



限界設計を目指した耐熱構造材料の設計規格の高度化

(13555182)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究 (B) (2))研究成果報告書

平成16年5月

研究代表者 丸 山 公 一

(東北大学大学院環境科学研究科 教授)

限界設計を目指した耐熱構造材料の設計規格の高度化

(13555182)

平成 13 年度～平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究 (B) (2))研究成果報告書

平成 16 年 5 月

研究代表者 丸 山 公 一

(東北大学大学院環境科学研究科 教授)

## はしがき

この報告書は、平成13～15年度に文部省科学研究費の補助金で行われた研究「限界設計を目指した耐熱構造材料の設計企画の高度化」に関する成果をまとめたものである。

### 研究の背景

地球環境保全、省エネルギーの要請から、火力発電プラントなどの高温機器や構造物をより高温・高応力で、より長期間使うことが必要となっている。このような条件では材料の経年劣化が促進され、材料を安全に使用するための支援システム(材料規格、残寿命評価技術など)の整備が不可欠である。

科学技術基本計画の基礎となる材料産業技術戦略の報告書で、「我が国は多くの材料データを保持するが、それを利用するための標準(材料設計規格)の提案が少ない」、「我が国は限界設計の能力に劣る」などが指摘されている。我が国の高温構造材料の設計規格は ASME 規格に準拠しており、完璧なものではない。より妥当な規格の設定と限界設計能力の向上に向けて、我が国独自の材料設計基準の確立が必要である。

高温機器の限界設計(安全裕度の少ない条件での使用)では、事故の予知と回避が不可欠である。事故を回避し、安全・安心な社会を確立するために、損傷の計測、残寿命の評価技術などの向上が材料産業技術戦略で強く望まれている。材料の劣化が時間とともに進行する高温クリープでは、長時間後に発生する事故を未然に予知するという大きな技術課題を解決しなければならない。

我が国は、高温プラントの設計・運転基準を国外からの導入技術に頼っている。そして、我が国が使っている ASME 規格よりドイツの DIN 規格の方が同じ性能の材料に対して高い許容応力を設定でき、プラントを安価に建設できる。この材料設計規格という手続き上の原因で、我が国の素材産業やプラントメーカーは、高い技術力があるにも関わらず、特に欧州では、産業競争力で劣勢に立っている。この劣性を解消するために、我が国独自の合理的な設計規格の策定が強く望まれている。

### 研究目的

クリープ域で使う高温構造材料には、過度(1%が目安)な変形をしないことと、破壊しないことが要求される。そして、設計寿命  $10^5$ h のプラント部材は、次の2つの応力 a)と b)の小さいものを設計許容応力とする。a)  $10^5$ h で 1%クリープ変形する最小応力。b)米国 ASME 規格では  $10^5$ h クリープ破断応力の 2/3, ドイツ DIN 規格では  $2 \times 10^5$ h 破断応力。このように材料の設計許容応力は、材料強度×安全係数という形で決められる。これらの許容応力を決めるには、長時間の材料性能を評価・予測しなければならない。安全係数は材料性能の不確実さに由来する部分も大きい。そして、不確実さを小さくすれば、安全係数が低減され、許容応力を高く設定できる。

限界設計では可能な限り小さい安全係数で材料を使用する。その結果、より厳しい条件(高温, 高応力)で材料が使える、高い許容応力を設定でき、材料の産業競争力が高まる。その反面、破損の危険が増し、より高度なリスク(事故)回避技術が不可欠となる。このリスク回避でも長時間挙動の高精度評価や破損の予知が不可欠である。

長時間挙動の評価・予測に影響する主因子には次の 3 つがある。長時間挙動の外挿精度 (1)構成式などの外挿手段に起因する技術的誤差と、2)外挿限界を越えた外挿による必然的誤差、3)材料間差(同じ SUS304 という規格材料でも、性能にばらつきがある)。安全係数の低減には、これらの誤差、不確実性の低減が必要である。

以上の観点から本研究では、次のことを目標として研究を行う。a)長時間強度の推定精度を上げ、長時間強度の不確実性を減らす。b)非破壊的に残寿命を評価する手法を高度化し、事故を未然に予知・回避する。そのためには、次のことが必要である。

a) 長時間挙動評価法の開発

b) 長時間挙動評価を阻害する因子の抽出と克服

なお本研究では、長時間クリープデータが蓄積されており材料としての使用実績が多い耐熱鋼を中心として研究を行った。

## 研究成果

本研究の結果、次の成果を得た。

### I. 高温長時間クリープ変形・破壊挙動の評価・予測手法

安全率を大きく取らなければならない材料性能のばらつきの原因を、316 鋼 NIMS クリープデータを例として検討し、以下の成果を得た。

a) 長時間挙動の外挿精度： 短時間試験結果を外挿して長時間挙動を予測する

際に最も問題となるのは、クリープ破断時間の温度依存性が変化することである。9ヒートの鋼全てで、活性化エネルギーの変化する複数の領域が確認された。そして、この領域の変化は、破壊機構変化と対応することが明らかになった。なお、この活性化エネルギー変化を無視する従来の解析手法では、材料性能を過大評価することになる。

- b) 材料間差：長時間側で、粒界脆性破壊のために、クリープ強度が低下する。この脆化は、 $\sigma$ 相の粒界析出と関係し、材料毎に $\sigma$ 相の析出速度が異なる。そのため、各材料のクリープ強度は、特に低応力・長時間側で顕著な差を示す。なお、この材料間差を無視して複数ヒートのデータを纏めて解析すると、弱い材料の長時間性能を過大評価することになる。
- c) 材料性能のばらつきに対する各因子の寄与：材料性能のばらつきを生む種々の原因を検討した結果、ヒート間差、外挿に伴う誤差と材料性能本来の不確実性が、それぞれ3:3:2の割合で寄与していることが分かった。

## II. 先進高 Cr フェライト鋼母材での早期破断

安全率を大きく取らなければならない第2の原因である先進高 Cr フェライト鋼の長時間での強度低下(予測より早期に破壊する)の原因を検討し、以下の成果を得た。

- a) 先進高 Cr フェライト鋼では、長時間側で、破断時間の活性化エネルギーが低下する。そのため、短時間側の大きな活性化エネルギーを使って予測した値に比べて、実際の材料は早期破断することがある。そして、この活性化エネルギー変化の原因を解明することが、長時間挙動推定の精度向上に不可欠である。
- b) 本材料は、短時間側では粒内破壊し、大きな延性を示す。これに対して、長時間側では、粒界破壊へ遷移し、小さいひずみ量で脆性的に破壊する。この破断ひずみの低下が、見かけの活性化エネルギーの低下と早期破断の原因である。
- c) W 含有高 Cr フェライト鋼では、粒界部に Laves 相が析出し、粗大化する。粒界破壊はこの Laves 相析出物を起点として発生する。そして、Laves 相が十分な大きさに成長することが早期破断開始の目安となる。
- d) 本材料の長時間強度の推定精度を向上させ、限界設計を可能にするには、Laves 相の成長、粒界ボイドの発生・成長等に関するデータベースを整備し、クリープ挙動変化を事前に予期できるようにしておく必要がある。

## III. 先進高 Cr フェライト鋼溶接熱影響部での早期破断

安全率を大きく取らなければならない第3の原因である先進高 Cr フェライト鋼のタイプIV破壊(溶接熱影響部で予測より早期に破壊する)の原因を検討し、以下の成果を得た。

- a) タイプIV破壊は低応力・長時間クリープ条件で出現する。タイプIV破壊の発生にともなって、延性が低下し、クリープ破断時の断面収縮率は10%程度となる。この条件での溶接継手のクリープ破断時間は、母材に比べて1桁程度短くなる。
- b) クリープキャビティは粗大な $M_{23}C_6$ 炭化物粒子と母相の界面に発生し、結晶粒界に沿って成長する。このキャビティはクリープ変形に誘起されて成長する。
- c) 2相HAZ部は、 $AC_1$ と $AC_3$ 温度の間の $\alpha+\gamma_2$ 相域に加熱される。この2相HAZでは、炭化物固溶度の低いフェライト( $\alpha$ )粒が多く残っており、しかも高温に加熱されるため、溶接時に $M_{23}C_6$ 粒子が最も早く粗大化する。しかも2相HAZ部は結晶粒径が小さく、クリープ変形抵抗が低く、他の部分より大きなひずみが蓄積される。
- d) 上記の原因により、タイプIVクリープ破壊は2相HAZ部に発生し、クリープキャビティを連結しながら2相HAZ部を成長する。
- e) タイプIV破壊の予知や抑制には、 $M_{23}C_6$ 炭化物の成長に注目する必要がある。

## 研究組織

研究代表者：丸山 公一（東北大学大学院環境科学研究科 教授）

研究分担者：阿部 富士雄（独立行政法人 物質・材料研究機構・フロンティア構造材料研究センター評価ステーション第3ユニット）

研究分担者：鈴木 真由美（東北大学大学院環境科学研究科）

## 交付決定額(配分額)

	直接経費	間接経費	合計
平成 13 年度	8, 100千円	0千円	8, 100千円
平成 14 年度	3, 900千円	0千円	3, 900千円
平成 15 年度	1, 600千円	0千円	1, 600千円
計	13, 600千円	0千円	13, 600千円

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. “Strengthening Mechanisms of Creep Resistant Tempered Martensitic Steel”  
K. Maruyama, K. Sawada and J. Koike  
ISIJ International, 41 (2001), No.6, 641-653.
2. “高温クリープ研究の現状と課題”  
丸山 公一  
金属, 71 (2001), No.9, p.899-902.
3. “耐熱鋼分野の材料技術戦略”  
丸山公一  
まてりあ(日本金属学会報), 40 (2001), No.5, p.488-489.
4. “9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb 鋼の長時間クリープ破壊挙動”  
李在勝, 丸山公一  
材料とプロセス, 16 (2003), No.3, p.?
5. “Correlation between premature failure and Laves phase growth in  
9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb steel”  
J.S.Lee, K.Maruyama  
Proceedings of 7<sup>th</sup> Workshop on the Ultra-Steel, June 24-25, 2003, Tsukuba,  
Japan, (2003), p.504-505.
6. “Mod.9Cr-1Mo 鋼の溶接部でのキャビティ発生機構” October  
李在勝, 丸山公一, 野中勇, 伊藤拓哉  
材料とプロセス, 16 (2003), No.6, p.1575.
7. “Mod.9Cr-1Mo 鋼の溶接熱影響部でのキャビティ発生機構”  
李在勝, 丸山公一, 野中勇, 伊藤拓哉  
日本学術振興会第 123 委員会報告, 44 (2003), No.3, p.249-254.  
November
8. “Microstructural Characterization of Type IV Failure in Weldment of a Mod.  
9Cr-1Mo Steel”  
J. S. Lee, K. Maruyama, I. Nonaka and T. Ito

Risk, Economy and Safety, Failure Mechanism and Analysis – Failure 2004,  
Edited by R.K. Penny, EMAS Publishing Ltd. ., (2004), p.211-223.

9. “Mod.9Cr-1Mo 鋼の熱影響部内でのキャビティ発生機構”  
李在勝, 野中勇, 伊藤拓哉, 丸山公一  
材料とプロセス, 17(2004), No.3, p.483
  
10. “Correlation between Premature Failure and Laves Phase Growth in  
9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb Steel”  
J.S. Lee and K. Maruyama  
Proceedings of the Second International Conference on Advanced Structural  
Steels (ICASS2004), April 14-16, 2004, Shanghai, China, (2004), p.838-842.
  
- (2) 招待講演
1. “安全率・許容応力設定調査 – クリープ域での許容応力評価の問題点”  
丸山公一  
材料リスク情報プラットフォーム開発研究会, 2002年3月18日, 東京工業大学
  
2. “State-of-the-Art of Heat Resistant Steel Technology in Japan and Prospects for the  
21st Century”  
K. Maruyama  
The First International Conference on Advanced Structural Steels, May 22-23,  
2002, Tsukuba
  
3. “クリープ構成式としての $\Omega$ 法の利点と課題”  
丸山公一  
材料リスク情報プラットフォーム開発研究会, 2003年3月10日, 未踏科学技術協  
会, 東京
  
4. “Microstructural Characterization of Type IV Failure in Weldment of a Mod.  
9Cr-1Mo Steel”  
J. S. Lee, K. Maruyama, I. Nonaka and T. Ito  
The 6<sup>th</sup> International Symposium on Risk, Economy and Safety, Failure  
Mechanism and Analysis, March 8-12, 2004, Cape Town, South Africa.
  
5. “安全率・許容応力設定調査報告 – 高温長時間強度の評価とその課題”

丸山公一, 木村一弘, 中島英治, 阿部富士雄, 増山不二光  
日本金属学会春期大会, 2004年3月30日-4月1日, 東京工業大学

(3) 出版物

1. “2章8節 クリープ”

丸山公一

設備管理技術事典, 大島栄次監修, 産業技術サービスセンター, (2003),  
p.178-186. July

# 研究 成 果 論 文 集

## 1) 高温長時間クリープ変形・破壊挙動の評価・予測手法

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。