ステンレス鋼の高温水中における応力腐食割れ感受性*

庄 司 三 郎**, 大 中 紀 之**, 菊 池 英 二**
湊 昭**, 丹 野 和 夫***

**株式会社日立製作所日立研究所

***岩手大学工学部応用化学科

Stress Corrosion Cracking Susceptibilities of Various
Stainless Steels in High Temperature Water*Saburō Shōji**, Noriyuki Ohnaka**, Eiji Kikuchi**,
Akira Minato** and Kazuo Tanno***

**Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.

***Faculty of Engineering, Iwate University

The intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) behaviors of several austenitic stainless steels in high temperature water were evaluated using three types of SCC tests, i.e., single U-bend test in chloride containing water, uniaxial constant load and constant extension rate tests (CERT) in pure water. The steels used were SUS 304, 304L, 316, 316L, 321 and 347 and several heats of them to examine heat to heat variations. The three test methods gave the same relative ranking of the steels. The CERT is the most sensitive method to detect the relative IGSCC susceptibilities. The CERT result for relative ranking from poor to good is: SUS 304-0.07% C, 304-0.06% C, 304L-0.028% C, 316-0.07% C. The IGSCC susceptibilities of SUS 304L-0.020% C, 316L-0.023% C, 321 and 347 were not detected. These test results suggest that the use of the low carbon, molybdenum bearing, or stabilized austenitic stainless steel is beneficial for eliminating the IGSCC problem in boiling water reactor environment.

1. 緒 言

沸騰水型発電用原子炉 (BWR) では, SUS 304 ステンレス鋼配管に生じる応力腐食割れによる損傷が, プラントの稼働率低下の一因となっている。この割れの発生を抑えるためには種々の方法が挙げられるが¹⁾, SUS 304 ステンレス鋼に代る更に安定な材料への変更が重要な防止手段と考えられる。配管の割れはほとんどすべてが溶接の熱によって鋭敏化した位置での粒界型応力腐食割れ (IGSCC) なので²⁾, 低炭素ステンレス鋼や安定化ステンレス鋼を代替材の候補に挙げることができる。1970 年前後に報告された米国における研究結果のいくつか^{3)~5)}, これらの鋼種への変更は割れを防止する可能性があることを示唆している。近年, 国内においても, 二三の鋼種について新しい試験法による IGSCC 感受性比

較検討結果⁶⁾ や鋭敏化度の定量的評価結果⁷⁾ などが報告されている。本報では, 市販のオーステナイト系ステンレス鋼 6 種類の IGSCC 感受性を, 強鋭敏化処理を施した試験片について, 種々の加速条件下で実験室的に比較検討した。

応力腐食割れ (SCC) の実験室的比較試験法として, 近年定速引張法 (Constant Extension Rate Test, CERT) が多用されつつあり, 本報でも, 試験が短時間で完了するという有利性から, 最も多くの鋼種について試験を行っている。しかしながら, この CERT は試験片をちぎれるまで引張るという特徴を有する試験法なので, 従来から採用されている U ベンド法や単軸引張法と異なる結果が得られるのではないかとということが懸念された。そこで, 試験にはこれら三方法を採用し, 鋼種間の感受性比較を行うと共に, 各応力負荷法の特徴や問題点なども検討した。

2. 実験方法

実験には厚さ 2 mm の市販の冷間圧延材を用いた。表

* 腐食防食協会 '77 春期学術講演大会 (東京) に一部発表

** 〒319-12 茨城県日立市久慈町 4026 (4026, Kuji-machi, Hitachi-shi, Ibaraki 319-12, Japan)

*** 〒020 盛岡市上田 4-3-5 (4-3-5, Ueda, Morioka-shi 020, Japan)

Table 1. Chemical compositions of stainless steels studied (wt.%).

	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Other
SUS 304 - A	0.07	18.52	8.72	1.56	0.70	0.023	0.003	
SUS 304 - B	0.07	17.27	8.88	0.95	0.54	0.033	0.005	
SUS 304 - C	0.06	18.08	8.79	1.20	0.52	0.031	0.008	
SUS 304L - A	0.028	18.72	9.93	1.52	0.60	0.034	0.011	
SUS 304L - B	0.020	18.36	10.49	1.52	0.66	0.034	0.007	
SUS 316	0.07	16.87	11.24	1.95	0.88	0.033	0.004	2.30 Mo
SUS 316L	0.023	17.85	11.86	1.54	0.70	0.046	0.002	2.10 Mo
SUS 321 - A	0.06	17.71	9.21	1.58	0.71	0.029	0.009	0.55 Ti
SUS 321 - B	0.04	18.15	9.43	0.92	0.63	0.032	0.003	0.26 Ti
SUS 347 - A	0.06	18.36	9.46	1.18	0.58	0.013	0.006	0.68 Nb + Ta
SUS 347 - B	0.04	17.71	9.80	1.00	0.86	0.035	0.005	0.93 Nb + Ta

Note : Letters, A, B and C denote heats

Fig. 1. Details of SCC test specimens

1はその化学組成を示す。図1は試片の形状を示す。銅種間比較などの大部分の実験はシングルUベンド試片および引張型試片で行い、ダブルUベンド試片はすきまの影響を調べる実験にのみ用いた。

Uベンド試片は、機械加工後に、高純度アルゴン・ガス（純度 99.995% 以上、 O_2 濃度 <0.5 ppm）気流中で 620°C に 24 h 加熱・炉冷の鋭敏化処理を施した。この鋭敏化処理で生じた干渉色の薄い酸化皮膜は、実験の条件により、そのまま付与、あるいは 500 番までの研磨紙による乾式手研磨⁹⁾ で除去した。前処理を終えた試片は治具⁸⁾ を通り抜けて曲げ、スプリング・バックで広がった両脚を、試片内側の間隔が 16 mm になるまでボルト、ナットで締付けた。なお、試片とボルト、ナットの間には電気的絶縁のために四弗化エチレン樹脂 (PTFE) のワッシャを入れたが、これが最初の試験区間にわずかに収縮するので、初試験区間 (50~100 h) 後にボルトを増締めした。この前後におけるシングルUベンド試片の外側表面ベンド頂点中央の応力を X 線法²⁰⁾ で測定したところ、試験前のベンド方向引張応力は約 70 kg/mm^2 、 288°C 100 h 加熱後は約 10 kg/mm^2 、ベンド両脚を 16 mm まで再締付後は約 20 kg/mm^2 であった。第 2 試験区間以後はワッシャの収縮はなかったので、高温水中での正確な値は分らないが、ベンド頂点では 20 kg/mm^2 程度の応力が負荷されていると思われる。

引張型試片は、機械加工後に、 $1,050^\circ\text{C} \cdot 30\text{ min}$ 間加熱後水冷の固溶化処理を施し、SUS 321 及び 347 には更に $850^\circ\text{C} \cdot 5\text{ h}$ 加熱後水冷の安定化処理を施した後、これらの熱処理で生じた酸化皮膜を研磨除去した。この後に U ベンド試片と同じ鋭敏化処理を施し、これによる皮膜は除かなかった。試片は引張用治具に直径 6 mm のピンで固定したが、試片と治具を絶縁するために、ピンには酸化皮膜を付けたジルコイ製ピンを用いると共に、薄い PTFE シートを巻いた。

試験には、電導度 $0.5\text{ }\mu\text{S/cm}$ 以下、 Cl^- 濃度 0.05 ppm 以下の脱イオン水を用いた。試験液には室温大気圧下で酸素、空気、酸素・窒素 (1 vol. %) 混合ガス、アルゴンを吹込んで O_2 濃度を調節した。室温実測値はそれぞれ 40, 8, 0.4, <0.05 ppm であった。pH は未調整のまま、 Cl^- は NaCl として添加した。

U ベンド法試験には容量 1~10 l の 304 鋼製静水型オートクレーブを用い、50~200 h ごとに試験液を更新すると共に、試片表面を目視あるいはルーペで観察して割れの有無を調べた。SCC 感受性は、割れが観察された時間、あるいは全供試試片数に対する割れ発生試片数の比を百分率で示した割れ発生率で評価した。単軸引張法では、インコネル 600 を内張りしたオートクレーブに、循環装置⁹⁾ により試験水を循環させ、昇温後に許容応力値 (Maximum allowable design stress, Sm) の 2.5 倍の引張応力を負荷し破断時間を求めた。CERT 法では、容量 1.9 l の静水型インコネル内張オートクレーブを用い、引張速度は $5\text{ }\mu\text{m/min}$ (見かけの歪速度, $\dot{\epsilon}=4.16 \times 10^{-6}\text{ sec}^{-1}$) で試験した。引張は試験水が所定の温度に保持された後に開始した。応力-伸び曲線から最大応力伸び ($\epsilon_{\sigma\text{max}}$) 及び引張開始から破断までの時間を求めると共に、走査型電子顕微鏡 (SEM) により破断面の割れ形態を観察した。また、SEM 写真から、破断面の面積に対する IGSCC あるいは TGSCC (粒内型応力腐食割れ) の面積の比を求め、これらの百分率を IGSCC 破面率あるいは TGSCC 破面率として表わした。SCC 感受性は主としてこれらの SCC 破面率で評価した。

Fig. 2. U-bend test results for furnace sensitized SUS 304-A in 288°C water with chloride ion and dissolved oxygen at various concentrations.

Note: * Test in 250°C water

3. 実験結果と考察

3.1 U ベンド法による検討

3.1.1 Cl⁻ による加速

まず 鋭敏化 SUS 304 に IGSCC が生じる水質その他の加速条件について調べた。後述するように、酸素飽和純水中では 2,000 h 後も割れが生じなかったため、実験室的な加速方法として Cl⁻ 含有水を採用し、その濃度や溶存酸素濃度を変えて^{10)~12)}実験した。

図 2 は、内容量 1~5 l の 304 鋼製静水型オートクレーブを用いて、シングルUベンド法で試験した結果を示す。この実験では鋭敏化処理で生じた酸化皮膜を研磨除去した試片を、各条件 4~5 箇所ずつ用いたが、割れ発生率は 100% かゼロのいずれかであった。Cl⁻ 無添加 (Cl⁻ <0.05 ppm) 酸素ガス飽和条件 (O₂ 濃度 40 ppm) については、288°C だけでなく、SCC がより生じ易い温度である^{9),13)} 250°C でも 2,000 h まで試験したが、いずれの場合にも試片の外観観察及び断面顕微鏡観察で割れは認められなかった。Cl⁻ を添加した大気圧空気飽和条件では、Cl⁻ 濃度が高いほど短時間で割れる傾向にあり、Cl⁻ 300 ppm では 288°C まで昇温後直ちに温度を下げた試験でも割れが生じた。また、O₂ 濃度が低いと割れにくくなる傾向がみられ、Cl⁻ 300 ppm, O₂ 0.4 ppm では 300 h で割れたが、O₂ <0.05 ppm (アルゴンガス飽和) では 2,000 h まで割れなかった。これらの試験で生じた割れは図 3 に示すように主に粒界割れであり、強く鋭敏化された材料では Cl⁻ がかなり高濃度でも粒界割れになる¹⁴⁾ことが確かめられた。Cl⁻ および O₂ 濃度が高いほど割れやすい傾向は、一般にいわれていることと一致している。しかしながら、O₂ 濃度が 8 ppm では Cl⁻ が 0.1¹¹⁾あるいは 1 ppm¹⁰⁾で割れるという報告があるが、本実験では Cl⁻ 3 ppm で割れていない。割れ発生の Cl⁻, O₂ 限界濃度は、杉本ら¹²⁾が負荷応力 20 kg/mm² のベントビーム法で鋭敏化 304 (0.07C) に

Fig. 3. Intergranular crack on the outer surface of a furnace sensitized SUS 304-A U-bend specimen after 300 hours tested in water containing 300 ppm Cl⁻ and 0.4 ppm O₂ at 288°C.

ついて求めた結果によく一致している。

3.1.2 酸化皮膜またはすきまによる加速

前項の実験では、鋭敏化処理で生じた干渉色の酸化皮膜を除いた試験片を用いたが、このような皮膜⁹⁾や構造的なすきまは SCC を促進するといわれているので、これらについて若干の試験を行った。

表 2 は、鋭敏化処理による皮膜を残存させた試片およびダブルUベンド試片について試験した結果を示す。皮膜付与シングルUベンド試片は、Cl⁻ 含有水中で除去試片の 1/20 の時間で割れが生じた。ダブルUベンド試片は、酸素飽和純水中で 200 h では割れが生じていなかったが、700 h 後には内側試片の外表面から生じた割れが試片板厚を貫通していた。これらの割れはいずれも粒界割れで、高温酸化皮膜の付与や構造的すきまは IGSCC を加速することが確かめられた。

3.1.3 加速 U ベンド法による感受性比較

これまでの結果から、鋭敏化 304 の U ベンド試片に IGSCC を生じやすくするためには、Cl⁻ の添加、酸化皮膜の付与、すきまの形成などにより加速する必要があることがわかった。本項では、このうち前二者を加速方法に採用した感受性比較試験の結果を述べる。

内容量 10 l の静水型オートクレーブを用いて、Cl⁻ 濃度 10 および 3 ppm, 288°C, 空気飽和水中で、各鋼種 5 箇の試片を同時に試験した結果を表 3 に示す。表には、各試験時間における割れ発生率と、断面の顕微鏡観察による主な割れ形態を示してある。SUS 304 は Cl⁻ 3 ppm の条件で、鋼中炭素量の少ない Heat C の方が割れ発生率が低い。SUS 304 に比べて 304L や 321, 347 の割れ発生率は低く、また 304 は主に IG 割れであるのに対して 304L-B や 321, 347 は TG (粒内) 割れなので、これらの鋼の IGSCC 感受性は 304 よりも低い。つぎに、SUS 316 の割れ発生率は、炭素量が若干少ない

Table 2. U-bend test results for furnace sensitized SUS 304-A in 288°C water under tarnished or creviced conditions.

Test conditions				Results
Specimen type	Surface finish	Concentration(ppm)		
		Cl ⁻	O ₂	
Single U-bend	Abraded	3	8	No cracks after 2000 hrs
	Tarnished (wear oxide film)*			Cracks after 100 hrs
Single U-bend	Abraded	<0.05	40	No cracks after 2000 hrs
Double U-bend				Cracks after 700 hrs

Note: * Oxide film was formed during furnace sensitization

Table 3. U-bend test results for various stainless steels under furnace sensitized condition in air saturated 288°C water containing chloride.

		Cracking ratios (%)*				Types of cracks**	
		Cl ⁻ 10ppm	Cl ⁻ 3ppm			Cl ⁻ 10ppm	Cl ⁻ 3ppm
Exposure time		100 h	250 h	500 h	1000 h		
SUS 304 - A	100	100				IG	IG
SUS 304 - C	100	40	60	100		IG	IG
SUS 304L - A	80	20	20	20		TG	TG + IG
SUS 304L - B	80	0	0	0		TG	
SUS 316	80	20	40	60		IG	IG
SUS 321 - A	60	20	20	60		TG	TG
SUS 347 - A	20	0	0	0		TG	
SUS 347 - B	20	0	0	0		TG	

Note : * Cracking ratio : the ratio of number of cracked specimens to number of tested specimens(5 pieces)

** IG : Intergranular , TG : Transgranular

Fig. 4. Uniaxial constant load test results for various stainless steels under furnace sensitized condition in oxygen saturated 250°C pure water stressed at 2.5 Sm (maximum allowable design stress).

304-C よりも低いので、316 の IGSCC 感受性は 304 よりも低いといえる。ステンレス鋼の IGSCC に関連して、硫酸・硫酸銅腐食試験（ストラウス試験）や電気化学的再活性化法で鋼の鋭敏化度を定量的に評価する研究が行われており^{9),7),15)}、これらの研究結果によれば、本報で採用した鋭敏化処理温度 620°C では、SUS 304L^{7),15)} や 316^{9),15)}、347¹⁵⁾ は鋭敏化され難いことが示されている。鋭敏化され難い鋼種は、上述の SCC 試験で IGSCC 感受性が低く、IGSCC 感受性と鋭敏化は密接に関連している。

3.2 単軸引張法による検討

図 4 は、いくつかの鋼種の鋭敏化処理試片について、単軸引張法で最長 2,000 h まで試験した結果を示す。試験条件は Cl⁻ 無添加 (Cl⁻ < 0.05 ppm) 大気圧酸素飽和

純水、250°C で、負荷応力は許容応力値の 2.5 倍である。SUS 304 は平均 98 h で IGSCC により破断したが、他の鋼種は破断しなかった。3.1.3. の加速 U ベンド法や 3.3 の CERT 法では、SUS 316 が若干の IGSCC 感受性を有するという結果が得られるが、この単軸引張法では SUS 316 の感受性は検出されなかった。

本報の結果では、上述の単軸引張法だけでなく加速 U ベンド法や CERT 法でも、IGSCC 感受性は SUS 304 よりも 304L および 316 が低いという結果になっている。単軸引張法による国谷ら¹⁶⁾、Wilde ら³⁾ の結果でも 304L の感受性は低いことが示されている。しかしながら、これらと異なる結果も見られ、主に単軸引張法で検討した Clarke ら⁴⁾ の結果では 304 と 304L は差が無く、Berry ら⁹⁾ の実験では最短破断時間が 304 よりも 316 の方がやや短いという結果になっている。これには、Heat のばらつきによるほかに、試片を酸洗し空気中で鋭敏化処理していること等の試片調製法の差も関与していると思われる。

3.3 定速引張法による検討

表 4 は、固溶化処理および鋭敏化処理試片それぞれについて、大気圧酸素飽和純水、288°C、見かけの歪速度 $\dot{\epsilon} = 4.16 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ の条件で試験した結果を示す。CERT における SCC 感受性の表示法はいくつかあるが¹⁷⁾、本報では IGSCC 破面率を第 1 順位の評価値とし、この値が同じ場合には最大応力伸び ($\epsilon_{\sigma \text{ max}}$) や破断時間 (t_f) の値で評価する。

まず、鋭敏化試片の結果から各鋼種の IGSCC 感受

Table 4. CERT results for various stainless steels in oxygen saturated 288°C pure water under a strain rate of $4.16 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$.

Solution heat treated*condition				Furnace sensitized**condition			
	$\epsilon_{\sigma \max}^{***}$ (%)	t_f^{****} (hr)	Fracture mode & SCC ratio*****	$\epsilon_{\sigma \max}^{***}$ (%)	t_f^{****} (hr)	Fracture mode & SCC ratio*****	
SUS 304 - A	45	32	Ductile & 15% TGSCC	11	9	100% IGSCC	
- B	49	35	Ductile & 10% TGSCC	11	10	100% IGSCC	
- C	41	30	Ductile & 23% TGSCC	15	14	100% IGSCC	
SUS 304L - A	49	35	Ductile	26	19	80% IGSCC & Ductile	
- B	40	31	Ductile & 2% TGSCC	42	31	Ductile & 3% TGSCC	
				44	34	Ductile	
SUS 316	53	38	Ductile	54	37	Ductile & 15% IGSCC	
SUS 316L	48	36	Ductile & 1% TGSCC	50	36	Ductile & 2% TGSCC	
				47	36	Ductile	
SUS 321 - A	34	25	Ductile & 2% TGSCC	28	23	Ductile & 1% TGSCC	
- B	41	31	Ductile	31	24	Ductile & 2% TGSCC	
	37	28	Ductile				
SUS 347 - A	29	22	Ductile	27	21	Ductile	
- B	30	22	Ductile	34	25	Ductile	

Note : * 1050°C, 30min.. ** 620°C, 24hr. *** Elongation at maximum stress.
**** Failure time. ***** Ratio of SCC to fractured surface area.

Fig. 5. Scanning electron micrograph of intergranular crack in constant extension rate test specimen (Furnace sensitized SUS 304-A, 288°C oxygen saturated pure water, $\epsilon=4.16 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$).

Fig. 6. Scanning electron micrograph of transgranular crack in constant extension rate test specimen (Furnace sensitized SUS 304L-B, 288°C oxygen saturated pure water, $\epsilon=4.16 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$).

性を比較する。表 4 に示されているように、304 は IGSCC 破面率が 100% なので、感受性は最も高い。図 5 は IGSCC 破面の SEM 写真の例を示す。炭素量が 0.06% の 304-C は、0.07% の 304-A および B よりも $\epsilon_{\sigma \max}$ や t_f がやや大きいので、IGSCC 感受性は 0.06% C の方が低いと見ることができる。0.028% C の 304L-A は IGSCC 破面率が 80% なので、304-C よりも IGSCC 感受性が低く、0.020% C の 304L-B は感受性を示さない。炭素量が 304-A と同じ 316 の IGSCC 破面率は 15% で、304 に比べてかなり小さく、これは鋼中のモリブデンが鋭敏化を抑制する作用を有すること^{9), 13)}の表われとみることができる。SUS 316L は 321 や 347 と同じように IGSCC 感受性を示さない。

この CERT 試験では、表 4 に示されているように、IGSCC 感受性を示さない固溶化処理 304 や 304L-B などの固溶化処理及び鋭敏化処理試片の破断面に、図 6 に

示したような TGSCC¹⁸⁾ が現われる場合がある。SUS 321 および 347 については固溶化処理後安定化処理を施した試片についても試験したが、固溶化処理や鋭敏化処理試片と同様の結果であった。このような TGSCC は、動的な歪の付与や歪量 (いずれの試片も $\epsilon_{\sigma \max}$ がかなり大きい) あるいは酸素濃度などが極めて苛酷な条件になっているために生じたものと考えられる (3.4 項)。したがって、BWR プラントの SUS 304 配管の SCC が溶接部近傍の IGSCC であるという観点からは、試片破断面に若干の TGSCC が現われた本実験結果を問題視する必要はない。むしろ、SUS 304L や 316L, 347 などは、固溶化・鋭敏化いずれの熱処理条件でも、その TGSCC 感受性 (TGSCC 破面率) が固溶化処理 304 よりも低いという結果になっているので、これらの材料は極めて苛酷な条件下でも安定な材料であることを示唆しているとみるべきであろう。

また、表4の結果で TGSCC 破面率が 3% 以下の試片の $\epsilon_{\sigma \max}$ 及び t_f を比較すると、これらの値は 304L-B や 316L に比べて 321 はおおむね小さく、347 は更に小さな値となっている。このような時間の差は CERT 法における問題点のひとつであろう。

3.4 各種 SCC 試験法の比較

まず、IGSCC 感受性の序列を、TG 割れを無視して求めると次のようになる。ここでは、感受性が大きいと判断した順序に不等記号で配列する。 Cl^- 3 ppm, 1,000 h 後の割れ発生率で求めた加速 U ベンド法による序列は 304-A > 304-C > 316 > 304L-A > 304L-B, 321-A, 347-A, 347-B である。ただし 304-A と 304-C の差は 250 h 後の割れ発生率で判断した。単軸引張法では 304-C > 316, 304L-B, 321-A, 347-B で、304 とこれ以外の鋼種とで差があることが認められただけである。主として IGSCC 破面率で評価した CERT 法による序列は 304-A, 304-B > 304-C > 304L-A > 316 > 304L-B, 316L, 321-A, 321-B, 347-A, 347-B である。304 は炭素量の少ない方が IGSCC 感受性が低いこと、および低炭素鋼やモリブデン添加鋼、安定化鋼の感受性が 304 よりも低いことはいずれの結果も同じである。しかしながら、鋼種間序列を詳細に求め得た加速 U ベンド法と CERT 法では 316 と 304L-A の順位が逆になっている。これには割れ評価法の違いや Cl^- の有無が関与していると思われるが、今後更に検討したい。次に、単軸引張法と CERT 法を比較すると、単軸引張法では検出されなかった SUS 316 の IGSCC 感受性が、CERT 法では検出されているので、CERT の方が感度が高いといえる。検出感度の差は加速性の違いで生じたと考えられるので、同一材質、水質条件で IG 破断した場合の応力や破断時間を比較検討する。図 7 は、酸素飽和 288°C 水中における鋭敏化 304-A の CERT (表 4) と単軸引張法⁹⁾の応力の時間変化を示す。CERT は最大応力値が単軸引張法の負荷応力よりも低いのに、約 2 桁短い時間で破断してお

Fig. 7. Stress-time curves in constant extension rate test (CERT) and uniaxial constant load test (UCLT) for furnace sensitized SUS 304-A in oxygen saturated pure water.

り、動的な歪を与える CERT は IGSCC を極めて加速していることがわかる²¹⁾。動的歪はすべりステップの生成²²⁾や表面皮膜の破壊²³⁾を促がすために、IGSCC や TGSCC を加速したと考えられる。

4. 結 論

高温水中における数種類のオーステナイト・ステンレス鋼の IGSCC 感受性を調べるために、強鋭敏化処理を施した試片を用いて、U ベンド法、単軸引張法および定速引張法 (CERT) で検討した結果、次のことがわかった。

(1) Cl^- 3 ppm 空気飽和条件の加速 U ベンド法による IGSCC 感受性序列は酸素飽和純水中の CERT 結果とかなりよく一致するが、304L (0.028% C) と 316 (0.06% C) の順位は逆転していた。

(2) 酸素飽和純水中の単軸引張法による 2,000 h までの試験では、SUS 304 よりも SUS 316, 304L, 321 および 347 の IGSCC 感受性は低いことが認められたが、304 以外の鋼の感受性の差は検出されなかった。

(3) 酸素飽和純水中の CERT 試験で、破面率および最大応力伸びで評価した IGSCC 感受性の序列は 304 (0.07% C) > 304 (0.06% C) > 304L (0.028% C) > 316 (0.06% C) の順に低くなり、0.020% C の 304L, 0.023% C の 316L, 0.04 あるいは 0.06% C の 321 および 347 は感受性を示さなかった。

(4) CERT 法は 3 方法の中で IGSCC 感受性を最も敏感に検出するので、IGSCC 感受性を実験的に比較検討する手法として有用である。

以上の結果は、BWR 配管の SCC を防止する方法として低炭素ステンレス鋼やモリブデン添加低炭素ステンレス鋼あるいは安定化ステンレス鋼の採用は極めて有望であることを示唆している。耐 IGSCC 性の観点からの炭素量の限界については、実際の溶接による鋭敏化を考慮した検討が必要であり、SUS 321 および 347 に対するナイフラインアタックの問題を含めて、今後の課題である。さらに、実機の代替材決定には、鋼管の製造性、機械的性質、溶接性および溶接割れなど、幅広い視点からの研究が必要で、これらに関する研究成果が報告されつつある²⁴⁾。

終りに、種々のご指導を頂いた (株) 日立製作所日立工場三木 実副技師長、伊藤久雄主任技師、ならびに U ベンド試験片の応力測定を担当された日立製作所機械研究所 (故) 長尾真人研究員に深く感謝致します。

(Received November 16, 1979)

文 献

- 1) 三木 実, 浜田邦雄, 伊藤久雄, 佐々木良一, 北村一郎: 日立評論 **60**, 93 (1978).
- 2) C. F. Cheng: *J. Nucl. Mater.*, **57**, 11 (1975).
- 3) B. E. Wilde, J. E. Weber: *Br. Corros. J.*, **4**, 42 (1969).
- 4) W. L. Clarke, G. M. Gordon: *Corrosion*, **29**, 1 (1973).
- 5) W. E. Berry, E. L. White, W. K. Boyd: *Corrosion*, **29**, 451 (1973).
- 6) M. Akashi, T. Kawamoto: *Boshoku Gijutsu*, **27**, 165 (1978).
- 7) 梅村文夫, 川本輝明: 防食技術, **28**, 24 (1979).
- 8) 腐食防食協会, ステンレス鋼の高温水中の応力腐食割れ分科会: 防食技術, **27**, 671 (1978).
- 9) 大中紀之, 庄司三郎, 丹野和夫: 腐食防食協会 '77 春期学術講演大会予稿集, p. 68 (1977).
- 10) W. L. Williams: *Corrosion*, **13**, 539t (1957).
- 11) V. V. Gerasimov, A. I. Gromova, E. T. Shapovalov: AEC-tr-5219, p. 146 (1962).
- 12) 杉本一六, 前川立夫, 香川 優: 防蝕技術, **14**, 155 (1965).
- 13) 石原只雄, 松島志延, 大橋重雄, 清水義彦: 日本金属学会誌, **41**, 596 (1977).
- 14) L. R. Scharfstein, W. F. Brindley: *Corrosion*, **14**, 588t (1958).
- 15) 深井 昌, 森 康彦, 浦山義直, 服部成雄, 佐々木良一, 伊藤久雄: 腐食防食協会 '79 春期学術講演大会予稿集, p. 13 (1979).
- 16) 国谷治郎, 正岡 功, 佐々木良一, 中川雄策, 成瀬明輔: 防食技術, **27**, 393 (1978).
- 17) 高野道典: 腐食防食協会第 25 回腐食防食討論会予稿集, p. 130 (1978).
- 18) D. A. Vermilyea: *J. Electrochem. Soc.*, **121**, 1190 (1974).
- 19) A. E. Pickett, R. G. Sim: *Mater. Prot. Perform.*, **12**, 39 (June 1973).
- 20) カリティ (松村 訳): X線回折要論 (昭 38).
- 21) 菱田 護, 川久保 隆: 腐食防食協会 '79 春期学術講演大会予稿集, p. 25 (1979).
- 22) 高野道典: 日本金属学会会報, **18**, 566 (1979).
- 23) 阿部征三郎: 日本金属学会会報, **16**, 15 (1977).
- 24) 小林 徹, 伊藤久雄, 服部和治, 糸 亮一, ほか: 日本鉄鋼協会第 98 回講演大会要旨集, p. 531~33 (1979).