

高速炉燃料用 SUS316 相当鋼の 高温強度及び照射特性評価

High-temperature Strength of Modified Type 316 Steel for Fast Reactor Fuel
before and after Neutron Irradiation

宮澤 健 上羽 智之 矢野 康英 丹野 敬嗣
大塚 智史 鬼澤 高志 安藤 勝訓 皆藤 威二

Takeshi MIYAZAWA, Tomoyuki UWABA, Yasuhide YANO, Takashi TANNO
Satoshi OHTSUKA, Takashi ONIZAWA, Masanori ANDO and Takeji KAITO

大洗研究所
高速炉サイクル研究開発センター
燃料材料開発部

Fuels and Materials Department
Fast Reactor Cycle System Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute

October 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

高速炉燃料用 SUS316 相当鋼の高温強度及び照射特性評価

日本原子力研究開発機構 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター 燃料材料開発部

宮澤 健、上羽 智之、矢野 康英、丹野 敬嗣、大塚 智史、
鬼澤 高志⁺¹、安藤 勝訓⁺¹、皆藤 威二⁺²

(2024 年 5 月 24 日受理)

SUS316 相当鋼を用いた高速炉燃料設計の高信頼性化に向けて、SUS316 相当鋼被覆管及びラッパ管の高温強度及び照射データを材料学的及び統計学的な観点で評価・解析することで、高温強度及び高照量までの照射特性に係る設計用強度式を導出した。

異常な過渡変化の上限温度を超える 900°C までの SUS316 相当鋼被覆管及びラッパ管（非照射材）の高温引張試験データ及び高温クリープ試験データを拡充し、0.2%耐力、引張強さ、クリープ破断強度の最適近似式と下限式並びに熱クリープひずみの最適近似式と上下限式を導出した。

また、高速実験炉「常陽」、仏国・高速原型炉 Phenix 及び米国・FFTF で高照量まで中性子照射した SUS316 相当鋼被覆管及びラッパ管の照射後引張試験データ及び SUS316 相当鋼被覆管の炉内クリープ破断試験データを解析することで、炉内 Na 中照射による引張強度及びクリープ強度の低下を表す強度補正係数を導出した。導出した式を実測値と比較することで、その妥当性を確認した。

大洗研究所：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

+1 大洗研究所 高速炉基盤技術開発部

+2 大洗研究所 戦略推進部

High-temperature Strength of Modified Type 316 Steel for Fast Reactor Fuel before and after Neutron Irradiation

Takeshi MIYAZAWA, Tomoyuki UWABA, Yasuhide YANO, Takashi TANNO,
Satoshi OHTSUKA, Takashi ONIZAWA⁺¹, Masanori ANDO⁺¹ and Takeji KAITO⁺²

Fuels and Materials Department,
Fast Reactor Cycle System Research and Development Center,
Oarai Research and Development Institute,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 24, 2024)

For the purpose of enhancing the reliability of fast reactor fuel designing using modified type 316 steel, the out-of-pile and in-pile mechanical data of modified type 316 steel cladding tubes and wrapper tubes were statistically analyzed with the knowledge on material science and engineering; the high-temperature strength equations of modified type 316 steel, which can be applied to high-dose neutron irradiation environment, were derived.

The out-of-pile high-temperature tensile and creep data of modified type 316 steel cladding tubes and wrapper tubes were derived up to 900°C, which is higher than the upper limit temperature of anticipated transient event of fast reactor. Using the extended database, the best-fit equation and the lower limit equation were derived for out-of-pile 0.2% proof strength, ultimate tensile strength and creep rupture strength while the best-fit equation and the upper and lower limit equations for creep strain. Furthermore, the degradation factors for tensile and creep strength, which will be produced by in-reactor environment (i. e., neutron irradiation in liquid sodium), were evaluated using the existing neutron irradiation data of modified type 316 steel, which were derived using the experimental fast reactor Joyo, the French proto-type fast reactor Phenix, the American experimental fast reactor FFTF. The derived equations were validated by the comparison with the experimental data.

Keywords: Modified Type 316 Steel, Fast Reactor Fuel, High-temperature Strength, Swelling, Irradiation Creep

+1 Fast Reactor Fundamental Technology Development Department, Oarai Research and Development Institute

+2 Strategy and Management Department, Oarai Research and Development Institute

目 次

1. はじめに	1
2. SUS316 相当鋼の高温強度、照射特性評価	3
2.1 評価項目と対象材	3
2.2 引張強度評価	3
2.3 クリープ強度・変形挙動評価	8
2.4 SUS316 溶体化材の強度特性	17
3. まとめ	18
謝辞	18
参考文献	19
付録 1 炉外高温引張試験データ一覧	44
付録 2 照射後引張試験データ一覧	54
付録 3 炉外クリープ破断試験データ一覧	57
付録 4 炉内外 Na 中クリープ破断データ一覧	64
付録 5 熱クリープ変形データ一覧	67
付録 6 SUS304、SUS316 溶体化材の高温クリープ破断関係式	83
付録 7 SUS304、SUS316 溶体化材の超高温クリープひずみ式	99
付録 8 SUS316 の物性式	125

Contents

1. Introduction	1
2. High-temperature strength and irradiation response of modified type 316 steel	3
2.1 Materials	3
2.2 Tensile strength	3
2.3 Creep strength and deformation behavior	8
2.4 Strength of type 316 steel	17
3. Summaries	18
Acknowledgements	18
References	19
Appendix 1 Out-of-pile tensile test data of modified type 316 steel	44
Appendix 2 Tensile test data after neutron irradiation of modified type 316 steel	54
Appendix 3 Out-of-pile creep strength data of modified type 316 steel	57
Appendix 4 In-pile and out-of-pile creep data of modified type 316 steel in liquid sodium	64
Appendix 5 Out-of-pile creep deformation data of modified type 316 steel	67
Appendix 6 Out-of-pile creep strength equation of type 304 and 316 steels	83
Appendix 7 Out-of-pile creep deformation equation of type 304 and 316 steels	99
Appendix 8 Physical property equations of type 316 steel	125

表リスト

表 1	SUS316 相当鋼と評価対象材の材料仕様	20
表 2	時間に依存しない設計応力強さ (S_m)	22
表 3	時間に依存する設計応力強さ (S_t)	23
表 4	回帰分析で算出した熱クリープひずみ式の係数	24
表 5	熱クリープひずみ式の平均、上下限用の係数	24

図リスト

図 1	本評価で用いた SUS316 相当鋼の引張試験データと各温度での平均値 (0.2%耐力)	25
図 2	本評価で用いた SUS316 相当鋼の引張試験データと各温度での平均値 (引張強さ)	25
図 3	0.2%耐力 (引張試験データ) と S_y との比較	26
図 4	引張強さ (引張試験データ) と S_u との比較	26
図 5	時間に依存しない設計応力強さ (S_m)	27
図 6	高速中性子照射量と 0.2%耐力の関係	28
図 7	高速中性子照射量と引張強さの関係	28
図 8	σ_y^*/σ_y と LMP の関係	29
図 9	σ_u^*/σ_u と LMP の関係	29
図 10	照射材の 0.2%耐力と照射条件における S_y^* の関係	30
図 11	照射材の引張強さと照射条件における S_u^* の関係	30
図 12	本解析で用いた SUS316 相当鋼被覆管の炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データ	31
図 13	炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの回帰曲線	32
図 14	クリープ破断予測比	32
図 15	S_R と炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの比較 (600~750°C)	33
図 16	S_R と炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの比較 (800~900°C)	33
図 17	破断時間と S_t の関係	34
図 18	SUS316 相当鋼被覆管内圧クリープ破断データの比較 (炉外大気中、炉外 Na 中、炉内 Na 中)	35
図 19	炉外 Na 中クリープ強度式	35
図 20	クリープ強度補正係数の LMP 依存性	36
図 21	炉内 Na 中試験データと S_R 、 S_R^* の比較	36
図 22	2次クリープひずみ速度の応力依存性 (650°C)	37
図 23	2次クリープひずみ速度の応力依存性 (700°C)	37
図 24	2次クリープひずみ速度の応力依存性 (750°C)	38
図 25	2次クリープひずみ速度の応力依存性 (800~1000°C)	38

図 26	$(d\varepsilon/dt)/\sigma^{3.34}$ の $1/(T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)	39
図 27	1 次クリープひずみの飽和値 (ε_t) の応力依存性	40
図 28	$\varepsilon_t/\sigma^{1.90}$ の $1/(T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)	41
図 29	1 次クリープひずみの飽和値 (ε_t) 平均値と上下限值 (650~900°C)	41
図 30	1 次クリープ係数 γ の応力依存性	42
図 31	$\gamma/\sigma^{2.63}$ の $1/(T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)	43

1. はじめに

高速炉燃料被覆管の国内開発は、動力炉・核燃料開発事業団（現・日本原子力研究開発機構）において1968年から開始された[1]。高速炉燃料被覆管に要求される高温強度、高温での耐Na腐食性、加工性及び溶接性に優れていること並びに海外で被覆材として実績があることを考慮して、開発対象としてSUS316ステンレス鋼が選定され、耐照射性（耐スエリング性）及び高温強度の向上に向けた研究開発が進められた。化学成分や加工熱処理条件等の製造プロセスの最適化により、SUS316としては世界的にも最高レベルの性能を有するSUS316相当鋼が開発され、高速実験炉「常陽」及び高速増殖原型炉「もんじゅ」の燃料被覆管、ラップ管等の炉心材料として使用されてきた。これまでの使用実績を踏まえ、現在、研究開発が進められている高速実証炉の初装荷炉心にも適用される計画である。

SUS316相当鋼の材料強度基準（案）は、材料強度及び照射特性に関する国内外における豊富なデータ及び知見を用いて既に策定されている。一方、材料強度基準（案）を、より合理的、且つ信頼性の高いものに仕上げるため、SUS316相当鋼の高温強度データ、Na腐食データの取得に加えて「常陽」や米国の高速実験炉FFTF等を用いた照射データ取得が進められた。本研究では、SUS316相当鋼を用いた高速炉燃料設計の高信頼性化に向けて、これまでに取得されたSUS316相当鋼の高温強度及び照射データを材料学的及び統計学的な観点で評価・解析することで、設計用強度基準式を導出した。

なお、高速増殖原型炉「もんじゅ」の燃料要素及び燃料集合体の構造設計用の技術基準として、1985年（昭和60年）12月に「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針（案）」及び「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針 材料強度基準（案）」等が策定され、初装荷燃料等の設計に用いられた。その後、高速増殖原型炉「もんじゅ」の設置変更申請が行われるとともに、燃料集合体等の設工認申請を行うこととなった。平成18年3月20日には、日本原子力研究開発機構内に「もんじゅプロジェクト推進本部」が設置され、材料強度基準の見直し等を行うために、同推進本部の下に「技術基準班」が設置された（メンバーは次ページ参照）。技術基準班では、平成18年3月から平成20年2月まで合計42回にわたる会合において、「材料強度基準（案）」及び「設計用物性値集」の各項目について、当時の材料の照射下でのふるまい等に関する知見を基に議論・検討が行われた。その結果、適用範囲、データベース、策定方法及び策定に至る背景や参考資料等について見直しが行われ、結果がまとめられた。本レポートでは、技術基準班での検討結果及び採用された方法論を踏襲しつつ、新たに拡充された炉外試験データ（主に700℃を超える高温側）を用いることで、技術基準班で定めた強度式のうち、非照射下及び照射下における強度式を更新した結果をまとめた。

「もんじゅ技術基準班メンバー」(括弧内は、活動当時の所属)

※「もんじゅ技術基準班」会合は平成18年3月から平成20年2月まで合計42回開催。

班 長：

松元 慎一郎 (平成19年4月まで班長。平成18年9月まで燃料材料試験部、平成18年10月から環境保全部)

有井 祥夫 (平成19年5月から燃料材料試験部)

班長代理：

安部 智之 (東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター 技術部)

班 員：

中江 延男 (平成18年5月まで。次世代原子力システム研究開発部門)

上羽 智之 (次世代原子力システム研究開発部門)

永沼 正行 (次世代原子力システム研究開発部門)

川崎 信史 (次世代原子力システム研究開発部門)

安藤 勝訓* (次世代原子力システム研究開発部門)

中沢 博明 (東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター 技術部)

小澤 隆之 (東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター 製造加工部)

吉田 英一 (大洗研究開発センター 技術開発部)

古川 智弘 (大洗研究開発センター 技術開発部)

関根 隆 (大洗研究開発センター 高速実験炉部)

永井 寛 (大洗研究開発センター 燃料材料試験部)

吉武 庸光 (平成19年6月まで大洗研究開発センター 燃料材料試験部、
平成19年7月から大洗研究開発センター 計画管理室)

小川 竜一郎* (大洗研究開発センター 燃料材料試験部)

矢野 康英* (大洗研究開発センター 燃料材料試験部)

竹内 則彦 (敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター もんじゅ開発部)

大川 剛 (敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター もんじゅ開発部)

北野 彰洋 (敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター もんじゅ開発部)

*職制外発令されていないが、検討作業に協力したメンバー

2. SUS316 相当鋼の高温強度、照射特性評価

2.1 評価項目と対象材

本研究では、高速炉の炉心材料（燃料被覆管、ラップ管等）に用いるために開発された SUS316 相当鋼[1, 2]及びこれと同等仕様の材料（表 1）について、高温強度及び照射特性の評価を実施した。評価項目は以下の通りである。

[非照射材評価]

- ・引張強度評価（設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 、時間に依存しない設計応力強さ S_m ）
- ・クリープ強度評価（設計クリープ破断応力強さ S_R 、時間に依存する設計応力強さ S_t ）
- ・クリープ変形挙動評価（熱クリープひずみ）

[照射材評価]

- ・照射後引張強度評価（短時間強度補正係数）
- ・炉内クリープ破断強度評価（クリープ強度補正係数）

高温強度特性及び照射特性への影響が大きな冷間加工度については、いずれの評価材でも SUS316 相当鋼の仕様範囲内（冷間加工度： $20 \pm 3\%$ ）である。非照射材のクリープ破断強度と引張強度の評価では、Ti と Nb の添加量が目標濃度に満たないロット及び溶体化処理温度が規定の 1040°C 以上を満足しないロットも評価に含めた。Ti 及び Nb は、溶体化熱処理により一旦母相に固溶させることで、高温環境下で微細な MX 析出物として析出し、材料の強度の向上に寄与する[1, 2]。よって、これら仕様範囲外のロットのデータを評価に含めることで、保守側の強度評価となる。その他項目の評価では、仕様範囲内の材料を用いた。

2.2 引張強度評価

2.2.1 非照射材引張強度評価

(1) 評価に用いたデータ

本評価に用いた引張強度データは以下の通りである（図 1、図 2、付録 1）[3]。ここで、付録 1 に示すラップ管材の 900°C までの引張試験データを新たに拡充した。

- ・試験方法：炉外（非照射）大気中の引張試験（JIS G 0567 の標準引張試験方法の規定による）
- ・試験温度：室温～ 900°C

ここで、「炉外」とは「原子炉外」のことであり、非照射環境の試験であることを意味している。一方、以下で用いる「炉内」とは原子炉内の中性子照射環境下の試験であることを意味している。

(2) 評価方法

引張強度データを以下の方法で回帰分析し、最適近似曲線（0.2%耐力 σ_y 、引張強さ σ_u ）と

下限曲線（設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u ）を求めた。降伏点が明確に表れないオーステナイト鋼において0.2%耐力を降伏点とみなした。まず、0.2%耐力と引張強さについて、各温度での試験データの平均値を算出した。これら各温度の平均値と温度の多項式で回帰分析することで最適近似曲線を求めた。ここで、最適近似曲線に対する各温度平均値の標準偏差（ σ ）が最小となるよう回帰分析した。データの傾向をよく表していると考えられる最小の次数の式として5次式を選択した。この最適近似曲線に対する試験データの標準偏差（ σ ）を算出し、平均曲線から 3.29σ を差し引いた曲線（99.9%信頼下限値）を下限曲線（設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u ）とした。ただし、温度 65°C 以下では、試験温度 65°C での値で一定とした。

(3) 評価結果

① 0.2%耐力

図3に上記の方法で導出した回帰曲線（0.2%耐力の最適近似曲線 σ_y [MPa] 及び下限曲線 S_y [MPa]）と0.2%耐力データを比較して示す。最適近似曲線の回帰結果は次式の通りである。

$$\begin{aligned} \sigma_y = & 6.7663905854072 \times 10^2 + 9.7808904492672 \times 10^{-1} \cdot T \\ & - 1.0594994904664 \times 10^{-2} \cdot T^2 + 3.3680156614436 \times 10^{-5} \cdot T^3 \\ & - 4.4429067505148 \times 10^{-8} \cdot T^4 + 1.9921452127951 \times 10^{-11} \cdot T^5 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 T は温度 [$^\circ\text{C}$] である。標準偏差 (σ) としては 23.3898593322371 を得た。

99.9%信頼下限式（設計降伏点 S_y [MPa]）は、次式の通りである。ここで、式の係数は四捨五入により、有効数字5桁とした。

・ $65^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} S_y = & 5.9969 \times 10^2 + 9.7809 \times 10^{-1} \cdot T - 1.0595 \times 10^{-2} \cdot T^2 + 3.3680 \times 10^{-5} \cdot T^3 \\ & - 4.4429 \times 10^{-8} \cdot T^4 + 1.9921 \times 10^{-11} \cdot T^5 \end{aligned} \quad (2)$$

・ $20^\circ\text{C} \leq T \leq 65^\circ\text{C}$

保守性を確保するため、式(2)における 65°C の値で一定とした。

② 引張強さ

図4に上記の方法で導出した回帰曲線（引張強さの最適近似曲線 σ_u [MPa] 及び下限曲線 S_u [MPa]）と引張強さデータを比較して示す。最適近似曲線の回帰結果は次式の通りである。

$$\begin{aligned} \sigma_u = & 7.8052982618862 \times 10^2 + 2.2227173858136 \times 10^{-1} \cdot T \\ & - 7.1017468766051 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 2.707855044915800 \times 10^{-5} \cdot T^3 \\ & - 3.876529682358 \times 10^{-8} \cdot T^4 + 1.8060339890951 \times 10^{-11} \cdot T^5 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、標準偏差(σ)として 22.4930165111296 を得た。

99.9%信頼下限式(設計引張強さ S_u [MPa])は、次式の通りである。ここで、式の係数は四捨五入により、有効数字5桁とした。

・ $65^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$

$$S_u = 7.0653 \times 10^2 + 2.2227 \times 10^{-1} \cdot T - 7.1017 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 2.7079 \times 10^{-5} \cdot T^3 - 3.8765 \times 10^{-8} \cdot T^4 + 1.8060 \times 10^{-11} \cdot T^5 \quad \text{----- (4)}$$

・ $20^\circ\text{C} \leq T \leq 65^\circ\text{C}$

保守性を確保するため、式(4)における 65°C の値で一定とした。

高速炉燃料集合体材料における時間に依存しない設計応力強さ (S_m) は次式により算出した。

$$S_m = \text{Min} \left(\frac{1}{2} S_u^{\text{RT}}, \frac{3}{4} S_y^{\text{RT}}, \frac{1}{2} S_u^{\text{HT}}, \frac{3}{4} S_y^{\text{HT}} \right) \quad \text{----- (5)}$$

- S_u^{RT} : 室温における S_u 値
- S_y^{RT} : 室温における S_y 値
- S_u^{HT} : 当該温度における S_u 値
- S_y^{HT} : 当該温度における S_y 値

ただし、記号 Min は括弧内の値で最も小さい値を選ぶことを意味する。 S_y 及び S_u を式(5)に代入して求めた S_m 値を表 2 及び図 5 に示す。 S_m は、 830°C までは S_u 支配であり、これを超える温度では S_y 支配となる。

2.2.2 照射材引張強度評価

(1) 評価に用いたデータ (付録 2) [4, 5]

- ・ 試験方法 : 高速中性子による材料照射(「常陽」、Phenix)及び燃料照射(「常陽」、FFTF)後の引張試験
- ・ ひずみ速度 : $6.0 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-3}$ [s^{-1}]
- ・ 照射温度 : $392 \sim 734$ [$^\circ\text{C}$]
- ・ 照射時間 : $3,852 \sim 24,464$ [h]
- ・ 中性子照射量 : $2.4 \times 10^{26} \sim 2.5 \times 10^{27}$ [n/m^2 , $E > 0.1\text{MeV}$]
- ・ 引張試験温度 : $400 \sim 750$ [$^\circ\text{C}$]

(2) 評価方法

短時間強度に及ぼす環境効果としては照射効果と Na 効果が考えられる。このうち照射効果として照射硬化がある。これは、照射温度が約 500°C 以下の場合、フランクループ生成に伴う

転位密度増加が生じ、短時間強度が上昇する現象である。これを超える高温では、主として製造時に導入した冷間加工組織の回復、軟化のため強度低下が生じる（照射軟化）。

一方、高温側では、加工組織の回復、軟化（照射軟化）に加えて、固溶元素の Na 中への選択的拡散溶出による効果（Na 効果）が 2 次的要因として重畳したものと現れる。現状のデータベース及び照射材料の機械的性質に及ぼす照射効果に関する知見を考慮すると、環境効果として各因子を単純に分離、定量化することは困難である。従って、現状で得られている Na 中での照射データを用い、短時間強度に関する補正係数を定めた。

強度補正係数の算出には、「常陽」、仏国 Phenix 及び米国 FFTF で材料照射試験又は燃料ピン照射試験を実施した SUS316 相当鋼被覆管及び「常陽」燃料照射 SUS316 相当鋼ラップ管の照射後引張試験データ（以下、照射材データと呼ぶ）を用いた。これらの 0.2%耐力及び引張強さと高速中性子照射量の関係を試験温度で整理したものを図 6、図 7 に示す。なお、試験温度は各試験片の照射温度に合わせた。これらのデータを用いて、短時間強度補正係数を次の方法により求めた。

① 短時間強度補正係数の算出

個々の照射材データ（照射後の 0.2%耐力 σ_y^* 、引張強さ σ_u^* ）を 2.2.1 で導出した非照射材強度値（最適近似式に照射材データの各試験温度を代入して求めた値： σ_y 、 σ_u ）でそれぞれ除した値（ σ_y^*/σ_y 、 σ_u^*/σ_u ）を算出し、照射による強度低下係数とした。

② 短時間強度補正係数の定式化

σ_y^*/σ_y 及び σ_u^*/σ_u の値をラーソンミラーパラメータ（LMP）にて整理し、各強度補正係数の標準偏差が最小となる最適近似式を求めた。ここで、 σ_y^*/σ_y 及び σ_u^*/σ_u が 1 を超える温度域（475℃未満）については、照射硬化により強度低下が生じないことを意味しているため、最適近似式の算出データから除外した。

(3) 評価結果

図 8 及び図 9 に照射材データと最適近似曲線を示す。算出した式は以下の通りである。

$$\sigma_y^*/\sigma_y = -12.219 + 7.5134 \times 10^{-3} (\text{LMP}) - 1.3726 \times 10^{-6} (\text{LMP})^2 + 7.9778 \times 10^{-11} (\text{LMP})^3 \text{ ----- (6)}$$

$$\text{LMP} = (T+273.15) \cdot (2.6624 + \log_{10}(t_{\text{irr}})) \text{ ----- (7)}$$

$$\sigma_u^*/\sigma_u = -13.377 + 2.7572 \times 10^{-3} (\text{LMP}) - 1.7059 \times 10^{-7} (\text{LMP})^2 + 3.3751 \times 10^{-12} (\text{LMP})^3 \text{ ----- (8)}$$

$$\text{LMP} = (T+273.15) \cdot (14.905 + \log_{10}(t_{\text{irr}})) \text{ ----- (9)}$$

ここで、T は照射温度[℃]、 t_{irr} は照射時間[h]である。

図 6 及び図 7 に示すように、照射温度 475～525℃は、SUS316 相当鋼のスエリングピーク温

度に対応し、潜伏期間が終了する 16×10^{26} (n/m^2 , $E > 0.1 \text{ MeV}$) を近傍から徐々に強度低下が生じている。スエリングに起因した強度低下の不確かさを考慮し、安全裕度を適切に設けるため、 $475 \sim 525^\circ\text{C}$ の照射温度範囲では、最も強度が低下する照射温度である 525°C を一律に最適式(式(6)～(9))に代入することにより短時間強度補正係数 (γ_{Sy} 及び γ_{Su}) を導出した。導出した短時間補正係数 γ_{Sy} 及び γ_{Su} を以下に示す。

- ・ 0.2%耐力に対する短時間強度補正係数 γ_{Sy}

$$\gamma_{Sy} = -12.219 + 7.5134 \times 10^{-3} (\text{LMP}) - 1.3726 \times 10^{-6} (\text{LMP})^2 + 7.9778 \times 10^{-11} (\text{LMP})^3 \quad \text{--- (10)}$$

$$\text{LMP} = (\text{T} + 273.15) \cdot (2.6624 + \log_{10}(t_{\text{irr}})) \quad \text{----- (11)}$$

ただし、LMP の値が 6968.8 を超える場合は、LMP の値が 6968.8 の場合の値を用いる。また、 γ_{Sy} の算出値が 1 以上の場合及び $\text{T} < 475^\circ\text{C}$ の温度範囲では一律に $\gamma_{Sy} = 1$ とする。 $475^\circ\text{C} \leq \text{T} \leq 525^\circ\text{C}$ の温度範囲では、一律に上式の T に 525°C を代入して得た値を用いることとする。

- ・ 引張強さに対する短時間強度補正係数 γ_{Su}

$$\gamma_{Su} = -13.377 + 2.7572 \times 10^{-3} (\text{LMP}) - 1.7059 \times 10^{-7} (\text{LMP})^2 + 3.3751 \times 10^{-12} (\text{LMP})^3 \quad \text{--- (12)}$$

$$\text{LMP} = (\text{T} + 273.15) \times (14.905 + \log_{10}(t_{\text{irr}})) \quad \text{----- (13)}$$

ただし、LMP の値が 20256 を超える場合は、LMP の値が 20256 の場合の値を用いる。また、 γ_{Su} の算出値が 1 以上の場合及び $\text{T} < 475^\circ\text{C}$ の温度範囲では一律に $\gamma_{Su} = 1$ とする。 $475^\circ\text{C} \leq \text{T} \leq 525^\circ\text{C}$ の温度範囲では、一律に上式の T に 525°C を代入して得た値を用いることとする。

上式に照射材データの照射条件（照射温度と照射時間）を代入して導出した短時間強度補正係数 (γ_{Sy} 、 γ_{Su}) を試験温度における設計降伏点 (S_y) 及び設計引張強さ (S_u) に乗じた値 (S_y^* 、 S_u^*) を求め、これらと各照射材データ (σ_y^* 、 σ_u^*) と比較した結果をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。 S_y^* と S_u^* が、全ての照射材データを包絡していることから、導出した短時間補正係数は妥当と判断される。

個々で求めた短時間強度補正係数の適用可能範囲は、用いたデータ条件から以下の通り定めた。

- ・ 温度：室温～ 700°C
- ・ 時間：24,000 [h]まで

2.3 クリープ強度・変形挙動評価

2.3.1 非照射材クリープ強度評価

(1) 評価に用いたデータ

本評価に用いた強度データは以下の通りである（図 12、付録 3） [3, 6-8]。ここで、付録 3 に示す板状クリープ片を用いた 900℃までのクリープ破断データを新たに拡充した。

- ・ 試験方法：炉外（非照射下）大気中内圧クリープ破断試験（内圧導入型）
及び Ar 中板状クリープ試験
- ・ 試験温度：600～900℃
- ・ 相当応力：17～424MPa

(2) 評価方法

クリープ変形は高温での母相原子の自己拡散を介して生じる事象であり、試験温度に大きく依存する。このため、温度の異なる試験で得たクリープ破断寿命データを応力のみ関数で表すことはできない。一方、アレニウス則に基づいて試験温度と破断時間を統一的に表す LMP を応力の関数として回帰分析することで、試験温度の異なるクリープ破断寿命データを精度よく整理できることが知られている [9, 10]。

$$LMP = (T+273.15) \cdot (C+\log_{10}(t_R)) \quad \text{-----} \quad (14)$$

ここで、T は温度 [℃]、 t_R はクリープ破断時間 [h]、C は材料依存定数である。

本評価で用いるデータの大半は内圧クリープ試験データである。内圧クリープ試験では、試験片を高温に加熱保持した状態で、外部から不活性ガスによる内圧を導入する。これにより、管の周方向及び軸方向への応力が負荷される。この状態での相当応力 (σ_{eq} [MPa]) は、以下の通り導入内圧から算出した。内圧クリープ試験片に加わる周方向の応力 (σ_θ) と軸方向の応力 (σ_z) は、薄肉円筒管近似により、次式の通り表すことができる（径方向応力 (σ_r) はゼロである）。

$$\text{周方向応力} \quad \sigma_\theta = \frac{d}{2t} \cdot P \quad \text{-----} \quad (15)$$

$$\text{軸方向応力} \quad \sigma_z = \frac{d}{4t} \cdot P \quad \text{-----} \quad (16)$$

ここで、P は内圧、d は管の外直径、t は管の肉厚である。上式を Von Mises 応力の式に代入することで、以下の通り、内圧からの相当応力 (σ_e) を算出する式が得られる。

$$\text{相当応力 (Von Mises)} \sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\theta = \frac{\sqrt{3} \cdot d}{4t} P \quad \text{----- (17)}$$

本検討では、クリープ破断強度の最適近似式と下限式（設計クリープ破断応力強さ S_R ）を LMP に対する相当応力の関数として導出した。具体的には、クリープ破断試験における試験温度 (T) とクリープ破断時間 (t_R) から LMP を算出し、この LMP の値を相当応力の常用対数 ($\log_{10}(\sigma_e)$) の多項式として回帰分析した。ここで、 $\log_{10}(\sigma_e)$ の標準偏差が最小となる LMP の定数 C 及び多項式の係数を算出した。データの回帰性から、 $\log_{10}(\sigma_e)$ の 4 次式を採用した。 S_R は、全ての試験データを包絡するよう、最適近似式における時間に係数 α を乗じることで導出した。

(3) 結果

回帰分析により求めた最適近似式を以下に示す。また、最適近似式と実測データを図 13 に示す。

・ $\sigma_{eq} \geq 17.6644467547202$:

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T+273.15) \cdot (15.1450082092206 + \log_{10} t_R) / 1000 \\ &= - 5.65339613604161 \cdot (\log_{10} \sigma_{eq})^4 + 42.7019417523048 \cdot (\log_{10} \sigma_{eq})^3 \\ &\quad - 119.487737798023 \cdot (\log_{10} \sigma_{eq})^2 + 142.649121036112 \cdot (\log_{10} \sigma_{eq}) \\ &\quad - 39.9934030462546 \quad \text{----- (18)} \end{aligned}$$

・ $\sigma_{eq} < 17.6644467547202$: LMP=21.2185058809371 (一定) ----- (19)

クリープ試験では、負荷応力の低下とともに破断寿命は増加する。よって、図 13 において、負荷応力の低下とともに LMP が増加すべきであるが、応力の 4 次式を採用したため、 σ_{eq} が 17.6644467547202MPa を下回ると、LMP は逆に減少傾向となる。このため、 σ_{eq} が 17.6644467547202MPa を下回る範囲では、 σ_{eq} が 17.6644467547202MPa の場合の LMP 値 (21.2185058809371) で一定という保守的な設定を行った。

予測値に対する実測値のバラツキを把握するため、クリープ破断時間の実測値を予測値（上式を用いて算出した値）で除した値（クリープ破断予測比）を算出し、LMP で整理した（図 14）。この比の常用対数の標準偏差 (σ) は 0.1770 と算出され、99%信頼上限及び 99%信頼下限に相当する強度比の常用対数は、それぞれ 0.4567 (2.58σ) と -0.4567 (-2.58σ) となる。よって、99%信頼上限及び 99%信頼下限に相当する強度比は、それぞれ 2.862 ($10^{0.4567}$) と 0.3494 ($10^{-0.4567}$) と算出される。本検討では、99%信頼下限よりも保守側の値である $1/3$ の逆数を時間係数とし、式 (18) より次の S_R の式を導出した。ここで、式の係数は四捨五入により、有効数字 5 桁とした。

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T+273.15) \cdot (15.145 + \log_{10}(3 \cdot t_R)) / 1000 \\ &= - 5.6534 \cdot (\log_{10} S_R)^4 + 42.702 \cdot (\log_{10} S_R)^3 - 119.49 \cdot (\log_{10} S_R)^2 \\ &\quad + 142.65 \cdot (\log_{10} S_R) - 39.993 \quad \text{----- (20)} \end{aligned}$$

ただし、 S_R が 17.664[MPa]を下回る場合は、 S_R の値が 17.664[MPa]の場合の LMP 値を用いる。

図 15 及び図 16 に炉外大気中/Ar 中クリープ試験データと S_R の比較を示す。時間係数 3 を適用することで、600～900℃までの全てのクリープ破断データを包絡できている。なお、各温度において、上式から得られる S_R の計算値が設計引張強さ S_u を上回る場合には、 $S_R=S_u$ としている。

上記で導出したクリープ破断強度式の適用可能温度範囲は、用いたデータの使用条件から 900℃以下とする。

次に、時間に依存する設計応力強さ (S_t) を次式により算出した。

$$S_t = 0.8 \cdot S_R \quad \text{-----} \quad (21)$$

上式に S_R を代入して求めた S_t を表 3 及び図 17 に示す。なお、 S_R の計算値が設計引張強さ S_u を上回る場合には、 $S_R=S_u$ としており、低温、高応力条件において $S_t=0.8 \cdot S_u$ となる場合、破断時間が一定値となる (図 17 の破線部)。

2.3.2 照射材クリープ強度評価

(1) 評価に用いたデータ

評価に用いたデータは以下の通りである (付録 4)。

- ・ 炉外 (非照射) Na 中内圧クリープ破断試験 (内圧封入型) [3]
 - 試験温度：650℃、675℃、700℃
 - 試験周応力：70～403MPa
- ・ 炉内 Na 中内圧クリープ破断試験 (FFTF/MOTA、内圧封入型) [8]
 - 試験温度：605℃、670℃、750℃
 - 試験周応力：70.0～328MPa
 - 中性子照射量：0.5～20.52×10²⁶ (n/m², E>0.1MeV)

(2) 評価方法

① クリープ強度に及ぼす環境効果

図 18 に炉外 (非照射下) 大気中、炉外 (非照射下) Na 中、炉内 (照射下) Na 中の内圧クリープ破断試験データを LMP で整理した結果を示す。ここで、LMP の材料定数 C は非照射材の評価で求めた $C=15.145$ を用いた。

LMP が 18.2 以下の範囲では、炉内 Na 中のクリープ破断強度は炉外 Na 中のクリープ破断強度を下回っているが、LMP がこれを超える範囲では、両者の破断寿命に有意な差が認められない。このような試験環境がクリープ破断強度に及ぼすメカニズムを以下に整理する。

- ・炉外 Na 中：鋼中の微量添加元素である P と B の Na 中への溶出が生じる。これに伴って $M_{23}C_6$ 等の炭化物の微細分散析出効果が失われるため強度低下が生じる[1, 11]。高温、長時間側では、冷間加工転位の回復による効果も重畳する。
- ・炉内 Na 中：上述の微量元素の溶出に加え、製造時の冷間加工転位の回復が照射によって促進されることで強度低下が生じる[1, 8, 11]。ここで、照射による冷間加工転位の回復は、照射温度に応じたレベルに収束する[12]。

炉外 Na 中の低 LMP 側（短時間、低温側）では、P と B がほとんど溶出しないためクリープ強度は維持される。一方、炉内 Na 中の場合、照射による転位回復が比較的早期に生じ、クリープ破断強度は低下する。このため、低 LMP 側では炉外と炉内でクリープ破断強度の違いが現れたと考えられる。一方、高 LMP 側（長時間、高温側）では、高温 Na 環境による P と B の Na 中への溶出と冷間加工転位の回復が支配的となる結果、炉内外のクリープ強度が同程度になったと考えられる。相当応力が 60MPa では炉内 Na 中と炉外 Na 中のクリープ破断時間は一致していること（図 18）から、これよりも低い応力、即ち高温長時間側で試験した場合、炉内と炉外のクリープ破断強度は一致すると考えることができる。

② クリープ強度補正係数の策定方法

高速炉内照射によるクリープ破断強度の低減効果を、以下の方法によりクリープ強度補正係数として定式化した。ここで、クリープ強度補正係数とは、炉外大気中と炉内 Na 中とで温度とクリープ破断時間がそれぞれ同じ条件の応力比（[炉内 Na 中クリープ破断強度]／[炉外大気中クリープ破断強度]）である。上述の通り、Na や照射によるクリープ破断強度の低下は使用温度と時間に依存することから、クリープ強度補正係数について LMP を用いて定式化する。一方、炉外大気中のクリープ破断試験と炉内 Na 中のクリープ破断試験における温度と破断時間がそれぞれ一致する条件で応力を直接比較できるような実測データはない。このため、実測データと整合性の高い最適近似式を介して応力比を求める必要がある。

そこで、クリープ強度補正係数の策定用に炉外 Na 中クリープ破断強度の最適近似式を作成した。炉外大気中の式としては、2.3.1 で求めた最適近似式（式(18)）を用いた。これらのクリープ強度式は、試験温度と破断時間から算出される LMP によって表される。上述のようにクリープ強度を決定するメカニズムが使用環境によって異なると考えられることから、炉外 Na 中のクリープ破断強度式用の LMP の材料定数 C は炉外 Na 中データで最適化した値を用いた。

(3) 結果

① 炉外 Na 中クリープ強度式の作成

低応力条件での炉内 Na 中のクリープ破断強度評価用に炉外 Na 中クリープ破断強度の最適近似式を策定した。炉外 Na 中の試験温度とクリープ破断時間から算出される LMP を応力の多項式で回帰分析することで、以下に示す最適近似式を導出した。LMP の材料定数 C もこの回帰処理で最適値を算出した。ここで、回帰分析は $\log_{10}t_R$ の標準偏差が最小となるよう実施した。

$\sigma_{eq} \geq 130\text{MPa}$:

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T+273.15) \cdot (18.0641594421482+\log_{10}t_R)/1000 \\ &= -7.06676262351665 \cdot (\log_{10} \sigma_{eq})^2 + 27.5487815344614 \cdot \log_{10} \sigma_{eq} \\ &\quad - 5.83325638064692 \text{ ----- (22)} \end{aligned}$$

$\sigma_{eq} < 130\text{MPa}$:

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T+273.15) \cdot (18.0641594421482+\log_{10}t_R)/1000 \\ &= - 2.32869020616547 \cdot \log_{10} \sigma_{eq} + 25.7463850042698 \text{ ----- (23)} \end{aligned}$$

応力の大きさによって式を切り替えたのは、試験データの回帰性を高めるためである。2つの関数を滑らかに接続するため、切り替え点における曲線の傾きを一致させている。図19に示す通り、本最適近似式と実測値はよく一致している。

② クリープ強度補正係数の定式化

クリープ強度補正係数 (γ) を以下の組み合わせで算出し、LMP を用いて定式化した。ここで、低応力側（高温、長時間側）では Na 効果が支配的になるという実験事実（図18）に基づき、低応力側（高温、長時間側）でのクリープ強度補正係数は「[炉内 Na 中クリープ強度] / 炉外[大気中クリープ強度]」ではなく「[炉外 Na 中クリープ強度] / [炉外大気中クリープ強度]」としている。

・ 高応力側（相当応力 $> 60\text{MPa}$ ）

$$\gamma = [\text{炉内 Na 中クリープ強度}] / [\text{炉外大気中クリープ強度}]$$

・ 低応力側（相当応力 $\leq 60\text{MPa}$ ）

$$\gamma = [\text{炉外 Na 中クリープ強度}] / [\text{炉外大気中クリープ強度}]$$

上記において、炉内 Na 中クリープ強度と炉外大気中クリープ強度は、試験温度とクリープ破断時間がそれぞれ一致する条件での相当応力である。具体的には、高応力側での炉外大気中クリープ強度は、温度と破断時間を炉内 Na 中クリープ試験と同一条件として、式(18)により炉外大気中クリープ強度（応力）を算出し、炉内 Na クリープ強度の実測値（試験応力の実測値）との比（強度補正係数）を求めた。低応力側では、式(18)と式(23)を用いて、以下の条件での炉外大気中クリープ強度と炉外 Na 中クリープ強度を算出し、両者の比（強度補正係数）を求めた。

T=605°C : $\sigma_{eq}=20\text{MPa}$ 、40MPa、60MPa

T=670°C : $\sigma_{eq}=20\text{MPa}$ 、40MPa、60MPa

T=750°C : $\sigma_{eq}=20\text{MPa}$ 、40MPa、60MPa

上述の通り算出した強度補正係数を LMP で整理した結果を図 20 に示す。この図より、強度補正係数は、以下の通り設定した。

- ・低 LMP 側 ($LMP \leq 24.8777329642065$) :

[炉内 Na 中強度] / [炉外大気中強度] の平均値を取り一定値 ($\gamma = 0.735884332647099$) とした。

- ・高 LMP 側 ($LMP > 24.8777329642065$) :

炉外 Na 中強度 / 炉外気中強度の常用対数を LMP の一次関数で回帰分析し、次式を得た。ここで、 $\log_{10} t_R$ の標準偏差が最小となるよう回帰分析を行った。

$$\log_{10} (\gamma) = 4.79989256913151 - 0.198293108924183 \cdot LMP \quad \text{----- (24)}$$

$$LMP = (T + 273.15) \cdot (21.5385641996209 + \log_{10} t_R) / 1000 \quad \text{----- (25)}$$

ここで、低 LMP 側と高 LMP 側の境界値 ($LMP : 24.8777329642065$) は、式 (24) に $\gamma = 0.735884332647099$ を代入して求めた値である。以上の検討により、強度補正係数 (γ) を次式の通り定式化した。ここで、式の係数は四捨五入により、有効数字 5 桁とした。

$$LMP > 24.878 : \gamma = 10^{(4.7999 - 0.19829 \cdot LMP)} \quad \text{----- (26)}$$

$$LMP = (T + 273.15) \cdot (21.539 + \log_{10} t_R) / 1000 \quad \text{----- (27)}$$

ここで、LMP の値が 24.878 以下の場合には、LMP の値が 24.878 の場合の値とする。

このクリープ強度補正係数を S_R (式 (20)、設計クリープ破断応力強さ) に乗じることにより、照射及び Na 効果を考慮したクリープ強度の下限値 (S_R^*) を求めることができる。 S_R^* と実測値 (炉内 Na 中クリープ破断試験データ) と比較した結果を図 21 に示す。 S_R^* は全てのデータを包絡しており、本検討におけるクリープ強度に及ぼす照射及び Na 効果 (クリープ強度補正係数) の評価は妥当と判断される。

本検討で定めたクリープ強度補正係数の適用可能温度範囲は、用いたデータの取得条件から 700°C 以下とする。

2.3.3 非照射材クリープ変形挙動評価

(1) 評価に用いたデータ

評価に用いたデータは以下の通りである (付録 5)。ここで、付録 5 に示す板状クリープ試験片を用いて 900°C までのクリープ破断データを新たに拡充した。

- ・被覆管単軸クリープ試験データ [6, 7]
試験温度 : 650°C、700°C、750°C
試験応力 : 49~255 MPa
- ・板状クリープ試験データ

試験温度：800℃、850℃、900℃、1000℃

試験応力：14～170 MPa

(2) 評価方法

熱クリープひずみデータのうち1次及び2次クリープ領域のデータを解析し、以下の構成式に基づく定式化を行った。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_t \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + (d\varepsilon/dt) \cdot t \quad \text{----- (28)}$$

ε_c : 熱クリープひずみ (%、相当ひずみ)

ε_t : 1次クリープひずみの飽和値 (%、相当ひずみ)

$d\varepsilon/dt$: 2次クリープひずみ速度 (%/hr)

ここで、第1項及び第2項は、それぞれ1次クリープひずみと2次クリープひずみを表す。1次クリープひずみの係数 (ε_t 、 γ) 及び2次クリープひずみ速度 ($d\varepsilon/dt$) を表す式は、以下の通り、いずれも熱活性化プロセスが律速となる事象に適用するアレニウスの項に応力依存の項を乗じる形とした。

$$\varepsilon_t = A_t \cdot (\sigma_{eq})^{n_t} \cdot \exp(-Q_t/(T + 273.15)) \quad \text{----- (29)}$$

$$\gamma = A_\gamma \cdot (\sigma_{eq})^{n_\gamma} \cdot \exp(-Q_\gamma/(T + 273.15)) \quad \text{----- (30)}$$

$$d\varepsilon/dt = A_s \cdot (\sigma_{eq})^{n_s} \cdot \exp(-Q_s/(T + 273.15)) \quad \text{----- (31)}$$

ここで、 σ_{eq} は相当応力[MPa]である。上記の式を用いたデータ解析を以下の手順で実施した。

① 2次クリープひずみ速度の定式化

- ・クリープ変形速度が最小となる速度を2次クリープひずみ速度とした。以下の手順で、2次クリープひずみ速度の式(31)の係数 (n_s 、 A_s 及び Q_s) を算出した。
- ・試験温度 (650～900℃) 毎に2次クリープひずみ速度の応力依存性データを回帰分析し、応力指数 n_s 及びその平均値を算出した。
- ・式(31)を次式の通り展開し、求めた応力指数 n_s の平均値を代入した。

$$\ln((d\varepsilon/dt)/(\sigma_{eq})^{n_s}) = \ln(A_s) - Q_s/(T + 273.15) \quad \text{----- (32)}$$

- ・ $d\varepsilon/dt$ 、 σ_{eq} 、試験温度 (650～900℃) の実測値を上式に代入した上で、 $\ln((d\varepsilon/dt)/(\sigma_{eq})^{n_s})$ の標準偏差が最小となるよう回帰分析し、係数 A_s と Q_s を算出した。

② 1次クリープひずみの定式化

- ・以下の通り、クリープひずみデータを回帰分析することで、1次クリープひずみ式の係数 ($n_t, A_t, Q_t, n_\gamma, A_\gamma, Q_\gamma$) を算出した。
- ・式(29)に示す1次クリープひずみの飽和値 (ϵ_t) の係数 (n_t, A_t 及び Q_t) を①と同じ手順で算出した。
- ・試験温度 (650~900°C) 毎に1次クリープひずみの飽和値 (ϵ_t) の応力依存性データを回帰分析し、応力指数 n_t 及びその平均値を算出した。
- ・式(29)を次式の通り展開し、求めた応力指数 n_t の平均値を代入した。

$$\ln(\epsilon_t/(\sigma_{eq})^{n_t}) = \ln(A_t) - Q_t/(T + 273.15) \quad \text{-----} \quad (33)$$

- ・ ϵ_t, σ_{eq} , 試験温度 (650~900°C) の実測値を上式に代入した上で、 $\ln(\epsilon_t/(\sigma_{eq})^{n_t})$ の標準偏差が最小となるよう回帰分析し、係数 A_t と Q_t を算出した。
- ・ γ の係数 (n_γ, A_γ 及び Q_γ) についても、式(30)を展開して得た次式を用いて、同じ手順で算出した。

$$\ln(\gamma/\sigma^{n_\gamma}) = \ln(A_\gamma) - Q_\gamma/(T + 273.15) \quad \text{-----} \quad (34)$$

(3) 結果

① 2次クリープひずみ速度の算出

図22~図25に各温度における2次クリープ歪み速度の応力依存性を示す。650°Cから900°Cの温度範囲において、応力指数 n_s の値は2.41から4.28であり、平均値3.34と算出された。これは、転位クリープ(高温累乗則)で想定される応力指数(3~5) [13]と同等である。一方、1000°Cはオーステナイト鋼の溶体化処理温度近傍であり、再結晶や冷間加工転位の回復等、顕著な微細組織の変化が考えられること及び1000°Cでの応力指数は6.10と他の温度域での値よりも高めであることから、1000°Cのデータは解析対象外とした。以降、 n_s の値として、650°Cから900°Cでの平均値である3.34を採用する。

次に式(32)の通り、 $\ln((d\epsilon/dt)/\sigma^{3.34})$ の $1/(T+273.15)$ 依存性を評価した結果を図26に示す。 $\ln((d\epsilon/dt)/\sigma^{3.34})$ は、 $1/(T+273.15)$ に対して線形関係にある。これは、 $(d\epsilon/dt)/\sigma^{3.34}$ の温度依存性がアレニウス則に則ることを示している。回帰分析により、 A_s と Q_s の最適値はそれぞれ 3.10×10^8 及び 4.24×10^4 と評価された。 $\ln((d\epsilon/dt)/\sigma^{3.34})$ の標準偏差(σ)は0.59560であり、 A_s の95%信頼区間 ($\pm 1.96\sigma$) の算出値は表4に示す通りとなった。

② 1次クリープひずみの算出

図27に1次クリープひずみの飽和値 (ϵ_t) の応力依存性を示す。650°Cのデータは明確な応力依存性を示し、その応力指数(n_t)は1.76となった。一方、高温になるに従い応力依存性が不明瞭となった。これは、高温環境では2次クリープ変形が顕著となり全体のひずみから1次ク

リープひずみを分離する精度が低下するためである。そこで、高温であってもクリープ変形やその温度依存性が無視できる条件を以下の通り設定し、700℃以上の高温域での応力指数評価に用いた。650℃における1次クリープひずみの飽和値 (ε_t) の応力依存性は次式の通り表すことができる (図 27)。

$$\varepsilon_t = 2.66 \times 10^{-5} \times \sigma^{1.76} \text{ ----- (35)}$$

応力がゼロに近い 0.098 [MPa] (0.01 [kgf/mm²]) の場合の ε_t を計算すると、 4.5×10^{-7} [%] となる。このように応力がほぼゼロの場合、いずれの温度でもクリープ変形は小さく、温度依存性は無視できると考え、700～900℃では、実測データだけでなく (σ, ε_t) = (0.098 [MPa], 4.5×10^{-7} [%]) を含めた回帰分析を実施した。その結果、図 27 に示す通り、650～900℃の温度範囲における応力指数 (n_t) は 1.70～2.15、平均値は 1.90 と評価された。

次に式(33)の通り、 $\ln(\varepsilon_t/\sigma^{1.90})$ の $1/(T+273.15)$ 依存性を評価した結果を図 28 に示す。 $\ln(\varepsilon_t/\sigma^{1.90})$ を $1/(T+273.15)$ の 1 次式で回帰分析し、 A_t 及び Q_t の最適値として、それぞれ 1.95 と 1.12×10^4 を算出した。 $\ln(A_t)$ の標準偏差 (σ) は 0.92844 であり、 A_t の 95%信頼区間 ($\pm 1.96\sigma$) の算出値は表 4 に示す通りとなった。

なお、図 29 に 650～900℃の温度範囲で算出した ε_t の全データを示す。全データの平均値、上限値及び下限値はそれぞれ 0.2348、0.6556 及び 0.0279 であった。

定数 γ についても同様な方法及び温度範囲 (650～900℃) で応力指数 n_γ 、 A_γ 及び Q_γ を算出した。算出結果を図 30、図 31 及び表 4 に示す。

③ 熱クリープひずみの定式化

以上の検討結果より、熱クリープひずみ式 (式(28)～(31)) の平均、上下限用の係数を表 5 の通り定めた。平均式では、全ての係数として最適値を採用した。上下限式については、全ての係数をそれぞれ上限値もしくは下限値とする方法も考えられるが、この場合、過度に保守的な式となる。このため、上限式については、 ε_t の係数 A_t のみ 95%信頼区間の上限値を採用し、それ以外の係数は最適値とした。下限式については、係数 A_t のみ下限値を採用した場合、係数 A_t の下限値と最適値の絶対値の差が小さく、十分な保守性が確保できない。このため、係数 A_t に加えて 2 次クリープひずみ速度の係数 A_s も 95%信頼区間の下限値を採用した。

なお、表 5 の脚注に注記している通り、1 次クリープの飽和値 (ε_t) は、図 29 に示す全体の平均値、上下限値を上限とした。即ち、熱クリープひずみの最適近似値、上限値及び下限値の計算において、 ε_t の計算値が図 29 に示す値 (ε_t 最適近似値の計算で 0.235、 ε_t 上限値の計算で 0.656、 ε_t 下限値の計算で 0.0279) を超えた場合、図 29 に示す値を用いる。これは、式(29)に基づくと、高応力になるほど ε_t の算出値が高くなるが、このような高応力域における実事象では、2 次クリープ変形が支配的となることを考慮したものである。

付録 5 に示す通り、650～850℃の温度範囲において、熱クリープひずみ式から算出される最適近似値は実測値と良く一致している。また、特異的なクリープ曲線形状を示す実測データのごく初期を除き、熱クリープひずみデータが上下限内に包絡されており、本検討で導出した熱

クリープひずみ式は妥当と判断される。一方、900℃では、本検討で導出した熱クリープひずみ式は実測データよりも過少評価となっている。これは、高温側での組織の回復による可能性が考えられる。

策定に用いたデータ条件及び 900℃では過少評価となっていることから、熱クリープひずみ式の適用範囲として以下を設定する。

- ・温度：425～850℃
- ・時間： $t \leq 0.3t_R$

(3次クリープ領域を含まない範囲に適用するため、破断時間(t_r)の0.3倍以内とする)

2.4 SUS316 溶体化材の強度特性

高速炉燃料用 SUS316 相当鋼は、P、B、Ti 等の微量元素の添加や転位組織導入のための冷間加工を行うことで、耐照射性改善のための組織を制御した材料である[1, 8]。一方、高照射量の中性子照射環境に晒されない炉心部材には、SUS316 溶体化材が使用される場合があり、その強度特性把握も重要である。

高速炉の構造材料として、SUS316 や SUS304 の溶体化材が使用されており、これらの強度特性が策定されている。高温クリープ破断強度及び高温クリープひずみ式については、それぞれ付録 6 及び付録 7 に示す通り、高速炉の燃料集合体設計で必要となる 850℃を超える 900℃まで適用可能な式が策定されており、これらを高速炉の燃料集合体設計にも適用可能である。

また、物性値については、ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME BPVC) で SUS316 の組成を含むオーステナイト鋼を対象とした値が規定されている。これらの値を使用することで、各種物性式を策定することができる。付録 8 に ASME BPVC 及びその他公開データを用いて、導出した SUS316 の物性式を示す。

3. まとめ

本研究では、SUS316 相当鋼を用いた高速炉燃料設計の高信頼性化に向けて、これまでに取得された SUS316 相当鋼の高温強度及び照射データを材料学的及び統計学的な観点で評価・解析することで、高温強度及び高照射量までの照射特性に係る設計用強度式を導出した。

- 1) 異常な過渡変化の上限温度を超える 900°C までの SUS316 相当鋼（非照射材）の高温引張強度データ及び高温クリープ破断強度データを拡充し、統計処理を行うことで、0.2%耐力、引張強さ及びクリープ破断強度の最適近似式及び下限式（設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 、設計クリープ破断応力強さ S_R ）を導出した。
- 2) 高速実験炉「常陽」、仏国・高速原型炉 Phenix 及び米国・FFTF で中性子照射した SUS316 相当鋼の引張試験データを統計的及び材料学的な観点で解析し、炉内 Na 中照射による引張強度低下を表す短時間強度補正係数を定式化した。 S_y 及び S_u に短時間強度補正係数を乗じた値と実測値（中性子照射後の引張強度データ）を比較することで、導出式の妥当性を確認した。
- 3) 米国・FFTF の照射リグ MOTA を用いて取得した SUS316 相当鋼被覆管の炉内（中性子照射下）高温 Na 中クリープ破断データと炉外（非照射）高温 Na 中クリープ破断データを統計的及び材料学的な観点で解析し、炉内高温 Na 環境によるクリープ強度の補正係数を導出した。 S_R にこのクリープ強度補正係数を乗じた値と実測値（炉内クリープ破断データ）を比較することで、導出式の妥当性を確認した。
- 4) 異常な過渡変化の上限温度を超える 900°C までの熱クリープひずみデータを拡充し、熱クリープひずみの最適近似式及び上下限式を定めた。
- 5) 高速炉の構造設計用に策定された SUS316 溶体化材の 900°C まで適用可能な高温クリープ破断強度及び高温クリープひずみ式を示した。これらは高速炉の炉心で用いる SUS316 溶体化材にも適用可能である。

謝 辞

本レポートにおけるデータの数値解析に協力頂いた株式会社 NESI の伊藤昌弘氏、石谷行生氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 立石嘉徳、柚原俊一、柴原格、伊藤正彦、野村茂雄、佐藤義則、吉田英一、鹿倉栄、高速炉炉心材料用改良 SUS316 ステンレス鋼の開発、日本原子力学会誌, vol.30, no.11, 1988, pp.1005-1019.
- [2] Fujiwara, M., Uchida, H., Ohta, S., Yuhara, S., Tani, S., Sato, Y., Development of modified type 316 stainless steel for fast breeder reactor fuel cladding tubes, Radiation-induced changes in microstructure : 13th International Symposium (Part I), ASTM STP 955, 1987, pp.127-145.
- [3] 飯塚昇司、吉田英一、加納茂機、二瓶勲、高速炉用改良 SUS316 ステンレス鋼燃料被覆管の高温材料強度データ集、PNC TN9450 88-004, 1988, 140p.
- [4] Yano, Y., Uwaba, T., Tanno, T., Yoshitake, T., Ohtsuka, S., Tensile properties of modified 316 stainless steel (PNC316) after neutron irradiation over 100 dpa, J.Nucl.Sci.Technol., vol.61, no.4, 2024, pp.521-529.
DOI: 10.1080/00223131.2023.2243943.
- [5] 吉武庸光、大森雄、田中康介、「もんじゅ」型燃料集合体 (MFA-1, 2) 被覆管の引張強度・延性特性評価、JNC TN9400 2001-116, 2001, 71p.
- [6] FBR 材料専門委員会クリープサブグループ (田中千秋)、高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第 12 次クリープ試験)、PNC TN241 83-19, 1983, 83p.
- [7] FBR 材料専門委員会クリープサブグループ (田中千秋)、高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第 13 次クリープ試験)、PNC TN241 85-02, 1984, 95p.
- [8] Ukai, S., Mizuta, S., Kaito, T., Okada, H., In-reactor creep rupture properties of 20% CW modified 316 stainless steel, J.Nucl.Mater., vol.278, 2000, pp.320-327.
- [9] 丸山公一、高温長時間クリープ特性の推定での信頼性向上、鉄と鋼, vol.105, no.8, 2019, pp.767-777.
- [10] Larson, F.R. and Miller, J., A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, Trans. ASME, vol.74, 1952, pp.765-771.
- [11] 吉田英一、材料分野におけるナトリウム技術報告—高温ナトリウム環境中の材料腐食・強度特性等について—, JAEA-Review 2013-026, 2013, 151p.
- [12] Garner, F.A., 4.02 Radiation Damage in Austenitic Steels, Eds. Konings R.J.M., Comprehensive Nuclear Materials, vol.4, 2012 pp.33-95.
- [13] Weertman, J., Dislocation climb theory of steady-state creep, Trans. ASME, vol.61, 1968, pp.681-694.

表 1 SUS316 相当鋼と評価対象材の材料仕様 (1/2)

仕様範囲	化学分析結果 (wt%)														溶体化温度 (°C)	冷間加工度 (%)	結晶粒度 (ASTM No.)	対象試験				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	N	Ti	Nb	V	Co					Cu	As	Al	O
50 MK	0.04 -0.08	0.60 -1.00	1.40 -2.00	0.015 -0.040	≤0.010	13.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	0.002 -0.006	≤0.01	0.05 -0.10	0.05 -0.10	≤0.2	≤0.02	≤0.2	≤0.03	≤0.05	≤0.004	≥1040	20±3	6.0-9.0	[受入れ材] ・クリープ強度評価
	0.052	0.42	1.69	0.027	0.005	13.85	17.76	2.30	0.0020	0.0071	0.003	≤0.005	0.04	0.07	0.04	0.003	0.048	0.0013	1075	20.1	8.5	
	0.058	0.45	1.75	0.027	0.004	13.92	17.75	2.26	0.0019	0.0065	0.005	≤0.005	0.03	0.06	0.04	0.003	0.010	0.0010	1080	19.8	8.2	
50 MS	0.056	0.41	1.70	0.028	0.003	13.80	17.88	2.31	0.0019	0.0074	0.004	0.006	0.04	0.06	0.04	0.003	0.048	0.0028	1075	20.4	8.0-8.1	[受入れ材] ・クリープ強度評価
	0.058	0.53	1.94	0.029	0.010	13.05	17.50	2.40	0.0012	0.0073	0.003	0.002	0.002	0.01	0.14	0.002	0.022	0.0033	1020	21	8.0	
	0.059	0.54	1.63	0.029	0.010	13.05	17.35	2.44	0.0012	0.0080	0.002	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.029	0.0017	1020	21	8.0	
	0.059	0.54	1.63	0.029	0.010	13.05	17.35	2.44	0.0012	0.0080	0.002	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.029	0.0017	1018	21	7.5-8.0	
	0.060	0.53	1.63	0.028	0.010	13.05	17.40	2.56	0.0012	0.0079	0.002	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.029	0.0020	1020	20	7.5-8.0	
	0.057	0.54	1.68	0.029	0.010	13.16	17.45	2.56	0.0014	0.0095	0.003	0.002	0.002	0.03	0.14	0.002	0.015	0.0024	1018	21	8.0	
	0.057	0.53	1.94	0.029	0.010	13.05	17.50	2.44	0.0012	0.0089	0.002	0.002	0.002	0.01	0.14	0.002	0.021	0.0015	1018	20	7.5-8.0	
54 MK	0.059	0.53	1.61	0.029	0.010	13.08	17.35	2.56	0.0011	0.0090	0.003	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.029	0.0015	1020	21	8.0	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリープ強度評価
	0.060	0.52	1.59	0.028	0.009	13.08	17.30	2.49	0.0014	0.0080	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.028	0.0023	1020	20	7.5-8.0		
	0.061	0.53	1.59	0.028	0.009	13.05	17.35	2.46	0.0014	0.0081	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.027	0.0016	1020	20	7.5-8.0		
	0.058	0.53	1.69	0.029	0.009	13.12	17.35	2.49	0.0012	0.0091	0.002	0.002	0.01	0.13	0.002	0.033	0.0027	0.0027	1020	20	7.5-8.0	
	0.057	0.54	1.65	0.029	0.009	13.16	17.55	2.48	0.0012	0.0098	0.002	0.002	0.002	0.03	0.14	0.002	0.015	0.0021	1020	20	8.0	
	0.062	0.82	1.95	0.028	0.009	13.77	16.70	2.34	0.0054	0.0024	0.084	0.042	<0.01	<0.01	<0.01	0.002	0.019	0.0014	1080	20	8.0	
	0.049	0.91	1.62	0.024	0.003	13.96	16.50	2.40	0.0037	0.007	0.078	0.073	<0.002	0.01	0.01	<0.002	0.015	0.0016	1080	20	8.5	
55 MK	0.052	0.82	1.83	0.028	0.009	13.84	16.52	2.48	0.0031	0.003	0.080	0.079	0.01	0.01	0.01	0.002	0.016	0.0016	1080	19-20	8.0-8.5	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリープ強度評価 ・クリープ変形挙動評価 [腫瘍材] ・引張強度評価 ・クリープ強度評価
	0.041	0.76	1.71	0.025	0.005	13.45	16.50	2.34	0.0030	0.005	0.070	0.046	<0.01	0.01	0.01	<0.002	0.013	0.0026	1040	20	8.0-8.5	

※グレーの箇所は仕様範囲外。

表 1 SUS316 相当鋼と評価対象材の材料仕様 (2/2)

仕様範囲	化学分析結果 (wt%)														溶体化温度 (°C)	冷間加工度 (%)	結晶粒度 (ASTM No.)	対象試験				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	N	Ti	Nb	V	Co					Cu	As	Al	O
仕様範囲	0.04 -0.08	0.60 -1.00	1.40 -2.00	0.015 -0.040	≤0.010	13.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	0.002 -0.006	≤0.01	0.05 -0.10	0.05 -0.10	≤0.2	≤0.02	≤0.2	≤0.03	≤0.05	≤0.004	≥1040	20±3	6.0-9.0	
	0.048	0.93	1.78	0.031	0.004	13.81	16.60	2.51	0.0044	0.0075	0.098	0.073	0.002	0.005	0.002	0.002	0.040	0.0017	1085	19	8.2-8.3	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリーブ変形挙動評価
55MS	0.047	0.92	1.74	0.030	0.004	13.74	16.50	2.50	0.0039	0.0077	0.097	0.070	0.002	0.005	0.002	0.002	0.040	0.0018	1085	19-20	8.3-8.8	[照射材] ・引張強度評価 ・クリーブ強度評価
60MK	0.054	0.78	1.72	0.028	0.003	13.45	16.22	2.35	0.0039	0.009	0.078	0.080	0.01	0.01	0.04	0.001	0.029	0.0010	1080	18	7.5	[受入れ材] ・引張強度評価 [照射材] ・引張強度評価
60MS1 (サドフマ材無)	0.056	0.78	1.82	0.025	0.002	13.71	16.30	2.52	0.0034	0.003	0.075	0.095	<0.01	<0.01	0.01	<0.002	0.017	0.0012	1095	20-21	8.5	[受入れ材] ・引張強度評価 [照射材] ・引張強度評価
60MS2	0.056	0.80	1.91	0.028	0.002	13.77	16.50	2.59	0.0037	0.003	0.077	0.091	<0.01	<0.01	0.03	<0.002	0.019	0.0013	1095	20-21	8.0	[照射材] ・引張強度評価
56JS	0.054	0.81	1.82	0.025	0.004	13.96	16.30	2.50	0.0032	0.005	0.097	0.062	<0.01	0.01	0.01	<0.002	0.023	0.0022	1080	21-22	8.5-9.0	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリーブ強度評価
LRK004	0.054	0.78	1.55	0.031	0.002	13.73	16.44	2.37	0.0040	0.0070	0.09	0.087	0.02	0.01	0.01	0.004	0.029	0.0010	1100	18	7.0-7.5	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリーブ強度評価 [照射材] ・引張強度評価
0301	0.063	0.84	1.64	0.030	0.005	13.74	16.40	2.43	0.0040	0.0074	0.09	0.083	0.01	0.01	0.03	0.002	0.019	<0.0003	1100	17	7.5-8.0	[受入れ材] ・引張強度評価 ・クリーブ強度評価 ・クリーブ変形挙動評価
N301	0.053	0.72	1.97	0.020	0.004	13.46	16.35	2.49	0.0022	0.008	0.068	0.066	0.01	0.01	0.02	0.004	0.013	0.0008	1090	20	7.5-8.5	[受入れ材] ・引張強度評価 [照射材] ・引張強度評価
2048010 (S1)	0.055	0.83	1.88	0.024	0.002	13.85	16.40	2.52	0.0036	0.0021	0.08	0.079	<0.01	0.01	0.01	<0.002	0.014	0.0009	1070	20	8.5-9.0	[受入れ材] ・引張強度評価
1035341 (K1)	0.060	0.75	1.86	0.029	0.003	13.60	16.50	2.51	0.0044	0.0033	0.08	0.080	0.03	0.02	0.03	0.002	0.019	0.0004	1060	20	7.5-8.0	[受入れ材] ・引張強度評価
1033301 (K2)	0.060	0.85	1.65	0.030	0.003	13.75	16.44	2.45	0.0045	0.0037	0.08	0.076	0.03	0.01	0.02	0.002	0.014	0.0008	1060	20	7.0-7.5	[受入れ材] ・引張強度評価

表 2 時間に依存しない設計応力強さ (S_m)

温度 (°C)	$1/2 \cdot S_u^{RT}$ (MPa)	$3/4 \cdot S_y^{RT}$ (MPa)	$1/2 \cdot S_u^{HT}$ (MPa)	$3/4 \cdot S_y^{HT}$ (MPa)	S_m (MPa)
20~65	348	469	348	469	348
75	348	469	346	469	346
100	348	469	340	465	340
150	348	469	326	450	326
175	348	469	319	441	319
200	348	469	313	432	313
225	348	469	308	423	308
250	348	469	303	415	303
275	348	469	300	408	300
300	348	469	297	402	297
325	348	469	295	398	295
350	348	469	294	394	294
375	348	469	293	390	293
400	348	469	292	387	292
425	348	469	291	384	291
450	348	469	289	381	289
475	348	469	287	377	287
500	348	469	284	371	284
525	348	469	279	363	279
550	348	469	273	354	273
575	348	469	265	342	265
600	348	469	256	328	256
625	348	469	244	311	244
650	348	469	231	291	231
675	348	469	216	268	216
700	348	469	199	243	199
725	348	469	180	216	180
750	348	469	161	189	161
775	348	469	141	159	141
800	348	469	121	131	121
825	348	469	102	103	102
850	348	469	86	79	79

※グレーの箇所は、 $1/2 \cdot S_u^{RT}$ 、 $3/4 \cdot S_y^{RT}$ 、 $1/2 \cdot S_u^{HT}$ 、 $3/4 \cdot S_y^{HT}$ の中での最小値 (S_m の値)。

表 3 時間に依存する設計応力強さ (S_t)

	1h	3h	10h	30h	100h	300h	1000h	3000h	10000h	18000h	30000h
425°C	466	466	466	466	466	466	466	453	430	418	408
450°C	463	463	463	463	463	463	445	422	397	385	374
475°C	460	460	460	460	460	440	414	390	364	350	339
500°C	454	454	454	454	434	410	383	358	329	315	303
525°C	447	447	447	433	405	380	351	324	294	278	265
550°C	437	437	431	405	376	349	318	289	256	240	225
575°C	425	425	403	376	345	316	284	253	217	200	184
600°C	410	406	375	346	314	283	248	215	177	159	143
625°C	391	379	346	316	281	248	211	175	137	120	106
650°C	370	351	317	284	247	212	172	136	102	88	77
675°C	345	323	286	252	212	175	134	102	75	65	58
700°C	318	293	255	218	176	138	101	76	56	49	44
725°C	289	263	222	183	140	105	76	57	43	38	34
750°C	258	231	188	147	107	79	58	44	34	29	26
775°C	226	199	153	115	81	61	45	35	26	22	18
800°C	194	165	121	88	63	47	35	27	18		
825°C	164	133	93	68	49	37	28	20			
850°C	137	104	72	53	39	29	20				

※左の網掛け部は $S_t=0.8 \cdot S_u$ となる条件である。右下の網掛け部は、応力レベルが適用可能範囲外で S_t が決定できない条件である。

表4 回帰分析で算出した熱クリープひずみ式の係数

算出した係数		最適値	95%信頼区間	
			上限値	下限値
1次クリープ ひずみ	A_t	1.95	12.0	0.315
	n_t	1.90	—	—
	Q_t	1.12×10^4	—	—
	A_γ	5.20×10^7	2.56×10^8	1.06×10^7
	n_γ	2.63	—	—
	Q_γ	3.38×10^4	—	—
2次クリープ ひずみ	A_s	3.10×10^8	9.96×10^8	9.65×10^7
	n_s	3.34	—	—
	Q_s	4.24×10^4	—	—

表5 熱クリープひずみ式の平均、上下限用の係数

算出した係数		最適近似式 ^{※1}	上限式 ^{※2}	下限式 ^{※3}
1次クリープ ひずみ	A_t	1.95	12.0	0.315
	n_t	1.90	同左	同左
	Q_t	1.12×10^4	同左	同左
	A_γ	5.20×10^7	同左	同左
	n_γ	2.63	同左	同左
	Q_γ	3.38×10^4	同左	同左
2次クリープ ひずみ速度	A_s	3.10×10^8	同左	9.65×10^7
	n_s	3.34	同左	同左
	Q_s	4.24×10^4	同左	同左

※1 ただし、1次クリープひずみの飽和値(ϵ_t)の上限値は0.235とし、計算値がこれを超えた場合、0.235を用いることとする。

※2 ただし、 ϵ_t の上限値は0.656とし、計算値がこれを超えた場合、0.656を用いることとする。

※3 ただし、 ϵ_t の上限値は0.0279とし、計算値がこれを超えた場合、0.0279を用いることとする。

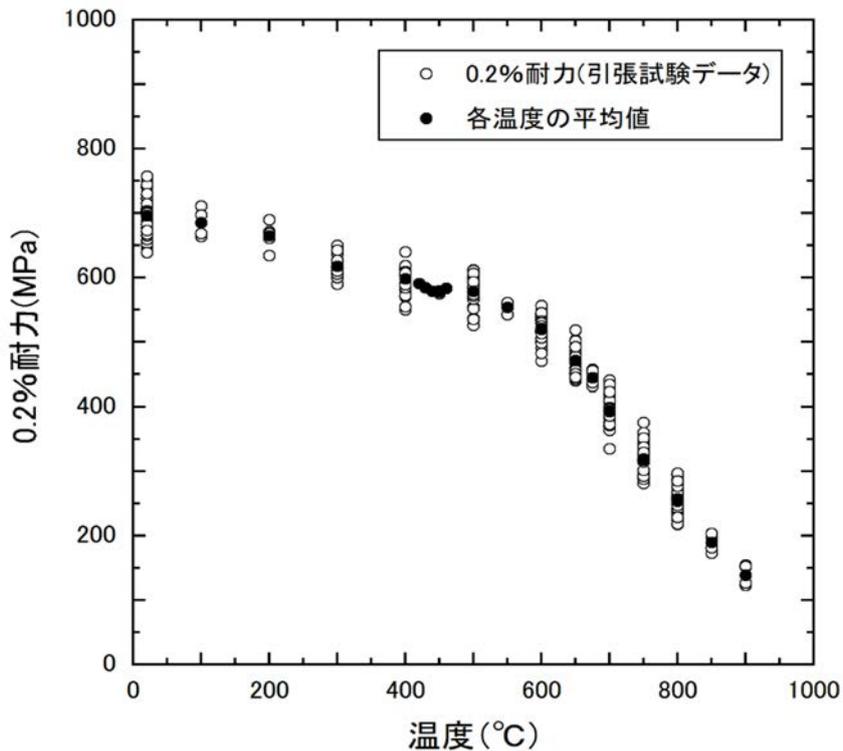


図1 本評価で用いた SUS316 相当鋼の引張試験データと各温度での平均値 (0.2%耐力)

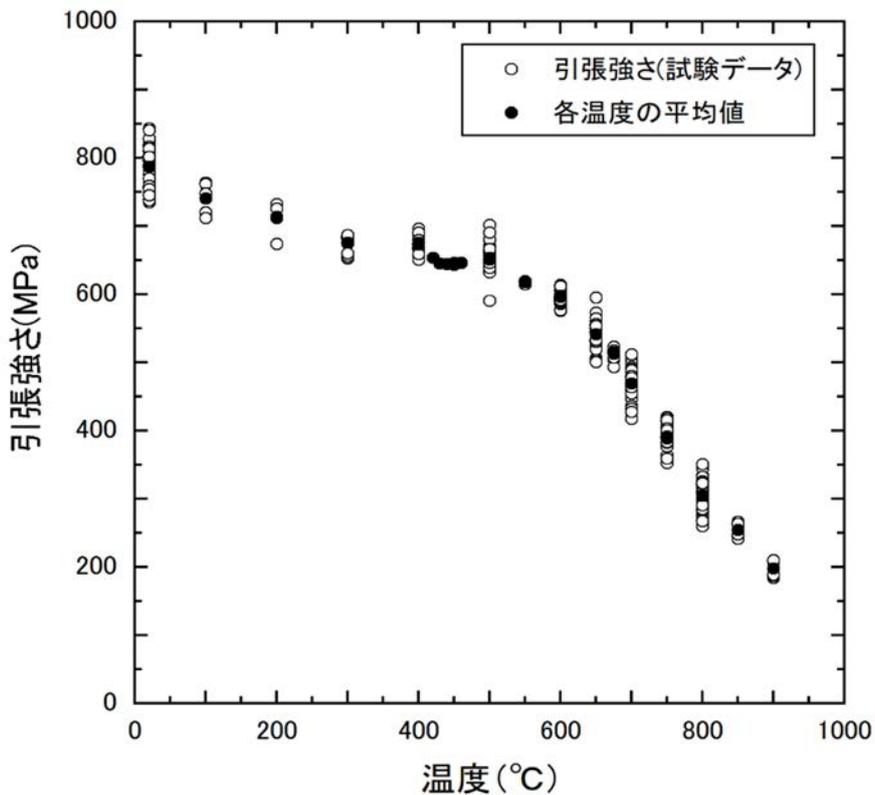


図2 本評価で用いた SUS316 相当鋼の引張試験データと各温度での平均値 (引張強さ)

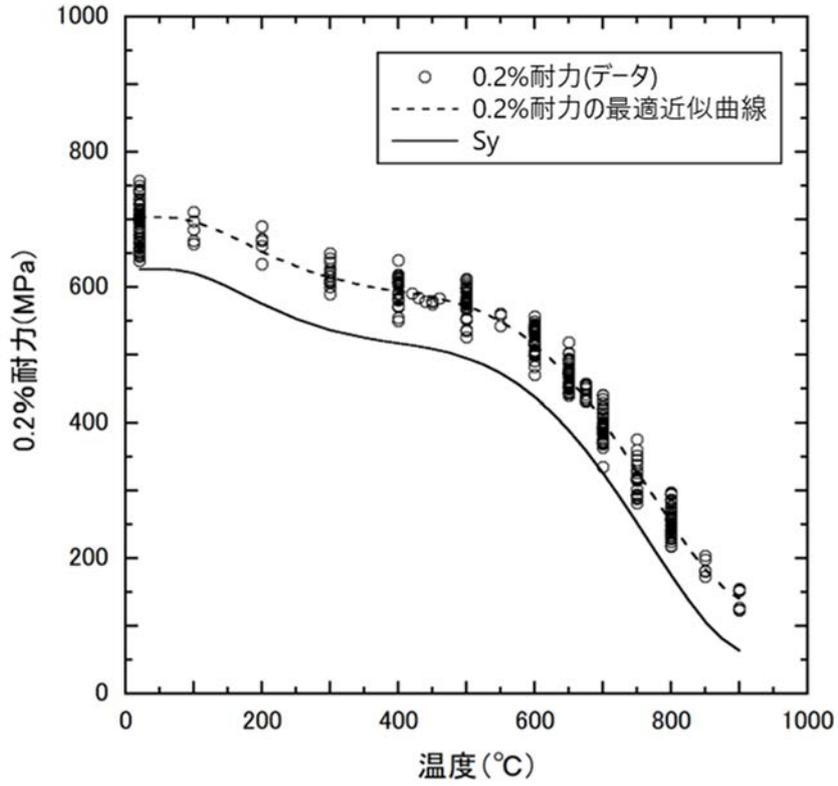


図3 0.2%耐力（引張試験データ）と S_y との比較

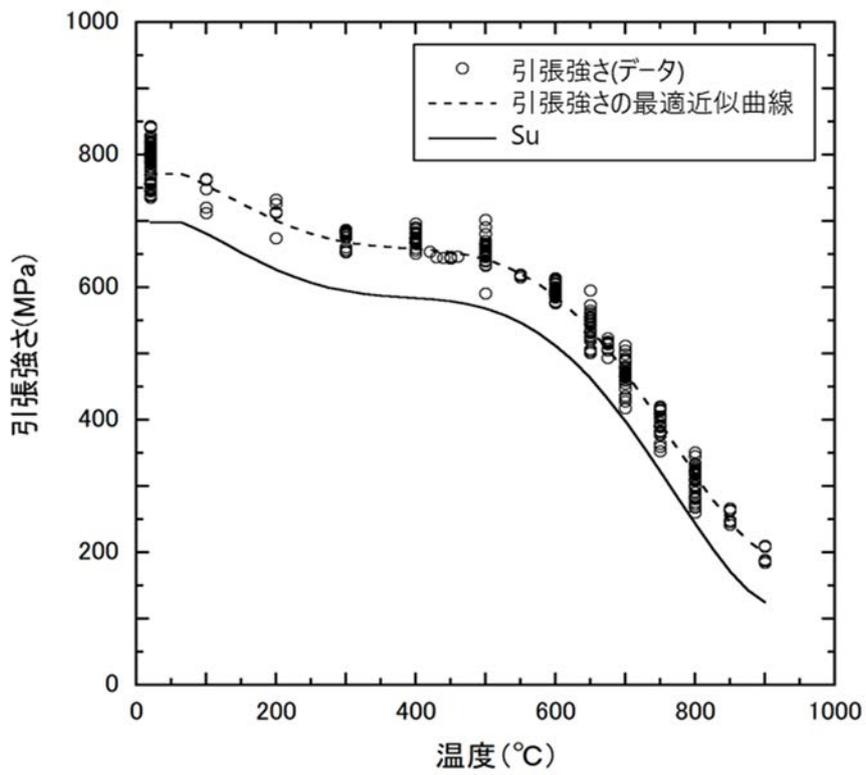


図4 引張強さ（引張試験データ）と S_u との比較

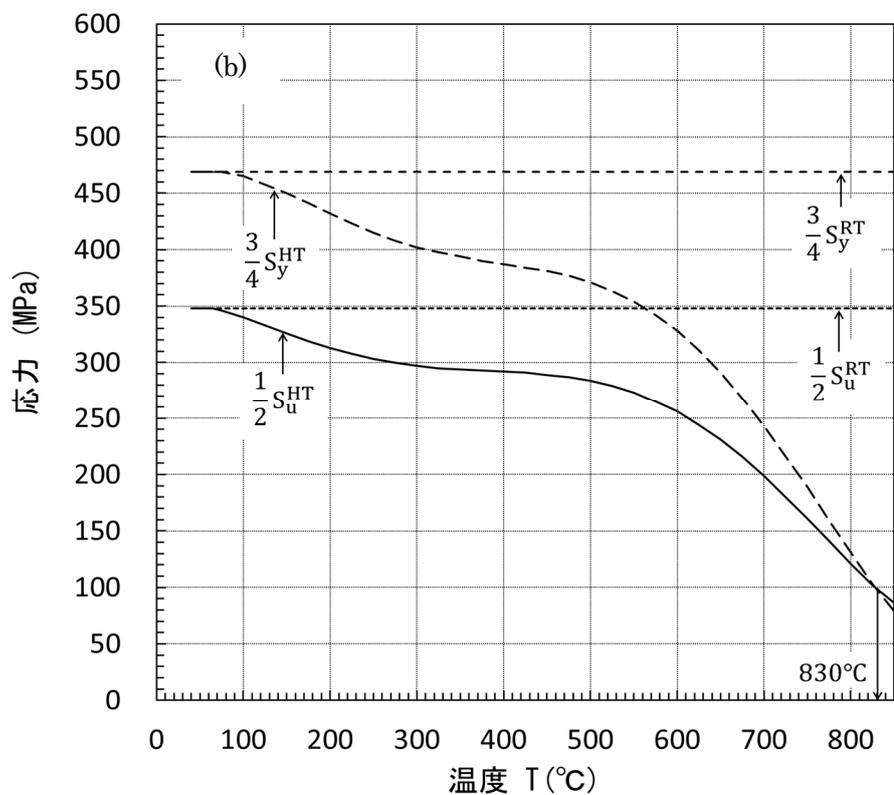
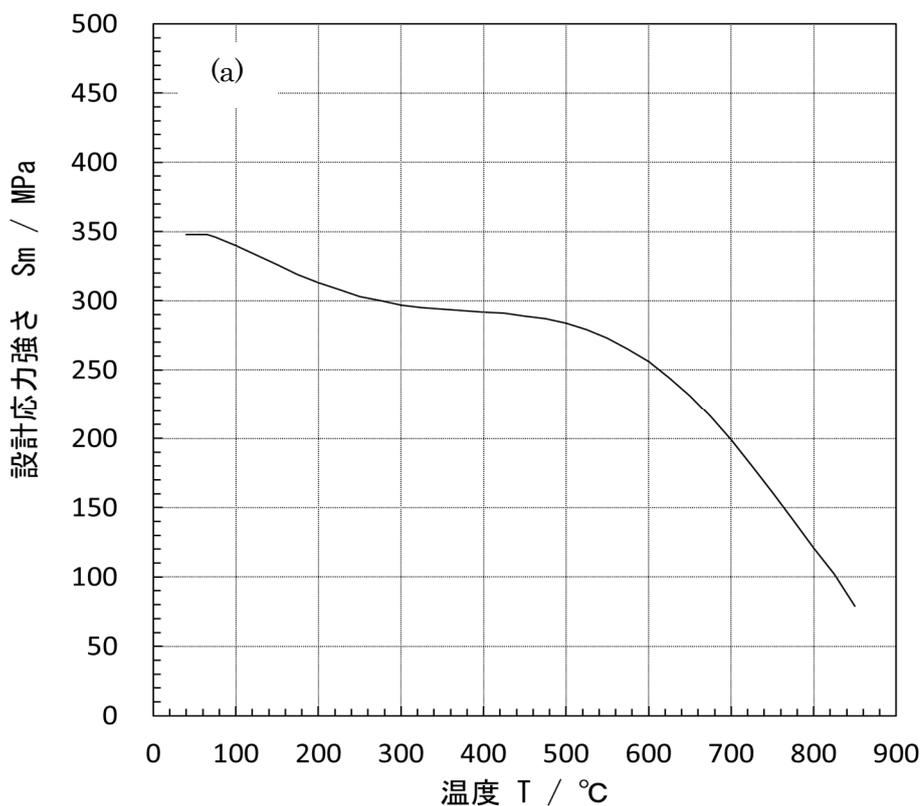


図5 時間に依存しない設計応力強さ (S_m)、
 (a) S_m の温度依存性、(b) $\frac{1}{2} \cdot S_u^{RT}$ 、 $\frac{3}{4} \cdot S_y^{RT}$ 、 $\frac{1}{2} \cdot S_u^{HT}$ 及び $\frac{3}{4} \cdot S_y^{HT}$ の温度依存性比較

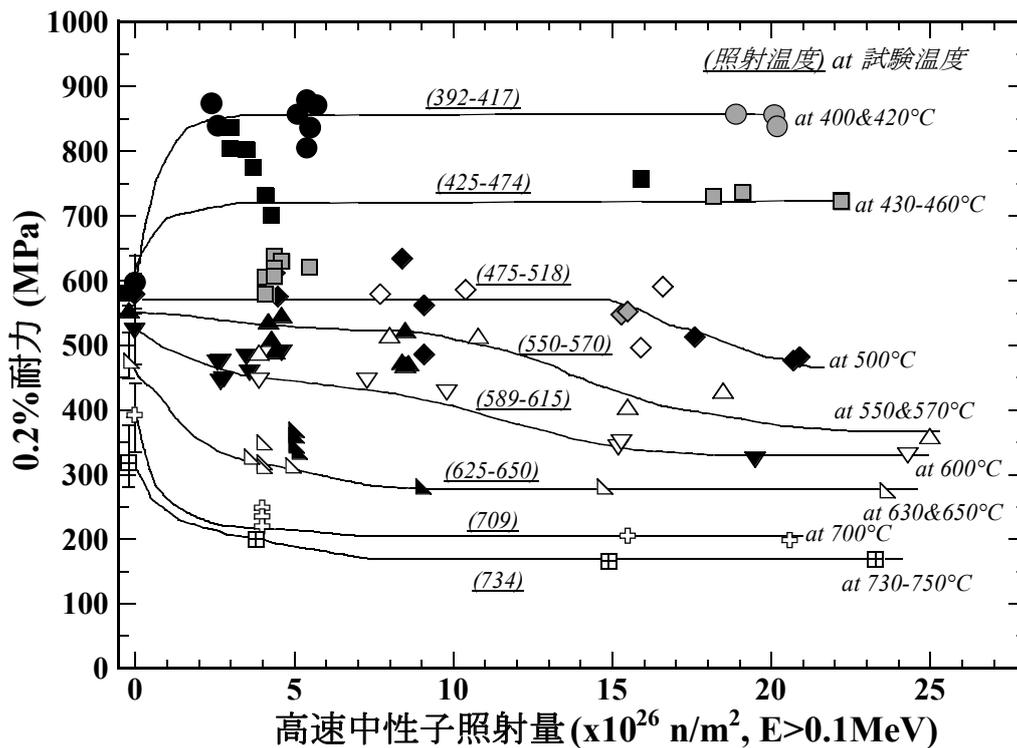


図6 高速中性子照射量と0.2%耐力の関係
(灰色印：ラップ管、白色印：材料照射被覆管、黒色印：燃料ピン照射被覆管)

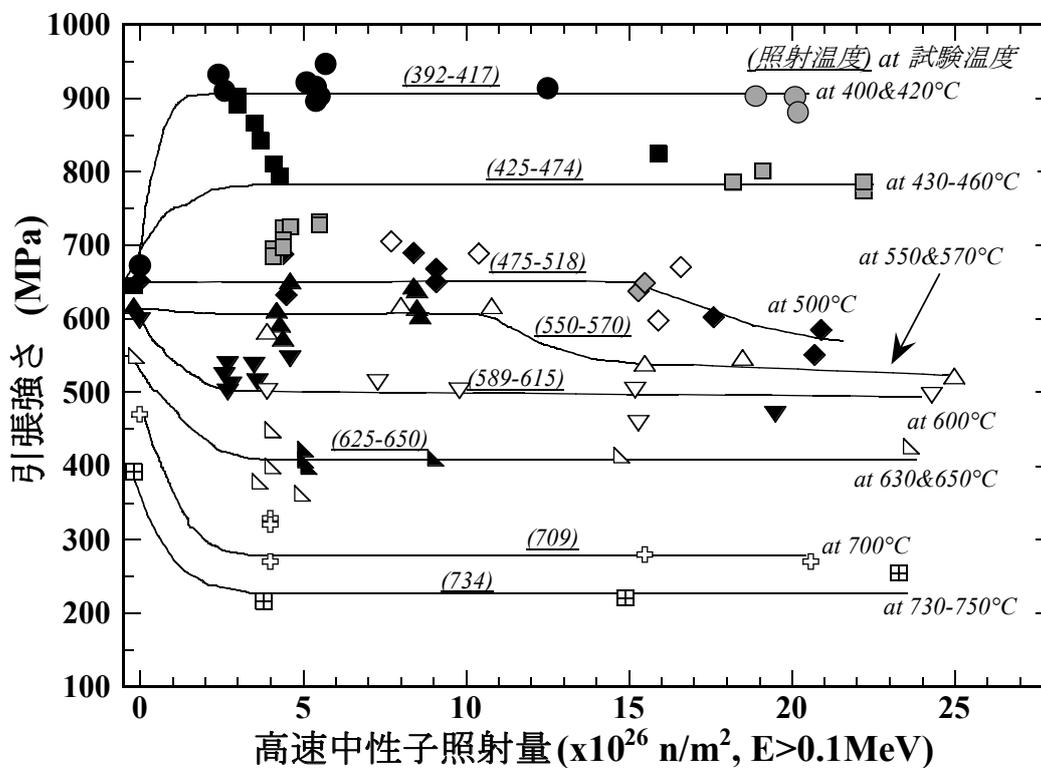


図7 高速中性子照射量と引張強さの関係
(灰色印：ラップ管、白色印：材料照射被覆管、黒色印：燃料ピン照射被覆管)

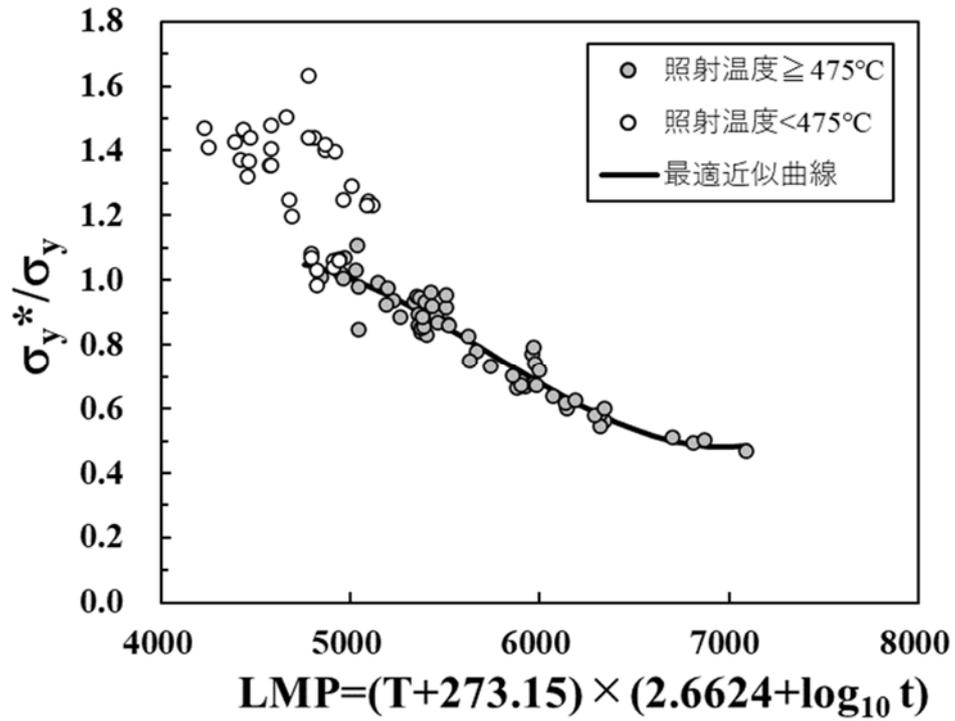


図8 σ_y^*/σ_y とLMPの関係

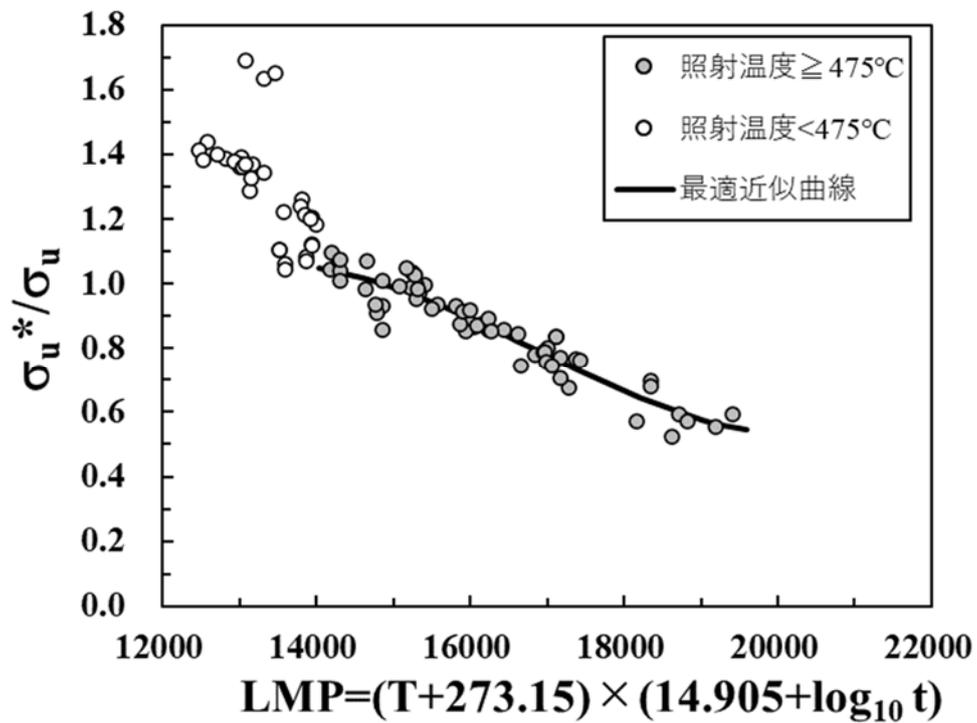


図9 σ_u^*/σ_u とLMPの関係

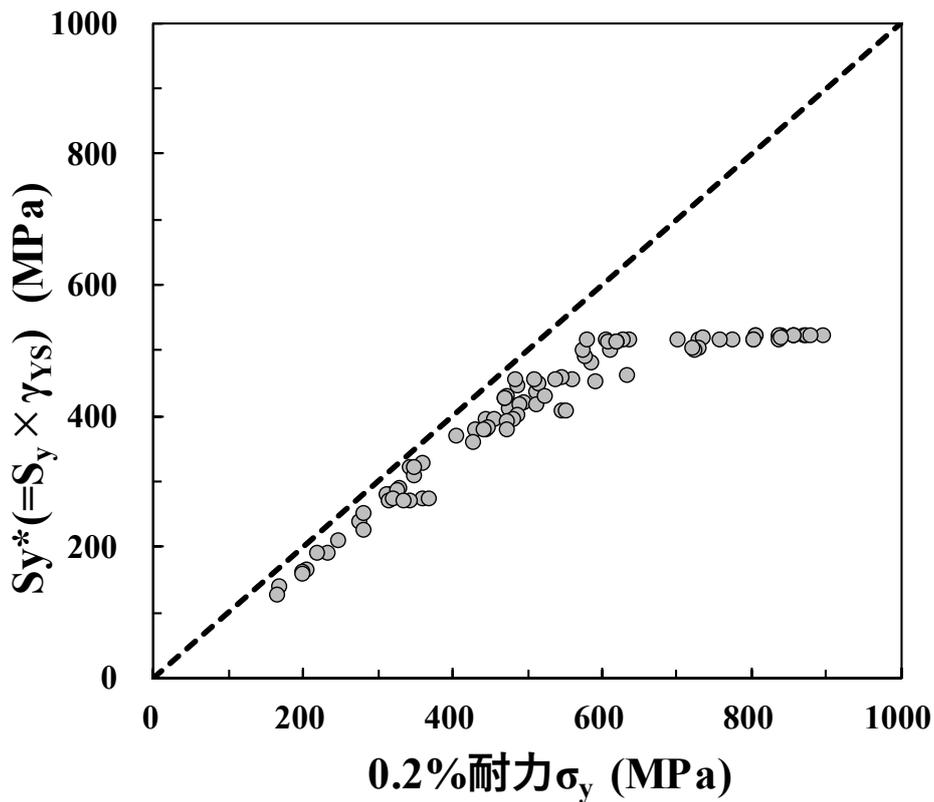


図 10 照射材の 0.2%耐力と照射条件における S_y^* の関係

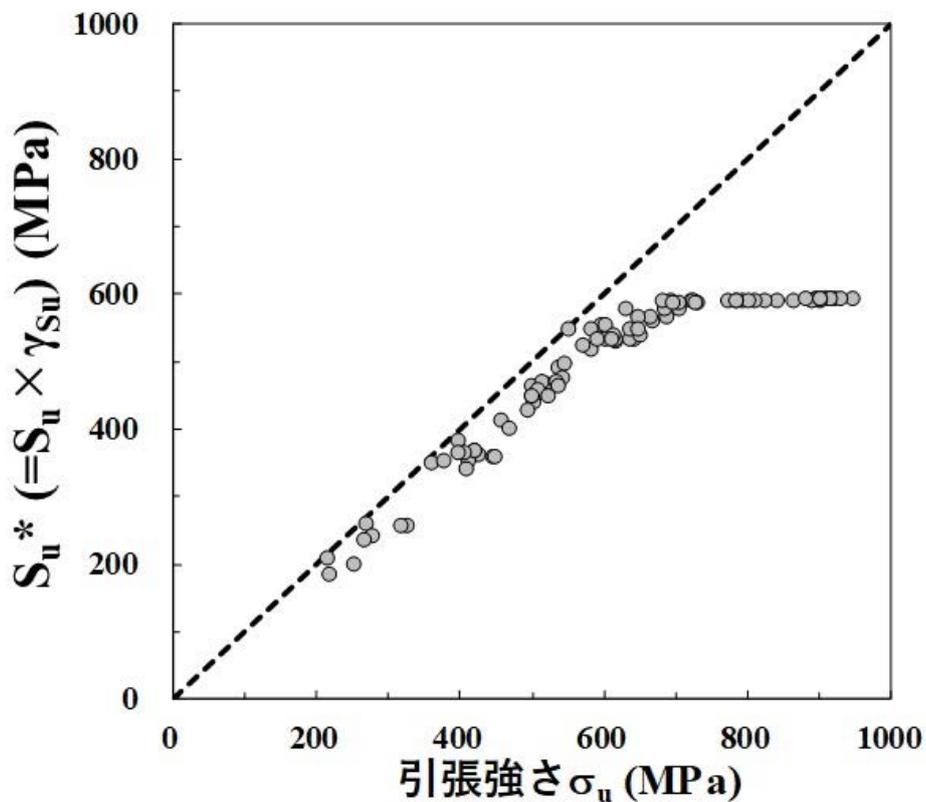


図 11 照射材の引張強さと照射条件における S_u^* の関係

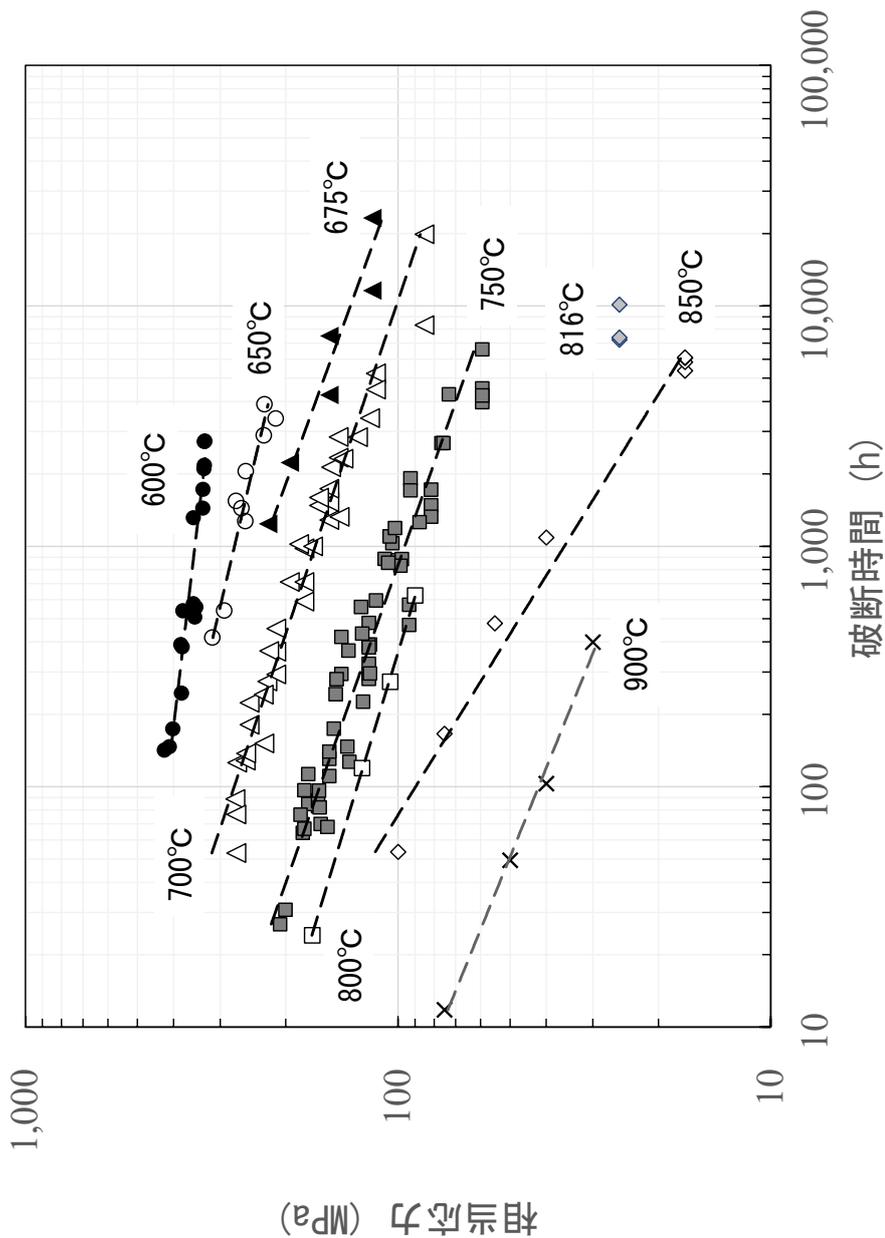


図 12 本解析で用いた SUS316 相当鋼被覆管の炉外大気中/Ar 中クリュー破断試験データ

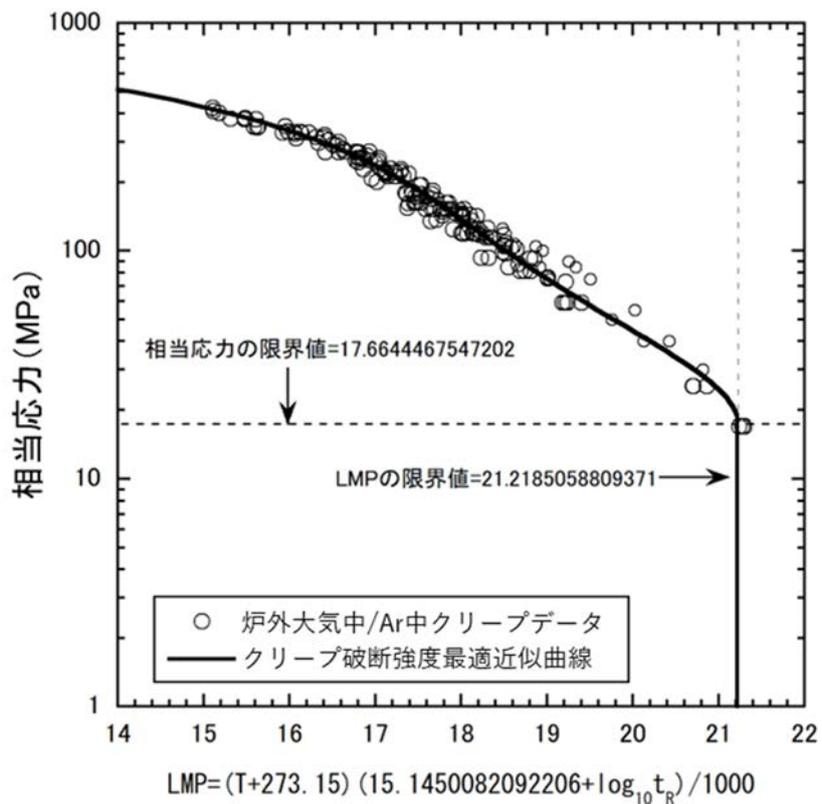


図 13 炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの回帰曲線

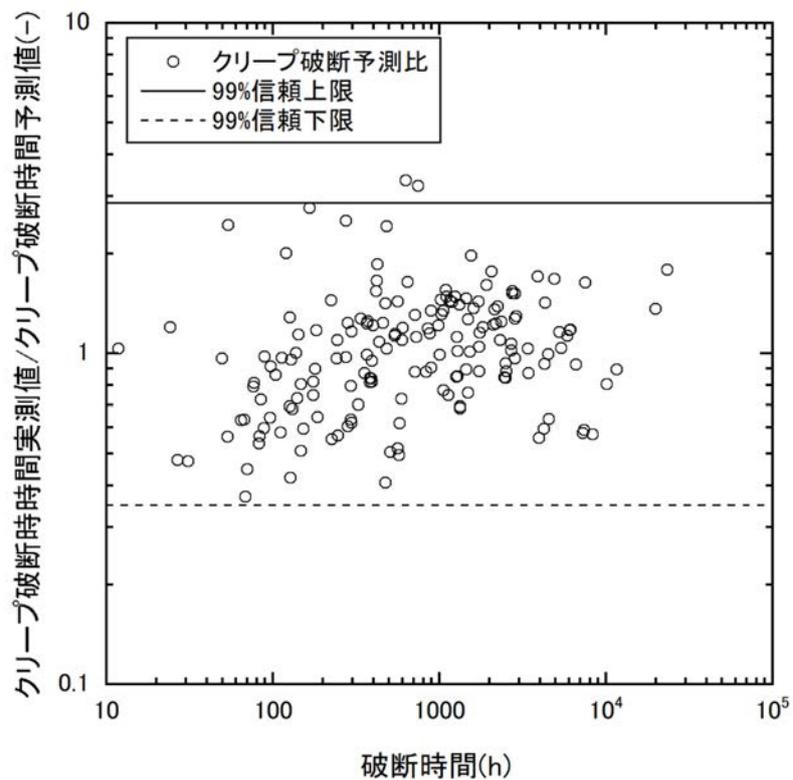


図 14 クリープ破断予測比

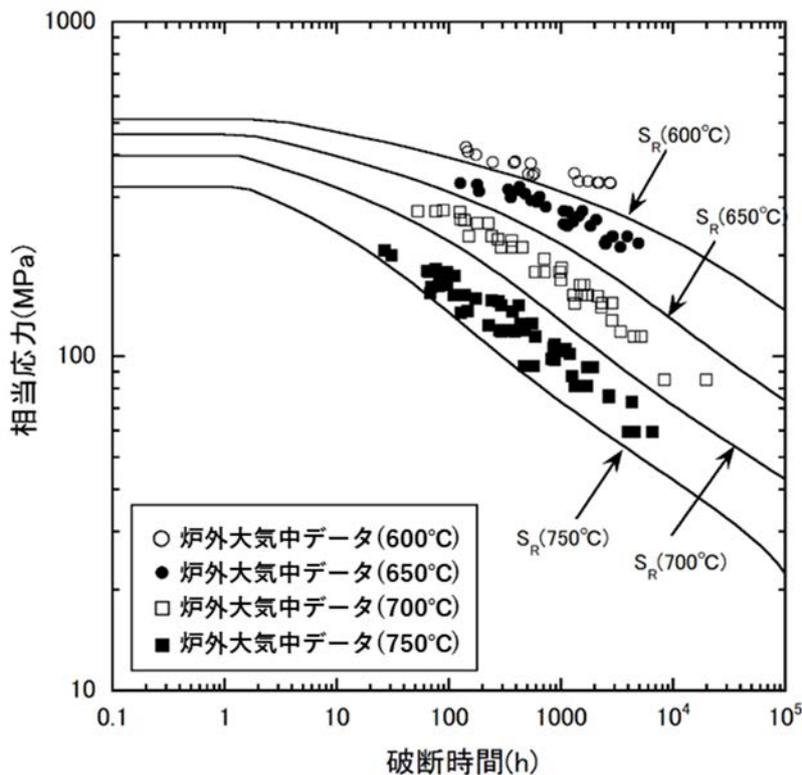


図 15 S_R と炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの比較 (600~750°C)
 低温、高応力条件で S_R の計算値が設計引張強さ S_u を上回る場合には、 $S_R=S_u$ としている。

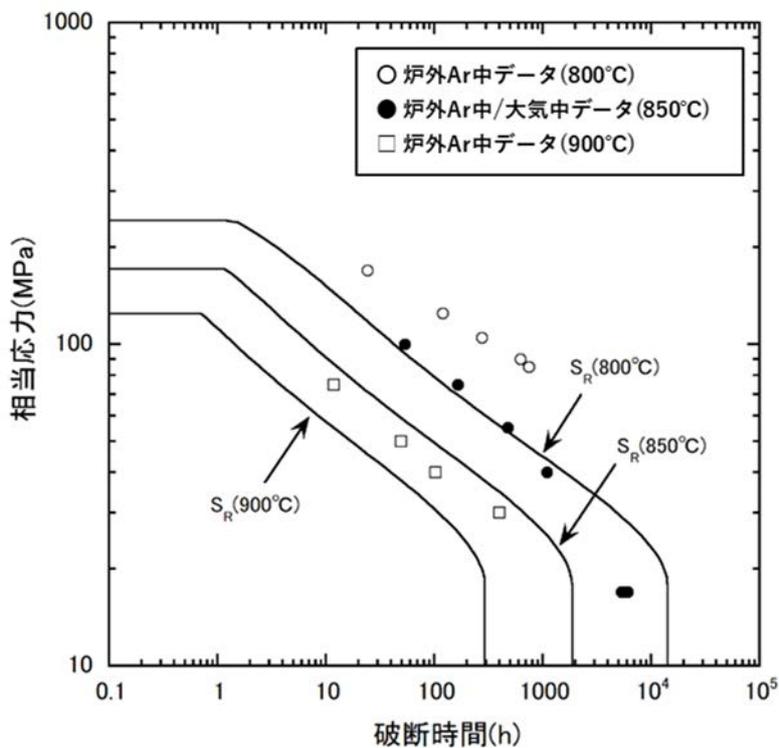


図 16 S_R と炉外大気中/Ar 中クリープ破断試験データの比較 (800~900°C)
 低温、高応力条件で S_R の計算値が設計引張強さ S_u を上回る場合には、 $S_R=S_u$ としている。

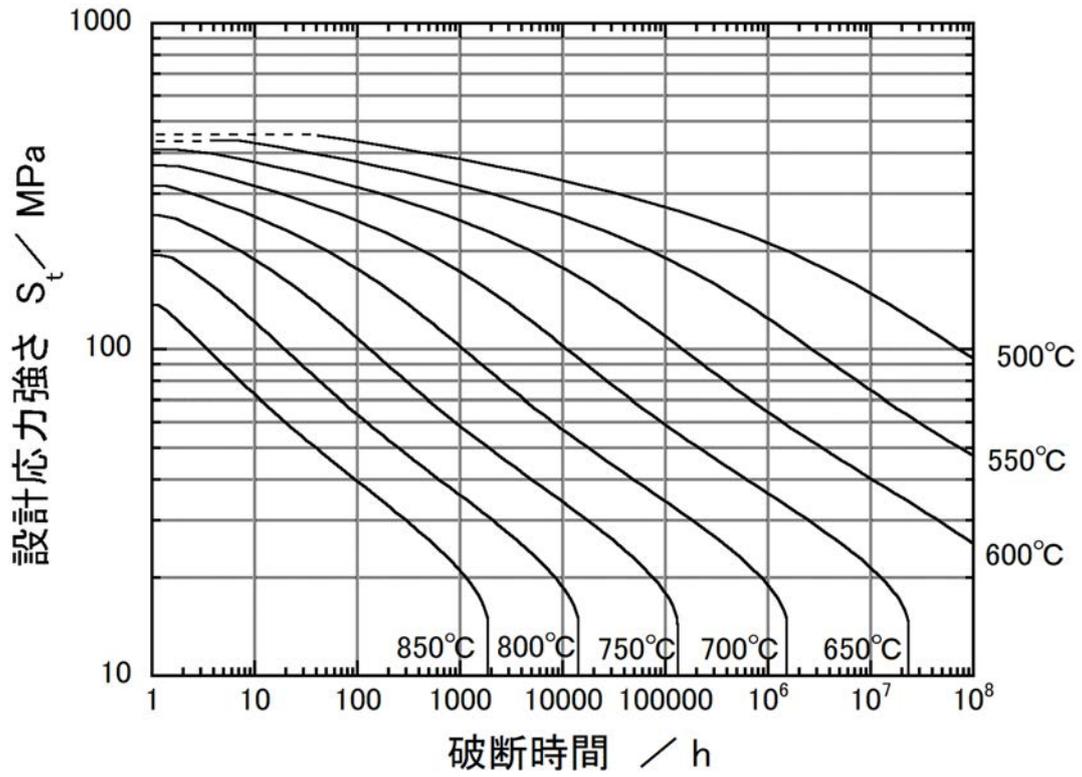


図 17 破断時間と S_t の関係

低温、高応力条件で S_R の計算値が設計引張強さ S_u を上回る場合には、 $S_t=0.8 \cdot S_u$ としている (破線部)。

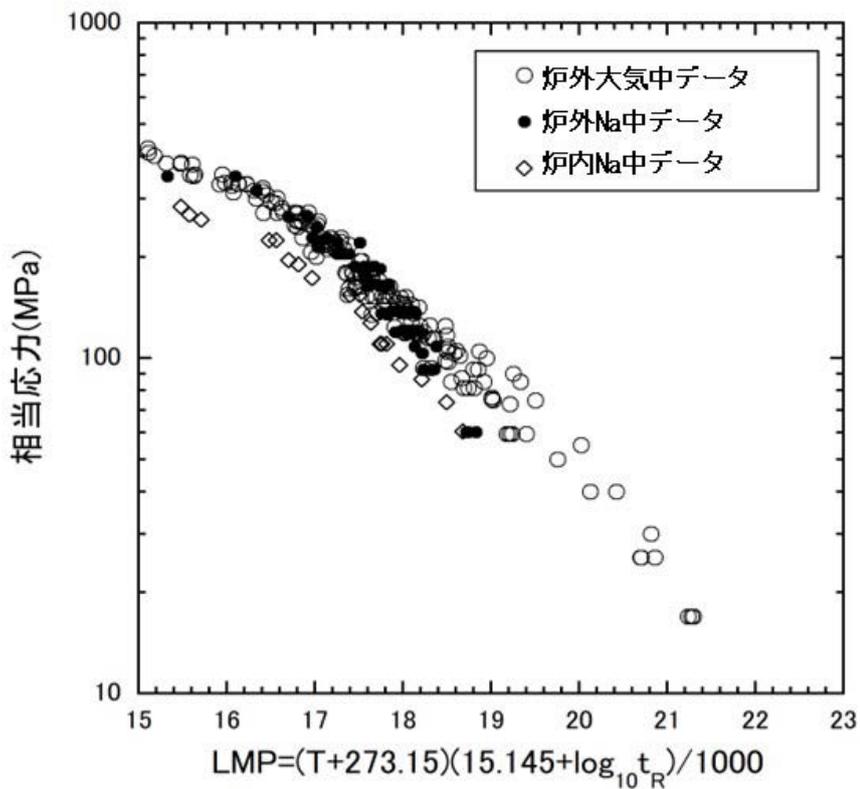


図 18 SUS316 相当鋼被覆管内圧クリープ破断データの比較 (炉外大気中、炉外 Na 中、炉内 Na 中)

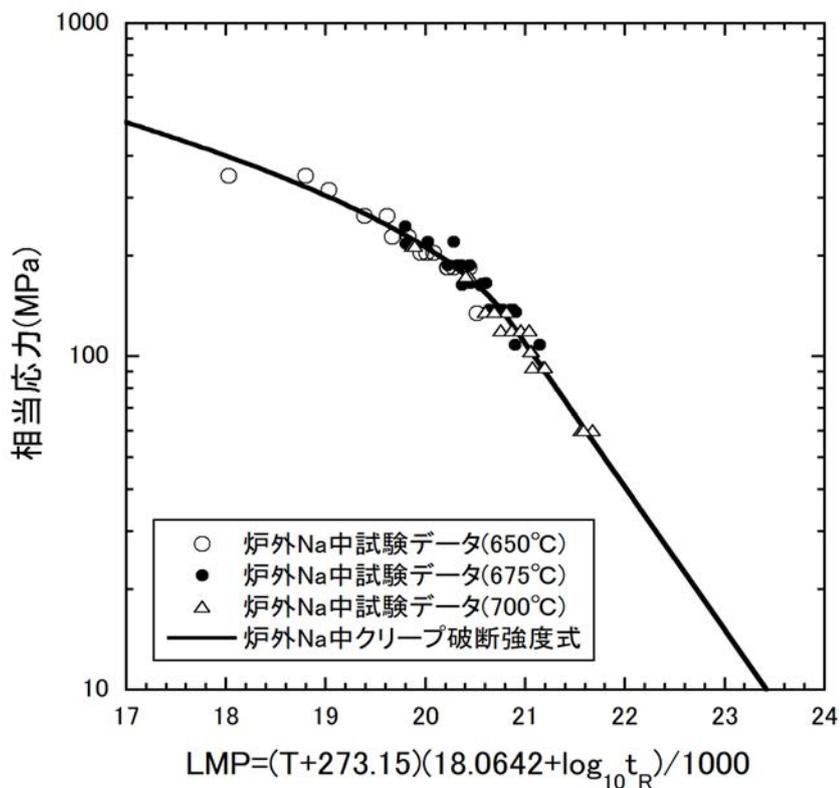


図 19 炉外 Na 中クリープ強度式

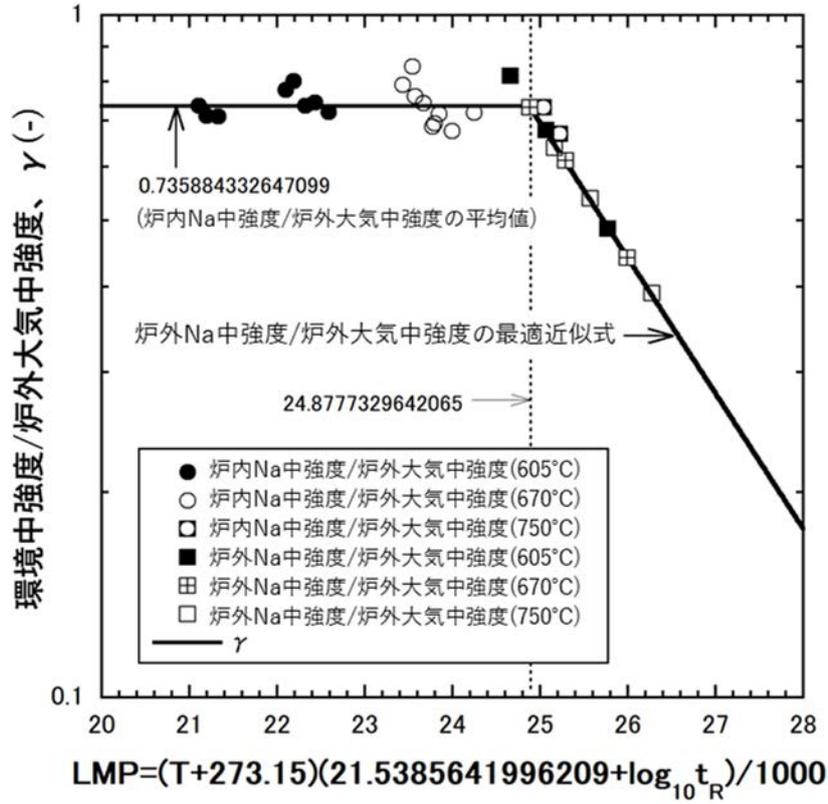


図 20 クリープ強度補正係数の LMP 依存性

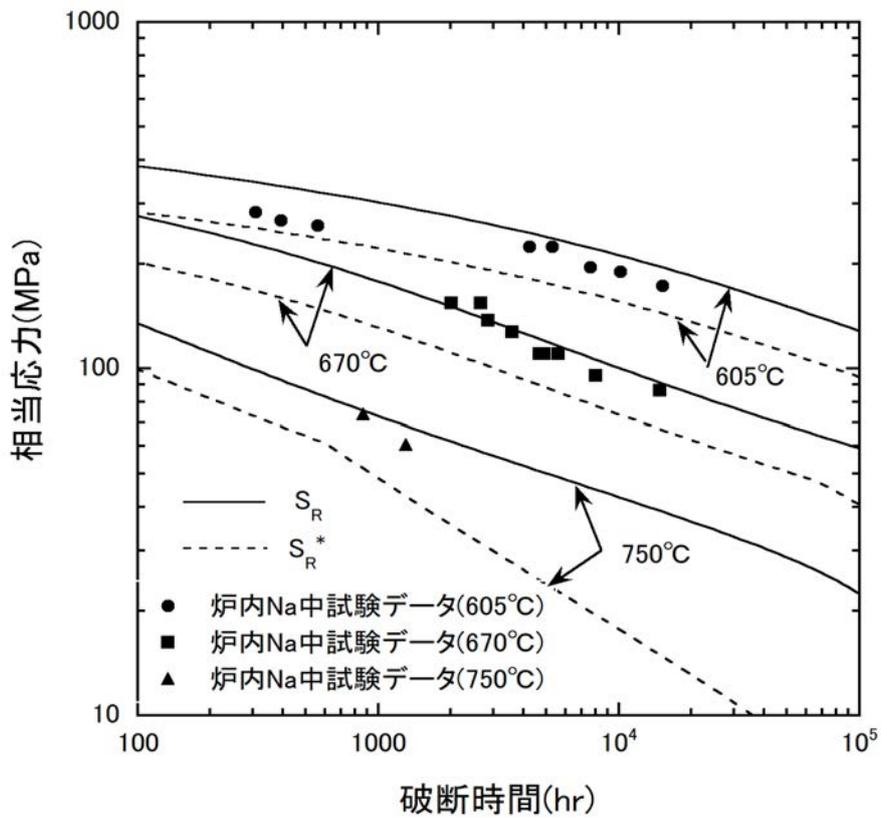


図 21 炉内 Na 中試験データと S_R 、 S_R^* の比較

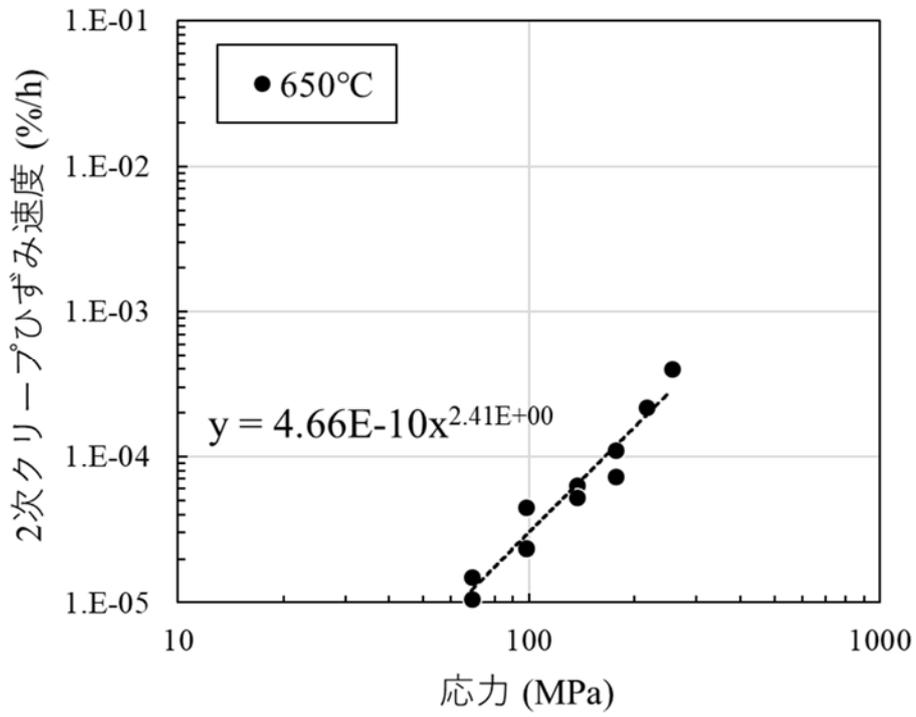


図 22 2次クリープひずみ速度の応力依存性 (650°C)

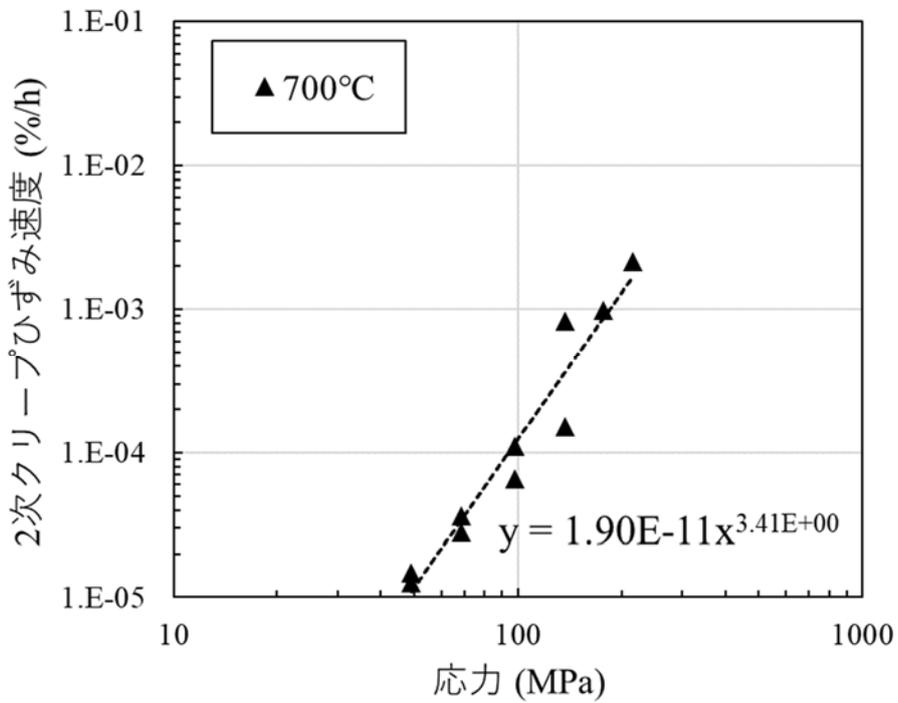


図 23 2次クリープひずみ速度の応力依存性 (700°C)

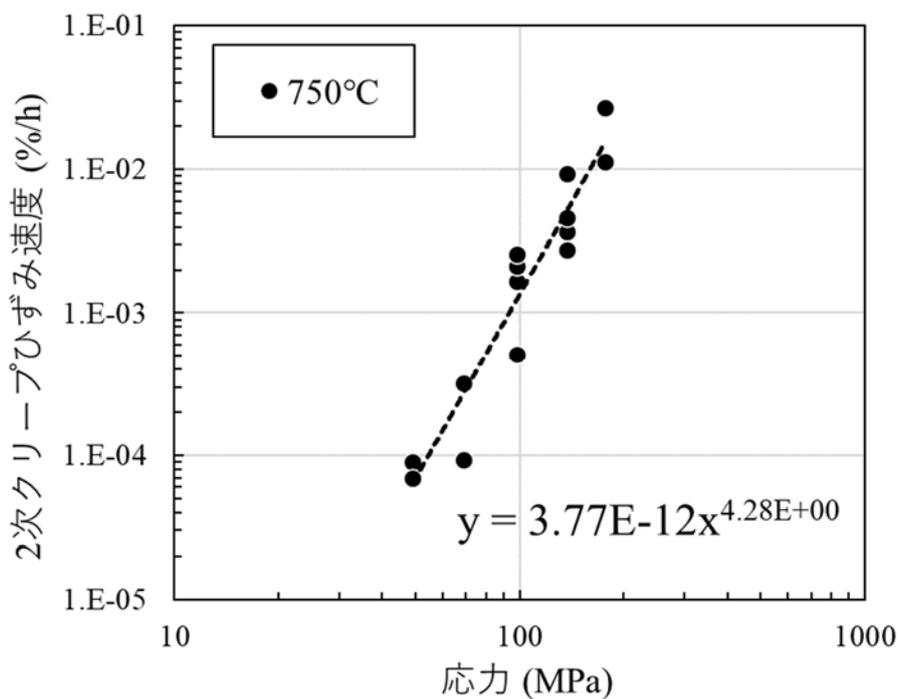


図 24 2次クリープひずみ速度の応力依存性 (750°C)

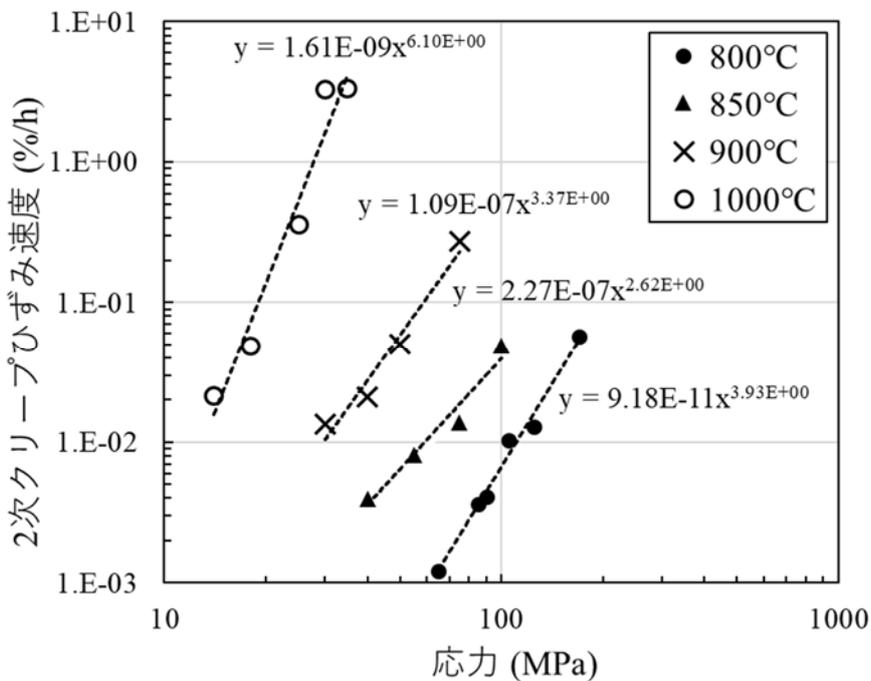


図 25 2次クリープひずみ速度の応力依存性 (800~1000°C)

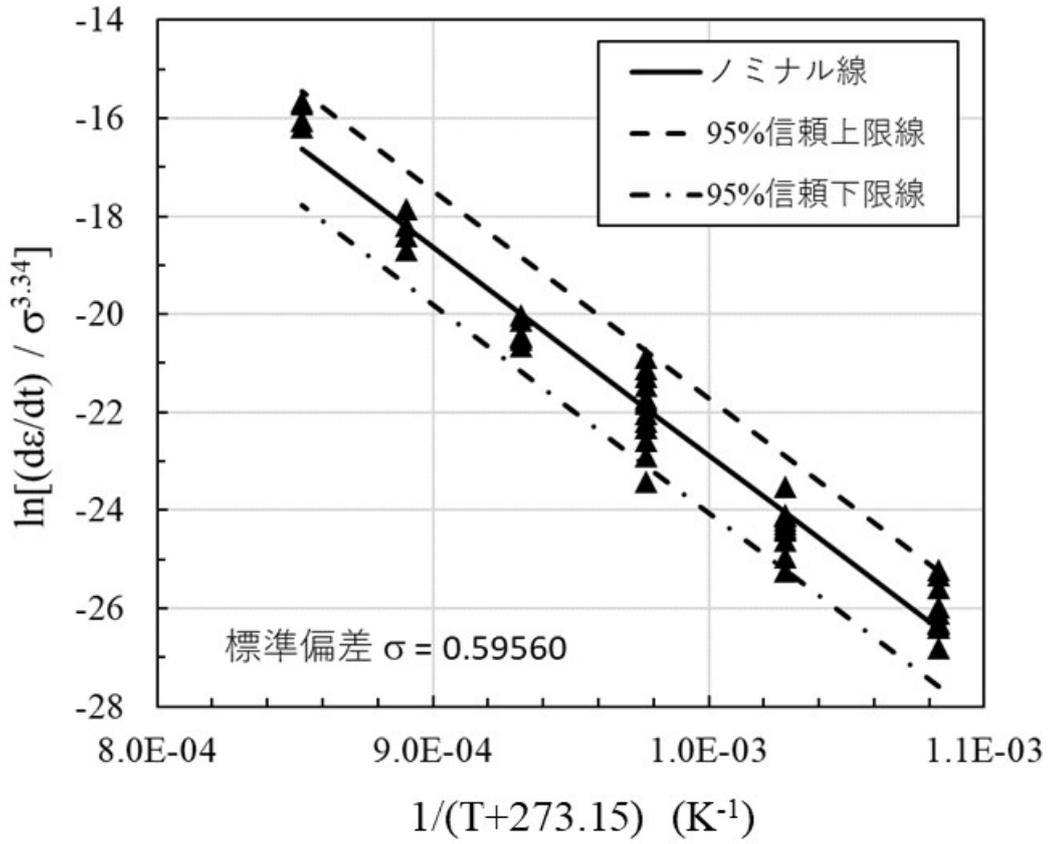


図 26 $(d\varepsilon/dt)/\sigma^{3.34}$ の $1/(T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)

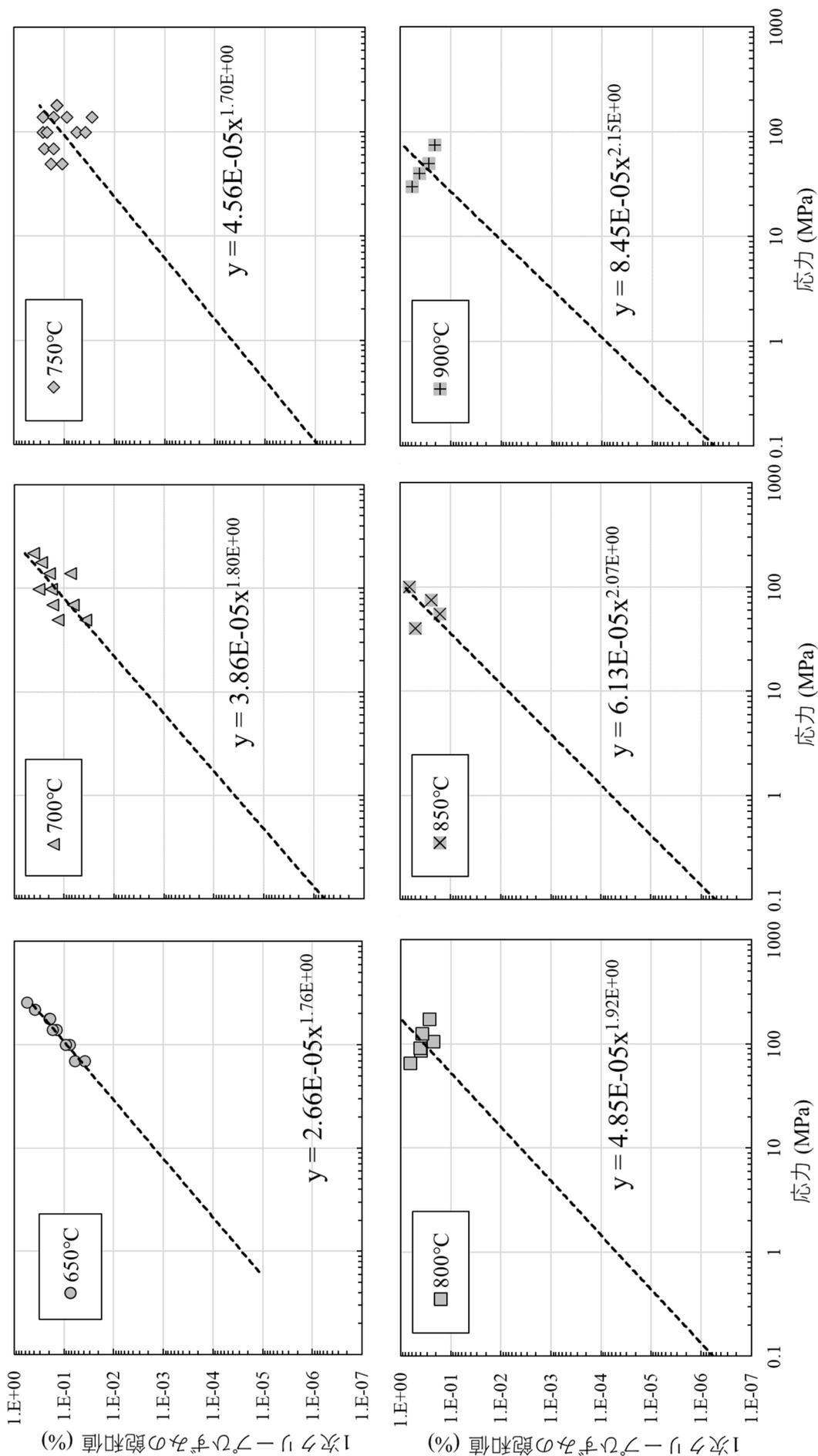


図 27 1次クリープひずみの飽和値 (ϵ_t) の応力依存性

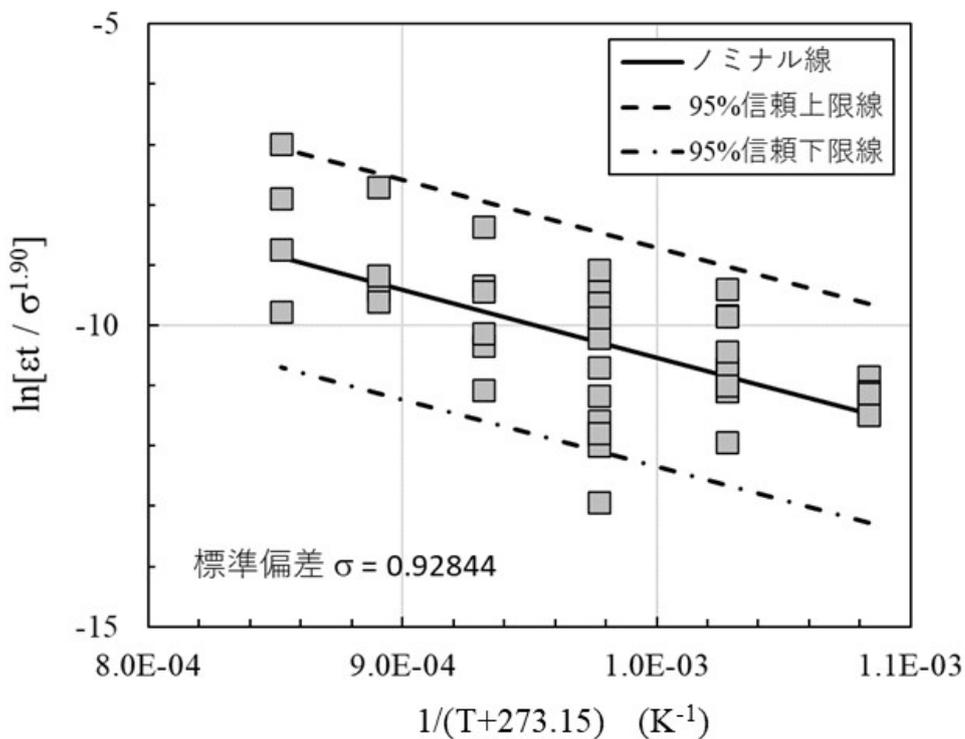


図 28 $\epsilon_t / \sigma^{1.90}$ の $1/ (T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)

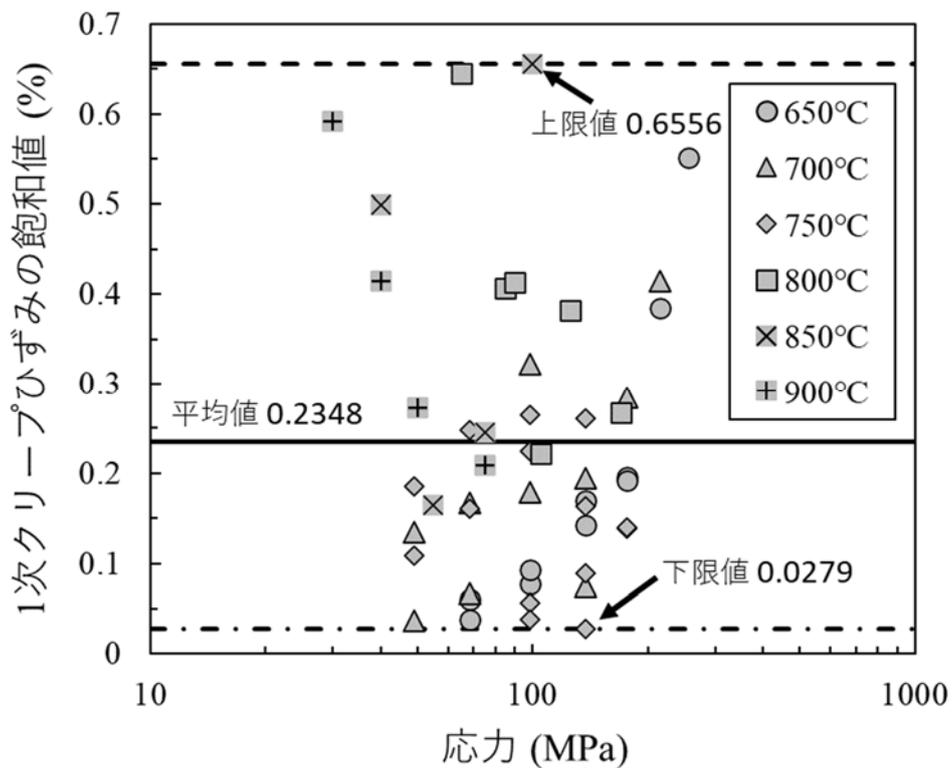


図 29 1次クリープひずみの飽和値 (ϵ_t) 平均値と上下限值 (650~900°C)

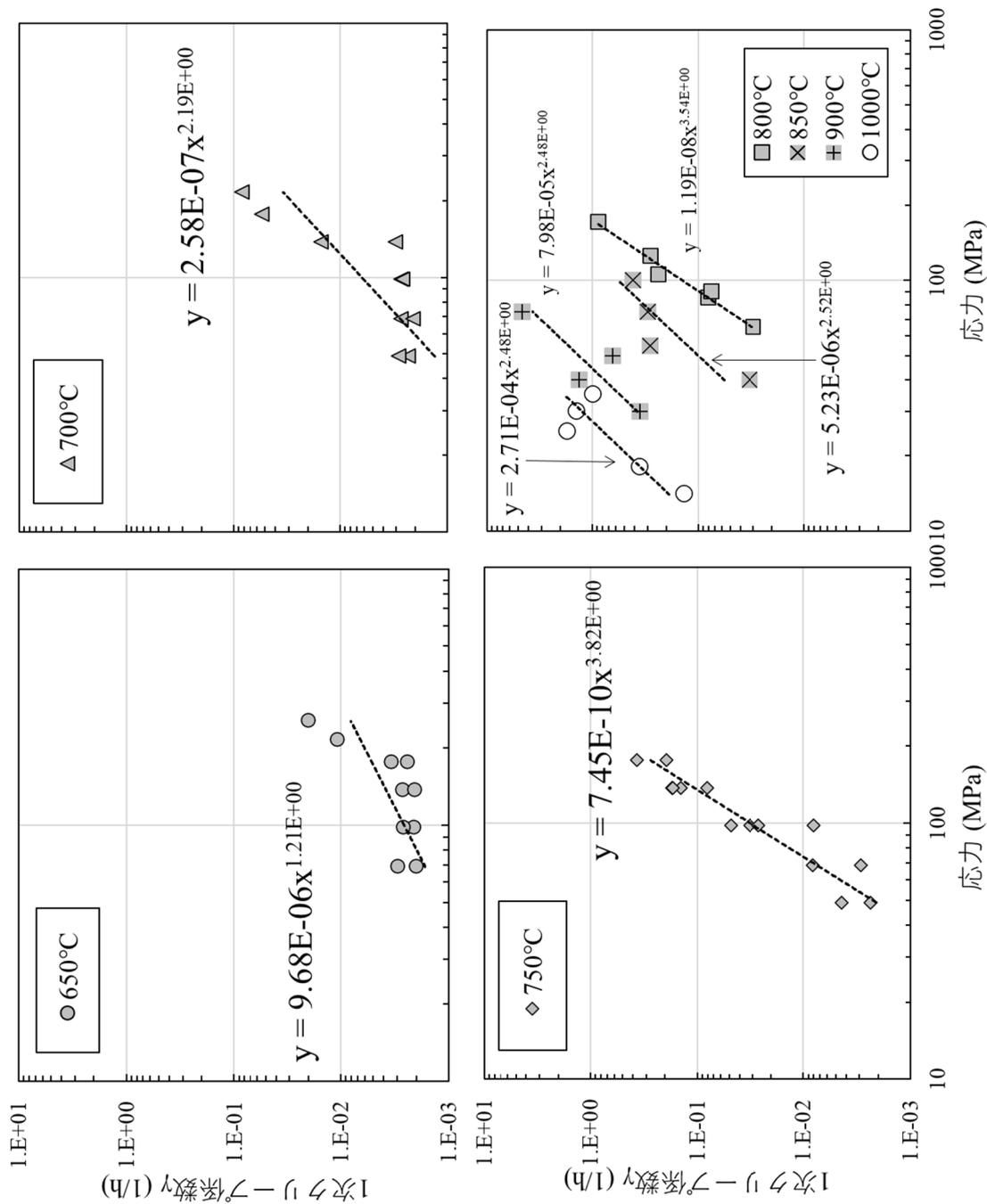


図 30 1次クリープ係数 γ の応力依存性

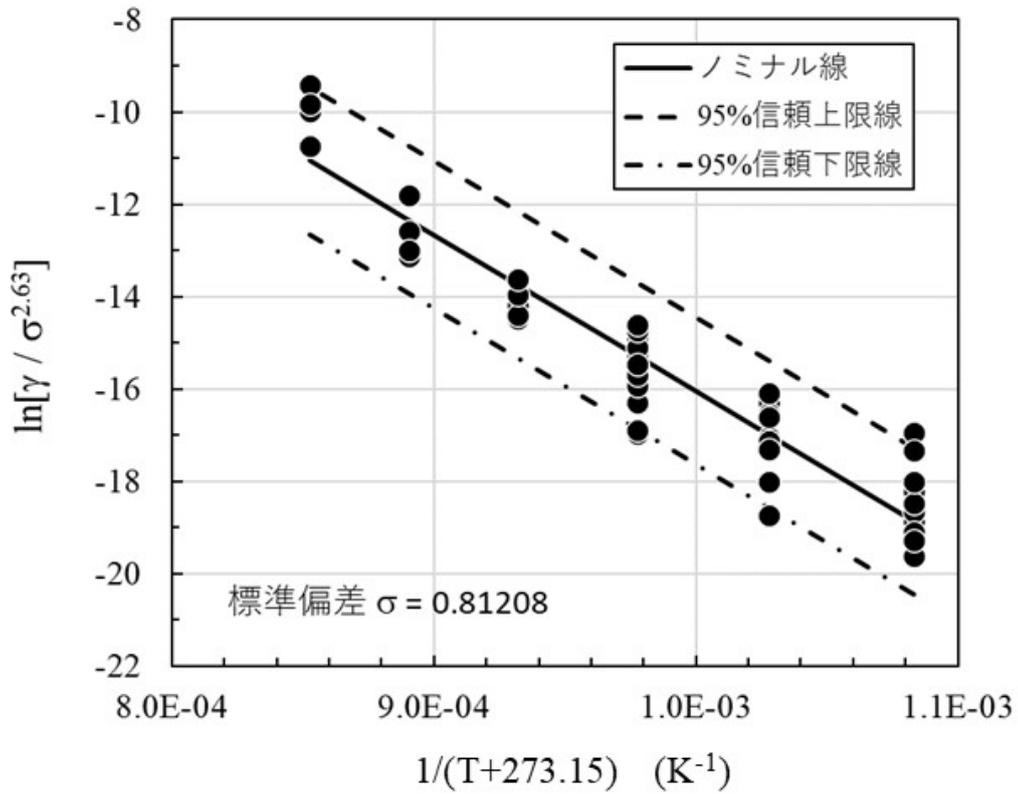


図 31 $\gamma / \sigma^{2.63}$ の $1/ (T+273.15)$ 依存性 (650~900°C)

付録 1
炉外高温引張試験データ一覧

燃料被覆管材については、被覆管の両端に治具を固定することで、大気中で管軸方向への引張試験を実施した[e. g., 1]。ラップ管材の引張試験は、JIS G0567 に準拠して実施した。試験片形状の例を図 A1-1 に示す[2]。試験データ一覧を表 A1 に示す。

参考文献

- [1] 飯塚昇司、吉田英一、加納茂機、二瓶勲、高速炉用改良 SUS316 ステンレス鋼燃料被覆管の高温材料強度データ集、PNC TN9450 88-004, 1988, 140p.
- [2] Y. Yano, T. Tanno, Y. Sekio, H. Oka, S. Ohtsuka, T. Uwaba, T. Kaito, Tensile properties and hardness of two types of 11Cr-ferritic/martensitic steel after aging up to 45,000 h, Nucl.Mater.Energy Vol.9, 2016, pp.324-330.

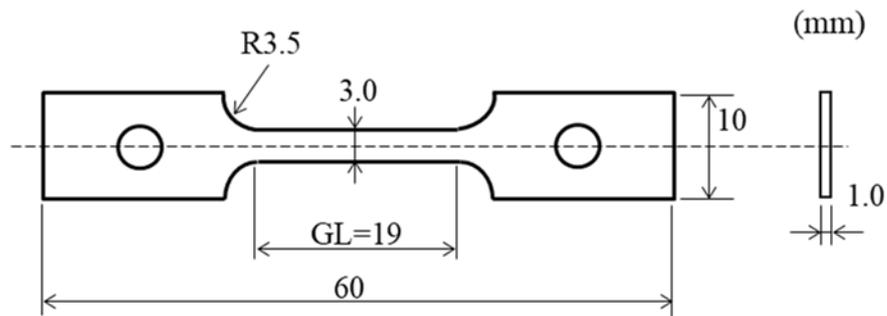


図 A1-1 ラップ管引張試験片形状の例[2]

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (1/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
被覆管単軸	60MS	20	721.0	797.0	9.0	15.8
被覆管単軸	60MS	20	716.0	797.0	8.9	16.0
被覆管単軸	60MS	20	715.0	796.0	9.4	16.8
被覆管単軸	60MK	20	694.0	794.0	9.4	16.4
被覆管単軸	60MK	20	698.0	797.0	9.9	17.0
被覆管単軸	60MK	20	694.0	795.0	9.9	16.8
被覆管単軸	55MK(K9311)	20	671.1	821.0	7.4	13.5
被覆管単軸	55MK(K9311)	20	666.1	813.7	7.6	13.6
被覆管単軸	54MS	20	743.3	796.3	—	17.0
被覆管単軸	55MK	20	650.2	795.3	—	16.0
被覆管単軸	55MK	20	647.2	799.2	—	14.6
被覆管単軸	55MK	20	699.2	811.0	—	15.9
被覆管単軸	55MK	20	672.7	809.0	—	18.2
被覆管単軸	55MK	20	645.3	803.2	—	13.6
被覆管単軸	55MK	20	688.4	817.9	—	17.2
被覆管単軸	55MK	20	682.5	814.0	—	13.8
被覆管単軸	55MK	20	665.9	808.1	—	15.6
被覆管単軸	55MK	20	647.2	819.8	—	15.0
被覆管単軸	55MK	20	654.1	823.8	—	15.1
被覆管単軸	55MS	20	741.4	790.4	—	20.2
被覆管単軸	55MS	20	740.4	789.4	—	19.4
被覆管単軸	55MS	20	711.0	800.2	—	18.2
被覆管単軸	55MS	20	744.3	805.1	—	19.1
被覆管単軸	55MS	20	740.4	807.1	—	18.1
被覆管単軸	56JS	20	721.8	827.7	—	14.4
被覆管単軸	56JS	20	705.1	842.4	—	14.8
被覆管単軸	56JS	20	708.0	828.7	—	16.6
被覆管単軸	56JS	20	750.2	843.4	—	15.0
被覆管単軸	56JS	20	739.4	841.4	—	17.0
被覆管単軸	54MS	20	724.7	769.8	—	16.0
被覆管単軸	54MS	20	728.6	775.7	—	16.0
被覆管単軸	54MS	20	743.3	804.1	—	14.0
被覆管単軸	54MS	20	723.7	770.8	—	15.0
被覆管単軸	54MS	20	744.3	816.9	—	16.2
被覆管単軸	54MS	20	730.6	795.3	—	17.0
被覆管単軸	54MS	20	757.1	814.0	—	16.7

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (2/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ラッパ管	lot 0301	20	706.8	787.8	14.7	28.3
ラッパ管	lot 0301	20	706.5	786.0	16.1	28.1
ラッパ管	lot 0301	20	714.6	782.2	15.7	26.7
ラッパ管	N301	20	672.7	740.4	—	26.0
ラッパ管	N301	20	704.1	763.0	—	19.0
ラッパ管	N301	20	672.7	735.5	—	26.0
ラッパ管	N301	20	677.6	749.2	—	30.0
ラッパ管	N301	20	676.7	738.4	—	26.0
ラッパ管	N301	20	658.0	744.3	—	27.0
ラッパ管	N301	20	671.8	735.5	—	26.0
ラッパ管	N301	20	696.3	758.1	—	18.0
ラッパ管	lot 0301	20	696.0	756.0	—	25.0
ラッパ管	lot 0301	20	703.0	757.0	—	22.0
ラッパ管	lot 0301	20	653.0	780.0	—	15.0
ラッパ管	lot 0301	20	659.0	780.0	—	15.0
ラッパ管	lot 0301	20	698.0	757.0	—	25.0
ラッパ管	lot 0301	20	701.0	756.0	—	24.0
ラッパ管	lot 0301	20	659.0	802.0	—	16.0
ラッパ管	lot 0301	20	639.0	770.0	—	15.0
ラッパ管	LRK004	20	700.2	756.1	—	22.0
ラッパ管	LRK004	20	664.9	738.4	—	24.0
ラッパ管	LRK004	20	684.5	759.0	—	22.0
ラッパ管	LRK004	20	667.8	747.3	—	25.0
ラッパ管	LRK004	20	682.5	755.1	—	25.0
ラッパ管	LRK004	20	673.7	745.3	—	25.0
被覆管単軸	2048010 (S1)	100	711.6	764.0	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	100	697.0	762.5	—	—
被覆管単軸	1033301 (K2)	100	685.8	748.1	—	—
ラッパ管	lot 0301	100	664.4	720.5	1.8	11.9
ラッパ管	lot 0301	100	668.9	711.9	2.3	13.2
被覆管単軸	2048010 (S1)	200	690.4	732.4	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	200	671.8	725.6	—	—
被覆管単軸	1033301 (K2)	200	661.2	714.3	—	—
ラッパ管	lot 0301	200	634.2	673.9	1.9	8.0
ラッパ管	lot 0301	200	668.9	711.9	2.3	13.2

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (3/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
被覆管単軸	55MS	300	608.0	653.1	—	3.6
被覆管単軸	55MS	300	610.0	654.1	—	4.0
被覆管単軸	55MK	300	590.4	683.5	—	4.0
被覆管単軸	55MK	300	600.2	683.5	—	2.4
被覆管単軸	60MS	300	650.0	679.0	2.1	3.7
被覆管単軸	60MS	300	617.0	676.0	2.1	3.7
被覆管単軸	60MS	300	606.0	675.0	1.7	3.0
被覆管単軸	60MS	300	620.0	684.0	2.3	4.6
被覆管単軸	60MS	300	623.0	681.0	1.9	4.4
被覆管単軸	60MK	300	623.0	685.0	2.1	4.4
被覆管単軸	60MK	300	610.0	683.0	1.8	4.6
被覆管単軸	60MK	300	616.0	683.0	2.0	4.8
被覆管単軸	60MK	300	637.0	686.0	1.7	3.8
被覆管単軸	60MK	300	643.0	687.0	1.7	4.4
ラッパ管	lot 0301	300	611.2	656.7	2.6	6.5
ラッパ管	lot 0301	300	610.7	659.9	2.0	5.8
ラッパ管	lot 0301	300	626.7	675.7	2.2	5.9
被覆管単軸	55MK	400	550.2	683.5	—	5.0
被覆管単軸	55MK	400	555.1	687.4	—	5.6
被覆管単軸	55MS	400	613.9	668.8	—	5.2
被覆管単軸	55MS	400	612.9	665.9	—	5.2
被覆管単軸	56JS	400	618.8	689.4	—	4.0
被覆管単軸	56JS	400	611.9	696.3	—	4.0
被覆管単軸	54MS	400	609.0	659.0	—	4.7
被覆管単軸	54MS	400	616.8	670.8	—	4.5
被覆管単軸	2048010 (S1)	400	639.7	681.7	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	400	619.1	691.0	—	—
被覆管単軸	55MK(K9311)	400	570.1	679.9	3.7	5.0
被覆管単軸	55MK(K9311)	400	580.7	680.0	3.2	4.4
被覆管単軸	60MS	400	592.0	676.0	2.7	6.8
被覆管単軸	60MS	400	592.0	674.0	3.9	5.8
被覆管単軸	60MS	400	592.0	671.0	3.5	5.4
被覆管単軸	60MS	400	605.0	668.0	3.5	5.2
被覆管単軸	60MS	400	583.0	675.0	3.3	5.8
被覆管単軸	60MK	400	607.0	673.0	4.1	6.0
被覆管単軸	60MK	400	603.0	667.0	4.0	4.6
被覆管単軸	60MK	400	608.0	674.0	4.1	5.4
被覆管単軸	60MK	400	609.0	669.0	3.0	5.6
被覆管単軸	60MK	400	608.0	671.0	3.1	5.8

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (4/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ラッパ管	lot 0301	400	572.5	655.6	4.9	8.2
ラッパ管	lot 0301	400	584.5	651.2	4.8	8.0
ラッパ管	lot 0301	400	589.1	659.2	3.9	7.5
ラッパ管	lot 0301	420	590.6	653.4	4.8	8.4
ラッパ管	lot 0301	430	584.2	645.4	4.3	7.7
ラッパ管	lot 0301	440	579.3	644.5	5.8	8.6
ラッパ管	lot 0301	450	579.6	646.5	4.5	7.6
ラッパ管	lot 0301	450	575.0	643.3	5.3	8.5
ラッパ管	lot 0301	450	578.8	645.7	4.7	8.1
ラッパ管	lot 0301	460	583.3	646.7	4.9	8.0
被覆管単軸	54MS	500	607.0	639.4	—	4.0
被覆管単軸	55MS	500	567.8	591.3	—	7.4
被覆管単軸	55MS	500	570.7	591.3	—	6.4
被覆管単軸	55MK	500	579.6	661.0	—	7.2
被覆管単軸	55MK	500	567.8	654.1	—	7.0
被覆管単軸	55MK	500	603.1	660.0	—	7.3
被覆管単軸	55MK	500	611.9	657.0	—	7.6
被覆管単軸	55MK	500	537.4	656.1	—	6.5
被覆管単軸	55MK	500	555.1	664.9	—	5.6
被覆管単軸	55MK	500	555.1	651.2	—	6.7
被覆管単軸	55MK	500	525.6	649.2	—	11.0
被覆管単軸	55MK	500	554.1	665.9	—	5.6
被覆管単軸	55MK	500	535.4	670.8	—	5.3
被覆管単軸	55MS	500	607.0	645.3	—	6.0
被覆管単軸	55MS	500	610.0	658.0	—	7.3
被覆管単軸	55MS	500	592.3	641.4	—	7.2
被覆管単軸	55MS	500	586.4	641.4	—	5.8
被覆管単軸	55MS	500	583.5	641.4	—	6.1
被覆管単軸	56JS	500	600.2	702.2	—	3.4
被覆管単軸	56JS	500	584.5	680.6	—	4.4
被覆管単軸	56JS	500	552.1	633.5	—	7.0
被覆管単軸	56JS	500	575.7	662.9	—	7.0
被覆管単軸	56JS	500	598.2	666.9	—	5.0
被覆管単軸	54MS	500	611.0	645.3	—	4.4
被覆管単軸	54MS	500	581.5	634.5	—	4.6
被覆管単軸	54MS	500	597.2	654.1	—	5.1
被覆管単軸	54MS	500	607.0	641.4	—	7.6
被覆管単軸	54MS	500	575.7	648.2	—	8.9
被覆管単軸	60MS	500	582.0	691.0	4.7	8.9
被覆管単軸	60MS	500	578.0	654.0	4.1	6.2
被覆管単軸	60MS	500	567.0	654.0	4.1	5.2
被覆管単軸	60MK	500	579.0	652.0	3.8	6.6
被覆管単軸	60MK	500	586.0	654.0	3.3	6.5
被覆管単軸	60MK	500	567.0	652.0	6.0	6.4

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (5/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ラッパ管	lot 0301	500	571.5	632.7	7.0	10.0
ラッパ管	lot 0301	500	574.7	638.9	3.5	10.1
ラッパ管	lot 0301	500	593.8	646.6	3.7	11.2
ラッパ管	lot 0301	550	558.6	615.2	6.5	10.2
ラッパ管	lot 0301	550	542.7	617.3	5.7	8.5
ラッパ管	lot 0301	550	561.0	619.6	6.9	9.9
被覆管単軸	54MS	600	536.4	584.5	—	6.6
被覆管単軸	54MK	600	517.8	609.0	—	10.0
被覆管単軸	55MS	600	500.1	575.7	—	8.4
被覆管単軸	55MS	600	503.1	578.6	—	9.2
被覆管単軸	55MK	600	491.3	589.4	—	7.8
被覆管単軸	55MK	600	505.0	597.2	—	8.4
被覆管単軸	55MK	600	529.6	601.1	—	9.9
被覆管単軸	55MK	600	549.2	606.1	—	9.1
被覆管単軸	55MK	600	512.9	595.3	—	7.2
被覆管単軸	55MK	600	520.7	606.1	—	—
被覆管単軸	55MK	600	501.1	605.1	—	6.3
被覆管単軸	55MK	600	491.3	598.2	—	10.0
被覆管単軸	55MK	600	470.7	612.9	—	8.7
被覆管単軸	55MK	600	514.8	605.1	—	8.9
被覆管単軸	55MS	600	544.3	613.9	—	—
被覆管単軸	55MS	600	533.5	597.2	—	7.6
被覆管単軸	55MS	600	501.1	576.6	—	11.0
被覆管単軸	55MS	600	516.8	586.4	—	8.6
被覆管単軸	55MS	600	515.8	590.4	—	8.4
被覆管単軸	56JS	600	529.6	610.0	—	8.0
被覆管単軸	56JS	600	534.5	607.0	—	—
被覆管単軸	56JS	600	542.3	605.1	—	8.2
被覆管単軸	56JS	600	537.4	610.0	—	8.0
被覆管単軸	56JS	600	542.3	613.9	—	8.0
被覆管単軸	54MS	600	557.0	605.1	—	—
被覆管単軸	54MS	600	542.3	588.4	—	6.6
被覆管単軸	54MS	600	541.3	600.2	—	7.7
被覆管単軸	54MS	600	540.3	591.3	—	9.0
被覆管単軸	54MS	600	539.4	592.3	—	8.9
被覆管単軸	2048010 (S1)	600	545.8	598.4	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	600	532.8	612.2	—	—
被覆管単軸	55MK(K9410)	600	482.7	594.3	5.6	7.7
被覆管単軸	55Mk(K9410)	600	498.3	595.7	5.6	7.3
被覆管単軸	60MS	600	520.0	598.0	4.6	7.3
被覆管単軸	60MS	600	507.0	591.0	4.5	8.2
被覆管単軸	60MS	600	513.0	591.0	3.1	9.0
被覆管単軸	60MK	600	521.0	595.0	4.1	6.6
被覆管単軸	60MK	600	529.0	590.0	3.9	7.5
被覆管単軸	60MK	600	530.0	594.0	4.4	5.9

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (6/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ラッパ管	lot 0301	600	520.0	590.8	4.3	10.9
ラッパ管	lot 0301	600	519.3	592.0	7.3	11.4
ラッパ管	lot 0301	600	525.2	596.5	7.8	10.7
被覆管単軸	55MK	650	470.7	595.3	—	—
被覆管単軸	55MK	650	454.0	550.2	—	7.9
被覆管単軸	55MK	650	472.7	534.5	—	10.0
被覆管単軸	55MK	650	452.1	555.1	—	8.9
被覆管単軸	55MK	650	451.1	560.0	—	8.7
被覆管単軸	55MS	650	503.1	560.9	—	6.4
被覆管単軸	55MS	650	482.5	556.0	—	7.6
被覆管単軸	55MS	650	474.6	532.5	—	11.5
被覆管単軸	55MS	650	472.7	543.3	—	8.8
被覆管単軸	55MS	650	466.8	544.3	—	8.4
被覆管単軸	56JS	650	475.6	560.0	—	8.6
被覆管単軸	56JS	650	486.4	573.7	—	6.4
被覆管単軸	56JS	650	459.0	544.3	—	11.2
被覆管単軸	56JS	650	467.8	546.2	—	12.0
被覆管単軸	56JS	650	487.4	560.0	—	11.0
被覆管単軸	54MS	650	492.3	531.5	—	8.0
被覆管単軸	54MS	650	487.4	533.5	—	8.0
被覆管単軸	54MS	650	518.8	564.9	—	—
被覆管単軸	54MS	650	491.3	545.2	—	5.4
被覆管単軸	54MS	650	494.3	551.1	—	9.5
被覆管単軸	54MS	650	479.5	545.2	—	8.2
被覆管単軸	54MS	650	482.5	549.2	—	8.2
ラッパ管	lot 0301	650	471.2	550.7	4.9	12.4
ラッパ管	lot 0301	650	448.9	525.4	5.9	15.4
ラッパ管	lot 0301	650	451.0	530.6	5.8	15.4
ラッパ管	N301	650	456.0	504.1	—	13.0
ラッパ管	N301	650	459.9	526.6	—	11.0
ラッパ管	N301	650	457.0	507.0	—	13.0
ラッパ管	N301	650	444.2	522.7	—	13.0
ラッパ管	N301	650	451.1	504.1	—	14.0
ラッパ管	N301	650	440.3	519.8	—	12.0
ラッパ管	N301	650	442.3	501.1	—	13.0
ラッパ管	N301	650	445.2	530.5	—	11.0
ラッパ管	LRK004	650	477.6	533.5	—	11.0
ラッパ管	LRK004	650	502.1	557.0	—	10.0
ラッパ管	LRK004	650	492.3	551.1	—	11.0
ラッパ管	LRK004	650	492.3	554.1	—	11.0
被覆管単軸	55MK	675	434.4	513.9	—	6.3
被覆管単軸	55MK	675	433.5	515.8	—	6.2

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (7/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ラッパ管	lot 0301	675	442.0	505.0	—	17.0
ラッパ管	lot 0301	675	432.0	494.0	—	20.0
ラッパ管	lot 0301	675	437.0	516.0	—	11.0
ラッパ管	lot 0301	675	450.0	519.0	—	12.0
ラッパ管	lot 0301	675	453.0	523.0	—	16.0
ラッパ管	lot 0301	675	450.0	518.0	—	17.0
ラッパ管	lot 0301	675	458.0	515.0	—	11.0
ラッパ管	lot 0301	675	456.0	508.0	—	12.0
被覆管単軸	54MS	700	392.3	474.6	—	14.4
被覆管単軸	54MK	700	376.6	470.7	—	13.6
被覆管単軸	55MS	700	368.7	463.9	—	6.0
被覆管単軸	55MS	700	390.3	466.8	—	7.2
被覆管単軸	55MK	700	376.6	465.8	—	15.8
被覆管単軸	55MK	700	386.4	479.5	—	13.4
被覆管単軸	55MK	700	372.7	470.7	—	18.2
被覆管単軸	55MK	700	373.6	472.7	—	14.2
被覆管単軸	55MK	700	369.7	463.9	—	10.3
被覆管単軸	55MK	700	397.2	511.9	—	9.2
被覆管単軸	55MK	700	373.6	468.8	—	7.1
被覆管単軸	55MK	700	335.4	447.2	—	15.4
被覆管単軸	55MK	700	401.1	505.0	—	10.8
被覆管単軸	55MK	700	383.4	478.6	—	13.5
被覆管単軸	55MS	700	440.3	499.2	—	8.4
被覆管単軸	55MS	700	407.0	477.6	—	13.4
被覆管単軸	55MS	700	371.7	436.4	—	21.6
被覆管単軸	55MS	700	420.7	493.3	—	10.4
被覆管単軸	55MS	700	414.8	493.3	—	10.4
被覆管単軸	56JS	700	394.2	491.3	—	15.8
被覆管単軸	56JS	700	441.3	511.9	—	9.0
被覆管単軸	56JS	700	363.8	459.0	—	22.1
被覆管単軸	56JS	700	371.7	459.9	—	27.0
被覆管単軸	56JS	700	375.6	459.9	—	28.0
被覆管単軸	54MS	700	419.7	489.4	—	7.0
被覆管単軸	54MS	700	409.9	472.7	—	7.6
被覆管単軸	54MS	700	394.2	466.8	—	19.4
被覆管単軸	54MS	700	391.3	477.6	—	14.0
被覆管単軸	54MS	700	428.6	478.6	—	11.2
被覆管単軸	2048010 (S1)	700	391.1	474.4	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	700	384.8	478.7	—	—
被覆管単軸	55MK(K9410)	700	375.8	480.5	2.4	19.1
被覆管単軸	55MK(K9410)	700	373.5	477.8	2.4	17.0
被覆管単軸	60MS	700	395.0	418.0	0.8	10.6
被覆管単軸	60MS	700	387.0	418.0	1.0	9.7
被覆管単軸	60MS	700	399.0	433.0	1.0	12.4

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (8/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
被覆管単軸	60MK	700	434.0	466.0	2.0	17.4
被覆管単軸	60MK	700	397.0	428.0	2.1	14.4
被覆管単軸	60MK	700	423.0	455.0	1.6	14.4
ラッパ管	lot 0301	700	393.1	465.1	3.2	23.0
ラッパ管	lot 0301	700	394.9	464.2	2.9	19.9
ラッパ管	lot 0301	700	385.9	464.0	2.8	20.3
被覆管単軸	55MK	750	345.2	414.8	—	12.0
被覆管単軸	55MK	750	290.3	379.5	—	15.0
被覆管単軸	55MK	750	281.5	353.0	—	28.1
被覆管単軸	55MK	750	294.2	391.3	—	23.0
被覆管単軸	55MK	750	290.3	390.3	—	20.2
被覆管単軸	55MS	750	359.9	420.7	—	13.6
被覆管単軸	55MS	750	315.8	396.2	—	21.7
被覆管単軸	55MS	750	293.2	363.8	—	29.1
被覆管単軸	55MS	750	316.8	406.0	—	19.3
被覆管単軸	55MS	750	320.7	413.8	—	17.1
被覆管単軸	56JS	750	320.7	392.3	—	21.6
被覆管単軸	56JS	750	352.1	418.7	—	17.0
被覆管単軸	56JS	750	288.3	358.9	—	25.3
被覆管単軸	56JS	750	292.2	376.6	—	41.0
被覆管単軸	56JS	750	302.0	376.6	—	35.0
被覆管単軸	54MS	750	375.6	415.8	—	12.4
被覆管単軸	54MS	750	325.6	382.5	—	12.8
被覆管単軸	54MS	750	316.8	383.4	—	32.9
被覆管単軸	54MS	750	338.3	404.0	—	21.6
被覆管単軸	54MS	750	329.5	401.1	—	19.6
ラッパ管	lot 0301	750	317.6	389.1	1.2	29.1
ラッパ管	lot 0301	750	315.2	391.7	1.3	31.7
ラッパ管	lot 0301	750	319.2	390.1	1.2	35.5
被覆管単軸	55MS	800	256.9	323.6	—	38.0
被覆管単軸	55MS	800	251.1	318.7	—	44.0
被覆管単軸	55MK	800	233.4	309.9	—	42.0
被覆管単軸	55MK	800	228.5	308.9	—	40.6
被覆管単軸	55MK	800	295.2	334.4	—	24.2
被覆管単軸	55MK	800	230.5	307.9	—	40.8
被覆管単軸	55MK	800	217.7	272.6	—	34.2
被覆管単軸	55MK	800	241.2	316.8	—	23.2
被覆管単軸	55MK	800	241.2	328.5	—	23.7
被覆管単軸	55MS	800	294.2	345.2	—	19.2
被覆管単軸	55MS	800	249.1	311.9	—	36.5
被覆管単軸	55MS	800	218.7	275.6	—	36.7
被覆管単軸	55MS	800	237.3	320.7	—	24.2
被覆管単軸	55MS	800	247.1	332.4	—	23.6

表 A1 炉外引張試験結果一覧 (9/9)

形状	鋼種	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び ⁶ (%)	破断伸び ⁶ (%)
被覆管単軸	56JS	800	224.6	260.9	—	—
被覆管単軸	56JS	800	287.3	351.1	—	20.0
被覆管単軸	56JS	800	218.7	284.4	—	29.0
被覆管単軸	56JS	800	238.3	300.1	—	39.0
被覆管単軸	56JS	800	234.4	302.0	—	50.0
被覆管単軸	54MS	800	297.1	325.6	—	16.2
被覆管単軸	54MS	800	264.8	318.7	—	16.0
被覆管単軸	54MS	800	242.2	311.9	—	33.4
被覆管単軸	54MS	800	258.9	324.6	—	26.3
被覆管単軸	54MS	800	247.1	318.7	—	34.9
被覆管単軸	60MS	800	274.0	281.0	0.5	15.4
被覆管単軸	60MS	800	283.0	297.0	0.5	18.0
被覆管単軸	60MS	800	262.0	269.0	0.9	18.0
被覆管単軸	60MS	800	260.0	269.0	0.5	12.3
被覆管単軸	60MS	800	259.0	272.0	0.6	13.5
被覆管単軸	60MK	800	277.0	283.0	0.3	23.1
被覆管単軸	60MK	800	229.0	268.0	1.0	18.0
被覆管単軸	60MK	800	269.0	285.0	0.4	17.0
被覆管単軸	60MK	800	277.0	285.0	0.5	18.2
被覆管単軸	60MK	800	285.0	291.0	0.5	17.6
ラップ管	lot 0301	800	255.7	318.6	1.0	49.7
ラップ管	lot 0301	800	257.1	322.3	0.8	36.2
ラップ管	lot 0301	800	255.9	323.6	0.7	41.3
被覆管単軸	2048010 (S1)	850	180.9	245.6	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	850	173.3	241.8	—	—
被覆管単軸	1033301 (K2)	850	181.1	247.9	—	—
ラップ管	lot 0301	850	204.3	262.9	0.6	52.7
ラップ管	lot 0301	850	197.9	267.0	0.7	57.3
ラップ管	lot 0301	850	204.2	263.7	0.6	51.9
被覆管単軸	2048010 (S1)	900	124.7	184.2	—	—
被覆管単軸	1035341 (K1)	900	123.7	187.1	—	—
被覆管単軸	1033301 (K2)	900	126.8	189.3	—	—
ラップ管	lot 0301	900	155.2	208.4	0.6	59.4
ラップ管	lot 0301	900	152.4	210.8	0.7	60.8
ラップ管	lot 0301	900	152.8	210.4	0.7	65.6

付録 2
照射後引張試験データ一覧

炉外高温引張試験（付録-1）と同様に、被覆管の単軸引張試験については、被覆管の両端に治具を固定することで、大気中で管軸方向への引張試験を実施した。ラップ管材の引張試験は、JIS G0567 に準拠して実施した。試験データの一覧を表 A2 に示す。

表 A2 照射後引張試験データ (1/3)

照射炉	形状	鋼種	試験片番号	照射温度 (°C)	高速中性子照射量 ($\times 10^{26}$ n/m ² , E>0.1MeV)	照射時間 (h)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	E2512	392	5.7	10082.6	400	871.5	946.5
FFTF	燃料照射被覆管	60MK	XL08B1	393	12.5	21667.2	400	895.2	913.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	C7632	400	5.1	9670.3	400	857.2	921.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83482	400	2.4	4189.2	400	874.6	931.7
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83472	403	2.6	4189.2	400	839.9	910.9
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI2E2	405	20.1	24463.9	400	856.2	901.9
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI2C6	409	18.9	24463.9	400	856.6	902.7
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4322	416	5.4	9483.4	400	805.1	895.5
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4232	417	5.4	9483.4	400	805.1	914.2
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4402	417	5.4	9483.4	400	879.4	915.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4222	417	5.5	9483.4	400	837.1	902.1
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI2A2	417	20.2	24463.9	420	839.3	881.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B22	425	3.0	4256.6	450	837.1	902.1
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B62	430	3.0	4256.6	450	804.0	890.0
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI4B6	431	19.1	24463.9	430	735.8	801.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83473	436	3.7	4189.2	450	774.1	841.7
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83483	437	3.5	4189.2	450	801.8	865.9
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5A2	440	4.4	11482.5	440	637.7	722.9
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5A1	440	4.6	11482.5	440	629.5	725.0
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5B2	444	4.1	11482.5	440	605.4	695.4
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5B1	444	4.1	11482.5	440	579.4	684.6
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	G35232	446	15.9	20081.0	450	757.9	824.4
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI4F6	449	22.2	24463.9	450	721.8	785.2
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI4C6	450	18.2	24463.9	450	729.9	786.0
「常陽」	ラップ管	LRK004	M2WI4E1	453	22.2	24463.9	450	723.1	774.1
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5C2	458	4.4	11482.5	460	619.0	707.2
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5C1	458	4.4	11482.5	460	607.1	697.6
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5E2	462	5.5	11482.5	460	621.0	730.8
「常陽」	ラップ管	N301	F5WH5E1	462	5.5	11482.5	460	620.5	727.7
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83484	471	4.1	4189.2	450	730.8	810.5
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83474	474	4.3	4189.2	450	701.4	793.2

表 A2 照射後引張試験データ (2/3)

照射炉	形状	鋼種	試験片 番号	照射温度 (°C)	高速中性子 照射量 ($\times 10^{26}$ n/m ² , E>0.1MeV)	照射時間 (h)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B04	475	16.6	11448.0	500	590.4	669.8
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	E26341	484	9.1	10082.6	500	485.6	667.5
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	E27641	484	9.1	10082.6	500	561.6	649.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	C7634	485	8.4	9670.3	500	633.8	689.3
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B05	490	10.4	6576.0	500	585.5	688.4
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B06	490	7.7	4872.0	500	578.6	705.1
FFTF	燃料照射被覆管	60MK	XL07G1	495	20.9	21667.2	500	481.4	584.6
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	G3203A	496	17.6	20081.0	500	512.7	602.3
「常陽」	ラッパ管	LRK004	M2W15F6	497	15.5	24463.9	500	552.0	649.0
FFTF	燃料照射被覆管	60MS1(1)	XL10J1	499	20.7	21667.2	500	475.5	551.1
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	H6AU51	502	15.9	18622.6	500	496.4	597.5
「常陽」	ラッパ管	LRK004	M2W15E6	508	15.3	24463.9	500	547.1	637.1
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83476	517	4.5	4189.2	500	575.0	632.1
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83486	518	4.4	4189.2	500	611.3	687.5
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4404	533	8.5	9483.4	550	523.5	614.6
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4324	534	8.4	9483.4	550	473.6	644.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4234	536	8.5	9483.4	550	469.2	638.8
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4224	539	8.6	9483.4	550	471.4	603.6
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B26	545	4.6	4256.6	550	546.3	650.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	C7636	547	4.4	9670.3	550	490.1	573.2
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B08	550	10.8	6576.0	550	513.9	617.8
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B09	550	8.0	4872.0	550	514.9	618.8
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83477	553	4.3	4189.2	550	509.1	592.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83487	554	4.2	4189.2	550	536.9	611.3
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	C5AT9	569	3.9	3851.5	550	488.4	582.5
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	F7AT81	569	15.5	14399.3	550	404.3	539.1
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	L9AT7	569	25.0	23806.7	570	359.6	522.5
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B10	570	18.5	11448.0	550	429.5	547.2
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B66	580	4.6	4256.6	600	487.9	545.2
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83478	583	3.6	4189.2	600	457.2	514.3
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83488	585	3.5	4189.2	600	481.4	536.9

表 A2 照射後引張試験データ (3/3)

照射炉	形状	鋼種	試験片 番号	照射温度 (°C)	高速中性子 照射量 ($\times 10^{26}$ n/m ² , E>0.1MeV)	照射時間 (h)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	C5AU9	589	3.9	3851.5	600	445.2	501.1
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	F7AU81	589	15.2	14399.3	600	342.0	503.2
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	L9AU7	589	24.3	23806.7	600	329.2	496.6
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B28	590	2.7	4256.6	600	473.6	537.5
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B11	595	9.8	6576.0	600	426.6	502.1
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B12	595	7.3	4872.0	600	445.2	513.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	98B68	595	2.8	4256.6	600	447.2	510.0
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	83489	603	2.6	4189.2	600	472.8	523.0
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	83479	605	2.7	4189.2	600	443.3	500.5
FFTF	燃料照射被覆管	60MK	XL07Q1	611	19.5	21667.2	600	322.2	470.5
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B13	615	15.3	11448.0	600	349.1	458.0
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4327	625	5.0	9483.4	650	360.2	422.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MS	A4237	626	5.0	9483.4	650	369.0	422.9
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4408	627	5.0	9483.4	650	344.7	407.5
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	L9AT4	628	23.6	23806.7	630	275.0	427.0
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	C5AT6	628	4.0	3851.5	650	350.1	400.1
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	F7AT51	628	14.7	14399.3	650	280.8	414.4
「常陽」	燃料照射被覆管	55MK	A4227	630	5.1	9483.4	650	334.8	398.7
FFTF	燃料照射被覆管	60MK	XL07T1	633	9.0	21667.2	650	280.8	409.9
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	D9ZT9	643	4.0	5978.4	650	318.7	448.2
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	D9ZU9	643	4.0	5978.4	650	312.8	449.1
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B17	650	4.9	6576.0	650	313.8	362.9
Phenix	材料照射被覆管	55MK	ZDB4B18	650	3.6	4872.0	650	327.5	379.5
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	C5AU3	709	4.0	3851.5	700	248.1	269.7
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	F7AU21	709	15.5	14399.3	700	205.5	279.7
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	H6AU11	709	20.6	18622.6	700	198.8	269.6
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	D9ZT7	709	4.0	5978.4	700	234.4	328.5
「常陽」	材料照射被覆管	60MS2	D9ZU7	709	4.0	5978.4	700	219.7	320.0
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	L9AT1	734	23.2	23806.7	730	169.0	254.0
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	C5AT3	734	3.8	3851.5	740	199.1	215.8
「常陽」	材料照射被覆管	60MK	F7AT21	734	14.9	14399.3	750	165.1	220.1

付録 3
炉外クリープ破断強度データ一覧

1. データ取得方法

内圧クリープ試験及び板状クリープ試験により SUS316 相当鋼被覆管の炉外クリープ破断試験データを取得した。内圧クリープ破断試験は、大気中において試験片を目標温度に加熱し、Ar ガスによる導入内圧により一定応力を保持し、破断に至るまでの時間を計測した。本試験は、高速炉用燃料被覆管の試験手法として定められた「高速炉燃料被覆管の内圧クリープ破断試験要領」に基づき実施された[1-3]。

板状クリープ試験は、Ar ガス雰囲気中で図 A3-1 に示す試験片を用い、JIS Z 2271 に準拠して実施した。20%冷間加工した SUS316 相当鋼板材から、応力負荷方向が圧延方向に対して垂直になるよう試験片を採取した (T 方向材)。

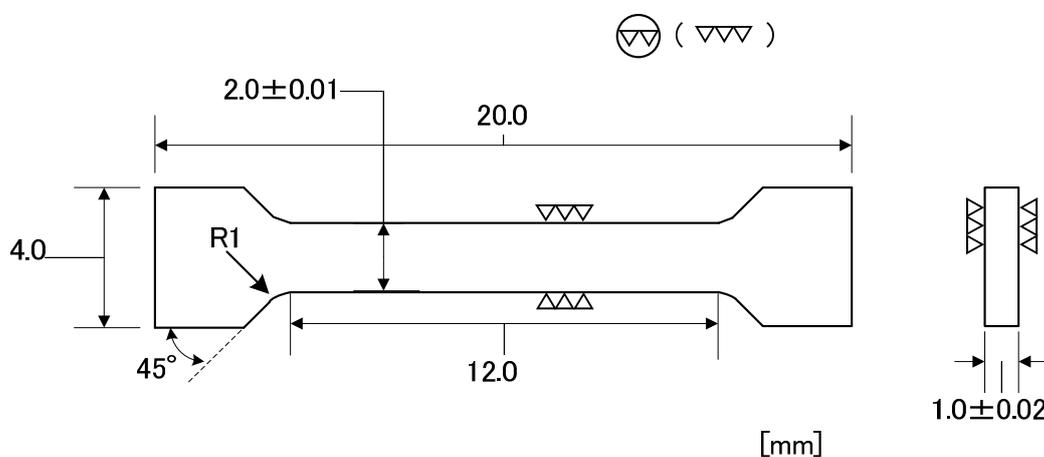


図 A3-1 板状クリープ試験片の形状

2. 炉外クリープ強度データ

内圧クリープ試験及び板状クリープ試験により取得した SUS316 相当鋼被覆管の炉外クリープ破断試験データ (試験温度: 600~900°C) の一覧を表 A3 に示す。

参考文献

- [1] 飯塚昇司、吉田英一、加納茂機、二瓶勲、高速炉用改良 SUS316 ステンレス鋼燃料被覆管の高温材料強度データ集, PNC TN9450 88-004, 1988, 140p.
- [2] FBR 材料専門委員会クリープサブグループ (田中千秋), 高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第 12 次クリープ試験), PNC TN241 83-19, 1983, 83p.
- [3] FBR 材料専門委員会クリープサブグループ (田中千秋), 高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第 13 次クリープ試験), PNC TN241 85-02, 1984, 95p.

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (1/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
55 MK	600	474.6	411.1	146.5	内圧クリープ
55 MK	600	442.3	383.0	390.1	同上
55 MK	600	408.9	354.2	577.2	同上
55 MK	600	386.4	334.6	1440.0	同上
55 MK	600	385.4	333.8	1726.0	同上
55 MK	650	304.0	263.3	1439.5	同上
55 MK	650	264.8	229.3	2893.0	同上
55 MK	650	314.8	272.6	1544.1	同上
55 MK	650	296.2	256.5	2050.5	同上
55 MK	650	263.8	228.5	3893.8	同上
55 MK	650	363.8	315.1	417.0	同上
55 MK	650	338.3	293.0	540.0	同上
55 MK	650	297.1	257.3	1271.0	同上
55 MK	650	246.1	213.2	3402.0	同上
55 MK	675	257.9	223.4	1239.1	同上
55 MK	675	225.6	195.3	2230.4	同上
55 MK	675	176.5	152.9	4258.6	同上
55 MK	675	135.3	117.2	11575.0	同上
55 MK	700	289.3	250.5	223.3	同上
55 MK	700	245.2	212.3	364.6	同上
55 MK	700	188.3	163.1	1478.9	同上
55 MK	700	132.4	114.7	5234.9	同上
55 MK	700	315.8	273.5	88.9	同上
55 MK	700	258.9	224.2	274.2	同上
55 MK	700	205.9	178.3	980.3	同上
55 MK	700	166.7	144.4	2847.5	同上
55 MK	700	137.3	118.9	3416.2	同上
55 MK	700	176.5	152.9	1287.0	同上
55 MK	700	98.1	84.9	8317.2	同上
55 MK	700	176.5	152.9	1526.0	同上
55 MK	700	176.5	152.9	1738.0	同上

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (2/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
55 MK	750	189.3	163.9	83.0	内圧クリープ
55 MK	750	157.9	136.7	147.0	同上
55 MK	750	138.3	119.7	325.0	同上
55 MK	750	120.6	104.5	875.0	同上
55 MK	750	176.5	152.9	130.6	同上
55 MK	750	138.3	119.7	293.7	同上
55 MK	750	94.1	81.5	1482.9	同上
55 MK	750	239.3	207.2	26.8	同上
55 MK	750	163.8	141.8	294.3	同上
55 MK	750	119.6	103.6	1030.1	同上
55 MK	750	207.9	180.0	64.3	同上
55 MK	750	169.7	146.9	243.0	同上
55 MK	750	132.4	114.7	596.0	同上
55 MK	750	88.3	76.4	2690.0	同上
55 MS	600	464.8	402.6	174.0	同上
55 MS	600	436.4	377.9	539.1	同上
55 MS	600	406.0	351.6	507.5	同上
55 MS	600	381.5	330.4	2740.0	同上
55 MS	600	382.5	331.2	2725.7	同上
55 MS	650	264.8	229.3	2843.8	同上
55 MS	650	314.8	272.6	1054.2	同上
55 MS	650	283.4	245.4	1816.9	同上
55 MS	650	252.0	218.3	4884.9	同上
55 MS	650	371.7	321.9	423.0	同上
55 MS	650	335.4	290.5	601.0	同上
55 MS	650	292.2	253.1	1280.0	同上
55 MS	650	256.0	221.7	2506.0	同上
55 MS	675	176.5	152.9	7501.1	同上
55 MS	675	135.3	117.2	23222.0	同上

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (3/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
55 MS	700	289.3	250.5	181.2	内圧クリープ
55 MS	700	245.2	212.3	454.7	同上
55 MS	700	188.3	163.1	1596.5	同上
55 MS	700	132.4	114.7	4490.9	同上
55 MS	700	311.9	270.1	126.0	同上
55 MS	700	256.0	221.7	366.7	同上
55 MS	700	212.8	184.3	1020.8	同上
55 MS	700	174.6	151.2	2135.5	同上
55 MK	700	98.1	84.9	19846.7	同上
55 MS	750	186.3	161.4	70.0	同上
55 MS	750	155.9	135.0	127.0	同上
55 MS	750	137.3	118.9	391.0	同上
55 MS	750	112.8	97.7	885.0	同上
55 MS	750	176.5	152.9	140.0	同上
55 MS	750	138.3	119.7	389.5	同上
55 MS	750	94.1	81.5	1329.9	同上
55 MS	750	201.0	174.1	84.7	同上
55 MS	750	163.8	141.8	419.6	同上
55 MS	750	106.9	92.6	1919.6	同上
55 MS	750	205.9	178.3	96.8	同上
55 MS	750	168.7	146.1	280.2	同上
55 MS	750	121.6	105.3	1100.7	同上
55 MS	750	87.3	75.6	2689.2	同上
54MS	600	440.3	381.3	245	同上
54MS	600	408.9	354.2	1315.3	同上
54MS	600	383.4	332.1	2102.8	同上
54MS	650	377.6	327.0	179	同上
54MS	650	345.2	298.9	354	同上
54MS	650	283.4	245.4	1131	同上
54MS	650	252.0	218.3	2459	同上
54MS	650	364.8	315.9	336.1	同上
54MS	650	347.2	300.6	640.7	同上
54MS	650	313.8	271.8	1153	同上

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (4/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
54MS	700	296.2	256.5	128.5	内圧クリープ
54MS	700	245.2	212.3	293	同上
54MS	700	195.2	169.0	999.8	同上
54MS	700	148.1	128.2	2840.9	同上
54MS	700	295.2	255.6	137.7	同上
54MS	700	225.6	195.3	710.8	同上
54MS	700	166.7	144.4	2338.8	同上
54MS	750	189.3	163.9	88	同上
54MS	750	138.3	119.7	281	同上
54MS	750	138.3	119.7	480	同上
54MS	750	106.9	92.6	1711	同上
54MS	750	188.3	163.1	96.3	同上
54MS	750	138.3	119.7	380.2	同上
54MS	750	101.0	87.5	1261.1	同上
54MS	750	68.6	59.4	4539.5	同上
54MS	750	201.0	174.1	112.9	同上
54MS	750	156.9	135.9	368.8	同上
54MS	750	113.8	98.5	831	同上
54MS	750	68.6	59.4	3970.2	同上
54MS	750	68.6	59.4	4244.5	同上
54MS	750	210.8	182.6	76.5	同上
54MS	750	145.1	125.7	558.8	同上
54MS	750	125.5	108.7	887.2	同上
54MS	750	68.6	59.4	6600.7	同上
56JS	600	489.4	423.8	141.9	同上
56JS	600	438.4	379.6	381.5	同上
56JS	600	403.1	349.1	558.5	同上
56JS	600	382.5	331.2	2171.2	同上

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (5/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
56JS	650	360.88472	312.5	185.3	内圧クリープ
56JS	650	288.31551	249.7	1056.4	同上
56JS	650	253.01157	219.1	2516.4	同上
56JS	650	381.478685	330.4	126	同上
56JS	650	354.020065	306.6	474	同上
56JS	650	323.61945	280.3	725	同上
56JS	650	251.05024	217.4	2501	同上
56JS	700	313.8128	271.8	53	同上
56JS	700	263.798885	228.5	151.5	同上
56JS	700	205.93965	178.3	589.3	同上
56JS	700	165.732385	143.5	1327.2	同上
56JS	700	313.8128	271.8	76.7	同上
56JS	700	264.77955	229.3	241.7	同上
56JS	700	205.93965	178.3	710	同上
56JS	700	161.809725	140.1	2311	同上
56JS	750	178.48103	154.6	68	同上
56JS	750	143.17709	124.0	226	同上
56JS	750	107.87315	93.4	471	同上
56JS	750	94.14384	81.5	1721	同上
56JS	750	176.5197	152.9	110.8	同上
56JS	750	137.2931	118.9	295.7	同上
56JS	750	107.87315	93.4	571.4	同上
56JS	750	231.43694	200.4	30.8	同上
56JS	750	187.307015	162.2	82	同上
56JS	750	144.157755	124.8	433.5	同上
56JS	750	122.583125	106.2	854.9	同上
56JS	750	205.93965	178.3	66.9	同上
56JS	750	171.616375	148.6	174.5	同上
56JS	750	117.6798	101.9	1192.8	同上
56JS	750	84.33719	73.0	4293.3	同上

表 A3 SUS316 相当鋼の高温クリープ破断試験結果一覧 (6/6)

鋼種	試験温度 (°C)	周方向試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験方法
55MS	816	29.42	25.5	7221	内圧クリープ
55MK	816	29.42	25.5	10119.9	同上
55MK	816	29.42	25.5	7383	同上
55MS	852	19.613	17.0	5377	同上
55MS	852	19.613	17.0	5841.6	同上
55MK	852	19.613	17.0	6078	同上
55MK	852	19.613	17.0	6100	同上
0301	800	—	170.0	24.1	板状クリープ
0301	800	—	125.0	119.4	同上
0301	800	—	105.0	273.2	同上
0301	800	—	90.0	623.8	同上
0301	800	—	85.0	742.5	同上
0301	850	—	75.0	165.8	同上
0301	850	—	100.0	53.6	同上
0301	850	—	55.0	478.8	同上
0301	850	—	40.0	1088.5	同上
0301	900	—	75.0	11.8	同上
0301	900	—	50.0	49.4	同上
0301	900	—	40.0	103.1	同上
0301	900	—	30.0	399.5	同上

付録4
炉内外 Na 中クリープ破断データ一覧

表 A4-1 炉外 Na 中内圧クリープ破断試験データ

環境	鋼種	試験片 番号	試験温度 (°C)	試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)
炉外Na	55 MK	K9334- 2	650	403.1	349.1	197.8
炉外Na	55 MK	K9333- 4	650	364.8	315.9	354.0
炉外Na	55 MK	K9333- 2	650	305.0	264.1	1517.9
炉外Na	55 MK	K9334- 6	650	263.8	228.5	1724.0
炉外Na	55 MK	K9333- 6	650	236.3	204.7	4870.2
炉外Na	55 MK	K9332- 5	650	236.3	204.7	3504.1
炉外Na	55 MK	K9335- 6	650	213.8	185.1	6795.9
炉外Na	55 MK	K9333- 5	650	213.8	185.1	6985.5
炉外Na	55 MK	K9334- 5	650	155.9	135.0	14506.0
炉外Na	55 MK	K9330- 5	650	403.1	349.1	29.0
炉外Na	55 MK	K9334- 1	675	283.4	245.4	648.5
炉外Na	55 MK	K9332- 3	675	255.0	220.8	1130.3
炉外Na	55 MK	K9333- 1	675	252.0	218.3	659.5
炉外Na	55 MK	K9335- 2	675	216.7	187.7	1837.4
炉外Na	55 MK	K9332-14	675	216.7	187.7	2376.0
炉外Na	55 MK	K9333-14	675	189.3	163.9	2593.0
炉外Na	55 MK	K9332- 1	675	188.3	163.1	4131.2
炉外Na	55 MK	K9334-14	675	159.8	138.4	5057.9
炉外Na	55 MK	K9330- 3	675	159.8	138.4	6402.1
炉外Na	55 MK	K9330- 2	675	156.9	135.9	7058.1
炉外Na	55 MK	K9330-16	675	156.9	135.9	6615.7
炉外Na	55 MK	K9335- 1	675	125.5	108.7	9509.7
炉外Na	55 MK	K9333-11	700	248.1	214.9	224.9
炉外Na	55 MK	K9335- 9	700	201.0	174.1	866.4
炉外Na	55 MK	K9332-12	700	156.9	135.9	2103.9
炉外Na	55 MK	K9334-10	700	156.9	135.9	1261.3
炉外Na	55 MK	K9332-11	700	138.3	119.7	1834.6
炉外Na	55 MK	K9332- 4	700	138.3	119.7	2377.2
炉外Na	55 MK	K9335- 9	700	119.6	103.6	3804.8
炉外Na	55 MK	K9330- 4	700	106.9	92.6	4948.3
炉外Na	55 MK	K9330-11	700	106.9	92.6	3874.3

表 A4-2 炉外 Na 中内圧クリープ破断試験データ (続き)

環境	鋼種	試験片 番号	試験温度 (°C)	試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)
炉外Na	55 MK	K9334- 8	700	69.6	60.3	12229.9
炉外Na	55 MS	S10201- 2	650	305.0	264.1	870.4
炉外Na	55 MS	S10206- 4	650	213.8	185.1	8090.7
炉外Na	55 MS	S10203- 1	650	213.8	185.1	11818.2
炉外Na	55 MS	S10201- 1	650	236.3	204.7	4103.3
炉外Na	55 MS	S10202- 1	650	263.8	228.5	2603.1
炉外Na	55 MS	S10203- 2	675	255.0	220.8	2120.2
炉外Na	55 MS	S10205- 2	675	216.7	187.7	2547.1
炉外Na	55 MS	S10205-15	675	216.7	187.7	3130.0
炉外Na	55 MS	S10202-14	675	192.2	166.5	4683.6
炉外Na	55 MS	S10203-14	675	192.2	166.5	3209.2
炉外Na	55 MS	S10205-14	675	159.8	138.4	7022.2
炉外Na	55 MS	S10206-14	675	159.8	138.4	8841.1
炉外Na	55 MS	S10201-15	675	156.9	135.9	7972.0
炉外Na	55 MS	S10202-15	675	156.9	135.9	6501.0
炉外Na	55 MS	S10202- 4	675	191.2	165.6	4245.7
炉外Na	55 MS	S10203- 4	675	159.8	138.4	8950.9
炉外Na	55 MS	S10201- 4	675	159.8	138.4	8422.5
炉外Na	55 MS	S10201- 6	675	156.9	135.9	9667.3
炉外Na	55 MS	S10202- 6	675	156.9	135.9	9660.3
炉外Na	55 MS	S10206- 5	675	125.5	108.7	17230.5
炉外Na	55 MS	S10202-12	700	248.1	214.9	240.0
炉外Na	55 MS	S10201-12	700	201.0	174.1	801.8
炉外Na	55 MS	S10205-10	700	156.9	135.9	1557.1
炉外Na	55 MS	S10201-13	700	138.3	119.7	2915.7
炉外Na	55 MS	S10205- 5	700	138.3	119.7	3613.0
炉外Na	55 MS	S10206-11	700	119.6	103.6	3831.4
炉外Na	55 MS	S10202- 5	700	119.6	103.6	3730.3
炉外Na	55 MS	S10205-11	700	106.9	92.6	5232.8
炉外Na	55 MS	S10202- 3	700	69.6	60.3	16035.9
炉外Na	55 MS	S10201- 3	700	69.6	60.3	13069.9

表 A4-3 炉内 Na 中内圧クリープ破断試験データ

環境	鋼種	試験片 番号	試験温度 (°C)	試験応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	高速中性子照射量 ($\times 10^{26}n/m^2, E>0.1MeV$)
炉内Na	55MK	ME26	605	327.6	283.7	309.3	0.50
炉内Na	55MK	ME25	605	309.9	268.4	393.6	0.62
炉内Na	55MK	ME24	605	299.1	259.0	560.0	0.87
炉内Na	55MK	MH11	605	260.0	225.2	4243.8	5.52
炉内Na	55MK	ME59	605	227.0	196.6	7608.2	9.05
炉内Na	55MK	MH10	605	220.0	190.5	10141.9	13.17
炉内Na	55MK	MH09	605	200.0	173.2	15169.4	19.36
炉内Na	55MK	ME31	670	178.5	154.6	2010.6	3.25
炉内Na	55MK	ME51	670	178.5	154.6	2663.8	3.17
炉内Na	55MK	ME30	670	158.9	137.6	2860.5	4.75
炉内Na	55MK	ME29	670	147.1	127.4	3610.1	6.00
炉内Na	55MK	MH23	670	127.5	110.4	5574.6	6.58
炉内Na	55MK	MH22	670	110.0	95.3	7985.0	9.82
炉内Na	55MK	MH21	670	100.0	86.6	14760	17.52-23.52
炉内Na	55MK	ME33	750	85.3	73.9	864.1	1.37
炉内Na	55MK	ME32	750	70.0	60.6	1301.2	2.12
炉内Na	55MS	MJ14	605	260.0	225.2	5263.0	5.90
炉内Na	55MS	MJ08	670	127.5	110.4	4898.0	5.52
炉内Na	55MS	MJ09	670	127.5	110.4	4678.0	5.24

付録 5

熱クリープ変形データ一覧

被覆管単軸クリープ試験は図 A5-1 に示す試験片を用い、JIS Z 2271 に準拠して実施した。被覆管の全長は 115 mm で、破断伸びは測定用の G.L. は 100 mm である。

板状クリープ試験は、Ar ガス雰囲気中で図 A5-2 に示す試験片を用い、JIS Z 2271 に準拠して実施した。20%冷間加工した SUS316 相当鋼板材から、応力負荷方向が圧延方向に対して垂直になるよう試験片を採取した（T 方向材）。

試験で取得した SUS316 相当鋼被覆管の変位-時間曲線（試験温度：650～1000℃）を解析して求めたデータの一覧を表 A5 に示す。これらのデータは以下の手順で実測データから抽出した。以下にデータ解析例（55MK、700℃、98 MPa）を例示しつつ示す。

- ・取得した変位-時間曲線から、弾性ひずみを差し引くことで熱クリープひずみ曲線とした。
- ・熱クリープひずみ曲線の傾きが最小となる点におけるクリープ変形速度（最小クリープひずみ速度）を求めた（図 A5-3）。
- ・熱クリープひずみ曲線上の最小ひずみ速度の点を通り、傾きが最小クリープひずみ速度とする直線を引き、その切片を 1 次クリープひずみの飽和値（ ε_t ）として算出した（図 A5-3）。
- ・熱クリープひずみを表すクリープ構成式（第 1 項：1 次クリープひずみ、第 2 項：2 次クリープひずみ）として次式を用い、以下の通り 1 次クリープの係数 γ を算出した（図 A5-4）。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_t \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + (d\varepsilon/dt) \cdot t \quad \text{----- (1)}$$

ε_c : 熱クリープひずみ [% , 相当ひずみ]

ε_t : 1 次クリープひずみの飽和値 [% , 相当ひずみ]

$d\varepsilon/dt$: 2 次クリープひずみ速度（最小クリープひずみ速度） [%/h]

t : 時間 [h]

式(1)を展開し、次式を得た。

$$\exp(-\gamma \cdot t) = (\varepsilon_t + (d\varepsilon/dt) \cdot t - \varepsilon_c) / \varepsilon_t \quad \text{----- (2)}$$

上記で求めた $d\varepsilon/dt$ の値、 ε_t の値及び熱クリープひずみデータ（ ε_c の t 依存性データ）を式(2)に代入し、回帰分析により、係数 γ の最適値を算出した。

図A5-5～14は650～900℃における熱クリープひずみ実験値と予測曲線を比較した図である。650～850℃の温度範囲において、熱クリープひずみ式から算出される平均値は実測値とよく一致している。また、特異的なクリープ曲線形状を示す実測データのごく初期を除き、熱クリープひずみデータが上下限内に包絡されている。

表 A5 熱クリープ変形データ (1/2)

鋼種	試験方法	試験温度 (°C)	応力 (MPa)	破断時間 (h)	γ定数 (1/h)	1次クリープひずみ飽和値 (%)	最小クリープひずみ速度 (%/h)
55MK	被覆管単軸クリープ	650	69	2154(未破断)	2.99.E-03	5.98.E-02	1.05E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	650	98	2296(未破断)	2.12.E-03	7.70.E-02	4.48E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	650	137	1995(未破断)	2.71.E-03	1.42.E-01	6.30E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	650	177	1995(未破断)	2.46.E-03	1.96.E-01	1.11.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	650	216	2102(未破断)	1.10.E-02	3.84.E-01	2.17.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	650	255	1375.2	2.02.E-02	5.51.E-01	4.03.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	700	49	2011(未破断)	2.35.E-03	1.34.E-01	1.47E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	700	69	2017(未破断)	2.70.E-03	1.68.E-01	3.62E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	700	98	2011(未破断)	2.71.E-03	3.22.E-01	1.12.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	700	137	2011(未破断)	1.52.E-02	7.52.E-02	8.36.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	700	177	743.6	5.42.E-02	2.84.E-01	9.89.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	700	216	289.7	8.44.E-02	4.14.E-01	2.15.E-03
55MK	被覆管単軸クリープ	750	49	5106(未破断)	2.35.E-03	1.86.E-01	9.09E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	750	69	4296.2	2.93.E-03	2.48.E-01	9.35E-05
55MK	被覆管単軸クリープ	750	98	2545.5	8.00.E-03	2.65.E-01	5.08.E-04
55MK	被覆管単軸クリープ	750	98	1056.4	3.18.E-02	2.24.E-01	1.67.E-03
55MK	被覆管単軸クリープ	750	137	302.6	1.73.E-01	8.91.E-02	3.70.E-03
55MK	被覆管単軸クリープ	750	137	209.7	1.42.E-01	2.61.E-01	4.62.E-03
55MK	被覆管単軸クリープ	750	177	70.7	1.94.E-01	1.38.E-01	1.13.E-02
55MS	被覆管単軸クリープ	650	69	2041(未破断)	2.01.E-03	3.81.E-02	1.51.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	650	98	2015(未破断)	2.65.E-03	9.24.E-02	2.38.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	650	137	2015(未破断)	2.11.E-03	1.70.E-01	5.23.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	650	177	2016(未破断)	3.45E-03	1.92.E-01	7.27E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	700	49	2022(未破断)	2.88.E-03	3.65.E-02	1.27.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	700	69	2015(未破断)	2.09.E-03	6.63.E-02	2.80.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	700	98	2057(未破断)	2.62.E-03	1.79.E-01	6.54.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	700	137	2063(未破断)	3.08.E-03	1.94.E-01	1.52.E-04
55MS	被覆管単軸クリープ	750	49	3660(未破断)	4.38.E-03	1.08.E-01	6.95.E-05
55MS	被覆管単軸クリープ	750	69	3947.1	8.14.E-03	1.61.E-01	3.18.E-04
55MS	被覆管単軸クリープ	750	98	1124.2	2.62.E-02	5.68.E-02	2.13.E-03
55MS	被覆管単軸クリープ	750	98	747.3	4.85.E-02	3.76.E-02	2.59.E-03
55MS	被覆管単軸クリープ	750	137	241.4	8.03.E-02	1.64.E-01	2.78.E-03
55MS	被覆管単軸クリープ	750	137	136.9	1.69.E-01	2.79.E-02	9.31.E-03
55MS	被覆管単軸クリープ	750	177	37.3	3.70.E-01	1.40.E-01	2.71.E-02

表 A5 熱クリープ変形データ (2/2)

鋼種	試験方法	試験温度 (°C)	応力 (MPa)	破断時間 (h)	γ 定数 (1/h)	1次クリープひずみ飽和値 (%)	最小クリープひずみ速度 (%/h)
0301	板状クリープ	800	65	974.3(未破断)	3.06.E-02	6.44.E-01	1.22.E-03
0301	板状クリープ	800	85	742.5	8.16.E-02	4.07.E-01	3.67.E-03
0301	板状クリープ	850	40	1088.5	3.28.E-02	5.00.E-01	3.98.E-03
0301	板状クリープ	850	55	478.8	2.84.E-01	1.65.E-01	8.17.E-03
0301	板状クリープ	850	75	165.8	2.97.E-01	2.46.E-01	1.39.E-02
0301	板状クリープ	850	100	53.6	4.11.E-01	6.56.E-01	4.89.E-02
0301	板状クリープ	1000	30	7.1	4.63.E+00	1.43.E+00	3.27.E+00
0301	板状クリープ	800	90	623.8	7.63.E-02	4.13.E-01	4.11.E-03
0301	板状クリープ	800	105	273.2	2.41.E-01	2.22.E-01	1.03.E-02
0301	板状クリープ	800	125	119.4	2.85.E-01	3.81.E-01	1.29.E-02
0301	板状クリープ	800	170	24.1	8.86.E-01	2.67.E-01	5.73.E-02
0301	板状クリープ	900	30	399.5	3.53.E-01	5.91.E-01	1.35.E-02
0301	板状クリープ	900	40	103.1	1.33.E+00	4.14.E-01	2.10.E-02
0301	板状クリープ	900	50	49.4	6.40.E-01	2.73.E-01	5.02.E-02
0301	板状クリープ	900	75	11.8	4.60.E+00	2.08.E-01	2.72.E-01
0301	板状クリープ	1000	14	777.7	8.15.E-01	1.37.E-01	2.12.E-02
0301	板状クリープ	1000	18	378.3	7.43.E-01	3.59.E-01	4.91.E-02
0301	板状クリープ	1000	25	55.2	2.95.E-01	1.72.E+00	3.59.E-01
0301	板状クリープ	1000	35	6.8	4.70.E+00	9.96.E-01	3.33.E+00

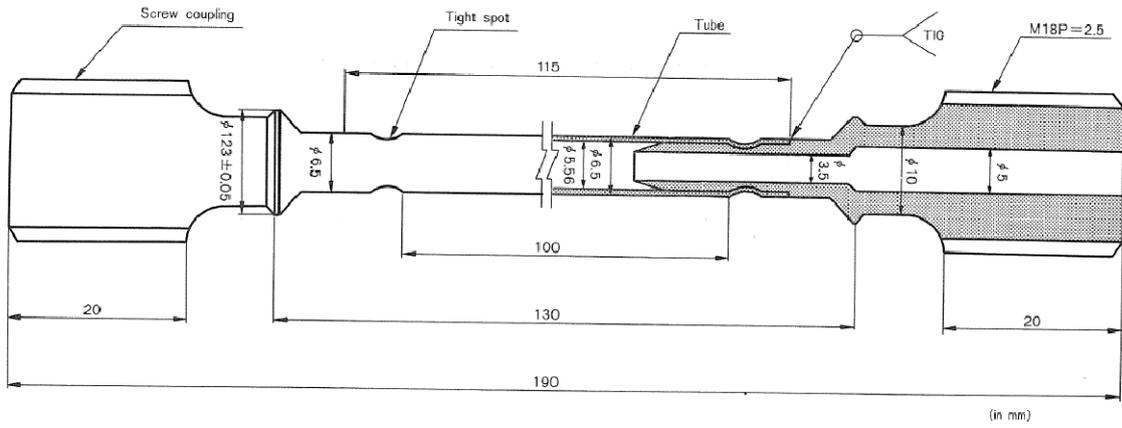


図 A5-1 被覆管単軸クリープ試験片の形状

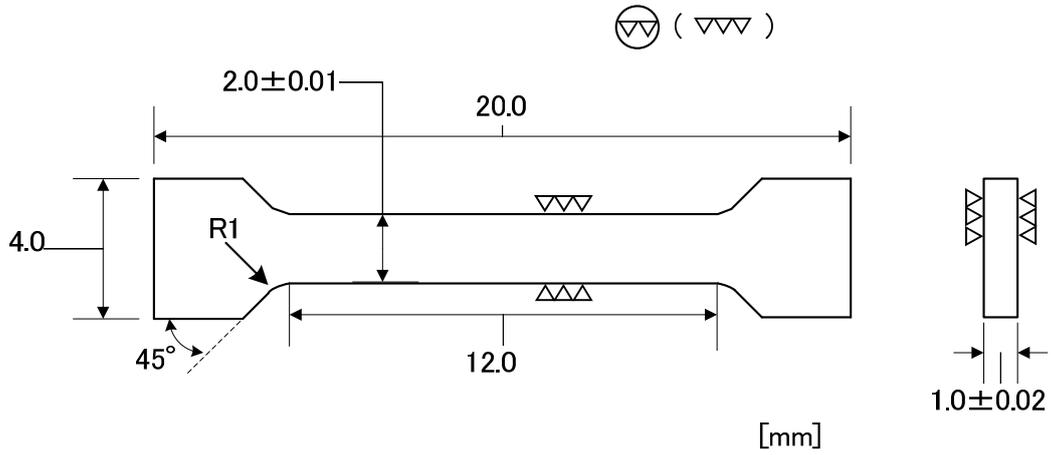


図 A5-2 板状クリープ試験片の形状

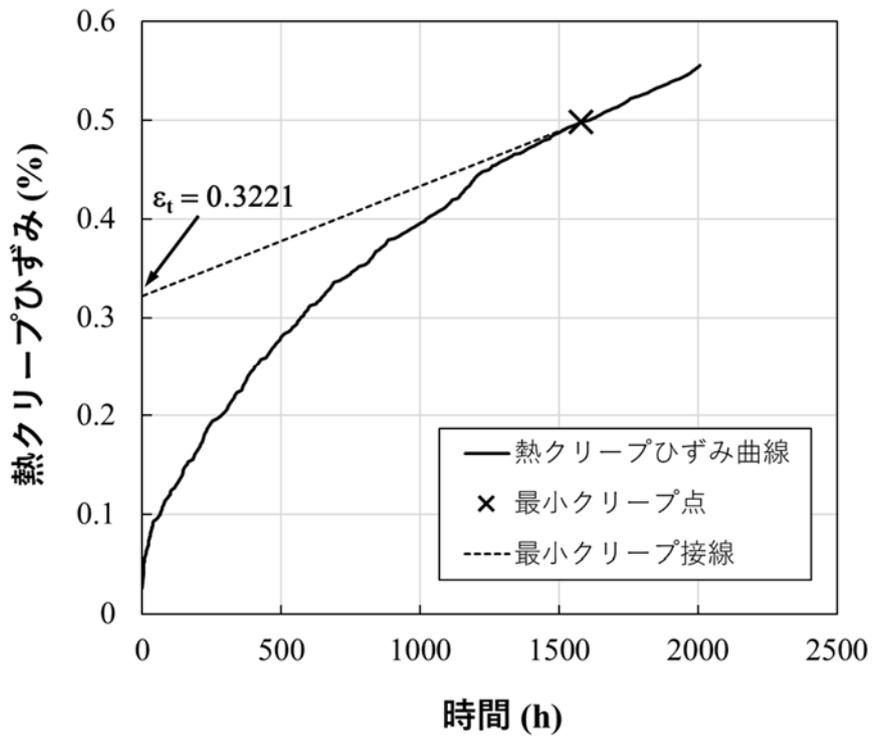


図 A5-3 熱クリープひずみ曲線からのデータ解析例 (鋼種 : 55MK, 700°C, 98 MPa)

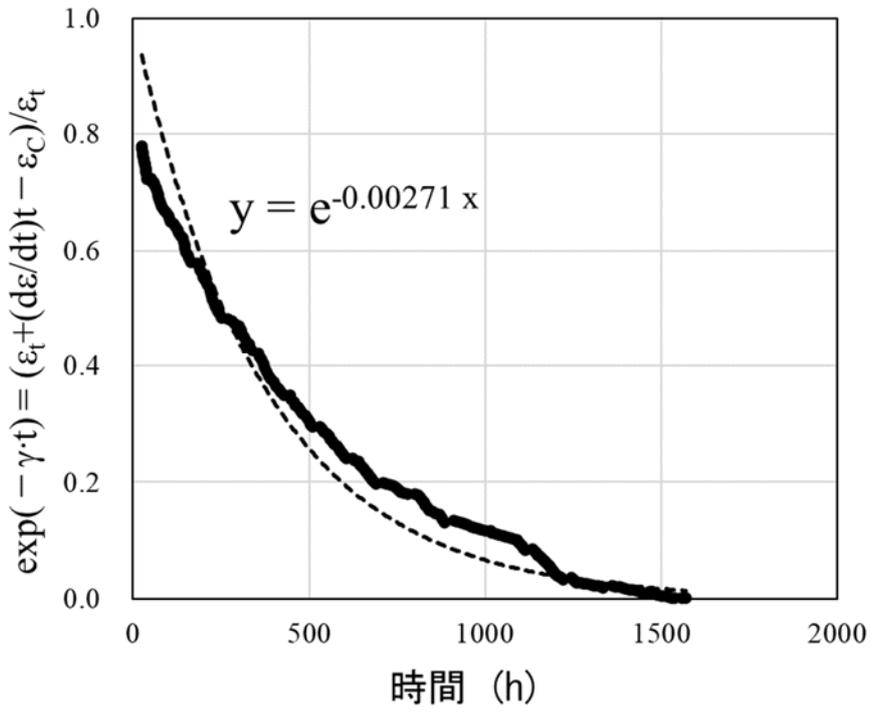


図 A5-4 熱クリープひずみ曲線からのデータ解析例 (鋼種 : 55MK, 700°C, 98 MPa)

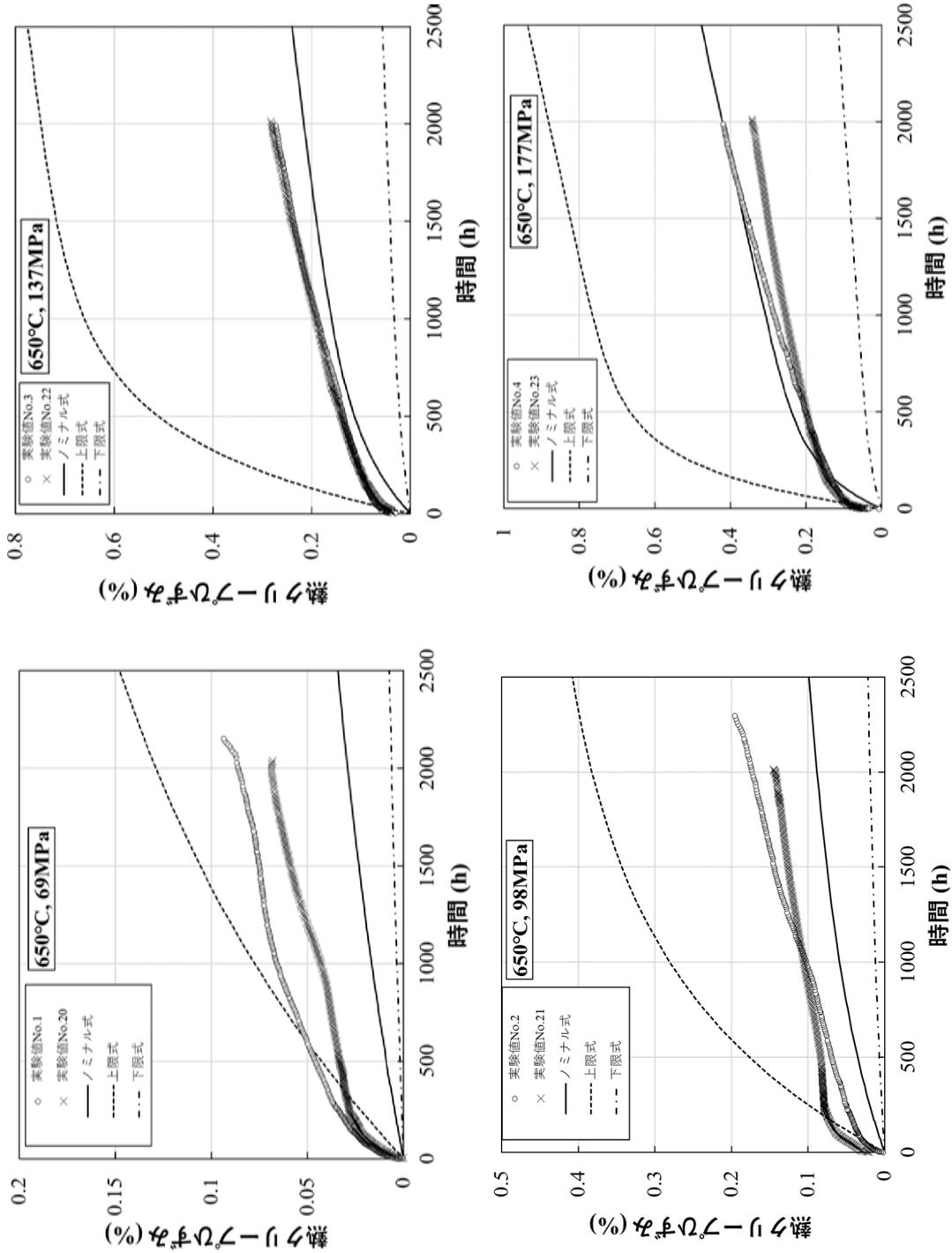


図 A5-5 650°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較 (1/2)

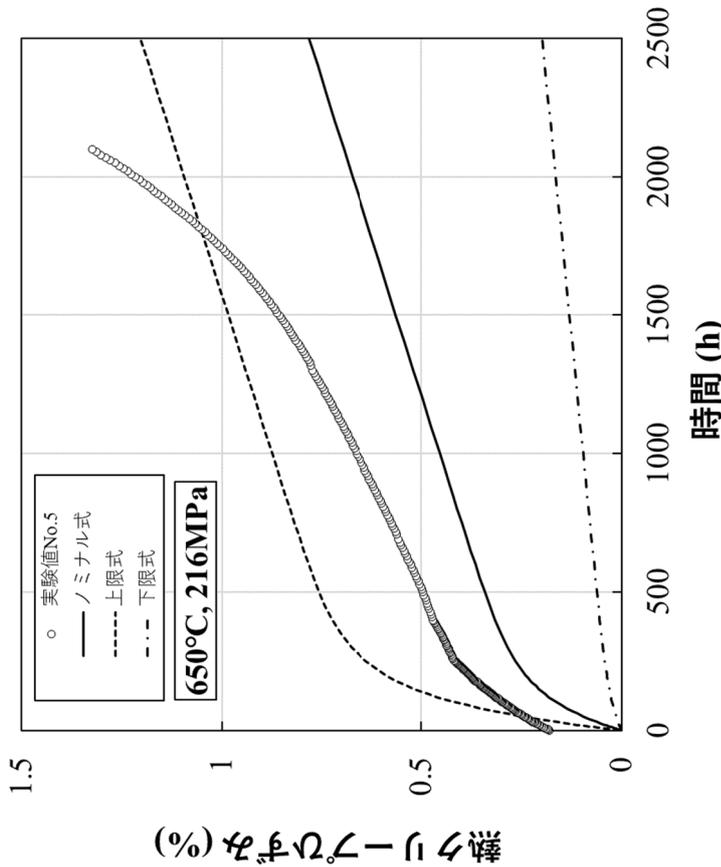
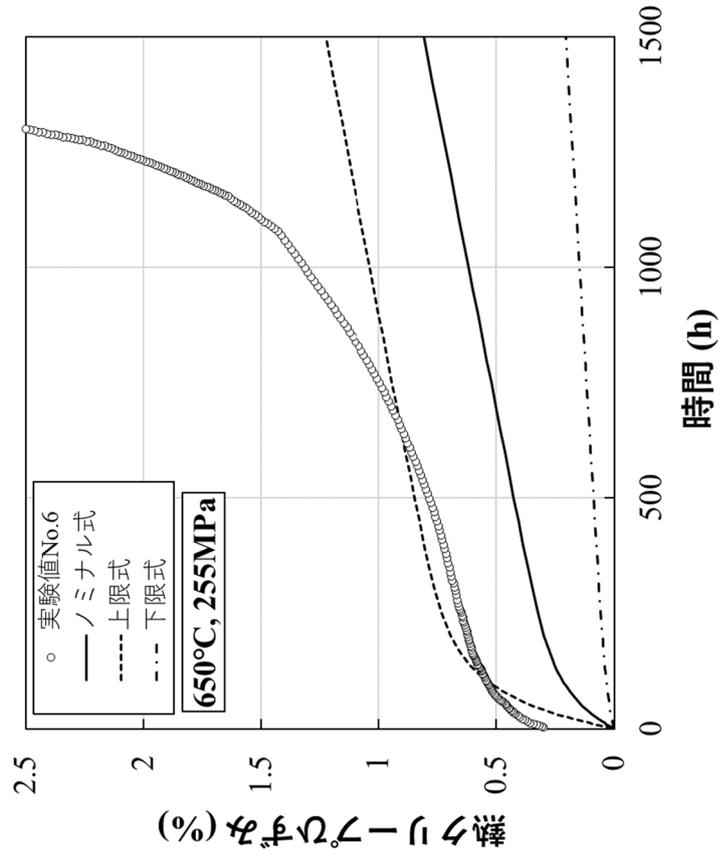


図 A5-6 650°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較 (2/2)

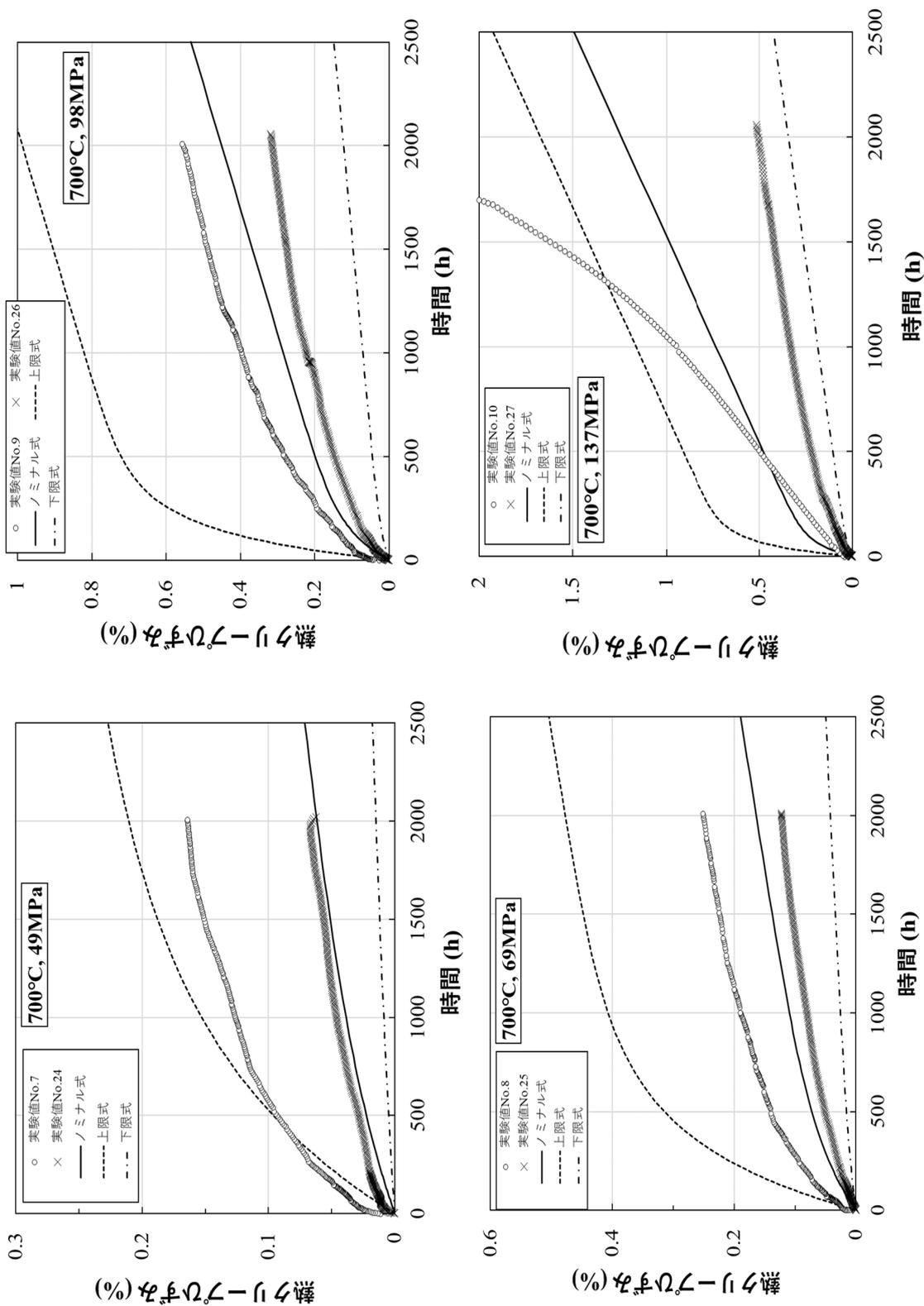


図 A5-7 700°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較 (1/2)

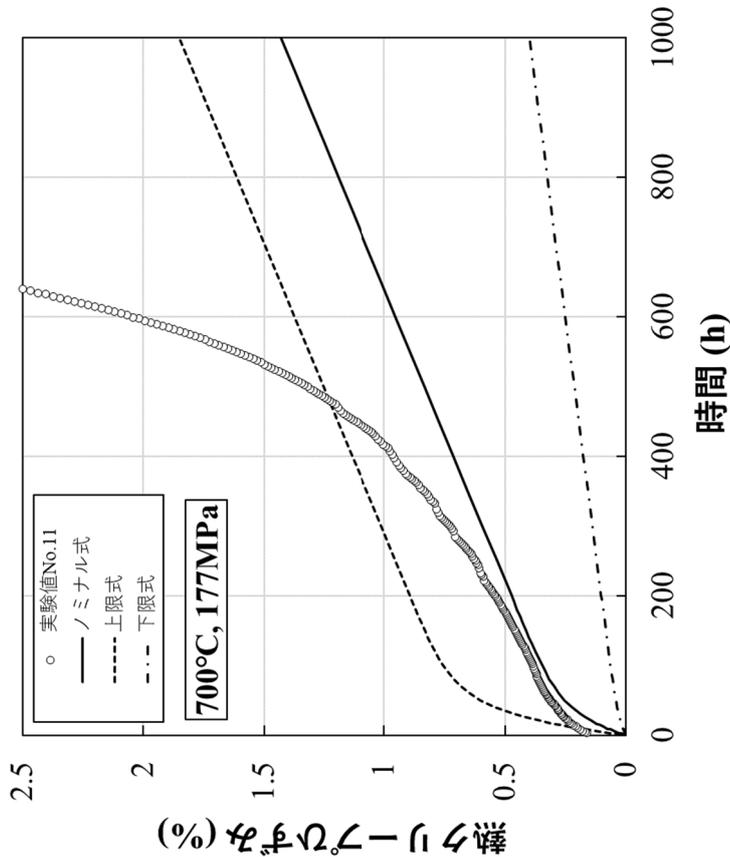
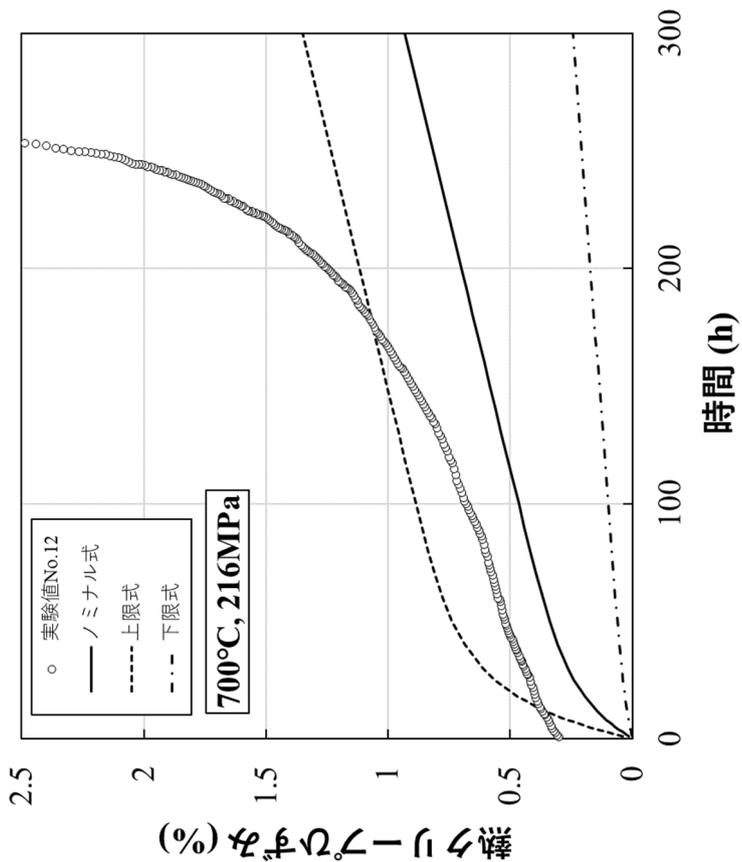


図 A5-8 700°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較 (2/2)

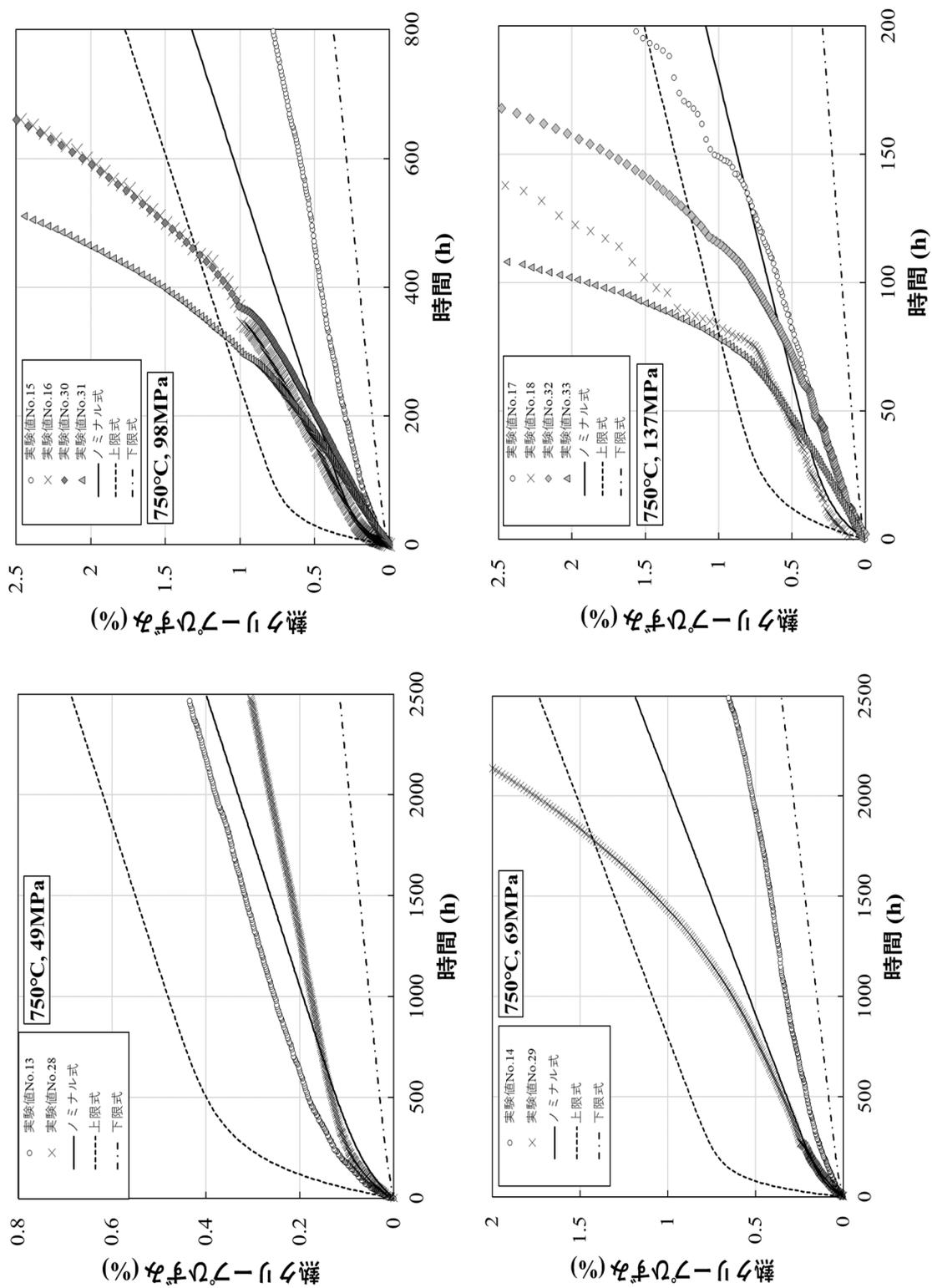


図 A5-9 750°Cにおける熱クリーブひずみ実験値と予測曲線の比較 (1/2)

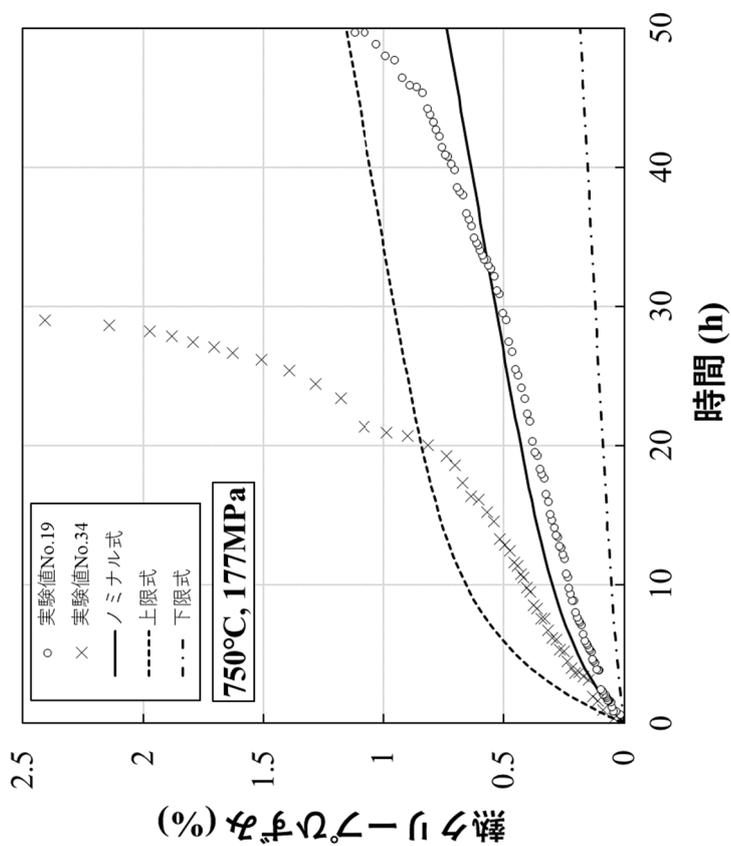


図 A5-10 750°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較 (2/2)

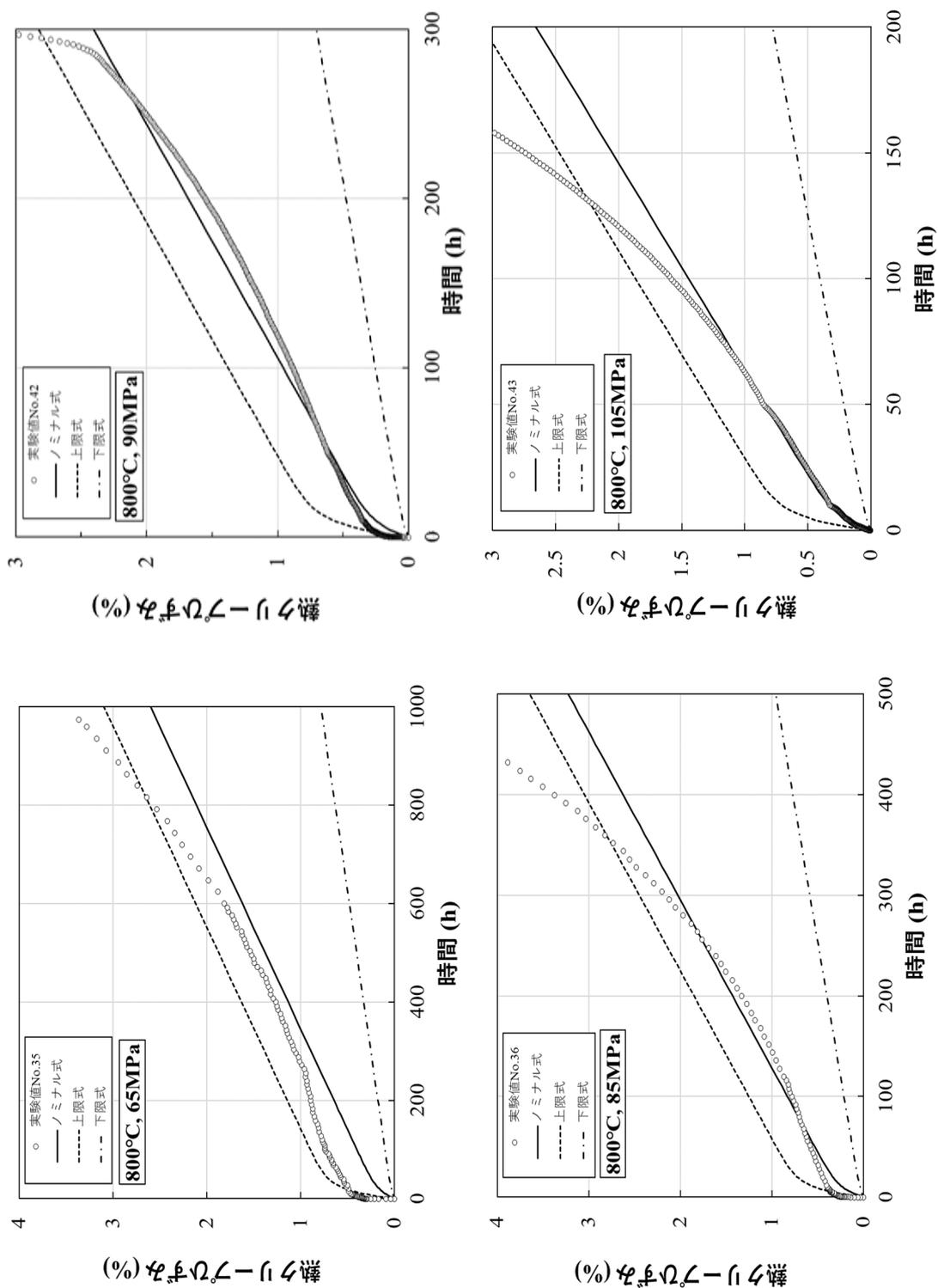


図 A5-11 800°Cにおける熱クリーブひずみ実験値と予測曲線の比較 (1/2)

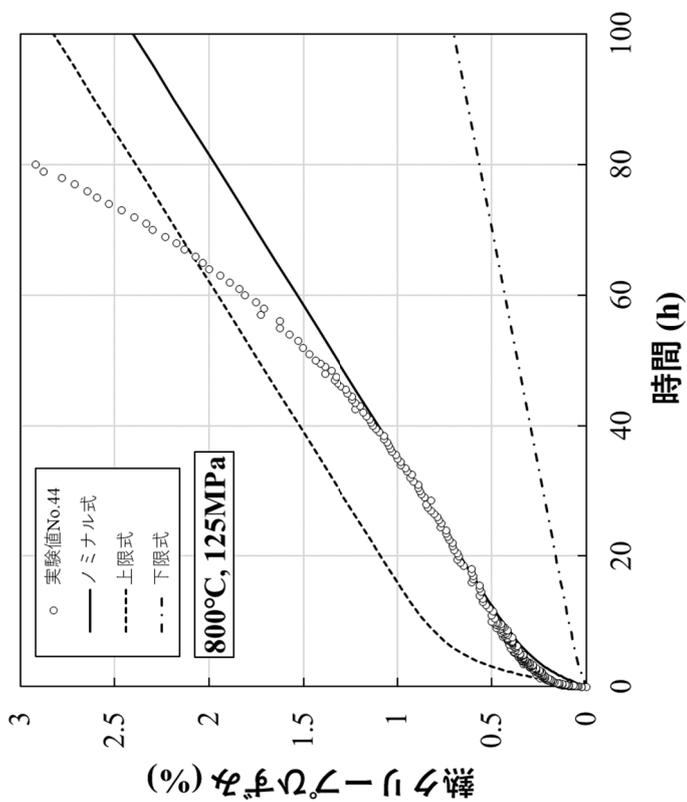
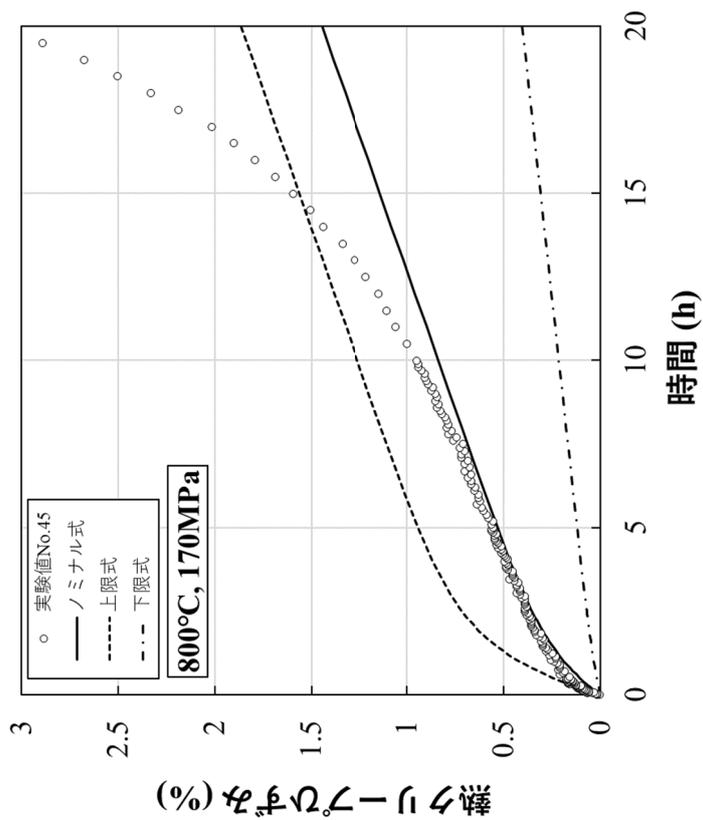


図 A5-12 800°Cにおける熱クリリース率の実験値と予測曲線の比較 (2/2)

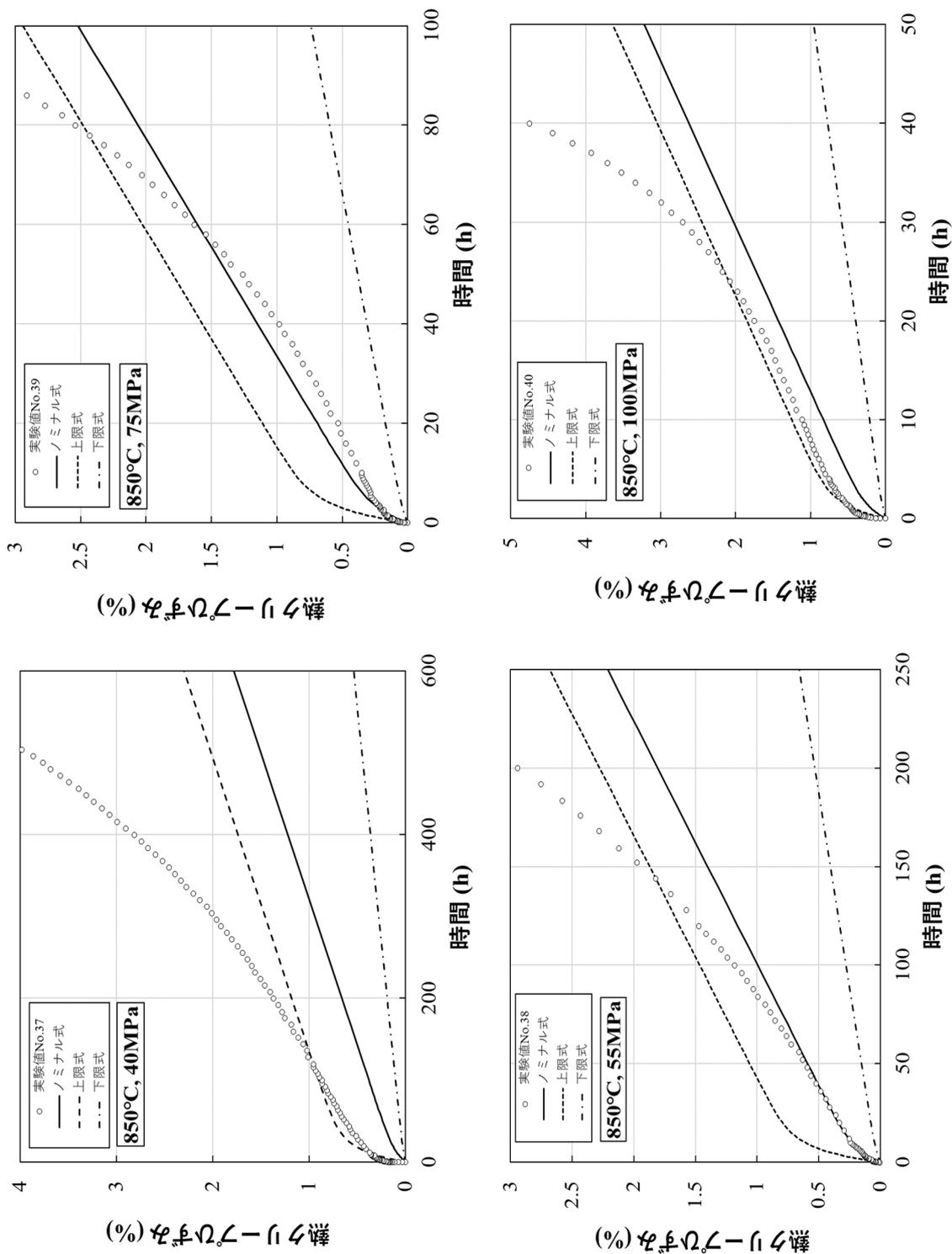


図 A5-13 850°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較

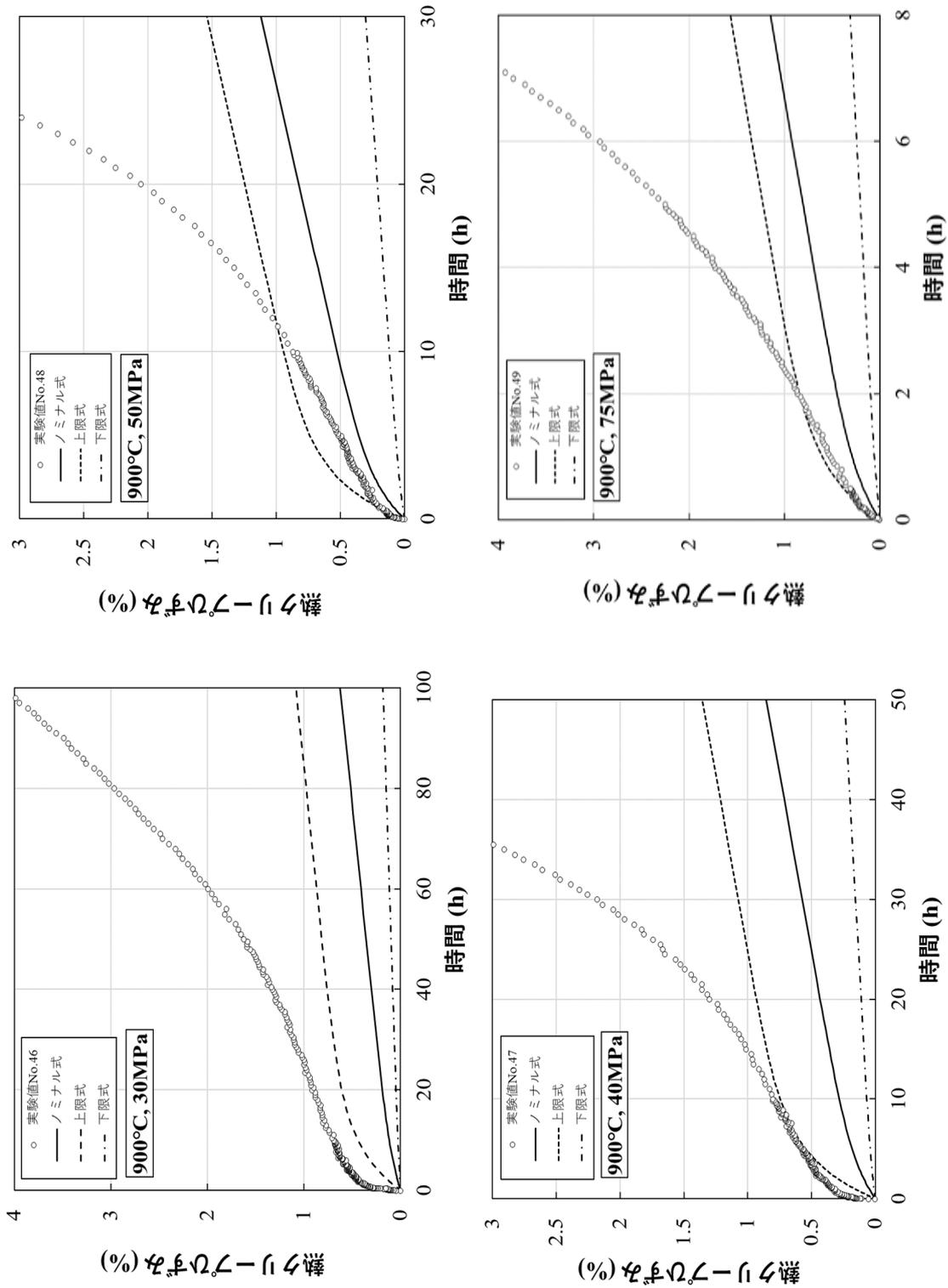


図 A5-14 900°Cにおける熱クリープひずみ実験値と予測曲線の比較

付録 6

SUS304、SUS316 溶体化材の高温クリープ破断関係式

1. 目的

高速炉のシビアアクシデント(SA)時のバウンダリ健全性評価に適用できる SUS304 及び SUS316 のクリープ破断関係式を検討する。適用温度範囲は 900°Cまでを想定する。

2. 現行式

SUS304 及び SUS316 のクリープ破断関係式は、高速炉規格 2022 年版に規格化されており、いずれの式も適用温度範囲は 825°Cまでとなっている。

表 A6-1 高速炉規格2022 年版 SUS304 クリープ破断関係式[1]

表 A6-2 高速炉規格2022 年版 SUS316 クリープ破断関係式[1]

3. 既存取得データ

高速炉規格 2022 年版のクリープ破断関係式 (BDS 式) は、SUS304 は最高 800°Cまで、SUS316 は最高 825°Cまでのデータを用いて策定されている。SUS304 は、BDS 策定以降 800°C、850°C、900°Cにてクリープ試験データを取得している[2]。SUS316 は、物質・材料研究機構 (NIMS) クリープデータシートにて 850°Cまでのデータが報告されている (NIMS クリープデータシート： 14B、15B) [3, 4]。

図 A6-1～図 A6-6 に高速炉規格に規定されている現行式とデータの関係を示す。825°Cを超える温度については、現行式の適用範囲外となることから点線にて示している。

- ・ SUS304 の高速炉規格の式は 900°Cまで外挿すると、データを過大評価する傾向がみられる。
- ・ SUS316 は、特に 800°C以上で高速炉規格の式は、過度に保守的な評価となっている。
- ・ SUS304 と SUS316 のデータを比較すると、700°C短時間までは SUS316 > SUS304 となっていることが分かるが、700°C長時間及び750°C以上ではSUS316 ≒ SUS304 となっていると評価できる。
- ・ SUS304 と SUS316 の高速炉規格の式を比較すると、750°C-1000 時間程度より SUS304 > SUS316 となっており、データと整合がとれていない。高速炉のSAにおける解析において 900°Cまで評価を実施する場合は、大きな問題になると考えられる。

4. 超高温クリープ破断関係式策定方針

SUS304 及び SUS316 の超高温クリープ破断関係式を策定する。高速炉規格の式と整合させるため LMP の定数 C を同一とし、応力により切り替えることとした。

5. 検討結果

5.1 SUS304

(1) データベース

加藤らが取得した SUS304 の 800~900°Cのデータ[2]及び BDS 式策定にも用いられている 775~800°Cのデータ[5]を用いることとした(高速炉規格の式との切替応力を調整するために、800°C 高応力のデータは除外することとした)。

(2) 策定結果

LMP(定数 C は高速炉規格 2022 年版 SUS304 クリープ破断関係式の値を使用)と $\text{Log}(\sigma)$ の関係において、2 次式回帰によりクリープ破断関係式を策定した(図 A6-7)。策定した SUS304 の超高温クリープ破断関係式を表 A6-3 に示す。また、データとの関係を図 A6-8~13 に示す。超高温データを適切に評価できる式となっている。

5.2 SUS316

(1) データベース

NIMS クリープデータシートの SUS316 の 800~850°Cのデータ[3, 4]を用いることとした。

(2) 策定結果

LMP(定数 C は高速炉規格 2022 年版 SUS316 クリープ破断関係式の値を使用)と $\text{Log}(\sigma)$ の関係において、2 次式回帰によりクリープ破断関係式を策定した(図 A6-14)。策定した SUS316 の超高温クリープ破断関係式を表 A6-4 に示す。また、データとの関係を図 A6-14~20 に示す。超高温データを適切に評価できる式となっている。

5.4 まとめ

900°Cまで適用可能な SUS304 クリープ破断関係式(表 A6-3)及び SUS316 クリープ破断関係式(表 A6-4)を策定した。なお、適用温度下限は $T > 650^\circ\text{C}$ としているが、低温から連続的に評価が必要な場合は、表 A6-3 及び表 A6-4 の式を低温側に外挿して使用して可能である。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力規格 設計・建設規格(2022 年版) <第 II 編 高速炉規格>, JSME S NC2-2022, 2022.
- [2] 加藤章一、長谷部慎一、吉田英一, 異常高温時における SUS304 のクリープ強度評価, JAEA-Research 2007-091, 2008, 33p.
- [3] 物質・材料研究機構, クリープデータシート, No. 14B.
- [4] 物質・材料研究機構, クリープデータシート, No. 15B.
- [5] 物質・材料研究機構, クリープデータシート, No. 4B.

表 A6-1 JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15) \{ \log_{10}(\alpha_R t_R) + C \}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 825$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma$

t_R : 破断時間(h)

C	17.54301
A_0	31883.53
A_1	-5261.784
A_2	-425.0012

α_R	平均値 : 1 設計最小値 : 10
------------	-----------------------

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 A6-2 JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 825$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma$

t_R : 破断時間(h)

C	17.37762
A_0	21647.56
A_1	3492.642
A_2	-2163.930

α_R	平均値 : 1 設計最小値 : 10
------------	-----------------------

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 A6-3 SUS304 の超高温クリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $650 < T \leq 900$

σ : 応力(MPa) $17 \leq \sigma < 49.3$

t_R : 破断時間(h)

C	17.54301
A_0	33054.77
A_1	-8354.307
A_2	993.0764

α_R	平均値 : 1 設計最小値 : 10
------------	-----------------------

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。
 49.3MPa を超える応力は、JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式を適用する。
 本式と合わせて使用する場合は、JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式を 900°C
 まで適用できる。

表 A6-4 SUS316 の超高温クリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $650 < T \leq 900$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma < 55.1$

t_R : 破断時間(h)

C	17.37762
A_0	22468.93
A_1	5542.442
A_2	-3612.345

α_R	平均値 : 1 設計最小値 : 10
------------	-----------------------

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。
 55.1MPa を超える応力は、JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式を適用する。
 本式と合わせて使用する場合は、JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式を 900°C
 まで適用できる。

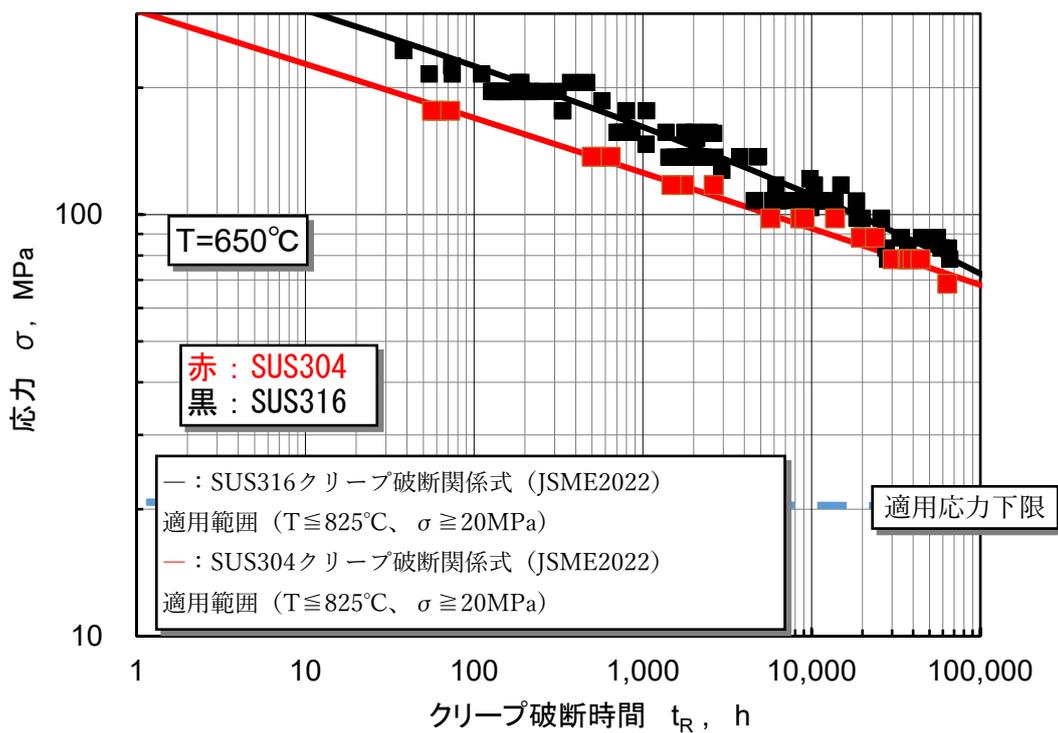


図 A6-1 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (650°C)

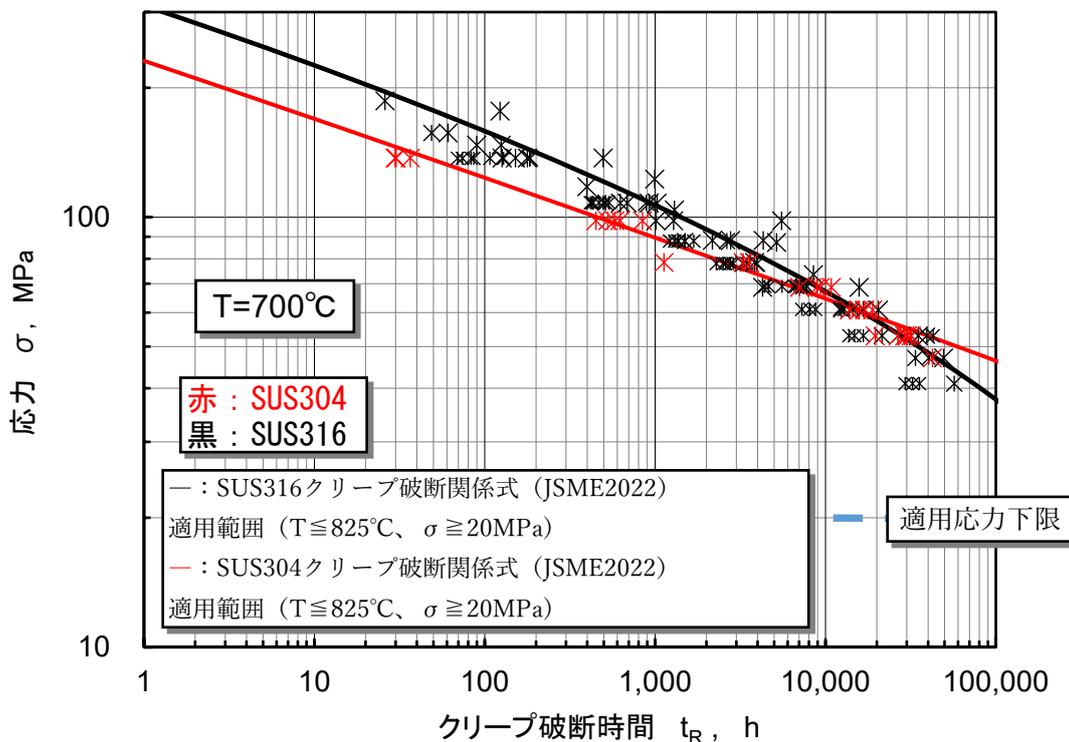


図 A6-2 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (700°C)

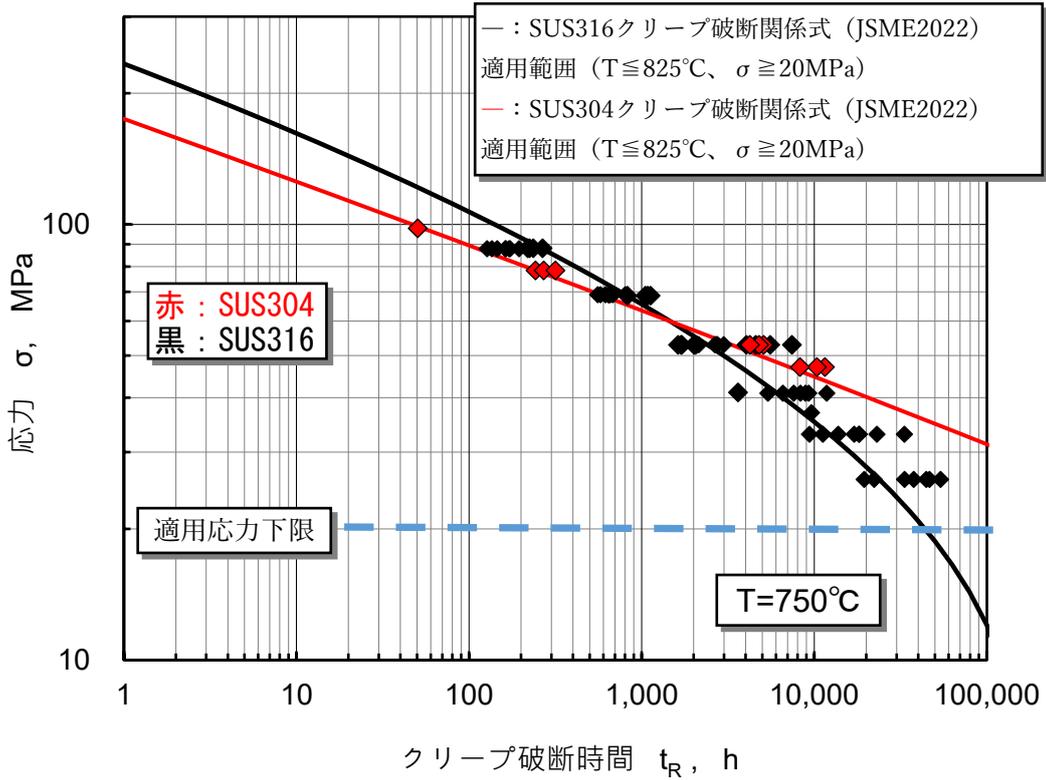


図 A6-3 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (750°C)

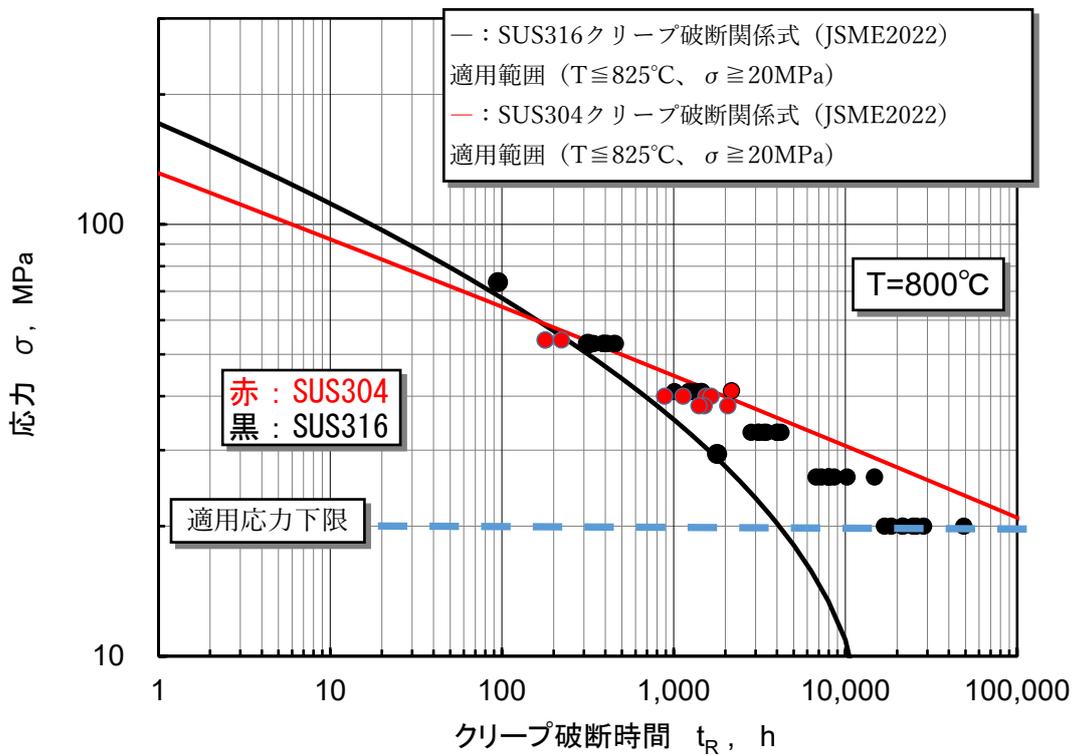


図 A6-4 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (800°C)

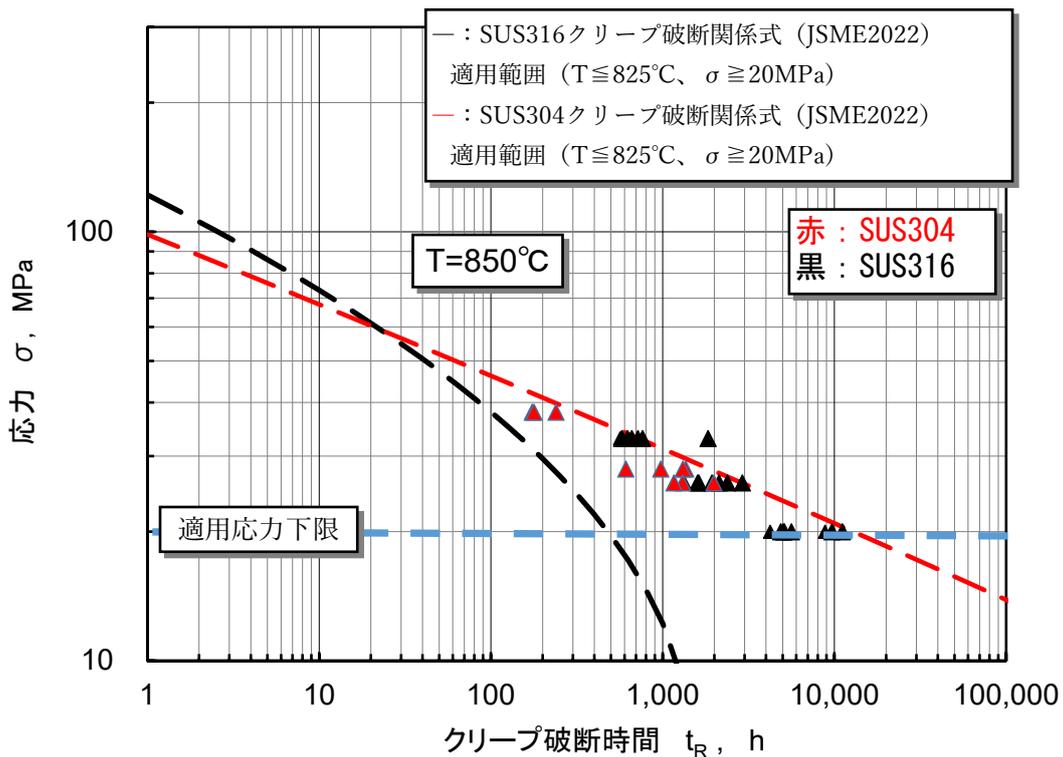


図 A6-5 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (850°C)

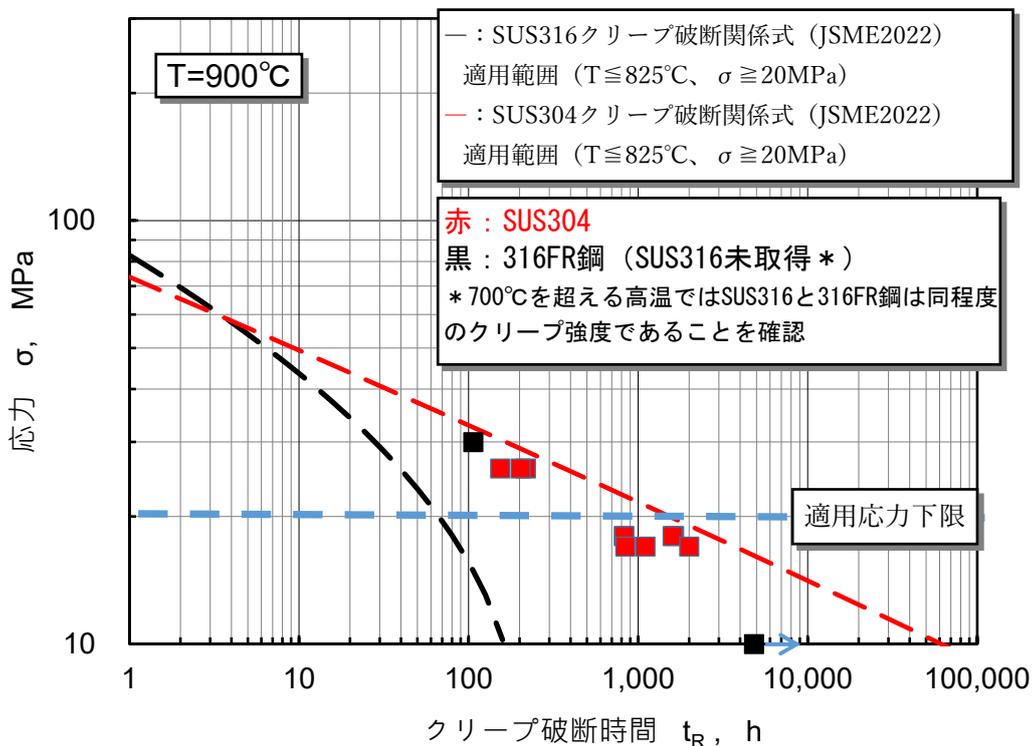


図 A6-6 SUS304 及び SUS316 の JSME 式とデータの関係 (900°C)

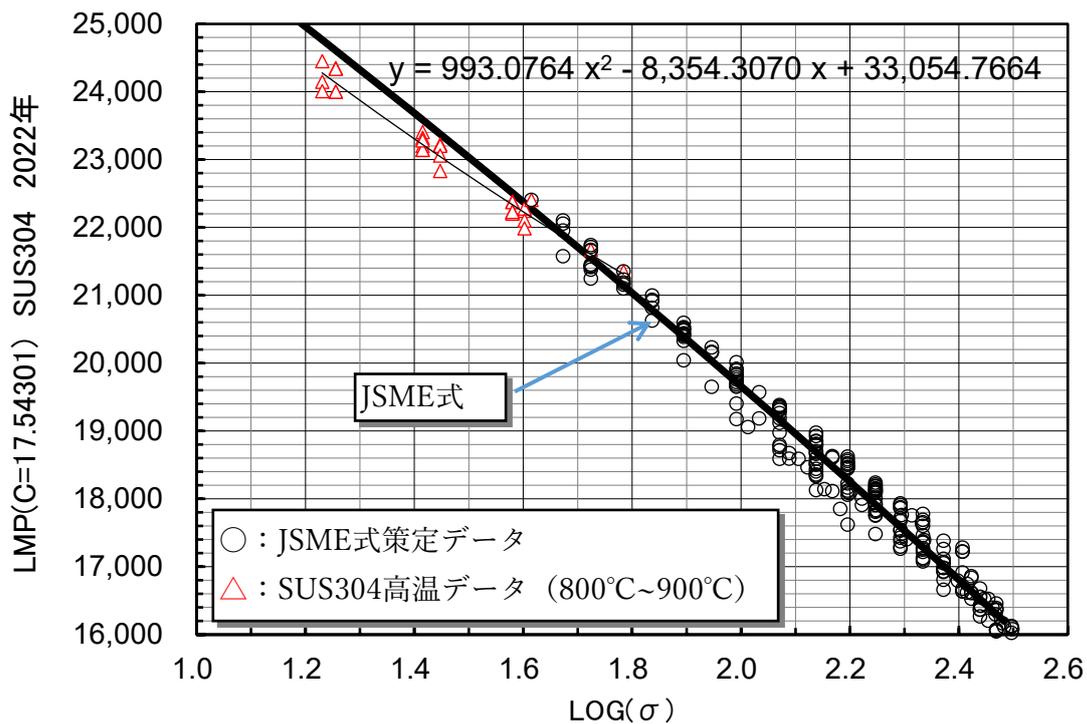


図 A6-7 SUS304、LOG(σ)とLMP (定数CはJSME2022 SUS304) の関係

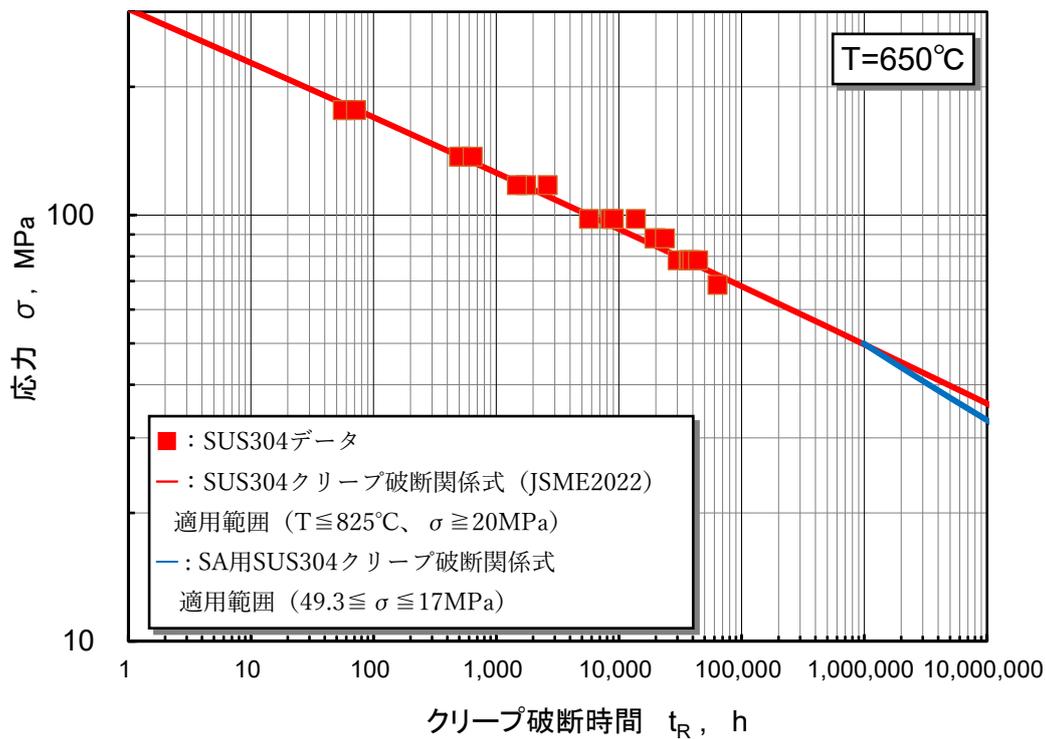


図 A6-8 超高温クリープ破断式とJSME式の関係 (650°C)

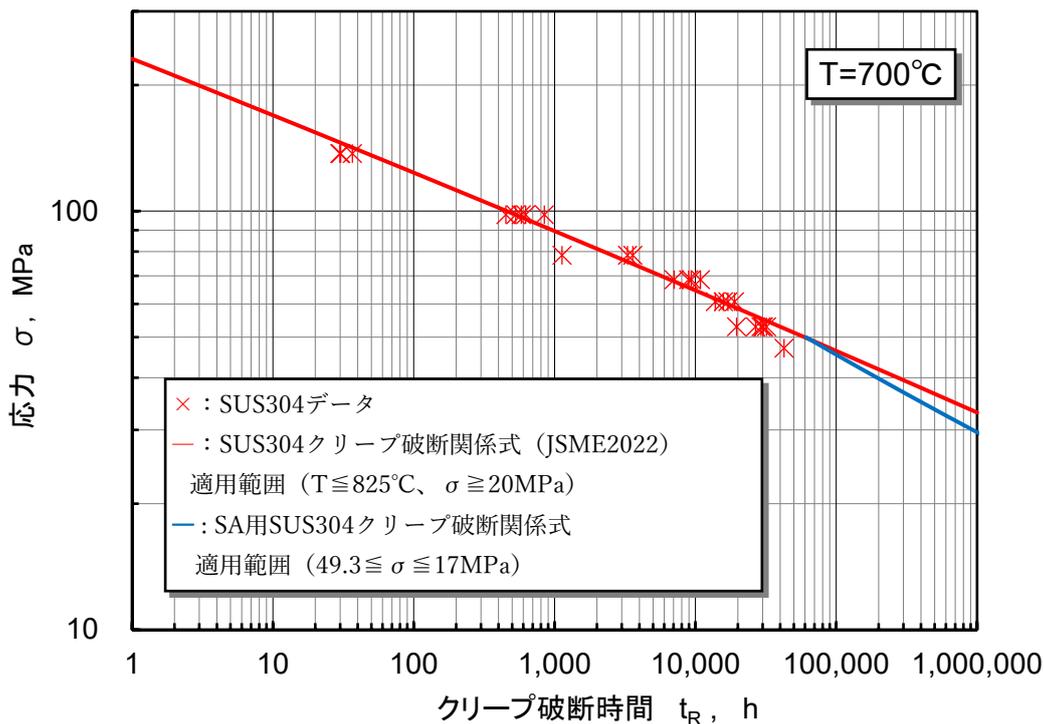


図 A6-9 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (700°C)

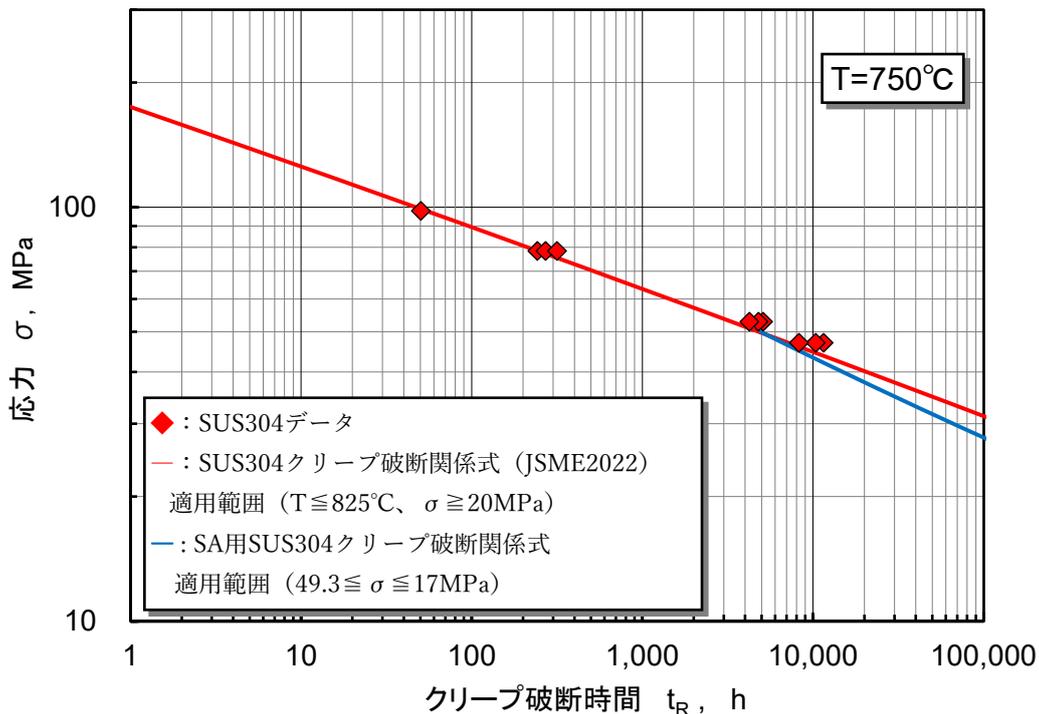


図 A6-10 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (750°C)

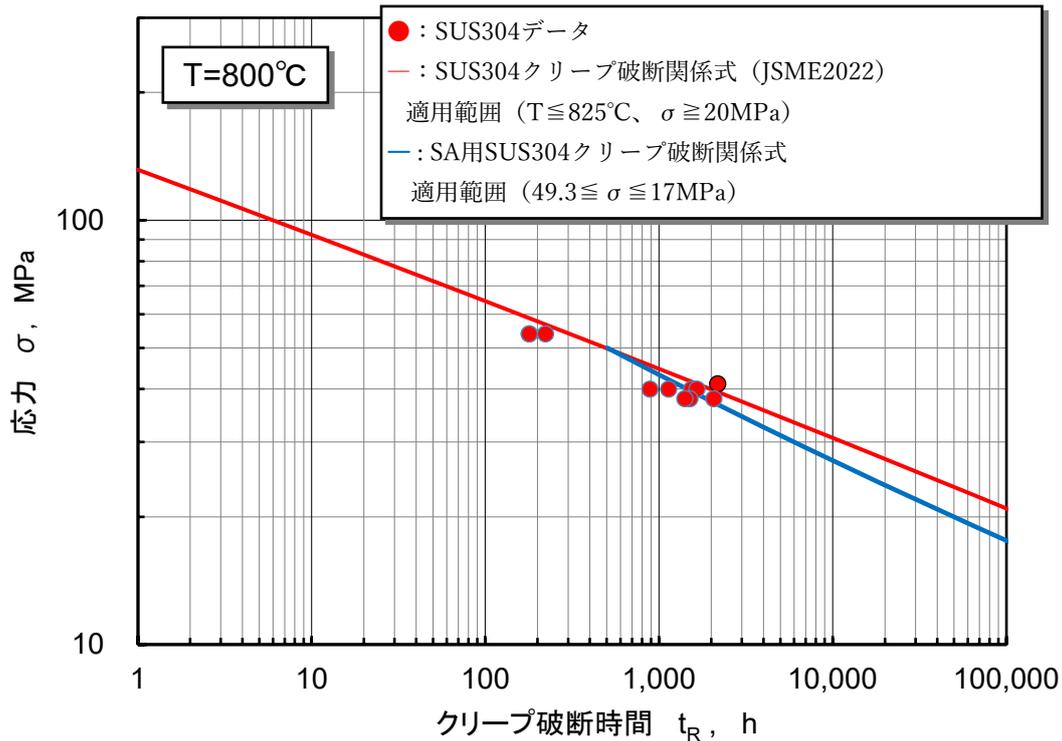


図 A6-11 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (800°C)

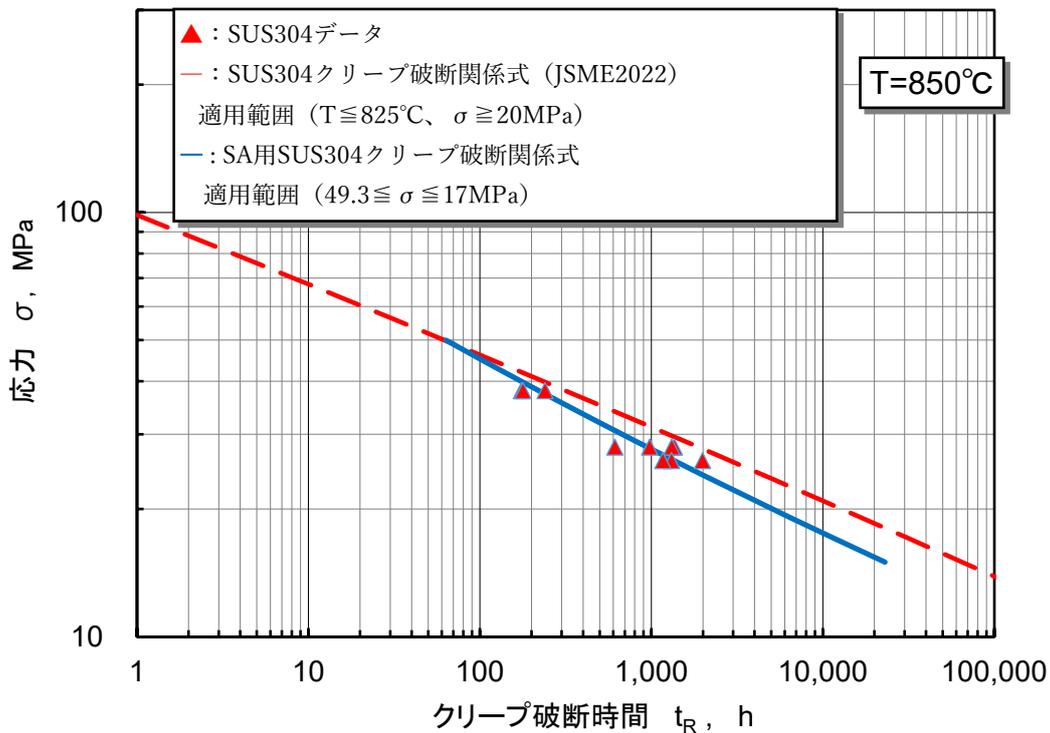


図 A6-12 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (850°C)

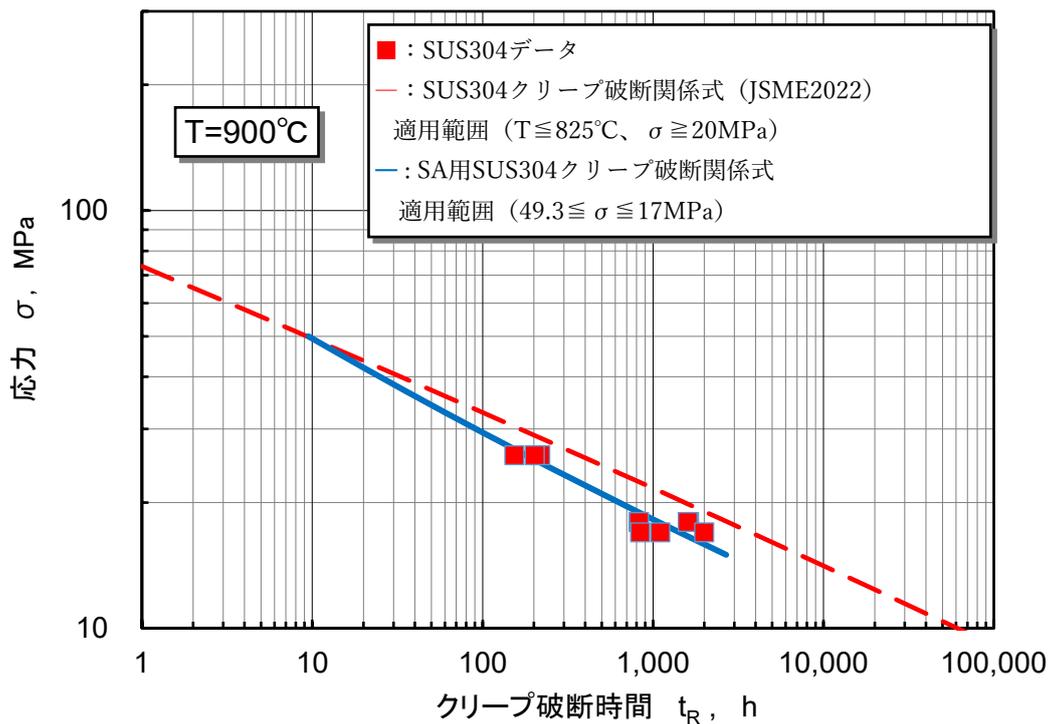


図 A6-13 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (900°C)

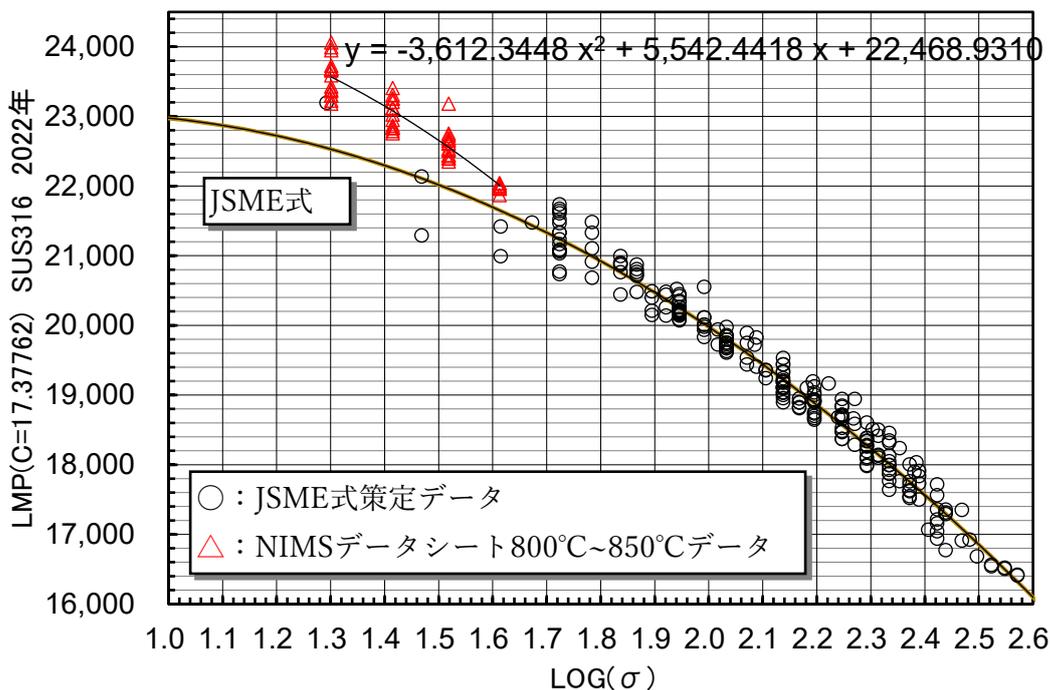


図 A6-14 SUS316 LOG(σ)と LMP (定数 C は JSME2022 SUS316) の関係

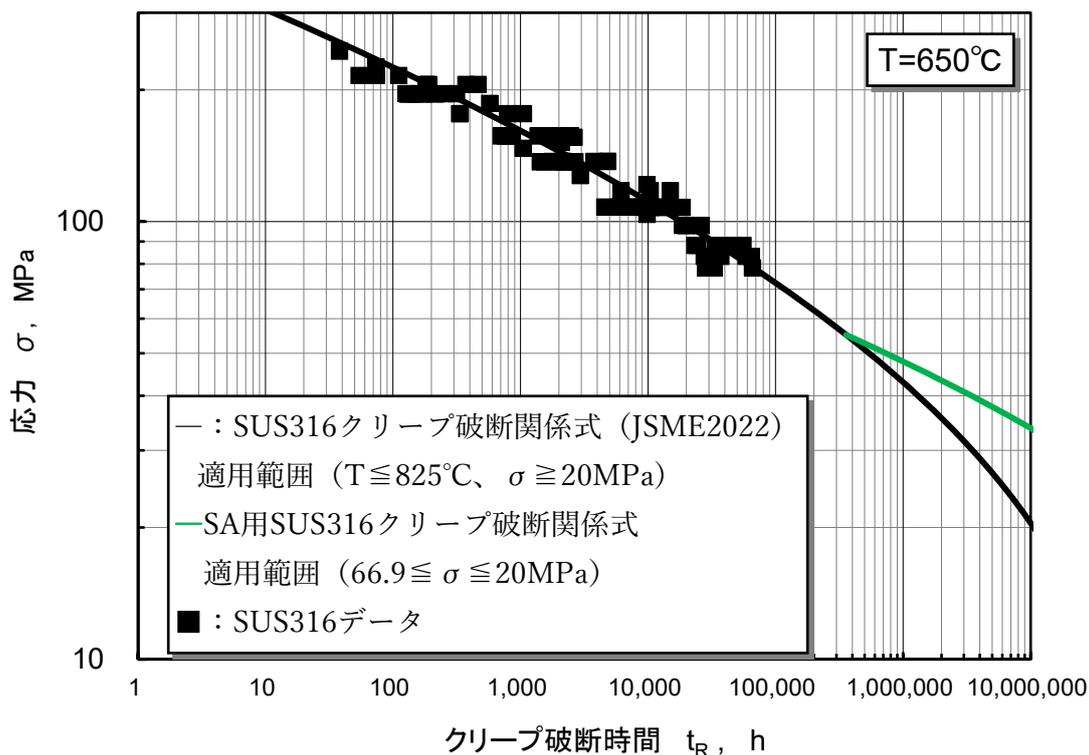


図 A6-15 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (650°C)

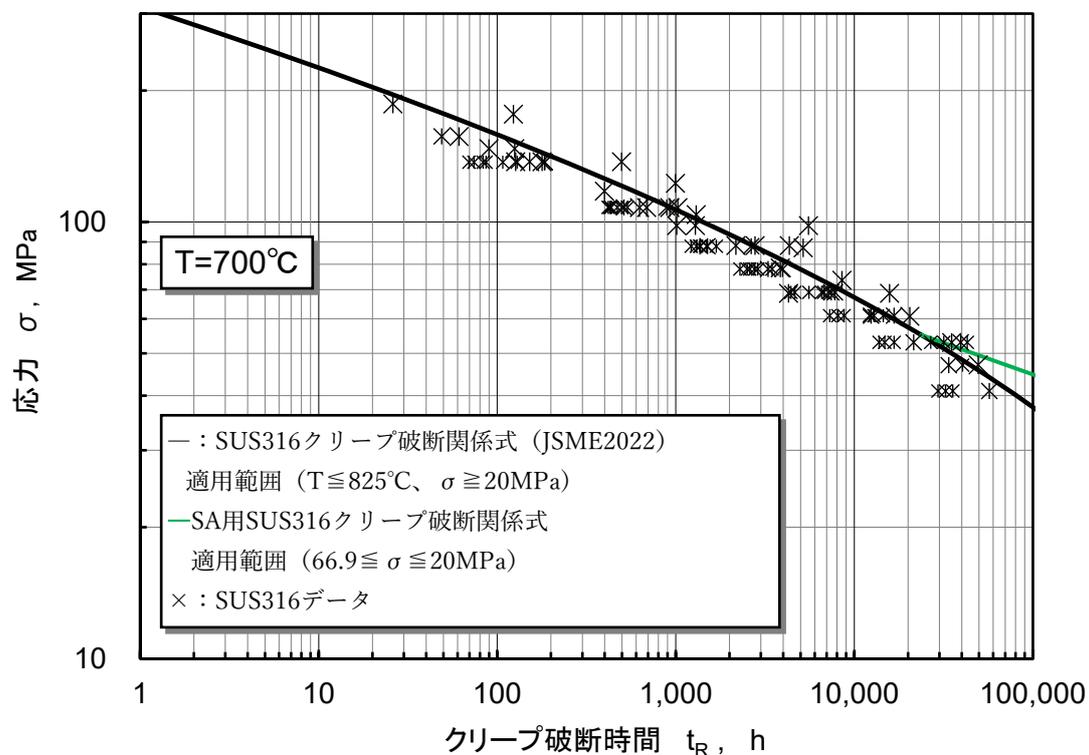


図 A6-16 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (700°C)

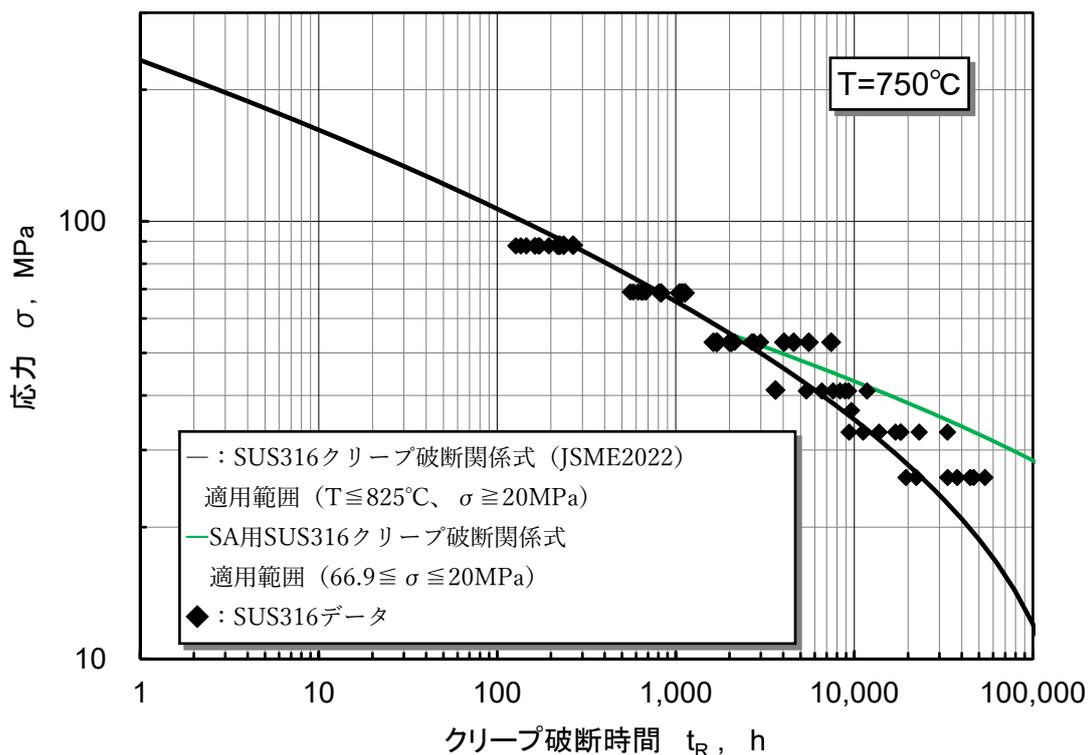


図 A6-17 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (750°C)

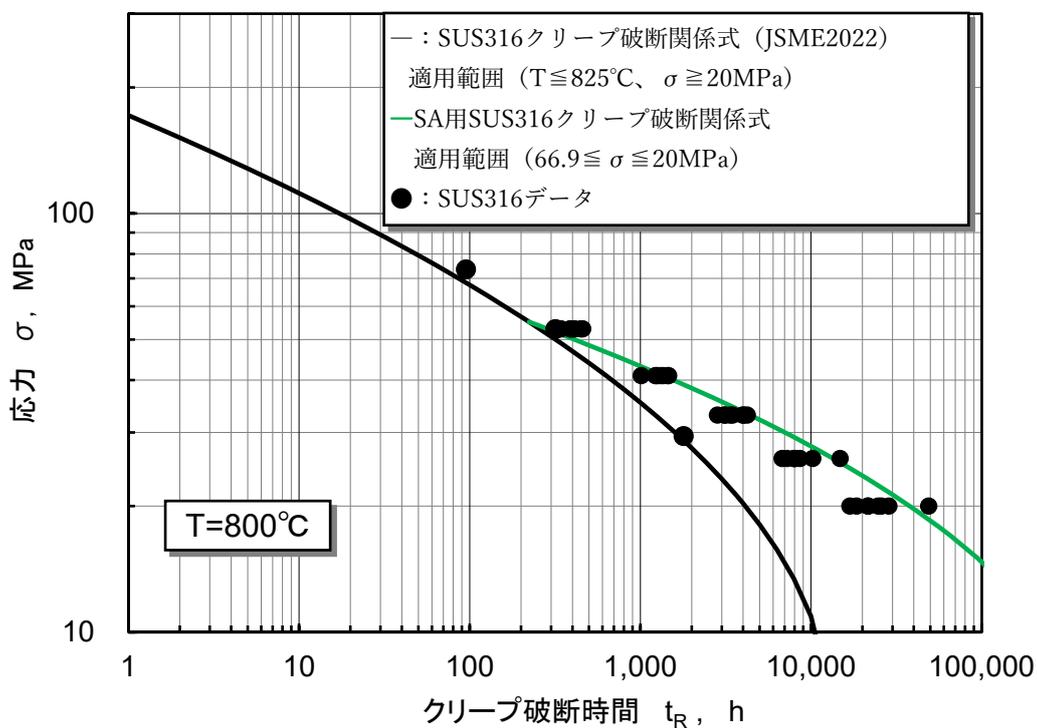


図 A6-18 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (800°C)

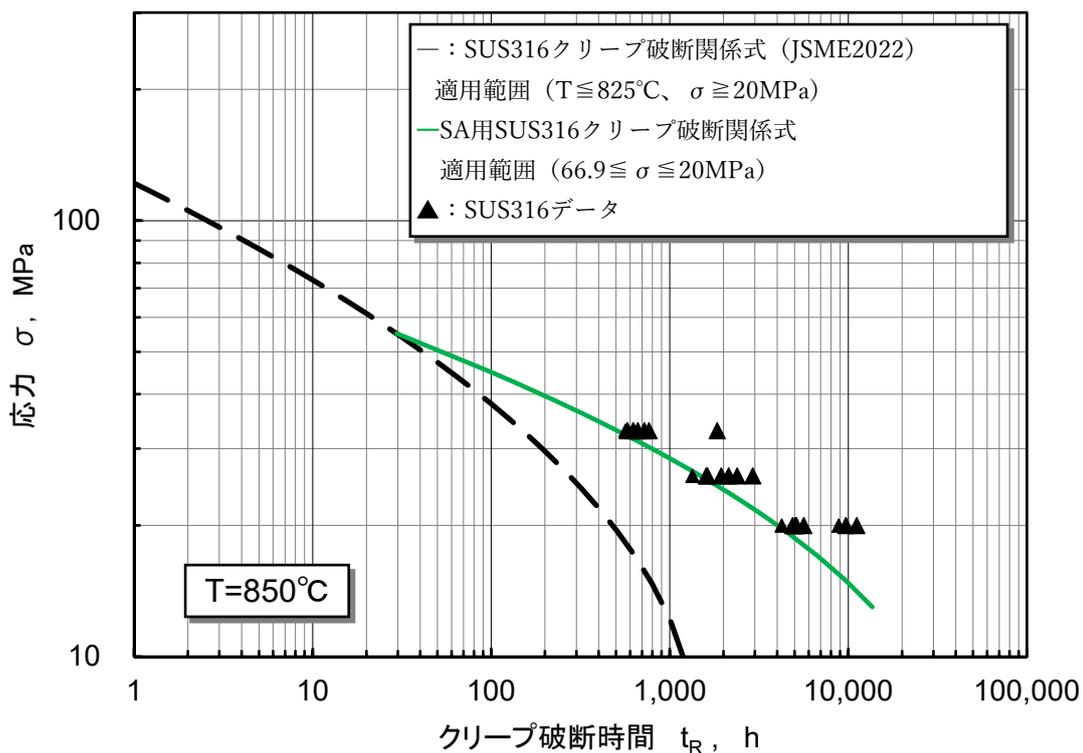


図 A6-19 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (850°C)

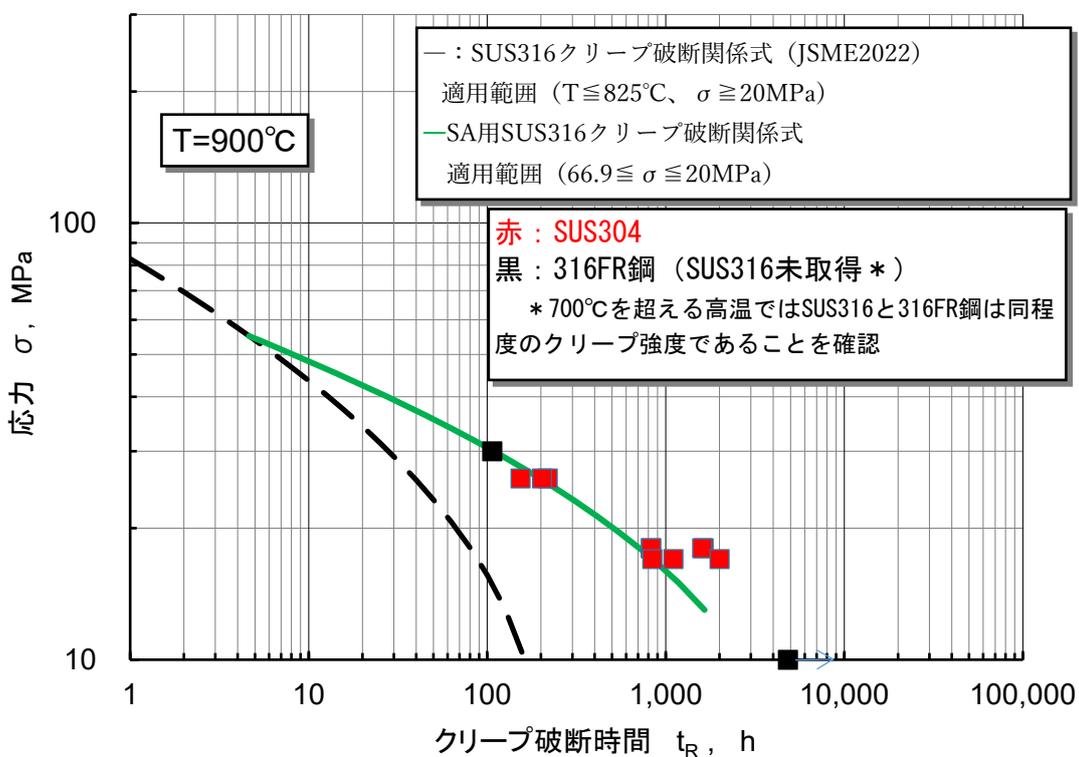


図 A6-20 超高温クリープ破断式と JSME 式の関係 (900°C)

付録 7

SUS304、SUS316 溶体化材の超高温クリープひずみ式

1. 目的

高速炉のシビアアクシデント(SA)解析評価に適用できる SUS304 及び SUS316 のクリープひずみ式を検討する。適用温度範囲は 900℃までを想定する。

2. 現行式

SUS304 及び SUS316 のクリープひずみ式は、JSME 設計・建設規格第Ⅱ編高速炉規格 2022 年版[1] (以下、現行式) に規格化されており、いずれの式も適用温度範囲は 650℃までとなっている。

表 A7-1 JSME2022 年版 SUS304 のクリープひずみ式

表 A7-2 JSME2022 年版 SUS316 のクリープひずみ式

3. 既存取得データ

現行式のクリープひずみ式 (BDS 式) は、SUS304、SUS316 共に最高 650℃までのデータを用いて策定されている。

SUS304 は、BDS 策定以降 800℃、850℃、900℃にてクリープデータを取得している[2]。SUS316 は、NIMS クリープデータシートにて 850℃までのデータが報告されている[3, 4]。しかし、定常クリープ速度については記載があるが、クリープひずみ挙動のデータは記載されていないため、現時点で利用可能な SUS316 溶体化材の 650℃を超える温度のクリープひずみ挙動データはゼロである。

4. 超高温クリープひずみ式の検討

4.1 SUS304

4.1.1 現行式 (JSME2022 年) の適用性確認

図 A7-1 に 800℃及び 900℃におけるクリープひずみ挙動を示す。図 A7-1 より現行式は、1 次クリープを明らかに過大評価している。これは、650℃を超えるような高温になると、1 次クリープが現れなくなるため考えられる。なお、800℃以上では、明瞭な 2 次クリープもなく、最初から 3 次クリープに入っているようにも見えるが、これは定荷重試験によるものと解釈できる。1 次クリープが超高温では生じなくなるメカニズムについては、将来の検討課題とする。

図 A7-2 に定常クリープ速度とクリープ破断時間の関係を示す。800℃のデータは、現行式 (外挿) で良く記述できているが、850℃、900℃のデータは当てはめ性がよくない。

4.1.2 超高温クリープひずみ式策定方針

4.1.1 の検討より、超高温クリープひずみ式として、現行式に対して以下の修正を行う。

- ・現行式において、1次クリープを記述している第1項及び第2項を修正する。
- ・800℃を超える温度について、定常クリープ速度を修正する。

※クリープ破断時間は、別途策定した超高温用のクリープ破断関係式を適用する。

表 A7-3 JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式

表 A7-4 超高温 SUS304 のクリープ破断関係式

4.1.3 策定結果

策定した SUS304 の超高温クリープひずみ式を表 A7-5 に示す。

第1項及び第2項については、下記に示す B_1 及び B_2 の係数を設定した。

温度T(℃)	B_1	B_2
～650	1	1
650～800	$(800-T)/150$	
800～850	0	$(850-T)/50$
850～900		0

定常クリープ速度については、850℃及び900℃のデータを用いて Monkman-Grant 則（定常クリープ速度 $=F \cdot \exp(-Q/RT) t_R^{-n}$ ）における係数 n について、800℃を超える温度について最小自乗法による修正を行った（図 A7-3 参照）。

図 A7-4～図 A7-5 に策定した超高温 SUS304 のクリープひずみ式とデータの関係を示す。限られた試験データによる補正であるが、概ね基本的な挙動は記述できている。

4.2 SUS316

4.2.1 超高温クリープひずみ式策定方針

SUS316 の超高温クリープひずみ式は、以下の理由より SUS304 の超高温クリープひずみ式を参考に策定を行う。

- ・現行式は、SUS316 と SUS304 のいずれも Blackburn の式で策定されており、第1項及び第2項は同一の係数としている（SUS304 と SUS316 の違いは、定常クリープ速度とクリープ破断時間のみである）。
- ・図 A7-6 から 650℃を超える高温では、SUS316 と SUS304 のクリープ強度は同程度と評価でき、図 A7-7 より破断伸びも高温では同等と評価できるため、クリープひずみ挙動も同等と推定される。

よって、SUS316 の超高温クリープひずみ式は、現行式に対して以下の修正・確認を行う。

・ SUS304 で設定した第 1 項及び第 2 項に対する係数 B_1 及び B_2 を SUS316 にも適用できることを確認する。SUS316 は、650°C を超える温度でのクリープひずみ挙動が取得されていないため、確認は SUS304 のデータを用いて実施する。

・ 定常クリープ速度については、SUS316 及び SUS304 データを参考に修正する。
 ※クリープ破断時間は、別途策定した超高温用のクリープ破断関係式を適用する。

表 A7-6 JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式

表 A7-7 超高温 SUS316 のクリープ破断関係式

4.2.2 策定結果

策定した超高温 SUS316 のクリープひずみ式を表 A7-8 に示す。

定常クリープ速度については、図 A7-8 に示すように現行式（温度外挿）の適用が良くないことから、修正を実施した。650°C を超える高温における SUS316 の定常クリープ速度と破断時間の関係は、SUS304 と同等と評価できることから、900°C で SUS304 と同一の値となるように、また、低温からの連続性を確保するために、650°C は SUS316 現行式と同一となるような Monkman-Grant 則（定常クリープ速度 = $F \cdot \exp(-Q/RT) t_R^{-n}$ ）における係数 F, Q, n を設定した（図 A7-9 参照）。

第 1 項及び第 2 項については、下記に示す SUS304 で設定した B_1 及び B_2 を適用した。

温度 T (°C)	B_1	B_2
～650	1	1
650～800	$(800-T)/150$	
800～850	0	$(850-T)/50$
850～900		0

図 A7-10～図 A7-11 に策定した超高温 SUS316 のクリープひずみ式とデータ（SUS304）の関係を示す。限られた試験データによる補正であるが、概ね基本的な挙動は記述できている。

5. まとめ

現行式（JSME2022 年版、適用温度範囲 650°C まで）を修正する形で、900°C まで適用可能な超高温 SUS304 のクリープひずみ式（表 A7-5）及び超高温 SUS316 のクリープひずみ式（表 A7-8）を策定した。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力規格 設計・建設規格 (2022 版) <第 II 編 高速炉規格>, JSME S NC2-2022, 2022.
- [2] 加藤章一、長谷部慎一、吉田英一, 異常高温時における SUS304 のクリープ強度評価, JAEA-Research 2007-091, 2008, 33p.

- [3]物質・材料研究機構, クリープデータシート, No. 14B.
- [4]物質・材料研究機構, クリープデータシート, No. 15.

表 A7-1 JSME2022 年版 SUS304 のクリープひずみ式

$\varepsilon_c = C_1(1 - e^{-t/t_R}) + C_2(1 - e^{-t/t_R}) + \dot{\varepsilon}_m t$	
<p>使用単位</p> <p>T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 650$</p> <p>σ : 応力(MPa) $1.0 \leq \sigma$</p> <p>t_R : 破断時間(h)</p> <p>$\dot{\varepsilon}_m$: 定常クリープひずみ速度(mm/mm/h)</p> <p>t : 時間(h)</p>	
t_R	$\log_{10}(\alpha_c t_R) = -17.54301 + \frac{31883.53}{T + 273.15} - \frac{5261.784}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{425.0012}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$62.416 \cdot \exp\left[-\frac{40812}{8.31(T + 273.15)}\right] t_R^{-1.1335}$
C_1	$1.2692 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.74491} / r_1$
C_2	$0.48449 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.81155} / r_2$
r_1	$103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$
<p>ただし、α_c はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間係数である。</p>	

表 A7-2 JSME2022 年版 SUS316 のクリープひずみ式

$\varepsilon_c = C_1(1 - e^{-\alpha_c t}) + C_2(1 - e^{-r_2 t}) + \dot{\varepsilon}_m t$	
<p>使用単位</p> <p>T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 650$</p> <p>σ : 応力(MPa) $7 \leq \sigma$</p> <p>t_R : 破断時間(h)</p> <p>$\dot{\varepsilon}_m$: 定常クリープひずみ速度(mm/mm/h)</p> <p>t : 時間(h)</p>	
t_R	$\log_{10}(\alpha_c t_R) = -17.37762 + \frac{21647.56}{T + 273.15} + \frac{3492.642}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{2163.930}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$59119.0 \cdot \exp\left[-\frac{93475}{8.31(T + 273.15)}\right] t_R^{-1.1126}$
C_1	$1.2692 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.74491} / r_1$
C_2	$0.48449 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.81155} / r_2$
r_1	$103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$
<p>ただし、α_c はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間係数である。</p>	

表 A7-3 JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 825$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma$

t_R : 破断時間(h)

C	17.54301
A_0	31883.53
A_1	-5261.784
A_2	-425.0012

α_R	平均値 : 1
	設計最小値 : 10

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 A7-4 超高温 SUS304 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $650 < T \leq 900$

σ : 応力(MPa) $17 \leq \sigma < 49.3$

t_R : 破断時間(h)

C	17.54301
A_0	33054.77
A_1	-8354.307
A_2	993.0764

α_R	平均値 : 1
	設計最小値 : 10

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

49.3MPa を超える応力は、JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式を適用する。
本式と合わせて使用する場合は、JSME2022 年版 SUS304 のクリープ破断関係式を 900°C まで適用できる。

表 A7-5 超高温 SUS304 のクリープひずみ式

$\epsilon_c = C_1(1 - e^{-\alpha_c t}) + C_2(1 - e^{-\alpha_c t}) + \dot{\epsilon}_m t$	
<p>使用単位</p> <p>T : 温度(°C) $650 \leq T \leq 900$</p> <p>σ : 応力(MPa) $1.0 \leq \sigma$</p> <p>t_R : 破断時間(h)</p> <p>$\dot{\epsilon}_m$: 定常クリープひずみ速度(mm/mm/h)</p> <p>t : 時間(h)</p>	
t_R	<p>JSME2022 年版クリープ破断関係式 (表 A7-3) 及び超高温クリープ破断関係式 (表 A7-4)</p>
$\dot{\epsilon}_m$	$62.416 \cdot \exp\left[-\frac{40812}{8.31(T + 273.15)}\right] t_R^{-n}$ <p>$650 \leq T \leq 800$ $n=1.1335$ $800 < T \leq 900$ $n=1.1335+0.001379(T-800)$</p>
C_1	$B_1 \cdot 1.2692 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.74491} / r_1$ <p>$650 \leq T \leq 800$ のとき $B_1 = (800-T)/150$ $800 < T \leq 900$ のとき $B_1 = 0$</p>
C_2	$B_2 \cdot 0.48449 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$ <p>$650 \leq T \leq 800$ のとき $B_2 = 1$ $800 < T \leq 850$ のとき $B_2 = (850-T)/50$ $850 < T \leq 900$ のとき $B_2 = 0$</p>
r_1	$103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$
<p>ただし、α_c はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間係数である。</p>	

表 A7-6 JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $425 \leq T \leq 825$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma$

t_R : 破断時間(h)

C	17.37762
A_0	21647.56
A_1	3492.642
A_2	-2163.930

α_R	平均値 : 1 設計最小値 : 10
------------	-----------------------

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 A7-7 超高温 SUS316 のクリープ破断関係式

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R t_R) + C\}$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度(°C) $650 < T \leq 900$

σ : 応力(MPa) $20 \leq \sigma < 55.1$

t_R : 破断時間(h)

C	17.37762
A_0	22468.93
A_1	5542.442
A_2	-3612.345

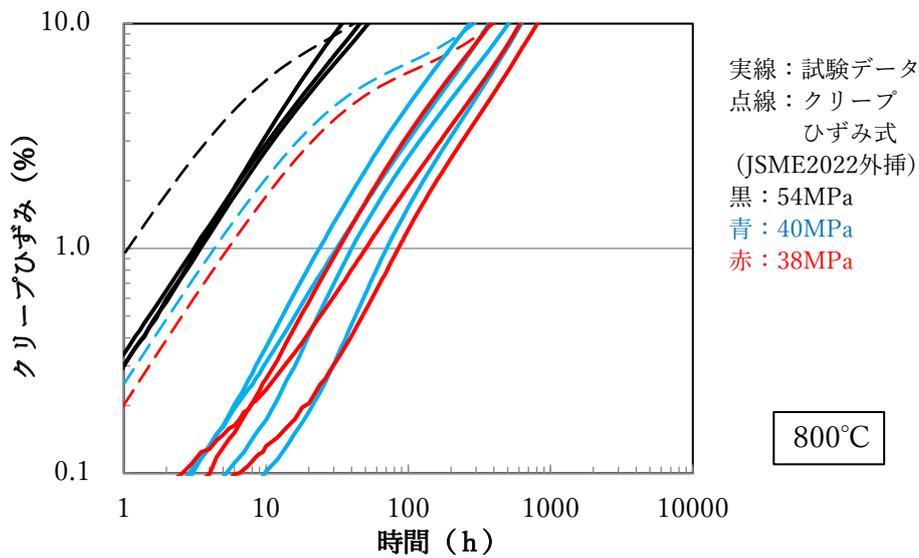
α_R	平均値 : 1
	設計最小値 : 10

ただし、 σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

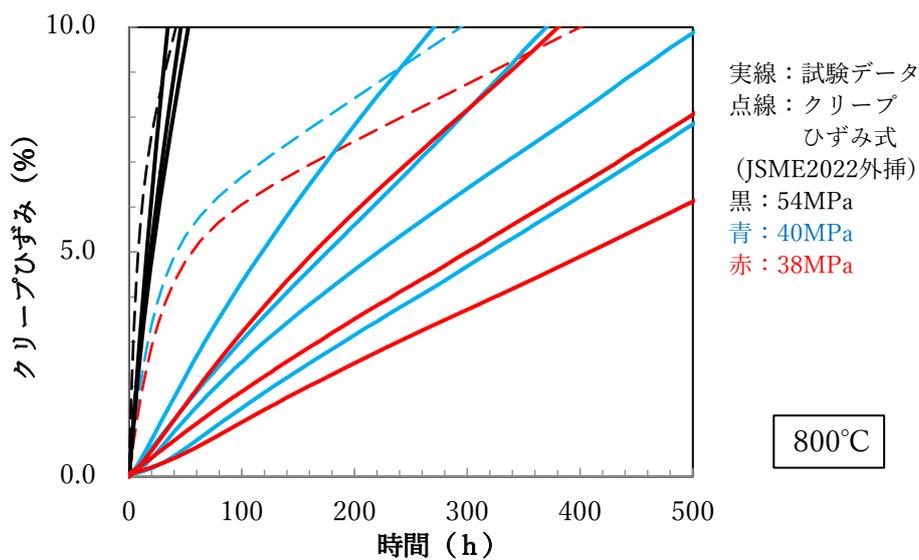
55.1MPa を超える応力は、JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式を適用する。
 本式と合わせて使用する場合は、JSME2022 年版 SUS316 のクリープ破断関係式を 900°C
 まで適用できる。

表 A7-8 超高温 SUS316 のクリープひずみ式

$\epsilon_c = C_1(1 - e^{-\alpha_c t}) + C_2(1 - e^{-\alpha_c t}) + \dot{\epsilon}_m t$	
<p>使用単位</p> <p>T : 温度(°C) $650 \leq T \leq 900$</p> <p>σ : 応力(MPa) $7 \leq \sigma$</p> <p>t_R : 破断時間(h)</p> <p>$\dot{\epsilon}_m$: 定常クリープひずみ速度(mm/mm/h)</p> <p>t : 時間(h)</p>	
t_R	<p>JSME2022 年版クリープ破断関係式 (表 A7-6) 及び超高温クリープ破断関係式 (表 A7-7)</p>
$\dot{\epsilon}_m$	$65.098 \cdot \exp\left[-\frac{41222}{8.31(T + 273.15)}\right] t_R^{-n}$ $n = 1.1126 + 0.0006352(T - 650)$
C_1	$B_1 \cdot 1.2692 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.74491} / r_1$ <p>650 ≤ T ≤ 800 のとき $B_1 = (800 - T) / 150$ 800 < T ≤ 900 のとき $B_1 = 0$</p>
C_2	$B_2 \cdot 0.48449 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$ <p>650 ≤ T ≤ 800 のとき $B_2 = 1$ 800 < T ≤ 850 のとき $B_2 = (850 - T) / 50$ 850 < T ≤ 900 のとき $B_2 = 0$</p>
r_1	$103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$
<p>ただし、α_c はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間係数である。</p>	

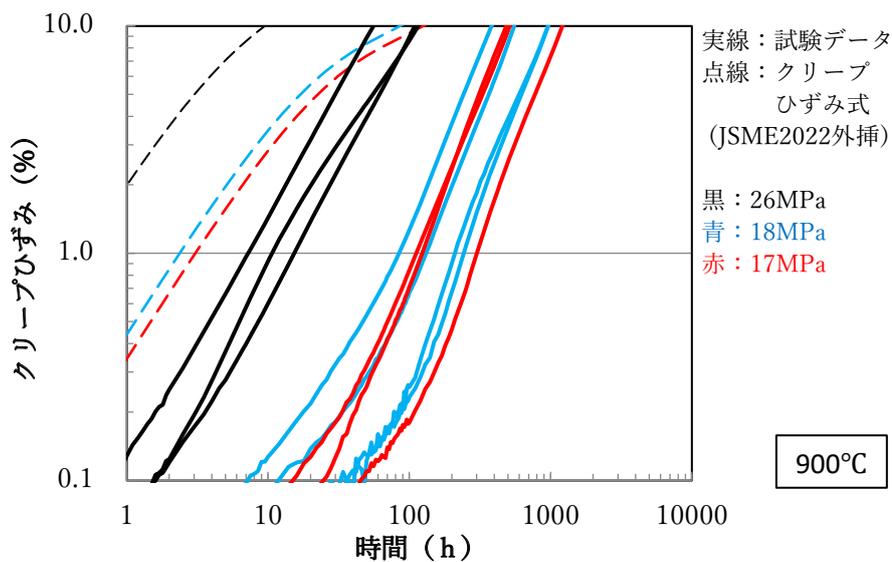


(a) 両対数表示

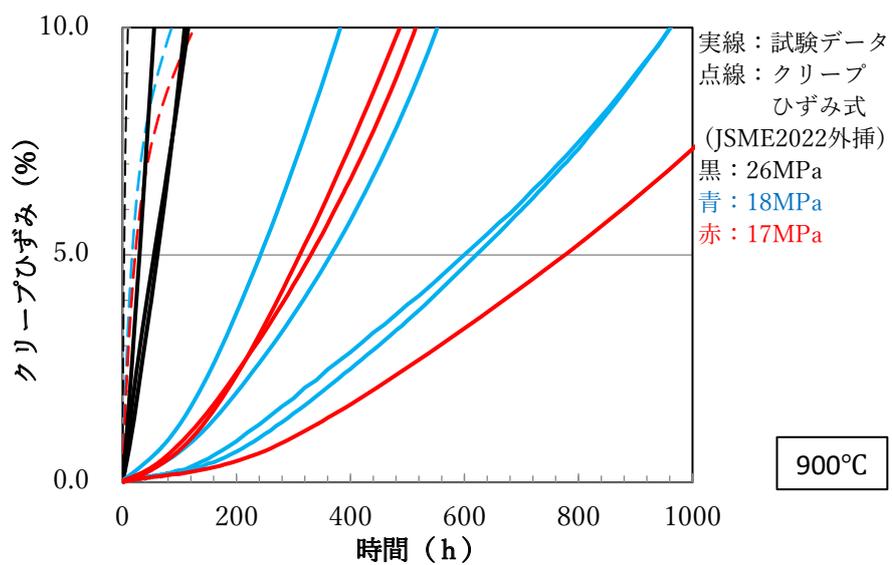


(b) 正規表示

図 A7-1-1 SUS304 現行式とデータの関係 (800°C)



(a) 両対数表示



(b) 正規表示

図 A7-1-2 SUS304 現行式とデータの関係 (900°C)

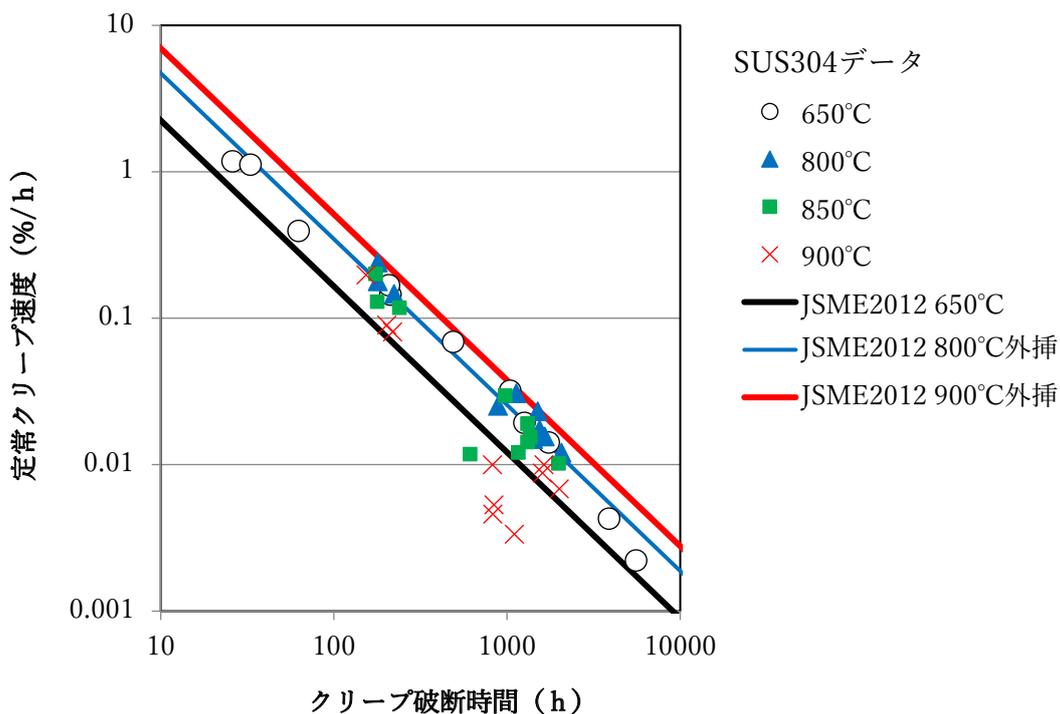


図 A7-2 SUS304 定常クリープ速度データと現行式の関係

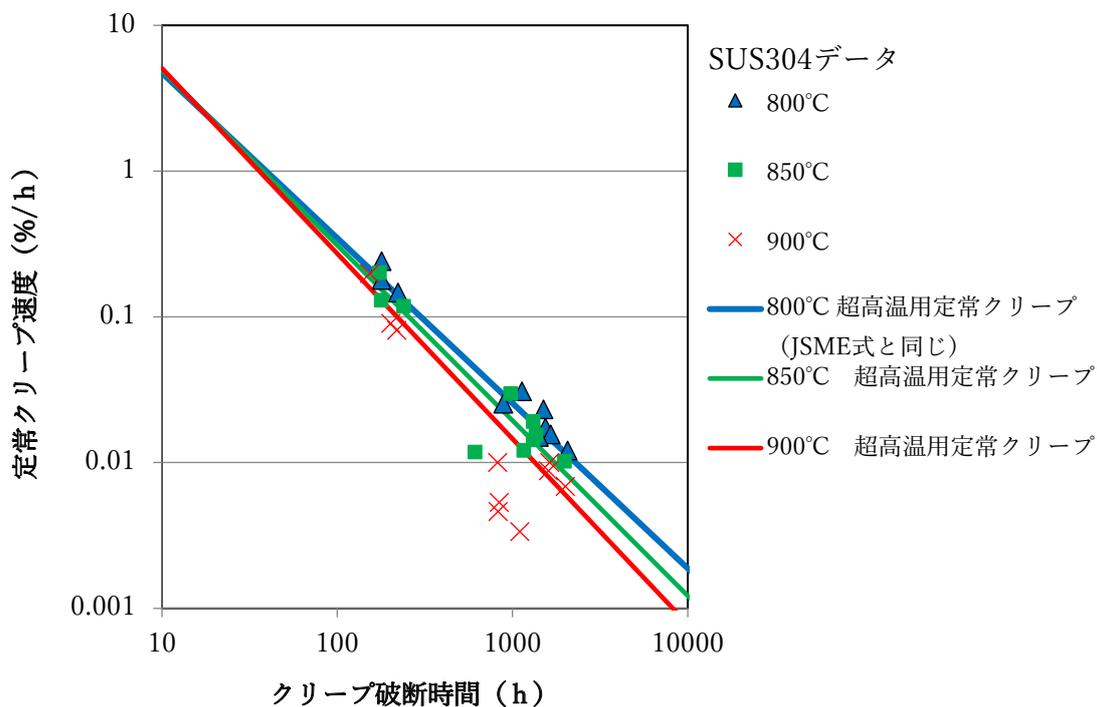
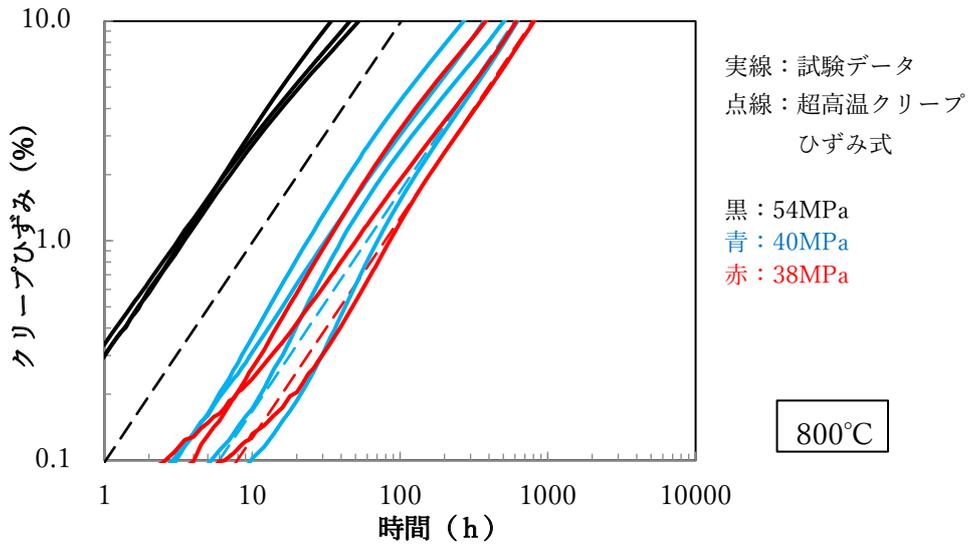
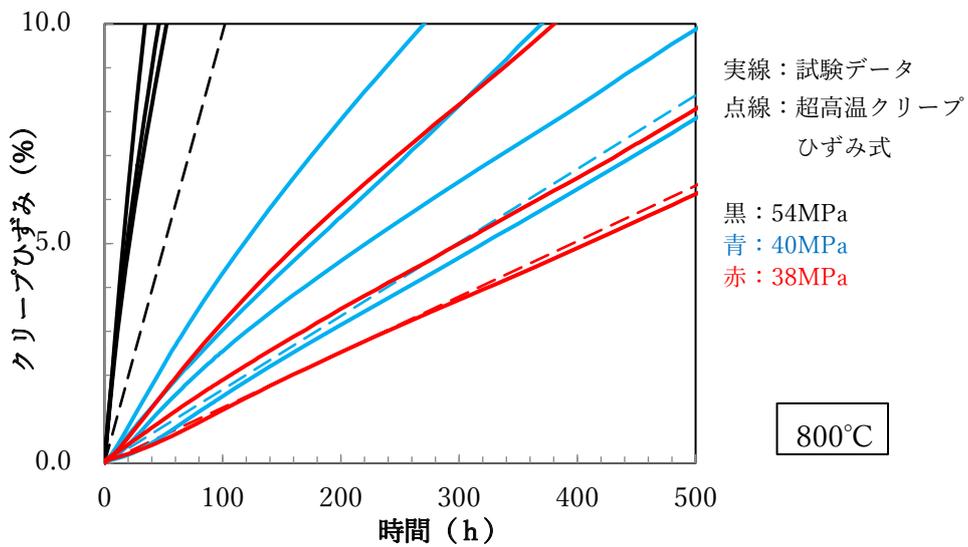


図 A7-3 SUS304 定常クリープ速度データと超高温クリープひずみ式（定常クリープ速度）の関係



(a) 両対数表示



(b) 正規表示

図 A7-4-1 超高温 SUS304 のクリープひずみ式とデータの関係 (800°C)

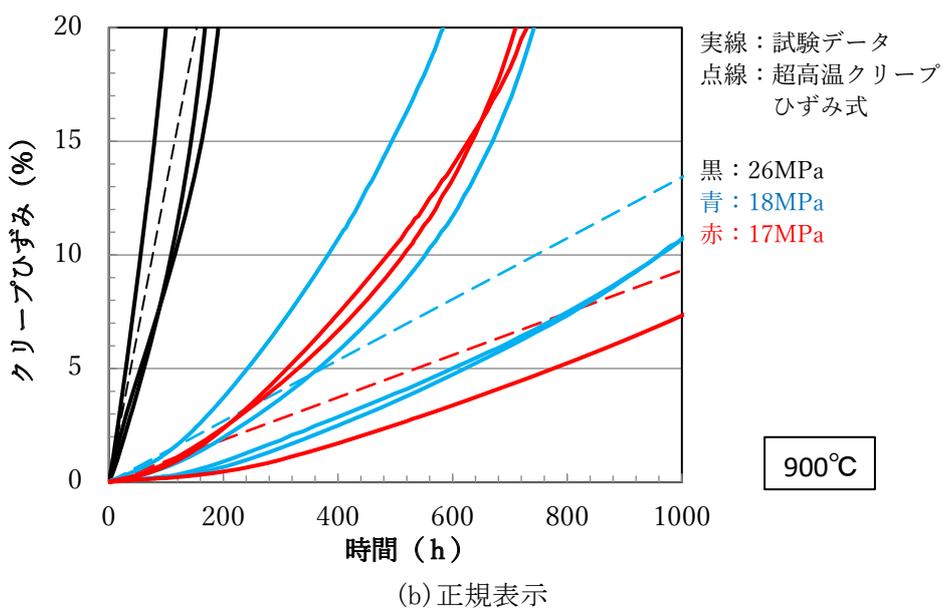
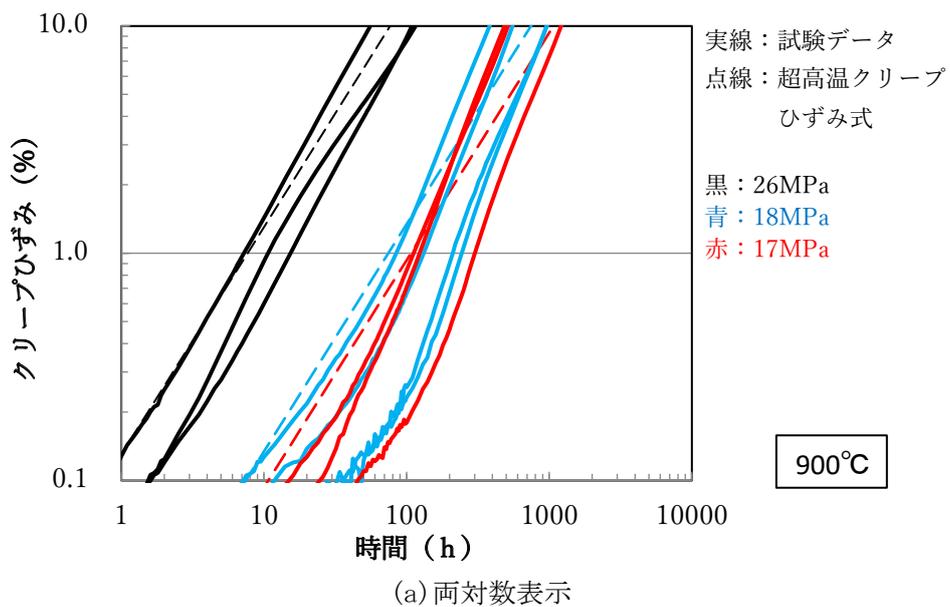


図 A7-4-2 超高温 SUS304 のクリープひずみ式とデータの関係 (900°C)

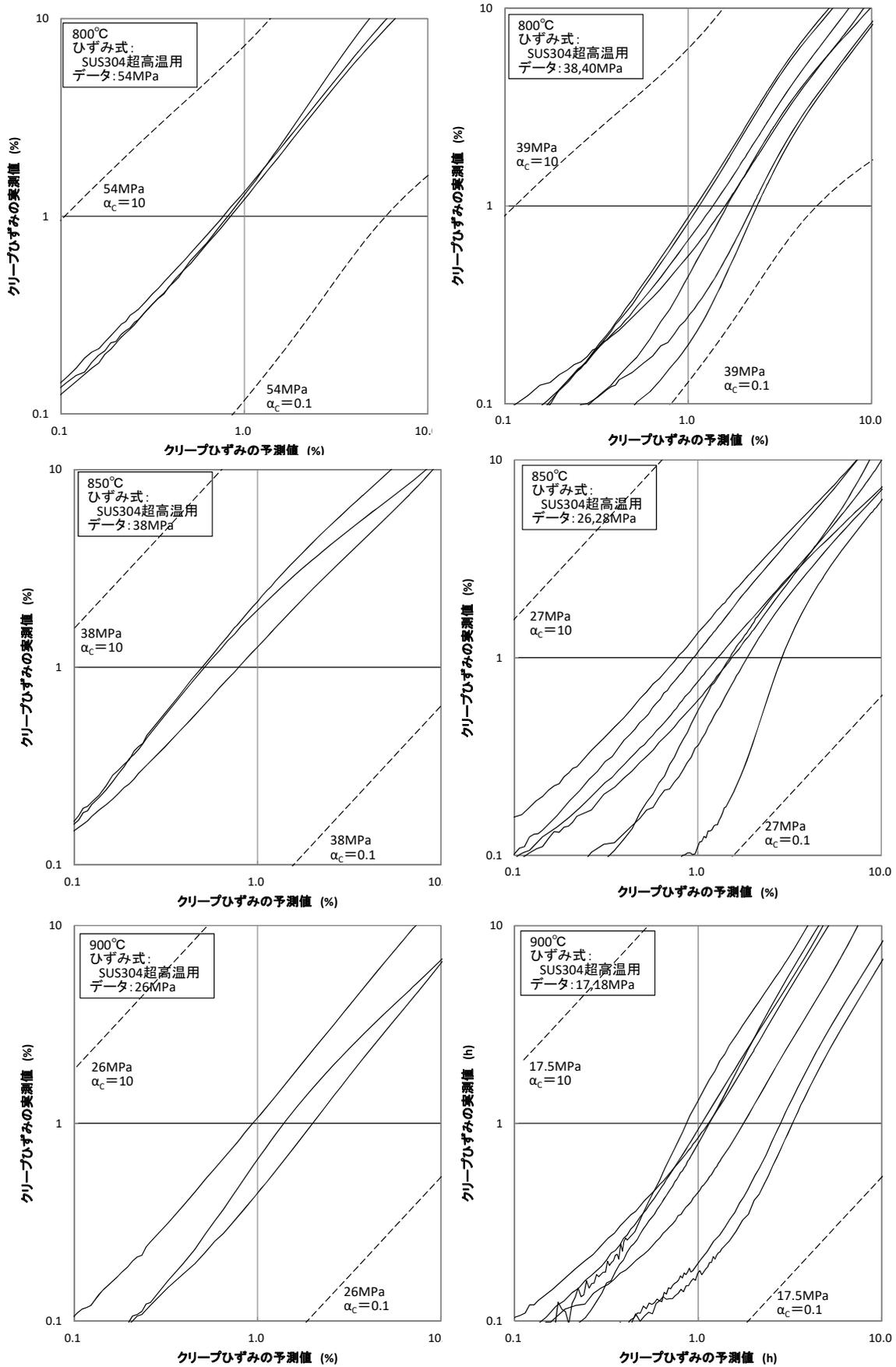


図 A7-5 超高温 SUS304 クリープひずみ式の記述性 ($\alpha_c=10, 1/10$ の上下限)

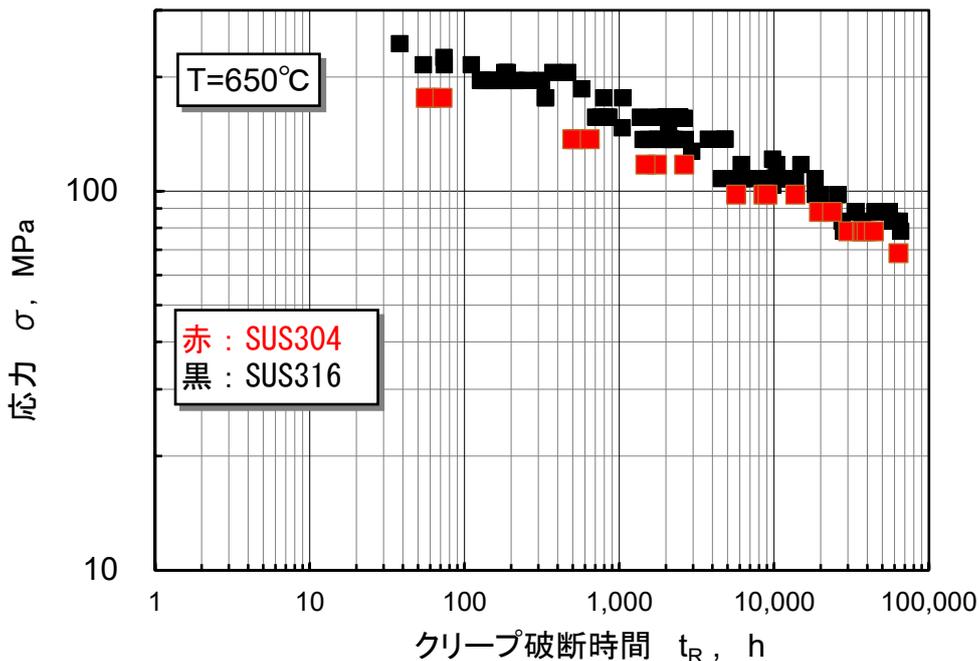


図 A7-6-1 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (650°C)

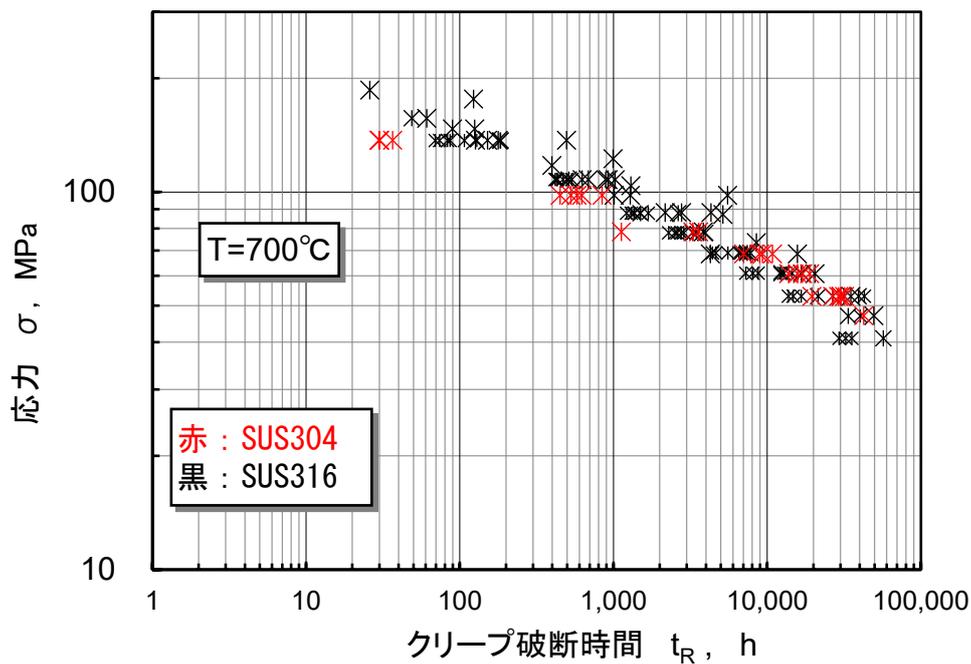


図 A7-6-2 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (700°C)

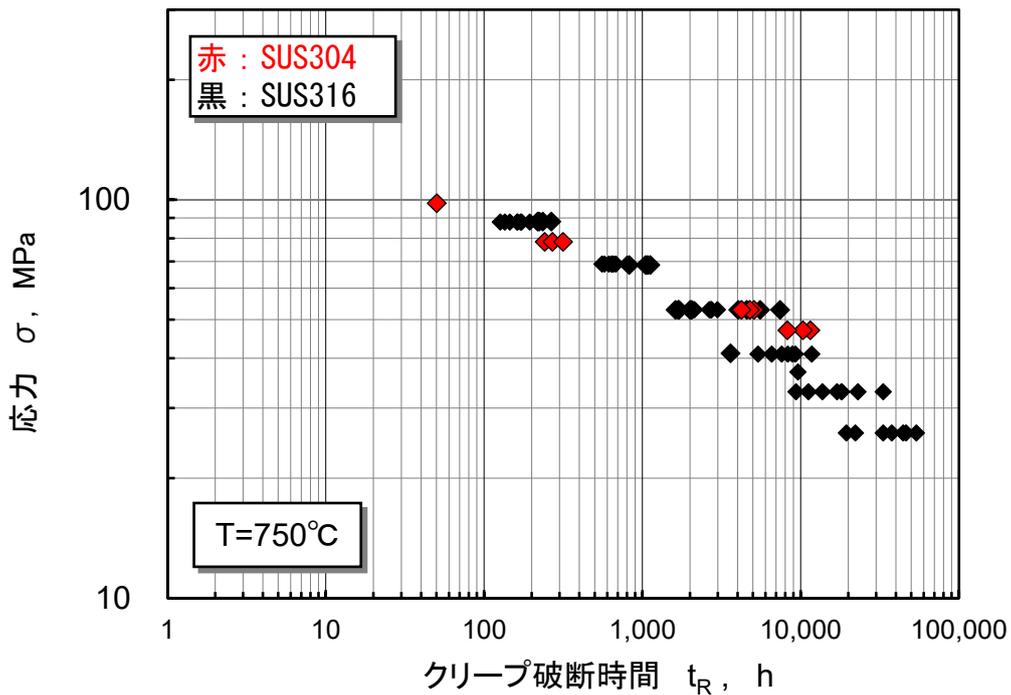


図 A7-6-3 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (750°C)

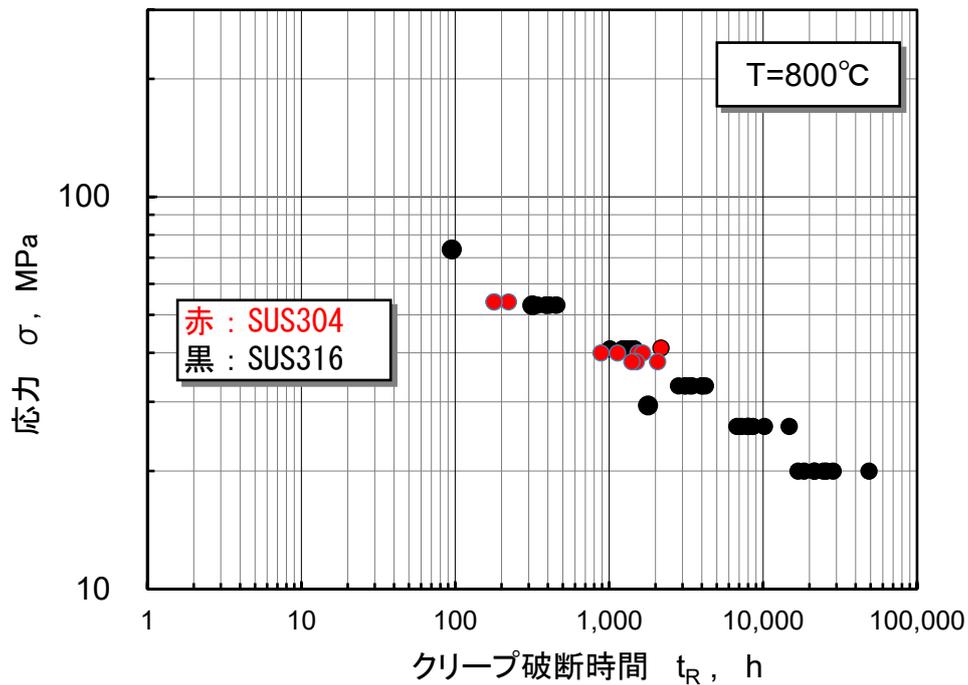


図 A7-6-4 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (800°C)

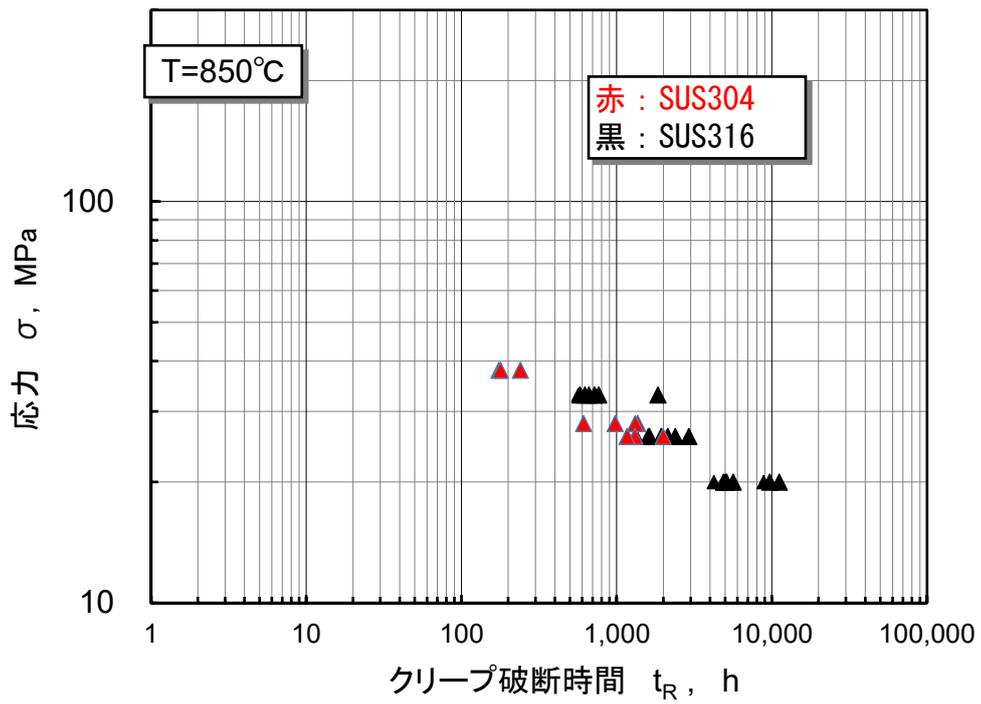


図 A7-6-5 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (850°C)

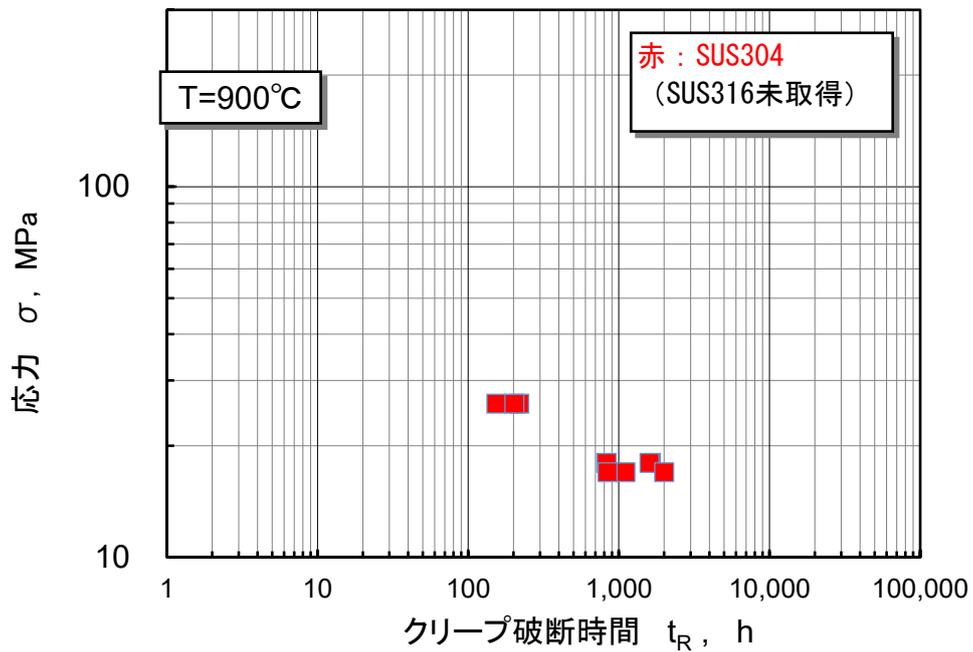


図 A7-6-6 SUS316 と SUS304 のクリープ強度比較 (900°C)

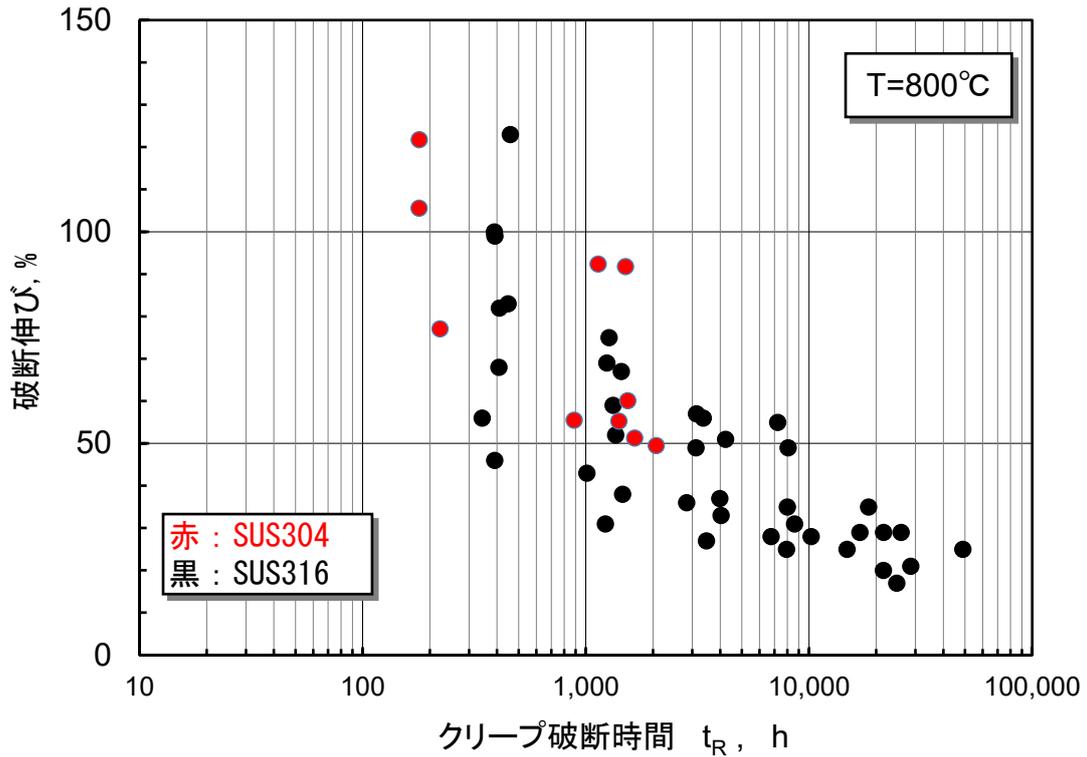


図 A7-7-1 SUS316 と SUS304 のクリープ破断伸び比較 (800°C)

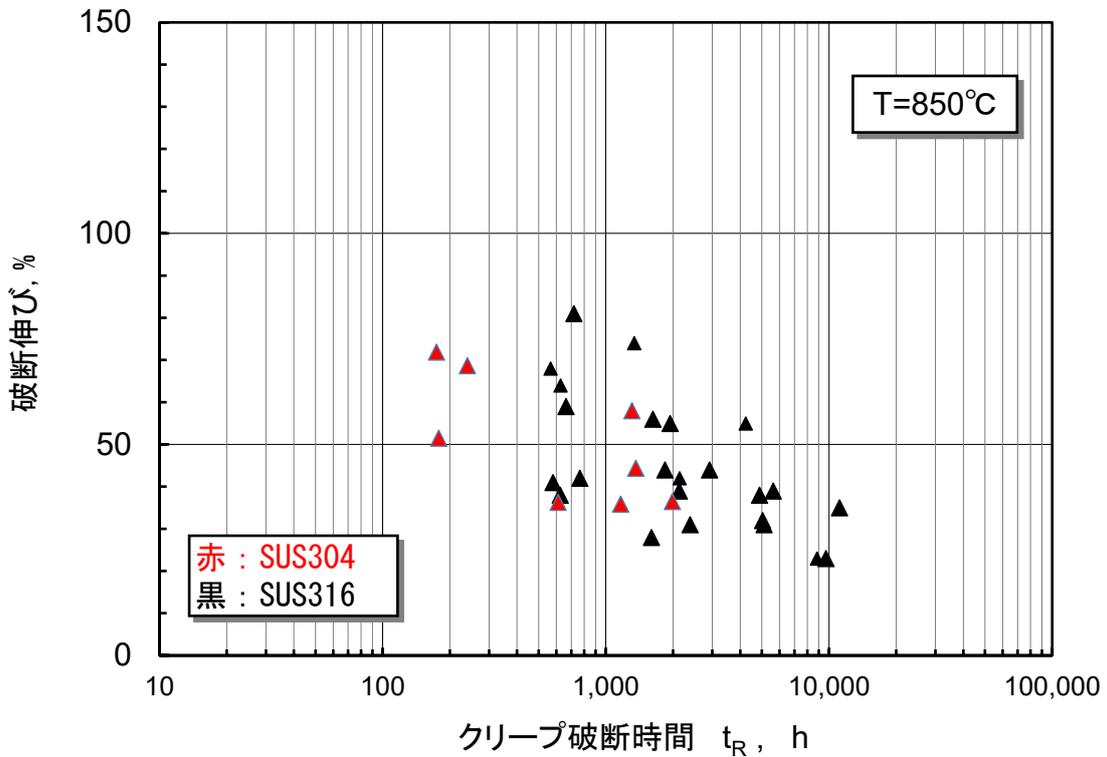


図 A7-7-2 SUS316 と SUS304 のクリープ破断伸び比較 (850°C)

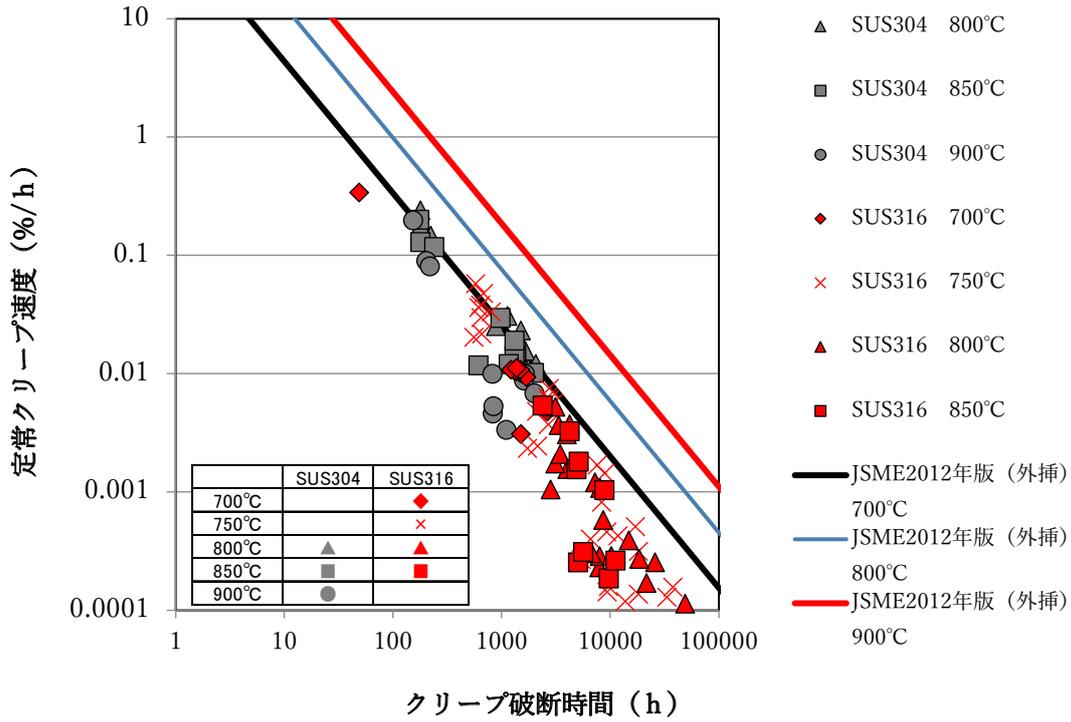


図 A7-8 SUS316 及び SUS304 定常クリープ速度データと SUS316 現行式の関係

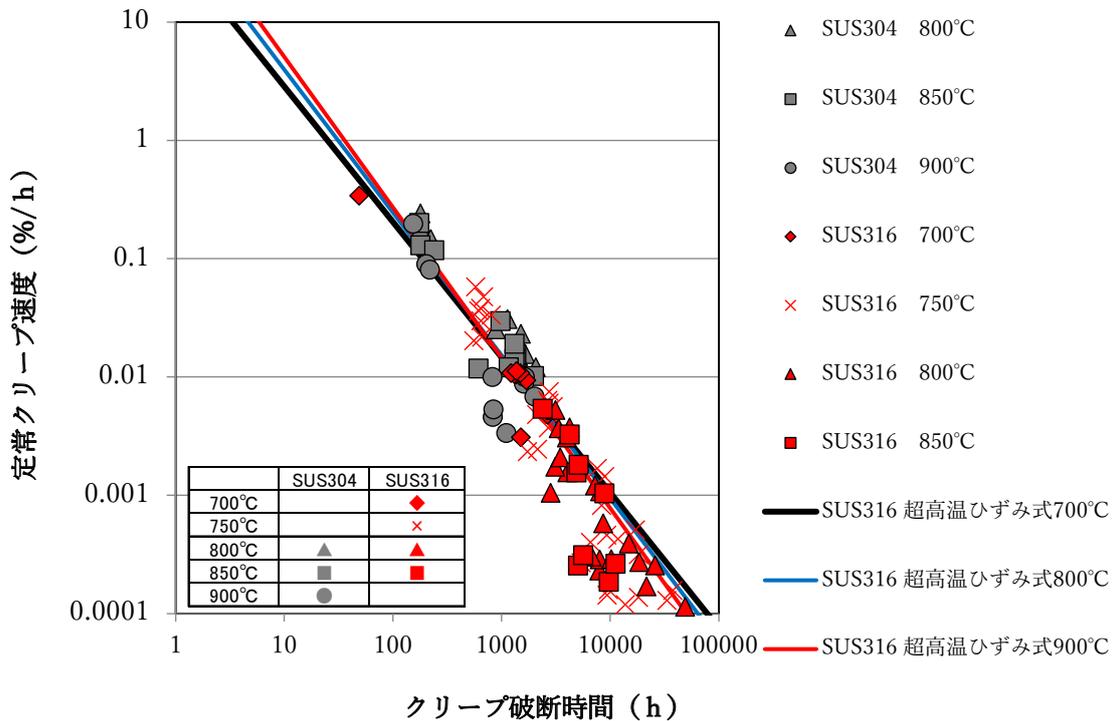
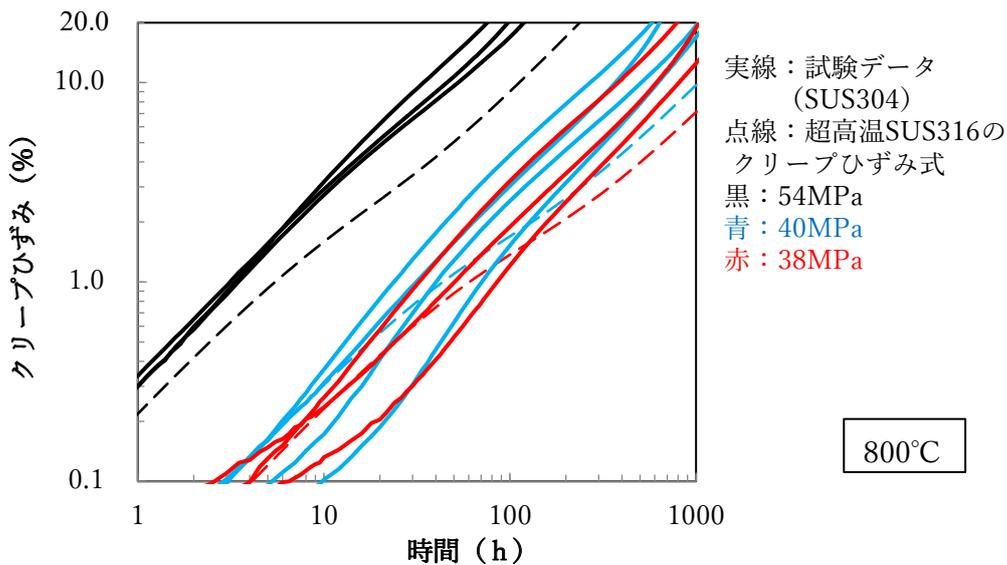
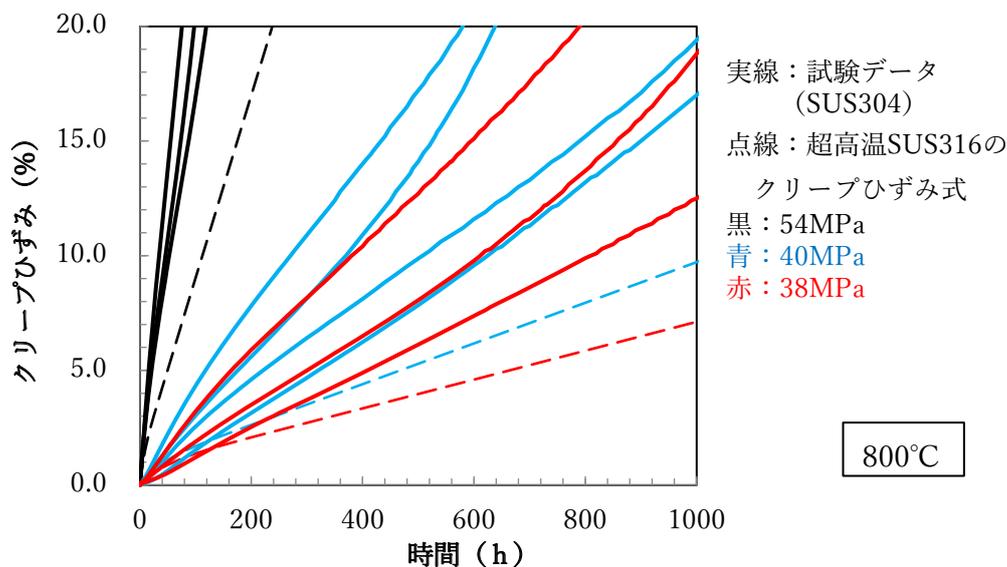


図 A7-9 SUS316 及び SUS304 定常クリープ速度データと SUS316 超高温クリープひずみ式 (定常クリープ速度) の関係



(a) 両対数表示



(b) 正規表示

図 A7-10-1 超高温 SUS316 のクリープひずみ式とデータ (SUS304) の関係 (800°C)

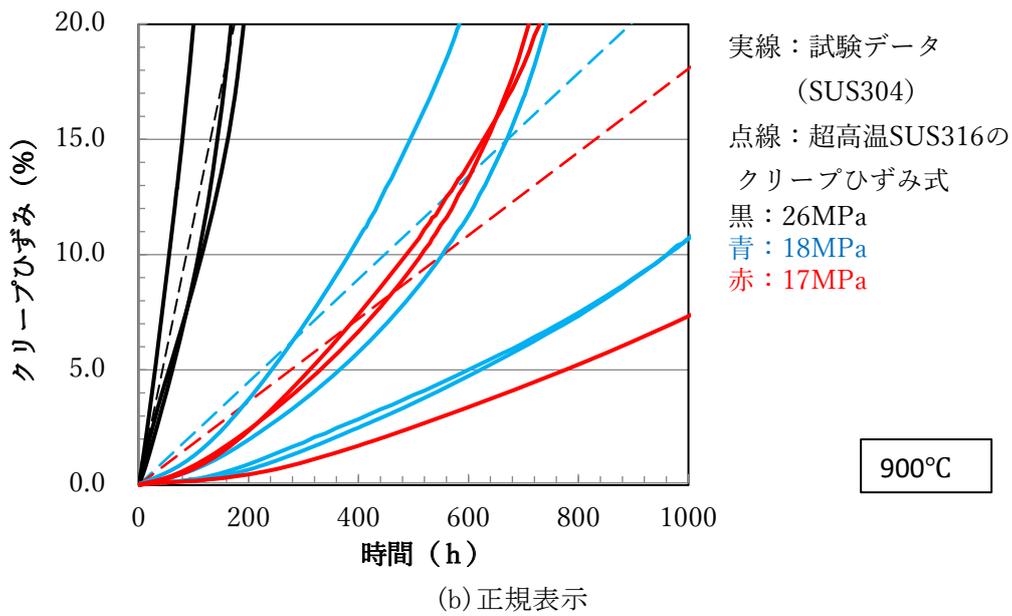
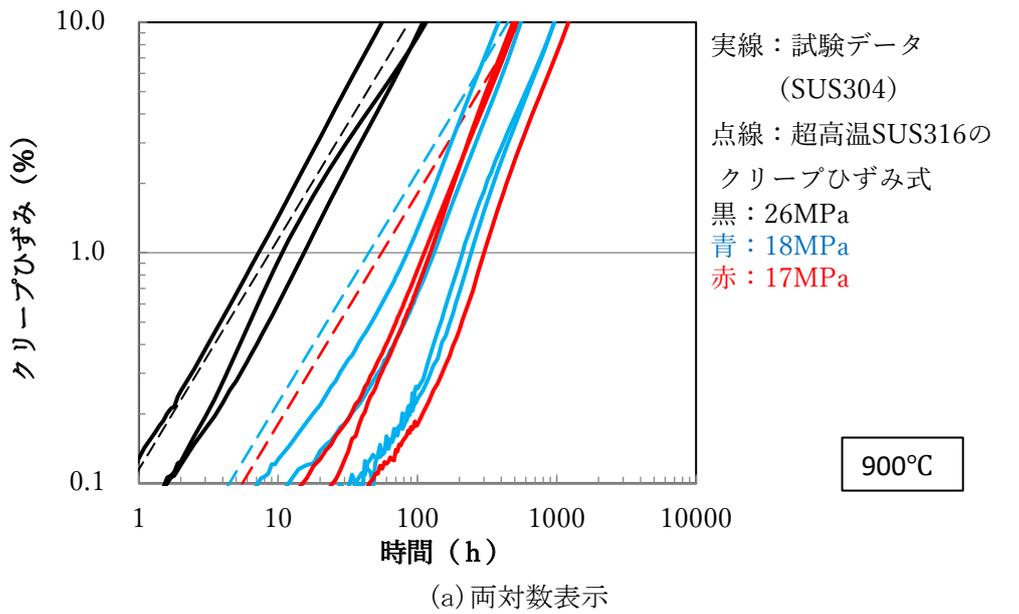


図 A7-10-2 超高温 SUS316 のクリープひずみ式とデータ (SUS304) の関係 (900°C)

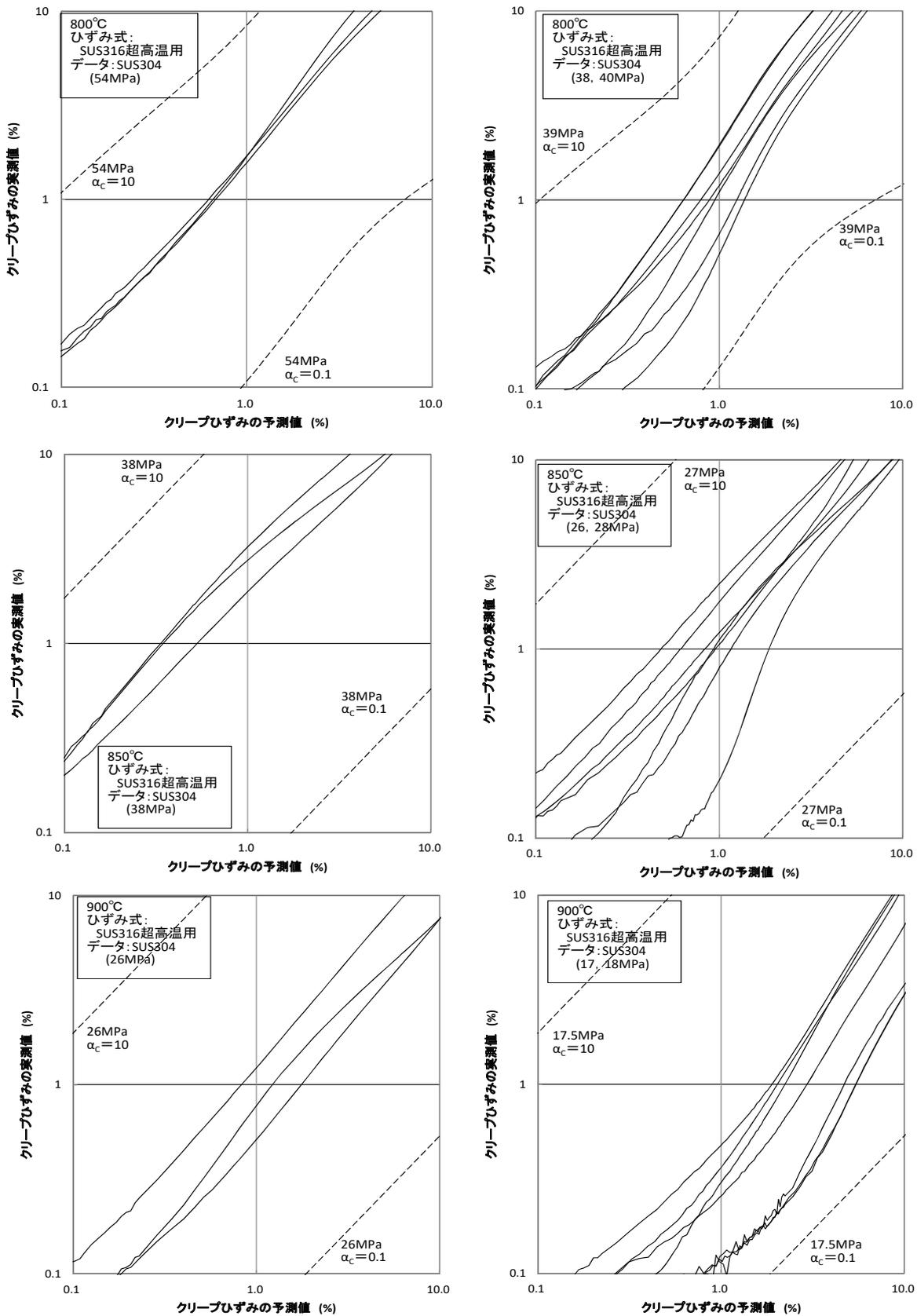


図 A7-11 超高温 SUS316 クリープひずみ式の記述性 ($\alpha_c=10, 1/10$ の上下限)

付録 8
SUS316 の物性式

1. 縦弾性係数

(1) 適用範囲

温度については室温から 850°C までとする。850°C を超えての外挿は、その妥当性が立証できない限り不可とする。

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 策定方法と結果

室温から 650°C の温度範囲においては、日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格—高速炉規格 2020 年度版（以下、JSME 高速炉規格 2020 と呼ぶ）[1] に掲載されている SUS316 の縦弾性係数の値を使用した。JSME 高速炉規格 2020 で規定されていない 650°C を超えて 850°C 以下までの温度範囲においては、以下の方法により、縦弾性係数を求めた。

2021 年度版の ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary) [2]（以下、2021 ASME BPVC. II. D.C. と呼ぶ）において、オーステナイトステンレス鋼の -325°F (-198°C) から 1500°F (816°C) までの縦弾性係数が規定されている。この値を 3 次式で最小自乗法によりフィッティングすることで、以下の近似式を得ることができる。

$$E = 1.9584 \times 10^5 - 65.403 \times T + 1.2853 \times 10^{-2} \times T^2 - 4.7599 \times 10^{-5} \times T^3$$

ここで、E 及び T は、それぞれ縦弾性係数 [MPa] と温度 [°C] である。

上記の式を 850°C まで外挿することで、650°C を超えて 850°C までの温度範囲における縦弾性率を求めた。

上記の方法で求めた縦弾性係数を表 A8. 1-1 に示す。また、図 A8. 1-1 に JSME 高速炉規格 2020 及び 2021 ASME BPVC. II. D.C. の値との比較を示す。

参考文献

- [1] 日本機械学会，発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2020 年版）＜第 II 編 高速炉規格＞，JSME S NC2-2020，2020.
- [2] 2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary), 2021.

表 A8. 1-1 縦弾性係数

温度 [°C]	縦弾性係数 E [MPa]
25	195,000
100	189,000
150	186,000
200	183,000
250	179,000
300	176,000
350	172,000
400	169,000
450	165,000
500	160,000
550	156,000
600	151,000
650	146,000
700	140,000
750	134,000
800	127,000
850	120,000

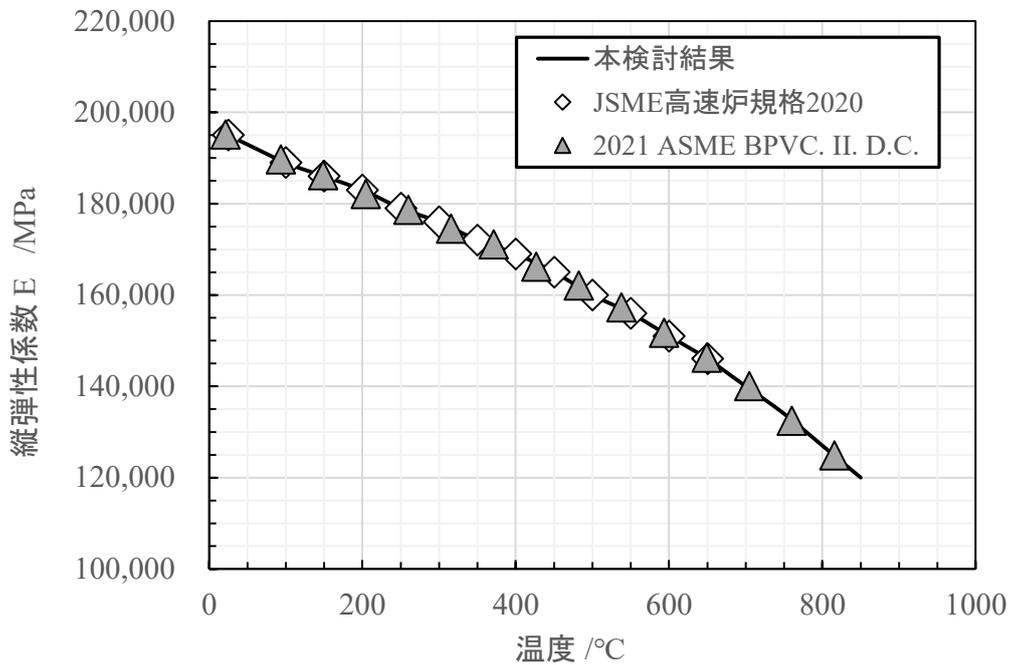


図 A8. 1-1 縦弾性係数

2. ポアソン比

(1) 適用範囲

温度については室温から 850°Cまでとする。850°Cを超えての外挿は、その妥当性が立証できない限り不可とする。

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 策定方法と結果（表A8.2-1、図A8.2-1）

375°Cから 650°Cの温度範囲においては、JSME 高速炉規格 2020[1]に掲載されている SUS316 のポアソン比の値を使用した。これに規定されていない室温から 375°Cまでの値と 650°Cを超えて 850°Cまでの値については下記の通りとした。

・室温から 375°Cまで

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格—軽水炉規格 2020 年度版（以下、JSME 軽水炉規格 2020 と呼ぶ）[2]で定められている値（ポアソン比 0.3 一定）を採用した。

・650°Cを超えて 850°Cまで

オーステナイトステンレス鋼(SUS304)のポアソン比は、室温から 1000°C近傍まで、温度に対して線形的に増加するデータ[3]が報告されていることから、JSME 高速炉規格 2020 で定められた 500°Cから 650°Cまでの値を直線外挿して求めた。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2020 年版) <第 II 編 高速炉規格>, JSME S NC2-2020, 2020.
- [2] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2020 年版) <第 I 編 軽水炉規格>, JSME S NC1-2020, 2020.
- [3] M. Fukuhara and A. Sanpei, “Elastic moduli and internal friction of low carbon and stainless steels as a function of temperature”, ISIJ Int. 33(4), 1993, pp. 508-512.

表 A8. 2-1 ポアソン比

温度 [°C]	ポアソン比 ν [-]
20~425	0.300
450	0.300
475	0.301
500	0.302
525	0.304
550	0.306
575	0.308
600	0.310
625	0.312
650	0.314
675	0.316
700	0.318
725	0.320
750	0.322
775	0.324
800	0.326
825	0.328
850	0.330

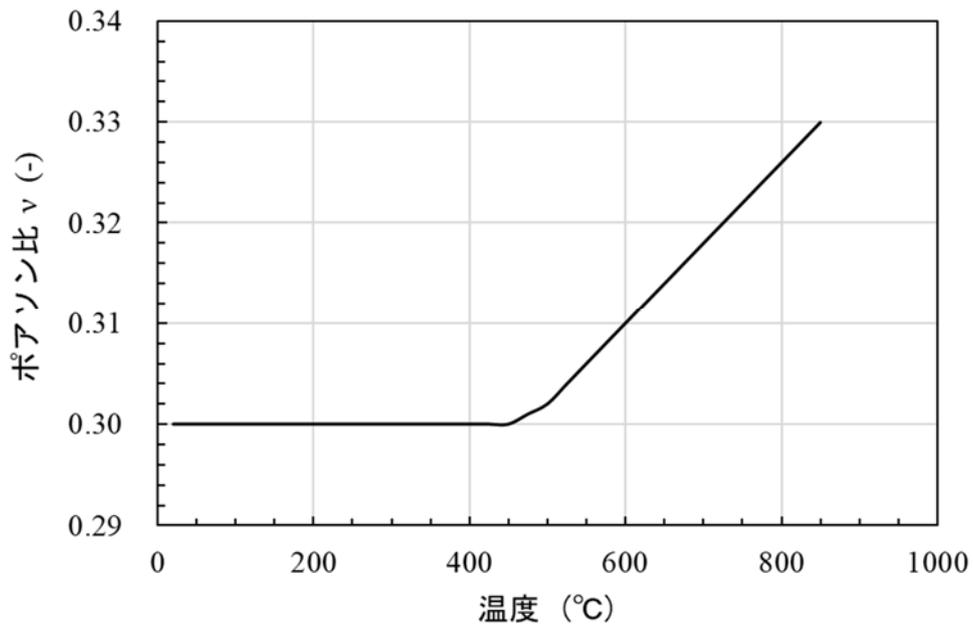


図 A8. 2-1 ポアソン比の温度依存性

3. 密度

(1) 適用範囲

室温～850℃

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 策定方法と結果

常温における SUS316 の密度は $8.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ とする[1]。温度 $T[^\circ\text{C}]$ における密度は、室温における密度 $\rho_{\text{RT}}[\text{kg/m}^3]$ 、平均熱膨張係数 $\alpha [1/^\circ\text{C}]$ から以下のようにして計算により求められる。計算値と実測値はよく一致することが知られている[2]。

$$\rho = \frac{\rho_{\text{RT}}}{1 + 3\alpha(T - 20)}$$

本式に ρ_{RT} として $8,000 \text{kg/m}^3$ 、平均熱膨張係数 α として本付録の第6項に定める平均熱膨張係数を代入し、室温から 850℃までの密度値を求めた。求めた密度値を表 A8. 3-1 及び図 A8. 3-1 に示す。

参考文献

- [1] ステンレス協会編，ステンレス鋼便覧-第3版-，日刊工業新聞社，東京，1428，1995.
- [2] 長谷川正義監修，ステンレス鋼便覧，日刊工業新聞社，東京，pp.103-105，1987.

表 A8.3-1 密度

温度 [°C]	密度 [kg/m ³]
20	8,000
50	7,989
75	7,979
100	7,969
125	7,959
150	7,949
175	7,938
200	7,927
225	7,916
250	7,905
275	7,894
300	7,883
325	7,872
350	7,861
375	7,850
400	7,838
425	7,827
450	7,815
475	7,805
500	7,794
525	7,782
550	7,770
575	7,758
600	7,747
625	7,735
650	7,723
675	7,710
700	7,698
725	7,686
750	7,675
775	7,663
800	7,652
825	7,641
850	7,630

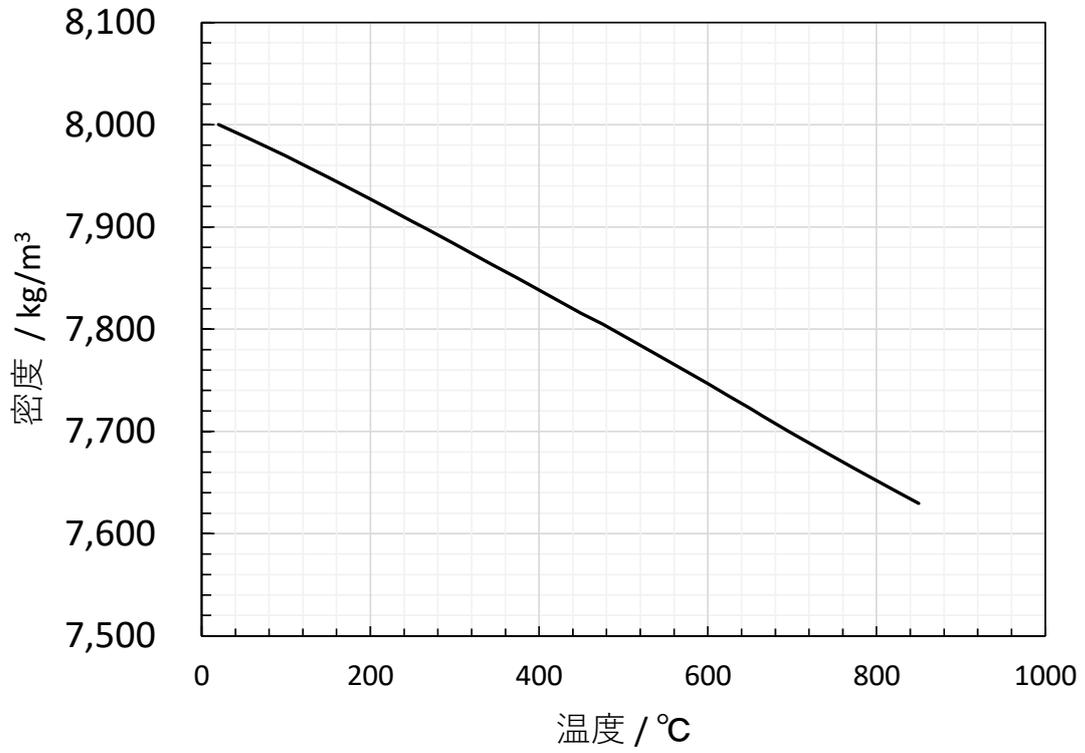


図 A8. 3-1 密度の温度依存性

4. 比熱

(1) 適用範囲

室温～850°C

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 方法と結果

比熱は、2021 年度版の ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary) (以下、2021 ASME BPVC. II. D.C. と呼ぶ) で規定されている熱伝導度 (TC)、熱拡散率 (TD) の値 (Material Group K) [1] と、付録 8 の第 3 項で定める密度から求めた。TC、TD は 70°F (21.1°C) から 1500°F (815.6°C) の温度範囲で 2021 ASME BPVC. II. D.C. [1] に示されている。ここで示される Material Group K の熱伝導度 (TC) 及び熱拡散率 (TD) の値を最小自乗法により、温度の一次式でフィッティングすることで次式を得た。

$$TC = 13.989 + 1.4218 \times 10^{-2} \times T$$

$$TD = 3.5378 \times 10^{-6} + 2.2452 \times 10^{-9} \times T$$

上式を用いて求めた各温度における熱伝導度、熱拡散率、本付録の第 3 項で定めた密度の値を下式に代入することで比熱 (C) を算出した。

$$C = \frac{TC}{\rho \times TD}$$

ここで、C は比熱[J/(kg・°C)]、TC は熱伝導度[W/(m・°C)]、 ρ は密度[kg/m³]、TD は熱拡散率[m²/s]である。上記の方法で求めた比熱を表 A8.4-1 及び図 A8.4-1 に示す。

比熱は、上記式の通り熱伝導度、熱拡散率及び密度から計算によって求められる。これらの物性値は日本機械学会高速炉規格[2]に定められていない。従って今回の見直しにあたっては、データの信頼性を考慮して、熱伝導度及び熱拡散率は信頼性が高いと考えられる ASME の規格値を用いた。ただし、密度については ASME 規格値にもないため付録 8 の第 3 項で定めた密度値を用いた。

参考文献

- [1]2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary).
 [2]日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2020 年版) <第 II 編 高速炉規格>, JSME S NC2-2020.

表 A8.4-1 比熱

温度 [°C]	比熱 [J/(kg · °C)]
20	498.0
50	504.1
75	509.1
100	514.0
125	518.8
150	523.5
175	528.1
200	532.6
225	537.0
250	541.4
275	545.7
300	549.8
325	554.0
350	558.0
375	562.0
400	565.9
425	569.8
450	573.5
475	577.2
500	580.9
525	584.5
550	588.1
575	591.6
600	595.1
625	598.6
650	602.0
675	605.4
700	608.7
725	611.9
750	615.2
775	618.3
800	621.4
825	624.5
850	627.5

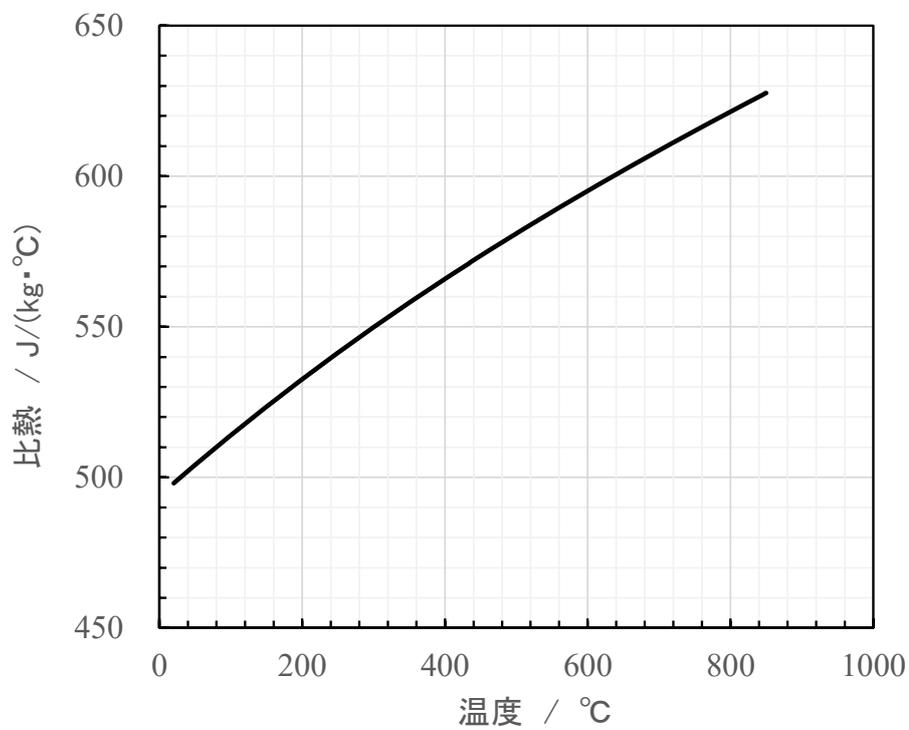


図 A8. 4-1 比熱の温度依存性

5. 熱伝導度

(1) 適用範囲

室温～850℃

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 策定方法と結果

熱伝導度は、日本機械学会高速炉規格値[1]にないため、本検討では ASME 規格値を用いた。オーステナイトステンレス鋼の熱伝導度は、70°F (21.1℃) から 1500°F (815.6℃) の温度範囲で 2021 年版の ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary) (以下、2021 ASME BPVC. II. D.C. と呼ぶ) [2]に示されている。ここで示される Material Group K の熱伝導度 (TC) の値を最小自乗法により、温度の一次式でフィッティングすることで次式を得た。

$$TC [W/(m \cdot ^\circ C)] = 13.989 + 1.4218 \times 10^{-2} \times T$$

ここで、T は温度[℃]である。上式を用いて 20～850℃における熱伝導度 (TC) を算出した。上記の方法で求めた熱伝導度を表 A8.5-1 及び図 A8.5-1 に示す。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2020 年版) <第Ⅱ編 高速炉規格>, JSME S NC2-2020.
- [2] 2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary) .

表 A8.5-1 熱伝導度

温度 [°C]	熱伝導度 [W/ (m・°C)]
20	14.3
50	14.7
75	15.1
100	15.4
125	15.8
150	16.1
175	16.5
200	16.8
225	17.2
250	17.5
275	17.9
300	18.3
325	18.6
350	19.0
375	19.3
400	19.7
425	20.0
450	20.4
475	20.7
500	21.1
525	21.5
550	21.8
575	22.2
600	22.5
625	22.9
650	23.2
675	23.6
700	23.9
725	24.3
750	24.7
775	25.0
800	25.4
825	25.7
850	26.1

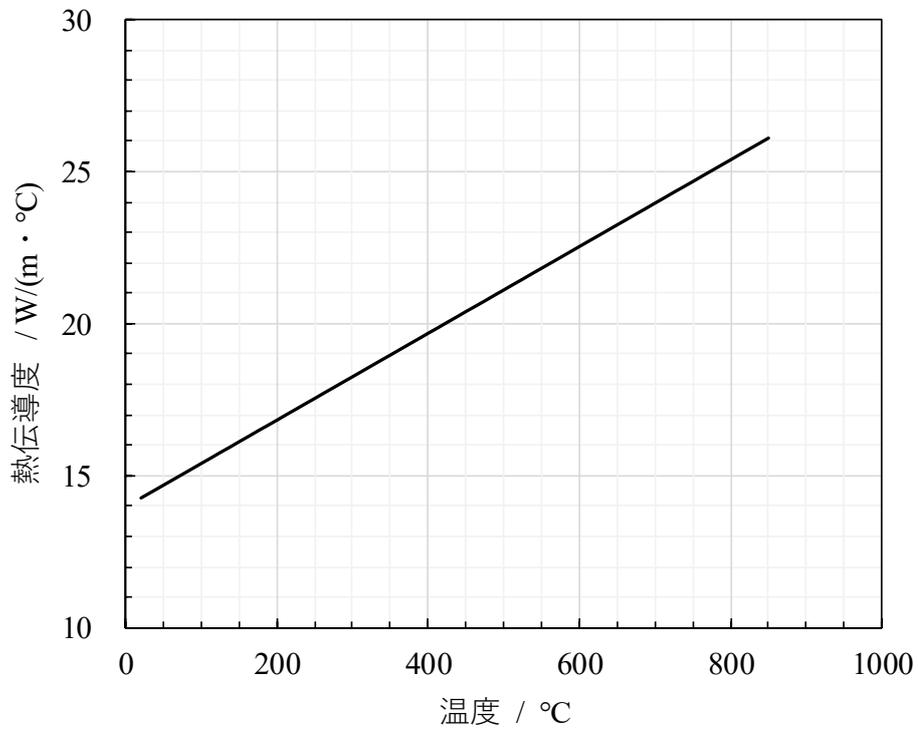


図 A8.5-1 熱伝導度の温度依存性

6. 熱膨張係数

(1) 適用範囲

室温～850℃

20%冷間圧延を施した SUS316 相当鋼を含む SUS316 オーステナイトステンレス鋼に適用可能とする。

(2) 策定方法

室温から 650℃の温度範囲においては、JSME 高速炉規格 2020[1]に SUS316 の熱膨張係数が示されており、これらの値を用いた。

650℃を超える温度での熱膨張係数は JSME 高速炉規格 2020 では示されていないが、2021 ASME BPVC. II. D.C. では、オーステナイトステンレス鋼 (Group 3) について、70 °F (21.1℃) から 1500°F (815.6℃) までの値が示されている。この 2021 ASME BPVC. II. D.C. で示されている 1200 °F (648.9℃) ～1500 °F (815.6℃) における熱膨張係数を最小自乗法を用いて 2 次式でフィッティングを行った結果、次式を得た。

$$\alpha^{in} = -60.033 + 0.23734 \times T - 1.7218 \times 10^{-4} \times T^2$$

$$\alpha^{se} = 12.981 + 1.4747 \times 10^{-2} \times T - 8.3314 \times 10^{-6} \times T^2$$

ここで、 α^{in} 及び α^{se} は、それぞれ瞬間熱膨張係数 [$\times 10^{-6}$ mm/mm/℃] 及び平均熱膨張係数 [$\times 10^{-6}$ mm/mm/℃] である。上式に 700℃、750℃、800℃及び 850℃をそれぞれ代入し、650℃を超える温度での熱膨張係数を求めた。

上記の方法で求めた熱膨張係数を表 A8. 6-1 に示す。図 A8. 6-1 に JSME 高速炉規格 2020 及び 2021 ASME BPVC. II. D.C. との比較を示す。

参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2020 年版) <第 II 編 高速炉規格>, JSME S NC2-2020.
- [2] 2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II - Materials Part D Properties (Customary) .

表 A8. 6-1 熱膨張係数

温度 ℃	瞬間熱膨張係数 ×10 ⁻⁶ mm/mm/℃	平均熱膨張係数 ×10 ⁻⁶ mm/mm/℃
20	15.3	15.3
50	15.9	15.6
75	16.5	15.9
100	16.9	16.1
125	17.4	16.4
150	17.7	16.6
175	18.1	16.8
200	18.3	17.0
225	18.6	17.2
250	18.8	17.4
275	18.9	17.5
300	19.1	17.6
325	19.2	17.8
350	19.3	17.9
375	19.4	18.0
400	19.5	18.1
425	19.7	18.2
450	19.8	18.3
475	20.0	18.3
500	20.2	18.4
525	20.5	18.5
550	20.7	18.6
575	21.0	18.7
600	21.2	18.8
625	21.4	18.9
650	21.6	19.0
675	21.7	19.1
700	21.7	19.2
725	21.5	19.3
750	21.1	19.4
775	20.5	19.4
800	19.6	19.4
825	18.6	19.5
850	17.3	19.5

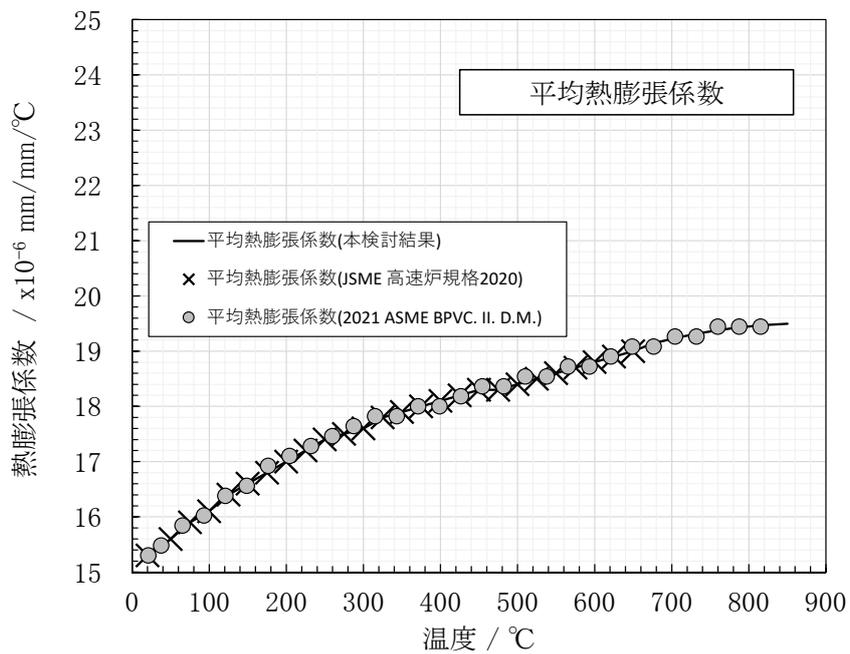
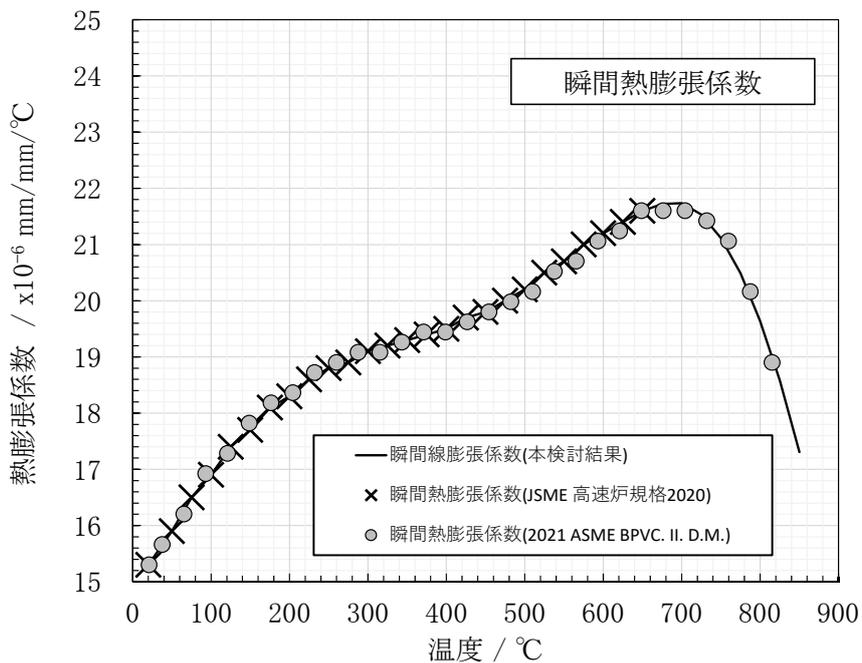


図 A8. 6-1 熱膨張係数

