

## Temp. No. ⑤ : P-11A Gr. 1 の溶接後熱処理 (PWHT) 温度の適正化

### 1. 現状

溶接部は、溶接時の入熱により、機械的性質が母材と異なり、かつ、残留応力が生じる。これらを改善するため、溶接後熱処理 (以下、PWHT という) が行われる。機械的性質の改善として、熱影響部の軟化、靱性の回復又は金属組織改善等を行う。PWHT の効果を支配する主要因子としては、PWHT 温度と保持時間があり、適正な温度と時間が要求される。

ニッケル鋼で、ニッケル標準合金成分が 3.50% を超え 9.0% 以下の母材区分 P-11A Gr. 1 (代表的なものは、9%ニッケル鋼) の PWHT 温度は、595~680℃となっており、母材の靱性が低下する焼戻し温度 (600℃前後) を超えたものになっている。

ただし、実機の P-11A Gr. 1 に対して PWHT を実施した実績はない (溶接部の厚さ 50 mm 以下では PWHT を行う必要はないため、実機ではこの厚さ以下で溶接されている)。

### 2. 目的

母材区分 P-11A Gr. 1 の PWHT 温度を母材の靱性が低下しない適正な温度に改正する。

### 3. 検討

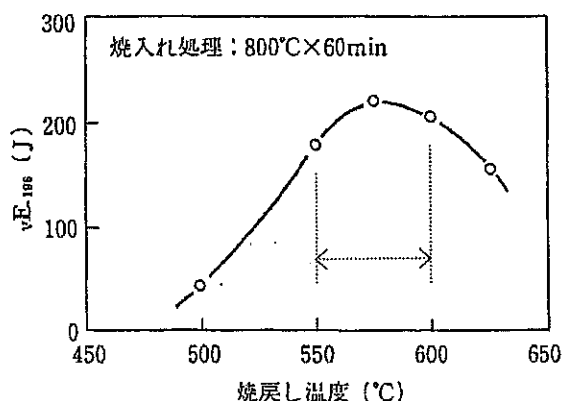
下記の検討結果を総合的に判断し、母材区分 P-11A Gr. 1 の PWHT 温度は、550℃~585℃に改正することは妥当と判断される。

#### 3.1 焼戻し温度における靱性の影響[1]

P-11A Gr. 1 である 9%ニッケル鋼には、焼戻し温度が 550~600℃の温度で高い靱性を示す最適な焼戻し範囲 (図⑤-1) が存在する。すなわちこの温度以外では、靱性が著しく低下する脆化域が存在する。これらの二つの脆化の原因は以下のとおりで、研究論文[1]においても示されている。

- a. 400~500℃ : 粒界脆化による脆化域 (焼戻し脆化)
- b. 600℃を超える : 析出オーステナイトの不安定化による脆化

後述する米国機械学会のボイラー及び圧力容器規格 (以下、ASME 規格という) Sec. VIII Div. 1 の PWHT 温度範囲は、この靱性が著しく低下する 600℃前後の焼戻し温度を避ける目的で 550~585℃に設定しているものと言える。



図⑤-1 9%ニッケル鋼の焼戻し温度における靱性の影響  
(保持 : 20 分、0.05C-0.25Si-0.53Mn-9.09Ni) [1]

### 3.2 ASME Sec. VIII Div. 1 での P-11A Gr. 1 の PWHT 温度

発電用火力設備の技術基準の解釈(以下、火技解釈という)と ASME 規格での P-11A Gr. 1 の材質を表⑤-1 に示す。何れも、9%ニッケル鋼が該当する。

表⑤-1 火技解釈と ASME 規格での P-11A Gr. 1 の材質

火技解釈 別表第 9 母材の区分[定義]	火技解釈材質	ASME 材質	標準成分
P-11A (グループ番号 1) * [ニッケル鋼であって、ニッケル標準合金成分が 3.5%を超え 9.0%以下のもの]	SL9N520	SA353	9%Ni 鋼
	SL9N590	SA553 Type - I	
	STPL690	SA333 Gr.8	
	STBL690	SA334 Gr.8	
	火 SFL9N690	SA522 Type - I	

\* : LNG タンク等に用いられる 9%Ni 鋼で、P-11A (グループ番号 1) に相当する材料は「別表第 1」(その 1)及び(その 2)に掲げられている。

ASME 規格での P-11A Gr. 1 の PWHT 温度範囲を火技解釈と比較して表⑤-2 に示す。

表⑤-2 PWHT 温度範囲の比較

規格・基準	表 No.	母材の区分	PWHT 理温範囲(°C)	備考欄
火技解釈	別表第 21	P-11A Gr. 1	595~680	9%Ni 鋼
ASME Sec. VIII Div. 1	Table UHT-56	P-11A Gr. 1	550~585	9%Ni 鋼

注 : ASME Sec. I では P-11A Gr. 1 の使用が認められていないため、PWHT 温度の規定はない。

### 3.3 JIS 規格及び ASME 規格における母材の熱処理規定

材質例として JIS 規格及び ASME 規格における母材の熱処理規定を表⑤-3 に示す。

JIS 規格及び ASME 規格とも熱処理の方法は同じであるが、JIS 規格では熱処理温度の規定はない。ASME 規格の PWHT 温度は母材の焼戻し(T)温度を超えない範囲と規定されている。

表⑤-3 JIS 規格及び ASME 規格における母材の熱処理規定

規格	材質例	熱処理の方法	熱処理の温度
JIS G3127 JIS G3460	SL9N520 (板) STPL690 (管)	2 回焼きならし後、 焼きもどし	規定なし
ASME Sec. II Part A	SA353 (板) SA333 Gr. 8 (管)	Double Normalized and Tempered	1 <sup>st</sup> N : 1650±25°F (900±15°C) 2 <sup>nd</sup> N : 1450±25°F (790±15°C) T : 1050~1125°F (565~605°C)

### 3.4 他法規での規定

高圧ガス保安法及びガス事業法での規定を表⑤-4 に示す。ボイラー及び圧力容器安全規則では、P-11A Gr. 1 の使用が想定されないことから、該当する規定はない。なお、高圧ガス保安法及びガス事業法では、9%ニッケル鋼を母材とする溶接部では PWHT を要しない規定となっているが、これは、9%ニッケル鋼母材をニッケル基の溶接材料(例 : インコネル等)で溶接することを前提としており、このような溶接では、母材厚さが 55

mm までは PWHT を要しないことが確認されている[2, 3]。母材厚さが 50 mm を超える溶接部は現状では想定されないため、このような規定となっていると考えられる。

表⑤-4 高圧ガス保安法及びガス事業法での規定

法規	規定
高圧ガス保安法 (特定設備の技術基準の解釈)	<p>特定設備の溶接部は、溶接後に、応力除去のため、熱処理を行わなければならない。ただし、次の各号のいずれかに該当するものについては、この限りでない。</p> <p>(1)～(5) 省略</p> <p>(6) オーステナイト系ステンレス鋼、オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼、9%ニッケル鋼又は非鉄金属を使用した母材の溶接部</p> <p>(7) 省略</p>
ガス事業法 (ガス工作物技術基準の解釈例)	<p>溶接部であって次の各号に掲げるもの以外のものは、日本工業規格 JIS B 8265(2003)「圧力容器の構造—一般事項」の「6.7 熱処理」に掲げる溶接後熱処理を行わなければならない。</p> <p>一～六 省略</p> <p>七 9%ニッケル鋼、非鉄金属材料、ニッケルクロム鉄合金、鉄ニッケルクロム合金又は 36%ニッケル合金で作られたものの溶接部</p> <p>八及び九 省略</p>

### 3.5 JIS 規格での規定概要

ボイラー及び圧力容器に関する JIS 規格についての規定の概要を調査した。表⑤-5 に JIS B 8265 (圧力容器の構造—一般事項)：2010 の規定概要を、表⑤-6 に JIS B 8266 (圧力容器の構造—特定設備)：2003 の規定概要を、表⑤-7 に JIS B 8267 (圧力容器の設計)：2008 の規定概要を示す。何れの JIS 規格においても、PWHT 温度範囲は 550～585℃と規定されている。なお、JIS B 8201 (陸用鋼製ボイラー構造)：2005 では、P-11A Gr. 1 の使用が想定されないことから、該当する規定はない。

表⑤-5 JIS B 8265 (圧力容器の構造—一般事項)：2010 の規定概要

S.4 溶接後熱処理の範囲
S.4.1～S.4.8 省略
S.4.9 9%ニッケル鋼
9%ニッケル鋼で製作された圧力容器又は圧力容器の部分で、次の a)及び b)の場合は、溶接後熱処理を行う。
a) 厚さが 50 mm を超える場合
b) 胴又は鏡板に管台などを取り付ける溶接で、材料の厚さの最大値が 50 mm を超える場合
S.4.10 及び S.4.11 省略
S.5 溶接後熱処理の方法
S.5.1 炉内加熱による方法

S.5.1.1 省略

S.5.1.2 方法

溶接後熱処理の方法は、次の a)~f)による。

a)~c) 省略

d) 溶接後熱処理の最低保持時間及び最小保持時間は、母材の区分に応じて表 S.1 による。保持中の加熱部全体にわたる温度差は、83℃以下とする。

なお、加熱部は過度の酸化を生じないように注意する。

e)及び f) 省略

表 S.1—溶接後熱処理の最低保持時間及び最小保持時間

母材の 区分	最低保持温度 (℃)	溶接後熱処理における厚さに対する最小保持時間 (h)				
		t≤6	6<t≤25	25<t≤50	50<t≤125	125<t
P-1~P-7 (省略)						
P-9A 及び P-9B (省略)						
9%Ni 鋼	550 (最大 585)	2.0			2+(T-50)/25	
P-45 (省略)						
(省略)						

表⑤-6 JIS B 8266 (圧力容器の構造—特定規格) : 2003 の規定概要

4. 溶接後熱処理の範囲

4.1~4.9 省略

4.10 P 番号 11A の鋼材

P 番号 11A の鋼材で製作された圧力容器又は圧力容器の部分で、次のいずれかのはせ愛には、溶接後熱処理を行わなければならない。

a) 厚さが 50 mm 以上のもの

b) 接続部及び取付部の取付け溶接部、鏡板又は胴に取り付けた箇所における材料のうち最も厚いものの厚さが 50 mm 以上の場合

4.11 省略

5. 溶接後熱処理方法

5.1 炉内加熱による溶接後熱処理方法

5.1.1 省略

5.1.2 後熱処理方法

後熱処理の方法は、次による。

a)~c) 省略

d) 溶接後熱処理の保持時間及び保持時間は、母材の区分に応じて附属書 14 表 1 に示す。保持時間中の加熱部全体にわたる温度差は、85℃以下とする。

なお、加熱部は過度の酸化を生じないように注意しなければならない。

e) 省略

附属書 14 表 1 溶接後熱処理の温度及び時間				
母材の 区分	最低保持温度 (°C)	溶接部の厚さに対する最小保持時間 (h)		
		T ≤ 50	50 < t ≤ 125	125 < T
P-1～P-7 (省略)				
P-9A 及び P-9B (省略)				
9%Ni 鋼	550～585	T/25		
(省略)				

表⑤-7 JIS B 8267 (圧力容器の設計) : 2008 の規定概要

S.4 溶接後熱処理の範囲						
S.4.1～S.4.8 省略						
S.4.9 9%ニッケル鋼						
9%ニッケル鋼の鋼材で製作する圧力容器又は圧力容器の部分で、次の a) 及び b) の場合には、溶接後熱処理を行う。						
a) 厚さが 50 mm を超える場合						
b) 胴又は鏡板に管台などを取り付ける溶接部で、最も厚い材料の厚さが 50 mm を超える場合						
S.4.10 及び S.4.11 省略						
S.5 溶接後熱処理方法						
S.5.1 炉内加熱による溶接後熱処理方法						
S.5.1.1 省略						
S.5.1.2 溶接後熱処理方法						
溶接後熱処理の方法は、次の a)～f) による。						
a)～c) 省略						
d) 溶接後熱処理の最低保持温度及び最小保持時間は、母材の区分に応じて表 S.1 による。保持中の加熱部全体にわたる温度差は、83°C 以下とする。						
なお、加熱部は過度の酸化を生じないように注意する。						
e) 及び f) 省略						
表 S.1—溶接後熱処理の最低保持時間及び最小保持時間						
母材の 区分	最低保持温度 (°C)	溶接後熱処理における厚さに対する最小保持時間 (h)				
		t ≤ 6	6 < t ≤ 25	25 < t ≤ 50	50 < t ≤ 125	125 < t
P-1～P-7 (省略)						
P-9A 及び P-9B (省略)						
9%Ni 鋼	550 (最大 585)	2.0		2+(T-50)/25		
P 番号 45 の NCF800 及び NCF800H (省略)						
(省略)						

### 3.6 火技解釈での PWHT 温度の履歴

現行の火技解釈の溶接後熱処理温度は、旧 ASME 規格 Sec. III 以外の JIS 等の規格に整合しておらず、また妥当性を示す技術的根拠も見当たらない。そのため、火技解釈／技術基準(\*)の制定、改正等の経緯を調査した結果、昭和 62 年に溶接技術基準調査委員会の中で ASME 規格との相違について提起され、平成 2 年に ASME 規格に整合させた改正(案)が作成されていたが、改正まで至っていないことが判った。単に改正されないまま、現在に至っているものとする。

(\*)：現在の火技解釈に相当し、平成 12 年 7 月の省令第 123 号にて省令 81 号が廃止されるまでは「技術基準」であった。

調査結果を下記に示す。

- ① 技術基準の改正履歴について表⑤-8 に示す。昭和 60 年版技術基準の解説版(素案)に「溶接後熱処理規定に、ASME Sec. III Table NB-4622.1-1 に従い P-11A, B を追加した」との記載がある。
- ② ASME 規格の改正履歴について、表⑤-9 に示す。1977 (昭和 52) 年版の ASME Sec. III Table NB-4622.1-1 に 595～680℃の規定があるが、1980 (昭和 55) 年版では、11A Gr. 4 について 540～565℃に変更されている。なお、ASME Sec. VIII では、全ての Gr. No. において、1977 (昭和 52) 年版から 540～595℃の範囲内にある。
- ③ 昭和 60 年版技術基準には、1980 (昭和 55) 年版ではなく、1977 (昭和 52) 年版の ASME Sec. III Table NB-4622.1-1 の 595～680℃が採り入れられている。理由は不明。
- ④ その後、ASME 規格との相異については、昭和 62 年溶接技術基準調査委員会の中で提起され、平成 2 年には、ASME 規格に整合させた改正案が作成されていたが、改正まで至っていない。その理由等は不明。

表⑤-8 技術基準の改正履歴について

制定/改正年	P-11 材の溶接後熱処理に関する規定の履歴
昭和 33 年版	9%Ni 鋼の溶接後熱処理温度の規定有り。 溶接後熱処理温度：1,000～1,100°F (540～595℃) [参考：この版は、American Welding Society のハンドブックにより規定したとの記載有り]
昭和 40 年版	9%Ni 鋼の区分が削除されている。
昭和 60 年版	母材区分 P-11A, B が追加され、溶接後熱処理温度は 595～680℃と規定された。現在までの変更は無い。 この解釈の解説版(素案)には、「溶接後熱処理の規定に、ASME Sec. III Table NB-4622.1-1 に従い、P-11A, B を追加した」との記載がある。

表⑤-9 ASME 規格の PWHT 温度の改正履歴

年 版	P-No.	主要成分	ASME Sec. VIII Div. 1 UHT-56	ASME Sec. III Table4622.1-1
1977 年版 (昭和 52 年)	11A Gr. 1	9%Ni 鋼	1,025-1,085°F (550-585°C)	—
	11&11A	9%Ni 鋼、 1/2Mn-1/2Mo、他	—	1,100-1,250°F (595-680°C)
	11A Gr.4	1/2Mn-1/2Mo-Ni、他	1,000-1,050°F (540-565°C)	—
	11B Gr. 1~6, 8	1/2Cr-1/4Mo-Si、他	1,000-1,100°F (540-595°C)	—
1980 年版 (昭和 55 年)	11A Gr. 1	9%Ni 鋼	1,025-1,085°F (550-585°C)	—
	11A Gr. 4	1/2Mn-1/2Mo-Ni、他	1,000-1,050°F (540-565°C)	1,000-1,050°F (540-565°C)
	11B Gr. 1~6, 8	1/2Cr-1/4Mo-Si、他	1,000-1,100°F (540-595°C)	—
2007 年版 (平成 19 年)	11A Gr. 1	9%Ni 鋼	1,025-1,085°F (550-585°C)	—
	11A Gr. 4	1/2Mn-1/2Mo-Ni、他	1,000-1,050°F (540-565°C)	1,000-1,050°F (540-565°C)
	11B Gr. 1~6, 8	1/2Cr-1/4Mo-Si、他	1,000-1,100°F (540-595°C)	—

火技解釈と合致

温度が変更された

注：なお、本件について過去に顕在化していない理由として、別表第 23 の溶接後熱処理の除外規定では、母材の区分 P-11A (グループ番号 1) の液化ガス設備に係る容器及び管の溶接部は溶接部の厚さが 50 mm 以下の場合、溶接後熱処理は要しないとなっており、実際 50 mm を超えるものがなく溶接後熱処理が必要無かったこと。溶接のままでの靱性に配慮するため、溶接材料に高 Ni 鋼 (インコネル系 70%Ni-Cr…オーステナイト系) などの異材系の溶材を用いることで、溶接後熱処理を不要としていたことが挙げられる。

4. 要請


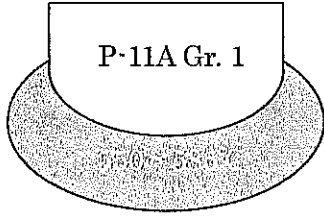
別表第 21 の母材の区分の P-11A を P-11A Gr. 1 と P-11A Gr. 2 に分け、P-11A Gr. 1 の PWHT 温度範囲について 595~680°C を 550~585°C に改正する。

5. 条項等

別表第 21 溶接後熱処理における温度範囲及び溶接部の厚さに応じた保持時間 (改正案の箇所に Temp. No.の⑤を記載)

6. イメージ

イメージを図⑤-2に示す。

NISA 文書 又は省令の年等	P-11A Gr. 1 の溶接後熱処理 (PWHT) 温度の適正化のイメージ	
現 行 (平成 23 年)		<p>9%Ni 鋼で代表される母材区分 P-11A Gr. 1 の PWHT 温度範囲が 595~680°C では、靱性低下が懸念される。ただし、実機の P-11A Gr. 1 に対して PWHT を実施した実績はない。</p>
検 討	<p>靱性低下が懸念されない PWHT 温度範囲に ASME 規格や JIS 規格等を参考として改正する。</p>	
改正案		<p>9%Ni 鋼で代表される母材区分 P-11A Gr. 1 の PWHT 温度範囲を 550~585°C の靱性低下が懸念されない温度とする。</p>

図⑤-2 P-11A Gr. 1 の溶接後熱処理 (PWHT) 温度の適正化のイメージ

参考文献

- [1] 斉藤直樹、山場良太、村岡寛英、佐伯修、LNG タンク用高靱性厚手 9%Ni 鋼板の開発、新日鉄技報第 384 号 (1993)、p25
- [2] 町田進、石倉則義、久保尚重、片山典彦、萩原行人、有持和茂、厚板 9%Ni 鋼板の脆性破壊特性と大形 LNG タンクへの適用性、JHPI Vol. 29、No. 6、1991、p25-39
- [3] 町田進、石倉則義、久保尚重、片山典彦、村本聖一、萩原行人、有持和茂、厚板 9%Ni 鋼板の破壊特性と大形 LNG タンクへの適用性、JHPI Vol. 31、No. 1、1993、p83-97