

304L, 316Lステンレス鋼製キャニスターの塩化物応力腐食割れ感受性評価

後藤将徳^{*1} 白井孝治^{*1} 谷純一^{*2}

コンクリートキャスクの実用化には、オーステナイト系ステンレス鋼製キャニスター密封容器の表面に塩分が付着したときに発生する応力腐食割れに起因する密封機能の喪失を防ぐ技術的な課題がある。そのため本研究では、汎用オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304L, 316L）を用いて、SCC 発生限界塩分濃度の閾値や、溶接残留応力改善処理が SCC 発生防止に及ぼす効果の解明を目的に SCC 試験を実施した。結果は以下に示す通りとなった。

(1) 相対湿度 35%，温度 50°C，試験時間 5000 時間での、SUS316L 材の SCC 発生限界塩分濃度の閾値は、 $4\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ であった。一方、実機相当の表面研磨施工を施した場合は閾値が $2\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ まで低下した。

(2) SUS304L 製モックアップキャニスター試験体表面に $4\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ の塩分を付着させ SCC 試験を実施した。その結果、ZSP を施工した溶接線近傍には圧縮応力が付与され、SCC の発生はなく、応力改善処理の有効性を確認した。

Keywords: 中間貯蔵, コンクリートキャスク, キャニスター, 応力腐食割れ, 溶接引張残留応力

For the practical application of multi-purpose canisters (MPCs), there are technical issues for containment function to prevent the initiation of chloride induced stress corrosion cracking (SCC). Therefore, the SCC test were conducted to clarify the critical salt density to initiate SCC and the effect which the reduction treatment of weld residual stress influeces to prevent SCC.

(1)The minimum threshold of salt for SCC initiation could be $4\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ under the condition of the temperatures of 50°C and the relative humidity of 35% with the 316 type L-grade austenite stainless steel used over 5000hr. However, the threshold could be reduced to $2\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ under the actual equipment surface condition corresponding to the conventional stainless steel MPC.

(2)An accelerated corrosion test was performed using mock-up MPC made of Type 304L, in which the salt concentration on the surface of weld lines was kept to $4\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$. As the result of the test, SCC on the surface-treated weld line by ZSP didn't occur because of the compressed stress induced appropriately, therefore the validity of surface treatment techniques was confirmed.

Keywords: interim storage, concrete cask, canister, stress corrosion cracking, welding tensile residual stress

1 背景

使用済み核燃料の有望な中間貯蔵方式の1つとして、キャニスターを用いたコンクリートキャスク方式がある。この方式は米国において中間貯蔵方式の主力となっており、我が国でも中間貯蔵方式選定の柔軟性を確保するため、実用化に向けた技術開発、指針や民間規格の整備が行われているところである[1-3]。自然換気を利用したコンクリートキャスク貯蔵施設では、Fig. 1 に示すように貯蔵容器下部に設けた開口部から冷却空気を取り入れキャニスター表面に外気を直接接触させて冷却するため、海岸立地を想定した場合、空気中に含まれる海塩粒子がキャニスター表面に付着する可能性がある。また、素材がオーステナイト系ステンレス鋼であることや、溶接部近傍に溶接引張残留応力が存在することから、キャニスター表面の塩化物応力腐食割れ(SCC)による密封機能の喪失がない設計が課題である[4]。そのため、SCC が発生する限界付着塩分濃度の閾値や、溶接部への残留応力改善処理の有効性について評価する必要がある。

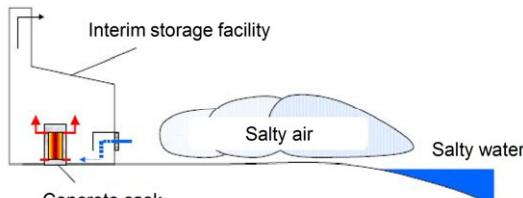


Fig. 1 Chloride induced SCC of canister

Study on prevention of chloride induced stress corrosion cracking for type 304L,316L stainless steel canister by Masanori GOTO (gotoh_ma@criepi.denken.or.jp), Koji SHIRAI, Junichi TANI

*1 一般財団法人 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

*2 一般財団法人 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1

2 限界塩分濃度 SCC 評価試験

キャニスター密封容器材料として汎用オーステナイト系ステンレス鋼を用いた場合の定荷重 SCC 評価試験を実施し、SUS304L,316L 材の SCC 発生限界塩分濃度について示す[5]。

2.1 供試材

供試材として 2mm 厚の SUS304L 材および SUS316L 材を用いた。塩分と応力の因子以外の表面状態の影響因子を除去ため、試験片の表面は #600 の湿式研磨で仕上げた。

2.2 定荷重 SCC 試験方法

SCC 試験では Fig. 2 に示すように、試験片を治具に装着後、圧縮試験機でバネを所定の荷重まで圧縮し引張荷重を付与した。塩分付与方法については、微粒子を噴霧できるノズルを用いて、間欠的に行い、試験片表面に付着した塩水滴が合体成長しないよう均一に噴霧した。試験温度や相対湿度については、国内の気象観測データに基づき実環境を考慮し、温度 50°C 、相対湿度 35%とした。

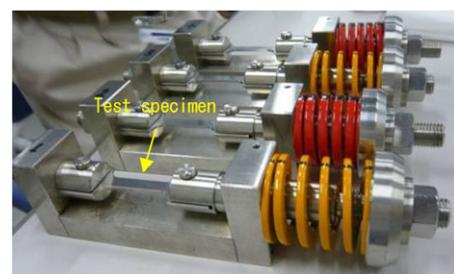
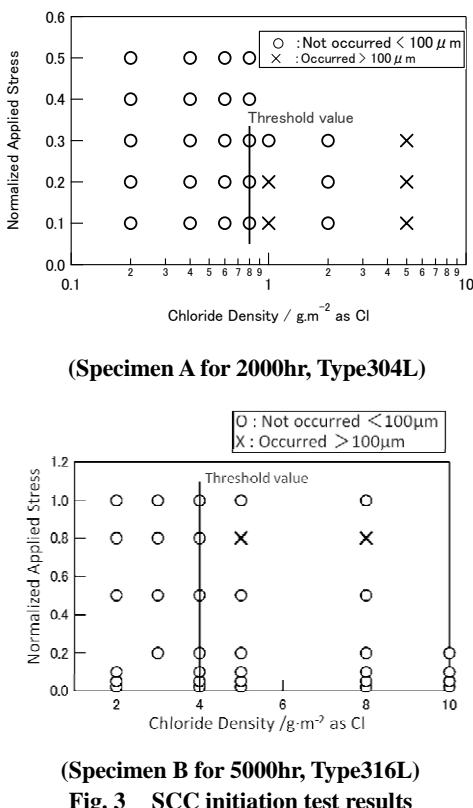


Fig. 2 Test jig appearance

Fig. 3 に、SUS304L,316L 材それぞれの SCC 試験判定結果と、応力および付着塩分濃度の関係を示す。SUS304L 材では、塩分濃度 $0.8\text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ 以下でき裂の発生は見られず、

負荷応力の顕著な依存性もみられていないため、限界塩分濃度の閾値を $0.8 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ とした。同様に、SUS316L 材の閾値は $4 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ とした。この結果から、SUS316L 材は SUS304L 材の閾値の約 5 倍となり、SUS304L 材に比べ耐 SCC 性に優れていると言える。さらに、実機キャニスタの一部の施工における溶接部のグラインダ研削等を考慮した場合、各材料ともに上記閾値の 1/2 まで低下する結果が得られており、表面硬化層が閾値を下げる恐れがあると考えられる。なお、本試験における SCC 発生の判定基準は、高温水環境で使用されるき裂の進展性[6]を基に、表面き裂長さが $100\mu\text{m}$ 以上を SCC 発生とし評価した。

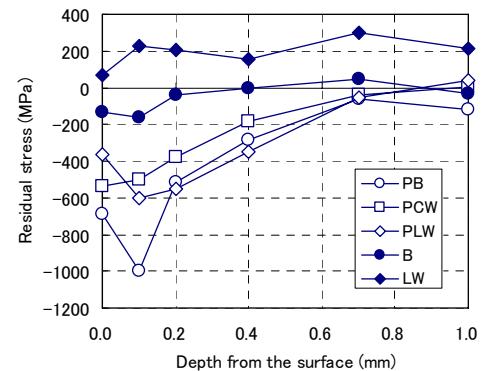


3 実径大 SUS304L 製キャニスタ SCC 評価試験

溶接部の一部に残留応力改善処理を施した実径大の SUS 304L 製キャニスタ試験体（直径 1836mm、高さ 1100mm、胴板厚 12.7mm）を用いて SCC 評価試験を行い、残留応力改善処理が SCC 発生防止に及ぼす効果を確認する[7]。

3.1 残留応力改善処理

実径大キャニスタ製作完了後、キャニスタ胴部半面の溶接線近傍のみ、残留応力改善処理(ZSP:ジルコニアショットピーニング)を実施した[8]。Fig.4 に溶接部近傍における深さ方向の残留応力分布を示す。ZSP を施工していない溶接部近傍で 1mm 深さまでほぼ一様な引張応力が生じているが、ZSP を施すことにより表面から 0.7mm の位置まで圧縮応力となっている。



<legends>

- PB: Base metal + shot peening
- PCW: Circumferential weld line+ shot peening
- PLW: Longitudinal weld line+ shot peening
- B: Base metal
- LW: Longitudinal weld line

Fig. 4 Measured residual radial stress distributions in the mock-up MPC

3.2 SCC 評価試験

2.2 節と同様にキャニスタ試験体表面に塩分を付与し、恒温恒湿槽に入れ、実環境より厳しい温度 80°C 、相対湿度 35% 定常状態に達したのち、2000 時間保持してキャニスタ試験体を取り出した。付与する塩分濃度は 2.2 節で得られた限界塩分濃度より厳しい $4 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ とした。

3.3 試験体の表面・断面観察

恒温槽から取り出した試験体溶接部の SCC 発生の有無を確認するため、浸透探傷試験(PT)により表面観察を実施した。JIS による判定基準(JIS Z 2343-1)で評価したが、欠陥とみなす浸透指示模様は認められなかった。さらに表面には製作時のグラインダ痕が存在することや、鋸が発色剤に反応して擬似模様を呈することから、目視や PT で SCC のき裂の発生を判別することは困難である。そのため、試験体を切断し、顕微鏡にて観察した結果、ZSP を施工していない溶接部近傍にのみ SCC 発生が認められた。

Fig.5 に SCC 発生が認められた箇所に対する断面観察結果を示す。ZSP を施工していない溶接部近傍から採取したき裂であり、最大のもので深さ方向のき裂寸法は約 4mm であった。この結果より、ZSP 未処理の溶接表面にき裂が多数発生したが、ZSP を施した溶接部にはき裂の発生はなく、溶接残留応力改善処理の有効性を確認した。

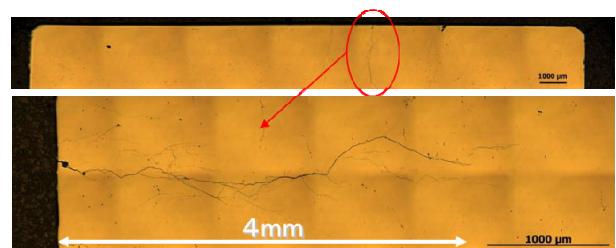


Fig. 5 SCC image observed on the Full-Scale Type 304L SS MPC

参考文献

- [1] 日本原子力学会:日本原子力学会標準 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, AESJ-SC-F009, (2007).
- [2] 原子力安全・保安院: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, (2006).
- [3] 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及びキャニスタ輸送キャスク. 構造規格, JSME S FB1-2003, (2003).
- [4] 白井孝治:リサイクル燃料貯蔵技術開発の今後の展開, 電力中央研究所フォーラム 2010, (2010).
- [5] 白井孝治, 谷純一, 三枝利有:「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ー」, 電中研 研究報告, N10035, (2011).
- [6] 腐食防食協会 編:腐食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第2版, 丸善株式会社, (2000).
- [7] 後藤利徳, 谷純一, 白井孝治:「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ー」, 電中研 研究報告 N12023, (2013)
- [8] 日本原子力技術協会:予防保全工法ガイドライン [ピーニング工法], JANTI-VIP-03-第2版, (2008).

