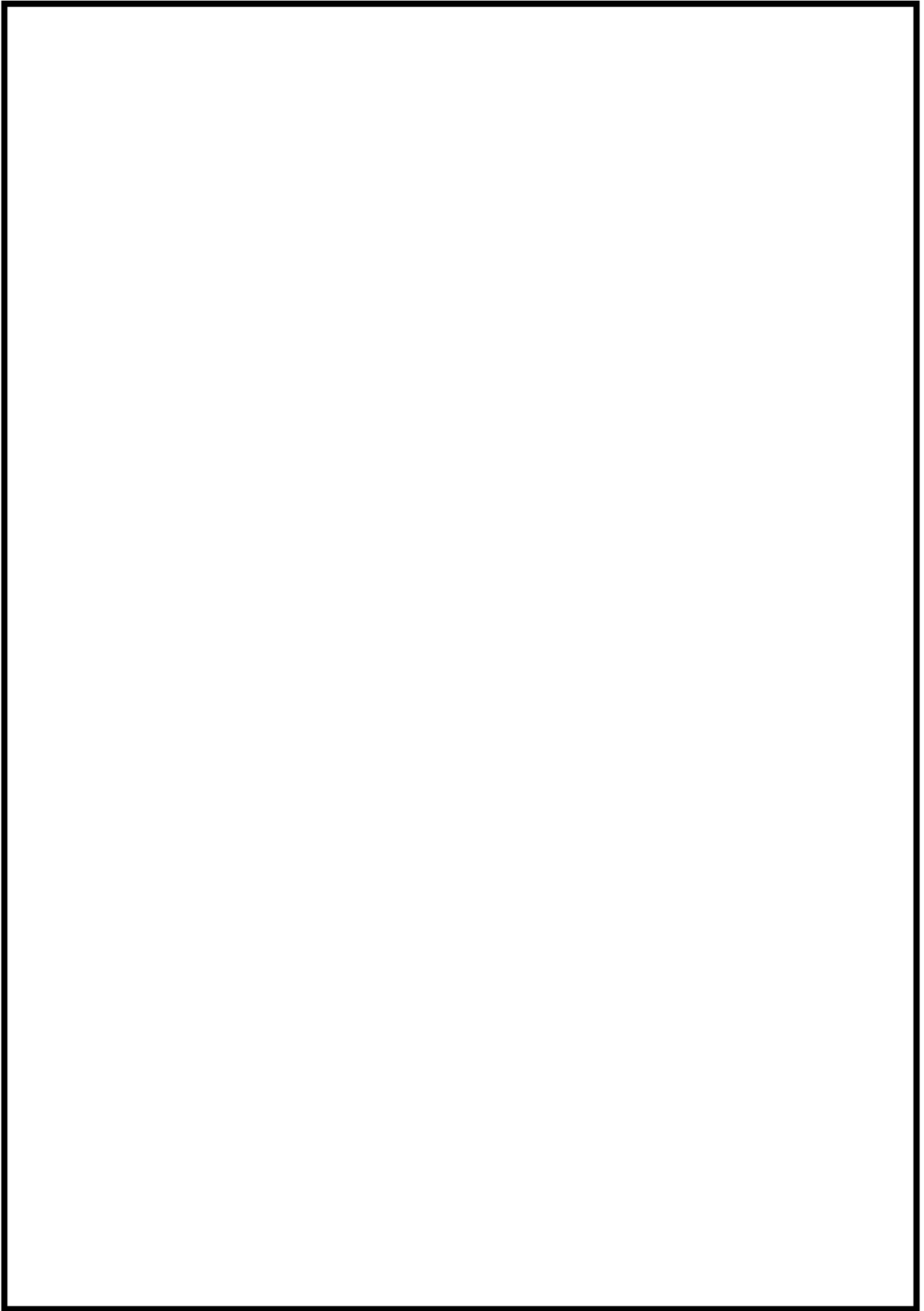
なお、今回の加圧器スプレイライン配管溶接部に関わる対応としては、配管取替にあたっては、過大な初層溶接入熱とならない全層 Tig 溶接を用いることから、同様の事象が発生しにくいと考えている。




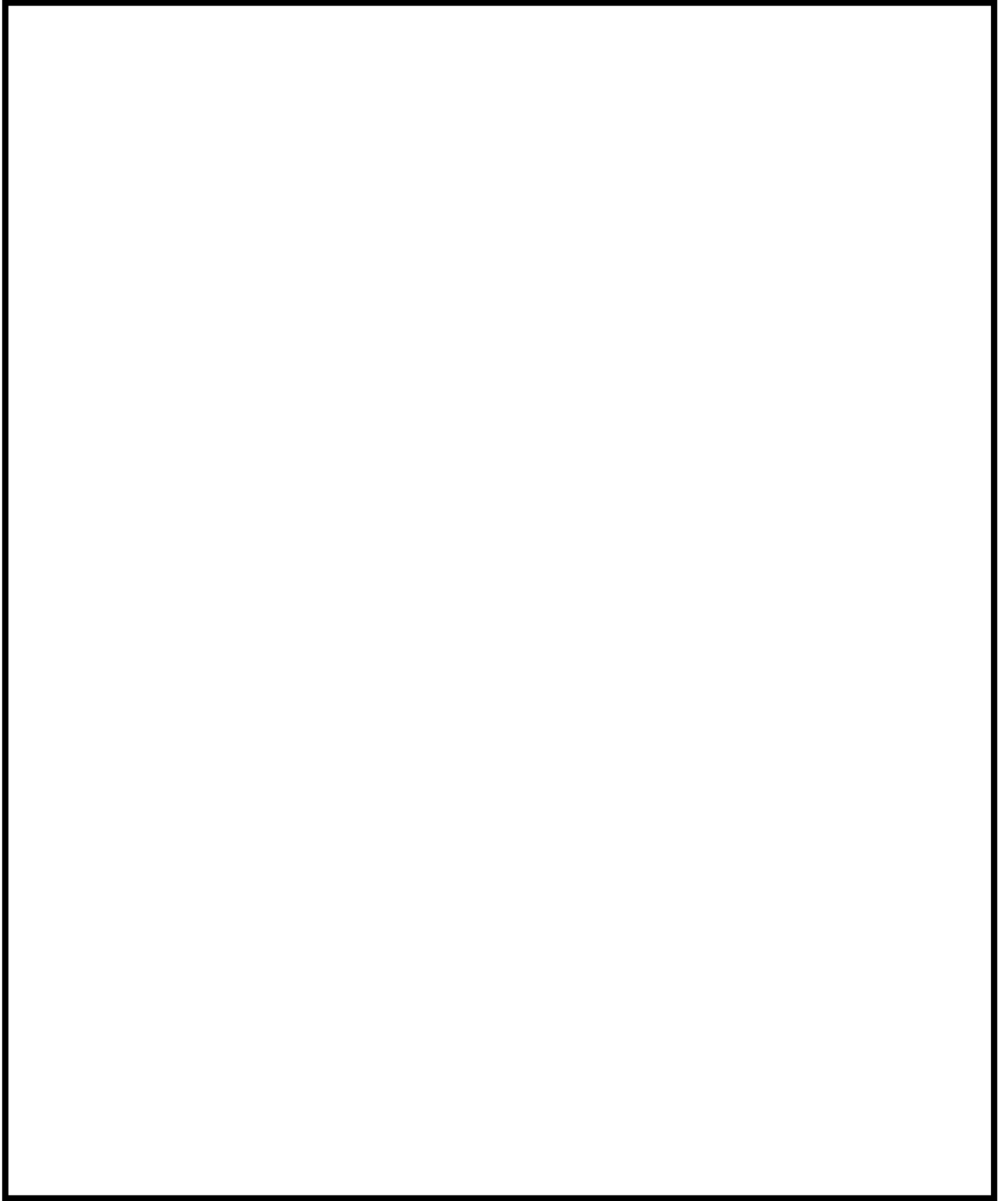
 :枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

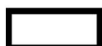


 :枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 :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。



 : 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。

<SUS316 (C≤0.05%) 採用理由>

本工事においては、同材料、同仕様（外径、厚さ）の配管取替を実施することとしており、使用する材料は、炭素含有量を制限（ $C \leq 0.05\%$ ※）した SUS316 系材料であり、応力腐食割れの感受性が低く、これまでも PWR の 1 次系高温環境下における応力腐食割れ対策材料として多く使用されているものである。

なお、原子力発電所配管破損防護設計技術指針（以下「JEAG4613」という）において O2SCC 対策として挙げられている SUS316NG（ $C \leq 0.02\%$ ）材は、発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版）において、「沸騰水型原子炉で生じた配管の応力腐食割れに対し、対策材として開発されたもので、加圧水型原子炉（PWR）環境での耐食性は確認されていないことから、耐食性目的での適用用途は沸騰水型原子炉に限定した」と記載されている。（参考 1 1）


一方、BWR プラントの水質環境に比べ、PWR プラントでは溶存酸素濃度及び塩化物イオン濃度が低く管理されていることから O2SCC が発生し難い環境であり（参考 1 1-1）、これまで国内 PWR プラントの水質環境下において、損傷事例は確認されていないこと、また、今回の加圧器スプレィ配管溶接部の破面調査の結果、金属組織は段状組織を呈しており、O2SCC によくみられる鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められなかったことから、応力腐食割れの感受性の低い SUS316 材（炭素含有量 0.08%以下）については、O2SCC の懸念はないと考えているが、念のため炭素含有量を 0.05%以下に制限した SUS316 材を用いる。

※次ページに示す試験結果は、腐食環境下で試験片に連続的な歪みを付与し、試験片を強制的に破断（SERT TEST）させ、SCC 感受性を有すると破面が粒界割れとなる特徴を使って SCC 感受性を評価したものである。

図 1 の縦軸「 A_{sc}/A_0 (%) (SERT TEST)」は、破断後の破面観察にて、破面の全断面積（ A_0 ）と SCC 破面の面積（ A_{sc} ）との比を SCC 感受性パラメータとして定義しているものであり、値が大きいと SCC 感受性を高いことを示している。また、横軸「 P_a ($C/cm^2 \cdot GBA$)」は、鋭敏化して結晶粒界（以下、粒界という。）に Cr 欠乏層が生じると粒界での金属溶解が促進される特徴を使って、電解液中で電圧を加えた際の試験片の金属溶解量（＝電気量（C）として測定）を単位粒界面積（ $cm^2 \cdot GBA$ ）あたりに換算し、鋭敏化度として定義したものである。

PWR 水質の酸素飽和環境下においては、SUS316 材の O2SCC 発生の感受性に対する鋭敏化しきい値は $2C/cm^2 \cdot GBA$ であり、また、炭素含有量と溶接による鋭敏化度の関係を調査した結果から、炭素含有量を 0.05%以下に制限することで鋭敏化しきい値 $2C/cm^2 \cdot GBA$ を下回ることが確認されていることから、炭素含有量を 0.05%に制限している。

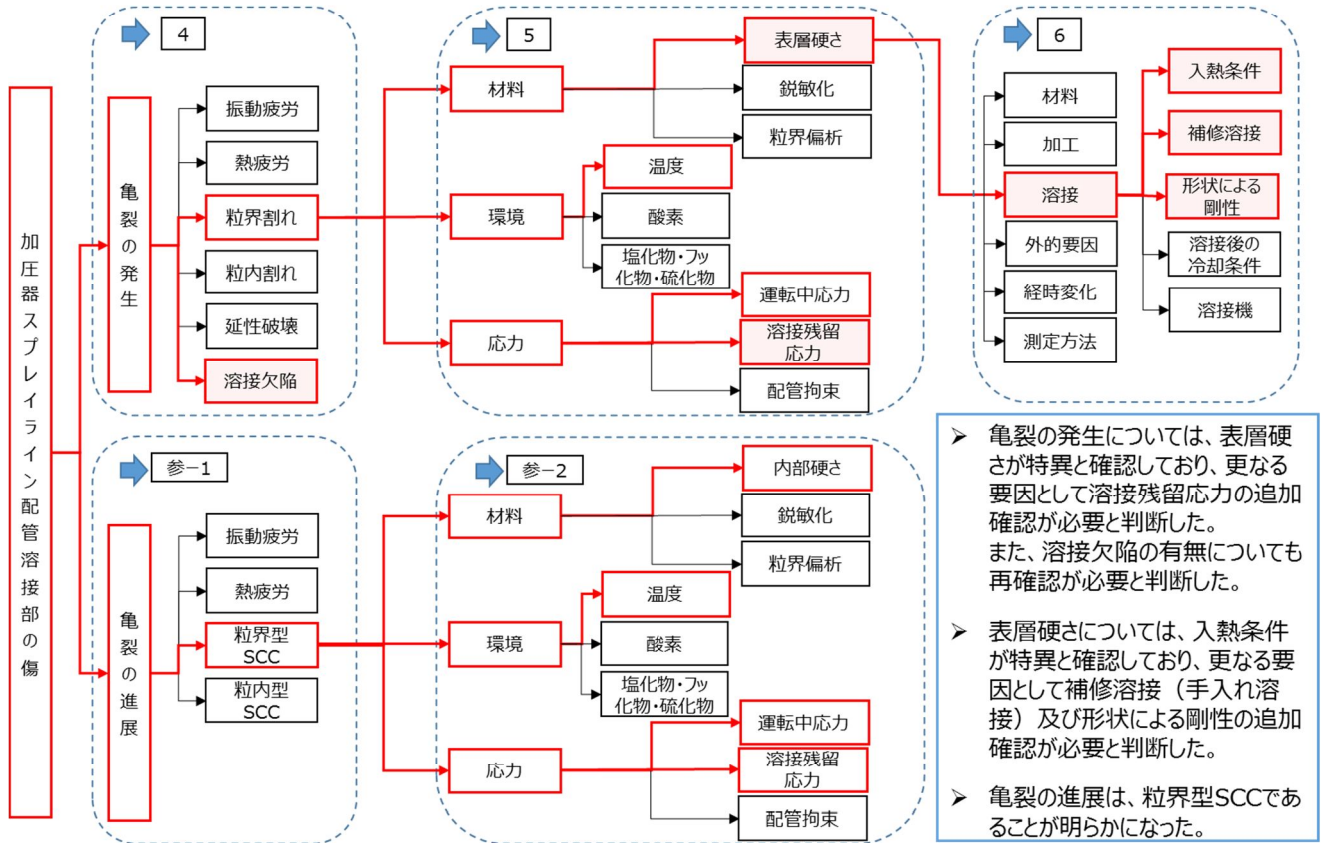


 :枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

<本事象の対策の整理>

本事象に対しては、「大飯発電所3号機 加圧器スプレイライン配管溶接部での事象への対応について（1月29日・2月4日・2月12日 公開会合）」において、以下のFT図を用いて要因分析を行い、亀裂発生及び亀裂進展原因を整理している。

本事象の亀裂要因の特定について（概要）



[亀裂発生及び亀裂進展原因]

- ・調査の結果、過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）と、形状による影響が重畳したことで、表層近傍において特異な硬化が生じたものと考えられる。
- ・この硬化部に高い応力が影響したことにより、亀裂が発生したものと考えられるが、メカニズムがすべて明らかにはなっておらず、PWR1 次系の配管溶接部では、これまで同様の事象が生じていないことから、今後知見の拡充に努める。

以上のとおり、今回の特異な事象について「材料」、「環境」、「応力」因子に分けて要因分析を行った結果を踏まえ、表層近傍における特異な硬化は「材料」因子、硬化部の高い応力は「応力」因子として整理している。溶接入熱は硬さ及び応力に影響を与える要因であることから、今回の工事範囲に用いる過大な初層溶接入熱とならない全層 TIG 溶接について、「材料」、「応力」の両者への対策であると整理している。

なお、材料で整理することに関して、事例規格において、材料に関する BWR プラントの例であるが、XX-2211.1(4)にオーステナイト系ステンレス鋼における溶接および高温での加工により鋭敏化した場合の事例があることから、今回のスプレイ配管の有意な指示に関する対応として、TIG 溶接の採用を材料選定で整理することが妥当であると考えます。

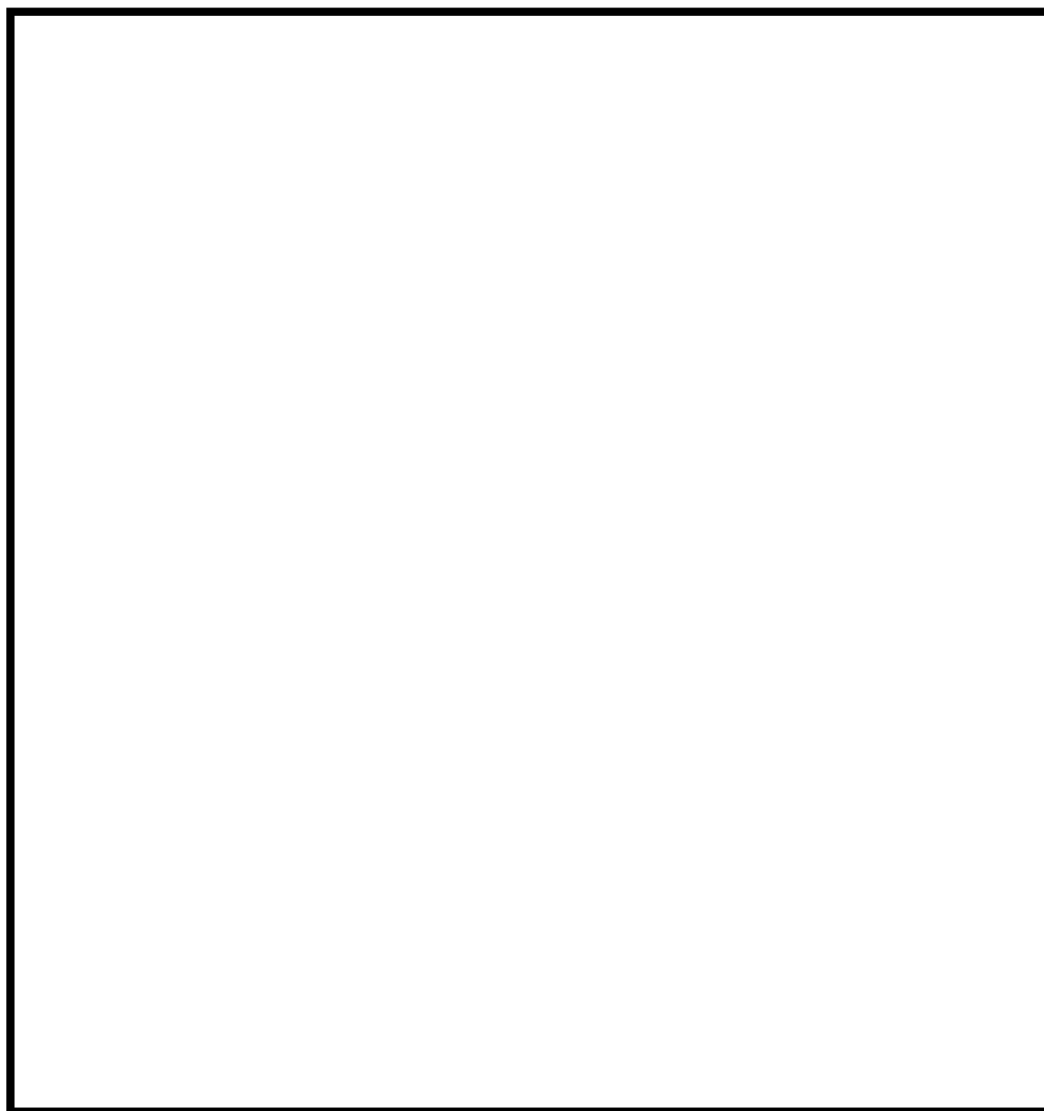
<運転中の引張応力が増大する設計及び製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けた設計の具体的な内容>


SCC は、材料、応力、環境の三因子が重畳し、特定の条件になったときに発生するものであり、三因子のうちの一因子以上を取り除けば SCC は発生しない。今回の申請範囲については、前述のとおり環境、材料の二因子に対して対策が講じられており、SCC 対策としては十分であると考えているが、応力についても以下のとおり運転中の引張応力が増大する設計及び製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けた設計を行っている。

- ・ 運転中の引張応力の増大する設計を避けた設計
 - 運転中の引張応力（内圧、自重、熱）が大きくなるように配慮したルート設計、サポート設計を行う。
 - 切欠き、形状不連続部等の応力集中を生じさせる構造を避けた設計を行う。
- ・ 製作時の引張残留応力が高くなる工法を避けた設計
 - 冷間加工により製造する曲げ管、エルボは、溶体化熱処理を実施し、残留応力の低減を図る。
 - 開先加工（機械加工）部においては、表面が強加工とならないように配慮し、加工硬化の低減を図る加工法を採用する。なお、加工硬化の低減を図る加工方法を適用できない部分については、引張残留応力の改善を図るバフ研磨を行う。
 - 溶接においては、JSME 設計・建設規格及び溶接規格に従った溶接部の設計、施工の計画を行う。補修溶接する際は、欠陥位置を特定し、極力補修範囲が少なくなるように施工する要領を定める。

(3)LBB成立性評価

クラス1機器の運転状態Ⅳの強度評価における「Ⅳ-a 1次冷却材喪失事故」の事象の想定において、本工事の取替範囲である4B配管については、LBB評価上考慮すべき作用応力が判定応力内であることから、配管破損形式は漏えいであることを確認した。なお、本結果については、本工事の取替え前と同じ結果である。



 : 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。

第3-1表 配管の破損形式及び開口面積

呼び径 (B)			4
外径 D_o (mm)			114.3
板厚 t (mm)			13.5
想定き裂角度 2θ (°)	(注5)		96.9
判定応力 ($\times S_m$)	(注2)		1.54
作用 応 力	$\sigma_t = 0.5 S_m$ $\sigma_b = 0$	(注1, 3) 破損形式 (B) (L) 及び 開口面積 (mm^2)	L(16)
	$\sigma_t = 0.5 S_m$ $\sigma_b = 0.5 S_m$		L(52)
	$\sigma_t = 0.5 S_m$ $\sigma_b = 1.0 S_m$		L(169)
	$\sigma_t = 0.5 S_m$ $\sigma_b = 1.5 S_m$		B
	$\sigma_t = 0.5 S_m$ $\sigma_b = 2.0 S_m$		B
	判定応力 (注2)		L(187)

(注1) B : 破断を想定する。
L : 漏えいを想定する。
() 内数値は開口面積 (mm^2)。
(注2) 判定応力 ($\sigma_t + \sigma_b$) 及び作用
応力のうち、 σ_t (膜応力) は内
圧で $0.5 S_m$ とみなし、残りは σ_b
(曲げ応力) とする。ただし、
 S_m は 114.7MPa とする。
(注3) 開口面積は作用応力に応じて内挿
するものとする。
(注5) 想定き裂角度 2θ は、想定き裂長
さに対する中心角を表わす。

第4-1表 L B B 成立性評価結果 (1/2)

分類	破損想定位置	呼び径 (B)	作用応力 ($\times S_m$)			判定応力 ($\times S_m$)	配管破損 形式	開口面積 (mm^2)	配管破損 反力 (kN)
			膜応力(注1)	曲げ応力(注2)	合計応力				
分岐管台(注4)	加圧器スプレイ管台(注6)	4	0.5	1.03	1.53	1.54	L	183	5

(注1) 膜応力は第3-1表の(注2)に従い、 $0.5 S_m$ とする。
(注2) 曲げ応力は自重、熱膨張、機械的荷重及び地震による応力値を合算し、小数第3位を切り上げたものとする。
(注4) 同一種類の管台で複数存在する場合、厳しい側の結果を代表として記載する。
(注6) 今回の申請にて、新規に評価を実施した。