

# 討27

## 窒素含有ステンレス鋼の耐SCC性および高温強度

住友金属工業㈱ 中央技術研究所 ○ 横木義淳 柘植宏之  
三浦 実 吉川州彦  
寺西洋志

### I 緒言

沸騰水冷却型原子炉 (BWR) の再循環系に使用されるステンレス鋼配管材の溶接 HAZ 部に生ずる粒界応力腐食割れに対する材料面からの対策として鋭敏化防止のために鋼中炭素量の低減あるいは炭素を安定化する元素の添加などの方法を単独あるいは組合せて用いる方法がある。

一方鋼中炭素量の低減は引張強さ、耐力の低下を招き所要の規格強度を満足しがたくなり窒素の添加により強度低下を償う必要がある。このように粒界応力腐食割れ性と引張強さのバランスを考慮して開発されたステンレス鋼が低炭素-含窒素 304, 316, 347 ステンレス鋼である (Fig. 1)。

本報ではこれらのステンレス鋼の耐応力腐食割れ性、引張性質組織、溶接性についての検討結果を報告する。さらにこれらの N 添加鋼がクリープ領域の高温でも適用しうるかを上記 18-8 系および耐食性にすぐれた 25Cr 系オーステナイト鋼につき検討し、適用の可能性があることを見出した。

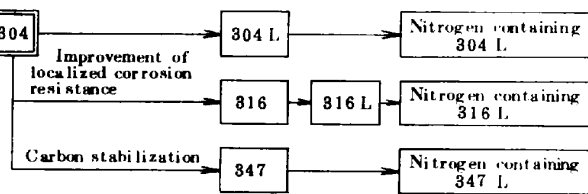


Fig. 1. Improvement of materials used for BWR piping

### II 低炭素-含窒素ステンレス鋼の諸性質

#### 1. 耐粒界応力腐食割れ性

低炭素-含窒素 316 ステンレス鋼および 347 ステンレス鋼の耐粒界応力腐食割れ性におよぼす C, N 量の影響を Fig. 2, 3 に示す。いずれも C 量が 0.02% 以下では鋭敏化を行なっても  $Cr_{23}C_6$  が析出せず耐 SCC 性が良好である。N 量は

0.13~0.15% 程度まで含有しても  $Cr_2(C, N)$  の粒界への析出は生じず耐 SCC 性への悪影響は認められない。C, N が共存する場合、耐 SCC 性からは Fig. 2, 3 の C, N 境界線の内側に C, N を制限する必要がある。さらに 347 ステンレス鋼では強鋭敏化での耐 SCC 性を考慮すれば N 量は 0.1% 以下におさえ、かつ  $Nb/C+N$  を 2.3

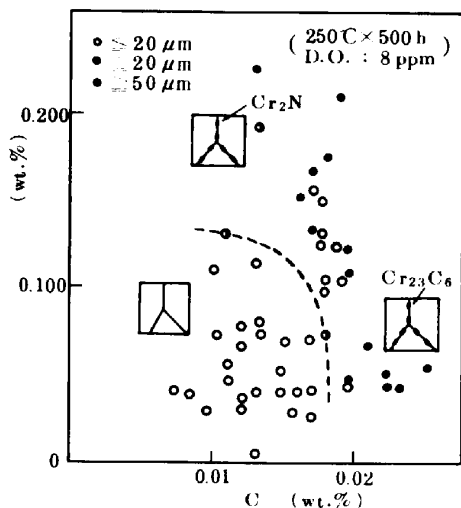


Fig. 2. Effects of C and N contents on SCC for 316 stainless steel sensitized at 700°C for 30h (Double U-bend)

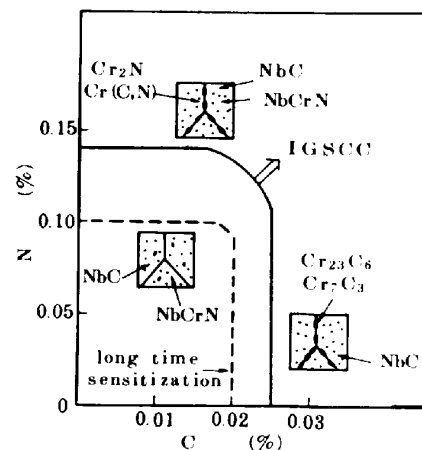


Fig. 3. Effects of C and N contents on SCC for 347 stainless steel sensitized at 700°C for 24h (Nb=0.3%)

以上とすることが望ましい。

P, S などの不純物元素はいずれ

の鋼種でも P: 0.002~0.05%, S: 0.001~0.05% の範囲では耐 SCC 性には影響が認められず通常の電気炉溶製材において存在する P, S レベルでは殆んど問題がないと考えられる。

#### 2. 引張性質および組織変化

316 および 347 ステンレス鋼で低 C 化による強度低下を N 添加で償う狙いは N の固溶強化を利用しようとするものである。そこでまず溶体化状態での組織観察を行い、固溶 N の挙動を調査した結果、316 鋼では N レベルが 0.2% まで完全固溶していることが確認された。これに対して Nb を添加した

347鋼ではNおよびNb量により溶体化状態でのNの固溶状況がかなり異なり、Fig. 4に示すように0.3% Nb添加の場合Nレベルが0.05%以下では未固溶析出物はNbC, NbNのみであるのに対し、Nレベルが0.075%をこえるとNbCrN窒化物が明らかに残存し、N量増加に伴い、その量が増加する結果が得られた。また、Fig. 5はトータルNと未固溶窒化物として残存しているN量との割合をNb量に対して整理したものであるが、これより、例えば0.3% Nb-0.1% N鋼では溶体化状態での固溶N量が0.08%程度であることおよびNb量の増加に伴い固溶N量が少なくなることがわかる。一方、引張性質については室温および300℃で検討を行い、目標強度に対して最も問題になるのは300℃での引張強さであることを明らかにした。下式は300℃での引張強さの多重回帰式を示したものであるが両鋼ともC, N量の増加および結晶粒の微細化が大きく寄与している。また347鋼でNbが負の効果となっているが、これは上述したように固溶N量が低減することに起因するものである。

○ 316 : T.S (kgf/mm<sup>2</sup>) = 108.9 (C%) + 82.1 (N%) + 1.8 Si (%) - 3.5

(Mn%) + 0.5 (Cr%) + 0.4 (Ni%) + 1.3 (Mo%) + 37.8 (d<sup>-1/2</sup>) + 21.9

○ 347 : T.S (kgf/mm<sup>2</sup>) = 138.5 (C%) + 77.4 (N%) + 2.5 Si (%) + 0.2

(Ni%) + (27.1 + 75.3 (N%) - 28.2 (Nb%)) d<sup>-1/2</sup> + 29.0

このように、347鋼では溶体化状態でのN, Nbの固溶状況が異なることが判明したため、0.3% Nb-0.1% Nレベルの材料を用いて時効後の析出挙動を検討した。その結果Fig. 6に示すように時効によりNb(C, N), NbCrNの2種類の析出物が生じ時効時間の増加に伴いNb(C, N)量が減少しNbCrN量が増加する傾向のあることがわかった。Photo 1は700℃×100h時効後の組織を示したものであるが、NbCrNが粒界、粒内に極めて微細に分散析出していることも明らかにした。

8. 溶接性

バレストレインおよびY形拘束割れ試験により316, 347鋼の溶接性に及ぼすN, Nbの影響を調べた結果316鋼ではNの悪影響は0.16%まで見られなかった。一方347鋼ではNbが0.3%以上で拘束割れ試験でビード割れが生ずるが、Ni, Cr量のバランス調整により溶接金属にδフェライトを2%以上含有させることにより割れ



Photo 1. Electron micro-structure (700℃×100h aging)

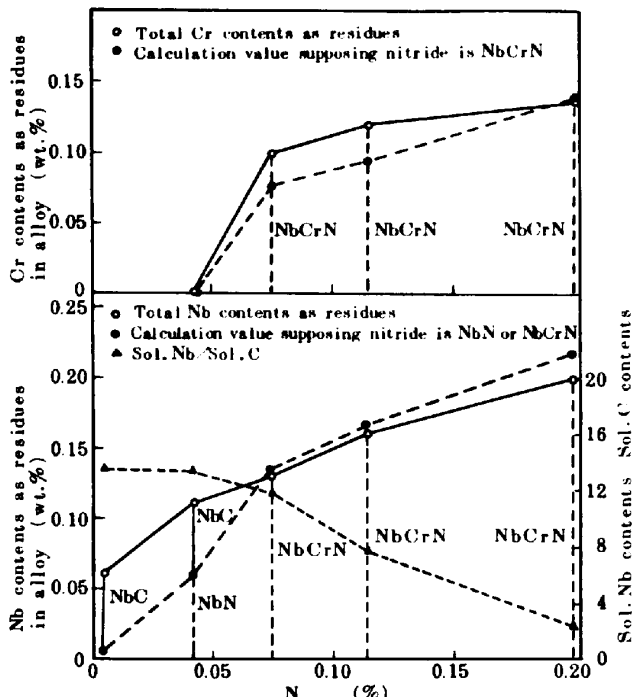


Fig. 4 Effects of N contents on precipitation behavior in solution treated condition at 1050°C (Nb ≈ 0.3%)

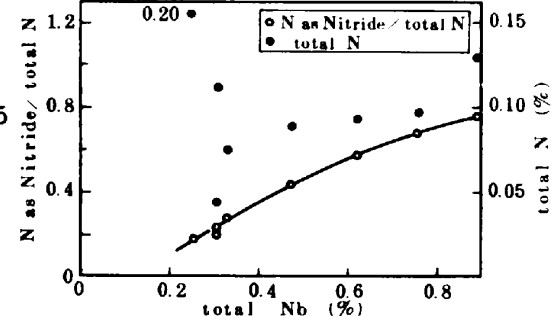


Fig. 5 Effects of Nb contents on the amount of nitride

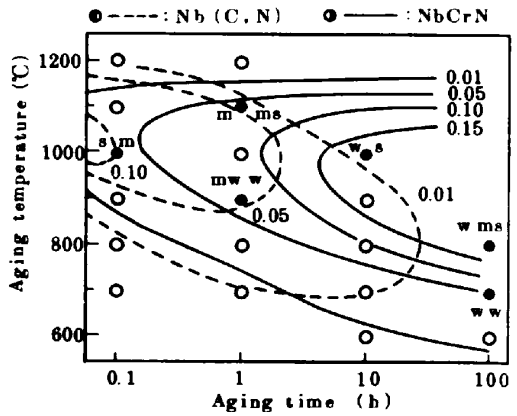


Fig. 6. Precipitation behavior after aging (Solution treatment : 1250℃×20min.W.Q.)

がなくなることを明らかにした。

以上の検討結果に基づき、耐応力腐食割れ性、引張強度、溶接性に優れた成分範囲として Table 1 に定めた。

Table 1. Chemical composition of 316 (LC) and 347 (LC) stainless steel

	(wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	C+N
SUS 316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00 14.00	16.00 18.00	2.00 3.00	-	-
316 (LC)	≤0.02	≤0.75	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00 14.00	16.00 18.00	2.00 3.00	≤0.12	≤0.13
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Nb	
SUS 347	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.0 12.0	17.0 19.0	-	≥10×C	
347 (LC)	≤0.02	0.10 0.50	≤2.00	≤0.020	≤0.010	9.0 12.0	17.5 19.0	≤0.10	0.20 0.50	

### III 低炭素-含窒素ステンレス鋼の高温部材への適用

II 項での検討により 316 鋼では N の固溶強化、347 鋼では N の固溶強化および NbCrN の微細分散析出強化が期待されたため、Table 2, 3 に示す供試材を用いてクリープ領域での高温強度特性を検討した。

#### 1. 316 (LC) ステンレス鋼の高温強度

高温引張性質を Fig. 7 に示すが引張強さ耐力とも ⊗ 許容応力を満足しており、伸び、絞りも十分高い。またクリープ破断特性については Fig. 8 に示すようにボイラ用の SUS 316H と同等以上の強度を有している。またクリープ強度も 316H と同等であることを確認している。以上の結果から

316 (LC) ステンレス鋼は 316H 鋼のクリープ領域での許容応力も満足すると判断される。

Table 2. Chemical composition of 316 (LC) stainless steel (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N <sub>2</sub>
0.011	0.45	1.60	0.025	0.004	17.25	12.60	2.48	0.100

Table 3. Chemical composition of 347 (LC) stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	N
0.009	0.39	1.45	0.012	0.001	18.35	9.9	0.32	0.085

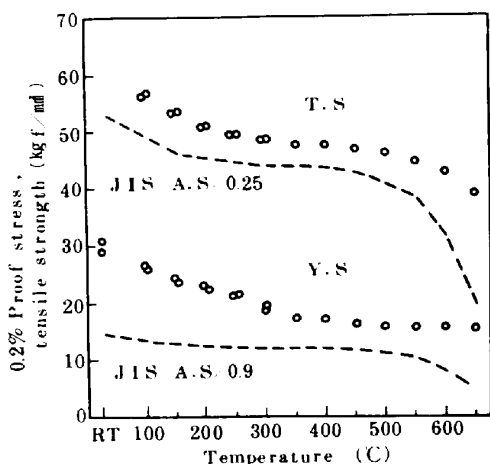


Fig. 7 Results of high temperature tensile test for 316 (LC)

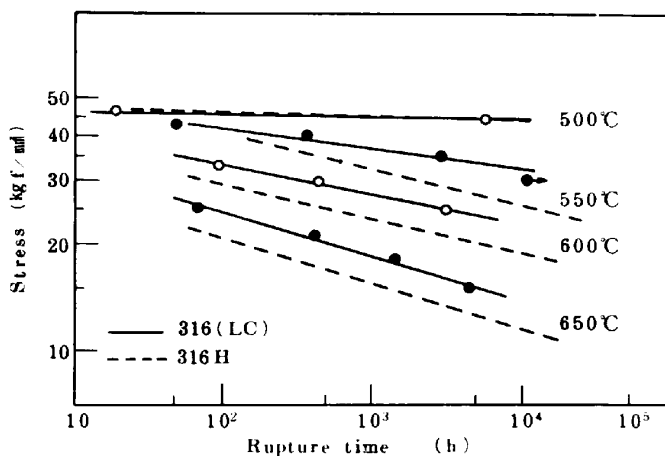


Fig. 8 Creep rupture properties for 316 (LC)

#### 2. 347 (LC) ステンレス鋼の高温強度

高温引張性質は Fig. 9 に示すように 316 (LC) と同様、引張強さ、耐力とも ⊗ SUS 347H の許容応力を満足する。クリープ破断強度も Fig. 10 に示すようにほぼ SUS 347H のバンド内にあり、許容応力を満足すると考えられるが、さらに長時間データにて確認中である。

このように 316 (LC) および 347 (LC) ステンレス鋼とも低 C でありながらクリープ領域でも充分適用できる可能性を見出したが、316 (LC) では主として N による固溶強化効果が寄与しており、347 (LC) では N による固溶強化効果は加えてクリープ中に析出する NbCrN や Nb(C, N) の微細分散析出効果もクリープ破断強度改善に寄与していると判断される。

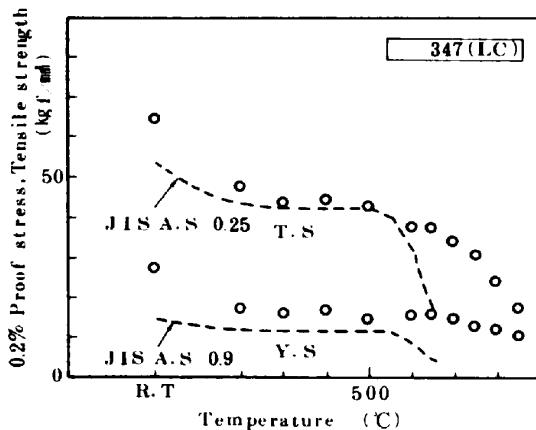


Fig. 9. Results of high temperature tensile test for 347(LC)

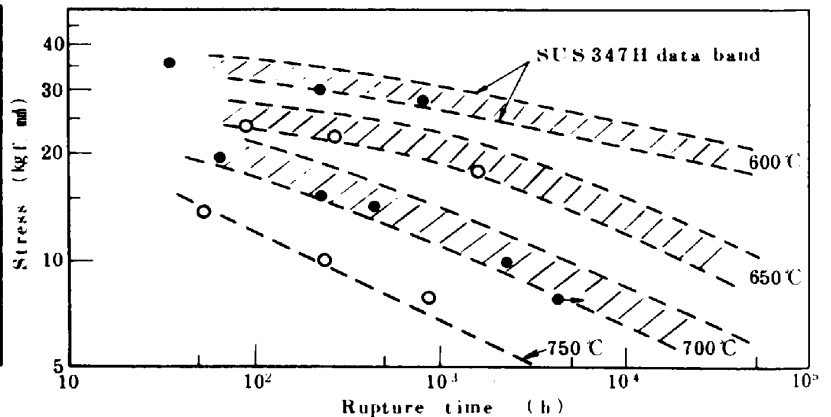


Fig. 10. Creep rupture properties for 347(LC)

IV 含窒素高耐食オーステナイト鋼の高温強度と組織

耐食性は優れるが650~800°Cでの高温強度が18-8系ステンレス鋼よりむしろ低目であつた相析出による靱性劣化の問題があるSUS310鋼(25Cr-20Ni)の高温強度および組織安定性の改善を目的としてⅢ項で得られたNおよびNbの効果を検討した。供試材はTable 4に示すようにNiレベルをA鋼では25%, B, C鋼では16.5%とした。クリープ破断特性についてはFig. 11から明らかなようにN添加のB, C鋼ではN無添加のA鋼に比較して極めて高い強度レベルを示している。N添加鋼での強度上昇はNの固溶強化によるものであり、C鋼ではさらにNbCrNの微細分散析出強化も寄与しており、NbCrNの成長は比較的遅く安定であることが、時効およびクリープ破断試験後の組織観察により推測された(Photo 2)。

Table 4. Chemical compositions of materials tested

		(wt%)					
		C	Cr	Ni	N	Nb	B
A	Low N	0.053	24.8	25.3	0.030	—	0.0062
B	High N	0.050	24.7	16.2	0.202	—	0.0043
C	High N-Nb	0.059	24.4	16.6	0.173	0.44	0.0033

また、N添加鋼の組織安定性はN無添加のA鋼に比較してNi量が少いにもかかわらず安定であることがわかった。



Photo 2. Electron microstructure after creep rupture test

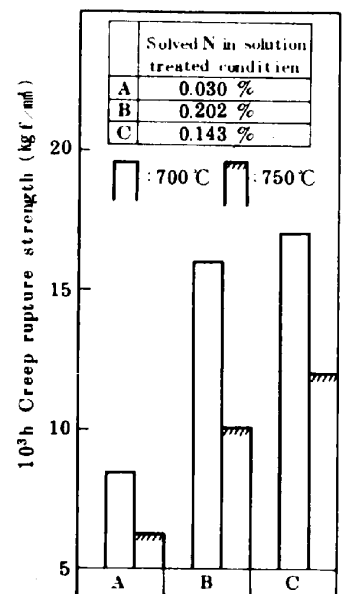


Fig. 11. Creep rupture strength at 700°C and 750°C

V まとめ

- (1) 耐SCC性にすぐれた低炭素-含窒素ステンレス鋼(316(LC), 347(LC))を開発した。
- (2) これらの鋼の高温強度は316H, 347H鋼と同等であり高温部材としても適用可能であると考えられる。
- (3) 高温強度が高い理由は主として窒素による固溶強化に起因し、347(LC)ではさらに微細NbCrN強化も寄与している。
- (4) N, Nbの固溶強化と析出強化を活用し高温強度が高く、組織の安定なSUS310相当の高耐食オーステナイト鋼が得られた。