

目 次

1	はじめに	3
2	鋼板の選択と取引上の留意点	4
2・1	鋼板の選択	4
2・2	取引上の留意点	4
2・2・1	最少限指定すべき事項（日本鉄鋼協会：厚板マニュアル）	5
	1) 規格	5
	2) 寸法、枚数、質量	5
	3) 納期、納入方法、納入場所	5
	4) 単 価	5
2・2・2	発注時に十分打合せておくべき事項（日本鉄鋼協会：厚板マニュアル）	5
	1) 用途および使用条件	5
	2) 製造仕様	5
	3) 検査保証方法	5
2・2・3	塗装に関する取決め事項	5
2・3	ミルシート	5
3	鋼板の製造	6
3・1	製 鋼	6
3・2	連続铸造（連铸）と造塊	7
3・2・1	連 铸	7
3・2・2	造 塊	7
3・3	圧 延	8
3・3・1	加 熱	8
3・3・2	圧 延	8
3・4	精 整	9
3・5	ショット塗装	9
3・6	熱処理	9
4	鋼板品質の造り込み技術	10
4・1	冶金学的方法	10
4・1・1	化学成分	10
4・1・2	組 織	12
4・2	圧延技術による方法	13
4・2・1	TMCPによる強靱化の手段	13
4・2・2	TMCP鋼板の特徴	14
4・3	熱処理による方法	15
4・3・1	焼入焼戻し	15
4・3・2	焼ならし	15
5	鋼板の種類とその特性	16
5・1	一般構造用鋼板	16
5・2	溶接構造用鋼板	16
5・2・1	橋梁用鋼板	16
5・2・2	耐候性鋼板	17
5・2・3	耐ラメラテア鋼板	18
5・2・4	ペンストック用鋼板	19
5・3	建築構造用鋼板	19
5・4	造船用鋼板	21
5・4・1	船体構造用鋼板	21
5・4・2	大入熱溶接用鋼板	21
5・5	圧力容器用鋼板	22
5・5・1	中・常温圧力容器用鋼板	23
5・5・2	低温圧力容器用鋼板	24
5・5・3	高温圧力容器用鋼板	25
5・6	ラインパイプ用鋼板	29
5・7	特殊用途用鋼板	29
5・7・1	耐摩耗鋼板	29
5・7・2	非磁性鋼板	29

6 鋼板の品質保証	31
6・1 品質保証	31
6・1・1 鋼板の生産管理システム	31
6・1・2 識別管理システム	33
6・2 検査	33
6・2・1 寸法、形状検査	33
1) 板幅、長さ	34
2) 板厚	34
3) 横曲り(キャンバ)および平坦度	34
6・2・2 外観検査	34
6・2・3 内質検査	35
7 鋼板使用にあたっての参考事項	37
7・1 加工	37
7・1・1 切断加工	37
1) シャー切断	37
2) ガス切断	37
7・1・2 曲げ加工	37
1) 冷間曲げ	37
2) 熱間曲げ	38
3) 炎加熱による曲げ	39
7・2 溶接	39
7・2・1 硬化と軟化	39
7・2・2 割れ	40
1) 高温割れ	41
2) 低温割れ	41
3) 再熱割れ(SR割れ)	41
7・2・3 脆化	42
7・3 使用中の材質劣化	43
7・3・1 疲れ	43
1) 母材の疲れ	43
2) 溶接継手部の疲れ	44
7・3・2 使用環境による割れ	44
1) 応力腐食割れ	44
2) 水素脆化割れ	45
7・3・3 脆性破壊	45
8 おわりに	47
参考文献一覧表	48

1 はじめに

板状の圧延鋼材を鋼板といい、わが国では、通常、板厚6mm以上の鋼板を厚板と称している。

鋼板は、それぞれの使用目的に適したものを選択できるように、化学成分、強度、延性、靱性などが規格化されており、船舶、橋梁、タンクなどの主要構造部材として広く用いられている。

しかし、鋼板に関する製品規格は、本便覧に掲載した主要規格だけでも190規格強もあり、多岐におよんでいることに加え、構造物が多様化し、設計、施工技術も日々進歩をとげているため、使用目的に合致した性能を有する鋼板を適切に選択することがむずかしくなっている。

ここでは、鋼板をご採用いただくにあたっての留意点とこれらの鋼板がどのようにして作られ、品質保証されて出荷されているかについて述べ、鋼板をご使用いただくうえでの一助としたい。

なお、本編のタイトルは、“厚板の知識”であり、特に断わらないかぎり鋼板は厚板を意味する。

2 鋼板の選択と取引上の留意点

鋼板の選択は、通常、その構造物に関する法規、基準などで定められている適用鋼板規格にもとづいてなされる。しかし、構造物の種類、設計施工法などの相違によって、鋼板に要求される諸性能が適用鋼板規格の内容では不十分な場合には、発注者と製造者間で打合せのうえ、要求性能を満足させるための仕様が取り決められる。その仕様内容にもとづいて、製造者は、適切な製造工程を駆使して、顧客の要望にそった鋼板を製造し、納入している。

したがって、発注時には、発注者と製造者は仕様内容について十分打合せることが必要で、発注後の規格変更、仕様の追加や変更などは、製造工程の混乱をまねき、不具合の発生、納期遅延など種々のトラブルの原因となるので是非とも避けるべきである。

2・1 鋼板の選択

鋼板の選択に際しては、対象となる構造物の種類と仕様に応じて関係法規、基準などに適用鋼板規格が定められており、ほとんどの場合、この適用鋼板規格にもとづいて選定されるが、設計方法、施工方法などを配慮し、溶接性、加工性などの要求性能も明確にしたうえで鋼種を決定することが重要である。

参考として、用途別関連法規の一例を表1に、JIS以外の国内官公庁、団体規格を表2に示す。

表1 用途別関連法規の一例

項目	用途		鋼材の設計基準および関連法規の一例
	実	例	
船舶	甲板構造、底部構造、船側構造	船殻、デリックポスト(荷役用揚貨柱) マスト、ヒームジョイント、タンク材料、艀船骨、船体縦強度部材	日本NK規則、ASMEクラッド鋼規格 英国ロイド規則、米国ABS規則その他各国船級協会規則 WES溶接用高張力鋼規格
海洋構造物	ジャケット形：ブレース部、ノード部、モジュール部、モジュールサポート部、パイル部 人工島形：トップサイド部、ハル部 ジャッキアップリグ形：ハル部、レグ部、ジャッキフレーム部、フーテング部		米国ASTM規格、米国API規格 英国BSI規格、ノルウェENV規格 米国ABS規則、英国ロイド規則 日本NK規則、その他各国船級規則
橋梁	鉄道橋、道路橋、水門、堰堤、水路橋		日本道路協会鋼道路橋設計示方書 " 溶接鋼道路橋 " 日本道路公団、首都高速道路公団設計示方書 JIS規格、WES規格、HBS規格、AASHTO規格(米国)
圧力容器	球形ガスホルダ、LNGタンク、LPGタンク、横形タンク、豎形タンク、高圧層成筒、ポンペ、高圧ガスコンテナ、原油貯蔵タンク、ベンストック		高圧ガス取締法(通産省)、JLPAタンク規準 高圧ガス製造設備検査基準(神奈川県等) 圧力容器構造規格(通産省および労働省) ASMEボイラコード、BS5500溶接圧力容器、JIS規格
鋼管	水圧鉄管(ベンストック) 構造用鋼管、水道用鋼管、配管用鋼管、ガス、石油輸送用鋼管		同上およびAPI規格、水門鉄管技術基準
建築	鉄骨構造外皮材、鉄塔、柱梁、カーテンウォール、シートパイル、ガードレール、クレーン鉄骨		建築基準法施行令、建設省告示第221号 建築学会規準(鋼構造計算規準、溶接工作規準、薄板鋼構造計算基準、設計施行規準、鋼管構造計算規準、建設工事標準仕様書)
鉄道車両	旅客車、貨車の台枠、車体側板、屋根板、妻板、合枠、外板、床板		車両部会編作業基準
自動車	車体、リアアクスルケース シャーシ部分		自動車技術会規格 JIS規格、SAE規格
建設機械 産業機械	パワーショベル、トラッククレーン、ブルドーザ、ミキサ、ホッパ、アームバケット、溝掘り設備、試錐鉄筒		JIS規格
ボイラ	ボイラ耐圧部分(圧力配管用、高温高圧配管用、ボイラ用) ボイラドラム、フランジ火室、ブーム炉体ヘッド		ASME規格、英国ロイド規則、米国ABS規則、JIS規格、ボイラ構造規格、労働省告示10号、各国船級規則、発電用火力技術基準

表2 JIS以外の国内官公庁団体規格¹⁾

略称	制定機関名
N D S	防衛庁(技術研究本部制式規格課)(頒布)日本兵器工業会
H B S	本州四国連絡橋公団
H P I S	日本高圧力技術協会
J A R I	日本鉄道車両工業協会
J A S O	自動車技術会
J A S S	日本建築学会
J C V A	日本高圧ガス容器バルブ工業会
J P I	石油学会
J S S C	日本鋼構造協会
J W W A	日本水道協会
N D I S	日本非破壊検査協会
N I K	日本鋳物協会
N K	日本海事協会
S M	日本船用工業会
S R S	日本造船研究協会
W E S	日本溶接協会

2・2 取引上の留意点

鋼板は、発注時に仕様を付加しなければ、該当規格どおりに製造される。

仕様を付加する場合は、発注者と製造者間で要求特性をもとに仕様を決定し、製造者は、鋼板の製造に着手する。

したがって、注文に際しては、発注者は、次に示す2・2・1項を指定し、さらに2・2・2項および2・2・3項について製造者と十分打合せし、取決めを行っておくことが必要である。

2・2・1 最少限指定すべき事項（日本鉄鋼協会：厚板マニュアル）

1) 規格

種類の選択にあたっては、用途、部材をよく検討し、品質とコストの面で最適な品種を選ぶことが大切である。

2) 寸法、枚数、質量

寸法とは、板厚、板幅、長さをいい、通常mm単位で指定する。また、質量は通常トン単位で指定する。なお、質量は、普通鋼板の密度を7.85g/cm³として計算で求める計算質量を用いるのが一般的である。

3) 納期、納入方法、納入場所

納期に関しては、製造に要する日程から決まる標準納期を考慮する。

4) 単価

2・2・2 発注時に十分打合せておくべき事項（日本鉄鋼協会：厚板マニュアル）

1) 用途および使用条件

特定の用途に対して使用する鋼板が満足すべき結果となるためには、発注者が鋼板の特性をよく理解し、製造者も鋼板の用途、使用条件について熟知したうえで、発注者の微妙な要求内容を受注材の品質設計ならびに製造工程に反映させることが望ましい。

2) 製造仕様

(1) 化学成分

適用される規格に溶鋼分析値の範囲が規定されているが、たとえば、冷間曲げ加工性とか、耐ラメラテア特性というような特別の用途特性を満足させるために、ある化学成分を規格範囲より厳しい範囲内におさえる必要がある場合には、その製造可否について十分打合せを行う必要がある。

(2) 機械的性質

機械的性質は、適用規格ごとに各種試験値の範囲が定められているが、適用範囲外の試験を指定する場合、あるいは定められた試験値よりも厳しい値を要求する場合には、細かい取決めを行っておくことが必要である。

(3) 表面性状

JISでは、使用上有害な欠陥があってはならないという表現になっているが、要求は、時として過度になるので、特に用途上トラブルが予想される場合には、使用上有害な欠陥について、その種類、限度などについて具体的な取決めをしておくことが望ましい。

(4) 寸法許容差

板厚、板幅、長さについては、適用規格ごとに規定されている。板厚のマイナス側許容差をプラス側に上乗せして要求することは、エキストラ対象となるので、使用部材の設計の考え方にマッチした許容値を選定する必要がある。

(5) 表示

刻印とすり込み（ステンシル）による表示がある。原則として規格に定められた項目を表示するようになっているので、それ以外の表示を特別に指定する場合には、その内容、表示位置、表示方法を十分打合せておく必要がある。

3) 検査保証方法

検査保証方法は、通常、次のどちらかによるが、どの方法を採用するか取り決める必要がある。

(1) 工場保証

注文品について取決めた仕様内容にしたがって製造者が製品を検査し、保証する方法で、発注者の要求によって鋼材検査証明書（Inspection Certificate一般にミルシートといわれている）が発行される。

(2) 第三者機関による保証

公に認められた第三者の検査機関に検査を依頼し、その機関が検査を行い、品質保証を行う方法である。

2・2・3 塗装に関する取決め事項

下地塗装が必要な場合は、仕様規格の他に除錆度、表面粗度、塗料メーカ、塗料銘柄、塗料色、塗膜厚、塗布量などの取決めを行っておくことが必要である。

2・3 ミルシート

ミルシートは、鋼板出荷検査後、発行される。

ミルシートは、向先別、規格別に発行されるが、この目的の一つは、納入した鋼板が契約時の規格または購入仕様（協定仕様）に合格していることを証明するため、もう一つの目的は、納入された鋼板が要求事項を満足しているか否かを発注者がチェックするためである。

万一、不具合が発生した場合には、ミルシートの製品番号（プレートNO.または板番ともいう）から対象鋼板の製造履歴を知ることができるので、発注者が製造者に製品番号を連絡することにより、製造者は、不具合原因の究明と適切な対策を迅速に講じることができる。

なお、鋼板には、種類の記号、製品寸法、製品番号などがすり込み表示してあり、ミルシートと対比することにより、発注者は、その鋼板の品質を確認して使用することができる。また、すり込みとともに社章、製品番号、規格なども規格、基準類にしたがって打刻してあり、納入鋼板の履歴確認の便を図っている。

3 鋼板の製造

製銑にはじまり、圧延、出荷までの鋼板の製造工程を別ページに示す。各工程とも最新の技術、設備を有しており、優れた品質の鋼板を安定して供給しうる体制を整えている。

3・1 製鋼

高炉から搬入した溶銑は、4～5%のCを含み、P、Sなどの不純物も多いため、これらを低減し、種々の用途に適用できる鋼に精錬する工程が製鋼である。

製鋼では、通常、大量生産方式に適した転炉が用いられ、特殊な場合（たとえば転炉での成分調整が困難、または少量生産など）には電気炉が用いられている。

製鋼炉の変遷は、図1に示すように、転炉製鋼法にすばらしい発展がみられる。すなわち、昭和30年代初期にLD転炉がトーマス転炉にとってかわり、昭和40年代中途には平炉が姿を消している。また、昭和40年代後半より、LD転炉プラス炉外精錬法が導入され、いっそう電気炉の領域をせばめている。さらに、最近では、LD転炉の炉内攪拌を強め、精錬反応の進行をより円滑に進める方法として、上下吹き法が開発、実用化されている。

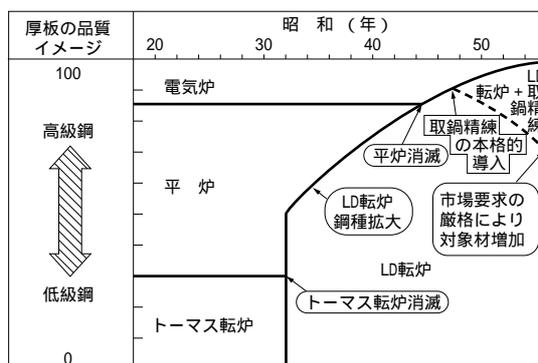


図1 わが国一貫メーカーにおける製鋼炉の変遷²⁾

製鋼の目的は、成分調整と不純物（主にP、S）、ガス成分（H、O、N）の低減であり、特にP、Sの低減については、転炉に溶銑を注入するまえに、溶銑予備処理として、取鍋またはトープードカー内に脱燐剤や脱硫剤を投入し、脱燐、脱硫を行った後、転炉精錬することによって低燐、低硫化を図っている。この溶銑予備処理工程の一例を図2に示す。

転炉精錬を終了した溶鋼は、必要に応じて、さらに溶鋼処理として取鍋加熱精錬などを行って、合金元素の調整、脱水素および非金属介在物の除去を図っている。溶鋼処理の一例を図3に示す。

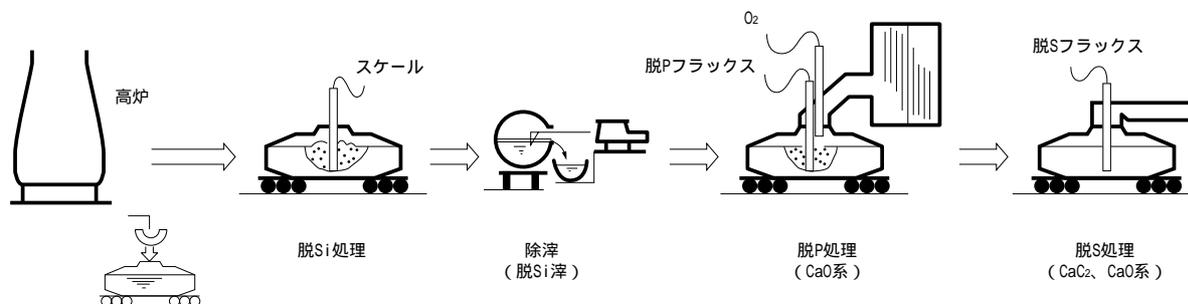


図2 溶銑予備処理工程の一例

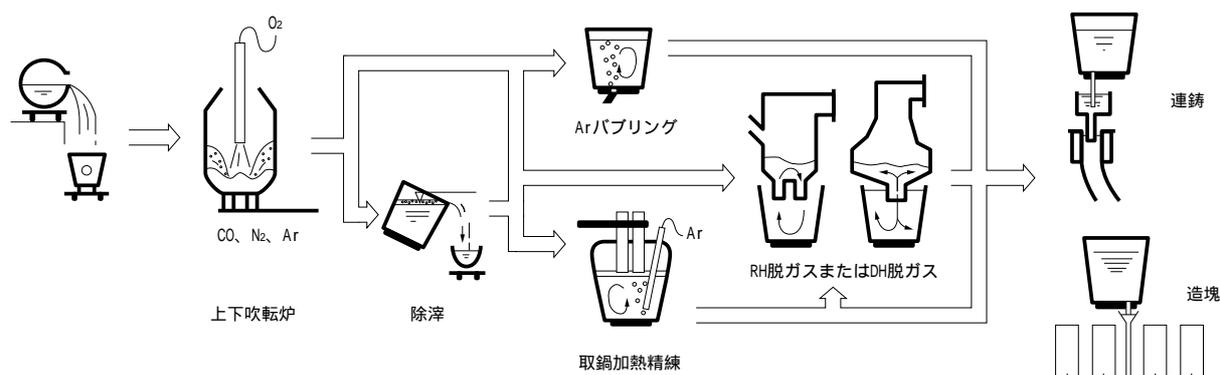


図3 溶鋼処理工程の一例

3・2 連続鋳造（連鋳）と造塊

製鋼工場で精錬を終了した溶鋼は、通常、大量生産方式に適したスラブ連鋳機に注入されて鋼板用スラブとなる。特殊な場合（たとえば、大単重鋼板、極厚鋼板など）では鋳型に鋳込まれて鋼塊となる。

3・2・1 連鋳

連鋳法は、鋼塊法における造塊工程と分塊圧延工程とによってかわるものである。鋼塊法に比べて工程の省略、省エネルギー、省力、歩留向上、生産性向上などに寄与するばかりでなく、偏析が少なく品質が安定しているため、連鋳化は着実に進んでおり、わが国の鋼板用スラブではすでに95%以上が連鋳法で製造されている。

連鋳方式を図4に示す。従来、連鋳スラブは幅一定であったが、最近になって鋳造途中でも幅を変更できる技術が開発され、実用化が進められている。その方法の一例を模式的に図5に示す。

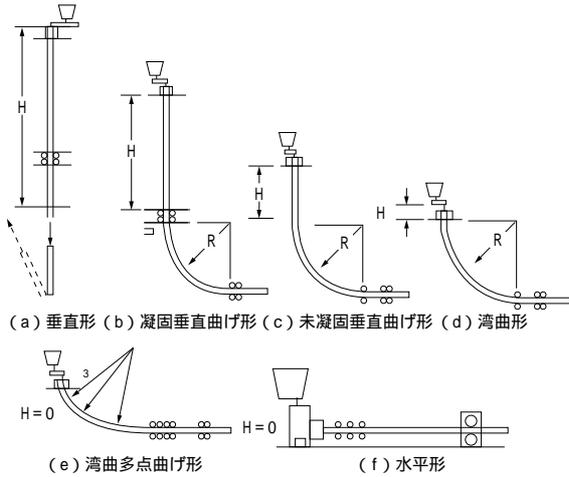


図4 現在の各種連鋳方式³⁾

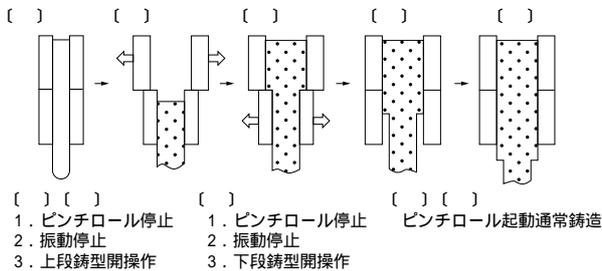


図5 幅変更方法の一例（模式図）⁴⁾

連鋳スラブ中の成分偏析や非金属介在物の凝集は、溶鋼の凝固過程で生じるもので皆無にはできないが、最近では、電磁攪拌技術の導入により、凝固過程で生じる偏析や介在物を軽減させ、いっそう均質なスラブを作る努力がなされている。このようにして連鋳スラブの品質は一段と向上しており、その適用品種も拡大の一途をたどっている。

連鋳材と造塊材の品質比較の一例を耐ラメラテア鋼板に

ついて図6に示す。この図から連鋳材は造塊材に比べて機械的性質のバラツキが少ないといえる。

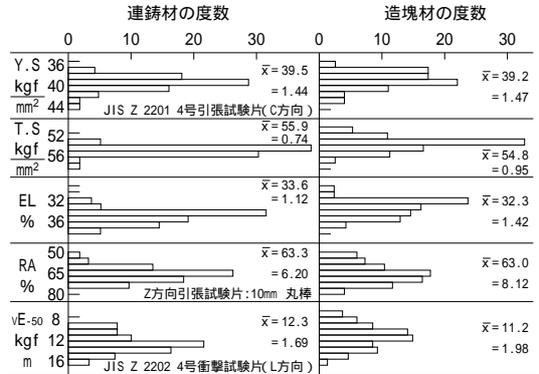


図6 耐ラメラテア鋼の連鋳材と造塊材の比較⁵⁾

3・2・2 造塊

鋳型への溶鋼の注入方式には、図7に示すように上注ぎ法と下注ぎ法とがある。また、溶鋼の脱酸の強弱により鋼塊はリムド鋼、セミキルド鋼およびキルド鋼に区別される。

鋼の品質に着目すると、リムド鋼、セミキルド鋼、キルド鋼と脱酸が強化されるにしたがって内部品質は良好となる。リムド鋼、セミキルド鋼は、以前には歩留が高いことから厚板では400N/mm²級の低級鋼に採用されていたが、内部健全性がキルド鋼より劣るため、連鋳技術が確立してからは、高歩留でしかも高品質の連鋳キルド鋼にとってかわられている。また、造塊が適用されている極厚鋼板あるいは大単重鋼板でもキルド鋼が充当されており、現在では、厚板製品にはリムド鋼、セミキルド鋼は、通常、充当されていない。

参考として、脱酸度による鋼塊内部の状況を図8に、各種の脱酸形式による鋼の比較を表3に示す。

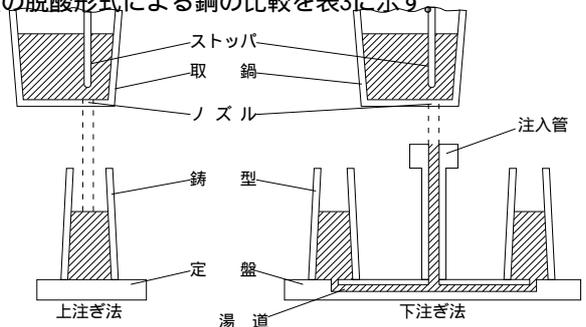


図7 鋳型への注入方式

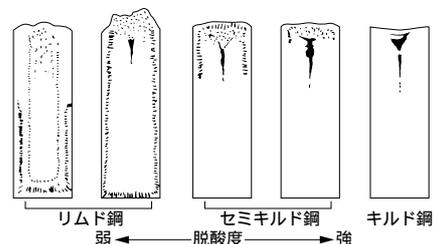


図8 脱酸度による鋼塊内部の状況⁶⁾

表3 各種の脱酸形式による鋼の比較⁷⁾

		リムド鋼	セミキルド鋼	キルド鋼
製造法	脱酸	ほとんど脱酸しないか、きわめてわずかに脱酸する。	リムド鋼とキルド鋼との中間程度の脱酸を行う。	完全に脱酸する。
	注入	下広型に上注ぎまたは下注ぎする。ある時間経過してから蓋を置く。	下広型に上注ぎする。	上広押湯付あるいは下広押湯付鑄型に上注ぎまたは下注ぎする。あるいは下広鑄型に下注ぎし頭部を水冷して注入管から押湯する。
鋼塊の性状	成分的制限	C<0.25%、Mn<0.60%が望ましく、また、脱酸剤をあまり加えられない。Si<0.03%	リムド鋼よりも制限が少ない。ただし脱酸剤をあまり多く加えられない。Si<0.15%	もっとも制限が少ない。普通はSi0.15~0.35%であるが必要に応じてSiを低くし、Alを主として用いて脱酸を行うこともある
	肌	もっとも良好	比較的不良になりがち	セミキルド鋼よりもやや良好
	内部の健全性	偏析が著しいため健全性が劣る	リムド鋼より健全	もっとも健全
	偏析	多い	リムド鋼より少ない	もっとも少ない
	分塊歩留り	キルド鋼より高い	リムド鋼より若干高い	押湯つきキルド鋼はもっとも低い

3・3 圧延

鋼板は、受注生産であり、発注者の必要とする寸法、品質に応じて製造され、一品一葉性が強い。

通常、厚板圧延機では、最小板厚は6mmであり、最大板厚は300mm以上におよび、板幅は最小約1m、長さは最小約3mから種々の注文サイズに応じて製造されている。

3・3・1 加熱

この工程は、スラブの受入れからはじまる。搬入されたスラブはロールチャンスや納期などを考慮してグルーピングされ、加熱炉に装入される。

通常、加熱は連続式加熱炉で行われるが、極端な小単重や大単重のスラブ、特殊な加熱パターンを要する鋼種などは、バッチ式加熱炉で処理される。

加熱作業における品質面での留意点は、適正温度に迅速かつ均一に加熱する、加熱中に生成するスケールをなるべく少なくする、の2点である。

最近では、スラブに適した最適加熱条件を設定し、加熱作業の数値制御を実施して加熱効率の向上とスラブの適正加熱を行っている。

加熱されたスラブは、炉から抽出後、高圧噴射式スケールブレイカで加熱中に生成したスケールを除去して圧延機に送られる。

3・3・2 圧延

圧延作業は、鋼板製造工程の中心をなすものであり、圧延の良否が鋼板の品質、歩留におよぼす影響は大きい。すなわち、寸法精度、平坦度、表面品質、機械的性質などの鋼板の品質特性は、いずれも圧延機の設備特性と作業管理状況によって大きく左右される。

そのため、四重広幅厚板圧延機2基を粗および仕上圧延機として配置し、さらに板厚精度の向上策として、板長手方向の板厚偏差の減少にはAGC(Automatic Gauge Control)を、また、板幅方向の板厚偏差の減少にはペアクロス機能やロールベンディング機能を有した形状制御ミルの導入が

進められている。

四重広幅厚板圧延機における油圧AGCシステムの一例を図9に示す。

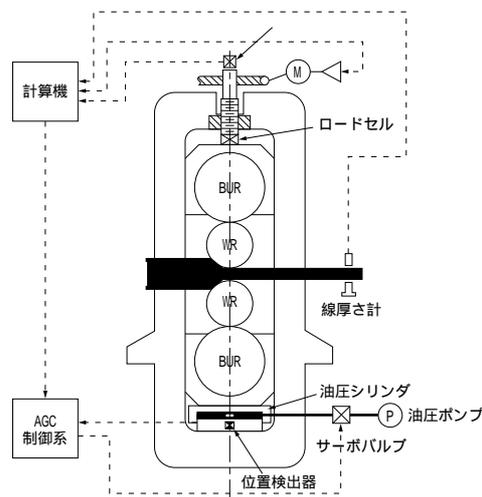


図9 四重広幅厚板圧延機における油圧AGCシステムの一例⁸⁾

また、材質上から、異方性の軽減を図るために圧延比(L/C)を考慮したパススケジュールの設定やラインパイプ用鋼板で代表されるように、高強度、高靱性を得るための制御圧延などもコンピュータ制御によって行われている。

さらに、最近では仕上圧延機の直後に加速冷却設備を設置し、オンラインで圧延後の鋼板の冷却速度を制御する技術が開発、実用化されており、この技術により低炭素当量で高強度、高靱性鋼板の製造が可能となり、また、オンラインでの焼入れも可能となってきている。

加速冷却設備の一例を図10に示す。

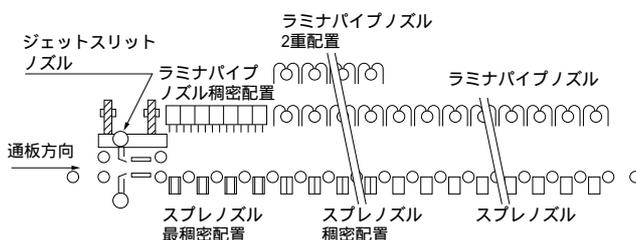


図10 加速冷却設備の一例

3・4 精整

圧延を終了した鋼板は、ホットレベラーに送られ、温間で矯正された後、冷却床上下面均一に大気冷却される。

冷却後の鋼板は、精整ラインに送られ、すり込み、刻印、指定寸法への切断、寸法測定、表裏面検査、形状検査などの一連の作業が実施される。さらに、建築構造用鋼板に対しては、小割後の材料識別を容易にするために、鋼板表面上に長さ、幅方向とも350mmピッチで社章と規格記号の識別マーキングが施される。また、熱処理を必要とする場合、ショット塗装を要求された場合、あるいはガス切断が必要な場合にはそれぞれの工程に送り、所定の作業が行われる。

このように、圧延後の工程は、発注者の指定または規格などによって多岐にわたるため、従来の手作業では対応が困難であり、最近では、コンピュータによる制御が主流となっている。また、当社では、独自に開発した自動すり込み、打刻装置を採用し、精整ラインを自動化することにより、作業ミスの防止、省力化、処理時間の短縮、危険作業の解消を図っている。

3・5 ショット塗装

発注時、指定があれば仕様にもとづきショット塗装を行っている。

ショット塗装の主な目的は、鋼板が出荷されてから船舶、橋梁などに加工されるまでの間のさび発生を防止することである。

ショットブラストは、研掃材（カットワイヤ、ショットなど）を圧縮空気によって吹付けたり、遠心力により投射したりして鋼板表面のさびを除去する方法である。研掃材には上記のほか砂（サンド）もあるが、サンドを使用するサンドブラストは鋼板製造時には適用しない。

塗装に使用する塗料をショッププライマと呼んでおり、塗料は密着性がよく耐候性、耐食性に優れ、上塗り塗料の選択性がひろく、溶接、溶断に対して害が少なく、かつ、速乾性があるなどの条件を具備する必要がある。

現在使用されている塗料には、長期暴露形ウオッシュプライマとジンクリッチプライマの2種類があり、ショット塗装を指定する場合には、この2種類の塗料から選択することが望ましい。

3・6 熱処理

規格に熱処理が規定されている場合、あるいは必要により熱処理を行う場合には、鋼板は熱処理工程に送られる。通常、鋼板の製造に関する熱処理は、焼入焼戻し、または焼ならしが一般的である。熱処理工程は、所定温度への加熱、均熱保持および冷却の3工程からなっている。加熱工程のポイントは 均一加熱 加熱時のスケール発生防止（冷

却能の向上のため）の2点であり、このため加熱方式は直火式から無酸化性雰囲気での間接加熱方式（ラジアントチューブ方式）に変更されている。

また、焼入れ時の冷却能の向上および熱処理材の表面品質確保のため、熱処理前にはショット工程を通し圧延スケールを除去している。

焼入装置も、当初、プレッシャクエンチ式焼入装置が使用されていたが、現在では、焼入れ時の冷却効率が優れ、かつ、鋼板の焼入れむらの減少および平坦度の改善に効果のあるローラプラテン式焼入装置が広く用いられている。

この装置は、炉から抽出された鋼板を上下のロールではさみ込み、連続的に移行させながら、上下パイプからの噴水で冷却する装置であり、ハイクエンチゾーンとロークエンチゾーンに大別される。ハイクエンチゾーンでは、高圧多量の噴射水で鋼板表面温度を急速に下げ、大きな熱伝達を得やすくする働きをし、また、ロークエンチゾーンでは鋼板内部から出てくる熱を奪う働きをする。

ローラプラテン式焼入装置のハイクエンチゾーンおよびロークエンチゾーンのノズル形状を図11に示す。

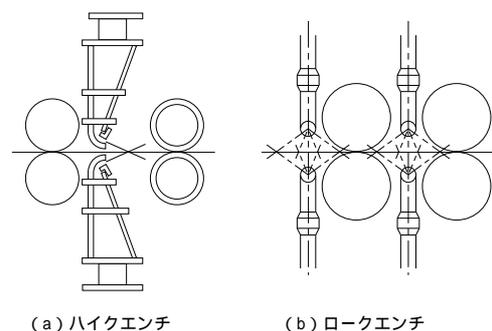


図11 ローラプラテン式焼入装置のノズル形状⁹⁾

4 鋼板品質の造り込み技術

各種鋼構造物の主要部材として使用される鋼板には、常に次の要望が提起されている。

高強度化

靱性の改善と耐脆性破壊特性の向上

溶接性の改善と継手性能の向上

加工性の向上

内部欠陥、偏析および非金属介在物の低減

また、構造物の大形化による安全性の保証、設計施工の合理化および溶接技術の進歩にともなって鋼板に要求される諸性能は、多岐にわたると同時に一段と厳しくなっており、製造者は、その要求を満足させるための研究、開発を常に行っている。

なお、参考として各産業分野の市場ニーズとそれに対応する製造技術を表4に示す。

4・1 冶金学的方法

鋼板の機械的性質、加工性、溶接性などの諸性質は、基本的には化学成分と組織の影響を大きく受ける。成分設計と圧延、熱処理技術によりこの両者を種々組合せ、所要の性能を有する各種鋼板が製造される。

4・1・1 化学成分

鋼中には、必要に応じて種々の成分が添加されており、また、不純物としてP、Sなど、ガス成分としてH、O、Nなどを含有している。これらの各種成分のうち主要元素の影響について次に示す。

(1) C: その含有量により鋼と鋳鉄を区分する重要な元素である。通常、鋼と呼んでいるのは、図12のFe - Fe₃C系二元状態図でオーステナイトからフェライト + パーライトまたはパーライト + セメンタイトの変態を示すC量0.03 ~ 1.7%の範囲である。

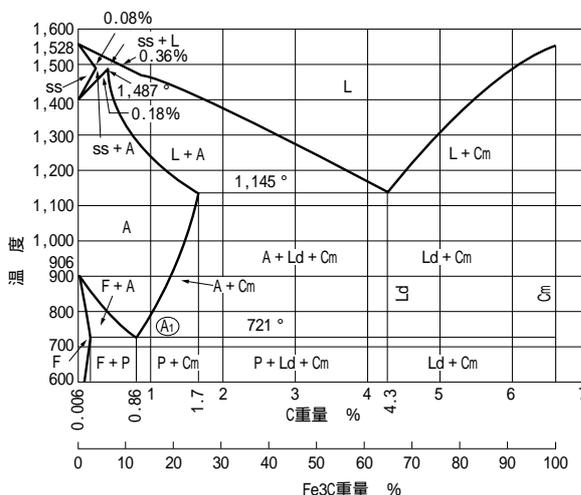


図12 Fe - Fe₃C系二元状態図⁽¹⁾

L: 融液
-s, s: フェライト (フェライトとセメンタイトの共析晶)
A: オーステナイト () Cm: セメンタイト (Fe₃C)
F: フェライト () (Ar): Ar変態点 (パーライト析出)
Ld: レデライト (オーステナイトとセメンタイトの共晶)

鋼中のCは、強度上昇、焼入性向上に有効であり、機械構造用鋼などはC量を増し、さらに必要に応じて焼入焼戻し処理などを行い、高強度を得ている。C量による機械的性質の変化の一例を表5に示す。

表4 市場ニーズと対応する製造技術⁽¹⁰⁾

産業分野	市場ニーズ	対応する製造技術
造 船	高張力鋼化、低Ceq化 大入熱溶接の採用 板厚精度向上	従来のCRでは対応不能 TMCPの開発 TiNの微細分散、Bの有効利用 AGC、クラウンコントロール
橋 梁、 建 築	70、80kgf/mm ² 鋼の使用拡大 平坦度要求の厳格化 内質保証要求の厳格化	成分コントロール、不純物元素低減、脱水素、鋼片割れきず対策 圧延クラウン、形状コントロール
圧 力 容 器	高強度化・低Ceq化 長時間加熱脆化感受性の低減 高純鋼の要求	非金属介在物対策、脱水素、自動UST 成分コントロール 不純物元素低減、成分コントロール 低S、低P、低O
水車、ペンス トック	高温における降伏点保証要求 高靱性80kgf/mm ² 鋼 平坦度要求の厳格化 エレクトロンビーム溶接の導入	PMS鋼の開発、成分コントロール 成分コントロール、不純物元素低減、脱水素、鋼片割れきず対策 圧延クラウン、形状コントロール
原 子 力 発 電 海 洋 構 造 物	QT60kgf/mm ² 鋼の採用 耐ラメラア特性 低Ceq化要求 低温靱性の厳格化 高純鋼の要求	ガス成分O、Nの低減、非金属介在物の低減 成分コントロール、不純物元素の低減、脱水素 低S、Ca添加 成分コントロール 低S、低O、成分コントロール 低S、低P、低O
ラ イ ン パ イ プ	高強度、厚肉化 耐サワーガス特性の要求 内質保証要求の厳格化	従来のCRでは対応不能 TMCPの開発 低S、低O、組織の均一化 低S、低O、脱水素、自動UST
貯 槽、 タ ン ク	内質保証要求の厳格化 高純鋼の要求 9%Ni靱性要求 高強度化	低S、低O、脱水素、自動UST 低S、低P、低O 極低S、極低O、成分コントロール、不純物元素低減
産 業 機 械	省溶接、プレス成形、鋳造化 エレクトロンビーム溶接の導入	成分コントロール、不純物元素低減、脱水素、鋼片割れきず対策 低S、低O、成分コントロール、AGC、クラウンコントロール ガス成分O、Nの低減、非金属介在物の低減

表5 炭素量による鋼の機械的性質の変化の一例¹²⁾

C量 %	降伏点 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸び %	硬さ HB	適用(自動車への適用例)
0.08	20	36	35	90	} (ボディ外板) 極軟鋼、プレス成形用
0.12	25	40	30	100	
0.20	28	45	26	120	軟鋼 } 構造用
0.30	30	50	22	140	
0.40	35	60	20	150	} 硬鋼、(ギヤ) 機械構造用(クランクシャフト) (クランクシャフト) ベヤリング
0.50	40	70	15	200	
0.80	45	100	10	230	

鋼中のCは、強度上昇、焼入性向上に有効であり、機械構造用鋼などはC量を増し、さらに必要に応じて焼入焼戻し処理などを行い、高強度を得ている。C量による機械的性質の変化の一例を表5に示す。

しかし、C量が増加すると延性、靱性が劣化し、また、溶接性にも悪影響をおよぼすので、通常、溶接構造用鋼ではC含有量を0.20%以下におさえ、Si、Mn、Vなどの合金元素を添加している。

- (2) Si : 脱酸剤として添加される。通常、0.5%以下であり、延性、靱性をほとんど損なうことなく強度を高める。また、この程度であれば溶接熱影響部(HAZ)の硬化、延性低下にもそれほど大きな影響はないといわれている。
- (3) Mn : 通常、2.0%以下であり、Mn量の増加とともに伸び、絞りおよび靱性をほとんど損なうことなく強度は上昇する。また、Mnは、焼入性を著しく高めるので、焼入焼戻し熱処理を施す鋼には必要な元素である。
- (4) Cu : 熱間加工割れの問題があるが、耐候性に効果があり、また、析出硬化により強度が増大する。耐候性鋼板には不可欠な元素である。
- (5) Ni : 強度、靱性の双方に有効な元素であり、低温用鋼板などには必要に応じて0.5~9%のNiが添加されている。
- (6) Cr : 焼入性を増大させる。耐候性、耐食性の向上に有効な元素であり、耐酸化性、耐高温水素脆化性などの向上にも寄与する。耐候性鋼板、その他耐食性を必要とする鋼板、高温用鋼板などには不可欠な元素である。
- (7) Mo : 高温強度を増し、焼戻し脆化を防止する有効な元素であり、高温用鋼には0.5~1.0%のMoが添加されている。
- (8) V : 強度を増加させるとともに焼戻し軟化抵抗を増大させる元素である。0.02~0.06%程度のVを添加し炭化物、窒化物を効果的に析出させることにより強度、靱性の改善が可能である。

- (9) Nb : 0.02~0.05%程度の添加でフェライトの生成を抑制し、再結晶温度を上げ結晶粒の微細化を図ることができ、これによって大幅な靱性改善が可能である。また、炭化物、窒化物を効果的に析出することにより高強度を得ることができる。
- (10) Al : 脱酸剤として添加される。また、加熱時のオーステナイト結晶粒の粗大化を防止する有効な元素であり、靱性を向上させる。
- (11) B : 0.0003~0.002%というごく微量の添加で焼入性を高める。590N/mm²級、780N/mm²級鋼板などの焼入焼戻し型高張力鋼板では、Bを適量添加することにより焼入性の向上が図られている。
- (12) Ti : C、Nとの親和力が強いので、適量の添加は微細な炭窒化物を鋼中に安定して生成し、HAZ靱性低下の防止に有効である。
- (13) P : 鋼の靱性や溶接性を損ない、溶接時の高温割れ発生の原因ともなるので、通常、0.04%以下におさえられている。しかし、耐候性向上に著しい効果があるので、溶接部の靱性劣化防止と高温割れ防止の対策を施したP含有量0.07%以上の溶接構造用高耐候性高P系鋼板が実用化されている。
- (14) S : 通常0.04%以下が不純物として含まれる。硫黄快削鋼のような特殊な例を除き、靱性、溶接性、加工性はもちろん、鋼板の板厚方向の特性にも悪影響をおよぼすので極力少なくすることが望ましい。
- (15) H : 靱性低下や遅れ割れ、溶接時のビード下割れ、銀点などの欠陥の主要因となる。割れは、圧延後または溶接後200 以下の常温付近に冷却されてから発生する。したがって、水素性欠陥を生じやすい鋼種では製鋼時脱ガス処理を適用し、さらに必要に応じてスラブまたは製品での徐冷処理により水素の低減を図っている。一方、溶接施工時には、溶接材料の選択、乾燥、予熱および後熱などにより溶接継手部への水素侵入防止および拡散性水素量の低減を図っている。
- (16) O : 主としてSi、Mn、Alなどと化合して非金属介在物の形で鋼中に存在し、鋼の諸性質に悪影響をおよぼすので、できるだけ少なくする必要がある。
- (17) N : 製鋼時に大気中より侵入し、大部分はAl、Ti、Nbなどと化合し窒化物として存在する。したがって、N量を適切に制御し、Al、Ti、Nbなどの元素を適量添加して窒化物を形成させ、組織の微細化を図るための有効な元素である。しかし、過剰のNは、鋼板の加工後の時効硬化の原因となり、また、溶接部の靱性劣化の原因ともなるので好ましくない。

4・1・2 組織

鋼板の諸性質は、化学成分と組織でほぼ決まる。化学成分については4・1・1に述べたとおりであるが、さらに熱処理や圧延をとおして、フェライト (Ferrite)、パーライト (Pearlite)、マルテンサイト (Martensite)、ベイナイト (Bainite)、オーステナイト (Austenite) などのさまざまな組織に変化させ、特性を大幅に変えることが可能である。

(1) フェライト+パーライト組織

圧延まま、または焼ならし状態で使用される鋼板を通常、非調質鋼板といい、一般にこれらの鋼板は、写真1に示すようなフェライトとパーライトの混合組織を呈している。

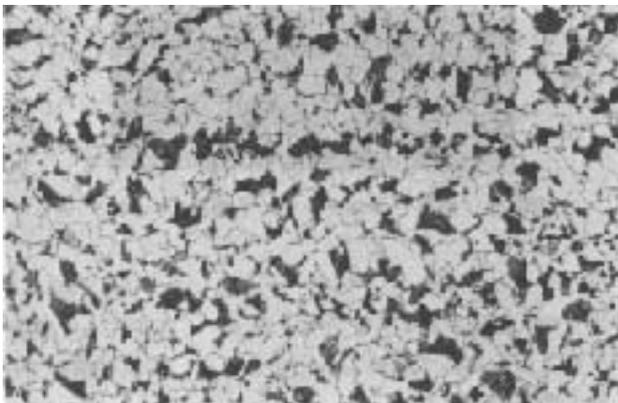


写真1 フェライト+パーライト組織の一例

鋼の強さは、フェライト地の強さ、結晶粒の細かさ、パーライトの占有率によってほぼ決まる。

フェライト地の強さは、固溶強化にもとづくのが一般的であるが、溶接構造用鋼板の一部にみられるように、V、Nb、Tiなどの炭窒化物をフェライト地中に微細析出させ、強化を図った鋼板もある。

結晶粒の微細化は、強度と靱性を同時に改善するきわめて有効な冶金的方法であり、このための手法として、制御圧延、焼ならし、炭化物の析出などの手法が用いられている。

一方、パーライトの増加による強化は、靱性の劣化と溶接性に悪影響をおよぼすので、溶接構造用鋼板への適用は好ましくない。

フェライトとパーライトの混合組織のままでは靱性や溶接性を維持しながら強度を高めるのは限度があり、590N/mm²級またはそれ以上の溶接構造用鋼板には、通常、焼入焼戻し型の調質高張力鋼板が用いられる。

(2) マルテンサイトおよび焼戻しマルテンサイト組織

焼入ままのマルテンサイトは硬くてもろいため、適当な温度 (溶接構造用鋼板では通常600~700) で焼戻すことにより、セメントイトが均一微細に分散した組織となって強靱化する。焼戻しマルテンサイト組織の一例を写真2に示す。

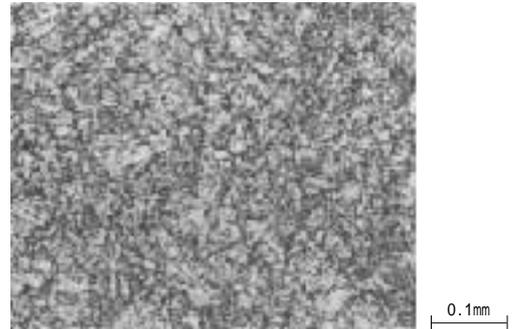


写真2 焼戻しマルテンサイト組織の一例

マルテンサイトにフェライトや上部ベイナイトが混入した不完全焼入組織を焼もどすとセメントイトが不均一に分散し、強度低下のみならず靱性も劣化するため、調質型鋼板では特に焼入性が問題となる。

焼入性に影響する因子は、結晶粒度 加熱温度 冷却速度 添加合金元素であり、それらを総合して焼入性の良し悪しを判定するには、CCT曲線 (Continuous Cooling Transformation Curve 連続冷却変態曲線) が用いられている。CCT曲線の一例を図13に示す。

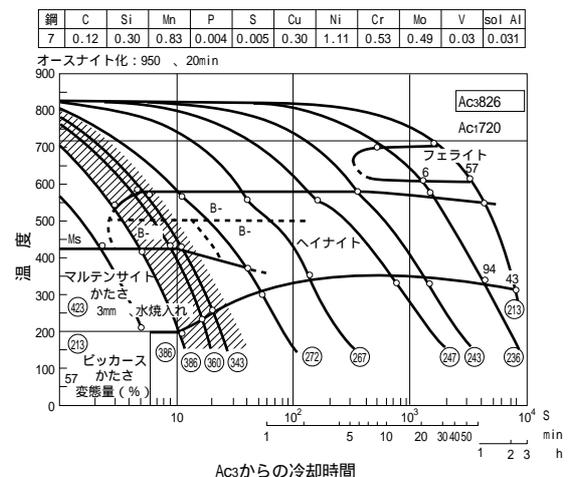


図13 0.12%C - Cu - Ni - Cr - Mo - V鋼のCCT曲線¹³⁾

図中、斜線部が最適冷却速度の範囲である。なお、CCT曲線は自動連続冷却変態測定装置 (フォーマスタ) により求められる。

(3) ベイナイト組織

鋼板を約600 とMs点 (マルテンサイト変態開始温度) の間で等温変態させるとベイナイト組織が得られる。焼入などの連続冷却ではベイナイト単相となることはなく、フェライトあるいはマルテンサイトとの混合組織としてベイナイトが存在する。

ベイナイトは炭化物の析出形態から、図14に示すように、B-形 (ベイニティックフェライト)、B-形 (フェライトラス界面にそってセメントイトが析出)、B-形 (ラス内部にもセメントイトが析出) の3種に分けられる。

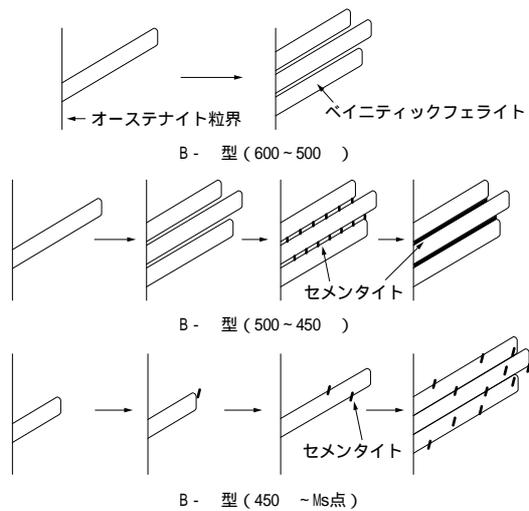


図14 バイナイトの生成と炭化物の析出形態

通常、B-形、B-形を上部ベイナイトと称し、B-形を下部ベイナイトと称している。一般に焼入時の冷却速度が遅い場合には、上部ベイナイトを生成し、強度、靱性が劣化する。

(4) オーステナイト組織

オーステナイト組織は、Ni - Cr系ステンレス鋼、耐熱鋼、高Mn系非磁性鋼などに認められる組織で、靱性、加工性などが優れている。オーステナイト組織の一例を写真3に示す。



写真3 オーステナイト組織の一例

4・2 圧延技術による方法

溶接構造用鋼板に要求される諸特性のうち、特に重要な

ものとして材料特性面からは強度と靱性があり、また、施工面からは耐溶接割れ性とHAZ靱性がある。

これらの性能を同時に具備させるため、最近、わが国では、圧延技術面ですばらしい進歩をとげており、制御圧延、加速冷却、さらにはこの両者の組合せ技術などがあいついで開発、実用化されている。

これらの技術は、熱加工制御法 (TMCP: Thermo Mechanical Control Process) と総称されており、この技術を駆使した降伏点315 ~ 460N/mm²級高張力鋼板や低温用鋼板が数多く開発され、すでに船舶、海洋構造物および建築物などに使用されている。

当社では、特殊制御圧延型鋼板としてKONTROLL鋼板、制御圧延 + 加速冷却型鋼板としてKCL鋼板をシリーズ化しており、船舶、海洋構造物および建築分野で好評を博している。

4・2・1 TMCPによる強靱化の手段

TMCPの効果は、圧延工程において強度上昇と靱性向上を実現したことであり、その熱加工履歴の概要を従来法と対比して図15に模式的に示す。

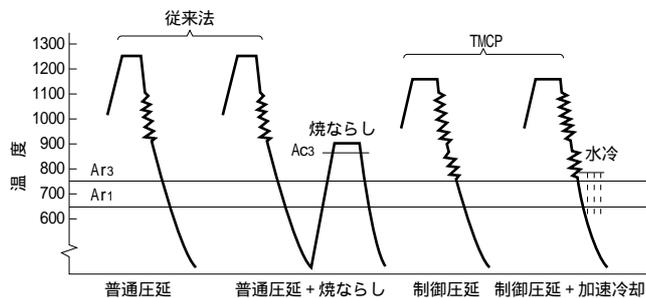


図15 TMCPと従来法の熱加工履歴の比較 (模式図)

靱性向上には結晶粒の微細化が効果的であることはよく知られているが、写真4に示すように、制御圧延 + 加速冷却型鋼板のフェライト結晶粒は従来の圧延まま、あるいは焼ならし型の鋼板にくらべ、 $1/3 \sim 1/4$ と細かくなっている。

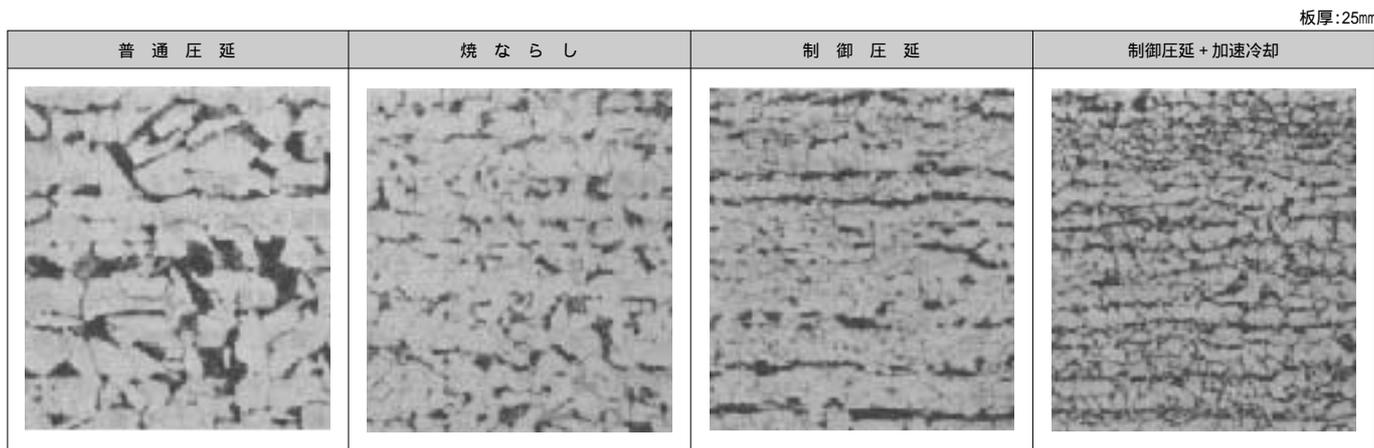


写真4 TMCP鋼板と従来鋼板の顕微鏡組織の一例

0.05mm

圧延過程で結晶粒が微細化されていく様子を、TMCPと従来法について模式的に対比して図16に示す。

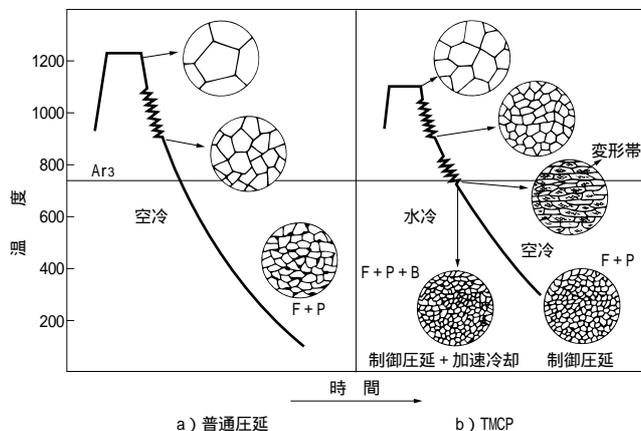


図16 TMCPと普通圧延の結晶粒微細化過程の比較（模式図）

TMCPにおいて従来法より細粒の鋼板が得られるのは、スラブ加熱温度を低目に設定しておくことにより、圧延前のオーステナイト粒度をあらかじめ小さくしていること、圧延時の温度を調整し、2段階の圧延を行うことにより、オーステナイト粒内に変形帯と呼ばれるサブ組織を生じさせ、フェライト生成の核の拠点として作用させていることの2点が寄与しているためである。

一方、強度上昇にもっとも大きく寄与しているのは急冷の効果である。この急冷の効果は、主としてベイナイトの生成にもなう変態強化によるもので、TMCPにおける適切な水冷はフェライト+パーライト組織の一部をベイナイトにかえ、それによって靱性を大きく損なうことなく、強度上昇させる働きをする。

これらの手段を工業的に実現させるには、スラブの均一加熱、圧延途中での鋼板の温度測定、強力な圧延、冷却時の精密な温度測定、プログラムどおりの冷却を実施するためのダイナミックコントロールシステムなどの諸技術が不可欠であり、精密に温度制御ができる加熱炉、圧延荷重7,000~10,000トンの強力な圧延機、均一な冷却を得るための水冷装置などの設備技術の進歩とあわせ、最近の計測技術、水量制御技術、コンピュータとそのソフトウェアの発達によってようやく実現可能となったものである。

4・2・2 TMCP鋼板の特徴

上述したように、鋼板に要求される主要性能は強度、靱性、耐溶接割れ性やHAZ靱性で、これらの特性を向上させるために工業的に用いられている手段を整理して表6に示す。

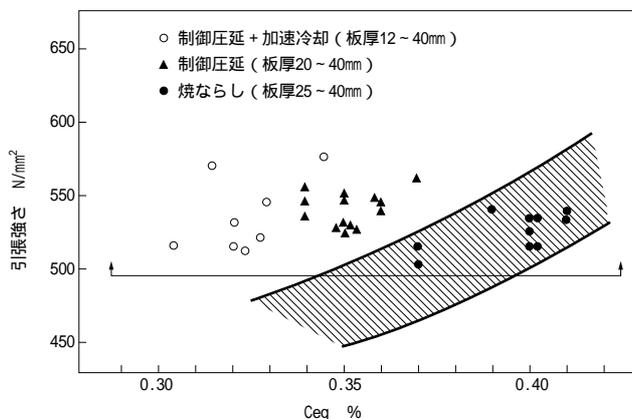
従来法では、強度、靱性の確保はほとんど化学成分に依存していたが、TMCPでは、鋼板製造工程のなかで強度と靱性の調整が可能であり、これらの効果を活用して鋼板特性の向上が図られている。

表6 厚板の主要性能向上にもちいられる工業的手段

項目	改善手段	圧延まま	焼ならし	制御圧延	制御圧延+加速冷却
強度	化学成分				
	結晶粒微細化	-	-		
	ベイナイト生成	-	-	-	
靱性	C量低減	-	-		
	結晶粒微細化	-			
耐溶接割れ性	C、Ceq低減	-	-		
HAZ靱性	C、Ceq低減	-	-		
	微量元素添加によるHAZ組織調整	-	-		

注 : よく用いられる : 用いられる - : 用いられない

TMCPは、従来鋼板と同一強度の鋼板を低C、低Ceqで製造することを可能とするため、耐溶接割れ性やHAZ靱性の向上にきわめて有効である。図17はCeqと引張強さとの関係を従来鋼板とTMCP鋼板について比較したものであり、たとえば降伏点355N/mm²級の高張力鋼板では、従来はCeq 0.38~0.42%を必要としたものが、制御圧延型TMCP鋼板では0.34~0.38%、制御圧延+加速冷却型TMCP鋼板では0.30~0.36%である。母材靱性についても従来鋼板はEH36の要求靱性(-40、34J以上)は満足できたものの、それ以上の要求(たとえば-60~-80)に対しては対応不可能であったが、TMCP鋼板では製造時の工夫により十分満足できる。また、TMCP降伏点355N/mm²級鋼板では、-5以上の気温で予熱なしの溶接が可能であり、さらに、従来以上の大入熱での高能率溶接も可能である。



注 $C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$

図17 TMCP鋼板と焼ならし型鋼板についてのCeqと強度との関係

4・3 熱処理による方法

組織改善に対してもう一つの有効な手段は、熱処理による方法である。

熱処理とは、鋼の変態を促進あるいは抑制阻止し、また、再結晶あるいは原子の拡散を行わせることをいい、熱処理によって鋼板に所要の機械的性質が付与される。熱処理の方法は、鋼板に与える性質によって異なり、その種類は多いが、通常、鋼板に施す熱処理は、焼入焼戻し、焼ならし焼戻し、焼ならしである。熱処理を適用する鋼板の一例を表7に示す。

表7 熱処理を適用する鋼板の一例

熱処理の種類	規 格 例	備 考
焼 入 焼 戻 し	SM570、SHY685 ASTM A517 " A553	溶接構造用高張力鋼板 圧力容器用低合金鋼板 低温用鋼板
焼ならし焼戻し	ASTM A302、A387 " A353	ボイラ用低合金鋼板 低温用鋼板
焼 なら し	船級協会E級鋼板 板厚50mm以上のボイラ用鋼板 (SB480、ASTM A515) ASTM A204、A302、A387 ASTM A203	造船用鋼板 圧力容器用鋼板 ボイラ・圧力容器用低 合金鋼板 低温用鋼板

4・3・1 焼入焼戻し

焼入焼戻しを施した鋼板を一般に調質型鋼板という。

焼入れは、鋼板をオーステナイト領域の温度に加熱し、セメントサイトをオーステナイト中に固溶させた後急冷する操作であり、これで生じるマルテンサイトおよび一部ベイナイト化した組織によって材質は左右される。冷却速度には限度があるため、Mn、Ni、Cr、Mo、V、Bなどの合金元素を添加し焼入れ性の向上を図っている。焼入れによってマルテンサイト化した組織は、硬くてもろいので、 A_1 変態点以下の温度で焼戻しすることによって所要の強度とし、韌性を向上させている。

4・3・2 焼ならし

焼ならしは、鋼板をオーステナイト領域の温度に加熱し、セメントサイトをオーステナイト中に固溶させた後空冷する操作で、これによってひずみのない均一な微細組織となる。引張強さにはほとんど変化はないが、降伏点が増し、韌性が大幅に向上する。

5 鋼板の種類とその特性

鋼板は、その用途に応じてJISなどに各種規格が定められている。

製造者では単に規格に合格させるだけでなく、その用途、目的に応じて、最適な諸性能を持たせるため、化学成分、圧延条件、熱処理条件などに工夫をこらし、安価で安定した性能を有する鋼板を供給するよう努力している。

ここでは、主として用途別に鋼板を分類し、それぞれの鋼板の特徴について解説する。

5・1 一般構造用鋼板

強度を主体にした鋼板で、通常C含有量を変化させることにより所要の機械的性質を得ている。

一般構造用鋼板は、JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材、SS」に、引張強さ330、400、490、540N/mm²級の4種類が規定され、土木、建築、橋梁、車輛などに圧延ままの状態で使用されている。

この鋼板は、機械的性質をおもにC含有量で調整しているため、炭素当量 (Ceq=C+Si/24+Mn/6) が高く、0.40%を超えることがあり、溶接施工時には予熱などの配慮が必要である。

溶接性を重視するような場合には、溶接構造用鋼板を使用するのが望ましい。

5・2 溶接構造用鋼板

主として溶接により構造物を組立てるのに適した鋼板であり、強度と同時に溶接性を重視している。このように、溶接構造用鋼板は、溶接性への配慮からC含有量、合金元素含有量を低くおさえ、圧延、熱処理などの技術を駆使して製造されているので、溶接性はもちろん、靱性、加工性などにも優れている。

この鋼板は、JIS G 3106「溶接構造用延鋼材、SM」に引張強さ400、490、520、570N/mm²級の4種類が、また、JIS G 3128「溶接構造用高降伏点鋼板、SHY」に耐力685N/mm²級の鋼板が規定され、各強度レベルの鋼板が広く用いられている。

5・2・1 橋梁用鋼板

橋梁用鋼板としては、SS400、SM400、SM490、SM490Y、SM520などの一般および溶接構造用400、490N/mm²級鋼板が主流であり、特にSM490Yが多用されている。

しかし、現在では、表8に示すように、溶接構造用鋼板に加え、耐候性鋼板も使用され、強度も590N/mm²(60kgf/mm²)級鋼板のSM57Q(SM58)、SMA57Q(SMA58)までが道路橋示方書に規定されており、一般化している。

また、橋梁の長大化にとまない、690N/mm²級、780N/mm²級鋼板も積極的に採用されている。しかしながら、このク

表8 板厚による鋼種選定標準¹⁴⁾

鋼種	板厚 (mm)						
	8	16	22	25	32	38	50
S S 4 1							
S M 4 1 A							
S M 4 1 B							
S M 4 1 C							
S M 5 0 A							
S M 5 0 B							
S M 5 0 C							
S M 5 0 Y A							
S M 5 0 Y B							
S M 5 3 B							
S M 5 3 C							
S M 5 8							
S M A 4 1 A W							
S M A 4 1 B W							
S M A 4 1 C W							
S M A 5 0 A W							
S M A 5 0 B W							
S M A 5 0 C W							
S M A 5 8 W							

注) 気温が著しく低下する地方では、特別な考慮をはらわなければならない。

ラスの鋼板を溶接する場合、低温割れ防止のために、100

以上の予熱が必要であり、作業環境の悪化や予熱によるひずみが発生するため、予熱温度の低減が要望されていた。最近、このニーズに対応した橋梁用予熱低減型高張力鋼板が開発され、実用化されはじめています。

これら高張力鋼板使用の利点としては、

鋼板断面が小さくなり、スパンの長大化が可能となる。

同一スパンの場合は、鋼板重量が小さくなり、製作運搬、架設費用が安くなる。

断面構成、継手部が簡単になり、施工能率が向上する。

強度の異なる鋼板との組合せによって、断面構成を大幅に変更しないで設計でき、応力伝達が円滑化する。

溶接時の予熱温度の低減により、作業環境の改善およびひずみ矯正作業の簡略化が図れ、施工能率が向上する。などがあげられる。

一方、鋼板は、高強度化すると降伏比が上昇し、降伏点から引張強さまでの余力が少なくなり、また、図18に示すように一様伸びも少なくなる。

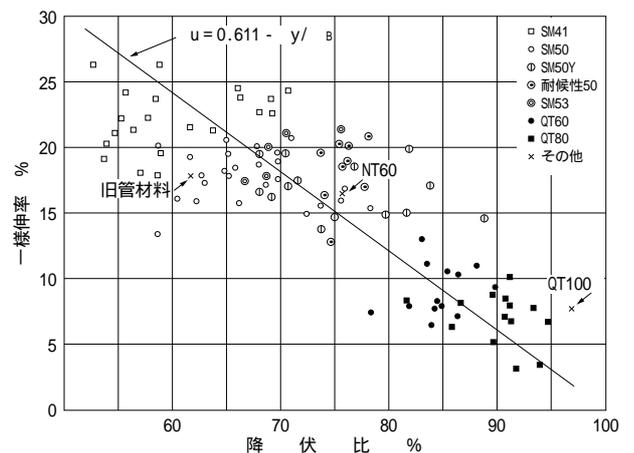


図18 溶接構造用鋼板の降伏比と一様伸びとの関係¹⁵⁾

表9 港大橋に採用された690N/mm²(70kgf/mm²)、780N/mm²(80kgf/mm²)級鋼板の要求性能¹⁶⁾

鋼板	種厚 mm	70kgf/mm ² 級鋼板		80kgf/mm ² 級鋼板	
		50以下	50~100	50以下	50~100
基本前提	構造物脆性破壊発生温度上限	-15	-15	-15	-15
	溶接予熱温度上限(目標)	100	125	100	150
	溶接入熱制限kJ/cm	50	40	50	40
	溶接継手脆化部ボンドvTe上限(目標)	0	0	0	0
化学成分	C上限%	0.14	0.16	0.14	0.16
	P、S上限%	0.03	0.03	0.03	0.03
	Ceq上限%	0.49	0.52	0.53	0.56
機械的性質	降伏点下限kgf/mm ²	63	60	70	68
	引張強さ	70~85	68~83	80~95	78~93
	温度	-15	-15	-15	-15
	vE kgf・m	4.8	4.8	4.8	4.8
	vTe上限	-35	-35	-35	-35
溶接性	溶接部最高硬さ上限HV	400	410	420	430
	ビード曲げ予熱温度上限	80	80	100	100
	曲げ角度	WES	WES	WES	WES

WES 135 (1969) に規定する角度

したがって、高張力鋼板の採用を決定するにあたっては、これらの利点と欠点を勘案する必要がある。

参考として、港大橋(阪神高速道路公団)に採用された690N/mm²(70kgf/mm²)、780N/mm²(80kgf/mm²)級鋼板の要求性能をまとめて表9に示す。

5・2・2 耐候性鋼板

耐候性への成分元素の影響は、Pがもっとも効果的であり、次いでCu、Crといわれており、これらの元素を含有した耐候性鋼板が橋梁、建築、車輛などの広い分野で使用されている。

引張強さ490N/mm²級鋼板が開発の発端であったが、現在では400、570N/mm²級鋼板もJISに規定されている。

耐候性鋼板は、JIS G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材、SMA」およびJIS G 3125「高耐候性圧延鋼材、SPA」がそれぞれ制定されており、JIS G 3114は耐候性よりも溶接性を優先させたCu-Cr系鋼板であり板厚50mm以下を、また、

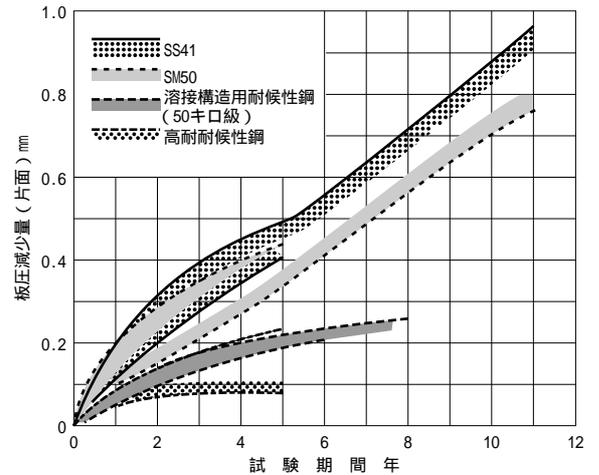


図19 非常に腐食量の大きい臨海工業地帯および海岸地帯(戸畑、足摺岬、川崎、千葉)における大気暴露試験結果¹⁷⁾

JIS G 3125は、耐候性の優れたP-Cu-Cr系であるが、Pを多く含有していることから、鋼板の溶接性が劣るため、16mm以下のあまり溶接性を必要としない部材用として規定されているのが特徴である。

各種400、490N/mm²級鋼板の臨海工業地帯および海岸地帯における大気暴露試験結果を図19に示すが、鋼種別の耐候性の順位は、P-Cu-Cr系の高耐候性鋼板SPA > 溶接構造用耐候性鋼板SMA490 (SMA50) > 溶接構造用鋼板SM490 (SM50) > 一般構造用鋼板SS400 (SS41) となっており、5年経過後の腐食による板厚減少量で比較するとSPAはSS400 (SS41) の約1/5の腐食減量である。

一方、当社では、耐候性にもっとも効果のあるPの含有量をSPAと同程度にまで高め、しかも溶接性に対するPの悪影響を極力少なくした、溶接構造用高耐候性低C-高P-Cu-Cr系鋼板〔神鋼規格TAICOR B400S、TAICOR B490S〕を開発、実用化している。TAICOR B400SおよびTAICOR B490Sの品質特性の一例を表10に示す。

表10 TAICOR B400SおよびTAICOR B490Sの化学成分および機械的性質の一例

神鋼規格名	区分	板厚 mm	化学成分 %									
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Ti
TAICOR B400S	規格	6~50	0.08	0.50	0.50/1.40	0.070/0.15	0.035	0.25/0.55	0.45	0.30/1.00	-	0.005/0.01
	実績	8~24 25~40	0.05 0.05	0.30 0.29	0.80 0.96	0 0.090	0.005 0.005	0.34 0.34	0.29 0.31	0.39 0.44	tr. tr.	5 0.012
TAICOR B490S	規格	6~50	0.08	0.50	0.50/1.80	0.094	0.035	0.25/0.55	0.45	0.30/1.00	0.10	0.013
	実績	9~15	0.05	0.33	1.31	0.070/0.15	0.005	0.36	0.30	0.33	0.06	0.005/0.01

神鋼規格名	区分	板厚 mm	引張試験			衝撃試験 vEo J
			降伏点N/mm ²	引張強さN/mm ²	伸び %	
TAICOR B400S	規格	t 16	245	400~510	18 22	47 47
		16 < t 40	235			
TAICOR B400S	実績	8~16	323~441	441~500 451~490	23~34 30~35	255~372 235~372
		17~40	323~412			
TAICOR B490S	規格	t 16	365	490~610	15	47
	実績	9~15	372~490			

耐候性鋼板の使用方法は、塗装使用と無塗装使用がある。無塗装使用には裸使用とさび安定化処理使用とがあるが、前者は文字どおり裸のまま使用するもので、もっとも経済的な使い方である。JIS G 3114では、無塗装用(W)と塗装用(P)に細分し、(W)は(P)よりCuおよびCr含有量を高め耐候性を向上した成分系となっている。

近年、鋼構造物の維持管理費低減が要求されるすう勢にあり、耐候性鋼板のより有効な使用方法が検討されており、今後、その需要は増大していくものと期待される。

5・2・3 耐ラメラテア鋼板

複雑な構造物、たとえば石油掘削装置の格点構造や建築構造物の仕口部では、板厚方向に引張応力が作用する。このような場合、すみ肉溶接部などに写真5に示すような板表面に平行な割れが発生することがあり、この割れをラメラテアという。

ラメラテアは、鋼中の硫化物系介在物が圧延工程で圧延方向に伸ばされ、板厚方向の応力により介在物を起点にし

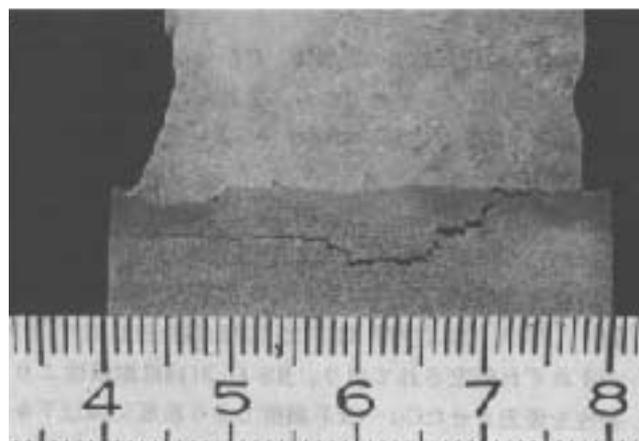


写真5 T形継手部に発生したラメラテアの例

で割れが発生し、進展したものである。

表11は、耐ラメラテア鋼板規格の一例を示したものであり、耐ラメラテア特性は、板厚方向引張試験の破断後の絞り値、すなわち断面収縮率(RAZ)で評価するのが普通である。

表11 耐ラメラテア鋼板規格の一例

規 格	規 格 値			棒状試験片の径 t: 板厚範囲 mm	組 合 せ る 規 格	備 考
	記号	RAZ %	S %			
J I S (G 3 1 9 9)	Z15	平均15以上、最小10以上	—	t: 15以上25以下 6 t: 25超150以下 10	降伏点または耐力の下限値が 500N/mm ² 以下	板厚方向特性を規定した鋼板
	Z25	平均25以上、最小15以上				
	Z35	平均35以上、最小25以上				
I S O (7 7 7 8)	Z15	平均15以上、最小10以上	—	t: 15以上25以下 6 t: 25超150以下 10	降伏点または耐力の下限値が 500N/mm ² 以下	板厚方向特性を規定した鋼板
	Z25	平均25以上、最小15以上				
	Z35	平均35以上、最小25以上				
W E S (3 0 0 8)	Z15	平均15以上、最小10以上	0.010以下	t: 15以上120未満 10 t: 120以上 14	WESなどに規定している溶接 性のよい熱間圧延鋼板	ラメラテアのおそれのある溶接構造物あ るいは、その部材に用いるもの
	Z25	平均25以上、最小15以上	0.008以下			ラメラテアの危険性が高い溶接構造物あ るいは、その部材に用いるもの
	Z35	平均35以上、最小25以上	0.006以下			ラメラテアの危険性が高かつ安全性が 重視される溶接構造物あるいは、その部 材に用いるもの
I A C S (W 1 4)	—	平均25以上 および3本中1本のみ20以上	—	t: 15以上25以下 6 t: 25超 10	軟鋼板および高張力鋼板	—
N K (3 ・ 9)	—	平均25以上 および3本中1本のみ20以上	—	t: 15以上 10	軟鋼板および高張力鋼板	—
A B S お よ び A S T M A 7 7 0	—	2本の最小20以上	—	t: 25以上32以下 8.75 t: 32超 12.5	—	試験の目的はラメラテアの低抗性の指標 をあたえることである。算定値はすべて の継手に対して、ラメラテアの非発生を 保証するものではない。
L R (S e c 8)	—	平均25以上	0.010以下 (推奨)	t: 20以上50以下 6 t: 50超 10	—	ラメラテアによる欠陥を少なくする必要 のある構造物に適用
B V (S e c 2 ・ 3)	Z25	平均25以上、最小15以上	—	t: 15以上50以下 6 t: 50超 10	軟鋼板、高張力鋼板およびボ イラ・圧力容器用鋼板	—
	Z35	平均35以上、最小25以上				
N V (C 8 0 0) (E 5 0 0)	—	平均25以上 および3本中1本のみ20以上	—	t: 10超16以下 6 t: 16超40未満 10	—	—

耐ラメラテア鋼板の指標である板厚方向（Z方向）引張試験における断面収縮率とS量の関係およびCa処理による球状化の効果を図20に示す。

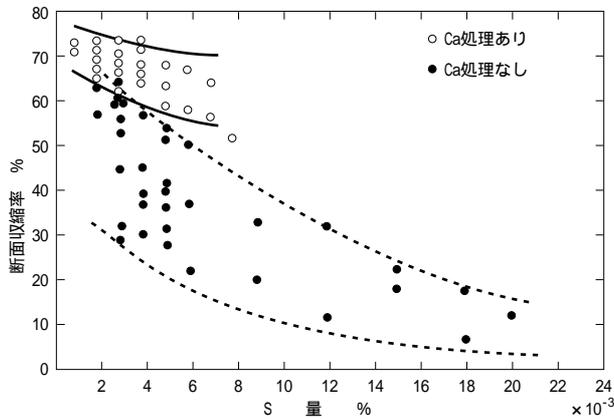


図20 Z方向引張試験結果

また、断面収縮率とL、Z方向の引張強さの比（Z/L）との関係を図21に示す。これによると、RAZが20%以上になると引張強さの比はほぼ1となる。すなわち、L方向とZ方向の引張強さは、ほぼ同じになることを示している。

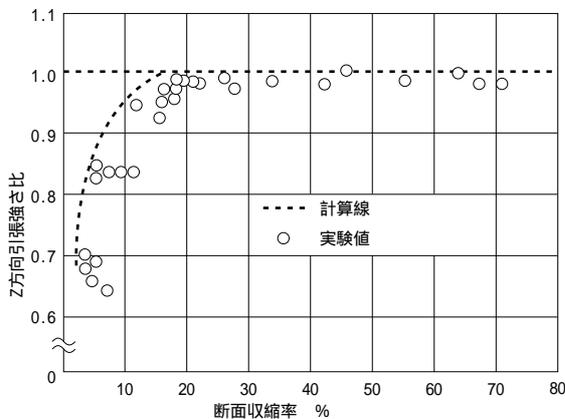


図21 断面収縮率とL、Z方向引張強さ比との関係¹⁸⁾

$$\text{注)} = \frac{\text{Z方向引張強さ}}{\text{L方向引張強さ}}$$

表12 ペンストック用690N/mm² (70kgf/mm²)、780N/mm² (80kgf/mm²) 級鋼板の化学成分規定の一例¹⁹⁾

発電所	鋼種	板厚区分 mm	化 学 成 分 %										
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq
沼原	HT70	(1)	0.14	0.50	1.10	0.015	0.015	0.90~	0.60	0.60	0.07		0.49
大平	HT80	(1)	0.14	—	—	0.015	0.015	1.50	—	—	0.05	0.005	0.53
南原	HT80	(1)	0.13	—	—	0.015	0.015	約1.0	—	—	0.05	0.005	0.52
奥清津 奥吉野	HT80	50	0.14	—	—	0.015	0.015	約1.0	—	—	0.05	0.005	0.53
		50 < 100						約1.0					0.57
(2) 奥矢作 第二	HT80	50	0.14	—	—	0.015	0.015	—	—	—	0.05	0.005	0.53
		50 < 100											0.57

(1) 沼原、大平、南原の各発電所の仕様には適用板厚の明示はないが、板厚の最大値はそれぞれ41、36、32mmである。

(2) 鋼板の靱性、均一性を確保するようその他の成分の配慮を行うものとするとの注記がある。

1) JIS G 3136 「建築構造用延鋼材、SN」

1982年に終局耐力を考慮した「新耐震設計法」が施行されて以来、建築物の部材や骨組の塑性変形能力が重要な設計因子となった。これにより、建築物に使用される鋼材は、所定の応力で降伏するとともに、降伏後の変形能力が確保されることが必要となったために、引張強さ400、490N/mm²級の鋼板に対して既存のJIS（SS材、SM材）とは異なる新たなJIS（SN材）が制定された。この規格では、塑性変形能力を確保するために降伏点の上下限值および降伏比の上限値（80%）を規定したことを始めとして、優れた溶接性や所定の公称断面の確保など、鉄骨造建築物の安全性の向上に必要な各種の品質特性を新たに設定したことが大きな特徴となっている。

2) 新しい建築構造用鋼板

(1) 建築構造用TMCP鋼板

近年、鉄骨建築物は空間の有効利用のために高層化しており、大スパン化やアトリウム化（大空間広間）が推進され、建築物下部の鉄骨には板厚100mmにも及ぶ厚肉材が採用されている。しかし、従来の製造法である圧延まや焼ならし型鋼板では、強度を確保するために炭素当量が高く、溶接施工面に問題があった。建築構造用TMCP鋼板は加速冷却の変態強化により強度を上昇できるため、表13に示すように焼ならし型鋼板に比べ炭素当量が低く、図22に示すように耐溶接割れ性が改善され、かつ、図23に示すように大入熱溶接継手靱性も優れているため、溶接施工効率の向上に極めて有効である。鉄鋼各社は、降伏点325およ

表13 母材性能の比較

タイプ	板厚 mm	主な化学成分%							* Ceq %	引張性能		
		C	Si	Mn	P	S	Al	Ti		YP N/mm ²	TS N/mm ²	YR %
TMCP	60	0.14	0.35	1.25	0.008	0.002	0.032	0.012	0.37	373	530	70
焼ならし	60	0.12	0.42	1.39	0.012	0.002	0.028	-	0.40	373	530	70

* Ceq = C + Si / 24 + Mn / 6 + Ni / 40 + Cr / 5 + Mo / 4 + V / 14 %

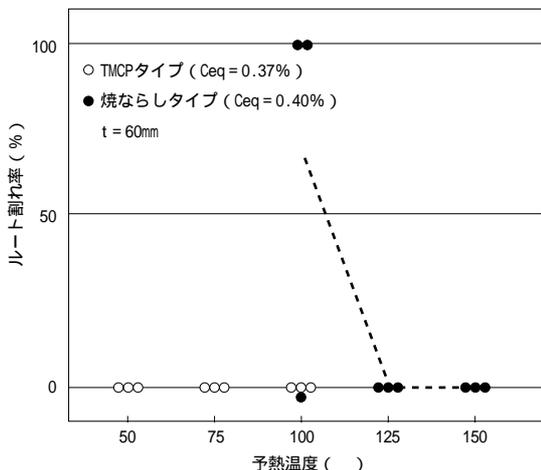


図22 耐溶接割れ性の比較

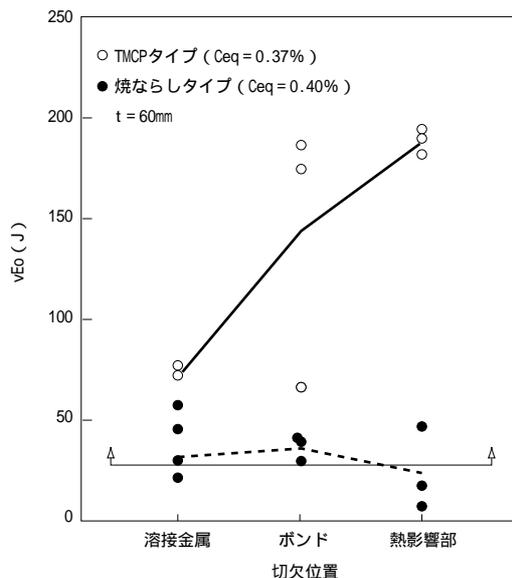


図23 大入熱溶接継手部の靱性の比較
SAW、入熱量：40kJ/mm

び355N/mm²級TMCP鋼板に関する建設大臣の一般認定を取得しており、今後、本鋼板は、優れた溶接性ならびに耐震性を有することから、建築構造用厚肉鋼板の主流になっていくものと思われる。

(2) 建築構造用耐火鋼板

鉄骨建築物は、火災を受けると熱により鋼材強度が低下するため、建築基準法では鉄骨を耐火被覆で保護することを義務付けているが、工事費の低減や工期の短縮あるいは設計面での斬新なデザインの実現などの面から耐火被覆の削減、さらには無被覆へのニーズが極めて高い。建築構造用耐火鋼板は、このニーズに対応して開発されたもので、建築構造用として常温における強度特性や溶接性を損なわない範囲でMoやNbなどを添加することにより、図24に示すように一般鋼に比較して高温における強度を大幅に向上させたものである。本鋼板の使用により耐火被覆を大幅に削減できるとともに、火災条件や設計条件によっては無被覆で鉄骨フレームを活かした斬新なデザインの建築物の設計が可能となるため、今後需要の拡大が図られていくものと思われる。

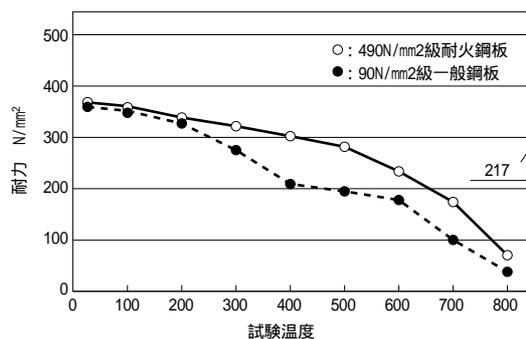


図24 高温耐力の温度依存性

(3) 建築構造用590N/mm²級鋼板

建築物の高層化、構造形式の複雑化などのニーズから、より高強度の590N/mm²級厚肉高張力鋼板が要望されていたが、従来鋼は降伏比が高く、耐震性の点から建築構造用として適用されなかった。最近、特殊熱処理あるいはTMCPによる低降伏比タイプのものが開発され、実用化されている。本鋼材に対して、建設省総合技術プロジェクト（'88～'93年）の共同研究により詳細な利用技術指針がまとめられたことから、今後、超高層建築物を主体に需要が拡大されていくものと思われる。

5・4 造船用鋼板

5・4・1 船体構造用鋼板

従来、主に軟鋼板が用いられていたが、最近では、制御圧延、加速冷却などのTMCP技術の進歩により引張強さ490N/mm²級高張力鋼板の溶接性が大幅に改善されたので、船体重量軽減を図るため船体構造用490N/mm²級鋼板が多用されるようになってきた。

船体構造用軟鋼板の規格は、SM400とほとんど変わらないが、船体の重要部材として使用されるD級、E級鋼板は脆性破壊への配慮からSM400Cよりも高い衝撃特性値を規定している。

また、船体構造用490N/mm²級鋼板の規格は、降伏点315N/mm²級、355N/mm²および390N/mm²級の3水準に、さらに、靱性のレベルによりA、D、Eの3グレードに分類されている。炭素当量の上限は、規定されていないが、各国の船級規格または造船会社が個々に規定する場合が多い。

わが国では、上述のTMCP技術を駆使することにより溶接入熱量の少ない横向き溶接やすみ肉溶接時にも予熱なしで割れを生じない低炭素当量でかつ高靱性を有する「TMCP

490N/mm²級鋼板」や、後述するように、片面サブマージアーク溶接、エレクトロスラグ溶接などの大入熱溶接の適用が可能な「大入熱溶接用490N/mm²級鋼板」なども開発、実用化されている。

TMCP490N/mm²級鋼板採用の効果は、一口にいえば造船工作面での制約条件の大幅な緩和である。表14は日本海事協会の溶接施工などの管理基準を示したものであるが、表14によれば、TM形HT（TMCP490N/mm²級鋼板）は実質的に予熱不要である。

また、最近では、造船工作時の工期短縮および溶接作業の合理化を推進するため、図25に示すような1枚の鋼板内に2種類の板厚を有した差厚鋼板などの異形鋼板も実用化されている。

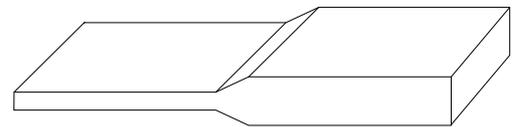


図25 異形鋼板の一例

5・4・2 大入熱溶接用鋼板

高張力鋼板や低温用鋼板に大入熱溶接を施すと、溶接熱影響部、特にボンド部近傍の靱性が劣化する。したがって、これらの鋼板の溶接にあたっては、入熱量が制限され、このため溶接能率が低下し、工期およびコストの点で大きな問題となっていた。

このような問題を解決することを目的に開発されたのが、大入熱溶接用鋼板であり、現在では、大入熱溶接用490～590N/mm²級鋼板および低温用A1キルド鋼板が溶接能率を高める鋼板として実用に供されている。

表14 溶接施工等の管理基準²⁰⁾

管理基準項目	JSQSなど				NK (85HW150GT)		
	軟鋼		従来形HT		TM形HT		
ショートビード (板付け、きず埋め等)	E	ビード長さ30mm以上	AH DH EH	ビード長さ50mm以上	AH DH EH	Ce _q 0.36%	ビード長さ10mm以上
アークストライク		許容しない		許容しない			許容しない
溶接部の手直し		ビード長さ30mm以上		ビード長さ50mm以上			ビード長さ30mm以上
予熱施工	A B D E	予熱の必要な気温 -5 以下 予熱温度 20 以上	AH DH EH	予熱の必要な気温 5 以下 予熱温度 50 以上	AH DH	Ce _q 0.38%	予熱の必要な気温 -5 以下 予熱温度 20 以上
非低水素系溶接棒の使用		非低水素系溶接棒の使用可		非低水素系溶接棒の使用不可			1パス水平すみ肉溶接に非低水素系溶接棒 (HJs 25cc/100gr) の使用可
線状加熱加工 (熱ひずみ取り加工) の鋼材表面最高加熱温度	—		AH DH EH	加熱直後水冷 650 以下 加熱後空冷 900 以下 加熱後空冷および水冷 900 以下 (水冷開始温度は500 以下)	Ce _q 0.38%	Ce _q 0.38%	加熱直後水冷または空冷 1000 以下 加熱直後水冷または空冷 900 以下

一例として、大入熱溶接用降伏点315N/mm²級鋼板の入熱量とボンド部のvTrsとの関係を図26に示す。また、大入熱溶接対策の効果を従来鋼板と比較して図27および図28に示す。いずれも大入熱溶接対策により著しい改善効果が認められる。

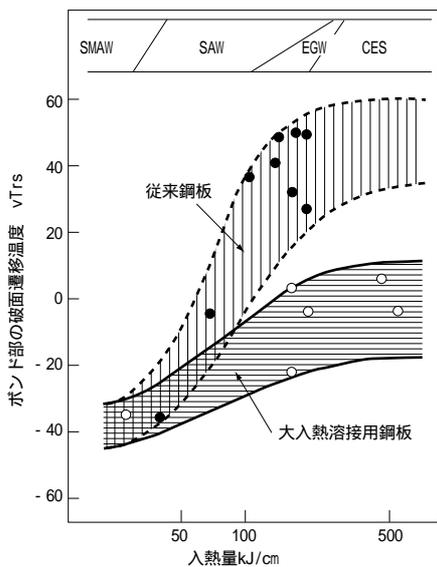


図26 入熱量とボンド靱性との関係²¹⁾

注) $Q = \frac{A \times V \times 60}{v}$ Q=溶接入力熱量 (J/cm)
 A=電流
 V=電圧
 v=溶接速度 (cm/min)

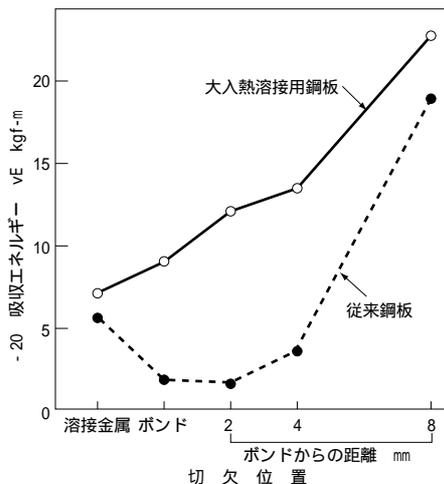


図27 ボンド部靱性の比較²²⁾

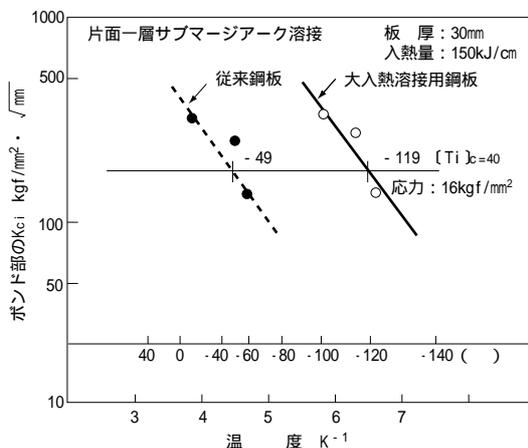


図28 ボンド部の脆性破壊発生特性の比較²³⁾

5.5 压力容器用鋼板

压力容器とみなされる機器の種類は非常に多い。用途から分類すると、ボイラ、反応容器、アキュムレータ、受槽、貯槽、ホルダ、蒸留塔、熱交換器などとなる。

これら压力容器の使用圧力は、真空から1,000気圧以上におよび、また、使用温度は図29および表15に示すように、絶対0度に近い超低温から500度を超える高温にわたり千差万別である。

したがって、压力容器に使用される材料の種類も多く、炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼、超合金、非鉄金属材料など多岐にわたっているが、ここでは使用温度区分別に通常よく用いられている炭素鋼、低合金鋼、合金鋼について述べる。

表15 設計温度と鋼種との関係²⁵⁾

設計温度 (概略)	主な鋼種
	小 ← 設計圧力 × 内径 → 大
-10 ~ 350	軟鋼、Si - Mn系50kgf/mm ² 級高張力鋼、60kgf/mm ² 級高張力鋼、Mn - Mo - Ni鋼
350 ~ 450	粗粒キルド鋼、Mn - Mo鋼、Mn - Mo - Ni鋼
450 ~ 500	C - Mo鋼、2 ¹ / ₄ Cr - 1Mo鋼
500 ~ 550	1Cr - ¹ / ₂ Mo鋼、1 ¹ / ₄ Cr - ¹ / ₂ Mo鋼、2 ¹ / ₄ Cr - 1Mo鋼
550 ~ 600	2 ¹ / ₄ Cr - 1Mo鋼、オーステナイト系ステンレス鋼
600以上	オーステナイト系ステンレス鋼

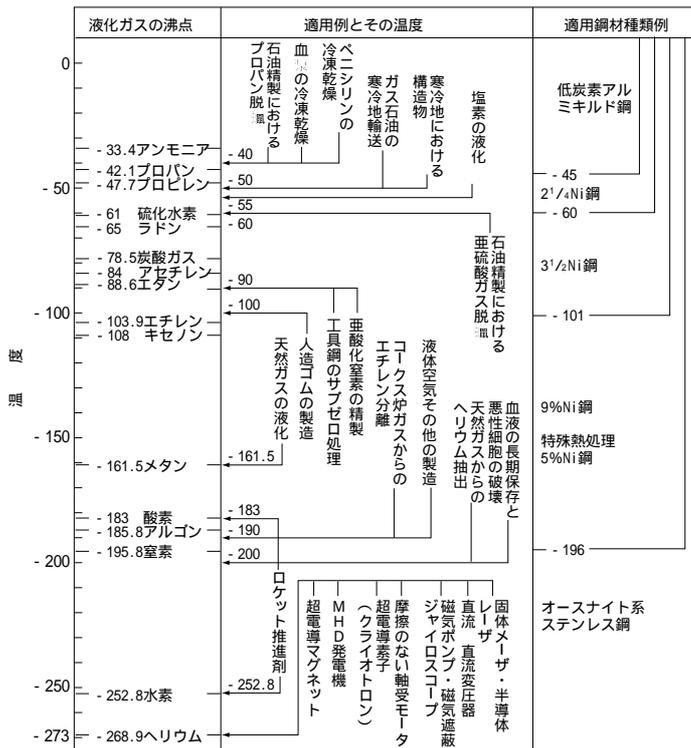


図29 低温用鋼材の適用例²⁴⁾

5・5・1 中・常温圧力容器用鋼板

中・常温の明確な定義はないが、高温側は、クリープを考慮しなくてよい温度で、約350℃であり、また、低温側は、低温用鋼と区分するため -10℃以上の温度をさしている。

したがって、ほとんどの鋼板は、この範ちゅうに入るが、比較的高圧容器によく使用される中・常温圧力容器用鋼板として次のものがある。

1) 炭素鋼板

この鋼板は、JIS G 3118「中・常温圧力容器用炭素鋼板、SGV」が制定されており、また、それに相当するものとしてASTM A516、BS EN 10028Part1などがある。これらの鋼板は、通常焼ならし処理によって製造される細粒キルド鋼であり、各種圧力容器用鋼板として使用されている。

図30に示すように、相当よい切欠き靱性が得られるが、次に述べるSPVに比較してMn含有量の上限が1.20%と低くおさえられているため、SPVと同一強度を得るにはC含有量を高める必要があり、靱性、溶接性の点でSPVよりやや劣る。

曲線記号	試料番号	化学成分%					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
●	A-20	0.17	0.23	1.11	0.011	0.006	0.14
○	A-32	"	"	"	"	"	"
×	A-38	"	"	"	"	"	"
□	A-50	"	"	"	"	"	"
△	B-40	0.16	0.20	1.12	0.012	0.020	-
▲	B-50	"	"	"	"	"	-

曲線記号	化学成分%			熱処理	板厚 mm	引張試験 kgf/mm ²	
	V	Mo	Al			降伏点	引張り強さ
●	0.05	0.04	-	焼ならし	20	37.4	53.5
○	"	"	"	"	32	37.8	53.4
×	"	"	"	"	38	37.1	53.6
□	"	"	"	"	50	34.1	51.5
△	-	-	0.035	"	40	34.0	50.6
▲	-	-	"	"	50	33.7	50.4

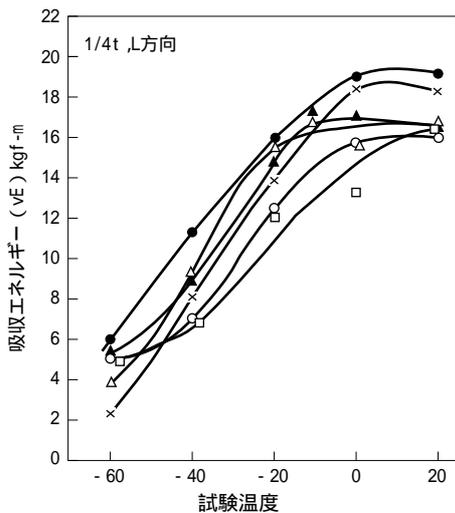


図30 圧力容器用炭素鋼板の切欠き靱性²⁶⁾

2) Si - Mn鋼板

この鋼板は、JIS G 3115「圧力容器用鋼板、SPV」が制定されており、常温降伏点の下限値を記号にしたSPV235、SPV315、SPV355、SPV410、SPV450、SPV490の6種類である。いずれも

Cを0.20%以下におさえたSi - Mn系鋼板で、Mnの上限も強度レベルに応じて1.60%まで許容されている。

前項のJIS G 3118と比較してMnの上限値が高いので、C含有量をあまり増さずに強度を確保でき、靱性、溶接性の点で有利である。2mmVノッチシャルピー衝撃試験遷移温度におよぼすCおよびMnの影響を図31および図32に示す。

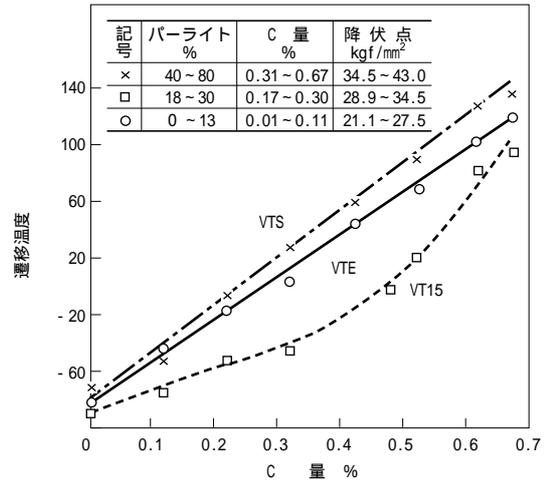


図31 2mmVノッチシャルピー衝撃試験遷移温度におよぼすC量の影響²⁷⁾

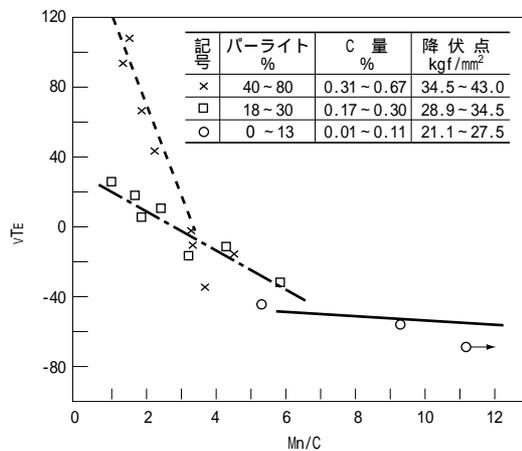


図32 2mmVノッチシャルピー衝撃試験遷移温度におよぼすMn量の影響²⁸⁾

なお、SPV315、SPV355、SPV410はTMCPによる製造が認められているが、その場合Ceq、P_{CM}を規定することにより、さらに優れた靱性、溶接性を得ることができる。

同様に、SPV450、SPV490を焼入焼もとして製造する場合には、CeqもしくはP_{CM}が規定されるため良好な靱性、溶接性を得ることが可能である。

SPVを含め、引張強さ490N/mm²級以上の鋼板は通常、溶接時の低温割れを防止するため予熱が必要である。球形タンクを製作する場合の予熱温度を表16に示す。

表16 高張力鋼製球形タンクの予熱温度²⁹⁾

鋼材の級別 肉厚 mm	引張強さ			
	50kgf/mm ² 級	60kgf/mm ² 級	70kgf/mm ² 級	80kgf/mm ² 級
15	-	-	75 ~ 125	100 ~ 150
25	50 ~ 100	50 ~ 100	100 ~ 150	125 ~ 175
32	75 ~ 125	75 ~ 125	125 ~ 175	150 ~ 200
38	100 ~ 150	100 ~ 150	150 ~ 200	150 ~ 200
50	125 ~ 175	125 ~ 175	150 ~ 200	150 ~ 200

しかし、施工時の溶接で予熱管理を正確に行うことは煩雑であり、また、作業環境も悪化する。

この予熱緩和を目的として、低き裂感受性鋼板（クラックフリー鋼板）が開発、実用化され、すでにWES 3009「溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性」が制定されている。低き裂感受性590N/mm²（60kgf/mm²）級鋼板と従来鋼板とのy形溶接割れ試験結果の一例を図33に示す。

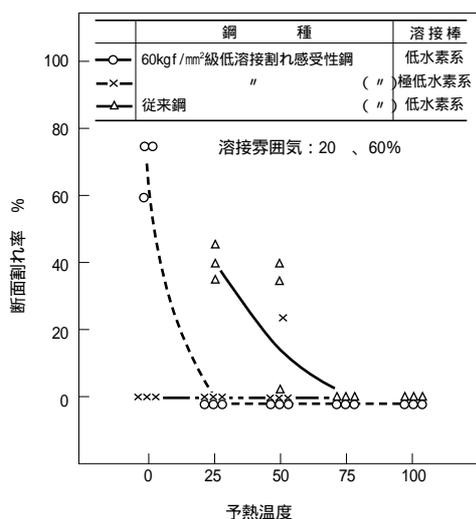


図33 y形溶接割れ試験による予熱温度と断面割れ率の関係³⁰⁾

3) 高温耐力保証鋼板

わが国の圧力容器に関する法令および構造規格は、ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. およびSec. Div.1に準拠しているため、材料に対する許容応力が低く、降伏点ベースの設計を採用している欧州系の法規 (BS5500、ADMerck-blätter B-0など) や米国ですでに採用しているASME Sec. Div.2などに比較して、容器の肉厚が厚くなり、設計上不利になっていた。

この鋼板は、高温耐力を保証することによって、欧州法規やASME Sec. Div.2と同等の設計理念が適用できるように、日本溶接協会によって、WES 3005「中・常温圧力容器用高強度鋼鋼板、PMS」として規格化され、その後、JIS G 3124「中・常温圧力容器用高強度鋼鋼板、SEV」が制定されている。規格末尾の数値は350 における0.2%耐力の保証値N/mm²をあらわしており適用最大板厚は150mmである。

記号	化学成分%					
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr
●	0.18	0.46	1.51	0.09	0.29	0.04
○	0.16	0.24	1.21	0.20	0.51	0.31
×	0.17	0.40	1.50	0.19	0.03	0.21
△	0.18	0.41	1.54	-	-	-
▲	0.17	0.32	1.29	0.19	0.42	0.56

記号	化学成分%				板厚 mm	熱処理
	Mo	V	Nb	Al		
●	0.24	0.037	0.024	0.038	75	NTSR
○	0.30	0.050	0.038	0.024	75	NTSR
×	0.23	-	0.023	0.041	75	NT
△	0.33	0.042	0.048	0.034	75	NT
▲	0.26	0.040	-	0.029	60	NTSR

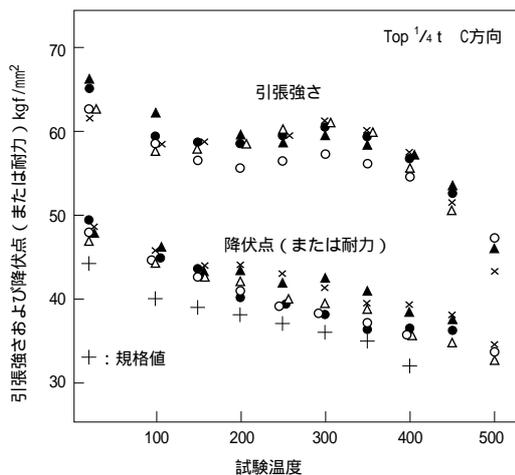


図34 PMS35鋼板の高温強さ³¹⁾

鋼板は圧延まま、焼ならし、または焼ならし焼戻し処理のいずれかで製造されている。

PMS35 (SEV345相当) の高温強度の一例を図34に示す。

5・5・2 低温圧力容器用鋼板

低温とは、通常 - 10 未満の温度をさし、これより低温で使用される鋼板を一般に低温用鋼板と称している。

低温で使用される鋼構造物では、脆性破壊が大きな問題となるため、その防止のため十分な低温靱性を有する鋼板を使用する必要がある。

低温圧力容器用鋼板を大別すると次の2種類となる。

1) 低炭素Alキルド鋼板

この鋼板は、JIS G 3126「低温圧力容器用炭素鋼鋼板、SLA」が制定されており、Si - Mn系キルド鋼をベースに、切欠き靱性の向上を図るためC含有量を低くおさえ、Mn含有量を高くし、かつ不純物のP、Sを極力低くおさえた鋼板である。また、結晶粒の微細化を図るためAlを添加しており、さらに制御圧延や焼ならし処理を行っている。

JISで規定する鋼板のうち、SLA325A (SLA33A)、SLA325B (SLA33B) およびSLA360 (SLA37) の特性の一例を表17に示す。

表17 SLA325A (33A)、325B (33B) および360 (37) の機械的性質³²⁾

種類の記号	板厚 mm	試験 方向	引張試験				衝撃試験			
			試験片	降伏点 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸び %	vT15	vTs	vTE	vE-60 kgf・m
SLA33A	13	L	5号	35.2	50.4	36	-75	-63	-63	21.0
		C	5号	35.6	51.2	36	-72	-50	-50	7.6
	30	L	4号	34.0	49.2	42	-100	-59	-70	21.0
		C	4号	34.7	49.4	41	-92	-52	-62	11.9
SLA33B	13	L	5号	41.9	49.0	44	-115	-83	-88	28.0
		C	5号	43.8	50.3	43	-112	-67	-73	16.0
	25	L	4号	38.6	50.6	36	-118	-105	-106	32.8
		C	4号	39.2	48.7	35	-116	-88	-88	21.3
SLA37	16	L	5号	43.0	55.7	43	-140	-118	-117	34.0
		C	5号	44.1	57.0	38	-132	-100	-98	22.8
	25	L	4号	45.8	55.9	36	-140	-95	-100	28.8
		C	4号	46.1	54.7	36	-130	-72	-87	17.8

2) Ni鋼板

この鋼板は、JIS G 3127「低温圧力容器用Ni鋼鋼板、SL-N」が制定されている。

Niは鋼の靱性を改善するもっとも有効な合金元素であり、Ni含有量が増すとともに靱性が向上し、最低使用温度も低くなる。

Ni鋼板をNi量から大別すると、2¹/₄%、3¹/₂%、5%、9% Ni鋼板に分類され、これらはさらに熱処理との組合せによって異なった強度と靱性を有する鋼板に分類される。

各種Ni鋼板の2mmVノッチシャルピー衝撃試験結果の一例を図35に示す。

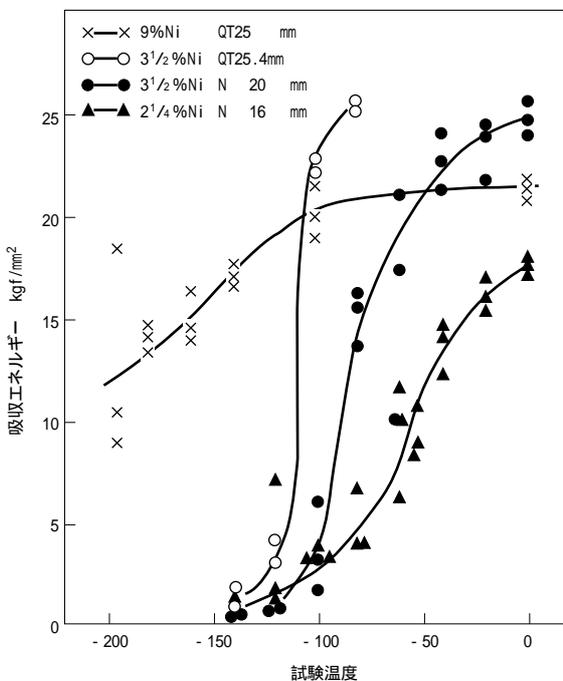


図35 2¹/₄、3¹/₂および9%Ni鋼板の2mmVノッチシャルピー衝撃遷移曲線³³⁾

5・5・3 高温圧力容器用鋼板

高温用鋼板とは、約400 以上で使用する鋼板をさしている。約350 以下の用途に対しては高温短時間引張強さ

に着目して設計が可能であるが、400 以上になるとさらにクリープ強さを考慮する必要がある。

高温圧力容器用鋼板として広く使用されている2¹/₄%Cr - 1%Mo鋼板の高温許容引張応力のきめ方の一例を図36に示す。450 をこえる場合には高温クリープにより許容応力が決められている。

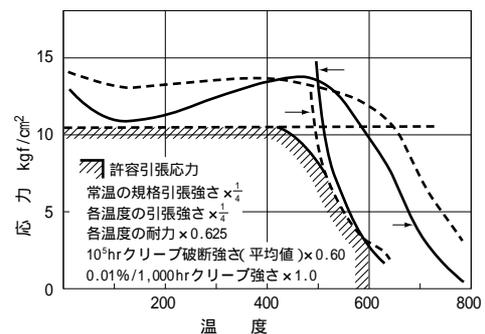


図36 高温引張応力のきめ方³⁴⁾

このクリープ温度を考慮する温度範囲という意味で主としてボイラを対象に高温という言葉が用いられているが、化学工業用容器の場合、酸化と水素侵食による脆化などが問題となり400 以下の温度でもこれら使用環境を考慮した鋼板の選択が必要である。

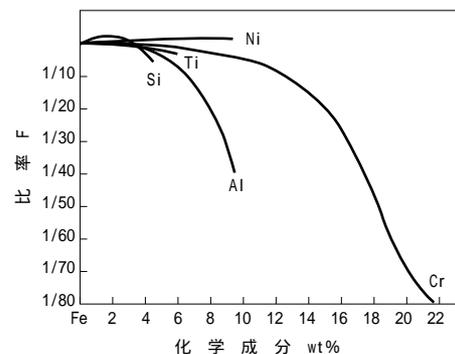


図37 Feの高温酸化におよぼす添加元素の影響 (900~1100)

$$\text{注) } F = \frac{\Delta m_{\text{alloy}}}{\Delta m_{\text{metal}}}$$

Δm_{alloy} : 合金元素を添加したときの酸化量
 Δm_{metal} : 純金属の酸化量

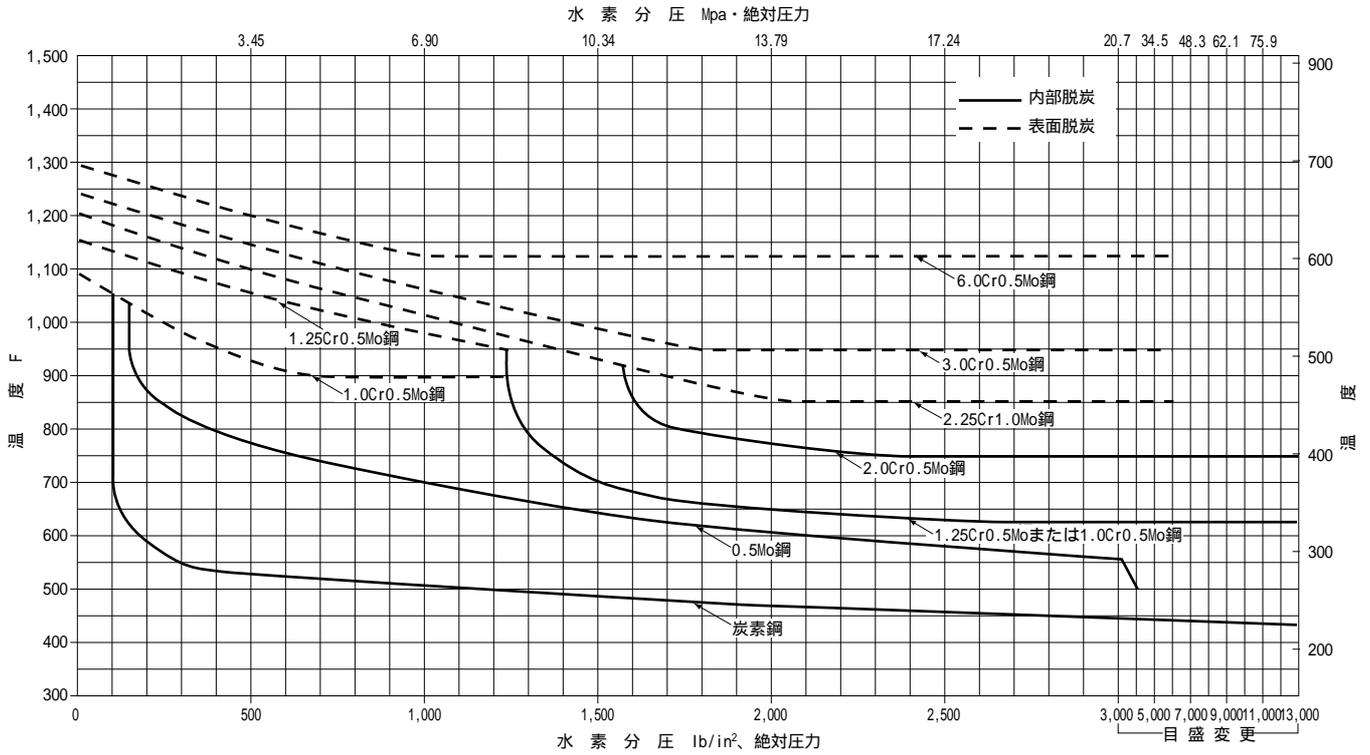


図38 高温高压水素に対する鋼の使用限界 (Nelson's Curve)³⁵⁾

参考として、高温での耐酸化性におよぼす添加元素の影響を図37に示す。この図から、Crの添加は、耐酸化性の向上に顕著な効果があることがわかる。

また、鋼の水素侵食に対する低抗性を評価するものとして、広く用いられているNelson's Curveを図38に示す。

高温压力容器用鋼板は、ボイラ用として一部炭素鋼板があるが、多くはクリープ強さを向上させるために0.5~1.0%のMoを添加し、さらに耐食性、耐高温水素脆化性向上を図る目的で1~9%のCrを含有させているのが特徴である。

1) 炭素鋼板

この鋼板は、JIS G 3103「ボイラ及び压力容器用炭素鋼及びモリブテン鋼鋼板、SB、SB-M」にSB410、SB450、SB480の3種類が規定されており、国内での使用歴史も古い。

近年、ボイラの大形化、高温高压化にともない、引張強さ410N/mm²級のものから450N/mm²級、480N/mm²級へと高強度化し、また、主として使用される板厚も50mm内外から100mmを超える極厚へと変わってきている。

炭素鋼板の特性の一例として、SB480 (SB49) について、機械的性質を図39に、また高温引張強さを図40に示す。

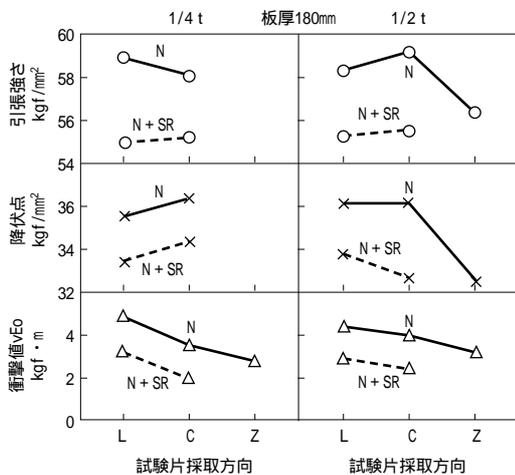


図39 SB480(SB49)の機械的性質 (板厚180mm)³⁶⁾

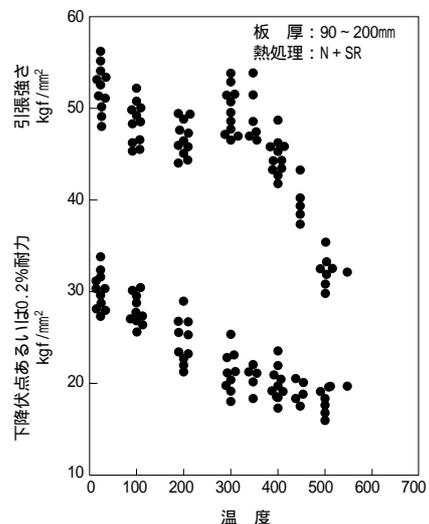


図40 極厚SB480(SB49)の高温引張強さ (板厚90~200mm)³⁷⁾

2) Mo鋼板

この鋼板は、JIS G 3103にSB450M、SB480M、JIS G 3119「ボイラ及び压力容器用マンガンモリブデン鋼及びマンガンモリブデンニッケル鋼鋼板、SBV」にSBV1A、SBV1BおよびJIS G 3120「压力容器用調質型マンガンモリブデン鋼及びマンガンモリブデンニッケル鋼鋼板、SQV」にSQV1A、SQV1Bとして $1/2\%$ Mo鋼板が規定されている。

Moは、少量でクリープ強さを著しく上昇させる。このため高温で使用し、クリープ強さを考慮しなければならない場合にはMo含有鋼が使用される。

図41はフェライト鋼のクリープ強さにおよぼす添加元素の影響を示したものであり、Moの効果が非常に大きいことがわかる。

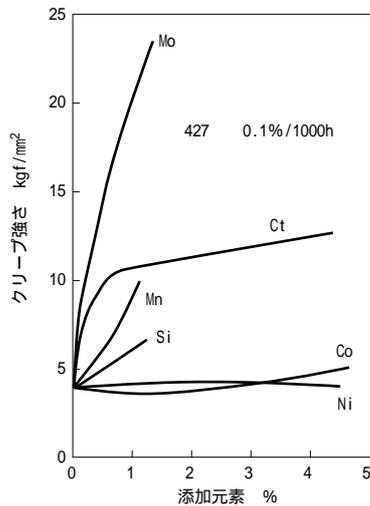


図41 フェライトのクリープ強さの添加元素による変化³⁸⁾

3) Mn - Mo - Ni鋼板

この鋼板は、JIS G 3119にSBV2、SBV3およびJIS G 3120にSQV2A、SQV2B、SQV3A、SQV3Bが規定されている。

容器の大形化、高压化にともない、使用鋼板の板厚が増大し、機械的性質を確保するため、Mn - Mo鋼にさらにNiを添加し、焼ならしあるいは焼入焼戻し処理した鋼板が使用されるようになった。

Niは変態点を下げ、焼入性を増大させるため、焼入焼戻し処理する場合には、その添加は強度、靱性の向上にきわめて有効である。

Mn - Mo鋼の引張特性および切欠き靱性におよぼすNiの影響を図42および図43に示す。

4) Cr - Mo鋼板

この鋼板は、JIS G 4109「ボイラ及び压力容器用クロムモリブデン鋼鋼板、SCMV」およびJIS G 4110「高温压力容器用高強度クロムモリブデン鋼鋼板、SCMQ」が制定されている。

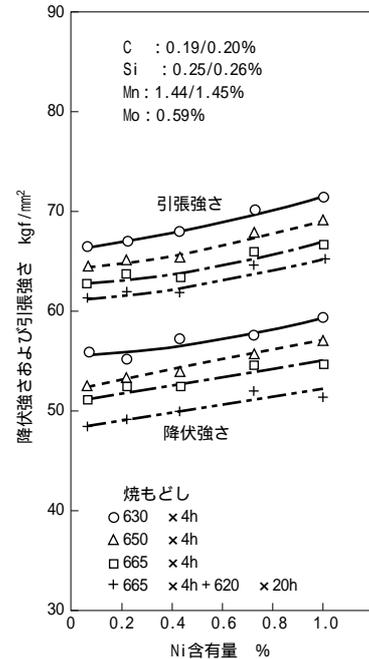


図42 Mn-Mo鋼の引張強さのおよぼすNiの影響 (オーステナイト化温度からの冷却速度 105 /min)³⁹⁾

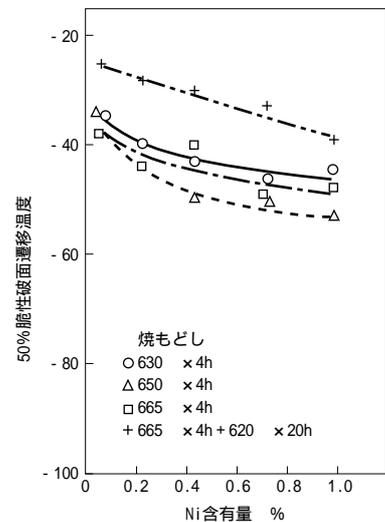


図43 Mn-Mo鋼の靱性におよぼすNiの影響 (オーステナイト化温度からの冷却速度 105 /min)⁴⁰⁾

Cr - Mo鋼板は高温用フェライト系鋼の中で、クリープ強さ、耐酸化性および耐水素脆化性に対して良好な特性を示すことから高温高压下で稼働する石油精製用压力容器や各種化学工業での化学反応容器用として用いられる。

ここでは、Cr - Mo鋼板のうち特に広く使われている1% Cr - $1/2\%$ Mo鋼板、 $1\frac{1}{4}\%$ Cr - $1/2\%$ Mo鋼板、 $2\frac{1}{4}\%$ Cr - 1%Mo鋼板と、最近JIS化された高温压力容器用高強度Cr - Mo鋼板について述べる。

(1) 1%Cr - 1/2%Mo鋼板および1 1/4%Cr - 1/2%Mo鋼板

この両鋼板は、CrおよびSi含有量以外は同一の化学成分範囲で規定されており、よく似た性質を示す。1/2%Mo鋼板にCrを添加するとCr含有量約1%までは添加量にしたがってクリープ強さを増し、1/2%Mo鋼板としては、1 1/4%Cr - 1/2%Mo鋼板が最大のクリープ強さを示す。

各種Cr - Mo鋼のクリープ強さを図44に示す。

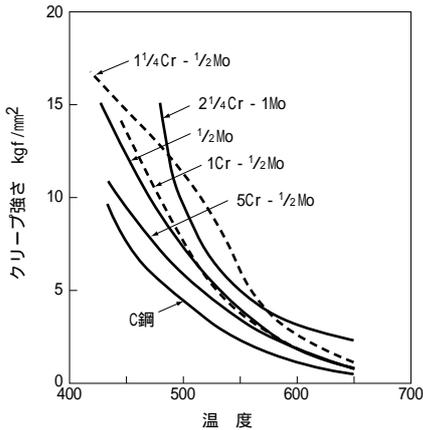


図44 Cr - Mo鋼のクリープ強さ (1%/10,000h)⁴¹⁾

高温で長時間使用する压力容器では鋼板の焼戻し脆性に留意する必要があり、この観点から、使用時の脆化程度を予想しておくため、図45に示すようなステップクーリング処理により、焼戻し脆化処理を施した後の衝撃特性を規定する方法がとられるようになってきている。

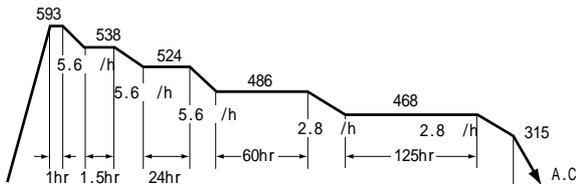


図45 ステップクーリング処理の熱サイクル⁴²⁾

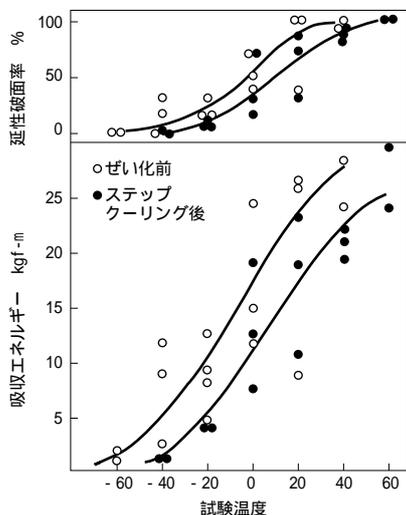


図46 1 1/4 - 1/2Mo鋼のステップクーリング前後2mmVノッチシャルピー衝撃遷移曲線⁴³⁾

1 1/4%Cr - 1/2%Mo鋼の使用中の脆化をステップクーリング法によりシミュレートした結果の一例を図46に示す。

(2) 2 1/4%Cr - 1%Mo鋼板

2 1/4%Cr - 1%Mo鋼板は、焼戻し脆化感受性が高いので注意する必要がある。

焼戻し脆化感受性におよぼす化学成分の影響については種々の研究があり、表18に示す脆化係数が提案されている。また、ステップクーリングによる遷移温度の変化の一例を図47に示す。

表18 2 1/4Cr - 1Mo鋼の脆化係数⁴⁴⁾

提案者	脆化係数
宮野、足立	$(Si + Mn) \times (P + Sn) \times 10^4$
LOW	$Mn + Si + 20Sn$
Bruscato	$(10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^{-2}$ および $(Mn + Si)$
SOCAL	$10Sb + 8P + 4Sn + As$
Emmer	ステップクーリングの場合 $vTr_{60} (°F) = 83.4 [Si \ln x] - 175.8Mn + 160.1Mo - 90.3$ $900 °F \times 5000h$ の場合 $vTr_{60} (°F) = 99.0 [Si \ln x] + 263Mo - 240.3$

注 . x : 上記の式等で求められる脆化係数

鋼板	板厚 mm	化学成分 %					
		C	Si	Mn	P	S	
A	250	0.13	0.19	0.50	0.006	0.006	
B	150	0.12	0.17	0.67	0.019	0.009	
C	140	0.11	0.25	0.57	0.011	0.006	
D	200	0.13	0.27	0.61	0.013	0.007	

Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al	Sn	As
2.35	1.00	-	0.11	0.07	0.026	0.008	0.031
2.42	0.97	-	0.19	0.13	0.016	0.015	0.017
2.32	0.99	0.04	0.09	0.05	0.014	0.008	0.008
2.38	0.9	-	0.03	0.04	0.012	0.003	0.004

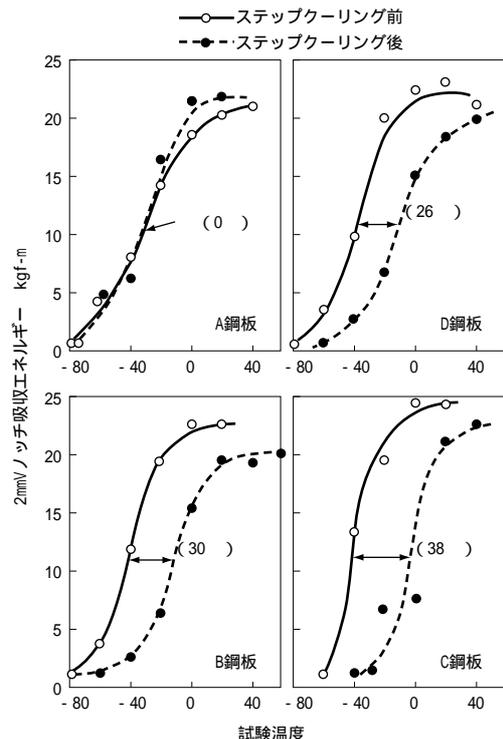


図47 ステップクーリングによる遷移温度の変化⁴⁵⁾

(3) 高温圧力容器用高強度Cr - Mo鋼板

重質油の分解精製や石炭液化の新プロセス開発にともない、450 以上の操作温度においても使用可能な従来のCr - Mo鋼板よりさらに高強度で耐水素侵食性に優れた鋼板の要求が高まり、これに対応した鋼板が開発されている。この鋼板に対し、既にASTMやASMEで規格化されていたが、わが国では、1993年にJIS G 4110「高温圧力容器用高強度クロムモリブデン鋼板、SCMQ」が制定され、SCMQ4Eとして2¹/₄%Cr - 1%Mo鋼板、SCMQ4Vとして2¹/₄%Cr - 1%Mo - ¹/₄%V鋼板、SCMQ5Vとして3%Cr - 1%Mo - ¹/₄%V鋼板が規定された。

5・6 ラインパイプ用鋼板

ラインパイプ用鋼板は、アメリカ石油協会規格API 5L (Line Pipe) が一般に準用されている。

この規格では、パイプから採取した試験片について機械的性質を保証することになっているため、鋼板に対する仕様は造管および試験片採取の際の材質変化を見込む必要がある。

大径ラインパイプ用鋼板の製造には、制御圧延法が採用されている。微量のNb、V、Tiなどの合金元素を有効に活用し、強度と靱性の最適なバランスを得る圧延パススケジュールを採用することにより、わが国では、板厚19.5mm、設計温度 - 20 、X70クラスの溶接性の優れたラインパイプ用鋼板の大量生産が可能となっている。

また、最近のラインパイプ用鋼板の問題点として、サワーガス環境下での使用による水素誘起割れ (Hydrogen Induced Cracking : HIC) があり、その対策が必要である。この点に関しては、脱硫および硫化物系介在物の形態制御、偏析の軽減、その他介在物の低減などの一連の鋼内質の改

善措置を講ずることおよびCuの添加などにより、サワーガス環境下でも十分使用可能なラインパイプ用鋼板が開発、実用化されている。

5・7 特殊用途用鋼板

5・7・1 耐摩耗鋼板

土木、建築、鉱山などの産業機械の主要部材には、土砂、鉱石などに対する耐摩耗性が要求される。

わが国において市販されているこの種の耐摩耗鋼板としては、C - Si - Mn系のほかに1.0%程度のCr、0.5%程度のMo、さらに微量のCu、V、Bなどを適宜含有させたCr - Mo系の焼入焼戻し型鋼板があり、それぞれ鋼板表面のブリネル硬さによって耐摩耗性を保証している。

耐摩耗鋼板の化学成分および表面硬さの一例を表19に示す。

5・7・2 非磁性鋼板

核融合炉、磁気浮上式リニアモーターカーなど磁気を利用する設備や、変圧器、ガス遮断器など各種重電機器の構造材料として非磁性鋼板が使用される。

非磁性鋼とは、強磁性でない鋼、すなわち、磁石に引っ付かない鋼の工業的通称であり、一般に磁場中での磁化のしやすさの尺度である透磁率μを用いその値が1.02以下のものをいう場合が多い。

先に述べた磁場の発生を伴う構造物に非磁性鋼が必要とされる理由は、磁性材料が存在すると、磁界分布を乱し、所定の磁場が得られないこと、また、磁性材料中に渦電流が発生しエネルギー損失になるばかりでなく、材料自体の

表19 市販耐摩耗鋼板の化学成分および表面硬さの一例⁴⁶⁾

分類	かたさの保証値 ブリネル硬さ HBS	記号	板厚 mm	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V	Ti	B	(1) Ceq	(2) P _{CM}	表面硬さ HBS
321		A	14.0	0.12	0.32	1.58	0.011	0.007	-	-	-	-	-	0.0017	0.40	0.218	360
		B	25.4	0.19	0.30	1.36	0.019	0.007	-	-	0.22	-	0.028	0.0015	0.48	0.290	345
		C	50.8	0.20	0.32	0.93	0.018	0.012	-	0.55	0.23	0.04	0.021	0.0011	0.54	0.309	352
360		D	12.7	0.19	0.30	1.43	0.24	0.009	-	-	0.21	-	0.023	0.0012	0.49	0.292	369
		E	25.4	0.20	0.31	0.92	0.018	0.010	-	0.54	0.23	0.04	0.021	0.0017	0.53	0.311	383
400		F	25.4	0.18	0.29	0.64	0.018	0.010	0.26	0.99	0.32	0.03	-	0.0017	0.58	0.317	410

$$(1) Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

$$(2) P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B (\%)$$

非磁性鋼板には、表20に示すようにJIS G 4304「熱間圧延ステンレス鋼板」で制定されたSUS 304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼板と、高Mn非磁性鋼板の2種類がある。前者は、一般に非磁性鋼というより高耐食性鋼として使用されることが多く、透磁率が不安定であること、耐力が205N/mm²級で鋼としては低いこと、また、Niを多量に含有しているため高価であることなどの問題を有している。一方、後者は、図48に示すように冷間加工を加えても透磁率はほとんど変化せず安定しており、耐力も295N/mm²級と高く、また、高価なNiの代わりにMnでオーステナイトの安定化を図っていることから経済性にも優れているという特徴を有している。ただし、高Mn非磁性鋼板は、加工硬化性が高いため、被削性、特にドリル加工性がSUS304より劣るという欠点がある。

表20 非磁性鋼板の一例

鋼種	化学成分 (%)							機械的性質				透磁率
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	E _l (%)	vE _o (J)	
JIS G 4304	0.05	0.58	1.51	0.02	0.01	10.2	18.8	235	598	74	245	1.002
SUS304	0.57	0.25	13.9	9	2	9	7	353	804	72	196	1.002

高Mn
非磁性鋼板
KNM295

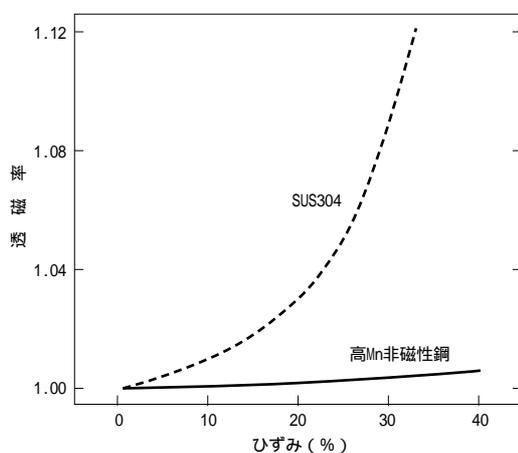


図48 冷間加工による透磁率の変化

現在までに、耐力295N/mm²級に加え、V、Nなどを添加した耐力395N/mm²級のもの、被削性を改善したもの、炭素鋼並の低熱膨張率を有するもの、さらに液体ヘリウム温度(4K)で高強度・高靱性を有するものなど、新しい高Mn非磁性鋼板が開発されている。

6 鋼板の品質保証

6・1 品質保証

鋼板の製造工程は、別ページに示すような工程であり、各工程において鋼板の品質が造り込まれていく。

また、鋼板に対する発注者の品質要求も年々多岐にわたり、厳しくなっており、これらの要求を満足させるには徹底した品質保証体制が必要である。

さらに、出荷した鋼板に関する情報をフィードバックして品質の向上に反映させる必要があり、このためにも総合的な品質保証体制が不可欠となっている。

6・1・1 鋼板の生産管理システム

各工程の管理項目は多く、また、相互に密接な関係があるので工程の総合管理にはコンピュータが大幅に活用されている。また、各工程ごとに品質を造り込むための管理項目とその管理方法としての基準が決められており、それにもとづいて各工程が管理されデータ収集が行われている。

鋼板の生産管理システムの一例を図49に、また、製造工程別の品質管理項目の一例を表21に示す。

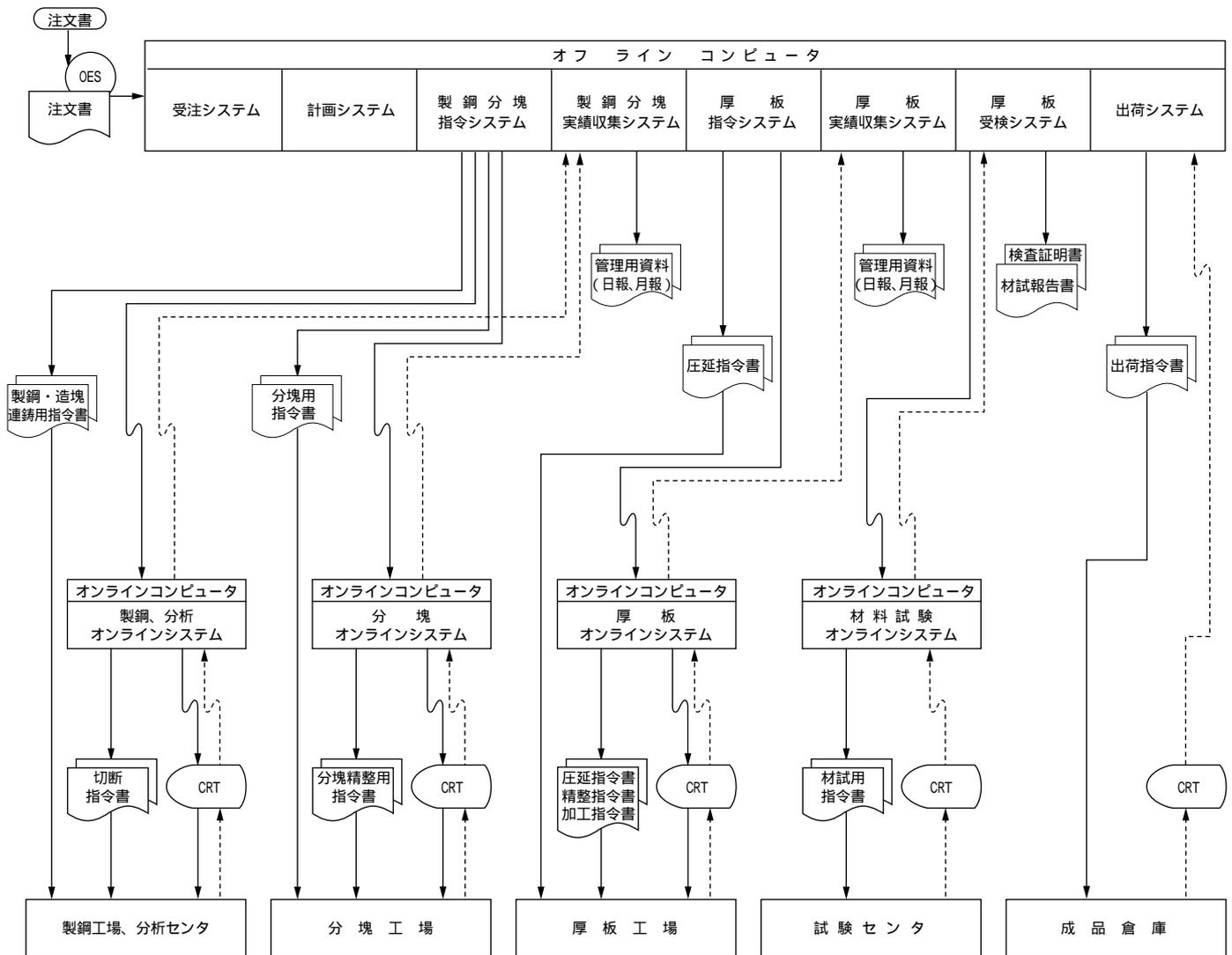


図49 厚板生産管理システムの概略図

表21 厚板工場における品質管理項目⁴⁷⁾

工 程 項 目	管 理 項 目	管 理 方 法	厚 板 品 質 特 性	
加 熱 厚板圧延	装入順位決定	装入順位決定基準	プレートクラウン、形状、しぼりスケール	
	昇温速度、均熱時間	ヒートパターン基準	板厚精度、長さ方向板厚偏差、表裏面延び差、スケール	
	設定温度、抽出温度	設定温度基準 温度計管理基準	ラインパイプ用素材低温靱性、含銅鋼表面欠陥、板厚精度、長さ方向板厚偏差、スケール	
	炉圧、空気比率	炉圧、空気比率設定基準 炉圧計、空気比率計管理基準	1次スケール	
	特殊加熱材加熱方法	スケール防止剤塗布基準 カバー板こん包基準	1次スケール	
	加熱焼きすぎ発生源管理	スキッドすぎ、パンバすぎ管理	へげ	
デスクー リング	ノズル摩耗、詰まり	ノズル点検、取替基準	スケール	
エッジャ	ロール摩耗、面あれ	エッジャロール取替基準	エッジング精度、表面欠陥（へげ）、平面形状	
厚板圧延	デスクノズル摩耗、詰まり、 デスク使用タイミング	ノズル点検、取替基準 デスク使用基準	1次スケール、2次スケール	
	パススケジュール	形状調整圧下量基準 幅出し圧下量基準、最大圧下量基準 形状制御基準	平面形状 幅出し精度、折込み量 板厚精度、プレートクラウン、ひずみ	
	AGC使用方法	AGC使用基準	板厚精度、長さ方向板厚偏差、ひずみ	
	圧延方向	圧延方向基準	材質異方性、加工性	
	圧延温度	コントロールドロリング基準、ミル温度計管理基準	材質、靱性、強度	
	ロール摩耗、膨張	ロールクラウン基準、ゼロ調基準、ロール内容、組 込量決定基準	板厚偏差、ひずみ、平面形状、しぼりスケール、板厚精度	
	ロール表面	ロール研摩基準、ロール面異常時取替基準	表面欠陥	
	板曲がり発生状況	チョックライン調整基準、レベリング基準	板曲がりによる板幅不足、長さ不足	
	表面欠陥発生状況	搬送設備管理基準	裏きず	
	熱間矯正	圧下量、矯正温度	レベラ圧下基準	ひずみ
冷却水		冷却水使用基準	かみ込みすぎ	
ロール表面		ロール面点検、手入基準	表面欠陥	
精 整	冷 却	PIC冷却方法	PIC冷却基準	材質特性
		表面欠陥発生状況	搬送によるすぎ防止基準	すりすぎ、かきすぎ
	採 寸	頭底部切捨量	採寸基準	表面欠陥の製品内はいり込み、材質異常部のはいり込み
		剪 断	切断精度	熱寸補正、入寸基準、アライニング基準
	ナイフ摩耗、クリアランス		シャーだれ、シャーボ管理基準 刃替周期基準、クリアランス設定基準	シャーだれ、シャーボ 断面形状
	キャンパ発生状況		ピンチロール、ガイド点検基準	キャンパ（横向がり）
	表面欠陥発生状況		搬送設備点検、手入基準 ピンチロール、下刃ホルダ点検	テーブルによるすりすぎ、かきすぎ、アライニング すりすぎ、ピンチロール押しすぎ、下刃台押しすぎ
	ガス切断	切断面形状	ノズル選定基準、切断速度基準	ガス切断面硬度
		切断精度	入寸基準	入り寸量、直角度
		表面欠陥発生状況	のる押込すぎ防止基準	のる押込すぎ
		予熱、後熱、徐冷	特殊鋼切断基準	切断による熱割れ、ガス切断面硬度
	ショット 塗 装	ショット粒度	ショット粒補給基準	表面粗さ、塗装後の耐さび性
		通板速度	通板速度基準	除錆度、塗装後の耐さび性
		膜厚	膜厚管理基準	耐さび性
		表面欠陥発生状況	搬送設備点検、手入基準	すりすぎ、かきすぎ、ショット粒押しすぎ
熱 処 理	焼ならし設定温度、時間	焼ならし設定温度、時間基準	ミクロ組織、強度、靱性	
	焼入設定温度、時間、水冷条件	焼入設定温度、時間、水冷基準	ミクロ組織、強度、靱性、材質のバラツキ	
	焼戻し設定温度、時間	焼戻し設定温度、時間基準	ミクロ組織、強度、靱性	
	温度計	温度計管理基準	材質全般	
	表面欠陥発生状況	ピックアップ防止基準	ピックアップ	
手 入	手入面積、深さ	手入許容基準（限界サンプル）	加工性	
	手入方法	砥石粒度基準、手入方向基準	加工性	
検 査	寸法形状 表面欠陥 内部欠陥 材 質	機器の精度	検査機器管理、検定基準	—
		検査技能の維持訓練	検査技能資格試験、検査教育	
		抜取検査方法	抜取検査基準	

6・1・2 識別管理システム

製鋼から出荷に至る製造、試験、検査工程における材料を識別するため、製造者は識別管理システムを確立し、運用している。一例として当社での識別管理システムの概要を図50に示す。

このシステムにより、すべての鋼板はミルシート記載の板番がわかれば、その鋼板の製鋼以降の製造履歴をたどることができる。

6・2 検査

上述の品質保証体制のもとに鋼板は製造されるが、最終製品の評価のために出荷検査が行われる。その目的には次の2点がある。

発注者の要求品質および規格に規定された品質に対し、出荷製品の品質が適合しているかどうかを検査すること。
 出荷検査で確認された品質特性を生産管理の総合指標として役立てること。

発注者の立場からは、**板番**が主であり、一般に鋼板には寸法、形状、外観、化学成分、機械的性質などが検査項目と

して定められており、特殊鋼板では、用途によって、結晶粒度、溶接後の硬さ、炭素当量などが種々追加される。検査は、規格および仕様にもとづいて行われ、ロットもしくは各板について合否が判定されている。

通常、鋼板の検査のうち、寸法、形状、外観および超音波探傷の各検査はオンラインで行っており、機械試験、その他の追加試験などの材質検査は、圧延鋼板から規格または仕様にもとづき試験片を採取し、オフラインで行っている。また、寸法、形状、外観検査は各板検査であり、材質検査は、規格または仕様により異なるが、一般にはロット単位である。

この項では、寸法、形状、外観および超音波探傷の各検査と不具合の発生原因などについて簡単に紹介する。

なお、引張試験、曲げ試験、衝撃試験などの試験方法の詳細については「各種試験方法」の項を参照されたい。

6・2・1 寸法、形状検査

主要規格の寸法、形状の許容差は、「主要規格製品の寸法・重量許容差」の項を参照されたい。

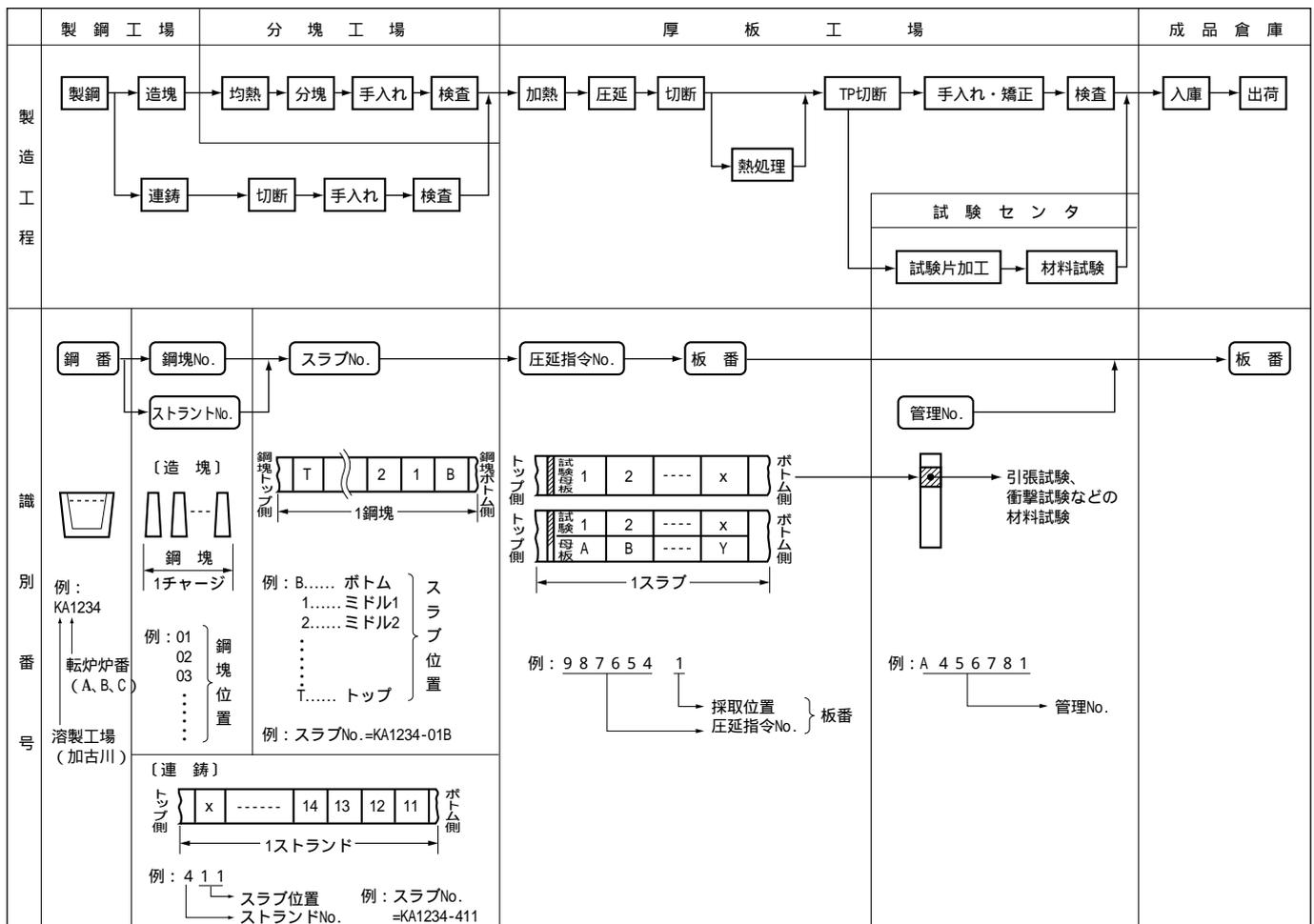


図50 識別管理システム

1) 板幅、長さ

板幅、長さの測定は、巻尺によりオンラインで行っている。

通常、鋼板は、冷却後所定の寸法に自動切断される。したがって、切断時の温度による伸び代、切断作業における機械的要因による寸法のバラツキなどを考慮して「入り寸」と称する寸法の余裕度を加算している。特に切断精度が厳しく要求される場合には、ガス切断を適用し、寸法検査は、オフラインで行っている。

2) 板厚

板厚測定は、マイクロメータによりオンラインで行っている。

板厚は、スラブ加熱条件、圧延条件、圧延ロールのたわみなどにより若干のバラツキは避けられないが、最近では、加熱精度の向上、ロールクラウン減少対策などの技術進歩によりさらにバラツキの低減が図られている。

3) 横曲り（キャンバ）および平坦度

目視によりオンラインで行い、比較的形状の悪いと判断される場合には、ストレッチャなどにより正確に測定している。

平坦度は、圧延鋼板の寸法、材質、圧延温度などの影響によって発生するものであり、許容基準を超えるような平

坦度の悪いものは圧延後レベラー、プレスなどによって矯正する。

一般に、板厚が薄く板幅の広い鋼板ほど、また、高張力鋼板ほど平坦度は悪くなる傾向にあり、特に平坦度の厳しい仕様を付加する必要がある場合には、あらかじめ発注者と製造者間でよく打合せすることが望ましい。

6・2・2 外観検査

鋼板表面あるいは断面に検出される欠陥は、通常、目視で検査され、有害なきずや欠陥は手入れ、補修あるいは出荷停止などの措置がとられる。

表面きずの発生原因は、次の二つが考えられる。

中間製品であるスラブ段階で、その表裏面、側面などにあったきずが、圧延後の鋼板の表裏面にきずとしてあらわれる。

スラブ段階では何らきずのない材料でも、その後の加熱、圧延、精整での作業によって製品にきずを生ずる。

検査で発見されたこれらのきずのうち、有害な欠陥は、該当規格または仕様にもとづいてグラインダ手入れ、溶接補修などにより除去される。

表面きずの代表的なものの名称とその特徴を表22に示す。

表22 表面きずの名称とその特徴⁴⁸⁾

No.	名 称	形 態 お よ び 特 徴	発 生 原 因
1	ふくれ (Blister)	表面が部分的にふくれて内部に空洞（空洞）のあるもの	鋼片内部の非金属介在物などの不連続部分に鋼中の水素が拡散凝集し、その圧力のために生じる。または、鋼塊頭部に発生する収縮孔、ブローホールなどの未圧着によるもの。
2	パウダーきず (Powder Inclusion)	連続鋳造時のパウダーなどが引き延ばされ鋼板表面に密着したもの。	連続鋳造材のパウダーまき込みによる鋼片表面または表面近傍の介在物欠陥が圧延中に伸延したもの。
3	ヘゲ (Scab)	表面が部分的にラップあるいははく離したもので部分的には根を持った状態で折れ重なったもの。	発生原因は種々あるが、鋼塊あるいは鋼片に残存した微小割れ、鋼片手入れ、切断時のばり残存、加熱圧延中に発生するかききずなどによる。
4	ロールきず (Roll Mark)	圧延方向に周期的にとつ状、または、へこみ状に写されたきず。	ワークロール、圧延テーブル、レベリソグロールなどの損傷または異物の付着によって生じる。
5	線状きず (Seam)	圧延方向に平行な浅い線状のきず	鋼片端部（稜線部）が圧延中に巻き込まれ、この部分が鋼板端部の直線状のきずとなる。また、脱酸不良に起因する表層直下のブローホールが表面に線状きずとして発生したもの。
6	スケールきず (Scale)	スケール（酸化鉄）が圧着したもの。通常局部的にかみ込み状に出る。	一次スケール（加熱時）および二次スケール（圧延時）による。
7	縦割れ (Longitudinal Crack)	圧延方向に線状に割れたもの。稲妻状に割れたり、割れの一部がヘゲ状になる場合もある。	鋼片割れの残存による。
8	横割れ (Transversal Crack)	圧延方向にほぼ直角に発生した線状、または波状の割れきず。	鋼塊または鋼片割れの残存による。
9	耳割れ (Edge Crack)	耳がのこぎり歯状に割れ込んだもの。	ブローホール、鋼塊、鋼片の過熱、鋼質による。
10	かみ込みきず (Rolled in Material)	表面に異物を押し込んだもの。	圧延中に異物が飛び込み、押しつけられたことによる。
11	あばた (Rolled in Scab)	スケール（酸化鉄）がはく離して、あばた状になったもの。	一次スケール（加熱時）二次スケール（圧延時）などによる。
12	ピックアップ (Pick Up)	ごく短かいかききず状、押しきず状のもので、熱処理鋼板特有のきずであり、鋼板裏面に点在する。	主として、ハースローラーの堆積物が原因であるが冷却テーブルローラーの堆積物によって生じることもある。
13	かききず (Scratch)	圧延後に発生した引っかききず。線状に比較的長く伸びたものと短かく密集したものがある。	鋼板の移送時にテーブルローラ等の搬送機器により引っかかれたり、すられたりしたもの。鋼板と鋼板の接触により発生する場合もある。
14	ひび割れ (Heat Crack)	網目状の割れきず。局部的に発生する場合もあるが、一般には、ほとんどが全面に発生する傾向がある。	含銅鋼などで鋼片の加熱条件が適切でない場合に発生する。

6・2・3 内質検査

鋼板の内部欠陥には、表23に示すように、非金属介在物、ラミネーション、二枚割れなどがあり、外観から直接確認できないため超音波探傷による非破壊検査が必要に応じて実施される。

表23 鋼材の内部欠陥⁴⁹⁾

きずまたは欠陥の名称	特徴	発生原因その他	検出法
二枚割れ ラミネーション	断面が連続あるいは断続して2枚に割れたもの	鋼塊のパイプ、介在物の混入	・超音波探傷 ・浸透探傷 ・切断時のガス吹き
断面すじ割れ	断面が断続した線状に小割れしたものの	偏析によるものおよびブローホールなどの圧着不十分	・超音波探傷 ・浸透探傷
外来系の非金属介在物	ノロ、耐火物などの介在したものの	造塊中のノロ、耐火物などのまき込み	・顕微鏡組織検査 ・肉眼検査 ・超音波探傷 ・磁粉探傷
内成系の非金属介在物	マンガンサルファイド(MnS)、アルミナ(Al ₂ O ₃)などの集積したものの	溶鋼中のO、Sなどと反応し、鋼塊上部に、浮上しきれず内部に密集する	・サルファプリント ・肉眼検査 ・チェック分析

物体に超音波をあてると、音波の一部は透過し、一部は吸収され、一部は反射されるが、この透過、吸収、反射の程度を電気的に検出し、物体内部の状態を定量的に測定する方法が超音波探傷検査の原理である。

表24に超音波探傷方法の種類を大別して上段に示すが、見方を変えて整理すると下段のようになる。パルス法だけでも細別すると種類は多岐にわたっている。

表24 超音波探傷法の種類⁵⁰⁾

パルス反射法	1 探触子法.....垂直法、斜角法、表面波法、板波法 2 探触子法.....垂直法、斜角法、板波法
透過法	パルス法 連続波法.....普通の透過法、共振動透過法
共振法	ブラウン管式 音響式
パルス法	反射式 <ul style="list-style-type: none"> 垂直法.....直接接触法、水浸法、部分水浸法 斜角法.....直接接触法、水浸法、部分水浸法 透過法 <ul style="list-style-type: none"> 垂直法.....直接接触法、水浸法、部分水浸法 斜角法.....部分水浸法

どの探傷法で、どの程度の探傷感度で検査するかは、被検材の内部欠陥の種類、欠陥の許容限度などにより選択されるものであり、鋼板と溶接部ではその方法、感度とも大きく異なる。

鋼板については、通常、表25および表26に示すように、JIS G 0801「压力容器用鋼板の超音波探傷検査方法」に規定されている二振動子垂直探触子または垂直探触子を使用した垂直探傷法が採用されている。また、探傷には局部水

表25 二振動子垂直探触子の探傷感度及び公称周波数⁵¹⁾

鋼板の厚さ mm	装置の種類	探傷感度	公称周波数 MHz
6以上 60以下	Aスコープ表示式探傷器	RB-Eを用い、Bmax : 50%に 対し使用する探触子によっ て10dBまたは14dBだけ感度 を高める。	5
	デジタル式探傷器	規定の感度設定試験片を用 いて、B ₁ を感度基準値に設 定し、使用する探触子によ って、10dBまたは14dBだけ 感度を高める。	

表26 垂直探触子の探傷感度、公称周波数及び振動子寸法⁵¹⁾

鋼板の厚さ mm	探傷感度	公称周波数 MHz	振動子の有効直径 mm
13以上20以下	STB-N1 : 25%	5	20
20を超え40以下	STB-N1 : 50%	5	20
40を超え60以下	STB-N1 : 70%	5(2)	20(30)
60を超え100以下	STB-G V15-4 : 50%	2	30
100を超え160以下	STB-G V15-4 : 80%	2	30
160を超え200以下	STB-G V15-2.8 : 50	2	30

備考 ()内の公称周波数及び振動子寸法は、なるべく使用しない。

浸法による手動探傷器または自動探傷装置が主として用いられている。

鋼板の出荷検査時の超音波探傷検査では問題にならなかったような欠陥が施工検査での溶接部の超音波探傷時に検出されトラブルの原因となることがある。これは検出しようとする有害欠陥の種類、大きさが鋼板の場合と溶接部の場合で大きく相違しているためであり、特に溶接部近傍の母材部の微小介在物などを検出してしまうためである。

溶接部には、通常、斜角探傷法が採用されている。溶接部の割れ、スラグまき込み、融合不良などは、その欠陥がたとえ微小であっても構造物の安全性を損なう可能性があるため、鋼板の垂直探傷の場合にくらべ探傷感度は高い。1探触子法、2探触子法における走査方法の概要を図51および図52に示すが、欠陥指示長さや欠陥位置の測定はむずかしい面があり熟練を要する。

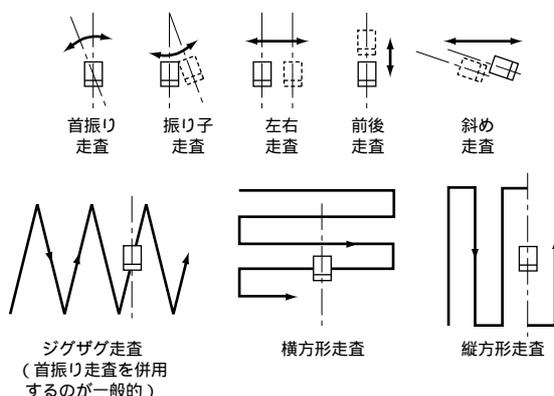


図51 斜角1探触子の基本走査(上段)と応用走査(下段)⁵²⁾

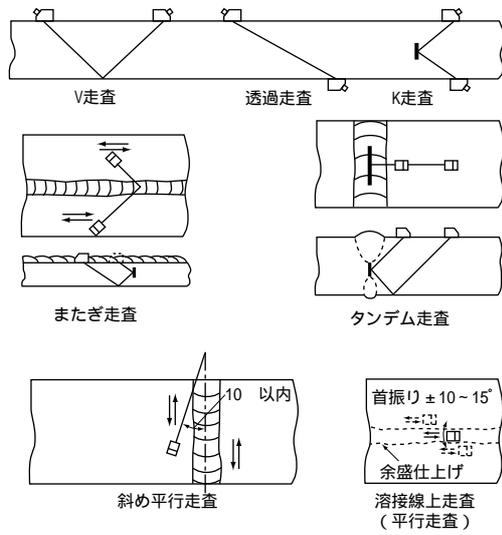


図52 斜角2探触子の走査(上段)と
溶接部探傷走査(下段)⁵³⁾

したがって、溶接部近傍の母材部の微小介在物までも問題となるような溶接部の超音波探傷検査が予定されている場合には、鋼板発注時に発注者と製造者間でよく打合せし、無用のトラブルを避けることが望ましい。

7 鋼板使用にあたっての参考事項

製造者から納入された鋼板は、所定の切断、曲げ加工などの加工工程と溶接を主体とする組立工程、ショット塗装などの仕上げ工程など諸工程を経て、各種構造物に仕上げられ、それぞれの用途に供される。

ここでは、加工、溶接時および構造物としての使用時における鋼板の材質変化について参考として若干紹介したい。

7・1 加工

7・1・1 切断加工

切断加工には、せん断力を利用したシャー切断とガス炎による酸化溶融を利用したガス切断が主として使用されている。

1) シャー切断

シャー切断は、下刃と上刃間に鋼板をそう入し、強力なせん断力で切断するため、せん断部近傍は塑性加工により硬化し、脆化する。せん断面の形状は、図53に示すように破断面bは凹凸の多い面となっており、また、破断面下部にはdで示されるかえりがある。

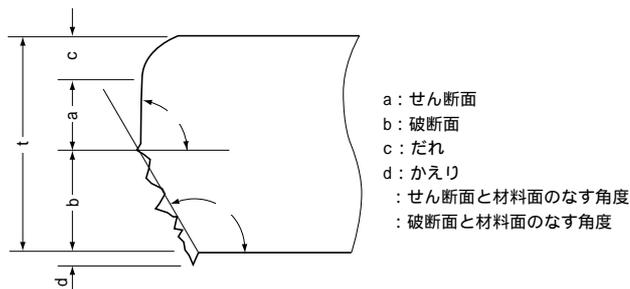


図53 せん断面形状

したがって、シャー切断ままで曲げ加工する場合、破断面が内側（圧縮側）になるように加工するか、あるいはかえりの部分をグラインダで除去し破断面先端のコーナ部に丸みをつけた後、曲げ加工するなどの曲げ加工割れへの配慮が高張力鋼板や曲げ半径比（ r/t ）の小さい場合には必要である。

せん断したブランク材の割れ発生状況を模式的に図54に示す。

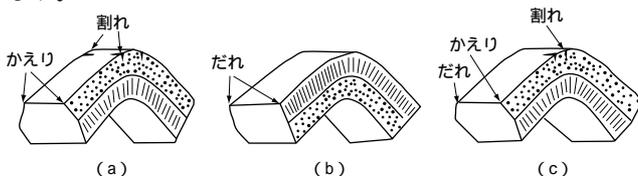


図54 せん断したブランクと割れ発生状況⁵⁴⁾

2) ガス切断

ガス切断面近傍は高温に急熱、急冷されるため、焼入硬化をおこすと同時に膨脹と収縮により、内部応力あるいはひずみ変形を発生する。切断部の熱影響部は、通常、トーチ側表面で3～4mm、裏面で1～2mmであり、硬化の度合は切

断条件によっても異なるが、主として板厚と炭素当量に支配される。

各種溶接構造用鋼板の自動ガス切断部の硬度分布の一例を図55に示す。炭素当量の高い780N/mm²級鋼板では最高硬さはピッカース硬さで400を超えている。このような鋼板を曲げ加工する場合には、グラインダなどで切断面コーナ部に丸みをつけ、割れ防止を図る必要がある。

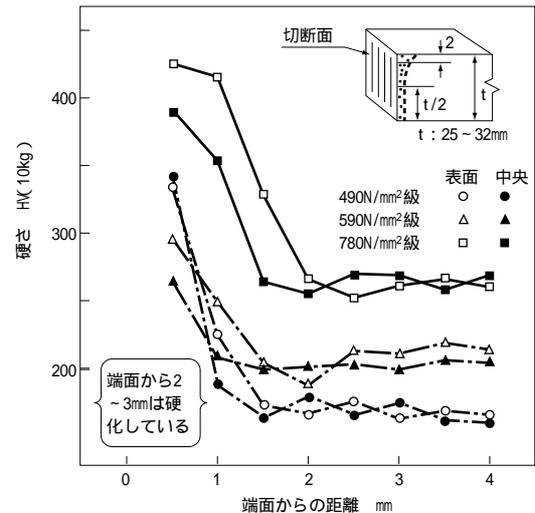


図55 ガス切断面の硬さ分布の例⁵⁵⁾

また、特に留意すべき点として、C含有量の比較的高い機械構造用炭素鋼板やCr - Mo鋼板、9%Ni鋼板などの厚肉鋼板を室温でガス切断すると切断面に微小割れを発生することがあるので、ガス切断時には予熱あるいは後熱などを行い割れの防止を図る必要がある。

この割れの深さは、1～3mmがほとんどであり、ガス切断による熱影響部内で停止しているものが多い。割れの除去は、グラインダやチッピングによって行うことが必要で、ガウジングによる除去は侵炭とガウジング熱であらたな割れを生じる可能性が高いので注意しなければならない。

7・1・2 曲げ加工

曲げ加工方法には、常温で曲げる冷間曲げ 熱間で曲げる熱間曲げ 炎加熱による曲げがある。

1) 冷間曲げ

冷間曲げは、図56に示すように、プレス、曲げロール、溝形ロールなどによる機械的加圧で鋼板に降伏点以上の曲げひずみをあたえて行われる。

曲げ加工時の外側表面に生じる平均曲げひずみ（ t ）は、次式であらわされ、 t と板厚、曲げ半径との関係は図57のようになる。

$$t = \frac{1}{1+2r/t} \times 100 \quad \frac{t}{2r} \times 100 (\%)$$

t : 板厚、 r : 曲げ半径

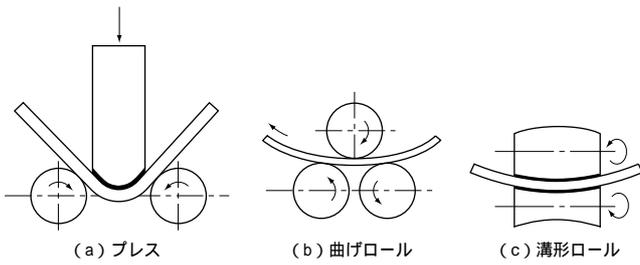


図56 冷間曲げ加工

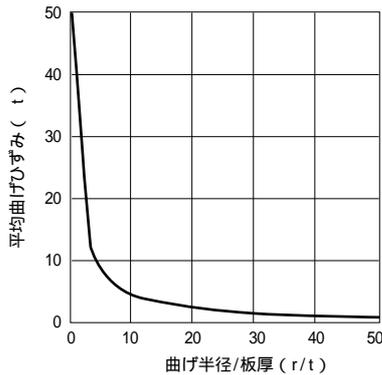


図57 板厚、曲げ半径と曲げひずみの関係⁵⁶⁾

このことは、板厚が厚いほど、曲げ半径が小さいほど曲げひずみが大きくなり、曲げ割れが生じやすくなることを示している。

また、材質、曲げ方向（鋼板の圧延方向に曲げるかどうか）、曲げ角度、板幅、端面の状況および表面の状況なども割れ発生に影響をおよぼす。すなわち、

- (1) 材質面では、高強度材ほど曲げ加工Lにくく、割れを生じやすい。
- (2) 曲げ方向では、鋼板の圧延方向に直角の方向（T方向）は熱間圧延によって長く延ばされた介在物を伝って割れが進展しやすく、曲げ性やフランジ性が圧延方向に比べて劣っているため、圧延方向（L方向）に比べ割れを生じやすい。
- (3) 曲げ角度が大きくなると塑性変形による硬化域がひろくなるため、また、板厚に対する曲げ半径比（ r/t ）の小さいものでは塑性変形量が大きくなるため割れやすくなる。
- (4) 曲げ加工は、2軸方向応力が表面に作用するため、板幅がひろくなるにしたがって、端部の収縮による伸びの緩和効果が少なくなり、割れを生じやすくなる。
- (5) 端面は、通常シャープあるいはガス切断された面であることが多いが、前者では塑性変形による硬化のため、また、後者では溶断時の急熱、急冷による硬化のために曲げ延性が劣化しているため、割れやすい。
- (6) 表面は、黒皮ままあるいはブラストで除錆した面の場合が多いが、ヘゲ、かききずなどが表面に存在するとその欠陥部を起点に割れを生じる。また、ブラスト後の鋼板表面は、図58に示すように、表面から約0.5mmの範囲にわた

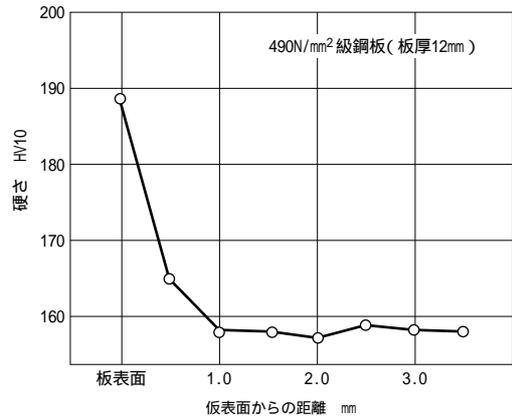


図58 ショットブラスト鋼板の表面硬さ分布

って硬化しているため圧延ままの鋼板に比べて曲げ半径で約0.5tほど悪くなる。

以上の諸条件を考慮し、高強度で幅広の鋼板の曲げ加工を行う場合には、L方向曲げとなるように鋼板を採取すること、曲げ半径を大きくとること、端面のシャープや溶断で硬化した部分をグラインダで除去することなどの処置を曲げ加工前に講じておくことが望ましい。

2) 熱間曲げ

鋼板を加熱すると変形能が増し、変形抵抗が減少するため曲げ加工が容易となり、また、加工硬化も生じない。

したがって、熱間では大きな曲げひずみを与えることができ、板厚や板幅の大きい場合でも曲げ半径を小さくした鋭角の曲げが可能であり、また、必要とする加圧力も小さくてすむ。

しかし、鋼には200~300 で強度が増し、延性、靱性が低下する青熱脆性域および950 付近で認められる赤熱脆性域があるので、その範囲あるいは近傍での加工は避けるべきである。

青熱脆性および赤熱脆性の一例を図59に示す。青熱脆性は、析出硬化の一種と考えられ、赤熱脆性は、S、Cu、Snなどの元素の存在により発生するといわれている。

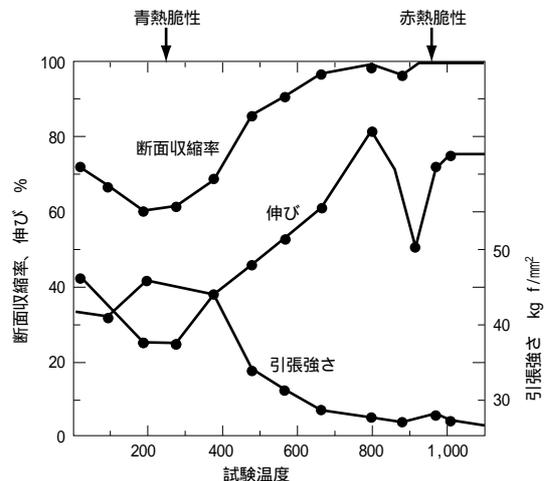


図59 高温における軟鋼の強さ⁵⁷⁾

したがって、加工を容易にするには加熱温度をなるべく高くすることが望ましいが、これらの脆化に配慮して、通常800～900の温度範囲が適用されている。

ただし、調質型鋼板の場合には、焼戻し温度以上に加熱すると熱処理効果が失われるので、加熱温度を焼戻し温度以下とし、温度管理にも十分配慮する必要がある。

3) 炎加熱による曲げ

鋼板にガス炎などで局部的に加熱、冷却の操作を与えると、機械的に加圧しなくても曲げ加工することができる。橋桁や鉄骨などのひずみ取りや船体外板の曲面形成加工などに用いられる線状加熱がその例である。詳細は省略するが、一般に、ガス加熱部は加熱後空冷した場合には軟化し、水冷した場合には水冷開始時の温度が高いと硬化し、脆化する。

なお、調質型鋼板では、焼戻し温度以上に加熱すると熱処理効果が失われるので温度管理には十分注意する必要がある。

7・2 溶接

近年、鋼構造物はほとんど溶接によって組立てられている。

溶接構造物の破壊事故は、第二次大戦でのリパティ型船の脆性破壊事故が有名であり、これを契機として溶接構造について調査、研究が行われ、母材特性、溶接性、継手特性などへの要求値が検討された。

溶接構造物の安全性を保证するには、溶接性の優れた鋼板の選択は重要であるが、同時に設計および溶接材料を含む溶接施工法などにも十分配慮する必要がある。

7・2・1 硬化と軟化

溶接構造物において、溶接部の割れを防止し、かつ延性を向上させるには、熱影響による硬化を最小限におさえる必要がある。また、溶接継手部の所要強度を確保し、さらに疲れ強度の低下およびボンド部の脆化を極力防ぐには、著しい軟化も避けなければならない。

溶接部の硬化、軟化には鋼材の炭素当量および溶接時の冷却速度が大きく関与しており、炭素当量が高くなるほど、また、溶接時の冷却速度が速いほど硬化する。

溶接継手部の硬化と軟化の一例を溶接継手部の硬さ分布の形で図60および図61に示す。また、硬化性の指標である炭素当量と溶接熱影響部の最高硬さとの関係を図62に示す。

通常、高張力鋼板、圧力容器用鋼板などの溶接施工では、適切な予熱を行って、継手部の硬化を少なくして溶接割れの防止を図っている。590N/mm²級鋼板の溶接初期温度と最高硬さとの関係の一例を図63に示す。

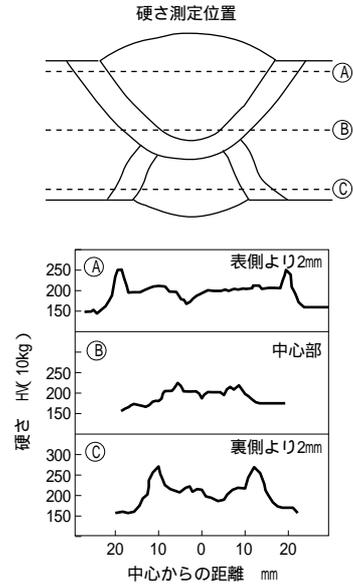


図60 SM490(SM50)鋼板両面溶接継手部の硬さ分布⁵⁸⁾
(手溶接)

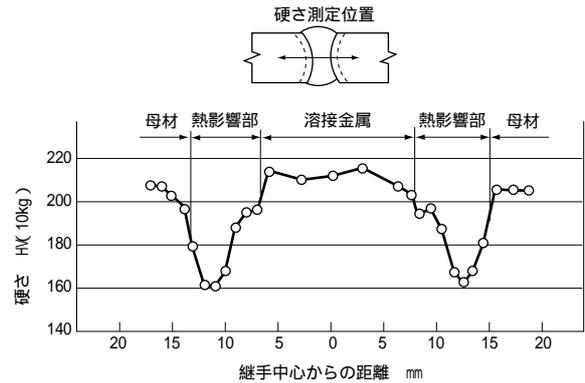


図61 SPV490Q (SPV50Q)鋼板溶接継手部の硬さ分布⁵⁹⁾
(自動溶接)

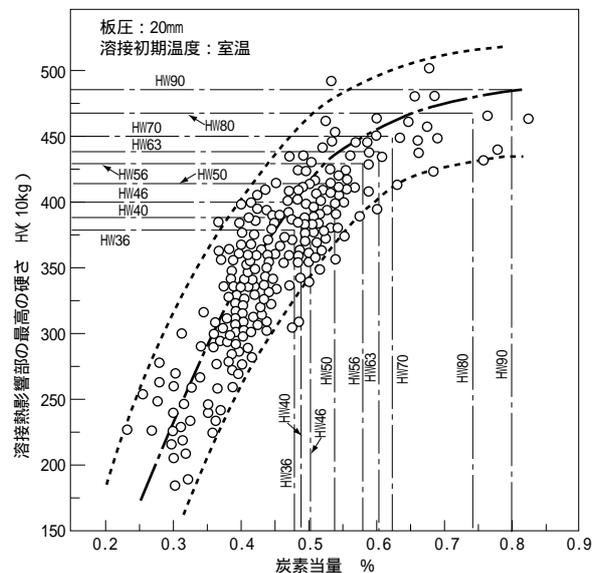


図62 鋼材の炭素量(Ceq)と最高硬さとの関係⁵⁹⁾

注) $Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$ (%)

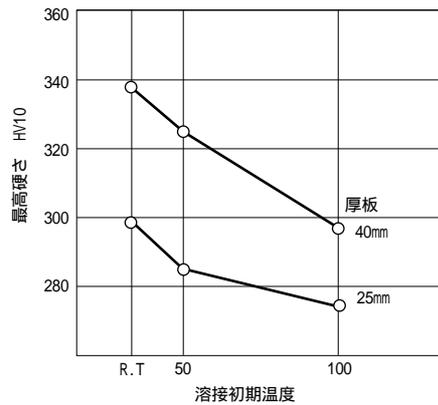


図63 590N/mm²級鋼板の溶接初期温度と最高硬さとの関係 (手溶接)

7・2・2 割れ

溶接割れは、鋼構造物の破壊につながる大きな要因となることから鋼板を溶接する時にもっとも配慮を要する点である。

したがって、製造者においても鋼板の製造にあたって溶接性を考慮することが重要な課題の一つになっている。

表27は各種溶接割れとその原因および防止対策の一例を示したものであり、割れは、高温割れ、低温割れ、再熱割れの3種に大別される。

表27 各種溶接割れの発生原因と一般的対策

種別	割れ名称	割れの発生場所	割れの形状例	原因	一般的対策
高温割れ	クレータ割れ	溶接金属		クレータ中心部への不純物析出 収縮による空孔	・クレータ処理
	粒界マイクロ割れ	熱影響部 溶接金属		溶接熱による鋼中のP、Sなど不純物の析出 1000 付近における拘束度	・鋼材中の不純成分の減少
	梨形ビード割れ	溶接金属		低融点不純物の偏析	・溶接条件の選択によりビード断面形状調整
低温割れ	ルート割れ	熱影響部 溶接金属		拡散性水素 鋼材の硬化性 拘束度 応力集中	・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用
	縦割れ	熱影響部 溶接金属		拡散性水素 鋼材の硬化性 溶接線に直角方向の拘束力	・ルート割れと同じ
	横割れ	熱影響部 溶接金属		拡散性水素 鋼材の硬化性	・ルート割れと同じ
	ビード下割れ	熱影響部		拡散性水素 鋼材の硬化性	・ルート割れと同じ
	トウ割れ	熱影響部		拡散性水素 鋼材の硬化性 アングカッタなど形状的不連続による応力集中	・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・トウ部の整形
	ヒールクラック	熱影響部		拡散性水素 鋼材の硬化性 溶接金属の収縮による角変形	・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・溶接ビードを長くする。仮付溶接により角変形を阻止する。
	ラメラテア	熱影響部		板厚方向延性低下 板厚方向に働く収縮応力 角変形によるひずみ集中 拡散性水素 鋼材の硬化性	・鋼中介在物の低減 ・継手設計の配慮 ・溶接方法の選択 ・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・バダリング法
再熱割れ	SR割れ	バック側上端部		鋼の化学成分 残留応力 ひずみ集中	・溶接施工法 ・残留応力の低減 ・化学成分の検討

1) 高温割れ

高温割れは約1000℃以上で生ずる割れであり、溶接熱影響部の液化割れと溶接金属の凝固割れ（梨形ビード割れともいう）が代表的である。いずれも、P、S、Nなどが作る低融点化合物が原因の結晶粒界割れである。

熱影響部の液化割れはP、Sの著しく高い鋼板や高Ni鋼板に生じ通常の高張力鋼板ではほとんど生じることはない。割れを防ぐには小入熱溶接が望ましい。

一方、溶接金属の凝固割れは、突合せ溶接やすみ肉溶接などでよく見られるものであり、サブマージアーク溶接時の溶接条件と割れ発生域の関係を図64に示す。

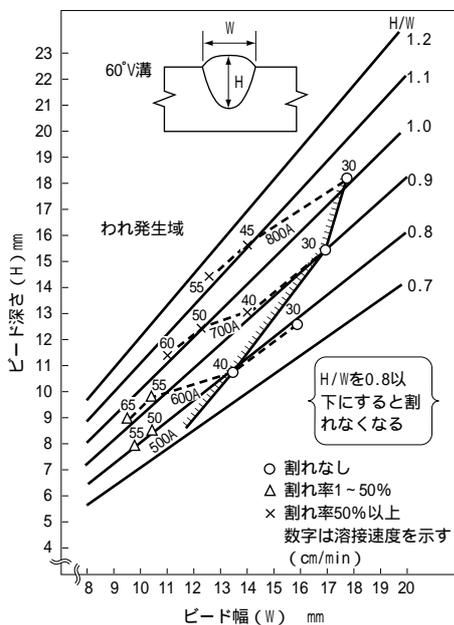


図64 ビード幅、ビード深さおよびサブマージアーク溶接条件と割れ発生域との関係⁶¹⁾

凝固割れは、ビード断面形状、すなわち、ビード幅(W)とビード高さ(H)の比(H/W)が大体0.8以上になると割れを生じるとされており、また、溶接速度が遅くなるとH/Wの限界値は大きくなる傾向を示す。

2) 低温割れ

低温割れは、約200℃以下で生じる。溶接直後に発生するとはかぎらず室温になって数時間から数十時間経過してから発生することがあるので注意を要する。

低温割れは、次の三つの条件がかさなったときに生ずる。

溶接熱による溶接熱影響部の硬化が大きいこと。

硬化部に一定値以上の応力が作用すること。

一定値以上の水素が存在すること。

溶接熱影響部の組織がマルテンサイト主体の組織になると溶接割れを生じやすい。割れるかどうかは硬さだけで判断することはできないが、低水素系の溶接棒を使用する場合でも、通常、ピッカース硬さ400以上になると、割れる危険性が高いと考えてよい。

溶接熱による硬化の程度は、前述のCeqで推定できるので、Ceqは割れ発生の目安となりうるが、同じ硬さでも化学成分によって割れ感受性が異なるので、より正確には低温割れに対して直接化学成分の影響を調査した溶接割れ感受性組成(P_{CM})を用いるほうが望ましい。

P_{CM}は、y形溶接割れ試験におけるルート割れ防止予熱温度と鋼板の板厚、化学成分、拡散性水素量および板厚との関係を調査した結果から導き出されたものであり、溶接時の予熱温度を決定する際の目安となる。

予熱温度とP_{CM}の関係を次に示す。

$$T_o = 1440P_c - 392$$

T_o = 溶接低温割れ防止のための予熱温度(℃)

P_c = 溶接割れ感受性指数

$$P_c = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{t}{600}$$

P_{CM} = 溶接割れ感受性組成(%)

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B(\%)$$

H = 溶接金属の拡散性水素量(μcc/100g)

t = 板厚(mm)

1983年WES 3001「溶接用高張力鋼板」の改正が行われたが、主な改正点は、P_{CM}をCeqのかわりに導入したことであり、さらに、とくにP_{CM}の低い調質型590N/mm²級鋼板についてWES 3009「溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性」が制定された。WES 3009の要点はC 0.09%、P_{CM} 0.20%の規定を定めたことである。

なお、実際取引には、Ceqを適用する場合が多いので、参考のため、P_{CM}とCeqとの関係を図65に示す。

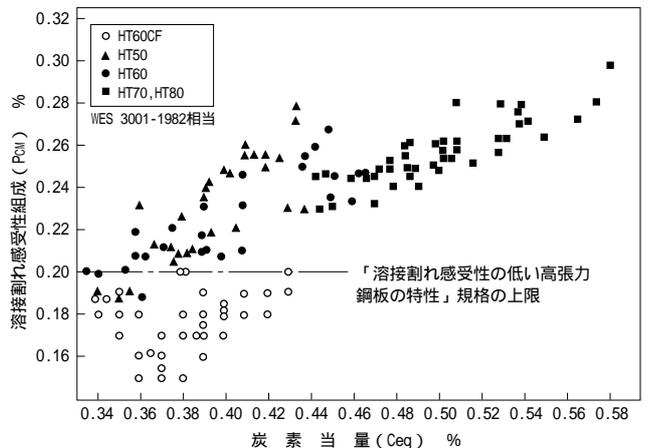


図65 溶接割れ感受性組成(P_{CM})炭素当量(Ceq)との関係⁶²⁾

3) 再熱割れ (SR割れ)

690N/mm²級、780N/mm²級などの高張力鋼板、Cr-Mo系などの压力容器用低合金鋼板などでは、溶接後応力除去焼きまし(SR)をした場合、HAZ粗粒域部に粒界割れを生じることがあり、これを再熱割れ(SR割れ)と称している。

SR割れは、熱処理中に生じる塑性ひずみが、粒界に集中しておこるもので、母材の化学成分も大きく影響しており、次式に示すようなSR割れ感受性指数が提案されている。

$$G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$$

$$P_{SR} = C + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2$$

G、P_{SR}とも0以上の場合にSR割れの危険性が高い。

SR割れを防ぐには適切な化学成分を選定すること、割れを生じやすい止端部の形状をなめらかにするなどの処置を講じて応力集中を少なくすること、溶接入熱を高めて硬化を防ぐことなどが有効である。

7・2・3 脆化

溶接構造物を製作するうえで留意しなければならない大きな課題としてHAZ靱性がある。

通常、溶接継手部のHAZは溶接熱により、組織変化をおこし、鋼板製造時にえられた切欠き靱性の良好な組織がこわされる。このため、HAZの切欠き靱性は、一般に母材部より劣る。

切欠き靱性の溶接熱による劣化は、結晶粒の粗大化組織の変化の二つの原因により生じる。

図66は溶接継手各部についての切欠き位置とvTsとの関係を示したものであるが、もっとも脆化している位置は、Bのポンド部である。ポンド部で脆化が最大となるのは上記、の脆化原因がもっとも強くあらわれることによるといえる。

また、図67は690N/mm² (70kgf/mm²) 級鋼板の溶接継手ポンド部についての溶接入熱量と2mmVノッチシャルピー特性値との関係を示したものであるが、この図から明らかなように、溶接入熱量が大きいほど脆化は著しい。

溶接部、特にポンド部の切欠き靱性は、鋼板と溶接条件の選定である程度改善できる。

大入熱溶接熱影響部の脆化原因と脆化軽減法を表28に示す。

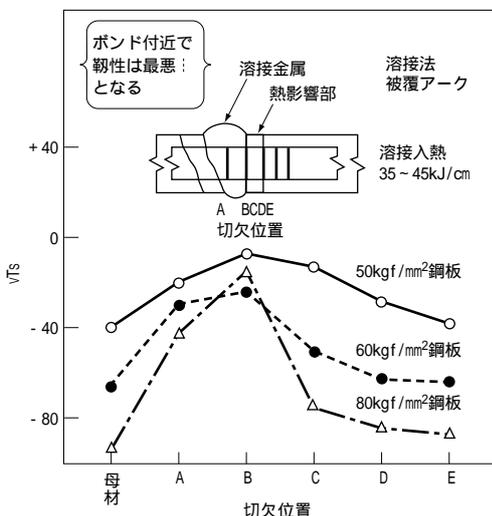


図66 溶接継手各部のvTs分布例⁶³⁾

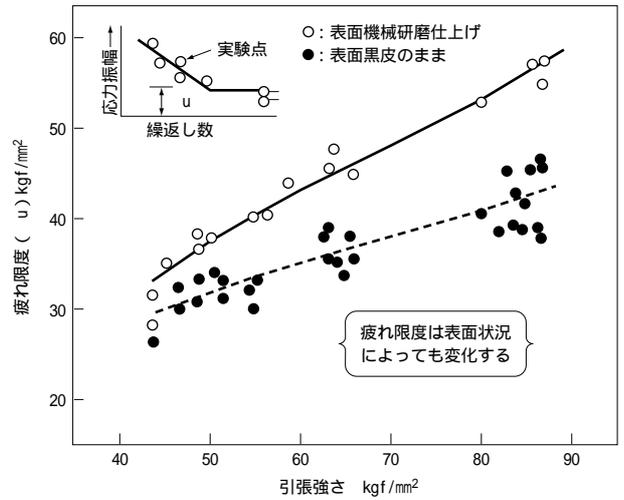


図67 溶接入熱量と破面遷移温度との関係 [690N/mm²(70kgf/mm²)級鋼板]⁶⁴⁾

表28 大入熱溶接熱影響部の脆化原因と脆化軽減法

因子	脆化原因	脆化軽減法		対象鋼重 N/mm ² 級
		冶金的手段	具体的な手段	
結晶粒	粒の粗大化	高温で安定な析出物の微細分散	・TiNの微細分散	
組織	上部ベイナイトの生成 (島状マルテンサイトの生成)	微細フェライト+パーライトの生成	・フェライト変態核となるTiN、BN、REM化合物、Ca化合物などの分散 ・低Ceq化	490 590
		上部ベイナイト組織中の島状マルテンサイトの低減	・低C化、低Ceq化 ・低Si化	490 780
		下部ベイナイトの生成	・焼入性を高める元素(Ni、Cr、Moなど)の添加	780 980
地の靱性	—	不純物元素の低減靱性を向上させる元素の添加	・P、S、Nの低減 ・Niの添加	590 780 980

すなわち、結晶粒の粗大化防止のため微量のTiを添加する。上部ベイナイト生成を抑制する目的でTi、B、REM、Caなどを添加しフェライトの生成を容易にする。C、SiおよびCeqを下げ、島状マルテンサイトを低減する。合金元素を添加し下部ベイナイトの育成を容易にする。P、S、Nを低減し、Niを添加し、ベイナイト地の靱性をよくするなど、の処置が鋼種、用途に応じて選択して用いられる。

このような対策を施し、大入熱溶接を行ってもポンド部の靱性の劣化が少ない鋼板を大入熱溶接用鋼板と称し、すでに実用化されている。

一方、溶接施工面からポンド部靱性を改良するには、溶接入熱量およびパス間温度を一定値以下に管理することが必要である。溶接入熱量の上限は、靱性の要求値、溶接方法、鋼種などによって異なるが、概略、590N/mm²級鋼板で7.0kJ/mm、690N/mm²、780N/mm²級鋼板で5.0kJ/mm、低温用AIキルド鋼板で3.5kJ/mmである。

7・3 使用中の材質劣化

鋼構造物に使用される鋼板は、その使用条件、環境によって疲れ、腐食などのため材質が劣化し、割れを生じ、破壊につながることもある。適切な鋼板の選定と十分管理された施工にあわせ、構造物の使用条件の管理と日常の点検、補修などのきめ細かい措置が構造物の寿命に大きく影響する。

7・3・1 疲れ

疲れとは、静的引張強さより小さい荷重の繰返しによってき裂を生じる現象であり、疲れによるき裂が脆性破壊の原因となることは多くの事故例で示されており、機械や鉄道橋などの繰返し荷重を受ける構造物の安全性を考えるうえで重要な特性である。

荷重または応力が、ある値以下になると荷重をいくら繰返しても疲れき裂を生じなくなり、この応力を疲れ限度または耐久限度という。

1) 母材の疲れ

図68は、片振引張疲れ試験における疲れ限度と引張強さとの関係を示したものであり、疲れ限度は、強度の高い鋼板ほど高い。この図から表面研磨仕上げ材に比べて、表面が粗い黒皮まま材では疲れ限度が小さくなるのがわかり、また、その低下量は高強度材になるほど大きくなるのがわかる。したがって、高強度材では、ポンチマーク、すりきず、加工きずなどの欠陥が疲れ限度におよぼす影響が大きいので、製作時の取扱いには慎重を要する。

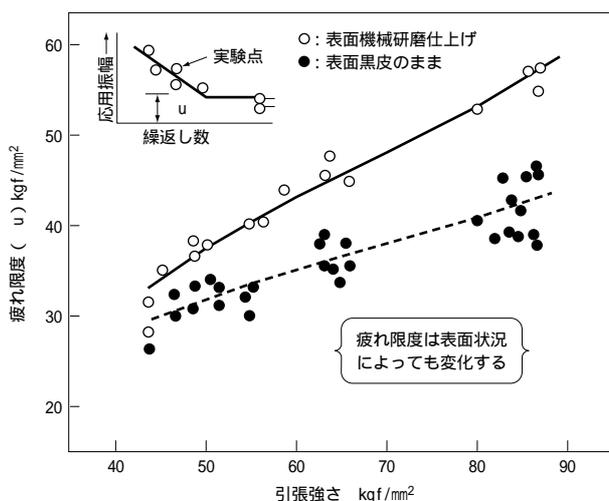


図68 母材の引張強さと片振引張疲れ限度との関係⁶⁵⁾

また、平滑材と切欠き付き材の疲れ試験結果の一例を図69に示す。この図から、構造物に切欠きに相当する欠陥があれば、より低い応力で破壊する恐れがあるといえる。このように疲れ限度におよぼす切欠きの存在による応力集中の影響は大きい。切欠き感受性係数と引張強さとの関係を

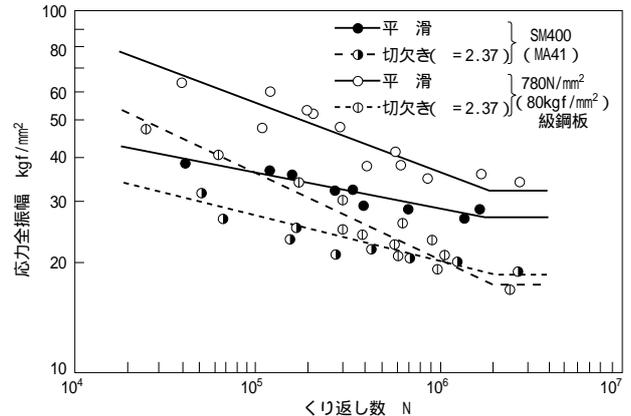


図69 SM400(SM41)および780N/mm²(80kgf/mm²)級鋼の疲れ試験結果の一例⁶⁵⁾

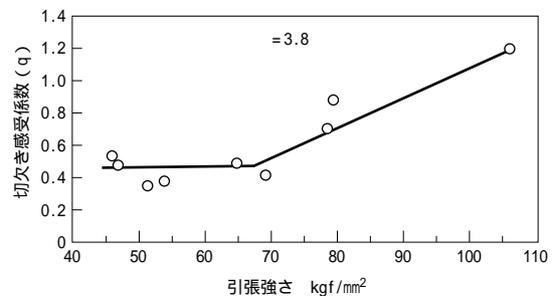


図70 切欠き感受係数と引張り強さとの関係⁶⁷⁾

注) 切欠き感受係数 $q = \frac{-1}{-1}$
 = 応力集中係数
 = $\frac{\text{切欠き付試験片の最大応力}}{\text{切欠き付試験片の平均応力}}$
 = 切欠き係数
 = $\frac{\text{平滑試験片の疲れ強度}}{\text{切欠き付試験片の疲れ強度}}$

図70に示す。この図によると590N/mm²(60kgf/mm²)級鋼板まで0.5とほぼ一定であるが、590N/mm²(60kgf/mm²)を超えると切欠き感受性係数は大きくなる。

すなわち、切欠きのある場合には、鋼板の静的強度を高くしても疲れ限度はあまり改善されないといえる。

構造物部材の疲れ破壊は、部材にもともと存在する欠陥または使用中の部材の一点に発生したクラックが、繰返し応力により成長、伝播するという過程を経て破壊に至る。したがって、疲れき裂の伝播速度は、重要な因子となる。

最近、疲れき裂の伝播現象に対し、破壊力学で用いられる応力拡大係数(K)を適用するとよく説明できることが明らかになった。き裂伝播速度と応力拡大係数との関係を図71に示す。

詳細は省略するが、素材の疲れき裂伝播特性を求めておけば、より複雑な形状の構造物にき裂が存在する場合のき裂伝播速度および疲れ寿命の推定ができ、また、下限応力拡大係数(K_{th})から許容欠陥寸法を推定できる。

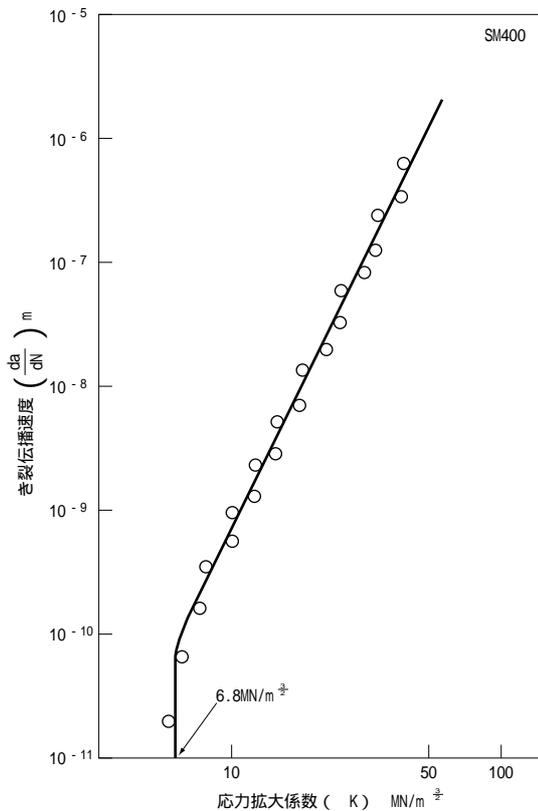


図71 疲れき裂伝播特性の一例

2) 溶接継手部の疲れ

母材の疲れ限度は、引張強さに比例して高くなるが、溶接継手部では必ずしもこの関係は成立しない。図72は各種継手の疲れ限度を母材と対比して示したものである。この図から継手の疲れ限度が母材のそれに比べて低くなるのは、主に溶接止端部の形状の不連続が原因となっている。止端部のフランク角（余盛立上り角度の余角）と止端部の半径 r の影響を調べた結果を図73に示す。フランク角および

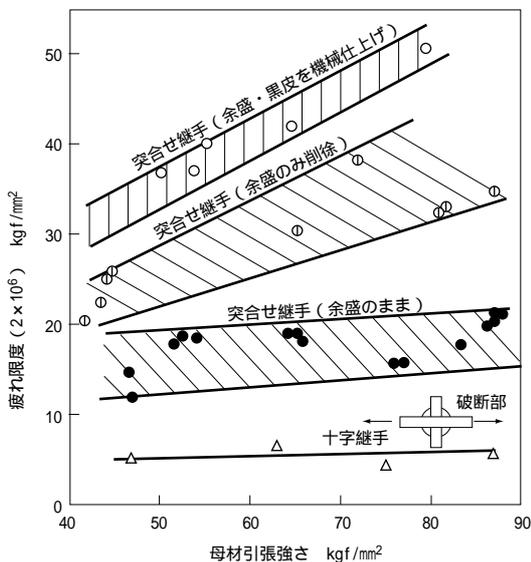


図72 溶接継手の片振り張疲れ限度と母材引張強さとの関係⁶⁸⁾

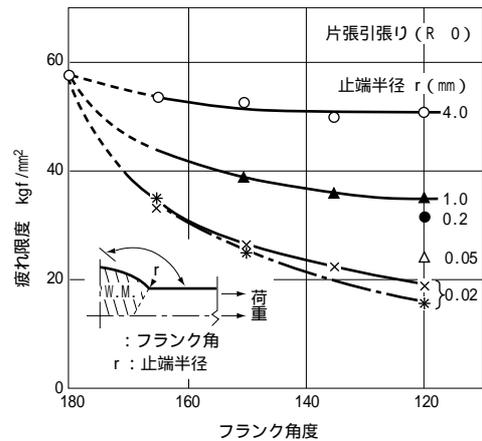


図73 突合せ継手模擬の母材試験片によるフランク角度と疲れ限度との関係⁶⁹⁾

止端部半径が小さくなると疲れ限度は母材の $1/3$ 程度まで小さくなる。

したがって、高張力鋼板の溶接施工時には、最終ビードの形状に十分注意することが必要であり、止端部の形状のよい特殊な被覆アーク溶接棒の使用、TIG溶接による形状修正またはグラインダなどによる研削仕上げ処理なども必要に応じて実施されている。

7・3・2 使用環境による割れ

広義には、液体金属脆化割れ、応力腐食割れ、水素脆化割れ、苛性脆化割れ、腐食割れによる割れなどがあり、非常に多くの割れが使用環境によって生じるが、ここでは、そのなかで代表的な応力腐食割れと水素脆化割れについて述べる。

1) 応力腐食割れ

応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: SCC) は、鋼構造物に腐食環境下で応力を負荷したときに生じる割れで、応力を除くと一般の腐食となり、割れは停止する。

割れには、環境因子 (電位、化学種、pH、酸素、温度など)、冶金因子 (化学成分、熱処理、加工、析出など) および応力因子が複雑に関与している。その機構はまだ十分解明されていないが、SCCは応力と腐食との相乗作用によっておこることから、次のような対策が採用されている。

(1) 環境因子

陰極防食法の適用

低電圧直流電源を用い、補助電極を陽極に、被防食金属を陰極として通電するか、または被防食金属に低電位金属体を陽極として接続し、その電位差を利用して電流を発生させ、防食する。

たとえば、Feに対しZnなどを適用する。

腐食抑制剤の添加

一般にインヒビタ (Inhibitor) と称し、腐食が水に関係している場合に主として用いられる。

古くはボイラのスケール（缶石）防止剤などがあり、化学工業の発達とともに種々の目的、用途のインヒビタが開発されている。

(2) 冶金因子

添加元素の制限

一般に純金属ほど割れが生じにくい。合金を添加すると異相の析出などによって局部電位を生じ腐食が促進する。また、局部硬度差にともなう応力集中度合の変化などによっても割れを生じる。したがって、なるべく合金元素を添加していない単純な成分系がよい。

熱処理の適用

き裂先端の応力集中を軽減する。しかし、異相の析出があると逆効果となる場合がある。

ショットピーニングの適用

表面に圧縮応力を与えるため、SCC防止に効果がある。

2) 水素脆化割れ

鋼板に水素が関与して脆化し、割れに至る現象として水素侵食 (Hydrogen Attack : HA) と水素誘起割れ (Hydrogen Induced Cracking : HIC) がある。前者は、石油精製装置などに高温高圧水素環境下で生じ、後者は、サワーガスなどの硫化水素 (H₂S) を含むガスのパイプラインなどに150以下の状態で生じる。いずれも材料表面に局部的なふくれ (Blister) をともなうことが多い。

(1) 水素侵食

水素侵食には脱炭とミクロ割れが認められる。割れは、主として粒界に生じ、鋼中の非金属介在物にそって発達する。水素侵食に影響する主要環境因子は温度と水素であり、一般に温度が高いほど、また、水素分圧が高いほど脆化し、割れやすくなる。一方、材料因子としては、安定な炭化物を生成する元素の添加は脆化を防ぐのに有効であり、Cr < Mo < W < V < Ti < Zr < Nbの順に耐水素侵食性の向上に寄与するといわれている。

水素侵食の防止には、鋼板の使用環境下の温度、水素分圧に応じて、前出のNelson's Curveをもとに、鋼板を選択することが必要である。

(2) 水素誘起割れ

水素誘起割れは、腐食などの電気化学的過程で発生した水素が鋼中に侵入し、内在する介在物などの界面で原子状水素から分子状水素に転換し、割れに至るものと考えられている。

HICにおよぼす環境因子としては、H₂S濃度、pH、水分、応力などがあり、また、材料因子としては、非金属介在物、偏析、化学成分などがある。

これらの各種要因に対する系統的な研究は少なく、また、その影響の程度も不明な点が多いが、HICの防止対策は環境条件の制御、材料の改善の両面から行われている。

環境条件の制御には、脱水、脱硫、液相pHの上昇などが効果があるが、インヒビタの添加も広く用いられている。また、材料面からの改善では、介在物の低減がもっとも効果がある。

7・3・3 脆性破壊

脆性破壊は、文字が示すとおり、ほとんど塑性変形をともなわず弾性限以下の低荷重で破壊する現象をいい、鋼構造部材に切欠きなどの応力集中源がある低温に冷却されている荷重が加わるなどの条件が重なった場合に生じる。

この問題が大きく取り上げられはじめたのは、1940年ごろヨーロッパで冬期に溶接橋が脆性破壊したことが発端といえる。その後第二次世界大戦中に、アメリカのリバティ型船の事故をはじめとする各国での溶接船の事故でその原因究明が進められ、溶接欠陥を主体とする切欠きと低温が主要因であることが判明し、これらの研究をベースに脆性破壊特性評価のための試験法が次々と開発された。

その代表的な試験法が2mmVノッチシャルピー衝撃試験であり、簡便な方法であることから、材料の靱性を評価するためのもっとも一般的な試験法として現在広く用いられており、データの蓄積も多い。

また、破壊力学にもとづき、材料の破壊靱性を評価するためのより実構造物に近い試験法として、ディーブノッチ試験、二重引張試験、ESSO試験、CTOD試験などが開発され、さらに、溶接継手部については、残留応力の効果も考慮した十字継手中央切欠き付広幅引張試験、角変形や目違いを付与した表面切欠き付広幅引張試験なども開発された。

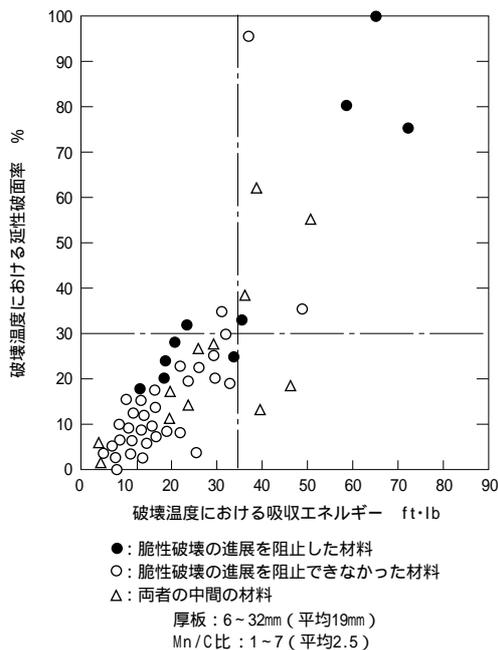


図74 破壊温度における延性破面率とVノッチシャルピー吸収エネルギーとの関係⁷⁰⁾

一方、各種規格の2mmVノッチシャルピー衝撃試験における評価基準値は、上記リパティ型船の事故にもとづいて実施された使用鋼板の靱性調査結果から、吸収エネルギー（vE）が21J（15ft-lbf）以下の場合に損傷が多いこと、また、1955年、IIWがフランス船の事故例を調査した結果から27J（20ft-lbf）の値が得られたこと、さらに、1958年にロイド船級協会が行った損傷船の調査結果から、図74に示すように、47J（35ft-lbf）が脆性破壊発生防止の目安となることが判明したことなどを参考に決められているものが多い。

破壊靱性の評価は、「き裂発生特性」と「き裂伝播停止特性」の二つの要素に分けられるが、これらの特性は、構造物の製作、使用条件によって異なるため、より構造物に近い条件での材料特性を詳しく調べる場合には、簡便なシャルピー試験に加えて、実構造物に近い大形試験を実施することが望ましい。

大形試験の代表的なディープノッチ試験および表面切欠き付広幅引張試験における温度と応力拡大係数(K_{IC})との関係を図75に示す。

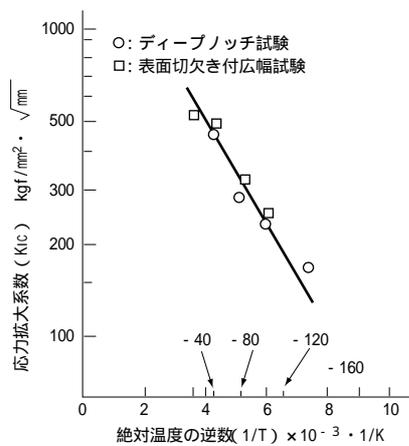


図75 大形脆性破壊試験の結果⁷¹⁾

図中のK_{IC}は次式で整理している。

$$K_{IC} = K_0 \exp(-kT)$$

K₀およびkを求めることにより、任意の温度におけるK_{IC}を計算により求めることができる。

K₀およびkは、材料定数であるが、製作時の加工履歴、熱履歴および使用中の環境条件によって異なるので、いずれの試験を採用するにあたってはその鋼板の受ける各種履歴を考慮し、供試材にあらかじめ、これらの履歴を加味したもので試験される場合が多い。

8 おわりに

本編は、厚板を使用するにあたり必要と思われる知識をとりまとめたものであります。紙面の都合もあり、記述内容に意をつくしえなかったところもありますが、皆様方の日常業務に多少なりともお役にたてば幸甚に存じます。

参考文献

- 1) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.164
- 2) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.12
- 3) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.19
- 4) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.23
- 5) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.24
- 6) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.18
- 7) 日本鉄鋼協会; 改訂厚板マニュアル、昭和62年、P.11
- 8) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)(1)・圧延基礎・鋼板、P.253
- 9) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)(1)・圧延基礎・鋼板、P.293
- 10) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.8
- 11) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.23
- 12) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.24
- 13) 日本鉄鋼協会; 第36・37回西山記念技術講座「厚鋼板の材質上の諸問題」、昭和50年、p.43
- 14) 日本道路協会; 道路橋示方書・同解説、平成2年、P.107
- 15) 土木学会; 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書別冊4、昭和48年、P.8
- 16) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.53
- 17) 鋼材倶楽部; 耐候性鋼板(改訂版)、昭和52年、P.7
- 18) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.75
- 19) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.54
- 20) 日本海事協会; 会誌No.193、1985、P.22
- 21) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.113
- 22) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.113
- 23) JSSC; 新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年、P.113
- 24) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.81
- 25) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.190
- 26) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.70
- 27) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.72
- 28) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.72
- 29) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.57
- 30) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.58
- 31) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.75
- 32) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.82
- 33) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.83
- 34) 日本鉄鋼協会; 新版鉄鋼技術講座・3・鋼材の性質と試験、昭和51年、P.243
- 35) API; API Publication 941、1983、P.D-6、D-7
- 36) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.86
- 37) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.86
- 38) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.87
- 39) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.87
- 40) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.88
- 41) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.88
- 42) AIME; Transactions of the Metallurgical Society of AIME、242(1968) P.14
- 43) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.90
- 44) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.92
- 45) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.92
- 46) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.56
- 47) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)(1)・圧延基礎・鋼板、P.336
- 48) 日本鉄鋼協会; 厚鋼板の形状及び外觀きず用語の定義 ISIJ TR005 - 1987
- 49) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.135
- 50) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.463
- 51) 日本規格協会; JIS G 0801 - 1993「压力容器用鋼板の超音波探傷検査方法」
- 52) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.465
- 53) 日本鉄鋼協会; 鉄鋼便覧(第3版)・鉄鋼材料、試験・分析、P.465
- 54) 日本塑性学会; プレス加工便覧
- 55) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.40
- 56) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.93
- 57) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.90
- 58) 日本鉄鋼協会; 新版鉄鋼技術講座・3・鋼材の性質と試験、昭和51年、P.143
- 59) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.106
- 60) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.105
- 61) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.66
- 62) 日本溶接協会; WES3009「溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性」解説、P.5
- 63) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.69
- 64) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.108
- 65) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.71
- 66) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.41
- 67) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.61
- 68) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.75
- 69) 日本溶接協会; 高張力鋼溶接の実際、1984、P.76
- 70) 金属の割れ・破壊対策研究会; 金属の割れ・破壊、昭和55年、P.1031
- 71) 土木学会; 新体系土木工学・37・構造用鋼材、1981、P.54