

## ボイラ用高強度 9CrW鋼管及び鍛鋼品(NF616)の開発

Development of 9CrW Tube, Pipe and Forging for  
Ultra Supercritical Power Plant Boilers

|                                              |                                              |                                      |                                            |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 大 神 正 浩 <sup>(1)</sup><br>Masahiro<br>OHGAMI | 三 村 裕 幸 <sup>(2)</sup><br>Hiroyuki<br>MIMURA | 直 井 久 <sup>(3)</sup><br>Hisashi NAOI | 池 本 猛 <sup>(4)</sup><br>Takeshi<br>IKEMOTO |
| 金 原 茂 <sup>(5)</sup><br>Shigeru<br>KINBARA   | 藤 田 利 夫 <sup>(6)</sup><br>Toshio FUJITA      |                                      |                                            |

## 抄 録

近年、省エネルギー及び地球環境保全のため、火力発電ボイラの効率向上を図るために蒸気条件の高温高圧化のための研究が世界的になされている。ボイラの蒸気条件の最終目標は352気圧×649℃の超々臨界圧であるが、当面は316気圧×593℃となっている<sup>1)</sup>。これら過酷な蒸気条件に耐え得る材料の研究を進め、9CrW鋼(NF616)を開発した。開発鋼はチューブ及びパイプとしてASMEに規格化され、既存のMod.9Cr-1Mo鋼の約1.3倍のクリープ破断強度を有しており、今後の超々臨界圧発電プラントの実現に大きく寄与するものと考えられる。

## Abstract

Highly pressured steam with an elevated temperature has been studied worldwide in recent years to improve the efficiency of boilers for thermal power generation and also from a standpoint of an energy conservation and a global environmental conservation. The final target of the steam conditions for the boilers is such an ultra supercritical pressure as 352 atmospheric pressures and 649°C, but the present one is 316 atmospheric pressures and 593°C. Studies on a material which can stand such severe steam conditions were carried out, and a 9CrW steel (NF616) for boiler use has been developed. This steel has been standardized in ASME as a tube and pipe, which has a creep rupture strength of about 1.3 times higher than the existing Mod. 9Cr-1Mo steel and is expected as the material for realizing a future ultra supercritical pressure steam power plant.

## 1. 緒 言

近年、省エネルギーの観点から火力発電ボイラにおいてはボイラの発電効率向上のために蒸気条件の高温高圧化が定着してきている。この動向は発電効率向上による燃料消費低減が大きな狙いであるが、同時に相対的にCO<sub>2</sub>排出量を抑制することになるため地球環境保全に対しても好ましい方向である。発電効率を向上させるためには高温高圧化が不可欠な条件であり、そのためには従来使用されている耐熱材料よりも優れた性能を有する材料が必要である。

超臨界圧発電プラントの過熱器管及び再熱器管にはSUS304, 321, 347HTBなどのオーステナイト系ステンレス鋼が多く用いられている。オーステナイト系ステンレス鋼はフェライト系鋼に比べ、高温強度は高いが、熱膨張係数が大きいため稼働・停止に伴う熱膨

張・収縮によりスケールが剥離する、熱伝導度が低いなどの欠点を有する。これらの点は使用部材の肉厚が厚くなるほどその影響が大きくなる。このため、超臨界圧ボイラ、更には600℃以上で使用される超々臨界圧ボイラ用の厚肉部材用材料として高Crフェライト系鋼に対する要求が高い<sup>2)</sup>。

また、超々臨界圧火力発電プラントの実現には高温高圧に耐えられる材料の開発が不可欠である。著者らはこれらの過酷な条件に耐えられるフェライト系材料の研究を推進し、600℃のクリープ破断強度が米国のORNLで開発されたフェライト鋼のMod.9Cr-1Mo鋼(T91, P91, F91)を大幅に超える9CrW鋼(NF616)を開発した<sup>3-6)</sup>。

本報告では、この超々臨界圧ボイラ用鋼の開発並びに鋼管及び鍛鋼品の諸特性について報告する。

<sup>(1)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

<sup>(2)</sup> 鋼管営業部 部長代理

<sup>(3)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部

主幹研究員 工博

<sup>(4)</sup> 日本鑄鍛鋼(株) 技術部 部長

<sup>(5)</sup> 大同特殊鋼(株) 素形材事業部 部長

<sup>(6)</sup> 東京大学 名誉教授 工博

## 2. NF616の特徴

NF616は化学成分において従来の耐熱材料には添加されていないWを含有することを大きな特徴とする材料である。Wは固溶強化及び析出強化に寄与し、クリープ強度を向上させる。開発材料のNF616はマトリックス中に微細な炭化物及び窒化物を微細に分散させ析出強化を図るとともに、置換型の元素あるいは侵入型の元素による固溶強化を図ることにより、高いクリープ破断強度を達成することを目標としている。また、金属組織はクリープ破断強度及び靱性の向上を目的として焼戻しマルテンサイト単相組織を基本としている。

## 3. 鋼管及び鍛鋼品の諸特性

### 3.1 鋼管及び鍛鋼品の試作

NF616の化学成分規格を表1に、試作材の化学成分及び寸法を表2に、製造工程の例を図1に示す。溶製は真空溶解(VIM)、電気炉溶解(EAF)-エレクトロスラグ再溶解法(ESR)、転炉(BOP)等に行い、造塊は銅塊法(IC)あるいは連続铸造法(CC)により銅塊あるいは鑄片を製造した。溶解量は300kgから120 tまでの範囲である。

各製品の製造方法は、伝熱器管用の小径鋼管(チューブ)は熱間押し、主蒸気管あるいは管寄せ用の中径鋼管(パイプ)はシームレス圧延及び大径鍛造鋼管(パイプ)は熱間鍛造、鍛鋼品は熱間鍛造である。各製品のサイズは、小径鋼管は外径38.1~70mm、肉厚6.6~12mm、中径鋼管は外径300~352mm、肉厚40~56mm、大径鍛造鋼管は外径318~584mm、肉厚50~134mm、鍛鋼品は肉厚50~200mmである。熱処理はクリープ強度、引張強度、靱性を考慮し、各製品サイズにより1050℃~1100℃の焼ならしあるいは油焼入れ、及び760℃~780℃の焼戻しを実施した。製造した鍛鋼品ティーの外観を写真1に示す。

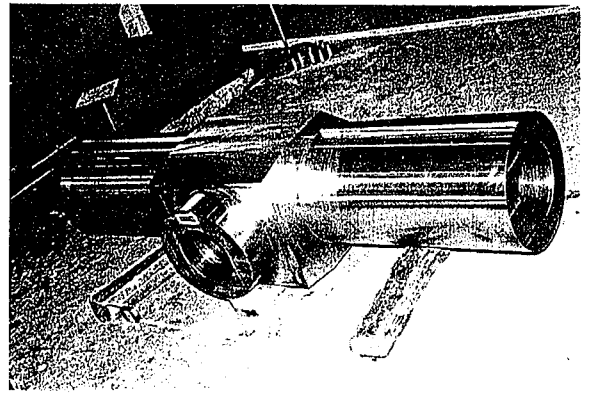


写真 1 鍛鋼品の外観写真

### 3.2 厚肉材の使用性能特性確保

薄肉材に関しては十分な使用性能が確保されていることを報告しているが<sup>7, 8)</sup>、厚肉材では、製造時に薄肉材と比較して使用性能を確保するために注意すべき点がある。肉厚が厚くなるほど中心部分の冷却速度が遅くなり、 $\delta$ フェライトの析出及び結晶粒径の粗大化、析出物の析出状態の変化等の金属組織上の問題が懸念される。また、鋼管内表面は輻射熱により鋼管外表面に比較して冷却速度が遅くなる傾向にあり、金属組織に影響を及ぼす。これらの金属組織上の変化は機械的特性に影響を及ぼすため、特性を確保する対策が必要となる。

この材料においては図2に示すように肉厚400mmの中心部分(1/2 t)の冷却速度が空冷でも $\delta$ フェライトが存在しないマルテンサイト単相組織であり、硬さも肉厚50mmの材料とほぼ同等である。厚肉材の方が硬さがやや低いのは析出物の析出状態がやや異なっているためと推定されるが、大きな差はないものと考えられる。写真2

表 1 規格化学成分 (mass%)

| Specification        |      | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | W    | Ni   | V    | Nb   | N     | Al    | B     |
|----------------------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Chemical composition | min. | 0.07 | —    | 0.30 | —     | —     | 8.50 | 0.30 | 1.50 | —    | 0.15 | 0.04 | 0.030 | —     | 0.001 |
|                      | max. | 0.13 | 0.50 | 0.60 | 0.020 | 0.010 | 9.50 | 0.60 | 2.00 | 0.40 | 0.25 | 0.09 | 0.070 | 0.040 | 0.006 |

表 2 供試材の化学成分及び寸法 (mass%)

| Heat | Size          | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | W    | Ni   | V    | Nb    | N     | Al    | B     |
|------|---------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| EPT  | 54 OD×12 t    | 0.106 | 0.04 | 0.46 | 0.008 | 0.001 | 8.96 | 0.47 | 1.84 | 0.06 | 0.20 | 0.069 | 0.051 | 0.007 | 0.001 |
| YAT  | 54 OD×12 t    | 0.124 | 0.02 | 0.47 | 0.011 | 0.006 | 9.07 | 0.46 | 1.78 | 0.06 | 0.19 | 0.063 | 0.043 | 0.002 | 0.003 |
| EPP  | 350 OD×50 t   | 0.106 | 0.04 | 0.46 | 0.008 | 0.001 | 8.96 | 0.47 | 1.84 | 0.06 | 0.20 | 0.069 | 0.051 | 0.007 | 0.001 |
| YBP  | 300 OD×40 t   | 0.101 | 0.04 | 0.47 | 0.011 | 0.001 | 8.96 | 0.48 | 1.94 | 0.06 | 0.20 | 0.065 | 0.045 | 0.005 | 0.004 |
| JAP5 | 318.5 OD×50 t | 0.100 | 0.12 | 0.43 | 0.005 | 0.001 | 9.00 | 0.50 | 1.80 | 0.16 | 0.20 | 0.060 | 0.044 | 0.012 | 0.001 |
| JCP  | 508 OD×83 t   | 0.100 | 0.26 | 0.47 | 0.009 | 0.003 | 8.84 | 0.34 | 1.88 | 0.29 | 0.19 | 0.065 | 0.042 | 0.003 | 0.001 |
| DBF1 | 300 OD×100 t  | 0.110 | 0.26 | 0.49 | 0.009 | 0.003 | 8.98 | 0.38 | 1.91 | 0.19 | 0.19 | 0.067 | 0.045 | 0.002 | 0.002 |
| DDF  | 400 OD×150 t  | 0.120 | 0.29 | 0.33 | 0.008 | 0.001 | 8.89 | 0.36 | 1.72 | 0.13 | 0.16 | 0.060 | 0.037 | 0.002 | 0.001 |

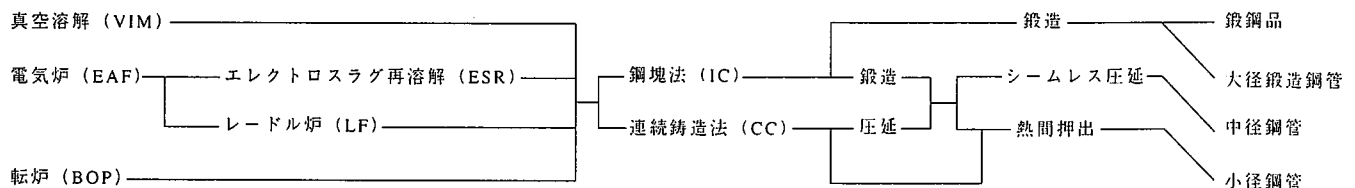


図 1 試作材の製造工程

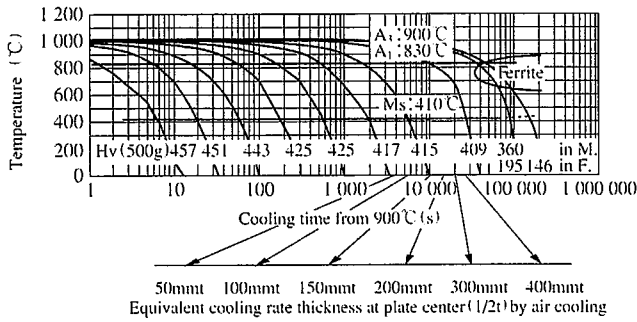


図 2 NF616鍛鋼品の連続冷却曲線図

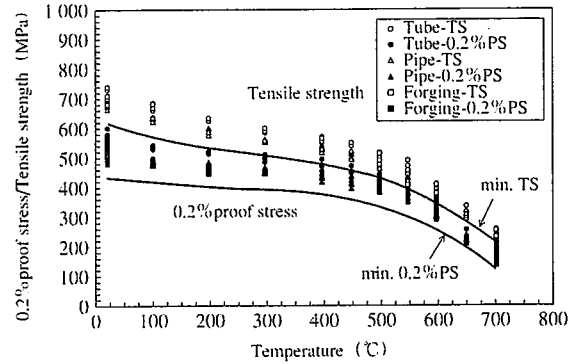


図 3 高温引張試験結果

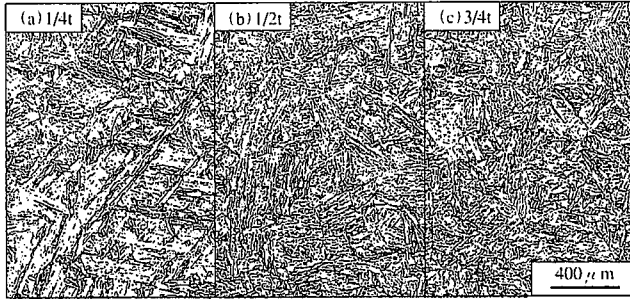


写真 2 大径鍛造鋼管の金属組織

に製品肉厚125mmの鋼管の金属組織を示す。鋼管内表面の冷却速度を鋼管外表面とほぼ同等の冷却速度としたために、外表層側の1/4 tから内表層側の3/4 tに至るまでの結晶粒径はいずれの位置においてもほぼ同一であり、肉厚位置による金属組織の差は認められない。

また、写真3に鋼管の熱処理後の電子顕微鏡写真を示す。抽出レプリカの電子顕微鏡観察においては、多くの微細な析出物がマルテンサイト・ラス内及びラス間に均一に分散している様子が観察される。析出物の種類、サイズ、分布状態等も各製品間で小さな相違はあるが、全体として大きな差は認められない。

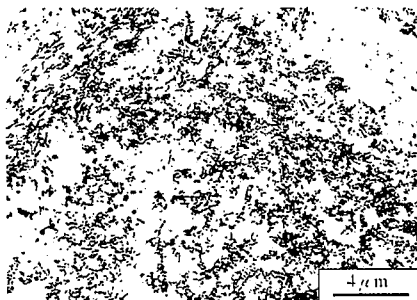


写真 3 中径鋼管の電子顕微鏡組織

### 3.3 鋼管及び鍛鋼品の機械的特性

鋼管及び鍛鋼品の高温引張試験結果を各製品ごとに分類して図3に示す。試験片の採取方向は薄肉材の小径鋼管(Tube)は長手方向、厚肉材の中径鋼管、大径鍛造鋼管(Pipe)及び鍛鋼品(Forging)は長手方向及び円周方向とした。また、鍛鋼品ティーについては肉厚方向及びコーナー中央部からも試験片を採取した。常温引張特性の規格最小値は、引張強さ620MPa、0.2%耐力440MPa、伸び20%であるが、試験結果はこれらの値を十分に満足している。厚肉材の鍛鋼品及び大径鍛造鋼管においても薄肉材の小径鋼管とほぼ同等の引張特

性を示しており、各製品間における引張特性の差は小さい。また、厚肉材においては肉厚方向の採取位置あるいは採取方向の差による引張特性の差は認められず、異方性はないものと考えられる。

小径鋼管及び中径鋼管の600℃における長時間時効後のシャルピー衝撃値の試験温度20℃における変化を図4に示す。時効により約1000hまでは靱性の低下が大きいが、10000h以降で安定化する傾向にある。長時間の時効においても20℃で100J/cm<sup>2</sup>以上の靱性を確保し、ボイラ用材料としては十分な値を示している。なお、この靱性低下の傾向はMod. 9Cr-1Mo鋼と同じである。また、大径鍛造鋼管及び鍛鋼品においても熱処理後の状態で20℃で200J/cm<sup>2</sup>程度の靱性を示し、厚肉材でも十分な靱性が確保されている。

図5に鋼管及び鍛鋼品の応力-クリープ破断時間線図を各製品ご

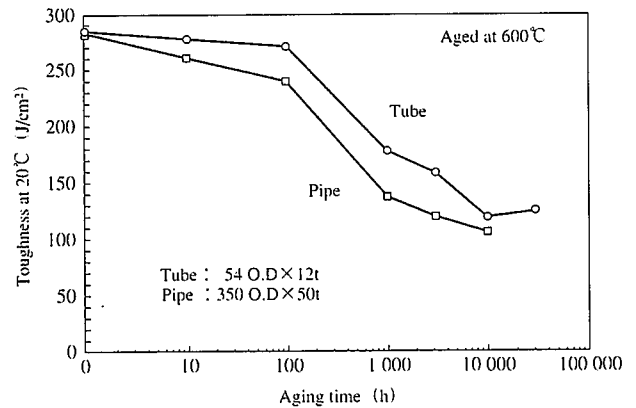


図 4 靱性の経時変化

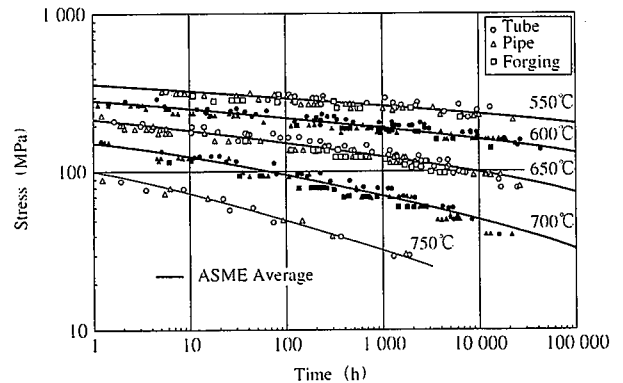


図 5 クリープ破断強度

とに分類して示す。現在50 000hを超えるデータが得られており、ラルソンミラー法により推定した600℃で10%hのクリープ破断強度は既存鋼種のMod. 9Cr-1Mo鋼(ASME SA213-T91/SA335-P91)の約1.3倍となる優れた値である。厚肉材の中径鋼管、大径鍛造鋼管及び鍛鋼品は薄肉材の小径鋼管と比較して短時間側ではやや低めの強度を示すが、長時間側ではほぼ同等の強度を示す傾向にある。また、試験片の採取位置及び採取方向によるクリープ破断特性の差はほとんど認めらず、異方性はないと考えられる。

#### 4. 鋼管及び鍛鋼品の実用化

##### 4.1 規格化

1993年2月に鋼管のASME規格としての登録をASMEボイラ・圧力容器規格委員会へ申請した。その結果1994年8月に伝熱管用(チューブ)はASME SA-213 T92及び配管用(パイプ)はASME SA-335 P92の材料名でASME Section 1 Code Case 2179として登録された。また、鍛鋼品のASMEへの規格化申請を1996年5月に行っている。鋼管のASTMの規格化の申請もASMEの申請とほぼ同時期に行い、近日中に規格化される予定である。

日本においては、チューブ、パイプ及び鍛鋼品の3種類について発電用火力設備の技術基準への材料の追加申請中であり、1997年に登録の予定である。

##### 4.2 高強度材使用のメリット

超々臨界圧ボイラの研究は米国電力研究所(EPRI)や欧州の研究組合(COST)が中心になって進められている。超々臨界圧ボイラの主要技術課題の一つは鋼管の肉厚が厚くなる結果、ボイラの負荷調整運転時に繰返し応力が加わるためクリープ疲労損傷で破壊しやすくなることである。このため、熱膨張係数が小さく熱伝導率の良いNF616のようなフェライト系の高強度鋼が必要となる。

ASMEに規格化された材料の許容引張応力をMod. 9Cr-1Mo鋼と比較して図6に示す。600℃においてMod. 9Cr-1Mo鋼の約1.3倍の値を

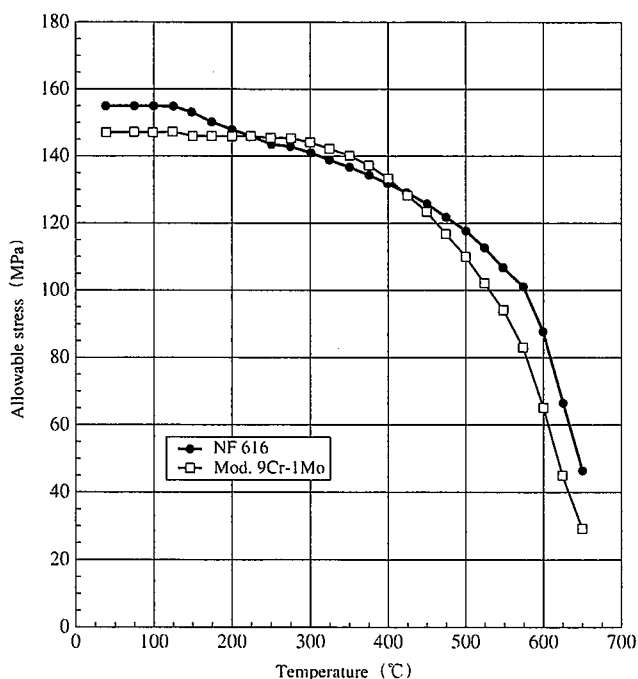


図6 許容引張応力の比較

有し、高温になるほどその比率は大きくなり、肉厚低減のメリットが大きくなる。メタル温度610℃、圧力280kg/cm<sup>2</sup>(27.5MPa)、内径400mmと仮定した場合のMod.9Cr-1Mo鋼との肉厚の比較を図7に示す。Mod.9Cr-1Mo鋼では141.2mmの肉厚が必要になるのに対してNF616では98.4mmで良いことになる。このような厚肉部材の肉厚減少は、材料コストの低減はもちろんのこと加工、溶接、作業負荷の軽減に貢献するとともに、ボイラ操業の起動停止における熱応力の低減にも寄与し、鋼材のクリープ疲労損傷を減少させることが可能である。

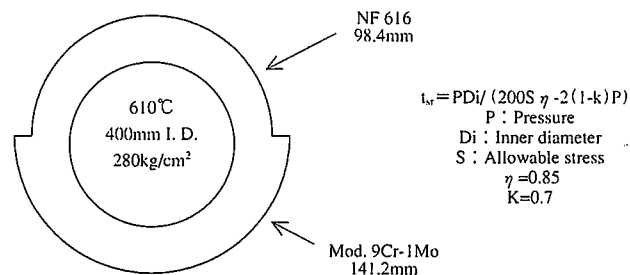


図7 鋼管肉厚の比較

##### 4.3 施工性

米国、英国、デンマーク及び日本の材料メーカー、ボイラメーカー及び電力会社により超々臨界圧ボイラ用厚肉パイプの国際共同研究(EPRI RP1403-50プロジェクト)が1990年から推進されている。Phase-1 材料評価及びPhase-2 実缶試験より構成される研究プログラムにおいて、Phase-1 でのボイラメーカー及び電力会社による母材及び溶接部の特性、曲げ加工及び溶接加工性の評価が実施され、NF616は良好な成績を収めている。

また、NF616用の溶接材料の開発も完了し、EPRI国際共同研究をはじめ日本国内外のボイラメーカー及び電力会社にて評価されており、高Cr鋼でありながら2.25Cr鋼よりも優れた溶接性を有している<sup>9)</sup>。

#### 5. 実缶試験

日本国内外において過熱器管(チューブ)及び主蒸気管(パイプ)として実缶試験を実施中である。

##### 5.1 小径鋼管(チューブ)の実缶への適用

チューブは通商産業省の認可を得て、1987年から戸畑共同火力(株)戸畑共同火力発電所4号ボイラにて実缶試験を実施中である<sup>10-12)</sup>。同ボイラの最高使用圧力は19.3MPa、最高使用温度569℃、メタル温度600℃である。鋼管は第3次過熱器管の高温部に挿入され、既設のSUS321HTB鋼管の一部と置き換えて設置された。試験開始後、13 763h、21 212h、44 567h後に抜管し評価を行った。挿入時の材料と比較して析出物は粒界及びラス境界に凝集しているが、粗大化は顕著ではなく、13 763h以降析出物形態及び析出状態は写真4に示すようにほぼ同一であり、650℃で10 000hの時効材(600℃で約2 000 000h相当)の析出状態と比較してもほぼ同一であることから今後の変化は小さいものと推定される。また、衝撃特性、溶接部硬さも13 763h以降安定した状態にある。これらの結果より長時間使用において材料が安定していることが確認された。なお、チューブの実缶試験は現在運転時間約65 000hを超えて特に問題を生ずることもなく実施中である。

またチューブは1992年よりドイツPreussen ElectraのWilhelmshaven

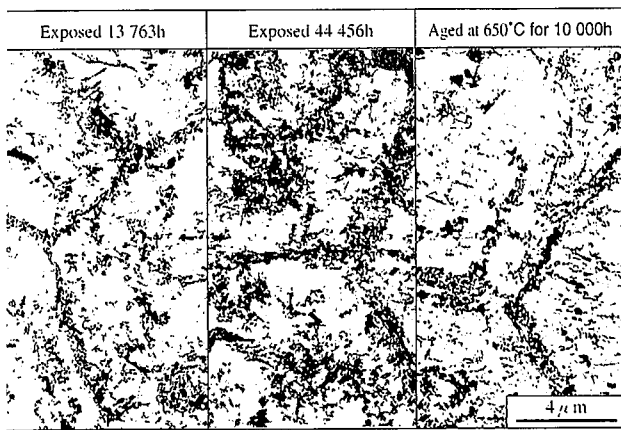


写真 4 実缶試験材の析出物の状態

ボイラの過熱器管にMod. 9Cr-1Mo及びX20CrMoV121と同時に挿入された<sup>13)</sup>。メタル温度608℃での実缶試験後の水蒸気酸化スケール厚さをMod. 9Cr-1Moの結果とともに表3に示す。8458h運転後の水蒸気酸化スケール厚さはMod. 9Cr-1Mo鋼とほぼ同等である。

表 3 実缶試験材の水蒸気酸化スケールの厚さの比較

| Steel                |         | NF616 | Mod. 9Cr-1Mo |
|----------------------|---------|-------|--------------|
| Temperature (°C)     |         | 608   | 609          |
| Exposure time (h)    |         | 8 458 | 8 458        |
| Scale thickness (μm) | min.    | 180   | 185          |
|                      | max.    | 315   | 325          |
|                      | average | 247   | 247          |

Preussen Electra/ Wilhelmshaven Power Station

## 5.2 中径鋼管及び大径鍛造鋼管(パイプ)の実缶への適用

パイプは1992年からデンマークELSAMのVestkraft No.3ボイラにて実缶試験を実施中である<sup>14)</sup>。同ボイラの最高使用圧力は25.4MPa, 最高使用温度は560℃である。鋼管は主蒸気管に挿入され、既設のX20CrMoV121鋼管の一部と置き換えられた。挿入された鋼管は許容引張応力を考慮して外径を研削し、既設鋼と内径が一定の状態となるように設定されている。現在、特に問題もなく実缶試験を実施中である。

また、国際共同研究(EPRI RP1403-50プロジェクト)のPhase-2の実缶試験に1995年より移行し、デンマークELSAMの最新鋭の超々臨界圧ボイラの管寄せの一部に挿入するため、組込用の管寄せの製作を完了し、現在ボイラ実機へ組込中である。

## 5.3 鍛鋼品の実缶への適用

EPRI RP1403-50プロジェクトにおいて、鍛鋼品ティーのボイラメーカーによるパイプ材と同様の特性評価を1996年より開始した。

## 6. 結 言

従来の9Cr鋼より高温強度に優れた新しい9Cr鋼としてNF616(9CrW)を開発した。本鋼はWを約1.8%添加したW強化型鋼であり、現在用いられているMod. 9Cr-1Mo鋼(T91, P91, F91)の約1.3倍のクリープ破断強度を有し、ASME規格に登録された。この材料は過熱器管及び再熱器管用のチューブ、管寄せ及び主蒸気管用のパイプ、ティー及びレデューサー用の鍛鋼品として、それぞれ実用されようとしている。

今後新設される火力発電プラントは蒸気条件が高温高压化される傾向にあるため、この高強度NF616を使用することにより、高温高压化の達成、コスト低減等、信頼性及び経済性の点から非常に有益な面が得られると考えられる。

## 7. 謝 辞

鋼管の実缶試験におきましては、戸畑共同火力(株)戸畑共同火力発電所、三菱重工業(株)、デンマークELSAM社のご協力をいただきました。深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Armor, A.F. : Proceedings, American Power Conference. (1984), p.1315
- 2) 大黒貴 ほか：三菱重工技報. 22, p.384(1985)
- 3) Fujita, T., et al. : COST-EPRI Workshop, Creep Resistant 9-12 Cr Steels. Schaffhausen, Switzerland, October 1986
- 4) Masumoto, H., et al. : Proceedings, EPRI 1st International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants. Palo Alto, USA, 1986, p.5-203
- 5) 榎原瑞夫 ほか：火力原子力発電. 38, p.841(1987)
- 6) 大神正浩 ほか：鉄と鋼. 76, p.1124(1990)
- 7) 直井久 ほか：新日鉄技報. (340), 22(1991)
- 8) 直井久 ほか：新日鉄技報. (347), 27(1992)
- 9) Masuyama, F. : EPRI/National Power Conference on New Steels for Advanced Plants up to 620°C. London, UK, 1995
- 10) 大神正浩 ほか：材料とプロセス. 3, p.1878(1990)
- 11) Ohgami, M., et al. : Proceedings, EPRI International Symposium on Improved Technology for Fossil Power Plants. Washington D.C., March 1993
- 12) 大神正浩 ほか：平成5年度火力原子力発電大会要旨集. 1993, p.52
- 13) Zabelt, K. : Proceedings, Kraftwerks-technisches Kolloquium. Dresden, Germany, October 1993, p.167
- 14) Blum, R. : Proceedings, VGB Fossil-fired Power Plants with Advanced Design Parameters. Kolding, Denmark, June 1993, V2