

.....
技術トピックス

UDC 669.14.018.41 : 621.771.23 : 621.771.016.2 : 621.785.797

特殊加工熱処理法による高靱性低温用鋼の製造方法の開発*

池 島 俊 雄**

Development of Sumitomo High Toughness Process (SHT) for Low Temperature Service Steels

Toshio IKESHIMA

1. 緒 言

当社は極北のガス輸送用鋼管をはじめとする低温用鋼の需要に対し、“低温靱性の著しく優れた鋼板を経済的にかつ短期間に供給する製造法”はいかなるものかについて検討を続けてきた。その結果、制御圧延鋼の経済性、生産性を生かし、また熱処理鋼の均一性の特長を兼備した新分野の加工熱処理法の開発とその製造プロセスの開発に成功した。これを SHT 法と名付け、昭和 50 年 8 月より鹿島製鉄所厚板工場に専用設備を設置し、製造を開始した。本法は省資源・省エネルギー型の製造法で、これにより製造コストを低減できるばかりでなく、溶接性の良好なことから使用者において溶接施工コストを低減できる等の便益がある。

このたび、標題の「高靱性低温用鋼の製造方法の開発」に関して、「昭和 53 年度大河内記念生産特賞」受賞の榮譽に浴した。ここにその概要を紹介し、参考に供したい。

2. 開発の背景

昭和 44 年アラスカ北部の石油をアメリカ本土に運ぶため、アラスカ縦断の TAPS (Trans Alaska Pipeline System) ラインの大径鋼管 50 万トンが日本ミル 3 社に発注された。要求された低温靱性はシャルピー衝撃試験にて -10°C でパイプ長さ方向 50ft-lb (6.9kg-m) および円周方向 25ft-lb (3.5kg-m) であり、これは当時の製鋼技術、制御圧延技術において最高級のレベルを必要とした。

当社ではこのような寒冷地でのパイプラインの建設と鋼材の需要が活発になるとの判断から、寒冷地でのガス輸送用鋼管としていかなる低温靱性が必要であるか、またそれをいかなる製造法により得ることができるかについて、昭和 42 年より中央技術研究所を中心に広範囲の基礎研究に着手してきた。TAPS 向ラインパイプの製造はこの研究成果の適用の端緒でもあった。とくに極北

のガス輸送用鋼管は気象上工事時期が制約されるため、短期間に莫大量の鋼管を必要とされるため、低温靱性ととも生産性と経済性が非常に重視される。

これらの需要を背景に制御圧延法による低温用高張力鋼板の製造技術は急速に進歩した。しかしながらエネルギー関連の資源開発の進行とともに、パイプラインの敷設条件が一層過酷なものへと変遷してきた。たとえば北極圏、シベリアなどで予想される環境温度の著しい低下は鋼に対して、さらに優れた低温靱性を要求し、また輸送効率を上げるために、鋼管の高強度化、厚肉化などが要求されつつある²⁾。従来の制御圧延法のみではこれらの要求を十分に満たす寒冷地向ラインパイプを製造するには極限に近づきつつあり、それに代わる経済性を備えた新しい低温用鋼の製造法が開発が望まれた。

SHT 法はこの要求を満たすべく開発されたもので、次章に述べるごとく制御圧延法と熱処理法の長所をかねそなえている。

3. SHT法の概要

3-1 SHT法とは

SHT 法は“極寒地において使用される低温靱性の著しく優れた鋼板を経済的にかつ短期間に、大量に供給するにはいかなる製造法が最適であるか”という命題のもとに開発されたものである。この目標達成のために、次項に述べる原理にもとづき、新しい領域の加工熱処理法を基礎的に解明し、つぎにこれを具体化するために設備・製造技術の開発を行った。

SHT 法の開発は次の 3 要素から構成されるといえる。

- (1) 新しい領域での加工熱処理法の開拓
 - (2) 量産方式製造プロセスの開発
 - (3) コンピュータ・コントロールの開発
- なお関連特許は 23 件出願している。

3-2 SHT法の原理

SHT 法は鋼の強靱化機構において

* 昭和 54 年 5 月 14 日受付 (Received May 14, 1979) (依頼技術トピックス)

** 住友金属工業(株) 工博 (Sumitomo Metal Industries, Ltd., 5-15 Kitahama Higashi-ku Osaka 541)

- (1) 結晶粒微細化作用³⁾⁴⁾
- (2) 析出強化作用⁵⁾⁶⁾
- (3) 加工硬化作用⁷⁾⁸⁾
- (4) 変態強化作用⁹⁾

の4作用を鋼板の所要性能に応じて組合せて機能させている。とりわけすべての SHT 鋼板（以下 SHT 法により製造された鋼板を SHT 鋼板と称する）の基礎として (1) の結晶粒微細化作用を最大限に活用している。また (1) 以外の3作用は従来強化法として有効であるが、圧延のままの鋼、焼ならし鋼では靱性を害する懸念があるものであった。SHT 法では鋼の A_{c3} 変態点直上への加熱圧延によつて、それぞれの作用を強化には有効のまま、靱性を害さないものへと性格を変化^{5)~9)}させて活用することに成功した。

結晶粒微細化の方法として

- (A) 鋼を A_{c3} 点直上に加熱することによる初期オーステナイト粒の細粒化³⁾
- (B) オーステナイトの再結晶域圧延による細粒化⁴⁾
- (C) オーステナイトの未再結晶域圧延による変形帯の導入（みかけの粒界の増殖）⁴⁾
- (D) オーステナイトとフェライトの二相域圧延による加工フェライトの再結晶または動的回復による細粒化³⁾⁸⁾

という4段階のメカニズムを SHT 法では機能させている。

この(A)~(D)の細粒化機構を実験室規模から経済性を損なうことなく、大量生産の場において発揮させるプロセスとして、図1に示すごとく、2回加熱・2回圧延法を考案した。

従来の熱処理法は図2に示すごとく、(A)の機構のみを利用したものである。また R. A. GRANGE の提案¹⁰⁾による加工熱処理法は(A)および(B)の機構による結晶粒微細化を示したものである。一方制御圧延法は(B)~(D)の機構を利用しているが、1回加熱・1回圧延であるために靱性上の最適圧延条件と生産性のかねあい、その他種々の制約条件を生じ、有効に機能し得ず、その靱性レベルに限界があつた。SHT 法では(A)~(D)の機構を必要靱性に応じて有効に機能させることが可能で、従来の熱処理法に勝るとも劣らない特性を付与することが可能である。

SHT 法におけるマイクロ組織の変化を制御圧延法、焼ならし法と比較して模式的に図3に示す¹¹⁾。制御圧延法では制御圧延により $5\sim 10\mu$ の細粒鋼が容易に得られるが、スラブ加熱温度が $1100\sim 1250^\circ\text{C}$ と高いためにオーステナイト粒成長により粗大・不均一化しており、加工不均一性と相まって、最終のマイクロ組織は SHT 法のほうがより均一でより微細である。一方焼ならし法では圧延後 A_{c3} 変態点直上への再加熱によりオーステナイト粒は整細粒となり、均一な最終のマイクロ組織が得られ

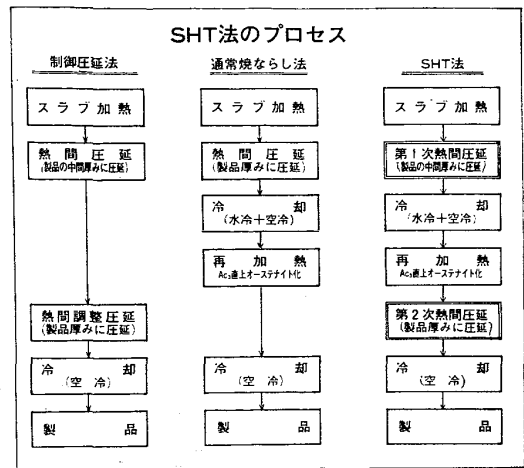


図1 SHT法のプロセス

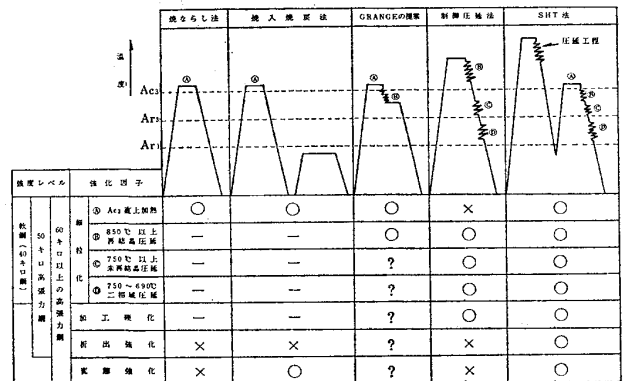


図2 低温用鋼の強化因子の靱性に及ぼす効果

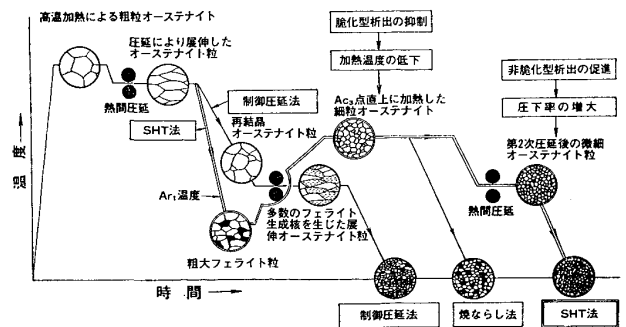


図3 SHT法の主要な強靱化機構

るが、このフェライト粒度はほぼオーステナイト粒度によつて決定されるので、標準以上の細粒化の促進はむづかしい。SHT 法は両者の長所を組合せた製造プロセスで、最終の加熱温度を $900\sim 950^\circ\text{C}$ と焼ならし法のそれに合わせ、整細粒オーステナイト粒を得、次に Thermomechanical な加工を行うことにより、一段と均一かつ微細なマイクロ組織を得ることができる。同一成分鋼にて同一板厚の鋼板を SHT 法、制御圧延法、焼ならし法でそれぞれ製造した時のマイクロ組織を写真1に示す。

3.3 製造プロセスの開発

SHT 法はその強靱化機構を機能させるために、2回

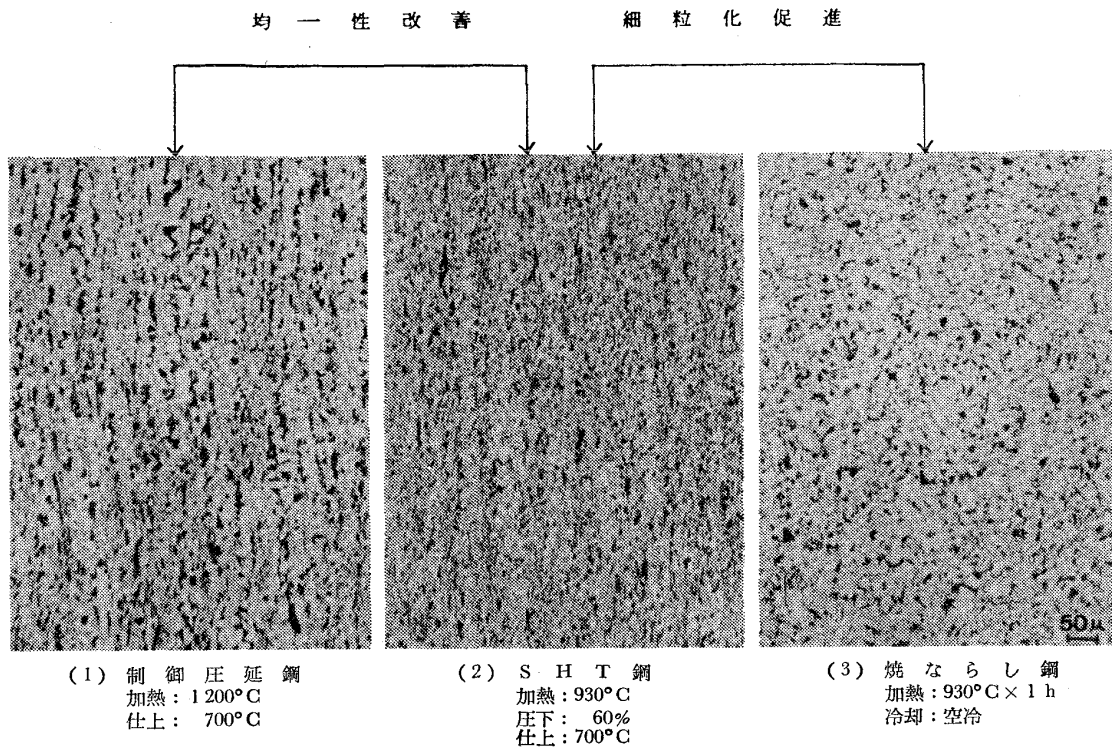


写真1 ミクロ組織の比較 (同一成分, 同一板厚)

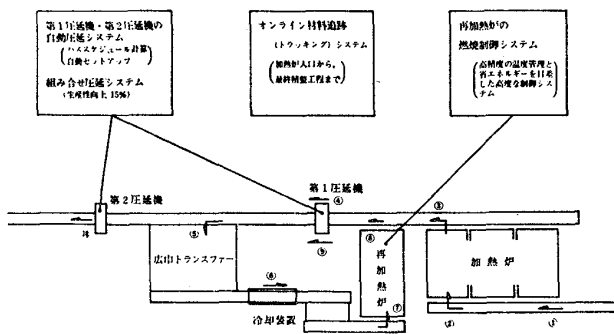


図4 SHTラインのレイアウトとコンピュータ・コントロールシステム

加熱・2回圧延の実施を特色としているが、既存の圧延ミル(鹿島製鉄所厚板工場)において、2回加熱・2回圧延をいかに組入れることにより、圧延ミルの能率を損なわずに実施できるかの検討がなされ、次の3点からなる製造プロセスが開発された。

- (1) 最適レイアウトの検討
- (2) 再加熱炉制御システムの開発
- (3) 組合せ圧延方式の導入と圧延自動制御システムの開発

図4にこのような観点から考案された工場レイアウトとコンピュータ・コントロールシステムを示す。レイアウトに着目すると、第1、第2圧延機を有する圧延ラインに対し、冷却装置、再加熱炉を有するSHTラインを併設した。これにより2回加熱・2回圧延がオンライン

にて可能である。しかしながらSHT法のみでの操作では通常圧延法に対し約1/2の圧延能率になり生産性は低下する。そこで(3)の組合せ圧延方式が考案された。これはSHT法の圧延と、その他の一般圧延材の圧延とを、第1、第2圧延機により平行して実施することにより、圧延機の遊休時間をなくそうとするものであり、これにより圧延ライン全体としての生産性の低下を防止でき、また制御圧延法に比べて圧延ライン全体としての生産性の向上をはかることが可能になった。

3.4 コンピュータ・コントロールの開発

複雑なSHT圧延および組合せ圧延を効率的に実施するため、図4中に示すようなコンピュータ・コントロールシステムが開発された。とくに再加熱炉制御システム(図5)は材料の装入温度・寸法がいかに変化しても抽出温度を目標どおりで抽出し、また炉内で材料温度をオーバーヒートさせないという制約下で、燃料原単位を最小

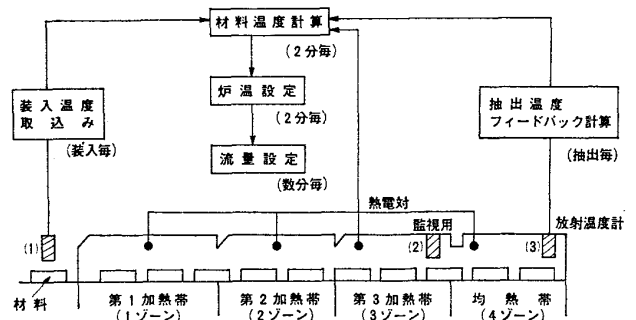


図5 再加熱炉制御方式

表 1 X-70 級高靱性ラインパイプの化学成分と機械的性質

マーク	プロセス		寸 法		化 学 成 分 (wt%)								そ の 他
	鋼板製造	鋼管製造	外径 (mm)	肉厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al	
1 A	SHT	UO	1 220	18.3	0.09	0.28	1.26	0.019	0.005	0.027	0.08	0.045	Cu, Cr, Mo添加 (0.20以下) 〃
1 B	SHT	UO	1 220	18.3	0.06	0.26	1.46	0.016	0.004	0.030	0.08	0.038	
1 C	SHT	C F E	1 220	18.3	0.07	0.35	1.51	0.011	0.004	0.041	0.09	0.046	
1 A'	CR	UO	1 220	18.3	0.09	0.28	1.26	0.019	0.005	0.027	0.08	0.045	Cu, Cr, Mo添加 (0.20以下) Cu, Cr添加(0.20以下)
1 C'	CR	C F E	1 220	18.3	0.07	0.35	1.51	0.011	0.004	0.041	0.09	0.046	

マーク	引 張 特 性 (C方向)				切 欠 靱 性 (C方向)			
	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降 伏 比 (%)	伸 び (%)	Vシャルピー			B-DWTT
					50%FATT (°C)	吸収エネルギー(J)		
					-25°C	-45°C	85%FATT (°C)	
1 A	535.6	652.8	81.4	30.0	-86	95	84	-57
1 B	513.7	605.8	84.8	34.0	-90	227	187	-52
1 C	493.1	611.7	80.5	35.1	-141	152	122	-68
1 A'	581.3	693.0	83.9	29.6	-68	54	52	-31
1 C'	541.0	637.1	85.0	34.3	-82	222	156	-31

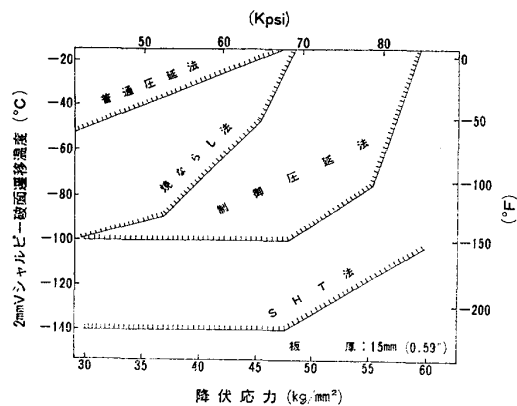


図 6 SHT 鋼板の低温靱性

にするための画期的コンピュータ・コントロールシステムであり、日本で実用化された第一号の加熱炉制御システム^{12)~15)}である。高精度の炉温制御が SHT 鋼板の安定した高品質の確保に寄与している。この再加熱炉制御方式は他の加熱炉制御にも応用され、省エネルギーの効果をおさめているが、今後さらに波及することが期待できる。

4. SHT 鋼板の性能

SHT 鋼板の性能上の特長としては、従来の熱処理鋼板、制御圧延鋼板に比し

- (1) 低温靱性が優れていること
- (2) 性能の均一性に優れていること

- (3) 溶接性が優れていること
- (4) 経済性、量産性に優れていることが挙げられる。

このような特長を活かした新しい低温用高張力鋼板の開発に成功した。たとえば図 6 は従来法で得られる強度-靱性範囲と今回開発した SHT 法の可能範囲を対比するものである。焼ならし法、制御圧延法などの従来法に対して、SHT 法では高い強度レベルまで優れた低温靱性を示していることがわかる。以下において SHT 鋼板の代表的な適用例および製造鋼種を紹介する。

4.1 寒冷地向ラインパイプへの適用例

表 1 に X-70 級高靱性ラインパイプへの適用試験結果をまとめる¹⁶⁾。通常の制御圧延鋼でも、SHT 鋼でもいづれも -25°C で用いる X-70 級ガス輸送用鋼管として十分な性質を示すが、バツテル DWTT (Drop Weight Tear Test) で得られる脆性破壊の伝播停止特性は SHT 鋼のほうがずっと優れた安定した値を示す。表 2 は 25 mm 以上の厚肉高靱性 X-65 級ラインパイプの製造試験結果を示す。SHT 法によると -45°C で十分な靱性を有する 31.8mm 厚の X-65 級鋼管の製造が可能である。図 7 には X-70 級、厚肉 X-65 級鋼管の DWTT 破面遷移温度曲線を示す。天然ガス輸送配管の中継基地用の一部特殊配管では -60°C での高い靱性を要求される。熱処理法ではこれを満足するために 2~3% のニッケル添加が必要となるが、SHT 法では 0.5~1% 程度の添加で十分である。本例に限らず従来法と同一の性能を得よ

表 2 X-65 級厚肉高靱性ラインパイプの化学成分と機械的性質

マーク	プロセス		寸 法		化 学 成 分 (wt%)								
	鋼板製造	鋼管製造	外径 (mm)	肉厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Al	そ の 他
2 A	SHT	UO	1 220	26.3	0.06	0.26	1.46	0.016	0.004	0.08	0.030	0.038	Cu, Cr, Mo添加 (0.20以下)
2 B	SHT	RB*	1 220	31.8	0.09	0.27	1.34	0.009	0.005	0.10	0.028	0.063	Cu, Ni添加(0.30以下)
2 C'	CR	UO	914	26.2	0.07	0.30	1.41	0.014	0.005	0.06	0.030	0.035	Ni, Mo添加(0.20以下)

マーク	引 張 特 性 (C方向)				切 欠 靱 性 (C方向)			
	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降 伏 比 (%)	伸 び (%)	Vシャルピー		B-DWTT	
					50%FATT (°C)	吸収エネルギー(J)		
					-25°C	-45°C	85%FATT (°C)	
2 A	455.8	575.4	79.3	44.1	-93	244	205	-53
2 B	454.7	547.8	81.0	58.0	-101	192	168	-65
2 C'	469.6	570.6	82.3	43.9	-62	182	116	-20

* ロールベンディング

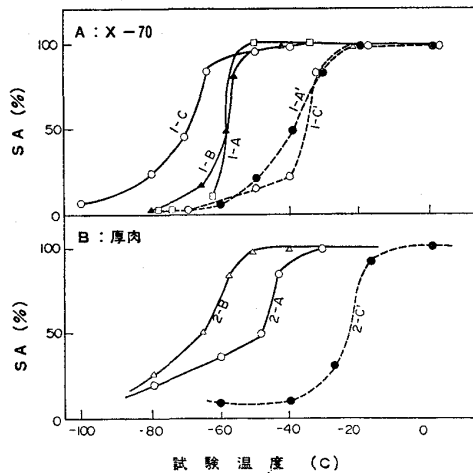


図 7 供試鋼管のバツテルDWT T遷移曲線 (記号は表 1, 2 参照)

うとする場合, SHT 法は省資源 (合金元素の節約) を可能にする。

4.2 造船用E級鋼, 低温用鋼としての適用

脆性破壊の Arrest 用に使用されるE級鋼¹⁷⁾あるいはLPG 船等に使用される低温用鋼は規格により焼ならし法またはそれに代わる熱処理法が規定されているのが一般的であるが, SHT 鋼は表 3 に示すごとく, E級鋼, 低温用鋼としての認定を取得している。SHT 法の加工熱処理による性能が従来熱処理法に匹敵するものであることが認められたと考えられる。低温用 SHT 鋼の特性の一例を表 4 および図 8 に示す。

4.3 溶接性の改善

SHT 法では 焼ならし法に比べ, より少ない化学成分で

表 3 鋼種認定取得状況

区分	協会名	取 得 規 格
WE S 低温用鋼	日本溶接協会	LT 29-IV-80G-60A LT 33-IV-90G-60A LT 37-IV-120G-90A
	日本海事協会	KL 24A, KL 24B KL 33 KL 37
船 級 低温用鋼	ノルウェー 船 級 協 会	NV 2-3, NV 4-3 NV 2-4, NV 4-4
	ロ イ ド 船 級 協 会	LT 0, LT 20 LT 40, LT 60
	日本海事協会	KE, KE 32 KE 36, KE 46
船 級 E 級 鋼	アメリ カ 船 級 協 会	E, EH 32 EH 36,
	ノルウェー 船 級 協 会	NVE, NVE 27 NVE 32, NVE 36
	ロ イ ド 船 級 協 会	E, EH 27 S EH 32, EH 34 S EH 36
	韓 国 船 級 協 会	RE, RE 32 RE 36, RE 46

高強度を得ることが可能である。このため溶接性が向上し, 溶接時の割れ防止のための予熱工程の省略が可能となる。図 9 は造船用の EH 36 グレード (降伏強さ 36 kg/mm² 保証の E 級鋼) に対する SHT 鋼と焼ならし鋼

表 4 低温用 SHT 鋼板の化学成分と機械的性質

鋼 種	化 学 成 分 (チェック値) (wt%)										板 厚 (mm)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Nb	sol. Al	Ceq	
SHT 41A	0.08	0.08	1.36	0.018	0.003	0.01	—	—	0.033	0.31	30
SHT 46A	0.09	0.07	1.34	0.022	0.003	0.01	0.05	—	0.035	0.33	30
SHT 50A	0.10	0.32	1.38	0.021	0.004	0.25	0.07	0.020	0.029	0.36	30

鋼 種	試験片	方 向	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	曲 げ 180°	
SHT 41A	JIS 5号	L	34.1	44.1	59.9	L	良
		C	35.5	44.3	58.8		
SHT 46A	5.65√A	C	35.8	43.2	34.9	C	良
		L	38.6	47.6	53.6	L	良
SHT 46A	JIS 5号	L	39.5	49.8	49.6	L	良
		C	39.3	49.1	31.6	C	良
SHT 50A	JIS 5号	L	44.4	55.6	50.8	L	良
		C	44.4	55.6	42.5		
SHT 50A	5.65√A	C	46.6	55.4	27.8	C	良

鋼 種	方向	V シ ャ ル ピ ー				歪 時 効 シ ャ ル ピ ー				プレ ス シ ャ ル ピ ー		NRL
		vEo (kg·m)	vTs (°C)	vTE (°C)	vE-60 (kg·m)	vEo (kg·m)	vTs (°C)	vTE (°C)	vE-60 (kg·m)	PTE (°C)	PTC (°C)	NDT 温度 (°C)
SHT 41A	L	27.6	-94	-75	11.4	25.5	-78	-61	7.8	-57	-66	-75
	C	19.3	-90	-78	9.0	—	—	—	—	-45	-57	—
SHT 46A	L	25.8	-102	-89	12.2	20.9	-95	-78	10.3	-66	-82	-85
	C	13.5	-88	-84	8.0	—	—	—	—	-51	-68	—
SHT 50A	L	23.3	-128	-124	16.4	21.5	-113	-112	10.8	-75	-88	-100
	C	10.2	-113	-108	8.4	—	—	—	—	-55	-63	—

表 5 EH 36 鋼 の 特 性

板 厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Nb	sol. Al	Ceq	PCM
25	0.13	0.23	1.38	0.021	0.004	0.020	0.033	0.360	0.207
38	0.12	0.26	1.35	0.020	0.005	0.024	0.048	0.345	0.197
50	0.13	0.26	1.41	0.020	0.004	0.026	0.043	0.365	0.210

板 厚 (mm)	方 向	引 張 試 験			曲 げ 試 験	衝 撃 試 験		
		降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	半径 1.5 t 180°	vE-10 (kg-m)	vE-10 (kg-m)	vTs (°C)
25	L	40.5	52.7	29.6	良	19.7	22.8	-89
	C	40.9	52.9	30.1	良	11.1	11.7	-83
38	L	39.1	52.4	36.1	良	20.2	23.0	-92
	C	39.5	52.4	31.9	良	9.8	11.5	-88
50	L	40.2	52.2	32.8	良	21.8	22.9	-88
	C	39.3	51.9	36.0	良	13.5	16.4	-72

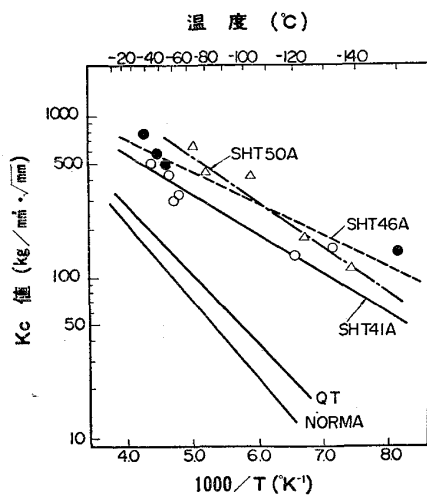


図8 SHT鋼板の二重引張試験結果

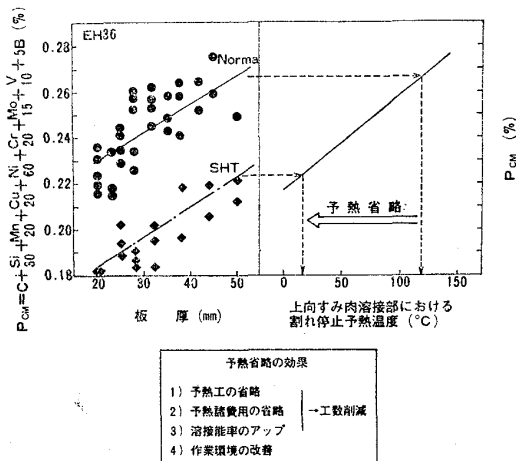


図9 EH36 50mm の予熱条件

の板厚毎に必要な化学組成の P_{CM} 換算値である。 P_{CM} 値は溶接割れ感受性組成と呼ばれ、この値が低いほどその鋼の割れ感受性が低く、溶接時に割れが発生しにくい。図8の関係よりたとえば板厚 50mm の場合には焼ならし鋼では上向き肉溶接部の割れ防止のためには 120°C の予熱が必要であるが、SHT 鋼では P_{CM} 値が低いので予熱が不要となる。EH 36 の代表的特性を表5に示す。

5. 省エネルギー効果

鋼板製造に要するエネルギー消費量を熱処理法と比較すると、焼ならし法に比べ平均 33%、焼入焼もどし法に比べ平均 120% の節減がはかれ、大きな省エネルギー効果を有する。

6. 用途と実績

寒冷地ガス輸送用大径鋼管、NGL 輸送用大径鋼管、

プラットフォーム用ジャケット鋼管、格点用鋼管、アンモニアプラント用压力容器、冷凍船冷凍タンク、寒冷地ガス輸送管大型バルブ、寒冷地大型産業機械、コンテナ船、油槽船、貨物船、鉄骨建築等の用途に実績を有しており、これまでに約 5 万 t の生産実績を有する。

7. 結 言

従来の低温用鋼製造法に代わる新しい高靱性鋼板の製造法である SHT 法を開発した。

これは新しい領域の加工熱処理法の開拓によるものであるが、それを工業化するにあつての専用設備の設置、コンピュータ・コントロールシステムの開発等の製造プロセスの開発も、生産性向上、省エネルギー化を図るために重要な役割を演じた。これにより低温靱性の著しく優れた鋼板を経済的にかつ短期間に大量に供給することが可能になった。

このように SHT 鋼は極寒地でのガス輸送用鋼管あるいはその他種々の低温用鋼として優れた特性を発揮するものであり、今後一層 SHT 法の特長を活かして、高品質の鋼板を供給して行きたい。

文 献

- 1) 長谷部茂雄: 鉄鋼界, 22 (1972) 4, p. 37
- 2) 池島俊雄: 鉄と鋼, 65 (1979) 2, p. 300
- 3) 三好栄次, 福田 実, 萩原康彦, 浅井弥寿宏: 特許公報, 昭49-7293
- 4) 福田 実, 橋本 保, 国重和俊: 鉄と鋼, 58 (1972) 13, p. 1832
- 5) 福田 実, 橋本 保, 国重和俊, 沢村武彰: 鉄と鋼, 64 (1978) 8, A219
- 6) 野崎徳彦, 福田 実: 圧力技術, 16(1978) 1, p. 8
- 7) 橋本 保, 福田 実: 鉄と鋼, 61 (1975) 12, S670, 671
- 8) 橋本 保, 沢村武彰, 大谷泰夫: 鉄と鋼, 投稿中
- 9) 橋本 保, 沢村武彰, 大谷泰夫: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, p.1589
- 10) R. A. GRANGE: Trans. ASM, 59(1966), p. 26
- 11) 福田 実, 橋本 保, 鈴木 孜, 渡辺孫也, 加藤豊: 住友金属, 30 (1978) 1, p. 71
- 12) 横井玉雄, 川野晴雄, 白井康太, 中塚康雄, 達脇正雄: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S689
- 13) 阪本喜保, 田村洋一, 達脇正雄: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S734
- 14) 住友金属: 鉄鋼協会第 67 回計測部会資料
- 15) 住友金属: 鉄鋼協会第 70 回計測部会資料
- 16) T. TANAKA, N. NOZAKI, K. BESSYO, M. FUKUDA, and T. HASHIMOTO: The Sumitomo Search No. 19(1978), p. 47
- 17) 別所 清, 藤本光春, 中野直和: 溶接学会53年度秋期講演概要集, p. 282