

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
(研究報告)

2002年12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

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)
2002

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
(研究報告)

吉武庸光¹、赤坂尚昭¹、阿部康弘¹

要旨

再結晶及び α - γ 相変態により結晶組織を改善して高温内圧クリープ強度等の機械的性質の向上を図った酸化物分散強化型 (Oxide Dispersion Strengthened; ODS) フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の基本的な照射後強度・延性特性を評価することを目的として、「常陽」SVIR-1 で照射試験を実施した。照射した被覆管試料は 12Cr-フェライト系再結晶 ODS 鋼被覆管 (F94、F95) 及び 9Cr-マルテンサイト系 ODS 鋼被覆管 (M93) である。これらについては照射後、リング引張試験を行い、本鋼被覆管のリング引張特性に及ぼす中性子照射効果を評価した。

本試験・評価で得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) F94、F95 及び M93 被覆管未照射材のリング引張強度は、ODS 鋼開発当初に温間加工で試作した ODS フェライト鋼被覆管 (1DS) と PNC-FMS 鋼被覆管の中間の強度レベルにあった。また、再結晶及び α - γ 相変態による結晶組織改善の結果、一様伸び及び全伸びは 1DS に比較して大幅に増加し、本鋼被覆管は良好な周方向延性を有することが分かった。
- 2) 高速中性子照射量 $0.5\sim 3.0\times 10^{26}\text{n/m}^2$ ($E>0.1\text{MeV}$)、照射温度 $397\sim 534^\circ\text{C}$ の照射条件範囲においては、本鋼のリング引張強度は降伏応力、引張強さともに照射に伴い約 10% 程度の増加を示したが、強度特性の照射量依存性は見られなかった。また伸びについては、一様伸び及び全伸びはともに高温側でやや低下する傾向が見られたものの、照射に伴う伸び特性の著しい劣化は確認できなかった。
- 3) 以上の結果から本照射条件範囲においては、本鋼被覆管は照射に伴う著しい強度変化や伸びの低下は見られず、照射後の周方向引張強度・延性特性が良好であることが判明した。しかし、現状の中性子照射データは非常に限られていることから、今後計画的に目標とする高照射量域までの照射試験を実施し、照射特性を把握することが重要である。

¹ 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室

Ring-tensile properties of oxide dispersion strengthened
ferritic/martensitic steel claddings irradiated in JOYO/SVIR-1

Tsunemitsu Yoshitake¹, Naoaki Akasaka¹, and Yasuhiro Abe¹

Abstract

The cladding samples of the 12Cr-ferritic Oxide Dispersion Strengthened (ODS) steel claddings with recrystallized microstructure (F94 and F95) and the 9Cr-martensitic ODS steel cladding (M93), in which their high temperature strengths were improved by the recrystallization and the α - γ phase transformation, respectively, were irradiated in the JOYO/SVIR-1. Post-irradiation ring-tensile tests and microstructural examination were carried out on these cladding samples in order to understand the effects of fast neutron irradiation on their ring-tensile properties.

The results obtained in this study are as follows;

- 1) The strength of F94, F95 and M93 claddings was higher than that of 11Cr-ferritic/martensitic steel without oxide dispersion, and lower than that of the first trial ODS ferritic steel cladding manufactured by warm working that had the strong strength anisotropy (1DS). The uniform and total elongations of these claddings were considerably increased by the improvement of their microstructures using recrystallization and α - γ phase transformation, compared with 1DS.
- 2) The strength of these claddings was increased about 10% by the irradiation hardening under the irradiation conditions examined where the fast neutron fluence was between 0.5×10^{26} and 3.0×10^{26} n/m² ($E > 0.1$ MeV) and the irradiation temperature ranged from 397 to 534 °C. No significant dependence of fast neutron fluence on the ring-tensile properties was observed and these claddings retained respectable elongation after the irradiation.
- 3) From these results and consideration, it is suggested that the ring-tensile properties of these ODS steel claddings (F94, F95 and M93) after irradiation would be excellent within the fluence level achieved in this irradiation test. However, it is necessary to conduct the irradiation tests on them because the irradiation data are still insufficient to evaluate their irradiation behavior in higher fluence conditions.

¹ Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

目次

1. 緒言	1
2. 供試材	1
2.1 フェライト系再結晶 ODS 鋼 (F94、F95)	1
2.2 マルテンサイト系 ODS 鋼 (M93)	2
2.3 素管及び被覆管の製造方法	2
3. 照射試験	3
4. リング引張試験	3
4.1 リング引張試験片	3
4.2 リング引張試験方法	3
5. 試験結果	3
5.1 未照射材 (受け入れ材) のリング引張試験結果	3
5.2 SVIR-1 照射材のリング引張試験結果	4
6. 考察	6
6.1 ODS 鋼被覆管のリング引張特性と組織改善の効果	6
6.2 ODS 鋼被覆管のリング引張特性に及ぼす中性子照射の影響	8
6.3 照射組織発達とリング引張特性	10
7. 結言	11
謝辞	11
参考文献	12

図表目次

表目次

表 2.1	ODS 鋼被覆管の化学成分（素管分析値）	14
表 4.1	SVIR-1 照射 ODS 鋼被覆管リング引張試験片の照射条件	15
表 5.1	ODS 鋼被覆管のリング引張試験結果（未照射材）	16
表 5.2	SVIR-1 照射 ODS 鋼被覆管のリング引張試験結果	17

図目次

図 4.1	リング引張試験片	18
図 5.1-1	F94 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	18
図 5.1-2	F94 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	19
図 5.1-3	F95 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	19
図 5.1-4	F95 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	20
図 5.1-5	M93 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	20
図 5.1-6	M93 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	21
図 5.2-1	SVIR-1 照射 F94 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	21
図 5.2-2	SVIR-1 照射 F94 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	22
図 5.2-3	SVIR-1 照射 F95 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	22
図 5.2-4	SVIR-1 照射 F95 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	23
図 5.2-5	SVIR-1 照射 M93 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係	23
図 5.2-6	SVIR-1 照射 M93 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係	24
図 5.2-7	F94 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係	25
図 5.2-8	F95 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係	26
図 5.2-9	M93 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係	27
図 6.1-1	ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の降伏応力と試験温度の関係	28
図 6.1-2	ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の引張強さと試験温度の関係	28
図 6.1-3	ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の一様伸びと試験温度の関係	29
図 6.1-4	ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の全伸びと試験温度の関係	29
図 6.2-1	照射前後での降伏応力の比と試験温度の関係	30
図 6.2-2	照射前後での引張強さの比と試験温度の関係	30
図 6.2-3	照射前後での一様伸びの比と試験温度の関係	31
図 6.2-4	照射前後での全伸びの比と試験温度の関係	31
図 6.2-5	降伏応力と引張強さの比と試験温度の関係	32

図 6.2-6	一様伸びと全伸びの比と試験温度の関係	32
図 6.3-1	F94 の TEM 組織	33
図 6.3-2	M93 の TEM 組織	34
図 6.3-3	M93 で見られた分散粒子周囲のアメーバ状組織	35

1. 緒言

酸化物分散強化型 (Oxide Dispersion Strengthened; ODS) フェライト/マルテンサイト鋼は、優れた耐スエリング性能と高温強度を有することから、FBR サイクル実用化戦略調査研究において高燃焼度用実用化被覆管材料の最重要候補材料のひとつとして位置付けられている。サイクル機構では、高速炉燃料被覆管としての ODS フェライト鋼の開発を 1987 年度から本格的に開始し、1989 年度に初めて国産 ODS フェライト鋼被覆管の試作に成功した (鋼種; 1DK、1DS) ¹⁾。

本試作材の評価試験の結果、ODS フェライト鋼被覆管に特有の材料の難加工性 (冷間加工できない)、管軸方向に比べ周方向 (内圧方向) の強度が著しく低いという強度の異方性等の課題が明らかとなり、その後の開発では、冷間加工の実現及び組織制御による機械的性質の改善を目標として、再結晶技術、相変態技術を取り入れた材料開発、製管技術開発を行ってきた ^{2~8)}。

これらの研究開発により、再結晶組織を有するフェライト系 ODS 鋼被覆管及び α - γ 変態を利用したマルテンサイト系 ODS 鋼被覆管について試作することができた。このたび、組織を改良した ODS 鋼被覆管としては初めて、「常陽」炉心材料照射用反射体 (SVIR-1) を用いて材料照射試験を行った。

本報では、同照射試験に供された ODS 鋼被覆管について行ったリング引張試験結果に基づき、その強度延性特性に及ぼす組織改善の効果及び強度・延性特性に及ぼす中性子照射の影響について微細組織との関連を含めて評価した。

2. 供試材

供試材は平成 9 年度に試作した ODS 鋼被覆管であり、組織制御方法として再結晶組織を導入したフェライト系再結晶材 (F94、F95) と相変態を利用したマルテンサイト系材 (M93) である。本試作において、粉末のメカニカルアロイング (以下、MA) から素管製造までは株式会社神戸製鋼所 (神鋼特殊鋼管株式会社) で、その後の素管から被覆管までの製管は住友金属工業株式会社にて行った。

2.1 フェライト系再結晶 ODS 鋼 (F94、F95)

F94 及び F95 の基本化学成分はともに $\text{Fe-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y}_2\text{O}_3$ である。これまでの研究成果から、強度の向上には W、Ti 及び Y_2O_3 量を高めるほうが良いが、再結晶性や加工性の観点からはこれらは低いほうが有利である。F94 及び F95 については、強度を重視した場合と、再結晶性・加工性を優先した場合の中間の成分量を狙った化学組成になっている。

合金粉末の MA 処理は、従来は不活性の Ar ガス雰囲気で行っている。製管した ODS 鋼被覆管の TEM 微細組織観察を行った結果、材料内に主として MA 残留 Ar と思われる微細なバブルが観察された。このように MA 雰囲気ガスが材料中に残留すると、中性子照射下にお

いて、耐スエリング特性に不利に働くと考えられる。そこで、可能な限り材料中の MA 残留ガスを低減するために、従来の Ar よりも、より脱気しやすい He を MA 雰囲気ガスに使用することにした。

よって本研究では、MA 時の雰囲気がスエリングや強度・延性等の照射特性に及ぼす影響を調べるために、Ar と He の 2 種類の雰囲気で試作した被覆管を試験に供した (Ar ガス雰囲気 ; F95、He ガス雰囲気 ; F94)。

F94 及び F95 の素管における化学成分分析値を表 2.1 に示す。主要な化学成分は概ね目標どおりとなった。また、He ガス MA 材である F94 では Ar ガス量は 0.0003wt% であり、Ar ガス MA 材の F95 よりも一桁小さい⁹⁾。

2.2 マルテンサイト系 ODS 鋼 (M93)

M93 の基本化学成分は、Fe-0.1C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y₂O₃ である。M93 では α - γ 変態を利用して組織の等軸化を図ることから、母相を 0.1C-9Cr 系とするマルテンサイト組織にしている。マルテンサイト系材では、これまでの試作試験において加工性の問題から Ti、Y₂O₃ 量を低くせざるを得ず、結果的に内圧クリープ強度はフェライト系材に比較して劣っていた。しかし、製管方法の改善に伴い、これら成分を増やすことが可能となった。したがって、M93 では加工性を考慮したうえで、可能な範囲で強度の上昇を狙っており、Y₂O₃ 量が F94、F95 に比較して多くなっている。

M93 の素管における化学成分分析値を表 2.1 に示す。主要化学成分は概ね目標に一致している。なお、M93 は F95 と同様に Ar ガス中で MA を行った⁹⁾。

2.3 素管及び被覆管の製造方法

F94、F95 及び M93 とともに、粒径 150nm 以下の合金粉末と平均粒径 20nm の Y₂O₃ 粉末を所定量混合し、アトライターを用いて MA 処理を施して原料粉末を作製した。その後粉末を軟鋼製の капсуルに脱気・密封した後、1150°C にて熱間押出を行って固形化し、機械加工により素管 (外径 16mm、肉厚 2mm、長さ 300mm) を製作した。なお、M93 については熱間押出の後、軟化を目的とした完全焼鈍 (1050°C × 1h ・ 炉冷) を行ってから、機械加工により素管を製作した⁹⁾。

素管から被覆管製品までの製管は、ピルガー圧延機を用いて 2 回の冷間圧延と 2 回の熱処理 (途中軟化熱処理 (1 回目圧延後) 及び最終熱処理 (2 回目圧延後)) を組み合わせて実施した。F94、F95 では、途中熱処理は 1100°C として加工転位の回復にとどめ、最終熱処理を 1150°C で行い再結晶組織を得た。一方 M93 では、途中熱処理は焼きならしとして加工性を維持し、最終熱処理は焼きならし・焼き戻し (1050°C × 60min ・ AC → 750°C ・ AC) としてマルテンサイト組織を得た。本供試材は全て熱処理仕上げ材であり、被覆管製品の設計寸法は外径 9.3mm、肉厚 0.6mm である¹⁰⁾。

3. 照射試験

材料照射試験は、「常陽」MK-II 炉心材料照射用反射体 SVIR-1 にて行った。SVIR-1 は「常陽」MK-II 炉心第 34、35 サイクルで照射され、装荷位置は全て炉心中心位置「000」であった。SVIR-1 の最大中性子照射量は $2.7 \times 10^{26} \text{n/m}^2 (E > 0.1 \text{MeV})$ 、100MW 相当日数 (Effective Full Power Days; EFPD) は 117.127 であった¹¹⁾。

4. リング引張試験

4.1 リング引張試験片

リング引張試験片は、被覆管を 5mm 長さに切断した後、放電加工によりゲージ部を加工して作製した。図 4.1 にリング引張試験片形状を示す。F94、F95 及び M93 被覆管のリング引張試験片は、SVIR-1 の照射条件の異なる 5 つのキャプセルにそれぞれ 2 試料ずつ装荷して照射した。表 4.1 に各リング引張試験片の照射条件を示す。

4.2 リング引張試験方法

リング引張試験は、MMF 試験セル内のインストロン 1185 型引張試験機 (ロードセル容量 100kN) を用いて行った。変位はクロスヘッドの移動量から測定した。試験温度は原則として照射温度に合わせて設定し、400、450、500 及び 525°C とした。また、引張速度はクロスヘッドスピード 0.1mm/min 一定 (初期ひずみ速度は $8.3 \times 10^{-4} \text{/s}$) とした。

本試験では、0.2% オフセット耐力を降伏応力とした。応力評価には、試験片製造時の検査記録に記載された寸法測定結果から求めた断面積 (両側断面の和) を用いた。また、一様伸び及び全伸び (破断伸び) は荷重-変位チャートから求めた。

5. 試験結果

5.1 未照射材 (受け入れ材) のリング引張試験結果

F94、F95 及び M93 被覆管未照射材のリング引張試験結果を表 5.1 に示す。また、降伏応力、引張強さ、一様伸び及び全伸びと試験温度の関係を鋼種ごとに図 5.1-1~図 5.1-6 に示す。それぞれの図中には、被覆管製造時に実施したリング引張試験結果¹²⁾¹³⁾を併せて載せている。

はじめに今回取得データと製造時の試験結果を比較する。両者を同一の試験温度で直接比較できるのは 400°C のみであるものの、F95 及び M93 においては、今回取得データと製造時取得データの強度、伸びの値及びその温度依存性はともに概ね同様であり、本試験結果は妥当であると判断される。一方 F94 では、他の 2 鋼種と比較して降伏応力、引張強さともに本

試験結果が製造時取得データに比べて高い傾向を示した（図 5.1-1）。F94 の一様伸び及び全伸びについて見ると、本試験結果と製造時取得データは概ね同程度であり、強度のような明確な差が見られなかった。

ここで着目すべきことは、製造時取得データの試験実施機関が F95 と M93 において同一であるのに対し、F94 では別機関ということである¹²⁾¹³⁾。今回 MMS で取得した試験結果は、F95、M93 の製造時取得データと概ね一致したことから、F94 製造時取得データについては、何らかの理由で強度、特に降伏応力を低めに測定した可能性がある。したがって本報では、F94 未照射材の強度レベルは今回 MMS で試験したデータを基準として、照射材との比較を行うこととした。

次に未照射材について鋼種の違いを見ると、強度レベルは、降伏応力、引張強さともに全体として強度が高いほうから M93>F95>F94 の順であった。また、降伏応力及び引張強さは温度の上昇に伴い単調に低下する傾向を示し、強度の温度依存性に及ぼす鋼種の違いによる影響はほとんど見られなかった。

一様伸びは、本試験温度範囲（400～525℃）において、F94 及び F95 では約 5% でほぼ同等であり、M93 ではやや小さく 3～4% であった。また、この温度範囲では温度依存性は見られなかった。製造時取得データを含めた室温から 700℃ の範囲では、一様伸びは鋼種によって違いが見られた。M93 の一様伸びでは、温度依存性はほとんど見られなかった。F95 の一様伸びは、温度の上昇に伴い緩やかに増加した。F94 では、一様伸びは室温で約 14% と他鋼種と比較して大きな値を示したが、温度の上昇に伴い低下し 400℃ 付近で最小となり、さらに高温になるにつれてまた増加する傾向を示した。M93 では、室温から 600℃ までの温度範囲において一様伸びの温度依存性はほとんどなく、600～700℃ でやや低下傾向が見られた。

全伸びは、本試験温度範囲（400～525℃）では F95 と M93 とともに約 14～22% と両者でほぼ同程度であったが、F94 では約 8～13% で F95 及び M93 よりやや小さかった。また、この温度範囲では全伸びは全体として温度の上昇に伴い増加する傾向を示した。全伸びについて一様伸びと同様に製造時取得データを含めて室温から 700℃ までの温度範囲で見ると、F95 では、温度の上昇に伴い全伸びは増加し約 600℃ で最大となり、それ以上の温度で減少した。M93 では、室温と 400℃ の全伸びはほぼ同程度であり、500℃ でやや増加したがさらに高温になると減少した。一方、F94 では、一様伸びと同様に、全伸びは温度の上昇に伴い低下し 400℃ 付近で最小となり、さらに高温になるにつれてまた増加する傾向を示した。

5.2 SVIR-1 照射材のリング引張試験結果

SVIR-1 照射材のリング引張試験結果を表 5.2 に示す。ここで、F95 の L7F18A（試験温度 525℃）の値は、降伏応力が他 3 試験片よりも 20% 以上低くなった。荷重-伸びチャートを確認した結果、L7F18A では弾性領域が途中で折れたようになっており、正確に弾性領域、比例限が測定できていなかった。これは、何かの原因で引張変形時に治具と試験片の隙間が大きくなった結果、試験初期に過度に曲げ変形が加わったと考えられる。よって L7F18A のデータは、曲げ変形の影響がほとんどないと考えられる引張強さのみを除いて、降伏応力、一様伸び及び全伸びに対しては参考値扱いとして評価には加えないこととする。

降伏応力、引張強さ、一様伸び及び全伸びと試験温度の関係を未照射材の結果と比較して図 5.2-1～図 5.2-6 に示す。

はじめに F94 については、降伏応力は 400、450℃では非照射材に対して約 11%増加したが、500、525℃では非照射材とほぼ同等であった。引張強さは全試験温度で非照射材に比較して増加した。増加量は低温側のほうが大きく、最大 400℃で 11%を示した。一様伸びは、全試験温度範囲において非照射材と照射材とで概ね同等であった。全伸びは、非照射材では温度の上昇に伴い増加するのに対して、照射材では温度の上昇に伴い低下する傾向を示した。そのため、約 500℃を境にして低温側では照射材のほうが大きく、高温側では逆に小さくなった。

次に F95 では、降伏応力は全ての試験温度で概ね照射材と非照射材で顕著な差がなかった。引張強さは、いずれの温度においても照射材のほうが非照射材に比べて 40MPa 程度増加したが、照射に伴う引張強さの増加は F94 に比べて小さかった。一様伸びは、照射材と非照射材でほとんど同等であった。400、450℃における照射材と非照射材の全伸びは同等であり、500、525℃では照射材がやや低い値を示したが、概ね両者の全伸びの温度依存性は同様であった。

M93 では、降伏応力は 400、450 及び 500℃では照射材が非照射材よりやや増加し、525℃では両者はほぼ同等であった。引張強さについては、全試験温度範囲において、照射材は非照射材よりも 20～80MPa 程度増加した。一様伸びは、全試験温度において照射材と非照射材で差は見られなかった。全伸びは、400、450℃では照射材と非照射材とで同等であった。一方、500℃では、照射材は非照射材の約 30～50%に低下した。さらに 500℃から 525℃になると、照射材は、非照射材と同様の温度依存性で増加した。

次に、各鋼の引張特性と高速中性子照射量の関係を図 5.2-7～5.2-9 にそれぞれ示す。なお本 SVIR-1 リング引張試験片の高速中性子照射量は $0.5\sim 3\times 10^{26}\text{n/m}^2$ ($E>0.1\text{MeV}$)であるが、同一の試験温度条件で照射量が異なるデータは 525℃のみである。

はじめに降伏応力及び引張強さについて見ると、全ての鋼種において 450 から 525℃での照射材の強度は非照射材に比較してやや増加する傾向があるものの、顕著な照射量依存性は見られなかった。試験温度 400℃では、F94 と M93 において照射硬化による顕著な強度上昇を示したが、F95 では同様な傾向とならなかった。400℃での照射量は $0.5\times 10^{26}\text{n/m}^2$ ($E>0.1\text{MeV}$)であるので、本試験結果のみからでは、強度の照射量依存性は十分に判断できない。

伸びに関しては、一様伸びは鋼種によらず全試験温度範囲においてほとんど温度依存性が見られなかった。一方、全伸びは鋼種によって違いが見られた。F94 と F95 では全体としては顕著な全伸びの照射量依存性は見られなかったが、M93 では、500、525℃において、照射量の増大に伴い明らかに全伸びが低下する傾向を示した。

6. 考 察

6.1 ODS 鋼被覆管のリング引張特性と組織改善の効果

F94、F95 及び M93 は、ODS フェライト鋼初期試作被覆管（1DS、1DK）で課題となった強度の異方性、周方向の低延性及び難加工性を改善するために、再結晶及び相変態を適用して結晶組織を改善した鋼種である。そこで、初期試作被覆管 1DS の引張特性と本試験結果を比較して組織制御の効果について検討した。

図 6.1-1～6.1-4 に、非照射材について本試験結果及び 1DS 鋼被覆管の引張特性¹⁴⁾を示す。なお、図 6.1-1、6.1-2、及び 6.1-4 には参考として、酸化物分散強化のないフェライト鋼である PNC-FMS 鋼被覆管の管軸方向引張試験結果¹⁵⁾を示す。PNC-FMS 鋼被覆管と ODS 鋼被覆管を比較すると、降伏応力、引張強さについては、全試験温度範囲において全 ODS 鋼被覆管の強度は PNC-FMS 鋼よりも高くなっており、酸化物分散強化によって強度が上昇したことが分かる。一方全伸びについても、1DS のリング引張試験結果を除けば、1DS 管軸方向及び F94、F95、M93 のリング引張試験結果は PNC-FMS 鋼と概ね同等以上の値を示し、ODS 鋼被覆管の延性特性が概ね良好であることが分かる。

ODS 鋼被覆管での比較では、はじめに強度について見ると、図 6.1-1 及び 6.1-2 から分かるように、1DS については降伏応力、引張強さともに室温から 600℃までの温度範囲では管軸方向引張とリング引張では顕著な強度レベルの差は見られない。600℃を超えた温度範囲では、リング引張の強度が相対的に低下する傾向を示し、800℃では管軸方向の約半分の強度になっている。これは、短時間強度試験では基本的にクリープ試験の場合と異なって、1DS 特有の結晶組織に起因する粒界すべりの影響が現れないために強度差が生じない。しかし、高温になると短時間強度においても結晶組織の影響がみられるようになるためと考えられる。

リング引張試験結果について、F94、F95 及び M93（本試験結果）と 1DS を比べると、各温度における強度レベルは、高いほうから $1DS > M93 > F95 > F94$ の順である。ただし試験温度で詳細に見ると、F94、F95 及び M93 の降伏応力は、試験温度 400℃では 1DS の 70～80%、700℃では同等になり、温度の上昇に伴い強度差が小さくなっている。一般に、ODS 合金の強度は母相自身の強度と第二相酸化物分散粒子による強度寄与分の和として考えられる。本鋼では F94 と F95 の母相はフェライト再結晶組織であり、M93 の母相はマルテンサイト素地である。両者を比較すると一般にはマルテンサイト素地のほうが硬く、強度が高いと考えられるが、F94、F95 及び M93 の被覆管製品の硬さはそれぞれ 316、375、379(10kgHV、縦断面 5 回測定の平均値)であった¹⁰⁾。

硬さ試験において、F95 と M93 の被覆管製品の硬さが概ね同等であったことから、本鋼被覆管における強度に及ぼす素地の影響はあまり大きくないと考えられる。この原因の一つとしては、材料の製管性能（加工性）と製管方法との関連があげられる。ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管では、冷間圧延と中間熱処理の組み合わせによる製管を実現するために、経験的に冷間圧延前の材料の硬さを概ね 350HV 以下にする必要がある。このため、M93 等のマルテンサイト系鋼種においても、中間熱処理（炉冷）によって硬さを 350HV に下げているために、最終冷間圧延＋最終熱処理（NT 仕上げ）後の硬さが 380HV 程度に仕上がってい

る。したがって、M93では巨視的にみると α - γ 相変態を適用したマルテンサイト組織であると考えているが、結晶学的には厳密にみると典型的なマルテンサイト組織ではない可能性があり¹⁶⁾、この組織の影響で硬さがフェライト系素地のF95とほぼ同等であると推察される。

以上の検討結果を考慮すると、本鋼被覆管においては、基本的には母相の違いによる影響は小さく、また Y_2O_3 (Y_2O_3 とTiの複合酸化物を含む)分散粒子の大きさは概ね同じであると考えられる。したがって、これらの強度特性は、主として強化に有効であると考えられる Y_2O_3 、Ti及びWの添加量で決まると推察される。1DSの化学成分では Y_2O_3 ; 0.40, Ti; 0.40, W; 2.67 (wt%)であり、加工方法(温間加工により製管)も異なることから、表2.1に示したF94、F95及びM93の化学成分を考慮すると、本試験結果では Y_2O_3 等の添加量の大小が強度レベルの差の主要な要因であると考えられる。ここでF94、F95及びM93に着目すると、M93の強度レベルが最も高くなっており、各鋼種の Y_2O_3 、Ti、Wの添加量を考えると一義的には Y_2O_3 量が最も支配的であると推察される。

一方、伸びについては図6.1-3、6.1-4に示すとおり、1DSのリング引張試験の一樣伸び及び全伸びは、ともに強度とは異なり管軸方向よりも小さくなっている。特に400~600°Cの温度範囲では、リング引張試験の一樣伸びは1%未満であり、伸びの異方性が顕著である。この周方向の低延性及び伸びの異方性の原因としては、1DSが温間加工材であり非常に硬い材料であることから、材料そのものの延性が低いことが考えられる。さらにこれに起因して1DSはリング引張試験開始初期に生じる曲げ変形によって、引張方向(変位測定方向)に十分に伸びを示さないまま試験片が破断しているのではないかと推察される。

次に各鋼のリング引張試験結果に関してみると、F94、F95及びM93の一樣伸び及び全伸びは1DSと比較して明らかに大きく、組織改善によって周方向の延性が改善したことが分かる。特に400~600°Cの温度範囲では一樣伸び、全伸びはそれぞれ3%、8%以上であり、1DSの管軸方向の伸びよりも大きな伸びを示した。F94、F95及びM93を比較すると、概ね試験温度400~600°Cの範囲では、一樣伸びは $F94 \approx F95 > M93$ 、全伸びは $F94 < F95 \approx M93$ の傾向を示した。鋼種による一樣伸びの違いは上記の各鋼の強度レベルに対応したものと考えられるが、全伸びの傾向については、強度が高く一樣伸びが小さいM93の伸びが大きくなっている。この問題について、現在のところ明確な原因は明らかでない。

再結晶組織や α - γ 相変態を適用したODS鋼被覆管の結晶組織の改善は、もともとは被覆管断面方向の結晶粒を大きくすることで高温での粒界すべりを抑制し、高温内圧クリープ強度の上昇を図ることが主要な目的であった。このための化学成分の検討や製管方法の工夫(ピルガー圧延機の採用)等により、結果的には加工性能が向上し(冷間加工と途中熱処理の組み合わせにより製管を可能にした)、また本リング引張試験結果が示すように周方向延性の改善にも効果があることが分かった。これまでの炉外試験の結果から、F94、F95及びM93の内圧クリープ破断強度は開発目標値に近いレベルまで到達しており¹⁷⁾、結晶組織の改善はODS鋼被覆管の高温強度、延性等の機械的性質と加工性能のバランスを図るために非常に有効であるといえる。

6.2 ODS 鋼被覆管のリング引張特性に及ぼす中性子照射の影響

これまで試作してきた ODS 鋼被覆管の中では、本供試材である F94、F95 及び M93 は前項に述べたように高温強度や延性等の機械的性質と加工性能（製管性能）等の諸特性が全体として優れていることから、今後のフェライト系再結晶 ODS 鋼被覆管及びマルテンサイト系 ODS 鋼被覆管の実用化開発を進めるうえでベースとなるものと考えられる。したがって、現在での唯一の高速中性子照射試料である本 SVIR-1 照射材から本鋼の基本的な照射特性及び機械的性質に及ぼす照射効果を把握することは極めて重要である。

そこで、リング引張特性に及ぼす高速中性子照射の影響を評価して本鋼の照射硬化挙動について検討した。リング引張試験における降伏応力、引張強さ、一様伸び及び全伸びについて照射前後で比をとり、各試験温度で整理して図 6.2-1～6.2-4 に示す。なお各図中には「常陽」CMIR-5 で照射した 1DS 被覆管のリング引張試験結果¹⁴⁾を併せて示し、また各データの照射量を付記した。

図 6.2-1 及び 6.2-2 に示すように、F94、F95 及び M93 の降伏応力、引張強さの照射前後の比は概ねそれぞれ 0.9～1.1、1～1.1 の範囲であり、本照射条件では顕著な照射硬化（強度上昇）は生じていないことが分かる。逆に F95 の 400℃では照射材の降伏応力が非照射材よりも低下したデータも見られた。また、図に示したように 15dpa までの範囲においてはリング引張強度特性に及ぼす照射量の影響はほとんどないと考えられる。一方 CMIR-5 で照射した 1DS では、降伏応力、引張強さともに比は 525℃において約 1.2 を示し最も照射硬化に伴う強度上昇が大きいものの、400、550℃では本結果と概ね同様の傾向を示した。

ODS 鋼では母相中に微細な第二相粒子が分散していることから、この分散粒子が母相の照射損傷の発達（照射硬化量）に影響することが予想される。本供試材には Y_2O_3 及び Y_2O_3 と TiO_2 の複合酸化物が分散しており、これらの分散粒子と母相との界面は非整合であると考えられる。本試験の結果、照射前後で強度があまり変わらなかったことから、これらの ODS フェライト/マルテンサイト鋼では酸化物分散粒子が照射欠陥の有効なシンクとして働くために照射硬化を抑制したと推察される。また、照射硬化による強度の上昇が鋼種によらず概ね同様であったことから、本鋼では、照射硬化挙動が母相の違いにほとんど依存しないことを示唆している。

MA 雰囲気ガスの影響に関しては、未照射材及び照射材の試験結果を考慮すると、全体として、He ガス MA 材の F94 のほうが、Ar ガス MA 材の F95 に比較して、若干強度レベルが低い傾向が見られるものの、本試験結果からは、照射後リング引張強度に及ぼす MA 雰囲気の違いによる顕著な影響はほとんどないと考えられる。

伸び特性に及ぼす照射の影響については、図 6.2-3 に示すように F94、F95、M93 の一様伸びの照射前後での比は概ね 0.8～1.3 である。このことから、525℃ではデータのばらつきがやや大きく、照射後の一様伸びが約 20%程度低下したデータもあるが、全体的には本試験条件では照射による一様伸びの著しい低下はないといえる。一方、1DS では各温度において一様伸びの比は本試験結果よりも小さい値を示し、照射後の一様伸びは大きく低下していた。

一般に鋼材では中性子照射硬化により強度が上昇し延性が低下すると考えられる。しかし、上述のように 1DS と本試験結果では照射硬化による強度の上昇は概ね同様であったにもかか

ならず、伸び特性に違いが見られた。このことを考慮すると、ODS 鋼の組織改善は照射による延性低下の軽減にも有効であると推察される。

一方、本鋼の全伸びについては、図 6.2-4 に示すように照射前後の比は概ね 0.3~1.5 であった。全伸びは一樣伸びとは異なり、500、525℃において照射後の低下が顕著である。また、鋼種で比較すると M93 は全伸びの低下が大きい傾向を示した。これは M93 照射材では破断がやや脆性的に生じたことを示唆しており、伸び特性には比較的有意に照射の影響が現れている。

一般に照射材料の引張強度特性に関しては、照射量の増大に伴って降伏応力が引張強さに近づく¹⁸⁾。また、伸びについては、オーステナイト系鋼種では高照射量条件でスエリング量が約 6%以上になると、全伸びが一樣伸びに近づくことが知られている¹⁹⁾。これらは具体的には、照射により降伏後の加工硬化率が減少し、また最大荷重後にほとんど絞りを生じずに破断にいたることを示している。

そこで、本試験結果について照射による加工硬化性能の変化を見るために、降伏応力と引張強さの比 (YS/UTS) と試験温度の関係を図 6.2-5 に示す。また、本試験結果では照射条件から判断して有意なスエリングは発生していないが、フェライト鋼では照射脆化が重要であるという観点から一樣伸びと全伸びの比 (UE/TE) と試験温度の関係を図 6.2-6 に示す。なお両図には図 6.2-1~6.2-4 と同様に各照射量を記し、また比較として CMIR-5 で照射した 1DS のリング引張試験結果を併せて示す。

図 6.2-5 から分かるように、1DS では非照射材の YS/UTS は 0.9~0.95 であり、もともと材料が硬いことに起因して降伏後から最大荷重までの加工硬化性能が低い材料であるといえる。1DS 照射材の YS/UTS は 400℃で 0.99、525、550℃で約 0.95~1 であり、照射により加工硬化性能がさらに低下し、ほとんど一樣変形を示さないことが分かる。

一方 F94、F95、M93 の組織を改善した鋼種では、非照射材の YS/UTS は 400~525℃の範囲において概ね 0.8~0.9 の範囲であり、1DS と比較して十分な加工硬化性能を有している。照射後においても YS/UTS はほとんど変化せず、特に F95 では非照射材よりも小さい値を示し、このことは、F94、F95、M93 が照射後においても加工硬化性能を十分に維持していることを示唆している。

一樣伸びと全伸びについては、図 6.2-6 に示すように、1DS の UE/TE は非照射材、照射材それぞれ約 0.55~1、0.65~1 である。1DS では、非照射材においても UE/TE が 1 になるデータがあることを考慮すると、周方向の延性が非常に低く、特に周方向の変形に対しては材料の硬さとその特有な結晶組織に起因して、破壊が脆性的に生じているものと推察される。

これに対して F94、F95 及び M93 では、非照射材の UE/TE は全ての温度範囲で 0.6 以下であることから、優れた周方向延性を有しているといえる。照射後においては、400、450℃で UE/TE は非照射材と同等であり、塑性不安定後に十分な絞りが生じて破断していることを示唆しているが、500、525℃では F94、M93 の UE/TE は増加している。これは、F94、M93 照射材では塑性不安定発生後の絞り変形が減少したことを意味しているため、これらでは高温域においてやや照射脆化の傾向が現れたものと推察される。

したがって、以上の試験結果及び検討を考慮すると、F94、F95 及び M93 では本照射条件

範囲では、F94、M93に500、525°Cにおいてやや照射脆化による絞り（最大荷重後の伸び）の低下傾向が見られるものの、全体としては本鋼のリング引張特性に及ぼす中性子照射の顕著な影響はほとんどないと考えられる。よって本リング引張結果を考慮すると、本鋼は照射硬化が小さく著しい延性の低下が生じないという優れた照射後機械強度・延性特性を有すると期待される。

ただし、実用化段階の ODS 鋼被覆管の目標照射量は 250dpa であり、本試験条件に比較して非常に大きいことから、今後計画的に高照射量域の試験データの拡充を図ることが極めて重要である。また、ODS 鋼被覆管の実際の使用条件を考えると 700°C 付近の温度条件における炉内（照射下）内圧クリープ強度が最も重要な機械的性質のひとつである。本リング引張試験は短時間強度試験であったことから、長時間側である炉内内圧クリープ強度についても再結晶及び α - γ 相変態を利用した組織改善による効果、具体的には粒界すべりの抑制効果を早急に確認していくことが必要である。

6.3 照射組織発達とリング引張特性

本照射条件範囲において、F94、F95 及び M93 のリング引張特性に及ぼす顕著な中性子照射の影響が見られなかったことを考慮すると、微細組織に関しても本照射量範囲では機械的性質に影響を及ぼすような大きな組織変化は生じていないものと推察される。

SVIR-1 でリング引張試験片と同一条件で照射した F94 及び M93 被覆管について TEM 微細組織観察を行った結果、両鋼ともに照射前後において分散粒子の分布状態、析出物挙動、転位組織等に顕著な違いは認められなかった。図 6.3-1 及び図 6.3-2 に、F94 及び M93 の照射前後での代表的な TEM 組織を示す。照射による微細組織の変化がほとんど見られなかった原因としては、主として酸化物分散粒子が照射欠陥の有効なシンクとして働くためであると推察される。このことから、本鋼被覆管は本照射条件においては微細組織について概ね良好な照射特性を有していると考えられる。

今後 ODS 鋼被覆管を実用化していくうえでは、250dpa までの高速中性子照射環境下において要求される諸特性を満足する必要がある。このなかで特に機械的性質について考えると、ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管では、 Y_2O_3 及び Y_2O_3 と Ti との複合酸化物の第二相分散粒子による「分散強化」によって高温強度を得ていることから、高照射量域まで高温強度を維持するためには、製造時の分散粒子の分布状態が維持されることが不可欠である。

一般に酸化物は熱的には非常に安定であり、またこれまでの試験結果からイオン照射や電子線照射に対しても酸化物粒子は非常に安定であると考えられている。一方、ODS 鋼の中性子照射データは非常に限られており、分散粒子の中性子照射に対する安定性についての系統的な詳細な研究はこれまでほとんど行われていない。

ODS 鋼被覆管の分散粒子の中性子照射安定性に関しては、Dubuisson らが Phenix で燃料ピンとして約 78dpa まで照射した DT2203Y05 被覆管において酸化物粒子が照射誘起により固溶することを指摘している²⁰⁾。サイクル機構で開発した鋼種においても、「常陽」CMIR-4 で照射した 1DS 被覆管の照射後微細組織観察により、 Y_2O_3 粒子の分散状態が照射によりわずかに変化する傾向が明らかになっている²¹⁾。また、本 F94、M93 照射材においても、TEM

微細組織観察の結果、分散粒子と思われる丸状析出物の形がくずれる傾向が認められている(図 6.3-3)。

したがって、ODS 鋼被覆管の実用化に向けては、中性子照射下における酸化物分散粒子の構造安定性の評価が重要であると考えられる。今後は中性子照射下における転位組織や分散粒子の状態、キャビティ、ボイド等の比較的マクロな微細組織の解析に加えて、分散粒子そのものの構造や母相との界面状態などの微視的な解析を進めながら、高照射量域での微細組織及び分散粒子の分布状態を評価していくことが必要である。

7. 結 言

「常陽」SVIR-1 で照射した、ODS フェライト鋼再結晶材被覆管 (F94、F95) 及び ODS マルテンサイト鋼被覆管 (M93) 試験片について照射後リング引張試験を行い、本鋼被覆管のリング引張特性に及ぼす中性子照射効果を評価して以下の結論を得た。

- 1) F94、F95 及び M93 被覆管の未照射材のリング引張強度は、開発当初に温間加工で試作した ODS フェライト鋼被覆管 (1DS) と PNC-FMS 鋼被覆管の中間の強度レベルにあった。また、再結晶及び α - γ 相変態による結晶組織改善の結果、一様伸び及び全伸びは 1DS に比較して大幅に増加し、本鋼被覆管は良好な周方向延性を有することが分かった。
- 2) 高速中性子照射量 $0.5 \sim 3.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2 (E > 0.1 \text{MeV})$ 、照射温度 $397 \sim 534^\circ\text{C}$ の照射条件範囲においては、本鋼のリング引張強度は降伏応力、引張強さともに照射に伴い約 10% 程度の増加を示したが、強度特性の照射量依存性は見られなかった。また伸びについては、一様伸び及び全伸びはともに高温側でやや低下する傾向が見られたものの、照射に伴う伸び特性の著しい劣化は確認できなかった。
- 3) 以上の結果から、本照射条件範囲においては照射に伴う著しい強度変化や伸びの低下は見られず、照射後の周方向引張強度・延性特性が良好であることが判明した。しかし、現状の中性子照射データは非常に限られていることから、今後計画的に目標とする高照射量域までの照射試験を実施し、照射特性を把握することが重要である。

謝 辞

本報告をまとめるにあたりご指導及び貴重なご助言をいただきました大洗工学センターシステム技術開発部 核燃料工学 Gr 鵜飼重治グループリーダー、燃料材料試験部 照射材料試験室 小野瀬庄二副主任技術員、同 山下真一郎博士研究員に深く感謝いたします。

リング引張試験、TEM 組織観察等の照射後試験の実施に多大なるご尽力を頂きました検査開発株式会社 重藤好克氏、原子力技術株式会社 関根学氏に改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Nomura et al.: "Development of Long Life FBR Core Materials", Proc. of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR'91, Vol. I pp7.4-1, 1991.
- 2) S. Ukai et al.: "Alloying design of oxide dispersion strengthened ferritic steel for long life FBRs core materials", J. Nucl. Mater. 204, pp65-73, 1993.
- 3) S. Ukai et al.: "Tube manufacturing and mechanical properties of oxide dispersion strengthened ferritic steel", J. Nucl. Mater. 204, pp74-80, 1993.
- 4) S. Ukai et al.: "Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application, (I) Improvement of mechanical properties by re-crystallization processing", J. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 34, No. 3, pp256-263, 1997.
- 5) S. Ukai et al.: "Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application, (II) Morphology improvement by martensitic transformation", J. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 35, No. 4, pp294-300, 1998.
- 6) S. Ukai et al.: "R&D of oxide dispersion strengthened ferritic martensitic steels for FBR", J. Nucl. Mater. 258-263, pp1745-1749, 1998.
- 7) S. Ukai et al.: "Tube manufacturing and characterization of oxide dispersion strengthened ferritic steels", J. Nucl. Mater. 283-287, pp702-706, 2000.
- 8) 吉武庸光他、酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼の開発～再結晶技術による性能改善～、JNC ZN9400 98-009、1998.
- 9) 奥田隆成他、分散強化型フェライト鋼被覆管用素管の製造評価、PNC ZJ9058 98-003、1998.
- 10) 萩茂樹他、分散強化型フェライト鋼被覆管の製管技術開発、PNC ZJ9009 98-002、1998.
- 11) 「常陽」照射試験サイクル報 (第 35 サイクル)、JNC TN9440 2000-008, 2000.
- 12) 奥田隆成他、分散強化型フェライト鋼被覆管用素管の製造評価～強度及び再結晶特性評価試験～、JNC TJ9400 99-009、1999.
- 13) 萩茂樹他、ODS 鋼被覆管の成分と加工・熱処理条件に関する最適化評価、JNC ZN9400 99-013、1999.
- 14) 吉武庸光他、CMIR-4、5 で照射した酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼被覆管 (中間加工材) の照射後強度特性評価、JNC TN9400 2001-105、2001.
- 15) 加納洋一他、燃料被覆管の引張特性に対するひずみ速度の影響評価、PNC ZN9410 92-020、1992.
- 16) 小弥徹平他、SEM/EBSP 法を用いた酸化物分散強化型マルテンサイト鋼の組織解析、日本鉄鋼協会第 144 回講演大会 講演概要集、pp.1238 (2002).
- 17) 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、No.7, 2000. 6、JNC TN1340 2000-002.
- 18) J.J. Holmes et al.: "Effects of fast reactor exposure on the mechanical properties of stainless steels", Proc. Int. Conf. Radiation Effects in Breeder Reactor Structural

- Materials, Scottsdale, The Metallurgical Society of AIME, New York, pp.53-63 (1977).
- 19) A. Fissolo et al.: "Influence of swelling on irradiated CW Titanium modified 316 Embrittlement", Effects of Radiation on Materials : 14th Int. Symp., ASTM STP 1046 Vol. II, pp.700-713 (1990).
- 20) P. Dubuisson et al.: "Behavior of an oxide dispersion strengthened ferritic steel irradiated in Phenix", Effects of Radiation on Materials : 18th Int. Symp., ASTM STP 1325, pp.882, 1999.
- 21) S. Yamashita et al.: "Phase stability in oxide dispersion strengthened ferritic steels during neutron irradiation", 10th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials, Oct. 14-19, 2001, Baden-Baden, Germany.

表2.1 ODS鋼被覆管の化学成分(素管分析値)

鋼種	化学成分 (wt%)											備考			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃	Ex. O		N	Ar	Fe
F94	0.058	0.03	0.049	0.004	0.004	0.025	11.78	1.93	0.30	0.24	0.04	0.010	0.0003	bal.	He中MA材、熱処理仕上げ
F95	0.056	0.03	0.048	0.003	0.004	0.025	11.72	1.92	0.31	0.24	0.04	0.010	0.0038	bal.	Ar中MA材、熱処理仕上げ
M93	0.12	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	8.99	1.94	0.20	0.35	0.06	0.010	0.0033	bal.	Ar中MA材、熱処理仕上げ

Y₂O₃=Y x 1.27, Ex. O=O-(Y x 0.27)

表4.1 SVIR-1照射ODS鋼被覆管リング引張試験片の照射条件

鋼種	コンパートメントNo.	キャプセルNo.	試験片No.	照射量*	照射温度** °C
F95(熱処理 まま材) (フェライト系再 結晶材、Arガス 中MA材)	SVC016	6-4	L7F11A L7F12A	0.5	397
	SVC015	5-8	L7F13A L7F14A	2.8	454
	SVC014	4-9	L7F15A L7F16A	3.0	497
	SVC015	5-11	L7F17A L7F18A	2.5	515
	SVC015	5-12	L7F19A L7F20A	1.4	534
F94(熱処理 まま材) (フェライト系再 結晶材、Heガス 中MA材)	SVC016	6-4	L7F11 L7F12	0.5	397
	SVC015	5-8	L7F14 L7F13	2.8	454
	SVC014	4-9	L7F15 L7F16	3.0	497
	SVC015	5-11	L7F17 L7F18	2.5	515
	SVC015	5-12	L7F19 L7F20	1.4	534
M93(熱処理 まま材) (マルテンサイト系 材、Arガス中 MA材)	SVC016	6-4	L7M11 L7M12	0.5	397
	SVC014	4-7	L7M13 L7M14	2.8	454
	SVC014	4-9	L7M15 L7M16	3.0	497
	SVC015	5-11	L7M17 L7M18	2.5	515
	SVC015	5-12	L7M19 L7M20	1.4	534

*) $\times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$

**) 照射温度はキャプセル軸方向中心位置での評価値。

表5.1 ODS鋼被覆管のリング引張試験結果(未照射材)

鋼種	試験片No.	断面積、mm ²	試験温度、 °C	0.2%耐力、 MPa	引張強さ、 MPa	一様伸び、 %	破断伸び、 %
F95	F4A	1.981	400	720	876	4.7	13.6
	F6A	2.014	450	665	797	5.0	16.2
	F7A	1.973	500	623	744	5.0	18.2
	F8A	1.978	525	597	710	5.1	20.6
F94	F23	1.917	400	652	764	4.8	7.9
	F24	1.918	450	594	724	5.0	9.5
	F25	1.922	500	572	656	5.4	11.1
	F26	1.890	525	526	619	5.0	12.8
M93	M24	2.078	400	825	960	4.0	18.0
	M25	2.084	450	806	902	3.1	14.3
	M26	2.070	500	725	834	3.2	14.8
	M27	2.079	525	717	807	3.1	22.4

表5.2 SVIR-1照射ODS鋼被覆管のリング引張試験結果

鋼種	コンパートメントNo.	キャプセルNo.	試験片No.	断面積、mm ²	照射量*	照射温度**、 °C	試験温度、 °C	0.2%耐力、 MPa	引張強さ、 MPa	一様伸び、 %	破断伸び、 %
F95(熱処理 まま材)	SVC016	6-4	L7F11A	1.949	0.5	397	400	654	862	6.2	14.9
			L7F12A	1.975				709	899	4.9	14.2
	SVC015	5-8	L7F13A	1.998	2.8	454	450	653	841	6.1	18.3
			L7F14A	1.962				691	842	5.4	14.5
(フェライト系再 結晶材、Arガス 中MA材)	SVC014	4-9	L7F15A	1.980	3.0	497	500	592	784	5.3	14.2
			L7F16A	1.971				627	769	5.5	17.4
	SVC015	5-11	L7F17A	1.958	2.5	515		638	739	4.7	17.0
			L7F18A	1.977			525	506***	748	5.7***	16.5***
F94(熱処理 まま材)	SVC015	5-12	L7F19A	1.987	1.4	534		601	739	5.4	19.5
			L7F20A	1.970				629	741	4.9	19.7
	SVC016	6-4	L7F11	1.919	0.5	397	400	724	848	5.3	11.5
			L7F12	1.918				722	847	5.8	14.6
(フェライト系再 結晶材、Heガス 中MA材)	SVC015	5-8	L7F14	1.919	2.8	454	450	664	772	5.1	13.3
			L7F13	1.913				660	770	5.1	11.4
	SVC014	4-9	L7F15	1.921	3.0	497	500	568	683	5.5	7.4
			L7F16	1.913				537	687	5.9	10.6
M93(熱処理 まま材)	SVC015	5-11	L7F17	1.920	2.5	515		552	644	4.4	8.0
			L7F18	1.923			525	549	645	4.2	8.2
	SVC015	5-12	L7F19	1.918	1.4	534		532	644	5.0	7.0
			L7F20	1.917				543	666	5.1	8.3
(マルテンサイト系 材、Arガス中MA 材)	SVC016	6-4	L7M11	2.093	0.5	397	400	889	1006	4.3	15.4
			L7M12	2.079				856	1005	4.4	16.9
	SVC014	4-7	L7M13	2.075	2.8	454	450	805	928	3.9	13.6
			L7M14	2.074				839	950	4.0	15.6
SVC014	4-9	L7M15	2.076	3.0	497	500	767	883	3.7	8.6	
		L7M16	2.075				771	892	3.1	5.1	
	SVC015	5-11	L7M17	2.082	2.5	515		756	839	3.2	15.3
			L7M18	2.074			525	734	837	2.7	9.0
SVC015	5-12	L7M19	2.084	1.4	534		684	823	3.7	15.8	
		L7M20	2.084				720	816	3.2	13.1	

*) $\times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$

**) 照射温度はキャプセル軸方向中心位置での評価値。

***) 参考値扱いとする。

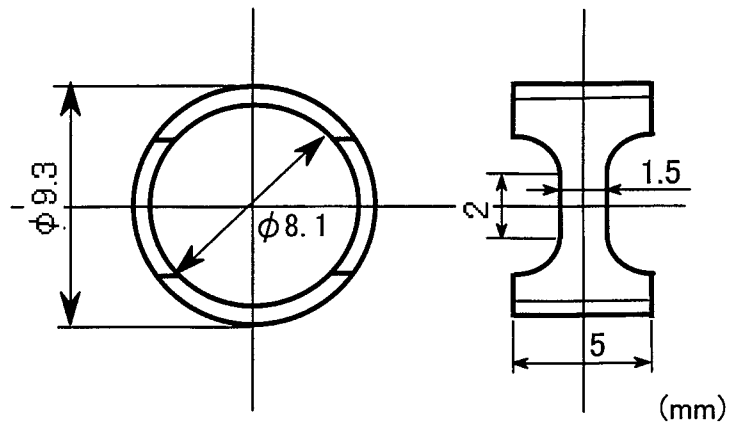


図 4.1 リング引張試験片

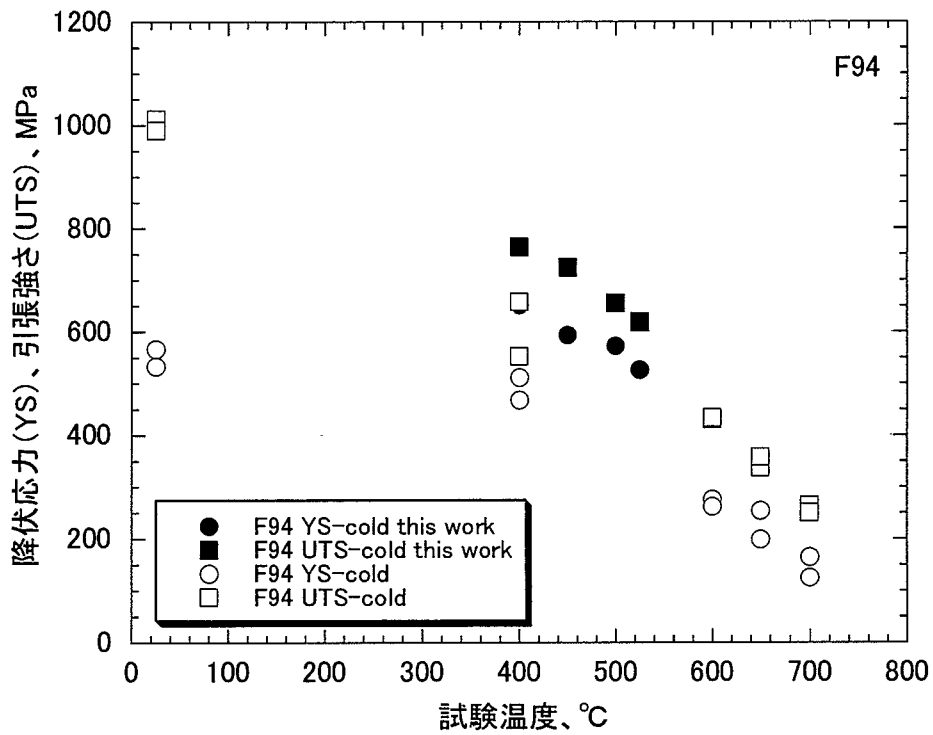


図 5.1-1 F94 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

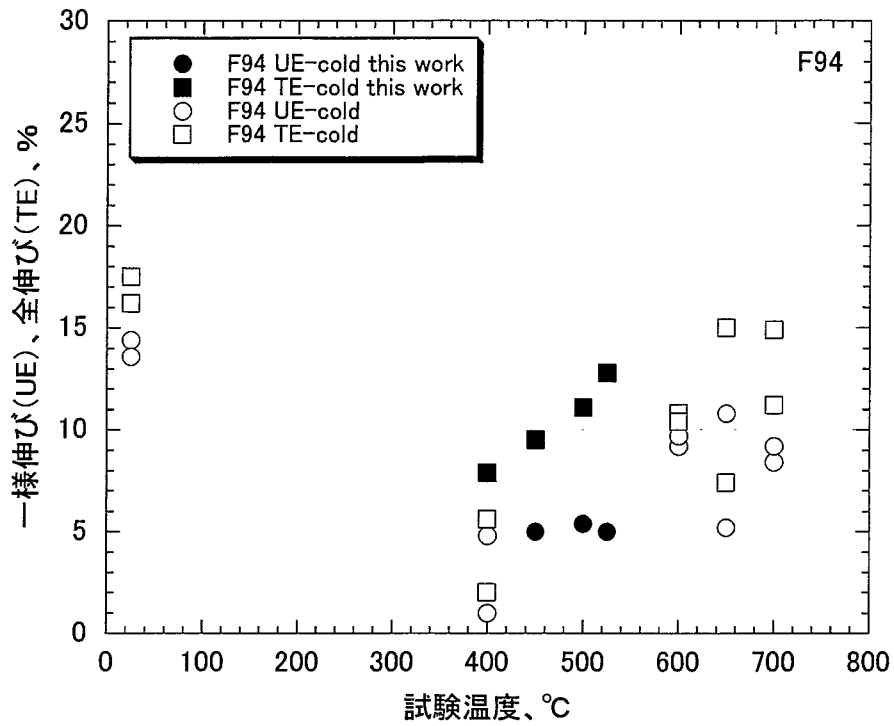


図 5.1-2 F94 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

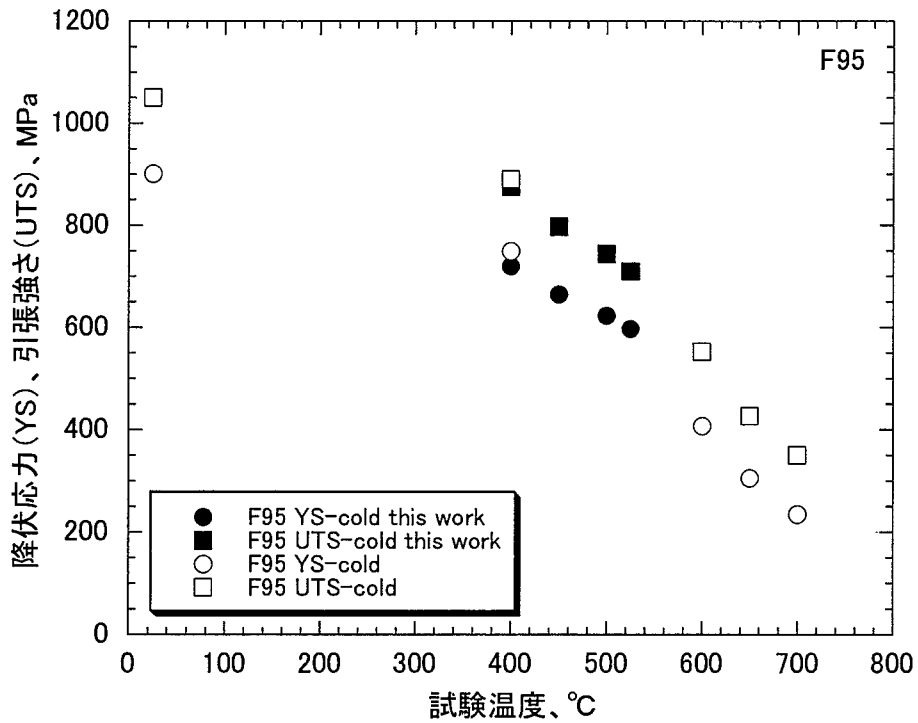


図 5.1-3 F95 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

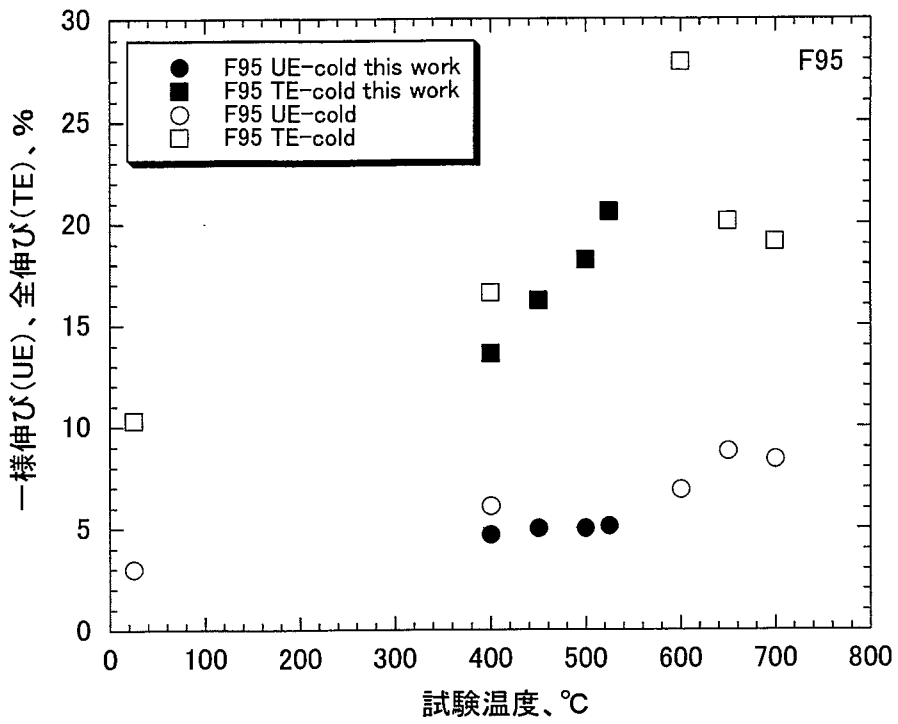


図 5.1-4 F95 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

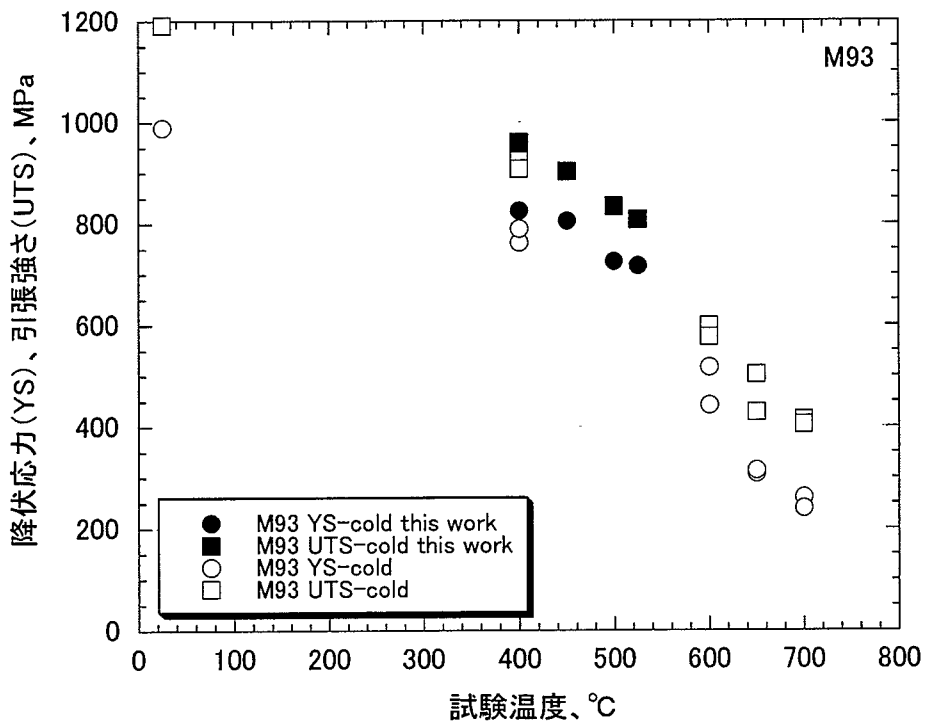


図 5.1-5 M93 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

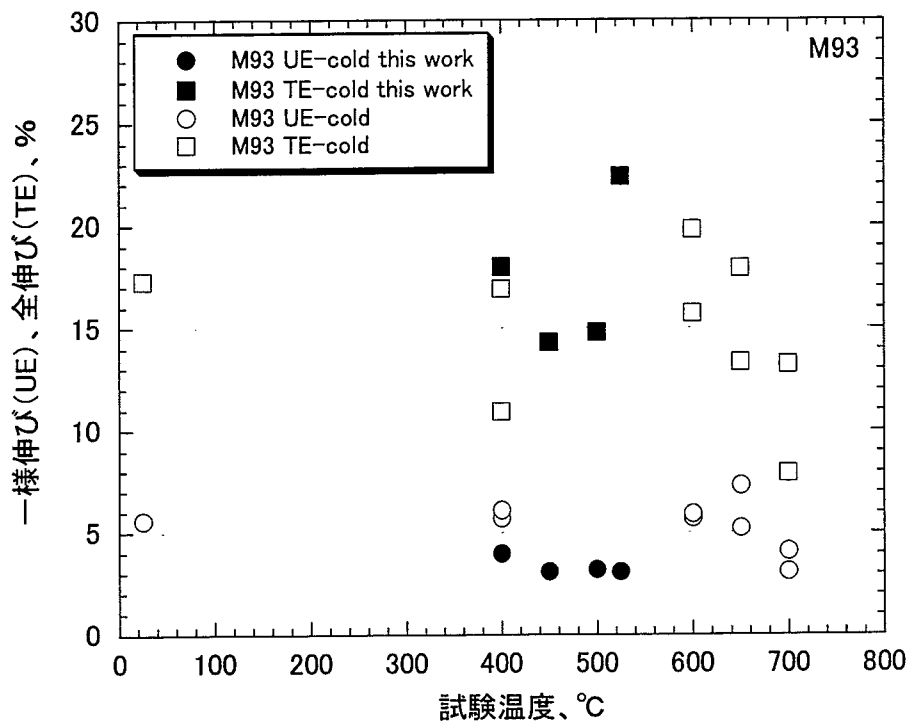


図 5.1-6 M93 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

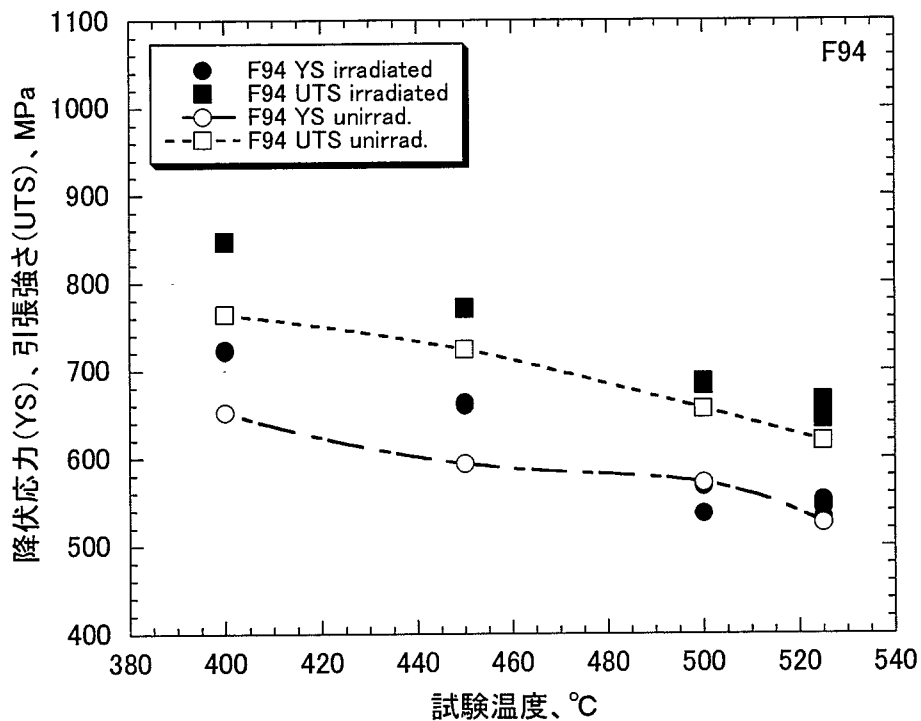


図 5.2-1 SVIR-1 照射 F94 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

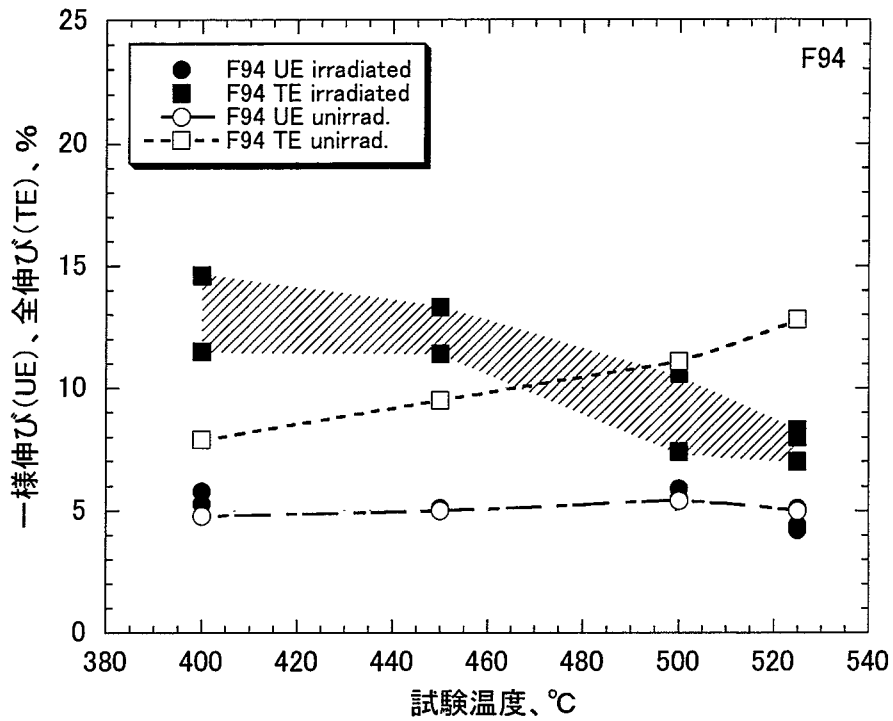


図 5.2-2 SVIR-1 照射 F94 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

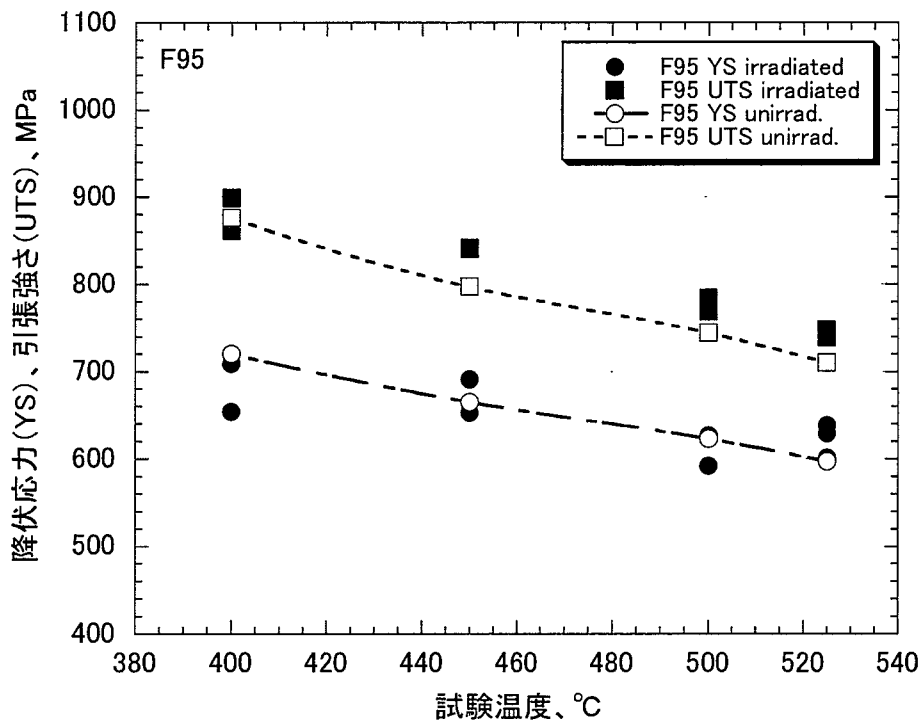


図 5.2-3 SVIR-1 照射 F95 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

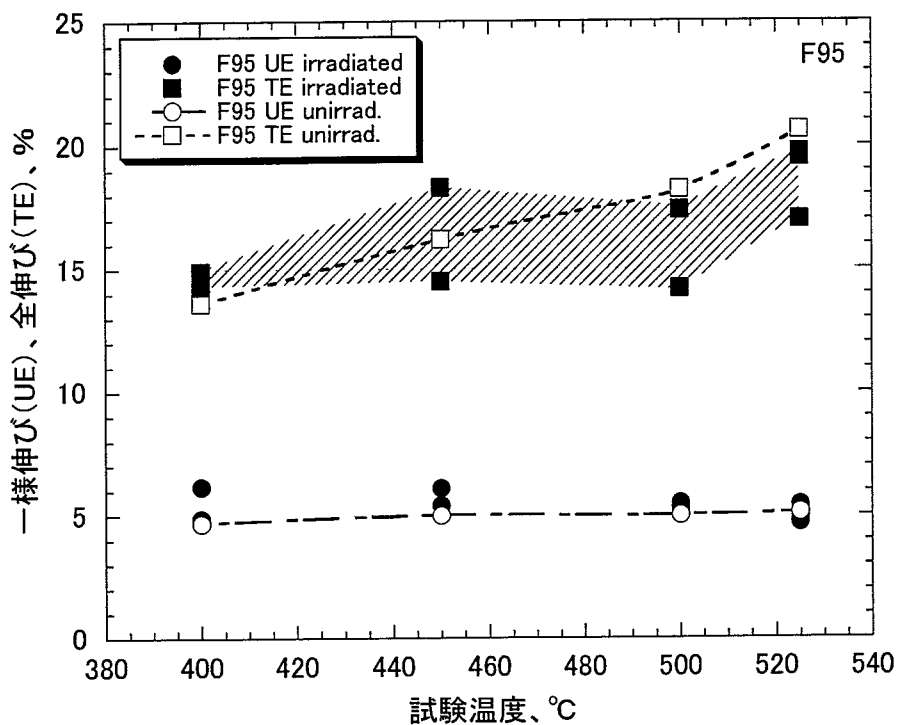


図 5.2-4 SVIR-1 照射 F95 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

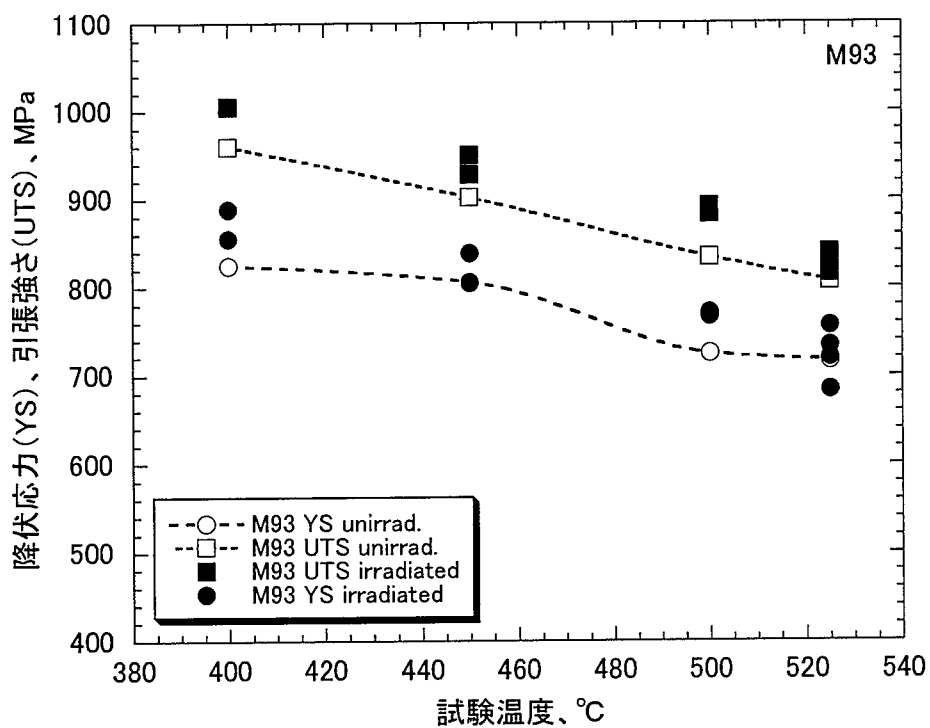


図 5.2-5 SVIR-1 照射 M93 の降伏応力、引張強さと試験温度の関係

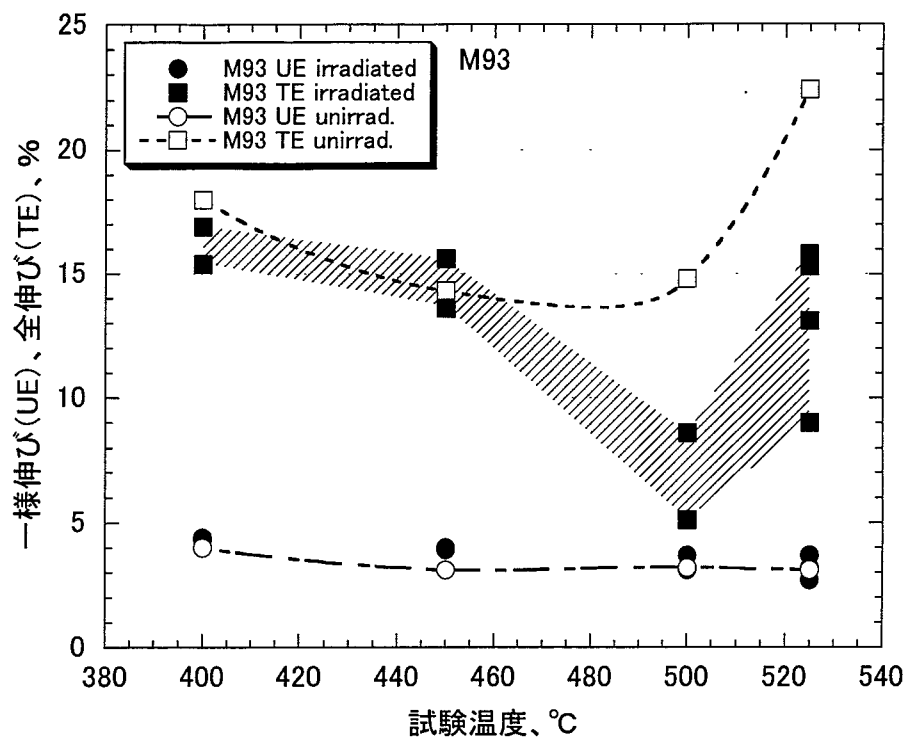


図 5.2-6 SVIR-1 照射 M93 の一様伸び、全伸びと試験温度の関係

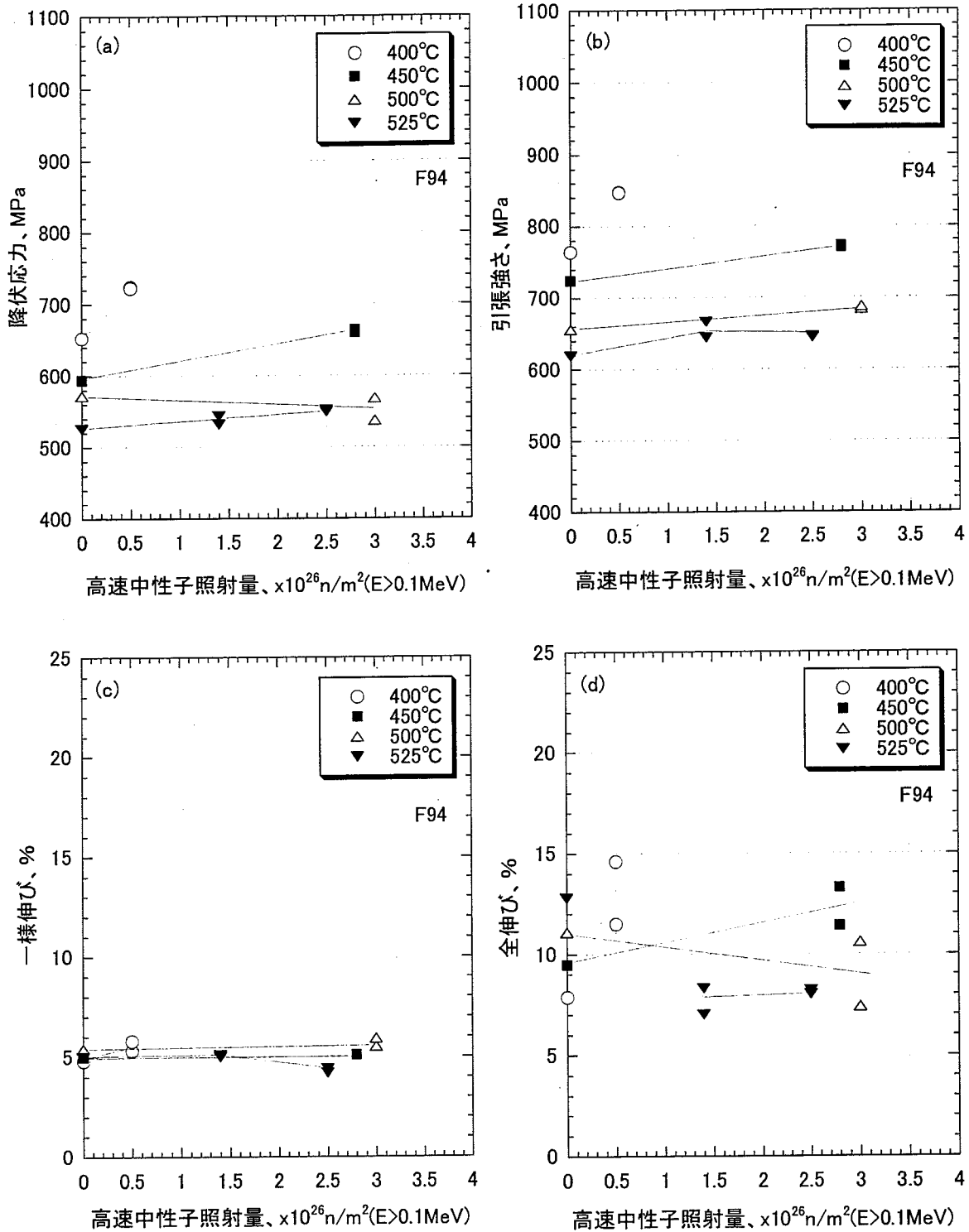


図 5.2-7 F94 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係
 (a)降伏応力、(b)引張強さ、(c)一様伸び、(d)全伸び

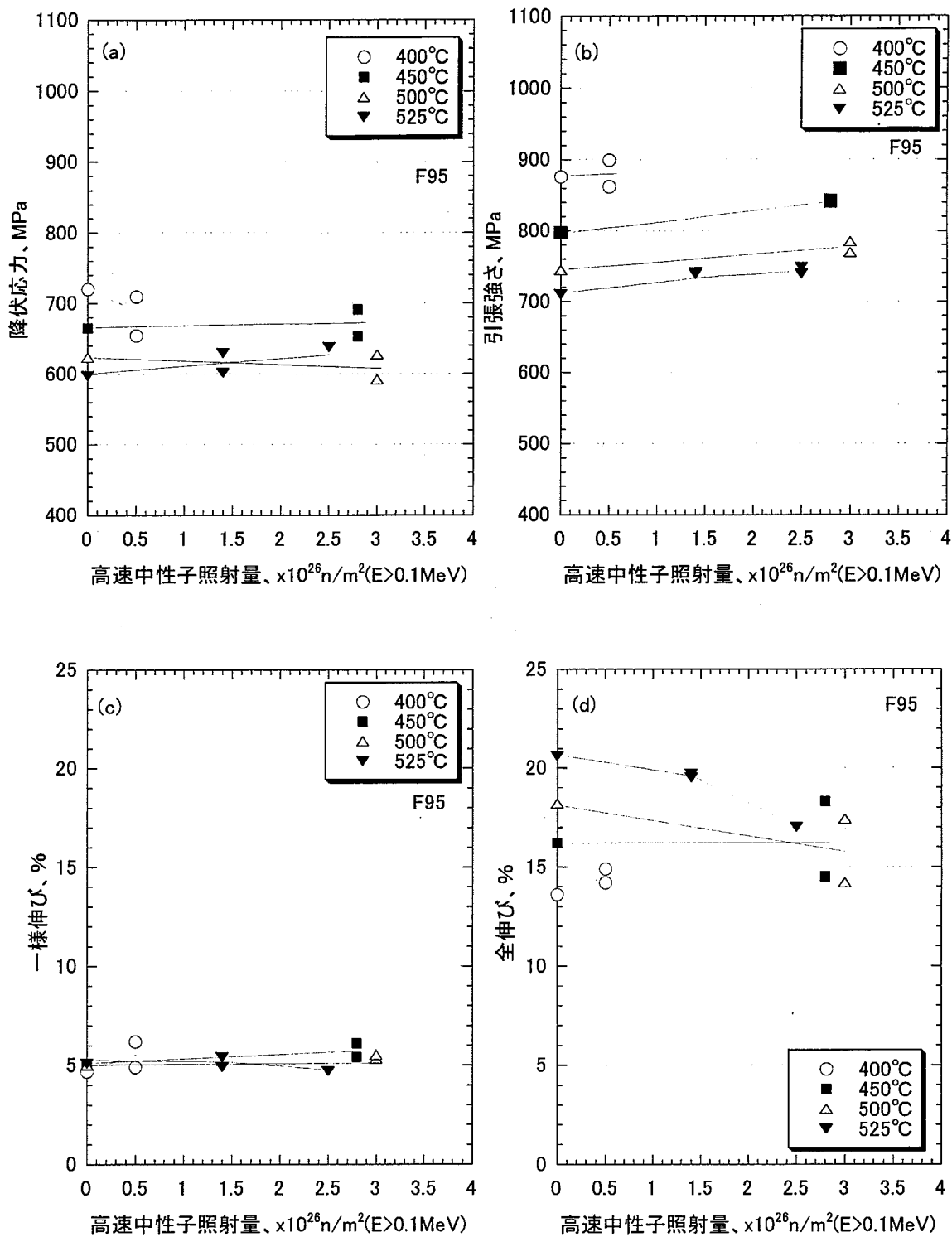


図 5.2-8 F95 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係
 (a)降伏応力、(b)引張強さ、(c)一様伸び、(d)全伸び

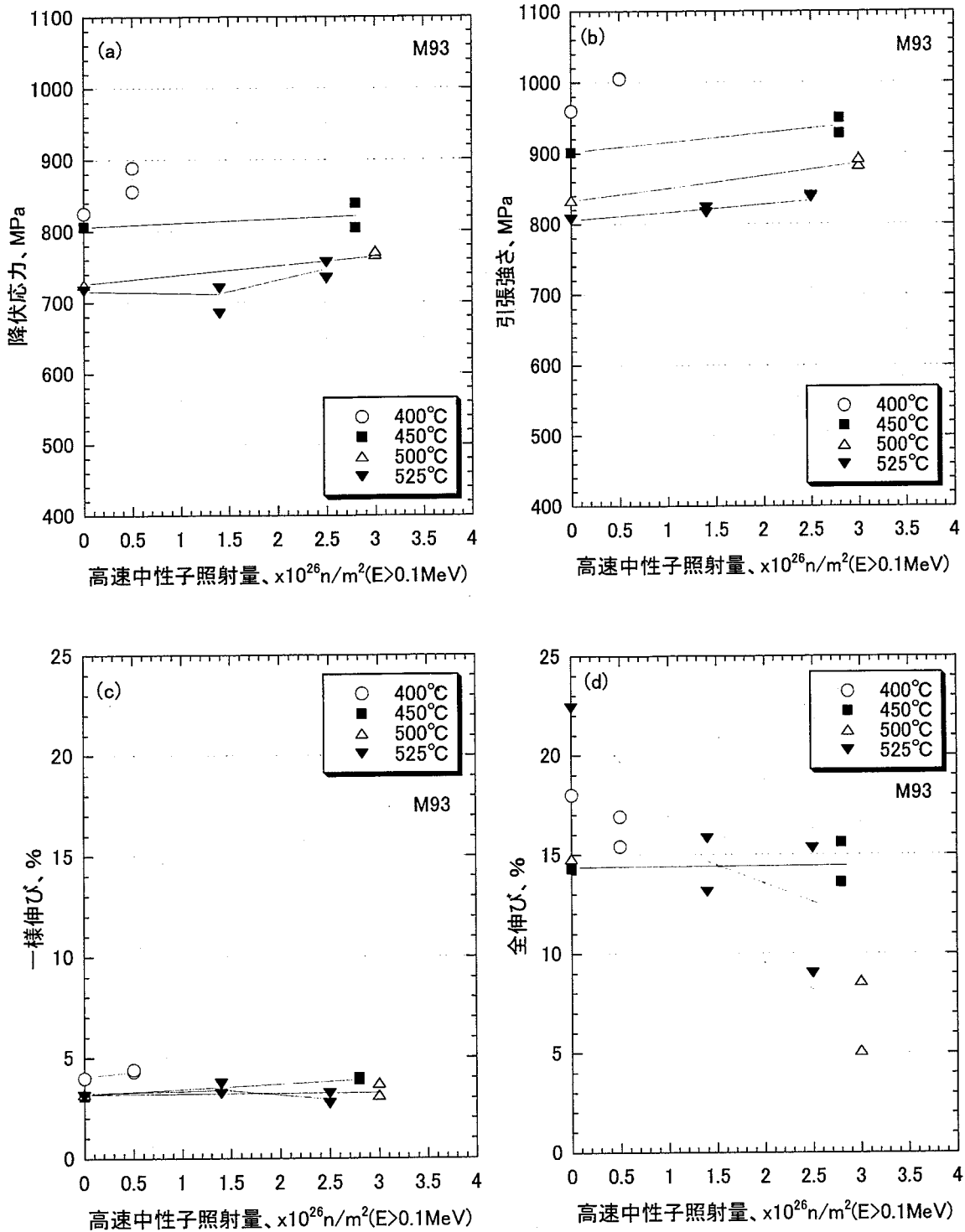


図 5.2-9 M93 のリング引張特性と高速中性子照射量の関係
 (a)降伏応力、(b)引張強さ、(c)一様伸び、(d)全伸び

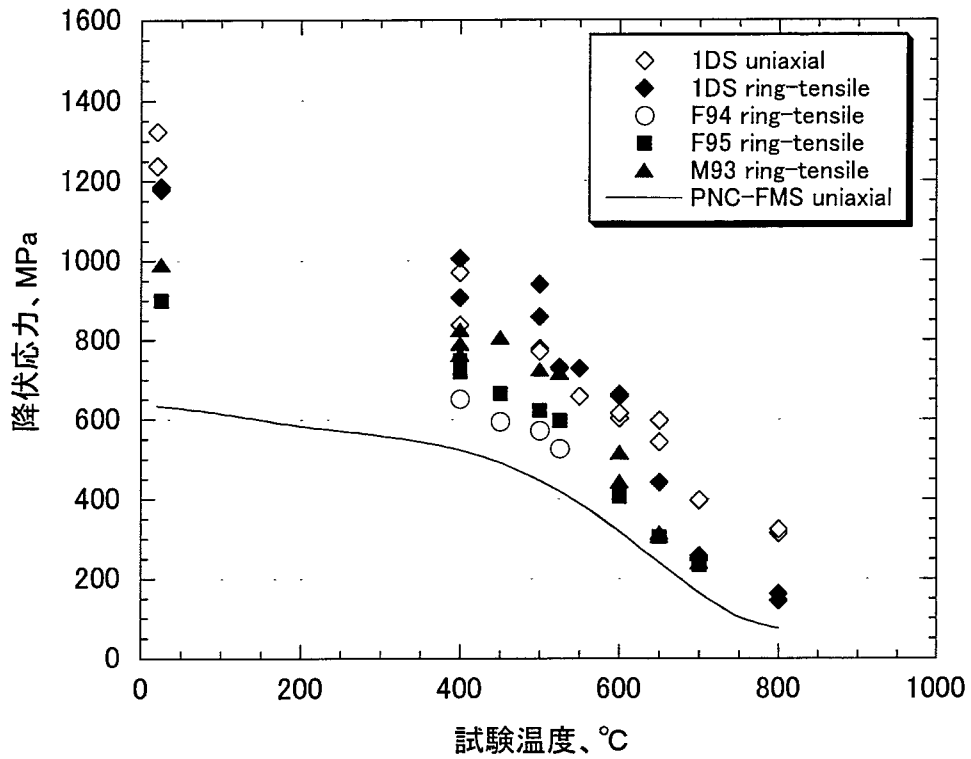


図 6.1-1 ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の降伏応力と試験温度の関係

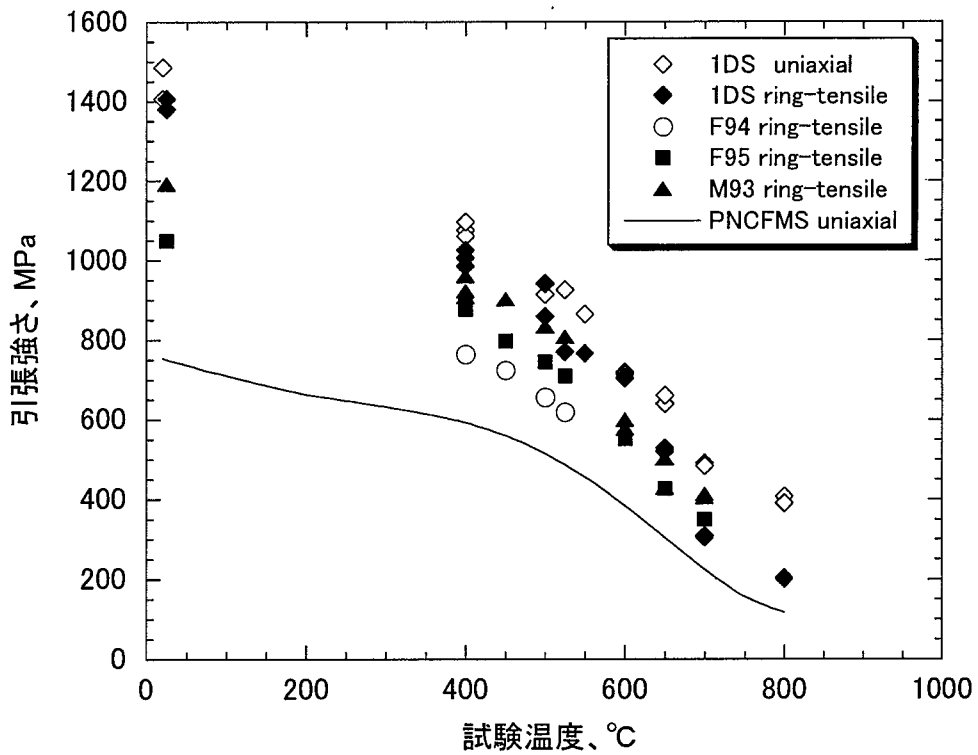


図 6.1-2 ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の引張強さと試験温度の関係

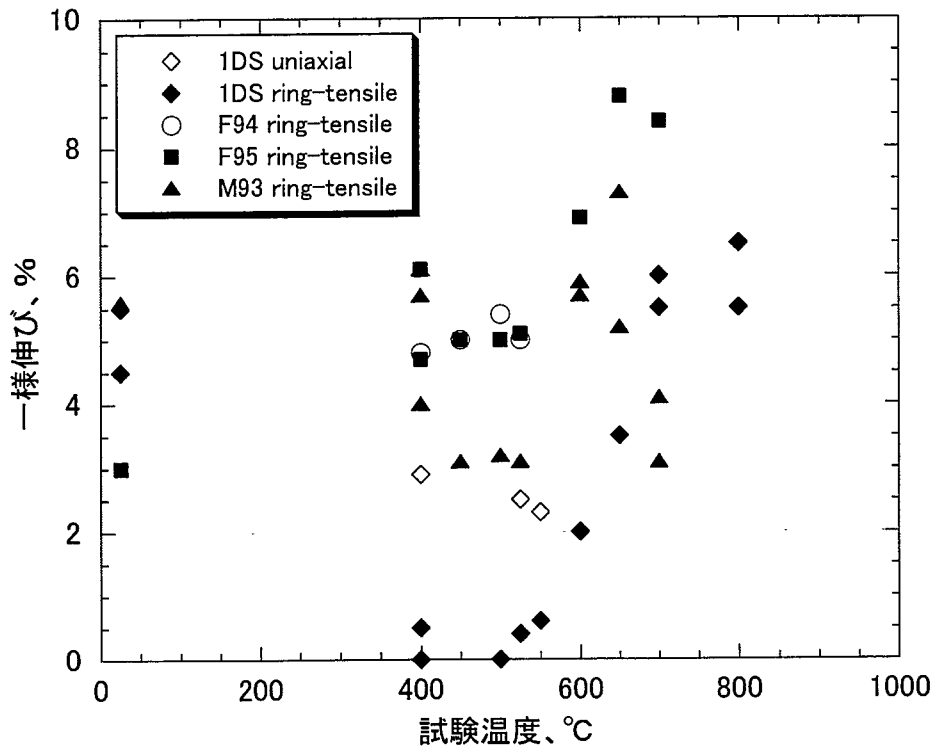


図 6.1-3 ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の一様伸びと試験温度の関係

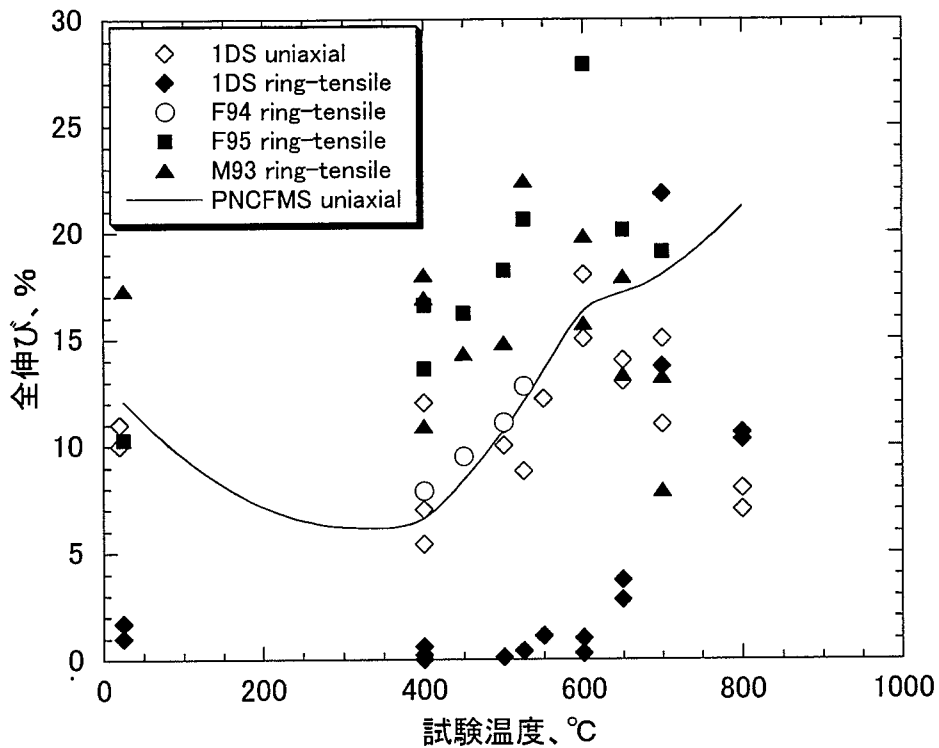


図 6.1-4 ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の全伸びと試験温度の関係

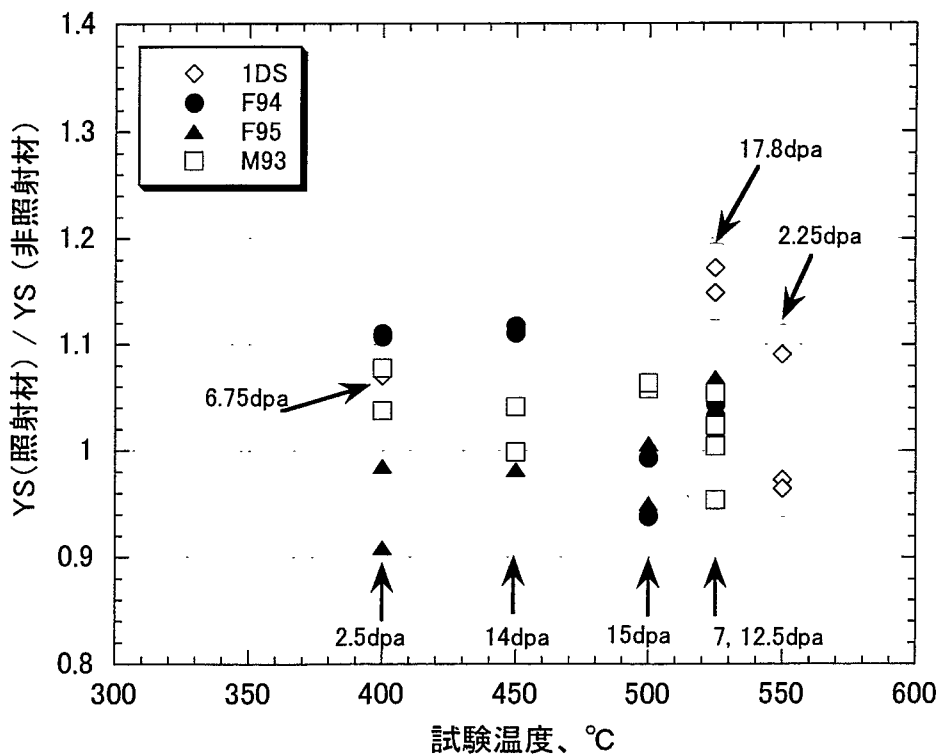


図 6.2-1 照射前後での降伏応力の比と試験温度の関係

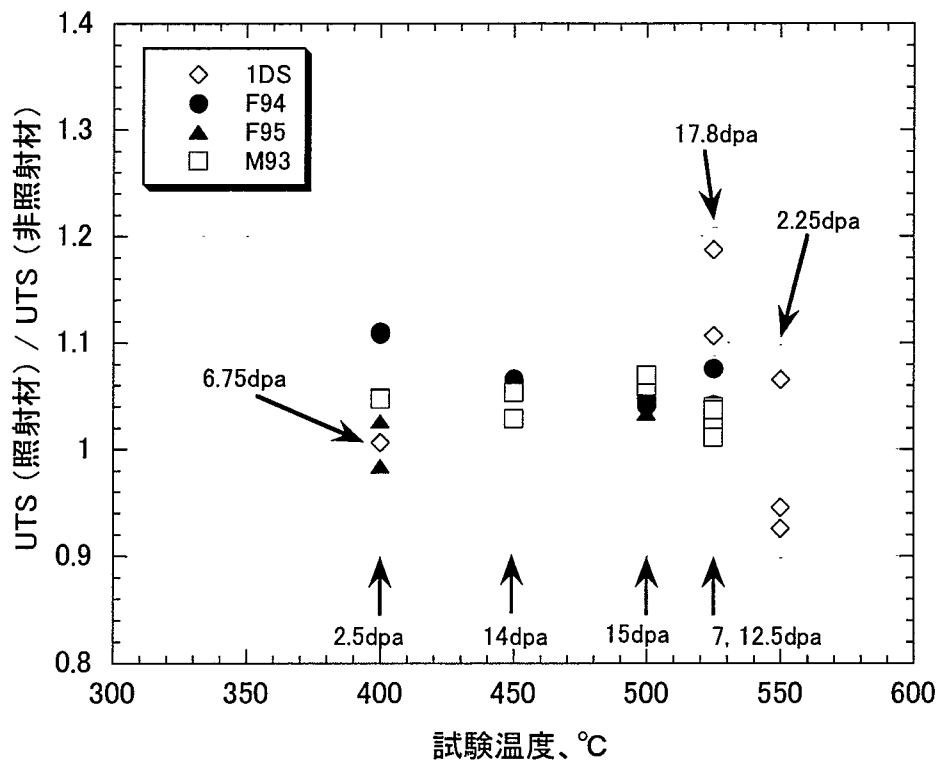


図 6.2-2 照射前後での引張強さの比と試験温度の関係

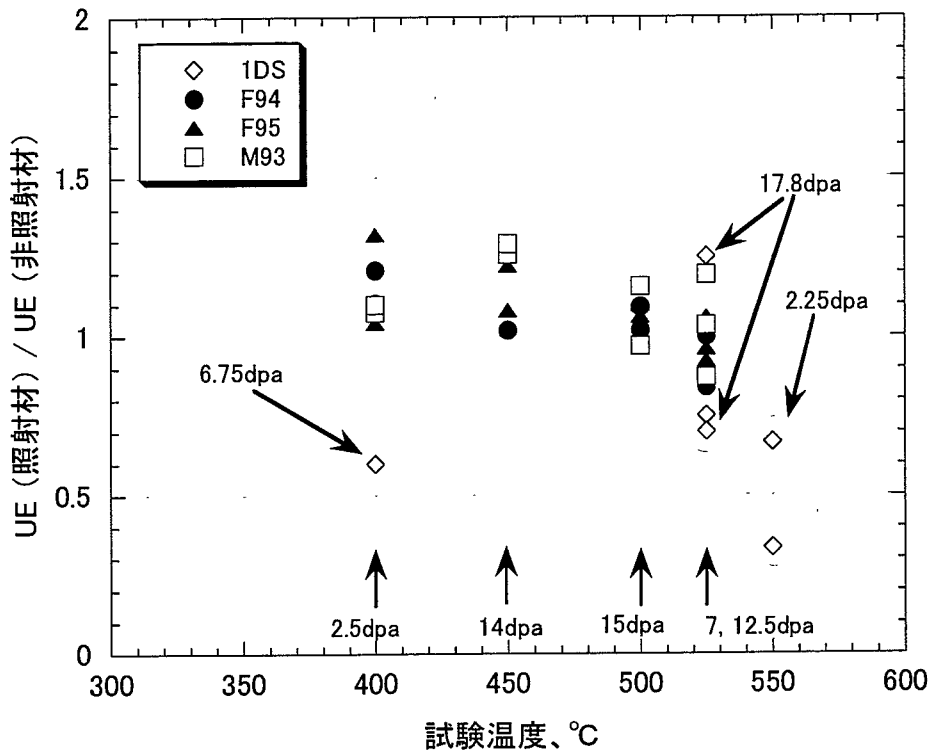


図 6.2-3 照射前後での一様伸びの比と試験温度の関係

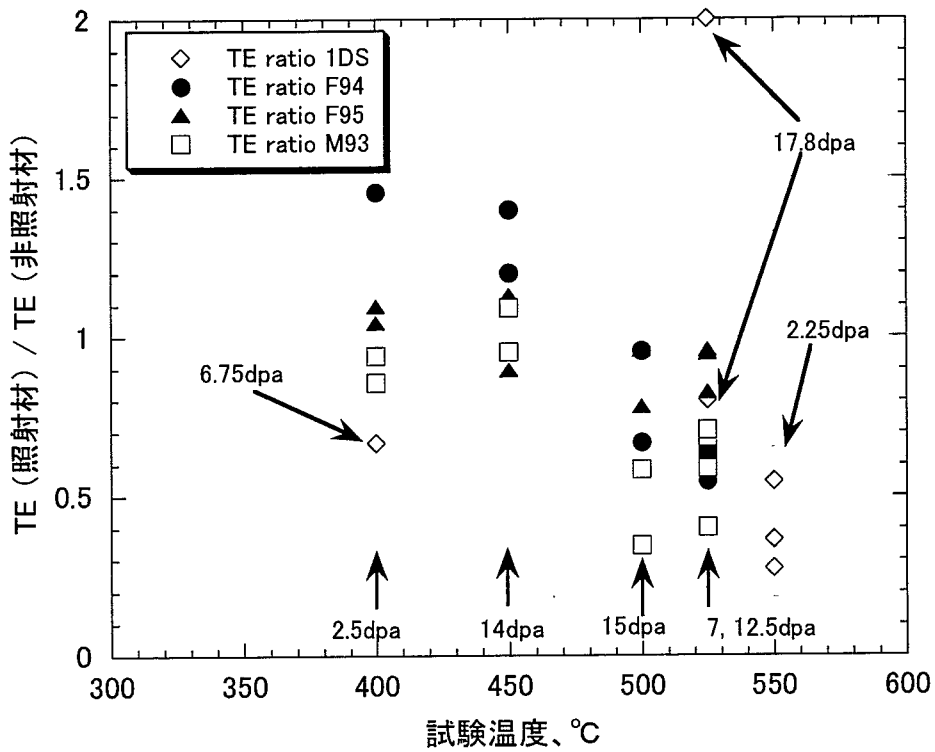


図 6.2-4 照射前後での全伸びの比と試験温度の関係

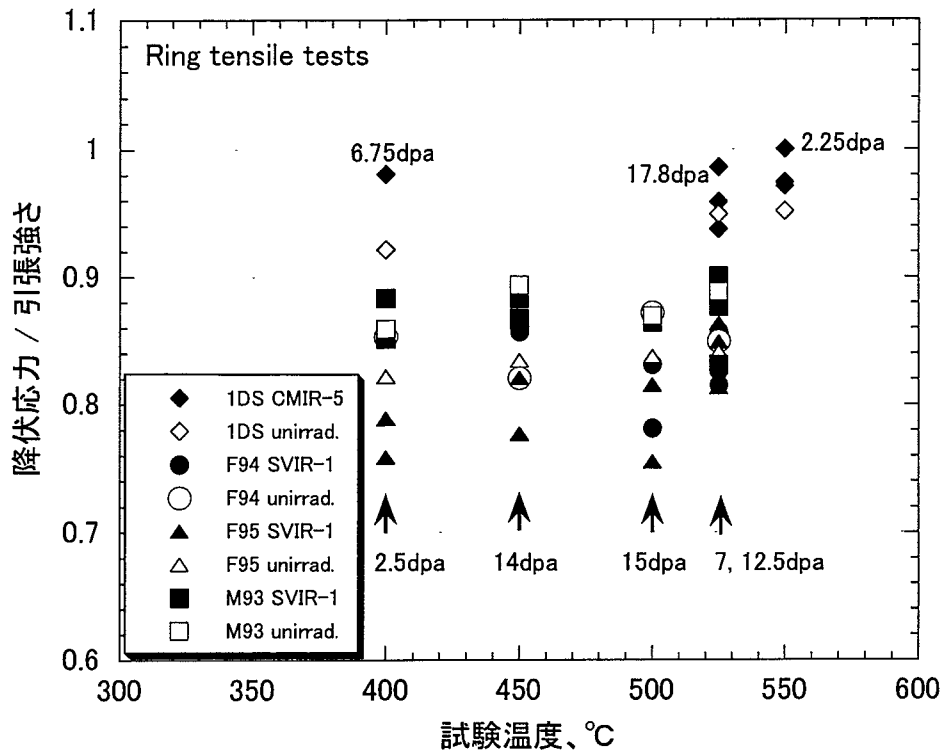


図 6.2-5 降伏応力と引張強さの比と試験温度の関係

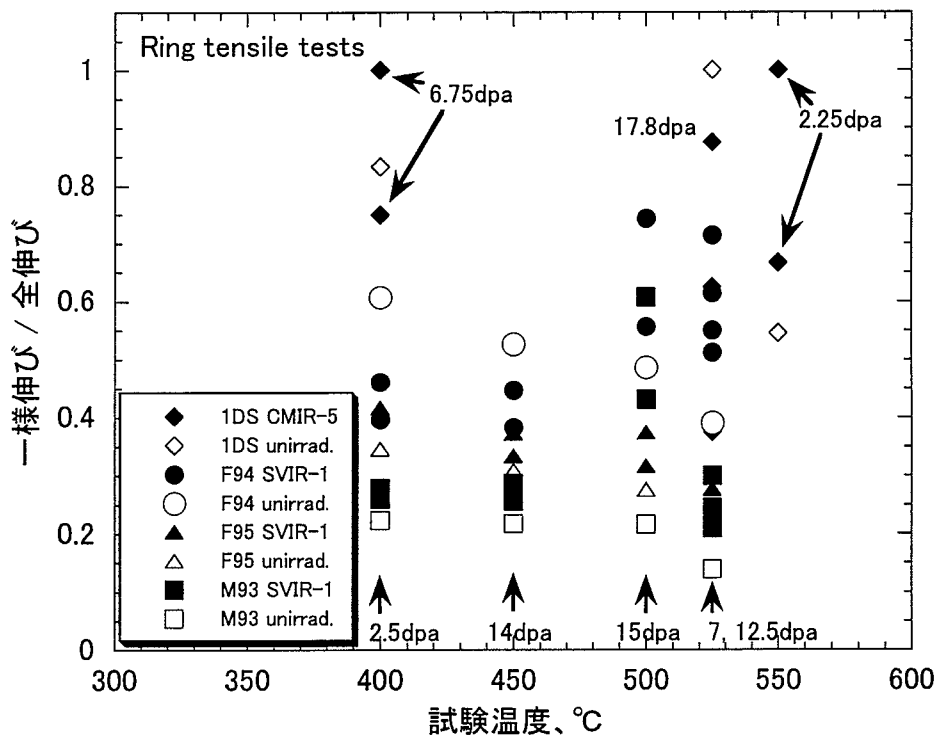
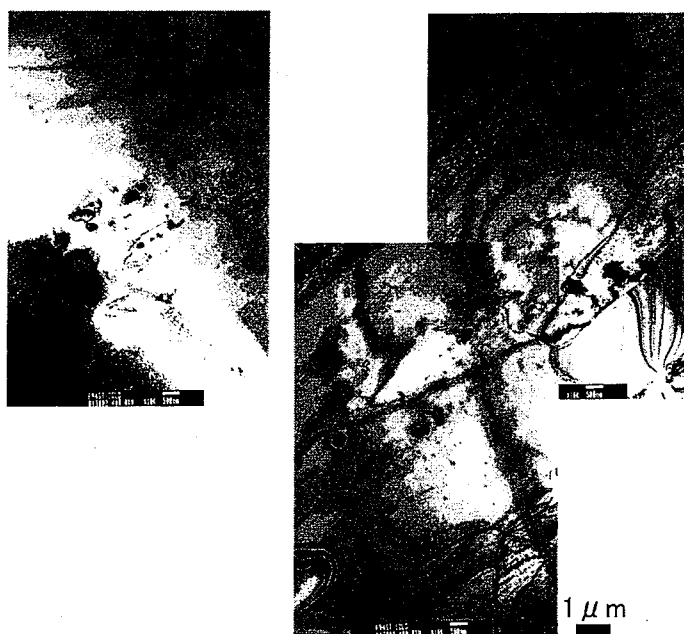


図 6.2-6 一様伸びと全伸びの比と試験温度の関係

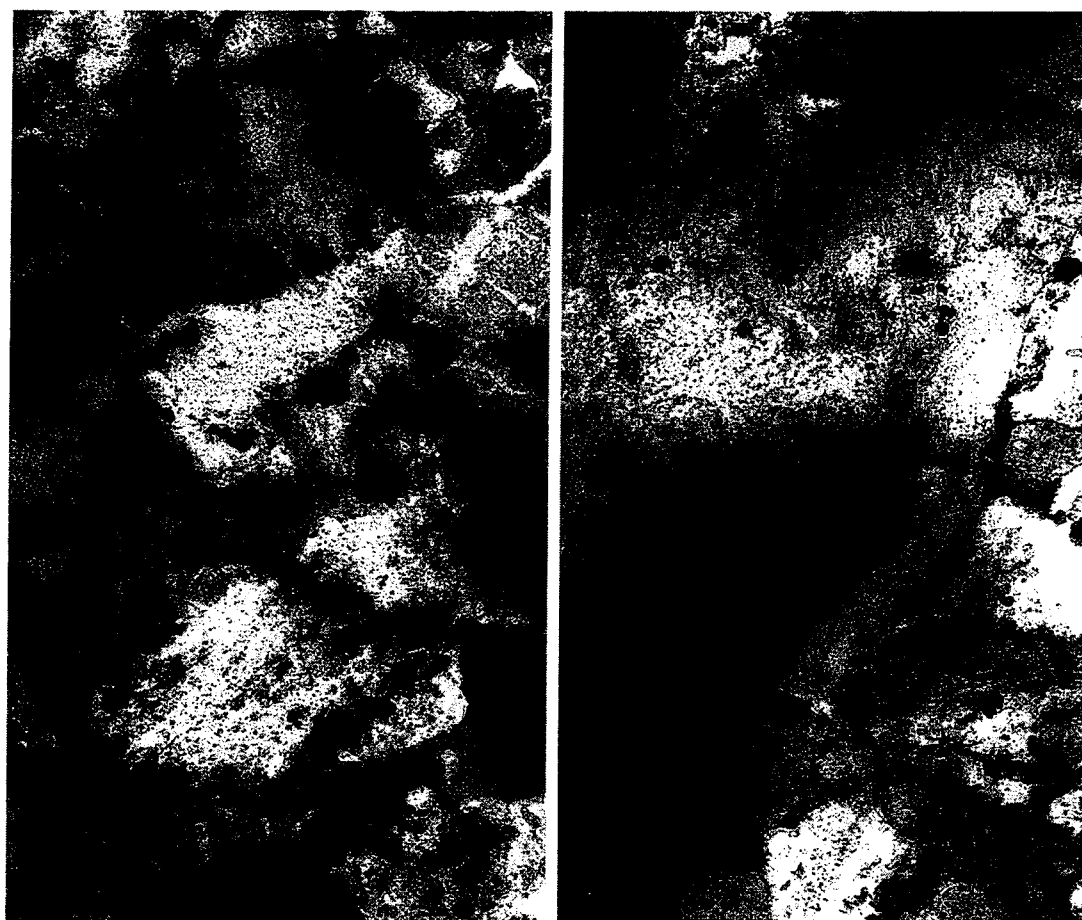


(a) 非照射材



(b) 照射材 497°C、 $3.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$

図 6.3-1 F94 の TEM 組織



(a) 非照射材

(b) 照射材 497°C、 $3.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ 500nm

図 6.3-2 M93 の TEM 組織



図 6.3-3 M93 で見られた分散粒子周囲のアメーバ状組織
(497°C、 $3.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$)