

社会基盤を支える鉄鋼材料の進化

三田尾 眞 司*

1. はじめに

私たちの現代都市生活を支える社会基盤用鋼材に求められる第一の機能は、構造物の安心・安全の確保であり、必要な強度とともに、破壊に対して抵抗を有すること、すなわち、十分な靱性が求められる。

近年、輸送の効率化のためのコンテナ船の大型化、大空間を可能にする建築構造物の大型化など、構造物の大型化が進み、鋼材も厚肉・高強度化している。しかし、高強度化は、一般には靱性の低下を招く。また、厚肉・高強度化を達成するためには、通常は多くの合金元素の添加が必要となり、溶接に際して予熱が必要になるなど、溶接施工性を大きく低下させる。また、鋼材が厚肉であるほど、その溶接には多大な労力を要し、厚肉鋼材を高効率で溶接する大入熱溶接を用いると、母材はおびただしい熱影響を受け、組織が粗大化して靱性が劣化してしまう。このように、鋼材の厚肉・高強度化は、靱性の確保という観点からは不利な方向性である。現実的に構造物の大型化が可能になっている背景には、厚肉・高強度でも、十分な靱性を確保できる鋼材の開発がある。

表1に、近年開発された社会基盤用鋼材の例を示す⁽¹⁾。特徴・機能としては、高強度、高靱性、優れた溶接継手性能、特に大入熱溶接が可能な鋼材の開発に関するものが多い。また、それを達成する製造プロセスとしてはTMCP(加工熱処理: Thermo-Mechanical Controlled Process)が多く、近年の鋼材開発に対する寄与の大きさが伺われる。本稿では、TMCPと大入熱溶接HAZ(熱影響部: Heat Affected Zone)の組織制御技術の進歩について概説するとともに、耐破壊性能に関わる鋼材開発例を中心にポイントを述べる。最後に、激動と言えるこの10年間に起きた社会構造用鋼材に関わる出来事を振り返り、今後の展望を考えたい。

2. TMCPの進歩

図1に、厚鋼板製造プロセスにおける連続化の足跡を年代とともに示す⁽¹⁾。圧延素材のスラブ製造は1960年代後半から連続鑄造の適用が進み、1980年代中ごろには連鑄比率が90%超に達した。

厚板圧延プロセスにおける連続化の第一歩は、焼きならし(焼準)(N: Normalizing)に対する制御圧延(CR: Controlled Rolling)の開発である。Nは900°C程度のオーステナイト(γ)域に加熱後放冷し、微細 γ から変態した微細な組織により、強度および靱性を向上させるプロセスである。CRは圧延温度を一般に低温側に制御することにより再結晶 γ 粒を微細化し、その後の変態生成組織を微細化する手法である。NとCRの大きな違いは、CRの場合は圧延条件の制御によって、冷却前の γ の状態を制御する自由度があることである。冷却前の γ の制御は圧延後に加速冷却(AcC: Accelerated Cooling)を行う場合に更に重要となり、ベイナイトなどの低温変態組織の活用と微細化により、一層の高強度、高靱性化を図ることができる。TMCPは、CR、AcCをオンラインで組み合わせた組織制御プロセスの技術体系であり、本格的に普及したのは、世界で初めて日本において厚板加速冷却設備

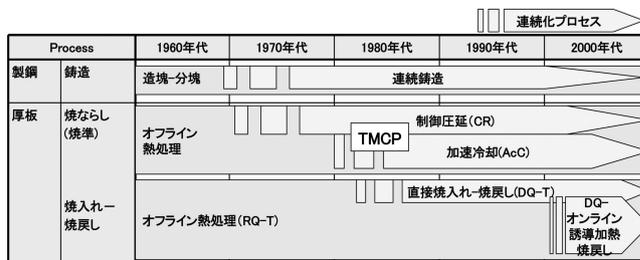


図1 厚鋼板の製造プロセスにおける連続化⁽¹⁾。

* 株式会社豊田中央研究所; 主監, 材料・プロセス1部; 部長(〒480-1192 長久手市横道41-1) Advance in Steel Materials for Social Infrastructure Supporting People's Modern Lives; Shinji Mitao (Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute) Keywords: steel plates, TMCP, shipbuilding, brittle crack arrestability, building, offshore structure, large heat input welding 2016年7月4日受理[doi:10.2320/materia.56.238]

表1 近年の厚板新商品開発例(文献(1)より抜粋).

分野	商品	製造プロセス	特徴, 機能, 備考
造船	大型コンテナ船用 YP 355-460 MPa 級鋼	TMCP	大入熱
	大型コンテナ船用 YP 390 MPa 級鋼	TMCP	大入熱 アレスト 大入熱・アレスト
	大型コンテナ船用 YP 460 MPa 級鋼	TMCP	大入熱 大入熱・アレスト
	耐疲労鋼	TMCP	
	耐食鋼		
海構	YP 500 MPa 級鋼	TMCP	-10°C継手 CTOD†
	YP 385 MPa 級鋼	TMCP	低 YR, 非大入熱, 大入熱
建築	YP 440 MPa 級鋼	DQ-Q'-T	低 YR, 高溶接性, 大入熱
		DQ-Q'-T	低 YR, 高溶接性
		DQ-Q'-T	低 YR, 耐火
	YP 630 MPa 級鋼	CR-AcC=誘導加熱 N-Q'-T DQ-N'-T	低 YR, オンライン製造 鋼管, 低 YR 鋼管, 低 YR
	TS 1000 MPa 級鋼		高 YR
橋梁	YP 500, 700 MPa 級鋼	TMCP	低 Pcm
	耐摩耗鋼 HB 360級	TMCP	-40°C靱性保証
	耐摩耗鋼 HB 500級	TMCP	-40°C靱性保証
	高加工性耐摩耗鋼		高加工性
建産機	ハイテン YP 685 MPa 級鋼	TMCP オースフォーム- 急速焼戻	-40°C靱性保証 -40°C靱性保証
	ハイテン YP 960 MPa 級鋼	オースフォーム- 急速焼戻	-40°C靱性, 耐水素脆化
	ハイテン YP 1100 MPa 級鋼	オースフォーム- 急速焼戻	-40°C靱性, 耐水素脆化
エネルギー	ハイテン TS 550-610 MPa 級鋼	TMCP オースフォーム- 急速焼戻	低 Pcm, 低温靱性, 大入熱 高靱性
	TS 610, 950 MPa 級鋼	オースフォーム	予熱フリー, 高靱性
	V 改良型 2.25Cr-1Mo	QT-PWHT	高靱性, 耐水素脆化
	スーパー 9Ni 鋼	Q-Q'-T	厚肉・高靱性
	9Ni 代替 6Ni 鋼		低コスト

† CTOD(Crack Tip Opening Displacement) : 亀裂先端開口変位.
CTOD 試験は破壊靱性試験のひとつであり, 各試験温度において不安定破壊に至る直前の亀裂先端開口量(限界 CTOD 値)で評価する.

が実用化された1980年以降である.

一方, バイナイト, マルテンサイトなどの低温変態組織を活用した, 概ね TS(引張強さ(Tensile Strength)) ≥ 600 MPaの熱処理プロセスとして, 焼入れ-焼戻し(RQ-T: Re-

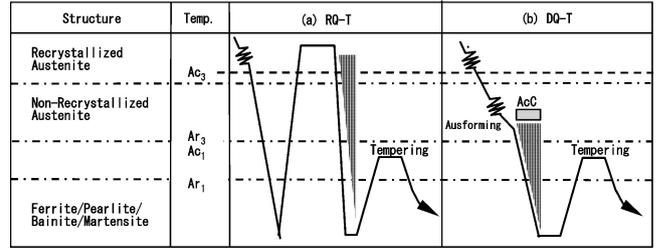


図2 RQ-T と DQ-T の熱加工履歴の比較⁽¹⁾.

heating, Quenching and Tempering)がある. これに対し, 熱間圧延後の γ 域から直接焼入れ, 焼戻すプロセスが DQ-T(直接焼入れ-焼戻し(Direct Quenching and Tempering))である. RQ-T と DQ-T の熱加工履歴を図2に比較して示す. DQ-T は, RQ-T における γ 域への再加熱処理を省略したプロセスと見ることができるが, DQ-T では熱間圧延条件の制御によって, 焼入れ前の γ の状態を制御できる自由度がある. 焼入れ性が十分に高い鋼に対して, 未再結晶 γ 域での圧延後, AcC することにより, 低温変態組織中に極めて微細な下部組織が形成され, その後の焼戻しによって微細な炭化物が分散されるため, 強度とともに靱性も向上する(オースフォーム).

2000年代に入り, DQ-T の焼戻しプロセスを誘導加熱によりオンラインで行う, DQ-オンライン誘導加熱プロセスが実用化された⁽²⁾⁻⁽⁴⁾. このプロセスは, DQ-T のバッチ焼戻し熱処理を連続化したプロセスと見ることができるが, 焼戻し(再加熱)前の組織を制御できるという自由度がある. 冷却停止温度-再加熱開始温度の制御により, 新しい組織制御技術が見出され, 例えば, 従来, 3回のバッチ熱処理を経ないと得られなかった TS ≥ 600 MPa の高強度, かつ低降伏比の鋼材が, オンラインで製造できるようになった⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

このように, TMCP をベースとする製造プロセスの連続化によって, オフライン熱処理を省略しつつ, 高性能鋼材が数多く開発されており, プロセス合理化と鋼材高機能化の両立が達成されている. プロセスの連続化は, 前工程のばらつきを次工程で受け継ぎ, 次工程のばらつきとともに拡大させる傾向にあるため, 種々のばらつきを極限にまで低減させるプロセス開発は極めて重要である. 1990年代後半以降の TMCP のバリエーションの増加に対するプロセス技術開発の寄与は非常に大きい. 至近の5年間では, 制御圧延時の温調冷却を強冷化するプロセスが新たに開発され, 高性能鋼開発と生産性向上に威力を発揮している⁽⁷⁾.

3. 高性能社会基盤用鋼材

ここでは, 造船, 建築, 海洋構造物の各分野にスポットを当て, 最近の高性能鋼材について概説する.

(1) 造船用アレスト鋼

表1にも示されているが, 造船用鋼板の耐破壊性能の向

上技術として注目されるのは、脆性亀裂伝播停止特性，すなわち，アレスト性に優れた鋼板である。

コンテナ船は，荷役の利便性を確保するため，開口部が大きく，船体の縦剛性を上部構造で確保する特殊な構造を有する．コンテナ積載数の増大にともない，上部構造には板厚50 mm以上の厚肉高強度鋼板が用いられるようになった。

板厚40 mm以下では，溶接部から発生した亀裂は残留応力の影響で母材側に逸れ，船体破断は免れると考えられてきたが，板厚50 mm以上の厚肉鋼板では，脆性亀裂が溶接ボンド部を直線的に伝播することが報告された⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾．溶接ボンド部を直進してきた脆性亀裂を母材で停止させる(アレストする)ためには，脆性亀裂伝播停止靱性(K_{ca}) ≥ 6000 N/mm^{3/2}が必要であることが明らかにされた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾．

アレスト性を向上させるためには，母材靱性の向上と集合組織制御によるセパレーション発生促進が有効である．母材靱性と K_{ca} 値と関係の一例を図3に示す⁽¹³⁾． $K_{ca} \geq 6000$ N/mm^{3/2}とするためには $vTrs \leq -80^\circ\text{C}$ の高い靱性が必要である．また，低温CRなどTMCPの最適化により，(100)面の面集積度を高め，マイクロクラックによる亀裂先端の応力

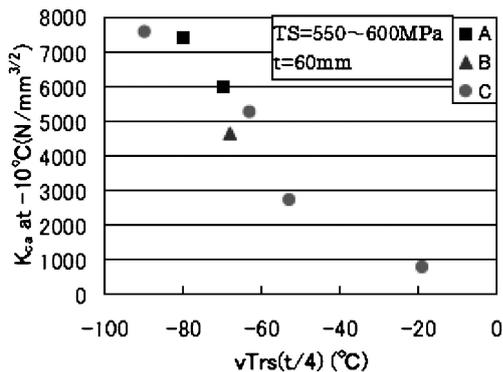


図3 母材靱性と K_{ca} の関係⁽¹³⁾．

緩和効果，ならびに亀裂の屈曲により，アレスト性を高められることが報告されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾．加熱温度の狭レンジ制御による初期 γ 粒径の微細化と合金元素溶体化，CR温度の低温高精度制御，CR後の均一強冷却など，最先端のTMCP技術が駆使され，降伏点(YP: Yield Point)390~460 MPa級のアレスト性に優れた厚肉高強度鋼板が開発されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾(表1)．

(2) 建築用高張力鋼板

この10年ほどの間に，低YR(降伏比(Yield Ratio) = YP/TS)，高溶接性，大入熱溶接性等を特徴とするYP 385 MPa以上の高張力鋼板が開発されている(表1)．

建築用鋼板には，大規模地震における建築構造物の倒壊を抑えるため，破断するまでに大きく変形して地震のエネルギーを吸収する機能が求められる．1994年に規格化されたSN鋼(JIS G 3136)は，その要求に応えるものであり，YR $\leq 80\%$ のほか，降伏点の狭レンジ化，衝撃特性，溶接性に関して炭素当量(C_{eq})，溶接割れ感受性組成(P_{CM})が規定されている．

その後，1995年の阪神・淡路大震災では，いくつかの建築物において脆性的な破断が確認され⁽¹⁹⁾，柱梁接合部にはより高い靱性が要求されるようになった(「鉄骨柱梁溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン」⁽²⁰⁾)．柱梁を想定した炭酸ガス多層盛り溶接部に対し， 0°C における衝撃吸収エネルギー(vE_0) $\geq 27, 70$ Jとなる鋼材成分の目安が，それぞれ，次式のように示されている⁽²¹⁾．

$$f_{HAZ} = [C + Mn/8 + 6(P + S) + 12N - 4Ti]$$

$$vE_0 \geq 27 \text{ J: } f_{HAZ} \leq 0.63\%$$

$$vE_0 \geq 70 \text{ J: } f_{HAZ} \leq 0.58\%$$

(ここで，C, Mn等は各元素のmass%である) (1)

建築構造用鋼の製造プロセスとマイクロ組織，強化機構について図4に整理して示す⁽²²⁾．鋼材の低YR化には，ミクロ

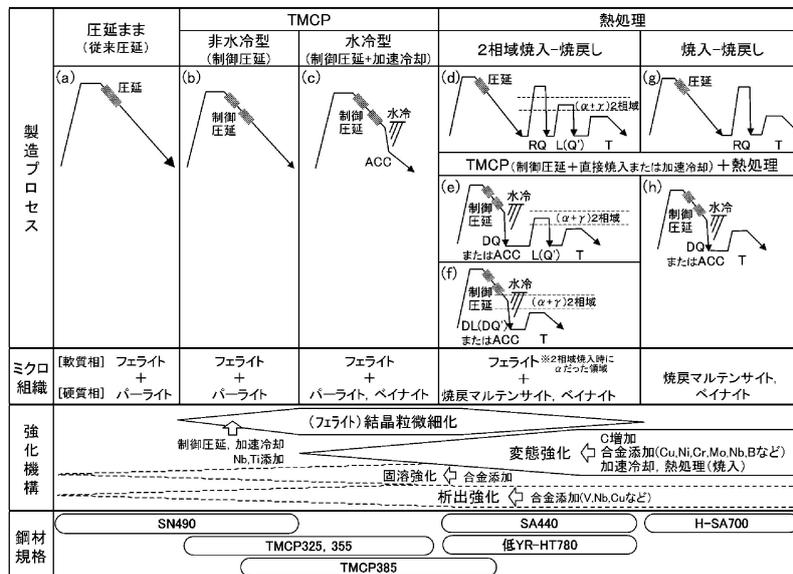


図4 建築構造用鋼の製造プロセスとマイクロ組織，強化機構⁽²²⁾．

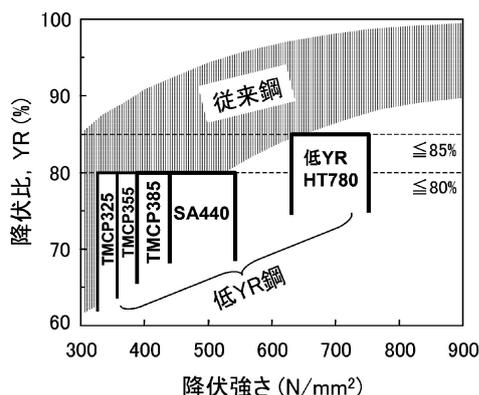


図5 鋼材の降伏点と降伏比の関係⁽²²⁾。

組織を軟質相(例えばフェライト(α))と硬質相(例えばパーライトやベイナイト)の混合組織とすることが有効である。

図5⁽²²⁾に、鋼材のTSとYRの関係を示すが、概ねTS \geq 600MPaの高強度鋼では、構成組織として α を活用しにくくなるため、AcCままやRQ-TなどでYR \leq 80%を得ることは難しい。そのため、例えば、図4(e)DQ-L(Q)-Tのような複数の熱処理プロセスを経て、高強度低YR鋼を製造している。先に紹介したDQ-オンライン誘導加熱プロセスを活用すれば、オンラインで低YR-HT780鋼を得ることができる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお、図4中のH-SA700は、次に述べる新構造システム設計に適用されるハイテンであり、YR \leq 98%であって、焼戻しマルテンサイトやベイナイトの単一組織である。

2004年からスタートした「革新的構造材料による新構造システム建築物の開発」プロジェクト⁽²³⁾⁽²⁴⁾では、主要構造部材は弾性に保ち、ダンパー等の制震デバイスによって地震のエネルギーを吸収して、震度7の地震に耐える「新構造システム設計法」が提案された。H-SA700は、新構造システム設計に対応した鋼材の一例で、YP \geq 700MPaの高強度とYR \leq 98%が規定されており、低YRの基準が大きく緩和されている。さらに高強度のTS1000MPa級鋼も実用化されている⁽²⁵⁾。

一方、制震ダンパーとしての機能を付与するブレース、間柱としては、低YP鋼(YP100, 225MPa級鋼)が用いられている。低YP鋼は純Feに近い成分組成であり、破断伸びは40~50%、あるいはそれ以上と大きく、溶接性等はTS400MPa級鋼と変わらない。最近では、低サイクル疲労特性の改善によって、制震ダンパーの性能余裕度を大幅に改善し、大地震および度重なる余震によるダンパー性能の劣化を抑え、交換頻度を大幅に低減できるFe-Mn-Si系合金が開発・実用化された⁽²⁶⁾。熱弾性マルテンサイトによる可逆的な変形により、弾塑性変形による地震エネルギー吸収を長期間持続させることができる。

(3) 海洋構造物用鋼材

エネルギーの採掘・生産・運搬・貯蔵には種々の性能を有する鋼材が用いられており、社会基盤用鋼材がエネルギーに

関連して果たす役割は、今後、益々、重要になると考えられる。ここでは、一例として、海洋構造物用鋼材について、近年の動向を簡単に述べる。

表1には、 -10°C の低温継手靱性を保証したYP500MPa級鋼の開発が挙げられているが、海洋構造物用鋼材に求められる代表的な特性は、厚肉、高強度、低温靱性である。1980年に北海で発生した掘削構造物施設アレキサンダー・キーランド(Alexander Kielland)の転倒事故で120名を超える犠牲者を出した反省をもとに、特に溶接継手に対する厳格な低温靱性が要求される。

海洋構造物は、掘削構造物と生産構造物に大別される。掘削構造物は場所を変えて試掘を繰り返すため、移動可能な構造であり、浅い海域ではジャッキアップリグが用いられる。掘削設備、居住設備を載せたプラットフォームと、それを昇降させる脚(レグ)、昇降装置から成り、レグ周りなどにはYP690MPa級の極厚高張力鋼が用いられる。

深い海域の生産構造物には、浮遊式のFPSO(Floating Production, Storage and Off-loading)などがあり、主要構造体にはYP315~355MPa級鋼板が使われてきたが、近年の大型化・深海化に伴い、YP420MPa級の厚肉高強度鋼板が用いられるようになった。

海洋構造物用鋼の主な開発課題は、YP420~550MPa級の高強度と、例えば -40°C の低温継手靱性の確保である。多層盛り溶接HAZ組織の粗大化と再熱による脆化組織の生成を抑制するため、①高温でも安定な微細粒子(TiN, Ca(O, S)など)の分散 ②析出物制御などにより有効な粒内 α 核生成サイトを設けること ③低 C_{eq} 設計、特に、C, P, Siを低減した成分設計等の手段が取られる。

掘削構造物レグ周りに用いられるYP690級極厚鋼板は、焼入れ性を付与するためのCr, Mo, BやNiの添加、およびP, Sの低減が重要であり、RQ-Tで製造される。

4. 大入熱溶接HAZの組織制御技術

厚肉鋼材の溶接に大入熱溶接を採用することにより、溶接能率が格段に向上し、構造物の製造コスト低減に直接寄与する。しかしながら、入熱の増大によって母材への熱影響は顕著となり、継手靱性が著しく低下してしまう。表1の造船、建築用鋼の特徴として多く現れる「大入熱」は、大入熱溶接を行っても継手靱性を確保できる鋼材である。

図6⁽²⁷⁾に大入熱溶接HAZの靱性低下を引き起こすミクロ組織的要因について模式的に示す。靱性劣化要因として、①溶接金属に隣接した粗粒域における粒成長が著しく、また、粗粒域の幅が広いこと、②冷却速度が遅く、粗粒域が、硬質なM-A(Martensite-Austenite constituent)を含む上部ベイナイトに変態すること、③粗大な γ 粒界に沿って、粗大なフェライトサイドプレートが生成すること、が挙げられる。

これらの対策として、①高温でも安定な微細粒子を分散させて γ 粒界をピン止めし、粗粒域の粒成長を抑制するとともに、粗粒域幅を狭める、②粒内に有効な α 核生成サイトを

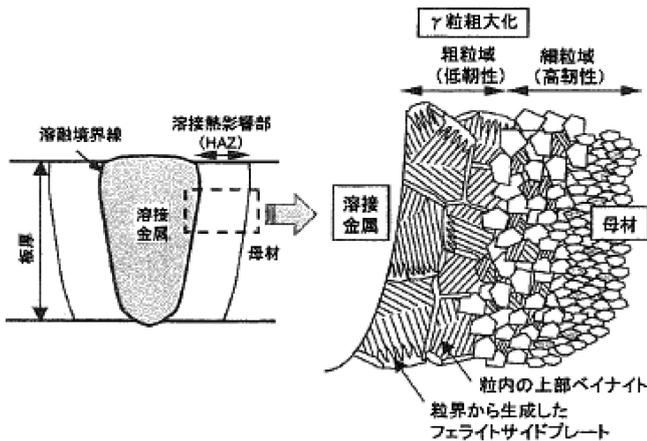


図6 大入熱溶接 HAZ 靱性を低下させるマイクロ組織的要因⁽²⁷⁾.

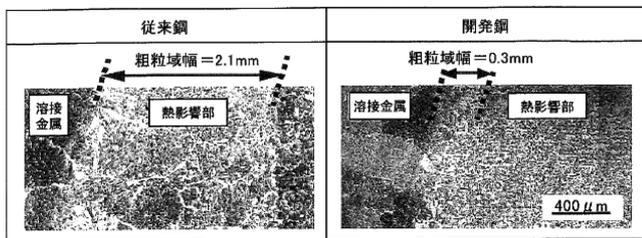


図7 大入熱溶接ボンド付近のマイクロ組織⁽²⁷⁾.

分散させ、粗大 γ 粒を微細粒内 α からなる微細組織に変態させる、③低 C_{eq} 設計とし、M-Aの生成を抑制する、④N低減、Ni添加等による母材靱性の向上、等の手段が取られる。ここでは、①、②について述べる。

① 高温でも安定な微細粒子：TiNが比較的古くから用いられている⁽²⁸⁾。TiNの活用等により、大入熱溶接 HAZ粗粒域幅を格段に小さくした開発例を図7⁽²⁷⁾に示す。また、TiNよりも高温で安定して γ 粒界のピン止め効果を発揮する粒子として、REM(O, S)⁽²⁹⁾や、さらに微細なMgあるいはCaの酸硫化物が効果的⁽³⁰⁾⁽³¹⁾であると報告されている。

② 粒内変態核による組織の微細化： α の有効な核生成サイトになり得る介在物として、TiN、REM(O, S)、BN、Ca(O, S)、 Ti_2O_3 などが報告されている。図8⁽³²⁾は、TiNを核に生成した α の例である。

介在物が粒内 α 変態核として機能するメカニズムとしては、介在物/母材 γ の熱膨張率差により生ずる歪、格子整合性、また、Mn欠乏層の生成が議論されている。例えば、鋼中のTi酸化物はMnを吸収して、その周囲にMn欠乏層を生成すると報告されている⁽³³⁾。Mn欠乏層の生成により、 α 変態の駆動力が増大し、変態を促進すると考えられる。

5. この10年間に起きた社会基盤用鋼材に関わる出来事

2005年からの10年間は、特にエネルギー経済・政策にお

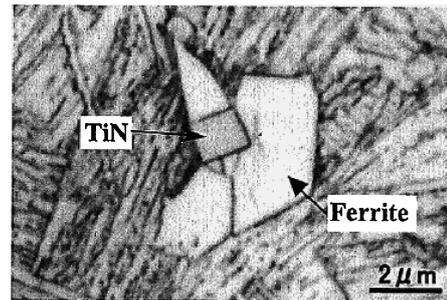


図8 TiNを核に生成したフェライト⁽³²⁾.

いて大きな変化があった激動の10年であった。米国サブプライムローンの信用問題に端を発し、世界同時不況に発展したリーマンショック(2008年9月)、東日本大震災(2011年3月)、シェール革命などは、現在も各方面で様々な影響を及ぼし続けている出来事である。ここでは、この10年を振り返り、社会基盤用鋼材と安心・安全、エネルギー、自然災害、そして自然環境について考えたい。

① ハリケーン「カトリーナ」：2005年8月に米国メキシコ湾岸を直撃。石油関連施設は激甚な被害を受け、一時、メキシコ湾の石油生産の約9割が停止に追い込まれた。原油供給に対する危機感が高まり、災害前に1バレル当たり約60ドルだった原油価格は、約70ドルに高騰した。

② メキシコ湾原油流出事故：2010年4月、メキシコ湾沖合の「Deepwater Horizon」において、逆流天然ガスに引火・爆発炎上する事故が発生。2日間炎上後、水没し、12名が行方不明となった。海底近くで掘削パイプが折損したため、原油流出の食い止め作業は困難を極め、封止の目途が立つまでの約3か月間に流出した原油は、約490万バレル(約78万kl)に達した⁽³⁴⁾。1989年にアラスカ沖で発生した、タンカー「Exxon Valdez(エクソンバルディーズ)」号の座礁事故(原油流出量約24万バレル(約4万kl))、1997年に島根県隠岐沖の日本海で発生した重油タンカー「Nakhodka(ナホトカ)」号の重油流出事故(重油流出量約6千kl)と比べても、その規模の大きさが伺える。リーマンショック後、原油価格は上昇し、投資意欲も旺盛であったが、シェール革命による米国での原油・天然ガス増産などの影響もあり、2014年以降、原油価格が大きく下落、深海海底油田開発を取り巻く環境も変化している。

③ 東日本大震災(東北地方太平洋沖地震)：2011年3月11日午後2時46分、三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の巨大地震が発生。巨大津波が東北・関東の太平洋沿岸を襲った。巨大津波に襲われた福島第一原発は外部電源、非常用電源等を喪失、INES(国際原子力・放射線事象評価尺度)の評価レベル7(チェルノブイリ原発事故と同等)の原子力事故となった。クリーンエネルギー源としての原子力発電の風向きは、この日を境に大きく変化した。クリーンで発電コストが低いというメリットの一方で、放射性廃棄物の再処理・最終処分の問題、事故発生時のリスク等を抱え、適正な原発依存度に向けた検討が進められている⁽³⁵⁾。

