

連携記事

高クロム鋼大径管溶接部の余寿命診断技術

Remaining Life Assessment Technologies for Weldment of
High Chromium Steel Pipe

屋口正次

(一財)電力中央研究所
材料科学研究所 構造材料領域
Masatsugu Yaguchi 副研究参事

1 はじめに

火力発電の分野では熱効率向上のため蒸気条件(温度、圧力)が次第に上昇し、約20年前に超臨界圧より蒸気温度が約30℃高い超々臨界圧(Ultra Super Critical (USC): 蒸気温度593℃以上、圧力24.1MPa以上)にまで達した。このUSC火力発電プラントでボイラからタービンへと蒸気を輸送する大径管(主蒸気管、高温再熱蒸気管)には、Creep Strength Enhanced Ferritic Steelsと呼ばれる改良型フェライト系耐熱鋼である9Cr-1MoVNb鋼(Grade 91鋼)、9Cr-0.5Mo-2WVNb鋼(Grade 92鋼)、12Cr-0.4Mo-2WCuVNb鋼(Grade 122鋼)が使用されている(以下、これらの材料を総称して“高クロム鋼”と略す)。しかし、近年、高クロム鋼大径管の溶接部において、クリープ損傷を原因とする不具合の発生等が報告されている。大径管での不具合は、発電プラント構内に甚大な被害をもたらす可能性がある。また、USC火力発電は100万kW級の大容量プラントが多いため、電力安定供給の観点から、不具合による計画外停止は未然に防がなければならない。そのため、高クロム鋼大径管溶接部に対する余寿命診断技術の高度化に関する研究・開発が、関連機関で活発に行われている。

そこで、本稿では、高クロム鋼大径管の不具合事例と損傷形態について述べた上で、余寿命診断技術の高度化に向けた取り組み例を紹介する。

2 高クロム鋼大径管の不具合事例と損傷形態

高クロム鋼大径管での不具合は世界中の火力発電プラントで生じている。ただし、その発生部位・箇所と要因は、火力発電プラントが存在する地域・国と不具合発生年によって

様々である。すなわち、不具合発生は、プラント設計の思想・規定、材料の品質管理・特性、配管の施工・組み立ての方法と管理、プラントの運用形態と保守・管理等に依存する。

本章では、まず2.1節で国内の火力発電プラントで発生した不具合事例を紹介し、次に2.2節で高クロム鋼大径管の損傷形態について概説する。

2.1 実機での不具合事例

日本では、1993年に再熱蒸気温度として初めて593℃を採用した火力発電プラントが運転を開始した。さらに、1997年には主蒸気温度が593℃のUSC火力発電プラントが運開し、その後も続々とUSC火力発電プラントの建設・運転が世界に先駆けて日本で進められた。ここで、新しい耐熱材料である高クロム鋼の適用がUSC火力発電プラント実現の大きな鍵であった。

しかし、長時間側で高クロム鋼のクリープ強度が想定以上に低下する傾向が現れ始め、また、溶接部の強度が母材よりも大きく低下するという特徴も出てきた。そのような中で、2004年には、運転時間が4万時間に満たないUSC火力発電プラントの高クロム鋼製高温再熱蒸気管の溶接部で蒸気リークが発生した¹⁾。ここで、高温再熱蒸気管は外径が700～1000mm程度の薄肉管であり、長手溶接を有するシーム管が一般的であった(2015年頃から、後述する理由によりシームレス管へと取り替えられつつある)。一方、主蒸気管は外径が400～500mm程度の厚肉管であり、長手溶接の無いシームレス管である。この不具合は国内の火力発電プラントではそれまでに例を見ない事象であったため、直ちに国による調査委員会(高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術基準適合性調査委員会(略称、SHC委員会))が設置された。その調査結果^{2,4)}に基づき、長時間クリープ強度の見直しが2005年に当時の原子力安全・保安院よりNISA文書として通

達された¹⁾。

SHC委員会の評価結果を受けて、発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈）の許容引張応力が引き下げられるとともに、寿命評価式と溶接継手強度低減係数が制定された。しかし、長時間クリープ試験データは十分ではなかったため、引き続き長時間クリープ強度を検討することの必要性も提言された。2010年には、民間主導で「高クロム鋼クリープデータ評価検討会（以下、データ検討会）」が組織され、2005年以降に取得されたクリープ試験結果も含めてクリープ強度の再評価が実施された^{5,6)}。この再評価の結果に基づき、対象とした複数の鋼種の許容引張応力、溶接継手強度低減係数および寿命評価式が2014年に再び改正された。ただし、この間にも、USC火力発電プラントの大径管溶接部での不具合が何度か発生した。2015年にはデータ検討会により再びその時点での最新のクリープデータによる評価が行われた。その結果、Grade 91鋼について、許容引張応力や寿命評価曲線の見直しが提言された^{7,8)}。Grade 91鋼溶接継手に関

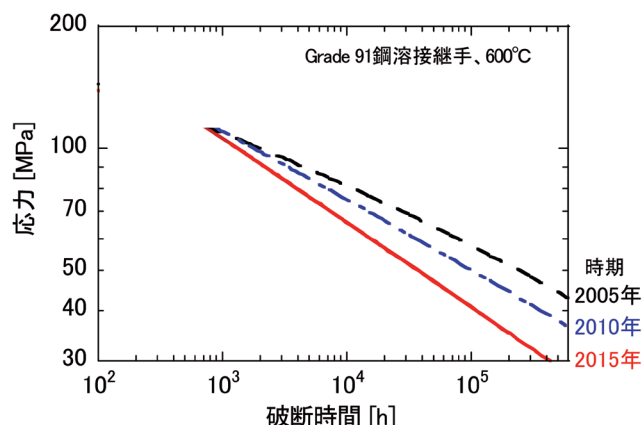


図1 Grade 91鋼溶接継手のクリープ寿命評価曲線

する寿命評価曲線の変化を図1に示す。

上記のように、高クロム鋼の長時間クリープ強度に関する再評価が2005年以降に数回行われ、鋼種によってはその度にクリープ強度が下方へと修正されてきた。このため、USC火力発電プラントの設計・建設時と比べると、高クロム鋼の許容引張応力が低下している。国内のUSC火力発電プラントに関しては、この材料特性の想定値の変化が不具合発生の主要因の一つであると考えられる。

2.2 損傷形態

高クロム鋼大径管での不具合の発生箇所は、一般に、溶接熱影響部 (HAZ) である。ここで、HAZは溶接時に温度がAc1変態点を越えた領域であり、高クロム鋼の場合、数mmほど形成される。このHAZの中で、結晶粒径が小さい領域（細粒域）、あるいは、硬さが最も低い領域（部分変態域）においてクリープ損傷が優先的に進行する（図2）。

構造の観点から損傷発生箇所を見ると、長手溶接におけるHAZ、周溶接におけるHAZ、管台溶接におけるHAZの3つに分類される。長手溶接の場合、内圧による周方向応力がHAZに垂直方向に作用するため、最も損傷の進行が速い。一方、周溶接の場合、内圧とシステム荷重による軸方向応力がHAZに対する評価応力となるが、システム荷重が過大に作用しない限り、一般的に軸方向応力は周方向応力より低い。大径管の外表面に小径管を取り付ける管台溶接は様々な構造があるため一概に論じるのは難しいが、何れの管台溶接の場合も管台根本部分で周方向の2ヶ所はHAZが大径管軸方向となり、部分的に長手溶接と類似の応力状態となる。そのため、一般論としては、損傷は「長手溶接」>「管台溶接」>「周溶接」の傾向が認められる。前述した溶接継手の寿命評価曲線の見

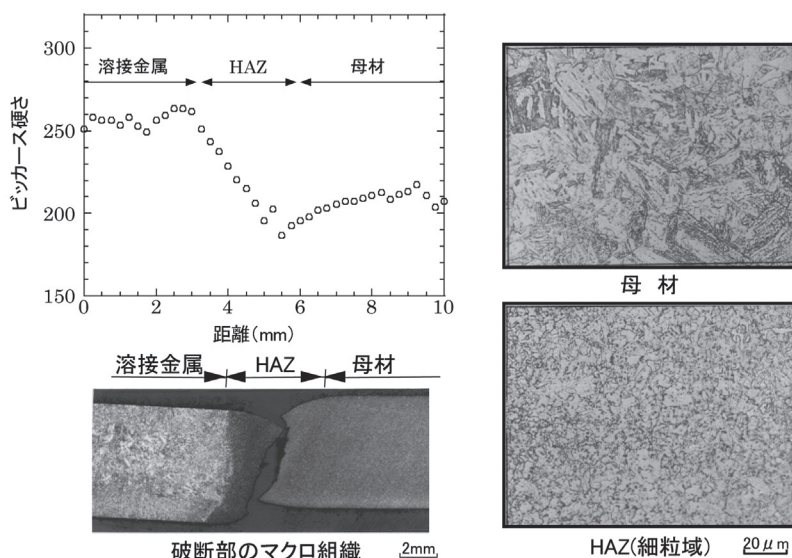


図2 高クロム鋼溶接継手のクリープ損傷形態

直し等を受けて、「長手溶接」の無いシームレス管への取り替えが進められている。

高クロム鋼溶接部での損傷の特徴は、何れの構造の場合もHAZで配管内部からき裂が発生・進展する可能性が考えられる点である。低合金鋼の場合は一般に外表面に損傷が発生するため、外表面の情報（ボイド、硬さ等）に基づく評価手法が主に開発されてきた。しかし、高クロム鋼の場合は内部に損傷が発生することがあるため、外表面に対する従来の評価手法だけではその診断精度が十分とは言えないケースも考えられる。そのため、高クロム鋼溶接部の診断においては、従来の評価手法とともに、内部損傷にも適用することのできる解析的なクリープ寿命評価法、ならびに、内部損傷を検出できる非破壊検査技術が重要な役割を担っている。

なお、海外の火力発電プラントにおいては、材料の品質管理や特性に起因すると思われる不具合が高クロム鋼母材部で発生することもあり、それらに対する対策や研究も進められている。

3 余寿命診断技術の高度化に向けた取り組み

本章では、高クロム鋼溶接部を対象とした解析的クリープ寿命評価法と非破壊検査技術の高度化に関する取り組み例を紹介する。

3.1 解析的寿命評価法の開発

溶接部のクリープ強度には、応力の多軸性が大きな影響を及ぼす可能性が従来から指摘されている。そこで、当所では、高クロム鋼溶接継手を対象とした内圧クリープ試験を実施し多軸応力下の破壊挙動を把握した上で、同材に対するクリープ寿命評価法を開発した⁹⁾。

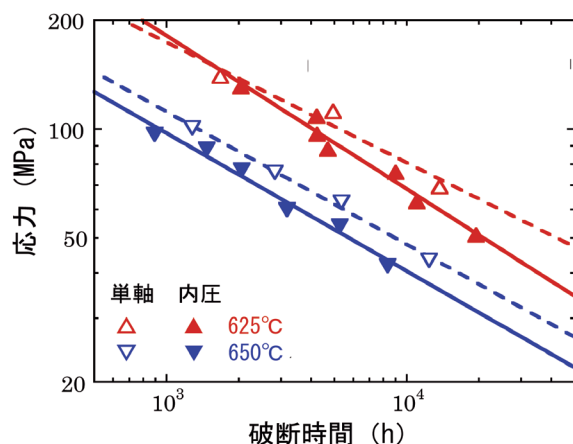


図3 Grade 122鋼溶接継手のクリープ試験結果

3.1.1 内圧クリープ試験の方法と結果

(1) 方法

本研究では、Grade 91鋼およびGrade 122鋼の長手溶接継手を対象として内圧クリープ試験を実施した。試験片は両鋼とも外径60mm、肉厚10mm、軸長350mmの円管であり、溶接施工法はティグ溶接である。共金系溶接材料を用いて軸方向に長手溶接を施した後、所定の熱処理を付与した。

圧力媒体は水蒸気であり、試験中、圧力が一定になるように制御した。試験温度は625℃と650℃であり、各温度で圧力を4～7レベル設定した。試験結果の整理には平均法式によって算出した周方向応力を用いた。

なお、本研究では、高クロム鋼溶接部のクリープ損傷の進行過程を明らかにするため、破断試験だけでなく中途止め試験も併せて実施し、クリープ損傷材を製作した。

(2) 結果

内圧クリープ試験の結果の例を図3に示す。ここで、同図には、比較用に溶接継手の単軸クリープデータも併記した。本試験結果の範囲内においては、クリープ寿命は両鋼とも内圧下の方が単軸下よりも短寿命となる傾向が見られた。何れの内圧クリープ試験片においても、き裂はHAZで試験片軸方向に生じていた。試験片軸に垂直方向の断面を観察したところ、き裂は試験片表面ではなく肉厚中央部において優先的に生じていた（図4）。

クリープ損傷材に関して走査型電子顕微鏡によりボイド観察を行ったところ、単軸試験片、内圧試験片とも、ボイドは溶接金属や母材部ではなくHAZ細粒域で顕著であった。損傷が高くなるにつれて、ボイドの個数が増えるとともに、サイズも大きくなっていった。なお、内圧試験片の場合、肉厚方向でのボイドの差異が顕著であり、肉厚内部でボイドが顕著に観察される一方で、管の内外表面近傍ではボイドは相対的に僅かであった。これは後述する応力多軸度の影響と考えられる。

クリープ損傷（寿命比）とボイドの関係を定量的に検討するため、各試験片のHAZ細粒域を対象として単位面積当た

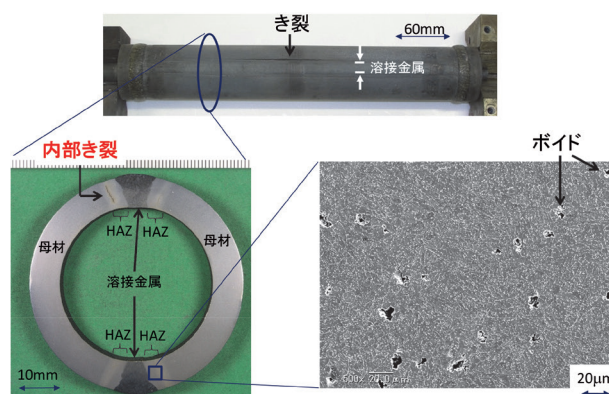


図4 内圧クリープ条件下における長手溶接の損傷形態

りのボイドの数（ボイド個数密度）を測定した結果を図5に示す。材料内部のボイド個数密度は損傷の進行と共に増大しているが、外表面においてはボイド個数密度の変化は僅かであった。また、損傷100%時のボイド個数密度は試験条件によって異なる値を示した。本観察結果より、高クロム鋼長手溶接部においては、内圧クリープ条件下では管内部で損傷が優先的に進行すること、および、外表面の観察結果に基づき余寿命を評価する際には表面と内部の違いに十分留意する必要があることが示唆される。

3.1.2 クリープ寿命評価法の提案

(1) 溶接部の応力ひずみ状態

溶接部の応力ひずみ状態を把握するため、Grade 91鋼およ

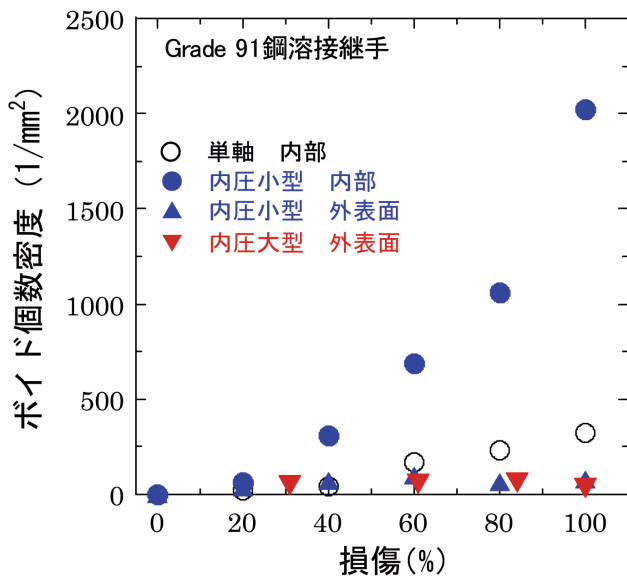


図5 各種試験片における損傷とボイド個数密度の関係

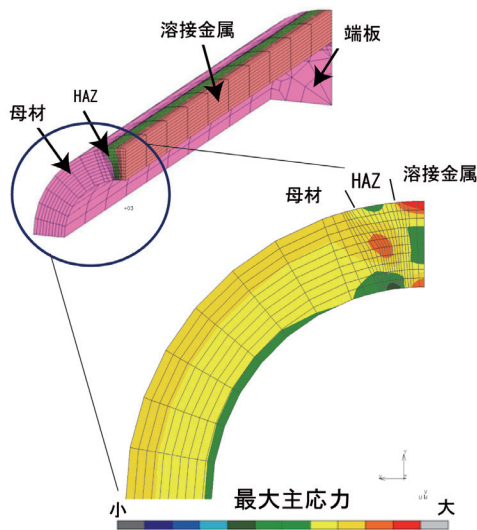


図6 解析に用いた有限要素と解析結果の例（応力再配分後の最大主応力）

びGrade 122鋼の内圧クリープ試験片を対象として有限要素法によるクリープ応力解析を実施した。本解析においては、図6に示すように、母材だけでなく溶接金属およびHAZの材料特性も考慮した3要素モデルを用いた。本解析の結果より、以下が明らかとなった。

- ・クリープ条件下では、HAZ部でひずみが優先的に進行する。
- ・ひずみの進行に伴い溶接部で応力の再配分が生じ、HAZ細粒域の肉厚中央部において最大主応力（周方向応力）および応力多軸度TFが最も高くなる。

ここで、TFとは主応力の線形和をミーゼス型相当応力で除した値であり、単軸条件下では1、等3軸条件下では無限大となる。

Grade 91鋼、Grade 122鋼とも、内圧試験片肉厚方向の分布に関して、最大主応力および応力多軸度とボイド個数密度との間には良好な相関関係が認められた（図7）。本解析結果より、ボイドの発生・成長には最大主応力と応力多軸度が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

(2) クリープ寿命評価法の提案

前述のクリープ損傷材の観察結果と数値解析結果に基づき、高クロム鋼溶接部に対するクリープ寿命評価法を提案した。

本寿命評価法は、延性消耗理論¹⁰⁾に立脚しており、局所のひずみが荷重状態に対応したひずみの限界値（限界ひずみ）に達すると、その箇所で巨視き裂が発生する、と考える。限界ひずみ ϵ_{lim} のモデル化が本寿命評価法の改良点であり、最大主応力が小さいほど、応力多軸度が高いほど、 ϵ_{lim} は小さな値となる。本寿命評価法の手順を図8に示す。評価対象に対する3要素モデルのクリープ解析で得られるHAZ細粒部での最大主応力、応力多軸度、局所クリープひずみ速度と材料定数により、損傷およびクリープ寿命が算出される。

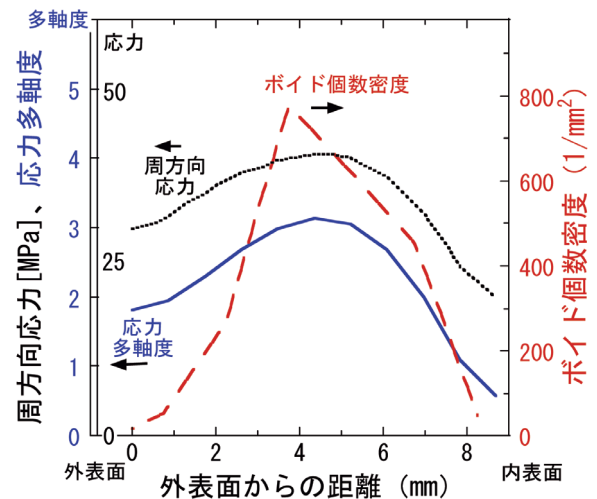


図7 肉厚方向に関する周方向応力、応力多軸度とボイド個数密度の関係（Grade 91鋼溶接継手）

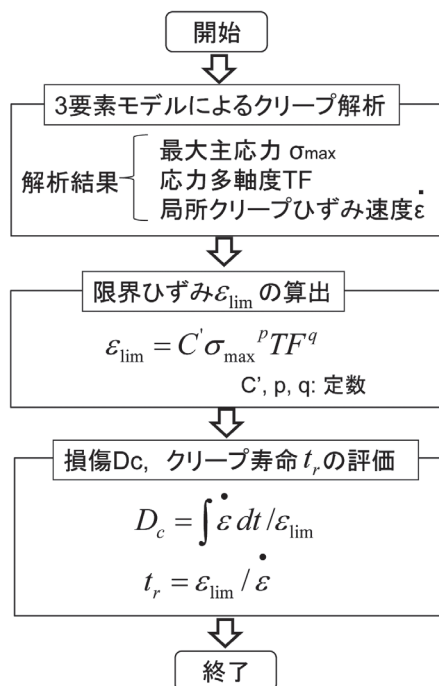


図8 クリープ寿命評価法のフロー

3.1.3 クリープ寿命評価法の検証

(1) 実機配管を用いた内圧クリープ試験

材料試験片と実機配管とでは、寸法は勿論として、負荷条件や管全体に占める溶接部の比率等が異なる。したがって、材料試験に基づき提案された寿命評価法を実機配管に適用する前に、これらが評価精度に及ぼす影響について検討・把握する必要がある。そこで、火力発電プラント大径管を用いた内圧クリープ試験を実施することとした。

試験体はGrade 91鋼製長手溶接管であり、寸法は外径が686mm、肉厚30mm、軸長が6000mmである。溶接施工は内表面側からティグ溶接を施した後、外表面側からミグ溶接を実施した。非破壊検査で配管の健全性を確認した後、所定の溶接後熱処理を施した。

大径管の内圧クリープ試験には、当所が開発した実証試験設備「実機コンポーネント寿命評価実験設備」¹¹⁾を用いた。本設備は、直管（最大の外径1000mm、軸長8000mm）に対して高温下（最高750℃）で内圧（最高50MPa）と曲げ荷重（最大4000kN）を重畳して負荷できる世界最大規模のクリープ試験設備である。本設備では、高温・高圧・高荷重下でのクリープ試験を実施しながら、試験体の巨視的な変形および局所の変形をオンラインで監視することができる。

試験温度は実機よりも約50℃高い650℃とした。荷重条件としては、本試験においては曲げ荷重は負荷せず内圧のみ作用させることとした。試験に用いた内圧は高温再熱蒸気管の標準的な値である4.3MPaである。

(2) 実機配管内圧クリープ試験の結果

き裂：長手溶接HAZ部



図9 破壊した実機配管試験体（Grade 91鋼溶接鋼管）

本試験においては8624時間にて試験体の破壊により試験が終了した。内圧による管の膨らみ（外径の変化）は試験終了直前までごく僅かであり、巨視的な変形の測定データからは破壊の兆候は観察されなかった。高温ひずみゲージで計測したHAZ部（外表面）における局所の周方向および軸方向ひずみに関しても、破壊直前まで変形は僅かであった。

破壊後のGrade 91鋼実機配管試験体の外観を図9に示す。長手溶接部は、端部の鏡板近傍を除いて試験体のほぼ全長に亘ってき裂が開口していた。本試験体では母材部も大きく変形しており、破壊時には配管内部の全蒸気が瞬間的に噴出したと推定される。3.1.1にて述べた“小型長手継手管”の内圧クリープ試験では管全体としての変形は僅かであり、母材部の大変形を伴うこの破壊挙動は実機配管を用いた本試験で確認された特徴である。

Grade 91鋼実機配管試験体の溶接部断面を観察したところ、き裂はHAZ細粒域に沿って進展していることが分かった。なお、本試験においては、破断までに3回中途止めを行い、試験体外表面のボイドや硬さ等について観察・測定を実施した。溶接部HAZの外表面を対象としてボイド個数密度を測定したところ、何れの損傷率においてもボイド個数密度は最大でも50 (1/mm²)程度であった（図5の“内圧大型 外表面”が測定結果）。したがって、本試験体においては、外表面のボイドと損傷との間で明瞭な相関関係は認められない、と言える。

(3) クリープ寿命評価法の検証

先に記載したクリープ寿命評価法を用いて、Grade 91鋼実機配管試験体の寿命を算出した結果を図10に示す。ここで、同図にはGrade 91鋼継手およびGrade 122鋼継手の内圧クリープ試験片に対する評価結果も併せてプロットした。クリープ寿命に関する計算結果と試験結果は良好な精度で一致しており、寿命評価の精度はFactor of 1.5（計算結果/試験結果の比が1/1.5～1.5倍）の範囲内に収まっている。以上の結果より、本研究で提案したクリープ寿命評価法は、高クロム

鋼長手溶接大径管に対して妥当性を有すると考えられる。

3.2 非破壊検査技術の高度化

上記の解析的クリープ寿命評価法は配管や溶接部の構造・形状や負荷条件の影響を評価する上で有力な手法ではあるが、前提条件として、評価対象とする材料のクリープ特性が既知である必要がある。既設の火力発電プラントの場合、対象材料のヒートに関するクリープ特性は一般に不明であるため、安全側の評価となるように99%信頼下限特性等が用いられることが多い。そのため、余寿命診断においては、個々の配管に関する情報が得られる非破壊検査技術が重要な役割を担っており、その高精度化が強く求められている。

そこで、当所はUSC火力発電プラントを建設しているプラントメカ（三菱日立パワーシステムズ、三菱重工業、IHI、東芝）と協力・連携して、先に記載した実証試験設備を用いて実機負荷条件を模擬した内圧曲げクリープ試験を行い、非破壊検査技術の高度化等に関する研究を実施した⁹⁾。ここで、非破壊検査手法としては、近年、火力発電プラントの現場に急激に浸透したフェーズドアレイ超音波探傷法を用いた。試験体は周継手を有する高温再熱蒸気管であり、Grade 91鋼およびGrade 122鋼についてそれぞれ製作した。試験温度は

650℃、内圧は実機相当、荷重は（引張側の曲げ荷重が作用する箇所の周溶接部において）周方向応力と軸方向応力の比が約1：1になるように設定した。なお、損傷の進行に伴う硬さやボイドの変化および非破壊検査の結果を得るため、所定の間隔で試験を一旦中断し、各種の計測・検査を実施した。

(1) Grade 122鋼

最初に実施したGrade 122鋼試験の場合、ある時点からひずみが急激に増大したため試験を停止した（累積試験時間：7894h）。外表面に巨視き裂が確認されたため断面の切断調査を実施したところ、肉厚方向の8割程度にまで巨視き裂が進展していた。断面の状況より、き裂の起点は外表面側の配管内部と推定された。

試験停止時間の約80%の時点で行った計測・検査においては、硬さの値は初期と概ね同じ、ボイドの状態は軽微、超音波探傷は明瞭な指示なし、との結果であった。すなわち、何れの手法でも、損傷80%の時点では、本試験体のクリープ損傷の進行を検出することは困難であった。そのため、試験終了後のGrade 122鋼配管を対象として検査技術の高度化に向けた分析・検討が行われた。

(2) Grade 91鋼

2番目に実施したGrade 91鋼も、ある時点からひずみが急激に増大したのを受けて試験を停止した（累積試験時間：6930h）。ここで、Grade 91鋼の場合、何れの参加機関も寿命中期の時点で超音波探傷により配管内部にクリープ損傷を示唆する結果を得ていた。各中途止め時の超音波探傷による画像の例を図11に示す。ここで、各画像は周溶接部が中央であり、色の印影が指示の強さ（＝損傷）を表しており、損傷50%の時点で肉厚中央より若干内部の位置に明瞭な指示が認められる。溶接部断面を切断調査したところ、き裂の位置や長さに関して超音波探傷による指示と実態とで良好な対応が認められた（図12）。一方、レプリカによるボイド計測に関しては、損傷75%の時点でも、本試験体のクリープ損傷の進行を示唆する情報は得られなかった。本試験結果より、超音波探傷法はGrade 91鋼配管溶接部のクリープ損傷の検出に有効であると考えられる。

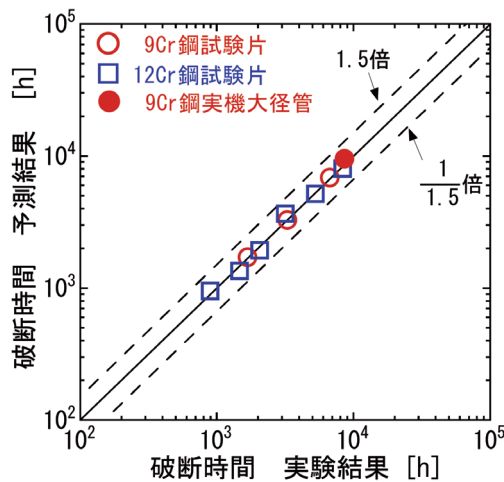


図10 寿命評価法による予測結果と実験結果の比較

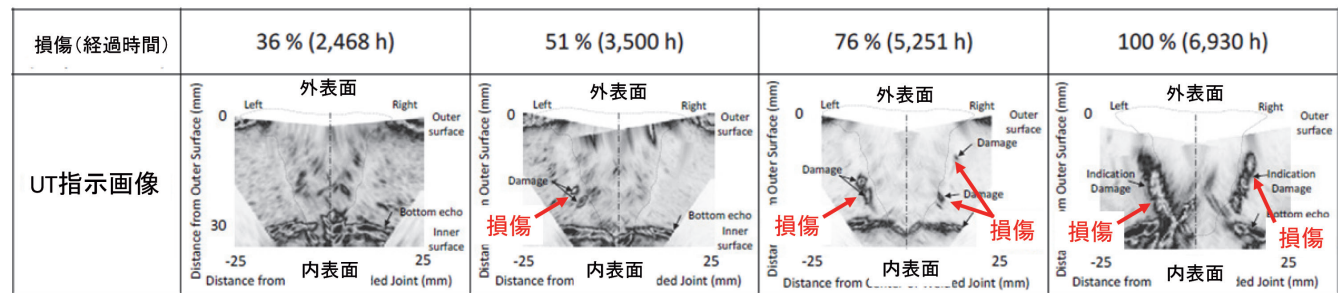


図11 Grade 91鋼周溶接実機配管試験体の超音波探傷（UT）非破壊検査結果

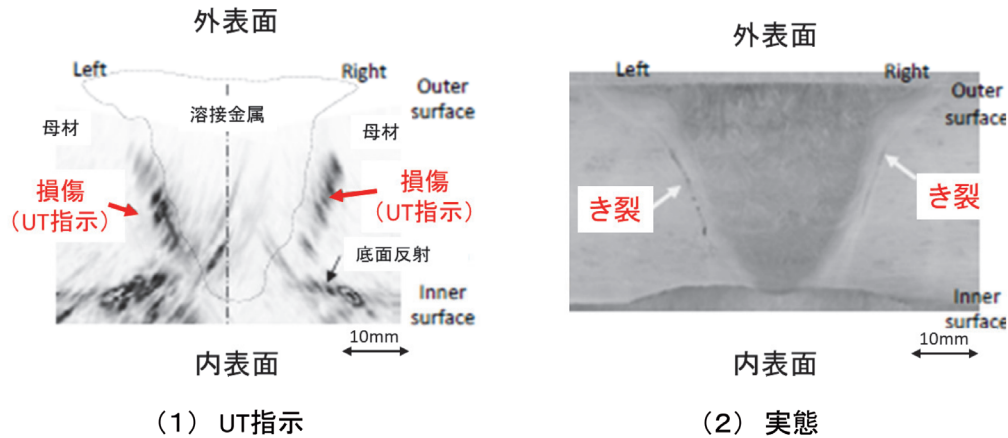


図12 Grade 91鋼試験体周溶接部：超音波探傷（UT）指示と実態の比較

超音波探傷に関して、Grade 122鋼試験体では寿命後期でもクリープ損傷の検出が難しかったのに対して、Grade 91鋼試験体では寿命中期から損傷を検出できた理由として、Grade 122鋼とGrade 91鋼のボイドの進展挙動の差異やボイドの絶対量の差異が影響している可能性もあるものの、最初に実施したGrade 122鋼の試験を通じて得た経験や知見が検査技術の向上に寄与したことは疑いようの無いことである。

なお、本節の冒頭に記載した「前提条件として、評価対象とする材料のクリープ特性が既知である必要がある」の具体策として、微小サンプルに基づき各配管のクリープ特性を評価する手法を当所は提案している¹²⁾。

4 おわりに

本稿では高クロム鋼大径管の不具合事例と損傷形態を述べるとともに、余寿命診断技術の高度化に向けた取り組み例を紹介した。高クロム鋼に関しては、世界中の研究機関で基礎研究から応用研究まで様々な検討が行われており、その結果、高クロム鋼大径管に関する余寿命診断技術は大きく進歩した。しかし、今後もUSC火力発電プラントを安定して運用していく上では、より長時間領域での高クロム鋼クリープ強度の評価をはじめとして様々な研究が必要と考えられる。

参考文献

- 1) K.Yoshida, H.Nakai and M.Fukuda : Proc. CREEP8, San Antonio, USA, CREEP2007-26512, (2007)
- 2) K.Kimura : Proc. PVP2006-ICPVT-11, Vancouver, Canada, PVP2006ICPVT-11-93294, ASME, (2006)
- 3) M.Tabuchi and Y.Takahashi : Proc. PVP2006-ICPVT-11, Vancouver, Canada, PVP2006ICPVT-11-93350, ASME, (2006)
- 4) Y.Takahashi and M.Tabuchi : Proc. PVP2006-ICPVT-11, Vancouver, Canada, PVP2006-ICPVT-1193488, ASME, (2006)
- 5) K.Kimura and Y.Takahashi : Proc. PVP2012, Toronto, Canada, PVP2012-78323, ASME, (2012)
- 6) M.Yaguchi, T.Matsumura and K.Hoshino : Proc. PVP2012, Toronto, Canada, PVP2012-78393, ASME, (2012)
- 7) K.Kimura and M.Yaguchi : Proc. PVP2016, Vancouver, Canada, PVP2016-63355, ASME, (2016)
- 8) M.Yaguchi, K.Nakamura and S.Nakahashi : Proc. PVP2016, Vancouver, Canada, PVP2016-63316, ASME, (2016)
- 9) 電力中央研究所, 火力発電プラントにおける高温/高圧蒸気配管(高クロム鋼配管)の余寿命診断技術, 電中研トピックス, 17 (2014)
- 10) R.Hales : Fatigue Eng. Mater. Structures, 6 (1983), 121.
- 11) 屋口正次, 三浦直樹, 緒方隆志, 酒井高行 : 設備診断技術実証のための大型実験設備“実機コンポーネント寿命評価実験設備BIPress”の開発, 電中研研究報告, Q08001, (2008)
- 12) M.Yaguchi : 44th MPA-Seminar, MPA, (2018)

(2018年11月8日受付)