

再熱割れ感受性に優れた TS780 N/mm² 級鋼

Development of TS780 N/mm² Class Steel Plate with Low Reheat Cracking Susceptibility

佐藤 祐也 SATO Yuya JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (副課長)
高橋 徹 TAKAHASHI Toru JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 商品技術部 厚板室
大森 章夫 OHMORI Akio JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (副部長)・博士 (工学)
安田 功一 YASUDA Koichi JFE テクノリサーチ 構造材料ソリューション本部 フェロー・博士 (工学)

要旨

溶接構造物の溶接後熱処理 (PWHT: Post-weld heat treatment) の際に再熱割れが発生しにくい、TS780 N/mm² 級鋼を開発した。再熱割れは Cr, Mo, V 等の炭化物生成元素の添加によって発生しやすくなるため、通常これらの元素を多く含む TS780 N/mm² 級以上の鋼で問題となりやすい。本開発鋼は、従来鋼から主要合金元素の成分設計を変えないことで優れた強度、靱性、溶接性のバランスを維持し、P および S の低減と Ca 添加を組み合わせた不純物元素低減設計で再熱割れ感受性の低減を図った。本成分設計で実機製造を行い、再熱割れ再現試験の 1 つである C リング試験によって、本開発鋼が再熱割れ感受性に優れることを確認した。

Abstract:

TS780 N/mm² class steel plate with low reheat cracking susceptibility during post weld heat treatment (PWHT: Post-weld heat treatment) of welded structures has been developed. Reheat cracking often becomes a problem for high strength steels of 780 N/mm² or higher class because the high strength steels usually contain carbide-forming elements such as Cr, Mo and V, which precipitate during PWHT and enhance the cracking. The reheat cracking susceptibility has been reduced by the alloy design in combination with reduction in impurity elements (P and S) and addition of Ca which forms sulfide. The developed steel was produced in an actual plate mill, and achieved excellent low reheat cracking susceptibility in the C-ring test, which is one of the methods evaluating reheat cracking.

1. はじめに

圧力容器、橋梁、建築をはじめする溶接構造物は、大型化、構造の多様化に伴い適用鋼材が高強度化しており、TS780 N/mm² 級の高張力鋼が適用されている。一方、溶接構造物は、溶接残留応力の緩和、溶接部の性能改善、水素などの有害ガス除去を目的に溶接後熱処理 (PWHT: Post-weld heat treatment) を行う場合がある。しかし、高張力鋼の PWHT 時には、強度・靱性低下などの材質劣化や、溶接止端部の溶接熱影響部粗粒域 (CGHAZ: Coarse grain heat affected zone) で旧オーステナイト粒界に沿って発生する粒界割れが問題となることが多い¹⁾。この割れは、再熱割れ (Reheat cracking) または応力除去焼なまし割れ (SR 割れ: Stress relief cracking) と呼ばれ、TS780 N/mm² 級以上の鋼材で生じやすく、古くから高強度鋼の課題として認識されている²⁾。

鋼板の PWHT に関する規則や基準は ASME 規格や国内の技術基準書等に記載されており、高張力鋼についても言

及されている。ASME Sec. VIII Div. 1 UHT-56 の Table UHT-56 では、TS780 N/mm² 級鋼を一部含む調質型高張力鋼について PWHT 条件が規定されており、同時に PWHT 時の焼戻し脆化に対する注意も喚起されている。一方、JIS Z 3700 の溶接後熱処理方法に関する規定は強度レベルが TS590 N/mm² 級鋼までとなっており、TS780 N/mm² 級鋼については詳細に記述されていない。また、技術指導書「溶接後熱処理基準とその解説」¹⁾ では、PWHT の採否はケースバイケースで考えることが必要で、特に TS 780 N/mm² 級鋼は溶接部の靱性劣化と再熱割れの問題があり、慎重に検討する必要があるとしている。水門鉄管技術基準³⁾ でも、TS 780 N/mm² 級鋼の JIS 規格である SHY685NS-F に関しては、再熱割れの危険性から原則として PWHT を行わず、実施する場合は十分な検討と確認が必要と述べている。

以上のように、TS780 N/mm² 級鋼の PWHT は一部の規格で規定されているものの、施工には細心の注意が必要とされる。そのため、PWHT 後も本来の高強度・高靱性を維持し、再熱割れの発生リスクが低い TS780 N/mm² 級鋼の開発が望まれた。

JFE スチールでは、種々の鋼材特性を損なうことなく再熱

表 1 開発鋼の目標母材特性

Table 1 Target chemical compositions and mechanical properties for developed steel plate

Thickness (mm)	(mass%)													ΔG	P _{SR}
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	C _{eq}			
t ≤ 50	≤ 0.14	≤ 0.55	≤ 1.50	≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.50	0.3 ~ 1.50	≤ 0.80	≤ 0.60	≤ 0.05	≤ 0.005	≤ 0.53	≤ 0.31	≤ 0.16	
50 < t ≤ 75												≤ 0.57			

Thickness (mm)	Tensile properties				Charpy impact properties	Reheat cracking test (%)
	Specimen	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	vE _{-40°C} (J)	
t ≤ 50	JIS 5	≥ 685	780 ~ 930	≥ 16 (6 ≤ t ≤ 16)	≥ 27 (Each) ≥ 47 (Ave.)	0
	JIS 4			≥ 24 (16 < t)		
t > 50	JIS 5	≥ 665	760 ~ 910	≥ 24		
	JIS 4			≥ 16		

C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14, ΔG = Cr + 3.3Mo + 8.1V-2, P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti-2, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, vE_{-40°C}: Absorbed energy at -40°C

割れ感受性を低減した TS780 N/mm² 級鋼を開発した。本論文では開発鋼の特徴ならびに鋼板の性能について紹介する。

2. 目標性能

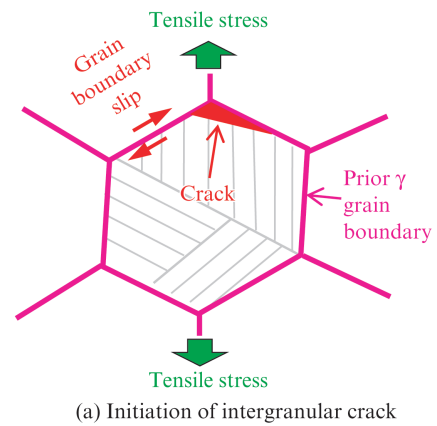
表 1 に開発鋼の目標化学成分と母材特性を示す。JIS G 3128 規定の溶接構造用高降伏点鋼板に準じ、-40°Cでの靱性が要求される SHY685NS の機械的特性を目標とした。再熱割れ感受性は、一般的に提案されている再熱割れ感受性指数 ΔG と P_{SR}^{4,5)} を従来鋼と同等以下に抑えるとともに、後述の C リング試験による再熱割れ再現試験で再熱割れが発生しないことを目標とした。

3. 開発鋼の成分設計

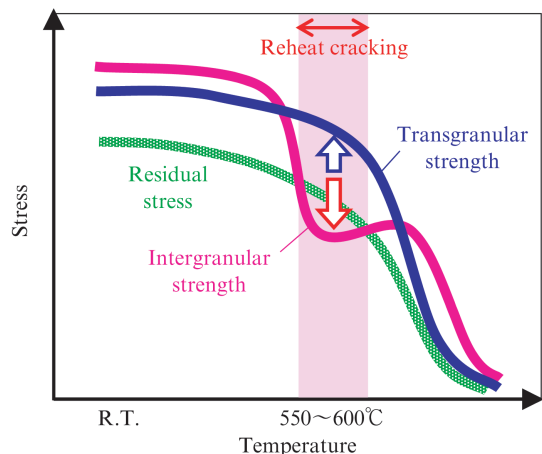
3.1 再熱割れの原理

再熱割れ機構の模式図を図 1 に示す。再熱割れの発生機構^{6,7)} は以下のとおりである。PWHT で温度が上昇し、析出強化による粒内強度上昇と不純物元素の偏析による粒界強度低下によって相対的に粒内強度が粒界強度を上回ると、粒内の塑性変形による溶接残留応力緩和が起こりにくくなる。その結果、粒界すべりが生じ、不純物元素の偏析による粒界周りの変形能低下も影響して、粒界に亀裂が発生する。この亀裂が再熱割れである。再熱割れには溶接残留応力と化学成分、マイクロ組織が関与しており、再熱割れ防止には、これら 3 要素の制御が重要である。

再熱割れ防止対策として、設計・施工の対策と材料の対策が考えられる。設計では応力集中が少ない溶接部構造とすること、施工では溶接止端部平滑化による応力緩和やテンパービード法やバタリング法による材質改善を施すことが有効である¹⁾。しかし、これらの対策は工期やコストの増加



(a) Initiation of intergranular crack



(b) Temperature dependence of intergranular and transgranular strength

図 1 再熱割れ機構の模式図

Fig. 1 Schematic illustration of mechanism for reheat cracking

を招くため、材料面での対策を打つことが設計・施工の負荷軽減の観点から期待される。

材料面の対策としては、粒内強度を上昇させる合金元素

の低減や、粒界脆化をもたらす不純物元素の低減や固定が効果的である^{8,9)}。粒内強度上昇を招く元素は、Cr, Mo, V, Nb 等の炭化物生成元素であり、P_{SR} や ΔG の再熱割れ感受性指数で整理されている^{4,5)}。

マイクロ組織もまた再熱割れ感受性に影響を及ぼす。結晶粒径が大きいほど再熱割れ感受性が高く、低硬度の組織ほど再熱割れ感受性が低くなることが指摘されている¹⁰⁾。溶接熱影響部の粗粒域 (CGHAZ) は、旧オーステナイト粒が粗大化しており、旧オーステナイト粒界が残存するような組織が形成された場合、最も再熱割れを起こしやすい領域であると考えられる。

本開発では、TS780 N/mm² 級鋼の母材特性を維持するため、強度への影響が大きい再熱割れ感受性指数 (P_{SR} 及び ΔG) を従来鋼と同等レベルとし、不純物元素の低減により再熱割れ感受性の低減を図ることとした。

3.2 再熱割れ再現試験

再熱割れ評価試験では、溶接残留応力と、発生起点である溶接熱影響部のマイクロ組織を適切に再現することが重要である。本開発では、再熱割れ評価方法の一つである C リング試験⁷⁾を用いた。試験片形状および採取位置を **図 2** に示す。今回の試験では、種々の熱影響部組織を評価するため 2 ビードのビードオン溶接部から C リング試験片を採取した。溶接前後の試験片外観写真を **写真 1** に示す。ノッチ反対側のスリットを密着させ溶接で固定することにより、ノッチ底に溶接残留応力を模擬した引張応力を付与した。

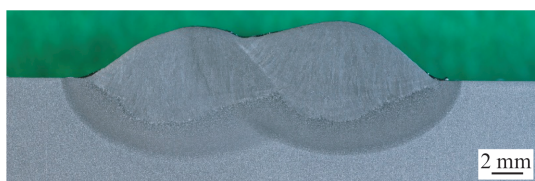
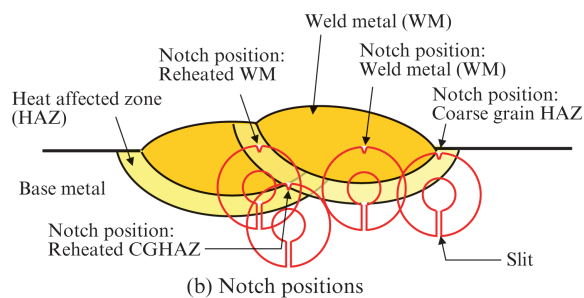
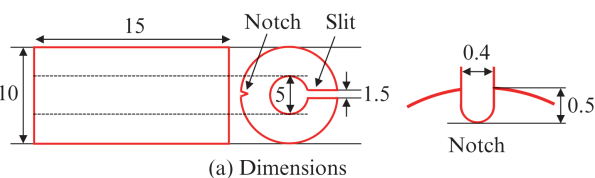


図 2 C リング試験片形状および採取方法

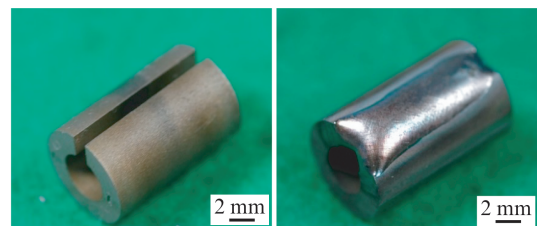
Fig. 2 C-ring test specimen

再熱割れ評価位置である U ノッチ底は、

- 1) 最も割れ感受性が高いと考えらえる熱影響部粗粒域 (1st ビード CGHAZ)
- 2) 2nd ビードによって再熱を受けた粗粒域 (1st ビード CGHAZ+2nd ビード HAZ エンド)
- 3) 溶接金属 (1st ビード WM)
- 4) 2nd ビードによって再熱を受けた溶接金属 (1st ビード WM+2nd ビード HAZ 中央)

の計 4 か所とした。

C リング試験で発生する応力は過去に報告されている^{7,11)}が、局所的な応力分布状態など詳細が不明瞭な点も多い。



(a) Before welding (b) After welding

写真 1 C リング試験片外観

Photo 1 Appearance of C-ring test specimen

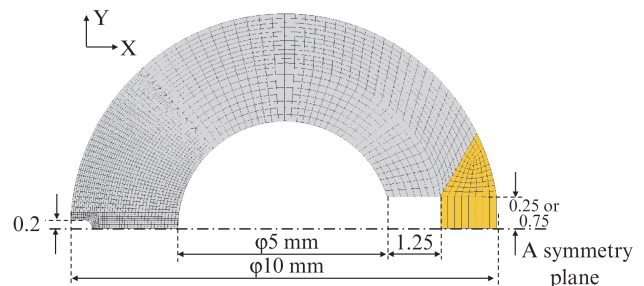


図 3 C リング試験片の FEM 解析モデル

Fig. 3 FEM mesh model of C-ring test specimen

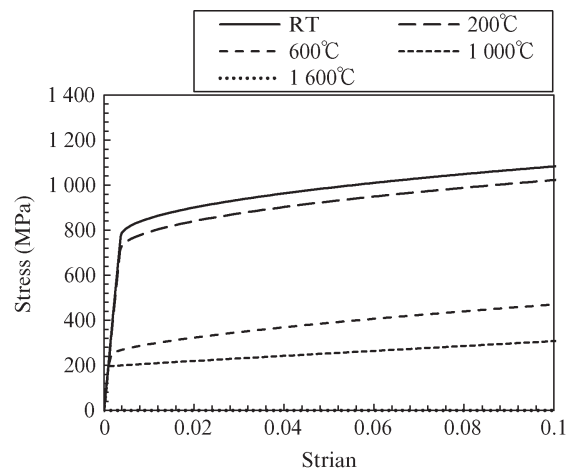


図 4 FEM 解析で用いた応力歪曲線の例

Fig. 4 Examples of stress-strain curves for FEM analysis

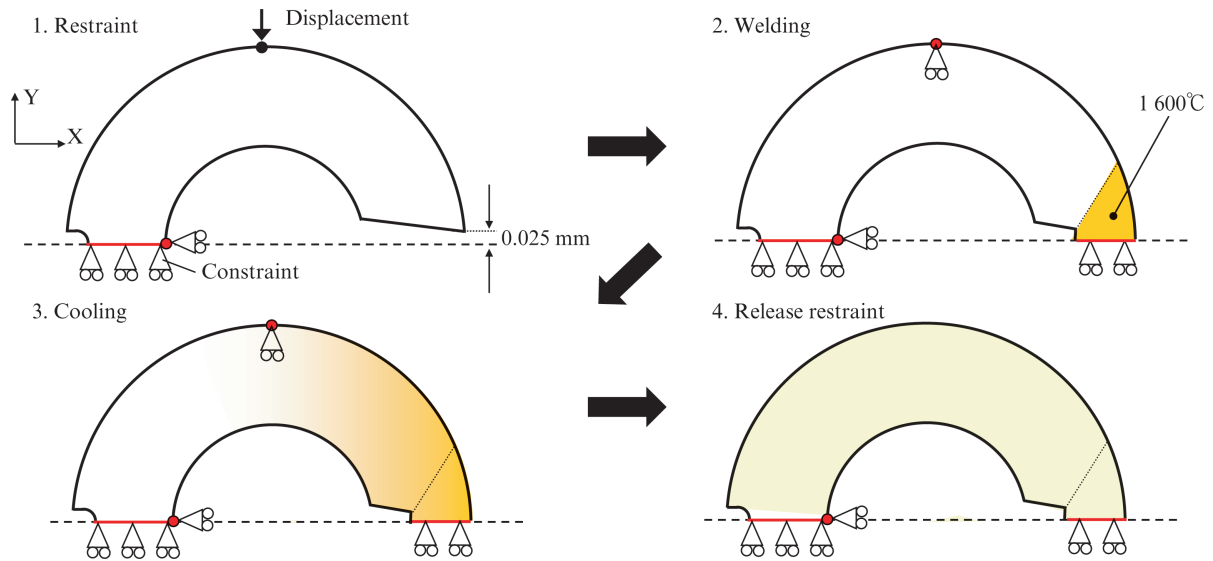


図5 FEM 解析手順

Fig. 5 FEM analysis flow

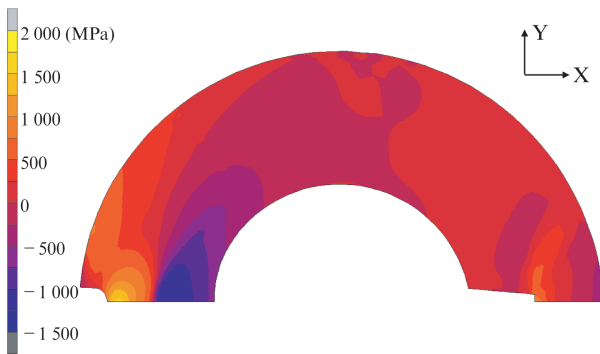


図6 Cリング試験片で発生するY方向主応力分布

Fig. 6 Principal stress distribution of C-ring test specimen in Y direction

そこで、改めてFEMによる応力解析を行い、今回の評価試験で適用するスリット幅を決定した。解析で用いたCリング試験片モデルを図3に、応力歪曲線を図4に示す。強度や熱伝導率などの物性条件はHT780の実測値や文献値¹²⁾を用いている。図5に計算の境界条件および解析手順を示す。まず、初期スリット幅が0.05 mmになるまでY方向に変位を与え、リング外側中央を拘束し(1. Restraint)、溶接部に1600℃の熱源を投与した(2. Welding)。その後、モデル全体が30℃になるまで空冷し(3. Cooling)、リング外側に与えていた拘束を解除し(4. Release restraint)、この時の発生応力を求めた。解析結果の一例を図6に示す。ノッチ底周辺で局所的に高い応力が発生しており、ノッチ直下内部から割れが発生するという過去の報告⁵⁾とも一致する。ノッチ直下部の最大相当応力(ミーゼス応力)に及ぼすスリット幅の影響を図7に示す。スリット幅が広いほど、最大相当応力が高く、再熱割れの発生リスクが高いことを示している。スリット幅が1.5 mmの試験片は室温で降伏強度に近い

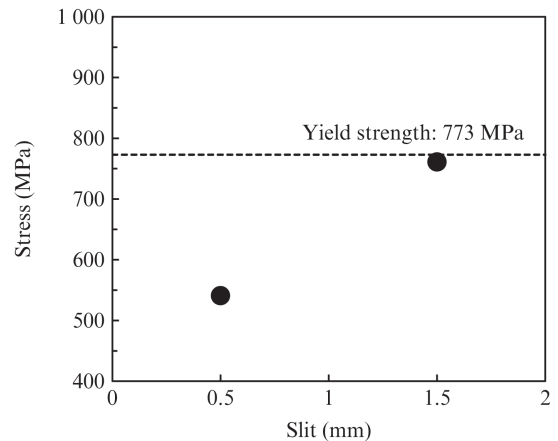


図7 Cリング試験の最大相当応力に及ぼすスリット幅の影響

Fig. 7 Effect of slit width on maximum equivalent stress in C-ring specimen

残留応力が残存しており再熱割れ発生リスクが高いことから、本開発ではスリット幅が1.5 mmのCリング試験を実施し、断面を光学顕微鏡で観察して明瞭な割れが発生していなければ、再熱割れ感受性が低い鋼材であると判断することとした。

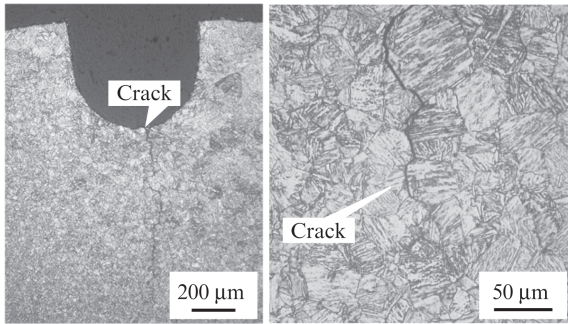
3.3 再熱割れ感受性に及ぼす成分の影響

従来のTS780 N/mm²級鋼に対し、PWHT条件を580℃×4hとしたCリング試験を実施し、再熱割れの再現の確認を行った。なお、本試験では、Cリング試験を3回実施し各試験片の3断面で割れの有無を確認、合計9断面あたりの割れ発生率で評価した。Cリング試験結果を表2、割れが発生したCリング試験片の断面マイクロ組織を写真2に示す。再熱割れはCGHAZのみで発生しており、発生した割れはノッチ直下から、旧オーステナイト粒界に沿って伝播している。

表 2 従来 TS780 N/mm² 級鋼の C リング試験結果

Table 2 Result of C-ring test for conventional TS 780 N/mm² class steel plate

Notch position	Crack ratio (%)
WM	0
Reheated WM	0
CGHAZ	100
Reheated CGHAZ	0



(a) Notch bottom

(b) Crack path

写真 2 従来鋼の C リング試験片 (ノッチ位置: CGHAZ) 断面

Photo 2 Cross section of C-ring specimen for conventional steel (Notch position: CGHAZ)

これは、従来の再熱割れ発生傾向と一致しており¹⁾、本試験で再熱割れが再現できることを確認できた。

次に従来の TS780 N/mm² 級鋼をベースに、再熱割れ感受性に及ぼす不純物元素の影響を調査した。再熱割れ感受性に及ぼす P と S の含有量、Ca 添加の影響を C リング試験で評価した結果を図 8 に示す。Ca を添加し P, S 量を低減することで再熱割れ発生率は低下する傾向がある。Ca 添加し、P 量を 0.007% 以下、S 量を 0.0012% 以下に制御すると、再熱割れは発生していない。写真 3 に低 P-低 S-Ca 添加成分の C リング試験片の試験後断面写真を示す。この試験片では、従来の TS780 N/mm² 級鋼で観察された明瞭な割れが確認されなかったことから、低 P-低 S-Ca 添加を成分設計に反映させることで、従来の TS780 N/mm² 級鋼と同等の再熱割れ感受性指数であっても再熱割れ感受性の改善が期待できることが分かった。

4. 開発鋼の特性

4.1 開発鋼の母材性能

表 3 に開発鋼の実機出鋼成分を示す。従来の TS780 N/mm² 級鋼と同じ基本成分とし、再熱割れ感受性を低減するため P, S の含有量を極力低減し、Ca を添加した。表 4 に焼入・焼戻しプロセスによって製造した板厚が 36 mm と 60 mm の開発鋼の母材特性を示す。PWHT 前後において SHY685NS の規格値を十分に満足する強度、および -40℃ での優れた低

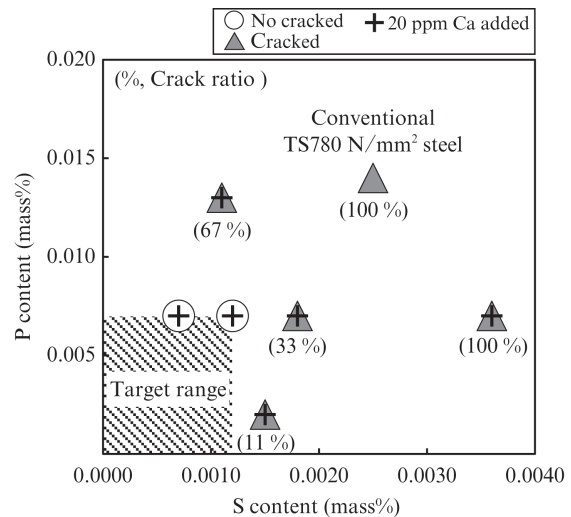


図 8 再熱割れ感受性に及ぼす P, S, Ca の影響

Fig. 8 Effect of P and S content, Ca addition on reheat cracking susceptibility

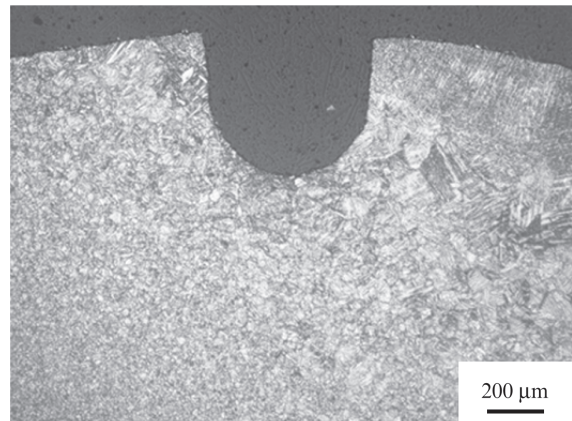


写真 3 0.007% P-0.0012% S-0.0020% Ca 鋼の C リング試験片ノッチ底の断面

Photo 3 Cross section of notch bottom of C-ring specimens for 0.007% P-0.0012% S-0.0020% Ca steel

温靱性を有している。

4.2 開発鋼の再熱割れ感受性

開発鋼について、スリット幅 1.5 mm の C リング試験によって再熱割れ感受性を評価した。結果を表 4 に示すと共に、試験後の断面写真例を写真 4 に示す。再熱割れは発生せず、本開発鋼は再熱割れ感受性が低い鋼材といえる。

5. おわりに

種々の鋼材特性を損なわず再熱割れ感受性を低減した TS780 N/mm² 級鋼板を開発した。本開発鋼は、PWHT を行う溶接構造物に TS780 N/mm² 級鋼を適用しても再熱割れ発生リスクを低減することができ、設計・施工の負荷軽減へ寄与するものと期待される。

表3 開発鋼の化学成分

Table 3 Chemical composition of the developed steel

Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq	ΔG	P _{SR}
36, 60	0.11	0.25	0.95	0.003	0.0004	Cu, Ni, Cr, Mo, V, Ti, B, Ca	0.5	0.14	-0.04

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15, \quad \Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2, \quad P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2$$

表4 開発鋼の母材性能

Table 4 Mechanical properties of the developed steel

Thickness (mm)	PWHT	Position	Tensile properties (Specimen: JIS4)				Charpy impact properties		Reheat cracking test (%)
			Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Direction	vE _{-40°C} (J)	
36	-	1/4t	T	783	827	24	L	261	0
	580°C×4h			776	824	25		265	
60	-	1/4t	T	782	826	25	L	245	0
	580°C×4h			778	828	25		261	

PWHT: Post weld heat treatment
vE_{-40°C}: Absorbed energy at -40°C

YS: Yield strength

TS: Tensile strength

El: Elongation

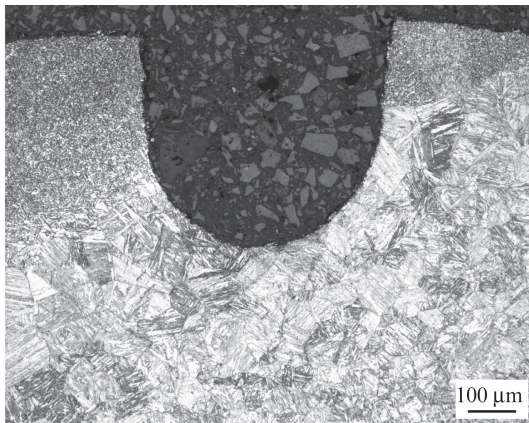


写真4 開発鋼のCリング試験片ノッチ底の断面

Photo 4 Cross section of notch bottom of C-ring specimens after test for developed steel

高張力鋼の再熱割れ感受性におよぼす各種元素の影響. 溶接学会論文集. 1995, vol. 13, no. 2, p. 256-261.

- 9) 大野恭秀, 岡村義弘, 矢野清之助, 藤井利光. 80 kg/mm² 級高張力鋼のCa添加による応力除去焼きなまし割れの改善. 鉄と鋼. 1995, vol. 67, no. 10, p. 1777-1786.
- 10) 菊池俊郎, 大西巖. 鋼溶接部の再熱割れに関する冶金学的研究(第3報). 溶接学会誌. 1979, vol. 48, no. 5, p. 259-265.
- 11) 中川武, 後藤明信, 畑野等. Cr-Mo 鋼溶接金属中の炭化物の析出挙動に及ぼすVの影響(第二報). 溶接学会全国大会講演概要. 1998, no. 62, p. 18-19.
- 12) 金属データブック. 改訂4版, 丸善, 2004, 604p.



佐藤 祐也



高橋 徹



大森 章夫



安田 功一

参考文献

- 1) 溶接後熱処理基準とその解説. 初版, 日刊工業新聞社, 1994, 281p.
- 2) 内木虎蔵, 山崎康久, 真子幸夫, 岡林久喜. 応力除去焼鈍割れに関する研究(第1報). 溶接学会誌. 1964, vol. 33, no.9, p. 710-717.
- 3) 水門鉄管技術基準 溶接・接合編. 第5回改訂版(第2版), 社団法人電力土木技術協会, 2010, 198p.
- 4) 内木虎蔵, 岡林久喜. 応力除去焼鈍割れに関する研究(第3報). 溶接学会誌. 1970, vol. 39, no. 10, p. 1059-1066.
- 5) 伊藤慶典, 中西睦夫. 低合金鋼溶接熱影響部の応力除去焼鈍割れの研究(第2報). 溶接学会誌. 1972, vol. 41, no. 1, p. 59-64.
- 6) 玉置維昭. Cr-Mo 鋼の再熱割れ. 溶接学会誌. 2003, vol. 72, no. 3, p. 193-200.
- 7) 内木虎蔵, 岡林久喜, 桑亮一. 応力除去焼鈍割れに関する研究(第2報). 溶接学会誌. 1964, vol. 33, no. 9, p. 718-725.
- 8) 玉置維昭, 今井兼敬, 鈴木実平, 堀井行彦, 熊谷達也. 720 N/mm² 級