

ボイラ「材料編」*

岡田 浩一**, 仙波 潤之**



岡田 浩一



仙波 潤之

Boiler (Materials)*

by OKADA Hirokazu** and SEMBA Hiroyuki**

キーワード 耐熱鋼, 規格, 電縫鋼管, 継目無鋼管, クリーブ, 溶接, 溶接材料

1. はじめに

我が国の発電電力量のうち、化石燃料である石炭、天然ガスおよび石油を燃料とする火力発電ボイラによる発電が占める割合は2010年度で約62%、さらに、東日本大震災に伴う原子力発電所の長期停止の影響により2011年度では約79%にまで高まっている。この火力発電においては、発電に伴い温暖化ガスである二酸化炭素を多く排出するため、発電効率の向上が求められている。特に石炭火力は他の化石燃料に比較して単位発電量当たりの二酸化炭素排出量が多く、これまでに蒸気条件の高温高压化により発電効率の向上が図られてきた。現状では、蒸気温度約600℃、蒸気圧力約25 MPaの超々臨界圧 (USC: Ultra Super-critical) ボイラが普及している。蒸気条件の高温高压化には、材料の高温強度や耐食性を高める必要があり、さまざまな新しい材料が開発されてきた。ここでは、火力発電ボイラに使用されている材料を中心に紹介する。

2. 適用材料と製造プロセス

石炭火力発電プラントの模式図を図1¹⁾に示す。発電プラントは、石炭の燃焼による熱で高温の蒸気を作るボイラと蒸気で発電機を廻すタービンからなる。ボイラ部分では水を予熱する節炭器 (Economizer)、蒸気を作る水壁 (Water Wall) ととも呼ばれる蒸発器 (Evaporator)、蒸気をさらに過熱する過熱器 (Superheater)、一度タービンを廻した後、圧力の下がった蒸気を再度炉内で過熱する再熱器 (Reheater)、高温の主蒸気および再熱蒸気を集めてタービ

ンに送る主蒸気管 (Main Steam Pipe) および高温再熱蒸気管 (Hot Reheater Pipe) で構成されており、そのほとんどの構造部材が鋼管である。また、材料としては、比較的低温の節炭器や炉壁管には炭素鋼や低合金鋼が、最も高温となる過熱器管や再熱器管には主に18~25Crのオーステナイト系耐熱鋼が、高温ではあるが大径厚肉部材となる主蒸気管や高温再熱蒸気管では、起動停止に伴う熱疲労が問題となるため、線膨張係数がオーステナイト鋼に比較し小さく熱疲労に対して有利な9~12Cr含有の高Crフェライト系耐熱鋼が使用されている。

こうしたボイラで使用されている鋼管には、JIS規格製品と経済産業省より認定された火技解釈 (発電用火力設備の技術基準の解釈)^{2, 3)}材料がある。JISにおける規格例を表1に、火技解釈材料 (材料記号の頭に「火」が付される) の例を表2に示す。ボイラに使用される構造材料は、許容引張応力 (Allowable Tensile Stress) が設定されており、ボイラの設計ではこの最大許容引張応力を超えないよう材料の寸法が決定される。蒸気圧力25 MPaで蒸気温度を変

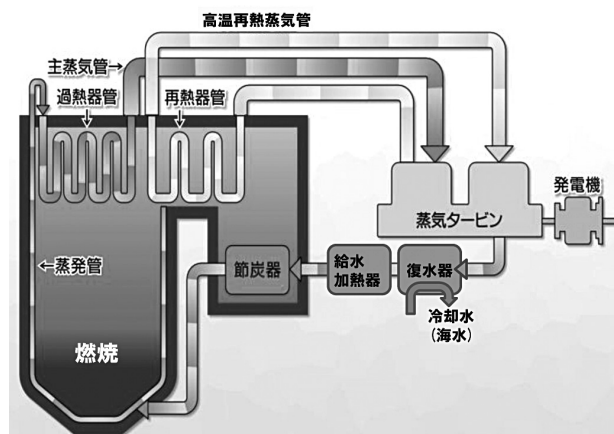


図1 石炭火力発電プラントの模式図¹⁾

*原稿受付 平成25年4月3日

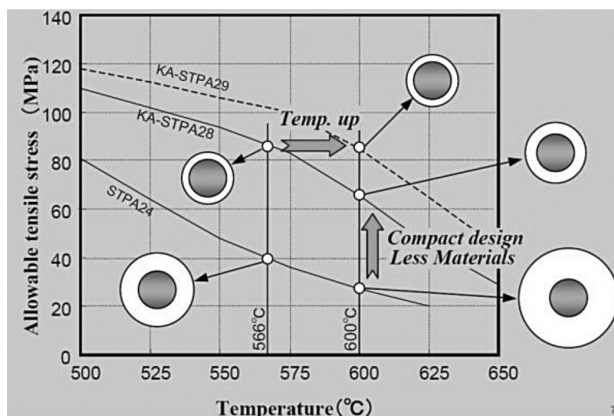
** 新日鐵住金株式会社 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

表1 発電用ボイラに使用される鋼管規格例 (JIS)

規格番号	規格名称	種類の記号例
JIS G 3456	高温配管用炭素鋼鋼管	STPT370
JIS G 3458	配管用合金鋼鋼管	STPA24
JIS G 3459	配管用ステンレス鋼管	SUS316HTP
JIS G 3461	ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管	STB370
JIS G 3462	ボイラ・熱交換器用合金鋼鋼管	STBA12
JIS G 3463	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管	SUS304HTB

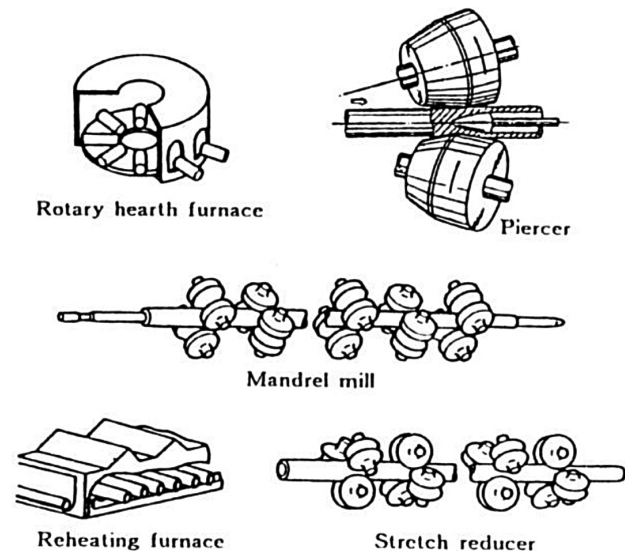
表2 発電用ボイラに使用される火技解釈材料例

名称	種類の記号	標準成分 (mass%)
発電配管用炭素鋼鋼管	火STPT380J2	0.3Cu-0.1Sb
発電配管用合金鋼鋼管	火STPA24J1	2.25Cr-1.6W
	火STPA28	9Cr-1Mo-Nb-V
	火STPA29	9Cr-1.8W
発電配管用ステンレス鋼管	火SUS410J3TP	11Cr-2W-0.4Mo-1Cu-Nb-V
発電ボイラ用合金鋼鋼管	火STBA10	1.25Cr-0.3Cu
	火SUS304J1HTB	18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N
	火SUS310J1TB	25Cr-20Ni-Nb-N
	火SUS310J2TB	20Cr-25Ni-1.5Mo
	火SUS321J1HTB	18Cr-10Ni-Ti-Nb
	火SUS347J1TB	18Cr-9Ni-W-Nb-V

図2 数種のフェライト鋼における許容応力と配管寸法例⁴⁾

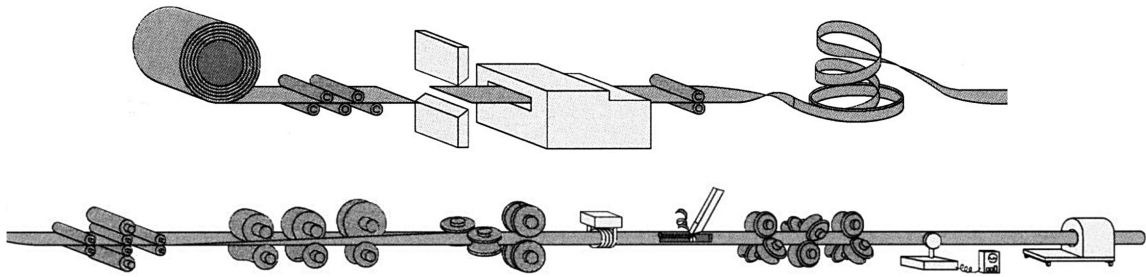
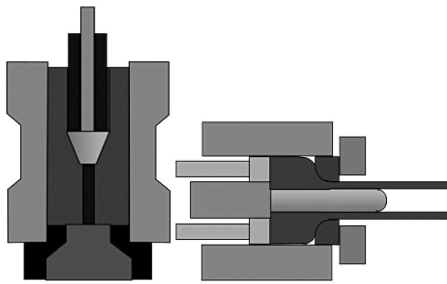
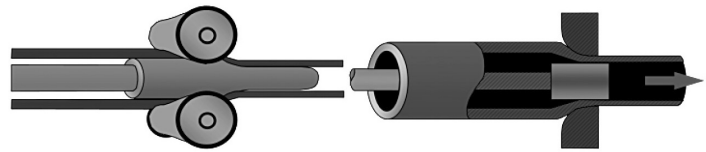
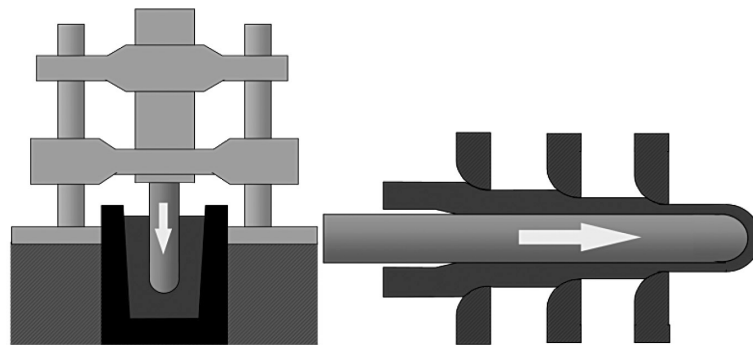
えた場合の配管寸法を計算した結果を図2に示す⁴⁾。発電効率を高めるためには、蒸気条件の高温高圧化が必要であるが、温度の上昇に伴い材料の強度は低下するため、許容引張応力は低下する。そのため、蒸気の高温化を図る場合には、配管の肉厚は厚くなり配管重量の増加から設備コストの上昇や、場合によっては鋼管を製造できない寸法となってしまう。高強度の材料があれば、同一蒸気温度では配管肉厚を減少させ設備コストの低減が図れ、また、高温化しても製造可能な配管寸法でボイラ設計を行うことが可能となる。従来のJIS規格材に比較して、開発材である火技解釈材料は高温強度や耐食性が高められた材料が多く、USCボイラの実現に寄与している。

このようなボイラ用鋼管は、その寸法や材料により異なる製管法により製造される。節炭器管や水壁管等に使用される小径の炭素鋼や合金鋼鋼管には、主に継目無鋼管が使用され、一部電縫鋼管も使用されている。継目無鋼管の製管法の例として、図3⁵⁾にマンネスマン製管法を示す。マンネスマン製管法では、ピレットと呼ばれる中実の棒状素材にピアサーで穿孔を行った後、マンドレル圧延さ

図3 マンネスマン・マンドレルミル法の模式図⁵⁾

らにストレッチレデューサーで鋼管形状に加工される。製造された鋼管には必要に応じて熱処理が施される。また、図4⁶⁾に電縫鋼管の製法例を示す。電縫鋼管は熱延鋼板を素材として製造される。鋼管の直径に応じてスリットされたコイルを筒状に成形し、突合せ部を電縫溶接して鋼管が製造される。

過熱器や再熱器などの高温部位に使用されるステンレス鋼管は、信頼性の高い継目無鋼管が使用される。その製法例を図5⁷⁾に示す。炭素鋼や合金鋼と異なり加工性が劣るステンレス鋼では、熱間加工をマンネスマン製管法ではなく、一般に図に示すユージーンセジュールネ法により行う場合が多い。ユージーンセジュールネ法では、素材に予め機械加工で穴をあけた丸ビレットを用い、必要に応じて縦プレスで拡管を行った後、横プレスで熱間押出を行い鋼管形状にする。さらに、冷間圧延もしくは冷間抽伸(図6)⁸⁾

図4 電縫鋼管の製法模式図⁶⁾図5 ユジーンセジュール法の模式図¹⁾図6 冷間圧延(左)と冷間抽伸(右)の模式図¹⁾図7 エルハルト・プッシュベンチ法の模式図¹⁾

により所定の寸法に加工した後、溶体化処理を施して製造される。

一方、主蒸気管や再熱蒸気管等の大径厚肉鋼管に関しては、主に図7に示すエルハルト・プッシュベンチ法で製造される¹⁾。この製管法に用いられる素材はインゴットやブルームであり、縦型プレスでコップ状の素管とした後、横型プレスで押し抜きによって成形される。さらに熱処理を行った後、切削あるいは研削により所定の寸法に仕上げられる。

3. 材料の特性と溶接性

2.で述べたボイラ用材料はbcc構造であるフェライト系耐熱鋼と比較的多量のCrおよびNiを含有しfcc構造であるオーステナイト系耐熱鋼に大別される。本章では表2に示す火技解釈材料の代表的な鋼種についてその特性と溶接性などについて述べる。

3.1 フェライト系耐熱鋼

火 STBA/STPA24J1 (ASME Code Case 2199, T/P23:

2.25Cr-1.6W-V-Nb)⁷⁻¹⁰⁾は従来広く使用されている STBA/STPA24^{9, 10)}の Mo を W に置換し、V と Nb を添加してクリープ強度を飛躍的に高めた 2.25Cr 系耐熱鋼であり、火力発電ボイラや排熱回収ボイラの大径厚肉管、過熱器管、再熱器管(比較的低温~575℃の蒸気)に適用可能である。STBA/STPA24 がフェライト/パーライト組織であるのに対し火 STBA/STPA24J1 はベイナイト単相組織であり、W の固溶強化とベイナイト母相に微細分散した V, Nb からなる MX 型炭窒化物が高強度化に寄与している¹²⁾。フェライト系耐熱鋼の溶接施工時には溶接金属や溶接熱影響部(HAZ)での硬化に起因した低温割れに注意する必要があるが¹³⁾、火 STBA/STPA24J1 は C を低めることにより HAZ の硬化を抑制し溶接性を改善している。図8は火 STBA24J1 の低温割れ感受性と予熱温度の関係を示したものであり⁷⁾、STBA24、後述の火 STBA28 と比較して低温割れ感受性は低い。溶接材料は強度と溶接性がマッチした共金系溶接材料が開発されている。

火 STBA/STPA28 (ASME T/P91: 9Cr-1Mo-V-Nb) は1970年代に米国で高速増殖炉の蒸気発生器用材料として開発され¹⁴⁾、1980年代にわが国で火力発電ボイラ用鋼管として

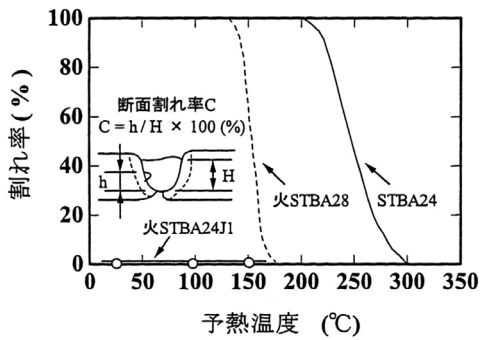


図8 低温割れ感受性と予熱温度の関係⁷⁾

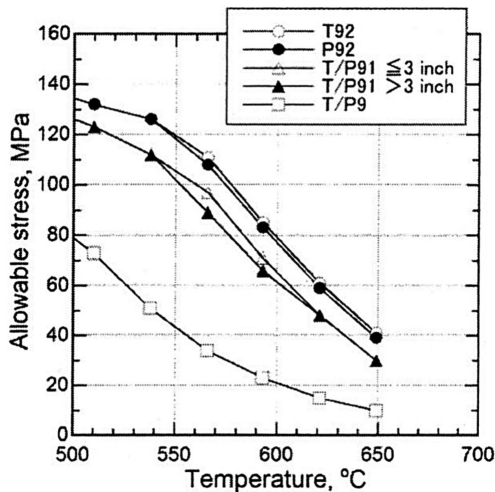


図9 Grades9, 91, 92の許容引張応力¹⁷⁾

実用化された^{9, 15)}。

従来の9Cr-1Mo鋼 (STBA/STPA26, ASME T/P9)¹⁶⁾にVとNbを添加してクリープ強度を飛躍的に高め、Si量を0.2-0.5%に最適化して靱性を改善した。マルテンサイト母相に微細分散したV, NbからなるMX型炭窒化物がクリープ強度を大きく向上させている。図9にASME規格に規定される許容引張応力をT/P9と比較して示すが¹⁷⁾、600°C付近では3倍程度高い許容引張応力を有しており、主蒸気管、管寄せ、再熱蒸気管、過熱器管、再熱器管等に広く使用されている。火STBA/STPA28は炭素当量が高く溶接時の冷却速度が遅くてもマルテンサイト単相組織となり溶接金属やHAZが著しく硬化するため、図8にも示す通り十分な予後熱管理が必要となる。高温割れ感受性や溶接施工、溶接継手性能等の詳細については文献¹⁸⁾などを参照されたい。HAZの高温割れ感受性はSUS316やSUS347より低く、SUS304程度であることが示されており、高温割れ感受性は比較的低い。図10に母材および継手のクリープ破断強度を示す¹⁹⁾。フェライト系耐熱鋼、特に高Crフェライト系耐熱鋼では破断時間が長くなる低応力側でHAZのクリープ強度が母材より低下することに注意が必要となる。強度が低下する時間領域ではHAZの細粒部で大きな変形を伴わずにTypeIVと呼ばれる破壊が生じることを特徴とする。HAZでのクリープ強度低下の冶金的要因については諸説あり²⁰⁾、材料面および溶接施工面から低下抑制の検討がなされているが、実用上は場合により継

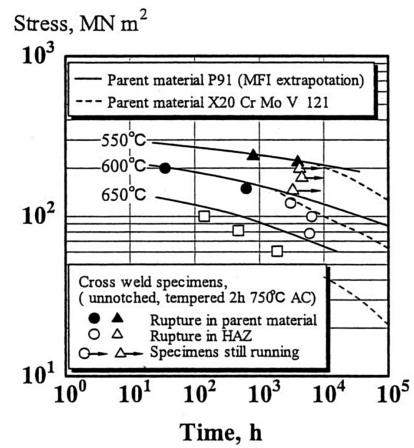


図10 9Cr-1Mo-V-Nb 鋼および 12Cr-1Mo-V 鋼母材・溶接継手のクリープ破断強度¹⁹⁾

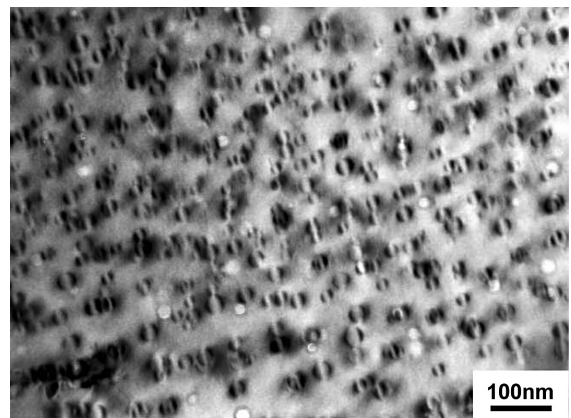


図11 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼に析出したCu相のTEM組織³⁰⁾

手強度低減係数を考慮するなど注意が必要である。

火STBA/STPA28よりさらに高強度の高Crフェライト系耐熱鋼として火STBA/STPA29 (ASME Code Case 2179, T/P92: 9Cr-1.8W-0.4Mo-V-Nb)^{9, 21, 22)}や火SUS410J3TB/TP (ASME Code Case 2180, T/P122: 11Cr-2W-1Cu-0.4Mo-V-Nb)^{9, 23, 24)}が開発されている。何れも火STBA/STPA28のMoの一部をWに置換し、大径厚肉管用途として靱性を確保するためマルテンサイト単相を狙っている。火SUS410J3TB/TPではδフェライト生成を抑制するためAc1点を顕著に低下させないオーステナイト生成元素Cuを活用してCrを11%に高めている²²⁾。図9に示す通り火STBA/STPA29 (T/P92)の許容引張応力は火STBA/STPA28 (T/P91)より1.3倍程度高く、フェライト系耐熱鋼としては世界最高の強度を有する。高強度化された母材に適應する合金系溶接材料も開発されており^{25, 26)}、溶接金属においてもWが活用されている²⁷⁾。高Crフェライト系耐熱鋼の溶接継手のクリープ強度を確保するには適切な溶接後熱処理 (PWHT)が必要であり、ASME規格においても規定されている。

3.2 オーステナイト系耐熱鋼

火SUS304J1HTB (ASME Code Case 2328: 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N)^{9, 28, 29)}は18-8系オーステナイト耐熱鋼で最もクリープ強度が高く、USCボイラの過熱器管、再熱器管の世

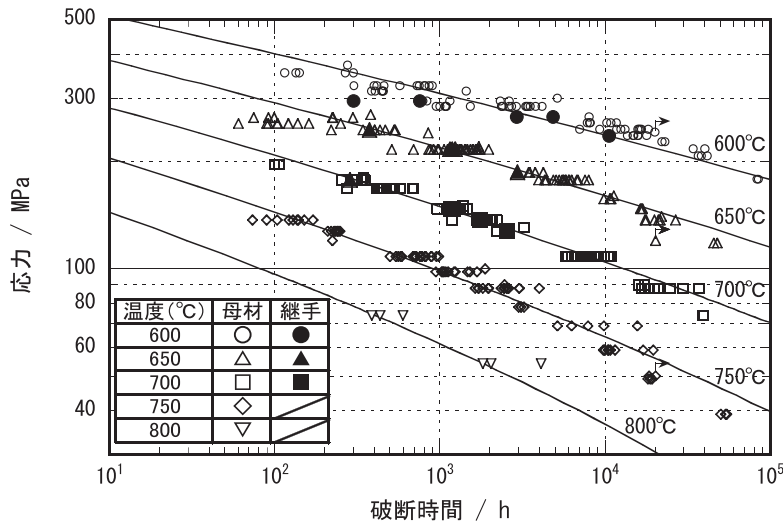


図12 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼母材と溶接継手のクリープ破断強度³⁰⁾

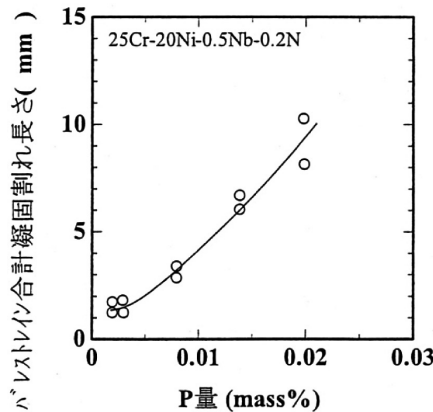


図13 25Cr-20Ni-Nb-N 鋼溶接金属の凝固割れ感受性に及ぼす P 量の影響³⁴⁾

界標準として最も広く使用されている³⁰⁾。Cu, Nb, N を添加することにより $M_{23}C_6$ 炭化物に加えてオーステナイト母相に Cu 相が整合微細分散析出し(図11), さらに NbCrN 型窒化物も析出することでクリープ強度を飛躍的に向上させた¹²⁾。拘束溶接割れ試験で評価した火 SUS304J1HTB の溶接性は従来の汎用鋼 347H 系鋼と同等レベルである²⁸⁾。オーステナイト系耐熱鋼においてはフェライト系耐熱鋼と異なり, HAZ の高温強度が問題となることは少なく, 溶接金属のクリープ強度を如何に確保するかが課題となることが多い¹³⁾。火 SUS304J1HTB においては強度と耐食性のマッチした共金系溶接材料が開発されており, Mo 添加とともに Ni, N 量を適正化することで母材と同等のクリープ強度を確保している (図12)^{30, 31)}。

火 SUS310J1TB (ASME TP310HCbN: 25Cr-20Ni-Nb-N)^{9, 32, 33)} は従来の 18-8 系オーステナイト系耐熱鋼よりもクリープ強度が低い SUS310S (25Cr-20Ni) に対して, クリープ強度を大幅に高めた 25Cr 系オーステナイト鋼で 18Cr 系オーステナイト鋼が使用できない高腐食環境下で使用可能である。Nb と N による NbCrN 型窒化物がオーステナイト母相に微細析出しクリープ強度を向上させている。オーステナイト系耐熱鋼は一般にフェライト系耐熱鋼に

比べて高温割れ感受性が高く, 溶接施工時には十分な対策が必要である。入熱の制限や層間温度の管理により冷却速度を速めるとともに, 熱応力を軽減することが溶接施工面からは有効である¹³⁾。凝固割れ感受性を低減する観点からは融点を下げる P, S 等の不純物元素の低減が有効であり, 25Cr-20Ni-Nb-N 鋼の溶接金属では P 量を管理し実用上問題のない耐凝固割れ性が得られている (図13)³⁴⁾。

火 SUS310J2TB (ASME Code Case 2581: 20Cr-25Ni-1.5Mo-Nb-N)^{9, 35)} は SUS310S よりクリープ強度に優れ, さらに 310 系の中では塩化物腐食環境に有利な Ni, Mo の含有量が多いため, ごみ焼却炉等の腐食環境下で SUS310S より優れた耐食性を示す。共金系の溶接材料が開発されている。

4. おわりに

本稿では火力発電ボイラを中心に使用されているフェライト系およびオーステナイト系の材料を取り上げ, 製造プロセス, 材料特性, 溶接性などについて概説した。許容引張応力に関する規格は長時間データの再評価によって修正されることがあるので, 常に最新の規格を参照されたい。本稿がボイラ材料全般を網羅できていない点をご容赦願うとともに, 耐熱鋼およびその溶接に関わる読者の方々の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 新日鐵住金(株), ボイラ用シームレス鋼管, 製品カタログ, 2012.
- 2) 発電用火力設備の技術基準の解釈, 経済産業省原子力安全・保安院, 平成17年12月14日, NISA-234c-05-8.
- 3) 発電用火力設備の技術基準の解釈, 経済産業省原子力安全・保安院, 平成19年7月10日, NISA-234a-07-2.
- 4) 五十嵐正見: 鉄鋼協会異業種交流セミナー「材料と環境シリーズ」-これからの日本のエネルギー動向と鉄鋼材料-, 2001年11月2日.
- 5) 林: 鋼管の製造法, 日本鉄鋼協会 (2000), 114.

- 6) 新日鐵住金(株), ボイラ・熱交換器用電気抵抗溶接鋼管, 製品カタログ, 2012.
- 7) F. Masuyama, T. Yokoyama, Y. Sawaragi and A. Iseda: Development of a Tungsten Strengthened Low Alloy Steel with Improved Weldability, Materials for Advanced Power Engineering, Part I, Kluwer Academic publishers (1994), 173.
- 8) Y. Sawaragi, T. Kan, Y. Yamadera, F. Masuyama, T. Yokoyama and N. Komai: Properties and Experiences for All Product Forms for Fossil Power Generation, Proceedings of the 6th International Conference on Materials for Advanced Power Engineering (1998), Liege, Forschungszentrum GmbH, 441.
- 9) F. Abe *et al.*: Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VIII, Vol. 2, Springer (2003), 9.
- 10) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.54 (2008).
- 11) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.3B (1986).
- 12) 五十嵐: 高効率火力発電用耐熱鋼の高温化: ボイラ, 第194・195回 西山記念技術講座 (2008), 77-98.
- 13) 例えば, 平田: 耐熱鋼およびその溶接, 溶接学会誌, 78-8 (2009), 709-714.
- 14) V. K. Sikka, C. T. Ward and K. C. Thomas: Modified 9Cr-1Mo Steel - an Improved Alloy for Steam Generator Application, Ferritic Steels for High Temperature Applications (ed. A. K. Khare), ASM (1983), 65.
- 15) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.43 (1996).
- 16) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.19B (1997).
- 17) 木村: 高強度フェライト耐熱鋼に関する規格と最近の動向, 耐熱金属材料第123委員会研究報告, 53 (2012), 341-364.
- 18) 片山, 糸, 大村: ボイラ用材料の溶接 (低合金鋼), 溶接学会誌, 62-3 (1993), 149-154.
- 19) H. Cerjak and E. Letofsky: The Effect of Welding on the Properties of Advanced 9-12%Cr Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 1-1 (1996), 36.
- 20) 平田: 溶接冶金研究の進歩と今後の展望, 溶接学会溶接冶金研究委員会編 (2003), 224-241.
- 21) 榊原, 榊本, 小川, 高橋, 藤田: ボイラ用高強度 9Cr-0.5Mo-1.8W (NF616) 鋼管, 火力原子力発電, 38-8 (1987), 841-849.
- 22) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.48A (2012).
- 23) 伊勢田, 名取, 榊本, 小川, 増山, 横山: ボイラ用高強度高耐食 12Cr 系鋼管 (HCM12A) の開発, 火力原子力発電, 45-8 (1994), 900-909.
- 24) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.51 (2006).
- 25) H. Morimoto, T. Tanaka, N. Yurioka, H. Mimura and T. Miyake: Welding Consumables and Mechanical Properties of Weldments for 9Cr-1.8W Steel for USC Boiler Piping and Tubing Application, Proceedings of International Conference on Power Engineering, Shanghai, China (1995), 1076-1081.
- 26) 小川, 伊勢田, 榊本, 松本, 増山: 12%Cr 系高強度ボイラ用鋼管 (HCM12A) の開発 (第2報) - HCM12A 鋼共金溶接金属と溶接継手の諸性質 -, 住友金属, 47-4 (1995), 39-46.
- 27) 森本, 櫻井, 田中, 大北, 藤: 9Cr フェライト系耐熱鋼用溶接金属の高温強度特性に及ぼす W の影響, 溶接学会論文集, 17-2 (1999), 266-278.
- 28) 榊本, 大塚, 小川, 加藤, 平野: ボイラ用高強度 18-8 系新ステンレス鋼管の開発, 住友金属, 43-6 (1991), 24-31.
- 29) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.56 (2009).
- 30) 仙波, 岡田, 小川, 伊勢田, 山寺: 高効率火力発電伝熱管用高強度ステンレス鋼管 SUPER304H (火 SUS304J1HTB) の開発, まてりあ, 46 (2007), 99-101.
- 31) K. Ogawa, Y. Sawaragi, N. Otsuka, H. Hirata, A. Natori and S. Matsumoto: Mechanical and Corrosion Properties of high Strength 18%Cr Austenitic Stainless Steel Weldment for Boiler, ISIJ International, 35 (1995), 1258-1264.
- 32) 榊本, 寺西, 牧浦, 三浦, 久保田: ボイラ用高強度 HR3C 鋼管の開発, 住友金属, 37-2 (1985), 166-179.
- 33) 物質・材料研究機構 クリープデータシート No.58 (2011).
- 34) 小川: 超々臨界圧火力発電ボイラ用高強度鋼管の溶接, 溶接学会誌, 70-8 (2001), 766-770.
- 35) 榊原, 菊池, 高橋, 角南, 藤田: 超超臨界圧ボイラ管用高強度 25Ni-20Cr (NF709) 鋼, 火力原子力発電, 38-1 (1987), 75-83.