

特集記事・2

安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線

フェライト系耐熱鋼の クリープ破断寿命評価と設計基準

Creep Life Prediction and Design Code of Ferritic Creep Resistant Steels

木村一弘
Kazuhiro Kimura

独立行政法人物質・材料研究機構
共用基盤部門データシートステーション
ステーション長

1 はじめに

環境問題に関する意識の高まりとともに、地球温暖化の要因と考えられている二酸化炭素ガスの排出量を削減するための様々な取り組みが活発に行われている。我が国の二酸化炭素排出量を部門別に整理すると、図1に示すように発電等のエネルギー転換部門と工場等の産業部門がそれぞれ全体の約30%程度を占めている。なかでも、エネルギー転換部門では火力発電所における石油、石炭、天然ガス等の化石エネルギーの燃焼による二酸化炭素の排出がその大部分を占める。そのため、風力発電や太陽光発電等の再生可能エネルギーの研究開発が行われているが、現状では再生可能エネルギーによる発電電力量は全体の1%以下とわずかであり、総発電電力量の約50%を担う火力発電プラントの高効率化が緊急の課題となっている。

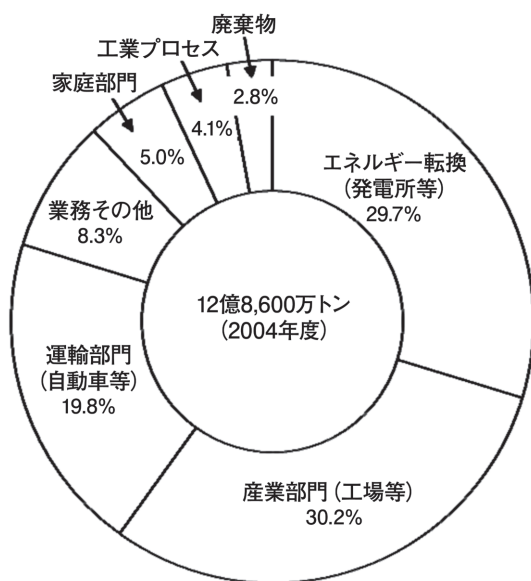


図1 日本国内の二酸化炭素排出量¹⁾

火力発電プラントのエネルギー効率を向上させるためには、蒸気タービンでは蒸気条件の高温高压化、ガスタービンでは燃焼温度を上昇させることが有効である。したがって、より高温で使用可能な高強度耐熱材料の開発が、高効率化の鍵を握っている。しかしながら、使用温度の上昇は材料の使用環境を苛酷にし、強度低下等の材料劣化が促進されるため、高温構造部材の長期信頼性を確保することが重要である。火力発電プラントの高効率化に関しては、石炭焚き超々臨界圧 (USC: Ultra Supercritical) 火力発電、及びコンバインドサイクル (CC: Combined Cycle) 発電が実用化されるとともに、石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle) の実証試験も進められている。本稿ではUSC火力発電用の高強度フェライト系耐熱鋼について、クリープ破断寿命評価と設計基準の見直し等について述べる。

2 高強度フェライト系耐熱鋼の開発

米国で1960年に運転を開始したEddystone 1号機では、主蒸気配管や高温高压部に316型オーステナイト鋼を使用し、649℃ (1200F) という高い蒸気温度条件を採用している。その結果、高温腐食や水蒸気酸化に加え、クリープ/クリープ疲労損傷や熱疲労き裂等、種々の解決すべき課題が見出された。とくにオーステナイト鋼は、フェライト鋼やNi基超合金に比べて熱伝導度が小さく熱膨張係数が大きいため、起動停止に伴い大きな熱応力が発生し、熱疲労き裂が発生しやすいことが重要な問題点として明らかになった。したがって、耐熱疲労特性を向上させ、大型厚肉部材の信頼性を向上させるためには、熱伝導度が大きく熱膨張係数が小さいことにより、耐熱疲労特性に優れているフェライト系耐熱鋼を採用した方が有利である。最新の超々臨界圧火力発電プラントでは、蒸気温度を従来の566℃から600℃程度にまで高め、

エネルギー効率の向上が図られているが、それを可能にしたのが、管寄せ (Header) 及び主 / 再熱蒸気管 (Main/Reheat Steam Pipe) 等の大型厚肉部材に使用可能な高強度フェライト系耐熱鋼の開発である。1980 年頃に米国で開発された改良 9Cr-1Mo 鋼 (ASME Grade 91/ 火 STPA28 系鋼) は、従来の 9Cr-1Mo 鋼 (ASME Grade 9/JIS STPA26 系鋼) に Nb、V、N を微量添加して、微細かつ高温安定性に優れた MX 型炭窒化物を析出させることにより、長時間クリープ強度特性が高められている。この材料を基本として Mo の一部を W で置換する、あるいは B を微量添加する等のさらなる改良が加えられ、火 STPA29 系鋼 (ASME Grade 92)、火 SUS410J3TP 系鋼 (ASME Grade 122) などの高強度フェライト系耐熱鋼が日本で開発されるとともに、欧州でも E911 (ASME Grade 911) が開発された。しかしながら、これら高強度フェライト系耐熱鋼では長時間クリープ強度の過大評価が懸念されており、国内外で多くの損傷事例が報告されている。そのため、長時間クリープ強度の再評価が行われ、設計基準である許容応力の見直し等が行われている。以下では高強度フェライト系耐熱鋼におけるクリープ破断寿命評価法と設計基準の見直し状況等について述べる。

3 クリープ破断寿命評価

火力発電プラントのボイラや圧力容器等の耐圧部材は、発電用火力設備の技術基準の解釈²⁾や米国機械学会 (ASME: American Society of Mechanical Engineers) ボイラ・圧力容器規格³⁾等の設計基準で材料ごとに規定された許容引張応力に基づいて設計・製作される。クリープが問題とならないクリープ温度領域未満の温度域では、許容引張応力は時間に依存しない引張強さと降伏強さ (耐力) で決定されるが、クリープ温度領域での許容引張応力は以下の最小値で決定される²⁾。

- ①当該温度において 1,000 時間に 0.01% のクリープを生ずる応力の平均値
- ②当該温度において 100,000 時間でクリープラプチャーを生ずる応力の最小値の 0.8 倍
- ③当該温度において 100,000 時間でクリープラプチャーを生ずる応力の平均値の 0.67 倍

上記の規定は、ASME ボイラ・圧力容器規格³⁾及び日本機械学会の発電用火力設備規格⁴⁾でも本質的に同等であり、一般に許容引張応力は①ではなく、100,000 時間でクリープラプチャーを生ずる応力で決定されることが多い。100,000 時間は 11 年 5 ヶ月に相当することから、高温構造部材の安全性・信頼性を確保するためには、10 年を超える長時間クリープ破断強度を精度良く予測評価することが重要である。

しかしながら、長時間クリープ試験データの取得にはコストと時間がかかるため、国家レベルあるいは学協会の活動等で実施されているケースが多い⁵⁾。我が国では国産の実用耐熱金属材料について、100,000 時間を超える長時間クリープ試験データを取得することを目的として、1966 年に科学技術庁金属材料技術研究所 (当時) で長時間クリープ試験が開始された。得られたクリープ試験データはクリープデータシートとして発行・公表されている。2001 年以降は独立行政法人物質・材料研究機構がクリープデータシートプロジェクトを引き継いで実施しており、これまでにクリープデータシートを 133 冊、長時間クリープ試験材の微細組織写真集を 7 冊、クリープ変形データ集を 2 冊発行している (2008 年 3 月末現在)。クリープデータシートプロジェクトの詳細については本誌掲載のアラカルト記事⁶⁾を参照されたい。

許容引張応力の策定に必要な長時間クリープ強度を実試験データのみで評価するには 10 年以上の長期間を要するため、時間-温度パラメータ (TTP: Time Temperature Parameter) 法^{7,8)}を用いて短時間クリープ試験データから予測評価するのが一般的である。TTP 法は時間-温度パラメータ、 $P(t_R, T)$ を用いて試験温度の違いを補償することにより、(1) 式のようにクリープ破断寿命 t_R が応力 σ のみの関数で表現されるという考えに基づいており、高温短時間試験データから低温長時間のクリープ破断寿命を予測する手法である。

$$P(t_R, T) = F(\sigma) \quad \dots\dots\dots (1)$$

応力の関数 $F(\sigma)$ としては一般に応力の対数、 $(\log \sigma)$ の多項式が使用されることが多い。また、TTP 法の時間-温度パラメータには多くの種類が提案されており、代表的なものを以下に示す。

$$\text{Larson-Miller}^{9)}: P = T(\log t_R + C) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Orr-Sherby-Dorn}^{10)}: P = \log t_R - Q/(2.3RT) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Manson-Succop}^{11)}: P = \log t_R + B \cdot T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Manson-Haferd}^{12)}: P = (\log t_R - \log t_a) / (T - T_a) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 T は絶対温度、 t_R はクリープ破断時間、 Q はクリープの活性化エネルギー、 R は気体定数、 C 、 B 、 t_a 、 T_a はいずれも定数である。Larson-Miller パラメータ (LMP: (2) 式) は焼戻しパラメータと同等であり、長時間クリープ寿命の予

測評価に最も広く使用されている。

これらのTTP法を用いることにより、異なる試験温度の長時間クリープ破断データから任意の温度における長時間クリープ強度を予測することができる。これらのTTP法では、解析に用いる短時間データと予測を行う長時間クリープ強度を、すべて同一の現象が生ずる単一の領域とみなしているが、破壊機構領域図^{13,14)}や変形機構領域図¹⁵⁾として報告されているように、材料のクリープ変形やクリープ破壊機構は温度・応力条件に依存して異なる。TTP法による長時間クリープ強度予測は、推定精度の点から3倍程度の長時間外挿が限界である⁷⁾とされているが、破壊機構が変化する場合や析出物等の組織変化に伴い強度や延性が大きく変化する場合には、3倍程度の外挿でも大きな誤差を生じることがある。そのため、外挿を行う際には、破断延性の変化や析出物の挙動等の情報を活用し、少なくとも見かけ上、同じ変形及び破壊機構が成立していることを確認することが望ましい⁷⁾。

前章で述べたように、高強度フェライト系耐熱鋼では長時間クリープ強度の過大評価が懸念されているため、長時間クリープ破断寿命の予測精度を向上させる手法が検討されている¹⁶⁻²¹⁾。Graphical method¹⁶⁾はヒート間のデータ数のばらつきやクリープ強度のばらつきを補正して、平均的な応力-破断時間関係を求めることにより、長時間クリープ強度の予測精度を向上させる手法である。応力-クリープ破断時間関係をヒートごとに評価して、所定のクリープ破断時間に対応する応力を求め、これを温度に対してプロットする。この結果から、所定のクリープ破断時間に対する応力の温度依存性を評価して、クリープ破断応力と温度の関係を求める。さらにこの結果から、各温度における応力-クリープ破断時間関係をプロットし、評価結果の妥当性を判断する。このように、一定温度における応力-クリープ破断時間関係とクリープ破断時間を一定にした場合のクリープ破断応力-温度関係を交互に図示することを繰り返して、評価精度を高める。主にドイツの研究者を中心に検討が行われ、クリープ破断強度評価に用いられているが、解析者の主観を排除できないという課題がある。

一方、クリープ変形機構や破壊機構の変化を考慮して、温度・応力条件等でクリープ破断データをグループ分けして、それぞれのグループごとにTTP法によるクリープ強度解析を行う手法が検討されている。「領域分割解析法」^{17,18)}は、応力-クリープ破断時間曲線の勾配が大きく変化する応力を境界条件として、クリープ破断データを高応力・短時間側と低応力・長時間側に分割して、クリープ破断強度を解析評価する。ここで、応力-クリープ破断時間曲線の勾配が大きく変化する応力は、その温度における0.2%耐力(ひずみ速度： $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)の1/2にほぼ相当するため、境界条件の設定が簡

便かつ容易である。これに対して丸山らは、温度加速によりクリープ変形機構が変化し、それが長時間クリープ強度を過大評価する原因であることを報告し、クリープ強度の温度依存性の変化を考慮してクリープ試験データを解析評価する「領域区分法」¹⁹⁾を提唱している。さらに、引張強さで規格化した応力を用いてクリープ破断寿命を解析評価する手法がWilshireとSharningによって提唱されている^{20,21)}。この場合でも、クリープ変形機構あるいは破壊機構の変化に対応して領域を分割し、それぞれの領域で材料定数に異なる値を採用する必要性が検討されている²¹⁾。

以上のように、TTP法による長時間クリープ寿命の予測評価法を高精度化するための検討が種々行われており、我が国では、上記の「領域分割解析法」による長時間クリープ強度の再評価結果に基づいて高強度フェライト系耐熱鋼の許容引張応力の見直しが行われた。そこで次章では、「領域分割解析法」によるクリープ破断寿命の予測評価と設計基準の見直し結果について述べる。

4 設計基準の見直し

第2章で述べた高強度フェライト系耐熱鋼は、クリープデータシートプロジェクトの開始後に開発・実用化された材料であるが、火力発電プラントの高効率化に欠かせない重要な材料である。そこで、プロジェクト開始当初に試験対象とした44材種の耐熱金属材料に加え、新規に開発された22材種の耐熱金属材料をクリープデータシートプロジェクトの試験対象材料としてサンプリングして、長時間クリープ試験を開始した。高強度フェライト系耐熱鋼については長時間クリープ強度の過大評価が懸念されていたことから、得られたクリープ試験データに基づいて長時間クリープ寿命予測法を検討した結果、前章で述べた「領域分割解析法」^{17,18)}を提唱した。

火SUS410J3系鋼のクリープ破断データをLMPを用いて解析評価した結果を図2に示す。点線で示したクリープ破断寿命曲線は、図中のすべてのクリープ破断データを解析に用いて得られた予測評価結果である。従来は、このようにできる限り多くのクリープ試験データを解析に用いて長時間クリープ強度の予測評価がなされてきたが、長時間クリープ強度を著しく過大評価する傾向が認められる。これに対して「領域分割解析法」^{17,18)}による予測評価結果を実線で示す。長時間クリープ強度を過大評価する原因は、応力とクリープ破断時間の関係が折れ曲がりを示すためである。そこで、「領域分割解析法」ではクリープ破断データを高応力・短時間領域と低応力・長時間領域に分割し、それぞれの領域のクリープ破断データを別々に解析評価する。いずれの解析手法でも

LMPを用い、応力の対数の二次式で回帰分析しているが、すべての試験データを一括解析した結果(点線)に比べて、領域分割解析法(実線)の方が試験データとの適合性が高い。

クリープ強度解析結果の妥当性を検証するため、解析結果に基づくクリープ破断時間の予測値を、実測のクリープ破断時間に対してプロットしたものを図3に示す。全試験データを一括解析した場合、予測結果の99%信頼範囲の幅が広く、予測精度が低いことに加え、長時間側になるのに伴い実測値を過大評価する程度が増大する。これに対して、領域分割解析法による予測結果は99%信頼範囲の幅が狭く、実測のクリープ破断時間を精度良く予測評価できる。

(財) 発電設備技術検査協会に設置された「高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術適合性調査委員会」で

は、平成16、17年度の2年間にかけて高強度フェライト系耐熱鋼の長時間クリープ強度の再評価を実施した。日本国内の公的研究機関や民間企業からクリープ試験データを収集し、長時間クリープ強度の解析評価法を検討した結果、「領域分割解析法」による予測評価結果が採用され、長時間クリープ強度の再評価結果が報告された^{22,23)}。この報告に基づいて、「発電用火力設備の技術基準の解釈」に規定されている高強度フェライト系耐熱鋼の許容引張応力が改定され、平成17年12月14日付²⁾で火SUS410J3系鋼の5鋼種について、さらに平成19年8月1日付²⁴⁾で火SCMV28系鋼及び火STPA29系鋼等の12鋼種について許容引張応力が引き下げられた。火SUS410J3系鋼と火STPA29系鋼の許容引張応力の改定結果をそれぞれ図4及び図5に示す。

高強度フェライト系耐熱鋼の長時間クリープ強度の再評価は日本国内のみならず海外でも同様に行われている。ASMEボイラ・圧力容器規格では、2006年8月4日付でASME Grade 92(火STPA29相当材)²⁵⁾及びASME Grade 122(火SUS410J3相当材)²⁶⁾の許容引張応力が、それぞれ図5及び図4と同等の値に引き下げられた。欧州クリープ共同委員会(ECCC: European Creep Collaborative Committee)はASME Grade 92の長時間クリープ強度の再評価を行った結果、1999年の報告よりも低く、我が国の評価結果と同等の再評価結果が2005年に報告されている²⁷⁾。

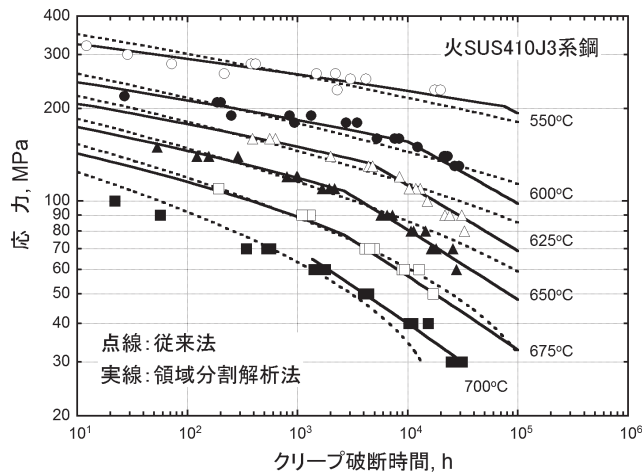


図2 従来法と領域分割解析法によるクリープ寿命予測結果の比較

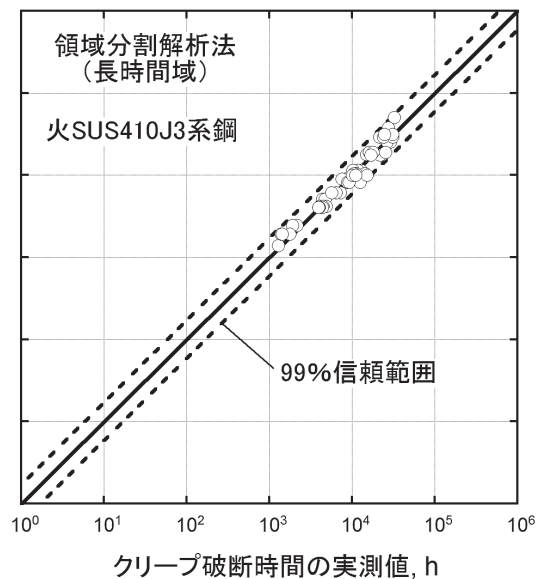
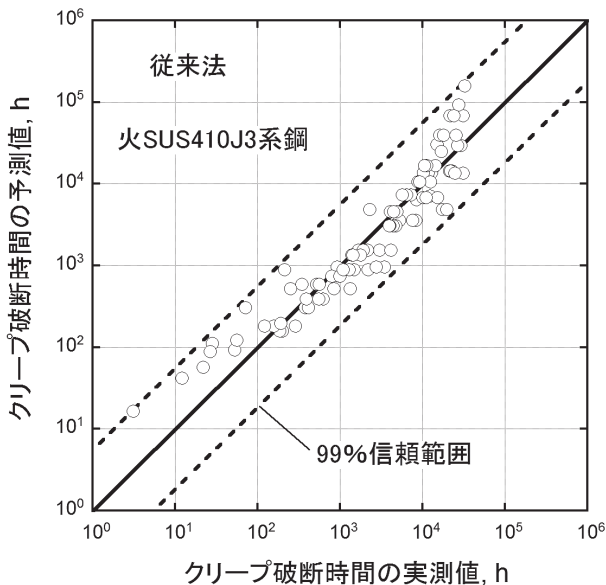


図3 従来法と領域分割解析法によるクリープ寿命予測結果と実測値との比較

5 まとめ

本稿では、長時間クリープ寿命予測法の概要と高精度化に関する最近の成果について述べた。また、最近の事例として、高強度フェライト系耐熱鋼に関する長時間クリープ強度の再評価と許容引張応力の見直しについても述べた。長時間クリープ強度の過大評価が短時間での損傷の重要な要因ではあるが、それ以外にも溶接熱影響により形成される微細結晶粒の領域で Type IV 破壊が発生するため、母材に比べてクリープ強度が著しく低下することも報告されている²⁸⁻³¹⁾。長時間クリープ強度の過大評価や Type IV 破壊によるクリープ強度の著しい低下は、高強度フェライト系耐熱鋼で顕著に認められる問題であり、それらが重畳することにより、従来の知見では予測できないような短時間での損傷事例を引き起こすこととなった。このように、従来技術の延長だけでは、新規開発材料の強度特性や経年劣化挙動を十分に評価することはできない。とくに材料信頼性に関する現象は時間に強く依存するため、問題が露見してから検討を開始したのでは迅速な対応は不可能である。新規開発技術を実機に適用する際には、あらかじめ材料信頼性に関わる検討を先行させ、実機部材で問題が発生する前に、起こりうる損傷等の発生を予測できるだけの知識を蓄積する体制の整備が重要である。それにより、最新の技術を有効かつ安全に実用化することが可能になる。米国エネルギー省が主導する第4世代原子炉や我が国の次世代高速増殖炉開発では、従来の軽水炉よりも稼働温度の高温化を図りエネルギー効率を向上させるとともに、60年という長期のプラント寿命を実現することが計画されている。高強度フェライト系耐熱鋼の適用に際して直面した問題とその解決に向けた経験は、今後のさらなる技術革新の普及促進に対しても、教訓として生かされるべきものと思われる。

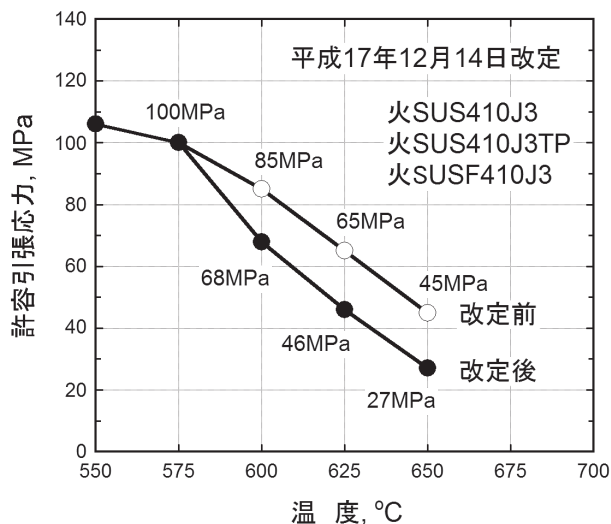


図4 火 SUS410J3 系鋼の許容引張応力の改定

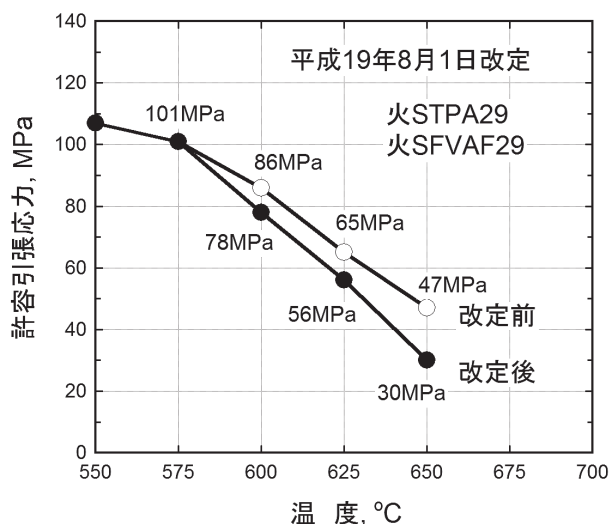


図5 火 STPA29 系鋼の許容引張応力の改定

すこととなった。このように、従来技術の延長だけでは、新規開発材料の強度特性や経年劣化挙動を十分に評価することはできない。とくに材料信頼性に関する現象は時間に強く依存するため、問題が露見してから検討を開始したのでは迅速な対応は不可能である。新規開発技術を実機に適用する際には、あらかじめ材料信頼性に関わる検討を先行させ、実機部材で問題が発生する前に、起こりうる損傷等の発生を予測できるだけの知識を蓄積する体制の整備が重要である。それにより、最新の技術を有効かつ安全に実用化することが可能になる。米国エネルギー省が主導する第4世代原子炉や我が国の次世代高速増殖炉開発では、従来の軽水炉よりも稼働温度の高温化を図りエネルギー効率を向上させるとともに、60年という長期のプラント寿命を実現することが計画されている。高強度フェライト系耐熱鋼の適用に際して直面した問題とその解決に向けた経験は、今後のさらなる技術革新の普及促進に対しても、教訓として生かされるべきものと思われる。

参考文献

- 1) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編 (2006)
- 2) 発電用火力設備の技術基準の解釈, 経済産業省原子力安全・保安院, NISA-234a-07-2, (2007), 3.
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2007 Edition, Section II, Mandatory Appendix 1, (2007)
- 4) 発電用火力設備規格 (2003年版), 第II章, 日本機械学会, (2003), 6.
- 5) 木村一弘: 鑄造工学, 76 (2004), 633.
- 6) 木村一弘, 山崎正義, 田淵正明: ふえらむ, 9 (2004), 816.
- 7) 藤田利夫, 門馬義雄, 松崎明博, 木原重光, 志賀正男, 笠原晃明: ISO6303 に準拠したクリープ破断データの外挿法の手引き (第1版), 日本鉄鋼協会編, 東京, (1983)
- 8) 横井信, 門馬義雄: 鉄と鋼, 65 (1979), 831.
- 9) F.R. Larson and J. Miller: Trans. ASME, 74 (1952), 765.
- 10) R.L. Orr, O.D. Sherby and J.E. Dorn: Trans. ASM, 46 (1954), 113.
- 11) S.S. Manson and G. Succop: ASTM, STP 174 (1956), 40.
- 12) S.S. Manson and A.M. Haferd: NACA, TN2890 (1953)
- 13) M.F. Ashby, C. Gandhi and D.M.R. Talpin: Acta Metall., 27 (1979), 699.
- 14) R.J. Fields, T. Weerasooriya and M.F. Ashby:

- Metall. Trans., 11A (1980), 333.
- 15) H.J. Frost and M.F. Ashby : Deformation Mechanism Maps, Pergamon Press, Oxford (1982)
 - 16) J. Granacher and M. Schwienheer : ECCC Recommendations 2001, Volume 5, Appendix D4 (2001)
 - 17) K. Kimura, H. Kushima and F. Abe : Proc. Int. Conf. on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, Orland, Florida, USA, Mar. 11-13, (2002)
 - 18) 木村一弘, 九島秀昭, 阿部富士雄 : 材料, 52 (2003), 57.
 - 19) K. Maruyama and J.S. Lee : Creep & Fracture in High Temperature Components - Design & Life Assessment Issues, ed. by I.A. Shibli, S.R. Holdsworth, G. Merckling, DEStech Publications, Lancaster, PA, USA, (2005), 372.
 - 20) B. Wilshire and P.J. Scharning : Scripta Mat., 56 (2007), 701.
 - 21) B. Wilshire and P.J. Sharning : Proc. CREEP8, 8th Int. Conf. on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures, July 22-26, 2007, San Antonio, USA, (2007)
 - 22) 平成 16 年度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報告書, 発電設備技術検査協会, (2005)
 - 23) 平成 17 年度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報告書, 発電設備技術検査協会, (2006)
 - 24) 発電用火力設備の技術基準の解釈, 経済産業省原子力安全・保安院, NISA-234c-05-8, (2005), 67.
 - 25) ASME Code Case 2179-6, (2006)
 - 26) ASME Code Case 2180-4, (2006)
 - 27) ECCC DATA SHEETS 2005, European Creep Collaborative Committee, (2005)
 - 28) S.J. Brett, D.L. Oates and C. Johnston : Creep and Fracture in High Temperature Components - Design and Life Assessment Issues, ed. by I.A. Shibli, S.R. Holdsworth, G. Merckling, DEStech Publications, Inc., Lancaster, PA, (2005), 563.
 - 29) J.A. Francis, W. Mazur and H.K.D.H. Bhadeshia : Mater. Sci. Tech., 22 (2006), 1387.
 - 30) M. Tabuchi and Y. Takahashi : Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Vancouver, Canada, PVP2006-ICPVT11-93350, (2006), 91.
 - 31) Y. Takahashi and M. Tabuchi : Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Vancouver, Canada, PVP2006-ICPVT11-93488, (2006), 122.
- (2008 年 9 月 10 日受付)