JAEA-Research 2007-091



異常高温時における SUS304 のクリープ強度評価

Evaluation of Creep Strength on SUS304 under Off-Normal Over-Heating

加藤 章一 長谷部 慎一 吉田 英一

Shoichi KATO, Shinichi HASEBE and Eiichi YOSHIDA

大洗研究開発センター 技術開発部

Technology Development Department Oarai Research and Development Center February 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(http://www.jaea.go.jp/index.shtml) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319–1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

異常高温時における SUS304 のクリープ強度評価

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 技術開発部 加藤 章一、長谷部 慎一、吉田 英一

(2007年12月17日受理)

高速炉の確率論的安全評価の対象の一つとして、炉停止後の崩壊熱除去機能喪失事象が挙げら れている。本研究では、このようなシビアアクシデントの評価における構造材料の強度評価に資 することを目的として、高温での SUS304 のクリープ強度データを取得し、現行の材料強度基準 (以下、「BDS」)に採用されているクリープ破断式の 825℃以上の適用性評価を実施した。

得られた成果の概要は、以下のとおりである。

- (1) SUS304 について、800℃、850℃及び900℃の高温域における 153.3h~4117.0h の破断データ 42 点を取得した。
- (2) 800℃~900℃のクリープ破断強さは、材料ヒートによるばらつきが認められたが、SUS304の 現行 BDS のクリープ破断式を用いて、高温域まで外挿して求められる値と比較するとファク ター5 のばらつき内であった。
- (3) 本試験で得られた3材料ヒートのSUS304のクリープ破断伸び及び絞りからは、延性低下の傾向は認められなかった。
- (4)本試験で得られた高温域データの標準偏差は、現行 BDS のクリープ破断式策定時に用いられたデータの標準偏差よりも小さかった。また、破断式策定データに本試験データを加えた場合のクリープ破断強さの標準偏差は、破断式策定データのみの標準偏差とほぼ同等であった。これらのことから、BDS のクリープ破断式を 900℃まで適用できるものと考えられる。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

Evaluation of Creep Strength on SUS304 under Off-Normal Over-Heating

Shoichi KATO, Shinichi HASEBE and Eiichi YOSHIDA

Technology Development Department Oarai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2007)

A loss of heat removal system at reactor shutdown is one of the objects of the probabilistic safety assessment of fast breeder reactors. In this research, the creep rupture data of type 304 stainless steel (SUS304) in high temperatures has been obtained for the purpose of evaluation of mechanical strength of the structural materials at the severe accident, and applicability of the creep rupture formula adopted as the material strength standard for prototype fast breeder reactors (MSS) has been investigated.

The outlines of the obtained results are as follows:

- Forty-two creep rupture data of SUS304 have been obtained. The testing temperatures were 800°C, 850°C and 900°C, and the range of the creep rupture time was from 153.3 to 4117.0h.
- (2) The dispersion of the creep rupture strength by material heat production was observed. However, the strengths over 800°C were contained in factor 5 as compared with the calculate creep rupture values extrapolated to the testing temperature.
- (3) The degradation of the creep ductility was not observed from the behavior of the creep fracture elongation and the reduction of area.
- (4) The standard deviation of the creep rupture data obtained in this research was smaller than that of the database for the MSS estimation. Moreover, the standard deviation of the obtained data added to the MSS database was similar to that of the only MSS database. It was considered that the creep rupture strength of SUS304 could be estimated up to 900°C by the creep rupture formula for MSS.

Keywords : FBR, Creep Strength, SUS304, Off-Normal Over-Heating

目 次

1.	緒	言	•	•	• •	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1
2.	뷺	験	方法		•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
	2.1	倛	、試材	才	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
	2.2	Ť	、験り	十形	洑		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
	2.3	ク	, リ-	ーフ	。武	験	方	法		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
3.	봚	、験	結果	:及	び枝	食意	寸	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3.1	ク	, リ-	ーフ	。破	断	強	さ		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3.2	ク	, リ-	ーフ	。破	断	伸	び	及	V;	絞	ŋ		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3.3	ク	, リ-	ーフ	r° V	ず	み	挙	勆		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3.4	迷	面	ミク	' D	組	織	及	Ű	破	面	形	態		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3.5	ク	, リ-	ーフ	。破	断	強	さ	の	ば	Ъ.	0	き	に	関	す	る	検	討		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	4
4.	緃	言	•	•	• •	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6
謝	辞	•	•••	•	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	7
参	:考了	と献	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	7

Contents

1. Introduction ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
2. Experimental method · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.1 Test materials ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
2.2 Configurations of test specimen · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.3 Method of creep test
3. Test Results and discussion ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
3.1 Creep rupture strength ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
3.2 Fracture elongation and reduction of area ••••••••••••••••••••••••••••••••••
3.3 Creep strain behavior ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
3.4 Microstructure and fracture surface
3.5 Standard deviation of creep rupture strength ••••••••••••••••••••••••••••••••
4. Conclusion •••••••••••••••••••••••••••••••••
Acknowledgements · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
References • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

図表リスト

【表リスト】

表 2.1-1	供試材の仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
表 2.3-1	クリープ試験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
表 3.1-1	クリープ試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
表 3.1-2	BDS の SUS304 のクリープ破断式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
表 3.5-1	SUS304 のクリープ破断強さの標準偏差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11

【図リスト】

図 2.2-1	クリープ試験片の形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
図 2.3-1	大気中クリープ試験装置の機器構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
図 2.3-2	アルゴン中クリープ試験装置の機器構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
図 3.1-1	SUS304(3 ヒート)のクリープ破断強さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
図 3.1-2	大気中とアルゴン中のクリープ破断強さの比較 ・・・・・・・・・・・・・・	15
図 3.2-1	SUS304(3 ヒート)のクリープ破断伸び ・・・・・・・・・・・・・・・・	16
図 3.2-2	SUS304 (3 ヒート) の絞り ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
図 3.2-3	大気中とアルゴン中のクリープ破断伸びの比較 ・・・・・・・・・・・・・・	17
図 3.2-4	大気中とアルゴン中の絞りの比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
図 3.3-1	800℃における SUS304(3 ヒート)のクリープひずみ挙動 ・・・・・・・・・	18
図 3.3-2	850℃における SUS304(3 ヒート)のクリープひずみ挙動 ・・・・・・・・・	18
図 3.3-3	900℃における SUS304(3 ヒート)のクリープひずみ挙動 ・・・・・・・・・	19
図 3.4-1	クリープ試験片の断面ミクロ組織観察部位・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
図 3.4-2	受入れ時の供試材の断面ミクロ組織・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
図 3.4-3	代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A01) ・・・・・・	21
図 3.4-4	代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A04) ・・・・・・	22
図 3.4-5	代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A03) ・・・・・・	23
図 3.4-6	代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07G02) ・・・・・・	24
図 3.4-7	析出物の TEM 観察結果(試験片 No. FA07A01) ・・・・・・・・・・・・・・	25
図 3.4-8	析出物の TEM 観察結果(試験片 No. FA07A03) ・・・・・・・・・・・・・・	26
図 3.4-9	クリープ試験片の破面観察部位 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
図 3.4-10	代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G09) ・・・・・・・・	28
図 3.4-11	代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G11) ・・・・・・・・	29
図 3.4-12	代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G02) ・・・・・・・・	30
図 3.5-1	クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(本試験データ) ・・・・・・・	31
図 3.5-2	クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(クリープ破断式策定データ) ・・	31
図 3.5-3	クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(本試験データ及びクリープ	
	破断式策定データ) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32

図 3.5-4	クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(クリープ破断式策定データ及	
	び同一ヒートの追加取得データ) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
図 3.5-5	クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(本試験データ、クリープ破断	
	式策定データ及び同一ヒートの追加取得データ) ・・・・・・・・・・・・	33

- vi -

1. 緒言

高速炉の確率論的安全評価 (PSA: Probabilistic Safety Assessment)の対象の一つとして、炉停止 後の崩壊熱除去機能喪失事象 (PLOHS: Protected Loss of Heat Sink)が挙げられている。この事象 では、最終的な熱の逃し場が失われるために、崩壊熱によって1次系と2次系の温度が上昇し、 冷却材であるナトリウムの沸点 (約 880℃)近傍にまで至ることを想定している。このようなシ ビアアクシデント評価における構造材料の強度評価を高い精度で実施するためには、クリープ破 断式が必要となるが、現行の高速炉の材料強度基準に採用されているクリープ破断式¹⁾は、適用 温度が 825℃以下であった。このことから、本試験研究ではシビアアクシデント時の構造材料の 強度評価に資することを目的として、構造材料の SUS304 について、825℃を超える領域の高温で のクリープ強度データを取得し、現行材料強度基準に採用されているクリープ破断式の 825℃以 上の適用性を評価した。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材の仕様を表 2.1-1 に示す。供試材には、高速炉の主要な構造材料である SUS304 を用いた。大気中クリープ試験には、材料ヒートによるクリープ強度のばらつきを評価するため、熱間圧延鋼板 3 ヒート(以下、材料ヒートの識別記号を「A7」、「A13」、「A14」とする。)を供した。A7 ヒートについては、試験片の高温酸化の影響を評価する目的で、不活性ガス中(以下、「アルゴン中」)におけるクリープ試験も実施した。

2.2 試験片形状

クリープ試験に使用した試験片の形状を図 2.2-1 に示す。大気中におけるクリープ試験では、 平行部の直径が 10mm の中実丸棒型試験片を用いた。また、試験片の高温酸化の影響を確認す るためのアルゴン中クリープ試験では、試験装置の最大負荷容量の制限から平行部直径を 4mm とした。両試験片とも JIS Z 2271 の「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」に準拠 した形状であり、クリープ強度に及ぼす形状効果はないと考えられる。これらの試験片は、軸 方向と供試材の圧延方向が平行になるように採取した。試験片平行部は、加工傷を除去するた めに、エメリー紙(#600)で軸方向に研磨し、最終表面仕上げを行った。

2.3 クリープ試験方法

大気中クリープ試験装置の機器構成を図 2.3-1 に示す。試験装置は、最大負荷容量 750kg 及び 3000kg のレバー型(レバー比 1:10) であり、負荷精度は設定に対して±0.5%である。クリープ ひずみは、試験片のツバ部にアームを取付け、検出精度±0.5%の伸び計により計測した。アル ゴン中クリープ試験装置の機器構成を図 2.3-2 に示す。試験装置は、最大負荷容量 100kg の直接 負荷型であり、負荷精度は大気中クリープ試験装置と同等である。クリープひずみの計測は、 試験装置の構造上、伸び計が取付けられないため実施していない。また、雰囲気容器内に供給 されるアルゴンガスの純度は 99.9999%であり、容器内の圧力は約 0.01MPa に制御した。大気中 及びアルゴン中クリープ試験の温度は、R 型熱電対を試験片平行部の上部、中部及び下部の 3 箇所に取付けて±3℃以内に制御した。

大気中及びアルゴン中クリープ試験は、JIS Z 2271 の「金属材料のクリープ及びクリープ破断 試験方法」及び FBR 金属材料試験実施要領書(改訂版)²⁾に準拠して実施した。クリープ試験 の条件を表 2.3-1 に示す。クリープ試験温度は、高速炉の冷却材であるナトリウムの沸点(約 880℃)を包絡する 800℃、850℃及び 900℃の 3 条件とした。また、目標試験時間は 300h、1000h 及び<3000h である。A7 ヒートについては、アルゴン中クリープ試験も実施し、高温酸化の影 響を評価した。

3. 試験結果及び検討

3.1 クリープ破断強さ

SUS304の高温域クリープ試験の結果を表 3.1-1 に示す。本試験では、大気中クリープ試験が 153.3h~2064.9hの破断データ 30 点、アルゴン中クリープ試験が 261.4h~4117.0hの破断データ 12 点をそれぞれ取得した。

800℃~900℃における SUS304 のクリープ破断強さを図 3.1-1 に示す。いずれも大気中の試験 データである。材料ヒートのばらつきをみると、若干の差異がみられ、A13、A14 ヒートのク リープ破断強さは、A7 ヒートよりも僅かに低くなる傾向がみられた。図中には、表 3.1-2 に示 す現行の材料強度基準 (BDS) の SUS304 のクリープ破断式¹⁾ により、式の適用温度 (425℃~ 825℃)を超える 900℃まで外挿して求めた平均値 (時間係数 α_R =1)、及びデータのばらつきの 下限値 (時間係数 α_R =5)を示した。本試験で得られた 3 ヒートのクリープ破断強さは、クリ ープ破断式に対して、ファクター5 のばらつき内であった。また、図 3.1-2 に示すように、大気 中とアルゴン中のクリープ破断強さはほぼ同等であり、試験雰囲気による差異は認められなか った。

3.2 クリープ破断伸び及び絞り

大気中でのクリープ破断伸び及び絞りを図 3.2-1、図 3.2-2 に示す。800℃~900℃における SUS304のクリープ破断伸びは約 30%~120%、絞りは約 30%~80%であった。材料ヒート間の 比較では、A13 ヒートのクリープ破断伸び、絞りは、A7、A14 ヒートよりも僅かに高くなる傾 向がみられた。また、各ヒートとも高温・長時間側ほどクリープ破断伸び、絞りが低くなる傾 向を示した。本試験で得られたクリープ破断伸び、絞りは、これまでに得られた低温域の値³⁾ と比較して同等、もしくはそれ以上であり、800℃以上の高温域でも延性が低下する傾向はみら れなかった。大気中とアルゴン中のクリープ破断伸び、絞りを比較して、図 3.2-3、図 3.2-4 に 示す。大気中のクリープ破断伸び、絞りはアルゴン中よりも僅かに高くなる傾向がみられた。

3.3 クリープひずみ挙動

大気中での SUS304 のクリープひずみ挙動を図 3.3-1~図 3.3-3 に示す。いずれの温度域にお いても第1期、第2期及び第3期の一般的なクリープひずみ挙動を示しており、これまでの低 温域の挙動³⁾と有意差は認められなかった。なお、アルゴン中のクリープひずみ挙動の計測は、 試験装置の構造上、伸び計が取付けられないため実施していない。

3.4 断面ミクロ組織及び破面形態

代表的なクリープ試験片について、断面ミクロ組織を観察した。クリープ試験片の観察部位 を図 3.4-1 に示す。試験片の破断部、及び破断部から約 10mm の部位(表面部、中央部)につい て、断面ミクロ組織を観察した。なお、エッチング処理には塩酸 2、硝酸 1、グリセリン 2 の割 合で混合した腐食液(ヴィレラ液)を用いており、エッチング時間は約 50 秒である。受入れ時 の供試材の断面ミクロ組織を図 3.4-2 に、破断後の大気中クリープ試験片の断面ミクロ組織を図 3.4-3~図 3.4-5 にそれぞれ示す。800℃~900℃における大気中クリープ試験片の破断部(図 3.4-3 ~図 3.4-5 の A 部)、及び表面部(図 3.4-3 ~図 3.4-5 の B 部)には、酸化皮膜が観察された。いずれの大気中クリープ試験片(図 3.4-3 ~ 図 3.4-5 の A 部~C 部)にも結晶粒界に沿ったき裂が数多く観察された。800℃の大気中クリープ試験片(図 3.4-3 の A 部~C 部)では、受入れ時の断面ミクロ組織(図 3.4-1)と比較して、粒界及び粒内に塊状の析出物が認められた。また、850℃、900℃の大気中クリープ試験片では、同様な塊状析出物の他に、試験片の表面部(図 3.4-4、図 3.4-5 の B 部)や破断部(図 3.4-5 の A 部)に針状の析出物が観察された。針状析出物は、900℃の試験片の方が内部まで成長しており、約 200µm~300µm の深さまで認められた。

900℃のアルゴン中クリープ試験片の断面ミクロ組織を図 3.4-6 に示す。同温度の大気中クリ ープ試験片(図 3.4-5)と比較して、き裂と塊状析出物は同様に認められるが、試験片の表面部 等の針状析出物は認められなかった。

透過型電子顕微鏡(以下、「TEM」)を用いて、析出物の観察を実施した。代表的な観察結果 を図 3.4-7、図 3.4-8 に示す。観察の結果、試験片内部の塊状析出物は $M_{23}C_6$ であり、試験片表 面部の針状析出物は Cr_2N であることが分かった。針状析出物については、大気中クリープ試験 片で認められ、アルゴン中クリープ試験片では認められなかった。窒素は高温において Cr と反 応しやすく、かつ鋼中を拡散しやすいことから、大気中の窒素が浸入・拡散して、 Cr_2N が形成 されたものと考えられる⁴⁾。なお、大気中における 800℃~900℃のクリープ破断強さは、アル ゴン中と同等であり、針状析出物の有意な影響は認められなかった。

代表的なクリープ試験片について、破面形態を観察した。試験片の破面観察部位は、図 3.4-9 に示すように、破面外周部、中央部、及びその中間部位である。破面の観察結果を図 3.4-10~ 図 3.4-12 に示す。大気中クリープ試験片の破面は酸化皮膜で覆われており、破面形態が不明瞭 であったため、800℃~900℃のアルゴン中クリープ試験片の観察結果を示している。いずれの 試験片(図 3.4-10~図 3.4-12 の A 部~C 部)も粒界と粒内の混合破壊の様相を呈しており、既 存の低温域の破面観察結果⁶ との有意差はみられなかった。

3.5 クリープ破断強さのばらつきに関する検討

クリープ破断強さのばらつき評価は、本試験におけるアルゴン中と大気中のクリープ破断強 さに有意差がなかったこと、及び BDS のクリープ破断式策定に用いられたデータが全て大気中 であったことから、大気中データのみを用いることとした。BDS のクリープ破断式から求めら れる予測値(時間係数 α_R =1)と本試験で取得した実測値との関係を図 3.5-1 に示す。予測され る破断時間と実測値との間には、ほぼ1:1の直線関係が成り立っていた。また、図中に示すよ うに、式-1により求めた標準偏差は 0.328 である。

$$SEE = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (x_j - \bar{x})^2 / (n - m - 1)}$$
(式-1)
但し、 x_j ; データ値 ($\ln(t_R^{OBS} / t_R^{CAL})$)、 \bar{x} ; 平均値 ($\bar{x} = \sum_{j=1}^{n} x_j / n$)、

SEE;標準偏差、n;データ数、m;自由度、 t_{R} ; クリープ破断時間(h)

図 3.5-2 は、BDS における SUS304 のクリープ破断式策定に用いられた 10 ヒートのクリープ 破断データ^{1)、5)}のばらつきについて同様に示したものであり、標準偏差は 0.559 である。これ らのデータの試験温度は 450℃~775℃が主体であるが、800℃のデータが 1 点含まれている。 本試験データの標準偏差は、破断式策定データよりも小さいことが分かる。破断式策定データ に本試験データを加えて図 3.5-3 に示す。本試験データは、破断式策定データのばらつき範囲に 入っていた。標準偏差は、図 3.5-3 に示すように 0.574 であり、クリープ破断式策定データのみ の値とほぼ同じである。また、参考としてクリープ破断式策定後に取得された同一ヒートの既 存データ (7 ヒート、450℃~750℃)^{1)、3)、5)}を追加したものを図 3.5-4 及び図 3.5-5 に示す。既 存データの追加により、標準偏差が僅かに大きくなっているが、本試験データの有無による標 準偏差の変化はほとんどなかった。以上の SUS304 のクリープ破断強さに関する標準偏差をま とめて、表 3.5-1 に示す。

本試験の結果、高温域における SUS304 のクリープ破断強さは、材料ヒートによる僅かな差 異が認められたが、破断式策定データのばらつき範囲内であった。材料ヒートのばらつきが考 慮された BDS のクリープ破断式は、900℃の高温域まで適用できるものと考えられる。なお、 クリープ破断式を 900℃まで用いるときの応力が本試験における最小応力の 17MPa 未満となる 場合は、適用性の確認が必要と考えられる。

4. 結言

高速炉のシビアアクシデントの評価には、冷却材であるナトリウムの沸点近傍(約 880℃)ま での構造材料の強度評価が必要となり、その強度評価にはクリープ破断式が用いられることにな る。しかし、現行の BDS に採用されているクリープ破断式は、適用温度が 825℃以下であった。 このことから、本試験研究ではシビアアクシデント時の構造材料の強度評価に資することを目的 として、高温での SUS304 のクリープ強度データを取得し、BDS のクリープ破断式の 825℃以上 における適用性評価を実施した。

得られた成果の概要は、以下のとおりである。

- (1) SUS304 について、800℃、850℃及び900℃の高温域における 153.3h~4117.0h の破断データ 42 点を取得した。
- (2) 800℃~900℃のクリープ破断強さは、材料ヒートによるばらつきが認められたが、SUS304の
 現行 BDS のクリープ破断式を用いて、高温域まで外挿して求められる値と比較するとファクター5のばらつき内であった。
- (3) 本試験で得られた3材料ヒートの SUS304 のクリープ破断伸び及び絞りからは、延性低下の傾向は認められなかった。
- (4) 高温域のクリープ試験片の破面形態は、粒界と粒内の混合破壊の様相を呈しており、低温域の 破面形態と比較して、有意な差はみられなかった。
- (5)本試験で得られた高温域データの標準偏差は、現行 BDS のクリープ破断式策定時に用いられたデータの標準偏差よりも小さかった。また、破断式策定データに本試験データを加えた場合のクリープ破断強さの標準偏差は、破断式策定データのみの標準偏差とほぼ同等であった。これらのことから、BDS のクリープ破断式を 900℃まで適用できるものと考えられる。

謝辞

終りに、本試験研究を進めるに当たり、日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開 発部門の笠原直人グループリーダから有益なご指導、並びにご助言を賜りました。また、一連の 材料試験には、常陽産業株式会社の鈴木 高一氏、鴨川 耕一氏、黒子 耕一氏及び鈴木 章裕氏の 多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等、PNC TN241 84-10 (1984)
- 2) 加藤 章一、他、FBR 金属材料試験実施要領書(改訂版)、JNC TN9520 2001-001 (2001)
- 3) 小高進、他、SUS304鋼の材料試験データ集(III)、JNC TN9450 2003-002 (2003)
- 4) ステンレス鋼便覧、第3版、ステンレス協会(1995)
- 5) 金属材料技術研究所クリープデータシート、No.4B、物質・材料研究機構(1986)
- 6) フラクトグラフィとその応用、日刊工業新聞社(1981)

细秳	材料ヒート	寸 法				熱処理条件				
刘 则 17里	識別記号	(mm)	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	※ 1
SUS304	A7	厚さ40 幅1000 長さ1000(圧延方向)	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	①1100°C ②48min ③水冷
	A13	厚さ25 幅1000 長さ1000(圧延方向)	0.04	0.57	0.98	0.029	0.002	8.43	18.38	①1050°C ②40min ③水冷
	A14	厚さ60 幅1000 長さ1000(圧延方向)	0.05	0.56	0.85	0.026	0.002	8.86	18.47	①1050°C ②12min ③水冷

表 2.1-1 供試材の仕様

※1 ①温度、②高温保持時間、③高温保持後の冷却方式

表 2.3-1 クリープ試験条件

材料ヒート	試験	試験温度	目標	試験時間と	点数
識別記 号	雰囲気	(°C)	300h	1000h	<3000h
		800	1	2	1
	大気中	850	1	2	1
<u>۸</u> 7		900	1	2	1
A/		800	1	2	1
	アルゴン中	850	1	2	1
		900	1	2	1
		800	1	1	1
A13		850	1	1	1
	十二日	900	1	1	1
		800	1	1	1
A14		850	1	1	1
		900	1	1	1
					計42点

表 3.1-1 クリープ試験結果

材料ヒート 識別記号	試験 雰囲気	試験片 番号	試験 温度	応力	破断 時間	破断 伸び	絞り	破断 位置	定常 クリーフ [°] 速度	第3期 クリープ 開始時間
			(°C)	(MPa)	(h)	(%)	(%)	X 2	(%/h)	(h)
		FA07A05	800	54	221.9	77.1	68.1	В	1.47E-01	115.3
		FA07A01	800	40	1539.7	60.1	48.1	В	1.74E-02	856.4
		FA07A13	800	40	1651.3	51.3	46.9	A	1.56E-02	597.1
		FA0/A09	800	38	2064.9	49.5	42.9	B	1.21E-02	8/9.5
		FA07A00	850	28	1360.9	08.7 44.4	32.5	D R	1.18E-01 1.54E-02	629.7
	大気中	FA07A12	850	28	1312.9	×	1	B	1.34E-02	698.8
		FA07A10	850	26	1984.6	36.5	31.6	B	1.02E-02	925.9
		FA07A08	900	26	217.6	*	1	Α	8.09E-02	119.3
		FA07A03	900	18	1625.9	*	1	В	1.00E-02	652.1
		FA07A02	900	18	1595.8	28.9	31.8	В	8.79E-03	457.2
Α7		FA07A11	900	17	1995.2	29.7	31.5	В	6.85E-03	529.1
11/		FA07G16	800	54	261.4	×	1	Α	-	-
		FA07G09	800	40	1473.1	27.3	34.6	A	-	-
		FA07G10	800	40	1447.9	×	1	A	-	-
		FA07G13	800	38	4117.0	×	10 7	B	-	-
		FA0/G12	850	38 29	294.4	40.4	48.7	A D	-	-
	アルコン中	FA07G15	850	20	1764.5	23.7	35.0	B	-	-
		FA07G13	850	26	1829.6	23.5	32.4	B	_	-
		FA07G04	900	26	274.6	<u> </u>	1	B	-	-
		FA07G02	900	18	1432.5	×	1	Α	-	-
		FA07G05	900	18	2146.6	23.2	25.0	Α	-	-
		FA07G03	900	17	2350.9	17.0	20.8	Α	-	-
		FA13A02	800	54	179.0	121.8	79.3	В	2.41E-01	87.3
		FA13A06	800	40	1132.9	92.4	69.5	В	3.08E-02	526.1
		FA13A09	800	38	1502.6	91.8	68.4	A	2.32E-02	723.6
		FA13A03	850	38	174.1	71.9	72.7	В	2.00E-01	87.0
A13	大気中	FA13A05	850	28	974.9	×	1	B	2.97E-02	391.6
		FA13A08	850	26	1308.0	58.0	55.5 72.0	В	1.91E-02	461./
		FA13A01	900	20	821.0	82.2 66.2	73.9 58.0	A D	1.98E-01	80.1
		FA13A04	900	10	1101.1	77.6	58.6	B	3.36E-02	93.7 77.4
		FA14A02	800	54	178.7	105.6	69.4	B	1 79E-01	80.5
		FA14A06	800	40	885.0	55.5	53.4	B	2.53E-02	391.6
		FA14A09	800	38	1405.3	55.3	47.0	В	1.50E-02	570.2
		FA14A03	850	38	178.0	51.5	55.8	В	1.30E-01	76.8
A14	大気中	FA14A05	850	28	610.8	36.3	34.6	В	2.05E-02	225.4
		FA14A08	850	26	1163.6	35.9	33.7	В	1.21E-02	420.3
		FA14A01	900	26	202.2	42.2	41.7	Α	9.01E-02	88.0
		FA14A04	900	18	826.3	38.8	34.9	Α	7.37E-03	145.2
		FA14A07	900	17	838.9	48.2	35.7	Α	1.17E-02	163.3
※1 突合せ	部(破断部)に隙間が生	じたため	り、破断		※2 破	断位置	の定義		



破断伸び、絞りを計測しなかった試験片の突合せ状況

表 3.1-2 BDS の SUS304 のクリープ破断式¹⁾



データ	データ点数	標準偏差	参照図
本試験データ	30 点	0.328	図 3.5-1
クリープ破断式策定データ	251 点	0.559	図 3.5-2
本試験データ及びクリープ破断式策定データ	281 点	0.574	図 3.5-3
クリープ破断式策定データ及び同一ヒートの 追加取得データ	341 点	0.595	図 3.5-4
本試験データ、クリープ破断式策定データ及 び同一ヒートの追加取得データ	371 点	0.599	図 3.5-5

表 3.5-1 SUS304 のクリープ破断強さの標準偏差







アルゴン中クリープ試験片

図 2.2-1 クリープ試験片の形状







- 14 -







図 3.1-2 大気中とアルゴン中のクリープ破断強さの比較











図 3.2-3 大気中とアルゴン中のクリープ破断伸びの比較



図 3.2-4 大気中とアルゴン中の絞りの比較



図 3.3-1 800°Cにおける SUS304 (3 ヒート)のクリープひずみ挙動



図 3.3-2 850°Cにおける SUS304 (3 ヒート)のクリープひずみ挙動



図 3.3-3 900℃における SUS304 (3 ヒート)のクリープひずみ挙動



図 3.4-1 クリープ試験片の断面ミクロ組織観察部位



図 3.4-2 受入れ時の供試材の断面ミクロ組織

大気中 800℃ 40Mpa 1539.7h





200µm C部

50µm

図 3.4-3 代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A01)

大気中 850℃ 28Mpa 1360.9h







図 3.4-4 代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A04)

大気中 900℃ 18Mpa 1625.9h



図 3.4-5 代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07A03)

アルゴン中 900°C 18Mpa 1432.5h







図 3.4-6 代表的なクリープ試験後の断面ミクロ組織(試験片 No. FA07G02)

大気中 800℃ 40Mpa 1539.7h





A**部の電子線回折像** (解析結果:M₂₃C₆)

試験片内部

図 3.4-7 析出物の TEM 観察結果(試験片 No. FA07A01)

大気中 900℃ 18Mpa 1625.9h





A部の電子線回折像 (解析結果:M₂₃C₆)



B**部の電子線回折像** (解析結果:Cr₂N)

試験片表面部

図 3.4-8 析出物の TEM 観察結果(試験片 No. FA07A03)





アルゴン中 800°C 40Mpa 1473.1h







B部



図 3.4-10 代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G09)

アルゴン中 850°C 28Mpa 1183.7h



図 3.4-11 代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G11)

アルゴン中 900°C 18Mpa 1432.5h



図 3.4-12 代表的なクリープ試験後の破面形態(試験片 No. FA07G02)



図 3.5-1 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(本試験データ)



図 3.5-2 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(クリープ破断式策定データ)





図 3.5-5 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係 (本試験データ、クリープ破断式策定データ及び同一ヒートの追加取得データ)

This is a blank page.

表1. SI 基本単位

甘木 昌	SI 基本単位							
	名称	記号						
長さ	メートル	m						
質 量	キログラム	kg						
時 間	秒	S						
電 流	アンペア	А						
熱力学温度	ケルビン	Κ						
物質量	モル	mol						
光 度	カンデラ	cd						

和午春	SI 基本単位	
和卫生里	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数	毎メートル	m-1
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈 折 率	(数 の) 1	1

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

表5 SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号								
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d								
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с								
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m								
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ								
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n								
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピ コ	р								
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f								
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а								
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	Z								
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У								

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

	51 租立单位						
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方			
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$			
立 体 自	ステラジアン ^(a)	cr ^(c)		$m^2 \cdot m^{-2} = 1$ (b)			
周 波 對	r n y	Hz		e ⁻¹			
ла (с. » Л	$= - + \gamma$	N		m • kg • c ⁻²			
医力 広 ナ	パスカル	Pa	N/m^2	m ⁻¹ ka s ⁻²			
エンジー 仕事 執長		Т	N/III N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s$			
		J	Т/а	2 1 -3			
		W	J/ S	m • kg • s			
电 何 , 电 风 国		U U	III. / A	S • A			
龍位差(龍庄),起龍九		V	W/A	m · kg · s · A ·			
静電浴重	「ファフド	F	C/V	$m^2 \cdot kg^1 \cdot s^4 \cdot A^2$			
電気抵抗	ロオーム ム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$			
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$			
磁東	ミウ エ ー バ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$			
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$			
インダクタンフ	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$			
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K			
光	ルーメン	lm	cd • sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$			
照風	ルクス	1x	1 m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$			
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Ba	1117 11	c ⁻¹			
吸収線量 質量エネル		Dq		3			
ギー分与、カーマ	. グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$			
線量当量. 周辺線量当							
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	T/kg	m ² • s ⁻²			
人線量当量,組織線量当			5, 40	m 0			
			•	•			

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

							SI 組立単位			
和立里							名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘						度	パスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
力	の	モ		メ	\sim	\mathbb{P}	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
表		面		張		力	ニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²	
角			速			度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角		加		速		度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
熱	流密	医度	, ;	放 射	照	度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg • s ⁻³	
熱	容量	, :	エン	トr	コピ	-	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質	量熱額	容量	(比	熱箔	₹量)	,	ジュール毎キログラム	T/(1	2 -2 -1	
質	量 :	I)	/ ト		F		毎ケルビン	J/ (Kg·K)	m·s·K	
質	量	I	ネ	N	ギ		ジュール伝モロガラム	T/lag	2 -2 12-1	
(比:	I 7	ネル	/ ギ	-)	シュール母イログノム	J/Kg	m·s·K	
泰丸		Æ		谱		굻	ワット毎メートル毎ケ	W/(m•K)	$m + k \sigma + \sigma^{-3} + K^{-1}$	
5868		14				-4-	ルビン	"/ (III IX)	m · kg · S · k	
休	穑	T.	ネ	ル	ギ		ジュール毎立方メート	T/m ³	$m^{-1} \cdot ka \cdot a^{-2}$	
	1.54				`		N	J/ III	m Kg 5	
電	界	Ĺ	の	強	i.	さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体		積		雷		荷	クーロン毎立方メート	C/m ³	m ⁻³ • s • A	
				_				0, 11		
電		気		変		位	クーロン毎半方メート	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
34.			-			-++		-,	-31 4 2	
誘			电			半	ノアフト毎メートル	F/m	$m \cdot kg \cdot s \cdot A$	
透			絋		24	平	ヘンリー毎メートル	H/m	m • kg • s ² • A ²	
÷	N	I	不	N .	Ŧ	-	シュール毎モル	J/mol	m [*] •kg•s [*] •mol ⁺	
モチ	ルコル	- >	ト 教	口上		,昌	シュール毎モル毎ケル ビン	J/(mol • K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	
BZ	射線₽		w v 编	石石	- 約) 	クーロン毎キログラム	C /kg	1 ⁻¹ A	
吸	e Agn Eis Ji	7	線	反 ()	9 /1936 r	- /	グレイ毎秒	Gv/s	ng - 5 - A	
放	4.8	射	10/JK	血 曲	2	一度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot ka \cdot e^{-3} - m^2 \cdot ka \cdot e^{-3}$	
JX		21		1:13		12	ロット毎平ちメートル	"/ 51	m·m·kg·s-m·kg·s	
放		射		輝		度	毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	٥	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1、 L	$11=1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

表7. 国际単位糸と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの								
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
電	子 ボ	ルト	eV	$1 \text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{J}$				
統	一原子質	量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$				
天	文 首	羊 位	ua	$1_{112}=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$				

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

	伊用されるての他の単位								
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値					
海		里		1 海里=1852m					
1	ツ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s					
P	_	ル	а	1 a=1 dam ² =10 ² m ²					
\sim	クター	- <i>i</i> V	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²					
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa					
オン	/グストロ	1-4	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m					
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$					

ま0 田方の夕かな合わのの知会尚は

	X3. 固有674772日4060版五平区								
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値					
工	IL	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn•s/cm²=0.1Pa•s					
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s					
ガ	ウ	ス	G	1 G 10 ⁻⁴ T					
エ	ルステッ	ĸ	0e	1 Oe (1000/4π)A/m					
$\overline{\mathbf{A}}$	クスウェ	ル	Mx	1 Mx 10 ⁻⁸ Wb					
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$					
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x					
ガ		ル	Gal	1 Gal =1 cm/s ² =10 ⁻² m/s ²					

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例							
名称 記号						SI 単位であらわされる数値		
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
\mathcal{V}	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
\mathcal{V}				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
Х	線		単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm		
ガ		${}^{\succ}$		7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$		
ジ	ヤン	/)	スキ		Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W • m ⁻² · Hz ⁻¹		
フ	エ		ル	11		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メー	ートル	系	カラッ	ノト		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg		
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力			IJ		cal			
3	ク		D	\sim	11	1		

この印刷物は再生紙を使用しています