



発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第I編 【事例規格】(NC-CC-002(改定)-2)

発電用原子力設備における 「応力腐食割れ発生への抑制に対する考慮」 の概要

2023年2月2日

(一社)日本機械学会 発電用設備規格委員会
原子力専門委員会 設計・建設分科会

目 次

1. SCCに関する事例規格 背景及び目的
2. SCCに関する事例規格 基本的な考え方
3. SCCに関する事例規格 概要
4. SCCに関する事例規格 添付の構成
5. SCCに関する事例規格 添付の主旨
6. SCC対応の基本方針
7. SCC対応フローチャート
8. XX-2230 環境(接液部)
9. NC-CC-002からNC-CC-002(改定)-2への主な変更
10. 技術的改定の説明 (付録 1 B : 52合金の改定)
11. 過去の技術評価での要望事項への対応状況

1. SCCに関する事例規格 背景及び目的

【背景】

- 国内の軽水炉プラントの冷却水環境下や塩化物を含む湿潤大気中環境下において応力腐食割れ(SCC)による損傷が発生している。
- SCCの発生を抑制するためには、使用材料と環境条件および応力条件を十分に考慮した設計を行うことが重要である。
- 日本機械学会「設計・建設規格(第I編)」には、設計時においてSCCに対して考慮すべき事項を示す記載がない。

【目的】

- 設計者に対して、SCCについて考慮すべき因子に関する基本的な知見を与える。
- 材料選択において、応力腐食割れの発生を抑制する観点からの考慮事項を示す。

2. SCCに関する事例規格 基本的な考え方

- 対象機器
 - クラス1機器、クラス1支持構造物および炉心支持構造物
- 使用環境
 - 接液(冷却水)環境と非接液(大気中)環境とする。
- SCC抑制策
 - 材料選定と応力低減策について扱う。
 - 環境対策は、設計建設規格になじまないため、技術の紹介にとどめる。
- 構成
 - 本文と添付とする。
 - 本文は、適用規定、適用範囲と基本的な考え方を述べた規定とする。
 - 添付には、SCC抑制に関する基本的な知見を示すとともに、材料選択の参考となるように対応の例をフローチャートとして示す。

3. SCCに関する事例規格 概要(本文)-1

対象規定:PVB-2000(クラス1容器に使用する材料)
PPB-2000(クラス1配管に使用する材料)
PMB-2000(クラス1ポンプに使用する材料)
VVB-2000(クラス1弁に使用する材料)
SSB-2000(クラス1支持構造物に使用する材料)
CCS-2000(炉心支持構造物に使用する材料)

本事例規格の対象は、クラス1機器、クラス1支持構造物
炉心支持構造物とする。

1. 適用

本事例規格は、クラス1機器、クラス1支持構造物及び炉心支持構造物の
材料選択において、応力腐食割れの発生を抑制する観点からの考慮事項
について規定する。

材料選択において、SCC発生抑制の観点の考慮事項を規定

3. SCCに関する事例規格 概要(本文)-2

2. 「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」の規定

応力腐食割れは、材料が特定の環境条件と応力条件に曝された時に割れを生じる現象であり、「材料」、「応力」、「環境」の三因子が重畳した時に発生する。応力腐食割れの発生を抑制するために、使用条件での発生応力、使用環境などを勘案し、材料選定においては注意深い考慮をすること。応力腐食割れ発生の抑制に対しては、材料のみならず、応力、環境面での対応が重要であるが、考慮すべき具体的な例には添付のようなものがある。

添付：応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮

本事例規格の本文は、注意事項を記載し、詳細については、添付に示す構成としている。

4. SCCに関する事例規格 添付の構成

- XX-1000 はじめに
 - XX-2000 SCC発生の抑制
 - XX-2100 事象の概要
 - XX-2200 SCC発生の抑制への対応
 - XX-2210 材料
 - XX-2211 オーステナイト系ステンレス鋼
 - XX-2211.1 BWRプラント
 - XX-2211.2 PWRプラント
 - XX-2212 高ニッケル合金
 - XX-2213 炭素鋼および低合金鋼
 - XX-2220 応力
 - XX-2221 構造設計、溶接、加工等に対する配慮
 - XX-2222 材料表面の応力改善方法
 - XX-2230 環境
 - XX-2231 接液部の環境
 - XX-2232 接液部以外の環境
 - XX-3000 参考文献
- 付録1: 材料の略称名と具体的な材料名の対応
付録2: SCC対応フローチャート

5. SCCに関する事例規格 添付の主旨

1. 目的(XX-1000)

本添付は、設計者がSCC発生抑制に役立てるための基本的な考え方を示す。

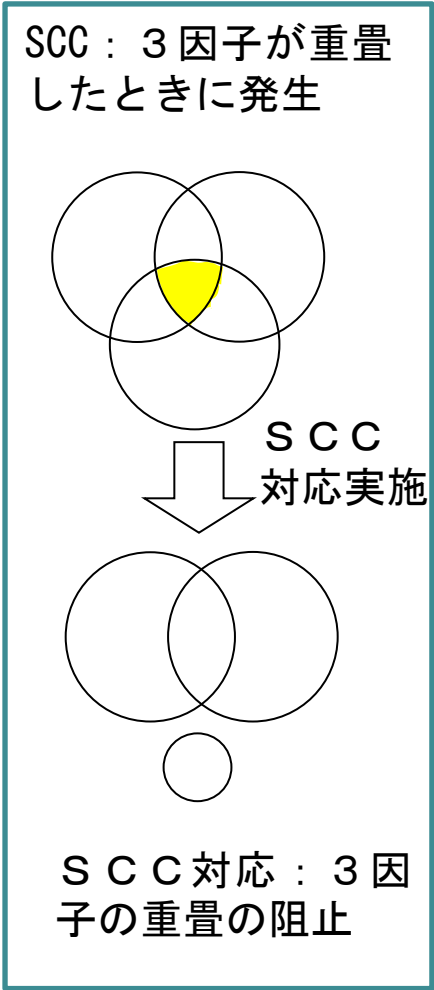
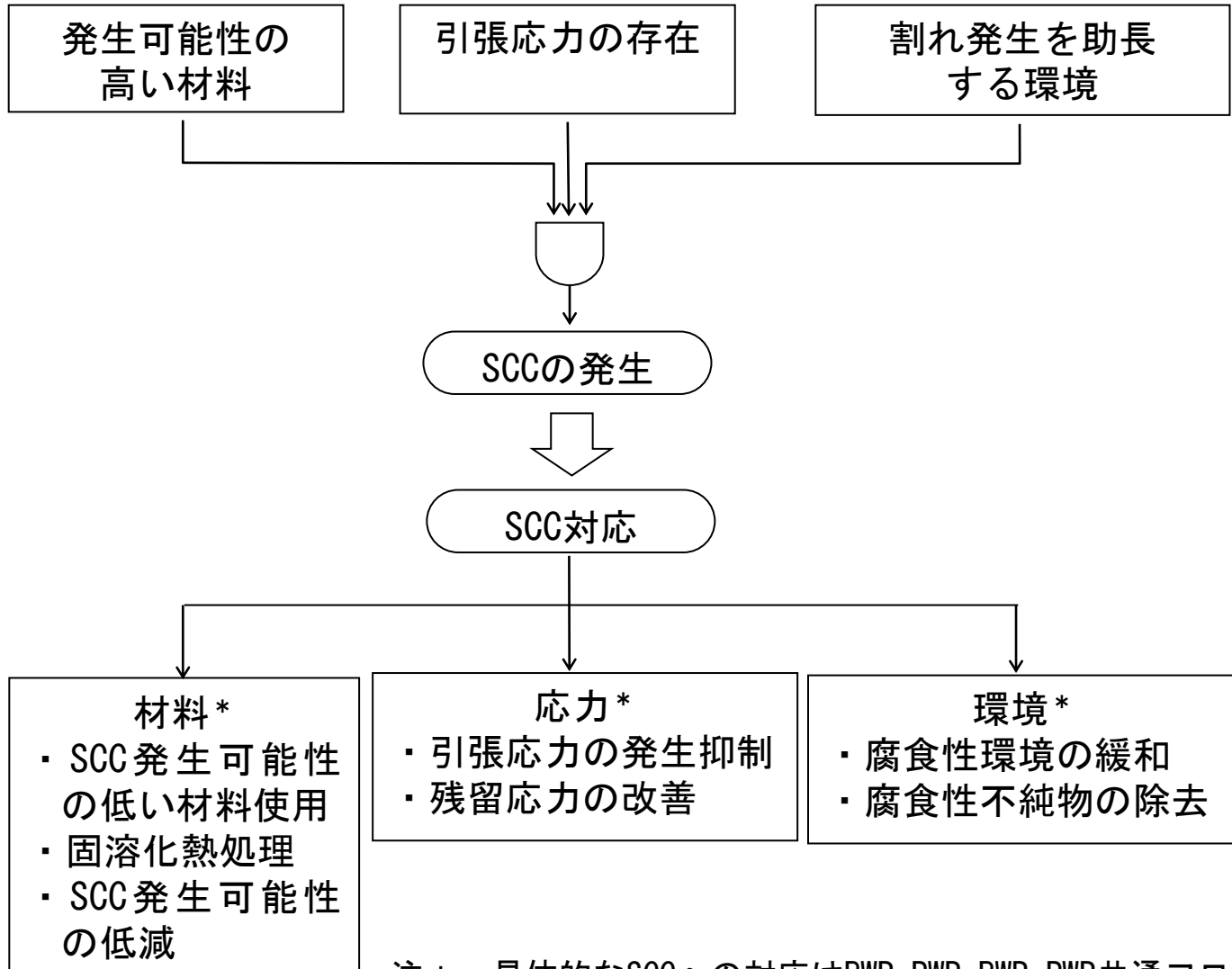
2. SCC抑制への対応

- (a) 使用環境におけるSCC発生の可能性の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す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) SCC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。

(本事例規格: 添付の特徴)

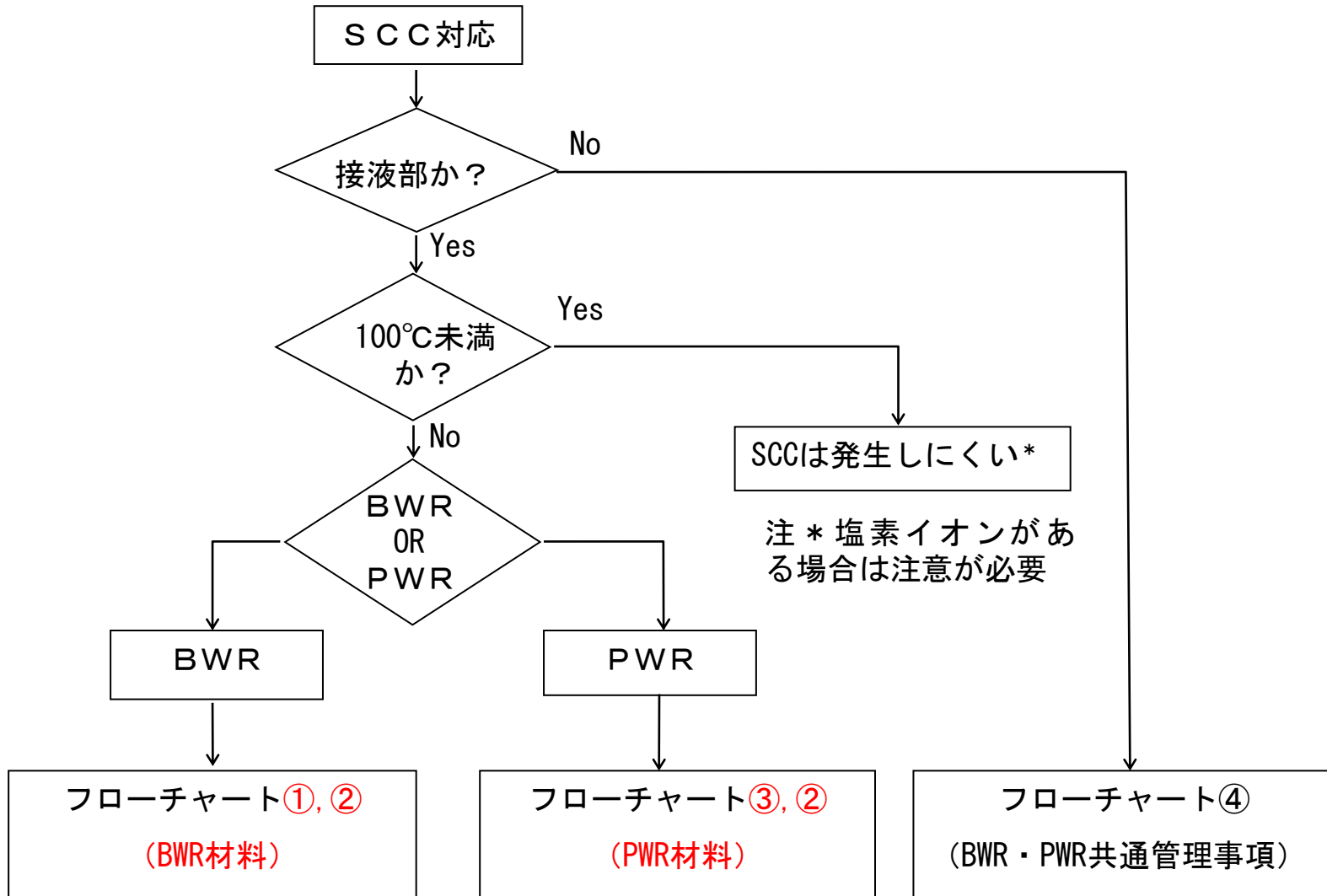
- ・ オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の高温水環境中のSCCを中心に知見をまとめている。
- ・ 材料の外面からのSCC発生の抑制に対する考慮についても言及する。
- ・ 中性子照射によるSCC発生については、その抑制に関する知見が少ないことから、本添付では扱わない。

6. SCC対応の基本方針

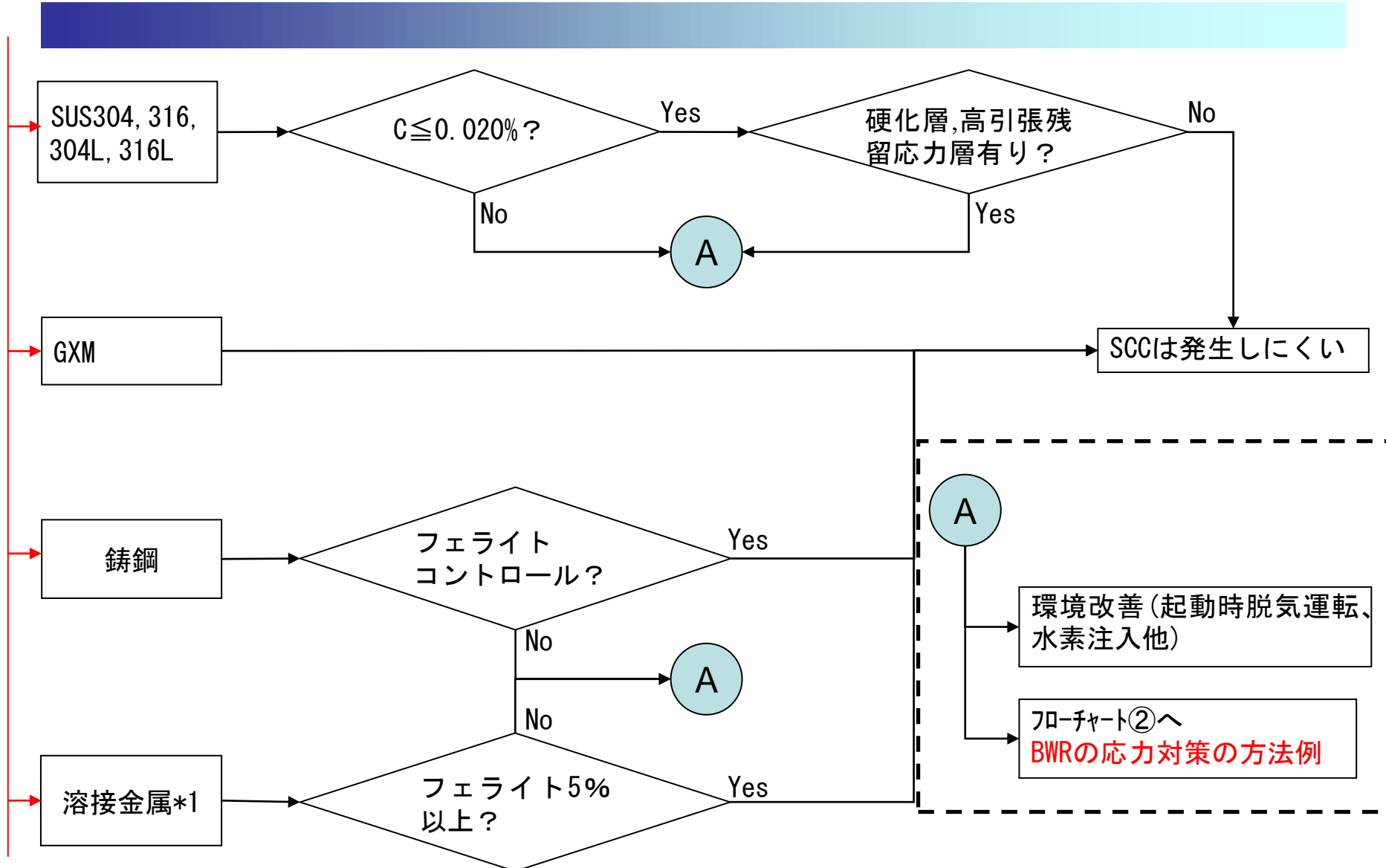


注* : 具体的なSCCへの対応はBWR, PWR, BWR・PWR共通フローチャート参照

7. SCC対応フローチャート

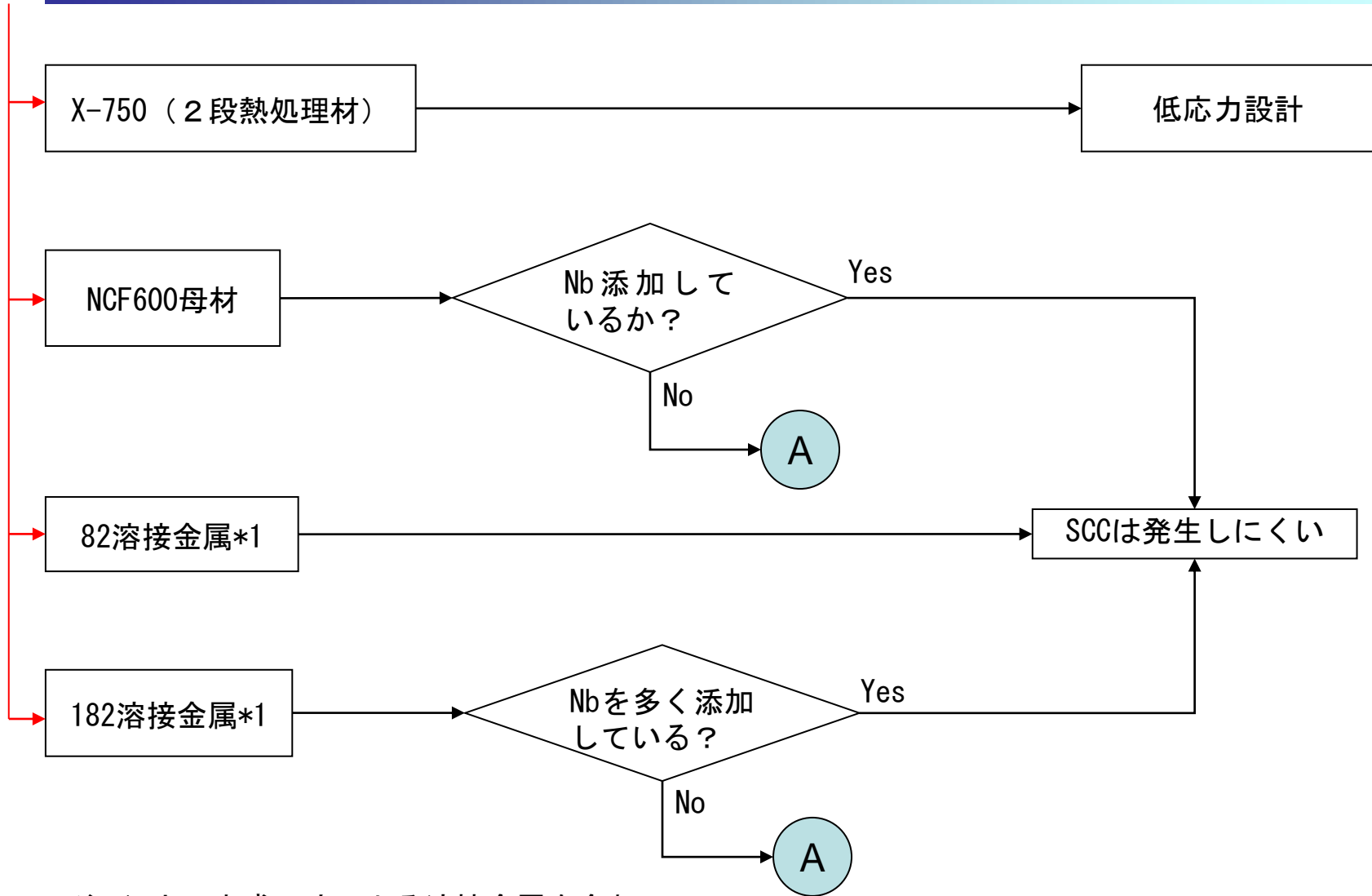


7. フローチャート①-1 BWR材料 オーステナイト系ステンレス鋼



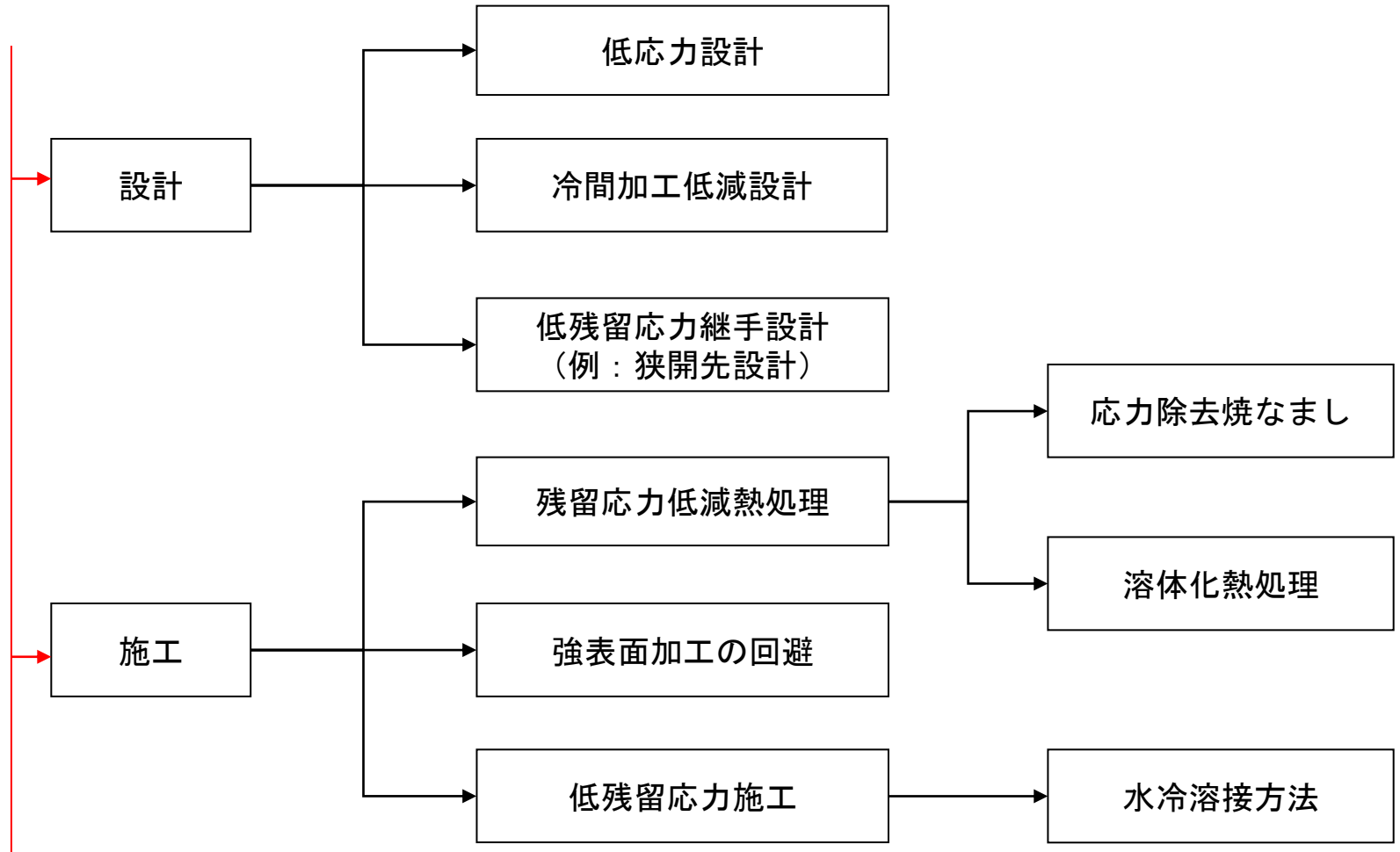
注*1:内面肉盛工法による溶接金属を含む

7. フローチャート①-2 BWR材料 高ニッケル合金

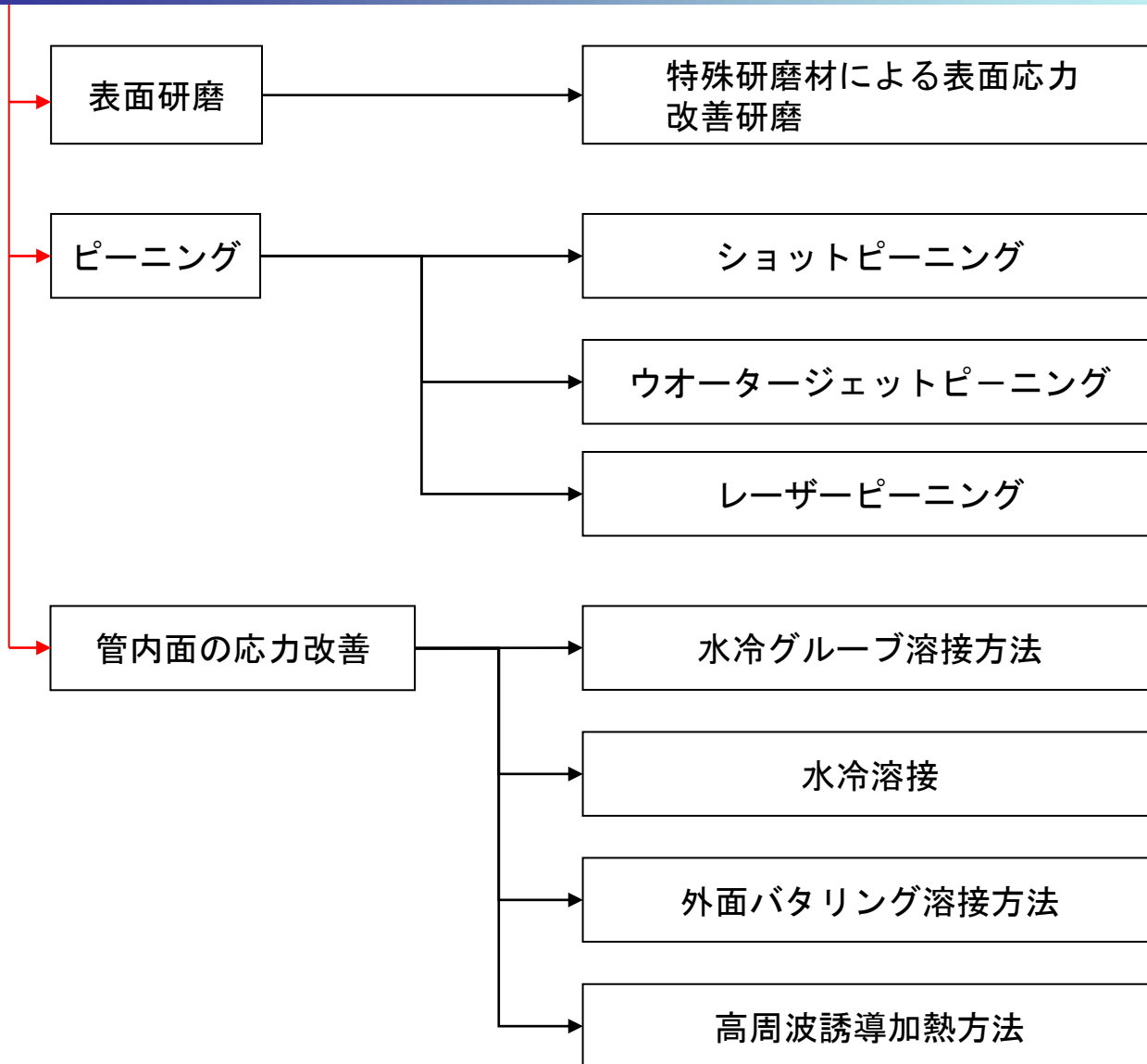


注*1:内面肉盛工法による溶接金属を含む

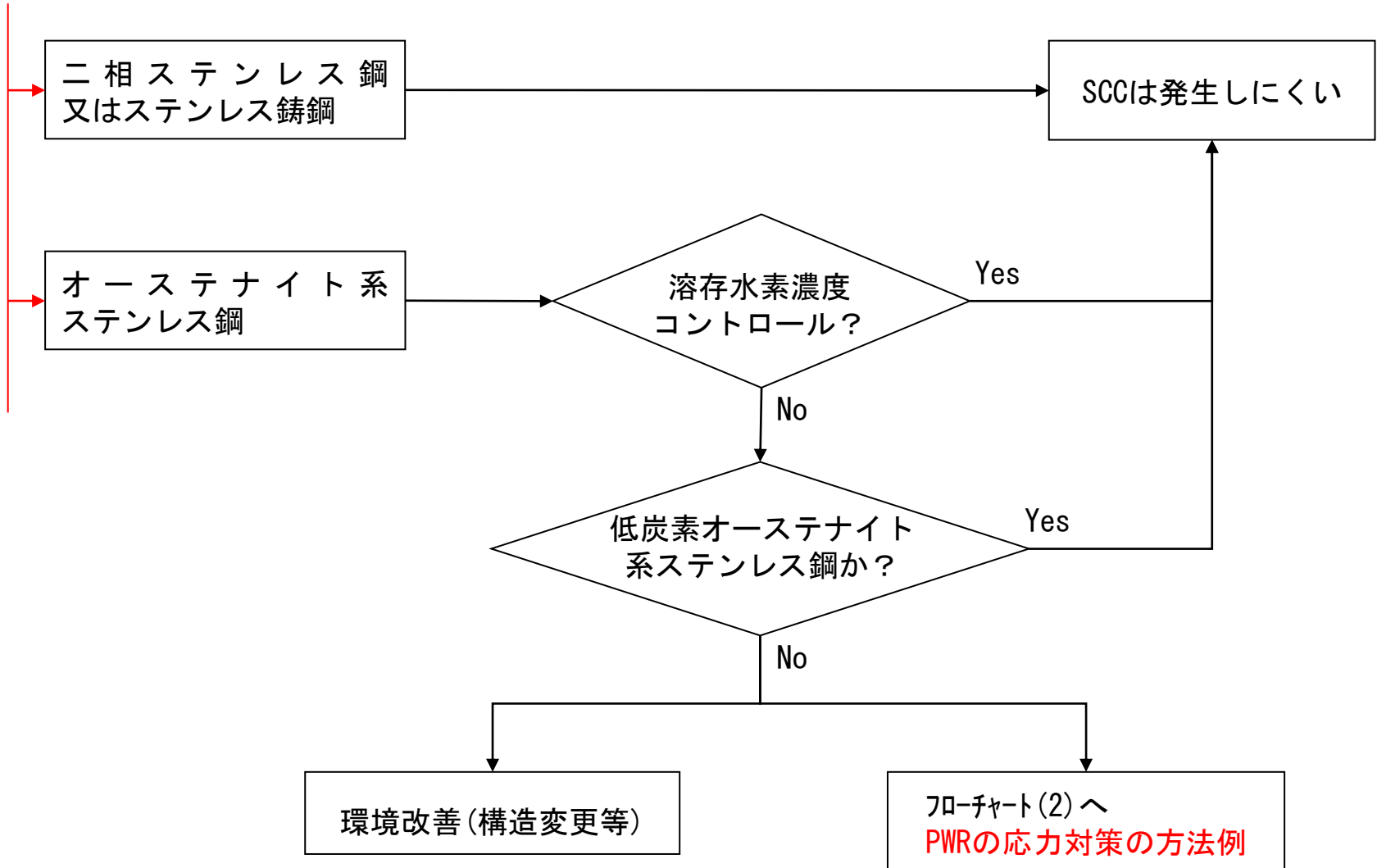
7. フローチャート②-1 BWR/PWRの応力低減の方法例



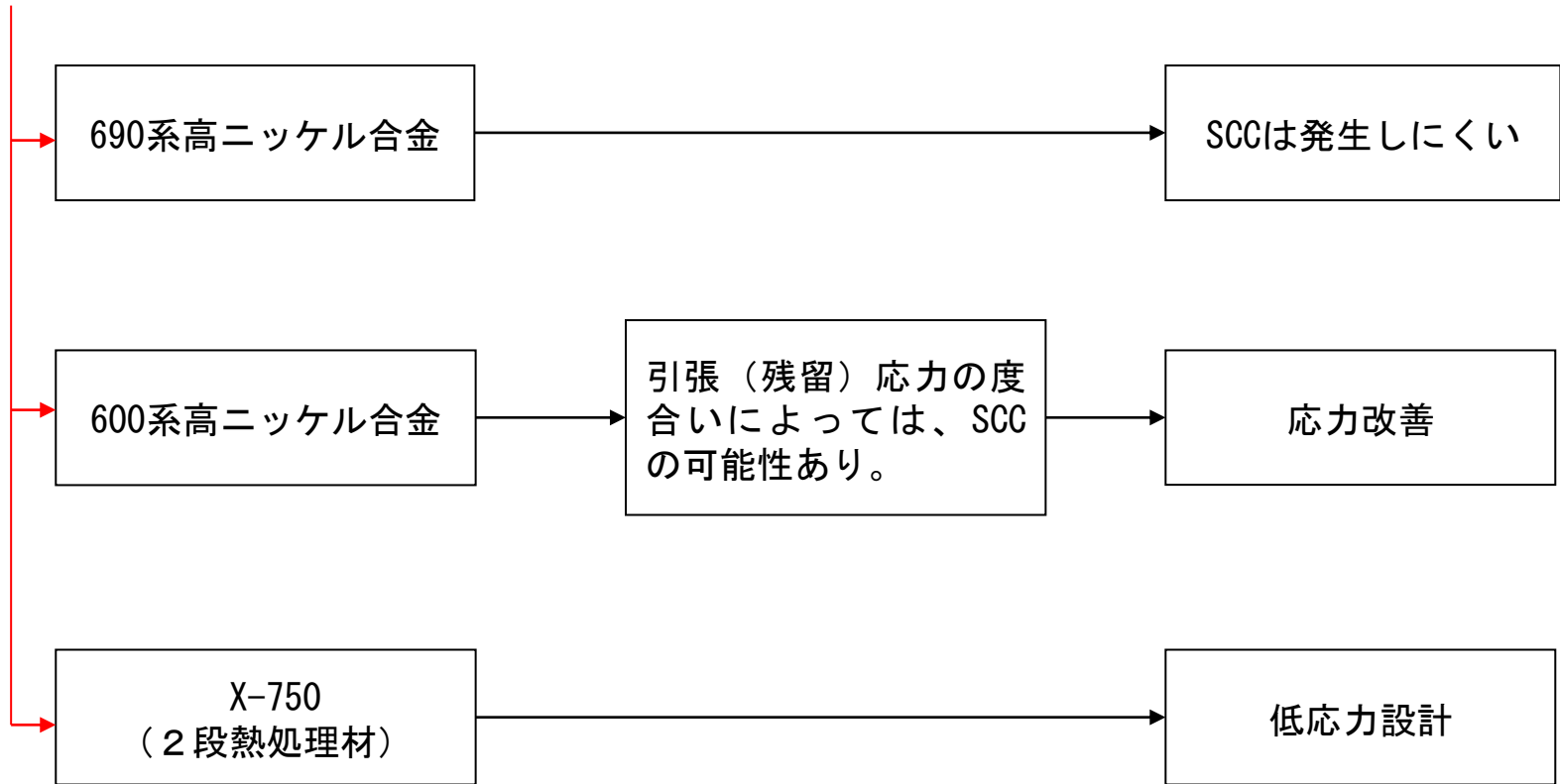
7. フローチャート②-2 BWR/PWRの応力低減の方法例



7. フローチャート③-1 PWR材料 ステンレス鋼



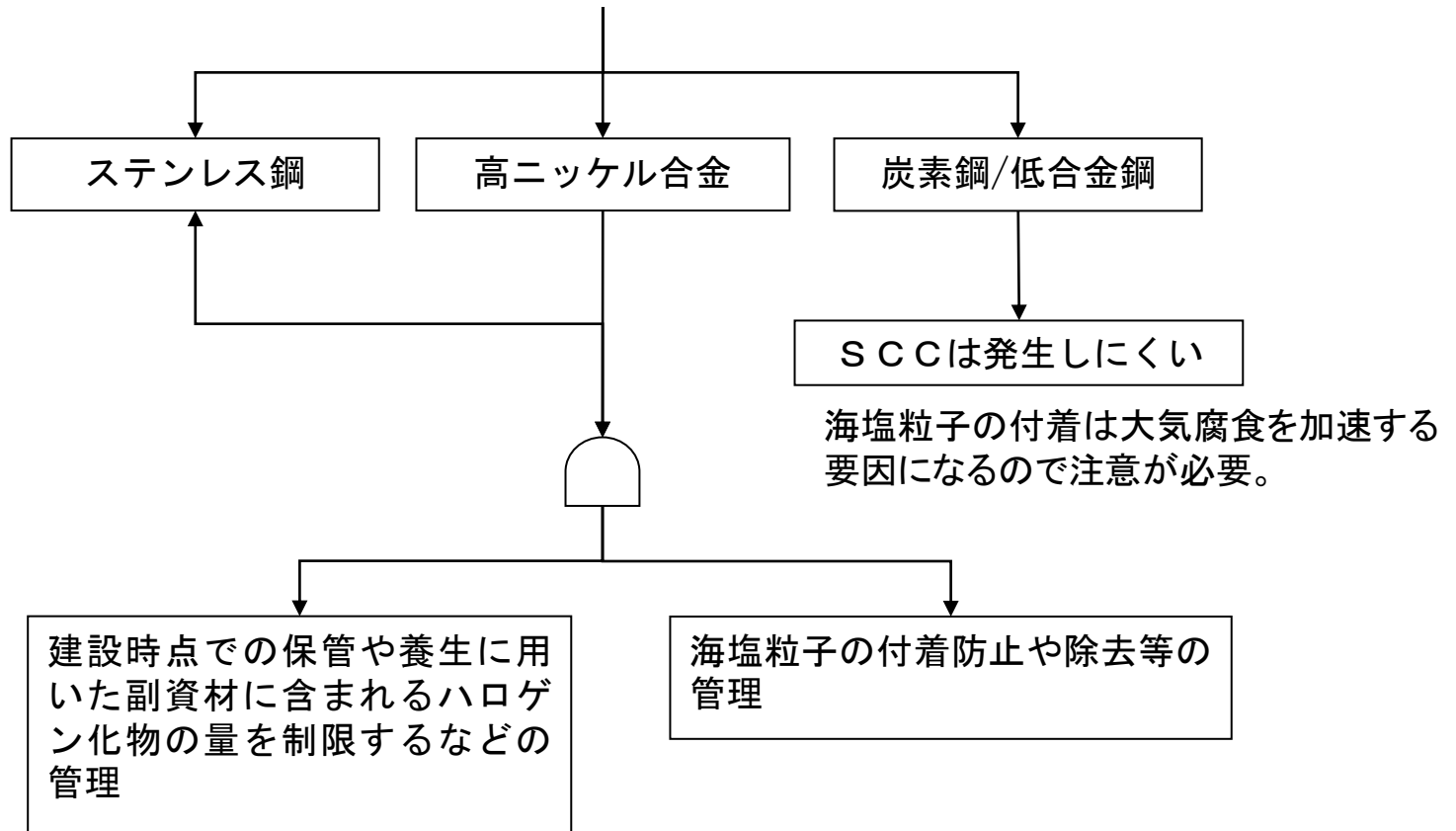
7. フローチャート③-2 PWR材料 高ニッケル合金



(注) 高ニッケル合金については、製造時に特殊熱処理を施すことで、SCC発生の可能性が低下することが知られている。

7. フローチャート④ BWR/PWR共通管理事項

(建設中・保管中の外面SCC対応)



8. XX-2230 環境(接液部)

1. 塩素イオン, 硫酸イオンが存在する場合室温でもSCCが発生する可能性があり, 注意が必要である。
2. 流体の滞留や隙間部の形成される設計を避ける。
3. 冷却材浄化系統でイオン交換樹脂が持ち込まれる場合には注意が必要
4. 炉水中の硫酸イオンが低温の場合でも高張力鋼のボルト等に水素脆化を引き起こす場合もあり, 注意が必要である。
5. PWRではスラッジに起因したSCCの事例がある。SG二次側への鉄分や不純物の混入を可能な限り小さくなる水質管理が必要。また定期的にもスラッジを除去することが望ましい。
6. 耐SCCの観点で溶存酸素濃度の低減が重要。PWRでは一次系で溶存水素濃度を管理。BWRでは起動時の脱気運転を実施。また, 腐食電位を改善する方法として水素注入, 貴金属注入等の技術がある。

9. NC-CC-002からNC-CC-002(改定)-2への主な変更

- NC-CC-002(改訂版) [2011年12月12日制定]
 - ✓ 初版は本文だけであったが、解説を追加した。
 - ✓ 「高ニッケル合金」の記述をBWRとPWRに分割した。
- NC-CC-002(改訂)-1 [2013年6月17日制定]
 - ✓ 事例規格集として発行するため、表紙等の体裁を見直した。
- NC-CC-002(改定)-2 [2022年6月22日制定]
 - ✓ 現行の事例規格では、52合金として、UNS Number N06052 AWS クラス ERNiCrFe-7)のみを対象としていたが、海外では N06054 AWS クラス ERNiCrFe-7A)が実機で適用されており、耐 PWSCC 性も ERNiCrFe-7 と同等である結果が得られている。国内で使用可能となるように、付録1Bで52合金として取り込む。[10章にて技術的改定内容を説明]
 - ✓ 用語の記載の統一を行った。

10.技術的改定の説明（付録 1 B：52合金の改定）

- 本事例規格では、応力腐食割れの発生抑制に対して有効な材料の一つとして、690系の溶接材料である52合金が挙げられており、52合金に分類される具体的な材料として、UNS Number N06052(AWSクラスERNiCrFe-7)が規定されている。

52 合金	UNS Number で N06052 (AWS クラス ERNiCrFe-7) に区分される 690 合金用の溶接材料（溶加棒及びソリッドワイヤ）である。
-------	--

- [改定] UNS Number N06054(AWSクラスERNiCrFe-7A)を追加する。**

各溶接材料の化学成分

AWSクラス	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Co	Cr	Mo	Nb	Ta	Fe	Al	Ti	B	Zr	Other Element Total
ERNiCrFe-7	<0.04	<0.50	<1.0	<0.02	<0.015	<0.30	Rem	-	28.0 - 31.5	<0.50	Nb+Ta <0.10	7.0 - 11.0	<1.10 Al+Ti<1.5 <1.0	-	-	-	-	<0.50
ERNiCrFe-7A	<0.04	<0.50	<1.0	<0.02	<0.015	<0.30	Rem	0.12	28.0 - 31.5	<0.50	Nb+Ta 0.5-1.0	7.0 - 11.0	<1.10 Al+Ti<1.5 <1.0	<0.005	<0.02	<0.005	<0.02	<0.50

[提案理由]

- 現規定にあるERNiCrFe-7は溶接時にスケールが多数発生するため、施工時の手入れの手間や溶接欠陥のリスクが高いことが課題である。
- 一方、海外では溶接時のスケール発生が少なく、溶接施工時の手入れが容易なことに加え、溶接欠陥のリスクも低減されることからN06054(AWSクラスERNiCrFe-7A)が実機に適用されており、国内でも今後適用する可能性がある。

10.技術的改定の説明（付録 1 B：52合金の改定）

- 応力腐食割れ特性：**SCC発生試験結果**

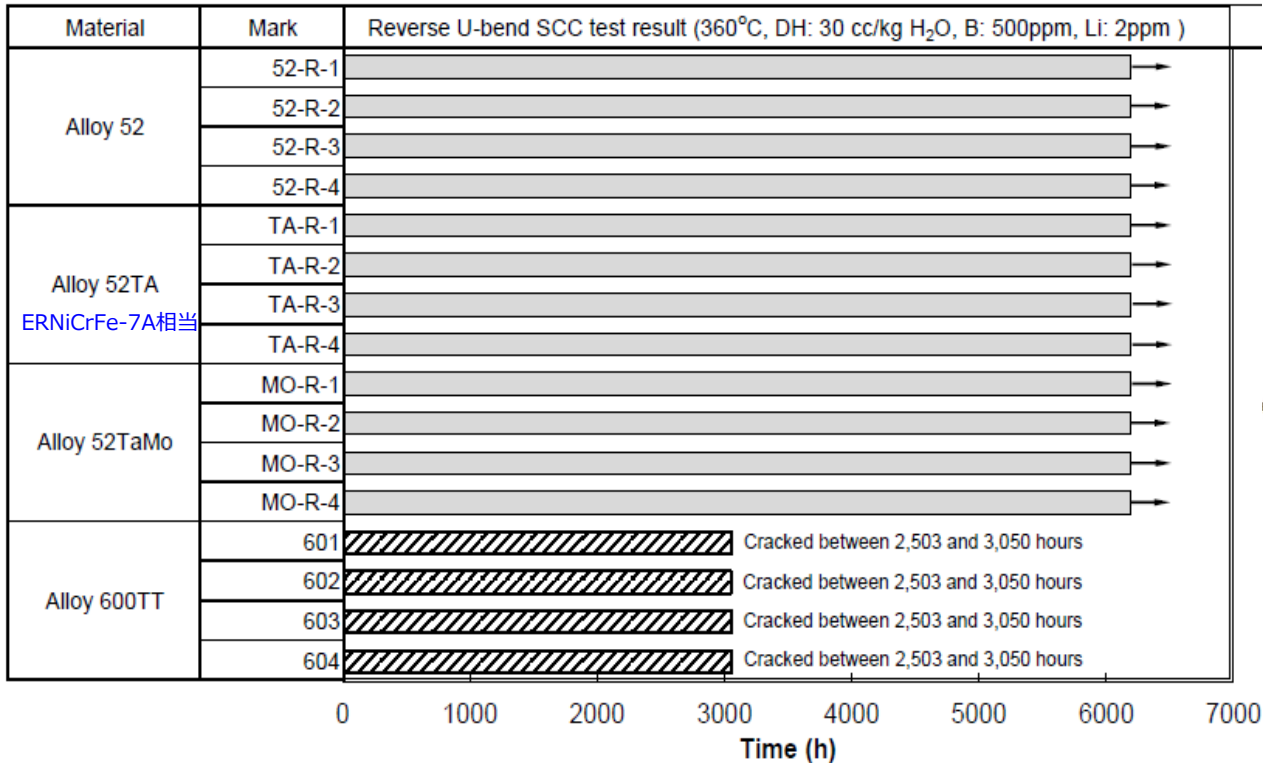


Figure 12: SCC initiation test results

360°C × 約6000hの発生試験において、PWSSCは発生しておらず、**両材料のPWSSC発生特性は同等**である。

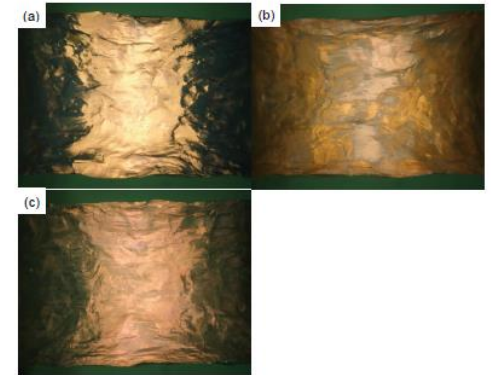
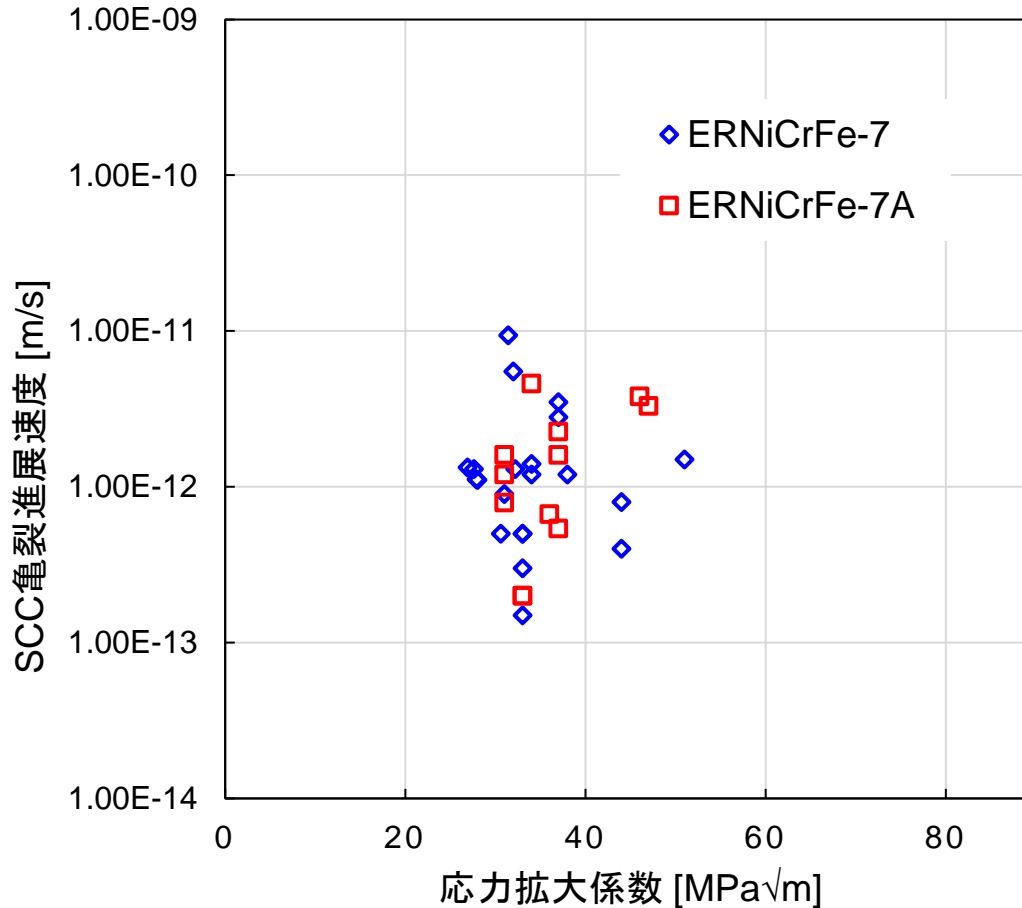


Figure 11: Reverse U-bend SCC specimens after testing in simulated primary water at 360°C for 6,197 hours (a) alloy 52, (b) alloy 52TA, and (c) alloy 52TaMo

10.技術的改定の説明（付録 1 B：52合金の改定）

- 応力腐食割れ特性: **SCC亀裂進展試験結果**



ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7AのPWSCC亀裂進展速度

- MRP-386において、52合金 (ERNiCrFe-7 相当) 及び 52M合金 (ERNiCrFe-7A相当) のSCC亀裂進展速度データが取得されている。
- 左図に示すとおり、両材料のSCC亀裂進展速度は同等である。

(出典) EPRI, Materials Reliability Program: Recommended Factors of Improvement for Evaluating Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) Growth Rates of Thick-Wall Alloy 690 Materials and Alloy 52, 152, and Variants Welds (MRP-386), Final Report, December 2017. (URL) <https://www.epri.com/research/products/000000003002010756>

10.技術的改定の説明（付録 1 B：52合金の改定）

- まとめ

- ✓ 本事例規格の52合金の分類として、N06054(AWSクラスERNiCrFe-7A)を追加する
- ✓ 現状規定されているERNiCrFe-7とSCC亀裂進展特性及び発生特性を公開文献ベースで比較した結果、両者の耐SCC性は同等と判断できることから、応力腐食割れ発生を抑制する材料として、本事例規格に取り込むことは問題ないと判断する。

11. 過去の技術評価での要望事項への対応状況

事例規格「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮(NC-CC-002)」技術評価書	
日本機械学会に対する要望	対応状況
<p>(1) 最新の知見の反映 応力腐食割れの発生の抑制に対する考慮については、応力腐食割れの発生メカニズム等安全研究が進められており、また、今後の継続検査により追加的知見も期待できるので、それらの知見を適切に規格に反映していくことが望まれる。</p>	<p>初版に対して、最新の知見を反映して改定を行ってきた。</p>
<p>(2) 応力腐食割れ発生に対する総合的対応 応力腐食割れは、設計建設段階での使用環境等を考慮した材料選定や応力改善、使用中の応力や環境の改善といった予防保全策、さらに応力腐食割れを考慮した検査・ひび割れが発生した場合の評価を行った上での継続使用・補修等、さまざまな視点から対応がとられている。 保安院では、SCCに関する知見のとりまとめを健全性評価制度に基づく報告実績、JNES安全研究に加え、事業者が行っている研究成果も反映してとりまとめたが、今後は日本機械学会においてSCC知見のとりまとめを適宜行い、関係規格の技術的基盤となるよう取り組むことが期待される。</p>	<p>引き続き、最新の知見をフォローし、適宜反映する。</p>

以上