

技術解説

エネルギー生産と供給を支える鋼材(エネルギー分野)

Steels for Energy Production and Transport

植 森 龍 治*

Ryuji UEMORI

篠 原 康 浩

Yasuhiro SHINOHARA

長谷川 泰 士

Yasushi HASEGAWA

井 上 裕 滋

Hiroshige INOUE

原 卓 也

Takuya HARA

古 谷 仁 志

Hitoshi FURUYA

井 上 健 裕

Takehiro INOUE

1. はじめに

エネルギー分野での鋼材開発状況について記述する。なお、エネルギー分野は裾野が広いため、ここでは、化石エネルギーの開発に対応した鋼材および発電用鋼材の開発状況を述べる。さらに新エネルギー分野の1つである風力発電用鋼の動向についても触れる。最後に、エネルギー鋼材の今後の展望について述べる。

2. エネルギー分野における鋼材開発の取り組み状況

2.1 エネルギー用鋼の動向

化石燃料である石油、石炭、天然ガスはエネルギー資源の大部分を占めるため、これらを合理的なコストで生産、輸送することは極めて重要である。とりわけ、原油、天然ガスの生産、輸送には高機能を有する鋼材が必須である。

原油、ガスを地下の貯留層から生産するために使用されるのが油井用鋼管である(油井、ガス井ともまとめて油井と呼ぶことにする)。地下1万mに近い大深度油田、高温、高圧、酸性ガスに富む腐食環境の油田、数千mの深海油田、屈曲の大きい水平坑井などの厳しい条件下で使用するため、高強度、高圧潰性、耐サワー特性、耐食性を備えた各種の高機能油井用鋼管が開発され使用されている。また、海底油田開発のためには、海洋構造物(プラットフォーム)が設置される。海洋構造物は可燃性物質の処理等を行うために厳格な安全性が要求され、これには溶接熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)の靱性に優れた厚鋼板が使用されている。近年では、低温海域の開発が多く、低温靱性に優れた海洋構造物用鋼の開発が精力的に進められている。

油田で生産された原油、ガスをパイプラインにて輸送するために使用される鋼管がラインパイプである。ガス生産地は消費地から数千kmも離れている場合があり、また、世界的には天然ガスの90%がパイプラインで輸送される

ために、輸送コスト削減可能なラインパイプの安定供給が重要である。このために、高圧輸送、深海、湿潤硫化水素環境、その他厳しい条件でも使用可能なラインパイプ用鋼が開発、製造されている。一方、日本では海洋輸送の利便性から、これまでは天然ガスは液化ガス(LNG: Liquefied Natural Gas)として輸入されている。世界的にもLNGとして輸送される天然ガスは増加する傾向にある。この分野で使用される鋼材としては、LNGタンク用鋼があり、極低温でも高靱性を有する9%Ni鋼が広く用いられている。最近では、9%Ni鋼のさらなる高性能化に加えて、高価な合金元素であるNiを減らす取り組みを行なっている。

火力発電、原子力発電、水力発電等でも発電プラント用鋼の高性能化を鋭意進めており、優れた高温強度を有する鋼材の開発、重油やバイオマス燃料とするボイラー向けの耐食鋼材の開発、ダム発電容量の大型化を支えるための鋼材の厚手化、高強度化、高靱化を検討している。

2.2 商品開発

2.2.1 高機能鋼管

(1) 油井用鋼管

油井用鋼管には、直径2-3/8~20インチのシームレス鋼管、電縫鋼管が使用される。苛酷な使用環境下での高い安全性を目指して高強度、高耐食性、ねじ継手を含めた商品が開発されてきた。新日本製鐵ではシームレス鋼管として、高強度耐サワー¹⁾、高耐食13Cr油井用鋼管²⁾、高トルク高気密ねじ継手³⁾、環境に配慮したドープフリーねじ継手⁴⁾など高機能、環境負荷低減商品を開発してきた。電縫鋼管としては、熱間圧延でのTMCP(Thermo Mechanical Control Process)技術、電縫溶接制御技術を駆使し、高圧潰油井用鋼管の開発を進めてきた。2001年の輸出用シームレス鋼管事業撤退後は、電縫鋼管の特長を活かした商品を重点的に開発、生産し、積極的な市場投入を進めている。高強度化に関しては、C95グレードまで製造可能とした。

高機能化の一例としては、油井中で掘管作業にも耐えう

* 鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

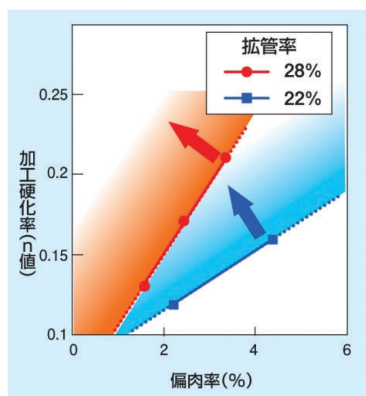


図1 正常に拡張できる偏肉率と加工硬化係数(22%:現行工法の最大拡張率, 28%:将来工法の最大拡張率)



図3 X120ラインパイプの敷設写真

る鋼管(Expandable Tubular)が挙げられる。本鋼管を用いた掘削技術は掘削に伴うコストを大幅に削減でき、油井設計に大幅な自由度を持たせることができるなど、今後の拡大適用が見込まれる。図1に示すように偏肉率が小さく(肉厚の均一性が高い)、材料の n 値(加工硬化率)が高いほど、拡張率を上げることが可能⁵⁾となる。偏肉率が小さい電縫鋼管の特長を生かし、当社の材料技術を組み合わせたExpandable油井用鋼管を開発、製造している。さらに、拡張後の圧潰特性を予測できる技術を取り入れたソリューション提案も行い⁶⁾、Expandable油井用鋼管の拡張を目指している。

(2) UOE ラインパイプ

(i) 高压輸送用ラインパイプ

ガス輸送は内圧を高めることで輸送量を増やせるため、高压輸送が指向される。高压化を達成するには、板厚の増加と鋼管の高強度化が有効となる。これらの要求に応えるのが、API(American Petroleum Institute)グレードX120, X100といった超高強度ラインパイプ、または極厚X80である。図2にこれまでのラインパイプの要求特性の変遷を示す。高強度化、極低温化に加えて、複合特性がラインパイプに要求されている。X120は最大の石油メジャーExxonMobil社と1995~2005年に共同研究を行って開発した最高強度のラインパイプであり、2007年には、API規格に登録された。必要な低温靱性、良好な現地溶接性を兼ね

備えたX120の強度をTMCPままだかつ合理的なコストで実現するために、B添加の低Cベイナイト組織を採用した。B添加は焼入れ性を大きく向上させ、少ない合金元素で高強度が得られるものの、TMCPで安定して製造するための高い技術力が必要である。特に、現地溶接性を損なうとしてラインパイプへの添加が規格上制限されていたために、実際の適用には大きなハードルがあった。

そこで、当社の解析技術を駆使してBを安定的に使用する技術を確認し、ExxonMobil社の承認を得てB添加鋼が採用された⁷⁾。X120の開発は、UOE成形技術やシーム溶接技術においても大きな技術開発を必要とした大プロジェクトであった⁸⁾。最終的に少量商業生産試験を経て、ExxonMobil社が1.6kmにもおよぶ敷設試験を2004年の厳冬期に北部カナダにて実施した(図3)。この時、従来グレードと同等な敷設能率と溶接部品質が得られることが証明された。この敷設したX120鋼管は、パイプラインの一部として現在使用されている。X100は、当初高強度ラインパイプとして開発が進められ⁹⁾¹⁰⁾、その後、ひずみ設計パイプラインに適用可能な高変形能ラインパイプとして完成した¹¹⁾。CLC- μ (Continuous on Line Control Process- μ)の高精度冷却(自在冷却技術)を駆使して組織制御を行い、高強度で且つ高い変形性能を実現した。X100は2007年カナダのパイプラインの一部5kmに適用された。

極厚X80は、ラインパイプに必須である高速延性破壊停止特性の確保が難しい。化学成分の最適化とTMCPの最適化、特にCLC- μ での高精度冷却を駆使して直径56インチ、板厚27.7mmのX80を開発した¹²⁾。この鋼管がロシアでのフルスケールバースト試験に供され、高速延性き裂を短距離(12m以内)で停止させることが証明された。

(ii) 深海用ラインパイプ

メキシコ湾、黒海、地中海など2000mを超える深海に敷設されるパイプラインでは圧潰が重要な設計因子となる。大径ラインパイプでは、圧潰試験の実施が難しく、小型試験で圧潰値を推定する方法が一般的であったが、予測精度に課題があった。新日本製鐵では、大規模な圧潰試験

年代	1970	1980	1990	2000	2010 ~
強度	X60~65	X65~70	X80	X100~120	
低温靱性保証		0°C	-20°C	-30°C	-46°C
環境及び特性	オイルLP	ガスLP	耐サワーLP	厚肉高強度LP	厚肉耐サワーLP 極低温用LP
LP: Line Pipe					超高強度LP 高変形能LP 深海用極厚肉LP

図2 ラインパイプの要求特性の変遷

とFEA (Finite Element Analysis) を駆使して、小型試験から圧潰値を精度良く推定する技術を確立した¹³⁾。材料開発としては、Moの含有とTMCPでの低温停止を指向することでひずみ時効をより積極的に利用する設計手法を提供した。この技術を用いて、圧潰強度の高いラインパイプを開発した。その成果として、MEDGAZプロジェクト(アルジェリア～スペイン)に当社の高圧潰ラインパイプを適用することができた。

(iii) 耐サワー用ラインパイプ

湿潤硫化水素(サワー)ガスを含有する流体を輸送するラインパイプには、水素誘起割れ(HIC: Hydrogen Induced Cracking)が発生することがある。HICの発生を抑制した耐サワーラインパイプでは、高品質な連続鋳造スラブを素材とし、TMCPで組織制御された鋼板が必要とされる。HICの起点となる延伸硫化物の生成発生を抑えるためにS量を10ppm未満に抑え、Ca添加による硫化物の形態制御、偏析の軽減などを実現するための製鋼技術が開発された¹⁴⁾。すなわち、耐サワーラインパイプの製造が非金属介在物や中心偏析の制御という製鋼技術を大きく進歩させた。現在ではAPIグレードX70までの耐サワーUOEラインパイプの製造が可能である。また、電縫鋼管においても最も高品質を要求される耐サワー海底パイプライン用APIグレードX65が製造されている。

(iv) ひずみ設計用ラインパイプ

不連続永久凍土、地滑り、断層などの地盤変動が起きやすい地域ではパイプラインが塑性変形するため、円周溶接部からの破壊や、管体での座屈を抑えるようなパイプラインの設計が必要である。このようなパイプラインの設計をひずみ設計(SBD: Strain-Based Design)と呼ぶ。SBDでは、プロジェクト毎に決定される要求ひずみ内で、溶接部からの破壊および管体からの座屈をさせない設計としなければならない。円周溶接部からの破壊を防止するための重要な設計は、円周溶接金属と鋼管長手方向の強度のオーバーマッチングである。通常、鋼管は防食を目的とした加熱塗装を実施するので、ひずみ時効による鋼管強度の上昇を抑える必要がある。鋼管強度の下限値は、必要グレードの最小強度であり、上限値は、現地溶接金属強度の最小値未満の値となり、狭レンジの強度を満足するような鋼管の製造法を検討しなければならない。

一方、曲げ変形時に鋼管の座屈性能を向上させるには、鋼管の高一様伸び化かつ低降伏比化が基本となる¹⁵⁾。新日本製鐵では、高変形能確保のために、加工硬化能に優れたフェライト(軟質組織)とベイナイト(硬質組織)の複合組織を適用した¹⁶⁾。さらに、変形能が要求される場所は、極寒地域が多いため、 -40°C のような低温靱性を保証することを目的として、平均粒径 $5\mu\text{m}$ 以下(ASTM法)の

微細複合組織を基本とした極低温用高変形能鋼管(Super Tough-Ace)を開発した^{17,18)}。Super Tough-Ace鋼管としては、APIグレードX60からX100までの鋼管製造を確立した。例えば、降伏比88%以下、一様伸び8%以上かつ -40°C の極低温の低温靱性を保証するX60グレードの鋼管を開発し、2009年ロシア向けに1.7万トン製造した¹⁷⁾。また、カナダでX100低温用高変形能鋼管を5km敷設した¹¹⁾。

天然ガスを輸送するパイプラインの長距離化は今後も確実であり、それに伴う鋼管の高靱化、高変形能化などの複合特性化は必須となる。そうした背景の中、Super Tough-Ace鋼管は今後多くの需要が見込まれるとともに、この鋼管が適用されることで天然ガスの安定供給につながると考えられる。

(3) 鋼管成形技術およびソリューション技術

素材の高強度化、厚肉化に伴い従来の鋼管成形技術では成形能力、製品形状の観点から造管困難な場合があり、新たな成形技術の開発、成形指標を導出する必要がある。また、鋼管の限界使用性能を評価することでより信頼性の高い商品を提供する責務がある。

X120に代表されるUOE造管法による高強度ラインパイプの製造では拡管時のシーム溶接割れ、スプリングバックの増大による形状不良、厚肉材では板エッジの曲がり不足などがあげられる。これらの課題はスプリングバックを精度よく予測できる数値解析シミュレーション、実験室レベルでのプレス実験(図4)により成形条件の最適化を行い¹⁹⁾、安定供給体制を整えた。

ソリューション技術として、高圧潰が要求される深海用ラインパイプについて、冷間成形によるバウシinger効果を考慮した圧潰強度評価式を導出した。また、不連続永久凍土地帯に敷設され、曲げ座屈抵抗が要求されるひずみ設計用ラインパイプについては鋼管自身が有する直交異方性を考慮できる数値解析技術を構築し、歪み設計技術の信頼性向上に寄与してきた。

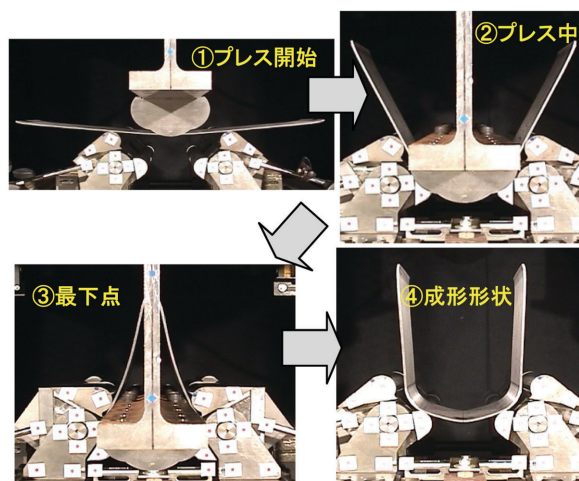


図4 Uプレスの実験シミュレーション(X120)

2.2.2 高機能厚鋼板

(1) 高強度、高靱性海洋構造物用鋼

石油、天然ガス関連の海洋構造物は、用途(掘削、生産)や水深等の設置海域の条件により分類できる。水深300m程度までの海域で使用されるジャケット型(図5)やジャッキアップリグ型などの固定型、水深1000m超の深海でも使用されるセミサブ型(Semi-Submersible)やTLP型(Tension Leg Platform)に代表される浮遊型、およびそれらの中間の揺動型の3形式に分類される。ほぼ全ての形式で厚鋼板が重要な役割を担っており、造船用鋼板に比べて高強度、厚手材が多いのが海洋構造物用鋼板の特徴である。

近年、設置海域が深海化、寒冷化しており、海洋構造物用鋼板(以下、海構用鋼と記す)には、さらに高い品質と優れた使用性能が求められている。特に1980年に起きた北海でのアレキサンダーキーランド号の転覆事故以後、破壊に対する安全性がさらに重要視されるようになり、破壊力学に基づいた靱性評価法であるCTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験が海構用鋼の評価指標として本格的に適用された。焼きならしにより製造された従来の海構用鋼ではCTOD値を満足することが、容易ではなかったため、当時日本の鉄鋼メーカー各社が鎚を削って開発していたTMCPの適用が試みられた。新日本製鐵では、TMCPのみならず、 casting, 再加熱, 圧延, 水冷, 焼戻しまでの厚板製造工程において、一貫プロセスメタラジの考え方にもとづいて最適プロセスを検討することにより、世界に先駆けてTMCPを適用したCTOD保証YP350鋼の開発に成功し、1984年 OsebergI の海洋構造物に適用された。

さらに構造物の大型化や掘削海域の深海化を背景とした高強度化ニーズに対応して、新日本製鐵は1990年の北海 Draugen プロジェクトにYP420鋼²⁰⁾、2000年のチモール海Bayu Undan プロジェクトにYP460鋼、同年の北海Grane プロジェクトにYP500鋼²¹⁾をそれぞれ世界に先駆けて供給してきた。加えて石油掘削用ジャッキアップリグの最重要部材であるレグ(脚)に適用されるラック材としては世界最大厚となる210mmの-60℃シャルピー仕様800N/mm²級の極厚高強度鋼²²⁾の開発に成功した。



図5 海洋構造物用鋼を用いた固定型生産プラットフォームの上部構造

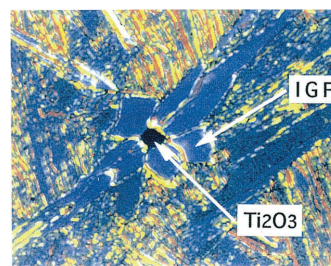


図6 Ti酸化物から生成した粒内変態フェライトの例

このように海構用鋼の高強度化が進む一方で、世界の未発見ガス資源の約30%が存在するとされる北極海周辺の氷海域における海洋資源開発が活発化し、極低温でも良好な特性を示す鋼材が求められた。CTOD値の評価温度は-10℃が一般的であるが、氷海域向けの鋼材に対してはさらに低温の-40℃~-60℃で良好なCTOD値が要求されるという極めて厳しいものであった。CTOD値は局所的な脆化域に支配されるため、溶接熱影響部(HAZ)における靱性の劣化に対してミクロ組織をいかに制御するかが極めて重要であり、海構用鋼の開発を通じてHAZの低温靱性向上に関する重要な研究がなされた。

1970年代にTiN²³⁾を利用した技術が検討され、1980年代には、海構用鋼としてTiO鋼²⁴⁾を新日本製鐵が実用化した。TiO鋼では、 γ 粒内に存在する高温で安定なTi酸化物から図6に示すように粒内変態フェライト(IGF: Intra-Granular Ferrite)が多量に生成することにより組織が微細化するため、安定的に優れたCTOD値が得られた。低温靱性を考える上では、M-A (Martensite-Austenite Constituent)の制御が重要であるが、M-Aの形成機構や合金元素の影響に関する基本的な考え方が明らかとなっている²⁵⁾。これらのHAZ靱性制御技術を駆使して、1990年代に新日本製鐵では-50℃CTOD保証のYP350鋼²⁶⁾、YP420鋼²⁷⁾の開発に成功した。近年、TiO鋼をさらに発展させたHAZ組織制御を強化した鋼の実用化が進んでおり、カスピ海北部プロジェクト向けにYP355N/mm²クラス-40℃継手CTOD保証鋼として2004年に開発された。今後、高強度・厚手化に加えて、氷海域におけるCTOD保証といった極めて厳しい環境でも良好な靱性を確保可能な海構用鋼として適用拡大が期待されている。

(2) LNGタンク用低温用鋼

LNG(液化天然ガス)タンクの内槽用鋼材には、-160℃の低温下での耐破壊性能が必要である。世界ではじめてLNGタンクの建造、供用が始まった1940年代には、破壊力学に基づく脆性破壊防止技術が必ずしも十分ではなく、米国クリーブランドで建造された世界最初のLNGタンクには3.5%Ni鋼が使用され、結果として大規模な火災をともしう破壊事故が発生した^{28, 29)}。その後1946年に

International Nickel Co. が開発した 9%Ni 鋼^{30, 31)}は、U.S.Steel, INCO と Chicago Bridge & Iron Co. の 3 社による大がかりな破壊試験³²⁾ (“Operation Cryogenics”, 1960 年)によって、応力除去焼鈍が不要であることが証明されて以来急速に普及した。

国内では、新日本製鐵はいち早く 9%Ni 鋼の基礎研究に着手し、その成果により、1969 年に東京ガス (株) 根岸工場の LNG タンクに当時の八幡製鐵が製造した 9%Ni 鋼が初めて適用された。その後、1970 年代には LPG タンクの大規模な破壊事故を契機として 9%Ni 鋼の安全性に嫌疑がかけられ、これを払拭するための種々の大型破壊試験が行われ、1980 年代には 9%Ni 鋼は LNG タンク用材料として十分な脆性破壊発生および伝播停止性能を有することが示された³³⁻³⁵⁾。

LNG タンクの容量は、1969 年の国内最初のタンク容量 4.5 万 kl から大型化が進み、現在では最大 18 万 kl のものが製造されている。これに伴い、最大板厚は容量 4.5 万 kl で 20mm であったものが、8 万 kl で 30mm、14 万 kl で 40mm、18 万 kl では 50mm 程度となった。この厚手化に対応するため、当社は後述する二相域熱処理 (L 処理^{36, 37)}) を適用した 9%Ni 鋼を開発³⁸⁾し、さらに厚手、高靱性を同時に達成する鋼材として、Si 低減、Mo 添加、L 処理を適用したスーパー 9%Ni 鋼を開発した³⁹⁾。

L 処理³⁶⁻³⁸⁾とは、図 7 に示すように、従来の焼入れ焼戻しの間に行う二相域熱処理のことであり、組織の微細化と安定なオーステナイトの生成により靱性を大きく改善できる技術である。これを用いると、高価な合金元素である Ni を減らすことが可能となり、当社は 1970 年代に 5.5%Ni 鋼 (N-TUF CR196) を開発した⁴⁰⁾。これは、Ni を 5.5% に低減するとともに、Cr, Mo を適量添加することで母材、溶接部の特性を 9%Ni 鋼と同等とする画期的なものであった。N-TUF CR196 は、エチレンタンク等への適用事例はあるものの、当時は 9%Ni 鋼の信頼性すら十分に検証されていなかった時期であり、LNG タンクへの適用には至らなかった。その後、2008 年からふたたび Ni 低減鋼の開発に着手し、TMCP と L 処理を適用して大型の LNG タンクにも適用可能とした 6%Ni 鋼を開発⁴¹⁾し、実用化に取り組んでいる。

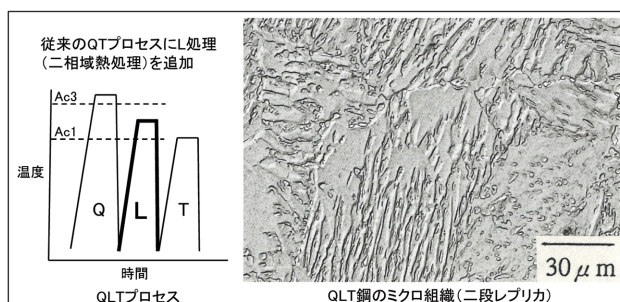


図 7 L処理を適用した9%Ni鋼のミクロ組織³⁸⁾

2.2.3 発電用鋼

(1) 発電プラント用鋼 (鋼管および厚鋼板)

発電用鋼の分野では、主に化石燃料を用いた発電プラントに使用する高温クリープ強度の高い耐熱鋼が求められる。特に、1990 年以降では発電効率向上を目的として、タービン入り口の蒸気温度が 600～610℃、圧力が 250N/mm²～300N/mm²と従来に比較して高温高压の、“超々臨界圧”条件において使用される配管および同部材の必要性が高まった。耐熱鋼に求められる特性は他に、低熱膨張率、耐水蒸気酸化性などがある。これらの複合特性を同時に満たすべく、フェライト系耐熱鋼として、9%以上の Cr を含有し、高温で安定な微細炭化物または窒化物を分散制御して高温耐久性の向上を図った鋼材が、米国 Oakridge 国立研究所で 1985 年頃に開発された。9Cr-1Mo-Nb-V-N (ASME Gr.91, 耐用温度目安 593℃) である。新日本製鐵はその高温強度向上機構に関する研究⁴²⁾を通じて耐クリープ変形特性の合金設計指針を明らかにし、この設計思想をさらに発展させて、W と B を添加した 9Cr-1.8W-0.5-Mo-Nb-V-N-B (Gr.92 耐用温度目安 610℃) を東京大学との共同研究で開発した。

1995 年から 2000 年にかけて国内プロジェクト (電源開発との共同研究 Phase II)、および米国 EPRI (Electric Power Research Institute) との国際共同研究を通じて規格化と実缶試験 (デンマーク) を進め、国内のプラント (四国、橋湾 1, 2 号) に適用された。当該鋼材のクリープ破断強度は図 8 に示すように 600℃、10 万時間で 100N/mm² を超え、フェライト系耐熱鋼として工業用材料では世界一高い⁴³⁾。また、より高温に曝される過熱器と呼ばれる部位ではオーステナイト系耐熱鋼 22.5Cr-20Ni-1.5Mo-Nb-N (TP310MoCbN)、18Cr-9Ni-2W-Nb-V-N (TP347W) も開発し、国内外で適用されている。今後、これら鋼種の適用範囲拡大を図るとともに、火力発電プラントの炭酸ガス排出低減および高効率化を目指し、より高温クリープ強度の高い新材料の開発にも注力していく予定である。

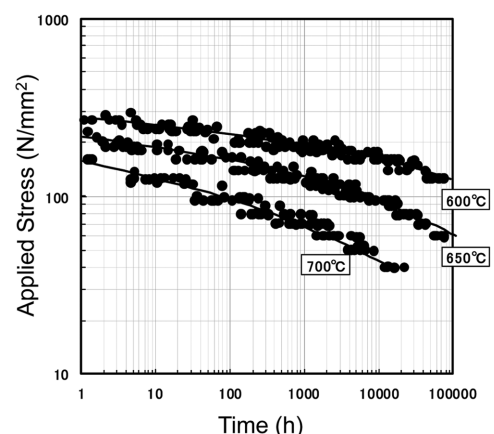


図 8 ASME Gr.92 鋼のクリープ破断曲線

(2) 石油精製用鋼

原油を各種石油類に精製，変換する石油化学プラントでは，特に高温となる脱硫反応容器の運転温度が環境対策の観点から高まり，容器の大型化，厚肉化が1990年代より著しく進んだ。反応塔の形状に加工できる鋼材の板厚には限度があるため，材料の高強度化で板厚低減が指向され，適用温度は発電用プラントに比べて低い(450～500℃)ものの，低合金鋼の中でも最も耐水素浸食性の優れた2.25Cr-1Mo鋼の高強度化が必要となり，Vを0.25%添加した厚板⁴⁴⁾の製造技術開発を確立した。現在も規格の改訂に伴う高温強度向上研究を継続中である。

(3) 耐硫酸・塩酸露点腐食鋼

ボイラープラントの排煙系統においては，排ガス中の水分や排ガスと接する材料の表面温度との関連で，高温排ガス中に含まれるガス状の酸性物質(SO_x ，HCl等)が結露し，材料を腐食させる現象が生じ，これを酸露点腐食(Acid Dew Point Corrosion)という。酸露点腐食が問題となるのは，たとえば，重油専焼ボイラーや化学プラント加熱炉の排煙処理装置や熱回収部分である。具体的には，エコノマイザー，空気予熱器，集塵器(電気集塵機，バブフィルター)，煙道，煙突内筒などである^{45,46)}。後述するように，最近ではごみ焼却施設などでも， SO_x ，HClによる酸露点腐食が生じている⁴⁷⁾。

酸露点腐食環境は，燃焼物によっておおよその分類ができる。重油や石炭焚きボイラーでは硫酸露点腐食が生じる。LNG 焚きではSやClをほとんど含まないため，いわゆる水腐食が生じる⁴⁸⁾。ごみ焼却施設や再資源化プラントでは，硫酸および塩酸露点腐食が生じる⁴⁷⁾。

新日本製鐵では時代のニーズに応じて，各種燃料焚きプラント向けの耐食鋼材を先駆けて開発，商品化してきた。1960年代以降の高度経済成長期では，重油専焼ボイラーの硫酸露点腐食対策として，鉄鋼各社で耐硫酸性鋼の開発が進み，新日本製鐵ではCOR-TEN 鋼をベースに耐硫酸露点腐食鋼 S-TEN1を開発，商品化した⁴⁸⁻⁵⁰⁾。1990年代には，火力発電所の LNG への燃料転換に伴った水腐食が新たに問題となり，ガス焚きエアヒータエレメント用耐食冷間圧延鋼板⁵¹⁾や，コンバインドサイクル発電用耐食厚板 WELACC5⁵²⁾を開発，商品化している。

近年，持続可能な社会，循環型社会の実現に向けて，環境負荷の低減や資源生産性の向上が強く志向され，その結果，再資源化の対象物質が急速に多様になっている。対象物質には焼却灰や廃タイヤなど，塩化物イオンを含む場合が多い。さらに最近の環境保全技術が急速に進歩したことを背景として，ごみ焼却施設や様々な再資源化プラントの排煙処理設備では塩酸雰囲気による設備の腐食事例が増えている。

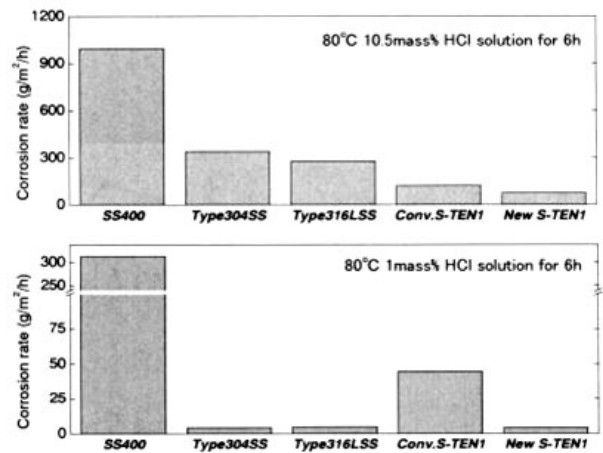


図9 各種鉄鋼材料の塩酸浸漬試験結果

2002年10月，ごみ焼却施設や各種リサイクル・再資源化施設の排煙処理設備で生じる塩酸腐食対策として，新日本製鐵は新S-TEN1を開発した。図9に80℃における各種鉄鋼材料の10.5%および1%塩酸中での浸漬試験結果を示す。新S-TEN1は従来S-TEN1と比較すると特に1%塩酸中での耐塩酸性が大幅に向上していることがわかる。新S-TEN1とSUS系を比較すると，高濃度ほど新S-TEN1がより優れていることがわかる。新S-TEN1は，塩化物イオンを含む酸に強い新たな特長を有するため，用途範囲は従来の耐硫酸性鋼(硫酸だけの環境に強い)と比較すると一段と広がった。塩化物イオンを含む酸が発生する排煙処理設備や，硫酸や塩酸を貯蔵，輸送する機器などへの応用が進んでいる。特に再資源化・リサイクル分野での排煙処理設備では塩酸，塩化物による腐食事例が多く，さまざまな分野，プラントで適用が進みつつある。

現在では従来材に代えて開発鋼(新S-TEN1)をS-TEN1として販売している。本鋼は，省合金ながらも優れた耐塩酸性を有し，使い勝手，入手性はSS400並というユニークな耐食鋼であり，その優れた特性を活かした用途の更なる広がりが期待されている。

(4) 水力発電用水圧鉄管(ペンストック)用鋼

水力発電用水圧鉄管は，ペンストックとも呼ばれ，ダム内の水を発電機まで誘導する役割を担っている。ダムの発電容量の大型化に伴い，水力発電所の水路の落差は大きくなり，ペンストックの内圧は高く，それに伴い，厚手化，高強度化が進められてきた。また，近年では電力需要の伸びとともに，夜間の余剰電力を蓄える目的で建設された揚水発電所の建設に，特に高強度のペンストック用鋼が適用されてきた。

ペンストックに日本で初めて780N/mm²級鋼(HT80)が適用されたのは，1975年に建設された大平揚水発電所であった。さらに，2005年には神流川揚水発電所において，

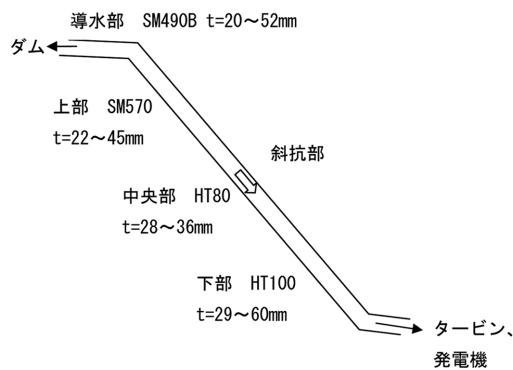


図10 ペンストックに適用される厚板の例
(文献 53)を元に作成)

日本で初めて950N/mm²級鋼 (HT100) が実適用された。ペンストックは、高靱性の厚手・高強度鋼が適用されてきた代表的な分野である。ペンストックの概要を図10に示す。

海外では1996年に稼働したHT100を世界で初めて採用したスイスのクルゾン・ディクソン発電所のペンストックにおいて2000年に破裂事故が発生している。これは溶接部の遅れ破壊が原因とされているが、海外では脆性き裂を停止する能力であるアレスト特性をペンストック用鋼に要求するという考え方は適用されていないことも被害を大きくした一因と思われる。

日本国内のペンストック用鋼の必要特性は、“水門鉄管技術基準”(水門鉄管協会発行)において、HT80までの要求特性が明記されている。これは、溶接部からの脆性き裂発生を防止するとともに、万が一溶接部で脆性き裂が発生しても、母材で停止することにより二重の安全性を確保しようという考えに基づいたものであり、“溶接部は0℃で脆性破壊が発生しないこと”に加え“母材は0℃で脆性き裂の伝播を停止すること”を要求している。さらに、日本溶接協会規格WES3003では脆性破壊発生特性を要求するG種とアレスト特性を要求するA種が規定されているが、これらの要求は、脆性破壊発生特性とシャルピー衝撃値の相関および脆性き裂伝播停止特性(アレスト特性)とシャルピー衝撃値との相関を用いて、シャルピー要求値に換算されシャルピー衝撃値の要求値が定められている。

特に鋼板のアレスト特性については、シャルピー衝撃値の確認のみでなく、しばしばESSO試験を実施してA種相当のアレスト特性を有することを確認することが要求されている。HT100についても“950N/mm²級高張力鋼 (HT100) の水圧鉄管適用への技術指針”(水門鉄管協会発行)において、HT80と同様の特性が要求されている。

新日本製鐵では最大板厚100mmのペンストック用極厚HT100で、WES3003A種を母材で満足し(図11)、溶接部でWES3003G種を満足する鋼板を開発、実用化し^{54,55)}、前述東京電力(株)神流川発電所に初適用され、九州電力(株)小丸川発電所では分岐部補剛桁 (HT100Z)を含めて

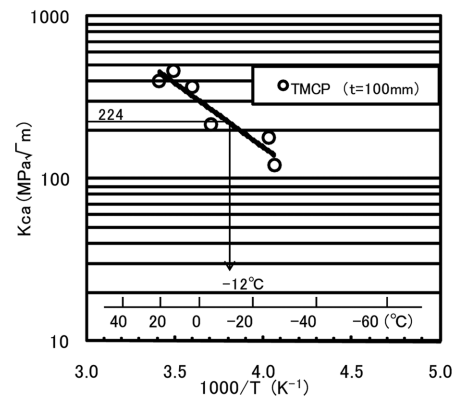


図11 HT100(100mm厚)のアレスト靱性⁵⁴⁾

採用された。

(5) 原子力発電用鋼

原子力発電に用いられる鋼材は、放射線に直接曝される蒸気発生器、反応容器等、さらには圧力容器を覆う鋼製格納容器において使用される厚鋼板がある。蒸気温度は火力発電プラントに比較して250~350℃程度と低く、腐食環境に曝されない部位では炭素鋼または低合金鋼を使用する。当社はこれまでに1980年代から高靱性を有するSGV480、SPV490等の炭素鋼を開発し、300℃以下で使用する部材、特に格納容器を中心に提供した実績をもつ。また、1990年代には容器の耐圧性向上と安全裕度向上の観点から0.5%Moを添加したSQVグレードの高強度鋼⁵⁶⁾、さらには電子ビーム溶接継手の靱性に優れた620N/mm²級のSQV2B鋼⁵⁷⁾、さらに、TMCP技術を適用した溶接後熱処理の省略が可能な格納容器用SGV480鋼などを開発し、実用化してきた。今後は原子力圧力容器に、より一層の安全性の向上が求められることから、高温強度と靱性に優れた鋼材への要求が厳格化することが予想され、高温特性のみならず、溶接性および耐食性に優れた低合金耐熱鋼への期待が高まると考えられる。

2.2.4 エネルギー分野における溶接ソリューション

上述の鋼材が構造物として使用され、社会的価値を発現するためには母材と同等の性能を有する溶接継手が必須である。ここでは一例として、2.2.1項(2)のラインパイプ、2.2.2項(1)の高強度、高靱性海洋構造物用鋼、および、2.2.3項(3)の耐硫酸・塩酸露点腐食鋼の溶接ソリューションを紹介する。

(1) UOEラインパイプの溶接ソリューション

パイプライン用の鋼管としては、UOE鋼管および電縫鋼管がある。これらは何れもシーム部を溶接により接合している。ここでは、その中でより高強度が要求されるAPIグレードX100以上の高強度UOEラインパイプのシーム溶

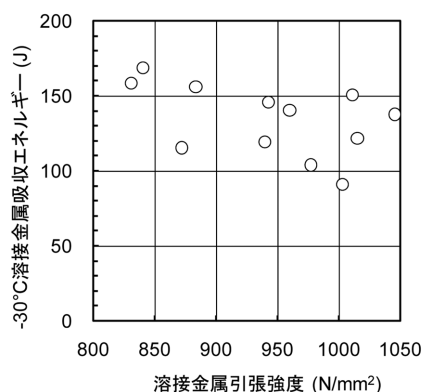


図12 サブマージアーク溶接金属の引張強度と靱性の関係の一例

接について述べる。

UOE ラインパイプのシーム溶接は、一般に品質と生産性を考慮して多電極のサブマージアーク溶接が使用される。UOE ラインパイプのシーム溶接部は鋼管の内面および外面から各々1層ずつ溶接する2層溶接により成り立ち、お互いの溶接金属は中央部で重なっている。

UOE ラインパイプのシーム溶接金属は母材に対してオーバーマッチングの強度と低温での高靱性を確保する必要がある。これらの要求値を満足する溶接金属を設計するため、溶接金属の強度と靱性の関係が検討された。図12は種々の化学組成を持つサブマージアーク溶接金属の引張強度と -30°C の吸収エネルギーの関係である⁵⁸⁾。図12では、溶接金属の引張強度が高くなるに従い吸収エネルギーは低下する傾向が見られる。特に、約 $1050\text{N}/\text{mm}^2$ を超えると、ベイナイト主体からマルテンサイトに組織変化しはじめるため、靱性が劣化する結果も得られており、過剰な強度は低温靱性の確保を困難とする。そのため、強度の上限を制限することで溶接金属の組織をベイナイト組織にすることが必要になる。又、高強度溶接金属では酸素量が高いと良好な低温靱性が得られないため溶接金属の酸素量を 200ppm 台にして、さらに酸化物形成元素を最適化することにより微細なベイナイト組織が得られた。その結果、約 $1000\text{N}/\text{mm}^2$ の引張強度を有する溶接金属でも -30°C で平均 150J 程度の高靱性が得られることが判明した。また、サブマージアーク溶接では溶接時に母材を溶かす量が多く溶接金属の化学組成は母材の組成にも影響されるため、母材の組成を考慮する必要がある。そのため、微細なベイナイト組織が得られる溶接金属の化学組成が得られる様に、母材の成分も考慮して新たにサブマージアーク溶接用溶接材料が開発された。

この新開発のサブマージアーク溶接用の溶接材料を用いることにより、高強度で、且つ、低温靱性の良好なX100およびX120UOEラインパイプのシーム溶接部を得ることができた⁵⁸⁾。

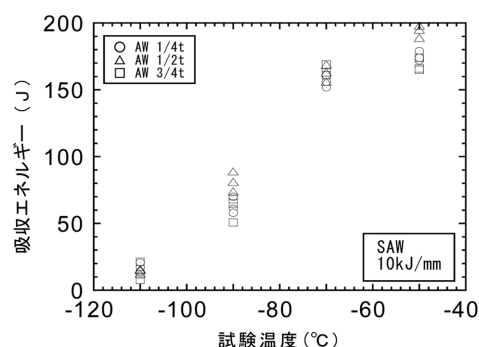


図13 溶接金属のシャルピー試験結果

(2) 高強度、高靱性海洋構造物用鋼の溶接ソリューション

高強度、高靱性海洋構造物用厚鋼板では、溶接継手に極低温靱性保障等の厳格な安全性が求められるだけでなく、厚鋼板を高効率で溶接施工する必要から、最近では大入熱溶接も要望されつつある。しかしながら、一般に溶接入熱が大きくなると粗大な粒界フェライトが生成しやすく⁵⁹⁾、また粒内変態組織であるアシキュラーフェライトも粗大化する⁵⁹⁾ため、溶接金属の靱性確保は困難となる。この課題克服のため、低C化によるM-A分率の低減、Niを使用した高靱性化、B添加による粒界フェライト抑制を組み合わせ高靱性化を検討し⁵⁹⁾、図13に示すように入熱 $10\text{kJ}/\text{mm}$ の大入熱サブマージアーク溶接においてもシャルピー試験吸収エネルギーが -70°C で 100J を上回る高靱性溶接金属が得られている⁶⁰⁾。溶接金属にNiが過剰に含まれると高温割れを起こしやすくなるが、ニューラルネットワークによる割れ予測計算を行い、溶接金属のNi量を2%程度に制限することで、高温割れの抑制が図られている⁶⁰⁾。

また、1パスのサブマージアーク溶接の溶接金属においてAl量によってアシキュラーフェライトの粒径が変化するという報告⁶¹⁾があり、より細粒なアシキュラーフェライトで高靱性溶接金属を得るためには、適量のAlが溶接金属に含有されるほうが好ましいとの指針が示されている⁶¹⁾。

(3) 耐硫酸・塩酸露点腐食鋼新S-TEN1の溶接ソリューション

耐硫酸・塩酸露点腐食鋼新S-TEN1の溶接では、母材と同様の耐食性指針に基づき溶接材料を開発している。一例として、溶接継手より切出した試験片を 80°C 、 10.5% 塩酸に浸漬した結果を図14に示す⁶²⁾。新S-TEN1鋼用に新規

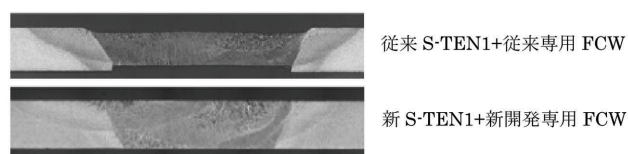


図14 塩酸浸漬後の溶接試験片
(10.5% 80°C の塩酸に24時間浸漬)

開発した専用溶接材料の溶接継手は、溶接金属の選択腐食が解消され、塩酸環境だけでなく硫酸環境でも母材と同等の優れた耐食性を示している⁶²⁾。

3. 新エネルギー用鋼とその将来展望

3.1 新エネルギー用鋼（風力発電用鋼）

世界的なCO₂排出量削減への動きや福島第一原子力発電所事故に端を発した脱原子力発電の観点から、風力、太陽光、バイオマスなどの再生可能な新エネルギーへの注目が高まっている。風力発電はこれまで陸上を中心に導入が進められてきたが、環境や周辺住民への配慮、さらには設置場所の減少といった理由から、今後は洋上設置化が進むとされている。既に欧州の北海、バルト海西部を中心に大規模洋上ファームの建設が計画されている。

図15は発電容量3 MW級の標準的な洋上風車に用いられる鋼材とその重量である⁶³⁻⁶⁵⁾。1基あたり厚板、電磁鋼板、棒鋼、鋳鉄といった鉄鋼材料が合計1 000 トン程度使用されている。今後、風車は大型化していく傾向にあるため、1基あたりの鋼材使用量の増大が見込まれている。2015年から北海での建設を開始する英国Round 3 プロジェクトでは年間100万トン以上の鋼材需要が期待されている。

タワーと基礎（モノパイル形式）は厚板の溶接鋼管である。これらはYP355級の鋼材を溶接した単位鋼管を円周方向に連結して製作されるが、基礎用鋼材はタワー用鋼材に比べて高い特性が要求される。タワーは板厚40mm以下、0℃から-20℃程度のシャルピー特性が求められるのが一般的であるのに対し、基礎では、板厚50～120mmの厚手材で母材および溶接部でも-40℃シャルピー特性といった海洋構造物材の中級グレードや造船Fグレード鋼とほぼ同じ特性が求められる。新日本製鐵では、これら風力向け用の鋼材を既に提供し始めている。

3.2 将来の大容量高効率発電用鋼

3.2.1 エネルギー需給環境の予想

社会インフラストラクチャを維持、発展させるためのエ

ネルギーは、主に発電、輸送に使用されるリソースであり、現在は主に化石燃料に依っている。日本の発電量の現状は約1億kWhに達し、そのうち火力発電は60%を占め、約30%が原子力発電に依存している。発電形態の見直しが検討されている中、今後は風力、太陽光等の再生可能エネルギーの増加と火力発電への依存が増すものと推定される。とりわけ、資源寿命が長く、比較的安価で、かつ資源産出場所が特定地域に限定されない石炭を燃料とする高効率火力発電は、CO₂分離回収技術との組合せにより、低排出かつ長時間耐久性の高い発電プラントとしての期待が大きい。

3.2.2 大容量高効率石炭火力発電用鋼

石炭火力発電の効率向上はオイルショックに端を発して、蒸気温度の高温高压化を中心として技術の改良が進んだ。しかしながら目指す蒸気温度がさらに高温化してくると、適用できる鋼材のクリープ強度がネックとなって、蒸気温度600℃以上を実現するのは困難な状況にある。

蒸気温度の上昇による高効率操業はCO₂排出低減に重要であるから、その高温化に耐える材料への期待は大きい。このために、耐熱鋼に添加する各種元素の最適化の研究開発が進み、中でもCrの最適値が約9%であることが近年提案されており、その設計思想に加えてW、B等の新たな強化元素の添加、あるいは初期組織の制御などをもって、現在650℃以上級の蒸気条件に耐えるフェライト系耐熱鋼の研究が模索されている。蒸気温度を650℃とすることが出来れば変換効率が3%向上し、700℃まで耐久出来ればさらに3%の効率向上が見込まれ、CO₂排出量がその分低減できる。

一方で650℃以上の温度域はフェライト系耐熱鋼の変態点に近く、高温の変形抵抗となる因子を組織中に導入しても効果が限定され、高強度化は非常に難しい。したがって、既存の規格鋼種だけでなく、より高温あるいは長時間でも強度を維持できる新たな組織制御技術の構築が重要であり、経済産業省のプロジェクト等で基礎検討が進んでいる。すなわち、従来の考え方である初期転位組織の高強度化と粒内析出強化だけでなく、例えば、粒界を活用して局部的に析出物を高密度で分散させた組織、あるいは経時変化の少ない組織の活用など、新しい発想による鋼材の探索を進めている。

これら耐熱鋼の研究にはクリープ特性の評価が必須であり、極めて長時間の試験が必要となる。長時間の材料寿命予測技術の高精度化を狙うと共に、開発に要する時間短縮のために、長時間の特性を見極める強度予測技術も同時に開発されつつあり、両者を併せた極長時間のクリープ特性に優れた材料の研究を通じて、先進超々臨界圧発電（A-USC：Advanced-Ultra Super Critical steam condition）の構想への材料の供給を検討中である。

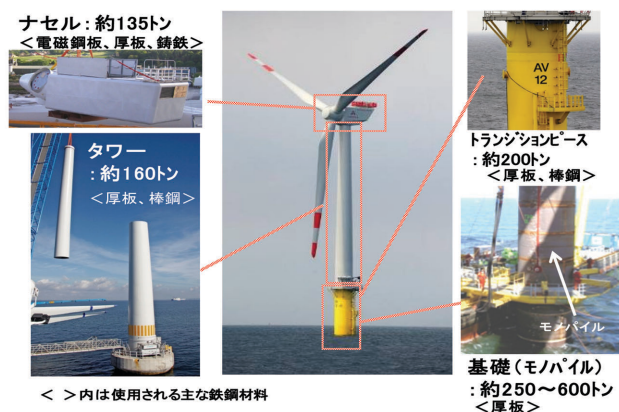


図15 洋上風車の鋼材所要と使用される鉄鋼材料⁶³⁻⁶⁵⁾

参考文献

- 1) 朝日均, 十河泰雄, 上野正勝, 東山博吉: 製鉄研究. (328), 16 (1988)
- 2) 朝日均, 原卓也, 川上哲, 杉山昌章, 高橋明彦, 坂本俊治, 佐藤直治, 重里元一: 新日鉄技報. (362), 6 (1997)
- 3) 小笠原昌雄, 神山藤雅, 丸山和士, 津留英司, 矢崎陽一, 三牧敏太郎, 田辺正義, 武末修一: 製鉄研究. (328), 22 (1988)
- 4) 津留英司, 岡村邦彦, 塚野保嗣, 吉沢治之, 丸山和士, 岡正春, 佐藤直治: 新日鉄技報. (371), 68 (1999)
- 5) Agata, J., Tsuru, E., Sawamura, M., Asahi, H., Tsugihara, H.: SPE Drilling Conference and Exhibition 2009. Amsterdam, 2009, SPE
- 6) Agata, J., Tsuru, E., Sawamura, M., Asahi, H., Tsugihara, H.: SPE Drilling Conference and Exhibition 2011. Amsterdam, 2011, SPE
- 7) Asahi, H., Hara, T., Sugiyama, M., Maruyama, N., Terada, Y., Tamehiro, H., Koyama, K., Ohkita, S., Morimoto, H.: International Journal of Offshore and Polar Engineering. 14 (1), 11 (2004)
- 8) Asahi, H., Tsuru, E., Hara, T., Sugiyama, M., Terada, Y., Shinada, H., Ohkita, S., Morimoto, H.: International Journal of Offshore and Polar Engineering. 14 (1), 36 (2004)
- 9) Tamehiro, H.: International Convention "Pipelines: The Ebergy Link". Townsville, 1996
- 10) 寺田好男, 為広博, 山下貢, 鮎川直史, 原卓也: 新日鉄技報. (362), 38 (1997)
- 11) Hara, T., Shinohara, Y., Asahi, H., Terada, Y., Doi, N.: Proceedings of International Pipeline Conference. Calgary, 2008, ASME
- 12) Hara, T., Fujishiro, T., Terada, Y., Inoue, T., Asahi, H., Doi, N.: Pipeline Technology Conference PIPE-15. Ostend, 2009
- 13) Tsuru, E., Asahi, H., Doi, N., Murata, M.: Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, 2007, ISOPE
- 14) Tamehiro, H., Takeda, T., Matsuda, S., Matsuda, K., Yamamoto, K., Okumura, N.: Transactions ISIJ. 25, 982 (1985)
- 15) Tsuru, E., Shinohara, Y., Asahi, H.: International Journal of Offshore and Polar Engineering. 18 (3), 176 (2008)
- 16) Shinohara, Y., Tsuru, E., Asahi, H., Hara, T., Doi, N., Ayukawa, N., Murata, M.: International Journal of Offshore and Polar Engineering. 18 (3), 220 (2008)
- 17) Hara, T., Shinohara, Y., Hattori, Y., Muraki, T., Doi, N.: Proceedings of the 21th ISOPE Conference. Hawaii, 2011, ISOPE
- 18) Shigesato, G., Shinohara, Y., Hara, T., Sugiyama, M., Asahi, H.: Proceedings of the 17th ISOPE Conference. Lisbon, 2007, ISOPE
- 19) 津留英司, 阿形淳, 篠原康浩, 吉田達哉: CAMP-ISIJ. 23, 297 (2010)
- 20) Yoshida, Y., Tamehiro, H., Chijiwa, R., Funato, K., Doi, N., Tanaka, K., Kibe, M.: Proceedings of the 12th Int. Conf. OMAE. Glasgow, 1993, ASME
- 21) 長井嘉秀, 深水秀範, 井上肇, 伊達昭宏, 中島隆雄, 児島明彦, 足達智彦: 新日鉄技報. (380), 12 (2004)
- 22) 大谷幸三郎, 服部恵一, 村岡寛英, 川副文宏, 鶴田早苗: 新日鉄技報. (348), 10 (1993)
- 23) 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研: 鉄と鋼. 61, 2589 (1975)
- 24) Chijiwa, R., Tamehiro, H., Hirai, M., Matsuda, H., Mimura, H.: Proceedings of the 7th Int. Conf. OMAE. Houston, 1988, ASME
- 25) 土師利昭, 栗飯原周二, 大野恭秀, 内野耕一, 川島善樹果, 富田幸男, 千々岩力雄, 三村宏: 製鉄研究. (326), 36 (1987)
- 26) Aihara, S., Tomita, T., Tsuzuki, T., Saitoh, N., Yoshida, Y., Ohkita, S., Imai, I.: Proceedings of the 18th Int. Conf. OMAE. Newfoundland, 1999, ASME
- 27) Chijiwa, R., Kojima, A., Tsuruta, T., Date, A., Isoda, S., Aihara, S., Saitoh, N., Ohkita, S., Imai, S.: Proceedings of the 18th Int. Conf. OMAE. Newfoundland, 1999, ASME
- 28) 小倉信和: 溶接技術. 8, 190 (1960)
- 29) Plummer, F. L.: Welding Journal. 25, 1081 (1946)
- 30) Brophy, G. R., Miller, A. J.: Trans. ASM. 41, 1185 (1949)
- 31) Hardwick, D.: Iron Steel. 34, 414 (1961)
- 32) Pitaud, J.: Rev. Metallurgy. 60, 83 (1963)
- 33) Consortium of Five Japanese Companies of Osaka Gas Co., Ltd., Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., Toyo Kanetsu K.K., Nippon Steel Corporation, Sumitomo Metal Industries Ltd.: Final Research Report on Crack Arrest Properties of 9%Ni Steel and Relation Between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests to Gas Research Institute. 1986, p.89
- 34) Miyakoshi, H., Ishikura, N., Suzuki, T., Tanaka, K.: Proceedings for Transmission Conf. Atlanta, 1981, American Gas Association
- 35) Ishikura, N., Kohno, T., Maeda, H., Arimochi, K., Tanaka, K.: International Conference "Transport and Storage of LNG & LPG". Brugge, 1984
- 36) Yano, Y., Sakurai, H., Mimura, H., Wakita, N., Ozawa, T., Aoki, K.: Transactions ISIJ. 13, 133 (1973)
- 37) 矢野清之助: 学位論文 6%Ni鋼の靱性と α - γ 二相共存域熱処理法に関する研究. 1977
- 38) 斎藤直樹, 山場良太, 村岡寛英, 佐伯修: 新日鉄技報. (348), 25 (1993)
- 39) 星野学, 斎藤直樹, 村岡寛英, 佐伯修: 新日鉄技報. (380), 17 (2004)
- 40) Nippon Steel Corp.: Development of a New 5 1/2 Ni Steel for Cryogenic Service (N-TUF-CR196). 1974
- 41) Furuya, H., Saitoh, N., Takahashi, Y., Kurebayashi, K., Kayamori, Y., Inoue, T., Uemori, R., Okushima, M.: Proceedings of the 30th Int. Conf. OMAE. Rotterdam, 2011, ASME
- 42) Hamada, K., Tokuno, K., Takeda, T.: Nuclear Engineering and Design. 139, 227 (1993)
- 43) Ohgami, M., Mimura, H., Naoi, H., Ikemoto, T., Kinbara, S., Fujita, T.: Nippon Steel Tech. Rep. (72), 59 (1997)
- 44) 長谷川泰士, 岡山豊, 川副文宏, 梅木進, 吉田卓: 圧力技術. 42

- (6), 328 (2004)
- 45) Moskovitz, P. D.: Ind. Eng. Chem. 51, 1305 (1959)
- 46) Holmes, D. R.: Dewpoint Corrosion. England, Ellis Horwood Ltd. 1985
- 47) 志垣政信: 絵とき廃棄物の焼却技術. 東京, オーム社, 1995, p.56, p.73
- 48) 手塚英志, 野口正, 宇佐見明: 火力原子力発電. 49, 991 (1998)
- 49) 小若正倫: 金属の腐食損傷と防食技術. 新版. 東京, アグネ承風社, 1995, p.1375
- 50) 寺前章, 門智, 乙黒靖男, 轟理一: 富士製鉄技報. (17), 103 (1968)
- 51) 宇佐見明, 野口正, 手塚英志, 西村哲, 楠隆: 新日鉄技報. (377), 9 (2002)
- 52) 宇佐見明, 田辺康児, 都築岳史, 糟谷正, 間瀬秀里, 富田幸男, 江原隆一郎, 近藤浩: 新日鉄技報. (365), 90 (1997)
- 53) 東京電力(株): 「神流川発電所で導入した先端技術」パンフレット
- 54) Tsuzuki, T. et.al.: Proc. on Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants-Takasaki. 6-1, 2009
- 55) Okushima, M., Kurebayashi, K., Tokuno, K.: Welding in the World. 52, 531 (2008)
- 56) 今井兼敬, 萩原行人, 岡山豊, 熊谷達也, 千葉秀隆, 山中勝義: 新日鉄技報. (348), 47 (1993)
- 57) 井上尚志, 田辺康児, 小原昌弘, 小山邦夫, 富田幸夫, 千々岩力雄, 磯田征司: 新日鉄技報. (348), 32 (1993)
- 58) Morimoto, H., Shinada, K., Koyama, K., Asahi, H., Sugiyama, M., Terada, Y., Hara, T., Ayukawa, N., Doi, N., Miyazaki, H., Yoshida, T., Terasawa, T., Murata, M.: Pipeline Technology PIPE-15. Ostend, 2009
- 59) 堀井行彦, 若林正邦, 大北茂, 名村優: 製鉄研究. (327), 3 (1987)
- 60) Kojima, K., Ohkita, S., Aihara, S., Imai, S., Motomatsu, R., Umeki, M., Miura, T.: Proceedings of the 18th Int. Conf. OMAE. New-foundland, 1999, ASME
- 61) 児嶋一浩, 長谷川俊永, 皆川昌紀, 大谷潤, 石田浩司: 溶接学会全国大会講演概要. 83, 講演番号228 (2008)
- 62) 児嶋一浩, 宇佐見明: 配管技術. 46 (3), 41 (2004)
- 63) Hube, W.: European Offshore Wind Energy 2009. Stockholm, September 2009, EWEA
- 64) Lund, R.: European Offshore Wind Energy 2009. Stockholm, September 2009, EWEA
- 65) Van der Veen, M.: European Offshore Wind Energy 2009. Stockholm, September 2009, EWEA



植森龍治 Ryuji UEMORI
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部長
工博
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



長谷川泰士 Yasushi HASEGAWA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



原 卓也 Takuya HARA
君津技術研究部 主幹研究員
工博



井上健裕 Takehiro INOUE
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 Ph.D.



篠原康浩 Yasuhiro SHINOHARA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主任研究員



井上裕滋 Hiroshige INOUE
鉄鋼研究所 接合研究センター
主幹研究員 工博



古谷仁志 Hitoshi FURUYA
名古屋技術研究部 主任研究員

執筆協力



本間竜一 Ryuichi HONMA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主任研究員



津留英司 Eiji TSURU
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



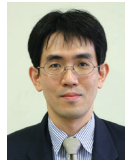
金子道郎 Michio KANEKO
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE
鉄鋼研究所 接合研究センター所長
工博



森本 裕 Hiroshi MORIMOTO
鉄鋼研究所 接合研究センター
主幹研究員 工博



児嶋一浩 Kazuhiro KOJIMA
鉄鋼研究所 接合研究センター
主任研究員



澤村 充 Mitsuru SAWAMURA
名古屋技術研究部 主幹研究員



斎藤直樹 Naoki SAITOH
名古屋技術研究部 研究審議役



朝日 均 Hitoshi ASAHI
知的財産部 マネジャー
工博