

JAERI - M
93-209

高温工学試験研究炉実機同一
ヒートハステロイXRの特性評価
第2報：母材の短時間強度特性評価
(共同研究)

1993年10月

辻 宏和・田辺 龍彦*・仲西 恒雄**
中曾根祐司*・中島 甫

JAERI-M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。
入手の間合わせは、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、お申しこしください。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）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

高温工学試験研究炉実機同一ヒート Hastelloy XR の特性評価
第 2 報：母材の短時間強度特性評価

日本原子力研究所東海研究所材料研究部
辻 宏和・田辺 龍彦*・仲西 恒雄**
中曽根祐司*・中島 甫

(1993年10月1日受理)

高温工学試験研究炉の高温機器の製作に用いられた30ヒートの Hastelloy XR のうちの代表的な1ヒートから得た2種類の厚さの板材(15mm及び60mm)を対象として、引張特性、シャルピー衝撃特性及びクリープ特性(試験温度:850, 900, 950及び1000°C, 最長試験時間:3371.4時間)を調べ、以下の結果を得た。

- (1) どちらの厚さの板材も、引張強度特性及び引張破断延性の面で、高温工学試験研究炉の高温機器の製作用素材として不都合な点は無い。
- (2) 厚さ15mmの板材は十分な靱性を有した材料であるといえるが、厚さ60mmの板材の靱性は、厚さ15mmの板材のそれよりも劣る。
- (3) どちらの厚さの板材も、設計クリープ破断応力強さ S_R を上回っているばかりでなく、平均クリープ破断応力強さの強度水準をも上回っている。また、十分なクリープ破断延性を有している。

本報は、金属材料技術研究所との共同研究の成果の一部を含んでいる。
東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* 金属材料技術研究所

** (株)富士電機総合研究所

Evaluation of the Same Heat Hastelloy XR as the Material
Used for High-temperature Components of the High-temperature
Engineering Test Reactor (Second Report: Evaluation of
Short-time Strength Properties for Base Metal)

Hirokazu TSUJI, Tatsuhiko TANABE^{*}, Tsuneo NAKANISHI^{**}
Yuji NAKASONE^{*} and Hajime NAKAJIMA

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

(Received October 1, 1993)

A series of tension, Charpy impact and creep tests was carried out on two sorts of plate materials with 15mm and 60mm in thickness obtained from typical one of 30 heats of Hastelloy XR manufactured as the component material of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). Creep test temperatures were 850, 900, 950 and 1000°C, and the maximum creep test time was 3371.4 h. The results obtained are as follows:

- (1) Both of plate materials tested exhibit acceptable tensile strength and tensile ductility as the structural material of the high-temperature components of the HTTR.
- (2) The plate material with 15mm in thickness exhibits enough toughness, while toughness of the plate material with 60mm in thickness is inferior to that of the plate material with 15mm in thickness.
- (3) Both of plate materials tested possess the creep rupture strength beyond not only the expected minimum stress-to-rupture values, S_R ,

This research report includes a part of the results of the joint study with National Research Institute for metals.

* National Research Institute for Metals

** Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

but also the expected mean stress-to-rupture values of the material strength standards of Hastelloy XR. The materials also possess enough creep rupture ductility.

Keywords: HTGR, HTTR, Heat-resistant Alloy, Nickel-base Alloy, Hastelloy XR, Yield Strength Values, Tensile Strength Values, Charpy Impact Value, Creep, Creep Rate, High-temperature Structural Design Code, Material Strength Standards, Expected Minimum Stress-to-rupture Values

目 次

1. まえがき	1
2. 実験方法	1
2.1 供試材料	1
2.2 引張試験	2
2.3 シャルピー衝撃試験	2
2.4 クリープ試験	2
3. 実験結果及び考察	3
3.1 引張特性	3
3.2 シャルピー衝撃特性	4
3.3 クリープ特性	5
3.3.1 最小クリープ速度	5
3.3.2 クリープ破断強度	6
3.3.3 クリープ破断延性	6
3.3.4 クリープ特性についての討論	6
4. まとめ	8
謝 辞	9
参考文献	10
付 録	44

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedures	1
2.1 Materials	1
2.2 Tension Tests	2
2.3 Charpy Impact Tests	2
2.4 Creep Tests	2
3. Results and Discussion	3
3.1 Tensile Property	3
3.2 Charpy Impact Property	4
3.3 Creep Property	5
3.3.1 Minimum Creep Rate	5
3.3.2 Creep Rupture Strength	6
3.3.3 Creep Rupture Ductility	6
3.3.4 Discussion on Creep Property	6
4. Summary	8
Acknowledgments	9
References	10
Appendix	44

1. まえがき

我が国の高温ガス炉 (High-Temperature Gas-Cooled Reactor, HTGR) 開発においては, 原子炉出口冷却材温度950℃の高温工学試験研究炉 (High-Temperature Engineering Test Reactor, HTR) を最初に建設することが計画され, 既に日本原子力研究所大洗研究所においてその建設が開始されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。このHTRの高温構造用部材としては, ハステロイXの原子炉用改良合金であるハステロイXR⁽⁶⁾⁽⁷⁾を使用することになった⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。HTRの高温機器の製作用素材として, 各々2トン規模で30ヒートのハステロイXRを製造した。本報は, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの代表的な1ヒートを対象として実施した短時間強度特性評価試験の結果をまとめるとともに, その強度水準をHTR高温構造設計方針に定められたハステロイXR材料強度基準⁽¹¹⁾と比較したものである。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材料は, 上述のように, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの1ヒートであり, 工業規模(2トン)での溶製の後, 熱間鍛造, 熱間圧延の工程を経て製造された厚さが15mmと60mmの2種類の板材である。その化学組成並びに材料製造者から報告された強度及び延性の特性値をハステロイXRの仕様⁽¹⁰⁾と併せてTable 1及びTable 2に示す。Table 1から分かるように, いずれの成分もハステロイXRの仕様を満足している。また, この合金の高温強度に大きな影響を与えるホウ素⁽¹²⁾⁽¹³⁾の含有量は0.0019~0.0037mass%となっている。Table 2から分かるように, いずれの強度及び延性の特性値も, ハステロイXRの仕様を満足している。なお, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRの化学組成のヒート間のばらつきは非常に小さく, 本研究で対象とする材料は, これらの30ヒートの中の代表的なものであることを確認した⁽¹⁴⁾。ここで, 厚さ15mmの板はHTRで使用される板材の特性を知る

1. まえがき

我が国の高温ガス炉 (High-Temperature Gas-Cooled Reactor, HTGR) 開発においては, 原子炉出口冷却材温度950℃の高温工学試験研究炉 (High-Temperature Engineering Test Reactor, HTR) を最初に建設することが計画され, 既に日本原子力研究所大洗研究所においてその建設が開始されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。このHTRの高温構造用部材としては, ハステロイXの原子炉用改良合金であるハステロイXR⁽⁶⁾⁽⁷⁾を使用することになった⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。HTRの高温機器の製作用素材として, 各々2トン規模で30ヒートのハステロイXRを製造した。本報は, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの代表的な1ヒートを対象として実施した短時間強度特性評価試験の結果をまとめるとともに, その強度水準をHTR高温構造設計方針に定められたハステロイXR材料強度基準⁽¹¹⁾と比較したものである。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材料は, 上述のように, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの1ヒートであり, 工業規模(2トン)での溶製の後, 熱間鍛造, 熱間圧延の工程を経て製造された厚さが15mmと60mmの2種類の板材である。その化学組成並びに材料製造者から報告された強度及び延性の特性値をハステロイXRの仕様⁽¹⁰⁾と併せてTable 1及びTable 2に示す。Table 1から分かるように, いずれの成分もハステロイXRの仕様を満足している。また, この合金の高温強度に大きな影響を与えるホウ素⁽¹²⁾⁽¹³⁾の含有量は0.0019~0.0037mass%となっている。Table 2から分かるように, いずれの強度及び延性の特性値も, ハステロイXRの仕様を満足している。なお, HTRの実機に用いられた30ヒートのハステロイXRの化学組成のヒート間のばらつきは非常に小さく, 本研究で対象とする材料は, これらの30ヒートの中の代表的なものであることを確認した⁽¹⁴⁾。ここで, 厚さ15mmの板はHTRで使用される板材の特性を知る

上での代表となる寸法のものであり、厚さ60mmの板はHTTRで使用される板材のうちの最も厚い部材の特性を知る上での代表となる寸法のものである。

供試材料の板には、Table 3に示す固溶化熱処理を施した。供試材料の組織写真をPhoto. 1及びPhoto. 2に示す。厚さ15mmの板の結晶粒度はASTM No. 4.5、厚さ60mmの板の結晶粒度はASTM No. 3.0であり、いずれの材料も目標としていたASTM No. 2.0~5.0の範囲に入っている。

2.2 引張試験

厚さ15mm及び60mmの板から、荷重軸が圧延方向と平行となるように試験片を採取した。引張試験は室温、800、850、900、950及び1000℃の大気中で、JIS G 0567⁽¹⁵⁾に記載されている方法に準拠して行った。用いた試験片は、直径6mm、標点間距離30mmの丸棒型である。用いた試験装置は、加熱炉を装備した容量100kNの万能材料試験機である。いずれの試験も、ひずみが1%に達するまでは、ひずみ制御で $5 \times 10^{-3}\%/s$ とし、ひずみが1%に達した後は、クロスヘッド速度制御で $1.25 \times 10^{-1}\%/s$ とした。厚さ15mmの板材に対しては、各条件における試験の繰り返し数を原則として2とし、厚さ60mmの板材に対しては、各条件において1回の試験を行った。

2.3 シャルピー衝撃試験

厚さ15mmの板から、T-L、L-T及びL-S方向の試験片を、厚さ60mmの板から、T-L及びS-T方向の試験片を採取した（Fig. 1参照）。シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2202⁽¹⁶⁾に示されている4号試験片（10mm×10mm×55mm）を用いて、JIS Z 2242⁽¹⁷⁾に記載されている方法に準拠して室温で行った。各方向の試験片に対する試験の繰り返し数を3とした。

2.4 クリーブ試験

クリーブ試験は、HTGRの1次冷却材を模擬した不純ヘリウムガス（HTGRヘリウムガス）中及び大気中で行った。

HTGRヘリウムガス中のクリープ試験は、厚さ15mmの板から、荷重軸が圧延方向と平行となるように採取した平行部直径6mm、平行部長さ30mmの丸棒型試験片を用いて、レバー式クリープ試験機で行った。試験雰囲気としたHTGRヘリウムガスは、クリープ試験機に備えた雰囲気槽に循環式ループで供給した。ここで用いたHTGRヘリウムガスは、我が国のHTGR開発における材料試験用標準ヘリウムガスとして広く用いられているHe-2'という標準仕様のものであり、Table 4に示すような組成の不純物を含んでいる。この雰囲気特性を不純物ガス組成の酸素分圧と炭素活量を用いて解析すると、ハステロイXR中のクロムが酸化し、わずかな浸炭が生じるという点で、He-2'と同様に我が国のHTGR開発における材料試験用標準ヘリウムガスとして広く用いられている原研B型ヘリウムガスとほぼ等価な特性といえる⁽¹⁸⁾。試験温度は850、900、950及び1000℃の4水準であり、最長試験時間が3000時間程度となるように応力水準を選んだ。クリープひずみの測定は、試験途中で所定の時間ごとに試験を中断することなくダイヤルゲージを用いて行った。

大気中のクリープ試験は、厚さ15mm及び60mmの板から、荷重軸が圧延方向と平行となるように採取した試験片を用いて、マルチ型のクリープ試験機で行った。用いた試験片は、直径6mm、標点間距離30mmの丸棒型である。試験温度は900及び950℃の2水準であり、最長試験時間が3000時間程度となるように応力水準を選んだ。クリープひずみの測定は、試験途中で所定の時間ごとに試験片を試験機から取り出し、試験片を冷却した後、マイクロメータを用いて行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 引張特性

引張試験の結果をTable 5に示す。0.2%耐力及び引張強さを試験温度の関数としてFig. 2及びFig. 3にそれぞれ示す。これらの図には、HTTR高温構造設計方針材料強度基準⁽¹¹⁾に定められたハステロイXRの設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 並びに材料製造業者からの報告値(Table 2の値)も示した。本研究で対象としているHTTR実機同一ヒートハステロイXRの0.2%耐力は、900℃以下で設計降伏点 S_y を、ま

H T G Rヘリウムガス中のクリープ試験は、厚さ15mmの板から、荷重軸が圧延方向と平行となるように採取した平行部直径6mm、平行部長さ30mmの丸棒型試験片を用いて、レバー式クリープ試験機で行った。試験雰囲気としたH T G Rヘリウムガスは、クリープ試験機に備えた雰囲気槽に循環式ループで供給した。ここで用いたH T G Rヘリウムガスは、我が国のH T G R開発における材料試験用標準ヘリウムガスとして広く用いられているHe-2'という標準仕様のものであり、Table 4に示すような組成の不純物を含んでいる。この雰囲気特性を不純物ガス組成の酸素分圧と炭素活量を用いて解析すると、ハステロイXR中のクロムが酸化し、わずかな浸炭が生じるという点で、He-2'と同様に我が国のH T G R開発における材料試験用標準ヘリウムガスとして広く用いられている原研B型ヘリウムガスとほぼ等価な特性といえる⁽¹⁰⁾。試験温度は850、900、950及び1000℃の4水準であり、最長試験時間が3000時間程度となるように応力水準を選んだ。クリープひずみの測定は、試験途中で所定の時間ごとに試験を中断することなくダイヤルゲージを用いて行った。

大気中のクリープ試験は、厚さ15mm及び60mmの板から、荷重軸が圧延方向と平行となるように採取した試験片を用いて、マルチ型のクリープ試験機で行った。用いた試験片は、直径6mm、標点間距離30mmの丸棒型である。試験温度は900及び950℃の2水準であり、最長試験時間が3000時間程度となるように応力水準を選んだ。クリープひずみの測定は、試験途中で所定の時間ごとに試験片を試験機から取り出し、試験片を冷却した後、マイクロメータを用いて行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 引張特性

引張試験の結果をTable 5に示す。0.2%耐力及び引張強さを試験温度の関数としてFig. 2及びFig. 3にそれぞれ示す。これらの図には、H T T R高温構造設計方針材料強度基準⁽¹¹⁾に定められたハステロイXRの設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 並びに材料製造業者からの報告値(Table 2の値)も示した。本研究で対象としているH T T R実機同一ヒートハステロイXRの0.2%耐力は、900℃以下で設計降伏点 S_y を、ま

た引張強さは、800℃以下で設計引張強さ S_u を上回っている。それ以上の高温域では、本研究で得た引張強度特性値は、設計値を下回っている。すでに第2章で述べたように、本研究ではJIS G 0567⁽¹⁴⁾に記載されている方法に準拠して引張試験を行ったことから、ひずみが1%に達するまでは、ひずみ制御で $5 \times 10^{-3}\%/s$ とし、ひずみが1%に達した後は、クロスヘッド速度制御で $1.25 \times 10^{-1}\%/s$ としたが、H T T R高温構造設計方針材料強度基準⁽¹¹⁾におけるハステロイX Rの設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u は、800℃を超える高温域の場合、ひずみ速度を1.67%/s(100%/min)とした引張試験で得たデータより定められていることから、本研究で得た800℃を超える高温域の引張強度特性値が、設計値を下回っていることは、当然のことといえる。本研究で得た高温域の引張強度特性値は、これまでに製造された多くのハステロイX Rの引張強度特性値⁽¹²⁾⁽¹⁹⁾⁻⁽²²⁾と比較して、平均的な水準ないしはそれ以上のものであり、引張強度特性の面でH T T Rの高温機器の製作用素材として不都合な点は無いといえる。

Table 5から分かるように、引張破断伸びはいずれも50%以上、引張破断絞りはいずれも40%以上であり、引張破断延性の面でも、本研究で対象としているハステロイX Rは、H T T Rの高温機器の製作用素材として不都合な点は無いといえる。

厚さ15mmの板材と厚さ60mmの板材を比較すると、室温では、厚さ15mmの板材の方が厚さ60mmの板材よりも0.2%耐力及び引張強さが高い。これは、第2章で述べたように、厚さ60mmの板の結晶粒度がA S T M N o. 3. 0であるのに対して、厚さ15mmの板の結晶粒度はA S T M N o. 4. 5と細粒であること等に起因している（いわゆるHall-Petchの効果⁽²³⁾）と思われる。900℃においても、厚さ15mmの板材の0.2%耐力及び引張強さは厚さ60mmの板材のそれらよりも高いが、室温におけるほど顕著な差ではない。引張破断延性に関しては、室温及び900℃のいずれにおいても、厚さ15mmの板材の方が厚さ60mmの板材よりもわずかに大きい。

3.2 シャルピー衝撃特性

シャルピー衝撃試験の結果をTable 6及びTable 7に示す。また、シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真をPhoto. 3～Photo. 7に示す。

Table 6から分かるように、厚さ15mmの板材では、T-L方向に採取した試験片で得られたシャルピー衝撃値が、L-T及びL-S方向に採取した試験片で得られたシャルピー

衝撃値よりもやや高い。また、Table 7から分かるように、厚さ60mmの板材では、T-L方向に採取した試験片で得られたシャルピー衝撃値が、S-T方向に採取した試験片で得られたシャルピー衝撃値よりもかなり高い。

厚さ60mmの板材は、厚さ15mmの板材よりもかなり低いシャルピー衝撃値を示している。これまでに製造された多くの Hastelloy XR のシャルピー衝撃値は140~240J/cm²の範囲にあり⁽¹²⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、厚さ15mmの板材のL-T及びL-S方向に採取した試験片で得た値はその上限をわずかに超える値、厚さ60mmの板材のT-L方向に採取した試験片で得た値はその範囲内の中央値をやや下回る値となっている。また、厚さ15mmの板材のT-L方向に採取した試験片で得た値は、これまでに製造された多くの Hastelloy XR のシャルピー衝撃値よりもかなり高い値であり、逆に厚さ60mmの板材のS-T方向に採取した試験片で得た値は、これまでに製造された多くの Hastelloy XR のシャルピー衝撃値よりもかなり低い値である。Photo. 7に示すように、厚さ60mmの板材のS-T方向に採取した試験片のシャルピー衝撃試験後の破面には、擬へき開状の様相が観察され、低いシャルピー衝撃値を裏付けている。

上に述べたように、厚さ15mmの板材は十分な靱性を有した材料であるといえるが、厚さ60mmの板材の靱性は、厚さ15mmの板材のそれよりも劣る。ここで観察した結果は、このヒートの材料に特有のものではなく、この程度の厚板材では普遍的なものであると考えられるが、これまでに、この程度の厚板材のシャルピー衝撃値を測定した例が無いことから、明確な結論は出せない。厚板材の靱性はやや低いということに、注意しておく必要がある。

3.3 クリープ特性

クリープ試験の結果をTable 8~Table 10に示す。これらの表中における最小クリープ速度は、Fig. 4~Fig. 15に示すクリープ曲線から、著者らの一部が提案した方法⁽²⁶⁾を適用して求めた。

3.3.1 最小クリープ速度

Fig. 16に、最小クリープ速度を応力の関数として示す。また、これらのデータをOrrr-

Sherby-Dorn 型のパラメータを用いて整理した結果をFig.17に示す。これらの図には、H T T R高温構造設計方針材料強度基準⁽¹⁾に定められた Hastelloy X R の最大許容応力強さ S_0 を定める際に用いられた平均最小クリープ速度も示した。これらの図から分かるように、本研究で対象としている H T T R 実機同一ヒート Hastelloy X R の最小クリープ速度は、ここで試験を行った条件の範囲内では、概ね平均最小クリープ速度を下回っており、十分なクリープ変形抵抗を有しているといえる。

3.3.2 クリープ破断強度

Fig.18に、応力-破断時間線図を示す。また、これらのデータを Orr-Sherby-Dorn パラメータを用いて整理した結果をFig.19に示す。これらの図には、H T T R高温構造設計方針材料強度基準⁽¹⁾に定められた Hastelloy X R の設計クリープ破断応力強さ S_R 、 S_R を定める際に用いられた平均クリープ破断応力強さ（マスターカーブ）及び材料製造業者からの報告値（Table 2の値を星印を付したデータ点で表示）も示した。これらの図から分かるように、本研究で対象としている H T T R 実機同一ヒート Hastelloy X R のクリープ破断強度は、ここで試験を行った3400時間程度までの範囲では、設計クリープ破断応力強さ S_R を上回っているばかりでなく、平均クリープ破断応力強さの強度水準をも上回っている。

3.3.3 クリープ破断延性

Fig.20及びFig.21に、クリープ破断伸び及びクリープ破断絞りとクリープ破断時間の関係をそれぞれ示す。Fig.20には、材料製造業者からの報告値（Table 2の値を星印を付したデータ点で表示）も示した。これらの図から分かるように、本研究で対象としている H T T R 実機同一ヒート Hastelloy X R のクリープ破断伸び及びクリープ破断絞りは、ここで試験を行った3400時間程度までの範囲では、いずれもほぼ20%以上であり、十分なクリープ破断延性を有しているといえる。

3.3.4 クリープ特性についての討論

厚さ15mmの板材と厚さ60mmの板材を比較すると以下のことが指摘できる。最小クリー

ブ速度は、厚さ15mmの板材の方が厚さ60mmの板材よりも小さい。クリーブ破断強度は、900℃では厚さ15mmの板材の方が厚さ60mmの板材よりも高いが、950℃では両方の材料間に有意な差は無い。クリーブ破断延性に関しては、いずれの温度においても、厚さ15mmの板材と厚さ60mmの板材の間に有意な差は認められない。

HTGRヘリウムガス中のクリーブ特性と大気中のそれを比較すると以下のことが指摘できる。最小クリーブ速度については、両方の試験雰囲気間に有意な差は無い。クリーブ破断強度は、900℃ではHTGRヘリウムガス中における方が大気中よりもわずかに高いが、950℃では両方の試験雰囲気間に有意な差は無い。クリーブ破断延性については、HTGRヘリウムガス中における方が大気中よりもわずかに小さい。特に、Fig. 21でソリッド・シンボルがオープン・シンボルよりも概して低い位置にあることから分かるように、破断紋りに関して、その傾向が著しいといえる。

HTGRヘリウムガス中のクリーブ試験後の破断材から、約0.2gの円盤状試料を採取し、炭素分析を行った。その結果をTable 11及びFig. 22に示す。これらの表及び図から分かるように、いずれの温度でクリーブ試験を行った破断材にもわずかな浸炭が生じている。このような浸炭は、第3次クリーブ域に入ってから急速に進行することが知られている⁽²⁷⁾。したがって、HTGRヘリウムガス中で生じるこのわずかな浸炭という現象は、クリーブ破断時間や最小クリーブ速度には大きな影響を及ぼさないが、最終破断の形態には比較的大きな影響を及ぼすことになる。破断紋りに関して認められた、HTGRヘリウムガス中における方が大気中よりも小さいという傾向は、こうした効果を反映したものであると考えられる。

光学顕微鏡を用いて、HTGRヘリウムガス中のクリーブ試験後の破断材の組織観察を行った。その典型例をPhoto. 8～Photo. 11に示す。どの試料も、粒界三重点に発生したボイドが成長・連結して破断に至ったことを示唆する様相を示している。また、試験温度が高いほど、ボイドが成長・連結して生じたき裂が大きいという傾向が認められる。

HTGRヘリウムガス中のクリーブ試験後の破断材を用いて、電解抽出残渣のX線回折を行った。得られた回折図形の典型例及び同定結果をFig. 23及びFig. 24にそれぞれ示す。Fig. 24から分かるように、 Cr_2O_3 、 M_6C 及び M_{23}C_6 の3種類が同定された。これらのうち、酸化物は試料表面の酸化被膜であり、炭化物は試料内部の析出物である。 M_6C と M_{23}C_6 のX線反射効率に差が無いとすると、いずれの試料でも M_6C の方が M_{23}C_6 よりも多いという傾向が認められた。なお、ハステロイXRをHTGRヘリウムガス中で加熱した

場合には、 Cr_2O_3 のほかに、試料表面の酸化被膜の最外層として MnCr_2O_4 が形成されている⁽⁷⁾と思われるが、今回のX線回折では、それを同定することができなかった。

4. ま と め

H T T Rの高温機器の製作に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの代表的な1ヒートから得た2種類の厚さの板材(15mm及び60mm)を対象として、引張特性、シャルピー衝撃特性及びクリープ特性(試験温度:850, 900, 950及び1000℃, 最長試験時間:3371.4時間)を調べ、以下の結果を得た。

- (1) どちらの厚さの板材も、引張強度特性及び引張破断延性の面で、H T T Rの高温機器の製作用素材として不都合な点は無い。
- (2) 厚さ15mmの板材は十分な靱性を有した材料であるといえるが、厚さ60mmの板材の靱性は、厚さ15mmの板材のそれよりも劣る。
- (3) どちらの厚さの板材も、クリープ破断強度は、設計クリープ破断応力強さ S_R を上回っているばかりでなく、平均クリープ破断応力強さの強度水準をも上回っている。また、十分なクリープ破断延性を有している。

以上のように、本報で評価対象としたH T T Rの高温機器の製作に用いられたのと同ヒートのハステロイXRは、引張特性、シャルピー衝撃特性及び3400時間程度までのクリープ特性において、高温機器の製作用素材として十分な性能を有していることを確認した。今後、さらに長時間の強度特性、時効特性、H T G Rヘリウムガス中の腐食挙動等についても調べる予定である。また、溶接部の特性についても、H T T Rの高温機器の製作に用いられたのと同ヒートの溶加材を適用して調べる予定である。

場合には、 Cr_2O_3 のほかに、試料表面の酸化被膜の最外層として MnCr_2O_4 が形成されている⁽⁷⁾と思われるが、今回のX線回折では、それを同定することができなかった。

4. ま と め

H T T Rの高温機器の製作に用いられた30ヒートのハステロイXRのうちの代表的な1ヒートから得た2種類の厚さの板材(15mm及び60mm)を対象として、引張特性、シャルピー衝撃特性及びクリープ特性(試験温度:850, 900, 950及び1000℃, 最長試験時間:3371.4時間)を調べ、以下の結果を得た。

- (1) どちらの厚さの板材も、引張強度特性及び引張破断延性の面で、H T T Rの高温機器の製作用素材として不都合な点は無い。
- (2) 厚さ15mmの板材は十分な靱性を有した材料であるといえるが、厚さ60mmの板材の靱性は、厚さ15mmの板材のそれよりも劣る。
- (3) どちらの厚さの板材も、クリープ破断強度は、設計クリープ破断応力強さ S_R を上回っているばかりでなく、平均クリープ破断応力強さの強度水準をも上回っている。また、十分なクリープ破断延性を有している。

以上のように、本報で評価対象としたH T T Rの高温機器の製作に用いられたのと同ヒートのハステロイXRは、引張特性、シャルピー衝撃特性及び3400時間程度までのクリープ特性において、高温機器の製作用素材として十分な性能を有していることを確認した。今後、さらに長時間の強度特性、時効特性、H T G Rヘリウムガス中の腐食挙動等についても調べる予定である。また、溶接部の特性についても、H T T Rの高温機器の製作に用いられたのと同ヒートの溶加材を適用して調べる予定である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、日本原子力研究所材料研究部材料応用工学研究室への派遣職員北智士氏には、引張試験及びデータ整理で多大な御助力をいただいた。石川島播磨重工業株式会社技術研究所接合研究部専門課長樋口洵氏及び同社原子力事業部開発プラント設計部小池上一氏には、厚板材を提供していただいたほか厚板材からの引張試験片及びクリープ試験片を準備していただいた。三菱マテリアル株式会社中央研究所金属材料研究部室長佐平健彰氏及び同社桶川第一製作所耐熱材料グループ丸七香樹氏には、本研究で対象としたハステロイXRがHTTRの実機に用いられた30ヒートの中の代表的なものであることを確認するために、それらの30ヒートのハステロイXRの化学組成分布を調査していただいた。日本原子力研究所材料研究部材料応用工学研究室副主任研究員渡辺勝利氏には、薄板材からの引張試験片のうちかなりの部分を準備していただいた。また、科学技術庁金属材料技術研究所第2研究グループ総合研究官白石春樹氏及び日本原子力研究所東海研究所副所長近藤達男氏のご支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：高温工学試験研究の現状(1991)
- (2) Japan Atomic Energy Research Institute : Present Status of HTGR Research & Development (August 1992)
- (3) 高温ガス炉研究会実行委員会（編）：日本原子力研究所レポート JAERI-M 90-078 (May 1990)
- (4) 高温ガス炉研究会実行委員会（編）：日本原子力研究所レポート JAERI-M 92-090 (July 1992)
- (5) (Ed.) Executive Committee of The 2nd JAERI Symposium on HTGR Technologies : Proc. 2nd Symp. on HTGR Technologies, Oarai / Japan, Japan Atomic Energy Research Institute Research Report JAERI-M 92-215(January 1993)
- (6) T. Kondo, M. Shindo, T. Ohmura, N. Yonezawa, A. Kawagoe and T. Kojima : United States Patent No.712760 (1976)
- (7) M. Shindo and T. Kondo : Proc. Conf. on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol / UK, 1982 (British Nuclear Energy Society) Vol.2, p.179
- (8) 大洗研究所高温工学試験研究炉設計室，東海研究所燃料・材料工学部，東海研究所高温工学部：日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-005(February 1989)
- (9) H. Tsuji, H. Nakajima and T. Kondo : Proc. of a Specialists Meeting on High Temperature Metallic Materials for Gas-Cooled Reactors, Cracow / Poland, 1989 (International Atomic Energy Agency) p.81
- (10) K. Hada, I. Nishiguchi, Y. Muto and H. Tsuji : Nuclear Engineering and Design, 132 (1991) p.1
- (11) 羽田一彦，元木保男，馬場 治：日本原子力研究所レポート JAERI-M 90-148 (September 1990)
- (12) 近藤達男，渡辺勝利，佐藤瓊介，仲西恒雄，佐平健彰，辻 宏和，倉田有司，塚田隆，小沢賢治：日本原子力研究所研究レポート JAERI-M 86-003(February 1986)
- (13) Y. Kurata, K. Sato, T. Nakanishi, K. Sahira and T. Kondo : Proc. of Conf. on Creep, Tokyo / Japan, 1986 (The Japan Society of Mechanical Engineers)

p. 97

- (14) 日本原子力研究所研究レポート JAERI-M (本シリーズ第1報) として刊行予定
- (15) 日本工業規格 JIS G 0567 鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法 (1978)
- (16) 日本工業規格 JIS Z 2202 金属材料衝撃試験片 (1980)
- (17) 日本工業規格 JIS Z 2242 金属材料衝撃試験方法 (1980)
- (18) 岡田雅年, 田辺龍彦, 阿部富士雄, 坂井義和, 近藤達男, 中島 甫, 小川 豊, 辻
宏和, 倉田有司: 日本原子力研究所レポート JAERI-M 87-193(November 1987)
- (19) 横井 信, 門馬義雄, 近藤達男, 小川 豊, 倉田有司: 日本原子力研究所レポート
JAERI-M 83-138(September 1983)
- (20) H. Tsuji and H. Nakajima : Journal of Nuclear Materials, 151 (1987) p.1
- (21) 中島 甫, 辻 宏和, 渡辺勝利, 鈴木富男, 倉田有司, 新藤雅美, 塚田 隆, 小川 豊
: 高温工学試験研究プログレスレポート第26号 (1989) p. 240
- (22) 中島 甫, 辻 宏和, 渡辺勝利, 鈴木富男, 塚田 隆, 新藤雅美, 倉田有司: 高温工
学試験研究プログレスレポート第27号 (1990) p. 239
- (23) N. J. Petch: Journal of Iron Steel Inst. 173 (1953) p. 25
- (24) 中島 甫, 辻 宏和, 小川 豊, 渡辺勝利, 鈴木富男, 倉田有司: 高温工学試験研究
プログレスレポート第25号 (1988) p. 254
- (25) 石川島播磨重工業株式会社: ハステロイ X R の同材継手時効材破壊靱性試験報告書
(1989)
- (26) H. Tsuji, N. Yokoyama, T. Tsukada and H. Nakajima : Proc. of Second Inter.
Conf. & Exhibition on Computer Applications to Materials and Molecular
Science and Engineering, Yokohama / Japan, 1993 (Elsevier Science Publish-
ers B.V.) p. 89
- (27) 田村 学, 小川 豊, 倉田有司, 近藤達男: 日本原子力研究所レポート JAERI-M 82
-032(April 1982)

Table 1 Chemical composition of the materials tested (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	B	Al	Ti	Cu	N	Ni
Specification																
max.	0.15	0.50	1.00	0.040	0.030	23.0	2.50	10.0	1.00	20.0	0.010	0.05	0.03	0.50	-----	Bal.
min.	0.05	0.25	0.75	-----	20.5	-----	-----	8.0	0.20	17.0	-----	-----	-----	-----	-----	Bal.
Analyzed values for ladled material	0.06	0.37	0.89	0.001	0.001	21.8	0.03	9.0	0.49	18.1	0.004	<0.01	0.01	<0.01	0.003	Bal.
top side	0.06	0.33	0.89	0.001	<0.001	21.60	0.03	9.06	0.49	17.99	0.0037	<0.01	0.01	<0.01	0.004	Bal.
Analyzed values for ingot																
bottom side	0.06	0.34	0.88	0.001	<0.001	21.62	0.04	9.04	0.49	18.05	0.0019	<0.01	0.01	0.08	0.011	Bal.
Analyzed value for plate t 15mm											0.0029					
Analyzed values for plate t 60mm	0.06	0.34	0.90	<0.001	0.001	21.82	0.03	9.01	0.49	18.13	0.0030	<0.01	0.01	<0.01	0.005	Bal.

Table 2 Mechanical properties of the materials tested.

Specification	Dimension (mm)	Tensile property at room temperature			Creep rupture property (815°C, 105MPa)		Creep rupture property (900°C, 49MPa)		HB
		0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Time to rupture (h)	Rupture elongation (%)	Time to rupture (h)	Rupture elongation (%)	
	—	≥241	≥655	≥35	≥24	≥10	≥100	≥10	—
Plate	15×200×500	329	727	50	87	101	244	88	86
	60×250×750	290	668	57	99	100	288	66	84

Table 3 Heat treatment conditions and grain size number.

Thickness	Heat treatment condition	ASTM No.
15 mm	at 1180°C for 15min → SQ	4.5
60 mm	at 1170°C for 60min → WQ	3.0

Table 4 Impurity levels in simulated HTGR helium gas (vol ppm).

H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	CH ₄
300	3	100	1	15

Table 5 Results of tension tests for Hastelloy XR sampled from plates.

Thickness of plate	Test temperature (°C)	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture location
15mm	RT	386	768	55.3	55.7	A
		358	766	57.3	55.9	A
	800	232	389	106.7	82.3	A
		228	391	82.9	74.6	A
	850	187	301	105.3	83.8	A
	900	127	228	107.1	86.8	A
		132	225	108.8	84.9	A
	950	90	166	118.3	92.3	A
		92	169	114.0	87.3	A
	1000	69	129	111.5	80.7	B
60mm	RT	313	744	53.7	45.9	A
	900	121	212	88.0	85.4	B

Table 6 Results of Charpy impact tests for Hastelloy XR sampled from plate with 15 mm in thickness.

Crack plane orientation	Test No.	Absorbed energy (J)	Impact value (J/cm^2)	Percent brittle fracture (%)	Lateral expansion (mm)
T - L	1	215	269	0	2.26
	2	240	300	0	2.53
	3	231	289	0	2.56
L - T	1	199	249	0	2.26
	2	194	243	0	2.27
	3	194	243	0	2.23
L - S	1	199	249	0	2.25
	2	202	253	0	2.22
	3	233	292	0	2.39

Table 7 Results of Charpy impact tests for Hastelloy XR sampled from plate with 60 mm in thickness.

Crack plane orientation	Test No.	Absorbed energy (J)	Impact value (J/cm ²)	Percent brittle fracture (%)	Lateral expansion (mm)
T - L	1	130	163	0	1.83
	2	141	177	0	1.88
	3	138	173	0	1.89
S - T	1	48	60	0*	0.97
	2	58	73	0*	1.07
	3	56	70	0*	0.96

* Quasi-cleavage fracture was observed.

Table 8 Results of creep tests in simulated HTGR helium gas for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Time to rupture (h)	Rupture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (%/h)
850	55.0	3321.6	35.5	41.2	3.1×10^{-3}
	65.0	1112.3	23.1	32.7	7.2×10^{-3}
900	38.0	3371.4	35.2	28.9	1.8×10^{-3}
	45.0	1081.3	46.3	35.6	8.6×10^{-3}
950	23.7	1842.3	22.2	19.0	3.8×10^{-3}
	31.5	537.6	41.7	27.3	1.1×10^{-2}
1000	14.3	1798.7	37.3	25.0	4.8×10^{-3}
	20.0	776.1	51.7	23.5	5.3×10^{-3}

Table 9 Results of creep tests in air for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Time to rupture (h)	Rupture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (%/h)
900	38	2567.4	40.9	54.2	1.7×10^{-3}
	47	657.8	38.5	65.2	1.1×10^{-2}
	58	172.5	64.4	80.7	3.8×10^{-2}
950	22	2566.4	32.6	39.9	1.3×10^{-3}
	30	431.5	46.1	59.6	1.3×10^{-2}
	40	110.4	56.4	75.7	1.1×10^{-1}

Table 10 Results of creep tests in air for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Time to rupture (h)	Rupture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (%/h)
900	38	2112.3	34.8	40.7	1.8×10^{-3}
	47	325.4	52.3	64.4	3.1×10^{-2}
	58	80.3	68.7	78.2	2.8×10^{-1}
950	22	2830.3	32.2	38.1	1.7×10^{-3}
	30	387.6	58.1	69.6	5.4×10^{-2}
	40	116.3	62.2	81.3	1.2×10^{-1}

Table 11 Results of carbon analyses for crept specimens in simulated HTGR helium gas. Original carbon content level is 600 mass ppm. Exposure time is given in Table 8.

Temperature (°C)	850		900		950		1000	
	Stress (MPa)	55.0	65.0	38.0	45.0	23.7	31.5	14.3
Carbon content (mass ppm)	810	674	770	1032	904	818	823	860

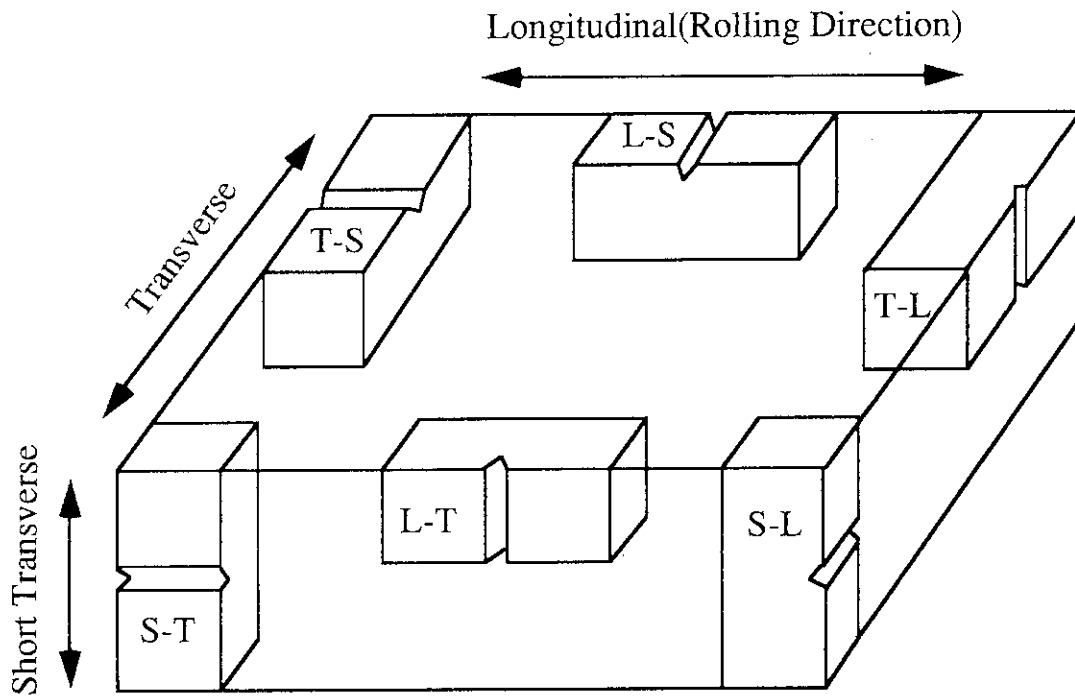


Fig. 1 Crack plane orientation code for rectangular sections.

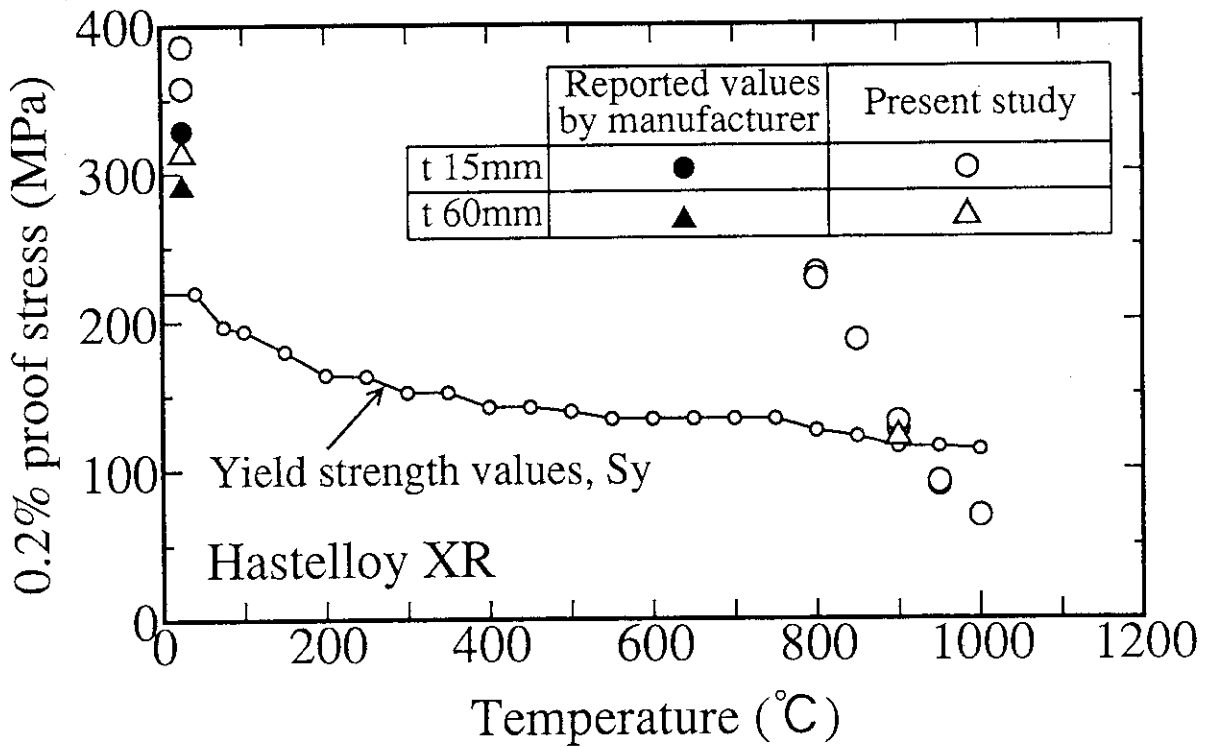


Fig. 2 0.2% proof stress as a function of test temperature for Hastelloy XR sampled from plates. The line indicates the yield strength values S_y of the material strength standards⁽¹¹⁾ of Hastelloy XR.

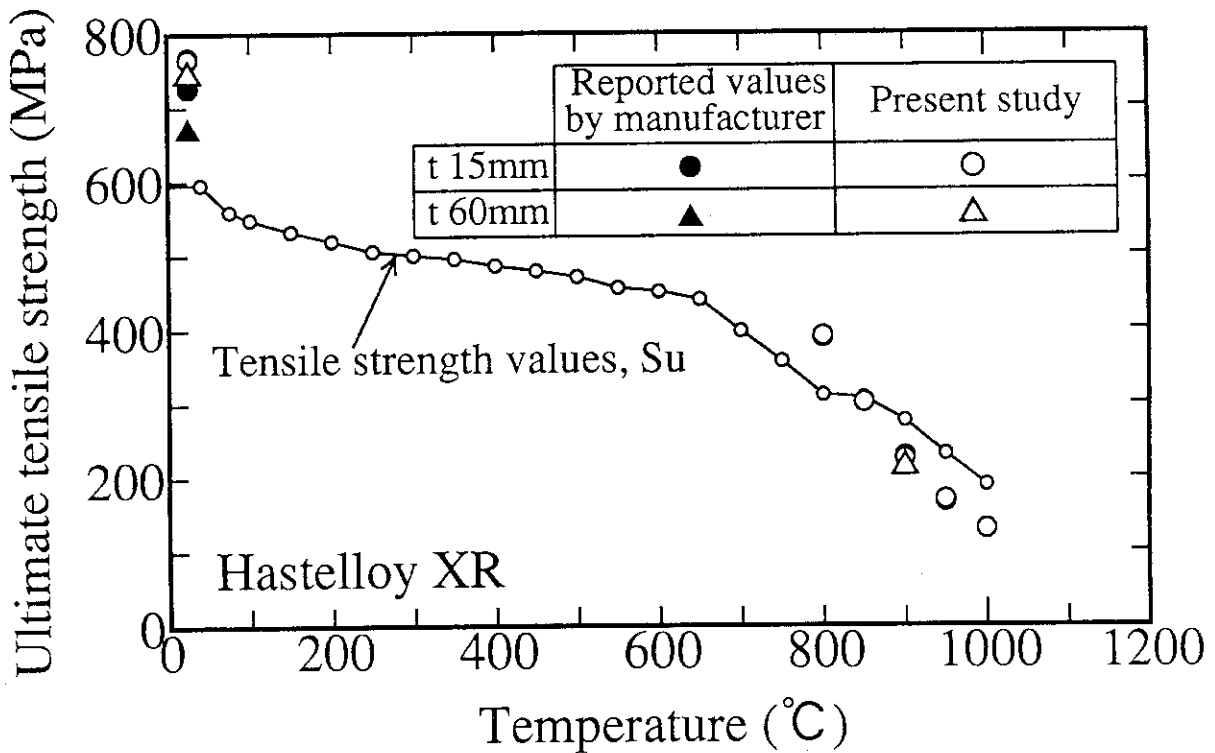


Fig. 3 Ultimate tensile strength as a function of test temperature for Hastelloy XR sampled from plates. The line indicates the tensile strength values S_u of the material strength standards⁽¹¹⁾ of Hastelloy XR.

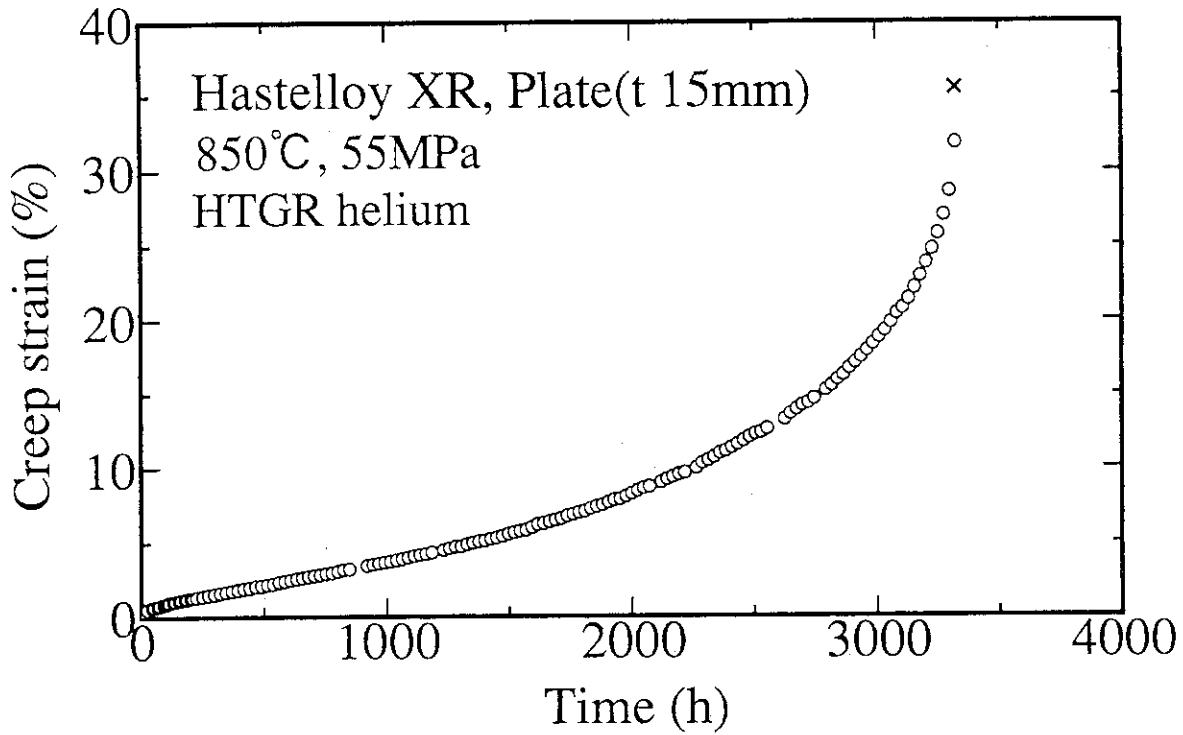


Fig. 4 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 850°C under a stress of 55MPa. The cross indicates the rupture point.

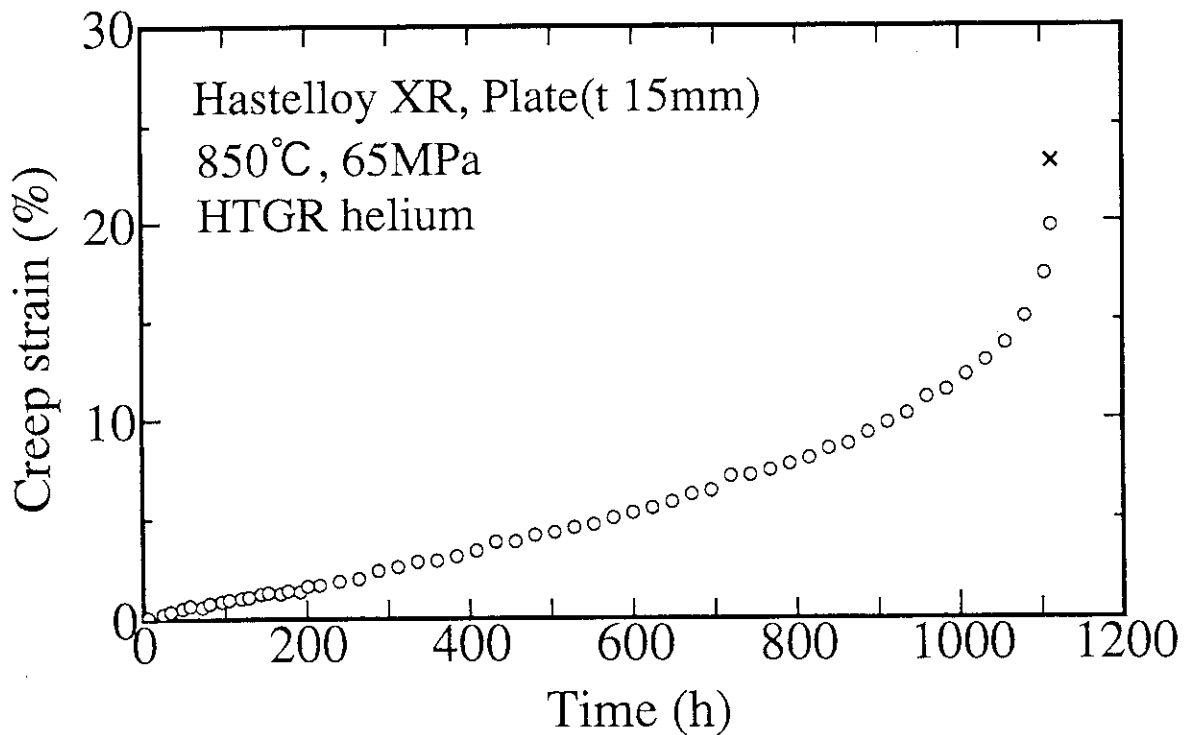


Fig. 5 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 850°C under a stress of 65MPa. The cross indicates the rupture point.

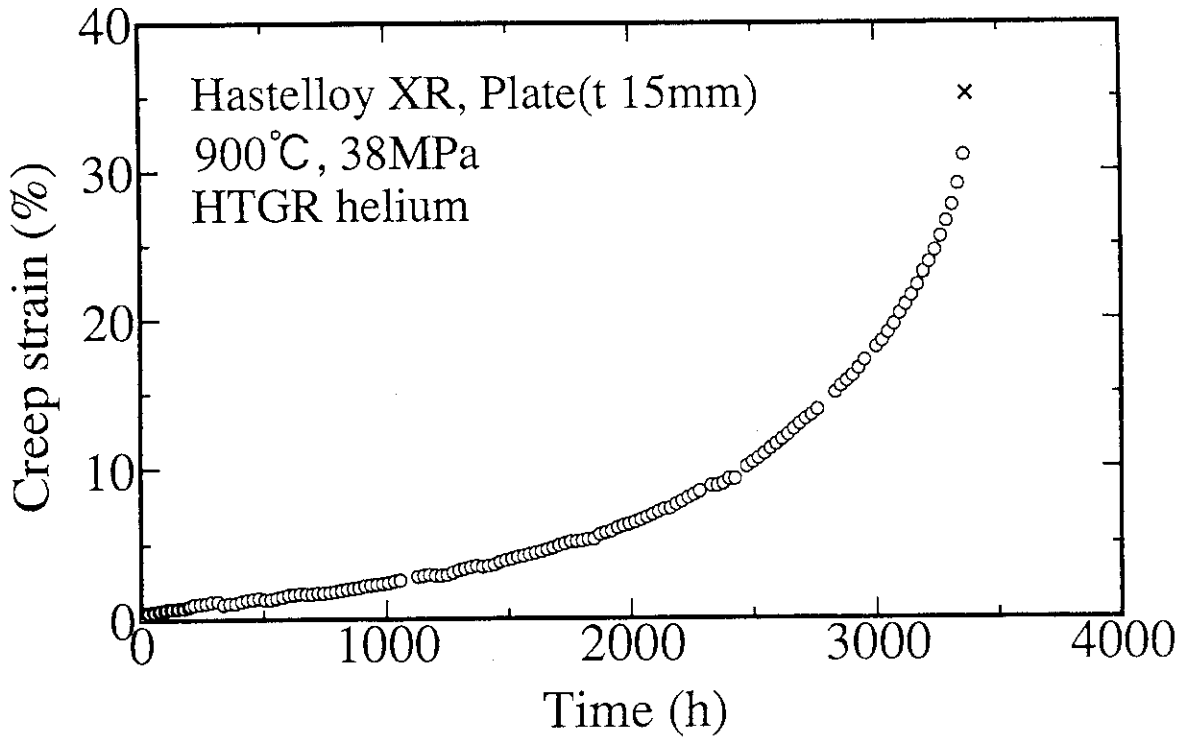


Fig. 6 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 900°C under a stress of 38MPa. The cross indicates the rupture point.

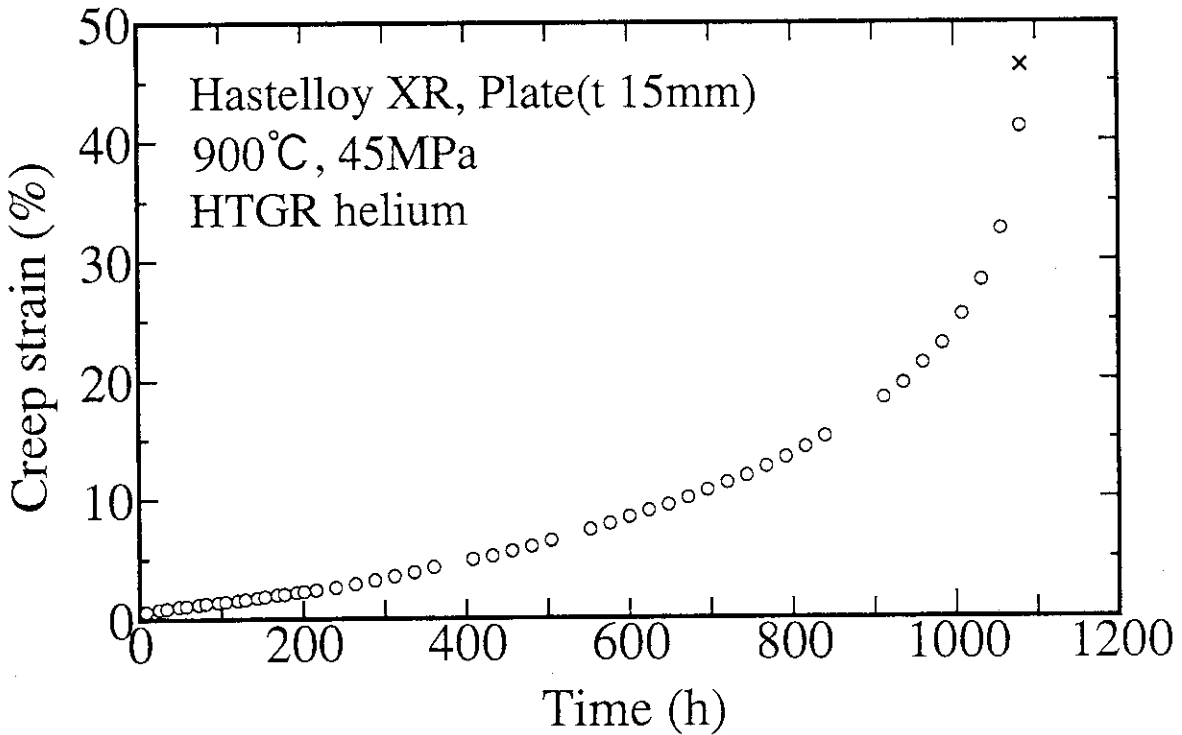


Fig. 7 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 900°C under a stress of 45MPa. The cross indicates the rupture point.

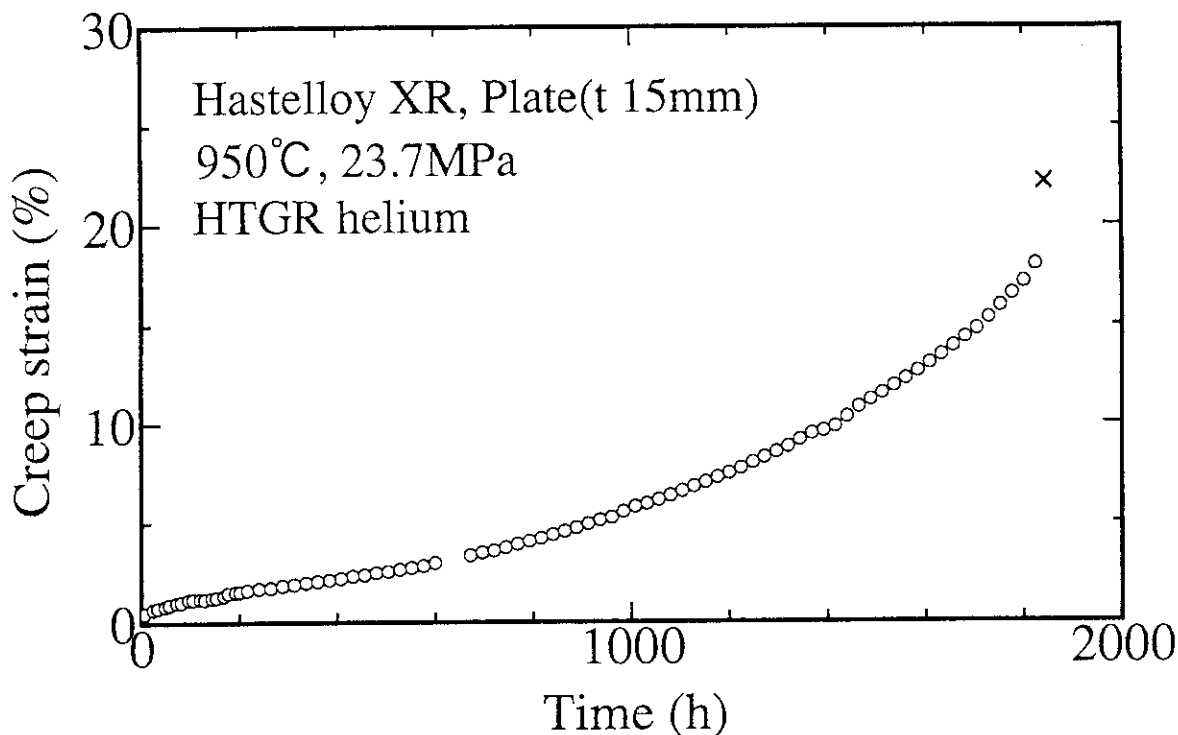


Fig. 8 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 950°C under a stress of 23.7MPa. The cross indicates the rupture point.

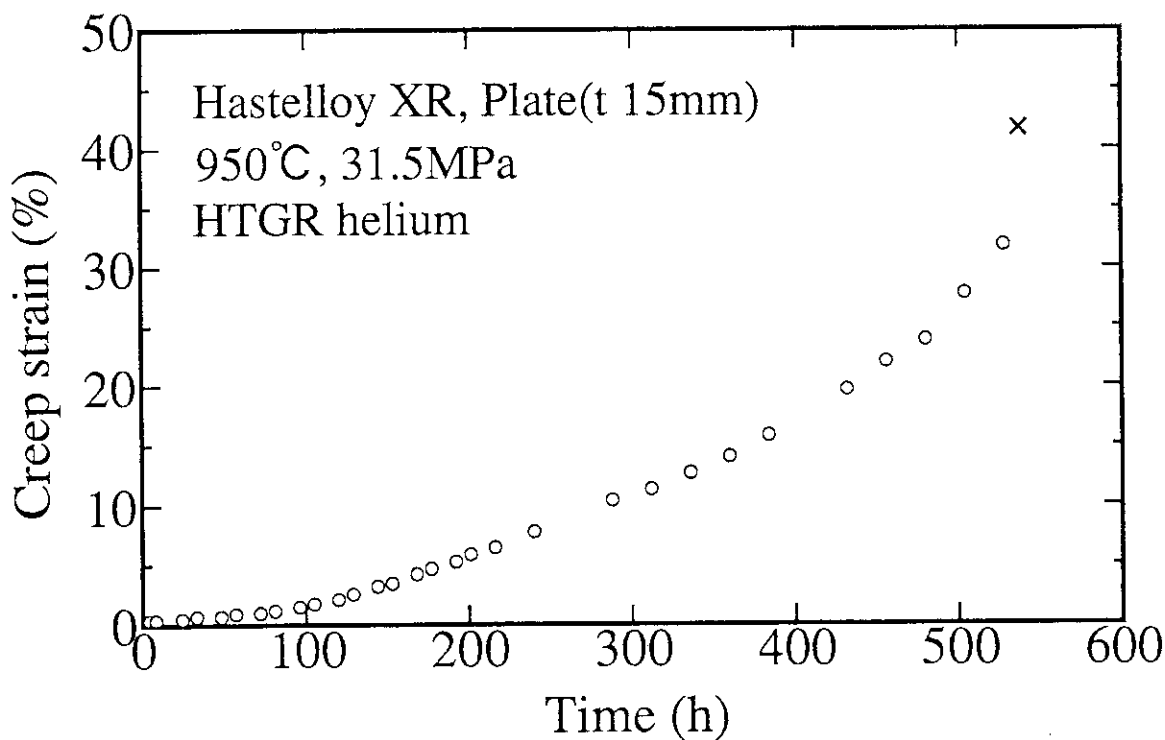


Fig. 9 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 950°C under a stress of 31.5MPa. The cross indicates the rupture point.

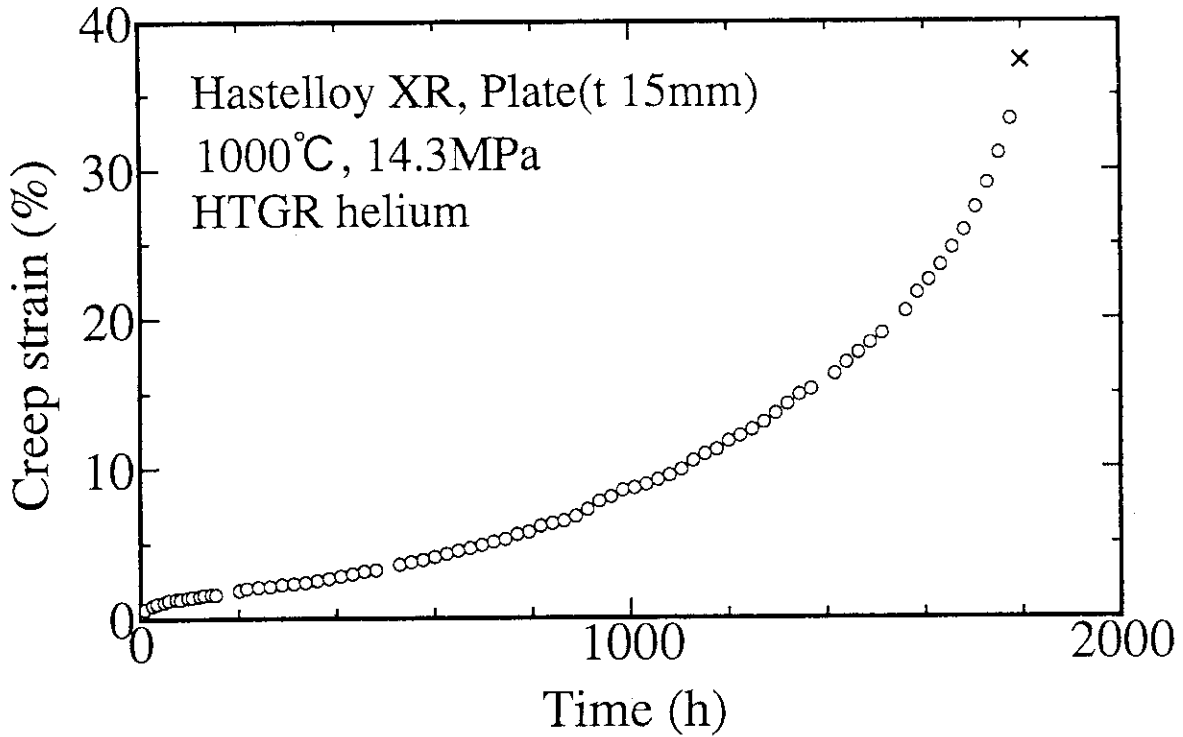


Fig. 10 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 14.3MPa. The cross indicates the rupture point.

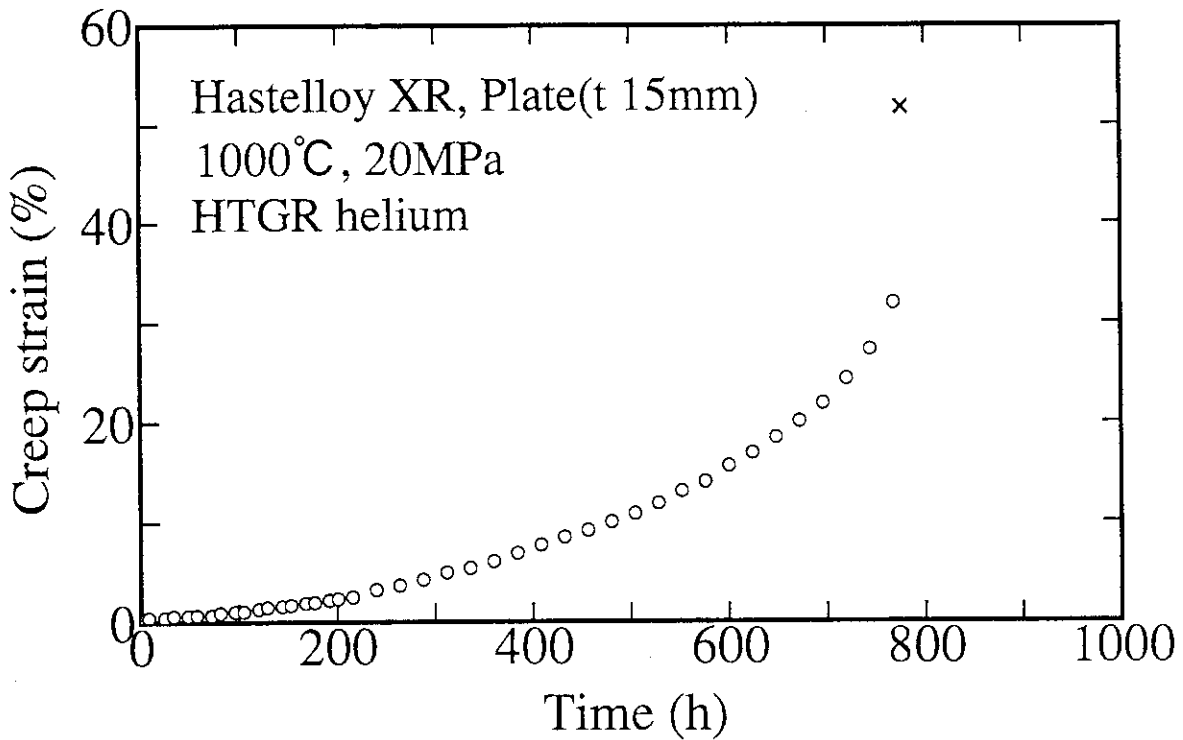


Fig. 11 Creep curve for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 20MPa. The cross indicates the rupture point.

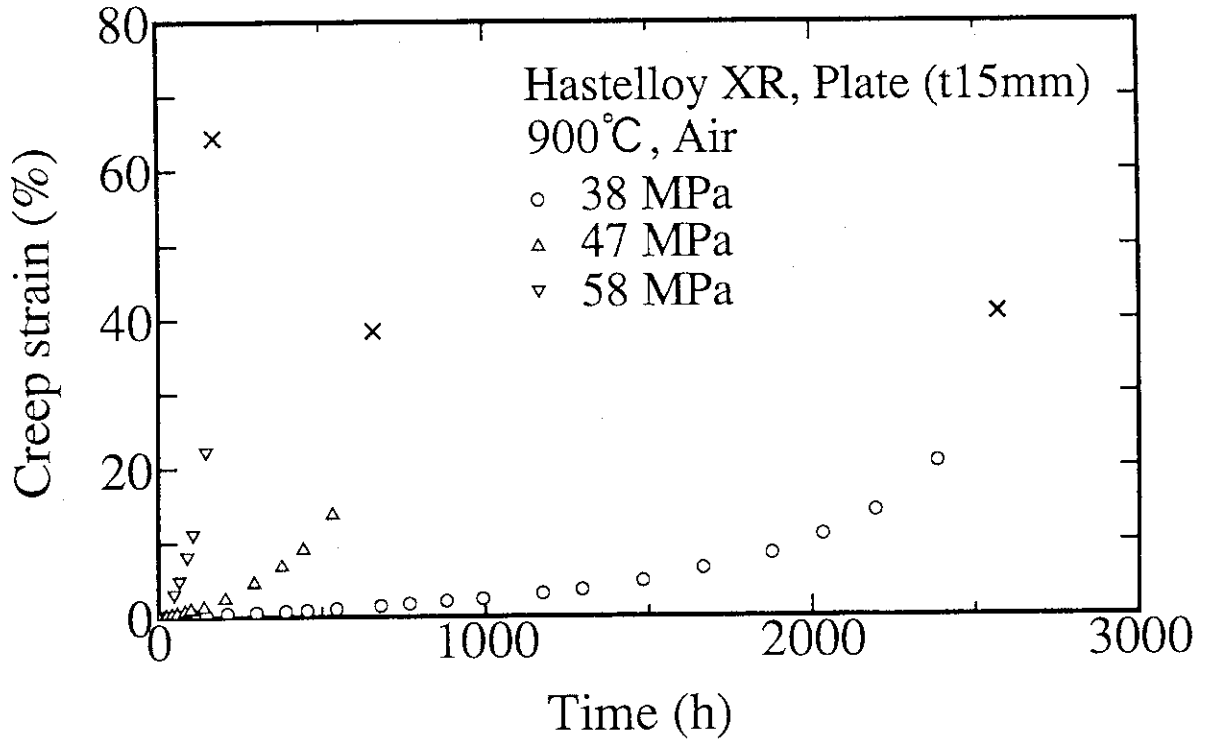


Fig. 12 Creep curves for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in air at 900°C. The crosses indicate the rupture points.

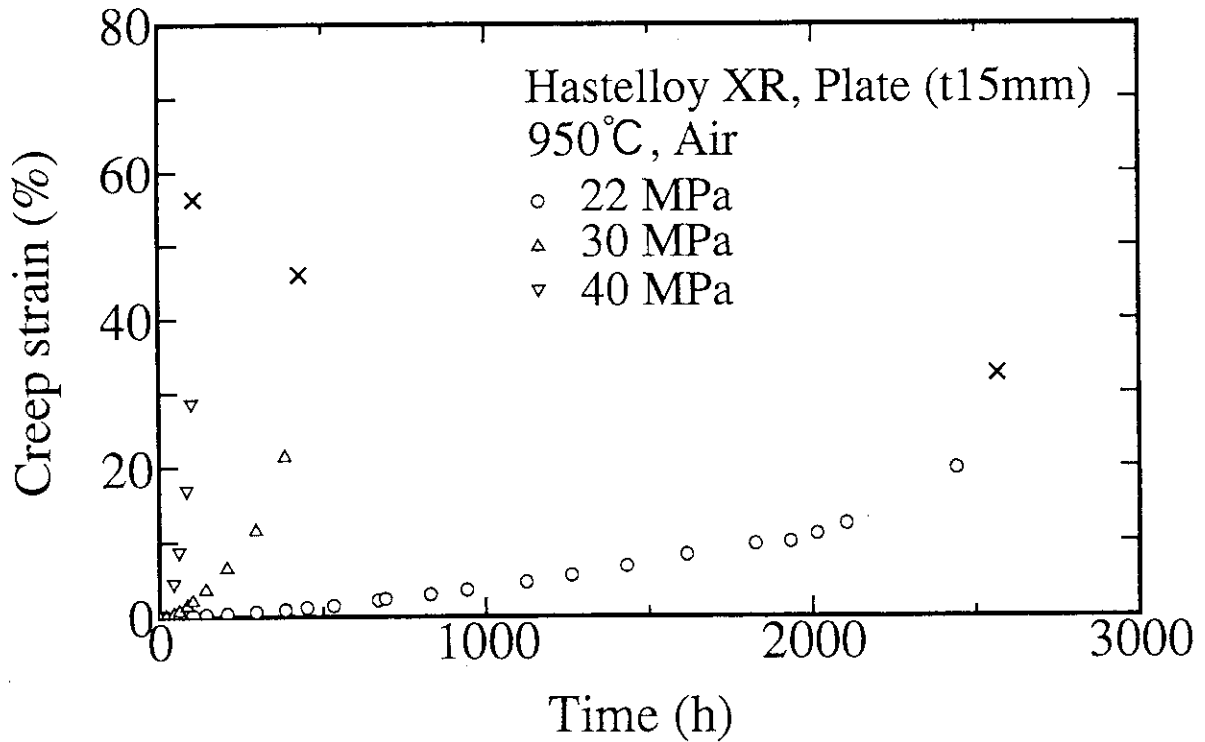


Fig. 13 Creep curves for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness obtained in air at 950°C. The crosses indicate the rupture points.

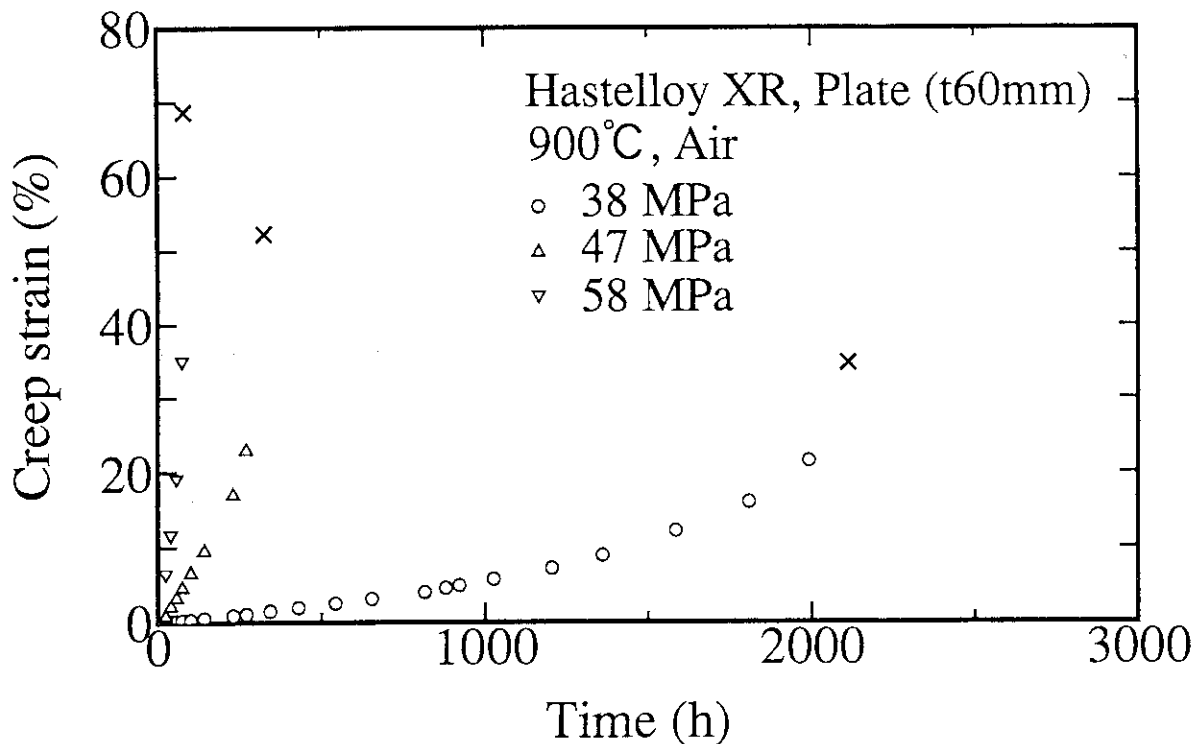


Fig. 14 Creep curves for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness obtained in air at 900°C. The crosses indicate the rupture points.

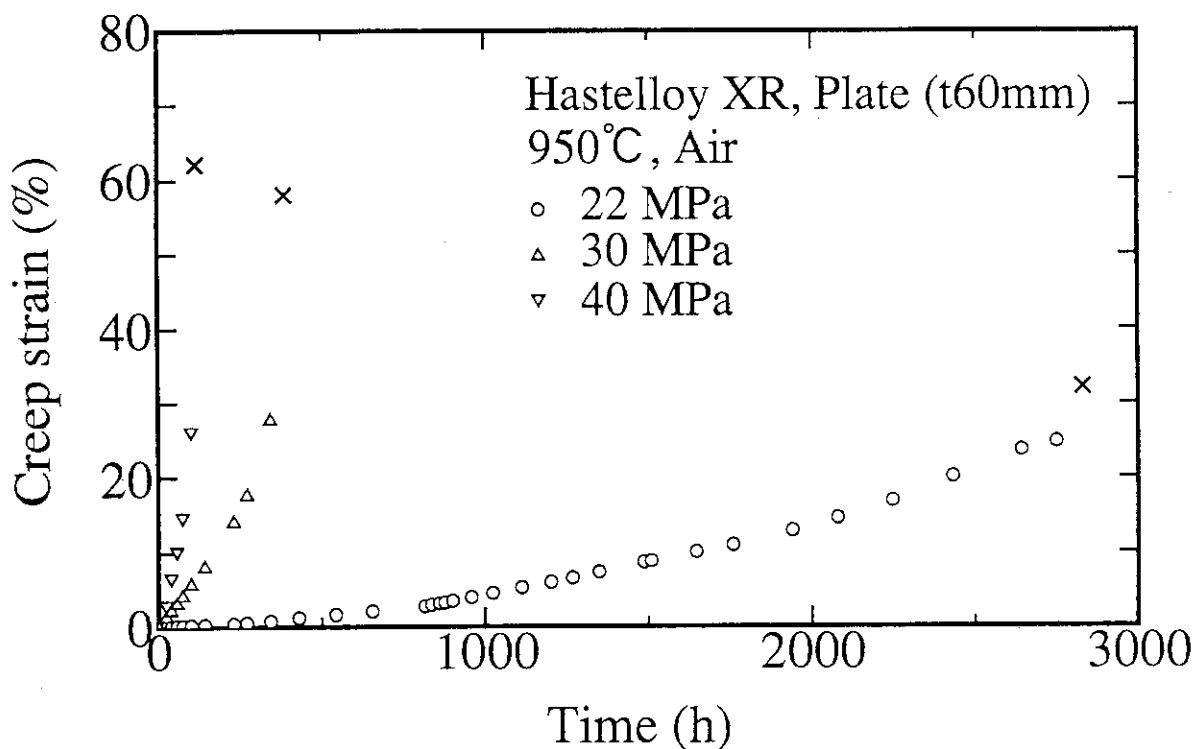


Fig. 15 Creep curves for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness obtained in air at 950°C. The crosses indicate the rupture points.

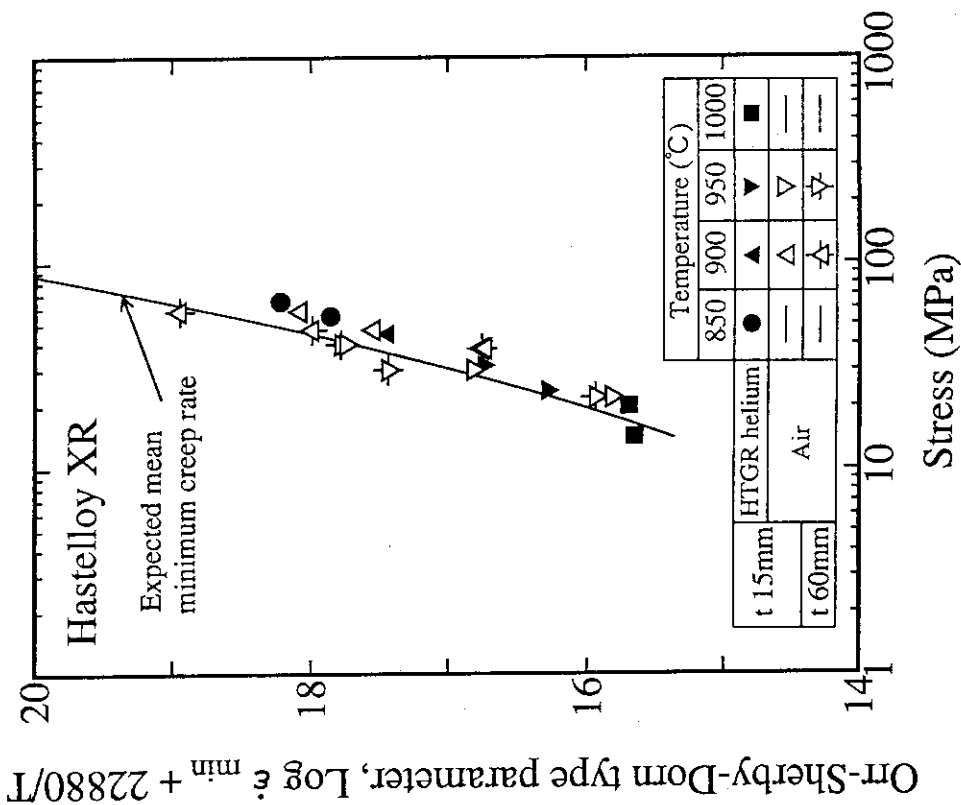


Fig. 17 Relation between applied stress and Orr-Sherby-Dorn type parameter for Hastelloy XR sampled from plates, where $\dot{\epsilon}_{min}$ is minimum creep rate in %/h and "T" is temperature in Kelvin. The line indicates expected mean minimum creep rate of the material strength standards (11) of Hastelloy XR.

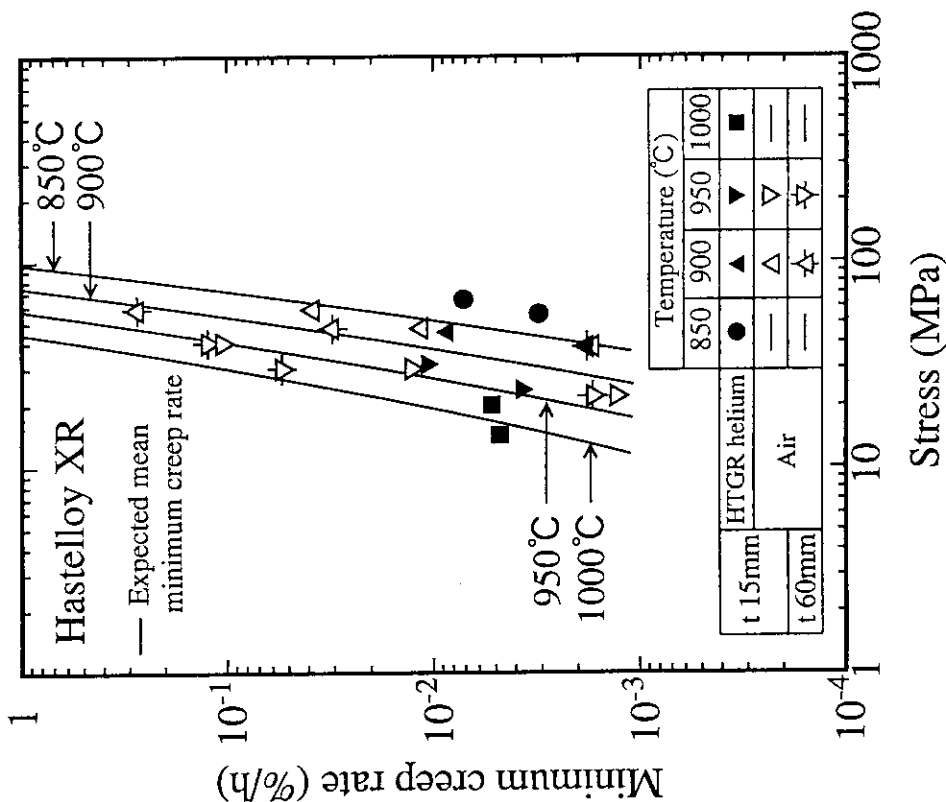


Fig. 16 Minimum creep rate as a function of applied stress for Hastelloy XR sampled from plates. The lines indicate expected mean minimum creep rate of the material strength standards (11) of Hastelloy XR.

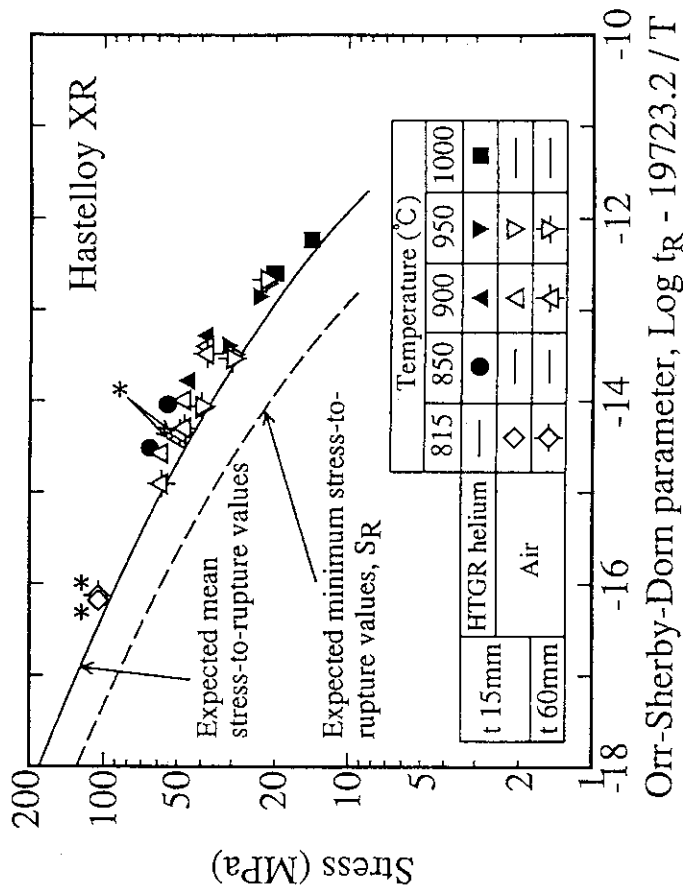


Fig. 18 Relation between applied stress and time to rupture for Hastelloy XR sampled from plates. The solid and broken lines indicate expected mean stress-to-rupture values, i.e., master curve and expected minimum stress-to-rupture values SR, respectively, of the material strength standards (11) of Hastelloy XR. The symbols with stars indicate the values reported by manufacturer.

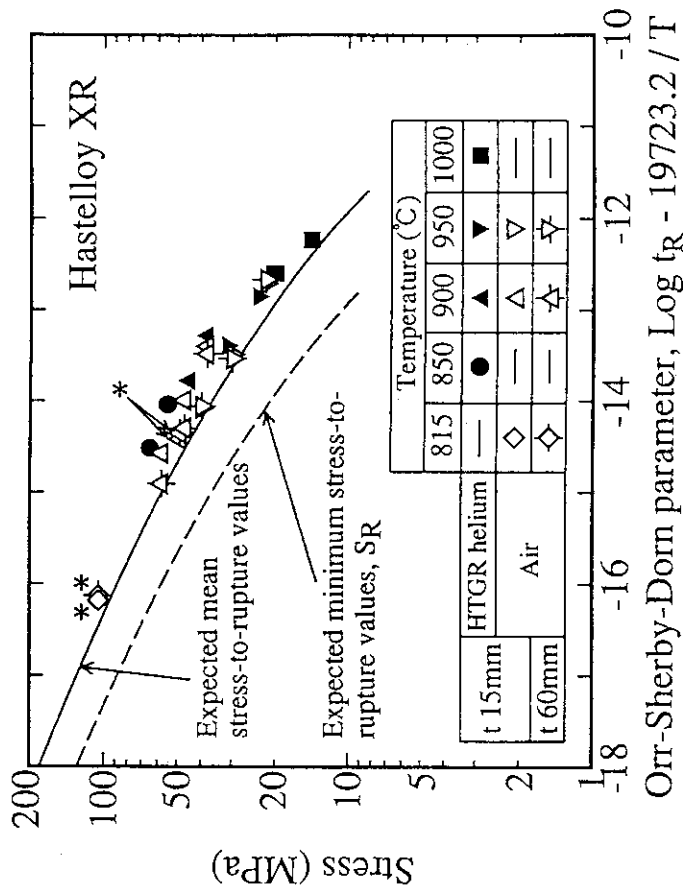


Fig. 19 Relation between applied stress and Orr-Sherby-Dorn parameter for Hastelloy XR sampled from plates, where t_r is time to rupture in hour and "T" is temperature in Kelvin. The solid and broken lines indicate expected mean stress-to-rupture values, i.e., master curve and expected minimum stress-to-rupture values SR, respectively, of the material strength standards (11) of Hastelloy XR. The symbols with stars indicate the values reported by manufacturer.

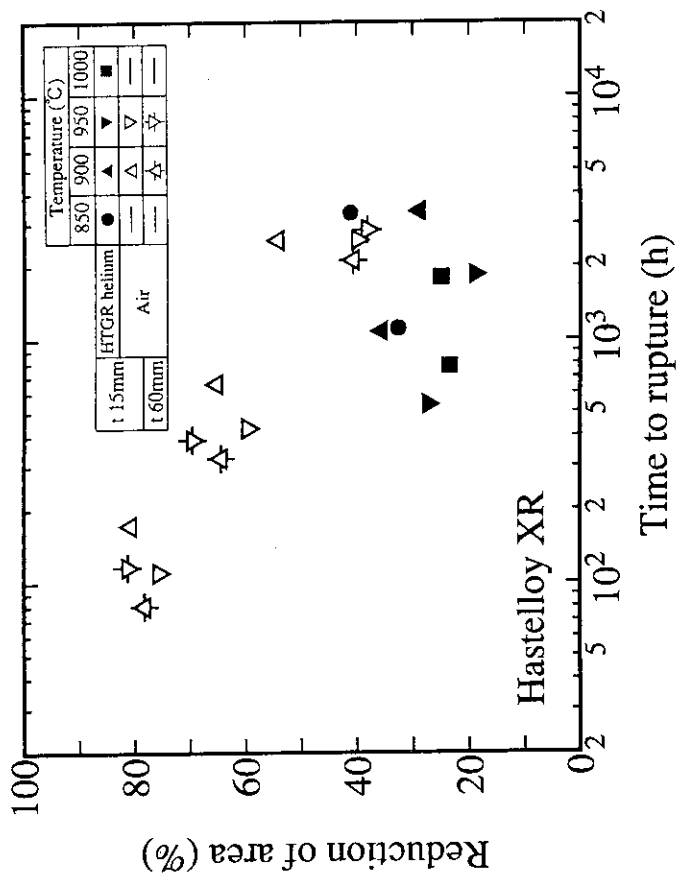


Fig. 21 Relation between reduction of area and time to rupture for Hastelloy XR sampled from plates.

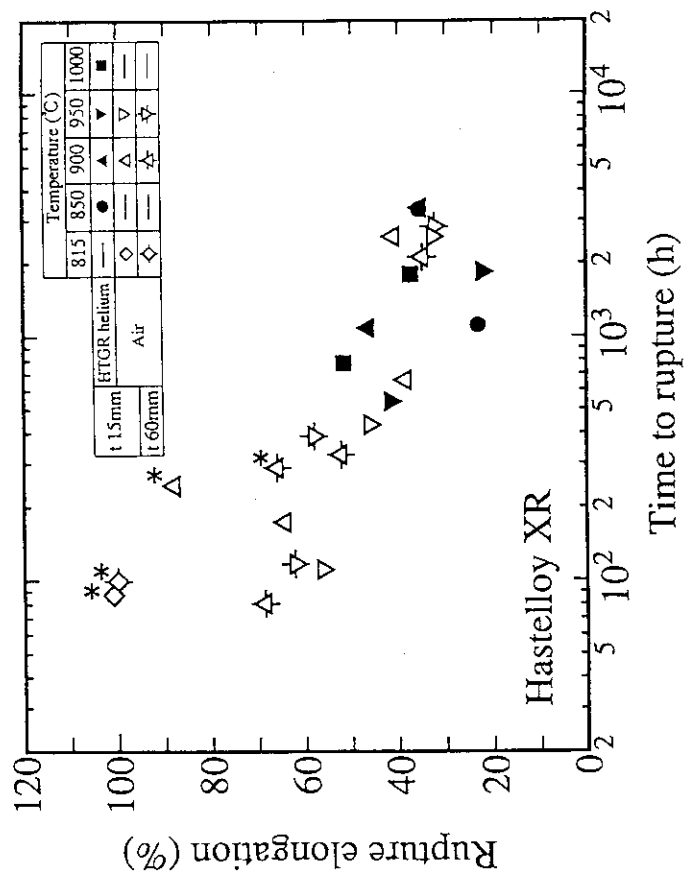


Fig. 20 Relation between rupture elongation and time to rupture for Hastelloy XR sampled from plates. The symbols with stars indicate the values reported by manufacturer.

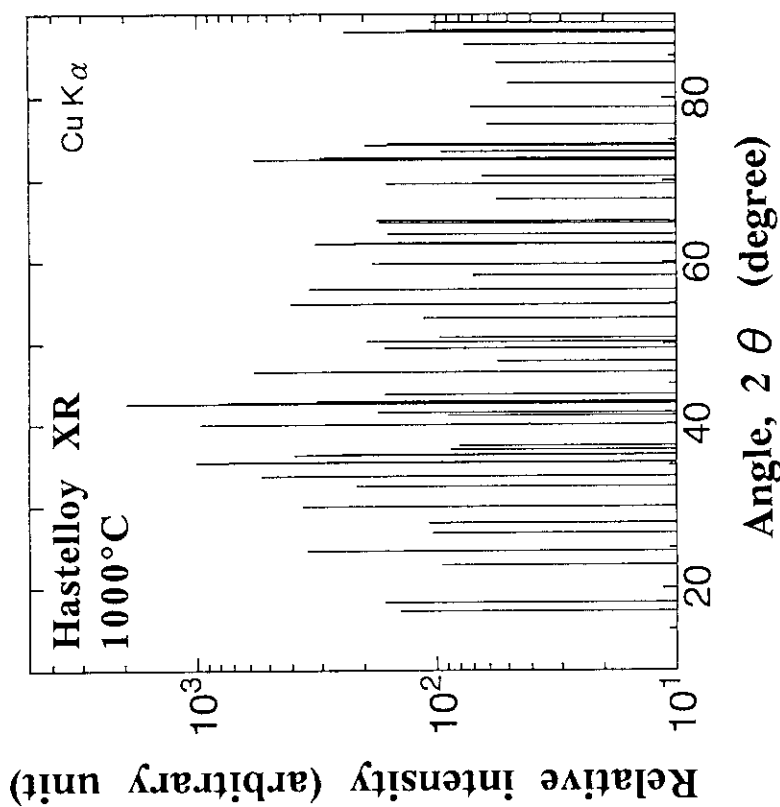


Fig. 23 Typical X-ray diffraction pattern of electrolytically extracted residue of Hastelloy XR ruptured in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 14.3MPa. ($t_R=1798.7h$)

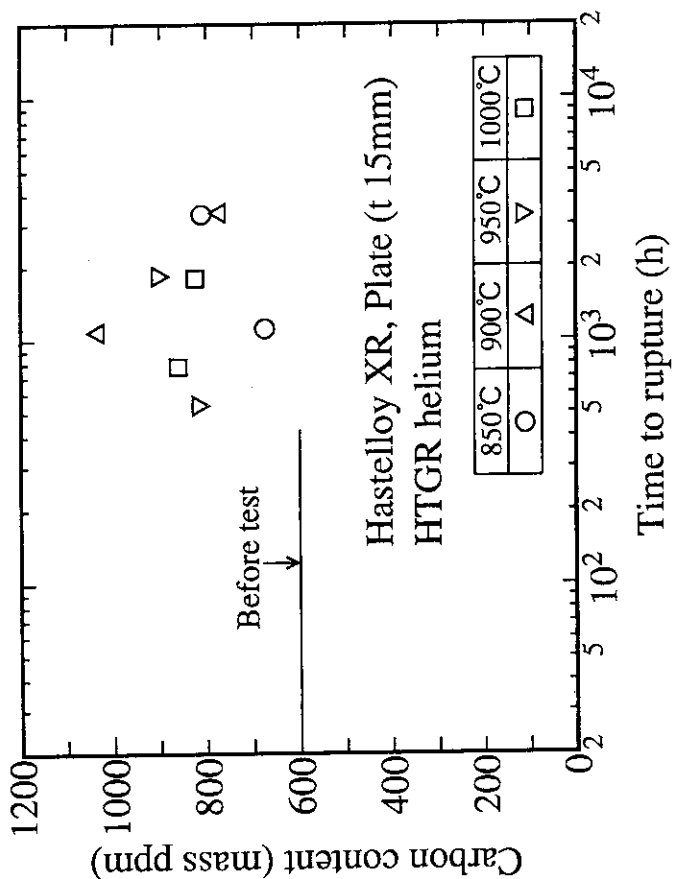


Fig. 22 Relation between carbon content and time to rupture for Hastelloy XR ruptured in simulated HTGR helium gas.

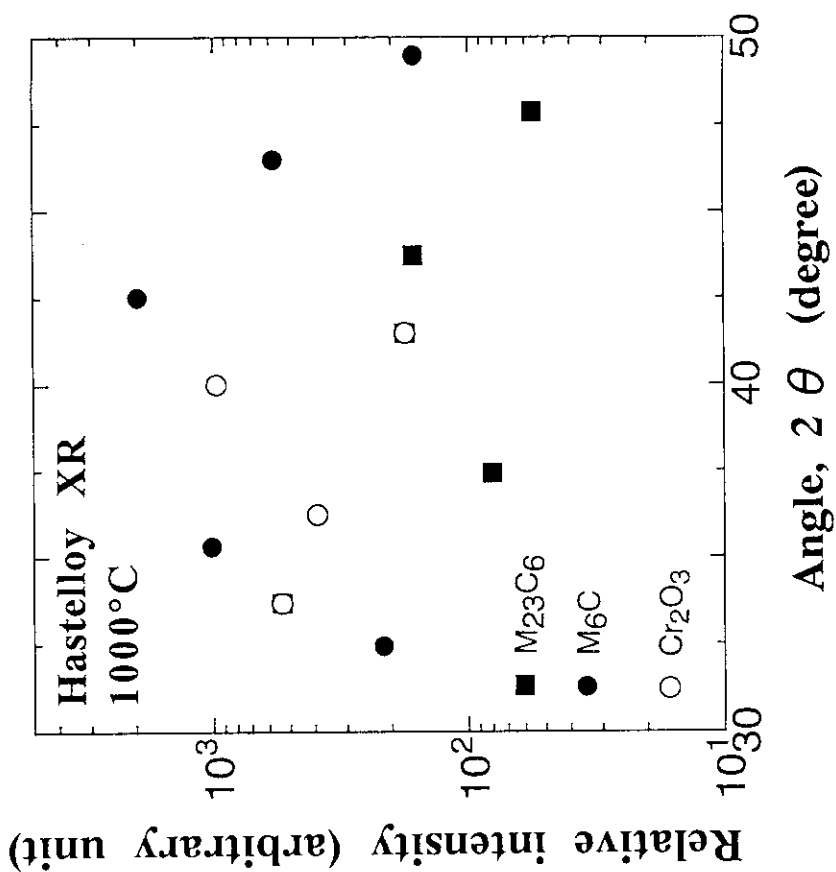


Fig. 24 Result of identification of electro-lytically extracted residue of Hastelloy XR ruptured in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 14.3 MPa. ($t_R=1798.7h$)

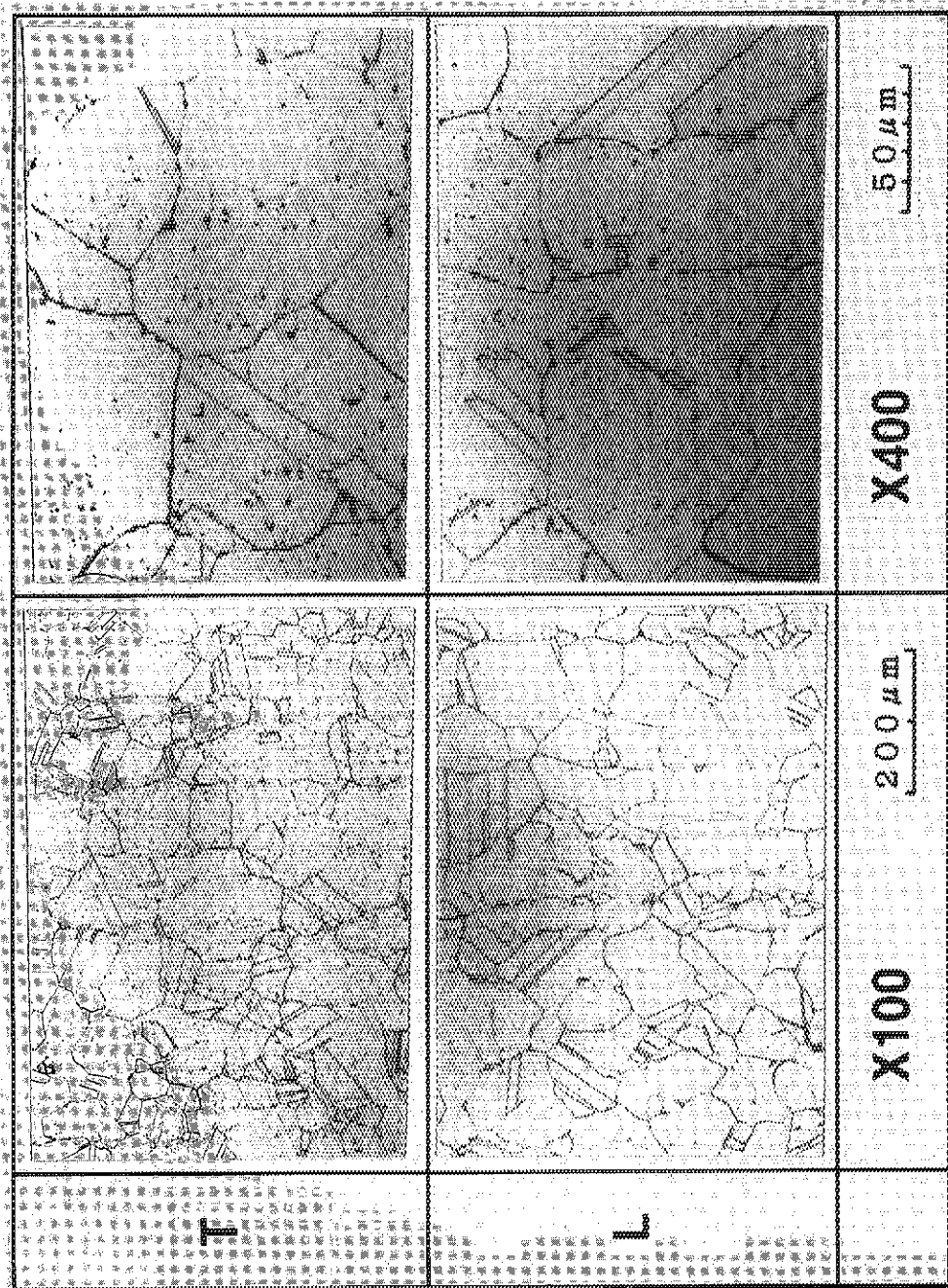


Photo. 1 Microstructures of Hastelloy XR plate with 15mm in thickness.

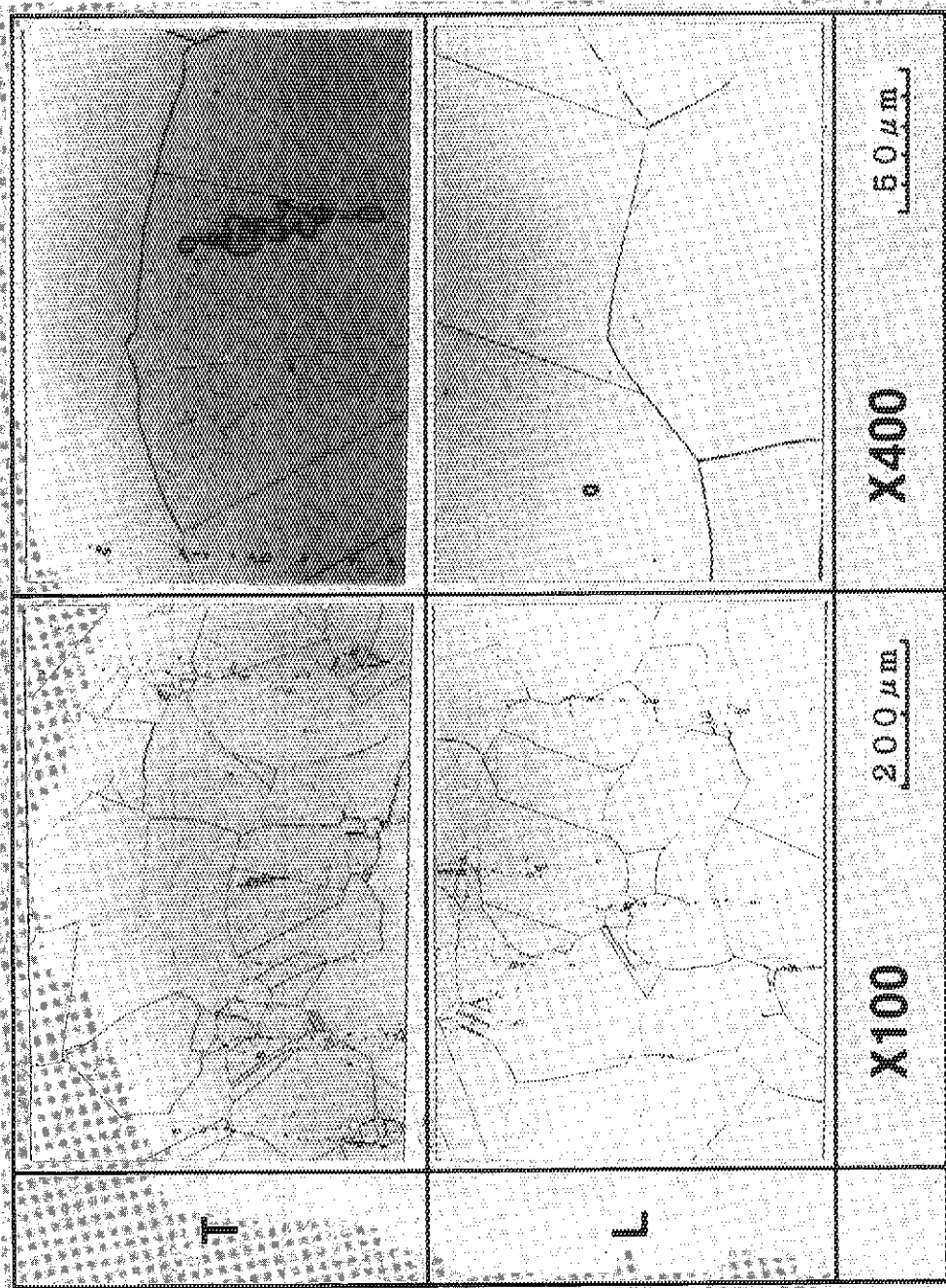


Photo. 2 Microstructures of Hastelloy XR plate with 60mm in thickness.

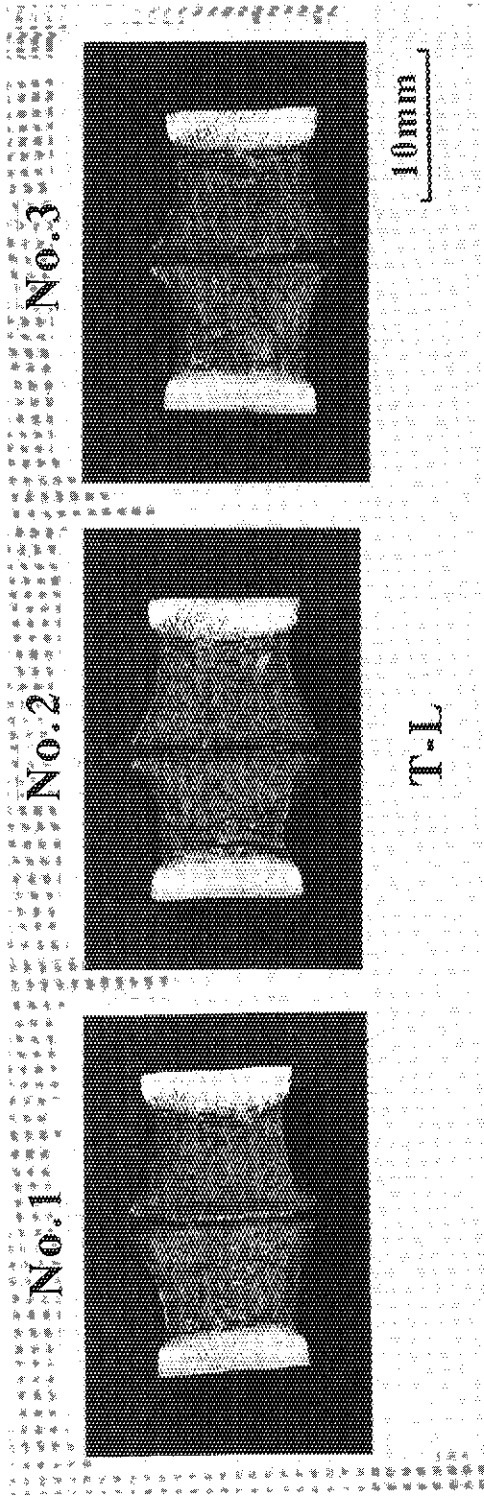


Photo. 3 Appearance of the specimens after Charpy impact tests for
Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.
Crack plane orientation: T-L

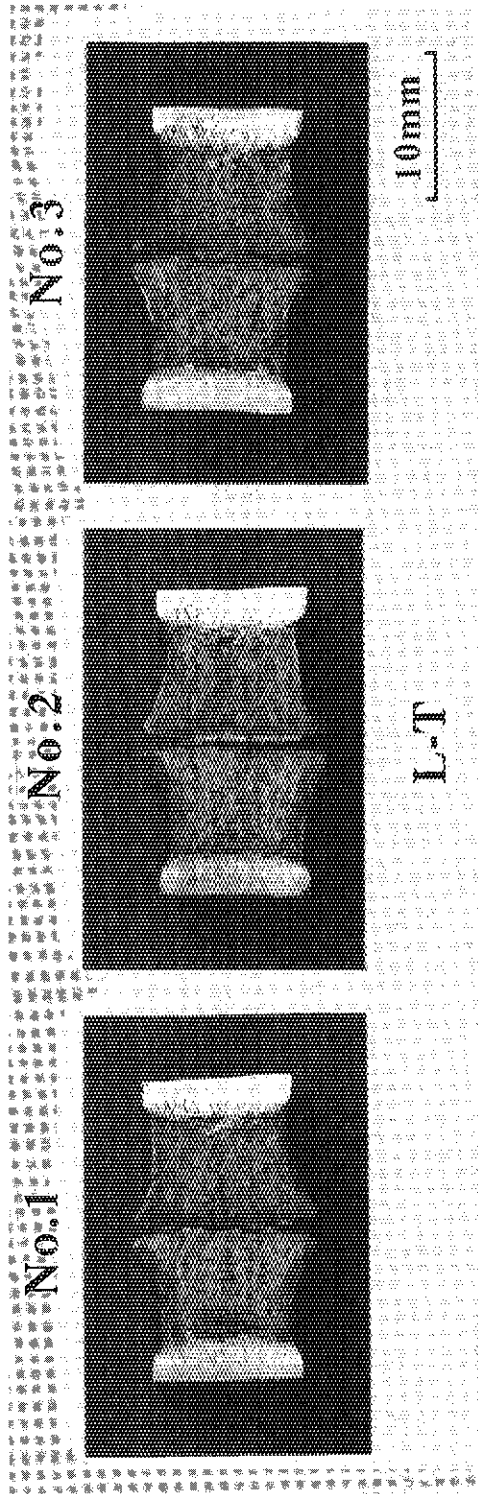


Photo. 4 Appearance of the specimens after Charpy impact tests for
Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.
Crack plane orientation: L-T

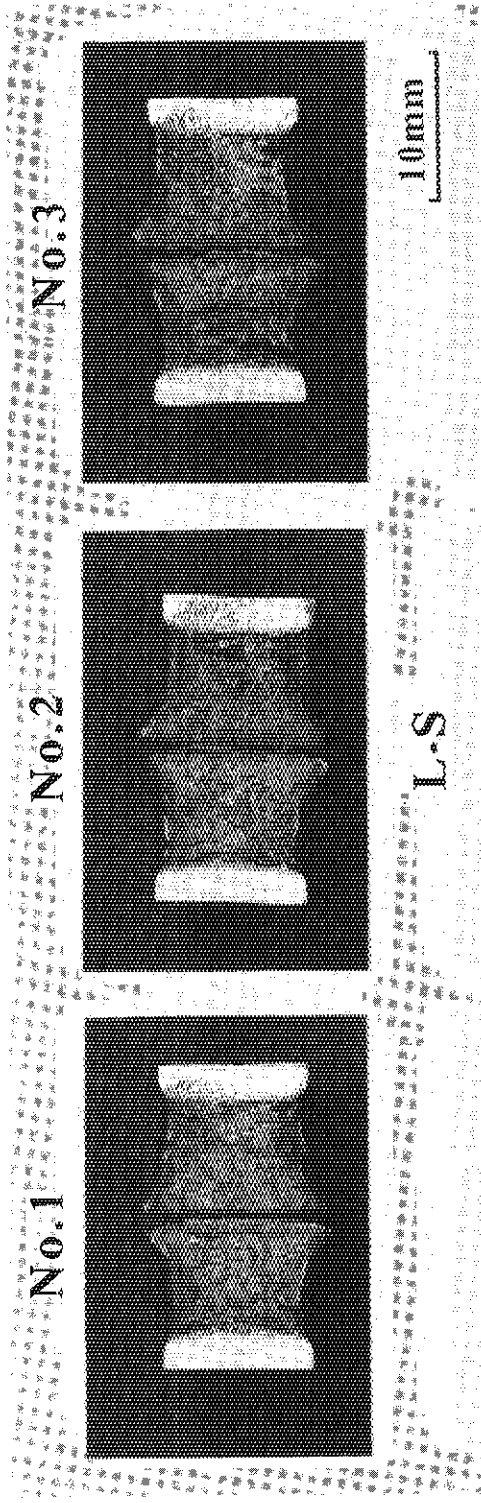


Photo. 5 Appearance of the specimens after Charpy impact tests for
Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.
Crack plane orientation: L-S

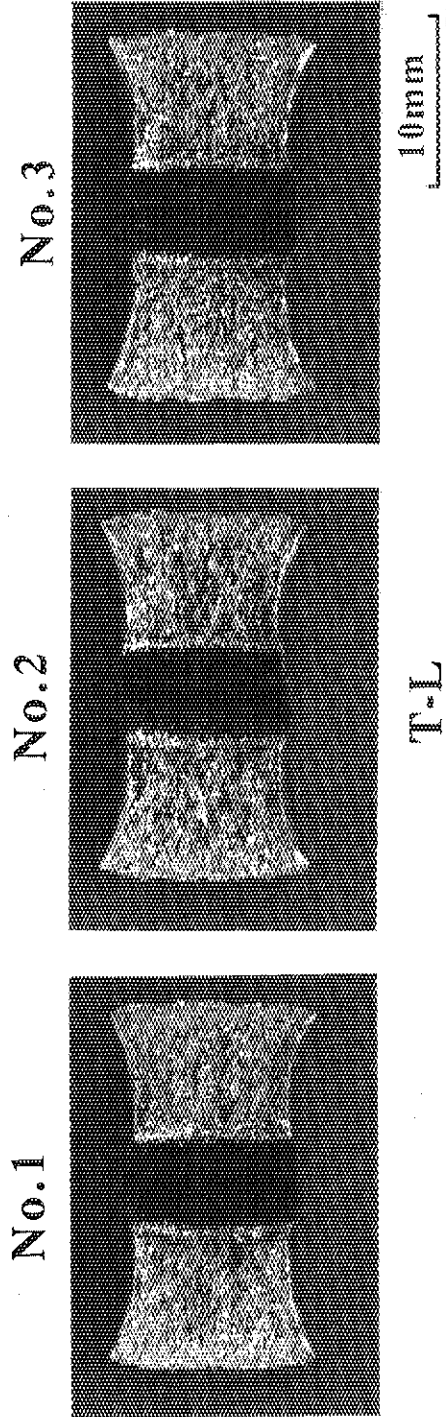


Photo. 6 Appearance of the specimens after Charpy impact tests for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness. Crack plane orientation: T-L

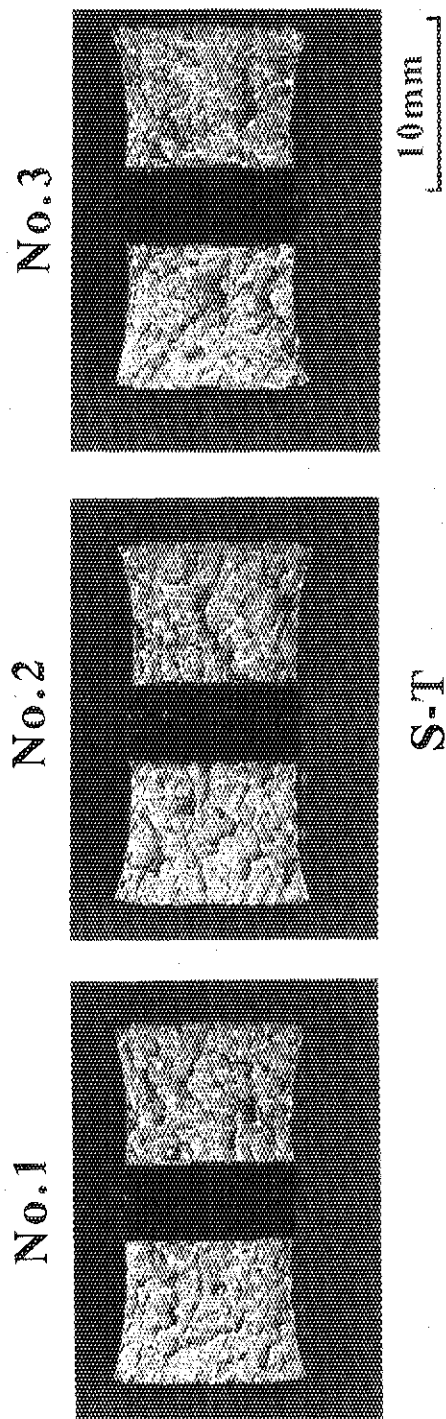


Photo. 7 Appearance of the specimens after Charpy impact tests for
Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.
Crack plane orientation: S-T

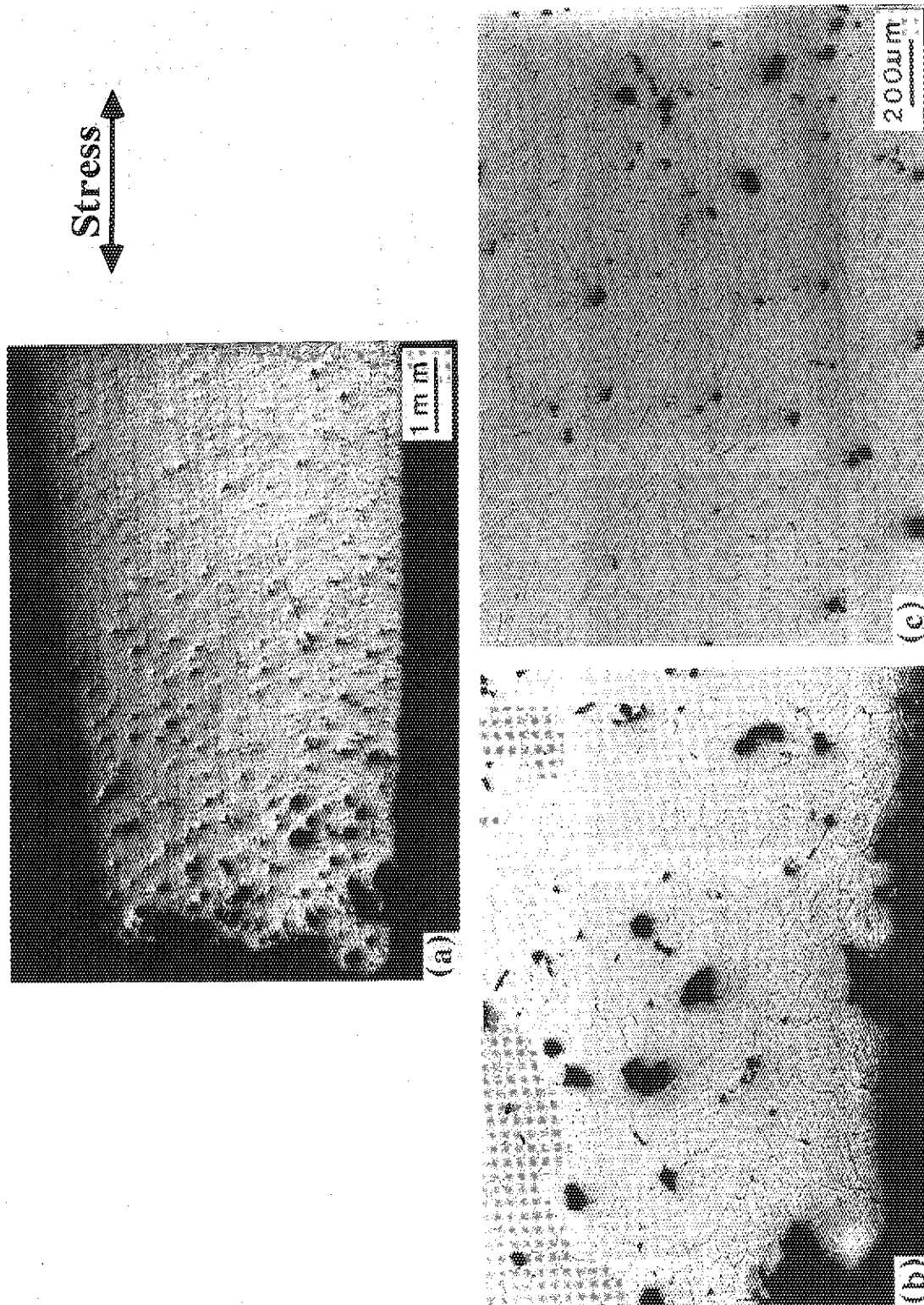


Photo. 8 Microstructures of Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness ruptured in simulated HTGR helium gas at 850°C under a stress of 55MPa. ($t_R=3321.6h$)
 (a) Surface region (b) Fracture region (c) Center region

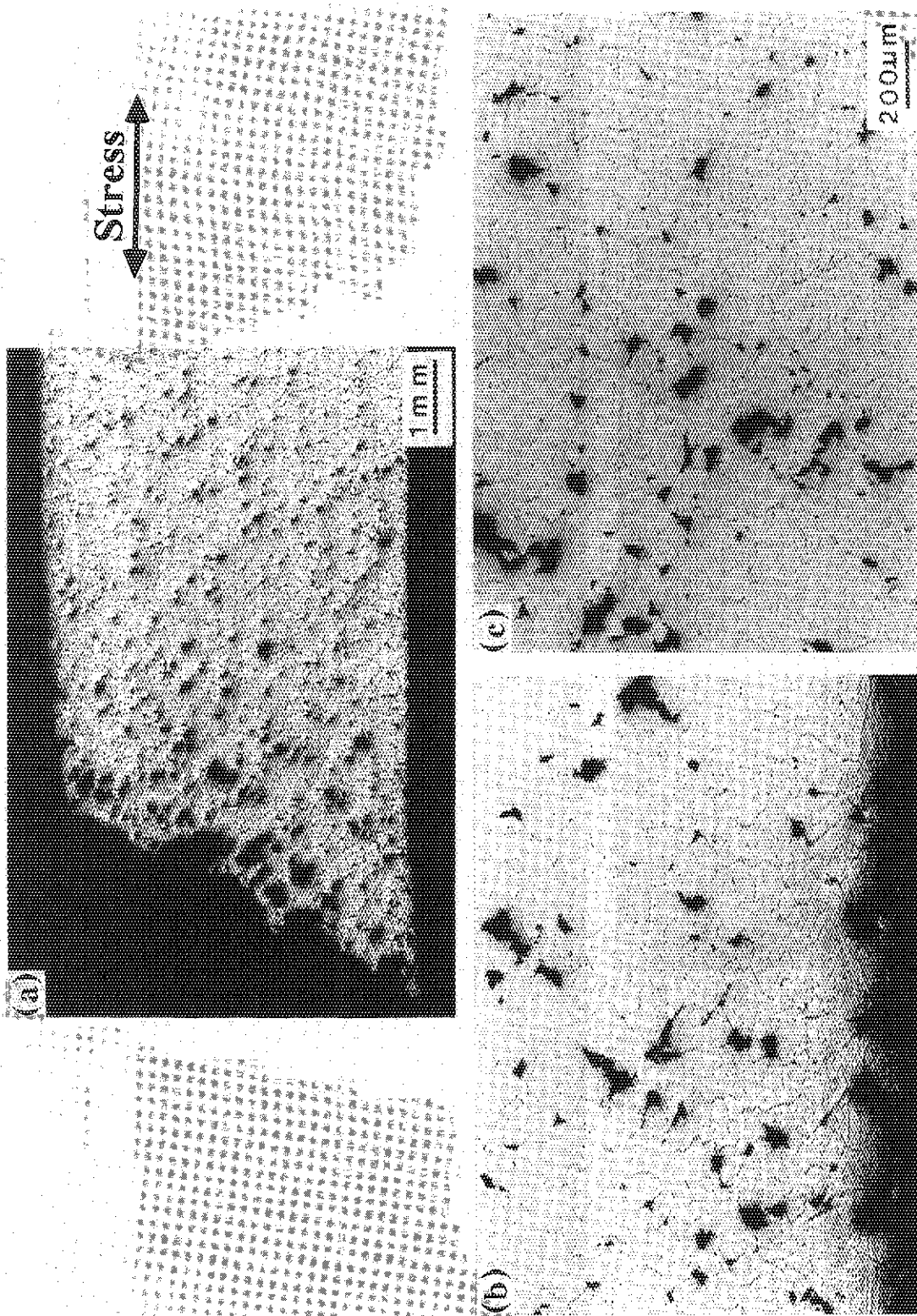


Photo. 9 Microstructures of Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness ruptured in simulated HTGR helium gas at 900°C under a stress of 38MPa. ($t_R=3371.4h$)
 (a) Fracture region (b) Surface region (c) Center region

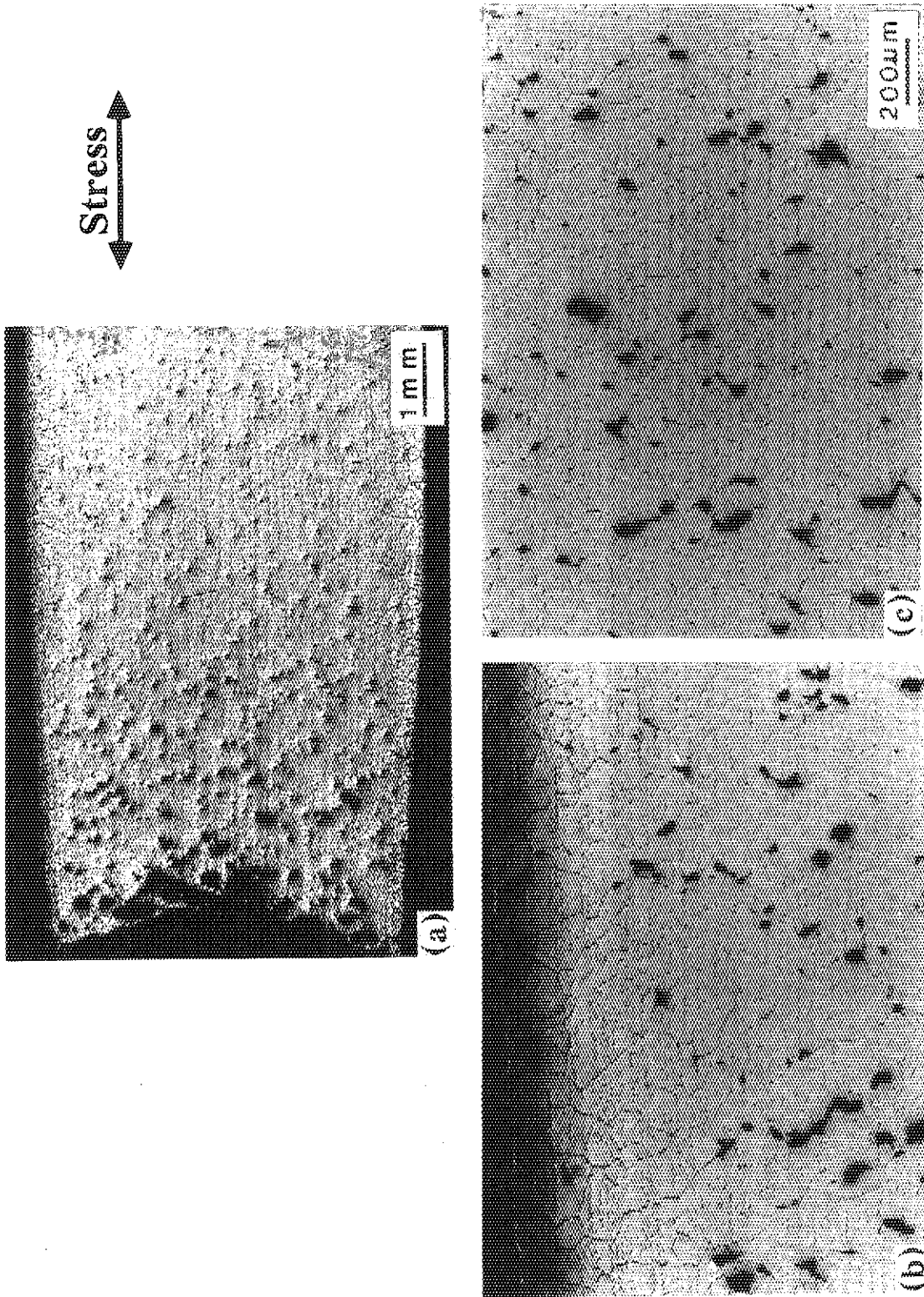


Photo. 10 Microstructures of Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness ruptured in simulated HTGR helium gas at 950°C under a stress of 23.7MPa. ($t_R=1842.3h$)
(a) Fracture region (b) Surface region (c) Center region

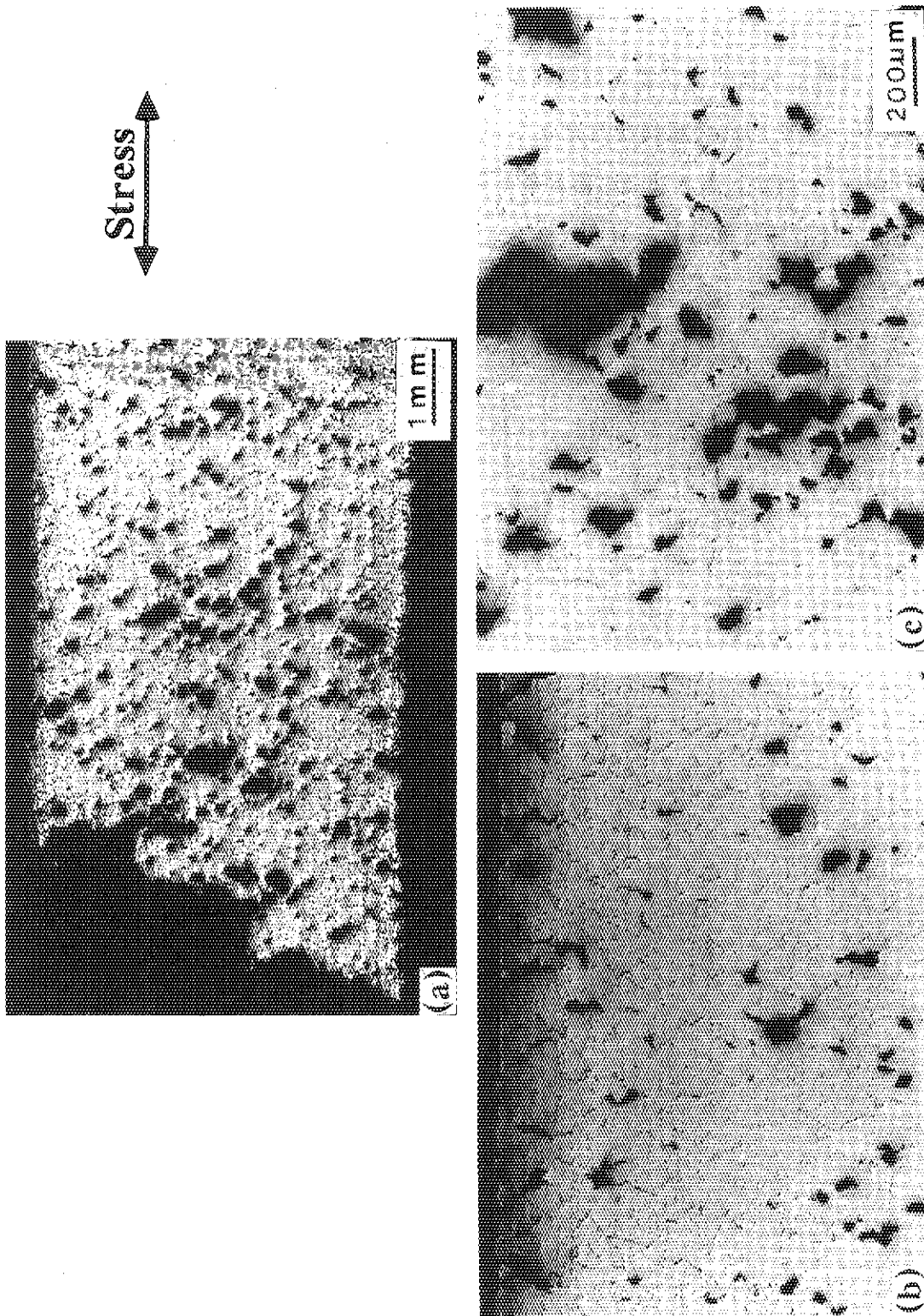


Photo. 11 Microstructures of Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness ruptured in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 14.3MPa. ($t_R=1798.7h$)
 (a) Fracture region (b) Surface region (c) Center region

付 録

本研究で得た時間とクリープひずみの関係をTable A.1~Table A.20に示す。Table A.1~Table A.8は、厚さ15mmの板材を対象として、HTGRヘリウム中で得たデータ、Table A.9~Table A.14は、厚さ15mmの板材を対象として、大気中で得たデータ、Table A.15~Table A.20は、厚さ60mmの板材を対象として、大気中で得たデータである。

Table A.1 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 850°C under a stress of 55MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	729.0	2.83	1833.0	7.27	2961.0	17.97
1.0	0.17	753.0	2.90	1857.0	7.40	2985.0	18.40
2.0	0.23	777.0	2.96	1881.0	7.50	3009.0	18.87
6.0	0.30	801.0	3.06	1905.0	7.68	3033.0	19.29
10.0	0.39	825.0	3.16	1929.0	7.83	3057.0	19.83
24.0	0.53	849.0	3.20	1953.0	7.89	3081.0	20.43
43.0	0.67	921.0	3.44	1977.0	8.08	3105.0	20.79
52.0	0.69	945.0	3.51	2001.0	8.27	3129.0	21.39
67.0	0.73	969.0	3.59	2025.0	8.47	3153.0	22.13
76.0	0.79	993.0	3.66	2049.0	8.64	3177.0	22.92
91.0	0.85	1017.0	3.73	2073.0	8.74	3201.0	23.82
99.0	0.87	1041.0	3.81	2121.0	9.03	3225.0	24.72
105.0	0.95	1065.0	3.90	2145.0	9.23	3249.0	25.75
114.0	1.00	1089.0	3.99	2169.0	9.39	3273.0	26.99
129.0	1.07	1113.0	4.08	2193.0	9.56	3297.0	28.59
138.0	1.08	1137.0	4.17	2217.0	9.66	3321.0	31.81
153.0	1.15	1161.0	4.23	2265.0	9.99	3321.6	35.50
162.0	1.17	1185.0	4.33	2289.0	10.33		
177.0	1.21	1233.0	4.49	2313.0	10.51		
186.0	1.23	1257.0	4.61	2337.0	10.72		
201.0	1.29	1281.0	4.70	2361.0	11.00		
210.0	1.30	1305.0	4.73	2385.0	11.13		
225.0	1.36	1329.0	4.88	2409.0	11.36		
249.0	1.41	1353.0	4.97	2433.0	11.59		
273.0	1.49	1377.0	5.07	2457.0	11.83		
297.0	1.56	1401.0	5.11	2481.0	12.08		
321.0	1.63	1425.0	5.23	2505.0	12.29		
345.0	1.70	1449.0	5.31	2529.0	12.40		
369.0	1.77	1473.0	5.42	2553.0	12.63		
393.0	1.84	1497.0	5.57	2625.0	13.27		
417.0	1.91	1521.0	5.67	2649.0	13.66		
441.0	1.97	1545.0	5.77	2673.0	13.95		
465.0	2.06	1569.0	5.83	2697.0	14.23		
489.0	2.10	1593.0	6.01	2721.0	14.39		
513.0	2.17	1617.0	6.19	2745.0	14.68		
537.0	2.23	1641.0	6.26	2769.0	14.98		
561.0	2.34	1665.0	6.39	2793.0	15.25		
585.0	2.40	1689.0	6.50	2817.0	15.57		
609.0	2.47	1713.0	6.60	2841.0	15.97		
633.0	2.56	1737.0	6.77	2865.0	16.30		
657.0	2.62	1761.0	6.87	2889.0	16.76		
681.0	2.70	1785.0	7.00	2913.0	17.13		
705.0	2.77	1809.0	7.08	2937.0	17.53		

Table A.2 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 850°C under a stress of 65MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	768.0	7.43				
1.0	0.07	792.0	7.73				
2.0	0.10	816.0	8.03				
5.5	0.07	840.5	8.50				
24.0	0.25	864.0	8.73				
33.0	0.38	888.0	9.30				
48.0	0.53	912.0	9.80				
57.0	0.67	936.0	10.25				
72.0	0.59	960.0	11.07				
81.0	0.78	984.0	11.43				
96.0	0.87	1008.0	12.20				
105.0	0.95	1032.0	12.93				
120.0	1.02	1056.0	13.81				
129.0	1.08	1080.0	15.17				
144.0	1.24	1104.0	17.35				
153.0	1.31	1112.0	19.77				
168.0	1.25	1112.3	23.10				
177.0	1.41						
192.0	1.36						
201.0	1.63						
216.0	1.68						
240.0	1.88						
264.0	2.00						
288.0	2.41						
312.0	2.59						
336.0	2.85						
360.0	2.90						
384.0	3.12						
408.0	3.39						
432.0	3.83						
456.0	3.84						
480.0	4.16						
504.0	4.30						
528.0	4.54						
552.0	4.70						
576.0	5.03						
600.0	5.29						
624.0	5.53						
648.0	5.83						
672.0	6.22						
696.0	6.40						
720.0	7.13						
744.0	7.18						

Table A.3 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 900°C under a stress of 38MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	720.0	1.73	1800.0	5.17	2928.0	16.66
0.5	0.16	744.0	1.73	1824.0	5.27	2952.0	17.21
1.0	0.22	768.0	1.78	1848.0	5.30	2976.0	17.61
2.0	0.37	792.0	1.83	1872.0	5.60	3000.0	18.10
4.0	0.27	816.0	1.90	1896.0	5.71	3024.0	18.50
8.0	0.30	840.0	1.98	1920.0	5.82	3048.0	19.07
24.0	0.47	864.0	2.02	1944.0	6.04	3072.0	19.62
33.0	0.48	888.0	2.07	1968.0	6.17	3096.0	20.34
48.0	0.56	912.0	2.20	1992.0	6.28	3120.0	20.94
57.0	0.50	936.0	2.25	2016.0	6.42	3144.0	21.55
72.0	0.59	960.0	2.30	2040.0	6.58	3168.0	22.25
81.0	0.61	984.0	2.34	2064.0	6.74	3192.0	23.11
96.0	0.63	1008.0	2.40	2088.0	6.91	3216.0	23.79
105.0	0.69	1032.0	2.50	2112.0	7.11	3240.0	24.56
120.0	0.71	1056.0	2.56	2136.0	7.27	3264.0	25.50
129.0	0.71	1128.0	2.80	2160.0	7.34	3288.0	26.53
144.0	0.70	1152.0	2.86	2184.0	7.60	3312.0	27.63
153.0	0.76	1176.0	2.92	2208.0	7.80	3336.0	29.07
168.0	0.79	1200.0	2.88	2232.0	8.05	3360.0	31.02
177.0	0.76	1224.0	2.86	2256.0	8.24	3371.4	35.17
192.0	0.84	1248.0	2.91	2280.0	8.46		
201.0	0.94	1272.0	3.08	2328.0	8.82		
216.0	1.00	1296.0	3.23	2352.0	8.83		
240.0	1.03	1320.0	3.33	2376.0	8.97		
264.0	1.08	1344.0	3.43	2400.0	9.27		
288.0	1.17	1368.0	3.51	2424.0	9.27		
312.0	1.20	1392.0	3.46	2472.0	10.08		
336.0	1.00	1416.0	3.51	2496.0	10.37		
360.0	1.07	1440.0	3.59	2520.0	10.63		
384.0	1.07	1464.0	3.77	2544.0	10.95		
408.0	1.20	1488.0	3.88	2568.0	11.28		
432.0	1.29	1512.0	3.97	2592.0	11.58		
456.0	1.34	1536.0	4.11	2616.0	11.90		
480.0	1.40	1560.0	4.17	2640.0	12.21		
504.0	1.31	1584.0	4.28	2664.0	12.57		
528.0	1.32	1608.0	4.37	2688.0	12.91		
552.0	1.41	1632.0	4.47	2712.0	13.24		
576.0	1.49	1656.0	4.59	2736.0	13.50		
600.0	1.60	1680.0	4.71	2760.0	13.86		
624.0	1.64	1704.0	4.87	2832.0	15.01		
648.0	1.70	1728.0	4.99	2856.0	15.47		
672.0	1.67	1752.0	5.11	2880.0	15.81		
696.0	1.67	1776.0	5.13	2904.0	16.17		

Table A.4 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 900°C under a stress of 45MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	768.0	12.65				
0.5	0.33	792.0	13.41				
1.0	0.38	816.0	14.27				
2.0	0.48	840.0	15.17				
4.0	0.54	912.0	18.40				
8.0	0.63	936.0	19.63				
24.0	0.83	960.0	21.34				
33.0	0.90	984.0	22.97				
48.0	1.07	1008.0	25.43				
57.0	1.11	1032.0	28.29				
72.0	1.23	1056.0	32.59				
81.0	1.31	1080.0	41.15				
96.0	1.39	1081.3	46.33				
105.0	1.47						
120.0	1.56						
129.0	1.64						
144.0	1.77						
153.0	1.87						
168.0	2.02						
177.0	2.07						
192.0	2.23						
201.0	2.30						
216.0	2.43						
240.0	2.63						
264.0	2.92						
288.0	3.23						
312.0	3.57						
336.0	3.88						
360.0	4.30						
408.0	4.93						
432.0	5.20						
456.0	5.60						
480.0	5.99						
504.0	6.49						
552.0	7.39						
576.0	7.90						
600.0	8.44						
624.0	8.97						
648.0	9.43						
672.0	10.05						
696.0	10.67						
720.0	11.30						
744.0	11.89						

Table A.5 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 950°C under a stress of 23.7MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	768.0	3.93	1800.0	17.17		
0.5	0.20	792.0	4.07	1824.0	18.03		
1.0	0.27	816.0	4.22	1842.3	22.17		
2.0	0.32	840.0	4.40				
4.0	0.39	864.0	4.57				
6.0	0.47	888.0	4.75				
24.0	0.67	912.0	4.95				
33.0	0.74	936.0	5.14				
48.0	0.83	960.0	5.27				
57.0	0.91	984.0	5.57				
72.0	1.00	1008.0	5.83				
81.0	1.03	1032.0	5.97				
96.0	1.16	1056.0	6.16				
105.0	1.17	1080.0	6.38				
120.0	1.19	1104.0	6.60				
129.0	1.17	1128.0	6.83				
144.0	1.23	1152.0	7.04				
153.0	1.27	1176.0	7.28				
168.0	1.35	1200.0	7.49				
177.0	1.48	1224.0	7.73				
192.0	1.53	1248.0	8.03				
201.0	1.54	1272.0	8.29				
216.0	1.62	1296.0	8.56				
240.0	1.70	1320.0	8.83				
264.0	1.73	1344.0	9.17				
288.0	1.84	1368.0	9.48				
312.0	1.90	1392.0	9.62				
336.0	1.99	1416.0	9.84				
360.0	2.06	1440.0	10.33				
384.0	2.13	1464.0	10.83				
408.0	2.21	1488.0	11.20				
432.0	2.32	1512.0	11.54				
456.0	2.38	1536.0	11.91				
480.0	2.49	1560.0	12.27				
504.0	2.56	1584.0	12.67				
528.0	2.66	1608.0	13.07				
552.0	2.74	1632.0	13.49				
576.0	2.84	1656.0	13.93				
600.0	2.99	1680.0	14.38				
672.0	3.36	1704.0	14.80				
696.0	3.51	1728.0	15.37				
720.0	3.60	1752.0	15.97				
744.0	3.75	1776.0	16.57				

Table A.6 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 950°C under a stress of 31.5MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0						
0.5	0.19						
1.0	0.21						
2.0	0.26						
4.0	0.37						
8.0	0.37						
24.0	0.50						
33.0	0.70						
48.0	0.71						
57.0	0.91						
72.0	0.99						
81.0	1.17						
96.0	1.50						
105.0	1.76						
120.0	2.13						
129.0	2.57						
144.0	3.23						
153.0	3.47						
168.0	4.24						
177.0	4.68						
192.0	5.27						
201.0	5.88						
216.0	6.47						
240.0	7.78						
288.0	10.43						
312.0	11.36						
336.0	12.70						
360.0	14.03						
384.0	15.81						
432.0	19.63						
456.0	22.01						
480.0	23.85						
504.0	27.76						
528.0	31.81						
537.6	41.67						

Table A.7 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 14.3MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	816.0	6.13				
0.5	0.10	840.0	6.30				
1.0	0.26	864.0	6.47				
2.0	0.33	888.0	6.78				
4.0	0.43	912.0	7.23				
8.0	0.61	936.0	7.79				
24.0	0.87	960.0	8.08				
33.0	0.99	984.0	8.53				
48.0	1.10	1008.0	8.69				
57.0	1.22	1032.0	8.92				
72.0	1.29	1056.0	9.23				
81.0	1.27	1080.0	9.53				
96.0	1.40	1104.0	9.90				
105.0	1.43	1128.0	10.50				
120.0	1.49	1152.0	10.94				
129.0	1.57	1176.0	11.24				
144.0	1.60	1200.0	11.81				
153.0	1.57	1224.0	12.17				
201.0	1.86	1248.0	12.58				
216.0	1.99	1272.0	13.07				
240.0	2.07	1296.0	13.67				
264.0	2.11	1320.0	14.30				
288.0	2.24	1344.0	14.93				
312.0	2.30	1368.0	15.29				
336.0	2.38	1416.0	16.31				
360.0	2.50	1440.0	17.07				
384.0	2.63	1464.0	17.73				
408.0	2.79	1488.0	18.39				
432.0	2.93	1512.0	19.03				
456.0	3.10	1560.0	20.50				
480.0	3.19	1584.0	21.73				
528.0	3.57	1608.0	22.57				
552.0	3.73	1632.0	23.57				
576.0	3.86	1656.0	24.73				
600.0	4.07	1680.0	25.90				
624.0	4.27	1704.0	27.42				
648.0	4.49	1728.0	29.09				
672.0	4.66	1752.0	31.07				
696.0	4.86	1776.0	33.37				
720.0	5.08	1798.7	37.33				
744.0	5.25						
768.0	5.58						
792.0	5.73						

Table A.8 Time versus creep strain obtained in simulated HTGR helium gas at 1000°C under a stress of 20MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)	Time (h)	Creep strain (%)
0	0	720.0	24.37				
0.5	0.07	744.0	27.31				
1.0	0.18	768.0	31.97				
2.0	0.33	774.0	34.40				
4.0	0.37	776.1	51.67				
8.0	0.43						
24.0	0.44						
33.0	0.62						
48.0	0.65						
57.0	0.69						
72.0	0.67						
81.0	0.93						
96.0	1.04						
105.0	1.05						
120.0	1.31						
129.0	1.48						
144.0	1.57						
153.0	1.69						
168.0	1.90						
177.0	1.97						
192.0	2.19						
201.0	2.33						
216.0	2.50						
240.0	3.22						
264.0	3.67						
288.0	4.23						
312.0	4.95						
336.0	5.39						
360.0	6.06						
384.0	6.87						
408.0	7.70						
432.0	8.47						
456.0	9.16						
480.0	9.99						
504.0	10.83						
528.0	11.87						
552.0	13.10						
576.0	14.04						
600.0	15.61						
624.0	16.90						
648.0	18.48						
672.0	20.09						
696.0	21.89						

Table A.9 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 38MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
23.9	0.06
47.9	0.08
64.3	0.14
88.3	0.25
106.0	0.26
145.9	0.27
210.7	0.43
299.6	0.55
389.1	0.69
454.9	0.82
544.4	1.02
680.7	1.40
768.7	1.69
881.6	2.05
992.9	2.33
1175.8	3.05
1296.2	3.56
1482.5	4.74
1666.9	6.43
1877.2	8.43
2032.8	10.95
2193.7	14.17
2383.0	20.71
2567.4	40.93

Table A.10 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 47MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
23.9	0.11
41.0	0.26
57.4	0.40
81.3	0.69
99.0	0.94
139.0	1.20
203.8	2.36
292.7	4.49
377.6	6.77
443.4	9.05
533.0	13.75
657.8	38.49

Table A.11 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 58MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
24.0	0.92
48.0	3.16
64.1	4.93
88.3	8.23
106.0	11.24
146.0	22.39
172.5	64.44

Table A.12 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 22MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
20.0	0.04
44.0	0.07
60.5	0.11
84.5	0.12
102.1	0.22
142.0	0.30
206.9	0.41
295.8	0.65
385.2	0.91
451.0	1.18
533.1	1.48
669.5	2.18
692.5	2.36
830.2	2.97
942.5	3.57
1124.4	4.57
1262.9	5.49
1431.0	6.71
1615.4	8.21
1825.7	9.61
1933.0	9.92
2014.2	11.00
2104.2	12.35
2440.2	19.80
2566.4	32.63

Table A.13 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 30MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
19.9	0.03
44.0	0.34
60.4	0.70
84.4	1.41
102.1	2.04
142.0	3.59
206.8	6.45
295.7	11.50
385.2	21.43
431.5	46.06

Table A.14 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 40MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 15mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
19.9	0.24
44.0	4.54
60.4	8.74
84.4	17.06
100.1	28.74
110.4	56.44

Table A.15 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 38MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
23.7	0.09
39.2	0.12
56.7	0.15
74.0	0.22
100.0	0.31
141.7	0.52
230.4	0.89
270.8	1.08
342.8	1.47
429.6	1.93
542.5	2.53
654.1	3.11
816.1	4.01
880.4	4.56
922.1	4.92
1026.8	5.74
1205.2	7.16
1360.5	8.87
1584.9	12.17
1809.0	16.03
1991.9	21.54
2112.3	34.77

Table A.16 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 47MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
23.7	0.73
39.2	2.05
56.7	3.23
74.0	4.56
100.0	6.52
141.7	9.48
230.4	16.96
270.7	22.98
325.4	52.31

Table A.17 Time versus creep strain obtained in air at 900°C under a stress of 58MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
23.7	6.52
39.2	11.70
56.7	19.22
74.0	35.09
80.3	68.68

Table A.18 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 22MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
24.0	0.06
39.3	0.09
56.8	0.14
74.0	0.17
100.1	0.22
141.8	0.30
230.6	0.41
270.1	0.54
343.0	0.76
429.7	1.19
542.6	1.65
654.2	2.05
816.1	2.74
836.1	2.93
860.1	3.11
876.6	3.23
900.6	3.46
958.1	3.94
1023.0	4.49
1111.9	5.23
1201.3	5.95
1267.1	6.51
1349.2	7.29
1485.6	8.63
1508.6	8.82
1646.3	10.02
1758.6	10.93
1940.5	12.84
2079.0	14.52
2247.0	16.86
2431.5	20.09
2641.8	23.67
2749.1	24.78
2830.3	32.19

Table A.19 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 30MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
24.0	1.31
39.3	2.16
56.8	3.09
74.0	4.07
100.1	5.63
141.8	8.00
230.6	14.02
271.0	17.62
343.0	27.72
387.6	58.05

Table A.20 Time versus creep strain obtained in air at 950°C under a stress of 40MPa for Hastelloy XR sampled from plate with 60mm in thickness.

Time (h)	Creep strain (%)
0	0
24.0	2.98
39.3	6.62
56.8	10.24
74.0	14.78
100.1	26.29
116.3	62.17