

耐応力腐食割れ性にすぐれたオーステナイト ステンレス鋼 (R 304 Cu)^{*1}

川崎製鉄技報
16 (1982) 2, 116-122

曽根 雄二^{*2} 倉橋 速生^{*3} 和田 佳代子^{*4} 中井 揚一^{*5}

Copper Bearing Austenitic Stainless Steel, R 304 Cu, Resistant to Stress Corrosion Cracking

Yuji Sone, Hayao Kurahashi, Kayoko Wada, Yoichi Nakai

要旨

貯湯槽等温水環境での耐塩化物応力腐食割れ性改善には Cu 添加が有効という知見により R 304 Cu 鋼を開発した。その研究 5t 真空溶製材について、製造工程、耐食性、耐応力腐食割れ性及び溶接性に及ぼす Cu の効果を調べた。さらに、内容積が 1.65 m³ の R 304 Cu 製貯湯槽を製作し実用に供した。以上の結果、① Cu の塩化物応力腐食割れ抑制作用は、塩化物濃度・温度・負荷応力が低い程顕著になる、② R 304 Cu 合金溶接継手の耐応力腐食割れ性は母材部のそれと同等である、③ R 304 Cu 製貯湯槽は設置後 1.5 年経過したが、内面には割れは全くなく孔食も認められず内面状況は良好であることが判明した。よって R 304 Cu は従来 304 鋼製温水機器で応力腐食割れが生ずるものの代替材として使用できる。

Synopsis:

Copper bearing 304 stainless steel (R 304 Cu) is developed on the basis of the fact that Cu was effective in preventing chloride stress corrosion cracking (SCC) in the environment of hot city water. The effects of Cu addition on the production process, SCC susceptibility and weldability are investigated by using R 304 Cu steel made in a 5-ton vacuum furnace and then a hot reservoir of R 304 Cu steel is produced and put to practical use.

The results are as follows: ① the effect of Cu on SCC depression is predominant below 100°C under lower stresses and lower chloride concentration environments, ② the SCC susceptibility of a weld joint is equivalent to that of base metal, and ③ though it is already 1.5 years since the reservoir was built, there is no cracking or pitting inside it.

Consequently, R 304 Cu steel can be used as an alternative to Type 304 steel which causes SCC in a chloride environment.

1 はじめに

304 鋼で代表されるオーステナイト系ステンレス鋼は、塩化物イオン (Cl⁻) が存在する環境では応力腐食割れ (SCC-Stress Corrosion Cracking) を起こすため、その使用範囲が制限されているのが現状である。この欠点を克服するため数多くの研究がなされてきたが、そのために用いられた促進環境は主として高濃度塩化物溶液であった。これらの試験結果において、例えば Si の場合、沸騰 42% 塩化マグネシウム溶液中では耐応力腐食割れ性改善に有効である¹⁾が、低濃度塩化物環境 (海水の NaCl 濃度である 3.5%, すなわち 21 000 ppm 以下) では効果がない²⁾というように、合金添加元素の耐応力腐食割れ性改善効果は試験環境によって不一致が存在する。したがって、この問題を解決するためには、より現実に近い低濃度塩化物環境で応力腐食割れ試験を行う必要がある。しかし、このような観点から、低濃度塩化物環境で応力腐食割れ挙動や合金添加元素の効果を調べた例は少ない。

そこで、筆者らはすきま構造と残留応力を兼ね備えたスポット溶接試験片を用いて気液界面浸漬試験を行った結果、100°C 以下の低濃度塩化物環境で材料の耐応力腐食割れ性を再現性良く調べ得ることを明らかにした³⁾。また、Cu の添加が 304 ステンレス鋼の応力

腐食割れを著しく抑制することを明らかにした。

従来から温水環境で用いられる貯湯槽や湯わかし器等の器具材料用ステンレス鋼は SUS 304 鋼が主であったが、SUS 304 鋼にはしばしば応力腐食割れが発生した。このため SUS 304 鋼をこのような環境で使用することは不適であるとされ、現在では応力腐食割れ感受性が SUS 304 鋼に比較して著しく低い極低炭素高純度フェライト系ステンレス鋼 (代表的な鋼種として 18 Cr-2 Mo の SUS 444 がある) が使用されるようになってきた⁴⁾。応力腐食割れや孔食、すきま腐食等の局部腐食に顕著な耐食性を発揮するこのフェライト系ステンレス鋼も、オーステナイト系ステンレス鋼に比し溶接性及び加工性に劣るという欠点を有している⁵⁾。したがって、耐応力腐食割れ性にすぐれたオーステナイト系ステンレス鋼に対する要求には根強いものがある。

そこで、Cu が耐応力腐食割れ性を改善するという知見を基に Cu 添加 304 鋼 (Riverlite 304 Cu) の試作を行った。本報告では 5t 真空溶製した R 304 鋼の製造上の問題、耐食性、溶接性を調べ、さらにこの材料を用いて製作した貯湯槽について述べる。

2 製造工程及び機械的性質

5t 真空炉で溶製後 5.5 mm の熱延板、1.5 mm の冷延板を製造

*1 昭和59年3月2日原稿受付

*2 技術研究所第3研究部腐食防食研究室主任研究員 (掛長)・工博

*3 技術研究所第3研究部腐食防食研究室主任研究員 (課長)

*4 技術研究所第3研究部腐食防食研究室

*5 技術研究所第3研究部腐食防食研究室室長 (課長)

Table 1 Chemical composition of steels (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
304 Cu	0.031	0.48	1.61	0.027	0.005	18.0	9.0	1.75	0.019
304	0.050	0.57	1.50	0.030	0.004	18.4	9.1	0.11	0.021

Table 2 Mechanical properties of steels

	0.2% Proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
304 Cu (1.5 mm t)	22	56	56	123
304 (1.5 mm t)	27	63	54	156

した。熱延板は後述する貯湯槽の製作に用いた。また、この冷延板より直径 25 mm の TIG 溶接パイプを製造した。これらの製造工程では、Cu の添加により懸念された熱間加工性もほとんど問題なく、大きな歩留り低下に至らず SUS 304 並みに製造できた。

この R 304 Cu 鋼の化学組成を比較材として用いた SUS 304 鋼とともに Table 1 に示す。その板厚が 1.5 mm の場合の機械的性質を Table 2 にまとめて示す。R 304 Cu 鋼の 0.2% 耐力 ($\sigma_{0.2}$) と引張強さ (TS) は、SUS 304 鋼に比較して各々 5 kgf/mm² 及び 7 kgf/mm² 低い値となっている。この差異は C 含有量の違いによるものであり、Cu の強度に及ぼす効果はほとんどなく、伸びも Cu の有無で差はない。

3 耐食性試験

3.1 塩化マグネシウム溶液中応力腐食割れ試験

3.1.1 U 曲げ応力腐食割れ試験

JIS G 5076 に定められた沸騰 42% 塩化マグネシウム溶液を含め濃度・温度の異なる計 9 条件の塩化マグネシウム溶液に U 曲げ試験片 (曲げ半径: 8 mm) を浸漬し、割れの発生時間と割れが試験片の幅方向を完全に横断するまでの時間 (破断時間) を求めた。試験時間は最大 200 時間である。なお、塩化マグネシウムは潮解性が大きく水分を含むため正確な重量測定が困難であることから、その濃度は、沸点と濃度の関係を利用して調整した。

得られた結果を Fig. 1 にまとめて示す。この結果から判明したことは次の通りである。

(1) 42% 塩化マグネシウム溶液の場合

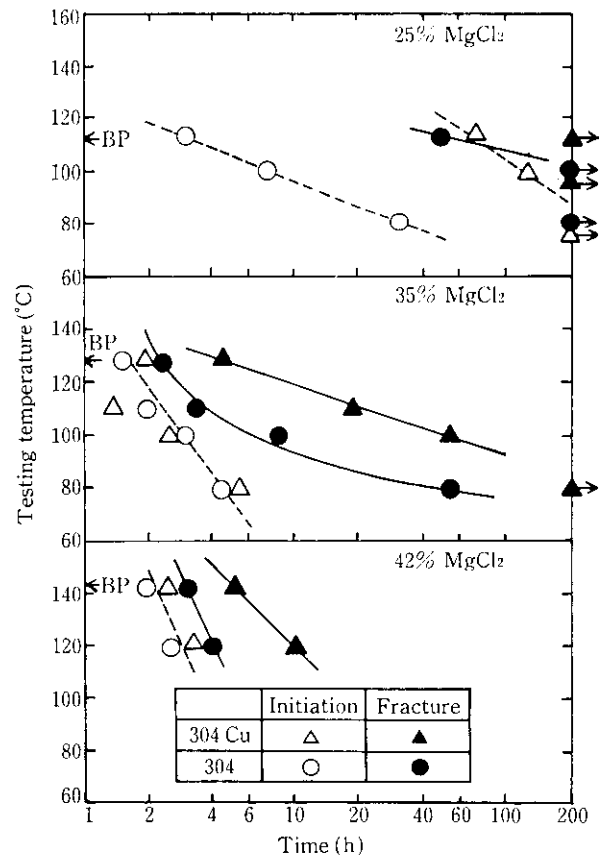
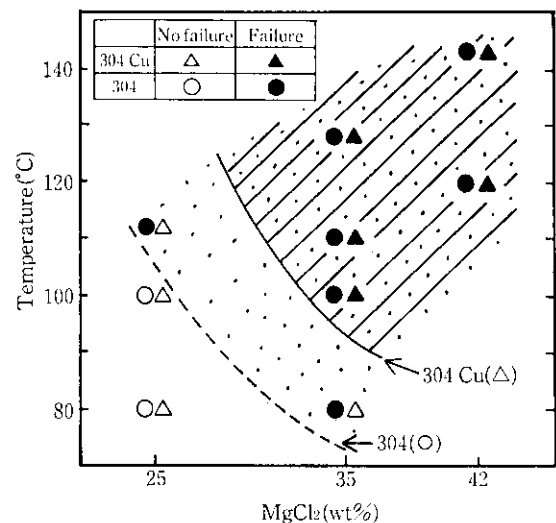
割れ発生時間は、R 304 Cu, SUS 304 鋼とも 2~3 h で差はない。しかし破断時間は、R 304 Cu 鋼の方が長く、試験温度が低くなる程 SUS 304 鋼との破断時間の差は大きくなった。

(2) 35% 塩化マグネシウム溶液の場合

42% 溶液の場合と全く同一の傾向を示すが、SUS 304 鋼との破断時間の差は、試験温度の低下とともに著しく増大する。例えば、100°C では 304 が 10 h, R 304 Cu が 60 h でいずれも破断しているのに対して、80°C では 304 は 60 h で破断しているが、R 304 Cu は 200 h でも破断に至らなかった。

(3) 25% 塩化マグネシウム溶液の場合

35% 及び 42% 溶液の場合と異なり、25% まで濃度が低下すると R 304 Cu 鋼の割れ発生時間が SUS 304 鋼に比べて著しく長くなることがわかった。例えば、80°C での割れ発生時間は 304 が 35 h であるのに対して、R 304 Cu は 200 h でも割れの発生

Fig. 1 Results of SCC tests in MgCl₂ solutions by using U bend methodFig. 2 The map of SCC region in MgCl₂ solutions by using U bend method

は観察されなかった。

以上の結果から、Cu は高濃度塩化物環境では割れ発生に対して効果はなく、割れの伝播速度を遅延させる効果しか認められないが、低濃度塩化物環境になると割れ発生を顕著に抑制することが明らかになった。なお、試験温度と塩化マグネシウム濃度の関係を示す図面に破断の有無を記入したのが、Fig. 2 である。このように整理すると、低濃度・低温側において、SUS 304 鋼に比しかなり広い範

図に R 304 Cu 鋼の SCC 不感受性領域が現れる。このことから Cu の耐応力腐食割れ改善効果は、100°C 以下の温度で低塩化物濃度になるほど効果があるといえる。

3.1.2 定荷重応力腐食割れ試験

先述した U 曲げ試験法は定歪条件であるため負荷応力の影響は検討できなかった。そこで負荷応力の影響を定荷重引張試験により調べた。試験条件は JIS G 0576 ステンレス鋼の 42% 塩化マグネシウム腐食試験方法による。

(1) 試験片形状: 平行部 (1.5 mm $\times$ 6 mm $W \times$ 25 mm L) の板状試験片

(2) 溶液: 沸騰 42% 塩化マグネシウム溶液 (143°C)

負荷応力と破断時間の関係で結果をまとめたものが Fig. 3 である。負荷応力が 14 kgf/mm² (R 304 Cu 鋼の 0.2% 耐力の 64%) 以上では R 304 Cu 鋼の破断時間が SUS 304 鋼のそれより短くなり、Cu 添加による耐応力腐食割れ性の改善は見られなかった。これは従来の高温・高塩化物濃度では Cu の耐応力腐食割れ性改善効果は認められないという知見と一致する。ところが、14 kgf/mm² 以下の低負荷応力下では、R 304 Cu 鋼の破断時間の方が逆に長くなり、下限界応力 (それ以下の応力では応力腐食割れにより破断しない臨界応力) も R 304 Cu 鋼の方が約 5 kgf/mm² 高い。このことは Cu の耐応力腐食割れ改善効果は低負荷応力条件で発揮されることを示している。

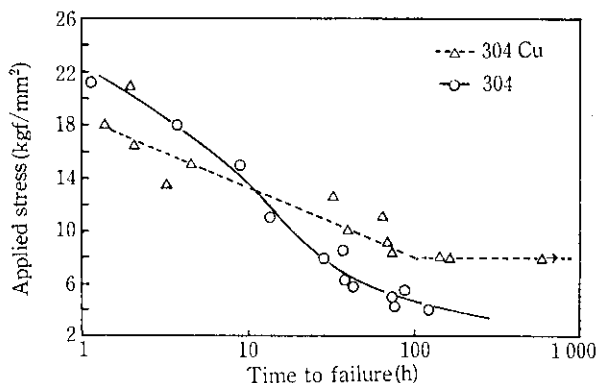


Fig. 3 Results of constant load SCC test in boiling 42% MgCl₂ solution

3.1.3 低歪速度引張試験 (SSRT)

塩化物応力腐食割れの伝播過程に対する Cu の効果を調べるため、沸騰 42% 塩化マグネシウム溶液中で SSRT 試験を行った。用いた試験片形状は定荷重引張試験片と同様である。歪速度は 4×10^{-7} , 4×10^{-6} , 4×10^{-5} , 4×10^{-4} min⁻¹ の 4 条件を用いた。応力腐食割れ感受性を示す指標として、ここでは試験中に観測される最大応力値を用いた。SSRT 試験の最大応力は割れ伝播速度と歪速度の差で決まると考えられ、歪速度が割れ伝播速度より大きい程最大応力は高くなり、ある歪速度以上では最大応力は大気中の引張強さに一致する。逆に歪速度が小さくなり、割れ伝播速度と一致すると最大応力は極小値を示すと考えられる。得られた結果を Fig. 4 に示す。SUS 304 鋼の曲線は歪速度が $4 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-6}$ min⁻¹ で最大応力が極小値を待つとみなせることから、割れ伝播速度はこの歪速度のレベルに相当すると考えられる。一方 R 304 Cu 鋼では、最大応力の極小値は歪速度が 4×10^{-7} min⁻¹ 以下に存在すると考えられ、R 304 Cu 鋼の割れ伝播速度の方が SUS 304 鋼のそれより遅いとされる。しかし、歪速度が 4×10^{-4} min⁻¹ 以上のように割れの伝播が外力によって加速される条件では、Cu の効果は認められ

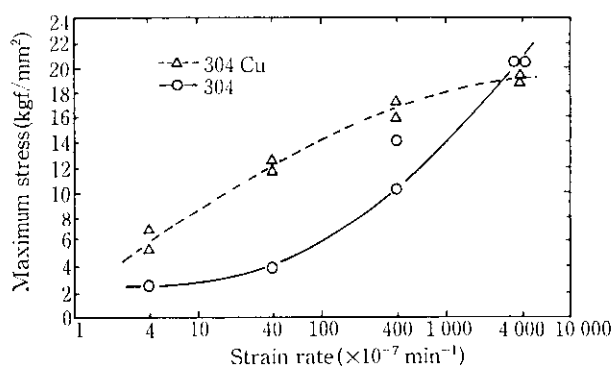


Fig. 4 The effect of strain rate on maximum stress of SSRT test in boiling 42% MgCl₂ solution

なくなる。

3.2 気液界面浸漬試験

貯湯槽等温水環境への適用に際して、実環境に近い環境で Cu の耐応力腐食割れ改善効果を確認する目的で気液界面における腐食試験を行った。試験条件は次の通りである。

(1) 試験片: ① 長手方向中央に TIG ナメ付ビードを持つ平板試験片 (1.5 mm $\times$ 50 mm $W \times$ 60 mm L)
② TIG 溶接パイプ (1.5 mm $\times$ 25 mm $\phi \times$ 60 mm L) の 2 種類

(2) 溶液: Cl⁻ 濃度が、100, 1000, 21000 ppm の 3 水準

(3) 温度: 40, 60, 80°C の 3 水準

(4) 試験期間: 2 箇月

試験は計 9 条件の溶液を用いて行った。試験終了後腐食減量の測定及び表面のカラーチェックと断面の顕微鏡観察から応力腐食割れの有無を調査した。

試験温度と Cl⁻ 濃度の関係で割れの有無を、Fig. 5 にまとめた。

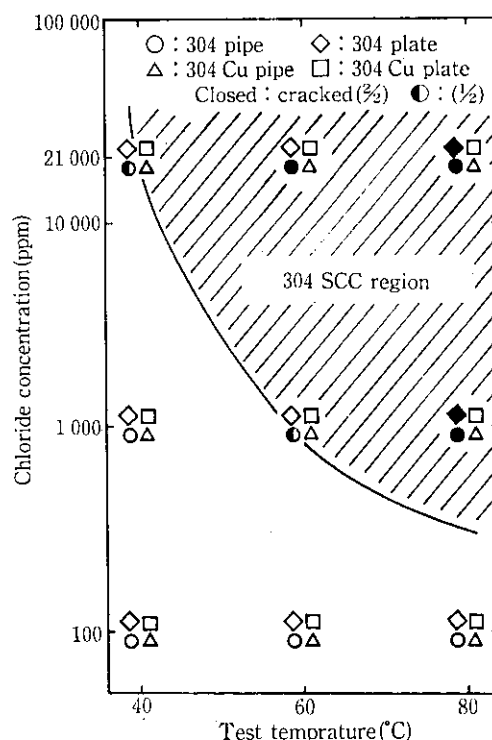


Fig. 5 The effect of temperature and chloride concentration on SCC of welded specimens of pipes and plates

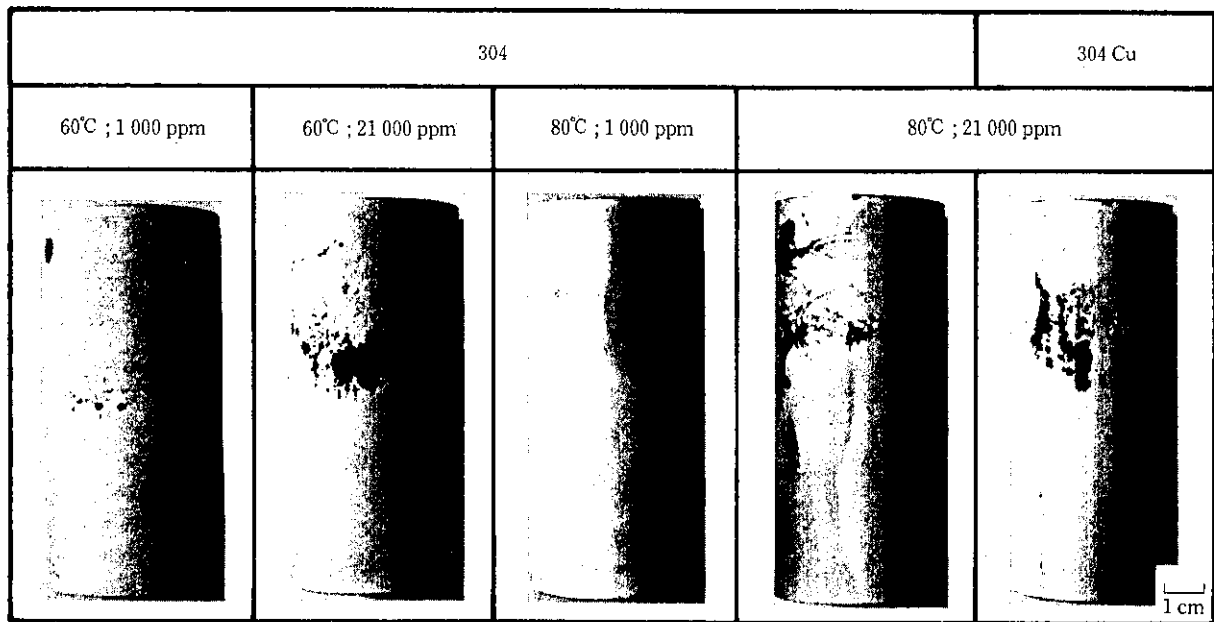


Photo 1 Colour checked appearance of pipes immersed for two months at the interface between air and solution

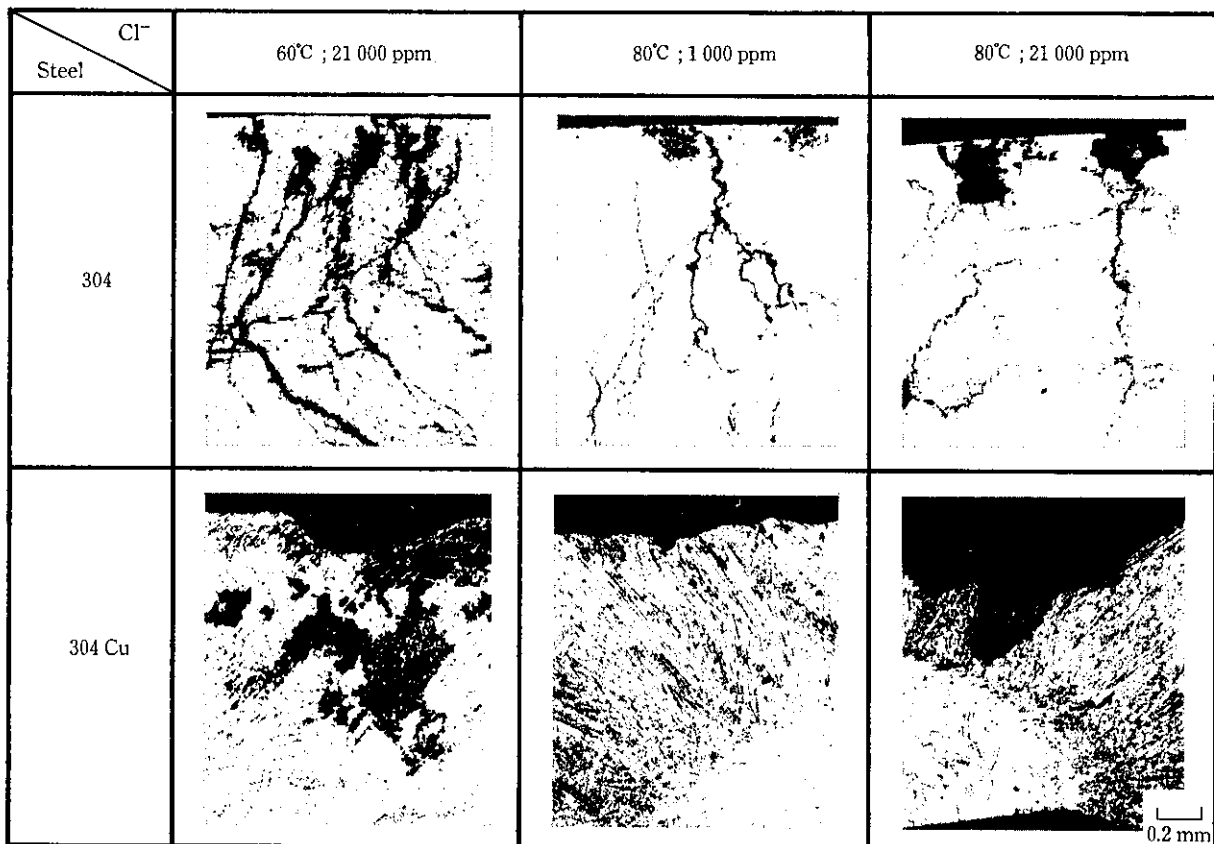


Photo 2 Microphotographs of immersion test pipes

Fig. 6 に Cl⁻ 濃度が 1 000 ppm における温度と腐食減量の関係を割れの有無とともに示す。さらに Photo 1 にパイプのカラーチェックの外観を、Photo 2 に試験片断面の組織写真を示す。これらの

結果をまとめると次の通りである。

- (1) SUS 304 パイプでは、Cl⁻ 濃度が 21 000 ppm の場合 40°C・60°C・80°C の各温度で割れが観察され、Cl⁻ 濃度が 1 000 ppm

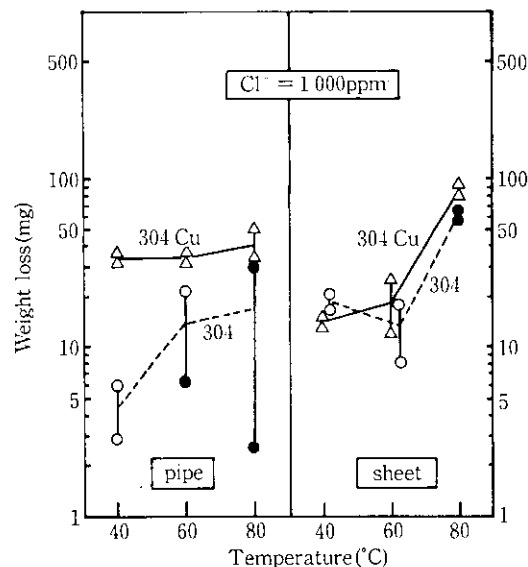


Fig. 6 The relation between temperature and weight loss with and without cracks immersed at the interface between air and solution containing 1 000 ppm Cl^-

- でも 60°C と 80°C で割れが観察された。SUS 304 TIG 板では、80°C の 1 000 および 21 000 ppm Cl^- 濃度で割れが確認された。
- (2) SUS 304 パイプ及び TIG 板の割れは、溶接部近傍の気液界面付近で観察され、孔食を起点とした粒内割れであった。したがって、これらの割れは溶接熱影響による鋭敏化に基づくものでなく塩化物応力腐食割れと判断できる。よって、パイプと板における応力腐食割れ感受性の差は残留応力の差に起因するものと考えられる。
- (3) R 304 Cu 鋼の場合、TIG 板・パイプとも本実験条件では全く応力腐食割れは観察されなかった。
- (4) R 304 Cu 鋼の腐食形態は孔食であり気液界面付近で顕著であった。温度及び Cl^- 濃度が高くなるほど、孔食は激しかった。R 304 Cu 鋼と SUS 304 鋼の腐食減量を比較すると、パイプの場合は R 304 Cu 鋼の腐食減量が大きかったが、TIG 溶接板ではほとんど差は認められなかった。

以上の気液界面浸漬試験から、R 304 Cu 鋼は低濃度塩化物環境で顕著な耐応力腐食割れ性を発揮することが確認された。また、Cu の効果は Photo 2 から明らかなように、食孔が割れ発生につながる深い型のものになるのを抑制することにより、この効果により、食孔底からの応力腐食割れの生長を防止する、即ち溶解から割れへ移行しないものと考えられる。

3.3 耐粒界腐食性評価

溶接熱影響による粒界腐食に対する Cu の効果を硫酸-硫酸銅腐食試験 (JIS G 0575-1970: Strauss 試験) により調べた。粒界腐食性を決める主因である鋭敏化の領域を求めめるため、熱処理温度を 550, 650, 750, 850°C とし、各温度で最大 5 時間保持した。所定の鋭敏化処理後、硫酸-硫酸銅溶液中浸漬・曲げ試験を行って粒界腐食の有無を顕微鏡観察にて判定した。この結果を鋭敏化処理温度-処理時間の関係で、比較材として用いた SUS 304, SUS 316 のデータとともに Fig. 7 に示す。耐粒界腐食性は、SUS 304 < R 304 Cu < SUS 316 の順に良くなった。R 304 Cu 鋼の耐粒界腐食性は SUS 304 より優れほぼ SUS 316 に匹敵する。

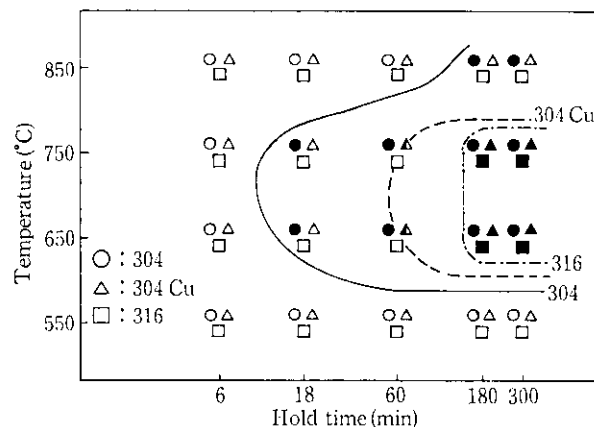


Fig. 7 Results of Strauss test (open: no crack, closed: cracked)

4 溶接性に及ぼす Cu の影響

貯湯槽等温水機器の製作には通常溶接施工が用いられることから R 304 Cu 鋼を温水機器に適用する場合、Cu の溶接性に及ぼす効果を確認しておく必要がある。そこで Table 3 に示す共金成分の溶加材を溶製し、被覆アーク溶接棒 (4 mm ϕ , 5 mm ϕ) と MIG 芯線 (1.6 mm ϕ) を製作した。これらを用いて溶着金属と溶接継手の性質及び溶接部の耐応力腐食割れ性に及ぼす Cu の効果を調べた。

4.1 溶着金属の性質

溶着金属は被覆アーク溶接棒を用いて 45 度開先の炭素鋼に 2 層バタリングを施して作成した。試験片はこの中央部より切り出し実験に供した。Table 4 にこの溶着金属の成分分析結果を示す。母材より C, Cr, Ni が高く Cu は 2.04% であった。Table 5 には機械的性質とデルタ・フェライト量をまとめて示す。母材と比較して引張強さはほぼ同等であるが、耐力は高く伸びは減少し、硬度は上昇して母材より硬い。なお、デルタ・フェライト量は 11.8% とやや多かった。

Table 3 Chemical composition of matching welded material (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	N
0.026	0.50	1.65	0.030	0.004	2.20	9.51	19.63	0.017

Table 4 Chemical composition of welded metal (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	N
0.032	0.45	1.43	0.038	0.003	2.04	9.43	19.21	0.028

Table 5 Mechanical properties of welded material

$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm^2)	TS (kgf/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)	δ -ferrite (%)
40	51	48	59	151	12

4.2 溶接継手の性質

溶接継手は 5 mm 厚の母材に 60 度開先をつけ、突合せて MIG 溶

Table 6 Chemical composition of matching welded joint

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	N
0.031	0.48	1.60	0.032	0.004	1.89	9.15	19.04	0.031

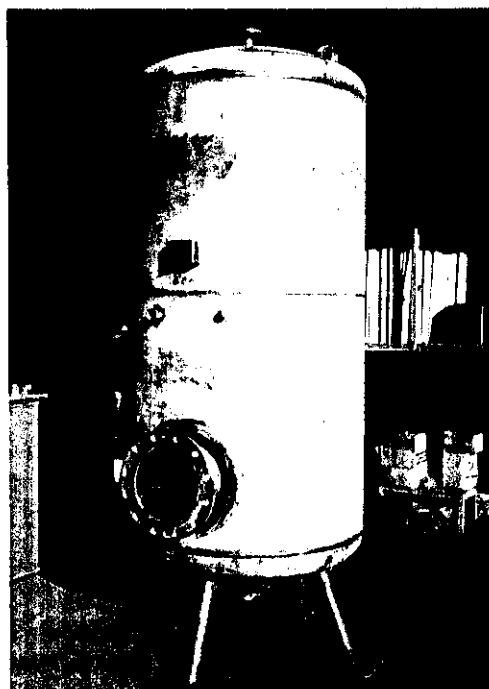
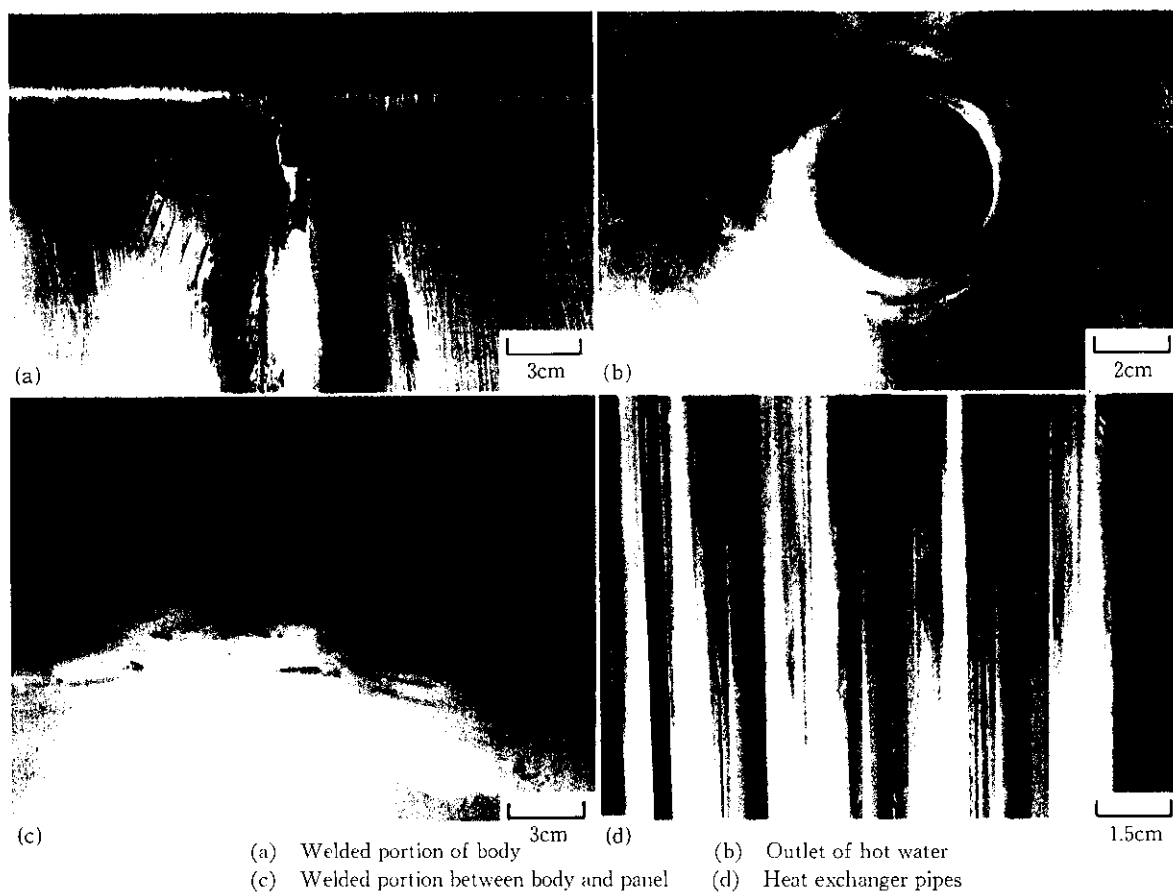
Table 7 Mechanical properties of welded joint

$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	δ -ferrite (%)
28	56	36	155	9.9

接により作成した。その成分分析結果を **Table 6** に示す。Cu は母材部の 1.75% より僅かに多い 1.89% であった。Cr は母材部に比して約 1% 多くその他の元素はほぼ母材と同量であった。この継手から中央に溶接部を有する板厚 3mm, 平行部幅 40mm の 1 号試験片を加工し機械的性質を調べた。その結果をデルタ・フェライト量とともに **Table 7** に示す。引張試験片の破断は母材部で起き、溶接部は母材部より硬い組織であるが破断は起きなかった。その引張強度は 56 kgf/mm² で母材と変わらない。これは Cu 含有材で共金溶接した場合、その継手効率は 100% とみなせることを示している。デルタ・フェライト量は 9.9% であり、溶接割れ防止に対して適正な値である。

4.3 溶接継手部の耐応力腐食割れ性

溶接継手部の耐応力腐食割れ性に及ぼす Cu の効果を検討するた

**Photo 3** R 304 Cu hot reservoir (5.5 mm $t \times 1\,000$ mm $\phi \times 2\,000$ mm h)**Photo 4** Inside views of R 304 Cu hot reservoir after 1.5 year from settlement

め、U 曲げ SCC テストと定荷重 SCC テストを沸騰 42% 塩化マグネシウム溶液環境で行った。これら 2 種の試験片は中央に溶接継手を有するもので、寸法・形状は母材の試験で用いたものと同一である。U 曲げ SCC テストの場合、割れ発生時間・破断時間とも母材のそれらと変わらず、破断は母材部で生じていた。

次に定荷重 SCC テストにおける破断時間の比較を、負荷応力 = $0.4\sigma_{0.2}$ で行った。その結果、破断時間は母材のそれと変わらず、破断は U 曲げ SCC テストと同じく母材部で生じていた。以上 2 種の SCC テストの結果、Cu 共金溶接した溶接継手の耐応力腐食割れ性は母材と同様に良好であると考えられる。

5 R 304 Cu 鋼製貯湯槽

実機使用環境での R 304 Cu の耐食性、耐応力腐食割れ性を調査する目的で Photo 3 に示す R 304 Cu 製貯湯槽を製作し、昭和 57 年 6 月 8 日より使用している。その仕様は下記の通りである。

- (1) 形 式: 堅円筒形 (蒸気加熱)
- (2) 内 容 積: 1.65 m^3 (最大内径: 1000 mm)
- (3) 使用材料
 - (i) 本体: R 304 Cu, 板厚 5 mm
 - (ii) 加熱チューブ: R 304 Cu, $25 \text{ mm } \phi \times 1.5 \text{ mm } t$
 - (iii) 溶接棒: KSS-308LT Cu (Cu 添加の 308L タイプの被覆溶接棒)
- (4) 用 途: 浴槽 (容積: 2.3 m^3) 用
- (5) 使 用 水: 水道水 (分析値を Table 8 に示す)
- (6) 温 度: $70 \sim 80^\circ \text{C}$

昭和 58 年 6 月 2 日に第一種圧力容器としての一年目の官庁検査が行われた。その際内部の詳細な観察を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 貯湯槽本体の母材、溶接部とも腐食は認められず、金属光沢の研磨面がほとんど全面に残存していた。
- (2) 温度計と圧力計の挿入口、給湯口と安全弁口などに赤錆が付着していたが、これは軟鋼製パイプで発生した錆であり、本体は全く腐食されていなかった。

Table 8 Chemical analysis of city water used

Turbidity (degree)	Color (degree)	pH	M-Alkalinity (ppm)	Cl ⁻ (ppm)
1	1	7.0	43	36
Total hardness (ppm)	Permanganic acid consumption (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	Residual chlorine (ppm)	
108	8	55	1.25	

- (3) 熱交パイプ本体・取付部とも全く腐食はなかった。

さらに約 1.5 年後の昭和 58 年 11 月に内部検査を行った。その時の状況を Photo 4 に示す。この場合も上述の一年目と同様な結果であり、内部状況はきわめて良好であった。このような結果から判断して R 304 Cu は応力腐食割れの恐れなしに貯湯槽等温水環境で使用可能なことが実証されたと考えられる。

6 ま と め

主として温水環境で耐応力腐食割れ性を有するオーステナイト系ステンレス鋼として開発した R 304 Cu 鋼につき、耐食性、耐応力腐食割れ性を調べた。さらに、R 304 Cu 鋼で貯湯槽を製作した。これらの結果をまとめると以下の通りである。

- (1) Cu の応力腐食割れ抑制作用は、Cl⁻ 濃度、温度、負荷応力が低下するほど顕著になる。気液界面浸漬試験では 80°C 以下、21 000 ppm Cl⁻ (3.5% NaCl に相当) 以下の条件では、R 304 Cu 鋼には全く応力腐食割れを生じなかった。しかし、SUS 304 鋼ではこの条件内で応力腐食割れを生じた。
- (2) R 304 Cu 共金溶接継手の耐応力腐食割れ性は母材部のそれと同等である。
- (3) R 304 Cu 鋼を用いて製作した貯湯槽は 1.5 年経過しているが、内面状況は良好で割れは全くなく孔食も認められなかった。したがって、貯湯槽等温水機器で従来 SUS 304 鋼で応力腐食割れが発生する場合の代替材として使用できる。

参 考 文 献

- 1) 小若正倫, 工藤超夫: 日本金属学会誌, 37 (1975) 1320
- 2) 増尾誠, 曾根雄二, 小野寛: 鉄と鋼, 69 (1983) 837
- 3) 木下昇, 石原賢一: 建築とステンレス, 7 (1980) 35, 19
- 4) 大橋延夫, 小野寛, 増尾誠, 竹田元彦, 西山昇: 川崎製鉄技報, 9 (1977) 1-2, 83