



再処理施設におけるジルコニウムの応力腐食割れ評価に関する考察

Consideration on Stress Corrosion Cracking Evaluation of Zirconium for Fuel Reprocessing Facilities

原子力規制庁長官官房 技術基盤グループ	橋倉 靖明	Yasuaki HASHIKURA	Member
日本原子力研究開発機構	石島 暖大	Yasuhiro ISHIJIMA	
日本原子力研究開発機構	中原 将海	Masaumi NAKAHARA	
日本原子力研究開発機構	佐野 雄一	Yuichi SANNO	
日本原子力研究開発機構	上野 文義	Fumiyoshi UENO	Member
日本原子力研究開発機構	阿部 仁	Hitoshi ABE	

For the aging of fuel reprocessing facilities, constant load tensile tests with controlled potentials and electrochemical tests for zirconium were conducted in nitric acid and sodium nitrate solutions. Consequently, information was obtained regarding the effects of nitric acid and nitrate ion concentrations on the stress corrosion-cracking initiation and effects of nitric acid and plutonium concentrations in solutions, along with the liquid temperature on natural potential. Based on the test results, a map was drawn to summarize the effects of nitric acid concentration on the crack initiation potential. This map can be used to confirm the initiation of stress corrosion cracking by comparing it with the actual environmental conditions of fuel reprocessing facilities. Moreover, the test results indicated that not only nitric acid but also nitrate ion associated with nitrate must be considered for evaluating the possibility of stress corrosion cracking.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Fuel Reprocessing Facility, Nitric Acid, Zirconium, Nitrate Ion, Plutonium

1. 序論

再処理施設の技術基準に関する規則（令和二年原子力規制委員会規則第九号）第十七条の第1号に「容器等に使用する材料は、その使用される圧力、温度、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学的成分を有すること」と規定されており、長期供用に伴う機器の経年劣化事象を考慮しても本規定を満足する必要がある。

再処理施設においては、高温で、強力な酸化剤である硝酸により使用済燃料を溶解し、有機溶媒により当該溶解液からウラン及びプルトニウムの抽出を行う。主要な機器のプロセス溶液には硝酸とともに使用済燃料から溶解した核分裂生成物等が含まれている。溶解した核分裂生成物の中には腐食を加速する金属イオンが存在していることから、施設内の機器は過酷な腐食環境に曝されていると言える[1~3]。

我が国の商用再処理施設では腐食進展を抑制する観点から一部の機器の材料として、耐食性に優れるジルコニウムが採用されているが[4]、上記過酷環境を考慮すると、ジルコニウムについても長期供用に伴う経年劣化事象に

よる漏えいの可能性を確認する必要がある[5,6]。

加藤ら[7]は、沸騰硝酸水溶液中におけるジルコニウムの耐食性及び応力腐食割れに関する試験を行い、ジルコニウムは十分な耐食性を有するが、再処理施設の溶液条件においては応力腐食割れが生じる可能性があるとの報告している。また、海外の既往の研究結果[6,8]においても、硝酸環境中において応力腐食割れ感受性があることが示唆されている。

Kajimuraら[9]は、1~22.2 mol/Lの濃度範囲の沸騰硝酸環境中のジルコニウムに所定の電位を加えた条件下で極低ひずみ速度引張試験装置による応力腐食割れ試験を実施し、硝酸濃度と応力腐食割れ感受性下限電位との関係を基に、硝酸濃度が高いほど、応力腐食割れ感受性下限電位が低下することを示している。

Ishijimaら[10]は、硝酸濃度を9 mol/L、温度を沸点とした条件で100~200 MPaの範囲の応力負荷で定荷重引張試験を実施し、所定の電位以上で表面に生成する変色皮膜下でマイクロクラックが成長することにより応力腐食割れが発生（変色皮膜破壊モデル）するが、電位に応力が影響しないこと、さらに、電位はジルコニウムの過不動電位であることも確認している。

以上のことから、本研究では、溶液組成及び溶液温度がジルコニウムの応力腐食割れ発生に及ぼす影響に関する知見を得ることを目的に、電位負荷定荷重引張試験や電気化学特性試験等を行い、その結果に基づき経年劣化事象に対する機器の維持・管理をするための技術的着眼点を取りまとめた。なお、本論文は、平成24年度から28年度まで原子力規制庁が国立研究開発法人日本原子力研究開発機構に委託した研究の成果[1]を基に作成したものである。

2. ジルコニウムの応力腐食割れ試験

2.1 試験概要

硝酸プルトニウムが溶解した硝酸溶液が供給されるプルトニウム濃縮缶を考慮し、硝酸濃度及び硝酸プルトニウム $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 由来の硝酸イオンの濃度がジルコニウムの応力腐食割れ発生条件（変色皮膜発生電位）に及ぼす影響を調べるために、電位負荷定荷重引張試験及び電気化学特性試験を実施した。また、硝酸濃度、硝酸プルトニウム溶液中のプルトニウム濃度及び溶液温度が溶液の自然浸漬電位に及ぼす影響を調べるために、硝酸プルトニウムを含む硝酸溶液中の自然浸漬電位を測定した。

2.1.1 電位負荷定荷重引張試験

過去に取得された応力腐食割れ発生条件（溶液の自然浸漬電位）に及ぼす硝酸濃度の影響についての知見[7,9]は、極低ひずみ速度引張試験により得られたものであり、実機相当の環境条件である定荷重での試験実施例は少ない。そこで、本試験では、まず電気化学特性試験（2.1.2 参照）により変色皮膜発生電位を確認し、これを参考に試験電位を設定して、電位負荷定荷重引張試験装置により応力腐食割れ発生条件（溶液の自然浸漬電位）に及ぼす

硝酸濃度の影響を調査した。既往の研究[9]では、降伏応力の 1/2 程度である 100 MPa 以上の範囲で定荷重引張試験は行われていることから、それ以下の低応力条件でのデータも取得するため、本研究では降伏応力の 1/4 以上の応力条件で試験を行った。

2.1.2 電気化学特性試験

硝酸溶液中の硝酸塩由来の硝酸イオンの濃度が変色皮膜発生電位に及ぼす影響の確認はこれまで行われていない。そこで、硝酸イオン単独の影響を電気化学特性試験により確認した。

2.1.3 硝酸プルトニウムを含む硝酸溶液の自然浸漬電位の測定

応力腐食割れの発生を防ぐためには、プルトニウム濃縮缶で取り扱う溶液の運転条件における自然浸漬電位が変色皮膜発生電位以下であることが重要である。そこで、硝酸、硝酸プルトニウム溶液中のプルトニウム濃度及び溶液温度が自然浸漬電位に及ぼす影響を電気化学特性試験により調べた。また、試験片表面の変色皮膜発生状況を観察した。

2.2 試験方法

2.2.1 電位負荷定荷重引張試験

(1) 試験条件

試験条件を Table 1 に示す。応力の影響、電位及び硝酸濃度の影響及び溶液（硝酸）温度の影響を調べる試験について、それぞれ硝酸濃度（3~11 mol/L）、試験温度（25~沸点）、試験応力（50~200 MPa）及び試験電位（1.28~3.85 V vs. SSE (sat. Ag/AgCl)）を設定した。

(2) 試験片

試験片は、工業用ジルコニウム圧延板（ASTM B551 R60702）から切り出した。化学成分を Table 2 に、試験片

Table 1 Test conditions of constant load tensile test with controlled potentials [1]

Test conditions	HNO ₃ concentration (mol/L)	Temperature (°C)	Stress (MPa)	Potential (V vs. SSE (sat. Ag/AgCl))
Effect of stress	7	Boiling	50, 100, 150, 200	1.5
Effect of HNO ₃ concentration and potential	3, 7, 11	Boiling	200	1.42, 1.46 (HNO ₃ 3 mol/L) 1.34, 1.36, 1.40 (HNO ₃ 7 mol/L) 1.28, 1.32, 1.37 (HNO ₃ 11 mol/L)
Effect of temperature	7	25, 50, 75, 90, Boiling	200	3.70, 3.80, 3.85 (25 °C) 2.40, 2.50, 2.55 (50 °C) 1.55 (75 °C) 1.30, 1.35 (90 °C) 1.34, 1.36, 1.40 (Boiling)

Table 2 Specimen composition of constant load tensile test (wt%) [1]

	C	N	O	H	Fe+Cr	Hf	Zr+Hf
Test material	0.01	0.005	0.13	<0.0003	0.07	1.1	bal.
ASTM B551 R60702	<0.05	<0.025	<0.16	<0.005	<0.2	<4.5	bal.

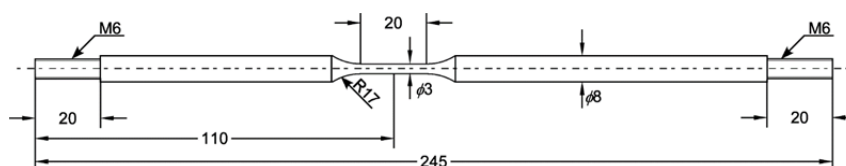


Fig. 1 Schematic view of constant load tensile test specimen (mm) [1]

寸法を Fig. 1 に示す。0.2 耐力は 220 MPa、試験片数は、それぞれの条件において 3 本とした。

(3) 試験装置

試験装置には低ひずみ速度引張試験装置を使用した。装置には硝酸溶液を注入するためのセルを設置し、試験片をセル内に配置した。セル外部には加熱用のヒーターを設置し、温度調整した。また、電位の調整ができるように電気化学測定装置と接続した。さらに、応力はロードセルにより制御した。

(4) 試験後の試験片の表面観察

試験終了後の試験片の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。

2.2.2 電気化学特性試験

(1) 試験条件

硝酸イオンが応力腐食割れ感受性下限電位に及ぼす影響について、溶液中で水素イオンを生じない硝酸ナトリウムを用いて電気化学特性試験を実施した。

比較のために硝酸のみの試験も行った。試験条件を Table 3 に示す。

(2) 試験装置

電気化学試験セルは、5 個口の蓋を有する 500 ml のセパラブルフラスコを用いた。蓋の各口は沸騰硝酸の蒸発を防止するためすり合わせとした。蓋の各口には、試験

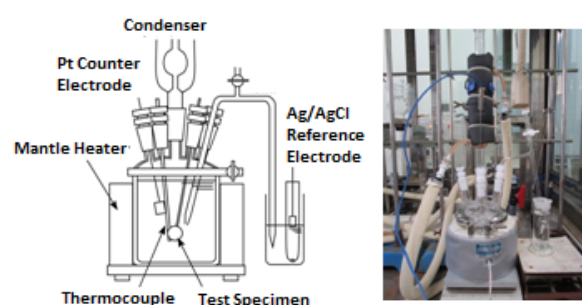


Fig. 2 Schematic view and appearance of electrochemical test apparatus [1]

片、熱電対、白金対極、銀塩化銀参照電極 (SSE) 及びコンデンサを接続した。Fig. 2 に試験装置の概略図と外観を示す。

(3) 電気化学特性の測定方法

前述のジルコニウム圧延板から切り出した試験片をセパラブルフラスコ中の硝酸溶液に浸漬し、マンテルヒーター及びホットプレート付きのマグネチックスターラーを用い、硝酸溶液をかくはん、加熱しながら電気化学測定 (アノード分極測定) を行った。測定は、試験溶液が沸騰後 3 時間経過した時点における自然浸漬電位より 0.1 V 卑な電位から開始した。電位の掃引は、+20 mV/min の速度で行った。掃引電位が銀塩化銀参照電極に対して 10

Table 3 Test conditions of electrochemical test [1]

Test conditions	HNO ₃ concentration (mol/L)	NaNO ₃ concentration (mol/L)	Temperature (°C)	Potential (V vs. SSE (sat.Ag/AgCl))
Effect of nitrate ion concentration	0	1, 3, 5, 7, 7.89	Boiling	-0.6 to 3
Effect of HNO ₃ concentration	1, 3, 5, 7, 11	0	Boiling	-0.2 to 2

Table 4 Measurement condition of natural potential of plutonium nitrate solution [1]

Test conditions	HNO ₃ concentration (mol/L)	Pu concentration (g/L)	Temperature (°C)	Potential (V vs. SSE (sat. Ag/AgCl))
Effect of Pu and HNO ₃ concentration	3, 5, 7	100, 150, 200, 250	Boiling	0 to 2
Effect of temperature	7	100, 250	25, 50, 75, 90, Boiling	0 to 2

Vに達するか、又は、測定される電流密度が1 mA/cm²に達した時点で測定を終了した。

2.2.3 硝酸プルトニウムを含む硝酸溶液の自然浸漬電位の測定

(1) 試験条件

再処理施設においてプルトニウムを濃縮するプルトニウム濃縮缶には、硝酸プルトニウムを含む硝酸溶液が供給され、プルトニウム濃度 約 250 g/L、硝酸濃度 約 7 mol/L まで濃縮される[11]。そこで、プルトニウム濃度が100、150、200、250 g/L、硝酸濃度が3、5、7 mol/Lとなるように、硝酸プルトニウム及び硝酸を用いて試験溶液を調製した。試験に用いた各溶液の組成、試験温度、分極範囲を Table 4 に示す。

(2) 試験装置

自然浸漬電位測定装置の概略図を Fig. 3 に示す。非密封の硝酸プルトニウムを取り扱うため測定用石英ガラスセルはグローブボックス内に設置した。試験片（作用電極）は、工業用ジルコニウム圧延板（ASTM B551 R60702）から切り出した直径2 mmの丸棒を使用した。

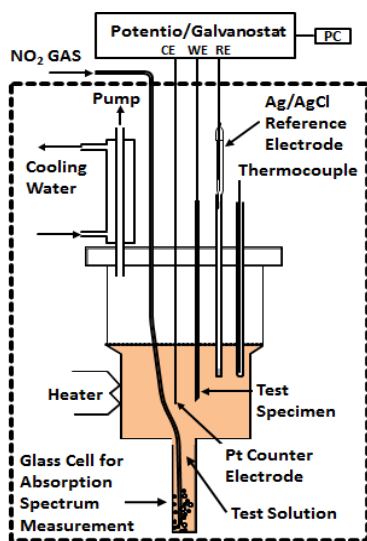


Fig. 3 Schematic view of natural potential measurement apparatus [1]

作用電極の先端は、45° にカットし、切断面は最終的に#2500のエメリー紙により研磨した。研磨後は、エタノール中で超音波洗浄を行った。対極及び参照電極も同様の洗浄を行った。

(3) 電気化学特性の測定方法

分光分析用ヒーター付石英ガラスセルに硝酸プルトニウムを含んだ硝酸溶液を入れ、同セルにガラス冷却器、作用電極及び対極をセットし、この溶液にN₂ガスを吹き込み、溶存酸素を取り除いた。参照電極は、硝酸溶液に入れ、液絡管で分光分析用ヒーター付石英ガラスセルに接続した。溶液が沸騰した後、約30分間浸漬電位を測定し、その後、0から2Vまでの範囲の電位において分極曲線を求め、自然浸漬電位を測定した。

2.3 試験結果

2.3.1 電位負荷定荷重引張試験

(1) 破断時間に及ぼす応力の影響

応力腐食割れが発生する電位条件（1.5 V vs. SSE）において、応力が破断時間に及ぼす影響を確認した結果を Fig. 4 に示す。試験の全ての応力条件において試験片は破断し、破断時間は応力の低下に伴い増加した。降伏応力の4分の1である低い応力（50 MPa）においても、破断時間は長くなるが破断が認められた。Fig. 5 に試験後の試験片外観写真と試料表面写真の一例を示す。試験片外観は全て

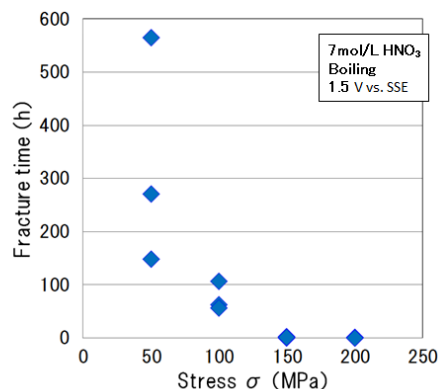


Fig. 4 Fracture time of zirconium as a function of stress [1]

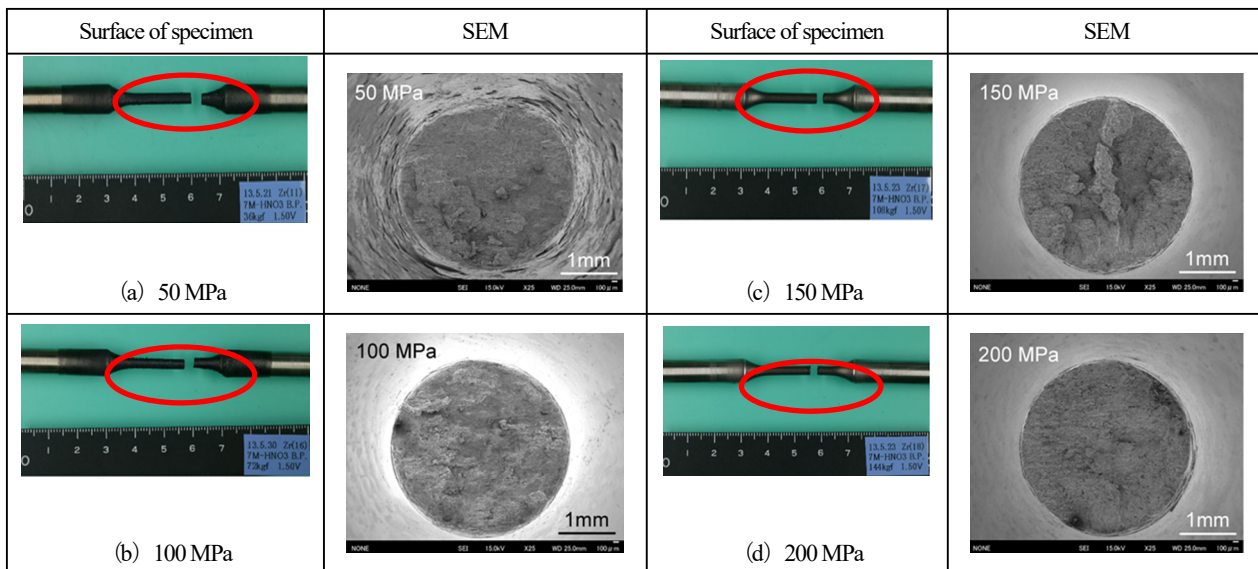


Fig. 5 Appearance and SEM images of some specimens after the constant load test [1]

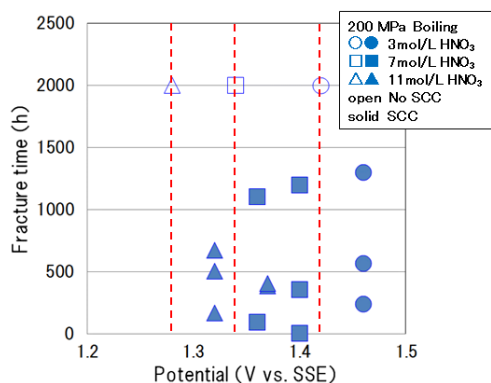


Fig. 6 Relationship between potential and concentration of HNO₃ on fracture time of zirconium [1]

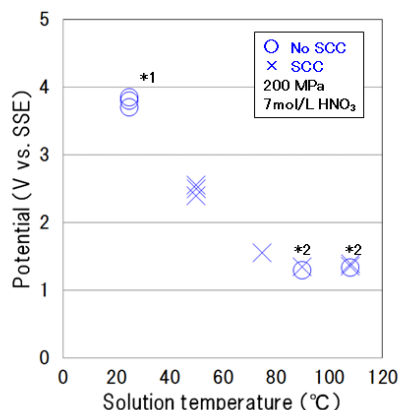


Fig. 7 Effect of solution temperature on breakdown potential of zirconium [1]

黒色であり変色皮膜が認められた (Fig. 5 枠線)。試料表面は全て粒内型のぜい性破面であり、応力が大きいほどぜい性的な破面領域が大きくなっていた。

(2) 破断時間に及ぼす電位及び硝酸濃度の影響

異なる硝酸濃度溶液における破断時間と電位の関係を Fig. 6 に示す。各条件における白抜きプロット点は、応力腐食割れが発生しなかった試験片である。2000 時間でも破断しなかった電位 (Fig. 6 点線で示す電位) では、電気化学特性試験により変色皮膜が発生しないことが確認されている。この電位は、硝酸濃度への依存性を示し、硝酸濃度の増加とともに低下することが分かる。また、表面観察では、Fig. 5 と同様、応力腐食割れが発生している領域においてぜい性的な様相を示すことが確認された。

(3) 応力腐食割れ感受性下限電位に及ぼす溶液 (硝酸) 温度の影響

応力腐食割れ感受性下限電位に及ぼす溶液 (硝酸) 温

度の影響を最大 500 時間の引張試験時間で調べた結果を Fig. 7 に示す。溶液 (硝酸) 温度が上昇することにより応力腐食割れ感受性下限電位は低下する傾向を示した。

また、破断した試験片の試験後の破面を観察した結果、Fig. 5 と同様に、粒内型のぜい性的破面を呈していた。

2.3.2 電気化学特性試験

応力腐食割れ感受性下限電位に及ぼす硝酸イオンの影響を電気化学的に調べた結果を Fig. 8 に示す。

2 つの溶液において硝酸イオン濃度の増加に伴って応力腐食割れ感受性下限電位は低下しているが、硝酸ナトリウムの方がその傾向は顕著である。

2.3.3 硝酸プルトニウムを含む硝酸溶液の自然浸漬電位の測定

(1) プルトニウム濃度及び硝酸濃度の影響

異なるプルトニウム濃度及び硝酸濃度が自然浸漬電位

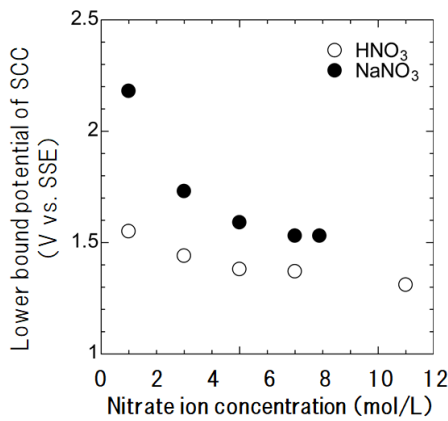


Fig. 8 Effect of nitrate ion concentration on breakdown potential of zirconium [1]

に及ぼす影響を調べた結果を Fig. 9 に示す。本図は、Nakahara らが示した本試験の結果[12]を基に自然浸漬電位の傾向を分析するため改変したものである。

分析の結果、硝酸濃度 3 mol/L 及び 5 mol/L の条件での自然浸漬電位の傾向は、プルトニウムの濃度が増加しても上昇は僅かである。一方、硝酸濃度 7 mol/L の条件では、プルトニウム濃度が増加すると、より明確に自然浸漬電位が上昇している。また、硝酸濃度 3 mol/L 及び 5 mol/L より自然浸漬電位は高く、プルトニウム 250 g/L の条件では、自然浸漬電位は 0.98 V vs. SSE を示している。

(2) プルトニウム濃度及び溶液温度の影響

異なるプルトニウム濃度の溶液を用いて溶液温度が自然浸漬電位に及ぼす影響を調べた結果を Fig. 10 に示す。

本図も Nakahara らが示した本試験の結果[12]を基に自然浸漬電位の傾向を分析するため改変したものである。

溶液温度の上昇に伴う自然浸漬電位の上昇傾向は、い

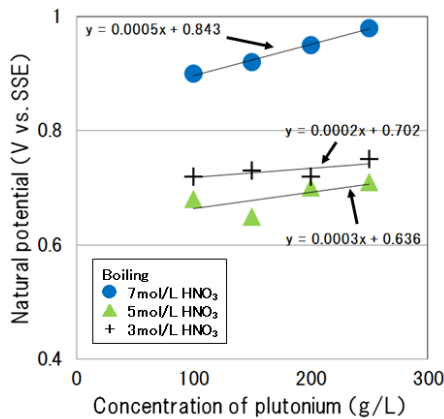


Fig. 9 Effect of concentrations of plutonium and HNO₃ on natural immersion potential of zirconium

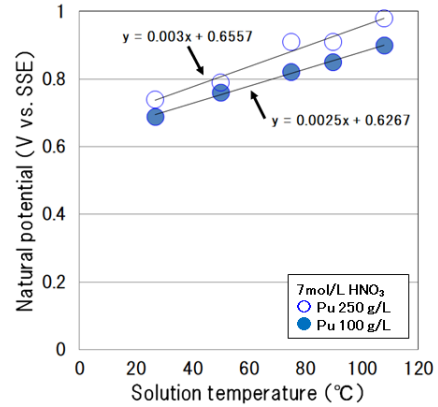


Fig. 10 Effect of solution temperature and concentrations of plutonium on natural potential of zirconium

ずれのプルトニウム濃度においても同様であるが、プルトニウム濃度 250 g/L の方が、有意に自然浸漬電位が高いことが分かる。

(3) 試料表面観察

試験終了後の試験片を観察した結果、試験片表面が僅かに茶色を示していたが試験前の金属光沢箇所が残り、変色皮膜は認められなかった。

3. 考察

3.1 溶液温度による影響

溶液温度の影響を確認した結果、溶液温度 25°C において設定した試験電位 (3.70~3.85 V) では試験片は破断しなかった (Fig.7 中*1)。このことから、この溶液温度における応力腐食割れ感受性下限電位は 3.85 V より貴であると考えられる。また、90°C 及び沸点において設定した試験電位では、破断するものあれば、未破断のものもあり (Fig.7 中*2)、この温度域では約 1.30~1.40 V 周辺に応力腐食割れ感受性下限電位があると考えられる。よって、応力腐食割れ感受性下限電位は、沸点以下では溶液 (硝酸) 温度への依存性があり、溶液 (硝酸) 温度が低下するに伴い応力腐食割れ感受性下限電位が上昇すると考えられる。

3.2 硝酸イオン濃度による影響

Kajimura ら[9]は、硝酸溶液中のジルコニウムの応力腐食割れ感受性下限電位が硝酸濃度の増加とともに低くなる傾向を見出し、水素イオンによってジルコニウムの酸化皮膜の安定性が弱められるためであると考察している。しかし、Fig. 8 に示すとおり、中性である硝酸ナトリウムを用いた試験の結果においても、応力腐食割れ感受性下限電位は硝酸イオン濃度に依存する傾向を示しており、

硝酸イオン濃度の増加のみによっても応力腐食割れ感受性下限電位が低下することが分かった。同じ硝酸イオン濃度で比較した場合、解離して水素イオンを生じる硝酸の場合の方が、応力腐食割れ感受性下限電位が小さいことから、水素イオンの存在もジルコニウムの酸化皮膜の安定性を低下させる一因であると考えられる。

3.3 応力腐食割れ発生に関する考察

応力腐食割れにより破断した試験片の外観は全て黒色であり変色皮膜が認められた。これは、硝酸環境中において応力腐食割れが発生する場合には表面に変色皮膜が生成するとの過去の知見[10]と一致している。このことは応力腐食割れ感受性下限電位域と変色皮膜発生電位域は同等であることを意味している。また、降伏応力より低い50 MPaにおいても破断が認められた。これは、変色皮膜が発生する電位条件であれば、小さな応力でも試験片が破断することを示唆している。これらの知見は、硝酸溶液中のジルコニウムの応力腐食割れを防止するためには、溶液の自然浸漬電位が変色皮膜を生成する電位未満であることが重要であることを示している。

電位負荷定荷重引張試験の結果から作成した、沸点での応力腐食割れ発生条件を電位と硝酸濃度の関係に示した応力腐食割れ発生マップを Fig. 11 に示す。

図中の矢印は応力腐食割れが発生する最小の電位を結んだものであり、応力腐食割れ感受性下限電位が硝酸濃度によって変化し、硝酸濃度が上昇すると応力腐食割れ感受性下限電位が低下することを示している。

3.4 本研究結果と実機評価に関する考察

本研究により硝酸及び硝酸塩由来の硝酸イオン濃度と

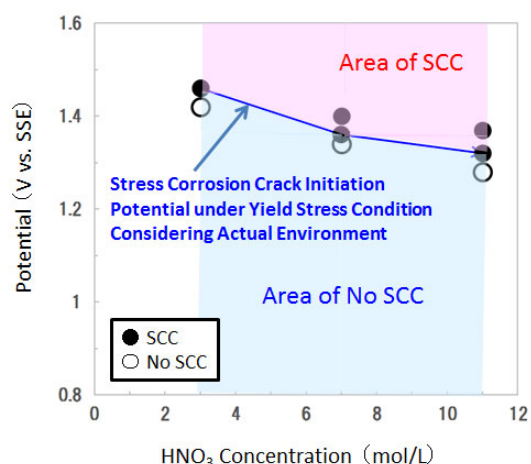


Fig.11 Stress corrosion cracking initiation map (Relationship between potential of zirconium and HNO₃ concentration at boiling temperature [1])

応力腐食割れ感受性下限電位との関係などが明らかとなった。

さらに、本研究成果を実際の再処理施設におけるジルコニウム製機器の維持管理に使用するためには、更に実際の使用条件等も加味して検討を行う必要があると考え、技術的考察を行い、以下の着眼点をまとめた。

実機の溶液は、プルトニウムが硝酸プルトニウム Pu(NO₃)₄ として硝酸に溶解している硝酸溶液である。応力腐食割れ感受性下限電位には主として水素イオンと硝酸イオンの濃度が影響することが分かったことから、硝酸濃度に加え溶解している硝酸プルトニウム由来の硝酸イオンも考慮する必要があると考えられる。このため、Fig. 11 の応力腐食割れ発生マップを用いる場合は、硝酸プルトニウム由来の硝酸イオンの濃度を硝酸溶液の硝酸濃度に加算した濃度により、応力腐食割れ感受性下限電位を読み取り、この電位を溶液の自然浸漬電位と比較して応力腐食割れ発生の可能性を評価すること必要である。

例えば、本研究の試験条件の最大値であるプルトニウム 250 g/L (≒ 1 mol/L Pu) 及び硝酸濃度 7 mol/L の条件においては、硝酸プルトニウムの硝酸イオンが全て解離していると仮定すると、試験溶液の硝酸イオン濃度は、硝酸由来の硝酸イオン濃度 7 mol/L に硝酸プルトニウム由来の硝酸イオンの濃度 4 mol/L を加算した 11 mol/L となる。硝酸濃度 11 mol/L における応力腐食割れ感受性下限電位を Fig. 11 の応力腐食割れ発生マップにより評価すると約 1.3 V vs. SSE となる。

本研究において、同じ条件 (プルトニウム 250 g/L 及び硝酸濃度 7 mol/L) で測定された自然浸漬電位は 0.98 V vs. SSE であるから、応力腐食割れ発生外領域にあることになり、この溶液条件では応力腐食割れは発生しないと評価できる。この評価結果は、試験片表面に応力腐食割れの起因事象である変色皮膜の発生[10]が観察されなかった試験結果とも整合する。

よって、実機の評価を行う場合には、実機の液温、硝酸濃度及びプルトニウム濃度を確認し、Fig. 11 に示す応力腐食割れ発生マップを活用することにより評価することが可能と考えられる。

上記は、プルトニウム濃縮缶等の運転・環境条件から応力腐食割れの可能性を評価するものであるが、併せて、本研究結果より、応力腐食割れが発生する場合、ジルコニウム表面には変色皮膜が生成すること、その状態では降伏応力より低い 50 MPa でも破断すること、さらに、試料表面観察の結果から、この場合の破断モードはぜい性

破壊であることが示されていた。これらを基にすれば、運転・環境条件からの評価とは別に、可能であれば実機の接液面において、変色皮膜の生成を確認することも当該機器の健全性を確認するために重要な着眼点であるといえる。

3.5 機器の維持管理のための技術的着眼点

以上のことから、我が国の商用再処理施設に設置されているジルコニウム製機器のうち最も硝酸濃度の高いプルトニウム濃縮缶の応力腐食割れ発生の可能性について評価する場合の技術的着眼点として以下を挙げることができる。

- ① 応力腐食割れに影響を与える主要な因子は、硝酸濃度、硝酸プルトニウム濃度及び溶液温度である。応力腐食割れについて評価する場合には、実機の運転条件として、硝酸濃度、硝酸プルトニウム濃度及び溶液温度を確認することが重要である。
- ② 応力腐食割れ発生の有無について評価する場合には、実機の運転条件での溶液の自然浸漬電位に着目し、硝酸濃度及び硝酸プルトニウムの硝酸イオンを考慮して応力腐食割れ発生マップと比較することにより評価することができる。
- ③ 応力腐食割れが生じる場合、試験片表面には変色皮膜が生成することから、実機において、接液面の観察が可能であれば、機器の表面の観察情報が応力腐食割れ発生を確認するための有力な判断材料になるものと考えられる。

4. 結言

- (1) 再処理施設で使用されているジルコニウムの応力腐食割れ評価を行う上での技術的着眼点をまとめた。特に、硝酸濃度、温度のみならず、硝酸イオン濃度（硝酸及び硝酸プルトニウム）の重要性について考察した。
- (2) 実機の溶液環境条件である硝酸イオン濃度（硝酸及び硝酸プルトニウム）及びその自然浸漬電位を分析測定し、本研究で作成した応力腐食割れ発生マップを用いて、その測定結果と比較することで応力腐食割れ発生の有無を確認することができる。

参考文献

- [1] (国研) 日本原子力研究開発機構 “平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（商用再処理施設の経年変化に関する研究）事業報告書”，平成 29 年 3 月
- [2] 槇彰: “東海再処理施設の腐食環境と機器の腐食速度評価”，サイクル機構技報, 14, pp.39-63 (2002).
- [3] R. Robin, F. Balbaud, P. Fauvet, N. Gruet, B. Gwinner: “Corrosion Issues about the Materials of the French Fuel Reprocessing”, Proceedings of GLOBAL2011 (2011).
- [4] 和田史博: “再処理プラントにおける信頼性向上技術”，材料と環境, 48 巻, pp.771-775 (1999).
- [5] 梶村治彦, 長野博夫: “原子力再処理プラントの腐食環境と耐食材料”，日本金属学会会報, Vol.31, No.8, pp.725-733 (1992).
- [6] J. A. Beavers, J. C. Griess, W. K. Boyd: “Stress Corrosion Cracking of Zirconium in Nitric Acid”, Corrosion, Vol.37, pp.292-297 (1981).
- [7] 加藤千明, 矢野昌也, 木内 清, 杉本克久: “沸騰硝酸環境におけるジルコニウムの耐食性に及ぼす伝熱の影響”，材料と環境, Vol.52, No.1, pp.35-43 (2003).
- [8] T. L. Yau: “Corrosion comparisons between Zirconium and titanium”, Werkstoffe und corrosion, 43, pp.358-363 (1992).
- [9] H. Kajimura, H. Nagano: “Stress Corrosion Cracking of Zirconium in Hot Nitric Acid”, Corrosion, Vol.48, No.5, pp.391-397 (1992).
- [10] Y. Ishijima, C. Kato, T.Motooka, M.Yamamoto, Y. Kano, T. Ebina: “Stress Corrosion Cracking Behavior of Zirconium in Boiling Nitric Acid Solution at Oxide Formation Potentials”, MATERIALS TRANSACTIONS, Vol. 54, No. 6, pp.1001-1005 (2013).
- [11] 木内 清: “再処理プラント材料の硝酸溶液中の腐食問題と防止対策”，日本原子力学会誌, Vol.31, No.2, pp.13-22 (1989).
- [12] M. Nakahara, Y. Sano, H. Abe: “Electrochemical properties of zirconium in highly concentrated plutonium nitrate solution”, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol.5, pp.52-55 (2018).

(2020 年 4 月 9 日受理, 2020 年 8 月 3 日採択)