

コンクリートキャスク用キャニスタの 応力腐食割れ防止に関する研究

Study on Prevention of Stress Corrosion Cracking of Canisters for
Transport and Storage



楠	和	憲	Katsunori Kusunoki	①
山	崎	洋	Yosuke Yamazaki	①
山	田	順	Junya Yamada	①
田	中	智	Tomohiro Tanaka	①
北	側	彰	Akikazu Kitagawa	②
大	岩	章	Akio Oiwa	③
浅	野	良	Ryoji Asano	④

あ ら ま し

キャニスタに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼は、長期の使用において塩化物による応力腐食割れ（SCC）が発生する可能性が指摘されている^{1),2),3)}。応力腐食割れ防止対策の一つとして、溶接部などに発生する引張応力を圧縮応力にする方法がある。ここでは、レーザ溶接を行ったSUS304LおよびSUS316Lステンレス鋼試験片に対して、ジルコニアピーニングおよびバニシングを行うことより応力腐食割れが防止できることを明らかにした。長期の使用では、孔食の影響も無視できない問題となる。しかし、60年の設計寿命で発生する最大孔食深さは、ジルコニアピーニングやバニシングによって得られた圧縮残留応力層の深さよりも浅いと推定される。ジルコニアピーニングやバニシングで圧縮残留応力層を形成することにより長期の応力腐食割れ防止が期待できる。

Abstract

The possibility of stress corrosion cracking (SCC) by chloride is pointed out in the long-term operation of austenitic stainless steel canisters.^{1) 2) 3)} One measure to prevent this SCC is to convert tensile stress in the welding part into compression stress. This paper clarifies that the zirconia peening process and the ball burnishing process can prevent SCC in laser welding specimens of SUS304L and SUS316L stainless steel. The effects of pitting corrosion are also a significant concern in long-term use. However, the maximum pitting depth in 60 years of design life is predicted to be shallower than that of compressive stress layers obtained by zirconia peening and burnishing. These methods show promise in the long-term prevention of SCC.

1. 緒 言

当社は、使用済み核燃料の輸送や保管に使用されるキャスクやキャニスタの製造に関して、30年以上の実績があり、日本、米国、その他の国で使用されている。また、2013年に米国NAC International Inc. (NAC社)の全株式を取得し、キャニスタに関するコンサルティン

グから設計、製造、輸送までの一体型ソリューションを提供できるようになった。

特に、使用済み核燃料を中間貯蔵するコンクリートキャスクに収納されるオーステナイト系ステンレス鋼製キャニスタは1990年代後半から製造しており、製造したキャニスタの数はすでに500基を超えている。

コンクリートキャスク方式は、金属キャスク方式に比較して廃棄物発生量が少なく、優れた経済性を有することが日本で認められ始めている。また、電力中央研究所ではコンクリートキャスクを日本で適用するための研究開発を進めている^{1),4)}。

国内での使用済み燃料は船での輸送が想定されるため、中間貯蔵施設は海岸線近くになると考えられる。また、

① Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 機械・インフラ研究室

② Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 技術研究所長

③ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット 設計部

④ Hitz日立造船㈱ 原子力機器事業推進室

コンクリートキャスクによる中間貯蔵は自然空冷方式であり、海塩粒子がキャニスタ表面に付着する可能性がある。オーステナイトステンレス鋼製キャニスタは、海塩粒子の付着によって応力腐食割れ（SCC）が発生する可能性がある（図1）。

そのような中で、SCCを防止・抑制し、密閉機能を失わないキャニスタの設計・製造技術の確立が大きな課題となっており、当社ではコンクリートキャスク用キャニスタの製造技術に関する研究開発を進めている。

本論文では、レーザ溶接したSUS304LおよびSUS316Lステンレス鋼に対して、圧縮残留応力を与えるためにジルコニアピーニングおよびバニシングを行った後、各種の試験を実施した。残留応力分布、圧縮残留応力の安定性、硬度分布、金属組織観察およびSCC試験の結果、ジルコニアピーニングおよびバニシングによって長期間SCCを防止できることを明らかにした。

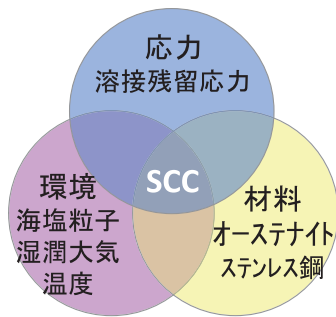


図1 キャニスターで想定されるSCCの3要素

2. 実験項目

2.1 試験材料および溶接方法 試験材料としては、キャニスタの候補材料であるSUS304LおよびSUS316Lステンレス鋼を選定した。溶接残留応力は、SCCが発生する応力的な要因となる。溶接方法としては溶接残留応力および溶接変形が小さいレーザ溶接を選定し、12.7mm厚さのステンレス鋼板にレーザ溶接を行い、初期の試験片とした。

2.2 表面処理 ジルコニアピーニングおよびバニシングによって試験片表面に圧縮残留応力を与えた。ジルコニアピーニングは、図2に示すジルコニアショットを高速空気です鋼材表面に吹き付けるピーニング方法である。ジルコニアショットは大きなかさ密度、高い硬度と優れた靱性を有しており、これによりジルコニアピーニングは深い圧縮残留応力層を得ることができる。バニシングは、高硬度ボールを取り付けたツールの先端を鋼板表面に転がり接触させて圧縮残留応力を得る方法である（図3）。バニシングは、鋼材表面を圧縮残留応力にするとともに、表面を平滑にすることで疲労強度を向上させる用途に用いられている。バニシングは、押付け力を変化させることにより圧縮残留応力層の深さを変えることができる。ここでは、2種類の押付け力でバニシングを行い、

SCC防止の効果を確認した。また、ステンレス鋼製キャニスタの製造、加工では、グラインダ研削、バフ研磨が行われる。SCCに対するこれらの効果も併せて評価した。



図2 ジルコニアピーニング（ジルコニアショット）

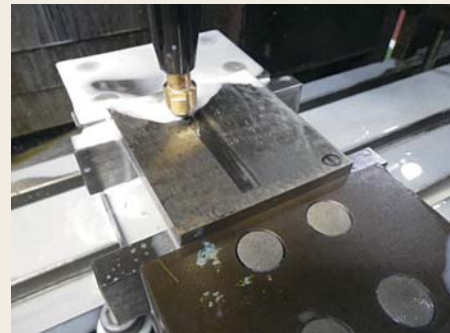


図3 バニシング状況

3. 実験結果

3.1 ジルコニアピーニングによる圧縮応力層の評価（SUS304L）

3.1.1 残留応力分布 各種表面処理を行ったSUS304L試験片の外観を図4に示す。また、X線回折法による深さ方向の残留応力測定結果を図5に示す。グラインダ研削では深さ400 μ mまで引張残留応力となる。グラインダ研削後にバフ研磨を行った場合は表面から100 μ mまでが圧縮残留応力となる。さらにジルコニアピーニングを行うと、深い圧縮残留応力層が形成され、深さは800 μ mに達する。

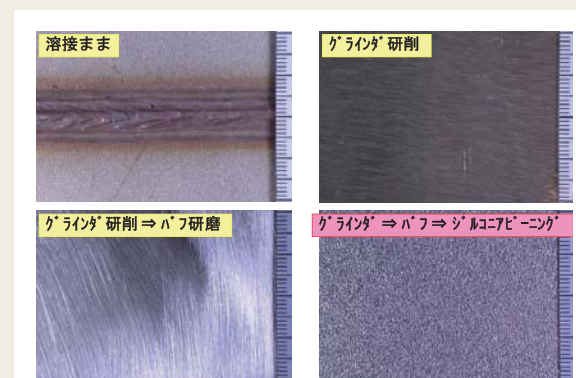


図4 表面処理を行った試験片の外観

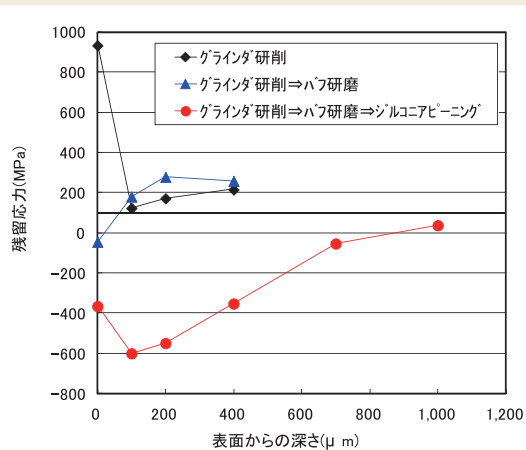


図5 深さ方向の残留応力測定結果(SUS304L)

3.1.2 硬度分布 各種表面処理を行ったSUS304L試験片の深さ方向の硬さ測定結果を図6に示す。表面付近の硬さは、ジルコニアピーニングが最も硬く、グラインダ研削、バフ研磨の順となる。ジルコニアピーニングによる硬化層の深さは、圧縮残留応力が計測された深さとほぼ等しく、約1mmである。

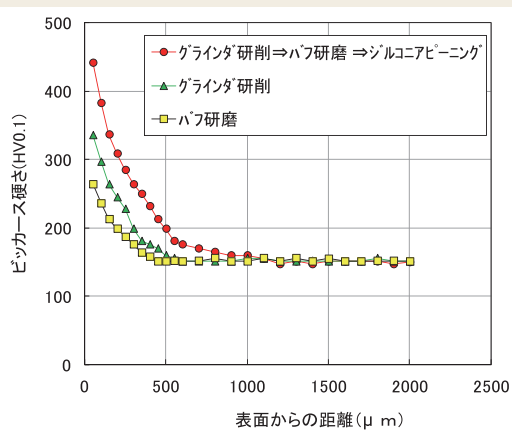


図6 深さ方向の硬さ測定結果(SUS304L)

3.1.3 金属組織観察 バフ研磨、グラインダ研削およびジルコニアピーニングを行ったSUS304L試験片の断面マイクロ組織観察結果を図7に示す。マイクロ組織観察で確認された加工硬化層は赤い点線の上側であり、結晶粒内に針状の変形双晶が確認できる。マイクロ組織観察による加工硬化層の深さはそれぞれ100μm、200μm、500μmであり、残留応力測定における変化域の60%程度である。

3.1.4 圧縮残留応力層の安定性 圧縮残留応力によるSCC防止では、荷重が負荷された場合でも圧縮残留応力が安定に存在することが重要になる。これを証明するため、表面に圧縮残留応力を与えたSUS304L試験片を引張試験機で引張荷重を付加しながら、X線回折法により表面の応力状態の変化を測定した結果を図8に示す。試験片表面は、引張応力が0.2%耐力

(243MPa) に達するまで圧縮状態を維持した。実機的设计応力は0.2%耐力よりも十分に小さいため、キャニスタに荷重が負荷されても表面の圧縮応力状態は維持されることが考えられ、圧縮残留応力によるSCC防止の有効性が確認できた。

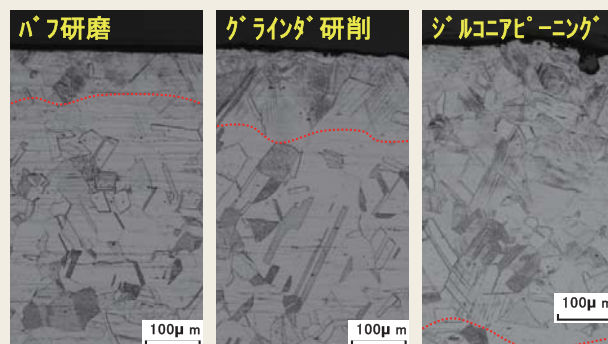


図7 各試験片の断面マイクロ組織(SUS304L)

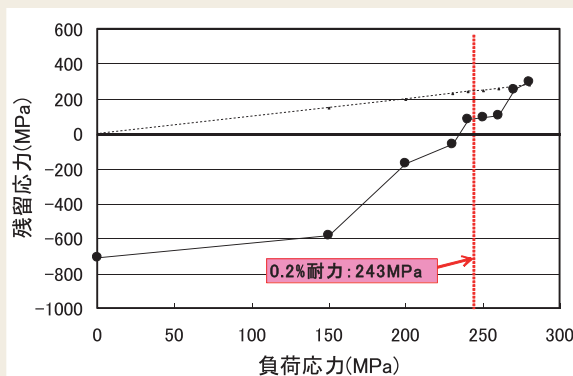


図8 圧縮残留応力を与えた試験片に引張荷重を付加したときの残留応力測定結果

3.1.5 SCC試験 各種表面処理を行ったSUS304L試験片について、JIS G 0576 (沸騰42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験) に準拠してSCC試験を実施し、表面処理の効果を確認した。浸透探傷試験を行った試験片の外観を図9に示す。溶接した状態では溶接線方向に高い引張残留応力が作用する。そのため、溶接のままの試験片は溶接線と直交した方向にSCCが発生し

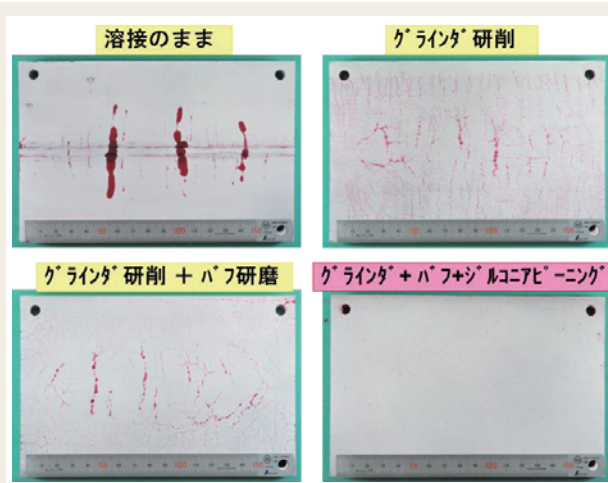


図9 SCC試験後の試験片の外観(SUS304L)

ており、溶接線から30mmの範囲で割れが確認できる。グラインダ研削した試験片は、試験片全面でSCCが発生している。バフ研磨した試験片は、試験片の中央付近に割れが観察される。バフ研磨では比較的小さな圧縮残留応力が発生するが、試験片中央は溶接残留応力が大きく、SCCが発生したと考えられる。一方、ジルコニアピーニングを行った試験片では、SCCは全く発生しなかった。これらから、ジルコニアピーニングは、SCC防止に非常に有効であることが確認できた。

3.2 バニシングによる圧縮応力層の評価(SUS316L)

3.2.1 残留応力分布 各種表面処理を行ったSUS316L試験片について、X線回折法により深さ方向に残留応力を測定した結果を図10に示す。表面加工していない母材は、深さ300 μm まで圧縮残留応力となっている。グラインダ研削では深さ1000 μm まで引張残留応力となる。バニシングによる圧縮残留応力層の深さは押付け力が強い場合では1800 μm 、弱い場合では1200 μm であり、押付け力で圧縮残留応力層の深さが変化した。なお、バニシングによる圧縮残留応力層の深さは、ジルコニアピーニングよりも深い。

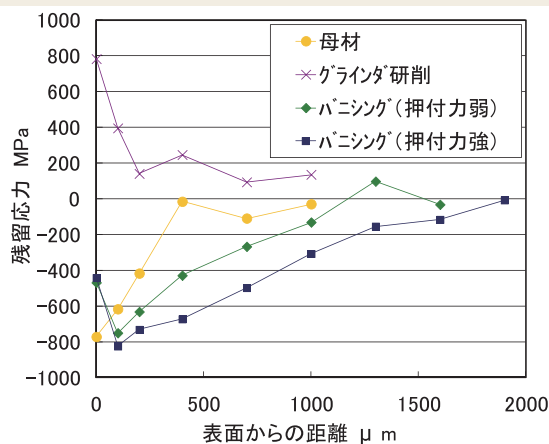


図10 深さ方向の残留応力測定結果(SUS316L)

3.2.2 金属組織観察 母材および2種類の押付け力でバニシングを行ったSUS316L試験片の断面マイクロ組織観察結果を図11に示す。マイクロ組織観察で確認できる加工硬化層は、赤い点線の上側である。マイクロ組織観察による加工硬化層の深さは、それぞれ300 μm 、500 μm 、700 μm であり、圧縮残留応力における変化域の約40%である。

3.2.3 SCC試験 各種表面処理を行ったSUS316L試験片について、SCC試験(JIS G 0576、沸騰42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験)を実施し、表面処理の効果を確認した。浸透探傷試験を行った試験片の外観を図12に示す。溶接のままの試験片では溶接線から20mm程度の範囲でSCCが発生している。バニシングした試験片では押付け力の強弱に関係なくSCCは発生していない。バフ研磨した試験片は押付け力強、弱とも外観ではSCCは確認できないが、顕微鏡観察を行っ

たところ、表面に微細なSCCが確認された。これらの結果から、バニシングはSCC防止に非常に有効であることが確認できた。

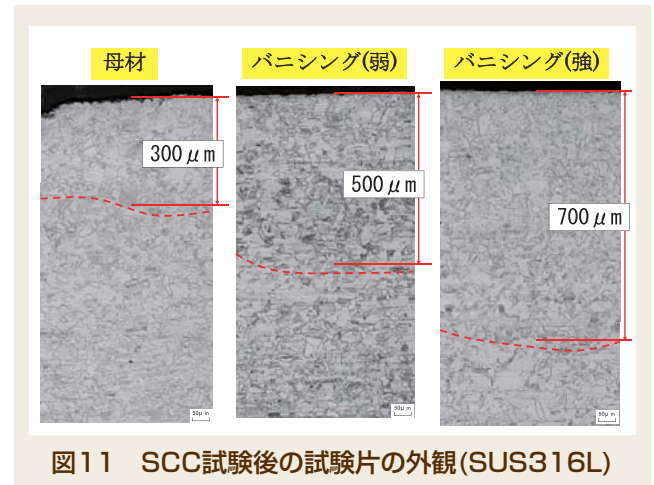


図11 SCC試験後の試験片の外観(SUS316L)

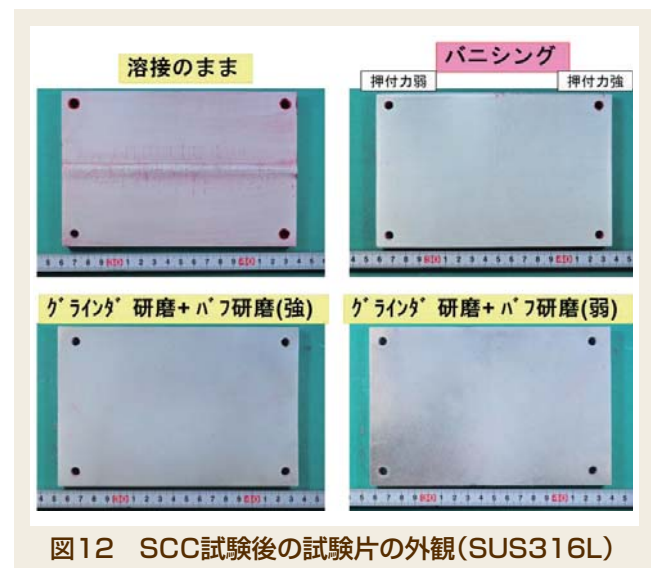


図12 SCC試験後の試験片の外観(SUS316L)

3.3 長期的な耐食性(孔食)の評価

3.3.1 試験片 グラインダ研削およびジルコニアピーニングを行ったSUS304L試験片と、グラインダ研削、ジルコニアピーニングおよびバニシングを行ったSUS316L試験片を用いて試験を行った。

3.3.2 試験方法 溶接金属部、溶接金属/母材部境界部、熱影響部および母材部のそれぞれ10か所に5 μL の人工海水を滴下した。液滴の直径は $\phi 3\text{mm}$ 程度であり、単位面積当たりの付着塩化物量は約14g/m²である。試験環境は、50 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度35%とした。試験終了後、試験片のスケールを除去した後、金属顕微鏡を用いた焦点視差法より各スポットの最大孔食深さを測定した。試験期間は、100h、300h、1000hおよび3000hとした。

3.3.3 試験結果 各種表面処理を行ったSUS316L試験片の試験時間ごとの最大孔食深さを図13に示す。試験時間が長くなるにつれて、最大孔食深さが大きくなっている。母材部および溶接金属部で測定された最大孔食深さは同程度であり、熱影響部や溶接金属/母材

部境界部でも最大孔食深さは母材と同程度であった。また、表面処理方法（グラインダ研削、ジルコニアピーニングおよびバニシング）が異なる場合でも最大孔食深さに顕著な差は認められなかった。

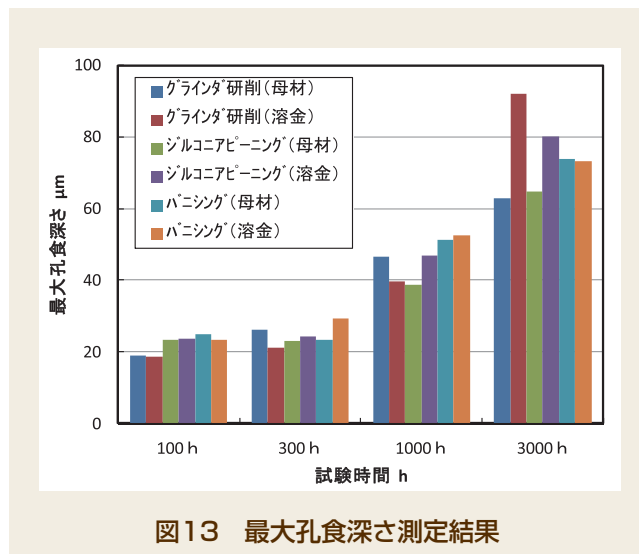


図13 最大孔食深さ測定結果

3.3.4 人工海水スポットにおけるSCC 人工海水を滴下したスポットにおけるSCC発生の有無を表1に示す。グラインダ研磨したSUS304L、SUS316Lは試験時間100hでSCCが確認される。一方、バニシングやジルコニアピーニングを行った試験片は3000hでもSCCが認められなかった。これらから、バニシングやジルコニアピーニングはSCC防止に非常に有効であることが確認できた。

表1 人工海水を滴下したスポットにおけるSCCの有無

試験片	試験時間			
	100h	300h	1000h	3000h
SUS304L-グラインダ研磨	×	×	×	×
SUS304L-Zrピーニング	○	○	○	○
SUS316L-グラインダ研磨	×	×	×	×
SUS316L-Zrピーニング	○	○	○	○
SUS316L-バニシング	○	○	○	○

× ; SCC発生、○ ; SCCなし

3.3.5 60年間の孔食深さの推定 60年間の設計寿命で発生する最大孔食深さを以下の二つの仮定のもとに推定した結果を表2に示す。

- 1) 孔食は3.3.3項で得られた3000hの最大孔食深さを基準に、直線的に成長する。
- 2) 腐食環境に曝される時間は、キャニスタ表面の相対湿度が15% RH以上になる時間とする¹⁾。

表2の中央列は60年の暴露期間で発生する最大孔食深さの推定値、右列は各表面処理で得られる圧縮残留応力層の深さを示す。ジルコニアピーニングおよびバニシングを行ったときの圧縮残留応力層の深さは最大孔食深さの推定値よりも大きく、孔食は圧縮残留応力層内に留まるため、SCCは発生しないと考えられる。

表2 孔食深さの推定値と圧縮層の深さ

材 料	キャニスタ表面の相対湿度が15%RH以上になる時間		圧縮層の深さ
	本州北端	中部日本海側	
	(3853h ¹⁾)	(15021h ¹⁾)	
SUS304L-グラインダ研磨	119μ m	466μ m	0μ m
SUS304L-Zrピーニング	77μ m	300μ m	800μ m
SUS 316L-グラインダ研磨	118μ m	461μ m	0μ m
SUS 316L-Zrピーニング	103μ m	401μ m	800μ m
SUS 316L-バニシング	103μ m	402μ m	1500μ m

4. 結 論

- 1) ジルコニアピーニングおよびバニシングは、SCC防止に非常に有効な方法である。
- 2) 表面の圧縮残留応力層は、0.2%耐力に相当の引張応力が負荷されるまで圧縮状態が維持される。
- 3) ジルコニアピーニングでは深さ800μ m、バニシングでは深さ1500μ mの圧縮残留応力層が得られる。
- 4) ジルコニアピーニングやバニシングによる硬化層の深さは圧縮残留応力層の深さとほぼ等しい。
- 5) ミクロ組織観察で確認された加工硬化層の深さは、圧縮残留応力が測定された深さの40%～60%である。
- 6) ジルコニアピーニングやバニシングを行った表面における孔食の成長速度は、母材部と同程度である。
- 7) グラインダ研削では非常に大きな引張残留応力が発生する。グラインダ研削を行った箇所はSCCを防止するための後処理が必要である。
- 8) ジルコニアピーニングおよびバニシングによる圧縮残留応力層の深さは、60年の設計寿命で予測される最大孔食深さよりも大きく、孔食は圧縮残留応力層内に留まるため、SCCは発生しないと考えられる。
- 9) SCCを防止するための有効な製造技術を得ることができた。

参考文献

- 1) 白井孝治 他: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定性評価-、電力中央研究所報告, N10035, 2011.
- 2) K. Sorenson, et al.: Long Term Storage of Used Nuclear Fuel in the US, PATRAM 2010.
- 3) L. Caseres ,T. S. Mintz : Atmospheric stress corrosion cracking Susceptibility of Welded and Unwelded 304, 304L and 316L Austenite Stainless Steels Commonly used for Dry Cask Storage Containers Exposed to Marine Environment,

NUREG/CR-7030, Oct, 2010.

- 4) 亘真澄 他：コンクリートキャスクのキャニスタ表面付着塩分量評価（その2）－実環境での気中塩分量および付着塩分量測定試験－，電力中央研究所報告, N11028, 2012.

【文責者連絡先】
 Hitz日立造船(株) 技術開発本部
 機械・インフラ研究室
 楠 和憲
 Tel : 06-6551-9239 Fax : 06-6551-9086
 e-mail : kusunoki@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
 Technology Development Headquarters
 Machinery & Infrastructure Laboratory
 Katsunori Kusunoki
 Tel : +81-6-6551-9239 Fax : +81-6-6551-9086
 e-mail : kusunoki@hitachizosen.co.jp



楠 和 憲



山 崎 洋 輔



山 田 順 也



田 中 智 大



北 側 彰 一



大 岩 章 夫



浅 野 良 二