

600合金系溶接金属のPWSCCに及ぼす温度の影響

Influence of Temperature on Primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 Weld Metals

西川 嘉人 (Yoshito Nishikawa)* 戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)* 有岡 孝司 (Koji Arioka)*

要約 600合金系溶接金属 (82合金および132合金) のPWR 1次冷却水中の応力腐食割れ (PWSCC) に及ぼす温度の影響を調べるため, 温度330℃から360℃の範囲で低歪速度引張試験 (SSRT試験) を実施した. その結果, これら溶接金属の見かけの活性化エネルギーは熱影響部に比べ約30kJ/mol大きく, 82合金と132合金のPWSCC感受性は同程度であった.

キーワード 溶接金属, 応力腐食割れ, 熱影響部, 活性化エネルギー

Abstract Influence of temperature on primary water stress corrosion cracking (PWSCC) of Alloy 600 weld metals was studied at temperatures ranging from 330 to 360 °C using slow strain rate technique (SSRT). As the results, it has been revealed that the apparent activation energy of weld metal is about 30 kJ/mol higher than that of heat affected zone, and the PWSCC susceptibility of Alloy 82 is close to that of Alloy 132.

Keywords weld metal, stress corrosion cracking, heat affected zone, activation energy

1. はじめに

近年, 特に海外の加圧水型軽水炉 (pressurized water reactor, PWR) プラントで1次冷却水中の応力腐食割れ (primary water stress corrosion cracking, PWSCC) が顕在化してきており, これはPWRプラントの経年劣化事象として認識されてきている⁽¹⁾. また2000年米国V.C.サマー原子力発電所において, 600合金の溶接部 (溶接金属として182合金が使用されている) においてPWSCCが発見され⁽²⁾, ニッケル基合金の溶接部においてもPWSCCが懸念されるようになった. 日本のPWRプラントで用いられている溶接金属は182合金の他に82合金や132合金があるが, これらのPWSCCに関するデータは限られている⁽³⁾. そこで本研究では82合金および132合金について溶接部およびその熱影響部 (heat affected zone, HAZ) の温度による影響を明らかにするため, 低歪速度引張試験 (slow strain rate technique, SSRT) を行い, 600合金溶接部のPWSCC特性を検討した.

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に使用した供試材は, 図1に示すMA600合金の板材にV形開先により試験片長手方向に垂直な方向に溶接したものである. ただしこれは実機の溶接部位をそのまま模擬したものではない. 溶接金属は82合金をティグ (tungsten inert gas, TIG) 溶接で, 132合金を被覆アーク溶接で用いている. 使用した溶接金属および母材の化学成分および溶接継手の機械的性質を表1に示す.

2.2 SCC試験

応力腐食割れ (stress corrosion cracking, SCC) 試験には促進SSRT法⁽⁴⁾を用いた. この方法では図2のように平板試験片平行部の中央を金型により曲げることで, 従来SSRT試験よりも数十倍PWSCCを加速して試験することができる. 促進SSRT試験では曲げ部凹面側のみからPWSCCが発生し進展するため, 曲げを溶接金属部や熱影響部に施工することにより, 特定部位のPWSCC特性を調べることができる. すな

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

わち、図3のように溶接継手の試験片において曲げる部位を指定することで、特定部位でPWSCCを発生させられる。試験は図4に示すSSRT試験装置により、従来から使用している⁽⁵⁾ PWR 1次冷却水模擬水溶液

(500ppmB + 2ppmLi + 2.75ppmH₂) 中で温度330℃, 340℃, 350℃, 360℃の4条件で実施した。また歪速度は曲げ施工前の平行部長20mmに対し 5×10^{-7} /sの一定速度で引っ張った。

表1 供試材の化学成分、機械的性質および溶接パス数・入熱量

(wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Cu	Nb
82合金	0.017	0.26	2.54	0.006	0.001	72.9	17.95	3.72	0.01	1.93
132合金	0.030	0.30	2.10	0.009	0.002	71.5	15.40	8.50	0.01	1.88
母材(MA600)*	0.030	0.27	0.29	0.010	0.001	72.9	16.20	-	0.05	-

*母材には他にTiが0.20%含まれる。

材料	0.2%耐力	引張強さ	溶接パス数	入熱量
82合金	306MPa	625MPa	4	10.1kJ/cm
	266MPa	589MPa	4	14.9kJ/cm
132合金	229MPa	563MPa	2	10.1kJ/cm
	200MPa	534MPa	2	14.9kJ/cm

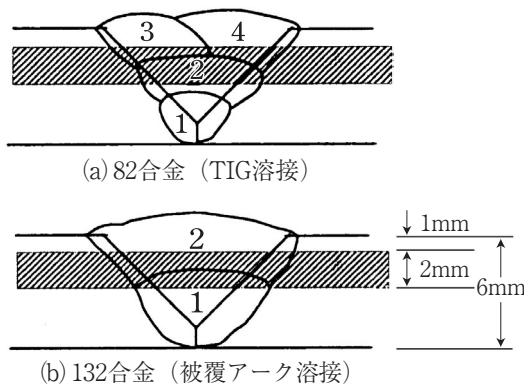


図1 溶接施工状況および試験片採取位置

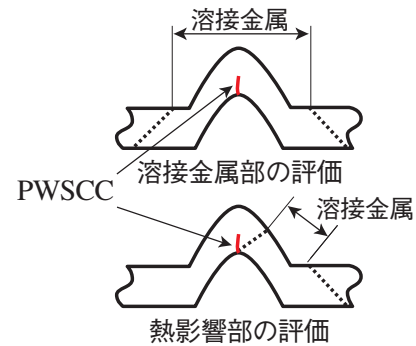


図3 溶接継手の促進SSRT試験片における曲げ位置とPWSCC発生部の関係

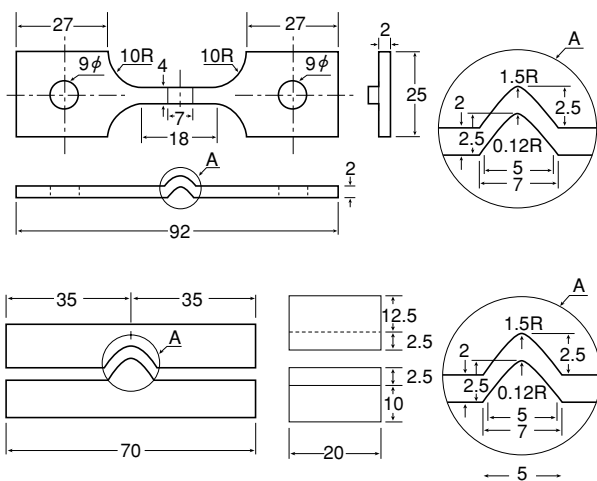


図2 促進SSRT試験片および金型の形状

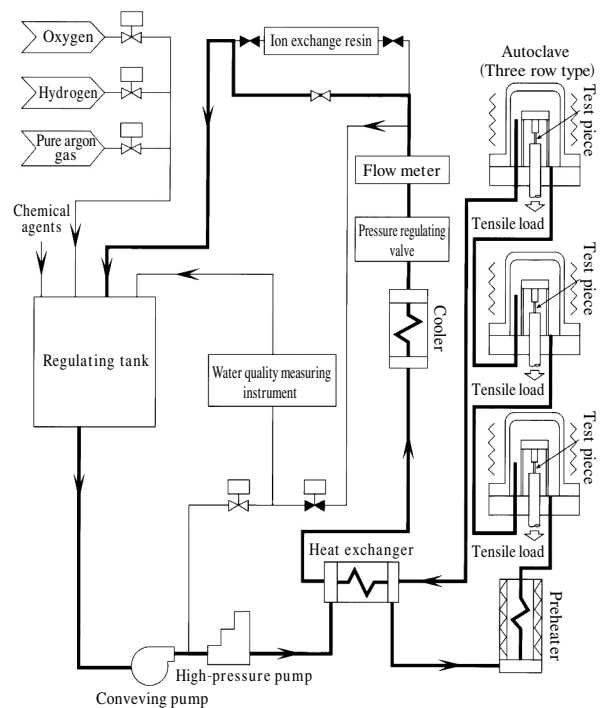


図4 SSRT試験装置

3. 実験結果

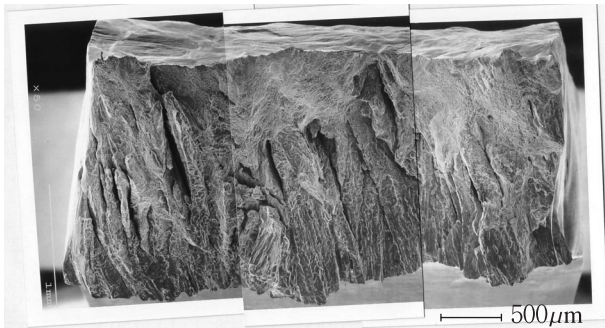


図5 SSRT試験による82合金溶接部破断部のSEMによる被面写真（温度：360℃）

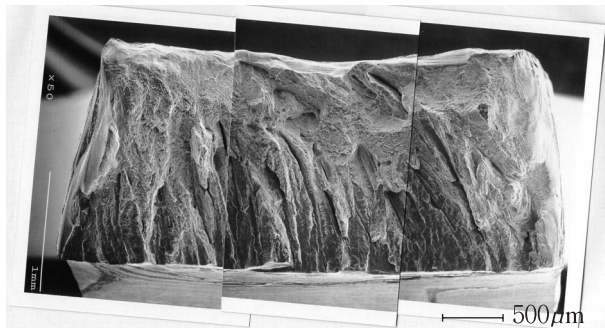


図6 SSRT試験による132合金溶接部破断部のSEMによる被面写真（温度：360℃）

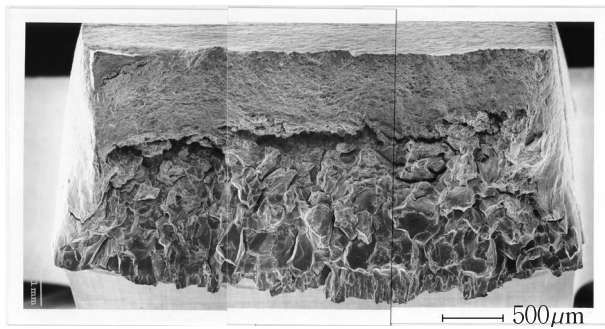


図7 SSRT試験による82合金溶接熱影響部破断部のSEMによる被面写真（温度：360℃）

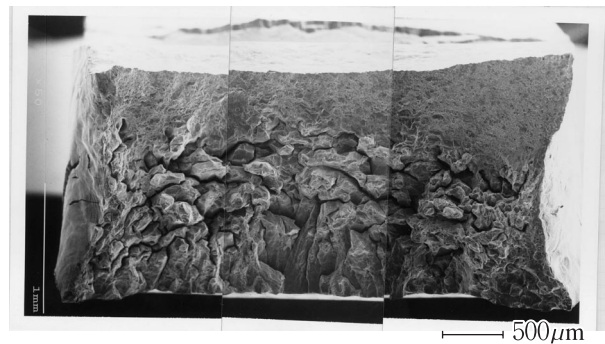


図8 SSRT試験による132合金溶接熱影響部破断部のSEMによる被面写真（温度：360℃）

PWSCC進展速度に及ぼす温度の影響

得られたデータのうち粒界破面率（金属破断面に対する粒界およびデンドライト境界破面の割合）が小さいデータは、判定によるバラツキが出やすく、温度依存性を示す見かけの活性化エネルギー算出において影響が大きいので、粒界破面率5%未満のデータを評価から除外した。図5と図6にはそれぞれ82合金と132合金で溶接した溶接継手の溶接金属部を360℃のSSRT試験により破断させた破面写真を、図7と図8にそれぞれ82合金と132合金で溶接した溶接継手の熱影響部を破断させた破面写真を示す。促進SSRT試験ではPWSCCは試験前の加工による引張り残留応力により、曲げの凹部（図5～8の下側）からのみ発生・進展する特徴がある。従って、破断面におけるき裂進展速度は次式により求めることができる。

$$\text{き裂進展速度} = \text{板厚} \times \text{粒界破面率} \div \text{破断時間}$$

図9と図10にそれぞれ82合金と132合金で溶接した溶接継手の溶接金属と熱影響部の温度とSSRT試験によるき裂進展速度の関係を示す。図11と図12には溶

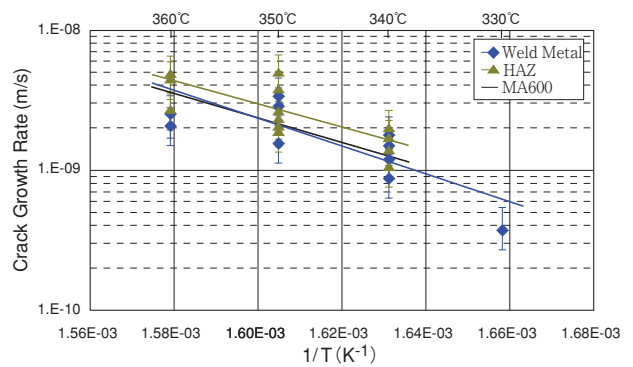


図9 SSRT試験による82合金溶接部の溶接金属と熱影響部の温度とき裂進展速度の関係

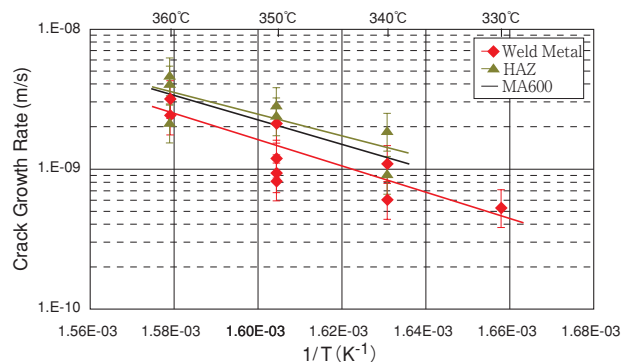


図10 SSRT試験による132合金溶接部の溶接金属と熱影響部の温度とき裂進展速度の関係

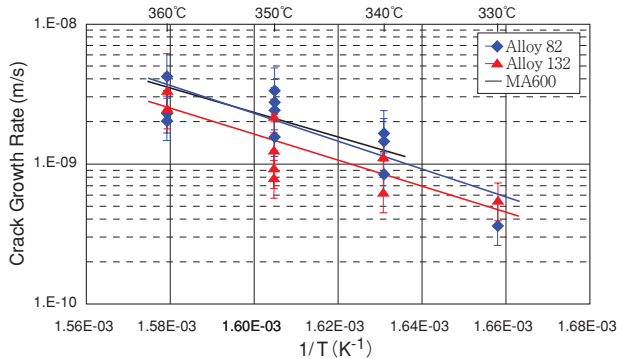


図11 SSRT試験による溶接金属部の溶接金属の温度とき裂進展速度の関係

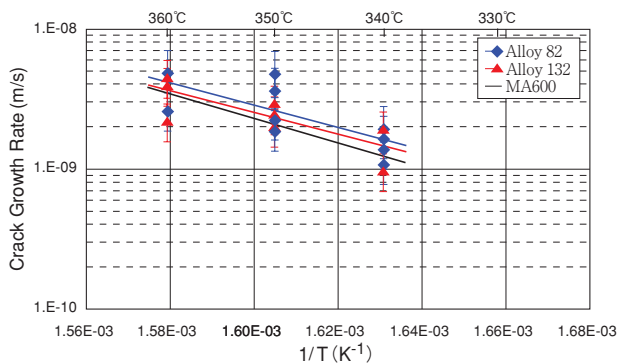


図12 SSRT試験による熱影響部の温度とき裂進展速度の関係

接金属と熱影響部で整理した溶接金属の違いで比較したものを示す。各グラフの直線はデータの対数を最小二乗法により近似したものである。また比較のため図9～12に母材であるMA600の温度とき裂進展速度の関係も示した。図9～12からわかるように、高温ほどき裂進展速度が大きくなる。このき裂進展速度の温度依存性により見かけの活性化エネルギーが求められる⁽⁵⁾。母材であるMA600の見かけの活性化エネルギーが167 kJ/mol (40 kcal/mol) であるのに対し、82合金と132合金の溶接金属における見かけの活性化エネルギーはそれぞれ188 kJ/mol (45 kcal/mol) と179 kJ/mol (43 kcal/mol) であり、82合金と132合金で溶接した熱影響部における見かけの活性化エネルギーはそれぞれ156 kJ/mol (37 kcal/mol) と148 kJ/mol (35 kcal/mol) と評価した。この結果から、82合金と132合金で溶接された溶接金属の見かけの活性化エネルギーはほぼ同様で、見かけの活性化エネルギーは溶接金属、母材、熱影響部の順に小さくなる傾向が見られる。なお近似線からの偏差量の対数について標準偏差の指数、すなわち対数グラフ上での倍率で表現される標準偏差に相当する値は、82合金、132合金の溶接金属とそれぞれの熱影響部で、順に1.43、1.38、1.37、1.33であり、母

材のMA600は1.20であった。全データの値1.44に比べて小さい値となっていることから、それぞれの差異は小さいものの、溶接金属、熱影響部、母材の見かけの活性化エネルギーの差異は有意であると考えられる。

4. 考察

得られた実験結果から見かけの活性化エネルギーの差異はあまり大きくないが、幾つかの傾向が見られる。図9と図10に示したように、82合金と132合金いずれの溶接継手でも溶接金属は熱影響部に比べき裂進展速度が小さく、見かけの活性化エネルギーは少し大きい。最近の研究で、き裂がある程度成長するまでの発生域では熱影響部の割れが溶接金属より深くなり、き裂が成長し進展が速くなる伝播域では溶接金属のき裂進展速度が熱影響部より大きくなる⁽³⁾ ことが報告されている。従来、この結果はよく一致している。従来のSSRT試験は発生域と伝播域の両方の影響を受けるが、促進SSRT試験は発生域の影響をより多く受けるものと考えられる。熱影響部が溶接金属より感受性が高いことは、PWRプラントで溶接金属部にPWSCCが見られることが少ないことの一因と考えられる。またこれらの結果から、PWSCC感受性の評価においては伝播域より発生域の評価の方がより重要と考えられる。

溶接金属部においては、図11に示すように、82合金と132合金の溶接金属のき裂進展速度と見かけの活性化エネルギーはほぼ同様であるものの、82合金の方がき裂進展速度は速く、見かけの活性化エネルギーは若干低い傾向が見られる。これは82合金の方が、運転温度域であるより低温で感受性が高い可能性があることを示している。一方、最近の研究⁽³⁾ では、リバースUバンド試験や定荷重試験の結果として、82合金の割れ時間が132合金の4～10倍短いとの報告が出されている。本研究で用いた供試材とは、化学成分、機械的性質、溶接方法、溶接入熱が異なっているので、どの要因がPWSCC挙動に影響しているかを特定することは難しいが、今後定荷重試験等によりPWSCC発生過程の差異を明らかにする研究が必要である。

一方熱影響部においては、図12に示すように、82合金と132合金による溶接の熱影響部のPWSCC感受

性と見かけの活性化エネルギーは、溶接パス数と溶接方法が異なっているが、ほぼ同様の値である。母材のMA600と比較すると僅かではあるが、PWSCC感受性が高く、見かけの活性化エネルギーが小さい傾向がある。図7と図8を見ると熱影響部は結晶粒が大きくなっており、組織の状態が明らかに変わっていることがわかる。溶接熱影響部は溶接条件にあまり影響されず、母材の性質により強く影響されたPWSCC挙動を示すものと考えられる。

以上のように見かけの活性化エネルギーは溶接金属と母材で異なることから、材料ごとの活性化エネルギーを求めることで、より正確に実機条件におけるき裂進展速度や寿命を予測することができると考えられる。

5. 結論

82合金と132合金の溶接金属と溶接熱影響部のPWSCCにおける温度の影響はほぼ同様である。しかしながら、以下の点で細かい差異が認められる。

- (1) 溶接金属は母材や溶接熱影響部に比べ見かけの活性化エネルギーが30kJ/mol程度高く、PWSCC感受性が若干低い。そのため、低温側では母材や溶接熱影響部に比べ割れが発生し難い。
- (2) 溶接熱影響部のPWSCC挙動は、溶接金属より母材のものに近い。溶接金属が違ってほぼ同じ挙動をする。
- (3) 82合金と132合金の見かけの活性化エネルギーはほぼ同じである。

文献

- (1) “高経年化に関する基本的な考え方,” 通商産業省資源エネルギー庁報告書(1996).
- (2) B. Crowley, NRC Special Team Inspection Report, 50-395/00-08, United States Nuclear Regulatory Commission (2001).
- (3) R.S.Pathania, A.R.Mcilree and J.Hickling, "Overview of Primary Water Cracking of Alloys 182/82 in PWRs," *Proc. Fontevraud 5 International Symposium*, France, Sept. 23-27, p.13 (2002).
- (4) N.Totsuka, E.Lunarska, G.Gragnoilino and

Z.S.Smialowska, *Corrosion*, 43, p.505 (1987).

- (5) N.Totsuka, S.Sakai, N.Nakajima and H.Mitsuda, *CORROSION/2000*, Paper No. 212 (2000).