



の繰り返し数（パス数）は20分の1程度に低減され、その分、施工効率も大幅に向上した。

溶接の入熱量は、構造物のデザインと使用環境（力のかかり具合、周辺の温度など）を勘案して決められる。最も低温の環境（約-50℃）の中で強い力を負荷される石油掘削用の海洋構造物（写真1）は、1センチあたり10万ジュール以下の入熱量で溶接される。一方、周囲の温度がせいぜい0℃程度までしか下がらない高層ビル（写真2）では100万ジュール近い入熱量で溶接される場合もある。現在では、構造物が使用される環境の温度と、厚板の降伏強度に応じて、さまざまな入熱量で溶接ができるようになったが（図3）、ここまでくるとは、溶接部の金属組織制御という大きなハードルがあった。

## 溶接部の金属組織を微細に保つ「種」を仕込む

「TMCP※1）のような高度な材質造り込み技術で製造された厚板は、結晶粒が微細で靱性も高い。しかし、溶接のような高温状態にさらされると、結晶粒が成長して粗大化してしまい、せっかく造り込んだ金属組織が元の本阿弥になってしまう。大入熱の溶接になればなるほど高温状態からゆっくり冷えるため、結晶粒も粗大化し、靱性の低下も大きくなる。大入熱溶接による靱性の低下をいかに克服するかは、厚板の利用加工の最大のニーズだ。

また、一口に溶接部（HAZ※2）と言っても、溶接金属からの距離によってさらされる温度が異なる。一番問題となるのは、溶接中に厚板が最も高温にさらされる溶ける寸前の部分（溶融線）であり、この位置の結晶粒が最も粗大化して、靱性が低下するため、脆性破壊の発生の危険性が一番高まるのである（図4）。

そこで、この溶融線近傍でも、結晶粒を粗大化させず、微細な金属組織と高い靱性を維持するために、製鋼段階（溶鋼）において、溶接部の金属組織を微細に保つための「種」をあらかじめ仕込んでおくのである。この種は、厚板工場での製造過程では何も作用しないが、溶接されて鉄が溶ける寸前の高温（約1,400～1,500℃）になると、初めてその効果を発揮する（図5）。

## 邪魔者だった酸化物を制御して結晶を微細化

溶接時の結晶粗大化を抑制する「種」の研究は1970年代に本格化した。まず、高温でも比較的安定で、固体中での析出を制御しやすいチタンの窒化物（TiN）を、結晶の粒界や結晶の内部に微細に分散させることにより、後述する「ピン止め効果」や「粒内変態」の機能を持つ厚板が実用化された。しかし、時代とともにさらなる大入熱溶接が指向されるようになると、窒化物では溶接熱で溶けてしまうため、高温でも安定な新たな種の発見が必要となった。

新日鉄は1990年代に、そのような新たな種としてチタンの酸化物を積極的に活用した「チタンオキシド（TiO）鋼※3）」を開発した。酸化物は高温の溶鋼の中で生まれるので、溶接で高温にさらされても安定である。しかし、これとって使

い道がなく、当時は邪魔者と考えられていた。これを積極的に活用して鋼材を高機能化しようというのが、当時全社で精力的に研究されていた「オキシドメタラジー」の概念であり、TiO鋼はこの概念を最初に具現化した商品である。

溶接で高温にさらされて成長し、粗大になったオーステナイトの結晶粒が冷える過程で、結晶構造の異なるフェライトの結晶が生まれる（変態）。通常はオーステナイトの粒界からしかフェライトが生まれられないため、少数のフェライトが成長して粗大化し、鉄の中を埋め尽くしてしまう。このような金属組織の靱性はきわめて低い。しかしチタンの酸化物を結晶

図3 構造物の使用温度、強度と溶接入熱量の関係の例

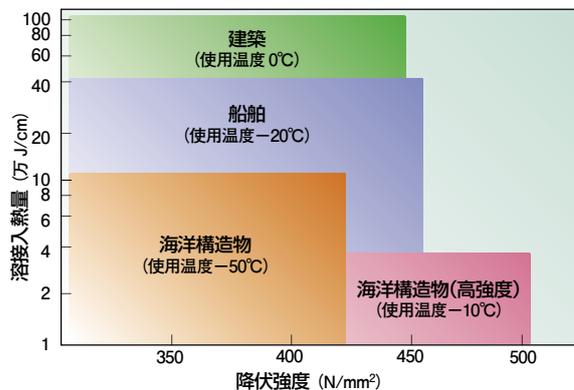


図4 溶接熱による金属組織の変化

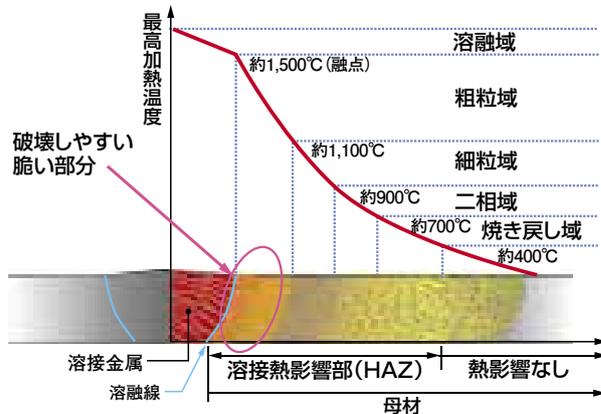
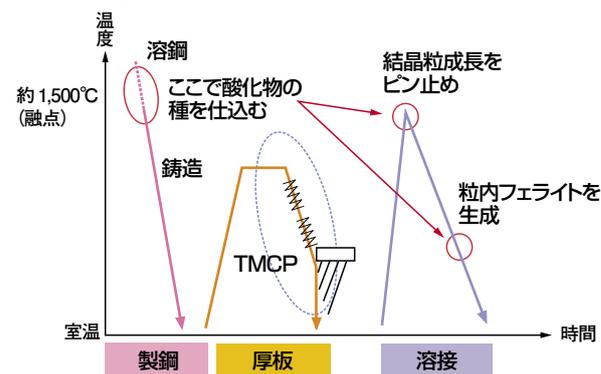


図5 高温で仕込んだ酸化物の種を高温の溶接で使う



※3 オキシド：酸化物

粒の内部に分散させておくと、それをきっかけ(核)として新たなフェライトの結晶(粒内フェライト)が生まれるようになり、結果的に元の大きなオーステナイトの結晶粒を分断する形で微細な金属組織が得られる。埋め込んだ種(TiO)から花びらのように複数のフェライトの結晶粒が生成し(写真3)、元の結晶の中を埋めつくすのである。

## 溶接部の金属組織制御技術の集大成 —「HTUFF® 鋼 (エイチタフ鋼)」

建築構造物の溶接部の靱性(衝撃試験の吸収エネルギー)は、従来は0℃で27ジュール以上あることが求められていた。TiO鋼は、建築分野で使われる可能性のある最大の入熱量の100万ジュールで溶接をした場合でも、27ジュールの靱性をクリアした。しかし、阪神淡路大震災以降、さらに高い70ジュールの靱性が要求されるようになると、TiO鋼の粒内変態のみでは十分でないケースも出てきた。ますます過酷化する大入熱溶接に対応するため、元のオーステナイト結晶粒の微細化への挑戦が必要となった。

技術開発のターゲットは、「ピン止め効果」による結晶粒の粗大化抑制を「微細な酸化物」で実現することにあった。溶接で高温にさらされると、オーステナイトの結晶粒界は膨れるように容易に移動し、結晶粒は粗大化してしまう。しかし、鉄の中に窒化物や酸化物の粒子がたくさん分散していると、これらの粒子が結晶粒界の移動をピンで止めるように抑えてくれ、オーステナイトの結晶粒は微細なまま保たれる(図6)。このような粒子一つ一つが、小さくかつたくさん分散しているほど、オーステナイトの結晶粒も小さく保たれるのである。幸い新日鉄には、TiO鋼の開発を通して、高温で最も溶けにくい(融点が高い)酸化物を制御する技術が蓄積されていた。この酸化物自体の数を増やし、かつ微細化できれば、強力な

ピン止め効果を発揮させることができる。このような、鋼中で微細に分散しやすい酸化物を探求した結果、マグネシウムやカルシウムが有効であることを見出した。さらに、これらの微細な酸化物をたくさん含む鋼片を現場で大量に生産できるように製鋼条件の最適化を図った結果、1999年に「HTUFF® 鋼」が完成した。TiO鋼で使われていた酸化物の大きさは数ミクロン(※3)だったが、HTUFF® 鋼で使われる酸化物の大きさはわずかに数十ナノメートル(※3)である。これはバスケットボールとパチンコ玉ほどのサイズの違いがある。10年間にわたる技術開発により、制御可能な酸化物の大きさは100分の1以下になったのである。

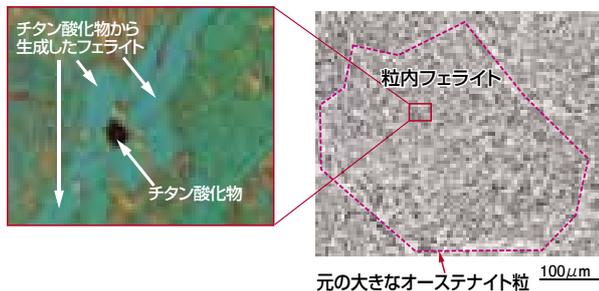
同じ条件で大入熱溶接をした場合、従来鋼と比べて、HTUFF® 鋼の溶接部の結晶粒は非常に微細で、溶接部の靱性も飛躍的に向上した(図7)。

20世紀後半に、窒化物で結晶粒の成長を抑えることから始まった溶接部の金属組織微細化への挑戦は、当時邪魔者だった酸化物を活用した粒内変態技術を経て、現在では、さらに微細な酸化物が強力なピン止め効果を発揮するHTUFF® 鋼の開発に結実した。この一連の開発は、より安全で信頼性の高い構造物を実現するために、お客様と一体となって厚板の利用加工技術の向上を目指した新日鉄の技術開発の歴史でもある(写真1、2の海洋構造物、高層ビルにはHTUFF® 鋼が使われている)。

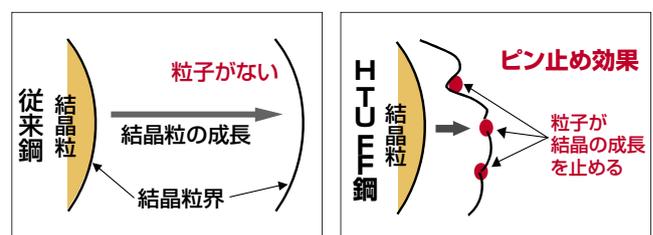
## 「CLC」と「HTUFF®」を組み合わせて安心・安全を提供

溶接構造物の安全性を確保するためには、「厚板(母材)」と「溶接部」の両面から安全を保証する必要がある。たとえ構造物に予想外の力が加えられても、①脆性破壊によるき裂を発生させない、②溶接部からき裂が生じたとしても、溶接部の

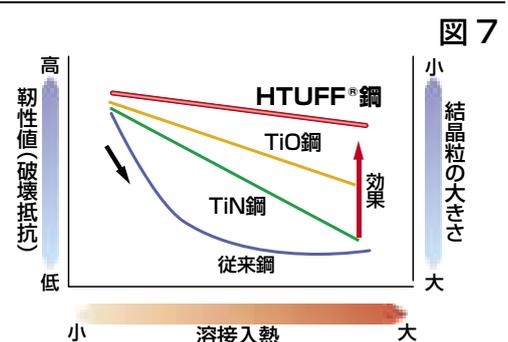
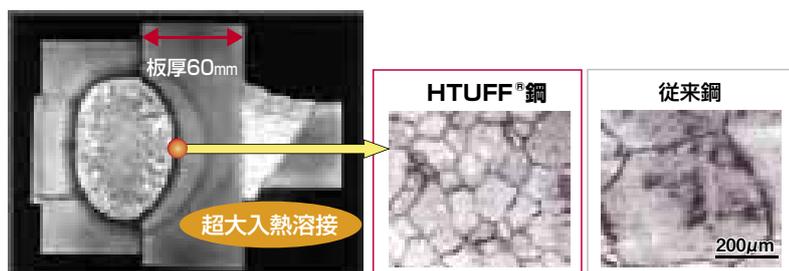
チタン酸化物から生まれたフェライト 写真3



ナノ粒子による結晶粒成長抑制 図6



HTUFF® によるHAZ靱性向上



※3 ミクロン：1,000分の1ミリ。 ナノメートル：100万分の1ミリ。

中でそのき裂を止める、③例えき裂が溶接部の外に進んでしまっても、母材でそのき裂を止める、という二重三重の安全対策が求められる(図8)。

新日鉄では、「CLC<sup>(※4)</sup>」「HIAREST」(2007.6月号 VOL.33参照)のような母材靱性の向上技術と、「TiO」「HTUFF<sup>®</sup>」のような溶接部継手靱性の向上技術を組み合わせて、使用環境にあった最適な厚板とその溶接法をお客様に提供している。厚板とともに安心・安全もあわせて提供しているのだ。

厚板の技術開発が目指すものは、鋼材の品質だけではなく、溶接のしやすさや溶接部の靱性のように、お客様の利用価値

向上までを視野に入れた「一貫したものづくり」だ。新日鉄は、造船、エネルギー、建設、機械などの各分野のお客様から、その時代時代でも最も難しい課題を投げかけられ、全力でそれに応えてきた。このようなお客様とのすり合わせの積み重ねにより、CLCやHTUFF<sup>®</sup>の適用範囲も大きく広がった。現在、それぞれの分野で、最も強度が高く大入熱溶接が可能な厚板が実用化されている(図9)。

今後も、構造物の機能高め、安全性と信頼性を向上させる厚板の開発は続く。そして、そのベースとなる金属組織制御・微細化への挑戦に終わりはない。

## 無限の種類の個性をもつ鉄を多様なプロセスで鍛える

お客様や製造現場からどんどんハードルの高い要求がくる。それに応えようともがいていると、次々と新しい現象が見えてくる。幸い解析機器やシミュレーション技術の進歩も著しいので、それらを使って調べていくうちに、こういうことだったのか、と初めてわかる。研究はこの繰り返しです。私たちは鉄という素材のもつ無限ともいえる可能性について、まだほとんどわかっていないのではないかと感じています。

今回の厚板シリーズでとりあげたTMCP(CLC)は、圧延でごりごり延ばし、冷却できゅっと冷やすという鉄のスパルタ教育です。大事なことは教育される鉄の身になってプロセスを考えることで、そうすれば鉄は必ず期待に答えて、強くタフに育ってくれます。マイクロアロイや合金元素の添加は鉄の個性を変えます。私たちは無限の種類の個性をもった鉄を、多様なプロセスで教育できるわけですから、わかっていないことだらけなのは当たり前かもしれません。史上最大の船で物を運びたい、2,000メートルを超える

深い海にパイプラインを通したい、100年間メンテナンスフリーの橋をかけたい、といったお客様からの要求に応えようとする日々の積み重ねが技術を進歩させてきました。新しく難しい課題がある時には、いつも当社に声をかけてもらったという事実が、当社の技術先進性の源であると思います。これからも、真っ先に相談してもらえるように、世界で誰よりも早く「わかりました」と言えるように努力を続けます。

監修 新日本製鉄(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所  
鋼材第二研究部長 主幹研究員  
吉江 淳彦 (よしえ・あつひこ)

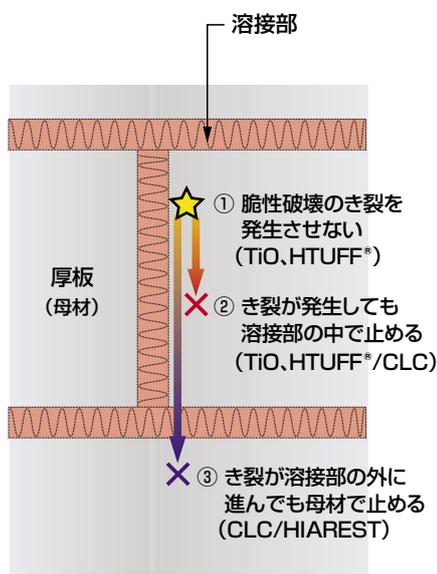
プロフィール  
1955年生まれ、東京都出身。  
1980年入社。

厚板、線材、形鋼、鋼管、薄板の研究開発  
および技術開発企画業務に従事。

2005年より現職。



## 溶接構造物の脆性破壊防止の考え方 図8



## 新日鉄のCLCとHTUFF<sup>®</sup>の適用状況 図9

強度クラス	500	600	700	800	900	1,000~
造船	CLC+HTUFF <sup>®</sup> (超大型コンテナ船)					
海洋構造物	CLC+HTUFF <sup>®</sup> (北海石油掘削リグ)					
ラインパイプ	CLC+HTUFF <sup>®</sup> (超高強度ラインパイプ)					
建機・産機	CLC (明石大橋, 大型クレーン車)					
建築・土木	CLC+HTUFF <sup>®</sup> (超高層ビル)		CLC (水力発電用水圧鉄管)			
タンク・圧力容器	CLC (球形タンク)					

※4 CLC：新日鉄のTMCPプロセスの名称(Continuous on-Line Control Process)(2007.6月号 VOL.33参照)