

展望

耐食性継目無鋼管の現状と展望

Current Status and Future Prospects of Corrosion-Resistant Seamless Tubes and Pipes

大塚伸夫

Nobuo Otsuka

小溝裕一

Yuichi Komizo

住友金属工業(株) 総合技術研究所
鋼管研究開発部 部長研究員

住友金属工業(株) 総合技術研究所 副所長
鋼管研究開発部 部長

1 緒言

継目無鋼管は製管による継目(溶接部)がなく均質な金属組織が得られることから、溶接部の耐食性や機械的特性が懸念される用途を中心に、高い信頼性が要求される部材で広く使用されている。本稿では継目無鋼管のなかで耐食用途に用いられる鋼管を取り上げ、一例として石油/ガス掘削・輸送用鋼管ならびに発電用鋼管についてその材料開発の経緯と現状、ならびに将来動向を述べることにする。

2 石油/ガス掘削・輸送用耐食鋼管

2.1 耐食性油井管

油井・ガス井に用いられる鋼管は掘削のためのドリルパイプ、掘削後に井戸内部に挿入され地層の崩壊を防ぐケーシング、ケーシング内部につり下げて生産に用いられるチュービング等からなり、油井管用材料(Oil Country Tubular Goods、OCTG)と呼ばれる。OCTGは信頼性の点から継目無鋼管が多用される。油井・ガス井はFig. 1¹⁾に示すように年々深井化しており、N80(降伏強さ551 MPa級)やP110(降伏強さ758 MPa級)等の高強度油井管がアメリカ石油協会(API)の規格化を通じて開発された。ところが1950年代にカナダで起きた硫化物応力割れ(Sulfide Stress Cracking、SSC)事故を契機に本腐食環境における高強度鋼のSSCが注目され、精力的な研究が進められた。低合金鋼のSSCは水素脆化の一形態であり、生産流体に随伴して産出される硫化水素(H₂S、H₂Sを含有する腐食環境をサワー(sour)と呼ぶ)が腐食反応過程で生じる水素ガスの散逸を抑制し、鋼中への水素侵入を著しく増加させることで問題となる。SSCは高強度鋼ほど感受性が高いため、耐SSC性を満足する高強度鋼の開発が進められた。鋼材の耐SSC性は鋼材のミクロ組織に依存し、マルテンサイト単相組織とした上でNb添

加とQT熱処理により細粒組織とすること²⁾、P、Mn等の粒界偏析元素を低減し粒界割れを防止すること³⁾、焼戻し温度を高め内部歪みを低減すること²⁾等が有効であることが判明した。1960年代以降耐SSC性に優れた低合金油井管が開発され、C75、C90、T95、C110(数字はksi単位でのspecified minimum yield strength)と耐食性油井管の高強度化は着実に進んでいる(Fig. 1)。

大深度油井では井戸底温度が高く(5000 m級の井戸で250℃程度になる)非常に厳しい腐食環境となる。腐食環境が厳しい油井では通常インヒビター(腐食抑制薬剤)注入で鋼材を保護するが、高温ではインヒビターの効果に限界があること、海底油田では海上リグからのインヒビター注入設備費が極めて高いこと、インヒビターによる環境汚染の懸念があること等により、技術的・経済的にインヒビター適用が困難となるケースが増加し、インヒビター注入不要な耐食性合金鋼(Corrosion Resistant Alloy、CRA)が種々の腐食環境に合わせて開発されている⁴⁾。CRAは耐食性の観点からマル

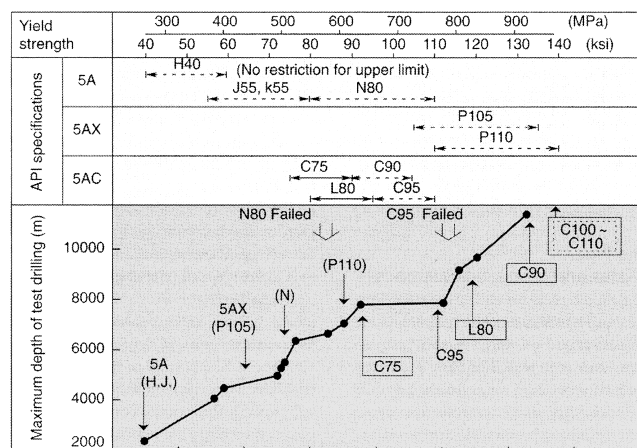


Fig.1 Maximum drilling depth of oil/gas wells and the yield strength of their low-alloy OCTG materials represented by the API specification¹⁾

テンサイト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼、オーステナイト系高Ni合金の3種に大別される。これら各鋼種の適用条件をCO₂分圧とH₂S分圧で整理した一例をFig. 2に示す¹⁾。

CO₂を含有した腐食環境はスイート (sweet) と呼ばれる。CO₂はH₂Sとともに生産流体に随伴して産出されるが、CO₂は水に溶解して弱酸を形成し、鋼の腐食反応で消費されるH⁺イオンの供給源として作用するため、炭素鋼の腐食速度は同一pHの強酸水溶液に比べてはるかに大きく、炭素鋼はメサコロージョンと呼ばれる虫喰い状の激しい腐食を受ける。CO₂環境下で腐食速度を低減するにはCr添加が有効であり、CO₂環境下で耐食性に優れかつ経済的な13Cr鋼 (AISI420) の需要が急速に増大している。しかし13Cr鋼は150℃以上で腐食速度が大きくなり、また微量H₂S環境でSSC感受性を有する。そのため、低C化によりCr炭化物析出を抑制して有効Cr量を確保することでCO₂環境での適用限界温度を高め、またMo添加により微量H₂S環境下での不動態皮膜を安定化させ、鋼への水素侵入を抑制した改良型13Cr鋼 (Super 13Cr Steel, Super Martensitic Stainless Steelなどと呼称) が開発された⁵⁻⁸⁾。さらに温度の高い環境には22~25%Crを含む二相ステンレス鋼が用いられる。H₂Sを多量に含む油井・ガス井では優れた耐食性を有するオーステナイト系高Ni合金が使用される。その限界使用温度は耐食合金元素であるMoおよびW含有量に依存し、環境に応じてMo、W添加量を変化させた合金がシリーズ化されている⁹⁾。

2.2 耐食性輸送管

石油・天然ガスの海底・地上輸送に使用される鋼管を輸送管 (ラインパイプ) と呼び、ギャザリングライン (坑口 (well head) から集合設備まで)・フローライン (集合設備から脱水・脱硫処理設備まで) 等腐食環境に曝される部位には厚肉の継目無鋼管、長距離輸送用トランクライン (脱水・脱硫処理設備以降の配管) には溶接大径管が多用される。ラインパイプは一般に油井管に比べ低応力で使用されることから強度が低く (例えばAPI規格でX65、降伏強さ448 MPa級が多い)、

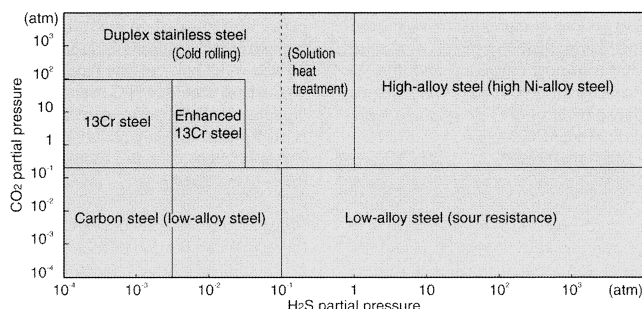


Fig.2 Suggested well conditions for the various OCTG materials¹⁾

流体にH₂Sが含まれる場合はSSC (応力存在下で水素が関与する腐食現象) に加えて水素誘起割れ (Hydrogen Induced Cracking、HIC、応力無負荷状態で水素が関与する腐食現象) が問題となる。HICは圧延により伸延された介在物や肉厚中心偏析部の硬化組織が起点となるため、脱S、Ca処理による介在物形態制御やC、P、Mnの低減による偏析軽減が対策とされてきた¹⁰⁾。溶接大径管では近年、圧延・加速冷却による加工熱処理技術 (Thermo-Mechanical Controlled Process、TMCP) とマイクロアロイング技術の組み合わせにより、低い炭素当量 (C_{eq}) にも関わらず鋼材の高強度化が可能になった¹⁰⁾。これにより高強度化・高韌化のみならず、偏析部のC濃縮回避による耐HIC性向上や、溶接熱影響部 (以下HAZという) の硬度低減による耐SSC性向上が可能となった¹⁰⁾。

海底油田開発においては開発コスト削減の観点から海底仕上げ井 (sub sea completion) が増加する傾向にあり、海底にある坑口 (well head) から脱水・脱硫処理設備のあるプラットフォームまでのフローラインに生産流体ならびに海水に対する防食対策が必要になった。この部位は従来炭素鋼がインヒビター処理で防食され使用されていたが、海底仕上げ井ではインヒビター処理は高コストかつ環境汚染防止の観点から使用が制限される。そこで生産流体と海水に対する耐食性に優れ、しかも溶接可能な材料として二相ステンレス鋼が注目された。

フェライト相とオーステナイト相からなる二相ステンレス鋼は高強度でかつ溶接でき、しかも同程度の耐食性 (このクラスの鋼では耐孔食性が問題となる) をオーステナイト系ステンレス鋼に比べ安価に得られるため、ラインパイプ用途に好都合な利点を有している。各種二相ステンレス鋼の位置づけはFig. 3¹¹⁾のように整理され、Cr、Mo、NおよびWを含

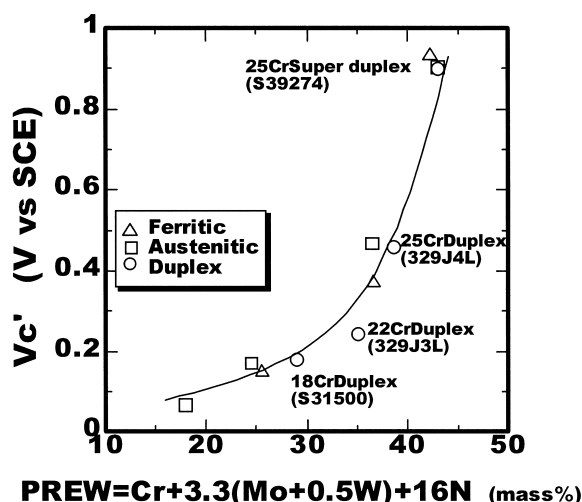


Fig.3 Pitting corrosion resistance of duplex stainless steels¹¹⁾
PREW : Pitting Resistance Equivalent with W
Vc' : 孔食電位、SCE : 標準電極電位 (カロメル電極)

むいわゆる孔食指標 (PREW) = $Cr + 3.3 (Mo + 0.5W) + 16N^{12)}$ が大きいほど耐孔食性が高い。ラインパイプ用に初めて本格的に実用となったのは溶接性が良好な22Cr系二相ステンレス (SUS329J3L等) である。この材料は海底フローラインに使用されているが、海水腐食への懸念から海水環境での耐孔食性を高めた二相ステンレス鋼のニーズが高まり、1990年代になるとMo、W、Nを多く含有するスーパー二相ステンレス鋼 (PREW > 40 mass %, たとえばUNS S39274) が開発され^{12,13)}、海底フローラインやアンピリカルチューブ (周辺に設置した小規模油井を制御する配線・配管用小径管) で実用化されている。

近年、カソード防食やコーティング技術が向上したため、耐海水性は二相ステンレス鋼より劣るがCO₂+微量H₂S環境で耐食性を有し、しかも材料コストを大幅に削減できる溶接性に優れたマルテンサイト系改良型13Cr鋼の適用が、北海地区を中心に海底フローラインで急速に広まっている¹⁴⁾。改良型13Cr鋼は、溶接熱影響部のマルテンサイト変態にともなう硬化を原因とする割れ、および溶接時に溶接金属中に溶解した水素に起因する割れを低C化により防止している。

3 発電用耐食材料

3.1 火力発電ボイラ用鋼管

我が国の火力発電ボイラではこれまでタービンへ供給される蒸気の高温・高圧化により発電効率を向上させてきた経緯があり (Fig.4¹⁵⁾)、現在600℃級 (593℃~610℃、24~27 MPa) 超々臨界圧 (Ultra Super Critical pressure, USC) プラントが実用化されるに至った¹⁶⁾。さらに高温・高圧化を目指した検討が材質面を中心に進められている。ボイラ用鋼管は火炉を構成する水壁管と蒸気を過熱する過熱器管・再熱器管等の小径管 (チューブ材という) と、大量の高温・高圧水蒸気を蒸気タービンへ供給するための大径の管寄せ・主

蒸気管等 (パイプ材という) からなる。水壁管の到達温度はこれまで450℃程度以下であったため従来は炭素鋼から1%Cr鋼が使用されてきたが、プラントの高温化にともない高温強度が高くかつ溶接施工が容易な材料が開発された¹⁵⁾。過熱器管・再熱器管では高温でのクリープ強度の高い材料が必要であるが、管内面は水蒸気酸化、管外面は石炭等燃料に含まれるSによる高温腐食が問題になる。そのため高強度・高耐食オーステナイト系ステンレス鋼が使用される。管寄せや主蒸気管等でも高強度材が必要であるが、火力発電ボイラは日常的に起動・停止を繰り返す負荷変動運転される場合が多いため、これらの厚肉パイプ材には靱性や耐熱疲労特性が要求される。そのため熱膨張および熱伝導特性に優れたフェライト系高強度9~12%Cr鋼が種々開発された¹⁶⁾。

2%Cr鋼から12%Cr鋼に至るフェライト系耐熱鋼の開発系統図をFig.5に示す。フェライト系耐熱鋼の高温強度向上は①転位強化 (C、Nなどによるマルテンサイト・ベイナイト組織) ②固溶強化 (Mo、Wなど) ③析出強化 (M₂₃C₆、MX等の炭窒化物、Cu、Laves、 α'' -FePdなど) により実現された¹⁷⁾。一方耐食性の向上はCr、Siの効果大きい¹⁸⁾。18-8系汎用ステンレス鋼から最新のボイラ用高Cr高Ni合金に至るオーステナイト系ステンレス鋼の開発系統図をFig.6に示す。オーステナイト系ステンレス鋼はフェライト系耐熱鋼に比べて種々の合金元素を多量に固溶でき、また高温での元素拡散が遅いため強度・耐食性の両面で有利である。しかしながらフェライト系耐熱鋼のように転位強化が利用できないため、高温強度の向上には①固溶強化 (Mo、Wなど) ②析出強化 (M₂₃C₆、MX等の炭窒化物、 ϵ -Cu、 α -Cr、金属間化合物など) が主に用いられてきた¹⁹⁾。また高Cr化により優れた耐食性が得られる反面 σ 相析出による脆化が懸念されるため、Ni、N等の添加で相安定化が図られている。

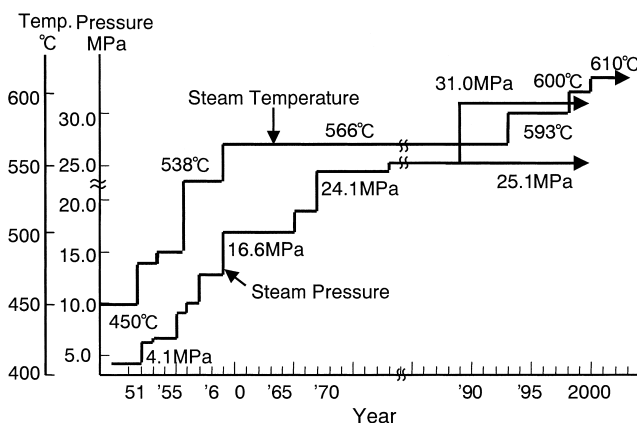
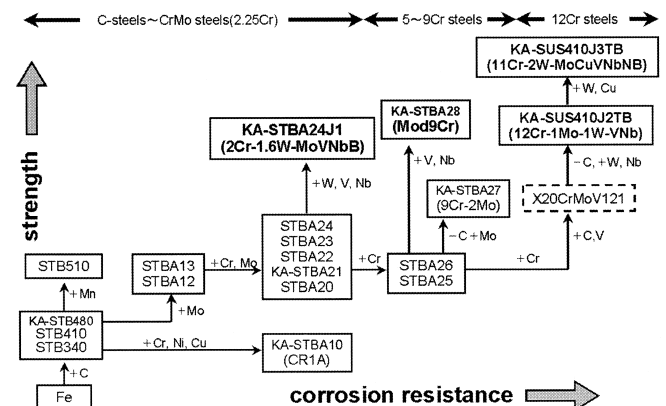


Fig.4 Turbine inlet steam conditions of the steam generating boilers in Japan¹⁵⁾



KA: qualified material in the Japanese technical standard for the fossil power generating equipments

Fig.5 A tree-chart of ferritic steels developed for boilers

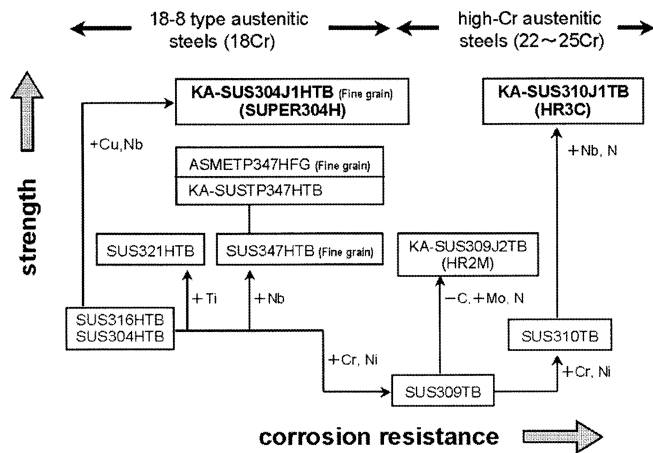
3.2 原子力発電用鋼管

現在我が国には29基の沸騰水型軽水炉（BWR）、23基の加圧水型軽水炉（PWR）が存在する。原子力による年間発電量は国内総発電量の約35%に至り（2001年実績）、2010年には約42%が目標とされている。原子力発電用鋼管には高い信頼性が求められ、その耐食性確保は重要な課題であり、各部位の必要性能に応じた材料が選択されている。

BWRの概略構造と代表的な使用材料を一例としてFig. 7に示す。炉水系の給水配管、給水加熱器伝熱管、再循環ループ配管などには耐全面腐食性が求められ、継目無オーステナイト系ステンレス鋼管が採用されている。当初は塩化物イオン

を含まない純水環境ということでSUS304が使用されていたが、1965年に米国のDressden-1でSUS304配管溶接熱影響部に応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、SCC）が発生して以降、溶存酸素を含む高温高圧純水中における配管溶接熱影響部のSCCが顕在化した²⁰⁾。SCCは材料・環境・応力の三因子が重畳して発生するが、材料因子は鋭敏化によるCr欠乏層の形成であった。そこで①C量を0.020%以下として鋭敏化を抑制し②Mo添加により鋭敏化を抑制し不働態皮膜を安定化させ③0.12%以下のN添加でSCCに悪影響を与えず強度を確保したSUS316NGが開発され²¹⁾、部位や環境に応じてSUS304等と使い分けられている。このように配管材料には改良がなされてきたが、BWR構造物（シュラウド、配管）でオーステナイト系ステンレス鋼のSCCが確認され、目下材質、部位、使用状況等の調査が進められている。湿分を含む主蒸気管など蒸気系では耐エロージョン性が重要視され、炭素鋼や低合金鋼が使用されている。炭素鋼は蒸気中の湿分増加にともないエロージョン損傷が増加するため、湿分の高い二相流が存在するような部位では低合金鋼が採用されている²²⁾。

PWR固有の機器の1つとして蒸気発生器（Steam Generator、SG）がある。SGは継目無管で構成され、管内面を流れる一次側冷却水の熱により管外面の二次側冷却水を加熱沸騰させる熱交換器である。当初は二次側冷却水への塩化物混入を危惧し、塩化物イオンによるSCC抵抗性に優れたNi基合金Alloy600（15Cr-75Ni-Fe）が使用された。Ni基合金では炭化物はその固溶度が低いいため容易に粒界析出してCr欠乏層を形成しやすい。したがって、Cr欠乏層起因のSCCに対



KA: qualified material in the Japanese technical standard for the fossil power generating equipments

Fig.6 A tree-chart of austenitic steels developed for boilers

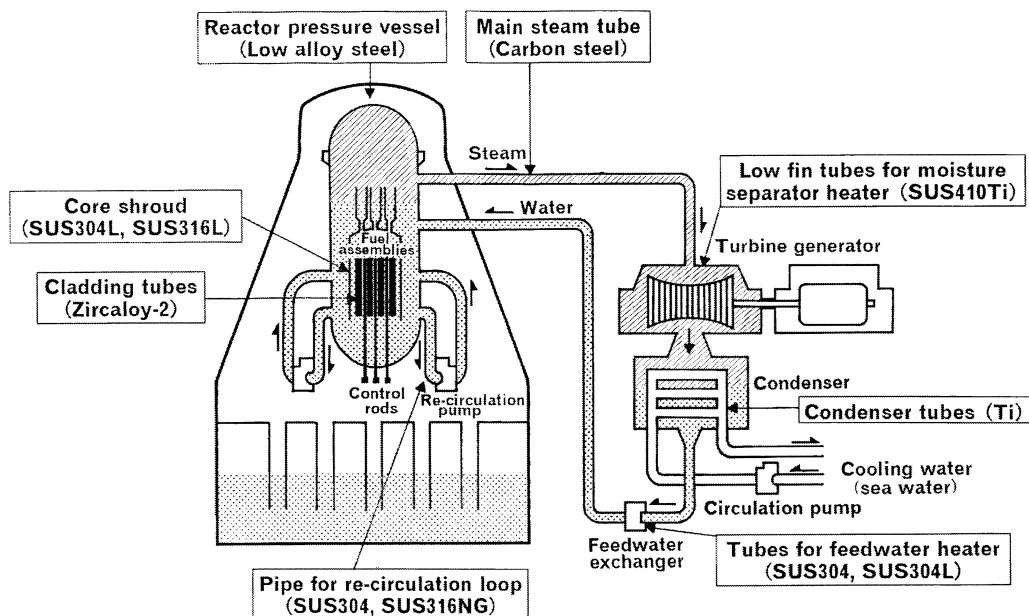


Fig.7 Typical structural materials of a boiling water reactor

するNi基合金の抵抗性をさらに向上させるため、Alloy600に特殊熱処理を施してCr欠乏層を回復させるとともに、粒界析出したCr炭化物によりSCC進展を抑制したTT600が開発され、耐SCC性が向上した²³⁾。最近ではCr量を増加させ、一次側冷却水に対する耐SCC性と二次側冷却水に対する耐粒界腐食性、耐SCC性をさらに向上させたTT690 (30Cr-60Ni-Fe) が採用されている²⁴⁾。

3.3 廃棄物発電ボイラ用鋼管

未利用エネルギー有効活用観点から都市ごみ焼却プラントにおいて廃熱回収効率を向上させる動きが定着している²⁵⁾。従来廃熱ボイラの蒸気温度は腐食防止のため300℃以下であったが、最近では400℃の蒸気を出すプラントが多くなり、それにともないボイラ用鋼管も炭素鋼に代わり耐食性に優れた火SUS310J1TB等の高Cr高Niオーステナイト系ステンレス鋼管が蒸気温度の高い部位で使用されるようになった²⁶⁾。ごみ焼却プラントは継目無ステンレス鋼管の新たな適用先となっている。

4 今後の展望

4.1 耐食性油井管

現在、大規模鉦床での油井・ガス井開発に加えて5000 mを越える高深度井の開発が盛んになっており、材料に対するユーザーからの高強度化の要望は依然として強い。またこれまで採算性の観点から開発が見送られてきた小規模井の開発や既存井での採油率向上、トータルコスト削減による採掘の効率化が指向されている。また増進採取法 (Enhanced Oil Recovery, EOR) の一つである水攻法 (Water Injection) において、圧入水から油層に硫酸塩還元菌が混入し、その代謝で生成するH₂Sによりスイート油層がサワー化する問題も指摘されている。耐サワー性を兼ね備えた低合金鋼、13Cr鋼に対する要望は強い。コイルドチュービングや拡張ケーシング (Expandable C/S) といった新たな掘削・生産技術開発によるトータルコスト低減も検討されている。コイルドチュービングは前もってチュービングを周継ぎしてコイルに巻き取った状態にしたものを現地で巻き戻しながら井戸に挿入し、生産が済めばまた別の井戸に用いるための鋼管で、小規模油田開発の生産コストを下げるために不可欠な材料である。コイルドチュービングは生産効率を上げるため既存のチュービングの中に挿入するVelocity tubingとして用いられることもある²⁷⁾。また掘削コストを大幅に削減するため、生産能力を維持したまま掘削径を小さくするスリムホール化技術が望まれ、Expandable C/S法がShellを中心に検討されている²⁸⁾。Expandable C/S法は油井内に設置されたケー

シングの管径を管内面にプラグを通して広げる手法であり、現状ではサンドスクリーン (砂混入防止用ネット) などの一部に適用されているが、将来的にはケーシングあるいはチュービングを含めた井戸全体への適用が予想される。これらの新生産技術では油井管はかなりの冷間加工を受けることになるので、加工性に優れるとともに加工後の耐食性確保まで考慮にいられた材料が望まれる。

4.2 ラインパイプ

地球環境保全の観点から石油から天然ガスへのエネルギーシフトが現今の大きなトレンドであり、天然ガス生産・輸送の重要性はますます高まる方向にある。天然ガスは高压操業ほど生産輸送効率が上がるため、トランクラインでの高压輸送が望まれる。このため耐食性ラインパイプも高強度化あるいは厚肉化が今後の大きな流れであり、溶接大径管では耐SSC性を有するX80 (降伏強さ551 MPa級) の開発も報告されている²⁹⁾。また現地溶接施工コスト低減のため、レーザーや低圧真空中で電子ビームを用いたワンショット (一回切り) 溶接法も検討されつつある。これらのワンショット溶接は従来のアーク溶接とは溶接冶金現象が異なることから、ワンショット溶接に対応した新鋼種が必要とされる。海底フローラインには前述のように溶接可能な13Cr系材料の適用が益々拡大していくと思われ、溶接部の耐食性向上研究が続けられている³⁰⁾。深海に設置される海底フローラインには、海底の高い水圧によるコラプスに耐え、しかもHICを起こしにくい耐サワー、高強度、厚肉の継目無鋼管が必要になり、最近インライン熱処理の特性を生かしたX70 (降伏強さ482 MPa級) 耐サワー継目無鋼管が開発されている³¹⁾。今後、天然ガスがより高压で輸送されるようになることから、さらに厚肉で高強度の耐サワー継目無ラインパイプ材に対する開発要望が強くなるものと思われる。

4.3 火力発電用鋼管

我が国では燃料電池や太陽光発電等の新エネルギーの普及にまだ時間を要すると考えられることから、既設火力の更新・高効率化は必須であり、USC (Ultra Supercritical) ボイラやガスタービン複合サイクル発電等の高効率化研究開発が続けられている。また燃料多様化の観点から、ごみ発電やバイオマス発電等の実用化も着実に進められている。一方欧米ではUSCプラントのさらなる高温化が検討されており、700℃級 (EU; Thermie, Marcko プロジェクト³²⁻³⁴⁾) や760℃級 (米; Vision21 プロジェクト³⁵⁾) プラント実現に向けた共同研究が進行中で、我が国で開発された種々の材料の評価と欧州独自材の開発が進められている。このような高温プラントの実現にはより高強度・高耐食の材料が必要であ

り、例えば水壁管には高Cr鋼が、過熱器管には高耐食Ni基合金の適用が検討されている。管寄せ・主蒸気管等の厚肉部材についても高温部にはNi基合金が、650℃程度までの中温部には高Cr鋼の適用が検討されている³²⁾。なかでもNi基合金の厚肉部材への適用には、強度・靱性に加え、疲労特性・加工性・溶接施工性等の問題をクリアする必要があり課題は多い。また高Cr鋼ではW-Co添加による高強度化とコーティングによる耐水蒸気酸化性向上が検討されているが¹⁷⁾、焼き戻しマルテンサイト組織の長時間不安定化に起因するクリープ強度低下が報告されており³⁴⁾、強度・耐食性の両面でハードルは高い。

近年、フェライト系耐熱鋼の新しい強化方法や耐食性向上に関する研究開発が国内においても活発化している³⁶⁾。今後の研究開発が期待される。

4.4 原子力発電用鋼管

原子力施設は長寿命化が進むとともに信頼性の確保が重要である。我が国の原子力施設の点検評価には設計基準が適用されており、使用開始後も新品同等であることが必要とされる。現在、欧米では設計基準ではなく維持基準(使用可能な性能劣化と寿命を判定する基準)が適用されており^{37, 38)}、我が国でも維持基準の規格化について技術的な裏付けや社会的合意について議論され始めている。一方原子力発電用鋼管としての高い信頼性を維持するため、長期使用状況下における材料裕度の把握とともに、腐食挙動の究明を通じた材料のさらなる高性能化研究が望まれる。

5 結び

耐食性継目無鋼管の用途にはエネルギー分野が多いため、その材料開発は地球環境を含めた世界のエネルギー動向に密接に関連する。求められる材料をタイムリーに提供するため、エネルギー動向を常に注視するとともに、ユーザーやファブリケーター等との連携による材料ニーズの正確な把握と素早い材料開発が今後も望まれる。

参考文献

- 1) T. Kushida : Steel Today & Tomorrow, 2002, 157 (2000), 5.
- 2) A. Ikeda, T. Kaneko and Y. Ando : Corrosion Science, 27 (1987), 1099.
- 3) H. Asahi, Y. Sogo, M. Ueno and H. Higashiyama : Met.Trans. A, 19A (1988), 2171.
- 4) 工藤赳夫, 寺崎富久長 : 日本金属学会会報, 26 (1987), 247.
- 5) M. Ueda, T. Kushida, K. Kondo and T. Kudo : Corrosion /92, paper no.55, NACE (1992)
- 6) A.Tamaki : Corrosion /89, paper no.469, NACE (1989)
- 7) S.Hashizume, T.Takaoka, Y.Minami, Y.Ishizawa and T.Yamada : Corrosion /91, paper no.21, NACE (1991)
- 8) A.Miyasaka and H.Ogawa : Corrosion /90, paper no.28, NACE (1990)
- 9) A. Ikeda, M. Ueda and H. Tsuge : Corrosion /89, paper no.7, NACE (1989)
- 10) 櫛田隆弘, 大谷泰夫 : 鉄と鋼, 80 (1994), 263.
- 11) 小川和博, 工藤赳夫 : 配管技術, 43 (2001), 52.
- 12) H. Okamoto : Proc. of Stainless Steels '92, Stockholm (1992), 360.
- 13) 小川和博, 岡本 弘, 五十嵐正晃 : 溶接学会論文集, 14 (1996), 368.
- 14) J. Enerhaug, S. L. Eliassen and P. E. Kvaale : Corrosion /97, paper no.60, NACE (1997)
- 15) A.Iseda : CEPSI 2002, Fukuoka, T7-3, 350.
- 16) 増山不二光, 石原岩見, 横山知充, 藤田正昭 : 火力原子力発電, 46 (1995), 498.
- 17) M. Igarashi, S. Muneki, H. Kutsumi, T. Itagaki, N. Fujitsuna and F. Abe : Proc. of 5th Int. Charles Parsons Turbine Conf., July. 3-7, Cambridge, (2000), 334.
- 18) K. Tamura, T. Sato, Y. Fukuda, K. Mitsuhata and H. Yamanouchi : Proc. 2nd Int. Conf. Heat-Resistant Materials, Gatlinburg, Tennessee, 11-14 Sept. (1995), 33.
- 19) 仙波潤之, 榎木義淳, 山寺芳美, 五十嵐正晃 : 火力原子力発電, 49 (1998), 756.
- 20) 小若正倫 : 金属の腐食損傷と防食技術, アグネ, (1983), 377.
- 21) 小若正倫, 長野博夫, 吉川州彦, 三浦実, 太田邦雄, 永田三郎 : 火力原子力発電, 32 (1991), 1303.
- 22) 福田俊彦, 田口耕世, 成瀬佳宏, 持田貴顕, 石渡雅幸, 住本秀樹 : 火力原子力発電, 53 (2002), 1143.
- 23) 小若正倫, 長野博夫, 工藤赳夫, 山中和夫, 岡田康孝, 南孝男 : 防食技術, 30 (1981), 692.
- 24) H. Kajimura, S. Kato and A. Natori : Proc. 8th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, (1997), 149.
- 25) 例えば吉葉正行 : まてりあ, 38 (1999), 203.
- 26) 遠山一廣, 吉田卓史, 芦刈貞了, 伊藤祐宣, 友野裕,

- 山田勝弘：日立造船技報，59 (1999)，56.
- 27) A.Martinez and J.Martinez：SPE 46030 (1998)
- 28) R. Mack, A. Filippov, L. Kendziora and L. Ring：Corrosion / 2000, paper no. 164, NACE (2000)
- 29) T. Kushida, S. Okaguchi, M. Hamada, A. Yamamoto, K. Ohnishi and J. Fujino：Corrosion / 97, paper no.24, NACE (1997)
- 30) H.van der Winden, P.Toissaint and L.Coudreuse：Supermartensitic 2002, 10 (2002)
- 31) 近藤邦夫，岡村一男，大迫一，久宗信之，村瀬恒夫：まてりあ，42 (2003)，237.
- 32) R. Blum and J. Hald：Proc. of 7th Liege Conf., III (2002)，1009.
- 33) T. U. Kern, M. Staubli, K.H. Mayer, K. Escher and G. Zeiler：ibid., 1049.
- 34) C. H. Mayer：Proc. of 28th MPA seminar, II (2002)，471.
- 35) R. Viswanathan, R. Purgert and U. Rao：Proc. of 7th Liege Conf., III (2002)，1109.
- 36) F. Abe, H. Okada, S. Wanikawa, M. Tabuchi, T. Itagaki, K. Kimura, K. Yamaguchi and M. Igarashi：ibid., 1397.
- 37) 鹿島浩一：火力原子力発電，53 (2002)，1500.
- 38) 成合英樹，前川治，小林英男，斑目春樹：日本原子力学会誌，44 (2002)，867.

(2003年3月3日受付)