

令和2年度原子力規制庁請負成果報告書

キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査

L9-83WP010 改正0

三菱重工業株式会社

令和3年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの請負により実施した業務の成果を取りまとめたものです。

本報告書に関する問合せは、原子力規制庁までお願いします。

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査 成果報告書概要

令和3年3月
三菱重工業(株)

1 業務件名

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査

2 概要

我が国における今後の使用済燃料の貯蔵規制の高度化に資することを目的に、使用済燃料の乾式貯蔵に用いられるキャニスタ材料の耐食性向上に係る情報の調査・収集を実施した。

3 実施内容

(1)キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査

国内外の使用済燃料用キャニスタへの高耐食材（二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼等）及び各種表面処理技術（塗装、溶射等）の適用について適用事例、技術的特徴、技術的課題、研究開発、許認可（規制要件及びその考え方）を調査した。海外の調査対象については、米国とした。

(2)キャニスタへの適用性調査

(1)で抽出した高耐食材及び表面処理技術を使用済燃料キャニスタに適用する場合に既存の技術要件において見直しが必要な箇所を抽出し整理した。また、海外で採用されている二重壁キャニスタ（DWC）に上記高耐食材と表面処理技術を採用する必要性及び採用する場合の技術的課題を整理した。

4 実施期間

令和2年9月～令和3年3月

5 実施成果

(1)キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査

下表に日米の高耐食材と各種表面処理のキャニスタへの適用状況、研究開発、許認可等の情報を示す。

日米の高耐食材及び表面処理技術のキャニスタへの適用に係る情報整理

分類	適用可能	日本	米国
高耐食材	適用事例	<ul style="list-style-type: none"> 適用実績無し コンクリートキャスク構造規格（機械学会）で次の材料を使用可能としている。 GSUS329J4L（二相ステンレス鋼） ASTMSA-240(S31254)（スーパーステンレス鋼） 	<ul style="list-style-type: none"> 現時点で実機への適用実績は無いが、以下のシステムが二相ステンレス鋼を代替材とする認可を得ている。 UHOMS-EOS(CoC 番号 1042) UNS31803 または UNS32205 HI-STORM10(CoC 番号 1014 改訂 12) UNS31803
	研究開発	上記材料の耐 CISC 性が SUS304 等より優れる知見が得られている。 ・定荷重 SCC 試験(80℃、RH35%) 304L 材が 250h で破断したのに対して、60000h 以上で破断せず。	—
	許認可	既存の技術要件は、高耐食材の適用による変更不要と考えられるが解説の補足が必要。	NRC は、キャニスタ材は NUREG-2215 にしたが、ASME B&PV 規格に適合する必要があるとしている。
表面処理	適用可能技術	<ul style="list-style-type: none"> 塗装：耐熱性に優れる無機系塗装（ジンクリッチ、シリコン樹脂系） 溶射：低温溶射（コールドスプレイ）、高速酸素燃料スプレイ（HVOF）等 残留応力低減処理：レーザーピーニング、低塑性バニシング等 	
	適用事例	適用実績無し	San Onofre ISFSI の HI-STORM UMAX の MPC にレーザーピーニングを適用
	研究開発	ピーニング、バニシングの耐 SCC 性、施工性試験を実施（電中研）	<ul style="list-style-type: none"> コールドスプレイの補修デモ(SONGS) DOE 出資の NEUP(大学研究)にて種々の表面処理技術の開発研究実施中
	許認可	既存の技術要件は、表面処理の適用による変更不要と考えられるが解説の補足が必要。	NRC は表面処理の審査/認可のため新たな規格整備が必要だろうとの見解。
技術的課題	施工要領/基準、耐放射線性等の長期的信頼性、貯蔵中の管理要領/基準(補修含む)		

(2)キャニスタへの適用性調査

①既存の技術要件への影響

高耐食材及び表面処理をキャニスタに適用する場合に、既存のコンクリートキャスク技術要件において見直しが必要な箇所はないと考えられるが、解説に補足する必要がある事項を下表に整理する。

分類	該当要件	解説に補足すべき事項	備考
高耐食材	要件 4 密封機能 ・閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・多重化された溶接蓋	二相ステンレス鋼の高温脆化を考慮した溶接条件の選定 高耐食材を使用する場合の貯蔵中の付着塩分管理(適切な基準、方法、頻度) 高耐食材を使用する場合の蓋溶接検査方法、基準（解説にて言及） ※現行は多層 PT と UT の両方	溶接割れ、耐食性低下、靱性低下の防止 適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能 当該材の溶接特性、溶接欠陥性状を考慮する。
	要件 21 検査、修理等の考慮	高耐食材を使用する場合の貯蔵中の外観検査(発錆状況等)の基準、方法、頻度	適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能
表面処理	要件 4 密封機能 ・閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・多重化された溶接蓋	<ul style="list-style-type: none"> 塗装や表面処理の施工条件や判定基準の確立 環境との共存性(化学反応)の考慮 表面塩分管理の扱い	<ul style="list-style-type: none"> 長期間の耐 SCC 性を確保できる施工法と貯蔵中検査基準 塗料とホウ酸水の反応事例有 適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能
	要件 21 検査、修理等の考慮	塗装や表面処理を前提として炭素鋼を用いる場合の蓋溶接検査方法、基準	脆性破壊の可能性を考慮した検査方法、判定基準
	要件 22 準拠規格及び基準	貯蔵中の塗装等の表面処理の外観検査の基準、方法、頻度	適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能
		表面処理技術に係る規格基準の整備	—

②二重壁キャニスタへの適用性

1)DWC への高耐食材または表面処理適用の必要性

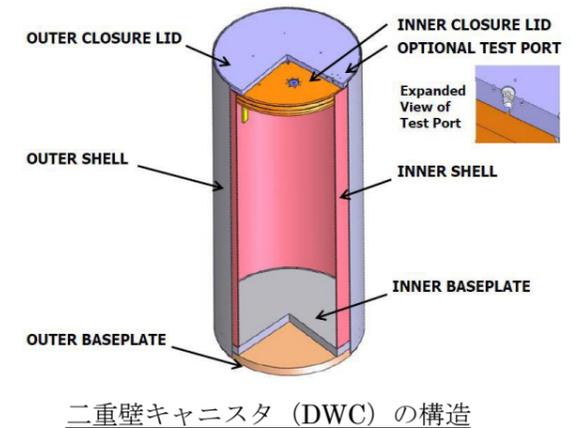
DWC の特徴の一つである内外壁間圧力監視による漏洩検知の有無によって下表のように必要性（優先度）が整理できる。

漏洩監視有無	外容器	内容器	優先度
有	○	○	C
	○	×	B1
	×	○	B2
無	×	×	A
	○	○	B
	○	×	A1
	×	○	A2
	×	×	C

○：高耐食材または表面処理適用 ×：適用せず
A：優先度大（A1>A2）、優先度中（B1>B2）、C：優先度小

2) DWC への高耐食材または表面処理適用の技術的課題

適用技術	外側容器	内側容器	一般的課題
高耐食材	特に無し	特に無し	<ul style="list-style-type: none"> 溶接管理要領/基準 貯蔵時管理要領/基準
塗装	特に無し	外側容器へ挿入時の健全性	<ul style="list-style-type: none"> 施工管理要領/基準 長期的信頼性、環境との共存性
溶射(コールドスプレイ)	特に無し		<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵時管理要領/基準 キャニスタへの適用に係る規格制定
ピーニング、バニシング	特に無し	特に無し	



二重壁キャニスタ（DWC）の構造

- 目 次 -

1.序論	1-1
1.1 概要	1-1
1.2 実施内容	1-1
1.3 実施期間	1-1
1.4 実施体制	1-2
2.調査結果	2.1-1
2.1 キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査	2.1-1
2.1.1 キャニスタの SCC に関する基本的事項	2.1-1
2.1.2 高耐食材に係る調査	2.1-5
2.1.3 表面処理技術に係る調査	2.1-38
2.2 キャニスタへの適用性調査	2.2-1
2.2.1 既存の技術要件への影響	2.2-1
2.2.2 二重壁キャニスタへの適用性	2.2-4
3.まとめ	3-1
添付-1 米国関係者への聞き取り調査結果	付-1
参考文献	

1.序論

1.1 概要

本業務では我が国における今後の使用済燃料の貯蔵規制の高度化に資することを目的に、使用済燃料の乾式貯蔵に用いられるキャニスタ材料の耐食性向上に係る情報の調査・収集を実施する。

1.2 実施内容

1.2.1 キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査

1.2.1.1 高耐食材に係る調査

国内外の使用済燃料用キャニスタへの高耐食材(二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼等)の適用について知見(データ)を収集し、以下の情報をまとめる。

- (1)適用事例(適用先、キャニスタ型式、使用材料、貯蔵開始時期等)
- (2)研究開発(耐 SCC 性、技術課題、対応策等)
- (3)許認可(規制要件及びその考え方)

なお、海外については、キャニスタを使用済燃料貯蔵に使用している国の代表として、米国を対象とする。なお、文献調査のみとし、訪問調査は含まない。

1.2.1.2 表面処理技術に係る調査

使用済燃料用キャニスタの大気 SCC 対策として有効と考えられる各種表面処理技術(塗装、溶射等)について調査を行い、使用済燃料用キャニスタの長期貯蔵環境に適合する候補技術を選定し、国内外での適用実績、技術的特徴、技術的課題、研究開発及び規制要件を整理する。

1.2.2 キャニスタへの適用性調査

1.2.2.1 既存の技術要件への影響

上記 1.2.1 項で抽出した高耐食材及び表面処理技術を使用済燃料用キャニスタへ適用する場合に既存の技術要件(コンクリートキャスク技術要件)において、見直しが必要と思われる箇所を抽出し、その根拠も含めてまとめる。

1.2.2.2 二重壁キャニスタへの適用性

令和元年度に調査した海外で採用されている二重壁キャニスタについて、上記高耐食材及び各種表面処理技術を採用する必要性及び採用する場合の技術的課題を整理しまとめる。

1.3 実施期間

令和 2 年 9 月 17 日から令和 3 年 3 月 26 日
実施工程を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 実施工程表

実施項目	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査		■					
キャニスタへの適用性調査			■				
報告会の実施							▼ (最終報告)
成果報告書の作成						■	

(凡例) □ : 計画、 ■ : 実績

1.4 実施体制

実施体制を図 1.4-1 に示す。

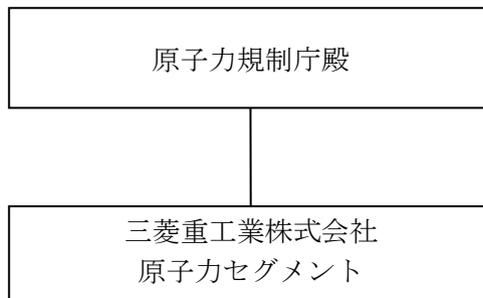


図 1.4-1 実施体制図

2.調査結果

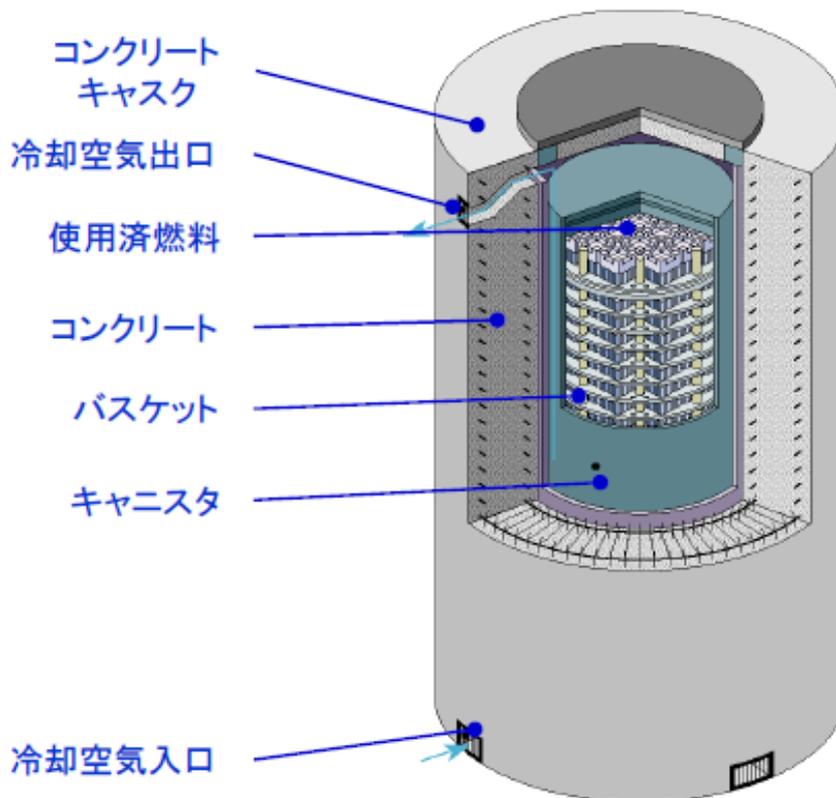
2.1 キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査

2.1.1 キャニスタの SCC に関する基本的事項[1]

(1)キャニスタの構造及び材料

キャニスタを用いる使用済燃料貯蔵方式の一つとしてコンクリートキャスクの構造と仕様の例を図 2.1.1-1 及び表 2.1.1-1 に示す。使用済燃料は、キャニスタと呼ばれるステンレス鋼製容器に収納し、キャニスタをコンクリート製貯蔵容器内に設置する。コンクリート製貯蔵容器は、遮蔽機能を有するとともに吸気口から空気を取り入れて自然換気でキャニスタを冷却する役割を持つ。キャニスタは肉厚が 10~20mm 程度の薄肉円筒容器で、発電所にて使用済燃料を装荷後に内部を水抜き乾燥し、上蓋を溶接して密封する。

キャニスタは、図 2.1.1-2 に示すように底部を含む胴部を工場で製作し、前記のとおり蓋は燃料装荷後に発電所にて溶接する。



(注)図中の←は空気の流れを示す。

図 2.1.1-1 コンクリートキャスクの構造例[2]

表 2.1.1-1 コンクリートキャスクの仕様例[3]

項目		PWR タイプ	BWR タイプ
収納集合体数		21~24	56~74
燃料総発熱量		20~26kW	
1 基当りの放射エネルギー(注)	中性子	3×10^{10} neutrons/s	
	γ 線	2×10^{17} photons/s	
キャニスタ	外寸法	1.6~1.7m ϕ \times 4.8~5.3mH	
	重量(実入り)	33~40 t	
コンクリート製貯蔵容器	外寸法	3.4~4.0m ϕ \times 5.8~6.1mH	
	重量(実入り)	130~135 t	

(注)PWR17 \times 17型燃料 24 体分 (平均燃焼度 50GWd/t、10 年冷却)

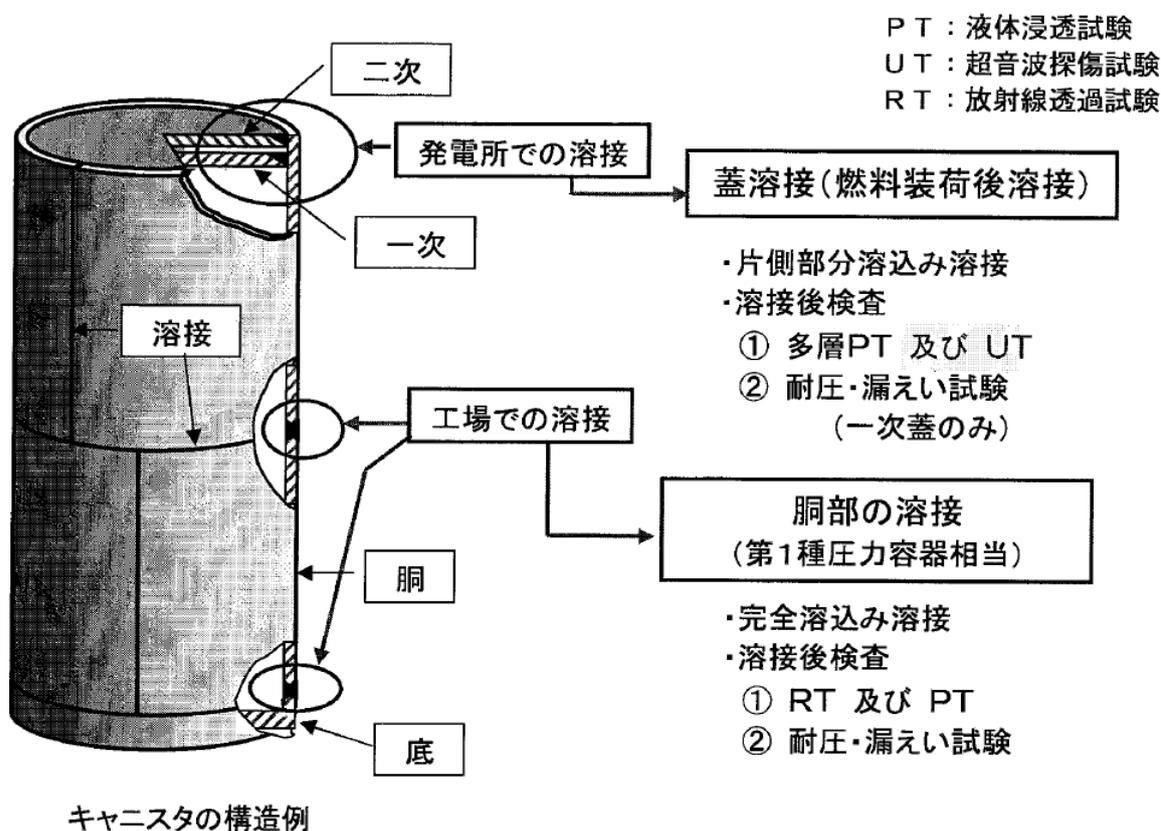


図 2.1.1-2 キャニスタの溶接例[3]

(2) キャニスタの SCC 発生機構

キャニスタは、外部の空気に直接接触するので大気中に含まれる様々な化学物質に曝されることに加えて、内蔵する使用済燃料の発熱や大気による温度と湿度の変動を受けることになる。

大気中に含まれる物質の中には、海洋性大気から運ばれる塩化物を含む粒子（海塩粒子）の他に工業活動や商業活動に伴って排出されるもの、あるいは道路の凍結防止剤のような塩素を含むものが考えられる。ステンレス鋼がこれらの大気中物質によって SCC（応力腐食割れ）を引き起こす可能性があることは以前から知られており、これは AISCC（大気応力腐食割れ）または CISCC（塩化物誘起応力腐食割れ）と呼ばれる。その発生機構についてはこれまで多くの研究事例があり、総合すると以下のように考えられている。[4,5]

- ・キャニスタ表面に塩化物が付着する。
- ・湿度がある値以上になると塩化物が潮解し、表面に塩素イオンを含んだ水膜が形成される。
- ・水膜中の塩素イオン濃度が高いとステンレス鋼表面の不動態被膜が溶解して破れ、局部腐食（孔食、隙間腐食）が発生する。
- ・さらに引張応力が存在すると、局部腐食が起点となって SCC が発生、進展する。
- ・SCC が進展すると最終的にキャニスタ肉厚を貫通する可能性がある。

以上の機構を模式的に図 2.1.1-3 に示す。

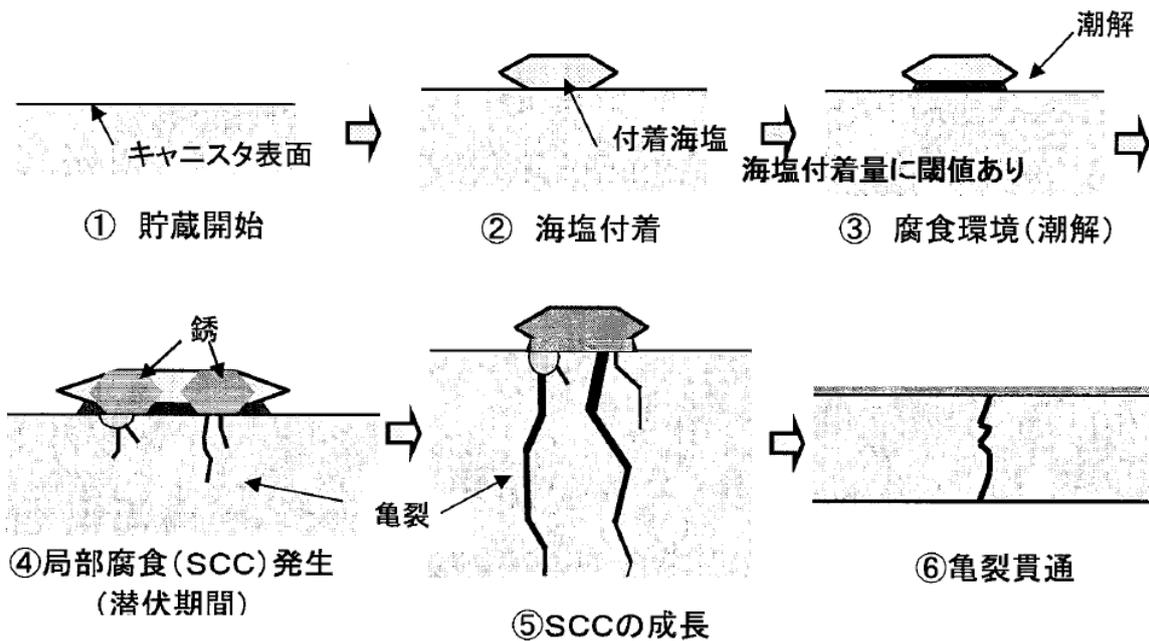


図 2.1.1-3 キャニスタの CISCC の発生・進展の模式図[3]

(3) SCC に影響する要因

SCC は次の 3 条件が揃った場合に発生すると考えられている。

- ・材料の SCC 感受性
- ・腐食環境
- ・十分高い引張応力の存在

キャニスタではこれらの条件すべてが存在する可能性があり、特に我が国において使用済燃料貯蔵施設は海岸近くに設置されるので、塩化物粒子を含む雰囲気曝される可能性があるため、2 番目の条件が特に重要である。SCC が発生し易い場所として、高い残留応力が存在する溶接部やキャニスタと支持構造物が接触して接触応力が発生する場所が挙げられる。

しかし、前記の 3 条件のうち少なくとも 1 つ除去できれば、キャニスタ外面の SCC 発生を効果的に防止できると考えられる。

キャニスタの SCC 発生を防止するための対策としては、大きく分けて以下の 3 つの方法が考えられる。[6]

1)高耐食材の採用

キャニスタの材料はオーステナイト系ステンレ鋼を使用するのが一般的であるが、これに代わるより耐食性、耐 SCC 性に優れる材料を採用する。このような材料の例としては二相ステンレ鋼やニッケル基合金がある。

2)腐食環境の改善

SCC 感受性がある材料への腐食性物質（例、大気中の塩化物）の付着防止あるいは抑制のためのキャニスタ環境の改善。この中には、環境雰囲気中の腐食性物質の低減とキャニスタ表面にコーティングを施してキャニスタ材料を環境雰囲気から遮断する方法が含まれる。

3)キャニスタ表面の引張応力低減

キャニスタ表面の引張残留応力の低減あるいは圧縮応力の付与。この方法の例として、ピーニング、バニシング加工、溶接技術がある。

以降の節では、2)の環境雰囲気の改善を除いたキャニスタ単体で対策が採れる 1)の高耐食材と 2)のコーティング及び 3)の引張残留応力低減を合わせたキャニスタ表面処理技術について国内及び米国に関する情報を調査した結果を報告する。

2.1.2 高耐食材に係る調査

我が国及び米国におけるキャニスタへの高耐食材の適用について公開文献に基づいて知見(データ)を収集し、以下の情報を整理した。

- (1)適用事例(適用先、キャニスタ型式、使用材料、貯蔵開始時期等)
- (2)研究開発(耐 SCC 性、技術課題、対応策等)
- (3)許認可(規制要件及びその考え方)

(1)高耐食材の種類

キャニスタへ適用されたもの、あるいは適用を検討された高耐食材を表 2.1.2-1 にまとめる。

表 2.1.2-1 キャニスタに適用される主な高耐食材

材料の分類	材料規格	主要成分	備考
二相ステンレス鋼	GSUS329J4L	25Cr-6Ni-3Mo-0.2N	日本[7]
	ASTM A240 (UNS S31803、S32205)	22Cr-5.3Ni-3.2Mo-0.16N	米国[8]
スーパーステンレス鋼	ASME SA-240(S31254) ASME SA-188 (F44) ※後出の YUS270 は、 SA-240(S31254)及び SA-188 (F44)の相当材である。	20Cr-18Ni-6Mo-0.2N	日本[7]

二相ステンレス鋼はオーステナイト相とフェライト相がほぼ同体積で混合する二相のマイクロ組織を持ち、耐食性、特に CISCC に対する耐性に優れている。この混合組織は、合金中に Cr と Mo のような相安定化成分を添加することによって作られる。二相ステンレス鋼は、耐食性により通常次の 4 つのグループに分類される。[6,9]

- ・低二相ステンレス鋼
- ・標準二相ステンレス鋼
- ・高二相ステンレス鋼
- ・超二相ステンレス鋼

塩化物環境下における局部腐食に対するステンレス鋼の耐性の定量的指標の一つに、孔食指数 (PREN) と呼ばれる種々の経験的公式によって化学組成と関連付ける指標がある。通常 PREN はクロム (Cr)、モリブデン (Mo)、そして窒素 (N) の重量比率 (%) から次式で計算される。[10]

$$\text{PREN} = 1 \times \% \text{Cr} + 3.3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N} \quad (1)$$

図 2.1.2-1 に幾つかのステンレス鋼に対する PREN と孔食電位の関係を示す。孔食電位は、ある腐食環境において孔食が発生・進展する下限の電位のこと、一般に電位が+側にあるほど孔食が起きにくい材料であると判定される。[11~13] 図 2.1.2-1 より一般的なオーステナイ

ト系ステンレス鋼である、SUS304 や SUS316L に比べて、二相ステンレス鋼（図の 329J4L、329J3L 等）は高い PREN を持つことがわかる。低二相ステンレス鋼は PREN が 22～27 で、標準二相ステンレス鋼は PREN が 28～38、高二相ステンレス鋼は PREN が 39～45、超二相ステンレス鋼は PREN が 45 を超える。[9]

一方、スーパーステンレス鋼は通常のステンレス鋼よりもさらに耐食性や耐熱性を高めた高機能ステンレス鋼を称し、PREN が 40 を超えるものを指す。[14]

表 2.1.2-1 に示す ASME SA-240(S31254)は高クロム高モリブデンを含有するスーパーステンレス鋼で、高温海水のような苛酷な環境でも優れた耐食性を有し、環境によってはニッケル合金や純チタンに匹敵する耐食性を有するとされる。[15] 図 2.1.2-1 の A 材が ASME SA-240(S31254)である。表 2.1.2-2 にこれら代表的なステンレス鋼の化学組成と PREN をまとめた。

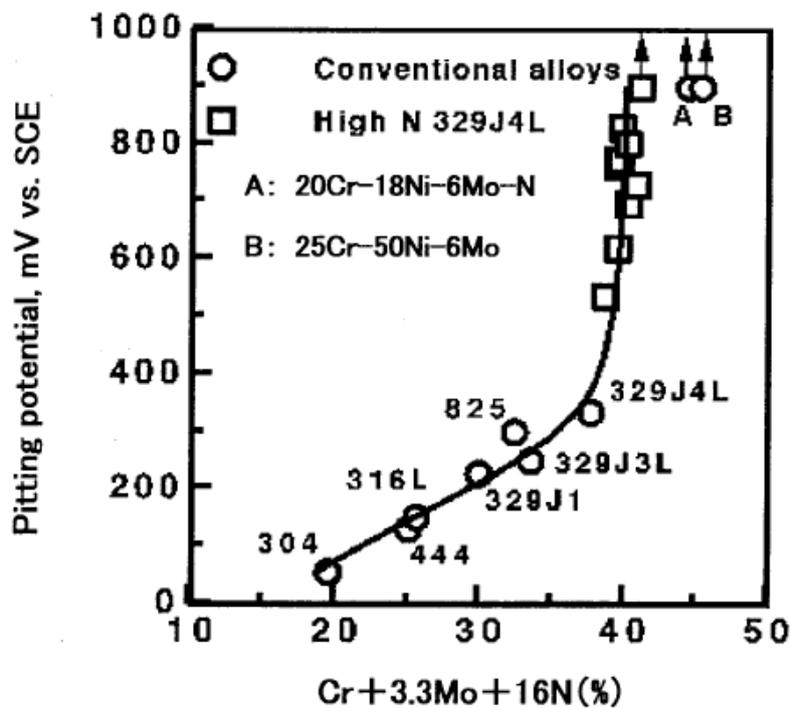


図 2.1.2-1 孔食指数(PREN)と孔食電位の関係[11]

表 2.1.2-2 主要なステンレス鋼の化学成分と孔食指数[16]

鋼の種類	化学組成と PREN (孔食指数)				
	Cr(wt%)	Ni(wt%)	Mo(wt%)	N(wt%)	PREN
SUS304L	18-20	8-12	—	0.10	19
SUS316L	16-18	10-14	2-3	0.10	24
二相ステンレス鋼	21-23	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	35
高二相ステンレス鋼	24-26	6-8	2-5	0.24-0.32	43
スーパーステンレス鋼 ASME SA-240(S31254)	19.5-20.5	17.5-18.5	6-6.5	0.18-0.22	43

(2)適用事例

表 2.1.2-3 に我が国と米国における前述の高耐食材のキャニスタへの適用事例を整理した。我が国では、使用済燃料の乾式貯蔵は金属キャスクを用いて行われており、キャニスタを使用する貯蔵システムの適用事例はない。

一方、米国では次の 2 つの貯蔵システムのキャニスタに二相ステンレス鋼を代替材として使用することが認可されている。

- ・ NUHOMS EOS システム (CoC 番号 1042) (横型サイロ)[8]
- ・ HI-STORM100 システム (CoC 番号 1014 改 12) (コンクリートキャスク) [17]

NUHOMS EOS システムでは、タイプ 2205 (UNS S31803 または UNS S32205) 二相ステンレス鋼を SUS304 と SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼の代替材として使用する。

HI-STORM100 システムは、UNS S31803 を代替材としている。

UNS S31803 と UNS S32205 は、それぞれ ASME B&PV コードケース N-635-1 と N-741 にてクラス 1 機器の製作用として認定され、これらの規格は NRC が R.G.1.84” 設計、製作及び材料に係るコードケースの許容性、ASME、Sec.III” Rev.38 によってエンドースしている。[18]

なお、現時点では前記 2 システム以外で二相ステンレス鋼等の高耐食材をキャニスタに使用することが認可されたものはない。

表 2.1.2-3 我が国と米国における高耐食材のキャニスタへの適用事例

国	適用事例	備考
日本	無し (キャニスタ系貯蔵システムはこれまで採用されていない。)	民間規格 (コンクリートキャスク機械学会構造規格[7]) にて、次の材料をキャニスタ材として使用可能としている。 ・ 二相ステンレス鋼 (GSUS329J4L) ・ スーパーステンレス鋼 ASME SA-240(S31254) ASME SA-188 (F44) ※後出の YUS270 は、SA-240(S31254) 及び SA-188 (F44)の相当材である。
米国	次の 2 つの貯蔵システムが二相ステンレス鋼をキャニスタ材の代替材とする認可を得ている。 ・ NUHOMS EOS (CoC 番号 1042) UNS S31803 または UNS S32205[8] ・ HI-STORM100 (CoC 番号 1014 改 12) UNS S31803 [17]	現時点では適用実績無し。

(3)研究開発（耐 SCC 性、技術課題、対応策等）

①耐 SCC 性

前述の高耐食性ステンレス鋼のキャニスタ貯蔵環境における耐 SCC 性に関して、我が国において比較的精力的に検討が行われている。それらの概要を説明する。

財団法人電力中央研究所（以下、電中研）は、コンクリートキャスク貯蔵システムのキャニスタに二相ステンレス鋼及びスーパーステンレス鋼を適用する場合の耐 SCC 性について試験を実施し、その効果を評価している。[19,20]

その結果は、以下のとおり通常のステンレス鋼（SUS304 等）に比べて良好な耐 SCC 性を示している。

1)供試材：

- ・二相ステンレス鋼：SUS329J4L（ASME S31260 相当材）
- ・スーパーステンレス鋼：YUS270（ASME S31254 相当材）

これらの化学組成を表 2.1.2-4 に示す。

2)試験方法：定荷重 SCC 試験

試験片形状を図 2.1.2-2 に示す。

3)試験条件：

- ・負荷応力：SUS329J4L：耐力の 0.5 倍～1.2 倍 YUS270：耐力の 0.5 倍～1.5 倍
- ・環境条件：温度 80℃、相対湿度（RH）35%
- ・付着塩分：試験片平行部に人工海水を滴下し乾燥（総量 50 μ l）

4)試験結果

比較材の SUS304L が最短約 250h で破断したのに対して、SUS329J4L 及び YUS270 はともに最も応力が高い試験片でも、62550h まで試験して破断しなかった。（図 2.1.2-3）

また、62550h 経過後の試験片の目視観察では塩分が付着した部分に発錆が確認されたものの、亀裂は認められなかった。（図 2.1.2-4）

表 2.1.2-4 電中研の定荷重 SCC 試験片の化学組成[20]

材料	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	N
SUS329J4L	0.01	0.41	0.45	0.49	6.88	25.67	3.33	0.23
同溶接部	0.016	0.3	0.5	0.49	9.06	25.28	3.06	0.22
YUS270	0.013	0.51	0.55	0.62	17.48	19.84	6.12	0.19
同溶接部	0.02	0.13	0.11	0.14	55.88	21.59	8.34	—

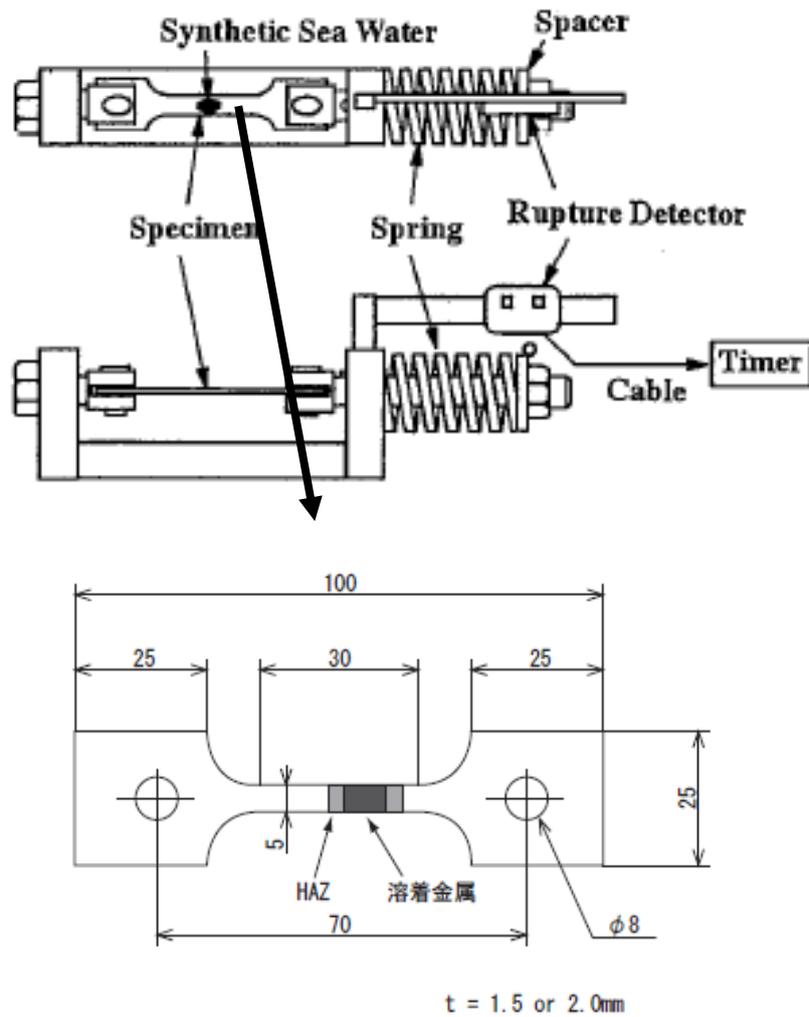


図 2.1.2-2 電中研が使用した定低重 SCC 試験片[20]

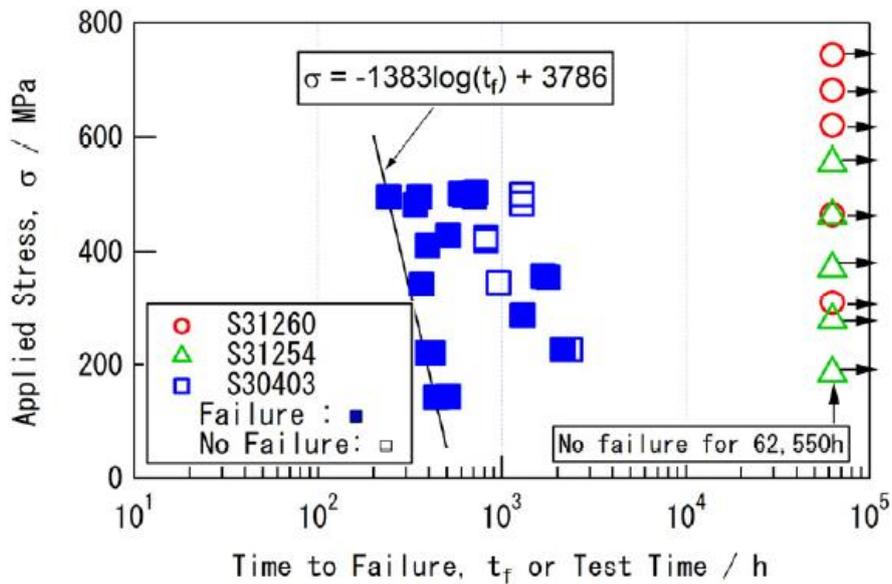


図 2.1.2-3 電中研が実施した定低重 SCC 試験の応力と破断時間の関係[12]

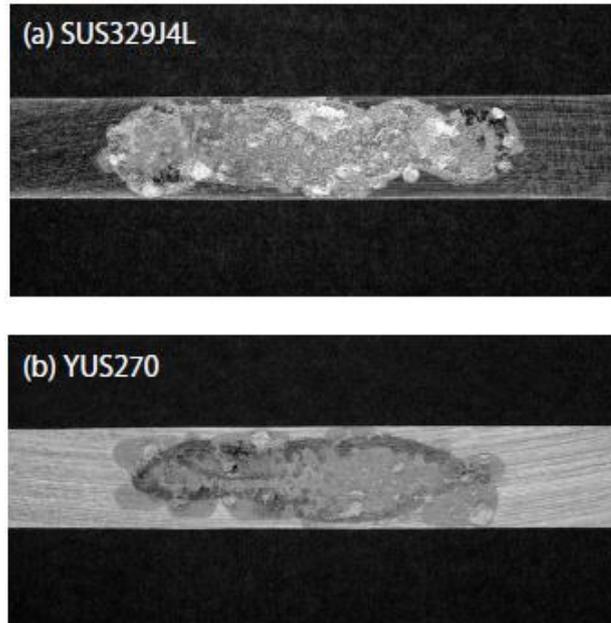


図 2.1.2-4 定低重 SCC 試験片の 62550h 経過後の外観[20]

以上の試験片の試験後の侵食部について SEM 観察を行い、微小亀裂の存在とその深さを測定し、その結果から SCC 亀裂進展速度を評価している。[21]

まず、試験片の侵食部を開放して SEM（走査型電子顕微鏡）により SCC 亀裂の有無と亀裂の深さを観察、測定した。図 2.1.2-5 は試験温度-応力と亀裂の有無の関係を整理したものである。温度 80℃、応力 1.1~1.5 σ_y を超える条件でのみ亀裂が観測されている。

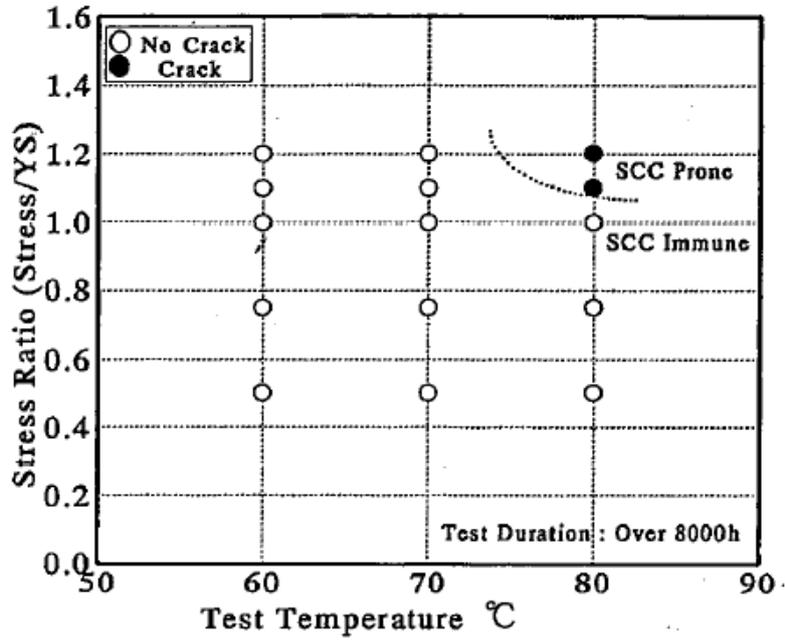
亀裂の破面の SEM 写真の例を図 2.1.2-6 に示すが、破面は TGSCC（粒内応力腐食割れ）の特徴である羽毛状破面[22]を呈している。[21]

図 2.1.2-7 は、測定した亀裂深さと経過時間の関係を整理したもので、ここから亀裂進展速度を評価した結果を表 2.1.2-5 に示している。ここでは、比較のため同じ環境条件（80℃，RH35%）の 4 点曲げ試験で取得した SUS304L の亀裂進展速度を併記している。

表 2.1.2-5 SCC 亀裂進展速度[21,23]

材料	SCC 亀裂進展速度 (mm/h)	備考
SUS329J4L	5.7×10^{-6}	
YUS270	4.0×10^{-6}	
SUS304L	$7.8 \times 10^{-4} \sim 6.4 \times 10^{-3}$	4 点曲げ試験[23]

(SUS329J4L)



(YUS270)

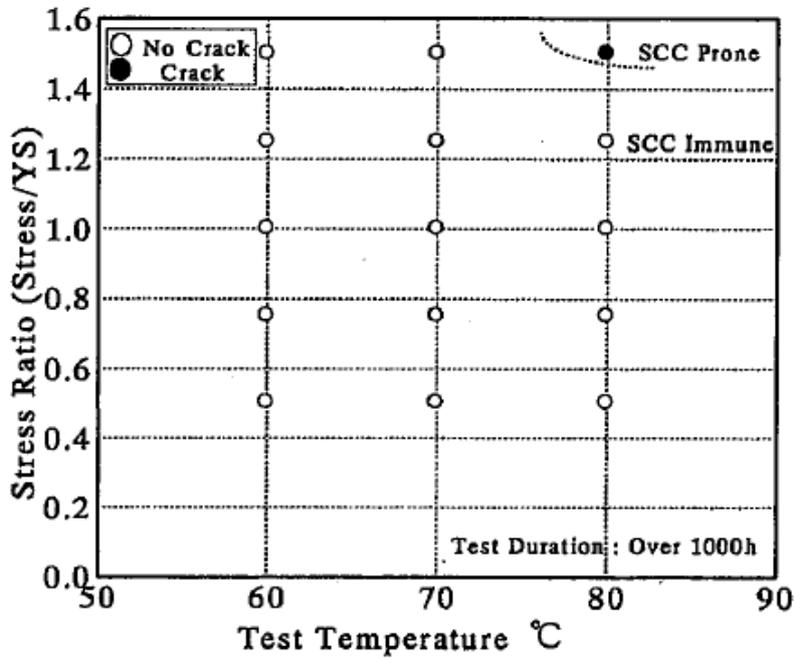


図 2.1.2-5 試験片の SEM 観察による微小亀裂有無と温度-応力の関係[21]

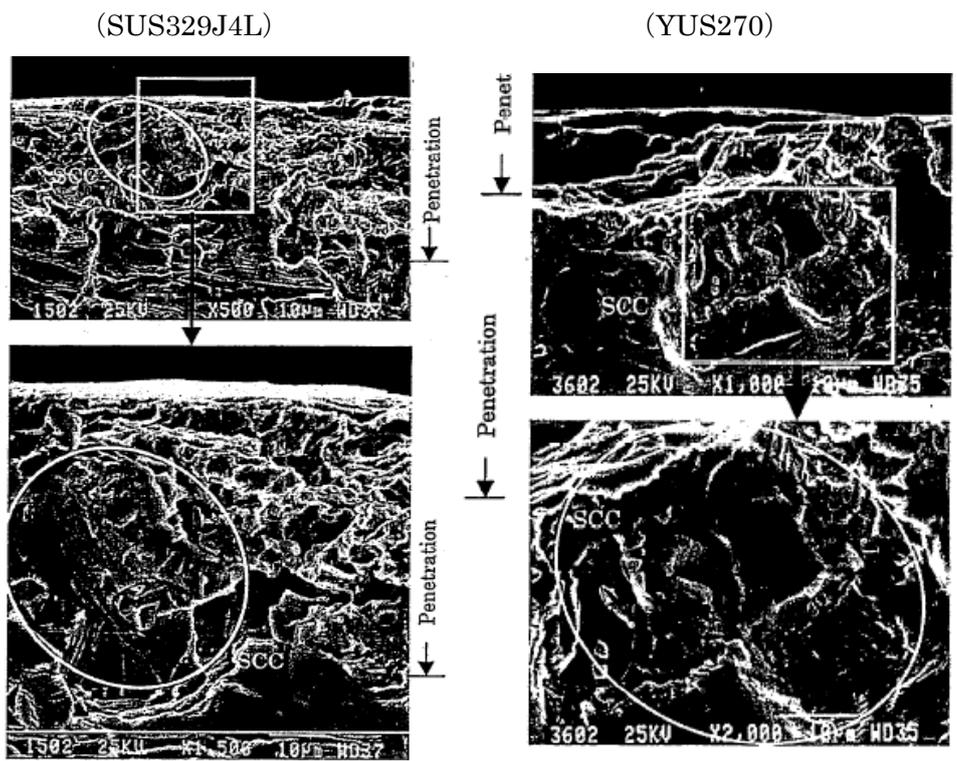


図 2.1.2-6 SCC 亀裂が認められた破面の SEM 写真[21]

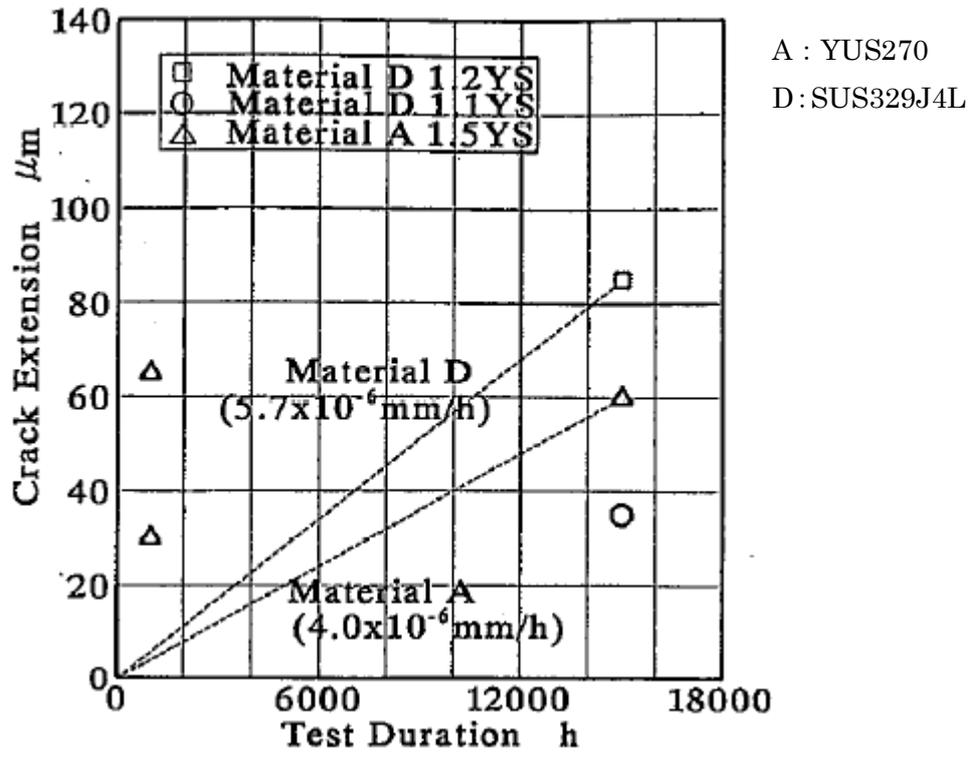


図 2.1.2-7 試験経過時間と試験片の亀裂深さの関係[21]

②技術課題と対応策

キャニスタ材料として二相ステンレス鋼とスーパーステンレス鋼を使用する場合の主な課題と対応策を以下に説明する。

1)高温脆化（二相ステンレス鋼）

二相ステンレス鋼は優れた耐食性と機械的特性を有するが、その主な制約の一つとして温度上昇に伴う共存性が挙げられる。[9] 高温におけるフェライト相の不安定性が耐食性と機械的特性の低下をもたらす。250°C～350°Cの範囲に長時間置かれるとフェライト相が分解して脆化を引き起こし、靱性が低下する。350°C～1000°Cの間では、炭化物、窒化物、 π 、 σ そして χ 相のような様々な第二相が現れて、耐食性及びまたは靱性を低下させる。そのため、圧力容器の規格では二相ステンレス鋼を用いることができる温度の上限を規定している。

ASME のボイラー及び圧力容器（B&PV）規格では、二相ステンレス鋼の大部分について260°Cを超えると脆化する可能性があるとの注釈付きで上限温度を 600° F(316°C)としている。[9]

既に取り上げた NUHOMS EOS 貯蔵システムではこれにしたがい、通常時及び異常時の二相ステンレス鋼の温度が 316°Cを超えないことと、事故時においては脆化を引き起こさない短時間であればこの温度を超えることを許容している。[8] なおこのことから、高温に伴う二相ステンレス鋼の耐食性を低下させずに機械的特性を向上するための窒化処理、浸炭処理、窒化浸炭処理などの表面処理技術の研究開発が行われている。[24]

2)溶接管理

溶接時の加熱冷却過程においてもオーステナイト相とフェライト相のバランスが変化することによって、耐食性や靱性が大きく変化する。そのため、溶接入熱範囲の設定やパス間温度の管理が重要となる。さらに溶接金属の組成は二相のバランス変化を考慮して母材よりも高 Ni とするよう設定する必要がある。[25]

一方、スーパーステンレス鋼では二相ステンレス鋼の相バランス変化による耐食性や機械的特性低下の問題はないが、溶接部の Cr、Mo 量の減少による耐食性低下や第二相析出による靱性低下の問題があるため、溶接金属の組成と入熱量及び冷却速度の調整が必要となる。[26]

3)蓋溶接の割れ

キャニスタの蓋溶接は使用済燃料を装荷した後に行うため、放射性透過試験が適用できないことと鋼種によって溶接時に懸念される割れ等の欠陥の特徴が異なることから、それに応じた適切な非破壊検査を行うことが求められる。ステンレス鋼溶接部に生じる溶接欠陥（割れ）は図 2.1.2-8 のように分類できる。通常のステンレス鋼（304,316）と二相ステンレス鋼及びスーパーステンレス鋼の溶接時に懸念される割れは次のとおり。[27]

・ 304,316 ステンレス鋼

5～10%の δ フェライト量を適切に管理することで溶接時の凝固割れを防止できる。一方、溶接過程における多層溶接金属中で次層パスの熱影響部に割れが発生する場合があります、この割れは延性低下割れと呼ばれ、長さが数百マイクロン以下の微細な割れである。

- ・ スーパーステンレス鋼

粒内硬化性の強い鋼種（ニッケルベースもしくはコバルトベースでアルミとチタン量の多いもの）は粒内塑性拘束が大きいいため層を跨ぐ切り欠き進展割れ（凝固割れに相当）が生じる可能性があるが、現在の規格材（ASME SA-188 (F44)、YUS270(同相当材)）は固溶体強化型で析出硬化型の析出を伴わない高合金で、前記のような凝固割れは起きにくいとされる。

- ・ 二相ステンレス鋼

上記の高温割れ(延性低下割れ)に加え、溶接環境条件によって水素に起因する割れが発生する可能性がある。これは低温割れに分類され、例としてステンレス鋼中のフェライトが増えるとガスシールとアーク溶接のシールドガスに水素添加した施工法を用いた場合に発生するものがある。

この割れは、溶接層を跨いで進展する可能性が否定できない。

以上をまとめると表 2.1.2-6 のように整理できる。

上記各鋼種に共通の延性低下割れはミクロンオーダーの微細な割れのため、溶接施工試験で強度上有害な割れ発生のない溶接条件を選定する必要がある。二相ステンレス鋼は溶接層間を跨いで進展する可能性がある低温割れの懸念があることから、PT(多層 PT)に加えて放射性透過試験に代わる適切な体積検査(UT)を適用する必要があると考えられる。

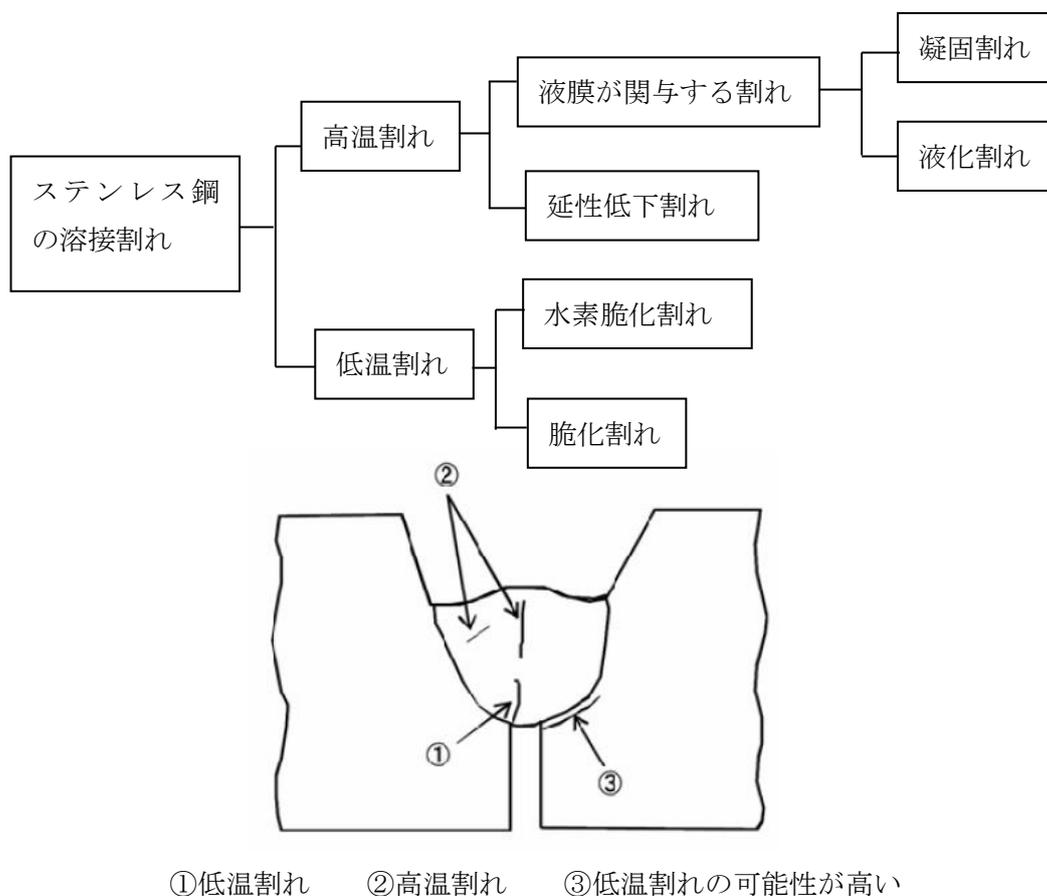


図 2.1.2-8 ステンレス鋼のキャニスタ蓋溶接部で生じる割れの種類[27]

上記で説明した二相ステンレス鋼とスーパーステンレス鋼をキャニスタ材料に適用する場合の課題と対応策を表 2.1.2-7 に整理して示す。

表 2.1.2-6 各種ステンレス鋼のキャニスタ蓋溶接部の割れ種類と対応[27]

鋼種	溶接割れの種類	溶接層を跨ぐ割れ進展有無	対応
通常のオーステナイト系ステンレス鋼(304,316 等)	高温割れ (延性低下割れ)	無	溶接条件で発生防止
スーパーステンレス鋼 (固溶硬化型) 現状の規格材[7] ASME SA-188 (F44)、 YUS270(同相当材)	高温割れ (延性低下割れ)	無	溶接条件で発生防止
二相ステンレス鋼	高温割れ(延性低下割れ) 低温割れ(水素脆化割れ)	無 有	溶接条件で発生防止 PT+体積検査(UT)

表 2.1.2-7 二相ステンレス鋼とスーパーステンレス鋼の主な課題[9,25,26]

材料	課題	対応策
二相ステンレス鋼	高温における耐食性と靱性低下	使用温度の制限(ASME 規格では 316°C以下に制限)
	溶接時の加熱冷却による耐食性と靱性低下	溶接条件管理 (入熱、パス間温度管理) 溶接金属組成調整(高 Ni 化)
	蓋溶接部の低温割れの可能性	多層 PT に加えて、UT による体積検査
スーパーステンレス鋼	溶接時の加熱冷却による耐食性と靱性低下	溶接条件管理 (入熱、パス間温度管理) 溶接金属組成調整(高 Ni 化)

(4)許認可

①日本

我が国のコンクリートキャスク技術要件[28]は、キャニスタに使用する材料を特に規定していないが、言外に SUS304 等の通常のステンレス鋼を前提としていると考えられる。コンクリートキャスク技術要件の各要件に対して高耐食材（二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼）を適用する場合の変更要否並びに検討が必要と思われる事項を表 2.1.2-8 に抽出した。

現行の技術要件の規定は基本的にキャニスタ材料によらず、また高耐食材と通常のステンレス鋼はそれらの物理的特性の差がわずかであることから、技術要件そのものを見直したり追加する必要はないと考えられる。しかし、実際の製造及び運用において技術要件に適合するうえで新たに解説に加える必要があると思われる事項等を表 2.1.2-9 に挙げる。（注；表 2.1.2-8 と表 2.1.2-9 の掲載順序を逆にしている。）

表 2.1.2-9 高耐食材を適用する場合のコンクリートキャスク技術要件[28]における検討事項

該当要件	高耐食材採用に関する要検討事項	備考
要件 4 密封機能 ・ 閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・ 多重化された溶接蓋	適切な溶接条件、溶接方法の選定 (解説にて言及)	溶接割れ、耐食性低下、 靱性低下の防止
	高耐食材を使用する場合の貯蔵中 の付着塩分管理等(適切な基準、方 法、頻度) (解説にて言及)	通常のステンレス鋼 より合理化の可能性
	高耐食材を使用する場合の蓋溶接 検査方法、基準 (解説にて言及) ※現行は多層 PT と UT の両方	溶接特性、溶接欠陥性状 を考慮
要件 21 検査、修理等の考慮	高耐食材を使用する場合の貯蔵中 の外観検査 (発錆状況等) の基準、方法、頻度 (解説にて言及)	通常のステンレス鋼 より合理化の可能性

表 2.1.2-8 高耐食材を適用する場合に検討が必要と思われるコンクリートキャスク技術要件の規定

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
Ⅲ 立地条件			
要件 1 基本的条件	<p>使用済燃料貯蔵施設（以下、「貯蔵施設」という。）の立地地点及びその周辺においては、事故の誘因となる事象が起こるとは考えられないこと。また、万一事故が発生した場合において、災害を拡大するような要因も少ないこと。</p> <p>（解説）</p> <p>事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から貯蔵施設の立地地点及びその周辺における以下について検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>1. 自然環境</p> <p>(1) 地震、津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等の自然事象</p> <p>(2) 地盤、地耐力、断層等の地質及び地形等</p> <p>(3) 風向、風速、降雨量等の気象</p> <p>(4) 河川、地下水等の水象及び水理</p> <p>2. 社会環境</p> <p>(1) 近接工場等における火災・爆発等</p> <p>(2) 航空機事故等による飛来物等</p> <p>(3) 農業、畜産業、漁業等の食物に関する土地利用及び人口分布状況等</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件 2 平常時条件	<p>貯蔵施設は、平常時における一般公衆の線量が、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低いものであること。</p> <p>（解説）</p> <p>1. 本要件は、貯蔵施設における、貯蔵、キャニスタ詰替、施設内移送、放射性廃棄物の廃棄等の活動を考慮して適切な方法により評</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>価される敷地周辺の一般公衆の被ばく線量が合理的に達成できる限り低いものになるように適切な措置が講じられていることの確認を求めるものである。</p> <p>2. 貯蔵施設からの放射線による一般公衆の外部被ばくの評価を行う際には、直接線及びスカイシャイン線による影響を考慮すること。</p> <p>3. 貯蔵施設から環境へ放出される放射性物質として、キャニスタを透過するトリチウム、キャニスタ冷却空気の放射化によって生成される放射性物質及びキャニスタ表面の放射性物質を考慮すること。</p>		
要件3 事故時条件	<p>貯蔵施設において、最大想定事故が発生した場合、一般公衆に対して、過度の放射線被ばくを及ぼさないこと。</p> <p>(解説)</p> <p>最大想定事故の評価にあたっては以下の事項を適切に考慮すること。</p> <p>1. 事故の選定</p> <p>貯蔵施設の設計に基づき、</p> <p>(1) 落下・衝突・転倒</p> <p>(2) 火災・爆発</p> <p>(3) 空気流路閉塞等の冷却不全</p> <p>(4) 経年変化等に伴う密封機能劣化</p> <p>(5) 自然災害</p> <p>等、コンクリートキャスクの基本的安全機能を著しく損なうおそれのある事故の発生の可能性を、長期貯蔵に伴うコンクリートキャスクの構成部材の経年変化も踏まえ、技術的観点から十分に検討し、最悪の場合、発生が想定される事故であって、一般公衆の放射線被ばくの観点</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>からみて重要と考えられる事故を選定すること。その際、信頼性のあるデータ、安全裕度のある妥当な仮定・条件等に基づいて、事故となる要因、発生の可能性、事故の進展過程等を評価すること。</p> <p>2. 線量の評価</p> <p>1.で選定した事故のそれぞれについて、技術的に妥当な解析モデル及びパラメータを採用するほか、次の事項等に関して検討し、安全裕度のある妥当な条件を設定して、放射性物質の放出量、遮蔽機能の低下等を評価すること。</p> <p>(1)コンクリートキャスクの密封機能</p> <p>(2)コンクリートキャスク及び貯蔵建屋等の遮蔽機能</p> <p>(3)放射性物質の放出を想定するコンクリートキャスクの基数</p> <p>(4)放出に寄与するキャニスタ内の放射性物質の核種と量</p> <p>落下・衝突・転倒等の衝撃力が発生する事故においては衝撃力による粒子状放射性物質の飛散等、事故の状態を考慮して放射性物質の核種と量を決定すること。</p> <p>(5)放射性物質の大気中の拡散条件</p> <p>(6)放射性物質の放出期間</p> <p>放射性物質の放出量等の計算における放出期間の設定にあたっては、事故発生後異常を検知するまでの時間や、影響緩和のための対策に要する作業時間等を適切に考慮すること。</p> <p>評価した事故のうち、一般公衆に対して最大の放射線被ばくを及ぼす事故を最大想定事故として設定し、その場合の線量をもってしても、</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>一般公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないことを確認すること。</p> <p>3. 一般公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないことの判断基準は「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）の事故時の判断基準のうち「周辺公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと。」の判断基準とする。</p>		
IV 基本的安全機能			
要件4 密封機能	<p>1. 貯蔵施設を構成するキャニスタは、放射性物質の閉じ込め、内部空間の不活性雰囲気を保つ密封機能を維持できる設計であること。</p> <p>2. キャニスタの蓋部は多重化された適切な溶接構造で密封される設計であること。</p> <p>（解説）</p> <p>1. キャニスタの密封機能は以下を達成するために要求するものである。</p> <p>(1) 使用済燃料が内包する放射性物質をキャニスタの外に放出させないこと。</p> <p>(2) バスケット及び使用済燃料の健全性を維持するために、キャニスタ内部の空間を不活性雰囲気に保つこと。</p> <p>2. キャニスタの密封機能に影響を及ぼすメカニズムとして、</p> <p>① 製造時の施工不良</p> <p>② 設計想定を超える荷重の負荷（熱応力及び応力サイクルを含む）</p> <p>③ 内面からの腐食（応力腐食割れを含む）</p> <p>④ 外面からの腐食（応力腐食割れを含む）が挙げられる。</p>	<p>無し</p> <p>（解説）</p> <p>2.</p> <p>① 二相ステンレスは高温脆化の問題があり、溶接条件を適切に選定する必要がある。</p> <p>また、スーパーステンレス鋼も含めて溶接部の耐食性が低下しない溶接条件（溶接金属の選定含む）を選定する必要がある。</p>	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>①は施工管理、検査を厳重に行うことによって、②は適切な安全裕度を有する機械設計によって、また、③はキャニスタ内の不活性雰囲気を維持することによって、密封機能への影響を排除できると考えられる。従って、密封機能維持のためには、④の外面からの腐食への対策が重要である。特に、冷却空気によって持ち込まれる塩分付着により応力腐食割れが発生するおそれがある場合には、高耐食性材の使用、溶接部残留応力の低減、塩分付着環境の改善等、適切な応力腐食割れ対策が講じられた設計であること。</p> <p>3. キャニスタは使用済燃料を収納した後に蓋を溶接によって取付ける構造である。そのため、蓋溶接部は、通常の原子炉施設の第一種容器で行われている両側完全溶け込み溶接とは異なる片側部分溶け込み溶接とする設計が想定される。また、溶接部の健全性を確認する検査方法についても、強い放射線を放出する使用済燃料が収納されているため、溶接部の放射線透過試験（RT）は適用できない。これらの点を考慮して、キャニスタの蓋の溶接部は、排水用貫通孔等の蓋の溶接部も含め、多重の溶接密封構造であることを求める。</p> <p>4. 「適切な溶接構造」とは、次のことをいう。</p> <p>(1) 蓋の溶接は、使用済燃料が放出する強い放射線環境下で行われること及び過去の実績が少ないこと等から、モックアップ試験等によって事前に施工の確実性、信頼性等が十分に確認された溶接方法を使用するものであること。</p> <p>(2) 蓋溶接部の検査は、多層 PT（許容される</p>	<p>④高耐食材は、通常のスแตนレス鋼よりも耐 SCC 性が優れることから、この特性を考慮した貯蔵中の付着塩分管理を行うことが考えられる。</p> <p>4.</p> <p>(1)高耐食材（二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼）の溶接特性に合わせた適切な溶接方法と溶接条件を選定する必要がある。</p> <p>(2) 高耐食材（二相ステンレス鋼、スー</p>	

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>最大欠陥寸法を超えない間隔で実施する多層浸透探傷試験)と UT (超音波探傷試験)によって実施されるものであること。これは以下の理由による。</p> <p>① 多層 PT は既に海外で実績がある方法であるが、PT により表面欠陥がないことが確認されても表面に現れていない潜在欠陥が存在した場合、その後の溶接で潜在欠陥が PT を実施した面を超えて成長する可能性を完全に排除できないこと。</p> <p>② RT の代替検査手法とすべき UT は、オーステナイト系ステンレス鋼への適用が困難といわれてきたが、近年の技術進歩により信頼性が向上してきていること。</p> <p>③ 密封機能維持の考え方において、溶接施工不良が原因の密封機能喪失は検査によって排除できるものとしており、本検査による健全性確認が重要であること。</p> <p>なお、必要な信頼性を有することが証明された場合はこの限りではない。</p>	<p>パーステンレス鋼)の想定される溶接欠陥の性状を考慮して必要に応じて見直すことが考えられる。</p>	<p>スーパーステンレス鋼の現規格材 (ASME SA-188 (F44)、YUS270(同相当材))は通常のステンレス鋼と同様に溶接層間を跨いで進展する溶接割れが生じないので、多層 PT のみで健全性を担保できると考えられる。</p> <p>一方、二相ステンレス鋼は、溶接層間を跨いで進展する低温割れの懸念があるため、多層 PT に加えて適切な UT を行う必要があると考えられる。</p> <p>なお、オーステナイト系ステンレス鋼と二相ステンレス鋼を用いるキャニスタの蓋溶接部に対する UT の適用性確認と UT 検査要領及び検査判定基準案が電中研より報告されている。[27,29]</p>
要件 5 遮蔽機能	<p>貯蔵施設は、直接線及びスカイシャイン線による一般公衆の線量が十分に低くなるように適切な放射線遮蔽機能を有する設計であること。また、放射線業務従事者の作業条件を考慮して、十分な放射線遮蔽機能を有する設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 貯蔵施設の遮蔽機能は、コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置、貯蔵建屋等によって分担させることができる。</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>2. コンクリート製貯蔵容器は、貯蔵エリアにおいて放射線業務従事者が必要な業務を安全に遂行するために十分な放射線遮蔽能力を有すること。</p> <p>3. コンクリート製貯蔵容器及び貯蔵建屋の遮蔽設計は、以下の項目を適切に考慮したものであること。</p> <p>① 給排気口からの中性子線及びガンマ線の漏えい（ストリーミング）</p> <p>② コンクリートの経年変化に伴う遮蔽能力の低下</p> <p>③ コンクリート製貯蔵容器の内表面に設置される鋼製ライナの剥離性腐食生成物による遮蔽能力の低下</p>		
要件6 臨界防止機能	<p>貯蔵施設は、技術的にみて想定されるいかなる状態においても、臨界を防止する設計であること。</p> <p>金属キャスク内のバスケットが臨界防止機能の一部を構成する場合には、バスケットは、臨界防止機能維持に必要な構造健全性を保つことができる設計であること。</p> <p>（解説）</p> <p>本要件は、金属キャスクの受入から搬出までの全行程で、事故発生時を含めたあらゆる状態において、臨界を確実に防止する設計であることを求めている。臨界解析においては、信頼性が確認された手法、解析コードを用いるとともに、以下の項目等について安全裕度のある妥当な条件を設定すること。</p> <p>① 収納する使用済燃料の初期濃縮度及び燃焼度並びにそれらの分布</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	② 金属キャスク内外の水又は水蒸気の存在 ③ バスケット格子内の燃料集合体位置 ④ ボロン等の中性子吸収材の濃度、非均質性、核反応に伴う減損 ⑤ バスケット及び使用済燃料集合体の形状変化 ⑥ 臨界解析は、移送作業、地震時の滑動等も考慮して、中性子実効増倍率が最も大きくなる金属キャスクの配置を想定して行うこと。		
要件 7 除熱機能	<p>貯蔵施設は、密封機能、遮蔽機能、臨界防止機能及び使用済燃料の健全性を維持するために必要な除熱機能を有する設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. コンクリートキャスクは、外部から取り入れた空気が、コンクリート製貯蔵容器下部の給気口から入り上部の排気口から排出される間に、キャニスタとコンクリート製貯蔵容器の間隙を通過してキャニスタ等を冷却する方式のものである。本要件は、コンクリートキャスクが十分な冷却能力を確保できる設計であること、また、貯蔵建屋はコンクリートキャスクに求める除熱機能を阻害しない設計であることを求めるものである。</p> <p>2. 必要な除熱機能を有する設計とは、以下の事項を満足するものをいう。</p> <p>(1) キャニスタ、バスケット、コンクリート製貯蔵容器の温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持すること。</p> <p>(2) 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損防止及び被覆管の機械的特性低下防止の観点から制限される値以下に維持すること。</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	(3) 上記の各温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータを測定等により取得できる設計であること。		
V 放射線管理及び環境安全			
要件 8 放射線業務従事者の被ばく管理	<p>1. 作業環境における放射線被ばく管理</p> <p>(1) 放射線業務従事者の作業環境を監視、管理するため、線量率等の監視系統及び測定機器並びに線量率の異常な上昇に対する警報系統を設けること。</p> <p>(2) 上記の系統からの主要な情報は、適切な場所において集中して監視できる設計であること。</p> <p>2. 放射線業務従事者の個人被ばく管理</p> <p>放射線業務従事者の個人被ばく管理に必要な線量計等の機器を備えること。</p> <p>3. 管理区域の区分</p> <p>管理区域は、線量率及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度の程度により必要に応じて適切に区分し、適切な出入り管理等が行える設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、線量率等の監視等を行う際は、施設の設計に応じて中性子線の影響を適切に考慮すること。</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件 9 放射性廃棄物の処理及び放出管理	<p>貯蔵施設は、その貯蔵等に伴い発生する放射性廃棄物を適切に処理する等により、周辺環境へ放出する放射性物質の濃度等を合理的に達成可能な限り低くする設計であること。</p> <p>(解説)</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>1. 貯蔵施設で発生する放射性液体廃棄物を環境に放出する場合には、放出される排水中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じて適切な処理を行える設計であること。</p> <p>2. 貯蔵施設で発生する放射性気体廃棄物を環境に放出する場合には、放出される排気中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じて適切な処理を行える設計であること。</p> <p>3. 貯蔵施設は、発生する放射性固体廃棄物を貯蔵するのに十分な容量の貯蔵設備を有し、必要に応じて適切な処理が行える設計であること。</p>		
要件 1 0 放射線監視	<p>1. 貯蔵施設は、放射性廃棄物の放出の経路における放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。</p> <p>2. 貯蔵施設は、貯蔵エリアの排気口において空気中の放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。</p> <p>3. 放射性物質の放出の可能性に応じ、周辺環境における線量率、放射性物質の濃度等を監視するための適切な対策が講じられていること。 (解説)</p> <p>1. 貯蔵施設で発生する放射性液体廃棄物を環境に放出する設計である場合には、その放出口またはその他の適切な箇所において、それぞれの放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていることを求めている。</p> <p>2. 一般公衆の放射線被ばくの観点から有意な</p>	無し	基本的に同じ

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>放射性物質が貯蔵エリアから排出される空气中に含まれていないことを確認するため、放射性物質の汚染のおそれのない管理区域（以下、「非汚染管理区域」という。）として管理される貯蔵エリアの排気口においても、放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていることを求めている。これはキャニスタの密封機能によって放射性物質を閉じ込める設計であること、貯蔵エリアが非汚染管理区域として管理されることから、平常時の放射性気体廃棄物の放出管理の観点からの監視は不要と考えるが、気体状放射性物質を多量に含む使用済燃料を貯蔵する施設であるという特徴を考慮して、一般公衆に有意な被ばくを及ぼす放射性物質の放出がないことを、測定結果をもって示すことは重要であると考えたことによる。</p> <p>3. 周辺環境等における放射線監視については、事故時においても線量率、放射性物質の濃度等に関する情報を得るための対策が講じられていることを求めている。</p>		
VI その他の安全対策			
要件 1 1 使用済燃料に関する考慮	<p>1. 貯蔵施設の設計に用いる使用済燃料の特性は、貯蔵しようとする使用済燃料の信頼性があるデータに基づき、安全裕度をもって適切に設定したものであること。</p> <p>2. 貯蔵する使用済燃料は、キャニスタに収納する前に漏えいしていないことが適切な方法により確認されたものであること。</p> <p>（解説）</p> <p>1. 貯蔵施設の設計にあたっては、貯蔵しよう</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>とする使用済燃料の範囲を明確にすること。 使用済燃料の発熱量、放射エネルギー、反応度、被覆管機械的特性等、貯蔵施設の設計に用いる諸特性は、貯蔵しようとする使用済燃料の範囲全てを包絡し、適切な安全裕度をもって設定されたものであること。</p> <p>2. バスケット及び使用済燃料の健全性は、キャニスタの内部空間を不活性雰囲気を保つことにより維持される。貯蔵する使用済燃料は、キャニスタ内に収納された後に乾燥されるが、ピンホール、ヘアクラック等の微小の漏れ孔を有する燃料棒の場合、乾燥が不完全になり、燃料棒内に残留した水分が貯蔵中に放出され、不活性雰囲気の低下をもたらす可能性がある。また、漏れ燃料棒では、浸入した冷却水とペレット等との反応によって生じた水素が被覆管に吸収され、被覆管の機械的特性が低下している可能性がある。</p> <p>これらのことから、貯蔵する使用済燃料は原子炉の運転中のデータや燃料集合体 SHIPPING 検査等により漏れしていないことが確認されたものに限定することとした。</p> <p>ただし、貯蔵施設の設計において、漏れ燃料棒の残留水分及び被覆管の機械的強度低下の影響が適切に考慮されている場合にはこの限りではない。</p>		
要件 1 2 キャニスタの内部空間の雰囲気に対する考慮	貯蔵施設に貯蔵するキャニスタは、バスケット、使用済燃料等の健全性を維持するために、不活性ガスが適切に充填される設計であること。 (解説)	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>1. 本要件は、キャニスタの内部空間の雰囲気、キャニスタ内面、バスケット及び使用済燃料の腐食、応力腐食割れ等を防止するために必要な不活性雰囲気にするをを求めるものである。</p> <p>2. キャニスタの内部空間が、以下の項目等を考慮しても、1. の目的を達成するのに十分な不活性雰囲気になるように対策される設計であること。</p> <p>① 充填ガスに含まれる不純物 ② ガス置換工程で混入する空気 ③ 乾燥工程で残留する水分</p>		
要件13 キャニスタ取扱等に対する考慮	<p>キャニスタ等を取り扱う設備は、これらの基本的安全機能に影響を及ぼす、落下、衝突等を防止する適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 「キャニスタ等」とは、キャニスタ、キャニスタを収納した輸送容器及びコンクリートキャスクをいう。</p> <p>2. 「取り扱う設備」とは、キャニスタ等を取扱う移送装置、キャニスタ詰替装置等をいう。</p> <p>3. 「落下、衝突等」とは、施設内でキャニスタ等を取り扱う際に発生する可能性のある落下、衝突、転倒、異常着床等の事象をいう。</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件14 火災・爆発に対する考慮	<p>貯蔵施設は、火災・爆発の発生を防止し、かつ、万一の火災・爆発の発生時にはその拡大を防止するとともに、基本的安全機能を維持する観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は以下の対策等が講じられた設計で</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>あること。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 貯蔵施設は実用上可能な限り不燃性または難燃性材料を使用する設計であること。 2. 貯蔵施設において可燃性物質を使用する場合は、火災・爆発の発生を防止するため、着火源の排除、異常な温度上昇の防止対策、可燃性物質の漏えい防止及び洩れ込み防止対策等適切な対策が講じられた設計であること。 3. 万一の火災の拡大を防止するために、適切な検知、警報系統及び消火設備が設けられているとともに、火災による影響低減のために適切な対策が講じられた設計であること。 		
要件 1 5 冷却用空気流路閉塞等の冷却不全に対する考慮	<p>貯蔵施設は、冷却用空気の流路閉塞等の冷却不全の発生を防止し、かつ、万一の冷却不全発生時に基本的安全機能を維持する観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は以下の対策等が講じられた設計であること。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. コンクリート製貯蔵容器は、冷却用空気の給排気口に異物の侵入防止対策を施した設計であること。 2. コンクリート製貯蔵容器は、冷却用空気流路が閉塞した場合、給排気温度の測定等により、これを検知できる設計であること。 3. 貯蔵建屋の給排気口は、積雪等により閉塞しない設計であること。 4. キャニスタ詰替装置の故障等によりキャニスタが詰替装置内に長時間留まっても基本的安全機能が損なわれないように除熱できる設計であること。 	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
要件16 電源喪失に対する考慮	<p>貯蔵施設は、外部電源喪失に対して、安全確保の観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、停電等の外部電源系の機能喪失時に、以下の安全上必要な設備・機器を作動し得るのに十分な容量及び信頼性のある電源系を有する設計であること。</p> <p>(1) 放射線監視設備</p> <p>(2) 火災等の警報設備、緊急通信・連絡設備、非常照明灯等の設備・機器</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件17 共用に対する考慮	貯蔵施設の安全上重要な施設のうち、当該貯蔵施設以外の原子力施設との間又は当該貯蔵施設内で共用するものについては、その機能、構造等から判断して、共用によって当該使用済燃料貯蔵施設の安全性に支障をきたさないものであること。	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件18 地震に対する考慮	<p>1. 貯蔵施設は、敷地及びその周辺地域における過去の地震記録、現地調査結果等を参照して、最も適切と考えられる設計用地震力に対し必要な基本的安全機能が維持できる設計であること。</p> <p>2. 貯蔵施設は、想定される地震力に対して、貯蔵中のコンクリートキャスクが転倒しない設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設の耐震設計について、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(以下「耐震設計審査指針」という。)」の考え方にに基づき、次の事項に従って妥当性を評価することとする。</p> <p>1. 耐震設計上の重要度分類</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>貯蔵施設の耐震設計上の重要度分類によるクラス別施設は、耐震設計審査指針に従い、以下の通りとする。</p> <p>①Aクラスの施設</p> <p>i) 使用済燃料を貯蔵するための施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ、バスケット <p>ii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設</p> <p>なお、貯蔵施設においては、特に i) に示す施設をAsクラスと呼称する。</p> <p>②Bクラスの施設</p> <p>i) 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が年間の周辺環境区域外の線量限度に比べ十分小さいものは除く。</p> <p>ii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置、貯蔵建屋（遮蔽機能を期待する場合） <p>iii) 使用済燃料を冷却するための施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置 <p>iv) 放射性物質の放出を伴うような場合、その外部放散を抑制するための施設でAクラスに属さない施設</p> <p>③Cクラスの施設</p> <p>上記A、Bクラスに属さない設備</p> <p>2. 各クラス別施設は、次に示す耐震設計に関する基本的な方針を満足すること。</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>(1) Aクラスの各施設は、基準地震動S1による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐えること。</p> <p>さらに、Asクラスの各施設は、基準地震動S2による地震力が作用しても、各施設に要求される基本的安全機能を損なわないこと。</p> <p>なお、「基準地震動S1による地震力」及び「基準地震動S2による地震力」とは、耐震設計審査指針に規定されるそれぞれの地震力の算定法により算定された地震力をいう。また、「静的地震力」とは耐震設計審査指針に規定される耐震設計評価法に基づく静的地震力をいう。</p> <p>(2) Bクラスの各施設は静的地震力に耐えること。また、基準地震動S2による地震力が作用したとしても、遮蔽機能の低下が一般公衆に過大な放射線被ばくを及ぼさないこと及び密封機能、遮蔽機能、臨界防止機能維持に必要な除熱機能を損なわないこと。</p> <p>(3) 上位の分類に属するものの基本的安全機能は、下位の分類に属するものの破損によって、波及的に喪失することがないこと。例えば、AsクラスのキャニスタはBクラスのコンクリート製貯蔵容器に収納されているが、この場合、コンクリート製貯蔵容器は、Asクラスに要求される地震力が作用した場合には損傷しても良いが、その損傷によってキャニスタの維持すべき基本的安全機能が喪失してはならない。</p> <p>3. キャニスタはコンクリート製貯蔵容器内に固定せずに収納されており、また、コンクリー</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>ト製貯蔵容器は床面に固縛されない設計も考えられる。基準地震動S2による地震力に対する評価においては、コンクリート製貯蔵容器と床面及びキャニスタの接触について安全裕度のある適切な条件を設定すること。また、コンクリート製貯蔵容器にかかる静的地震力に対する評価では、キャニスタ及びコンクリート製貯蔵容器は固定されているものと仮定し、地震力が完全に伝達されるものとする。</p> <p>4. コンクリートキャスクの転倒を許す設計では、多数のコンクリートキャスクが転倒して転がり、相互に干渉することを考慮する必要があるが、この解析・評価は複雑で困難と考えられること、また深層防護の観点も考慮して、基準地震動S2による地震力が作用した場合において、コンクリートキャスクが転倒しないことを要求することとする。なお、コンクリートキャスクの固縛は、転倒防止設計の一方法ではあるが、本要件は必ずしも固縛を求めるものではない。</p> <p>5. 耐震設計審査指針における「重要な建物・構築物は岩盤に支持されねばならない。」という要求に対しては、支持することとなる地盤が地震時における安定性、建屋との相互作用等を適切に解析・評価できるものであれば、この要求を満たすものとする。</p>		
要件19 地震以外の自然現象に対する考慮	<p>貯蔵施設における安全上重要な施設は、予想される地震以外の自然現象のうち最も苛酷と考えられる自然力を考慮した設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>「予想される地震力以外の自然現象のうち最</p>	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	<p>も苛酷と考えられる自然力」としては、敷地及びその周辺地域の自然環境をもとに洪水、津波、台風、積雪等のうち予想されるものに対して、過去の記録の信頼性を十分検討の上、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、妥当とみなされるものを選定すること。なお、過去の記録、現地調査の結果等を参考にして必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させること。</p>		
要件 2 0 事故時に対する考慮	<p>貯蔵施設は、事故時に対応した警報、通信連絡、放射線業務従事者等の避難等のための適切な対策が講じられていること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、以下の対策等が講じられた設計であること。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 適切な放射線計測器、放射線防護具等が必要に応じ確保されていること。 2. 通常の照明用の電源が喪失した場合においても、その機能を失うことのない待避用の照明を設備し、かつ、単純、明確及び永続性のある標識のついた安全退避通路を有する設計であること。 	無し	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。
要件 2 1 検査、修理等に対する考慮	<p>貯蔵施設における安全上重要な施設は、その重要度及び必要性に応じ、適切な方法により、検査、試験、保守及び修理ができる設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>キャニスタは、密封機能維持の確認の観点から、溶接部近傍の発錆状況等を確認できる設計でなければならない。また、コンクリート製貯蔵容器は、除熱機能維持等の観点から、内側の</p>	<p>無し</p> <p>(解説)</p> <p>高耐食材（二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼）は、通常のスチールよりも耐 SCC 性が優れることから、この特性を考慮した貯蔵中の外観検査要</p>	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに高耐食材を適用する場合に検討を要する事項	備考
	鋼製ライナの腐食状態等を確認できる設計であることが必要である。	領を定めることが考えられる。	
要件 2 2 準拠規格及び基準	<p>貯蔵施設における安全上重要な施設の設計、材料の選定、製作、工事及び検査は、適切と認められる規格及び基準によるものであること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、「原子炉等規制法」、「建築基準法」、「消防法」等日本国内法令を満足するとともに、安全上重要な施設の設計、材料の選定、製作、工事及び検査は、適切と認められる日本工業規格、学会等の規格及び基準によるものであること。なお、必要に応じて、国外の規格及び基準も信頼性が十分高いと確認される場合には準拠することができる。</p>	<p>無し</p> <p>(解説)</p> <p>高耐食材（二相ステンレス鋼、スーパーステンレス鋼）は適切な規格に適合することが求められる。</p>	この条件はキャニスタ材料の選定によらない。

②米国

米国では、キャニスタは NUREG-2215(2020 年版)[30]の 8.5.2 節に記載しているとおり ASME B&PV 規格にしたがって設計しなければならない。NRC は ASME B&PV、Sec.III、”原子力施設用機器の建設規格”、Div.1、”金属機器” を承認しており、乾式貯蔵システムの閉じ込め境界を構成する機器は材料と製造の両方について、ASME B&PV、Sec.III、Subsection NB、” Class1” の要求にしたがい製作される。

前出のとおり NRC が認可した NUHOMS EOS システムと HI-STORM100 システムでは、キャニスタ材料について二相ステンレス鋼を SUS304 と SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼の代替材とすることができる。この代替材であるタイプ 2205 (UNS S31803 または UNS S32205) 二相ステンレス鋼は、CISCC に対する優れた耐性を持つ。S31803 と S32205 はそれぞれ ASME B&PV コードケース N-635-1 と N-741 にてクラス 1 機器の製作用として規定され、これらの規格は R.G.1.84” 設計、製作及び材料に係るコードケースの許容性、ASME、Sec.III” Rev.38 [18] によって NRC がエンドースしている。

米国においてこれ以外の高耐食材を使用する場合は、規格化のための膨大な作業と ASME B&PV、Sec.III、Class1 の承認を必要とする。特に閉じ込め境界機器に対する合金を規定する貯蔵システムの設計は以下を満足しなければならない。[30]

- ・これらの合金に関するマイクロ組織の考慮
- ・耐食性または靱性に悪影響を及ぼすようなマイクロ組織変化をもたらさない製造過程と溶接方法であることを保証するための試験と許容基準を含むこと。

2.1.3 表面処理技術に係る調査

キャニスタの SCC 対策として有効と考えられる各種表面処理技術（塗装、溶射等）について調査を行い、キャニスタの長期貯蔵環境に適合する候補技術を選定し、国内外での適用実績、技術的特徴、技術的課題、研究開発及び規制要件を整理した。

(1)候補技術

キャニスタの SCC 対策として適用可能と考えられる表面処理技術の候補を表 2.1.3-1 にまとめた。以下にそれらの概要を説明する。

①塗装

表 2.1.3-2 に各種塗料の耐熱温度を示す。塗料は大きく有機系塗料と無機系塗料に大別されるが、前者は一般に耐熱温度が低い（～150℃）。一方、キャニスタ表面の温度は貯蔵初期で最高 200℃程度、50 年後で～100℃程度との評価結果がある。（図 2.1.3-1）原子力発電所の床や壁のような放射線環境では一般にエポキシ樹脂塗料が用いられているが、耐熱温度が低い（～130℃）ため、キャニスタに適用する場合は温度による制約が課せられる。このため、キャニスタに適用する場合には表 2.1.3-2 より以下が候補として考えられる。

- ・無機系亜鉛含有（ジンクリッチ）塗装
- ・シリコン樹脂系塗装

無機系ジンクリッチ塗料は、錆び止め顔料（防錆顔料；rust preventive pigment, rust inhibitive pigment）として高濃度の亜鉛末（zinc dust）を用い、鋼の防食を目的としたプライマー（地肌塗り）や下塗り塗料として用いられている。

これは、亜鉛が母材（鉄）よりもイオン化傾向が高い性質を持つため、亜鉛末が鉄素地より先に腐食することによって母材を守る特性（犠牲防食効果）を利用するものである。さらに、塗装を行うことにより、保護被膜が形成され、表面被膜が綿密になり空気や水の侵入を防ぐ効果がある。ジンクリッチ塗料は JIS K 5552 によって、1 種 無機ジンクリッチプライマーと 2 種 有機ジンクリッチプライマーの 2 種類に分類され、ここでの無機系ジンクリッチ塗料は前者を指す。

屋外大気環境で長期防錆が期待できる塗装系には、ジンクリッチ系塗料を下塗り塗料として用いるのが一般的になっている。[33～35]

シリコン樹脂は、結合の主骨格となるシロキサン結合（Si-O-Si）と各種有機基が結び付くことで、多くの特性を発揮する。シロキサン結合の強さと酸化しにくいことから、耐熱性に非常に優れ、そのほかにも耐候性や耐水性、撥水性、耐薬品性、電気絶縁性にも優れており、またオイル、レジン、ゴムなど性状も多彩であらゆる産業分野で使用されている。[36]

後で述べるように、米国では炭素鋼製キャニスタ表面に無機系ジンクリッチ塗料を全面に塗装した仕様のものが複数の ISFSI（独立使用済燃料貯蔵施設）で採用されている。

表 2.1.3-1 キャニスタに適用できる可能性がある耐 SCC 向上のための表面処理技術の候補

対策分類	主な候補技術	概要	密着強度	耐熱性	耐放射線性	蓋溶接部への適用性	キャニスタへの適用実績	候補技術	
環境遮断	樹脂塗装	無機系亜鉛含有 (ジンクリッチ) 塗装 [37~39]	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ表面は比較的高温 (～200℃) となるため [32]、耐熱性が高い無機系塗料 (ジンクリッチ、シリコン樹脂等) が第一候補として挙げられる。 ・貯蔵期間が長く温度が低下したキャニスタに対しては、エポキシ系やポリウレタン系も適用できる可能性がある。 ・塗装は、無機系も含めて樹脂 (有機材) を含有するため耐放射線性が課題 	△	○ 400℃以下[31]	△～○	○ (米国) [48,49]	○ 米国のキャニスタで実績有	
		エポキシ樹脂塗装		△	△～× 130℃以下[31]	△	○		
		ポリウレタン樹脂塗装		△	△～× 130℃以下[31]	△ [64,65]	○		
		シリコン樹脂塗装[36]		△	○ 200~600℃[31]	△ [63]	○	○	
	コーティング	低温溶射 (コールドスプレイ) [6,40,41]	防食溶射には、亜鉛溶射、アルミニウム溶射等があるが、[42] 施工温度が低いため対象物への熱影響が少なく、また緻密な被膜形成が可能で母材に圧縮残留応力を付与できる低温溶射 (コールドスプレイ) が有力な候補技術と考えられる。(図 2.1.3-2)	○	○	○	○	○ 実貯蔵施設で SCC 補修デモ試験 (米国) [50]	○
		高速酸素燃料スプレイ (HVOF) [6,43]	気体または液体燃料を酸素で燃焼させて高速のガス流を作り、粉末溶射材を半熔融状態として高速で対象物に吹き付ける。緻密でかつ高強度の被膜が形成でき、また母材の残留応力を制御できる。(図 2.1.3-3,4)	○	○	○	○		
		高速レーザー加速沈着 (HVLAD) [6]	レーザーピーニングの応用で、薄い水層で覆われたコーティング材にレーザーパルス照射し、コーティング材と母材の界面に材料の塑性流動を引き起こし接着させる。室温の大気中で施工が可能。また、母材に圧縮応力を付与できる。(図 2.1.3-5)	○	○	○	不明		
残留引張応力低減	ピーニング	レーザーショットピーニング (LSP) [23,44]	対象物の表面を水膜で覆った状態でレーザーを照射することにより発生する衝撃波で圧縮残留応力を形成する方法。図 2.1.3-6 に LSP の概念を示す。	—	○	○	△	○ (米国) [50]	○
		ジルコニアショットピーニング (ZSP) [23,45,46]	ショット材に高密度ジルコニアを用いるもので、ステンレス鋼に用いられる。鉄を含まないため錆を持ち込まない、均一な残留応力場が形成できる等の特徴がある。	—	○	○	×	○ 実規模施工性、耐 SCC 試験(日本) [45]	○ (蓋部への適用は不明)
	バニシング	低塑性バニシング (LPB) [12,23,47]	バニシング加工は対象物の表面に高硬度材でできた円筒あるいは半球形状の工具を押し付けて仕上げ面を得る工法で、表面に圧縮残留応力を付与できる。[47] 低塑性バニシング(LPB)は米国 LAMBDA 社が開発したもので詳細は非公開。[23]	—	○	○	△	○ 実規模施工性、耐 SCC 試験(日本) [12]	○

表 2.1.3-2 各種塗装の耐熱温度[31]

一般名	商品名	耐熱温度℃
ウォッシュプライマー	ビニレックス 120 アクチブプライマー	70℃以下
有機系ジンクリッチプライマー	ニッペジンキー8000 メタルグレー	150℃ //
" ペイント	" 8000HB	150℃ //
無機系ジンクリッチプライマー	ニッペジンキー1000P	400℃ //
" ペイント	" 1000QC	400℃ //
油性系さび止	シアナミドヘルゴン下塗類	80℃ //
合成樹脂系さび止(フタル酸)	速乾シアナミドヘルゴン下塗類	80℃ //
合成樹脂調合さび止(フタル酸)	CRペイント中塗、上塗	80℃ //
塩化ゴム系塗料	ハイラバーE下、スーパー中、スーパー上塗	70℃ //
塩化ビニル樹脂系塗料	ニッペハイビニル、ラバラック 3000	70℃ //
エポキシ樹脂系塗料	ハイボン 30 マスチックプライマー	130℃ //
	ハイボン 30 上塗 HB、ハイボン 40 上塗	130℃ //
変性エポキシ樹脂塗料	ハイボン 20 デクロ、エース、ファイン	130℃ //
タールエポキシ樹脂塗料	エポタール H 類	80℃ //
ノンブリード形タールエポキシ樹脂	エポタール NB20 類	130℃ //
フェノール樹脂系塗料	サルホタイト 10	80℃ //
ポリウレタン樹脂系塗料	ハイボン 50 上塗、50 ファイン	130℃ //
ふっ素樹脂系塗料	デュフロン 100、100 フレッシュ	130℃ //
シリコン樹脂系塗料(耐熱)	テツゾール 200、300、500、600	200~600℃

上記温度以下では外観上(ツヤ、色など)の多少の変化はあっても短期では致命的な欠陥に結びつかないと思われる温度である。

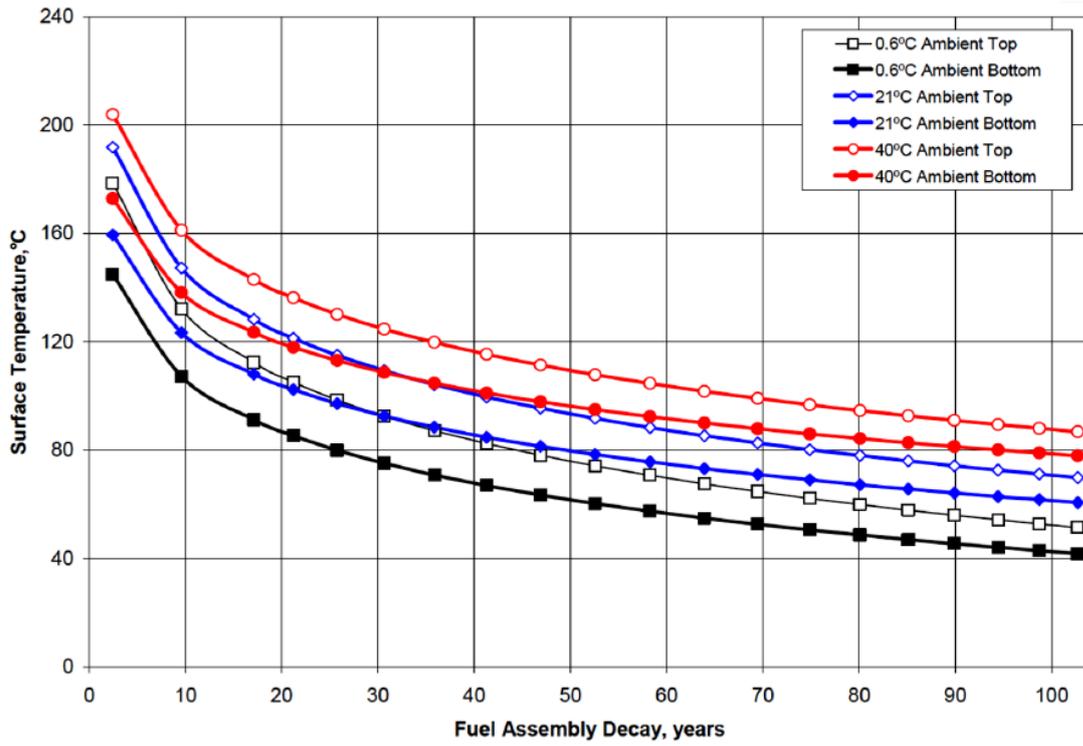


図 2.1.3-1 キャニスタ表面温度 vs 貯蔵期間 (解析例) [32]

②コーティング（溶射）

コーティング技術として最も一般的な方法は溶射である。溶射は微粒子状（熔融状含む）のコーティング材を高速で対象物に吹き付けて表面に被膜を接着させる技術で様々な方法が考案されている。[42]これらの中でキャニスタに適用できる可能性があるものとして、次のものが提案されている。[6]

- ・低温溶射（コールドスプレイ）
- ・高速酸素燃料スプレイ（HVOF）
- ・高速レーザー加速沈着（HVLAD）

以下では、キャニスタに適用するコーティング技術として溶射に限定して議論する。溶射の中で、最も有力で米国において精力的に研究開発が行われているのが、低温溶射（コールドスプレイ）である。これについては、以降の節で改めて説明する。

③残留引張応力低減処理

これは、キャニスタ表面に圧縮組成変形を与えて、圧縮応力場を形成する技術で代表的なものとして以下が挙げられる。[23]

- ・レーザーピーニング
- ・ショットピーニング
- ・バニシング（低塑性バニシング）

このうち、レーザーピーニングは後で述べるように米国で実機キャニスタの溶接部に適用した事例がある。また、ショットピーニングとバニシングは、我が国において実規模のキャニスタ試験体を用いた施工試験と SCC 試験が行われている。（後述）さらにバニシングは蓋溶接残留応力への適用を前提として試験が行われた。

以上の各技術の概要は表 2.1.3-1 に示したとおりである。

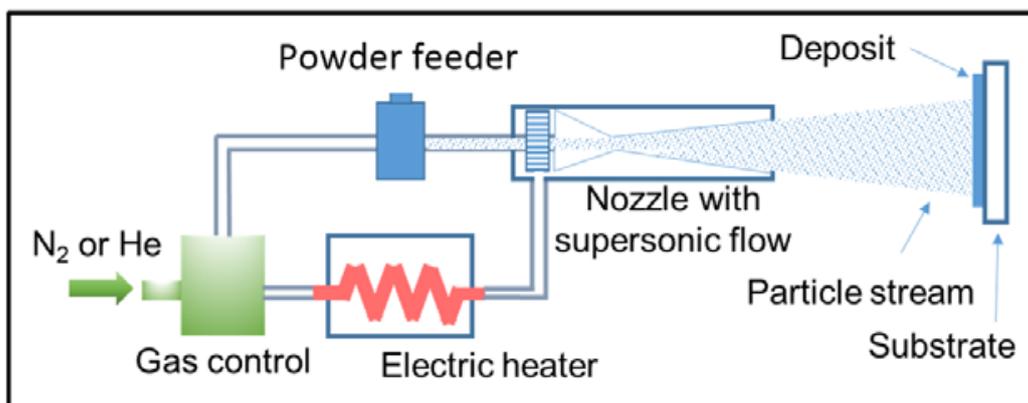


図 2.1.3-2 低温溶射（コールドスプレイ）の原理 [40]

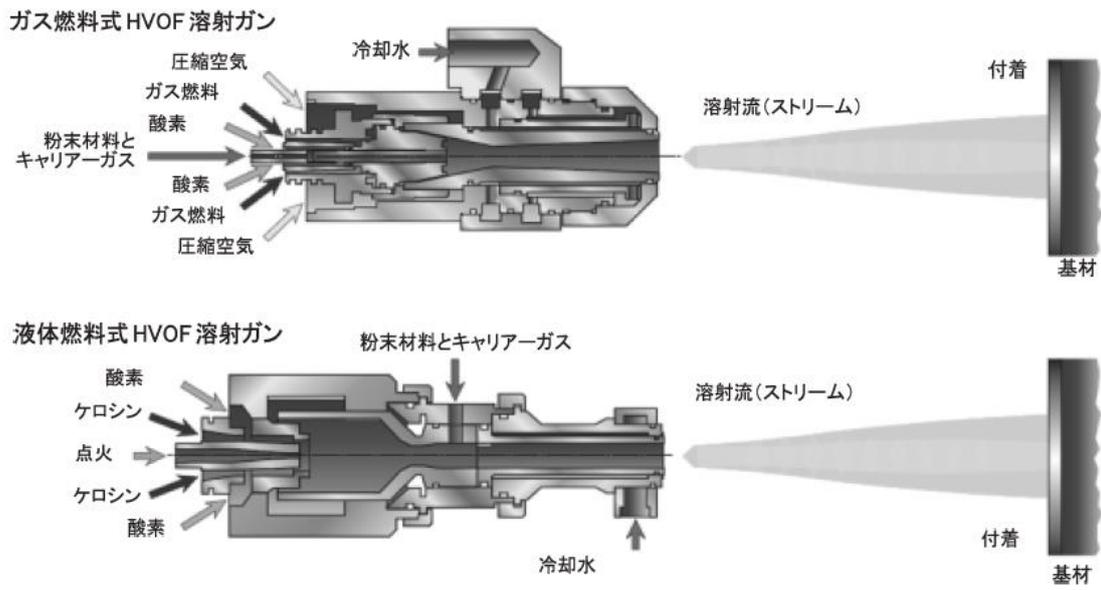


図 2.1.3-3 高速酸素燃料スプレー (HVOF) の原理[43]

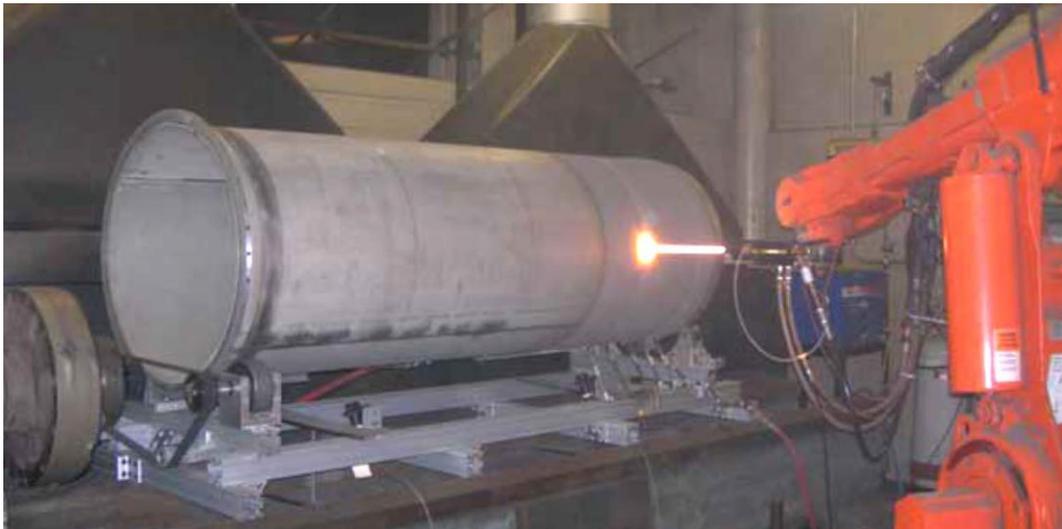


図 2.1.3-4 高速酸素燃料スプレー (HVOF) の縮尺モデル施工試験 [6]

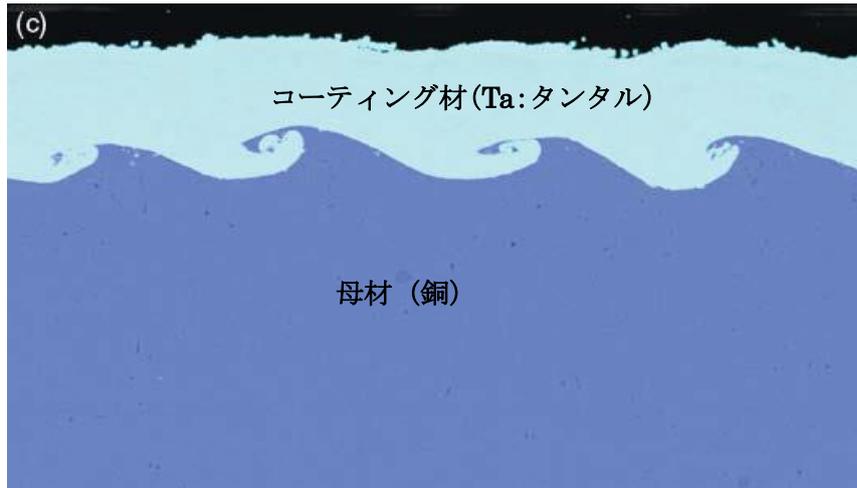


図 2.1.3-5 高速レーザー加速沈着 (HVLAD) による銅母材への Ta コーティング[6]

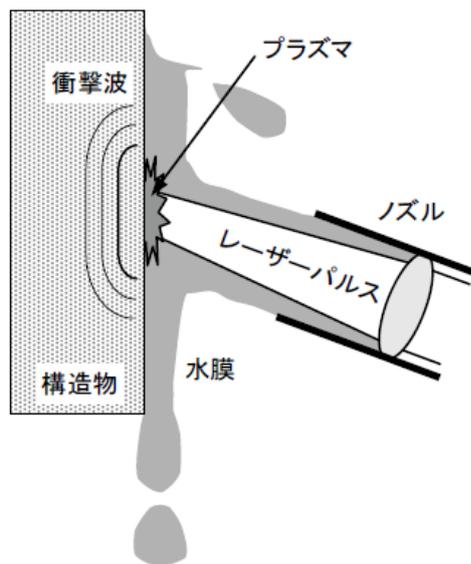


図 2.1.3-6 レーザーショットピーニング (LSP) の原理[44]

(2)適用実績

(1)で取り上げたキャニスタ表面処理技術の実機への適用実績を表 2.1.3-3 にまとめた。我が国では、キャニスタ系貯蔵を行っていないため適用実績は無い。米国では、デモ試験を含め以下に示す実績がある。

①塗装

VSC-24 システムで炭素鋼製キャニスタに塗装を行う仕様で NRC の認可を得ている。[49] 米国では、3 か所の ISFSI で同システムを採用している。

②溶射（コールドスプレイ）

San onofre ISFSI（以下 SONGS ISFSI）にて、キャニスタの SCC 亀裂補修のためのコールドスプレイ施工のデモ試験が行われている。[50] 実機への適用事例はない。

③残留応力低減処理

SONGS ISFSI の HI-STORM UMAX システム[54]のキャニスタ（MPC）の胴溶接と熱影響部にレーザーピーニングを適用している。（工場製作段階での施工）[50]

以下にそれらの概要を説明する。

表 2.1.3-3 キャニスタへの SCC 対策としての表面処理技術の適用実績

適用技術	日本	米国
塗装	—	<ul style="list-style-type: none">・以下の貯蔵システムにて NRC 認可済<ul style="list-style-type: none">- VSC-24(NRC docket 番号：72-1007) [48]・仕様は、炭素鋼(キャニスタ)に亜鉛系塗装[49]・以下の 3 か所の ISFSI にて採用している。[51]<ul style="list-style-type: none">- Arkansas Nuclear (1996 年～[52])- Palisades (1993 年～[53])- Point Bach (1995 年～[53])
溶射	—	<ul style="list-style-type: none">・SONGS ISFSI にてコールドスプレイによる SCC 亀裂補修のデモを実施している。[50]・同システムは Holtec の HI-STORM UMAX[54]
残留応力低減	—	<ul style="list-style-type: none">・SONGS ISFSI の HI-STORM UMAX のキャニスタ（MPC）の胴溶接と熱影響部にレーザーピーニングを適用している。・ピーニングによりキャニスタ表面から深さ約 3.2mm の範囲に圧縮応力を付与している。[50]

①塗装の適用事例 (VSC-24)

1)概要

前述のとおり米国ではVSC-24貯蔵システムのキャニスタに塗装が行われている。このシステムは、Energy Solutions社が開発したコンクリートキャスクシステムで、炭素鋼製キャニスタに防食のため非有機亜鉛系塗装を施している。表2.1.3-4にシステム諸元を示す。また、図2.1.3-7にコンクリートキャスク（キャニスタ含む）の構造を示す。

表 2.1.3-4 VSC-24 の主な仕様[48,49]

構成機器	項目	仕様
コンクリートキャスク	構造	鉄筋コンクリート（内面鋼板ライニング）
	寸法	・外径：3.35m（132インチ） ・厚さ：740mm（29インチ）
キャニスタ（MSB）	構造	二重溶接蓋（蓋+リング）
	材質	・本体、蓋：鋼（SA516 Gr70+塗装*） ・バスケット：鋼（SA516 Gr70+塗装*） *表 2.1.3-5
	寸法	全長：約 4.2～約 4.9m 外径：約 1.6m 肉厚：1.0 インチ（25.4mm）
	内部雰囲気	ヘリウム
	収納燃料体数	PWR 燃料 24 体

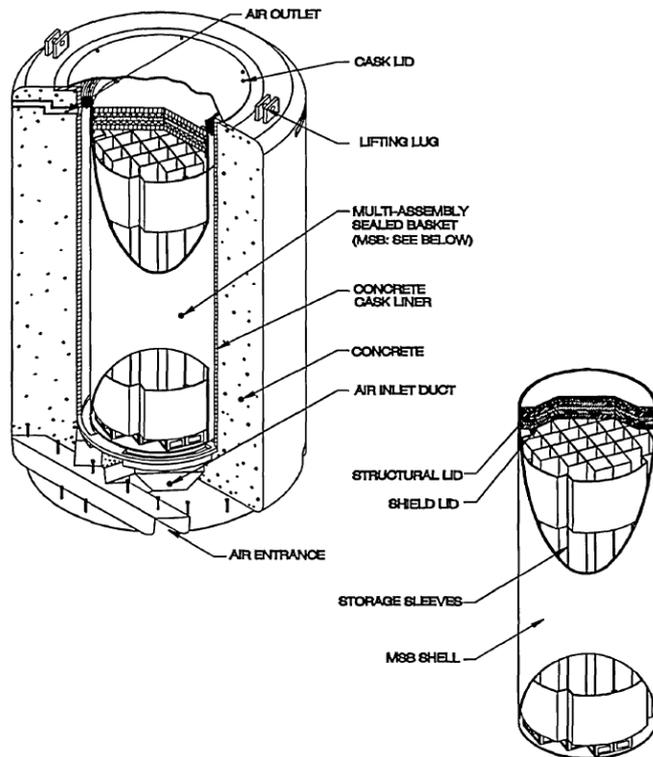


図 2.1.3-7 VSC-24 の構造[48]

2) 塗装の仕様

VSC-24 のキャニスタ塗装の仕様等を以下に示す。[49]

- ・炭素鋼表面（キャニスタ内部を含む全面）に耐熱、耐放射線性に優れる非有機系塗装（Dimetcote 6[55]または Carbo-Zinc 11[56]）を適用。これらの主な特性を表 2.1.3-5 に示す。
- ・長期の塗装効果は必ずしも期待できないので、炭素鋼の腐食損失を保守側に仮定している。（海洋環境での炭素鋼の腐食速度を 0.003 インチ/年とし、50 年間の腐食量を 0.15 インチと仮定）
- ・貯蔵中の外観検査で塗装の異常を確認でき、また補修（再塗装）できるとしている。

表 2.1.3-5 VSC-24 キャニスタの塗装の主な特性

項目	Dimetcote 6[55]	Carbozinc 11[56]
販売者	CARBOLINE	AMERCOAT
塗料のタイプ	シリコン樹脂系亜鉛末塗料	無機系亜鉛末塗装 (結着材はシリコン樹脂等)
塗装厚み	65 μ m/層	51-67 μ m (150 μ m を超えない)
塗装層数	1	1
耐熱温度	400°C	400°C~540°C
乾燥時間	24h (18~27°C)	24h (16°C)

3) 塗装からの水素発生事象[57]

1996年5月28日、米国 Point Beach ISFSI にて VSC-24 コンクリートキャスクシステムのキャニスタ (MBS) の蓋溶接中に、水素爆発により蓋が外れて少し傾くという事象が発生した。調査の結果、MBS に使用していた塗装 (Carbozinc 11) 中に含まれる亜鉛が使用済燃料プールのホウ酸水によって酸化して水素が発生したことが判明した。同 MBS は本体とバスケットが炭素鋼で作られており、どちらも腐食防止のため亜鉛末含有塗装を施していた。爆発の原因となった水素は、MBS の内部塗装から発生したと考えられている。

この事象は、移送キャスク (MTC) に収納した MBS に使用済燃料プール中で使用済燃料を装荷し、プールから引き上げてから 11 時間後に発生している。

これを踏まえて、NRC は同年 5 月 31 日に情報通知 96-34 を発行して関係者に周知並びに注意喚起を促している。

② 溶射の適用事例 (コールドスプレイのデモ試験) [50]

前に述べたように SONGS ISFIS ではキャニスタの SCC 亀裂補修のためのコールドスプレイのデモ試験が行われている。まずコールドスプレイについて説明し、次にデモ試験について述べる。

1) コールドスプレイの原理

コールドスプレイは、不活性ガス的高速ジェットにより粉体粒子を対象物に衝突させる固体沈着法である。(前出の図 2.1.3-2 参照) 粉体粒子が対象物に衝突した瞬間、粒子は変形して表面に付着し対象物と強固に接着する。このプロセスで発生する熱量はわずかで、寸法安定性は維持され有害な熱影響(熱影響部、熱応力、希薄層生成)が回避できる。コールドスプレイの特徴を次に挙げる。

2) コールドスプレイの特徴[6,40]

- ・エネルギー投入量が非常に少ないため、熱影響が最小で有害な熱影響部が形成されない。
- ・構造的特性が影響を受けない。
- ・沈着深さに特に制限がない。
- ・沈着層中に問題となるようなポロシティが形成されない。
- ・高硬度で圧縮残留応力をもつ冷間加工組織が作られる。これは、アーク溶接によって引張残留応力が生じると逆である。
- ・酸化物生成、合金成分の分解及び燃焼生成物の取込みが少ない。
- ・携帯型の溶射装置が商業的に入手可能である。

コールドスプレイはステンレス鋼、ニッケル基合金及びその他の合金をステンレス鋼の基盤上に沈着させて耐食性の向上と沈着層に圧縮残留応力を付与できることが実証されている。[40,41] Yeom らは[41]、ステンレス鋼製キャニスタに 304L ステンレス鋼を低温溶射することによって耐 SCC 性を向上できることを示している。304L ステンレス鋼の粉末を噴霧状にして、供用中のキャニスタ溶接部にあらわれる様々な表面状態とマイクロ組織(研磨面、酸化、冷間加工、そして典型的な SCC)を持つ 304 ステンレス鋼板に沈着させた。コールドスプレイコーティングは優れた密着強度、高い硬度、及び大きな表面残留圧縮応力を示した。この研究から得られた結果は、コールドスプレイステンレスコーティングがステンレス鋼製キャニスタ溶接部の SCC に対する腐食障壁を与える有効なオプションであることを実証している。

3) SONGS ISFSI でのコールドスプレイデモ施工試験[50]

SONGS ISFSI において試験用キャニスタを用い破損(SCCを想定)を補修する方法の実証を目的として、キャニスタの損傷部にニッケルコーティングを施す遠隔操作のコールドスプレイ施工システムのデモが行われた。

(i) 概要

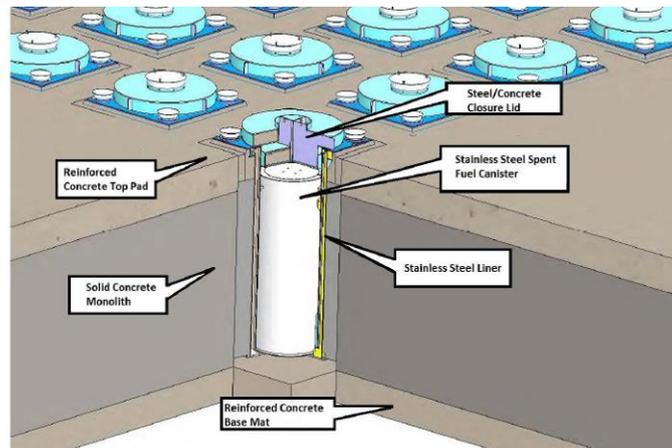
SONGS ISFSI は 2015 年に認可を受けた Holtec 社の HI-STORM UMAX システム(図 2.1.3-8) に関し、IMP(貯蔵中検査保守計画)を策定して定期的な検査を行うこととしている。NRC の許認可要件では、最初の 20 年間の認可期間中には経年劣化管理は必須ではなく、貯蔵期間更新以降に経年劣化管理計画(AMP)を定めて実行することを求めている。IMP はカリフォルニア州沿岸委員会が同サイトの廃炉に関連して定めた条例にしたがい、

SONGS に対しこれを策定して運用することを求めるものである。[58] この定期的検査は 2019 年に EPRI と産業界との共同プログラムにより開始され、IMP は NRC の AMP の要件[59]に沿ったものとしている。

なお、NRC は現時点ではキャニスタの SCC 対策として実機にコールドスプレイを適用することを認めていない。(添付-1 参照)

この IMP の概要は以下のとおり。

- ・ 2019 年に 8 基のキャニスタ (MPC) を選んでロボットを用いた遠隔操作で外観検査を行った。(図 2.1.3-9)
- ・ それ以降、2 基の MPC について 5 年毎に外観検査を行う。次回は 2024 年の予定。
- ・ 内部にヒーターを入れた 1 基の空 MPC を貯蔵し、2.5 年毎に検査を行う。次回の検査は 2022 年の予定。
- ・ さらに、MPC が破損 (SCC による) することを想定して、その補修のための遠隔操作によるオーバーレイ技術 (コールドスプレイ) を開発した。



licensed facility is the best path forward, and that it should happen as soon as safely achievable.



Figure 3 - The Holtec UMAX storage system at SONGS

図 2.1.3-8 SONGS ISFSI の HI-STORM UMAX システム[50]



Figure 4 - The inspection robot is held in a delivery tool and placed into the cavity enclosure container to begin the visual inspection of a loaded MPC

図 2.1.3-9 SONGS ISFSI の MPC 外観検査装置[50]

(ii) コールドスプレイによる SCC 補修デモ

VRC Metal システムによって開発された金属オーバーレイプロセスを用いたロボットを用いて遠隔操作による MPC の SCC 亀裂補修のデモを実施した。

- ・ コールドスプレイによるニッケルコーティング (図 2.1.3-10)
- ・ 貯蔵状態に置いた実物大モックアップ MPC に設置した厚さ 5/8 インチのキャニスタ壁のレプリカ上にコーティングを施工した。(図 2.1.3-11)
- ・ NRC の立会のもとでコーティング施工は特に問題なく成功した。施工後のキャニスタ壁レプリカを図 2.1.3-12 に示す。

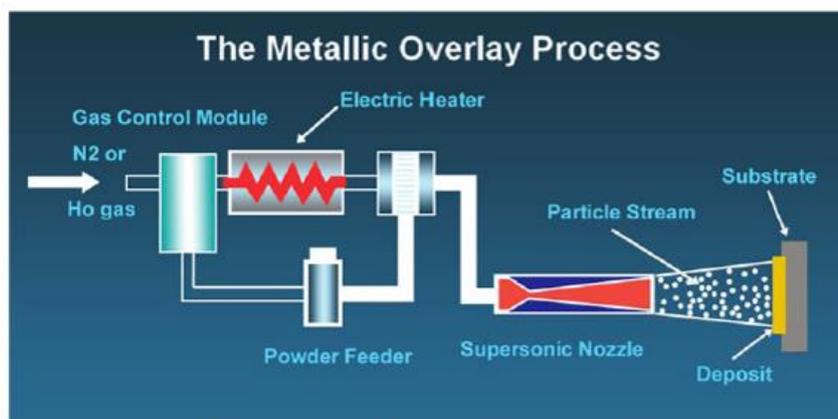


Figure 7 - Schematic of a high-pressure metallic overlay process

図 2.1.3-10 コールドスプレイによる金属オーバーレイの原理[50]

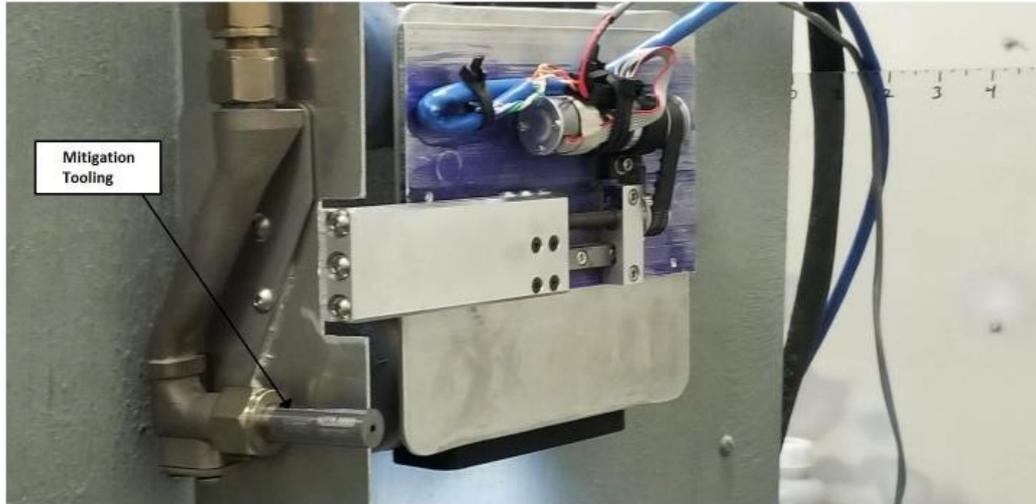


Figure 8 - Robot with mitigation tooling. Arrow shows location of nozzle that applies the overlay to an MPC

図 2.1.3-11 遠隔ロボット式金属オーバーレイ装置[50]



金属オーバーレイ面
(ニッケルコーティング)

Figure 9 - Canister steel sample with metallic overlay repair

図 2.1.3-12 デモ施工試験後のキャニスタ壁レプリカ[50]

③残留応力低減の適用事例[50]

既に取り上げたように米国 SONGS ISFSI に設置している HI-STORM UMAX システムのキャニスタ (MPC) は、工場製作段階において胴の溶接部とその熱影響部にレーザーピーニングを適用して引張残留応力を緩和している。この処理によって、表面から 0.125 インチ(約 3.2mm)の深さの範囲に圧縮残留応力を形成するとしている。

レーザーピーニングは産業界で広く用いられている工法であるが、使用済燃料キャニスタに適用されたのは、これが最初である。このピーニングは、10CFR72.48 “変更、試験および検査”の規定にしたがってメーカー (Holtec) の判断で行ったもので、NRC はこれについての審査は行っていない。※

なお、海岸立地である SONGS ISFSI で採用しているこのタイプのキャニスタは、上記のレーザーピーニングの他に以下に挙げる SCC 対策としての改良を行っている。これは、同サイトが海岸に近接しており、海塩粒子を含む大気に曝されることを考慮しているものと思われる。

- ・キャニスタ材料として標準仕様の SUS304 に代えて、SUS316L を使用。
- ・キャニスタの肉厚を標準仕様の 0.5 インチ (12.7mm) から 0.625 インチ(15.9mm)に増加。
- ・溶接設計を改善し、熱影響部を最小化
- ・キャニスタ胴板の曲げ加工工程を改善し、表面引張応力を低減
- ・溶接残留応力低減のための溶接条件 (電流、電圧、溶接速度) の最適化

※NRC の担当審査官から聴取した内容。(添付-1 参照)

(3)研究開発（耐 SCC 性、技術課題、対応策等）

①耐 SCC 性

1)日本

(i)ステンレス鋼の SCC 防止用塗料の開発

塗装は主に炭素鋼のような腐食しやすい材料の全面腐食を抑制する目的で使用され、ステンレス鋼の SCC 防止に用いられることは少ない。なお先に挙げた米国のキャニスタへの塗装事例も炭素鋼製キャニスタに適用している。

我が国においてステンレス鋼の CISCC 防止を目的とした塗料に関する研究開発の報告がある。この塗料は原子力発電所を含むプラント設備のステンレス鋼製配管やタンクの CISCC を防止するために開発されたもので、SCC 試験を行って効果を確認している。表 2.1.3-6 にその概要を示す。

表 2.1.3-6 ステンレス鋼の CISCC 防止用塗料の概要[60]

項目	内容	備考
塗料の SCC 抑制機構	塗料中にイオン固定化剤を添加し、塩化物イオンを吸着・固定化する。 イオン固定化剤はアニオン性インヒビターを含有し、塩化物イオンをそれと交換、固定化する。 イオン交換されたアニオン性インヒビターは鋼材表面を不働態化する。	図 2.1.3-13 に CISCC の抑制機構を示す。
塗料の概要	以下の各温度域に最適な樹脂系を選定し、これにイオン安定化剤を配合している。 ・常温用（～80℃）：ポリウレタン樹脂ベース ・中温用（80～200℃）：エポキシ樹脂ベース ・高温用（200～300℃）：シリコン樹脂ベース	
定荷重 SCC 試験	・試験材：SUS304 板（700℃×1h 鋭敏化処理） ・条件：80℃、RH50%、応力 250MPa 50mg/m ² asCl ・結果：割れ発生時間 －無塗布：68h －イオン固定化剤無し：653h －開発塗料(常温用)：4000h で割れ無し	
適用事例	伊方発電所の一次系配管外面、ステンレス製タンク外面 他	

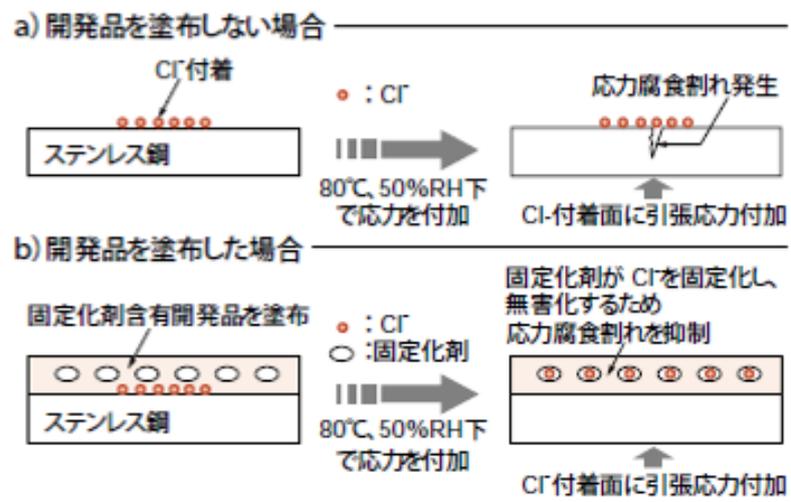


図 2.1.3-13 塗料のステンレス鋼の CI SCC 抑制機構[60]

(ii) 残留応力低減処理

我が国においてキャニスタへの溶射に着目した研究開発に関する情報は得られなかったが、残留応力低減処理については、電中研がラボ試験と実規模試験体を用いた試験を行って、耐 SCC 効果と施工性を確認している。以下にその概要を説明する。

a. ラボ試験[23]

ラボ試験では、

- ・ レーザーピーニング (LSP)
- ・ ジルコニアショットピーニング (ZSP)
- ・ 低塑性バニシング (LPB)

の 3 つの残留法力緩和法を小型円板状 ($\phi 100\text{mm} \times 13\text{mm}$) の SUS304L 製溶接試験体(図 2.1.3-14)に適用し、残留応力測定と SCC 試験を行っている。表 2.1.3-7 にその結果を整理した。

いずれの方法も、溶接部の未処理面では降伏応力 (σ_y) の 0.7~1.7 倍の引張応力が存在するのに対して、溶接部表面から約 1mm の深さの範囲に圧縮応力が付与されている。

(図 2.1.3-15) また、SCC 試験 (温度 80°C、相対湿度 (RH) 35%、塩分濃度 4g/m² as Cl) で未処理試験体に 1000h で亀裂が発生したのに対し、残留応力低減処理を行った試験体は 1500h で亀裂は発生しなかった。

b. 実径大キャニスタ試験体試験

上記の 3 つの残留応力低減処理法のうち、ジルコニアショットピーニング (ZSP) と低塑性バニシング (LPB) について実規模のキャニスタ試験体を製作して、施工性と耐 SCC 性を確認している。

(a) 実径大キャニスタ試験体を用いた ZSP 施工試験及び SCC 試験[45]

SUS304L 製の実機と同じ径を持つキャニスタ試験体を製作し、溶接部に ZSP を施工して残留応力測定並びに SCC 試験を実施している。

表 2.1.3-8 にその結果を整理した。図 2.1.3-16,17 に実径大キャニスタ試験体を示す。ZSP を施工しない溶接部では表面から深さ約 1mm の範囲に引張残留応力が存在するのに対して、ZSP を施した部位は表面から約 0.7mm 深さまで圧縮応力が付与されている。(図 2.1.3-18) この試験体表面に塩分 (4g/m² as Cl) を付着させて 2000h の SCC 試験 (温度 80°C、相対湿度 (RH) 35%) を実施している。その結果、ZSP を施工しない溶接部には 100 μm 以上の亀裂が多数発生したのに対し、ZSP を施工した部位では亀裂は発生しなかったと報告されている。(図 2.1.3-19 に亀裂発生状況を示す。)

(b) 実径大蓋部キャニスタ試験体を用いた LPB 施工試験及び SCC 試験[12]

SUS304 製の実機と同じ径を持つキャニスタ蓋部試験体を製作し、溶接部に LPB を施工して、残留応力測定並びに SCC 試験を実施している。

表 2.1.3-9 にその結果を整理した。図 2.1.3-20 に実径大蓋部キャニスタ試験体を示す。

LPB は、工作機械 (ターニングセンター) の切削工具の代わりに専用治具を取り付け、

施工面に治具先端を押し付けて圧縮応力を付与する方法である。図 2.1.3-21 に試験体への LPB 施工状況を示す。

図 2.1.3-22 に X 線測定法による施工面の深さ方向の残留応力分布を示す。深さ約 1mm まで圧縮応力が付与されている。

この試験体に人工海水を 4g/m²as Cl 噴霧し、5000h の SCC 試験（温度 80℃、相対湿度（RH）35%）を実施している。試験後の試験体に蛍光 PT 試験を行って亀裂有無を確認した。その結果、蓋部の密封リング溶接部等に SCC 亀裂が発見されたが、LPB を施工した部分には SCC 亀裂は発生していなかったと報告されている。（図 2.1.3-23 に亀裂発生状況を示す。）

表 2.1.3-7 キャニスタへの残留応力低減処理の耐 SCC 研究(ラボ試験)[23]

項目	内容	備考
適用技術	①レーザーピーニング(LSP) ②ジルコニアショットピーニング(ZSP) ③低塑性バニング(LPБ)	
試験体(寸法 mm)	・材料：SUS304L ・寸法：φ100×13t ・溶接法：TIG 溶接、レーザー溶接	図 2.1.3-14 参照
残留応力測定	測定法：X 線測定法(XRD) 残留応力： ・未処理：深さ 0.1～1.5mm まで引張 －TIG：0.7～1.7σ _y －レーザー：0.7～1.4σ _y ・処理： －ZSP：深さ 0.6～0.7mm まで圧縮 －LSP、LPB：深さ 1mm まで圧縮	図 2.1.3-15 参照
SCC 試験	・環境条件： －80℃、RH35% －塩分濃度：4g/m ² (Cl) ・試験結果 －未処理：1000h で亀裂発生 －処理：1500h で亀裂無し	SUS304L 材の SCC 発生 限界塩分濃度は 0.2g/m ² (Cl) [12]

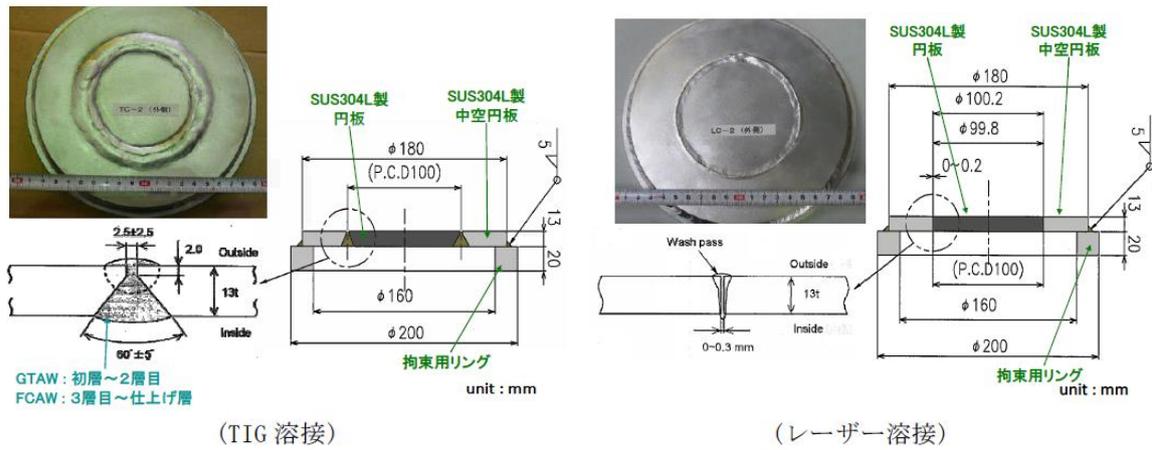


図 2.1.3-14 小型円板試験体の寸法[23]

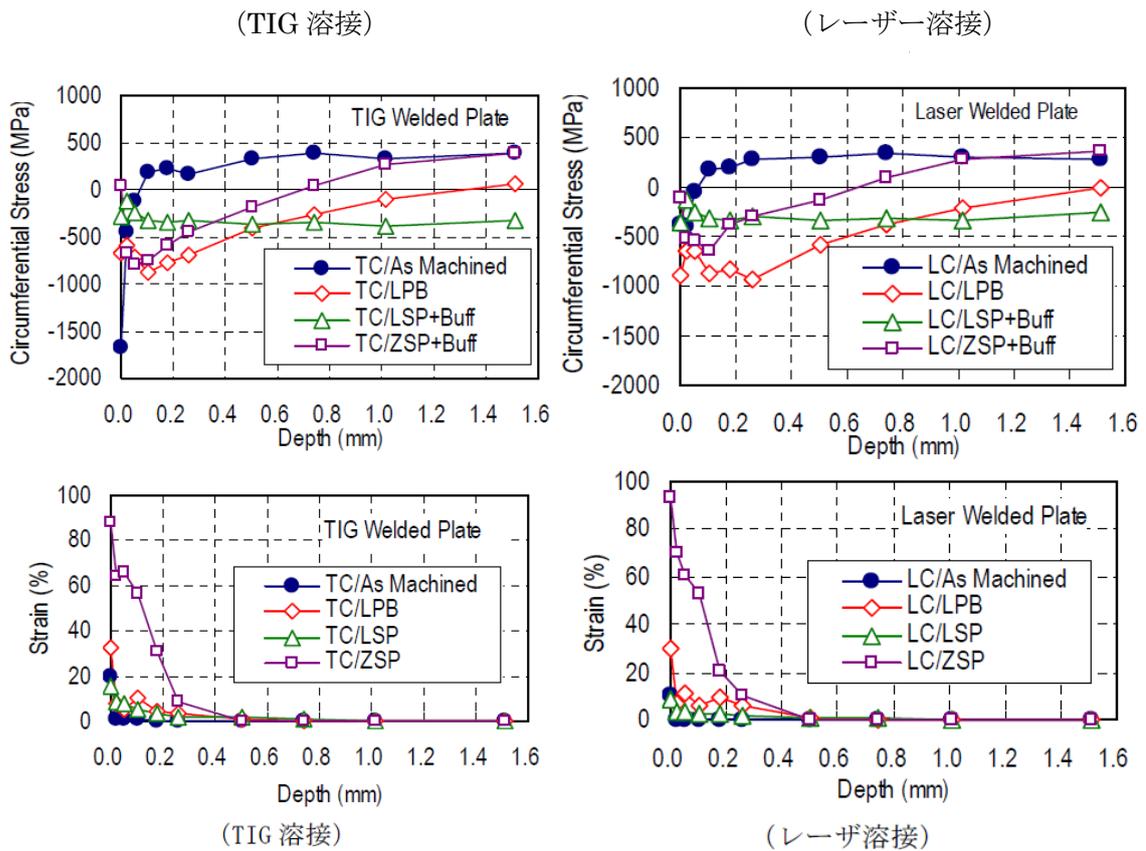
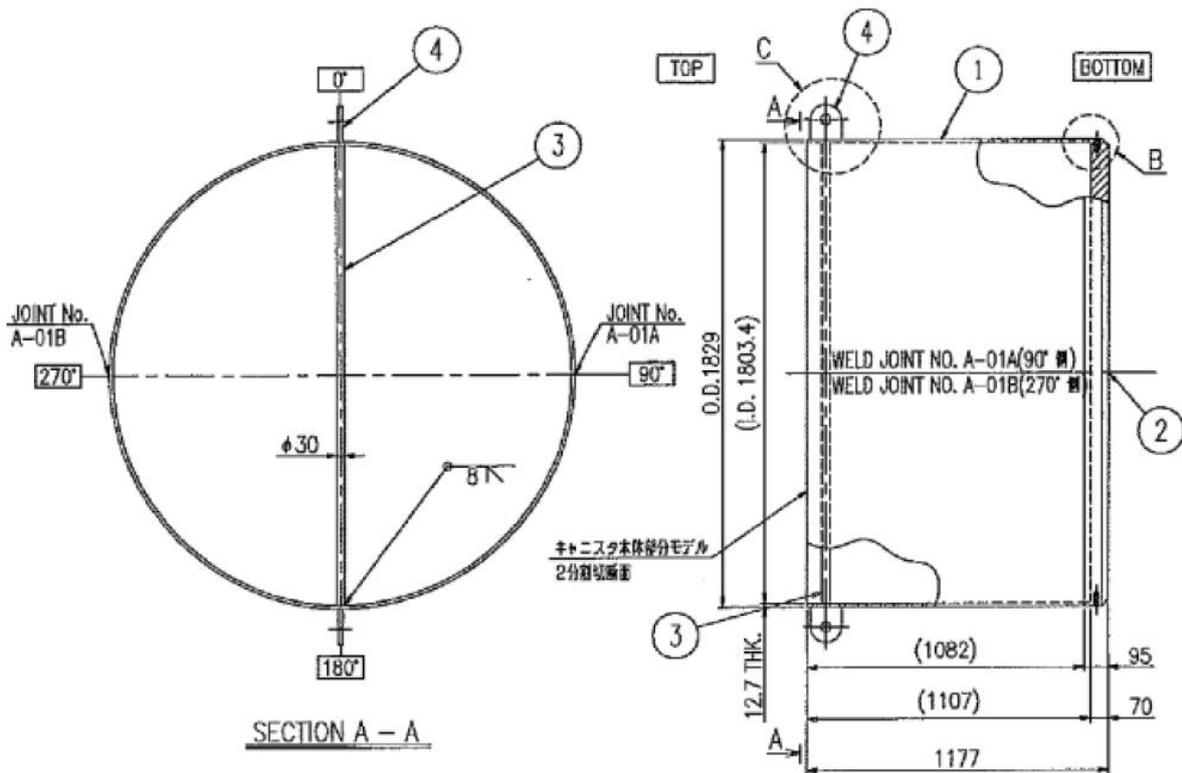


図 2.1.3-15 小型円板試験体の溶接部残留応力の深さ方向分布[23]

表 2.1.3-8 実径大キャニスタ試験体を用いた ZSP 施工性及び耐 SCC 性確認試験[45]

項目	内容	備考
適用技術	ジルコニアショットピーニング(ZSP)	施工条件は JISB2711 準拠 ショット材はφ1.0mm 部分 安定化ジルコニア
試験体(寸法 mm)	<ul style="list-style-type: none"> ・材料：SUS304L ・寸法：φ1836×1100L×12.7t ・溶接法：レーザー溶接 ・溶接部：胴長手 2 か所、底板周 	図 2.1.3-16,17 参照
残留応力測定	測定法：X線測定法(XRD) 残留応力： <ul style="list-style-type: none"> ・未処理：深さ約 1mm まで引張 ・処理部：深さ約 0.7mm まで圧縮 	図 2.1.3-18 参照
SCC 試験	<ul style="list-style-type: none"> ・環境条件： <ul style="list-style-type: none"> －80℃、RH35% －塩分濃度：4g/m² (Cl) －試験時間：2000h ・試験結果 <ul style="list-style-type: none"> －未処理：多数の亀裂(100μm 以上)発生 －処理部：亀裂無し 	図 2.1.3-19 参照



①本体胴 ②底板 ③ガセット(拘束棒) ④吊ピース

図 2.1.3-16 実径大キャニスタ試験体の形状・寸法[45]



図 2.1.3-17 実径大キャニスタ試験体の外観 (ZSP 施工後) [45]

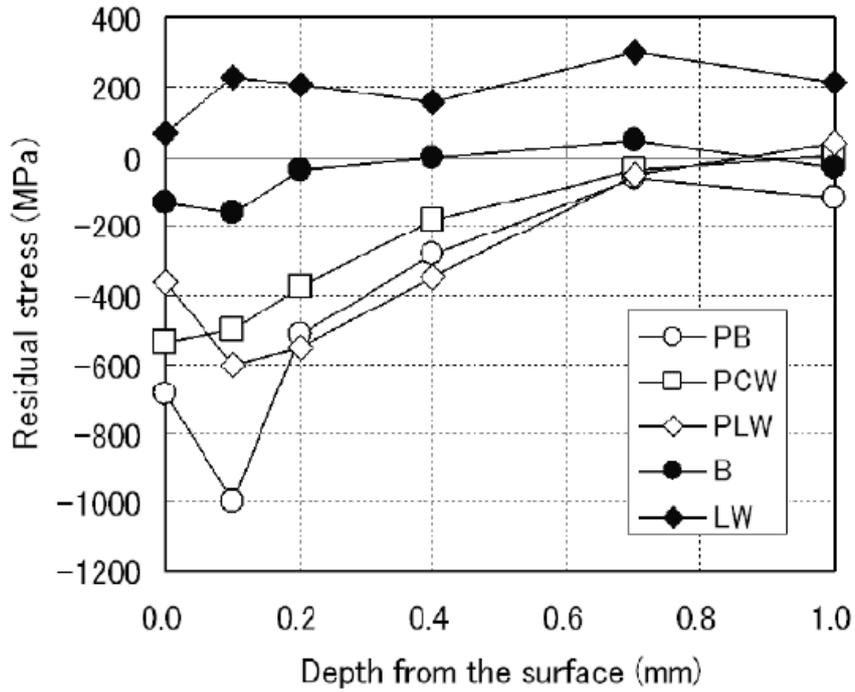


図 2.1.3-18 実径大キャニスタ試験体の溶接部の深さ方向応力分布[45]

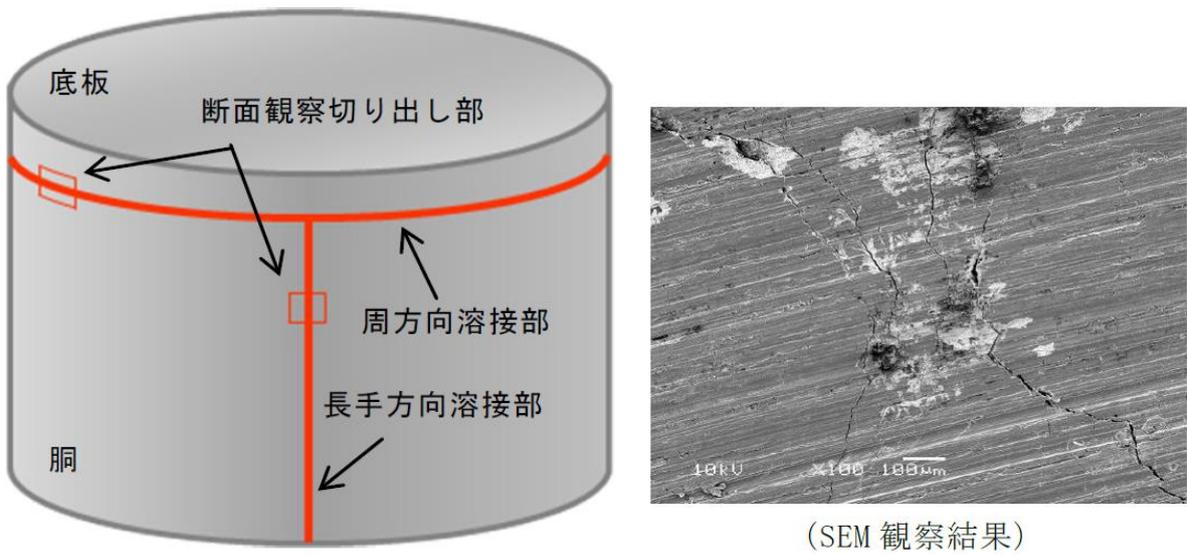


図 2.1.3-19 実径大キャニスタ試験体の溶接部亀裂 (SEM) [45]

表 2.1.3-9 実径大蓋部キャニスタ試験体を用いた LPB 施工性及び耐 SCC 性確認試験[12]

項目	内容	備考
適用技術	低塑性バニシング (LPB)	工作機械(ターニングセンター)の切削工具に代えて、治具先端(鋼球)を取り付けて施工面に押し当てて圧縮応力付与(図 2.1.3-21)
試験体(寸法 mm)	<ul style="list-style-type: none"> ・材料：SUS304L ・寸法： <ul style="list-style-type: none"> －胴：φ 1832×1000L×16t －蓋：100t －密封リング ・溶接法：TIG(初層)+多層 MIG ・溶接部：胴長手 2 か所 蓋、密封リング 周 	図 2.1.3-20 参照
残留応力測定	測定法：X線測定法(XRD) 残留応力： <ul style="list-style-type: none"> ・未処理：引張 ・処理部：約 1mm 深さまで圧縮 	図 2.1.3-22 参照
SCC 試験	<ul style="list-style-type: none"> ・環境条件： <ul style="list-style-type: none"> －80℃、RH35% －塩分濃度：4g/m² (Cl) －試験時間：5000h ・試験結果 <ul style="list-style-type: none"> －未処理部：密封リング溶接部等に SCC 亀裂 －処理部：SCC 亀裂無し 	図 2.1.3-23 参照

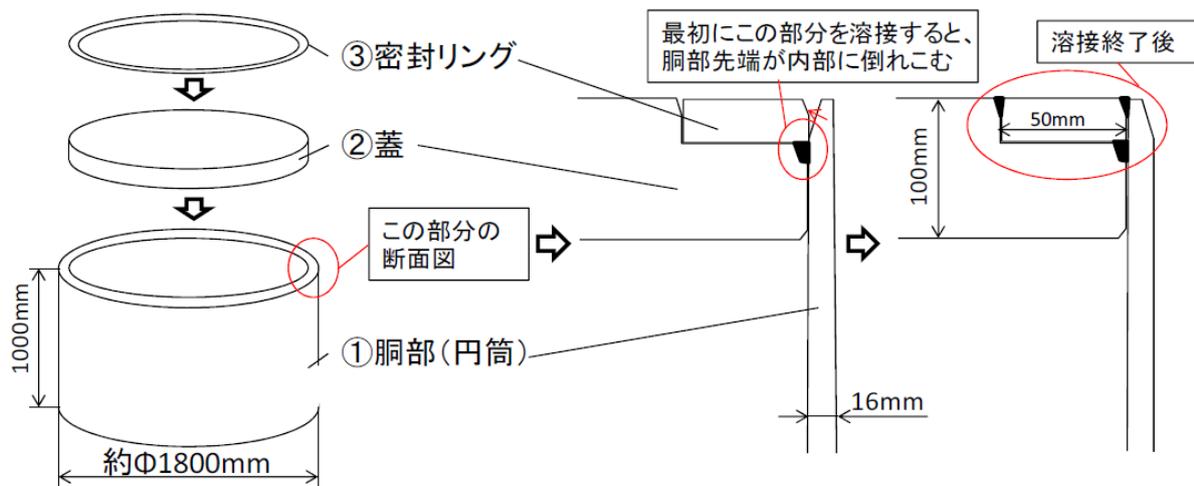


図 2.1.3-20 実径大蓋部キャニスタ試験体の構造[12]

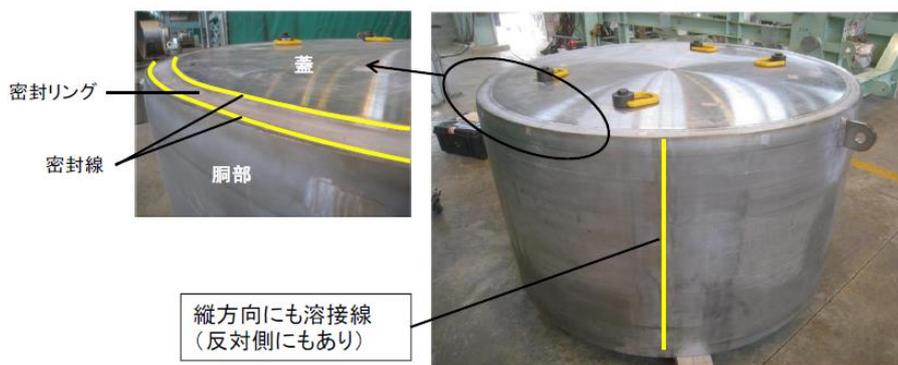


図 8.1-2 実径大蓋部キャニスタ試験体の外観

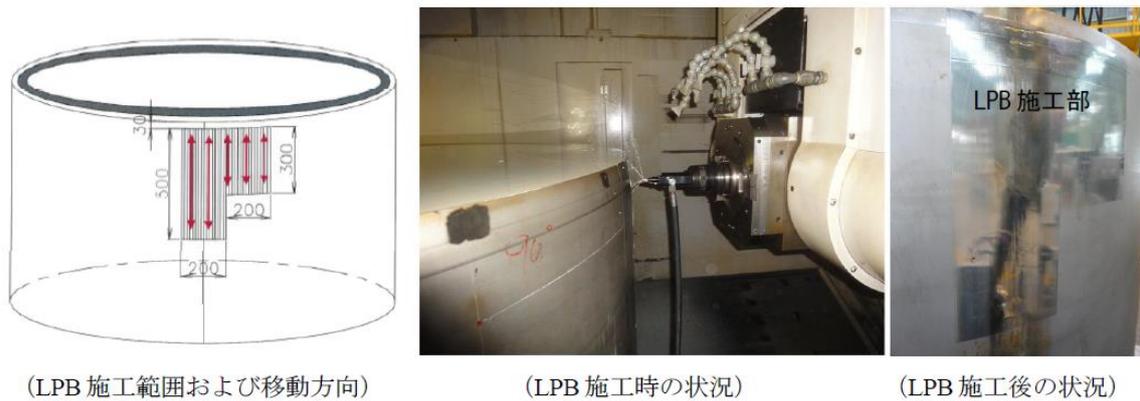


図 2.1.3-21 実径大蓋部キャニスタ試験体への LPB 施工状況[12]

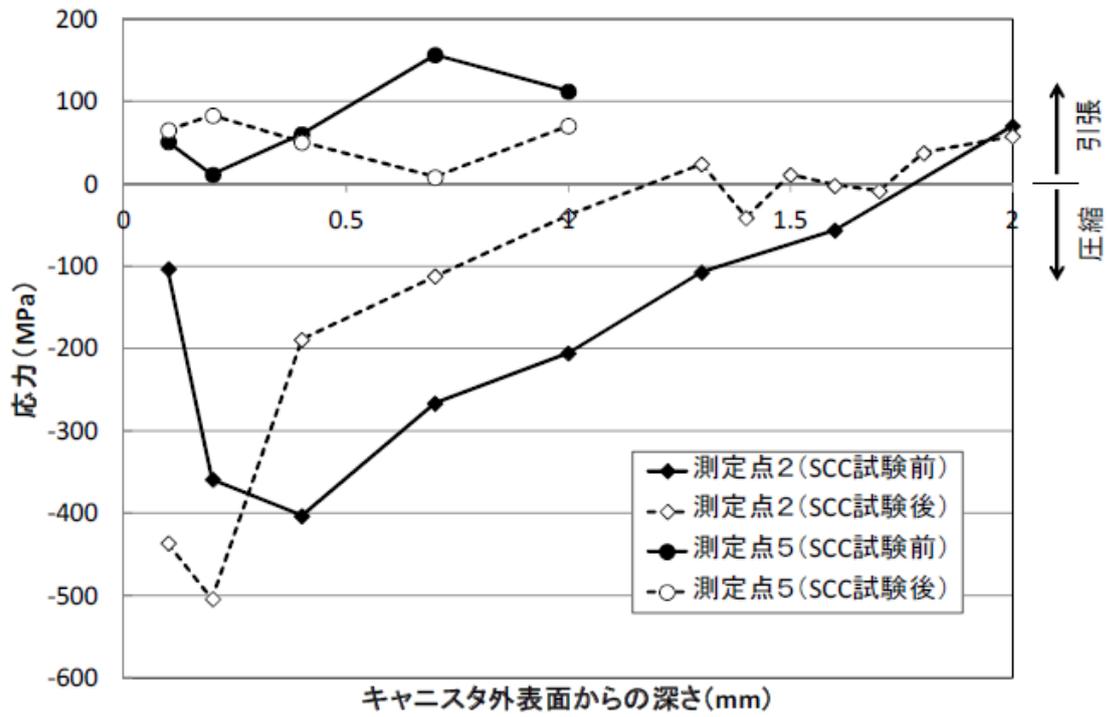


図 2.1.3-22 実径大蓋部キャニスタ試験体の残留応力測定結果[12]

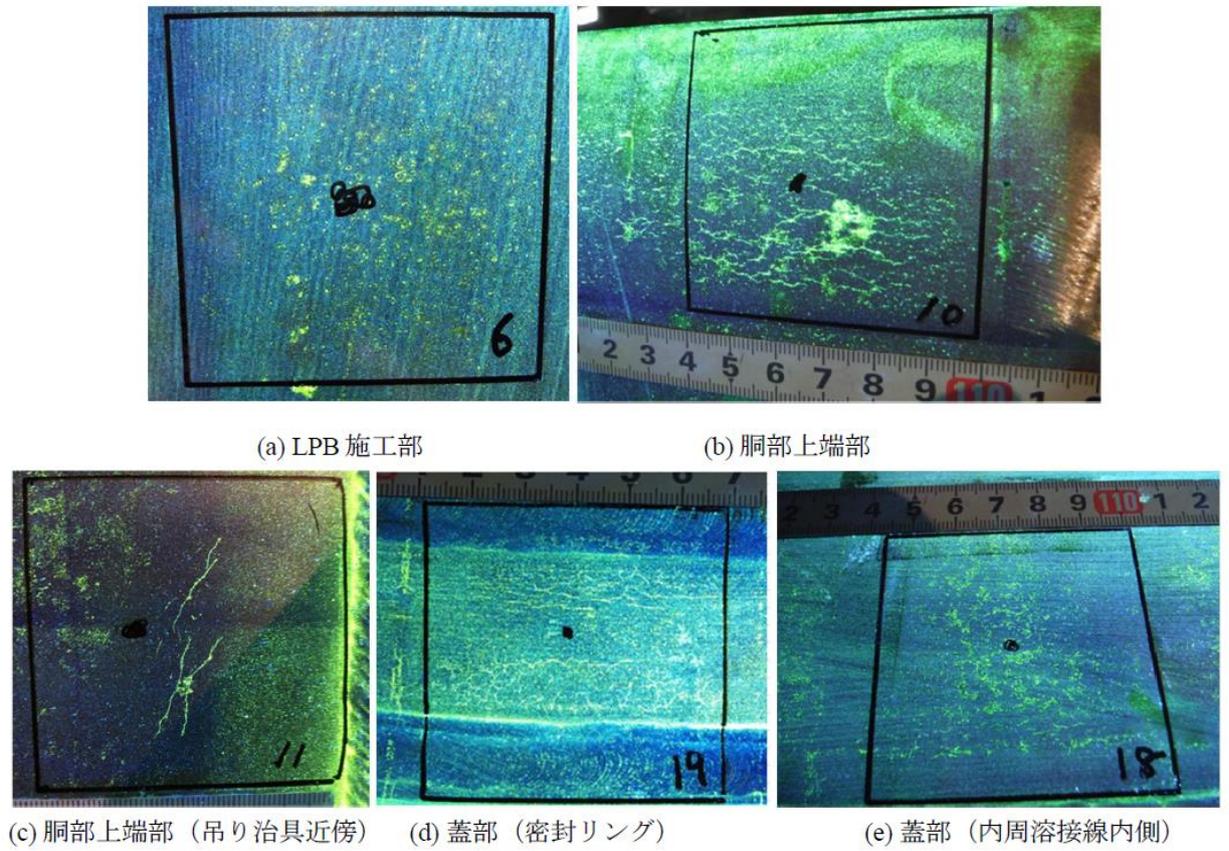


図 2.1.3-23 SCC 試験後の実径大蓋部キャニスタ試験体の蛍光 PT 試験結果[12]

2)米国

米国では原子力産業界、EPRI、キャスク製造メーカー、DOE 及び大学がキャニスタの腐食低減と補修のための研究開発に参画している。これらの研究開発は次の 2 つに分類できる。

(i)EPRI が主導する ESCP

(ii)DOE 研究 (NEUP、その他)

これらの活動を以下に説明する。

(i)ESCP[61]

EPRI が主催する ESCP (Extended Storage Collaboration Program) は使用済燃料の貯蔵期間延長に関連する課題に対して、事業者、メーカー、大学および政府機関が協力して取り組む枠組みを構成している。ESCP の分科会では非破壊評価法とサイトでの取り扱いシステムの他に SCC 対策と補修について精力的に活動している。

ESCP の CM&R SC 作業グループは、キャニスタの SCC 対策と補修法としてコールドスプレイを第一候補と考えている。また、SCC 対策及び補修技術を商業規模で展開するために以下の 3 つのフェーズで技術開発を進めている。[62]

- ・概念の実証
- ・遠隔操作法のデモ
- ・実規模キャニスタモックアップによるデモ

これら 3 つのフェーズを踏まえて、キャニスタ SCC 対策と補修技術の評価と実証に関する指針を策定する予定である。

この ESCP の活動の中で、コールドスプレイ技術開発のための様々なモックアップが作られている。[62,63] これらのモックアップの幾つかは、ガスタングステンアーク溶接法によって作られた。基板材は炭素鋼の支持体にボルトで固定された 304L ステンレス鋼板である。これらのモックアップ試験体は実機キャニスタの製作過程で発生すると予想される溶接残留応力を保守側に再現するよう設計、製作された。モックアップ試験体に V 溝開先溶接(溶接材 SUS308L)を行った後、コールドスプレイによって溶接線の半分の長さにインコネル 625 を付着させた。図 2.1.3-24 にコールドスプレイ施工後のモックアップ試験体を示す。

この試験体に対し逐次孔掘削応力測定法によって、溶接のままの領域とコールドスプレイを施した領域の残留応力を評価した。その結果、コールドスプレイによって残留応力低減のため一般に用いられているピーニング法と同程度の残留応力低減効果をもたらされることが確認された。(図 2.1.3-25)

このようなコールドスプレイ技術の特性から、溶射部の残留応力低減と耐食材の沈着による亀裂の密封という SCC 対策と補修に対する二重の効果をもたらすことが期待できる。

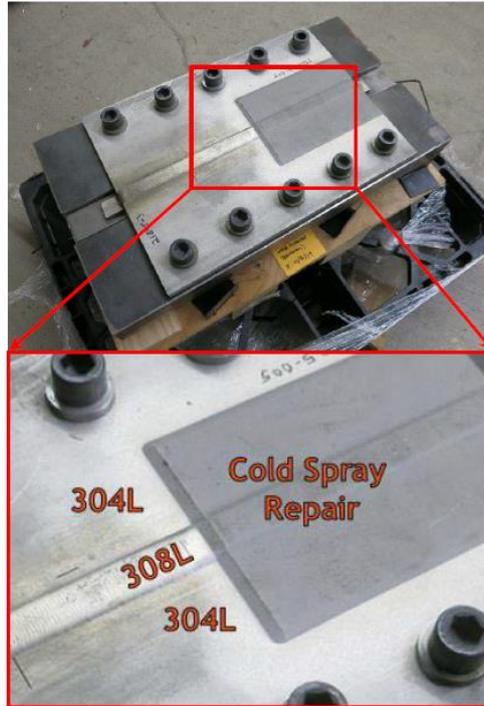


図 2.1.3-24 コールドスプレイによってインコネル 625 を付着させたモックアップ試験体[62]

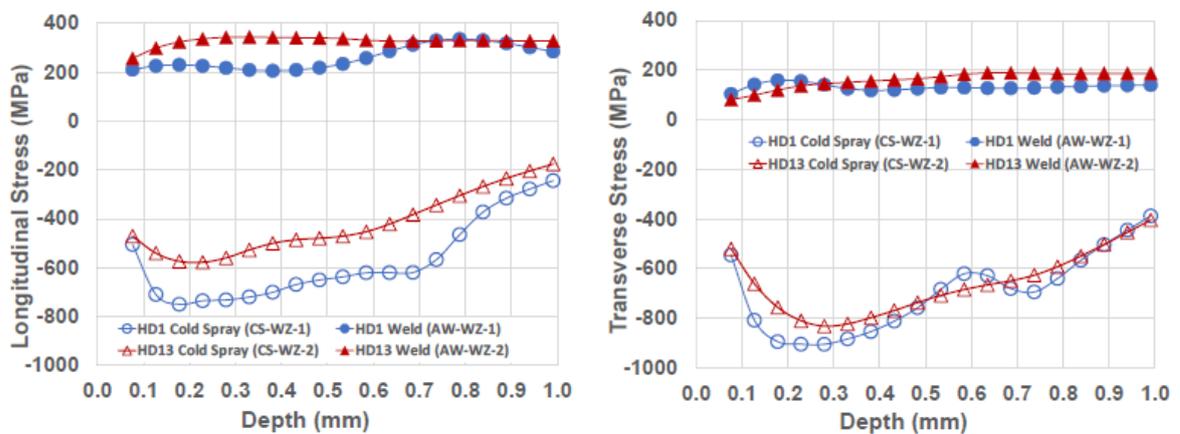


図 2.1.3-25 コールドスプレイによる溶接部残留応力低減効果[62]

VRC Metal Systems 社とその協力企業は、貯蔵中キャニスタの SCC 対策と補修技術の開発について DOE から Small Business Innovation Research (SBIR) 賞を授与されている。[64] この中には、貯蔵施設における貯蔵中キャニスタの SCC 対策と補修に関する高速コールドスプレイ技術とロボット式搬送技術開発が含まれる。しかし、現状の成果は未だ初期段階で、その技術と設備を完全に評価するにはさらなる開発と試験が必要であると考えられる。

またキャニスタの貯蔵中検査のために開発された遠隔搬送システムが、ESCP の SCC 対策と補修技術のデモに用いられている。

(ii)DOE 研究

a.NEUP[65]

DOE は NEUP (Nuclear Energy University Program) に資金を拠出してキャニスタの SCC 予防と補修の両方を目的とした表面処理技術に関する大学での研究を支援している。表 2.1.3-10 にこれらのプロジェクト活動の要点をまとめた。

表 2.1.3-10 キャニスタの SCC 対策と補修技術開発に関する NEUP の概要(1/2)[65]

プロジェクト名 (プロジェクト番号)	主な実施大学	実施内容
NEUP プロジェクト (20-19318)	Kumar Sridharan 大	オーステナイト系ステンレス鋼キャニスタの CISCC 対策として種々の表面ピーニング処理技術と表面処理技術の開発 表面処理技術として、ピーニング後のコールドスプレイの開発が含まれる。マイクロ組織、圧縮応力、腐食の評価及び試験を行う。
NEUP プロジェクト (20-19506)	南カリフォルニア大	湿分の吸収、塩化物中性化を行う『工学的複合パッチ』による SCC 発生防止と非破壊評価法 (NDE) の開発 NDE は遠隔レーザー超音波評価法を用いてパッチの品質と性能を監視するもの。
NEUP プロジェクト (20-19614)	バージニア州立工業大	陸地と海洋環境の両方におけるキャニスタ表面の耐食性向上のための新型無機コーティング (SiOCN(H)) の開発 この新しいコーティングはキャニスタの孔食と SCC 防止に有効と考えられる。
NEUP プロジェクト (20-19678)	ノースカロライナ州立大	キャニスタへの超音波スプレイ噴霧化学蒸着 (Mist-CVD) を用いる高硬度セラミックコーティング開発 この新しいコーティングは、単層セラミック層と Zr-Al-O の柔軟バッファ層を交互に重ねて耐食性、耐摩耗性、耐水素侵入性を向上して SCC を防止するもの。

表 2.1.3-10 キャニスタの SCC 対策と補修技術開発に関する NEUP の概要(2/2)[65]

プロジェクト名 (プロジェクト番号)	主な実施大学	実施内容
NEUP プロジェクト (18-15332)	Frank Pfefferkorn 大	<p>次の 2 つの貯蔵中の SCC 対策及び補修技術の評価と開発を行う。</p> <p>(i) 摩擦攪拌溶接法</p> <p>(ii) コールドスプレイ</p> <p>ステンレス鋼製キャニスタの SCC 防止と補修のための低荷重、低入熱技術開発</p> <p>研究成果として、オーバーパックとキャニスタの隙間における上記 2 つの技術の適用性が期待される。</p>
NEUP プロジェクト (18-15372)	シンシナチ大	<p>キャニスタの CISCC への耐性向上のための、残留応力低減を目的としたレーザー誘起低温溶射と摩擦攪拌溶接をレーザーショットピーニングと超音波ナノ組織表面改良を組み合わせた技術開発。</p> <p>期待成果は、製造過程と組織構造及び性能の機構的解明及び SCC 防止と補修策</p>
NEUP プロジェクト (18-15531)	オハイオ州立大	<p>ステンレス鋼製キャニスタの塩化物誘起孔食と SCC の補修方法並びに対策の開発評価</p> <p>低温摩擦攪拌溶接とコールドスプレイを含む新しい方法を耐食性等の種々の基準にて評価する。</p> <p>次のステップの開発研究のため 2 つの方法を選定する。</p>
NEUP プロジェクト (18-15559)	パーディユ大	<p>ステンレス鋼キャニスタの CISCC の補修と対策のためのコールドスプレイのデモを行う。</p> <p>実規模キャニスタの部分セクターモックアップにより最適化された補修技術のデモを行う。</p>

b.SNL のコーティング材調査

SNL（サンディア国立研究所）では、DOE の委託を受けてキャニスタの CISCC の防止並びに貯蔵中の補修を目的とした各種コーティング材の成立性と課題について調査した結果を報告している。[66] SNL は、各種コーティング材を広範囲に調べており、それらのキャニスタへの適用性と課題並びに採否判断を決めるための試験方案の概念を提示している。

これらの要点を表 2.1.3-11 に整理した。

表 2.1.3-11 に示すとおり、これらのコーティング材の中で耐熱性、耐放射線性及びキャニスタへの施工性のいずれにおいてもコールドスプレイを用いた高耐食金属の溶射コーティングが他の有機材やセラミック蒸着に対して優れる結果となっている。

表 2.1.3-11 米国 SNL によるキャニスタ CISCC 防止と補修のためのコーティング技術の比較評価[66]

分類	コーティング	耐熱性	耐放射線性	その他の特性	キャニスタへの施工性		総合評価と課題
					貯蔵施設での補修	工場での施工	
有機材	エポキシ樹脂	△ (<130℃) △ (母材との熱膨張差)	△		○	○	△ 耐熱性と耐放射線性のさらなる調査が必要
	PVDF(ポリフッ化ビニリデン)	○ (<350℃) △ (母材との熱膨張差)	△		× (260℃~360℃に保持する必要)	○	× サイトでの施工性不良
	グラフェン強化エポキシ樹脂	○ (<150℃)	△	エポキシ樹脂より安定で強固な密着性が期待できる。	× (スピンコートが必要)	× (スピンコートが必要)	× 施工性不良
	ポリウレタン樹脂	○ (<300℃) △ (母材との熱膨張差)	△	2年ごとに再塗装が必要	○	○	× 2年ごとに再塗装が必要
	シリコン樹脂	×	×	数か月ごとに補修が必要	○	○	× 数か月ごとに補修が必要
	ポリエチレン樹脂	— データ無し ※耐熱温度 80~100℃	×		○	○	× 耐放射線性に問題
	アルキド樹脂	— データ無し	×		○	○	× 耐熱、耐放射線性に問題
	PVC(ポリ塩化ビニール)	× (<60℃)	×		○	○	× 耐熱性(<60℃)に問題
	ポリエステル	× (25℃~400℃で劣化)	×		○	○	× 耐熱、耐放射線性に問題
	ラバー	○ (<400℃~600℃)	△		○	○	△ 高温安定性と耐放射線性のさらなる調査が必要
セラミック	ソルゲル	○	○	長期密着性データ不十分	△ (高温処理温度必要)	△ (施工後輸送時健全性)	△
	IBAD(イオンビームアルミ蒸着)	○	○		×	×	× 施工設備の開発要素大
	CVD(化学蒸着)	○	○		×	×	× 施工設備の開発要素大
化成処理	クロメート	×	×		×	×	×
	リン酸塩皮膜	○	○		△	○	△ サイトでの施工設備開発必要
金属溶射	コールドスプレイ (インコネル 718、Ni 等)	○	○	長期データ無し	○	○	○ 現時点で最も有力な技術

②技術課題と対応策

1)塗装

キャニスタに塗装を行う場合の技術的課題とそれらへの対応について、表 2.1.3-12 に整理した。

(i)塗料に求められる要件

キャニスタの SCC 対策として適用する塗装に求められる要件として以下が挙げられる。

- ・耐 SCC 性
- ・耐熱性
- ・耐放射線性
- ・長期的信頼性
- ・環境との共存性

これらの各項目について以下に説明する。

a.耐 SCC 性

塗装は一般に炭素鋼の全面腐食を防止するために使用され、ステンレス鋼の SCC 抑制に用いられることは少ない。ステンレス鋼製キャニスタに塗装を適用する場合は、キャニスタ貯蔵環境に適合した適切な条件での SCC 試験を行い、その効果を確認する必要がある。前に説明したステンレス鋼の CISCC 防止のため開発された塗料は、80℃、RH50%という条件での定荷重 SCC 試験で SUS304 に比べて優れた SCC 防止効果を示すことが報告されているが、キャニスタに適用する場合は、同様の条件で塗装の SCC 抑制効果を確認する必要があると考えられる。

b.耐熱性

既に述べたとおり使用済燃料を装荷したキャニスタの表面温度は最大 200℃程度になることから、耐熱温度が 200℃以上ある塗料を選定する必要がある。これについては、無機系ジンクリッチ（亜鉛末含有塗料）やシリコン樹脂系塗料を使用することで対応可能と考えられる。

また、塗料の熱的安定性だけでなく温度変動に伴う塗料とキャニスタ材との熱膨張差に由来する塗装の劣化についても注意が必要である。

c.耐放射線性

シリコン系樹脂についてコバルト線源を用いたガンマ線照射試験のデータが公開されており、それを図 2.1.3-26 に示す。このデータは、高濃度放射性廃棄物保管容器の防水シール材として開発されたシリコン樹脂の耐放射線性を調べる目的で取得されたもので、最大 $5 \times 10^5 \text{Gy}$ の吸収線量に対する機械的特性変化を調べている。吸収線量とともに伸びはほぼ直線的に低下するが、 $5 \times 10^5 \text{Gy}$ の吸収線量でも 100%以上の伸びが残っており、防水性は維持できるとしている。[67]

使用済燃料を装荷したキャニスタの外表面の線量率は、高々 100Gy/h との見積があるの[1]、これをもとに前記の $5 \times 10^5 \text{Gy}$ に相当する貯蔵期間を求めると $5 \times 10^5 / 10^2 = 5000 \text{h}$

で約7か月となる。

このため、このデータから数十年の貯蔵期間中においてシリコン樹脂が十分な機械的特性が維持できるとは言えない。むしろ、このデータから外挿すると1~2年で伸びがほぼゼロとなる可能性が考えられる。このような伸びがほぼ無くなる状態になると塗装の剥離や亀裂発生が懸念される。

また、原子力発電所の床や壁等に用いるエポキシ樹脂塗料やフェノール樹脂塗料について、ガンマ線に対する耐照射性を調べた文献があり、それらの試験では照射線量が最大 10^6Gy (10^8rad)程度まで有意な塗装の劣化が無いことが報告されている。[68,69]

10^6Gy はキャニスタの貯蔵期間に換算すると上記計算から約 10^4h (約1年程度)に相当するので、これらの知見からは十分な耐放射線性があるとは言えない。

無機系ジメチルシリケート塗料については、耐放射線性に関わるデータは見当たらなかったが、無機系塗料といえども多少の樹脂が添加されているため、放射線劣化が起こる可能性は否定できない。

そのため、キャニスタに塗装を適用する場合は、放射線源を用いた加速照射試験を行い長期貯蔵に対する健全性を確認する必要があるものと考えられる。

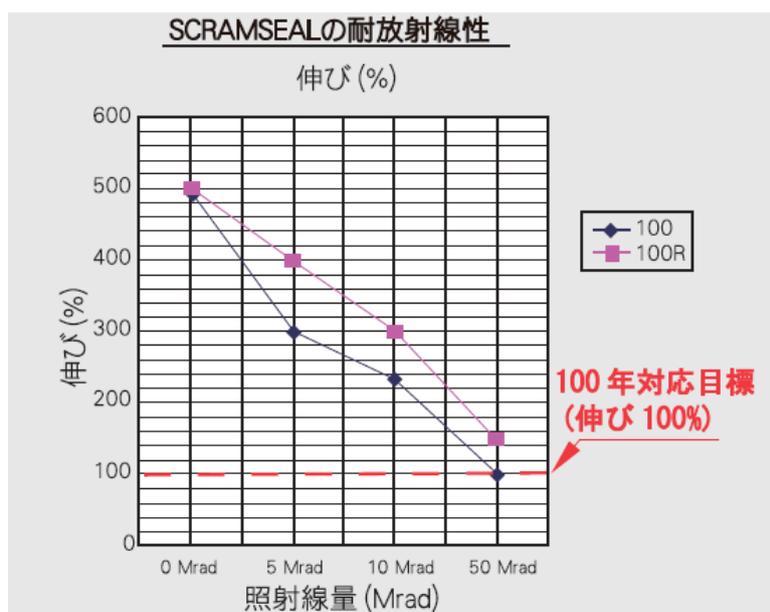


図 2.1.3-26 シリコン樹脂のガンマ照射線量と伸びの関係[67]

d.長期的信頼性

米国でキャニスタに塗装を行っている ISFSI は3サイト (Arkansas nuclear, Palisades, Point Beach) あり、貯蔵を開始したのは1993年~1996年で現在までに最長28年の貯蔵実績がある。

その間の塗装の状態に関する情報はないが、次の蓋溶接中の水素発生の問題を除いて特に塗装に関する異常の報告は見当たらない。しかしながら、前出の放射線劣化を含めて~60年の貯蔵期間の塗装の健全性を示すデータが無いことから、貯蔵中の塗装の劣化状況を継続して確認する必要があると考えられる。

e.環境との共存性

既に取り上げたように米国では VSC-24 システムのキャニスタの塗装中に、亜鉛が使用済燃料プールのホウ酸水により酸化して水素が発生し、蓋溶接中に爆発する事象が発生している。[57]こうした事象に鑑みて貯蔵中以外のプール水環境等も含めて、塗装と環境との化学的共存性に問題ないか確認する必要がある。

(ii)蓋溶接部への施工管理

キャニスタ蓋溶接部への塗装は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。そのため、自動遠隔機構を備えた塗装設備の開発を行う必要がある。

(iii)貯蔵中管理

a.塗装の補修

(i)d.で述べたようにキャニスタの貯蔵環境での塗装の数十年に及ぶ長期間の実績がないため、塗装が劣化してその機能が低下することを想定しなければならない。このため、貯蔵中の塗装の補修を行うための方法と基準を確立する必要があると思われる。

b.貯蔵中の管理要領

a.に関連するが、キャニスタに適用する塗装の長期的健全性に対する知見が十分でないため、塗装の経年劣化の進展をフォローする必要がある。一方、塗装を行うことで貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。後者は塗装しない場合よりも外観検査や付着塩分濃度測定の頻度や方法の簡略化につながるが、前者では適切な頻度と方法で塗装の健全性を確認することが求められる。

これら両方の視点から貯蔵中の塗装の管理要領とその根拠を整備する必要があると思われる。

表 2.1.3-12 キャニスタに塗装を行う場合の技術的課題と対応

分類	課題	内容	対応
塗装の要件	耐 SCC 性	塗装が CISCC の抑制に十分な効果があることを貯蔵環境に適合する試験で確認する必要がある。	従来実施されている 80℃、RH30～50%のような条件での SCC 試験を行い塗装無しとの比較評価を行う。
	耐熱性	キャニスタ表面温度は～200℃となるため、このような温度に耐える塗料を選定する必要がある。	耐熱温度が 200℃以上ある無機系ジンクリッチ（亜鉛未含有塗料）やシリコン樹脂系塗料が候補に挙げられる。
	耐放射線性	シリコン樹脂やエポキシ樹脂塗料については、最大 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \text{Gy}$ のガンマ照射線データがあるが、貯蔵期間に換算すると 1 年程度で不十分。無機系ジンクリッチの耐放射線性に関する文献は見当たらない。	放射線源を用いた加速照射試験による長期間貯蔵に対応する耐放射線性の確認が必要と考えられる。
	長期的信頼性	数十年に及ぶ長期貯蔵中の塗装の経年劣化に関する実績がない。米国の VSC-24 システムの実績は高々 30 年程度である。	貯蔵中に適切な頻度と方法で塗装の健全性を確認し、必要に応じて補修を行う。
	環境との共存性	米国 VSC-24 キャニスタの塗装中の亜鉛がプールのホウ酸水と反応（酸化）し水素爆発した事例がある。このような貯蔵中以外も含めた外部環境と塗装の共存性（化学反応）を考慮する必要がある。	使用済燃料プールや真空乾燥のような短時間の操作における環境と塗装の共存性についても評価する。（必要に応じて試験を行う。）
施工管理	蓋溶接部への施工	キャニスタ蓋溶接部への塗装は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。	自動遠隔機構を備えた塗装設備の開発を行う。
貯蔵中管理	塗装の補修	塗装の剥離や欠陥が見つかった場合の補修要否の判断と補修ができること。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗装の限界欠陥基準確立 ・ 貯蔵中の塗装の健全性確認と補修を行う遠隔技術開発
	貯蔵中管理	キャニスタ外観、表面塩分濃度等の貯蔵中管理要領	塗装の特性を考慮した適切な貯蔵中の検査方法、頻度、基準を策定する。

2)溶射

キャニスタに溶射を行う場合の技術的課題とそれらへの対応について表 2.1.3-13 に整理した。

(i)溶射に求められる要件

キャニスタの耐 SCC 対策として適用する溶射に求められる要件として以下が挙げられる。

- ・耐 SCC 性
- ・耐熱性
- ・耐放射線性
- ・長期的信頼性
- ・環境との共存性
- ・母材への影響

SCC 対策を目的とした溶射はニッケル等の高耐食性金属材料をキャニスタ表面にコーティングするのが一般的と考えられるので、この場合は耐熱性、耐放射線性、環境との共存性については特に大きな課題はないと考えてよい。

a.耐 SCC 性

溶射コーティングは、微細な孔が存在する可能性があるため、SCC のような局部腐食に対する環境遮断効果があるかどうか見極めが必要である。すなわち、塗装の場合と同様にキャニスタ貯蔵環境に適合した適切な条件での SCC 試験を行い、その効果を確認する必要がある。

b.長期的信頼性

キャニスタの SCC 対策として実機に溶射を適用した事例は国内外含めて未だ無い。貯蔵期間が数十年に及ぶことから、前出の塗装と同様に溶射コーティングが貯蔵中に劣化することを想定して、貯蔵中のコーティングの劣化状況を継続して確認する必要があると考えられる。

c.母材への影響

溶射は溶融あるいは半溶融した微粒子を高速でキャニスタ表面に衝突させて密着させる技術である。このため、キャニスタ母材が熱影響を受けて機械的性質や寸法形状に有害な影響を及ぼす可能性がある。そのため、米国では母材への影響が少ないコールドスプレイを有力な候補技術と考えて技術開発が続けられている。コールドスプレイは、母材への熱影響が少ないことに加えて母材表層に圧縮応力を付与できる特性を持ち、SCC 対策の観点からも非常に優れた技術と考えられる。

(ii)蓋溶接部への施工管理

キャニスタ蓋溶接部への溶射は、使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。このため、自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う必要がある。

(iii)貯蔵中管理

a.溶射の補修

塗装と同じくキャニスタの貯蔵環境での数十年に及ぶ長期間の実績がないため、溶射コーティングが劣化してその機能が低下することを想定しなければならない。このため、貯蔵中の溶射コーティングの補修を行うための方法と基準を確立する必要があると思われる。

b.貯蔵中の管理要領

塗装と同様に貯蔵中の溶射コーティングの管理要領とその根拠を整備する必要があると思われる。

表 2.1.3-13 キャニスタに溶射を行う場合の技術的課題と対応

分類	課題	内容	対応
溶射の要件	耐 SCC 性	溶射は微小孔が存在する可能性があるため、CISCC の抑制に十分な効果があることを貯蔵環境に適合する試験で確認する必要がある。	従来実施されている 80℃、RH30～50%のような条件での SCC 試験を行い未処理材との比較評価を行う。
	耐熱性	ニッケル等の高耐食性金属をコーティングする場合は、特に問題無し。	適切なコーティング材を選定する。
	耐放射線性	同上	同上
	長期的信頼性	数十年に及ぶ長期貯蔵中の溶射コーティングの経年劣化に関する実績がない。	貯蔵中に適切な頻度と方法で塗装の健全性を確認し、必要に応じて補修を行う。
	環境との共存性	ニッケル等の高耐食性金属をコーティングする場合は、特に問題無し。	適切なコーティング材を選定する。
	母材への影響	通常の溶射では母材に熱影響を及ぼして機械的性質や寸法形状に影響を与える可能性がある。	低温溶射（コールドスプレイ）は熱影響が少なく、また圧縮残留応力を付与できるので有力な候補技術である。また、米国では実サイトでデモ施工試験が行われている。[50]
施工管理	蓋溶接部への施工	キャニスタ蓋溶接部への溶射は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。	自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う。
貯蔵中管理	溶射の補修	溶射コーティングの剥離や欠陥が見つかった場合の補修要否の判断と補修ができること。	<ul style="list-style-type: none"> 溶射の限界欠陥基準確立 貯蔵中の溶射コーティングの健全性確認と補修を行う遠隔技術開発
	貯蔵中管理	キャニスタ外観、表面塩分濃度等の貯蔵中管理要領	溶射の特性を考慮した適切な貯蔵中の検査方法、頻度、基準を策定する。

3)残留応力低減

キャニスタに残留応力低減処理を行う場合の技術的課題とそれらへの対応について表 2.1.3-14 に整理した。

(i)残留応力低減処理に求められる要件

キャニスタの耐 SCC 対策として適用する残留応力低減処理に求められる要件として以下が挙げられる。

- ・耐 SCC 性
- ・耐熱性
- ・耐放射線性
- ・長期的信頼性
- ・母材の機械的特性への影響

このうち、残留応力低減処理は、母材の耐熱性や耐放射性に影響するとは考えられない。

a.耐 SCC 性

残留応力低減の SCC 抑制効果はキャニスタ貯蔵環境に適合した適切な条件での SCC 試験を行って確認する必要がある。また、SCC 抑制効果を担保できる残留応力の基準（応力の大きさと範囲）を明確化する必要がある。

b.長期的信頼性

貯蔵中キャニスタは定置しているので、過渡的なものを除いて作用する荷重は自重と内圧だけであり、付与される応力は降伏応力よりも十分小さい僅かなレベルにとどまる。そのため、残留応力が存在する領域の応力状態が変化することは考えられない。

c.母材の機械的特性への影響

残留応力低減処理によって、応力状態が変化するのはキャニスタ表面から高々数 mm の範囲なので母材全体の機械的特性への影響は無視できると考えられる。

(ii)施工管理

a.蓋溶接部への施工

キャニスタ蓋溶接部への残留応力低減処理は、使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。このため、自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う必要がある。

b.残留応力の確認

製品の残留応力は外観で確認できないため、所定の値に処理されたことを何等かの方法で確認する必要がある。残留応力を直接測定することは困難なので、適切な施工パラメータで間接的に確認する方法を確立する必要がある。

(iii)貯蔵中管理

残留応力低減処理を行うことで貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。この点を考慮して貯蔵中のキャニスタの管理要領/根拠を整備する必要があると思われる。

表 2.1.3-14 キャニスタ溶接部の残留応力低減対策の技術的課題と対応

分類	課題	内容	対応
残留応力 低減処理 の要件	耐 SCC 性	残留応力低減処理によって、 CISCC の抑制に十分な効果があることを貯蔵環境に適合する試験で確認する必要がある。 SCC 抑制効果を担保できる残留応力の基準を確立する必要がある。	従来実施されている 80℃、RH30～50%のような条件での SCC 試験を行い処理無しとの比較評価を行う。 上記試験にもとづいて残留応力の基準を決める。
	耐熱性	残留応力処理により母材の耐熱性は影響を受けないと考えられる。	—
	耐放射線性	残留応力処理により母材の遮蔽性能や耐放射線性に影響しないと考えられる。	—
	長期的信頼性	過渡的なものを除いて貯蔵中にキャニスタに過大な応力は作用せず残留応力状態は変化しないと考えられる。	—
	母材の機械的特性への影響	残留応力が変化するのキャニスタ表面から高々数 mm の範囲で母材全体の機械的特性への影響は無視できると考えられる。	—
施工管理	蓋溶接部への施工	キャニスタ蓋溶接部の残留応力低減処理は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。	自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う。
	残留応力の確認	残留応力は外観で確認できないため、所定の値に処理されたことを何等かの方法で確認する必要がある。	製品の残留応力を直接測定することは困難なので、適切な施工パラメータで間接的に確認する方法を確立する。
貯蔵中管理	貯蔵中管理	キャニスタ外観、表面塩分濃度等の貯蔵中管理要領	残留応力低減効果を考慮した適切な貯蔵中の検査方法、頻度、基準を策定する。

(4)許認可

①日本

我が国のコンクリートキャスク技術要件[28]は、キャニスタに使用する材料を特に規定していないが、言外に SUS304 等の通常のステンレス鋼を前提としており塗装や表面処理は想定していないと考えられる。

表 2.1.1-15 に現行のコンクリートキャスク技術要件の各規定に対して塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否並びに検討が必要と思われる事項を抽出した。現行の技術要件の規定は基本的にキャニスタ材料によらず、また塗装等の表面処理を施すことによる母材の物理的特性への影響が小さいことから、技術要件そのものを見直したり追加する必要はないと考えられる。しかし、実際の製造及び運用において技術要件に適合するうえで新たに解説に加える必要があると思われる事項が幾つかあり、それらを表 2.1.3-16 に整理した。(表 2.1.3-15 と表 2.1.3-16 の掲載順序を逆にしている。)

表 2.1.3-16 キャニスタに塗装等の表面処理技術を適用する場合のコンクリートキャスク技術要件における検討事項

該当要件	塗装や表面処理技術の適用に関する要検討事項	備考
要件 4 密封機能 ・ 閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・ 多重化された溶接蓋	・ 塗装や表面処理の施工条件や判定基準の確立 (解説にて言及) ・ 塗装等のコーティング材と環境との共存性 (化学反応) を考慮 (解説にて言及)	・ キャニスタ母材の長期間の耐 SCC 性を確保できる施工法と検査基準 ・ 塗料中の亜鉛がホウ酸水と反応し水素爆発する事例有
	表面塩分管理の扱い (解説にて言及)	通常のスチンレス鋼より合理化の可能性
	塗装や表面処理を前提として炭素鋼を用いる場合の蓋溶接検査方法、基準 (解説にて言及)	脆性破壊の可能性を考慮した検査方法、判定基準
要件 21 検査、修理等の考慮	・ 貯蔵中の塗装等の表面処理の外観検査の基準、方法、頻度 (解説にて言及) ・ 塗装等の補修性 (解説にて言及)	・ 通常のスチンレス鋼より合理化の可能性 ・ 補修の基準及び方法
要件 22 準拠規格及び基準	塗装や表面処理に適用する規格 (解説にて言及)	新たな規格の整備が必要

表 2.1.3-15 キャニスタに塗装等の表面処理技術を適用する場合のコンクリートキャスク技術要件の変更要否

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
Ⅲ 立地条件			
要件 1 基本的条件	<p>使用済燃料貯蔵施設（以下、「貯蔵施設」という。）の立地地点及びその周辺においては、事故の誘因となる事象が起こるとは考えられないこと。また、万一事故が発生した場合において、災害を拡大するような要因も少ないこと。</p> <p>（解説）</p> <p>事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から貯蔵施設の立地地点及びその周辺における以下について検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>1. 自然環境</p> <p>(1) 地震、津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等の自然事象</p> <p>(2) 地盤、地耐力、断層等の地質及び地形等</p> <p>(3) 風向、風速、降雨量等の気象</p> <p>(4) 河川、地下水等の水象及び水理</p> <p>2. 社会環境</p> <p>(1) 近接工場等における火災・爆発等</p> <p>(2) 航空機事故等による飛来物等</p> <p>(3) 農業、畜産業、漁業等の食物に関する土地利用及び人口分布状況等</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
要件2 平常時条件	<p>貯蔵施設は、平常時における一般公衆の線量が、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低いものであること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 本要件は、貯蔵施設における、貯蔵、キャニスタ詰替、施設内移送、放射性廃棄物の廃棄等の活動を考慮して適切な方法により評価される敷地周辺の一般公衆の被ばく線量が合理的に達成できる限り低いものになるように適切な措置が講じられていることの確認を求めるものである。</p> <p>2. 貯蔵施設からの放射線による一般公衆の外部被ばくの評価を行う際には、直接線及びスカイシャイン線による影響を考慮すること。</p> <p>3. 貯蔵施設から環境へ放出される放射性物質として、キャニスタを透過するトリチウム、キャニスタ冷却空気の放射化によって生成される放射性物質及びキャニスタ表面の放射性物質を考慮すること。</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件3 事故時条件	貯蔵施設において、最大想定事故が発生した場合、一般公衆に対して、過度の放射線被	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>ばくを及ぼさないこと。</p> <p>(解説)</p> <p>最大想定事故の評価にあたっては以下の事項を適切に考慮すること。</p> <p>1. 事故の選定</p> <p>貯蔵施設の設計に基づき、</p> <p>(1) 落下・衝突・転倒</p> <p>(2) 火災・爆発</p> <p>(3) 空気流路閉塞等の冷却不全</p> <p>(4) 経年変化等に伴う密封機能劣化</p> <p>(5) 自然災害</p> <p>等、コンクリートキャスクの基本的安全機能を著しく損なうおそれのある事故の発生の可能性を、長期貯蔵に伴うコンクリートキャスクの構成部材の経年変化も踏まえ、技術的観点から十分に検討し、最悪の場合、発生が想定される事故であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事故を選定すること。その際、信頼性のあるデータ、安全裕度のある妥当な仮定・条件等に基づいて、事故となる要因、発生の可能性、事故の進展過程等の評価すること。</p> <p>2. 線量の評価</p>		い。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>1.で選定した事故のそれぞれについて、技術的に妥当な解析モデル及びパラメータを採用するほか、次の事項等に関して検討し、安全裕度のある妥当な条件を設定して、放射性物質の放出量、遮蔽機能の低下等を評価すること。</p> <p>(1) コンクリートキャスクの密封機能</p> <p>(2) コンクリートキャスク及び貯蔵建屋等の遮蔽機能</p> <p>(3) 放射性物質の放出を想定するコンクリートキャスクの基数</p> <p>(4) 放出に寄与するキャニスタ内の放射性物質の核種と量</p> <p>落下・衝突・転倒等の衝撃力が発生する事故においては衝撃力による粒子状放射性物質の飛散等、事故の状態を考慮して放射性物質の核種と量を決定すること。</p> <p>(5) 放射性物質の大気中の拡散条件</p> <p>(6) 放射性物質の放出期間</p> <p>放射性物質の放出量等の計算における放出期間の設定にあたっては、事故発生後異常を検知するまでの時間や、影響緩和のための対策に要する作業時間等を適切に考慮すること。</p> <p>評価した事故のうち、一般公衆に対して最大の</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>放射線被ばくを及ぼす事故を最大想定事故として設定し、その場合の線量をもってしても、一般公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないことを確認すること。</p> <p>3. 一般公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないことの判断基準は「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）の事故時の判断基準のうち「周辺公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと。」の判断基準とする。</p>		
IV 基本的安全機能			
要件4 密封機能	<p>1. 貯蔵施設を構成するキャニスタは、放射性物質の閉じ込め、内部空間の不活性雰囲気を保つ密封機能を維持できる設計であること。</p> <p>2. キャニスタの蓋部は多重化された適切な溶接構造で密封される設計であること。</p> <p>（解説）</p> <p>1. キャニスタの密封機能は以下を達成するために要求するものである。</p> <p>(1) 使用済燃料が内包する放射性物質をキャニスタの外に放出させないこと。</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>(2) バスケット及び使用済燃料の健全性を維持するために、キャニスタ内部の空間を不活性雰囲気を保つこと。</p> <p>2. キャニスタの密封機能に影響を及ぼすメカニズムとして、</p> <p>① 製造時の施工不良</p> <p>② 設計想定を超える荷重の負荷（熱応力及び応力サイクルを含む）</p> <p>③ 内面からの腐食（応力腐食割れを含む）</p> <p>④ 外面からの腐食（応力腐食割れを含む）が挙げられる。</p> <p>①は施工管理、検査を厳重に行うことによって、②は適切な安全裕度を有する機械設計によって、また、③はキャニスタ内の不活性雰囲気を維持することによって、密封機能への影響を排除できると考えられる。従って、密封機能維持のためには、④の外面からの腐食への対策が重要である。特に、冷却空気によって持ち込まれる塩分付着により応力腐食割れが発生するおそれがある場合には、高耐食性材の使用、溶接部残留応力の低減、塩分付着環境の改善等、適切な応力腐食割れ対策が講じられた設計であること。</p>	<p>2.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・塗装や表面処理の施工条件と判定基準の確立について言及する必要がある。 ・塗装等のコーティングを行う場合は、化学反応等、環境との共存性に注意する必要がある。 ・塗装や表面処理の適用を適用する場合の貯蔵中の付着塩分管理について言及することが考えられる。 	<p>米国では塗料中の亜鉛がプールのホウ酸水により酸化して水素発生爆発する事象が発生している。[53]</p>

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>3. キャニスタは使用済燃料を収納した後に蓋を溶接によって取付ける構造である。そのため、蓋溶接部は、通常の原子炉施設の第一種容器で行われている両側完全溶け込み溶接とは異なる片側部分溶け込み溶接とする設計が想定される。また、溶接部の健全性を確認する検査方法についても、強い放射線を放出する使用済燃料が収納されているため、溶接部の放射線透過試験（RT）は適用できない。これらの点を考慮して、キャニスタの蓋の溶接部は、排水用貫通孔等の蓋の溶接部も含め、多重の溶接密封構造であることを求める。</p> <p>4. 「適切な溶接構造」とは、次のことをいう。</p> <p>(1) 蓋の溶接は、使用済燃料が放出する強い放射線環境下で行われること及び過去の実績が少ないこと等から、モックアップ試験等によって事前に施工の確実性、信頼性等が十分に確認された溶接方法を使用するものであること。</p> <p>(2) 蓋溶接部の検査は、多層 PT（許容される最大欠陥寸法を超えない間隔で実施する多層浸透探傷試験）と UT（超音波探傷試験）によって実施されるものであること。これは以下の理由による。</p>	<p>4. 塗装や表面処理を前提として炭素鋼を用いる場合の溶接検査基準について言及する必要がある。（脆性破壊の可能性を考慮した欠陥判定基準等）</p>	

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>① 多層 PT は既に海外で実績がある方法であるが、PT により表面欠陥がないことが確認されても表面に現れていない潜在欠陥が存在した場合、その後の溶接で潜在欠陥が PT を実施した面を超えて成長する可能性を完全に排除できないこと。</p> <p>② RT の代替検査手法とすべき UT は、オーステナイト系ステンレス鋼への適用が困難といわれてきたが、近年の技術進歩により信頼性が向上してきていること。</p> <p>③ 密封機能維持の考え方において、溶接施工不良が原因の密封機能喪失は検査によって排除できるものとしており、本検査による健全性確認が重要であること。</p> <p>なお、必要な信頼性を有することが証明された場合はこの限りではない。</p>		
要件 5 遮蔽機能	<p>貯蔵施設は、直接線及びスカイシャイン線による一般公衆の線量が十分に低くなるように適切な放射線遮蔽機能を有する設計であること。また、放射線業務従事者の作業条件を考慮して、十分な放射線遮蔽機能を有する設計であること。</p> <p>(解説)</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>1. 貯蔵施設の遮蔽機能は、コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置、貯蔵建屋等によって分担させることができる。</p> <p>2. コンクリート製貯蔵容器は、貯蔵エリアにおいて放射線業務従事者が必要な業務を安全に遂行するために十分な放射線遮蔽能力を有すること。</p> <p>3. コンクリート製貯蔵容器及び貯蔵建屋の遮蔽設計は、以下の項目を適切に考慮したものであること。</p> <p>① 給排気口からの中性子線及びガンマ線の漏えい（ストリーミング）</p> <p>② コンクリートの経年変化に伴う遮蔽能力の低下</p> <p>③ コンクリート製貯蔵容器の内表面に設置される鋼製ライナの剥離性腐食生成物による遮蔽能力の低下</p>		
要件6 臨界防止機能	<p>貯蔵施設は、技術的にみて想定されるいかなる状態においても、臨界を防止する設計であること。</p> <p>金属キャスク内のバスケットが臨界防止機能の一部を構成する場合には、バスケットは、臨界防止機能維持に必要な構造健全性を保つ</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>ことができる設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>本要件は、金属キャスクの受入から搬出までの全行程で、事故発生時を含めたあらゆる状態において、臨界を確実に防止する設計であることを求めている。臨界解析においては、信頼性が確認された手法、解析コードを用いるとともに、以下の項目等について安全裕度のある妥当な条件を設定すること。</p> <p>① 収納する使用済燃料の初期濃縮度及び燃焼度並びにそれらの分布</p> <p>② 金属キャスク内外の水又は水蒸気の存在</p> <p>③ バスケット格子内の燃料集合体位置</p> <p>④ ボロン等の中性子吸収材の濃度、非均質性、核反応に伴う減損</p> <p>⑤ バスケット及び使用済燃料集合体の形状変化</p> <p>⑥ 臨界解析は、移送作業、地震時の滑動等も考慮して、中性子実効増倍率が最も大きくなる金属キャスクの配置を想定して行うこと。</p>		
要件 7 除熱機能	貯蔵施設は、密封機能、遮蔽機能、臨界防止機能及び使用済燃料の健全性を維持するために必要な除熱機能を有する設計であること。	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>(解説)</p> <p>1. コンクリートキャスクは、外部から取り入れた空気が、コンクリート製貯蔵容器下部の給気口から入り上部の排気口から排出される間に、キャニスタとコンクリート製貯蔵容器の間隙を通してキャニスタ等を冷却する方式のものである。本要件は、コンクリートキャスクが十分な冷却能力を確保できる設計であること、また、貯蔵建屋はコンクリートキャスクに求める除熱機能を阻害しない設計であることを求めるものである。</p> <p>2. 必要な除熱機能を有する設計とは、以下の事項を満足するものをいう。</p> <p>(1) キャニスタ、バスケット、コンクリート製貯蔵容器の温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持すること。</p> <p>(2) 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損防止及び被覆管の機械的特性低下防止の観点から制限される値以下に維持すること。</p> <p>(3) 上記の各温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータを測定等により取得できる設計であること。</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
V 放射線管理及び環境安全			
要件 8 放射線業務従事者の被ばく管理	<p>1. 作業環境における放射線被ばく管理</p> <p>(1) 放射線業務従事者の作業環境を監視、管理するため、線量率等の監視系統及び測定機器並びに線量率の異常な上昇に対する警報系統を設けること。</p> <p>(2) 上記の系統からの主要な情報は、適切な場所において集中して監視できる設計であること。</p> <p>2. 放射線業務従事者の個人被ばく管理</p> <p>放射線業務従事者の個人被ばく管理に必要な線量計等の機器を備えること。</p> <p>3. 管理区域の区分</p> <p>管理区域は、線量率及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度の程度により必要に応じて適切に区分し、適切な出入り管理等が行える設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、線量率等の監視等を行う際は、施設的设计に応じて中性子線の影響を適切に考慮すること。</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件 9 放射性廃棄物	貯蔵施設は、その貯蔵等に伴い発生する放射性	無し	この条件はキャニスタへの塗装

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を用いる場合の変更要否	備考
の処理及び放出管理	<p>廃棄物を適切に処理する等により、周辺環境へ放出する放射性物質の濃度等を合理的に達成可能な限り低くする設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 貯蔵施設で発生する放射性液体廃棄物を環境に放出する場合には、放出される排水中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じて適切な処理を行える設計であること。</p> <p>2. 貯蔵施設で発生する放射性気体廃棄物を環境に放出する場合には、放出される排気中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じて適切な処理を行える設計であること。</p> <p>3. 貯蔵施設は、発生する放射性固体廃棄物を貯蔵するのに十分な容量の貯蔵設備を有し、必要に応じて適切な処理が行える設計であること。</p>		や表面処理の適用有無によらない。
要件 10 放射線監視	<p>1. 貯蔵施設は、放射性廃棄物の放出の経路における放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。</p> <p>2. 貯蔵施設は、貯蔵エリアの排気口において</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>空気中の放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。</p> <p>3. 放射性物質の放出の可能性に応じ、周辺環境における線量率、放射性物質の濃度等を監視するための適切な対策が講じられていること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 貯蔵施設で発生する放射性液体廃棄物を環境に放出する設計である場合には、その放出口またはその他の適切な箇所において、それぞれの放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていることを求めている。</p> <p>2. 一般公衆の放射線被ばくの観点から有意な放射性物質が貯蔵エリアから排出される空气中に含まれていないことを確認するため、放射性物質の汚染のおそれのない管理区域（以下、「非汚染管理区域」という。）として管理される貯蔵エリアの排気口においても、放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていることを求めている。これはキャニスタの密封機能によって放射性物質を閉じ込める設計であること、貯蔵エリアが非汚染管理区域として管理されることから、平常時の放射性気体廃棄物の放出管理の観点からの監視は不</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>要と考えるが、気体状放射性物質を多量に含む使用済燃料を貯蔵する施設であるという特徴を考慮して、一般公衆に有意な被ばくを及ぼす放射性物質の放出がないことを、測定結果をもって示すことは重要であると考えたことによる。</p> <p>3. 周辺環境等における放射線監視については、事故時においても線量率、放射性物質の濃度等に関する情報を得るための対策が講じられていることを求めている。</p>		
VI その他の安全対策			
要件 1 1 使用済燃料に関する考慮	<p>1. 貯蔵施設の設計に用いる使用済燃料の特性は、貯蔵しようとする使用済燃料の信頼性があるデータに基づき、安全裕度をもって適切に設定したものであること。</p> <p>2. 貯蔵する使用済燃料は、キャニスタに収納する前に漏えいしていないことが適切な方法により確認されたものであること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 貯蔵施設の設計にあたっては、貯蔵しようとする使用済燃料の範囲を明確にすること。</p> <p>使用済燃料の発熱量、放射エネルギー、反応度、被覆管機械的特性等、貯蔵施設の設計に用いる諸特</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>性は、貯蔵しようとする使用済燃料の範囲全てを包絡し、適切な安全裕度をもって設定されたものであること。</p> <p>2. バスケット及び使用済燃料の健全性は、キャニスタの内部空間を不活性雰囲気を保つことにより維持される。貯蔵する使用済燃料は、キャニスタ内に収納された後に乾燥されるが、ピンホール、ヘアクラック等の微小の漏えい孔を有する燃料棒の場合、乾燥が不完全になり、燃料棒内に残留した水分が貯蔵中に放出され、不活性雰囲気の低下をもたらす可能性がある。また、漏えい燃料棒では、浸入した冷却水とペレット等との反応によって生じた水素が被覆管に吸収され、被覆管の機械的特性が低下している可能性がある。</p> <p>これらのことから、貯蔵する使用済燃料は原子炉の運転中のデータや燃料集合体 SHIPPING 検査等により漏えいしていないことが確認されたものに限定することとした。</p> <p>ただし、貯蔵施設の設計において、漏えい燃料棒の残留水分及び被覆管の機械的強度低下の影響が適切に考慮されている場合にはこの限りではない。</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
要件1 2 キャニスタの内部空間の雰囲気に対する考慮	<p>貯蔵施設に貯蔵するキャニスタは、バスケット、使用済燃料等の健全性を維持するために、不活性ガスが適切に充填される設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 本要件は、キャニスタの内部空間の雰囲気を、キャニスタ内面、バスケット及び使用済燃料の腐食、応力腐食割れ等を防止するために必要な不活性雰囲気にすることを求めるものである。</p> <p>2. キャニスタの内部空間が、以下の項目等を考慮しても、1. の目的を達成するのに十分な不活性雰囲気になるように対策される設計であること。</p> <p>① 充填ガスに含まれる不純物 ② ガス置換工程で混入する空気 ③ 乾燥工程で残留する水分</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件1 3 キャニスタ取扱等に対する考慮	<p>キャニスタ等を取り扱う設備は、これらの基本的安全機能に影響を及ぼす、落下、衝突等を防止する適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>1. 「キャニスタ等」とは、キャニスタ、キャ</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>ニスタを収納した輸送容器及びコンクリートキャスクをいう。</p> <p>2. 「取り扱う設備」とは、キャニスタ等を取扱う移送装置、キャニスタ詰替装置等をいう。</p> <p>3. 「落下、衝突等」とは、施設内でキャニスタ等を取り扱う際に発生する可能性のある落下、衝突、転倒、異常着床等の事象をいう。</p>		
要件 1 4 火災・爆発に対する考慮	<p>貯蔵施設は、火災・爆発の発生を防止し、かつ、万一の火災・爆発の発生時にはその拡大を防止するとともに、基本的安全機能を維持する観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は以下の対策等が講じられた設計であること。</p> <p>1. 貯蔵施設は実用上可能な限り不燃性または難燃性材料を使用する設計であること。</p> <p>2. 貯蔵施設において可燃性物質を使用する場合は、火災・爆発の発生を防止するため、着火源の排除、異常な温度上昇の防止対策、可燃性物質の漏えい防止及び洩れ込み防止対策等適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>3. 万一の火災の拡大を防止するために、適切な検知、警報系統及び消火設備が設けられてい</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	るとともに、火災による影響低減のために適切な対策が講じられた設計であること。		
要件 1 5 冷却用空気流路閉塞等の冷却不全に対する考慮	<p>貯蔵施設は、冷却用空気の流路閉塞等の冷却不全の発生を防止し、かつ、万一の冷却不全発生時に基本的安全機能を維持する観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は以下の対策等が講じられた設計であること。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. コンクリート製貯蔵容器は、冷却用空気の給排気口に異物の侵入防止対策を施した設計であること。 2. コンクリート製貯蔵容器は、冷却用空気流路が閉塞した場合、給排気温度の測定等により、これを検知できる設計であること。 3. 貯蔵建屋の給排気口は、積雪等により閉塞しない設計であること。 4. キャニスタ詰替装置の故障等によりキャニスタが詰替装置内に長時間留まっても基本的安全機能が損なわれないように除熱できる設計であること。 	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を採用する場合の変更要否	備考
要件16 電源喪失に対する考慮	<p>貯蔵施設は、外部電源喪失に対して、安全確保の観点から適切な対策が講じられた設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、停電等の外部電源系の機能喪失時に、以下の安全上必要な設備・機器を作動し得るのに十分な容量及び信頼性のある電源系を有する設計であること。</p> <p>(1) 放射線監視設備</p> <p>(2) 火災等の警報設備、緊急通信・連絡設備、非常照明灯等の設備・機器</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件17 共用に対する考慮	貯蔵施設の安全上重要な施設のうち、当該貯蔵施設以外の原子力施設との間又は当該貯蔵施設内で共用するものについては、その機能、構造等から判断して、共用によって当該使用済燃料貯蔵施設の安全性に支障をきたさないものであること。	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件18 地震に対する考慮	<p>1. 貯蔵施設は、敷地及びその周辺地域における過去の地震記録、現地調査結果等を参照して、最も適切と考えられる設計用地震力に対し必要な基本的安全機能が維持できる設計であること。</p> <p>2. 貯蔵施設は、想定される地震力に対して、</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>貯蔵中のコンクリートキャスクが転倒しない設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設の耐震設計について、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（以下「耐震設計審査指針」という。）」の考え方にに基づき、次の事項に従って妥当性を評価することとする。</p> <p>1. 耐震設計上の重要度分類</p> <p>貯蔵施設の耐震設計上の重要度分類によるクラス別施設は、耐震設計審査指針に従い、以下の通りとする。</p> <p>①Aクラスの施設</p> <p>i) 使用済燃料を貯蔵するための施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ、バスケット <p>ii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設</p> <p>なお、貯蔵施設においては、特に i) に示す施設をAsクラスと呼称する。</p> <p>②Bクラスの施設</p> <p>i) 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が年間</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を用いる場合の変更要否	備考
	<p>の周辺環境区域外の線量限度に比べ十分小さいものは除く。</p> <p>ii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置、貯蔵建屋（遮蔽機能を期待する場合） <p>iii) 使用済燃料を冷却するための施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート製貯蔵容器、キャニスタ詰替装置 <p>iv) 放射性物質の放出を伴うような場合、その外部放散を抑制するための施設でAクラスに属さない施設</p> <p>③Cクラスの施設</p> <p>上記A、Bクラスに属さない設備</p> <p>2. 各クラス別施設は、次に示す耐震設計に関する基本的な方針を満足すること。</p> <p>(1) Aクラスの各施設は、基準地震動S1による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐えること。</p> <p>さらに、Asクラスの各施設は、基準地震動S2による地震力が作用しても、各施設に要求さ</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>れる基本的安全機能を損なわないこと。</p> <p>なお、「基準地震動S 1による地震力」及び「基準地震動S 2による地震力」とは、耐震設計審査指針に規定されるそれぞれの地震力の算定法により算定された地震力をいう。また、「静的地震力」とは耐震設計審査指針に規定される耐震設計評価法に基づく静的地震力をいう。</p> <p>(2) Bクラスの各施設は静的地震力に耐えること。また、基準地震動S 2による地震力が作用したとしても、遮蔽機能の低下が一般公衆に過大な放射線被ばくを及ぼさないこと及び密封機能、遮蔽機能、臨界防止機能維持に必要な除熱機能を損なわないこと。</p> <p>(3) 上位の分類に属するものの基本的安全機能は、下位の分類に属するものの破損によって、波及的に喪失することがないこと。例えば、AsクラスのキャニスタはBクラスのコンクリート製貯蔵容器に収納されているが、この場合、コンクリート製貯蔵容器は、Asクラスに要求される地震力が作用した場合には損傷しても良いが、その損傷によってキャニスタの維持すべき基本的安全機能が喪失</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>してはならない。</p> <p>3. キャニスタはコンクリート製貯蔵容器内に固定せずに収納されており、また、コンクリート製貯蔵容器は床面に固縛されない設計も考えられる。基準地震動S2による地震力に対する評価においては、コンクリート製貯蔵容器と床面及びキャニスタの接触について安全裕度のある適切な条件を設定すること。また、コンクリート製貯蔵容器にかかる静的地震力に対する評価では、キャニスタ及びコンクリート製貯蔵容器は固定されているものと仮定し、地震力が完全に伝達されるものとする。</p> <p>4. コンクリートキャスクの転倒を許す設計では、多数のコンクリートキャスクが転倒して転がり、相互に干渉することを考慮する必要があるが、この解析・評価は複雑で困難と考えられること、また深層防護の観点も考慮して、基準地震動S2による地震力が作用した場合において、コンクリートキャスクが転倒しないことを要求することとする。なお、コンクリートキャスクの固縛は、転倒防止設計の一方法ではあるが、本要件は必ずしも固縛を求めるものではない。</p>		

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を採用する場合の変更要否	備考
	<p>5. 耐震設計審査指針における「重要な建物・構築物は岩盤に支持されねばならない。」という要求に対しては、支持することとなる地盤が地震時における安定性、建屋との相互作用等を適切に解析・評価できるものであれば、この要求を満たすものとする。</p>		
要件19 地震以外の自然現象に対する考慮	<p>貯蔵施設における安全上重要な施設は、予想される地震以外の自然現象のうち最も苛酷と考えられる自然力を考慮した設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>「予想される地震力以外の自然現象のうち最も苛酷と考えられる自然力」としては、敷地及びその周辺地域の自然環境をもとに洪水、津波、台風、積雪等のうち予想されるものに対して、過去の記録の信頼性を十分検討の上、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、妥当とみなされるものを選定すること。なお、過去の記録、現地調査の結果等を参考にして必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させること。</p>	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件20 事故時に対する考慮	貯蔵施設は、事故時に対応した警報、通信連絡、放射線業務従事者等の避難等のための適切な	無し	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
	<p>対策が講じられていること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、以下の対策等が講じられた設計であること。</p> <p>1. 適切な放射線計測器、放射線防護具等が必要に応じ確保されていること。</p> <p>2. 通常の照明用の電源が喪失した場合においても、その機能を失うことのない待避用の照明を設備し、かつ、単純、明確及び永続性のある標識のついた安全退避通路を有する設計であること。</p>		い。
要件 2 1 検査、修理等に対する考慮	<p>貯蔵施設における安全上重要な施設は、その重要度及び必要性に応じ、適切な方法により、検査、試験、保守及び修理ができる設計であること。</p> <p>(解説)</p> <p>キャニスタは、密封機能維持の確認の観点から、溶接部近傍の発錆状況等を確認できる設計でなければならない。また、コンクリート製貯蔵容器は、除熱機能維持等の観点から、内側の鋼製ライナの腐食状態等を確認できる設計であることが必要である。</p>	<p>無し</p> <p>(解説)</p> <p>キャニスタの塗装や表面処理の劣化状態を確認できる設計とする必要がある。また、塗装や表面処理の補修の基準とP方法を確立する必要がある。</p>	この条件はキャニスタへの塗装や表面処理の適用有無によらない。
要件 2 2 準拠規格及	貯蔵施設における安全上重要な施設の設計、材	無し	この条件はキャニスタへの塗装

要件	コンクリートキャスク技術要件[28]	キャニスタに塗装や表面処理技術を適用する場合の変更要否	備考
び基準	<p>料の選定、製作、工事及び検査は、適切と認められる規格及び基準によるものであること。</p> <p>(解説)</p> <p>貯蔵施設は、「原子炉等規制法」、「建築基準法」、「消防法」等日本国内法令を満足するとともに、安全上重要な施設的设计、材料の選定、製作、工事及び検査は、適切と認められる日本工業規格、学会等の規格及び基準によるものであること。なお、必要に応じて、国外の規格及び基準も信頼性が十分高いと確認される場合には準拠することができる。</p>	<p>(解説)</p> <p>キャニスタへの塗装や表面処理に関わる規格、基準を新たに制定する必要がある。</p>	<p>や表面処理の適用有無によらない。</p>

②米国

NUREG-2215 [30]の 8.5.12 節にあるように、乾式貯蔵システムの表面処理は第一の目的として腐食障壁として使用し、一般には安全上重要な構造物、システム及び機器 (SSC) には使用しない。

NRCは現在までにキャニスタの CISCC 対策としてレーザーピーニングやコールドスプレー等の審査を行ったことはなく、あるいは認可していない。これらの技術を CISCC 対策として認可するには、以下の内容 (データ) を含む新たな規格 (コードケース) の制定が必要になるのではないかと考えている。(添付-1 参照※)

- ・これらの施工が貯蔵システムの構造物、システム及び機器 (SSC) の機能に影響しないことを示すデータ
- ・施工法、材料仕様、材料特性の認証
- ・母材及び環境との共存性
- ・施工後 (補修含む) の経年劣化管理

※これは、聴取した NRC の担当審査官の意見で NRC としての正式見解ではない。

運転中の原子炉プラントの SCC 感受材に対してはコードケース N-729-6 と N-770-5 にレーザーピーニングと低塑性バニング法の両方が規定されているが、使用済燃料キャニスタには未だ同様の規格は策定されていない。

なお、2020 年に乾式貯蔵システムの経年劣化管理検査のためのコードケース N-860”使用済燃料の貯蔵及び輸送閉じ込めシステムに対する検査要求と評価標準”が ASME Sec.XI、Div1 および Div.2 において承認されている。[70] コードケース N-860 は、オーステナイト系ステンレス鋼製キャニスタの貯蔵中の検査に対する指標を規定するもので、概要は以下のとおり。

- ・外気環境にて貯蔵するキャニスタに適用する。貯蔵建屋内で貯蔵する場合でも外気を導入する場合は含まれる。
- ・貯蔵期間更新以降に適用し、初期の貯蔵認可には適用しない。
- ・初期外観検査の実施間隔と検査対象キャニスタ数を規定する。
- ・外観検査にもとづいてスクリーニングを行う。
- ・外観異常の程度により詳細検査を行い、欠陥の大きさ、形状を評価する。
- ・欠陥の補修/交換はこのコードケースには含まず、事業者の判断に委ねる。

2.2 キャニスタへの適用性調査

2.2.1 既存の技術要件への影響

2.1 章で検討した高耐食材及び表面処理技術をキャニスタへ適用する場合に既存の技術要件（コンクリートキャスク技術要件[28]）において、見直しが必要と考えられる箇所を抽出した。

(1)高耐食材を適用する場合

2.1.2(4)の表 2.1.2-8 に整理したとおり、高耐食材を使用済燃料キャニスタに適用する場合に既存のコンクリートキャスク技術要件そのものを見直したり、あるいは追加する事項は基本的に無いと考えられる。その理由を要約すると以下ようになる。

①既存のコンクリートキャスク技術要件のキャニスタの設計、製作に対する要求の主要部は以下に要約される。

- 1)放射性物質を閉じ込めて、内部空間の不活性機能を維持できること。
- 2)キャニスタの蓋部は多重化された適切な溶接構造で密封されること。
- 3)適切な方法により、検査、試験、保守及び修理ができること。
- 4)設計、材料の選定、製作、工事及び検査は適切な規格及び基準によること。
- 5)事故時を含め基本的安全機能（遮蔽、臨界防止、除熱、構造強度）を維持できること。

②高耐食材の候補と考えられる二相ステンレス鋼やスーパーステンレス鋼は、

- ・通常の SUS304 等のステンレス鋼に比べて耐食性、耐 CISCC 性に優れる以外、機械的特性（強度、靱性）、熱的特性に大きな違いはなく、溶接性等の加工性についても特に大きな課題はない。
- ・JIS、ASME 等にて規格化されたものが存在する。
- ・米国では、一部システムで二相ステンレス鋼を代替材とする認可を取得している。[8,17]

②より、高耐食材を用いて上記①の 1)～5)を満足し、実績がある通常のステンレス鋼製キャニスタと同等以上の機能を持つキャニスタの設計、製作が可能であると判断できる。

なお、表 2.1.2-8 の整理を踏まえてコンクリートキャスク技術要件の解説に補足することが必要と考えられる事項を改めて、表 2.2.1-1 にまとめた。

表 2.2.1-1 高耐食材を適用する場合のコンクリートキャスク技術要件[28]の解説補足案

該当要件	解説に補足すべき事項	備考
要件 4 密封機能 ・ 閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・ 多重化された溶接蓋	二相ステンレス鋼の高温脆化を考慮した溶接条件の選定	溶接割れ、耐食性低下、靱性低下の防止
	高耐食材を使用する場合の貯蔵中の付着塩分管理等(適切な基準、方法、頻度)	適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能
	高耐食材を使用する場合の蓋溶接検査方法、基準（解説にて言及） ※現行は多層 PT と UT の両方	溶接特性、溶接欠陥性状を考慮
要件 21 検査、修理等の考慮	高耐食材を使用する場合の貯蔵中の外観検査（発錆状況等）の基準、方法、頻度	適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能

(2)表面処理技術を適用する場合

(1)と同様に 2.1.3(4)の表 2.1.3-15 に整理したとおり、表面処理技術（塗装、溶射、残留応力低減処理）を使用済燃料キャニスタに適用する場合に既存のコンクリートキャスク技術要件そのものを見直したり、あるいは追加する事項は基本的に無いと考えられる。その理由を要約すると以下ようになる。

①既存のコンクリートキャスク技術要件のキャニスタの設計、製作に対する要求は以下に要約される。

- 1)放射性物質を閉じ込めて、内部空間の不活性機能を維持できること。
- 2)キャニスタの蓋部は多重化された適切な溶接構造で密封されること。
- 3)適切な方法により、検査、試験、保守及び修理ができること。
- 4)設計、材料の選定、製作、工事及び検査は適切な規格及び基準によること。
- 5)事故時を含め基本的安全機能（遮蔽、臨界防止、除熱、構造強度）を維持できること。

②表面処理技術（塗装、溶射、残留応力低減処理）を適用した場合、

- ・ 表面処理は、曲げ加工や溶接等を行った後で行うため、それらの製作工程での製品品質に影響しない。
- ・ 表面処理によってキャニスタ母材が影響を受ける範囲は、表層の一部にとどまるため、全体の機械的特性（強度、靱性）、熱的特性、遮蔽性能等への影響はほとんどないと考えられる。
- ・ 米国では、一部システムで塗装、ピーニングを施工する前提で認可を取得している。
[49,50]（溶射については未認可）

②より、表面処理を適用した場合でも上記①の 1)~3),5)に対して実績がある通常のステンレス鋼製キャニスタと同等以上の機能を持つキャニスタの設計、製作が可能と判断できる。また、4)については、今後必要に応じて適切な規格化を行うことが可能と考えられる。

なお、表 2.1.3-15 の整理を踏まえてコンクリートキャスク技術要件の解説に補足することが必要と考えられる事項を改めて、表 2.2.1-2 にまとめた。

表 2.2.1-2 表面処理技術を適用する場合のコンクリートキャスク技術要件[28]の解説補足案

該当要件	解説に補足すべき事項	備考
要件 4 密封機能 ・ 閉じ込め、不活性雰囲気維持 ・ 多重化された溶接蓋	・ 塗装や表面処理の施工条件や判定基準の確立（解説にて言及）	・ キャニスタ母材の長期間の耐 SCC 性を確保でき、かつ健全性に影響しない施工法と検査基準
	・ 塗装等のコーティング材と環境との共存性（化学反応）を考慮	・ 塗料中の亜鉛がホウ酸水と反応し水素爆発する事例有
	表面塩分管理の扱い	適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能
	塗装や表面処理を前提として炭素鋼を用いる場合の蓋溶接検査方法、基準	脆性破壊の可能性を考慮した検査方法、判定基準
要件 21 検査、修理等の考慮	・ 貯蔵中の塗装等の表面処理の外観検査の基準、方法、頻度 ・ 塗装等の補修性	・ 適切な根拠があれば通常のステンレス鋼より合理化可能 ・ 補修の基準及び方法
要件 22 準拠規格及び基準	キャニスタに適用する表面処理技術に係る規格基準の整備	現状、キャニスタの SCC 対策としての塗装、溶射、残留応力低減の規格基準は無い。

2.2.2 二重壁キャニスタへの適用性

令和元年度に調査した海外で採用されている二重壁キャニスタ[71]に、前出の高耐食材及び各種表面処理技術を採用する必要性及び採用する場合の技術的課題を整理した。以下に結果を報告する。

(1)二重壁キャニスタの仕様及び特徴

二重壁キャニスタ（DWC）は米国 Holtec 社が開発した同社の MPC（多目的キャニスタ）の仕様オプションの一つで、内側容器と外側容器の 2 つの密封容器で構成される。これは、従来の一重壁キャニスタ（SWC）に対して追加の閉じ込め障壁を求める他国（英国とウクライナ）の要望に応じて作られたもので、メーカーによれば次の特徴を持つ。[72]

- ・内側のステンレス鋼製容器を SCC や孔食のような外部環境劣化から完全に防護できる。
- ・圧力境界を内側容器に置くことで、貯蔵中の外側のステンレス鋼製容器の応力が大幅に下がるため SCC のリスクを低減できる。
- ・腐食や設計基準事故を超える事象によって外側容器が破損した場合でも、内側容器の密封性が維持され、放射性物質の環境への放出が無い。
- ・DWC の外寸は SWC の取扱い設備や装置に適合するよう設定できる。また、内側容器と外側容器の材料は、貯蔵環境に応じて適切なものを選定できる。（内と外で異なる選択も可能）

図 2.2.2-1 に DWC の構造概念を示す。

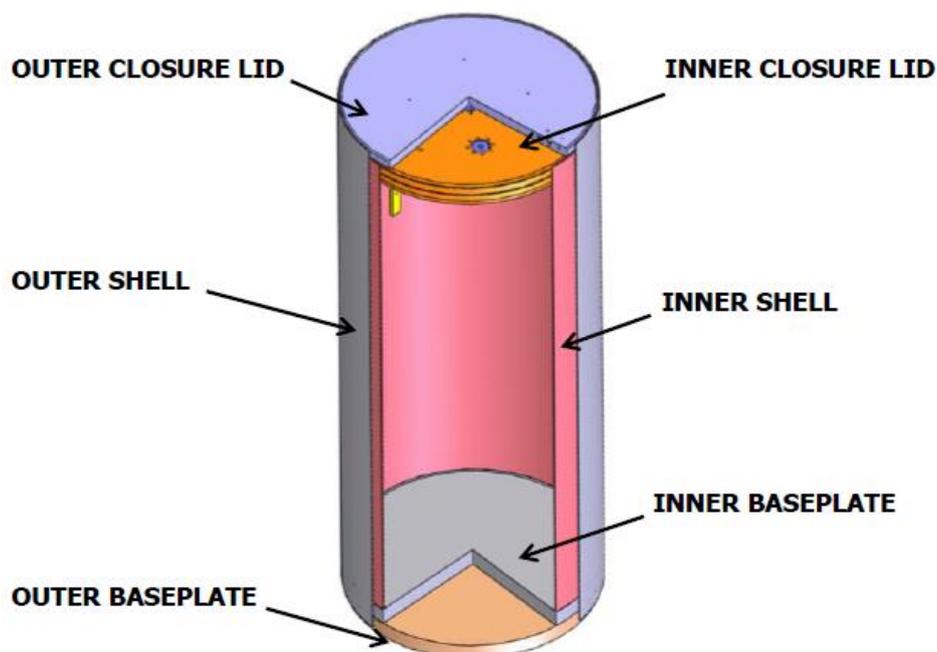


図 2.2.2-1 二重壁キャニスタ（DWC）の構造[68]

(2)DWC の採用実績[71]

前述のとおり DWC は英国とウクライナで採用されている。表 2.2.2-1 にそれらに関する情報を整理した。英国では、サイズウエル B 使用済燃料乾式貯蔵施設に導入した HI-STORM 貯蔵システム（コンクリートキャスク）のキャニスタに DWC を採用している。また、計画中のヒンクリーポイント C 原子力発電所には同じく DWC を用いる HI-STORM システムを最初から設置することが検討されている。ウクライナでは、チェルノブイリ使用済燃料乾式貯蔵施設（ISF-2）と新たに建設した集中中間貯蔵施設（CSFSF）で DWC を用いた乾式貯蔵を 2020 年から開始している。

英国では前記貯蔵施設が海岸近くにあるため、CISCC のリスクを考慮して DWC を採用しているものと考えられる。ウクライナでは、貯蔵施設が内陸にあり CISCC への懸念は少ないものの破損燃料も貯蔵することと貯蔵期間の長期化（～100 年）を考慮して DWC を採用している。

表 2.2.2-1 DWC を採用済または計画中の使用済燃料貯蔵施設[71]

国	サイト名	DWC の仕様	備考
英国	サイズウエル B	貯蔵システム：HI-STORM 貯蔵燃料：PWR 材質：ステンレス鋼(内外壁とも) 寸法：－ 内部雰囲気：ヘリウム充填（4bar） (図 2.2.2-1)	貯蔵建屋内に キャスクを設置
	ヒンクリー ポイント C	貯蔵システム：HI-STORM 貯蔵燃料：PWR 材質：SUS316L(内外壁とも) 寸法：外壁肉厚 9.5mm 内壁肉厚 12.7mm 内部雰囲気：ヘリウム充填（4bar）	計画中
ウクライナ	チェルノブイリ ISF-2	貯蔵システム：水平モジュール(横型サイロ) 貯蔵燃料：RMBK 材質：ステンレス鋼(内外壁とも) 寸法：外壁肉厚 9.5mm 内壁肉厚 12.7mm (図 2.2.2-2)	チェルノブイリ 1~4 号機の使用 済燃料を貯蔵
	CSFSF (集中貯蔵施設)	貯蔵システム：HI-STORM 貯蔵燃料：VVER 材質：ステンレス鋼(内外壁とも) 寸法：－	ウクライナ全体 の VVER 使用 済燃料を貯蔵予 定



MPC (DWC)



コンクリートキャスク(HI-STORM)

図 2.2.2-1 サイズウエル B 乾式貯蔵施設の DWC とコンクリートキャスク[71]

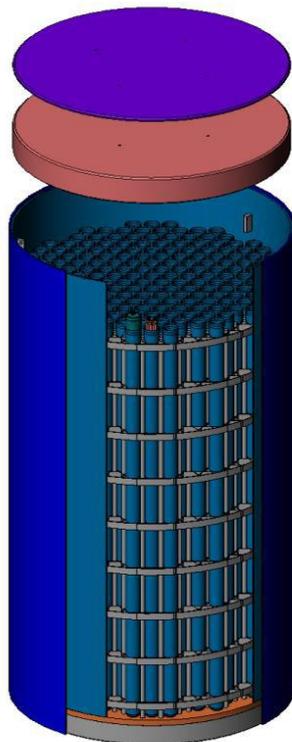


図 2.2.2-2 チェルノブイリ ISF-2 の DWC の構造[71]

なお、米国では現時点で DWC を採用する具体的な計画は見られないが、非営利団体 Citizens Oversight が使用済燃料貯蔵の長期化による安全性への懸念から、既存の SWC を DWC に転換するよう NRC に請願を行っている。[73]

この HELMS(Hardened Extended-life Local Monitored Surface)と名付けた DWC を用いるシステムの特徴は以下のとおり。

- ・ 既存の SWC を新たに製作した外側容器に収納し、密封することで DWC に転換できる。外側容器の蓋は溶接またはボルト締めのもちも可能。
- ・ 外側容器と内側容器の間の圧力を監視することで、外側容器（または内側容器）の漏洩を検知できる。（図 2.2.2-3 に圧力監視法の概念を示す。）
- ・ 外側容器または内側容器が破損しても、破損した容器を交換すれば放射性物質の環境への放出無しで貯蔵を継続できる。
- ・ 容器の交換を繰り返すことによって長期間（～1000 年）の貯蔵さえ可能になる。

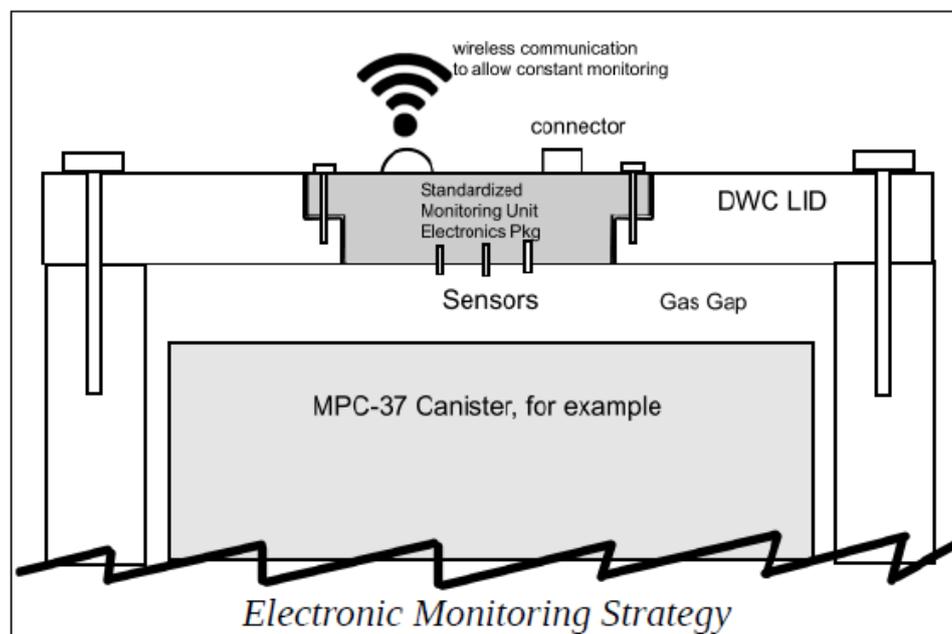


図 2.2.2-3 Citizens Oversight が提案する DWC の漏洩監視法[73]

(3) DWC に高耐食材及び表面処理技術を適用する必要性

DWC の特徴は(1)で示したように次の特徴（機能）を持つ。

- ・内側のステンレス鋼製容器を SCC や孔食のような外部環境劣化から防護できる。
- ・外側容器と内側容器の間の圧力を監視することで、外側容器（または内側容器）の漏洩を検知できる。
- ・外側容器または内側容器が破損しても、破損した容器を交換すれば放射性物質の環境への放出無しで貯蔵を継続できる。

これらの特徴を踏まえて、DWC に高耐食材あるいは各種表面処理技術（塗装、溶射、残留応力低減処理）を適用する必要性について検討した結果を表 2.2.2-2 と表 2.2.2-3 に整理した。

まず、整理の切り口として DWC の主要な特徴である内外壁間圧力監視を行うことによる外側容器または内側容器の漏洩検知性を取り上げて、圧力監視（漏洩監視）を行う場合と行わない場合でケースを分類した。次にこの両ケースに対して、外側容器に対して高耐食材あるいは表面処理技術を適用する必要性を高いものから A～C でランク付けした。そして、外側容器に高耐食材あるいは表面処理技術を適用する場合と適用しない場合について、内側容器にそれらを適用する優先度を同様に A～C でランク付けした。（さらに番号で優先度を順位づけた。1>2）

各ケースのランク付けは高耐食材でも表面処理技術でも基本的に同じなので、高耐食材を例に説明する。

1)漏洩監視を行う場合

内外容器の両方に通常材を採用した場合、仮に内外どちらかが漏洩しても検知でき、また漏洩した容器の交換を行うことで外部への放射性物質の放出を伴うことなく現状回復ができる。このため、このケースを A とした。閉じ込めの信頼性をさらに増すために高耐食材を採用する場合は、内外容器の両方に適用する必要はなく、どちらかに適用すればよいと考えられる。その場合、内側容器よりも外部環境に曝される外側容器に高耐食材を用いる必要性は高いと考えられるため外側容器を B1 とし内側容器を B2 とした。なお、この結論は、漏洩監視の信頼性が 100%に近い前提にもとづくもので、漏洩検知の信頼度によって優先度が逆転することが考えられる。

2)漏洩監視を行わない場合

内外容の少なくともどちらか一方に高耐食材を用いる必要性は高いと判断し A ランクとした。その場合、上記 1)と同じ理由によって、外側容器を A1 とし内側容器を A2 とした。外側容器または内側容器に高耐食材を採用すれば、貯蔵期間中に SCC によって DWC が閉じ込め機能を喪失するリスクは内外容器とも通常材を使用する場合に比べて大幅に低減されると考えられることから、外側容器と内側容器の両方に高耐食材を採用するケースは B ランクとしている。（もちろん、経済性を除けば内外容器の両方に高耐食材を使用することの否定要素はない。）

表 2.2.2-2 DWC に高耐食材を適用する必要性

DWC の特徴	漏洩監視有無*1	外側容器	内側容器	必要性*2 (優先度)	解説
①内側のステンレス鋼製容器を SCC や孔食のような外部環境劣化から防護できる。 ②外側容器と内側容器の間の圧力を監視することで、外側容器（または内側容器）の漏洩を検知できる。 ③外側容器または内側容器が破損しても、破損した容器を交換すれば放射性物質の環境への放出無しで貯蔵を継続できる。	漏洩監視を行う。	高耐食材	高耐食材	C	漏洩監視を行う場合は、仮に外側容器が漏洩しても、外側容器を交換することで放射能放出を防止できるので内外容器ともに通常材でも可能。 高耐食材を用いる場合は、内外容器のどちらかに適用すればよい。その場合、腐食環境に直接曝される外側容器に高耐食材を採用する方が優先度は高い。
		高耐食材	通常材	B1	
		通常材	高耐食材	B2	
		通常材	通常材	A	
	漏洩監視を行わない。	高耐食材	高耐食材	B	漏洩監視を行わない場合は、少なくとも内外容器のどちらか一方を高耐食材とする必要性は高いと考えられる。 その場合、腐食環境に直接曝される外側容器に高耐食材を採用する方が優先度は高い。
		高耐食材	通常材	A1	
		通常材	高耐食材	A2	
		通常材	通常材	C	

*1 ここでは、外側容器または内側容器が漏洩すれば直ちに検知できるという前提を置いている。

*2 A：優先度大 B：優先度中 C：優先度小（番号は1が2より優先度大）

表 2.2.2-3 DWC に表面処理を行う必要性

DWC の特徴	漏洩監視有無*1	表面処理有無		必要性*2 (優先度)	解説
		外側容器	内側容器		
①内側のステンレス鋼製容器を SCC や孔食のような外部環境劣化から防護できる。 ②外側容器と内側容器の間の圧力を監視することで、外側容器（または内側容器）の漏洩を検知できる。 ③外側容器または内側容器が破損しても、破損した容器を交換すれば放射性物質の環境への放出無しで貯蔵を継続できる。	漏洩監視を行う。	有	有	C	漏洩監視を行う場合は、仮に外側容器が漏洩しても、外側容器を交換することで放射能放出を防止できるので内外容器ともに表面処理無しでも可能。 表面処理を行う場合は、内外容器のどちらかにすればよい。その場合、外側容器が腐食環境に直接曝されることと、内側容器を外側容器に挿入する際の干渉の問題から外側容器に表面処理を適用する方が優先度は高い。
		有	無	B1	
		無	有	B2	
		無	無	A	
	漏洩監視を行わない。	有	有	B	漏洩監視を行わない場合は、少なくとも内外容器のどちらか一方に表面処理を適用する必要性は高いと考えられる。 その場合、外側容器が腐食環境に直接曝されることと、内側容器を外側容器に挿入する際の干渉の問題から外側容器に表面処理を適用する方が優先度は高い。
		有	無	A1	
		無	有	A2	
		無	無	C	

*1 ここでは、外側容器または内側容器が漏洩すれば直ちに検知できるという前提を置いている。

*2 A：優先度大 B：優先度中 C：優先度小（番号は1が2より優先度大）

(4) DWC に高耐食材及び表面処理を適用する場合の技術的課題

表 2.2.2-4 に DWC に高耐食材あるいは表面処理技術を適用する場合の技術的課題を整理した。以下にそれらについて説明する。

①高耐食材

キャニスタに適用する高耐食材は、2.1.2 節で述べたとおり二相ステンレス鋼あるいはスーパーステンレス鋼と考えられ、米国では一部の貯蔵システムで NRC の認可を得ており、また我が国においても既に民間規格に取入れている。[7] これらの高耐食材は通常のステンレス鋼に比べて CISC に対する耐性が高いことが試験で示されている以外、機械的特性、熱的特性、製作性（加工性、溶接性）に特に大きな違いが無い。また、DWC の内側容器と外側容器の製作方法は SWC と基本的に同じである。このため、これらの高耐食材を DWC に適用する場合に DWC 固有の技術的課題は見当たらない。しかし、DWC、SWC 共通の課題として以下が挙げられる。

1)溶接管理

2.1.2 節で説明したように二相ステンレス鋼は高温におけるフェライト相の不安定性が耐食性と機械的特性の低下をもたらす可能性があり、スーパーステンレス鋼では溶接部の Cr、Mo 量の減少による耐食性低下や第二相析出による靱性低下の問題があるため、溶接施工管理（温度、入熱、溶接材選定等）が重要である。

2)蓋溶接部の非破壊検査

鋼種に特有の溶接割れ性状を考慮した非破壊検査を行う必要がある。特に、二相ステンレス鋼は蓋部の溶接において溶接層間を跨いで進展する可能性がある低温割れの懸念があることから、PT(多層 PT)に加えて放射性透過試験に代わる適切な体積検査（UT）を適用する必要があると考えられる。

3)高温脆化（二相ステンレス鋼）

二相ステンレス鋼は 250°C～350°C の範囲に長時間置かれるとフェライト相が分解して脆化を引き起こし、靱性が低下する。このため、ASME のボイラー及び圧力容器（B&PV）規格では、上限温度を 600° F(316°C)としている。貯蔵中のキャニスタ温度は最大約 200°C なので実際問題として二相ステンレス鋼の高温脆化が問題になる可能性は低いと考えられる。

4)漏洩監視(必要性)

高耐食材に限らず DWC の特徴の一つとして、内外壁間の圧力を測定監視することで外側容器または内側容器の漏洩を検知できる可能性が挙げられる。たとえば、通常のステンレス鋼を使用する場合に対して内外壁間の圧力監視を要求する規制を設けた場合、高耐食材を使用すればその規定を外せるという除外規定を取り入れることも考えられる。

5)内外壁間の雰囲気と圧力の要件

DWC では内外壁間の空間の雰囲気と圧力に対する仕様を設定する必要がある。その場合、高耐食材と通常材でこれらの仕様に対する要件を変えることが考えられる。

6)貯蔵時の管理要領（外側容器）

高耐食材は CISCC に対する耐性が通常のステンレス鋼よりも優れることがこれまでの試験研究によって示されている。そのため、貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。これに関して、通常ステンレスの場合よりも外観検査や付着塩分濃度測定の頻度や方法を簡略化できることを規定する場合、その規定と根拠を整備する必要があると思われる。

②表面処理（塗装）

DWC に塗装を適用する場合は、一般に外側容器のみに塗装を行い内側容器にも塗装を行う必要性は低いと考えられる。仮に、内側容器に塗装を行う場合には、塗装した内側容器を外側容器に挿入した後の内側容器の塗装の健全性を確認することが課題となる。つまり、内側容器の塗装が挿入時に外側容器内面との干渉によって損傷していないことを確認する必要がある。

これ以外の DWC、SWC 共通の塗装に対する課題として以下が挙げられる。

(2.1.3(3)②1) 参照)

1)塗装の選定基準と根拠の明確化

キャニスタへの塗装に対して求められる要求として次の項目がある。貯蔵時のキャニスタの環境条件を考慮してこれらの要件に適合するための塗装の選定基準と選定根拠を示す必要がある。

- ・耐 SCC 性
- ・耐熱性
- ・耐放射線性
- ・長期的信頼性
- ・環境との共存性

2)蓋溶接部への施工管理

キャニスタ蓋溶接部への塗装は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。そのため、自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う必要がある。

3)貯蔵中管理（外側容器）

(i)塗装の補修基準/要領

キャニスタの貯蔵環境での塗装の長期間の実績がないため、塗装が劣化してその機能が低下することを想定しなければならない。すなわち貯蔵中の塗装の補修を行うための基準と方法を確立する必要があると思われる。

(ii)貯蔵中の管理要領

塗装を行うことで貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。一方、キャニスタに適用する塗装の長期的健全性に対する知見が無く、塗装の経年劣化の進展をフォローする必要がある。前者は通常ステンレスの場合よりも外観検査や付着塩分濃度測定の頻度や方法の簡略化につながるが、後者は適切な頻度と方法で塗装の健全性を確認することが求められる。これら両方の視点から貯蔵中の塗装の管理要領とその根拠を整備する必要があると思われる。

4)キャニスタに適用する塗装の規格基準制定

コンクリートキャスク技術要件 22 の規定にしたがい、キャニスタに適用する塗装の規格基準を整備する必要がある。

③表面処理（溶射）

DWC に溶射（コールドスプレイ）を適用する場合は、一般に外側容器のみに溶射を行い内側容器にも溶射を行う必要性は低いと考えられる。仮に、内側容器に溶射を行う場合には、塗装の場合と同様に溶射した内側容器を外側容器に挿入した後の内側容器の溶射の健全性を確認することが課題となる。

これ以外の DWC、SWC 共通の溶射に対する課題として以下が挙げられる。

(2.1.3(3)②) 参照)

1)溶射の選定基準と根拠の明確化

キャニスタへの溶射に対して求められる要求として次の項目がある。貯蔵時のキャニスタの環境条件を考慮してこれらの要件に適合を満足するための溶射の選定基準と選定根拠を示す必要がある。

- ・耐 SCC 性
- ・耐熱性
- ・耐放射線性
- ・長期的信頼性
- ・環境との共存性
- ・母材への影響

2)蓋溶接部への施工管理

キャニスタ蓋溶接部への溶射は使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。このため、自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う必要がある。

3)貯蔵中管理（外側容器）

(i) 溶射の補修基準/要領

キャニスタの貯蔵環境での溶射の長期間の実績がないため、溶射が劣化してその機能が低下することを想定して貯蔵中の塗装の補修を行うための基準と方法を確立する必要があると思われる。

(ii)貯蔵中の管理要領

溶射を行うことで貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。溶射材が金属である場合は塗装のような長期的健全性への懸念は小さいことから、通常ステンレスの場合よりも外観検査や付着塩分濃度測定の頻度や方法を簡略化できることを規定する場合、その規定と根拠を整備する必要があると思われる。

4)キャニスタに適用する溶射の規格基準制定

コンクリートキャスク技術要件 22 の規定にしたがい、キャニスタに適用する溶射の規格基準を整備する必要がある。

④表面処理（残留応力低減処理）

DWC に残留応力低減処理（ピーニング、バニシング）を適用する場合は、一般に外側容器のみに残留応力低減処理を行い、内側容器にも施工する必要性は小さいと考えられる。DWC 固有の残留応力低減処理に伴う技術的課題は特に見当たらないが、DWC、SWC 共通の課題として以下が挙げられる。(2.1.3(3)②3) 参照)

1)残留応力低減処理法の選定基準と根拠の明確化

キャニスタへの残留応力処理に対して求められる要求として次の項目がある。

- ・耐 SCC 性（残留応力の大きさと付与範囲）
- ・長期的信頼性
- ・母材の機械的特性への影響
- ・施工性（蓋溶接部への施工性）

キャニスタに適用する残留応力低減処理法として大きくピーニングとバニシングに大別されるが、それらについても多くの方法が存在する。そのため、上記の要件に適合する残留応力低減処理法の選定に対する基準とその根拠を整備する必要があると考えられる。

2)施工管理

(i)蓋溶接部への施工

キャニスタ蓋溶接部への残留応力低減処理は、使用済燃料を装荷後に行うため高放射線下の作業となる。このため、自動遠隔機構を備えた施工設備の開発を行う必要がある。

(ii)残留応力の確認

キャニスタに適用する残留応力低減処理を行った後に、所定の範囲と大きさの残留応力が付与されていることを確認する必要があるが、その確認方法と判定基準を確立しなければならない。特に使用済燃料装荷後のキャニスタ蓋溶接部の残留応力は直接測定が困難で間接的な方法によることになるが、その方法及び基準並びに根拠を整備する必要がある。

3)貯蔵中管理（外側容器）

残留応力低減処理を行うことで貯蔵中のキャニスタ外観検査や付着塩分濃度測定のような貯蔵中の管理を合理化できる可能性がある。通常ステンレスの場合よりも外観検査や付着塩分濃度測定の高頻度や方法を簡略化できることを規定する場合、その規定と根拠を整備する必要があると思われる。

4)キャニスタに適用する残留応力処理の規格基準制定

コンクリートキャスク技術要件 22 の規定にしたがい、キャニスタに適用する残留応力処理の規格基準を整備する必要がある。

表 2.2.2-4 DWC に高耐食材あるいは表面処理技術を適用する場合の技術的課題 (1/2)

適用技術		DWC 特有の課題		一般的課題
		外側容器	内側容器	
高耐食材 (二相ステンレス鋼、 スーパーステンレス鋼)		特になし	特になし	<ul style="list-style-type: none"> 溶接管理 (温度等) 脆化、欠陥防止 蓋溶接部の非破壊検査 高温脆化 (二相ステンレス鋼) 漏洩監視 (必要性) 内外壁間の雰囲気と圧力の要件 貯蔵時の管理要領 (外側容器) (外観、塩分濃度測定の方法、頻度、判定基準) ⇒通常ステンレス鋼より合理化する場合の根拠 明確化
表面処理	塗装	特になし	<p>—</p> <p>一般に内側容器に塗装を適用する必要性は低いと考えられる。 仮に塗装を施工する場合は、外側容器への挿入後の健全性確認 (挿入時の塗装損傷の可能性)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 塗料の選定、塗装施工仕様とその根拠の 明確化 (耐食性、耐熱性、耐放射線性) 貯蔵時の管理要領 (外側容器) (外観検査の方法、頻度、判定基準) 塗装の補修基準と補修要領 キャニスタに適用する塗装の規格基準制定

表 2.2.2-4 DWC に高耐食材あるいは表面処理技術を適用する場合の技術的課題 (2/2)

適用技術		DWC 特有の課題		一般的課題
		外側容器	内側容器	
表面処理	溶射 ・ コールドスプレイ	特になし	— 一般に内側容器に溶射を適用する必要性は低いと考えられる。 仮に溶射を施工する場合は、外側容器への挿入後の健全性確認 (挿入時の溶射面損傷の可能性)	<ul style="list-style-type: none"> 溶射の選定基準と根拠の明確化 (耐食性、耐熱性、耐放射線性) 溶射施工要領・基準と根拠の明確化 貯蔵時の管理要領 (外側容器) (外観検査の方法、頻度、判定基準) 溶射の補修基準と補修要領 キャニスタに適用する溶射の規格基準制定
	残留応力緩和処理 ・ ピーニング ・ バニシング	特になし	— 一般に内側容器に残留応力低減処理を適用する必要性は低いと考えられる。	<ul style="list-style-type: none"> 残留応力低減処理要領・基準と根拠の明確化 残留応力の確認 (直接測定することが困難な場合は、代替手段による間接確認が必要) 貯蔵時の管理要領 (外側容器) (外観、塩分濃度測定の方法、頻度、判定基準) ⇒通常ステンレス鋼より合理化する場合の根拠明確化 <ul style="list-style-type: none"> キャニスタに適用する残留応力低減処理の規格基準制定

3.まとめ

我が国における今後の使用済燃料の貯蔵規制の高度化に資することを目的に、使用済燃料の乾式貯蔵に用いられるキャニスタ材料の耐食性向上に係る情報の調査・収集を行い、以下の成果を得た。

3.1 キャニスタ材料の耐 SCC 性の観点からの調査

3.1.1 高耐食材に係る調査

(1)我が国では、現時点でキャニスタを用いる使用済燃料貯蔵施設が無いため高耐食材のキャニスタへの適用実績はないが、過去に二相ステンレス鋼とスーパーステンレス鋼の適用性について民間を中心に検討が行われており、技術規格に使用可能材料として登録されているものがある。

これらの材料は、通常のステンレス鋼に比べて耐 SCC 性能が大幅に向上することが試験で示されている。

一方、米国では一部の貯蔵システムで二相ステンレス鋼を代替材とする認可を取得しているが、現時点では未だ実機に採用されたものはない。

(2)二相ステンレス鋼とスーパーステンレス鋼のような高耐食材をキャニスタに適用する場合、既存の技術要件(コンクリートキャスク技術要件)そのものの見直しが必要な箇所はないが、溶接施工、検査要領や貯蔵中検査等、高耐食材特有の考慮すべき事項があるため技術要件の解説にそれらを加える必要があると考えられる。

3.1.2 表面処理技術に係る調査

(1)キャニスタの SCC 対策として適用可能な表面処理技術として、以下が候補として挙げられる。

- ①塗装：耐熱性に優れる無機系塗装（ジンクリッチ系やシリコン樹脂系）
- ②溶射：母材への影響が少なく圧縮応力を付与できるコールドスプレイが有力
- ③残留応力低減：ピーニング（レーザーピーニング等）及び低塑性バニシング

・①については、米国の VSC-24 システム（コンクリートキャスク）の炭素鋼製キャニスタに適用しており 3 サイトで実貯蔵を行っている。最長 28 年の実績がある。

・②は米国の SONGS ISFSI でキャニスタ SCC 補修デモ試験が行われている。また、米国では官民挙げてコールドスプレイを中心としたコーティングの研究開発を行っている。NRC では未だコーティングの審査を行った実績は無いが、審査のためには適切な規格基準の整備が必要と認識している。

・③は、同じく SONGS ISFSI の HI-STORM UMAX システムのキャニスタに工場製作段階でレーザーピーニングを適用している。（メーカーの自主判断で NRC は審査していないとの立場）

SONGS ISFSI は海岸に近接しており、SCC への懸念が大きいことからレーザーピーニングの他にキャニスタの肉厚増加や材料変更（304⇒316L）等の対策を取り入れている。

(2)我が国では、③の残留応力低減の施工性と耐 SCC 性について民間で研究が行われており、実規模試験体で耐 SCC 及び施工性を確認している。

(3)前記①～③の表面処理技術をキャニスタに適用する場合、既存の技術要件（コンクリートキャスク技術要件）そのものの見直しが必要な箇所はないが、施工要領/基準、環境との共存性、貯蔵中検査及び規格基準の整備等の考慮すべき事項があるため、技術要件の解説にそれらを加える必要があると考えられる。

3.2 キャニスタへの適用性調査

3.2.1 既存の技術要件への影響

前記のとおり、高耐食材及び表面処理技術をキャニスタへ適用する場合に既存の技術要件（コンクリートキャスク技術要件）は基本的に見直す必要はないが、施工要領/基準、貯蔵中管理要領/基準、規格基準整備等、これらに特有の考慮事項があるため、技術要件の解説にそれらを加える必要があると考えられる。

3.2.2 二重壁キャニスタへの適用性

(1)二重壁キャニス（DWC）の持つ以下の特徴を考慮して前記の高耐食材及び表面処理技術（以下、高耐食材等）を適用する必要性を検討した。

- ①内側のステンレス鋼製容器を SCC や孔食のような外部環境劣化から防護できる。
- ②外側容器と内側容器の間の圧力を監視することで漏洩を検知できる。
- ③外側容器または内側容器が破損しても、破損した容器を交換すれば放射性物質の環境への放出無しで貯蔵を継続できる。

- ・②の漏洩監視を行わない場合、外側容器または及び内側容器へ高耐食材等を適用する必要性は高いが、漏洩監視を行えば③の理由によって、これらを適用する必要性は相対的に低下する。
- ・漏洩監視を行う場合は、仮に外側容器が漏洩しても外側容器を交換することで放射能放出を防止できるので内外容器ともに通常仕様でも可能と考えられる。高耐食材等を適用する場合は、内外容器のどちらかに適用すればよい。（もちろん、経済性を除いて内外容器の両方に適用を否定する要素は無い。）
- ・なお、どのような仕様を選択するかは、耐食材等の適用技術の効果と漏洩監視の信頼度の両方から総合的に判断されるべきである。

(2)DWC に高耐食材あるいは表面処理技術を適用する場合の課題として、以下が挙げられる。

- ・DWC 特有の課題としては、内側容器に塗装や溶射のようなコーティングを行う場合に内側容器を外側容器に挿入する際の干渉によるコーティングの損傷有無を確認することが挙げられる。
- ・上記以外の課題は一重壁キャニスタ（SWC）と共通である。すなわち、一高耐食材については、溶接施工管理基準、貯蔵時管理要領/基準

—表面処理技術については、施工要領/基準、環境との共存性、貯蔵中検査及び規格基準の整備等がある。

3.3 SCC 発生に影響を与える因子からの考察

今回の調査では SCC 発生に影響を与える因子として、材料及び応力緩和の視点で調査を実施した。その結果として SCC 対策として切り札として採用できるあるいは期待できるものは認められなかった。また、従前に実施した中間貯蔵施設におけるキャニスタ耐食性能に係る自然影響調査（平成28年度）の結果を踏まえると、今後のキャニスタの耐 SCC に係る研究を進める観点で現時点での知見では環境面での管理・運用が容易と考える。

添付-1 米国関係者への聞き取り調査結果

米国におけるキャニスタ SCC 抑止のための高耐食材並びに表面処理技術の適用について、次の関係機関の担当者への聞き取り調査（電話ベース）を行った。表 1 にその結果を表 1 に要約する。

- ・ EPRI : ESCP (Extended Storage Collaboration Program) のとりまとめ者から聴取
- ・ NRC : 原子炉材料安全及び防護局の燃料管理部門のキャニスタの CISCC に関する担当者から聴取

表 1 キャニスタへの高耐食材及び表面処理技術の適用に関する米国関係者への質問と回答 (1/3)

質問事項	回答者	回答
1. NUHOMS-EOS システム[6]は二相ステンレス鋼タイプ 2205(UNS S31803 または S32205)を代替材とすることで認可を得ているが、米国でこれ以外に高耐食材をキャニスタ適用している事例は無いのか？	EPRI	公開情報ではこれ以外に見当たらない。
	NRC	NRC は HI-STORM100 システムの認可改訂 12 (CoC 番号 1014) [17]で UNS S31803 を使用することを認可している。
2. SONGS ISFSI の HI-STORM UMAX システムで試験用キャニスタを用いたコールドスプレイによるニッケルコーティングの補修デモ試験[50]を行っているが、これ以外に SCC 防止あるいは補修のための対策を行っている事例はないか？	EPRI	EPRI ではキャニスタ SCC 対策の試験とデモの段階にあり、未だ実用化したものはない。
	NRC	SONGS で行われたコールドスプレイによる補修デモは SCE(南カリフォルニアエジソン)がカリフォルニア州の沿岸委員会の要求に応じて行ったもので、NRC はコールドスプレイを SCC 補修法として審査しておらず、当然認可していない。 また、同 ISFSI の HI-STORM UMAX システムのキャニスタに工場製作段階でレーザーピーニングを施工していることを認識している。このレーザーピーニングは軍用機の疲労寿命の改善目的で施工を請け負っている業者に委託して行われた。 この処理はメーカー (Holtec) が 10CFR72.48 項 “変更、試験及び実験”に基づいて自主的に行ったもので NRC は審査していない。

表1 キャニスタへの高耐食材及び表面処理技術の適用に関する米国関係者への質問と回答 (2/3)

質問事項	回答者	回答
<p>3.キャニスタの SCC 対策の目的で実施している研究開発で ESCP[61]と DOE の NEUP[65]以外の活動について情報はなにか？</p>	EPRI	<p>EPRI のキャニスタ SCC に関わる研究開発成果はすべて ESCP の中で共有される。</p>
	NRC	<p>NRC は EPRI の ESCP に参画しており、またその一部は DOE の NEUP の研究も含まれている。</p> <p>これ以外に NRC はキャニスタの腐食と検査に関わる研究に出資している。その成果は NUREG-2214 (Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report) [59] にて公開している。</p>
<p>4.キャニスタ SCC 対策として高耐食材またはその他の腐食防護策を適用する場合の許認可上の課題は何と考えるか？</p>	EPRI	<p>EPRI は現在キャニスタの SCC 補修と緩和の指針策定に取り組んでいる。この中で、コーティングは安全性に係る要素に変更をもたらす可能性があるため、事前に規制当局の承認を得る必要があるかもしれないと考えている。</p> <p>また、この活動は SCC の緩和と補修の規格 ASME コードケース N-860[70]のタスクグループを支援している。</p> <p>指針の報告書は 2021 年 9 月に発行される予定。[63]</p>
	NRC	<p>NRC は現在までにキャニスタの CISCC 対策としてレーザーピーニングやコールドスプレイの審査を行ったことはなく、あるいは認可していない。これらの技術を CISCC 対策として認可するには、以下の内容（データ）を含む新たな規格（コードケース）の制定が必要になるのではないかと考えている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・これらの施工が貯蔵システムの構造物、システム及び機器（SSC）の機能に影響しないことを示すデータ ・施工法、材料仕様、材料特性の認証 ・母材及び環境との共存性 ・施工後（補修含む）の経年劣化管理

表1 キャニスタへの高耐食材及び表面処理技術の適用に関する米国関係者への質問と回答 (3/3)

質問事項	回答者	回答
<p>5.米国において ASME コードケース N-860 の他にキャニスタの SCC 緩和と補修のための新たな規格が策定中あるいは検討されているか？</p>	<p>EPRI</p>	<p>ASME のN-860 に関わるタスクグループは同規格の改訂あるいは新たなコードケースの策定に引き続き取り組んでいる。それとは別に、ASME BPVⅢKIWG-TG Advanced Surface Stress Improvement Technology (ASSIT)がレーザーピーニングを用いた SCC 対策に係わる活動を行っている。</p>
	<p>NRC</p>	<p>ASME のN-860 に関わるタスクグループは同規格の改訂あるいは新たなコードケースの策定に引き続き取り組んでいるが、今後の方向性は決まっていない。現時点では新たなコードケースを作るか、あるいはN-860 を改訂するかははっきりしていない。</p>
<p>6.キャニスタ SCC 対策として高耐食材や他の防食技術を HI-STORM100 システムの二重壁キャニスタ (DWC) に適用する場合の課題は何と考えるか？</p>	<p>EPRI</p>	<p>回答無し</p>
	<p>NRC</p>	<p>NRC は使用済燃料貯蔵システムにDWC を使用する認可申請を未だ受理していない。DWC が他国で採用されたことは承知しているが、このような貯蔵システムの審査を行ったことはない。(ので回答は控える)</p>

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査 成果報告書 参考文献 (1/4)

No.	標題	著者	所属	文献の種類	レポート番号	発行年	概要
1	平成28年度 中間貯蔵設備におけるキャニスタ耐食性能に係る自然影響調査 成果報告書	三菱重工業(株)		報告書	L9-83VU110 Rev.0	2017	
2	中間貯蔵設備長期健全性等試験 資料2-5	原子力規制委員会		スライド		2013	コンクリートキャスク貯蔵の代表例を提示している。
3	コンクリートキャスクを用いる使用済燃料貯蔵施設(中間貯蔵施設)に係る技術検討報告書(案) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 平成16年5月		METI	報告書		2004	コンクリートキャスク技術要件の案。キャニスタのSCC機構に関する説明がある。
4	ステンレス鋼の湿潤大気応力腐食割れ研究の現状と課題	明石 正恒	IHI	論文	材料のパフォーマンス研究会講演(腐食防食協会腐食センター、1998年12月5日)	1998	ステンレス鋼の大気応力腐食割れ(ASCC)のうち、室温付近で使用されるステンレス鋼が結露によって薄い水膜に覆われた状態で発生するSCC(タイプII、鋭敏化型)の発生機構と研究の現状を紹介している。 1)ASCCは中世塩化物水溶液環境におけるSCCと同じく孔食を起点として発生する。 2)ASCCは結露による水膜形成と乾燥の交番で進行する局部腐食である。その際、水膜中の塩分の濃縮が重要である。(すきま付与が加速効果) 3)相対湿度が重要で、最も割れやすい湿度域が存在する。(それより高くても低くてもSCCは起きない。例RH40~60%) 各塩化物の飽和溶液の平衡相対湿度付近で最も割れやすい。(室温ではNaCl75%、MgCl ₂ 33%、CaCl ₂ 31%、ZnCl ₂ 11%) 海水と食塩水の差は、MgCl ₂ の存在である。融雪剤にCaCl ₂ が用いられる場合は、海塩粒子よりASCCが発生しやすい条件が形成され得ることに注意が必要。 4)湿潤大気の下温な条件では、ASCC発生に材料の鋭敏化が必要条件である。損傷事例からはEPR試験の再活性化率で5%が下限値であるが、暴露試験結果からは1%程度と見なし得る。 5)ステンレス鋼のASCCはAPC(活性経路腐食)機構によるもので、き裂発生下限応力はσ _y に比べて極めて低い。溶接残留応力の存在は常にASCCの必要条件を満たしている。 6)実験室での実験から実機を予測する加速法は今後の課題である。
5	ステンレス鋼の発錆	辻川 茂男	東大	技術報告	腐食センターニュース No.009(1995年12月1日)	1995	ステンレス鋼の塩化物腐食、応力腐食割れに関する一般解説。 1)ステンレス鋼の塩化物イオンを含む水溶液中の腐食形態について解説している。孔食の発生条件は電極電位と孔食電位の関係で決まる。すなわち、電極電位が孔食電位よりも高ければ孔食が発生する。電極電位は、溶存酸素等の酸化剤の量に依存する。孔食電位は、水溶液中の塩化物イオン(Cl ⁻)濃度が高くなると低下する。以上のことから、孔食は水溶液中の溶存酸素濃度が高く、Cl ⁻ 濃度が高いほど起きやすい。 2)さらに十分な応力があれば、SCCが起こる。TGSCC(粒内SCC)は溶体化処理材にも起こり中性環境では高温ほど起こりやすい。IGSCC(粒界SCC)は鋭敏化材に起こり、TGSCCより低温側で起こりやすい。 3)SCCは相対湿度RHに強く依存する。RHがある範囲で孔食あるいはSCCが発生する(ある実験(文献51)では304鋼の孔食が20~60%RHで発生している。)のは、RHが塩化物の飽和水溶液の相対湿度を超えると水膜中のCl ⁻ 濃度が低下することや、水膜が厚くなってステンレス鋼表面への酸素の到着速度が遅くなる(電極電位が下がる)ことが考えられる。 4)付着海塩量と発錆の関係について整理している。ステンレス鋼の発錆を決定するのは、電極電位とCl ⁻ 濃度である。東京商船大臨海実験実習所で行った海岸地域での暴露試験によれば、304鋼の発錆限界塩分濃度は、0.1g/m ² 、22Cr-0.8Mo鋼では1g/m ² である。
6	Aging Management Guidance to Address Potential Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking of Welded Stainless Steel Canisters	EPRI		報告書	EPRI 3002008193	2017	キャニスタのSCC対策として適用可能な高耐食材や各種コーティング技術を紹介している。
7	日本機械学会 使用済燃料貯蔵施設規格 コンクリートキャスク、キャニスタ詰替装置およびキャニスタ輸送キャスク構造規格	日本機械学会		技術規格	JSME S FB1-2003	2003	コンクリートキャスク貯蔵システムの構造設計および検査要領に関する技術規格
8	SAFETY EVALUATION REPORT TN AMERICAS LLC NUHOMS® EOS DRY SPENT FUEL STORAGE SYSTEM	NRC		CoC	DOCKET NO. 72-1042 ML17116A278	2017	NUHOMS® EOSシステムのキャニスタ材料として、二相ステンレス鋼(タイプ2205(UNS S31803またはUNS 32205))を代替材として使用することを認めている。
9	Duplex Stainless Steels	International Stainless Steel Forum		報告書	ISSF2020 Brussels, Belgium	2020	二相ステンレス鋼に関する解説
10	Corrosion of Cast Stainless Steels	Malcolm Blair	Steel Founders' Society of America	ハンドブック	ASM Handbook, Vol. 13B. Corrosion: Materials. S.D. Cramer and B.S. Covino, Jr., eds. pp. 78-87. Materials Park, Ohio: ASM International. 2005.	2005	ステンレス鋼の局部腐食に対する耐性の定量的指標として用いる孔食指数(PREN)の解説がある。
11	原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置の安全設計及び検査基準:2007	日本原子力学会		技術規格	AESJ-SC-F009:2007	2007	コンクリートキャスク貯蔵システムの安全設計および検査要領に関する技術規格
12	コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究-キャニスタのSCC対策事例規格の提案と検証-	巨 真澄 白井 孝治 谷 純一 後藤 将徳	電中研	報告書	N15014	2016	①304L、316Lステンレス鋼のSCC評価に関するデータ取得 実機と同じ施工方法(溶接、研磨)で製作した304L、316L試験片の実機環境下での定荷重SCC試験を実施し限界塩分濃度を求めた。(50°C、RH35%、時間2000,5000,10000h) その結果、限界塩分濃度として、304Lが0.2gCl/m ² 、316Lが0.8gCl/m ² (従来は、それぞれ、4.0、0.8)を得た。 ②過去に実施した垂直風洞試験による付着塩分量データをもとに、経過時間と付着塩分量の関係をあらわす予測式を作成した。 ③①と同じ実機と同じ施工法で製作した試験片からき裂進展速度を測定し、304Lに対して4.4×10 ⁻¹² ~6.8×10 ⁻¹² m/sを得た。(従来は、2×10 ⁻¹¹ m/s(文献22)) この値から60年間のSCCき裂深さを求めると4mmとなる。 ④溶接残留応力緩和技術の一つであるパーニング(LP)を実行大蓋部キャニスタ試験体に施工し、表面に塩分を付着させて恒温恒湿槽で5000h保持したが、LP施工部にはSCCは発生しなかった。 ⑤以上の成果を取り込んで、SCCに対するキャニスタ密封機能確保に関する機械学会の事例規格案を作成した。(材料種別ごとに環境、残留応力低減対策のオプションを規定)
13	電気化学的手法によるステンレス鋼の耐食性評価	橋本 郁郎	株式会社コベルコ科研	技術報告	こべるにくす NOV. 2019 No.49	2019	ステンレス鋼の電気化学的測定による耐食性評価法の解説
14	ステンレス鋼材の定義と分類	ステンレス鋼(SUS)専門情報サイト susjis.info		WEB			スーパーステンレス鋼の解説
15	NAS185N(UNS S31254) NAS 高耐食スーパーステンレス鋼	日本冶金工業ホームページ		WEB			
16	A Primer for Duplex Stainless Steel	Grocki, J.	ArcelorMittal	スライド		2012	

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査 成果報告書 参考文献 (2/4)

No.	標題	著者	所属	文献の種類	レポート番号	発行年	概要
17	FINAL SAFETY EVALUATION REPORT DOCKET NO. 72-1014 HOLTEC INTERNATIONAL HI-STORM 100 MULTIPURPOSE CANISTER STORAGE SYSTEM	NRC		CoC	DOCKET NO. 72-1014 ML18355A383	2017	HI-STORM100システムのキャニスタ材料として、二相ステンレス鋼(UNS S31803)を代替材として使用することを認めている。
18	Regulatory Guide 1.84, Revision 38, "Design, Fabrication, and Materials Code Case Acceptability, ASME Section III."	NRC		審査指針	Regulatory Guide 1.84, Revision 38, ML19128A276	2019	
19	キャニスタ系使用済燃料貯蔵施設におけるSCC対策に関する研究(その1)-塩分流入対策技術およびSCC評価-	竹田浩文 谷 純一	電中研	報告書	N07030	2007	①貯蔵施設への塩分流入低減装置を用いた室内試験および実環境試験を実施してその性能を評価した。 ②実機よりも厳しい条件である80°C、相対湿度35%にてキャニスタ候補材(SUS329J4L, YUS270)に人工海水を塗布し定荷重SCC試験を実施した。従来材が数百hで破断したのに対して、候補材は54300経過後も破断しておらず優れた耐SCCを示した。
20	キャニスタ系貯蔵施設におけるSCC対策に関する研究(その2)-SCC評価のとりまとめ-	谷 純一 黛 正巳	電中研	報告書	Q08007	2009	①キャニスタ材のSCCが発生しなくなる下限温度(下限臨界温度)を決定するためキャニスタ候補材(YUS270, SUS329J4L)に対して、温度20-40°C、相対湿度35%の恒温槽中で表面電位を測定した。表面電位は25°C以下で以前測定した隙間腐食電位(文献18)を下回ったことから下限臨界温度を25°Cと定めた。 ②実機よりも厳しい80°C、相対湿度35%で候補材の定荷重SCC試験を継続し、62500h経過しても破断しておらずSCC発生時間はそれ以上であることがわかった。 ③国内で最も高温多湿な気象データを用いて、SCCが生じ得る時間を58400hと見積もった。(実機キャニスタ底部表面の相対湿度が15%を超える累積時間の予想値)
21	人工海水粒子を滴下した中間貯蔵用高耐食性ステンレス鋼の高温湿潤環境中での応力腐食割れ感受性	伊東 眸(1) 大西 一成(2) 奥西 祐之(2) 松永 健一(3) 村上 和夫(3)	(1)原子力サービシエンジニアリング (2)関西電力 (3)MHI	論文	材料と環境、 54.25(2005)	2005	コンクリートキャスクのキャニスタに用いる材料候補として、耐食性に優れた二相ステンレス鋼(ASTM SA240 S31260、以下D材)およびオーステナイト系スーパーステンレス鋼(ASTM SA240 S31254相当、以下A材)を選定し、耐SCC性を試験により評価した。 1)両材料について別途実施した定荷重SCC試験の試験片について、SCCき裂発生および進展データを採取した。SCC試験は、試験片に人工海水を滴下乾燥させて温度60-80°C、相対湿度35%、応力0.5σ _Y ~1.5σ _Y で最長16000hにわたり保持したもので、試験後の試験片について浸食部を開放してSEM観察した。 2)D材、A材ともに微小なSCCが80°C試験片のみに観察された。SCCき裂があったのは、D材は15000hで1.1σ _Y 以上、A材は1000hで1.5σ _Y 以上であった。 3)両材のき裂進展速度を見積もると、10-6mm/年のオーダーであった。 4)SCC発生条件であるKISCCを計算すると、D材が7MP√m、A材が5MP√m程度であった。
22	オーステナイト系ステンレス鋼に発生した塩化物応力腐食割れの事例とその対策	中野 正太(1) 炭矢 芳男(1) 安西 敏雄(2)	(1)メンテナンスサービスセンター (2)九州工業大学	技術報告			オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ発生機構と形態について解説している。
23	コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究-304Lステンレス鋼キャニスタの塩化物応力腐食割れ防止に対する成立性評価-	白井 孝治 谷 純一 三枝 利有	電中研	報告書	N10035	2011	コンクリートキャスク貯蔵用キャニスタの材料として米国で実績のある304Lステンレス鋼を使用する場合の応力腐食割れ(SCC)対策の一つとしてキャニスタ溶接部の残留応力改善工法がSCC抑制に及ぼす影響を評価した。 ・残留応力低減処理法として、 1)レーザーショットピーニング(LSP) 2)ジルコニアショットピーニング 3)低塑性バーニング工法(LPBB)の3種類を適用した。 ・小型平板状試験体(SUS304L)の溶接試験体を用いた定荷重SCC試験(温度80°C、相対湿度35%、付着塩分量4gCl/m ²)を実施した。未処理試験体では1000hで亀裂が発生したのに対して残留応力緩和処理を施した試験体は1500hで亀裂は発生せず。
24	Duplex and Superduplex Stainless Steels: Microstructure and Property Evolution by Surface Modification Processes	Tahchieva, A.B. et.al.	バルセロナ大学	論文	Metals. Vol. 9. p. 347. 2019.	2019	
25	スーパー二相ステンレス鋼溶接材料	渡辺博久	神戸製鋼所	技術報告	溶接学会誌 第80巻(2011)第2号	2011	二相ステンレス鋼の特徴や課題を解説
26	汎用高耐食スーパーステンレス鋼NSSC®270	末次和広 他	新日鐵住金ステンレス	技術報告	Zairyo-to-Kankyo, 57, 322-326 (2008)	2008	スーパーステンレス鋼の解説
27	コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究 ステンレス鋼製キャニスタ蓋溶接部検査手法の提案	後藤将徳 白井孝治 東海林一 三枝利有	電中研	報告書	N14001	2012	実径大キャニスタ蓋溶接試験体にPA(フェーズドレイ)法と従来の固定角探傷法によるUTを実施し、画像化による欠陥検出性を評価した。その結果を踏まえて機械学会構造規格に取入れるキャニスタ蓋溶接部の非破壊試験の要領と判定基準案を提案している。
28	コンクリートキャスクを用いる使用済燃料貯蔵施設の安全審査に係る技術要件	原子力安全・保安院		技術要件		2006	コンクリートキャスク技術要件
29	コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究 304Lステンレス鋼キャニスタ蓋溶接部における画像化による超音波探傷試験の適用性評価	後藤将徳 白井孝治 東海林一	電中研	報告書	N11057	2012	実径大キャニスタ蓋溶接試験体にPA(フェーズドレイ)法と従来の固定角探傷法によるUTを実施し、画像化による欠陥検出性を評価した。
30	NUREG-2215, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities."	NRC		審査指針	NUREG-2215, ML20121A190	2020	米国における使用済燃料乾式貯蔵システムの安全審査に関わる標準審査指針
31	各種塗膜の耐熱性について				DS.No.020-90-03		
32	Literature Review of Environmental Conditions and Chloride-Induced Degradation Relevant to Stainless Steel Canisters in Dry Cask Storage Systems	S. Chu	EPRI	報告書	3002002528 Technical Update, May 2014	2014	キャニスタ表面の温度は貯蔵初期で最高200°C程度、50年後で~100°C程度との評価結果が示されている。
33	無機ジンクリッチペイント(略称 無機ジンク)	日本ペイント防食コーティングス株式会社 ホームページ		WEB		2020	シリケートなどの無機系バインダーを結着剤として用い、塗膜中の亜鉛濃度は75%以上になります。塗膜の性質上、亜鉛溶射とほぼ同様の性能を示します。 ・高い防錆性能を発揮します。 ・耐熱性に優れています。 ・アンカー効果によって素地と密着するため、プラスト処理が必須となります。
34	防食概論・塗料・塗装 ジンクリッチ系塗料とは	技術情報館 SEKIGIN		WEB			ジンクリッチ系塗料は、さび止め顔料(防せい顔料; rust preventive pigment, rust inhibitive pigment)として高濃度の亜鉛末(zinc dust)を用い、鋼の防食を目的としたプライマー(地肌塗り)や下塗り塗料として用いられている。 同種の塗料は、溶融亜鉛めっき鋼の不めっき部の補修用としても活用されている。なお、JIS H 8641「溶融亜鉛めっき」では、この塗料を「高濃度亜鉛末塗料(cold galvanizing coating)」と称している。 屋外大気環境で長期防せい期待できる塗装系には、ジンクリッチ系塗料を下塗り塗料として用いるのが一般的になっている。

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査 成果報告書 参考文献 (3/4)

No.	標題	著者	所属	文献の種類	レポート番号	発行年	概要
35	ジンクリッチプライマーとは	株式会社日本ケミカルホームページ		WEB			・ジンクリッチプライマーとは、高濃度亜鉛末を含有している一次防錆塗料です。建築物、橋梁、鋼構造物などに使用される金属の腐食を長期間防ぐために用いられます。 ・ジンクリッチプライマーには、犠牲防食効果があり、亜鉛末が鉄素地より先に腐食し、鉄素地を守ります。さらに、塗装を行うことにより、保護被膜が形成され、表面被膜が綿密になり空気や水の侵入を防ぐ効果があります。 ・ジンクリッチプライマーは、「JIS K 5552」によって、1種 無機ジンクリッチプライマーと2種 有機ジンクリッチプライマーの2種類に分類されています。 ・1種 無機ジンクリッチプライマー：アルキルシリケートをビヒクルとした、1液1粉末形のもの。
36	シリコーン樹脂塗料の特徴	大日本塗料ホームページ		WEB			シリコーン樹脂は、結合の主骨格となるシロキサン結合(Si-O-Si)と各種有機基が結び付くことで、多くの特性を發揮します。シロキサン結合の強さと酸化しにくさにより、耐熱性に非常に優れ、そのほかにも耐候性や耐水性、撥水性、耐薬品性、電気絶縁性にも優れています。 また、オイル、レジン、ゴムなど性状も多彩であらゆる産業分野で使用されています。
37	熱を制御する機能性塗料	西崎俊一郎(1) 島本幸三(2)	(1)菱電化成(株) (2)三菱電機	技術報告	色材, 59 [10]618-628.1986)	1986	
38	熱と塗料 - 耐熱、耐火塗料 -	華園繁弥	日建塗装工業(株)	技術報告	実務表面技術 Vol.30, No.5, 1983	1983	
39	耐熱塗料 スズカスターク	スズカファイン株式会社		カタログ			
40	Update on Investigations of Viability of Cold Spray and FSW as a Spent Nuclear Fuel Dry Storage Canister Mitigation Tool	Ken Ross Morotolaoluwa Alabi	PNNL	報告書	PNNL-29217	2019	キャニスタへの低温溶射(コールドスプレイ)の適用について記載
41	Cold Spray Deposition of 304L Stainless Steel to Mitigate Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking in Canisters for Used Nuclear Fuel Storage	Hwasung Yeom et. Al.		ウイコンシンマ ジソン大学	Journal of Nuclear Materials. Vol. 538. Article 152254. 2020	2020	
42	溶射とは 防食溶射(JIS H8300)	シンコーメタリオン株式会社ホームページ		WEB		2020	溶射とは、金属やセラミックス、サーメットなどをさまざまな熱源を用い溶融噴射し、基材表面に材料を噴きつけて機能皮膜を形成する表面改質技術です。 大きな構造物にも溶射が可能で、基材の熱による変形や変質もなく、溶射方法が簡単で移動設備があれば建設現場、又は補修現場において溶射を施工することができます。皮膜自体が耐食性を持つとともに、素地を電気化学的に防食する性質をもっています。 溶射材料には亜鉛、アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金、アルミニウム・マグネシウム合金があります。
43	高速フレーム(HVOF)溶射の現状と課題	和田哲義	スルザーメテコジャパン	技術報告	日本溶射学会誌 Vol.59, No8, 2008	2008	
44	構造物の寿命を延ばすレーザーピーニング	佐野 雄二	東芝	技術報告	表面技術 Vol.60, No.11, 2009	2009	レーザーピーニングの原理とSCC対策として残留応力を低減するための適用例を紹介している。
45	コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究-304L, 316Lステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ感受性評価-	後藤 将徳 谷 純一 白井 孝治	電中研	報告書	N12023	2013	①316L材ステンレス鋼のSCC発生限界塩分濃度を評価するため、定荷重SCC試験を実施した。(温度50°C, 相対湿度35%, 時間2000,5000h, 付着塩分量2-10gCl/m ² , 応力0.02-1.0σ _y) ②溶接残留応力改善処理法としてZSP(ジルコニアショットピーニング)を実験大キャニスタ試験体に施工し、2000hのSCC試験を実施した。 ZSP未処理部に多数のき裂が発生したが、ZSP処理部にはき裂発生無く有効性を確認した。
46	ショットピーニング	カンメタエンジニアリング株式会社ホームページ		WEB			ジルコニアショットピーニングについて解説。 ・ジルコニアショットは鉄分を含まないため、ショット後に錆を生じさせることがなく、またほぼ完全な球体で粒度も揃っているため、均一な残留応力を与える。 ・ジルコニアショット材は密度が高いため、機器に適切な圧縮応力を与えることができる。
47	バニッシング加工	公益社団法人 精密工学会 Precipedia		WEB			表面残留応力低減のためのバニッシング加工についての解説
48	FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT FOR THE VSC-24 VENTILATED STORAGE CASK SYSTEM	BNG FUEL SOLUTIONS CORPORATION		FSAR	ML060810682	2005	VSC-24の最終安全解析書(FSAR)
49	Certificate of Compliance Renewal Application For the VSC-24 Ventilated Storage Cask System (Docket No. 72-1007)	EnergySolutions		許認可申請書	LAR 1007-007	2012	VSC-24システム(コンクリートキャスク)のキャニスタ塗装に関する情報(炭素鋼に非有機亜鉛系塗装; 商品名Cabo zinc11)
50	SONGS Inspection and Maintenance Program	SOUTHERN CALIFORNIA EDISON(SCE)		報告書		2020	SONGS のコールドスプレイによるキャニスタSCC補修デモ試験の情報
51	NRC Information Digest 2019-2020	NRC		報告書	NUREG-1350, Volume 31	2019	2019-2020の原子力関係の諸統計について記載している。乾式キャスク貯蔵の実績も含まれる。
52	In the United States Court of Federal Claims No. 12-389C (Filed: April 15, 2015)			訴訟関係書類		2015	Arkansas Nuclear(1996年~)ISFSIのVSC-24キャスク(キャニスタに塗装を適用)の初装荷時期の情報
53	Information Handbook on Independent Spent Fuel Storage Installations	NRC		報告書	NUREG-1571	1996	Palisades(1993年~)、Point Bach(1995年~)ISFSIのVSC-24キャスク(キャニスタに塗装を適用)の初装荷時期の情報
54	FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT on THE HI-STORM UMAX CANISTER STORAGE SYSTEM Revision.3	Holtec		FSAR		2016	HI-STORM UMAXの最終安全解析書(FSAR)
55	Dimetcoat 6 Inorganic Zinc Silicate Coating	AMERCOAT		カタログ		2020	Dimetcoat 6(商品名、非有機系亜鉛末塗料)のデータシート
56	Carbozinc® 11 PRODUCT DATA SHEET	CARBOLINE		カタログ		2020	Carbozinc® 11(商品名、非有機系亜鉛末塗料)のデータシート
57	CHEMICAL, GALVANIC, OR OTHER REACTIONS IN SPENT FUEL STORAGE AND TRANSPORTATION CASKS	NRC		官広報	BULLETIN 96-04:	1996	カーボジンク塗装(Carbozinc 11)がキャニスタ蓋溶接中にホウ酸水と反応(酸化)して水素を発生すると注意喚起している。
58	カリフォルニア州沿岸委員会 沿岸開発許可特別条件7条	カリフォルニア沿岸委員会ホームページ		WEB			カリフォルニア州の沿岸委員会が定めたSONGSの廃炉に関連した条例にしたがい、IMP(検査及び保守計画)を策定して運用することを求めている。
59	Managing Aging Processes In Storage (MAPS) Report	NRC		報告書	NUREG-2214	2019	貯蔵期間の延長を行った施設のAMP(経年劣化管理計画)の内容と実施要領を規定している。
60	ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ防止塗料の開発	宮下 剛 里 隆幸	大日本塗料	技術報告	大日本塗料技報 技術解説-4 ステンレス鋼の塩化物 応力腐食割れ防止塗 料の開発		ステンレス鋼のCISCC防止用塗料についての報告

令和2年度キャニスタを用いた使用済燃料の乾式貯蔵方法に係る調査 成果報告書 参考文献 (4/4)

No.	標題	著者	所属	文献の種類	レポート番号	発行年	概要
61	Extended Storage Technical Issues	John Kessler	EPRI	スライド	INMM Spent Fuel Management Seminar XXVIII 16 January 2013 Extended	2013	ESCPについて説明。 ①2009年に発足 フェーズ1～3 ②ESCP小委員会・燃料/内部構造物・沿海環境・非破壊評価(NDE)・コンクリートシステム・高燃焼度実証試験・国際協力・経年劣化管理(2013より新設、ANLと産業界の仕事に基づく) ③ギャップ分析・優先度高(キャニスタSCC、高燃焼度被覆管、ボルト劣化、燃料ペレットのスウェリング)・共通課題(熱解析手法改良、応力分布、経年劣化監視システム、真空乾燥の妥当性、臨界管理(燃焼度クレジット)、INLキャスク調査、燃料再取出し性) ④ESCP主導の共同研究・キャニスタ実機調査・SUSのSCC試験(電中研が最初)・高燃焼度デモ試験 ⑤Calvert Criffsの実機キャニスタ調査結果 ⑥高燃焼度燃料デモ試験計画
62	Welding and Repair Technology Center: Extended Storage Collaboration Program Canister Mitigation and Repair Subcommittee - Industry Progress Report	EPRI		報告書	EPRI 3002013130	2018	
63	Welding and Repair Technology Center: Residual Stress Analysis of Cold Spray Deposition for Stress Corrosion Cracking Mitigation and Repair	J. Tatman	EPRI	報告書	EPRI 3002018449	2020	
64	In Situ Stress Corrosion Crack Repair and Prevention for Nuclear Waste Canisters.	Johnson, K.	VRC Metal Systems	技術報告 (WEB)		2017	
65	U.S. Department of Energy Nuclear Energy University Program	DOE		WEB		2020	DOEが資金提供して推進しているNEUP(原子力大学プログラム)に関する情報
66	Corrosion-Resistant Coatings for Mitigation and Repair of Spent Nuclear Fuel Dry Storage Canisters	A. Knight R. Schaller et.al.	SNL	報告書	SAND2020-7916R	2020	キャニスタのSCC対策として適用可能な各種コーティング技術の成立性と課題並びに必要なR&Dを文献調査にもとづいて検討している。
67	耐放射線性シリコン樹脂「スクラムシール CRAMSEAL-100」	株式会社ホクコン		カタログ			高濃度放射性廃棄物保管容器の防水シール材として開発されたシリコン樹脂の耐放射線性を調べる目的で取得されたもので、最大50Mradの吸収線量に対する機械的特性変化を調べている。
68	原子力発電所内面用 エポキシ樹脂塗料「エポマリンRXC床用」の開発	加納 央 堀 誠	関西ペイント販売(株)	技術報告	塗料の研究 No.148 Sept. 2007	2007	原子力発電所に使用する耐放射線エポキシ樹脂塗料の説明 10 ⁸ radのガンマ線照射に対して有意な劣化が無いことを確認している。
69	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)XC床用」の開発	喜田大三 住野正博	大林組	技術報告	大林組技術研究所報 No.6 1972	1972	原子力発電所に使用する耐放射線性塗料(エポキシ樹脂塗料及びフェノール樹脂塗料)のガンマ線照射試験 最大1×10 ⁸ レントゲン(8.77×10 ⁷ rad)の照射を行った後、耐衝撃性、密着性、耐摩耗性、耐熱水性を調べている。
70	Code Case N-860, "Inspection Requirements and Evaluation Standards for Spent Nuclear Fuel Storage and Transportation Containment Systems."	ASME		規格	ASME Code Case N-860	2020	使用済燃料キャニスタの特にCISCCを念頭に置いた経年劣化管理のための規格。
71	令和元年度原子力規制庁請負成果報告書 乾式貯蔵施設に対する深層防護概念の適用に係る調査	三菱重工業(株)		報告書	L9-83WK010 改正0	2020	
72	Holtec's Double Wall Canister for Extended Service Life of a Spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility	Holtec		技術報告	Holtec Technical Bulletin HTB-020	2017	二重壁キャニスタ(DWC)の紹介
73	A New Strategy: Storing Spent Nuclear Fuel Waste Featuring HELMS Storage: "Hardened Extended-life Local Monitored Surface" Storage and "Dual-Wall Canisters" (DWC)	Ray Lutz	Citizens' Oversight(NPO)	請願書	NRC Petition Version V13, Jan 2, 2018	2018	使用済燃料貯蔵の長期化による安全性への懸念から、現状の一重壁キャニスタ(SWC)をDWCに移行するようNRCに請願を行っている。