

JAERI-Research

96-020



稠密六方晶の結晶構造を有するリフラクトリー金属の
機械的性質に及ぼす結晶学的異方性の影響
(受託研究)

1996年3月

遠山 晃・木内 清・菊地正彦

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 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（〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 (株)原子力資料サービス

稠密六方晶の結晶構造を有するリフラクトリー金属の
機械的性質に及ぼす結晶学的異方性の影響

日本原子力研究所東海研究所材料研究部
遠山 晃・木内 清・菊地 正彦

(1996年3月1日受理)

ジルコニウム及びチタン等のリフラクトリー金属は、酸化力の高い沸騰硝酸溶液中で優れた耐食性を示す材料である。しかし、厚肉の構造用材料としての実使用経験が非常に少なく、また結晶学的異方性の強い稠密六方晶の結晶構造を有している。この観点から使用温度領域における引張試験及び衝撃試験を行い、構造材料としての基本特性を評価して、当該材料特有の中低温の変形特性を明らかにした。その結果として、ジルコニウムの0.2%耐力及び引張強さは温度の上昇に伴い大きく低下し、低温クリープが重要であることが示唆された。また、ジルコニウムの衝撃値には結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織に依存して、非常に低い衝撃値が表れることが分かった。この特性は同じ稠密六方晶を持つチタンには認められない。結晶学的解析結果から、ジルコニウムは辺り変形を起こす特定結晶面における変形抵抗が著しく低いことに依ることが明らかとなった。

本報告は、科学技術庁電源開発特別研究受託研究として実施した「大型再処理施設環境安全試験研究（再処理プラント材料技術の開発）」の成果の一部である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

Effect of Crystal Anisotropy on Mechanical Properties of Refractory Metals and
Alloys with cph Type Crystal Structure

Akira TOHYAMA, Kiyoshi KIUCHI and Masahiko KIKUCHI

Department of Material Science and Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 1, 1996)

Refractory metals like zirconium (Zr) and titanium (Ti) have the excellent corrosion resistance in highly oxidizing environments like reprocessing nitric acid. However, there are few experiences for practical use as structural materials of these materials. Mechanical properties of these materials, so the tensile test and the impact test of zirconium, titanium, and their alloys were examined with a function of testing temperature. Both 0.2% proof stress and ultimate tensile strength of zirconium decrease with testing temperature, it is suggested to play an important role of the low temperature creep on the mechanical deformation. The crystallographic anisotropy appears clearly in the impact value of zirconium, it has a very low impact value along the crystal orientation of the cph slip planes like (1010). This property is not seen in titanium which has the same crystal structure. It is necessary to consider zirconium showing a remarkable decrease in the deformation resistance along such specific crystal planes.

Keywords: Refractory Metal, Anisotropy, Crystal Structure, Crystal Orientation

This research is sponsored by the Science & Technology Agency under contact of the "Development of material technologies applied for reprocessing plant".

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	1
2.1 供試材	1
2.2 引張試験	1
2.3 衝撃試験	1
3. 結果と考察	2
3.1 引張試験結果	2
3.2 ZrとZr合金の衝撃試験結果	2
3.3 TiとTi合金の衝撃試験結果	3
4. 結 論	4
謝 辞	4
参考文献	4

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
2.1 Specimen Materials	1
2.2 Tensile Test	1
2.3 Impact Test	1
3. Results and Discussions	2
3.1 Tensile Test	2
3.2 Impact Value Temperature Dependence of Zr and Zr Alloy	2
3.3 Impact Value Temperature Dependence of Ti and Ti Alloy	3
4. Conclusions	4
Acknowledgments	4
References	4

1. 緒 言

ジルコニウム及びチタン等のリフラクトリー金属は、酸化力の高い沸騰硝酸溶液中においてもステンレス鋼のような過不働態腐食を示さず、耐食性の優れた材料である^{1) - 3)}。しかし、厚肉の構造用材料としての工業的実使用経験が非常に少ないほか、結晶学的異方性が強い稠密六方晶（h c p）の結晶構造を有し、相変態温度も800~900°Cと低く、合金化により高温側の体心立方晶を持つ β 相が残留したり、マルテンサイト変態型の無拡散変態によりラス状の組織を生じやすい等の特異的な金属学的性質を有している。また、これまでに実施した応力腐食割れ試験、腐食疲労試験、機械的性質の評価試験等の結果から^{4) - 5)}、100°C近くの低温においてもクリープが生じること、硝酸中では稠密六方晶の最密面に沿った擬劈開型の貫粒応力腐食割れ（T G S C C）の感受性が比較的高いこと等が見出されてきている。さらに、海外のプラントの経験では、強い曲げ加工部位において割れが発生した経緯もある。今後の応力腐食割れや腐食疲労等の環境割れの機構や支配因子を解明する上では、当該h c p結晶構造を持つ材料間の破壊力学的な性質の相違を詳細に調べることが重要と考えられる。

この観点から、今回、金属ZrとZr合金及び金属TiとTi合金について、引張試験及び衝撃試験を温度を変えて実施して、破壊靭性の違いを評価し、当該材料特有の変形挙動を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本試験に用いた材料は、純Zr、純Ti、及びそれらの合金である。Table 1に化学成分を示す。試験片は、各供試材の板材から機械加工により切り出して使用した。板材は8 mm厚さに圧延して、焼鈍によって α 相安定化処理を施した。

2.2 引張試験

Figure 1に試験に用いた平行部径5 mm、標点距離27 mmの丸棒小型試験片の形状を示す。試験片には、圧延方向に平行に切り出した試験片（L方向材）と垂直方向に切り出した試験片（C方向材）の二つを用いた。引張試験には、容量10 tonのオートグラフIS-10 T型引張試験機を用いた。試験は、室温~300°Cの範囲で段階的に試験温度を変えて実施した。引張速度は、JISG0567の鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験法に準じて、降伏点付近まで0.3%/min、その後3mm/minの条件で実施した。試験では、降伏点、引張強さ、伸び、絞りについて測定した。

2.3 衝撃試験

試験法には、Vノッチ型のシャルピー衝撃試験法（CVN）を用い、試験片には、JIS Z 2202 4号試験片のハーフサイズ（厚さ5 mm）を用いた。Figure 2に当該試験に用いた試験片の切り出し方向を示す。試験片は前記引張試験と同様に、圧延方向に対して平行に切り出した試験片（L方向材）とそれに垂直方向に切り出した試験片（C方向材）の二つを用いた。なお、衝撃試験における割れの成長方向も、試験片の切り出し方向とは逆に、

1. 緒 言

ジルコニウム及びチタン等のリフラクトリー金属は、酸化力の高い沸騰硝酸溶液中においてもステンレス鋼のような過不働態腐食を示さず、耐食性の優れた材料である^{1) - 3)}。しかし、厚肉の構造用材料としての工業的実使用経験が非常に少ないほか、結晶学的異方性が強い稠密六方晶（h c p）の結晶構造を有し、相変態温度も800~900°Cと低く、合金化により高温側の体心立方晶を持つ β 相が残留したり、マルテンサイト変態型の無拡散変態によりラス状の組織を生じやすい等の特異的な金属学的性質を有している。また、これまでに実施した応力腐食割れ試験、腐食疲労試験、機械的性質の評価試験等の結果から^{4) - 5)}、100°C近くの低温においてもクリープが生じること、硝酸中では稠密六方晶の最密面に沿った擬劈開型の貫粒応力腐食割れ（T G S C C）の感受性が比較的高いこと等が見出されてきている。さらに、海外のプラントの経験では、強い曲げ加工部位において割れが発生した経緯もある。今後の応力腐食割れや腐食疲労等の環境割れの機構や支配因子を解明する上では、当該h c p結晶構造を持つ材料間の破壊力学的な性質の相違を詳細に調べることが重要と考えられる。

この観点から、今回、金属ZrとZr合金及び金属TiとTi合金について、引張試験及び衝撃試験を温度を変えて実施して、破壊靭性の違いを評価し、当該材料特有の変形挙動を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本試験に用いた材料は、純Zr、純Ti、及びそれらの合金である。Table 1に化学成分を示す。試験片は、各供試材の板材から機械加工により切り出して使用した。板材は8 mm厚さに圧延して、焼鈍によって α 相安定化処理を施した。

2.2 引張試験

Figure 1に試験に用いた平行部径5 mm、標点距離27 mmの丸棒小型試験片の形状を示す。試験片には、圧延方向に平行に切り出した試験片（L方向材）と垂直方向に切り出した試験片（C方向材）の二つを用いた。引張試験には、容量10 tonのオートグラフIS-10 T型引張試験機を用いた。試験は、室温~300°Cの範囲で段階的に試験温度を変えて実施した。引張速度は、JISG0567の鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験法に準じて、降伏点付近まで0.3%/min、その後3mm/minの条件で実施した。試験では、降伏点、引張強さ、伸び、絞りについて測定した。

2.3 衝撃試験

試験法には、Vノッチ型のシャルピー衝撃試験法（CVN）を用い、試験片には、JIS Z 2202 4号試験片のハーフサイズ（厚さ5 mm）を用いた。Figure 2に当該試験に用いた試験片の切り出し方向を示す。試験片は前記引張試験と同様に、圧延方向に対して平行に切り出した試験片（L方向材）とそれに垂直方向に切り出した試験片（C方向材）の二つを用いた。なお、衝撃試験における割れの成長方向も、試験片の切り出し方向とは逆に、

L方向材がC方向に、C方向材がL方向になる。試験は、JIS Z 2242の金属材料衝撃試験法に準拠し、両方向材とともに、-100°C~300°Cの範囲で50°Cないし100°Cの試験温度間隔で実施した。試験では、吸収エネルギーを試験片断面積にて標準化したシャルピー衝撃値の試験温度依存性を調べたほか、横膨出量の試験温度依存性と破面観察を行った。

3. 結果と考察

3.1 引張試験結果

Zrに関して、Figure 3に0.2%耐力及び引張強さの温度依存性を、Figure 4に破断伸び及び絞りの温度依存性をそれぞれ示す。0.2%耐力及び引張強さとともに、温度の上昇に伴い大きく低下しており、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。引張試験において試験片の平行部に垂直に割れが発生した場合の進展方向や次項の衝撃試験における割れの成長方向は、試験片の切り出し方向とは逆に、L方向材がC方向、C方向材がL方向になる。Figure 5に示すように、Zr材のL方向面では、最密面の優先配向傾向が強く、逆にC方向面では、辺り変形を生じ易い柱状晶平行面の優先的配向傾向を示している。別途報告⁴⁾で、低速歪み速度試験を実施しているが、歪み速度によっても当該機械的強度の測定値が低下する傾向が観察されている。Figure 3において、引張強さには試験片の切り出し方向の違いによる差異が見られないが、0.2%耐力は、いずれの温度においてもC方向材よりもL方向材が小さい。これは、引張方向に垂直な面に変形の容易な(1100)面が優先配向しているL方向材の方が変形が容易であること、逆に、引張方向に垂直な面に(0001)や(1011)面などの最密面が優先配向しているC方向材では辺り変形抵抗が大きいことを示している。

3.2 ZrとZr合金の衝撃試験結果

金属Zr及びZr合金としてZr-15Tiのシャルピー衝撃値と横膨出量の試験温度依存性をそれぞれFigure 6及びFigure 7に示す。金属ZrのL方向材の衝撃値は、C方向材のそれと比較して非常に小さく、温度とともに増加しているが、0°Cで40J/cm²、100°Cでも47.5J/cm²と低い値を示す。L方向材では、横膨出量も温度とともに増大している。一方、これに対して、C方向材の衝撃値は、-50°C付近に遷移温度が見られ、0°Cにおける衝撃値で127.5J/cm²と良好な値を示す。また、その遷移温度域以上で横膨出量もほぼ一定の飽和値を示している。

Zr-15Tiは、金属Zrとことなり、L、C方向の違いによる衝撃値の温度依存性傾向の異なりは示さない。しかし、衝撃値の絶対値は両方向材ともに0°Cで25J/cm²と低く、温度とともに増加してはいるが、200°Cでも100J/cm²以下であり低い。Zr-15Tiの横膨出量も衝撃値と同じく金属ZrのL方向材と同じ傾向を示す。

Photo 1に金属Zrの各試験温度における破面形態の変化について、高倍率のSEM写真により示す。同様に、photo 2にZr-15Tiの各試験温度における破面形態の変化についてを示す。金属Zrの破面形態は、試験温度の低温域から高温域にかけて大きく変わる様相は示さない。

L方向材がC方向に、C方向材がL方向になる。試験は、J I S Z 2242の金属材料衝撃試験法に準拠し、両方向材とともに、-100°C~300°Cの範囲で50°Cないし100°Cの試験温度間隔で実施した。試験では、吸収エネルギーを試験片断面積にて標準化したシャルピー衝撃値の試験温度依存性を調べたほか、横膨出量の試験温度依存性と破面観察を行った。

3. 結果と考察

3.1 引張試験結果

Zrに関して、Figure 3 に0.2%耐力及び引張強さの温度依存性を、Figure 4 に破断伸び及び絞りの温度依存性をそれぞれ示す。0.2%耐力及び引張強さとともに、温度の上昇に伴い大きく低下しており、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。引張試験において試験片の平行部に垂直に割れが発生した場合の進展方向や次項の衝撃試験における割れの成長方向は、試験片の切り出し方向とは逆に、L方向材がC方向、C方向材がL方向になる。Figure 5 に示すように、Zr材のL方向面では、最密面の優先配向傾向が強く、逆にC方向面では、辺り変形を生じ易い柱状晶平行面の優先的配向傾向を示している。別途報告⁴⁾で、低速歪み速度試験を実施しているが、歪み速度によっても当該機械的強度の測定値が低下する傾向が観察されている。Figure 3において、引張強さには試験片の切り出し方向の違いによる差異が見られないが、0.2%耐力は、いずれの温度においてもC方向材よりもL方向材が小さい。これは、引張方向に垂直な面に変形の容易な(1100)面が優先配向しているL方向材の方が変形が容易であること、逆に、引張方向に垂直な面に(0001)や(1011)面などの最密面が優先配向しているC方向材では辺り変形抵抗が大きいことを示している。

3.2 ZrとZr合金の衝撃試験結果

金属Zr及びZr合金としてZr-15Tiのシャルピー衝撃値と横膨出量の試験温度依存性をそれぞれFigure 6 及びFigure 7 に示す。金属ZrのL方向材の衝撃値は、C方向材のそれと比較して非常に小さく、温度とともに増加しているが、0°Cで40 J/cm²、100°Cでも47.5 J/cm²と低い値を示す。L方向材では、横膨出量も温度とともに増大している。一方、これに対して、C方向材の衝撃値は、-50°C付近に遷移温度が見られ、0°Cにおける衝撃値で127.5 J/cm²と良好な値を示す。また、その遷移温度域以上で横膨出量もほぼ一定の飽和値を示している。

Zr-15Tiは、金属Zrとことなり、L, C方向の違いによる衝撃値の温度依存性傾向の異なりは示さない。しかし、衝撃値の絶対値は両方向材ともに0°Cで25 J/cm²と低く、温度とともに増加してはいるが、200°Cでも100 J/cm²以下であり低い。Zr-15Tiの横膨出量も衝撃値と同じく金属ZrのL方向材と同じ傾向を示す。

Photo 1 に金属Zrの各試験温度における破面形態の変化について、高倍率のSEM写真により示す。同様に、photo 2 にZr-15Tiの各試験温度における破面形態の変化についてを示す。金属Zrの破面形態は、試験温度の低温域から高温域にかけて大きく変わる様相は示さない。

衝撃値の温度依存性において -50°C 付近に遷移温度が観察されたC方向材の破面においても同じであり、この遷移が延性一延性の遷移であることが示唆される。一方、衝撃値の低いL方向材の破面においては、粗大辺りが観察され、変形抵抗が小さいことが分かる。金属Zrでは、衝撃値は辺り変形を生じているL方向材の方がC方向材に比較してかなり小さく、低温の急速変形において、結晶学的異方性に付随した変形抵抗の違いが現れている。Zr-15Tiの破面形態は、L, C両方向ともに試験温度の低温域から高温域にかけて同じ様相を示している。衝撃値は金属ZrのL方向と同様な低い値を示しているが、破面形態は金属ZrのL方向材のような粗大辺りは生じていない。破面形態上は、良好な延性破面を示しており、衝撃値が低い原因是、合金化に起因し、合金組成や熱履歴によって、衝撃特性に重要な影響を持つ合金元素や微量不純物(O, N, C等の格子間侵入型元素)の偏析等が考えられる。

3.3 TiとTi合金の衝撃試験結果

金属Ti及びTi合金としてTi-5Taのシャルピー衝撃値と横膨出量との試験温度依存性をそれぞれFigure 8及びFigure 9に示す。金属Tiは同じ結晶構造である六方晶金属の金属Zrと異なり、L, C両方向ともにシャルピー衝撃値、横膨出量ともに高く、 0°C にて $250\text{ J}/\text{cm}^2$ 以上の値の良好な値を示す。試験温度に対する依存性は、低温域から 0°C まで一様に増加するが、 $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ にて極大値を示したあと、 100°C 以降は逆に低下する傾向を示す。

Ti-5Taは、前項のZr-15Tiと同様に合金化によって衝撃値は金属Tiよりも低下している。しかし、絶対値では、 0°C でL, C両方向ともに $100\text{ J}/\text{cm}^2$ 以上の値の良好な値を示す。また、試験温度に対する依存性は金属Tiと全く同じ傾向を示し、低温域～ 100°C まで増大した後、それ以降は逆に低下する傾向を示す。

Photo 3に金属Tiの各試験温度における破面形態の変化について、高倍率のSEM写真により示す。同様に、Photo 4にTi-5Taの各試験温度における破面形態の変化についてを示す。両材料ともに衝撃値が大きいことに対応し破面形態からも変形量が大きく引き剥がされた様相の破面を呈している。破面形態上、良好な延性破面を示しているが、金属Zrはこの金属Tiと同じ結晶構造を有しているながら、結晶学的異方性を示している。一方、金属Ti, Ti-5Taにおいても 100°C 以上の温度域において再び衝撃値が低下していく現象は特異なものであり、破面形態上からは原因不明である。

一連の衝撃試験から、金属Zrにおいては結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織の結晶方向性によっては非常に低い衝撃値を持つことが明らかになった。さらにこの特性は同じ金属学的性質を有する金属Tiには見られないことから金属Zr特有の性質である可能性を示す。Figure 10,11に金属Ti, Ti-5Taの結晶配向性をX線回折強度の相対比から求めた結果を示す(金属ZrはFigure 5参照)。金属ZrのL方向を除いて、{10-11}が主体であるが、金属ZrのL方向は、{10-10}と{11-20}面の割合が高い。金属ZrのL方向の特性が他と異なることの原因の一つと考えられる。

一般に構造材料では、遷移温度が材料を使用する温度域の判断の重要な基準の一つになっているが、金属Zrの場合はL方向材の場合に遷移温度が明確でなくかつ高温域にわたっているが、金属Zrの場合はL方向材の場合に遷移温度が明確でなくかつ高温域にわたっている。

て低い衝撃値を示した。金属Zrの破面形態上では、脆性破面が見られず、金属Tiと比較しても現象の説明は現状では困難であるが、特定結晶面において変形抵抗の著しい低下や高い応力腐食割れ感受性を示すことは当該材料の特徴であり、十分に考慮することが必要である。

4. 結 論

- (1) 金属Zrの0.2%耐力及び引張強さは、温度の低下とともに大きく低下し、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。また、0.2%耐力は、最密面の優先配向により辺り変形抵抗が異なるため、試験片の切り出し方向による差異を生じた。
- (2) 金属Zrの衝撲値には、結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織の結晶方向性によつては、非常に低い衝撲値を持つ。この特性は、同じ金属学的性質を有する金属Tiには見られない。
- (3) 金属ZrのL方向は、(1010)と(1120)面の割合が高く、他のリフラクトリ金属の特性と異なる原因の一つと考えられる。金属Zrは特定結晶面において変形抵抗の著しい低下を示すことに考慮する必要がある。

謝 辞

本実験の一部につきまして高木愛夫氏（現：東京電力株式会社電力技術研究所）に協力頂き感謝致します。

参 考 文 献

- 1)K.Kiuchi;J.Atomic Energy Society of Japan,31(1989),p.229
- 2)K.Kiuchi,N.Yamanouchi,M.Kikuchi and Y.Kuriki;Proc.RECOD'91,Vol.2(1991),p.549
- 3)J.A.Beavers,J.C.Griess and W.K.Boyd;Corrosion,36(1981),p.292
- 4)C.Kato, Y.Takagi and K.Kiuchi;Proc.Inter.Sympo.on Plant Aging and Life Prediction of Corroable Structures ,(1995),BVI27
- 5)T.Motooka,K.Kiuchi;Proc.1995 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, (1995),p.513

て低い衝撃値を示した。金属Zrの破面形態上では、脆性破面が見られず、金属Tiと比較しても現象の説明は現状では困難であるが、特定結晶面において変形抵抗の著しい低下や高い応力腐食割れ感受性を示すことは当該材料の特徴であり、十分に考慮することが必要である。

4. 結 論

- (1) 金属Zrの0.2%耐力及び引張強さは、温度の低下とともに大きく低下し、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。また、0.2%耐力は、最密面の優先配向により辺り変形抵抗が異なるため、試験片の切り出し方向による差異を生じた。
- (2) 金属Zrの衝撃値には、結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織の結晶方向性によつては、非常に低い衝撃値を持つ。この特性は、同じ金属学的性質を有する金属Tiには見られない。
- (3) 金属ZrのL方向は、(1010)と(1120)面の割合が高く、他のリフラクトリ金属の特性と異なる原因の一つと考えられる。金属Zrは特定結晶面において変形抵抗の著しい低下を示すことに考慮する必要がある。

謝 辞

本実験の一部につきまして高木愛夫氏（現：東京電力株式会社電力技術研究所）に協力頂き感謝致します。

参 考 文 献

- 1)K.Kiuchi;J.Atomic Energy Society of Japan,31(1989),p.229
- 2)K.Kiuchi,N.Yamanouchi,M.Kikuchi and Y.Kuriki;Proc.RECOD'91,Vol.2(1991),p.549
- 3)J.A.Beavers,J.C.Griess and W.K.Boyd;Corrosion,36(1981),p.292
- 4)C.Kato, Y.Takagi and K.Kiuchi;Proc.Inter.Sympo.on Plant Aging and Life Prediction of Corroable Structures ,(1995),BVI27
- 5)T.Motooka,K.Kiuchi;Proc.1995 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, (1995),p.513

て低い衝撃値を示した。金属Zrの破面形態上では、脆性破面が見られず、金属Tiと比較しても現象の説明は現状では困難であるが、特定結晶面において変形抵抗の著しい低下や高い応力腐食割れ感受性を示すことは当該材料の特徴であり、十分に考慮することが必要である。

4. 結 論

- (1) 金属Zrの0.2%耐力及び引張強さは、温度の低下とともに大きく低下し、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。また、0.2%耐力は、最密面の優先配向により辺り変形抵抗が異なるため、試験片の切り出し方向による差異を生じた。
- (2) 金属Zrの衝撃値には、結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織の結晶方向性によつては、非常に低い衝撃値を持つ。この特性は、同じ金属学的性質を有する金属Tiには見られない。
- (3) 金属ZrのL方向は、(1010)と(1120)面の割合が高く、他のリフラクトリ金属の特性と異なる原因の一つと考えられる。金属Zrは特定結晶面において変形抵抗の著しい低下を示すことに考慮する必要がある。

謝 辞

本実験の一部につきまして高木愛夫氏（現：東京電力株式会社電力技術研究所）に協力頂き感謝致します。

参 考 文 献

- 1)K.Kiuchi;J.Atomic Energy Society of Japan,31(1989),p.229
- 2)K.Kiuchi,N.Yamanouchi,M.Kikuchi and Y.Kuriki;Proc.RECOD'91,Vol.2(1991),p.549
- 3)J.A.Beavers,J.C.Griess and W.K.Boyd;Corrosion,36(1981),p.292
- 4)C.Kato, Y.Takagi and K.Kiuchi;Proc.Inter.Sympo.on Plant Aging and Life Prediction of Corroable Structures ,(1995),BVI27
- 5)T.Motooka,K.Kiuchi;Proc.1995 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, (1995),p.513

て低い衝撃値を示した。金属Zrの破面形態上では、脆性破面が見られず、金属Tiと比較しても現象の説明は現状では困難であるが、特定結晶面において変形抵抗の著しい低下や高い応力腐食割れ感受性を示すことは当該材料の特徴であり、十分に考慮することが必要である。

4. 結 論

- (1) 金属Zrの0.2%耐力及び引張強さは、温度の低下とともに大きく低下し、低温クリープの効果が現れやすいことが示唆される。また、0.2%耐力は、最密面の優先配向により辺り変形抵抗が異なるため、試験片の切り出し方向による差異を生じた。
- (2) 金属Zrの衝撃値には、結晶学的異方性が顕著に現れ、集合組織の結晶方向性によつては、非常に低い衝撃値を持つ。この特性は、同じ金属学的性質を有する金属Tiには見られない。
- (3) 金属Zrのし方向は、(1010)と(1120)面の割合が高く、他のリフラクトリ金属の特性と異なる原因の一つと考えられる。金属Zrは特定結晶面において変形抵抗の著しい低下を示すことに考慮する必要がある。

謝 辞

本実験の一部につきまして高木愛夫氏（現：東京電力株式会社電力技術研究所）に協力頂き感謝致します。

参 考 文 献

- 1)K.Kiuchi;J.Atomic Energy Society of Japan,31(1989),p.229
- 2)K.Kiuchi,N.Yamanouchi,M.Kikuchi and Y.Kuriki;Proc.RECOD'91,Vol.2(1991),p.549
- 3)J.A.Beavers,J.C.Griess and W.K.Boyd;Corrosion,36(1981),p.292
- 4)C.Kato, Y.Takagi and K.Kiuchi;Proc.Inter.Sympo.on Plant Aging and Life Prediction of Corroable Structures ,(1995),BVI27
- 5)T.Motooka,K.Kiuchi;Proc.1995 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, (1995),p.513

Table 1 The chemical composition of the tested specimen.T

	Zr	Ti	Ta	Hf	Fe	Cr	C	O	N	H
Zr	99.7 *			0.07	0.06※		0.01	0.139	0.003	0.0008
Zr-15Ti	bal.	15.31		0.008	0.047	0.007	0.003	0.072	0.0008	0.0005
Ti		bal.		1.001	0.017	0.014	0.005	0.044	0.0054	0.0003
Ti-5Ta		bal.	5.1		0.020			0.08	0.0031	0.0009

* Zr+Hf ※Fe+Cr

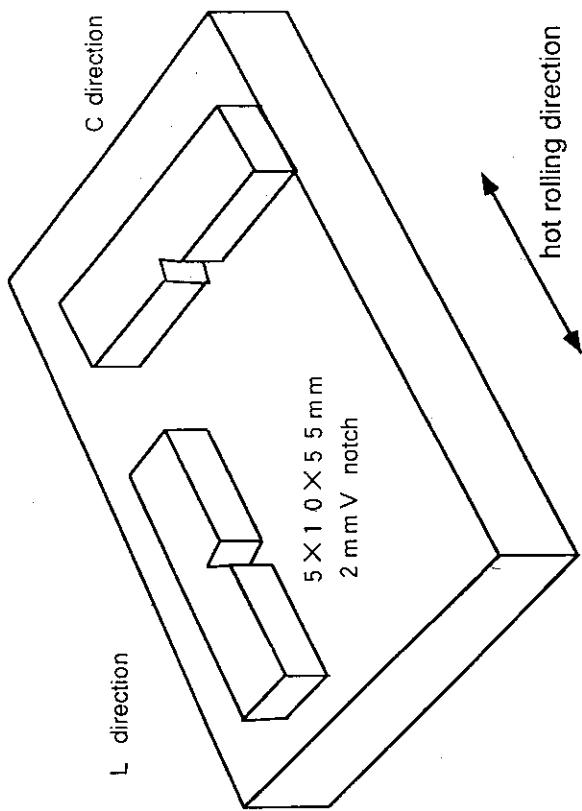


Fig. 2 A schematic view of impact test specimens and the difference of cutting out direction to the rolling direction.

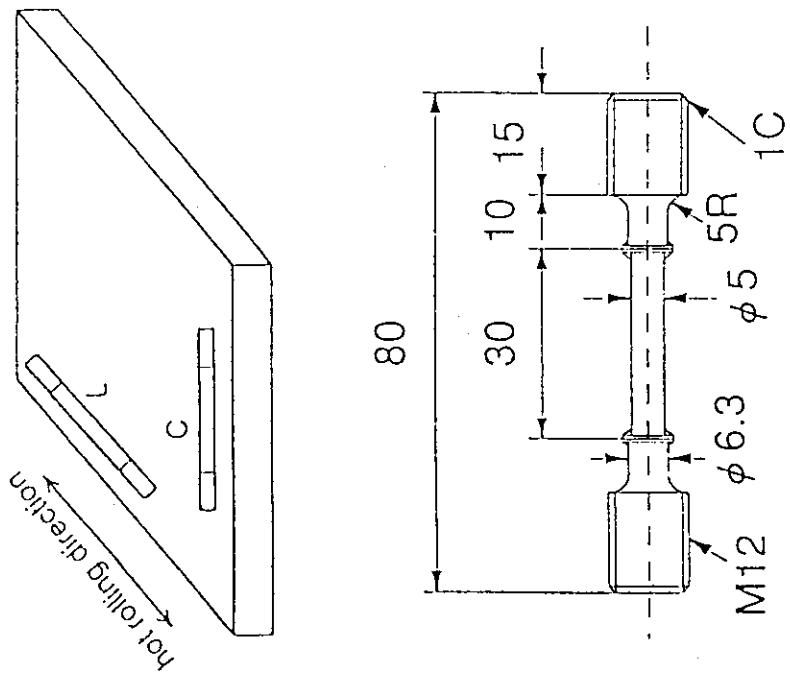


Fig. 1 A schematic view of tensile test specimens and the difference of cutting out direction to the rolling direction.

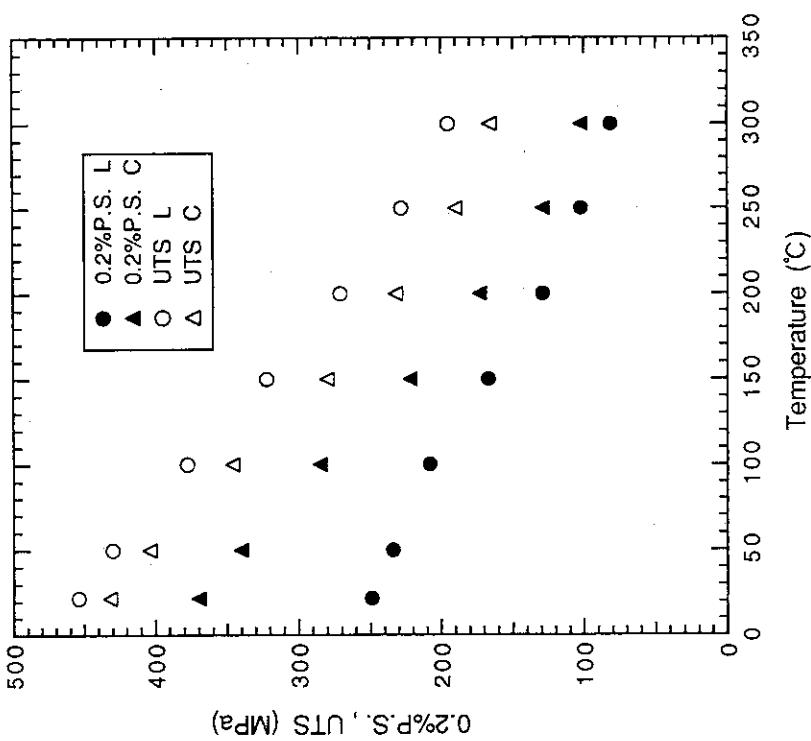


Fig. 3 The effect of temperature tensile test on the 0.2% proof stress and ultimate tensile strength of zirconium.

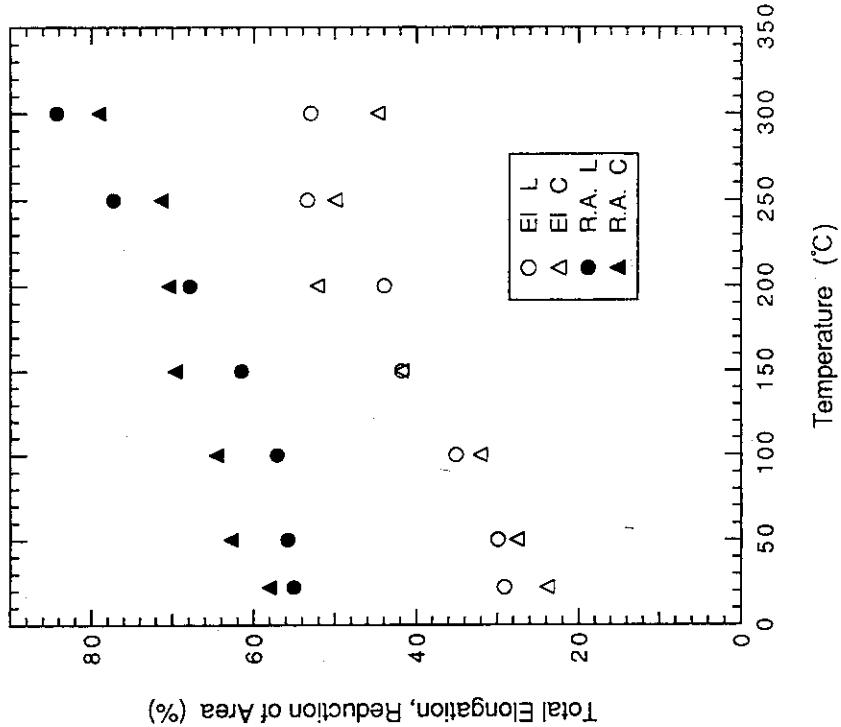


Fig. 4 The effect of temperature tensile test on the total elongation and the reduction of area of zirconium.

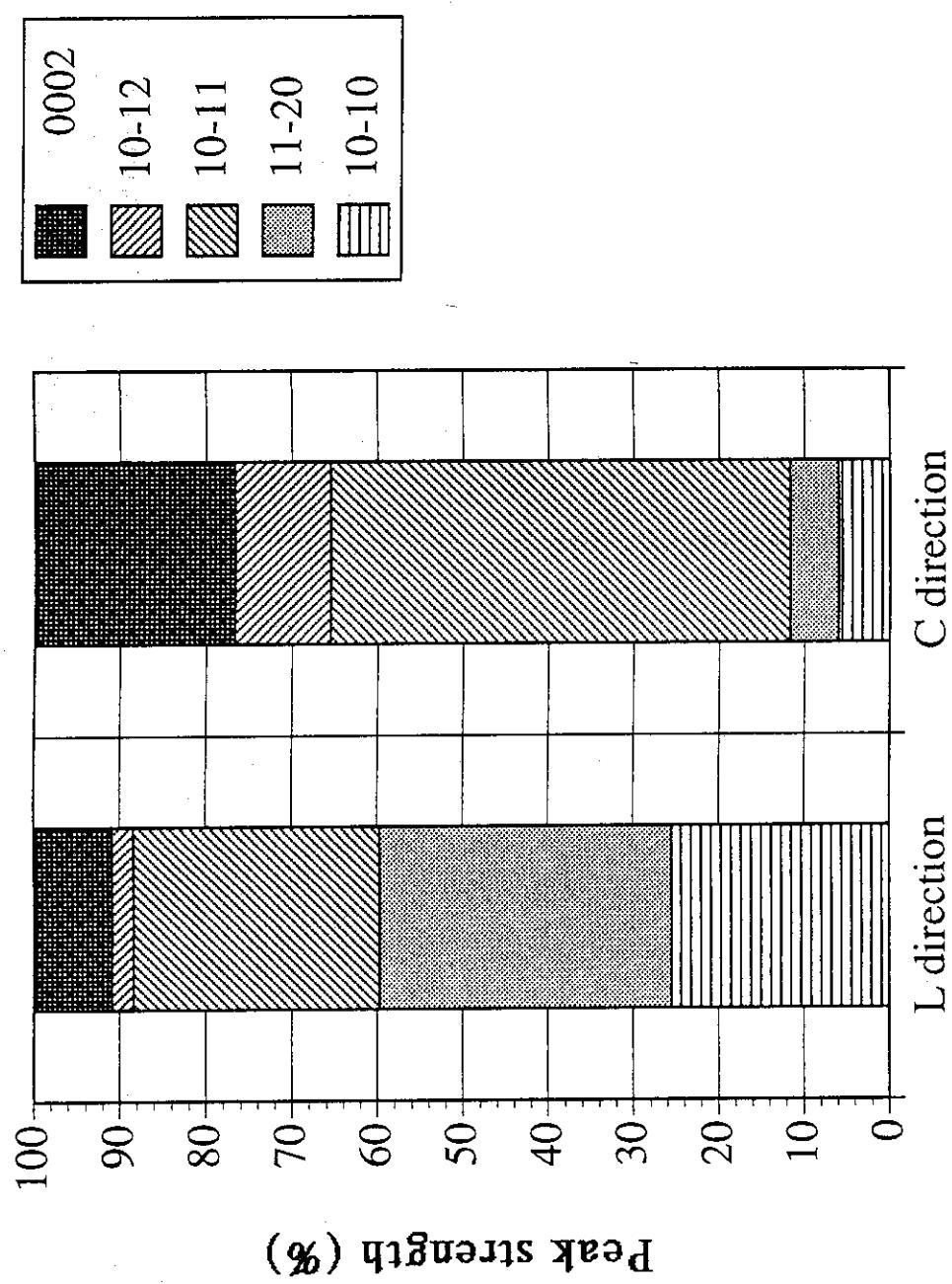


Fig. 5 The relative ratio of the line intensity of representative crystal planes of zirconium measured by X-ray diffraction.

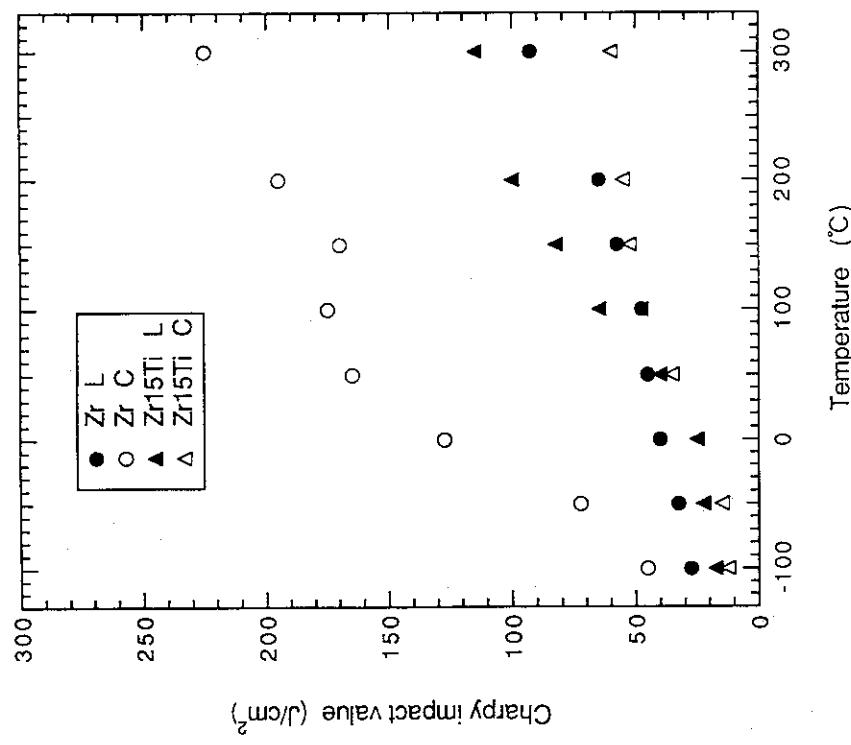


Fig. 6 The effect of testing temperature on the Charpy impact value of zirconium and Zr-15Ti.

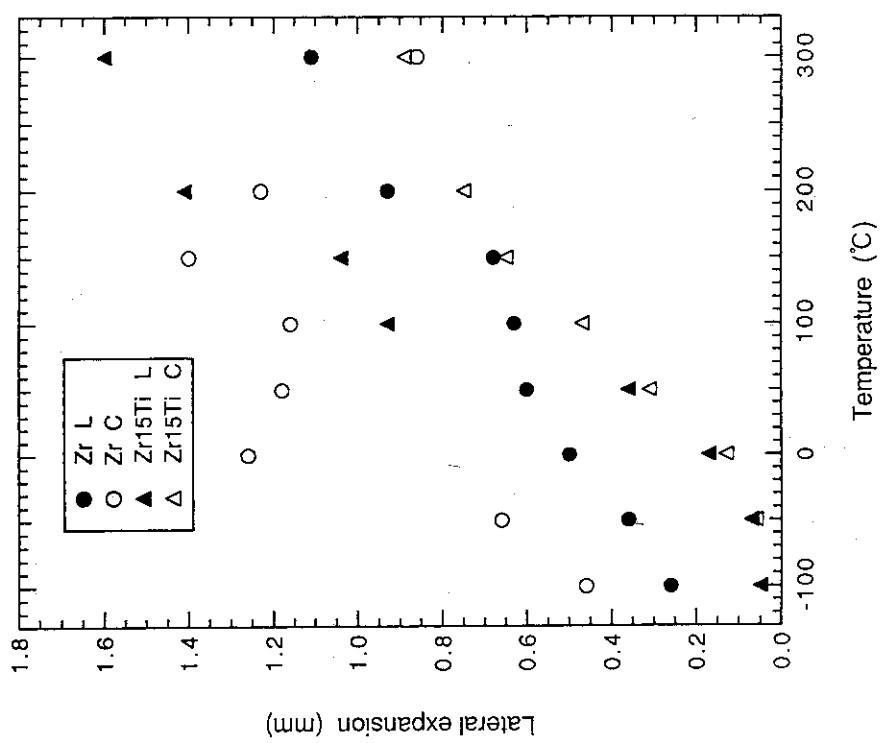


Fig. 7 The effect of testing temperature on the lateral expansion of zirconium and Zr-15Ti obtained by the Charpy impact test.

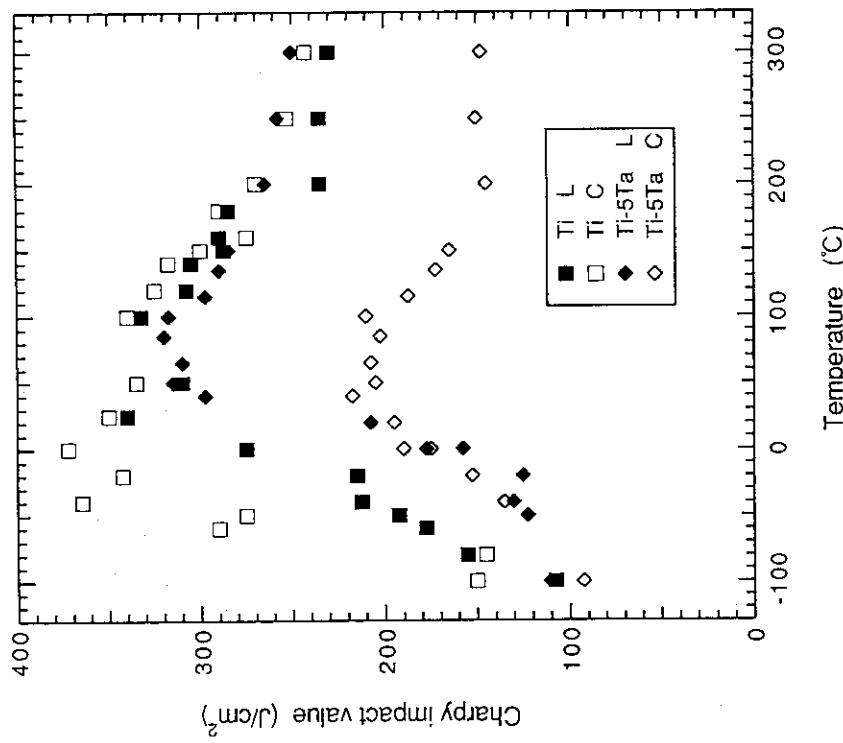


Fig. 8 The effect of testing temperature on the Charpy impact value of titanium and Ti-5Ta.

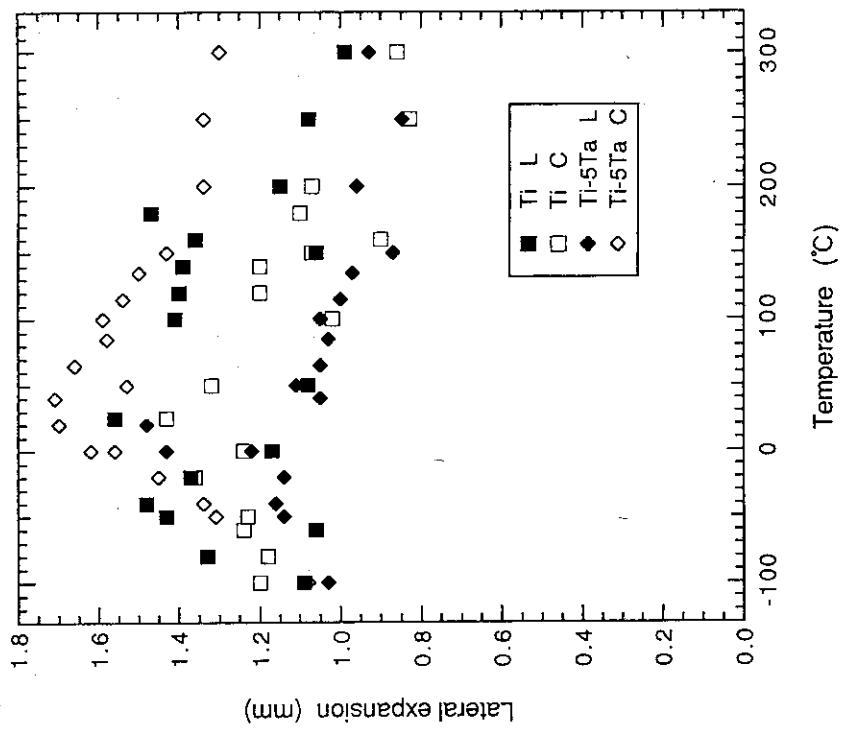


Fig. 9 The effect of testing temperature on the lateral expansion of titanium and Ti-5Ta obtained by the Charpy impact test.

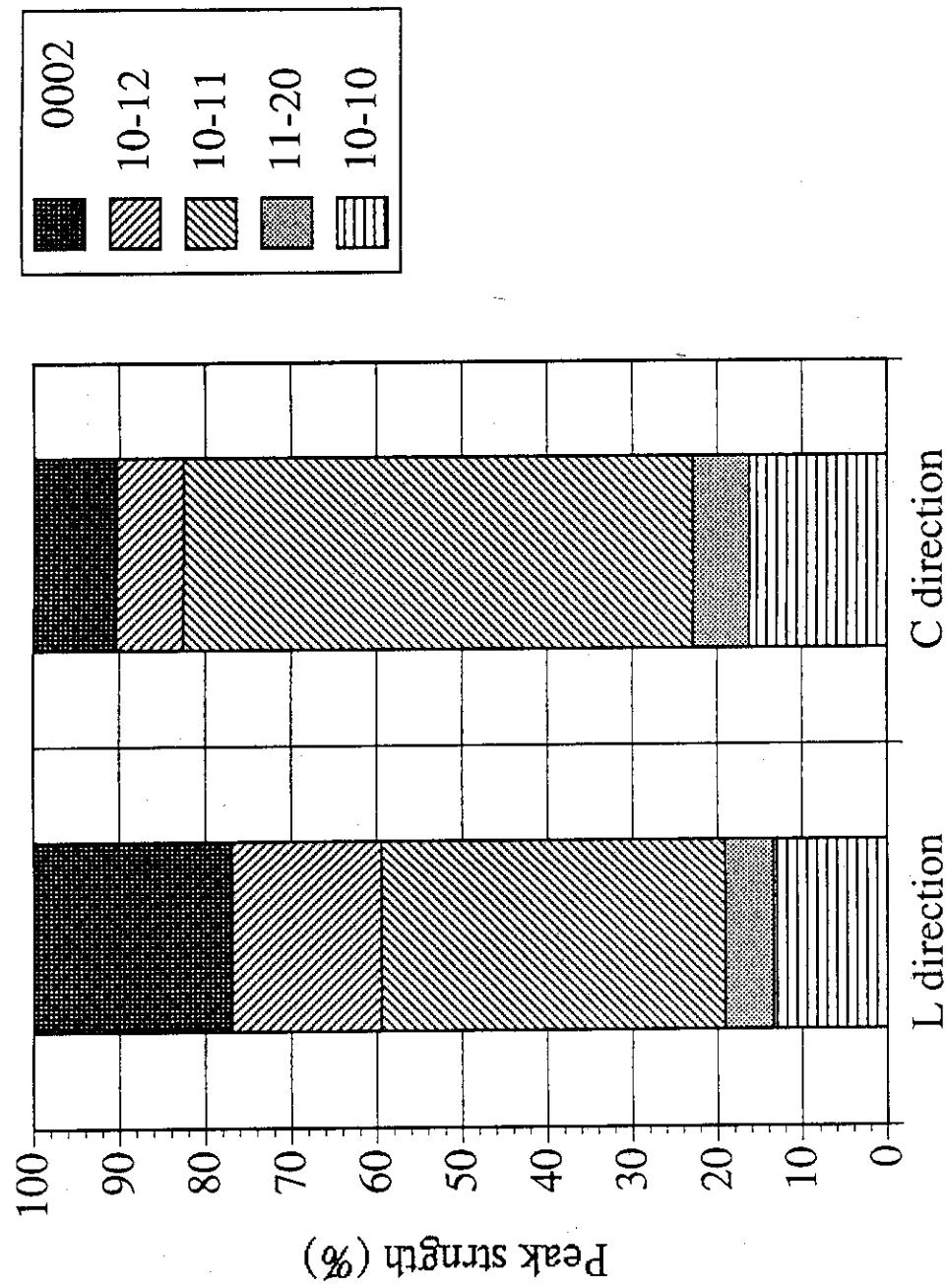


Fig. 10 The relative ratio of the line intensity of representative crystal planes of titanium measured by X-ray diffraction.

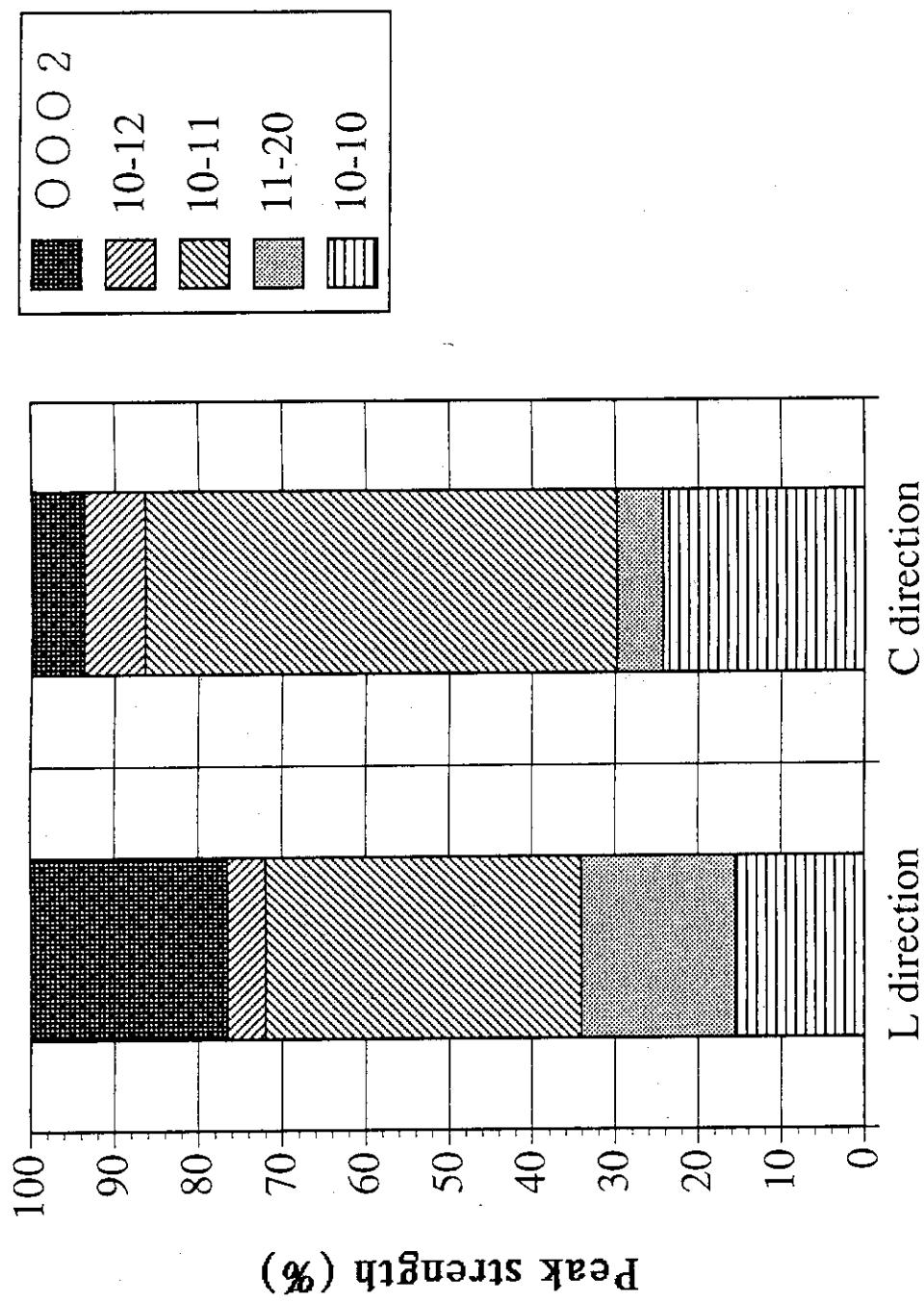


Fig. 11 The relative ratio of the line intensity of representative crystal planes of Ti-5Ta measured by X-ray diffraction.

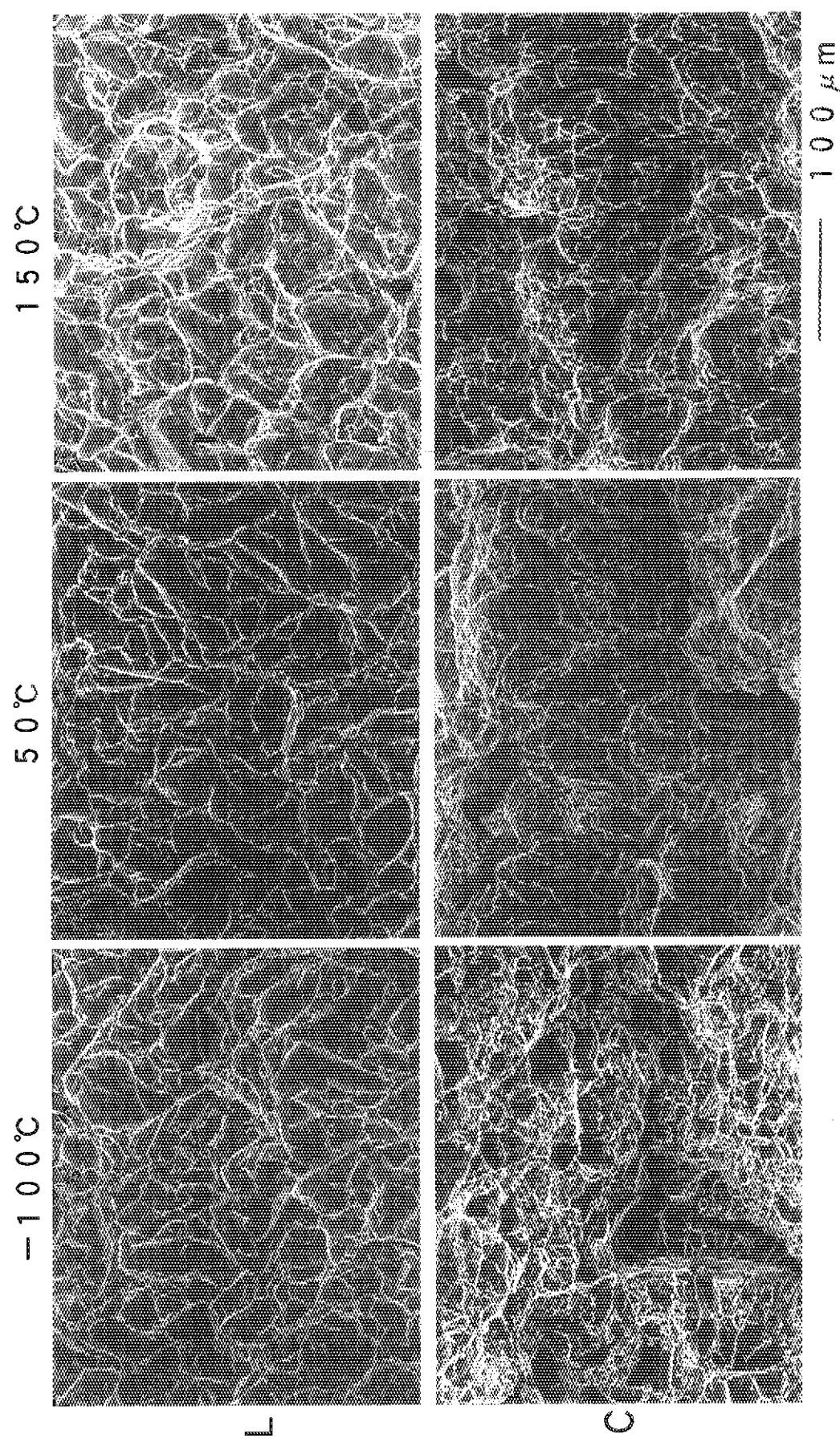


Photo. 1 Effect of testing temperature on SEM photographs of fracture surfaces of zirconium after the Charpy impact test.

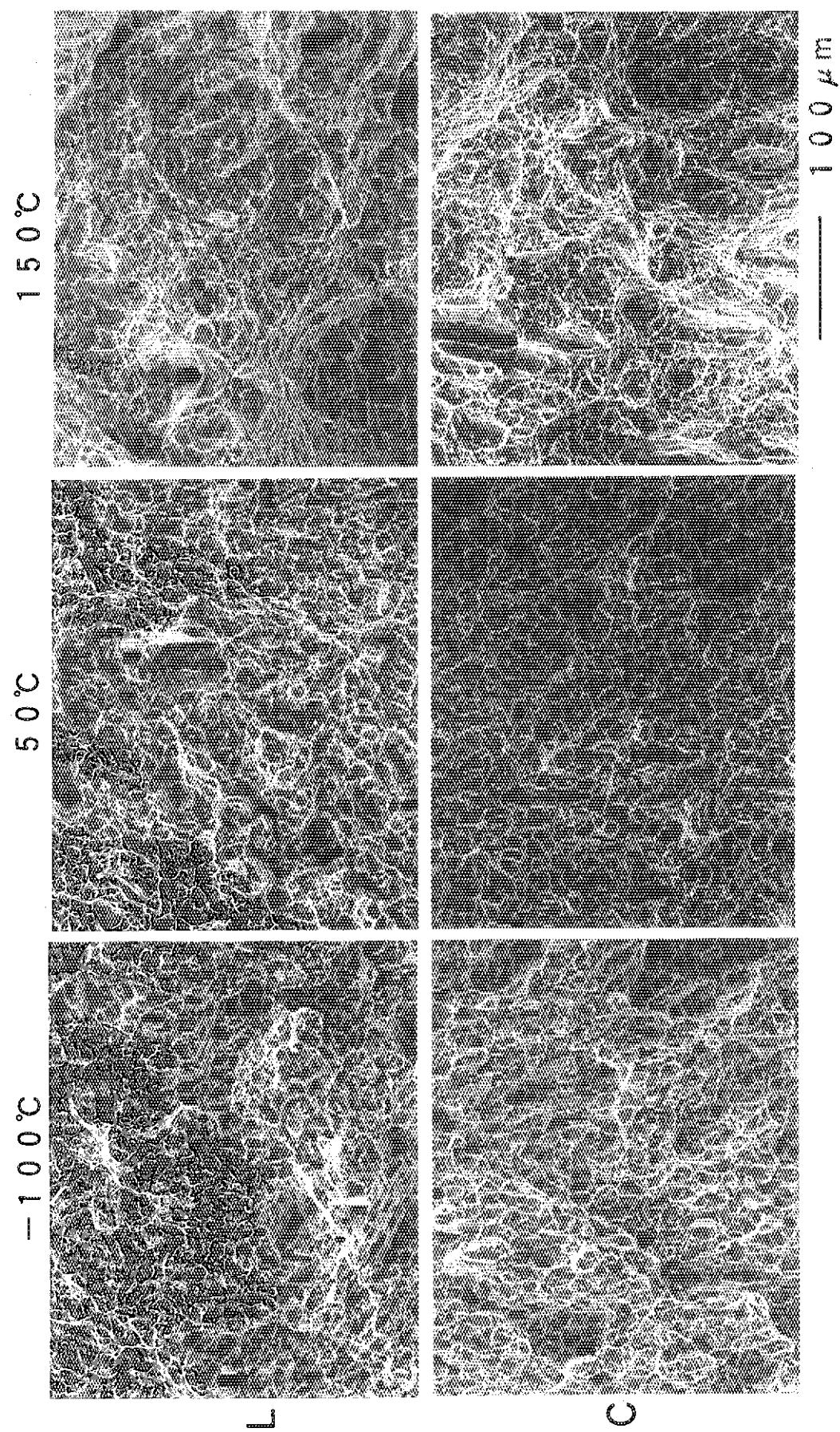


Photo. 2 Effect of testing temperature on SEM photographs of fracture surfaces of Zr-15Ti after the Charpy impact test.

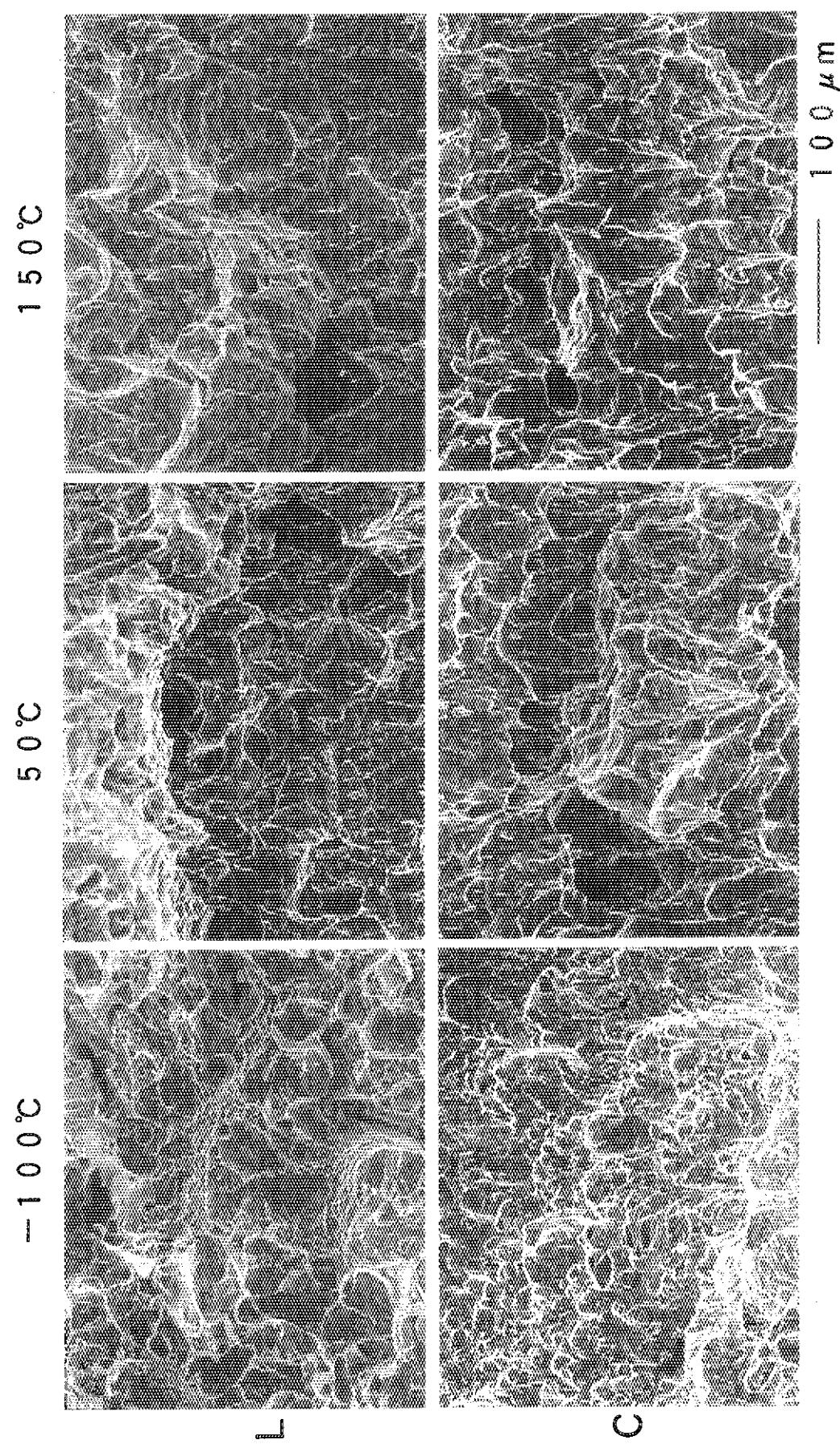


Photo. 3 Effect of testing temperature on SEM photographs of fracture surfaces of titanium after the Charpy impact test.

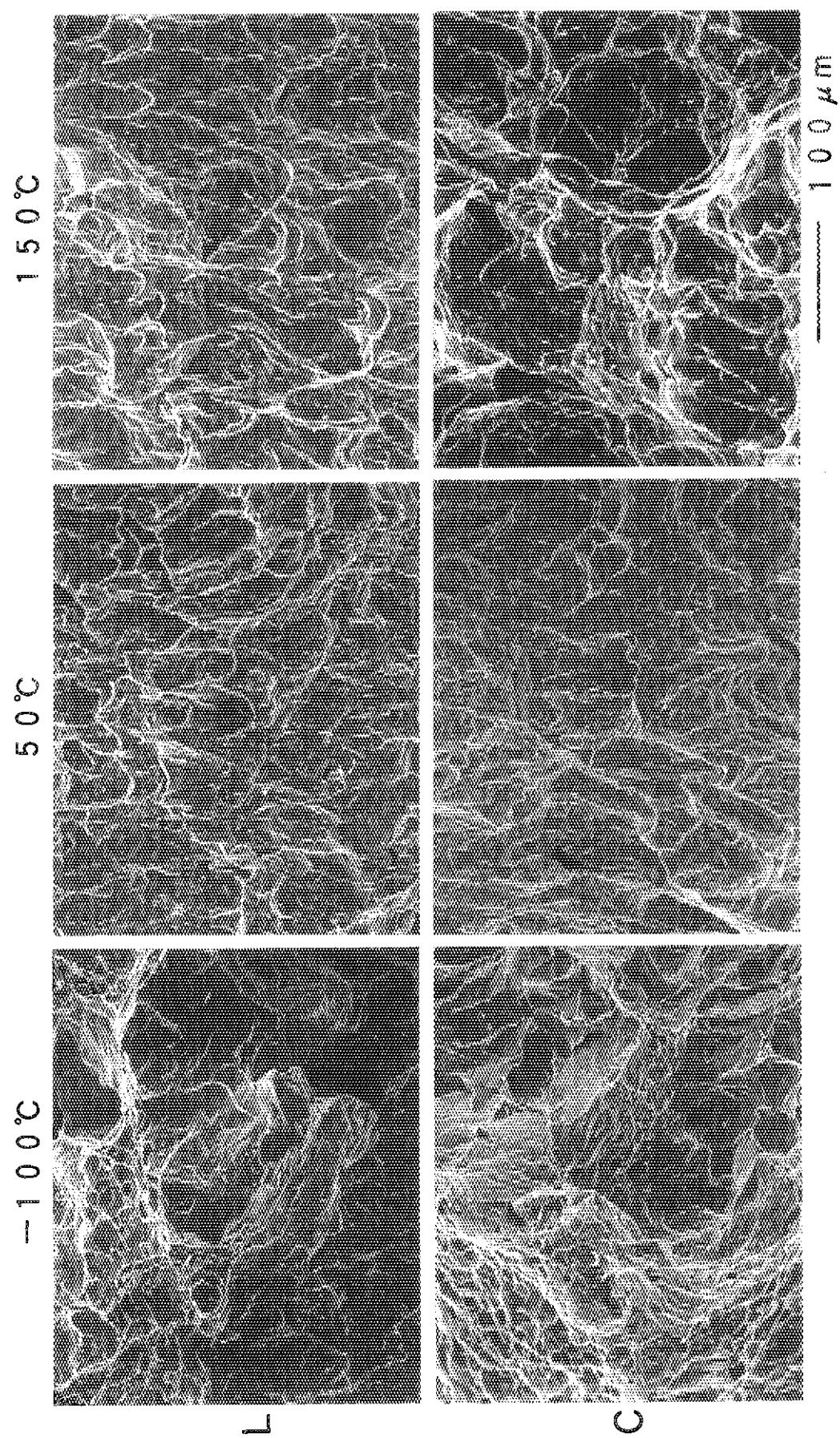


Photo. 4 Effect of testing temperature on SEM photographs of fracture surfaces of Ti-5Ta after the Charpy impact test.