

ODS フェライト鋼被覆管の 材料強度基準（暫定案）

（研究報告書）

2005年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division ,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

ODSフェライト鋼被覆管の材料強度基準（暫定案）
（研究報告書）

皆藤 威二^{*)}、水田 俊治^{*)}、上羽 智之^{*)}、
大塚 智史^{*)}、鶴飼 重治^{*)}

要 旨

高速炉用燃料被覆管は、高温・高中性子照射環境下で優れた耐スエリング性と高いクリープ強度が要求される。実用化段階の高速炉では、燃料集合体の取出平均燃焼度150GWd/tの達成を目標としており、このときの燃料被覆管のはじき出し損傷量は最大で250dpaに達する。このため、耐スエリング性に優れたフェライト鋼中に酸化物粒子を微細分散して高温強度の改善を図った酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼が最有力候補材として期待されている。核燃料サイクル開発機構（JNC）では、耐照射性を重視した9Cr系を主とし、耐食性を重視した12Cr系をバックアップの位置づけとして、2種類のODSフェライト鋼被覆管の開発を進めてきている。この優れた特性を有するODS鋼被覆管の実用化見通しを判断するためには、原子炉内における燃料ピンとしての挙動を確認することが重要であり、「常陽」MK-III炉心での燃料ピン照射試験を計画し、照射試験に向けた準備を進めている。

本報告書は、製造した ODS フェライト鋼被覆管について、引張試験、内圧クリープ破断試験等の各種強度試験、Na 中試験や「常陽」MK-II 炉心での材料照射試験（～15dpa）の結果に基づく環境効果評価、溶接部の健全性評価を実施し、ODS フェライト鋼被覆管の材料強度基準（暫定案）としてとりまとめたものである。

^{*)} 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

The Tentative Materials Strength Standard of ODS Ferritic Steel Claddings
(Research Report)

Takeji KAITO^{*)}, Shunji MIZUTA^{*)}, Tomoyuki UWABA^{*)},
Satoshi Ohtsuka^{*)} and Shigeharu UKAI^{*)}

Abstract

Superior radiation resistance and high temperature capability are essential properties for the cladding of the advanced fast reactor (FR) fuels because they are used in severe conditions such as high temperature environment around 700 °C and average burn-up of 150 GWd/t which is relevant to a peak neutron dose as high as 250 dpa. Oxide dispersion strengthened (ODS) ferritic steel is noticed as the most prospective candidate cladding material for the advanced FR. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) has developed two types of ODS steel claddings : 9Cr-ODS martensitic steel aiming at especially radiation resistance and 12Cr-ODS ferritic steel aiming at corrosion resistance. In order to confirm and demonstrate the ODS fuel pins integrity to high burnup conditions, fuel pin irradiation test of ODS ferritic steel cladding in FR such as JOYO is in the planning stage.

This report describes the tentative materials strength standard of ODS ferritic steel claddings for designing of FR fuel pins which is based on the evaluation results of the mechanical properties, e.g. tensile strength, internal creep rupture strength, environmental effects and integrity of welded part.

^{*)} Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

目 次

1. 材料強度	1
1.1 設計応力強さ (S_m)	1
1.2 設計降伏点 (S_y) 及び設計引張強さ (S_u)	2
1.3 設計クリープ破断応力強さ (S_R)	3
1.4 許容繰返し数	4
1.5 累積損傷制限値	6
1.6 急速加熱破裂特性	7
2. 溶接部強度	8
2.1 短時間強度 (S_y 、 S_u)	8
2.2 内圧クリープ強度	9
2.3 高サイクル疲労特性	10
3. 応力・ひずみ関係式	12
3.1 短時間応力・ひずみ	12
3.2 熱クリープひずみ	13
3.3 照射クリープひずみ	17
4. 環境効果	19
4.1 短時間塑性ひずみ制限	19
4.2 ボイドスエリング量	20
4.3 ナトリウム腐食量	21
4.4 内面腐食量	21
4.5 強度補正係数	22
5. 材料物性	24
5.1 ヤング率	24
5.2 ポアソン比	24
5.3 平均熱膨張係数	24
5.4 熱伝導度	24
5.5 比熱	25
5.6 密度	25
5.7 変態点	25
6. 材料仕様	26
6.1 製法	26
6.2 成分	26
6.3 最終熱処理	26
7. 参考文献	28

表リスト

表1.1	ODS鋼被覆管の引張試験結果（照射材及び非照射材）	30
表1.2	ODS鋼被覆管及び溶接部の設計応力強さ（ S_m ）	31
表1.3	9Cr-ODS鋼被覆管の降伏点及び引張強さ	32
表1.4	12Cr-ODS鋼被覆管の降伏点及び引張強さ	33
表1.5	9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ	34
表1.6	12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ	35
表1.7	9Cr-ODS鋼の高温低サイクル疲労試験結果	36
表1.8	12Cr-ODS鋼の高温低サイクル疲労試験結果	37
表1.9	試験データのフィッティングにより求めたManson-Coffin平均式の係数	38
表1.10	試験データのフィッティングにより求めたDierck平均式の係数	38
表1.11	ODS鋼被覆管の急速加熱破裂試験結果	39
表2.1	ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果	41
表2.2	ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の内圧バースト試験結果	41
表2.3	ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の内圧クリープ試験結果	42
表2.4	ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果	43
表3.1	ODS鋼被覆管のリング引張試験結果（応力・ひずみ関係式策定用）	44
表3.2	オンライン単軸クリープひずみ試験	45
表3.3	9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試料の外径測定結果	46
表3.4	12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試料の外径測定結果	47
表3.5	MA957照射材の相当ひずみ（オープンチューブ、内圧封入管）	49
表3.6	MA957照射材の照射クリープひずみ	49
表3.7	MA957照射材の単位応力当たりの照射クリープひずみ	50
表4.1	9Cr-ODS鋼被覆管（Mm14）のリング引張試験結果（ひずみ速度依存性）	51
表4.2	Na浸漬材及び熱時効材の引張試験結果	52
表4.3	Ni拡散材及び熱時効材の引張試験結果	53
表4.4	9Cr-ODS鋼の大気中、Ar中及びNa中での内圧クリープ試験結果	54
表4.5	9Cr-ODS鋼の熱時効材及びNi拡散材の内圧クリープ試験結果	55
表6.1	9Cr-ODS鋼被覆管の材料仕様	56
表6.2	12Cr-ODS鋼被覆管の材料仕様	56

図リスト

図1.1	降伏点／引張強さの温度依存性（非照射材）	57
図1.2	降伏点／引張強さの照射量依存性	57
図1.3	ODS鋼被覆管及び溶接部の設計応力強さ（ S_m ）	58
図1.4	9Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点（ S_y ）	59
図1.5	9Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ（ S_u ）	59
図1.6	12Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点（ S_y ）	60
図1.7	12Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ（ S_u ）	60
図1.8	9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ	61
図1.9	9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：650℃）	61
図1.10	9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：700℃）	62
図1.11	9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：750℃）	62
図1.12	12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ	63
図1.13	12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：650℃）	63
図1.14	12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：700℃）	64
図1.15	12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断強さ（ S_R ：750℃）	64
図1.16	疲労破損データとManson-Coffin平均曲線（600℃）	65
図1.17	疲労破損データとManson-Coffin平均曲線（650℃）	65
図1.18	疲労破損データとManson-Coffin平均曲線（700℃）	66
図1.19	疲労破損データとManson-Coffin平均曲線（750℃）	66
図1.20	Dierck平均曲線と疲労破損データ（600℃）	67
図1.21	Dierck平均曲線と疲労破損データ（650℃）	67
図1.22	Dierck平均曲線と疲労破損データ（700℃）	68
図1.23	Dierck平均曲線と疲労破損データ（750℃）	68
図1.24	Nf-1/20下限曲線，ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ（600℃）	69
図1.25	Nf-1/20下限曲線，ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ（650℃）	69
図1.26	Nf-1/20下限曲線，ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ（700℃）	70
図1.27	Nf-1/20下限曲線，ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ（750℃）	70
図1.28	各温度の平均疲労破損ひずみ曲線	71
図1.29	各温度の許容ひずみ範囲	71
図1.30	ODS鋼とMod.9Cr-1Mo鋼の各温度の平均疲労破損ひずみ曲線の比較	72
図1.31	ODS鋼とMod.9Cr-1Mo鋼の各温度の許容ひずみ範囲の比較	72
図1.32	ODS鋼被覆管の急速加熱破裂試験結果	73
図2.1	ODS鋼被覆管・端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果（M11）	74
図2.2	ODS鋼被覆管・端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果（Mm13）	74
図2.3	ODS鋼被覆管・端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果（F11）	75
図2.4	ODS鋼被覆管・端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果（F13）	75
図2.5	ODS鋼被覆管・端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果（M11、700℃）	76

図2.6	ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (Mm13、700℃)	76
図2.7	ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (Mm13、750℃)	77
図2.8	ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (F13、700℃)	77
図2.9	ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (F13、750℃)	78
図2.10	9Cr-ODS鋼被覆管の単軸クリープ破断試験結果 (M11、700℃)	78
図2.11	ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果 (700℃)	79
図2.12	ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果 (400℃)	79
図3.1	パラメータkの温度依存性 (9Cr-ODS鋼)	80
図3.2	パラメータmの温度依存性 (9Cr-ODS鋼)	80
図3.3	パラメータkの温度依存性 (12Cr-ODS鋼)	81
図3.4	パラメータmの温度依存性 (12Cr-ODS鋼)	81
図3.5	データ再現性の確認 (9Cr-ODS鋼)	82
図3.6	データ再現性の確認 (12Cr-ODS鋼)	82
図3.7	応力・ひずみ曲線 (9Cr-ODS鋼)	83
図3.8	応力・ひずみ曲線 (12Cr-ODS鋼)	83
図3.9	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (650℃)	84
図3.10	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (700℃)	84
図3.11	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (750℃)	85
図3.12	オンライン単軸クリープひずみ試験片の形状	85
図3.13	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の内圧クリープひずみ試験 (800℃)	86
図3.14	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の内圧クリープひずみ試験 (850℃)	86
図3.15	9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の単軸クリープ破断および内圧クリープ破断試験結果	87
図3.16	単軸クリープひずみ試験における1次クリープ係数の応力依存性	87
図3.17	単軸クリープひずみ試験における2次クリープひずみ速度の応力依存性	88
図3.18	1次クリープひずみの応力依存係数 (nt) の算出	88
図3.19	1次クリープひずみの温度依存係数の算出	89
図3.20	2次クリープひずみ速度の応力依存係数 (ns) の策定	89
図3.21	2次クリープひずみ速度の温度依存係数の算出	90
図3.22	時間係数 γ の算出例 (650℃)	90
図3.23	単軸クリープひずみ実測値と評価値の比較 (650℃)	91
図3.24	単軸クリープひずみ実測値と評価値の比較 (700℃)	91
図3.25	内圧クリープひずみ実測値と評価値の比較 (800℃)	92
図3.26	内圧クリープひずみ実測値と評価値の比較 (850℃)	92
図3.27	内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (650℃)	93
図3.28	内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (700℃)	93
図3.29	内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (750℃)	94
図3.30	9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較	94
図3.31	MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (~400℃)	95
図3.32	MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (~500℃)	95

図3.33	MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (～550℃)	96
図3.34	MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (～605℃)	96
図3.35	照射クリープ係数 (B_0) の照射温度依存性	97
図3.36	照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 26\text{MPa}$)	97
図3.37	照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 52\text{MPa}$)	98
図3.38	照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 87\text{MPa}$)	98
図3.39	照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 121\text{MPa}$)	99
図4.1	ODS鋼被覆管の一樣伸びの照射量依存性	100
図4.2	ODS鋼の一樣伸び (非照射材) とPNC316の短時間塑性ひずみ制限値の比較	100
図4.3	9Cr-ODS鋼 (Mm14) の一樣伸びのひずみ速度依存性	101
図4.4	スエリング式の計算結果	102
図4.5	スエリング式計算値と実測値の比較	103
図4.6	ODS鋼のNa腐食 (外面腐食量)	104
図4.7	ODS鋼のFCCI (内面腐食量)	104
図4.8	12Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と0.2%耐力との関係	105
図4.9	12Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と引張強さとの関係	105
図4.10	9Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と0.2%耐力との関係	106
図4.11	9Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と引張強さとの関係	106
図4.12	熱時効及びNa浸漬後の受入材との0.2%耐力の比	107
図4.13	熱時効及びNa浸漬後の受入材との引張強さの比	107
図4.14	Ni拡散材の0.2%耐力とNi拡散深さとの関係	108
図4.15	Ni拡散材の引張強さとNi拡散深さとの関係	108
図4.16	σ_y / σ_{ynom} のLMPによる最適近似 (9Cr-ODS鋼)	109
図4.17	σ_u / σ_{unom} のLMPによる最適近似 (9Cr-ODS鋼)	109
図4.18	Na浸漬材の0.2%耐力と S_y^* との比較	110
図4.19	Na浸漬材の引張強さと S_u^* との比較	110
図4.20	Na中クリープ破断データと大気中及びArガス中クリープ破断データとの比較 (650℃)	111
図4.21	Na中クリープ破断データと大気中及びArガス中クリープ破断データとの比較 (700℃)	111
図4.22	クリープひずみによる破断時間の推定 (650℃、Ni拡散深さ100 μm)	112
図4.23	クリープひずみによる破断時間の推定 (700℃、Ni拡散深さ50 μm)	112
図4.24	クリープひずみによる破断時間の推定 (700℃、Ni拡散深さ100 μm)	113
図4.25	Na腐食代を考慮した周応力と破断予想時間との関係	113
図4.26	PNC-FMS鋼の炉内データと大気中ノミナル強度との比較	114
図5.1	ODS鋼のヤング率	115
図5.2	ODS鋼のポアソン比	115
図5.3	ODS鋼の平均熱膨張係数	116
図5.4	ODS鋼の熱伝導度	116
図5.5	ODS鋼の比熱	117
図5.6	ODS鋼の密度	117

1. 材料強度

1.1 設計応力強さ (S_m)

SUS316 20%冷間加工材 (PNC316) に対する現行の設計応力強さ (S_m) には次式が用いられている^[1]。

$$S_m = \min \{ 1/2S_{u RT}, 3/4S_{y RT}, 1/2S_{u HT}, 3/4S_{y HT} \}$$

$S_{u RT}$: 室温での設計引張強さ

$S_{y RT}$: 室温での設計降伏点

$S_{u HT}$: 当該温度における設計引張強さ

$S_{y HT}$: 当該温度における設計降伏点

この S_m は、一次応力による燃料ピンの引張破断を防止するために、引張強さに対して十分な余裕を持って一次応力を制限するものであり、これらの安全係数は、材料の加工硬化特性を考慮して決定される。加工硬化特性に優れている場合は、降伏点から引張強さまでの余裕が大きくなるので、 S_y に対する安全係数を大きく設定することができる。 S_u に対する安全係数は、環境効果によって降伏点から引張強さまでの余裕が少なくなった場合においても、 S_m が引張強さに対して一定の裕度を確保して応力を制限できるように設定している。従って、ODS鋼の S_m を検討するにあたっては、降伏点／引張強さの比が重要である。図1.1は、非照射の場合の、ODS鋼被覆管の降伏点／引張強さの比についてPNC316との比較を示すが、室温から600℃まではこの強度比はPNC316と同程度であるが、600℃以上になるとPNC316よりも低くなる。これより、ODS鋼の加工硬化特性はPNC316と同等以上であることが分かる。

次に、照射材について評価を行う。図1.2は降伏点／引張強さの比の照射量依存性を、ODS鋼とPNC316で比較したものである。この図に用いた評価データを表1.1に示す^[2]。ODS鋼の場合、照射量が低いレベルでは、照射による加工硬化性能の低下はなく、PNC316と同等以上の加工硬化性能を有している。照射が更に進んだ場合については、今後実施する照射試験データによって評価する計画である。

以上のことから、ODS鋼被覆管の S_m については、暫定的にPNC316の S_m と同じ安全係数を適用する。また、端栓溶接部についても、管部と同様の安全係数を当面用いることとするが、溶接部においても延性が確保されていることを、今後確認していく計画である。

$$S_m = \min \{ 1/2S_{u RT}, 3/4S_{y RT}, 1/2S_{u HT}, 3/4S_{y HT} \}$$

$S_{u RT}$: 室温での設計引張強さ (被覆管または端栓溶接部)

$S_{y RT}$: 室温での設計降伏点 (被覆管または端栓溶接部)

$S_{u HT}$: 当該温度における設計引張強さ (被覆管または端栓溶接部)

$S_{y HT}$: 当該温度における設計降伏点 (被覆管または端栓溶接部)

ODS鋼の管部及び端栓溶接部の S_m を、表1.2及び図1.3に示す。

1.2 設計降伏点 (S_y) 及び設計引張強さ (S_u)

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (Mm11, M11) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (F11), 平成14年度材 (F14) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

② データ範囲

試験温度 : 室温～900℃ (F14は室温～800℃)

(2) 試験方法

上記供試材よりリング状の試料 (平行部2mm^L) を採取し、JIS 2241に準拠して引張速度0.5%/minでリング引張試験を行った。

(3) 結果

① 9Cr-ODS鋼

Mm11, M11の降伏点及び引張強さを表1.3に示す。これまでに得られた知見から、Ex.O (過剰酸素 : 鋼中に含まれる全酸素のうちYと結合していない酸素) を制御するとともにTiを増量することでMm11相当の強度は確保できる見通しである。このことから、Mm11をノミナル強度として強度式を作成することとした。

・ 設計降伏点 (S_y)

上記の考え方に基づき、Mm11の降伏点のデータを温度T (°C) の4次式で回帰して求めたものを降伏点の平均式 σ_y (MPa) とし、この平均式に対するデータの99.9%信頼下限を設計降伏点 S_y (MPa) とした。ただし、作成にあたっては以下の2点を考慮した。

- ・ 室温のデータについては保守側にM11に置き換える。
- ・ 100℃におけるMm11のデータが200℃のそれよりも低いことから使用しない。

このようにして作成した9Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点 (S_y) を以下に示すとともに、図1.4に示す。

$$\sigma_y = 1067 - 1.910T + 7.818 \times 10^{-3}T^2 - 1.576 \times 10^{-5}T^3 + 9.066 \times 10^{-9}T^4$$

$$S_y = 977.0 - 1.910T + 7.818 \times 10^{-3}T^2 - 1.576 \times 10^{-5}T^3 + 9.066 \times 10^{-9}T^4 \quad (3\sigma = 90.0)$$

・ 設計引張強さ (S_u)

同様に、Mm11の引張強さのデータを温度T (°C) の4次式で回帰して求めたものを引張強さの平均式 σ_u (MPa) とし、この平均式に対するデータの99.9%信頼下限を設計引張強さ S_u (MPa) とした。ただし、Mm11の引張強さのデータのバラツキが小さい ($3\sigma = 52.7$) ことから、保守側に降伏点と同等のバラツキ ($3\sigma = 90.0$) を用いることとした。

このようにして作成した9Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ (S_u) を以下に示すとともに、図1.5に示す。

$$\sigma_u = 1215 - 1.307T + 4.468 \times 10^{-3}T^2 - 1.036 \times 10^{-5}T^3 + 6.201 \times 10^{-9}T^4$$

$$S_u = 1125 - 1.307T + 4.468 \times 10^{-3}T^2 - 1.036 \times 10^{-5}T^3 + 6.201 \times 10^{-9}T^4 \quad (3\sigma = 90.0)$$

② 12Cr-ODS鋼

F11, F14の降伏点及び引張強さを表1.4に示す。12Cr系では最終熱処理時の再結晶の程度による

強度のバラツキがみられることから、ノミナル強度としてはF11のデータをベースとするが、バラツキを評価する際にはF14のデータも考慮して強度式を作成することとした。なお、F13も同等の強度を有しているが、非再結晶材であることから強度式作成には使用しないこととした。

・設計降伏点 (S_y)

上記の考え方に基づき、F11の降伏点のデータを温度T (°C) の4次式で回帰して求めたものを降伏点の平均式 σ_y (MPa) とし、この平均式に対するF11及びF14のデータの99.9%信頼下限を設計降伏点 S_y (MPa) とした。

このようにして作成した12Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点 (S_y) を以下に示すとともに、図1.6に示す。

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 918.8 - 1.497T + 6.325 \times 10^{-3}T^2 - 1.366 \times 10^{-5}T^3 + 8.218 \times 10^{-9}T^4 \\ S_y &= 828.8 - 1.497T + 6.325 \times 10^{-3}T^2 - 1.366 \times 10^{-5}T^3 + 8.218 \times 10^{-9}T^4 \quad (3\sigma = 90.0)\end{aligned}$$

・設計引張強さ (S_u)

同様に、F11の引張強さのデータを温度T (°C) の4次式で回帰して求めたものを引張強さの平均式 σ_u (MPa) とし、この平均式に対するF11及びF14のデータの99.9%信頼下限を設計降伏点 S_u (MPa) とした。

このようにして作成した12Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ (S_u) を以下に示すとともに、図1.7に示す。

$$\begin{aligned}\sigma_u &= 1033 - 1.053T + 3.990 \times 10^{-3}T^2 - 1.012 \times 10^{-5}T^3 + 6.437 \times 10^{-9}T^4 \\ S_u &= 913.0 - 1.053T + 3.990 \times 10^{-3}T^2 - 1.012 \times 10^{-5}T^3 + 6.437 \times 10^{-9}T^4 \quad (3\sigma = 120)\end{aligned}$$

1.3 設計クリープ破断応力強さ (S_R)

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (Mm11, M11) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (F11), 平成14年度材 (F14) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

② データ範囲

試験温度 : 650, 700, 750°C

周応力 : 90~290MPa

破断時間 : ~10233.4hr

(2) 試験方法

上記供試材より管状の試料を採取し、所定の試験温度及び応力で内圧クリープ破断試験 (圧力導入型) を行った。

(3) 結果

① 9Cr-ODS鋼

Mm11, M11の内圧クリープ破断強さを表1.5に示す。設計降伏点及び設計引張強さと同じ考え方に基づき、Mm11をノミナル強度として強度式を作成することとした。しかし、Mm11の内圧クリープ破断強さのデータは700°Cの4点のみであることから、M11とMm11は絶対強度は異なるものの

それ以外は同等の特性を有しているものと判断して強度式を作成した。

具体的には、M11の平均式の材料定数 ($C=21.94$) と応力依存性 (ラーソン・ミラー・パラメータ (LMP : Larson-Miller Parameter)) を用いて算出した周応力 σ_H (MPa) の1次式の傾き = 9.943) をそのまま用い、切片を変えることによりMm11の平均式とした。この結果を以下に示すとともに、データとあわせて図1.8に示す。ここで、Tは温度 (°C)、 t_R は破断時間 (hr) である。

$$LMP = (T + 273.15) (21.94 + \log t_R) / 1000 = 45.37 - 9.943 \log \sigma_H$$

これに、各データの試験温度、周応力を代入して破断時間を計算し、実際の破断時間との比を求めた。この値よりも控えめな値の逆数を時間係数とし、設計クリーブ破断応力強さ S_R (MPa) とした。この結果を以下に示すとともに、図1.9~1.11に示す。

$$LMP = (T + 273.15) \{21.94 + \log (3 \cdot t_R)\} / 1000 = 45.37 - 9.943 \log S_R$$

②12Cr-ODS鋼

F11, F14の内圧クリーブ破断強さを表1.6に示す。ここでは、F11、F14のデータをまとめて強度式を作成することとした。また、設計降伏点及び設計引張強さと同様にF13のデータは使用しないこととした。

これらのデータをLMPを用いて周応力 σ_H (MPa) の1次式で整理した結果を以下に示すとともに、データとあわせて図1.12に示す。ここで、Tは温度 (°C)、 t_R は破断時間 (hr) である。

$$LMP = (T + 273.15) (37.47 + \log t_R) / 1000 = 60.74 - 9.839 \log \sigma_H$$

これに、各データの試験温度、周応力を代入して破断時間を計算し、実際の破断時間との比を求めた。この値よりも控えめな値の逆数を時間係数とし、設計クリーブ破断応力強さ S_R (MPa) とした。この結果を以下に示すとともに、図1.13~1.15に示す。

$$LMP = (T + 273.15) \{37.47 + \log (7 \cdot t_R)\} / 1000 = 60.74 - 9.839 \log S_R$$

1.4 許容繰返し数

(1) データベース

①供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成14年度材 (Mm14) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成14年度材 (F14) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

②データ範囲

試験温度 : 600, 650, 700, 750°C

ひずみ : 1.5, 1.0, 0.6, 0.4, 0.5%

(2) 試験方法

JIS Z 2279に準拠し、両振引張圧縮荷重を用いて、下記要領でデータ取得を行った。

- ・試験片寸法 : 平行部直径5mm×平行部長さ12mm
- ・平行部表面 : #600仕上げ
- ・試験機 : 島津サーボパルサー EHF-ED10-20L
- ・試験温度 : 600, 650, 700, 750°C
- ・ひずみ範囲 : 1.5, 1.0, 0.6, 0.4または0.5%

- ・ ひずみ速度：0.1%/sec
- ・ 試験雰囲気：大気

(3) 結果

表1.7と表1.8に示す試験結果を基に平均疲労破損式の策定を行った。代表的な平均疲労破損式の求め方として、Manson-Coffin則に基づく方法とDierckにより行われた汎用回帰解析法がある^[3]。Manson-Coffin型の場合には、比較的少ないデータでも定式化できるが、温度とひずみ速度依存性の記述が困難である欠点がある。一方、Dierckによる汎用解析法を用いる場合には、温度とひずみ速度依存性を記述するのに適しているが、パラメータが多いため、定式化には多くのデータが必要である。今回は限られたデータの中で、温度とひずみ速度依存性を記述する平均式を策定するため、以下のステップで定式化を試みた。

- ・ Manson-Coffin法に基づき各温度で試験データのフィッティングを行い、試験データとの整合性の良い平均曲線を作成する。さらに、各温度の平均曲線から、繰返し数 $10^2 \sim 10^6$ サイクルの範囲で100サイクルごとの全ひずみデータを読み取る。
- ・ 読み取った（繰返し数、全ひずみ範囲）の値を擬似的に試験データとみなし、Dierckによる汎用解析法を用いて、温度とひずみ速度依存性を記述する平均式を定式化する。

①Manson-Coffin法に基づく各温度での平均曲線の策定

Manson-Coffin法に基づく、全ひずみ幅（ $\Delta \varepsilon_t$ ）と破損サイクル数（Nf）の関係は次式のように表せる^[4]。

$$\Delta \varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (1.4.1)$$

$$\varepsilon_e = C_e \cdot N_f^{\alpha_e} \quad (1.4.2)$$

$$\varepsilon_p = C_p \cdot N_f^{\alpha_p} \quad (1.4.3)$$

- $\Delta \varepsilon_t$: 全ひずみ範囲 (%)
- ε_e : 弾性ひずみ範囲 (%)
- ε_p : 非弾性ひずみ範囲 (%)
- Nf : 破損繰返し数 (サイクル)
- C_e, C_p : 温度とひずみ速度の関数
- A_e, α_p : 定数

表1.7と表1.8に示す試験データと材料強度・構造信頼性評価システム”MSS-REAL”^[5]を用いて、Manson-Coffin法に基づく平均曲線を求めた。表1.9に算出した係数を図1.16～1.19に試験データと平均曲線をまとめる。本方法により求めた平均曲線は実験データと良く整合していることがわかる。

これら各温度（600, 650, 700, 750℃）の平均曲線から、破損繰返し数（Nf） $10^2 \sim 10^6$ サイクルの範囲で100サイクルごとに読み取った値を以下のDierckによる汎用解析法を用いた回帰曲線の策定に用いる。

②Dierckによる汎用解析法を用いた平均式の策定

①で求めた擬似的試験データを用いて、Dierckによる汎用解析法により、温度とひずみ速度依存性を記述する平均式を策定する。本汎用解析法では、平均疲労破損式を次式で表す^[3]。

$$(\log_{10} N_f)^{-1/2} = A_0 + A_1 \cdot S + A_2 \cdot S^2 + A_3 \cdot S^3 + A_4 \cdot S^4 + F(S, R, T) \quad (1.4.4)$$

$$F(S, R, T) = A_5 \cdot (T/100)^a \cdot R^b + A_6 \cdot S^c \cdot R^d + A_7 \cdot S^e \cdot (T/100)^f \quad (1.4.5)$$

$$S = \log_{10} \Delta \varepsilon_t \quad (1.4.6)$$

$A_0 \sim A_4$: 定数

R : ひずみ速度 (%/sec)

T : 試験温度 (°C)

$a \sim f$: 0~5の整数

”MSS-REAL”^[5]を用いて上式のフィッティングを行い、最も標準偏差が小さく相関係数の良好な係数を選択した(表1.10参照)。この係数を用いて算出した各温度の疲労平均曲線と試験データを図1.20~1.23に示す。各温度での平均曲線は試験データと良く一致しており、式(1.4.4)~(1.4.6)及び表1.10はODS鋼の平均疲労破損式として妥当である。また、併せてプロットしたMod.9Cr-1Mo鋼の平均曲線と比べると、ODS鋼の場合は高サイクル側での曲線の傾きの低下が顕著である。

上述の方法で求めた平均疲労破損式を基に下限式の策定を行う。「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準」^[3]における許容ひずみ範囲(A)は、以下の方法により求められている。

- ・平均疲労破損曲線に対し、(a) ひずみ範囲で1/2、(b) 繰返し数で1/20の係数を乗じた値のいずれか小さい方の値を仮の許容ひずみ範囲(A)とする。
- ・仮の許容ひずみ範囲(A)の値を用いて、②で行った方法で求めた回帰曲線を許容ひずみ範囲(A)とする。

図1.24~1.27に各温度での平均疲労破損曲線の(a) ひずみ範囲を1/2とした下限曲線(ひずみ1/2下限)及び(b) 破損繰返し数を1/20にした下限曲線(Nf-1/20下限)の評価結果を試験データとともに示す。いずれの下限曲線も実験データを包絡している。本強度基準では、ひずみ1/2下限曲線及びNf-1/20下限のうち小さい方の値を疲労破損下限とする。

平均疲労破損曲線及び許容ひずみ範囲をそれぞれ図1.28、図1.29に示す。ODS鋼とMod.9Cr-1Mo鋼の平均疲労破損曲線と許容ひずみ範囲をそれぞれ図1.30と図1.31に示す。

なお、今回の策定式は棒材のデータを基に策定したものであるため、許容ひずみ範囲は平均式に比べて十分裕度のある式を設定した。

1.5 累積損傷制限値

累積損傷制限値Dは、ASME Code Case N-47と同様に累積クリープ損傷(Dc)と累積疲労損傷(Df)の代数和により次式により制限する。

$$D_c + D_f \leq D$$

$$D_c = \int_0^t \frac{dt}{T_d}$$

$$D_f = \sum_i \frac{n_i}{N_{di}}$$

T_d : 許容時間

t : 継続時間

N_i : ひずみサイクルの繰返し数

N_{di} : 許容繰返し数

1.6 急速加熱破裂特性

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成9年度材 (M93), 平成11年度材 (M11) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成元年度材 (1DS), 平成9年度材 (F95) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

② データ範囲

照射量 (1DSのみ) : 0.3~3×10²⁶n/m² (E>0.1MeV)

(2) 試験方法

上記供試材から急速加熱破裂試験片を作成し、加熱速度5°C/sec、設定周応力50~200MPaの範囲で急速加熱破裂試験を実施した。試験データを表1.11に示す。

(3) 結果

図1.32に、ODS鋼とPNC316の急速加熱破裂試験の結果を比較する。非照射材同士で比較すると、運転中の被覆管周応力レベルの100MPa前後でODS鋼はPNC316よりも破裂温度は50~100°C高くなっている。次に、ODS鋼の照射材と非照射材を比較すると、照射材の照射量は0.3~3×10²⁶n/m² (E>0.1MeV) と低いですが、この範囲では照射による破裂温度の有意な低下は見られない。

オーステナイト鋼の急速加熱破裂試験では、加熱中に照射組織が回復するため、破裂温度に及ぼす照射の影響は顕著ではないと考えられており、20×10²⁶n/m² (E>0.1MeV) を超えるレベルまで照射したPNC316被覆管では、燃料ピンとして使用する場合の内圧による周応力の使用範囲 (~150MPa) において、その破裂温度は非照射材の破裂温度からほとんど低下していない。

ODS鋼の場合も、オーステナイト鋼と同様の理由で、照射量が高くなっても破裂温度の低下は少ないと考えられ、これを確認するための高照射量のODS鋼の急速加熱破裂試験データは、「常陽」材料照射試験によって取得する計画である。

以上のことから、照射試験中のODS鋼被覆管の最高温度については、暫定的に以下のPNC316の照射済被覆管の最高温度によって制限することとする。この制限値は、5°C/secの温度上昇率での急速加熱破裂試験におけるPNC316の破裂温度下限値一周応力曲線^[6]である (図1.32に破線で示す)。なお、急速加熱後の再使用の観点から、9Cr-ODS鋼についてはAc₁点 (884°C) を考慮するのが望ましいため、下記の式とAc₁点の低い方を用いるものとする。

$$\sigma = 6.2818 \times 10^{-4} T^2 - 1.694 T + 1126.1$$

σ : 周応力 (MPa)、 T : 被覆管最高温度 (°C)

2. 溶接部強度

2.1 短時間強度 (S_y , S_u)

9Cr-ODS鋼では、溶接後の処理を適切に行えば、溶接部の硬さは確保され、溶接部の短時間強度は被覆管のリング引張強度と同等以上になることから、9Cr-ODS鋼については溶接部の短時間強度を被覆管と同じ強度とする。

一方、12Cr-ODS鋼では、溶接部の硬さが低下した場合、被覆管の強度より低くなる可能性があるが、接合部の硬さと接合長さを確保することによって、接合の短時間強度を被覆管と同等にできる見通しである。また、以下に述べるように、引張試験では管部で破断したことから、暫定的に被覆管と同じ強度に設定する。

(1) データベース

①供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (M11), 平成13年度材 (Mm13) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (F11), 平成13年度材 (F13) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

②データ範囲

試験温度 : 室温～800℃

(2) 試験方法

①軸方向引張試験 (M11, Mm13, F11, F13)

上記供試材から被覆管と端栓を加圧抵抗溶接 (PRW : Pressurized Resistance Welding) 法により接合した軸方向引張試験用試験片を作製し、引張速度0.5mm/minで、軸方向引張試験を行った。試験データを表2.1に示す。

②内圧バースト試験 (M11, F11)

上記供試材から被覆管と端栓を抵抗溶接した内圧バースト試験用試験片を作成し、昇圧速度 : 20MPa/minで内圧バースト試験を実施した。試験データを表2.2に示す。

(3) 結果

引張試験の破断位置は管部であり、溶接部の軸方向引張り強度は管部のリング引張強度と同等以上となった。図2.1～2.4は、この軸方向引張試験結果を管のリング引張強度曲線 (ノミナル値) と比較したものである。試験の結果は全て管部破断になったことから、図中のプロットは溶接試験片における被覆管の軸方向引張強度を示しているが、リング引張試験の強度に近い値になっている。また、内圧バースト試験も全て管部破断する結果となった。これらの結果から、溶接部の短時間強度は被覆管と同等以上の強度を確保しているといえる。

以上から、ODS鋼被覆管の溶接部の短時間強度は、被覆管のリング引張試験で得られた強度と同じ強度に設定する。

①9Cr-ODS鋼

設計引張強さ (室温 $\leq T \leq 800^\circ\text{C}$)

$$S_u = 1125 - 1.307T ; 4.468 \times 10^{-3}T^2 - 1.036 \times 10^{-5}T^3 ; 6.201 \times 10^{-9}T^4$$

設計降伏点 (室温 $\leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$)

$$S_y = 977 - 1.910T + 7.818 \times 10^{-3}T^2 - 1.576 \times 10^{-5}T^3 + 9.066 \times 10^{-9}T^4$$

②12Cr-ODS鋼

設計引張強さ (室温 $\leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$)

$$S_u = 913.0 - 1.053T + 3.990 \times 10^{-3}T^2 - 1.012 \times 10^{-5}T^3 + 6.437 \times 10^{-9}T^4$$

設計降伏点 (室温 $\leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$)

$$S_y = 828.8 - 1.497T + 6.325 \times 10^{-3}T^2 - 1.366 \times 10^{-5}T^3 + 8.218 \times 10^{-9}T^4$$

2.2 内圧クリープ強度

(1) データベース

①供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (M11), 平成13年度材 (Mm13) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成13年度材 (F13) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

②データ範囲

試験温度 : 700, 750 $^{\circ}\text{C}$

応力範囲 : 80~170MPa

試験雰囲気 : 大気 (封入ガスはAr)

(2) 試験方法

上記供試材より内圧クリープ破断試験用の抵抗溶接試験片を作成し、内圧クリープ破断試験を行った。試験データを表2.3に示す。

(3) 結果

図2.5~図2.9は、抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果を、ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断曲線と比較したものである。ここで、溶接試験片における周応力は管部に加わる周応力を示している。試験の結果、図2.9に示す試験温度750 $^{\circ}\text{C}$ のF13では、管部と溶接部に亀裂が生じたが、これ以外には管部からの破断であった。ただし、溶接部に亀裂が生じたF13の750 $^{\circ}\text{C}$ の内圧クリープ破断試験では、破断時間は被覆管のノミナル破断曲線から予測される破断時間と一致していた。内圧に対して溶接部に加わる応力は、以下のような考察から管部のおよそ半分になることを考慮し、溶接部の破断予想時間が管部と同等になるように、溶接部の内圧クリープ強度として管の強度の1/2に設定する。

燃料ピンの上部端栓溶接部に加わる応力は、FPガスの内圧によるものが主体となる。ここで、内圧による管の周応力を σ_H 、軸方向応力を σ_Z 、溶接部の周応力を σ_{WH} 、軸方向応力を σ_{WZ} とおくと、 σ_{WZ} は σ_Z と等しくなるが、 σ_{WH} は周方向ひずみが端栓との溶接によって拘束されることから、 σ_{WZ} にポアソン比(ν)を乗じた値となる。管部に対して、薄肉円筒管近似を適用すると、 σ_Z は σ_H の半分になることから、 σ_{WH} と σ_{WZ} は σ_H を用いて以下のように計算される。

$$\sigma_{WH} = \nu \sigma_H / 2$$

$$\sigma_{WZ} = \sigma_H / 2$$

ここで、管部の相当応力を σ_{eq} 、溶接部の周応力を σ_{Weq} とおくと、

$$\sigma_{eq} = [\{(\sigma_H - \sigma_R)^2 + (\sigma_R - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_H)^2\} / 2]^{0.5}$$

$$\sigma_{Weq} = [\{(\sigma_{WH} - \sigma_{WR})^2 + (\sigma_{WR} - \sigma_{WZ})^2 + (\sigma_{WZ} - \sigma_{WH})^2\} / 2]^{0.5}$$

$\sigma_R = \sigma_{WR} = 0$ より、

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3/2} \sigma_H$$

$$\sigma_{Weq} = \{(\nu^2 - \nu + 1)^{0.5} / 2\} \sigma_H$$

通常、 ν は0.3程度になることから、 $\sigma_{weq} \approx 0.44 \sigma_H$ となり、 $\sigma_{eq} (\approx 0.87 \sigma_H)$ の半分となる。従って、内圧が加わる状態では、溶接部に加わる応力は、軸方向応力が支配的となるため、相当応力は管部の半分になる。

図2.10は、9Cr-ODS鋼被覆管の短軸クリープ破断試験の結果である。この試験では、溶接部で破断が生じたが、強度は被覆管に対して若干下回る程度であるため、合理化できる可能性があることから、今後、溶接部の短軸クリープ破断試験データを拡充し、合理化を検討する予定である。

2.3 高サイクル疲労特性

溶接部の高サイクル疲労特性は、9Cr-ODS鋼についてのみ設定することとし、12Cr-ODS鋼については、今後、回転曲げ疲労試験データを取得し設定する。

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼

- ・被覆管：平成11年度材 (M11) -端栓：平成13年度材 (Mm13) 0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y₂O₃
- ・被覆管：平成13年度材 (Mm13) -端栓：平成14年度材 (MB14) 0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y₂O₃

② データ範囲

試験温度：400, 700℃

(2) 試験方法

回転曲げ疲労試験

上記供試材から被覆管と端栓を抵抗溶接した回転曲げ疲労試験片を作成し、応力振幅：120～372MPa (700℃)、280～350℃ (400℃) に設定し、回転曲げ疲労試験を行った。試験結果を表2.4に示す。

(3) 結果

試験の結果、ほとんどの試験片が溶接部で破断した。図2.11、図2.12に、抵抗溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果を示す。図2.11に示すように、700℃の試験結果では、繰返し数が10⁷サイクルを超えると応力振幅が飽和する傾向が現れた。一方、図2.12に示すように、400℃の試験結果では、繰返し数が10⁷サイクルを超えても、応力振幅が飽和する傾向は現れなかった。

燃料ピンが照射中に受ける高サイクル疲労は流力振動である。ODS鋼燃料ピンの照射試験中に受ける流力振動の繰返し数を10¹⁰～10¹¹サイクルと想定し、回転曲げ疲労試験のデータを次式の溶接継手に対する疲労曲線の式⁷⁾で回帰し10¹¹サイクルまで外挿した。

$$\sigma = CN^k \quad (\sigma : \text{応力振幅 (MPa)}, N : \text{繰返し数 (サイクル)}, C, k : \text{パラメータ})$$

図2.11、図2.12のように、応力振幅と繰返し数を対数プロットすると、繰返し数と応力振幅はほぼ直線関係となることから、上式を用いれば直線近似できるようになる。上式でデータを直線回帰し、パラメータを求め、繰返し数 10^{11} サイクルまで応力振幅を外挿した結果は以下の通りである。

- ・ 400°C : $C=645.26$ 、 $k=-0.043945$ 、 $\sigma=212\text{Mpa}$
- ・ 700°C : $C=1373.2$ 、 $k=-0.13744$ 、 $\sigma=42\text{MPa}$

回転曲げ疲労試験は繰返し数 10^8 サイクルで試験を打ち切った結果、400°Cでは280MPa、700°Cでは120MPaの場合、 10^8 サイクルに達しても破断しなかった。データのバラつきがあるため、疲労限の決定は難しいが、図2.11の700°Cの結果が示すように、一般的に $10^6\sim 10^8$ で疲労曲線が水平になる場合が多いことから、疲労限は280MPa（400°Cの場合）、120MPa（700°Cの場合）に近いレベルにあると考えられる。従って、上式の直線回帰は疲労特性を保守的に外挿していると考えられる。

これより、燃料ピン溶接部の流力振動による応力が、これらの外挿応力を下回っていれば、照射試験における高サイクル疲労に対する健全性を確保できると考えられる。

3. 応力・ひずみ関係式

3.1 短時間応力・ひずみ

(1) データベース

ODS鋼被覆管に対する短時間強度のノミナル値は、9Cr-ODS鋼と12Cr-ODS鋼で、それぞれMm11とF11のリング引張試験結果を用いて策定されていることから、短時間応力・ひずみ関係式の策定においても、これとの整合をとるためデータベースを以下のようにした。

①供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (M11 (室温のみ), Mm11) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (F11) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

②データ範囲

試験温度 : 室温～900℃

(2) 試験方法

上記供試材からリング引張試験片を作製し、引張速度0.5%/secで、リング引張試験を行った。

(3) 結果

引張試験で得られる応力と塑性ひずみの関係は以下のLudwik型の式によって、適切に表現することができる¹⁾。

$$\sigma - \sigma_p = k \varepsilon_p^m$$

σ_p : 比例限度

ε_p : 塑性ひずみ

k, m : 温度依存性を持つパラメータ

上式にリング引張試験によって得られた比例限度、降伏点、引張強さ、一様伸びを代入し、 k と m を求めた。ここで、リング引張試験データは室温から900℃の範囲で、100℃きざみで各温度におけるデータを平均化した値とした。これらの値を表3.1に示す。なお、Mm11では、100℃の強度が極端に低いことから、このデータは除外した。次に、各温度について k と m を算出し、温度の5次式を用いて、これらを最小二乗法で回帰し、以下の式を得た (図3.1～3.4)。

①9Cr-ODS鋼 (室温 $\leq T \leq 900$ ℃)

・ 比例限 σ_p

$$\sigma_p = 999.17 - 2.7630T + 1.3179 \times 10^{-2}T^2 - 2.8464 \times 10^{-5}T^3 + 2.2712 \times 10^{-8}T^4 - 5.4677 \times 10^{-12}T^5$$

・ パラメータ k

$$k = 689.38 + 2.2296T + 4.4620 \times 10^{-3}T^2 - 5.1643 \times 10^{-5}T^3 + 8.4934 \times 10^{-8}T^4 - 4.0713 \times 10^{-11}T^5$$

・ パラメータ m

$$m = 0.36322 - 9.3711 \times 10^{-4}T + 1.0271 \times 10^{-5}T^2 - 3.4315 \times 10^{-8}T^3$$

$$+ 4.3449 \times 10^{-11}T^4 - 1.8341 \times 10^{-14}T^5$$

②12Cr-ODS鋼 (室温 $\leq T \leq 900^\circ\text{C}$)

- ・ 比例限 σ_p

$$\sigma_p = 837.88 - 1.6463T + 6.7538 \times 10^{-3}T^2 - 1.4010 \times 10^{-5}T^3 + 9.2510 \times 10^{-9}T^4 - 9.6944 \times 10^{-13}T^5$$

- ・ パラメータ k

$$k = 394.78 + 2.2300T - 8.2315 \times 10^{-3}T^2 + 8.8061 \times 10^{-6}T^3 - 3.7434 \times 10^{-9}T^4 + 8.7023 \times 10^{-13}T^5$$

- ・ パラメータ m

$$m = 0.24035 + 1.0248 \times 10^{-3}T - 6.2806 \times 10^{-6}T^2 + 1.5453 \times 10^{-8}T^3 - 1.6824 \times 10^{-11}T^4 + 7.0184 \times 10^{-15}T^5$$

T : 温度($^\circ\text{C}$)

これらの式を使って、降伏点、引張強さを評価した結果、図3.5, 3.6に示すように、試験データを適切に再現できていることが確認できた。図3.7, 3.8に各温度における応力と全ひずみの関係式を以下に示す。

$$\varepsilon = \sigma / E + \{ (\sigma - \sigma_p) / k \}^{1/m}$$

ε : 全ひずみ

E : ヤング率

(4) 環境効果について

短時間応力・ひずみ関係式は、非照射材を対象に策定されたものである。照射材については、現状得られている短時間強度データの照射量が $0.5 \sim 3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) と低く、強度と伸びに及ぼす照射の影響は明確に現れていない。そこで、暫定的に「もんじゅ」の材料強度基準に準じ、環境効果を考慮した応力・ひずみ関係式は、 σ_p の代わりに σ_p^* (環境効果を考慮した σ_p) を用い、他の値は変更せずに適用することとする。なお、短時間強度に対する環境効果は、降伏点と引張強さで差が少ないことから、 σ_p に対しては設計降伏点 (S_y) に対する短時間強度補正係数を適用することとする。

3.2 熱クリープひずみ

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (M11, Mm11) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成11年度材 (F11, Fm11), 平成13年度材 (F13) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

② データ範囲

- ・ 単軸クリープ試験(9Cr-ODS鋼)

- 試験温度 : 650°C , 700°C , 750°C

- 単軸応力範囲 : $105 \text{MPa} \sim 265 \text{MPa}$

- 試験時間 : $111 \text{hr} \sim 8819 \text{hr}$

- ・ 内圧クリープ試験

- 試験温度 : 9Cr-ODS鋼 650°C , 700°C , 750°C ,

	12Cr-ODS鋼	800°C, 850°C
- 応力範囲 :	9Cr-ODS鋼	60MPa～220MPa
	12Cr-ODS鋼	95MPa～290MPa
- 試験時間 :	9Cr-ODS鋼	222hr～9788hr
	12Cr-ODS鋼	101hr～10233hr

(2) 試験方法

単軸クリープ試験及び内圧クリープ試験を行った。650°C, 700°C, 750°Cの内圧クリープ試験は圧力導入型で行い、破断後の外径ひずみを測定した。また、800°Cと850°Cの内圧クリープ試験は内圧封入型で行い、200時間ごとに外径ひずみの評価を行った。外径変化量の測定は試験中断後、炉外・室温にてレーザー寸法測定器またはマイクロメータで測定しており、このひずみには初期ひずみ分は含まれない。単軸クリープ試験は、被覆管材にゲージ部加工（長さ13mm×幅3mm）を施し、掴み部の変位をオンラインで計測することにより、クリープひずみ時間曲線を求めており、このひずみには初期ひずみが含まれる。

(3) 結果 (9Cr-ODS鋼)

① クリープ試験結果

熱クリープひずみ式の策定のため、オンライン単軸クリープひずみ試験を実施した（表3.2）。図3.9～図3.11に各温度での試験結果（初期ひずみを含む）を示す。ここで、オンライン単軸クリープひずみ試験用試料として、M11被覆管を図3.12のように加工したものを用いている。

また、800°Cおよび850°CでM11被覆管の内圧クリープ試験を実施し、200時間ごとに外径の変化率の測定を実施した結果（初期ひずみ含まず）を図3.13と図3.14に示す。さらに、9Cr-ODS鋼のクリープ破断材の外径測定を行い、熱クリープひずみ式の策定に用いた。表3.3に外径ひずみ測定結果（初期ひずみ含まず）をまとめる。

② Galofaloの式に基づく熱クリープひずみ式の策定

上記のデータを用いて次の手順に則り、熱クリープひずみ式の策定を行った。

- ・内圧クリープ破断ひずみと単軸クリープひずみの比較から、異方性の換算定数を算出する。
- ・PNC-FMS鋼の熱クリープひずみ式の策定方法⁸⁾と同様に、1次クリープ、2次クリープの応力指数及び温度依存係数を求め、Galofaloの式（次式）に基づき定式化を行う。

ここで、図3.9から図3.11に見られるように、ODS鋼では3次クリープ領域が見られないことから、次式による定式化は妥当であると考えられる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_t \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + (d\varepsilon/dt) \cdot t$$

ε_c : 熱クリープひずみ (% , 相当ひずみ)

$\varepsilon_0 = \sigma/E \times 100$: 初期ひずみ (% , 相当ひずみ)

σ : 応力 (MPa, 相当応力)

E : ヤング率 (MPa)

ε_t : 1次クリープひずみ (% , 相当ひずみ)

$d\varepsilon/dt$: 2次クリープひずみ速度 (%/hr)

以下で内圧クリープひずみと単軸ひずみの換算定数を求める。図3.15にM11被覆管の700°C単軸

クリープ破断強度と内圧クリープ破断強度を示す。ここで、内圧強度はフープ応力 (σ_H) を次式に従い相当応力 (σ_e) とし、単軸応力と比較している。

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_H$$

M11被覆管の場合には内圧強度よりも単軸強度の方が高く、若干の強度異方性が生じている。従って、本検討ではまず、上記試験で得られた単軸クリープひずみの内圧クリープひずみへの換算を行う。

図3.16と図3.17に650°C、700°Cの単軸クリープひずみ曲線から読み取った1次クリープ係数と2次クリープひずみひずみ速度の応力依存性を示す。これより、各温度の熱クリープひずみ曲線として次式が導かれる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_t \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + (d\varepsilon/dt) \cdot t$$

・ 650°C

$$\varepsilon_t = 6.79 \times 10^{-10} \times (\sigma^{3.87})$$

$$d\varepsilon/dt = 5.86 \times 10^{-16} \times (\sigma^{4.85})$$

・ 700°C

$$\varepsilon_t = 2.45 \times 10^{-6} \times (\sigma^{3.87})$$

$$d\varepsilon/dt = 6.10 \times 10^{-25} \times (\sigma^{9.26})$$

ここで、各クリープひずみ曲線のフィッティングにより、 γ (650°C) = 9.5×10^{-3} 、 γ (700°C) = 8.5×10^{-3} としている。また、ヤング率としては、すでに報告されている値^[9]を用いた。

表3.4に上式を用いて求めた単軸クリープひずみ推定値 (y , 初期ひずみを含まず) 及び内圧クリープ破断ひずみ (x , 初期ひずみを含まず) との比 (x/y) を示す。ここで、内圧クリープ破断ひずみは、破断後の試料から軸方向に等間隔で5点 (ただし、破損位置と測定位置が重なる場合は破損部近傍の測定を行う)、周方向4方向の外径測定結果の平均から求めている。内圧クリープ試験における破損相当ひずみは平均で単軸ひずみ ($\varepsilon_c - \varepsilon_0$) の2.4倍となることから、以降、単軸クリープひずみ ($\varepsilon_c - \varepsilon_0$) データを2.4倍した値を熱クリープひずみ式の策定に用いることとする。

以下で、内圧負荷モードに対応した熱クリープひずみ式の策定を行う。まず、1次クリープひずみ式を策定する。図3.18にクリープひずみ曲線から読み取った ε_t の応力依存性を示す。応力指数 nt は、650°C、700°Cでの平均値を取り3.1とする。図3.19は $\varepsilon_t / \sigma^{3.1}$ の $1 / (T + 273.15)$ (T は試験温度 (°C)) 依存性である。これより、下記のノミナル、上下限式が得られる。

$$\text{ノミナル式} : \varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 1.65 \times 10^{-5} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

$$\text{上限式} : \varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 4.20 \times 10^{-5} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

$$\text{下限式} : \varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 9.18 \times 10^{-6} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

2次クリープひずみ速度の応力依存性を図3.20に示す。応力指数 ns は、広い応力範囲でデータが取得できている650°C、700°C、750°C及び850°Cでの指数を平均して7.5とする。図3.21は $(d\varepsilon/dt) / \sigma^{7.5}$ の $1 / (T + 273.15)$ (T は試験温度 (°C)) 依存性である。これより、下記のノミナル、上下限式が得られる。

$$\text{ノミナル式} : (d\varepsilon/dt) / \sigma^{7.5} = 1630 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

$$\text{上限式} \quad : (d\varepsilon / dt) / \sigma^{7.5} = 4220 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

$$\text{下限式} \quad : (d\varepsilon / dt) / \sigma^{7.5} = 347 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

最後に時間係数 γ を算出する。最初に示した熱クリープひずみ式を変形して次式が得られる。

$$\text{Exp}(-\gamma t) = (\varepsilon_t - \varepsilon_c + \varepsilon_0 + (d\varepsilon / dt) \cdot t) / \varepsilon_t$$

ここで、右辺を a とする。

$$a \equiv (\varepsilon_t - \varepsilon_c + \varepsilon_0 + (d\varepsilon / dt) \cdot t) / \varepsilon_t$$

各温度でのオンライン単軸クリープデータから読み取った ε_t , ε_0 , ε_c , $(d\varepsilon / dt)$ を用いて a を算出した。さらに、算出データを $a = \text{exp}(-\gamma t)$ でフィッティング（最小二乗法）することにより、650°C、700°C、750°Cでの γ を求めた。650°Cでの測定値との比較を図3.22に示す。ここで、顕著な応力および試験温度依存性が見られなかったことから、これらの平均値をとり、 γ を 2.8×10^{-3} とした。

以上より、9Cr-ODS鋼の内圧モードでのクリープひずみ式として次式が得られる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_t \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + (d\varepsilon / dt) \cdot t$$

$$\varepsilon_0 = \sigma / E \times 100$$

$$\gamma = 2.8 \times 10^{-3}$$

[ノミナル]

$$\varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 1.65 \times 10^{-5} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

$$(d\varepsilon / dt) / \sigma^{7.5} = 1630 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

[上限]

$$\varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 4.20 \times 10^{-5} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

$$(d\varepsilon / dt) / \sigma^{7.5} = 4220 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

[下限]

$$\varepsilon_t / \sigma^{3.1} = 9.18 \times 10^{-6} \times \exp(-4580 / (T + 273.15))$$

$$(d\varepsilon / dt) / \sigma^{7.5} = 347 \times \exp(-51900 / (T + 273.15))$$

以下で、熱クリープひずみ式と実測値の比較を行う。図3.23と図3.24に単軸クリープひずみデータ（初期ひずみを含む）とひずみ式（ ε_c ）の算出結果を示す。ここで、単軸ひずみデータを内圧ひずみデータに換算するため、単軸での1次及び2次クリープひずみに2.4を乗じた値を示している。図3.25、図3.26に800°C、850°Cにおける内圧クリープひずみ実測値（ $\varepsilon_c - \varepsilon_0$ ）とひずみ式算出結果（ $\varepsilon_c - \varepsilon_0$ ）を示す。いずれの場合もひずみ式と実測値は良好な一致を示している。図3.27から図3.29に、内圧クリープ破断ひずみとひずみ式算出結果の比較を、図3.30に内圧クリープ破断ひずみと熱クリープひずみ式の比較を示している。本ひずみ式のノミナル値は測定値と概ね一致しているが、上限式は過大になっている傾向にある。

(4) 結果（12Cr-ODS鋼）

12Cr-ODS鋼については、熱クリープひずみの測定が行われていないため、上で求めた9Cr-ODS鋼のようなGalofaloの式に基づく定式化はできない。そのため、内圧クリープ破断試験と単軸クリープ破断試験のデータをベースに策定した、BOR-60照射試験用の12Cr-ODS鋼の熱クリープ式^[10]を適用

することとする。表3.4にODSフェライト鋼の内圧クリープ破断ひずみの実測値とクリープひずみ式計算値（ノミナル、上下限）を示す。ノミナル評価値と実測値は良く一致しており、クリープひずみ評価式は妥当であると考えられる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + K(T) \cdot \sigma^{4.4} \cdot t^{0.28} \times 100$$

$$\varepsilon_0 = \sigma / E \times 100$$

$$K(T) = \begin{cases} 30 \cdot \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T + 273.15)) & \text{(上限式)} \\ 13 \cdot \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T + 273.15)) & \text{(ノミナル式)} \\ 5.0 \cdot \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T + 273.15)) & \text{(下限式)} \end{cases}$$

R=8.31J/K/molである。

3.3 照射クリープひずみ

以下のデータベースを用いて作成した評価式を暫定的に用いるものとする。

(1) データベース

① 供試材

MA957 (0.014C-14Cr-0.3Mo-0.9Ti-0.25Y₂O₃)

② データ範囲

照射温度：400～605℃

応力範囲：30～140MPa（フープ応力）

照射量：23～112dpa

(2) 試験方法

炉内内圧クリープ破断試験のデータを用いた。試験は、FFTF/MOTA（1E）を用いて、9Aサイクルから9Cサイクルで行われた。試験片の寸法は、0.23インチ外径×0.20インチ内径×1インチ長さである。

(3) 結果

照射クリープひずみ式として、一般に次式が用いられる。

$$\varepsilon_{\text{Irr}} / \sigma = (B_0 \cdot \phi t + D \cdot \varepsilon_s)$$

ε_{Irr} ：照射クリープひずみ（－、相当ひずみ）

σ ：応力（MPa、相当応力）

ϕt ：照射量（dpa）

ε_s ：スエリングひずみ（－、相当ひずみ）

B_0 ：照射クリープ係数（dpa⁻¹・(MPa)⁻¹）

D ：照射クリープ・スエリング相互作用係数（MPa⁻¹）

上述の照射クリープひずみ一般式の右辺第1項はスエリングに独立な項であり、第2項はスエリングに関する項である。フェライト系ステンレス鋼は耐スエリング特性に優れており、スエリングひずみ（ ε_s ）はほぼゼロであるので第2項については無視して、以下の手順に従い照射クリープひずみ式の定式化を行なった。

(a) $\varepsilon_{\text{Irr}}/\sigma$ の算出

内圧クリープ試験片の炉内ひずみには、照射クリープだけでなくスエリング、焼きしまり及び熱クリープによるひずみが寄与しているため、照射クリープひずみを求めるためには炉内ひずみからスエリング及び焼きしまりによるひずみを差し引く必要がある。

表3.5にFFTF/MOTAで照射した内圧クリープ試験片及びオープンチューブの相当ひずみをまとめた。ここで、相当ひずみは管状試験片の外径ひずみに $2/\sqrt{3}$ を乗じることにより求めている。オープンチューブのひずみはスエリング及び焼きしまりによるものであるため、照射クリープ相当ひずみ (ε_{Irr}) を下式に従い、内圧試験片の相当ひずみ (ε_e) からオープンチューブの相当ひずみ (ε_s) を差し引くことにより算出した。

$$\varepsilon_{\text{Irr}} = \varepsilon_e - \varepsilon_s$$

なお、ここでは熱クリープを無視できる605°C以下での炉内クリープひずみのデータを用いているため、熱クリープひずみは無視している。算出した照射クリープ相当ひずみ (ε_{Irr}) を表3.6に、単位応力当たりの照射クリープ相当ひずみ ($\varepsilon_{\text{Irr}}/\sigma$) の値を表3.7に、各照射温度での $\varepsilon_{\text{Irr}}/\sigma$ の照射量依存性を図3.31~3.34にまとめた。

(b) 照射クリープ係数 (B_0) の算出

照射クリープ係数 (B_0) は照射クリープひずみ一般式において $\varepsilon_s=0$ として、以下のように表される。

$$B_0 = (\varepsilon_{\text{Irr}}/\sigma) / \phi t$$

$\varepsilon_{\text{Irr}}/\sigma$ は照射量と線形関係にありその傾きが B_0 となるので、図3.31~図3.34において、原点を通る一次式で最小自乗法によるフィッティングを行って B_0 を算出した。算出した B_0 の値は図中に示す通りである。

図3.35は算出した B_0 の照射温度依存性である。照射クリープ係数と温度の間には明瞭な関係がないため、 B_0 のノミナル値としてはこれらの平均値をとり、 8.67×10^{-7} に設定した。また、上限値、下限値としては、それぞれ B_0 のばらつきの上下限である 1.62×10^{-6} 、 5.18×10^{-7} をとった。

以上の検討より設定したODS鋼の照射クリープひずみ式 (9Cr-ODS鋼, 12Cr-ODS鋼共通) を以下に示すとともに、図3.36~図3.39に示す。

$$\text{ノミナル式} : \varepsilon_{\text{Irr}} = 8.67 \times 10^{-7} \cdot \sigma \cdot \phi t$$

$$\text{上限式} : \varepsilon_{\text{Irr}} = 1.62 \times 10^{-6} \cdot \sigma \cdot \phi t$$

$$\text{下限式} : \varepsilon_{\text{Irr}} = 5.18 \times 10^{-7} \cdot \sigma \cdot \phi t$$

4. 環境効果

4.1 短時間塑性ひずみ制限

(1) データベース

① 供試材

9Cr-ODS鋼 : 平成9年度材 (M93),

平成11年度材 (Mm11), 平成14年度材 (Mm14) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

12Cr-ODS鋼 : 平成9年度材 (F95), 平成11年度材 (F11) 0.03C-12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y₂O₃

② データ範囲

試験温度 : 非照射材 室温~900°C、照射材 400~525°C

照射量 : 0.5~3×10²⁶n/m² (E>0.1MeV)

(2) 試験方法

上記供試材から被覆管リング引張試験片を作成し、引張速度0.5%/minで、リング引張試験を行った。9Cr-ODS鋼のMm14については、引張速度25%/minのリング引張試験を行った。ここで使用した、Mm14の引張試験データを表4.1に示す。

(3) 結果

ODS鋼の短時間塑性ひずみについては、ひずみ速度の影響を定量的に評価できるだけの十分なデータベースが蓄積されていない。また、照射材の一樣伸びについても、現状取得されているのは、3×10²⁶n/m² (E>0.1MeV) までのリング引張試験データに限られており、高照射量の延性データは、今後の「常陽」の材料照射試験で取得する計画となっている。このようなことから、ODS鋼のリング引張試験から得られた一樣伸びを、SUS316相当鋼 (PNC316) の短時間塑性ひずみ制限値^{III}と比較し、その適用性を調べることにした。

ODS鋼被覆管 (M93, F95) の非照射材と照射材のリング引張試験における一樣伸びの比較のデータを図4.1に示す。照射量3×10²⁶n/m² (E>0.1MeV) までは、9Cr-ODS鋼、12Cr-ODS鋼とも一樣伸びに及ぼす照射の影響はほとんどないことが分かる。

次に、PNC316の短時間塑性ひずみ制限値との比較を行った。図4.2は、ひずみ速度8.3×10⁻⁵/secでリング引張試験を行った非照射のM11とF11の一樣伸びとPNC316の短時間塑性ひずみ制限値を示す。PNC316の一樣伸びは、ひずみ速度が低くなると小さくなる傾向があるため、図に示すようなひずみ速度に依存した制限値が適用されている。PNC316の塑性ひずみ制限値はひずみ速度が約10⁻⁴/sec以下では0.3%と規定されているが、ひずみ速度約10⁻⁴/secにおけるODS鋼の一樣伸びはこの制限値を上回っている。図4.3は、9Cr-ODS鋼 (Mm14) の一樣伸びとひずみ速度の関係を示すが、ODS鋼の場合も、全体的にはひずみ速度が低い方が一樣伸びは小さくなっており、定性的にはPNC316と同様の傾向を示している。

以上のことから、ODS鋼に対して、PNC316の短時間塑性ひずみ制限値を暫定的に適用することとした。

短時間塑性ひずみ制限値 (室温≤T≤900°C)

$$d\varepsilon / dt : 3 \times 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ (1/sec)}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= 1.0 \\ d\varepsilon / dt &: 7 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ (1/sec)} \\ \varepsilon_p &= 0.266 \log (d\varepsilon / dt) + 1.405 \\ d\varepsilon / dt &: 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ (1/sec)} \\ \varepsilon_p &= 0.3 \\ \varepsilon_p &: \text{短時間塑性ひずみ制限値 (\%)} \\ d\varepsilon / dt &: \text{ひずみ速度 (1/sec)} \end{aligned}$$

4.2 ボイドスエリング量

以下のデータベースを用いて作成した評価式を暫定的に用いるものとする。

(1) データベース

① 供試材

MA957 : 0.014C-14Cr-0.3Mo-0.9Ti-0.25Y₂O₃
 MA956 : 0.02C-20Cr-4Al-0.5Ti-0.5Y₂O₃
 PNC-FMS : 0.12C-11Cr-0.40Mo-2.0W-0.20V
 ODS鋼 : 平成元年度材 (1DK) 0.05C-13Cr-3W-0.5Ti-0.3Y₂O₃

② データ範囲

照射温度 : 405~670°C
 照射量 : 20~40 × 10²⁶n/m² (E>0.1MeV)

(2) 試験方法

以下の方法に従い、スエリング値を求めた。

- (a) 照射材の密度測定値から算出した。
- (b) 照射材の外径をレーザー寸法測定器で測定し、外径変化率を3倍することにより求めた。

(3) 結果

ODS鋼はフェライトもしくはマルテンサイト相の母材に微細なY₂O₃粒子を分散させたものであり、そのスエリング特性はフェライト鋼やマルテンサイト鋼と同様であると考えられる。よって、すでに策定されている下記のPNC-FMSのスエリング式を適用する。スエリング評価式の照射量依存性と照射温度依存性を図4.4に、評価式の計算値と実測値の比較を図4.5に示す。

$$\Delta V/V = S_0 + D'$$

$$S_0 = R \phi t = [R_0 \exp \{A (T - T_p)^2\}] \phi t$$

定数	ノミナル	上限	下限
R ₀	2.44 × 10 ⁻²	5.13 × 10 ⁻²	1.40 × 10 ⁻²
D'	-0.17	0	-0.48
A	-1.74 × 10 ⁻⁴	-1.74 × 10 ⁻⁴	-1.74 × 10 ⁻⁴
T _p	414	414	414

ΔV/V : スエリング (Vol%)

S₀ : ボイドスエリング (Vol%)

- D' : 焼きしまり (Vol%)
 R : 定常スエリング速度 (Vol%/10²⁶n/m² (E>0.1MeV))
 Φt : 中性子照射量 (10²⁶n/m² (E>0.1MeV))
 A : 定常スエリング速度での温度依存性に関する定数 (°C⁻²)
 T : 照射温度 (°C)
 T_p : ピークスエリング温度 (°C)

4.3 Na腐食量

高温側 (650, 700°C) でのNi浸入によるオーステナイト化厚さ (γ相>30vol%の領域=Ni濃度11wt%以上) を腐食代として設定し、その厚さは、最近得られたNi拡散係数を用いた拡散方程式から求めて^[11]、実機条件である酸素濃度3ppmでの既存高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 腐食式と比較した (図4.6)。この腐食代に比べ、既存のPNC-FMS腐食式の方が大きな腐食代となるため、当面はODS鋼被覆管のNa腐食量として、PNC-FMSのNa腐食量を暫定的に適用することとする。

なお、Ni浸入が生じない極低流速 (<10⁻⁴m/s) の高温Na中 (650, 700°C) に浸漬した場合には、殆ど無視できる量の重量増加しか起こらず (重量増加分を腐食量として、最大0.5 μ m/year程度)、9Cr-ODS鋼と12Cr-ODS鋼で有意差は認められていない^[11]ことから、9Cr-ODS鋼、12Cr-ODS鋼ともに共通の式とする。その式を以下に示すとともに図4.6に示す。

$$C_{Na} = (C_{R1} + C_{R2} \times t) \times O_x$$

C_{Na} : Naによる外面腐食量 (μ m/ppm)

C_{R1} : 初期腐食量 (μ m/hr/ppm)

$$\log C_{R1} = 9.078 - 8.251 \times 10^3 / (T + 273.15)$$

C_{R2} : 定常腐食量 (μ m)

$$C_{R2} = 4.1667 \times 10^4 \times \exp \{ -1.7580 \times 10^4 / (T + 273.15) \}$$

T : 被覆管外面温度 (°C)

O_x : Na中の酸素濃度 (ppm)

t : 被覆管外面温度T, Na中の酸素濃度O_xでの使用時間 (hr)

4.4 内面腐食量

内面腐食量 (FCCI) については、「ODSフェライト鋼の設計評価用関係式の検討」(JNC TN9400 2000-048)^[12]で、炉外でのFPを模擬した試験結果から、ODS鋼開発途中材 (1DS, 1DK) とPNC-FMSとの腐食量は変わらないため、PNC-FMSの内面腐食式を流用している。最近、フェライト鋼燃料ピンB9 (HT9M, PNC-FMS) の内面腐食データが取得され、それらのデータは本内面腐食式により十分包絡されている (図4.7)。そのため、同様なフェライト鋼であるODS鋼の内面腐食式として、当面はその式を用いることとする。この式を以下に示すとともに図4.7に示す。

$$0 \leq B \leq 9000$$

$$CFP = 35$$

$$9000 < B \leq 57500$$

$$\text{CFP} = 1.363 \times 10^{-3} (B - 9000) - 1.363 \times 10^{-3} / K2 \times \{1 - \exp(-K2 \times (B - 9000))\} + 35$$

$$57500 < B$$

$$\text{CFP} = 1.363 \times 10^{-3} (57500 - 9000) - 1.363 \times 10^{-3} / K2 \times \{1 - \exp(-K2 \times (57500 - 9000))\} + 35$$

CFP : FPによる内面腐食量 (μm)

T : 被覆管内面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

B : 局部燃焼度 (MWd/t)

K2 : $7.676 \times 10^8 \times \exp\{-47000 / (1.987 \times (T + 273.15))\}$

4.5 強度補正係数

4.5.1 短時間強度補正係数

極低流速 ($< 10^{-4}\text{m/s}$) のNa浸漬の場合には、12Cr-ODS鋼ではNa浸漬後の引張試験で、引張強度の低下は認められていない(表4.2, 図4.8, 図4.9)。しかし、9Cr-ODS鋼では、Na浸漬後に引張強度の低下が認められているが、この低下は熱時効材と同等である(図4.10~図4.13) [11]。

Na流速があり、表面からのNi浸入によるオーステナイト化の影響は、Ni拡散材と熱時効材とで比較したが、引張強度で両者に有意な差は認められていない(表4.3, 図4.14, 4.15)。これは、オーステナイト中でも酸化粒子が母材と同様に微細に分散しているためと考えられる[13]。

照射効果に関しては、「常陽」SVIR-1にて、照射温度約400~530 $^{\circ}\text{C}$ 、最大照射量約15dpaまで照射した9Cr-ODS鋼と12Cr-ODS鋼の引張試験結果から、照射による影響はほとんど認められていない[2]。また、海外のODS鋼であるMA956, MA957を420 $^{\circ}\text{C}$ で200dpaまで照射した結果、組織は安定であったことが報告されている[14]。一方、海外ODS鋼であるベルギー材(DT2203Y05)のPhenixでの燃料ピン照射(~約80dpa)では、低温で α' 相、高温で χ 相(70Fe-15Cr-7Ti-6Mo)生成による照射脆化が認められている[15]、JNC材では、Crを12wt%以下にするとともに、Moを添加していないため、このような照射脆化は起こらないものと推察される。

そのため、マルテンサイト系ODS鋼のみについて、熱時効による短時間強度補正係数を策定した。

(1) データベース [11, 13]

① Na浸漬材

供試材 : 9Cr-ODS鋼 平成9年度材 (M93) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

データ範囲 : 浸漬時間 1,000~10,000hr

浸漬温度 650, 700 $^{\circ}\text{C}$

試験温度 650, 700 $^{\circ}\text{C}$ (浸漬温度と同じ)

② 熱時効材

供試材 : 9Cr-ODS鋼 平成14年度材 (Mm14) 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y₂O₃

データ範囲 : 時効時間 : 70~260hr

時効温度 : 700~800 $^{\circ}\text{C}$

試験温度 : 650, 700 $^{\circ}\text{C}$

(2) 策定方法

9Cr-ODS鋼のNa浸漬材及び熱時効材の0.2%耐力 (σ_y)、引張強さ (σ_u) を、それぞれの受入材の

0.2%耐力 $\sigma_{y\text{ nom}}$ 、引張強さ $\sigma_{u\text{ nom}}$ で割った値 $\sigma_y / \sigma_{y\text{ nom}}$ 、 $\sigma_u / \sigma_{u\text{ nom}}$ を求めて、それらの温度と時間のパラメータであるLMPで整理し最適近似曲線を求め、短時間補正係数とした。その結果を図4.16及び図4.17に示す。

$$\gamma_{S_y} = \sigma_y / \sigma_{y\text{ nom}} = 3.959 - 1.934 \times 10^{-1} \times \text{LMP} + 2.267 \times 10^{-3} \times \text{LMP}^2$$

$$\gamma_{S_u} = \sigma_u / \sigma_{u\text{ nom}} = 4.297 - 2.596 \times 10^{-1} \times \text{LMP} + 4.664 \times 10^{-3} \times \text{LMP}^2$$

γ_{S_y} : 設計降伏点 (S_y) に対する短時間強さ補正係数

γ_{S_u} : 設計引張強さ (S_u) に対する短時間強さ補正係数

LMP : $(T+273.15) \times (17.885 + \log t) / 1000$ [設計降伏点に対して]

$(T+273.15) \times (17.670 + \log t) / 1000$ [設計引張強さに対して]

T : 温度 (°C)

t : 時間 (hr)

適用範囲は暫定的に次の通りとする。

$$\gamma_{S_y} \leq 1.0, \gamma_{S_u} \leq 1.0, t \leq 30,000, \text{室温} \leq T \leq 750$$

適用範囲の外挿については、Ni拡散材との比較として実施された熱時効材の引張試験によりその妥当性を確認した (図4.16, 図4.17)。本熱処理は焼き戻し温度を超える850°Cで行われたことから、参考値扱いとしている。

このようにして設定した短時間強さ補正係数 γ_{S_y} 、 γ_{S_u} の妥当性は、Na浸漬データ (M93) と S_y^* ($\gamma_{S_y} \times S_y$)、 S_u^* ($\gamma_{S_u} \times S_u$) との比較により行い、設計式は全てのデータを包絡していることを確認した (図4.18, 図4.19)。

4.5.2 クリープ破断強度補正係数

極低流速 ($< 10^{-3}\text{m/s}$) のNa中クリープ試験において、PNC-FMSでは、650°C, 1,000hr以上で脱炭による強度低下が認められている^[6]。しかし、9Cr-ODS鋼では、700°C, 10,000hr程度まで、大気中及びAr中に比べて、Na中でのクリープ強度の低下は認められていない (表4.4, 図4.20, 図4.21)。これは、ODS鋼では安定な酸化物粒子により強化されているため、脱炭による強度低下は影響しないためと考えられる。これは、12Cr-ODS鋼についても同様と考えられる。

Na流速があり、Niが浸入して表面がオーステナイト化する場合の影響は、9Cr-ODS鋼被覆管のNi拡散材と熱時効材 (未破断のため、破断時間をひずみ量から予測 (表4.5, 図4.22~図4.24)) との比較から予測した。その強度低下はNi拡散による腐食代 (γ 相 $> 30\text{vol}\%$ の領域) を考慮すると、図4.25に示すような良い相関を示し、減肉による周応力の増加で整理することができる。そのため、腐食代のみで強度低下は起こり、母材のクリープ破断強度の低下はないとして良いと考えられる。これは12Cr-ODS鋼についても同様と考えられる。

照射効果に関しては、PNC-FMSでは照射によるクリープ強度の低下は認められていないため (図4.26)^[7]、同様なフェライト鋼であるODS鋼でも照射によるクリープ強度の低下はないと考えられる。今後、MARICO-2において、ODS鋼の炉内クリープ破断試験を実施して照射効果は確認していく計画である。

5. 材料物性

材料物性については、「ODSフェライト鋼の設計評価用物性式の策定」(JNC TN9400 2001-108) [9] にすでにまとめられており、以下に結果のみ示す。

5.1 ヤング率 (図5.1)

9Cr-ODS鋼

$$E = 212.4 - 0.1482T + 6.628 \times 10^{-4}T^2 - 1.412 \times 10^{-6}T^3 + 7.324 \times 10^{-10}T^4$$

12Cr-ODS鋼

$$E = 225.4 - 0.1380T + 5.701 \times 10^{-4}T^2 - 1.245 \times 10^{-6}T^3 + 6.954 \times 10^{-10}T^4$$

E : ヤング率 (GPa)

T : 温度 (°C)

5.2 ポアソン比 (図5.2)

9Cr-ODS鋼, 12Cr-ODS鋼共通

(室温 ≤ T ≤ 600°C)

$$\nu = 0.2814 + 8.593 \times 10^{-5}T - 6.800 \times 10^{-7}T^2 + 2.090 \times 10^{-9}T^3 - 1.786 \times 10^{-12}T^4$$

(600°C < T ≤ 800°C)

$$\nu = -0.0526 + 5.98 \times 10^{-4}T$$

ν : ポアソン比 (-)

T : 温度 (°C)

5.3 平均熱膨張係数 (図5.3)

9Cr-ODS鋼 (室温 ≤ T ≤ 850°C)

$$\alpha_m = 9.843 + 1.030 \times 10^{-2}T - 2.036 \times 10^{-5}T^2 + 2.508 \times 10^{-8}T^3 - 1.191 \times 10^{-11}T^4$$

12Cr-ODS鋼 (室温 ≤ T ≤ 850°C)

$$\alpha_m = 9.571 + 7.926 \times 10^{-3}T - 8.886 \times 10^{-6}T^2 + 3.948 \times 10^{-9}T^3 + 6.975 \times 10^{-13}T^4$$

α_m : 平均熱膨張係数 (×10⁻⁶/°C)

T : 温度 (°C)

5.4 熱伝導度 (図5.4)

9Cr-ODS鋼 (室温 ≤ T ≤ 850°C)

$$K = 28.47 - 1.244 \times 10^{-2}T + 8.483 \times 10^{-5}T^2 - 1.911 \times 10^{-7}T^3 + 1.216 \times 10^{-10}T^4$$

12Cr-ODS鋼 (室温 ≤ T ≤ 850°C)

$$K = 24.81 + 1.213 \times 10^{-2}T - 3.554 \times 10^{-5}T^2 + 5.137 \times 10^{-8}T^3 - 2.567 \times 10^{-11}T^4$$

K : 熱伝導度 (W/m・°C)

T : 温度 (°C)

5.5 比熱 (図5.5)

9Cr-ODS鋼 (室温 $\leq T \leq 750^{\circ}\text{C}$)

$$C_p = 0.1072 + 1.087 \times 10^{-4}T - 3.648 \times 10^{-7}T^2 + 8.637 \times 10^{-10}T^3 - 4.486 \times 10^{-13}T^4$$

12Cr-ODS鋼 (室温 $\leq T \leq 700^{\circ}\text{C}$)

$$C_p = 0.1100 + 2.342 \times 10^{-5}T + 6.297 \times 10^{-7}T^2 - 2.168 \times 10^{-9}T^3 + 2.388 \times 10^{-12}T^4$$

C_p : 比熱 (cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

5.6 密度 (図5.6)

9Cr-ODS鋼

$$\rho = 7.830 \{ 1 - 3 (9.843 + 1.030 \times 10^{-2}T - 2.036 \times 10^{-5}T^2 + 2.508 \times 10^{-8}T^3 - 1.191 \times 10^{-11}T^4) (T - 20) \times 10^{-6} \}$$

12Cr-ODS鋼 (室温 $\leq T \leq 850^{\circ}\text{C}$)

$$\rho = 7.808 \{ 1 - 3 (9.571 + 7.926 \times 10^{-3}T - 8.886 \times 10^{-6}T^2 + 3.948 \times 10^{-9}T^3 + 6.975 \times 10^{-13}T^4) (T - 20) \times 10^{-6} \}$$

ρ : 密度(g/cm³)

T : 温度($^{\circ}\text{C}$)

5.7 変態点

9Cr-ODS鋼

A_{C1} 点 : 884°C , A_{C3} 点 : 960°C

6. 材料仕様

6.1 製法

ODSフェライト鋼は、耐スエリング性に優れたフェライト鋼中に酸化物粒子を微細分散して高温強度の改善を図った材料である。そのため、従来の溶解法とは異なり、製造法はメカニカルアロイング(MA)による合金粉末の製造と熱間押出による固化成型という粉末冶金技術を適用する。その後、PNC316等のステンレス鋼と同様に、室温での冷間圧延と熱処理を繰り返して被覆管に製管する^[18]。

6.2 成分

基本成分を設定する上で重要な酸化物としては、熱的に安定であり、高温長時間でも成長粗大化が遅く、クリープ破断強度の改善効果が最も大きい Y_2O_3 を選定した。また、MA処理中に Y_2O_3 と同時にTiを添加すると、 Y_2O_3 粒子は超微細化し、高温強度が大幅に改善される。これらのことから、ODS鋼の基本成分は、Fe-Cr-Cをベースに、酸化物としての Y_2O_3 、酸化物粒子の微細化促進のためのTi及び固溶強化元素としてのWを添加した成分系とした^[18]。

また、上記の成分系をベースに、耐照射特性の観点からCr添加量を9wt%とした9Cr-ODS鋼と、耐食性の観点からCr添加量を12wt%とした12Cr-ODS鋼の2種類のODS鋼を開発している。それぞれの化学成分を以下に示す。

(1) 9Cr-ODS鋼

9Cr-ODS鋼の化学成分を表6.1に示す。高温強度の観点からは、 Y_2O_3 添加量、Ti添加量ともに増加させることが有効であるが、加工性が低下し冷間加工の適用が困難になる^[19]。このため、9Cr-ODS鋼では、加工性及び高温強度のバランスを考慮し、 Y_2O_3 添加量を0.33~0.37wt%、Ti添加量を0.20~0.35wt%とした。また、9Cr-ODS鋼ではEx.O(過剰酸素：鋼中に含まれる全酸素のうちYと結合していない酸素)量が強度に影響を及ぼすことが明らかとなり、0.10wt%を超えると強度が低下し、逆に0.04wt%未満でも強度が低下する傾向にある^[20-22]。これらのことから、Ex.O量は0.04~0.10wt%とした。

(2) 12Cr-ODS鋼

12Cr-ODS鋼の化学成分を表6.2に示す。12Cr-ODS鋼でも、 Y_2O_3 添加量、Ti添加量の増加は高温強度の観点からは有効であるが、加工性が低下する。また、12Cr-ODS鋼では、クリープ破断強度の向上を目的として、後述する最終熱処理において再結晶熱処理を施す必要がある。再結晶の起こりやすさは Y_2O_3 添加量に依存し、Ex.O量にもわずかに影響される傾向がある^[18]。このため、 Y_2O_3 添加量は0.26wt%以下、Ex.O量は0.09wt%以下に制限する必要がある。これらのことから、12Cr-ODS鋼では、加工性、高温強度及び再結晶の起こりやすさを考慮し、 Y_2O_3 添加量を0.20~0.26wt%、Ti添加量を0.24~0.28wt%、Ex.O量を0.05~0.09wt%とした。

6.3 最終熱処理

(1) 9Cr-ODS鋼

9Cr-ODS鋼では、冷間圧延で圧延方向に針状に伸びた結晶粒を等軸化し、強度異方性を改善するた

め、 $1050^{\circ}\text{C} \times 60\text{分} + 780 \sim 800^{\circ}\text{C} \times 60\text{分}$ の焼ならし・焼戻し処理を施すこととした。

(2) 12Cr-ODS鋼

12Cr-ODS鋼では、前述のとおり、最終熱処理において再結晶組織とする必要があることから、 $1050^{\circ}\text{C} \times 60\text{分}$ の再結晶熱処理を施すこととした^[20]。

7. 参考文献

- [1] 松元 慎一郎 他、「解説 高速原型炉燃料集合体の構造設計方針 材料強度基準(案)」、PNC ZN241 85-22(2)、(1985)
- [2] 吉武 庸光 他、「SVIR-1照射ODSフェライト／マルテンサイト鋼被覆管のリング引張特性評価」、JNC TN9400 2002-073、(2002)
- [3] 「解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準」、PNC TN241 84-10、(1984)
- [4] M. Klesnil and P. Lukas、「5.2 疲労寿命曲線 (ϵ_a - N_f の関係)」、金属疲労の力学と組織学、養賢堂、(1984)、p.126
- [5] 加藤 猛彦、浅山 泰、「材料強度・構造信頼性評価システム MSS-REAL使用説明書 Version1.0」、JNC TN9520 2003-002、(2003)
- [6] 瀬下 一郎 他、「燃料被覆管許容設計限界の検討 急速加熱試験結果の評価」、PNC ZN9410 89-122、(1989)
- [7] 溶接便覧 溶接学会編 丸善株式会社、(1966)
- [8] 野村 茂雄 他、「高速炉炉心構成要素 高強度フェライト／マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準 (暫定案) 解説」、PNC ZN9410 92-111、(1992)
- [9] 畠山 耕一、鶴飼 重治、「ODSフェライト鋼の設計評価用物性式の策定」、JNC TN9400 2001-108、(2001)
- [10] 皆藤 威二 他、「BOR-60照射試験用ODS鋼被覆管の設計評価暫定式の策定」、JNC TN9400 2002-061、(2002)
- [11] 加藤 章一 他、「高速炉炉心用酸化物分散強化型フェライト鋼の材料特性 第5報 Na浸漬材及びNi拡散模擬材の機械的強度特性 [中間報告]」、JNC TN9400 2003-107、(2004)
- [12] 水田 俊治 他、「ODSフェライト鋼の設計評価用関係式の検討」、JNC TN9400 2000-048、(2000)
- [13] 加藤 章一 他、「高速炉炉心用酸化物分散強化型フェライト鋼の材料特性 第4報 Na浸漬材及びNi拡散模擬材の引張特性」、JNC TN9400 2002-080、(2002)
- [14] DOE/ER-0313/16, Fusion Materials semiannual Progress Report, March 31, (1994)
- [15] D. S. Dubuisson et al., "Behavior of an Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel Irradiated in PHENIX.", Effects of Radiation on Materials, ASTM STP 1325, (1997)
- [16] 伊藤 卓志 他、「高速炉炉心構成要素高強度フェライト／マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準 (暫定案) 解説編 -Na腐食、強度補正係数、設計許容繰返し数-」、PNC ZN9410 93-045、(1993)
- [17] 上平 明弘 他、「高強度フェライト／マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) のクリープ強度特性の評価」、JNC TN9400 99-045、(1999)
- [18] 鶴飼 重治、「ODSフェライト・マルテンサイト鋼被覆管の組織制御技術開発」、サイクル機構技報、7 (2000) 83-91
- [19] S.Ukai et al., J. Nucl. Scie. and Technol., Vol.39, No.7 (2002) p.778
- [20] S.Ukai et al., ISIJ Int. 43 (12) (2002) 2038
- [21] S.Ohtsuka et al., J. Nucl. Mater. (submitted).

[22] S.Ohtsuka et al., J. Nucl. Mater. 329-333 (2004) 372-376.

[23] 水田 俊治 他、「フェライト系ODS鋼被覆管の製造技術開発」、JNC TN9400 2001-103、(2001)

表1.1 ODS鋼被覆管の引張試験結果（照射材及び非照射材）

鋼種	照射量 ^[*] ($\times 10^{26}$ n/m ²)	照射温度 (°C)	試験温度 (°C)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	降伏点/ 引張強さ
9Cr- ODS鋼 (M93)	—	—	400	825.0	960.0	4.0	0.859
	—	—	450	806.0	902.0	3.1	0.894
	—	—	500	725.0	834.0	3.2	0.869
	—	—	525	717.0	807.0	3.1	0.888
	0.5	397	400	872.5	1005.5	4.4	0.868
	2.8	454	450	822.0	939.0	4.0	0.875
	3.0	497	500	769.0	887.5	3.4	0.866
	2.5	515	525	745.0	838.0	3.0	0.889
	1.4	534	525	702.0	819.5	3.5	0.857
12Cr- ODS鋼 (F95)	—	—	400	720.0	876.0	4.7	0.822
	—	—	450	665.0	797.0	5.0	0.834
	—	—	500	623.0	744.0	5.0	0.837
	—	—	525	597.0	710.0	5.1	0.841
	0.5	397	400	681.5	880.5	5.6	0.774
	2.8	454	450	672.0	841.5	5.8	0.799
	3.0	497	500	609.5	776.5	5.4	0.785
	2.5	515	525	638.0	739.0	4.7	0.863
	1.4	534	525	615.0	740.0	5.2	0.831

[*] E>0.1MeV

表1.2 ODS鋼被覆管及び溶接部の設計応力強さ (S_m)

鋼種	温度 (°C)	管 部			溶接部		
		S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_m (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_m (MPa)
9Cr- ODS鋼	25	933.9	1095.0	547.5	933.9	1095.0	547.5
	100	849.3	1029.2	514.6	849.3	1029.2	514.6
	150	817.8	997.7	498.8	817.8	997.7	498.8
	200	796.1	969.4	484.7	796.1	969.4	484.7
	250	777.3	939.8	469.9	777.3	939.8	469.9
	300	755.5	905.5	452.8	755.5	905.5	452.8
	350	726.5	863.7	431.9	726.5	863.7	431.9
	400	687.3	812.8	406.4	687.3	812.8	406.4
	450	636.3	751.8	375.9	636.3	751.8	375.9
	500	573.1	681.1	340.5	573.1	681.1	340.5
	550	499.0	601.5	300.8	499.0	601.5	300.8
	600	416.3	515.2	257.6	416.3	515.2	257.6
	650	328.9	425.0	212.5	328.9	425.0	212.5
	700	241.9	334.8	167.4	241.9	334.8	167.4
	750	161.9	249.4	121.4	161.9	249.4	121.4
	800	96.8	174.5	72.6	96.8	174.5	72.6
	850	55.9	116.8	41.9	55.9	116.8	41.9
12Cr- ODS鋼	25	795.1	889.0	444.5	795.1	889.0	444.5
	100	729.5	838.1	419.1	729.5	838.1	419.1
	150	704.6	813.9	407.0	704.6	813.9	407.0
	200	686.3	791.3	395.7	686.3	791.3	395.7
	250	668.5	766.1	383.1	668.5	766.1	383.1
	300	646.7	735.1	367.5	646.7	735.1	367.5
	350	617.3	695.9	348.0	617.3	695.9	348.0
	400	578.1	647.3	323.7	578.1	647.3	323.7
	450	528.2	588.9	294.4	528.2	588.9	294.4
	500	467.7	521.3	260.7	467.7	521.3	260.7
	550	398.1	446.1	223.1	398.1	446.1	223.1
	600	322.1	365.9	183.0	322.1	365.9	183.0
	650	243.6	284.2	142.1	243.6	284.2	142.1
	700	167.9	205.4	102.7	167.9	205.4	102.7
	750	101.3	135.0	67.5	101.3	135.0	67.5
	800	51.4	79.4	38.5	51.4	79.4	38.5
	850	27.1	45.9	20.3	27.1	45.9	20.3

表1.3 9Cr-ODS鋼被覆管の降伏点及び引張強さ

温度 (°C)	降伏点 (MPa)		引張強さ (MPa)	
	Mm11	M11	Mm11	M11
25	1062	1012	1221	1168
	1095	1034	1154	1199
100	892	985	1115	1133
	835	987	1118	1134
200	898	929	1074	992
	905	841	1047	1063
300	820	892	990	995
	797	896	989	1005
400	784	820	903	918
	784	852	903	900
500	694	700	803	786
	716	680	792	782
600	486	522	581	596
	535	530	606	619
650	354	420	488	509
	412	415	511	505
700	306	309	411	416
	284	313	415	413
750	271	253	345	334
	246	251	351	340
800	230	209	301	294
	205	166	290	288
850	160	138	199	193
	157	139	208	196
900	129	127	171	164
	108	134	171	159

表1.4 12Cr-ODS鋼被覆管の降伏点及び引張強さ

温度 (°C)	降伏点 (MPa)		引張強さ (MPa)	
	F11	F14	F11	F14
25	881	834	1018	916
	889	870	1005	905
100	789	—	950	—
	855	—	956	—
200	718	—	909	—
	832	—	919	—
300	730	764	838	796
	722	734	852	789
400	678	709	777	714
	668	706	770	731
500	567	584	657	626
	590	535	670	612
600	376	415	487	461
	437	371	481	444
650	320	284	384	309
	328	265	386	310
700	240	207	299	255
	261	—	302	—
750	166	209	288	213
	195	163	292	205
800	153	178	205	189
	176	151	214	156
850	143	—	183	—
	133	—	177	—
900	109	—	157	—
	125	—	159	—

表1.5 9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ

	温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	備考
Mm11	700	180	24.5	
		150	374.4	
		130	1435.6	
		110	7850.2	
M11	650	270	24.7	
		220	590.5	
		200	888.0	
		170	4135.4	
	700	180	222.2	
		170	284.4	
		170	414.5	
		150	684.9	
		150	1097.2	
		150	1544.9	
		130	1589.6	
		130	9123.9	
	110	(19202.0)	試験継続	
	750	120	521.7	
		100	1738.1	
		90	9788.0	
75		(19136.5)	試験中止	

表1.6 12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ

	温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	備 考
F11	650	290	509.7	
		270	467.1	
		240	5783.3	
	700	200	16.2	
		190	323.4	
		165	241.1	
	750	150	9.2	
		95	5105.1	
		90	10233.4	
F14	700	180	37.3	(PRW接合)
		180	37.6	(PRW接合)
		165	262.9	
		150	193.3	
		150	319.0	(PRW接合)
		130	574.7	(PRW接合)
	750	105	313.6	
		95	427.4	

表1.7 9Cr-ODS鋼の高温低サイクル疲労試験結果

鋼種	試験温度 (°C)	全ひずみ範囲 (%)	非弾性ひずみ範囲 (%)	弾性ひずみ範囲 (%)	破損繰返し数 (サイクル)
Mm14	600	0.601	0.107	0.494	7850
		1.005	0.419	0.586	610
		1.507	0.834	0.673	528
		0.502	0.065	0.437	352210
	650	1.507	0.890	0.617	298
		1.006	0.467	0.539	433
		0.601	0.155	0.446	4775
		0.502	0.097	0.405	31625
	700	1.507	1.031	0.476	182
		1.007	0.566	0.441	467
		0.604	0.234	0.370	2828
		0.502	0.152	0.350	8608
		0.403	0.061	0.342	107.86*
	750	1.506	1.004	0.502	163
		1.006	0.533	0.473	697
		0.606	0.270	0.336	4270
0.404		0.141	0.263	28400	

←未破損

表1.8 12Cr-ODS鋼の高温低サイクル疲労試験結果

鋼種	試験温度 (°C)	全ひずみ範囲 (%)	非弾性ひずみ範囲 (%)	弾性ひずみ範囲 (%)	破損繰返し数 (サイクル)
F14	600	1.507	0.902	0.605	217
		1.005	0.437	0.568	726
		0.601	0.109	0.492	5831
		0.503	0.006	0.497	79812
	650	1.506	0.909	0.597	192
		1.006	0.481	0.525	287
		0.603	0.106	0.497	2444
		0.503	0.054	0.449	13337
	700	1.506	1.012	0.494	260
		1.005	0.530	0.475	526
		0.604	0.180	0.424	2615
		0.501	0.084	0.417	10740
	750	1.007	0.564	0.443	550
		0.605	0.192	0.413	1788
		0.401	0.054	0.347	28820
		1.506	1.045	0.461	168

表1.9 試験データのフィッティングにより求めたManson-Coffin平均式の係数

試験温度 (°C)	Ce	Cp	αe	αp
600	0.00799	0.146	0.0474	0.538
650	0.00849	0.110	0.0708	0.515
700	0.00678	0.211	0.0642	0.577
750	0.00813	0.109	0.0965	0.473

表1.10 試験データのフィッティングにより求めたDierck平均式の係数

A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
-5.36E+01	-1.02E+02	-7.13E+01	4.64E+01	-2.51E+00	-1.06E-13	-7.59E+00	1.98E-14
a	b	c	d	e	f	標準偏差	相関係数
4	1	3	2	1	4	0.129	0.954

表1.11 ODS鋼被覆管の急速加熱破裂試験結果 (1)

鋼種	照射量 ^[*] ($\times 10^{26}$ n/m ²)	照射温度 (°C)	加熱速度 (°C/sec)	試験内圧 (MPa)	周応力 (MPa)	破断温度 (°C)	破断形態
M93	—	—	5.3	6.3	50.4	1181	Fissure
	—	—	5.2	12.7	101.7	1130	↑
	—	—	5.4	25.3	201.5	929	Fissure
M11	—	—	5.2	6.1	50.0	1247	↑
	—	—	5.2	5.9	50.0	1245	↑
	—	—	5.2	6.1	50.0	1236	↑
	—	—	5.2	12.0	100.0	1158	↑
	—	—	5.2	12.1	100.0	1147	↑
	—	—	5.3	11.9	100.0	1162	↑
	—	—	5.4	23.9	200.0	940	↑
	—	—	5.4	23.8	200.0	940	↑
F95	—	—	5.4	15.8	102.8	1067	Fissure
	—	—	5.4	15.8	102.8	1067	Fissure
1DS	—	—	5.2	13.5	118.0	940	Fissure
	—	—	5.5	13.5	118.0	960	↑
	1.1	420	5.2	13.7	118.0	1003	Violent
	0.3	555	5.1	13.7	118.0	986	↑
PNC316	—	—	5	22.9	147.1	974	Violent
	—	—	5	22.9	147.1	973	↑
	—	—	5	22.9	147.1	965	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1105	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1091	Pinhole
	—	—	5	7.6	49.0	1097	Violent
	—	—	5	15.3	98.1	1013	↑
	—	—	5	15.3	98.1	1023	↑
	—	—	5	15.3	98.1	1031	↑
	—	—	5	33.6	215.7	920	↑
	—	—	5	33.6	215.7	898	↑
	—	—	5	33.6	215.7	900	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1082	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1100	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1081	↑
	—	—	5	15.3	98.1	992	↑
	—	—	5	15.3	98.1	1012	↑
	—	—	5	15.3	98.1	995	↑
	—	—	5	22.9	147.1	960	↑
	—	—	5	22.9	147.1	973	↑
—	—	5	22.9	147.1	935	↑	
—	—	5	7.6	49.0	1093	↑	
—	—	5	7.6	49.0	1093	↑	

[*] E>0.1MeV

表1.11 ODS鋼被覆管の急速加熱破裂試験結果 (2)

鋼種	照射量 ^[*] ($\times 10^{26}$ n/m ²)	照射温度 (°C)	加熱速度 (°C/sec)	試験内圧 (MPa)	周応力 (MPa)	破断温度 (°C)	破断形態
PNC316	—	—	5	15.3	98.1	1031	Violent
	—	—	5	15.3	98.1	1022	↑
	—	—	5	30.6	196.1	907	↑
	—	—	5	30.6	196.1	877	↑
	—	—	5	45.9	294.2	818	↑
	—	—	5	45.9	294.2	810	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1086	↑
	—	—	5	7.6	49.0	1102	↑
	—	—	5	15.3	98.1	1022	↑
	—	—	5	15.3	98.1	1027	↑
	—	—	5	30.6	196.1	911	↑
	—	—	5	30.6	196.1	923	↑
	—	—	5	45.9	294.2	818	↑
	—	—	5	45.9	294.2	828	↑
	17.3	481	5	7.6	49.0	1067	Violent
	17.4	504	5	15.3	98.0	985	↑
	17.0	469	5	30.6	196.0	853	↑
	17.4	486	5	45.9	294.0	808	↑
	7.0	412	5	40.0	294.0	718	↑
	8.9	474	5	13.3	98.0	980	↑
	7.8	520	5	6.7	49.0	1071	↑
	9.2	477	5	6.7	49.0	1049	↑
	9.2	477	5	29.3	216.0	856	↑
	9.2	477	5	40.0	294.0	694	↑
	9.2	477	5	40.0	294.0	712	↑
	21.1	491	5	16.3	104.3	969	↑
	20.9	519	5	8.3	53.2	1073	Fissure
19.4	545	5	16.1	103.5	1013	Violent	
14.3	596	5	11.4	73.3	1056	↑	

[*] E>0.1MeV

表2.1 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果

鋼種	試験雰囲気	引張速度 (mm/min)	温度 (°C)	引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	破断伸び (%)	破断位置
M11	大気中	0.5	RT	1306.8	1200.0	7.1	管部
			400	1022.4	895.2	3.7	
			500	820.9	680.4	15.9	
			600	573.3	555.4	14.0	
			700	368.2	274.4	7.3	
			800	278.0	208.0	14.1	
Mm13	大気中	0.5	RT	1096.0	857.0	7.5	管部
			700	290.0	260.0	15.5	
F11	大気中	0.5	800	213.0	225.0	7.8	管部
Mm13	大気中	0.5	RT	976.0	1195.0	15.7	管部
			700	386.0	391.0	4.4	

表2.2 ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の内圧バースト試験結果

鋼種	試験雰囲気	加圧方式	昇圧速度 (MPa/min)	試験温度 (°C)	破裂圧力 (MPa)	周応力 (MPa)	破断位置
M11	大気中	水圧	20	室温	172	1380	管部
				400	128	1024	↑
				700	56	448	↑
				800	39	312	↑
Mm13	大気中	水圧	20	室温	144	1169	管部
				700	49	398	↑
F11	大気中	水圧	20	室温	131	1047	管部
				400	98	780	↑
				700	45	356	↑
				800	30	240	↑
F13	大気中	水圧	20	室温	154	1289	管部
				700	49	410	↑

表2.3 ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の内圧クリープ試験結果

鋼種	試験雰囲気	封入ガス	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	破断位置
M11	大気中	Ar	700	170	415	管部
			700	150	685	↑
			700	130	1590	↑
Mm13	大気中	Ar	700	100	1122	管部
			750	80	287	↑
F13	大気中	Ar	700	150	112	管部
			700	140	418	↑
			750	120	72	↑
			750	110	412	管部及び溶接部

表2.4 ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果

鋼種	試験温度 (°C)	回転数 (rpm)	負荷荷重 (kgf)	応力 (MPa)	繰返し数 (サイクル)	破断位置
M11被覆管 -Mm13端栓	700	900	8.52	352	1.91E+04	母材
	700	900	9.01	372	8.10E+03	溶接部
	700	900	8.06	333	2.85E+04	↑
	700	900	7.60	314	4.53E+04	↑
	700	900	6.63	274	1.54E+05	↑
	700	900	8.55	353	1.93E+04	↑
	700	900	8.55	353	1.87E+04	↑
	700	900	8.55	353	1.72E+04	母材
	700	900	8.55	353	2.27E+04	溶接部
Mm13被覆管 -MB14端栓	700	2000	4.43	350	1.47E+05	溶接部
	700	2000	3.48	275	1.38E+05	母材
	700	2000	2.85	225	3.43E+05	溶接部
	700	2000	2.22	175	2.27E+06	↑
	700	2000	1.90	150	8.58E+06	↑
	700	2000	1.77	140	1.46E+07	↑
	700	2000	1.71	135	8.14E+06	↑
	700	2000	1.65	130	1.01E+07	↑
	700	2000	1.52	120	1.00E+08	未破断
	700	2000	1.58	125	1.69E+07	溶接部
Mm13被覆管 -MB14端栓	400	2000	4.43	350	1.47E+05	溶接部
	400	2000	4.18	330	1.01E+07	↑
	400	2000	4.12	325	1.76E+07	↑
	400	2000	4.31	340	1.38E+07	↑
	400	2000	3.99	315	3.95E+06	↑
	400	2000	3.80	300	6.39E+06	↑
	400	2000	3.55	280	1.00E+08	未破断
	400	2000	3.67	290	6.07E+07	溶接部
	400	2000	5.45	430	6.31E+04	↑
	400	2000	4.94	390	7.72E+04	↑

表3.1 ODS鋼被覆管のリング引張試験結果（応力・ひずみ関係式策定用）

鋼種	試験温度 (°C)	比例限度 (MPa)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)	k	m
M11	25	936.0	1023.0	1183.5	4.1	4.5	754.33	0.35
M11	100	770.7	863.9	1116.6	3.9	9.9	1448.70	0.44
	200	797.5	902.1	1060.6	2.7	7.3	946.13	0.35
	300	734.5	808.5	989.5	3.4	3.9	1116.37	0.44
	400	695.0	784.0	904.5	2.9	3.2	650.76	0.32
	500	640.5	705.	797.5	3.2	3.5	473.72	0.32
	600	458.5	510.5	593.5	5.4	6.9	314.24	0.29
	700	249.5	295.0	413.0	8.9	12.0	369.47	0.34
	800	194.5	217.5	295.5	9.0	10.9	257.51	0.39
	900	102.7	118.7	170.8	3.6	5.4	366.32	0.50
F11	25	797.4	884.8	1011.4	6.2	14.1	443.58	0.26
	100	734.4	822.1	953.1	4.5	8.8	546.72	0.29
	200	685.2	775.4	914.2	4.5	9.8	583.19	0.30
	300	627.5	726.4	845.2	3.9	12.3	515.35	0.27
	400	594.1	673.2	773.5	3.8	10.5	448.96	0.28
	500	520.3	578.8	663.5	4.2	13.2	363.72	0.29
	600	342.0	406.8	483.7	5.0	20.3	293.71	0.24
	700	230.9	250.6	300.5	10.3	29.0	144.16	0.32
	800	146.5	164.5	209.0	5.9	21.0	178.44	0.37
	900	104.0	117.1	157.8	4.8	8.4	207.86	0.45

表3.2 オンライン単軸クリープひずみ試験

鋼種	試験温度 (°C)	単軸応力 (MPa)	破断時間 (hr)	破断伸び (%)
M11	650	265	1104.1	8.5
	650	205	8818.8	6.9
	650	185	(3648.0)	(未破断)
	700	205	169.3	5.4
	700	180	1508.3	6.9
	700	155	5278.7	6.9
	700	140	(5280.0)	(未破断)
	750	155	111.1	9.2
	750	135	260.8	5.4
	750	120	4989.9	10.0
	750	105	(3000.0)	(未破断)
	750	105	(2856.0)	(未破断)

表3.3 9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試料の外径測定結果

鋼種	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	破断形態	外径ふくれ 平均 (%)	相当ひずみ x (%)	推定単軸ひずみ y (%)	x/y (-)
Mm11	700	150	129.9	374	Fissure	0.584	0.67	0.26	2.59
	700	130	112.6	1436	Pinhole	0.604	0.70	0.20	3.57
	700	110	95.3	7850	Fissure	0.431	0.50	0.14	3.67
M11	650	220	190.5	591	↑	1.147	1.32	0.49	2.70
	650	200	173.2	888	↑	1.023	1.18	0.35	3.37
	650	170	147.2	4135	↑	0.384	0.44	0.25	1.80
	700	180	155.9	222	↑	0.540	0.62	—	—
	700	150	129.9	1097	↑	0.384	0.44	0.29	1.54
	700	130	112.6	9124	↑	0.400	0.46	0.24	1.91
	700	130	112.6	1590	Pinhole	0.410	0.47	0.20	2.41
	700	170	147.2	415	Fissure	0.630	0.73	0.37	1.95
	700	150	129.9	685	↑	0.500	0.58	0.28	2.08
	700	170	147.2	284	↑	0.470	0.54	0.34	1.58
	700	150	129.9	1545	↑	0.340	0.39	0.30	1.32
	750	120	103.9	522	↑	0.280	0.32	—	—
	750	90	77.9	9788	↑	0.490	0.57	—	—
	750	100	86.6	1738	↑	0.064	0.74	—	—

平均：2.4

表3.4 12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試料の外径測定結果 (1)

鋼種	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	破断形態	外径ふくれ 平均 (%)	相当ひずみ (%)	計算値－ ノミナル (%)	計算値－ 上限 (%)	計算値－ 下限 (%)	備 考
F13	700	140	121	2042.5	—	0.65	0.751	0.60383	1.3935	0.2322	4回圧延材 (再結晶後1回圧 延⇒加工組織)
	750	100	87	2516.8	—	0.67	0.774	0.66016	1.5234	0.2539	
	750	110	95	1180.2	—	1.18	1.363	0.81224	1.8744	0.3124	
	650	245	212	364.2	—	0.7	0.808	0.81885	1.8896	0.3149	
	650	225	195	657.4	—	0.64	0.739	0.66419	1.5327	0.2555	
	650	210	182	792.5	—	1.04	1.201	0.51663	1.1922	0.1987	
F13	700	180	156	1849.5	—	2.73	3.152	1.77451	4.0950	0.6825	3回圧延材 (再結晶組織)
	700	165	143	2660.2	—	2.66	3.072	1.33971	3.0916	0.5153	
FM1 1	700	165	143	134.6	Violent	0.8	0.924	0.58099	1.3407	0.2235	プレミクス材
F11	650	270	234	467.1	Violent	1.8	2.078	1.34627	3.1068	0.5178	プレアロイ材
	650	290	251	509.7	↑	1.5	1.732	1.88928	4.3599	0.7266	
	650	240	208	7227.9	↑	1.1	1.270	1.72643	3.9841	0.6640	
	700	190	165	323.4	Fissure	1.3	1.501	1.38149	3.1881	0.5313	
	700	165	143	241.1	↑	1.1	1.270	0.68399	1.5784	0.2631	
	750	95	82	5105.1	—	0.8	0.924	0.64215	1.4819	0.2470	
	750	95	82	10233.4	—	0.6	0.693	0.78019	1.8004	0.3001	

表3.4 12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試料の外径測定結果 (2)

鋼種	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	破断形態	外径ふくれ 平均 (%)	相当ひずみ (%)	計算値－ ノミナル (%)	計算値－ 上限 (%)	計算値－ 下限 (%)	備 考
7A	700	170	147	101.1	Fissure	0.6	0.693	0.61152	1.4112	0.2352	4回圧延材 (工程2)
	700	150	130	491.5	↑	0.3	0.346	0.54895	1.2668	0.2111	
7A	700	150	130	327.1	Fissure	0.7	0.808	0.48980	1.1303	0.1884	2回圧延材
	700	150	130	113.2	↑	0.9	1.039	0.36390	0.8398	0.1400	
	700	150	130	2162	↑	0.9	1.039	0.83113	1.9180	0.3197	
	700	140	121	2243.1	—	0.9	1.039	0.61988	1.4305	0.2384	
	700	130	113	1206.4	Fissure	0.7	0.808	0.37607	0.8679	0.1446	

表3.5 MA957照射材の相当ひずみ（オープンチューブ、内圧封入管）

照射温度 (°C)	照射量 (dpa)	ϵ_s (%)	ϵ_e (%)			
		相当応力 =0MPa	相当応力 =26MPa	相当応力 =52MPa	相当応力 =87MPa	相当応力 =121MPa
400	40	-5.05E-02	—	1.06E-01	1.93E-01	2.46E-01
	77	-7.30E-02	—	2.04E-01	3.61E-01	4.55E-01
	112	-1.05E-01	—	2.52E-01	4.20E-01	5.55E-01
490~495	23.5	2.31E-02	—	1.04E-01	—	—
	40.5	1.15E-02	—	1.39E-01	2.54E-01	—
550	41.5	4.62E-02	—	5.20E-01	—	—
	82.5	8.08E-02	—	5.89E-01	—	—
605	41.5	1.04E-01	3.46E-01	—	—	—
	82	1.27E-01	4.39E-01	—	—	—

(*) オープンチューブの相当ひずみ (ϵ_s) 及び内圧封入管の相当ひずみ (ϵ_e) は、オープンチューブ及び内圧封入管の外径変化率に $2/\sqrt{3}$ を乗じることにより求めた。

表3.6 MA957照射材の照射クリープひずみ

照射温度 (°C)	照射量 (dpa)	$\epsilon_{Irr} = \epsilon_e - \epsilon_s$ (%)			
		相当応力 =26MPa	相当応力 =52MPa	相当応力 =87MPa	相当応力 =121MPa
400	40	—	1.56E-01	2.43E-01	2.97E-01
	77	—	2.77E-01	4.34E-01	5.28E-01
	112	—	3.57E-01	5.25E-01	6.59E-01
490~495	23.5	—	8.08E-02	—	—
	40.5	—	1.27E-01	2.42E-01	—
550	41.5	—	4.73E-01	—	—
	82.5	—	5.08E-01	—	—
605	41.5	2.42E-01	—	—	—
	82	3.12E-01	—	—	—

(*) 照射クリープひずみ (ϵ_{Irr}) は、内圧封入管の相当ひずみからオープンチューブの相当ひずみを差引くことにより求めた。

表3.7 MA957照射材の単位応力当たりの照射クリープひずみ

照射温度 (°C)	照射量 (dpa)	ϵ_{Irr} / σ (%/MPa)			
		相当応力 =26MPa	相当応力 =52MPa	相当応力 =87MPa	相当応力 =121MPa
400	40	—	3.00E-03	2.81E-03	2.45E-03
	77	—	5.34E-03	5.02E-03	4.36E-03
	112	—	6.86E-03	6.06E-03	5.44E-03
490~495	23.5	—	1.56E-03	—	—
	40.5	—	2.44E-03	2.80E-03	—
550	41.5	—	9.11E-03	—	—
	82.5	—	9.78E-03	—	—
605	41.5	9.33E-03	—	—	—
	82	1.20E-02	—	—	—

表4.1 9Cr-ODS鋼 (Mm14) のリング引張試験結果 (ひずみ速度依存性)

鋼種	ひずみ速度 (%/min)	試験温度 (°C)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)	
Mm14	25	25	907.8	1153.4	7.0	9.7	
		25	946.8	1169.1	6.5	8.9	
		300	723.0	882.7	3.2	3.6	
		300	762.2	931.3	3.5	4.0	
		400	642.9	814.3	3.5	4.0	
		400	668.2	789.3	2.8	3.4	
		500	579.5	735.8	4.6	6.5	
		500	587.4	722.2	4.1	4.8	
		600	400.5	512.7	5.8	8.5	
		600	395.9	522.8	5.0	9.6	
		700	251.4	337.7	6.7	11.6	
		700	233.9	337.4	7.0	11.5	
		800	147.0	233.9	8.8	13.6	
		800	181.2	233.9	8.8	12.5	
		0.5	25	874.4	1117.4	4.5	5.8
			400	724.1	850.3	4.0	4.4
	600		348.6	449.1	4.5	7.8	
	800		150.9	177.5	1.9	3.6	

表4.2 Na浸漬材及び熱時効材の引張試験結果^{[1], [3]}

鋼種	材 料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
M93	受入材	650	471	535	4.0	13.7
		650	498	556	4.3	13.6
		700	391	441	4.1	12.0
		700	353	431	4.5	10.0
	Na浸漬材 (650°C×1000hr)	650	524	566	2.6	14.1
		650	560	601	2.8	15.3
	Na浸漬材 (650°C×3000hr)	650	528	573	2.9	11.4
		650	475	538	3.2	14.3
	Na浸漬材 (650°C×10000hr)	650	453	510	4.3	13.8
		650	441	496	3.7	11.8
	Na浸漬材 (700°C×1000hr)	700	379	433	3.2	5.6
		700	385	459	4.6	6.6
	Na浸漬材 (700°C×3000hr)	700	351	412	4.5	8.3
		700	368	433	4.3	8.8
	Na浸漬材 (700°C×10000hr)	700	290	363	2.9	6.4
		700	308	375	4.6	9.4
F95	受入材	650	397	452	5.5	15.4
		650	400	447	4.8	15.1
		700	295	343	5.4	11.2
		700	306	340	5.3	9.4
	Na浸漬材 (650°C×1000hr)	650	363	430	5.6	11.5
		650	366	431	5.7	11.5
	Na浸漬材 (650°C×3000hr)	650	372	431	6.0	15.0
		650	374	432	5.0	11.7
	Na浸漬材 (700°C×1000hr)	700	266	320	5.2	9.9
		700	268	321	3.8	10.6
	Na浸漬材 (700°C×3000hr)	700	252	317	6.2	14.1
		700	266	321	5.5	12.5
Mm14	受入材	650	351	422	3.5	12.6
		650	364	429	3.1	11.6
		700	309	355	3.5	9.6
		700	299	354	3.8	9.8
	熱時効材 (700°C×70hr)	650	382	443	3.0	10.9
		650	363	431	3.0	8.5
	熱時効材 (750°C×70hr)	650	347	412	2.9	8.2
		650	342	415	3.3	7.9
	熱時効材 (750°C×210hr)	650	340	410	3.2	9.2
		650	343	412	3.3	9.1
	熱時効材 (750°C×70hr)	700	294	325	2.5	6.5
		700	280	338	3.7	9.4
	熱時効材 (800°C×70hr)	700	265	309	3.4	6.8
		700	263	322	4.4	7.4
	熱時効材 (800°C×260hr)	700	266	328	4.1	6.6
		700	248	305	3.9	6.6

表4.3 Ni拡散材及び熱時効材の引張試験結果^[13]

鋼種	材 料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
M11	受入材	650	420	509	8.8	11.0
		650	415	505	7.8	9.0
		700	309	416	7.4	8.2
		700	313	413	8.0	8.3
	熱時効材 (850°C×500hr)	650	360	400	3.6	11.8
	熱時効材 (850°C×750hr)	650	363	420	5.0	12.0
	熱時効材 (850°C×500hr)	700	255	316	4.7	11.6
	熱時効材 (850°C×750hr)	700	269	319	5.0	18.0
	Ni拡散材80 μ m (850°C×500hr)	650	355	403	3.4	10.6
		650	366	406	2.7	8.0
	Ni拡散材120 μ m (850°C×750hr)	650	359	419	3.2	7.3
		650	339	398	2.6	6.0
	Ni拡散材80 μ m (850°C×500hr)	700	287	310	1.8	9.9
		700	273	318	4.6	8.9
	Ni拡散材120 μ m (850°C×750hr)	700	296	316	1.3	5.5
		700	286	319	1.4	10.5

表4.4 9Cr-ODS鋼の大気中, Ar中及びNa中での内圧クリープ試験結果^[11]

鋼種	材料	試験雰囲気	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	備考
M11	受入材	大気中	650	270	25	
			650	220	591	
			650	200	888	
			650	170	4135	
			700	180	222	
			700	170	415	
			700	170	284	
			700	150	1097	
			700	150	684	
			700	150	1545	
			700	130	9124	
			700	110	19202	(継続中)
	受入材	Ar中	650	180	7800	
			650	160	10254	(継続中)
			650	155	10254	(継続中)
			650	140	10254	(継続中)
			650	200	1554	(継続中)
			700	120	10076	(継続中)
			700	115	10076	(継続中)
			700	110	10076	(継続中)
			700	105	10776	(継続中)
			700	150	1115	
			700	135	1500	(継続中)
			750	100	8976	(継続中)
			750	90	8976	(継続中)
			750	85	8976	(継続中)
			受入材	Na中	650	200
	650	180			3746	
	650	180			969	
	650	165			969	(継続中)
	650	165			969	(継続中)
	650	150			969	(継続中)
	650	150			969	(継続中)
	700	150			895	
	700	135			3338	
	700	115			8201	(継続中)
700	135	1784			(継続中)	
700	120	1784			(継続中)	
700	110	1784			(継続中)	
700	110	1784	(継続中)			

表4.5 9Cr-ODS鋼の熱時効材及びNi拡散材の内圧クリープ試験結果^[11]

鋼種	材料	試験雰囲気	試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (hr)	備考
M11	Ni拡散材100 μ m (850°C×1000hr)	Ar中	650	125	5210	
			650	110	6254	(継続中)
	熱時効材 (850°C×1000hr)	Ar中	650	125	6254	(継続中)
			650	110	6254	(継続中)
	Ni拡散材100 μ m (850°C×500hr)	Ar中	700	150	80	
			700	135	621	
			700	115	1392	
	Ni拡散材120 μ m (850°C×750hr)	Ar中	700	150	16~38.5	
			700	135	64	
			700	115	16~38.5	
			700	105	786	
	Ni拡散材50 μ m (850°C×100hr)	Ar中	700	110	4535	
			700	100	6000	(継続中)
	Ni拡散材100 μ m (850°C×1000hr)	Ar中	700	100	4067	
			700	90	4682	
			700	80	6000	(継続中)
			700	70	6000	(継続中)
	熱時効材 (850°C×100hr)	Ar中	700	110	6000	(継続中)
			700	100	6000	(継続中)
	熱時効材 (850°C×1000hr)	Ar中	700	100	6000	(継続中)
700			90	6000	(継続中)	
700			80	6000	(継続中)	
700			70	6000	(継続中)	

表6.1 9Cr-ODS鋼被覆管の材料仕様

(1) 化学成分

・原料粉末にプレアロイ粉を使用する場合

(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃	Ex.O	N	Ar
規格値	0.11 ~0.15	≦0.20	≦0.20	≦0.02	≦0.02	≦0.20	8.6 ~9.4	1.8 ~2.2	0.20 ~0.35	0.33 ~0.37	0.04 ~0.10	≦0.07	≦0.007

(2) 最終熱処理条件

1050℃×60分+780~800℃×60分

表6.2 12Cr-ODS鋼被覆管の材料仕様

(1) 化学成分

(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃	Ex.O	N	Ar
規格値	0.01 ~0.05	≦0.20	≦0.20	≦0.02	≦0.02	≦0.20	11.6 ~12.4	1.8 ~2.2	0.24 ~0.28	0.20 ~0.26	0.05 ~0.09	≦0.07	≦0.007

(2) 最終熱処理条件

1050℃×60分

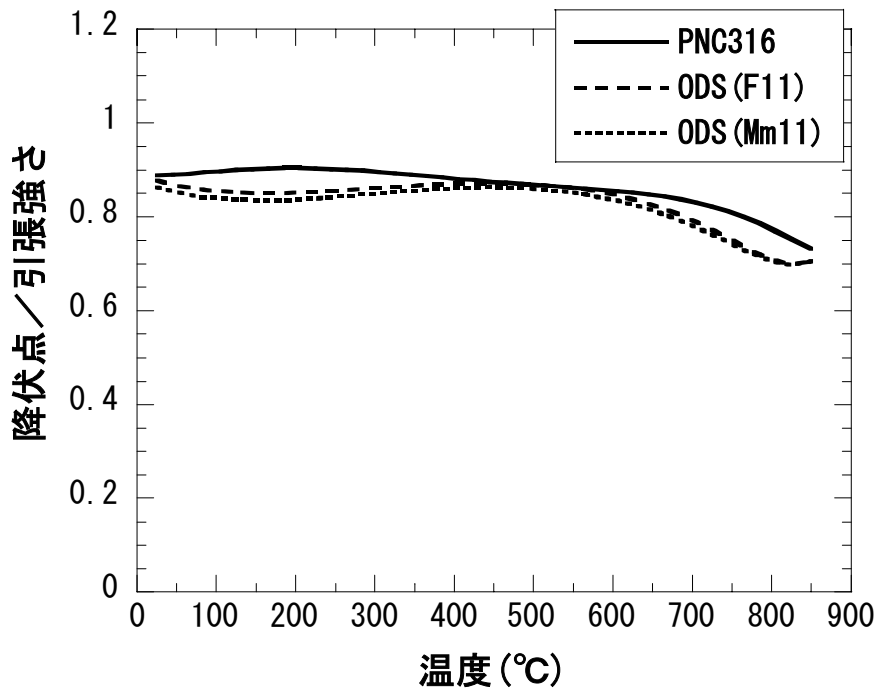


図1.1 降伏点/引張強さの温度依存性（非照射材）

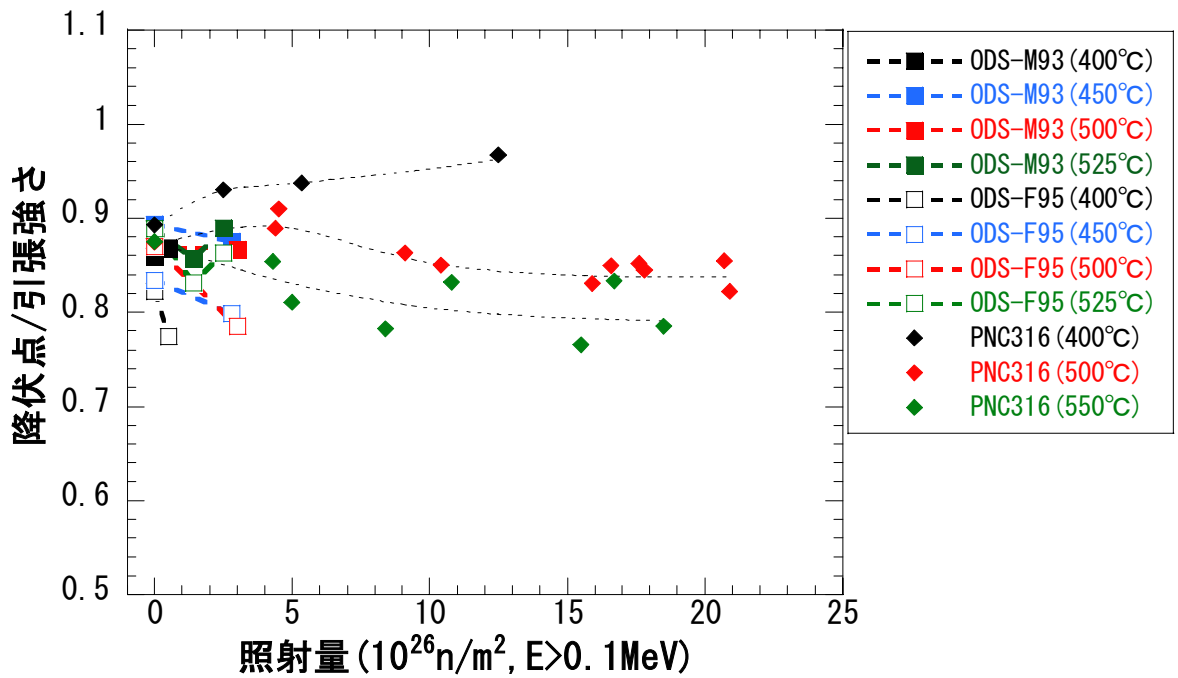


図1.2 降伏点/引張強さの照射量依存性

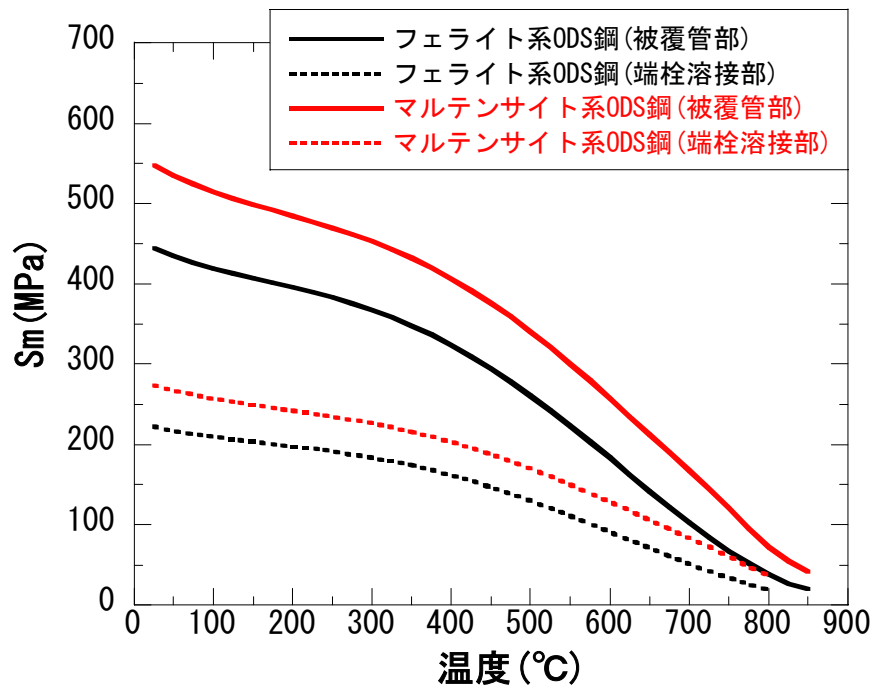


図1.3 ODS鋼被覆管及び溶接部の設計応力強さ (S_m)

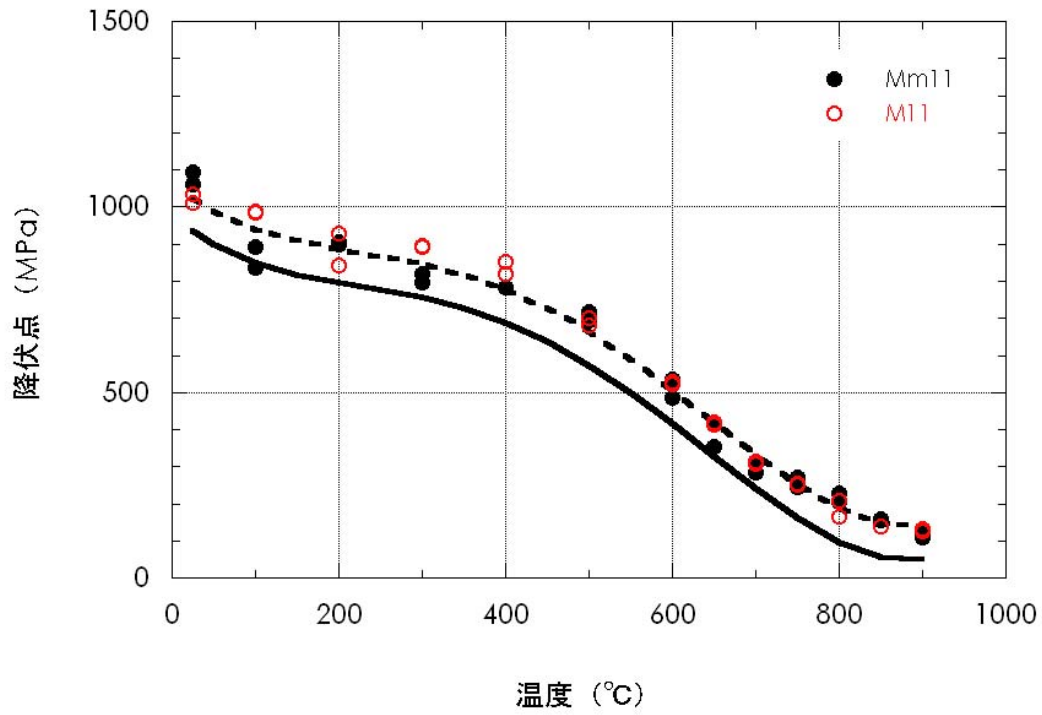


図1.4 9Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点 (S_y)

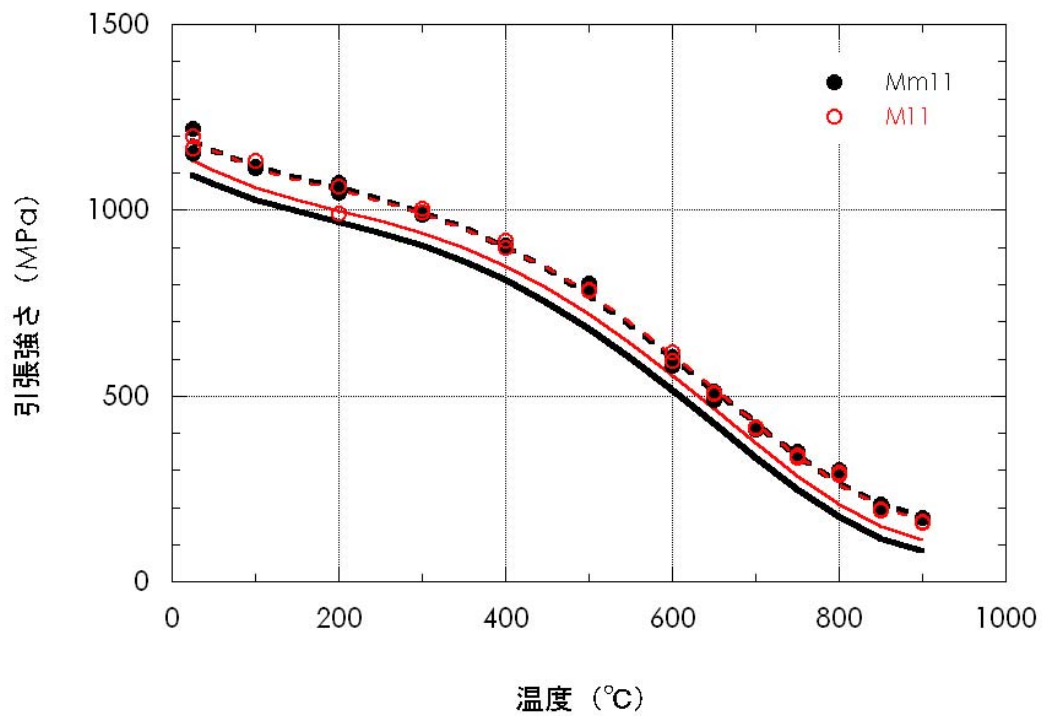


図1.5 9Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ (S_u)

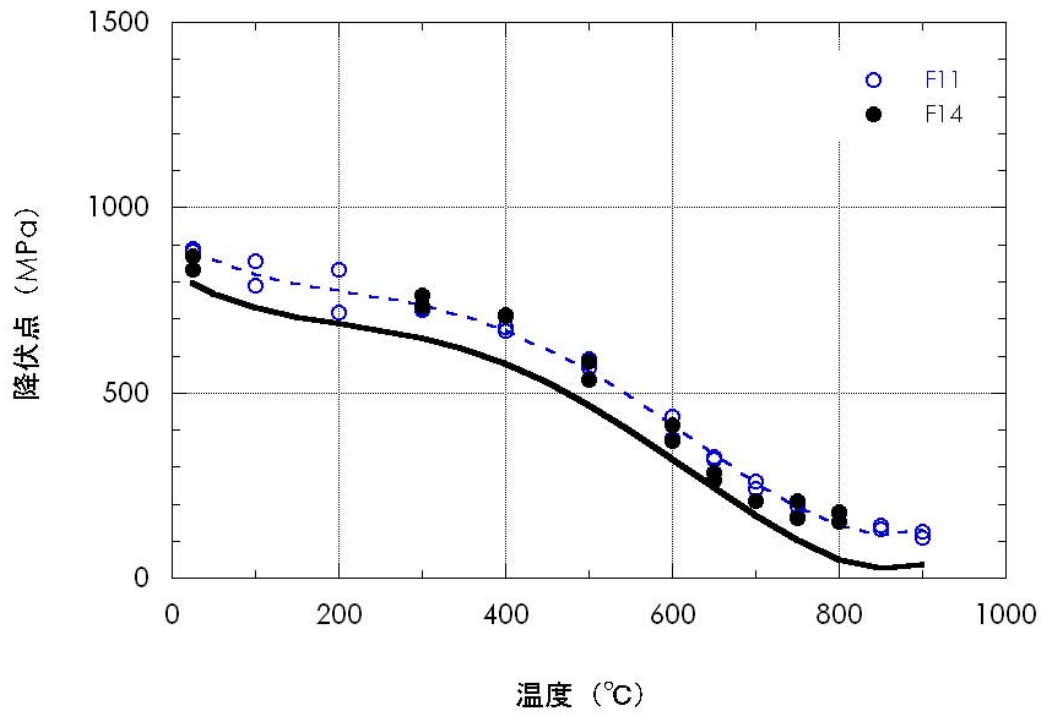


図1.6 12Cr-ODS鋼被覆管の設計降伏点 (S_y)

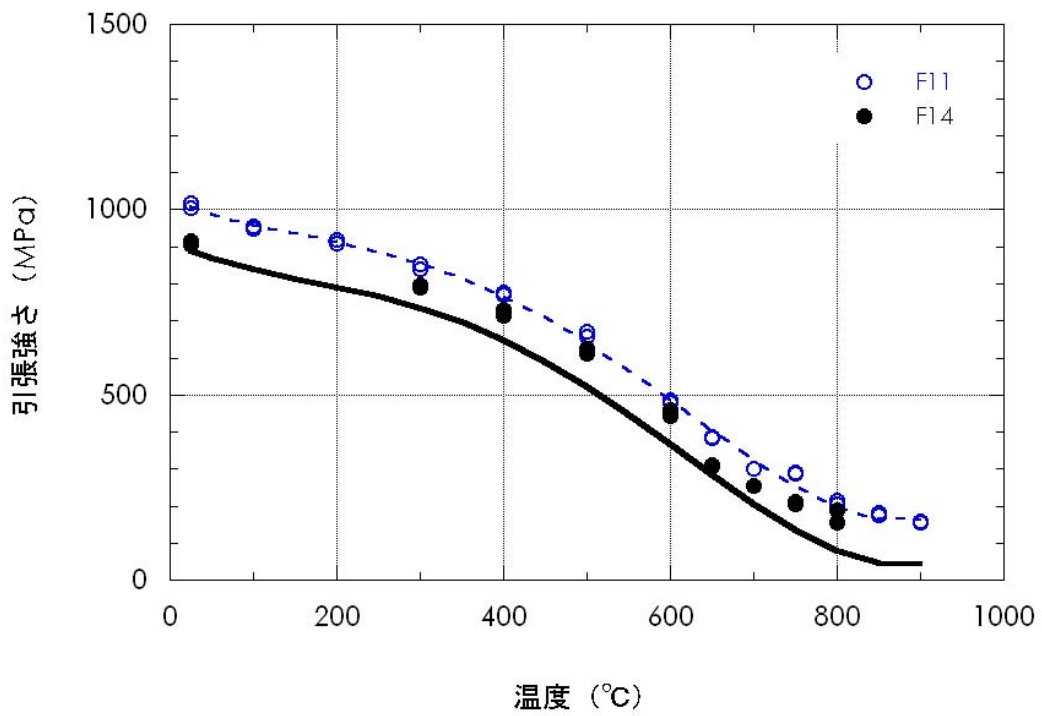


図1.7 12Cr-ODS鋼被覆管の設計引張強さ (S_u)

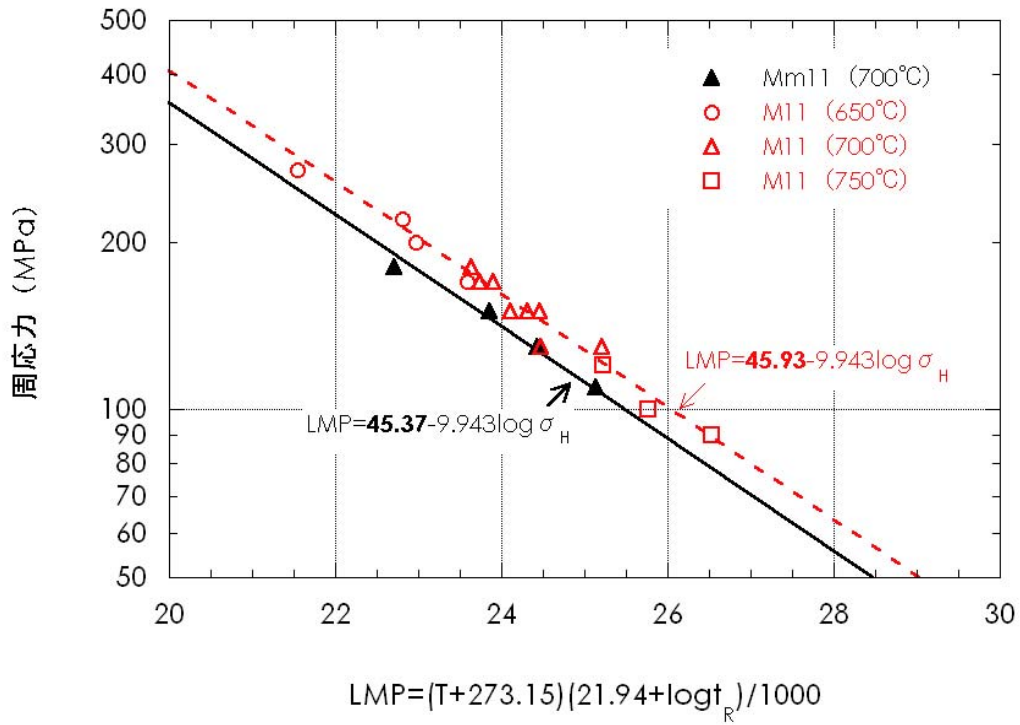


図1.8 9Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ

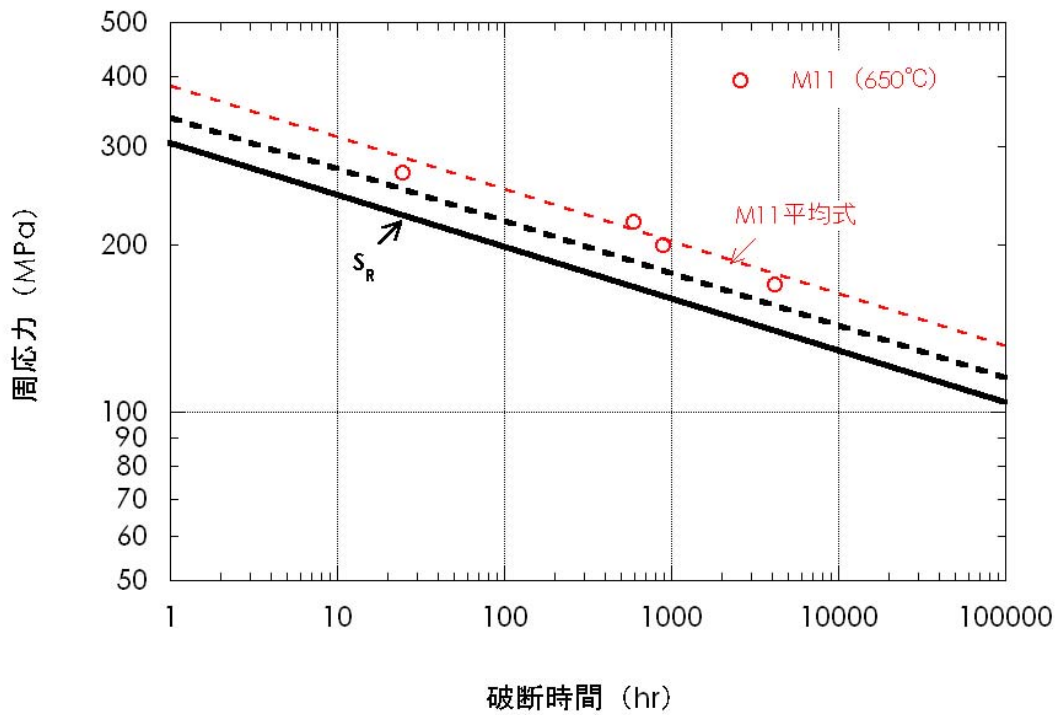


図1.9 9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 650°C)

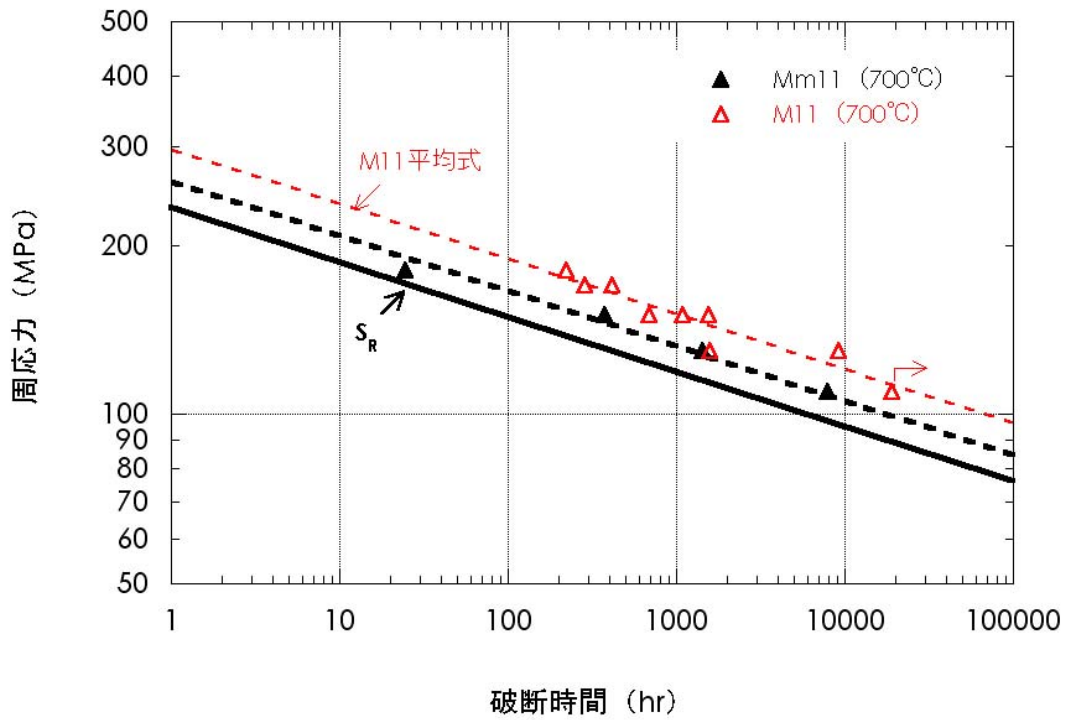


図1.10 9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 700°C)

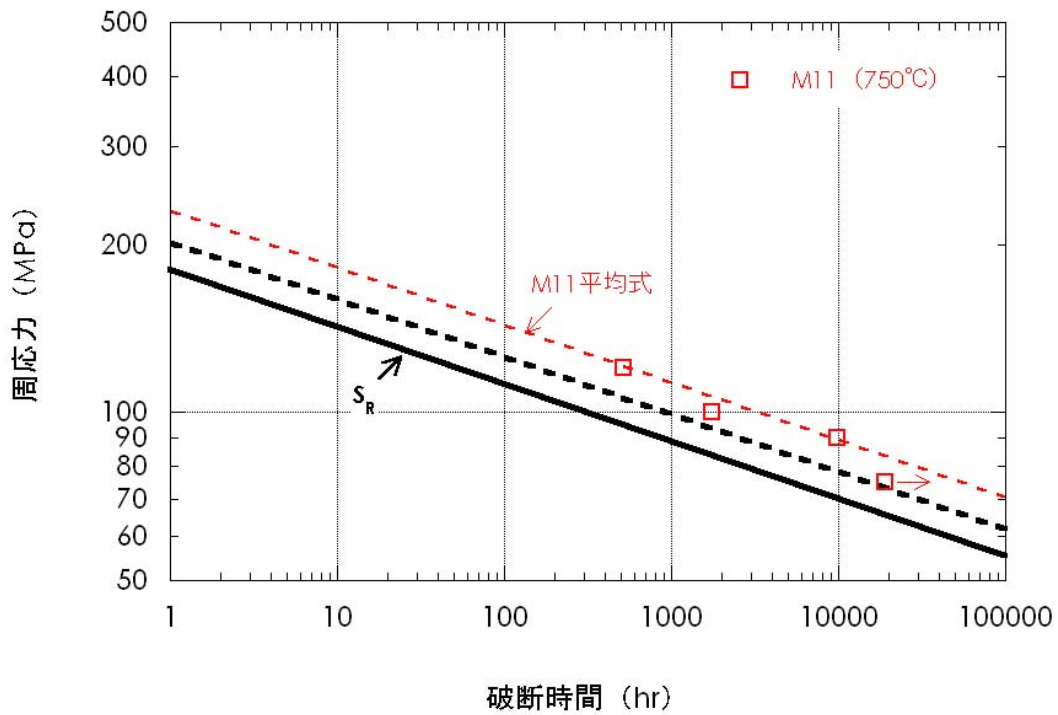


図1.11 9Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 750°C)

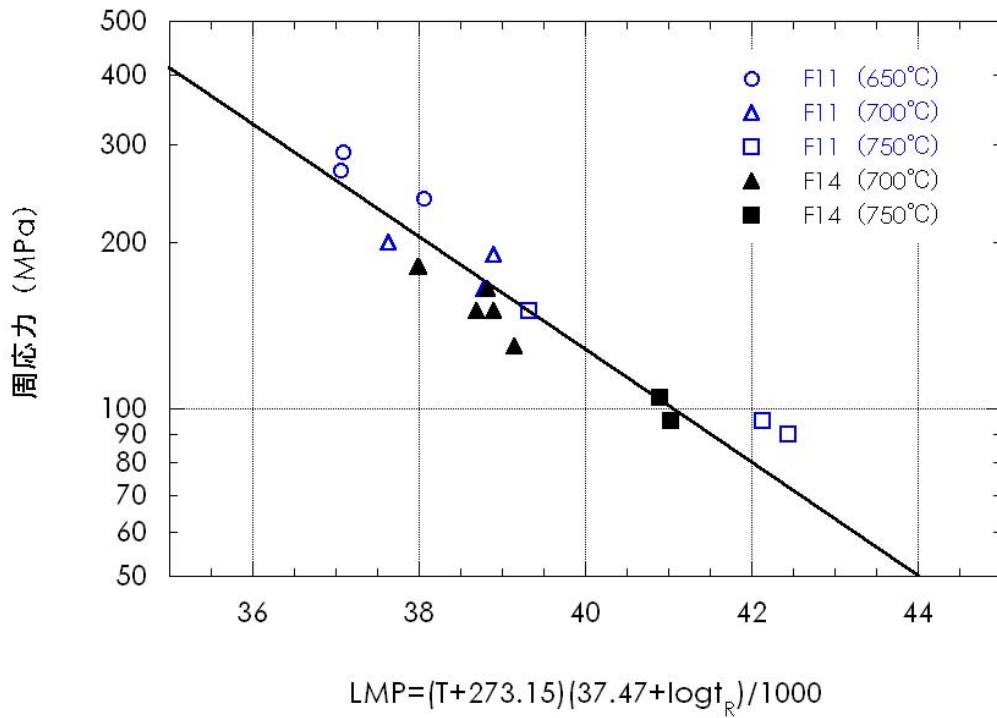


図1.12 12Cr-ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断強さ

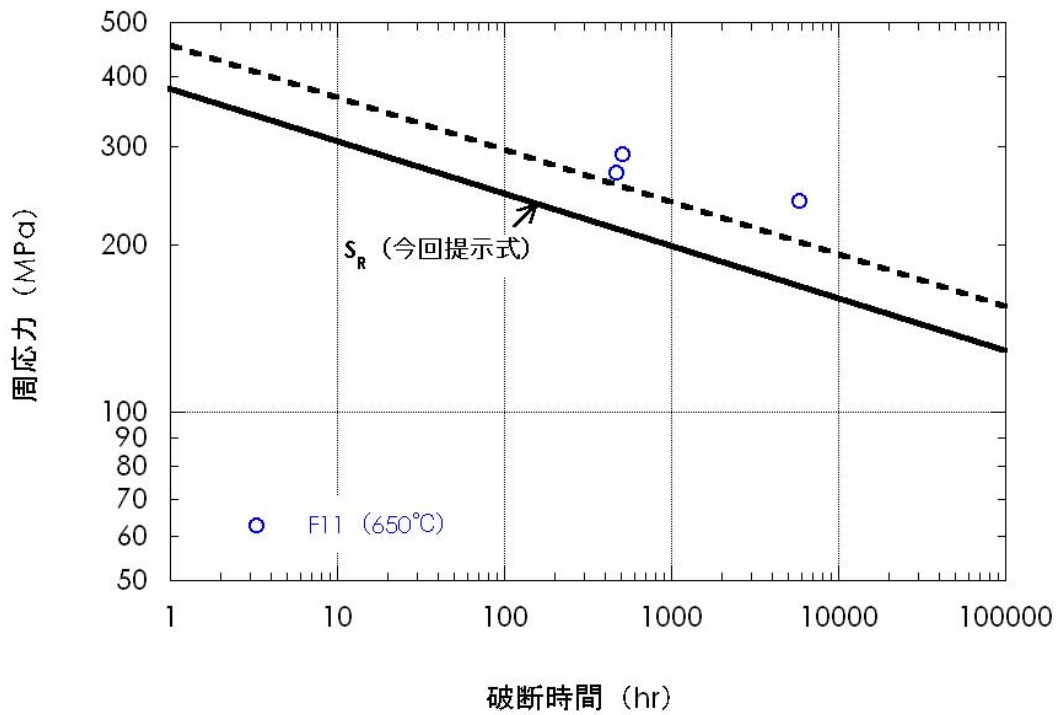


図1.13 12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 650°C)

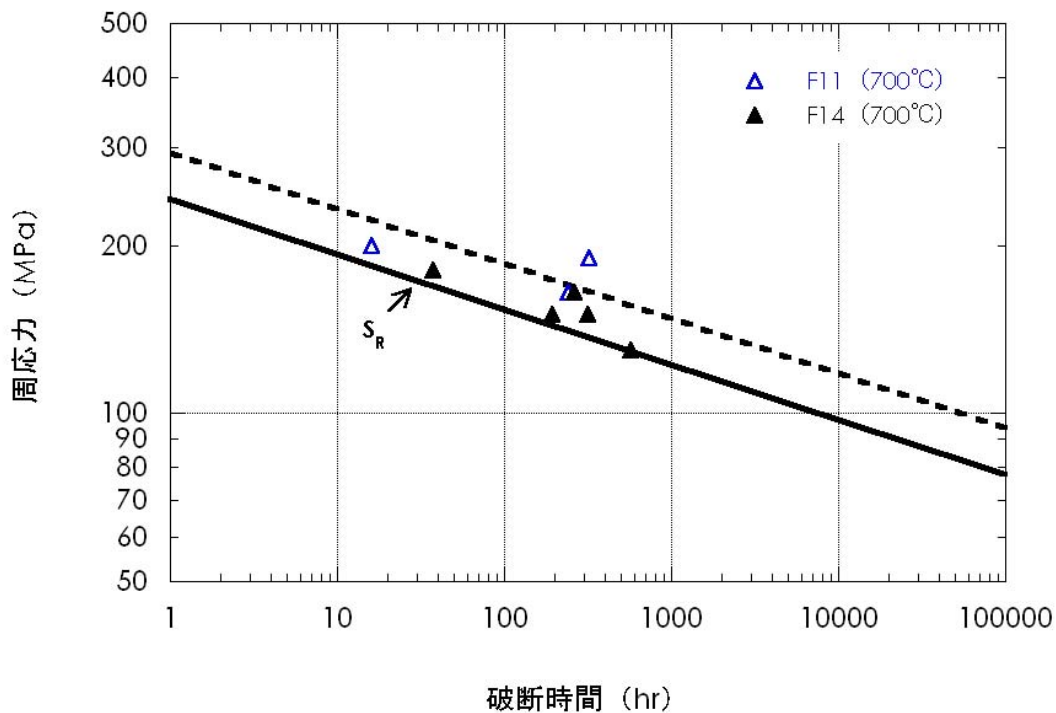


図1.14 12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 700°C)

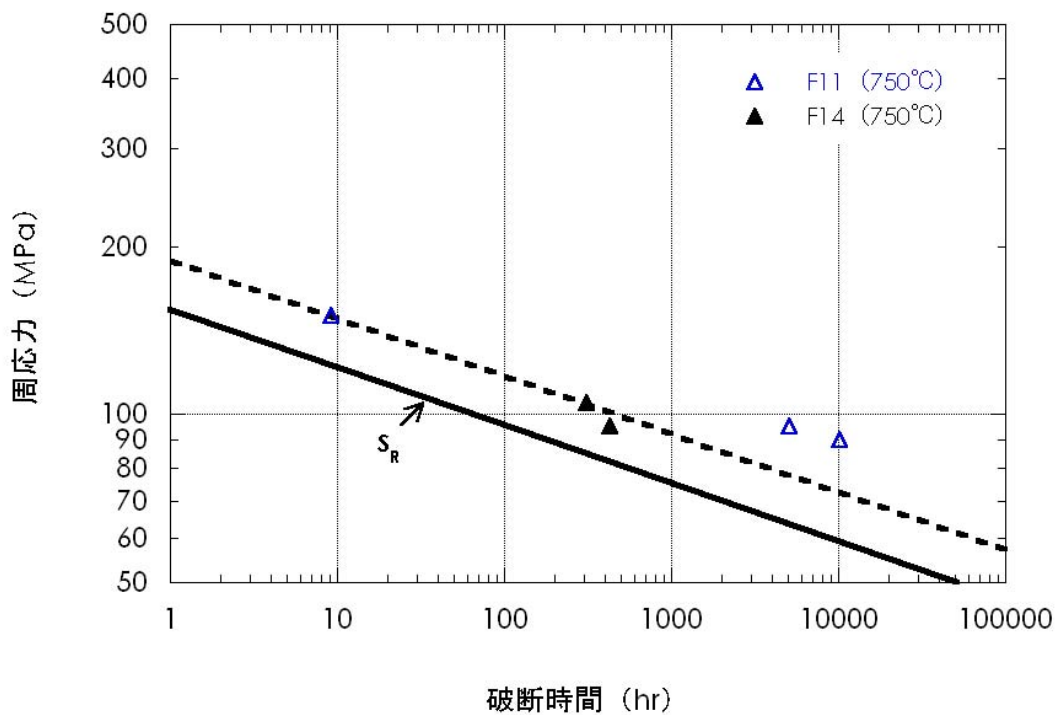


図1.15 12Cr-ODS鋼被覆管の設計クリープ破断応力強さ (S_R : 750°C)

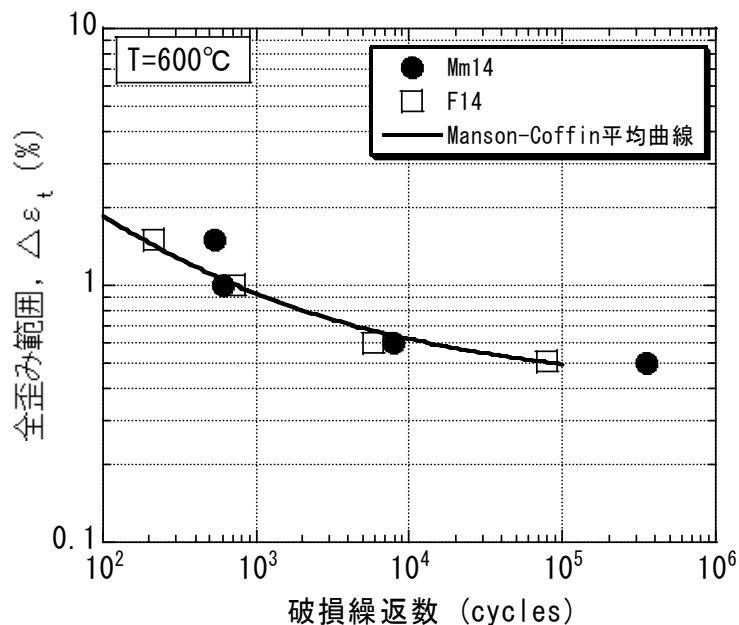


図1.16 疲労破損データとManson-Coffin平均曲線 (600°C)

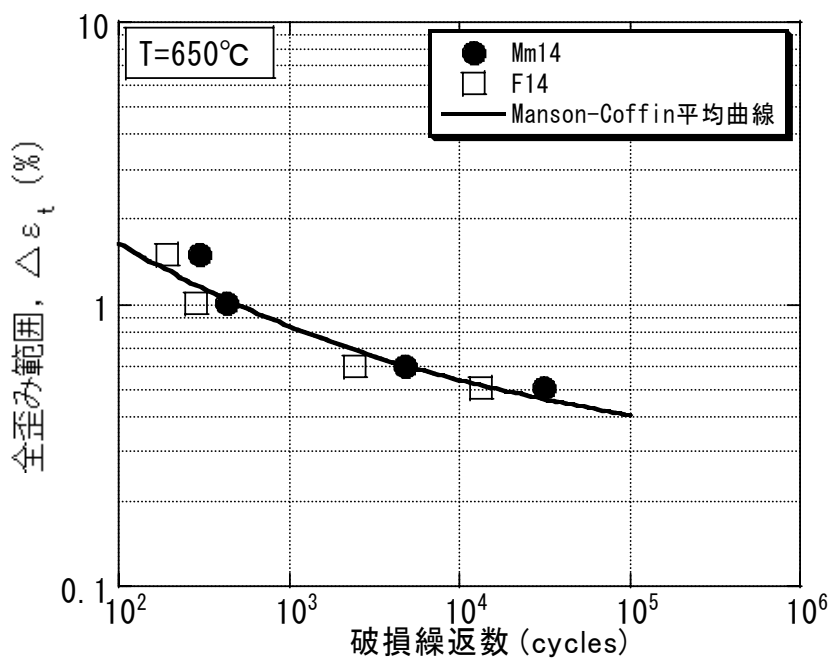


図1.17 疲労破損データとManson-Coffin平均曲線 (650°C)

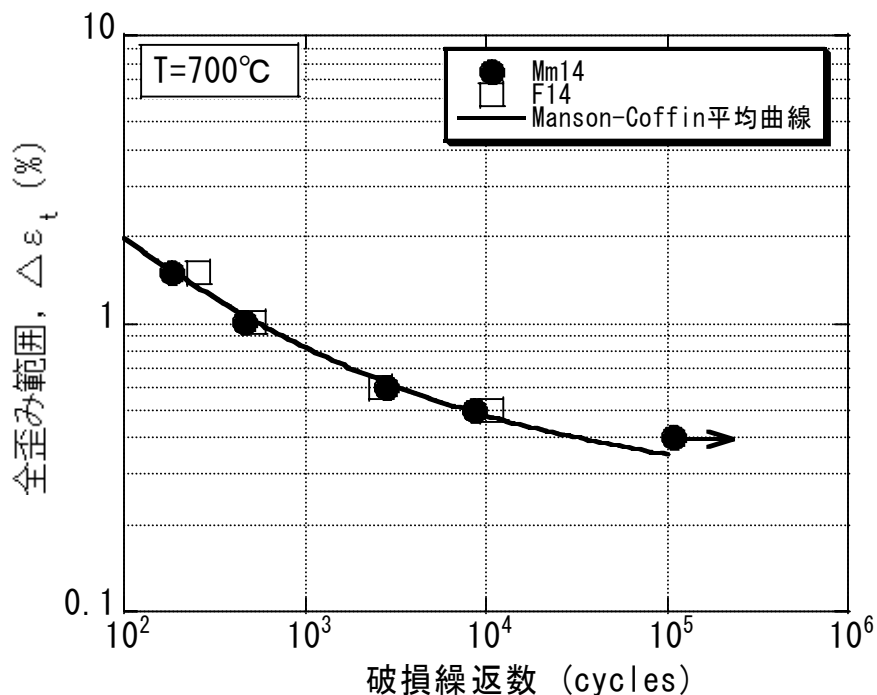


図1.18 疲労破損データとManson-Coffin平均曲線 (700°C)

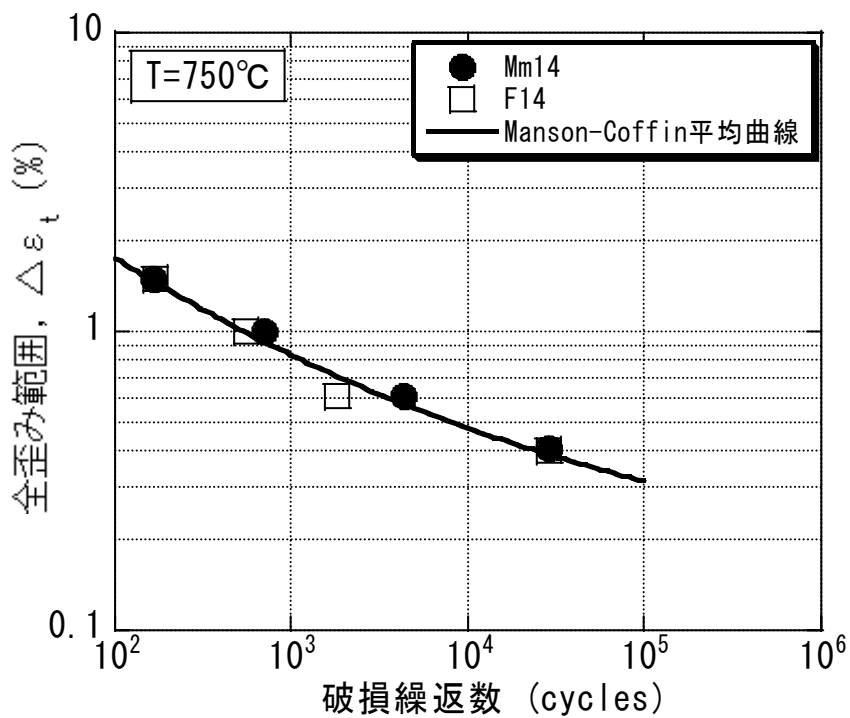


図1.19 疲労破損データとManson-Coffin平均曲線 (750°C)

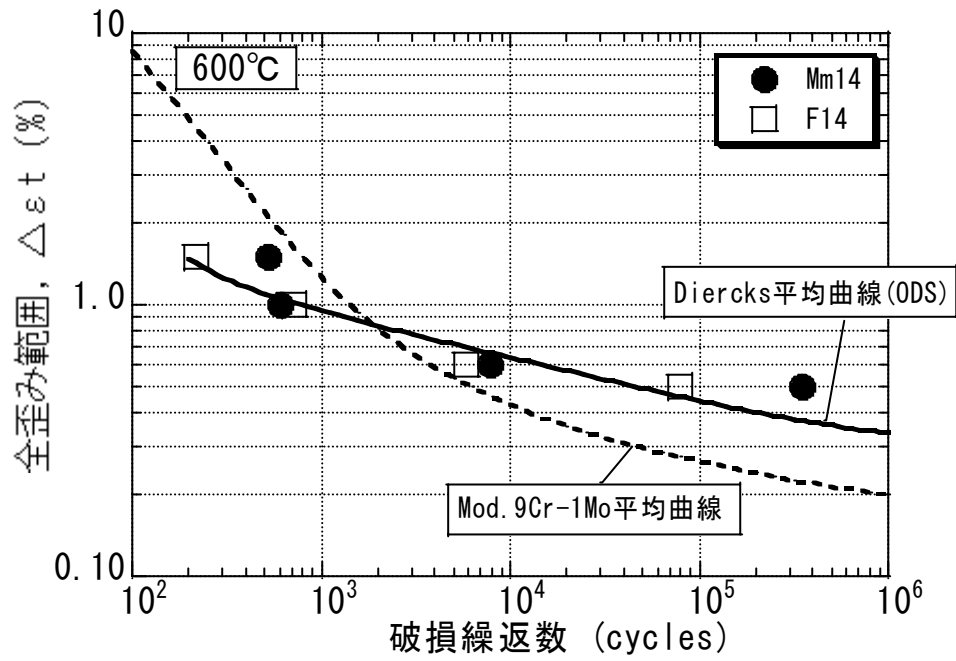


図1.20 Dierck平均曲線と疲労破損データ (600°C)

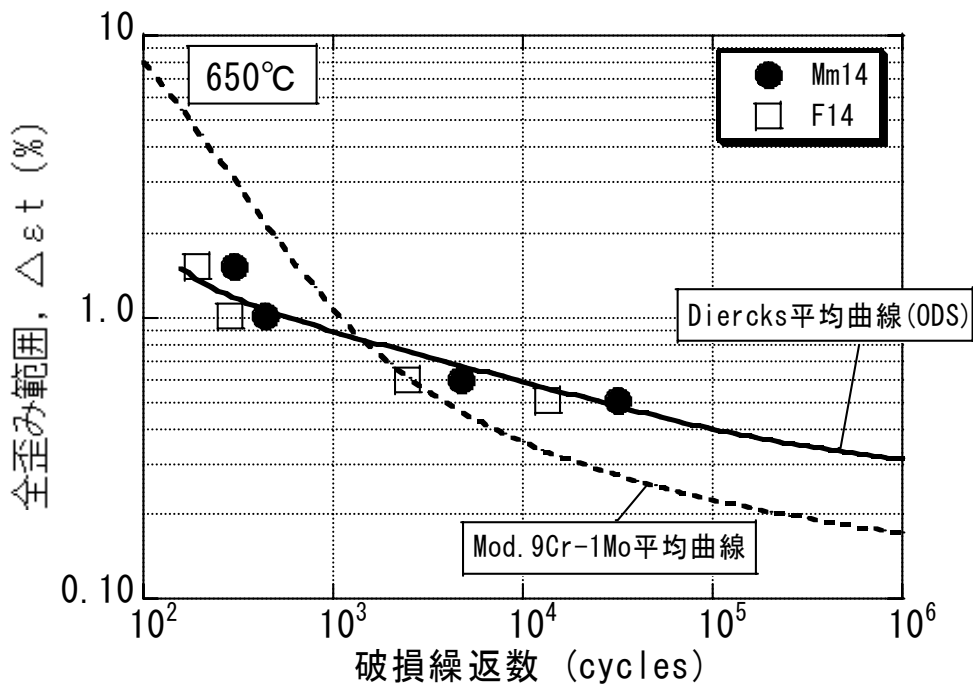


図1.21 Dierck平均曲線と疲労破損データ (650°C)

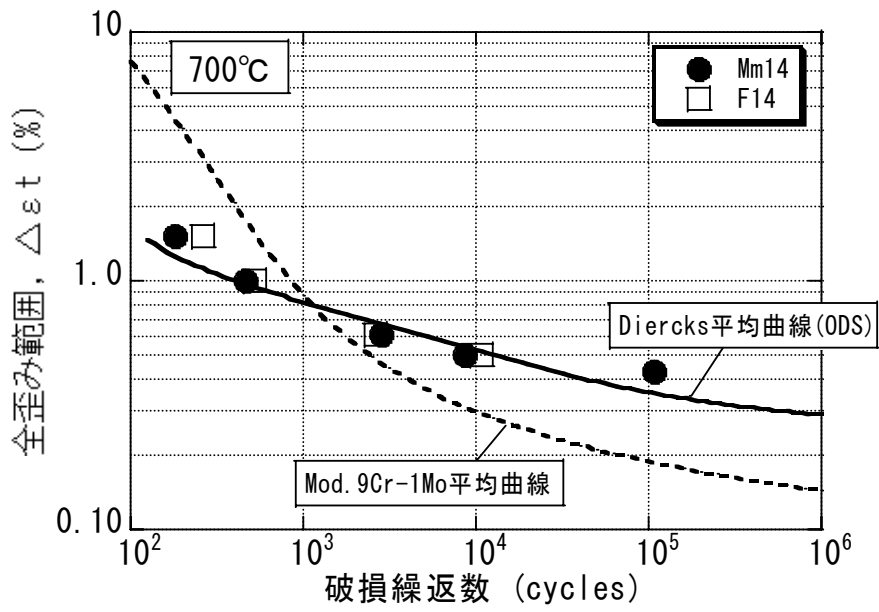


図1.22 Dierck平均曲線と疲労破損データ (700°C)

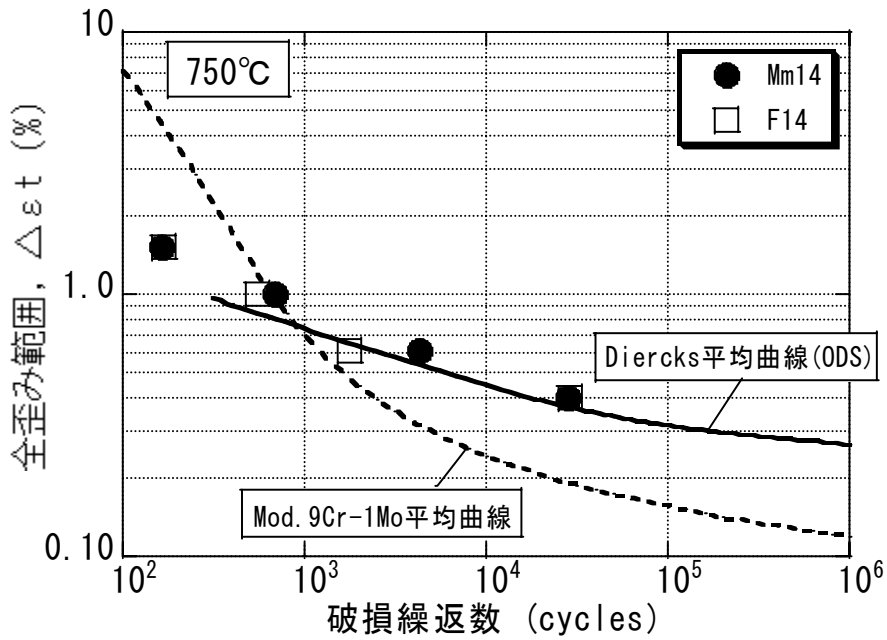


図1.23 Dierck平均曲線と疲労破損データ (750°C)

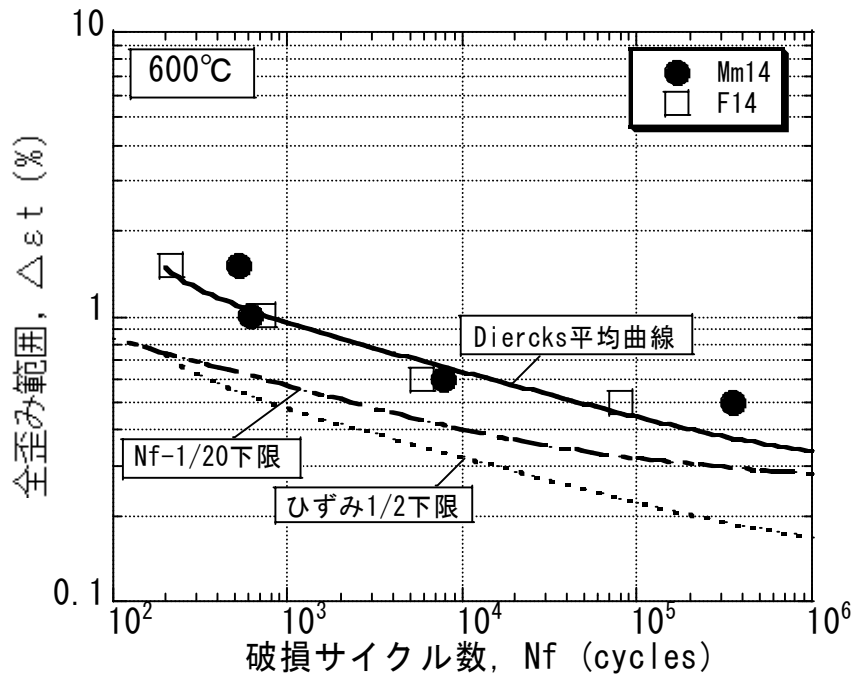


図1.24 Nf-1/20下限曲線、ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ (600°C)

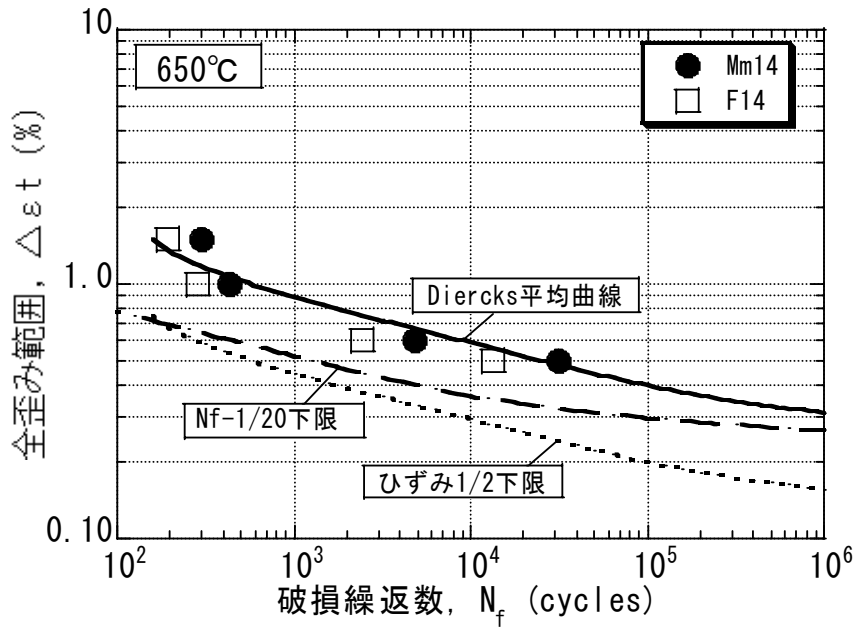


図1.25 Nf-1/20下限曲線、ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ (650°C)

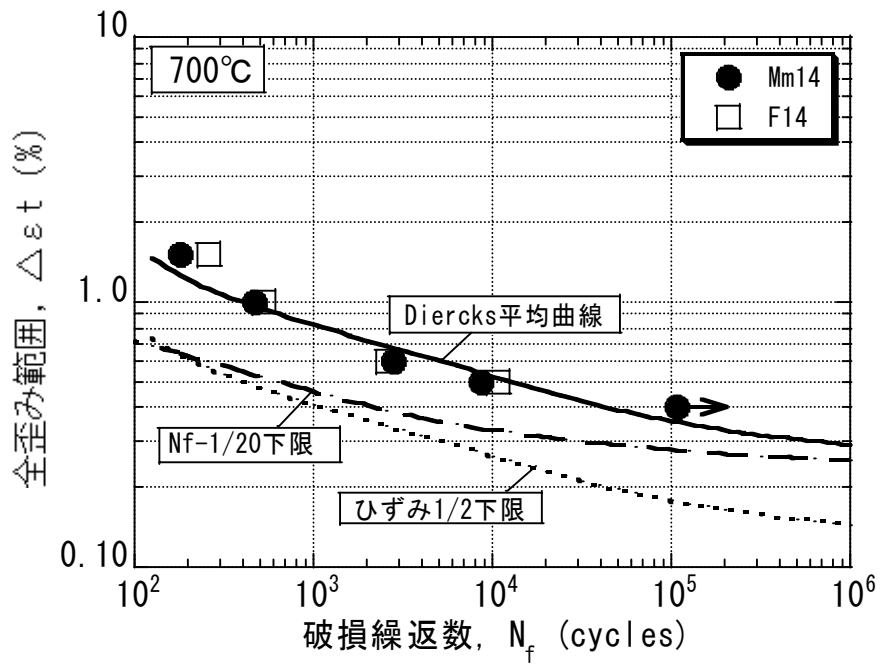


図1.26 Nf-1/20下限曲線、ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ (700°C)

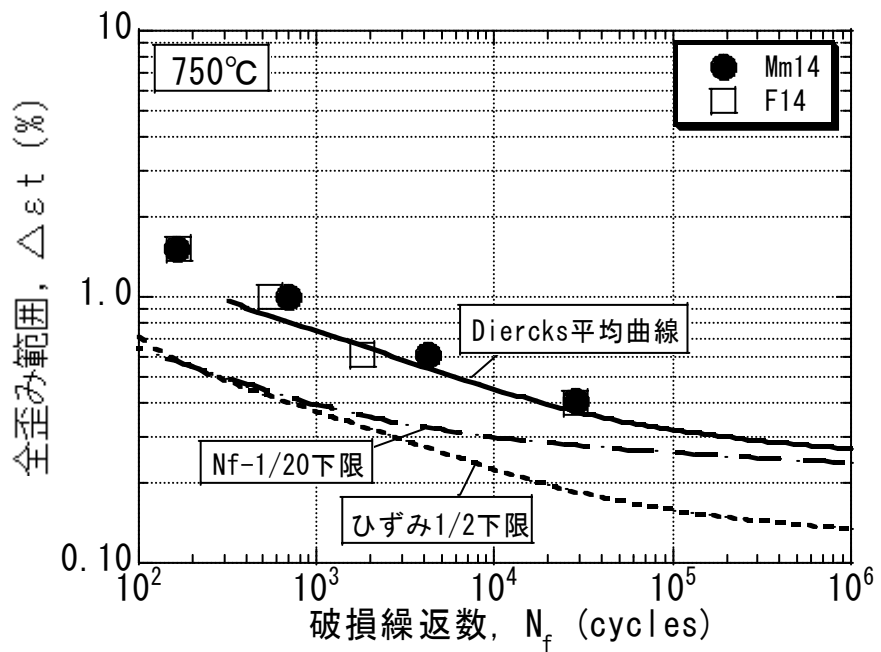


図1.27 Nf-1/20下限曲線、ひずみ1/2下限曲線と疲労破損データ (750°C)

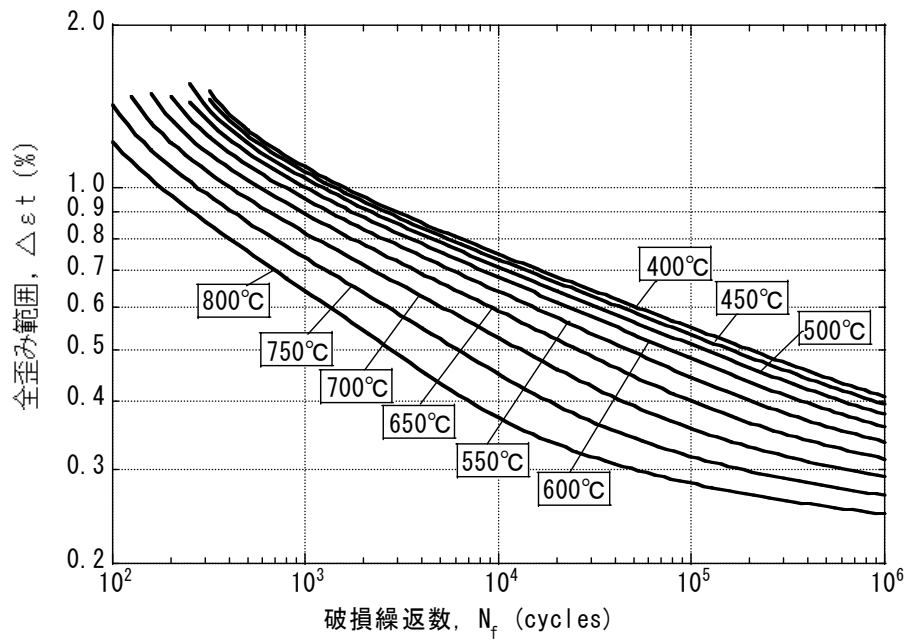


図1.28 各温度の平均疲労破損ひずみ曲線

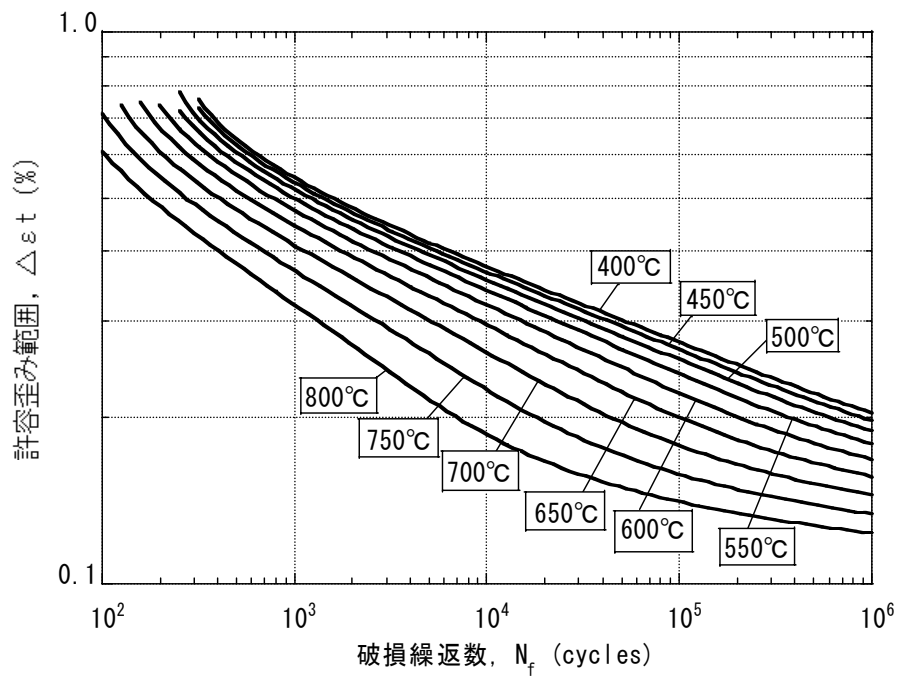


図1.29 各温度の許容ひずみ範囲

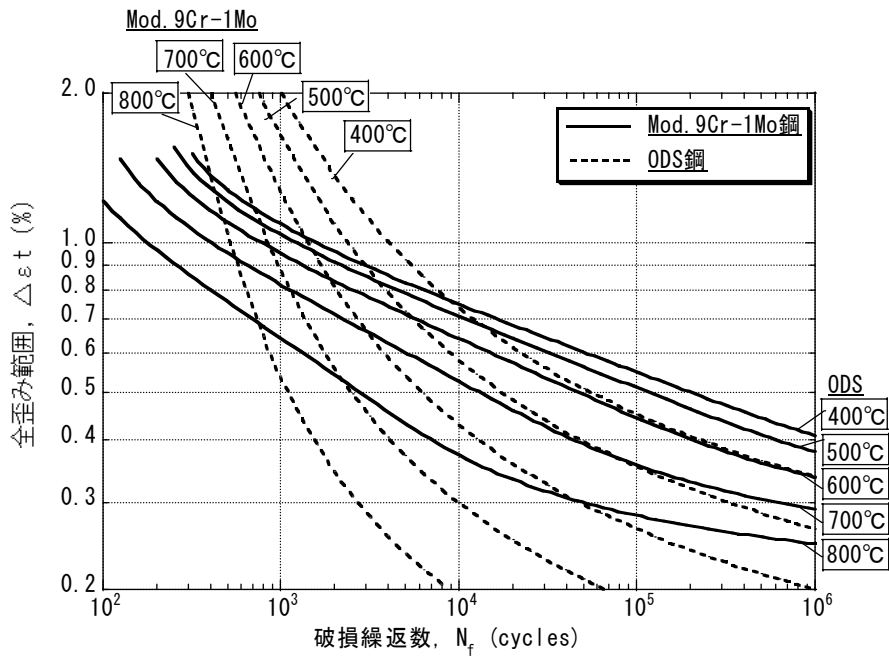


図1.30 ODS鋼とMod.9Cr-1Mo鋼の各温度の平均疲労破損ひずみ曲線の比較

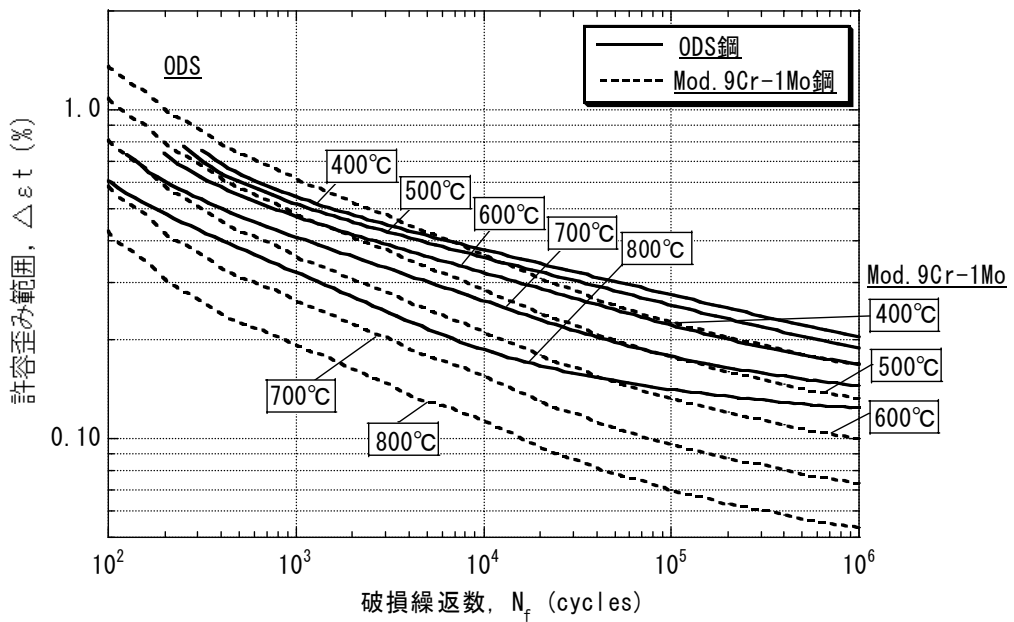


図1.31 ODS鋼とMod.9Cr-1Mo鋼の各温度の許容ひずみ範囲の比較

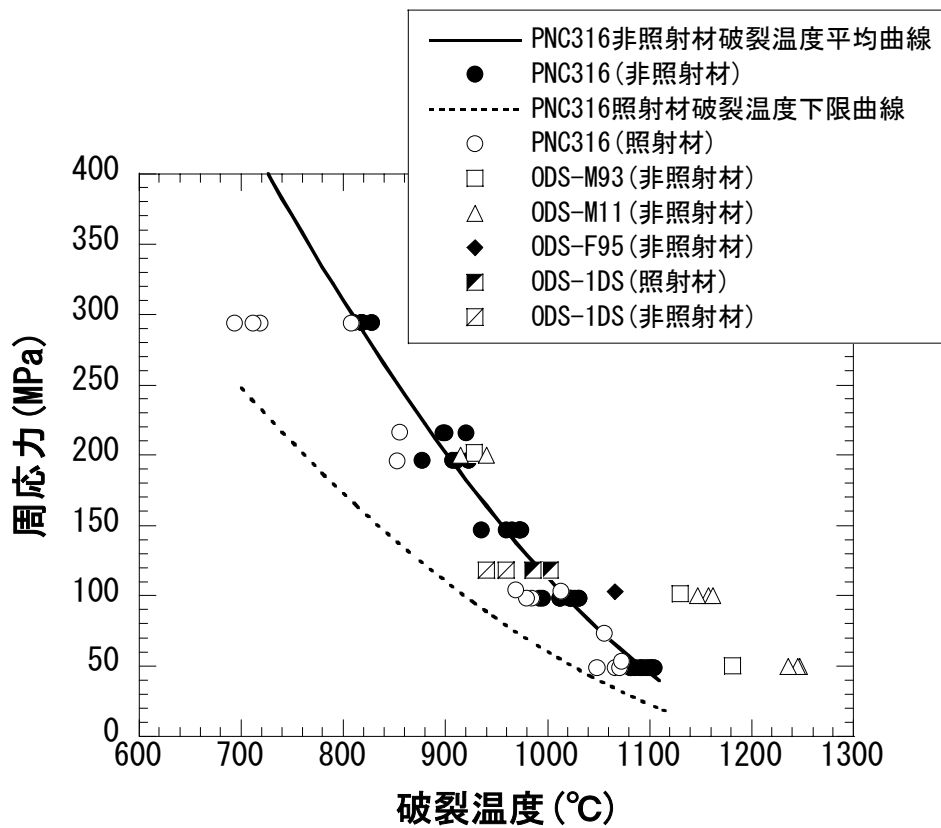


図1.32 ODS鋼被覆管の急速加熱破裂試験結果

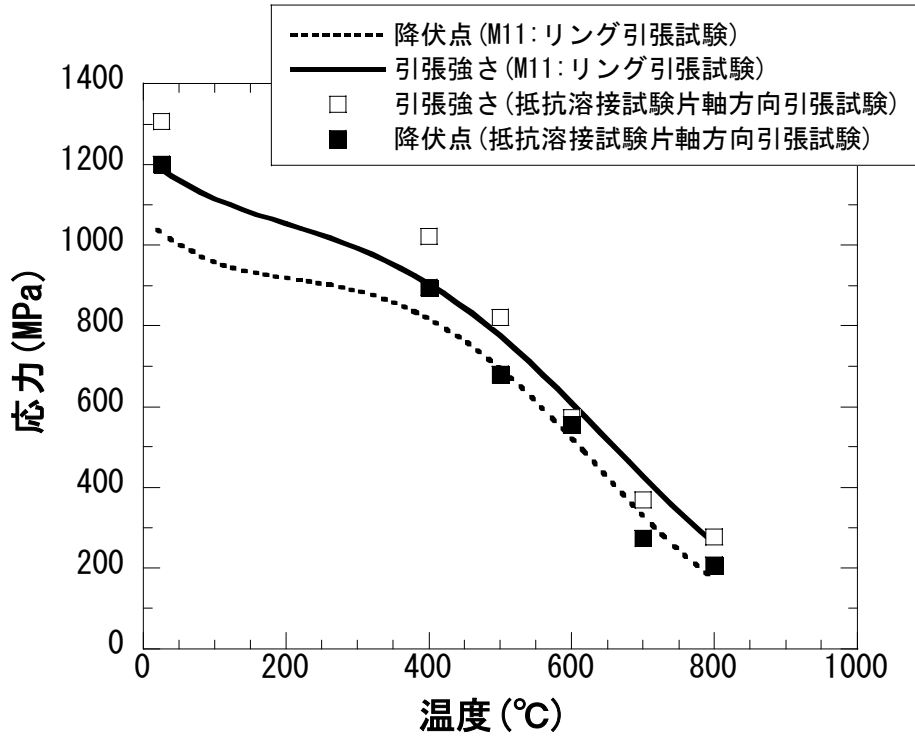


図2.1 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果 (M11)

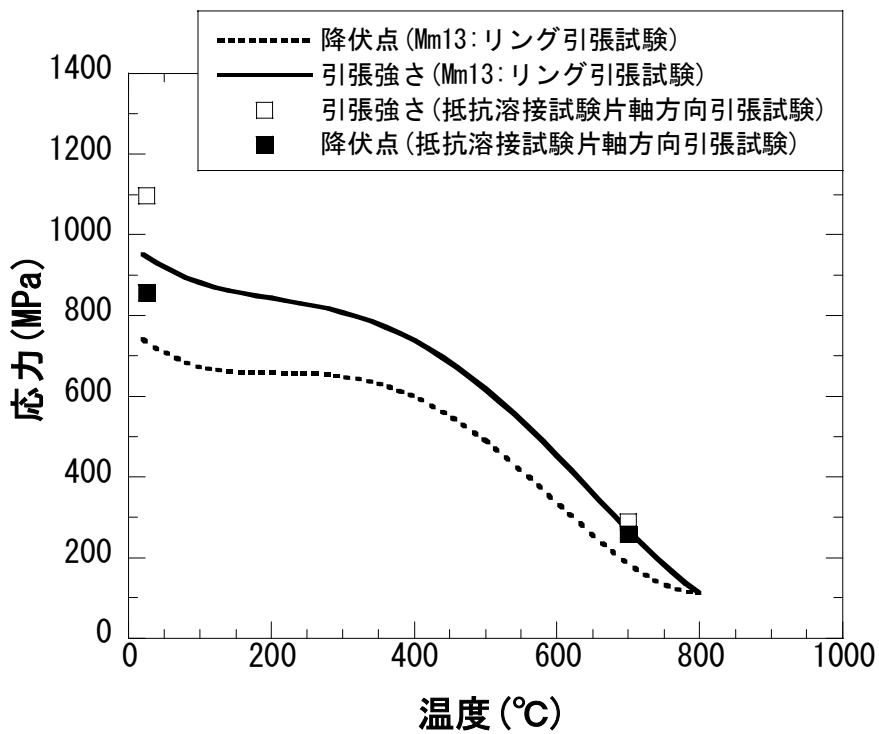


図2.2 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果 (Mm13)

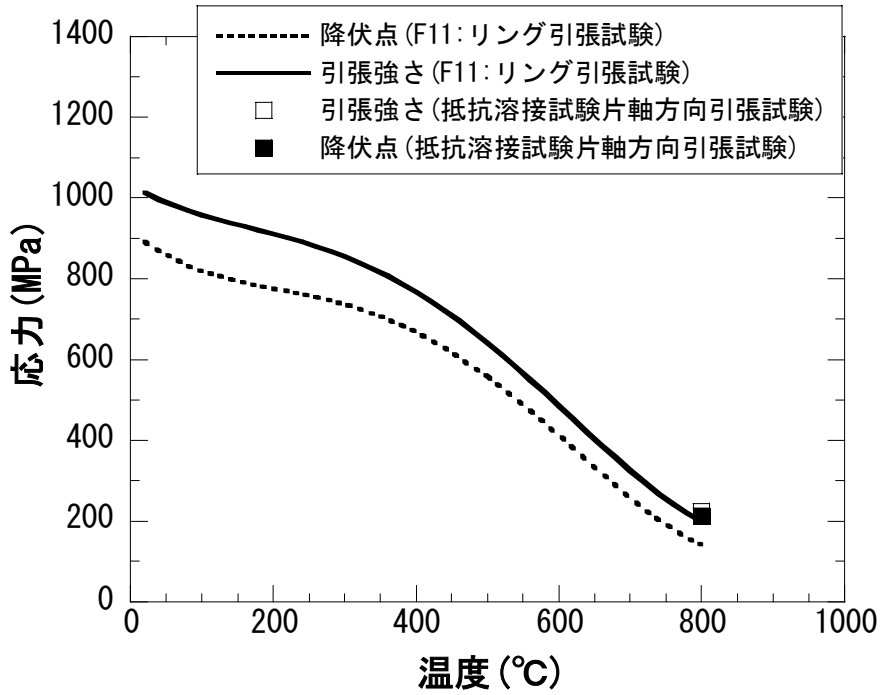


図2.3 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果 (F11)

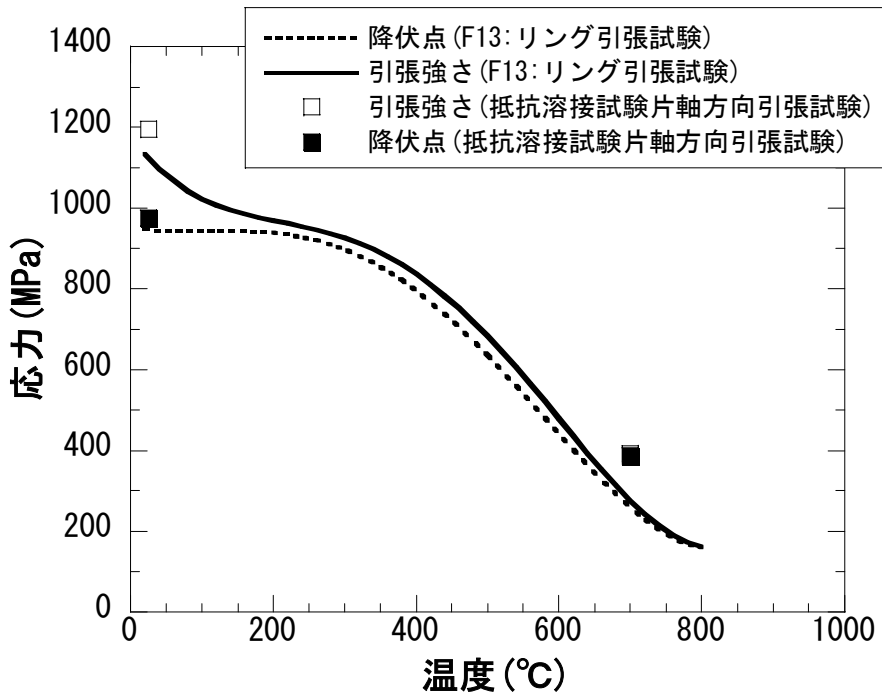


図2.4 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の引張試験結果 (F13)

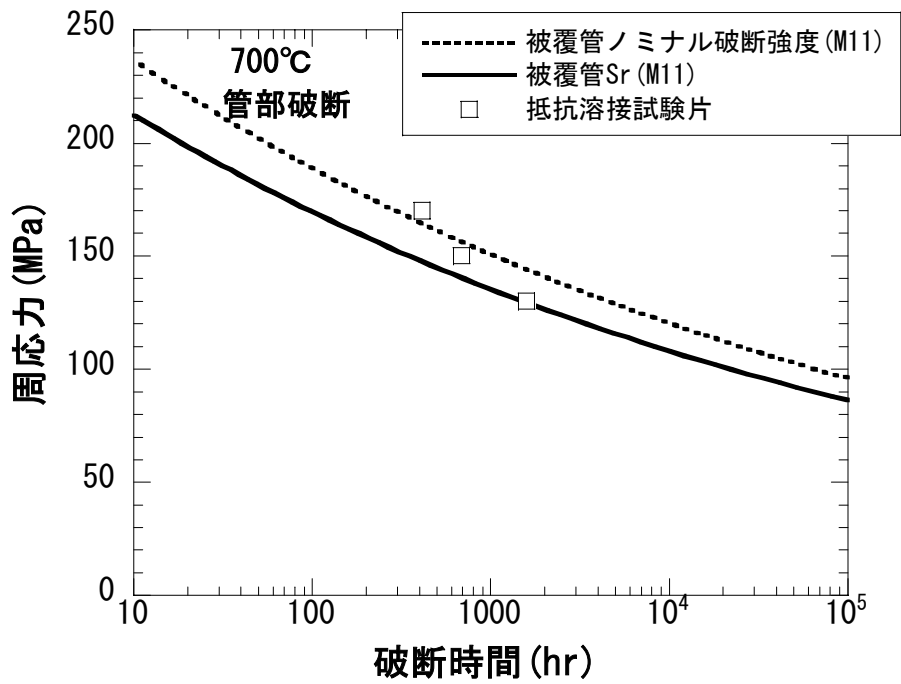


図2.5 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (M11、700°C)

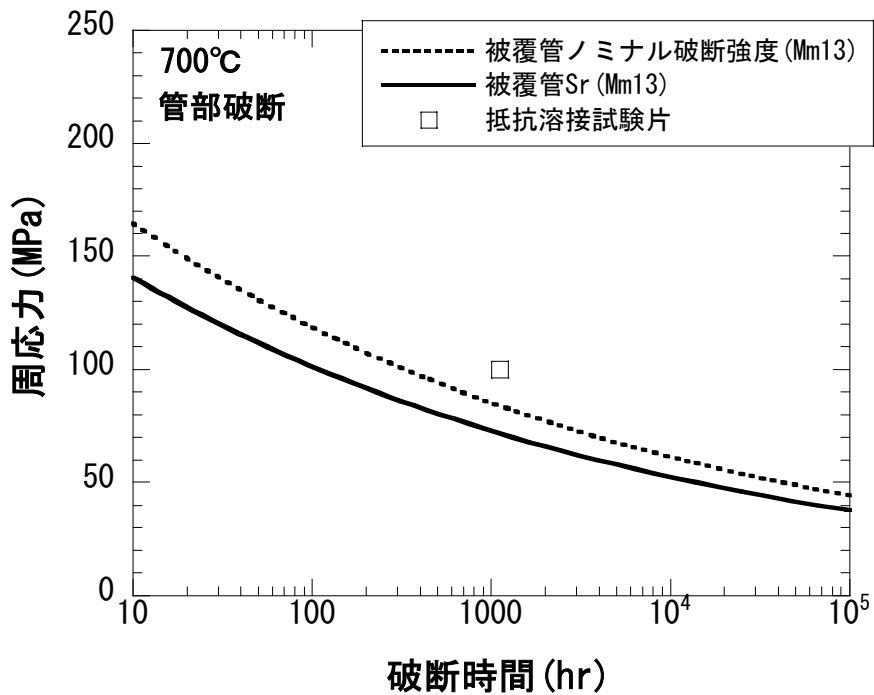


図2.6 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (Mm13、700°C)

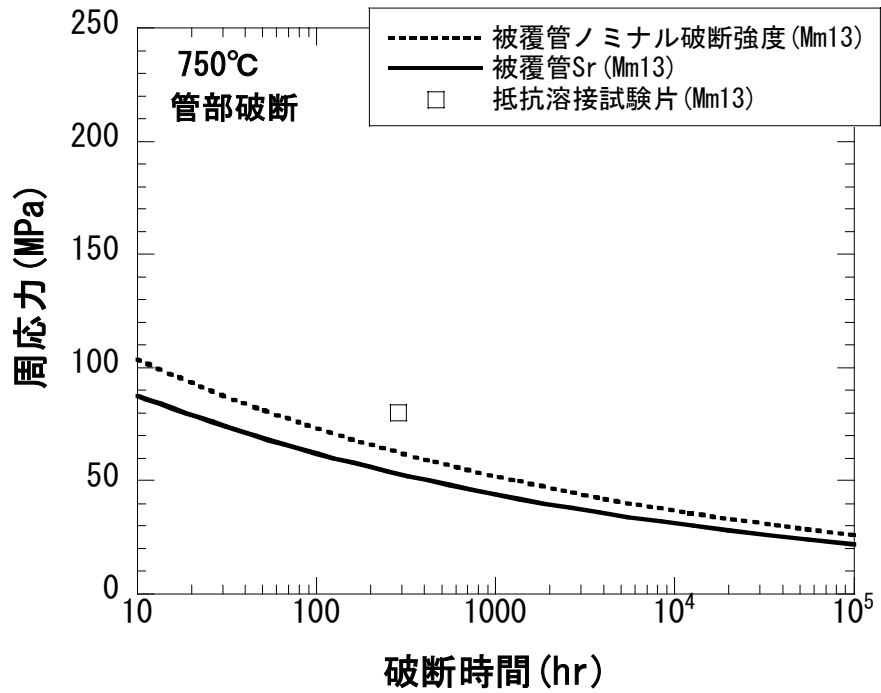


図2.7 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (Mm13、750°C)

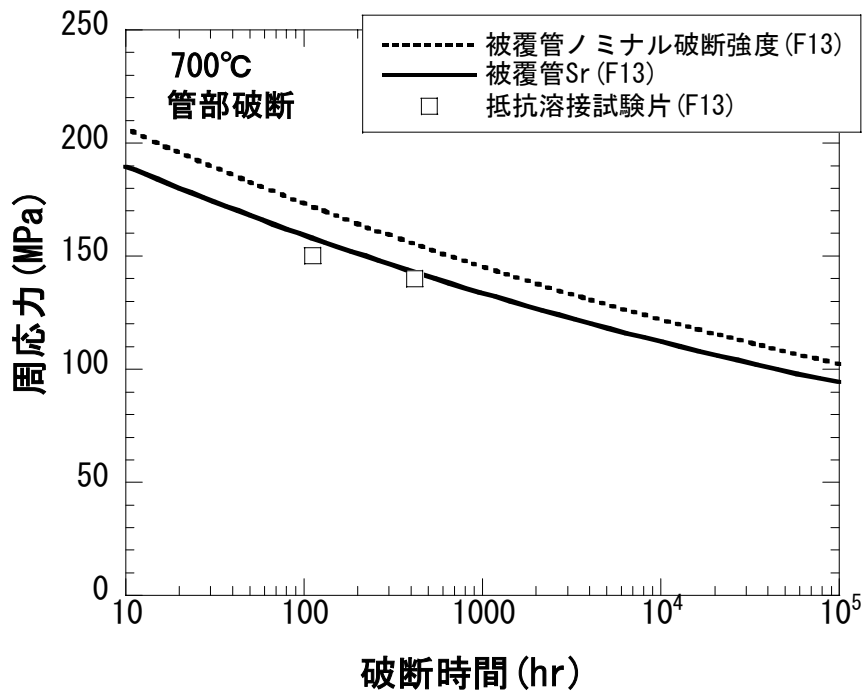


図2.8 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (F13、700°C)

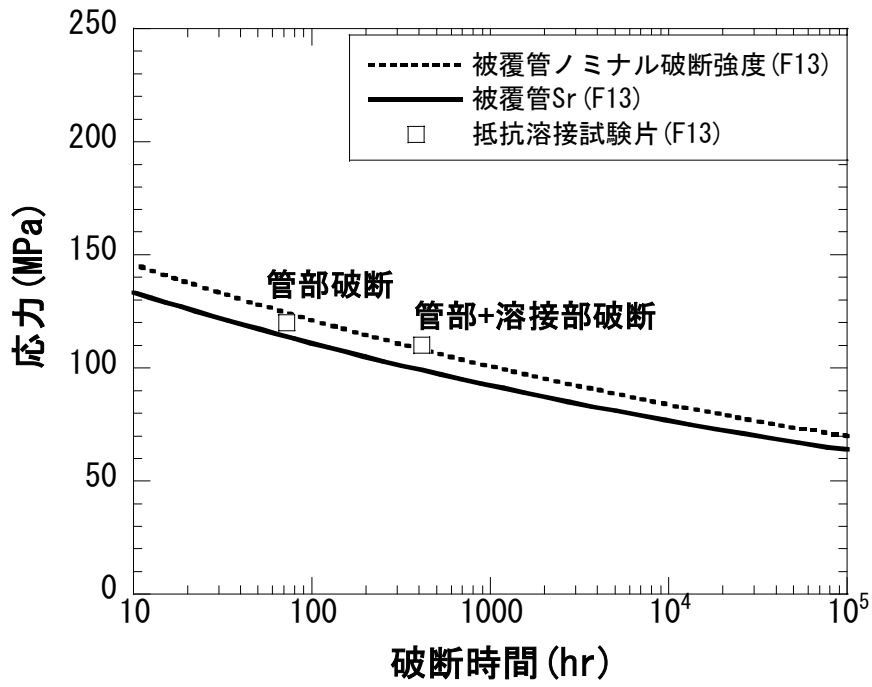


図2.9 ODS鋼被覆管-端栓抵抗溶接試験片の内圧クリープ破断試験結果 (F13、750°C)

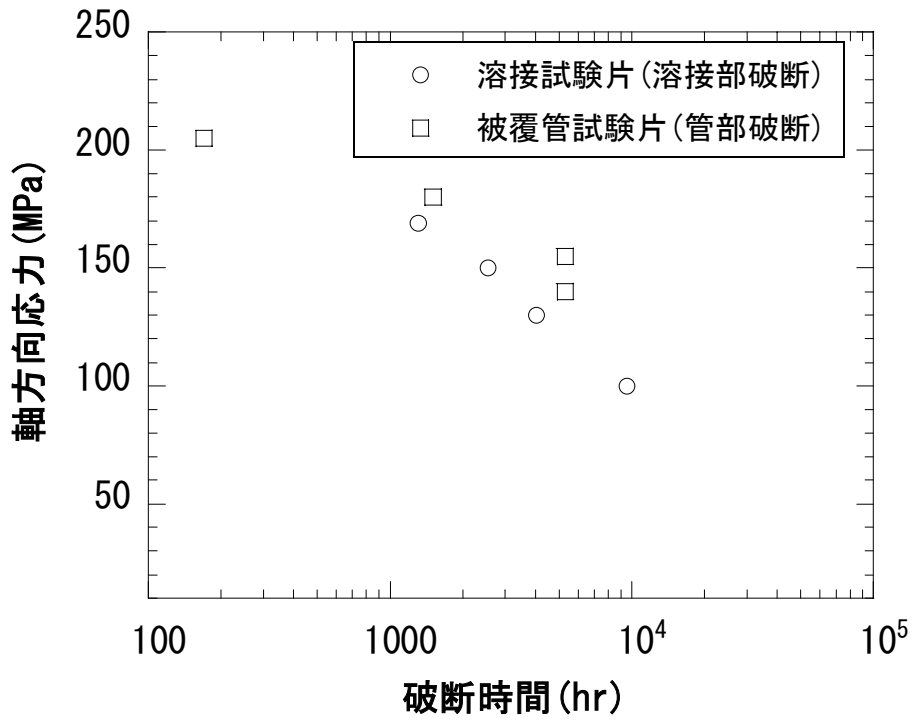


図2.10 9Cr-ODS鋼被覆管の単軸クリープ破断試験結果 (M11,700°C)

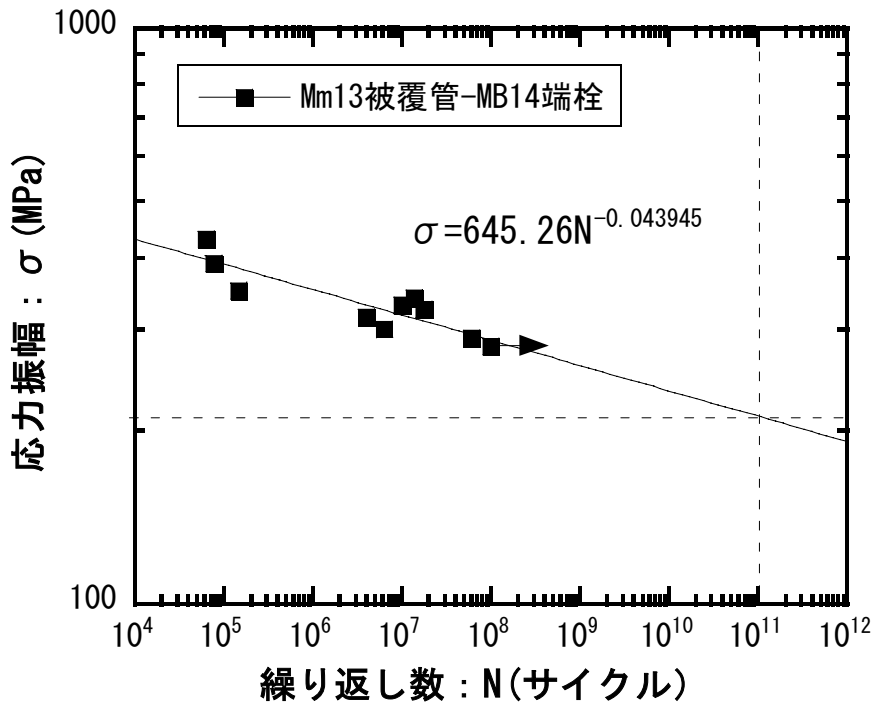


図2.11 ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果（700°C）

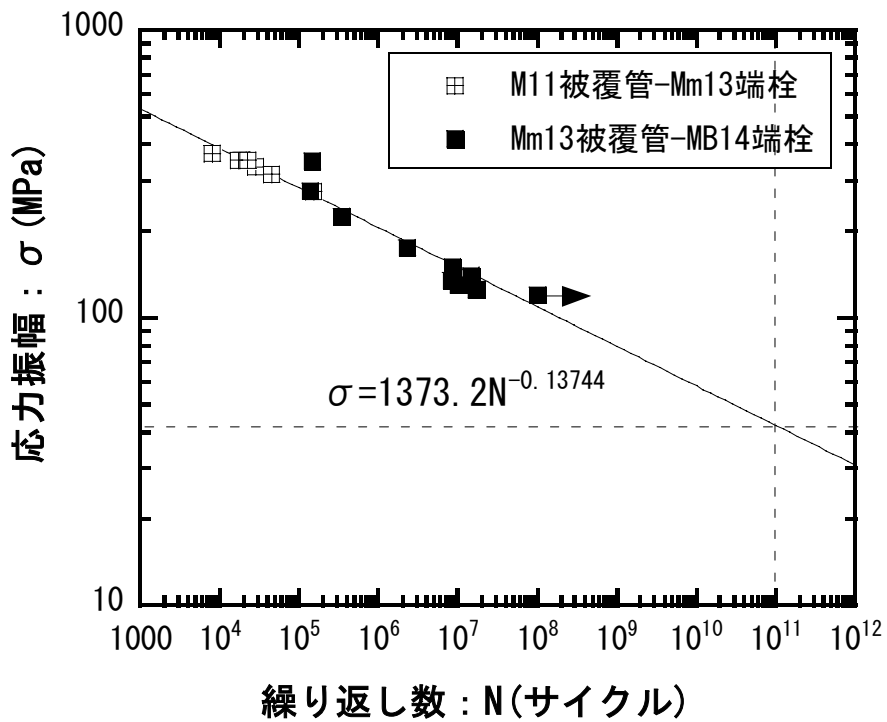


図2.12 ODS鋼被覆管-端栓溶接試験片の回転曲げ疲労試験結果（400°C）

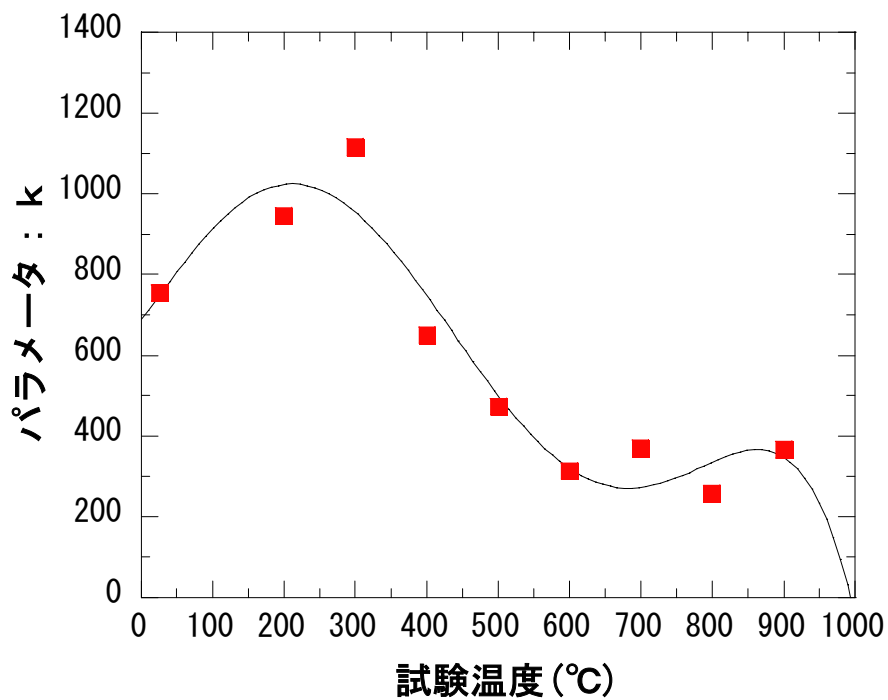


図3.1 パラメータkの温度依存性 (9Cr-ODS鋼)

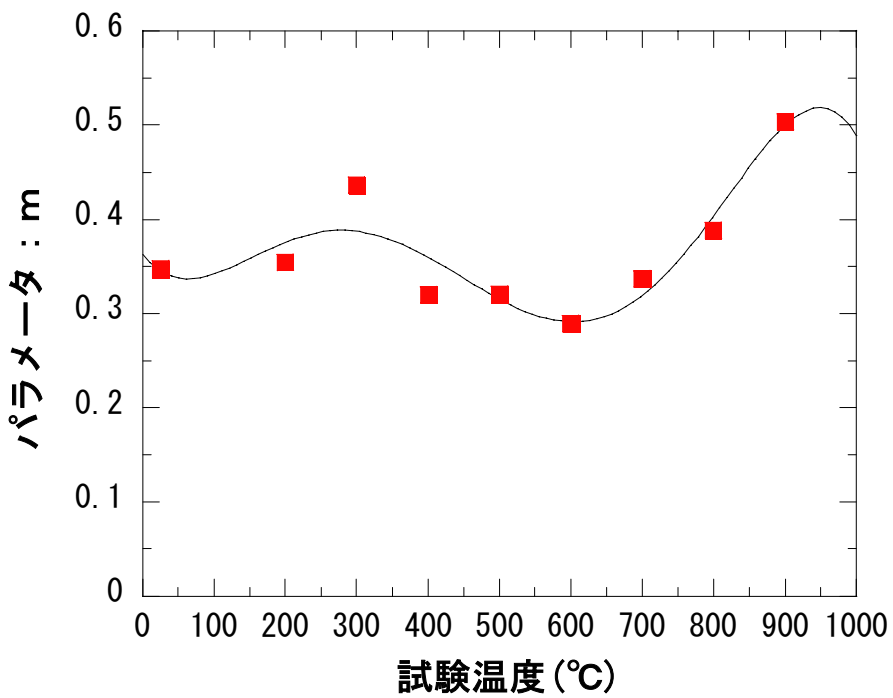


図3.2 パラメータmの温度依存性 (9Cr-ODS鋼)

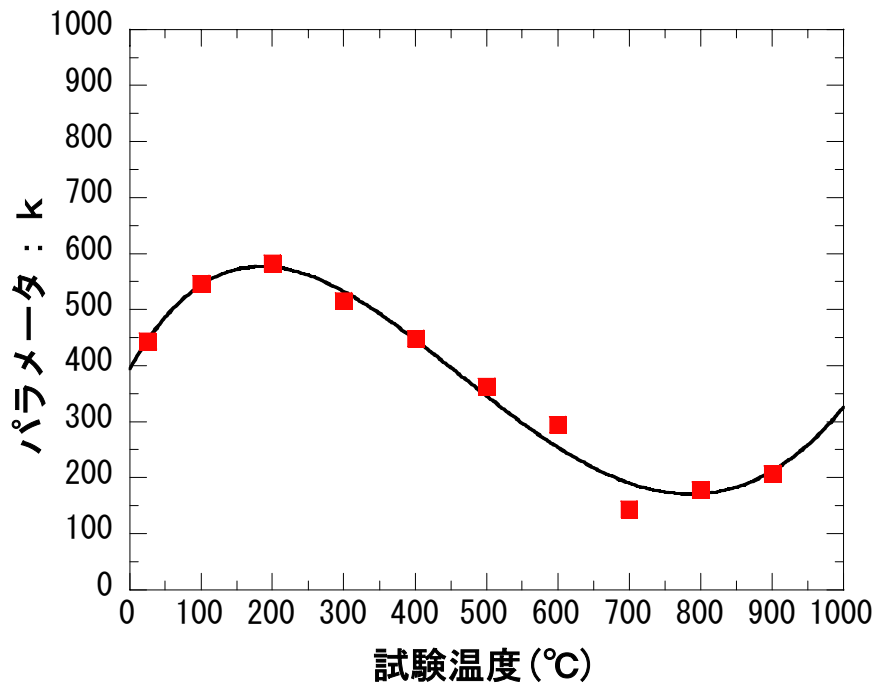


図3.3 パラメータkの温度依存性 (12Cr-ODS鋼)

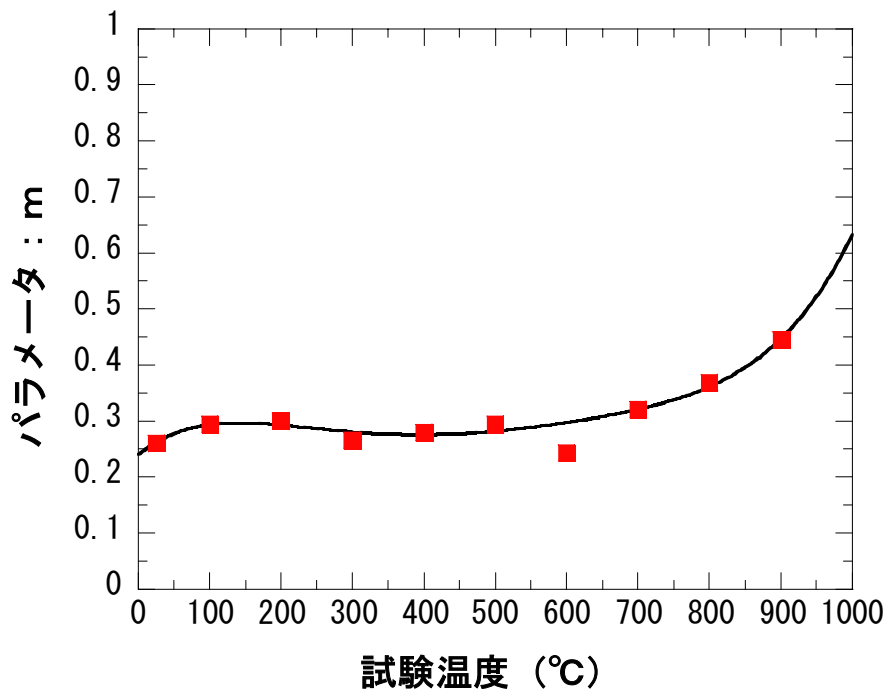


図3.4 パラメータmの温度依存性 (12Cr-ODS鋼)

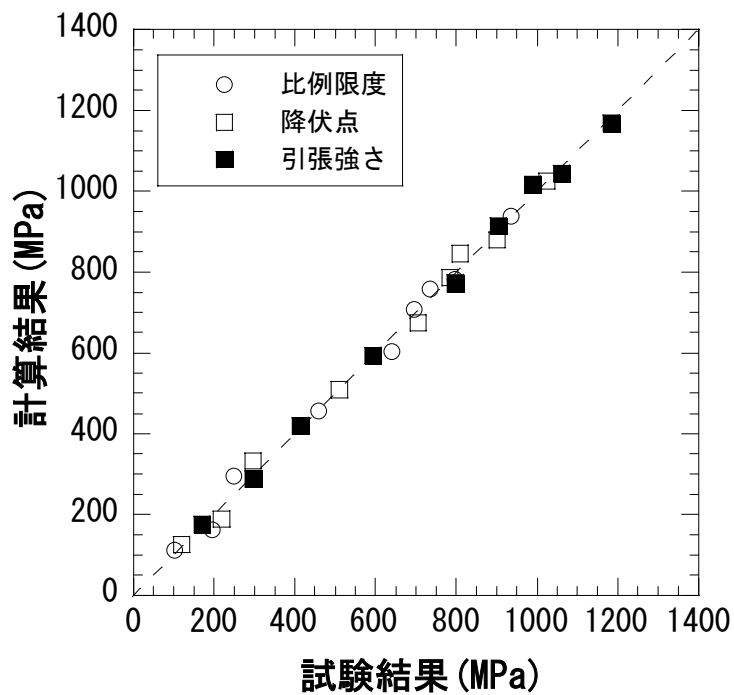


図3.5 データ再現性の確認 (9Cr-ODS鋼)

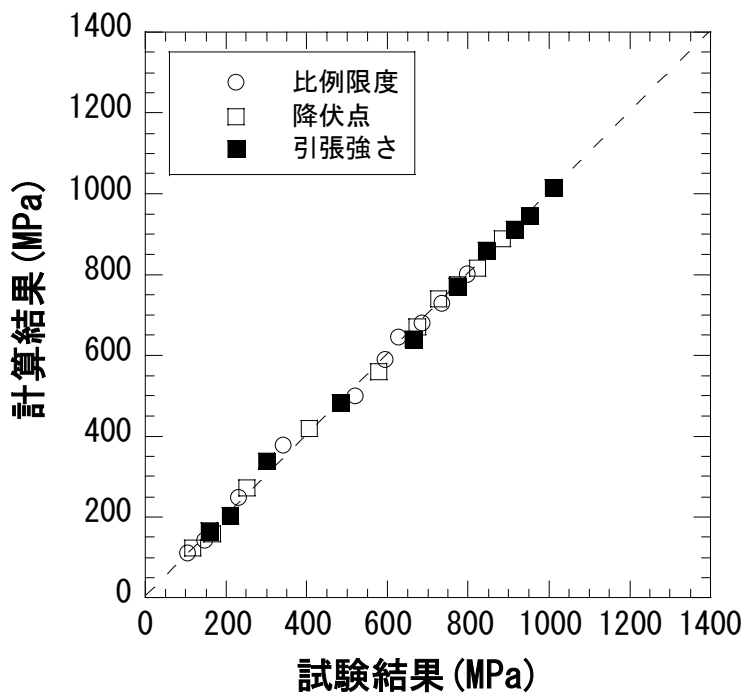


図3.6 データ再現性の確認 (12Cr-ODS鋼)

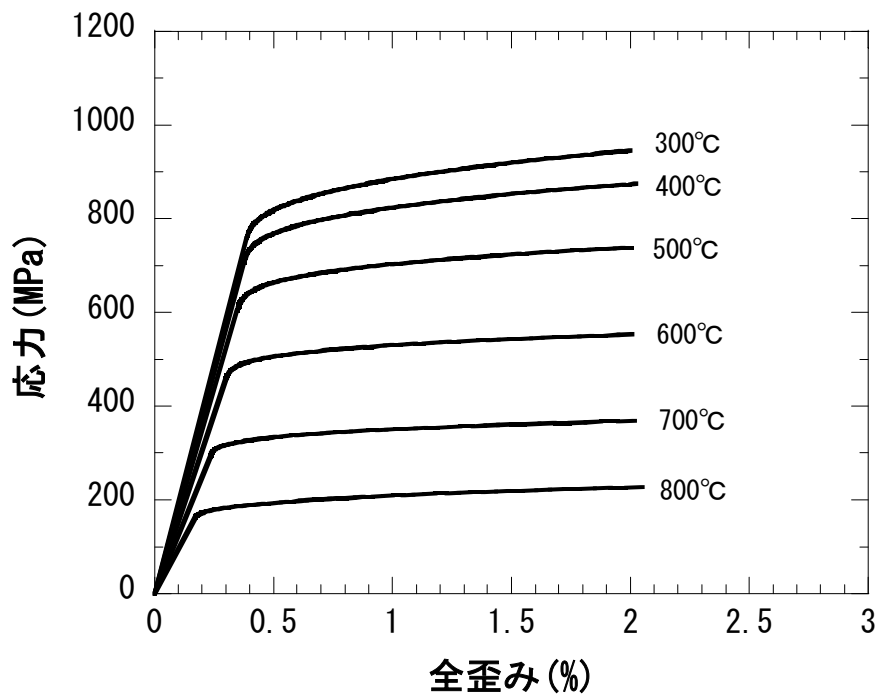


図3.7 応力・ひずみ曲線 (9Cr-ODS鋼)

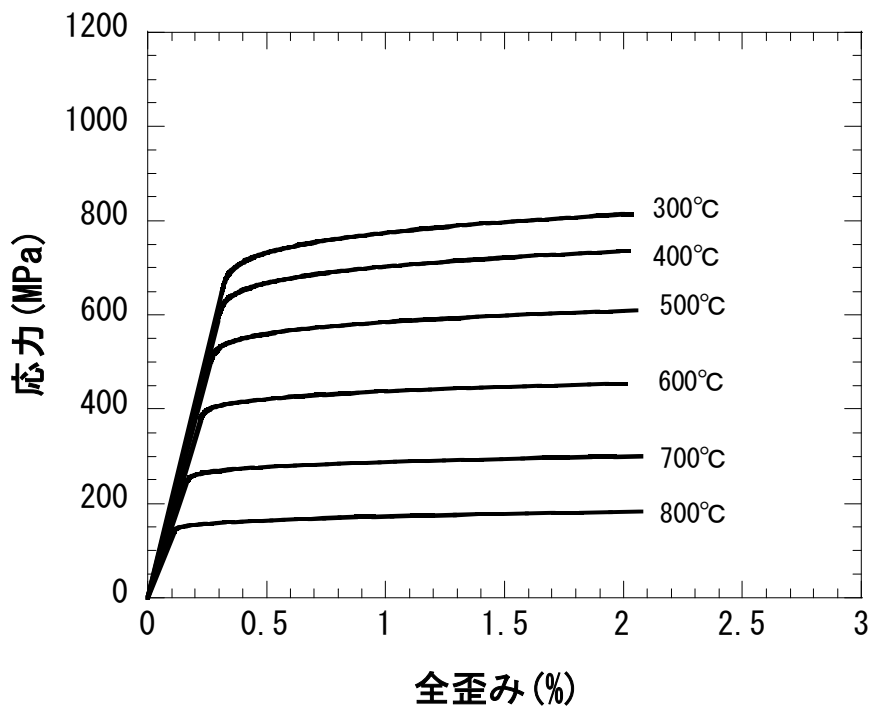


図3.8 応力・ひずみ曲線 (12Cr-ODS鋼)

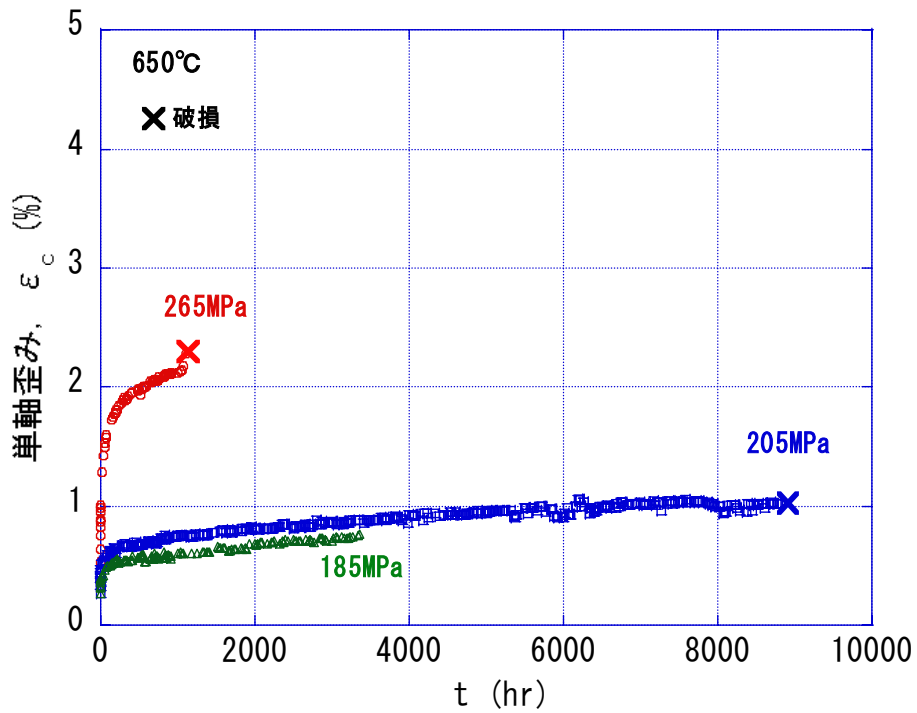


図3.9 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (650°C)

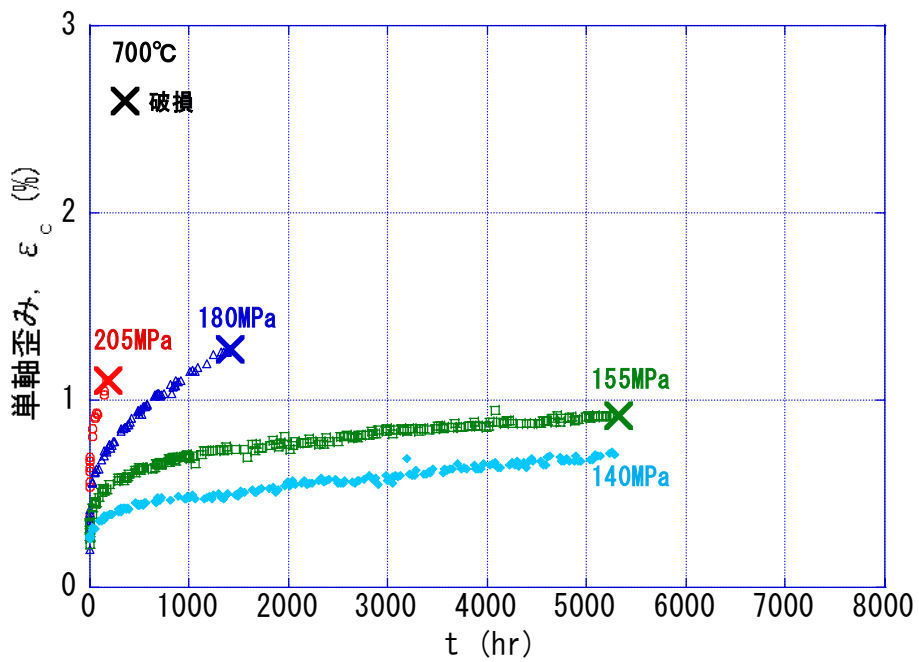


図3.10 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (700°C)

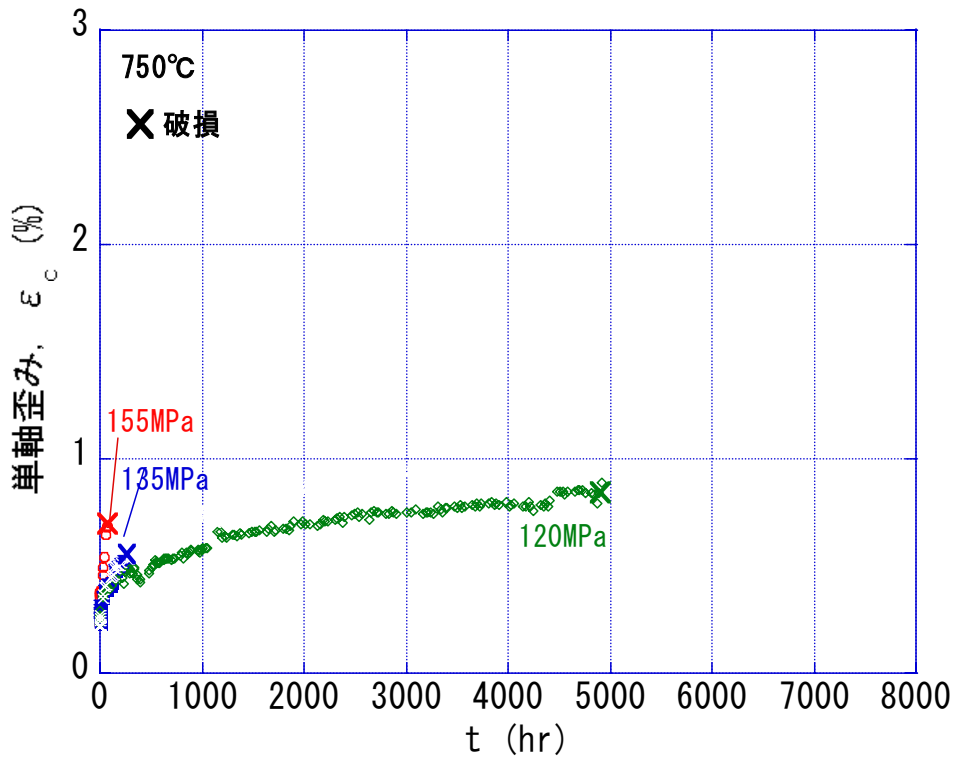


図3.11 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) のオンライン単軸クリープひずみ試験結果 (750°C)

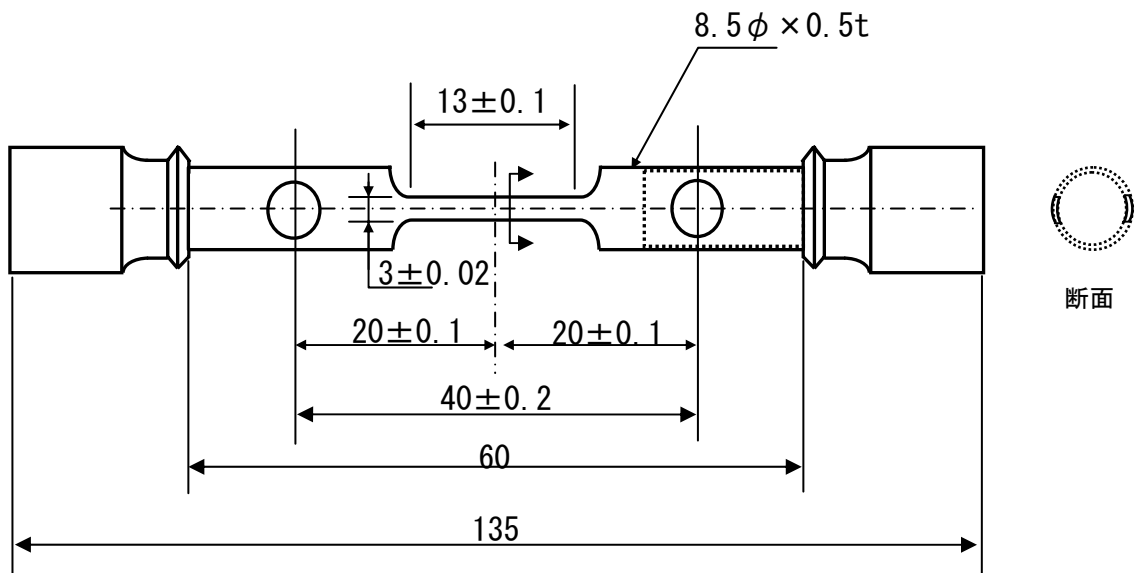


図3.12 オンライン単軸クリープひずみ試験片の形状

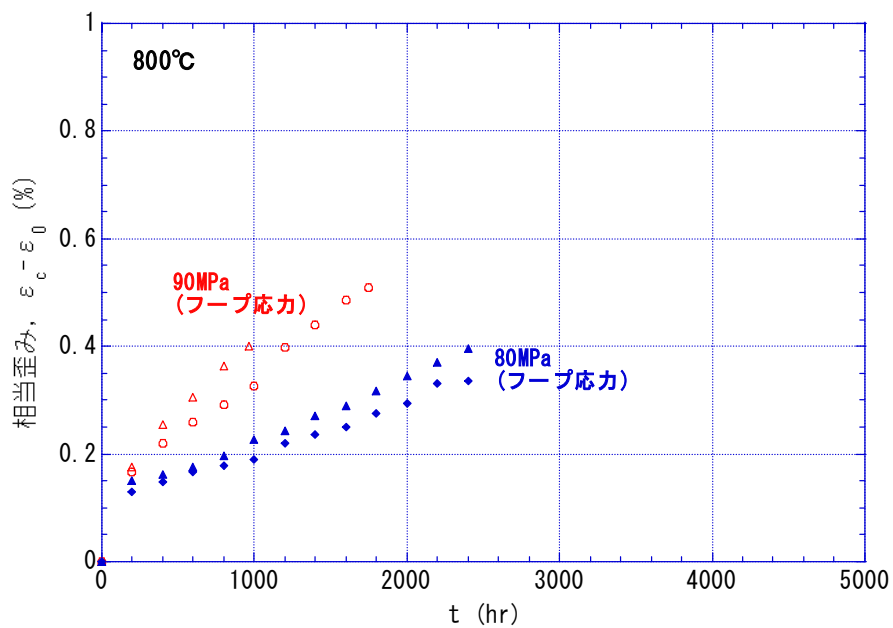


図3.13 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の内圧クリープひずみ試験 (800°C)

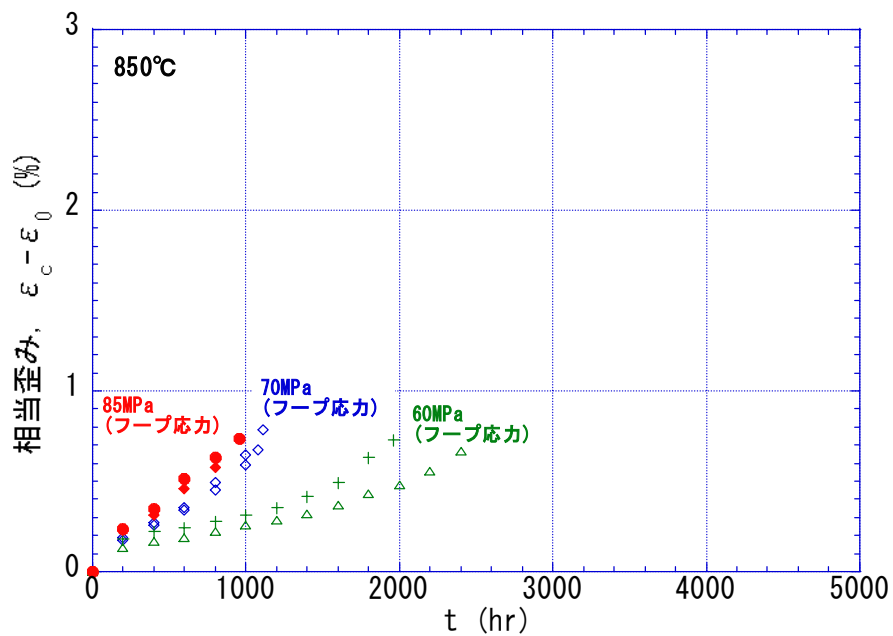


図3.14 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の内圧クリープひずみ試験 (850°C)

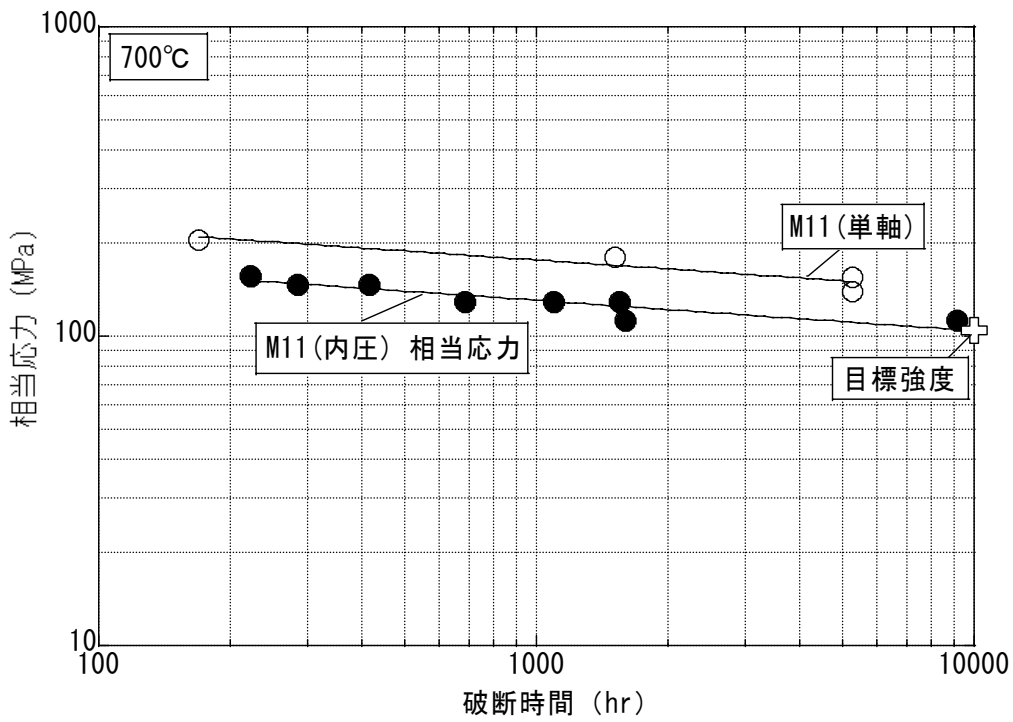


図3.15 9Cr-ODS鋼被覆管 (M11) の単軸クリープ破断および内圧クリープ破断試験結果

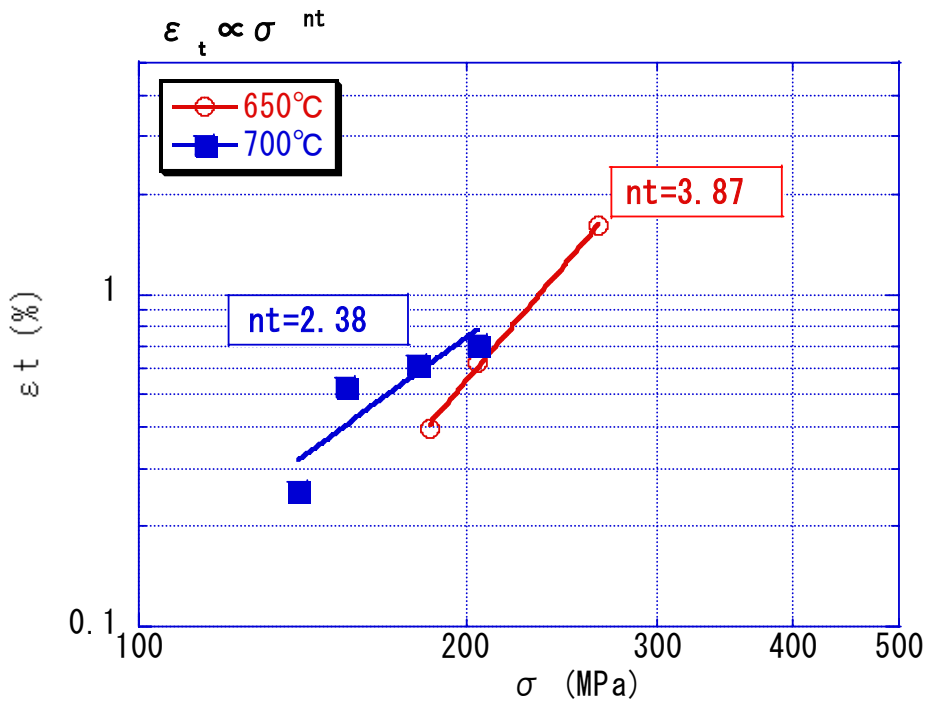


図3.16 単軸クリープひずみ試験における1次クリープ係数の応力依存性

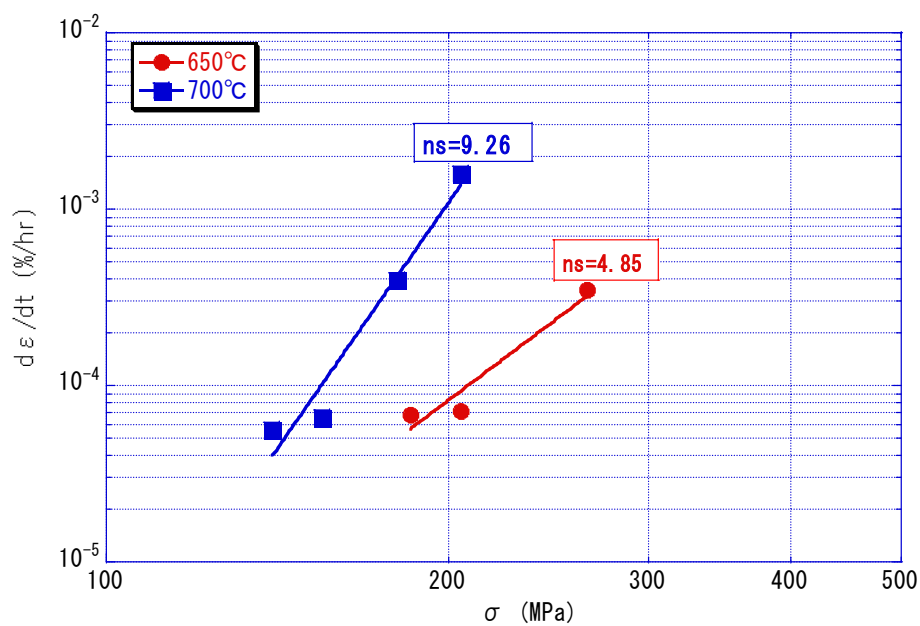


図3.17 単軸クリープひずみ試験における2次クリープひずみ速度の応力依存性

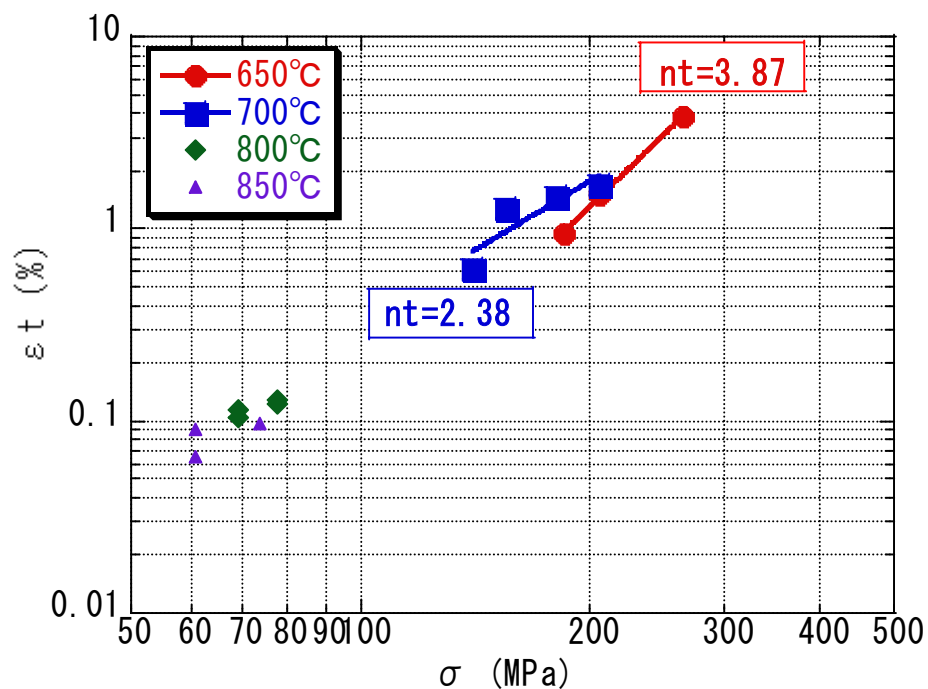


図3.18 1次クリープひずみの応力依存係数 (nt) の算出

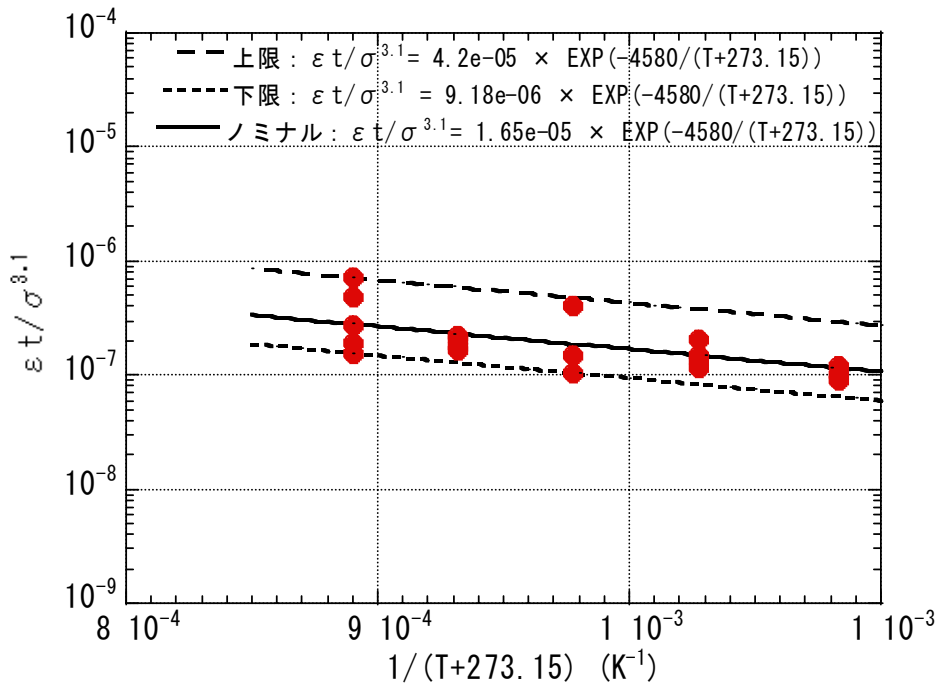


図3.19 1次クリープひずみの温度依存係数の算出

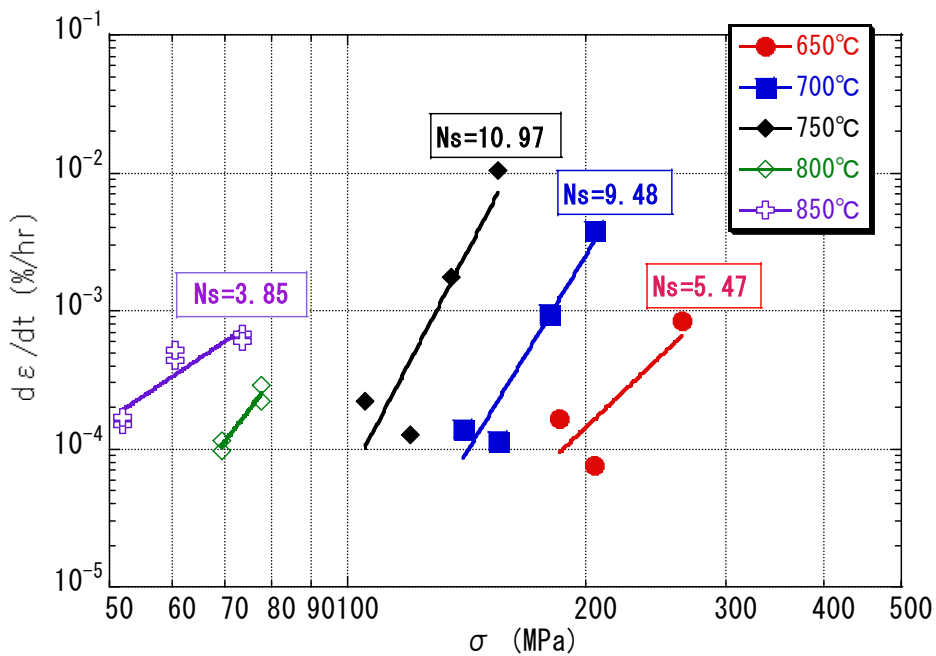


図3.20 2次クリープひずみ速度の応力依存係数 (ns) の策定

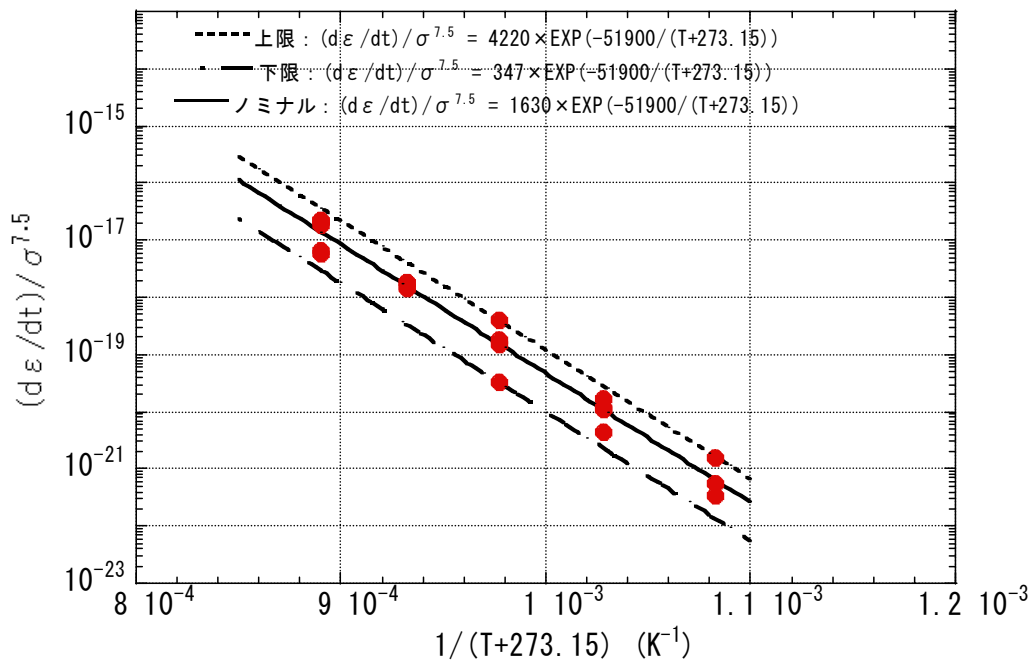


図3.21 二次クリープひずみ速度の温度依存係数の算出

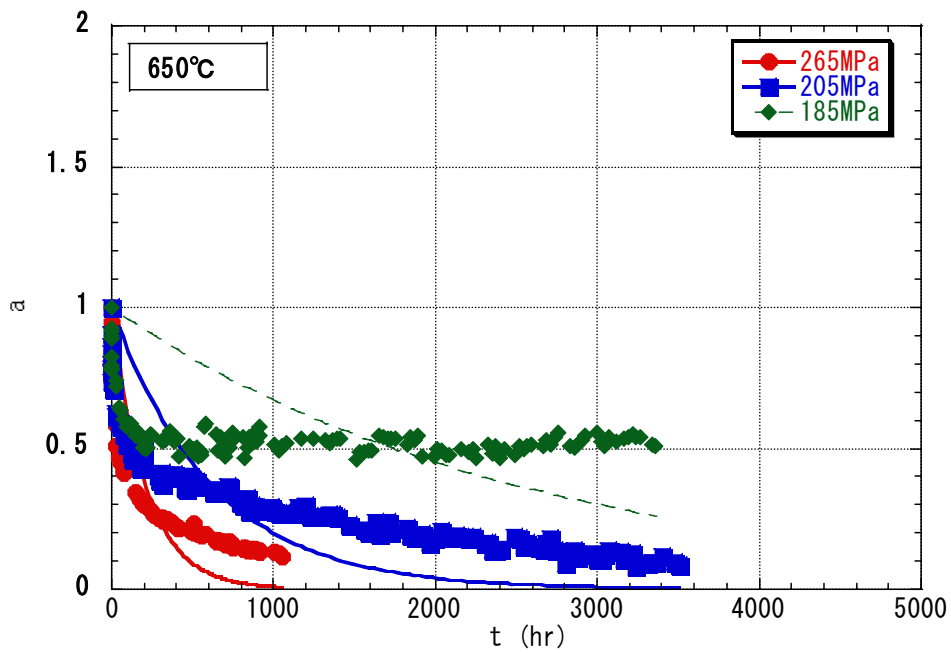


図3.22 時間係数 γ の算出例 (650°C)

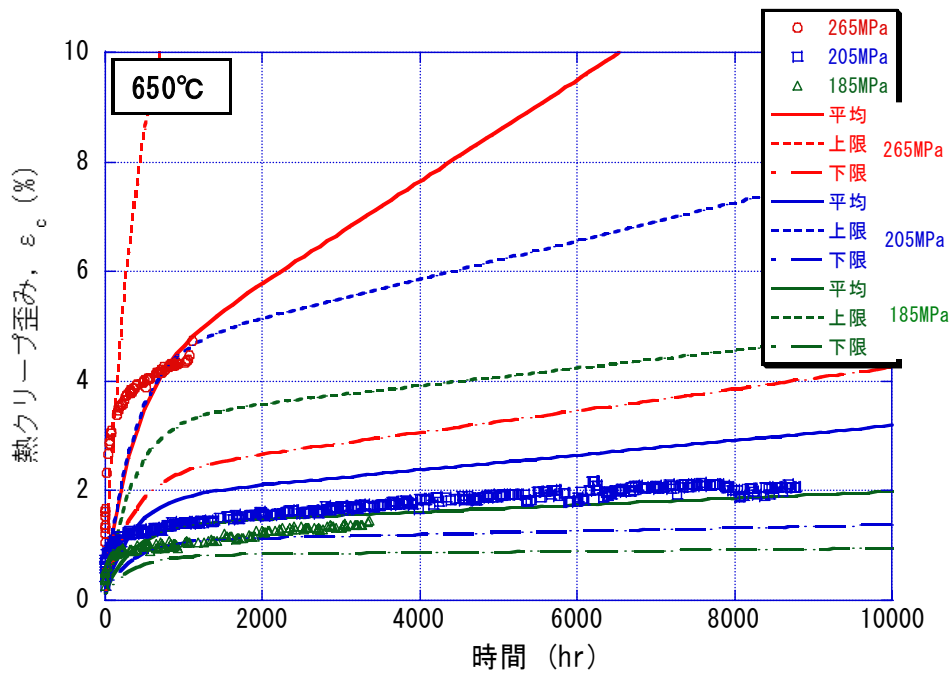


図3.23 単軸クリープひずみ実測値と評価値の比較 (650°C)

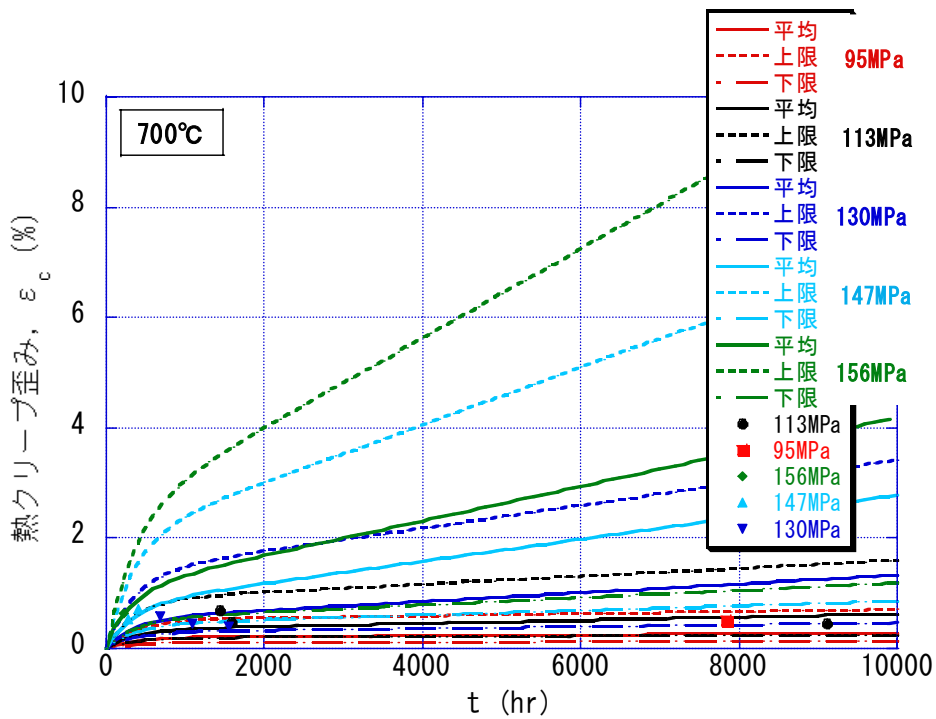


図3.24 単軸クリープひずみ実測値と評価値の比較 (700°C)

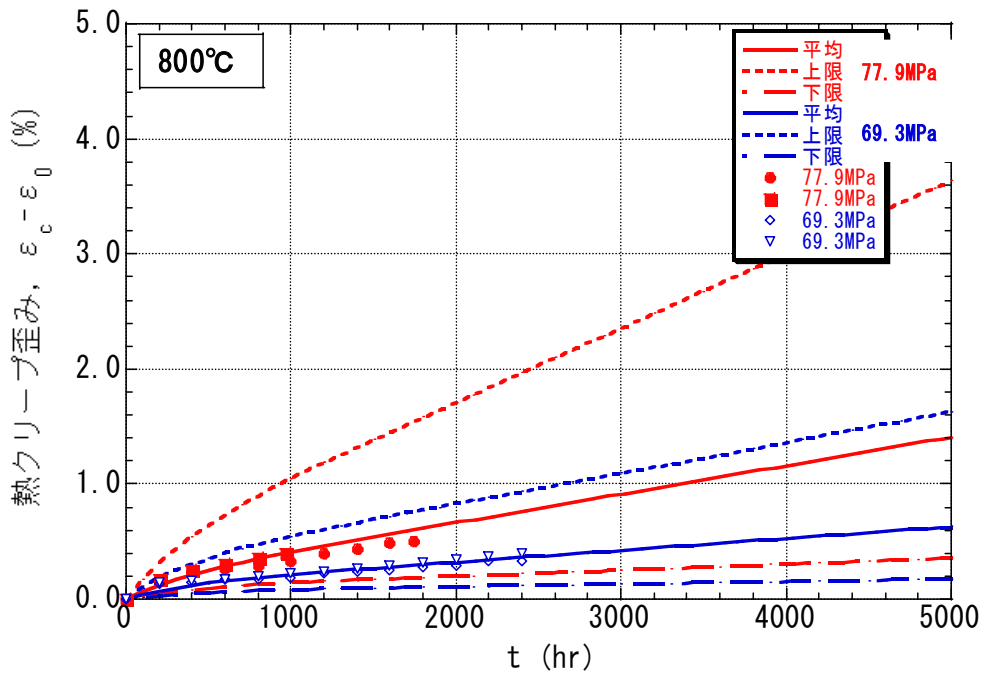


図3.25 内圧クリープひずみ実測値と評価値の比較 (800°C)

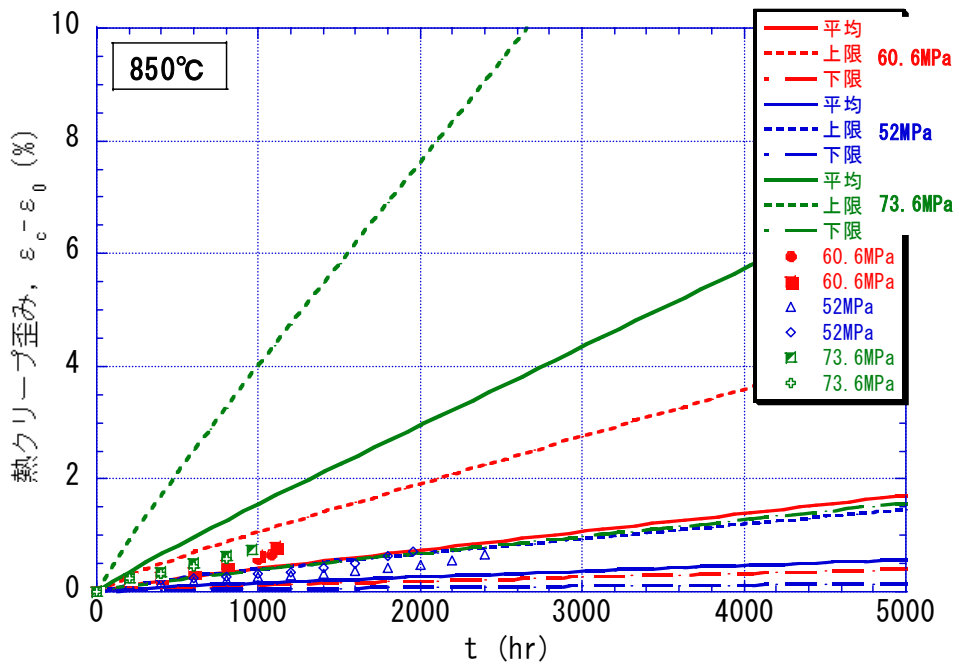


図3.26 内圧クリープひずみ実測値と評価値の比較 (850°C)

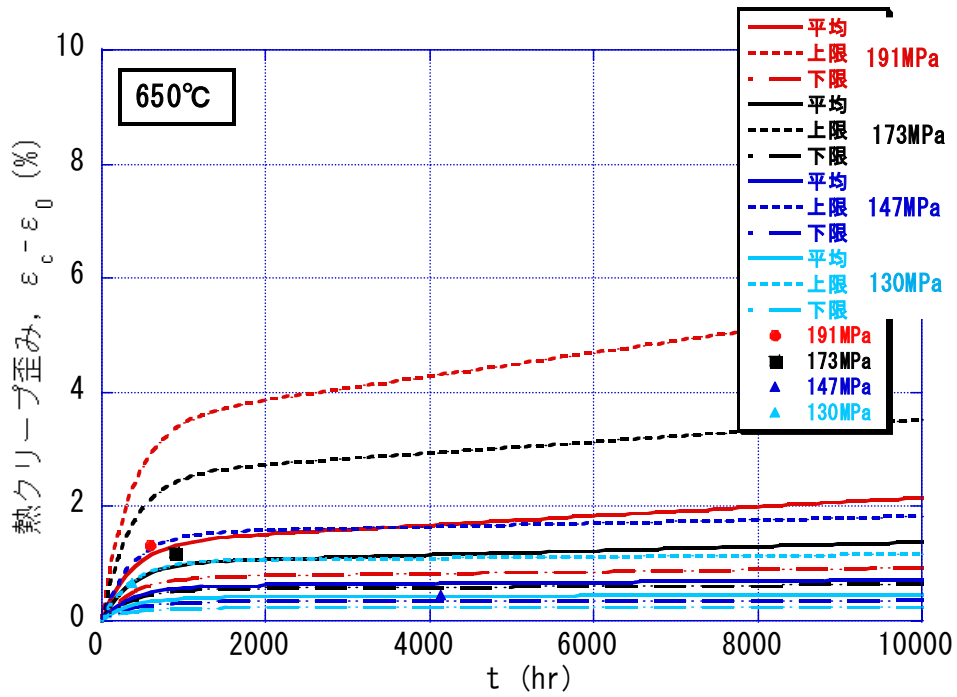


図3.27 内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (650°C)

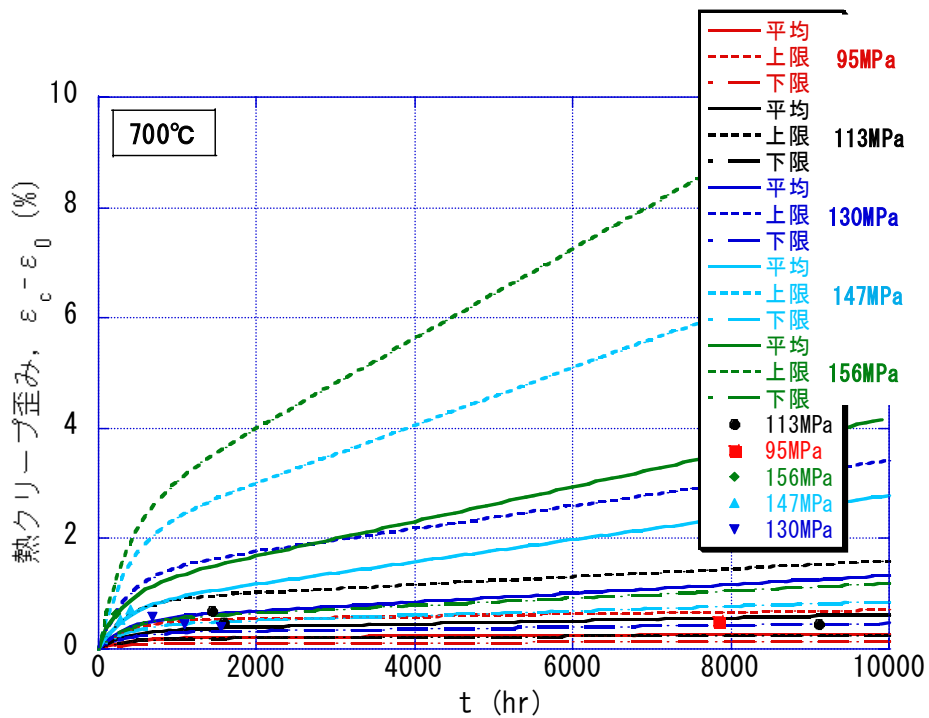


図3.28 内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (700°C)

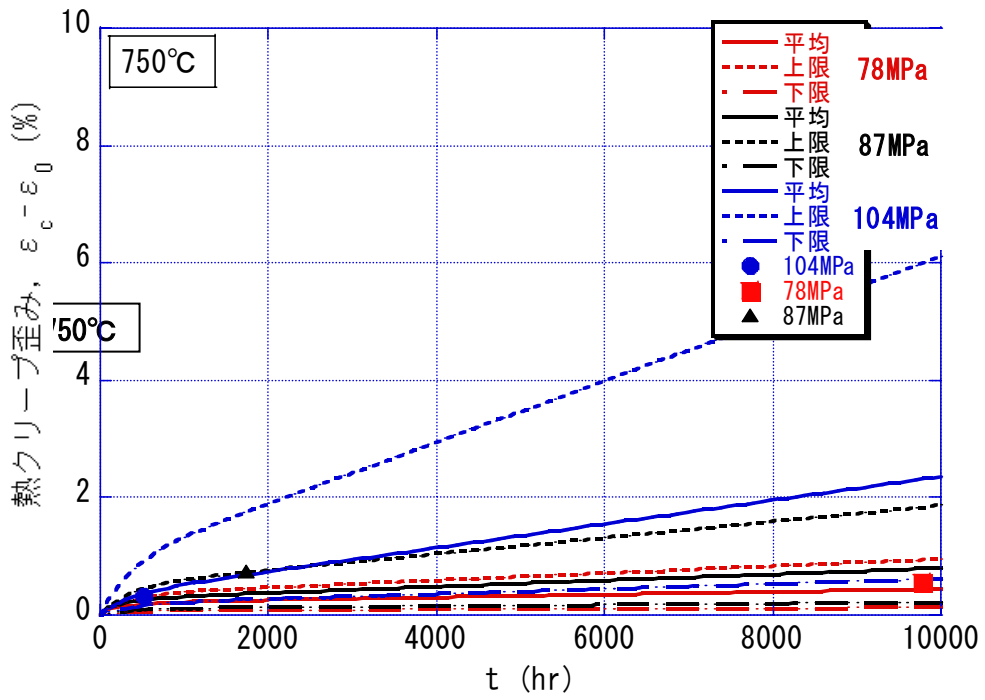


図3.29 内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較 (750°C)

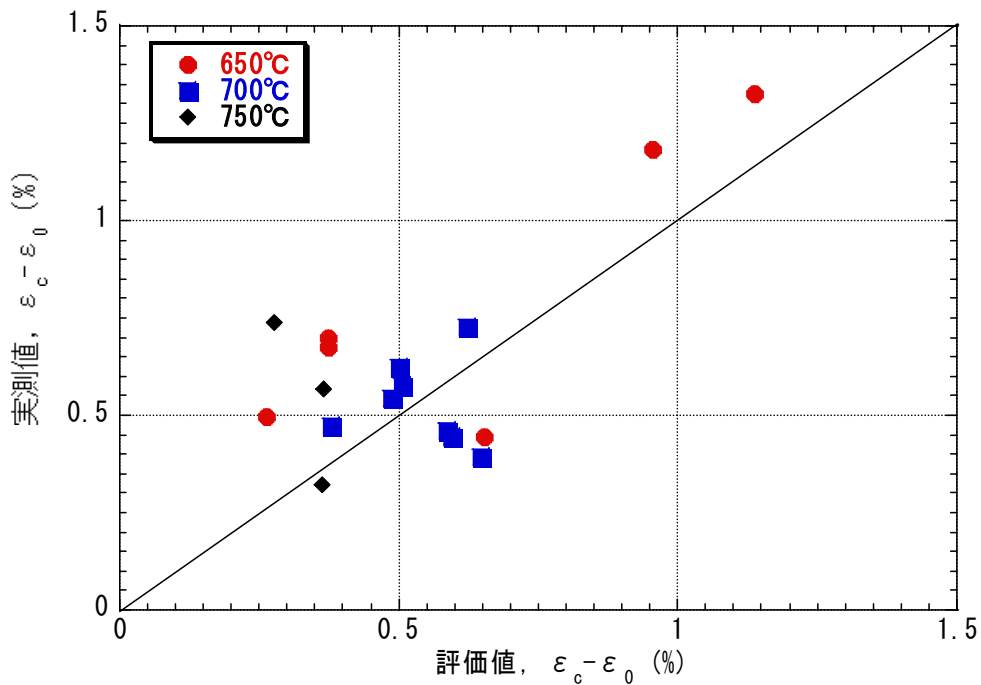


図 3.30 9Cr-ODS 鋼被覆管の内圧クリープ破断ひずみと評価値の比較

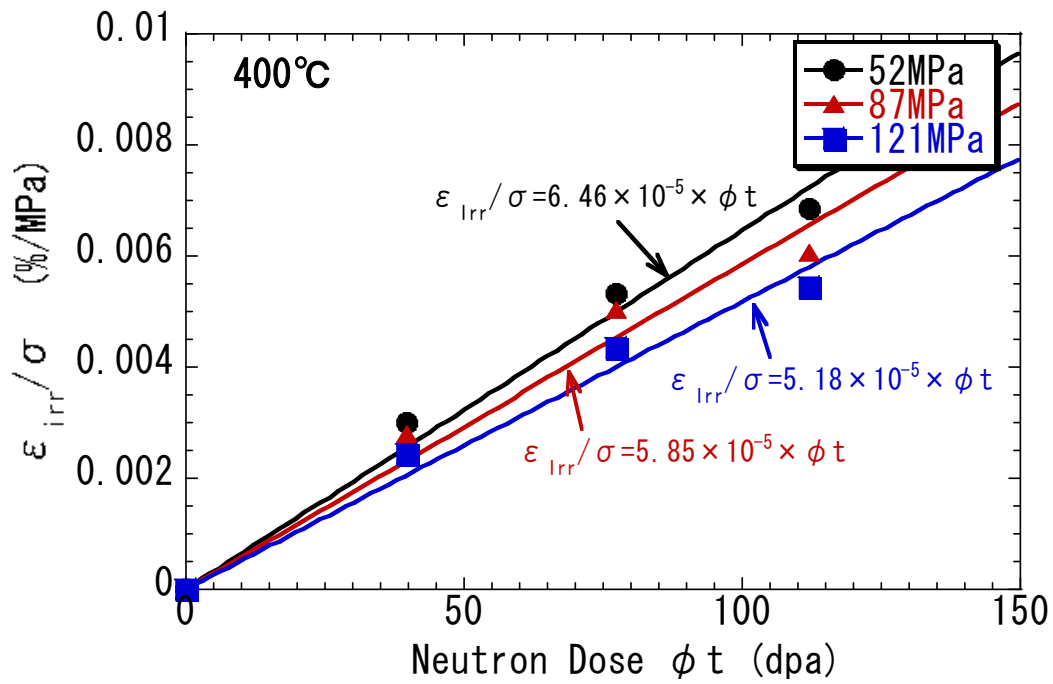


図3.31 MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (~400°C)

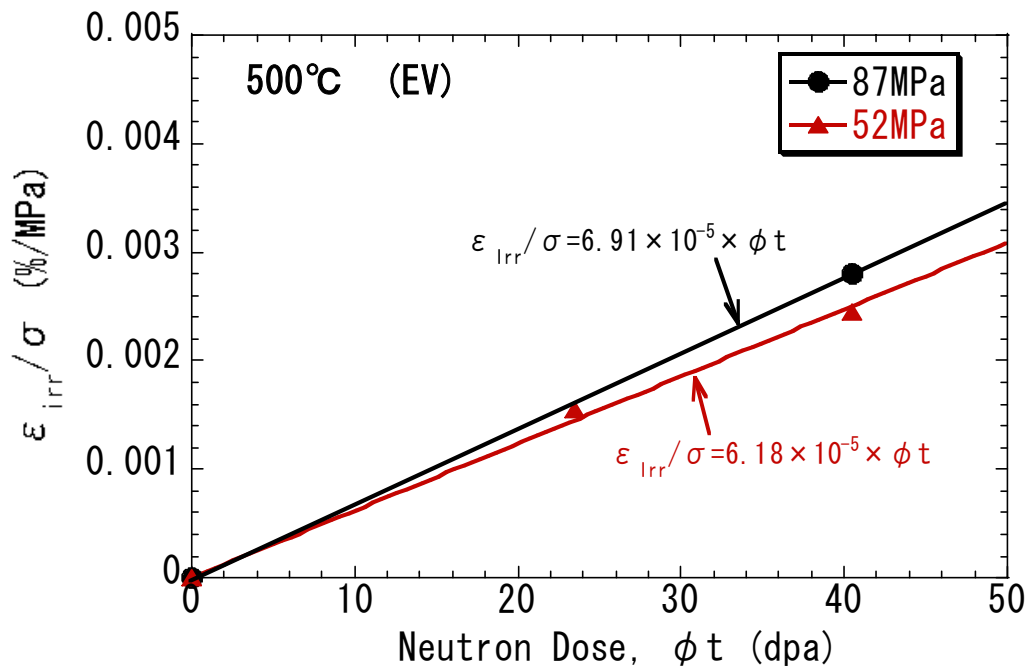


図3.32 MA957の照射クリープひずみの照射量依存性 (~500°C)

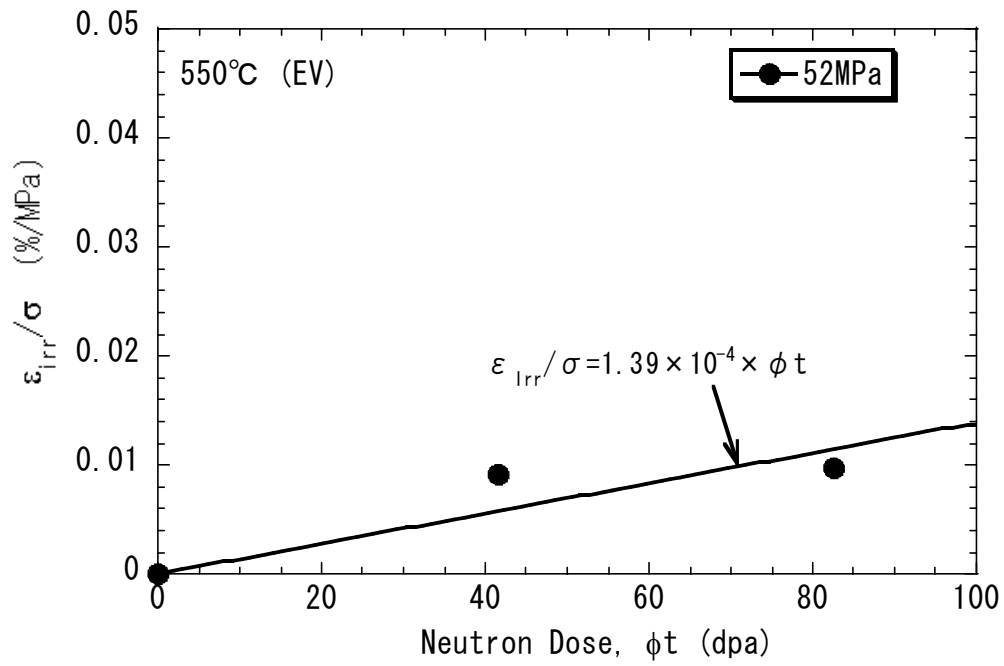


図3.33 MA957の照射クリープひずみの照射量依存性（～550°C）

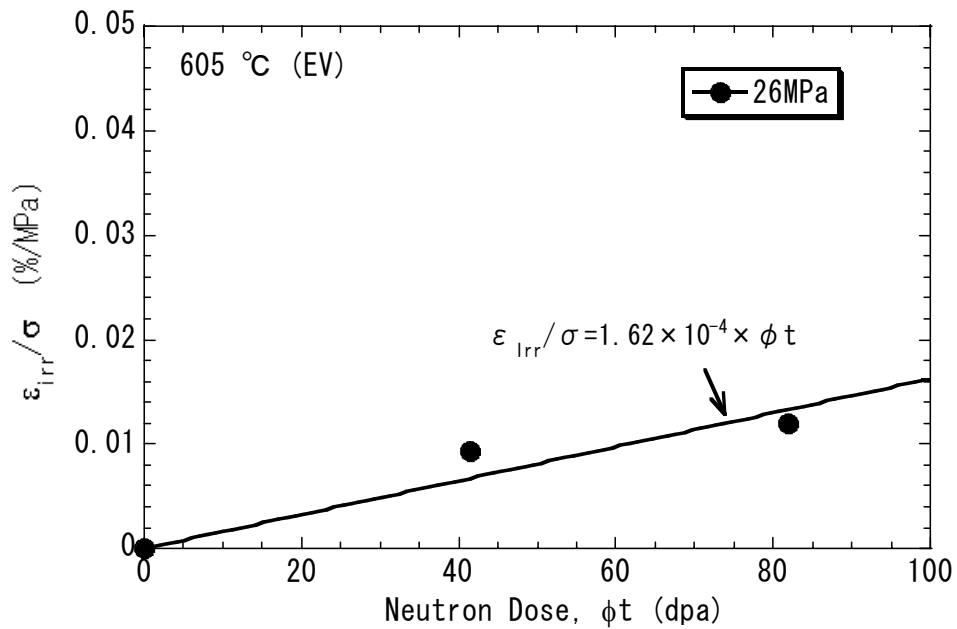


図3.34 MA957の照射クリープひずみの照射量依存性（～605°C）

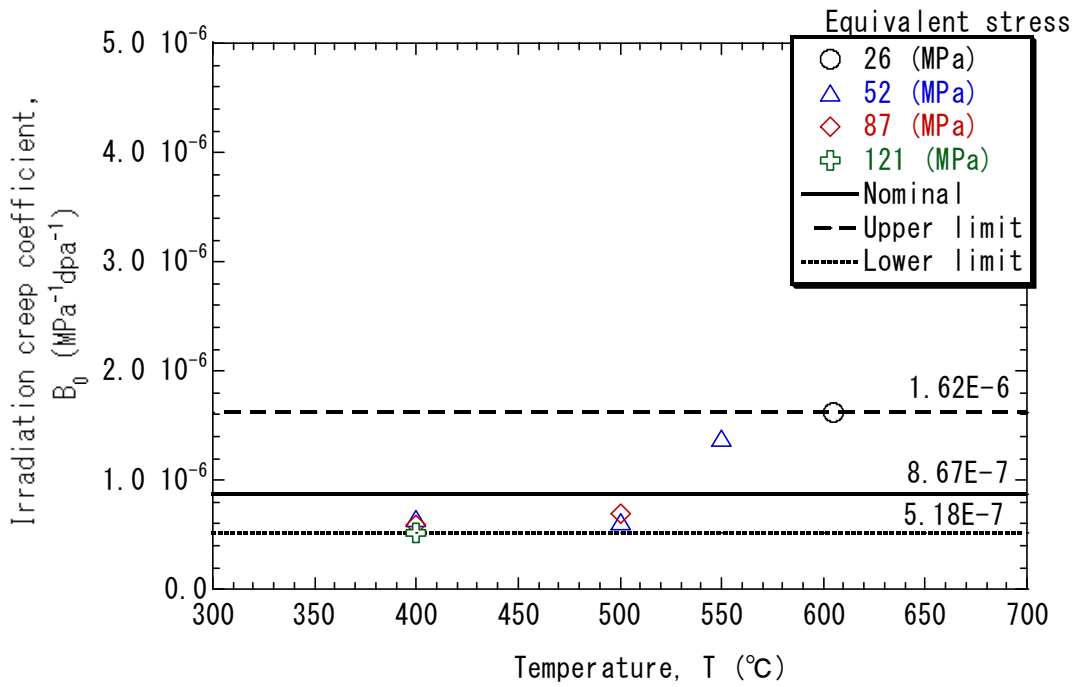


図3.35 照射クリープ係数 (B_0) の照射温度依存性

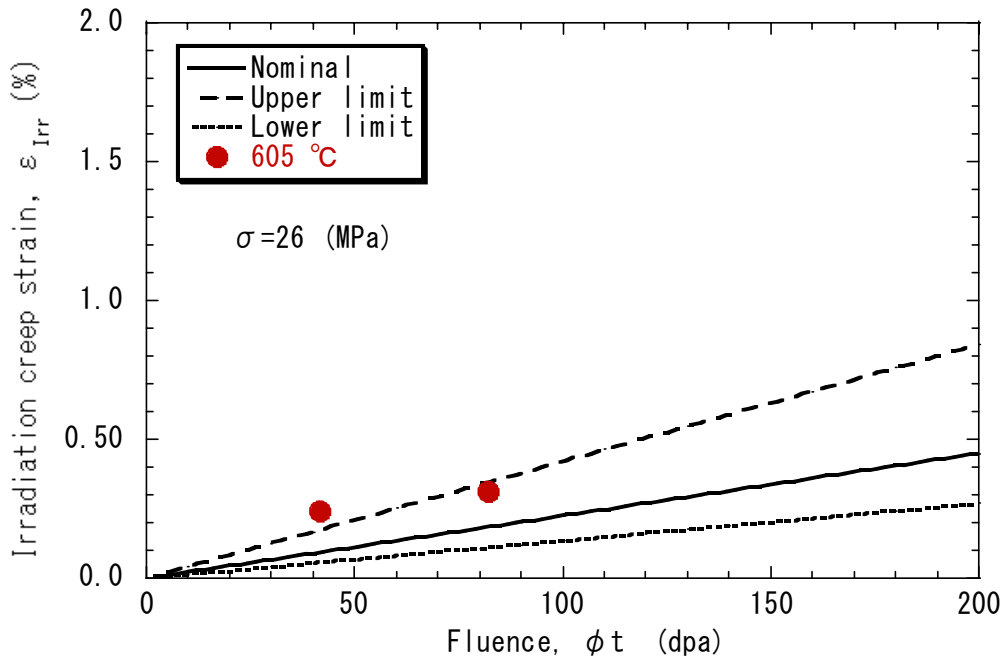


図3.36 照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 26\text{MPa}$)

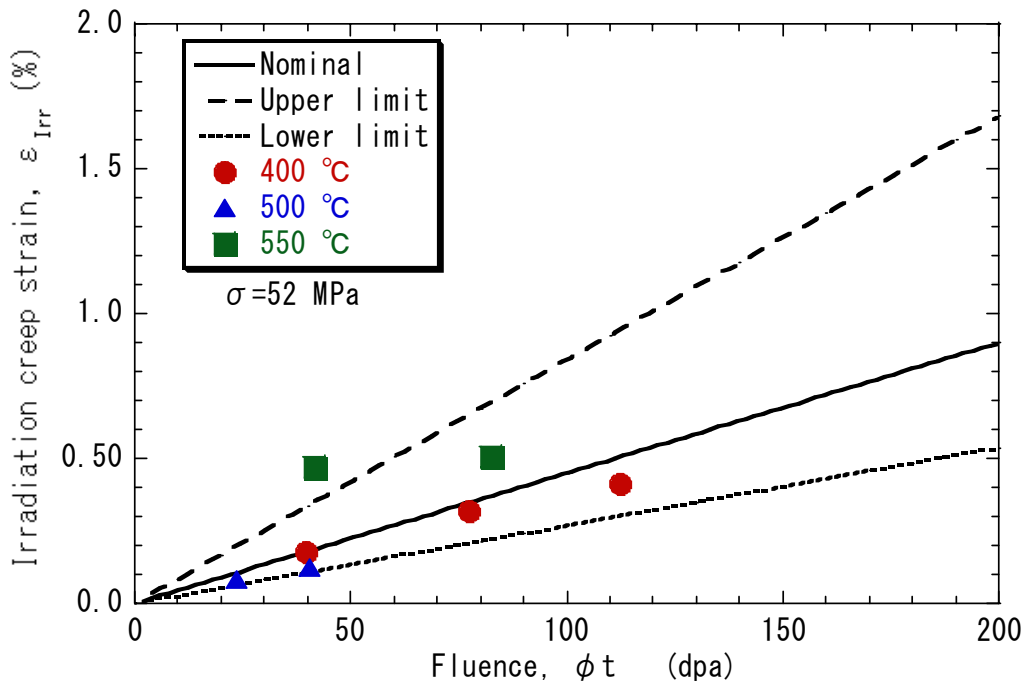


図3.37 照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 52$ MPa)

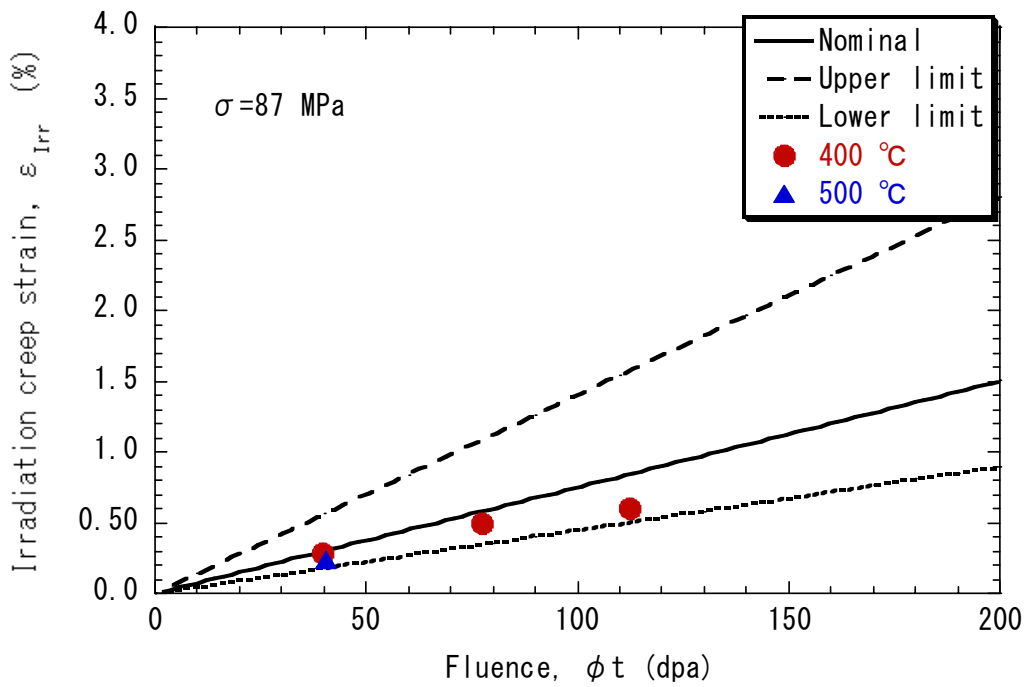


図3.38 照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 87$ MPa)

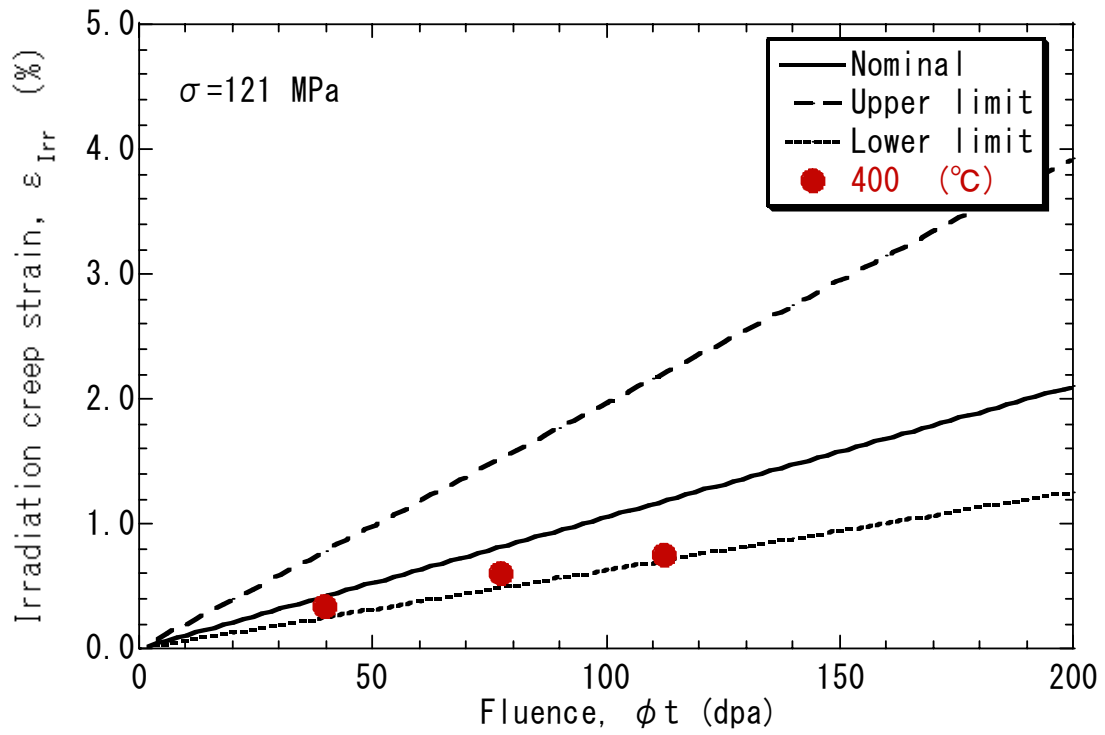


図3.39 照射クリープひずみ評価式と実測値の比較 ($\sigma = 121$ MPa)

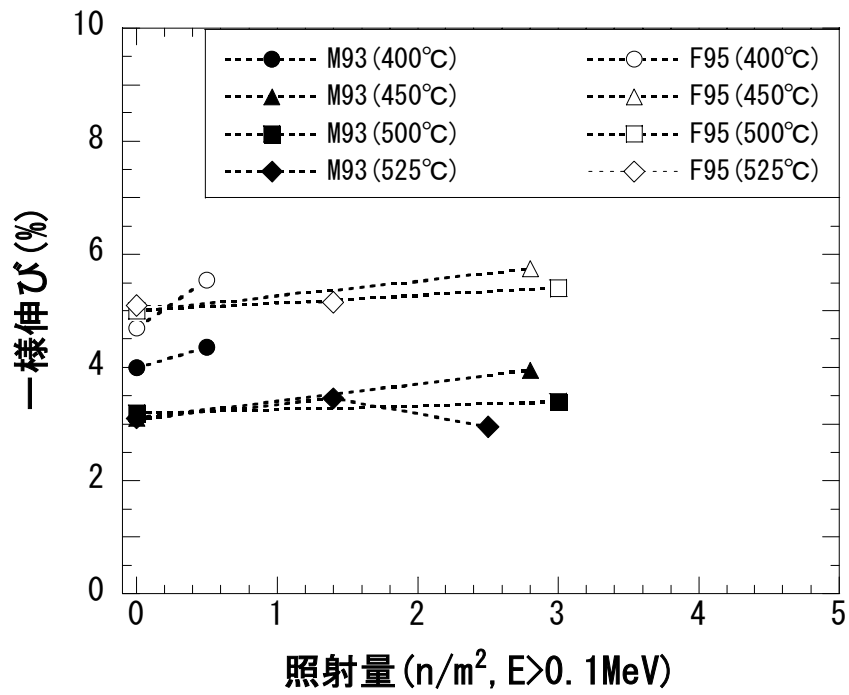


図4.1 ODS鋼被覆管の一様伸びの照射量依存性

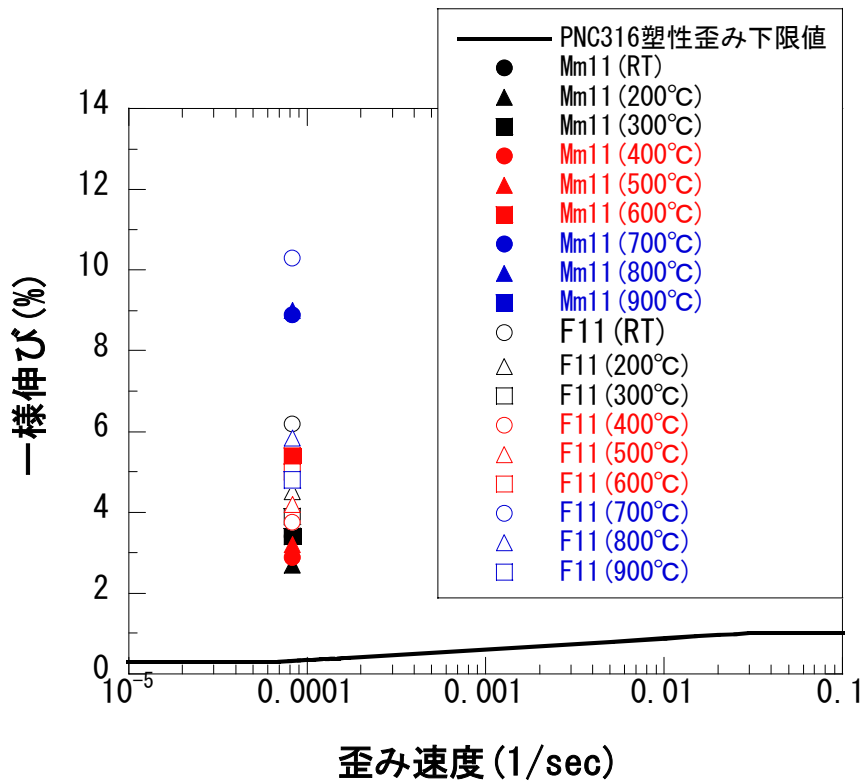


図4.2 ODS鋼の一様伸び（非照射材）とPNC316の短時間塑性ひずみ制限値の比較

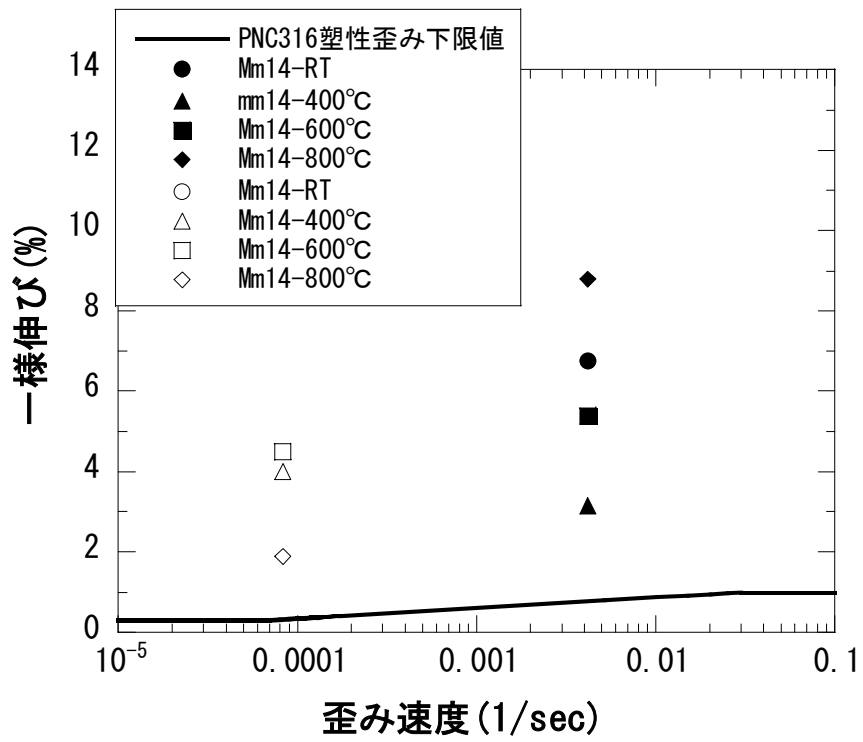
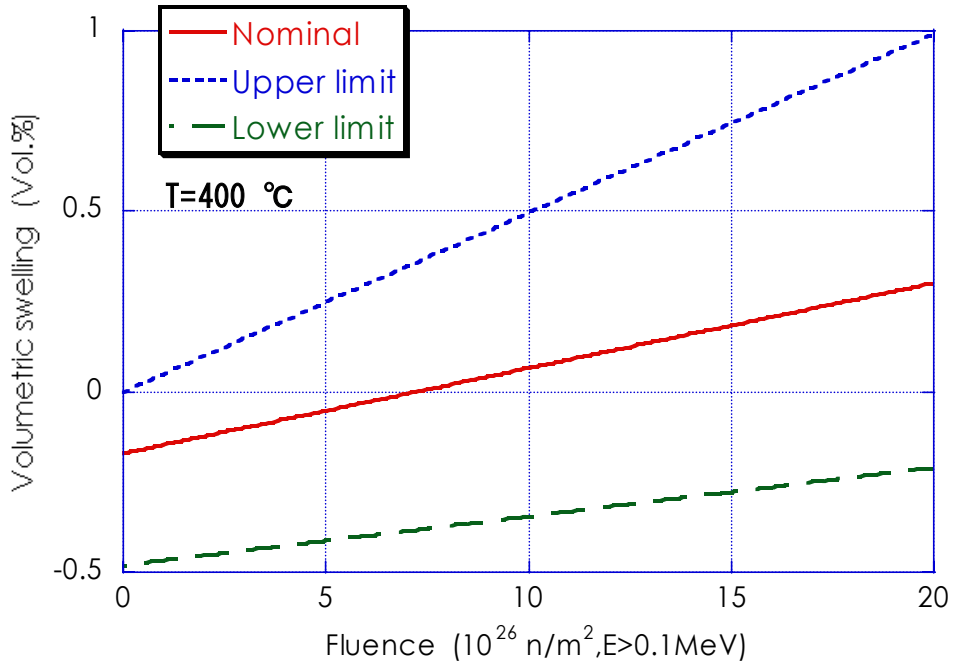
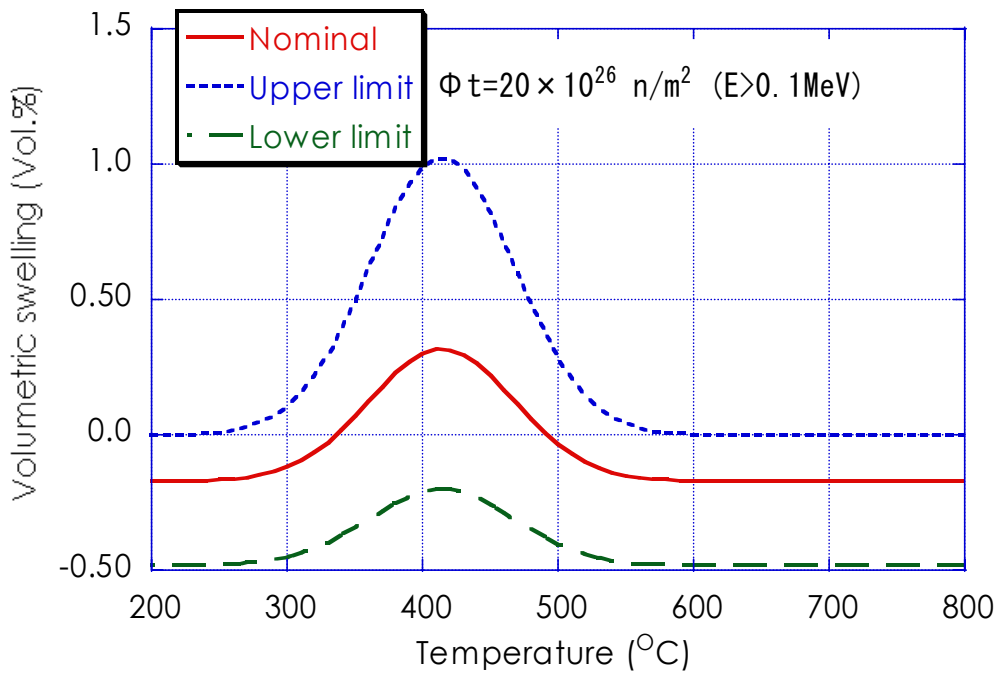


図4.3 9Cr-ODS鋼 (Mm14) の一様伸びのひずみ速度依存性

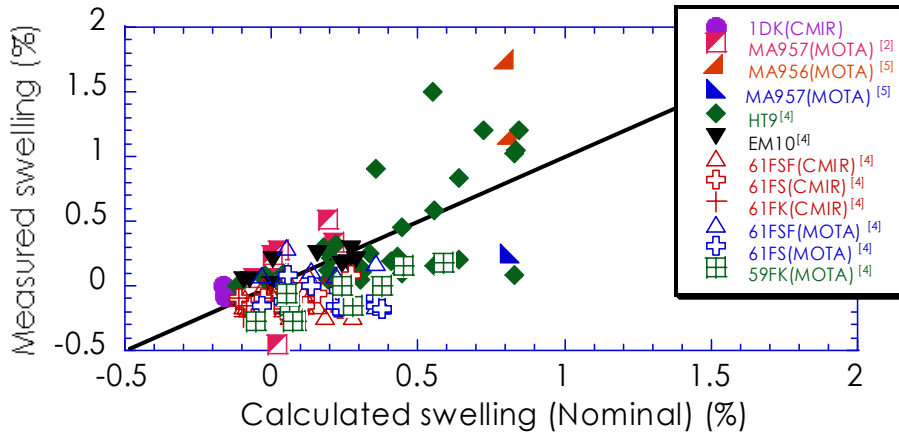


(1) 中性子照射量依存性 ($T=400^\circ\text{C}$)

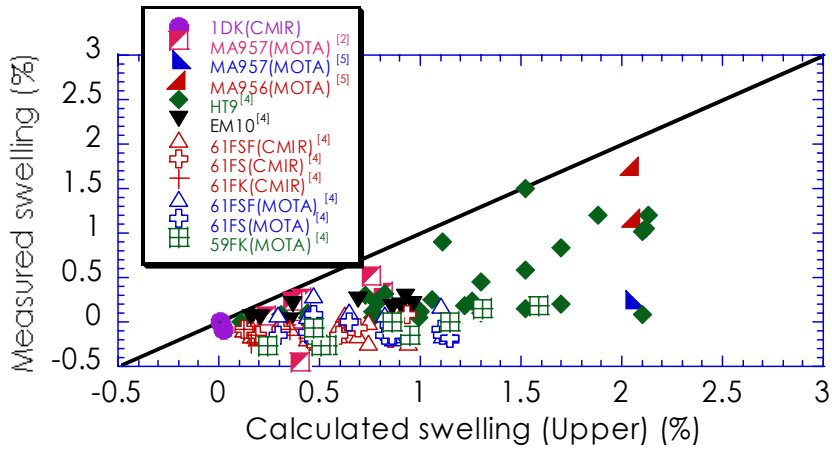


(2) 照射温度依存性 ($\Phi t=20 \times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E>0.1\text{MeV})$)

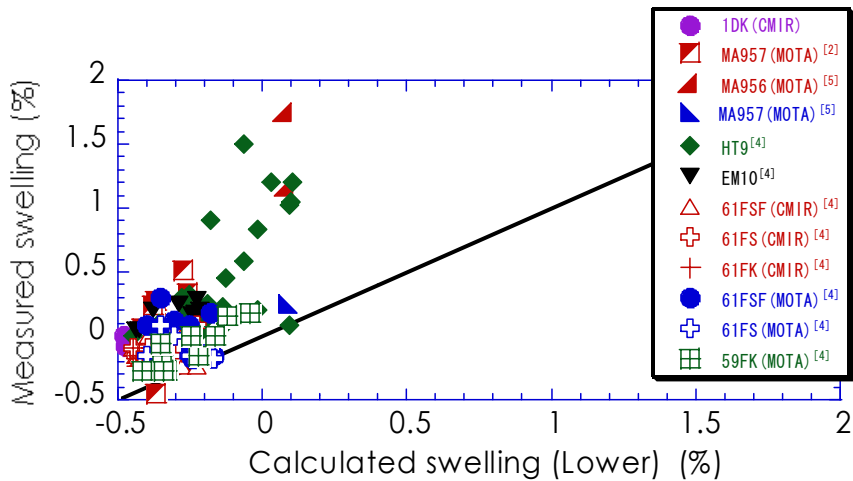
図4.4 スエリング式の計算結果



(1) ノミナル式と実測値の比較



(2) 上限式と実測値の比較



(c) 下限値と実測値の比較

図4.5 スエリング式計算値と実測値の比較

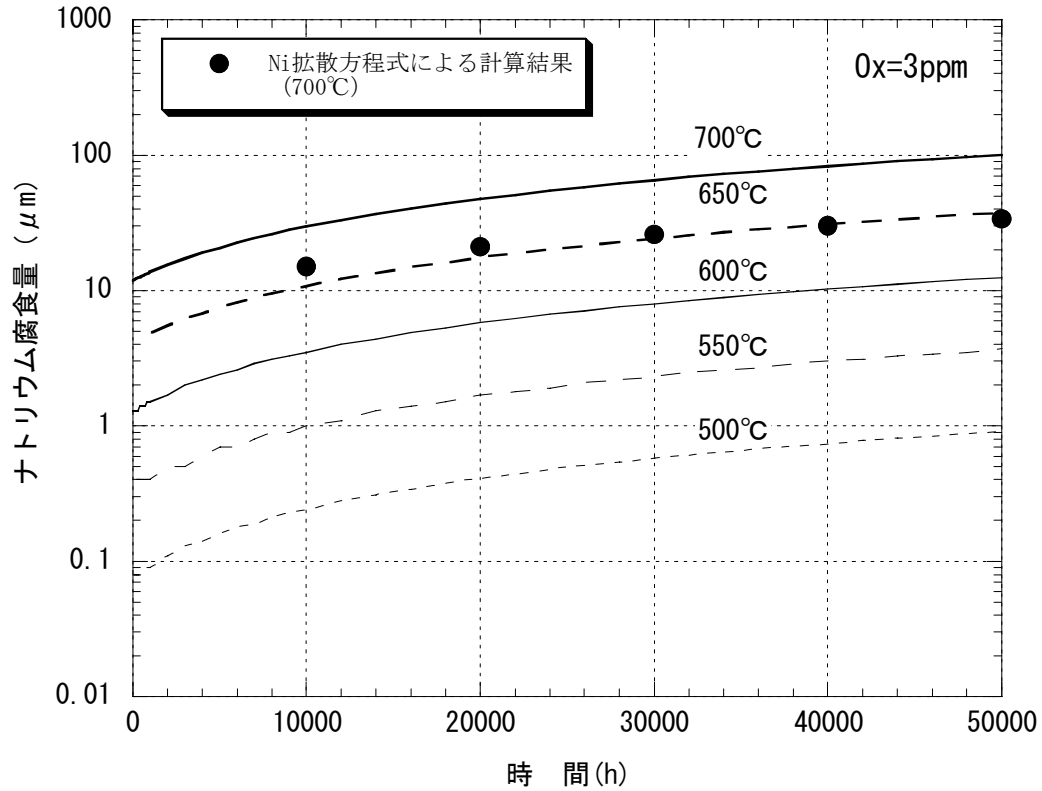


図4.6 ODS鋼のNa腐食 (外面腐食量)

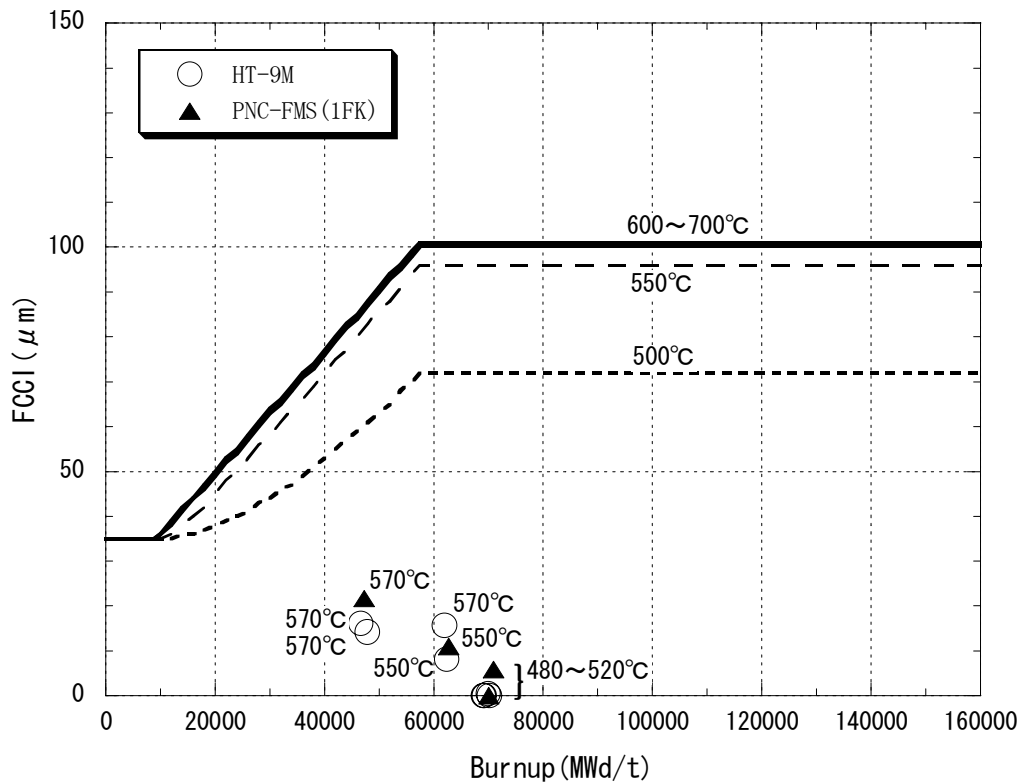


図4.7 ODS鋼のFCCI (内面腐食量)

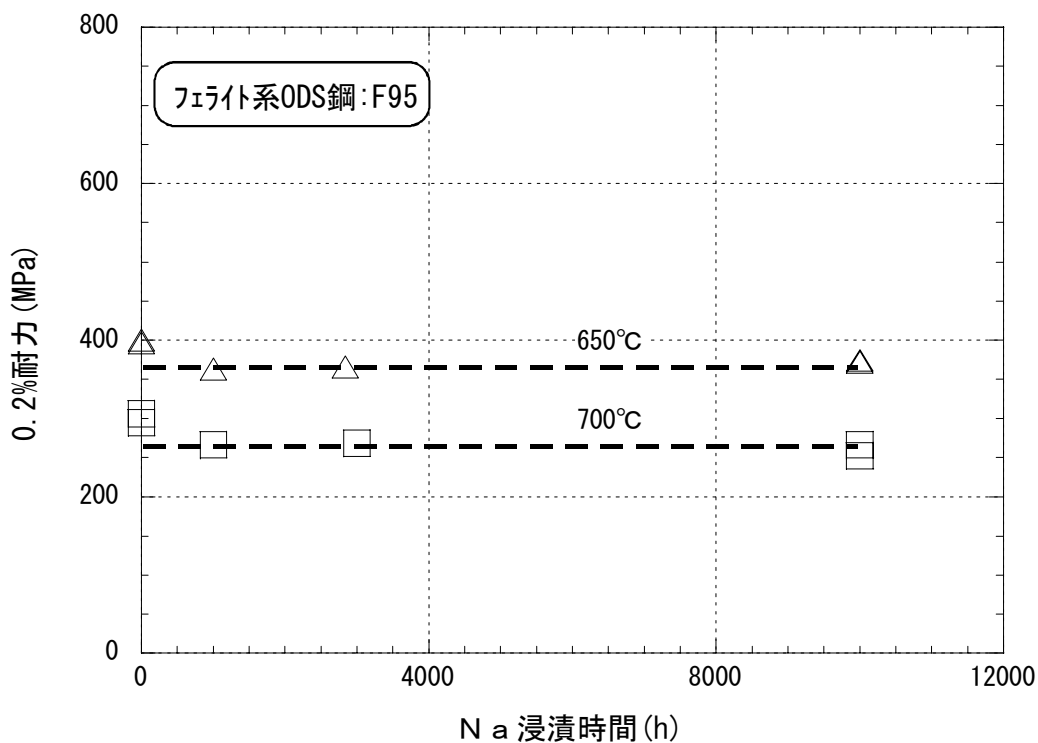


図4.8 12Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と0.2%耐力との関係

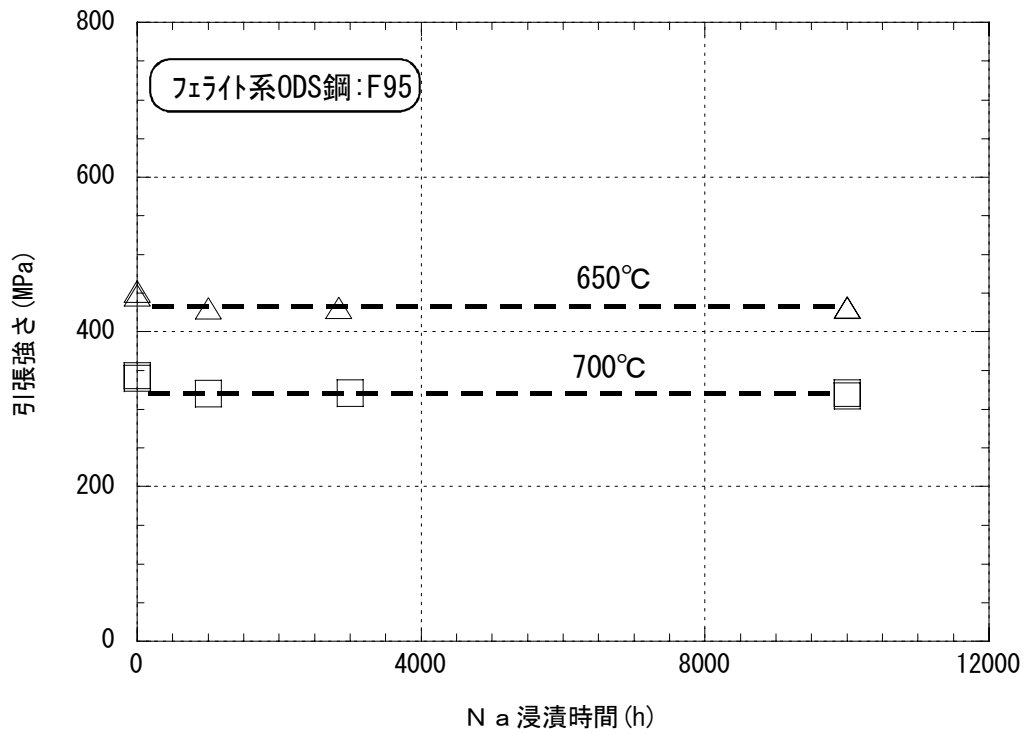


図4.9 12Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と引張強さとの関係

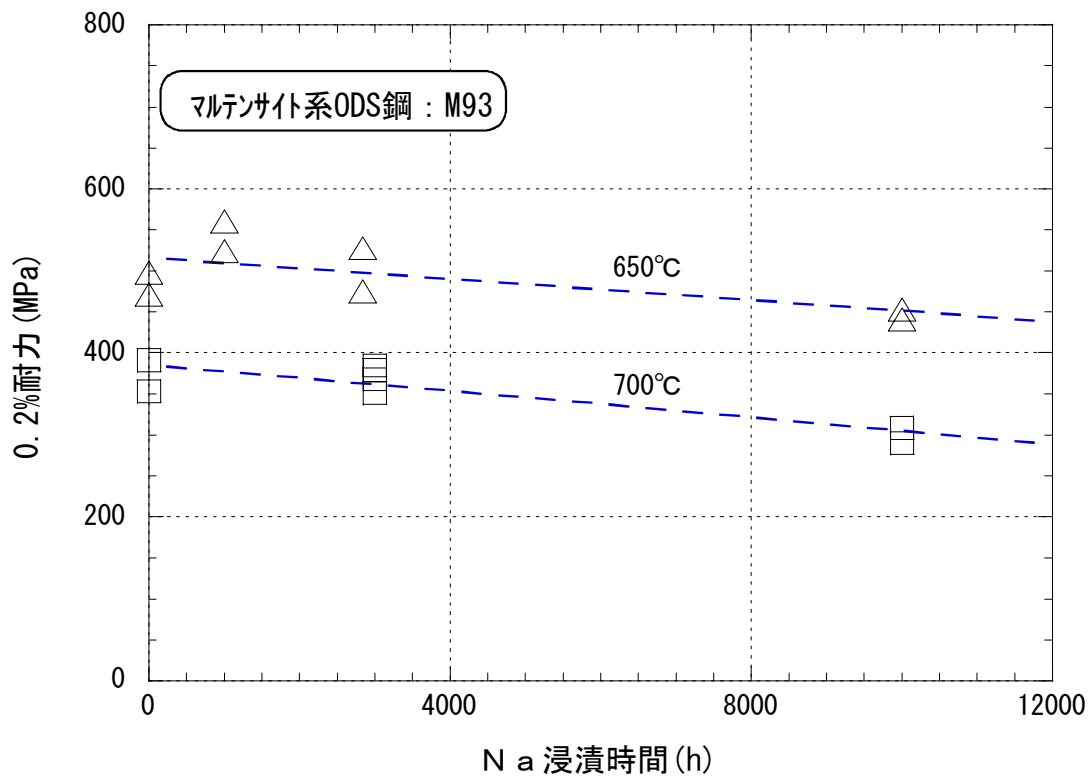


図4.10 9Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と0.2%耐力との関係

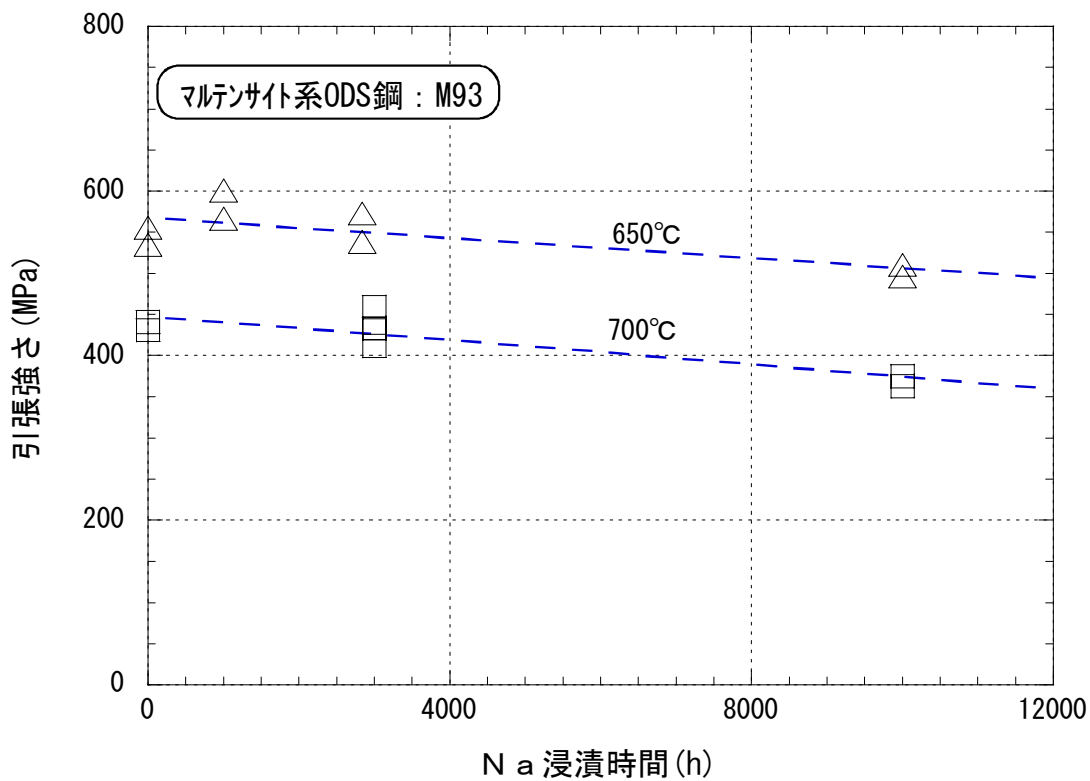


図4.11 9Cr-ODS鋼のNa浸漬時間と引張強さとの関係

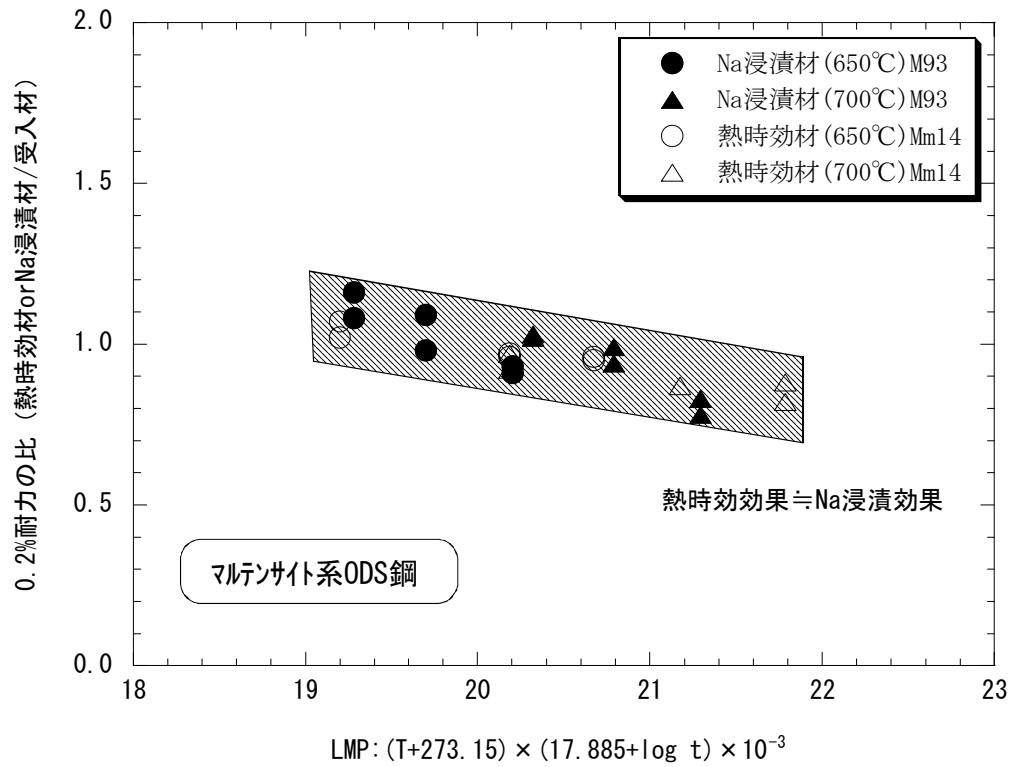


図4.12 熱時効及びNa浸漬後の受入材との0.2%耐力の比

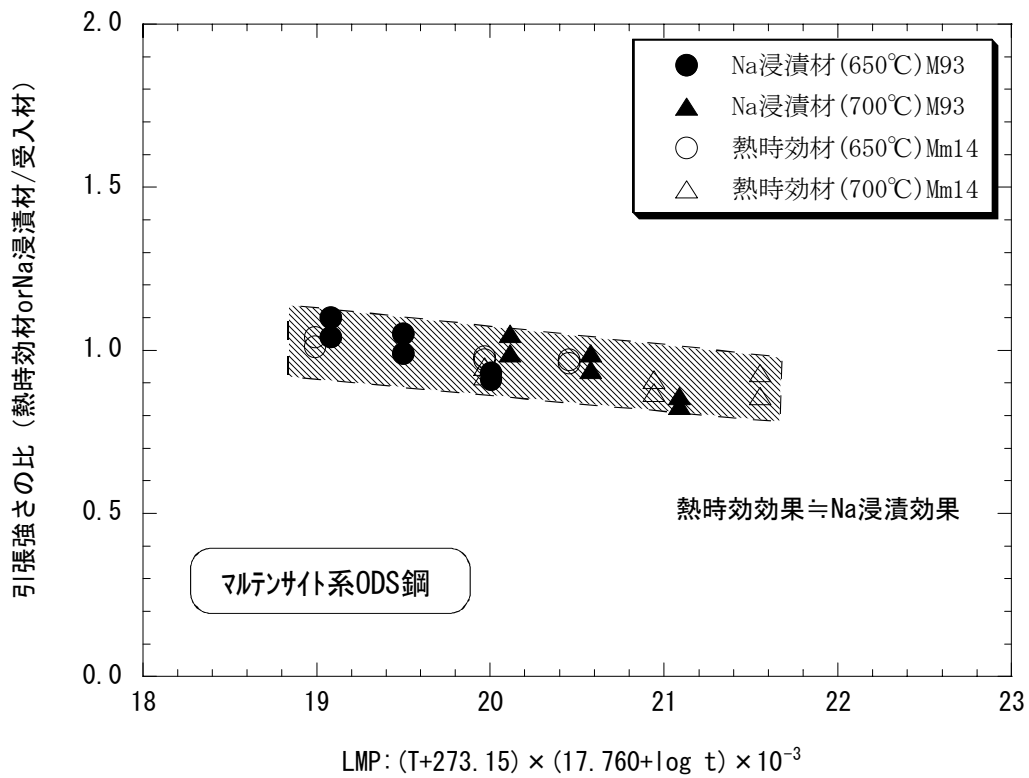


図4.13 熱時効及びNa浸漬後の受入材との引張強さの比

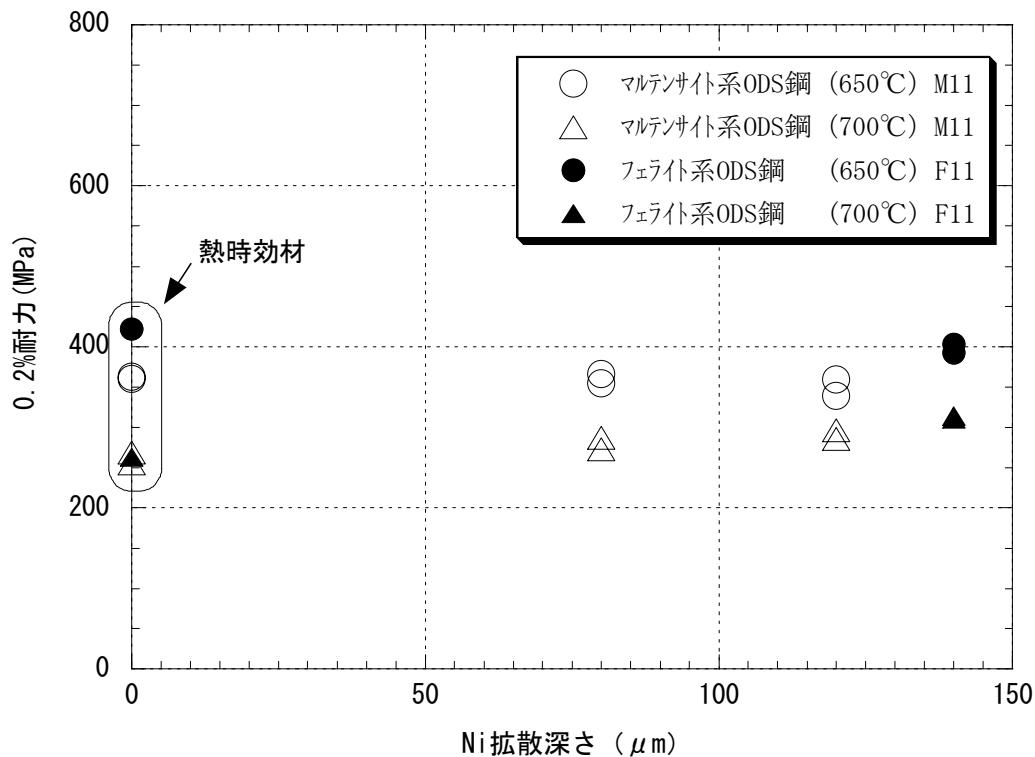


図4.14 Ni拡散材の0.2%耐力とNi拡散深さとの関係

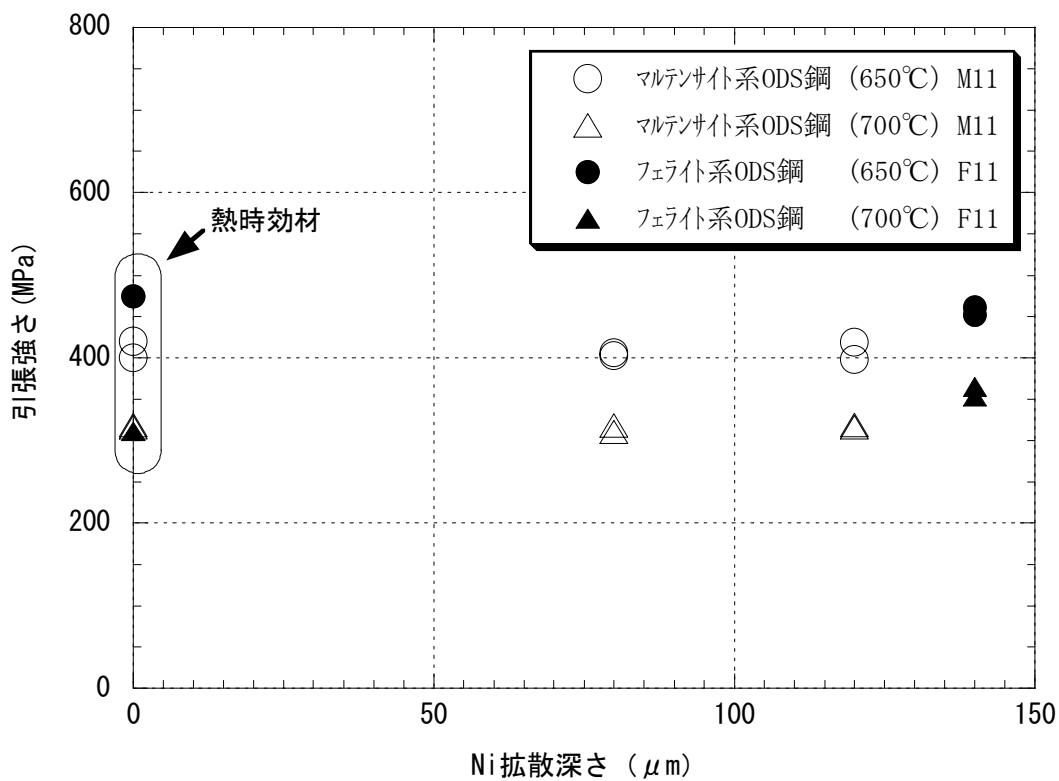


図4.15 Ni拡散材の引張強さとNi拡散深さとの関係

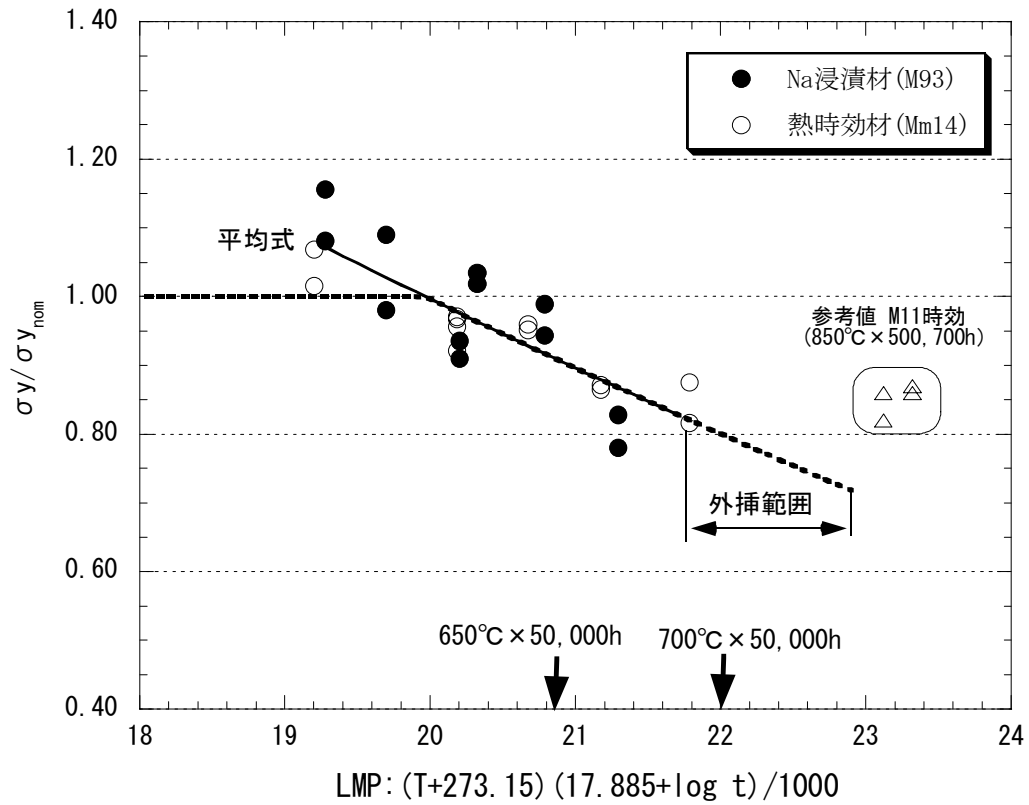


図4.16 σ_y / σ_{ynom} のLMPによる最適近似 (9Cr-ODS鋼)

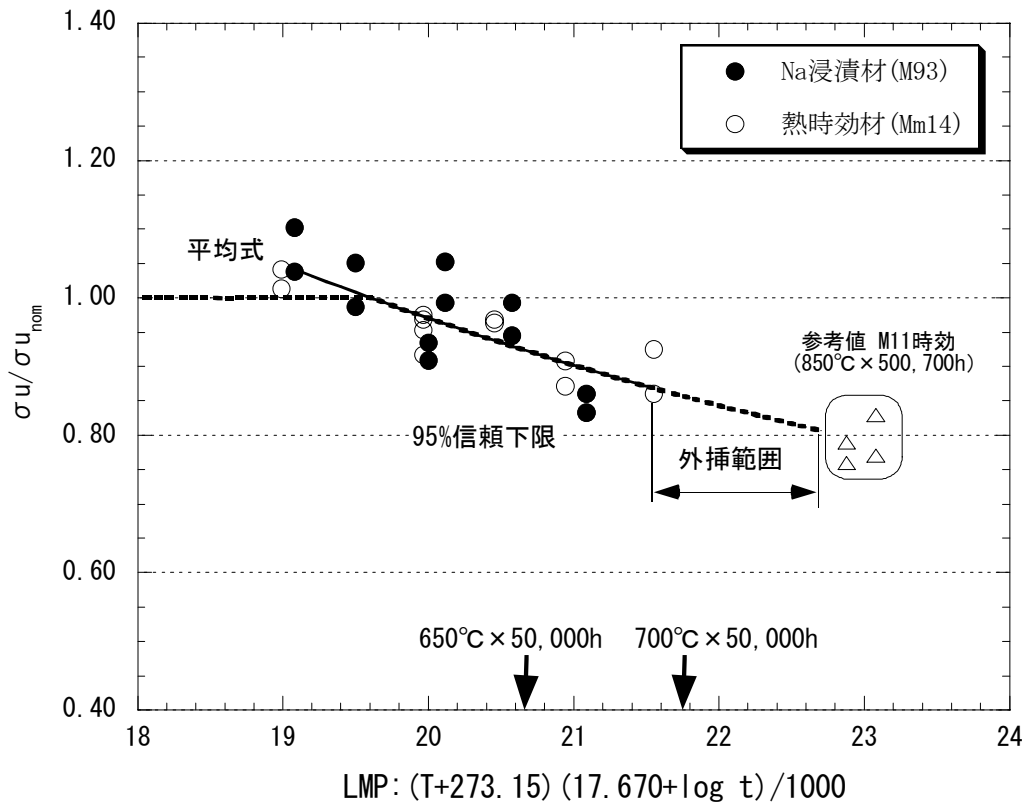


図4.17 σ_u / σ_{unom} のLMPによる最適近似 (9Cr-ODS鋼)

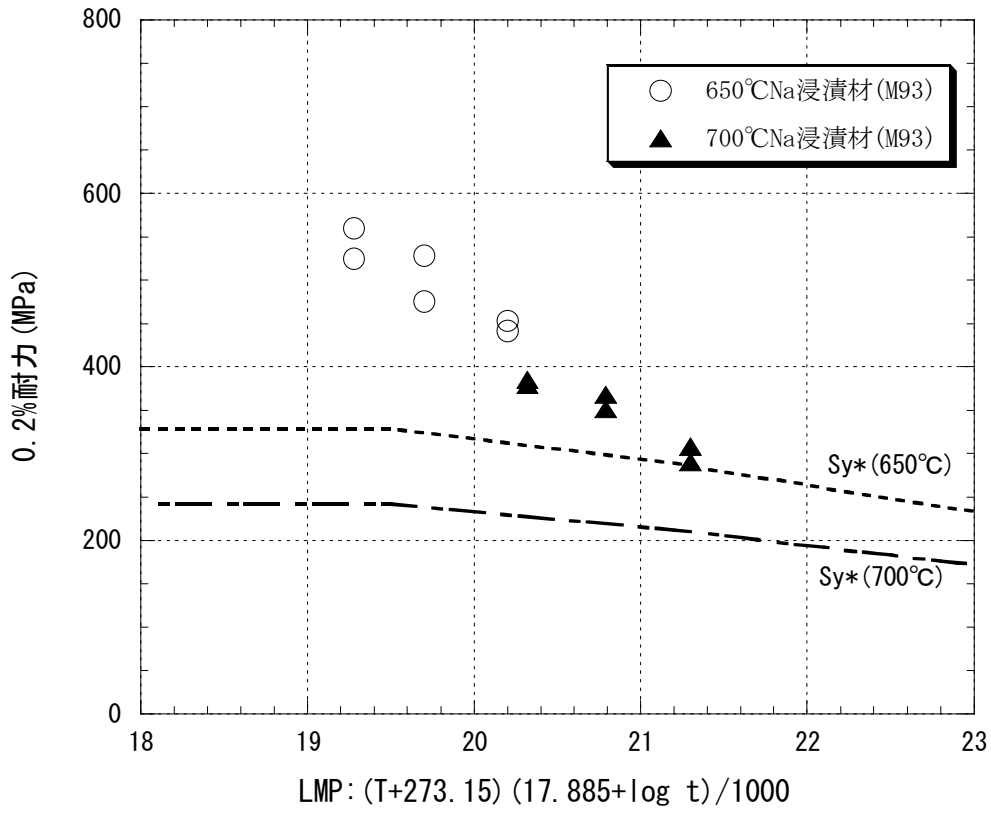


図4.18 Na浸漬材の0.2%耐力と S_{y^*} との比較

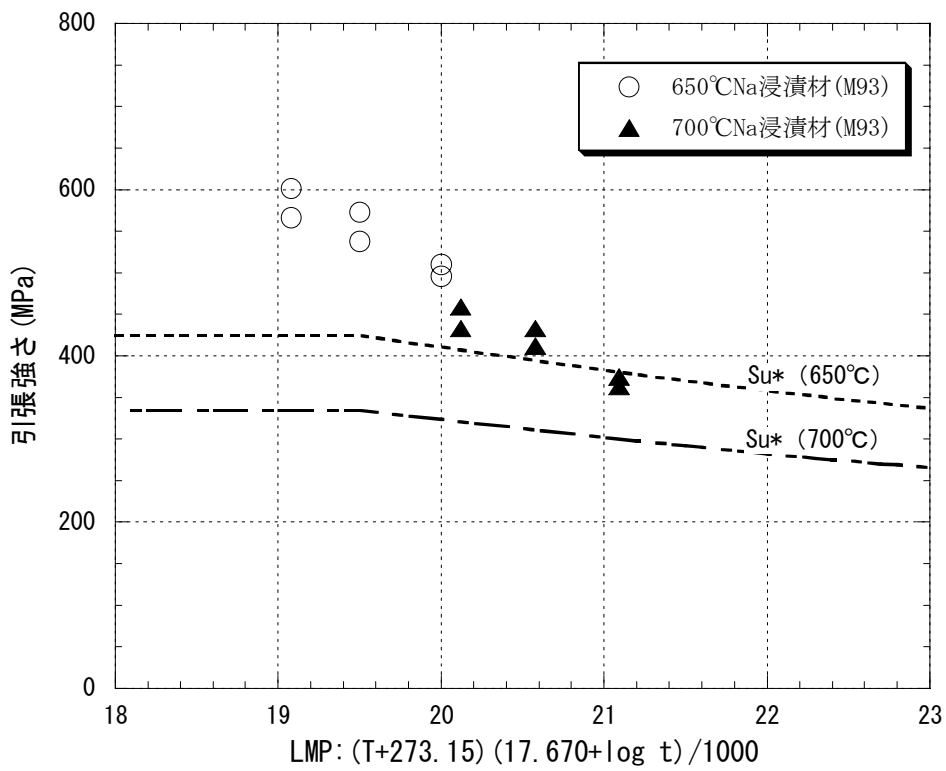


図4.19 Na浸漬材の引張強さと S_{u^*} との比較

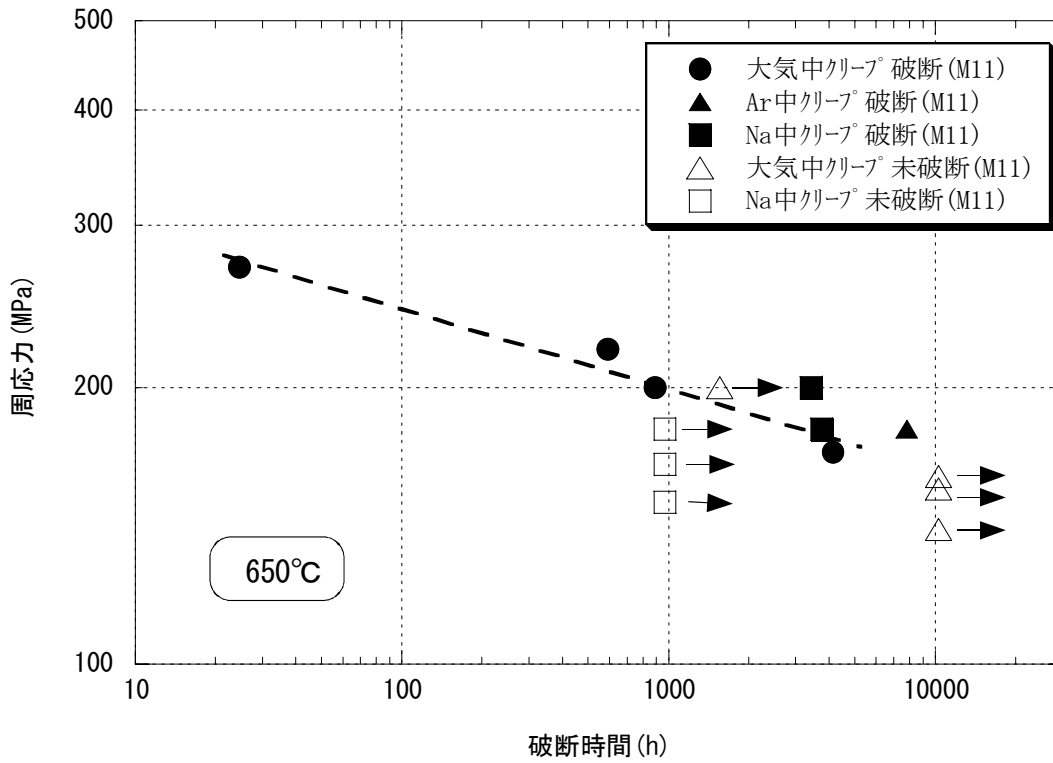


図4.20 Na中クリープ破断データと大気中及びArガス中クリープ破断データとの比較 (650°C)

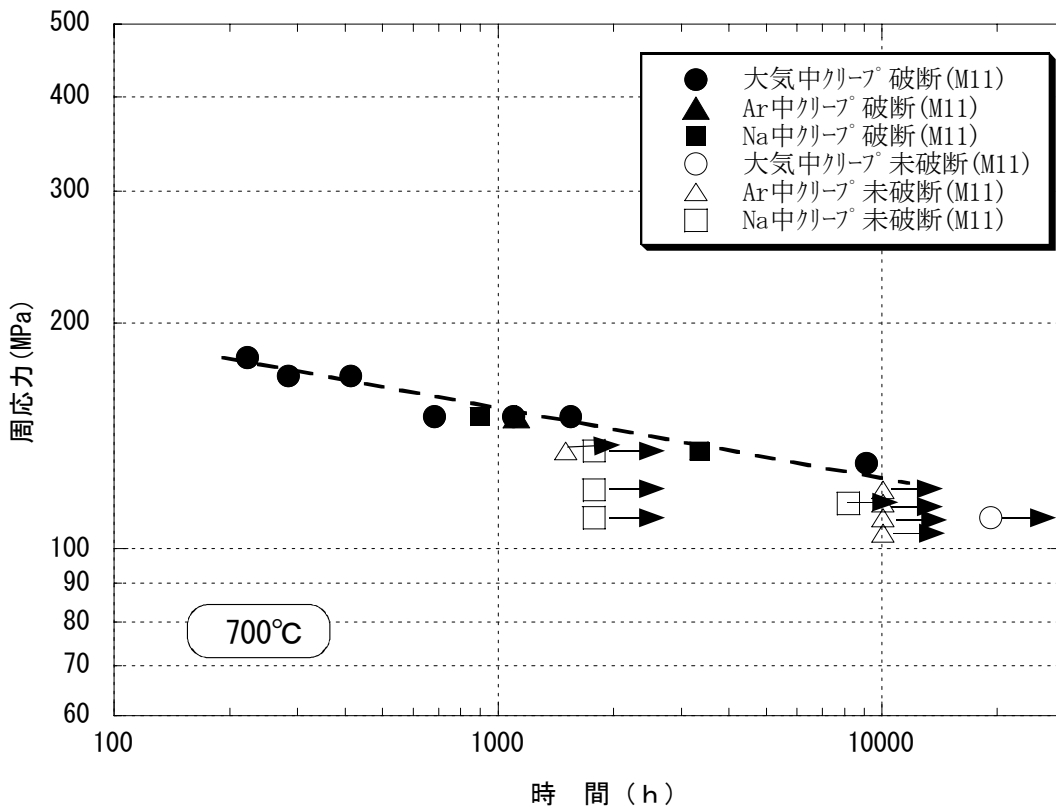


図4.21 Na中クリープ破断データと大気中及びArガス中クリープ破断データとの比較 (700°C)

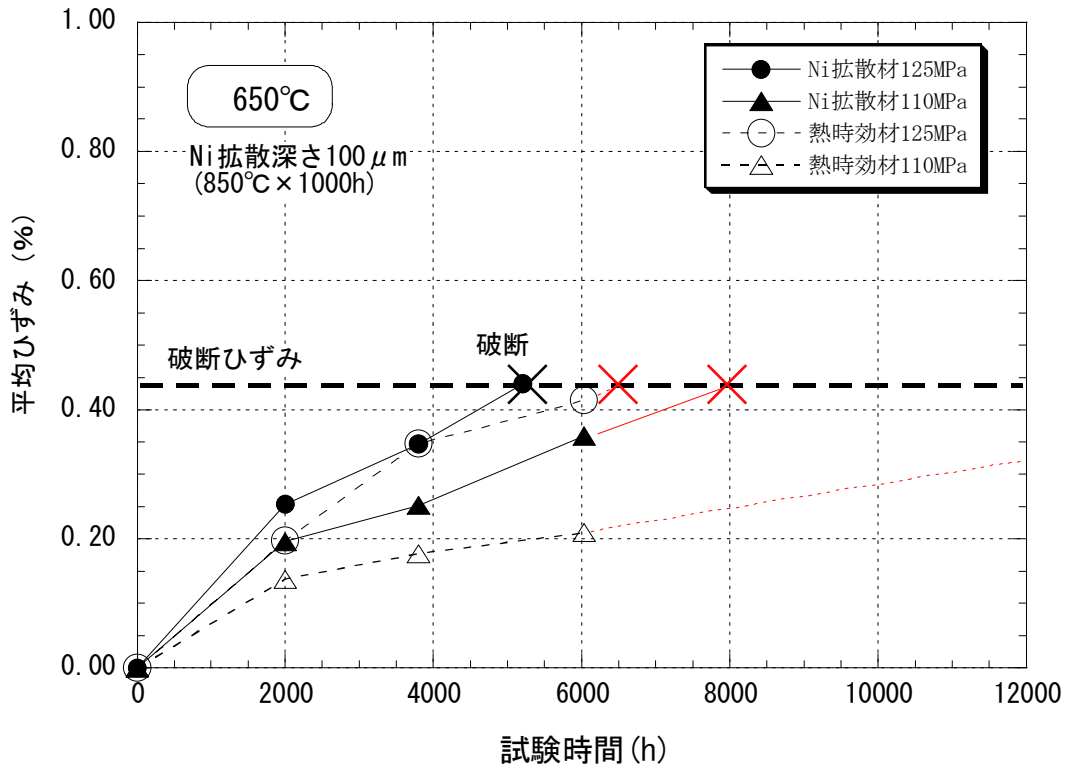


図4.22 クリープひずみによる破断時間の推定 (650°C、Ni拡散深さ100 μm)

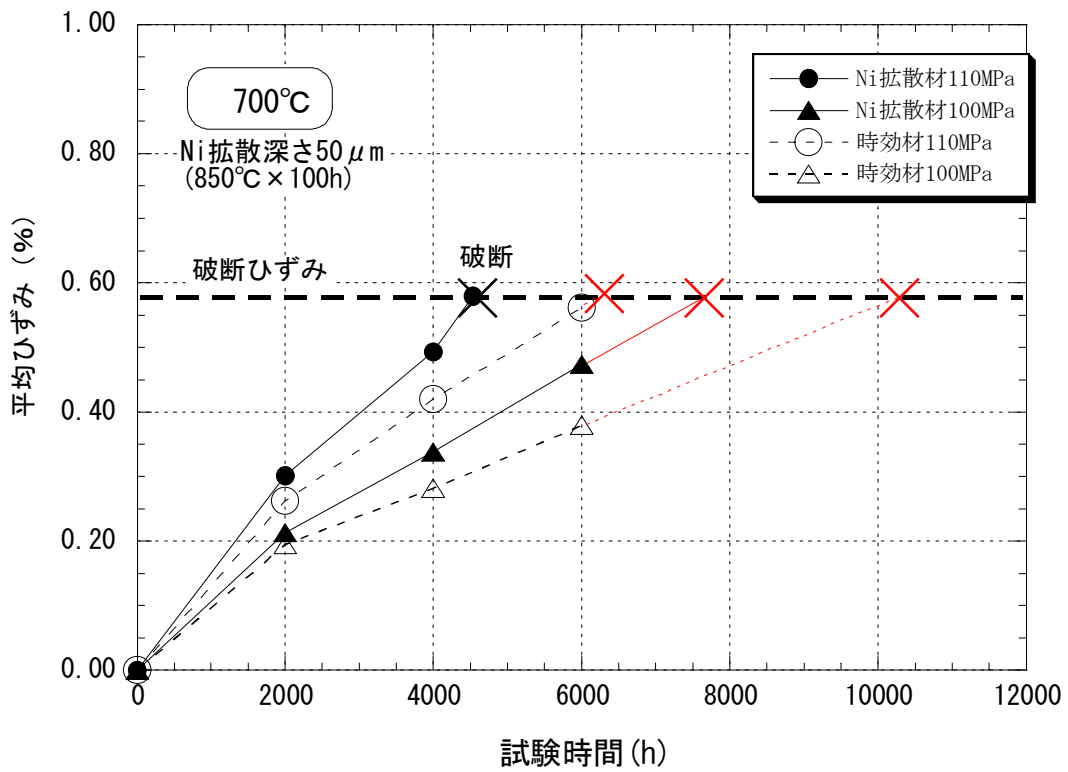


図4.23 クリープひずみによる破断時間の推定 (700°C、Ni拡散深さ50 μm)

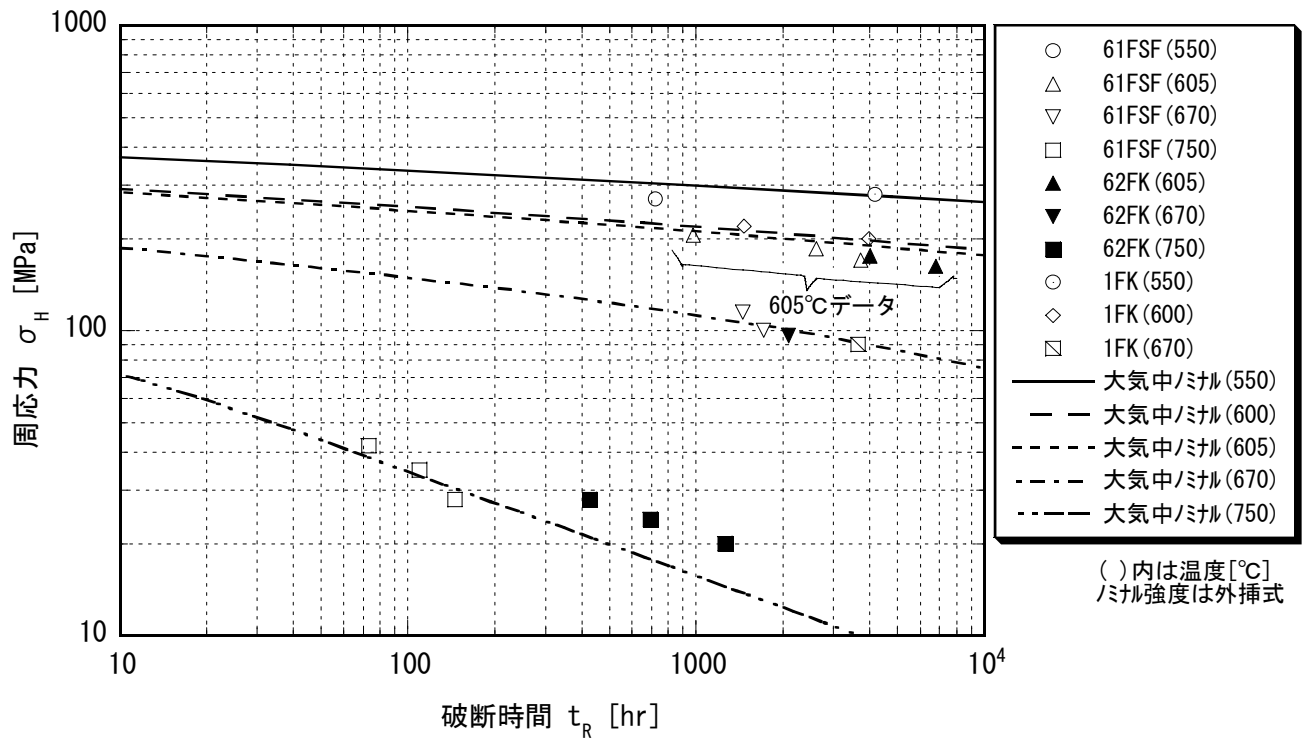


図4.26 PNC-FMS鋼の炉内データと大気中ノミナル強度との比較

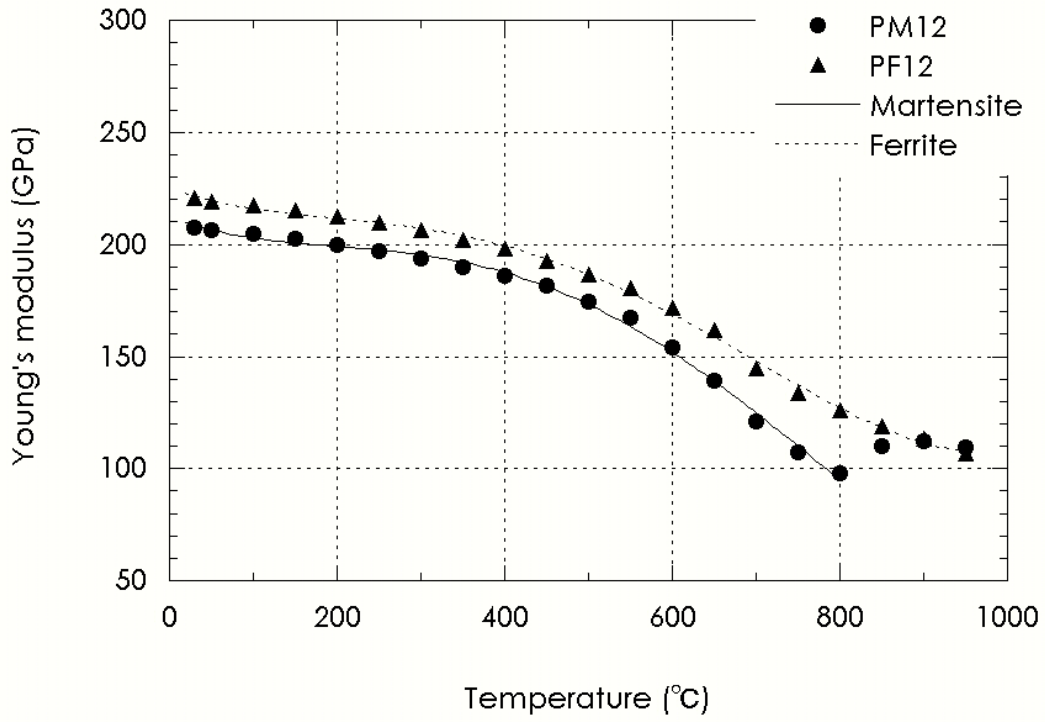


図5.1 ODS鋼のヤング率

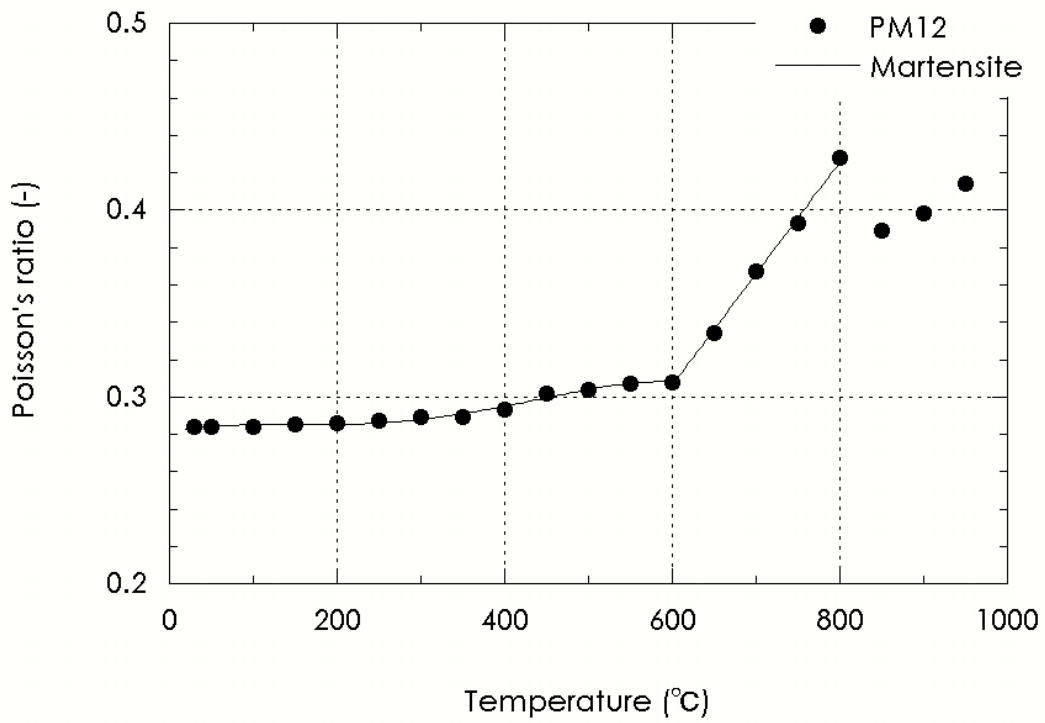


図5.2 ODS鋼のポアソン比

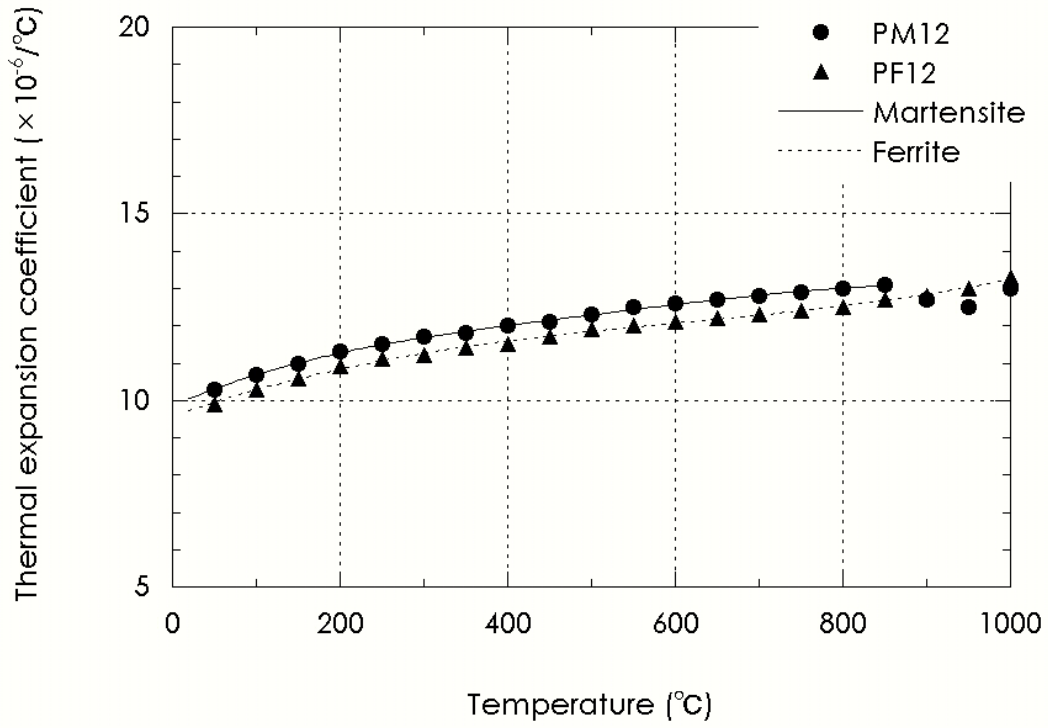


図5.3 ODS鋼の平均熱膨張係数

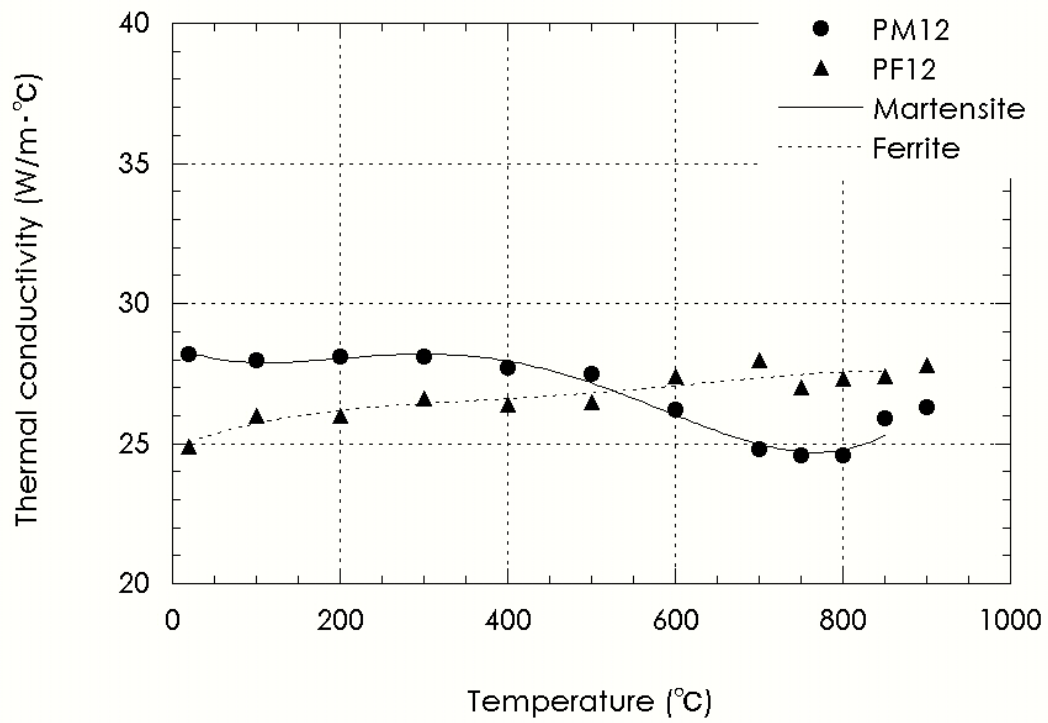


図5.4 ODS鋼の熱伝導度

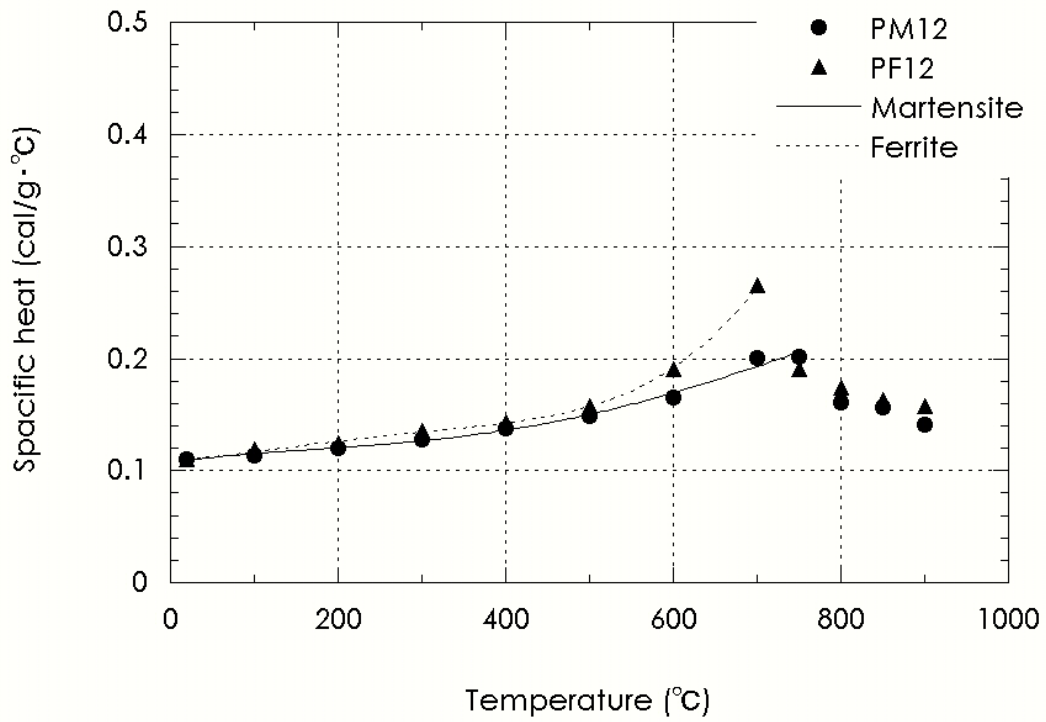


図5.5 ODS鋼の比熱

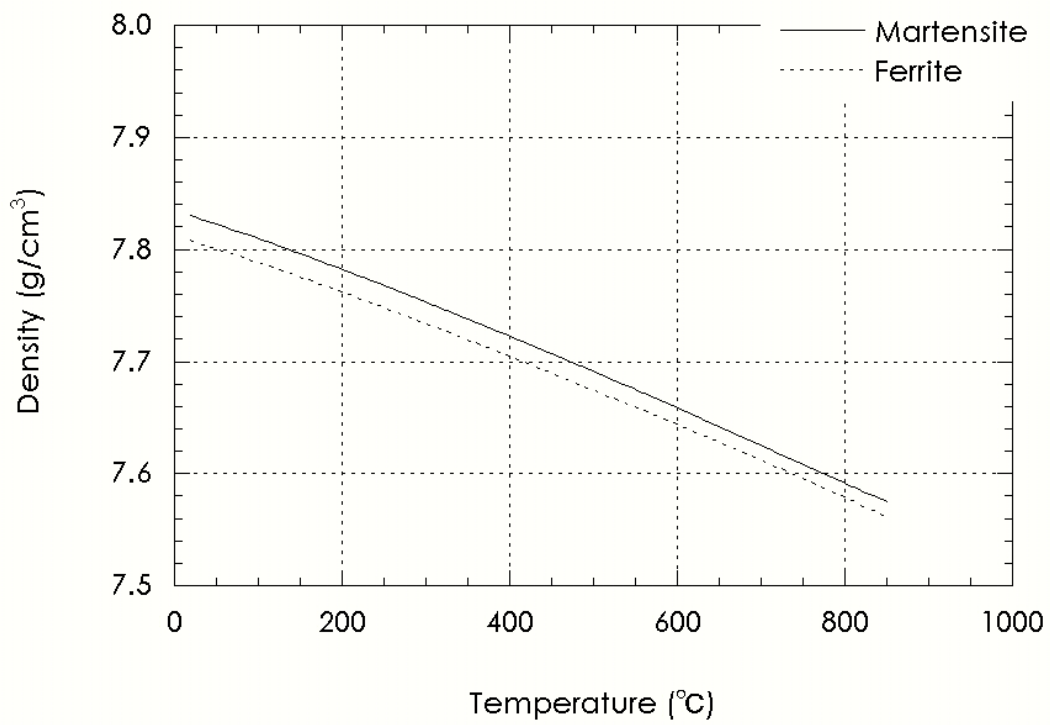


図5.6 ODS鋼の密度