

# 溶接部の破壊に強い厚板 HTUFF<sup>®</sup>



トロフィー

## 画期的ナノテクノロジーが市村産業賞受賞

2004年4月28日、新日鉄が開発した「HAZ細粒高靱化技術：HTUFF」が「ナノ粒子を利用した溶接部高靱性高張力厚鋼板」で第36回市村産業賞(貢献賞)を受賞した。高層ビルなど大型構造物で使用される厚鋼板の溶接部の特性は、構造物の安全性・信頼性を左右する非常に重要なポイントとなる。「HAZ細粒高靱化技術：HTUFF」は、溶接時、熱影響部(HAZ)にもろさが発生する課題を克服。高能率な「大入熱溶接」でも、溶接部が壊れにくい特性を持つ。大型溶接構造物の安全性・信頼性向上、建造コスト低減、輸送効率向上などに貢献するHTUFFの開発経緯と鋼材開発史上困難とされた超高温状態で多量のナノ粒子を分散させるメカニズムについて紹介し、その強みを探る。

### 製鋼部門からの一貫製造体制を確立

船舶、高層ビル、橋梁、海洋構造物、パイプラインなど溶接構造物の大型化に伴い、一度で一気に溶接できる能率の高い「大入熱溶接」が可能で、強度と靱性とを併せ持つ厚鋼板の開発が強く求められてきた。鋼材を溶接する際に課題となるのは、溶接部に近い熱影響部(HAZ)。溶接によって厚鋼板が1,400 以上の高温状態で数十秒加熱されるとHAZの金属組織が粗大化し、もろく壊れやすくなる(靱性が低下する)という現象だ。

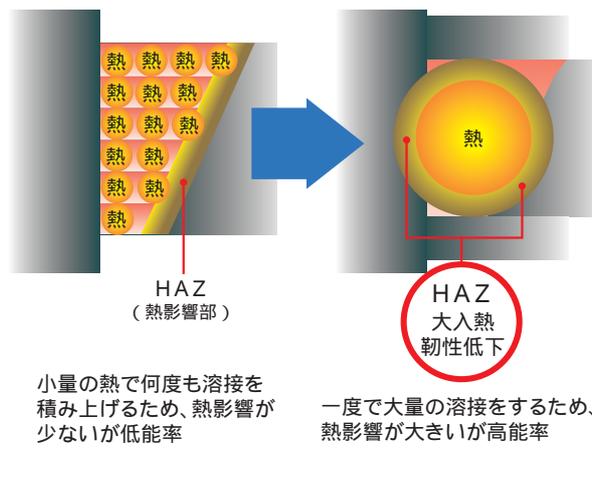
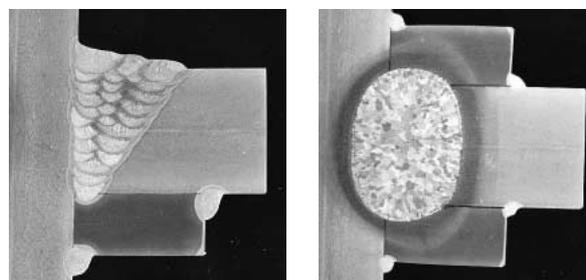
このため、構造物の安全性・信頼性を重視する場合には、「大入熱溶接」ではなく、少しずつ溶接を積み上げる溶接手法「小入熱溶接」が取り入れられてきた(図1)。しかし、「小入熱溶接」では板厚が厚くなるほど何度も溶接作業が必要となり、能率の低下は避けられない。そこで、HAZに大きな熱ダメージを与える過酷な大入熱溶接でも靱性が低下しない厚鋼板のニーズが高まってきた。

新日鉄は、熱影響部が1,400 以上の超高温状態でも結晶粒の成長を抑制する数多くの酸化物や硫化物のナノ粒

図1 大入熱溶接と小入熱溶接の比較

小入熱溶接

大入熱溶接



子を高密度に分散させることに成功。HAZの靱性を飛躍的に向上させた「HTUFF」を開発した(図2)。

「新現象の発見から実験室での小規模溶解炉でのつくり込み、そして厚板部門における研究開発だけではなく製鋼部門の現場と密に連携することで1チャージ300t規模の大量製造体制を確立しました」と技術開発本部鉄鋼研究所鋼材第二研究部主任研究員の児島明彦は開発当時を振り返る。

商業生産を開始した1999年以降、ユーザーニーズに応えたHTUFFは、すでに国内外の大型構造物において28万t以上の採用実績がある(P4、図8参照)。

HAZ (Heat Affected Zone) : 溶接時の熱影響部

HTUFF (Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles) : 新日鉄のHAZ細粒高靱化技術の登録商標(エイチタフ)

## 金属組織制御のトップランナー、新日鉄

新日鉄では、長年HAZの金属組織制御の開発研究に取り組んでいた。1970年代にはTiN steel (チタン窒化物を利用)、1990年代にはTiO steel (チタン酸化物を利用)そして第3世代のNew steelとして今回のHTUFFが開発された(図3)。HTUFFの開発は、1990年代初期に社内に蓄積された先人の知見を足掛かりとしてHAZの結晶粒微細化制御の基礎研究を開始、足掛け10年程度で製品化を実現した。

開発過程で発生した阪神・淡路大震災(1995年)では、建設物の溶接部が壊れる事例もあり、鋼材に求められる要求特性はさらに厳格になった。この時期、新日鉄では、実験室での酸化物・硫化物のナノ粒子の分散制御に成功している。

「理論上、金属材料は、小さな粒子を数多く分散させるほど強度や靱性が上がる等、良い特性が出ることは知られていました。しかし、実際に数十秒という長時間にわたり超高温のもとで安定なナノ粒子を多く分散させることが難しかったのです」と技術開発本部大分技術研究部主任研究員の皆川昌紀は振り返る。

その後、溶鋼中でのナノ粒子生成機構について基礎研究を行い、1990年代後期に、製鋼工場の300t規模の転炉において、大量生産を可能にする製造技術の確立に取り組んだ。

「数十kg単位の溶鋼から300t規模の転炉で同じ効果を安定的に再現しなければなりません。製鋼工場での数回の試行錯誤の後、安定製造条件を確立しました」と技術開発本

部環境・プロセス研究開発センター製鋼研究開発部主任研究員の清瀬明人は、製鋼部門での現場実験の苦勞を語る。

1990年代、新日鉄では全社をあげて新しい金属組織制御技術を重点テーマに取り組んでいた。このような大きな流れの中で、今回のHTUFFについても、君津、名古屋、大分の3製鉄所で実用化のための大規模な試験が行われた。

「複数の製鉄所で1つのテーマに取り組み、競争しながら情報交換し、一つの技術に収斂(しゅうれん)されていきました。その結果、大規模な研究開発を遂行することができました。また、全く別の目的で行った実験から、細粒化のポイントをつかみました」(皆川)。複数の研究テーマが相互作用によって解決の糸口となったと言える。

## 超高温状態でのナノ粒子の高密度微細分散 “熱”との戦い

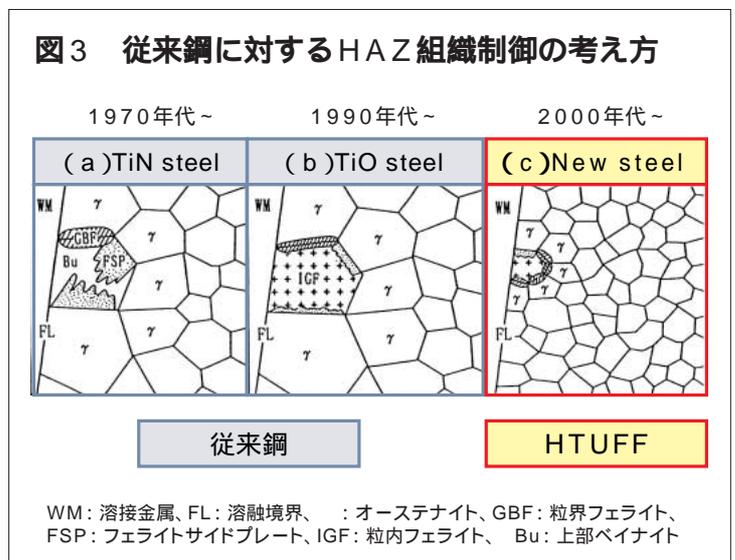
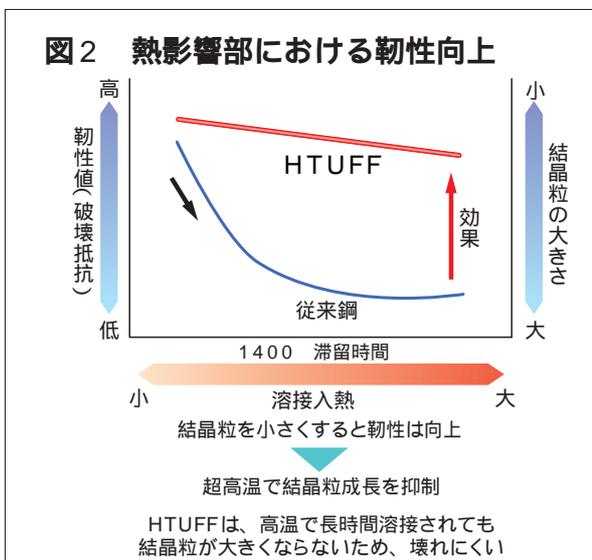
鋼材は結晶の集合体だ。この結晶粒の大きさが、鋼材の特性に大きな影響を及ぼす。熱を加えると結晶粒は大きくなる。特に鉄の溶融温度に近い1,400℃の超高温に長時間置かれると、結晶粒が急激に成長する。溶接の場合、



技術開発本部 鉄鋼研究所  
鋼材第二研究部  
主任研究員 児島 明彦



技術開発本部  
大分技術研究部  
主任研究員 皆川 昌紀





HTUFFが採用された海洋構造物 石油や天然ガスを掘削する海洋構造物へのHTUFF適用で、建造コストを大幅に削減

HAZがこのような超高温状態に数十秒置かれるため、鋼の結晶粒は粗大化してもろくなる。

そこで、結晶粒の粗大化を防ぐために酸化物や硫化物の微細な粒子を数多く分散させ、結晶粒の成長を“ピン止め（抑止）”する（図4）。

通常、低温の世界では、鋼にナノ粒子を分散させることは難しくない。しかし、1,400 という超高温では鋼中に存在する大概の微細粒子は溶けてなくなってしまふ。

「酸化物や硫化物はHAZのような超高温でも溶けにくいことは従来から分かっていたが、粗大で個数が少ないために“ピン止め効果”が思うようには得られませんでした。そこで、熱に強い溶けにくい粒子を“微細に数多く”分散させるために酸素(O)や硫黄(S)と化学的な親和力の強いマグネシウム(Mg)やカルシウム(Ca)などに着目しました（図5）」（児島）

マグネシウム(Mg)やカルシウム(Ca)などを鋼の中に適正に含ませることで、従来はミクロンオーダーであった粗大な粒子をナノオーダーの超微細な酸化物や硫化物へと変身させ、超高温でも“ピン止め粒子”が微細かつ高

図4 超高温下でのナノ粒子による結晶粒成長抑制

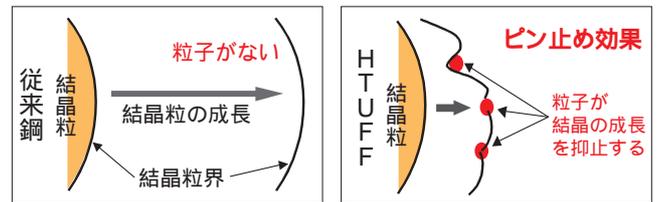


図5 ピン止め粒子分散制御の考え方

ピン止め粒子の性質		鋼中への分散性	
		粗大分散	微細分散
熱的な安定性	溶けて消失しやすい	(低温長時間保持によって粗大化した炭化物や窒化物)	炭化物 Fe <sub>3</sub> C, VC, TiC, NbC 窒化物 AlN, TiN
	溶けにくい	酸化物 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 硫化物 MnS	OやSとの親和力の強いMgやCaなどに着眼して酸化物・硫化物を微細分散化
		従来技術	HTUFF

密度に存在することが可能になった（図6、7）。

「熱との戦いでした。大規模な生産ラインで安定的に期待される効果を実現するのは非常に難しいことでした」

児島は製鋼現場での超高温プロセスでナノ粒子を造り込み、厚鋼板を溶接する時の超高温状態で利用することの難しさを“熱との戦い”と表現する。

また、製鋼現場における試行錯誤について清瀬は次のように語る。

「実験室での数十kgというオーダーの溶鋼では、攪乱要因が少ないのですが、実際の生産ラインでは大気やスラグの影響があり、“混ざり方”も不均一になりますから難易度が格段に増します」

さらに、厚鋼板のさまざまな用途に向けてHTUFFを新商品として完成させる段階では、お客様や構造物の種類によって溶接方法や使用環境が変わるため、それに合わせ



技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター 製鋼研究開発部 主任研究員 清瀬 明人

図6 新しい粒子と従来粒子のサイズ比較

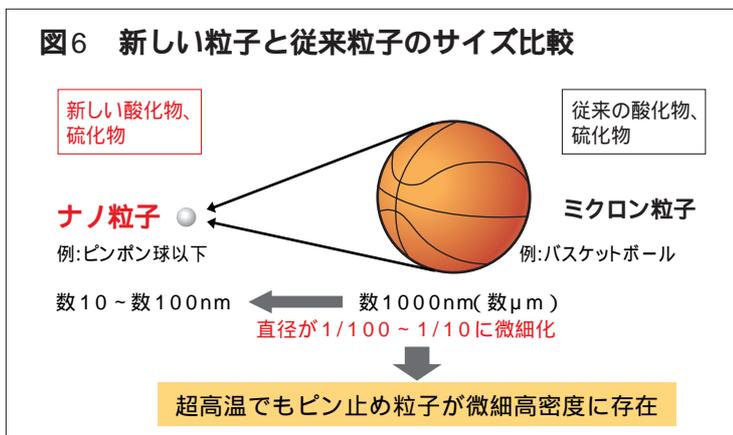
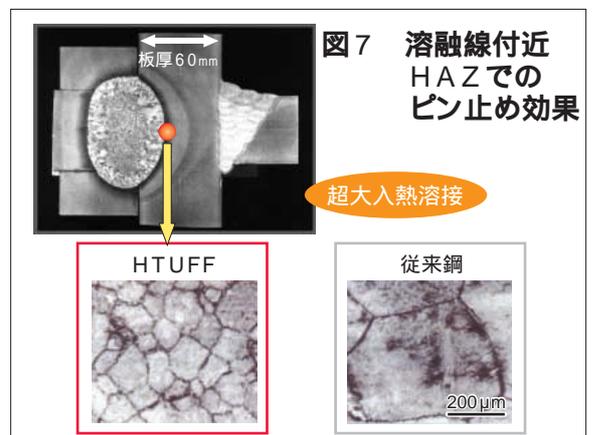


図7 溶融線付近 HAZでのピン止め効果



たきめ細やかで迅速な商品化を厚板営業部と厚板工場が中心になって推進した。また、HTUFFに適合する新しい溶接材料の開発は接合研究センター、特性最適化のためのナノ粒子調査は解析科学研究部、構造部材としての性能評価は鋼構造研究開発センターや鋼材第二研究部破壊研究グループ、広範かつ多数の知的財産化は特許部門、微量元素の迅速分析技術は分析部門が、それぞれに重要な役割を担った。

「まさに、新日鉄の総力を挙げた連携体制のもとでHTUFFの商品化に邁進しました」(児島)

## 安全性と溶接能率向上に 貢献する高機能商品として定着

大入熱溶接でも溶接部がもろくならないHTUFFの開発により、建造物の溶接能率と安全性が飛躍的に向上した。例えば造船では、溶接施工の効率化が実現。また、高層ビルでは、小入熱溶接と比較して溶接時間が短縮される大入熱溶接を使用することで、鉄骨柱の製作工期を大幅に短縮、高能率溶接でも高い耐震安全性を維持することが可能となった。最近では海洋構造物の需要が高まっている(図8)。

「近年、海底エネルギー資源の開発が盛んに行われ、北海やカスピ海などの海洋構造物への需要が増えています」(児島)

HTUFFを高張力厚鋼板に適用することにより、石油や天然ガスを掘削する海洋構造物の建造費用を大幅に削減できるという。

こうして着実に実績を積み、ユーザーでの溶接能率と安全性・信頼性に貢献する高機能商品として定着したことが、今回の市村産業賞で高く評価された。今後はどのようなビジョンで研究開発に取り組んでいくのだろうか。

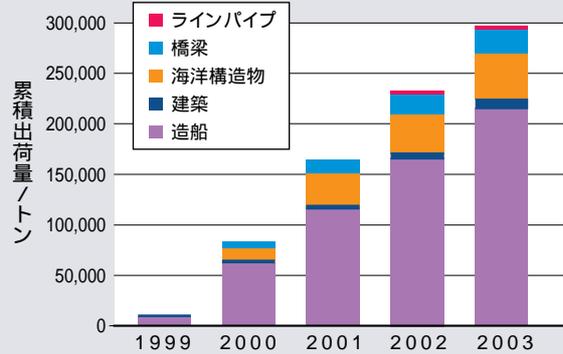
「今後、HTUFFの性能をさらに高度化するにあたり、製鋼プロセスでも新たな課題が出てくると思います。そのときには、300t規模で安定して製造する技術の開発を進めていきたいと思います」(清瀬)

「今後、今の性能をブラッシュアップしていくことや新たなメカニズムを付与し、“さらなる微細化”を目指すこと等を検討していきます。今回のHTUFF開発の経験から、製鋼、厚板といった分野を横断する境界の技術領域には、まだ重要な研究テーマがあると改めて認識しました。長期使用に耐色あせにくい、足跡として残るような技術を目指します」(児島)

「社会に役立つ喜ばれる鋼材を世の中に送り出していくという思いで、今後も新たな技術を生み出していきます」(皆川)

図8 開発鋼の普及状況

分野ごとの出荷実績 積出荷量282,000トン以上



### 採用実績

造船	5,500TEU(個)大型コンテナ船 84,000m <sup>3</sup> 級大型LPG運搬船、同級LNG運搬船 ほか
海洋構造物	ティモール海/BAYU UN DAN プロジェクト 北海/GRANE プロジェクト 北海/KVITEBJORN プロジェクト カスピ海/ACG プロジェクト メキシコ湾/THUNDER HORSE プロジェクト ほか
建築	丸の内1丁目1街区計画C棟(仮称: JR 本社ビル跡地) 丸の内1丁目1街区計画B棟(仮称: JR 本社ビル跡地) 丸の内2丁目明治生命館(下記写真) 大阪証券取引所 赤坂1丁目再開発(興和不動産ビル)ほか
ラインパイプ	サハリン島/SAKHALIN- プロジェクト



HTUFFが採用された高層ビル 明治生命館(東京・千代田区)