

溶接後熱処理 (PWHT) の概要と応用事例 ＜プラントライフサイクルエンジニアリングシリーズ＞

An Outline of Post Weld Heat Treatment and Some Application Examples

< Plant Life-cycle Engineering Series >

中野 光一（技術本部 企画開発部）

Kouichi Nakano (Technology Planning & Development Dept. Technology & Engineering Div. TAKADA Corporation)

溶接後熱処理は、苛酷な使用条件で運転されるプラント設備の安全性を高め長寿命化を図るために各種適用法規・規格で定められており、特定の鋼種や板厚の溶接部に適用され、特定の条件で溶接後に実施される熱処理のことである。そして、溶接技術者のみならずプラントエンジニアに対しては、基礎的な素養として、その目的をはじめ性能改善効果、問題点等に関する十分な理解が必要とされる。本報告では、筆者が九州熱処理技術研究会技術講演会で講演した内容に基づき、プラントエンジニアとして知っておくべき溶接後熱処理の概要を述べるとともに、溶接後熱処理に関するエンジニアリング検討事例として、繰返し熱処理による材料強度低下の評価事例、脆化係数による焼戻脆化感受性の評価事例、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の固溶化熱処理事例等について紹介する。

Post weld heat treatment is sometimes required by the several standards and laws for increasing safety and for lengthening the life time of the plants equipments used under the severe conditions. It is applied for the weldments of specific kinds of steels or thickness. It means the heat treatment executed under specific condition after welding. Sufficient understanding about the purpose and performance improvement effects and problems of the post weld heat treatment is necessary for the plant engineers not only for the welding engineer as the basic background. In this report, outline of the post weld heat treatment for the plant engineers based on the lecture content of the Research Committee for Heat Treatment Technology in Kyushu by the author is explained at first, and then the evaluation of the material strength reduction by the repeated heat treatments, the evaluation of the tempering embrittlement susceptibility by the embrittlement coefficient, case study of the solid solution heat treatments of the austenitic stainless-steel welds are explained as the examination cases.

1. はじめに

溶接後熱処理は、苛酷な使用条件で運転されるプラント設備の安全性を高め長寿命化を図るために各種適用法規・規格で定められており、特定の鋼種や板厚の溶接部に適用され、特定の条件で溶接後に実施される熱処理のことである。そして、これまで使用されてきた応力除去焼きなまし (SR : Stress Relieving) という用語は、溶接後の熱処理の目的が溶接残留応力緩和のみと誤解される恐れがあることから、最近では国内外で溶接後熱処理 (Post Weld Heat Treatment : PWHT, 以下 PWHT と表示) が用語として採用され、一般に PWHT は、「溶接継手部を金属の変態点以下で、かつ溶接部の性能を改善し、溶接残留応力などの有害な影響を除去するのに十分な温度に均一に加熱、一定時間保持し、その後均一に冷却すること」と定義されている¹⁾。

一方、PWHT を「溶接後に実施される熱処理」と広義に解釈すると、鋳鉄・鋳鋼・硬化肉盛り等補修溶接熱影響部の急冷を避け、冷却速度を調整する目的で実施される溶接直後熱処理、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の耐食

性改善のために適用される固溶化熱処理、高分子材料や無機材料（ガラス）等の成型加工や接合加工後に残留応力やひずみ除去の目的で実施されるアニーリング熱処理なども挙げられる。また、溶接と直接関係のない冷間加工などの残留応力やひずみなどの影響を除去するための熱処理は PWHT には含まれないが、PWHT 条件が準用されることが多い。そして、当然理解しておくべき基礎的な素養として、溶接技術者のみならずプラントエンジニアに対しても、PWHT の目的をはじめ性能改善効果、問題点等に関する十分な理解が必要とされてきている。

そこで、本稿では、溶接技術者のみならずプラントエンジニアとして知っておくべき PWHT の概要を述べるとともに、PWHT に関するエンジニアリング検討事例として、繰返し熱処理による材料強度低下の評価事例、脆化係数による焼戻脆化感受性の評価事例、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の固溶化熱処理事例等²⁾についても紹介する。

2. PWHT の概要

2.1 PWHT の目的

一般に溶接部は局所的な加熱・急冷が行われる事になり、

時間経過に伴う温度勾配の大きな個所では、変形やひずみのほかに、溶接残留応力が生じたりする。変形やひずみは製品の形状や寸法に影響を与え、溶接残留応力は、ぜい性的な低応力破壊、クリープ損傷、疲労特性、座屈変形、応力腐食割れ等にも影響する。PWHTはこれらを改善しながら、溶接部の使用性能や健全性を向上させるために実施される。つまり、PWHTの目的は、溶接熱影響部の軟化、溶接金属の延性の増大、破壊靱性の向上、含有ガスの除去、クリープ特性の改善、耐食性の向上、疲労特性の改善、溶接残留応力の緩和、応力腐食割れの防止、形状寸法の安定等を図ることである。

2.2 PWHTによる性能改善効果

PWHTで生じる溶接部の冶金的性質の変化は、以下の三つに集約される³⁾。

- ①不安定な（焼入れのまま）組織の熱的安定な組織への変換：析出物（炭化物など）の生成、成長を伴う内部組織変化であり、硬さの低下、延性・靱性の向上となって現れ、これは低応力破壊（ぜい性破壊）、応力腐食割れ、疲労（特に切欠き感受性）、クリープ、水素侵食等の使用性能に影響を与える。
- ②溶接時に溶解した拡散性水素の逸出：溶接割れの防止のみでなく、低応力破壊の危険防止にも役立つ。
- ③塑性加工などで導入された加工硬化組織の回復：加工硬化組織のPWHT温度での内部組織回復現象による靱性向上を利用するものである。

以上のPWHTで生じる溶接部の冶金的性質の変化を利用した、ぜい性的な低応力破壊、応力腐食割れ、水素侵食、クリープ、疲労特性、溶接残留応力等の性能改善効果について以下に示す。

2.2.1 ぜい性的な低応力破壊の性能改善効果

低応力破壊は、降伏応力以下の外部荷重で生じるぜい性破壊であり、その発生は切り欠き寸法、応力値と切り欠き部の靱性で決まる。合金元素の少ない炭素鋼はPWHTにより靱性が向上する。一方、合金量の多い高張力鋼（780MPa級以上）では、PWHTで靱性が劣化する傾向がある。これは、V、Moなどの炭化物形成元素による析出脆化とP、Sbなどの不純物元素とMn、Si量に関係する焼戻ぜい性の重畳作用による。PWHTによる残留応力の低減効果と、破壊靱性の変化との重畳効果によって継手の破壊性能が決まるので、高張力鋼（780MPa級以上）のようにPWHTにより溶接部の靱性劣化をもたらす場合は、PWHTを行わないほうがよい。

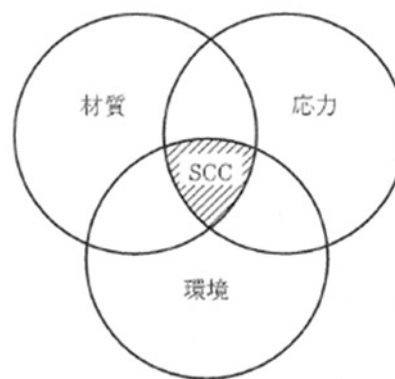


図1 SCC発生因子の模式図⁴⁾
(材質、応力、環境の3因子の条件が満たされた時に割れが発生する。)

2.2.2 応力腐食割れの性能改善効果

応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking : SCC, 以下SCCと表示)の発生要因の模式図を図1に示す。一般に、SCC感受性は硬さで整理される。硬さの限界値は腐蝕環境で異なるが、硫化水素環境ではHV245、液体アンモニアではHV200程度と言われている。応力腐食割れは、図1中の3要素のうち一つでも欠ければ発生しない。従って、PWHTは溶接部の硬さを低下させることと、残留応力を低減させることの両方で、応力腐食割れに対する抵抗性を著しく向上させることから、SCCに及ぼす効果は大きい。ただし、PWHTの効果を発揮させるには、硬さが割れ限界値以下になるように、PWHTの処理条件を選定する必要がある。

2.2.3 水素侵食の性能改善効果

鋼を高温高圧水素環境にさらすと、鋼中に侵入した水素が炭化物と反応してボイドが生成し、機械的性質が劣化する。熱的に不安定な炭化物ほど水素と反応しやすいので、溶接部は水素侵食を受けやすい組織となる。図2は高温高圧水素環境暴露後の絞り値に及ぼすPWHT温度の影響を示しており、適切なPWHTは水素侵食による材質劣化を軽減させることが分かる。

図3は石油化学系プラントの設計やメンテナンス等で多用され、プラントエンジニアとして知っておくべき炭素鋼・合金鋼の高温水素侵食限界線(APIネルソン線図,1983)であり、水素分圧や最高使用温度に応じた各鋼種の使用可能領域を示している。配管設計時における内部流体の水素分圧や使用温度に応じた配管材質の選定や補修計画時の運転条件(水素分圧変動域、使用温度変動域)に応じた配管材質の確認等に広く利用されている。

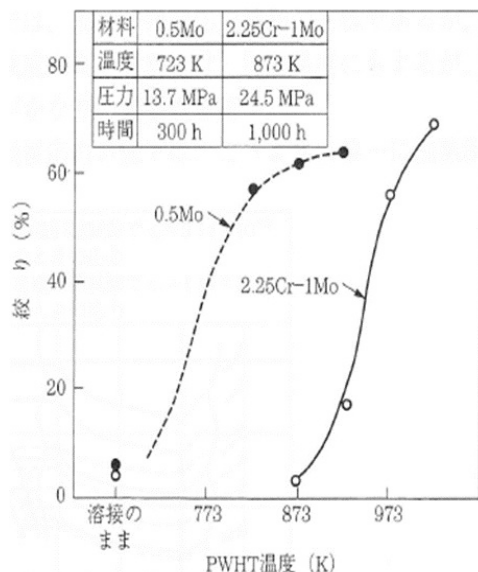


図2 高温高圧水素環境暴露後の絞り値に及ぼすPWHT温度の影響⁴⁾

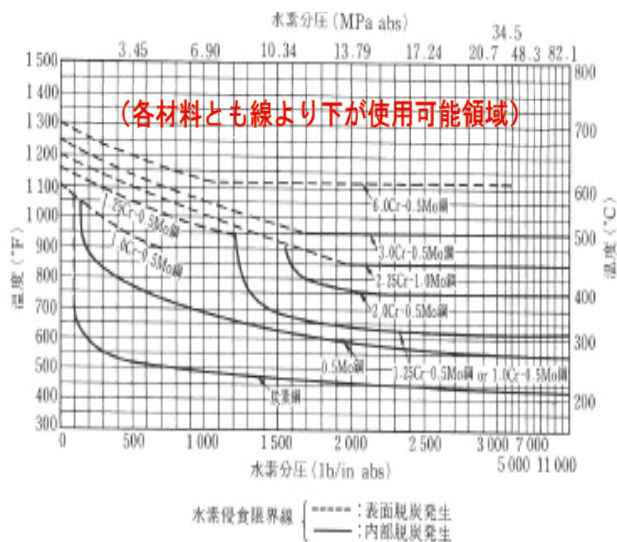


図3 炭素鋼・合金鋼の高温水素侵食限界線⁵⁾
(API ネルソン線図, 1983)

2.2.4 クリープの性能改善効果

耐熱鋼の溶接部は、母材より強度は高いが延性が劣る。溶接のままの溶接部をクリープ試験すると、短時間側では高い強度を示すが、長時間側になるにつれ強度低下とともに破断延性も低下する。

PWHTは、溶接部の延性を回復させ、長時間側のクリープ特性を改善する。ただし、過度の高温PWHTは溶接部の組織を粗くし、クリープ特性を劣化させるので注意を要する。図4に2.25Cr-Mo鋼再現HAZのクリープ破断試験結果の例を示す。1,350℃、1,000℃熱サイクル材の破断強度は母材より高いが勾配が急であり、10,000時間以上では逆に低くなる。725℃のPWHT処理材は、勾配が緩やかとなり、長時間側での強度が改善されている。

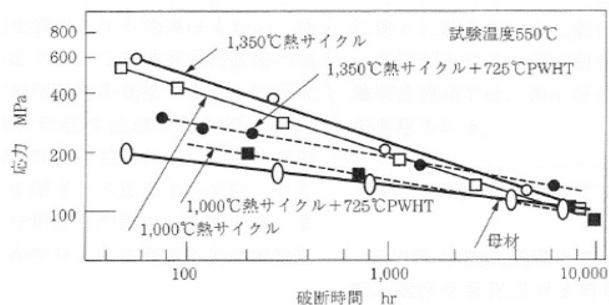


図4 2.25Cr-Mo鋼再現HAZのクリープ破断試験結果の例⁶⁾

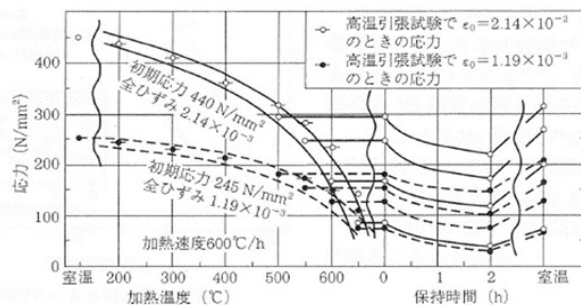


図5 590MPa級高張力鋼の応力緩和試験結果⁶⁾
(化学組成：0.16C, 0.40Si, 1.21Mn, 0.21Mo)

2.2.5 疲労特性の性能改善効果

PWHTが疲労特性に及ぼす作用は残留応力の分布形態とき裂の起点や伝播経路で複雑に変化するので、溶接残留応力は溶接部の疲労強度に影響を及ぼす場合とあまり影響しない場合がある。特に、疲労き裂の起点近傍に引張残留応力が存在する場合には、PWHTは好ましい結果を与える。

ただし、疲労強度(疲れ強さ)の向上には、残留応力軽減効果よりもアンダカット、オーバーラップおよび溶接ビードのイレギュラリティ等の溶接部の形状補正による応力集中係数の低減効果のほうが直接的であるので、特殊な場合を除いて、疲労強度(疲れ強さ)の向上を目的としてPWHTを実施する事は一般には少ない。

2.2.6 溶接残留応力の性能改善効果

残留応力の低減は、溶接部に存在する弾性ひずみが塑性ひずみに変換する事で生じる。この変換は、加熱過程で生じる降伏応力低下に起因する塑性ひずみの生成と高温保持過程で生じるクリープ変形の2つで起こる。図5に示す590MPa級高張力鋼の応力緩和試験結果からもわかる様に、残留応力は、加熱過程で材料の降伏点の低下に従って減少し、PWHT温度に達するとその温度における材料の降伏点直下のレベルまで緩和される。さらに、保持時間中にクリープ現象(高温リラクゼーション)によって残留応力緩和現象が進行する。

2.3 PWHTに関する問題点

PWHTは焼戻処理と類似するもので、母材の強度、靱性を変化させる可能性がある。調質鋼やTMC P鋼ではその製造条件や化学成分を検討し、母材の機械的性質が損なわれないPWHT条件を選ぶ必要がある。

また、冷却が穏やかであるため焼戻ぜい性を考慮する必要や析出硬化元素を多量に含む鋼材では、PWHT過程で、熱影響部に粒界割れ（再熱割れ）を生ずる危険がある。

2.3.1 PWHTによる強度低下

炭素鋼における炭化物の粗大化以外に、Cr-Mo系鋼などでは、新しい相の析出や溶接金属での粗粒フェライトの成長により強度が低下する。強度低下の傾向は、ラーソン・ミラー(Larson / Miller)の焼戻しパラメータ P (Temper Parameter) によって推定することができる。後述の図8および図9にも示しているが、各種Cr-Mo鋼がASTM規格の焼戻しパラメータ規程の最小値を満足する条件としては、

1.25Cr - 0.5Mo 鋼の場合、 $P \leq 21.3 \times 10^3$

2.25Cr - 1Mo 鋼の場合、 $P \leq 21.0 \times 10^3$

3Cr - 1Mo 鋼の場合、 $P \leq 21.5 \times 10^3$

5Cr - 0.5Mo 鋼の場合、 $P \leq 21.8 \times 10^3$

となる。

2.3.2 PWHTによる脆化

フェライト・パーライト組織を持つ低温用鋼で、エチレンプラントなどに用いられる焼ならし型 3.5%Ni 鋼の場合、繰り返し熱処理による焼戻パラメータの増加は靱性の低下を招く。これは、PWHT中の粒界炭化物の粗大化が原因とされ、脆化の抑制には低炭素化や炭化物の粒内微細分布の促進が有効であり、製造技術対策が講じられている。

焼戻マルテンサイト組織を持つ中・高温圧力容器用鋼で、P, Sb, As, Snなどの不純物元素を多く含有するNi-Cr-Mo系合金鋼では、400~600℃で長時間使用された場合、あるいはこの温度域でPWHTを受けた場合、さらにはより高温で焼戻しやPWHTの処理を受けた後、この温度域を徐冷された場合に、旧オーステナイト粒界が不純物元素の偏析により脆化する。この現象は焼戻脆化と呼ばれ、一般には600℃を超える温度域に再加熱し、上記温度域をなるべく速く冷却させると、元の靱性に回復するという可逆性を特徴としている。

2.3.3 PWHTによる再熱割れ

Ni-Cr-Mo-V-B 鋼, Cr-Mo-V-B 鋼, Cr-Mo-B 鋼, Cr-Mo-V 鋼, 2.25Cr-1Mo 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。板厚が大きい場合には注意を要し、「再熱割れ（旧SR割れ）」と呼ばれている。再熱割れは応力集中しやすい余盛止端部の熱影響部粗粒域の旧オーステナイト粒界で発生し、粒界を伝播して通常細粒域で停止しており、溶接金属や母材では観察されていない。再熱割れの発生原因は、PやSなどの不純物元素が粒界に偏析することにより、粒界すべりが引き起こされるものと考えられている。結晶粒の変形能の低下は、Cr-Mo鋼では Mo_2C 、Cr-Mo-V鋼では V_4C_3 と Mo_2C の析出により、それぞれもたらされると考えられている。

2.3.4 調質鋼・熱加工制御(TMCP)鋼の問題点

焼入焼戻高張力鋼の場合には、焼戻温度を超える温度で熱処理を行うと、材料の調質効果が失われて強度や靱性の低下を招く。材料の焼戻温度を正規の温度より低めにし、最終PWHTが母材の焼戻を兼ねる工法を取る場合は、製造過程でのぜい性破壊に注意を要する。加速冷却を用いたTMC P鋼では、PWHTにより強度低下を生じることがある。強度変化の程度は、製造方法とPWHT条件に依存するが、一般には600℃を超えないPWHT温度を選定するのが望ましい。

2.4 PWHT条件の選定

PWHT条件の選定においては、保持温度、保持時間、加熱速度、冷却速度、炉出入れ温度、溶接部厚さ等を検討しておく必要がある。

2.4.1 保持温度

保持温度が低すぎれば、組織変化や残留応力低下が不十分となり、保持温度が高すぎれば強度低下を招く。材料の使用環境に必要な特性が最適となる条件を採用する必要がある。

2.4.2 保持時間

保持時間は、組織変化や残留応力緩和が温度と時間の関数であることに関係する。正規の温度より低い加熱温度を用いる時には現行の諸規定では保持時間を大幅に延長して温度の不足を補う考え方が取られるが、ある温度以下では、PWHT本来の効果は期待できない。

2.4.3 加熱速度

加熱速度は、厚さの増大に応じてその上限が低くなるが、55℃/hより低くすることは一般的に要求されない。ただし、特別な極厚構造物で不均一加熱が好ましくないような場合などでは、さらに低い加熱速度が望ましい。

2.4.4 冷却速度

冷却速度をあまり大きくすると、熱応力のために変形や割れを生ずることがあり、また残留応力の再発生の原因となる。構造物の最大厚さと最少厚さの比が4を超える場合には、冷却速度を遅めにし、厚さが大きい場合にも下限の5 5℃/h を適用せず、280×25 / t [℃/h] 程度(t:板厚)にすることが望ましいこともある。一方、材料の種類によっては叙冷によって靱性が劣化する場合があります、この場合は冷却速度を速くする必要がある。この時、変形や残留応力の点では正規の条件よりも悪くなるので、実質的な影響が生じないように設計や施工上の配慮が必要となる。

2.4.5 炉出入れ温度

被加熱物を炉から出し入れする時の温度は、一般に425℃以下とされているが、特に炉から取り出すときの温度は、構造物の形状・寸法に応じて十分低くしないと、取出し後の冷却過程で大きな残留応力が再発生したり、熱応力による割れや変形を生じる恐れがある。

2.4.6 溶接部の厚さ

溶接部の厚さに応じて保持時間や冷却速度が決められるが、溶接部の厚さは完全溶込突合せ継手では、材料の呼び厚さとし、厚さが異なる時は薄いほうの厚さとする。開先溶接では開先の深さとする。重ね継手では、厚い方の材料の呼び厚さとするが、ノズル補強部では、接合される厚さの和を取るのが望ましい。T型すみ肉継手では、厚い方の材料の呼び厚さとする。溶接部のPWHT条件を決める要因を表1に示す。

2.5 PWHTに関する法規・規格

PWHTに関する主な国内法規・規格を表2に、主な海外法規・規格を表3にそれぞれ示す。

表1 溶接部のPWHT条件を決める要因⁷⁾

No.	条 件	検 討 す べ き 要 因
1	保持温度の上限	①変態点以下②調質鋼の焼戻温度以下③その他母材およ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	①応力緩和効果②硬化部の軟化③水素などのガス除去
3	保持時間の条件	①その他母材およ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製造時間の短縮
4	保持時間の下限	①応力緩和効果②硬化部の軟化③水素などのガスの除去④組織の安定化
5	加熱速度の上限	①厚物の温度不均一の防止②形状・寸法の変化などによる温度不均一の防止③変形・割れの防止
6	加熱速度の下限	①炉の温度制御②製造時間の短縮
7	冷却速度の上限	①厚物の温度不均一の防止②形状・寸法の変化などによる温度不均一の防止③残留応力の再発生および変形・割れの防止
8	冷却速度の下限	①炉の温度制御②母材および溶接部の性能③再熱割れの防止
9	挿入温度の上限	①形状・寸法の変化などによる温度不均一の防止②変形・割れの防止
10	取出し温度の上限	①形状・寸法の変化などによる温度不均一の防止②残留応力の再発生および変形・割れの防止

一般に、新規に設計・建設されるプラント溶接部のPWHT条件は、適用される法規・規格で現在施行されている規定に従って実施される。一方、既設プラントの旧材料の補修溶接の場合には、そのプラントの建設時に適用された法規・規格の規定に従ってPWHT条件を設定する場合があるので、適用法規・規格のみではなく、適用年度の確認も併せて行っておく必要がある。

2.5.1 各種法規・規格とPWHT保持温度の相違

PWHT保持温度をはじめとするPWHT条件は、各種法規・規格により異なる場合があるので、充分確認しておく必要がある。筆者が過去に取りまとめた各種規格における炭素鋼及び低合金鋼のPWHT保持温度、各種規格におけるフェライト系及びマルテンサイト系ステンレス鋼のPWHT保持温度、および各種規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼のPWHT保持温度をそれぞれ、表4～6に示す。

表2 PWHTに関する主な国内法規・規格（一例）²⁾

No.	規 格 名
1	JIS B 8266 :2003圧力容器の構造—特定規格 7.4 熱処理
2	JIS Z 3700 :1987溶接後熱処理方法
3	N.K.-1986 日本海事協会鋼船規則 D編 11.3
4	HPIS-E-107～E-112-1994日本高圧力技術協会
5	高圧ガス保安法特定設備検査規則(平成15・03・28原院第8号)別添1 特定設備の技術基準の解釈第38条
6	ボイラー構造規格(溶接後熱処理)第46条圧力容器構造規格(溶接後熱処理)第43条
7	発電用原子力設備規格溶接規格JSME S NB1-2001 第1部 溶接規格表-4
8	発電用火力設備の技術基準の解釈(平成17・11・17原院第3号, NISA-234c-05-8)別表第21
9	JLPA201-1989 球形貯槽基準 日本エルピーガスプラント協会

表3 PWHTに関する主な海外法規・規格（一例）²⁾

No.	規 格 名
1	API 1104 16th edition May.1983
2	ASME SEC. III DIVISION 1-2004 ND 4620
3	ASME SEC. III NB4620
4	ASME SEC. VIII DIVISION 1-2004 SUBSECTION C PART UCS
5	AWS D1.1 4.4
6	ANSI/ASME B31.1 Power Piping
7	ANSI/ASME B31.3
8	AS (Australian Standard) 1210-1982
9	BSI (British Standard Institute) BS 1514 Part2 1968
10	BSI (British Standard Institute) BS 1113

2.5.2 各種法規・規格外品の熱処理条件

法規・規格のピラミッドを図6に示す。最下段の材料のようにJIS等の規格に規定されていない材料（例えば、鋳鋼品等）を用いる場合には、客先との協議に基づき、材料メーカーの推奨するPWHT条件を検討するようにする。

2.5.3 取り合い部や複数の法規・規格が適用される場合

機器や配管の接続部で、適用法規の取り合い部や、複数の法規・規格が適用される場合については、予め客先や関係法規所管部門との協議により確認しておく必要がある。そし

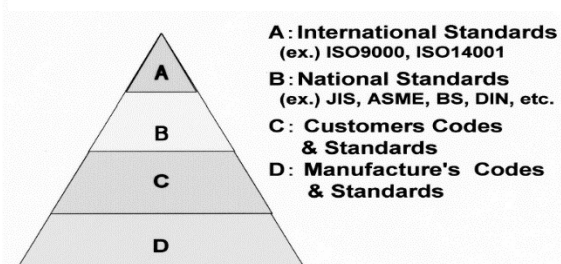


図6 法規・規格のピラミッド²⁾

て、プラントエンジニアとしては、両者を満足できるようにPWHT処理条件を検討しておくことが肝要である。

2.5.4 国内で製造されたJIS規格材を海外で使用する場合の熱処理条件(クロス・コード)

海外のプラント設備に適用される構造規格や溶接部に適用される規格がASME規格である場合、JIS規格で製造された材料をASME/ASTMと同等材として適用するのであれば、客先承認のもと、両方の規格を満足するように溶接部の熱処理条件を設定する必要がある。その逆の場合も同様である。

2.5.5 化学組成から A_{c3} 点、 A_{c1} 点、 M_s 点を求める方法

適用法規・規格によっては、PWHT温度は、 A_{c3} 点を超えない事と推奨あるいは規定している場合もある。化学組成から、 A_{c3} 点、 A_{c1} 点、 M_s 点を求める方法として、下記のような実験式[(1)~(3)式]⁸⁾が提案されており、 A_{c3} 点、 A_{c1} 点、 M_s 点を目安として求める際に利用できる。

$$A_{c3} [^{\circ}C] = 910 - 203 \times (\%C)^{0.5} - 15.2 \times (\%Ni) + 44.7 \times (\%Si) + 104 \times (\%V) + 31.5 \times (\%Mo) + 13.1 \times (\%W) \quad \cdots (1)$$

表4 各種規格における炭素鋼及び低合金鋼のPWHT 保持温度²⁾

[$^{\circ}C$]

P No. (*)	材料区分	1	2	3*	4*	5	6	7	8	9*	10	11
		JIS 8266:2003 圧力容器の構造 一定規格 7.4 熱処理	JIS 3700:1987 溶接後熱処理方法	N.K.-1986 日本海事協会 鋼船規則 D編 11.3	HPIS-E-107~E-112:1994 日本高圧力技術協会	高圧ガス保安法特定設備検査規則(平成15-03-28原第8号)別添1 特定設備の技術基準の解釈 第38条	ボイラー構造規格(溶接後熱処理)第46条 圧力容器構造規格(溶接後熱処理)第43条	発電用原子力設備規格溶接規格 JSME S NB1-2001 第1部 溶接規格表-4	発電用火力設備の技術基準の解釈(平成17-11-17原第3号、NISA-234c-05-8)別表第21	JLPA201-1989 球形貯槽基準 日本エルビーガスプラント協会	ASME SEC. III DIVISION 1-2004 ND 4620	ASME SEC. VIII DIVISION 1-2004 SUBSECTION C PART UCS
P1	C-(Mn)Steel	≥ 595 (*5)	≥ 595 (*5)	≥ 600	≥ 550	≥ 600	≥ 595 (*5)	595 ~ 700	595 ~ 700	≥ 600	595 ~ 675	≥ 595
P3	C-0.3Mo	≥ 595	≥ 595	≥ 600	≥ 590	≥ 600	≥ 595	595 ~ 710	595 ~ 710	-	595 ~ 675	≥ 595
P4	1Cr-0.5Mo	≥ 595	≥ 595	≥ 600	≥ 590	≥ 600	≥ 595	595 ~ 740	595 ~ 740	-	595 ~ 675	≥ 650
P5	2.25Cr-1Mo	≥ 680	≥ 675	≥ 680	≥ 675	≥ 680	≥ 675	680 ~ 760	680 ~ 760	-	675 ~ 760	≥ 675
P9A	2.5Ni	≥ 595	≥ 595	-	≥ 550	≥ 600	≥ 595	595 ~ 680	595 ~ 680	-	595 ~ 675	≥ 595
P9B	3.5Ni	-	-	-	≥ 550	-	-	-	-	-	595 ~ 635	≥ 595
P10A	1.45Mn-0.10V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≥ 595
P10B	1Cr-0.15V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P No. (*)	材料区分	12*	13*	14*	15*	16*	17*	18*	19*	20*	21*	22*
		API 620-1986 Large Welded Low-Pressure Storage Tanks Section 4.18	AWS D1.1 AMERICAN WELDING SOCIETY	ANSI/ASME B31.1-1992 Power Piping 132	ANSI/ASME B31.3-1993 Chemical Plant And Petroleum Refinery Piping 331	ISO TC11 DIS 2694	BSI 1113-1969 Water-Tube Steam Generating Plant	BSI 1515-1978 Part 1 Fusion Welded Pressure Vessels	BSI 2633 Arc Welding of Ferritic Steel Pipe	BSI 5500-1988 Unfired Fusion Welded Vessels	AS 1210-1982 SAA Unfired Pressure Vessels Code	IIW X-WG
P1	C-(Mn)Steel	≥ 593	590 ~ 650 (*5)	600 ~ 650	593 ~ 649	550 ~ 600	580 ~ 620	580 ~ 620	580 ~ 620	580 ~ 620	550 ~ 600	540 ~ 580
	Q.T.Steel	-	≤ 590 (*5)	-	-	$< T.T. (*2)$	-	-	-	-	540 ~ 590	≥ 580 (*4)
P3	C-0.3Mo	-	-	600 ~ 650	593 ~ 718	580 ~ 620	-	-	650 ~ 680	650 ~ 680	580 ~ 620	-
	C-0.5Mo	-	-	600 ~ 650	593 ~ 718	580 ~ 620	-	620 ~ 660	650 ~ 680	650 ~ 680	580 ~ 620	-
	0.5Cr-0.5Mo	-	-	600 ~ 650	593 ~ 718	620 ~ 660	630 ~ 670	620 ~ 660	-	-	620 ~ 700	-
P4	1Cr-0.5Mo	-	-	700 ~ 750	704 ~ 746	620 ~ 660	630 ~ 670	620 ~ 660	630 ~ 670	630 ~ 670	620 ~ 700	-
	1.25Cr-0.5Mo	-	-	700 ~ 750	704 ~ 746	620 ~ 660	630 ~ 670	620 ~ 660	-	-	620 ~ 700	-
P5	2.25Cr-1Mo	-	-	700 ~ 760	704 ~ 760	625 ~ 750	650 ~ 700	660 ~ 700	680 ~ 720 (*4)	630 ~ 670 (*4)	625 ~ 750	-
	5Cr-0.5Mo	-	-	700 ~ 760	704 ~ 760	670 ~ 740	-	700 ~ 740	710 ~ 760	710 ~ 760	670 ~ 740	-
	7Cr-0.5Mo	-	-	700 ~ 760	704 ~ 760	-	-	-	710 ~ 760	-	670 ~ 740	-
	9Cr-1Mo	-	-	700 ~ 760	704 ~ 760	-	-	-	710 ~ 760	-	670 ~ 740	-
P9A	2.5Ni	-	-	600 ~ 650	593 ~ 635	-	-	-	-	-	-	-
P9B	3.5Ni	-	-	600 ~ 630	593 ~ 635	550 ~ 590	-	580 ~ 620	590 ~ 620	580 ~ 620	550 ~ 590	-
P10A	1.45Mn-0.10V	-	-	-	593 ~ 704	-	-	-	-	-	-	-
P10B	1Cr-0.15V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表5 各種規格におけるフェライト系及びマルテンサイト系ステンレス鋼のPWHT 保持温度²⁾

P No.	鋼 種	1	2	3*	4	5	6	7	8*	9*	10*
		JIS Z 3700-1987 溶接後熱処理方法	JIS B 8266:2003 圧力容器の構造—特定規格7.4 熱処理	JLPA201-1989 日本エルビーガスプラント協会	ガス工作物技術基準・同解説 釈例の解説 2次改訂版(平成18年3月) 省令第16条・解説 釈例第71条	高圧ガス保安法 特定設備検査規則(平成15・03・28原院第8号)別添1 特定設備の技術基準の解釈 第38条第56条	発電用原子力設備規格溶接規格 JSME S NB1-2001 第1部 溶接規格表-4	発電用火力設備の技術基準の解釈(平成17・11・17原院第3号、NISA-234c-05-8)別表第21	NK規格-1986 日本海事協会 鋼船規則D編	HPIS E-107~E-112-1994 日本高圧力技術協会	SAS ステンレス協会規格 SAS801:2000 ステンレス鋼溶接施工基準
P6	マルテンサイト系 ステンレス鋼 (13Cr)	特に規定なし	680℃以上 1)T ≤ 50 T/25 (h) Min.1 (h) 2)50 < T 2+(T-50)/100 (h)	特に規定なし	760℃以上 T/25 (h) 1)T < 6 Min. 0.24 (h)	760℃以上 T/25 (h) 1)T < 6 0.25(h) 2)6 ≤ T < 12.5 0.5(h) 3)12.5 ≤ T < 25 1(h)	680~760℃ 1)T ≤ 12.5 0.5 (h) ≤ 2)12.5 < T ≤ 50 T/25 (h) ≤ 3)50 < T 2+(T-50)/100 ≤ (h)	680~760℃ 1)T ≤ 12.5 0.5 (h) ≤ 2)12.5 < T ≤ 50 T/25 (h) ≤ 3)50 < T 2+(T-50)/100 ≤ (h)	特に規定なし	700~760℃ 2×T/25 (h) 590℃以上の温度域における冷却速度は50℃/hを超えてはならない。	700~760℃ T/25 (h) SUS410,SUS403
P7	フェライト系 ステンレス鋼 (18Cr)	特に規定なし	770℃以上 1)T ≤ 50 T/25 (h) Min. (h) 2)50 < T 2+(T-50)/100 (h)	特に規定なし	740℃以上 T/25 (h) 1)T < 6 Min. 0.24 (h)	740℃以上 T/25(h) 1)T < 6 0.25(h) 2)6 ≤ T < 12.5 0.5(h) 3)12.5 ≤ T < 25 1(h)	705~760℃ 1)T ≤ 12.5 0.5 (h) ≤ 2)12.5 < T ≤ 50 T/25 (h) ≤ 3)50 < T 2+(T-50)/100 ≤ (h)	705~760℃ 1)T ≤ 12.5 0.5 (h) ≤ 2)12.5 < T ≤ 50 T/25 (h) ≤ 3)50 < T 2+(T-50)/100 ≤ (h)	特に規定なし	700~820℃ 2×T/25 (h) 590℃以上の温度域における冷却速度は50℃/hを超えてはならない。	700~760℃ 2(h) SUS405,SUS410L 700~820℃ 2(h) SUS430
P No.	鋼 種	11*	12*	13	14	15*	16*	17*	18*	19*	20*
		API 620-1986 Large Welded Low-Pressure Storage Tanks	AWS D1.1-1984 4.4 American Welding Society	ASME SEC. III DIVISION 1-2004 ND 4620	ASME SEC. VIII DIVISION 1-2004 SUBSECTION C PART UHA	ANSI/ASME B31.1-1992 Power Piping	ANSI/ASME B31.3-1993 Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping	AS 1210-1982 SAA Unfired Pressure Vessels Code	BSI 1515-1978 Part 1 Fusion Welded Pressure Vessels	BSI 1640-1962 Steel Butt-Welding Pipe Fittings	BSI 5500-1988 Unfired Fusion Welded Pressure Vessels
P6	マルテンサイト系 ステンレス鋼 (13Cr)	特に規定なし	特に規定なし	565~620℃ 1)T < 13 0.5 (h) 2)13 ≤ T < 125 T/25 (h) 3)125 ≤ T 5+(T-125)/100 (h)	760℃以上 T/25 (h) 1)T < 50 T/25 (h) Min.0.25 (h) 2)50 ≤ T 2+(T-50)/100 (h)	760~800℃ 1)T ≤ 127 T/25 (h) Min.0.25(h) 2)127 < T 5+(T-127)/100 (h)	730~788℃ T/25 (h) Min.2(h) HB < 241 >	760~800℃ 1(h) Min.0.25(h)	特に規定なし	特に規定なし	特に規定なし
P7	フェライト系 ステンレス鋼 (18Cr)	特に規定なし	特に規定なし	705~760℃ 1)T < 13 0.5 (h) 2)13 ≤ T < 125 T/25 (h) 3)125 ≤ T 5+(T-125)/100 (h)	730℃以上 T/25 (h) 1)T < 50 T/25 (h) Min.0.25 (h) 2)50 ≤ T 2+(T-50)/100 (h)	730~775℃ 1)T ≤ 127 T/25 (h) Min.0.25(h) 2)127 < T 5+(T-127)/100 (h)	適用しない	730~780℃ 1(h) Min.0.25(h) 650℃以上の温度域における冷却速度は50℃/hを超えてはならない。	特に規定なし	特に規定なし	特に規定なし

表6 各種規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼のPWHT 保持温度²⁾

No.	1	2	3*	4	5	6*	7*	8*	-
規格名	JIS Z 3700-1987 溶接後熱処理方法	JIS B 8266:2003 圧力容器の構造—特定規格7.4 熱処理	JPI-7R-66-85 ブレハパイプの製作及び検査基準	ガス工作物技術基準・同解説 釈例の解説 2次改訂版(平成18年3月) 省令第16条・解説 釈例第71条	高圧ガス保安法 特定設備検査規則 別添1 特定設備の技術基準の解釈 第38条	NK規格 E編 4章 溶接	ステンレス協会規格 SAS801:2000 ステンレス鋼溶接施工基準	API 1104 16th edition May.1983	-
オーステナイト系ステンレス鋼の 応力除去熱処理に関する記載内容の概要	特に規定なし	母材の厚さにかかわらず原則として溶接後熱処理を行わないが、必要とするならば当事者間で協議する。合せ材がオーステナイト系ステンレス鋼の場合、合せ材の溶接後熱処理は原則として行わない。溶接後熱処理を行う場合は、溶接後熱処理の温度、保持時間などについて、注文者と製作者の協議によって、あらかじめ明確にする必要がある。	規定なし。 部品の熱処理の規定はあるが、構造物については規定しない。 ステンレスクラッド鋼板及び加工基準には一般に合せ材材の材料を必要とする規定は行っていない。合せ材が304,316の場合は、550℃以下で長時間保持する。	オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部は、応力除去を行うもの除外例となっている。従ってオーステナイト系ステンレス鋼に対しては、応力除去を行わなくてもよいという考え方である。	オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部は、溶接後、応力除去のための熱処理は基本的に行わなくてもよいという考え方である。	承認を得て省略化(明記はされていない)時に切欠き、剛性の優れた材料を使用する場合に省略することができるとある。オーステナイト系ステンレス鋼はこれに該当するものと思われる。	応力除去は、原則として低炭素オーステナイト系ステンレス鋼および安定オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部で、残留応力が特に悪い影響を与える場合に行う。品物全体を850~930℃に均熱し、25mmにつき1hr以上保持、12mm以下は、1mmにつき2分以上、最低10min保持空中放冷。	規定なし。 非常に一般的な規定しかしていない。	-
No.	9*	10*	11*	12*	13*	14*	15*	16*	17*
規格名	ASME SEC. III NB4620	AWS D1.1 4.4	ANSI/ASME B31.1 Power Piping	ANSI/ASME B31.3	AS規格 Section 26 Part III ボイラ、火なし圧力容器など	LR規格 Part 5 Chapter 17 Section 10 機械装置及び圧力容器の溶接	AS (Australian Standard) 1210-1982	BSI (British Standard Institute) BS 1514 Part2 1968	BSI (British Standard Institute) BS 1113
オーステナイト系ステンレス鋼の 応力除去熱処理に関する記載内容の概要	要求も禁止もしていない。	設計図又は設計仕様により要求されている場合には、溶接構造物は応力除去熱処理を実施されるべきであるが、最終仕上げは熱処理後実施される。	Table 132 P-No.8 Gr. No.1,2,3 Noneとなっている。 注)として、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接後熱処理は要求されることが禁止されていないとなっている。	Table 331.3.1 None となっている。 基本的には、溶接後熱処理は実施しない方針であり、詳細の記述はないが、曲げや成形等の加工により生じる残留応力除去に関しては考慮している。	材料に適した条件で行う。 合金鋼については材料により行うことになっているが、Cr-Mo鋼程度の合金鋼の範囲は考慮されているものと思われる。	規定なし。 素材、部品については規定あり。	Table 4.2.17.3 オーステナイト系ステンレス鋼ASTM A240 Gr304の後熱処理は、命令、委任ではなく当事者間の同意のもとに実施されるべきだとされている。【参照】4.2.17.11 オーステナイト系ステンレス鋼の後熱処理は要求もしないが禁止もしていないとしている。又、腐食抵抗が要求される場合は固溶化熱処理を推奨し、その条件を示している。	溶接後熱処理は、あくまで客先の要求に基づいて行われ、熱処理条件は、客先と施工業者、当事者間の同意の上で決定されるとしている。	規定なし。 部品の熱処理の規定はあるが、構造物については規定は見当たらない。 部品の熱処理例 180℃-12Ni 1070℃-1120℃ 20min/板厚25mm

$$A_{cl}[^{\circ}\text{C}] = 723 - 10.7 \times (\% \text{Mn}) - 16.9 \times (\% \text{Ni}) \\ + 29.1 \times (\% \text{Si}) + 16.9 \times (\% \text{Cr}) \\ + 290 \times (\% \text{As}) + 6.38 \times (\% \text{W}) \quad \dots (2)$$

$$M_s[^{\circ}\text{C}] = 550 - 361 \times (\% \text{C}) - 39 \times (\% \text{Mn}) \\ - 35 \times (\% \text{V}) - 20 \times (\% \text{Cr}) - 17 \times (\% \text{Ni}) \\ - 10 \times (\% \text{Cu}) - 5 \times (\% \text{Mo} + \% \text{W}) \\ + 15 \times (\% \text{Co}) + 30 \times (\% \text{Al}) \quad \dots (3)$$

2.6 プラントエンジニアが知っておくべき留意点

2.6.1 板厚の異なる部材の溶接部のPWHT条件

薄い板厚の部材（厚さ： t_1 ）と厚い板厚の部材（厚さ： t_2 ）とが、図7のように溶接される場合の溶接部のPWHT条件は、適用法規・規格に規定が無い場合には、客先との協議により確認しておく必要があるが、一般的に以下のように実施される場合が多い。

(a) 熱処理温度

薄い板厚の部材（厚さ： t_1 ）に合わせる。

(b) 加熱速度

厚い板厚の部材（厚さ： t_2 ）に合わせる。

(c) 冷却速度

厚い板厚の部材（厚さ： t_2 ）に合わせる。

2.6.2 異種材料継手のPWHT

(a) 炭素鋼と低合金鋼およびグレードの異なる低合金鋼同士 の溶接部

強度が重視される場合には強度低下を避けるため低級鋼側のPWHT温度が選定され、水素脆化などの耐環境性が重視される場合には高級鋼側のPWHT温度が選定される。

(b) オーステナイト系ステンレス鋼と炭素鋼や低合金鋼の 溶接部

あらかじめ炭素鋼や低合金鋼側の開先面にオーステナイト系ステンレス鋼あるいはニッケル基合金を肉盛溶接（バタリング）し、その状態で炭素鋼あるいは低合金鋼側の条件に合わせたPWHTを施工しておく。その後はPWHTを実施しない。

(c) フェライト系及びマルテンサイト系ステンレス鋼と炭 素鋼や低合金鋼の溶接部

溶接材料は高クロムのフェライト系ステンレス鋼(17Cr)、オーステナイト系ステンレス鋼あるいはニッケル基合金が用いられるが、クロム量の差により浸炭層や脱炭層が形成



図7 板厚の異なる部材の溶接部（模式図）

される。一般に、PWHT温度は炭素鋼あるいは低合金鋼側の条件で適用されることが多い。

2.6.3 再熱割れ感受性指数

高張力鋼およびCr-Mo鋼の溶接残留応力を緩和するために、約600～700℃の温度範囲でPWHTを行うと、溶接止端部から割れを生じることがある。先述のようにこの割れは再熱割れと言われ、溶接残留応力、応力集中が高い場合にPWHTの過程でHAZ粗粒部に生じる粒界割れで、析出硬化元素含有量が多いほど生じやすく、ひずみ集中による延性低下割れである。以下の(4)式および(5)式に示す二つの再熱割れ感受性の評価式が提案されており、いずれも正の値で割れやすくなる。PWHTを実施する前に、これらの再熱割れ感受性指数の値を確認しておく必要がある。

$$P_{SR}(\%) = \text{Cr} + \text{Cu} + 2\text{Mo} + 10\text{V} + 7\text{Nb} + 5\text{Ti} - 2 \quad \dots (4)$$

$$\angle G(\%) = \text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 8.1\text{V} - 2 \quad \dots (5)$$

3. PWHTに関するエンジニアリング検討事例

3.1 繰返し熱処理による材料強度低下の評価事例

【ラーソン・ミラー(Larson/Miller)の焼戻しパラメータ】

石油精製や原子炉に用いられる压力容器は益々大型化し、それに伴い板厚は増加の一途をたどっている。このような極厚鋼材の場合、製作過程で数回のPWHTを受けることがあり、溶接施工の途中でも溶接割れの防止のために中間PWHTを受けることもある。従って、PWHTの総時間は著しく長くなる。一方、熱履歴を受けた既設材の補修を行う際には、既設材の強度が熱履歴によりどの程度低下しているのかをあらかじめ推定しておくことは重要である。このため、繰返し熱処理や長時間加熱による機械的性質の変化（強度や焼戻し脆化）に対し、鋼材製造時の焼戻し方法および温度以降の熱履歴を十分考慮する必要がある。

長時間加熱や複数の熱履歴によるラーソン・ミラーの焼戻しパラメータ P は、(6)式により与えられる。

$$P = T(20 + \log t) \quad \dots (6)$$

但し、 T : Tempering Temperature, [K]

t : Tempering Time, [Hr]

複数の熱履歴がある場合のラーソン・ミラーの焼戻しパラメータ P の算出は、先ず、(7)式に示すように代表的な共通の等価熱処理温度 T_s を設定して、等価熱処理時間 t_{sn} を求めておく。この時、(7)式中の対数は、常用対数 ($\log$) である事に留意する必要がある。次に、(8)式を用いてそれらの合計を求めると、複数の熱履歴がある場合のラーソン・ミラーの焼戻しパラメータ P を求める事ができる。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= T_1 (20 + \log t_1) = T_s (20 + \log ts_1) \\ P_2 &= T_2 (20 + \log t_2) = T_s (20 + \log ts_2) \\ &\sim \\ P_n &= T_n (20 + \log t_n) = T_s (20 + \log ts_n) \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\therefore P = \sum P_i = T_s [20 + \log (ts_1 + ts_2 + \dots + ts_n)] \quad \dots (8)$$

P値を用いて、図8に示す焼戻しパラメータと引張強さの関係や、図9に示す焼戻しパラメータと破面遷移温度 vT_s の関係から、熱履歴を受けた既設材の引張強さや破面遷移温度を推定することができる。

3.2 脆化係数による焼戻脆化感受性の評価事例

ブルースカト (R.Brusscato) の脆化係数は、焼戻脆化感受性指数として、(9)式で示される。

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) / 100 \quad [\text{ppm}] \quad \dots (9)$$

脆化を生じない一応の目安として $\bar{X} \leq 20 \text{ ppm}$ が挙げられていたが、1990年に、ある石油会社の加熱炉管では、

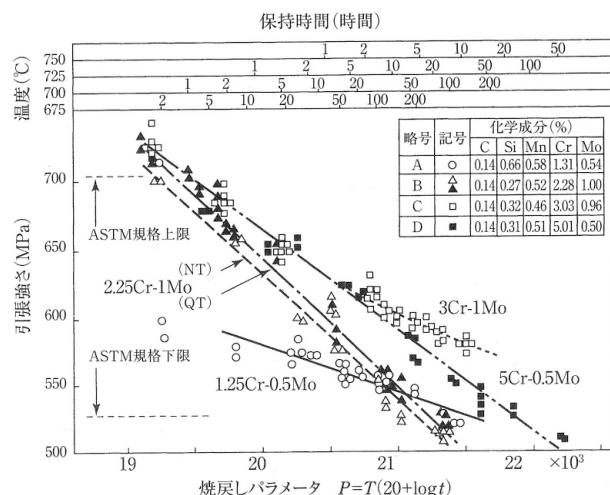


図8 焼戻しパラメータと引張強さの関係⁹⁾

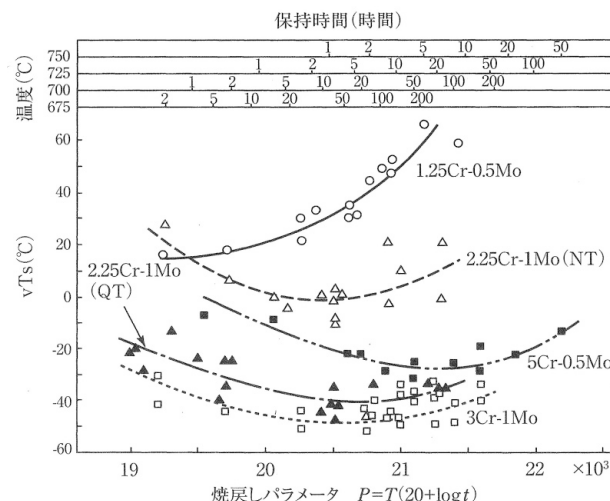


図9 焼戻しパラメータと破面遷移温度 vT_s の関係⁹⁾

$\bar{X} \leq 15 \text{ ppm}$ (目標値 $\bar{X} \leq 10 \text{ ppm}$) が母材や溶接材料に対して設定された。そして、それぞれMill Sheetへの明示が求められた。表7に母材の $\bar{X}$ 値(一例)、表8に溶接材料の $\bar{X}$ 値(一例)、並びに、表9に溶接材料の品質保証書中に記載された $\bar{X}$ 値(一例)をそれぞれ示す。

3.3 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の固溶化熱処理事例(溶接部と母材部の等電位化による耐食性改善)

一般にオーステナイト系ステンレス鋼溶接部は、鋭敏化温度域にさらされるため、クロム炭化物(Cr_{23}C_6)が析出し、

表7 母材の $\bar{X}$ 値(一例)

種類	規格	規格値 $\bar{X}$ Max	Mill Sheet $\bar{X}$
STPA23	JISG3458	30	18
STPA25	JISG3458	30	23
STFA26	JISG3467	30	10

表8 溶接材料の $\bar{X}$ 値(一例)

銘柄(*)	規格	規格値 $\bar{X}$ Max	Mill Sheet $\bar{X}$
TGS1CM	JISZ3316	25	5
(現:TG-S1CM)	JISZ3317	25	7
TGS5CM	JISZ3316	25	9
(現:TG-S5CM)	JISZ3317	25	10
TGS9CM	—	—	7
(現:TG-S9Cb)	JISZ3317	25	7

*神戸製鋼所製

表9 溶接材料の品質保証書中に記載された $\bar{X}$ 値(一例)²⁾

Trade Name (品名)		Size (寸法)	Applicable Code (適用規格)
TGS-1CM		0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 3.2	JIS Z 3316-1989 YGT1CM
Applicable Welding Process (適用溶接法) ☒ SMAW (半自動アーク溶接) ☒ GTAW (ガス・メタルアーク溶接) ☒ GMAW (ガス・ワイヤアーク溶接) ☒ SAW (サブマージングアーク溶接) ☐ TIGW (TIGアーク溶接)			
Applicable Welding Conditions (適用溶接条件) ☒ WELDING PROCEDURE (溶接工程) ☐ WELDING POSITION (溶接位置) ☐ SHIELDING GAS COMPOSITION AND QUANTITY (シールドガス組成と流量)			
PREHEAT TEMP. (予熱温度) ☐ ACCORDING TO THE CODE (適用規格に準ずる) ☐ INTERPASS TEMP. (溶接間温度) ☐ ACCORDING TO THE CODE (適用規格に準ずる)			
POLARITY (極性) ☒ DCEN ☐ CONSUMABLE (溶接材料の消耗品) ☐			
CHEMICAL COMPOSITION (化学組成) (単位: wt%) ☐ C ☐ Si ☐ Mn ☐ P ☐ S ☐ Cu ☐ Cr ☐ Mo ☐ Ni ☐ N ☐ As ☐ Sb ☐ Sn ☐ Al ☐ Ti ☐ B ☐ Zr ☐ Hf ☐ Nb ☐ Ta ☐ W ☐ Co ☐ Fe ☐ Other ☐			
TENSILE PROPERTY OF WELD METAL (溶接金属の引張特性) ☐ TENSILE STRENGTH (引張強さ) ☐ ELONGATION (伸び) ☐ REDUCED SECTION (縮小断面) ☐ IMPACT VALUE OF WELD METAL (溶接金属の衝撃値) ☐ KICK (キック) ☐ BLOW (ブロー) ☐			
HARDNESS OF WELD METAL (溶接金属の硬度) ☐ HARDNESS (硬度) ☐ TEST PROCEDURE (試験手順) ☐			
RADIOGRAPHIC SMOOTHNESS OF WELD (溶接の放射線平滑性) ☐ FILLET WELDING (溶接の溶接) ☐ COVERING MOISTURE CORROSION (溶接金属の被覆水分腐食) ☐ DIFFUSIBLE HYDROGEN CONTENT OF WELD METAL (溶接金属の拡散性水素含量) ☐			
* $\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) / 100$			
We guarantee the quality of the welding consumables within the scope mentioned above. (上記の範囲内で溶接材料の品質を保証します)			
Note: The items indicated with * mark are only available on the items mentioned in the mark. If the additional order of the items are not stated herein, the items are not to be supplied. (注: *印で示した項目は、*マークで印したもののみを提供いたします。前記の範囲外で追加の注文がない場合は、本要約書の発行年月日における範囲を適用いたします。)			
APPROVED BY (承認)		PREPARED BY (作成)	

耐食性が低下することが知られている。これを補うため、低炭素型オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304L)や極低炭素型オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304ULC)等が開発されてきた。また、TiやNbを含有した安定化型オーステナイト系ステンレス鋼(SUS321,SUS347)も開発されてきた。しかし、これらの溶接部におけるクロム炭化物は、改善によって減少するもののゼロではなく、また、溶接部と母材部は完全な等電位ではない為、溶接部と母材部との間には電位差に起因する腐食電池が生成し、ガルバニック腐食の原因となる。また、オーステナイト系ステンレス鋼と炭素鋼との異材接合部のみならず、オーステナイト系ステンレス鋼同士の間でもロットNo. が異なる場合や母材と化学組成の異なる溶接材料を用いた場合等には、溶接部と母材部は完全な等電位ではない為、重量比が大きな接合材が長期間腐食環境に曝されるとガルバニック腐食が発生する事になる。この事は、電気化学的なインコ法や交番電流法等により、透明な酸化被膜を形成させると、溶接部と母材部では厚みが一定とならず、光の干渉色が異なってくる事からも確認できる。

従って、特殊な食品や医薬品製造機器・プラント等で、ガルバニック腐食防止が求められる際には、同一ロットの母材を用いて、母材から切り出した共金による共金溶接か、溶加材を用いない「なめ付け」溶接を実施し、その後、固溶化熱処理を行う事により、溶接部と母材部とを等電位化することが推奨される¹⁰⁻¹²⁾。

固溶化熱処理後の残留応力が問題となる場合には、必要に応じて残留応力除去を目的としたPWHTを実施するとよいと考えられる¹¹⁻¹²⁾。さらに、微生物誘起腐食等に対する耐食性を高めるためには、溶接部の凹凸をなくす目的で余盛を除去し、母材と同等程度の表面粗さとなるよう溶接部の表面を研磨することが望まれる。

4. おわりに

PWHTは、苛酷な使用条件で運転されるプラント設備の安全性を高め長寿命化を図るために各種適用法規・規格で定められており、本報告では、筆者が九州熱処理技術研究会技術講演会で講演した内容を中心に、プラントエンジニアとして知っておくべきPWHTの概要を述べるとともに、PWHTに関するエンジニアリング検討事例として、繰返し熱処理による材料強度低下の評価事例、脆化係数による焼戻脆化感受性の評価事例、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の固溶化熱処理事例等について紹介した。溶接技術者あるいはプラントエンジニアを志す諸氏にとって少しで

も役に立てれば幸いである。

<参考文献>

- 1) 溶接後熱処理基準とその解説, (社)日本高圧力技術協会 応力焼鈍(SR)委員会, 日刊工業新聞社, pp.3-76, (1994)
- 2) 中野光一: 私の熱処理業務体験談-金属材料のPWHT(溶接後熱処理)を中心に-, 平成22年度九州熱処理技術研究会第110回技術講演会資料, pp.1-34, (2010)
- 3) (社)日本熱処理技術協会編: 熱処理技術便覧, 日刊工業新聞社, p.289, (2000)
- 4) (社)日本熱処理技術協会編: 熱処理技術便覧, 日刊工業新聞社, p.290, (2000)
- 5) (社)溶接学会編: 溶接・接合便覧 第2版, 丸善, p.872, (2003)
- 6) (社)日本熱処理技術協会編: 熱処理技術便覧, 日刊工業新聞社, p.291, (2000)
- 7) 成田園郎: PWHT, 溶接学会誌, 第53巻, 第6号, p.282, (1984)
- 8) (社)日本金属学会編: 金属データブック 改訂4版, 丸善, p.162, (2004)
- 9) JIS Z3410 (ISO14731) / WES8103溶接管理技術者再認証別冊資料, (一社)溶接協会編, 第4版, 第5改定, p.74, (2018)
- 10) 中野光一, 他: 「均一着色に適した溶接構造のステンレス鋼製品製造方法」, 特願平3-68834, (1991)
- 11) 中野光一: オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の耐食性や残留応力の改善に関する溶接後熱処理に関する検討, 溶接学会九州支部講演論文集, 第18号, pp.17-20, (2021)
- 12) 中野光一: オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の固溶化熱処理時間による光干渉皮膜厚さの傾斜化, オンラインフォーラムFGMs2021講演要旨集, 傾斜機能材料研究会, p18, (2021)



中野 光一 Kouichi Nakano
技術本部 企画開発部 博士(工学)

Technology Planning & Development Dept.
Technology & Engineering Div.
TAKADA Corporation