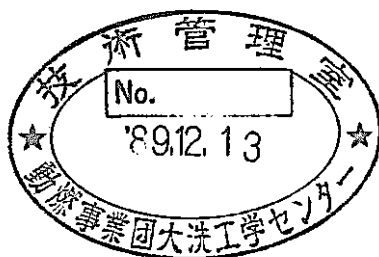


新材料ラップ管試作評価試験（ⅡA）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）



1989年8月



株式会社 神戸製鋼所

KOBE STEEL, LTD.

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

新材料ラップ管試作評価試験（ⅡA）

藤原 優行 *¹ 西田 俊夫 *¹
中村 重治 *² 溝口 満 *²

要 旨

耐スエリング性の優れた高Crフェライト／マルテンサイト鋼は大型高速炉の長寿命ラップ管材料として有望と考えられる。固溶強化、析出強化による高強度フェライト／マルテンサイト鋼のラップ管への適用性を評価するために、引張性質と衝撃特性の要求性能を満たすための材料設計と試作試験を行った。基本組成として0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.06N鋼を選定し、引張性質および衝撃特性におよぼすN, V, Nb量および熱処理条件の影響を検討した。

- (1) 高温における引張強さ、降伏強さは、熱処理条件による影響が大きく、一方、成分による影響は小さい。
- (2) 衝撃特性は成分、熱処理条件ともによる影響を大きく受け、とくに基本組成よりN, V, Nb量を高めるとDBTTが上昇することがわかった。
- (3) ラップ管の引張性質と衝撃特性に対する要求性能を満足させるためには、本研究において選定した基本組成と1050℃焼ならし、710℃焼もどし処理の熱処理条件が適当であると判断された。
- (4) 材料設計で選定した化学成分と熱処理条件を適用したラップ管の試作試験により、目標性能を上回る高強度と優れた衝撃特性を有するラップ管を得ることができた。

本報告書は、（株）神戸製鋼所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：630D151

事業団担当部課室および担当：燃料材料開発部 燃料材料技術開発室

瀬 下 一 郎

※1：（株）神戸製鋼所 材料研究所

※2：（株）神戸製鋼所 鉄鋼事業本部 長府北工場

Trial — Manufacturing and Evaluation Tests on New Material Wrapper Tube

Masayuki Fujiwara *¹

Toshio Nishida *¹

Shigeharu Nakamura *²

Mitsuru Mizoguchi *²

Abstract

The high Cr ferritic / martensitic steels with a superior resistance to swelling are thought to be preferable for the long - life wrapper tube materials of the large - scale FBR's. To evaluate the applicability of the ferritic / martensitic steels strengthened by solid - solution and carbide precipitation for the wrapper tubes, the material design to fulfill the requirements for the tensile and the impact properties, and the trial - manufacturing test were performed. The composition selected as a basis was 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.06N, and the effects of N, V, and Nb contents and the heat - treatment conditions on the tensile and the impact properties were examined.

- (1) The tensile and yield strength at elevated - temperatures was largely affected by the heat - treatment conditions, while the effect of the chemical compositions on the strength was small.
- (2) The impact properties were largely affected by both chemical composition and the heat - treatment condition. The higher contents of N, V, and Nb than those of the basic composition increased the DBTT.
- (3) To fulfill the requirements for the tensile and the impact properties of the wrapper tubes, the basic composition selected in this study and the heat - treatment condition, normalized at 1050°C and tempered at 710°C, were thought to be suitable.
- (4) From the manufacturing test of the wrapper tubes applying the selected chemical composition and the heat - treatment condition, the wrapper tubes having high strength and superior impact properties exceed the requirements were obtained.

Work performed by KOBE STEEL, LTD. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : ADS, Fuels and Materials Division, I.Seshimo

* 1 : Materials Research Laboratory, KOBE STEEL, LTD.

* 2 : Iron & Steel Production Division, Choufu - Kita Plant.

目 次

1. ま え が き	1
2. 材 料 設 計	2
2.1 板材の試作	3
2.2 評価試験	3
2.3 板材による評価試験結果のまとめ	5
3. ラ ッ パ 管 の 試 作、 評 価	6
3.1 試 作	6
3.2 試作ラ ッ パ 管 の 検 査 お よ び 評 価 試 験 結 果	8
4. ま と め と 今 後 の 検 討	10
5. あ と が き	11
6. 参 考 文 献	11
付録Ⅰ ラ ッ パ 管 試 作 工 程 の 概 要	
付録Ⅱ 試 作 ラ ッ パ 管 の 試 験 検 査 成 績 書	

表 図 写 真 一 覧 表

- 表 1 試作板材の化学成分
- 表 2 試作板材の硬さ測定結果
- 表 3. 1 試作板材の引張試験結果
(鋼種 A : 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.06N)
- 表 3. 2 試作板材の引張試験結果
(鋼種 B : 0.12C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.08N)
- 表 3. 3 試作板材の引張試験結果
(鋼種 C : 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.35V - 0.10Nb - 0.06N)
- 表 4. 1 シャルピー衝撃試験結果 (A)
- 表 4. 2 シャルピー衝撃試験結果 (B)
- 表 4. 3 シャルピー衝撃試験結果 (C)
- 表 5 試作ラップ管の化学成分分析結果
- 表 6 試作ラップ管の結晶粒度測定結果
- 表 7 試作ラップ管の非金属介在物測定結果
- 表 8 試作ラップ管の引張試験結果
- 表 9 試作ラップ管のシャルピー衝撃試験結果
-
- 図 1 板材の製造工程
- 図 2 試作板材の熱処理条件
- 図 3 引張試験片 (板材)
- 図 4 シャルピー衝撃試験片 (板材)
- 図 5 硬さと熱処理条件の関係
- 図 6. 1 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種 : A)
- 図 6. 2 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種 : B)
- 図 6. 3 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種 : C)
- 図 7. 1 シャルピー衝撃試験結果 (A : 1050℃ - 750℃)
- 図 7. 2 シャルピー衝撃試験結果 (A : 1050℃ - 725℃)
- 図 7. 3 シャルピー衝撃試験結果 (A : 1050℃ - 700℃)
- 図 7. 4 シャルピー衝撃試験結果 (A : 1050℃ - 675℃)
- 図 7. 5 シャルピー衝撃試験結果 (B : 1050℃ - 750℃)
- 図 7. 6 シャルピー衝撃試験結果 (B : 1050℃ - 725℃)

- 図7.7 シャルピー衝撃試験結果 (B : 1050℃ - 700℃)
- 図7.8 シャルピー衝撃試験結果 (B : 1050℃ - 675℃)
- 図7.9 シャルピー衝撃試験結果 (C : 1050℃ - 750℃)
- 図7.10 シャルピー衝撃試験結果 (C : 1050℃ - 725℃)
- 図7.11 シャルピー衝撃試験結果 (C : 1050℃ - 700℃)
- 図7.12 シャルピー衝撃試験結果 (C : 1050℃ - 675℃)
- 図8 DBTTと熱処理条件の関係
- 図9 引張試験片の形状 (ラップ管)
- 図10 シャルピー衝撃試験片 (ラップ管)
- 図11 試作ラップ管パッド部縦断面の硬さ分布
- 図12 試作ラップ管パッド部縦断面中心部における厚さ方向の硬さ分布
- 図13 試作ラップ管の引張試験結果
- 図14 試作ラップ管のシャルピー衝撃試験結果

- 写真1.1 試作板材の縦断面組織 (鋼種A)
- 写真1.2 試作板材の縦断面組織 (鋼種B)
- 写真1.3 試作板材の縦断面組織 (鋼種C)
- 写真2 試作ラップ管の組織

1. ま え が き

将来の大型高速炉における経済性向上を図るために燃料の長寿命化は重要な因子の一つであり、この実現のためには高温強度と耐スエリング性に優れ、長期間の使用に耐える炉心材料の開発が必要である。フェライト系鋼はオーステナイト系鋼に比べて耐スエリング性が格段に優れており長寿命炉心材料の候補として有望であるが高温強度が劣る欠点があり、この改善が必要である。昭和58年度より高速炉炉心材料開発計画に基づき、高Crフェライト系鋼の開発が開始され、炭化物析出型フェライト／マルテンサイト鋼最適成分選定のための試作、評価試験が進められており、昭和59、61年度には被覆管の試作が行われた。本計画で対象とされる炭化物析出型フェライト／マルテンサイト鋼はボイラ用鋼等と同じく炭窒化物析出強化、固溶強化によって高温強度を改善するもので、別途計画で開発が進められている粉末冶金による酸化物分散強化型フェライト鋼のような飛躍的な高温強度向上は期待できないが、従来の製鋼技術、製管技術が適用可能であるので経済性が高く、とくに炉心材料の中で大型部材であり、燃料被覆管に比べて温度、内圧の低い条件で使用されるラップ管への適用性は高い。そこで、昭和62年度研究では被覆管への適用を主目標に開発してきた高Crフェライト／マルテンサイト鋼の中から数種の成分を選定しラップ管への適用性を検討すると共に、高速原型炉サイズのラップ管を試作、評価した。¹⁾この前年度研究ではラップ管の要求特性として高温における短時間強度、クリープ強度、および衝撃特性とした。しかし、ラップ管の場合、クリープ変形を支配する応力は冷却材より受ける内圧であり、この応力は低いので、クリープ強度よりむしろ耐震設計から要求される高温における短時間強度が重要な因子となることから、本研究では短時間強度と衝撃特性に重点をおいた材料設計とラップ管試作を実施した。まず、これまでの開発成果から有望成分選定のための材料設計と評価試験を行い、その結果より成分、製造条件を決めて、ラップ管の試作、評価を行った。

2. 材料設計

高Cr フェライト/マルテンサイト鋼の燃料被覆管への適用を主目的とした場合にはクリープ強度を重視してきたが、ラップ管では短時間強度と衝撃特性に目標をおく。本年度研究におけるこれらの特性の目標値として以下のものがあたえられている。

引張性質：

Temperature (°C)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
RT	≥60	≥70	>10
650°C	≥30	≥40	>7

衝撃特性：

$$\text{DBTT} \leq 20^\circ\text{C}$$

高Cr フェライト/マルテンサイト鋼の短時間強度は、基本的には熱処理条件で決まる。しかし、高温長時間使用中の強度低下を極力抑えるためには長時間強度も考慮に入れた成分を選定するのがよいと考えられる。すなわち、固溶強化に有効な Mo, W の添加、析出強化に有効な V, Nb の添加、C, N の最適量の添加、および熱処理の組合せにより強度向上と衝撃特性の確保を図る。これまでの開発成果より、以下の知見が得られている。^{1) 2)}

(1) 衝撃特性からは、 δ フェライト量はできるだけ少なくし、マルテンサイト単相が望ましい。また、Mo 添加より W 添加の方が有利である。

(2) これまで検討した Mo の最大添加量は 2%、W の最大添加量は約 2.7% であるが、0.4 Mo + 1.8 W (Mo 当量 : Mo + 1/2 W = 1.3%) の場合と 0.2 Mo + 2.7 W (Mo 当量 = 1.55%) の場合で、650°C の短時間強度および 700°C のクリープ破断強度には大きな差がない。したがって、W 添加量は 2% 程度以下、また Mo 当量は約 1.5% 程度で十分と判断される。

Mo 当量が多くなると金属間化合物 (Laves 相) の析出が著しくなり、衝撃特性を劣下させる。

(3) 硬さ、短時間強度には C+N 量の影響が大きく、多いほど硬さ、短時間強度は上昇する。しかし、あまり多くすると加工性、衝撃特性を損なうので、C+N 量は約 0.2% 以下に抑えるのが望ましい。

以上のことから、本年度研究では、基本組成として、Mo 当量を 1.5% 程度とし、Mo 量を約 0.5%、W 量を約 2.0% とする。C+N 量は 0.2% 程度とし、N は 0.06% 程度添加して Mo-N による強化を図る。また V、Nb を添加してこれらの炭窒化物析出強化も利用する。韌性向上のために Ni を少量添加する。この基本組成に対して、N 量を増加させた場合の効果、また炭窒

化物生成元素である V, Nb を増量させた場合の効果を検討するための成分を加えた下記の 3 鋼種について、板材の試作と評価試験を行った。

(A) 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.06N

(B) 0.12C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.08N

(C) 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.35V - 0.10Nb - 0.06N

2.1 板材の試作

上記 (A), (B), (C) 3 鋼種の板材を試作した。製造工程を図 1 に示す。

真空高周波炉で溶製した 100 kg 鋼塊を鍛造してスラブを製作し、これに熱間圧延、冷間圧延を施し 15 mm 厚さの板材に仕上げた。最終熱処理として図 2 に示す 4 条件の焼ならし、焼もどし処理を施した。焼ならし温度は 1050℃一定とし、焼もどし温度を 750～675℃の 4 水準とした。

(1) 1050℃ × 30 min ・ AC → 750℃ × 30 min ・ AC

(2) 1050℃ × 30 min ・ AC → 725℃ × 30 min ・ AC

(3) 1050℃ × 30 min ・ AC → 700℃ × 30 min ・ AC

(4) 1050℃ × 30 min ・ AC → 675℃ × 30 min ・ AC

焼ならし温度は高いほど強度に有利であるが、結晶粒が大きくなり、延性、靱性には不利となる。また、焼ならし温度をあまり高くすると実機ラップ管の熱処理時の変形、酸化が大きくなり問題となる。このため、焼ならし温度は 1050℃を選定し、焼もどし温度を変化させることによって強度と衝撃特性の調整を検討した。

A, B, C 3 種の板材の化学成分分析結果を表 1 に示す。ほぼ、目標通りの成分となっているが、C+N 量は目標 0.2% に対して 0.18～0.19% とやや低くなっている。

光学顕微鏡で観察した各板材の縦断面の組織を写真 1.1～1.3 に示す。3 鋼種で差はみられず、いずれも焼もどしマルテンサイト相に数%程度の δフェライト相が混在した組織となっている。

2.2 評価試験

3 種の各板材について 4 条件の熱処理を施した合計 12 種の試験材について、硬さ測定、引張試験、衝撃試験を行い、これらの諸性質と成分、熱処理条件の関係を調べた。硬さ測定は組織観察と同じ板材の縦断面について荷重 10 kgf のビッカース硬度計を用いて行った。引張試験は図 3 に示す平行部 6 mm φ の丸棒試験片を用いて、RT, 600, 650, 700℃の 4 温度で行った。

板の圧延方向を試験片の軸方向に合わせた。ひずみ速度は、0.2%耐力測定まで0.5%/min、耐力測定後7.5%/minとした。衝撃試験は図4に示す厚さ5mmの1/2サイズの2mm Vノッチシャルピー衝撃試験片を用いて実施した。

試験片は、板材の圧延方向から切欠位置が圧延方向に直角になるように採取した。

1) 硬さ測定結果

硬さ測定結果を表2および図5に示す。焼もどし温度が高くなるにつれて硬さは低下する。焼もどし温度750℃では3鋼種ともほぼ同じ硬さになるが、これより低い焼もどし温度では基本組成としたA鋼の硬さがN量を高めたB鋼、V、Nb量を高めたC鋼の硬さに比べてやや低くなっている。

2) 引張試験結果

引張試験結果を図3.1～3.3に示す。RTおよび650℃における引張性質と焼もどし温度との関係を図6.1～6.3に示す。

硬さと同様、RTおよび650℃における引張強さ、0.2%耐力は焼もどし温度が高くなるほど低下する。伸びの焼もどし温度に対する変化は小さいが、焼もどし温度が高くなるほどやや大きくなる傾向がみられる。RTの引張性質はいずれの焼もどし温度でもラップ管の目標値を十分に上まわっている。650℃の場合、伸びは目標値を十分上まわっているが、引張強さ、耐力は焼もどし温度が750℃で目標値かつかつとなる。それ以下の焼もどし温度では目標値に対して余裕のある強度となっている。RTの引張強さ、耐力は、硬さの場合と同様、基本組成のA鋼に対してNを増量したB鋼とV、Nbを増量したC鋼でやや高くなる。しかし、650℃ではA、B、C鋼の強度と伸びに差は認められない。したがって、ラップ管の機械的性質として重要な650℃の短時間強度に対しては、検討した成分範囲では差がなく基本組成で十分であり、これよりN、V、Nbを高める必要はないと判断される。また、焼もどし温度は750℃以下にする必要がある。

本鋼のようなマルテンサイト鋼の強度は、焼もどしマルテンサイト組織中の転位密度に支配される。したがって、本研究でも引張強さ、耐力におよぼす熱処理条件の影響は顕著に認められた。一方、成分の影響については、熱処理条件の影響が大きいため検討した程度の範囲ではその効果がほとんど認められなかったものと考えられる。

3) 衝撃試験結果

各温度で実施したシャルピー衝撃試験結果を表4.1～4.3および図7.1～7.12に示す。これらの結果から求めたDBTT（エネルギー遷移温度； vT_{re} ）と焼もどし温度の関係を図8に示す。焼もどし温度750℃の場合、基本組成のA鋼のDBTTに対してB、C鋼のDBT

Tがやや低くなるが、それ以下の焼もどし温度では逆にB, C鋼の方が高くなる。とくに、N量を高めたB鋼のDBTTは焼もどし温度700、675℃では目標値(20℃以下)を満足しない。靱性の観点からは、基本組成に対してN、V、Nbの増量は不利となる。

衝撃特性については使用中の劣化、すなわち高温、高速中性子照射下での脆化挙動を含めて評価する必要があり、このためには照射試験が必要である。長寿命燃料のラップ管で考えられている使用条件600℃×5 yearsに相当する単純な加熱の場合、前研究で検討したごとく、本研究で選定した基本組成よりMo当量が多く、 δ フェライト量を多く含み、脆化の起き易い0.04C-0.5Ni-11Cr-1.8Mo-0.23V-0.05Nb-0.06N鋼でもDBTTの上昇は50℃程度であり、またこのDBTTの上昇の程度は初期のDBTTによらずほぼ一定であった。¹⁾したがって、本研究で選定した基本組成の鋼についても使用寿命に相当する単純な加熱によるDBTTの上昇は約50℃以下の範囲と推定され、また初期のDBTTは可能な限り低くしておくのが有利と考えられる。

2.3 板材による評価試験結果のまとめ

以上に示したごとく、ラップ管の引張性質と衝撃特性に対する目標値を満足するための成分と熱処理条件の検討を行った。引張性質の成分による影響は小さく、熱処理条件に敏感である。検討した成分範囲では、1050℃焼ならしの場合、750℃以下の焼もどしにより引張性質の目標値を満たすことが明かとなった。一方、衝撃特性については熱処理条件と共に成分による影響も大きく、Nの増量およびV、Nbの増量はDBTTを上昇させ、これらの鋼ではDBTTの目標値を満たすためには700℃以上の焼もどし温度が必要となる。基本とした成分では、検討した焼もどし温度の範囲で、衝撃特性の目標を満足することができた。

以上の結果から、本研究で目標とした引張性質と衝撃特性を満足させるため基本組成としたA鋼の成分が適当と判断され、この熱処理条件として1050℃焼ならし、710℃焼もどしが適当と判断された。この条件で、板材の評価試験結果から、硬さHV320程度(図5より)、650℃の引張強さ約46 kgf/mm²、0.2%耐力約37 kgf/mm²(図6.1より)、1/2サイズ試験片によるシャルピー衝撃試験のDBTTが約0℃(図8より)が達成できることが予想される。

これらの条件を適用してラップ管の試作を実施した。

3. ラッパ管の試作、評価

材料設計で求めた成分、熱処理条件を適用して、原型炉用サイズを目標としたパッド付きラッパ管3本の試作を行い、製管性を評価すると共に、うち1本については破壊試験を行い機械的性質を調べた。

3.1 試作

試作仕様の概要を以下に示す。

- ① 数量： 3体、うち1体破壊試験用、2体は納入。
- ② 材質： 0.14C - 0.5Ni - 11Cr - 0.5Mo - 2.0W - 0.25V - 0.07Nb - 0.06N
- ③ 形状： 正六角形継目無鋼管（パッド部付き）
- ④ 寸法： （単位：mm）

外側対面間距離（管部）	110.6
外側対面間距離（パッド部）	114.8 +0.60 - 0
内側対面間距離	104.6 ±0.4
肉厚（管部）	3.00 ±0.20
肉厚（パッド部）	5.10 +0.50 - 0
パッド部長（頂部）	40 +7 - 1
パッド部長（底部）	80 ±5
内側角部曲率半径	4.5 ±0.5R
全長	3020 +10 - 0
パッド部位置（下端よりパッド中心まで）	1695 ±5

ラッパ管試作工程の概要を付録Iに示す。真空高周波誘導炉により溶製した鋼塊から鍛造、ピレット加工、熱間押出により継目無押出素管を製作した。素管から熱処理と抽伸の繰り返しにより六角管にする前の所定肉厚の丸管（最終素管）を製作し、この段階で超音波探傷検査を行った。これから多段連続抽伸法によって丸管のパッド加工ならびに六角管への引き抜き加工を行って所定の寸法に仕上げた。最終熱処理は、材料設計の結果より1050℃・40min・AC → 710℃・40min・ACの焼ならし、焼もどし処理を適用した。この際、内面側はArシールとし、外面側

は大気雰囲気とした。熱処理後の表面を手入れした後、各種の検査、試験を行った。検査、試験の仕様の概要を以下に示す。

① 寸法等

1) 寸法測定

試作管全数について寸法測定を行い、その測定値が前記の試作仕様に示した値を満足すること。

2) 真直度

試作管の真直度はいかなる位置をとっても1.00 mm以下で、また局部曲がり、ねじれがないことを目標とする。

3) ねじれ検査

試作管全数について、定盤上に並べ各辺について六角管片端（下端）2点を固定して、他端（上端）2点の定盤からの浮き上がりをすきまゲージで測定し、その差が0.50 mm以下になることを目標とする。

② 表面品質

1) 表面粗さ

試作管全数について内外面の表面粗さをJIS標準試験片（JIS B 0659）と対比して肉眼による観察を行い、その表面粗さが12.5 S以下とする。

③ 欠陥健全性

1) 超音波探傷検査

試作管の最終素管全数の全面、全長にわたって水浸式超音波パルス法によって超音波探傷を行い、管内外表面の管軸方向につけられた下記寸法の標準人工欠陥信号と対比して、これ以上の欠陥信号を認めてはならない。

深さ : \leq 素管肉厚の7%

長さ : \leq 12.7 mm

幅 : \leq 1.5 mm

2) 外観検査

試作管全数の内外表面には、油、酸化物等の有害な付着物がないこととする。また、肉眼で認められる割れ、および深さ0.3 mm以上の穴や疵がないこととする。

④ 機械的性質

1) 引張試験

試作管1本の管部およびパット部の軸方向から試験片を採取し、JIS Z 2241およびJIS

G0567に準じて、RTおよび600、650、700℃における引張試験を行い、性質が下記の値を満足することを目標とする。

Temperature (°C)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
RT	≥ 60	≥ 70	> 10
650℃	≥ 30	≥ 40	> 7

試験片：管の長さ方向より JISZ2201 13号 B 試験片 (図9) を採取する。

パッド部の試験片については管部の肉厚 3 mm まで頂部を削除する。

試験片の採取位置および個数：パッド部は 2 辺から RT および高温引張試験片 4 本を採取する。管部はパッド部と対応させて引張試験片 4 本を採取する。計 8 本の試験片を採取する。

2) 衝撃試験

試作管 1 本について、パッド部および管部の管軸方向から厚さ 2.5 mm の 1/4 サイズの 2 mmV ノッチシャルピー衝撃試験片 (図10) を 10 本採取し、これらを用いて延性、脆性遷移曲線を求める。

⑤ 金相試験

1) 介在物試験

試作管 1 本の縦断面上下 2 カ所について、ASTM E 45 - A の規定にしたがって非金属介在物を測定し、結果を報告する。

2) 結晶粒度試験

試作管 1 本の横断面上下 2 カ所について、ASTM E 112 により結晶粒度を測定し、光学顕微鏡組織と共に報告するものとする。

3) 硬さ試験

試作管 1 本のパッド斜部端から管部へ 20 mm の範囲 (パッド中央部から両側 120 mm の範囲) における板厚中心部について、軸方向の硬さ分布を荷重 10 kgf のビッカース硬度計により求める。また、パッド中央部について、厚さ方向の硬さ分布を求める。

3.2 試作ラップ管の検査および評価試験結果

原型炉用サイズのラップ管 3 本を試作した。それぞれ 63 WFK No 1、2、3 と区別する。

真空溶解によるインゴットおよび試作ラップ管余長部から採取した試料について行った化学成分の分析結果を表 5 に示す。分析値は設定した範囲の中に入り、ほぼ目標通りの成分となって

いる。

試作ラップ管3本すべてについて寸法等の検査を行った結果を付録Ⅱ（試作ラップ管の試験検査成績書）に示す。ほぼ目標値を達成することができた。

次に試作したラップ管3本のうちの1本（No.2）を切断して試験片を採取し、金相および機械的性質試験を実施した。

No.2ラップ管の上下2カ所の縦断面について行った非金属介在物の測定結果を表7に示す。大きな介在物は認められず、十分に清浄と判断される。同位置の横断面について行った結晶粒度測定結果を表6に、また光学顕微鏡で観察した組織を写真2に示す。結晶粒度はNo.8～9であり、比較的均一で微細な結晶粒が得られている。組織はほぼ焼もどしマルテンサイト単相となっている。

パッド部断面の軸方向硬さ分布測定結果を図11に、パッド部中央部の厚さ方向の硬さ分布測定結果を図12に示す。パッド部の軸方向、厚さ方向ともHV320～325程度でほぼ均一であり、この値は板材の結果から予想された値とほぼ同等である。

引張試験結果を表8および図13に示す。管部とパッド部の引張性質はほぼ同等であり、これらの650℃における引張強さは44～46 kgf/mm²、0.2%耐力は35～37 kgf/mm²であり、目標値を十分に上まわっている。

シャルピー衝撃試験結果を表9および図14に示す。衝撃特性も管部とパッド部で差はみられない。また、試験片サイズが小さいことにもよるが、DBTTは-38℃（エネルギー遷移温度 vT_{re} 。破面遷移温度 vT_{rs} では-45℃となる。）と十分に低い値となっており、これも目標値を満たしている。

4. まとめと今後の検討

高速炉燃料の長寿命化の一環として、耐スエリング性の優れた高Crフェライト系鋼のラップ管への適用性を評価するために、引張性質と衝撃特性の要求性能を満たす材料設計とその結果にもとづく原型炉用サイズのラップ管試作と評価試験を実施した。検討結果をまとめると以下の通りである。

- 1) これまでの開発成果から、高Crフェライト/マルテンサイト鋼の高温強度の改善に有効な固溶強化元素、析出強化元素としてC、N、Mo、W、V、Nbを添加した $0.14\text{C} - 0.5\text{Ni} - 11\text{Cr} - 0.5\text{Mo} - 2.0\text{W} - 0.25\text{V} - 0.07\text{Nb} - 0.06\text{N}$ を基本組成として選定し、さらにこれよりN量を高めた鋼、V、Nb量を高めた鋼を加えて、板材の試作と評価試験を行った。高温における引張性質は、成分による影響は比較的小さく、熱処理条件による影響が大きい。1050℃で焼ならし処理を行った場合、750℃以下で焼もどし処理を行うことによってラップ管の引張性質の要求値を満足させることができる。
- 2) 衝撃特性は成分、熱処理条件とも影響が大きい。基本組成よりN、V、Nb量を高めた鋼は、基本組成の鋼よりDBTTが高くなる。
- 3) 本研究で提示されたラップ管の引張性質と衝撃特性の要求値を満たすためには、検討した範囲内では基本組成の成分が適当であり、またこの熱処理条件として1050℃焼ならし、710℃焼もどしが最適と判断された。
- 4) 上の条件でラップ管3本の試作試験を実施した結果、従来の製造設備と製造技術ではほぼ目標仕様を満足するラップ管を得ることができた。また、試作ラップ管の引張性質、衝撃特性は、板材の評価結果から予測される値に近く、いずれも要求性能を十分に上まわることができた。
- 5) 今後は開発鋼の高温長時間加熱中、あるいは高温照射下における引張性質、衝撃特性の変化を明らかにして行く必要がある。ラップ管の要求性能である引張性質と衝撃特性は本研究で明らかにしたごとく熱処理条件による影響が大きく、高温使用中の変化を把握した上で、加工性、溶接性を考慮して必要な場合には本研究で選定した成分よりさらに合金元素の添加量を下げることが可能と考えられる。

5. あとがき

高温強度、耐スエリング性の優れた長寿命炉心材開発の一環として、高 Cr フェライト／マルテンサイト鋼のラップ管への適用性を評価した。

本研究では、ラップ管の目標性能すなわち引張性質と衝撃特性の要求値が明確にされ、板材の試作、評価によりこの目標性能を満たすための成分、製造条件を策定した。この成果を反映させてラップ管を試作し、評価した結果、寸法等の、要求仕様ならびに機械的性質の要求性能を満足するものを得ることができた。今後は、高温照射下で使用中の性質変化を把握し、高 Cr フェライト／マルテンサイト鋼の長寿命ラップ管の確立を図る必要がある。

6. 参考文献

- 1) 新材料ラップ管試作試験 (IA) : PNC SJ905888-006 (1988).
- 2) 将来材料の性能試験-改良炭化物析出強化型フェライト鋼被覆管と板材の試作 (A) : PNC SJ905887-003 (1987)

表1 試作板材の化学成分 (wt%)

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N
A	0.13	0.060	0.62	0.0016	0.0018	0.52	11.60	0.56	2.01	0.25	0.07	0.048
B	<u>0.12</u>	0.018	0.64	0.0013	0.0017	0.50	11.54	0.55	2.02	0.25	0.07	<u>0.071</u>
C	0.14	0.024	0.63	0.0016	0.0020	0.50	11.54	0.55	2.03	<u>0.35</u>	<u>0.11</u>	0.050

表2 試作板材の硬さ測定結果

Mark	Temper 条件	Hardness, HV 10 kgf					
		1	2	3	4	5	Average
A	A1 (750℃)	304	302	299	306	308	304
	A2 (725℃)	315	318	315	315	315	316
	A3 (700℃)	327	329	319	326	325	325
	A4 (675℃)	336	332	334	332	336	334
B	B1 (750℃)	308	302	309	305	308	306
	B2 (725℃)	323	317	322	319	314	319
	B3 (700℃)	332	333	334	334	336	334
	B4 (675℃)	343	343	346	350	344	345
C	C1 (750℃)	298	297	298	297	303	299
	C2 (725℃)	319	317	315	319	318	318
	C3 (700℃)	336	333	330	333	332	333
	C4 (675℃)	340	337	339	339	343	340

表 3.1 試作板材の引張試験結果
 (鋼種 A : 0.14C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.25V-0.07Nb-0.06N)

符 号 (焼もどし温度)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	破 断 位 置
1 (750°C)	RT	78.5	96.3	18.3	67.0	A
		79.1	95.8	18.0	66.3	A
	600	40.1	49.8	23.7	88.3	A
		38.5	49.1	25.0	88.1	A
	650	32.4	41.4	23.0	90.5	A
		29.0	41.2	25.3	91.5	A
	700	24.3	31.1	22.3	92.4	A
		24.2	31.5	22.7	92.8	A
2 (725°C)	RT	82.6	99.9	17.0	67.0	A
		83.8	99.7	17.7	65.8	A
	600	42.7	52.3	24.3	87.0	A
		43.3	52.5	23.3	86.6	A
	650	35.0	44.3	22.3	88.7	A
		35.5	44.3	23.0	88.9	A
	700	26.4	33.1	26.0	91.2	A
		26.6	32.8	24.0	91.2	A
3 (700°C)	RT	86.6	104.0	17.3	66.4	A
		83.3	102.8	18.3	66.4	A
	600	44.6	54.7	21.7	85.8	A
		46.3	56.2	20.3	85.3	A
	650	38.8	47.3	20.3	86.7	A
		38.1	47.5	20.3	87.4	A
	700	29.6	35.8	20.3	90.4	A
		28.3	35.3	22.0	90.6	A
4 (675°C)	RT	89.9	106.0	16.7	65.5	A
		89.6	105.2	16.7	67.0	A
	600	46.3	56.9	19.3	84.7	A
		47.1	56.9	19.3	85.1	A
	650	38.9	48.0	20.0	86.6	A
		39.9	48.6	20.0	87.7	A
	700	28.8	36.4	20.0	90.9	A
		29.1	35.4	20.0	89.9	A

表 3.2 試作板材の引張試験結果
 (鋼種 B : 0.12C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.25V-0.07Nb-0.08N)

符 号 (焼もどし温度)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	破 断 位 置
1 (750°C)	RT	79.2	96.9	18.3	66.4	A
		79.4	96.3	17.3	67.5	A
	600	39.0	50.7	22.7	86.4	A
		38.9	51.1	20.7	85.7	A
	650	32.3	40.9	22.0	89.8	A
		32.6	41.2	24.0	90.1	A
	700	24.9	32.2	20.3	90.0	A
		23.0	31.7	22.7	91.9	A
2 (725°C)	RT	83.5	100.5	18.3	66.5	A
		84.8	101.7	18.0	66.7	A
	600	42.6	52.9	22.7	85.5	A
		43.7	54.4	20.7	85.1	A
	650	34.9	43.4	21.0	89.8	A
		35.3	44.6	22.7	89.2	A
	700	27.0	34.4	21.0	91.2	A
		26.8	33.6	21.7	91.3	A
3 (700°C)	RT	89.4	106.4	18.0	67.0	A
		88.4	104.4	17.0	66.2	A
	600	46.6	56.0	20.0	84.3	A
		46.2	56.6	20.0	84.8	A
	650	39.1	48.4	19.3	88.4	A
		39.8	48.7	19.3	86.5	A
	700	29.9	36.7	20.0	89.3	A
		30.5	37.9	19.3	89.4	A
4 (675°C)	RT	92.9	110.2	18.0	64.5	A
		90.1	108.3	17.3	65.6	A
	600	48.9	58.8	19.3	84.8	A
		49.5	58.7	19.3	84.5	A
	650	40.4	49.6	19.7	86.6	A
		40.9	50.5	20.0	89.5	A
	700	28.6	37.0	20.0	89.5	A
		28.1	37.6	19.0	91.0	A

表 3.3 試作板材の引張試験結果
 (鋼種 C : 0.14C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.35V-0.10Nb-0.06N)

符 号 (焼もどし温度)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	破 断 位 置
1 (750°C)	RT	77.5	93.2	17.7	66.4	A
		77.8	94.1	17.7	65.8	A
	600	35.0	47.8	23.7	87.2	A
		38.1	48.3	23.7	86.9	A
	650	29.2	39.9	25.3	91.2	A
		30.2	40.0	23.0	89.9	A
	700	21.2	29.0	22.7	92.1	A
		20.9	29.6	23.0	91.8	A
2 (725°C)	RT	82.0	99.5	17.7	65.5	A
		81.2	100.1	17.0	64.4	A
	600	44.5	53.9	21.7	84.6	A
		42.4	53.2	22.3	88.7	A
	650	33.9	43.5	23.3	89.0	A
		35.1	44.4	22.3	88.7	A
	700	26.1	32.6	20.7	91.0	A
		24.7	33.0	23.3	91.4	A
3 (700°C)	RT	87.4	105.0	17.7	66.5	A
		87.6	106.3	18.0	66.3	A
	600	46.0	55.8	21.3	83.0	A
		45.8	55.9	21.0	84.1	A
	650	38.8	43.9	23.0	88.1	A
		38.8	47.6	21.7	88.4	A
	700	28.3	35.8	21.7	90.4	A
		27.5	36.0	24.3	89.8	A
4 (675°C)	RT	89.2	108.6	17.3	65.6	A
		92.0	108.7	17.7	64.2	A
	600	48.5	58.8	20.7	83.7	A
		49.5	58.6	21.0	84.1	A
	650	40.1	49.3	20.0	87.1	A
		40.7	49.5	20.0	86.8	A
	700	29.7	36.7	19.3	89.9	A
		29.2	36.3	21.0	90.0	A

表 4.1 シャルピー衝撃試験結果

(A : 0.14C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.25V-0.07Nb-0.06N)

試験 温度 (°C)	1050°C・½h・AC 750°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 725°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 700°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 675°C・½h・AC	
	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)
-78	/		/		/		/	
-60	0.6	100	0.6	100	0.8	90	0.4	100
-40	1.2	85	1.2 1.0	82 86	1.0	80	1.0	88
-20	1.2 3.0	71 32	1.8 1.8	62 67	1.2 1.2	75 81	1.8 1.6	55 70
0	3.7 4.2	23 0	3.2 3.2	26 33	1.8 2.7	63 20	1.8 2.3	67 38
25	5.5 4.7	0 3	4.7	3	4.4 4.7	14 0	4.2 3.9	7 9
60	6.3	0	6.0	0	5.5	0	5.5	0
100	6.0	0	5.7	0	5.5	0	5.5	0
160	/		/		/		/	
240	/		/		/		/	

表 4.2 シャルピー衝撃試験結果

(A : 0.12C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.25V-0.07Nb-0.08N)

試験 温度 (°C)	1050°C・½h・AC 750°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 725°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 700°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 675°C・½h・AC	
	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)
-78	0.6	100						
-60	1.0	85	0.8	90	0.6	100	0.4	100
-40	1.4 1.2	84 86	1.4	77	0.8	86	0.8	88
-20	3.0 3.0	48 41	1.6	72	1.6 1.6	75 76	1.2	78
0	4.2	21	2.5 2.5	45 48	2.0 1.6 1.6	66 68 76	1.6 1.6	66 77
25	5.5	0	5.2 4.4	0 13	4.4	15	3.7 2.7	16 26
60	6.3	0	5.7	0	5.5	0	5.2	0
100	5.7	0	6.5	0	5.5	0	6.0	0
160			6.3	0			5.7	0
240								

表 4.3 シャルピー衝撃試験結果

(C : 0.14C-0.5Ni-11Cr-0.5Mo-2.0W-0.35V-0.10Nb-0.06N)

試験 温度 (°C)	1050°C・½h・AC 750°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 725°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 700°C・½h・AC		1050°C・½h・AC 675°C・½h・AC	
	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)
-78	0.6	100						
-60	1.0	86	0.4	100	0.4	100	0.4	100
-40	1.4	72	0.8	90			0.6	90
-20	3.0	34	0.8	84	0.8	86	1.2	84
	1.8	67	1.4	77	1.2	83		
0	3.9	0	1.8	57	1.6	66	1.6	61
	3.4	16	2.0	54	1.4	73	1.4	60
25	4.4	7	3.7	9	3.2	8	3.0	15
					3.4	18		
60	6.0	0	5.2	0	4.4	0	4.4	0
100	5.5	0	5.7	0	6.0	0	4.9	0
160			5.5	0	5.2	0	5.7	0
240							5.5	0

表5 試作ラッパ管の化学成分分析結果 (wt%)

区 別	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	Al	N
範 囲	0.11 ~0.17	≦ 0.10	0.30 ~0.70	≦ 0.030	≦ 0.030	0.30 ~0.70	10.0 ~12.2	0.30 ~0.70	1.70 ~2.30	—	0.20 ~0.30	0.04 ~0.10	≦ 0.03	0.04 ~0.08
目 標	0.14	—	0.50	—	—	0.50	11.2	0.50	2.00	—	0.25	0.07	—	0.06
インゴット上部	0.14	0.05	0.50	0.003	0.004	0.49	11.3	0.46	2.06	0.02	0.23	0.06	0.02	0.05
インゴット下部	0.14	0.05	0.49	0.002	0.004	0.50	11.2	0.45	2.07	0.02	0.24	0.05	0.02	0.06
製 品	0.14	0.05	0.49	0.002	0.003	0.50	11.3	0.45	2.07	0.02	0.22	0.06	0.02	0.06

表6 試作ラッパ管の結晶粒度測定結果
(ASTM E112 Plate 1)

試料：Top側横断面

視野	粒度番号
1	8.0
2	8.0
3	8.5
4	8.5
5	8.5
6	8.0
7	8.0
8	8.0
9	8.5
10	8.0
平均粒度	8.2

試料：Bottom側横断面

視野	粒度番号
1	8.5
2	9.0
3	9.0
4	9.0
5	9.0
6	8.5
7	8.5
8	9.0
9	9.0
10	8.5
平均粒度	8.8

表7 試作ラッパ管の非金属介在物測定結果
(ASTM E45 Method A Plate 1)

試料		介在物種類			
		A	B	C	D
Top側縦断面	THIN	—	1	—	4
	HEAVY	—	—	—	—
Bottom側縦断面	THIN	—	—	—	3
	HEAVY	—	—	—	—

表8 試作ラッパ管の引張試験結果

試験温度 (°C)	管 部			パッド部		
	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)
RT	85.9	102.7	13.2	82.3	99.7	10.4
600	46.0	54.8	19.6	44.1	52.3	12.0
650	37.1	46.2	20.4	35.8	44.1	15.4
700	28.7	36.2	19.2	28.5	35.3	17.0

表9 試作ラップ管のシャルピー衝撃試験結果

試験温度 (°C)	管 部		パッド部	
	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (kgf-m)	脆性破面率 (%)
-120	0.7	90	0.7	90
-100	0.9	90	0.9	90
-80	0.9	80	0.7	85
-60	0.9	65	0.9	65
-50	1.0	55	1.0	55
-40	1.2	35	1.2	45
-20	1.6	15	1.4	20
0	1.8	0	1.8	0
+20	2.0	0	1.8	0
+50	1.8	0	1.8	0

Specimen : 2.5^t × 10^w × 55^L mm

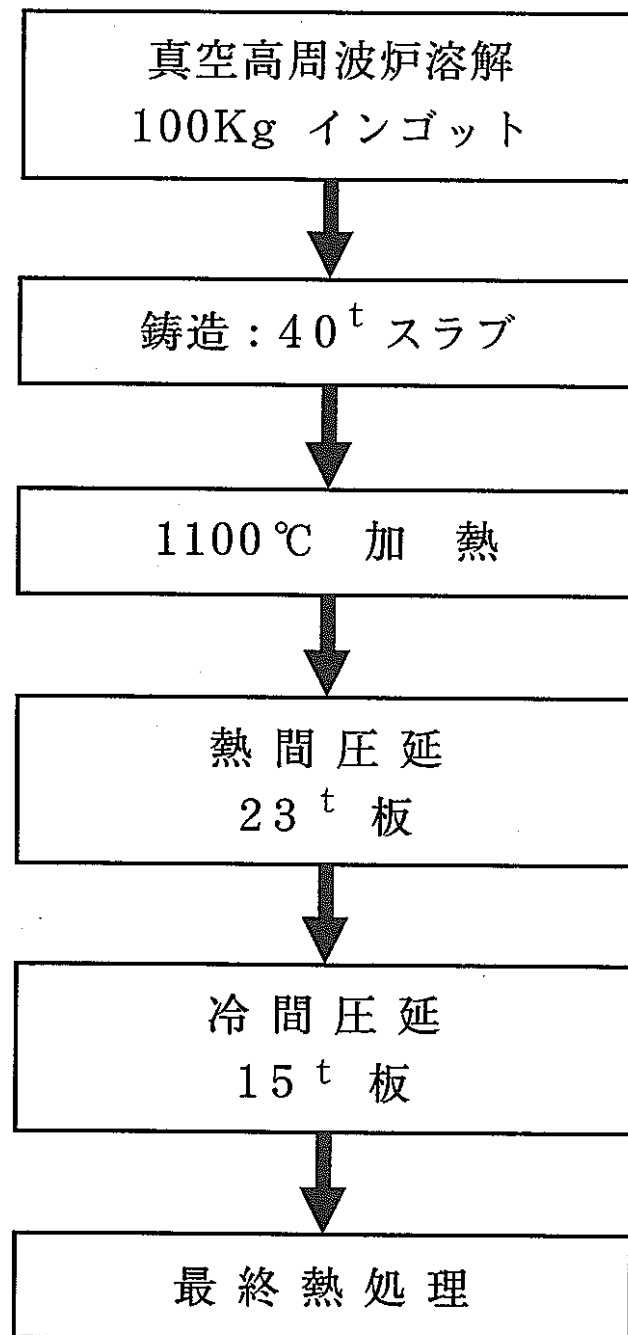


図1 板材の製造工程

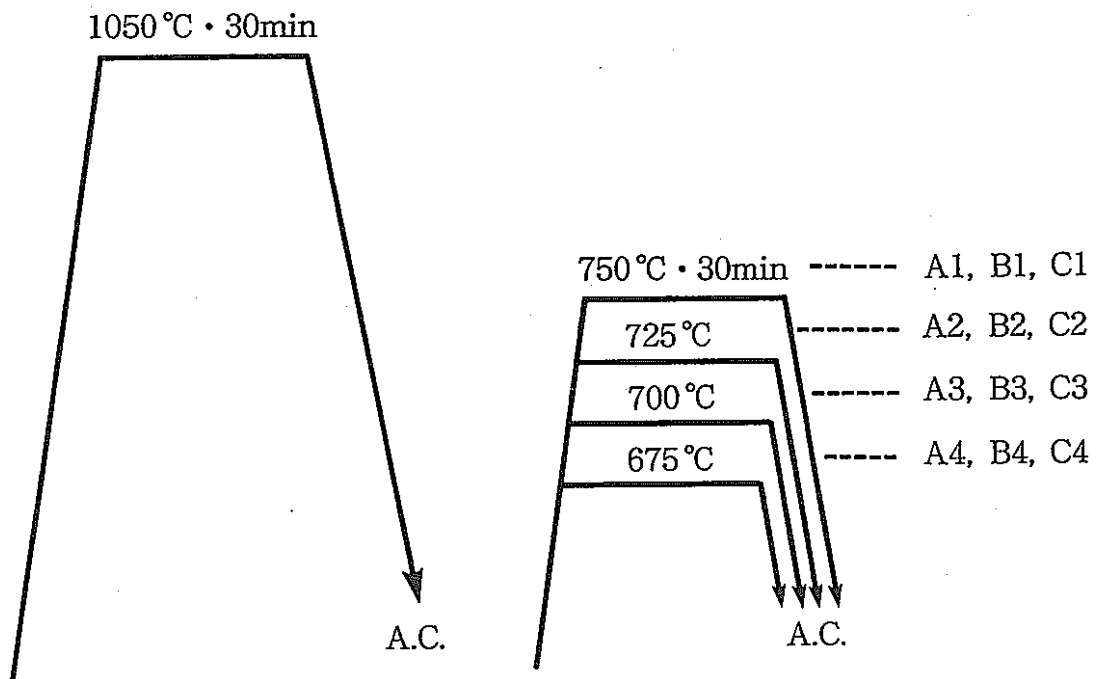


図2 試作板材の熱処理条件

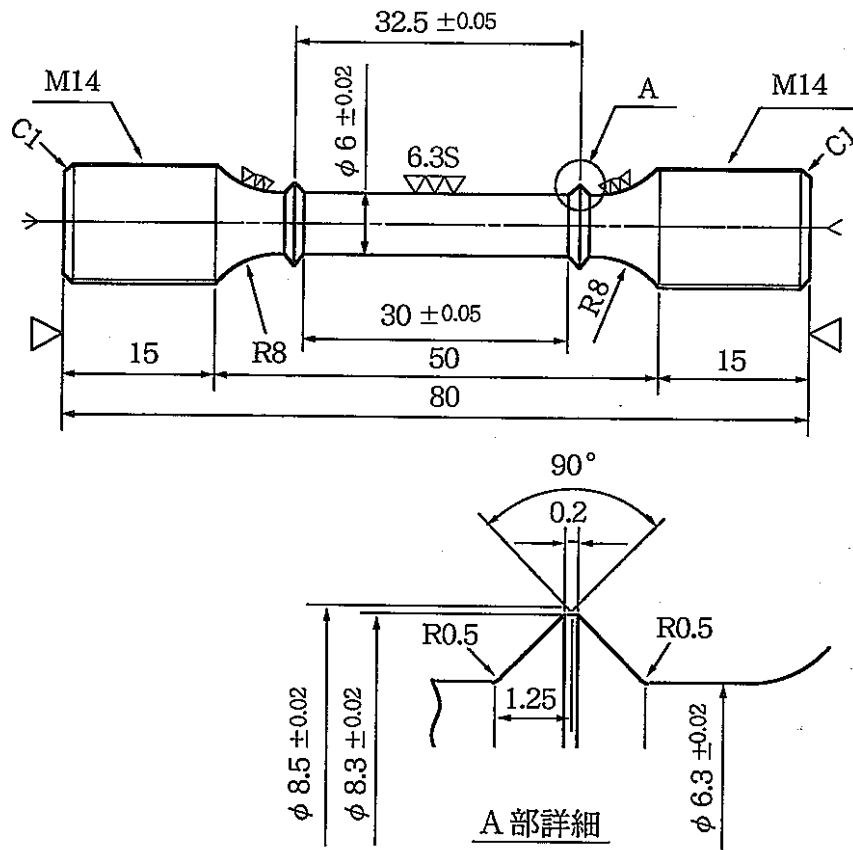


図3 引張試験片 (板材)

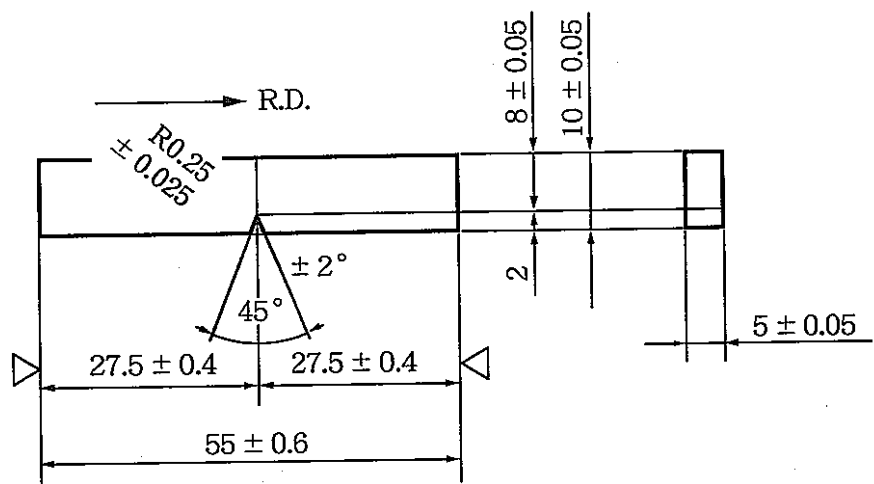


図4 シャルピー衝撃試験片（板材）

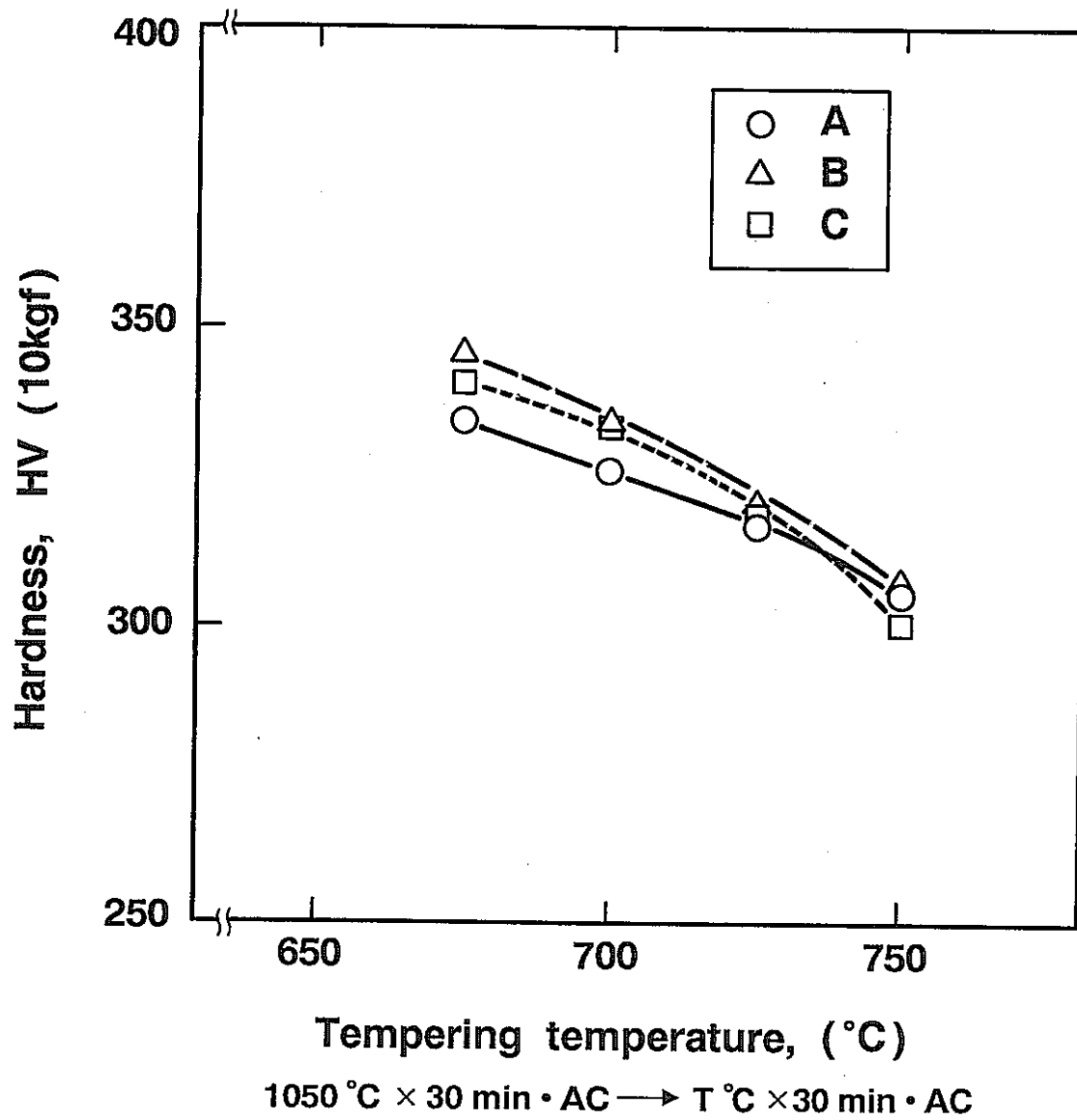


図5 硬さと熱処理条件の関係

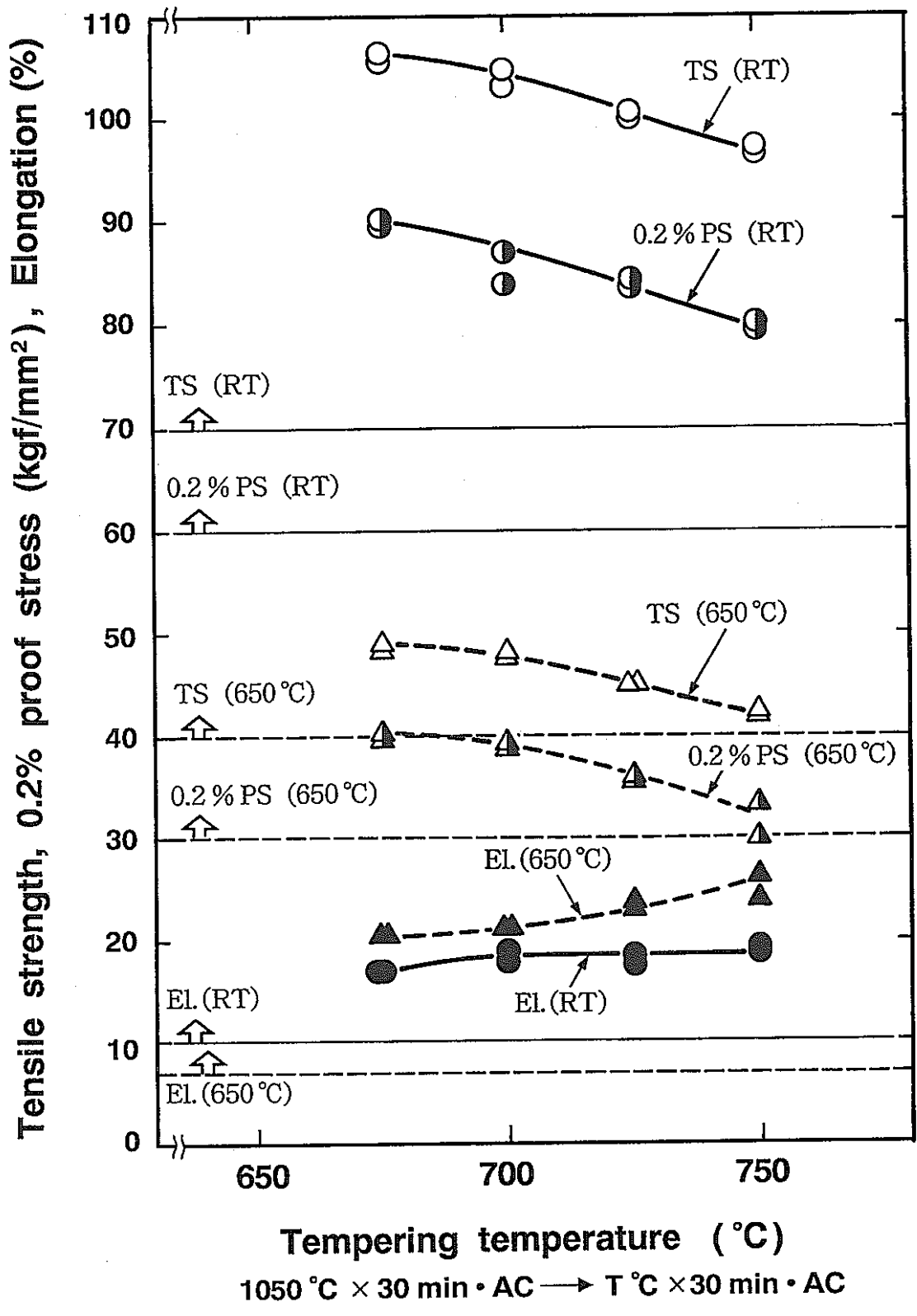


図 6.1 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種 A)

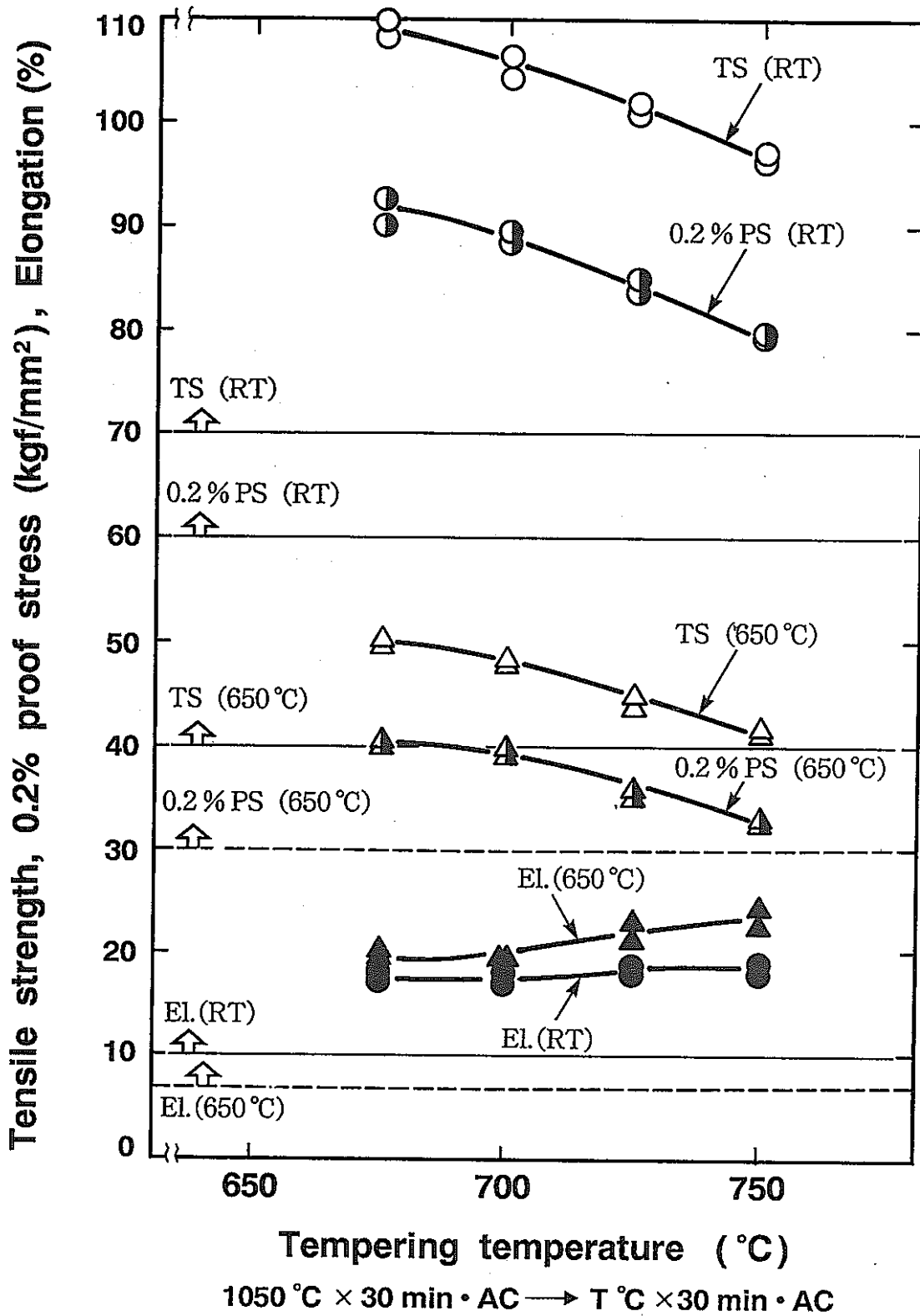


図6.2 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種B)

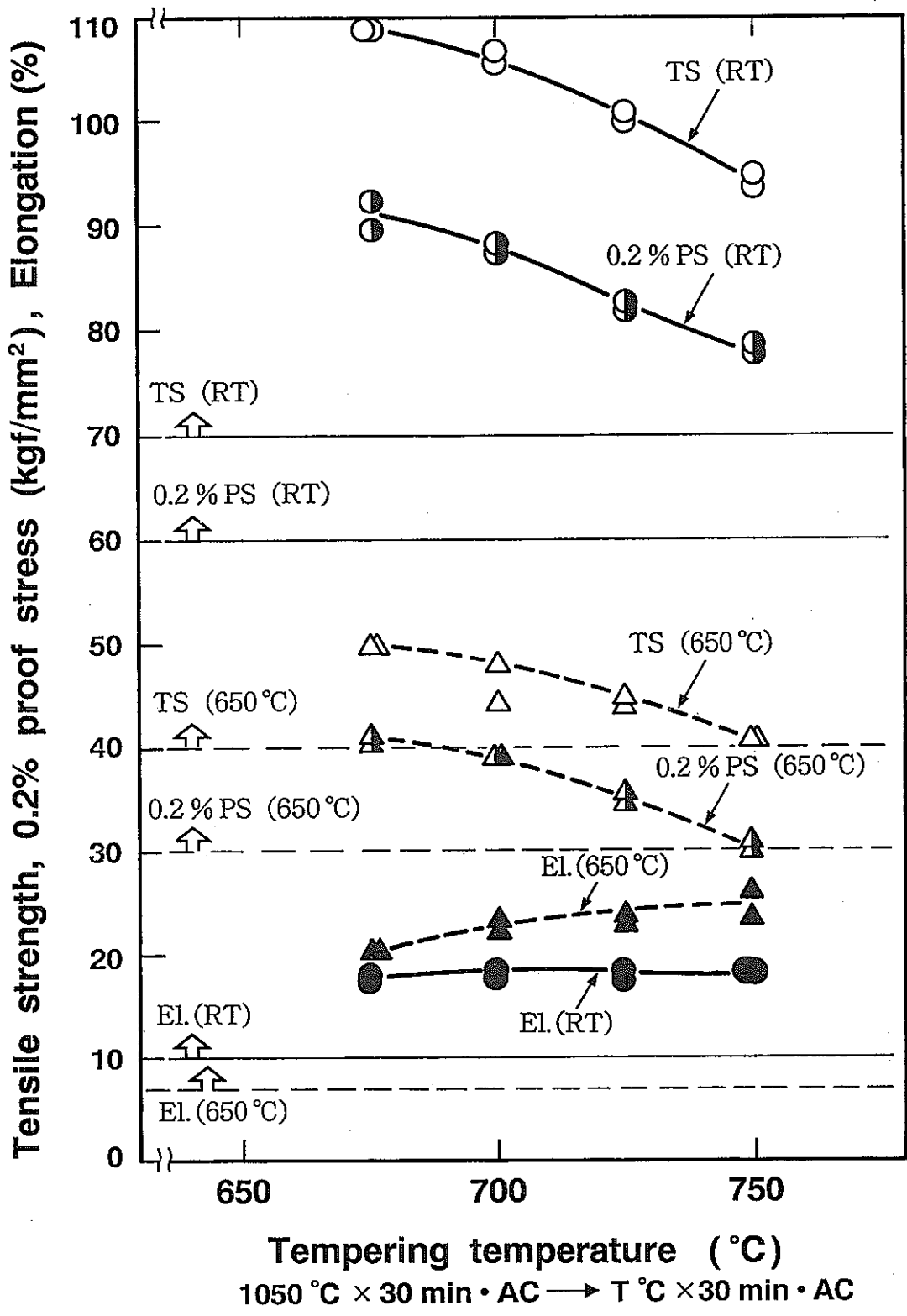


図6.3 引張性質と焼もどし温度の関係 (鋼種C)

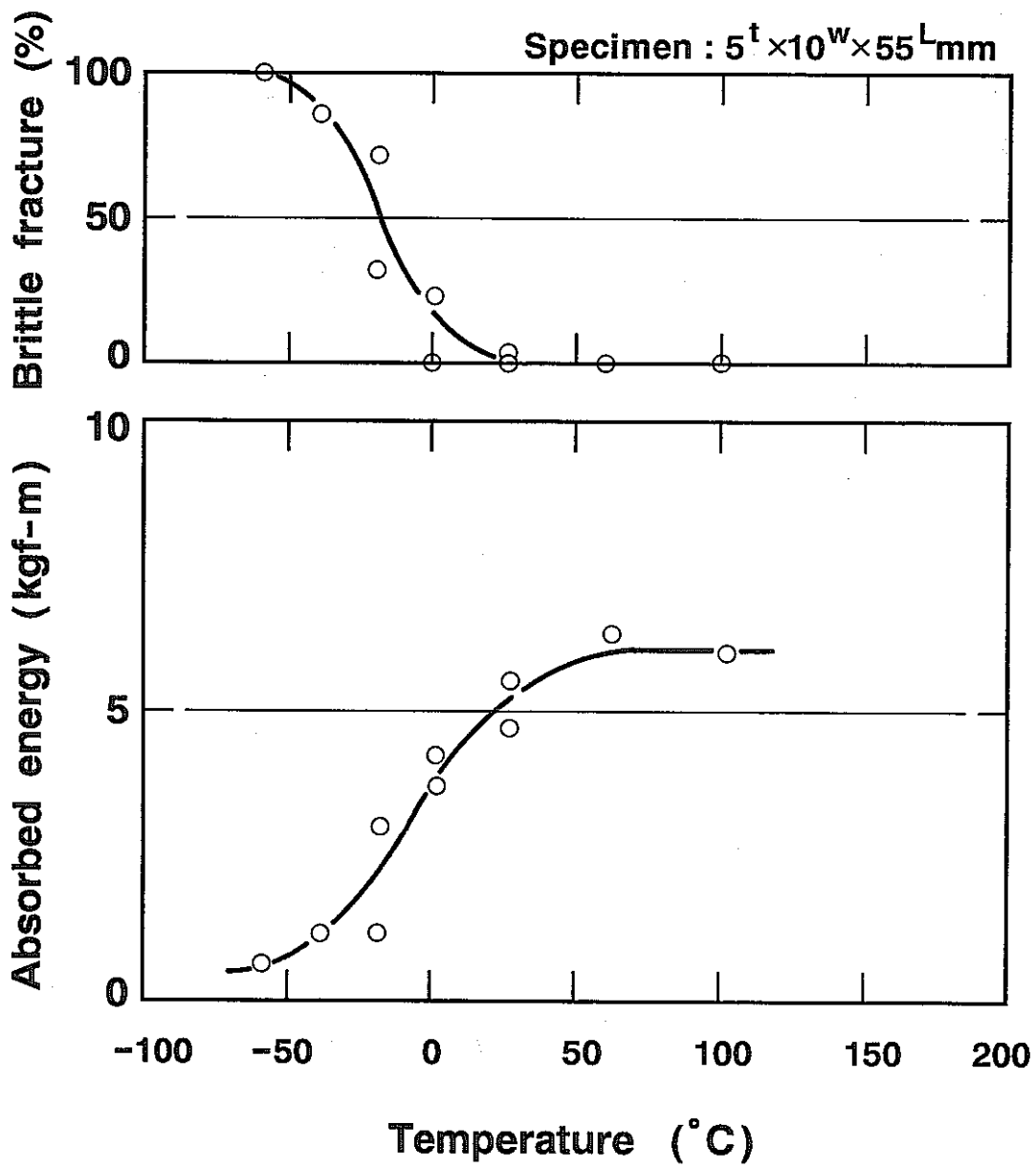


図 7.1 シャルピー衝撃試験結果
(A : 1050 °C → 750 °C)

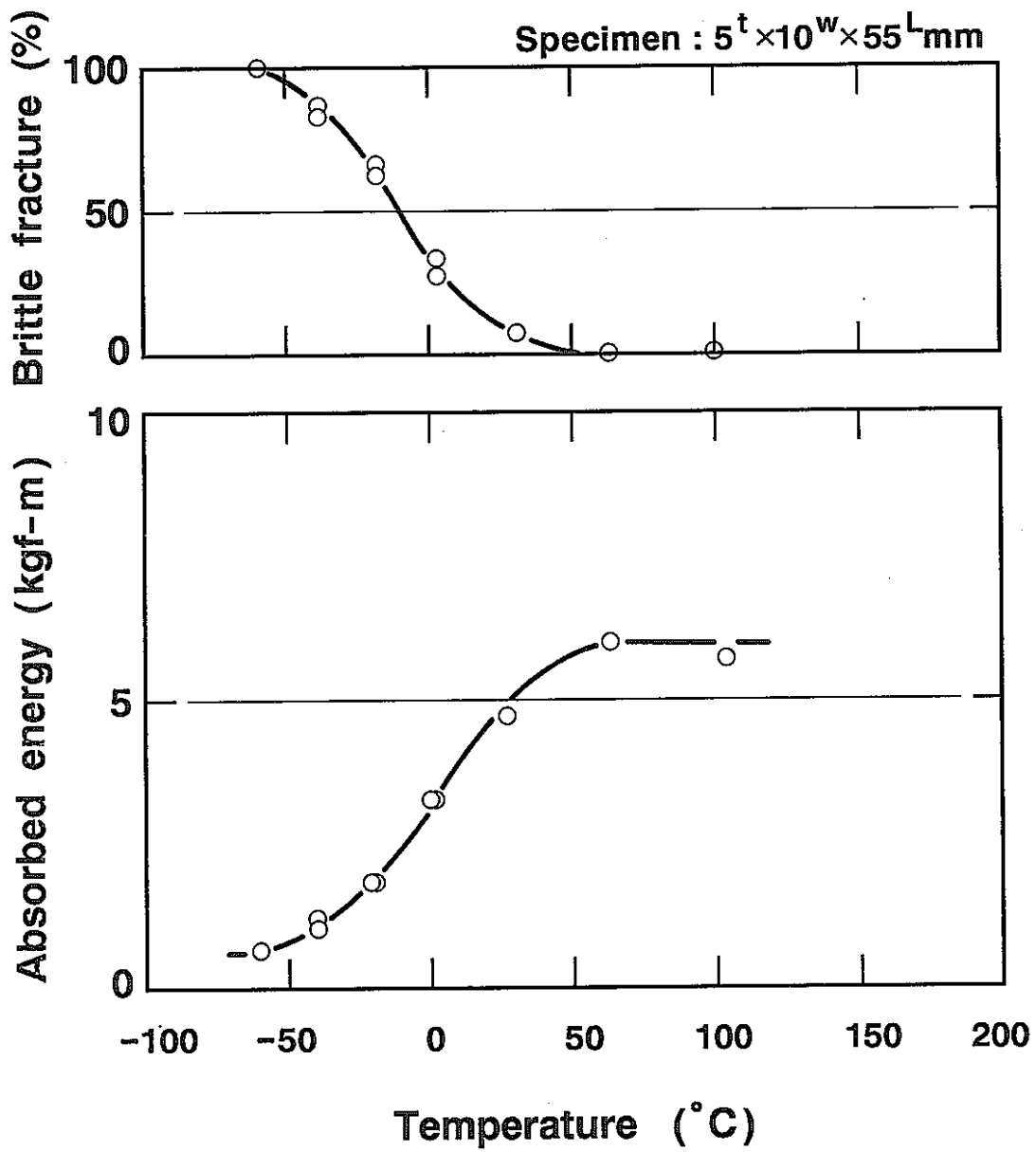


図 7.2 シャルピー衝撃試験結果
(A : 1050 °C → 725 °C)

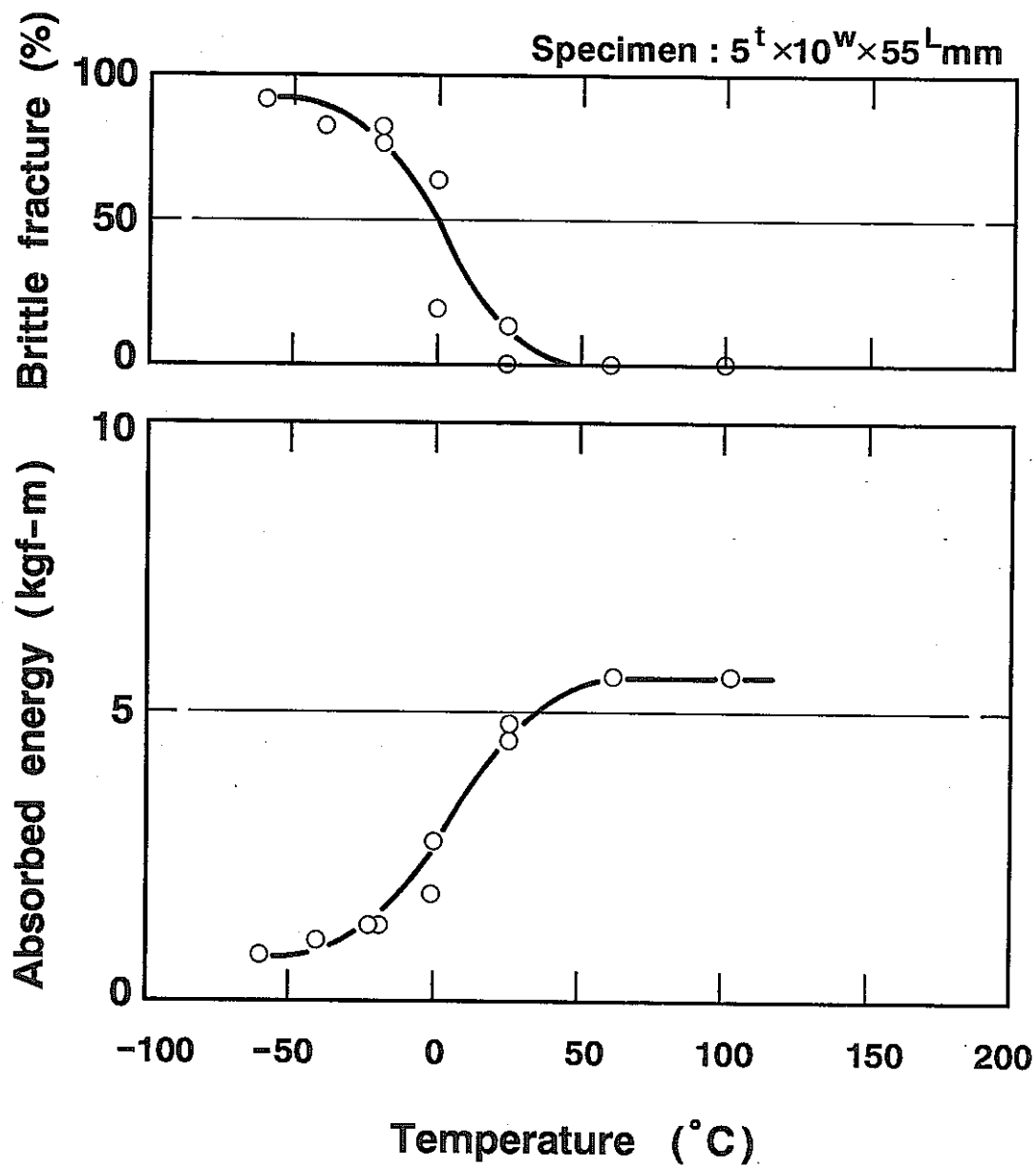


図 7.3 シャルピー衝撃試験結果
 (A : 1050°C → 700°C)

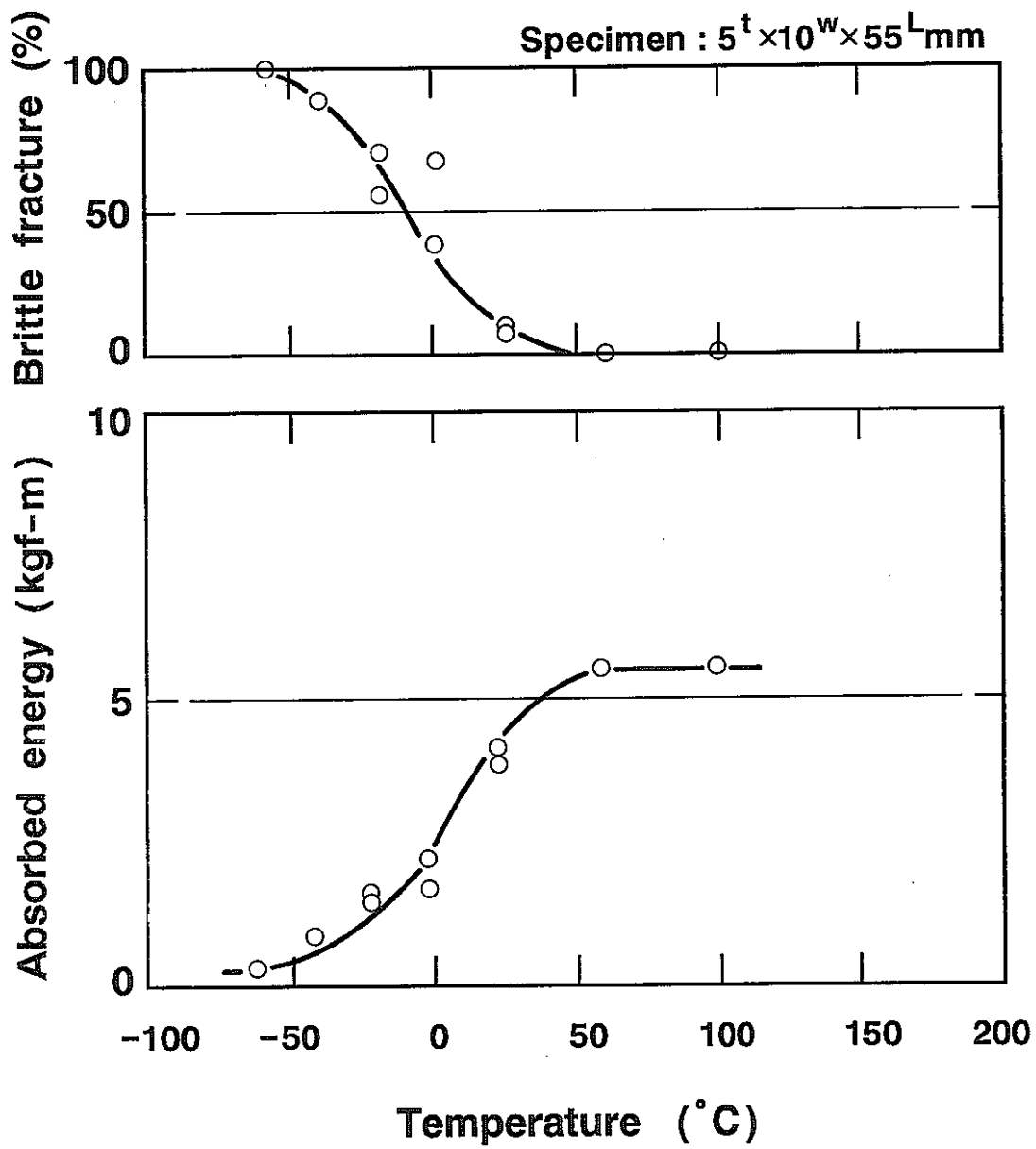


図7.4 シャルピー衝撃試験結果
(A : 1050 °C → 675 °C)

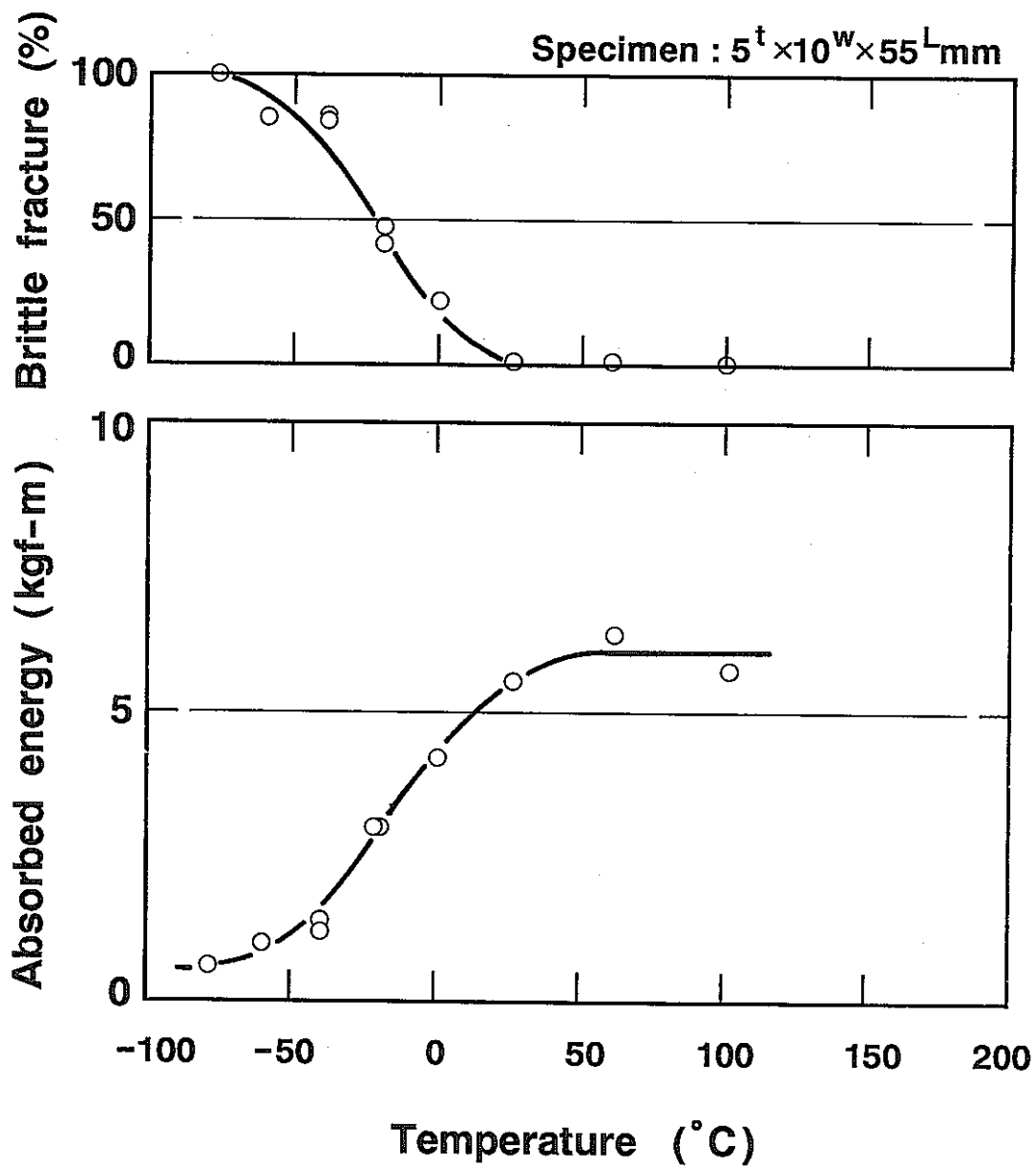


図 7.5 シャルピー衝撃試験結果
(A : 1050 °C → 750 °C)

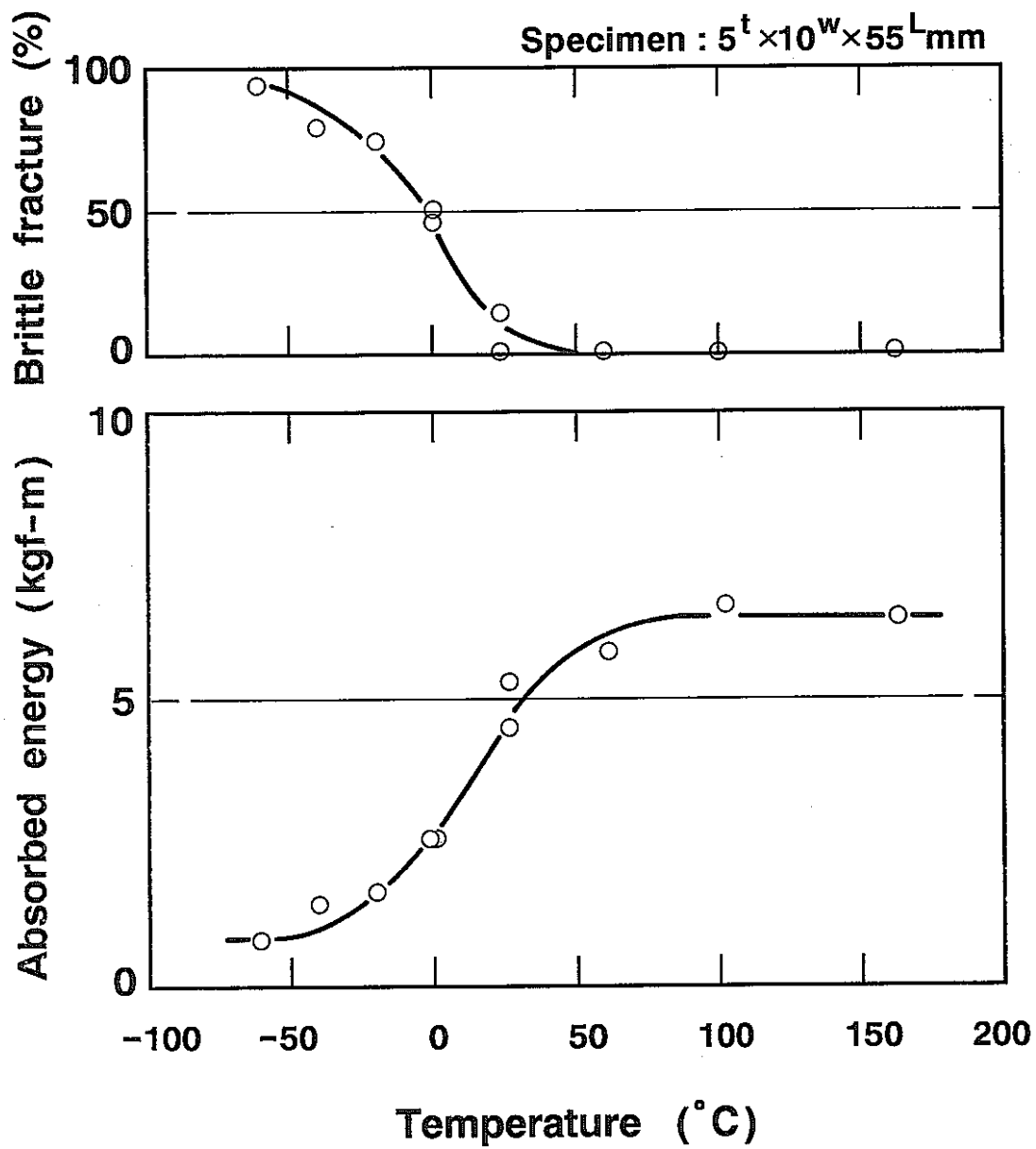


図 7.6 シャルピー衝撃試験結果
(B : 1050 °C → 725 °C)

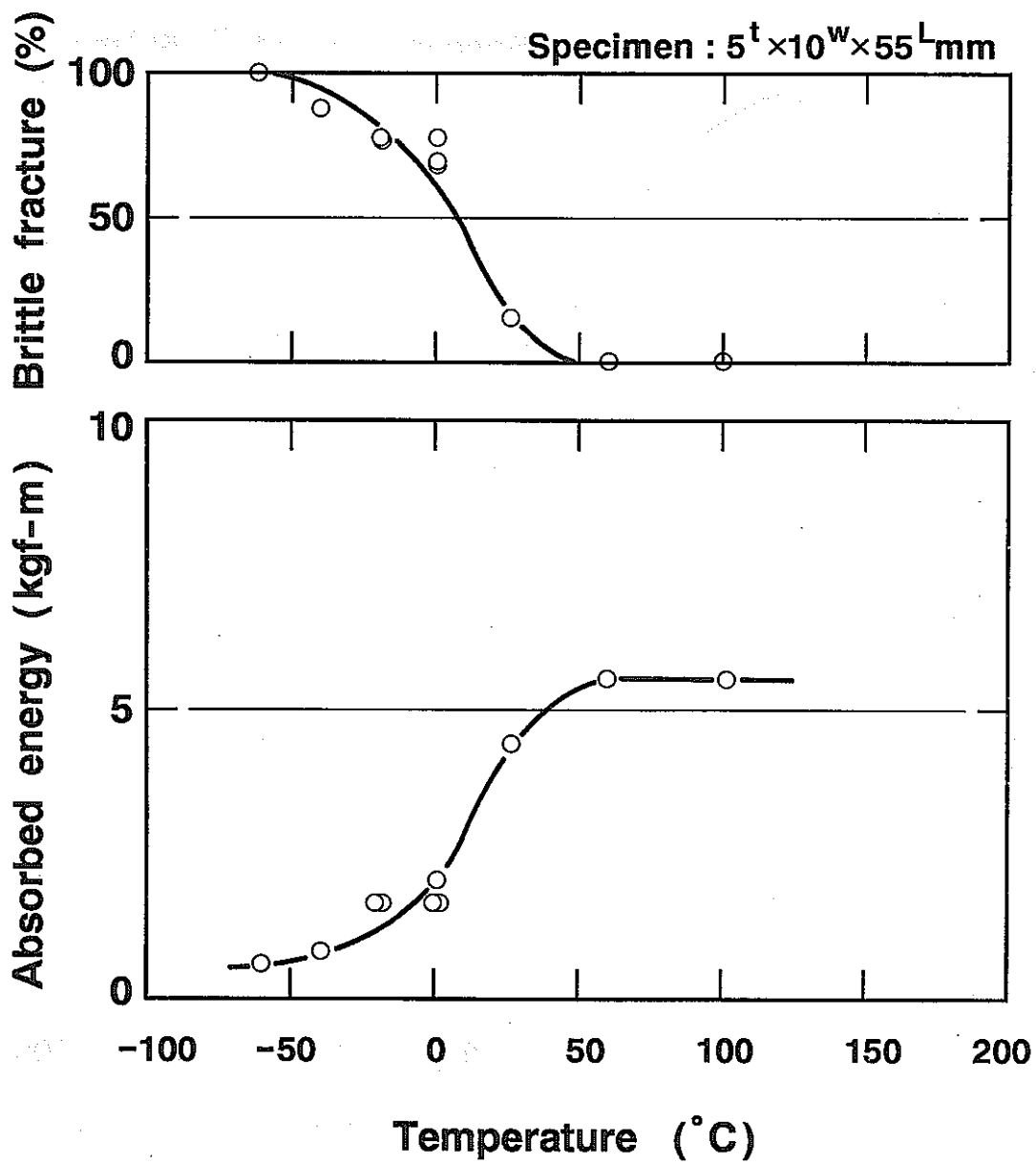


図7.7 シャルピー衝撃試験結果
(B : 1050 °C → 700 °C)

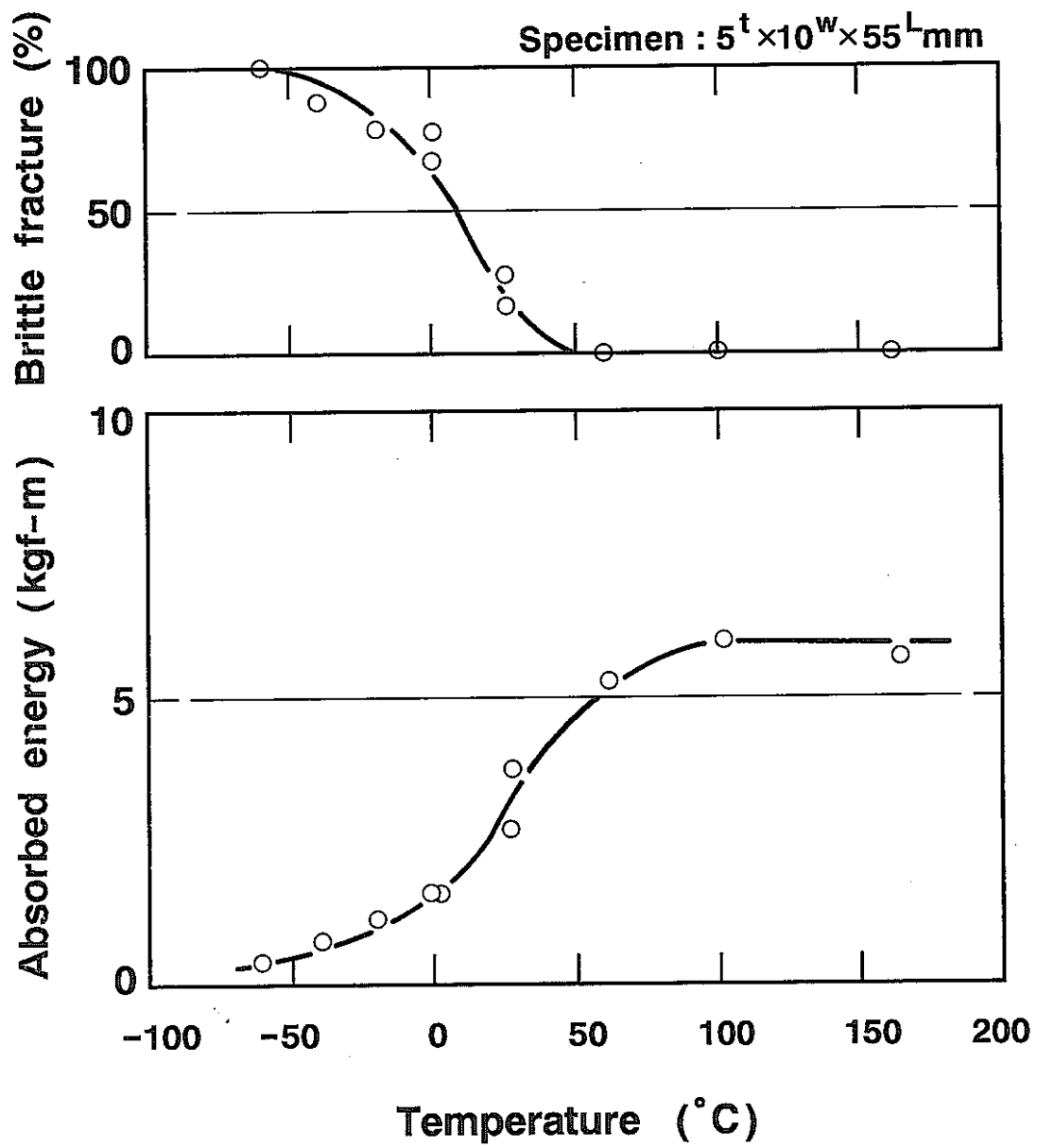


図 7.8 シャルピー衝撃試験結果
(B : 1050 °C → 675 °C)

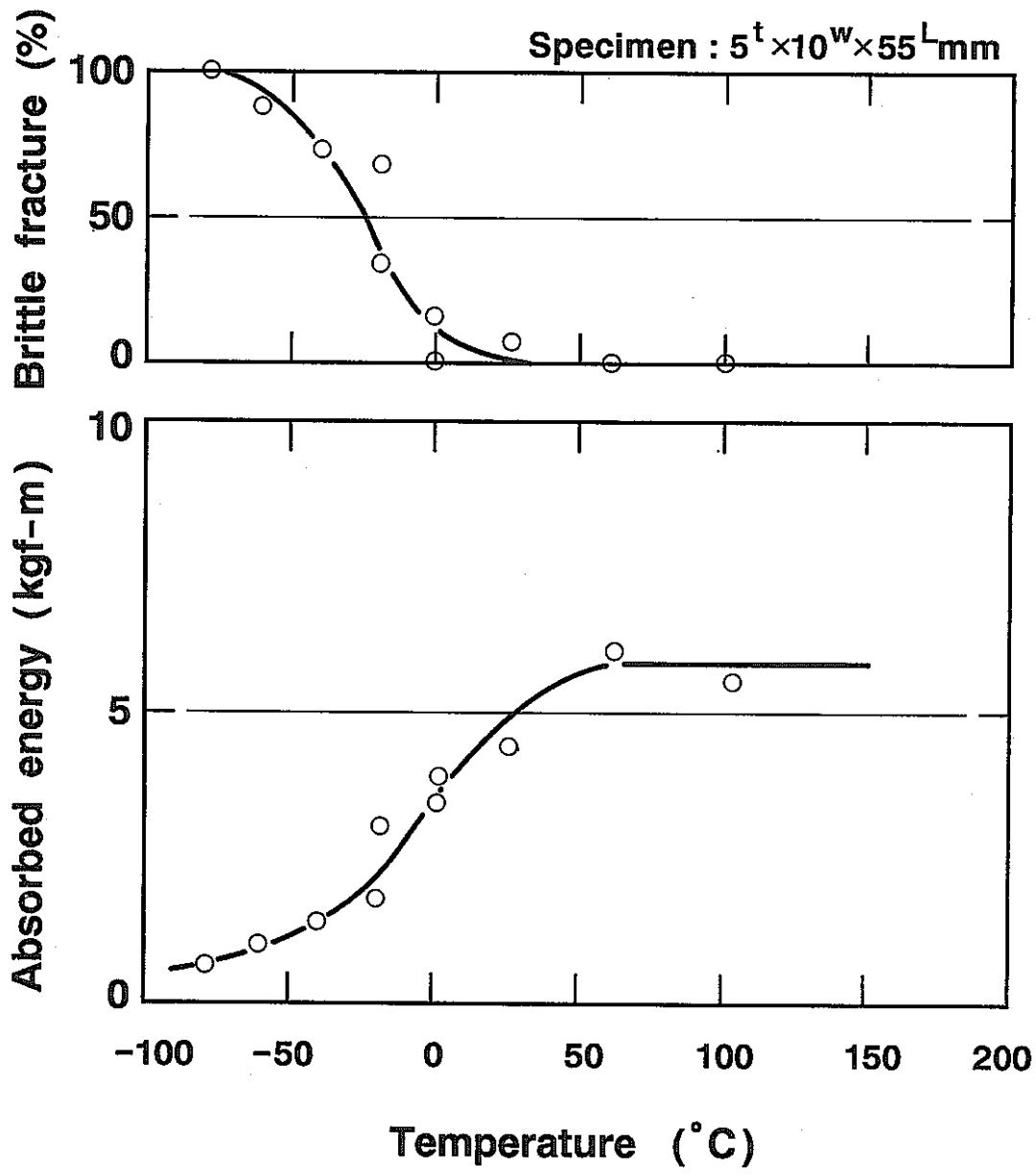


図 7.9 シャルピー衝撃試験結果
(C : 1050 °C → 750 °C)

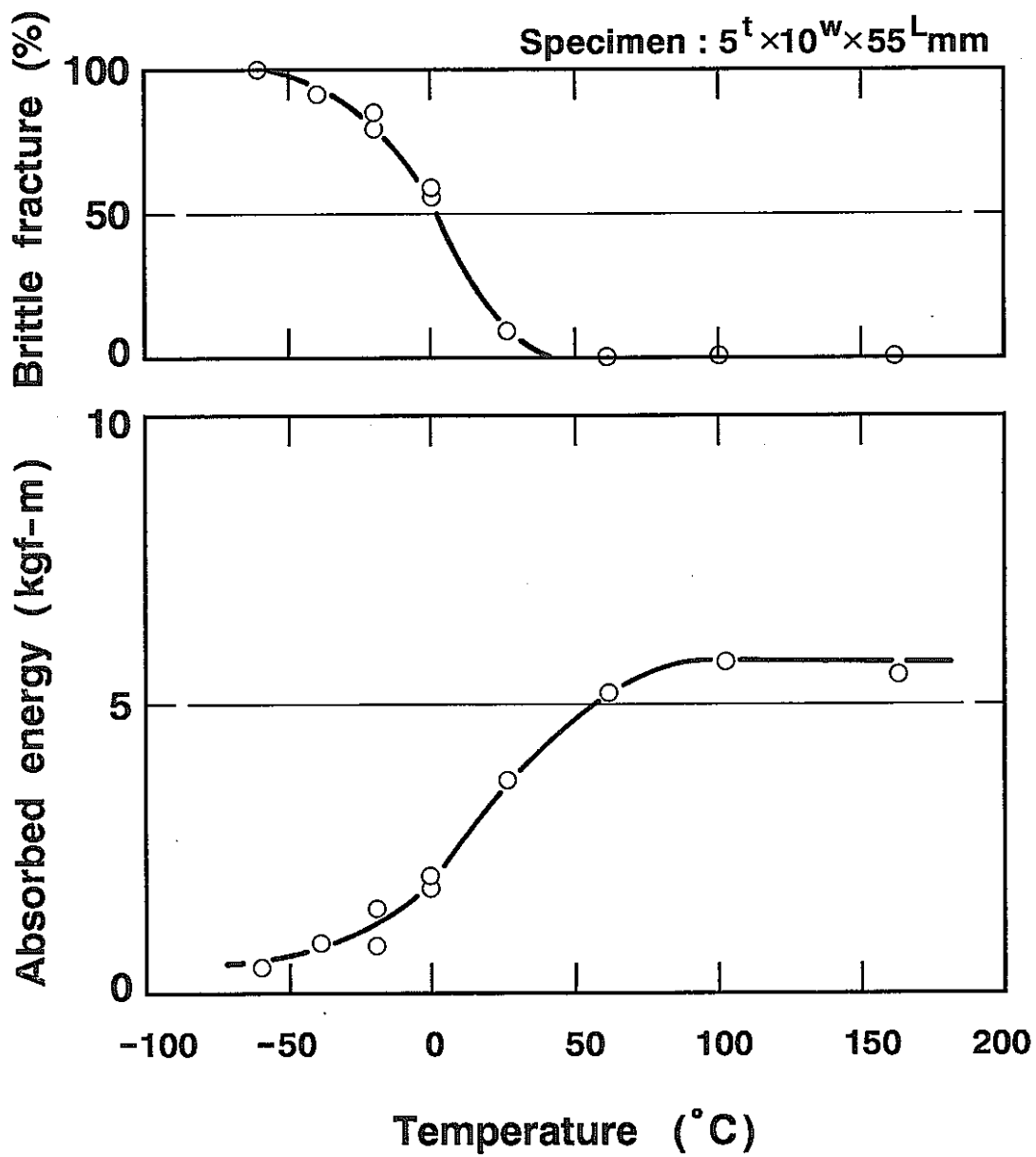


図 7.10 シャルピー衝撃試験結果
(C : 1050 °C → 725 °C)

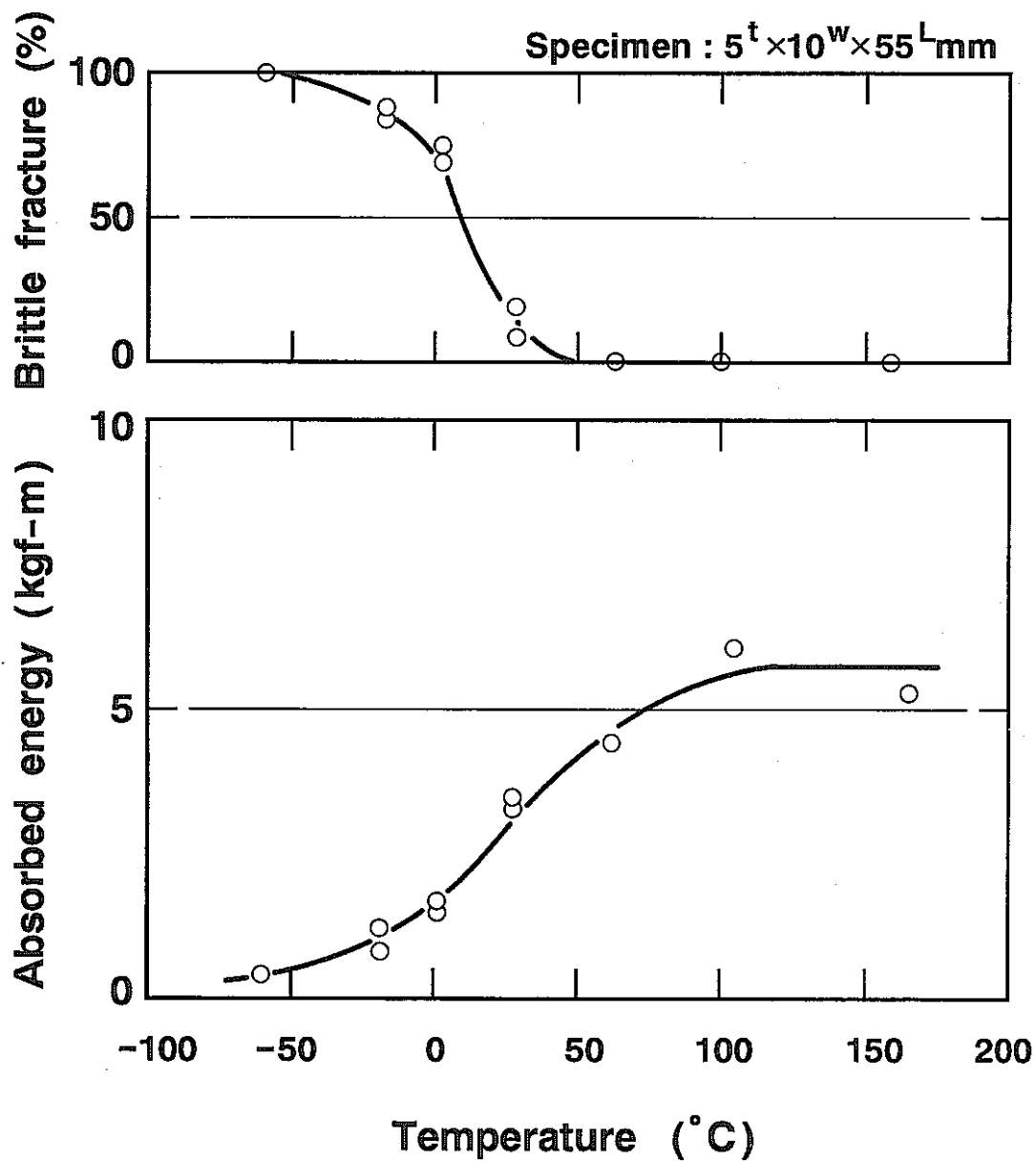


図 7.11 シャルピー衝撃試験結果
(C : 1050 °C → 700 °C)

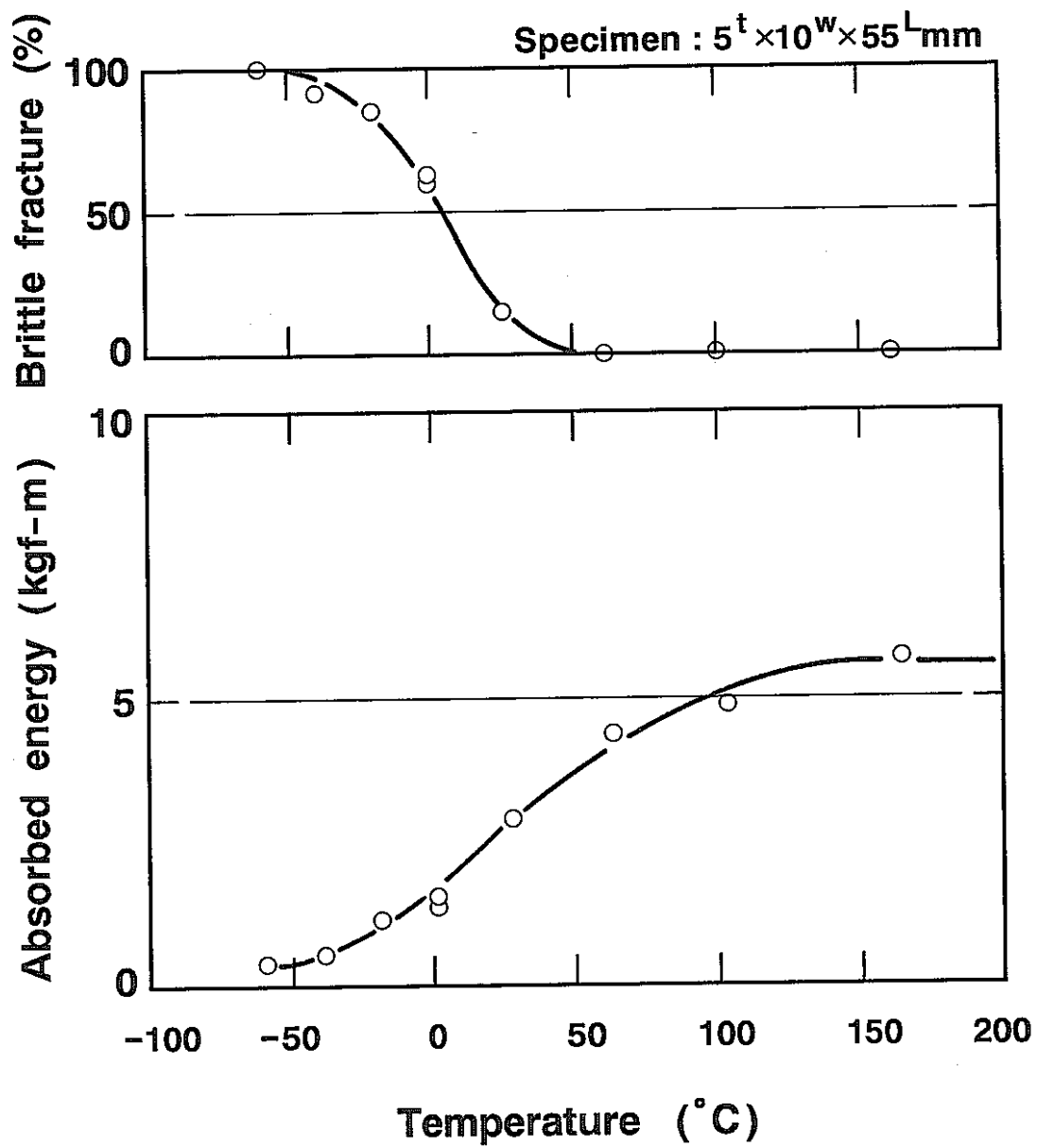


図7.12 シャルピー衝撃試験結果
(C : 1050 °C → 675 °C)

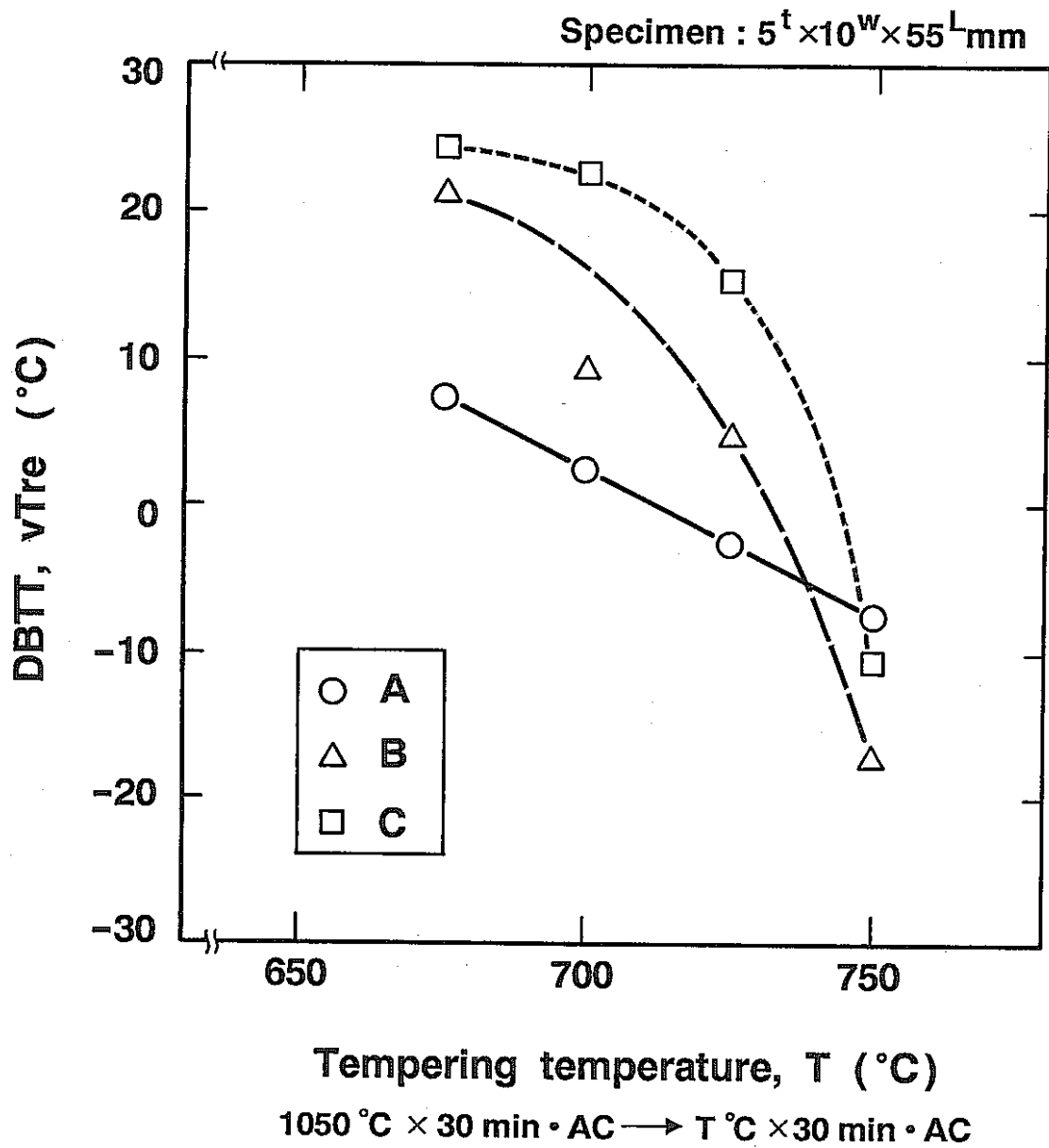


図8 DBTTと熱処理条件の関係

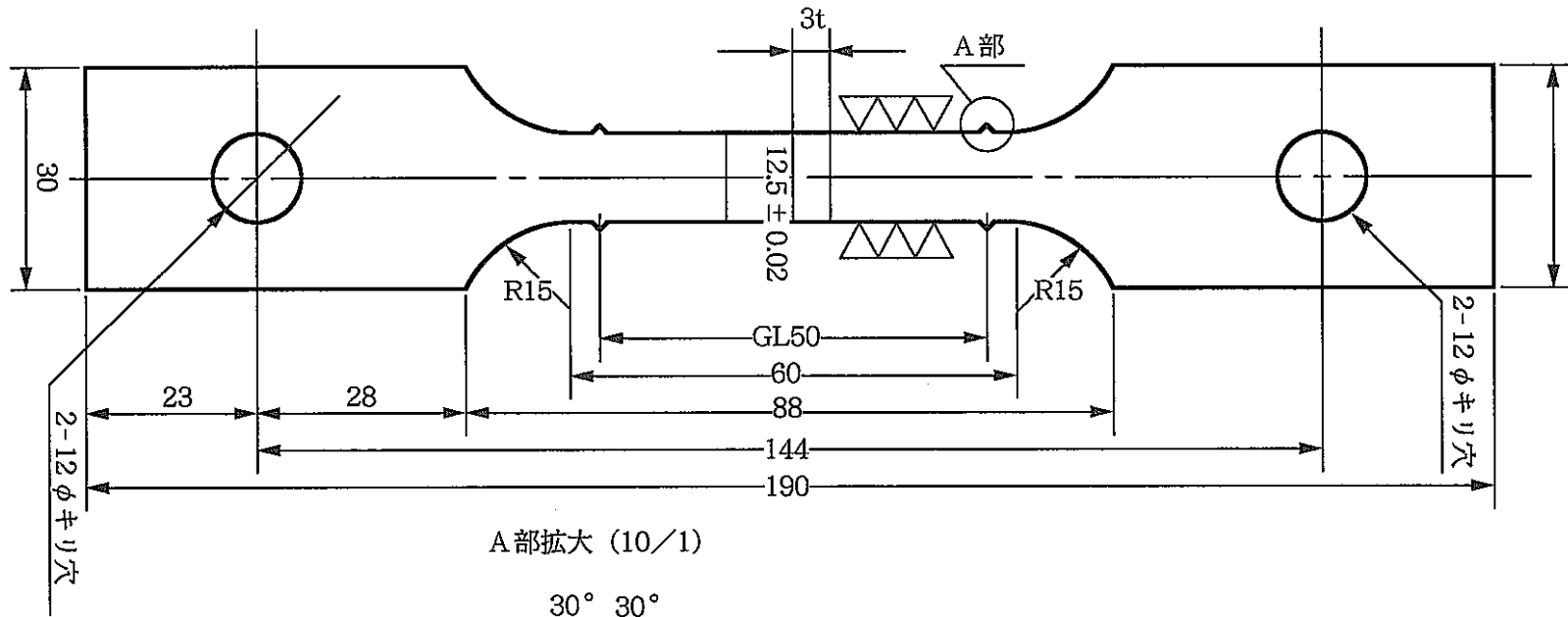


図9 引張試験片の形状 (ラップ管)

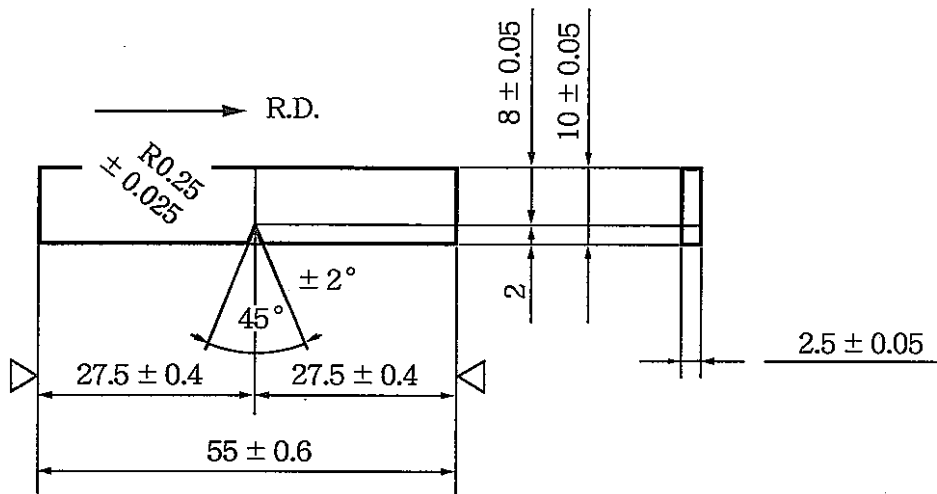


図10 シャルピー衝撃試験片 (ラッパ管)

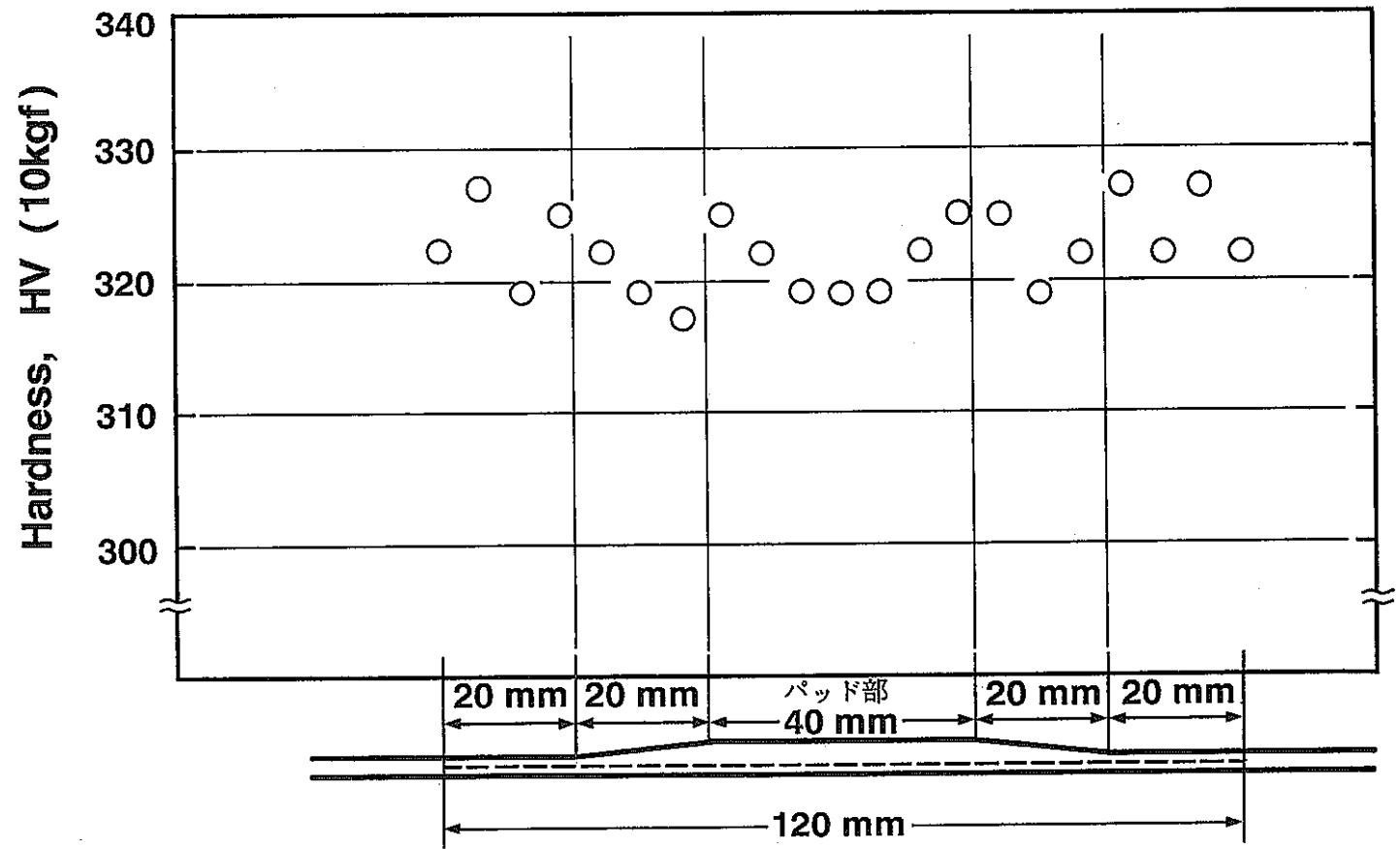


図 11 試作ラッパ管パッド部縦断面の硬さ分布

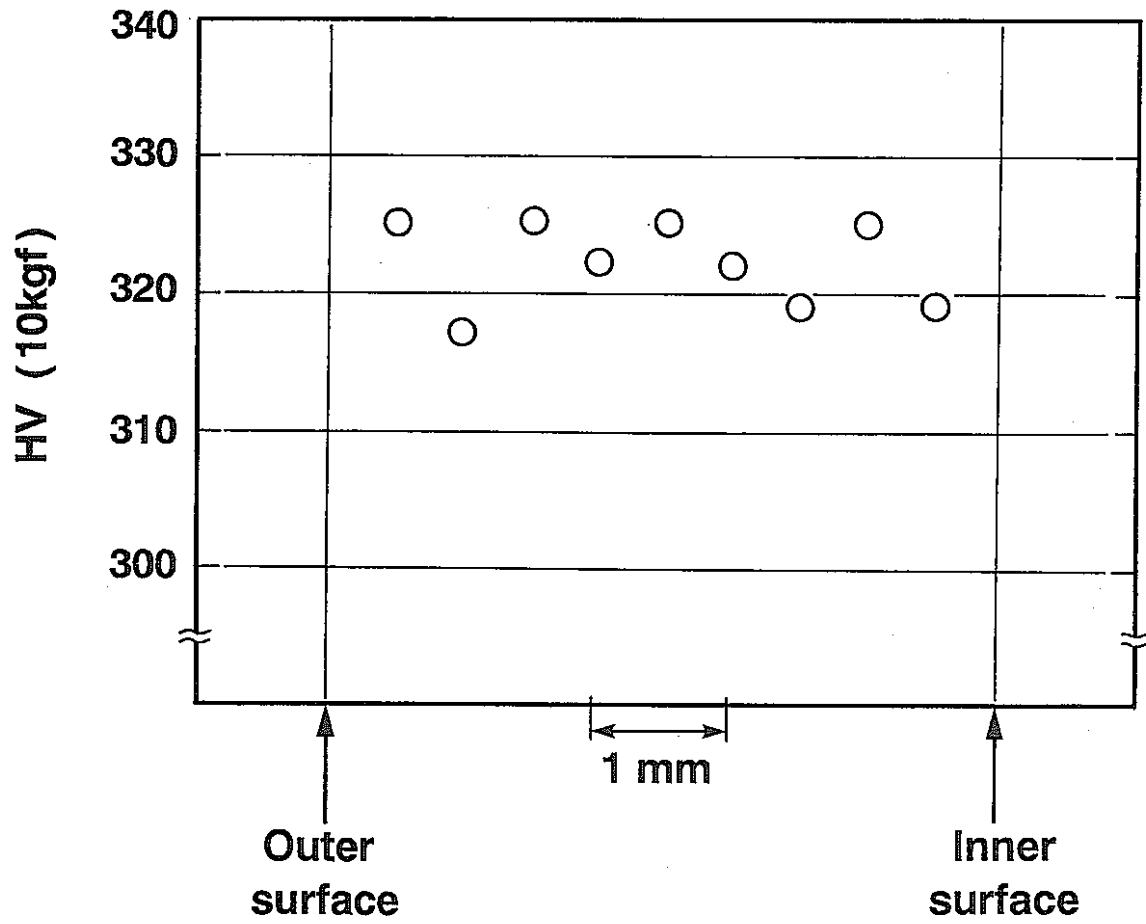


図 12 試作ラップ管パッド部縦断面中心部における厚さ方向の硬さ分布

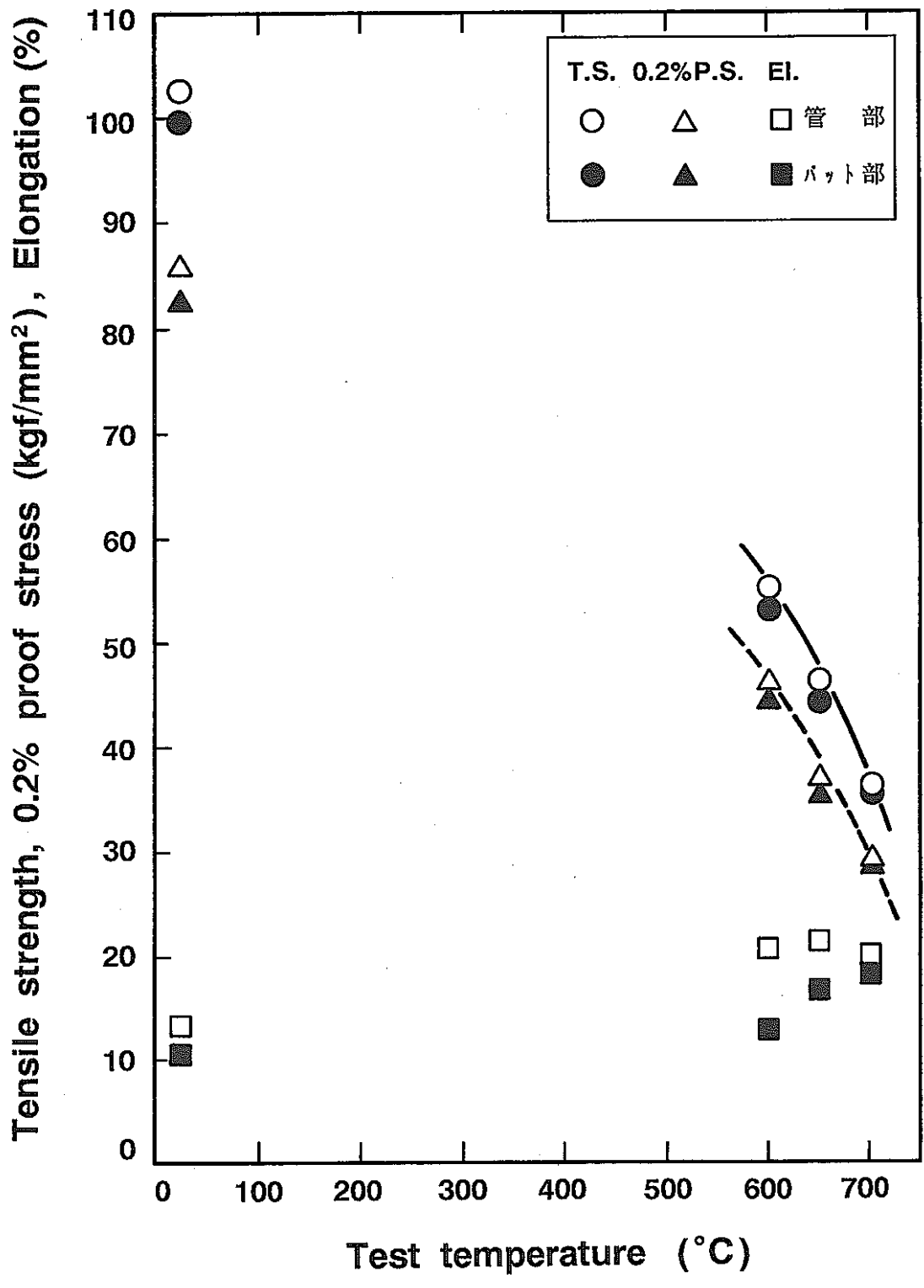


図 13 試作ラッパ管の引張試験結果

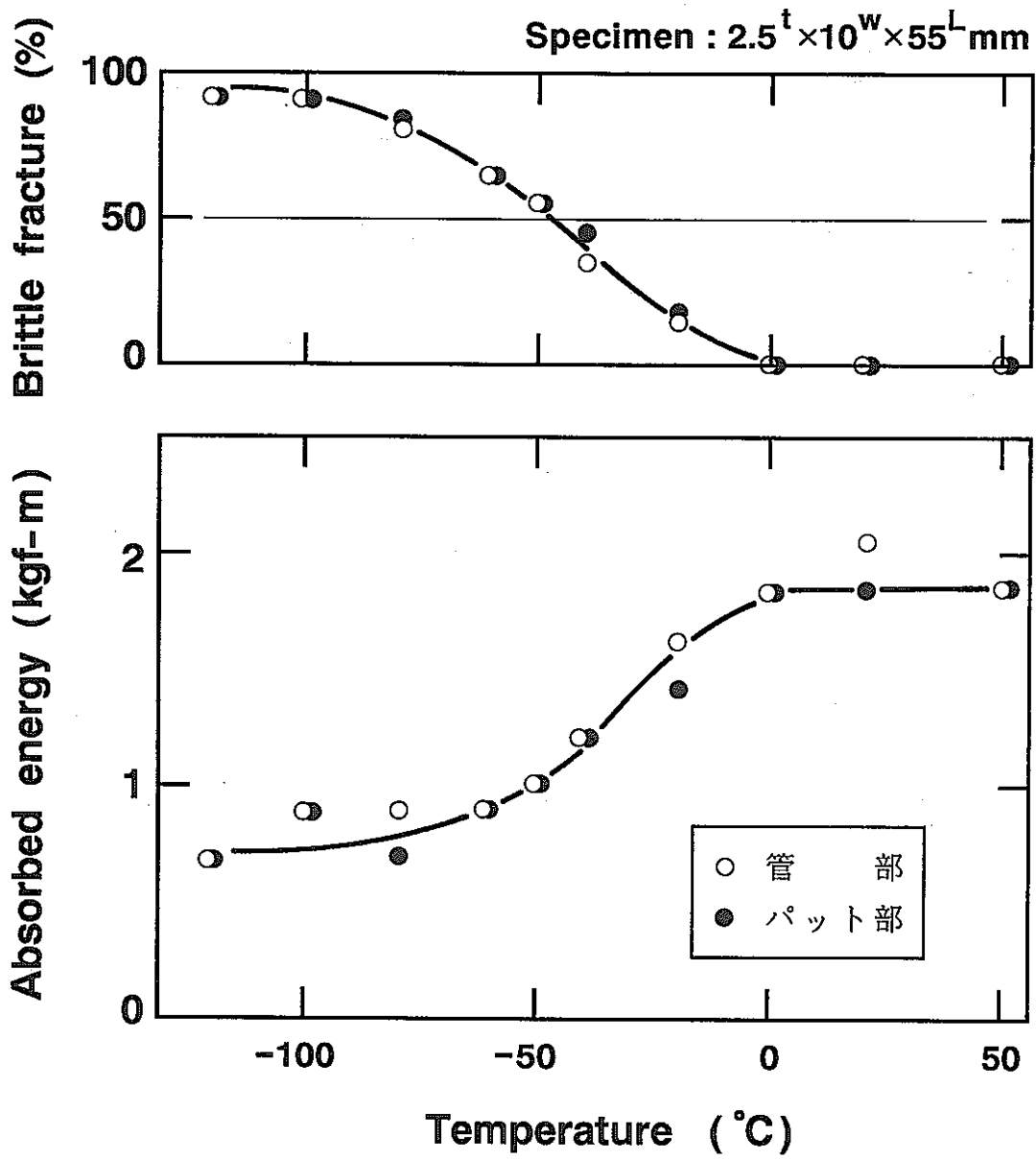


図14 試作ラップ管のシャルピー衝撃試験結果

1050 °C × 30min ・ AC → T °C × 30min ・ AC

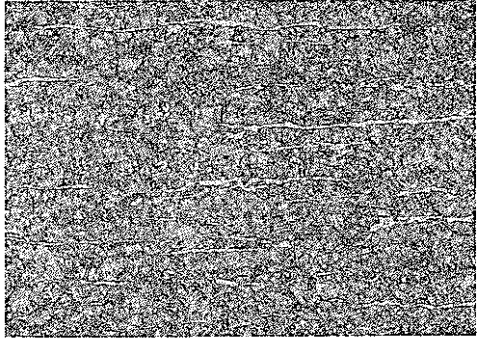
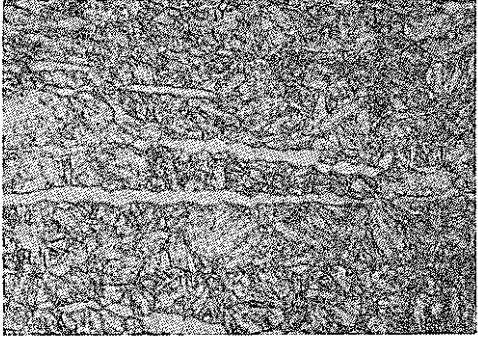
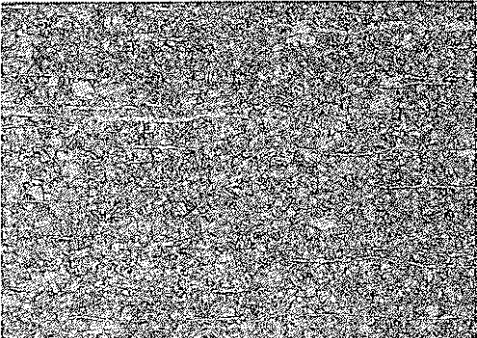
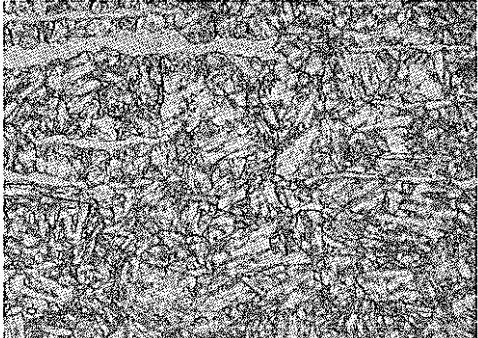
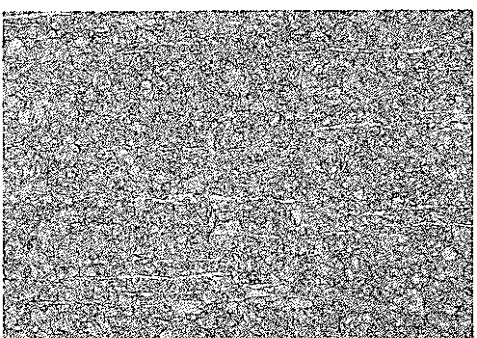
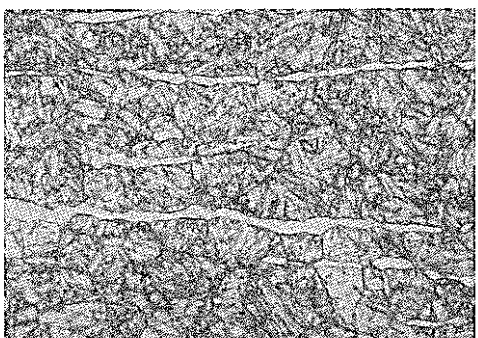
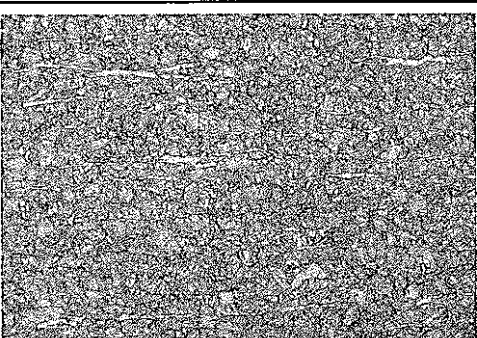
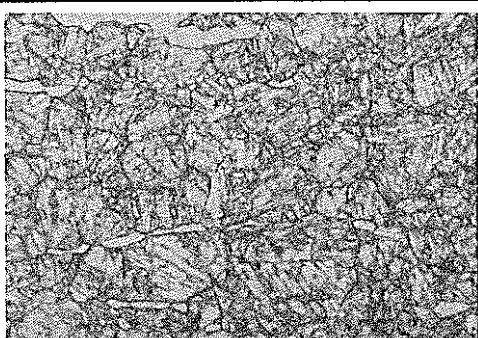
倍率 MARK	× 100	× 400
A - 1 (750 °C)		
A - 2 (725 °C)		
A - 3 (700 °C)		
A - 4 (675 °C)		

写真 1.1 試作板材の縦断面組織 (鋼種 A)

1050°C × 30min · AC → T °C × 30min · AC

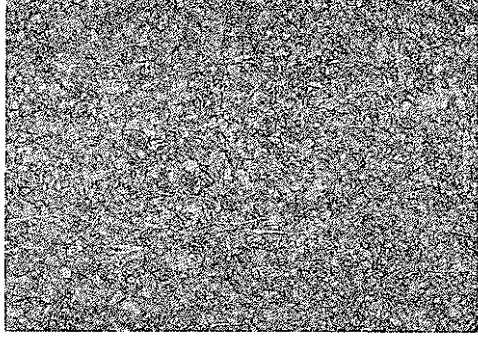

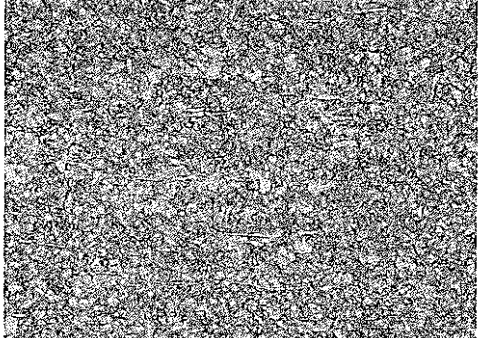
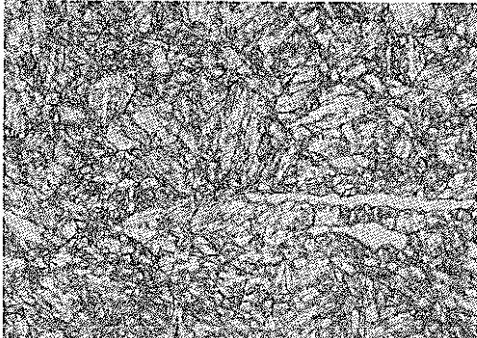
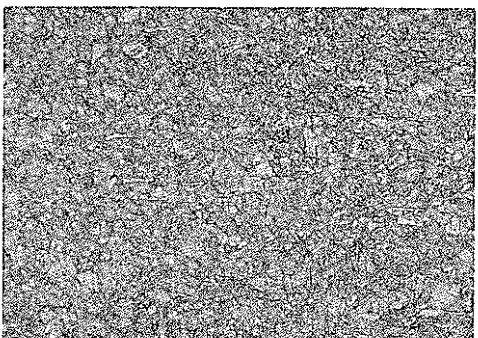

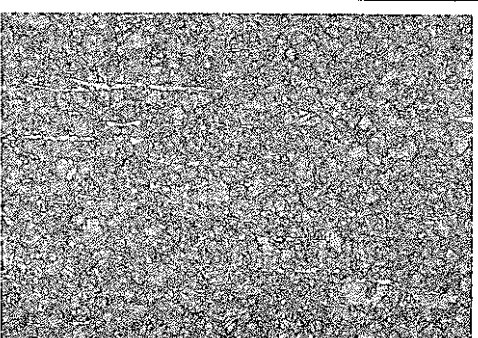
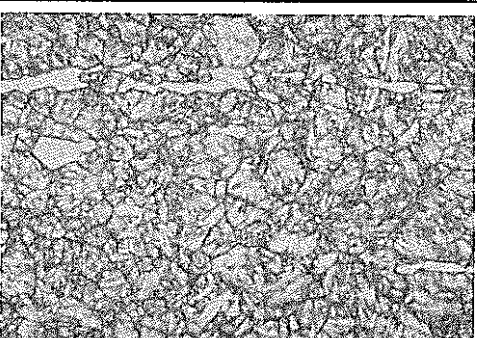
MARK \ 倍率	× 100	× 400
B - 1 (750 °C)		
B - 2 (725 °C)		
B - 3 (700 °C)		
B - 4 (675 °C)		

写真 1.2 試作板材の縦断面組織 (鋼種 B)

1050 °C × 30min · AC → T °C × 30min · AC

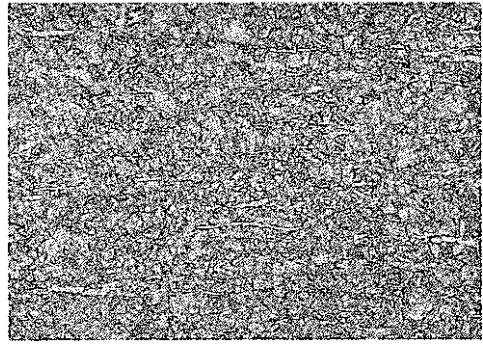

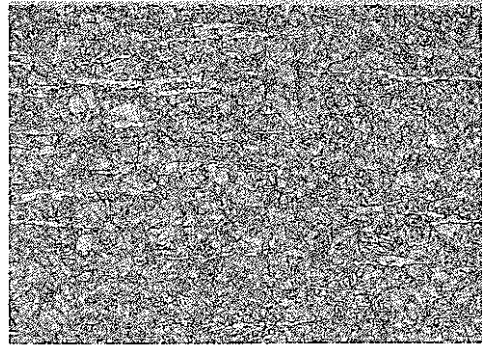

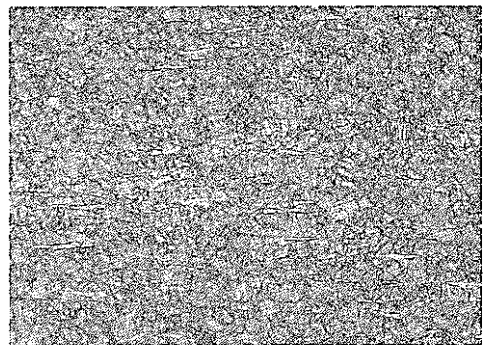
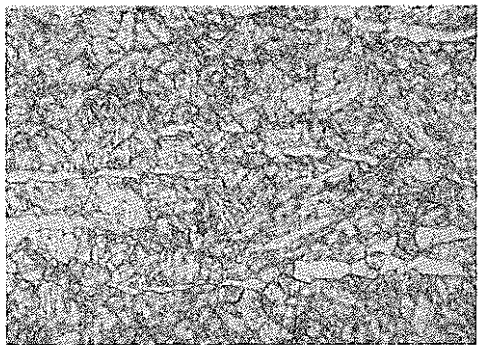
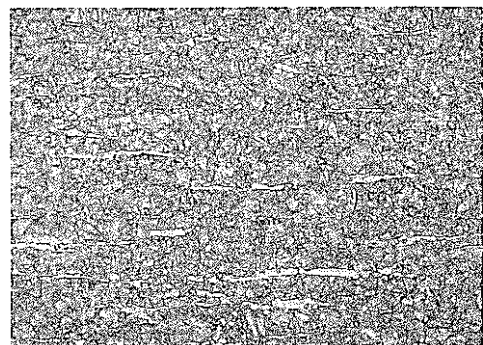

MARK \ 倍率	× 100	× 400
C-1 (750 °C)		
C-2 (725 °C)		
C-3 (700 °C)		
C-4 (675 °C)		

写真 1.3 試作板材の縦断面組織 (鋼種 C)

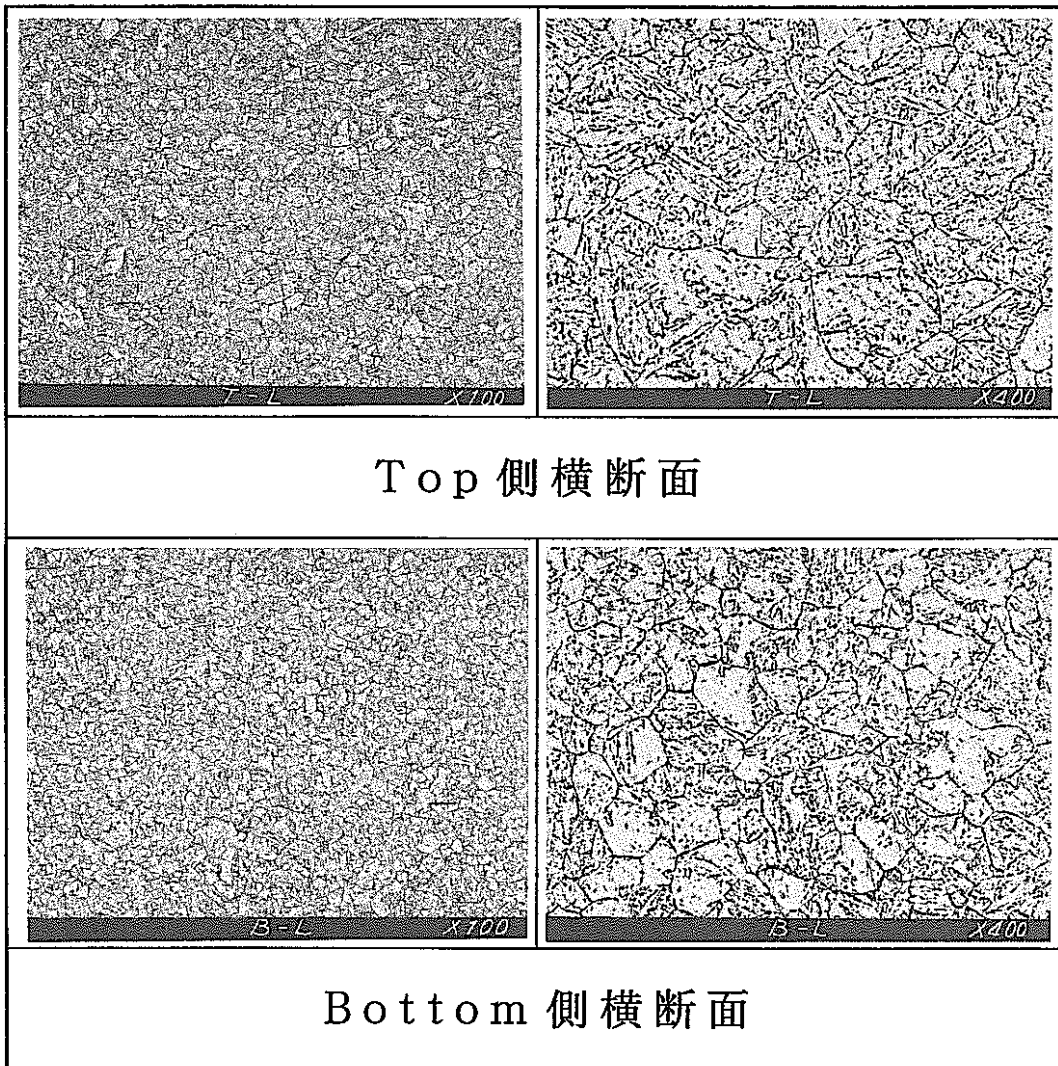


写真2 試作ラップ管の組織

付録 I

ラッパ管試作工程の概要

ラップ管試作工程の概要

No.	製造工程	主要設備	主要管理項目																														
1	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">電極溶解</div> (VIF)	真空高周波誘導炉	真空度 出鋼温度 化学成分 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; width: 80%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">成分</th> <th style="text-align: center;">規 格</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">C</td><td style="text-align: center;">0.11~0.17 (目標0.14)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td><td style="text-align: center;">≤ 0.10 (目標≤ 0.05)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Mn</td><td style="text-align: center;">0.30~0.70 (目標0.50)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">P</td><td style="text-align: center;">≤ 0.030 (目標≤ 0.010)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">S</td><td style="text-align: center;">≤ 0.030 (目標≤ 0.010)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Ni</td><td style="text-align: center;">0.30~0.70 (目標0.50)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Cr</td><td style="text-align: center;">10.0~12.2 (目標11.2)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Mo</td><td style="text-align: center;">0.30~0.70 (目標0.50)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Co</td><td style="text-align: center;">— (-)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">N</td><td style="text-align: center;">0.04~0.08 (目標0.06)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Nb</td><td style="text-align: center;">0.04~0.10 (目標0.07)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">V</td><td style="text-align: center;">0.20~0.30 (目標0.25)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">W</td><td style="text-align: center;">1.70~2.30 (目標2.00)</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Al</td><td style="text-align: center;">< 0.03 (目標0.01)</td></tr> </tbody> </table>	成分	規 格	C	0.11~0.17 (目標0.14)	Si	≤ 0.10 (目標≤ 0.05)	Mn	0.30~0.70 (目標0.50)	P	≤ 0.030 (目標≤ 0.010)	S	≤ 0.030 (目標≤ 0.010)	Ni	0.30~0.70 (目標0.50)	Cr	10.0~12.2 (目標11.2)	Mo	0.30~0.70 (目標0.50)	Co	— (-)	N	0.04~0.08 (目標0.06)	Nb	0.04~0.10 (目標0.07)	V	0.20~0.30 (目標0.25)	W	1.70~2.30 (目標2.00)	Al	< 0.03 (目標0.01)
成分	規 格																																
C	0.11~0.17 (目標0.14)																																
Si	≤ 0.10 (目標≤ 0.05)																																
Mn	0.30~0.70 (目標0.50)																																
P	≤ 0.030 (目標≤ 0.010)																																
S	≤ 0.030 (目標≤ 0.010)																																
Ni	0.30~0.70 (目標0.50)																																
Cr	10.0~12.2 (目標11.2)																																
Mo	0.30~0.70 (目標0.50)																																
Co	— (-)																																
N	0.04~0.08 (目標0.06)																																
Nb	0.04~0.10 (目標0.07)																																
V	0.20~0.30 (目標0.25)																																
W	1.70~2.30 (目標2.00)																																
Al	< 0.03 (目標0.01)																																
2	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">鍛 造</div> 205 φ	鍛造プレス	加熱温度 寸法、形状 外観																														
3	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">管材受入</div>		識別番号 寸法 外観 数量																														
4	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">切 断</div>	丸鋸切断機	長さ																														
5	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ビレット加工</div>	旋 盤	外径 196 φ 内径 120 φ 端面R																														
6	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ビレット検査</div>		外観																														
7	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">加 熱</div>	インダクションヒーター	加熱温度 1100 ± 20 °C 加熱時間																														
8	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">熱間押出</div>	横型水圧プレス	<ul style="list-style-type: none"> • 工具寸法、ダイス、マンドレル径 • 押出管寸法及び外観、外径、肉厚 (130.4 φ × 8.8') 																														

ラップ管試作工程の概要

No.	製造工程	主要設備	主要管理項目
9	脱ガラス		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール、ガラス残りが無いこと。
10	素管熱処理	焼鈍炉	加熱温度 800℃ 加熱時間 30 min
11	脱スケール		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール、ガラス残りが無いこと。
12	口付		口付け長さ及び径
13	潤滑		
14	抽伸	ドローベンチ	工具寸法 ダイス径 プラグ径 表面状況 内外面焼付、ビビリ等がないこと。
15	脱脂	アルカリ脱脂槽	浸漬時間
16	熱処理	焼鈍炉	加熱温度 800℃ 加熱時間 30 min
17	矯正	ロール矯正機	曲り、真円度
18	脱スケール		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール、ガラス残りが無いこと。
19	内削	旋盤	内削 内径寸法
20	口付		口付長さ
21	潤滑		
22	抽伸	ドローベンチ	工具寸法 ダイス径 プラグ径 表面状況 内面焼付、ビビリ等がないこと。
23	脱脂	アルカリ脱脂槽	浸漬時間

ラッパ管試作工程の概要

No.	製造工程	主要設備	主要管理項目
24	熱処理	焼鈍炉	加熱温度 800℃ 加熱時間 300 min
25	脱脂	ロール矯正機	曲り、真円度
26	脱スケール		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール、ガラス残りが無いこと。
27	最終素管 超音波探傷	Mark - IV (1) 探傷方法 ・ 水浸斜角法 ・ 管回転スパイラル送り ・ 周波数 5MHZ ・ 探触子ビーム径 10 mm ライン	標準欠陥 深さ： ≤ 肉厚 × 7 % 長さ： ≤ 12.7mm 幅： ≤ 1.5mm 内外面 軸方向
28	潤滑		液温度及び浸漬時間
29	パッド加工	油圧抽伸機	丸管に対し、一方向引き抜きによりパッド加工を行う。 表面状況：内外表面に焼付、ビビリなどが無いこと。 寸法 $118.2 \phi \times \frac{6.4t}{3.6t}$
30	脱脂	アルカリ脱脂槽	浸漬時間
31	熱処理	焼鈍炉	加熱温度 800℃ 加熱時間 30 min
32	脱スケール		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール残りが無いこと。
33	潤滑		液温度及び浸漬時間
34	六角管引き抜き	油圧抽伸機	丸管にパッド加工されたものを一方向引き抜きにより最終六角形状に仕上げる。 表面状況：内外表面に焼付、ビビリなどが無いこと。 寸法 $110.6 \phi \times \frac{5.1t}{3.0t}$

ラッパ管試作工程の概要

No.	製造工程	主要設備	主要管理項目
35	脱脂	アルカリ脱脂槽	浸漬時間
36	矯正	油圧矯正機	曲り0.5mm以下／製品長さ 外側対面距離 外観 有害な結果のないこと
37	熱処理	大気炉	加熱温度, 加熱時間 焼ならし 1050 ± 10℃ × 40min AC 焼もどし 710 ± 10℃ × 40min AC
38	脱スケール		液温度及び浸漬時間 表面状況 肌荒れ及びスケール残りがいないこと。
39	矯正	油圧矯正機	曲り0.5mm以下／製品長さ
40	外面研磨	エメリペーパー及び スコッチブライト	表面粗さ 12.5S以下 外対面距離 肉厚
41	定尺切断	パッドソー及び旋盤	長さ パッド部位置 1695 ± 5mm 全長 3020 $\begin{matrix} +10 \\ -0 \end{matrix}$ mm
42	材質試験		硬度測定
43	面取り		糸面取りを行う 端面にバリがないこと
44	洗浄	アルカリ脱脂及び アセトン脱脂	表面清浄度
45	製品検査		肉厚 外側対面間距離 内側対面間距離 表面粗さ 端面仕上げ 外観 パッド部形状 パッド部位置 真直度 長さ

ラッパ管試作工程の概要

No.	製造工程	主要設備	主要管理項目
46	製品検査		ねじれ 内側角部R 表面清浄度
47	梱包		1本毎ポリエチレンシートに包み木箱包みする
48	出荷		

付録Ⅱ

試作ラッパ管の試験検査成績書

成績書番号 : S-89-93

発行年月日 : 1989年 8月11日

動力炉・核燃料開発事業団 殿

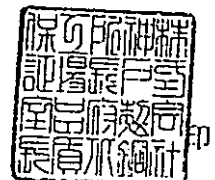
試 験 検 査 成 績 書

契 約	名 称	新材料ラッパ管
	部 品 名	フェライト/マルテンサイト鋼
	番 号	_____
	数 量	3 本
公 称 寸 法		110.6 ^{OD} X 104.6 ^{ID} X 3.00 ^{WT} X 3020 L (mm) (114.8) (5.1)
製造元仕様番号		
納 入	送 付 先	茨城県東茨城郡大洗町成田町4002 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 燃料材料開発部 技術開発室 殿
	数 量	3 本
	ロット番号	63WFK
	製品数量	3
	製品番号	1 ~ 3
試 験 検 査 結 果		別紙の通り全ての試験検査項目について 仕様規格内であることを保証致します。
備 考		

株式会社 神戸製鋼所

長 府 北 工 場

品 質 保 証 室 長



試験検査結果

品名 ラッパ管材 (1/2) (B)

株式会社 神戸製鋼所
長府北工場
品質保証室

(P-3/8)
1989年 8月 11日
承認 審査 作成

製品名	区分コード	製造年月日	製造コード	P/MC契約名	試験検査履歴番号	検査シールシート名
613:WFK	NKI	1989107127	HA46:04		S-89-1-93	

製品名	開始名	終了名
02	13	23

外観 { 1 : 合格
2 : 不合格

(単位 : mm)

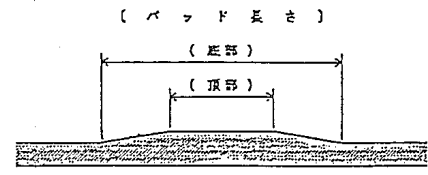
製品名	長さ	パッド位置	パッド長さ(底部)	パッド長さ(頂部)	=1
04	3020 ± 0.5	1695 ± 5	80 ± 10	40 ± 1	104.60 ± 0.25

=1 内側対面間距離断面平均(全体)

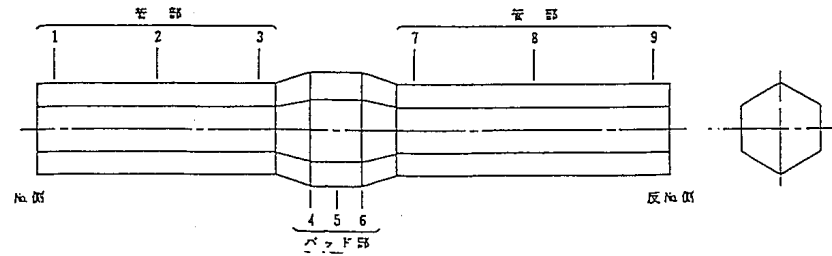
製品名	外側角部曲率半径(管部)												内側角部曲率半径											
05	R 7 ~ 9												R 4 ~ 5											

製品名	外側角部曲率半径(パッド部)						真直度						ねじれ					
06	R 6 ~ 10						< 1.00						< 0.50					

製品名	外側対面間距離(管部)								
07	110.6 (標準値)								
08	A-D			B-E			C-F		
09	I	II	III	I	II	III	I	II	III

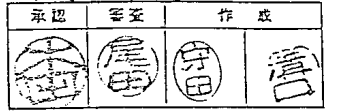


製品名	外側対面間距離(パッド部)								
13	114.8 ± 0.5								
14	A-D			B-E			C-F		
15	I	II	III	I	II	III	I	II	III



ラッパ管材 (2/2) (B)

株式会社神戸製鋼所
長府北工場
品質保証室
1989年 8月 11日
(P-4/8)

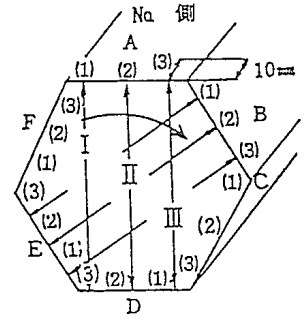


製品コード	区分コード	製造年月日	製造コード	試験検査結果	試験レポート
01	...	19890727	HA4604	S-89-93	...

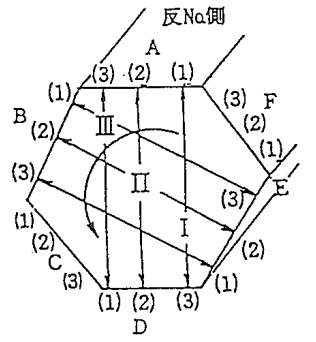
数量	製品名	材料
02

(単位: mm)

製品名	内径対面間距離									=2	
	104.60 ± 0.40										104.60
	A - D			B - E			C - F				±0.25
SEQ	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
16	10473	10471	10482	10488	10474	10476	10469	10472	10483	管部 1	
17	10484	10481	10485	10484	10478	10485	10465	10461	10474	管部 2	
18	10472	10471	10477	10481	10478	10478	10474	10480	10477	管部 3	
19	10461	10455	10468	10466	10452	10459	10463	10459	10473	管部 4	
20	10466	10461	10475	10471	10454	10467	10474	10464	10479	管部 5	
21	10472	10473	10480	10477	10466	10472	10478	10480	10488	管部 6	
22	10473	10457	10475	10470	10442	10461	10480	10469	10491	管部 7	
23	10476	10471	10480	10463	10449	10468	10496	10494	10497	管部 8	
24	10484	10479	10481	10466	10455	10471	10481	10477	10483	管部 9	



製品名	肉厚 (管部)																	
	3.00 ± 0.25 (目視 ± 0.20)																	
	A			B			C			D			E			F		
SEQ	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
25	2993	3023	3020	2993	3022	2997	3053	3073	3053	3053	09	2993	3043	3082	2999	3099	3022	296
26	3013	3053	3022	2993	3042	2993	3033	3083	3053	08	3010	2993	3063	3010	2963	3000	2993	2993
27	2922	2942	2932	2942	2982	2963	3033	3073	3043	10	3083	3033	3073	3072	2942	2982	296	296
28	2943	3002	2952	2953	2963	3003	3053	3023	3063	12	3063	3063	3093	3052	2982	3012	295	295
29	2983	3032	2992	2983	3022	2953	3013	3042	2992	2973	3053	3003	3013	3072	2942	2982	3032	298
30	3013	3033	3023	3013	3073	3013	3023	3073	3042	2983	3042	2992	2953	3022	2932	2993	3002	294



製品名	肉厚 (パッ下部)																	
	5.10 ± 0.10																	
	A			B			C			D			E			F		
SEQ	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
31	5085	1051	1250	5065	1550	5085	5095	1951	1551	1451	2451	1751	1451	1951	1251	1051	1951	13
32	5085	1051	1050	5025	1351	5035	5075	1751	1151	1351	2351	1651	1051	2051	1151	1151	1951	11
33	5085	1051	1085	5045	1050	5075	5095	1451	1251	1651	2351	1851	1151	2051	1251	1251	1651	12



株式会社 神戸製鋼所
長府北工場
品質保証室

品名 ラップ管材 (1/2) (B)

試験検査結果

製品名	区分コード	製造年月日	製造コード	PVC契約名	試験実施場所	試験シールシート名
ラップ管材	...	1989 07 27	HA4604		S-89-93	

製品名	製造年月日	製造コード
ラップ管材	1989 07 27	HA4604

外観 { 1 : 合格
2 : 不合格

(単位 : mm)

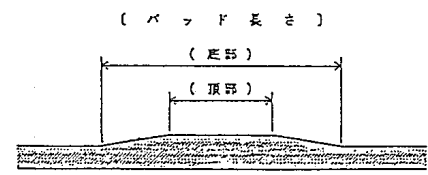
製品名	長さ	パッド位置						パッド長さ (底部)						パッド長さ (頂部)						=1
		A	C	E	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F				
ラップ管材	3020 ± 0.5	1695 ± 5						80 ± 10						40 ± 1						104.60 ± 0.25

=1 内側対面間距離断面平均 (全体)

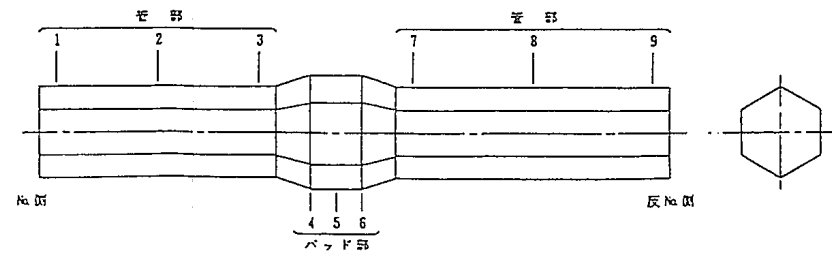
製品名	外側角部曲率半径 (管部)												内側角部曲率半径											
	R 7 ~ 9												R 4 ~ 5											
	No 側						反 No 側						No 側						反 No 側					
ラップ管材	AB BC CD DE EF FA						AB BC CD DE EF FA						AB BC CD DE EF FA						AB BC CD DE EF FA					

製品名	外側角部曲率半径 (パッド部)						真 直 度						ね じ れ					
	R 6 ~ 10						< 1.00						< 0.50					
	パッド中央部						A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
ラップ管材	AB BC CD DE EF FA						1692	1779	1775	1880	1740	1968	1262	1516	1948	1957	1289	1076

製品名	外側対面間距離 (管部)								
	110.6 (標準値)								
	A - D			B - E			C - F		
ラップ管材	I	II	III	I	II	III	I	II	III
07	110.74	110.77	110.73	110.85	110.90	110.87	110.71	110.77	110.72
08	110.71	110.75	110.73	110.93	110.91	110.93	110.78	110.81	110.73
09	110.73	110.87	110.80	110.91	110.92	110.97	110.65	110.68	110.62
10	110.73	110.68	110.82	110.89	110.90	110.89	110.62	110.48	110.59
11	110.88	110.93	110.84	110.85	110.90	110.93	110.68	110.66	110.60
12	110.85	110.90	110.83	110.89	110.99	110.96	110.55	110.54	110.57



製品名	外側対面間距離 (パッド部)								
	114.8 ± 0.5								
	A - D			B - E			C - F		
ラップ管材	I	II	III	I	II	III	I	II	III
13	114.95	115.01	115.01	115.12	115.10	115.12	114.82	114.82	114.82
14	114.98	115.01	115.04	115.20	115.23	115.18	114.85	114.85	114.85
15	115.04	115.08	115.09	115.24	115.24	115.23	114.90	114.93	114.93



試験検査結果

品名 ラッパ管材 (2/2) (B)

株式会社 神戸製鋼所
 長府北工場
 品質保証室

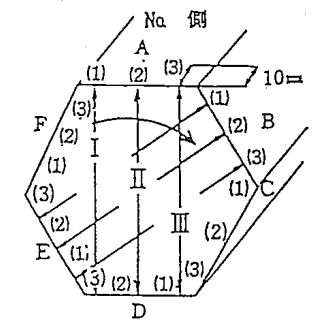
1989年 (P-8,8) 8月11日
 承認 簽交 作成

品名	ラッパ管材
品番	513-WFK
区分コード	101
製造年月日	1989.10.12
製造コード	HA4604
製造ロット	S-89-93

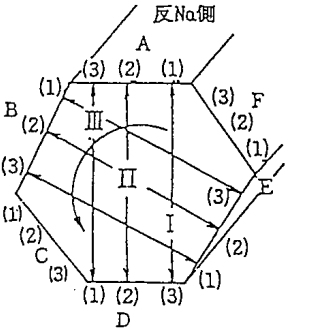
製造	製造場所	終了
02	3	3N

(単位: mm)

品番	内径対面間距離										管部
	104.60 ± 0.40										
	A - D			B - E			C - F				
SEQ	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
16	104.87	104.74	104.83	104.77	104.73	104.84	104.67	104.55	104.65	104.74	管部 1
17	104.85	104.77	104.85	104.84	104.81	104.89	104.58	104.46	104.63	104.74	管部 2
18	104.77	104.66	104.70	104.68	104.63	104.74	104.83	104.76	104.79	104.73	管部 3
19	104.69	104.55	104.62	104.61	104.49	104.72	104.72	104.55	104.66	104.63	管部 4
20	104.81	104.60	104.69	104.70	104.55	104.79	104.74	104.59	104.69	104.68	管部 5
21	104.84	104.71	104.74	104.79	104.68	104.80	104.82	104.71	104.72	104.76	管部 6
22	104.82	104.61	104.70	104.69	104.48	104.81	104.76	104.54	104.69	104.68	管部 7
23	104.95	104.86	104.91	104.63	104.49	104.69	104.76	104.62	104.69	104.73	管部 8
24	104.90	104.80	104.84	104.61	104.53	104.75	104.61	104.66	104.72	管部 9	



品番	内厚 (管部)																		
	3.00 ± 0.25 (目標 ± 0.20)																		
	A			B			C			D			E			F			
SEQ	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
25	2.98	3.04	3.01	2.93	2.98	2.96	3.02	2.98	3.00	3.07	3.02	3.04	3.13	3.06	3.02	3.08	3.02	管部 1	
26	3.01	3.04	3.01	2.98	3.00	2.96	3.00	3.06	3.00	3.02	3.07	3.03	3.05	3.09	3.05	3.00	3.06	3.01	管部 2
27	2.99	3.01	2.98	2.97	2.98	2.96	3.02	3.04	3.01	3.02	3.05	3.02	3.03	3.03	3.01	2.97	3.00	2.97	管部 3
28	2.93	2.99	2.95	2.99	3.04	3.00	3.06	3.09	3.04	3.04	3.08	3.04	2.99	3.05	2.98	2.94	2.98	2.94	管部 7
29	2.98	3.02	2.99	2.95	3.01	2.97	3.01	3.05	3.02	3.02	3.08	3.04	3.05	3.08	3.04	2.97	3.02	2.97	管部 8
30	2.99	3.06	3.01	3.00	3.05	3.01	3.02	3.05	3.02	2.99	3.04	3.01	2.99	3.04	2.99	2.98	3.02	2.98	管部 9



品番	内厚 (パフ部)																		
	5.10 ± 0.10																		
	A			B			C			D			E			F			
SEQ	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
31	5.21	5.19	5.14	5.13	5.21	5.10	5.11	5.19	5.11	5.09	5.19	5.10	5.06	5.19	5.07	5.10	5.18	5.10	パフ部 4
32	5.06	5.17	5.10	5.12	5.19	5.11	5.13	5.19	5.11	5.08	5.19	5.10	5.06	5.20	5.06	5.10	5.17	5.10	パフ部 5
33	5.06	5.12	5.17	5.10	5.19	5.14	5.16	5.22	5.17	5.13	5.20	5.19	5.10	5.20	5.04	5.10	5.13	5.13	パフ部 6