

DEN-CHU-KEN

TOPICS

2014 10 October

VOL.17

Central Research Institute of Electric Power Industry

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

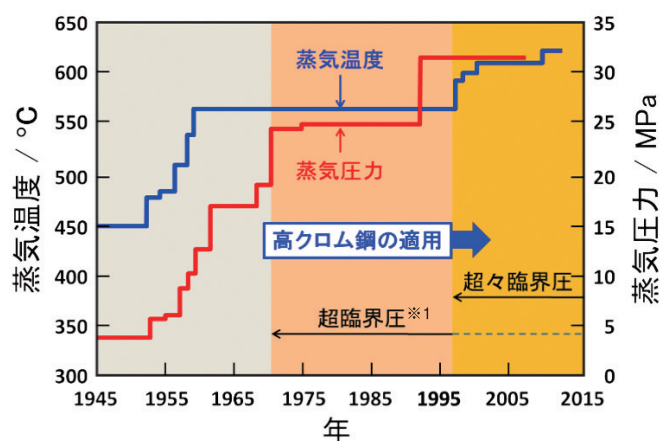
1. 火力発電プラントにおける高クロム鋼配管と余寿命診断の必要性
2. 高クロム鋼溶接継手に対するクリープ寿命評価法の開発
3. 大型配管試験体でのクリープ寿命評価法の検証と課題
4. 設備診断技術の実プラントへの適用
5. 寿命予測法の高度化に向けた新たな取り組み

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 1.火力発電プラントにおける高クロム鋼配管

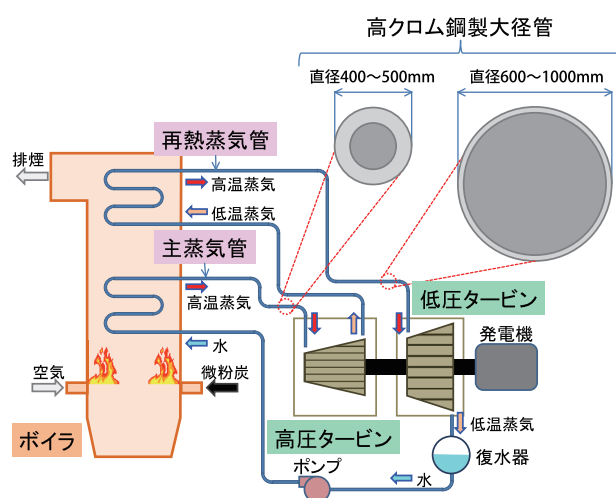
火力発電プラントは、ボイラで発生させる蒸気の高温/高圧化により、熱効率の向上(高効率化)を図ってきました。最新の高効率プラントは超々臨界圧※1という極めて高い蒸気条件下で運転しています。この蒸気条件を実現できたのは、高クロム鋼と呼ばれる、新しい材料の適用によるものです。ここで、高クロム鋼とは9～12%程度のクロムを含んだ耐熱鋼であり、様々な元素を添加することにより高温での強度が従来鋼(1～2%程度のクロムを含んだ耐熱鋼)と比較して格段に高くなっています。

しかし近年、高効率火力発電プラントの高クロム鋼製の配管で不具合が発生した事例が幾つかあります。東日本大震災以降は、火力発電の役割が従来に増して高まっており、電力安定供給の観点からも高クロム鋼配管の余寿命診断は火力発電分野における最重要課題の一つとなっています。そのため、電力中央研究所をはじめ関連する機関が協力・連携して、本課題の早期解決に向けた高クロム鋼の寿命評価の高精度化に取り組んでいます。本号では、この高クロム鋼の寿命評価に関する研究成果と現在の取り組みについて紹介します。

材料科学研究所
上席研究員
屋口 正次



火力発電プラントにおける蒸気条件の推移



火力発電プラントの構成

※1 超臨界圧:蒸気温度566℃以上、蒸気圧力24MPa以上
超々臨界圧:蒸気温度593℃以上、蒸気圧力24MPa以上

寿命診断技術 と余寿命診断の必要性

左図(上)に示したように、火力発電における蒸気条件は、発電効率向上のため高くなり、超々臨界圧(USC:Ultra Super Critical)の蒸気を用いたUSC火力発電プラントが1997年に実現した。この火力発電プラントは発電端で約43%(高位熱量基準)という高い熱効率を有するとともに、燃料に石炭(微粉炭)を用いているため経済性にも優れている。また、USC火力発電プラントは現在、国内に約20ユニットあるが、いずれも60~100万kWと大容量である点も特徴である。そのため、現時点でみた場合、USC火力発電プラントは電源設備としては火力発電全体の約1/7、年間発電電力量では火力全体の約1/5を占めており、火力発電の中核の一つを担っている。

USC火力発電プラントの高温部位には新しい耐熱材料である高クロム鋼(9Cr鋼、12Cr鋼)が適用された。これは、USCの使用条件に対しては従来鋼では高温強度が十分ではなかったためである。9Cr鋼は1980年代に、12Cr鋼は1990年代に開発された材料であり、鉄-クロム合金にモリブデン、ニオブ、バナジウム等を添加することにより高温強度を向上させたマルテンサイト耐熱鋼である。しかし、近年の研究により、従来鋼ではあまり見られない二つの特徴が高クロム鋼には存在することが明らかになってきた。

一つは応力とクリープ寿命^{※2}の関係が長時間領域(数万時間超)で下方(低強度側)へ折れ曲がる点である(P.3上図参照)。もう一つは高クロム鋼同士を溶接で接合した箇所(溶接継手)の強度および延性が製造したままの高クロム鋼(母材)と比べて長時間領域で大きく低下する点である。

実際に、国内のUSC火力発電プラントにおいては、2000年代初頭から高クロム鋼製の配管溶接部で不具合が幾つか発生した。この不具合は、設計寿命

である10万時間よりも短い運転時間において生じており、従来の火力発電プラントではほとんど見られなかった事象である。

高クロム鋼配管はプラント建屋における巡回エリア内に位置しているため、不具合の発生箇所と程度によってはプラント内の安全を損なう可能性がある。また、前述したように、USC火力発電プラントはすべて大容量の発電プラントであり、各地域において基幹的な電源の役割を担っている。したがって、電力安定供給の観点から高クロム鋼の不具合に起因したUSC火力発電プラントの停止は、可能な限り未然に防止する必要がある。

このような状況を受けて、高クロム鋼の寿命評価に関する研究が多くの機関で進められており、最近では各機関の間での研究の協力・連携も積極的に実施されている。

そこで、2章以降では、国内の諸機関と当研究所が共同で実施したクリープ強度の再評価、溶接継手に対して当研究所が開発したクリープ寿命評価法の概要、大型配管試験体による寿命評価法の検証および、これらの研究成果の実プラントへの適用について紹介する。最後に、寿命予測の更なる高精度化に向けた取り組みについても述べる。

※2 高温下の場合、負荷が一定であっても時間の経過に従い損傷が徐々に進行する(クリープ)。最終的に破断するまでの時間をクリープ寿命と呼ぶ。

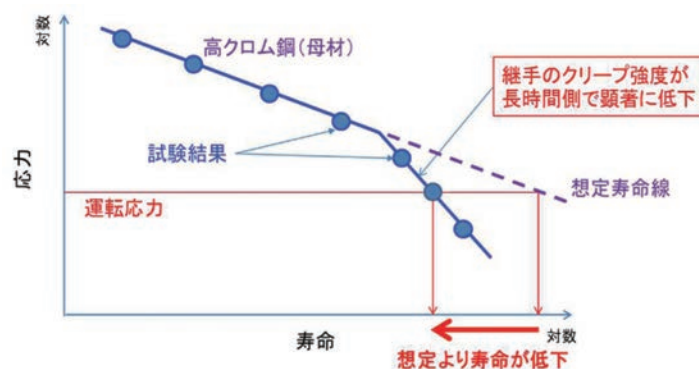
火力発電プラントにおける高温/高圧蒸気配管(高クロム鋼配管)の余 2.高クロム鋼溶接継手に対するクリープ寿命

高クロム鋼は従来鋼と比べて極めて優れた高温強度(クリープ強度)を有していますが、長時間領域では当初の想定よりもクリープ強度が低い傾向にあることが次第に明らかになってきました。特にこの傾向は溶接継手の場合に顕著であり、母材に比べて大幅に寿命が短くなるデータが複数の機関で取得されました。このため、国内の関連する全機関※¹が集まり、2010年に高クロム鋼の長時間クリープ強度の再評価を実施しました。

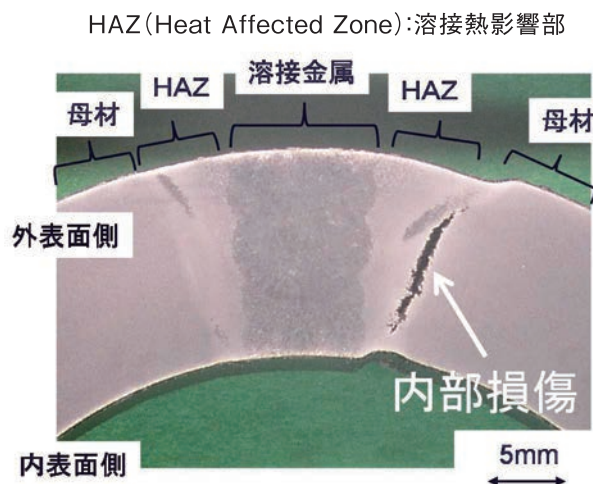
一方、現在の高効率火力発電プラントで使用されている高クロム鋼配管の多くはこの再評価の前に製造されたものであり、早急にその余寿命を高い精度で評価・診断する必要があります。配管形状を模擬した試験片にて内圧クリープ試験を実施したところ、高クロム鋼の損傷は従来鋼のように管外表面から進行するのではなく、管内部から進行することがわかりました。そこで、当研究所は、この内部損傷も評価できるように、解析によるクリープ寿命評価法を開発しました。

本章では、上記の再評価および寿命評価法開発の概要について紹介します。

材料科学研究所
上席研究員
屋口 正次



高温・長時間領域における母材の寿命



高クロム鋼溶接部の損傷形態
(溶接部を有する円筒試験片の垂直断面)

※1 メーカー・ユーザ・国立研究所

寿命診断技術 評価法の開発

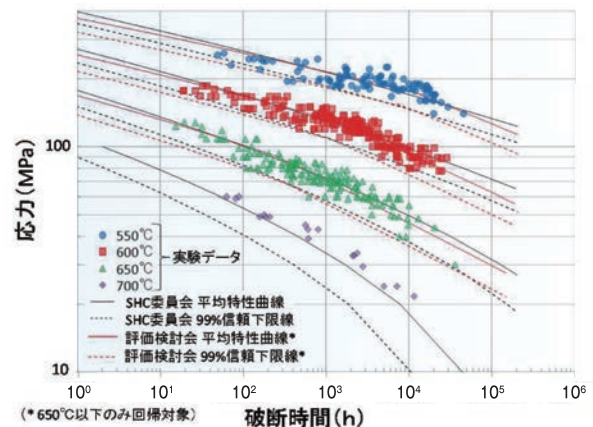
2.1 長時間クリープ強度の再評価

本節では高クロム鋼の長時間クリープ強度に関する再評価の概要について紹介する。なお、以下では特に断らない限り、クリープとは一方向にのみ荷重を受ける単軸クリープを指す。

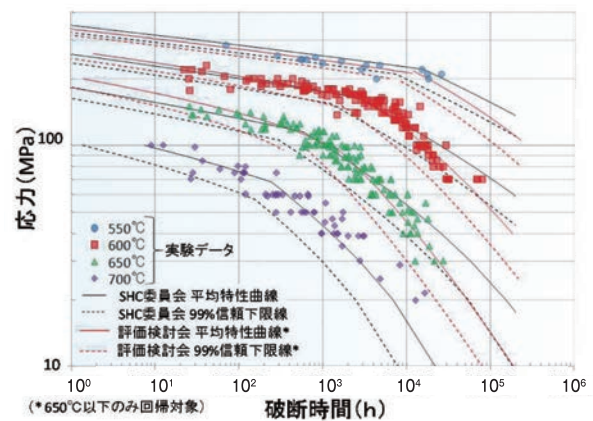
2004年に、運転開始後4万時間（実運転時間）未満のUSC火力発電プラントにおいて12Cr鋼製配管で不具合が発生した。これを受けて、経済産業省原子力安全・保安院（以下、NISA）からの委託で「高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術基準適合性調査委員会」（以下、SHC委員会）が直ちに発電設備技術検査協会に設置された。その調査結果に基づき、長時間クリープ強度の見直しが2005年にNISA文書として通達された。

NISA文書通達以降も、さらなる長時間クリープデータの整備・拡充が関連機関において積極的に実施された。その一方で、高クロム鋼配管での不具合が2007年頃から幾つか発生した。そのため、SHC委員会以降に取得された長時間データも含めて、クリープ強度について再評価の必要性が関連機関の中で高まった。このような背景から、2010年に電気事業連合会の呼びかけにより「高クロム鋼クリープデータ評価検討会」が発足した。この会議体には、電気事業連合会をはじめとして、当研究所、物質・材料研究機構（NIMS）、発電用高クロム鋼に関する全プラントメーカ、全鉄鋼メーカが参加した。検討対象材料は9Cr鋼、タングステン（W）添加の9Cr鋼、12Cr鋼の3鋼種の母材および溶接継手であり、参加機関から関連する全てのクリープデータが検討会に提出された。細部まで議論するために、技術的部分については、母材分科会と継手分科会が設けられ、議論・検討がなされた。この体制の中で、当研究所は継手分科会において解析・評価を担当した⁽¹⁾。

各分科会では、SHC委員会の方法を参照しつつ最新の知見を踏まえてデータ分析・解析方法を新たに採用した。この方法に基づき収集した全データを用いてクリープ強度の再評価を行い、統計誤差に基づきクリープ寿命評価式を提案した。



(1) 9Cr鋼継手



(2) 12Cr鋼継手

図2-1 クリープ寿命評価式の再評価

この評価式を用いると、SHC委員会のクリープ寿命評価式によるクリープ寿命とは異なる結果になるケースが見られた。例として、9Cr鋼および12Cr鋼継手のクリープ寿命の評価結果を図2-1に示す。SHC委員会の寿命評価式と比べると、本検討会による寿命評価式は低いクリープ強度を与える傾向が認められた。さらに、本検討会の母材に関するクリープ寿命評価式との比較より、溶接継手強度低減係数の値を算出した。なお、この結果は2014年5月に国の技術基準解釈および寿命評価式にも取り入れられた⁽²⁾。

2.2 クリープ寿命評価法の開発

溶接部は母材、溶接金属、および両者の間に形成される溶接熱影響部(HAZ)より構成される(図2-3下図)。各構成材料の化学成分は概ね同じであるにも拘わらず、各材料の変形抵抗やクリープ寿命は大きく異なる。これは、溶接時に各材料が受ける温度履歴に応じて金属組織がそれぞれ異なるためである。したがって、溶接部は異なる材質からなる一種の複合材料と言える。そのため、一方向からのみ荷重を受けても、溶接部の中は様々な方向から応力を受ける状態(多軸応力状態)となる。この応力の多軸性が溶接部のクリープ強度に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、当研究所では、9Cr鋼および12Cr鋼溶接継手に関して多軸応力状態となる内圧クリープ試験を実施し、多軸応力下の破壊形態および強度特性を調査した。さらに、同試験に対する詳細な数値解析の結果等を踏まえ、高クロム鋼溶接継手に対する高精度なクリープ寿命評価法を開発した。以下にその概要を紹介する。

内圧クリープ試験とは、高温下において、密閉した管の中に高压の圧力媒体を負荷し、破断(蒸気漏洩)させる試験である。この内圧により、管は周方向および軸方向に引張の荷重を受ける。本研究では、軸方向に溶接線を有する9Cr鋼、12Cr鋼製管を内圧クリープ用の試験片として用いた。蒸気漏洩後の試験片を観察した写真を図2-2に示す。試験片自体は殆ど変形しておらず、HAZにおいて軸方向き裂が確認された。外表面にき裂が無かった箇所では試験片を切断し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生じていた。この肉厚中央部を電子顕微鏡にて観察した結果、クリープ損傷の実態であるボイド(空洞)が多数確認された。

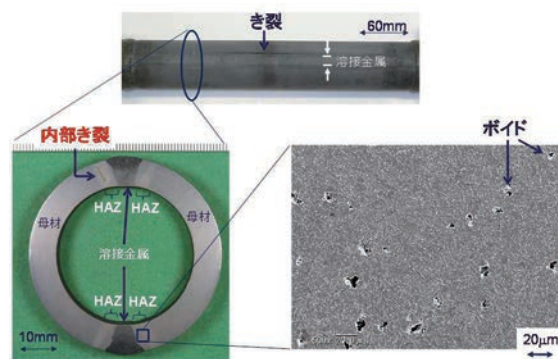


図2-2 試験終了後の内圧クリープ試験片

内圧クリープ試験で得られた寿命を別途実施した単軸クリープ試験のデータと比較した結果を図2-3に示す。同じ試験条件に対して内圧下の方が単軸下よりも短い破断時間となり、内圧下では設計等で用いられる評価式(平均径式)で算出した値より高い応力が作用していることを示している。

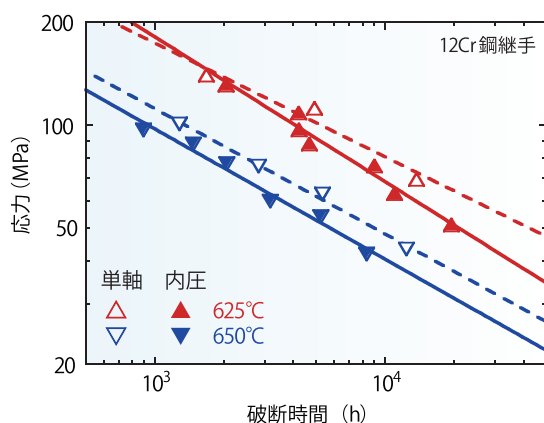


図2-3 単軸と内圧クリープ試験結果の比較

内圧クリープ試験片を対象として、溶接部の各材料特性を考慮した詳細な応力解析を実施したところ、以下が明らかとなった(図2-4)。

- ・クリープひずみはHAZで集中的に進行する。
- ・応力はHAZの肉厚中央部において高くなる。
- ・上記箇所では三方向から引張の応力を受ける。

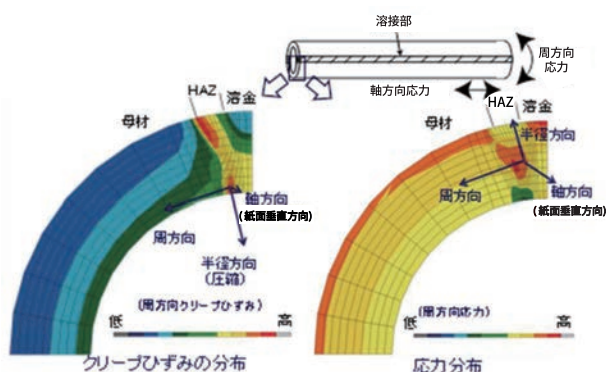


図2-4 内圧クリープ試験片のクリープ解析結果

これらの試験結果・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。本寿命評価法においては、HAZ内のある場所のひずみが応力の多軸性に対応したひずみの限界値に達すると材料は破損する、と考える。

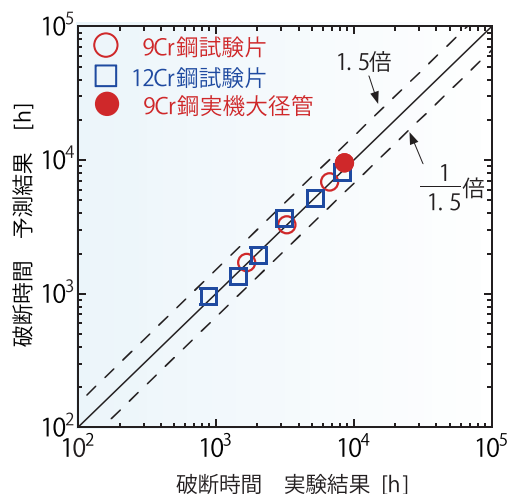


図2-5 寿命評価の結果

本評価法を用いて内圧クリープ試験片の寿命を予測した結果を図2-5に示す。ここで、同図には3章にて述べる9Cr鋼の実機配管試験体に対する適用結果を併せてプロットした。クリープ寿命に関する予測結果と実験結果は良好な精度で一致しており、寿命評価の精度はファクターオブ1.5(予測結果/実験結果の比が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、高クロム鋼溶接管に対して妥当性を有すると考えられる⁽³⁾。

<参考文献>

- (1) M. Yaguchi etc.: Evaluation of long-term creep strength of welded joints of ASME grades 91, 92 and 122 type steels, Proc. ASME PVP conf. PVP2012-78393, 2012
- (2) http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2014/06/2606303-.html
- (3) 屋口正次ほか:「高クロム鋼長手溶接部のクリープ寿命評価法の開発と検証」平成24年度火力原子力発電大会論文集、p.76、2013

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 3.大型配管試験体でのクリープ寿命評

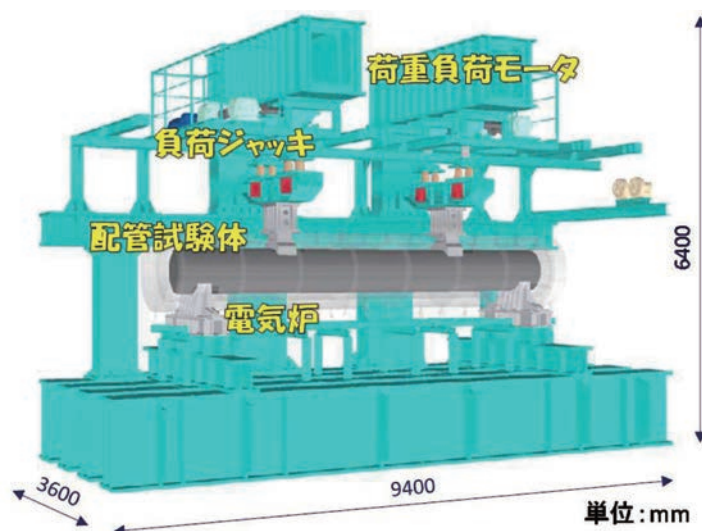
一般に、通常の単軸クリープ試験は外径1cm程度の丸棒試験片を、内圧クリープ試験は外径5cm程度の円管試験片を用いて行います(P.18参照)。材料の特性が均一である母材の場合はこの試験方法の妥当性が確認されています。溶接部を対象とする場合、実際の配管(外径40cm~1m)では溶接部は配管全体の極一部であるため、周囲から強い拘束を受けます。そのため、配管の溶接部は通常の試験片では再現困難な複雑な応力状態になり、大型の配管試験体による検証試験が必要と考えられます。また、火力発電プラントの配管には、内圧に加えて、起動停止時の熱伸びによる曲げ荷重も作用します。

このような背景から、当研究所では大型の配管試験体に対して内圧と曲げを同時に負荷できる実証試験設備(実機コンポーネント寿命評価実験設備)を開発しました。本章ではこの実証試験設備を用いて、高クロム鋼製の長手溶接配管および周溶接配管の試験体に対して実機の負荷形態を模擬したクリープ試験を行い、クリープ寿命評価法の妥当性を検証した結果を紹介します。

材料科学研究所
主任研究員
西ノ入 聡



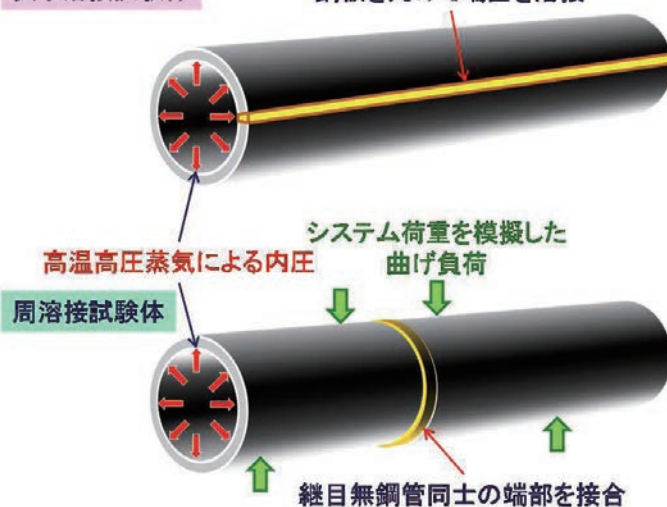
材料科学研究所
研究参事
高橋 由紀夫



実機コンポーネント寿命評価実験設備⁽¹⁾の構成

長手溶接試験体

鋼板を丸めて端面を溶接



配管試験体の溶接ならびに負荷形態

寿命診断技術 価法の検証と課題

3.1 長手溶接試験体による検証

本節では長手溶接試験体を用いた内圧クリープ試験の結果と寿命評価法の検証について述べる。長手溶接とは、左図(下)に示したように、丸く加工した鋼板で配管を製作する際の周方向端部の溶接箇所である(溶接線の方法は軸方向)。長手溶接法は大口径の配管を製作することが可能であり、USC火力発電プラントでは高温再熱蒸気管に採用されている。内圧を受ける配管は周方向の応力が最も高くなるため、その応力に直交する長手溶接部は損傷の進行が最も懸念される箇所である。

本研究では実機仕様の9Cr鋼製高温再熱蒸気管を長手溶接試験体として用いた。本試験体の寸法は図3-1に示す通りである。本試験体に対して、試験温度はUSC火力発電プラントより約50℃高い650℃、内圧は高温再熱蒸気管の実機相当である4.3MPaの条件にて内圧クリープ試験を実施した。試験は破断(蒸気漏洩)が生じるまで実施した。

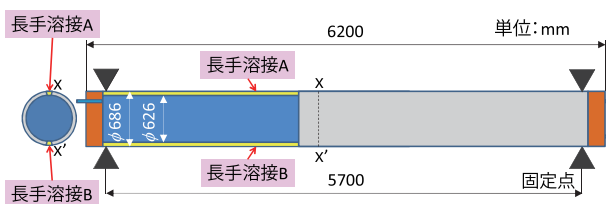


図3-1 長手溶接試験体の構造

破断後の9Cr鋼長手溶接試験体の外観を図3-2に示す。本試験体の軸長は6mであるが、その全長に亘って長手溶接部が完全に開口していた。前章の図2-2に示したように、小型の内圧クリープ試験片では蒸気漏洩時に母材で変形はほとんど見られ

なかったのに対して、本試験体では母材部も大きく変形していた。これは、前章の小型の試験片と本章の試験体とは寸法が大きく異なるので、その影響により溶接部肉厚方向の損傷分布が異なったためと考えられる。図3-3に示すように、破断直前まで試験体の変位は極わずか(外径686mmの試験体において1mm以下)であることから、破断時に配管内部の全蒸気が瞬間的に噴出し、母材が大きく変形したと推定される。

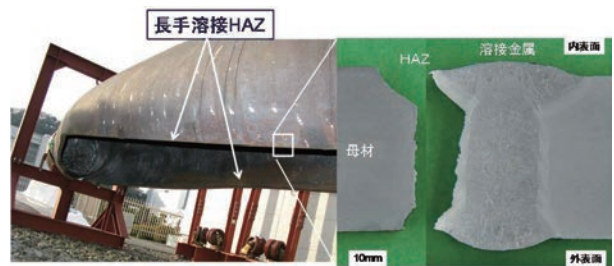


図3-2 破断後の長手溶接試験体の外観

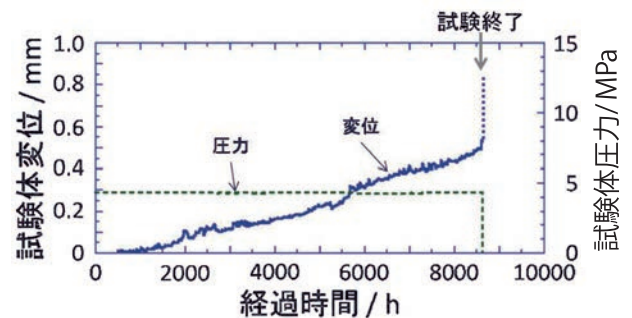


図3-3 長手溶接試験体の圧力と変位の推移

破断した溶接部断面を観察したところ、き裂はHAZに沿って進展していることが分かった(図3-2)。

そこで、肉厚方向にボイドの個数密度を計測した結果、外表面ではなく管内部でボイドが最も顕著に観察された。本試験結果から、実機の長手溶接配管においても内部から損傷が進行する可能性があること、および、その破壊形態は大規模な変形を伴う可能性もあることが示唆された。

本試験体に対して2章に記したクリープ寿命評価法を適用した結果、図2-5に示したように、実験と予測による寿命はほぼ一致した。このことから、小型試験片に基づき提案した寿命評価法が実機規模の長手溶接試験体に対しても良好な精度で適用可能であることが確認された⁽²⁾。

3.2 周溶接試験体に対する評価法とその課題

本節では周溶接試験体を用いた内圧曲げクリープ試験の結果と寿命評価法の検証について述べる。周溶接とは、P.7下図に示したように、配管と配管を軸方向に接続する際の軸方向端部の溶接箇所（溶接線の方向は周方向）であり、配管系統において一定間隔で必ず存在する。これは、配管の軸方向長さは最長でも8m程度であるため、約100mにおよぶボイラ配管系統においては各配管を周溶接で繋ぐ必要があるためである。この周溶接部には、熱伸びに起因した熱応力や複雑な配管系統の自重といったシステム荷重が作用する。ただし、内圧による応力の方がシステム荷重による応力よりも大きいため、従来の火力発電プラント材である低合金鋼の場合は、内圧に基づく長手溶接部および母材のクリープ寿命評価が主に行われてきた。一方、高クロム鋼の場合は、内圧に基づく長手溶接部のクリープ寿命評価に加えて、今後はシステム荷重を考慮した周溶接部のクリープ寿命評価も

望ましいと考えられた。これは、低合金鋼は母材と溶接部のクリープ強度差が顕著ではないのに対して、2章(2.1)に記したように、高クロム鋼の場合は両者の強度差が長時間領域で大きくなる傾向が認められるためである。

このような背景から、当研究所では従来は検討対象外であった周溶接部のクリープ寿命評価に関する研究に2011年より取り組んでいる。なお、その実施に際しては結果の反映や研究の加速化・効率化を図るため、USC火力発電プラントを建設している全プラントメーカー（三菱重工業、IHI、バブcock日立、東芝、日立製作所）と協力・連携して進めることとした。具体的には試験体の製作はプラントメーカーが、試験の実施は当研究所が、試験体に関する観察・評価は全機関が担当している。

本研究で使用した周溶接試験体の構造と寸法は図3-4の通りである。ここで材質は12Cr鋼であり、溶接のない継目無鋼管を周溶接で接合して試験体を製作した。試験温度は650℃、内圧は4.6MPaであり、本試験ではシステム荷重として213kNを曲げ方式で負荷した。なお、試験時間が約7500時間の時点で内圧とシステム荷重を若干増加した。

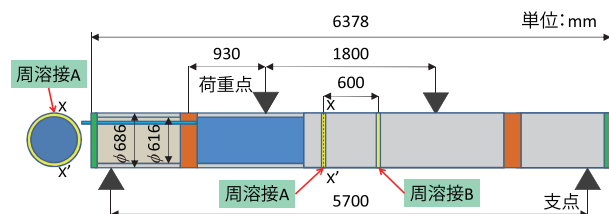


図3-4 周溶接試験体の構造

本試験においては曲げ荷重に起因して鉛直方向（荷重方向）に変位が進行した。試験時間が約7900時間に達した時点で変位が急増したため、試験を停止し、試験体の検査および観察を実施し

た。その結果、図3-5に示すように、周溶接部のHAZに目視できる、き裂が確認された。肉厚方向の損傷分布を切断調査したところ、曲げ荷重を重ねさせた本試験体においても管内部で損傷が支配的であった。なお、本試験体を切断する前に超音波探傷法によって内部の損傷状態の検査をした。この結果については4章にて述べる。

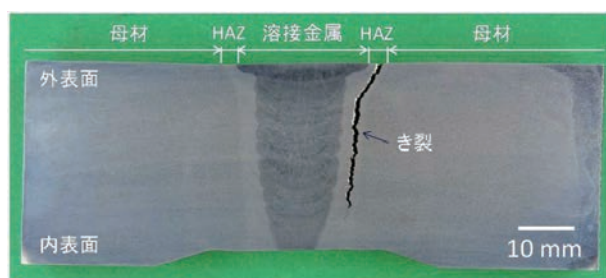


図3-5 周溶接試験体の溶接部の断面写真

システム荷重と内圧を受ける周溶接部は、内圧を受ける長手溶接部よりも複雑な応力ひずみ状態となる。そこで、長手溶接用に開発した寿命評価法を更に精緻化したクリープ寿命評価法(延性消耗則)によって周溶接部の評価を試みた。数値解析で得られた試験体の変位の時間的变化を実測データとともに図3-6に示す。中途止め時に材料が軟化すると仮定した場合、軟化を考慮しない場合よりもクリープ変形が大きく推定され、実測データと一致する傾向になる。この解析結果に基づき、周溶接部のクリープ寿命評価を行った。ここでの評価には、高温機器の設計で使用されることの多い応力基準の評価法(時間消費則)も比較のために実施した。各手法による予測寿命を実測寿命と比較した結果を図3-7に示す。本試験体の寿命を時間消費則は短めに推定する傾向があるのに対して、延性消耗則は概ね妥当な精度で推定できることが確認された。なお、周溶接部の評価に関する知見は必ずしも十分とは

言えないため、現在も当研究所とプラントメーカーは共同研究を進めている。

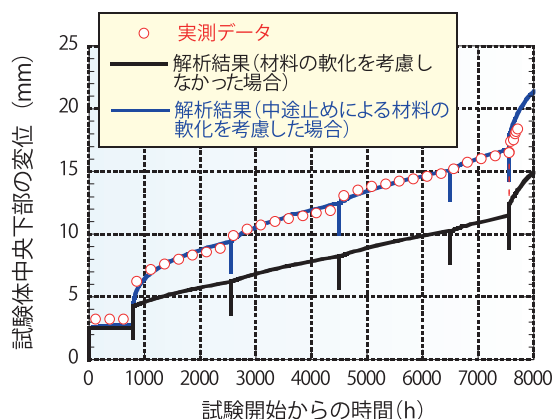


図3-6 試験体変位に関する実験データと数値解析結果の比較

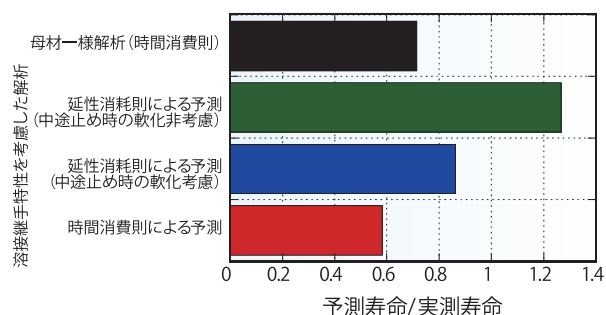


図3-7 各手法による予測寿命と実測寿命の比較

<参考文献>

- (1) 屋口正次ほか:「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」
電力中央研究所報告Q08001、2008
- (2) 屋口正次ほか:「高クロム鋼長手溶接部のクリープ寿命評価法の開発と検証」、平成24年度火力原子力発電大会論文集、p.76、2013

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 4.設備診断技術の実プラントへの適用

2章で述べたように、高クロム鋼は当初の想定よりもクリープ強度が低いことが、近年、判明しました。そのため、既に建設されている高効率火力発電プラントを安全に運転していくためには、従来に増して高い信頼性・精度の設備診断を実施し、的確に対応する必要があります。右図に示すように、設備診断は幾つかのステップを踏んで行われるため、各ステップにおいて診断精度を向上させることが望まれています。

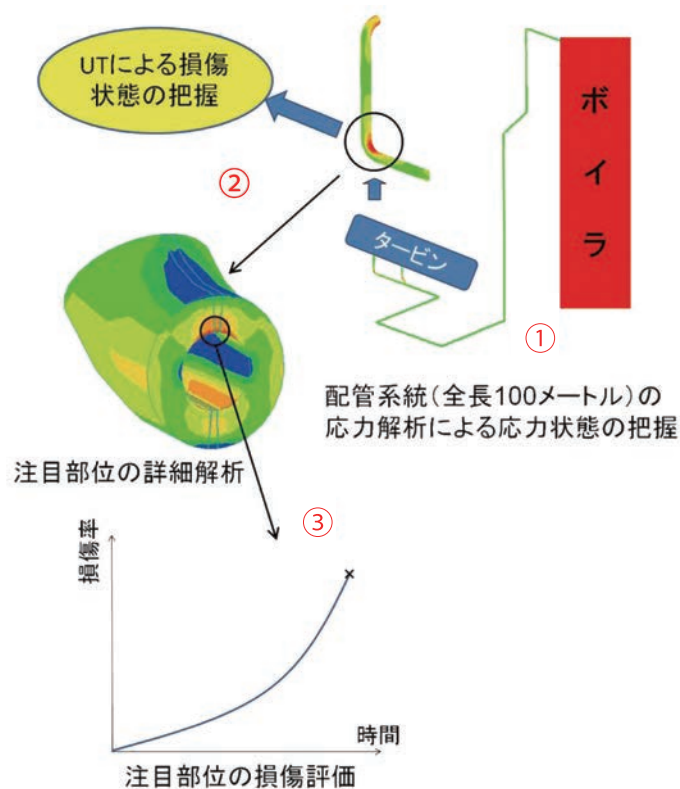
このような背景から、当研究所では2章・3章で述べた材料のクリープ寿命評価法の開発に加えて、配管系統に作用する応力をより高い精度で推定する解析手法の開発や材料内部の損傷の早期検出を目指した非破壊検査手法の高度化に関する研究を進めています。さらに、これらの開発した技術をUSC火力発電プラントに適用し、検証するとともに、現場での実測経験も蓄積し、高クロム鋼配管に対する設備診断技術の確立を目指しています。

本章ではこれらの研究成果と実機への適用事例について紹介します。

材料科学研究所
上席研究員
酒井 高行



材料科学研究所
上席研究員
林 山



配管系統の設備診断の流れ

寿命診断技術

4.1 配管系統応力解析手法の開発

高クロム鋼配管の寿命評価を適切に行うためには、配管系統の応力を高い精度で推定する必要がある。これは、配管系統の中でクリープ寿命評価を行う部位の絞り込み/選定、およびクリープ寿命評価における前提条件(入力条件)という二つの意味で重要である。配管系統応力解析に基づくクリープ寿命評価の流れを図4-1に示す。配管系統の応力解析用プログラムは既に幾つか市販されているが、これらは配管系統の設計を目的として開発されているため、寿命評価に関しては十分とは言えない点がある。具体的には、プラントの起動・停止時の熱応力の算出はできるが、定常運転時のクリープによる応力再配分は評価できない点や、解析する上で内圧負荷を直接評価しない点などである。

そこで当研究所では、寿命評価を目的とした配管系統応力解析プログラムを開発した⁽¹⁾。本プログラムはクリープ解析が可能であり、また、3次元要素を用いて配管をモデル化することにより内圧を直接評価することができる。また、一般に、3次元構造の要素分割は未だに多くの部分を手作業で行っており、この工程に膨大な労力と時間を必要とするが、本解析プログラムでは、設計用の配管データに基づく3次元の要素分割を自動で処理する機能も付与した。その結果、配管系統に作用する応力を比較的容易に、高い精度で推定可能となった。図4-2は解析事例であり、従来の配管系統解析プログラムでは評価していなかった定常運転時のシステム荷重の影響とその時間変化を視覚的に把握することが可能となった。

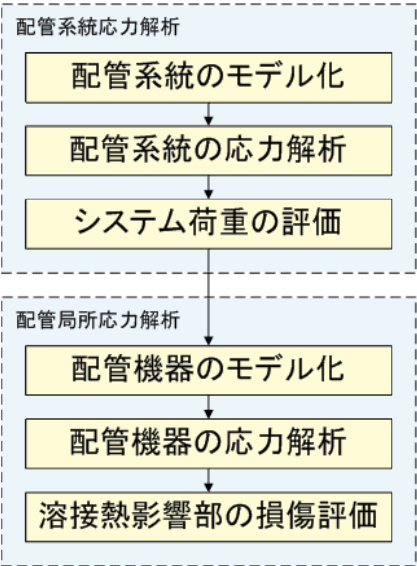


図4-1 配管系統応力解析に基づく配管溶接部のクリープ寿命評価の流れ

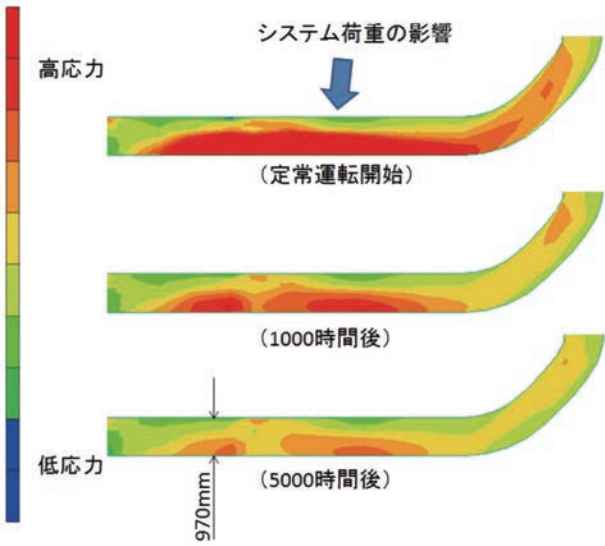


図4-2 配管系統解析の例
(起動時と定常運転時の応力状態の比較)

4.2 非破壊検査手法の高度化

2章で述べたように、高クロム鋼は管内部から損傷が進行することが多いため、内部損傷に対する検査法である超音波非破壊検査手法の高精度化が期待されている。しかし、既存の超音波非破壊検査法は巨視き裂や欠陥の検出に対しては有効であるものの、クリープ寿命評価で対象とするボイド（クリープ損傷）を定量的に検出することは困難であった。一方、従来は装置の価格や国内での生産体制などの理由から普及していなかったフェーズドアレイ超音波探傷法（タイミングの異なった超音波を利用）が、最近では装置の低廉化や生産体制の確保に加えて、検出性・信頼性の向上等によりボイラ配管に使用される状況となってきた。

そこで当研究所では、高クロム鋼溶接部のクリープ損傷の早期検出を目指して、フェーズドアレイ超音波探傷法に関する研究を進めてきた⁽²⁾。具体的には以下の検討を行った。

- ・クリープ損傷と溶接欠陥から出る信号を識別するための位置情報の高感度検出（溶接継手の形状とクリープ損傷の同時測定）
 - ・探傷条件最適化のための数値シミュレーション
 - ・探傷の安定性向上のための探触子の機構改良
- これらの検討の結果、従来と比べて高い精度でクリープ損傷を検出することが可能となった。

図4-3は3章で述べた12Cr鋼周溶接試験体のクリープ損傷を本手法で検査した結果を示している。ここで、上側の図中の“周方向”、“軸方向”、“肉厚方向”とは、それぞれき裂発生箇所を基準にした場合の配管の周方向、軸方向、肉厚方向を意味している。検査結果においてクリープ損傷の先端と見なされた箇所を切断調査したところ、検査結果に対応する位置にクリープ損傷が確認された（下側の図）。この結果から、フェーズドアレイ超音波探傷法が12Cr鋼周溶接部のクリープ損傷検出に有効であることが確認された。

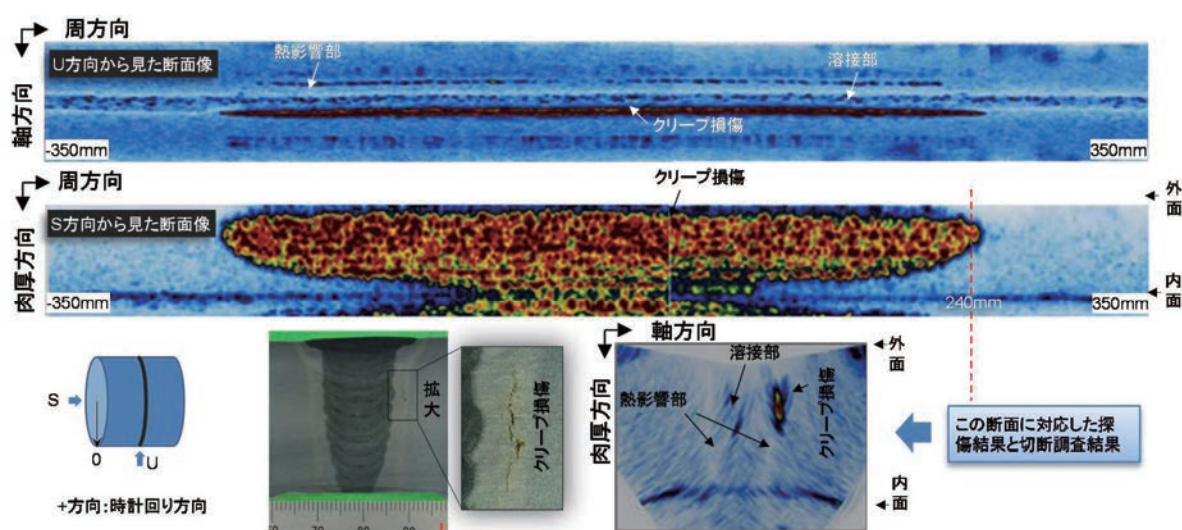


図4-3 実機高クロム鋼配管を模擬した12Cr鋼周継手試験体の探傷結果の一例

4.3 適用事例

当研究所の研究成果をUSC火力発電プラントに活用した事例を以下に紹介する。

あるプラントにおいて、「高クロム鋼クリープデータ評価検討会」のクリープ寿命評価式を用いて一次評価を行ったところ、9Cr鋼継手部のクリープ寿命は旧評価式での評価と比べて短寿命であり、余寿命診断が必要であると判断された。そこで、前述した配管系統解析プログラムを用いて当該配管について応力解析を実施した。ここで、図4-4に示すレーザー計測で得られた配管位置データを境界条件として用いることで、これまでの計測と比べて格段に高い精度で配管の応力を推定できた。この推定結果において高応力であった箇所を対象にHAZや溶接金属の特性も考慮したクリープ解析(図4-5)を行い、2章に示したクリープ寿命評価法による当該箇所のクリープ損傷を予測した。

従来の診断データおよびこれらの解析的評価等に基づき損傷が高いと判断された箇所に対して、当研究所で開発したスキャナー⁽³⁾とフェーズドアレイ超音波非破壊検査装置(図4-6)で診断した。その結果、ある箇所では配管内面にクリープ損傷の指示が認められた。この結果等を踏まえ、事業者が当該部位の取り替えを決定した。後日、この取り替え部位の断面を切断調査したところ、顕著なクリープ損傷の存在が内面側で確認された。

本事例においては、当研究所の総合的な設備診断技術を活用することにより、USC火力発電プラントの不具合の未然防止に貢献することができた。

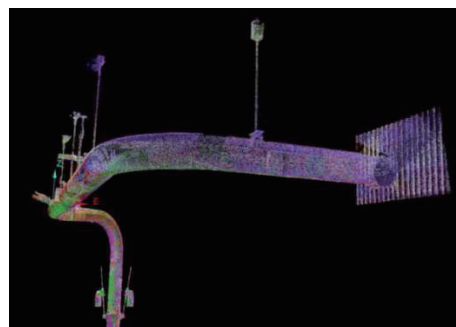


図4-4 レーザー計測で得られた配管位置データ
(配管応力の推定に利用)

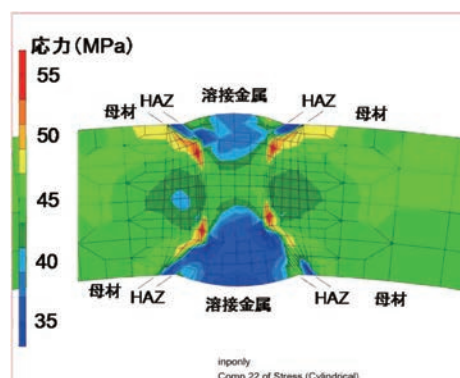


図4-5 クリープ解析結果の例



図4-6 フェーズドアレイ超音波非破壊検査装置による
実機配管の検査

<参考文献>

- (1) 酒井高行ほか:「配管系統応力解析に基づく溶接部損傷評価システムの開発」
電力中央研究所報告Q09005、2010
- (2) 林山ほか:「超音波探傷試験の高精度化・高効率化に活用する
シミュレーションツールの開発」
電力中央研究所報告Q08010、2009
- (3) 福富広幸ほか:「配管溶接部へ適用する小型超音波自動探傷システムの
高感度化・高効率化」
電力中央研究所報告Q10005、2011

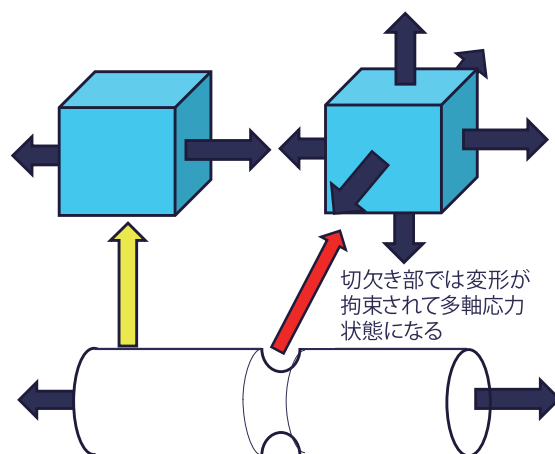
火力発電プラントにおける高温/高圧蒸気配管(高クロム鋼配管)の余 5.寿命予測法の高度化に向けた新たな

実機部材では材料に働く応力が一般的な材料試験のように一方向だけではなく、他の二方向にも働く多軸応力状態になることがほとんどであり、かつその程度が寿命に大きな影響を及ぼします。このため、厳しい多軸応力が発生しやすい応力集中部を含めて、今後幅広い部位に適用できる寿命評価法を整備していく上で、多軸応力の効果を的確に考慮することが重要となります。

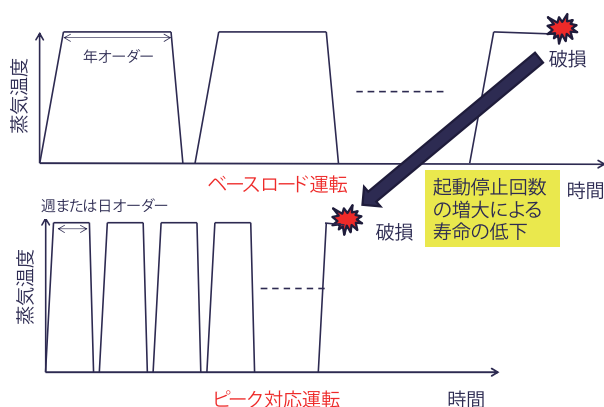
さらに、長期間高温で材料に一方向の引張力がかかり続けたときに起きるクリープ破壊に加え、実機配管系では蒸気温度の変化による熱応力が発生します。特に、発電プラントが起動停止や負荷変動の多い過酷な運転を余儀なくされた場合、この影響がより顕著になると考えられます。そのため、応力変動を含んだクリープ/疲労相互作用下での寿命評価法の開発も重要となってくると予想されます。

そのため、当研究所では9Cr鋼と12Cr鋼に対する評価法の高度化に加え、より高い強度を持つW添加9Cr鋼(Grade 92)を対象にした研究も、先駆的に米国の電力研究所(EPRI)と共同で進めています。

材料科学研究所
研究参事
高橋 由紀夫



応力集中部での応力状態



プラント運転モードと破損寿命の関係(模式図)

寿命診断技術 取り組み

5.1 多軸応力下での寿命予測精度の向上

一般に材料試験は単軸応力状態で実施されるが、管接合部など、発電プラント機器の一部では複雑な多軸応力状態が発生するため、これらの設計や寿命評価においては、多軸応力状態での材料の特性を的確に評価することが不可欠となる。このため、当研究所では様々な材料を対象に多軸応力状態での材料特性を評価し、機器の寿命評価法に反映するための研究に取り組んできた。

9Cr鋼に関しても環状切欠きを付けた丸棒試験片に対する多数のクリープ試験を実施したところ、短時間試験では切欠きの有無の差は小さいのに対し、長時間領域では多軸応力によってクリープボイドの発生や成長が加速される結果、切欠きがない場合に比較して延性が1/10程度にまで低下することを明らかにした(図5-1)⁽¹⁾。

さらに、9Cr鋼溶接継手HAZ部に対してはパラメータとして限界ひずみエネルギー密度を採用するとともに、さらに高い多軸度が生じるき裂進展試験の結果も活用することによって、幅広い温度、ひずみ速度と応力多軸度での破壊挙動を統一的に表現できる数式を導いた⁽²⁾。さらに、これを用いることによって任意の負荷条件に対応した限界変形量が容易に推定できるため(図5-2)、高精度なクリープ変形評価法⁽¹⁾と組み合わせることによって、様々な評価部位に適用できる汎用的な寿命評価法として活用していく予定である。

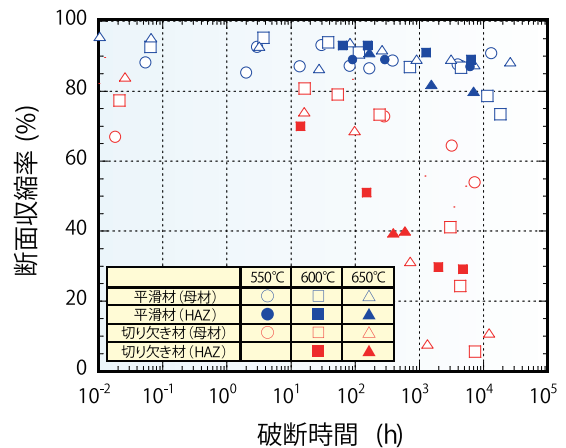


図5-1 9Cr鋼母材とHAZの平滑材と切欠き材のクリープ試験における断面収縮率の比較

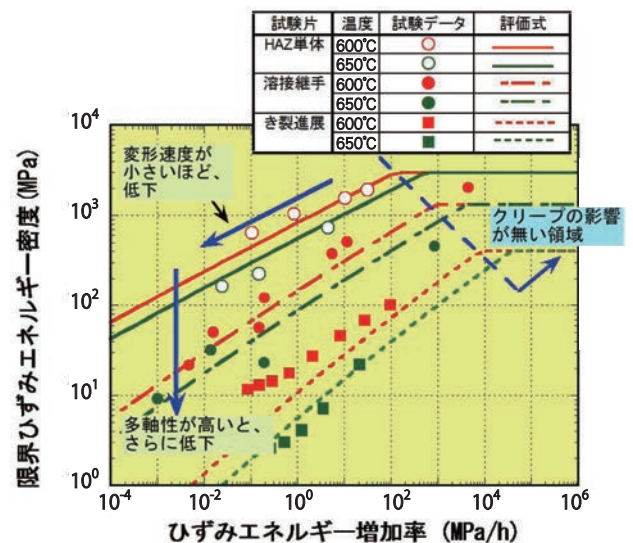


図5-2 9Cr鋼溶接継手における限界ひずみエネルギー密度に対する試験結果と評価式の比較

5.2 クリープ疲労寿命評価法の開発

高温で使用される構造物でクリープ変形が顕著となる場合にはこれに伴う損傷を評価する必要があるが、繰返し荷重が作用する場合にはこれに伴う疲労損傷をも同時に考慮することが必要になる。このように両者が重畳した場合の寿命(クリープ疲労寿命)を予測するため、これまで様々な方法が提案されているが、手法によって予測結果が著しく変動し、どの手法を適用すればよいかについてまだ統一的な見解が得られていない。

当研究所では、USC火力発電プラントに使用されている3種の高クロム鋼の母材と溶接継手を対象に、クリープと疲労が重畳する条件で試験期間が1年を超えるものも含む多数の寿命評価試験を行い、各種評価法の寿命予測精度を検討した。

その結果、現行設計基準に採用されている応力をベースとした評価法では十分な精度で寿命を予測することが困難であることを明らかにするとともに(図5-3)、新たに非弾性ひずみや非弾性ひずみエネルギーに基づく寿命評価法を開発し、ファクターオブ2以内の誤差で高精度に寿命を予測できることを確認した(図5-4)⁽³⁾⁽⁴⁾。

<参考文献>

- (1) 高橋由紀夫:「環状切欠き試験片による耐熱鋼の多軸クリープ破壊挙動の評価」
電力中央研究所報告Q10027, 2011
- (2) 高橋由紀夫:「改良9Cr-1Mo鋼の高温破壊の統一モデル化の試み」
電力中央研究所報告Q11012, 2012
- (3) 高橋由紀夫ほか:「高クロム系フェライト鋼に対する解析的寿命評価法の開発
-第4報:長時間データの拡充とクリープ疲労寿命評価法の再検討-」
電力中央研究所報告Q05023, 2006
- (4) Electric Power Research Institute,
“Program on Technology Innovation :
Evaluation of Creep-Fatigue Behavior of Grade 92 Steel”
Product ID:3002000088, 2013

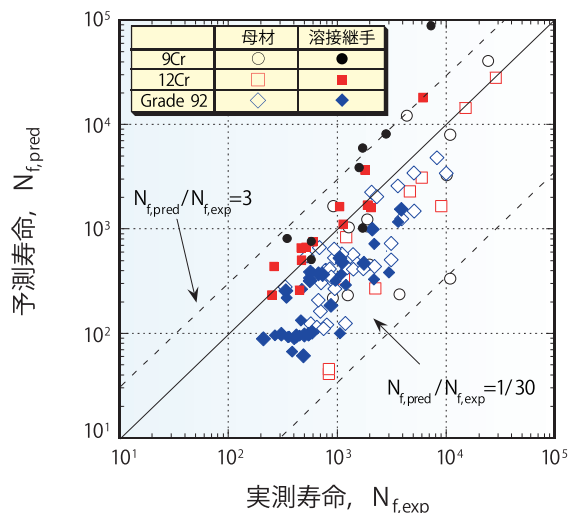


図5-3 応力をベースにした従来法による寿命予測精度

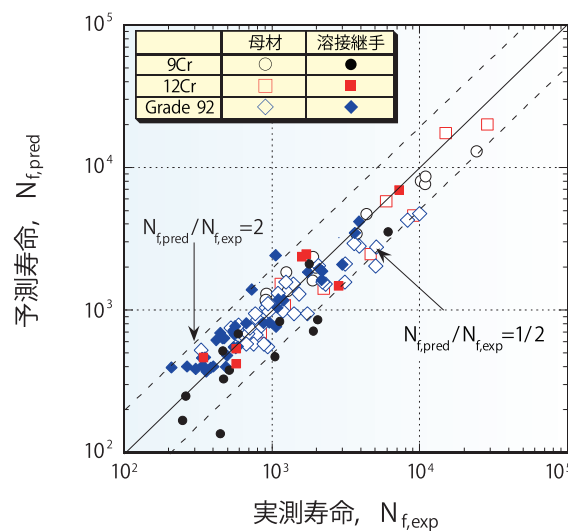
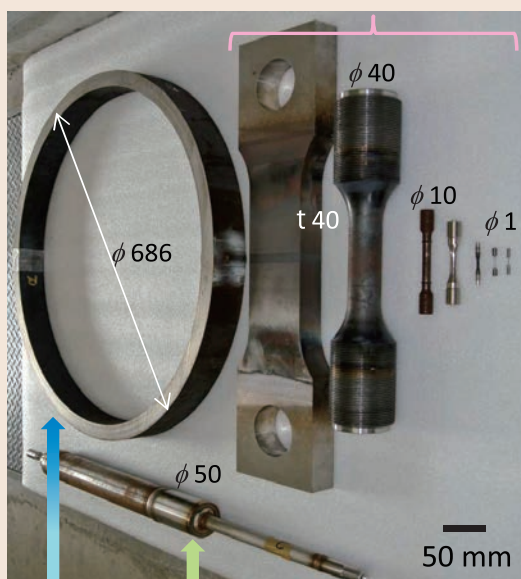


図5-4 当研究所が開発したひずみエネルギーをパラメータとした評価法による寿命予測精度

電力中央研究所における高クロム鋼関連の主な評価試験

当研究所では、様々な試験片と試験設備を用い、材料評価研究を進めています。
その概要を紹介します。

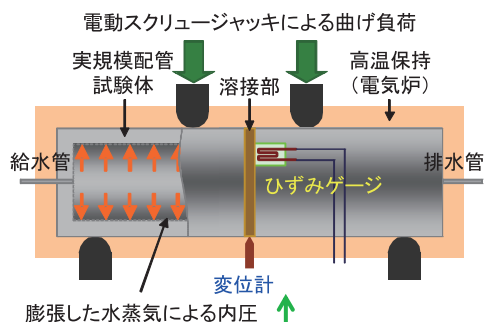
様々な大きさの丸棒・平板試験片
(試験部の直径・板厚:1~40mm)



円管試験片 (外径: 50mm、軸長: 350mm)

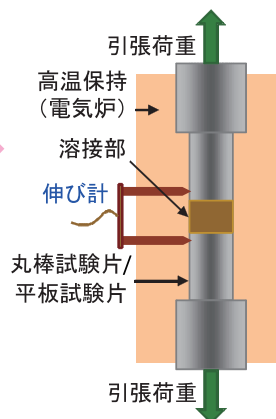
実規模配管試験体 (切断後の一部)
(外径: 400~1,000mm、軸長: 8,000mm)

実規模配管試験体を用いた試験

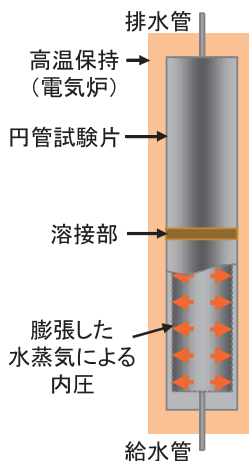


試験を数回中断し非破壊検査/非破壊評価を実施
(超音波探傷/磁粉探傷/組織観察 (ボイド個数計測)/硬さ計測/外径計測)

小型試験片を用いた試験



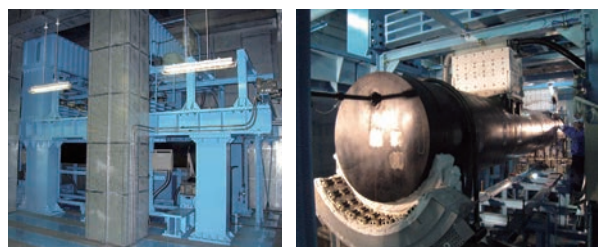
単軸クリープ試験機



内圧クリープ試験機



実機コンポーネント寿命評価実験設備(BIPress)



DEN-CHU-KEN
TOPICS

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1（大手町ビル7階）

TEL：03-3201-6601 FAX：03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>