

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360323

研究課題名(和文) 低転位密度化によるフェライト耐熱鋼の長寿命化

研究課題名(英文) Life extension of ferritic creep resistant steel by reduced dislocation density

研究代表者

木村 一弘 (KIMURA KAZUHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・データシートステーション・ステーション長

研究者番号：30354236

研究成果の概要(和文)：既存の高強度フェライト耐熱鋼はクリープ変形を担う転位を多量に含むため、転位密度の低いフェライト組織鋼について、高強度フェライト耐熱鋼の耐用温度を超える 700 及び 750°C におけるクリープ強度向上の可能性を検討した。その結果、700 及び 750°C において既存の高強度フェライト耐熱鋼よりも高いクリープ強度を得ることが可能であることを明らかにするとともに、強化因子である第二相の析出を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Existing high strength ferritic creep resistant steels contain large amounts of dislocations, therefore, a potential of strengthening at the elevated temperatures of 700 and 750°C which is above the upper limit of usable temperature range for existing steels has been investigated on ferritic steels contain reduced dislocation density with ferrite matrix instead of tempered martensite. It has been revealed on ferritic steels that the higher creep strength is obtained by reducing dislocation density than the existing high strength ferritic creep resistant steels at 700 and 750°C, and precipitation behavior of second phase which is a strengthener has been demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

研究分野：構造材料、高温強度、材料信頼性

科研費の分科・細目：材料工学、構造・機能材料

キーワード：耐熱鋼、フェライト鋼、転位、クリープ、長寿命

1. 研究開始当初の背景

電力は現代社会に必要な不可欠なエネルギーであり、我が国ではその約 55% を火力発電に依存している。しかしながら、火力発電プラントにおける石油、石炭、天然ガス等の化石エネルギーの燃焼は大量の二酸化炭素ガスを排出し、その量は我が国全体の排出量の約 1/3 にも相当する。そのため、火力発電プラントのエネルギー効率向上が求められている。1980 年頃に米国で開発された改良 9Cr-1Mo 鋼に代表される高強度フェライト

耐熱鋼は、超臨界圧火力発電プラントの蒸気温度と蒸気圧力を高めた超々臨界圧火力発電プラントの建設を可能とし、蒸気温度を 566°C から 600°C 前後にまで高めるのに貢献した。

これにより発電のエネルギー効率は向上したが、クリープ強度と耐酸化性の観点から、高強度フェライト耐熱鋼を利用した場合の蒸気温度の上昇は 620°C 前後が限界と見なされている。更なるエネルギー効率向上を目指して蒸気温度を 700°C 以上に高めるための技

術開発が世界中で活発に行われているが、700°C以上の蒸気温度を実現するためには、高強度フェライト耐熱鋼の代わりに Ni 基超合金、あるいはオーステナイト耐熱鋼の使用が必要不可欠と考えられている。しかし、Ni 基超合金やオーステナイト耐熱鋼はフェライト耐熱鋼に比べて極めて高価であるばかりでなく、熱伝導度が小さく、熱膨張係数が大きいと、頻繁な起動停止に伴う熱疲労特性に劣るという致命的な欠点を有する。そのため、従来よりも煩雑かつ高度な解析能力を必要とする応力解析に基づく設計 (Design by Analysis) が求められる。したがって、安価で熱疲労特性に優れたフェライト耐熱鋼のクリープ強度と耐酸化性を飛躍的に向上させることができれば、火力発電プラントのエネルギー効率を容易に向上させることができる。

2. 研究の目的

既存の高強度フェライト耐熱鋼とは異なる強化機構を活用して、650°Cで既存の高強度フェライト耐熱鋼よりも優れたクリープ強度を有するとともに、耐酸化性も大幅に向上させた高 Cr フェライト耐熱鋼を開発し、国内外の基本特許を取得している。そこで本研究では、高 Cr フェライト耐熱鋼の 700°C 以上の高温領域におけるクリープ強度特性を調べ、フェライト耐熱鋼によるさらなる蒸気温度向上の可能性を探索する。

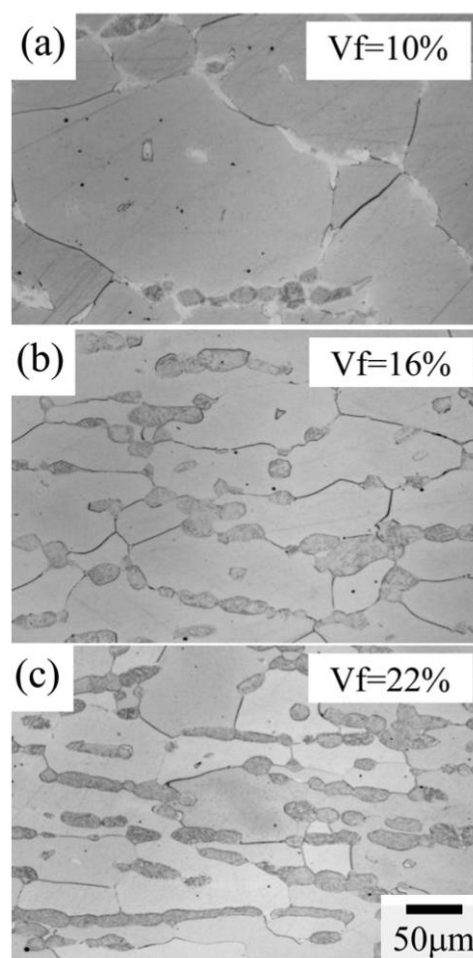
3. 研究の方法

本研究では、フェライト組織とした 15Cr 耐熱鋼に関するこれまでの検討結果を基にして、クリープ強度と衝撃特性のバランス向上を意図した供試鋼 3 鋼種を成分設計し、700 および 750°C におけるクリープ寿命延長の効果を調べる。また、シャルピー衝撃特性を調べるとともにクリープ試験材の組織解析を行い、15Cr 耐熱鋼の実用化に必要な諸特性を明らかにするとともに、クリープ寿命延長の機構を解明する。さらに、焼戻しマルテンサイト組織を有する既存の高強度フェライト耐熱鋼、およびオーステナイト耐熱鋼とクリープ強度特性を比較検討し、フェライト耐熱鋼のクリープ寿命延長の可能性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 先行研究の結果を参考にして、クリープ強度と衝撃特性のバランス改善を意図した供試材 3 鋼種を成分設計し、各鋼種 50kg のインゴットを溶製した。供試鋼の標準化学組成は 0.05C-15Cr-2Co-1Mo-6W-0.2V-0.05Nb-0.04N-0.003B (mass%) であり、これに Ni を 0.86、1.41 及び 2.15 mass% の 3 水準で添加した。インゴットは熱間圧延により厚さ約

15mm の板に成形し、鑄造及び加工による欠陥がないことを超音波探傷により確認した。供試材は、1200°C で 30 分保持後、水冷の溶体化熱処理を行った後、試験に供した。供試材の溶体化熱処理後の光学顕微鏡組織を図 1 に示す。なお、写真中に記載した Vf は、マルテンサイト組織の体積率である。供試材はいずれも第二相のほとんど認められない溶体化組織であるが、粗大なフェライト粒と微細なマルテンサイト相の二相組織である。Ni 添加量の増加に伴いマルテンサイト相の体積率は約 10% から約 22% に増加するとともに、フェライト粒のサイズが減少する。



(a) 0.86Ni, (b) 1.41Ni, (c) 2.15Ni

図 1 供試鋼の溶体化熱処理後の光学顕微鏡組織

(2) 供試材について、室温から 800°C の温度範囲で高温引張試験を行って求めた引張強さと 0.2% 耐力を図 2 に示す。400°C 以下の低温域では、Ni 量の高い 2.15Ni 鋼の 0.2% 耐力は他の鋼種よりも若干低い傾向を示すが、その程度はわずかであり、600°C 以上の高温域では、Ni 量の違いによらず、0.2% 耐力は同程度である。Ni 量の増加に伴い室温の引張強さが増大するが、これは細粒化の効果によるものと推察される。しかし、200°C 以上では、

引張強さに及ぼす Ni 量の影響はほとんど認められない。

供試材について、室温から 800°Cの温度範囲で高温引張試験を行って求めた破断伸びと破断絞りを図 3 に示す。室温における破断延性は低いが、200°C以上では破断伸びは 20%以上、破断絞りは 50%以上の値を示し、600°C以上ではさらに破断延性が向上する。また、高 Ni 材ほど破断延性が高い傾向が認められ、破断延性の Ni 量依存性は室温で最も顕著に認められる。高 Ni 材の方が高い破断延性を示すのは、結晶粒径が小さいためであると推察される。

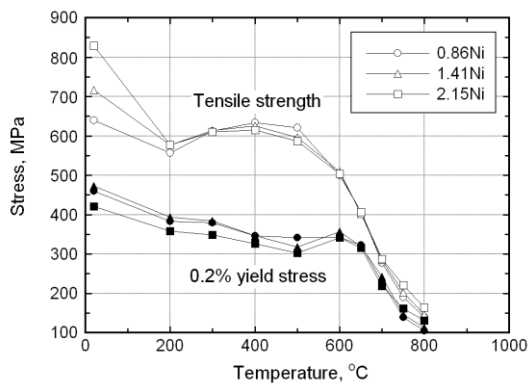


図 2 供試鋼の引張強さと 0.2%耐力の温度依存性

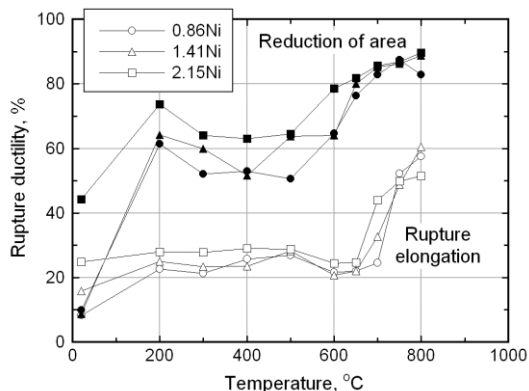


図 3 供試鋼の破断伸びと破断絞りの温度依存性

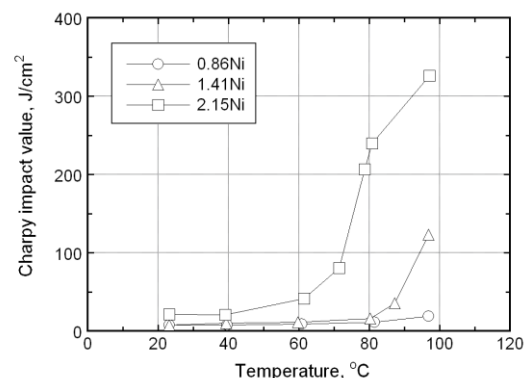


図 4 供試鋼のシャルピー衝撃値の温度依存性

(3) 供試材 3 鋼種のシャルピー衝撃値を図 4 に示す。室温ではいずれの鋼種もシャルピー衝撃値は小さいが、試験温度の上昇に伴いシャルピー衝撃値は上昇する傾向を示し、2.15Ni 鋼の延性脆性遷移温度は約 75°Cである。1.41Ni 鋼は 80°Cを超えるとシャルピー衝撃値が上昇する傾向を示し、延性脆性遷移温度は 2.15Ni 鋼よりも約 20°C高いと推定される。一方、最も Ni 添加量の少ない 0.86Ni 鋼は、100°C近傍でもシャルピー衝撃値が大きく向上する傾向は認められない。

(4) 供試材 3 鋼種の 650°Cにおける応力 - クリープ破断時間曲線を図 5 に示す。図中には、フェライト耐熱鋼の Grade 92 とオーステナイト系耐熱鋼である SUS316 のクリープ破断データを併せて示す。Grade 92 は焼戻しマルテンサイト組織を有する高強度フェライト系耐熱鋼の中で最高レベルのクリープ強度を有する材料であるが、本研究の供試材は 650°C、約 1,000h までの時間域において、Grade 92 の約 2 倍のクリープ破断強度を有するとともに、オーステナイト系耐熱鋼である SUS316 よりも高いクリープ破断強度を示す。供試材 3 鋼種の 700°Cにおける応力 - クリープ破断時間曲線を図 6 に示す。図 5 と同様、Grade 92 と SUS316 のクリープ破断データを図中に併せて示す。供試材は、Ni 量が多い鋼種ほどクリープ破断時間が長い。また、本研究の供試材は 700°Cにおいても Grade 92 の約 2 倍のクリープ破断強度を有する。さらに、700°Cで約 20,000h までの時間域では、オーステナイト系耐熱鋼である SUS316 よりも高いクリープ破断強度を示す。供試材 3 鋼種の 750°Cにおける応力 - クリープ破断時間曲線を Grade 92 及び SUS316 のクリープ破断データと併せて図 7 に示す。700°Cの場合と同様、750°Cでも Ni 量が多い 2.15Ni 鋼が最も長いクリープ破断時間を示すが、いずれの供試材もクリープ破断強度は Grade 92 の約 2 倍の高い値を示す。また、

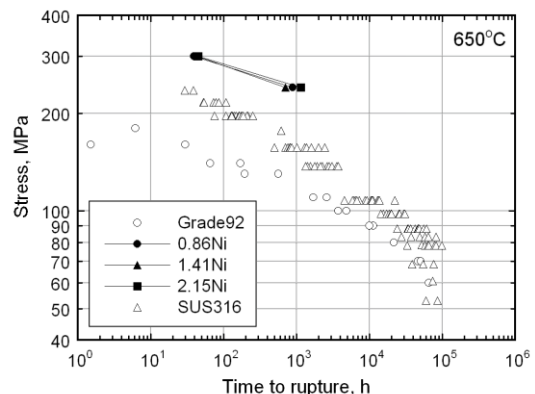


図 5 供試鋼と Grade 92 及び SUS316 の 650°Cにおけるクリープ破断強度の比較

750°Cで約 10,000h までの時間域では、オーステナイト系耐熱鋼である SUS316 と同等以上のクリープ破断強度を示す。
 以上のことから、焼戻しマルテンサイト組織を有する既存の高強度フェライト耐熱鋼とは異なり、低転位密度化の手法を用いて、700°Cを超える高温域でのクリープ寿命を延長できることを明らかにした。

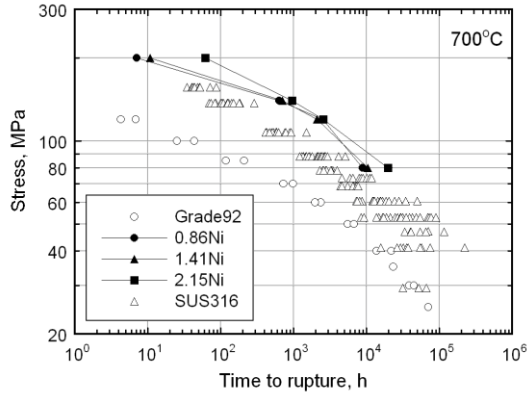


図6 供試鋼と Grade 92 及び SUS316 の 700°Cにおけるクリープ破断強度の比較

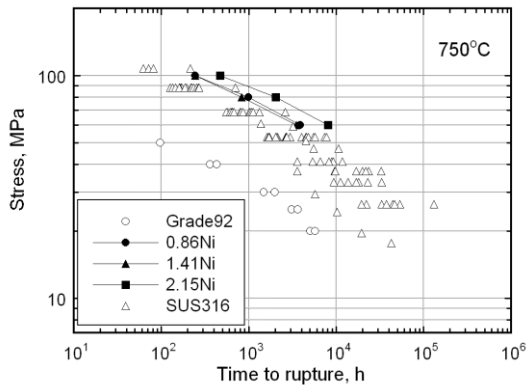


図7 供試鋼と Grade 92 及び SUS316 の 750°Cにおけるクリープ破断強度の比較

(5) 供試材のクリープ試験前の溶体化熱処理状態 (As ST) とクリープ破断後の硬さを、クリープ破断時間に対して整理して図8に示す。クリープ破断試験片はクリープ試験前よりも高い硬さを示すが、クリープ破断時間の増加に伴い硬さは低下する傾向を示す。また、硬さの値には試験温度と Ni 量依存性が認められ、試験温度が低く、Ni 量が多いほど、硬さの値は大きい。高 Ni の 2.15Ni 鋼は 750°C の約 8,000h クリープ破断材でも HV290 以上の高い値を示すが、低 Ni の 0.86Ni 鋼の 750°C、約 4,000h クリープ破断材の硬さはクリープ試験前の溶体化状態と同程度の HV236 である。700 及び 750°C では高 Ni 鋼ほど長いクリープ破断寿命を示すのは、硬さの違いと関連すると考えられる。

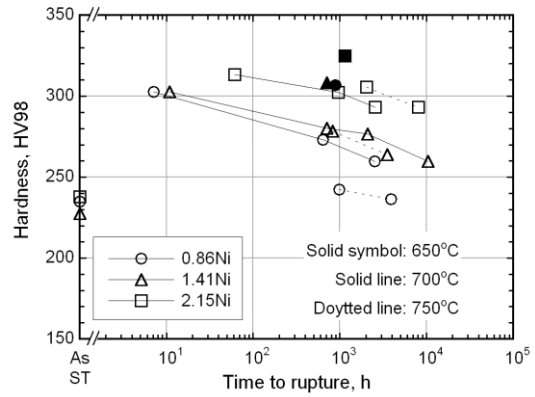
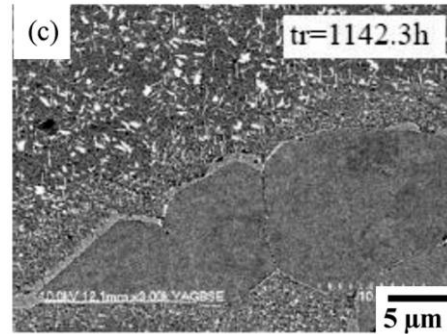
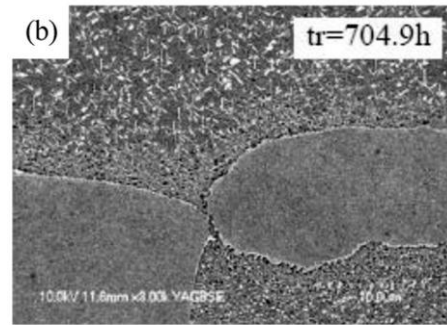
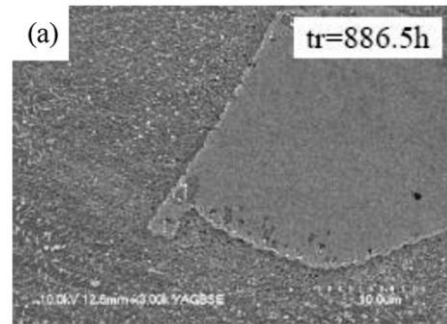


図8 供試鋼の溶体化熱処理状態 (As ST) の硬さとクリープ破断後の硬さ変化



(a) 0.86Ni, (b) 1.41Ni, (c) 2.15Ni

図9 650°C-240MPaでクリープ破断した供試材3鋼種の走査電子顕微鏡 (SEM) 組織

硬さの増加が最も大きな 650°C、240MPa クリープ破断材 3 鋼種の走査電子顕微鏡 (SEM) 組織を図9に示す。フェライト相内に多量の第二相が析出しており、第二相の析出が少ないマルテンサイト相とフェライト相の粒界及びその近傍に比較的微細な第二相が多数析

出している。この第二相は主に Fe, Cr, W および Mo から構成される金属間化合物 (Laves 相, χ 相及び μ 相) であり, 高 Ni 鋼ほど析出量が多い傾向が認められた。したがって, クリーブ試験後の硬さ増加は金属間化合物の析出に起因し, 高 Ni 鋼ほどクリーブ破断時間が長い理由は, 金属間化合物の析出挙動と密接に関連すると推察した。

以上の結果から, 本研究では低転位密度化による長寿命化という新しい強化機構と金属間化合物の析出強化により, 700°C を超える高温においても, フェライト耐熱鋼のクリーブ強度をオーステナイト耐熱鋼の SUS316 と同等以上に向上できる可能性を見出した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① K. Kimura, Y. Toda, H. Kushima and K. Sawada, Creep Strength of High Chromium Steel with Ferrite Matrix, Int. J. Pressure Vessels and Piping, 査読有, Vol.87, Issue 6, 2010, pp.282-288.

[学会発表] (計 3 件)

- ① M. Shibuya, Y. Toda, K. Sawada, H. Kushima and K. Kimura, Effects of Nickel and Cobalt Addition on Creep Strength and Microstructure of the Precipitation-Strengthened 15Cr Ferritic Steels, 9th Liège Conf. on Materials for Advanced Power Engineering, 平成 22 年 9 月 27 日, Liège, Belgium
- ② 渋谷直哉, 戸田佳明, 澤田浩太, 九島秀昭, 木村一弘, 析出強化型 15Cr フェライト鋼のクリーブ強度と微細組織に及ぼす Ni 添加の影響, 日本鉄鋼協会第 159 回春季講演大会, 平成 22 年 3 月 30 日, つくば
- ③ K. Kimura, Y. Toda, H. Kushima and K. Sawada, Creep Strength of High Chromium Steel with Ferrite Matrix, 2nd Int. ECCO Conf. Creep & Fracture in High Temperature Components - Design & Life Assessment, 平成 21 年 4 月 22 日, Dubendorf, Switzerland

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称: 耐熱性精密部品用フェライト系 Cr 鋼とその製造方法, および耐熱性精密部品とその製造方法

発明者: 木村一弘, 戸田佳明, 九島秀昭, 澤田浩太

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/059453

出願年月日: 22 年 6 月 3 日

国内外の別: 国外

名称: 化学処理装置用耐熱部品とその製造方法

発明者: 木村一弘, 戸田佳明, 九島秀昭, 澤田浩太

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/059450

出願年月日: 22 年 6 月 3 日

国内外の別: 国外

名称: 化学処理装置用の耐熱部品

発明者: 木村一弘, 戸田佳明, 九島秀昭, 澤田浩太

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2009-149579

出願年月日: 21 年 6 月 24 日

国内外の別: 国内

名称: 耐熱性精密部品

発明者: 木村一弘, 戸田佳明, 九島秀昭, 澤田浩太

権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2009-143774

出願年月日: 21 年 6 月 17 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 一弘 (KIMURA KAZUHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・データシートステーション・ステーション長

研究者番号: 30354236

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

戸田 佳明 (TODA YOSHIKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・主任研究員

研究者番号: 60343878

澤田 浩太 (SAWADA KOTA)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性センター・主任研究員

研究者番号: 00354225

九島 秀昭 (KUSHIMA HIDEAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・データシートステーション・主席エンジニア

研究者番号: 20354235

渋谷 直哉 (SHIBUYA MASACHIKA)
独立行政法人物質・材料研究機構・データ
シートステーション・特別研究員
研究者番号：2037533