

Techno Scope

高クロム鋼の 寿命を見極める

高効率火力発電プラントでは、高温高圧に耐えられる高クロム鋼の配管が使用されている。プラントが運転される数十年の間、配管材料は損傷なく使用されなくてはならない。高クロム鋼の寿命を精度良く評価するために、実機環境を想定したクリープ試験が行われている。

実機コンポーネント寿命評価実験設備BIPressでの内圧クリープ試験の様子。試験体は高温高圧にじっと耐えているようだ。(神奈川県横須賀市の電力中央研究所材料科学研究所)

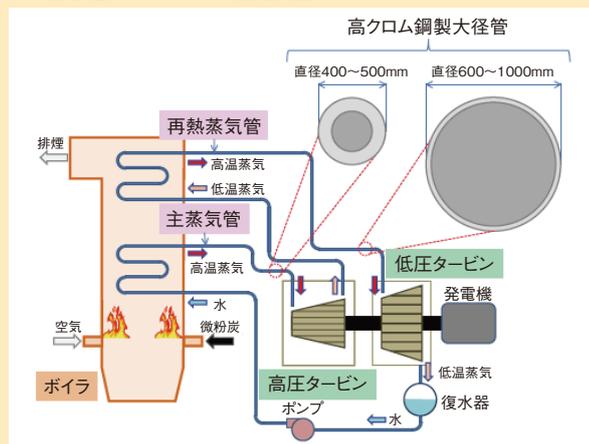
世界でも類を見ないクリープ試験設備

神奈川県横須賀市に、世界でも類を見ない試験設備があるという。訪れたのは電力中央研究所材料科学研究所。案内された場所は、大きなコンクリート基礎のように見える。この地下で、高効率火力発電プラントに使われるのと同じサイズの、大型配管の寿命評価試験が継続されているという。



BIPressの地上部

火力発電プラントの構造(図1)



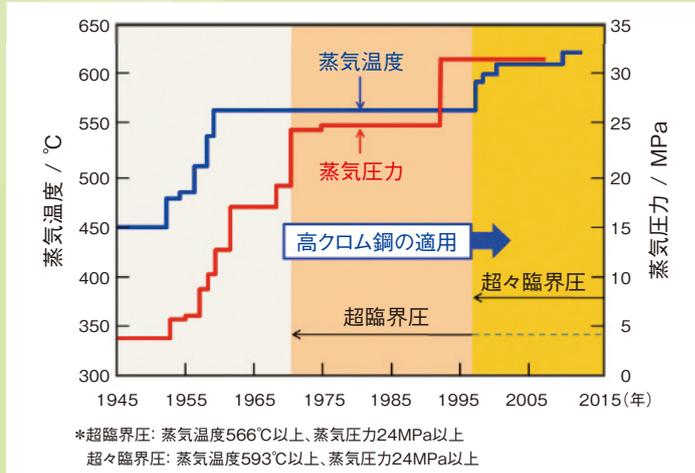
(資料提供: 電力中央研究所)

何もかもがビッグサイズだ。試験に使用される試験体は、最大で直径1m、長さ8m。地下には厚さ1mのコンクリート壁に囲まれた試験室があり、その中で試験体には高温高圧がかけられ、時間とともに起こるわずかな変形量が計測される。しかし遠隔監視するモニターからは、室内で試験体に変形していることなどまったく想像できないほどの静寂ぶりだ。温度や圧力のデジタル表示がなければ試験中ということは実感できない。

このような試験設備がどうして作られたのか。それは、高クロム鋼配管の正確な寿命予測のために、ここでのクリープ試験が不可欠だったからだ。

● 火力発電の効率化に不可欠な耐熱材料

火力発電における蒸気条件の推移 (図2)



(資料提供: 電力中央研究所)

現在、日本のエネルギーは石炭、天然ガスなどを燃料とする火力発電に大きく依存している。東日本大震災以降、原子力発電所の稼働停止に伴い火力発電のウェイトが増えているためだ。石炭火力発電は、燃料に安価で、長期的に安定供給できる石炭を使用し、高温高圧の蒸気でタービンを回転させて発電する。発電効率を向上させるには蒸気の高圧化が不可欠であり、その蒸気に耐えられる耐熱材料の適用が重要な鍵となる。日本の火力発電プラントの蒸気温度は、1980年代以前は566°Cであった。その後、1990年代になると蒸気温度600°C級の高效率火力発電プラントが、世界に先駆けて建設された(図2)。そして、高效率火力発電プラントで最も高温になる箇所の配管に使用されているのが高クロム鋼の配管である。

1990年代から採用された高クロム鋼

火力発電所で使われる高クロム鋼とは、クロムを9～12%程度含むフェライト耐熱鋼であり、高温強度を高めるために添加元素や熱処理が最適化されている。高クロム鋼は、元々1970年代にアメリカで、高速増殖炉に使用することを想定して開発された。その後日本で火力発電所用の材料として実用化され、1990年代半ばから9クロム鋼が火力発電プラントの配管に採用され、追って12クロム鋼も採用されるようになった。

高クロム鋼が使用されている配管は主蒸気管と高温再熱蒸気管と呼ばれる大径厚肉の鋼管で、ボイラーからタービンまで長さ100m以上、重量は数百トンにも及ぶ構造物である(図1)。

火力発電プラントの耐熱材料に求められる重要な特性は、クリープ強度である。クリープとは、高温で材料に一定応力を加えると降伏応力以下であっても徐々に時間とともに変形が進む現象のことである。高温下で長期間にわたり稼働する火力発電所プラントは、使用温度における10万時間(約11年5か月)でクリープ破断する応力を測定し、ここから求められる許容引張応力に基づいて配管の設計が行われる。クリープ試験中の変形量(ひずみ)は、1時間当たり10万分の1%レベルという極めて微小な変化にしかすぎない。しかし、ここで得られるデータの蓄積が、長期間にわたるクリープ寿命を予測するうえで最も基本的な情報となる。

クリープ強度を再評価する取り組み

2004年以降、高クロム鋼の配管の一部で、蒸気漏えいの事象が複数発生した。このような事象は、プラントの安全操業の問題はもとより、運転が停止すれば電力の安定供給に支障をきたし、設備の復旧に多大な手間とコストがかかってしまう。

この事態を重く見て、国は2004年に「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(SHC委員会)」を発足し、原因の調査を行った。その調査結果に基づき長時間クリープ強度の見直しが行われた。

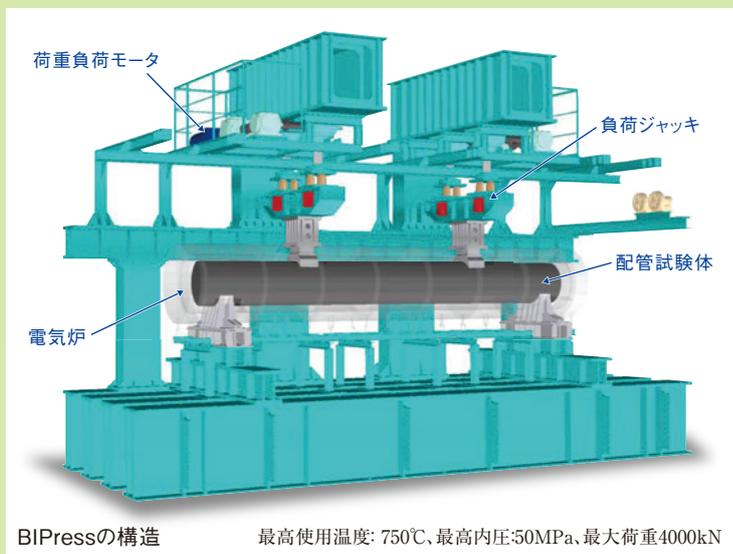
その後も、長時間クリープ強度調査の整備・拡充が継続されたが、一方で高クロム鋼配管での不具合が2007年ごろからいくつか発生した。そこで、クリープ強度の再評価の必要性が関連機関の間で高まり、2010年に「高クロム鋼クリープデータ評価検討会」が発足した(電気事業連合会、電力中央研究所、物質・材料研究機構、関連するプラントメーカーや鉄鋼メーカーが参加)。ここでは高クロム鋼の母材および溶接継手を検査対象とし、収集した全データを用いてクリープ強度の再評価を行った。

この再評価式は、最新の知見に基づく結果として各機関が参照することになり、2012年には「高效率火力発電設備健全性調査委員会(RHC委員会)」の高クロム鋼継手用クリープ評価式に採用し、日本の材料強度基準として各機関が使用することになった。

◎ 実機コンポーネント寿命評価実験設備 BIPress (Bending & Internal Pressure on real structural samples)

実際の火力発電プラント配管と同じサイズの試験体を用いてクリープ試験を行う、実機コンポーネント寿命評価実験設備BIPressは2006年に設置された。ここでは、鉄鋼メーカーで製作できる配管の最大サイズに相当する直径1m、長さ8mまでの試験体を試験することができる。

実際の火力発電所を想定し、最高温度750℃、最高圧力50MPaを掛けることができる。試験体の上部から曲げ荷重をかけられるように電動ジャッキも備えられている。試験体には、熱電対やひずみゲージ、変位計が取り付けられ、その細かな変化は遠隔監視で管理されている。



大型の試験体はクレーンでつり下げ、地上部を開口して試験室に搬入される。

(資料提供: 電力中央研究所)

溶接継手の寿命を精度良く評価

多くの機関による高クロム鋼寿命評価の検討の中から、電力中央研究所が取り組んだ長手溶接継手の寿命評価の研究について紹介する(詳細は連携記事を参照)。

一般に、クリープ試験で使われる試験体は外径1cmであり、内圧クリープ試験では外径5cm程度である。しかし実機の配管は外径70cm程度であり、標準サイズの試験体とは、様々な方向から応力を受ける状態(多軸応力状態)が異なる。そこで、実機の配管と同じサイズの試験体を用いて内圧クリープ試験を行い、多軸応力下の破壊形態や強度特性を調査し、さらに溶接継手に対する高精度な寿命評価法の開発に役立てることになった。

使用された試験体は、直径約70cm、長さ6m、板厚30mmであり、この大きな試験体を、できるだけ実機を再現した条件で試験するために、これまでにない試験装置が導入された。それが、冒頭に紹介した実機コンポーネント寿命評価実験設備(BIPress)である。

この試験設備で内圧クリープ試験を実施したところ、予想ど

おり長手溶接部の熱影響部に沿って亀裂が起り、配管が貫通することを確認した。また、あらかじめ標準サイズ試験体に基づいて行った破断時間の予測と比較したところ、予測結果と試験結果が精度よく一致し、標準サイズ試験体に基づいた寿命評価法は、実機でも精度よく適用できることが確認された。

このほか、高クロム鋼配管の損傷の特徴として、溶接熱影響部(HAZ)で配管内部から亀裂が発生することから、非破壊検査による内部損傷診断の高精度化に取り組むなど、新たなクリープ寿命診断技術の開発が進められている。

クリープ試験の豊富な経験を生かす

耐熱材料のクリープ試験について、長年取り組みを継続しているのが物質・材料研究機構(NIMS)である。1966年より継続しているクリープデータシートプロジェクトでは、国産の実用耐熱金属材料の、炭素鋼、フェライト耐熱鋼、オーステナイト耐熱鋼、超合金を対象として、フェライト耐熱鋼の一つとして高クロム鋼の試験も継続されている(詳細は連携記事を参照)。

● 物質・材料研究機構のクリープ試験機



世界有数の規模を誇るNIMSのクリープ試験機群
(茨城県つくば市の物質・材料研究機構)

クリープ試験の世界最長記録は、日本の物質・材料研究機構(NIMS)が保有している。1969年に開始した炭素鋼のクリープ試験は、2011年2月に356,838時間に達し、それまでの記録を塗り替えた。現在、500台ある試験機(通常型:0.75~5t、470台 大型:10t、30台)が試験を継続中である。NIMSでは、試験で得られたクリープデータシート、長時間クリープ試験材微細組織写真集、クリープ変形データシートなどの発行を行い、国内及び海外の関係機関に配布している。



大型クリープ試験装置では高クロム鋼配管溶接部の
10万時間の試験プロジェクトが進行している。

(資料提供: 物質・材料研究機構)

NIMSは、2004年のSHC委員会で、高クロム鋼の許容引張応力の見直しに参画し、その後の許容引張応力の見直しに継続的に関わってきた。最近の調査では、同じ規格の9クロム鋼でも、クリープ強度に差が生じることがわかり、例えば、ニッケル含有量が多いとクリープ寿命が短いとか、製造時期によりクリープ寿命が異なる、などの傾向があることが明らかになった。

2015年には、NIMSと関係各社が協力して長時間クリープ劣化材の金属組織共同調査プログラムを立ち上げた。

例えば、同じ規格材であっても、製造条件によってクリープ強度が異なる場合がある。そこで、9クロム鋼について、それぞれの試験体のクリープ強度差を調べたところ有意な差があることがわかり、その原因の解明に取り組んだ。試験体の組織を観察すると、筋状のクロムの偏析部が残る場合があり、このクロム濃度差が出鋼ごとに異なり、それがクリープ強度差となる事例が確認された。偏析がクリープ強度に及ぼす影響の詳細はまだ明らかになっていないことも多いが、今後は偏析の低減も予め取り組むべき課題と考えられる。

2017年には大型クリープ試験機を用いて、高クロム鋼の溶接継手を対象としたクリープ試験を、電力メーカーやプラントメー

カーなど計8社と共同で開始した。これまで国内で取得された溶接継手のクリープデータは4万時間程度であるが、10万時間に及ぶクリープデータは未だ取得されていない。そこで溶接部のデータベース構築のため、実機の配管周溶接した試験体から大型試験片を採取し、クリープ試験を行うことにした。この試験では、10万時間までクリープ試験を継続するが、途中の時点で試験片を取り外し、非破壊検査や硬さ試験を行ってから、再度クリープ試験を継続する。この繰り返しにより、実機相当の長時間のクリープ試験条件で、溶接部の劣化・損傷過程を効率よく調査することができるものと期待されている。

日本の高性能火力発電所は世界の中でも日本がリードしてきた分野であり、これまで運転実績を重ねてきた。ここに使われる高クロム鋼は比較的歴史の浅い材料であるため、解明すべき課題はまだ残っている。この材料をうまく使いこなすためのノウハウを蓄積していることが、将来的には日本のアドバンテージになるはずである。鉄鋼材料を安心して使っていくための道筋が、今後示されていくことだろう。

- 取材協力 電力中央研究所、物質・材料研究機構
- 文 杉山香里