高効率火力発電ボイラ用高強度18-8系 SUPER304H 鋼管の開発

仙波潤之¹⁾ 榎木義淳²⁾ 小川和博²⁾
名取 敦³⁾ 菅 孝雄⁴⁾

1. 緒 言

我国では、LNG、石炭、石油等の化石燃料をエネルギー源とする火力発電の電源構成比率が全エネルギー源の50%以上を占めており、今後も最も重要なエネルギー源と位置付けられている。しかし、火力発電の場合にはCO₂削減対策が必須となり、これを解決するための最も現実的な対策は、高効率発電の一層の推進であるとされている。特に化石燃料の中で最もCO₂排出量の多い石炭火力においては、効率向上による燃費削減の点から蒸気条件の超々臨界圧(USC)化¹⁾が必須とされており、これを支える先進耐熱鋼の開発が最重要課題の一つである。

一般には、ボイラ用鋼管は、過熱器管に代表される小径薄肉熱交換器管(ボイラチューブ)と主蒸気配管に代表される大径厚肉鋼管に大別されるが、ボイラチューブでは、高温強度、管内面の耐水蒸気酸化性、溶接性、加工性に加えて、管外面の耐高温腐食性が要求されることから、従来からオーステナイト系耐熱鋼が多く使用されている。既存規格鋼の中で最も高い高温強度を有する18-8系オーステナイト鋼としてはASME-TP347H鋼があるが、USCボイラのように蒸気条件を高めていくと本鋼では強度余裕がなくなることから、ASME-TP347H鋼の高温強度を大幅に上回る高強度18-8系新ステンレス鋼適用に対するニーズが高まっている。

このような背景の下に当社で開発したSUPER304H鋼管(0.1C-18Cr-9Ni-3Cu-Nb, N)²⁾(³⁾は、ASME-TP347Hの1.2倍以上(500~750℃)の許容応力を保持しており、さらに、ボイラ材料に要求される耐食性、長時間組織安定性、溶接性および経済性にも優れている。これらの優れた性能は長期に亘る実証テストで実証⁴⁾(⁵⁾され、実用化に成功するとともに、国内外の規格化も既に完了している。現在では、超々臨界圧プラントを含めた火力発電ボイラにおいて、累計5800トンの採用実績がある。本稿では、SUPER304H鋼管の成分設計指針、特徴および実用化、規格化状況について述べる。

2. 開発鋼の成分設計指針

本開発鋼の成分設計の大きな独自点は3%のCuを添加し、さらにNbとNを複合添加することにより600~700℃でのクリープ破断強度を大幅に向上させたもので18-8系鋼では世界最高強度レベルを達成した点にある。図1に18Cr-10Ni系のクリープ破断強度におよぼすCu添加量の影響を示す。2.5%以上の添加でクリープ破断強度が飛躍的に向上する⁶⁾。SUPER304Hの時効材の透過電子顕微鏡組織を図2に示す。20~50nmの極めて微細なCu相の析出が観察される。Cu相はオーステナイト母相と同じfcc構造であり、格子定数の差も小さいためクリープ中に母相に板状に整合析

* 住友金属工業株式会社
総合技術研究所: 1) 鋼管研究開発部主任研究員
2) 商品基盤技術研究部主任研究員
関西製造所特殊管事業所特殊管技術部 3) 部長 4) 次長
** 住友金属工業株式会社
現在: 住友金属テクノロジー株式会社受託研究事業部副事業部長
Development of "SUPER304H" Austenitic Stainless Steel Tubes with High Temperature Strength for USC Boilers; Hiroyuki Semba*, Yoshiatsu Sawaragi**, Kazuhiro Ogawa*, Atsushi Natori*, Takao Kan*(*Sumitomo Metal Industries, Ltd. **Sumitomo Metal Industries, Ltd., Present address: Sumitomo Metal Technology, Inc.)
2001年10月31日受理

図1 クリープ破断強度におよぼすCuの影響。

図2 700°C, 1000 h 時効材の透過電顕組織.

図3 Cu添加鋼のクリープ破断伸びにおよぼす Nb の影響.

図4 開発鋼の諸特性と Cu, Nb 量との関係.

出し、転位の運動に対する障害としてクリープ抵抗を大きく向上させている。しかし、オーステナイト鋼に Cu のみを添加した場合は破断延性が10%以下にまで低下し実用鋼として適用するには問題がある。SUPER304H では Nb と N の複合添加によりこの問題を克服した。図3に 18Cr-10Ni-3Cu-N 鋼のクリープ破断延性を示す。0.4%程度の Nb を N と複合添加することで細粒組織となり、高温長時間側でも20%程度以上の良好なクリープ破断延性を保持している。

Nb と N を複合添加した本鋼においては微細な NbCrN 複合窒化物⁽⁷⁾も確認され、前述の Cu 相や $M_{23}C_6$ 、Nb(C, N)とともにクリープ破断強度を向上させている。Cu, Nb量の最適範囲は図4に示す通り、クリープ破断強度、クリープ破断延性および耐水蒸気酸化特性のバランスを考慮し、Cu : 2.5 ~ 3.5%, Nb : 0.3 ~ 0.6%に設定した。表1は SUPER304H

表1 SUPER304H の化学成分例. (mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Nb	N
0.10	0.18	0.75	9.25	17.9	2.97	0.41	0.105

図5 SUPER304H のクリープ破断特性.

図6 SUPER304H の許容引張応力.

鋼管の化学成分例である。N は高温引張強度の向上にも有効であるが、高温長時間加熱後の延性、靱性を考慮して上限を0.12%とした。

3. 開発鋼の特徴

(1) クリープ破断性質

本開発鋼のクリープ破断特性は図5に示す通り各温度においてほぼ直線的に推移しており、高温長時間側でも安定したクリープ破断強度を示す。図6はこれらのデータから求めた室温から750°Cまでの許容引張応力を ASME-TP347H, SUS321HTB と比較して示したものである。本鋼の600 ~ 700°Cでの許容引張応力は SUS321HTB と比較して69%以上高く、18-8系ステンレス鋼の中で最も高い強度を示す ASME-TP347H と比較しても35%(600°C) ~ 47%(700°C) 高い許容引張応力を有し、18-8系鋼では世界最高的高温強度レベルを達成している。許容引張応力が引張強度に支配され

図7 長時間加熱後のシャルピー衝撃値(0°C).

図8 実用使用材の水蒸気酸化特性⁽⁵⁾.

る低温側(〜600°C)ではNによる固溶強化が、クリープ破断強度に支配される高温側(600〜750°C)では前述の通り炭窒化物に加えて母相に微細に整合析出するCu相が従来鋼と比較して極めて高い高温強度の実現に寄与している。

(2) 高温長時間加熱後の組織安定性

500〜750°Cにおいて10⁴ hまで長時間加熱を行った本開発鋼のシャルピー衝撃値(0°C)を図7に示す。衝撃値は加熱温度の上昇に伴い低下する傾向があるが、高温加熱では経時的な低下は特に認められず、750°C、10⁴ h加熱後でも100 J/cm²以上の高い値を保持している。光学顕微鏡組織においても長時間加熱による顕著な組織変化はみられず、塊状のσ相や窒化物等、脆化相の析出も生じなかった。本開発鋼のNi量は9%であり、通常の18-8系耐熱ステンレス鋼より低いにもかかわらず脆化相が析出しないのはN添加(〜0.12%)によるオーステナイト安定化と低Si化(≦0.3%)による効果である。

(3) 耐水蒸気酸化特性

図8に事業用火力発電ボイラの過熱器管として10年間使用したSUPER304H鋼管の平均内層スケール厚さの経時変化を比較材(SUS321HTB, SUS347HTB)とともに示す⁽⁵⁾。ボイラ的设计蒸気温度は過熱器出側で571°Cである。10年使用後のSUPER304H鋼管の水蒸気酸化スケール厚さは粗粒鋼のSUS321HTBの約1/3であり、細粒組織の

SUS347HTBとほぼ同等の耐水蒸気酸化性を示す。NbとNの複合添加による細粒化はクリープ破断延性を向上させるだけでなく、耐水蒸気酸化性向上にも寄与していることが実環境下での長期試験で実証された。

(4) 溶接性および溶接材料

本開発鋼SUPER304Hは、Nb添加量をSUS347Hに比べて低く抑えているため、溶接高温割れ感受性は、SUS347Hよりも低く溶接性に優れている⁽²⁾。また、ボイラ用鋼管として実用化に不可欠な溶接金属の特性についても検討し共金溶接材料を開発済みである。母材と比較して、溶接材料中のMn, N量を高めることでパス間温度の規制をしない高能率な施工法を用いても、Nの離脱が抑えられ母材と同等のクリープ破断強度(図5)、引張強度をもつ溶接継手が得られる⁽⁸⁾。

4. 実用化、規格化状況および特許

超々臨界圧発電プラントの開発などを背景に、高まる高強度オーステナイト鋼へのニーズに応え、耐食性、溶接性にも優れた高強度18-8系ステンレス鋼管、SUPER304Hを開発した。本開発鋼は事業用火力発電ボイラの過熱器管、再熱器管として既に10年間使用の実績がある。1993年には火SUS304J1HTBとして発電用火力設備の技術基準に規格化され、20基以上の新設の事業用火力設備においても大量に採用されている。既にUSC発電プラントを含めた国内の火力発電ボイラにおいて累計5800トンの採用実績があり、CO₂削減に寄与する高効率発電の実現に大きく貢献している。2000年には米国ASMEにCode case 2328として、2001年にはASTMにUNS No. S30432として登録され、今後は国内同様、高効率発電が推進されている米国、欧州においても大きな需要が期待される。

なお、本開発鋼に関わる特許は溶接材料も含めて国内では3件が登録されており、9件を出願済みである。海外においてはアメリカ、イギリスをはじめとする5カ国に出願し登録されている。

文 献

- (1) 村松正浩：配管技術，**40**(1998)11, 86.
- (2) 榎木義淳，大塚伸夫，小川和博，加藤信一郎，平野 奨：住友金属，**43**(1991)6, 25.
- (3) Y. Sawaragi, N. Otsuka, H. Semba and S. Yamamoto: Sumitomo Search, (1994), No. 56, 34.
- (4) 仙波潤之，榎木義淳，岡田浩一，増山不二光：CAMP-ISIJ, **11**(1998)3, 609.
- (5) 榎木義淳，仙波潤之，岡田浩一，増山不二光，駒井伸好：CAMP-ISIJ, **14**(2001)3, 525.
- (6) 平野 奨，榎木義淳：学振123委員会研究報告，**29**(1988), 241.
- (7) D. H. Jack and K. H. Jack: J. Iron Steel Inst., **210**(1977), 790.
- (8) K. Ogawa, Y. Sawaragi, N. Otsuka, A. Natori and S. Matsumoto: ISIJ Int., **35**(1995), 1258.