解 説

P W H T*

成 田 圀 郎

Postweld Heat Treatment*

by Kunio Narita**

ま え が き

応力除去焼なまし、あるいは応力焼鈍と呼ばれてきた溶接後熱処理は、古くからボイラー、压力容器などの溶接製品の品質向上の手段として適用され、世界各国の規格、技術基準に規定されてきた。今日も、厚い鋼材や合金鋼で作られる溶接構造物に広く適用されており、大型熱処理炉の建設や、内部加熱による現地熱処理方法の採用により、従来不可能とされていたような大型溶接構造物の溶接後熱処理も実施されている。

鋼材の種類の多様化と品質の向上によって、溶接後熱処理の要否及び熱処理条件についての考え方も次第に変化してきており、溶接構造物の溶接後熱処理の採用と実施には、新しい考え方に基づくエンジニアリングデザインにより、構造物の使用目的・使用条件に見合った適正な溶接の品質を得るようにする必要がある。

1. 溶接後熱処理 (PWHT) の定義

溶接後熱処理 (postweld heat treatment) とは、広義には、溶接後、溶接部又は溶接構造物に行う熱処理のすべてをいう。したがって、いわゆる応力除去焼なましから、溶接後の焼ならし、焼入れ焼戻し、固溶化熱処理などの熱処理、後熱 (postheating) などがすべて含まれる。しかし、いわゆる応力除去焼なまし (stress relief heat treatment 又は thermal stress relief) は溶接後熱処理の代表的なものであり、狭義にはこのことをいい、実際に各国の規格・基準類もこのように使っている。

本稿では、狭義の溶接後熱処理を取り上げ、その他の熱処理については関連を明らかにするとどめる。以下

一般に用いられている略称 PWHT を用いて、この狭義の溶接後熱処理を表すこととする。

PWHT の定義は、国際的に明確に決められてはいないが、大まかには次のようになる。「溶接部又はその部分を、溶接部の性能を改善し、溶接残留応力等の有害な影響を除去するのに適切な温度に加熱し、その後、均一に冷却すること。」温度は一般に変態点以下である。

応力除去焼なましは溶接後熱処理と呼ばれるようになったのは、後に述べるように、前者では熱処理の目的が溶接残留応力の緩和のみと誤解されやすいからである。

2. 溶接後熱処理の歴史と動向

かつて、溶接性の優れた鋼材が得られなかったときには、压力容器等の製造と使用性能に関して PWHT に懸けられた期待は非常に大きかった。当時の鋼材では、塑性加工、溶接熱影響及び残留応力のため、容器製作中に割れを生じたり、加圧又は使用時にぜい性破壊などの事故を発生するおそれが大きかった。当然、塑性加工後の熱処理、継手又は部材ごとの中間熱処理及び溶接完了後の最終熱処理は、重要というよりは必須であった。

戦後までは、炭素鋼で 590~680℃、C-Mo 鋼で C 量に応じて 590~680℃ 又は 680~760℃、Cr-Mo 鋼で鋼種に応じて 720~750℃、730~760℃、745~775℃ のような保持温度と、炭素鋼で厚さ 25 mm 当たり 1 h、最小 1 h、C-Mo 鋼及び Cr-Mo 鋼で厚さ 25 mm 当たり 2 h、最小 2~3 h の保持時間が用いられていた。例えば JIS Z 3701-1960 では、炭素鋼に対して 625±25℃、厚さ 25 mm 当たり 1 h、Mo 鋼及び Cr-Mo 鋼鋼管に対して 725±25℃、厚さ 25 mm 当たり 2 h が規定されていた¹⁾。

今日では、厚さ 50 mm 級までの炭素鋼、高張力鋼等では溶接割れ感受性が低く、かつ、溶接熱影響部も含めて使用条件で十分な破壊じん性を有する鋼材が入手で

*原稿受付 昭和59年7月16日

**正 員 日本鋼管(株)技術開発本部 Member,
Nippon Kokan K.K

きる。したがって、鋼材及び溶接施工条件の選定と施工管理を適切に行えば、PWHT の必要性は大きく低下したと言える。ただし、鋼材規格が許容している化学成分、機械的性質等の幅はかなり大きいので、鋼材の選定の際には十分注意し、溶接性を確認する必要がある。

近年の内外の規格・基準は、これら鋼材や溶接技術の進歩を考慮し、また、新規な鋼種や鋼材製造法を取り入れてかなり新しいものとなってきた。この間、IIW 第 X 委員会は 1950 年代から応力除去焼なましの問題を取り上げ、各国の意見を求め、また、ヨーロッパ諸国で低合金鋼の応力緩和について共同研究を実施した。

これらの諸研究は IIW などでは発表されたが、第 X 委員会に WG (最終名称 Thermal Stress Relief) が作られ、応力除去焼なましの recommendation の検討と関連研究資料の取りまとめが課題として与えられた。WG は 1972 年に第一次案をまとめ、その後の検討を経て最終報告が 1979 年に Doc. IIW X-913-78 "Desirability of postweld heat treatment in welded construction" として発表された²⁾。

IIW の長期にわたる調査・研究は、ヨーロッパ各国の規格、更には ISO/DIS 2694 にかなり取り入れられている。我が国では IIW 第 10 委員会が IIW に対する窓口となっているが、(社)日本高圧力技術協会(HPI)は、応力焼鈍委員会(第一次 1964~66 年、第二次 1968~72 年、第三次 1976~82 年)を組織し、特に第二、三次委員会は共同研究と併せて IIW の資料及び外国規格の動向を検討し提案及び指針をそれぞれ取りまとめた。

特に、第三次応力焼鈍委員会は、後に述べる推奨基準 HPIS E 107~112 の原案を作成するとともに関連事項を併せ集録して「応力焼なまし基準とその解説」¹⁾を 82 年に刊行した。

3. 溶接後熱処理の目的と効果

PWHT の目的を列挙すると次のようになる。

A 残留応力及び変形対策

- A 1 溶接残留応力の緩和
- A 2 形状寸法の安定(精密機械加工のためなど)

B 母材・溶接部及び構造物の性能改善

- B 1 溶接熱影響部(著しい硬化部)の軟化
- B 2 溶接金属の延性の増大
- B 3 破壊じん性の向上
- B 4 含有ガスの除去
- B 5 クリープ特性の改善
- B 6 腐食に対する性能の向上
- B 7 疲れ強さの改善

3.1 残留応力及び変形対策

(1) 溶接残留応力の緩和、溶接残留応力は PWHT によって減小する。図 1 に示すように、残留応力は、まず加

図 1 HW 70 の応力緩和試験結果の例¹⁾

熱過程で材料の降伏点の低下に従って減小し、保持温度に達すると、その温度での降伏点直下のレベルになる¹⁾。更に、保持時間中にクリープ現象(高温リラクセーション)によって残留応力の低下が進行する。温度保持後、冷却すると、図 1 に示すように、ヤング係数の上昇で応力値が上昇する。実際の PWHT では、冷却条件や被加熱物の形状・寸法によって変わるが、不均一冷却による熱応力が生じ、最終的にかなり残留応力が残る。

(2) 形状寸法の安定 PWHT 完了後の形状寸法が時間の経過によって変化しないためには、上記の最終残留応力が低いことが必要である。冷却速度が小さく、炉からの取出温度が低いほど効果がある。

3.2 母材・溶接部及び構造物の性能改善

(1) 溶接熱影響部の軟化と組織の安定これは PWHT の大きな効果の一つである。軟化には高温・長時間の条件が有効であるが、効きすぎて強度不足にならないよう注意が必要である。PWHT による組織安定の効果は一般に認められているが、大入熱溶接などで著しい結晶粗大化が生じたときには十分な改善は望めない。Cr-Mo 鋼では保持時間も重要で、合金成分の量が多いと、厚さが小さくてもあまり短い保持時間は組織安定の面から不適当である。

(2) 溶接金属の延性の増大 溶接のままでは溶接金属の延性が十分でない場合の溶接部の性能改善も、PWHT の目的の一つである。

(3) 破壊じん性の向上 この効果は鋼材の種類や溶接方法・条件によって変わる。焼入れ焼戻し鋼や Ni 鋼などの PWHT では、この点に十分注意する必要がある。溶接残留応力の緩和はぜい性破壊の危険性を減らすので、構造物では PWHT の影響を総合的に考えるべきであ

る¹⁾。

(4) 含有ガスの除去 PWHT によって、水素等の有害なガスは、溶接部及びその近傍から放出・除去される。

(5) クリープ特性の改善 Cr-Mo 鋼のクリープ特性は PWHT 条件の影響を受ける。比較的短時間のクリープ強さは高温長時間の熱処理で低めになる傾向があり、压力容器では低温側の条件が用いられることが多い。しかし、溶接部の長時間クリープのデータが少ないので、クリープ特性からの最適 PWHT 条件の確立は将来の問題として残されている。

(6) 腐食に対する性能の向上 腐食の中でも、応力腐食割れは溶接残留応力と溶接による硬化の影響を大きく受けるので、PWHT はその防止に大きな効果がある。厳しい応力腐食割れ環境が予想される場合の PWHT では、その効果を得るためには計画・実施・管理に特別な配慮が要求される。

(7) 疲れ強さの改善 溶接残留応力は疲れ強さに影響を及ぼすが、単純な場合には、図 2 のハッチした部分に

図 2 繰返し数 N に対する時間強度

設計条件が入っていなければ影響は少ない¹⁾。したがって、疲れ強さの向上を目的として PWHT を行うことは一般にはない。しかし、压力容器のノズル取付部などで、形状による応力集中と溶接残留応力が重量し、複雑な三軸応力状態になるような場合には、PWHT は疲れ破壊の防止に有効と考えられ、実施されることが多い。

4. 溶接後熱処理の問題点

近年、PWHT の要否及び実施条件が厳しく検討されるようになったのは、PWHT が溶接部の多くの性能を改善する反面、次に述べるようなマイナスの効果が示される場合があるからである。新しい鋼材の開発・導入と超厚板の使用の増大は、この問題をより深刻にした。

4.1 母材等の性能の劣化

焼入れ焼戻し高張力鋼などは、焼戻し温度を超える温度で PWHT を行うと、材料の調質効果が失われて強度やじん性が低下する。

超厚板等では、中間 PWHT、最終 PWHT と何回も行われる熱処理の重畳効果で、機械的性質、破壊じん性、クリープ特性などが低下する。この傾向は、次式で表される Larson-Miller のパラメータ(焼戻しパラメータ) P の値で推定することができる。

$$P = T(20 + \log t) \quad \dots \dots (1)$$

ここで P は Larson-Miller のパラメータ、 T は加熱温度(K)、 t は保持時間(h)である。熱処理を繰り返すとき、温度が同じであれば時間 t を加算すればよいが、熱処理温度が異なるときには、計算又は表を用いて一つの温度に対する等価時間を求めて加算しなければならない¹⁾。

2¼ Cr-1 Mo 鋼などでは、高温長時間の熱処理によって溶接金属の粗粒フェライトの生成が進み、強度が低下する。低温用 Ni 鋼で、PWHT によって破壊じん性が損われることはよく知られている。

低強度の炭素鋼では、PWHT による機械的性質の低下は通常問題にされないが、熱処理条件によっては規定の強度を割ることがある。特に、合金鋼と溶接され、合金鋼の熱処理条件で PWHT を受けるときには注意を要する。

3.2 再熱割れの発生

Ni-Cr-Mo-V-B 鋼, Cr-Mo-V-B 鋼, Cr-Mo-B 鋼, Cr-Mo-V 鋼, 2¼ Cr-1 Mo 鋼などでは、PWHT の際に溶接熱影響部に割れを発生する傾向がある。HT 80 鋼板にはこの系統に含まれるものが多い。Mn-Mo 鋼, Mn-Mo-Ni 鋼では板厚が大きい場合には注意を要する。

この割れは再熱割れ (reheat cracking) 又は応力除去焼なまし割れ (SR 割れ) と呼ばれる高温割れで³⁾、後熱の際にも発生する。止端の応力集中はこの割れの発生を助長する。最近、再熱割れの発生し難い鋼材も研究、開発されている¹⁾。

4.3 作業上の問題

大きな構造物は炉に入れることが困難である。厚物の長い円筒などでは中間 PWHT を含む熱処理総時間が長くなり、品質と納期に影響する。厚さの変化が大きい構造物、複雑な構造物、剛性の小さい構造物などでは PWHT による変形、破損、応力の残留などの問題がある。

PWHT 後の溶接補修、改造、部材の溶接取付などは、この問題に上積みされる。

5. 溶接後熱処理の基本計画

溶接構造物の製作では、設計段階で使用目的及び使用条件を十分検討し、“設計の品質”を定め、材料選定や加工・施工の基本条件を定める必要があるが、PWHTの要否及び実施条件の検討を忘れてはならない。

5.1 材料選定

溶接構造物の材料選定では、大きく分けると①主として溶接性による材料選定、②主として使用条件から要求される特殊性能による材料選定の二つの考え方がある。①の場合はもちろん、②の場合にも、高温強度、高温環境特性、耐食性、低温特性等を基本にしながら、溶接性に考慮を払い、溶接性の良い材料を選定しないと、実際の構造物がうまく出来ない。

調質高張力鋼、低温用 Ni 鋼などで PWHT を適用するときには、事前に鋼材メーカーと協議し、発注の際にこのことを明示すべきである。

5.2 溶接後熱処理の適用性と要否

PWHT は炉内で行うのが基本であるが、炉内 PWHT の適用は、①巨大な構造物、②現場で建設される構造物、③形状寸法が加熱に対して不安定な構造物、④複雑な構造物、⑤異材による複合構造物などでは困難である。このため、代替手段として局部加熱 PWHT や現場全体(内部加熱) PWHT が行われ、又は材料や施工に特別な配慮をして PWHT を省略する例もある。

フェライト系鋼材にオーステナイト系ステンレス鋼をクラッドした材料の PWHT は、熱処理条件の影響がそれぞれ異なるため、特別な注意が必要である。

5.3 塑性加工に関する検討

応力除去焼なましの考え方には、材料の塑性加工による劣化の回復も含まれていた。これは PWHT ではないが、今日でも材料、使用条件及び塑性加工の程度によって、塑性加工後に PWHT に準ずる熱処理が行われることがある。塑性加工後の材料の性質が設計条件を十分満足すれば、熱処理は必要ないと言える。

曲げ加工では、次式によりひずみ量を算出して、その値が3～5%を超えると熱処理を検討することが行われている。

$$\text{一方向曲げ} \quad \epsilon = 50 t (1 - R_f / R_o) / R_f \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\text{二方向曲げ} \quad \epsilon = 75 t (1 - R_f / R_o) / R_f \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで ϵ はひずみ量(%), t は成形前の板厚 (mm), R_f は成形後の最小曲率半径 (mm), R_o は成形前の曲率半径 (mm) である。

6. 溶接後熱処理の方法

PWHT 施工方法は、炉内 PWHT、局部加熱 PWHT 及び炉外(現地)全体 PWHT に分けられる。また、構造物が完成してから行う最終 PWHT のほかに、製造過程で行う中間 PWHT がある。いずれの方法によるにせよ、PWHT は①熱処理方法及び設備の選定、②被加熱物又は炉温の計測、③外観・形状の保持対策、④必要な場合の本体・余材又は同時熱処理材による材質試験及びその他必要と認められる事項について十分検討、決定する必要がある。

6.1 炉内 PWHT

加熱炉は、①要求される炉温の制御が可能で、②加熱の際に被加熱物に有害な影響を与えず、温度の酸化及び炎の加熱部への接触を生じないものとする。その他の条件は7に述べてある。温度は、加熱部を対象として熱電対により自動計測するのが原則であるが、炉内温度で加熱部各部の温度が推定できるときは、この方法が認められる場合もある。

6.2 局部加熱 PWHT

局部加熱 PWHT は、炉内又は炉外全体 PWHT ができないか又は実用的でない場合に適用される。配管や円筒形容器などで行われる円周のある幅を加熱する方法が主であるが、ノズル取付部などを局部的に加熱することもある。後者の方法は安易に採用すべきではない¹⁾。

加熱の方法には、①電気抵抗加熱、②電気誘導加熱、③バーナー加熱、④化学反応による発熱体その他多くの方法があり、施工対象や施工場所などの条件に応じて決定される。いずれの方法でも、所要の熱処理条件を満足するように設備及び保温の方法等を用いる必要がある。

局部加熱では、加熱炉に対する要求のほか、①加熱部と非加熱部との温度勾配を緩やかにする、②溶接部の周りに規定の加熱幅及び保温幅をとる、③適切な保温をすることなどが必要である。温度は、加熱部で自動計測するのが原則である。

6.3 炉外全体 PWHT

大型球形貯槽のように、炉内 PWHT ができないものでは、炉外(現地)全体 PWHT (内部加熱 PWHT と同じ)が適用されることがある。国内での実績は少ないが、海外では数多くの実施例がある。日溶協化学機械溶接研究委員会現地焼鈍施工小委員会では、この方法に関する指針を検討し、また、高圧ガス保安協会は、特定設備検査委員会溶接分科会現地焼鈍小委員会の検討に基づき、球形貯槽の炉外熱処理による応力除去基準の試案を1983年10月に説明した。

この方法は、適切な加熱装置(熱源と熱気のかくはん)と外部の防熱によって、炉内 PWHT に近い効果を挙げることができるが、対象物が大きく、現場で行われることから、均一加熱、温度管理、熱膨張対策、安全対策等について綿密な計画、実施及び管理が要求される¹⁾。

7. 溶接後熱処理の条件

今日、PWHT に関する世界各国の規格・基準の規定は、新しい研究や技術を取り入れて変わりつつある。

7.1 PWHT 条件の概要

表1に各種鋼材の PWHT 温度に関するコードの比

表1 PWHT 温度に関するコードの比較

P Number	鋼 種	HPIS	JIS Z 3700 ¹⁾	ISO/DIS 2694	ASME Sec VIII ¹⁾	ASME Sec III ¹⁾	BS 5500	BS 2633(管)	ANSI B 31.3(管)	
1	炭 素 鋼	≧550	≧600	550～600	≧595	595～675	600±20	580～620 630～670 ²⁾	595～650	
3	C-Mo鋼	≧590	≧600	580～620	≧595	595～675	650～680	650～680	595～720	
4	1¼Cr-½Mo鋼	≧590 ³⁾ ≧620	≧600	620～660	≧595	595～675	630～670 650～700	630～670	705～745	
5	2¼Cr-1Mo鋼	≧650 ³⁾ ≧675	≧680	625～750 ⁴⁾	≧675	675～760	630～670 680～720 710～750	680～720 ³⁾ 700～750	705～760	
	5Cr-½Mo鋼	≧675 ³⁾		670～740 ⁴⁾			710～760	710～760		
	9Cr-1Mo鋼	≧700								
9	3½Ni鋼	≧550		550～580	595～635	595～635	580～620	590～620	595～635	

[注] 1) 温度を下げて保持時間を長くする代替条件規定あり

2) 0.25% < C ≤ 0.40% のとき

3) 使用条件、環境又は強度設計条件(高温強度、クリープ、軟化)による

4) 個々の場合には40°Cの温度範囲を指定する

表2 PWHT 実施の条件

			HPIS	JIS Z 3700	ISO/DIS 2694	ASME Sec VIII-I	ASME Sec III	BS 5500	BS 2633(管)
保持時間 (分)	炭 素 鋼	対 厚 さ 最 小	2.4 t ¹⁾ 60	2.4 t ¹⁾ 15	2 t 30(最大120)	2.4 t ¹⁾ 15	2.4 t ¹⁾ 30	2.5 t 60	2.5 t 30
	合 金 鋼	対 厚 さ 最 小	2.4 t ²⁾ 60	2.4 t ²⁾ 15	2.4 t 60, 120	2.4 t ^{1, 2)} 15	2.4 t ^{1, 2)} 30	2.5 t 60, 120, 180 ³⁾	2.5 t, 5 t 30, 60, 120, 180
取入取出最高炉温 (°C)			400	400	400	425	425	400 300 ⁴⁾	
最高加熱速度 (°C/h)	対 板 厚 最 小 最 大		220×25/T	220×25/T	220×25/T	220×25/T	3)	220×25/T	220×25/T
			50	50	55	55		55	55
			220	220	220	220		220	220
最高冷却速度 (°C/h)	対 板 厚 最 小 最 大		275×25/T	275×25/T	275×25/T	280×25/T	3)	275×25/T	275×25/T
			50	50	55			55	55
			275	275	275	280		275	275
加熱・冷却中の温度差最大(°C/m)			130/4.5	130/4.5	150/4.57	150/5.0	3)	150/4.5	
保持中の温度差最大(°C)			[80 ³⁾]	80		85		規定値	
分割のときの重なり最小 (m)			1.5	1.5	1.5	1.5			5 √Rt ≥1

[注] 1) t > 50 mm で通減(表3 [注]参照)

2) t > 125 mm で通減(表3 [注]参照)

3) 施工要領書で定める

較を示す。表2及び表3には PWHT の保持時間、炉に入れ又は取り出すときの最高炉温、加熱・冷却速度の最高値などに関するコードの規定を示す¹⁾。

7.2 保持温度

PWHT 温度(保持温度)は、材料のグループごとに定められる。温度の下限のみが規定される場合と、上限も併せて規定される場合とがある。前者の場合と、後者で温度範囲が広い場合には、設計条件を考慮して適切な温度を選ぶ必要がある。一般に、压力容器などでは強度、クリープを考慮して低めの温度が、配管では軟化に重点を置いて高めの温度が選ばれることが多い。

表 3 厚さ 1 mm 当たりの保持時間と最小保持時間(分)

P Number	鋼 種	HPIS	JIS Z 3700	ASME Sec VIII	ASME Sec III	BS 5500	BS 2633(管)		ANSI B 31.3(管)
							全 体	溶接部のみ	
1	炭 素 鋼	2.4, 60 ¹⁾	2.4, 15 ¹⁾	2.4, 15 ^{1, 3)}	2.4, 30 ¹⁾	2.5, 60	2.5, 30		60/25.4, 60
3	C-Mo鋼	2.4, 60 ²⁾	2.4, 15 ²⁾				2.4, 15 ^{2, 3)}	2.4, 30 ²⁾	
4	1¼Cr-½Mo鋼			5, 120	2.5, 30	60/25.4, 120			
5	2¼Cr-1Mo鋼			2.5, 180	2.5, 120 ⁴⁾				
	5Cr-½Mo鋼			2.5, 120	5, 120				2.5, 120
	9Cr-1Mo鋼	—							
9	3.5Ni鋼	2.4, 60	—			2.5, 60	2.5, 60		60/50.8, 60

〔注〕 1) 50 mmを超えるとき 0.6 (150+t)

2) 125 mmを超えるとき 0.6 (375+t)

3) 最小保持時間は Div. 1 のものを示す。Div. 2 では60分

4) 緩和規定あり

炭素鋼及び高張力鋼の保持温度は、下限 550℃ 程度に下がる傾向にある。

7.3 保持時間

一般に厚さ 25 mm 当たり 1 時間程度で、厚さが大きいときの通減が材料に応じて定められている。厚さが小さいときの最小保持時間は15分から2時間程度である。英国規格 (BS) では、材種によって長い保持時間が規定されている。JIS, ASME では保持温度を下げたときの保持時間の延長が規定され、BS 5500 では等価時間温度式の採用が一部認められている¹⁾。

7.4 加熱・冷却条件

最高加熱速度及び最高冷却速度の規定は、コードによって実質的な変わりはない。装入、取出時の炉温も同様である。構造物の形状・寸法によっては、変形や破損を防止するため、更に厳しい加熱・冷却条件を用いる必要がある。

加熱・冷却中の温度差、保持中の温度差、分割して炉に入れるときの加熱部の重なりなどについても規定がある。保持中の温度差は、熱処理される溶接部については仕様書又は溶接施工要領書で明確にすべきである。

7.5 溶接後熱処理省略可能最大厚さ

表 4 に PWHT 省略可能厚さに関するコードの規定を示す。炭素鋼及び 3.5% Ni 鋼ではかなりの相違が見られるが、次第に厚い方に動いている。これは鋼材や溶接技術の進歩に基づいているが、表の厚さ未満では常に PWHT が必要ないわけではなく、諸条件を勘案して、望ましいときには PWHT を施すべきである¹⁾。

7.6 熱処理条件の選定

具体的な熱処理条件の選定に必要な検討事項を表 5 に示す。PWHT は、この検討に基いた熱処理条件を明確に定め、これに従って実施、管理しなければならない。

8. 溶接後熱処理と関連工程

8.1 溶接施工

PWHT は溶接部の性能改善を目的としているが、溶接欠陥や著しい性能不良をカバーするわけではないので、割れ等の欠陥を防止し、性能の良い溶接部を得るよう、予熱、入熱を含む溶接条件及び溶接施工は慎重に行う必要がある。PWHT 後に溶接補修を要する欠陥等が発見されることは極めて望ましくない。

表 4 PWHT 省略可能最大厚さ

P Number	鋼 種	HPIS	ISO/DIS 2694	ASME Sec VIII	ASME Sec III	BS 5500	ASME Sec VIII管	ASME Sec III管	BS 2633 (管)	ANSI B 31.3(管)
1	炭 素 鋼	38 50	30, 38 50	30 40	15 (20, 30, 40)	35 38	13	13	30	19
3	C-Mo鋼	16, 20	20	15	15				20, 12.7	19
4	1¼Cr-½Mo鋼	13, 16	15	0	0	0	15	13	20, 12.7	12.7
5	2½Cr-1Mo鋼	8, 0	0	0	0	0	15	13	0	12.7
	5Cr-½Mo鋼	0	0			0			0	
9	3½Ni鋼	50	協定	15	15	任意	13	13	15	19

〔注〕 省略規定には、母材の溶接性、化学成分、溶接施工方法、管の最大径、使用条件などが附随していることが多いので注意する必要がある。

表5 PWHT 条件を決める要因

条 件	検 討 す べ き 要 因
1. 保持温度の上限	1.1 変態点以下 1.2 熱処理鋼の焼戻し温度以下 1.3 その他母材及び溶接部の使用上必要な性能が実用的に劣化しない範囲
2. 保持温度の下限	2.1 応力緩和効果 2.2 硬化部の軟化 2.3 水素等のガス除去
3. 保持時間の上限	3.1 母材及び溶接部の使用上必要な性能が実用的に劣化しない範囲 3.2 製造時間の短縮
4. 保持時間の下限	4.1 応力緩和効果 4.2 硬化部の軟化 4.3 水素等のガスの除去 4.4 組織の安定
5. 加熱速度の上限	5.1 厚物の温度不均一の防止 5.2 形状・寸法の変化等による温度不均一の防止 5.3 変形・割れの防止
6. 加熱速度の下限	6.1 炉の温度制御 6.2 製造時間の短縮
7. 冷却速度の上限	7.1 厚物の温度不均一の防止 7.2 形状・寸法の変化等による温度不均一の防止 7.3 残留応力の再発生及び変形・割れの防止
8. 冷却速度の下限	8.1 炉の温度制御 8.2 母材及び溶接部の性能 8.3 再熱割れの防止
9. 装入温度の上限	9.1 形状・寸法の変化等による温度不均一の防止 9.2 変形・割れの防止
10. 取出温度の上限	10.1 形状・寸法の変化等による温度不均一の防止 10.2 残留応力の再発生及び変形・割れの防止

また、複雑な構造物、不連続部のある構造物や部材などを PWHT するときには、変形や破損を防ぐよう、補強補剛、不連続部の修正などの対策が必要になる。

8.2 試験検査

(1) 耐圧・漏れ試験 圧力容器・配管等の耐圧試験及び漏れ試験は PWHT の後に行われる。これらの試験の前後に欠陥が発見され、溶接補修が行われると、一般には PWHT からやり直さなければならない。

(2) 非破壊検査 圧力容器等の最終の非破壊検査は、本来、PWHT 完了後に行うべきものである。しかし、PWHT 後に検査で欠陥が発見されると、補修の内容によっては再び PWHT が行われる。PWHT の繰返しは、材質などに悪影響を及ぼすおそれがあり、好ましいことではない。

そこで、最終 PWHT の前に予備非破壊検査を行い、有害な欠陥がないことを確認することは意味がある。PWHT により欠陥の発生・成長が起こらないと考えられるときには、PWHT 前に本検査を行うこともある。

また、構造物の材質・厚さ・形状などから、溶接後、放冷すると割れの発生等が懸念される場合には、冷却しないうちに PWHT を行うことがある。この際のトラ

ブルを防止するため、特に超厚板等では、溶接に引き続いて中間 PWHT 又はこれに代わる熱処理を施し、非破壊検査に合格してから正規の PWHT を行う方法も行われている¹⁾。

8.3 溶接補修

PWHT 後に溶接補修したり、部材を容器の受圧部材に溶接したりすると、一般に再 PWHT が要求される。ただし、補修溶接が強度上重要でなく、かつ、構造物の使用性能に実用上有害でないと考えられるときには、PWHT を省略してよいこともある。この場合、補修溶接には本溶接よりも更に厳しい計画・施工・管理・検査が要求される。ハーフビード法と呼ばれる溶接補修方法はその例である^{1),3)}。

9. 溶接後熱処理実施上の注意

3～8で PWHT の有効な適用及び問題点と対策について述べたが、その他の注意すべき点を捨い上げる。

9.1 注意を要する材料

調質鋼の焼戻し温度、SR 割れと材料などについては先に述べた。3.5Ni 及び 9Ni 鋼に PWHT を施すときには、保持温度の上下限の幅が小さく、また、300℃以

上の温度での冷却速度を十分低くする必要がある。

Cr-Mo 鋼では、使用条件と要求される強度、クリープ性能を考慮した熱処理条件の選定が重要である。

9.2 異材溶接及びステンレスクラッド鋼

異種の材料を溶接する場合、材料を異種の溶材で溶接する場合の PWHT には特別な配慮が必要である。異種の材料の場合には、一般に重要と考えられる材料の PWHT 条件が適用されることが多いが、このために他の材料が受ける影響を考慮しなければならない。

オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系鋼を溶接したり、フェライト系鋼をオーステナイト系溶接で溶接するときには、PWHT を適用しないことが多いが、適用するときには、オーステナイト系の劣化や炭素の移動による浸炭層の発生などに注意が必要である。

オーステナイト系ステンレス鋼をクラッドしたクラッド鋼板の PWHT は、合せ材を重視するときには行わないのが原則で、このために母材は十分溶接性の優れたものとする必要がある。母材を重視して PWHT を行うときには、合せ材は母材の PWHT 条件で著しい劣化を起こさないものとする必要がある。

あ と が き

2 で述べたように、HPI 応力焼鈍委員会（委員長

渡辺正紀）は第三次委員会までの調査・研究・検討の成果を82年に出版したが¹⁾、更に、その延長線上で現地全体 PWHT、局部加熱 PWHT の調査・研究が日溶協化学機械溶接研究委員会の下で進められている。

本資料は、筆者が第二次応力焼鈍委員会以来の幹事として取りまとめに当たった経験をもとに、PWHT の概略について記述したものである。更に PWHT について知識を深めたい方々には、文献¹⁾を一読されることをお勧めする。

最後に、渡辺委員長はじめ、委員会、小委員会の関係者の方々に深甚の謝意を表明させていただく。

参 考 文 献

- 1) 日本高圧力技術協会（HPI）応力焼鈍（SR）委員会編、応力焼なまし基準とその解説、日刊工業新聞社82年2月
- 2) Doc. IIW X-913-78, Final report of WG "Thermal Stress Relief", Desirability of post-weld heat treatment in welded construction (1979)
- 3) 溶接学会編 新版溶接技術入門 広済堂産報出版, 81年2月

＜出 版 案 内＞

「溶 接 工 学 の 基 礎」

溶 接 学 会 編 丸 善 株 出 版
A 5 判 256 ページ 定 価 3,000 円

溶接学会溶接教育委員会が溶接工学の基礎としての学習の指針を検討し、それにもとづいて大学、高専あるいは生産技術者のための学習書として編纂されたものです。

全国書店で購入できます。

内容項目：1. 溶接構造物の特徴、2. 溶接法概論、3. 溶接熱伝導論、4. 溶接力学、
5. 溶接冶金概論、6. 材料と溶接性、7. 溶接設計、8. 溶接施工と管理
9. 溶接試験法概論、参考図書