

2-6

耐熱鋼およびその溶接*



平田 弘 征**

Weldability of Heat Resistant Steel*

by HIRATA Hiroyuki**

キーワード 溶接, 耐熱鋼, 溶接割れ, 溶接継手性能

1. はじめに

耐熱鋼は火力および原子力発電プラントや石油精製プラントなど様々な用途の高温・高圧環境で使用される鋼材の総称であり、その種類は炭素鋼から超合金まで多岐にわたる。本稿では、代表的な適用先である発電プラント用鋼管材料として広く使用されているフェライト系耐熱鋼ならびにオーステナイト系ステンレス耐熱鋼を取り上げ、その開発動向を紹介するとともにそれぞれの溶接上の留意点、特に、溶接施工上問題になる溶接割れならびに最も重要な使用性能である溶接継手のクリープ強度について概説する。

2. 耐熱鋼の種類と開発動向

2.1 フェライト系耐熱鋼

フェライト系耐熱鋼はオーステナイト系ステンレス耐熱鋼に比べ、熱膨張係数が小さく、熱伝導度が高いという利点を有する。そのため、火力発電プラントにおいては水壁管や熱応力が問題となる主蒸気配管などの鋼管用材料として多く使用されている。

図1は発電プラント鋼管用フェライト系耐熱鋼の開発系統図を示す¹⁾。フェライト系耐熱鋼としては、古くは炭素鋼が用いられてきたが、高温強度・耐食性向上の観点から、マルテンサイトもしくはベイナイト変態による転位強化を活用した2.25%Cr-1%Mo鋼(STBA/STPA24)や9%Cr-1%Mo鋼(STBA/STPA26)などの

いわゆるCr-Mo耐熱鋼が用いられるようになった。その後、発電プラントの高効率化のためには、操業条件の高温・高圧化を実現しうる高強度材料が必要となり、9-12%Cr系鋼を中心にクリープ強度に及ぼす合金元素の影響ならびに作用機構について基礎的な検討が行われてきた。その結果、VおよびNbによる析出強化を図った9%Cr-1%Mo-V, Nb鋼²⁾(火STBA/STPA28)が開発され、現在でも広く使用されている。さらに近年では、Moに代えてWの固溶強化を活用し、更なる高強度化を図った11%Cr-0.4%Mo-2%W-Cu-V, Nb鋼³⁾(火SUS410J3TB/TP)や9%Cr-0.5%Mo-2%W-V, Nb鋼⁴⁾(火STBA/STPA29)が実用化されている。また、低Cr鋼においてもWによる固溶強化とVおよびNbによる析出強化により9%Cr-1%Mo-V, Nb鋼と同等にまで強度を高めた2.25%Cr-1.6%W-V, Nb鋼⁵⁾(火STBA/STPA24J1)が開発・実用化されている。

2.2 オーステナイト系耐熱鋼

オーステナイト系耐熱鋼は面心立方構造を有し、かつ多量のCrを含有するため、フェライト系耐熱鋼に比べて高温強度が高く、耐水蒸気酸化性や耐食性に優れるという長所を有する。そのため、火力発電プラント用ボイラにおいては高温・高圧かつ苛酷な腐食環境に曝される過熱器管や再熱器管などの鋼管用材料として使用されている。

図2は発電プラント用鋼管用オーステナイト系耐熱鋼の開発系統図を示す¹⁾。オーステナイト系耐熱鋼としては、18%Cr-8%Ni鋼(SUS304HTB)をベースにMoやNb添加により高強度化を図ったSUS316HTBやSUS347HTB、高Cr化により耐食性の向上を図ったSUS310TB等が古くから使用されてきた。そして、フェライト系耐熱鋼と同様、火力発電プラントの高効率化に関する技術開発が進められるとともに、オーステナイト系耐熱鋼についても高強度化、高耐食化を図った材料開

*原稿受付 平成21年9月17日

**正 員 住友金属工業 株式会社 Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

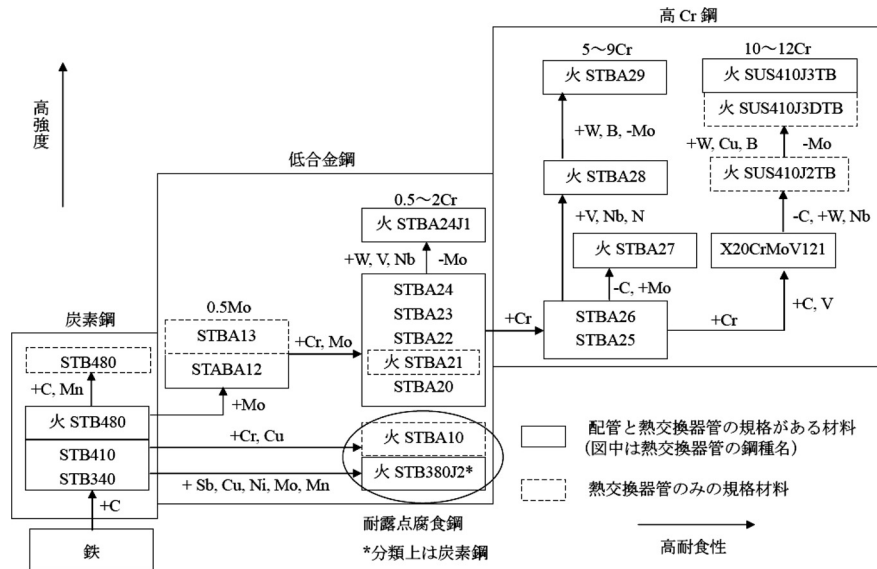


図1 発電プラント鋼管用フェライト系耐熱鋼の開発系統図¹⁾ (火)記号は火力技術基準に登録された材料規格

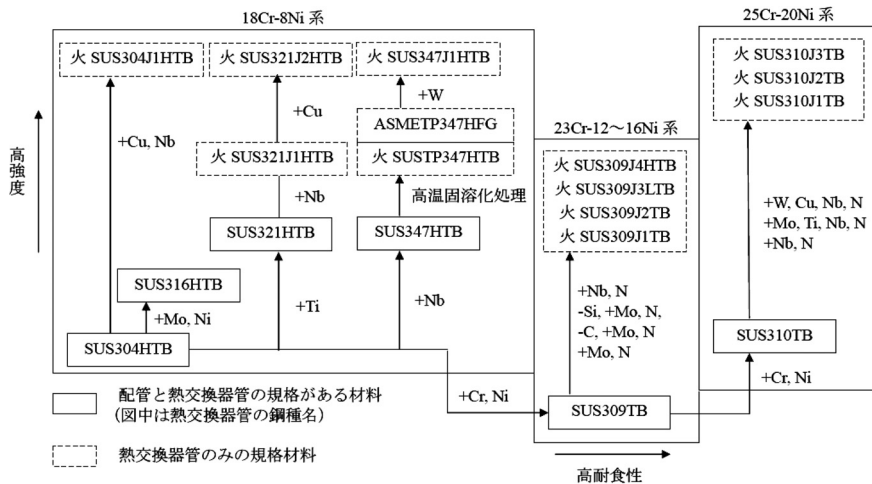


図2 発電プラント鋼管用オーステナイト系耐熱鋼の開発系統図¹⁾ (火)記号は火力技術基準に登録された材料規格

発が積極的に進められた。結果、18%Cr系鋼では、特殊な加工熱処理を施すことにより、SUS347HTBと同等の強度を有したまま耐水蒸気酸化性を向上させた細粒18%Cr-12%Ni-Nb鋼(火SUSTP347HTB)⁶⁾、CuとNb, Nによる析出強化を図った18%Cr-9%Ni-3%Cu-Nb, N鋼(火SUS304J1HTB)⁷⁾が開発され、世界的に広く使用されている。また、これら以外にも18%Cr-10%Ni-3%Cu-Nb, Ti(火SUS321J2HTB)⁸⁾、18%Cr-10%Ni-2W-Nb, V, N(火SUS347J1HTB)⁹⁾が開発されている。また、20~25%Cr系鋼では、Nb, Nによる析出強化を活用した25%Cr-20%Ni-Nb, N鋼(火SUS310J1TB)¹⁰⁾が開発され、耐高温腐食性を要求される部位に使用されている。他にも20%Cr-25%Ni-Mo, Nb, Ti鋼(火SUS310J2TB)¹¹⁾、22%Cr-15%Ni-Nb, N鋼(火SUS309J4HTB)¹²⁾が開発されている。

3. フェライト系耐熱鋼の溶接上の課題

3.1 溶接割れ

3.1.1 低温割れ

フェライト系耐熱鋼はマルテンサイトもしくはベイナイト変態による転位強化を活用した材料であり、溶接金属や溶接熱影響部(以下HAZ: Heat Affected Zone)で硬化が生じるため、溶接施工時には低温割れに留意し、その防止対策をとることが重要である。低温割れは水素による脆化に起因した、いわゆる遅れ割れ(水素脆化割れ)が良く知られているが、水素が存在しなくても硬化し、脆化した溶接部に熱応力が生じただけでも割れ(脆化割れ)が生じるので注意が必要である。これらの割れは、いずれも溶接部の硬さが重要な感受性支配要因の一つである。一般に溶接部の最高硬さはC量の増加とともに

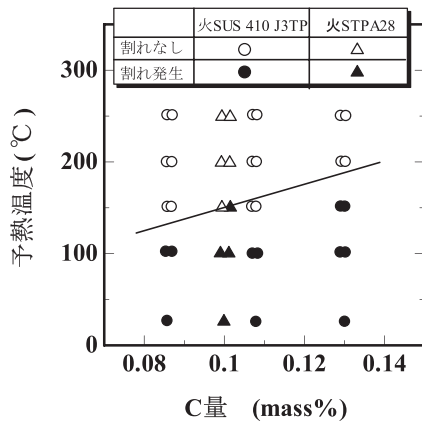


図3 高Crフェライト系耐熱鋼の低温割れ感受性に及ぼすC量の影響¹³⁾

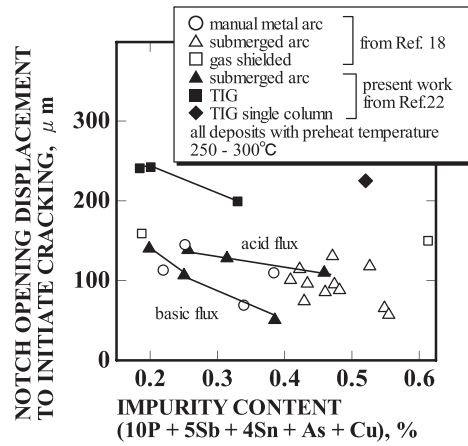


図5 2.25%-1%Mo鋼溶接金属の再熱割れ感受性に及ぼす不純物元素の影響¹⁵⁾

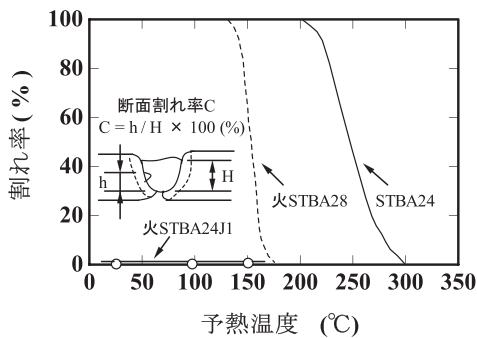


図4 フェライト系耐熱鋼の低温割れ感受性と予熱温度の関係⁵⁾

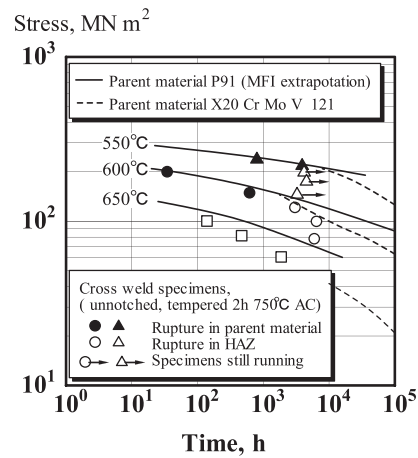


図6 9%Cr-1%Mo-V, Nb鋼および12%Cr-1%Mo-V鋼母材および溶接継手のクリープ強度¹⁶⁾

に高くなることから、溶接部の硬化を抑制し、低温割れを防止するためには、材料面からはC量の低減による硬化の抑制、溶接施工面からは適正温度での予熱の実施が有効である。

図3は高Crフェライト系耐熱鋼のY型溶接割れ試験例を示す¹³⁾。HAZの低温割れ感受性はC量の増加による硬さの増大とともに大きくなり、割れ防止のためには高温での予熱の実施が必要となることがわかる。図4は同様に2.25%Cr-0.5%Mo鋼、9%Cr-1%Mo-V, Nb鋼および2.25%Cr-1.6%W-V, Nb鋼のY型溶接割れ試験例を示す⁵⁾。C含有量が少なくなる2.25%Cr-0.5%Mo鋼、9%Cr-1%Mo-V, Nb鋼、2.25%Cr-1.6%W-V, Nb鋼の順にHAZの硬化が抑制され、低温割れ感受性が低下し、割れ防止のための予熱温度が低くなる。

また、溶接施工面では予熱以外にも直後熱の実施や溶接手順ならびに継手形状の適正化による熱応力の軽減などが低温割れ防止の観点からは有効である。

3.1.2 再熱割れ

前節でも述べたように、フェライト系耐熱鋼はマルテンサイトもしくはベイナイト組織を有する材料であり、溶接施工時にはHAZの硬化に起因した低温割れや性能低下が生じる。そのため、溶接部の延性や靱性の改善、残留応力の除去などを目的とし、溶接後に熱処理が実施される場合が多い。また、熱処理が実施されなくとも、溶

接構造物は使用中に再加熱される。フェライト系耐熱鋼溶接構造物では、この再加熱の過程でHAZや溶接金属に割れが生じる場合があり、その再加熱の目的によりSR割れや溶接後熱処理割れなどの用語が使われるが、一般的に再熱割れと呼ばれている。再熱割れはフェライト系耐熱鋼の中でもCr量が2.25%までの、いわゆる低合金耐熱鋼で問題となりやすいので留意が必要である。

再熱割れは高温に加熱されたHAZや溶接金属の旧オーステナイト粒界に発生することが特徴であり、冶金的には化学成分の影響を受ける。再熱割れ感受性は、Cr, Mo, VやNbといった合金元素の増加により増大することが報告されている¹⁴⁾が、これらはクリープ強度や耐食性など鋼材の他の性能を確保する上で重要である。そのため、材料面からは不純物元素の低減により耐再熱割れ性の改善が図られている。

図5は2.25%Cr-1%Mo鋼溶接金属の再熱割れ感受性に及ぼす不純物元素の影響を曲げ拘束応力緩和試験における開口変位量で評価した結果を示す¹⁵⁾。再熱割れ感受性はP, Sb, Snなどの不純物元素の低減により低下することがわかる。また、同様にSの低減も再熱割れ感受性の低減に有効である¹⁶⁾ことが示されている。

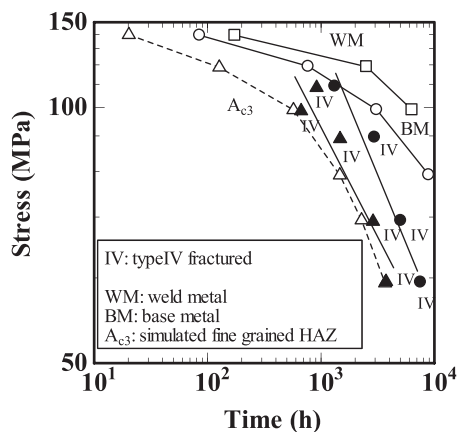


図7 高 Cr フェライト系耐熱鋼の溶接継手のクリープ破断強さに及ぼす溶接方法の影響²¹⁾

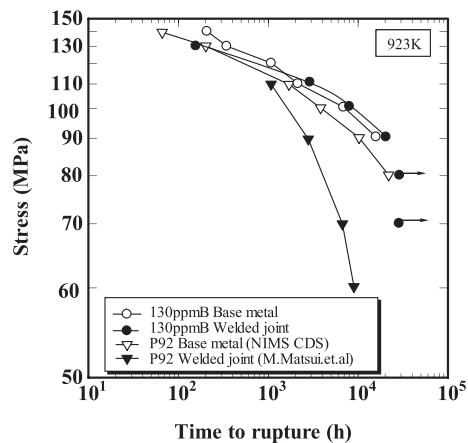


図9 高 Cr フェライト系耐熱鋼の母材および溶接継手のクリープ破断強さに及ぼす B の影響²³⁾

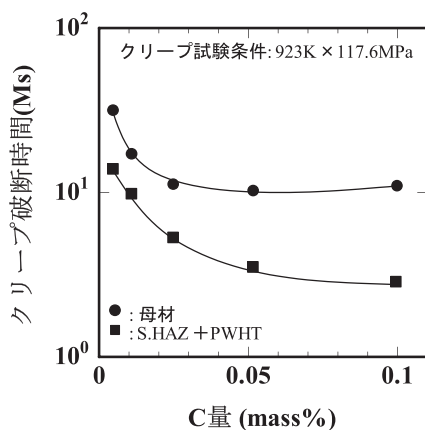


図8 高 Cr フェライト系耐熱鋼の母材および再現 HAZ 材のクリープ破断強さに及ぼす C 量の影響²²⁾

一方では、再熱割れ感受性は結晶粒の粗大化により増大することも報告されており¹⁷⁾、溶接施工面からは結晶粒の粗大化を抑制する適正な溶接条件の選定、テンパービード法の適用が再熱割れ防止には有効である。

3.2 溶接継手性能 (高温強度)

耐熱鋼において高温強度は最も重要な性能の一つであるため、溶接継手にも十分な高温強度を有することが求められる。一般的にフェライト系耐熱鋼溶接継手では図6¹⁸⁾に示すように低応力側で HAZ のクリープ強度が母材に対して低下することに留意が必要である。HAZ でのクリープ強度低下については、溶接継手の 1073-1273 K 付近に加熱された細粒 HAZ で生じる¹⁹⁾現象であることでは見解が一致するものの、その発生機構について諸説が提案²⁰⁾されており、定説は得られていない。また、HAZ のクリープ強度低下の抑制手法についても溶接施工面ならびに材料面から種々検討がなされている。

図7は溶接継手のクリープ破断時間に及ぼす溶接方法の影響を示す²¹⁾。電子ビーム溶接継手ではティグ溶接継手と同様に細粒 HAZ で破断するものの、破断寿命が長くなる。この理由については HAZ の幅が狭いことおよび開先角度が小さいことによると理解されており、開先角度お

よび HAZ 幅の低減がクリープ強度低下の抑制に有効であることを示唆している。

一方、材料面からは図8に示すように C 量の低減が HAZ のクリープ強度の低下の抑制に有効であることが示されている²²⁾。また、最近では図9に示すように多量の B を添加した材料では、HAZ のクリープ強度低下が生じないことが報告されている²³⁾。

しかしながら、これら数多くの検討にもかかわらず、HAZ のクリープ強度低下を完全に解決する対策は未だ確立されておらず、実用上は溶接継手では母材の強度に低下係数を乗じた強度評価がなされている²⁴⁾のが現状であり、使用に際しては注意が必要である。

4. オーステナイト系耐熱鋼の溶接上の課題

4.1 高温割れ

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、高温割れ感受性が高く、溶接施工時には十分な対策をとる必要がある。高温割れは結晶粒界に存在する液膜が関与する割れと固相状態で発生する延性低下割れに大別される。さらに、液膜が関与する割れは溶接金属に発生する凝固割れと溶接金属、HAZ のいずれにおいても発生する液化割れに分類される。

このうち凝固割れおよび液化割れはオーステナイト系耐熱鋼の溶接において最も生じやすい問題の一つであり、融点降下元素である S や P などの不純物元素ならびに Ti や Nb などの低融点相を形成する元素増加により感受性が増大する。そのため、耐凝固割れおよび液化割れ性の観点からはこれらの元素の低減が有効である。しかしながら、Ti や Nb は強度や耐食性など鋼材の他の性能を確保する上でも重要な元素であるため、材料面からは不純物元素の制限により割れ感受性の低減が図られている場合が多い。

図10は 25%Cr-20%Ni-Nb, N 鋼溶接金属の凝固割れ感受性に及ぼす P 量の影響を示す¹³⁾。溶接金属の凝固割れ感受性の低減には P の低減が有効であり、0.015% 以下に

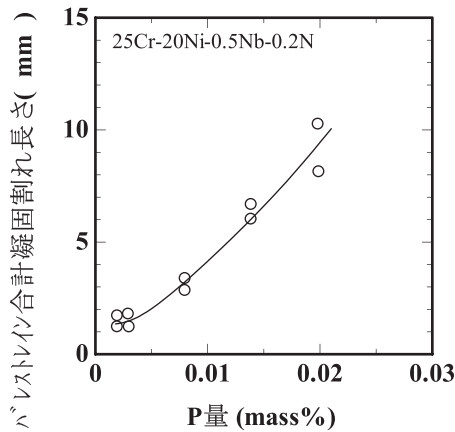


図10 25%Cr-20%Ni-Nb, N 鋼溶接金属の凝固割れ感受性に及ぼす P 量の影響¹³⁾

管理することにより、実用上問題のない耐凝固割れ性が得られている。

ところで、凝固割れ感受性の低減には室温で数%以上のデルタフェライトを含む組織とすることも実用上有効な手段の一つであることは良く知られている。しかしながら、 δ フェライトは高温での長時間加熱によりシグマ相と呼ばれる金属間化合物に変態し、溶接金属のクリープ強度の低下を招く場合がある²⁶⁾ため、高温で使用されるオーステナイト系耐熱鋼においては有効な凝固割れ対策とはならないので注意が必要である。

尚、最近では、炭化物などとの共晶反応を活用した凝固割れ感受性低減手法²⁶⁾も提案されており、これまで凝固割れに有害であると考えられていた Si などの元素の活用を可能にする技術として注目される。

延性低下割れは S や P などの不純物元素の偏析に起因した粒界脆化がその支配要因の一つであるため、一般的にはこれらの元素の低減が有効な対策とされているが、近年、共晶炭化物を活用した粒界形状の複雑化に粒界すべりの抑制ならびに偏析の分散が延性低下割れ感受性の低減に有効であるとの報告もなされている²⁷⁾。

また、溶接施工面からは、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高温割れの防止には有効であるとされている。

4.2 溶接継手性能 (高温強度)

オーステナイト耐熱鋼溶接継手ではフェライト系耐熱鋼とは異なり、HAZ の高温強度が問題となる場合は少なく、むしろ溶接金属のクリープ強度の確保が課題となる。溶接金属は粗大な凝固ままの組織であるため、母材に比べて引張強度が低くなりやすく、これに起因し、高応力側で溶接金属のクリープ強度が低下する場合がある。さらに、オーステナイト系耐熱鋼溶接金属では凝固偏析が生じやすく、完全オーステナイト組織を有する場合でもシグマ相の生成に起因し、破断時間が長くなる低応力側でもクリープ強度の低下が生じる場合がある。特に、引張強さを高めるために母材に比べて Mo や W などの合金元素を高めた場合にその傾向が強くなるため、留意が必要である。

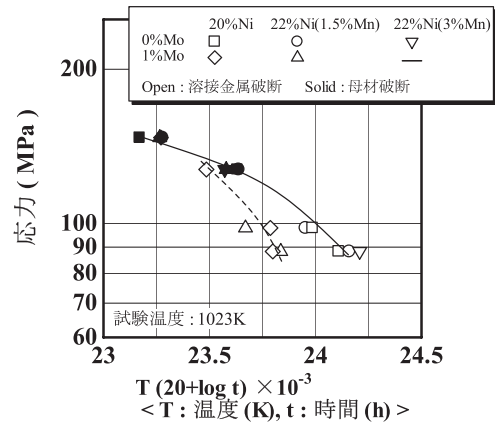


図11 23%Cr-20%Ni-3%Cu-1.5%W-Nb, N 系溶接金属のクリープ強度に及ぼす合金元素の影響²⁸⁾

図11は 23%Cr-20%Ni-3%Cu-1.5%W-Nb, N 系溶接金属のクリープ強度に及ぼす合金元素の影響を示す²⁸⁾。引張強度の向上を意図して Mo を添加した場合、低応力で長時間試験後にはシグマ相の生成に起因し、クリープ強度が低下することがわかる。

このため、オーステナイト系耐熱鋼溶接金属においては短時間ならびに長時間クリープ強度の両立の観点から成分設計が必要であり、例えば、23%Cr-20%Ni-3%Cu-1.5%W-Nb, N 系溶接金属や 18%Cr-9%Ni-3%Cu-Nb, N 系溶接金属では Mo, W の適正化とともに N, Ni の添加による相安定性の向上により母材と同等のクリープ強度が得られている^{28, 29)}。

5. おわりに

本稿では発電プラント用鋼管材料などに使用されているフェライト系耐熱鋼ならびにオーステナイト系ステンレス耐熱鋼を取り上げ、その溶接性について概説した。筆者の力不足により必ずしも内容が十分ではない点をご容赦願うとともに、本著が耐熱鋼の溶接に係わる読者の方々にとって聊かでも参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 伊勢田, 高温高压用パイプとチューブ, 配管技術, 48-11, (2006), 26.
- 2) V. K. Sikka, C. T. Ward, K. C. Thomas, ASM Int. Conf. Prod., Fab., Prop.
- 3) 伊勢田, 名取, 榎木, 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.
- 4) 榎原, 榎本, 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.
- 5) F. Masuyama, T. Yokoyama, Y. Sawaragi, A. Iseda, Development of a tungsten Strengthened Low Alloy Steel With Improved Weldability, Materials For Advanced Power Engineering, Part I (1994), 173.
- 6) 吉川, 富士川, 寺西, 湯沢, 久保田, 高強度・高耐食 347H ステンレス鋼の開発, 火力原子力発電, 36-12

- (1985), 1325.
- 7) 榎木, 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 (ST3Cu) の開発, 住友金属, 43-6 (1991), 24.
 - 8) 吉川, 富士川, 寺西, 湯沢, 久保田, 高強度・高耐食 347H ステンレス鋼の開発, 火力原子力発電, 36-12 (1985), 1325.
 - 9) 石塚, 三村, 森本, 松本, 永島, 水本, 岡本, 高温強度と耐粒界腐食性を両立させたオーステナイト系ステンレスボイラ用鋼管の開発, 新日鉄技報, 380 (2004), 91.
 - 10) 榎木, 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, Apr. (1985), 167.
 - 11) 榎原, 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.
 - 12) 木村, 栗原, 南, 山下, 橋田, 岩崎, 高強度耐熱ステンレス鋼板の開発, 火力原子力発電, 48-2 (1997), 168.
 - 13) 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.
 - 14) 例えば, 伊藤, 中西, 低合金鋼溶接熱影響部の応力除去焼鈍割れの研究 (第 2 報), 溶接学会誌, 41-1 (1972), 59.
 - 15) 例えば, A. D. Batte, M. C. Murphy, Reheat Cracking in 2.25Cr-Mo-Weld Metal, Metals Technology, 2 (1979), 62.
 - 16) 例えば, 鈴木, 玉置, 楯, Cr-Mo 鋼の再熱割れに関する研究 (第 8 報), 溶接学会論文集, 8-2 (1990), 217.
 - 17) 井川, 中尾, 武原, 鋼の再熱割れに関する基礎的研究 (第 1 報), 溶接学会誌, 47-3 (1978), 153.
 - 18) H. Cerjak, E. Letofsky, The Effect of Welding on the Properties of Advanced 9-12%Cr Steel, Sci. and Tech. of Welding and Joining, 1-1 (1996), 36.
 - 19) 例えば, 森本, 大北, 櫻井, W 含有 9Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手のクリープ特性, 溶接学会論文集, 15-4 (1997), 664.
 - 20) 例えば, 平田, 小川, フェライト系高温用鋼溶接熱影響部のクリープ強度低下現象と組織変化, 溶接学会論文集, 22-1 (2004), 78.
 - 21) 田淵, 渡部, 久保, 松井, 衣川, 安部, W強化フェライト鋼溶接継手の組織とクリープ強度, 材料, 50-2 (2001), 116.
 - 22) 平田, 小川, フェライト系高温用鋼溶接熱影響部のクリープ強度と組織変化に及ぼす C 量の影響, 溶接学会論文集, 25-2 (2007), 245.
 - 23) 清水, 塚本, 近藤, 田淵, 阿部, ボロン添加による 9%Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手のタイプ IV 破壊抑制, 溶接学会講演概要集, 78 (2006), 28.
 - 24) 中代, 貴原, 北川, CrMoV 鋼のタイプ IV クラック損傷解析と 2.25Cr1Mo および Mod.9Cr 鋼における損傷対策と評価, 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 34-1 (1993), 31.
 - 25) 現代溶接技術大系 14-耐熱鋼・耐熱材料の溶接-, 産報出版, (1980), 105.
 - 26) 小薄, 小川, 高 Si 添加エチレンプラント用鋼管の溶接凝固割れの抑制, 溶接学会講演概要集, 81 (2007), 104.
 - 27) 平田, 小川, 高耐食 30%Cr-40%Ni-1%Mo-0.15%N 鋼溶接金属性能 (第 2 報), 溶接学会講演概要集, 78 (2006), 236.
 - 28) 平田, 小川, オーステナイト系ステンレス耐熱鋼溶接金属の長時間組織安定性, 溶接学会講演概要集, 81 (2007), 106.
 - 29) K. Ogawa, Y. Sawaragi, N. Otsuka, H. Hirata, A. Natori, S. Matsumoto, Mechanical and Corrosion Properties of High Strength 18%Cr Austenitic Stainless Steel Weldment for Boiler, ISIJ International, 35-10 (1995), 1258.