

改良オーステナイト最適化鋼の開発（Ⅲ）  
— 試作被覆管の炉外強度特性評価 —  
(研究報告)

2001年3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

Inquires 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)  
2001

改良オーステナイト最適化鋼の開発(Ⅲ)  
-試作被覆管の炉外強度特性評価-  
(研究報告)

大塚智史\*、上羽智之\*、鶴飼重治\*、水田俊治\*

要旨

改良オーステナイト最適化鋼(以下、14Cr-25Ni鋼)は「もんじゅ」高度化炉心のバックアップ材料として改良オーステナイト鋼(PNC1520)の耐スエリング特性をさらに向上させるために改良を図った材料であり、すでに合金開発は終了している。これまで合金添加元素(Ti, Nb, V, P)を変えた7鋼種の被覆管試作を行ない、炉外特性評価試験を実施してきた。本研究では炉外特性のうち引張特性と高温クリープ特性を評価した。得られた結果は以下の通りである。

1. 試験温度が室温から900°Cにおける14Cr-25Ni鋼の引張特性(0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸び)は、PNC316鋼およびPNC1520鋼とほぼ同等であった。
2. 14Cr-25Ni鋼のクリープ強度はPNC316鋼とPNC1520鋼の中間にあることがわかった。しかし、Ti, Nb, Vの複合添加材は750°Cでの長時間側クリープ強度が顕著に改善されることが判明した。
3. クリープ破断材の組織観察結果より、V添加による長時間側のクリープ強度増加の機構として、(Ti, Nb, V)炭窒化物の微細析出物分散による転位組織の安定化が考えられる。

---

\*)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

Development of 14Cr-25Ni Advanced Austenitic Steels(III)  
- Out of Piles Tensile and Thermal Creep Properties Evaluation -

Satoshi Ohtsuka\*, Tomoyuki Uwaba\*,  
Shigeharu Ukai\* and Shunji Mizuta\*

Abstract

14Cr-25Ni advanced austenitic steels (14Cr-25Ni steel) was developed in order to improve the swelling resistance of modified 15Cr-20Ni base austenitic steels(PNC1520). This steel is planned to be utilized as back-up material for Monju advanced core component. Seven types of cladding tubes with different amounts of alloying elements of Ti, Nb, V and P had been fabricated and the out-of-pile testing of these cladding tubes has been conducted. Among out of piles properties, tensile property and creep property of 14Cr-25Ni steels were evaluated in this study. The results can be summarized as follows.

- (1) Tensile properties (0.2% yield stress, ultimate tensile strength, uniform elongation, ultimate elongation) of 14Cr-25Ni steels were almost equivalent to those of PNC316 steel and PNC1520 steel in the temperature range from room temp. to 900°C.
- (2) The creep strength of 14Cr-25Ni steels was between PNC316 and PNC1520. It was shown that the long term creep strength at 750°C was remarkably improved by the Ti, Nb and V addition.
- (3) It is suspected that the improvement of creep strength of V-added-steel would be caused by stabilization of dislocation microstructure due to finely distributed carbo-nitride [Ti, Nb, V(C, N)] precipitates.

---

\*Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Div.,  
O-arai Engineering Center

## 目次

1. はじめに	1
2. 14Cr-25Ni 鋼の合金設計の考え方と試作被覆管の組成・製造条件	1
3. 炉外強度試験の評価	2
3-1 14Cr-25Ni 鋼の高温引張試験	
3-1-1 試験条件	2
3-1-2 試験結果	2
3-2 14Cr-25Ni 鋼の高温内圧クリープ試験	3
3-2-1 試験条件	3
3-2-2 試験結果	3
4. 破断材の組織観察によるクリープ強度向上の機構の検討	4
4-1 組織観察方法	4
4-2 抽出レプリカ組織観察、EDS および電子線回折の結果	4
4-3 薄膜 TEM 観察(明視野像)結果	6
5. まとめと今後の課題	7
6. 参考文献	7

## 表 リスト

表 2-1 改良オーステナイト最適化鋼(14Cr-25Ni), PNC316 鋼および PNC1520 鋼の化学成分と製造方法 ······	8
表 3-1 14Cr-25Ni 鋼の炉外引張試験結果 ······	9
表 3-2 14Cr-25Ni 鋼のクリープ破断強度データ ······	13
表 4-1 組織観察を行なった試料の試験条件と観察の着眼点 ······	14
表 4-2 抽出レプリカ組織観察における倍率と観察対象 ······	14
表 4-3 7AKV2-11(750°C × 110MPa, 10871hr 中断材)の内圧クリープ 試験後の析出物調査結果 ······	15
表 4-4 7AKV2-2(700°C × 180MPa, 2699.5hr 破断材)の内圧クリープ 試験後の析出物調査結果 ······	15
表 4-5 7AKV4-4(750°C × 160MPa, 427.6hr 破断材)の内圧クリープ 試験後の析出物調査結果 ······	16
表 4-6 7AKS2-5(750°C × 70MPa, 3619.2hr 破断材)の内圧クリープ 試験後の析出物調査結果 ······	16
表 4-7 7AKV 鋼(V 添加鋼)と 7AKS 鋼(V 無添加鋼)のクリープ 破断試験後の組織調査結果 ······	17

## 図 リスト

図 1 サイクル機構におけるオーステナイト系炉心材料の開発の方向 ·····	18
図 3-1 0.2%耐力の試験温度依存性 ······	19
図 3-2 引張強さの試験温度依存性 ······	19
図 3-3 一様伸びの試験温度依存性 ······	20
図 3-4 破断伸びの試験温度依存性 ······	20
図 3-5 0.2%耐力平均値の試験温度依存性 ······	21
図 3-6 引張強さ平均値の試験温度依存性 ······	21

図 3-7 一様伸び平均値の試験温度依存性	22
図 3-8 破断伸び平均値の試験温度依存性	22
図 3-9 14Cr-25Ni 鋼の内圧クリープ試験結果	23
図 4-1 7AKS 鋼と 7AKV 鋼の製品まま抽出レプリカ組織観察結果	24
図 4-2 7AKV2-11 の抽出レプリカ組織観察結果	25
図 4-3 7AKV2-2 の抽出レプリカ組織観察結果	26
図 4-4 7AKV4-4 の抽出レプリカ組織観察結果	27
図 4-5 7AKS2-5 の抽出レプリカ組織観察結果	28
図 4-6 各組織観察試験片における MX 型炭窒化物中のバナジウム(V)濃度	29
図 4-7 7AKV2-11 の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)	30
図 4-8 7AKV2-2 の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)	31
図 4-9 7AKV4-4 の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)	32
図 4-10 7AKS2-5 の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)	33

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)における高速炉用オーステナイト系炉心材料の開発の方向を図1にまとめる。これまで「もんじゅ」用に、SUS316 鋼の規格範囲内で微量添加元素と製造条件を改良して耐スエリング特性の改善を図った PNC316 鋼が開発され、さらに母材の Ni/Cr 比を大きくすることが耐スエリング特性の改善に有効であるとの知見に基づき、「もんじゅ」高度化炉心用に 15Cr-20Ni を母材とする改良オーステナイト鋼(以下、PNC1520 鋼)が開発された。改良オーステナイト最適化鋼(以下、14Cr-25Ni 鋼)は PNC316 鋼および PNC1520 鋼以上の耐スエリング性の改善を図り、「もんじゅ」高度化炉心材料のバックアップ材として中性子照射量が  $30 \times 10^{26} n/m^2 (E > 0.1 MeV)$  レベルまでの適用性を期待して開発された材料である<sup>[1]</sup>。14Cr-25Ni 鋼は母材組成の Ni/Cr 比を PNC1520 鋼以上に高めて 14Cr-25Ni ベースとし、これまでに蓄積してきたオーステナイト系材料の照射データに基づき合金成分と加工・熱処理条件の最適化を図った材料である。

14Cr-25Ni 鋼被覆管の開発では、被覆管の試作を 7 鋼種の合金添加元素を変えた鋼種について行ない、それぞれの鋼種に対して炉外試験として製品まま材の組織観察、合金元素の固溶量測定および加工・熱処理条件検討のための結晶粒度測定を実施した<sup>[2]</sup>。本鋼種の合金開発はすでに終了し、現在設計用データベースの整備のための引張試験、高温内圧クリープ試験およびナトリウム(Na)環境効果試験を実施している。本報告ではこれらの炉外特性評価のうち、引張特性と高温内圧クリープ特性の評価結果および内圧クリープ破断材の組織観察結果について報告する。

## 2. 14Cr-25Ni 鋼の合金設計の考え方と試作被覆管の組成・製造条件

MX 型炭化物やリン化物といった微細な析出物は照射欠陥(空孔、格子間原子)の強いシンクである転位を安定化するだけでなく、析出物と母材の界面が照射欠陥の再結合サイトとなることから、耐スエリング特性の改善のためにはこれら微細析出物を高照射量まで安定に維持することが重要である。

チタン(Ti), ニオブ(Nb), バナジウム(V)といった元素は炭化物生成能の強い元素であるが、これらを複合添加することにより Ti, Nb, V を含んだ MX 型炭化物の核生成が微細化してより安定な炭化物になること、およびボロン(B)とリン(P)は触媒的な働きをするため、添加により MX 型炭化物の生成が容易にな

ることが報告されている<sup>[3]</sup>。また、P, Ti, Nb および V の添加により FeTiP の Ti が Nb に置き換わり、スエリングの発生抑制に大きな効果を有するリン化物が照射安定化することが報告されている<sup>[4]</sup>。これらの知見を基に、安定な MX 型炭化物およびリン化物を形成させて耐スエリング特性を向上させることを目指して、Ti, Nb, V および P を 14Cr-25Ni 鋼に添加した。14Cr-25Ni 鋼 7 鋼種の試作被覆管の化学成分を表 2-1 にまとめた。7AKS は 14Cr-25Ni 鋼の標準材であり、7AKV は標準組成に V を添加して MC 炭化物およびリン化物の安定化を目指した鋼である。8AK1 と 8AK2 に関しては、標準組成に対して P 添加量を増加させて、リン化物の析出によるスエリングの抑制を目指した鋼となっている。

溶体化処理に関しては、多量に添加した Ti, Nb, V および P を十分固溶させるために、14Cr-25Ni 鋼の溶体化処理温度を従来鋼(PNC1520, PNC316)よりも高めの 1150°C 程度に設定している。また、転位は照射欠陥の有効なシンクであり、その密度を高めることは耐スエリング特性の改善に有効であるので、クリープ強度が顕著に低下しない範囲で転位密度を増加させるために冷間加工度を従来の 20%程度から 23%に増やしている。

### 3. 炉外強度試験の評価

#### 3-1 14Cr-25Ni 鋼の高温引張試験

##### 3-1-1 試験条件

試験条件は以下のようになっている。

- ・引張速度 (JIS0567 に準拠)
  - 0.5%ひずみまで : 0.3%/min (0.005%/s)
  - 0.5%～破断まで : 7.5%/min (0.125%/s)
- ・試験温度 : 室温～900°C
- ・試験雰囲気 : 大気
- ・測定項目 : 0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸び

##### 3-1-2 試験結果

14Cr-25Ni 鋼の引張試験データを表 3-1 を示す。また、図 3-1～3-4 には 14Cr-25Ni 鋼の合金添加量の異なる各鋼種の引張特性の試験温度依存性を示しているが、いずれの鋼種も同様な値を示しており、鋼種間で顕著な相違は認め

られない。図 3-5～3-8 に 14Cr-25Ni 鋼の各鋼種の引張特性の平均データを比較のために PNC316 鋼と PNC1520 鋼の平均データとともに示す。強度(0.2%耐力、引張強さ)については、これらの鋼種の中で顕著な相違はないが、14Cr-25Ni 鋼の強度は他の 2 鋼種に比べて若干高い傾向がある。伸び値(一様伸び、破断伸び)に関しては、ほぼ他の 2 鋼種と同等となっている。一様伸びの温度依存性(図 3-7)を見ると 500～600°C 近傍で一様伸びのピークが観察されるが、これは 300°C 近傍および 700°C 以上の温度での一様伸びの低下によるものである。300°C 近傍での全鋼種の伸びの低下は材料中の炭素原子が転位を固着することにより生じていると考えられ、700°C 以上では転位の回復により強度が減少していくのが生じやすくなつたためであると考えられる。

### 3-2 14Cr-25Ni 鋼の高温内圧クリープ試験

#### 3-2-1 試験条件

- ・試験片寸法
  - 管の寸法 : 8.5mm φ × 40mm
  - 管の肉厚 : 0.5mmt
- ・試験温度 : 650、700、750°C
- ・試験片内圧 : 40～400 MPa
- ・試験雰囲気 : アルゴン(Ar)または大気
- ・圧力負荷方法 : 内圧封入型および圧力導入型

#### 3-2-2 試験結果

表 3-2 は 14Cr-25Ni 鋼の高温内圧クリープ破断試験データの一覧である。14Cr-25Ni 鋼のデータを PNC316 鋼および PNC1520 鋼と比較して図 3-9 にまとめた。図中のプロット点は 14Cr-25Ni 鋼の各鋼種のクリープ破断データを示している。破線の曲線は試験温度が 650°C、700°C および 750°C での PNC316 鋼と PNC1520 鋼の内圧クリープ破断式(ノミナル式)による曲線であり、太線の曲線は V 添加鋼(7AKV)のデータの傾向を分かりやすくするためにデータ点に合わせてひいた曲線である。14Cr-25Ni 鋼のクリープ強度は PNC316 鋼よりは若干高く、PNC1520 鋼に比べると若干低い傾向が見られる。また、試験温度 750°C で試験時間が 10000 時間近傍において、標準鋼(7AKS)に V を添加した 7AKV および P の添加量を増量した 8AK1 のクリープ強度が他の鋼種に比

べて高く、V の添加または P の添加量の增量により長時間側クリープ強度が顕著に改善されていることが認められる。

#### 4. 破断材の組織観察によるクリープ強度向上の機構の検討

V 添加による長時間側のクリープ強度向上の機構を検討するために、V 添加鋼と無添加鋼のクリープ破断材の組織観察を行なった。

##### 4-1 組織観察方法

V 添加鋼である 7AKV と標準鋼である 7AKS を試験片として用いた。それぞれの試料の化学成分と製造履歴を表 2-1 に示す。

表 4-1 には組織観察試料として用いたクリープ試験片の試験条件と組織観察を行なうにあたっての着眼点をまとめた。7AKV2-11(750°C, 10871hr)は長時間側でのデータであり V 添加によりクリープ強度が向上している試料であることから選択した。また、7AKV2-2(700°C, 2699.5hr)、7AKV4-4(750°C, 427.6hr)および 7AKS2-5(750°C, 3619.2hr)はそれぞれ試験温度、試験時間、鋼種の違いの影響を検討するために選択した。

観察項目としては、析出物の観察・同定のため、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた抽出レプリカ組織観察、電子線回折解析および EDS 解析を行ない、転位を含めた組織の観察のため薄膜 TEM 観察を行なった。抽出レプリカ組織観察では、2100 倍で粒界の析出物、10000 倍で粒内の析出物、さらに 21000 倍、100000 倍で粒内の微細析出物の観察を行なった(表 4-2)。管肉厚方向で組織が異なる可能性があるため、組織観察位置は管外表層部、肉厚中央部および管内表層部の 3 点とした。

##### 4-2 抽出レプリカの組織観察、EDS 分析および電子線回折の結果

図 4-1 は製品まま(23% CW)の 7AKS 鋼と 7AKV 鋼のレプリカ組織である。粒界析出物は観察されず、粒内に角状・粒状の析出物が点在しているのが観察される。EDS 分析と電子線回折より、これらの析出物は Ti, Nb の MX 型炭窒化物であることがわかった(V は全量固溶している)。

図 4-2 は 7AKV2-11(750°C, 10871hr)の管外表層部と肉厚中心部のレプリカ写真である。管外表層部では粒界の塊状の析出物が多量に形成されており、粒内にはそれに加えて角状・針状析出物および高密度の微細析出物が観察される。

電子線回折と EDS 分析より、同図内に示してあるように塊状析出物は G 相 ( $Ni_{16}Cr_6Si_7$ )、角状・針状析出物は Ti, Nb, V の複合炭窒化物であることがわかった。微細析出物に関しては、寸法が小さすぎて同定することはできなかった。肉厚中心部の粒界でも、管外層部と同様に塊状析出物が観察されたが、その量は少量であった。また、粒内には角状析出物と微細析出物のみ観察された。電子線回折と EDS 分析の結果、塊状析出物は  $\chi$  相( $Fe_{18}Cr_6Mo_5$ )、角状析出物は Ti, Nb, V の複合炭窒化物であることがわかったが、微細析出物に関しては小さすぎて同定することができなかった。

図 4-3 は 7AKV2-2(700°C, 2699.5hr)の管外表層部、肉厚中心部および管内表層部のレプリカ写真である。いずれの領域にも、粒界に塊状、棒状の析出物が形成しており、粒内にはそれらに加えて針状析出物、粒状・角状析出物および微細析出物が観察される。微細析出物の密度に関しては 7AKV2-11(750°C, 10871hr)と異なり低かった。電子線回折と EDS 分析より、同図内に示してあるように塊状・棒状析出物は  $\chi$  相、ラーベス層( $Fe_2Mo$ )、G 相などであり、針状析出物は  $FeNi_3P_2$  または  $Ni_3Ti$ 、粒状・角状の析出物は Ti と Nb の MX 型炭窒化物であることがわかった。微細析出物に関しては寸法が数 nm と小さいことから同定不能であった。

図 4-4 は 7AKV4-4(750°C, 427.6hr)の管外表層部、肉厚中心部および管内表層部の抽出レプリカ組織である。7AKV4-4(750°C, 427.6hr)でも 7AKV2-2(700°C, 2699.5hr)と同様に粒界に塊状、棒状の析出物、粒内にはこれらに加えて、球状・角状の未固溶の Ti, Nb の炭窒化物、針状の析出物と微細析出物が観察される。7AKV2-2(700°C, 2699.5hr)との析出状況の顕著な相違は、管内面において粒内の微細析出物が 7AKV4-4(750°C, 427.6hr)の方がより高密度に形成している点である。電子線回折と EDS 分析の結果、この微細析出物は組成が Ti(50%)-Nb(5%)-V(15%)の MX 型炭窒化物であることがわかった。

図 4-5 は 7AKS2-5(750°C, 3619.2hr)の管外表面部および肉厚中心部の抽出レプリカ組織である。粒界には塊状の析出物、粒内には加えて粒状・角状の析出物および微細析出物が観察される。微細析出物の密度は 7AKV2-2(700°C, 2699.5hr)同様低かった。以上述べた抽出レプリカ法による析出物の詳細な分析結果を表 4-3～4-6 にまとめた。

表 4-7 のクリープ破断試験後試料における析出物観察結果(寸法、量)に関し、7AKV2-11(750°C, 10871hr)と 7AKS2-5(750°C, 3619.2hr)を比較すると、V

添加によって析出物が微細化している傾向が、7AKV4-4(750℃,427.6hr)と7AKV2-2(700℃,2699.5hr)を比較すると、試験が高温になることにより微細析出物の密度が増加している傾向が観察される。また、7AKV4-4(750℃,427.6hr)と7AKV2-11(750℃,10871hr)の比較により試験時間の影響の検討を試みたが、両試料とともに寸法5nm程度の微細析出物が高密度に形成されており、明確な微細析出物の密度および寸法の試験時間依存性は観察されなかった。

各組織観察試料におけるMX型炭窒化物中のV濃度を図4-6にまとめた。7AKV4-4(750℃,427.6hr)と7AKV2-11(750℃,10871hr)に観察された高密度の微細析出物(寸法:約5nm)や針状析出物といった寸法の小さな析出物中のV濃度は寸法の比較的大きな粒状・角状析出物(寸法:約数100nm)に比べて高いこと、および7AKV4-4(750℃,427.6hr)と7AKV2-11(750℃,10871hr)との比較からクリープ試験の長時間化により微細析出物中のV濃度が増加していることがわかる。これらのことから、MX型炭窒化物中のV濃度の増加がMX型炭窒化物の安定化・高密度化に寄与している可能性が考えられる。

#### 4-3 薄膜TEM観察(明視野像)結果

肉厚中央部・管外層部の明視野組織観察を行なったところ、いずれの試料でも転位組織の保たれている領域と転位組織が回復し、一部再結晶が生じている領域が観察された。図4-7～4-10にそれぞれの組織を示す。転位組織の残っている領域にはMX型微細析出物が点在しているが、転位の回復した領域では微細析出物は観察されず、粗大化した寸法数10～数100nm程度の析出物が観察される傾向が見られる。これより、微細析出物が分散していると転位の移動を妨げることにより転位組織が安定化されるが、粗大化してしまうと転位組織の回復が生じると考えられる。すなわち、V添加鋼でクリープ強度が向上する機構として、高密度に形成したMX型微細析出物による転位組織の安定化の可能性が考えられる。

顕著なクリープ強度の向上を示したV添加鋼(7AKV2-11)の試験は大気雰囲気で行なわれていることから、数nm未満のTEMでも観察不可能な寸法の微細なバナジウム酸化物の分散による組織の安定化により強化されている可能性も考えられる。この可能性について検討するため、現在試験雰囲気を大気からアルゴン(Ar)に変えて7AKV2-11と同じ試験条件で試験を実施中である。

## 5. まとめと今後の課題

耐スエリング性能の向上を目指して開発した 14Cr-25Ni 鋼の炉外強度特性評価の一環として、試作被覆管 7 鋼種の引張強度特性評価と高温内圧クリープ強度評価を行なった。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 試験温度が室温～900°Cにおける 14Cr-25Ni 鋼の引張特性(0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸び)は、PNC316 鋼および PNC1520 鋼とほぼ同等であった。
- (2) 14Cr-25Ni 鋼のクリープ強度は PNC316 鋼に比べて高く、PNC1520 鋼に比べると低い傾向があった。また、試験温度が 750°Cの場合には、V 添加または P 添加量の增量により長時間側のクリープ強度が顕著に改善されることがわかった。
- (3) V 添加による長時間側のクリープ強度増加の機構として、高密度の微細析出物の形成による転位組織の安定化の可能性が考えられる。
- (4) 今後、「常陽」の MK-III 炉心において材料照射試験を行ない、照射特性データを取得する予定である。

## 6. 参考文献

- [1]鵜飼他、“14Cr-25Ni 改良オーステナイト鋼の開発” JNC ZN9400 99-002
- [2]上羽他、“改良オーステナイト最適化鋼の開発(II)” JNC TN9400 2000-028
- [3] P. J. Maziasz, JOM, July 1989, p.14-20
- [4] P. Dubuisson et al, ASTM STP 1125, 1992, p.995-1014

表2-1 改良オーステナイト最適化鋼(14Cr-25Ni), PNC316鋼およびPNC1520鋼の化学成分と製造方法

鋼種		化学成分(wt%)																	最終溶体化処理温度 (°C)	冷間加工度 (%)	Q値				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Cu	Ti	V	Nb	Ta	Al	O	Zr					
PNC316	60MS	0.057	0.79	1.87	0.026	0.002	13.73	16.35	2.55	<0.01	0.0038	0.003	0.01	0.08	<0.01	0.095(Nb+Ta)	<0.002(As)	0.016	0.0017	<0.01	1095°C×1min	21	-		
	規格	0.04	0.20	1.40	0.015	~	13.00	16.00	2.00	~	0.002	~	~	~	0.05	~	0.05	~	0.030	≤0.050	≤0.0040				
		~	~	~	~	≤0.010	~	~	~	≤0.05	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.1	≤0.030	≤0.050	≤0.0040	≤0.10				
PNC1520	60AK2	0.057	0.41	1.72	0.026	0.005	19.66	14.89	2.55	0.01	0.0044	0.002	0.01	0.28	<0.01	0.090	0.015	0.0010	<0.01	1125°C×2min	18	-			
	62AK	0.059	0.41	1.88	0.029	0.001	19.65	15.15	2.51	<0.01	0.0025	0.004	<0.01	0.22	0.01	0.11	<0.01	0.038	0.0013	<0.01	1120°C×2min	17	-		
	62AS	0.050	0.75	1.73	0.025	0.005	19.80	15.15	2.40	0.04	0.0030	0.006	0.01	0.18	<0.01	0.10	<0.001	0.033	0.0019	<0.01	1100°C×1min	19	-		
	規格	0.04	0.60	1.40	0.015	~	19.50	13.50	2.00	~	0.0020	~	≤0.05	~	≤0.15	~	0.05	~	≤0.050	≤0.050	≤0.0040	≤0.10	1040°C以上	20±3	-
		~	~	~	~	≤0.010	~	~	~	≤0.05	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.15	≤0.050	≤0.050	≤0.0040	≤0.10	1095°C×1min	21	-	
14Cr-25Ni鋼	7AKS	0.08	0.83	1.84	0.022	0.003	25.08	13.96	2.35	<0.01	0.0024	0.006	<0.01	0.31	0.02	0.19	<0.01	0.03	0.0007	<0.01					
	規格	0.06	0.60	1.80	0.015	~	24.50	13.50	2.00	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.17	~	≤0.05	≤0.05	≤0.10				
		~	~	~	~	≤0.010	~	~	~	≤0.05	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.23	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10				
	7AKV	0.081	0.84	1.85	0.023	0.002	25.34	14.10	2.35	~	0.0023	0.006	<0.01	0.30	0.29	0.20	<0.01	0.024	0.0004	<0.01	1140°C×2min	23	1		
	規格	0.06	0.60	1.80	0.015	~	24.50	13.50	2.00	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.25	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10				
		~	~	~	~	≤0.010	~	~	~	≤0.05	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.35	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10				
	8AK1	0.084	0.86	1.88	0.048	0.003	25.14	13.88	2.33	<0.01	0.0042	0.0055	<0.01	0.30	<0.01	0.21	<0.01	0.017	0.0004	<0.01	1140°C×2min	23	1		
	規格	0.06	0.60	1.80	0.035	~	24.5	13.5	2.0	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.25	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10				
		~	~	~	~	0.10	1.00	2.20	0.065	~	0.006	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.35	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10			
	8AK2	0.087	0.84	1.83	0.083	0.003	25.16	14.02	2.32	<0.01	0.043	0.0061	<0.01	0.35	<0.01	0.21	<0.01	0.025	0.0003	<0.01	1140°C×2min	23	1		
	規格	0.06	0.60	1.80	0.065	~	24.5	13.5	2.0	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.3	~	≤0.05	≤0.050	≤0.040	≤0.10			
		~	~	~	~	0.10	1.00	2.20	0.090	~	0.006	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.4	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10			
8ASN	0.07	0.78	2.11	0.027	<0.01	25.40	14.30	2.2	0.01	0.003	0.001	0.01	0.19	<0.1	0.31	<0.01	0.026	0.0018	<0.01	1130°C×1min	23	1			
	規格	0.05	0.60	1.60	0.015	~	24.50	13.50	2.00	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.15	~	≤0.050	≤0.050	≤0.040	≤0.10			
		~	~	~	~	0.09	1.00	2.40	0.04	~	0.006	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.25	~	≤0.050	≤0.050	≤0.10			
	8AST	0.1	0.79	2.26	0.027	<0.01	25.40	14.00	2.4	<0.01	0.003	0.001	0.01	0.44	<0.1	0.1	<0.01	0.027	0.0007	<0.01	1150°C×1.5min	23	1		
	規格	0.08	0.60	1.60	0.015	~	24.50	13.50	2.00	~	0.002	~	≤0.05	~	≤0.20	~	0.40	~	≤0.050	≤0.050	≤0.040	≤0.10			
9AKN	0.088	0.82	1.92	0.027	0.004	24.77	13.66	2.19	0.01	0.0046	0.0034	0.01	0.46	<0.01	0.10	<0.01	0.011	0.0004	<0.01	1130°C×2min	23	1			
	規格	~	~	~	~	0.11	1.00	2.20	0.040	~	0.006	~	≤0.010	≤0.20	~	≤0.20	~	0.50	~	≤0.050	≤0.050	≤0.040	≤0.10		

表3-1 14Cr-25Ni鋼の炉外引張試験結果(1)

鋼種	試験温度(°C)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	一様伸び(%)	破断伸び(%)	破断位置
7AKV	25	735	802	-	11.0	A
	25	736	796	-	11.0	A
	25	740	796	-	-	
	25	728	803	6.78	10.8	A
	25	716	801	6	11.6	A
8AST	25	760	812	-	12.0	A
	25	761	820	-	12.0	A
	25	744	808	5.52	11	A
	25	742	809	6.57	12	A
8ASN	25	734	785	-	13.0	A
	25	734	786	-	13.0	A
	25	748	798	5.9	12.5	A
9AKN	25	693	798	4.4	10.6	A
	25	683	799	6.5	12.2	A
平均値	25	724	802	6.0	11.5	
7AKS	200	701	748	-	3.0	B
	200	695	734	-	3.2	B
7AKV	200	690	730	-	4.4	B
	200	678	734	-	3.8	A*
8AST	200	718	744	1.2	4.4	A(2段)
	200	706	742	1.4	4.4	A
8ASN	200	686	700	0.4	4.6	A*
	200	672	704	0.4	4.2	A*
9AKN	200	645	725	0.8	2.6	B
	200	641	727	0.7	2.9	B
平均値	200	683	729	0.8	3.8	
7AKS	300	682	721	-	2.7	A*
	300	661	715	-	4.8	A*
	300	670	715	1.8	-	*
7AKV	300	669	720	-	2.7	A*
	300	679	720	-	3.7	A
	300	672	716	1.7	4.0	A
8AST	300	678	720	1.0	2.4	C
	300	667	730	1.5	8.2	B(2段)
8ASN	300	666	698	2.4	4.5	B*
	300	648	702	2.1	5.0	B*
8AK1	300	685	727	1.2	3.3	A
8AK2	300	675	725	1.3	-	*
9AKN	300	633	715	0.8	2.9	B
	300	637	713	0.8	3.0	B
平均値	300	666	717	1.5	3.9	
7AKS	400	649	716	-	5.7	A,B*
	400	643	703	3.5	-	*
7AKV	400	661	716	-	5.3	A*

	400	646	714	-	4.4	A
	400	640	702	5.2	-	*
8AST	400	645	719	3.6	6.0	A
	400	642	716	3.5	5.1	B
8ASN	400	628	685	3.8	5.1	B
	400	617	688	3.5	4.4	C
8AK1	400	648	718	3.7	-	*
8AK2	400	661	718	3.0	-	*
9AKN	400	607	701	4.0	4.2	B
	400	617	697	3.8	3.9	B
平均値	400	639	707	3.8	4.9	

(\*) スパイラル破断

表3-1 14Cr-25Ni鋼の炉外引張試験結果(2)

鋼種	試験温度(°C)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	一様伸び(%)	破断伸び(%)	破断位置
7AKS	450	627	694	4.4	-	*
7AKV	450	627	695	4.5	-	*
8AK1	450	642	697	3.1	-	*
8AK2	450	649	709	3.1	-	*
平均値	450	636	699	3.8	-	
7AKS	500	625	711	-	5.0	A*
	500	625	702	-	6.4	A*
	500	614	691	4.8	-	*
7AKV	500	619	690	-	6.4	A,B*
	500	604	706	-	6.7	A,B*
	500	608	689	4.9	-	*
8AST	500	634	724	5.5	11.2	B(2段)
	500	619	722	6.0	9.8	A(2段)
8ASN	500	597	680	4.9	9.4	A*(2段)
	500	598	668	5.1	6.1	A
	500	597	680	4.9	9.4	A
8AK1	500	619	694	4.3	-	*
8AK2	500	621	698	4.1	-	*
9AKN	500	588	678	3.3	5.5	A
	500	588	675	4.3	5.8	A
平均値	500	610	694	4.7	7.4	
7AKS	550	594	685	-	6.3	A,B*
	550	580	676	-	5.6	A,B*
	550	589	675	5.6	-	*
7AKV	550	597	693	-	6.9	A*
	550	596	683	-	6.5	A*
	550	583	674	5.8	-	*
8AK1	550	593	681	4.6	-	*
8AK2	550	593	686	5.2	-	*
平均値	550	591	682	5.3	6.3	
7AKS	600	571	671	-	8.5	A*
	600	569	668	-	7.5	A*
	600	548	650	4.8	-	*
7AKV	600	533	653	-	8.0	A,B*

	600 600	571 558	673 649	- 5.4	8.1 -	A* *
8AST	600	586	668	5.8	9.0	A
	600	565	668	5.3	7.0	C
8ASN	600	527	603	4.4	6.6	A
	600	531	615	5.0	9.6	A(2段)
8AK1	600	555	652	4.3	-	*
8AK2	600	567	667	4.7	-	*
9AKN	600	535	621	3.8	7.2	A
	600	533	623	4.2	9.0	A
平均値	600	554	649	4.8	8.1	
7AKS	650	540	604	-	10.0	A*
	650	540	604	-	10.0	A*
	650	511	584	2.1	13.0	B
7AKV	650	531	602	-	10.0	A*
	650	532	596	-	10.0	A*
	650	517	585	2.7	16.4	B
8AK1	650	519	596	2.4	11.5	B
8AK2	650	543	620	3.4	14.3	B
9AKN	650	490	555	0.9	6.9	A
	650	475	528	1.0	7.5	A
平均値	650	520	587	2.1	11.0	

(\*) スパイラル破断

表3-1 14Cr-25Ni鋼の炉外引張試験結果(3)

鋼種	試験温度(°C)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	一様伸び(%)	破断伸び(%)	破断位置
7AKS	675	475	536	1.4	20.4	B
7AKV	675	476	539	1.6	20.4	B
8AST	675	494	567	-	18.0	B
	675	483	558	-	21.0	A
8ASN	675	449	519	-	19.0	A
	675	467	525	-	13.0	B
8AK1	675	490	555	2.0	21.7	B
8AK2	675	510	579	2.4	15.7	B
9AKN	675	487	530	-	11.0	B
	675	496	534	-	11.0	B
平均値	675	483	544	1.9	17.1	
7AKS	700	477	532	-	15.5	A
	700	468	547	-	27.4	A
	700	441	500	0.6	26.2	B
7AKV	700	496	552	-	16.0	A
	700	472	548	-	12.5	A*
	700	448	502	0.4	26.0	B
8AST	700	439	469	0.8	13.4	A
	700	457	484	0.7	11.6	A*
8ASN	700	431	446	0.7	12.8	A
	700	415	429	0.8	10.8	A
8AK1	700	442	508	0.6	29.4	B
8AK2	700	464	532	1.0	16.2	B

9AKN	700 700	412 421	465 470	1.0 1.0	8.3 9.2	A A
平均値	700	449	499	0.8	16.8	
7AKS	750	387	445	-	23.8	A
	750	391	454	-	21.2	A
	750	377	433	0.5	26.2	B(2段)
7AKV	750	400	463	-	22.2	A
	750	396	458	-	22.4	A
	750	380	428	0.6	23.0	A
8AK1	750	370	433	0.5	20.4	A(2段)
8AK2	750	403	465	0.7	17.9	B
9AKN	750	365	409	1.0	10.7	A
	750	359	404	1.0	10.1	A
平均値	750	383	439	0.7	19.8	
7AKS	800	341	390	-	28.6	A
	800	334	396	-	21.6	A
	800	306	353	0.4	28.1	B(2段)
7AKV	800	332	363	-	23.5	A
	800	333	373	-	23.8	A
	800	309	356	0.4	24.6	B(2段)
8AST	800	303	313	0.4	12.2	A
	800	316	323	0.5	14.2	A
8ASN	800	293	308	0.4	13.7	B
	800	291	296	0.4	14.8	A
8AK1	800	298	349	0.4	17.9	B(2段)
8AK2	800	277	332	0.4	23.8	A(2段)
9AKN	800	283	316	1.3	13.5	A
	800	292	329	1.1	11.4	A
平均値	800	308	343	0.6	19.4	

(\*) スパイラル破断

表3-1 14Cr-25Ni鋼の炉外引張試験結果(4)

鋼種	試験温度(°C)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	一様伸び(%)	破断伸び(%)	破断位置
7AKS	850	240	285	0.4	22.2	B(2段)
7AKV	850	237	283	0.6	24.1	B(2段)
8AK1	850	212	263	0.4	35.5	B(2段)
8AK2	850	210	262	0.4	38.9	B(2段)
平均値	850	225	273	0.5	30.2	
7AKS	900	125	169	0.6	30.5	B(2段)
7AKV	900	119	163	0.6	31.4	B(2段)
8AST	900	174	183	0.4	15.9	A
	900	184	191	0.4	4.8	C
8ASN	900	171	177	0.4	11.3	A
	900	186	190	0.4	11.8	A
8AK1	900	74	108	2.7	74.4	B(2段)
8AK2	900	89	130	1.2	41.1	B
9AKN	900	173	215	1.3	18.9	A
	900	174	215	1.3	16.3	A
平均値	900	147	174	0.9	25.6	

(\*) スパイラル破断

表3-2 14Cr-25Ni鋼のクリープ破断強度データ

## ●圧力導入型試験データ

鋼種	試験温度 (°C)	フープ応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験時間 (hr)
7AKS	650	400	95.3	
	650	360	208.5	
	650	300	2701.4	
	650	250	3348.9	
	700	350	64.4	
	700	260	560.3	
	700	280	383.9	
	700	240	1059.1	
	700	340	126.6	
	700	200	1036.2	
	700	170	3021.6	
	750	230	94	
	750	160	422.5	
	750	120	980.7	
	750	95	2094.5	
	750	70	3619.2	
	800	160	30.4	
	800	120	136.4	
	800	90	86.3	
	800	80	266.9	
	800	75	244.2	
	800	60	680.2	
7AKV	650	400	201.7	
	650	360	671.7	
	650	300	1573.9	
	650	260	4617.4	
	700	340	138.5	
	700	350	125.6	
	700	260	645.3	
	700	280	406.5	
	700	240	1075.1	
	700	210	1442.4	
	700	180	2699.5	
	750	230	130.5	
	750	160	427.6	
	750	120	試験中	23621
	750	100	中止 (10871)	
	750	130	試験中	13538
	800	160	65.5	
	800	120	100.6	
	800	90	70.8	
	800	75	80.7	
	800	65	210.6	
	800	50	618.9	
	800	40	1249.5	

鋼種	試験温度 (°C)	フープ応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験時間 (hr)
8AK1	650	400	197.1	
	650	360	501.2	
	650	300	1520.5	
	700	340	142.3	
	700	260	456.2	
	750	230	119.9	
	750	160	288.9	
	750	90	試験中	16537
	800	160	43.6	
	800	120	42.8	
8AK2	650	400	166.5	
	650	360	723.3	
	700	340	150.5	
	700	260	508.2	
	700	180	1900	
	700	150	5164.7	
	750	230	128.6	
	750	160	272.8	
	800	160	66.5	
	800	120	122.8	

## ●内圧封入型データ

鋼種	試験温度 (°C)	フープ応力 (MPa)	破断時間 (hr)	試験時間 (hr)
7AKS	650	300	3572.4	
	650	250	試験中	7800
	700	200	2761.1	
	700	170	4740.2	
	750	120	1234.8	
	750	95	1863	
7AKV	750	140	762.7	
8AK1	650	300	3318.2	
	650	260	6354.2	
	700	170	4751.9	
	700	140	試験中	7800
	750	100	2345.9	
	750	90	2869.4	
8AK2	650	300	3141.1	
	650	260	7773.4	
	700	170	5937	
	700	140	試験中	7800
	750	100	3444.4	
	750	90	3902.4	

表4-1 組織観察を行なった試料の試験条件と観察の着眼点

	破断試験片	試験温度 (°C)	内圧 (MPa)	破断時間 (hr)	着眼点
V添加鋼	7AKV2-2	700	180	2699.5	温度の違い
	7AKV4-4	750	160	427.6	時間の違い
	7AKV2-11	750	100	10871	
V無添加鋼	7AKS2-5	750	70	3619.2	鋼種の違い

表4-2 抽出レプリカ組織観察における倍率と観察対象

倍率	観察対象
× 2100	粒界の析出物
× 10000	粒内の析出物
× 21000, × 100000	粒内の微細析出物

表4-3 7AKV2-11(750°C × 110MPa, 10871hr 中断材)の内圧クリープ試験後の析出物調査結果

試料	観察位置	析出物の形状		同定された析出物	析出物の元素分析結果(at%)							
		粒界	塊状		Cr	Fe	Ni	Mo	Nb	Ti	V	Si
7AKV2-11 [750°C × 110MPa, 10871hr 中断材]	管外層部	粒界	塊状	G相	40	2.4	39	7.2	0.91	0.48	2.7	3.8
			塊状	G相	36	3.7	36	8.7	1.3	1.1	5.0	8.7
		粒内	角状	Ti, Nb, V(C, N)	4.7	1.7	3.2	9.4	19	57	5.0	0.090
			針状	Ti, Nb, V(C, N)	14	3.6	7.9	5.6	4.7	39	22	2.4
			微小粒状	TiN	17	10	19	4.6	3.4	25	20	0.50
	肉厚中央部	粒界	塊状	$\chi$ 相	12	9.1	35	24	4.4	4.7	3.8	7.0
			塊状	$\chi$ 相	13	40	15	20	5.4	0.53	0.48	5.5
		粒内	葉状	Ti, Nb, V(C, N)	5.1	1.8	3.5	4.9	5.1	61	15	3.6
			角状	Ti, Nb, V(C, N)	2.3	1.5	2.7	8.1	11	69	4.8	0.73
			微小粒状	Ti, Nb, V(C, N)	7.3	3.3	6.8	4.3	2.8	55	20	0.17

表4-4 7AKV2-2 (700°C × 180MPa, 2699.5 破断材)の内圧クリープ試験後の析出物調査結果

試料	観察位置	析出物の形状		同定された析出物	析出物の元素分析結果(at%)							
					Cr	Fe	Ni	Mo	Nb	Ti	V	Si
7AKV2-2 [700°C × 180 MPa, 2699.5 hr破断材]	管外層部	粒界	塊状	LAVES相または $\chi$ 相	12	42	19	17	3.1	3.1	0.6	1.7
			塊状	LAVES相	12	38	16	20	5.4	1.0	0.4	3.1
		粒内	塊状	G相	9.4	8.5	41	19	4.4	8.0	2.3	7.6
			粒状	Ti, Nbの複合炭窒化物	2.0	2.0	1.9	7	23	62	1.7	0
			針状	FeNi <sub>3</sub> P <sub>2</sub> , Ni <sub>3</sub> Ti	12	29	20	5	6.3	26	2.2	0.1
		粒状	Ti, Nbの複合炭窒化物	0.9	1.4	0.7	11	20	65	0.7	0	-
			微小粒状	同定不能	-	-	-	-	-	-	-	-
	肉厚中央部	粒界	塊状	LAVES相または $\chi$ 相	14	35	15	21	5.5	1.8	2.4	4.6
			塊状	LAVES相または $\chi$ 相	11	39	16	24	1.9	1.4	1.2	4.6
		粒内	塊状	$\chi$ 相またはLAVES相	12	38	17	20	4.1	1.1	1.5	5.7
			粒状	Ti, Nbの複合炭窒化物	1.2	1.8	3.1	16	17	57	3.3	0.2
			角状	Ti, Nbの複合炭窒化物	4.6	2.6	4.8	6.0	21	59	2.0	0
		管内層部	微小針状	同定不能	-	-	-	-	-	-	-	-
		粒界	塊状	G相	16	8.1	35	20	3.4	5.1	3.4	4
			塊状	G相	12	7.6	29	19	7.3	15	2.3	3.1
		粒内	棒状	LAVES相または $\chi$ 相	12	38	16	23	3.1	0.9	0.6	3.3
			粒状	NbN	0.8	1.1	0.4	12	23	61	1.0	0
			針状	FeNi <sub>3</sub> P <sub>2</sub> , Ni <sub>3</sub> Ti	8.5	25	18	4.2	1.0	19	1.6	-
		粒状	Ti, Nbの複合炭窒化物	1.1	0.7	0.8	7.8	24	65	1.0	0	-
			角状	Ti, Nbの複合炭窒化物	1.3	1.0	1.1	8.1	22	66	0.6	0
		微小粒状	不明	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表4-5 7AKV4-4 (750°C × 160 MPa, 427.6 破断材)の内圧クリープ試験後の析出物調査結果

試料	観察位置	析出物の形状	同定された析出物	析出物の元素分析結果 (at%)								
				Cr	Fe	Ni	Mo	Nb	Ti	V	Si	P
7AKV4-4 [750°C × 160 MPa, 427.6 hr破断材]	管外層部	粒界	塊状 G相	13	8.1	34	24	2.7	6.8	3.5	8.8	-
		粒内	棒状 $\chi$ 相	12	40	15	23	2.5	0.78	0.18	6.0	-
			塊状 LAVES相または $\chi$ 相	12	39	14	24	3.2	1.1	0.21	6.7	-
			粒状 Ti, Nbの複合炭窒化物	1.2	1.1	0.90	11	22	64	0.0	0	-
			角状 Ti, Nbの複合炭窒化物	1.3	1.4	0.82	12	17	66	1.5	0.080	-
			粒状 Ti, Nbの複合炭窒化物	2.6	1.6	2.6	11	15	65	1.8	0.39	-
			針状 FeNi <sub>3</sub> P <sub>2</sub> , Ni <sub>3</sub> Ti	8.2	21	14	2.6	4.0	25	2.7	-	23
			粒状 Ti, Nbの複合炭窒化物	5.9	4.0	7.2	9.5	18	48	6.5	0.39	-
			微小粒状 同定不能	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	肉厚中央部	粒界	塊状 G相	16	10	36	21	4.0	4.7	2.2	6.9	-
		粒内	塊状 G相	12	10	39	25	2.8	3.6	3.2	3.3	-
			針状 $\eta$ 相(Ni <sub>3</sub> Ti)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			粒状 Ti, Nbの複合炭窒化物	2.1	1.6	4.4	12	15	64	0.98	0.33	-
			角状 Ti, Nbの複合炭窒化物	4.8	1.9	4.4	17	8.8	58	3.0	1.7	-
			角状 Ti, Nbの複合炭窒化物	2.9	20	4.5	8.0	15	63	4.9	0.30	-
			針状 同定不能	12	25	22	3.0	6.4	23	8.4	0	-
			角状 Ti, Nbの複合炭窒化物	1.7	0.79	3.1	7.9	21	65	0.66	0.24	-
	管内層部	粒界	塊状 G相	29	5.1	36	13	1.8	0.80	6.2	9.0	-
		粒内	棒状 LAVES相または $\chi$ 相	13	39	14	24	3.5	0.70	0.51	5.6	-
			塊状 G相	30	4.7	36	11	1.8	0.42	5.7	9.6	-
			角状 NbN	1.5	0.79	1.0	8.9	20	66	1.3	0.030	-
			粒状 Ti, Nbの複合炭窒化物	1.4	1.0	1.2	8.8	23	64	0.25	0	23
			針状 FeNi <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	12	2.2	6.0	2.0	4.0	49	25	0.090	-
			微小粒状 Ti, Nb, VのMX型炭窒化物	13	4.5	9.0	4.4	6.3	48	14	0.50	-

表4-6 7AKS2-5 (750°C × 70 MPa, 3619.2hr 破断材)の内圧クリープ試験後の析出物調査結果

試料	観察位置	析出物の形状	同定された析出物	析出物の元素分析結果 (at%)								
				Cr	Fe	Ni	Mo	Nb	Ti	V	Si	P
7AKS2-5 [750°C × 70 MPa, 3619.2 hr破断材]	管外層部	粒界	塊状 G相またはCr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	34	3.7	38	14	1.8	0.3	0.7	7.6	-
		粒内	塊状 G相またはCr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	29	5	37	17	1.9	0.78	0.61	8.5	-
			角状 Ti, Nb(C, N)	2	1	3	10	15.1	67.9	1.50	0.1	-
			粒状 Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	9.2	6.3	24.3	18	5	26	3.6	6.9	-
			針状 Ti, Nb(C, N)	14.5	7	14	2.5	1.5	49	10.0	0.8	-
			微小粒状 TiN	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	肉厚中央部	粒界	塊状 G相またはCr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	10	9	38	24	6.1	6.2	0.7	6.5	-
			塊状 $\chi$ 相またはラーベス相	13	39	15	25	4.4	0.2	1.3	1.5	-
		粒内	塊状 $\chi$ 相	13	41	15	22	5.0	0.5	0.31	2.7	-
			角状 Ti, Nb(C, N)	2.7	1.5	2.5	7	18	65	2.62	0.58	-
			粒状 Ti, Nb(C, N)	1.7	2.2	5.0	7	14.0	70	0.0	0.0	-
			針状 Ti, Nb(C, N)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			微小粒状 同定不能	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	管内層部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表4-7 7AKV鋼(V添加鋼)と7AKS鋼(V無添加鋼)のクリープ破断試験後の組織調査結果

試料	観察位置	抽出レプリカ法による析出物観察結果(寸法、量)		
		粒界	粒内	微細析出物
7AKV2-2 [700°C, 180MPa, 2699.5 hr]	管外面	0.5~1.5 ( $\mu\text{m}$ )	0.1~0.4 ( $\mu\text{m}$ )	2 (nm) : 低密度
	肉厚中央	0.25~1.5	0.1~2.0	2 : 低密度
	管内面	0.25~1.5	0.1~2.0	2 : 低密度
7AKV4-4 [750°C, 160MPa, 427.6 hr]	管外面	0.25~1.5	0.1~1.7	2 : 低密度
	肉厚中央	0.2~2.0	0.1~2.0	2 : 低密度
	管内面	0.25~2.0	0.1~1.9	5 : 高密度
7AKV2-11 (中断材) [750°C, 100MPa, 10871 hr]	管外面	2.5~5.0	0.05~0.5	5 : 高密度
	肉厚中央	0.2~4.0	0.1~2.5	5~10 : 低密度
	管内面	×	×	×
7AKS2-5 [750°C, 70MPa, 3619.2 hr]	管外面	0.25~2.5	0.1~1.2	3~10 : 低密度
	肉厚中央	0.3~2.0	0.1~2.3	5~12 : 低密度
	管内面	×	×	×

(注1) (×)未観察

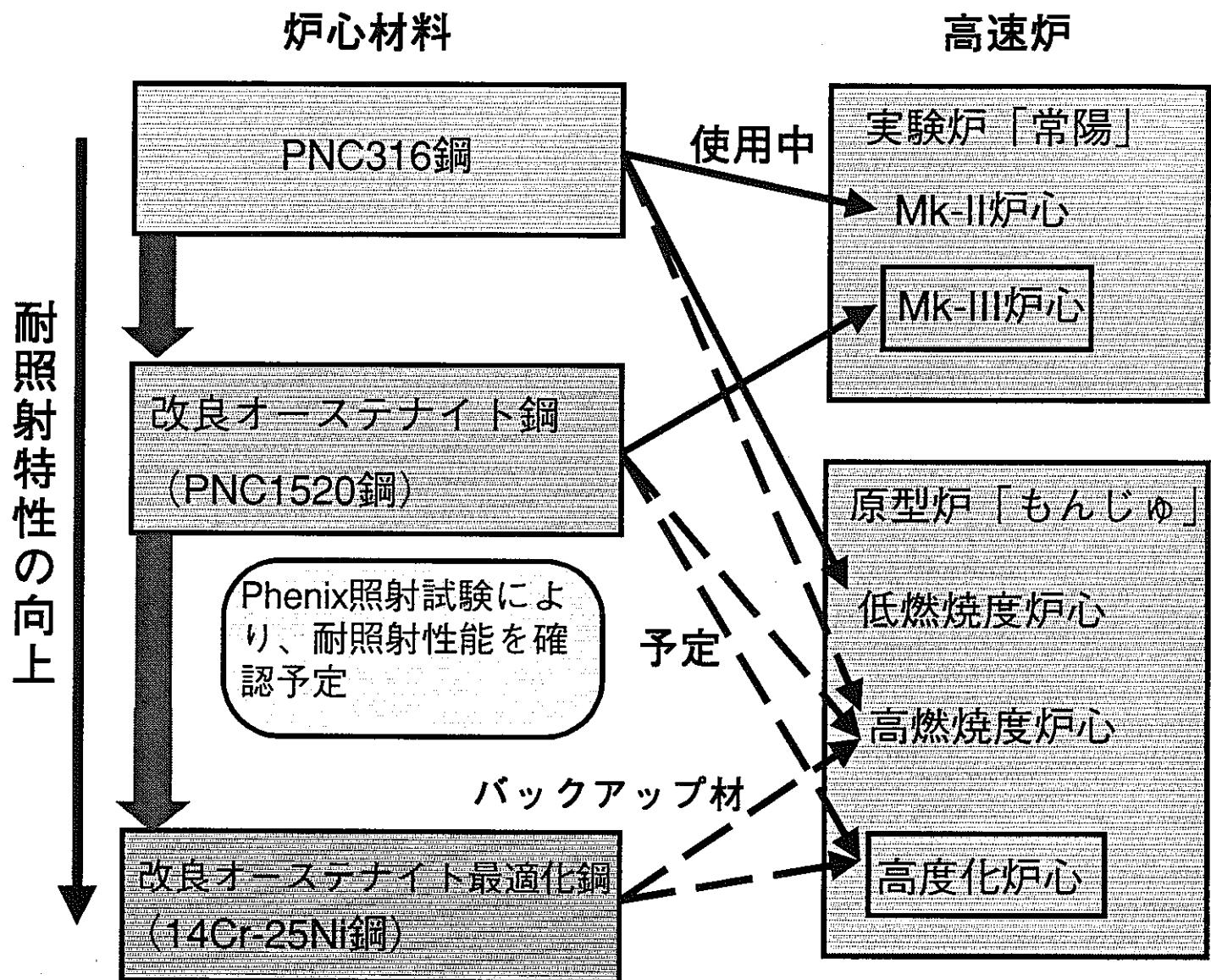


図1 サイクル機構におけるオーステナイト系炉心材料開発の方向

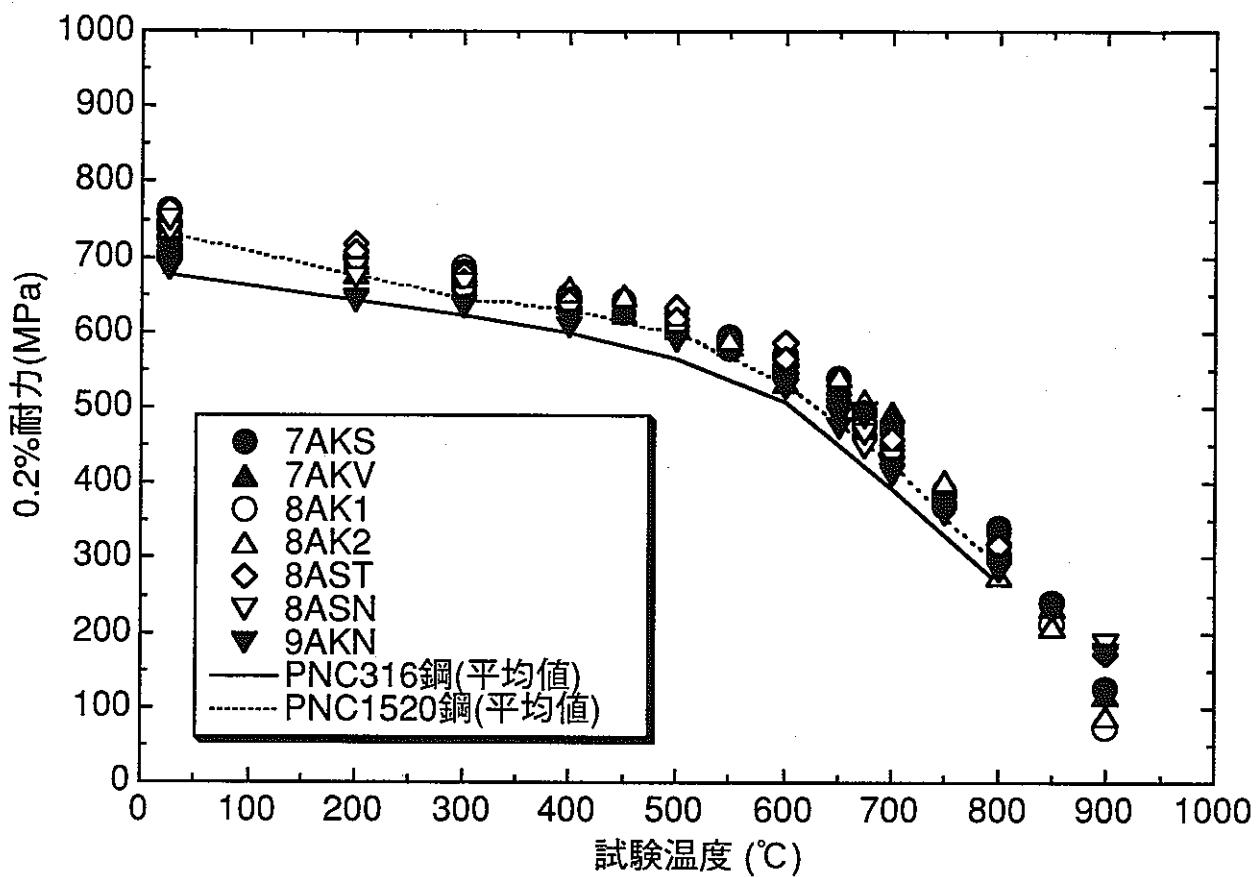


図3-1 0.2%耐力の試験温度依存性

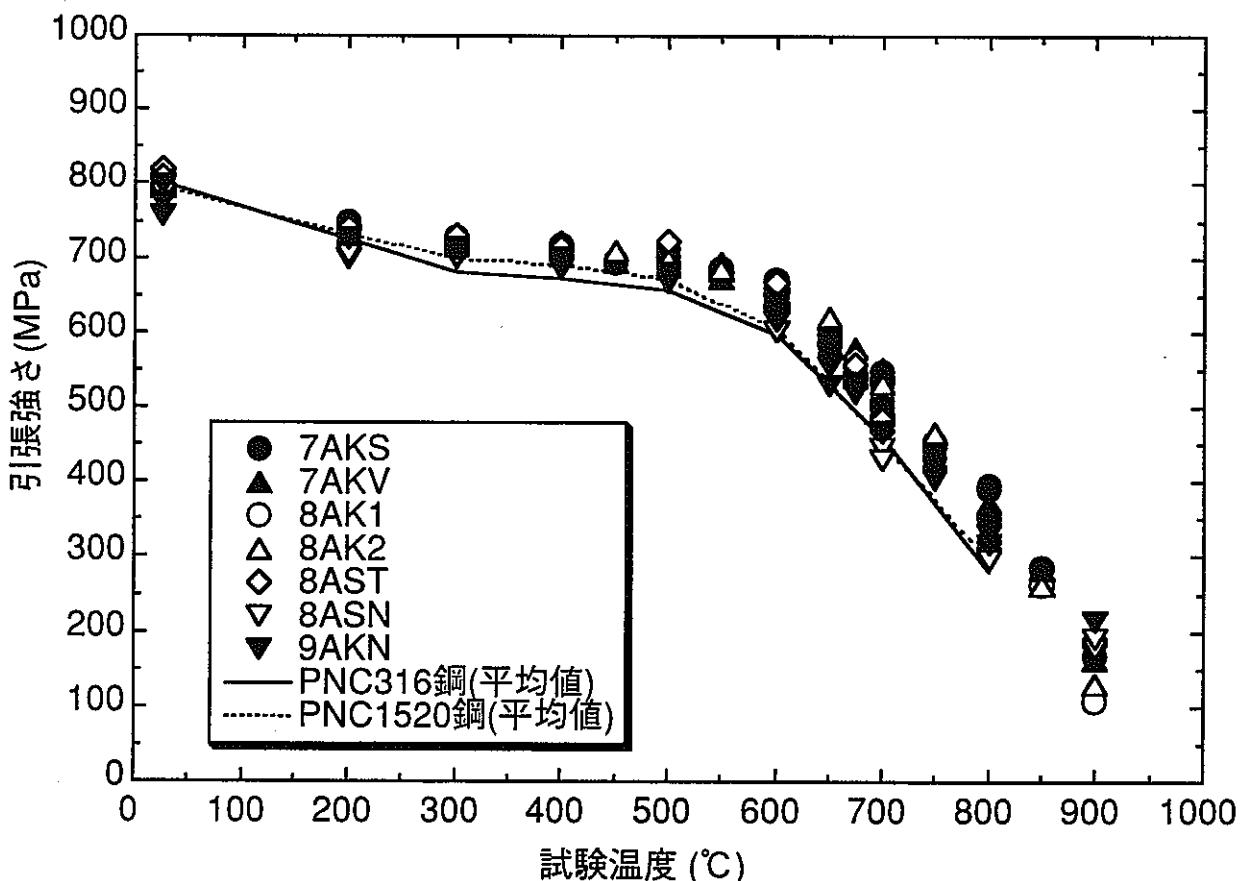


図3-2 引張強さの試験温度依存性

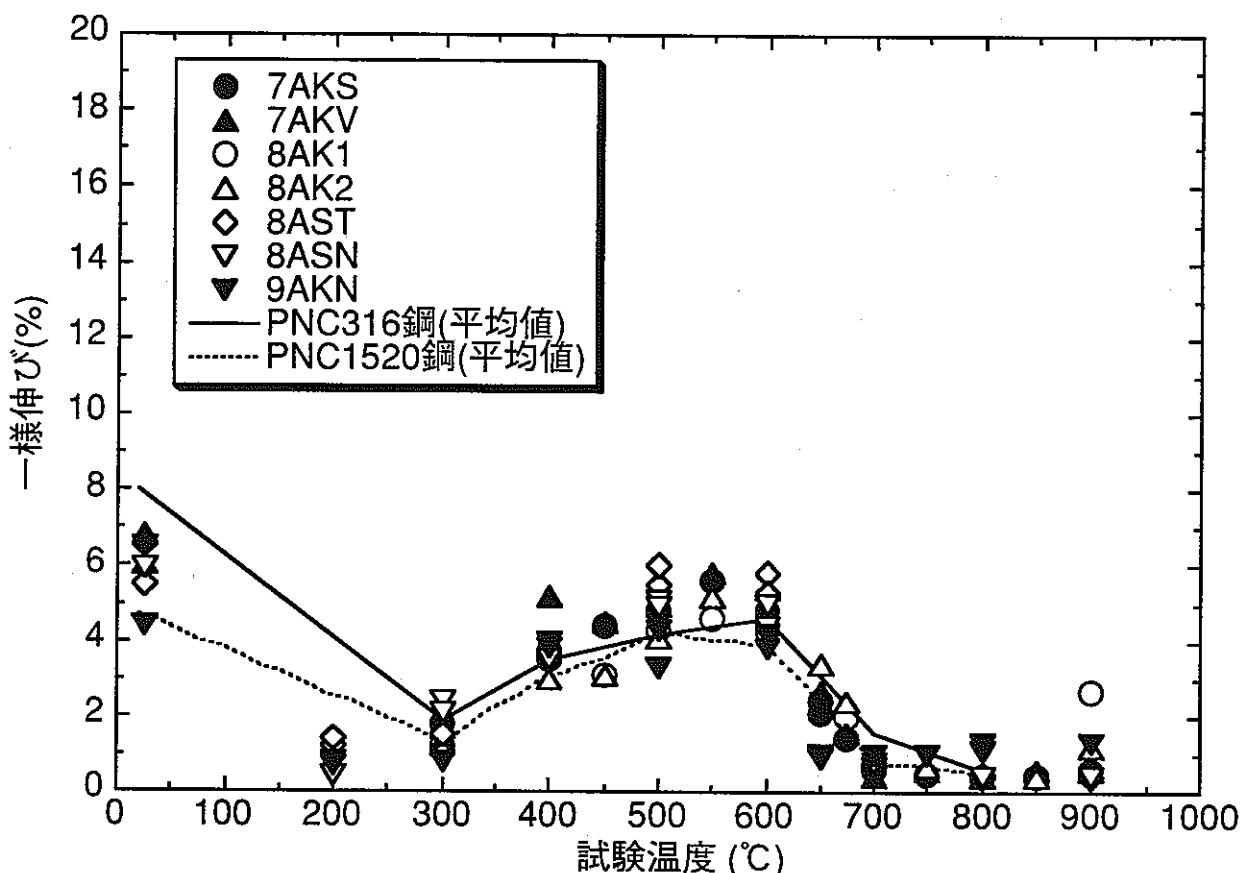


図3-3 一様伸びの試験温度依存性

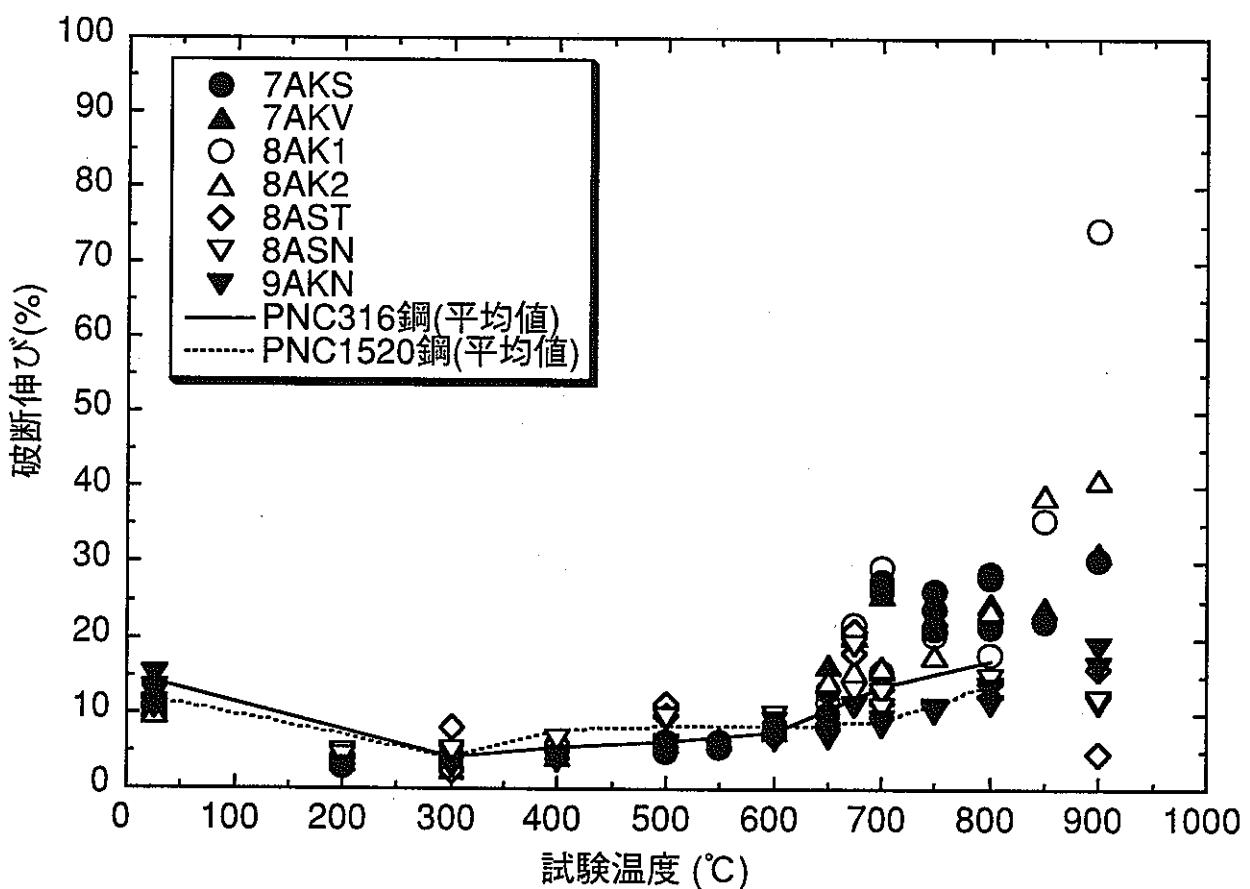


図3-4 破断伸びの試験温度依存性

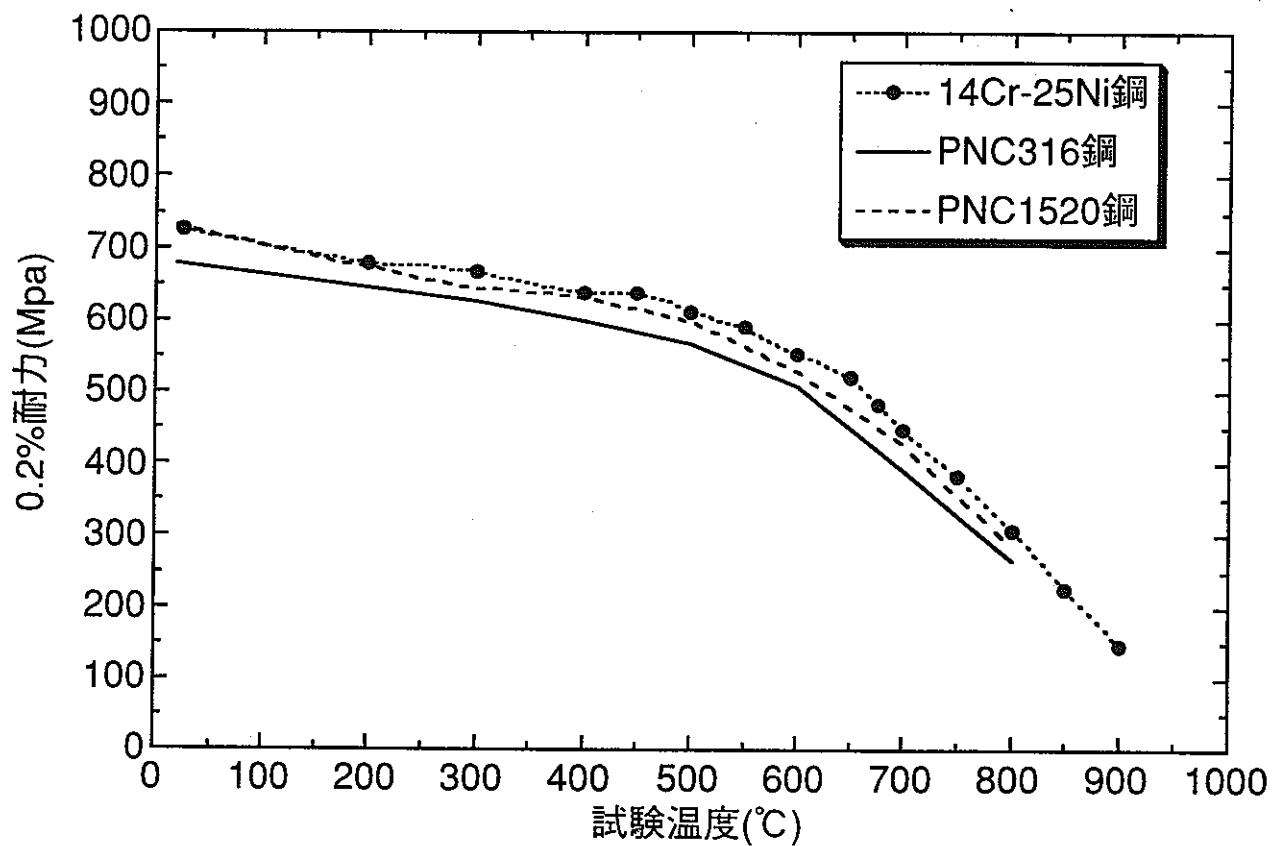


図3-5 0.2%耐力平均値の試験温度依存性

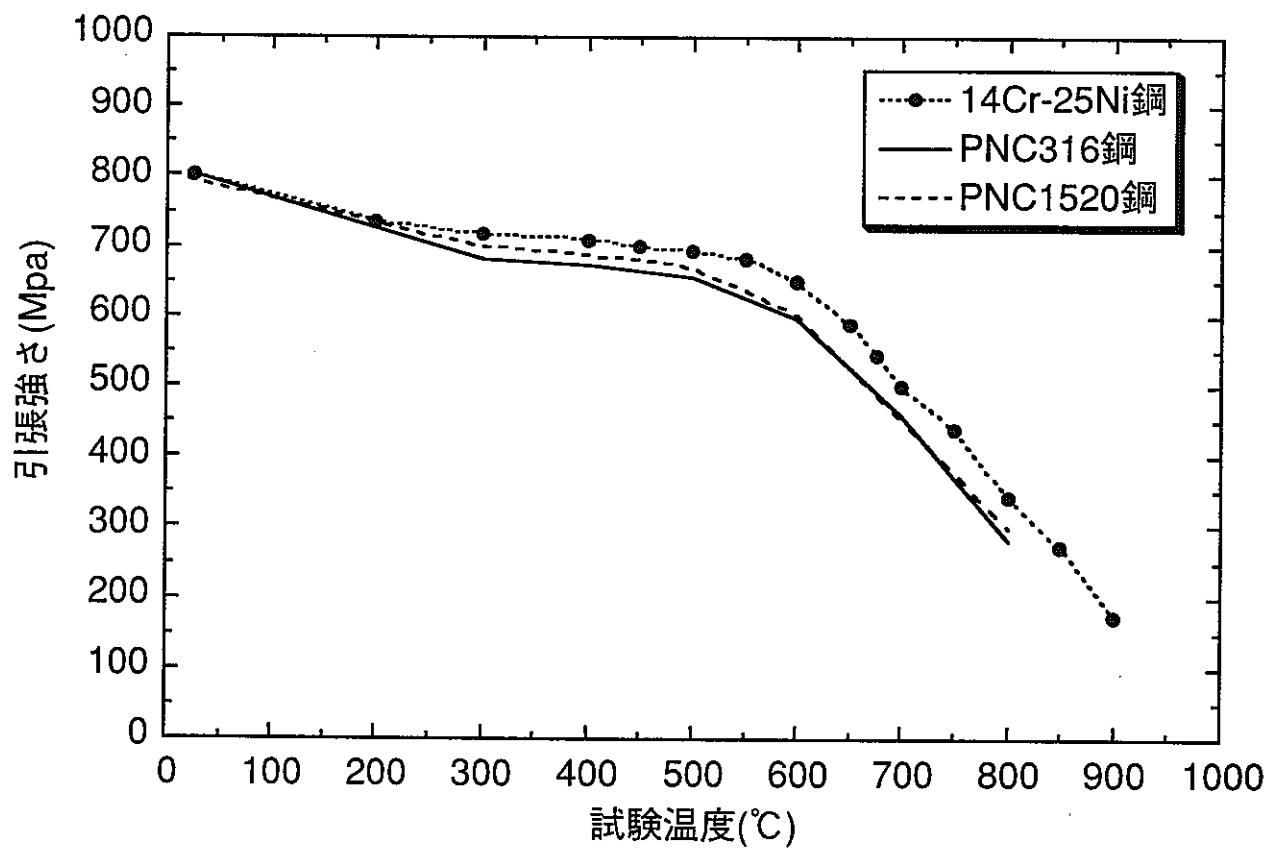


図3-6 引張強さ平均値の試験温度依存性

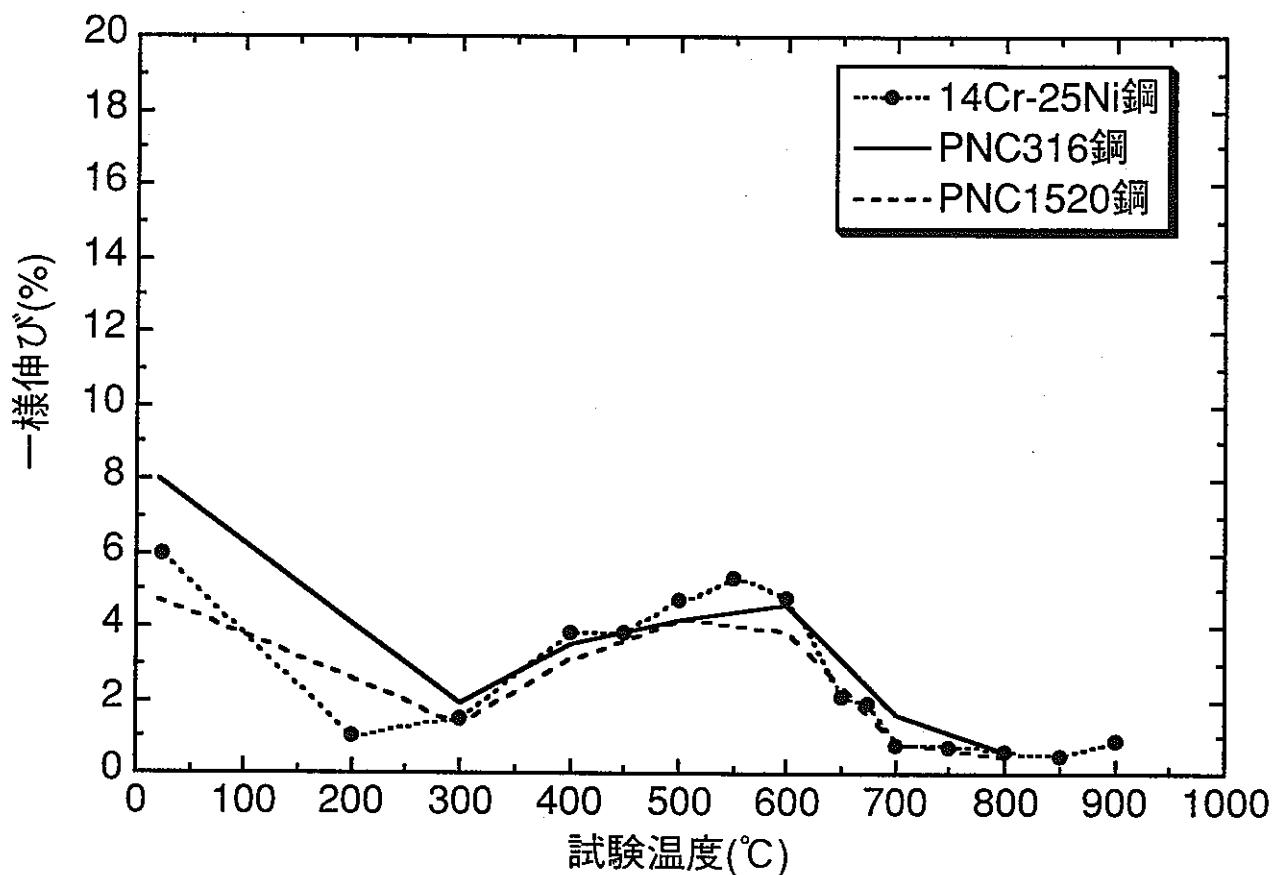


図3-7 一様伸び平均値の試験温度依存性

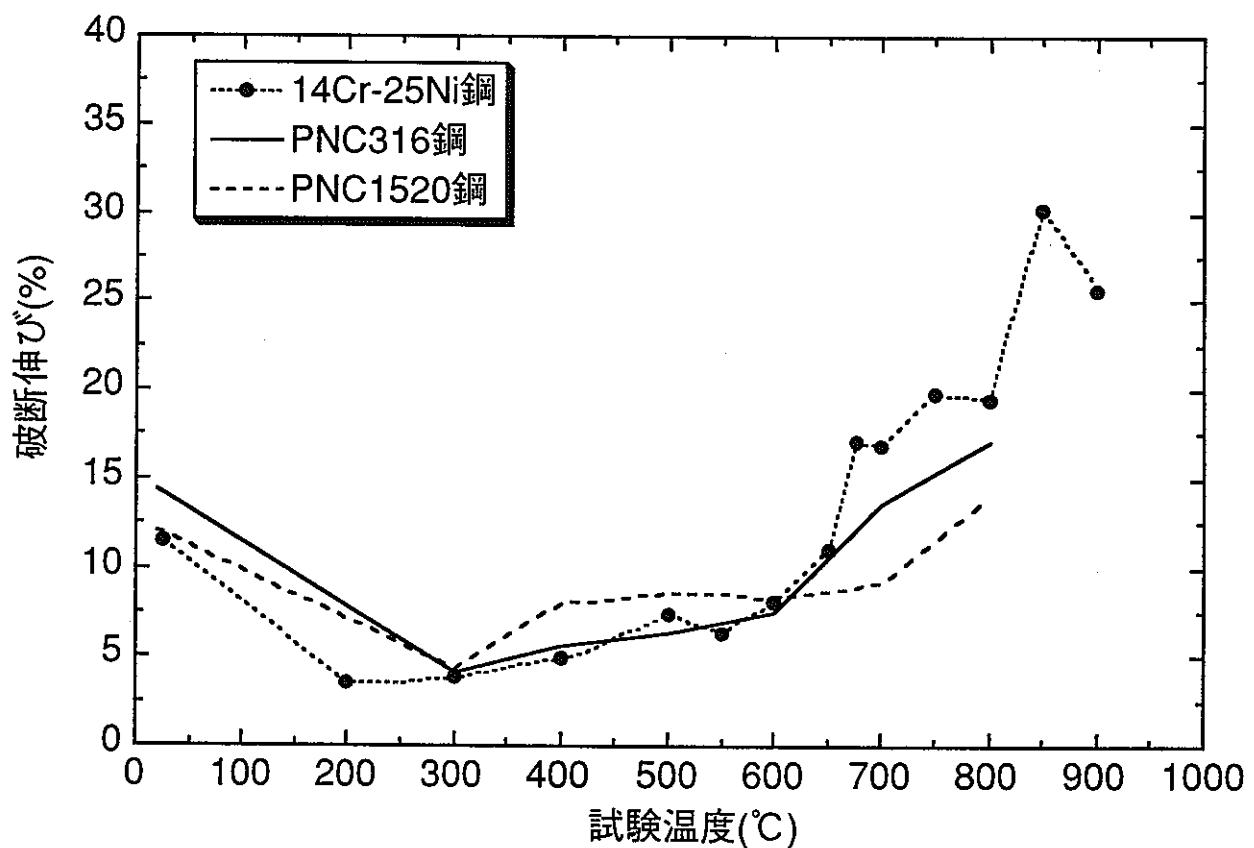


図3-8 破断伸び平均値の試験温度依存性

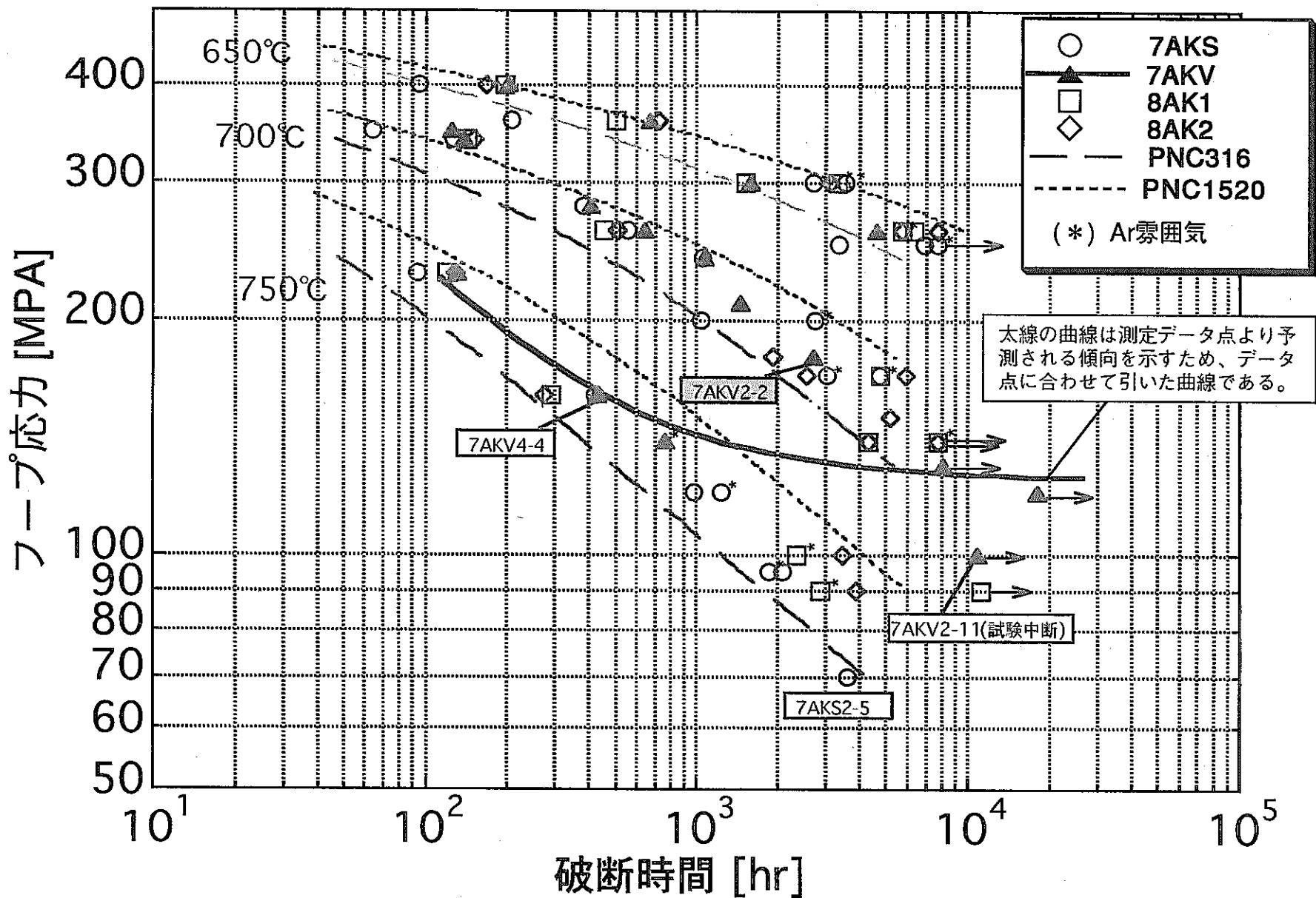


図3-9 14Cr-25Ni鋼の内圧クリープ試験結果

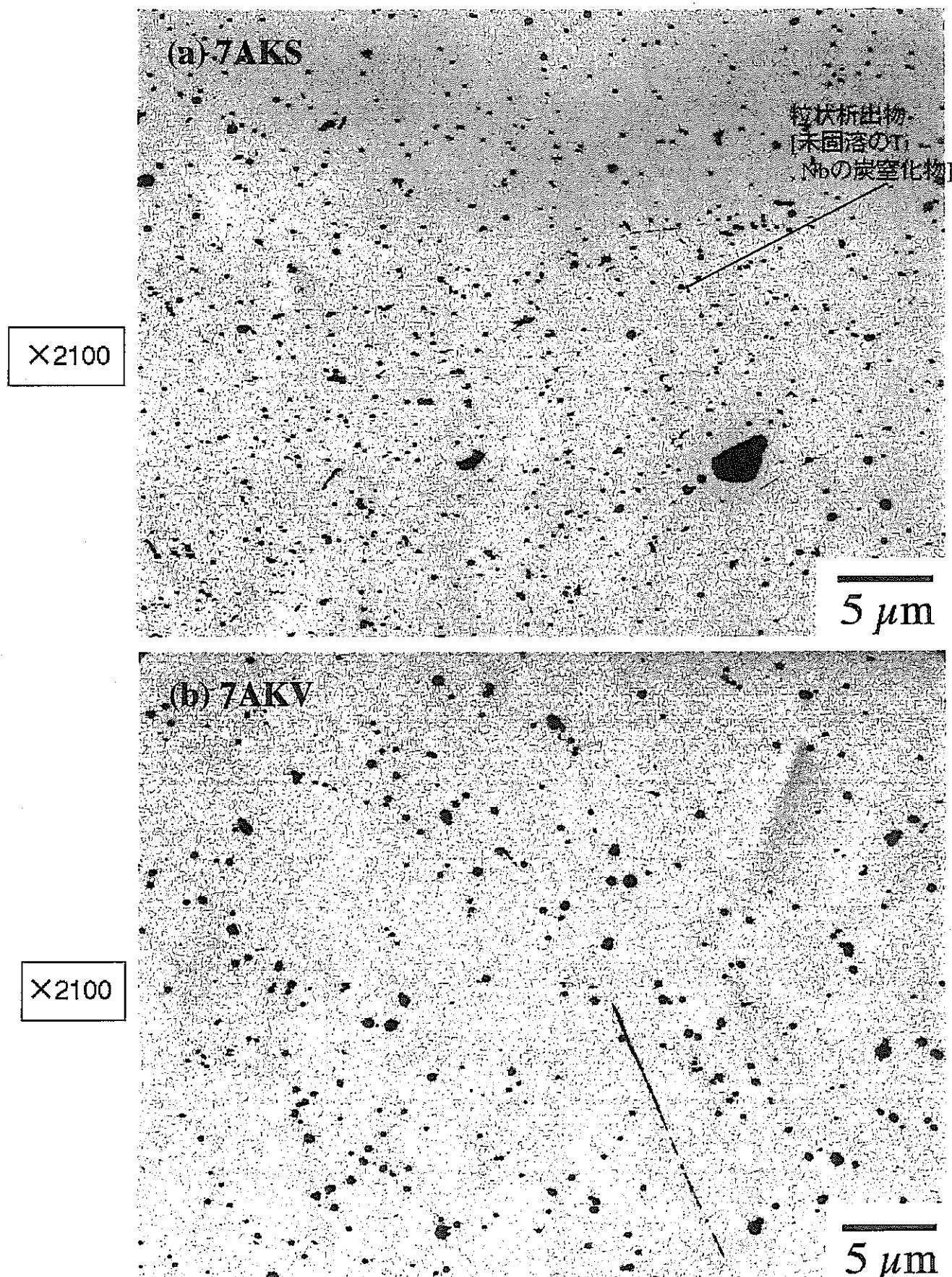


図4-1 7AKS鋼と7AKV鋼の製品まま材の抽出レプリカ組織観察結果

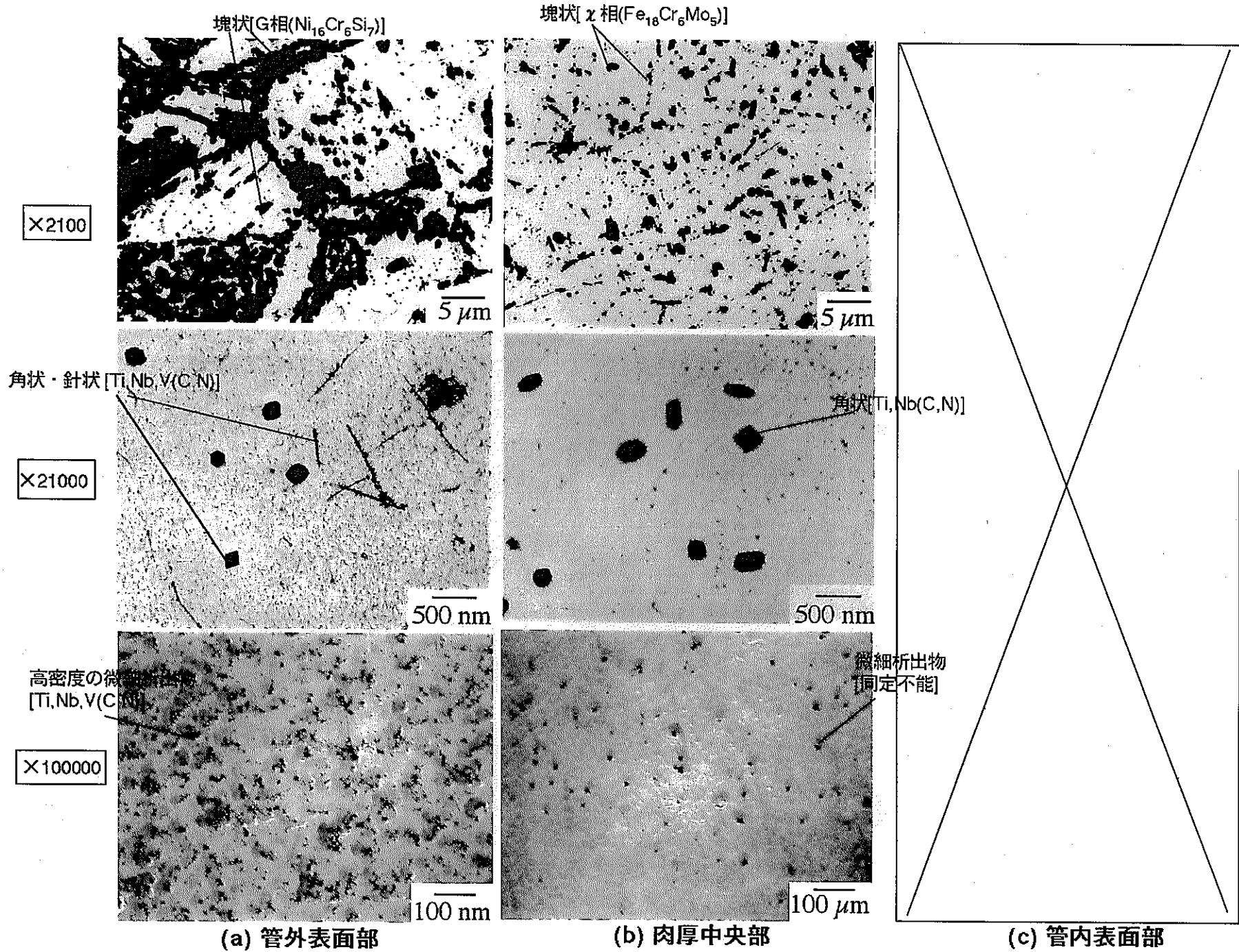


図4-2 7AKV2-11 (750°C, 100MPa, 10871hr破断材)の抽出レプリカ組織観察結果

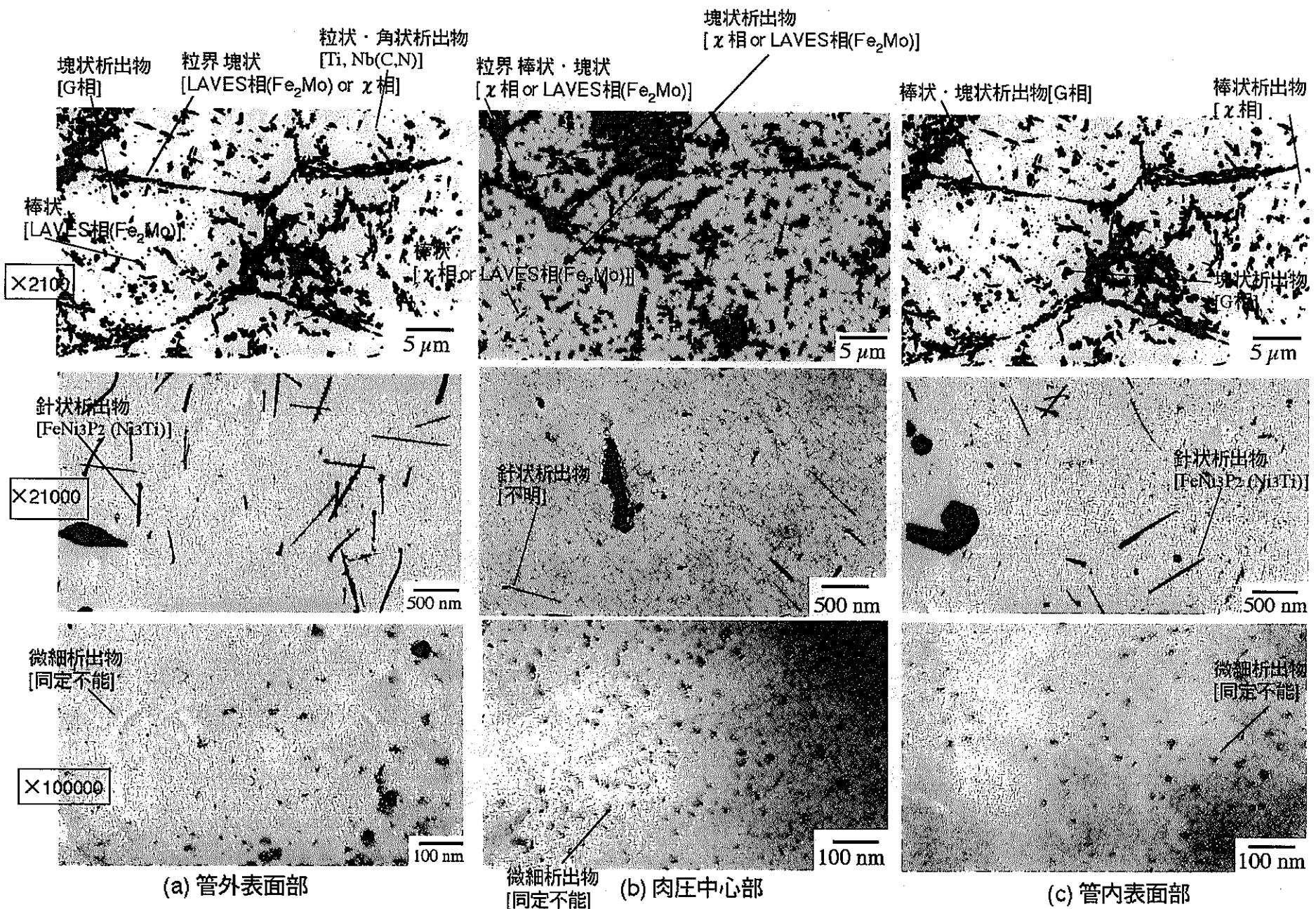


図4-3 7AKV2-2(700°C, 180MPa, 2699.5h破断材)の抽出レプリカ組織観察結果

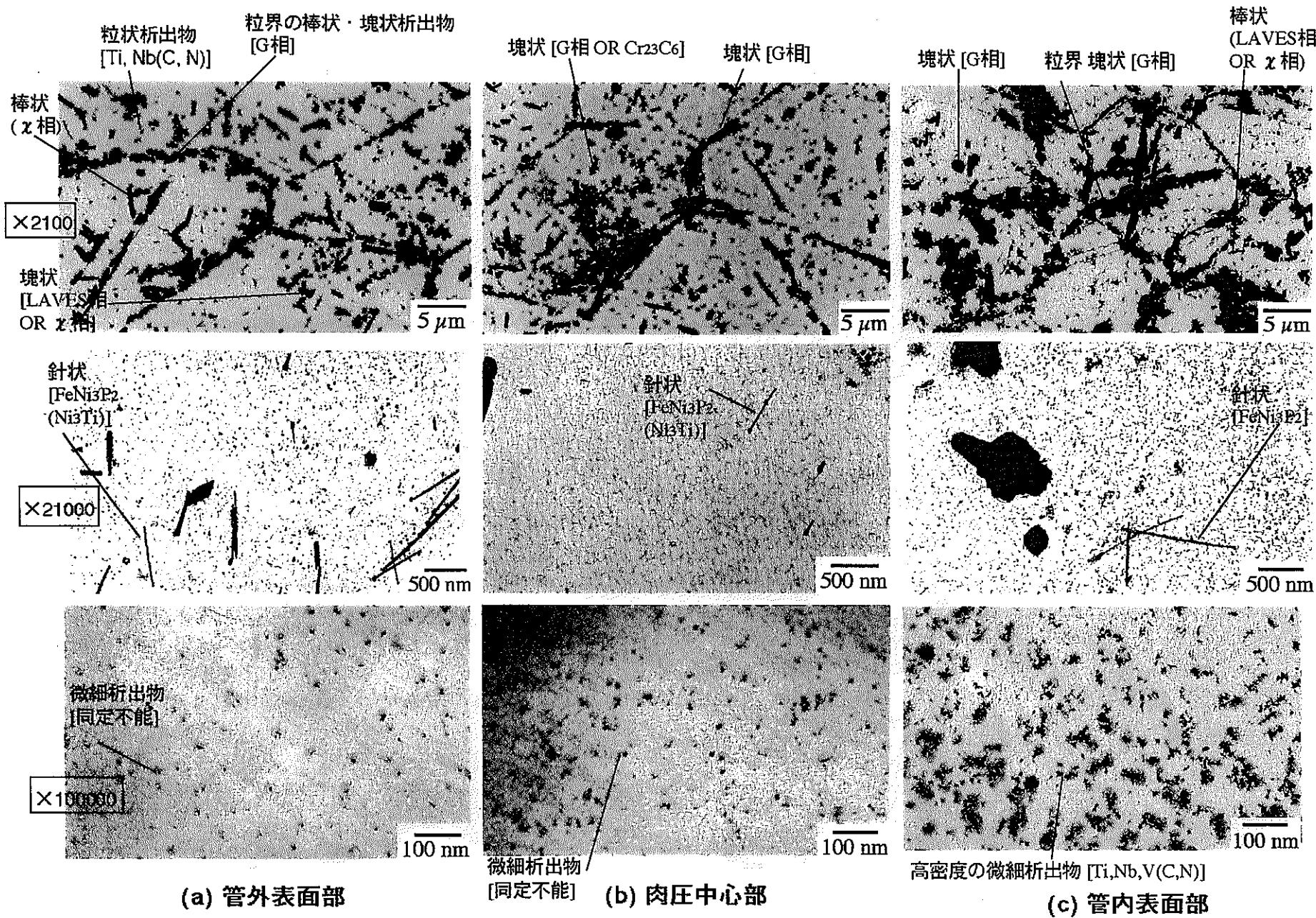


図4-4 7AKV4-4(750°C, 160MPa, 427.6hr破断材)の抽出レプリカ組織観察結果

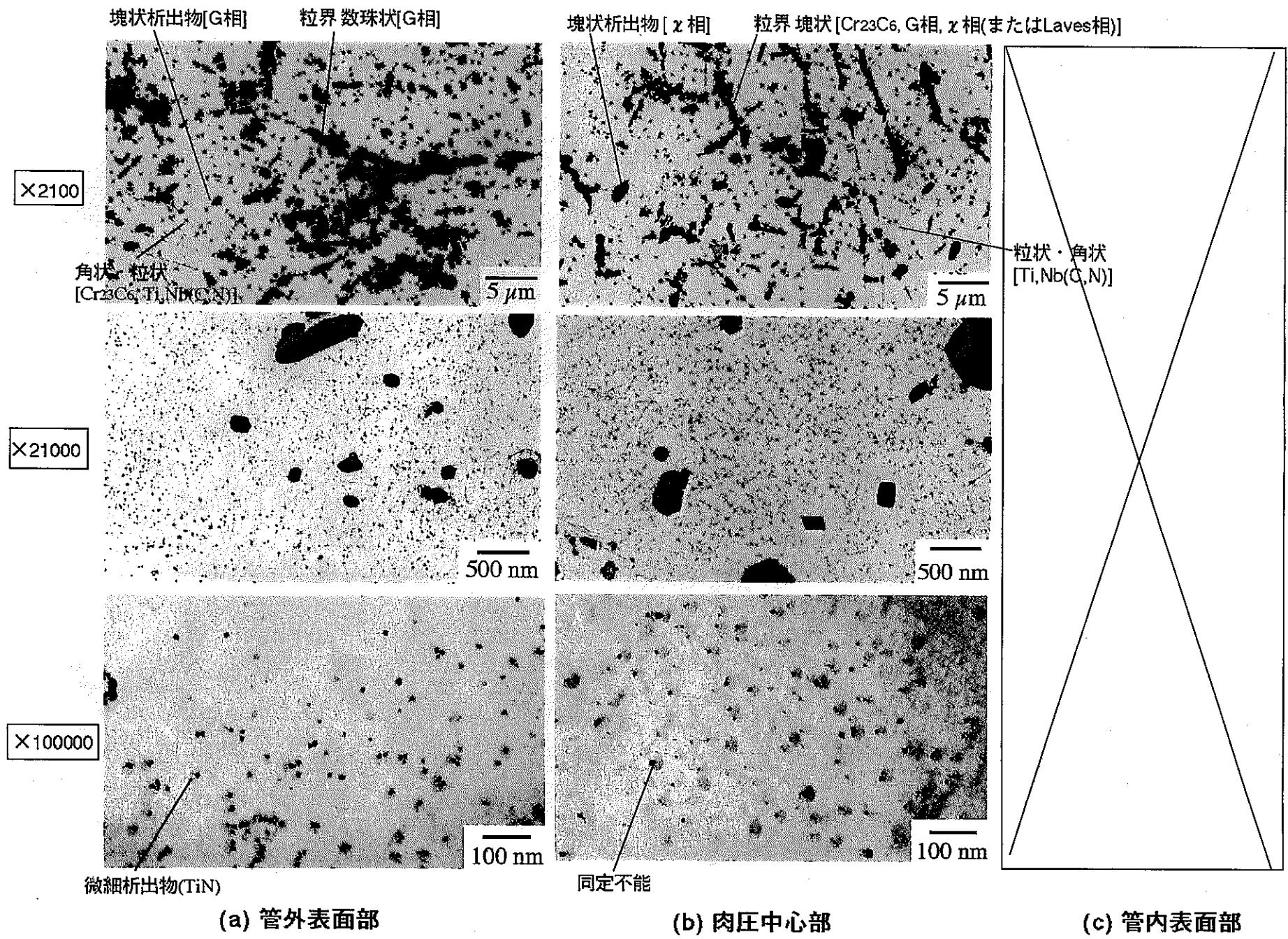


図4-5 7AKS2-5(750°C, 70MPa, 3619.2hr)の抽出レプリカ組織観察結果

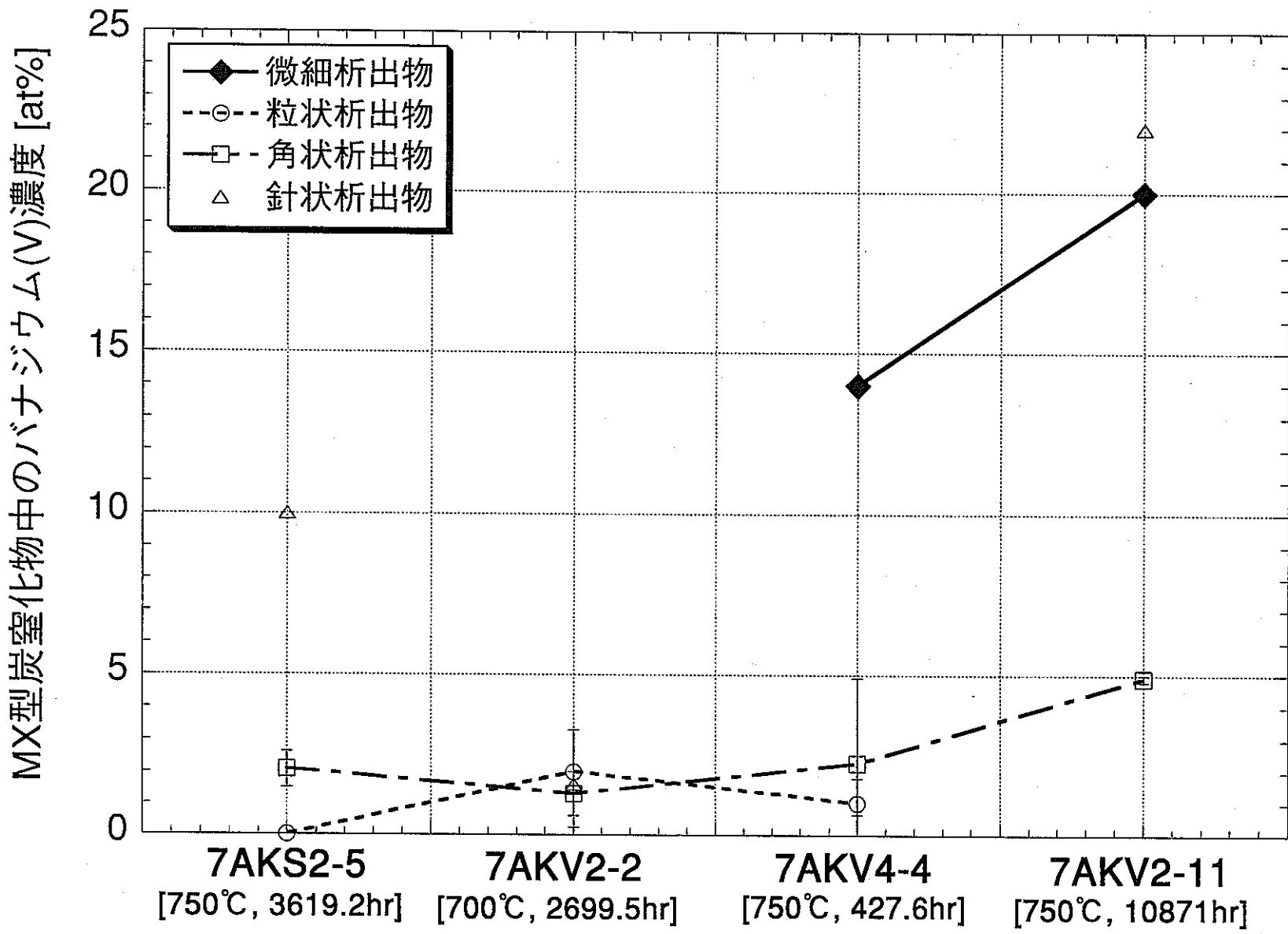


図4-6 各組織観察試験片におけるMX型炭窒化物中のバナジウム(V)濃度

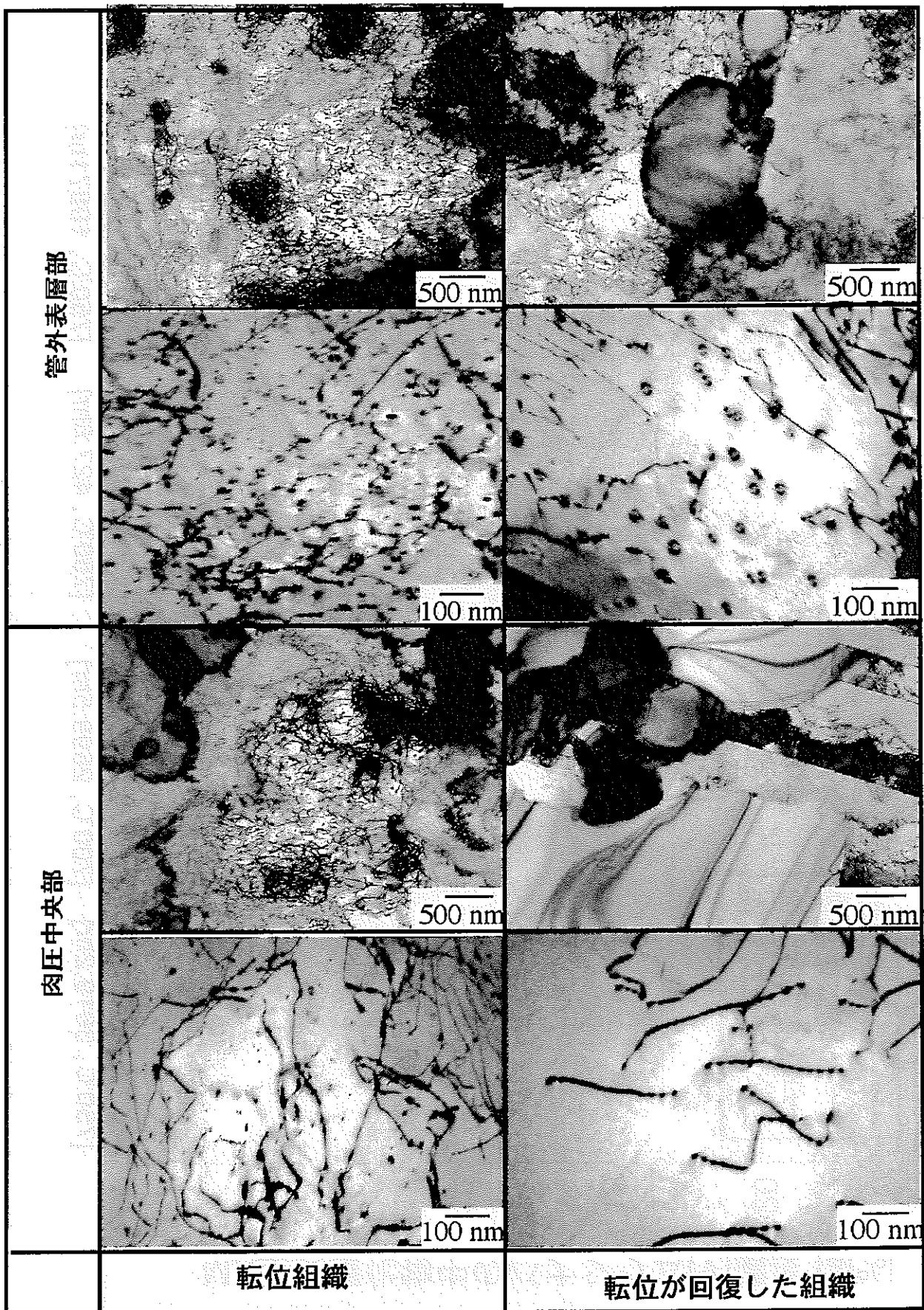


図 4-7 7AKV2-11の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)

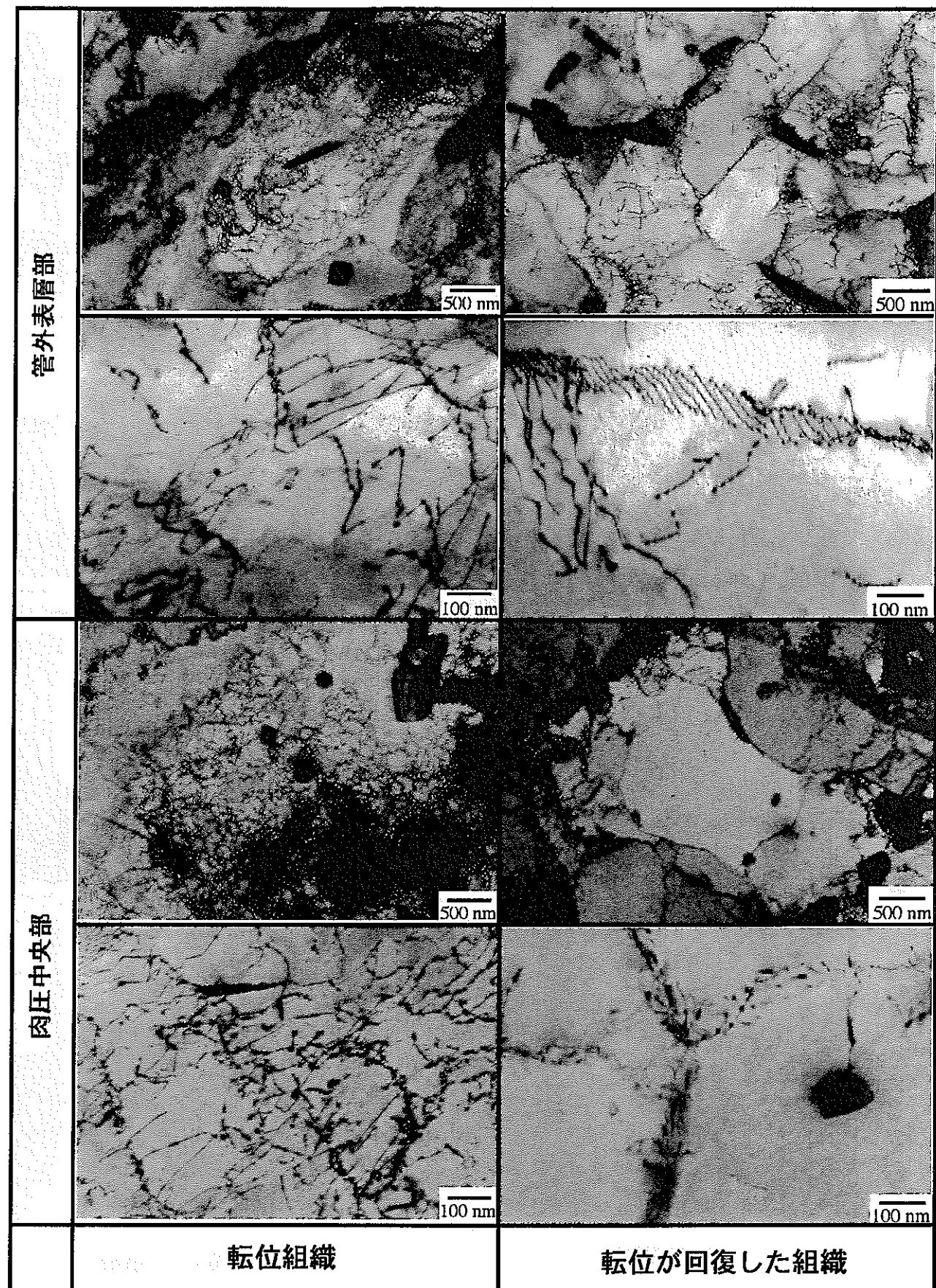


図4-8 7AKV2-2の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)

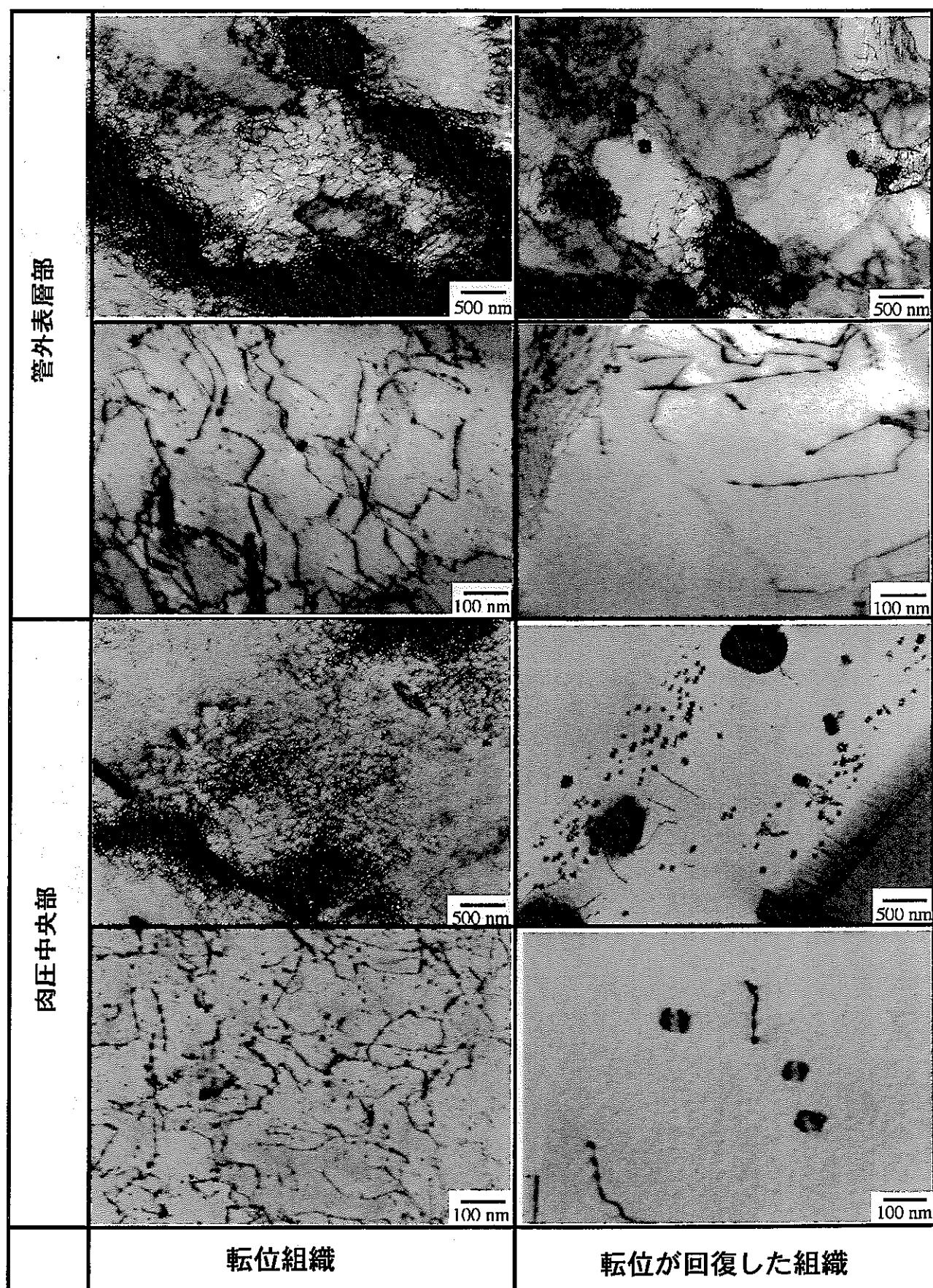


図4-9 7AKV4-4の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)

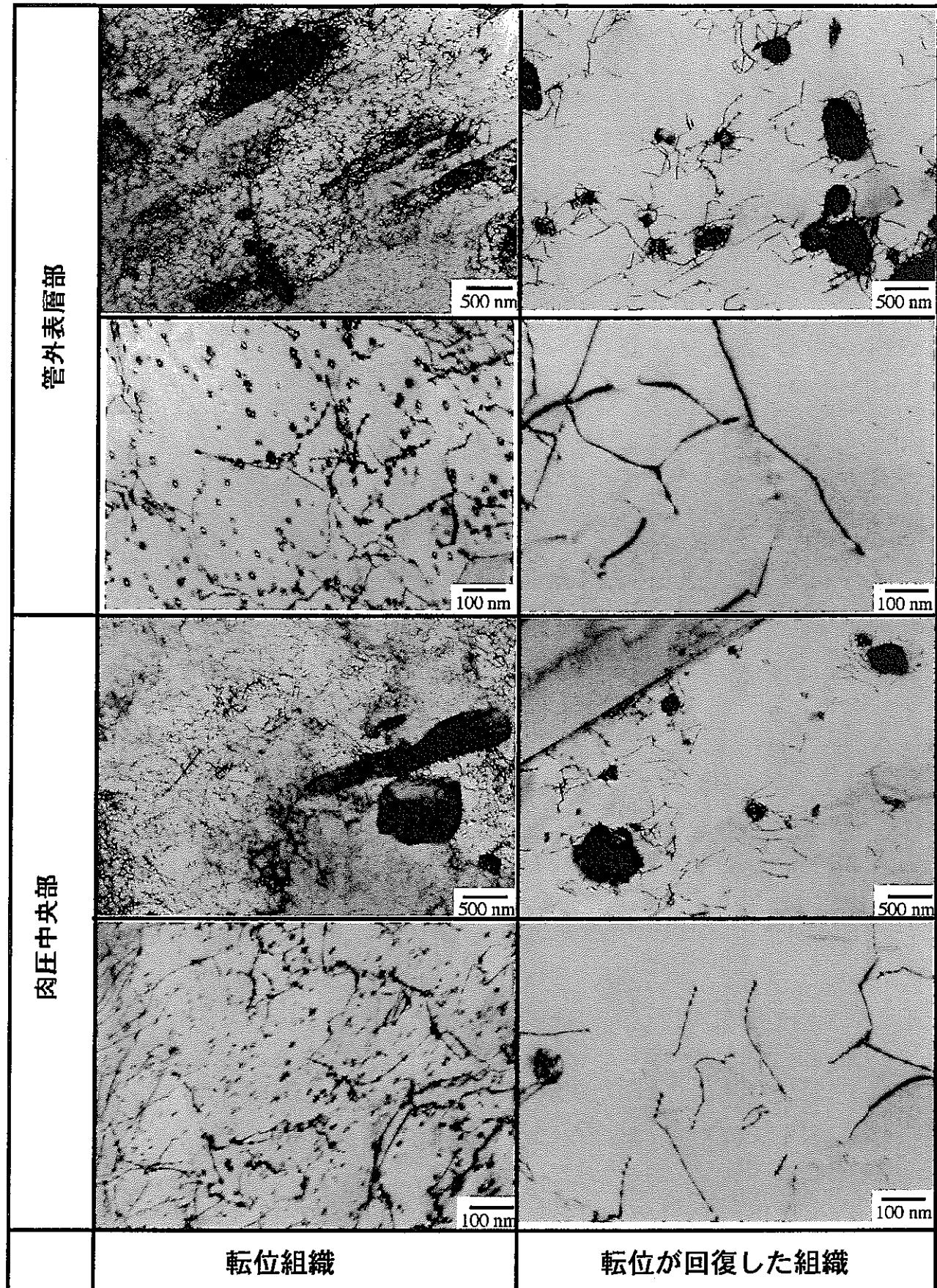


図4-10 7AKS2-5の透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果(明視野像)