

ODSフェライト鋼被覆管の 設計評価用関係式の検討

(研究報告書)

2000年4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 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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)

2000

ODS フェライト鋼被覆管の設計評価用関係式の検討

(研究報告書)

水田 俊治¹⁾ 上平 明弘¹⁾ 鶴飼 重治¹⁾

要旨

高速増殖炉の被覆管材料としてのODSフェライト鋼は、耐照射性に優れるフェライト-マルテンサイト鋼中に酸化物 (Y_2O_3) を微細に分散させて高温強度を改善しているため、燃料集合体の高燃焼度化とプラントの高温化を同時に達成可能な材料として期待されている。実用化戦略調査研究において、基準プラントである「MOX燃料Na冷却炉」の燃料被覆管にODSフェライト鋼を適用した場合の設計研究に供するため、ODS鋼フェライト鋼について、最新データを基に以下の材料特性・強度関係式を暫定的に策定した。

- (1) 設計クリープ破断応力強さ
- (2) クリープ強度補正係数 (環境効果)
- (3) 外面腐食 (Na中)
- (4) 内面腐食 (MOX燃料中)
- (5) 熱伝導度

1) 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発グループ

The evaluation of material base standard of ODS ferritic stainless steel
core component for fast breeder reactors

Shunji MIZUTA¹⁾, Akihiko Uehira¹⁾, Shigeharu UKAI¹⁾

Abstract

ODS (Oxide Dispersion Strengthened) ferritic-martensitic steels are one of the most prospective cladding materials for advanced fast breeder reactors, since they are expected to have excellent swelling resistance and superior high temperature strength due to the finely distributed stable oxide particles (Y_2O_3). Properties and the tentative strength equations for ODS ferritic-martensitic were proposed on the basis of the latest data to apply to the feasibility study of the sodium coolant MOX fuel plant.

The items of equations are follows .

- (1) creep rupture strength
- (2) correction factor of creep rupture strength (in Na and in reactor)
- (3) outer surface corrosion (Na)
- (4) inner surface corrosion (in MOX fuel pin)
- (5) thermal conductivity

1) O-arai engineering center, Nuclear fuel research group, System engineering technology division

目 次

1. はじめに	1
2. 材料特性・強度関係式の策定	2
2.1 設計クリープ破断強さ	3
(1) 鋼種及び使用データの選定	3
(2) 応力・温度依存性の検討	3
(3) 応力の対数の1次式によるフィッティング	4
(4) 時間係数の検討	4
2.2 クリープ破断強度補正係数（環境効果）	6
2.3 外面腐食（Na中）	7
2.4 内面腐食（MOX燃料）	8
2.5 熱伝導度（被覆管内面/肉厚中心/外面温度評価）	9
3. まとめ	10
4. 参考文献	11

表

表 1	ODS鋼試作被覆管の化学成分 (wt%)	12
表 2	平成 9 年度試作ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果	13
表 3	ODS鋼 (1DS) の内圧クリープ破断試験結果	14
表 4	ODS鋼 (1DK) の内圧クリープ破断試験結果	14
表 5	熱伝導率測定データ	15

図

図 1	平成 9 年度試作管の内圧クリープ試験結果	16
図 2	700℃での0.2%耐力で企画化した値の温度依存性	17
図 3	1DSと1DKのクリープ破断強度の比較	17
図 4	1DS及び1DKデータによるフィッティング (600℃データ除く)	18
図 5	上下限式の設定 (時間係数 3 の場合)	19
図 6	平成10年度試評価式と今回策定式の比較	20
図 7	炉外Na中データと大気中ノミナル強度	21
図8.1	ODSフェライト鋼 (63DSA) の内圧クリープ破断強度	22
図8.2	ODSフェライト鋼 (1DS) の内圧クリープ破断強度	22
図 9	炉内クリープデータと大気中ノミナル強度の比較	23
図10	MA957およびMA956の重量変化とナトリウム温度との関係	24
図11	X線回折による γ 相生成量測定結果	25
図12	PNC-FMS鋼のナトリウム腐食量	26
図13	CsOH/CsI中での腐食試験結果の比較 (700℃,100h)	27
図14	内面腐食量と燃焼度の関係	28
図15	ODSフェライト鋼の熱伝導率	28

1. はじめに

高速増殖炉（FBR）サイクルに関する事業の進め方について、サイクル機構・中長期事業計画では、中期的にはFBRサイクル全体で軽水炉とその関連核燃料サイクルと比肩する経済性を達成すべく研究開発を進めるとの方針としている。このようなFBRサイクル実用化像構築に向けての具体的な展開は、経済性向上を最優先にして、5年程度の期間毎に研究開発の方向性および成果について広く評価を受けて次の期間の研究開発を具体化する方式で進めることとしている。

中長期事業計画を受けて、FBR実用化戦略調査研究においては、「MOX燃料Na冷却炉」を基準プラントとして、経済性ポテンシャルを有する複数の概念を創出している。それらの設計研究を行う場合には、プラントの炉心材料として適用される燃料被覆管についての材料特性・強度関係式等を整備しておく必要があった。

高速増殖炉の被覆管材料としてODSフェライト鋼は、耐照射性に優れるフェライト-マルテンサイト鋼中に酸化物（ Y_2O_3 ）を微細に分散させて高温強度を改善しているため、燃料集合体の高燃焼度化とプラントの高温化を同時に達成できる可能性のある材料として期待されている。そのため、実用化戦略調査研究において基準プラントである「MOX燃料Na冷却炉」の燃料被覆管にODSフェライト鋼を適用した場合の設計研究を行うためには、材料特性・強度関係式を最新データを基に策定しておく必要がある。本報告書ではODSフェライト鋼被覆管について、設計評価用の関係式を暫定的に策定した。

2. 材料特性・強度関係式の策定

ODSフェライト鋼の目標成分の被覆管については、試作した被覆管の数量が限られていることもあって、材料特性・強度関係式を策定するには十分なデータは取得できない状況にある。しかしながら、これまでに試作した被覆管（平成元年度試作材：1DS, 1DK）については、ある程度まとまったデータが取得されていることから、それらを活用することによって、設計研究に必要な関係式の検討を行った。

また、内外面の腐食はODSフェライト鋼と基本的なマトリックスが同じであるPNC-FMS鋼（フェライト-マルテンサイト）の挙動評価式を基本的に適用することにした。

2. 1 設計クリープ破断応力強さ

(1) 鋼種及び使用データの選定

ODS鋼被覆管の目標成分は、内圧クリープ破断強度と加工性のバランスした以下の成分を目標として、現在開発を進めているところである（詳細は表1）。

フェライト系 : $12\text{Cr}-0.03\text{C}-2\text{W}-0.28\text{Ti}-0.23\text{Y}_2\text{O}_3$ (7AとF95の中間成分)

マルテンサイト系 : $9\text{Cr}-0.12\text{C}-2\text{W}-0.20\text{Ti}-0.35\text{Y}_2\text{O}_3$ (M93成分)

そのため、内圧クリープ強度評価式策定用のデータとしては、7A,F95,M93のデータを用いることにした（表2、図1）。策定用としたこれらのデータは平成11年8月18日時点での最新データである。ここで、7Aの700℃,130MPaのクリープ破断時間は、高応力の140MPa及び150MPaよりも短時間で破断しているが、これは管部で破断していることを確認している。なお、M93の低応力データ2点は現状では破断していないが、保守側の評価となるため、策定には用いることにした。これら2点のデータはF95のデータを包絡する傾向にある（本報告書作成時点では2点とも内圧クリープ破断しており、F95のデータを包絡することが確認できている）。

評価式策定用データとしては、各鋼種のデータ点数は7A（5点）、F95（4点）、M93（4点）とデータ点数が少なく、また得られたクリープ強度レベルは3鋼種でそれほど変わらないため、フェライト系（7A,F95）及びマルテンサイト系（M93）を一緒にして関係式を策定することにした。

(2) 応力・温度依存性の検討

現状では目標成分のODSフェライト鋼の内圧クリープ破断試験は700℃のみ（ただし、M93は650℃でも1点実施）で実施されており、700℃以外でのデータが全く得られていないために、平成元年度に試作した被覆管である1DS及び1DKの応力・温度依存性を流用することについて検討した。

まず、ODSフェライト鋼のリング引張試験結果（0.2%耐力）から応力・温度依存性を各鋼種について推定した（図2）。クリープ試験では試験温度での応力レベルを評価する目安として、0.2%耐力と関連づけられると考えている（例えば、0.2%耐力を越えるような応力レベルでは塑

性変形が起こってくるために、クリープ破断時間は極端に短くなる傾向にある)。そのため縦軸は各鋼種の700℃での0.2%耐力により規格化した値を用いた。この規格化によって、データ点数の多い700℃との温度依存性が推定できるものと考えた。図2より、1DS及び1DKデータは、650℃以上については両者の温度依存性は同程度と判断される。これに対して低温側の600℃以下については1DSと1DKのリング引張強度の差は大きくなる傾向にある。この傾向は1DSと1DKの試験温度によるクリープデータの比較(図3)によって得られる傾向と同様であり、650℃以上の温度では両者のクリープ強度は同程度と判断される。そのため、応力・温度依存性を求めるためのフィッティングには温度依存性が同程度である650℃以上の1DS及び1DKのクリープデータを用いることにした。

温度依存性の検討に用いた1DSと1DKのデータ範囲を以下に示した(データの詳細:表3¹⁾, 4²⁾)。

650℃: 304~174MPa, 28.1~2494.7h

675℃: 203~123MPa, 161.7~2249.5h

700℃: 147~88MPa, 23.7~17167.1h

750℃: 120~70MPa, 24.8~7191.2h

(3) 応力の対数の1次式によるフィッティング

フィッティング式の応力の対数による次数については、長時間側での外挿性を考慮して、LMP(Larson-Miller-Parameter)の1次式でフィッティングをすることにした。策定式には、1DS及び1DKの650℃以上のデータでフィッティングした式の温度・応力依存性を流用した(図4)。

$$(T+273.15)(35.12+\log t)/1000 = 56.784 - 9.133 \log \sigma$$

ここで、

T: 温度 (°C)

t: クリープ破断時間 (h)

σ : 周応力 (MPa)

(4) 時間係数の検討

時間係数を3とした場合には、全てのデータは包絡できるため、設計クリープ破断応力強さ

S_R は以下の式とした（図5）。今回策定した式はH10年度の試評価式（平成元年度試作材と7A2CR材で策定）に比べて低応力側で若干強度が低下した（図6）。

$$(T+273.15)(35.12+\log(3 \times t_R))/1000 = 56.784 - 9.133 \log S_R$$

ここで、

T：温度（℃）

t_R ：クリープ破断時間（h）

S_R ：設計クリープ破断応力強さ（MPa）

2.2 クリープ破断強度補正係数（環境効果）

Na環境効果に関しては、ODSフェライト鋼と同じフェライト系マトリックスであるPNC-FMS鋼については、炭化物の微細分散によって析出強化していることから、Na中では650℃、1000h以上で脱炭によるクリープ強度の低下が認められる（図7）³⁾。しかし、ODSフェライト鋼では安定な Y_2O_3 粒子によってマトリックスは分散強化しており、脱炭することによるクリープ強度低下は起こらないと考えられる。このことは、63DSA及び1DSについて実施されたNa中クリープ破断試験結果において、実機使用条件に近い低応力長時間側については大気中試験結果とNa中クリープ強度は変わらないことから（図8.1, 8.2）、ODSフェライト鋼についてはNa環境効果による母材のクリープ破断強度の低下はないものと考えられる。

照射効果に関しては、PNC-FMS鋼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9）³⁾、同様なフェライト鋼であるODSフェライト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。今後はMARICO-2においてODSフェライト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。

2.3 外面腐食 (Na 中)

ODS フェライト鋼の Na 腐食は 650℃ までの範囲では PNC-FMS 鋼と同様に減肉するため、PNC-FMS 鋼のナトリウム腐食式⁴⁾を流用できると考えられる。ただし、650℃を越える高温になると表面から Ni が浸入してオーステナイト化する現象により、重量増加が起こることが報告されている (図 10)⁵⁾。表面がオーステナイト化した ODS フェライト鋼被覆管の強度特性は現状では不明であるため、ここでは、オーステナイト化した領域は減肉分として扱うことにした。オーステナイト化領域は X 線回折による γ 相生成量測定結果より体積割合が 30% 程度を越える部分と仮定すると、図 11⁶⁾ から 700℃, 5000h でのオーステナイト化領域は 10 μ m となるため、PNC-FMS 鋼の Na 腐食量の予測値が 700℃, 5000h で 10 μ m になるように、PNC-FMS の外面腐食式の値を 1.5 倍することにした。その結果を図 12 に示した。

$T \leq 650^\circ\text{C}$ の時

$$C_{\text{Na}} (\mu\text{m}) = [C_{\text{R1}} + C_{\text{R2}} \times t] \times \text{Ox}$$

$T > 650^\circ\text{C}$ の時

$$C_{\text{Na}} (\mu\text{m}) = [C_{\text{R1}} + C_{\text{R2}} \times t] \times 1.5 \times \text{Ox}$$

ここで、

C_{Na} : Na による外面腐食量 (μ m)

C_{R1} : 寿命初期の被覆管外面温度における初期腐食量 (μ m/ppm)

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

C_{R2} : 定常腐食速度 (μ m/h/ppm)

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

T : 被覆管外面温度 ($^\circ\text{C}$)

Ox : Na 中の酸素濃度 (ppm)

t : 被覆管外面温度 T , Na 中の酸素濃度 Ox での使用時間 (h)

今後は表面のオーステナイト化を模擬した試験を機安 Gr において実施して、その影響について評価する予定である。

2.4 内面腐食 (MOX 燃料)

炉外でのFPを模擬した腐食試験結果から⁷⁾、ODSフェライト鋼開発途中材(1DS、1DK)とPNC-FMSの腐食量は変わらないため(図13)、PNC-FMS鋼の内面腐食式を流用することにする(図14)⁴⁾。

$$a) 0 \leq B \leq 9000$$

$$CFP = 35$$

$$b) 9000 < B \leq 57500$$

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

$$c) 57500 < B$$

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

ここで、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)

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

2.5 熱伝導度（被覆管内面/肉厚中心/外面温度評価上）（表5、図15）⁸⁾

現在目標としている成分の被覆管のデータは現状では取得されていないため、1DS相当鋼材の熱伝導率の値を流用することにする。1DS相当鋼材の熱伝導率はSUS316鋼より大きくPNC-FMSと同程度である。

$$K=22.2 + 4.74 \times 10^{-2} \cdot T - 7.06 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 3.75 \times 10^{-8} \cdot T^3$$

K：熱伝導率 (W/m・K)

T：温度 (°C)

3. まとめ

ODSフェライト鋼被覆管について、材料特性・強度関係式を限られた目標成分のデータを基に策定し、設計評価用の関係式について検討した。

- (1) 設計クリープ破断応力強さ S_R の策定には、平成元年度に試作した ODS 鋼 (1DS、1DK) の温度依存性を流用して、目標成分の ODS フェライト鋼の設計クリープ破断式を策定した。
このとき時間係数を 3 とした場合に、全てのデータは包絡できた。
- (2) クリープ強度補正係数 (環境効果) は、Na 中及び照射中において酸化物は安定であると考えて、強度低下はないものとした。
- (3) 外面腐食 (Na 中) については、高温 650℃ 以上において表面から Ni の浸入によるオーステナイト化が起こるため、その部分を減肉分とした外面腐食式を策定した。
- (4) 内面腐食は炉外での FP を模擬した腐食試験結果から判断して、PNC-FMS 鋼の内面腐食式を適用する。
- (5) 熱伝導度については、ほぼ同じ成分である平成元年度試作の 1DS 鋼について策定された式を適用する。

4. 参考文献

- 1) 田中ら；高速炉燃料被覆管のクリープ試験（第21次クリープ試験）、
PNC ZN9410 93-206、1993年3月
- 2) 田中ら；高速炉燃料被覆管のクリープ試験（第22次クリープ試験）、
PNC ZN9410 94-246、1994年7月
- 3) 上平ら；高強度フェライト/マルテンサイト鋼（PNC-FMS鋼）のクリープ強度特性の評価、
JNC TN9400 99-045、1999年4月
- 4) 野村ら；高速炉炉心構成要素用高強度フェライト/マルテンサイト鋼（PNC-FMS）材料強度
基準（暫定案）、PNC ZN 9410 92-110、1992年4月
- 5) 吉田ら；FBR炉心用酸化物分散強化型フェライト鋼の材料特性、
PNC ZN9410 90-067、1990年2月
- 6) 平川；酸化物分散強化型フェライト鋼の高温Na中における腐食特性、
日本原子力学会春の年会K15 発表資料、1996年3月
- 7) T. Yutani, et. al.; High temperature chemical reactions of Fe-Cr-Ni and Fe-Cr
cladding alloys by Te, I₂ and CsOH/CsI, Journal of Nuclear Materials 201(1993)35-45.
- 8) 岡田ら；酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼の物性評価、
PNC ZN 9410 92-255、1992年8月

表 1. ODS 鋼試作被覆管の化学成分 (w t %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	W	Y ₂ O ₃	N	Ex.O
1DS	0.09	0.05	0.03	0.003	0.002	0.15	10.98	0.40	2.67	0.40	0.014	0.07
1DK	0.05	0.02	0.01	<0.005	0.001	0.16	12.87	0.52	2.81	0.34	0.015	0.11
63DSA	0.023	0.03	0.02	0.002	0.005	0.12	12.8	0.74	2.75	0.46	0.015	0.095
7A	0.015	0.02	<0.01	0.001	0.003	<0.01	12.80	0.26	1.54	0.23	0.008	0.076
F95	0.056	0.03	0.048	0.003	0.004	0.025	11.72	0.31	1.92	0.24	0.010	0.04
M93	0.12	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	8.99	0.20	1.94	0.35	0.010	0.06

表2. 平成9年度試作ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果
(平成11年8月18日時点)

鋼種	試験片No.	試験温度 (°C)	応力 (MPa)	破断時間 (h)	破断伸び (%)	備考
F91ST	F91ST-1	700	110	25.1	-	F
	F91ST-2	700	80	178.8	-	F
F92ST	F92ST-1	700	130	23.6	-	V
	F92ST-2	700	90	100.5	-	F
F93ST	F931	650	170	586.1	1.5	
	F933	700	170	9.2	2.6	
	F934	700	120	59.2	1.7	
F94ST	F94ST-1	650	280	2.5	-	V
	F94ST-2	650	200	100.2	-	F
	F94ST-3	650				試験中止
	F94ST-4	700	180	22.0	-	V
	F94ST-5	700	150	70.1	-	F
	F94ST-6	700	130	136.7	-	F
	F94ST-7	700	100	2119.8	-	F
F95ST	F952	700	190	80.6	1.4	
	F951	700	170	370.3	1.5	
	F954	700	150	628.1	1.5	
	F953	700	130	1883.3	0.5	
M91	M91-1	700	160	22.5	-	F
	M91-2	700	100	1521.3	-	破断位置不明
	M91-3	700	80	(2460)		試験中(7329.9h破断)
	M91-4	700	135	260.9	-	F
M92	M92-1	700	160	213.2	-	F
	M92-2	700	120	1628.2	-	F
	M92-3	700	100	(2471)		試験中(8240.0h破断)
	M92-4	700	140	460.7	-	F
M93	M937	650	250	1084.9	-	
	M934	700	170	214.0	1.8	
	M933	700	150	382.8	1.8	
	M935	700	130	(2688)		試験中(2933.5h破断)
	M936	700	120	(4152)		試験中(4828.2h破断)
7A(2CR) (1100°C→ 1150°C)	41	700	200	16.0	1.9	
	—	700	170	89.1	-	
	42	700	150	2162.0	0.9	
	51	700	140	2243.1	0.9	
	43	700	130	1206.4	0.7	

表3. ODS鋼 (1DS) の内圧クリープ破断試験結果

試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (h)	備考
600	366	367.9	
	339	521.5	
	313	1312.0	
650	304	28.1	
	261	69.5	
	243	225.6	
	218	554.4	
	174	2494.7	
675	203	161.7	追加データ*
	143	1695.0	追加データ*
	123	2249.5	追加データ*
700	147	37.3	
	108	2577.7	
	88	12505.9	追加データ*
750	120	24.8	
	100	598.7	
	90	880.0	
	70	7191.2	

*: 報告書作成後に取得されたデータ

表4. ODS鋼 (1DK) の内圧クリープ破断試験結果

試験温度 (°C)	周応力 (MPa)	破断時間 (h)	備考
600	418	969.5	
	393	847.5	
	337	2007.5	
650	260.7	372.4	
	260.7	130.8	
	260.7	313.1	
	243	163.1	
	243	654.6	
	226.4	1796.4	
	208.7	1169.7	
	208.7	834.0	
700	147.1	23.7	
	107.9	3852.9	
	88.3	17167.1	追加データ*
750	110	229.0	
	90	1149.2	
	75	5446.0	

*: 報告書作成後に取得されたデータ

表5 熱伝導率測定データ

温度 (°C)	熱伝導率 (W/m · K)			
	1	2	3	平均
20	24.875	21.678	21.539	22.697
50	27.255	23.672	23.528	24.818
100	28.141	25.419	25.265	26.275
150	29.416	26.895	26.747	27.686
200	31.266	28.171	28.019	29.152
250	32.039	29.783	29.644	30.489
300	32.492	30.479	30.324	31.098
350	33.286	30.817	30.426	31.510
400	33.510	31.576	31.100	32.062
450	34.558	31.181	31.075	32.271
500	34.991	32.033	31.744	32.923
550	35.562	32.448	32.304	33.438
600	35.530	32.758	32.637	33.642
650	34.555	33.001	32.716	33.424
700	34.151	32.913	33.231	33.432
750	37.725	35.615	35.876	36.405
800	40.987	39.902	39.255	40.048

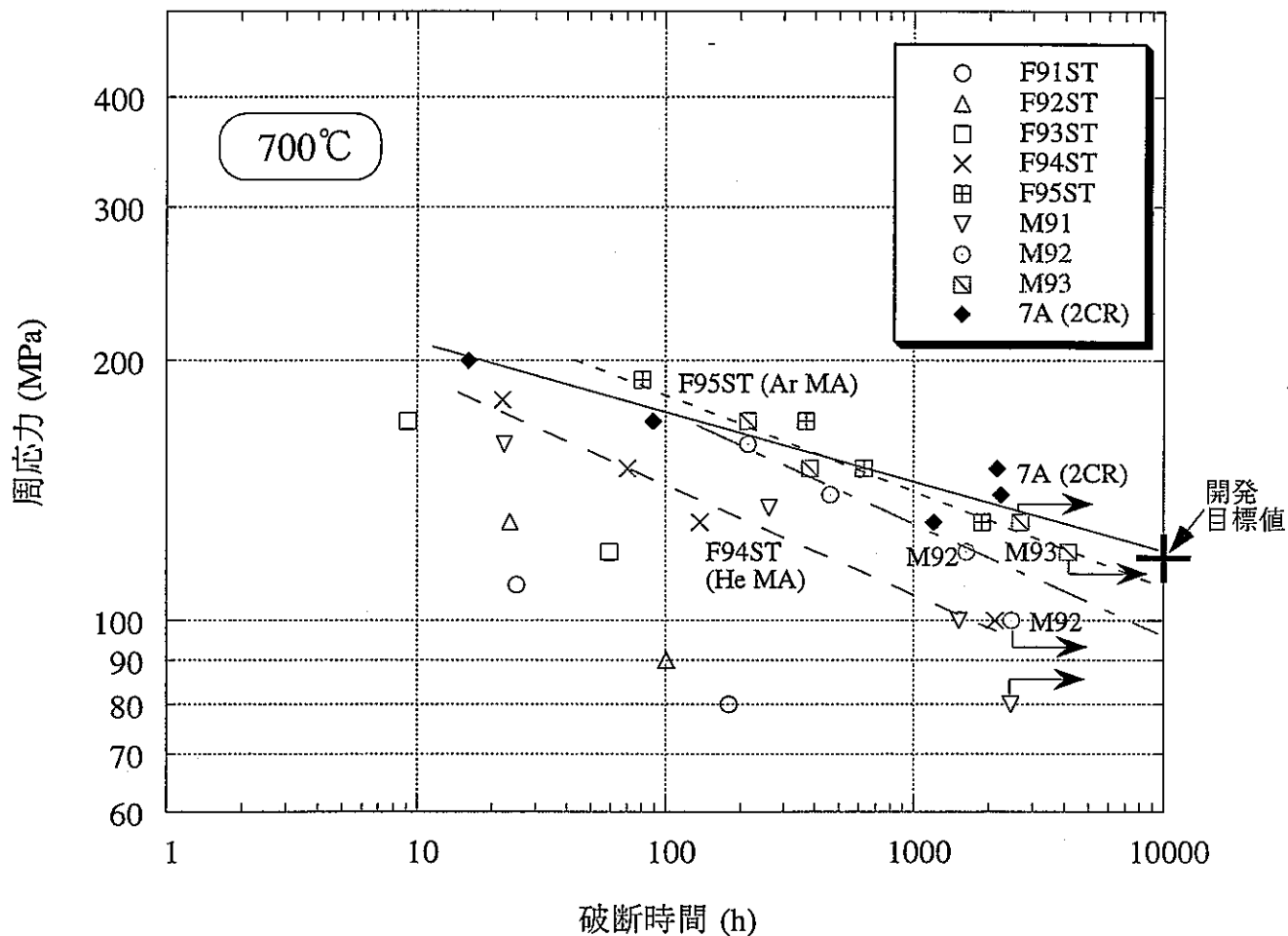


図1. 平成9年度試作管の内圧クリープ試験結果 (8/18/99時点)

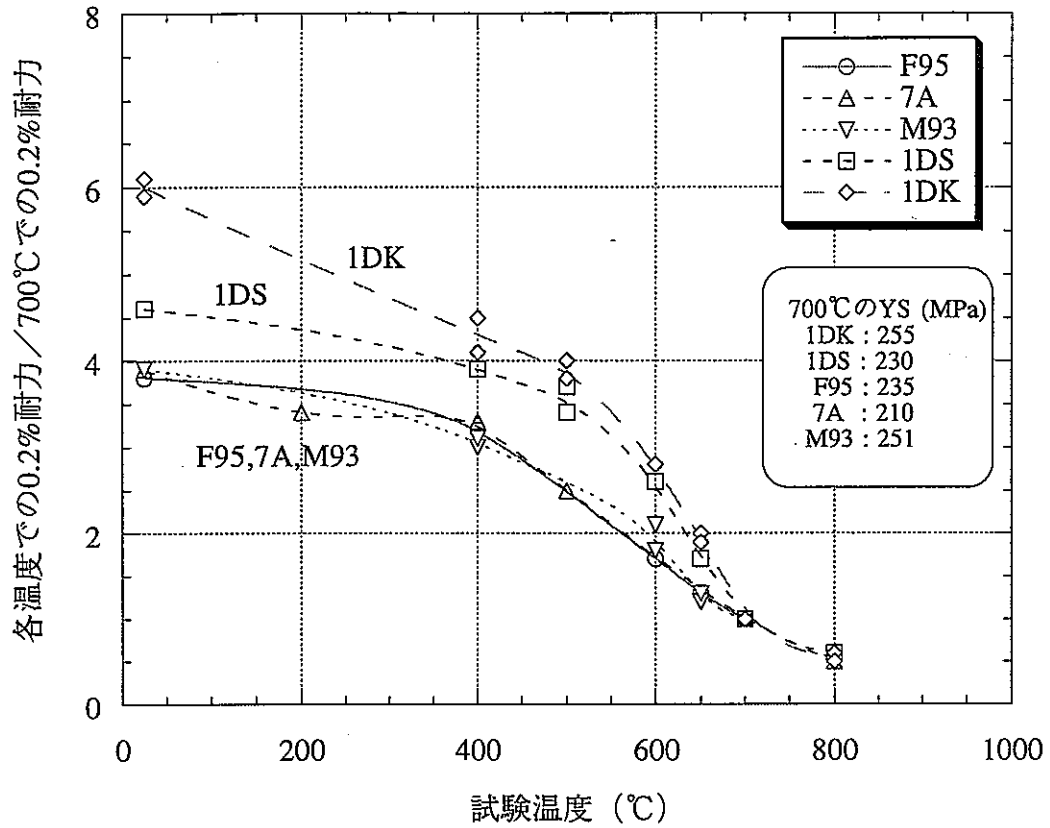


図 2. 700°Cでの0.2%耐力で規格化した値の温度依存性

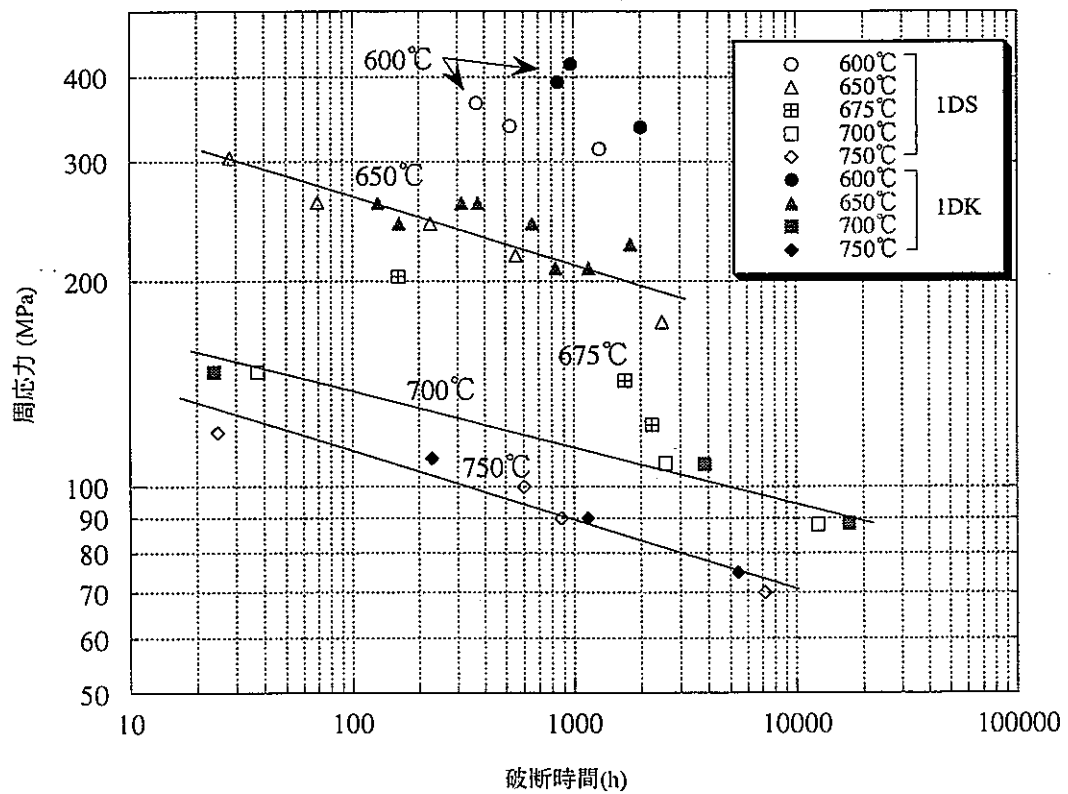


図 3. 1DSと1DKのクリープ破断強度の比較

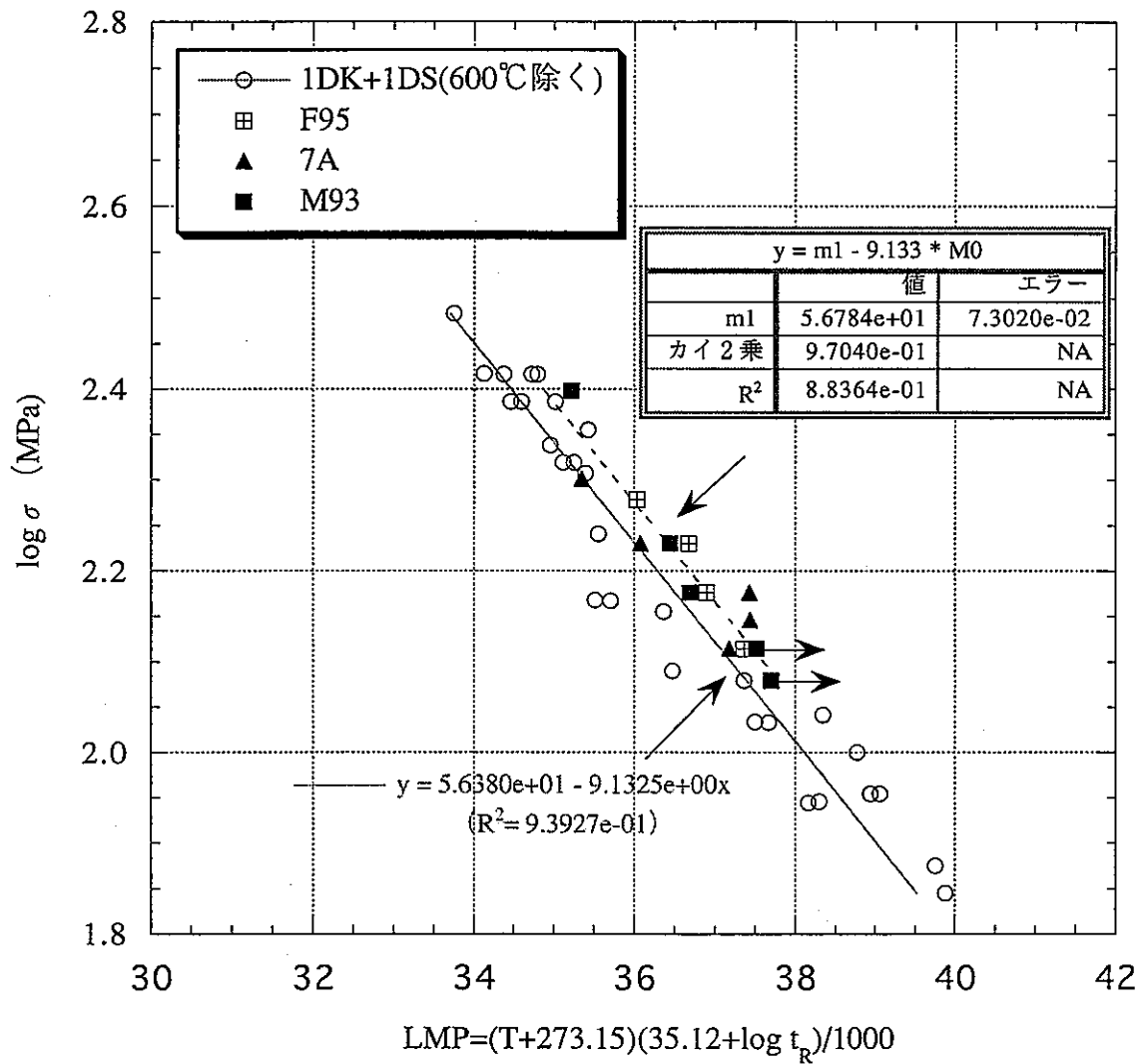


図 4. 1DS及び1DKデータによるフィッティング
(600°Cデータ除く)

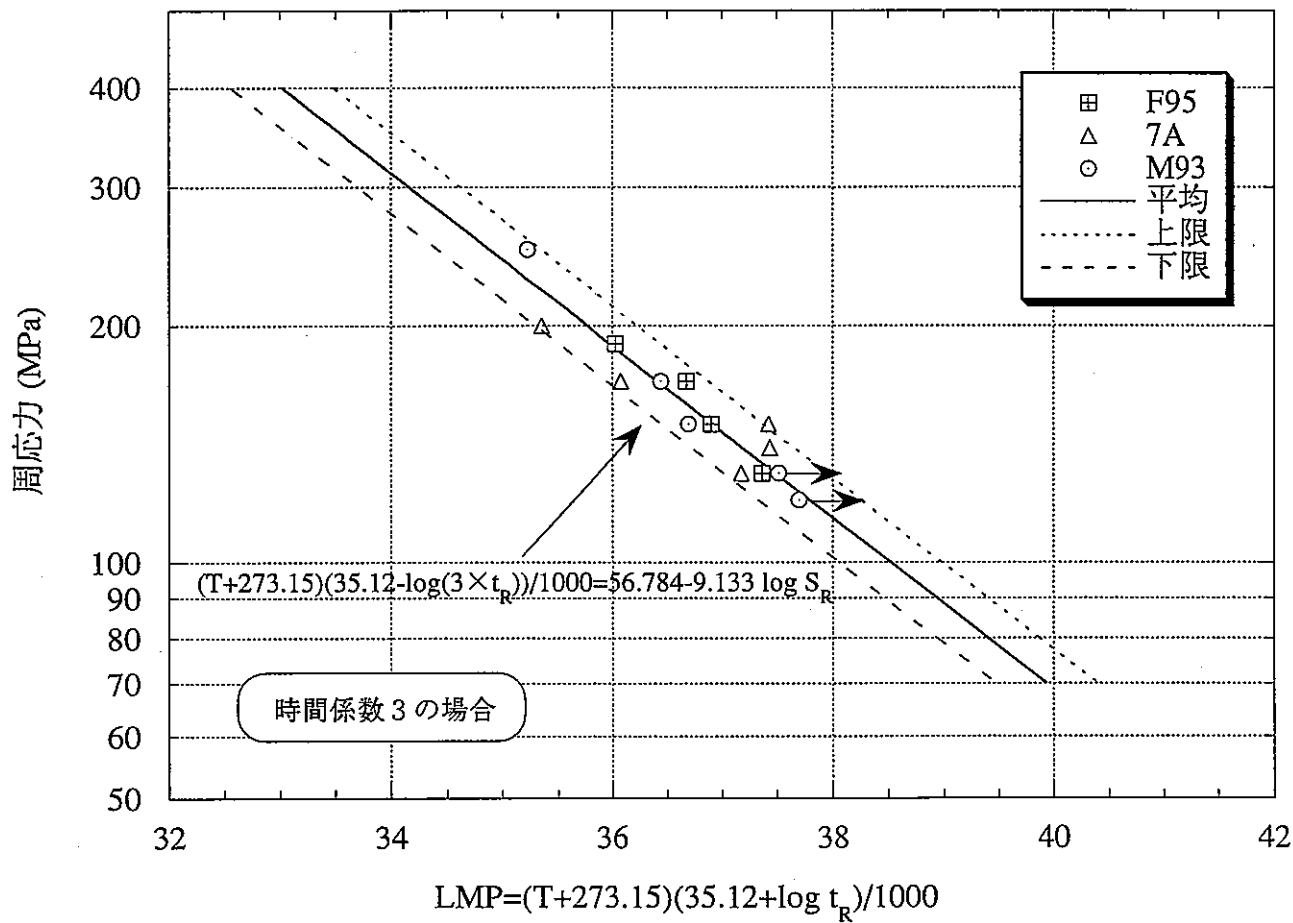


図 5. 上下限式の設定 (時間係数 3 の場合)

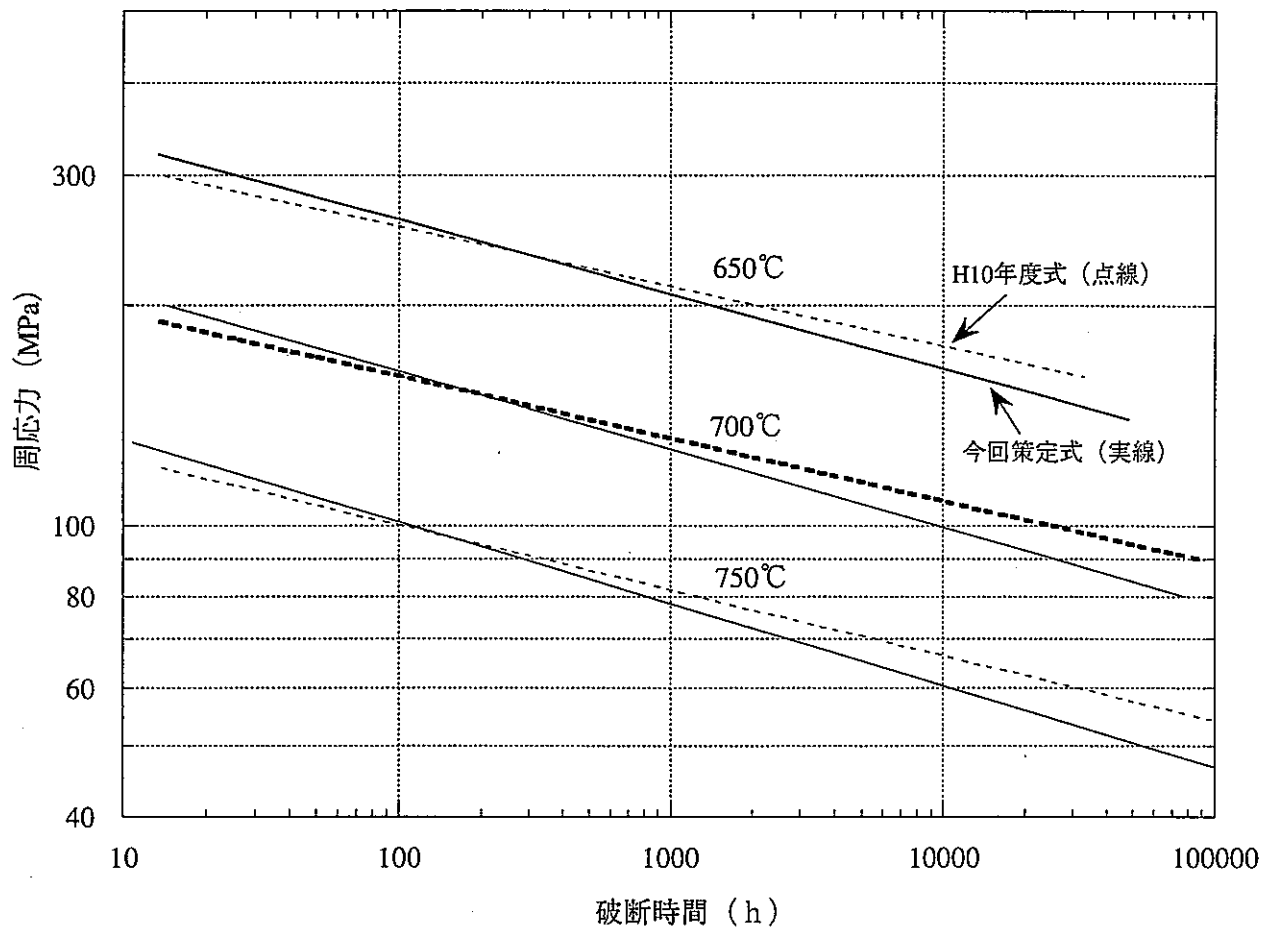


図6. 平成10年度試評価式と今回策定式の比較

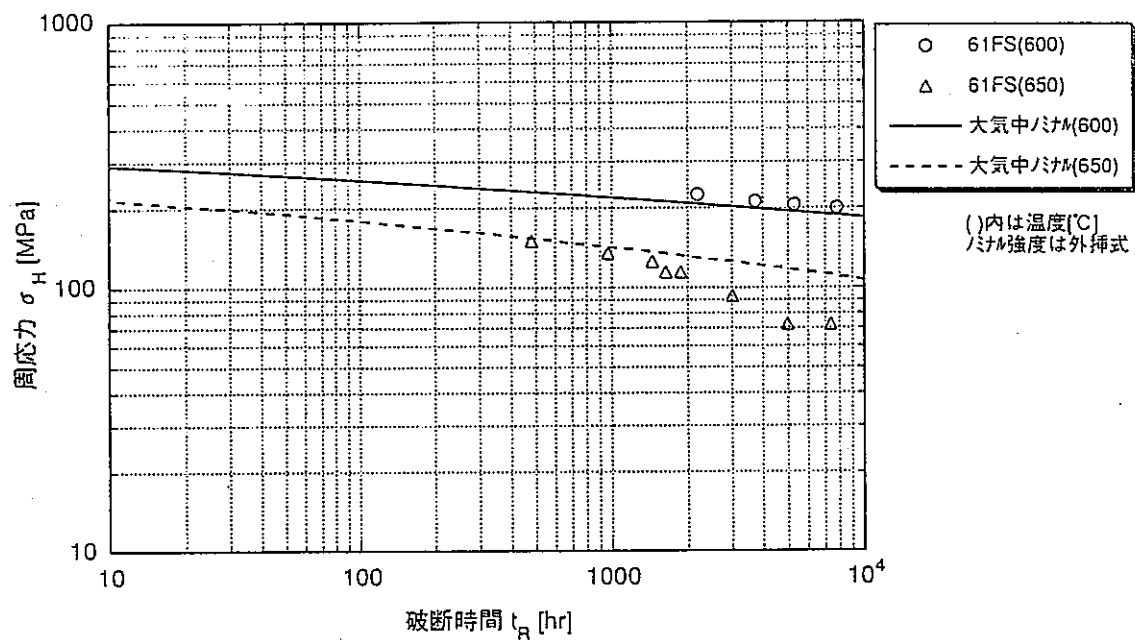


図7 炉外Na中データと大気中ノミナル強度

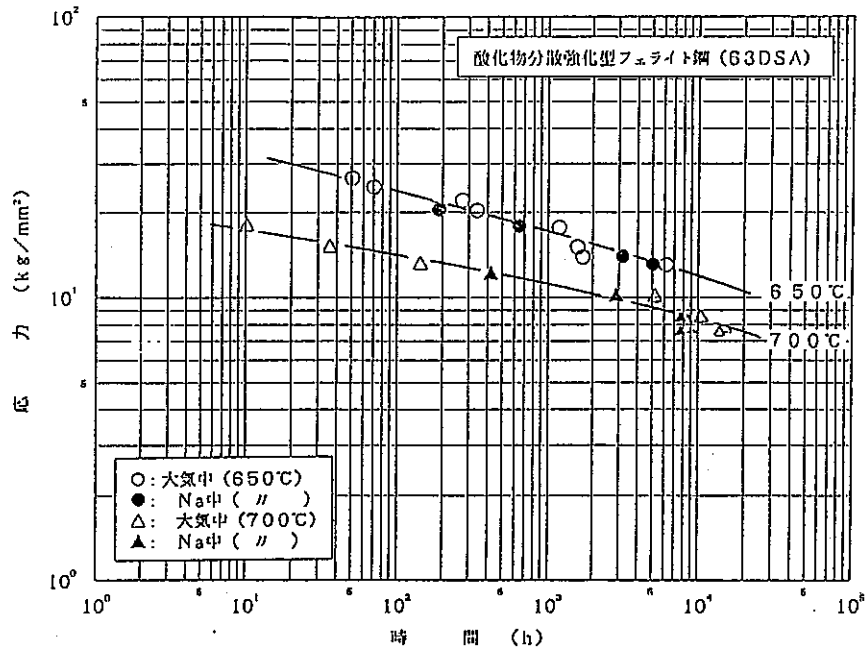


図 8.1 ODSフェライト鋼 (63DSA) の内圧クリープ破断強度

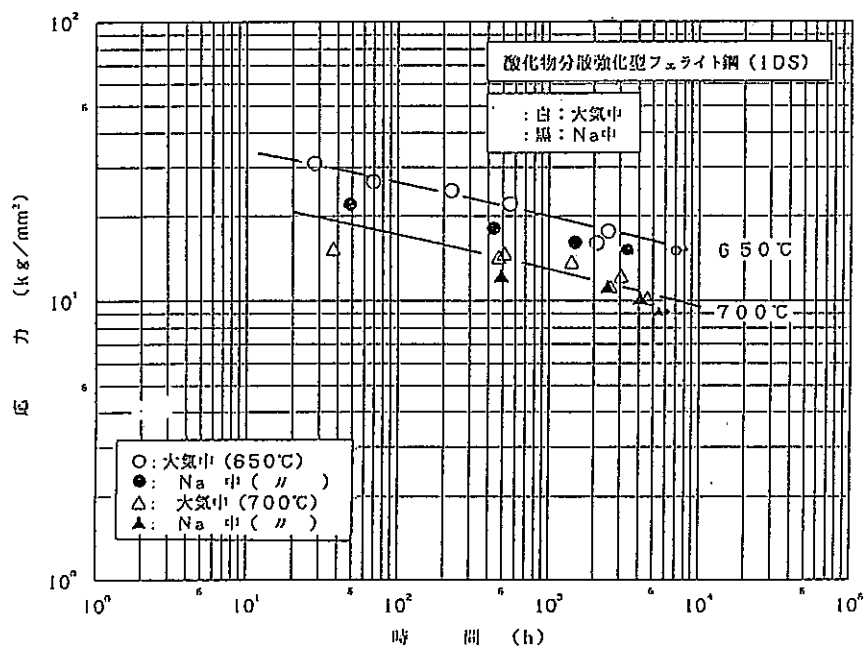


図 8.2 ODSフェライト鋼 (1DS) の内圧クリープ破断強度

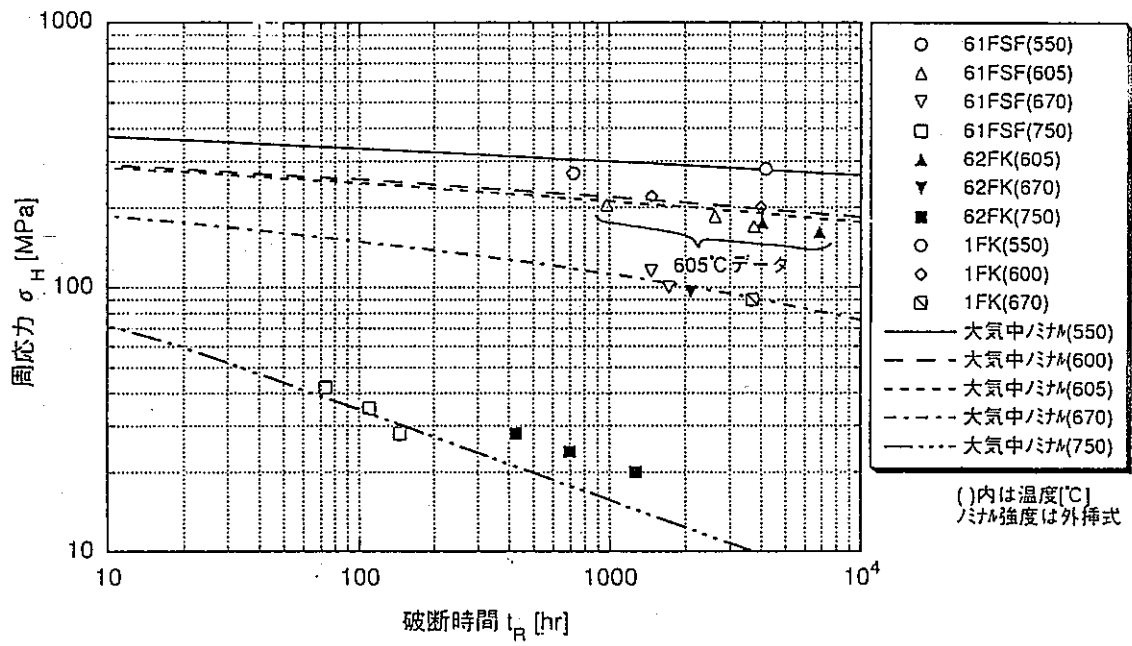


図9 炉内クリープデータと大気中ノミナル強度の比較

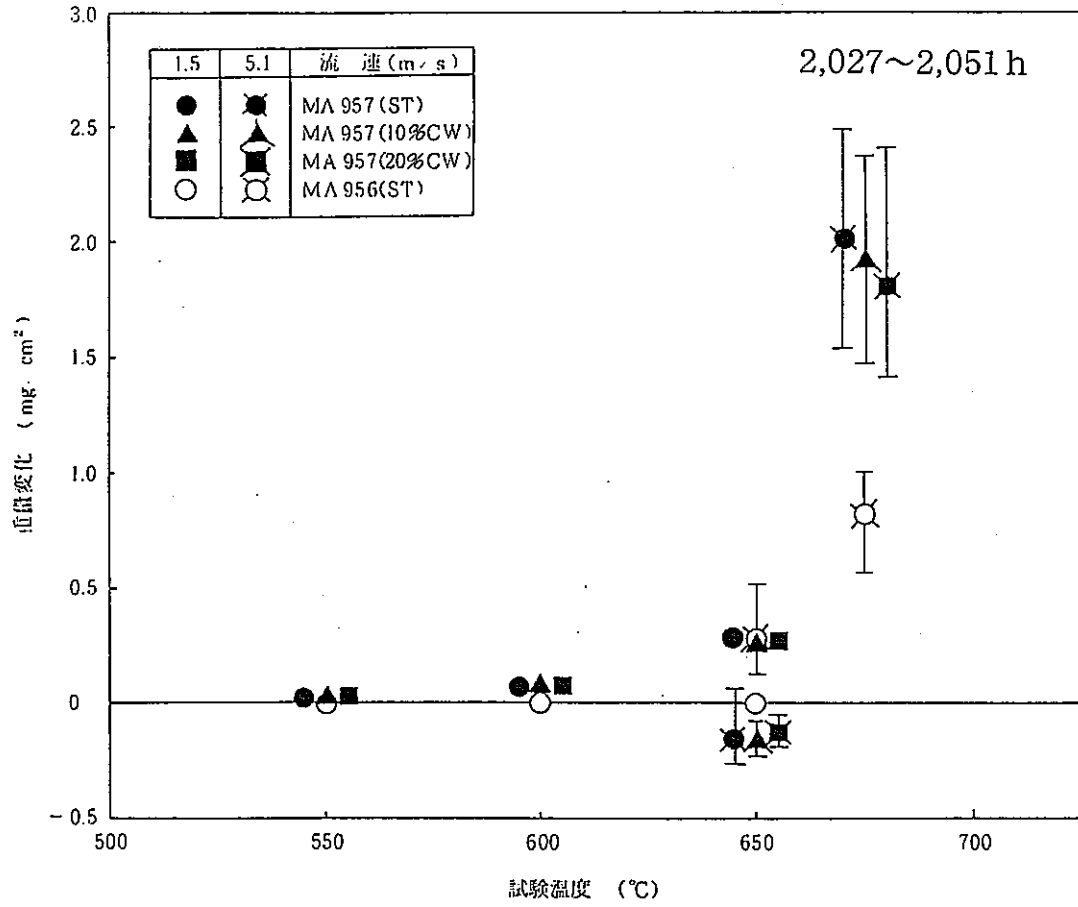


図10 MA957およびMA956の重量変化とナトリウム温度との関係

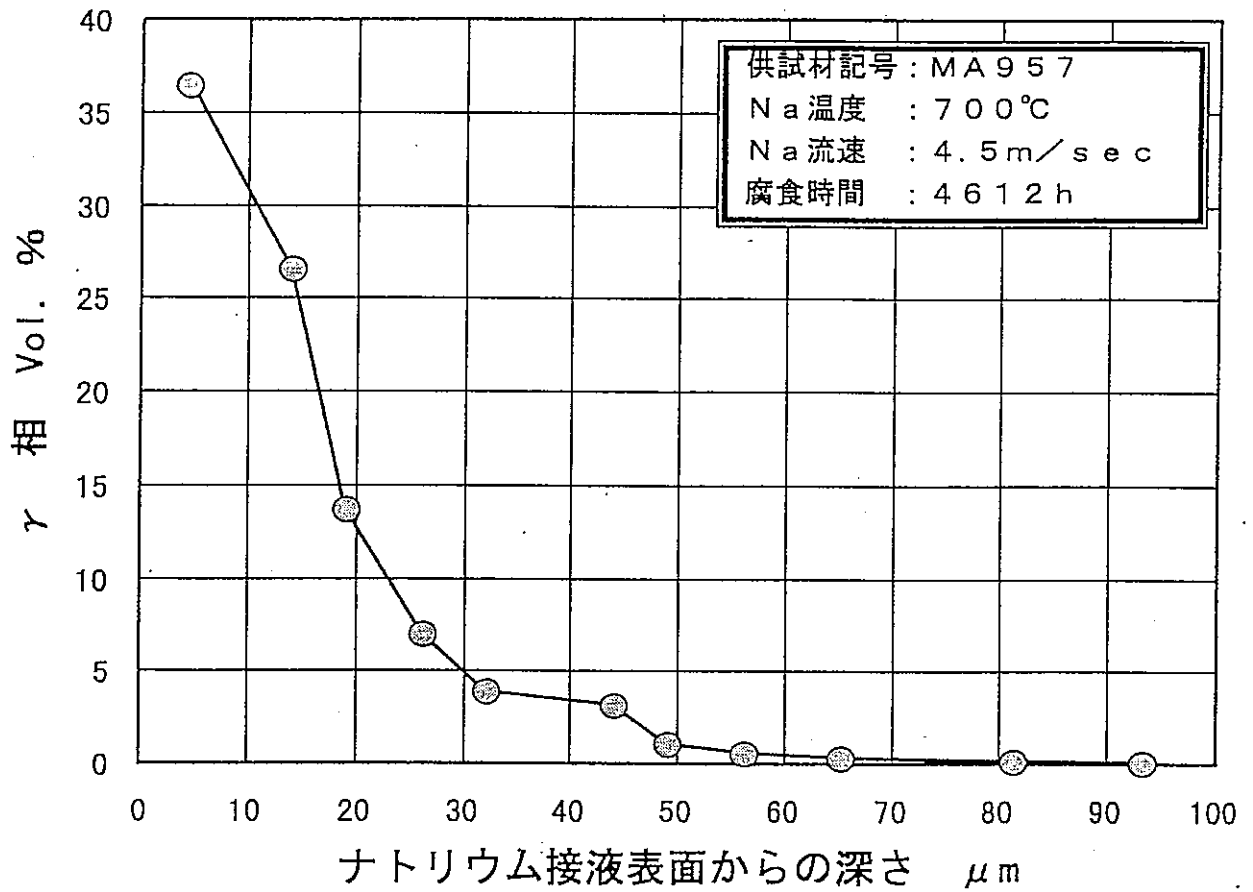


図11 X線回折による γ 相生成量測定結果

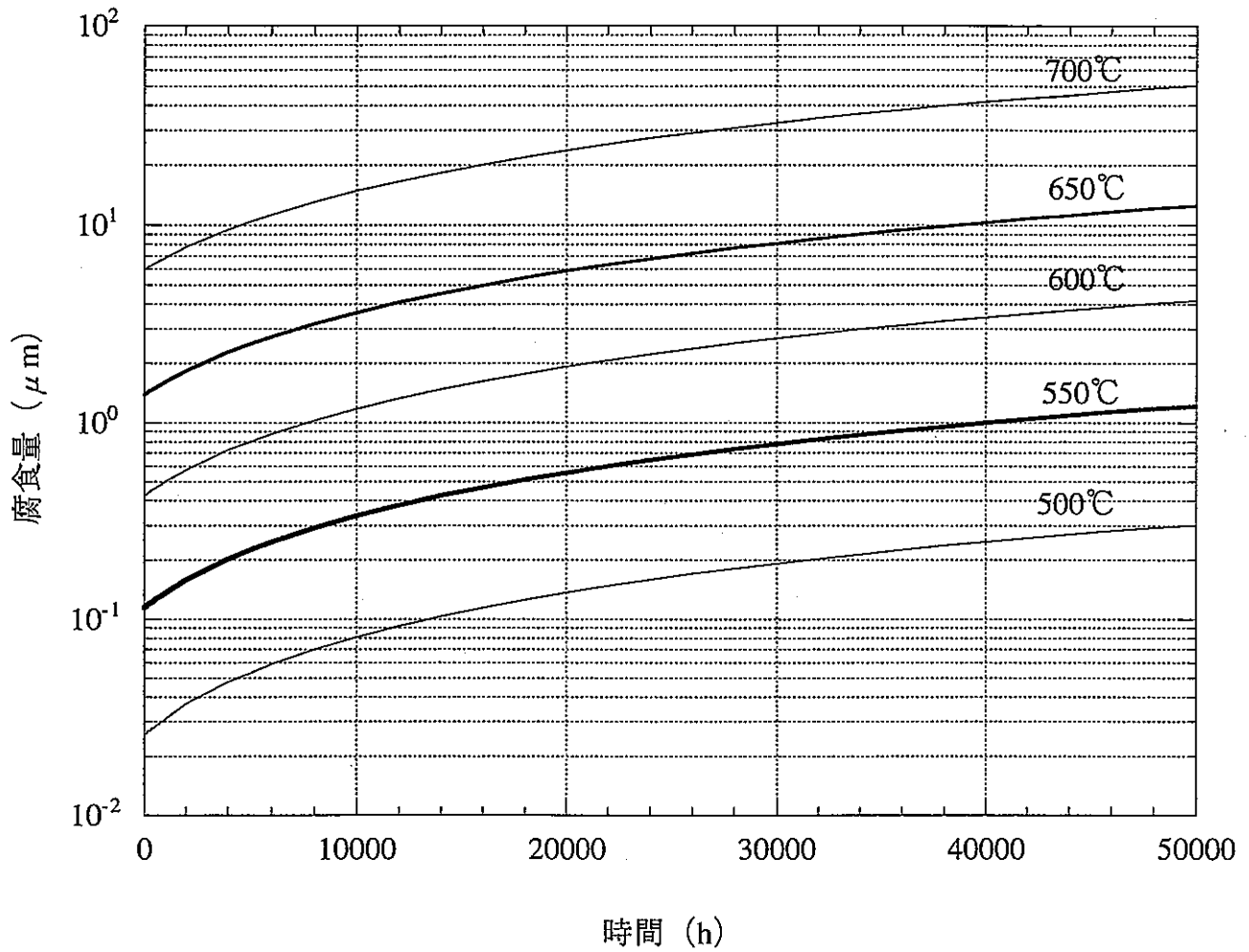


図12. PNC-FMS鋼のナトリウム腐食量

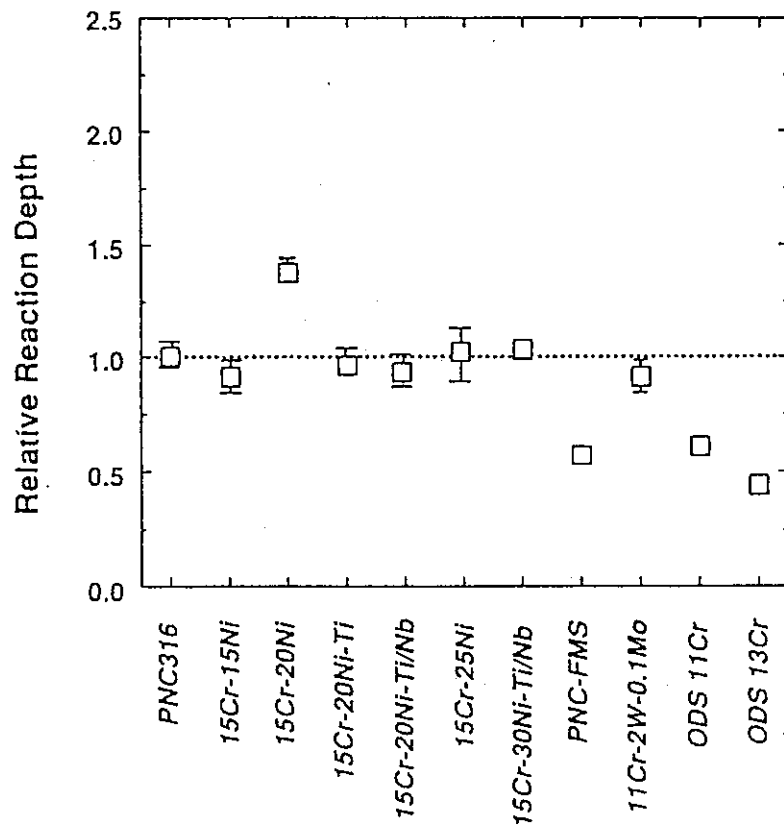


図13 CsOH/CsI中での腐食試験結果の比較 (700°C,100 h)

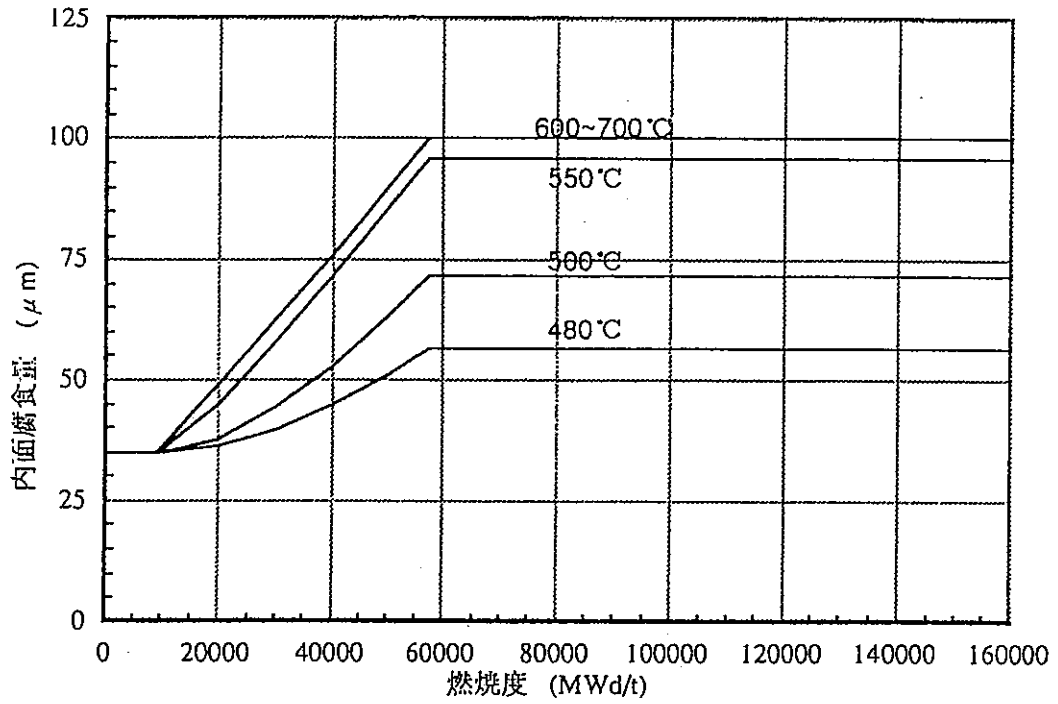


図14 内面腐食量と燃焼度の関係

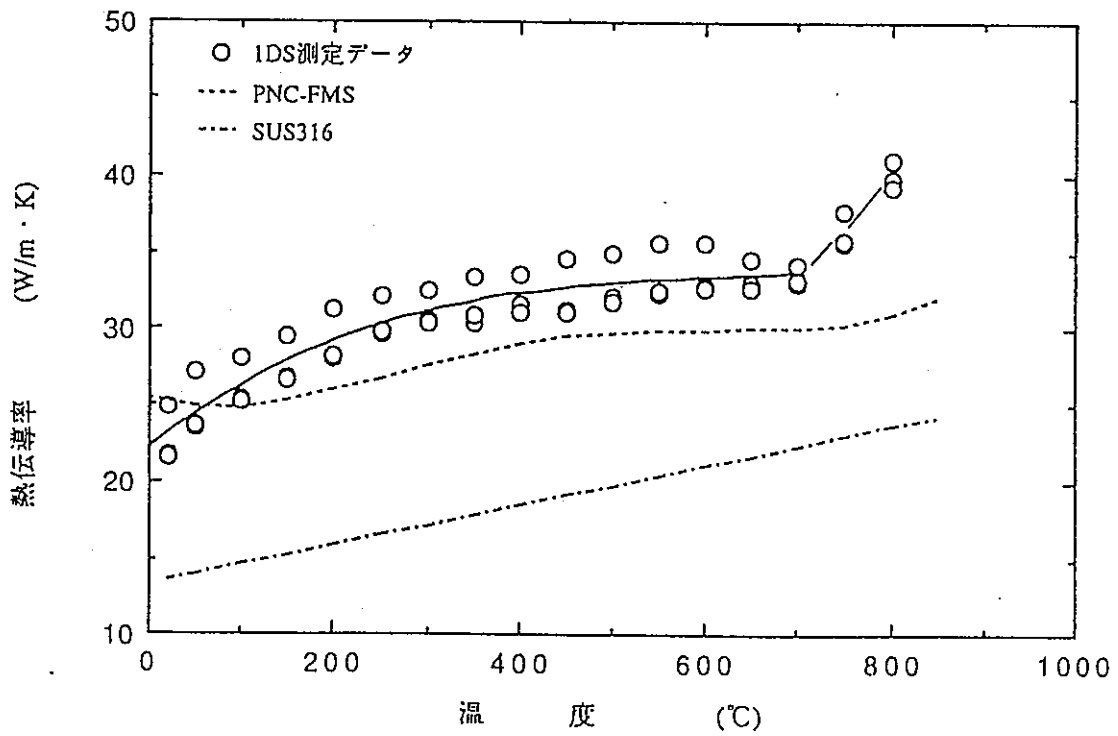


図15 ODSフェライト鋼の熱伝導率