

JAERI-Tech  
2000-047



JP0050816



低放射化Mn-Cr鋼の特性評価試験(2)  
－物理的特性及び時効特性－

2000年8月

斎藤 滋・深谷 清・石山 新太郎  
佐藤 育男<sup>\*</sup>・楠橋 幹雄<sup>\*</sup>・畠山 剛<sup>\*</sup>・高橋 平七郎<sup>\*</sup>・菊池 満

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂  
郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター  
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっ  
ております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research  
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy  
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

低放射化 Mn-Cr 鋼の特性評価試験（2）  
-物理的特性及び時効特性-

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

斎藤 滋・深谷 清・石山 新太郎\*

佐藤 育男\*<sup>1</sup>・楠橋 幹雄\*<sup>1</sup>・畠山 剛\*<sup>1</sup>・高橋 平七郎\*<sup>2</sup>・菊池 満\*\*

(2000年6月9日受理)

現在、日本原子力研究所（以下原研）では、核融合炉の実現に向けて定常炉心試験装置（以下 JT-60SU）の検討・評価作業が進められている。この JT-60SU の真空容器鋼としては、高強度、低放射化かつ非磁性であることが求められている。しかし、既存の鋼種でこれらの条件を満たすものは無いため、原研と（株）日本製鋼所が共同で Ni, Co が無添加で低 Mn 型の低放射化非磁性鋼の開発を進めてきた。成分と各製造工程のスクリーニングテストを行った後、平成 9 年度までに VC9 と名付けた鋼種が有望であるという結果を得た。平成 10 年度以降はこの VC9 の JT-60SU 真空容器鋼としての適性評価として、機械的特性・物理的特性・溶接性・耐食性・時効特性など様々な特性試験を行ってきた。本報告書はそれらの結果の中から物理的特性及び時効特性についてまとめたものである。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\*大洗研究所核熱利用研究部

\*\*那珂研究所炉心プラズマ研究部

\*<sup>1</sup>（株）日本製鋼所室蘭製鋼所

\*<sup>2</sup>北海道大学エネルギー先端研究所

Evaluation of Properties of Low Activation Mn-Cr Steel (2)  
-Physical Properties and Aging Properties -

Shigeru SAITO, Kiyoshi FUKAYA, Shintaro ISHIYAMA\*,  
Ikuo SATO\*, Mikio KUSUHASHI\*, Takeshi HATAKEYAMA\*, Heishichiro TAKAHASHI\*<sup>2</sup>  
and Mitsuru KIKUCHI\*

Department of Nuclear Energy System  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 9, 2000)

The JT-60SU (Super Upgrade) program is under discussion at JAERI. Its design optimization activity requires the vacuum vessel material to be non-magnetic, very strong and with low induced activation. However, there is no suitable material available to fulfill all the requirements. JAERI started to develop a new material for the vacuum vessel together with the Japan Steel Works LTD. (JSW). Chemical composition and metallurgical processes were optimized and a new steel named VC9, which has the composition of Cr :16wt%, Mn :15.5wt%, C :0.2 wt%, N :0.2wt% with non-magnetic single  $\gamma$  phase, was selected as a candidate material. Here, physical properties and aging properties of VC9 were studied and the results were compared with those of 316L stainless steel.

Keywords : JT-60SU, Vacuum Vessel, Low Activated Material, Mn-Cr Steel, VC9, Physical Properties, Aging Properties

---

\*Department of Advanced Nuclear Heat Technology, Oarai Research Establishment

\*\*Department of Fusion Plasma Research, Naka Fusion Research Establishment

\*<sup>1</sup>The Japan Steel Works LTD      \*<sup>2</sup>Hokkaido University

## 目 次

1. 緒言	1
2. 実験方法	2
3. 物理的特性試験結果	5
4. 熱時効試験結果	6
4.1 金相観察・硬さ試験	6
4.2 引張試験	7
4.3 シャルピー衝撃試験	8
5. まとめ	9
謝辞	10
参考文献	10
付録	56

## Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
3. Results of Physical Property Tests	5
4. Results of Aging Property Tests	6
4.1 Metallographic Observation and Hardness Test	6
4.2 Tensile Test	7
4.3 Charpy Impact Test	8
5. Summary	9
Acknowledgment	10
References	10
Appendix	56

This is a blank page.

## 1. 緒言

現在、日本原子力研究所（以下原研）では、核融合炉の実現に向けて定常炉心試験装置（以下JT-60SU）の検討・評価作業を進めている[1]。このJT-60SUの設計の前提条件として、現行 JT-60U の建屋や付帯設備を最大限有効利用することとなっている。そのため総重量が制限されることになり、特に重量のある真空容器鋼には高比強度の材料を使用することが求められる。その他 JT-60SU の真空容器鋼に求められる特性としては、低放射化・非磁性・核発熱が少ない・低コストなどがある。しかし既存の鋼種でこれらの要求を満たすものは無いため、原研と（株）日本製鋼所は共同で Ni, Co が無添加で低 Mn 型の低放射化非磁性鋼の開発を進めてきた。成分と各製造工程のスクリーニングテストを行った後、平成 9 年度までに VC9 と名付けた鋼種が有望であるという結果を得た[2,3]。平成 10 年度以降は JT-60SU 真空容器鋼としての適性評価として、この VC9 を対象に機械的特性・溶接性[4,5]・物理的特性・耐食性・時効特性など様々な特性試験を行ってきた。本報告書はそれらの結果の中から物理的特性および時効特性についてまとめたものである。物理的特性試験としては密度、熱・電気及び磁気的特性などの測定を行った。時効特性試験としては長時間熱時効処理による組織や機械的特性（引張り及びシャルピー衝撃試験）の変化を調べた。

## 2. 実験方法

### (1) 製法及び成分分析値

本試験で用いたMn-Cr鋼(VC0、VC2~4、VC8~15)は、平成8~10年度に(株)日本製鋼所で製造されたものである。以下に示すように、①溶解・造塊、②荒地鍛造、③熱間圧延、④固溶化処理の各製造工程を経て供試材を試作した。ただし、溶解後にレードル分析、完成後にもチェック分析を行った。以下に各工程の条件を示す[2]。

#### ①溶解・造塊

溶解は高周波溶解炉により行い、丸形25~50kg鋼塊に造塊した。目標成分はTable 2.1の通りとした。

#### ②荒地鍛造

1 tonハンマーにより鍛造を行い、板状に成形した。主鍛造方向は鋼塊の軸方向と一致させた。

#### ③熱間圧延

厚さ30mmまで熱間圧延を行った。

#### ④固溶化熱処理

固溶化熱処理条件は1050°C×1hourで、その後水冷を行った。

#### ⑤チェック分析

チェック分析はJIS-G-0321に準拠して行われた。チェック分析の結果はTable 2.1に示す。

完成した各供試材は試験片形状に加工して、物理的特性試験及び熱時効試験などに供した。

### (2) 物理的特性測定

物理的特性測定は密度測定、熱・電気及び磁気的特性試験などを行った。以下に測定条件と測定を行った鋼種を記す。

#### 密度(VC8、9)

測定方法 : アルキメデス法

溶媒 : アセトン

試験温度 : 室温

熱拡散率、比熱、熱伝導率 (VC8、9)

測定方法 : レーザーフラッシュ法  
測定装置 : 真空理工製熱定数測定装置TC-3000型  
試験温度 : 室温～300°C  
雰囲気 : 真空中

比電気抵抗 (VC9)

測定方法 : 直流電位差計法  
測定装置 : 真空理工製温度-電気抵抗測定装置TER2000-RHS型  
試験温度 : 室温～600°C  
雰囲気 : 真空中

透磁率 (VC0、VC2～4、VC8～15)

測定方法 : 透磁率計法  
試験温度 : 室温  
雰囲気 : 大気中

(3) 热時効試験

热時効試験はVC9のみ行った。大気中で300°C～900°Cの各温度で1時間から最大10000時間まで処理し、組織観察と機械特性試験を行った。処理温度と評価項目の一覧をTable 2. 2に示す。

組織観察

金相観察 : 光学顕微鏡、×100、×400  
硬さ試験 : ビッカース硬度計、荷重=500gf、保持時間=15秒  
フェライト量測定 : Ferrite Content Meter 1.054(INSTITUT DR. FORSTER)

機械特性試験

引張り試験

試験片 : φ4mm × G.L.30mm (JMTR照射用の小型試験片、Fig. 2. 1)  
クロスヘッド速度 : 0.5mm/min  
試験温度 : 室温～500°C  
雰囲気 : 大気中

シャルピー衝撃試験

試験片 : 10×5×55mm、2mmVノッチ（ハーフサイズ、Fig. 2. 2）

試験温度 : 室温

雰囲気 : 大気中

試験機 : 容量30kgf-m計装シャルピー衝撃試験機  
(原研原子炉安全工学部機器信頼性研究室所有)

破面観察 : SEM、フェライト量測定

### 3. 物理的特性試験結果

物理的特性測定試験として密度測定、熱的特性として熱拡散率及び比熱、電気的特性として比電気抵抗、磁気的特性として透磁率の測定をそれぞれ行った。以下に結果を述べる。

#### (1) 密度

アルキメデス法によるVC9とSUS316Lの密度測定試験の測定結果をTable 3. 1に示す。VC9とSUS316Lの密度はそれぞれ7.76および7.95 ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ ) であった。SUS316Lの文献値[6]は7.96 ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ ) で、測定値とほとんど同じであった。VC9の方がSUS316Lに比べやや低比重であることが分かった。

#### (2) 热拡散率、比熱および热伝導率

レーザーフラッシュ法によるVC8とVC9の熱拡散率ならびに比熱の測定結果とそれから計算した熱伝導率をTable 3. 2に、また温度依存性を他のステンレス鋼の文献値[6, 7]とともにFig. 3. 1に示す。熱伝導率 $\lambda$ の計算式は

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \sigma$$

で表される。ここで $\alpha$ は熱拡散率、 $C_p$ は比熱、 $\sigma$ は密度である。VC8およびVC9の熱伝導率は室温から300°Cの範囲ではFe-Cr系(フェライト及びマルテンサイト系)には及ばないものの、同じオーステナイト系であるFe-Cr-Ni系よりも高いことが分かった。

#### (3) 比電気抵抗

直流電位差計法で測定したVC9の比電気抵抗の温度依存性をSUS316Lの結果と文献値[8]とともにFig. 3. 2に示す。VC9の比電気抵抗はSUS316Lの圧延方向と平行な試料およびSUS316の文献値と同様の値であった。またSUS316では圧延方向に垂直な試料の比電気抵抗の値が平行な試料よりも10%程度高い値を示した。VC9では圧延方向による比電気抵抗の差はごく僅かであった。

#### (4) 透磁率

透磁率の測定結果をTable 3. 3に示す。 $\gamma$ 单相の鋼種であるVC8~15の固溶化処理材(As SLT)の透磁率はいずれも1.003で、ドイツのDIN規格で定められている非磁性鋼の透磁率( $\mu \leq 1.02$ )を下回り、良好な非磁性を示した。またVC8とVC9については引張り試験後の破断面の透磁率測定も行った。その結果、VC9は1.003で試験前と変化が無かったのに対し、VC8は1.030に上昇した。これは試験中に加工誘起マルテンサイトが生成したためではないかと考えられている[2]。

#### 4. 热时効試験結果

热时効試験は300°C～900°Cの温度範囲で、1～10000時間まで行った。

##### 4.1 金相観察・硬さ試験

金相観察写真をFig.4.1～4.4に示す。400°C以下ではFig.4.1に示すように、10000時間まで処理しても組織に变化は見られないのに対し、Fig.4.2に示すように500°C以上では粒界に析出が見られるようになった。600°CではFig.4.3に示すように組織が全体に黒ばみ始めていることから、粒界だけでなく粒内にも析出が始まっていると考えられる。次に650°C～900°Cの240時間の金相写真をFig.4.4に示す。240時間で組織の黒ばみから粒内析出があると考えられるのは700°C～850°Cの間で、特に750°C～800°Cの間では顕著であった。700°Cおよび850°Cでは若干減少し、650°Cおよび900°Cでは見られなくなった。

热時効後の硬さ試験の結果をFig.4.5及び4.6にSUS316Lの結果とともに示す。300°C～500°Cの温度範囲では10000時間まで処理しても硬さには大きな変化は見られなかった。550°Cでは5000時間付近から若干硬さが増加した。一方、600°Cでは240時間付近から硬さが増加し始め、ピークとなる5000時間では約340mHvに達した。650°C～700°Cの間も同様に240時間付近から硬さが増加し始めた。最も短時間で硬化したのは750°C～800°Cの間で、100時間付近から硬化している。850°C以上になると240時間でも硬化の程度は小さくなる。一方、SUS316Lでは硬さの増加が始まるのは600°Cでは10000時間、650°Cでは2000時間付近であることから、VC9鋼はSUS316Lに比べると热時効による析出が生じやすい材料であると言える。

以上の金相観察と硬さ試験の結果から、オーステナイトステンレス鋼の一般的な傾向と同様に析出はまず粒界で起こり、続いて粒内に生じるものと考えられる。また、粒界析出だけでは硬さの増加はほとんど無いが、粒内析出が始まると硬化することが分かった。また、いずれの条件に於いてもフェライトは検出されなかった。

## 4.2 引張試験

焼鈍後の引張試験の結果を Table 4. 1～4. 11 に示す。また強度及び耐力の試験温度依存性を Fig. 4. 7～4. 10 に、伸びと絞りの試験温度依存性を Fig. 4. 11～4. 14 にそれぞれ示す。また、耐力及び強度、伸び、絞りの各項目について、処理時間依存性を Fig. 4. 15～4. 17 にそれぞれ示す。破面の SEM 観察写真を Fig. 4. 18～4. 21 にそれぞれ示す。

Fig. 4. 7 及び 4. 11 から明らかなように、300°C では 10000 時間焼鈍しても強度、耐力、伸び、絞りともに未処理材と比べて大きな変化は見られなかった。破面は Fig. 4. 18(a)～(c) に示すようにいずれも延性破面で、試験温度が上昇するにつれてディンプルがはっきり見られるようになる。この傾向及び破面の形態は未処理材とほぼ同様であった。

500°C では Fig. 4. 8 及び 4. 12 に示すように、1000～2000 時間までは試験温度によらず強度、耐力、伸び、絞りともに未処理材と比べて大きな変化は見られなかった。しかし Fig. 4. 19(a)～(b) に示すように試験温度が室温～300°C では一部に粒界破面が見られた。10000 時間では強度・耐力には大きな変化は無いが、伸び、絞りはともに室温では大きく低下している。試験温度が 200°C 以上になると未処理材と同レベルの伸び、絞りになった。Fig. 4. 19(c) に示すように室温ではほぼ 100% 粒界破面で、300°C は延性破面と粒界破面が半々、500°C になるとほぼ 100% 延性破面であった。従って引張り試験においては、ほぼ 100% 粒界破面となるような粒界析出が生じて初めて伸び、絞りの低下が現れるものと考えられる。

550°C で焼鈍した試料では Fig. 4. 9 及び 4. 13 に示すように、1000 時間までは強度、耐力、伸びともに変化は無いが、絞りは低下する。2000 時間でも強度に変化は無いが、耐力が若干増加し、室温における伸び、絞りがともに低下するが、試験温度が 200°C 以上になると未処理材と同レベルになる。破面は Fig. 4. 20(a)～(b) に示すように 1000 時間、2000 時間ともに室温ではほぼ 100% 粒界破面で、300°C は延性破面で一部粒界破面、500°C になるとほぼ 100% 延性破面であった。

600°C で焼鈍した試料では Fig. 4. 10 及び 4. 14 に示すように、1000 時間すでに強度、耐力の増加と伸び、絞りの低下が見られた。強度の増加は処理時間によらず 10～20% 程度であった。耐力の増加は 1000～2000 時間では 30～40% 程度であるのに対し、10000 時間では最大で 60% にも達した。伸び、絞りは焼鈍時間の増加とともに低下の割合が大きくなり、また試験温度が低い方が低下が大きい。特に室温での伸び、絞りは 2000 時間の試料で 20% 弱、10000 時間で 10% 強まで低下する。試験温度が上昇すると伸び、絞りは増加し、2000 時間以下の試料は試験温度 400～500°C で未処理材と同レベルにまで回復するが、10000 時間の試料は未処理材の 60～70% までしか回復しない。これらの試料の破面は Fig. 4. 21(a)～(c) に示すように 1000 時間は室温はほぼ 100% 粒界破面で、300°C は延性破面で一部が粒界破面、500°C になるとほぼ 100% 延性破面であった。2000 時間は室温から 300°C まではほぼ 100% 粒界破面で、500°C になるとほぼ 100% 延性破面であった。10000 時間は室温から 500°C まではほぼ 100% 粒界破面であった。

熱時効処理を行った試料の引張り試験の応力-変位曲線を付録 Fig. A. 1～A. 4 に示す。

### 4.3 シャルピー衝撃試験

焼鈍後のシャルピー衝撃試験の結果を Table 4. 12～4. 23 に示す。熱処理時間と衝撃値及び横膨出量との関係を Fig. 4. 22 に、脆性破面率と衝撃値及び横膨出量との関係を Fig. 4. 23 に示す。破面の SEM 観察写真を Fig. 4. 24～4. 27 に示す。

Fig. 4. 22 に示すように、300°C では 10000 時間焼鈍しても衝撃値及び横膨出量には大きな変化は見られなかった。破面は Fig. 4. 24 に示すようにいずれも延性破面である。

500°C では 1000 時間までは大きな変化は無いが、2000 時間で衝撃値及び横膨出量が若干低下し始め、10000 時間では衝撃値が未処理母材の約半分に、横膨出量がおよそ 6 割に低下した。破面は Fig. 4. 25 に示すように 2000 時間までは延性破面の中に一部粒界破面が見られるが、10000 時間にになると粒界破面の比率が高くなる。

550°C では 1000 時間では衝撃値が未処理母材の 7～8 割に、横膨出量がおよそ 8 割に低下した。2000 時間では衝撃値が約半分に、横膨出量がおよそ 6 割に低下した。破面は Fig. 4. 26 に示すように 1000 時間では延性破面と粒界破面が半々であるが、2000 時間にになるとほぼ 100% 粒界破面になる。

600°C では 1000 時間焼鈍した段階ですでに衝撃値が未処理母材の 1/4 に、横膨出量が 1/3 に低下した。2000 時間以上焼鈍した試料ではそれぞれ未処理母材の 10～20% 程度と著しく脆化していることが分かる。破面は Fig. 4. 27 に示すようにほぼ 100% 粒界破面である。

また、SEM 写真より求めた脆性破面率と衝撃値及び横膨出量との関係を Fig. 4. 23 に示す。脆性破面率は処理温度、時間の増加とともに高くなり、それとともに衝撃値及び横膨出量が低下することが分かる。しかし脆性破面率は 550°C、2000 時間でほぼ 100% に達し、衝撃値及び横膨出量はそれぞれ未処理母材の 5 割及び 6 割に低下しているが、それ以降も衝撃値及び横膨出量は低下し続けることが分かる。粒界析出物の厚みの増加と粒内析出に伴う硬化のためと考えられる。

各試料のシャルピー衝撃試験の荷重-変位曲線を付録 Fig. A. 5～A. 9 に示す。

以上の事をまとめると、VC9 鋼は JT-60SU の運転温度である 300°C では 10000 時間まで焼鈍しても金相、硬さ、フェライト測定、引張り試験及びシャルピー衝撃試験のいずれに於いても変化は認められ無いことから、相変化や析出物などは生じず相安定性が保たれていると言える。一方、500°C 以上では熱処理が一定時間を越えると粒界に析出物が現れ始め、引張り及びシャルピー衝撃試験後の破面に脆性破面が現れる始める。脆性破面率の増加とともにシャルピー衝撃値及び横膨出量は低下するが、引張り試験では変化は認められない。脆性破面率がほぼ 100% に達すると (550°C、2000 時間)、引張り試験において伸び、絞りの低下が認められるようになる。さらに焼鈍温度、時間を増加させて粒内にも析出物が現れ始めると、金相では組織が黒ばみ始め、硬さの増加、引張り強度及び耐力の増加が認められるようになる。また、脆性破面率が 100% に達した後も粒内の硬化により衝撃値及び横膨出量はさらに低下し続ける。

## 5.まとめ

JT-60SU 真空容器用鋼として開発した低放射化 Mn-Cr 鋼について、物理的特性および熱時効試験を行った。結果については ITER の真空容器用鋼として用いられる SUS316L の結果と比較検討した。

### 1. 物理的特性

物理的特性として密度、熱的特性、電気的特性及び磁気的特性の評価を行った。その結果、以下の事が分かった。

- (1) VC9 の密度は SUS316L よりもやや低い。
- (2) VC9 の熱伝導率は Fe-Cr 系ステンレスと Fe-Cr-Ni 系ステンレスの中間ぐらいである。
- (3) VC9 の比電気抵抗は SUS316L とほぼ同じ程度であった。
- (4) 透磁率は  $\gamma$  単相の鋼種 (VC8~15) ではいずれも良好な非磁性を示した。

### 2. 熱時効試験

VC9 の熱時効試験を行った結果、以下の事が分かった。

- (1) JT-60SU の運転温度である 300°C では 10000 時間まで焼鈍しても金相、硬さ、引張り及びシャルピー衝撃試験のいずれに於いても変化は認められず、相安定性が保たれていると言える。
- (2) 500°C 以上では焼鈍が一定時間を越えると粒界析出が生じ、引張り及びシャルピー衝撃試験後の破面に脆性破面が現れ始める。脆性破面率の増加とともに衝撃値及び横膨出量は低下するが、引張り試験では変化は認められない。
- (3) シャルピー衝撃試験後の脆性破面率がほぼ 100% に達すると (550°C、2000 時間) 、引張り試験においても伸び、絞りの低下が認められるようになる。さらに焼鈍温度、時間を増加させると、金相では組織が黒ばみ始め、硬さの増加、引張り強度及び耐力の増加が認められるようになり、粒内析出が現れ始めていることを示している。
- (4) 脆性破面率が 100% に達した後も粒内の硬化により衝撃値及び横膨出量はさらに低下し続ける。
- (5) どの温度、時間においてもフェライトは検出されなかった事から、析出物は非磁性の炭化物や  $\sigma$  相などではないかと考えられる。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、多くの援助と助言を頂きました旧高温材料強度研究室室長衛藤基邦氏（現ワシントン事務所所長）、炉心プラズマ研究部炉心プラズマ計画室の方々ならびに原子力エンジニアリングの大山剛氏と森順二氏に深く感謝いたします。また、シャルピー衝撃試験を行うに当たり、快く装置を使わせて下さった原子炉安全工学部機器信頼性研究室鬼沢邦雄氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] K. Ushiga, G. Kurita, N. Toyoshima and et al., IAEA-F1-CN-69/FTP/12(1998).
- [2] S. Ishiyama, K. Fukaya, M. Eto, M. Kikuchi, I. Sato, M. Kusuhashi, T. Hatakeyama and H. Takahashi, J. At. Energy Soc. Japan Vol.42, No.2, 116-123(2000).
- [3] H. Takahashi, Y. Shindo, H. Kinoshita and et al., J. of Nuclear Mater. Vol.258-263, 1644-1650 (1998).
- [4] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, M. Eto, I. Sato, M. Kusuhashi, T. Hatakeyama, H. Takahashi and M. Kikuchi, JAERI-Tech 99-076(1999).
- [5] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, M. Eto, I. Sato, M. Kusuhashi, T. Hatakeyama, H. Takahashi and M. Kikuchi, Proceedings of 9th International Conference on Fusion Reactor Material (ICFRM-9).
- [6] A. A. Tavassoli, "Assessment of Austenitic Stainless Steels", N. T. SRMA 94-2061, F. A. 3591-ITER(1994).
- [7] ステンレス協会編、"ステンレス鋼便覧第3版"、日刊工業新聞社、1429-1430(1996).
- [8] D. Peckner and I. M. Bernstein, "Handbook of Stainless Steels", McGraw-Hill, New York(1997).

Table 2. 1 Chemical composition of VC series and SUS316L (wt%).

		Mn	Cr	Ni	Mo	C	N	Si	P	S	Co
VC0 1996	Nominal	24.5	13.5	—	—	0.02	0.20	0.50	—	—	—
	product	24.85	13.46	0.01	0.01	0.019	0.227	0.48	0.024	0.008	0.002
VC2 1996	Nominal	18.5	15.2	—	—	0.02	0.20	0.30	—	—	—
	product	18.36	15.08	0.01	0.01	0.022	0.205	0.32	0.024	0.005	0.003
VC3 1996	Nominal	15.5	15.2	—	—	0.02	0.20	0.30	—	—	—
	product	15.16	15.08	0.01	0.01	0.023	0.193	0.29	0.026	0.004	0.003
VC4 1996	Nominal	12.5	15.2	—	—	0.02	0.20	0.30	—	—	—
	product	12.39	15.16	0.01	0.01	0.024	0.243	0.29	0.026	0.003	0.003
VC8 1996	Nominal	15.5	15.2	—	—	0.20	0.20	0.30	—	—	—
	product	15.47	15.07	0.01	0.01	0.020	0.213	0.26	0.024	0.004	<0.01
VC9 1996	Nominal	15.5	16.0	—	—	0.20	0.20	0.30	—	—	—
	product	15.31	16.02	0.01	—	0.21	0.205	0.30	0.026	0.005	<0.01
VC10 1997	Nominal	15.5	15.2	—	—	0.10	0.20	0.30	—	—	—
	product	15.49	15.02	0.01	—	0.10	0.181	0.24	0.024	0.003	—
VC11 1997	Nominal	15.5	15.2	—	—	0.15	0.20	0.30	—	—	—
	product	15.35	15.14	0.01	—	0.15	0.172	0.23	0.024	0.003	—
VC12 1997	Nominal	12.5	15.5	—	—	0.10	0.20	0.30	—	—	—
	product	12.42	15.73	0.01	—	0.10	0.220	0.24	0.023	0.004	—
VC13 1997	Nominal	12.5	16.0	—	—	0.15	0.20	0.30	—	—	—
	product	12.58	15.94	0.01	—	0.15	0.238	0.24	0.023	0.004	—
VC14 1997	Nominal	12.5	16.5	—	—	0.20	0.20	0.30	—	—	—
	product	12.50	16.39	0.01	—	0.20	0.203	0.23	0.023	0.003	—
VC15 1997	Nominal	12.5	17.0	—	—	0.20	0.20	0.30	—	—	—
	product	12.15	17.12	0.01	—	0.20	0.198	0.24	0.024	0.004	—
SUS 316L	JIS spec.	<2.00	16~18	12~15	2~3	<0.03	—	<1.00	<0.045	<0.03	—
	product	1.07	17.16	12.07	2.14	0.011	0.07	0.51	0.021	0.001	—

Table 2. 2 Annealing conditions and evaluated items of phase stability tests on VC9.

Time \ Temp.	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	750°C	800°C	850°C	900°C
1h	Metallographic Hardness	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		● ○ ○ ○ ○
2h	Corrosion	— — — — —									— — — — —		— — — — —
5h	Metallographic Hardness	— — — — —									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
20h	Metallographic Hardness	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
100h	Metallographic Hardness	— — — — —									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
240h	Metallographic Hardness	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
500h	Metallographic Hardness	○ ○ ○ ○ ○									○ ○ ○ ○ ○		— — — — —
1000h	Metallographic Hardness Tensile and Charpy impact	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
2000h	Metallographic Hardness Tensile and Charpy impact	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
5000h	Metallographic Hardness Tensile and Charpy impact	● ○ ○ ○ ○									● ○ ○ ○ ○		— — — — —
10000h	Metallographic Hardness Tensile and Charpy impact	— — — — —							○ ○ ○ ○ ○		● ○ ○ ○ ○		— — — — —

● : Reported in this study.  
 ○ : Under processing.

Table 3. 1 Results of density measurement of VC9 and SUS316L .

	VC9	SUS316L
Test temperature	26.6°C	
Density of Acetone ( $10^3$ kg/m $^3$ )	0.7837	
Weight in air ( $10^3$ kg)	23.5157	32.1530
Weight in Acetone ( $10^3$ kg)	21.1428	28.9886
Density ( $10^3$ kg/m $^3$ )	7.7572	7.9534
Literature value	—	7.96 [6]

Table 3. 2 Thermal properties of VC8 and VC9

Test temp.		Thermal diffusivity ( $10^{-6}$ m $^2$ /s)	Specific Heat (W s/(kg K))	Density ( $10^3$ kg/m $^3$ )	Thermal conductivity (W/(m K))
VC8	26°C (299K)	4.36	500	7.81	17.0
	308°C (581K)	4.89	582	7.81	22.2
VC9	26°C (299K)	4.94	494	7.76	18.9
	307°C (580K)	5.01	556	7.76	21.6

Table 3. 3 Ferrite content and magnetic permiability of VC series.

	Phase (as cast)	Ferrite content (as SLT)(%)	Magnetic Permiability	
			as SLT	after tensile test
VC0	$\gamma + \delta$	0	1.003	1.001
VC2	$\gamma + \delta$	0	1.007	1.195
VC3	$\gamma + \delta$	0	1.011	>2
VC4	$\gamma + \delta$	0	1.004	>2
VC8	$\gamma$	0	1.003	1.030
VC9	$\gamma$	0	1.003	1.003
VC10	$\gamma$	0	1.003	—
VC11	$\gamma$	0	1.003	—
VC12	$\gamma$	0	1.003	—
VC13	$\gamma$	0	1.003	—
VC14	$\gamma$	0	1.003	—
VC15	$\gamma$	0	1.003	—

Table 4. 1 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (300°C × 1000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M1-1	R.T.	427	893	63.1	65.8	69.1	B
M1-2	200	266	641	57.0	62.8	66.8	B
M1-3	300	240	600	56.2	66.0	70.5	B
M1-4	400	226	556	46.8	61.2	76.2	B
M1-5	500	193	530	38.2	47.5	66.8	A
M1-6	R.T.	427	893	70.5	73.3	62.4	A
M1-7	200	258	630	64.0	70.4	69.2	B
M1-8	300	247	614	58.0	65.3	72.3	B
M1-9	400	249	560	44.7	55.7	74.1	B
M1-10	500	214	526	36.7	42.9	68.8	B

Table 4. 2 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (300°C × 2000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M5-1	R.T.	414	893	65.2	68.9	51.0	B
M5-2	200	259	657	62.8	70.0	71.5	B
M5-3	300	258	621	60.0	70.4	67.2	B
M5-4	400	258	567	42.7	55.1	69.8	A
M5-5	500	196	509	35.7	43.7	66.9	B

Table 4. 3 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (300°C × 10000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M2-1	R.T.	408	893	64.8	68.4	52.7	B
M2-2	200	288	662	59.5	66.3	64.9	B
M2-3	300	259	616	52.8	67.9	67.2	B
M2-4	400	256	561	44.5	58.0	69.6	B
M2-5	500	204	524	37.7	46.6	73.2	B

Table 4. 4 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (500°C × 1000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M3-1	R.T.	408	846	72.8	81.8	48.7	A
M3-2	200	254	642	60.2	65.9	67.3	B
M3-3	300	220	614	56.2	69.4	73.5	B
M3-4	400	222	574	47.2	58.2	78.0	B
M3-5	500	195	532	38.5	45.4	70.9	B
M3-6	R.T.	424	855	68.7	77.5	49.4	B
M3-7	200	245	639	62.7	67.4	73.9	B
M3-8	300	230	613	55.2	67.0	72.8	B
M3-9	400	224	572	46.2	61.4	72.4	B
M3-10	500	197	533	38.2	48.1	69.6	B

Table 4. 5 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (500°C × 2000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M6-1	R.T.	417	876	67.8	74.3	57.0	B
M6-2	200	252	644	59.8	67.0	69.6	B
M6-3	300	263	622	54.3	68.1	68.9	A
M6-4	400	196	567	44.0	55.5	69.6	B
M6-5	500	214	513	33.8	43.5	64.7	B

Table 4. 6 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (500°C × 10000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M4-1	R.T.	421	830	45.5	45.8	33.2	B
M4-2	200	273	654	58.2	65.0	64.0	B
M4-3	300	252	623	53.3	64.1	65.5	A
M4-4	400	267	582	43.5	58.2	69.0	B
M4-5	500	214	513	35.8	43.5	64.7	B

Table 4. 7 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (550°C × 1000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M7-1	R.T.	390	863	66.0	66.5	44.2	B
M7-2	200	251	656	65.2	72.2	69.0	B
M7-3	300	245	624	54.5	66.2	70.4	B
M7-4	400	224	569	45.7	61.3	70.7	A
M7-5	500	208	536	38.7	47.4	71.2	B

Table 4. 8 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (550°C × 2000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M9-1	R.T.	443	835	33.8	34.0	26.8	B
M9-2	200	308	682	55.7	62.9	64.9	B
M9-3	300	304	660	45.7	54.5	64.0	A
M9-4	400	316	600	39.2	50.7	66.6	A
M9-5	500	230	539	34.8	43.7	69.8	A

Table 4. 9 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (600°C × 1000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
M0-1	R.T.	455	857	28.1	28.1	24.4	B
M0-2	200	351	705	44.3	49.2	50.9	A
M0-3	300	353	692	39.5	48.1	51.5	A
M0-4	400	294	601	40.5	50.4	68.2	B
M0-5	500	294	553	30.8	38.1	65.9	B

Table 4. 10 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (600°C × 2000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
T1-1	R.T.	498	890	19.7	19.7	17.5	C
T1-2	200	383	708	32.0	35.9	49.1	B
T1-3	300	345	698	35.8	41.4	43.7	A
T1-4	400	326	647	35.2	43.5	59.4	B
T1-5	500	276	550	28.0	35.1	65.4	B
T1-6	R.T.	551	893	18.5	18.5	16.3	A
T1-7	200	362	710	31.7	36.5	47.5	B
T1-8	300	353	697	30.0	34.8	46.6	B
T1-9	400	320	629	30.3	42.4	58.6	B
T1-10	500	264	556	26.5	33.1	65.7	B

Table 4. 11 Results of tensile tests of annealed VC9 base metal (600°C × 10000 h).

T.P. No.	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon_{uni.}$ (%)	$\varepsilon_{total}$ (%)	RA (%)	Location of failure
T2-1	R.T.	533	900	11.9	11.9	12.1	A
T2-2	200	464	726	21.5	26.2	34.4	B
T2-3	300	400	681	19.3	23.2	33.6	B
T2-4	400	365	639	22.3	28.8	41.9	B
T2-5	500	318	554	16.5	25.3	51.1	A

Table 4.12 Results of Charpy impact tests (base metal, test temp. ; R.T.).

T.P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M1	85	211	~100	1.78
M2	83	206	~100	1.69
1B1	82	204	~100	1.60
1B2	84	207	~100	1.80
Ave.	<u>83.5</u>	<u>207</u>	<u>100</u>	<u>1.72</u>

Table 4.13 Results of Charpy impact tests (300°C × 1000h, test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M1-1	79.3	197.9	99.3	1.96
M1-2	74.7	186.6	—	1.68
M1-3	77.9	194.6	—	1.93

Table 4.14 Results of Charpy impact tests (300°C × 2000h, test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M5-1	77.1	193.2	—	1.81
M5-2	87.5	219.2	—	1.93
M5-3	92.5	231.1	—	1.94

Table 4.15 Results of Charpy impact tests (300°C × 10000h, test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M2-1	78.7	196.8	98.7	1.70
M2-2	76.3	191.2	—	1.73
M2-3	86.7	217.0	—	1.77

Table 4.16 Results of Charpy impact tests (500°C × 1000h,test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M3-1	82.3	205.3	87.0	1.81
M3-2	76.8	191.9	—	1.90
M3-3	75.2	188.0	—	1.59

Table 4.17 Results of Charpy impact tests (500°C × 2000h,test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M6-1	67.7	169.2	—	1.51
M6-2	75.5	188.5	—	1.58
M6-3	75.8	189.2	—	1.67

Table 4.18 Results of Charpy impact tests (500°C × 10000h,test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M4-1	46.3	116.1	29.9	1.17
M4-2	48.8	121.9	—	1.23
M4-3	45.1	112.6	—	1.19

Table 4.19 Results of Charpy impact tests (550°C × 1000h, test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M7-1	56.1	140.3	54.3	1.39
M7-2	62.8	157.0	—	1.48
M7-3	61.7	154.4	—	1.46

Table 4.20 Results of Charpy impact tests (550°C × 2000h, test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M9-1	40.8	102.0	~0	1.05
M9-2	38.7	96.8	—	1.02
M9-3	42.5	105.9	—	1.13

Table 4. 21 Results of Charpy impact tests (600°C × 1000h,test temp. ; R.T.)

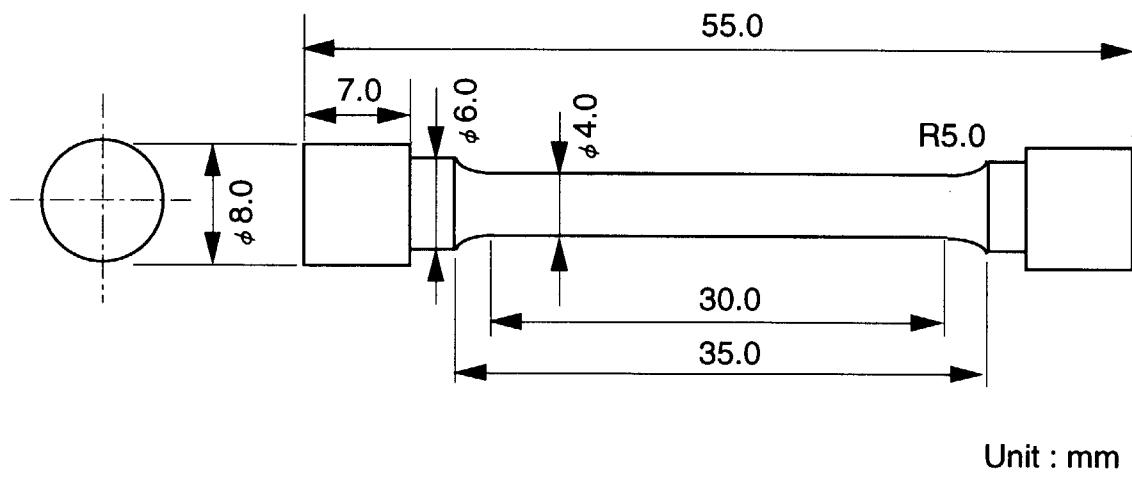
T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M0-1	26.0	64.6	~0	0.82
M0-2	23.2	58.3	—	0.71
M0-3	24.2	60.7	—	0.77

Table 4. 22 Results of Charpy impact tests (600°C × 2000h,test temp. ;R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
T1-1	12.1	30.2	~0	0.34
T1-2	13.1	32.7	—	0.38
T1-3	14.5	36.2	—	0.42

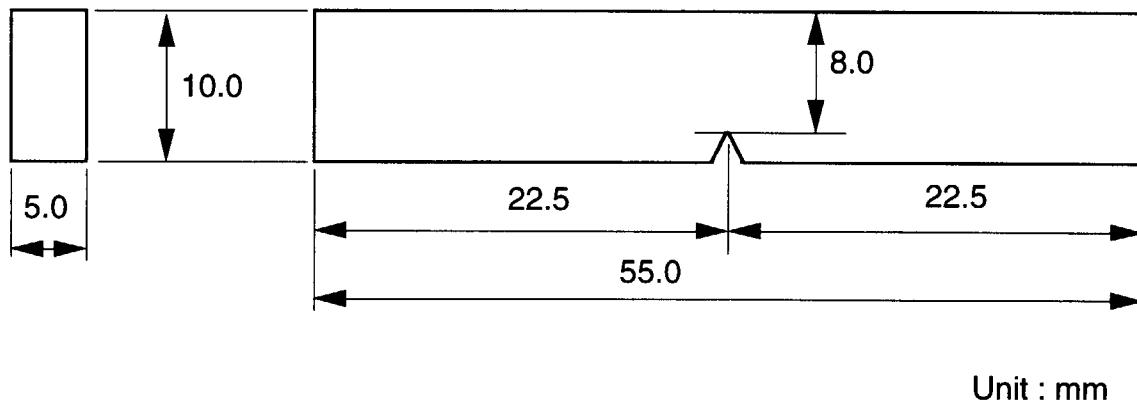
Table 4. 23 Results of Charpy impact tests (600°C × 10000h,test temp. ; R.T.)

T. P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
T2-1	9.5	23.7	~0	0.19
T2-2	9.7	24.3	—	0.20
T2-3	9.7	24.4	—	0.22



Unit : mm

Fig. 2. 1 Test piece for tensile test.



Unit : mm

Fig. 2. 2 Test piece for half-size charpy impact test.

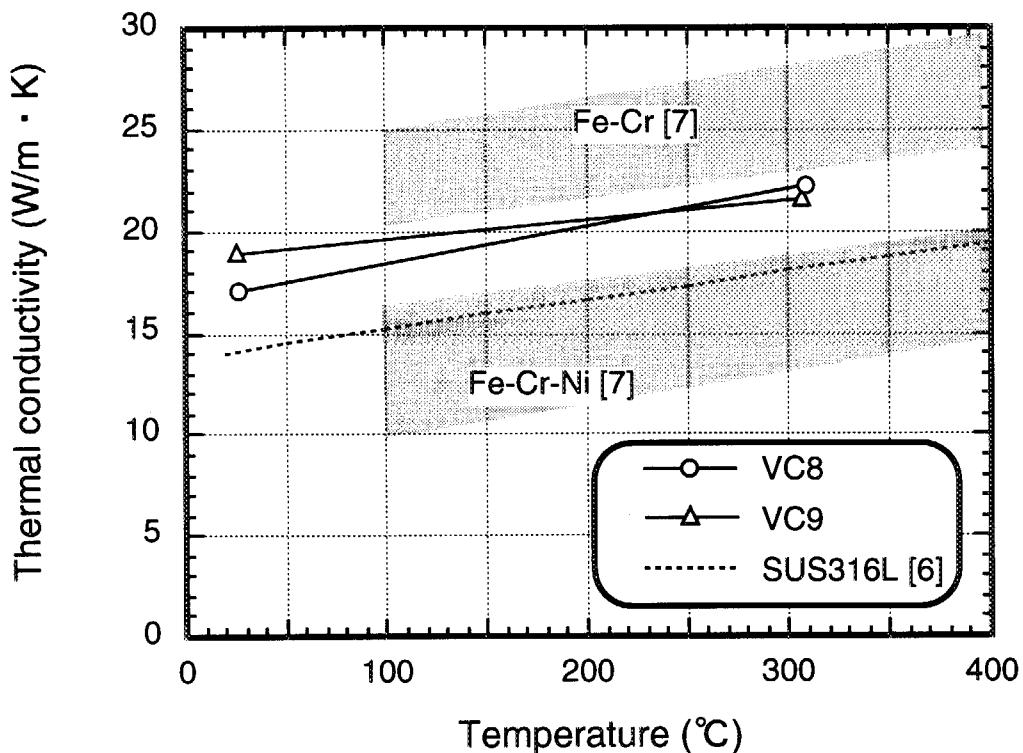


Fig. 3. 1 Thermal conductivity of VC8, VC9 and SUS316.

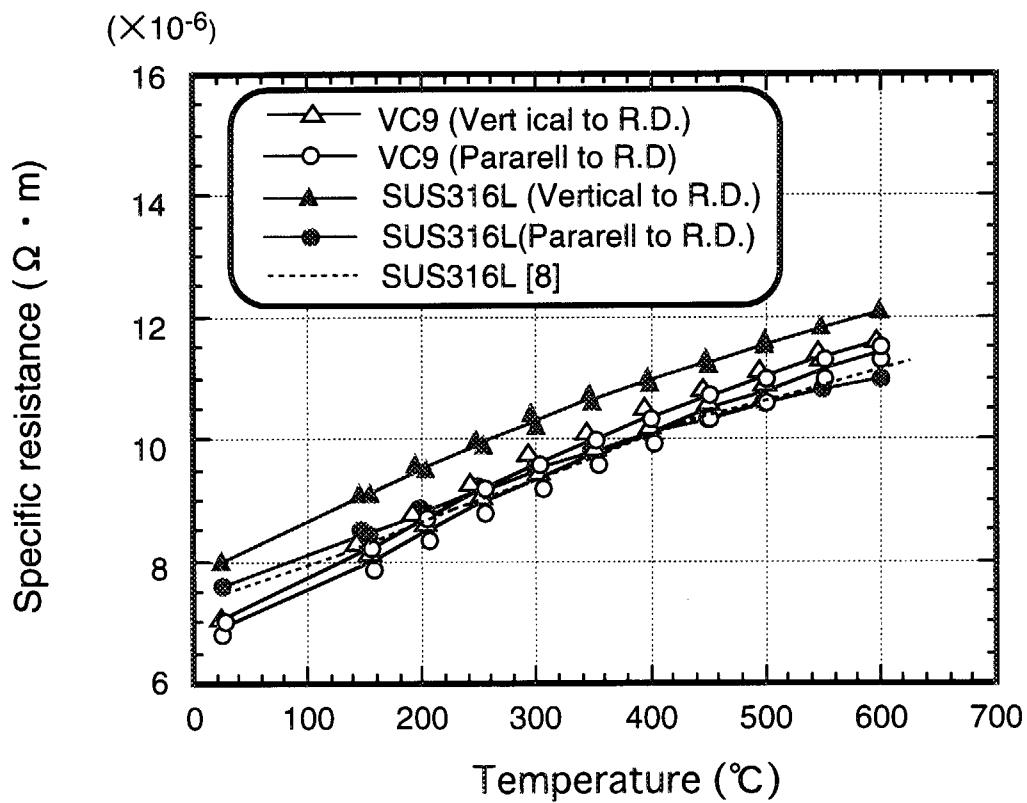


Fig. 3. 2 Specific resistance of VC9 and SUS316L.

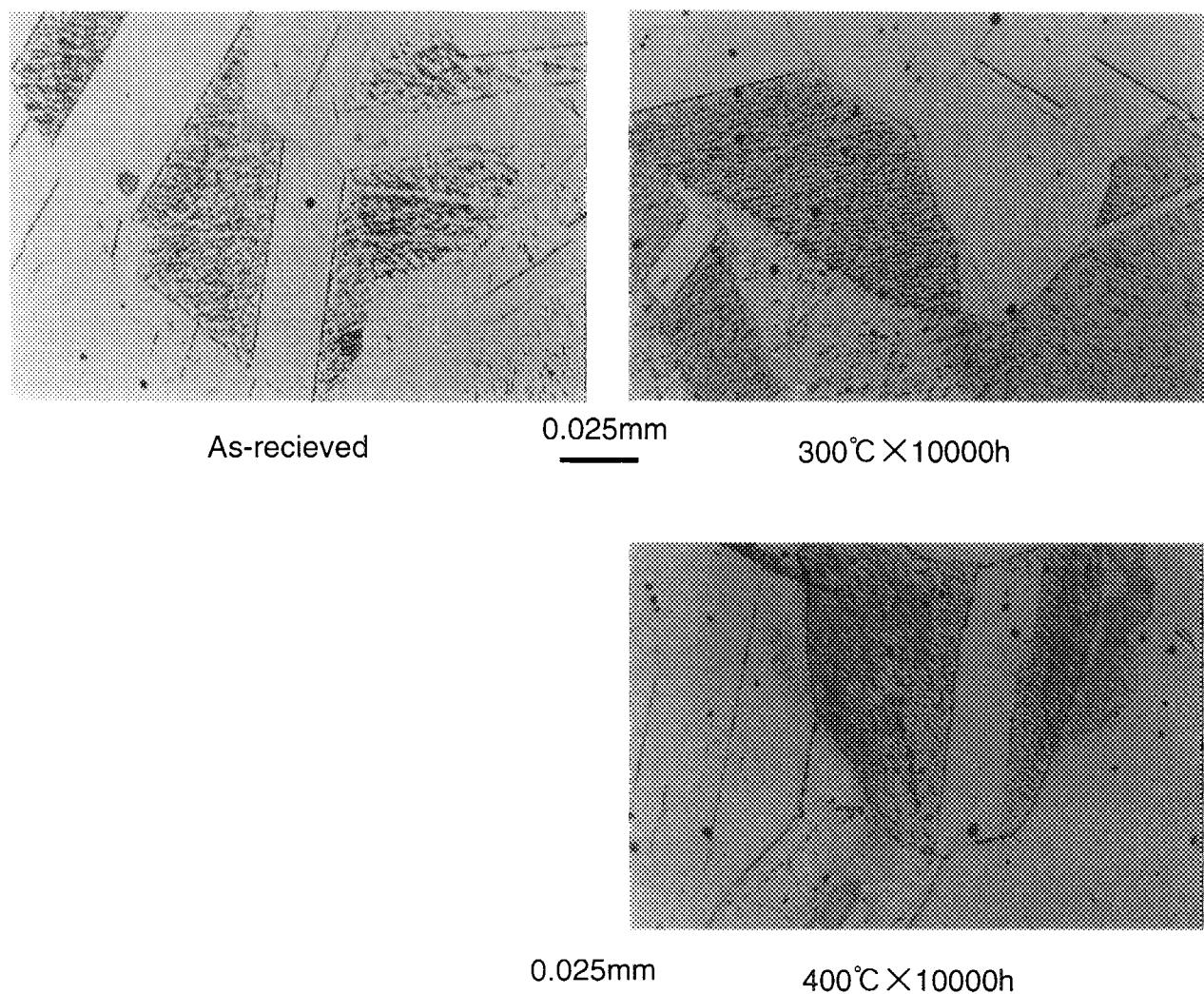


Fig. 4. 1 Metallographic observation of annealed VC9 base metal (300~400°C).

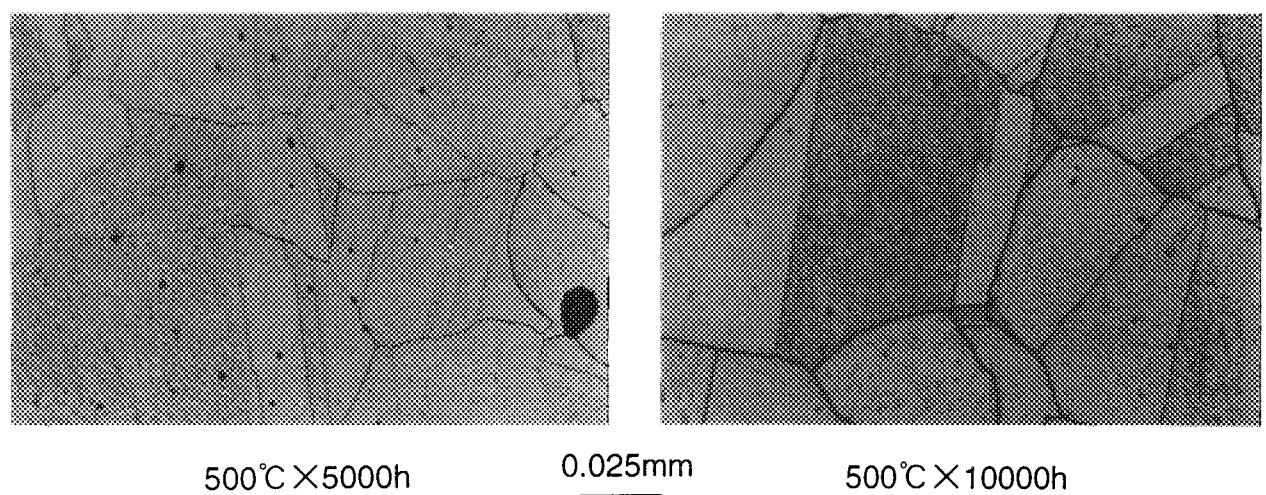


Fig. 4. 2 Metallographic observation of annealed VC9 base metal (500°C).

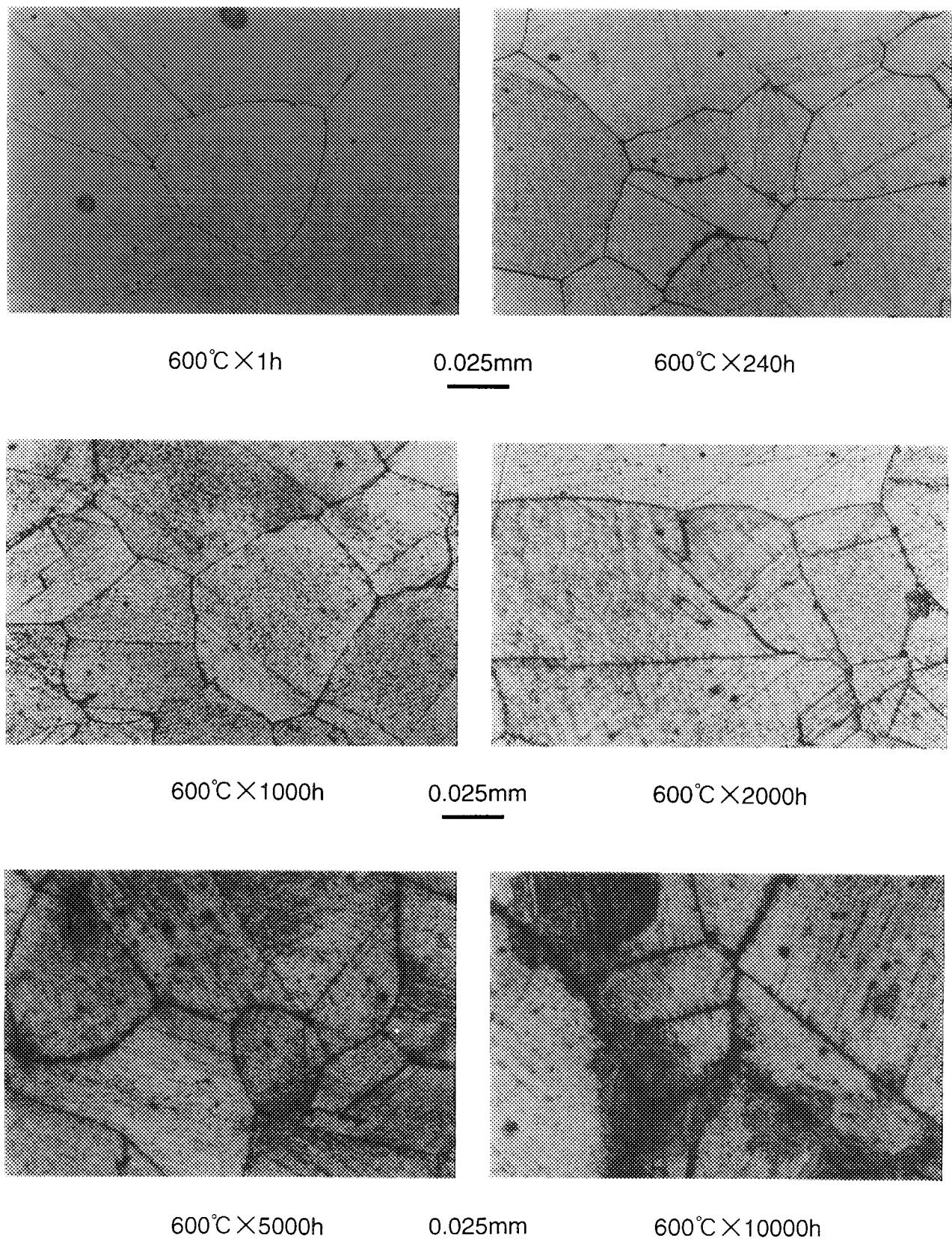


Fig. 4. 3 Metallographic observation of annealed VC9 base metal ( $600^{\circ}\text{C}$ ).

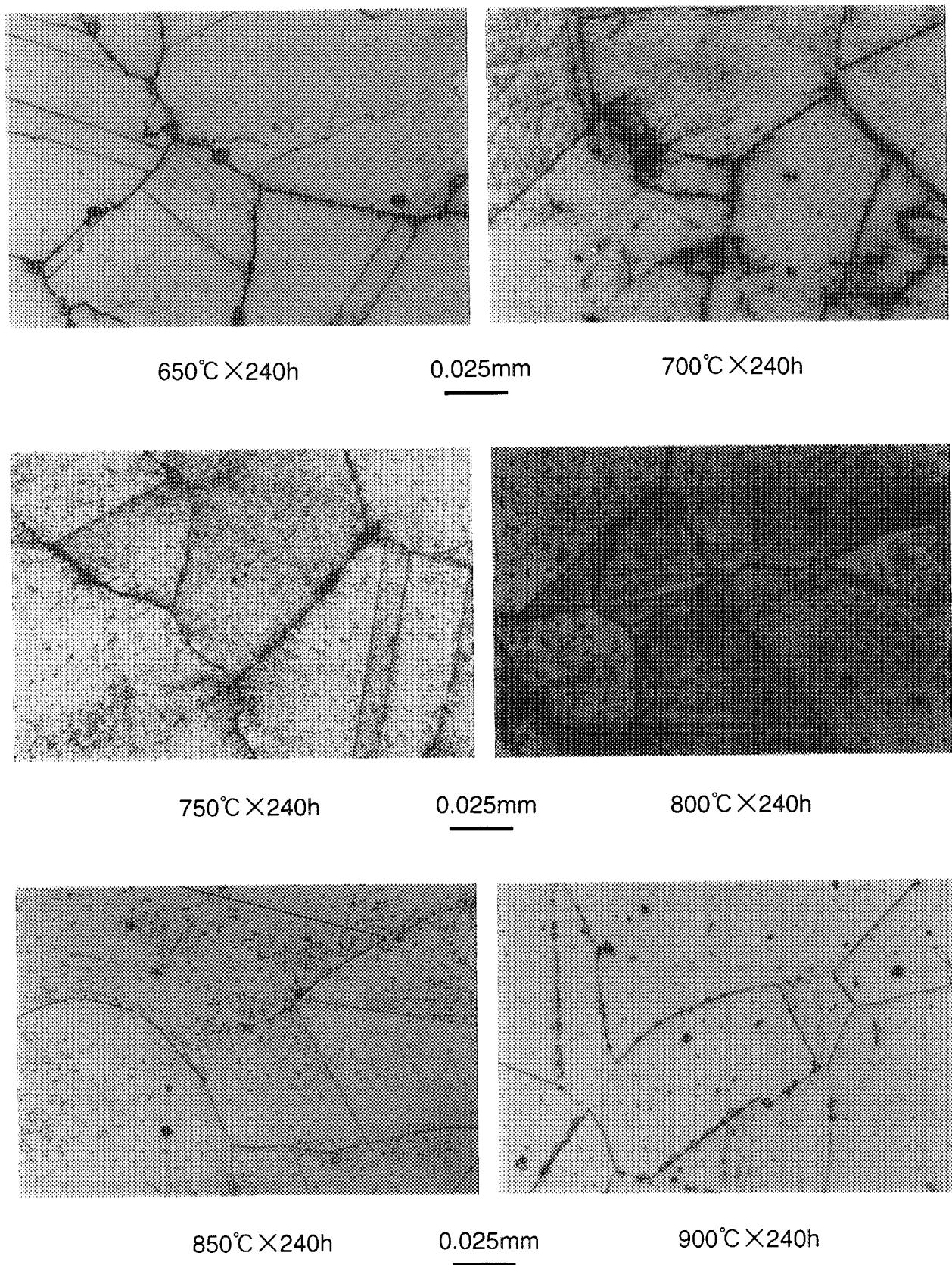


Fig. 4. 4 Metallographic observation of annealed VC9 base metal ( $650\sim 900^{\circ}\text{C}$ ).

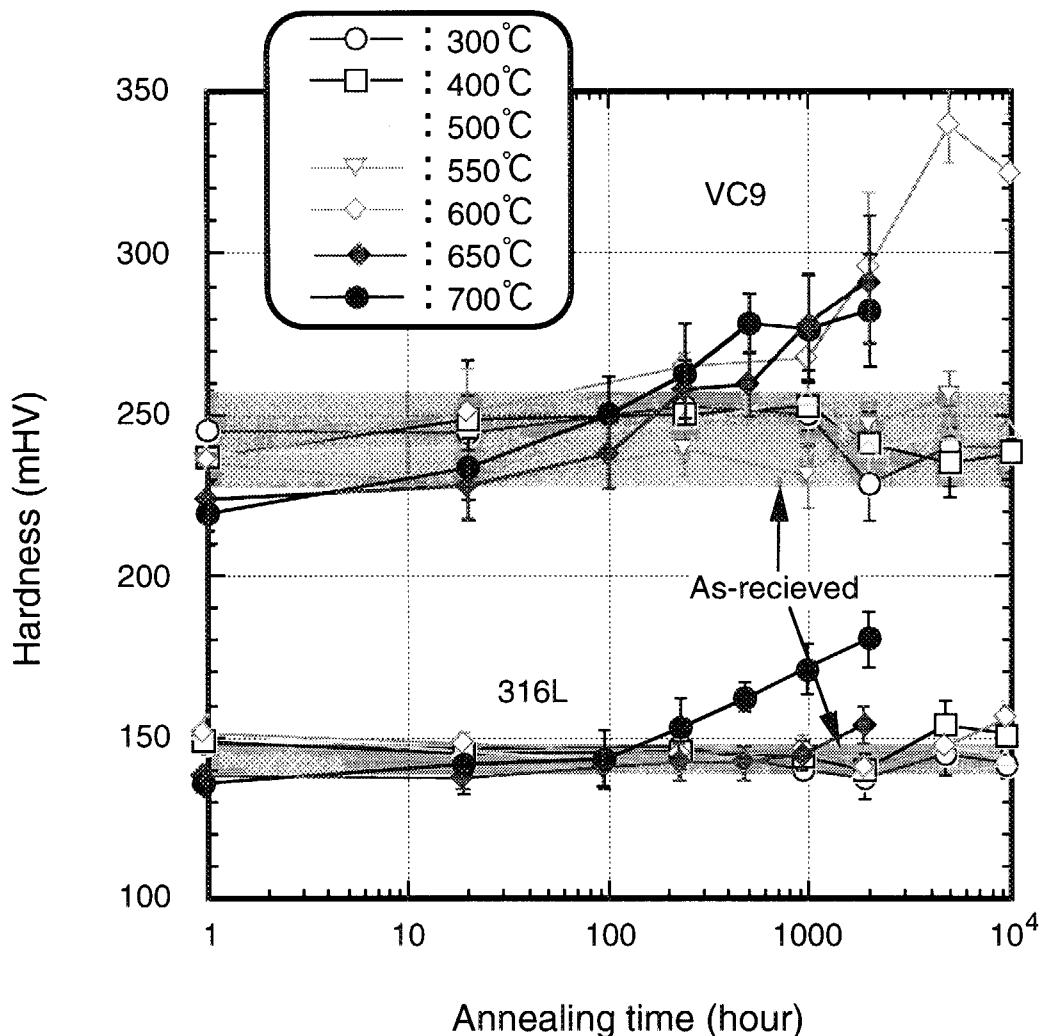


Fig. 4. 5 Results of hardness tests on annealed VC9 and type 316L stainless steel (300°C ~700°C).

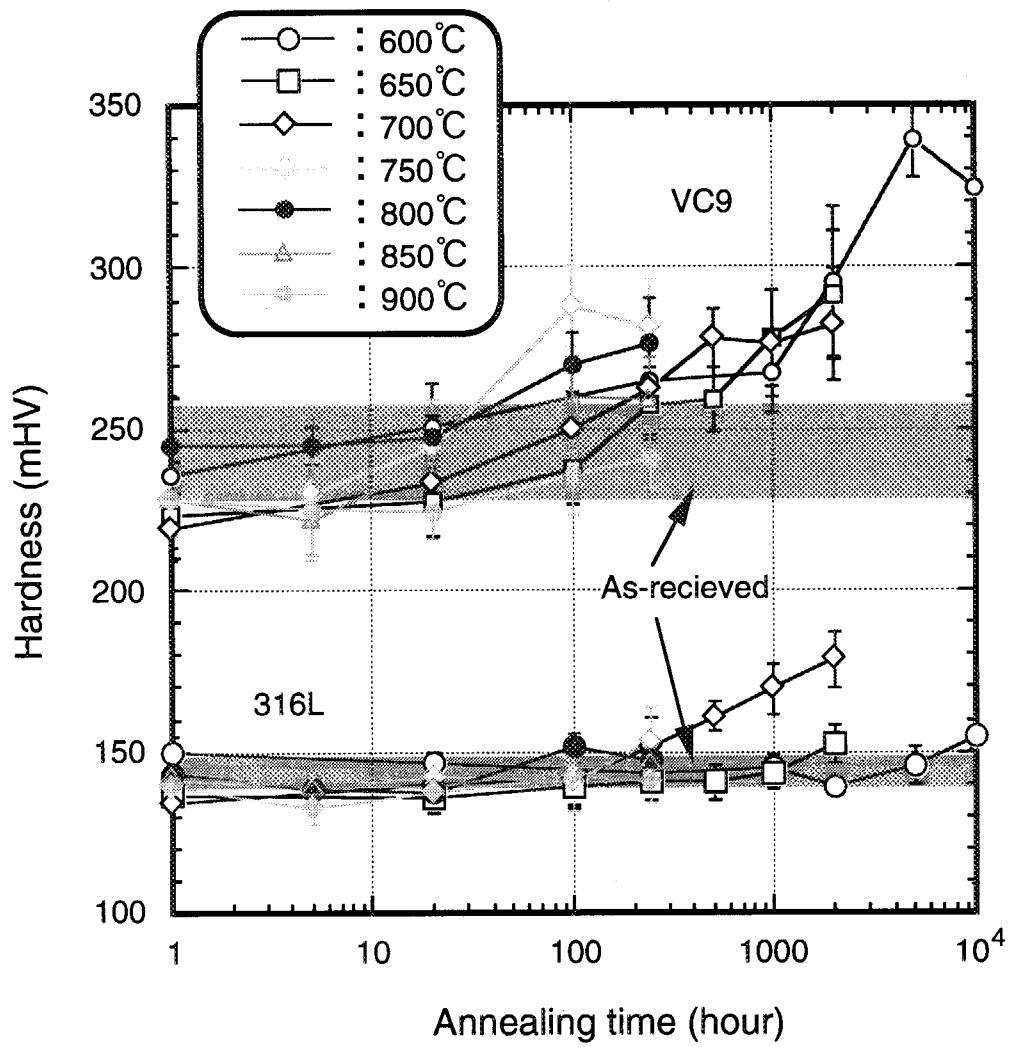


Fig. 4. 6 Results of hardness tests on annealed VC9 and type 316L stainless steel (600°C ~900°C).

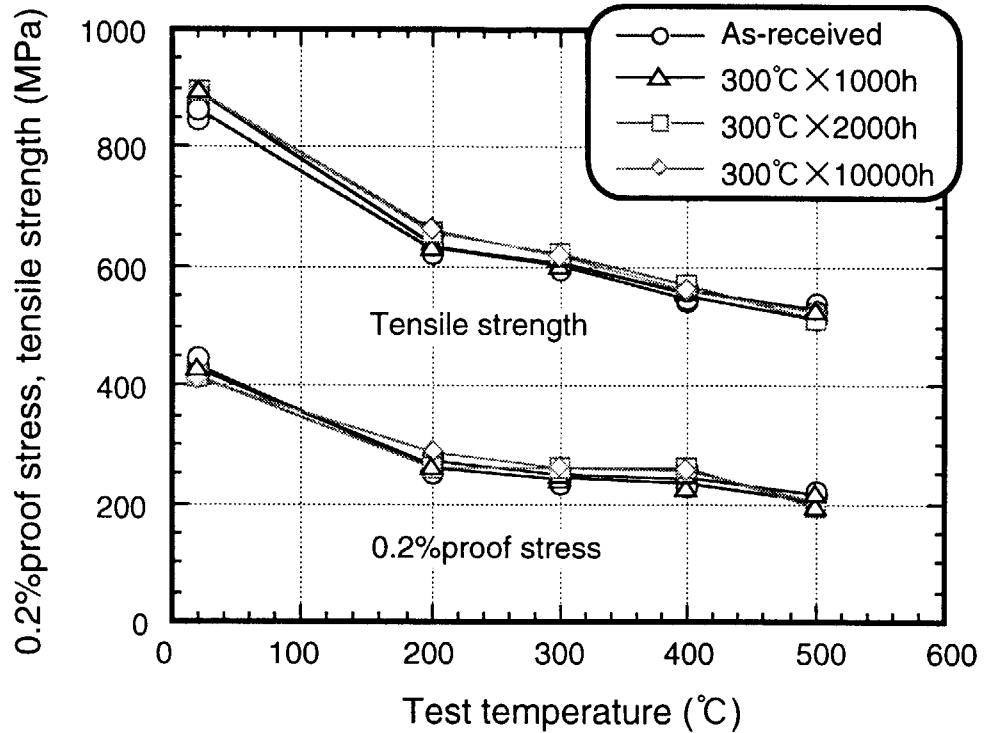


Fig. 4. 7 Test temperature dependence of 0.2% proof stress and tensile strength of VC9 base metal annealed at 300°C.

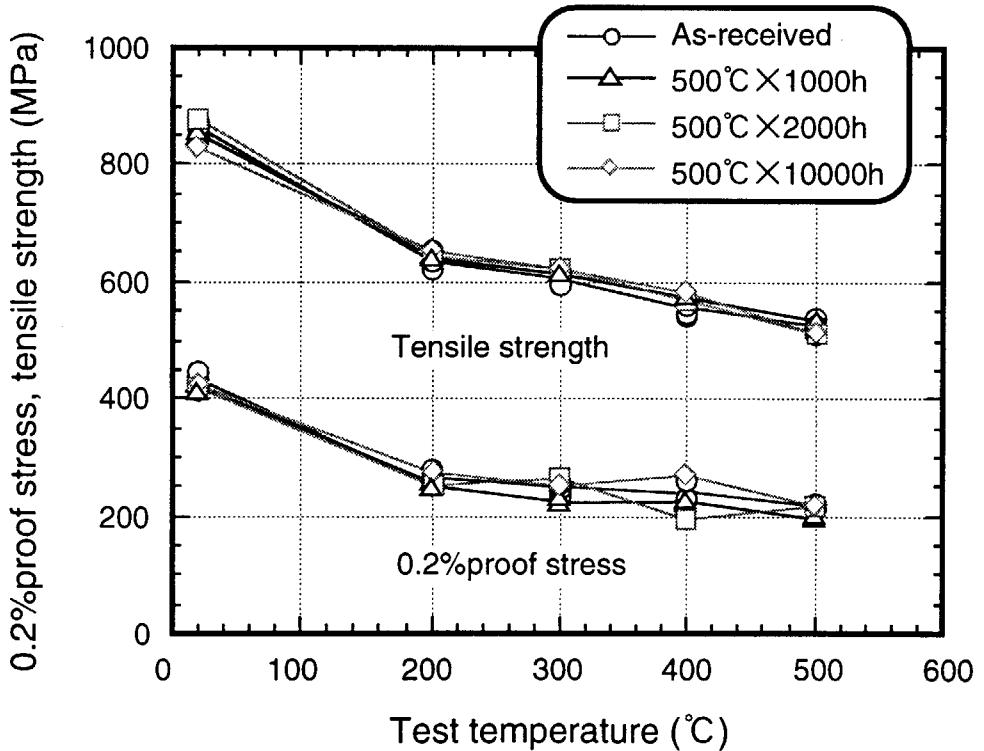


Fig. 4. 8 Test temperature dependence of 0.2% proof stress and tensile strength of VC9 base metal annealed at 500°C.

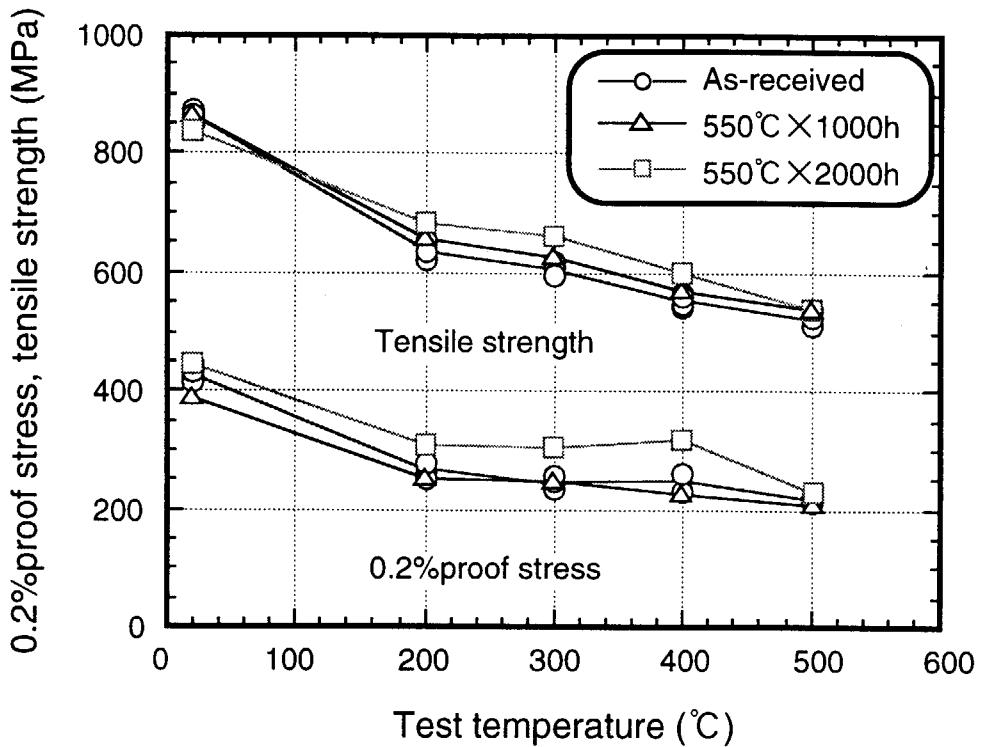


Fig. 4. 9 Test temperature dependence of 0.2% proof stress and tensile strength of VC9 base metal annealed at 550°C.

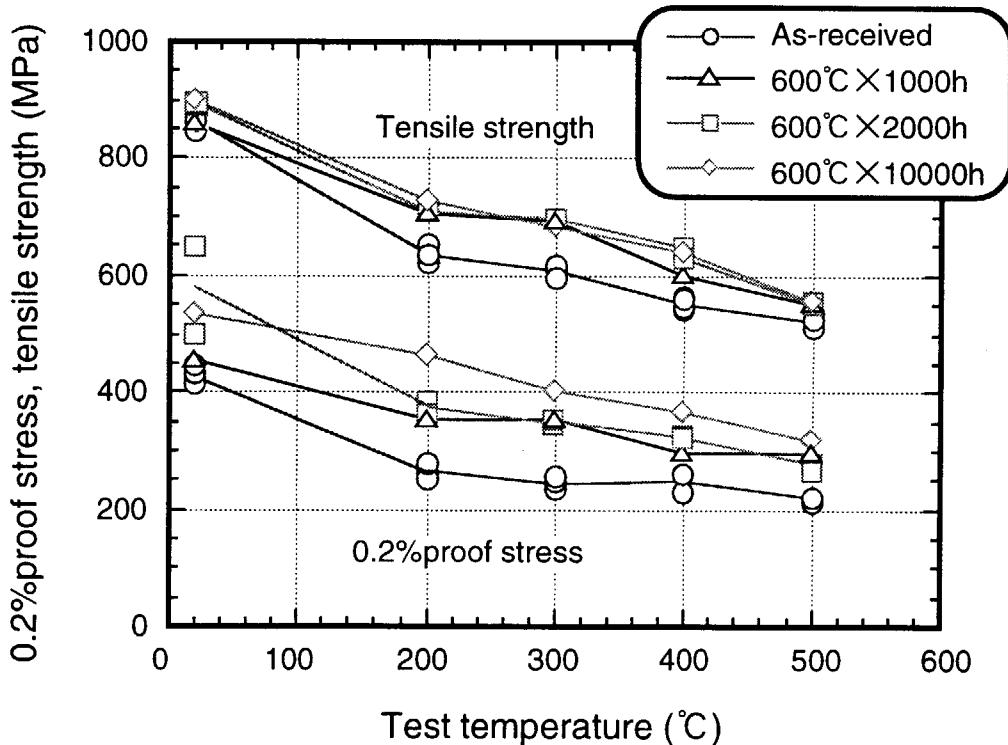


Fig. 4. 10 Test temperature dependence of 0.2% proof stress and tensile strength of VC9 base metal annealed at 600°C.

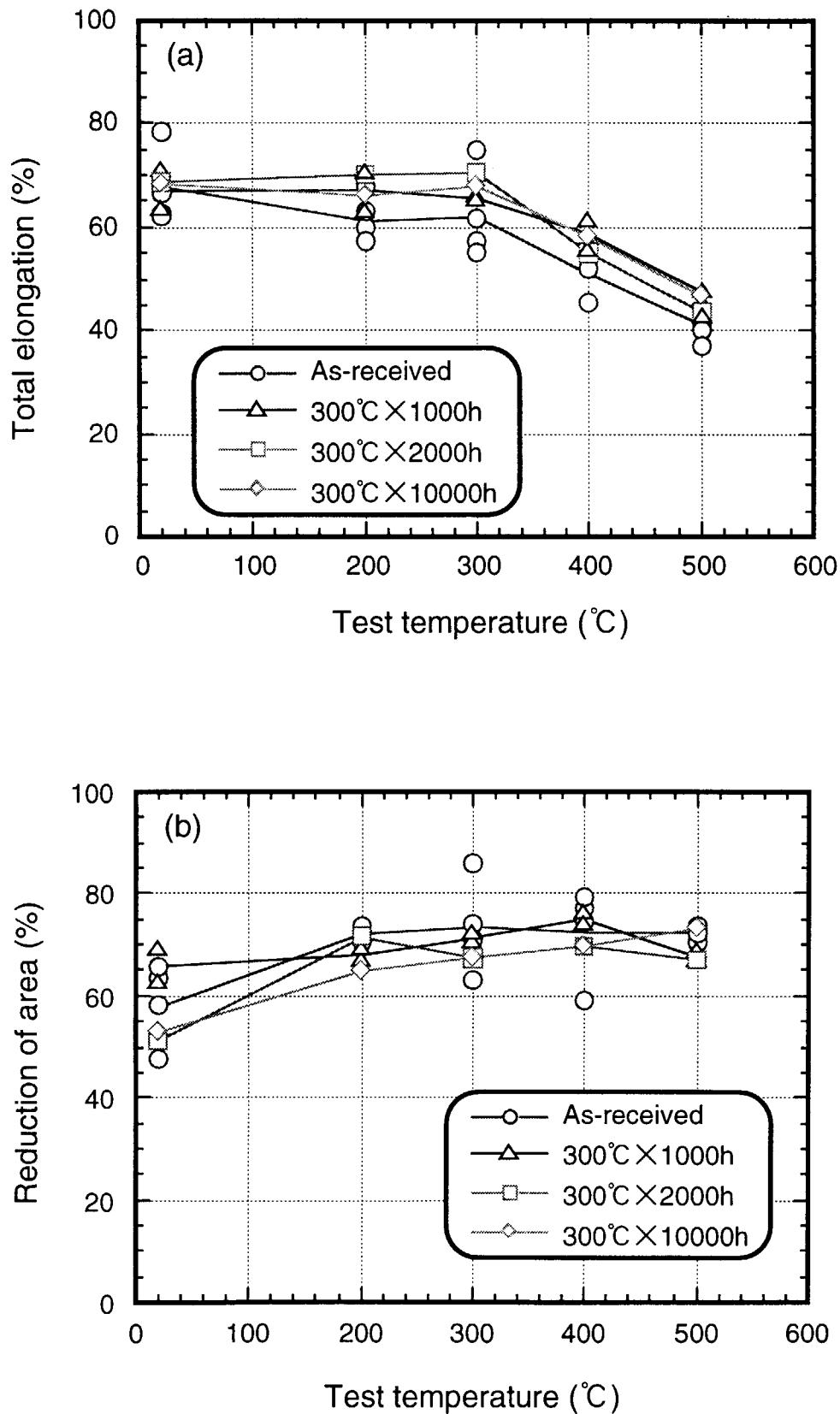


Fig. 4.11 Test temperature dependence of (a)total elongation and (b)reduction of area of VC9 base metal annealed at 300°C.

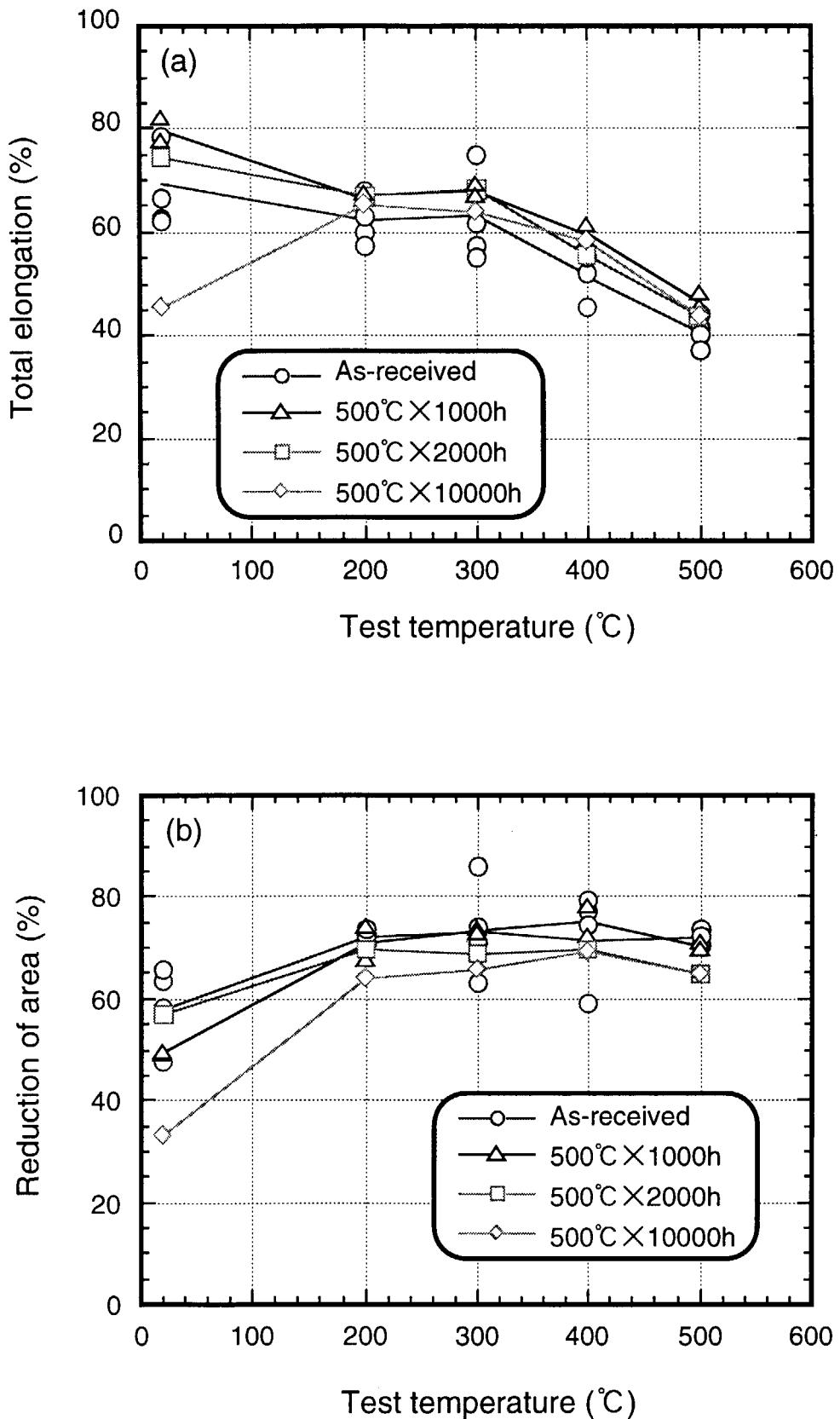


Fig. 4. 12 Test temperature dependence of (a)total elongation and (b)reduction of area of VC9 base metal annealed at 500°C.

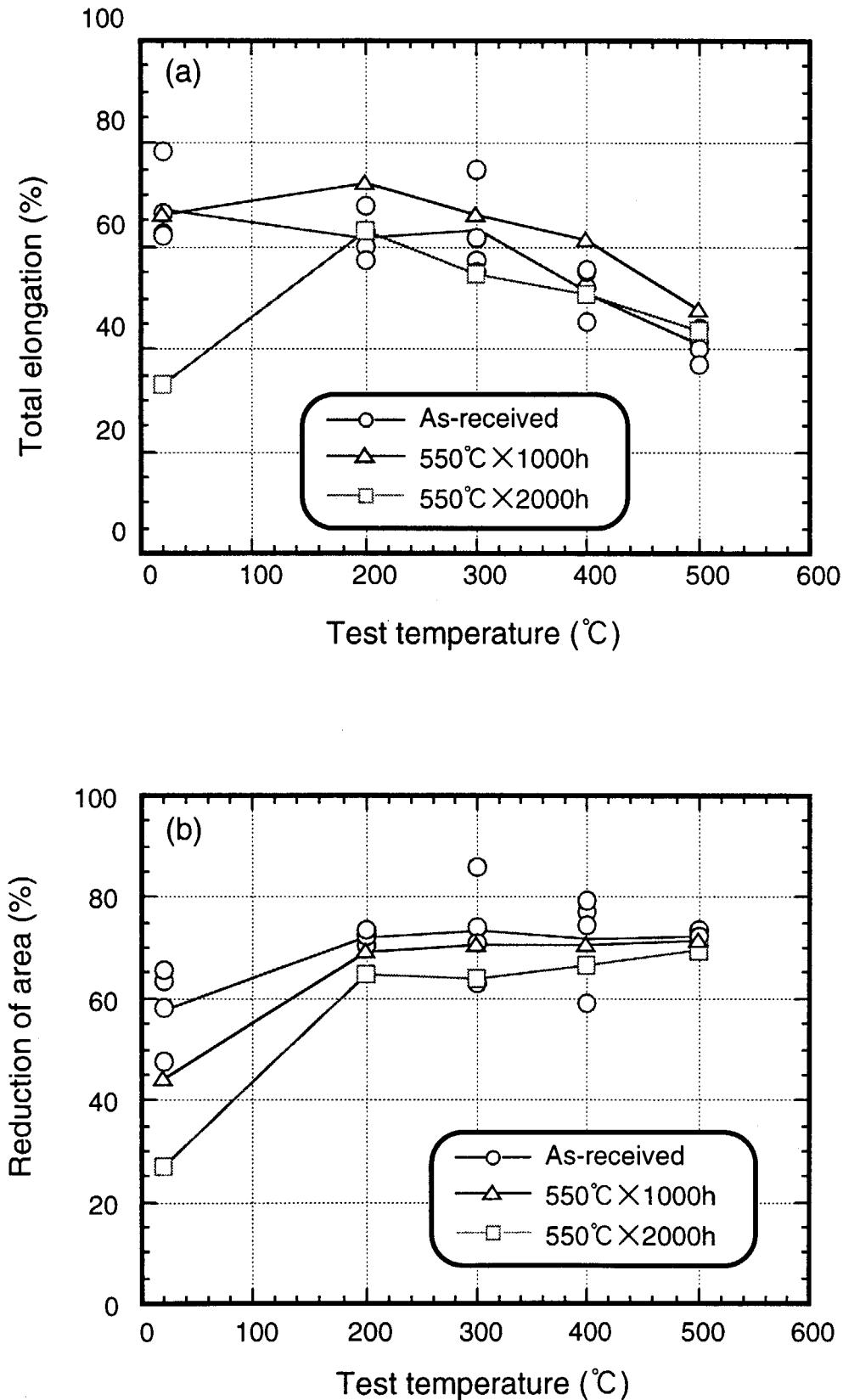


Fig. 4. 13 Test temperature dependence of (a)total elongation and (b)reduction of area of VC9 base metal annealed at 500°C.

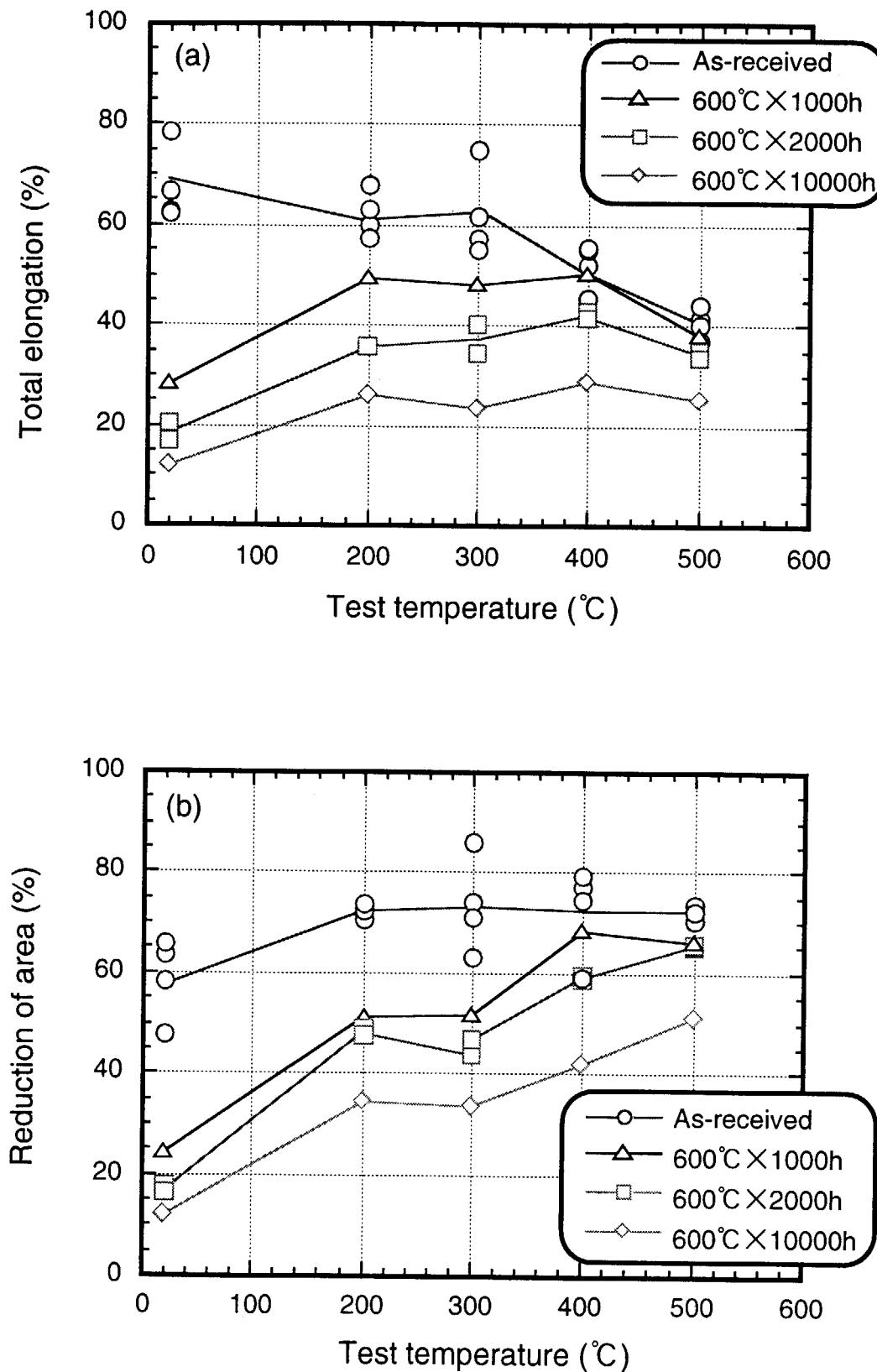


Fig. 4. 14 Test temperature dependence of (a)total elongation and (b)reduction of area of VC9 base metal annealed at 600°C.

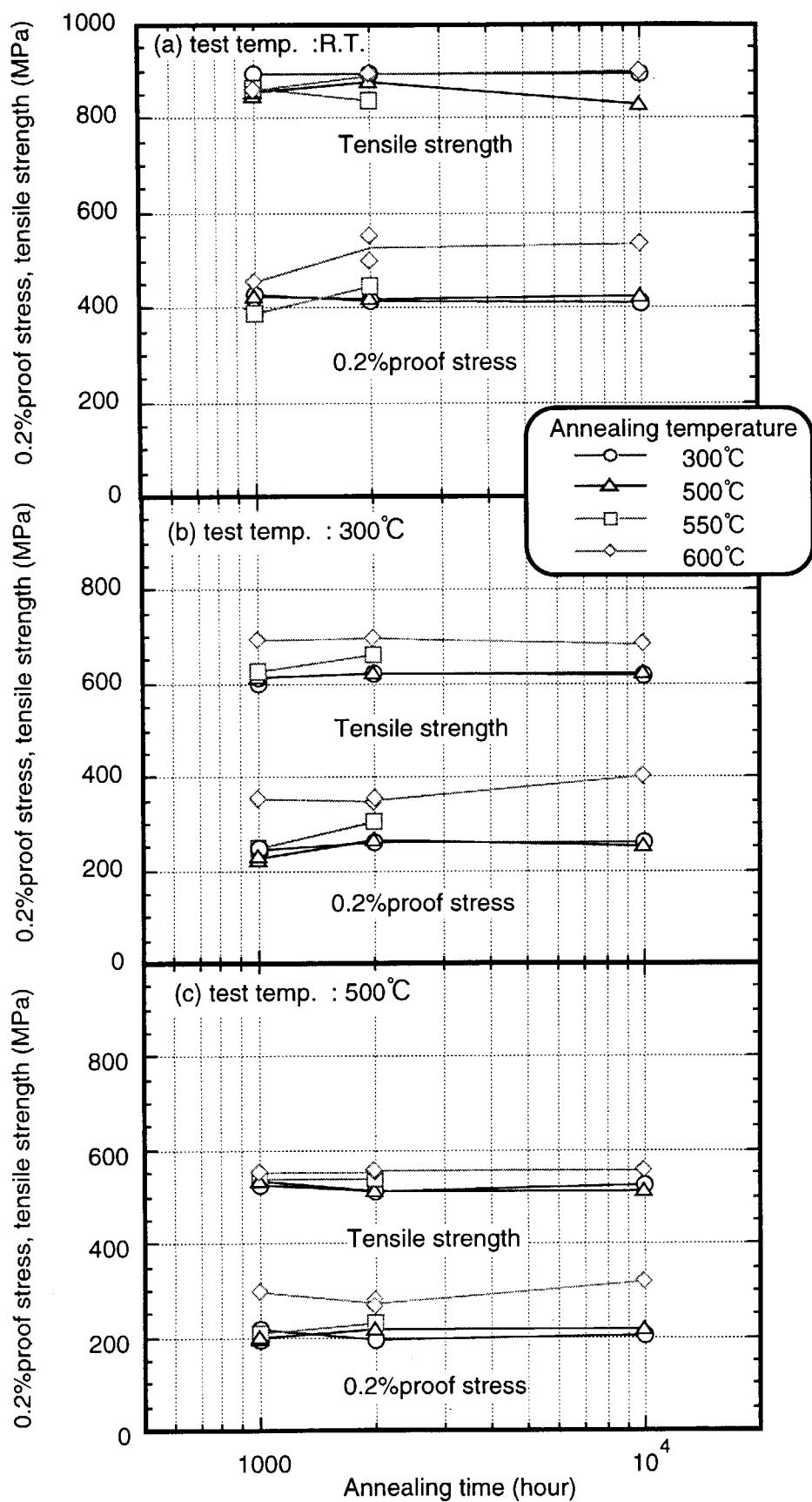


Fig. 4. 15 Annealing time dependence of 0.2%proof stress and tensile strength of VC9 base metal tested at(a)R. T. , (b)300°C and (c)500°C.

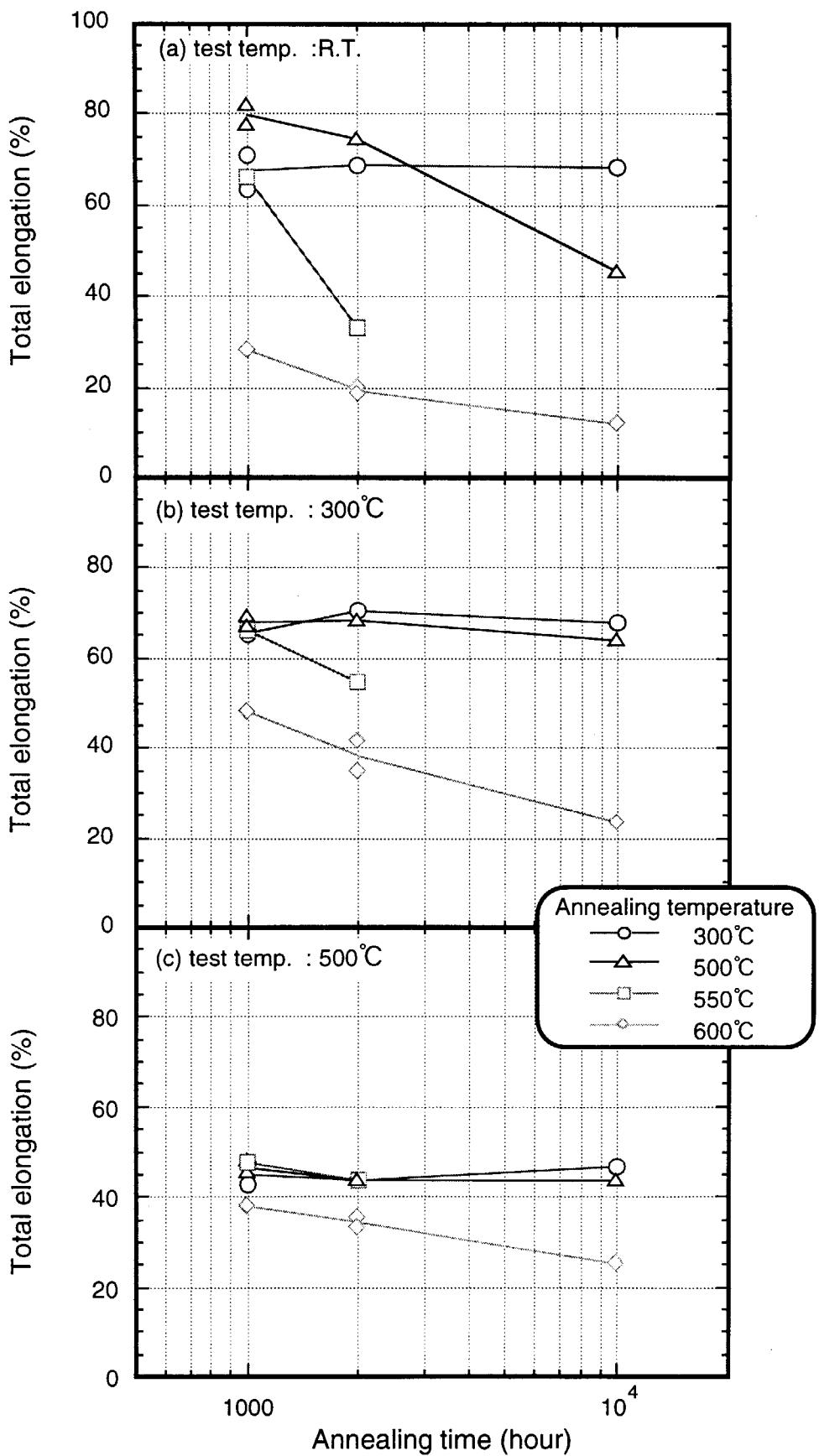


Fig. 4. 16 Annealing time dependence of total elongation of VC9 base metal tested at (a) R. T. , (b) 300°C and (c) 500°C.

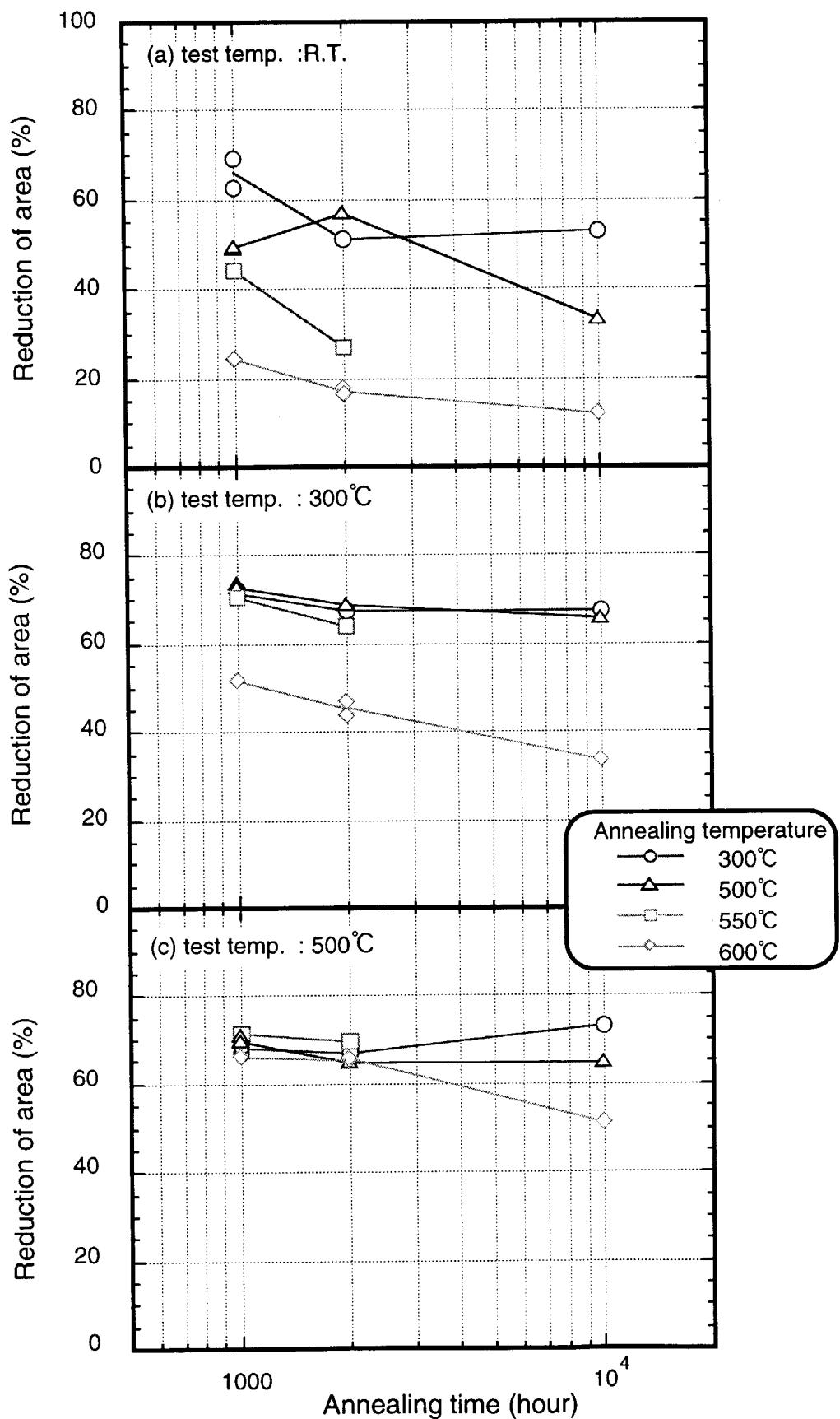
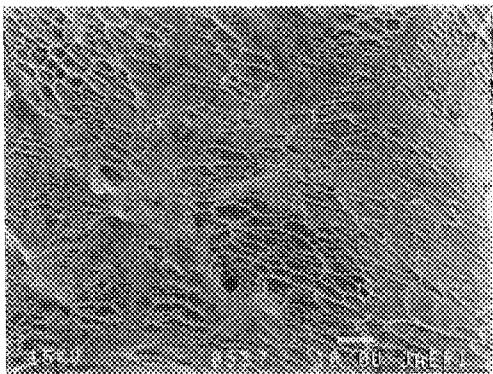
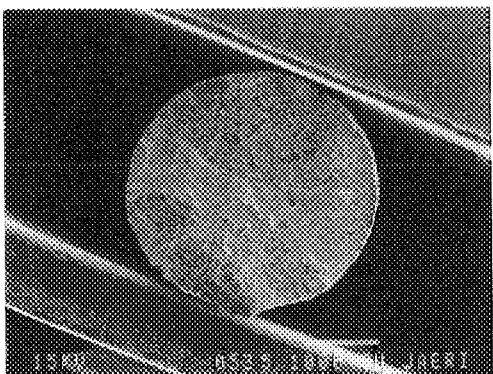


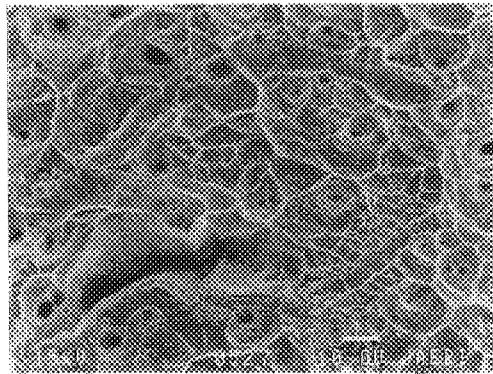
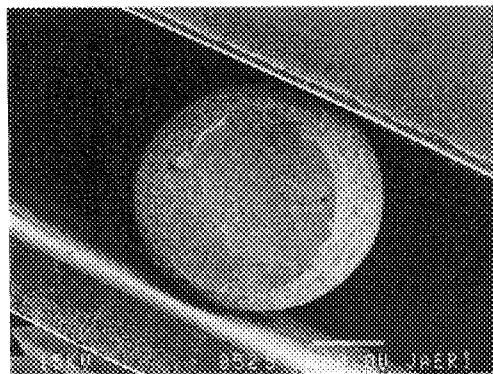
Fig. 4. 17 Annealing time dependence of reduction of area of VC9 base metal tested at (a) R. T. , (b) 300°C and (c) 500°C.

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

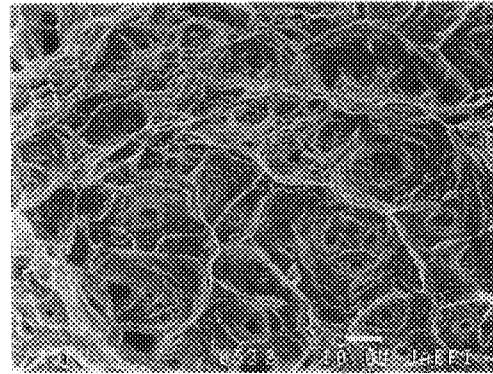
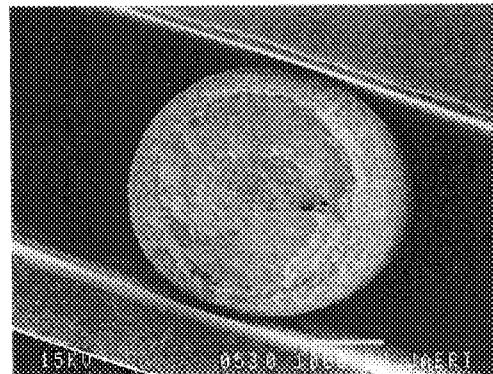
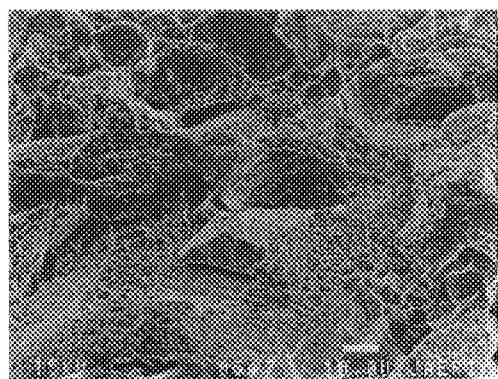
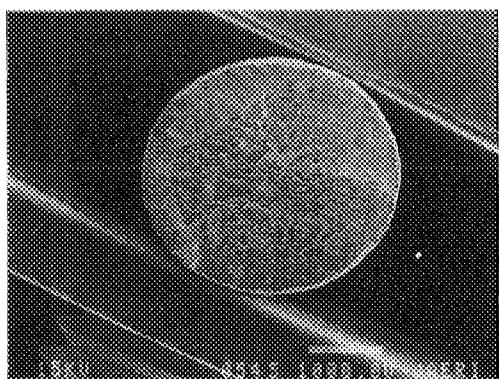


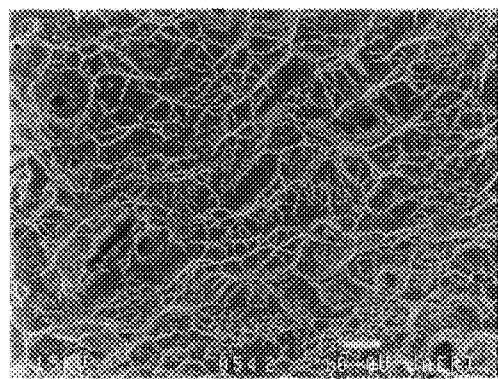
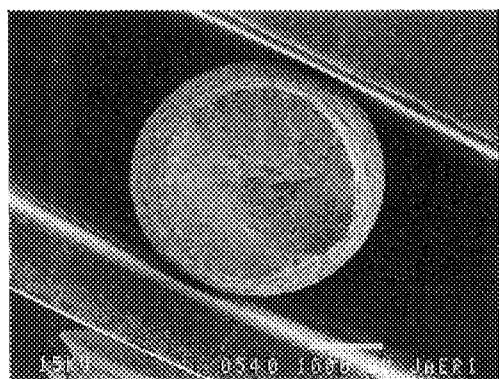
Fig. 4. 18(a) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal( $300^{\circ}\text{C} \times 1000\text{h}$ ).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

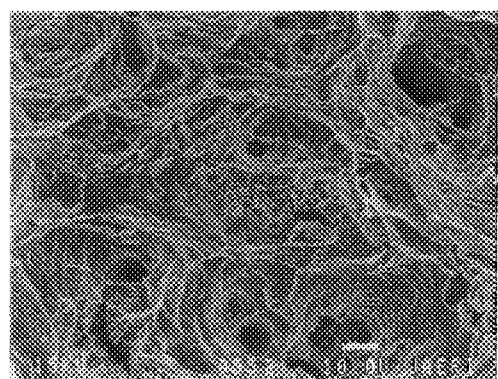
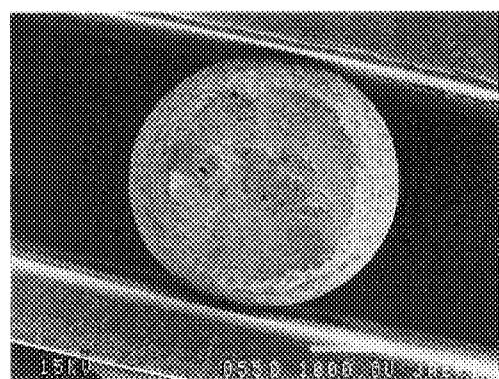
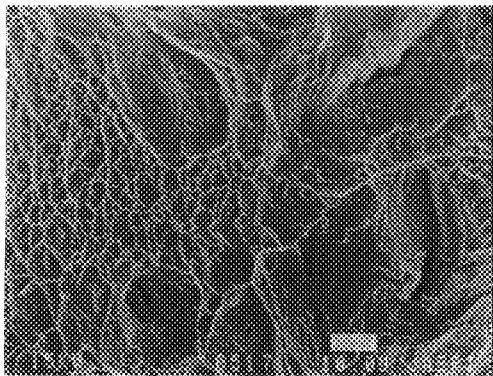
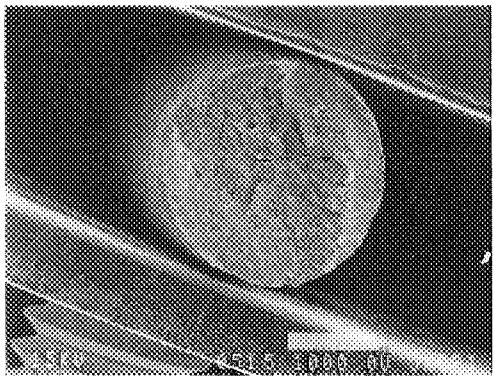


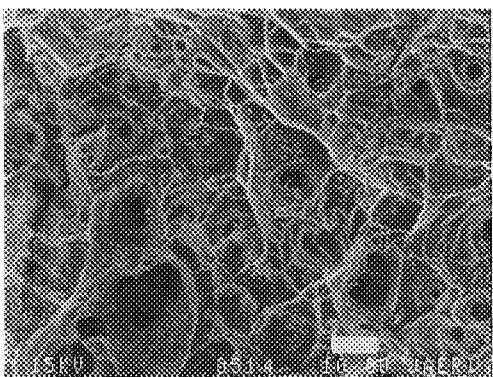
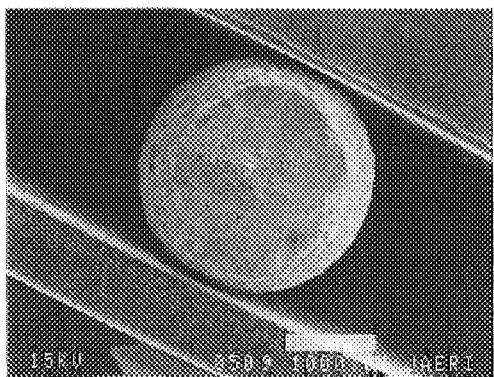
Fig. 4. 18(b) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(300°C ×2000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

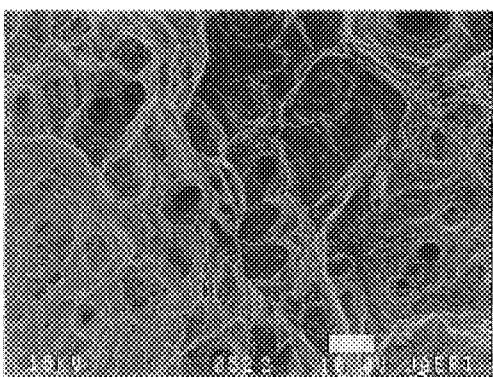
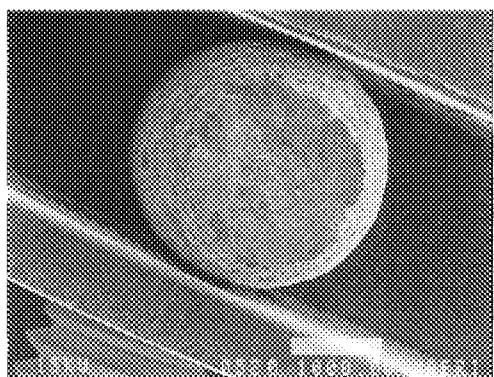
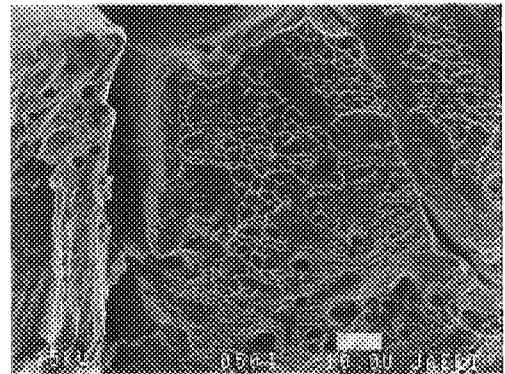
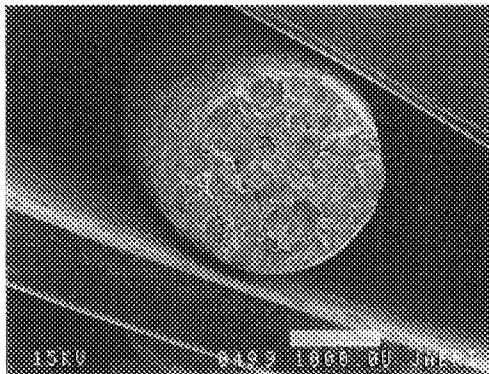


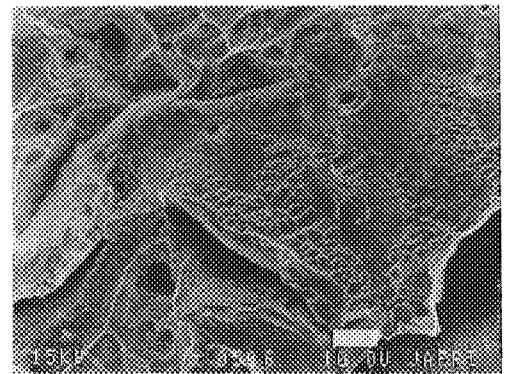
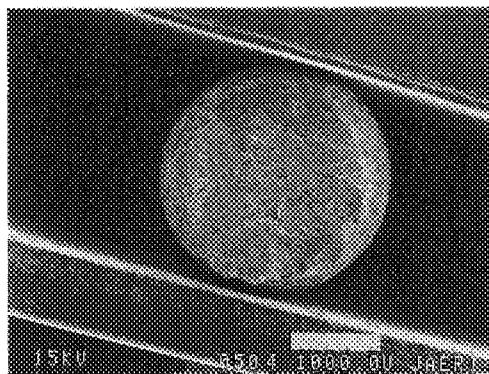
Fig. 4. 18(c) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(300°C × 10000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

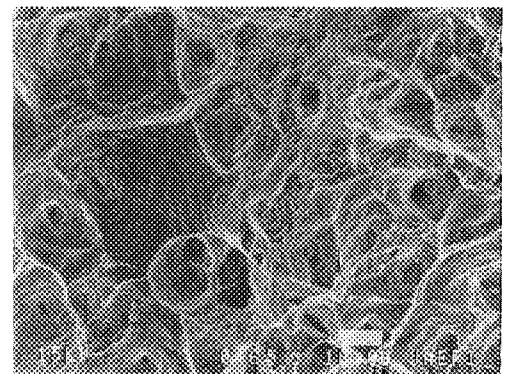
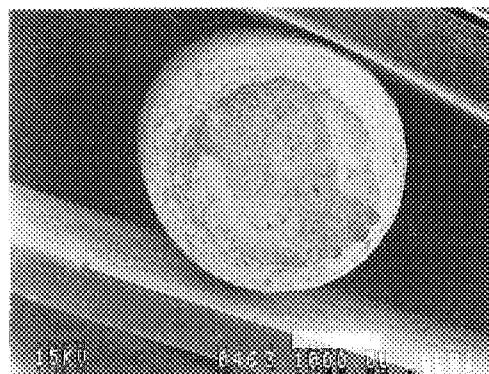
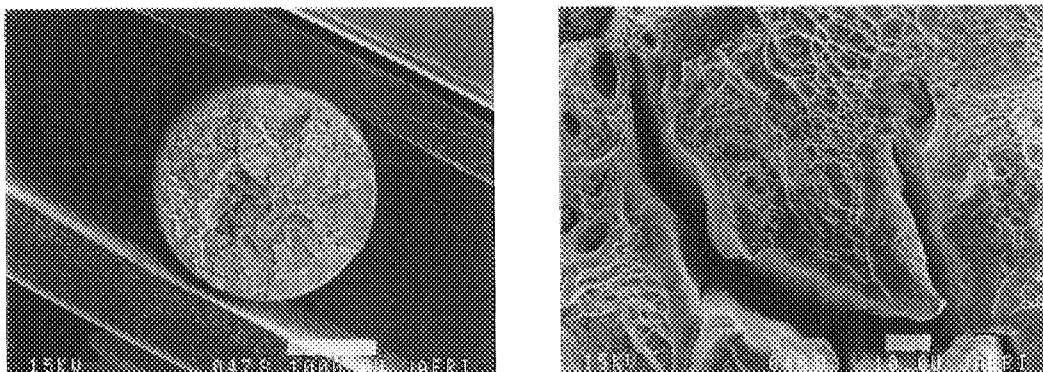


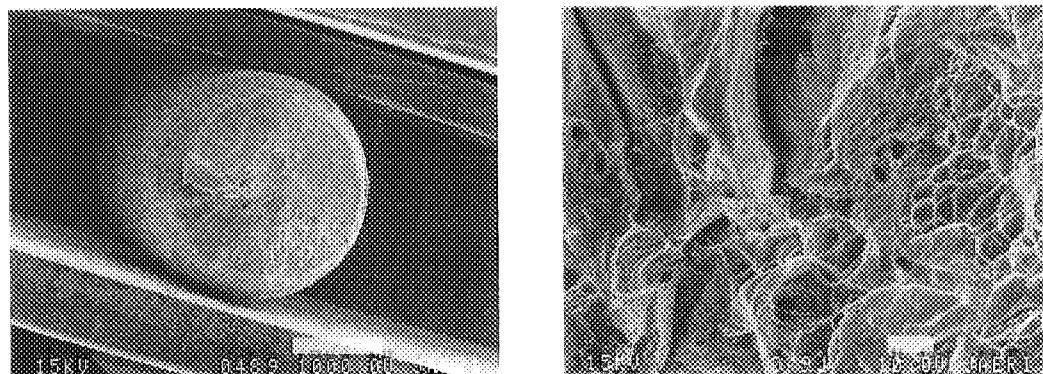
Fig. 4. 19(a) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(500°C × 1000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

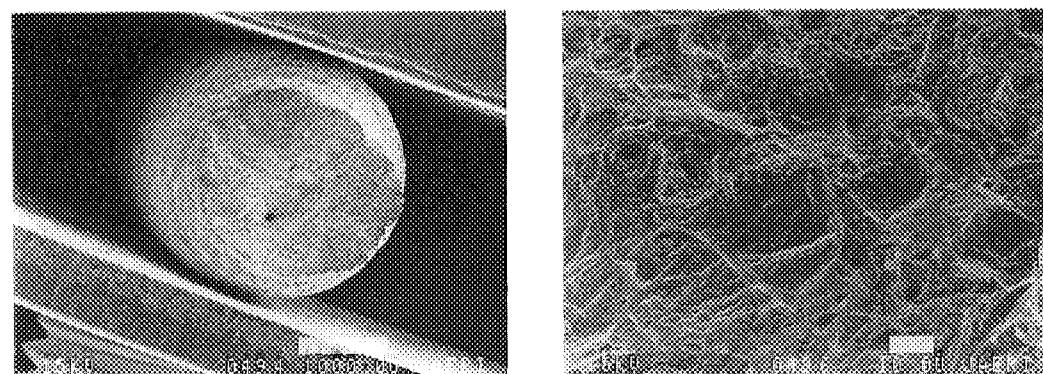
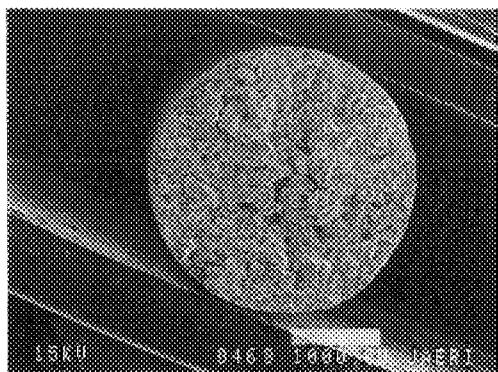


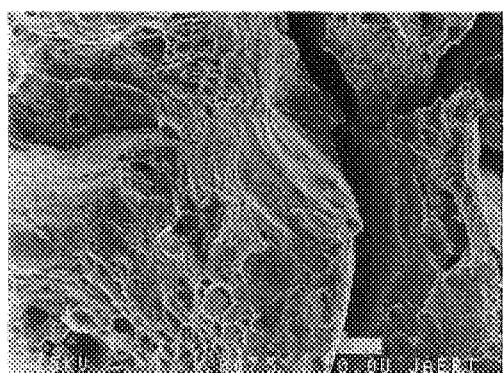
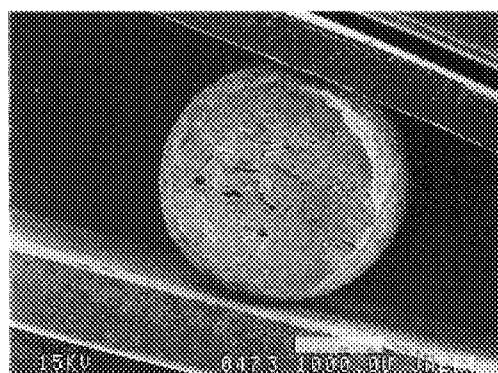
Fig. 4. 19(b) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(500°C ×2000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

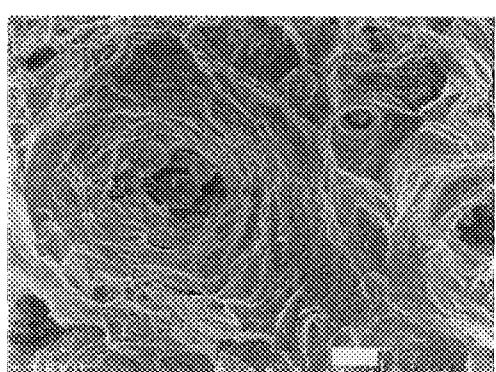
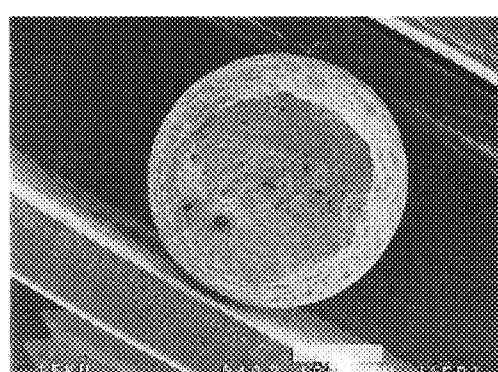
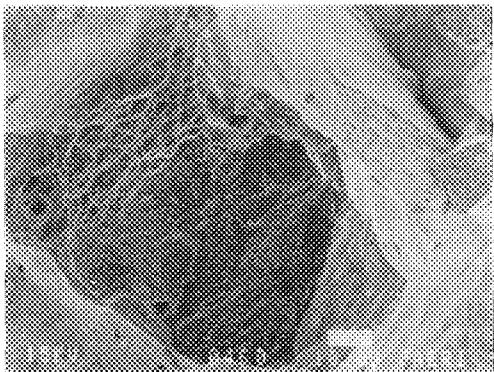
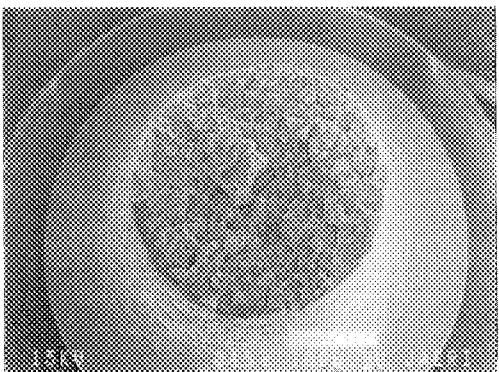


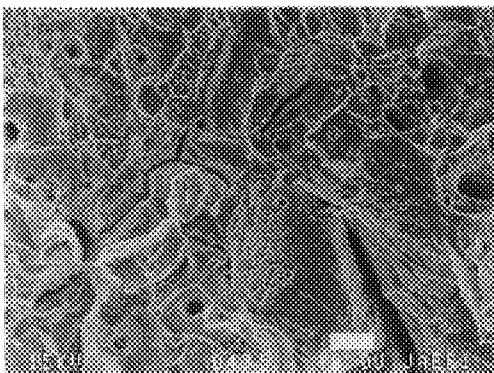
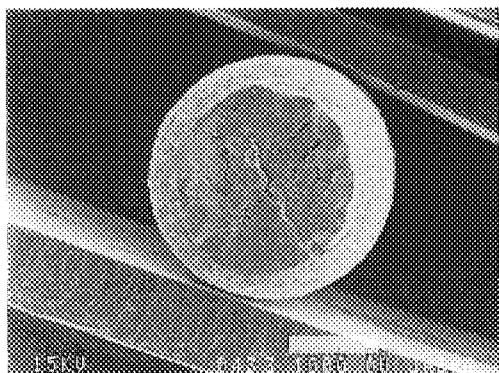
Fig. 4. 19(c) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(500°C × 10000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

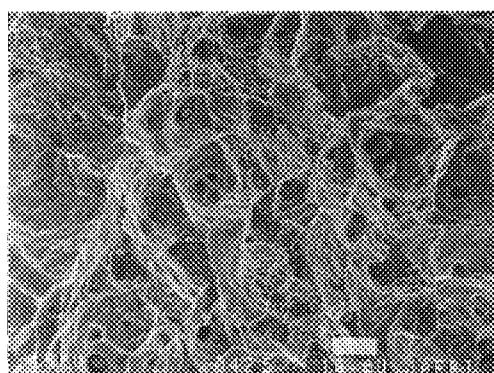
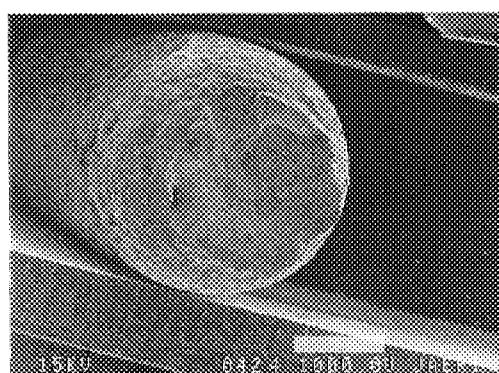
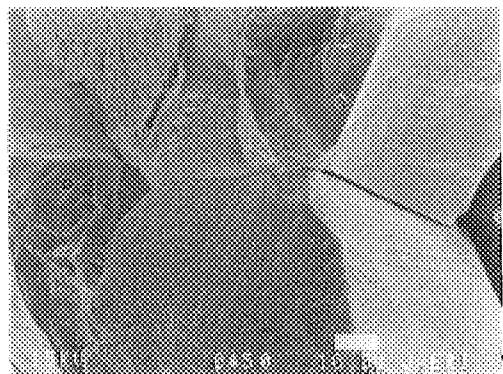
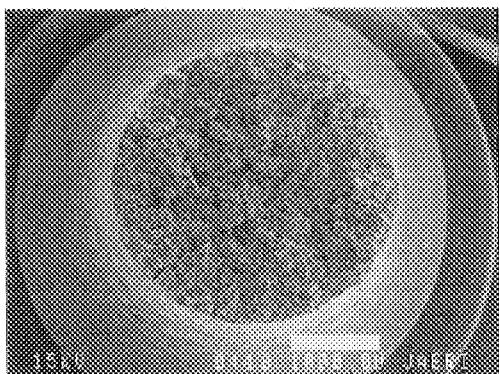


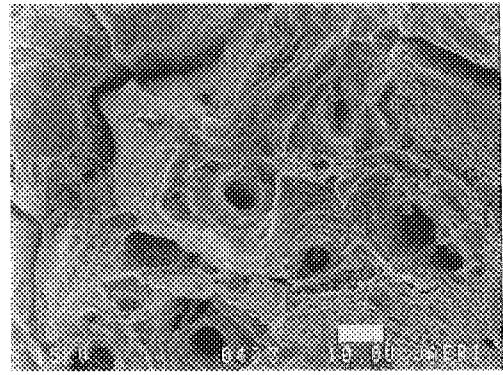
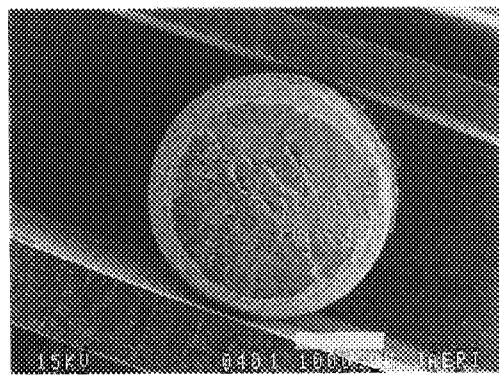
Fig. 4. 20(a) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal( $550^{\circ}\text{C} \times 1000\text{h}$ ).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

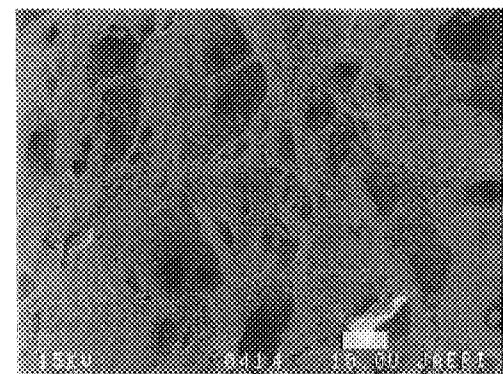
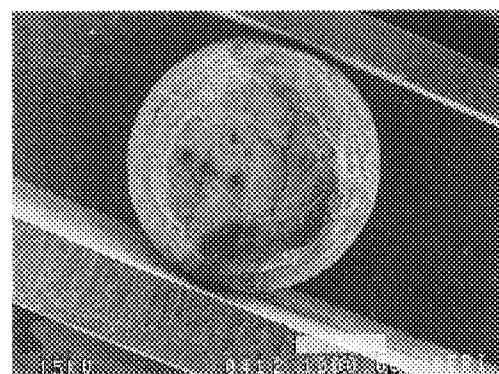
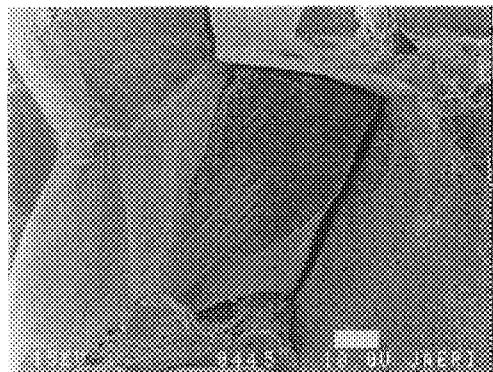
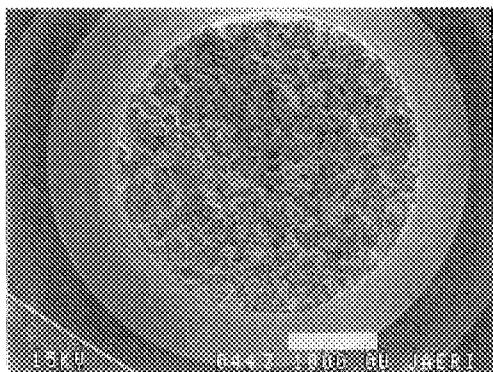


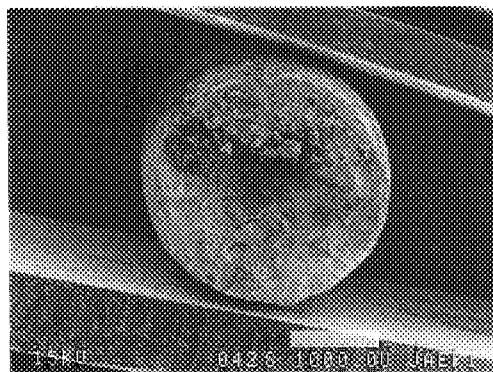
Fig. 4. 20(b) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(550°C ×2000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

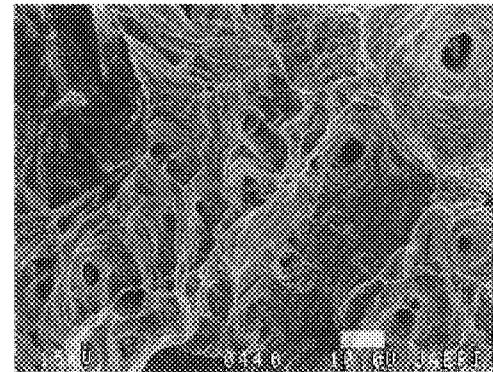
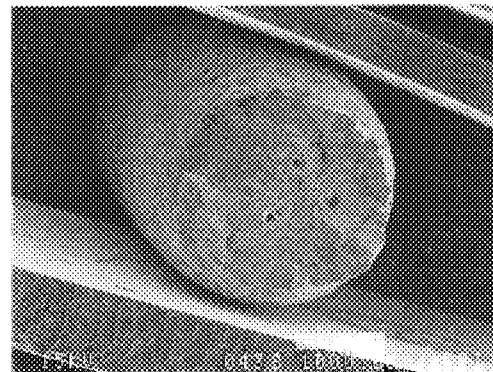
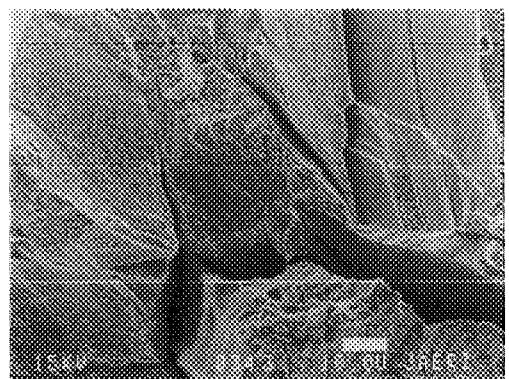
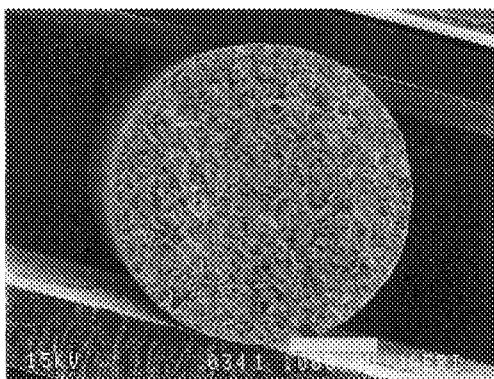


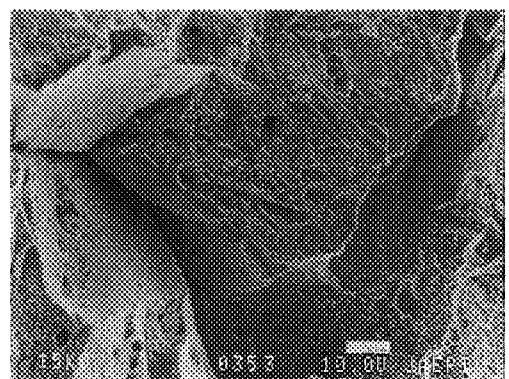
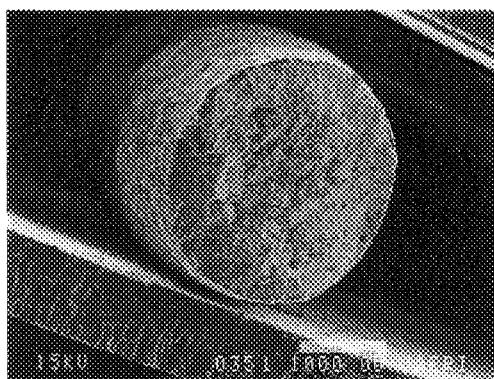
Fig. 4. 21(a) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(600°C ×1000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

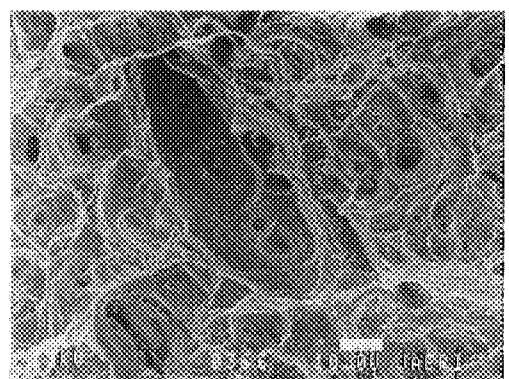
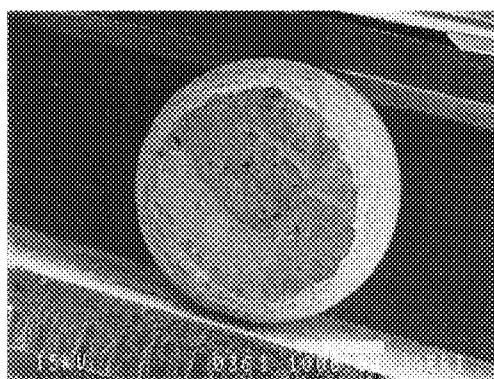
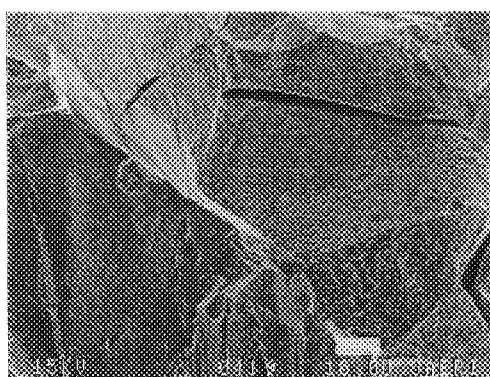
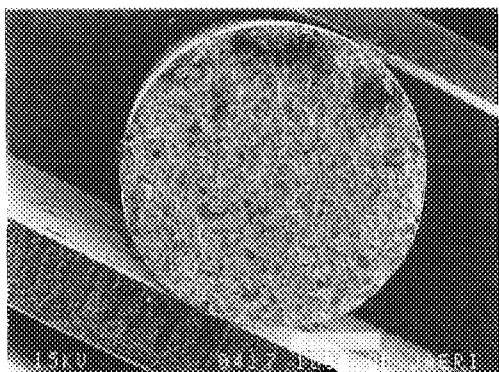


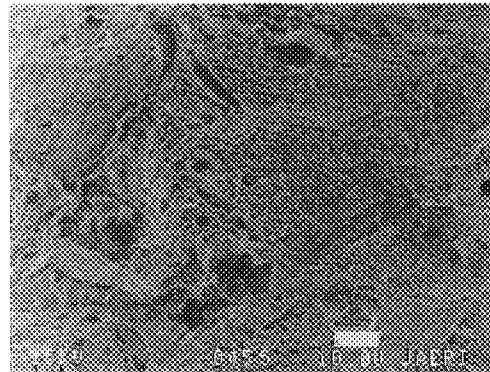
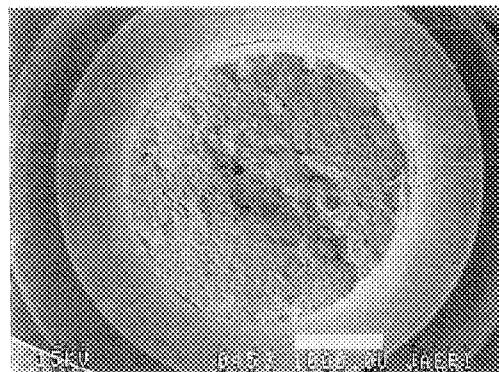
Fig. 4. 21(b) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(600°C×2000h).

Test temp.

R.T.



300°C



500°C

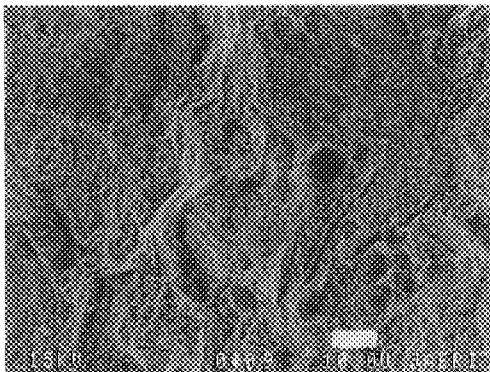
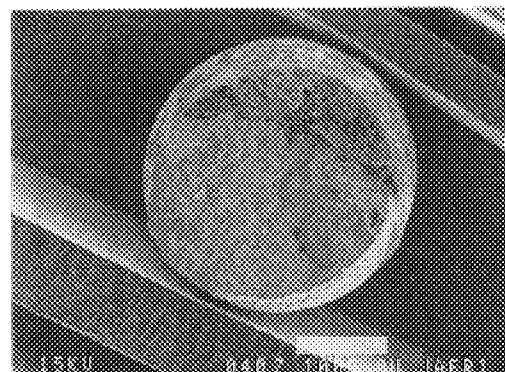


Fig. 4. 21(c) SEM photograph of fracture surface after tensile tests on annealed VC9 base metal(600°C × 10000h).

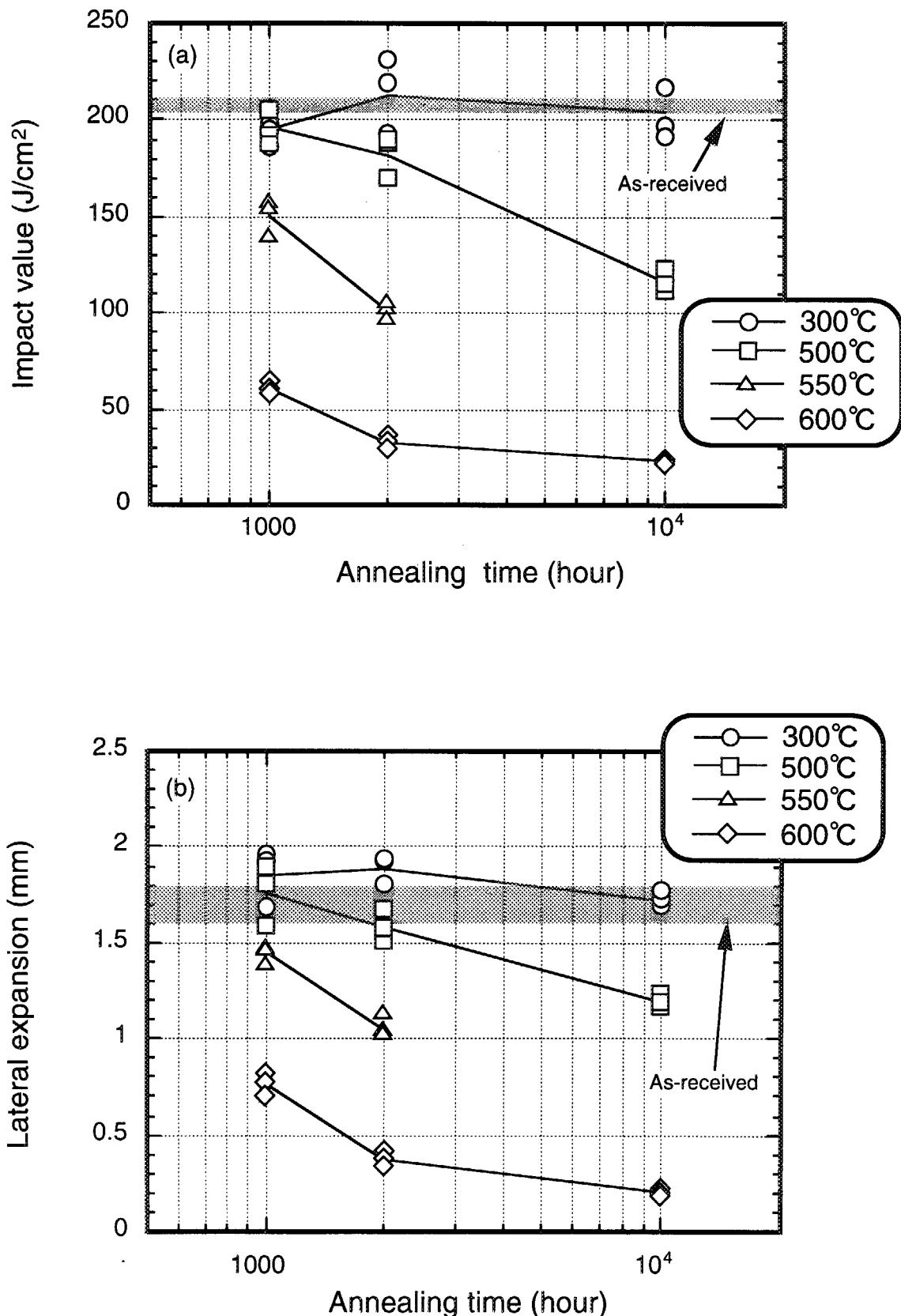


Fig. 4.22 Relationship between annealing time and (a)Charpy impact value (b)lateral expansion.

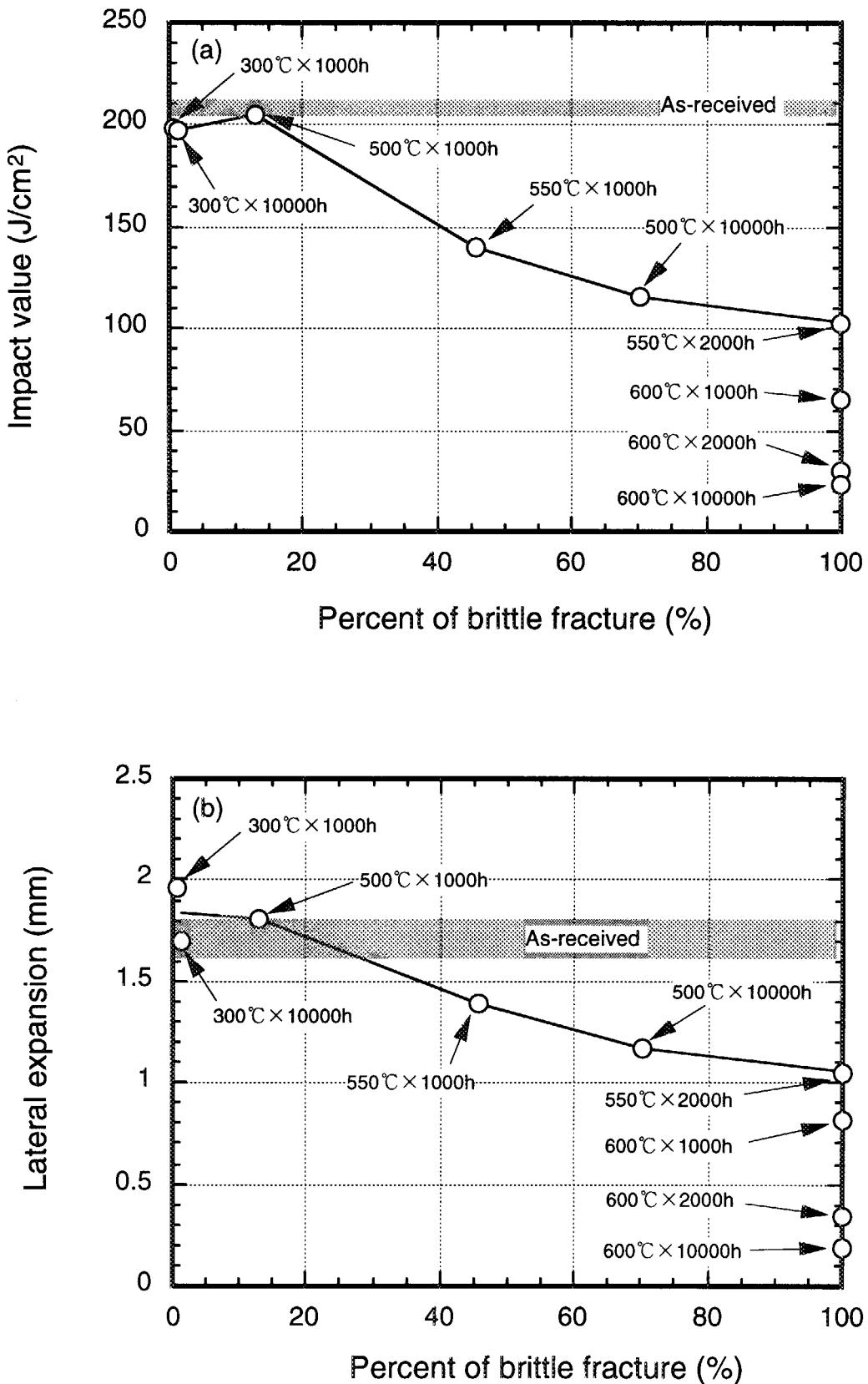


Fig. 4.23 Relationship between percent of brittle fracture and (a)Charpy impact value (b)lateral expansion.

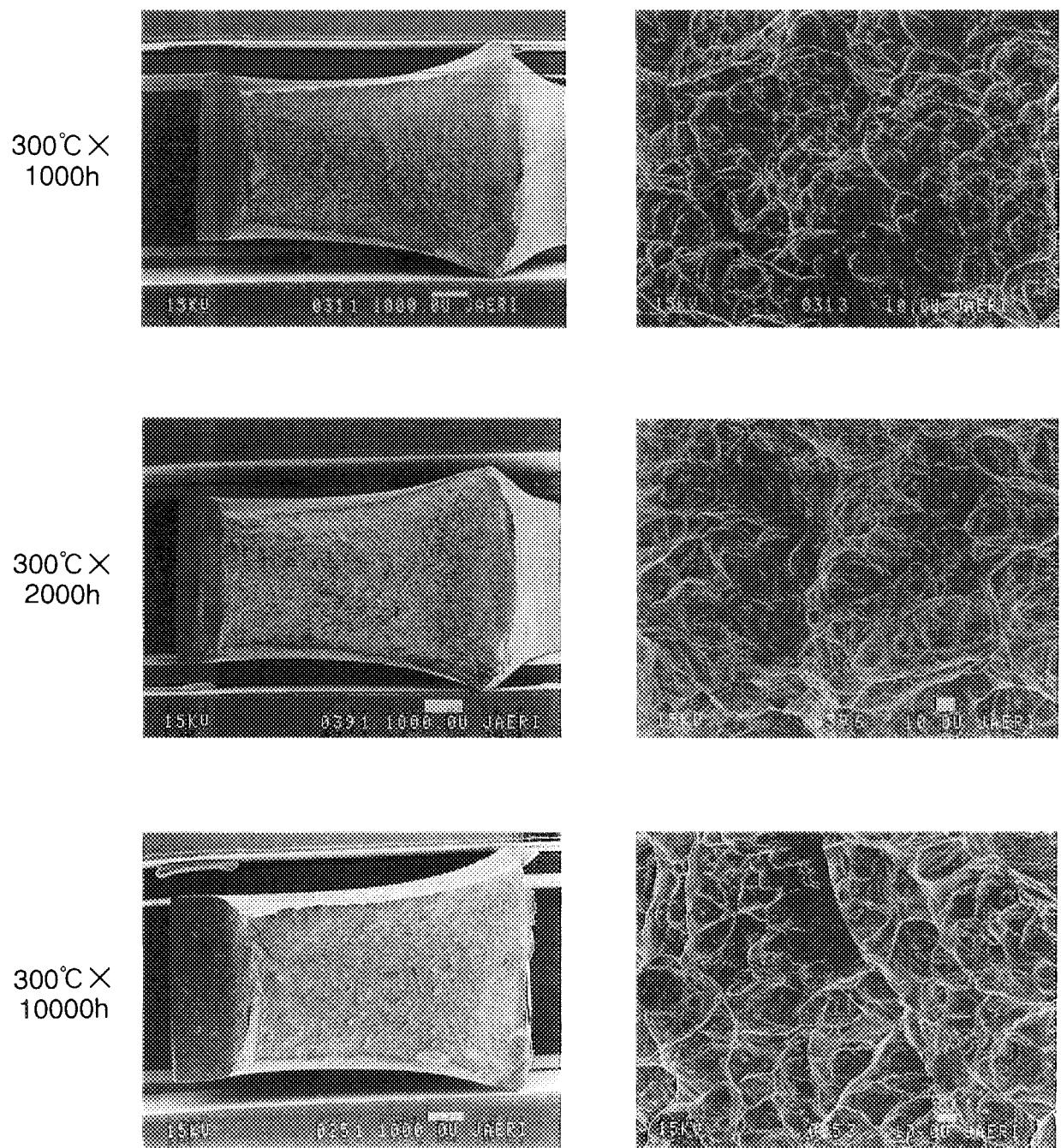


Fig. 4. 24 SEM photograph of fracture surface after Charpy impact tests on annealed VC9 base metal(300°C, test temp. ; R.T.).

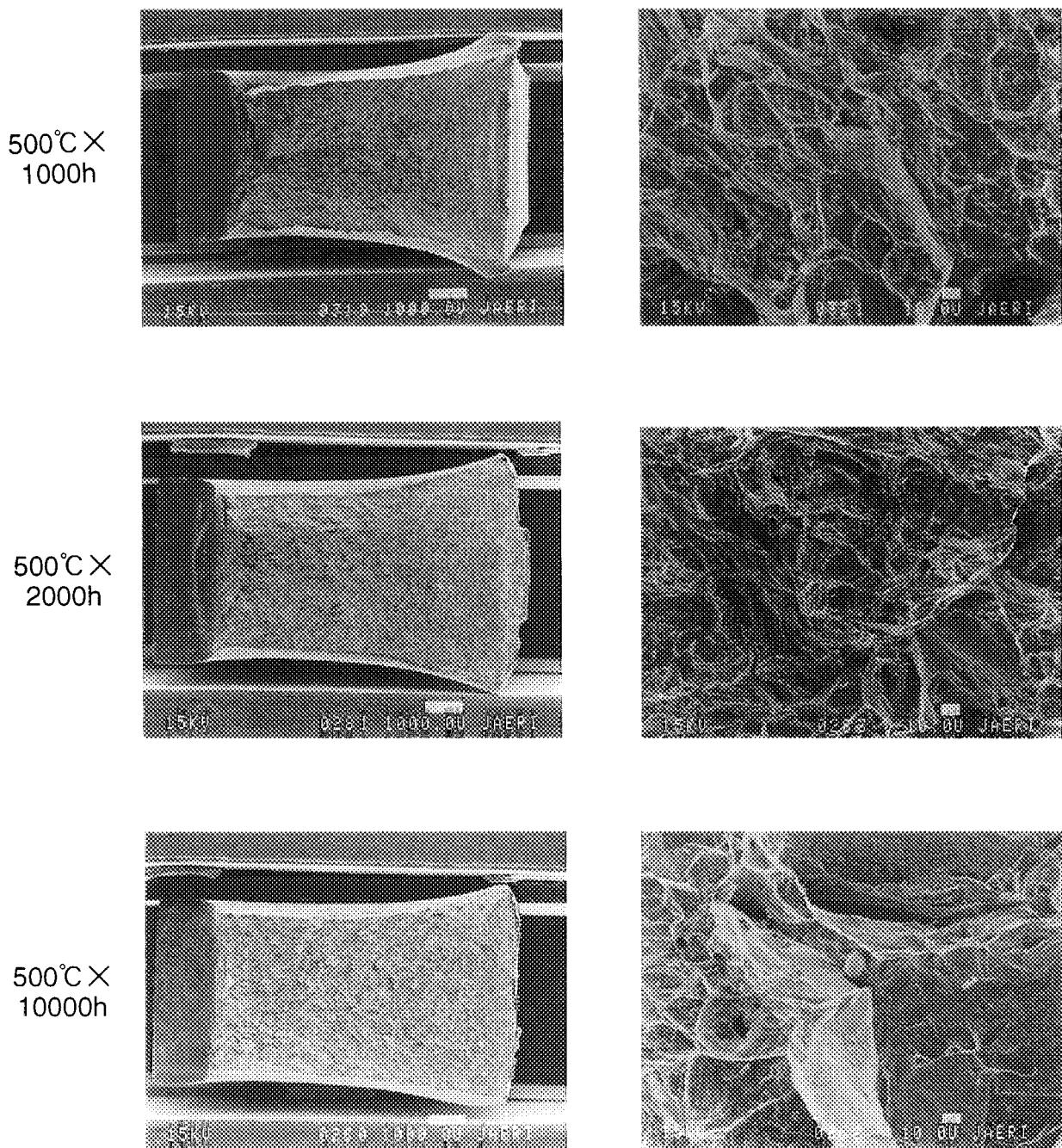


Fig. 4. 25 SEM photograph of fracture surface after Charpy impact tests on annealed VC9 base metal(500°C, test temp. ; R.T.).

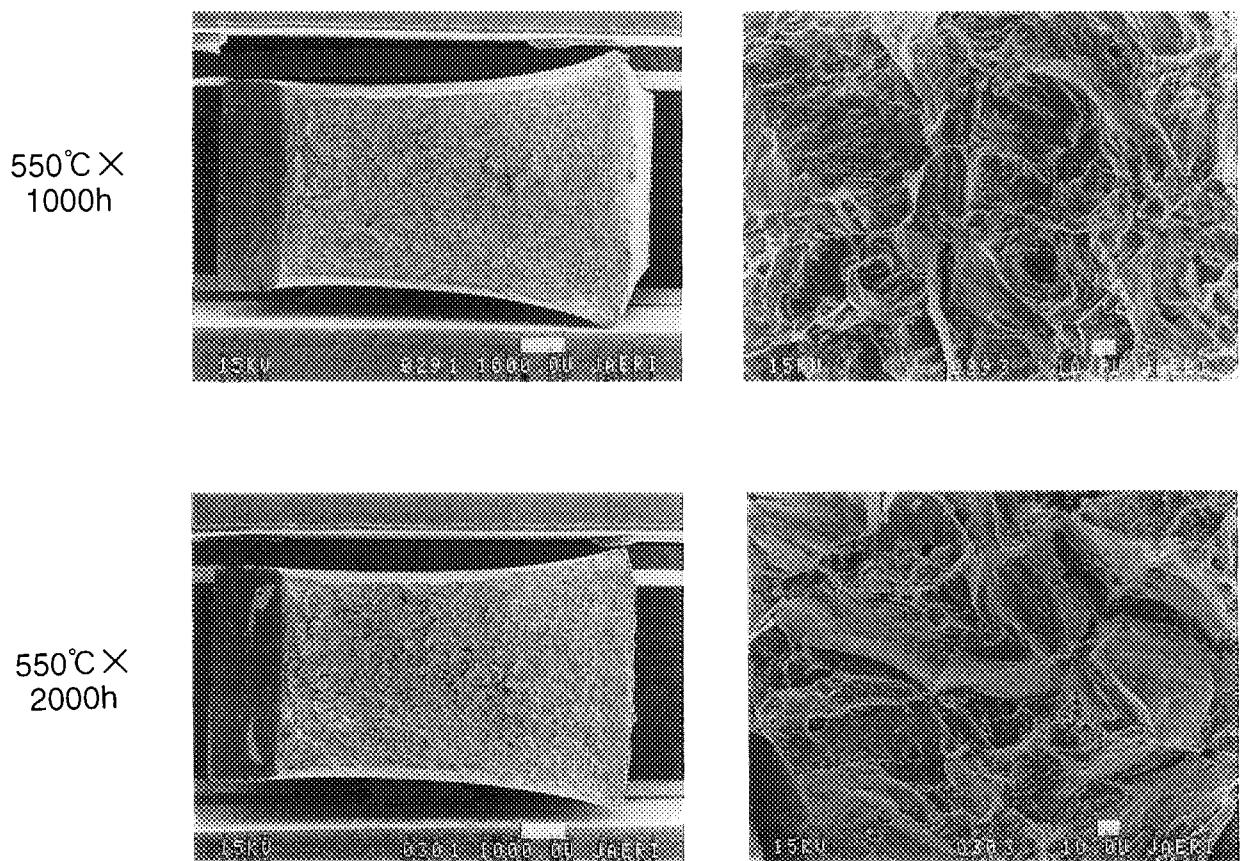


Fig. 4. 26 SEM photograph of fracture surface after Charpy impact tests on annealed VC9 base metal(550°C, test temp. ; R.T.).

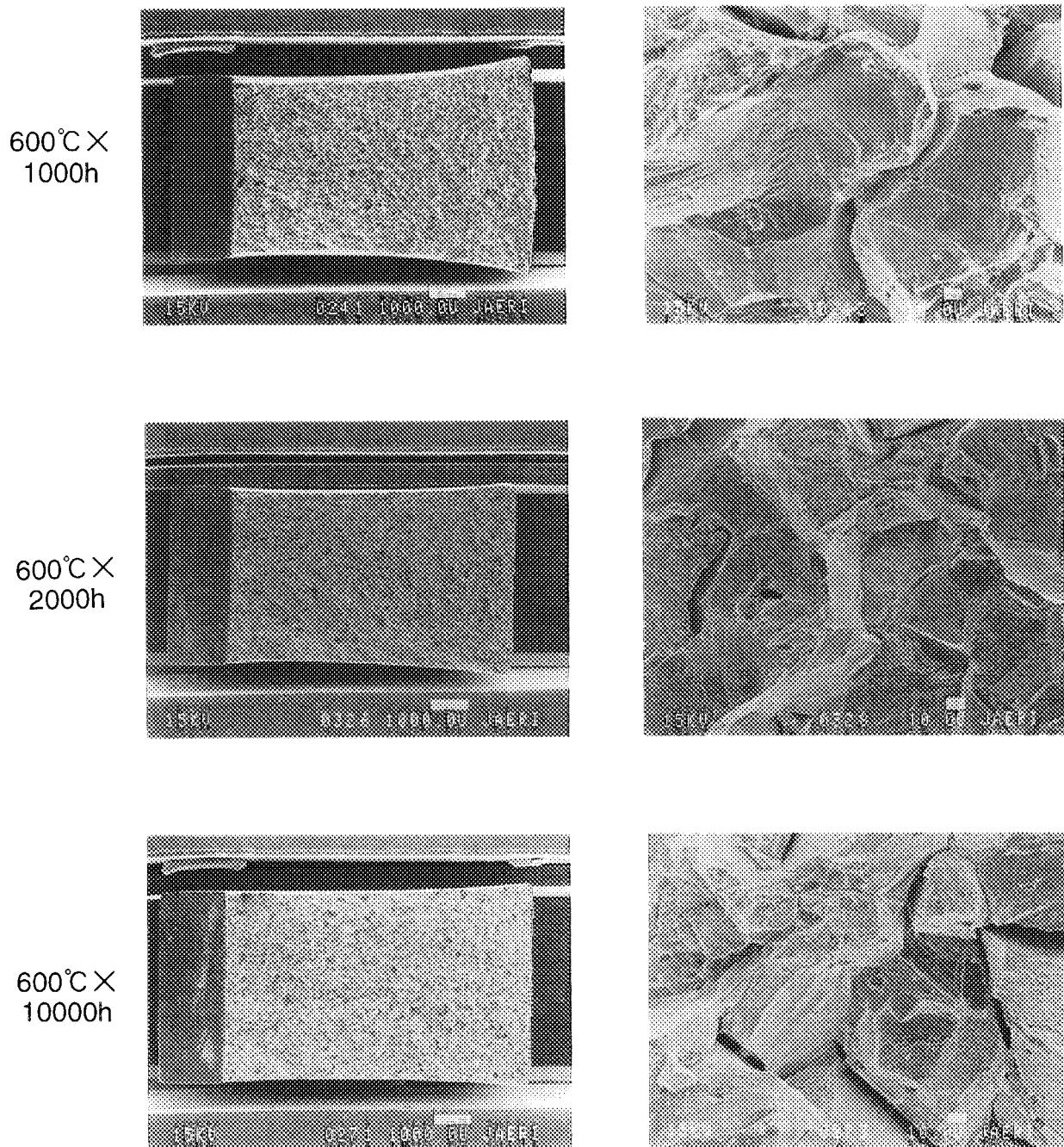


Fig. 4. 27 SEM photograph of fracture surface after Charpy impact tests on annealed VC9 base metal(600°C, test temp. ; R.T.).

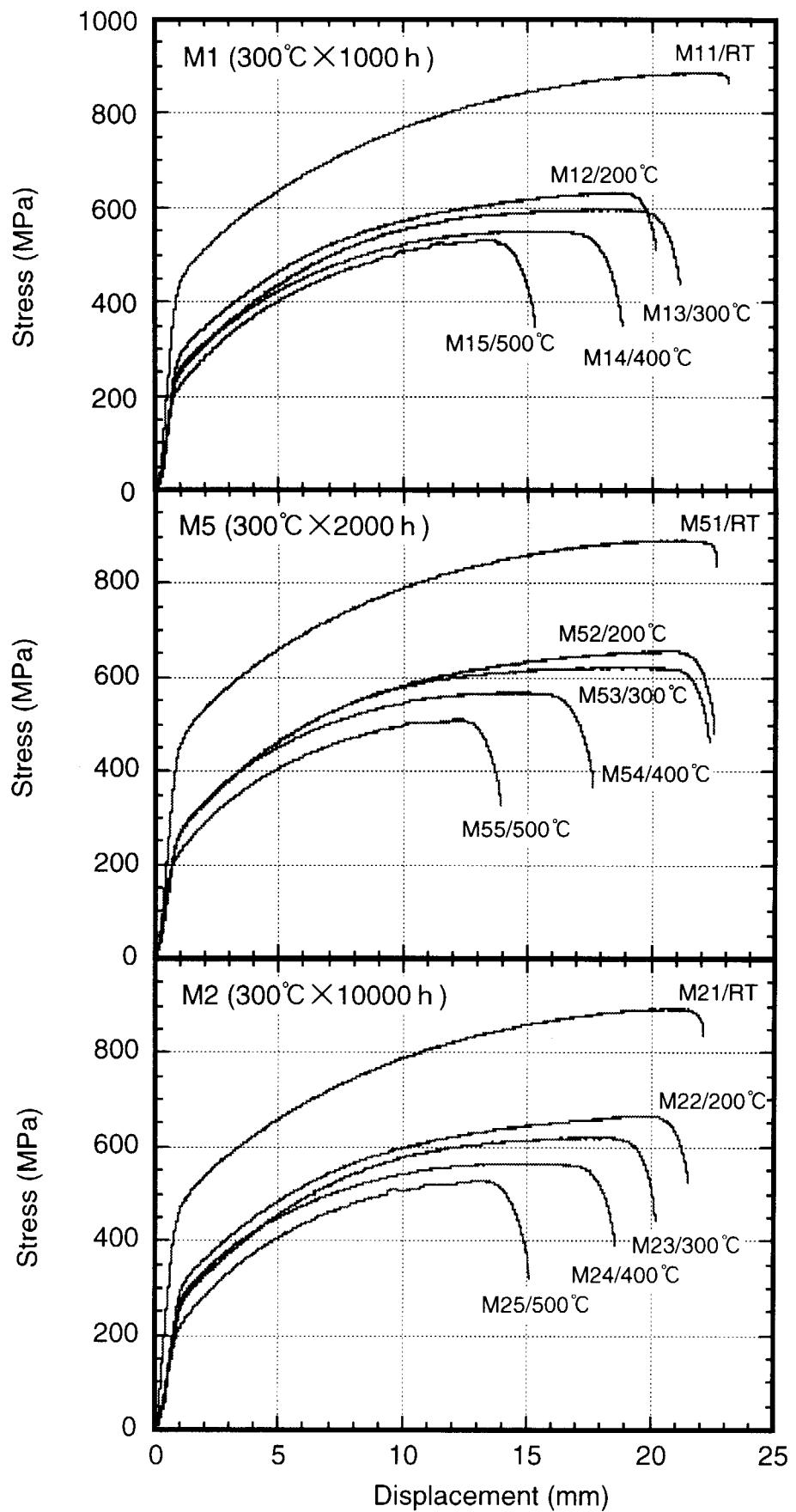


Fig. A. 1 Stress-displacement curve of tensile tests on VC9 base metal annealed at 300°C.

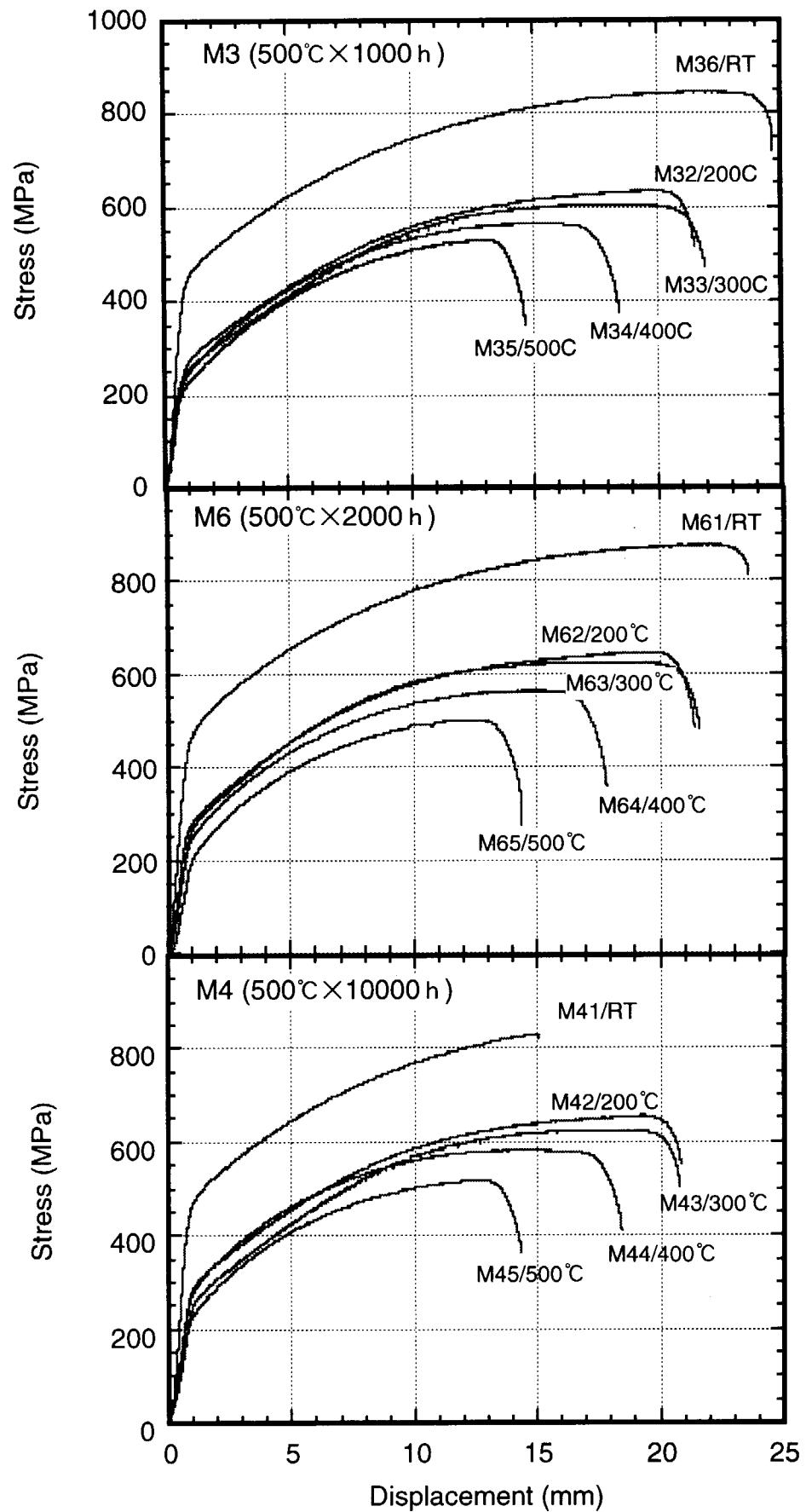


Fig. A. 2 Stress-displacement curve of tensile tests on VC9 base metal annealed at 500°C.

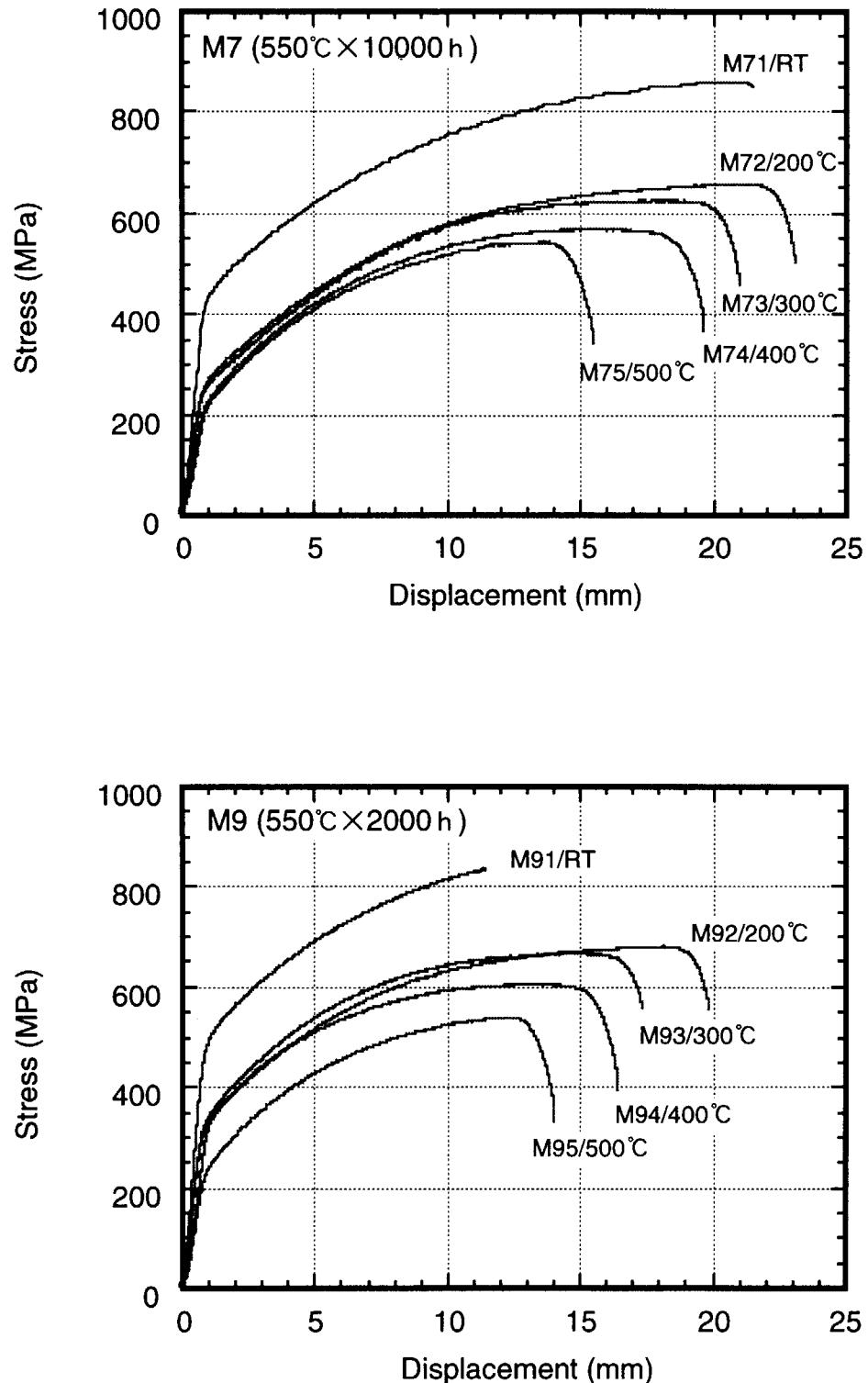


Fig. A. 3 Stress-displacement curve of tensile tests on VC9 base metal annealed at 550°C.

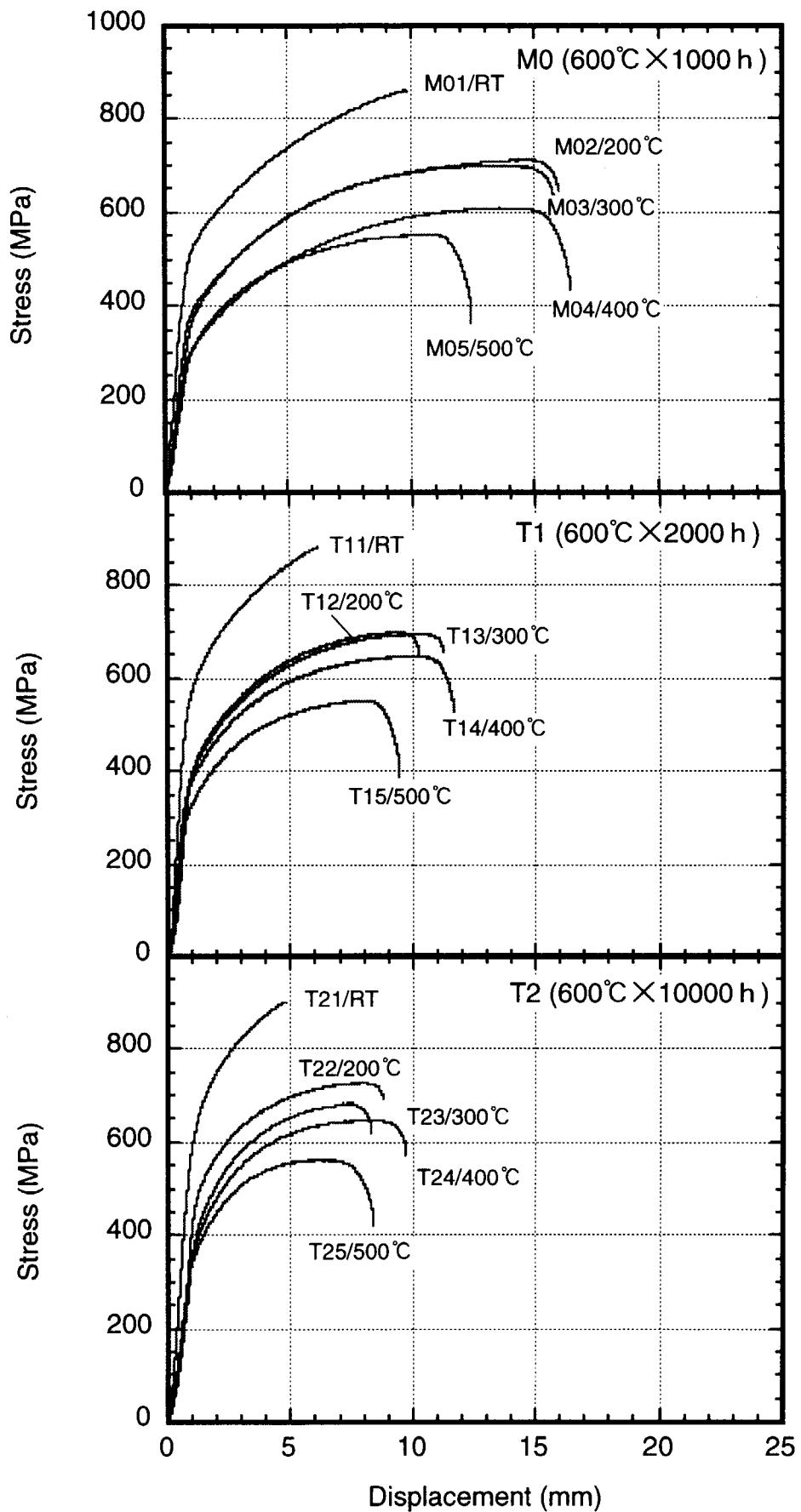


Fig. A. 4 Stress-displacement curve of tensile tests on VC9 base metal annealed at 600°C.

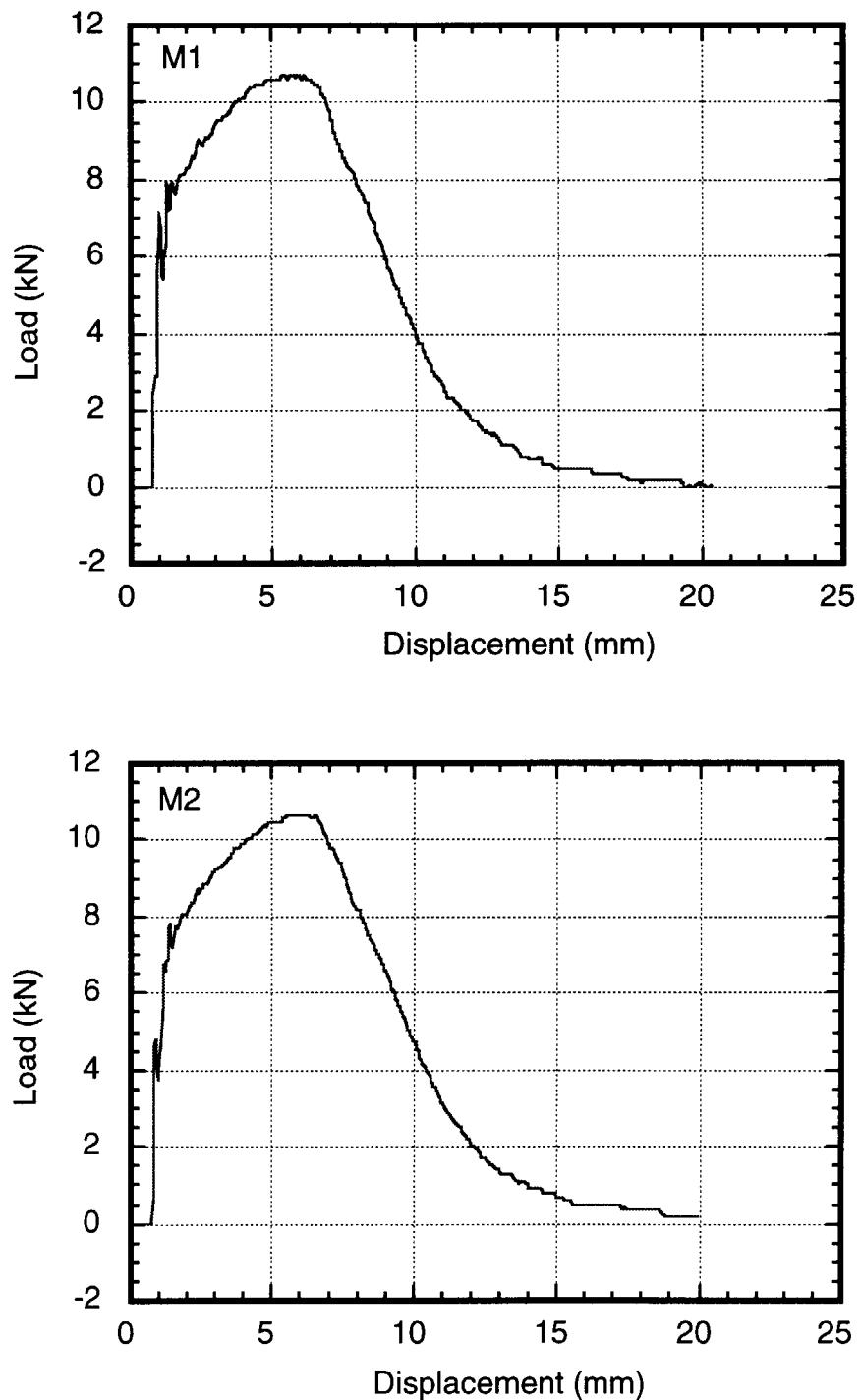


Fig. A. 5 Load-displacement curve of Charpy impact tests on VC9 base metal.

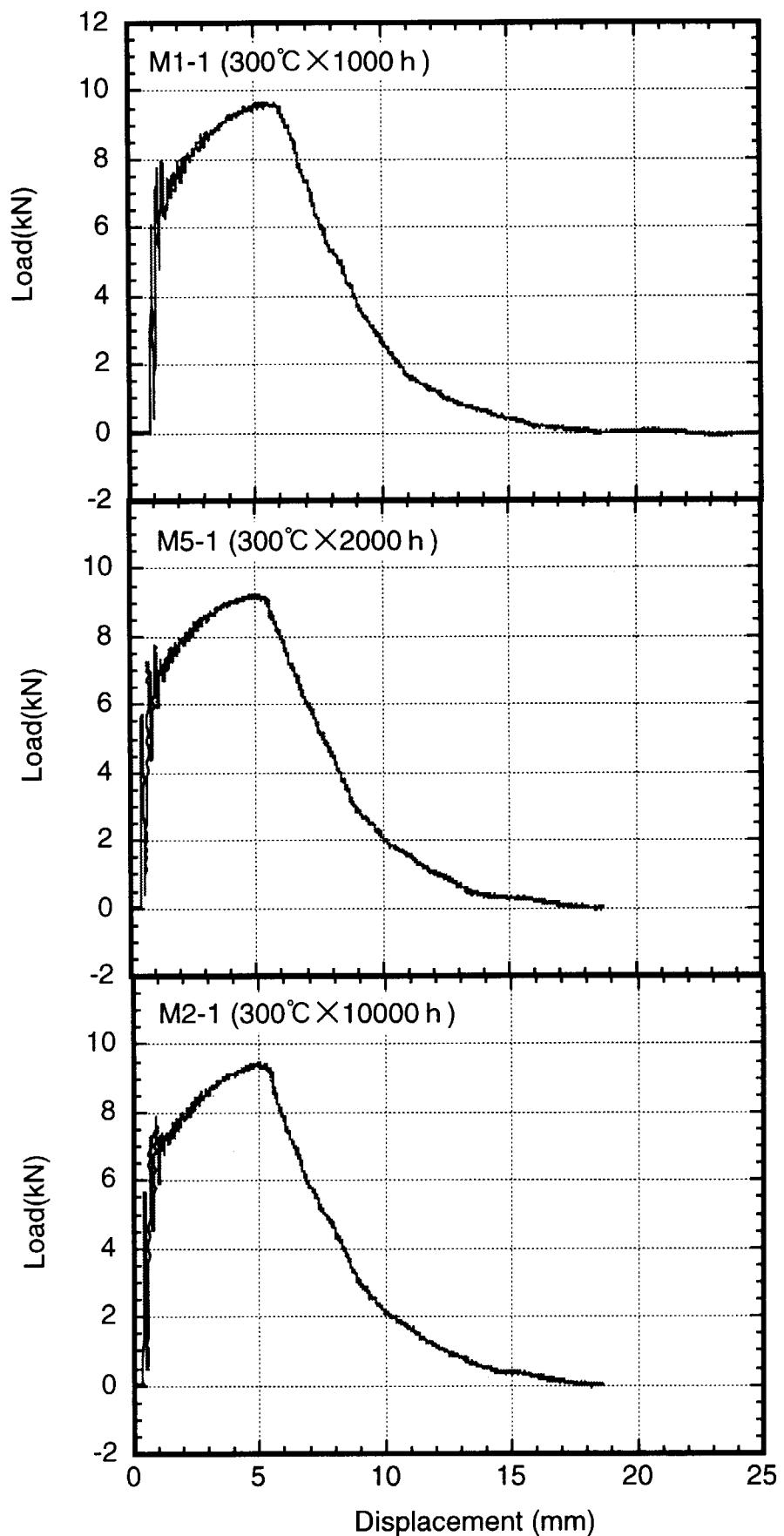


Fig. A. 6 Load-displacement curve of Charpy impact tests on VC9 base metal annealed at 300°C.

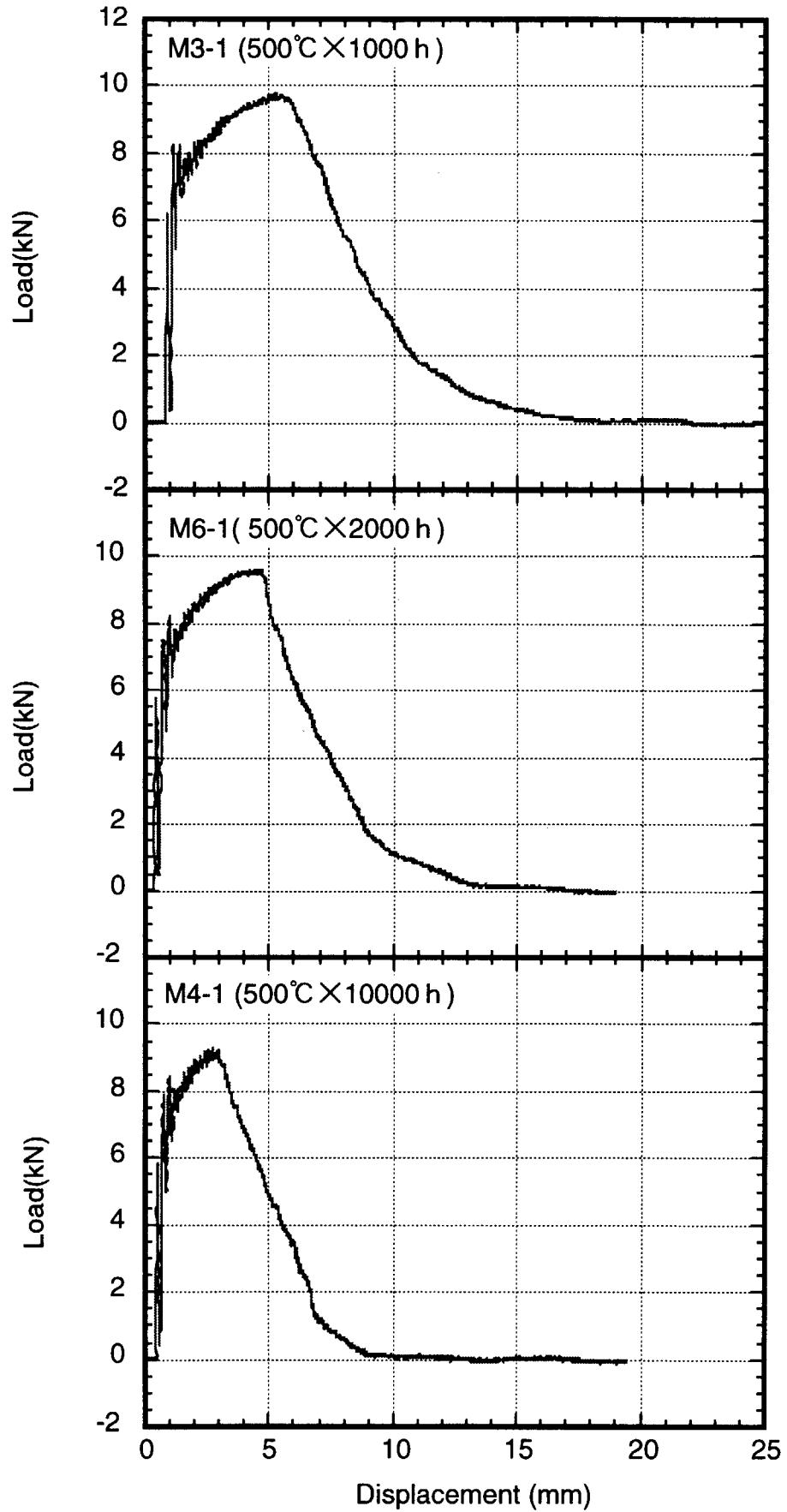


Fig. A. 7 Load-displacement curve of Charpy impact tests on VC9 base metal annealed at 500°C.

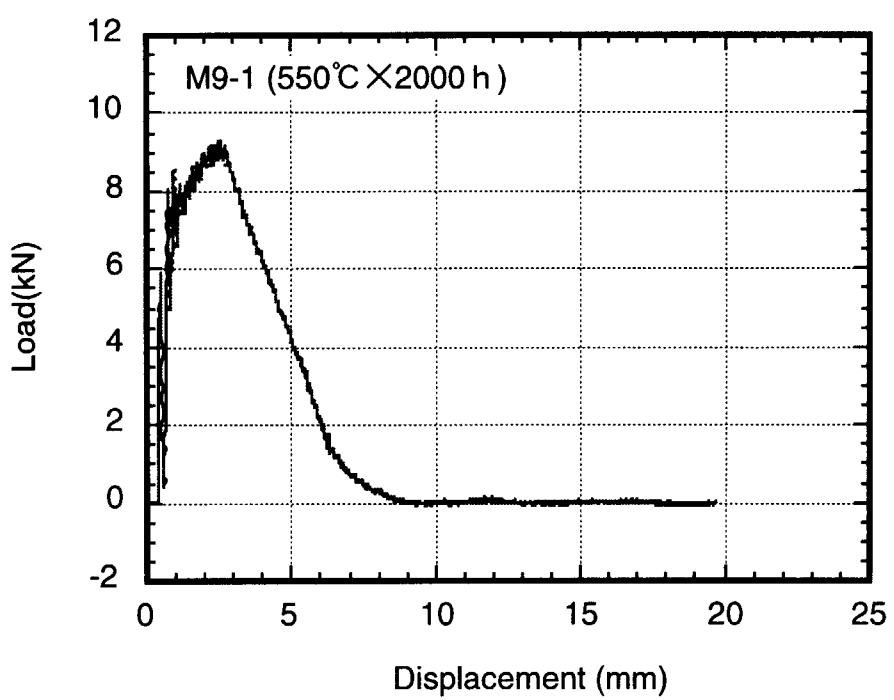
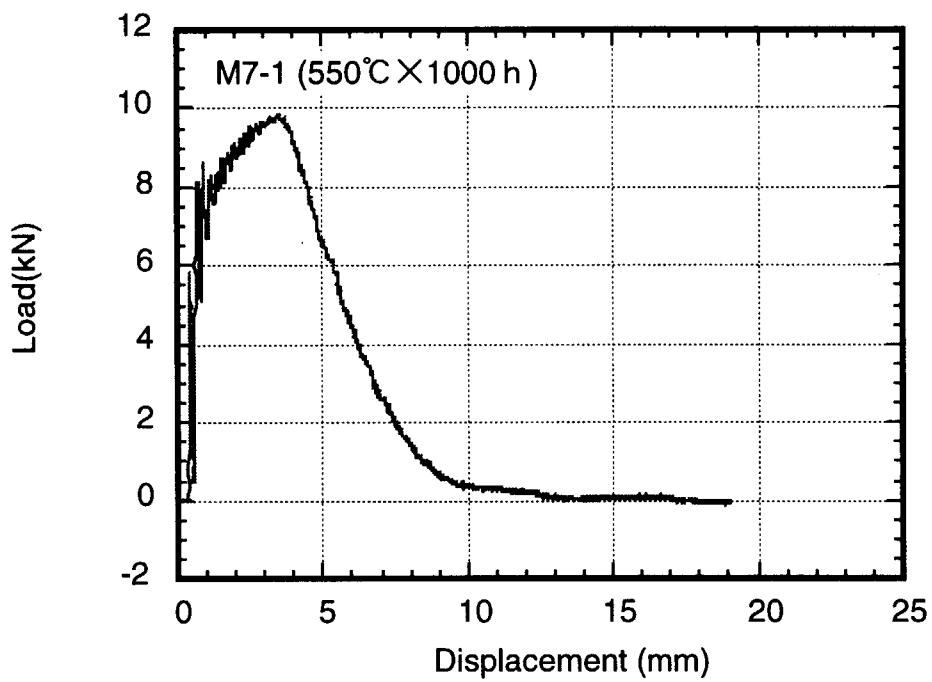


Fig. A. 8 Load-displacement curve of Charpy impact tests on VC9 base metal annealed at 550°C.

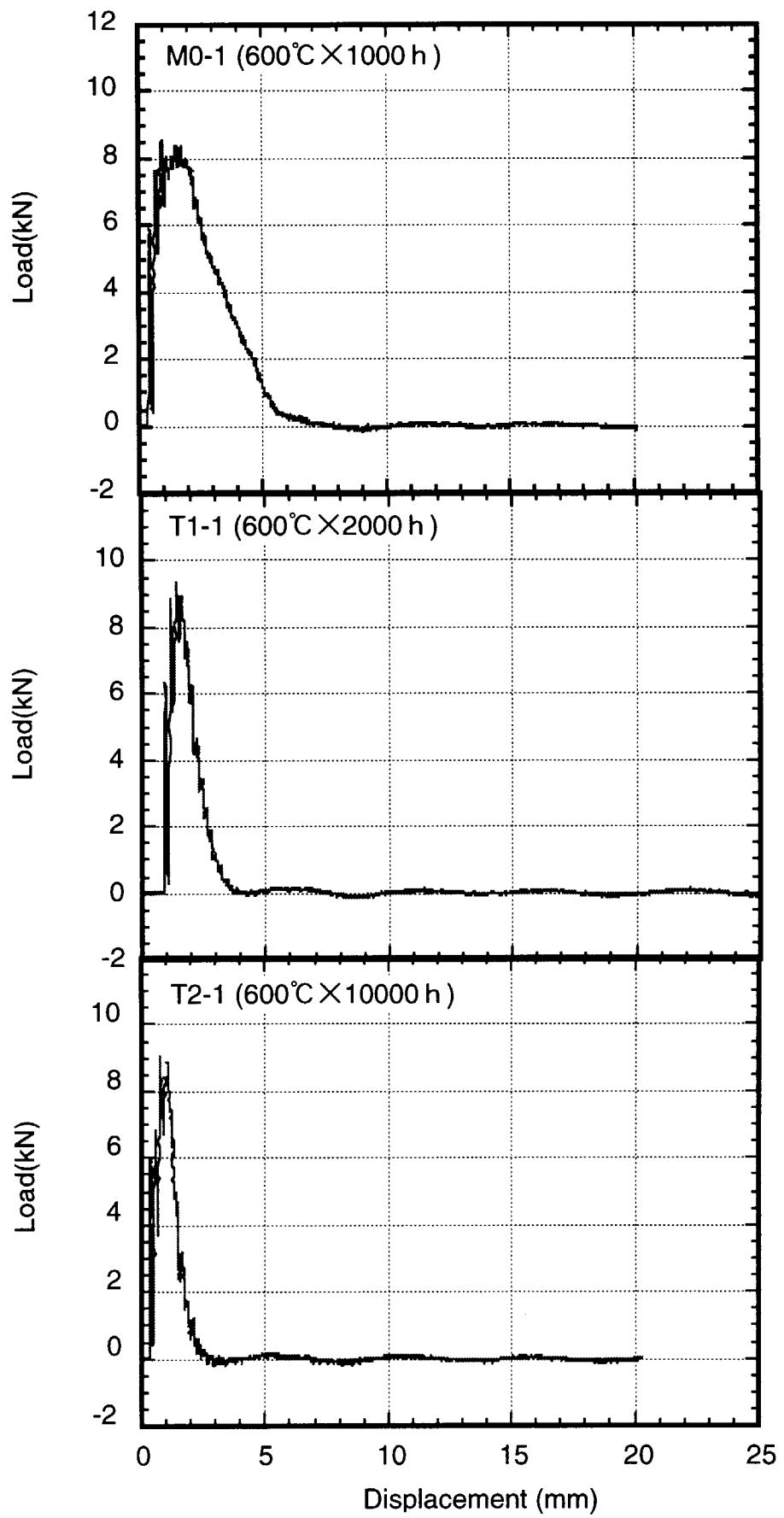


Fig. A. 9 Load-displacement curve of Charpy impact tests on VC9 base metal annealed at 600°C.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血压の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

### 換算表

力	N( $=10^5$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 1 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa( $=10$ bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{-18}$
9.80665	1	2.72407 $\times 10^{-6}$		2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{-25}$	$= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	3.96759 $\times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$	$= 4.1855 \text{ J} (15^\circ \text{C})$
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{-21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{-18}$	$= 735.499 \text{ W}$
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1		1	100		1	3876		1	100
$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1			$2.58 \times 10^{-4}$	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

低放射化Mn-Cr鋼の特性評価試験(2)  
—物理的特性及び時効特性—