

ステンレス鋳鋼およびステンレス鋼溶接金属の 高温水中応力腐食割れ挙動に及ぼす長時間熱時効の影響 －これまでの研究状況と今後の課題－

Influence of long-term thermal aging on SCC Behavior of Cast Stainless Steels
and stainless steel weld metals in High-Temperature Water
- Current research status and Future Program -

山田 卓陽 (Takuyo Yamada) *¹ 寺地 巧 (Takumi Terachi) *¹
宮本 友樹 (Tomoki Miyamoto) *¹ 有岡 孝司 (Koji Arioka) *¹

要約 ステンレス鋳鋼やステンレス鋼溶接金属は、その良好な耐食性や溶接性から軽水炉で広く使用されているが、実機使用温度域 (290℃～320℃) における長期間の使用により熱時効脆化し、靱性等の機械的性質が低下することが知られている。このように供用期間中に諸性質が変化する材料については、熱時効により経年変化した状態においても健全性が保証されることが望ましい。当研究所ではステンレス鋳鋼およびステンレス鋼溶接金属の高温水中応力腐食割れ挙動について、2000年以降研究を続けてきた。本報告では、既報告済みの内容を整理し、応力腐食割れ挙動に及ぼす熱時効の影響を中心に説明する。

キーワード ステンレス鋳鋼, ステンレス鋼溶接金属, 熱時効, 高温水中応力腐食割れ (SCC), SCC進展速度, 腐食電位, 冷間加工, 軽水炉

Abstract Cast austenitic stainless steels and stainless steel weld metals have good corrosion resistance and weldability, so these are widely used for light water reactors in the intermediate temperature range of 290℃-320℃. However when they are used in this temperature range for extended periods of time, they can suffer a loss of toughness and Charpy impact energy. For material reliability of such as degraded materials during service time, it is necessary to evaluate the SCC behavior even after long-term thermal aged materials. Since 2000 years, we continuously performed the research program, such as SCC behavior of those materials before and after long-term thermal ageing. In this study, influence of long-term thermal aging on SCC behavior of cast stainless steels and stainless steel weld metals in high-temperature water will be introduced refer from our reports.

Keywords cast stainless steels, stainless steel weld metal, thermal aging, stress corrosion cracking (SCC) in high-temperature water, SCC growth rate, corrosion potential, light water reactor

1. 諸言

ステンレス鋳鋼は、加圧水型軽水炉 (PWR, pressurized water reactor) の一次冷却材主配管として、また、ステンレス鋼配管の接合にはステンレス鋼溶接金属が広く使用されている。これらの材料は実機使用温度域 (290℃～320℃) における長期間の使用により熱時効し、靱性等の機械的性質が低下

することが知られている。この熱時効による機械特性変化については多くの報告^{(1)～(8)}があり、靱性、シャルピー衝撃値等の機械的性質に関する経年劣化挙動はほぼ明らかになっている。その結果によれば、ステンレス鋳鋼の靱性低下は、この材料に8～23%程度含まれるフェライト相がスピノーダル分解するとともにG相がフェライト相中に析出することで硬化することにより引き起こされる。このように

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

供用期間中に靱性等の機械的性質が変化する材料については、熱時効により経年変化した状態においても応力腐食割れ (SCC, stress corrosion crack) に対する健全性が保証される必要がある。著者らは、そのような検討例はほとんどなかった2000年頃から熱時効後のSCC挙動評価の観点で研究プログラムを開始し、ステンレス鋼やステンレス鋼溶接金属のSCC挙動について報告してきた^{(9)~(22)}。2000年代中頃には、高温水中でのステンレス鋼溶接金属部のSCC事例として、沸騰水型軽水炉 (BWR, boiling water reactor) の再循環配管で、溶接部近傍で強い加工を受けたステンレス鋼母材部で発生したSCCが溶接金属部に達している事例が報告された⁽²³⁾。その後、ステンレス鋼溶接金属のBWR標準水質 (NWC, normal water chemistry) 条件下でのSCC進展データが報告されるようになった^{(24)~(31)}。熱時効の影響の観点では、T. Lucasら⁽²⁶⁾は、316Lステンレス鋼溶接金属を400℃5,000時間まで熱時効し、熱時効材は未時効材の2倍のSCC進展速度を示すことを報告している。著者らも、酸素を添加した条件でのステンレス鋼のSCC進展について、400℃で3万時間⁽²²⁾ および4万時間^{(19),(21)}の熱時効条件では未時効材の約10倍のSCC進展速度に増加することを報告している。

そこで本報告では、これまで著者らが報告してきたステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属のSCC挙動について、熱時効の影響の観点で成果を取りまとめるとともに、今後の課題を述べる。

2. これまでの研究状況

ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属のPWR一次冷却材環境下 (低電位環境下) のSCCに

ついて、現在まで実機での発生事例はない。研究についても著者らの報告例を除いてほとんどない状況であった。2000年頃に開始したステンレス鋼のSCC挙動研究は、低歪速度引張 (slow strain rate technique, SSRT) 試験と定荷重式腐食試験により、そのSCC感受性の有無などについて検討を開始した。その主要な結果を2.2項にまとめる。

その後、BWRの再循環配管でSCCがステンレス鋼溶接金属まで到達する実機事例が報告され⁽²³⁾、2000年代中頃からステンレス鋼溶接金属のBWR (NWC) 条件下のSCC進展試験による検討例が報告されるようになった^{(24)~(31)}。著者らも同時期から、評価対象にステンレス鋼溶接金属を加え、また評価手法もコンパクトテンション (CT, compact tension) 試験片を用いたSCC進展試験による定量評価を開始した。その結果、水素を添加したPWR一次冷却材環境下 (低電位環境下) では、ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属は優れた耐SCC性を示すことを明らかにした。一方、酸素を添加した高電位環境下では、未時効材でも有意なSCC進展を示し、明確な腐食電位依存性があることを報告してきた^{(13)~(18),(21)}。2.3項では、それらの結果を熱時効の影響の観点で材料条件毎にまとめる。2.4項では、熱時効による機械的性質の変化とSCC挙動の変化を比較し、SCC進展挙動に及ぼす熱時効の影響メカニズムについて現状と課題をまとめる。

2.1 対象材料

主要な材料条件は表1~3に、試験条件は表4に一覧で示す。SCS14Aは、表1に示したように、Moを含むステンレス鋼で、化学組成はSUS316

表1 SCS14A ステンレス鋼の化学組成 (wt%)

鋳造法	目標フェライト量	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
遠鋳	23	0.044	1.46	0.68	0.029	0.016	9.57	20.02	2.23	0.0501	Bal.
遠鋳	15	0.039	1.07	0.84	0.023	0.008	9.28	18.80	2.14	0.0558	Bal.
遠鋳	8	0.047	0.79	0.90	0.026	0.017	10.67	18.85	2.22	0.0562	Bal.
静鋳	15	0.061	1.40	0.69	0.026	0.016	9.45	20.41	2.63	0.0407	Bal.
静鋳	8	0.061	0.98	0.78	0.025	0.016	9.19	19.09	2.61	0.0305	Bal.

表2 SCS13A ステンレス鋼の化学組成 (wt%)

鋳造法	目標フェライト量	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Fe
静鋳	15	0.052	1.39	0.58	0.022	0.016	8.38	20.01	0.0358	Bal.
静鋳	8	0.062	0.73	0.59	0.024	0.017	8.96	20.06	0.0326	Bal.

表3 溶接金属の化学組成の代表例 (カタログデータ) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
316L 溶接金属	0.024	0.42	1.56	0.025	0.002	19.26	12.11	2.20	Bal.
308L 溶接金属	0.032	0.35	1.45	0.024	0.002	19.53	9.79	—	Bal.

表4 試験条件の一覧

評価項目	試験項目	試験温度	水質	歪み速度	応力条件
SCC 感受性	SSRT 試験	360℃	PWR一次冷却材模擬水 500B+2Li, 30ccDH	$5.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	—
SCC 進展速度	SCC 進展試験	320℃	PWR一次冷却材模擬水 500B+2Li, 30ccDH	—	30MPa $\sqrt{\text{m}}$
		320℃	PWR一次冷却材模擬水 500B+2Li, 8ppmDO	—	30MPa $\sqrt{\text{m}}$

と類似である。この鋼種は、PWRプラントにおいては一次冷却材管の直管部（遠心铸造）およびエルボ部（静铸造）で使用されている。SCS13AはMoを含まないステンレス铸鋼で、化学組成はSUS304と類似である。この鋼種は、一次冷却材ポンプケーシングとして使用されている。これらのステンレス铸鋼は、熱間割れを防ぐために8~23%程度のフェライト相を含む。フェライト量は、ASTM-A800⁽³²⁾で規定された化学組成とフェライト量の関係からある程度制御可能であり、対象材料として3種類のフェライト量の素材を準備した。これらの材料に対しては、溶接熱影響により硬化した部位を模擬するため、10%圧下率の冷間加工（CW）を加えたものを基本素材とした。CT試験片は、SCC進展方向が、配管板厚方向となるように採取し、SCC進展試験に供した。

316Lおよび308L溶接金属は、溶接時の熱変形を避けるため、母材を固定した状態で溶接し、基本素材とした。溶接材の場合も、CT試験片はSCC進展方向が配管板厚方向となるように採取し、SCC進展試験に供した。配管板厚方向と溶接材中央部のデンドライト成長方向が同じなので、SCC進展方向とデンドライト成長方向は同じである。

その他詳細条件などについては、既報^{(16),(21),(22)}を参照されたい。

2.2 SSRT 試験による検討^{(9)~(12)}

図1にSCS14A ($\alpha=23\%$) 未時効材のSSRT試験後の破面観察結果を示すとともに、図2に時効材の結果を示す。図1に示したように、未時効材では、オーステナイト相はTG (trans granular) SCCを

呈し、フェライト相は延性破面を呈している。図2に示した400℃で1万時間熱時効後では、オーステナイト相とフェライト相の両者ともにTGSCCを呈した。これらの結果から、オーステナイト相は、未

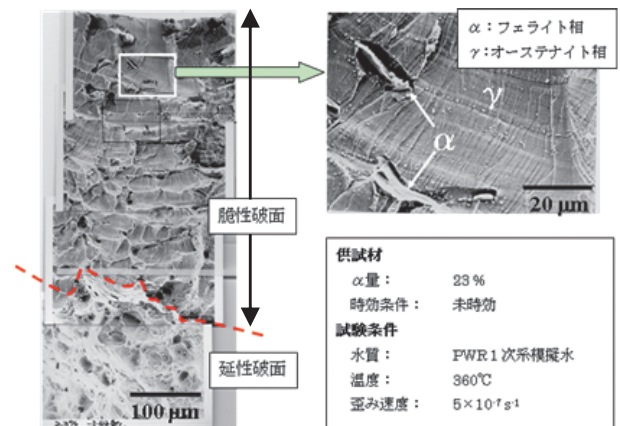


図1 SCS14A (未時効材) のSSRT後破面の代表例⁽¹⁰⁾
オーステナイト相: TGSCC
フェライト相: 延性破面

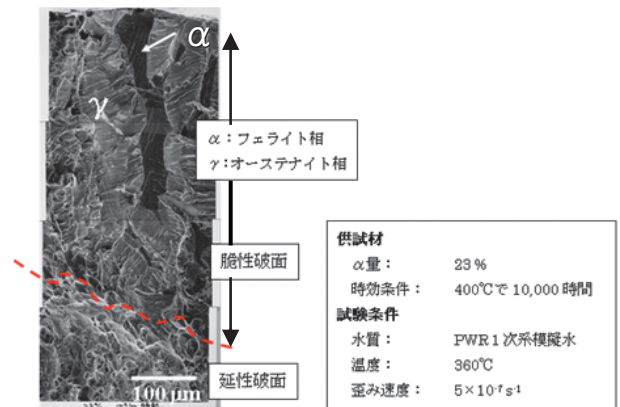


図2 SCS14A (熱時効材) のSSRT後破面の代表例⁽¹⁰⁾
オーステナイト相: TGSCC
フェライト相: TGSCC

時効材も熱時効材も TGSCC 感受性を有することがわかった。フェライト相は、未時効状態では SCC 感受性を示さないが、400℃で1万時間の熱時効後では TGSCC 感受性を示すことがわかった。このようにステンレス鋼の PWR 一次冷却材環境下の SCC 感受性は、熱時効の影響を受けることが確認された。

2.3 SCC 進展試験による検討^{(13)~(22)}

図3に10%CW SCS14A^{(21),(22)}、図4に10%CW SCS13A^{(21),(22)}、図5に316Lおよび308L溶接金属の SCC 進展速度⁽¹⁶⁾の熱時効による影響を示す。

図3に示したように10%CW SCS14Aは、PWR 一次冷却材環境下で SCC 進展を示さず、400℃で4万時間までの熱時効の影響も観察されない。一方で、酸素を含む高電位条件では、未時効状態で 10^7 mm/sec 程度の SCC 進展速度を示す。400℃で2~4万時間の長時間熱時効材では SCC 進展速度が未時効に比べて約10倍増加している。

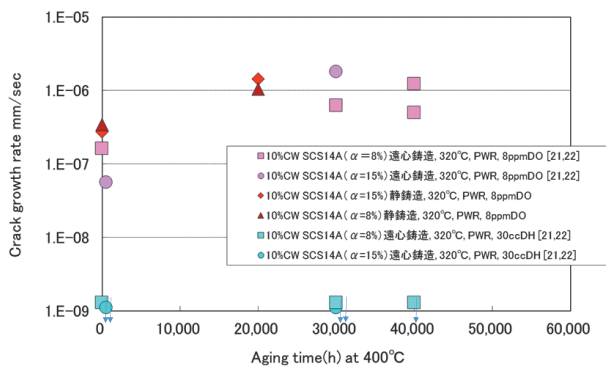


図3 き裂進展速度の熱時効時間による変化 (10%CW SCS14A) (フェライト量 (α) : 8.15%)

図4に示したように10%CW SCS13Aは、PWR 一次冷却材環境下で SCC 進展を示さず、400℃で1万時間までの熱時効の影響も観察されない。酸素を含む高電位条件では、未時効状態で 10^7 mm/sec 程度の SCC 進展速度を示し、10%CW SCS14Aの未時効材と同程度の速度である。400℃で1万時間の熱時効材では SCC 進展速度は未時効材と同程度であり、熱時効の影響は観察されない。

図5に示したように、316L/308L溶接金属は PWR 一次冷却材環境下で SCC 進展を示さず、400℃で1万時間までの熱時効の影響も観察されない。酸素を含む高電位条件では、未時効状態で

10^7 mm/sec 程度の SCC 進展速度を示す。この SCC 進展速度は、10%CW の SCS14A および SCS13A の未時効材の SCC 進展速度とほぼ同等である。著者らの研究で用いたステンレス鋼溶接材は「溶接まま」であり冷間加工を加えていないが、母材を固定して溶接しているので溶接熱変形の影響を受けている。316L/308L 溶接金属部の硬さは、未時効材で HV (1) = 214 ~ 226 で、10%CW SUS316 の硬さと同程度である。そのため、10%CW SCS14A および 10%CW SCS13A の SCC 進展速度と同程度の値を示したものと推定される。316L/308L 鋼溶接金属の 400℃で1万時間の熱時効材では SCC 進展速度は未時効と同程度であり、明確な熱時効の影響は観察されていない。

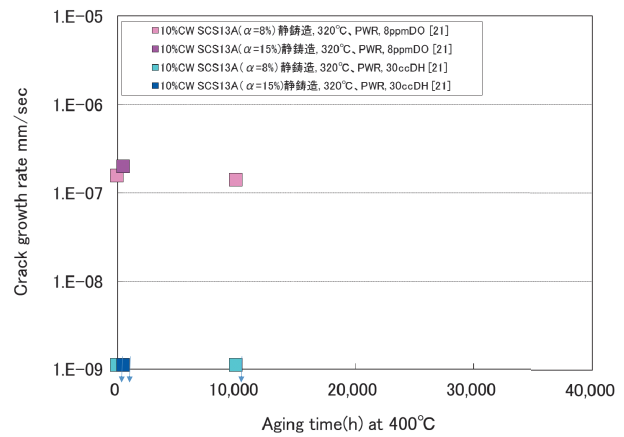


図4 き裂進展速度の熱時効時間による変化 (10%CW SCS13A) (フェライト量 (α) : 8.15%)

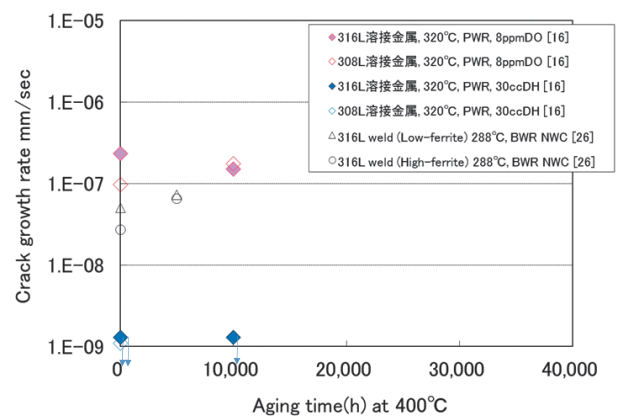


図5 き裂進展速度の熱時効時間による変化 (316L/308L 溶接金属)

T. Lucas⁽²⁶⁾ は、BWR (NWC) 条件下で316L 溶接金属の SCC 進展速度を評価し、400℃で5000時間の熱時効材では、SCC 進展速度が未時効材に比べて約2倍に増加すると報告している。図5に示し

た彼らのデータは、未時効材および熱時効材ともに、本研究のデータと比べて若干遅いものの近い値となっている。彼らの試験条件は288℃、純水中、300ppbDO、 $K \approx 30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で、本研究の試験条件320℃、500B+2ppmLi、8ppmDO、 $K \approx 30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と試験温度およびホウ酸とリチウムの量などが異なる。彼らのデータとのSCC進展速度の差は、この試験条件の差によるものと考えられる。熱時効の影響について、400℃5000時間で彼らは差があるとしているもののその差は2倍と小さく、著者らの400℃1万時間の熱時効までのデータの誤差範囲内の違いである。以上の結果を集約すると、酸素を含むような高電位環境下のSCC進展速度に及ぼす熱時効の影響は、400℃1万時間までは小さく、400℃2～4万時間材では約10倍の増加因子となる。その理由については後述する。

以上のように、高電位条件では長時間の熱時効によりSCC進展速度が増加する。一方で、水素を添加したPWR一次冷却材環境下（低電位環境下）では、ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属は、未時効状態でもSCC進展が観察されず、優れた耐SCC進展性を示す。この低電位環境下のSCC進展速度に及ぼす熱時効の影響は、400℃4万時間の熱時効後もSCC進展が観察されないことから、熱時効による影響も小さいと考えられる。著者らは、この一因としてフェライト相の耐食性が低電位環境下で極めて良好であることを確認し報告している⁽²²⁾。しかし、ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属のフェライト含有量はわずか8%～23%であり、フェライト相の耐食性のみでこの種の材料の耐SCC性を説明できるかどうか不明である。また、SSRT試験においては、400℃1万時間時効材でフェライト相のTGSCCが観察されており、SCC進展試験の結果と必ずしも整合しない点もある。ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属がPWR一次冷却材環境下で良好な耐SCC性を示すことは実験結果から明確であるが、良好な耐SCC性の機構については、軽水炉プラントにおけるSCC対策材料開発の観点でも今後さらに検討が必要である。

2.4 SCC進展挙動に及ぼす熱時効の影響機構

(1) SCC進展速度増加要因（高電位条件）

前述のように、400℃で2～4万時間の長時間熱

時効材の高電位条件のSCC進展速度は、未時効材に比べて約10倍に増加する。著者らはこの理由についてSCC進展経路の詳細観察から検討している。図6に示したように、SCC進展経路に関する既報⁽²¹⁾では未時効材のSCCは初期にオーステナイト相の粒内、その後オーステナイト相の粒界を進展する。部分的に、フェライト相とオーステナイト相の相境界を進展するが、フェライト相の粒内を進展する例は観察されていない。図7に示したように熱時効材のSCC進展経路⁽²²⁾では、未時効材で観察されたSCC進展経路に加えて、フェライト相の粒内割れが観察されている。これが熱時効材において、SCC進展速度が増加する主要因と考えられる⁽²²⁾。

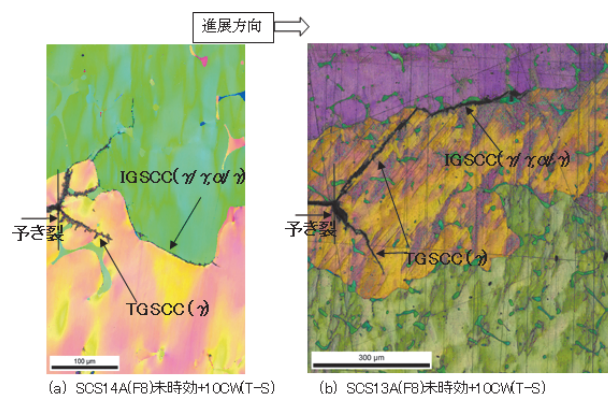


図6 未時効材のき裂進展経路の代表例⁽²¹⁾
(a) 10%CW SCS14A ($\alpha=8\%$)
(b) 10%CW SCS13A ($\alpha=8\%$)

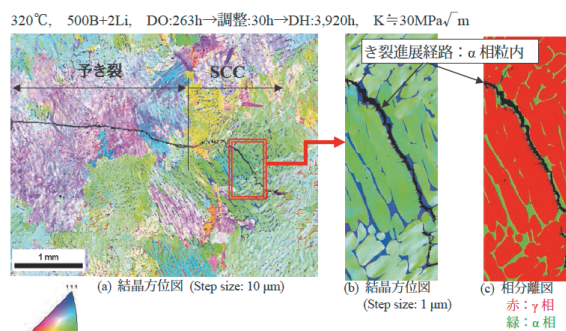


図7 熱時効ステンレス鋼のSCC進展経路⁽²²⁾
(10%CW SCS14A ($\alpha=15\%$))
熱時効：400℃で3万時間

(2) 熱時効による機械的性質の変化とSCC挙動の変化との関係

SCS14Aの熱時効による機械的性質の変化と微細組織の変化に関する既報^{(7),(8)}によれば、図8に示したように熱時効によるシャルピー衝撃値の変化は、400℃で1万時間では概ね飽和傾向を示す。し

しかし、図9に示したようにフェライト相の硬さはその後も増加し400℃で3万時間まで増加傾向を示す。一方で、オーステナイト相の硬さは、400℃の3万時間までほとんど変化しない。シャルピー衝撃値のような材料全体の挙動は、材料の大部分を占めるオーステナイト相の機械的性質に大きく影響されるため、シャルピー衝撃値の変化とフェライト相の硬さ変化は一致しないものと考えられる。今後、熱時効による機械的性質の変化とSCC挙動の変化と

の関係を検討するにあたっては、シャルピー衝撃値のような材料全体の熱時効挙動だけではなく、フェライト相の熱時効挙動（硬さの変化あるいは微細組織の変化）との関係を検討する必要がある。

これまで示してきた400℃の熱時効条件は加速熱時効条件であり、実機温度条件でのSCC挙動予測が必要である。仮に熱時効によるシャルピー衝撃値の活性化エネルギーとして報告されている100kJ/molを用いると、400℃で1～4万時間の熱時効は実機ホットレグ使用温度近傍の320℃の熱時効で約13～51年に相当する（稼働率80%の場合約16年～63年）。ただし、ここで用いた活性化エネルギー100kJ/molは、シャルピー衝撃値の変化から経験的に求められた数値⁽¹⁾であり、様々な材料条件によって65～250 kJ/molまで幅のある値を持つことも指摘されている⁽⁶⁾。したがって、今後実機温度条件でのSCC挙動予測のためには、活性化エネルギーの評価についても検討が必要である。

PWR一次冷却材環境は通常酸素を含まない低電位条件であるが、閉塞部など酸素が滞留するような部位においては、高電位条件下にさらされる可能性があり、オーステナイトステンレス鋼のSCC事例が報告されている^{(33)～(35)}。そのような部位では、熱時効の影響でSCC進展速度が増加する懸念がある。

3. まとめ

ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属の高温水中SCC挙動に与える熱時効の影響について、これまでの成果を再整理し紹介した。主要な結論と今後の課題について以下に述べる。

320℃のPWR一次冷却材環境下において、ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属は、未時効で優れた耐SCC性を示す。400℃で4万時間（320℃で約63年）の長時間熱時効後もSCC進展は観察されず、優れた耐SCC性が維持される。

これらの知見から、PWRの一次冷却材のように水素を添加した腐食電位の低い高温水中では、この種の材料使用箇所がSCCによって破損する可能性は、高経年化したプラントにおいても低いと期待される。

酸素を含む高電位環境下（320℃）では、ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属は、未時効状態で 10^7 mm/sec程度のSCC進展速度を示す。400℃で1万時間の熱時効材では、SCC進展速度は

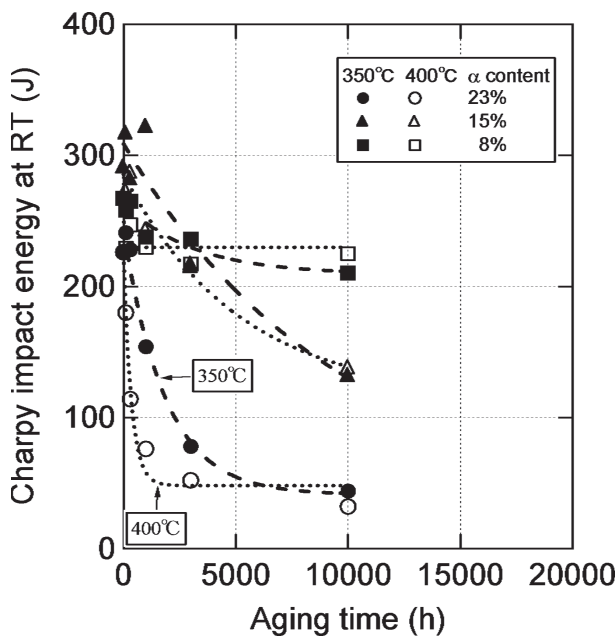


図8 シャルピー衝撃値の熱時効変化⁽⁸⁾ (SCS14A 遠心铸造材)

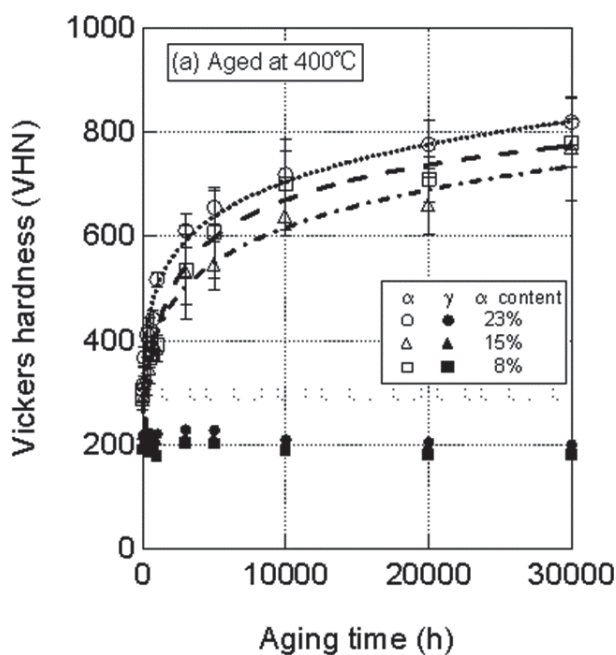


図9 硬さの熱時効変化⁽⁸⁾ (SCS14A 遠心铸造材)

ほぼ変わらないが、400℃で2～4万時間の長時間熱時効材では、SCC進展速度が未時効材に比べて約10倍増加する。

これらの知見から、PWRプラントにおいても酸素滞留部など高電位条件に晒され、かつ比較的高温の部位においては、熱時効の影響でSCC進展速度が増加する懸念がある。

4. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、各種実験準備や腐食試験等の実施にあたっては、(株)原子力安全システム研究所 材料グループ 村上公治氏、黒崎登氏、平尾充司氏(現関電プラント)、高瀬亮人氏(現東洋紡)の多大な協力があった。ここに記して謝意を表す。

5. 参考文献

- (1) A. Trautwein and W. Gysel, *Stainless Steel Castings*, ASTM STP 756, pp.165-189, (1982).
- (2) O.K.Chopra, *SMiRT 13*, pp.349-354, (1995).
- (3) T.Tanaka, S.Kawaguchi, N.Sakamoto and K.Koyama, *ASME, PVP-318*, pp.141-146 (1995).
- (4) L.Mraz, F.Matsuda, Y.Kikuchi, N.Naruo and S.Kawaguchi, *Trans. JWRI*, 23 [2] , pp.213-222, (1994).
- (5) S. A. David, J. M. Vitek, and D.J. Alexander, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.15, Nos. 3/4, pp.129-136, (1996).
- (6) NUREG/CR-4513, ANL-93/22 Rev.1, "Estimation of Fracture Toughness of Cast Stainless Steels during Thermal Aging in LWR Systems"
- (7) 山田卓陽, 根岸和生, 工藤大介, 桑野寿, "2相ステンレス鋼の熱時効機構に関する研究", *INSS JOURNAL Vol.7*, pp.145-158, (2000).
- (8) T. Yamada, S. Okano, H. Kuwano, *Journal of Nuclear Materials*, 350, pp.47-55, (2006).
- (9) 山田卓陽, 根岸和生, 戸塚信夫, 中島宣雄, "鑄造2相ステンレス鋼のPWSCC感受性に及ぼす熱時効の影響", *INSS JOURNAL Vol.8*, pp.125-133, (2001).
- (10) 山田卓陽, 千葉吾郎, 戸塚信夫, 有岡孝司, "鑄造2相ステンレス鋼のPWSCC感受性に及ぼす熱時効の影響(第2報) - SSRT後破面解析からの考察 -", *INSS JOURNAL Vol.9*, pp.141-133, (2001).
- (11) T. Yamada, K. Negishi, N. Totsuka and N. Nakajima, *Corrosion/2002*, Paper No.02524, (2002).
- (12) T. Yamada, K. Negishi, N. Totsuka, N. Nakajima and K. Arioka, *Fontevraud 5*, Paper011, (2002).
- (13) T. Yamada, T. Terachi, K. Arioka, "SCC growth of 308L/316L weld metals in hydrogenated and oxygenated high-temperature water", *Proc. of JSCE Materials and Environments*, (2008), A-206.
- (14) 山田卓陽, 寺地巧, 有岡孝司, "ステンレス鑄鋼および溶接部の高温水中き裂進展挙動", 第55回材料と環境討論会 (2008), A-109
- (15) T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto and K. Arioka, "Effect of potential on SCC Growth of Weld and Cast Stainless Steels in High-Temperature Water", *Proc. of JSCE Materials and Environments*, (2009), A-204.
- (16) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, "ステンレス鋼溶接金属部の高温水中SCC進展挙動 -腐食電位, 鋼種, 熱時効, 冷間加工および温度の影響-", *INSS JOURNAL Vol. pp.* (2009).
- (17) T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto and K. Arioka, "Crack Growth Behavior of Welded and Cast Stainless Steels in Hydrogenated and Oxygenated High-Temperature Water", 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Virginia Beach, VA, August 23-27, (2009)
- (18) T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto and K. Arioka, *Proc. of Nuclear Plant Chemistry Conf. 2010*, Quebec, Canada, (2010).
- (19) T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto, M. Aoki and K. Arioka, *Proc. of Nuclear Plant Chemistry Conf. 2012*, Paris, French, (2012).
- (20) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, "高温ホウ酸水中ステンレス鑄鋼と溶接金属のSCC進展挙動", 第58回材料と環境討論会,

- (2011), D-115.
- (21) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, “ステンレス鋳鋼の高温水中SCC進展挙動 - 腐食電位, 鋼種, 熱時効, 冷間加工の影響 -”, INSS JOURNAL Vol.18, pp.158-169, (2011).
- (22) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, “ステンレス鋳鋼の高温水中SCC進展挙動に及ぼす熱時効の影響”, 材料と環境2016 (2016), A-302.
- (23) 経済産業省 原子力安全・保安院, 「炉心シールドおよび原子炉再循環系配管の健全性評価について - 検討結果の整理 -」, 経済産業省白書・報告書, (2004).
- (24) J. R. Hixon, J. H. Kim, R. G. Ballinger, “EFFECT OF THERMAL AGING ON SCC AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL WELD METALS”, 13th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Whistler, British Columbia, August 19-23, (2007).
- (25) J. H. Kim, R. G. Ballinger, P. W. Stahle, "SCC Crack Growth in 316L Weld Metals in BWR Environments", Corrosion/2008, Paper No.08600.
- (26) T. Lucas, R.G. Ballinger H. Hanninen and T. Saukkonen, “Effect of Thermal Aging on SCC, Material Properties and Fracture Toughness of Stainless Steel Weld Metals”, 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems,
- (27) J. H. Kim, R. G. Ballinger, Stress Corrosion Cracking Crack Growth Behavior of Type 316L Stainless Steel Weld Metals in Boiling Water Reactor Environments, CORROSION SCIENCE
- (28) R. Ishibashi, T. Kato, J. Kuniya, H. Fujimori, Y. Kitsunai T. Karasuma and M. Kodama, Proc. of the 52nd Japan Conf. on Materials and Environments, (2005), B-208.
- (29) H. Abe, K. Shimizu and Y. Watanabe, Proc. of the 53rd Japan Conf. on Materials and Environments, (2006), D-204.
- (30) K. Kumagai, S. Suzuki and K. Asano, Fontevraud 6, (2006).
- (31) Y. Maruno, J. Kaneda, R. Obata, M. Koshiishi, M. Ando and K. Nakata, Proceedings of JSCE Materials and Environments, (2009) A-201.
- (32) ASTM-A800
- (33) G. O. Ilevbare, F. Cattant and N. K. Peat, "SCC of Stainless Steels under PWR Service Conditions", Fontevraud 7, A115 T03, (2010).
- (34) Francois Cattant, “MATERIALS AGING IN LIGHT WATER REACTORS”, HANDBOOK DESTRUCTIVE ASSAYS, EDF and MAI (2014).
- (35) 有岡孝司, 山田卓陽, 寺地巧, 福村卓也, “PWR1次系環境でのステンレス鋼のSCC挙動”, INSS MONOGRAPHS No.5 (2012).