

炭素鋼および低合金鋼の溶接部における溶接補修および溶接後熱処理の繰返しによる継手性能への影響評価

Effect of welded joint performance in carbon steel or low alloy steel subjected to reheat by welding repair or post weld heat treatment

中野 正大（技術本部 企画開発部）

山崎 義彦（技術本部 企画開発部）

安西 敏雄（技術本部）

Masahiro NAKANO, Yoshihiko YAMASAKI, Toshio ANZAI

(Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

圧力容器や配管などの溶接構造物では製造時や供用後に何らかの事情によって、溶接部を切断して再溶接を行う場合、または溶接後熱処理を行ったものに対して再び溶接後熱処理を行う場合がある。このような溶接補修や溶接後熱処理を繰返し行くと、継手強度や耐食性が低下し、場合によっては狙いとする品質性能が得られなくなる可能性がある。そこで、圧力容器や配管の材料としてもっとも広く使用されている炭素鋼および低合金鋼を対象に、溶接補修を繰返し行った場合および溶接後熱処理を繰返し行った場合の影響を評価した。その結果、炭素鋼および低合金鋼の溶接部に対して、溶接補修を3回行っても、溶接後熱処理を3回行っても、継手性能はほとんど低下しないことが明らかとなった。

Welded structures such as pressure vessels and pipes are occasionally treated by heat again after welding when their welded parts are cut and rewelded or treated by heat after welding. If joint parts are repeatedly weld-repaired or heat-treated after welding, the joint strength and corrosion resistance will degrade; thus, in some cases, the parts are unable to meet their target performance level. Therefore, we evaluated the effect on carbon steel and low alloy steel, which are widely used as material for pressure vessels and pipes, when they are repeatedly subjected to weld repair or heat treatment after welding. The results showed that after welded parts made of carbon steel or low alloy steel were weld-repaired or heat-treated after welding three times, their joint performance barely degraded.

1. はじめに

圧力容器や配管などの溶接構造物において、製造時や供用後に、図面変更、構造変更、部分更新、機器の点検整備などの理由から溶接した部分を切断し、その溶接熱影響部を除去することなく、開先加工を行い、再び溶接を行う場合がある。また、溶接後熱処理を行ったものに対しても同様の理由から再び溶接後熱処理を行う場合がある。このような溶接補修や溶接後熱処理を繰返し行くと、材料は熱の影響によって引張強度、じん性、耐食性などが低下し、場合によっては狙いとする品質性能が得られなくなる可能性がある。

国内規格において、溶接補修の回数を制限しているものとしては、JLPA201「球形貯槽基準」に“溶接補修の回数は3回を限度とし、それを超える場合はその溶接部を完全に除去したのち再溶接を行う必要がある”とあり¹⁾、原子炉等規制法関連では「加工施設及び再処理施設の溶接の方法の認可について」に“腐食環境の厳しい接液部の溶接において、同一箇所でも3回以上補修溶接を行う場合は、溶接施工法の確認実施要領に準じて腐食試験を行い、耐食性を確認する”とある²⁾。さらに、供用後の再溶接ということでは、KKH/PAJ/JPCAS0851「高圧ガス設備の供用適正評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準」およびJPI-8R-16「溶接補修」では、“むやみに再溶接を繰返してはならない。同一箇

所で2回以上の補修が発生した場合には、原因を調査し材料劣化に起因した損傷でないことを確認してから溶接補修すること”とある^{3,4)}。その他の法規や規格では、溶接補修の回数に加え、溶接後熱処理の回数に関しても明確に定められていない。

石油精製・石油化学プラント設備の溶接構造物には、環境や強度などの要求性能に合わせて様々な金属材料が適用されている。その中でも広く適用されている材質に炭素鋼、低合金鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼がある。ここで、オーステナイト系ステンレス鋼に関しては、以前行った試験で“SUS304は溶接補修を2回行くと溶接熱影響部の応力腐食割れ感受性が増大する傾向がみられ、一方、SUS304Lは溶接補修を3回行ってもその傾向はみられなかった。また、引張特性はいずれも溶接補修の回数が増大しても影響はみられない”という結果を得ている⁵⁾。

そこで、オーステナイト系ステンレス鋼と同様に、炭素鋼および低合金鋼についても溶接補修を繰返し行った場合の影響を評価するとともに、溶接後熱処理を繰返し行った場合の影響についても合わせて評価した。なお、ここでは溶接補修と溶接後熱処理を組み合わせた試験は行わないものとした。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は配管用鋼管とし、炭素鋼には軟鋼に分類される STPG370S-H を、低合金鋼には 2.25Cr-1Mo 鋼の STPA24 S-H を用いた。配管サイズは、溶接補修に関する試験では外径 114.3mm (4B)、肉厚 8.6mm (S/80) とし、溶接後熱処理に関する試験では外径 165.2mm (6B)、肉厚 11.0mm (S/80) とした。また、溶接材料は STPG370 には W49A3U16 (TG-S50) を、STPA24 には W62-2C1M2 (TG-S2CM) を用いた。棒径は ϕ 2.4mm とした。表 1 にこれらの化学成分を示し、表 2 に引張特性を示す。

2.2 溶接試験材の作製

表 3 の溶接条件に従って、図 1 に示す溶接試験材をそれぞれの材質とサイズで計 16 本作製した。溶接補修に

関する試験では、図 2 の手順に従って、溶接補修を行わないもの、溶接補修の回数が 1 回、2 回および 3 回のものを作製した。この試験は溶接後熱処理を行わない条件とした。一方、溶接後熱処理に関する試験では、図 3 の手順に従って、溶接後熱処理を行わないもの、溶接後熱処理の回数が 1 回、2 回および 3 回のものを作製した。この試験は溶接補修を行わない条件とした。溶接後熱処理は JIS Z 3700「溶接後熱処理方法」に従って行い、その種類は局部加熱によるものとした。また、溶接後熱処理の条件は、STPG370 では保持温度を 649℃、保持時間を 1 時間とし、STPA24 では保持温度を 760℃、保持時間を 2 時間とした。この条件は国内規格の中で最も保持温度が高い KHK S 0801「高圧ガスの配管に関する基準」の表 13.2 に示す値とし、保持温度はその表中に示される範囲の最大値とした。

表 1 供試材と溶接材料の化学成分 [mass%]

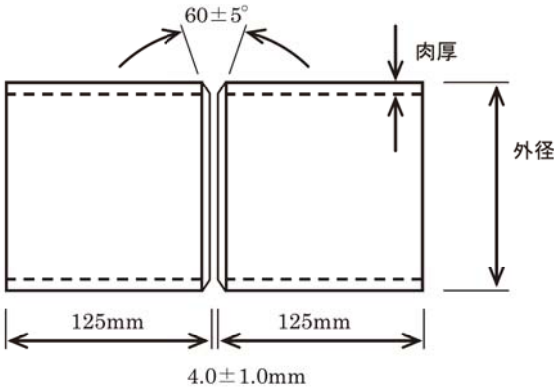
材料	サイズ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
STPG370S-H	4B・S/80	0.13	0.23	0.51	0.022	0.001	-	-
	6B・S/80	0.15	0.20	0.48	0.021	0.001	-	-
STPA24S-H	4B・S/80	0.11	0.25	0.43	0.018	0.004	2.13	0.93
	6B・S/80	0.12	0.23	0.43	0.010	0.005	2.07	0.93
TG-S50	ϕ 2.4mm	0.11	0.71	1.40	0.011	0.014	-	-
TG-S2CM	ϕ 2.4mm	0.11	0.37	0.69	0.005	0.008	2.30	1.03

表 2 供試材と溶接材料の引張特性

材料	サイズ	降伏応力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]
STPG370S-H	4B・S/80	322	449	42
	6B・S/80	272	446	42
	(規格値)	215 $\leq$	370 $\leq$	30 $\leq$
STPA24S-H	4B・S/80	254	487	38
	6B・S/80	284	473	42
	(規格値)	205 $\leq$	410 $\leq$	30 $\leq$
TG-S50	ϕ 2.4mm	427	565	29
TG-S2CM	ϕ 2.4mm	583	699	22

表 3 溶接条件

項目	STPG370	STPA24
溶接方法	ティグ溶接	
電流極性	直流棒マイナス	
溶接電流	100~200 A	
溶接姿勢	PH (水平固定管上進)	
トーチシールド	アルゴンガス	
バックシールド	なし	あり
予熱	なし	200℃以上
パス間温度	350℃以下	200℃以上
溶接後熱処理	なし	なし



	溶接補修用	溶接後熱処理用
外径	114.3mm	165.2mm
肉厚	8.6mm	11.0mm
STPG370	4 本	4 本
STPA24	4 本	4 本

図 1 溶接試験材の形状と数量

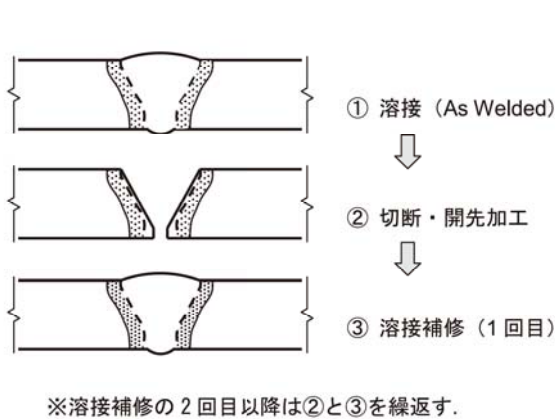


図2 溶接補修に関する試験の溶接試験材の作製手順

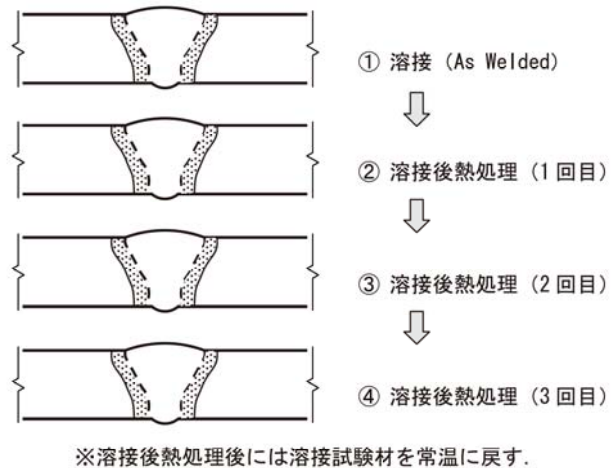


図3 溶接後熱処理に関する試験の溶接試験材の作製手順

表4 機械試験の方法

試験項目	内容
継手引張試験	継手引張試験は、JIS Z 3121「突合せ溶接継手の引張試験方法」に従って行った。継手引張試験片の形状は、溶接補修用の溶接試験材に対しては3号試験片とし、溶接後熱処理用の溶接試験材に対しては4号試験片とした。
裏曲げ試験	裏曲げ試験は、JIS Z 3122「突合せ溶接継手の曲げ試験方法」に従ってローラ曲げ試験を行った。試験片の厚さは8.6mm、10mmとした。
表面硬さ試験	表面硬さ試験は、エコーチップ硬さ試験機を用いて行った。硬さ試験の対象は溶接金属、溶接熱影響部、母材とした。測定値はそれぞれを5点ずつ測定した値の最大値と最小値を除く平均値とした。
断面硬さ試験	断面硬さ試験は、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて行った。硬さ試験の対象は溶接金属、溶接熱影響部、母材とした。硬さ試験の位置は外面側から肉厚方向に深さ1mmとし、0.5mm間隔で硬さ試験を行った。

2.3 機械試験の方法

機械試験は、压力容器4法関連法規のうち高压ガス保安法および労働安全衛生法に溶接施工法の確認試験方法として適用されているJIS B 8285「压力容器の溶接施工方法の確認試験」に従って行った。試験項目は、継手引張試験、裏曲げ試験、硬さ試験および断面マクロ・ミクロ組織試験とした。表4に機械試験の方法を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接補修の繰返し数の影響

3.1.1 機械的性質

図4に機械的性質におよぼす溶接補修の影響を示す。

引張試験では、破断位置はすべて母材となり、溶接補修を繰返し行っても引張強さおよび伸びにほとんど変化がみられなかった。引張強さはSTPG370が460N/mm²程度で、STPA24が520N/mm²程度となり、いずれも母材の規定最小引張強さを大きく上回った。

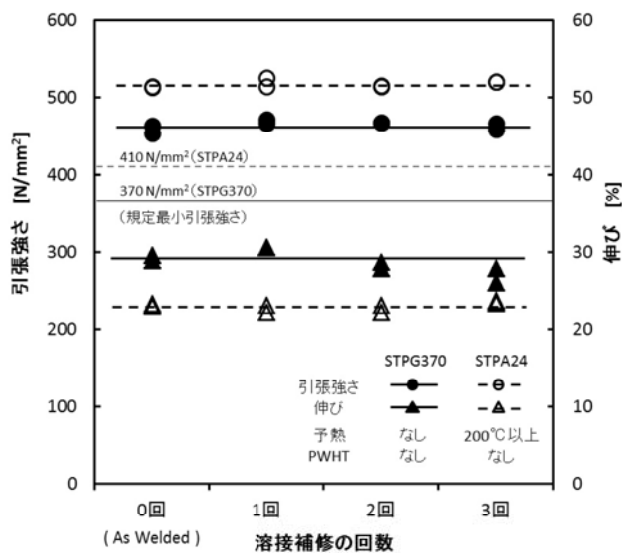
硬さ試験では、表面硬さおよび断面硬さのいずれも溶接補修を繰返し行ってもほとんど変化がみられなかった。表面硬さでは、STPA24の溶接金属および溶接熱影響部が250HV以上で比較的高い値を示したが、その他はいずれも150～200HVの範囲であった。一方、断面硬さでは、STPG370の溶接金属が180HV程度で、母材

が130HV程度となり、STPA24の溶接金属が300HV程度で、母材が145HV程度となった。STPA24の溶接金属の硬さはSTPG370に比べて120HV程度硬くなることが明らかとなった。また、溶接金属から母材への硬さの勾配は溶接補修の回数が増加してもほとんど変化しないことから、溶接補修時に開先加工の位置を同じにすれば溶接熱影響部の幅は溶接補修を繰返ししてもほとんど変わらないことが明らかとなった。なお、溶接熱影響部の幅は3～4mmであった。

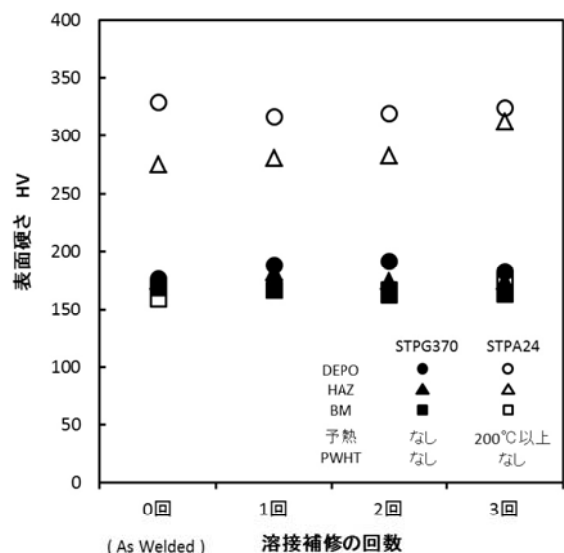
裏曲げ試験では、曲げ試験後のすべての試験片に割れはみられなかった。

3.1.2 断面マクロ・ミクロ組織

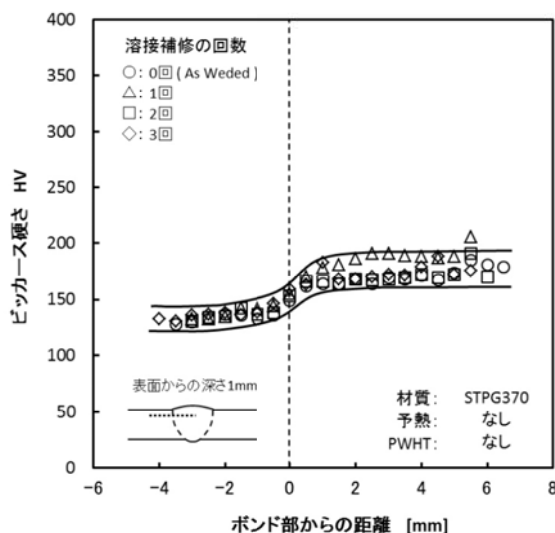
溶接補修を行っていないものと溶接補修を3回行ったものを比較した。図5に溶接部の断面マクロ組織を、図6に溶接熱影響部の断面ミクロ組織を示す。STPG370およびSTPA24において、溶接補修を繰返し行っても、溶接金属の溶込み形状や溶接熱影響部の幅にほとんど変化はなく、溶接熱影響部の金属組織も結晶粒の粗大化などの兆候はみられなかった。すなわち、断面マクロ・ミクロ組織は溶接補修を繰返し行ってもほとんど変化しないことが明らかとなった。



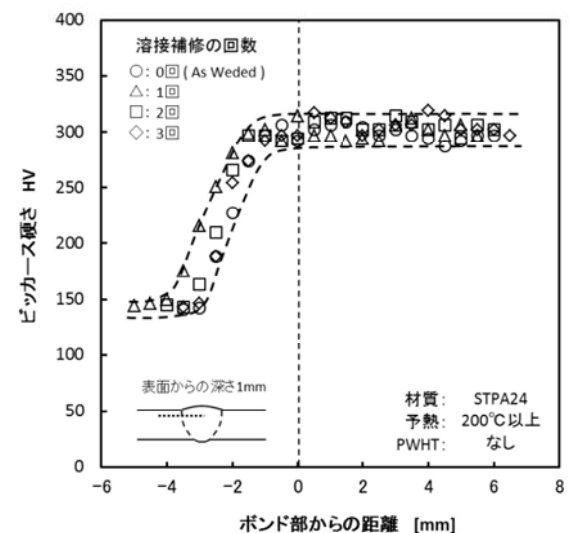
(a) 引張試験



(b) 表面硬さ試験



(c) 断面硬さ試験 (STPG370)



(d) 断面硬さ試験 (STPA24)

図 4 溶接部の機械的性質におよぼす溶接補修の影響

3.2 溶接後熱処理の繰返し数の影響

3.2.1 機械的性質

図 7 に機械的性質におよぼす溶接後熱処理の影響を示す。

引張試験では、破断位置はすべて母材となり、溶接後熱処理を繰返し行っても伸びに著しい変化がみられなかったが、引張強さに軽微な減少傾向がみられた。溶接後熱処理を 3 回行った場合の引張強さにおいてもそれぞれ母材の規定最小引張強さを大きく上回った。

硬さ試験では、STPG370 の表面硬さおよび断面硬さは溶接後熱処理を繰返し行ってもほとんど変化がみられなかった。STPA24 の溶接金属および溶接熱影響部の表面硬さは溶接後熱処理を繰返し行うことで低下する傾向を示した。STPA24 における溶接金属の断面硬さは、溶接後熱処理を行うことで 320HV から 200HV に低下することが明らかとなった。また、溶接後熱処理を繰返し行う

ことで、溶接金属、溶接熱影響部および母材の硬さがわずかに低下する傾向がみられた。溶接熱影響部の幅は溶接補修のものと同様に 3~4mm であった。

裏曲げ試験では、曲げ試験後のすべての試験片に割れはみられなかった。

3.2.2 断面マクロ・ミクロ組織

溶接後熱処理を行っていないものと溶接後熱処理を 3 回行ったものを比較した。図 8 に溶接部の断面マクロ組織を示し、図 9 に溶接部の断面ミクロ組織を示す。STPG370 および STPA24 において、溶接後熱処理を繰返し行っても、溶接金属の溶込み形状や溶接熱影響部の幅にほとんど変化はなく、溶接金属、溶接熱影響部および母材の金属組織も結晶粒の粗大化やパーライトの分解などの兆候はみられなかった。すなわち、断面マクロ・ミクロ組織は溶接後熱処理を繰返し行ってもほとんど変化しないことが明らかとなった。



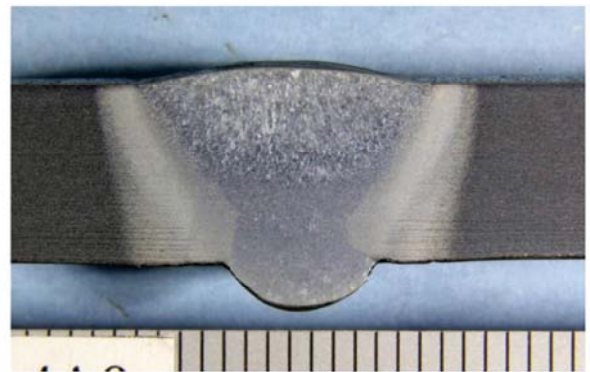
(a) As Welded (STPG370)



(b) 溶接補修 3 回 (STPG370)



(c) As Welded (STPA24)

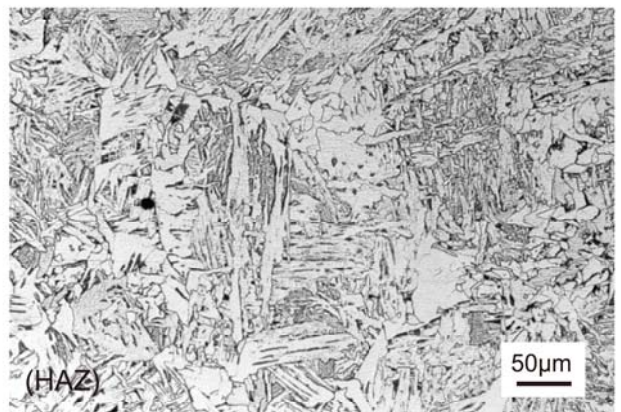


(d) 溶接補修 3 回 (STPA24)

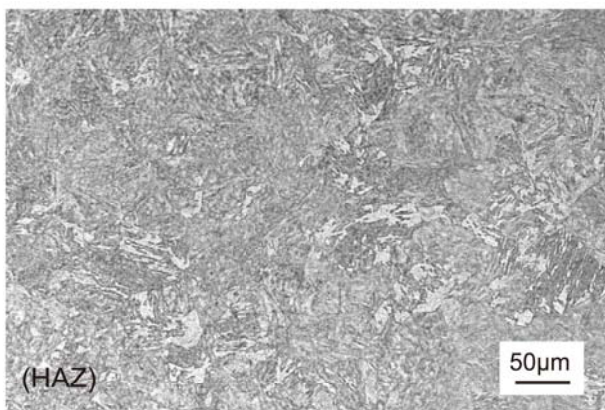
図 5 溶接部の断面マクロ組織におよぼす溶接補修の影響



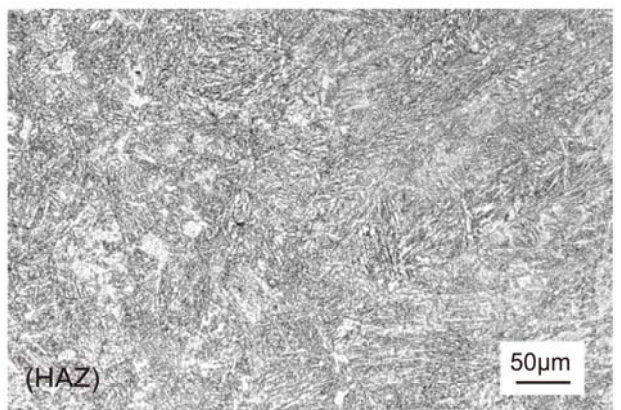
(a) As Welded (STPG370)



(b) 溶接補修 3 回 (STPG370)

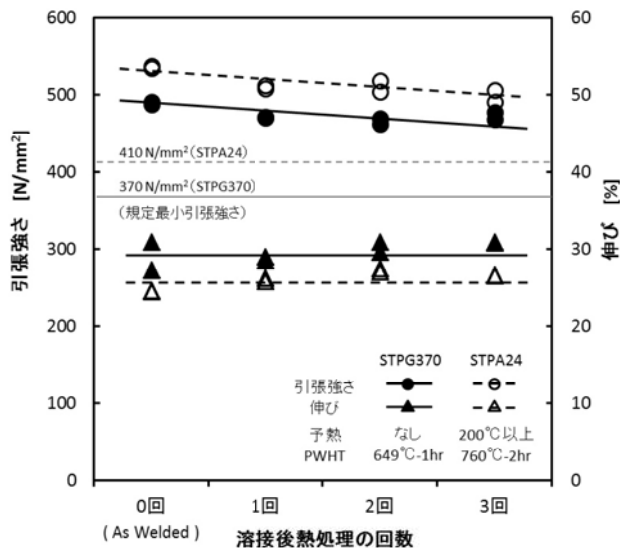


(c) As Welded (STPA24)

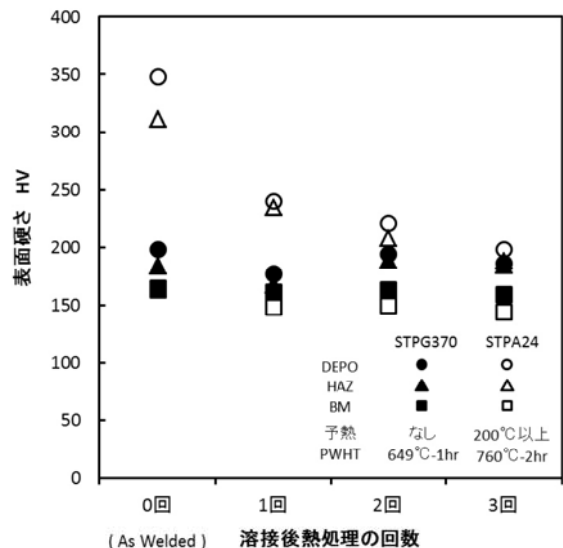


(d) 溶接補修 3 回 (STPA24)

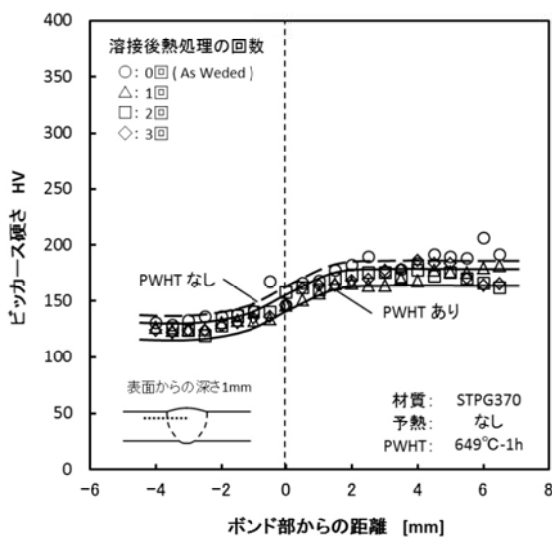
図 6 溶接熱影響部の断面ミクロ組織におよぼす溶接補修の影響



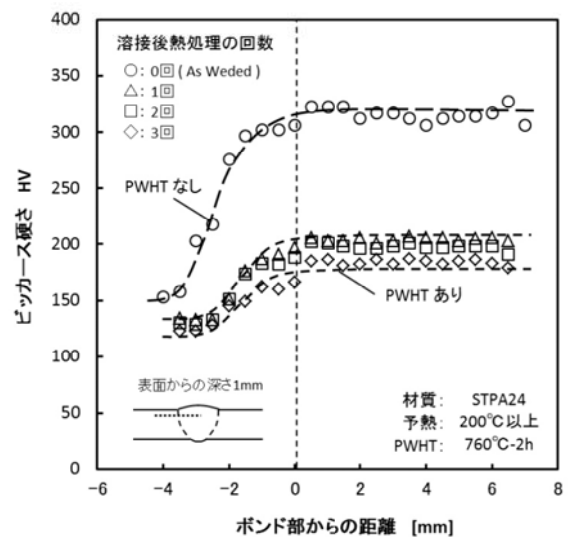
(a) 引張試験



(b) 表面硬さ試験



(c) 断面硬さ試験 (STPG370)



(d) 断面硬さ試験 (STPA24)

図 7 溶接部の機械的性質におよぼす溶接後熱処理の影響

4. おわりに

炭素鋼および低合金鋼を対象に、溶接補修を繰返し行った場合および溶接後熱処理を繰返し行った場合の影響評価を行った。その結果、炭素鋼および低合金鋼の溶接部に対して、溶接補修を3回行っても、溶接後熱処理を3回行っても、継手性能はほとんど低下しないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本エルピーガスプラント協会：JLPA201:2004「球形貯槽基準」
- 2) 科学技術庁原子力安全局長通知:12安局第212号「加工施設及び再処理施設の溶接の方法の認可について」, 平成12年12月

- 3) 高压ガス保安協会, 石油連盟, 石油化学工業協会：KHK/PAJ/JPCA S 0851:2009「高压ガス設備の供用適正評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準」
- 4) 石油学会：JPI-8R-16-2009「溶接補修」
- 5) 中野正大, 安西敏雄, 古川誠喜：SUS304の粒界鋭敏化に及ぼす補修溶接の影響, 高田技報, Vol.14, pp22-27, (2004)



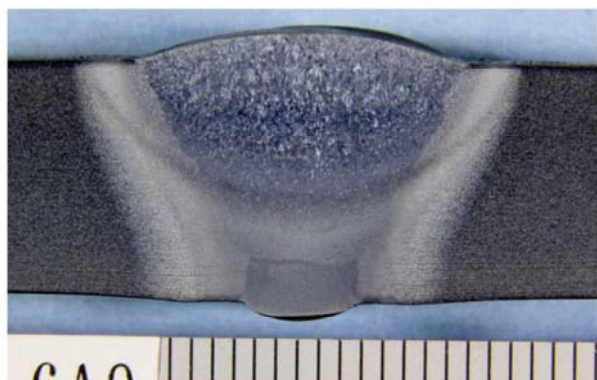
中野 正大 Masahiro NAKANO
(株)高田工業所 技術本部 企画開発部
技術開発グループ グループ長
技術士(金属部門)



(a) As Welded (STPG370)



(b) 溶接後熱処理 3 回 (STPG370)

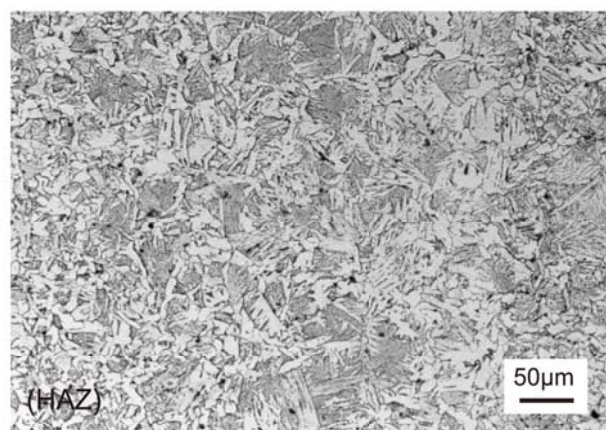
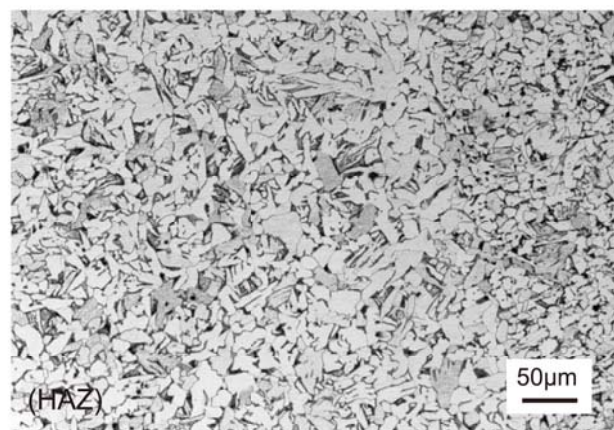
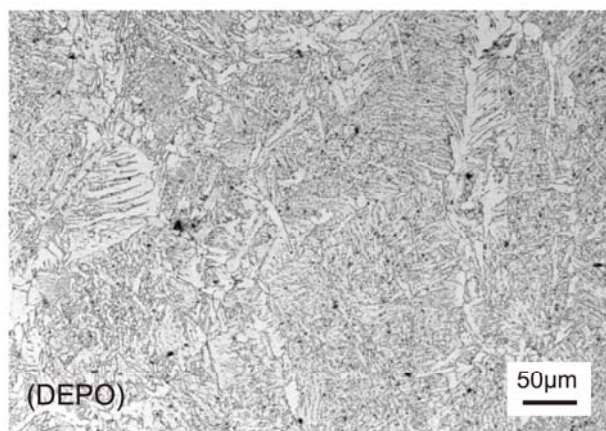


(c) As Welded (STPA24)



(d) 溶接後熱処理 3 回 (STPA24)

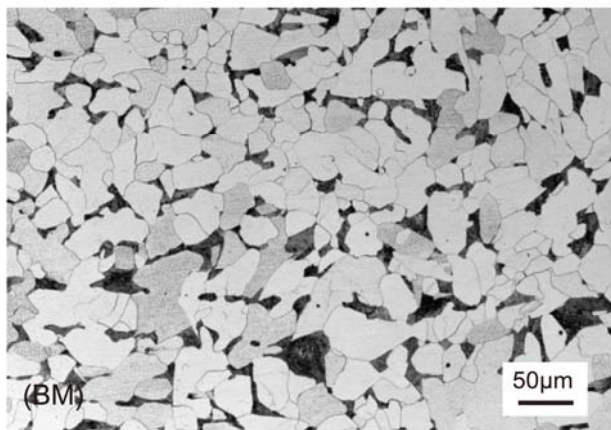
図 8 溶接部の断面マクロ組織におよぼす溶接後熱処理の影響



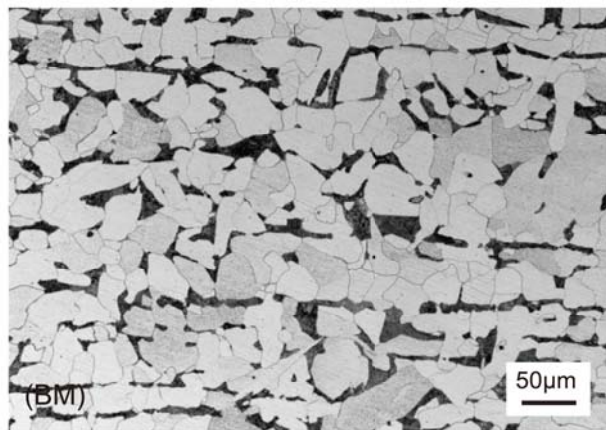
(a) As Welded (STPG370)

(b) 溶接後熱処理 3 回 (STPG370)

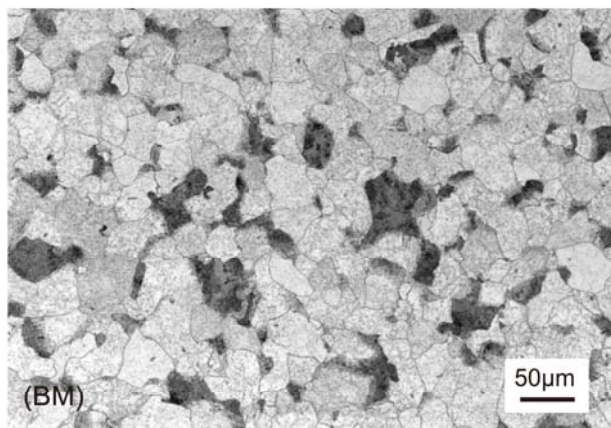
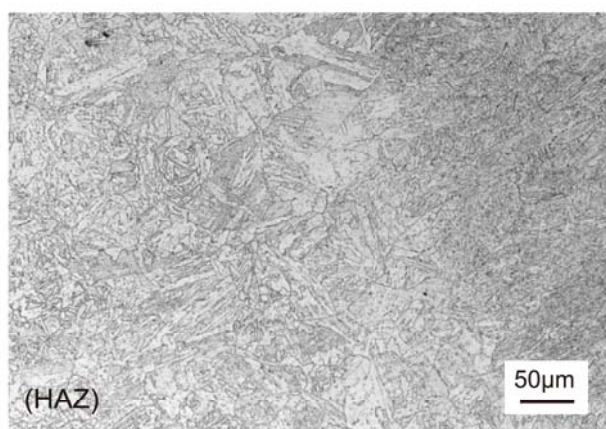
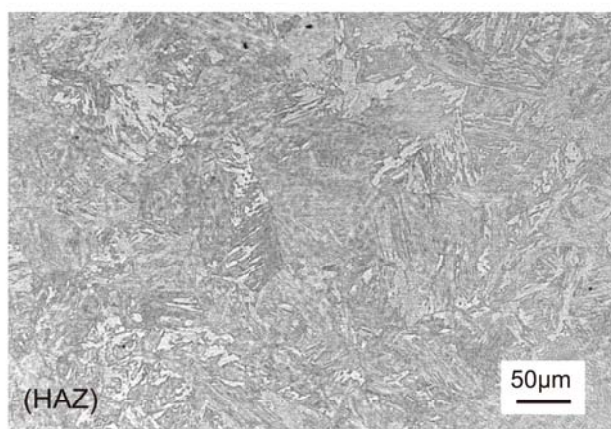
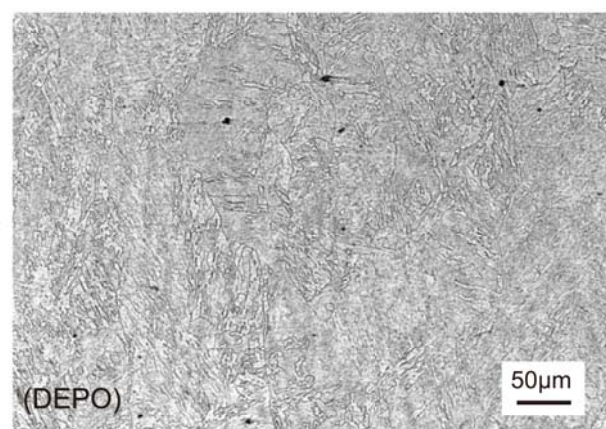
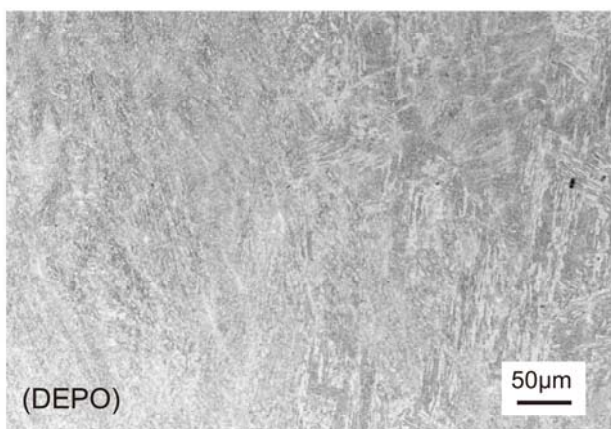
図 9 溶接部の断面ミクロ組織におよぼす溶接後熱処理の影響



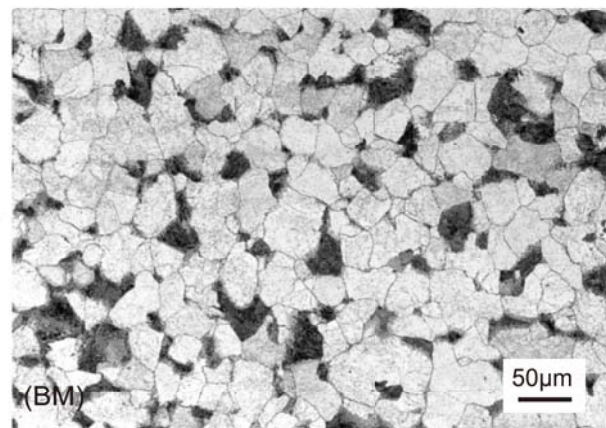
(a) As Welded (STPG370)



(b) 溶接後熱処理 3回 (STPG370)



(c) As Welded (STPA24)



(d) 溶接後熱処理 3回 (STPA24)

図9 溶接部の断面ミクロ組織におよぼす溶接後熱処理の影響 (つづき)