

添付書類 8-2-4 バスケットプレート用材料
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) について

目次

1. 材料の用途	1
1.1 用途	1
2. 材料の仕様	1
2.1 適合規格	1
2.2 化学成分	1
2.3 機械的性質	2
2.4 寸法の許容差	2
3. 使用条件	3
3.1 適用範囲	3
3.2 温度範囲	3
4. 特徴及び使用上の留意事項	3
4.1 特徴	3
4.2 特許及びライセンス	3
5. 製造工程及び製造条件	4
5.1 製造方法	4
5.2 熱処理	4
5.3 品質管理	4
6. 化学成分	6
7. マクロ及びミクロ組織	8
8. 実用試験	13
9. 加工性及び加工条件	13
10. 機械的性質	13
10.1 引張特性	13
10.2 靱性	19
10.3 硬さ（参考）	22
11. 高温及び低温引張特性	23
11.1 高温引張特性（初期材）	23
11.2 低温引張特性	28
11.3 引張特性（時効材）	28
12. クリープ特性	46
13. 靱性（時効後）	53
14. 耐食性	63

15.	設計降伏点	65
16.	設計引張強さ	66
17.	設計応力強さ	67
18.	許容引張応力	68
19.	その他特性	70
19.1	熱物性	70
19.2	弾性定数	70
19.3	線膨張係数	70
20.	照射影響	80
21.	引用文献	82

別紙 1	バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の熱処理方法及び強度特性について
別紙 2	バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の破壊靱性に係る特性について
別紙 3	バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) のクリープ特性について
別紙 4	バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の物性について
別紙 5	バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の製造管理について

図表目次

第 2-1 表	化学成分仕様	1
第 2-2 表	機械的性質	2
第 5-1 表	管理程度表	5
第 6-1 表	供試材仕様	6
第 6-2 表	供試材の評価試験実施項目	6
第 6-3 表	供試材の化学成分の分析結果	7
第 10-1 表	常温における引張試験結果	14
第 10-2 表	正規確率プロット	18
第 10-3 表	シャルピー衝撃試験結果	19
第 10-4 表	硬さ測定結果	22
第 11-1 表	高温引張試験結果	24
第 11-2 表	高温引張試験結果詳細	27
第 11-3 表	時効後の引張試験結果	29
第 11-4 表	時効後の引張試験計測結果	30
第 11-5 表	初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果	39
第 12-1 表	0.01%/1,000hr クリーブ強さ、100,000hr 破断強さ及び 60 年間破断強さ	49
第 12-2 表	クリーブ試験計測結果	51
第 13-1 表	シャルピー衝撃試験結果	54
第 13-2 表	シャルピー衝撃試験計測結果	55
第 15-1 表	各温度における設計降伏点 S_y	65
第 16-1 表	各温度における設計引張強さ S_u	66
第 17-1 表	各温度における設計応力強さ S_m	67
第 18-1 表	各温度における許容引張応力 S	69
第 19-1 表	供試材の熱物性測定結果	71
第 19-2 表	供試材の弾性定数測定結果	74
第 19-3 表	供試材の線膨張係数測定結果	77
第 5-1 図	製造フロー	4
第 7-1 図	供試材の T 方向断面マクロ観察結果	9
第 7-2 図	供試材 (1/2T 代表部) の断面ミクロ組織観察結果 (供試材 A)	10
第 7-3 図	供試材 (1/2T 代表部) の断面ミクロ組織観察結果 (供試材 B)	11
第 7-4 図	供試材 (1/2T 代表部) の断面ミクロ組織観察結果 (供試材 C)	12

第 10-1 図	引張強さの正規確率プロット	15
第 10-2 図	0.2%耐力の正規確率プロット	16
第 10-3 図	伸びの正規確率プロット	17
第 10-4 図	走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真	20
第 11-1 図	初期材の引張強さ	25
第 11-2 図	初期材の0.2%耐力	25
第 11-3 図	初期材の伸び	26
第 11-4 図	引張強さに関する初期材のトレンドカーブ	37
第 11-5 図	0.2%耐力に関する初期材のトレンドカーブ	37
第 11-6 図	引張強さに関する時効後強度の低下率	38
第 11-7 図	0.2%耐力に関する時効後強度の低下率	38
第 12-1 図	応力-破断時間プロット	48
第 12-2 図	応力-定常クリープ速度プロット	48
第 13-1 図	走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真	58
第 14-1 図	耐食性	64
第 20-1 図	A5052 材の引張特性の照射依存性	80
第 20-2 図	A1100 材の引張特性の照射依存性	81

1. 材料の用途

1.1 用途

本材料は、MSF-21P 型の内部に設置される使用済燃料集合体を保持するためのバスケットプレートに適用する。

2. 材料の仕様

2.1 適合規格

本材料はアルミニウム合金の押出成形品であり、技術仕様については、JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」（以下「JIS H 4100」という。）に準じている。

2.2 化学成分

本材料の化学成分仕様は、第 2-1 表に規定のとおりである。

第 2-1 表 化学成分仕様

記号	化学成分 (mass%)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他		Al (注1)
										個々	合計	
MR-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部
(参考) JIS H 4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 以上 1.5 以下	0.8 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部

(注1) Al 成分には製造時に不可避免的に混入する不純物元素を含む。

2.3 機械的性質

常温の規格値（引張強さ、耐力及び伸び）については、第 2-2 表に示す値に適合すること。

第 2-2 表 機械的性質 ^(注1)

記号	引張試験 (試験温度：常温)			シャルピー衝撃試験 ^(注2) (試験温度：-40℃)
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
MB-A3004	185 以上	85 以上	15 以上	41 以上

(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

2.4 寸法の許容差

製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。

- ・肉厚 : 16mm 以下
- ・押出比 ^(注1) : 10 以上

ただし、上記を逸脱する寸法を製品に適用する場合は、第 2-2 表に示す機械的性質を満足すること。

(注 1) ピレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比

3. 使用条件

3.1 適用範囲

本材料を MSF-21P 型のバスケットプレートに適用するにあたり、本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (6) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は、弾性範囲内であること。
- (7) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたり熱応力を生じない構造とすること。

3.2 温度範囲

- ・最高使用温度： 250 °C
- ・最低使用温度： -40 °C

4. 特徴及び使用上の留意事項

4.1 特徴

JIS H 4000 A3004 材は構造材料として使用可能な機械的強度と優れた加工性・耐食性を兼ね備えているアルミニウム合金であり、様々な用途に広く使用されている。MB-A3004 は、JIS H 4000 A3004 材と比較し第 2-1 表に示す成分規定範囲を狭めた材料であり、JIS H 4000 A3004 材と同等材である。

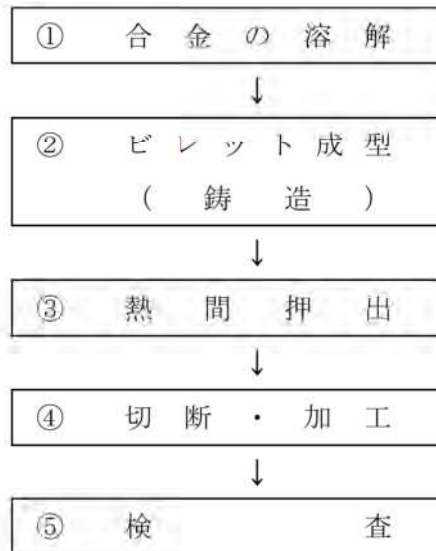
4.2 特許及びライセンス

なし。

5. 製造工程及び製造条件

5.1 製造方法

本材料の製造フローは、第5-1図に示すとおりである。



第5-1図 製造フロー

5.2 熱処理

質別はH112とする。

熱間押出成形加工後、熱処理は行わず、空冷されたものであること。また、熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。なお、質別H112は、JIS H 0001「アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金—質別記号」によること。

5.3 品質管理

第5-1図の製造フローの各段階において、第5-1表に示す品質管理を行う。なお、品質管理値は生産設備能力等を考慮し設定すること。

第 5-1 表 管理程度表 (注1)

製造工程 (注2)	管理項目		材料保証 (規定)	製造管理 (参考)
①合金の溶解	材料特性 (初期材)	化学成分 (溶湯)	○	—
⑤検査		引張強度特性	—	○
		シャルピー 衝撃特性	—	○
		組織観察	—	○
③熱間押出	製造条件	押出比	○	—
		押出条件	—	○
		押出冷却条件	—	○
		整直条件	—	○
		質別	○	—

(注1) 設計貯蔵期間における設計強度特性保証に係る材料管理程度一覧である。

(注2) 製造工程は第 5-1 図の製造フローに対応する。

6. 化学成分

供試材は、第 6-1 表に示す実規模の供試材より採取した第 6-2 表に示す 3 標本（A、B 及び C）を用いた。これら 3 標本の化学成分分析結果を第 6-3 表に示す。

第 6-1 表 供試材仕様

供試材 符号	記号	質別	製造加工	押出断面形状	備考
A	MB-A3004	H112	熱間押出	外寸□150×t13mm の押出材	第 7-1 図 供試材 A
B	MB-A3004	H112	熱間押出	200×60×t16mm の日形押出材	第 7-1 図 供試材 B
C	MB-A3004	H112	熱間押出	200×60×t16mm の日形押出材	第 7-1 図 供試材 C

第 6-2 表 供試材の評価試験実施項目

供試材 符号	試験項目					
	化学 成分	引張 試験	時効後 引張試験	衝撃 試験	クリープ/ クリープ破断 試験	物性測定
A	○	○	○	○	○	○
B	○	○	○	○	○	○
C	○	○	○	○	○	○

第 6-3 表 供試材の化学成分の分析結果

供試材 符号	化学成分 (mass%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他	
										個々	合計
A	0.19	0.6	0.16	1.1	1.0	N/A	0.06	—	N/A	0.05 以下	0.15 以下
B	0.18	0.6	0.18	1.1	1.0	0.02	0.04	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
C	0.20	0.5	0.19	1.1	1.0	0.01	0.05	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
規定値 MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下
(参考) JIS H 4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 以上 1.5 以下	0.8 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下

7. マクロ及びマイクロ組織

供試材のT方向断面マクロ組織観察結果を第7-1図に示す。第7-1図の写真中にはやや白く観察される領域があるが、これは熱間押出の際にメタルフローの向きが異なる領域が形成され、エッチング時に光の反射方向が異なるために生じるものであり、欠陥ではない。

断面マイクロ組織観察結果を第7-2図から第7-4図に示す。黒く観察される斑点はAl-Mn系の3000系合金の特徴であるマンガ系晶出物である。

供試材A



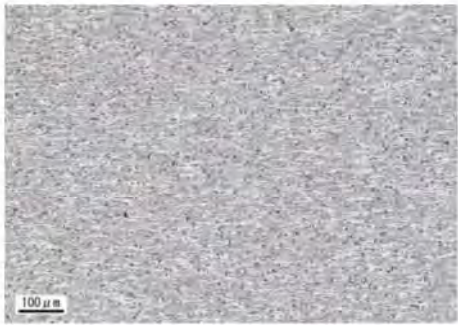



供試材B



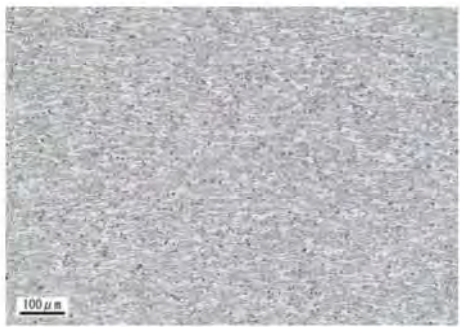
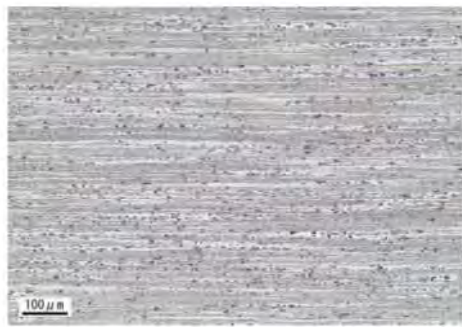


供試材C



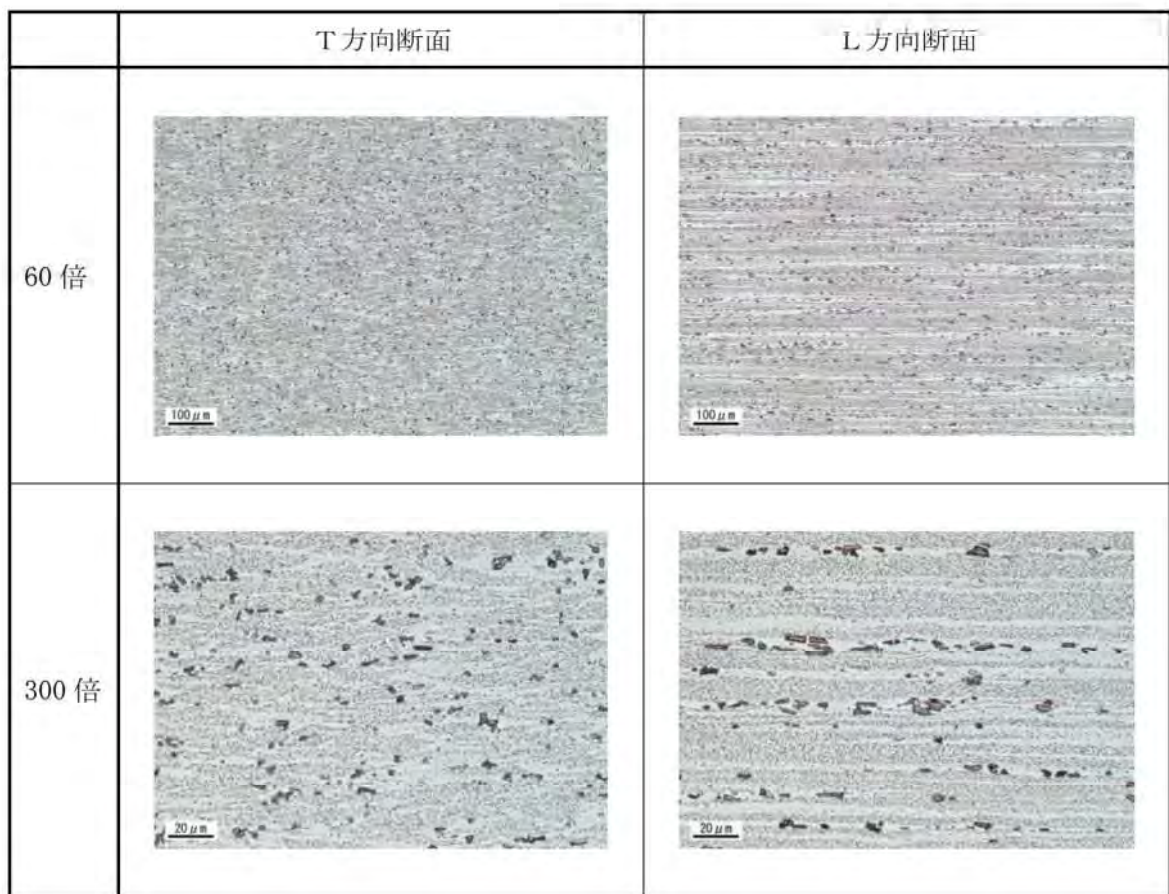
第7-1図 供試材のT方向断面マクロ観察結果

	T方向断面	L方向断面
60倍		
300倍		

第7-2図 供試材（1/2T代表部）の断面マイクロ組織観察結果（供試材A）

	T方向断面	L方向断面
60倍		
300倍		

第7-3図 供試材（1/2T代表部）の断面マイクロ組織観察結果（供試材B）



第7-4図 供試材（1/2T代表部）の断面マイクロ組織観察結果（供試材C）

8. 実用試験

へん平試験、押し広げ試験等の実用試験は溶接部のある管に対し要求されるものであるのに対し、本材料は溶接を行わないため、実用試験は実施していない。

9. 加工性及び加工条件

本材料は押出材を所定の寸法・形状に加工して用いる。本材料は切削性に優れ、あらゆる機械加工が可能である。なお、本材料には溶接は行わない。

また、防食を目的に酸化皮膜等の表面処理を行う場合がある。

10. 機械的性質

10.1 引張特性

(1) 試験条件

・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。

(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。

・ 試験片 : 棒状試験片 (JIS G 0567 : 1998 準拠) を用いた。

・ 試験方法 : JIS Z 2241 : 1998 による。

・ 試験温度 : 常温

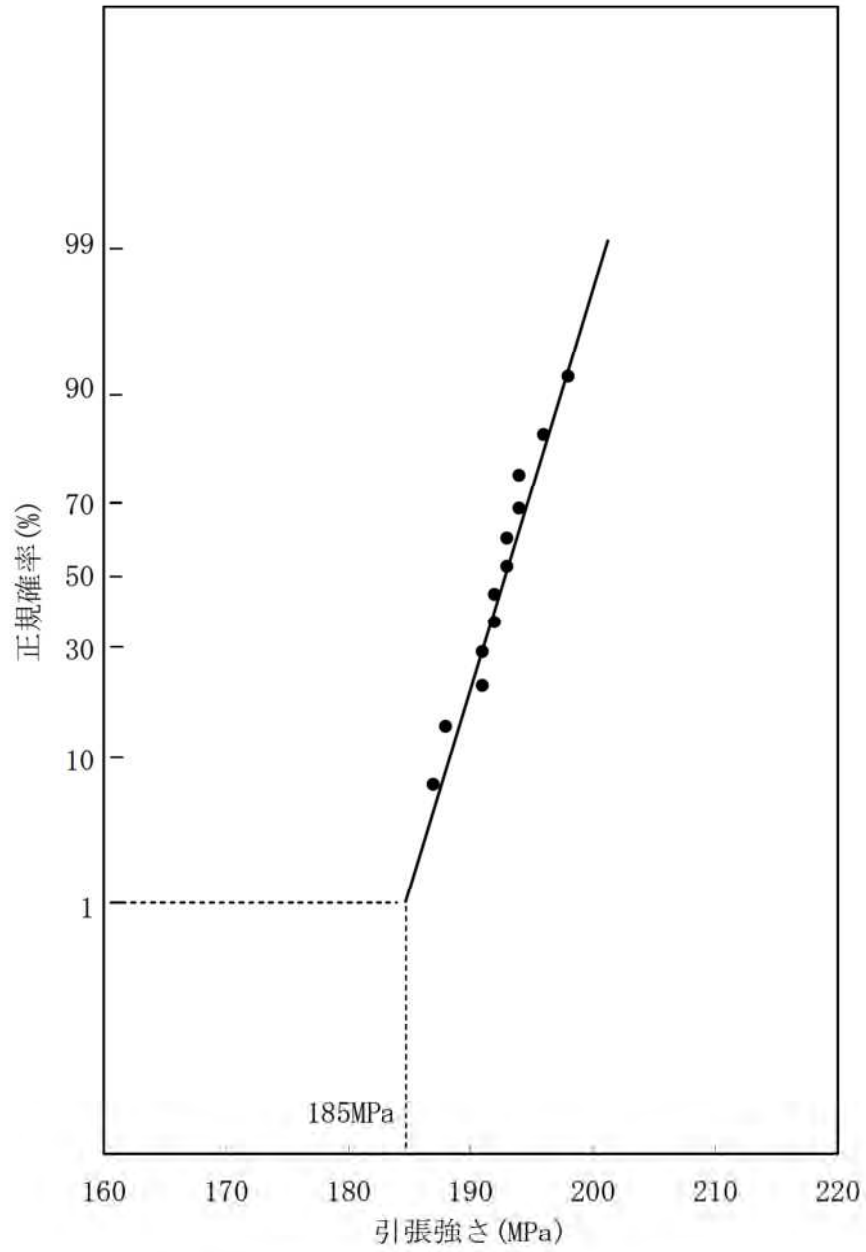
・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

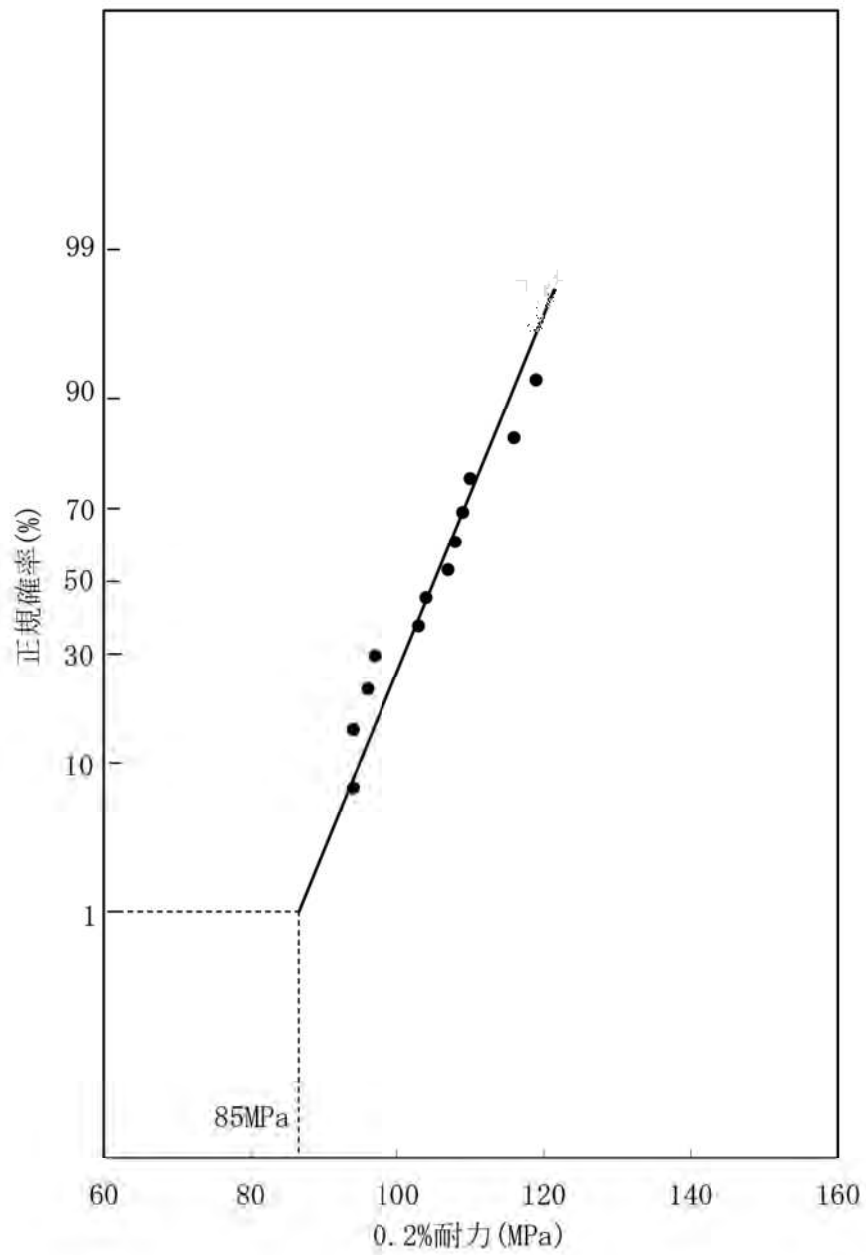
第 10-1 表に引張試験結果を示す。この結果より、引張強さと 0.2%耐力の常温の規格値は、試験データの 99%が包絡されるような最低強度として、平均値から標準偏差の 2.33 倍を減じて安全側に丸めた (小数点以下を切り捨て) 値とした。また、伸びの常温の規格値は、これらデータの 99%が包絡されるような最低伸びが 20%であるものの、後述する高温引張試験の結果において 100°C程度の温度ではこれよりも若干低い伸びを示す特性があることを考慮して 15%と設定した。また、正規確率プロットによる処理結果を第 10-1 図から第 10-3 図、及び第 10-2 表に示す。

第 10-1 表 常温における引張試験結果

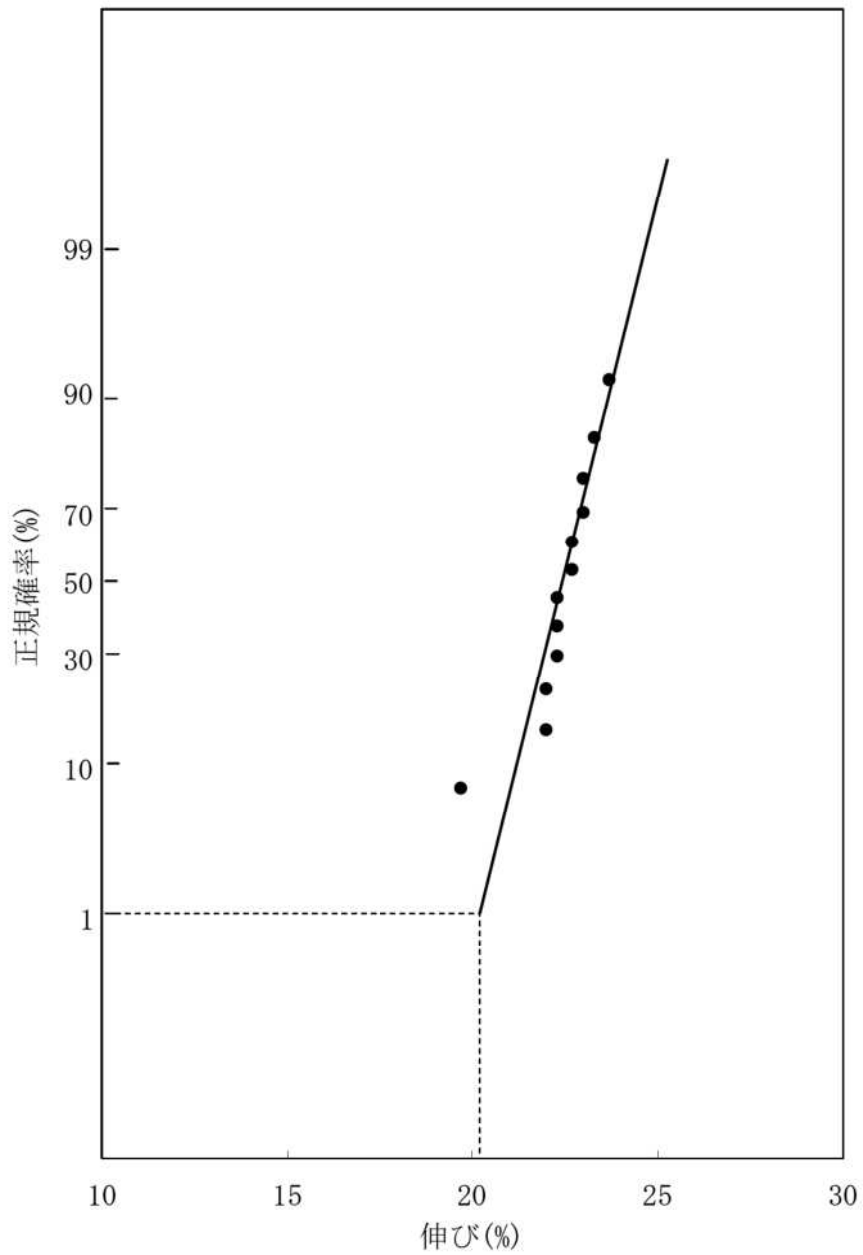
項目	N数	平均値	標準偏差	99%包絡(下限)値
引張強さ(MPa)	12	192	3.1	185
0.2%耐力(MPa)	12	105	8.3	85
伸び(%)	12	22	1.0	



第 10-1 図 引張強さの正規確率プロット



第 10-2 図 0.2%耐力の正規確率プロット



第 10-3 図 伸びの正規確率プロット

(注) 伸びの常温の規格値は、これらデータの 99% が包絡される最低伸びは 20% であるが、高温引張試験の結果において 100℃ 程度の温度ではこれよりも若干低い伸びを示す特性があることを考慮して 15% と設定した。

第 10-2 表 正規確率プロット

	引張強さ		0.2%耐力		伸び	
	引張強さ (MPa)	正規確率 (%)	0.2%耐力 (MPa)	正規確率 (%)	伸び (%)	正規確率 (%)
1	187	7.7	94	7.7	19.7	7.7
2	188	15.4	94	15.4	22.0	15.4
3	191	23.1	96	23.1	22.0	23.1
4	191	30.8	97	30.8	22.3	30.8
5	192	38.5	103	38.5	22.3	38.5
6	192	46.2	104	46.2	22.3	46.2
7	193	53.8	107	53.8	22.7	53.8
8	193	61.5	108	61.5	22.7	61.5
9	194	69.2	109	69.2	23.0	69.2
10	194	76.9	110	76.9	23.0	76.9
11	196	84.6	116	84.6	23.3	84.6
12	198	92.3	119	92.3	23.7	92.3

10.2 靱性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。
(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2242 : 2005 V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2242 : 2005 による。
- ・ 試験温度 : -40°C
- ・ 記録 : 吸収エネルギー、衝撃値及び横膨出量を測定した。

(2) 試験結果

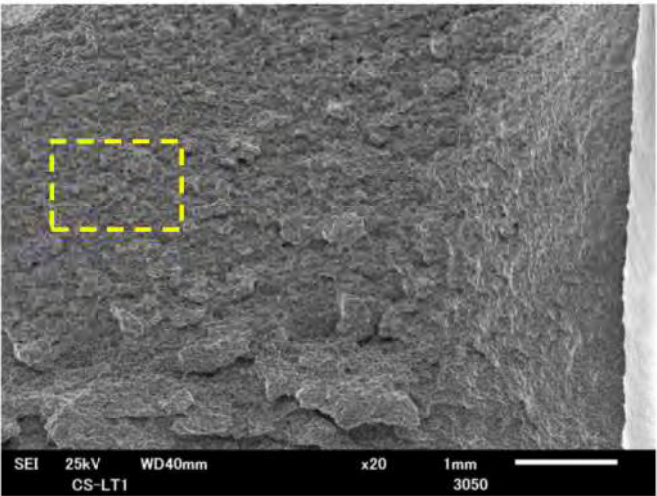
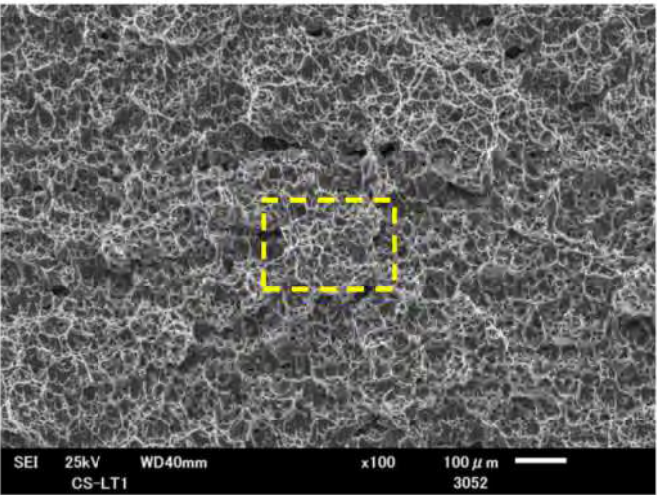
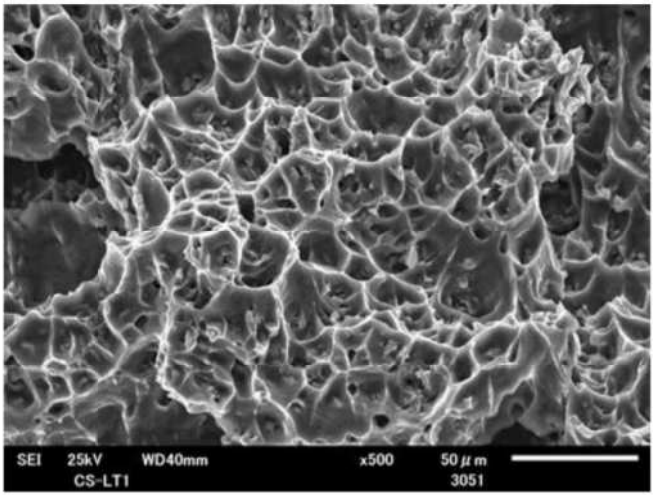
第 10-3 表にシャルピー衝撃試験結果を示す。

本材料はアルミニウム合金であるため、面心立方格子構造 (fcc : face-centered cubic) であり脆性遷移は発生せず、脆性破面率は 0 (ゼロ) である。

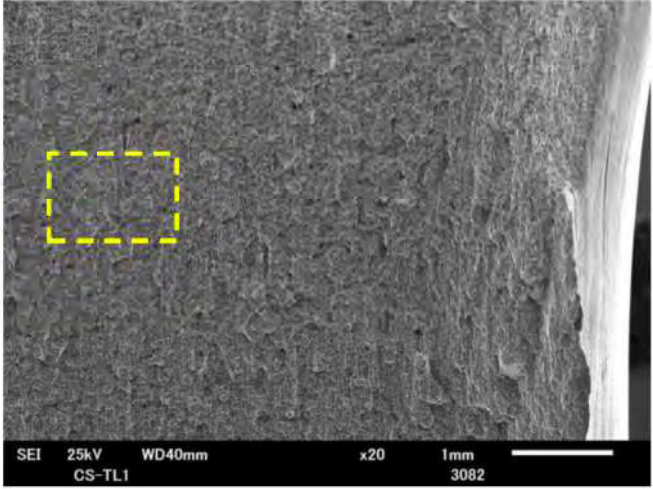
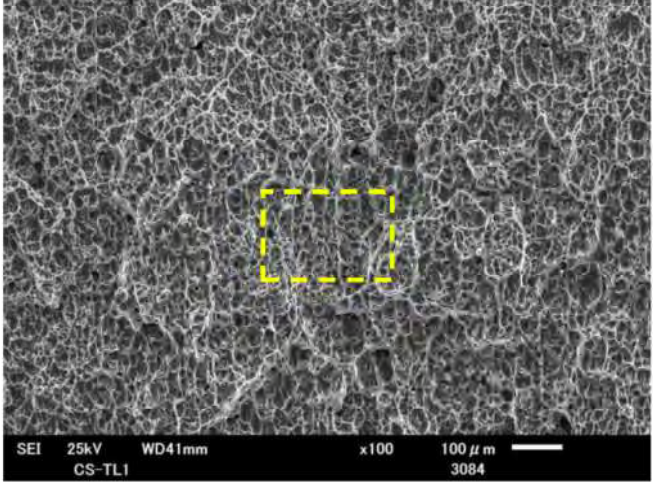
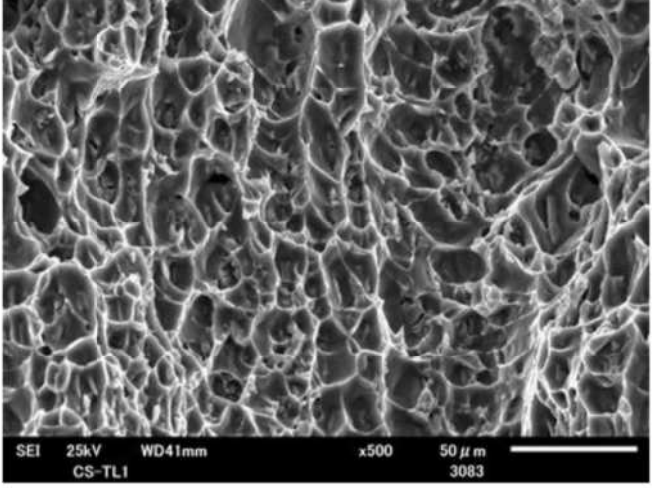
第 10-4 図に衝撃試験を実施した後の破面の拡大観察結果を示す。

第 10-3 表 シャルピー衝撃試験結果

供試材 符号	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	方向	N 数	吸収エネルギー 平均値 (J)	衝撃値 平均値 (J/cm^2)	横膨出量 平均値 (mm)
A	-40	L	3	63	79	2.75
		T	3	45	56	1.80
B	-40	L	3	58	72	2.60
		T	3	44	55	2.15
C	-40	L	3	58	72	2.70
		T	3	41	51	2.08

<p>試験片</p>	<p>供試材C 試験片採取方向：L方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向↑</p> <p>×20</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x20 1mm 3050</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x100 100 μm 3052</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x500 50 μm 3051</p>

第 10-4 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真(1/2)

試験片	<p style="text-align: center;">供試材C 試験片採取方向：T方向 試験温度：-40℃</p>
<p style="text-align: center;">き裂進展方向↑ ×20</p>	
<p style="text-align: center;">×100</p>	
<p style="text-align: center;">×500</p>	

第 10-4 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真(2/2)

10.3 硬さ（参考）

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2245 : 2005 による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : ロックウェル硬さ（F スケール）を測定した。

(2) 試験結果

第 10-4 表に硬さ測定結果を示す。硬さは JIS 規格において要求されておらず、本データは参考値である。

第 10-4 表 硬さ測定結果

N 数	平均値 (HRF)
9	47

11. 高温及び低温引張特性

11.1 高温引張特性（初期材）

(1) 試験条件

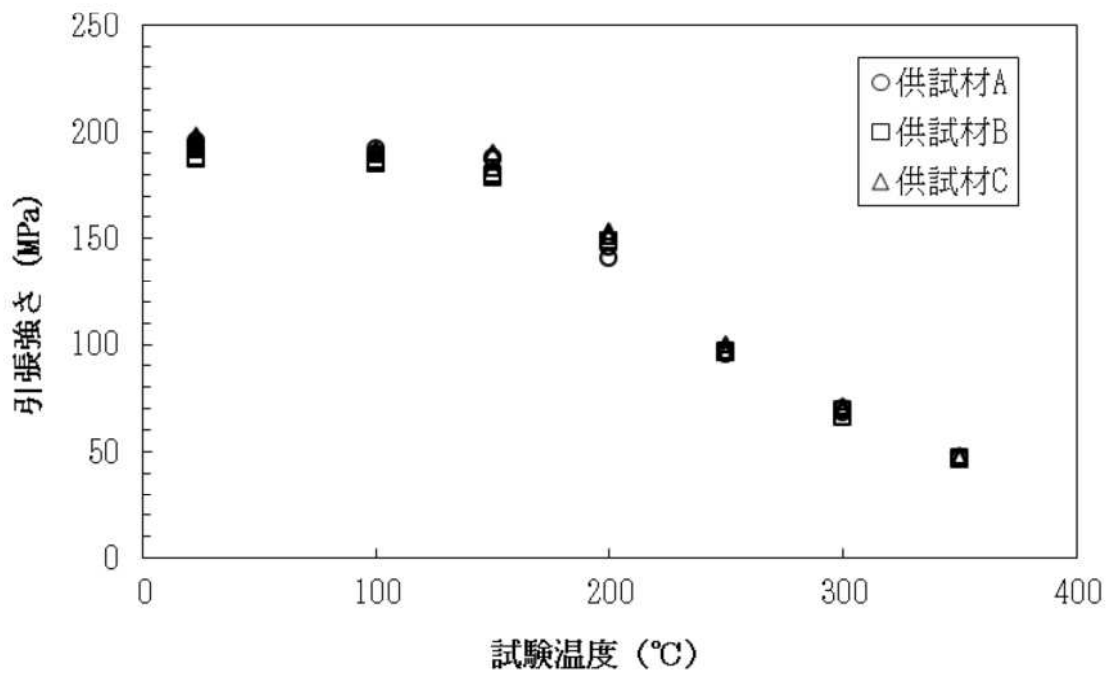
- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。
(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。
- ・ 試験片 : 棒状試験片 (JIS G 0567 : 1998 に準拠) を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS G 0567 : 1998 による。
- ・ 試験温度 : 常温、100、150、200、250、300 及び 350℃
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

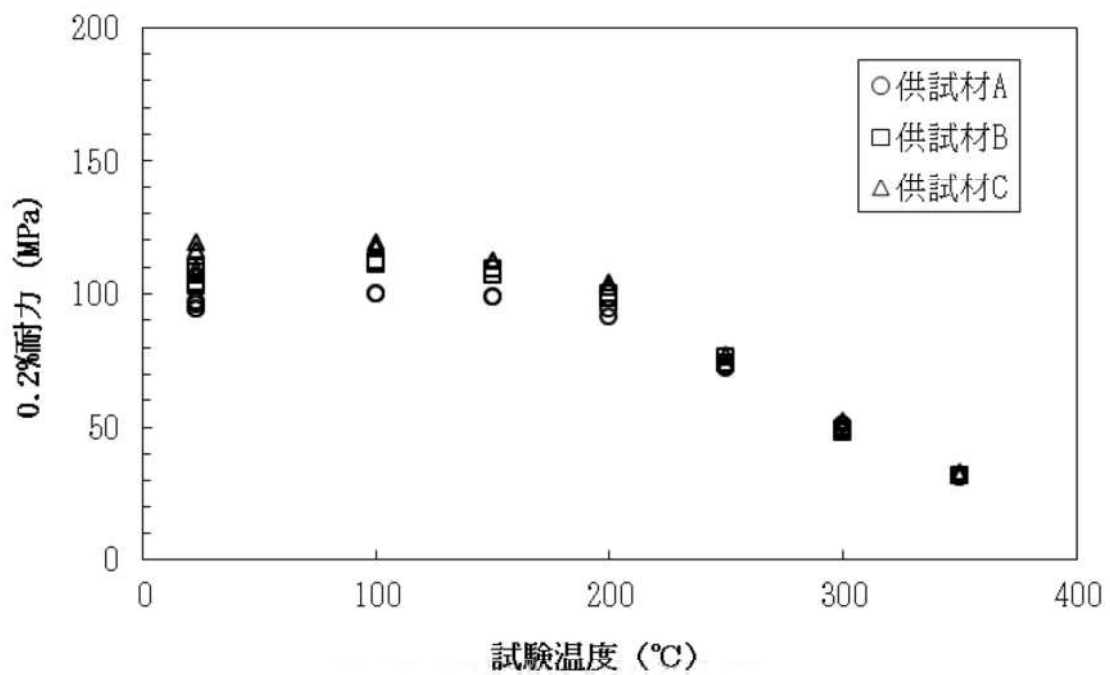
第 11-1 表及び第 11-2 表、第 11-1 図から第 11-3 図に引張試験結果を示す。

第 11-1 表 高温引張試験結果

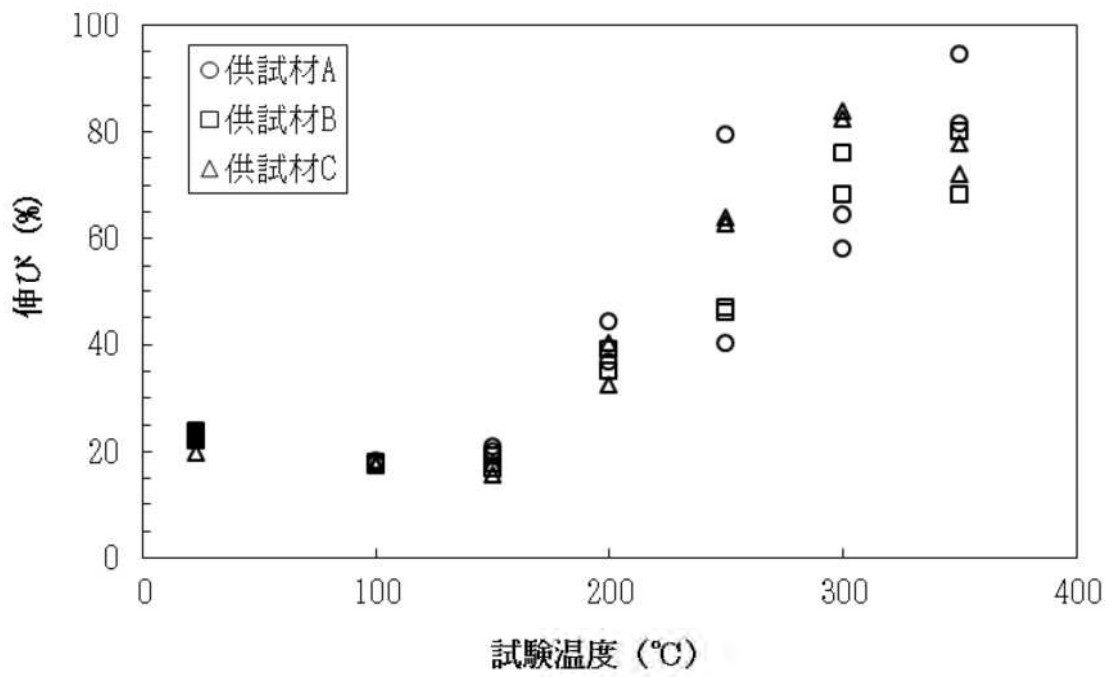
材質		MB-A3004	
試験片形状		JIS G 0567 : 1998	
試験方法		JIS G 0567 : 1998	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
項目	温度	N 数	平均値
引張強さ (MPa)	常温	12	192
	100℃	6	189
	150℃	6	184
	200℃	6	148
	250℃	6	97
	300℃	6	69
	350℃	6	47
0.2%耐力 (MPa)	常温	12	105
	100℃	6	110
	150℃	6	106
	200℃	6	98
	250℃	6	74
	300℃	6	50
	350℃	6	32
伸び (%)	常温	12	22
	100℃	6	18
	150℃	6	18
	200℃	6	38
	250℃	6	56
	300℃	6	72
	350℃	6	79



第 11-1 図 初期材の引張強さ



第 11-2 図 初期材の 0.2%耐力



第 11-3 図 初期材の伸び

第 11-2 表 高温引張試験結果詳細

供試材 符号	試験 温度 (℃)	L 方向			T 方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	97	196	22.3	94	193	23.3
	23	96	194	22.3	94	193	22.7
	100	100	192	18.3			
	100	100	190	17.7			
	150	99	188	20.0			
	150	99	187	20.7			
	200	91	141	44.3			
	200	94	146	36.7			
	250	73	97	40.3			
	250	72	95	79.3			
	300	51	70	58.0			
	300	48	68	64.3			
	350	31	47	81.3			
	350	31	47	94.3			
	B	23	110	192		22.3	104
23		108	192	23.0	103	188	23.7
100		112	186	17.7			
100		111	185	18.0			
150		109	180	16.7			
150		107	178	19.0			
200		100	149	35.0			
200		98	149	39.0			
250		74	96	46.0			
250		76	97	46.7			
300		48	69	76.0			
300		49	66	68.3			
350		32	46	80.0			
350		32	47	68.3			
C		23	119	198		19.7	109
	23	116	194	22.0	107	191	23.0
	100	117	191	17.7			
	100	119	189	17.3			
	150	112	190	15.7			
	150	112	183	17.7			
	200	102	151	40.3			
	200	104	153	32.3			
	250	74	96	63.7			
	250	77	100	62.7			
	300	52	71	82.3			
	300	50	69	83.7			
	350	32	47	72.0			
	350	33	48	77.7			

11.2 低温引張特性

低温での強度を高く設定しないため、該当しない。

11.3 引張特性（時効材）

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。
(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。
- ・ 時効条件 : 250℃で 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr
300℃で 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr の長時間過時効熱処理を行った。
また、520℃×10hr 保持後 0.3℃/hr で制御冷却した完全焼なまし処理を行った。
- ・ 試験片 : 棒状試験片 (JIS G 0567 : 1998 準拠) を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241 : 1998、JIS G 0567 : 1998 による。
- ・ 試験温度 : 常温、100、150、200、250、300 及び 350℃
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

第 11-3 表及び第 11-4 表に引張試験結果を示す。これらのデータに基づき、時効後の強度を評価した。まず、温度変化による強度変化を ASME のトレンドカーブ法を用いて定式化し、これに時効による強度の低下率を乗じることにより評価した。

第 11-4 図と第 11-5 図に引張強さと 0.2%耐力に関するトレンドカーブを示す。

第 11-6 図と第 11-7 図に引張強さと 0.2%耐力に関する時効後強度の低下率を示す。近似にはデータの下限を包絡するような 4 次及び 5 次の多項式を用いた。第 11-5 表に処理結果を示す。

第 11-3 表 時効後の引張試験結果

材質	MB-A3004										
試験片形状	棒状試験片 (JIS Z2201 : 1998 準 4 号試験片)										
試験方法	JIS Z2241 : 1998、JIS G0567 : 1998										
評価材料標本数	3										
評価材料標本符号	供試材 符号A、符号B、符号C										
項目	温度	押出まま(時効なし)		250℃×1,000hr 時効		250℃×5,000hr 時効		300℃×1,000hr 時効		300℃×5,000hr 時効	
		N数	平均値	N数	平均値	N数	平均値	N数	平均値	N数	平均値
引張強さ (MPa)	常温	12	192	6	183	6	181	6	183	6	185
	100℃	6	189	6	176	6	172	6	177	6	178
	150℃	6	184	6	157	6	156	6	166	6	170
	200℃	6	148	6	121	6	121	6	126	6	131
	250℃	6	97	6	88	6	89	6	91	6	90
	300℃	6	69	6	66	6	64	6	65	6	64
	350℃	6	47	6	48	6	49	6	47	6	46
0.2%耐力 (MPa)	常温	12	105	6	84	6	82	6	81	6	84
	100℃	6	110	6	87	6	85	6	82	6	84
	150℃	6	106	6	85	6	83	6	82	6	83
	200℃	6	98	6	80	6	78	6	78	6	80
	250℃	6	74	6	65	6	65	6	65	6	65
	300℃	6	50	6	47	6	46	6	45	6	45
	350℃	6	32	6	31	6	31	6	30	6	30
伸び (%)	常温	12	22	6	22	6	23	6	23	6	19
	100℃	6	18	6	20	6	21	6	18	6	24
	150℃	6	18	6	31	6	30	6	27	6	38
	200℃	6	38	6	52	6	49	6	53	6	50
	250℃	6	56	6	48	6	49	6	46	6	55
	300℃	6	72	6	68	6	65	6	54	6	67
	350℃	6	79	6	66	6	70	6	72	6	19

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (1/7)

(250°C×1,000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L方向			T方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	86	187	22.0	86	180	24.0
	23	85	183	21.5	83	180	22.5
	100	89	179	19.0			
	100	87	179	19.5			
	150	85	158	32.5			
	150	88	160	33.0			
	200	78	118	51.0			
	200	78	117	52.0			
	250	65	88	49.5			
	250	65	88	46.5			
	300	46	64	58.5			
	300	47	66	57.5			
	350	31	48	51.5			
	350	31	49	65.0			
B	23	82	181	22.0	82	175	22.5
	23	82	178	21.5	82	174	23.0
	100	85	173	20.0			
	100	84	172	21.0			
	150	81	153	29.5			
	150	83	154	30.5			
	200	81	123	54.0			
	200	78	120	50.5			
	250	64	89	49.0			
	250	64	89	47.5			
	300	47	64	69.5			
	300	46	66	85.0			
	350	30	47	67.5			
	350	30	47	58.5			
C	23	84	186	21.5	84	180	22.5
	23	83	183	22.0	82	179	22.5
	100	86	178	20.5			
	100	89	177	20.0			
	150	85	157	30.5			
	150	86	159	29.5			
	200	83	126	49.0			
	200	-	-	-			
	250	65	91	52.5			
	250	66	90	50.0			
	300	48	66	71.0			
	300	47	67	65.0			
	350	31	50	69.0			
	350	31	48	81.5			

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (2/7)

(250°C×5,000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L 方向			T 方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	88	190	23.1	86	180	24.4
	23	83	182	24.3	87	180	24.3
	100	87	175	21.2			
	100	88	177	20.8			
	150	84	157	34.6			
	150	89	163	32.7			
	200	78	118	50.2			
	200	77	118	51.9			
	250	65	90	41.6			
	250	64	88	56.9			
	300	47	65	55.4			
	300	45	64	74.6			
	350	31	50	64.7			
	350	32	49	53.7			
B	23	80	177	22.3	82	173	23.2
	23	78	175	24.4	84	172	22.6
	100	84	169	21.4			
	100	84	168	21.4			
	150	81	151	29.3			
	150	81	153	28.1			
	200	77	120	56.3			
	200	79	124	40.9			
	250	62	86	55.7			
	250	62	86	61.8			
	300	44	63	73.9			
	300	46	64	55.0			
	350	32	49	45.9			
	350	31	47	97.8			
C	23	81	183	22.6	86	178	23.9
	23	82	180	23.0	84	177	22.2
	100	84	173	19.6			
	100	83	172	19.9			
	150	82	157	28.5			
	150	81	157	28.0			
	200	78	122	48.4			
	200	80	124	45.8			
	250	65	89	52.9			
	250	64	89	43.5			
	300	47	65	61.1			
	300	46	65	70.0			
	350	31	48	79.7			
	350	31	48	80.1			

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (3/7)

(250°C × 10, 000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L方向			T方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	88	187	21.0			
	23	83	181	21.5			
	100	85	175	20.0			
	100	85	175	20.5			
	150	87	161	29.0			
	150	85	156	30.5			
	200	78	120	47.0			
	200	78	119	34.5			
	250	63	88	45.0			
	250	64	87	38.5			
	300	45	65	61.0			
	300	45	64	70.5			
	350	29	45	55.0			
	350	30	47	85.0			
B	23	82	178	21.0			
	23	80	177	22.5			
	100	81	168	20.5			
	100	82	168	21.0			
	150	80	152	30.0			
	150	78	152	28.0			
	200	75	118	32.5			
	200	75	119	33.5			
	250	61	86	37.5			
	250	60	84	41.5			
	300	44	63	53.5			
	300	44	63	53.0			
	350	29	46	46.0			
	350	28	45	52.5			
C	23	83	183	20.5			
	23	83	181	22.0			
	100	84	172	19.5			
	100	84	171	19.0			
	150	82	155	29.0			
	150	82	155	27.5			
	200	78	122	38.5			
	200	78	119	36.0			
	250	63	89	54.5			
	250	63	88	48.5			
	300	46	66	72.0			
	300	44	64	71.0			
	350	31	47	60.5			
	350	32	49	57.5			

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (4/7)

(300°C×1,000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L方向			T方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	84	190	22.0	85	182	24.0
	23	83	184	24.0	85	181	24.0
	100	87	181	18.0			
	100	85	180	18.5			
	150	84	167	28.5			
	150	87	172	25.5			
	200	79	126	51.5			
	200	80	125	52.5			
	250	64	91	44.5			
	250	65	90	48.0			
	300	46	65	73.5			
	300	46	67	47.5			
	350	30	46	50.5			
	350	30	46	55.0			
B	23	79	181	22.0	80	175	22.5
	23	78	178	23.0	81	175	23.5
	100	81	174	19.0			
	100	80	173	18.5			
	150	78	161	25.5			
	150	79	163	25.5			
	200	79	130	52.5			
	200	76	124	53.5			
	250	62	90	57.0			
	250	64	89	55.5			
	300	44	63	47.5			
	300	44	65	50.5			
	350	29	45	94.0			
	350	29	46	74.5			
C	23	81	184	22.0	81	179	23.0
	23	79	182	22.5	81	178	22.5
	100	81	176	18.0			
	100	80	175	17.5			
	150	81	164	27.5			
	150	85	167	26.5			
	200	79	128	55.5			
	200	77	124	53.5			
	250	65	92	52.5			
	250	63	89	43.5			
	300	44	65	51.0			
	300	44	65	53.0			
	350	30	48	71.0			
	350	30	48	86.5			

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (5/7)

(300°C×5,000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L方向			T方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	86	190	23.0	87	183	23.0
	23	84	185	22.1	86	183	22.7
	100	86	182	18.5			
	100	86	182	19.7			
	150	86	175	21.3			
	150	88	176	24.1			
	200	79	128	39.6			
	200	82	131	39.1			
	250	64	89	51.8			
	250	65	91	48.0			
	300	45	63	52.4			
	300	44	63	59.2			
	350	31	45	45.7			
	350	30	46	49.9			
B	23	83	182	22.0	85	176	22.7
	23	82	180	22.0	84	176	21.7
	100	83	176	19.1			
	100	80	174	19.6			
	150	80	166	22.9			
	150	80	166	23.0			
	200	79	130	35.3			
	200	80	133	36.6			
	250	60	88	56.7			
	250	62	87	52.5			
	300	44	64	60.8			
	300	45	64	68.9			
	350	30	45	63.1			
	350	30	45	79.1			
C	23	86	188	22.0	82	179	22.2
	23	85	183	21.8	84	179	22.7
	100	84	179	18.7			
	100	83	177	18.9			
	150	81	168	26.6			
	150	82	168	24.7			
	200	80	129	39.5			
	200	81	133	36.3			
	250	63	88	51.0			
	250	63	88	46.8			
	300	46	66	42.0			
	300	44	64	46.1			
	350	30	47	86.1			
	350	31	48	79.5			

第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (6/7)

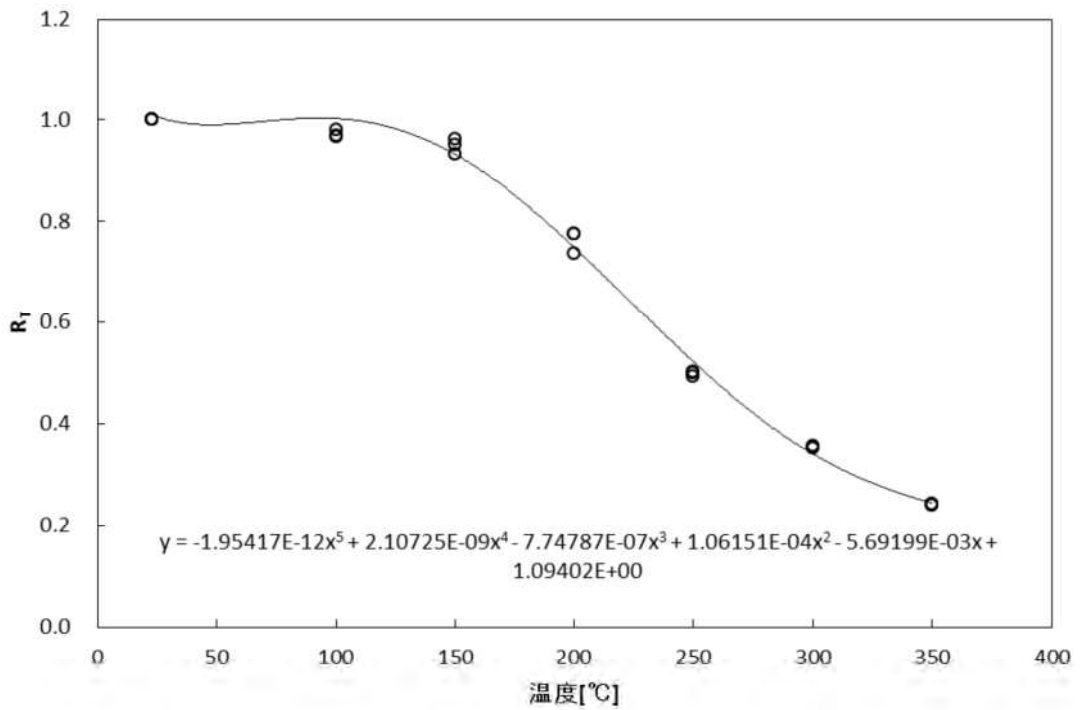
(300°C × 10, 000hr)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	L 方向			T 方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	86	193	22.0			
	23	82	186	22.5			
	100	84	181	19.5			
	100	84	181	19.5			
	150	87	176	26.5			
	150	84	173	26.5			
	200	78	128	53.0			
	200	77	128	55.5			
	250	62	88	85.0			
	250	62	87	75.5			
	300	41	61	92.5			
	300	42	62	85.5			
	350	28	44	54.0			
	350	29	46	83.0			
B	23	78	183	23.5			
	23	77	181	22.5			
	100	81	174	18.5			
	100	80	173	19.0			
	150	79	166	25.0			
	150	79	166	25.0			
	200	76	128	54.0			
	200	76	128	54.0			
	250	59	86	67.0			
	250	58	84	70.0			
	300	42	62	38.0			
	300	41	61	45.5			
	350	28	44	73.5			
	350	27	43	91.5			
C	23	81	187	22.5			
	23	80	185	22.0			
	100	81	177	18.5			
	100	80	176	20.0			
	150	80	167	26.0			
	150	79	169	25.0			
	200	77	128	49.5			
	200	77	127	49.5			
	250	59	85	75.0			
	250	59	84	77.5			
	300	41	61	86.5			
	300	41	61	74.0			
	350	30	45	39.0			
	350	29	45	49.0			

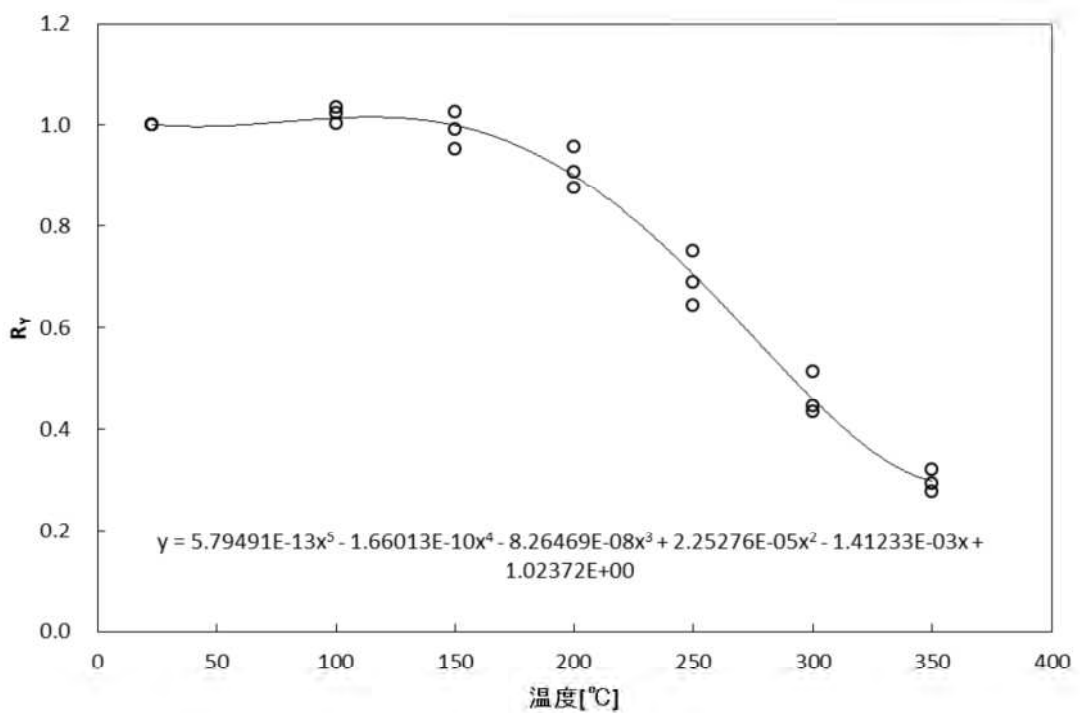
第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (7/7)

(完全焼なまし処理)

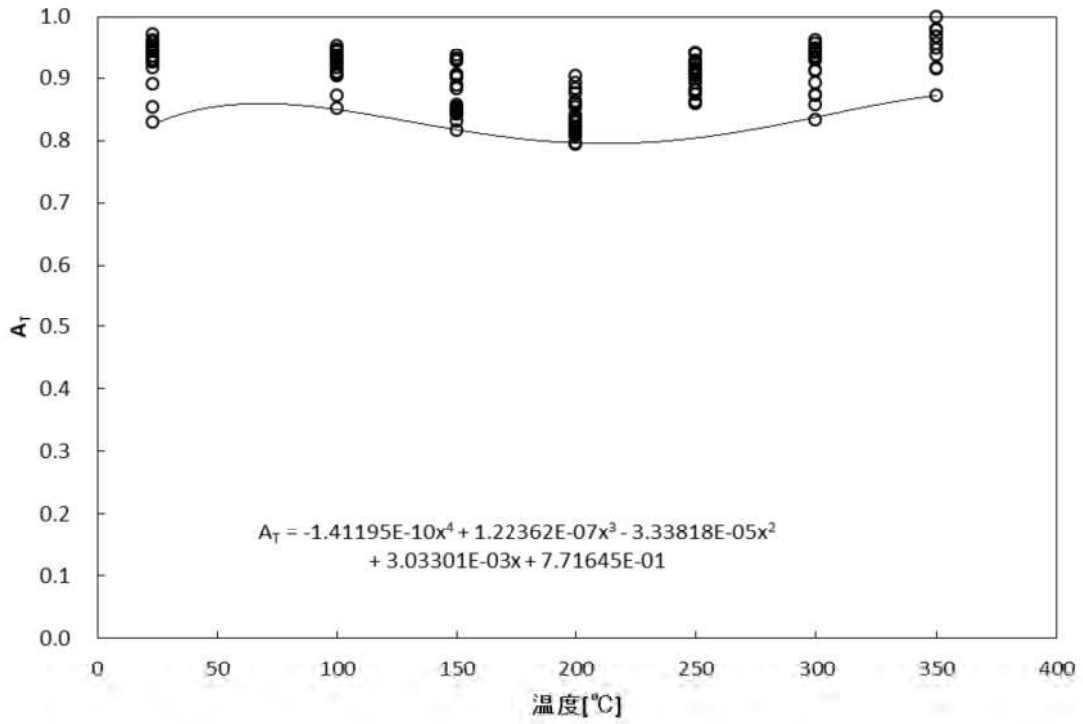
供試材 符号	試験 温度 (℃)	L 方向			T 方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	80	162	21.5			
	23	75	161	21.5			
	100	77	160	19.0			
	100	86	165	18.0			
	150	80	153	24.5			
	150	83	153	23.5			
	200	75	121	38.0			
	200	74	120	40.5			
	250	58	82	62.0			
	250	58	83	54.0			
	300	39	57	86.0			
	300	39	58	88.0			
	350	26	41	59.5			
	350	27	41	63.0			
B	23	85	173	20.5			
	23	85	169	21.0			
	100	91	168	18.5			
	100	92	168	17.5			
	150	86	157	23.0			
	150	86	159	23.0			
	200	77	121	38.5			
	200	76	121	38.0			
	250	59	83	62.0			
	250	59	83	54.0			
	300	41	59	75.5			
	300	40	59	69.0			
	350	27	43	51.0			
	350	27	42	62.5			
C	23	78	168	20.5			
	23	79	166	20.5			
	100	83	165	18.0			
	100	86	166	17.5			
	150	82	156	22.5			
	150	81	158	22.5			
	200	74	122	36.5			
	200	77	123	38.5			
	250	59	85	48.5			
	250	61	86	46.5			
	300	41	60	86.0			
	300	42	60	86.5			
	350	28	43	51.5			
	350	28	44	99.0			



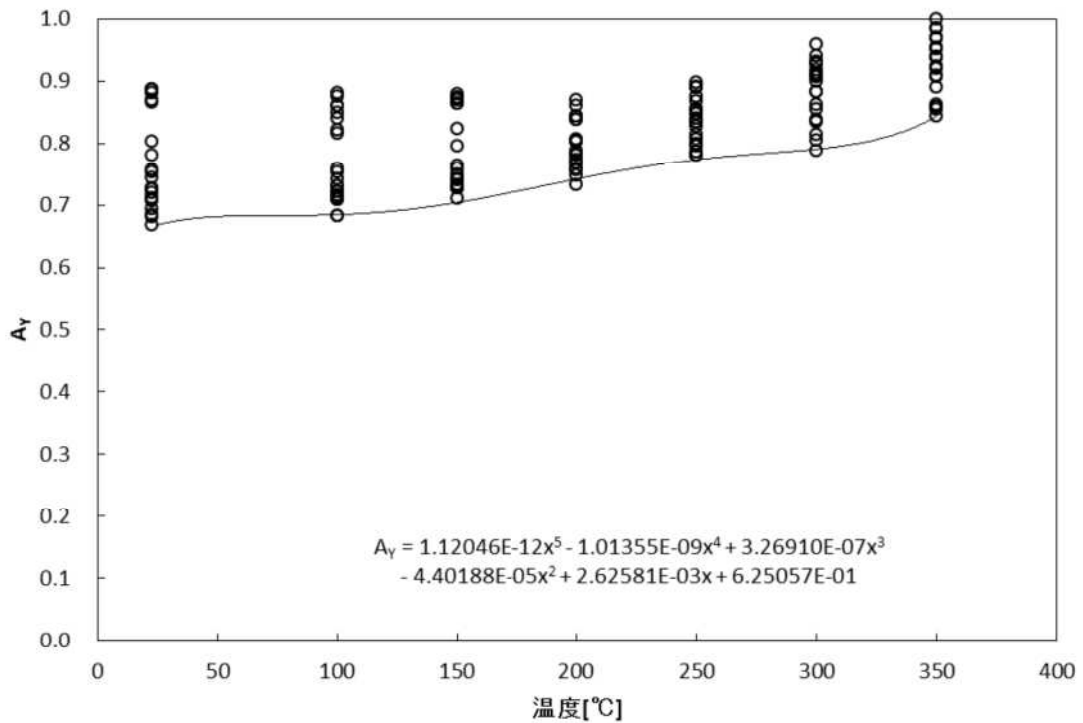
第 11-4 図 引張強さに関する初期材のトレンドカーブ



第 11-5 図 0.2%耐力に関する初期材のトレンドカーブ



第 11-6 図 引張強さに関する時効後強度の低下率



第 11-7 図 0.2%耐力に関する時効後強度の低下率

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (1/7)

(初期材トレンドカーブデータ)

供試材 符号	温度 (℃)	引張強さ		0.2%耐力	
		平均値 (MPa)	常温値で 規格化 した値	平均値 (MPa)	常温値で 規格化 した値
A	23	195.0	1.00	96.5	1.00
	100	191.0	0.98	100.0	1.04
	150	187.5	0.96	99.0	1.03
	200	143.5	0.74	92.5	0.96
	250	96.0	0.49	72.5	0.75
	300	69.0	0.35	49.5	0.51
	350	47.0	0.24	31.0	0.32
B	23	192.0	1.00	109.0	1.00
	100	185.5	0.97	111.5	1.02
	150	179.0	0.93	108.0	0.99
	200	149.0	0.78	99.0	0.91
	250	96.5	0.50	75.0	0.69
	300	67.5	0.35	48.5	0.45
	350	46.5	0.24	32.0	0.29
C	23	196.0	1.00	117.5	1.00
	100	190.0	0.97	118.0	1.00
	150	186.5	0.95	112.0	0.95
	200	152.0	0.78	103.0	0.88
	250	98.0	0.50	75.5	0.64
	300	70.0	0.36	51.0	0.43
	350	47.5	0.24	32.5	0.28

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (2/7)

(時効による引張強さ低減係数)

供試材 符号	温度 (°C)	250°C×1,000hr		250°C×5,000hr		300°C×1,000hr		300°C×5,000hr	
		平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比
A	23	185.0	0.95	186.0	0.95	187.0	0.96	187.5	0.96
	100	179.0	0.94	176.0	0.92	180.5	0.95	182.0	0.95
	150	159.0	0.85	160.0	0.85	169.5	0.90	175.5	0.94
	200	117.5	0.82	118.0	0.82	125.5	0.87	129.5	0.90
	250	88.0	0.92	89.0	0.93	90.5	0.94	90.0	0.94
	300	65.0	0.94	64.5	0.93	66.0	0.96	63.0	0.91
	350	48.5	1.03	49.5	1.05	46.0	0.98	45.5	0.97
B	23	179.5	0.93	176.0	0.92	179.5	0.93	181.0	0.94
	100	172.5	0.93	168.5	0.91	173.5	0.94	175.0	0.94
	150	153.5	0.86	152.0	0.85	162.0	0.91	166.0	0.93
	200	121.5	0.82	122.0	0.82	127.0	0.85	131.5	0.88
	250	89.0	0.92	86.0	0.89	89.5	0.93	87.5	0.91
	300	65.0	0.96	63.5	0.94	64.0	0.95	64.0	0.95
	350	47.0	1.01	48.0	1.03	45.5	0.98	45.0	0.97
C	23	184.5	0.94	181.5	0.93	183.0	0.93	185.5	0.95
	100	177.5	0.93	172.5	0.91	175.5	0.92	178.0	0.94
	150	158.0	0.85	157.0	0.84	165.5	0.89	168.0	0.90
	200	126.0	0.83	123.0	0.81	126.0	0.83	131.0	0.86
	250	90.5	0.92	89.0	0.91	90.5	0.92	88.0	0.90
	300	66.5	0.95	65.0	0.93	65.0	0.93	65.0	0.93
	350	49.0	1.03	48.0	1.01	48.0	1.01	47.5	1.00

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (3/7)

(時効による引張強さ低減係数)

供試材 符号	温度 (°C)	250°C×10,000hr		300°C×10,000hr		完全焼なまし処理	
		平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比
A	23	184.0	0.94	189.5	0.97	161.5	0.83
	100	175.0	0.92	181.0	0.95	162.5	0.85
	150	158.5	0.85	174.5	0.93	153.0	0.82
	200	119.5	0.83	128.0	0.89	120.5	0.84
	250	87.5	0.91	87.5	0.91	82.5	0.86
	300	64.5	0.93	61.5	0.89	57.5	0.83
	350	46.0	0.98	45.0	0.96	41.0	0.87
B	23	177.5	0.92	182.0	0.95	171.0	0.89
	100	168.0	0.91	173.5	0.94	168.0	0.91
	150	152.0	0.85	166.0	0.93	158.0	0.88
	200	118.5	0.80	128.0	0.86	121.0	0.81
	250	85.0	0.88	85.0	0.88	83.0	0.86
	300	63.0	0.93	61.5	0.91	59.0	0.87
	350	45.5	0.98	43.5	0.94	42.5	0.91
C	23	182.0	0.93	186.0	0.95	167.0	0.85
	100	171.5	0.90	176.5	0.93	165.5	0.87
	150	155.0	0.83	168.0	0.90	157.0	0.84
	200	120.5	0.79	127.5	0.84	122.5	0.81
	250	88.5	0.90	84.5	0.86	85.5	0.87
	300	65.0	0.93	61.0	0.87	60.0	0.86
	350	48.0	1.01	45.0	0.95	43.5	0.92

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (4/7)

(時効による引張強さ低減係数 (最低値))

温度	A_T
23	0.83
100	0.85
150	0.82
200	0.79
250	0.86
300	0.83
350	0.87

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (5/7)

(時効による 0.2%耐力低減係数)

供試材 符号	温度 (°C)	250°C×1,000hr		250°C×5,000hr		300°C×1,000hr		300°C×5,000hr	
		平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比
A	23	85.5	0.89	85.5	0.89	83.5	0.87	85.0	0.88
	100	88.0	0.88	87.5	0.88	86.0	0.86	86.0	0.86
	150	86.5	0.87	86.5	0.87	85.5	0.86	87.0	0.88
	200	78.0	0.84	77.5	0.84	79.5	0.86	80.5	0.87
	250	65.0	0.90	64.5	0.89	64.5	0.89	64.5	0.89
	300	46.5	0.94	46.0	0.93	46.0	0.93	44.5	0.90
	350	31.0	1.00	31.5	1.02	30.0	0.97	30.5	0.98
B	23	82.0	0.75	79.0	0.72	78.5	0.72	82.5	0.76
	100	84.5	0.76	84.0	0.75	80.5	0.72	81.5	0.73
	150	82.0	0.76	81.0	0.75	78.5	0.73	80.0	0.74
	200	79.5	0.80	78.0	0.79	77.5	0.78	79.5	0.80
	250	64.0	0.85	62.0	0.83	63.0	0.84	61.0	0.81
	300	46.5	0.96	45.0	0.93	44.0	0.91	44.5	0.92
	350	30.0	0.94	31.5	0.98	29.0	0.91	30.0	0.94
C	23	83.5	0.71	81.5	0.69	80.0	0.68	85.5	0.73
	100	87.5	0.74	83.5	0.71	80.5	0.68	83.5	0.71
	150	85.5	0.76	81.5	0.73	83.0	0.74	81.5	0.73
	200	83.0	0.81	79.0	0.77	78.0	0.76	80.5	0.78
	250	65.5	0.87	64.5	0.85	64.0	0.85	63.0	0.83
	300	47.5	0.93	46.5	0.91	44.0	0.86	45.0	0.88
	350	31.0	0.95	31.0	0.95	30.0	0.92	30.5	0.94

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (6/7)

(時効による 0.2%耐力低減係数)

供試材 符号	温度 (°C)	250°C×10,000hr		300°C×10,000hr		完全焼なまし処理	
		平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比	平均値 (MPa)	初期材 との比
A	23	85.5	0.89	84.0	0.87	77.5	0.80
	100	85.0	0.85	84.0	0.84	81.5	0.82
	150	86.0	0.87	85.5	0.86	81.5	0.82
	200	78.0	0.84	77.5	0.84	74.5	0.81
	250	63.5	0.88	62.0	0.86	58.0	0.80
	300	45.0	0.91	41.5	0.84	39.0	0.79
	350	29.5	0.95	28.5	0.92	26.5	0.85
B	23	81.0	0.74	77.5	0.71	85.0	0.78
	100	81.5	0.73	80.5	0.72	91.5	0.82
	150	79.0	0.73	79.0	0.73	86.0	0.80
	200	75.0	0.76	76.0	0.77	76.5	0.77
	250	60.5	0.81	58.5	0.78	59.0	0.79
	300	44.0	0.91	41.5	0.86	40.5	0.84
	350	28.5	0.89	27.5	0.86	27.0	0.84
C	23	83.0	0.71	80.5	0.69	78.5	0.67
	100	84.0	0.71	80.5	0.68	84.5	0.72
	150	82.0	0.73	79.5	0.71	81.5	0.73
	200	78.0	0.76	77.0	0.75	75.5	0.73
	250	63.0	0.83	59.0	0.78	60.0	0.79
	300	45.0	0.88	41.0	0.80	41.5	0.81
	350	31.5	0.97	29.5	0.91	28.0	0.86

第 11-5 表 初期材及び時効後の引張試験 計測値処理結果 (7/7)

(時効による 0.2%耐力低減係数 (最低値))

温度	Λ_Y
23	0.67
100	0.68
150	0.71
200	0.73
250	0.78
300	0.79
350	0.84

12. クリープ特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。

(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。

- ・ 試験片 : 円形断面試験片 (JIS Z 2271 : 2010 に準拠)
- ・ 試験方法 : JIS Z 2271 : 2010 による。
- ・ 試験温度 : 200、250、300 及び 350°C

なお、試験時間は最長約 10,460 時間 (未破断) である。

(2) 試験結果

応力-破断時間プロットを第 12-1 図及び第 12-1 表に示す。破断時間をラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) を用いて応力で直線回帰した次式を用いて、100,000hr クリープ破断強さ及び 60 年間クリープ破断強さの推定を行った。LMP における定数は、直線回帰で得られた式と実測値の差の二乗和が最小となるような整数として 13 と定めた。

平均クリープ破断強さは以下のとおりである。

$$\text{LMP} = (T + 273.15) (13 + \log t_r) \times 10^{-3} = 13.31 - 3.36 (\log \sigma)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- T : 温度 (°C)
- t_r : 破断時間 (hr)
- σ : 応力 (MPa)

また、100,000hr でクリープ破断を生じる最小クリープ応力については、100,000hr でクリープ破断を生じる平均応力に対して破断時間に時間係数 $\alpha_R=10$ を考慮した破断応力、すなわち、1,000,000hr でクリープ破断を生じる平均応力として設定した。最小クリープ破断強さは以下のとおりである。

$$\text{LMP} = (T + 273.15) (13 + \log t_r) \times 10^{-3} = 12.61 - 3.18 (\log \sigma)$$

種々の温度において算出したクリープ破断強さ、及び温度が初期から低下せずに 200°C 一定と仮定した場合の 60 年間クリープ破断強さを第 12-1 表に示す。60 年間で破断に至る最小の応力は 200°C で 15.3MPa である。

応力-定常クリープ速度プロットを第 12-2 図及び第 12-2 表に示す。定常クリープ速度を LMP として応力で直線回帰すると以下のとおりとなる。LMP における定数は、直線回帰で得られた式と実測値の差の二乗和が最小となるような整数として 13 と定めた。

定常クリープ速度は以下のとおりである。

$$\text{LMP} = (T + 273.15) (13 - \log \dot{\epsilon}) \times 10^{-3} = 12.77 - 2.51 (\log \sigma)$$

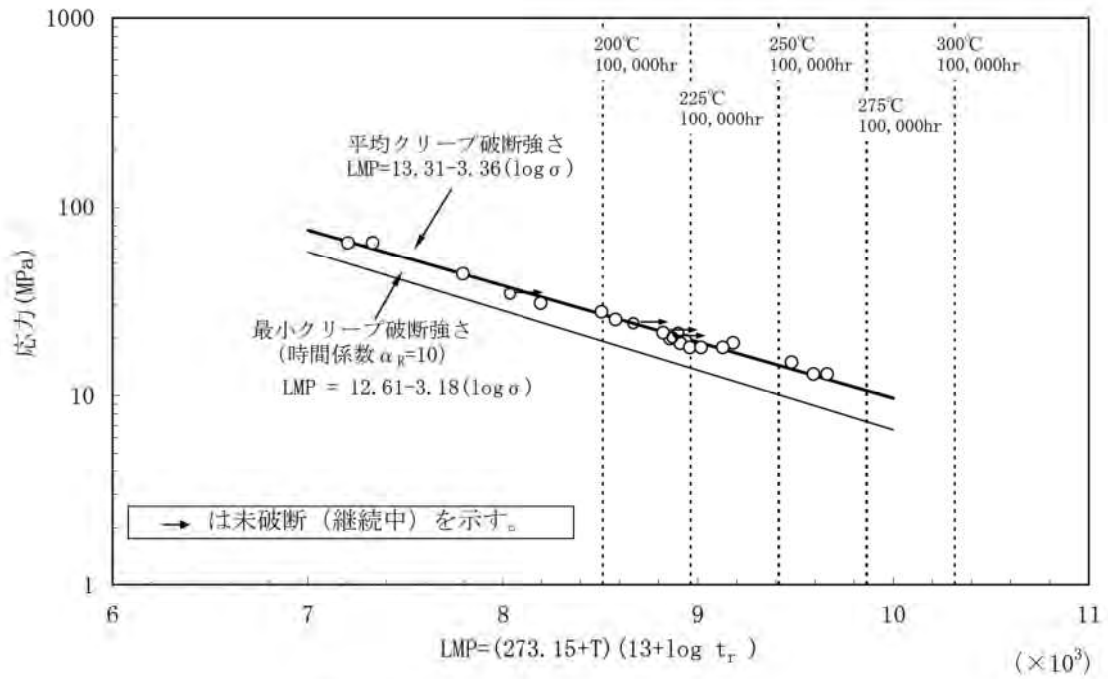
ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

T : 温度(°C)

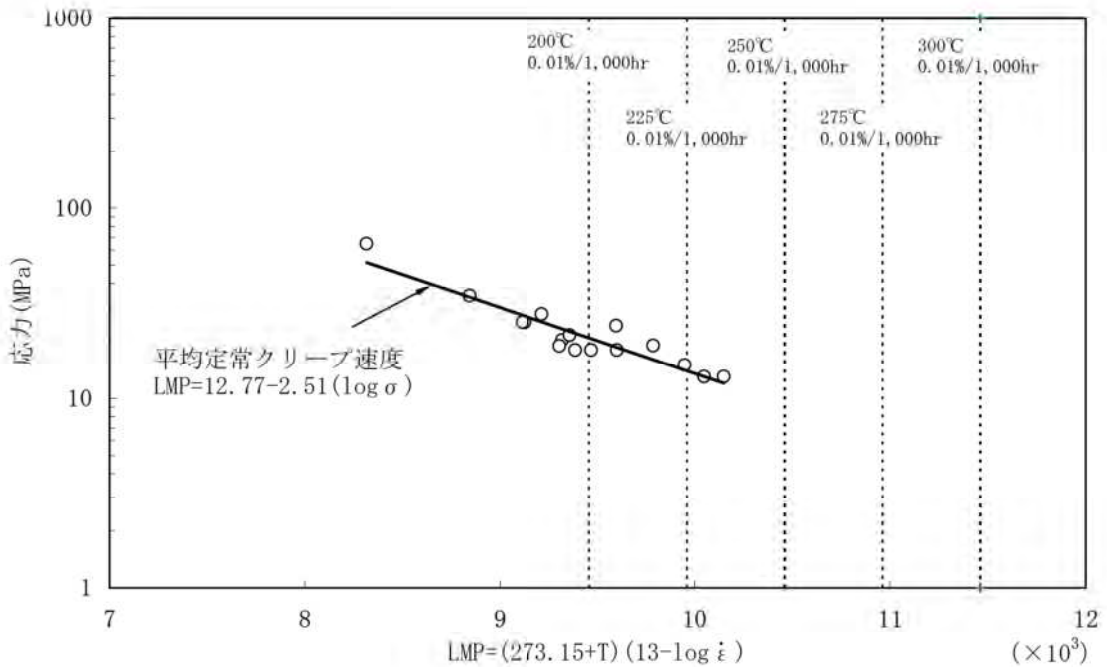
$\dot{\epsilon}$: 定常クリープ速度(hr^{-1})

σ : 応力(MPa)

これを用いて S_c (0.01% / 1,000hr のクリープ速度を生じる応力の平均値) を算出した。



第 12-1 図 応力-破断時間プロット



第 12-2 図 応力-定常クリーブ速度プロット

第 12-1 表 0.01%/1,000hr クリープ強さ、100,000hr 破断強さ及び 60 年間破断強さ (1/3)

(a) 種々の温度における 0.01%/1,000hr クリープ強さ

温度 (°C)	0.01%/1,000hr に対応する LMP ($\times 10^3$)	0.01%/1,000hr クリープ強さ (MPa) (注1)
100	7.46	(129.0)
125	7.96	(81.6)
150	8.46	(51.6)
175	8.96	(32.7)
200	9.46	20.7
225	9.96	13.1
250	10.46	(8.3)
275	10.96	(5.2)
300	11.46	(3.3)
325	11.96	(2.1)
350	12.46	(1.3)

(注1) () 内の数値は、クリープ試験を実施した温度以下又は応力以下における外挿値である。

第 12-1 表 0.01%/1,000hr クリープ強さ、100,000hr 破断強さ及び 60 年間破断強さ (2/3)

(b) 種々の温度における 100,000hr 破断強さ

温度 (°C)	LMP ($\times 10^3$)	平均クリープ 破断強さ (MPa) (注1)	最小クリープ 破断強さ (MPa) (注1)
100	6.72	(92.0)	(71.2)
125	7.17	(67.6)	(51.4)
150	7.62	(49.6)	(37.1)
175	8.07	(36.4)	(26.8)
200	8.52	26.7	19.3
225	8.97	19.6	13.9
250	9.42	14.4	10.1
275	9.87	(10.6)	(7.3)
300	10.32	(7.8)	(5.2)
325	10.77	(5.7)	(3.8)
350	11.22	(4.2)	(2.7)

(注1) () 内の数値は、クリープ破断試験を実施した温度以下又は応力以下における外挿値である。

第 12-1 表 0.01%/1,000hr クリープ強さ、100,000hr 破断強さ及び 60 年間破断強さ (3/3)

(c) 200°Cにおける 60 年間破断強さ

温度 (°C)	LMP ($\times 10^3$)	平均クリープ 破断強さ (MPa)	最小クリープ 破断強さ (MPa)
200	8.86	21.2	15.3

第12-2表 クリープ試験計測結果 (1/2)

供試材 符号	試験 温度 (°C)	応力 σ (MPa)	破断時間 (hr)	破断 LMP (定数 13)	破断伸び (%)	破断絞り (%)
A	200	64.8	171.6	7.21	31.3	86.1
	200	44.1	3016.6	7.80	39.9	89.9
	200	34.5	10376(未破断)	(8.05)	—	—
	250	30.8	472.3	8.20	66.8	92.8
	250	25.2	2542.7	8.58	65.5	93.5
	250	21.5	11208(未破断)	(8.92)	—	—
	250	20.3	8454.3(未破断)	(8.86)	—	—
	300	19.5	395.3	8.94	61.3	94.7
	300	18.9	356.5	8.91	67.9	96
	300	20.0	288.7	8.86	57.8	95
	350	18.0	24.1	8.96	62.3	93
	350	13.0	248.9	9.59	90.4	95
B	200	64.8	318.0	7.33	49	84.4
	250	27.7	1860.1	8.51	—	—
	300	21.5	250.8	8.83	69.4	92
	350	18.0	29.8	9.02	89.1	93
	350	13.0	322.9	9.66	66.9	95
C	200	25.2	5831(未破断)	(7.93)	—	—
	250	24.1	5830.8(未破断)	(8.77)	—	—
	300	19.0	1056.5	9.18	74.8	92.9
	350	18.0	45.0	9.13	82.7	92
	350	15.0	164.8	9.48	89.1	96

第12-2表 クリープ試験計測結果 (2/2)

供試材 符号	試験温度 (°C)	応力 (MPa)	定常クリープ速度 (hr ⁻¹)	LMP (定数 13)
A	200	34.5	2.0×10^{-6}	8.05
	250	25.2	3.5×10^{-5}	8.58
	250	20.3	1.5×10^{-5}	8.86
	300	18.9	5.7×10^{-4}	8.91
	350	18.0	8.5×10^{-3}	8.96
	350	13.0	7.4×10^{-4}	9.59
B	200	64.8	2.6×10^{-5}	7.33
	250	27.7	2.4×10^{-5}	8.51
	300	21.5	4.6×10^{-4}	8.83
	350	18.0	6.3×10^{-3}	9.02
	350	13.0	5.1×10^{-4}	9.66
C	200	25.2	5.3×10^{-7}	7.93
	250	24.1	4.4×10^{-6}	8.77
	300	19.0	8.3×10^{-5}	9.18
	350	18.0	3.9×10^{-3}	9.13
	350	15.0	1.1×10^{-3}	9.48

13. 靱性（時効後）

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-2 表に示す 3 標本を対象とした。試験材は、JIS H 4100 : 2006 に従って、断面内の辺中央領域の一般部より採取^(注1)している。
(注1) 試験材の板厚が均一で、熱処理を行わないため、一般部を材料特性の代表部位として試験片切り出し位置とすることは、適切と判断した。
- ・ 時効条件 : 250℃で 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr
300℃で 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr の過時効熱処理を行った。
また、520℃×10hr 保持後 0.3℃/hr で制御冷却した完全焼なまし処理を行った。
- ・ 試験片 : JIS Z 2242 : 2005 V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2242 : 2005 による。
- ・ 試験温度 : -40℃
- ・ 記録 : 吸収エネルギー、衝撃値及び横膨出量を測定した。

(2) 試験結果

第 13-1 表及び第 13-2 表にシャルピー衝撃試験結果を示す。時効によって衝撃値、吸収エネルギー及び横膨出量は若干減少するが、時効条件による有意な特性変化は無い。

また、時効後においても脆性遷移は発生せず、脆性破面率は 0（ゼロ）であった。

第 13-1 図に衝撃試験を実施した後の破面の拡大観察結果を示す。

第 13-1 表 シャルピー衝撃試験結果

材質		MB-A3004									
試験片形状		JIS Z 2242 : 2005 (Vノッチシャルピー衝撃試験片)									
試験方法		JIS Z 2242 : 2005									
評価材料標本数		3									
評価材料標本符号		A、B、C									
供試材 符号	項目	試験温度 (°C)	N数	初期材	250°C× 1,000hr	250°C× 5,000hr	250°C× 10,000hr (注1)	300°C× 1,000hr	300°C× 5,000hr	300°C× 10,000hr (注1)	完全焼なまし 処理
				平均値(J)	平均値(J)	平均値(J)	平均値(J)	平均値(J)	平均値(J)	平均値(J)	
A	吸収 エネルギー (J)	-40	6	54	62	60	57	56	50	47	52
B		-40	6	51	56	54	51	52	50	45	56
C		-40	6	50	54	53	49	51	47	41	48
A	衝撃値 (J/cm ²)	-40	6	68	78	75	71	69	63	59	65
B		-40	6	64	70	68	63	65	63	56	70
C		-40	6	62	67	66	61	64	59	51	60
A	横膨出量 (mm)	-40	6	2.28	1.81	1.69	1.63	1.77	1.67	1.53	1.62
B		-40	6	2.38	1.81	1.75	1.58	1.80	1.73	1.50	1.94
C		-40	6	2.39	1.80	1.75	1.55	1.79	1.73	1.43	1.82

(注1) 250°C×10,000hr 及び 300°C×10,000hr の過時効熱処理材のN数は3である。

第 13-2 表 シャルピー衝撃試験計測結果 (1/3)

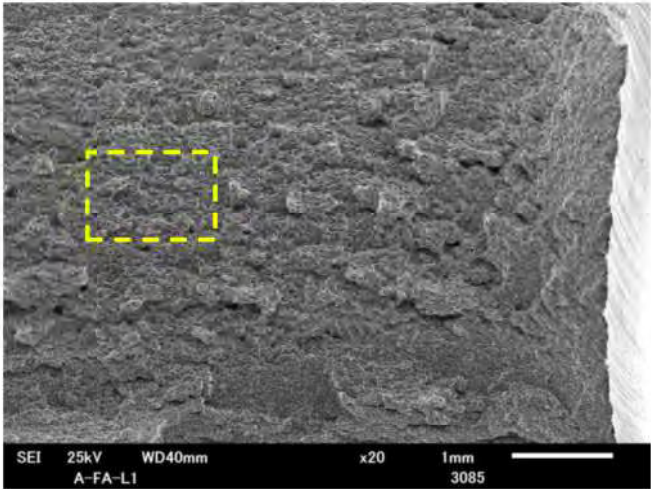
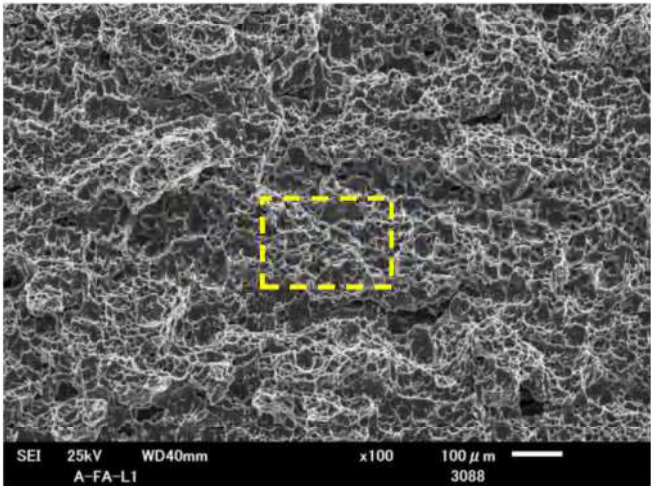
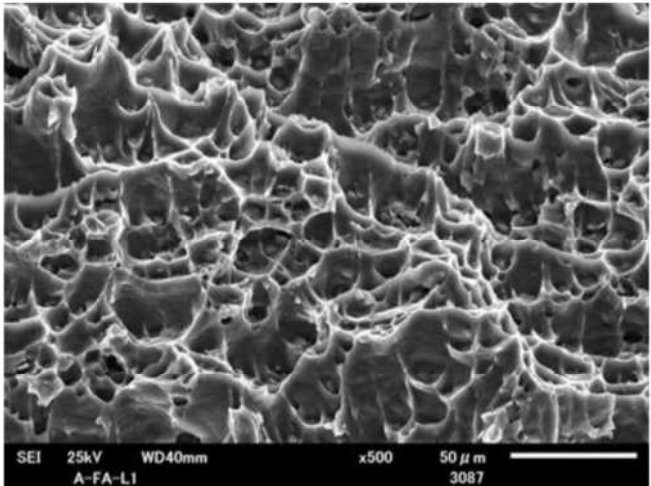
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
A	なし	L 方向	-40	62	78	2.62
			-40	65	81	2.88
			-40	62	78	2.76
		T 方向	-40	44	55	1.64
			-40	44	55	1.86
			-40	46	58	1.91
	250°C × 1,000hr	L 方向	-40	71	88	1.63
			-40	68	85	1.86
			-40	68	85	2.05
		T 方向	-40	54	68	1.76
			-40	54	68	1.76
			-40	57	71	1.81
	300°C × 1,000hr	L 方向	-40	60	74	1.69
			-40	60	74	1.79
			-40	60	74	1.85
		T 方向	-40	52	64	1.75
			-40	52	64	1.72
			-40	52	64	1.80
	250°C × 5,000hr	L 方向	-40	68	85	1.60
			-40	68	85	1.73
			-40	62	78	1.80
		T 方向	-40	54	68	1.69
			-40	54	68	1.68
			-40	52	64	1.61
	300°C × 5,000hr	L 方向	-40	57	71	1.63
			-40	54	68	1.70
			-40	54	68	1.79
		T 方向	-40	44	55	1.65
			-40	46	58	1.69
			-40	44	55	1.56
	250°C × 10,000hr	T 方向	-40	57	71	1.59
			-40	57	71	1.69
			-40	57	71	1.60
	300°C × 10,000hr	T 方向	-40	49	61	1.48
			-40	46	58	1.52
			-40	46	58	1.59
完全焼なまし 処理	L 方向	-40	59	74	1.81	
		-40	58	72	1.58	
		-40	58	72	2.16	
	T 方向	-40	44	55	1.27	
		-40	46	57	1.53	
		-40	49	62	1.38	

第13-2表 シャルピー衝撃試験計測結果 (2/3)

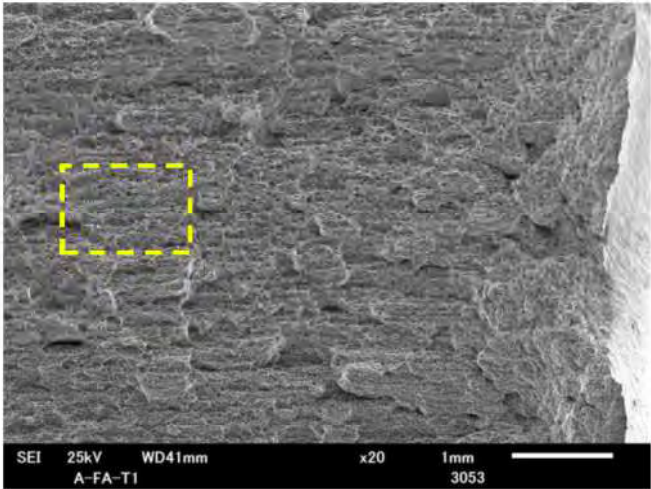
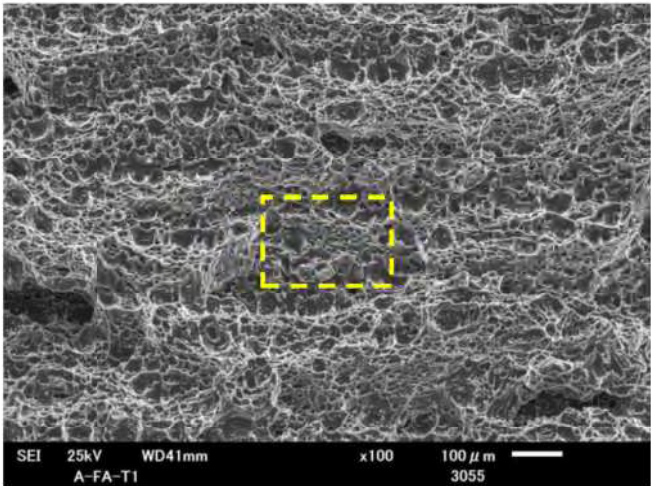
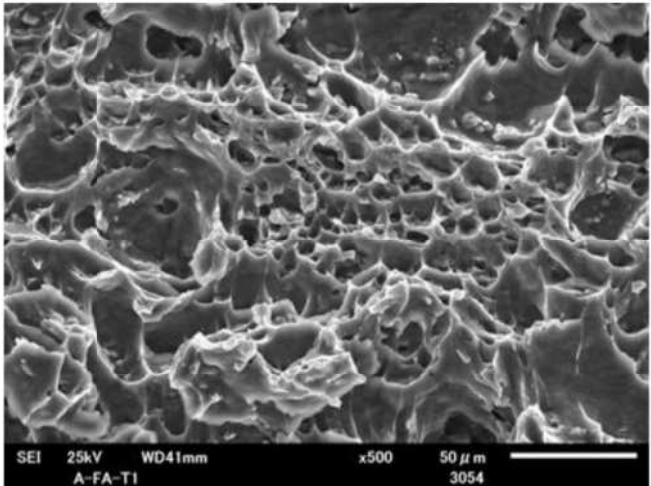
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
B	なし	L方向	-40	54	68	2.53
			-40	60	74	2.58
			-40	60	74	2.70
		T方向	-40	44	55	2.25
			-40	44	55	2.09
			-40	44	55	2.11
	250°C× 1,000hr	L方向	-40	62	78	1.92
			-40	60	74	2.21
			-40	60	74	1.83
		T方向	-40	52	64	1.66
			-40	52	64	1.55
			-40	52	64	1.67
	300°C× 1,000hr	L方向	-40	54	68	1.78
			-40	60	74	2.38
			-40	57	71	1.87
		T方向	-40	49	61	1.58
			-40	46	58	1.55
			-40	46	58	1.61
	250°C× 5,000hr	L方向	-40	57	71	1.86
			-40	62	78	2.06
			-40	60	74	1.86
		T方向	-40	49	61	1.61
			-40	49	61	1.57
			-40	49	61	1.55
	300°C× 5,000hr	L方向	-40	54	68	1.80
			-40	57	71	2.05
			-40	54	68	1.89
		T方向	-40	44	55	1.54
			-40	46	58	1.58
			-40	44	55	1.49
	250°C× 10,000hr	T方向	-40	52	64	1.64
			-40	52	64	1.59
			-40	49	61	1.52
	300°C× 10,000hr	T方向	-40	44	55	1.56
			-40	44	55	1.48
			-40	46	58	1.46
完全焼なまし 処理	L方向	-40	61	76	1.95	
		-40	62	77	1.94	
		-40	64	80	2.06	
	T方向	-40	50	63	1.91	
		-40	49	62	1.89	
		-40	50	62	1.88	

第13-2表 シャルピー衝撃試験計測結果 (3/3)

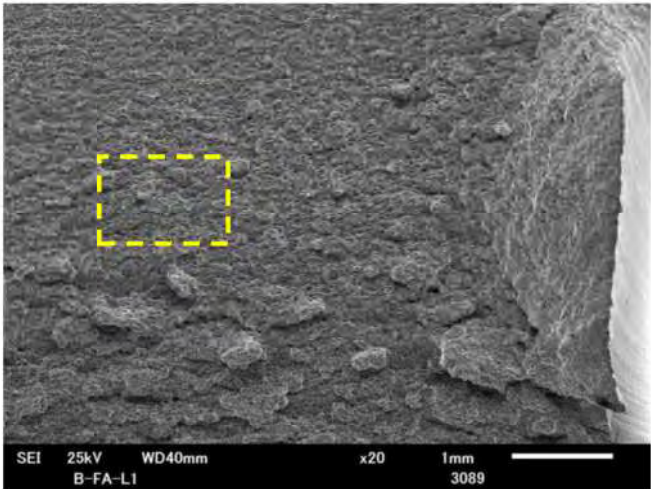
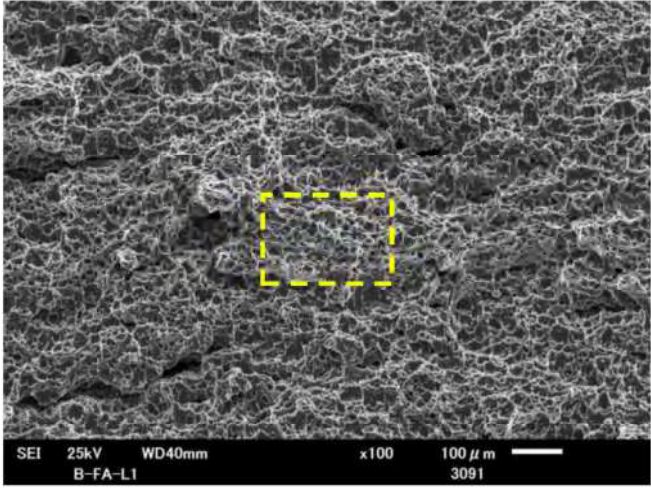
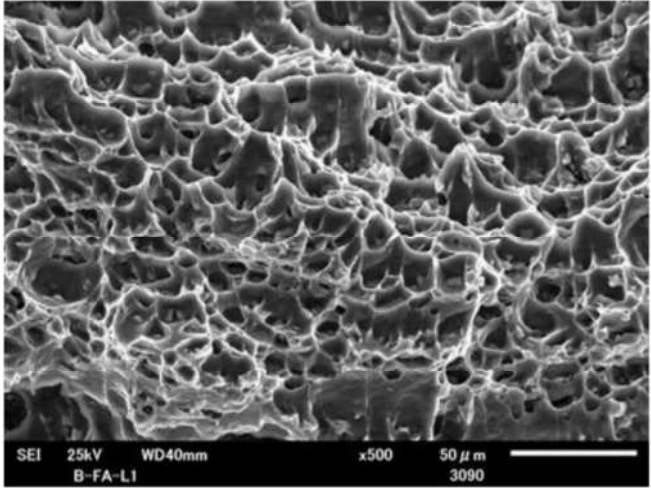
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
C	なし	L方向	-40	57	71	2.77
			-40	57	71	2.54
			-40	60	74	2.78
		T方向	-40	41	51	2.15
			-40	41	51	2.02
			-40	41	51	2.06
	250°C× 1,000hr	L方向	-40	60	74	1.72
			-40	62	78	2.10
			-40	60	74	1.83
		T方向	-40	46	58	1.72
			-40	46	58	1.67
			-40	49	61	1.73
	300°C× 1,000hr	L方向	-40	54	68	1.74
			-40	57	71	2.34
			-40	57	71	1.88
		T方向	-40	46	58	1.55
			-40	46	58	1.65
			-40	44	55	1.57
	250°C× 5,000hr	L方向	-40	57	71	1.76
			-40	62	78	2.11
			-40	60	74	1.92
		T方向	-40	46	58	1.54
			-40	46	58	1.56
			-40	46	58	1.60
	300°C× 5,000hr	L方向	-40	52	64	1.78
			-40	54	68	1.99
			-40	54	68	2.00
		T方向	-40	41	51	1.56
			-40	41	51	1.50
			-40	41	51	1.53
	250°C× 10,000hr	T方向	-40	49	61	1.65
			-40	49	61	1.48
			-40	49	61	1.53
	300°C× 10,000hr	T方向	-40	41	51	1.52
			-40	41	51	1.37
			-40	41	51	1.39
	完全焼なまし 処理	L方向	-40	54	67	1.87
			-40	53	67	1.90
			-40	51	64	1.83
		T方向	-40	43	54	1.80
			-40	43	54	1.78
			-40	43	53	1.74

<p>試験片</p>	<p>供試材A、完全焼なまし処理 試験片採取方向：L方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向↑ ×20</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x20 1mm 3085 A-FA-L1</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x100 100 μm 3088 A-FA-L1</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x500 50 μm 3087 A-FA-L1</p>

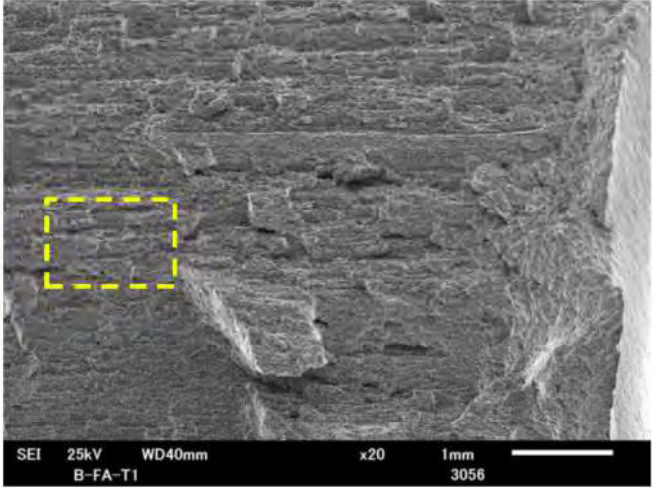
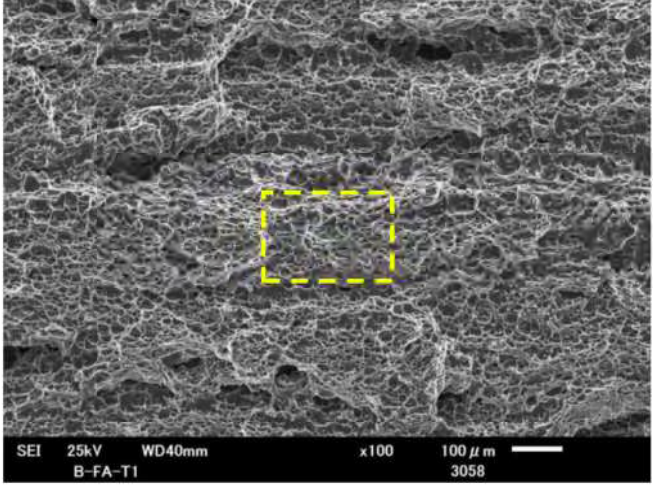
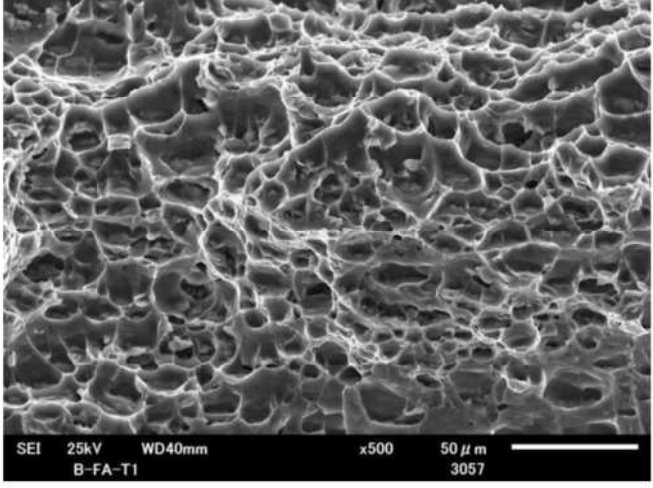
第13-1図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真(1/5)

<p>試験片</p>	<p>供試材A、完全焼なまし処理 試験片採取方向：T方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向↑</p> <p>×20</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x20 1mm 3053 A-FA-T1</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x100 100 μm 3055 A-FA-T1</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x500 50 μm 3054 A-FA-T1</p>

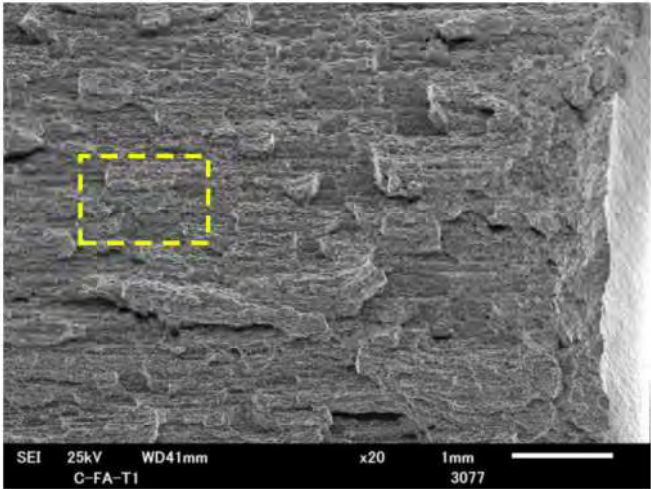
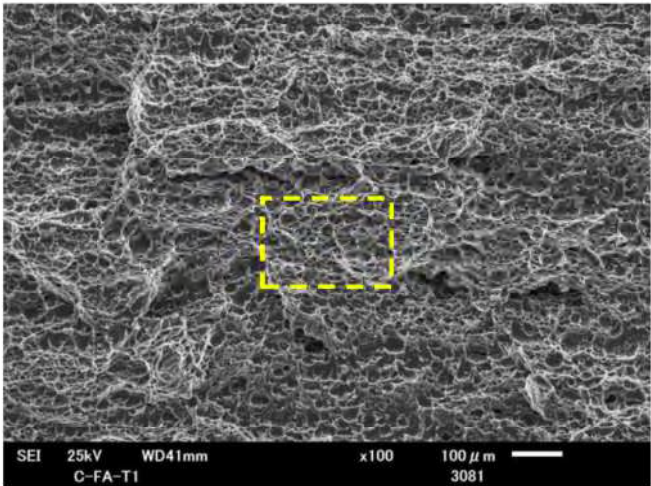
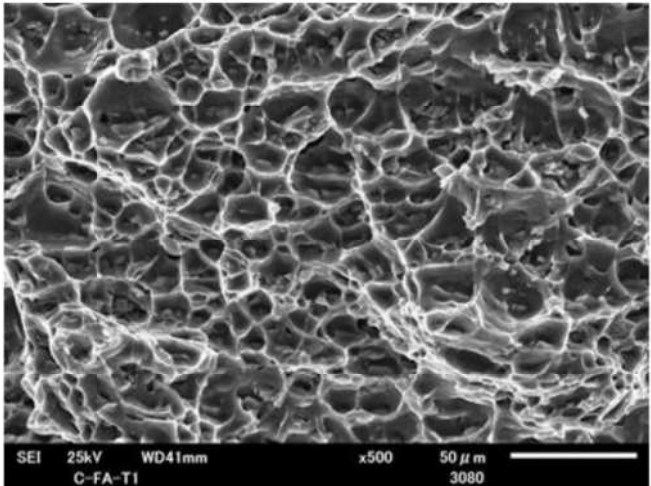
第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (2/5)

<p>試験片</p>	<p>供試材B、完全焼なまし処理 試験片採取方向：L方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向 ↑</p> <p>×20</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x20 1mm 3089</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x100 100 μm 3091</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x500 50 μm 3090</p>

第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (3/5)

<p>試験片</p>	<p>供試材B、完全焼なまし処理 試験片採取方向：T方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向↑ ×20</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x20 1mm 3056</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x100 100 μm 3058</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x500 50 μm 3057</p>

第13-1図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (4/5)

<p>試験片</p>	<p>供試材C、完全焼なまし処理 試験片採取方向：T方向 試験温度：-40℃</p>
<p>き裂進展方向↑</p> <p>×20</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x20 1mm 3077 C-FA-T1</p>
<p>×100</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x100 100 μm 3081 C-FA-T1</p>
<p>×500</p>	 <p>SEI 25kV WD41mm x500 50 μm 3080 C-FA-T1</p>

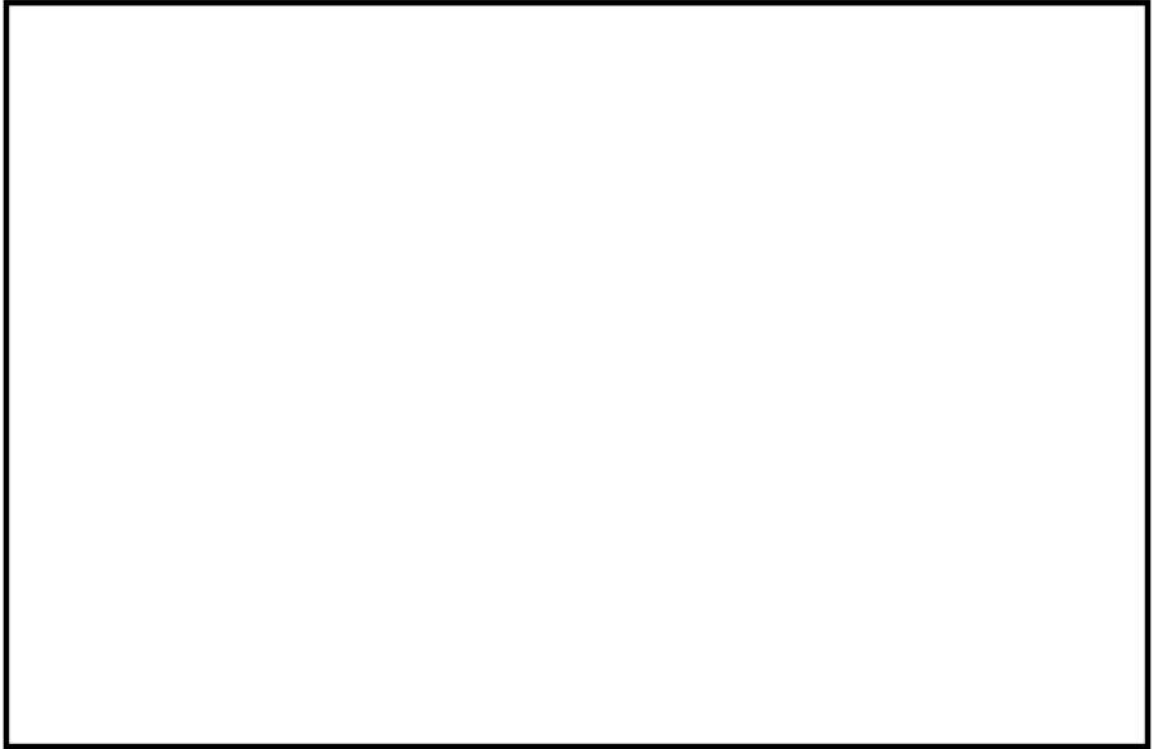
第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (5/5)

14. 耐食性

JIS H 4000 A3004 材は耐食性に優れたアルミニウム合金であり、飲料缶や屋根板等の耐食性を要求される用途に広く使用されている。バスケットは貯蔵中不活性ガスのヘリウム雰囲気にあること、また、不活性環境下における供用期間以外の工程は短期間であることから腐食の影響はない。

耐食性について、想定され得る使用環境に合わせて示す。

- ・燃料装荷時において MSF-21P 型は使用済燃料貯蔵プール水（ほう酸水）中に最大数日間置かれる。アルミニウムのほう酸水への耐食性は第 14-1 図⁽¹⁾に示すとおり、使用済燃料貯蔵プール水においては腐食量は 0.127mm/年以下（0.348μm/日以下）である。また、真空乾燥時の温度上昇を考慮しても、腐食量は 0.5mm/年以下（1.4μm/日以下）程度であり問題ない。なお、第 14-1 図は、アルミニウムに対するものであるが、溶質元素が比較的希薄である MB-A3004 材に対しても同様な傾向であると考えられる。さらに、アルミニウム合金に関して、飽和濃度までのほう酸水溶液がアルミニウム合金に与える影響は無視できるとのデータ⁽²⁾がある。使用済燃料貯蔵プールのほう酸濃度は、ほう酸の溶解度（2.7%⁽³⁾）に対して十分小さいことから、バスケットに適用するアルミニウム合金についてもほう酸に対する耐食性に問題ないと判断できる。
- ・真空乾燥時は金属キャスク内に発生する水蒸気にさらされるので水和酸化物が形成され、水和酸化物が表面を覆うことより腐食の進行が生じにくくなる。⁽⁴⁾
- ・アルミニウム合金に接触する可能性のある異種金属は、ドレン管、胴及び一次蓋（表面処理材を含む）に使用されるステンレス鋼、炭素鋼及びニッケルである。それら異種金属に対するアルミニウム合金の耐食性への影響はほとんどないことが知られている。⁽¹⁾



第 14-1 図 耐食性⁽¹⁾

15. 設計降伏点

発電用原子力設備規格（材料規格 JSME S NJ1-2012）（日本機械学会 2012 年 12 月）（以下「材料規格」という。）の新規材料採用ガイドラインに準拠し、第 2-2 表に示す規定値に第 11-5 図及び第 11-7 図に示すトレンドカーブから算出した結果を第 15-1 表に示す。

第 15-1 表 各温度における設計降伏点 S_y

項目 \ 温度(°C)	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325 (注1)	350 (注1)
常温における 耐力規定値 S_{Y0} (MPa)	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
耐力比 R_Y (トレンドカーブ)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.963	0.901	0.814	0.705	0.582	0.459	0.356	0.298
時効後強度比率 A_Y (トレンドカーブ)	0.668	0.683	0.684	0.691	0.704	0.722	0.742	0.760	0.773	0.783	0.791	0.806	0.843
$S_{Y0} \times R_Y \times A_Y$ (MPa) (=設計降伏点 S_y , 時効後)	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30	24	21

(注1) 325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

R_Y : 温度トレンドカーブ (1.0 を超える分は 1.0 へ修正)

$$= 5.79491 \times 10^{-13} T^5 - 1.66013 \times 10^{-10} T^4 - 8.26469 \times 10^{-8} T^3 + 2.25276 \times 10^{-5} T^2 - 1.41233 \times 10^{-3} T + 1.02372$$

S_{Y0} : 常温における耐力規定値 (MPa)

時効後強度比率 A_Y : 初期材に対する時効後の 0.2% 耐力の比 (最小値トレンドカーブ)

$$= 1.12046 \times 10^{-12} T^5 - 1.01355 \times 10^{-9} T^4 + 3.26910 \times 10^{-7} T^3 - 4.40188 \times 10^{-5} T^2 + 2.62581 \times 10^{-3} T + 0.625057$$

16. 設計引張強さ

「材料規格」の新規材料採用ガイドラインに準拠し、第 2-2 表に示す規定値に第 11-4 図及び第 11-6 図に示すトレンドカーブから算出した結果を第 16-1 表に示す。

第 16-1 表 各温度における設計引張強さ S_u

項目 \ 温度(°C)	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325 (注1)	350 (注1)
常温における 引張強さ規定値 S_T (MPa)	185	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
引張強さ比 R_T (トレンドカーブ)	1.000	0.999	1.000	0.983	0.932	0.852	0.750	0.636	0.522	0.421	0.341	0.284	0.245
時効後強度比率 A_T (トレンドカーブ)	0.828	0.859	0.849	0.834	0.817	0.803	0.796	0.796	0.804	0.818	0.837	0.857	0.871
$S_T \times R_T \times A_T$ (MPa) (=設計引張強さ S_u , 時効後)	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52	44	39

(注1) 325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

R_T : 温度トレンドカーブ (1.0 を超える分は 1.0 へ修正)

$$= -1.95417 \times 10^{-12} T^5 + 2.10725 \times 10^{-9} T^4 - 7.74787 \times 10^{-7} T^3 + 1.06151 \times 10^{-4} T^2 - 5.69199 \times 10^{-3} T + 1.09402$$

S_T : 常温における引張強さ規定値 (MPa)

時効後強度比率 A_T : 初期材に対する時効後の引張強さの比 (最小値トレンドカーブ)

$$= -1.41195 \times 10^{-10} T^4 + 1.22362 \times 10^{-7} T^3 - 3.33818 \times 10^{-5} T^2 + 3.03301 \times 10^{-3} T + 0.771645$$

17. 設計応力強さ

「材料規格」の新規材料採用ガイドラインに準拠し、15. 項及び16. 項の結果を引用し、算出した結果を第17-1表に示す。

なお、第17-1表に示す $1.0/3S_T \times R_T \times A_T$ について、「材料規格」の新規材料採用ガイドラインでは $1.1/3S_T \times R_T \times A_T$ となっている。「材料規格」の新規材料採用ガイドラインで採用している1.1倍について、アルミニウム合金では高温強度特性における動的ひずみ時効に伴う強度向上は確認されている⁽⁴⁾が、全評価温度域において動的ひずみ時効に伴う強度向上が明確ではない。そのため、保守的な評価となるように、本材料では1.0倍を採用する。

第17-1表 各温度における設計応力強さ S_m

試験温度(°C)	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325 (注1)	350 (注1)
$1/3S_T$ (MPa)	61.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$1.0/3S_T \times R_T \times A_T$ (MPa)	51.1	52.9	52.4	50.5	47.0	42.2	36.8	31.2	25.9	21.3	17.6	15.0	13.1
$2/3S_{y0}$ (MPa)	56.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$2/3S_{y0} \times R_Y \times A_Y$ (MPa)	37.8	38.7	38.8	39.1	39.9	39.4	37.9	35.0	30.9	25.8	20.6	16.3	14.2
最小値 (MPa)	37.8	38.7	38.8	39.1	39.9	39.4	36.8	31.2	25.9	21.3	17.6	15.0	13.1
S_m (MPa)	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17	14	13

(注1) 325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

S_{y0} : 常温の降伏点(耐力)の規定値 (MPa)

S_T : 常温の引張強さの規定値 (MPa)

R_Y : 温度Tの降伏点(耐力) / 常温の降伏点(耐力)

R_T : 温度Tの引張強さ / 常温の引張強さ

18. 許容引張応力

「材料規格」の新規材料採用ガイドラインに準拠し、12. 項、15. 項及び 16. 項の結果を引用し、算出した結果を第 18-1 表に示す。

なお、第 18-1 表に示す $1/4 S_T$ 及び $1.0/4 S_T \times R_T \times A_T$ について、「材料規格」の新規材料採用ガイドラインでは $1/3.5 S_T$ 及び $1.1/3.5 S_T \times R_T \times A_T$ となっている。「材料規格」の新規材料採用ガイドラインで採用している 1.1 倍について、アルミニウム合金では高温強度特性における動的ひずみ時効に伴う強度向上は確認されている⁽⁴⁾が、全評価温度域において動的ひずみ時効に伴う強度向上が明確ではない。また、係数 1/3.5 は、使用実績があり材料強度特性上の問題が生じていないことから定められた係数である。したがって、保守的な評価となるように、本材料では 1.0 倍及び係数 1/4 を採用する。

第 18-1 表 各温度における許容引張応力 S

試験温度(°C)	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275 (注1)	300 (注1)	325 (注1)	350 (注1)
1/4 S _T (MPa)	46.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0/4 S _T × R _T × A _T (MPa)	38.3	39.7	39.3	37.9	35.2	31.7	27.6	23.4	19.4	16.0	13.2	11.2	9.9
2/3 S _{Y0} (MPa)	56.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2/3 S _{Y0} × R _Y × A _Y (MPa)	37.8	38.7	38.8	39.1	39.9	39.4	37.9	35.0	30.9	25.8	20.6	16.3	14.2
S _{RAVG} (MPa)	-	-	92.0	67.6	49.6	36.4	26.7	19.6	14.4	(10.6)	(7.8)	(5.7)	(4.2)
S _{RMIN} (MPa)	-	-	(71.2)	(51.4)	37.1	26.8	19.3	13.9	10.1	(7.3)	(5.2)	(3.8)	(2.7)
10 ^(1/n)	-	-	-	-	-	-	0.72	-	0.78	-	0.87	-	0.73
F _{AVG}	-	-	(0.67)	(0.67)	(0.67)	(0.67)	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
F _{AVG} S _{RAVG} (MPa)	-	-	(61.7)	(45.3)	(33.2)	(24.4)	17.9	13.2	9.7	(7.1)	(5.2)	(3.8)	(2.7)
0.8 S _{RMIN} (MPa)	-	-	(57.0)	(41.1)	(29.7)	(21.4)	15.5	11.2	8.1	(5.8)	(4.2)	(3.0)	(2.2)
1.0 S _C (MPa)	-	-	(129.0)	(81.6)	(51.6)	(32.7)	20.7	13.1	(8.3)	(5.2)	(3.3)	(2.1)	(1.3)
最小値 (MPa)	37.8	38.7	38.8	37.9	29.7	21.4	15.5	11.2	8.1	5.2	3.3	2.1	1.3
S (MPa)	37	37	37	37	29	21	15	11	8	5	3	2	1

(注1) 275°C、300°C、325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

(注2) () 内の数値は、クリープ試験及びクリープ破断試験を実施した温度以下又は応力以下における外挿値である。これらクリープ外挿値が引張特性に起因する諸値よりも小さな値となった場合(すなわち 150~175°C)においては、安全側の評価のためにクリープ外挿値を採用した。

S_{RAVG} : 100,000 hr での破断を生じる平均応力 (MPa)

S_{RMIN} : 100,000 hr での破断を生じる最小応力 (MPa)

S_C : 0.01% / 1,000 hr のクリープ速度を生じる応力の平均値

F_{AVG} : S_{RAVG} に適用する係数。ただし、0.67 を超えない値とする。

$$F_{AVG} = 10^{(1/n)}$$

n : 100,000 hr でのクリープ破断時間の対数と応力の対数との曲線の傾きで下式で表される負の値

$$n = \Delta \log(\text{クリープ破断時間}) / \Delta \log(\text{応力})$$

19. その他特性

19.1 熱物性

熱伝導率、比熱、温度伝導度を測定した結果を第 19-1 表に示す。

19.2 弾性定数

縦弾性定数、せん断弾性定数及びポアソン比を測定した結果を第 19-2 表に示す。

19.3 線膨張係数

線膨張係数を測定した結果を第 19-3 表に示す。

第 19-1 表 供試材の熱物性測定結果 (1/3)

材質		MB-A3004		
試験方法		レーザーフラッシュ法		
評価材料標本数		3		
評価材料標本符号		供試材 A、B、C		
供試材 符号	温度 (°C)	比熱 (J/(kg·K))	熱拡散率 (m ² /s)	熱伝導率 (W/(m·K))
A	25	900	6.11×10^{-5}	150
	100	903	6.41×10^{-5}	158
	150	941	6.54×10^{-5}	167
	200	984	6.49×10^{-5}	174
	250	996	6.50×10^{-5}	176
	300	1040	6.49×10^{-5}	183
B	25	908	6.01×10^{-5}	148
	100	892	6.44×10^{-5}	156
	150	922	6.46×10^{-5}	162
	200	945	6.50×10^{-5}	167
	250	973	6.47×10^{-5}	171
	300	1010	6.48×10^{-5}	178
C	25	894	6.04×10^{-5}	147
	100	899	6.34×10^{-5}	155
	150	924	6.46×10^{-5}	162
	200	943	6.45×10^{-5}	165
	250	982	6.45×10^{-5}	172
	300	993	6.39×10^{-5}	173

第 19-1 表 供試材の熱物性測定結果 (2/3)

材質		MB-A3004					
試験方法		レーザーフラッシュ法					
評価材料標本数		3					
評価材料標本符号		供試材 A、B、C					
熱処理		250°C×5,000hr			300°C×5,000hr		
供試材 符号	温度 (°C)	比熱 (J/(kg·K))	熱拡散率 (m ² /s)	熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (J/(kg·K))	熱拡散率 (m ² /s)	熱伝導率 (W/(m·K))
A	25	875	6.52×10^{-5}	155	875	7.05×10^{-5}	168
	100	905	6.76×10^{-5}	166	912	7.17×10^{-5}	178
	150	934	6.82×10^{-5}	173	927	7.12×10^{-5}	180
	200	951	6.80×10^{-5}	176	943	7.09×10^{-5}	182
	250	970	6.80×10^{-5}	179	958	7.02×10^{-5}	184
	300	1000	6.74×10^{-5}	184	963	6.94×10^{-5}	182
B	25	885	6.40×10^{-5}	155	888	7.06×10^{-5}	171
	100	920	6.68×10^{-5}	168	918	7.07×10^{-5}	177
	150	953	6.71×10^{-5}	175	939	7.06×10^{-5}	180
	200	969	6.70×10^{-5}	177	970	7.03×10^{-5}	186
	250	991	6.76×10^{-5}	183	996	6.99×10^{-5}	189
	300	1020	6.65×10^{-5}	185	1010	6.90×10^{-5}	190
C	25	899	6.41×10^{-5}	157	891	6.52×10^{-5}	171
	100	924	6.60×10^{-5}	166	925	6.79×10^{-5}	171
	150	937	6.63×10^{-5}	169	932	6.79×10^{-5}	172
	200	959	6.65×10^{-5}	173	959	6.73×10^{-5}	176
	250	978	6.65×10^{-5}	177	976	6.72×10^{-5}	178
	300	988	6.59×10^{-5}	177	989	6.61×10^{-5}	178

第 19-1 表 供試材の熱物性測定結果 (3/3)

材質		MB-A3004		
試験方法		レーザーフラッシュ法		
評価材料標本数		3		
評価材料標本符号		供試材 A、B、C		
熱処理		520°C×10hr、0.3°C/hr 完全焼なまし処理		
供試材 符号	温度 (°C)	比熱 (J/(kg·K))	熱拡散率 (m ² /s)	熱伝導率 (W/(m·K))
A	25	936	7.18×10^{-5}	183
	100	973	7.24×10^{-5}	192
	150	987	7.20×10^{-5}	194
	200	1010	7.16×10^{-5}	196
	250	1020	7.07×10^{-5}	197
	300	1040	6.92×10^{-5}	197
B	25	870	7.21×10^{-5}	171
	100	911	7.16×10^{-5}	178
	150	933	7.29×10^{-5}	186
	200	956	7.21×10^{-5}	188
	250	978	7.13×10^{-5}	190
	300	1000	7.03×10^{-5}	192
C	25	876	7.09×10^{-5}	169
	100	918	7.09×10^{-5}	177
	150	943	7.06×10^{-5}	181
	200	964	7.00×10^{-5}	184
	250	988	6.90×10^{-5}	186
	300	1010	6.80×10^{-5}	187

第 19-2 表 供試材の弾性定数測定結果 (1/3)

材質		MB-A3004	
試験方法		共振法	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
供試材 符号	温度 (°C)	縦弾性定数 (GPa)	ポアソン比
A	25	72.7	0.38
	100	70.3	0.38
	150	68.6	0.38
	200	66.9	0.38
	250	64.7	0.38
	300	61.9	0.38
B	25	75.3	0.41
	100	73.6	0.41
	150	72.1	0.41
	200	70.6	0.41
	250	68.7	0.41
	300	66.1	0.42
C	25	74.5	0.41
	100	73.0	0.41
	150	71.6	0.41
	200	70.1	0.41
	250	68.4	0.42
	300	65.8	0.42

第 19-2 表 供試材の弾性定数測定結果 (2/3)

材質		MB-A3004			
試験方法		共振法			
評価材料標本数		3			
評価材料標本符号		供試材 A、B、C			
熱処理		250°C × 5,000hr		300°C × 5,000hr	
供試材符号	温度 (°C)	縦弾性定数 (GPa)	ポアソン比	縦弾性定数 (GPa)	ポアソン比
A	25	74.2	0.41	74.1	0.4
	100	72.4	0.41	72.0	0.41
	150	71.0	0.42	70.3	0.4
	200	69.4	0.42	68.7	0.4
	250	67.4	0.42	66.8	0.41
	300	64.9	0.43	64.1	0.41
B	25	73.6	0.39	74.1	0.41
	100	71.5	0.4	72.5	0.41
	150	70.0	0.39	71.3	0.41
	200	68.5	0.4	69.9	0.41
	250	66.6	0.39	68.4	0.42
	300	63.4	0.39	65.5	0.42
C	25	74.1	0.4	74.0	0.41
	100	72.1	0.41	71.9	0.41
	150	70.6	0.41	70.6	0.41
	200	69.2	0.41	68.9	0.41
	250	67.3	0.41	67.3	0.41
	300	64.6	0.42	64.7	0.42

第 19-2 表 供試材の弾性定数測定結果 (3/3)

材質		MB-A3004	
試験方法		共振法	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
熱処理		520°C×10hr、0.3°C/hr 完全焼なまし処理	
供試材 符号	温度 (°C)	縦弾性定数 (GPa)	ポアソン比
A	25	73.3	0.39
	100	71.5	0.39
	150	69.9	0.39
	200	68.3	0.39
	250	66.3	0.39
	300	63.2	0.39
B	25	73.2	0.39
	100	71.2	0.39
	150	69.7	0.39
	200	68.0	0.39
	250	65.9	0.38
	300	62.6	0.38
C	25	73.0	0.34
	100	71.1	0.34
	150	69.5	0.34
	200	67.8	0.34
	250	65.7	0.34
	300	62.6	0.34

第 19-3 表 供試材の線膨張係数測定結果 (1/3)

材質		MB-A3004	
試験方法		熱機械分析法	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
供試材 符号	温度 (°C)	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)	
		区分 A (注1)	区分 B (注1)
A	50	23.30	22.90
	100	23.90	23.60
	150	25.10	24.00
	200	25.80	24.30
	250	26.40	24.70
	300	28.10	25.20
B	50	23.60	23.30
	100	24.60	23.80
	150	25.40	24.20
	200	25.30	24.50
	250	26.40	24.80
	300	28.10	25.20
C	50	23.80	23.20
	100	24.30	23.90
	150	25.20	24.30
	200	25.80	24.60
	250	26.70	24.90
	300	27.60	25.30

(注1) 区分Aは瞬時線膨張係数、Bは常温から当該温度までの平均線膨張係数を表す。

第 19-3 表 供試材の線膨張係数測定結果 (2/3)

材質		MB-A3004			
試験方法		熱機械分析法			
評価材料標本数		3			
評価材料標本符号		供試材 A、B、C			
熱処理		250℃×5,000hr		300℃×5,000hr	
供試材 符号	温度 (℃)	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ mm/mm℃)			
		区分A (注1)	区分B (注1)	区分A (注1)	区分B (注1)
A	50	23.30	22.90	23.50	23.10
	100	23.90	23.60	24.10	23.80
	150	25.10	24.00	25.40	24.10
	200	25.80	24.30	25.50	24.40
	250	26.40	24.70	25.50	24.60
	300	28.10	25.20	26.80	24.90
B	50	23.60	23.30	23.80	23.00
	100	24.60	23.80	24.00	23.70
	150	25.40	24.20	25.40	24.10
	200	25.30	24.50	25.10	24.40
	250	26.40	24.80	26.30	24.70
	300	28.10	25.20	27.60	25.10
C	50	23.80	23.20	23.80	23.00
	100	24.30	23.90	24.00	23.70
	150	25.20	24.30	25.40	24.10
	200	25.80	24.60	25.20	24.40
	250	26.70	24.90	26.30	24.70
	300	27.60	25.30	28.00	25.10

(注1) 区分Aは瞬時線膨張係数、Bは常温から当該温度までの平均線膨張係数を表す。

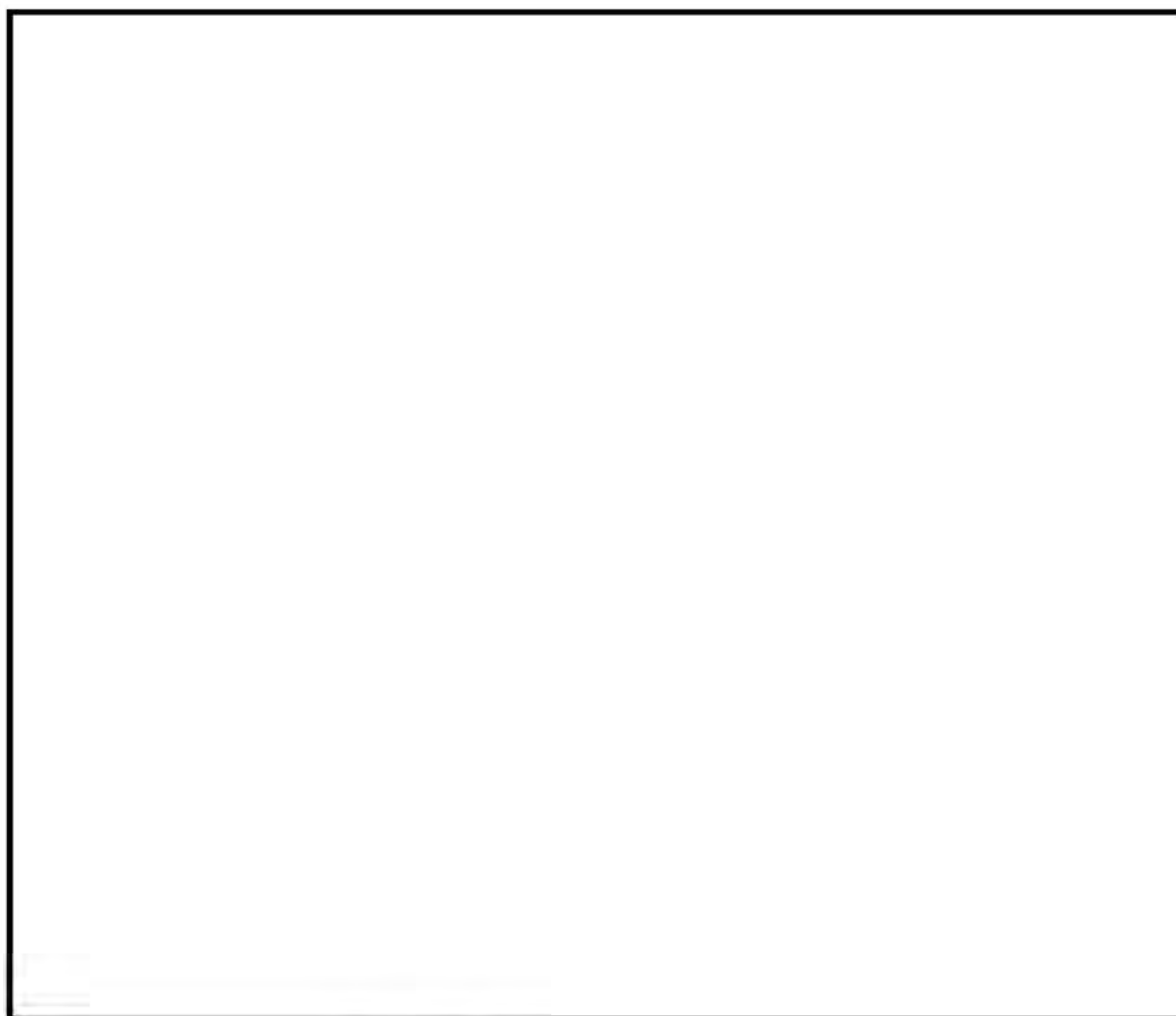
第 19-3 表 供試材の線膨張係数測定結果 (3/3)

材質		MB-A3004	
試験方法		熱機械分析法	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
熱処理		520℃×10hr、0.3℃/hr 完全焼なまし処理	
供試材 符号	温度 (℃)	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ mm/mm℃)	
		区分 A (注1)	区分 B (注1)
A	50	22.40	—
	100	23.90	23.30
	150	24.50	23.70
	200	25.00	24.00
	250	25.50	24.30
	300	26.50	24.60
B	50	22.60	—
	100	23.80	23.20
	150	24.30	23.60
	200	24.90	23.90
	250	25.60	24.20
	300	26.70	24.60
C	50	22.60	—
	100	24.20	23.50
	150	24.80	23.90
	200	25.30	24.30
	250	26.00	24.60
	300	27.40	25.00

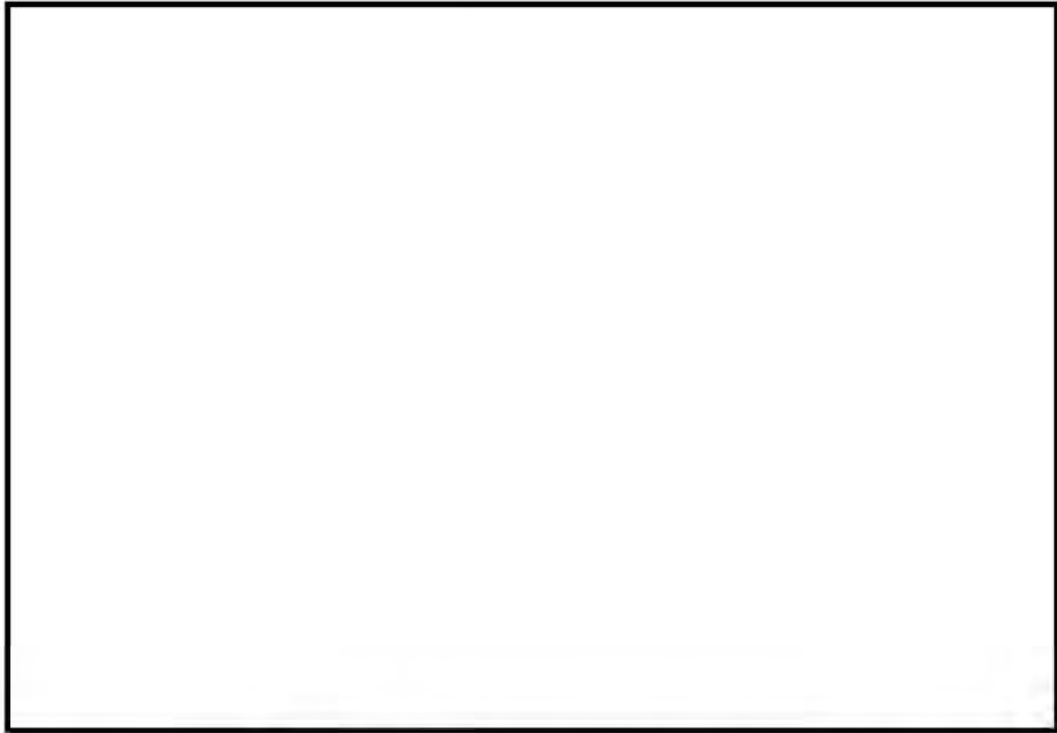
(注1) 区分Aは瞬時線膨張係数、Bは常温から当該温度までの平均線膨張係数を表す。

20. 照射影響

第 20-1 図及び第 20-2 図に本材料に化学成分が類似する A5052 材及び A1100 材の引張特性に及ぼす中性子照射量の影響⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾を示す。横軸に示された中性子照射の後に行った引張試験結果を縦軸に示している。第 20-1 図及び第 20-2 図に示すとおり、中性子照射量が $10^{19}\text{n}/\text{cm}^2$ までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、使用済燃料貯蔵時の照射条件はその範囲内であることから照射脆化の影響はない。



第 20-1 図 A5052 材の引張特性の照射依存性⁽⁵⁾



第 20-2 図 Al100 材の引張特性の照射依存性⁽⁵⁾

21. 引用文献

- (1) アルミニウムハンドブック、一般社団法人 日本アルミニウム協会 (2007)
- (2) Edited by R. Winston Revie, “Uhlig’ s Corrosion Handbook (Third Edition)” , A John Wiley & Sons, Inc., (2011)
- (3) 国立天文台編、理科年表(平成 28 年)、(株)丸善出版、(2015)
- (4) 社団法人軽金属協会、アルミニウム材料の基礎と工業技術、(1985)
- (5) K. Farrell, “Microstructure and Tensile Properties of Heavily Irradiated 5052-0 Aluminum Alloy” , Journal of Nuclear Materials, Vol.97, Elsevier Science B. V., Vol. 97 Issues 1-2, 39(1980), with permission from Elsevier.
- (6) H. Yoshida, et al., “Reactor irradiation effects on Al1100” , Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, p1-6 (1981)