

ボイラ用鋼管SUPER304H[®]の異材溶接部の高温疲労特性High Temperature Fatigue Properties of Dissimilar Welded Joint of SUPER304H[™]

野口 泰隆* 平田 弘征 吉澤 満
Yasutaka NOGUCHI Hiroyuki HIRATA Mitsuru YOSHIZAWA
浜口 友彰 栗原 伸之佑
Tomoaki HAMAGUCHI Shinnosuke KURIHARA

抄 録

ボイラ用鋼管 SUPER304H[®] は石炭火力発電ボイラの過熱器管や再熱器管の世界スタンダードとして使用されており、近年、発電効率向上のために高温化が進む排熱回収ボイラ (HRSG) においても使用されつつある。HRSG は起動、停止が石炭火力ボイラより多いため、ボイラ管には多数の熱サイクルが負荷される。このため、高温部に SUPER304H[®] を適用した場合は、低温部に使用されるフェライト鋼との異材溶接部において、線膨張率の差に起因する熱応力の繰返しに対する耐久性が要求される。SUPER304H[®] 鋼とフェライト鋼の異材溶接継手の熱疲労試験を実施し、多数の熱負荷に耐え得る耐久性を有することを実証した。

Abstract

Austenitic stainless steel SUPER304H[™] has been used as a world standard for superheater and reheater tubes in coal-fired power boilers. In recent years, SUPER304H[™] has also been used in heat recovery steam generators (HRSG) operating at high temperature. Since the number of start-ups and shut-downs in the HRSG is larger than that in a coal-fired power boiler, boiler tubes in the HRSG are subjected to many thermal cycles. When the SUPER304H[™] is applied to the higher temperature part in the HRSG, dissimilar welded parts of SUPER304H[™] and a ferritic steel, which is used in lower temperature regions, are required to withstand the repetition of the thermal stresses caused by a mismatch of thermal expansion between SUPER304H[™] and the ferritic steel. Thermal fatigue tests for the dissimilar welded tube of SUPER304H[™] has been conducted and reveal that the dissimilar welded tube could endure many thermal cycles.

1. 緒 言

新日鉄住金(株)が開発したボイラ用オーステナイト系ステンレス鋼管 SUPER304H[®] (火SUS304J1HTB, ASTM A213 S30432, ASME SA213 Code Case 2328)¹⁾ は石炭火力発電ボイラの過熱器管や再熱器管に幅広く使用されてきた。近年、コンバインド発電プラントの排熱回収ボイラ (Heat Recovery Steam Generator: HRSG) においても、その高温化に伴い従来はフェライト系耐熱鋼が使用されていた伝熱管に SUPER304H[®] 鋼が適用されつつある。

SUPER304H[®] 鋼のような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高温強度や耐水蒸気酸化性に優れるため、発電プラントの高温部にはオーステナイト鋼、低温部にはフェライト鋼が使用される。それらの中間

部には、オーステナイト鋼とフェライト鋼の異材溶接部が形成される。オーステナイト鋼はフェライト鋼に比べて線膨張率が高いため、異材溶接部の温度が上昇すると、両者の熱膨張量の差に起因して熱応力が発生する。また、石炭火力発電ボイラに比べて起動性に優れる HRSG では頻繁に起動、停止が行われるため、異材溶接部に負荷される熱応力の繰返し数が多くなる。このため、HRSG の伝熱管にオーステナイト鋼を適用する場合は、フェライト鋼との異材溶接部における疲労特性の確保が重要になる。

本報では、SUPER304H[®] 鋼の HRSG への適用性を検討することを目的に実施した、フェライト鋼との異材溶接継手のクリープ疲労試験、熱疲労試験、および熱応力解析結果について紹介する。

* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

2. SUPER304H[®]異材溶接継手のクリープ疲労試験

SUPER304H[®]異材溶接継手の高温における基本的な疲労特性を把握するため、600℃の一定温度下でクリープ疲労試験を実施した。供試材は、SUPER304H[®]鋼(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N鋼)とフェライト系耐熱鋼 T91(火STBA28, ASTM A213 T91, ASME SA213 T91:9Cr-1Mo-V-Nb鋼)の異材溶接継手である。SUPER304H[®]鋼と T91 鋼の線膨張率を図 1 に示す。SUPER304H[®]鋼の線膨張率は T91 鋼より約 1.5 倍高いことが分かる。SUPER304H[®]鋼と T91 鋼の異材溶接には、ニッケル基合金の溶接金属が一般的に使用される。図 1 には、その代表的な合金である Alloy 82 (AWS A5.14 ERNiCr-3) と Alloy 617 (AWS A5.14 ERNiCrCoMo-1) の線膨張率も示した。これらの溶接金属の線膨張率は SUPER304H[®]鋼と T91 鋼の間に位置する。SUPER304H[®]鋼、溶接金属、T91 鋼の順で熱膨張量を段階的に変化させることにより、SUPER304H[®]鋼と T91 鋼が直に接する場合より異材界面での熱膨張差が小さくなるため熱応力の低減が期待できる。クリープ疲労試験には溶接金属に Alloy 82 を用いて自動 TIG 溶接した後、740℃×30min 保持後空冷の溶接後熱処理を施した鋼板を使用した。鋼板から試験部直径 10mm の丸棒試験片を採取し、600℃でクリープ疲労試験を実施した。クリープ疲労試験では試験片に取り付けた伸び計で計測したひずみを制御し、図 2 に示す PP (fast-fast) 波形、CP (slow-fast) 波形のひずみを繰り返し与えた。ひずみ速度は高速側(P側)を 0.8%/s、低速側(C側)を 0.01%/sとした。高速側の 0.8%/s は負荷中に発生するクリープひずみを無視し得るひずみ速度であり、低速側の 0.01%/s は負荷中にクリープひずみが生じるひずみ速度である。このため、PP 波形を用いた試験(以下 PP 試験と呼ぶ)では試験片にクリープひずみは負荷されず、弾性ひずみと塑性ひずみが繰り返し負荷され、CP 波形を用いた試験(以

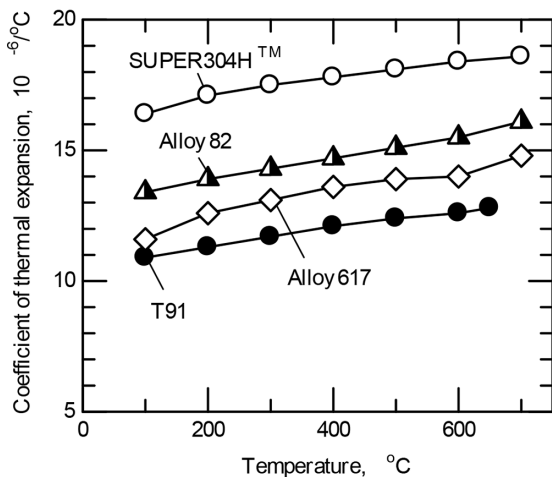


図 1 SUPER304H[®]鋼と T91 鋼の線膨張率
Coefficient of thermal expansion of SUPER304H[™] and T91

下 CP 試験と呼ぶ)では弾性ひずみと塑性ひずみに加えて、引張側のみクリープひずみも繰り返し負荷される。一般に、クリープひずみ、特に引張クリープひずみが繰り返し負荷されると疲労寿命が短くなるため、クリープひずみの影響を考慮した条件と考慮していない条件の両方で試験した。試験は、全ひずみ範囲 0.5% (引張 0.25%, 圧縮 0.25% のひずみの繰り返し) の条件で実施した。

クリープ疲労試験後の試験片外観を写真 1 に示す。PP 試験、CP 試験のいずれにおいても、破断位置は溶接金属から少し T91 鋼側の溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) であった。PP 試験では HAZ の最も軟化した領域、CP 試験では最も細粒の領域からき裂が発生した。異材溶接継手の疲労寿命を T91 鋼の疲労寿命と比較した結果を図 3 に示す。本試験による異材溶接継手の疲労寿命は、T91 鋼の疲労寿命と同程度であった。このように、SUPER304H[®]鋼と T91 鋼の異材溶接継手に高温で繰り返しひずみを与えた場合、クリープひずみの有無によらず、SUPER304H[®]鋼に損傷はみられず、T91 鋼側の HAZ が最も弱いことが明らかになった。また、本試験では異材溶接部のクリープ疲労寿命は T91 鋼母材の寿命から大きな低下がないことを確認できた。

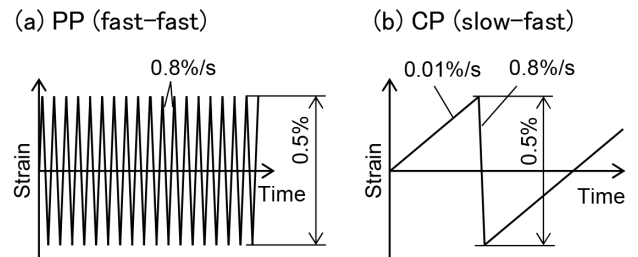


図 2 クリープ疲労試験で与えたひずみ波形
Strain waveforms for the creep-fatigue test

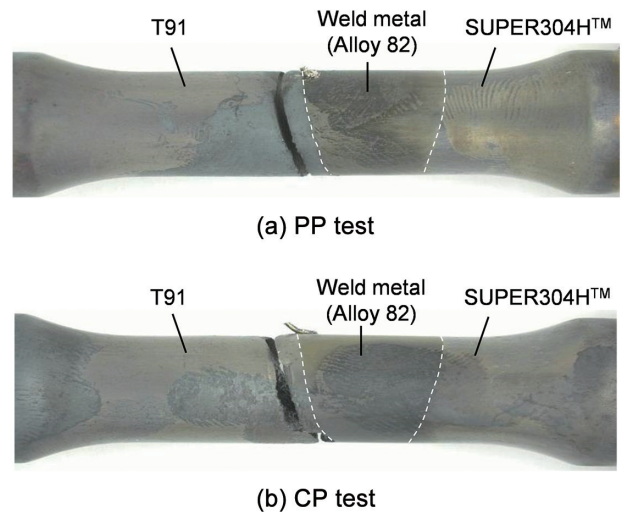


写真 1 クリープ疲労試験後の試験片外観
Appearance of the specimens after the creep-fatigue test

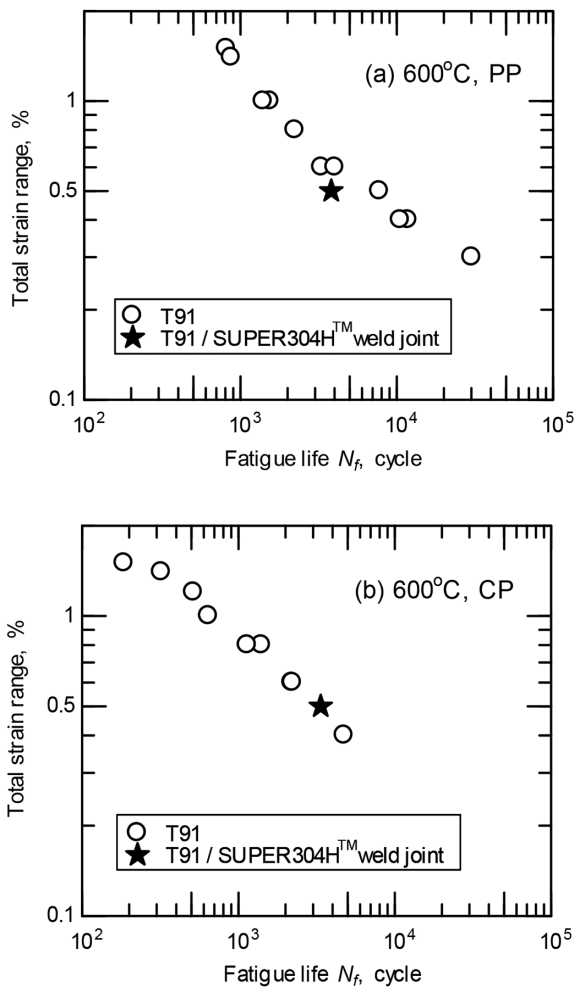


図3 SUPER304H[®] 鋼異材溶接継手と T91 鋼のクリープ疲労寿命の比較

Comparison of creep-fatigue life between dissimilar welded joint of SUPER304H[™] and T91 steel

3. SUPER304H[®] 異材溶接鋼管の熱サイクル試験

前章に示したクリープ疲労試験は一定温度下で実施したため、異材溶接継手の母材および溶接金属の線膨張率の差に起因する熱応力、熱ひずみを繰り返し与えた試験ではない。本章では、実機プラントでの温度変動下の疲労特性を把握するために、異材溶接継手に熱サイクルを与え、熱膨張差に起因する熱応力、熱ひずみを繰り返し負荷した試験およびその結果について紹介する。供試材は SUPER304H[®] 鋼と T91 鋼のシームレス鋼管を異材溶接した継手である。鋼管の寸法は外径 45mm、肉厚 7mm であり、溶接金属 Alloy 82 を用いて自動 TIG 溶接した。熱サイクル試験では、高周波誘導加熱により異材溶接鋼管を加熱し、鋼管の内面および外面に空気を吹き付けることにより冷却した。試験で与えた温度波形を図 4 に示す。Test 1 は最低 100℃、最高 620℃ の温度サイクルを 1000 回与えた後、最低 300℃、最高 620℃ の温度サイクルを 5000 回与えた試験である。最低 100℃、最高 620℃ の温度サイクルは、HRSG プラントを週末に停止する WSS (Weekly Start and Stop) 運転を想定

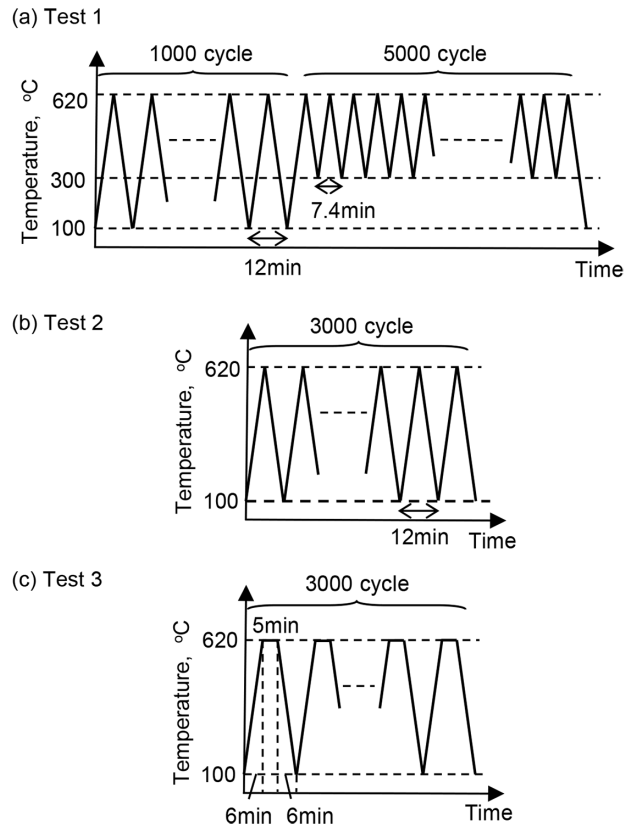


図 4 熱サイクル試験の温度波形
Temperature cycles for the thermal fatigue test

した温度サイクルであり、最低 300℃、最高 620℃ の温度サイクルは、HRSG プラントを夜間停止する DSS (Daily Start and Stop) 運転を想定した温度サイクルである。平日 5 回 DSS 運転を行い、週 1 回 WSS 運転を行うと仮定した場合、プラントを 20 年間稼働させると DSS 運転を約 5000 回、WSS 運転を約 1000 回実施することになる。従って、Test 1 は HRSG プラントを 20 年間稼働させたときの熱サイクル数に相当する負荷といえる。Test 2 は最低 100℃、最高 620℃ の大きい温度変化をさらに多く与えた場合の影響を評価するための温度サイクルであり、Test 3 は高温で保持された場合の影響を評価するために Test 2 の温度波形に 620℃ で 5min の保持時間を挿入した温度サイクルである。

熱サイクル試験において、最低 100℃、最高 620℃ の温度サイクルを与えたときの溶接部近傍の温度測定結果を図 5 に示す。非磁性体であるオーステナイト鋼と強磁性体であるフェライト鋼を高周波誘導加熱によって同じ温度に加熱することは難易度が高いが、本試験では加熱コイルの形状を調整することにより、SUPER304H[®] 鋼、T91 鋼、および溶接金属をほぼ一様な温度に加熱できた。また、空気の吹き付け方法を調節することによって冷却時も溶接部近傍をほぼ一様な温度にすることができ、その結果、異材溶接部に狙いの温度サイクルを与えることができた。試験後の溶接部外観を写真 2 に示す。外観の観察では溶接部に割れなどの損傷は確認されなかった。また、Test 1 の試験後

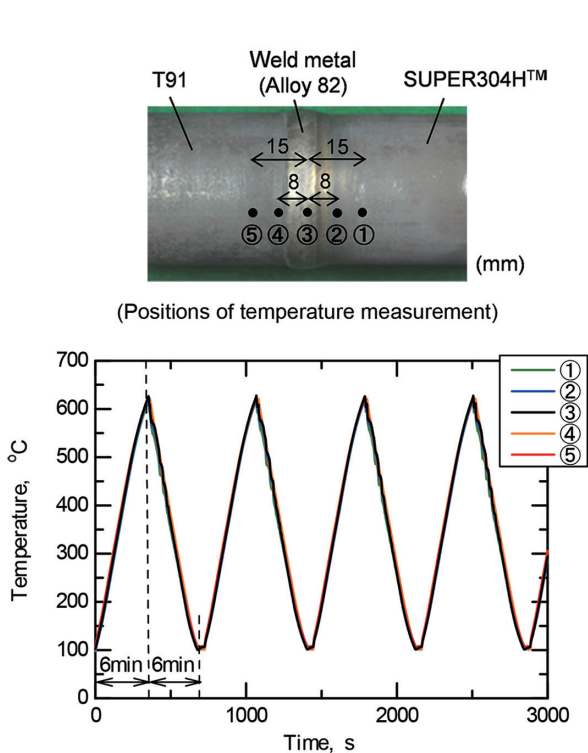


図5 熱サイクル試験中の溶接部近傍の温度測定結果
Temperature distribution in the dissimilar welded tube near the welded part

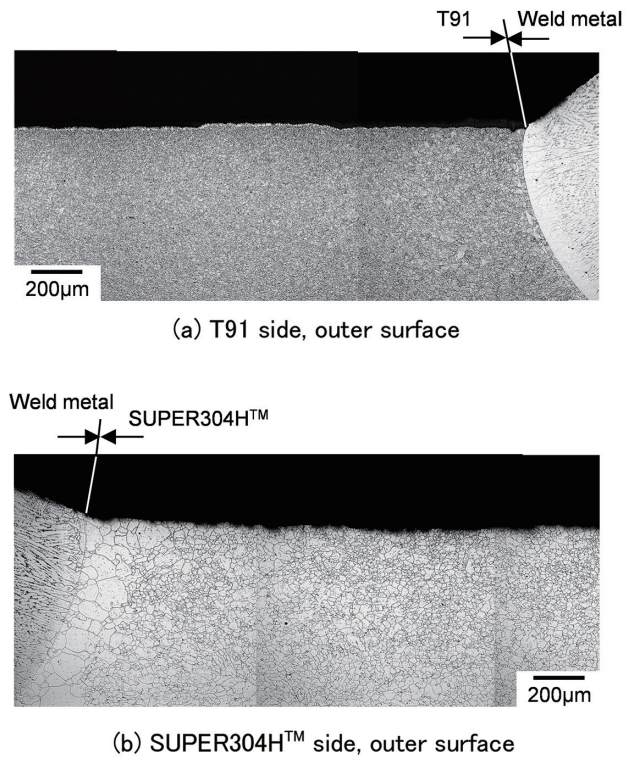


写真3 熱サイクル試験後の異材溶接部断面
Cross-section of the welded part of the tube after the thermal fatigue test

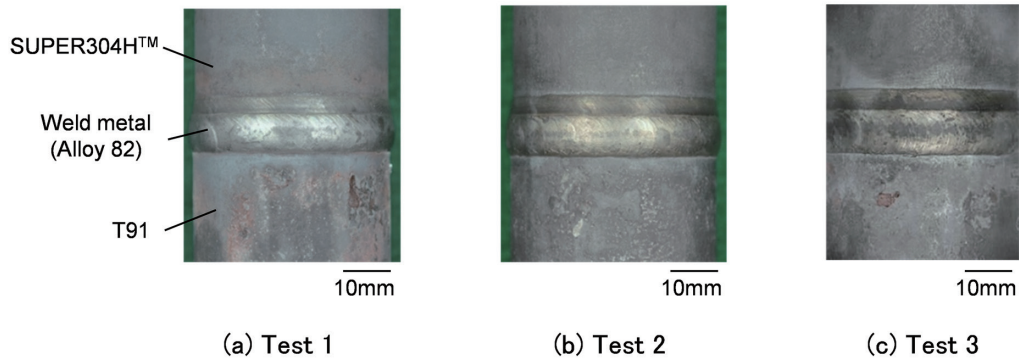


写真2 熱サイクル試験後の異材溶接鋼管の溶接部外観
Appearance of the welded part of the tube after the thermal fatigue tests

には超音波探傷によって溶接部の内面と外面を検査したが、欠陥は確認されなかった。熱サイクルによる溶接部の損傷をより詳細に調査するため、Test 1の試験後に鋼管を切断し、溶接部断面を観察した結果を写真3に示す。写真3(a)には溶接部のT91鋼側を、(b)にはSUPER304H[®]鋼側の観察結果を示した。T91鋼側、SUPER304H[®]鋼側のどちらにもき裂のような損傷は確認されなかった。

以上の試験結果より、SUPER304H[®]鋼とT91鋼の異材溶接鋼管は多数の熱サイクルに耐え得ることを確認できた。起動、停止の回数が多く、多数の熱サイクルが負荷されるHRSGにおいても、長期間の使用が可能であると考えられ、今後、HRSGの高温化に伴う発電効率向上および環境負荷低減にSUPER304H[®]鋼が貢献できるものと期待される。

4. SUPER304H[®]異材溶接鋼管のFEM解析

前章において、SUPER304H[®]鋼とT91鋼の異材溶接鋼管は多数の熱サイクルに耐え得ることを確認したが、溶接部への負荷をより詳細に把握するため、FEM(有限要素法)解析を実施した。図6に示すように、解析対象は外径45mm、肉厚8.5mmのSUPER304H[®]鋼とT91鋼の異材溶接鋼管である。Tube AはSUPER304H[®]鋼とT91鋼を直接つないだ継手であり、Tube BはSUPER304H[®]鋼とT91鋼の間にニッケル基合金HR6W(ASM B167-UNS N 06674, ASME SB167 Code Case 2684: 23Cr-45Ni-7W-Ti-Nb)²⁾の短管を挟んだ継手である。この短管はトランジションピースと呼ばれ、オーステナイト鋼とフェライト鋼の熱膨張差に

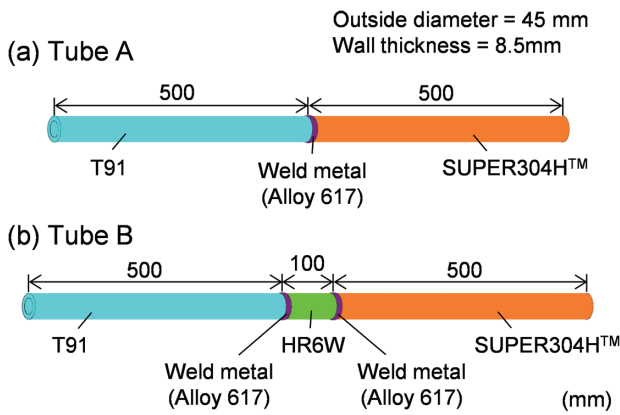


図6 FEM解析対象としたSUPER304H[®]異材溶接鋼管
Dissimilar welded tube of SUPER304H[™] for FE-analysis

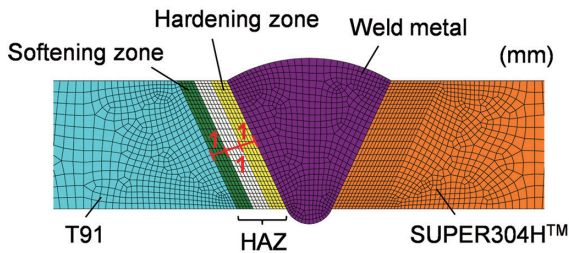


図7 異材溶接部の解析モデル
FE-modeling of the dissimilar welded part

起因する熱疲労損傷が懸念される場合に、線膨張率が両鋼の間にあるニッケル合金を挟み、溶接部に発生する熱応力を低減する目的で挿入される。トランジションピースの効果を検証するため、Tube A, Bの溶接部に発生するひずみをFEM解析し、比較した。Tube A, Bとも溶接金属はAlloy 617とした。

鋼管は軸対称形状であるため、鋼管断面の2次元モデルを作成し、軸対称要素を用いて解析した。溶接部の解析モデルの一例として、Tube Aの溶接部近傍のメッシュ分割図を図7に示す。フェライト鋼であるT91鋼は溶接の熱影響によって、溶接部近傍の特性が変化する。本FEM解析では、溶接金属から3mmの領域をHAZと定義し、さらにHAZ内を幅1mmの3領域に分割した。そして、溶接金属から1mmの範囲を硬化域、T91鋼母材から1mmの範囲を軟化域と定義し、別途実施したHAZ再現材の試験結果をもとに、硬化域には母材の1.6倍の応力となる応力-ひずみ関係および1/50倍のクリープひずみ速度を与え、軟化域には母材の0.9倍の応力となる応力-ひずみ関係および50倍のクリープひずみ速度を与えた。また、硬化域と軟化域との間にある幅1mmの領域には母材と同じ物性値を与えた。

解析では、最低温度100℃、最高温度620℃、620℃における保持時間10minの熱サイクルを10回与えた。また、100℃から620℃への加熱時間、および、620℃から100℃への冷却時間はいずれも10minとした。Tube A, Bの異材溶接部に発生するクリープひずみの解析結果を図8に示

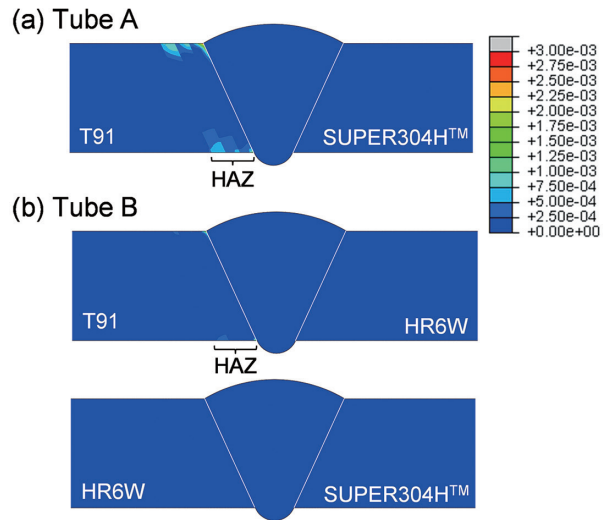


図8 熱サイクル負荷によって異材溶接部に発生するクリープひずみ

Distribution of creep strain near the dissimilar welded part calculated by the FE-analysis

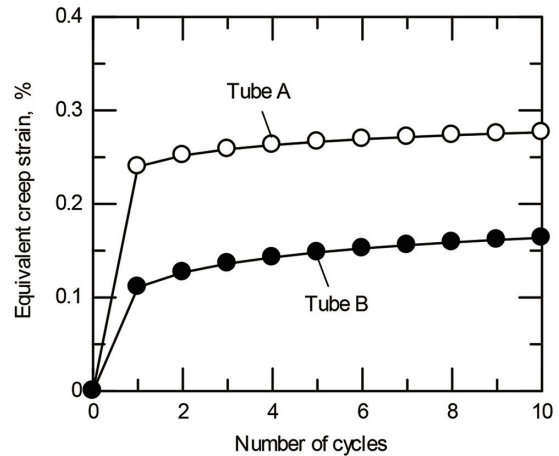
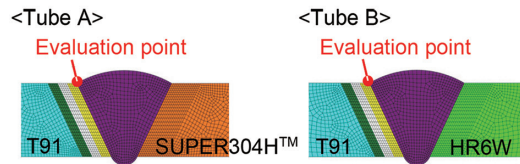


図9 T91鋼側溶接止端部に発生するクリープひずみと熱サイクル数の関係

Relationship between equivalent creep strain and number of cycles at the weld toe in T91

す。クリープひずみは主にT91鋼のHAZに発生し、SUPER304H[®]鋼およびHR6Wに発生するクリープひずみは小さい。これは、これらの材質の中ではT91鋼が最もクリープ変形抵抗が低いからである。Tube A, Bを比較すると、トランジションピースを挿入したTube BのほうがT91鋼に発生するクリープひずみが小さいことが分かる。クリープひずみが最も大きくなったT91鋼側外面の溶接止端部に発生するクリープひずみと熱サイクル数の関係を図9に示す。Tube Bはトランジションピースの挿入によって、クリープ

ひずみが約 40%低減された。Tube A, B はいずれも 1 サイクル目にクリープひずみが生じた後, 2 サイクル目以降は発生するクリープひずみが小さくなった。また, 1 サイクルあたりに発生するクリープひずみはサイクル数を重ねるに従って小さくなった。

このように, SUPER304H[®] 鋼と T91 鋼の異材溶接鋼管に熱サイクルを与えると, 溶接部の T91 鋼側にクリープひずみが蓄積するものの, サイクル数を重ねるに従い 1 サイクルあたりに発生するクリープひずみは小さくなるため, 前章に示したように多数回の熱負荷を与えても溶接部にき裂のような損傷が発生しなかったものと考えられる。また, SUPER304H[®] 鋼とフェライト鋼の間にニッケル基合金のトランジションピースを挿入することにより, 溶接部に発生するクリープひずみが低減され, 熱サイクルに対する耐久性をさらに高められることが明らかになった。

5. 結 言

ボイラ用オーステナイト系ステンレス鋼管 SUPER304H[®] (火SUS304JIHTB, ASTM A213 S30432, ASME SA213 Code Case 2328) とフェライト鋼の異材溶接部の高温疲労特性について紹介した。SUPER304H[®] 鋼は石炭火力発電ボイラで多く採用されてきたが, フェライト鋼との異材溶接部の熱疲労特性も確保できると考えられることから, 今後, 高温化が進む排熱回収ボイラでの採用も増え, 発電効率の向上および環境負荷の低減に貢献するものと期待される。

参考文献

- 1) 榎木義淳, 大塚信夫, 小川和博, 加藤信一郎, 平野奨: 住友金属. 43 (6), 24 (1991)
- 2) 榎木義淳, 吉川州彦: 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告. 31 (3), 485 (1990)



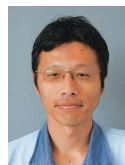
野口泰隆 Yasutaka NOGUCHI
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



浜口友彰 Tomoaki HAMAGUCHI
鉄鋼研究所 鋼管研究部
主任研究員



平田弘征 Hiroyuki HIRATA
鉄鋼研究所 接合研究部長
博士(工学)



栗原伸之佑 Shinnosuke KURIHARA
鉄鋼研究所 鋼管研究部
主任研究員



吉澤 満 Mitsuru YOSHIZAWA
欧州事務所 主幹
博士(学術)