

資料 1-13

Doc No. L5-95JY221 R1

2021年10月14日

三菱重工業株式会社

補足説明資料

バスケットプレート用材料に関する説明資料

枠囲みの範囲は、商業機密のため、非公開とします。

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

目 次

1. 概要 1
2. 当該型式指定におけるバスケットプレート用材料の審査概要 1
3. MSF-24P(S)型にアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) を使用することの妥当性 3

別添 型式設計特定容器等の型式指定申請 (三菱重工業(株)) 抜粋

添付書類 8-2-3

バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

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

添付書類 8-2-5

バスケットの設計基準値

1. 概要

本資料は、MSF-24P(S)型のバスケットプレートに使用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）（以下「本材料」という。）に関する補足説明を示す。

本材料は、（一社）日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格」等では規定されていない材料であることから、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第四十三条の二十六の三第1項の規定により、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定（原規規発第1709261号、指定の番号：T-DPC17001）（以下「当該型式指定」という。）を受けた金属製の乾式キャスク（MSF-21P型）のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）の適用範囲内で使用する。

2. 当該型式指定におけるバスケットプレート用材料の審査概要

当該型式指定では、本材料を高温領域（250℃以下）で60年もの長期間にわたって構造材として使用することを踏まえ論点として抽出された、その強度、破壊靱性・耐衝撃特性及びクリープひずみに係る性能評価について、本材料を用いた詳細な試験データに基づく説明^{（注）}を行い、バスケットの設計基準値が適切に設定され、破断やクリープひずみに対して大きな裕度を有していることが確認されている。

本材料の強度、破壊靱性・耐衝撃特性及びクリープひずみに係る審査概要（原子力規制庁審査書抜粋）を第1表に示す。

（注）当該型式指定申請書の添付書類抜粋（以下）を別添に示す。

- ・添付書類8-2-3

バスケットプレート用材料 アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書

- ・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

- ・添付書類8-2-5

バスケットの設計基準値

（出典）

三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).)

第 1 表 当該型式指定におけるバスケットプレート用材料の審査概要(原子力規制庁審査書抜粋)

項目	審査書概要
①強度	<p>申請者は、強度設計の考え方として、保守的に、落下等の事故事象においてバスケットの変形を許容しない設計を採用するとしており、設計基準値の設定に当たって、設計貯蔵期間 60 年の崩壊熱による高温下での熱ばく露による強度低下を考慮した強度を設定するため、長時間過時効熱処理を行った供試材と当該供試材の強度特性が設計貯蔵期間中の温度における金属組織の平衡状態を模擬していることの検証を目的として完全焼きなまし熱処理を行った供試材を作成し、機械的強度の確認試験を行っている。</p> <p>(i) 長時間過時効熱処理材の機械試験</p> <p>申請者は、供試材を設計貯蔵期間中の温度より高温で長時間保持することにより、熱劣化を加速し、強度特性が軟化安定化することを確認。</p> <p>(ii) 完全焼きなまし熱処理材の機械試験</p> <p>申請者は、供試材を加工ひずみが除去できる高温まで加熱した後、十分に低い速度で常温まで冷却することで常温における平衡状態を模擬した金属組織を得ていることを電気伝導率等で確認。併せて、完全焼きなまし熱処理材の設計貯蔵期間中の温度での機械的特性を確認。</p> <p>規制庁は、長時間過時効熱処理材の引張試験結果から強度はおおよそ加熱後 1000 時間以上で軟化安定化していること及び長時間過時効熱処理材と完全焼きなまし材は同等の機械的特性を示していることを確認した。</p> <p>以上のことから、規制庁は、60 年後のアルミニウム合金の強度については、設計基準値が適切に設定されていることを確認した。</p>
②破壊靱性 ・耐衝撃特性	<p>申請者は、材料特性確認試験として破壊靱性試験（初期材及び熱処理材）を実施し、取得した J_q 値から評価した結果、許容線状欠陥深さは板厚の 40% まで問題がないことを確認している。</p> <p>規制庁は、申請者が実施した破壊靱性試験の評価結果及び板厚の 40% 深さの欠陥であれば検査で十分発見可能としていることから、当該アルミニウム合金が衝撃荷重負荷時の破断に対して大きな裕度を有していることを確認した。</p>
③クリープ ひずみ	<p>申請者は、バスケット格子間を接合していないこと、格子間は適度な隙間を有していること及びバスケットの外周も拘束されていないことから、熱応力は発生せず、貯蔵中の長期荷重はバスケットの自重のみで、発生する応力は極めて小さい (1MPa 以下) ため、十分な安全裕度があり、クリープが設計上の制約条件とならないとしている。</p> <p>規制庁は、熱応力が発生しないこと及び発生する長期荷重の応力が小さいことからクリープひずみに対して大きな裕度を有しており、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えないことを確認した。</p>

3. MSF-24P(S)型にアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) を使用することの妥当性

MSF-24P(S)型のバスケットプレートに使用する本材料の適用妥当性について、本材料の適用範囲内であること、及び当該型式指定の審査において確認された第1表に示す事項に対する確認結果を以下に示す。本材料の適用範囲内で使用すること、及び当該型式指定の審査で論点となった事項に対して、当該型式指定の設計と同じ設計方針としていることから、MSF-24P(S)型で使用することに問題はない。

3.1 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の適用範囲

本材料を使用するための適用範囲 (別添の添付書類 8-2-3 参照) は以下のとおりである。MSF-24P(S)型はその適用範囲内で使用する。

- (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る熱応力を生じない構造とすること。

3.2 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の設計用強度

別添の添付書類 8-2-3 に示す本材料の設計用強度 (設計用応力強さ、許容引張応力、設計降伏点、設計引張強さ) は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定されている (設計用強度の設定根拠等は、添付書類 8-2-4 を参照)。設計用強度は、 -40°C から 250°C までの温度範囲で示されており、MSF-24P(S)型の使用温度 (-20°C から 185°C) はその範囲内である (補足説明資料「除熱機能に関する説明資料 (L5-95JY213)」参照)。

3.3 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の破壊靱性・耐衝撃特性

当該型式指定の審査において、バスケットプレートを弾性範囲に留めることで、板厚の 40% 深さまでの欠陥まで、き裂進展による破断が起らないとされている。MSF-24P(S)型のバスケットプレートについても、弾性範囲内に留める設計とすることから、衝撃荷重が負荷される場合においても同様に大きな裕度を有している。

3.4 クリープひずみ

アルミニウム合金は、0.1%から1.0%程度のクリープひずみが予め付与されている場合において、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えないことが示されている。当該型式指定の設計と同様に、MSF-24P(S)型は、バスケットプレートを格子状に組み立てる構造であり、バスケットプレートの勘合部には組立てに支障のないように適度な隙間を有し、また、バスケットプレートの外周も拘束していないため有意な熱応力が発生しない。したがって、貯蔵中にバスケットに考慮すべき長期荷重はバスケットの自重のみであり、発生する応力は極めて小さい(1MPa以下)。設計貯蔵期間経過後のクリープひずみが0.1%に到達するためには、10MPa以上の応力環境下に置かれ続ける必要があるが、バスケットプレートに発生する応力は10MPaに対して十分な安全裕度があるため、クリープひずみに対して大きな裕度を有しており、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えず、設計上の制約条件とならない。

別添 型式設計特定容器等の型式指定申請（三菱重工業(株)）抜粋

添付書類 8-2-3 バスケットプレート用材料
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

目次

1. 概要	1
2. 適用範囲	2
3. 材料規定	3
3.1 材料名称	3
3.2 化学成分	3
3.3 設計応力強さ	3
3.4 許容引張応力	3
3.5 設計降伏点	3
3.6 設計引張強さ	3
3.7 縦弾性係数	3
3.8 熱膨張係数	3
4. 製造管理規定	7

図表目次

第 3-1 表	材料の規定名称	4
第 3-2 表	化学成分規定	4
第 3-3 表	材料の各温度における設計応力強さ S_m	5
第 3-4 表	材料の各温度における許容引張応力 S	5
第 3-5 表	材料の各温度における設計降伏点 S_y	5
第 3-6 表	材料の各温度における設計引張強さ S_u	5
第 3-7 表	材料の各温度における縦弾性係数	6
第 3-8 表	材料の各温度における熱膨張係数	6
第 4-1 表	機械的性質	8
第 4-2 表	管理程度表	8
第 4-1 図	製造フロー	9

1. 概要

本書は、MSF-21P 型のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

2. 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る熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は、設計貯蔵期間における熱劣化を考慮した設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4章に示す製造管理規定を満足しなければならない。

3.1 材料名称

材料の規定名称は第 3-1 表に示すものであること。

3.2 化学成分

化学成分は第 3-2 表に示す百分率の値の範囲内にあること。

3.3 設計応力強さ

設計応力強さは第 3-3 表の規定によること。

3.4 許容引張応力

許容引張応力は第 3-4 表の規定によること。

3.5 設計降伏点

設計降伏点は第 3-5 表の規定によること。

3.6 設計引張強さ

設計引張強さは第 3-6 表の規定によること。

3.7 縦弾性係数

縦弾性係数は第 3-7 表の規定によること。

3.8 熱膨張係数

熱膨張係数は第 3-8 表の規定によること。

第 3-1 表 材料の規定名称

材料の名称	記号	質別
バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	MB-A3004	H112

第 3-2 表 化学成分規定

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
										個々	合計	
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	残部

第 3-3 表 材料の各温度における設計応力強さ S_m (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-4 表 材料の各温度における許容引張応力 S (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)									
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	250
MB-A3004	37	37	37	37	29	21	15	11	8	

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-5 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-6 表 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-7 表 材料の各温度における縦弾性係数 (注1)

単位 : MPa

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	73900	73300	72800	72100	71400	70600	69800	68900	67900	66900	65800	64600

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

第 3-8 表 材料の各温度における熱膨張係数 (注1)

単位 : $\times 10^{-6}$ mm/mm \cdot °C

記号	区分 (注2)	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	A	22.75	23.52	24.02	24.42	24.76	25.05	25.35	25.68	26.06	26.54	27.14	27.91
	B	22.61	23.14	23.48	23.76	23.99	24.17	24.33	24.48	24.63	24.79	24.99	25.24

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 区分 A は瞬時熱膨張係数、区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、第 3-2 表に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において、化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は、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。)によること。
- (2) 材料の製造は、第 4-1 図に示す製造フローに従い、熱間押出成形加工されたものであること。
- (3) 材料は、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。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。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。
- (4) 機械的性質は、第 4-1 表に示す値に適合すること。
- (5) 製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合、機械的性質が第 4-1 表を満足することを確認すること。
 - ・ 肉厚 : 16mm 以下
 - ・ 押出比^(注1) : 10 以上

(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
- (6) 本材料は、耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合、機械的性質が第 4-1 表を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、第 4-1 図の製造フローの各段階において、第 4-2 表に示す品質管理を行う。
- (8) 上記規定以外の規定については、JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

第 4-1 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。

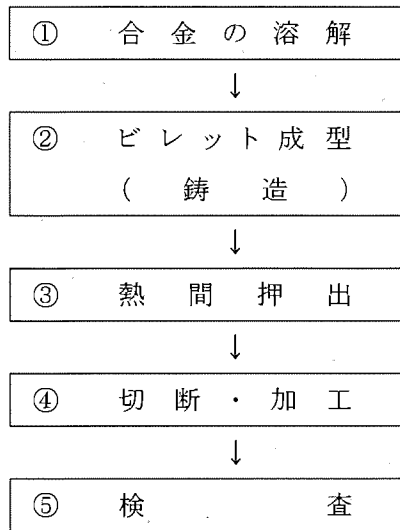
(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

第 4-2 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 4-1 図の製造フローに対応する。



第 4-1 図 製造フロー

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) の断面マイクロ組織観察結果 (供試材 A)	10
第 7-3 図	供試材 (1/2T 代表部) の断面マイクロ組織観察結果 (供試材 B)	11
第 7-4 図	供試材 (1/2T 代表部) の断面マイクロ組織観察結果 (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形材」（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	
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	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) ビ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。

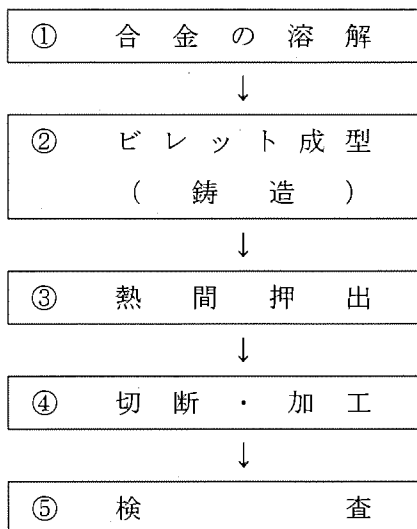
4.2 特許及びライセンス

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

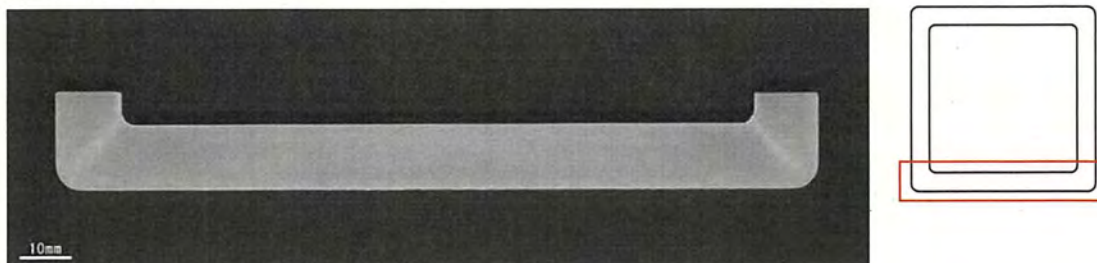
供試材 符号	化学成分 (mass%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他	
										個々	合計
A	0.19	0.6	0.16	1.1	1.0	N/A	0.06	—	N/A	0.05 以下	0.15 以下
B	0.18	0.6	0.18	1.1	1.0	0.02	0.04	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
C	0.20	0.5	0.19	1.1	1.0	0.01	0.05	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
規定値 MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下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

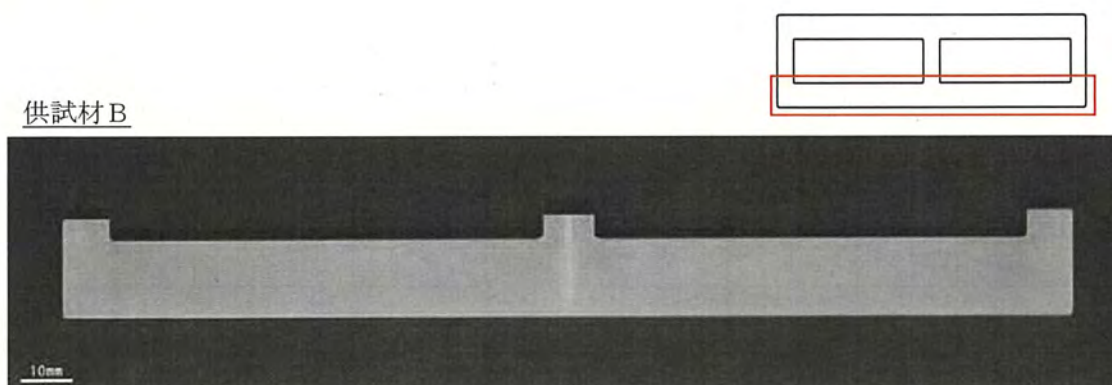
供試材のT方向断面マクロ組織観察結果を第7-1図に示す。第7-1図の写真中にはやや白く観察される領域があるが、これは熱間押出の際にメタルフローの向きが異なる領域が形成され、エッチング時に光の反射方向が異なるために生じるものであり、欠陥ではない。

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ン系晶出物である。

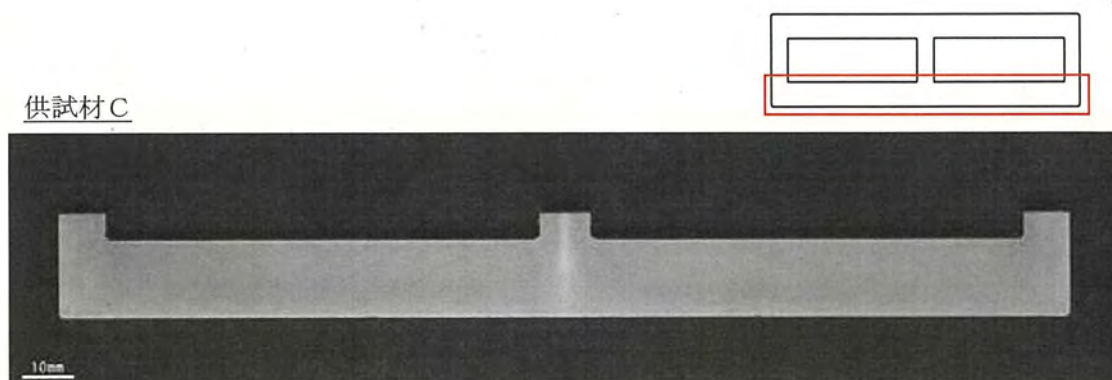
供試材 A



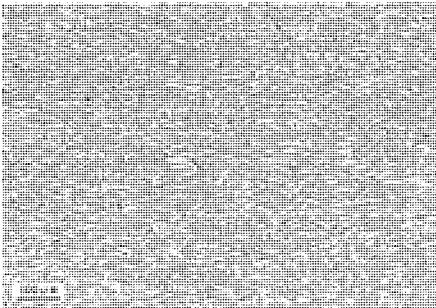

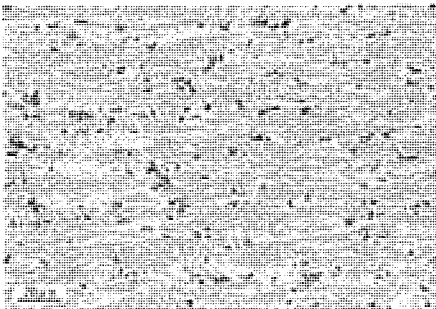
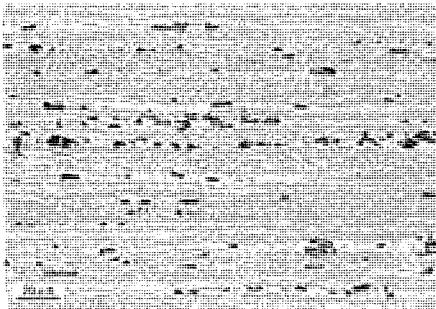
供試材 B



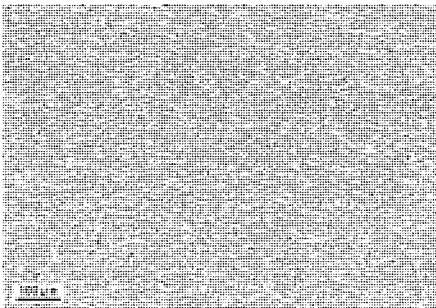

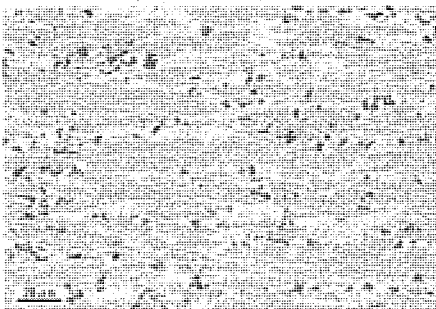

供試材 C



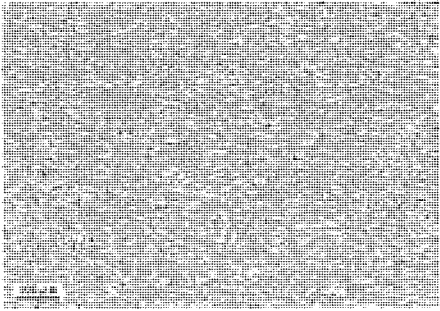

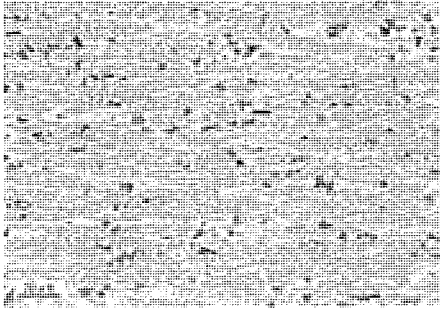

第 7-1 図 供試材の T 方向断面マクロ観察結果

	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）

	T方向断面	L方向断面
60倍		
300倍		

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

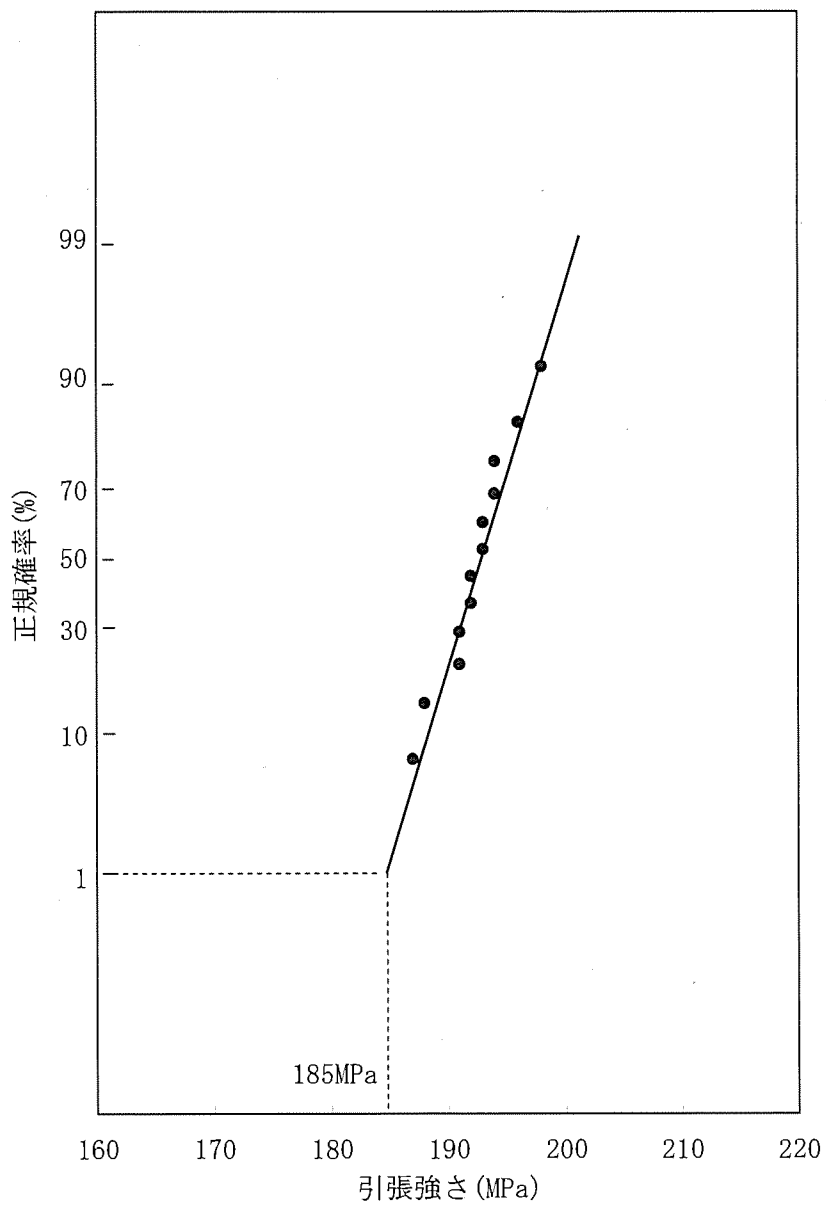
・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

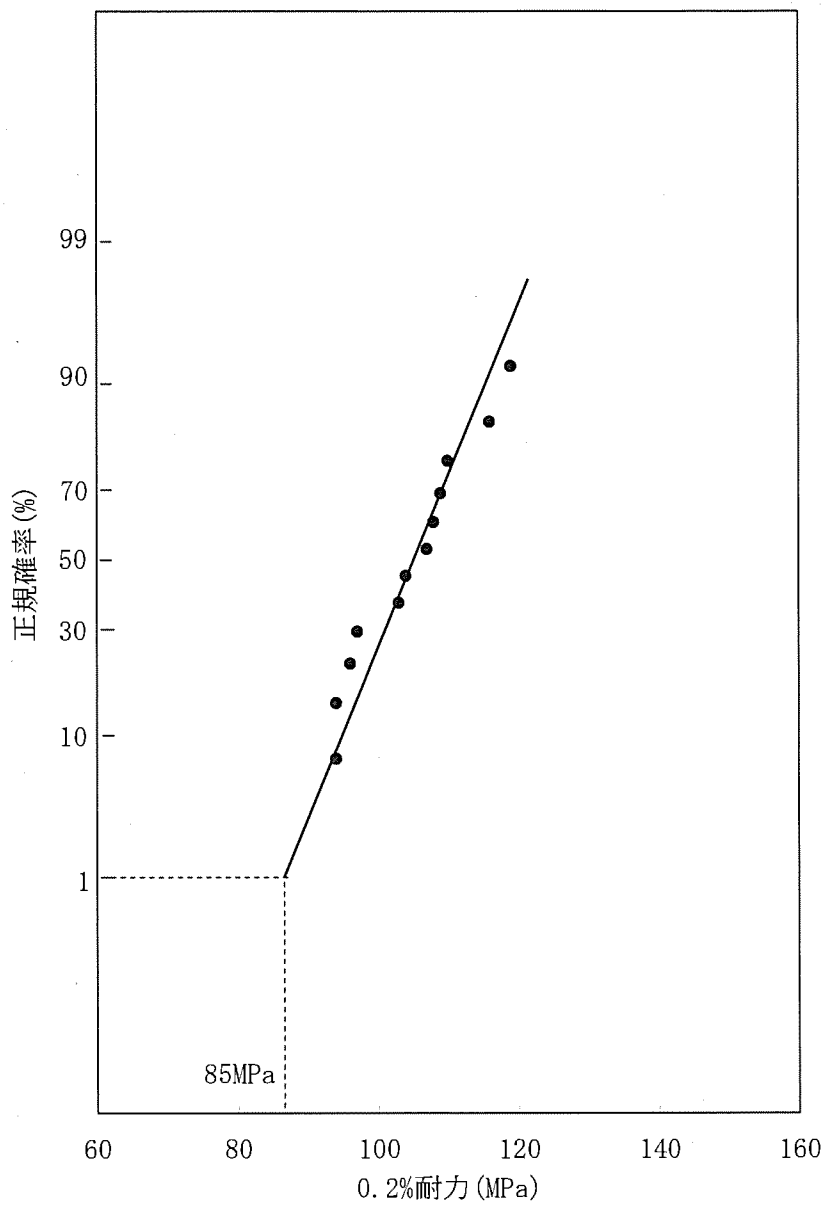
第 10-1 表に引張試験結果を示す。この結果より、引張強さと 0.2%耐力の常温の規格値は、試験データの 99%が包絡されるような最低強度として、平均値から標準偏差の 2.33 倍を減じて安全側に丸めた (小数点以下を切り捨て) 値とした。また、伸びの常温の規格値は、これらデータの 99%が包絡されるような最低伸びが 20%であるものの、後述する高温引張試験の結果において 100°C程度の温度ではこれよりも若干低い伸びを示す特性があることを考慮して 15%と設定した。また、正規確率プロットによる処理結果を第 10-1 図から第 10-3 図、及び第 10-2 表に示す。

第 10-1 表 常温における引張試験結果

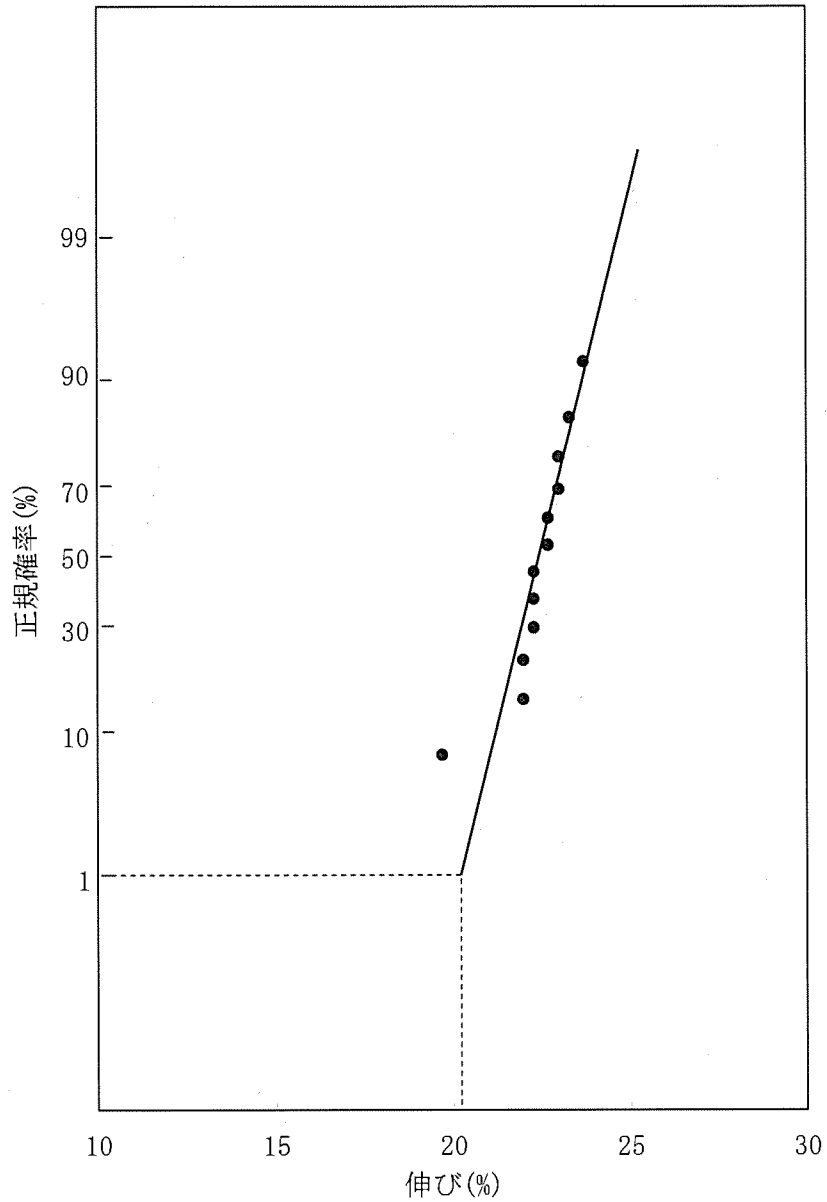
項目	N数	平均値	標準偏差	99%包絡(下限)値
引張強さ (MPa)	12	192	3.1	185
0.2%耐力 (MPa)	12	105	8.3	85
伸び (%)	12	22	1.0	



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°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。

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 韌性

(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

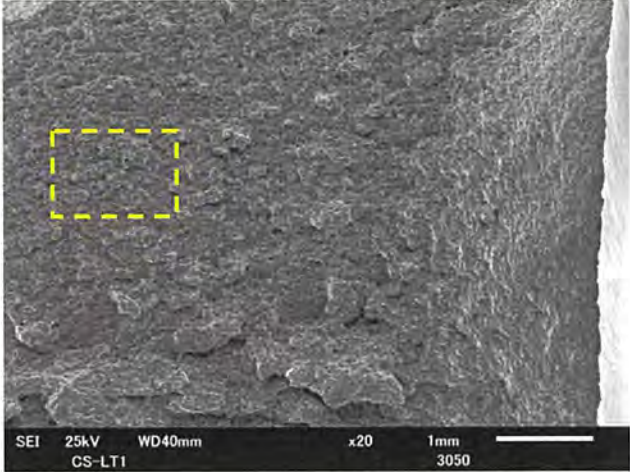
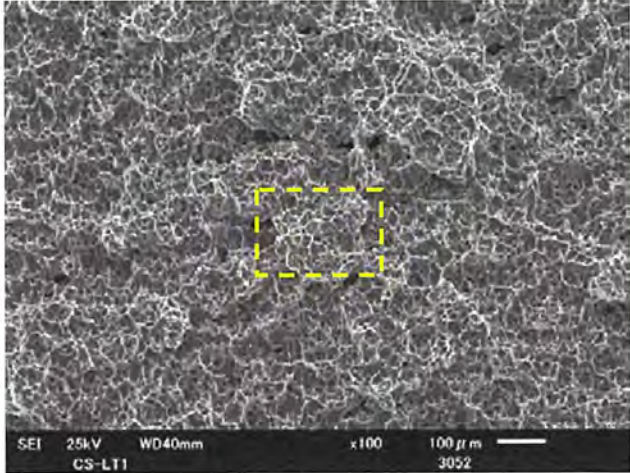
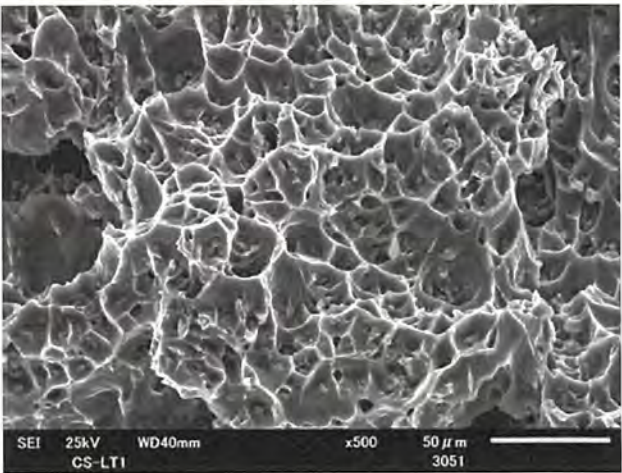
第 10-3 表にシャルピー衝撃試験結果を示す。

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。

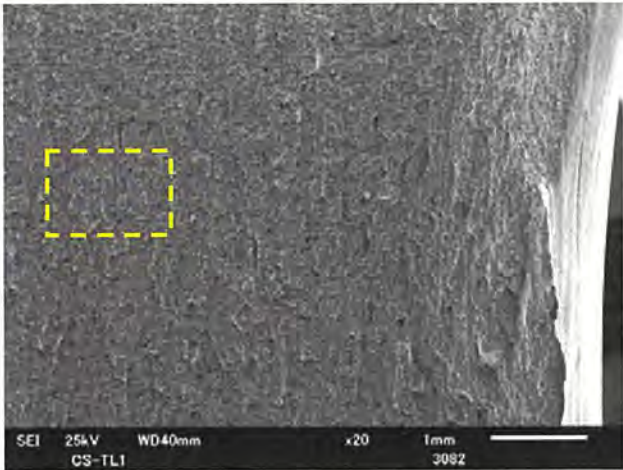
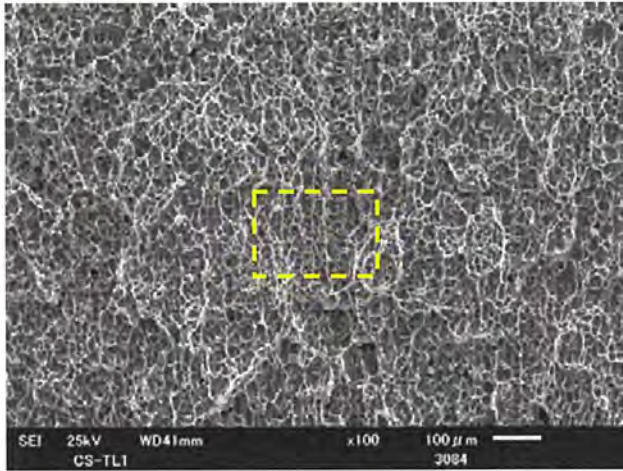
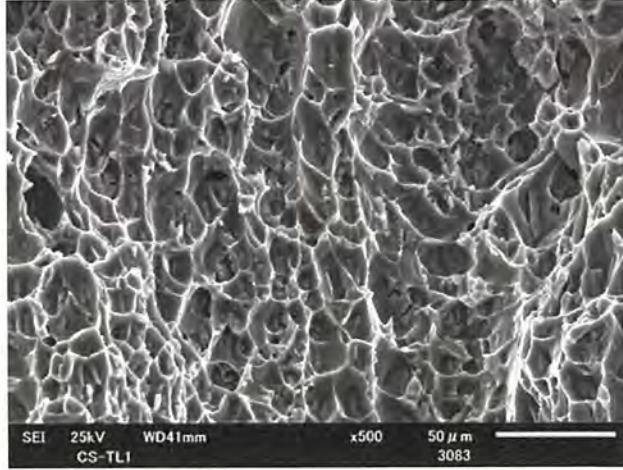
第 10-4 図に衝撃試験を実施した後の破面の拡大観察結果を示す。

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

試験片	<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>×100</p>	
<p>×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(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°C</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。

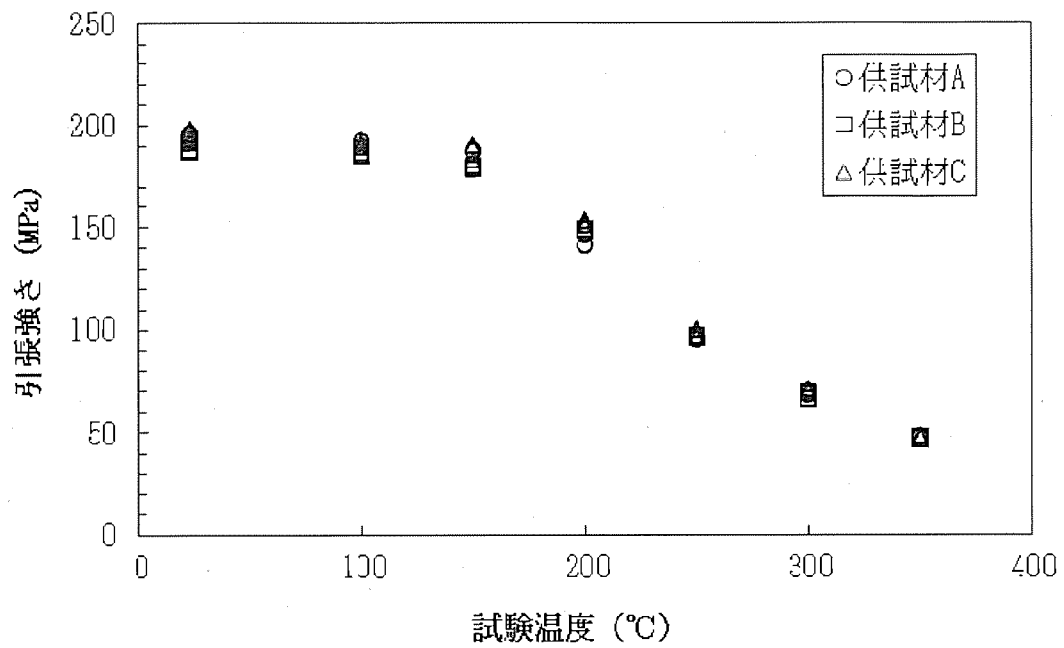
- ・ 試験片 : 棒状試験片 (JIS G 0567 : 1998 に準拠) を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS G 0567 : 1998 による。
- ・ 試験温度 : 常温、100、150、200、250、300 及び 350℃
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

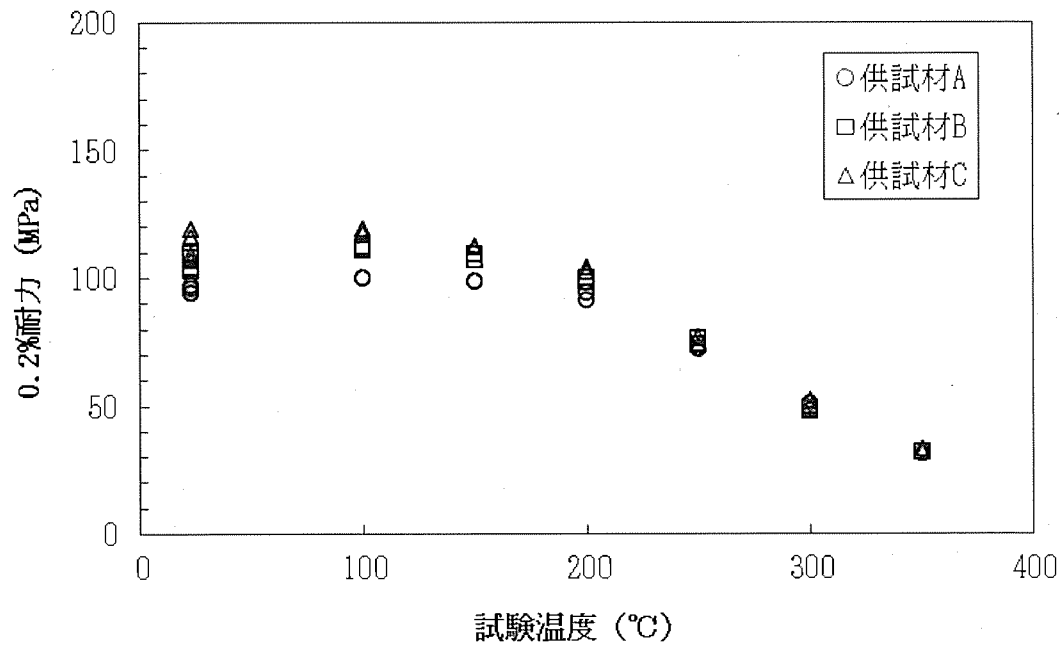
第 11-1 表及び第 11-2 表、第 11-1 図から第 11-3 図に引張試験結果を示す。

第 11-1 表 高温引張試験結果

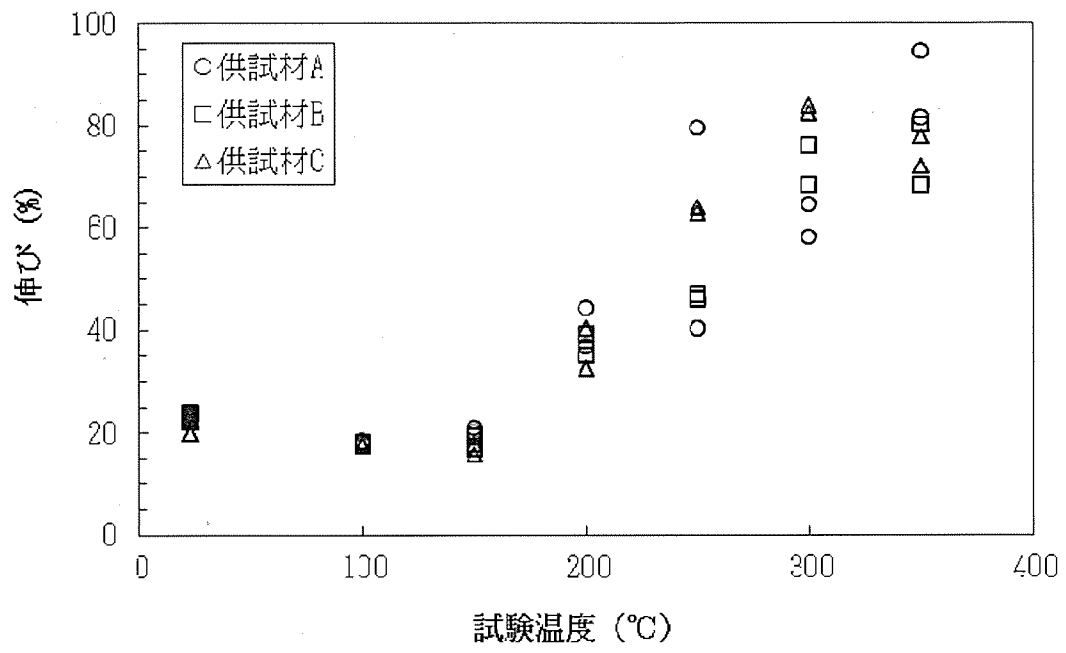
材質		MB-A3004	
試験片形状		JIS G 0567 : 1998	
試験方法		JIS G 0567 : 1998	
評価材料標本数		3	
評価材料標本符号		供試材 A、B、C	
項目	温度	N数	平均値
引張強さ (MPa)	常温	12	192
	100°C	6	189
	150°C	6	184
	200°C	6	148
	250°C	6	97
	300°C	6	69
	350°C	6	47
0.2%耐力 (MPa)	常温	12	105
	100°C	6	110
	150°C	6	106
	200°C	6	98
	250°C	6	74
	300°C	6	50
	350°C	6	32
伸び (%)	常温	12	22
	100°C	6	18
	150°C	6	18
	200°C	6	38
	250°C	6	56
	300°C	6	72
	350°C	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 (°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	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	187	22.7
	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	191	22.0
	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°C で 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr
300°C 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°C × 10hr 保持後 0.3°C/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°C
- ・ 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°C×1,000hr 時効			250°C×5,000hr 時効			300°C×1,000hr 時効			300°C×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	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	183	6	185			
	100°C	6	189	6	176	6	172	6	177	6	177	6	178			
	150°C	6	184	6	157	6	156	6	166	6	166	6	170			
	200°C	6	148	6	121	6	121	6	126	6	126	6	131			
	250°C	6	97	6	88	6	89	6	91	6	91	6	90			
	300°C	6	69	6	66	6	64	6	65	6	65	6	64			
0.2%耐力 (MPa)	350°C	6	47	6	48	6	49	6	47	6	47	6	46			
	常温	12	105	6	84	6	82	6	81	6	81	6	84			
	100°C	6	110	6	87	6	85	6	82	6	82	6	84			
	150°C	6	106	6	85	6	83	6	82	6	82	6	83			
	200°C	6	98	6	80	6	78	6	78	6	78	6	80			
	250°C	6	74	6	65	6	65	6	65	6	65	6	65			
伸び (%)	300°C	6	50	6	47	6	46	6	45	6	45	6	45			
	350°C	6	32	6	31	6	31	6	30	6	30	6	30			
	常温	12	22	6	22	6	23	6	23	6	23	6	19			
	100°C	6	18	6	20	6	21	6	18	6	18	6	24			
	150°C	6	18	6	31	6	30	6	27	6	27	6	38			
	200°C	6	38	6	52	6	49	6	53	6	53	6	50			
250°C	6	56	6	48	6	49	6	46	6	46	6	55				
	300°C	6	72	6	68	6	65	6	54	6	54	6	67			
	350°C	6	79	6	66	6	70	6	72	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℃×5,000hr)

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	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℃×5,000hr)

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	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)

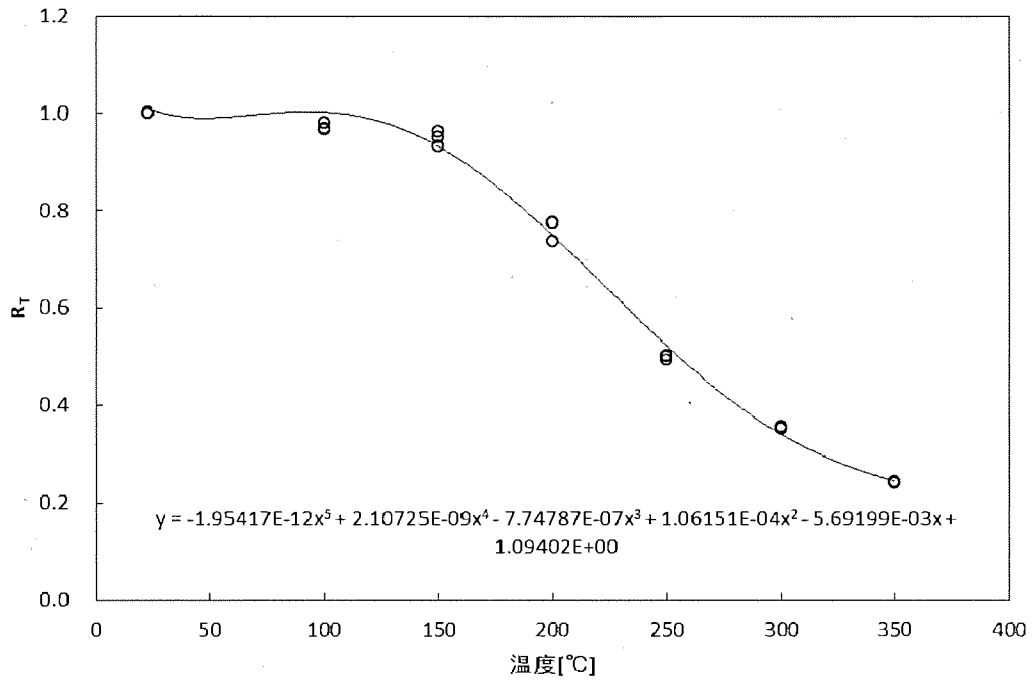
(300°C × 10, 000hr)

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			

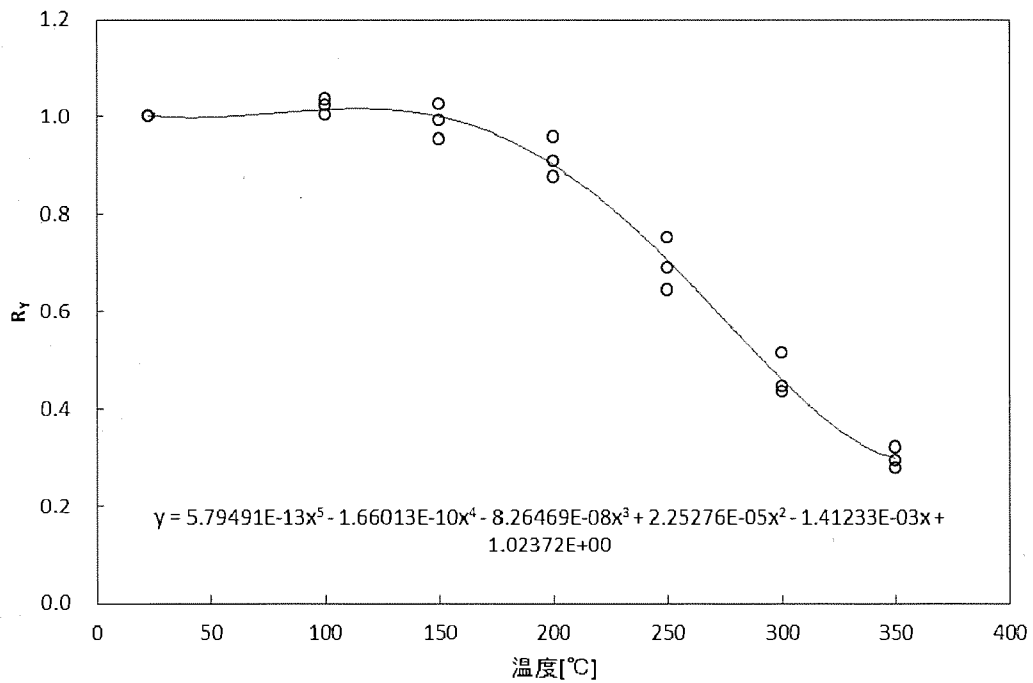
第 11-4 表 時効後の引張試験計測結果 (7/7)

(完全焼なまし処理)

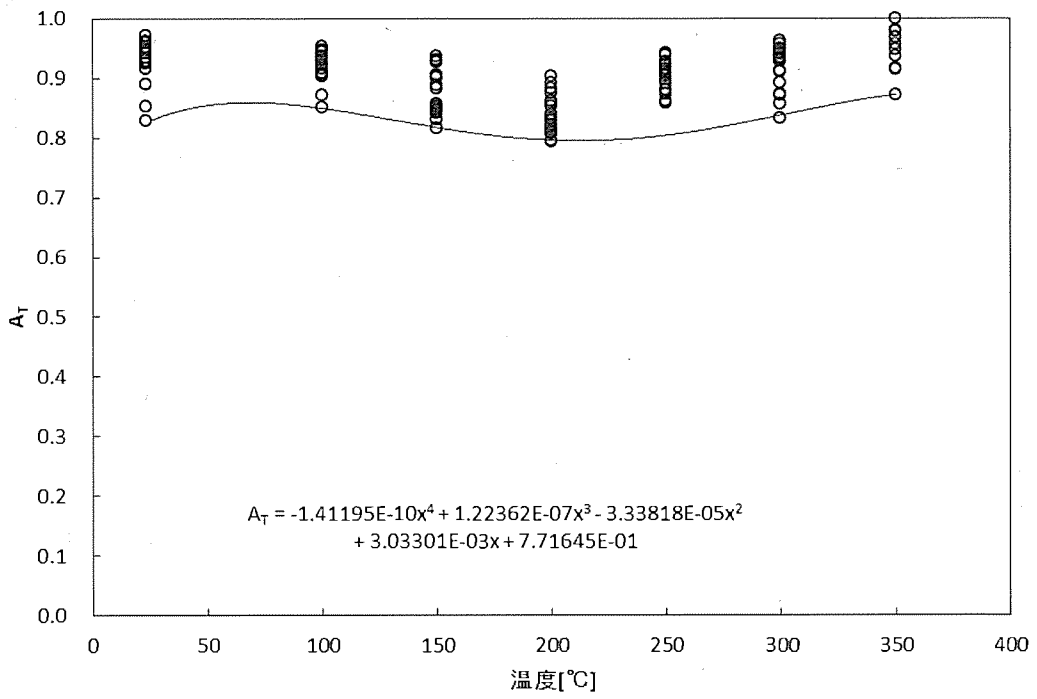
供試材 符号	試験 温度 (°C)	L 方向			T 方向		
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
A	23	80	162	21.5			
	23	75	161	21.5			
	100	77	160	19.0			
	100	86	165	18.0			
	150	80	153	24.5			
	150	83	153	23.5			
	200	75	121	38.0			
	200	74	120	40.5			
	250	58	82	62.0			
	250	58	83	54.0			
	300	39	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			



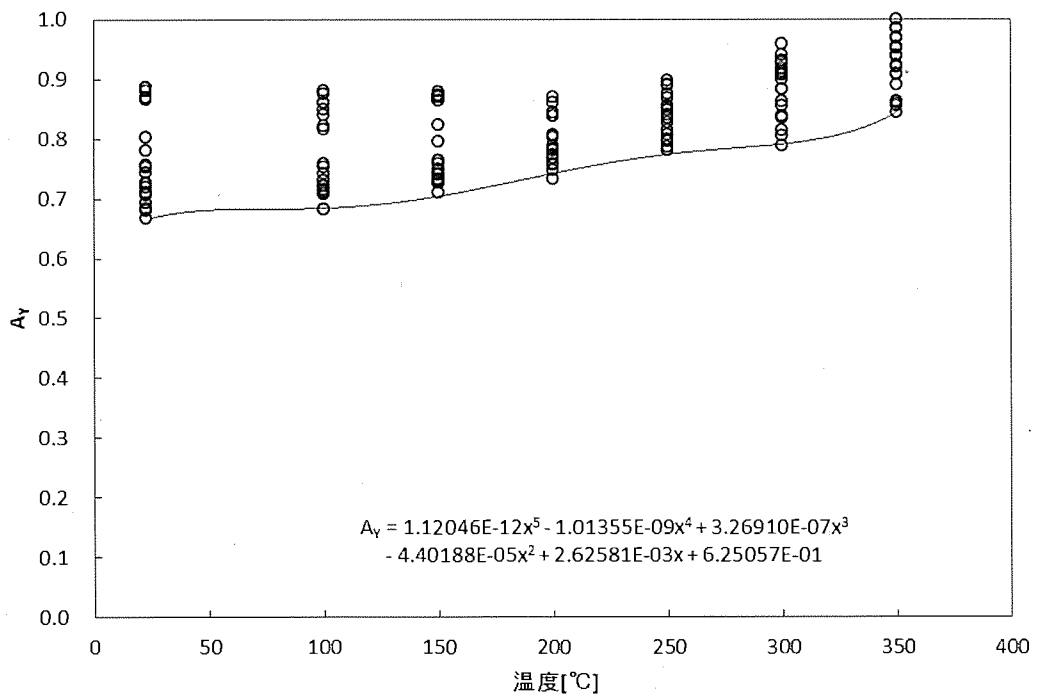
第 11-4 図 引張強さに関する初期材のトレンドカーブ



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 (°C)	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	A_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℃

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 (℃)
- 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℃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℃で 15.3MPa である。

応力一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。

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

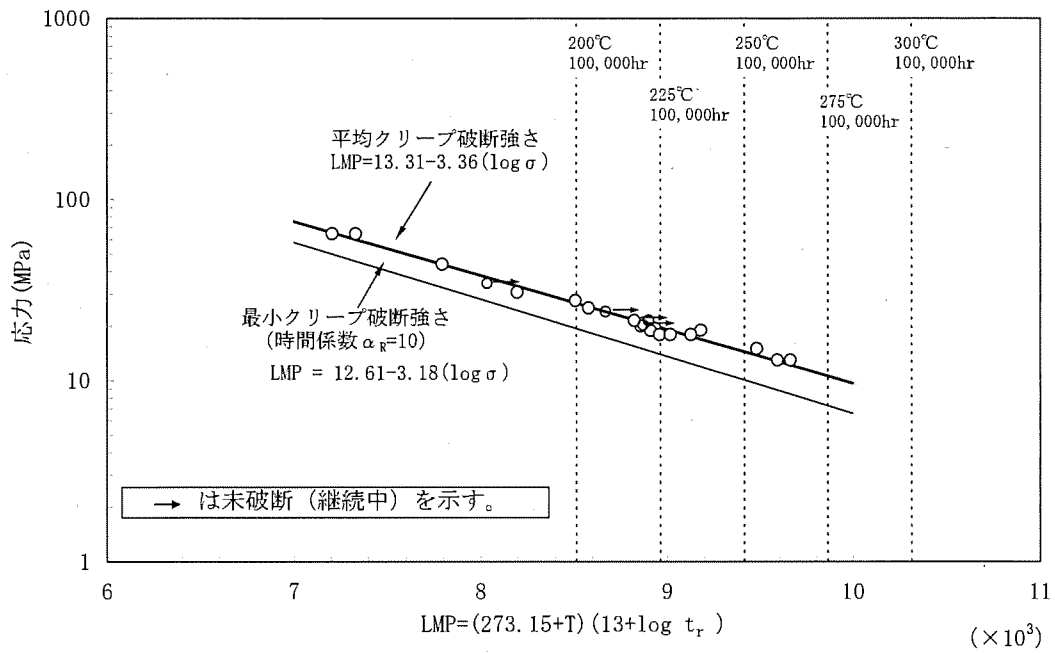
ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

T : 温度(°C)

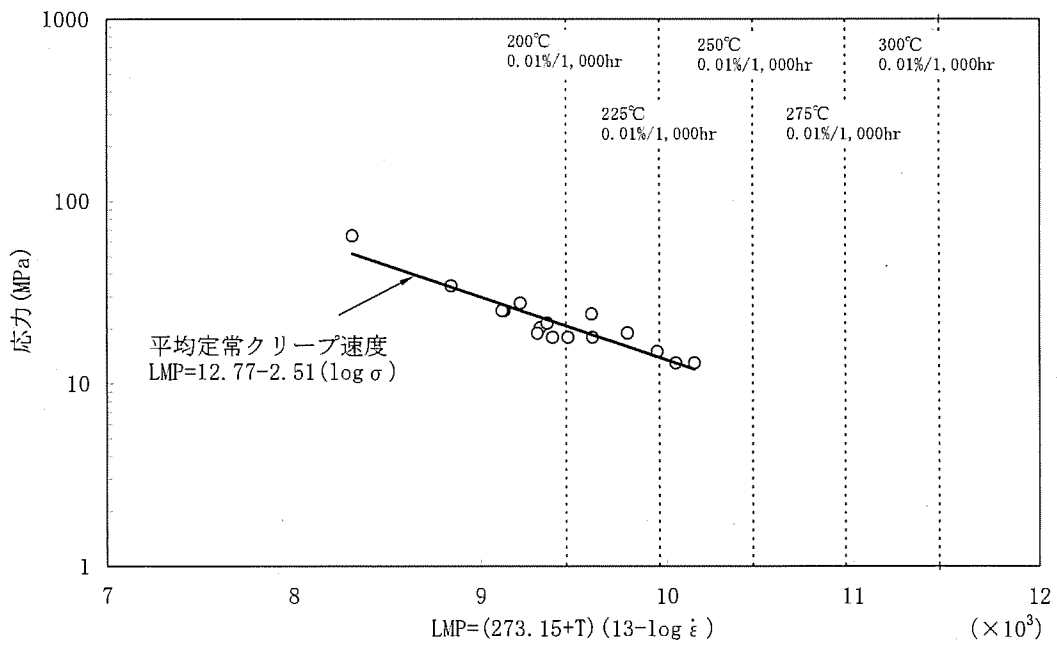
$\dot{\epsilon}$: 定常クリープ速度(hr^{-1})

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-定常クリープ速度プロット

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
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	試験温度 (°C)	N数	初期材 平均値(J)	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	-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	-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	-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)

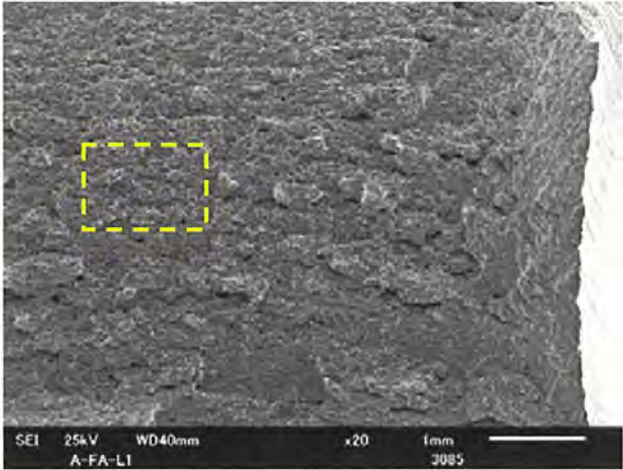
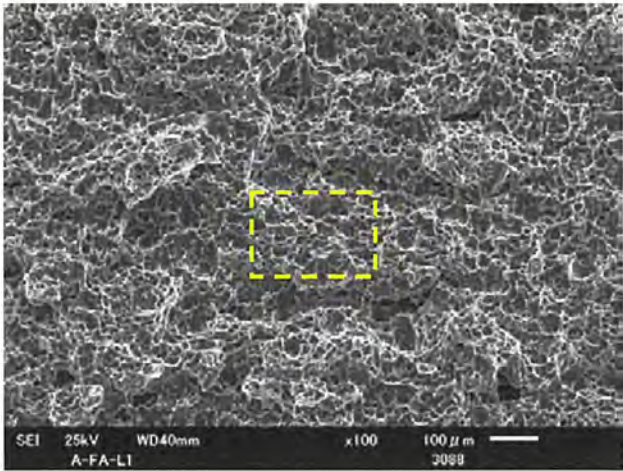
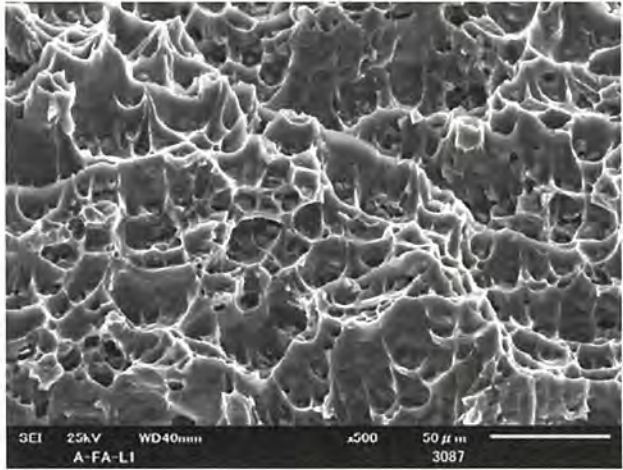
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
A	なし	L方向	-40	62	78	2.62
			-40	65	81	2.88
			-40	62	78	2.76
		T方向	-40	44	55	1.64
			-40	44	55	1.86
			-40	46	58	1.91
	250°C× 1,000hr	L方向	-40	71	88	1.63
			-40	68	85	1.86
			-40	68	85	2.05
		T方向	-40	54	68	1.76
			-40	54	68	1.76
			-40	57	71	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)

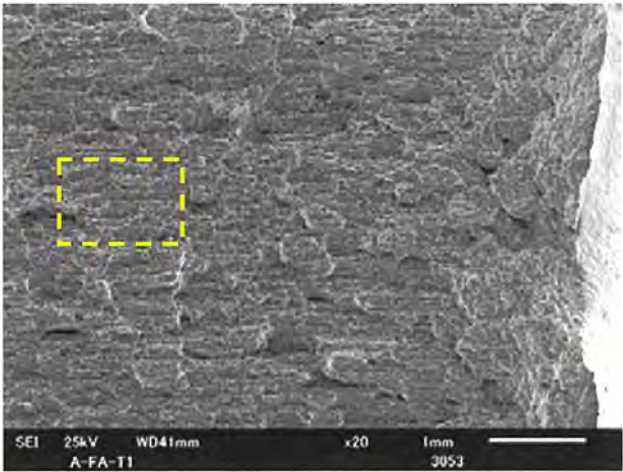
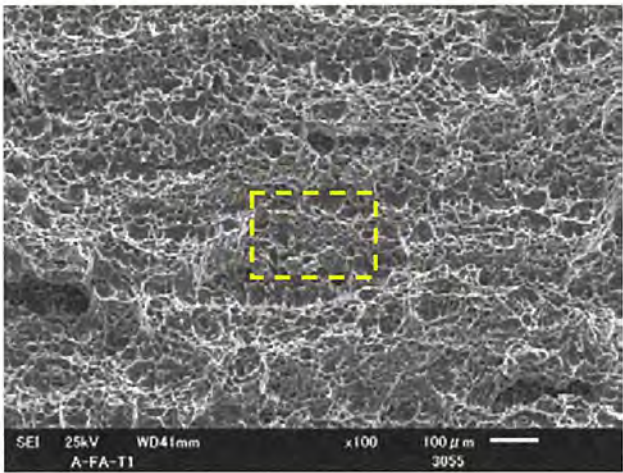
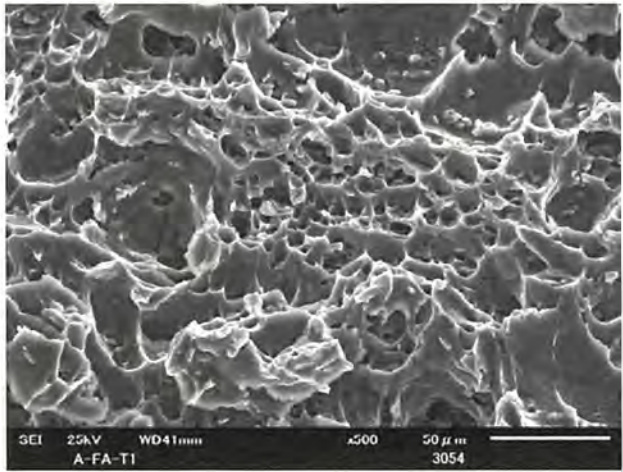
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
B	なし	L方向	-40	54	68	2.53
			-40	60	74	2.58
			-40	60	74	2.70
		T方向	-40	44	55	2.25
			-40	44	55	2.09
			-40	44	55	2.11
	250°C× 1,000hr	L方向	-40	62	78	1.92
			-40	60	74	2.21
			-40	60	74	1.83
		T方向	-40	52	64	1.66
			-40	52	64	1.55
			-40	52	64	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)

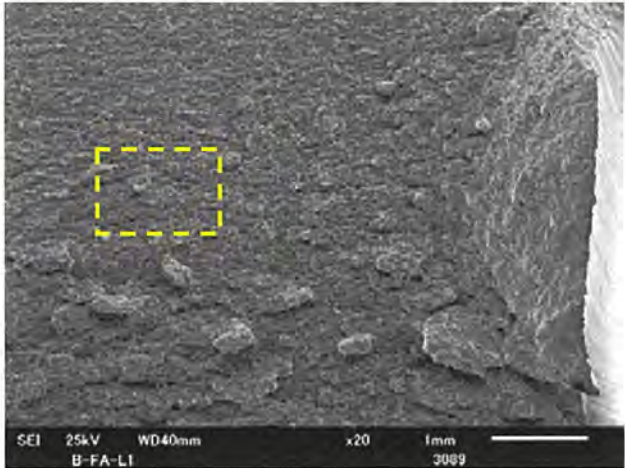
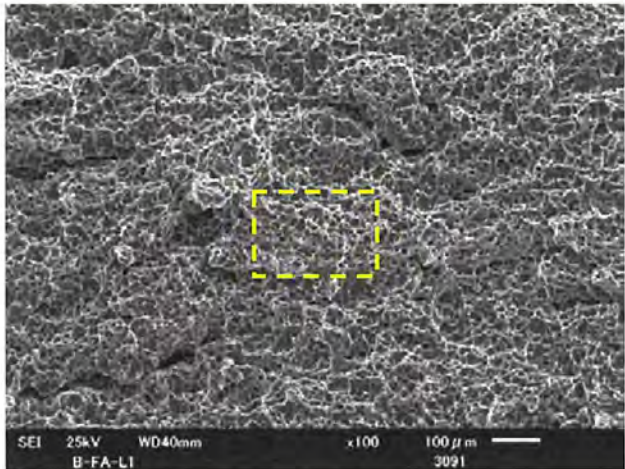
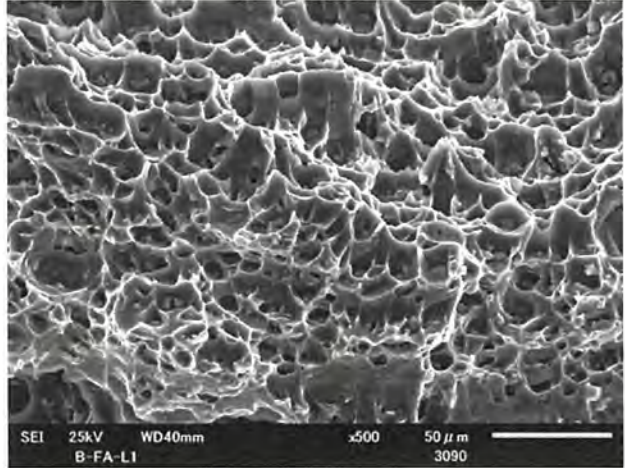
供試材 符号	時効条件	採取方向	試験温度 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
C	なし	L 方向	-40	57	71	2.77
			-40	57	71	2.54
			-40	60	74	2.78
		T 方向	-40	41	51	2.15
			-40	41	51	2.02
			-40	41	51	2.06
	250°C × 1,000hr	L 方向	-40	60	74	1.72
			-40	62	78	2.10
			-40	60	74	1.83
		T 方向	-40	46	58	1.72
			-40	46	58	1.67
			-40	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↑</p> <p>×20</p>	
<p>×100</p>	
<p>×500</p>	

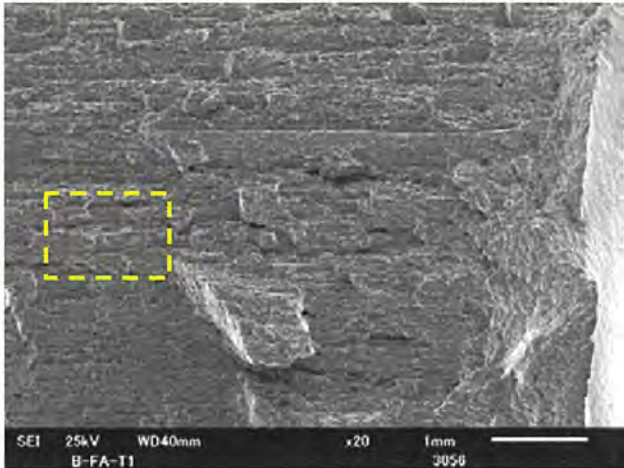
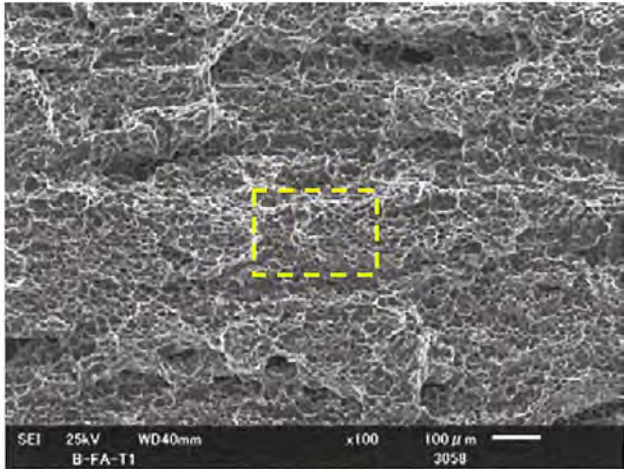
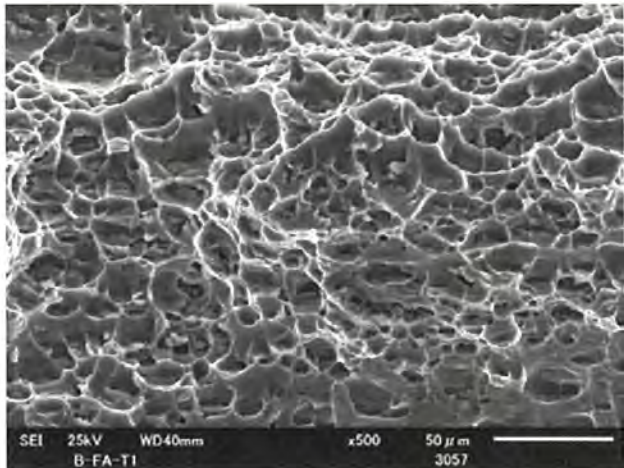
第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (1/5)

<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>×100</p>	
<p>×500</p>	

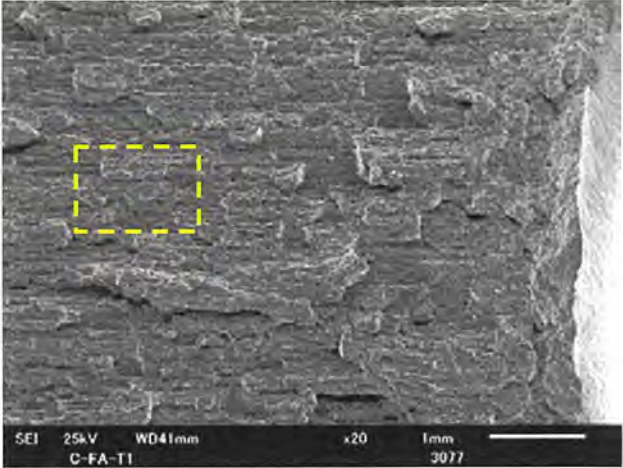
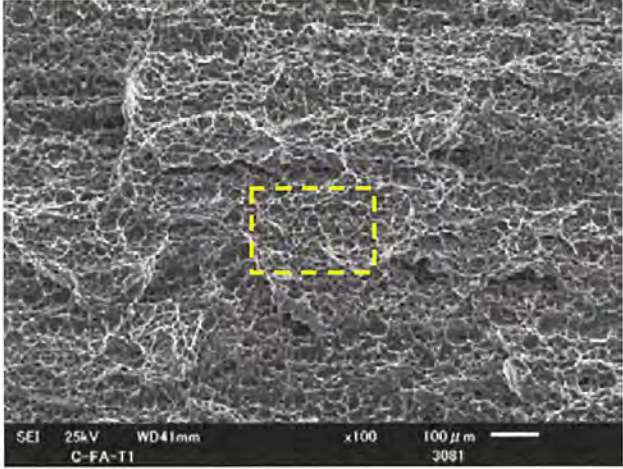
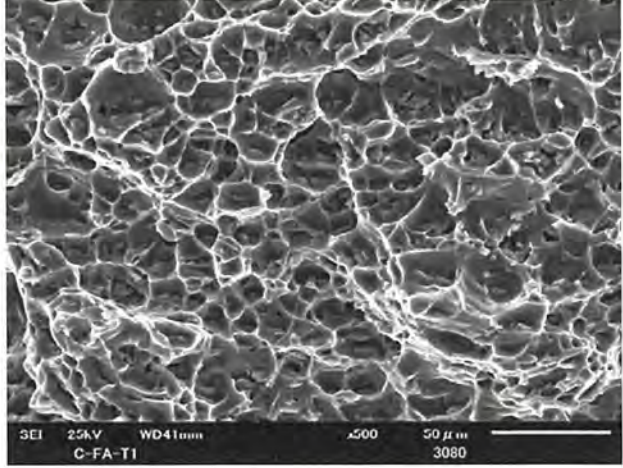
第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (2/5)

<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°C</p>
<p>き裂進展方向↑</p> <p>×20</p>	
<p>×100</p>	
<p>×500</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↑</p> <p>×20</p>	 <p>SEI 25kV WD40mm x20 1mm 3058</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)

試験片	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°C
き裂進展方向↑ ×20	
×100	
×500	

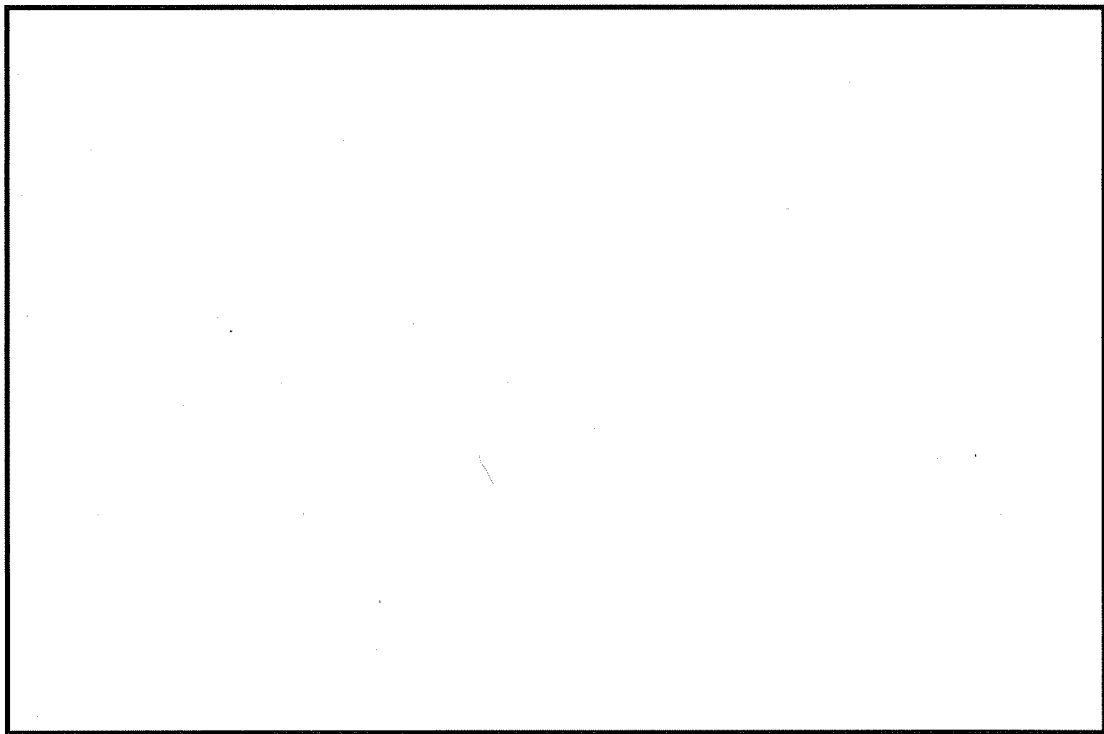
第 13-1 図 走査型電子顕微鏡によるVノッチシャルピー衝撃試験片の破面写真 (5/5)

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（0.348 μ m/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（1.4 μ m/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。⁽¹⁾
- ・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 $1.0/3 S_T \times R_T \times A_T$ について、「材料規格」の新規材料採用ガイドラインでは $1.1/3 S_T \times R_T \times A_T$ 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。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)
$1/3 S_T$ (MPa)	61.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$1.0/3 S_T \times R_T \times A_T$ (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
$2/3 S_{y0}$ (MPa)	56.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$2/3 S_{y0} \times R_Y \times A_Y$ (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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$1.0/4 S_T \times R_T \times A_T$ (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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$2/3 S_{y0} \times R_Y \times A_Y$ (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
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°C × 5,000hr		300°C × 5,000hr	
供試材 符号	温度 (°C)	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ mm/mm°C)			
		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。

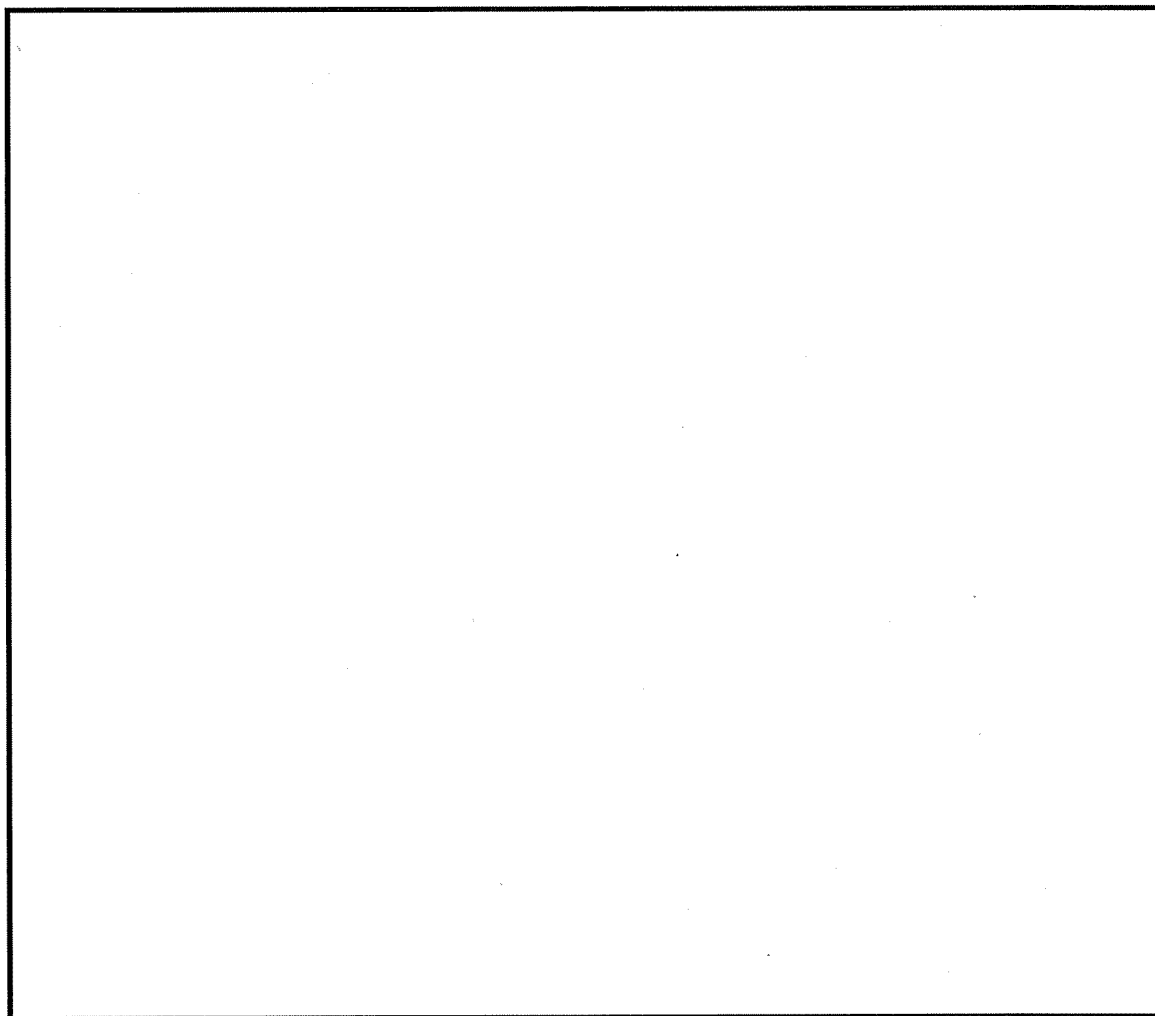
第 19-3 表 供試材の線膨張係数測定結果 (3/3)

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°C×10hr、0.3°C/hr 完全焼なまし処理	
供試材 符号	温度 (°C)	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ mm/mm°C)	
		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

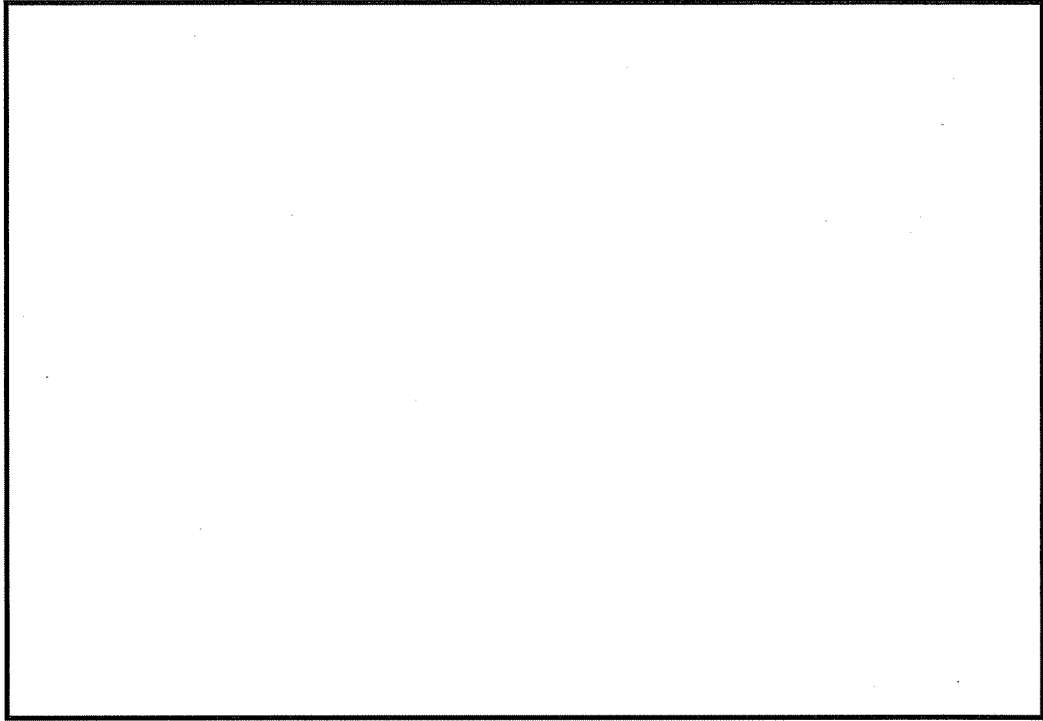
(注1) 区分Aは瞬時線膨張係数、Bは常温から当該温度までの平均線膨張係数を表す。

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}n/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 A1100 材の引張特性の照射依存性⁽⁶⁾

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)

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

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) (以下「MB-A3004」という。) について、供用期間 (60 年間) を想定した材料特性評価に供する材料への熱処理方法の考え方、熱処理により得られた材料の強度特性、及び熱処理条件の妥当性等についてまとめたものである。

2. 熱処理の考え方

2.1 強化機構

材料の強度に寄与する強化機構は、主に次の 4 種である。

- (1) 固溶強化
- (2) 析出強化 (分散粒子強化含む)
- (3) 加工硬化
- (4) 組織微細化

適用材料における強化機構の特徴を理解した上で、供用期間中の温度変化を考慮した条件下の平衡状態に達し安定化させた材料をもって材料特性評価することが重要である。

別紙 1-1 表に MB-A3004 の供用初期及び供用終期の強化機構に関する概要を示す。

別紙 1-1 表 バスケットプレート用材料の概要

記号		MB-A3004	
		非熱処理系	
分類		供用初期	供用終期 (60 年後)
		強化 機構 (注 1)	固溶強化
析出強化 (分散粒子強化含む)	Al ₆ Mn		Al ₆ Mn
加工硬化	あり		なし
結晶組織微細化	押出組織		回復再結晶組織

(注 1) 強化機構は主要因子のみ抽出

2.2 熱処理方法

供用期間（60年）及び環境条件を考慮し、MSF-21P型のバスケットプレート用材料において60年間の熱ばく露に伴い熱劣化し平衡状態にある材料での材料特性を評価する必要がある。

(1) 長時間過時効熱処理

熱劣化を模擬する手法として、使用環境温度より高い温度において長時間熱ばく露する長時間過時効熱処理を施すことが一般的に知られている。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 長時間過時効熱処理の熱処理方法概要及び平衡状態の判断基準の考え方を別紙1-1図及び別紙1-2図に示す。当該手法は、高温ばく露することにより析出物の生成及び成長（粗大化）に伴い強度低下する過時効現象を促進させ安定化させる手法である。

(2) 完全焼なまし処理

完全焼なまし処理は、前述の長時間過時効熱処理に代わる方法として、2.1項の強化機構それぞれの特徴を考慮し、設定する条件で行う処理方法である。完全焼なまし処理の熱処理方法概要及び平衡状態の判断基準の考え方を別紙1-3図及び別紙1-4図に示す。

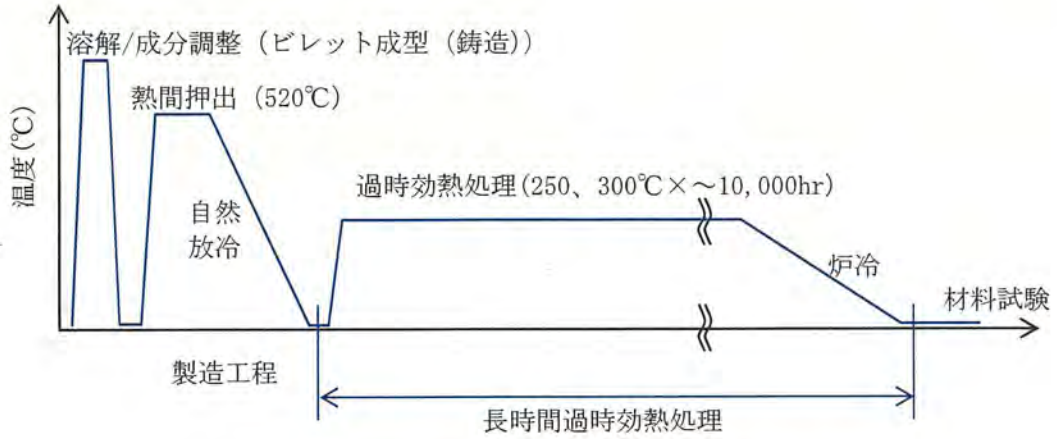
押出後の製品材料に対して、高温での焼鈍処理を実施する。この焼鈍は、焼鈍等の熱処理を施していない材料には通常転位が多く含まれ、加工硬化していることから、その転位を高温焼鈍することで転位解放（加工硬化回復）させ、かつ、それに伴う再結晶及び組織粗大化等の組織変化又は転位密度をTEM等により直接確認することで2.1項に示す強化機構(3)、(4)を安定化させた状態かを確認できる。また、焼鈍後の材料を徐冷（制御冷却）することで、冷却中の各温度での平衡状態（固溶、析出）を維持しながら常温付近まで徐冷され、平衡状態に達した安定な材料を得ることができる。

平衡状態の判断指標には、導電率及び引張強度を適用した。導電率は、固容量が多い場合は低下し、固容量が少ない場合は高い値を示す。固溶状態が平衡状態に達すると、冷却速度をより遅くしても変化しない領域が確認できる。また、強度特性においても、固溶強化及び析出強化が安定化することから、冷却速度が遅くなるごとに低下し、ある冷却速度以下の冷却速度では強度特性が変化しない領域が確認できる（別紙1-4図参照）。

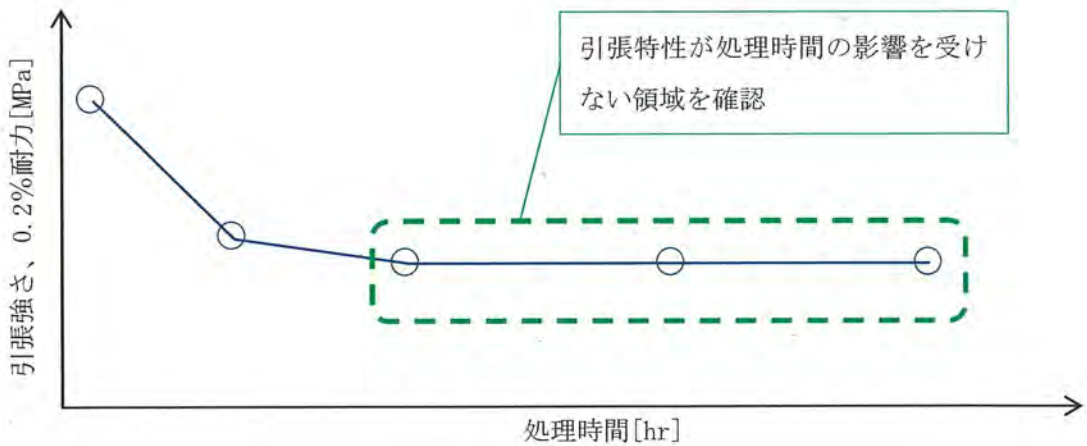
4.項以降に詳細を示しているが、完全焼なまし処理条件において、焼鈍温度は、熱間押出により生じた冷却（自然放冷）中の熱歪みや整直（冷間加工）時の加工硬化を除去するため押出温度条件と同じとし、熱間押出により生じた材料状態から再度制御冷却を施し平衡状態とするために設定している。焼鈍温度の保持時間は、60年間の供用期間を考慮し、十分な加熱となるよう拡散距離（200℃、60年間一定と仮定した場合の拡散距離に対し、保守性を考慮し約2倍以上であることを確認）を考慮して設定したものである。

なお、熱間押出温度以上で生じる析出物（例えば、MB-A3004のAl₆Mn（共晶温度658.5℃：別紙1-9図参照））は完全焼なまし処理条件により変化しないことを確認しており、熱間押

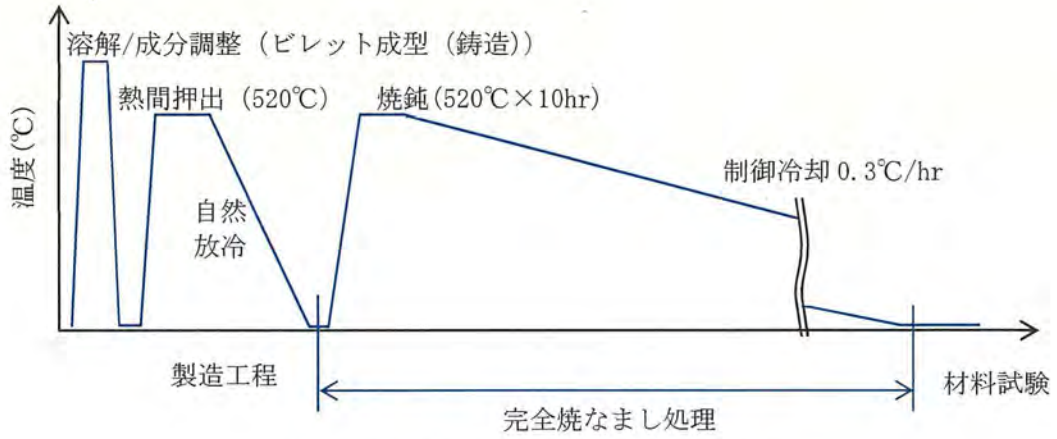
出温度を完全焼なまし処理の焼鈍条件と設定することは妥当である。



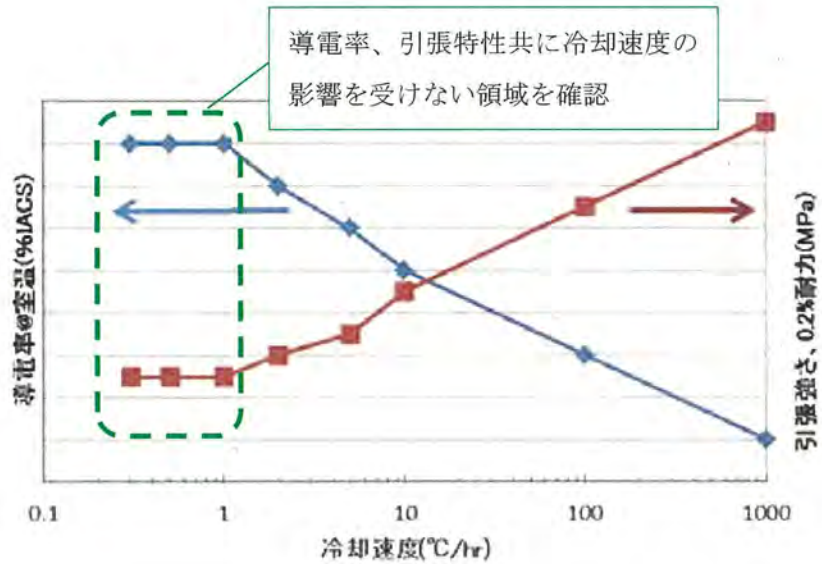
別紙 1-1 図 長時間過時効熱処理方法概要図



別紙 1-2 図 平衡状態の判断基準の考え方 (長時間過時効熱処理)



別紙 1-3 図 完全焼なまし処理方法概要図



別紙 1-4 図 平衡状態の判断基準の考え方 (完全焼なまし処理)

2.3 熱処理の妥当性

MB-A3004 への熱処理は、次項以降に詳細を示す長時間過時効熱処理（250℃、300℃において、1,000hr、5,000hr、10,000hr）及び完全焼なまし処理（520℃において10hr 保持後、0.3℃/hr の制御冷却）を実施し、材料特性評価の供試材としている。

(1) 長時間過時効熱処理

評価基準強度を定める試験は、長時間過時効熱処理を施した材料に対して実施している。

(a) 主要成分

MB-A3004 材の主な強化機構は Mg の固溶強化と Mn の析出強化である。そこで、各成分の生成物について各状態図を基に確認している。Al-Mn-Mg 3 元系状態図（別紙 1-5 図）により 3 元化合物を生成しないことを確認している。

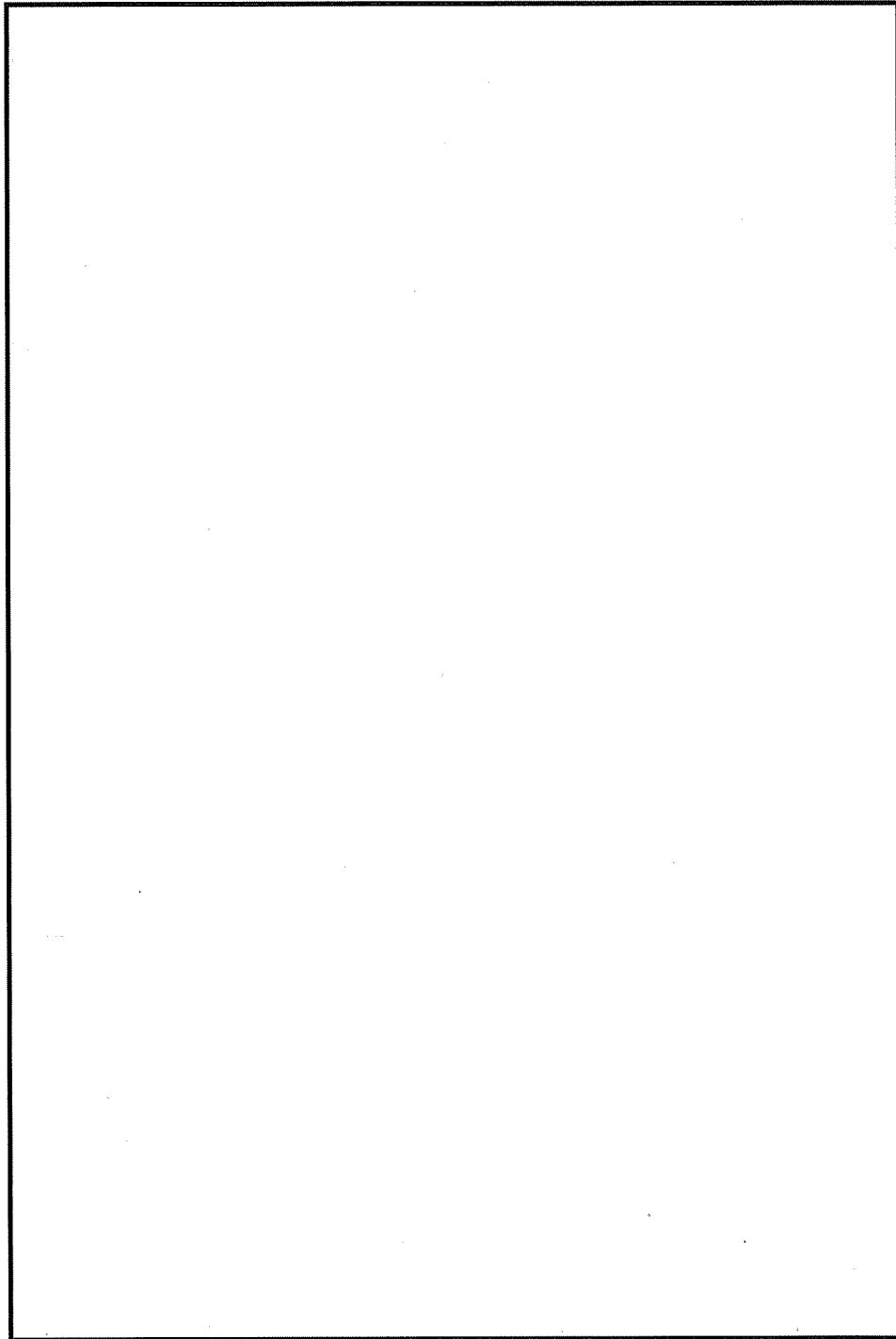
(b) 不純物成分

不純物成分である Si 及び Cu について、各々の 3 元系状態図として、主要成分である Mg との状態図を別紙 1-6 図に、Mn との状態図を別紙 1-7 図に示す。別紙 1-6 図及び別紙 1-7 図より供用温度及び熱処理温度域での相変化を確認すると、Al-Si-Mg 及び Al-Cu-Mg 系は析出物が生成し、Al-Mn-Fe 及び Al-Mn-Si 系は相変化が生じないことを確認している。Al-Si-Mg 及び Al-Cu-Mg 系析出物は BC-A6N01 の場合と同様、粗大化による過時効現象（別紙 1-8 図参照）を生じることが知られている。不純物元素として Cu の影響（過飽和、時効等による強化）を焼鈍温度と保持時間で確認している。これによると、高温であるほど、短期間に基底強度に下がっていることがわかる。完全焼なまし処理は 520℃×10hr 保持から約 70 日（0.3℃/hr）を掛けて冷却しており、例えば 260℃⇒240℃の変化に約 3 日間を要しており、別紙 1-8 図に示す過時効軟化に要する時間を考慮すると十分 Cu 系の影響を排除できているものと判断できる。したがって、不純物成分は初期材においては強化に寄与する可能性があるが、長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理により軟化された状態においては、有効な強化機構として寄与していない。

以上より、評価基準強度の算定に当たっては、主要成分である Mn 及び Mg 個々について供用温度及び熱処理温度域での影響を考慮すればよい。各々の 2 元系状態図を別紙 1-9 図及び別紙 1-10 図に示す。Mn の析出物及び Mg の固溶状態の変化は今回の長時間過時効熱処理により影響を受けない範囲であり、別紙 1-11 図から別紙 1-13 図に示すとおり、長時間の過時効熱処理及び完全焼なまし処理により Al₆Mn 系析出物が安定化されており、強度低下（過時効）現象が確認されている。個々の成分の拡散に伴う状態変化（過時効現象等）のみ生じることから当該熱処理条件は妥当と判断される。なお、他の成分である Fe、Cu、Si については添加量が少なく、別紙 1-14 図から別紙 1-16 図に示すとおり、各温度範囲において評価すべき相変化がないことを確認した。

(2) 完全焼なまし処理

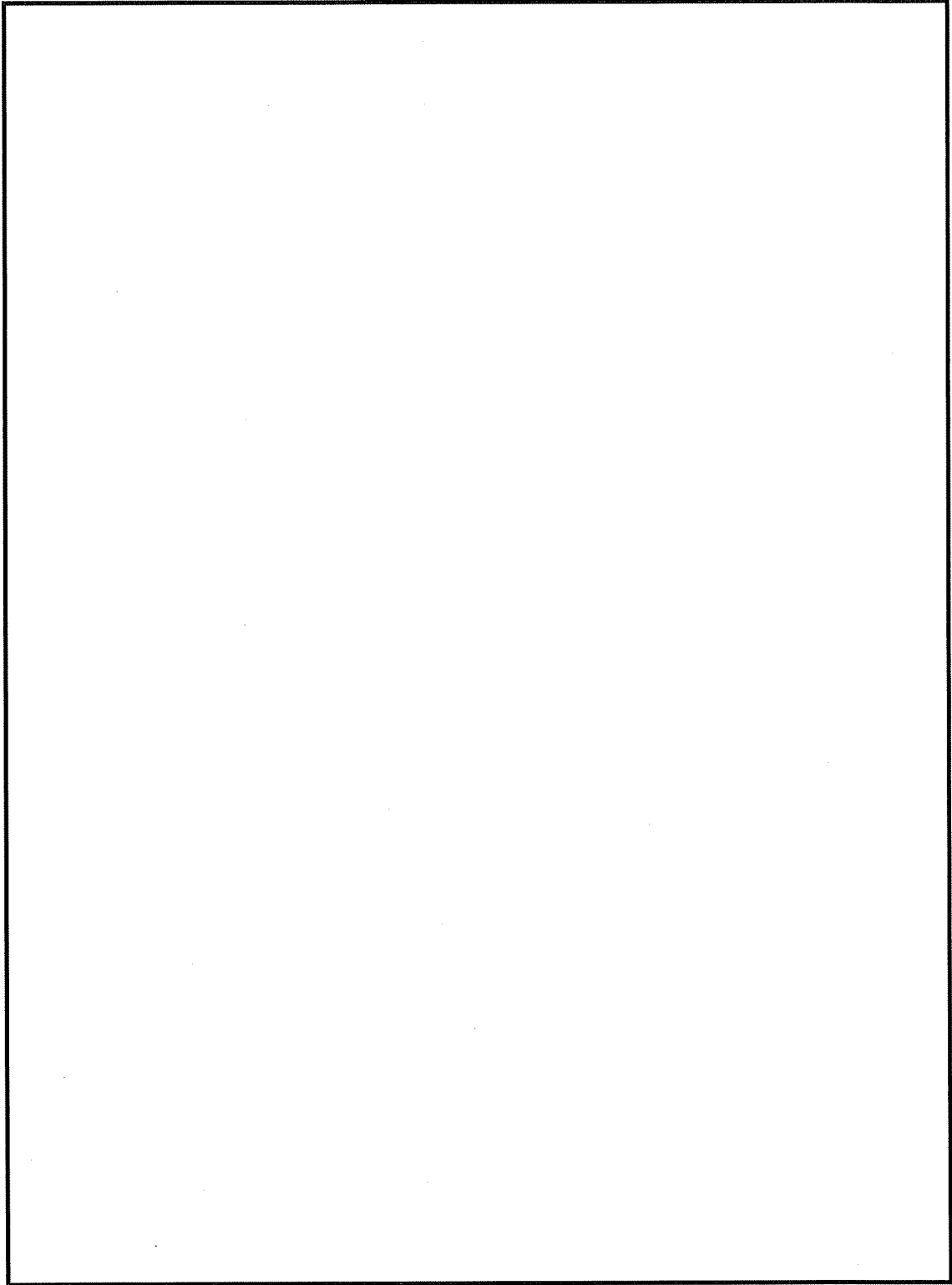
完全焼なまし処理は、520°Cの高温焼鈍（10hr 保持）後に0.3°C/hrの制御冷却を行っている。Mnは520°Cの焼鈍温度域で添加成分が低い場合は、一部再固溶する α 相域（別紙1-9図）であるが、その温度域から制御冷却を施すことにより、 Al_6Mn 系析出相が適切に析出する時間及び温度（別紙1-11図）が確保されていることを確認している。また、別紙1-12図に示すとおり、Al-Mn合金における過時効処理が長時間過時効熱処理及び完全焼なまし材において、軟化に要する十分な温度・時間であることが確認されている。また、Mgは、BC-A6N01と同様に高温からの制御冷却により平衡固溶量への到達及び Mg_2Si 粗大析出物が生成される。したがって、完全焼なまし処理における強度特性変化と一致しており、当該材料への熱処理が妥当性であると判断できる。



別紙 1-5 図 3 元系状態図 (Al-Mn-Mg) ^{(3) (4)}

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

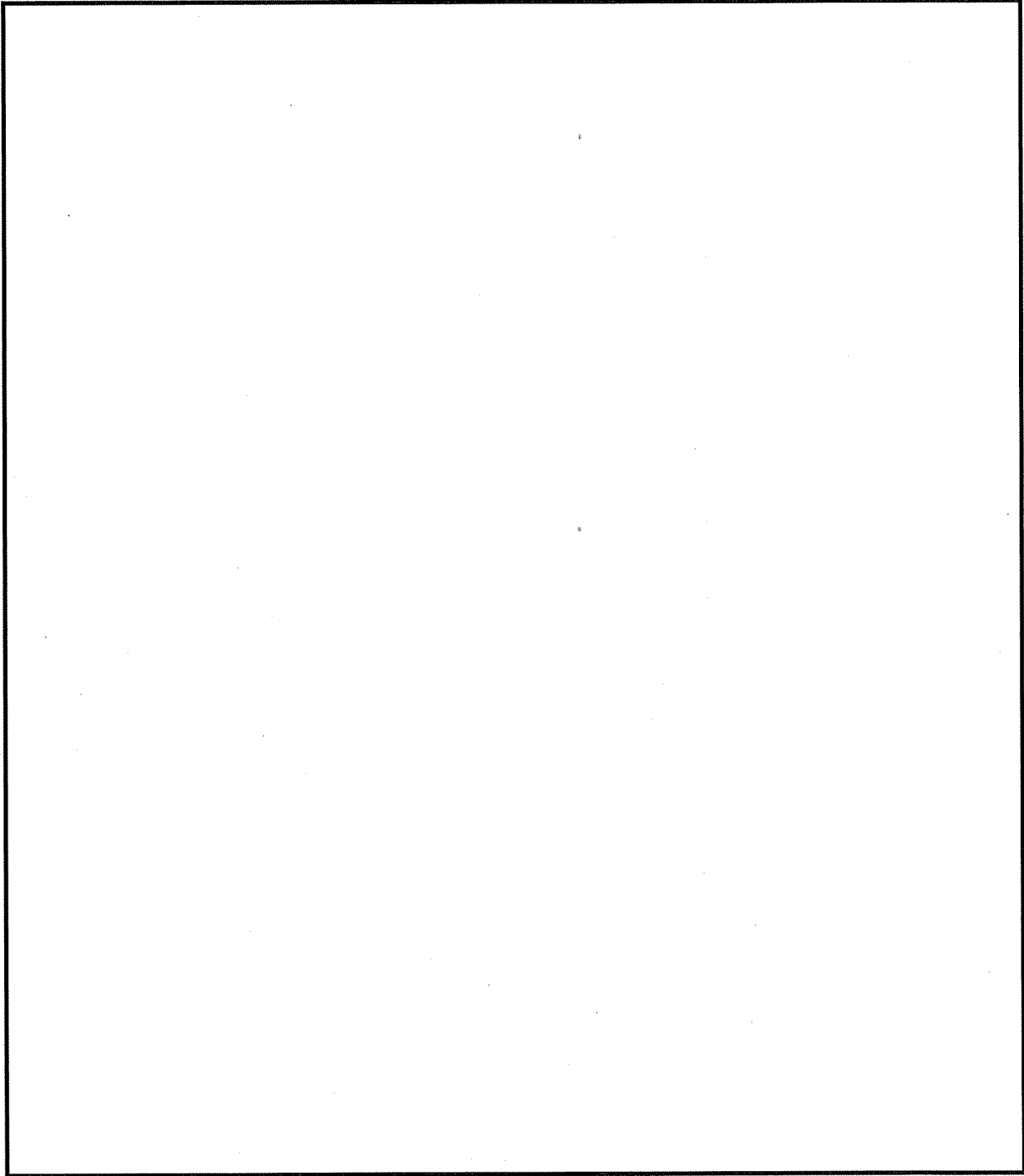
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1-6 図 3 元系状態図 (Al-Si/Cu-Mg) ⁽⁴⁾

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

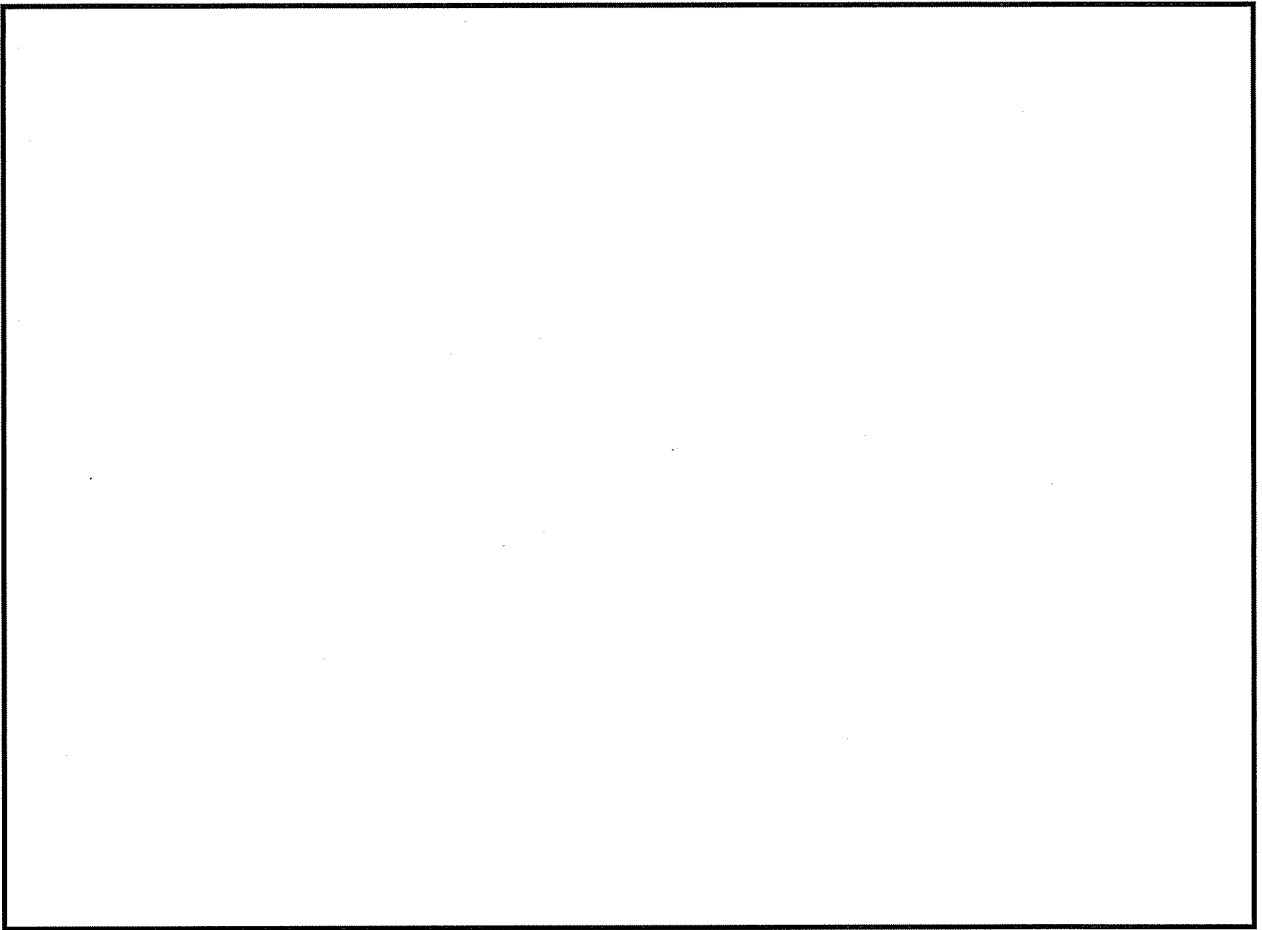
内は商業機密のため、非公開とします。



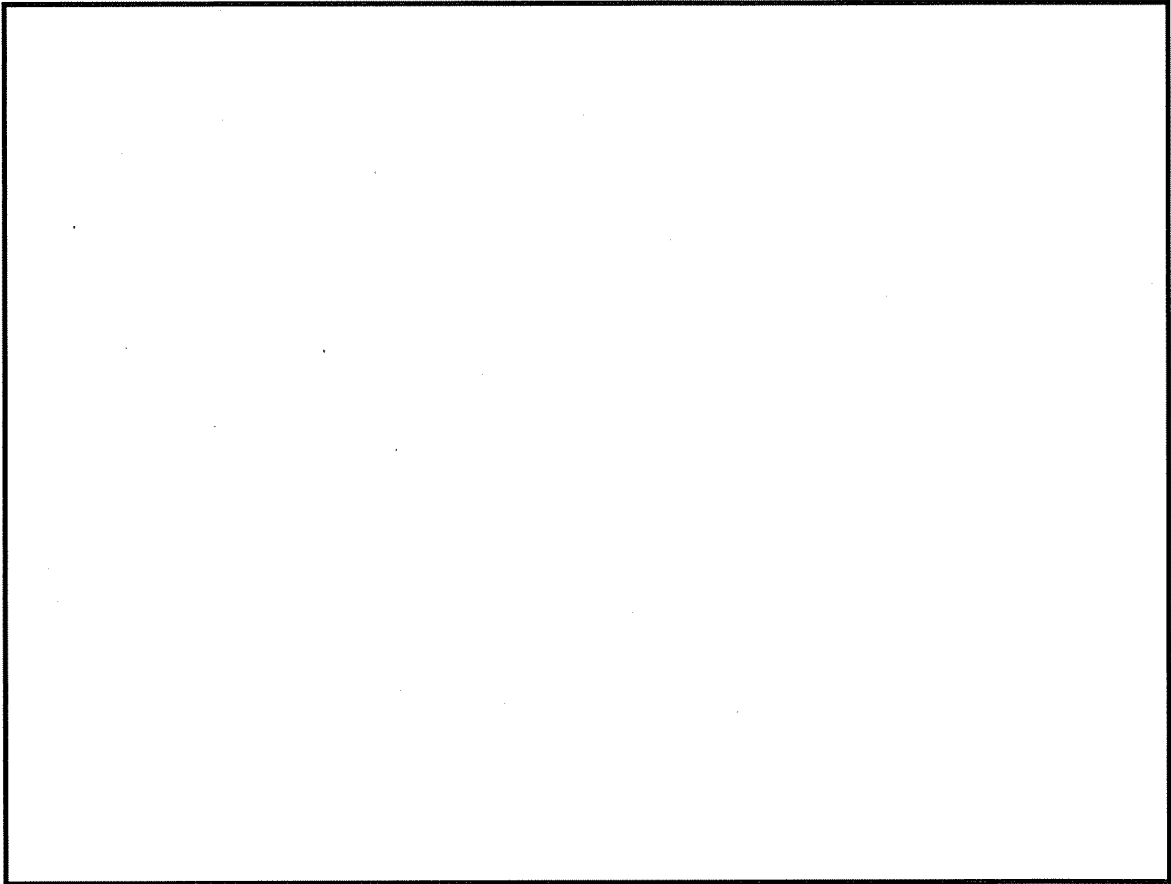
別紙 1-7 図 3 元系状態図 (Al-Mn-Si/Fe) ⁽³⁾

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

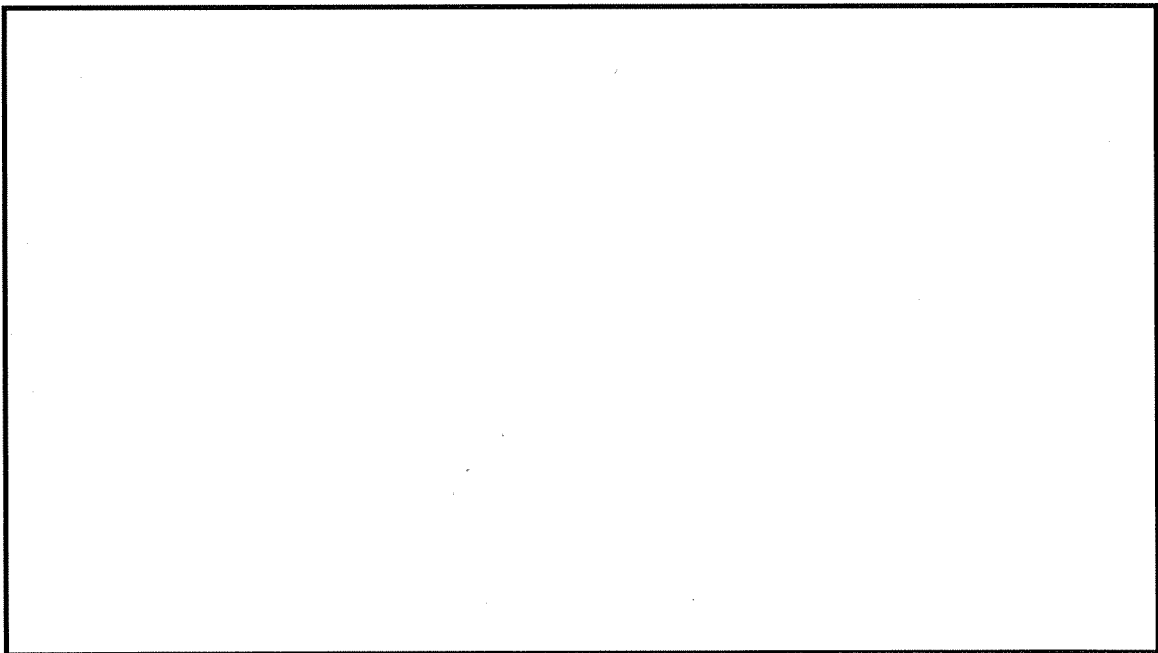
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1-8 図 Al-Cu 合金の時効温度、時効時間と硬度の関係⁽³⁾



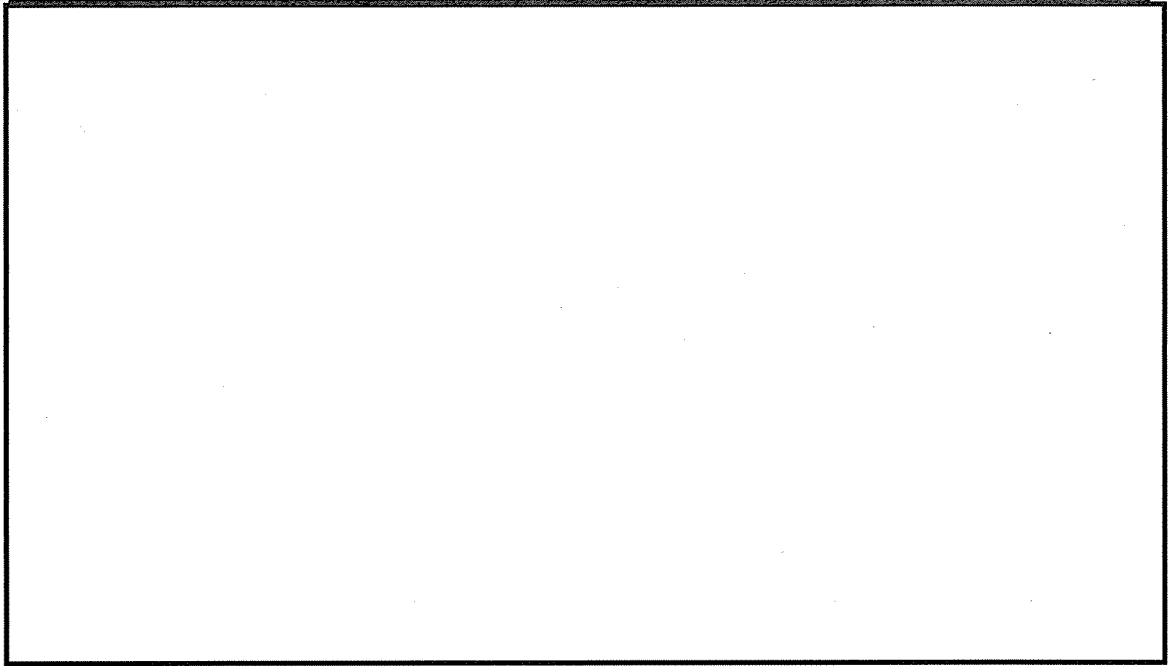
別紙 1-9 図 Al-Mn 2 元系状態図⁽³⁾



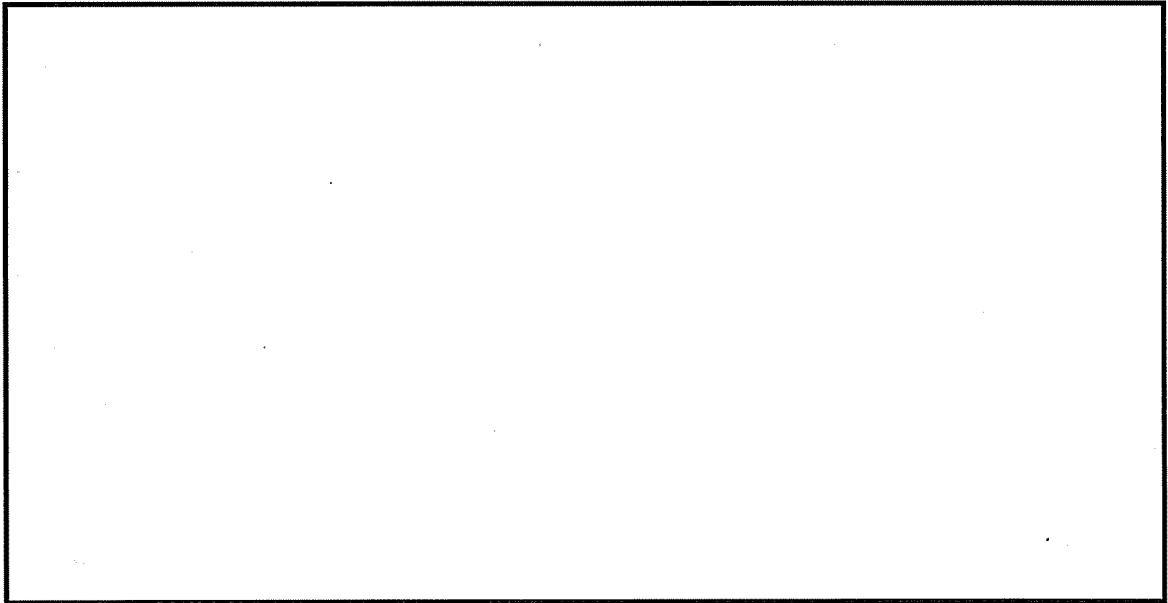
別紙 1-10 図 Al-Mg 2 元系状態図⁽⁵⁾

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

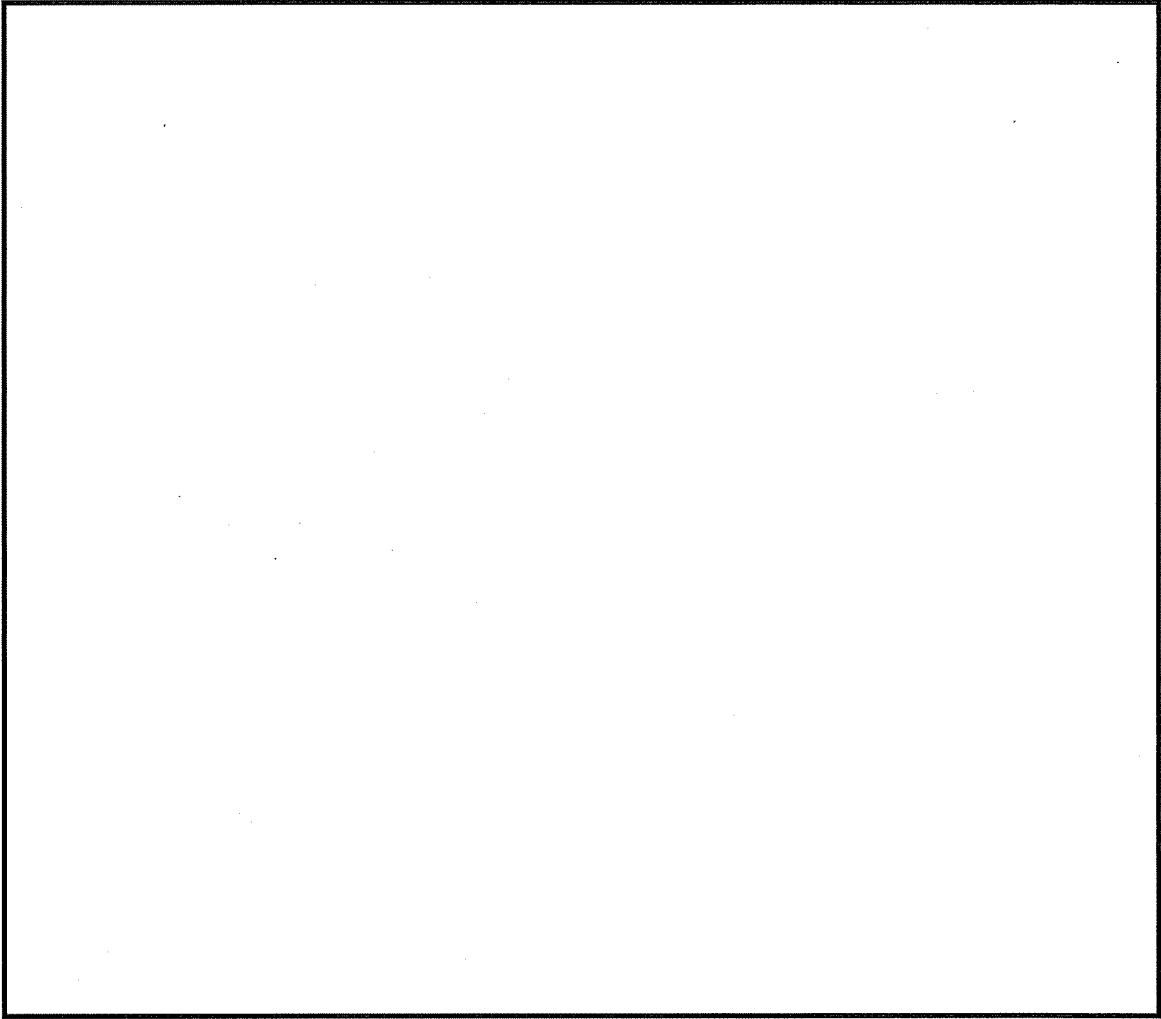
内は商業機密のため、非公開とします。



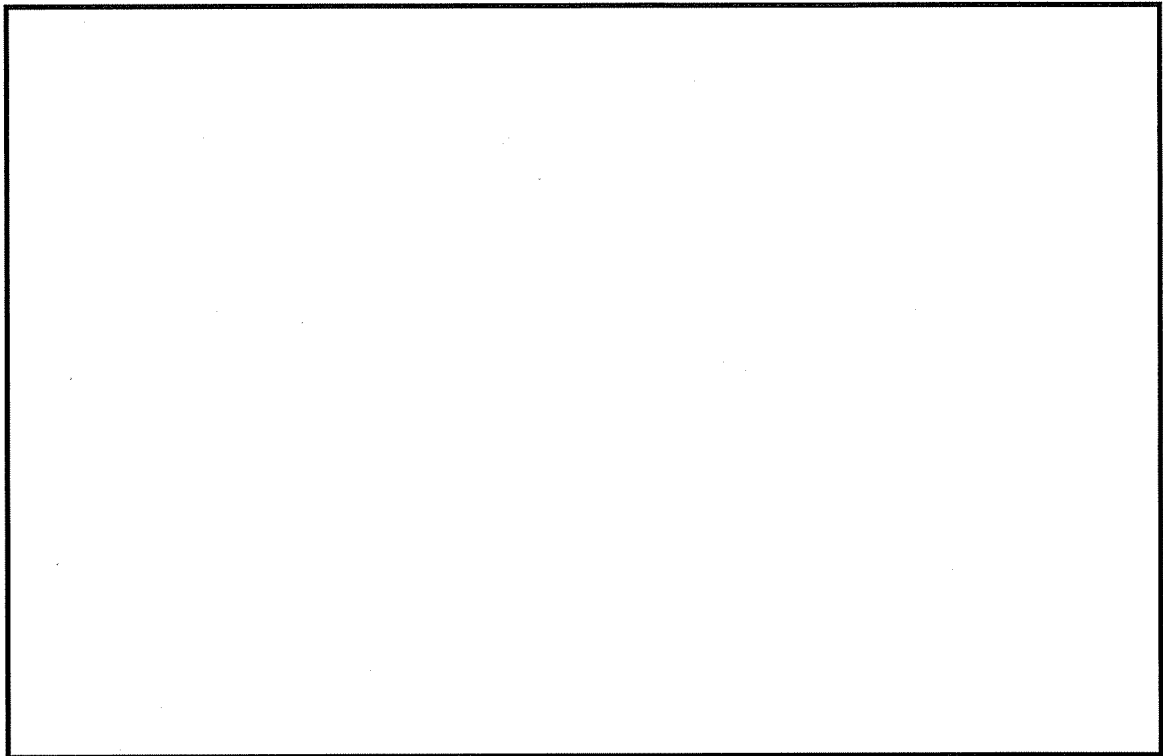
別紙 1-11 図 Al-Mn 析出相の時間変化⁽³⁾



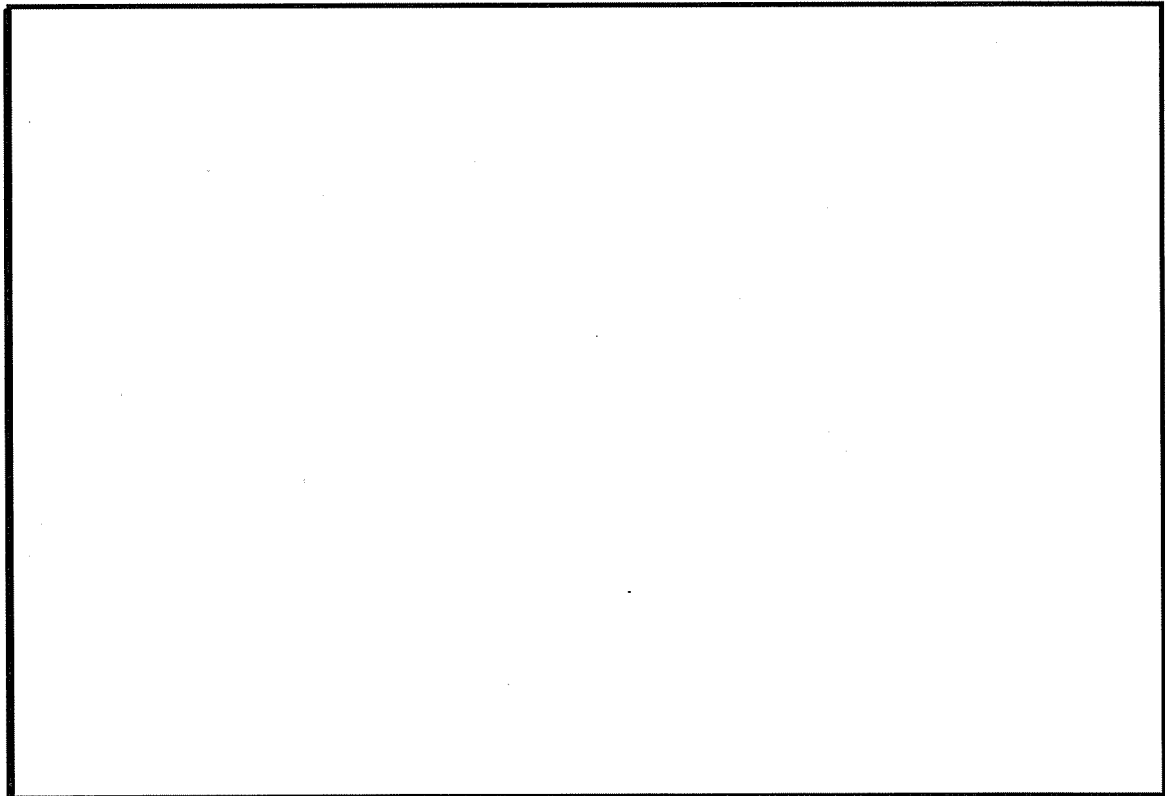
別紙 1-12 図 Al-Mn 系合金の焼鈍温度-時間と硬さの関係⁽³⁾



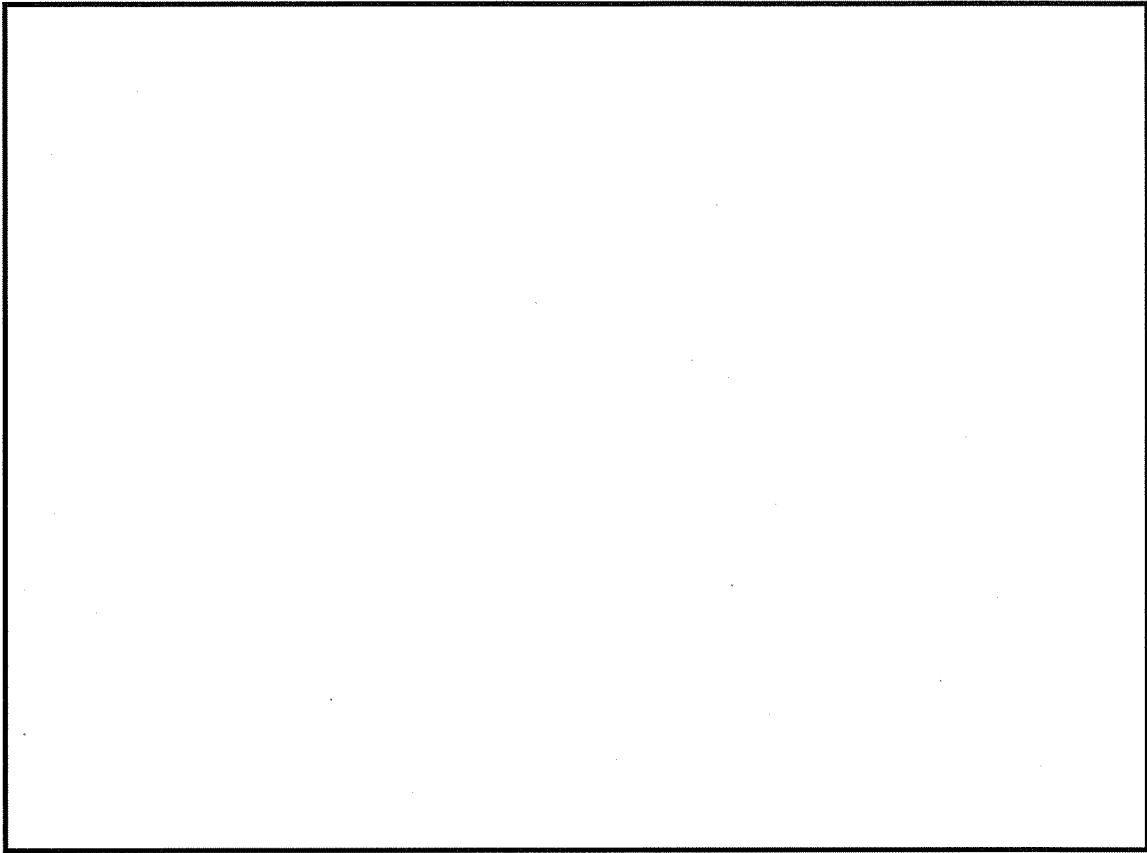
別紙 1-13 図 Al-Mn 系合金の焼鈍時間及び温度と硬度の関係⁽⁶⁾



別紙 1-14 図 Al-Fe 2 元系状態図⁽⁵⁾



別紙 1-15 図 Al-Cu 2 元系状態図⁽⁵⁾



別紙 1-16 図 Al-Si 2 元系状態図⁽⁵⁾

2.4 完全焼なまし処理の位置付け

MSF-21P 型に適用する MB-A3004 の材料特性に影響する強化因子の概要（供用初期、供用終期）を別紙 1-2 表に示す。別紙 1-2 表に示すとおり、非熱処理系である MB-A3004 は固溶強化（Mg）及び析出強化（分散粒子強化：Al₆Mn）が主たる強化因子である。

供用期間の材料特性変化（過時効軟化）を考慮した各設計基準値は、長時間過時効熱処理を施した材料を供試材とした材料特性試験をもとに設定している。長時間過時効熱処理は供用温度域を超える温度による熱処理であることから、熱処理温度域と供用温度域での添加成分の固溶量の差による過飽和固溶等の材料組織（固溶、析出の状態）が異なる材料を対象として評価している可能性を考慮する必要がある。これら過飽和固溶について、別紙 1-17 図に Al-Mg の 2 元系状態図を例に示す。別紙 1-17 図に示すとおり、例えば Mg 添加量が 4% と仮定すると供用温度域では温度により固溶線を通る状態が生じることから析出と固溶の平衡状態変化を考慮する必要があることがわかる。本材料は Mg 添加量が 1% 程度と低く、2 元系状態図では全温度域にて固溶していると考えられる。なお、多元系の場合は固溶量が変化するため、供用温度域及び長時間過時効熱処理温度により固溶量が変化する可能性を考慮する必要がある。

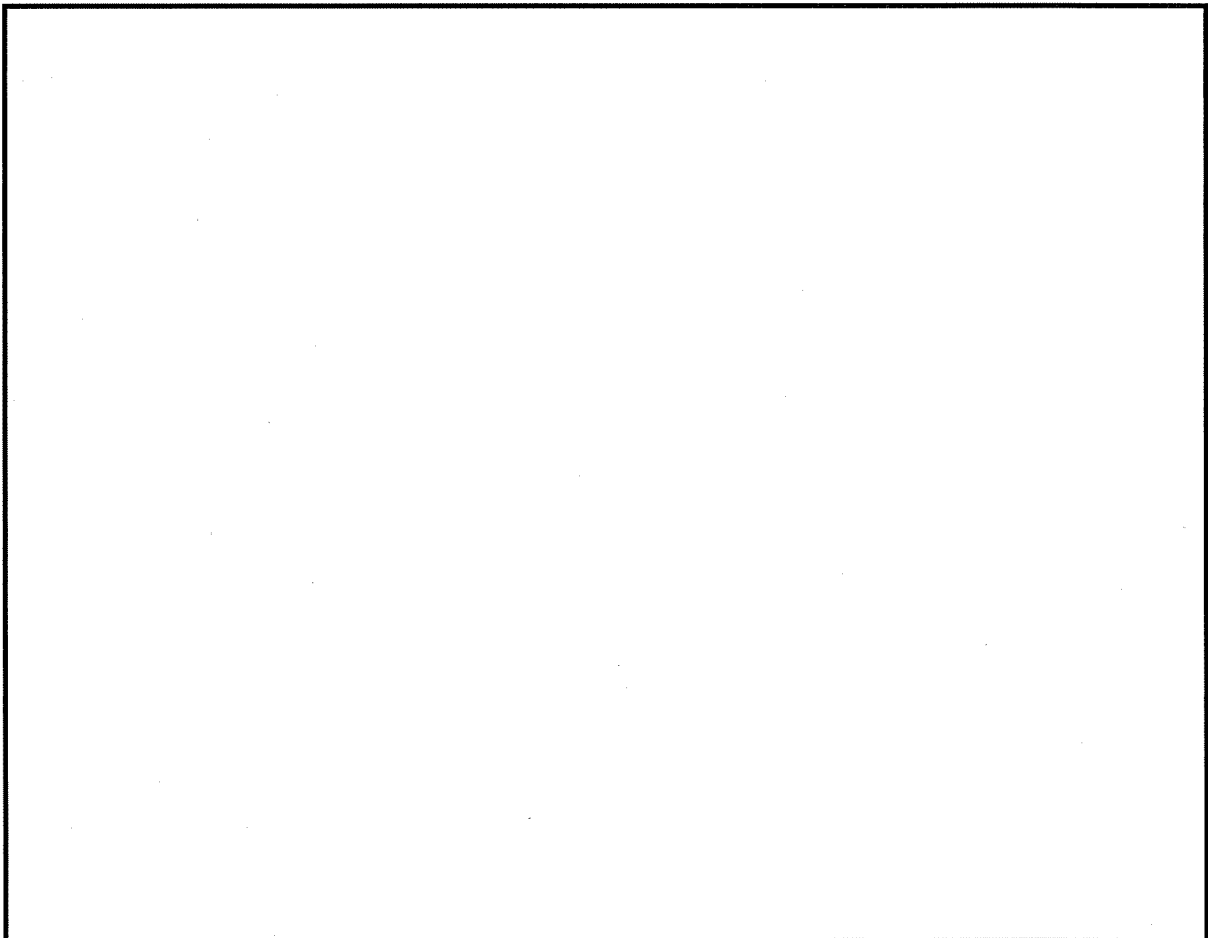
したがって、設計貯蔵期間終期の温度（約 100℃以下）において材料組成（固溶、析出の状態）が平衡状態となった材料を作成し、長時間過時効熱処理材と比較することにより、長時間過時効熱処理の妥当性（固溶、析出の平衡状態）を検証する必要がある。そこで、平衡状態となった材料を完全焼なまし処理により作成し、長時間過時効熱処理（固溶、析出の平衡状態）の妥当性検証を実施した。

なお、完全焼なまし処理は供用期間中の熱履歴として生じ得ない高温域で焼鈍を施すため、供用期間中に生じる材料の結晶組織変化を過剰に生じさせている可能性がある。しかしながら、設計基準値は、長期間過時効熱処理材に加え、結晶粒径が異常に粗大化し、強度が低下した完全焼なまし処理材を用いた引張試験結果を包絡するよう保守的に設定する。

別紙 1-2 表 バスケットプレート用材料の強化因子の概要

記号		MB-A3004	
分類		非熱処理系	
		供用初期	供用終期 (60 年後)
強化 機構 (注 1)	固溶強化	Mg	Mg (平衡固溶量)
	析出強化 (分散粒子強化含む)	Al ₆ Mn	Al ₆ Mn
	加工硬化	あり	なし
	結晶組織微細化	押出組織	回復再結晶組織

(注 1) 強化機構は主要因子のみ抽出。なお、別紙 1-1 表と同一表である。



別紙 1-17 図 Al-Mg 2 元系状態図⁽⁵⁾

3. 供試材の概要

3.1 供試材の化学成分

MB-A3004 は、JIS H 4000 等に規定されている材料を基に、キャスク用バスケットとして材料特性を評価したものである。

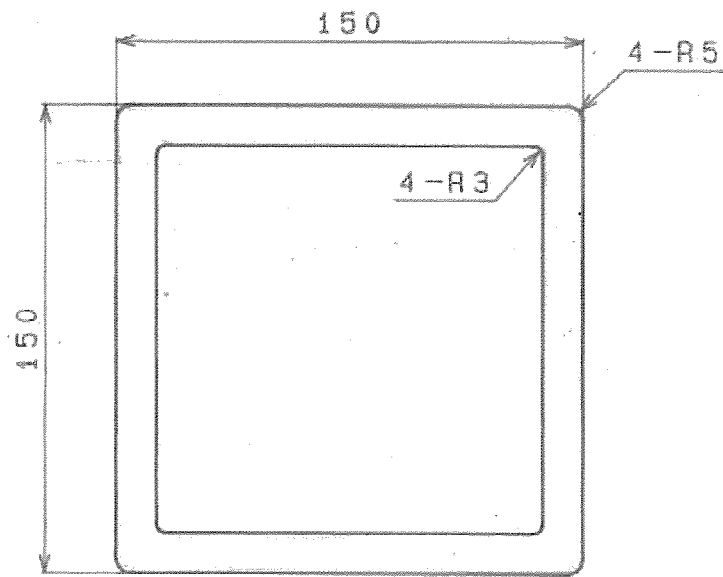
主な特徴として、MB-A3004 は非熱処理系に分類され、冷間加工に伴う加工硬化により強度特性を制御する材料（質別 H）である。

また、本検証に供した供試材一覧を別紙 1-3 表に、供試材形状を別紙 1-18 図に示す。

別紙 1-3 表 MB-A3004 供試材一覧

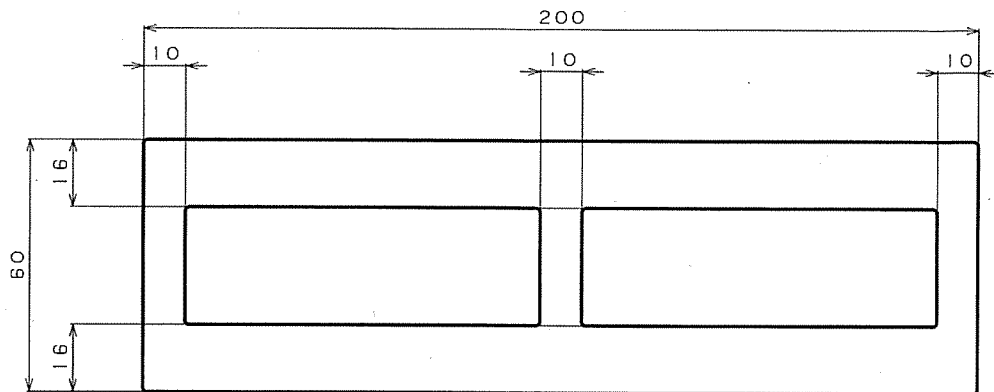
供試材 符号	化学成分 (mass%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他	
										個々	合計
A	0.19	0.6	0.16	1.1	1.0	N/A	0.06	—	N/A	0.05 以下	0.15 以下
B	0.18	0.6	0.18	1.1	1.0	0.02	0.04	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
C	0.20	0.5	0.19	1.1	1.0	0.01	0.05	—	0.02	0.05 以下	0.15 以下
規定値 MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下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

(注 1) 長時間過時効熱処理、完全焼なまし処理の両処理方法に供した。



$t = 13 \text{ mm}$

(1) 押出断面形状 (供試材A)



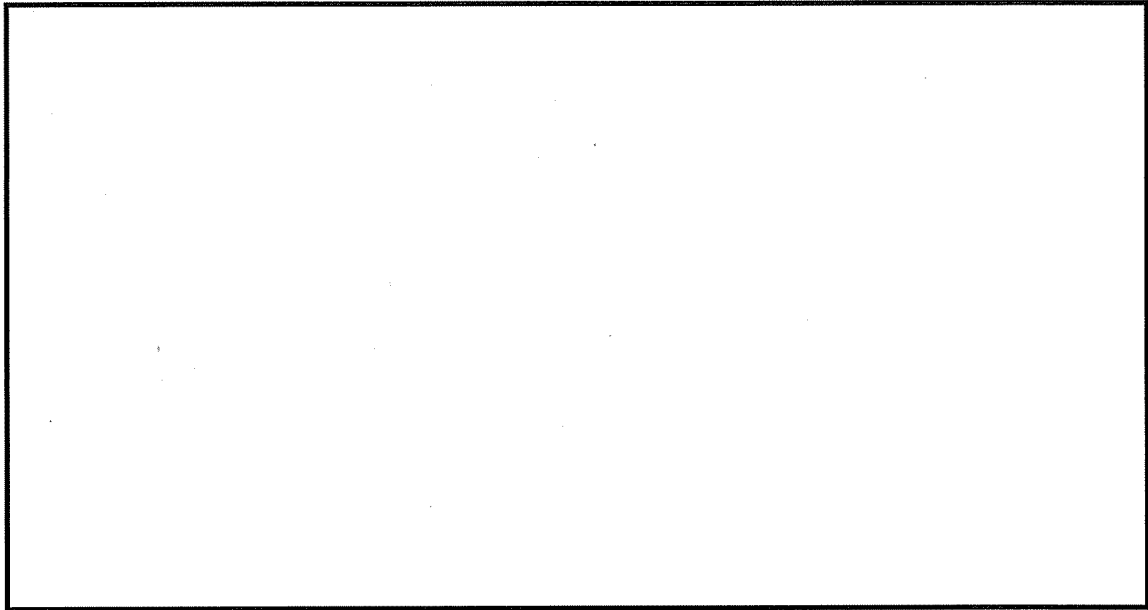
(単位 : mm)

(2) チャージ押出断面形状 (供試材B及びC)

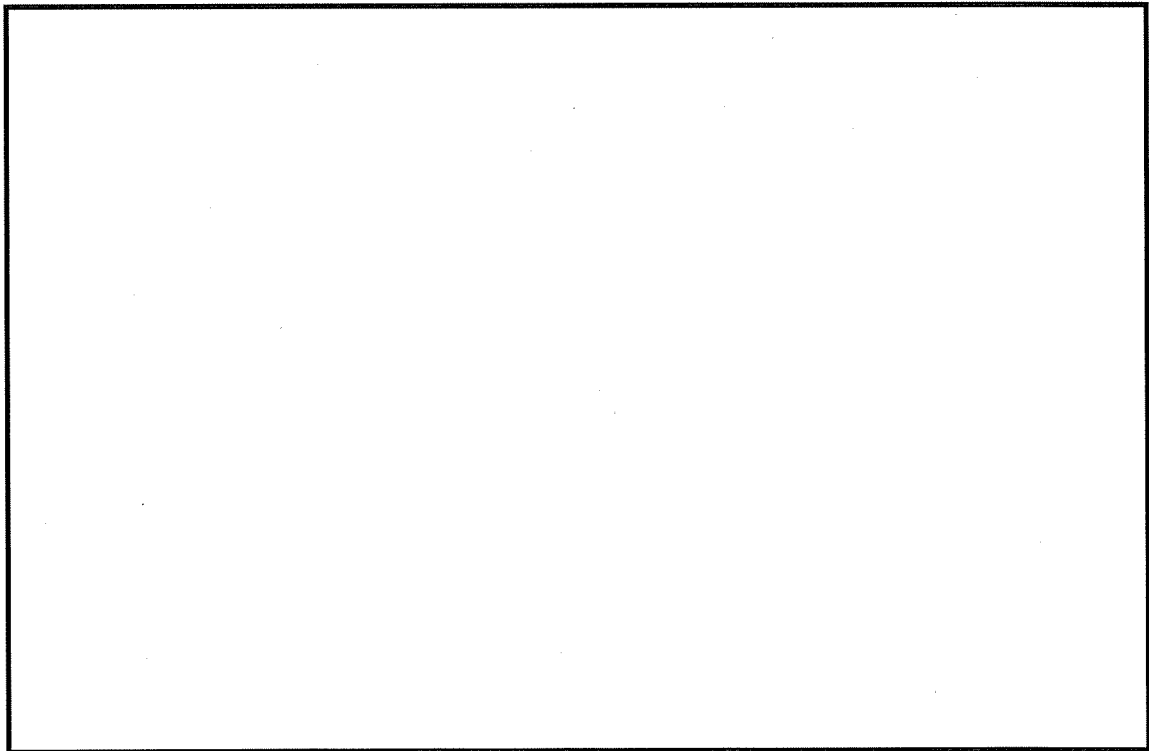
別紙 1-18 図 MB-A3004 供試材断面形状

3.2 供試材の代表性

供試材の化学成分は、別紙 1-19 図及び別紙 1-20 図に示すとおり Mg 及び Mn の添加量に応じて強度強化されることが文献にて確認されており、その最低値を供試材とすることにより、保守的な設定となるため、供試材は代表性を有するものと判断できる。



別紙 1-19 図 Mg の添加量と強度の関係⁽³⁾



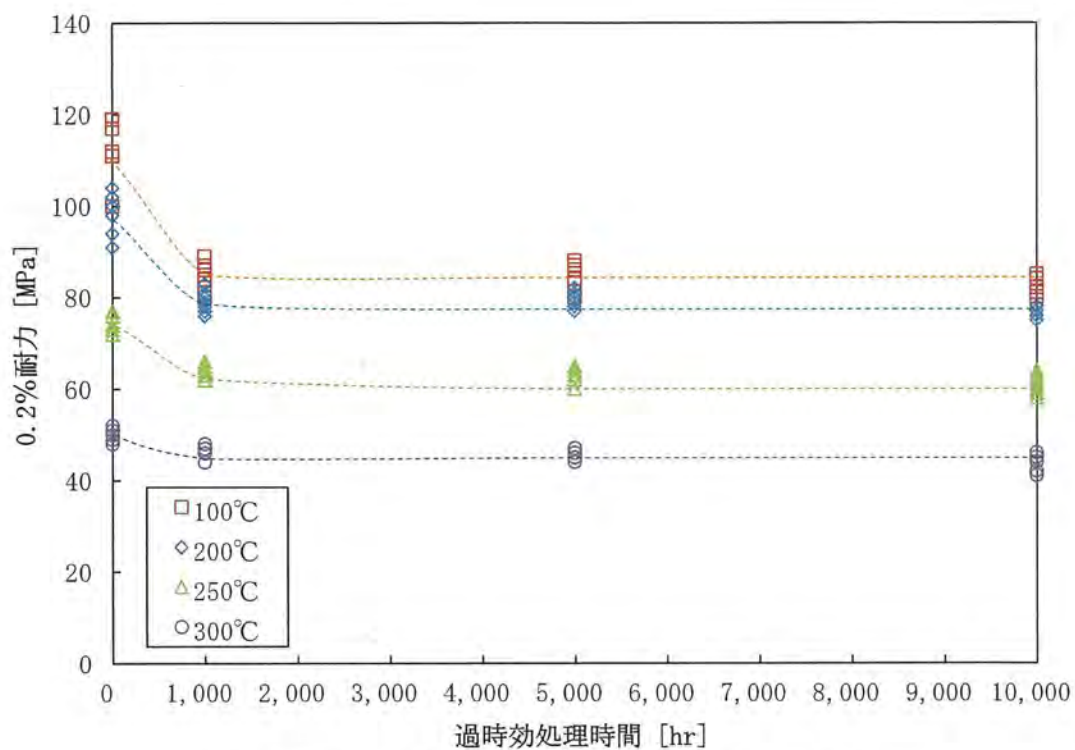
別紙 1-20 図 Mn の添加量と強度の関係⁽³⁾

4. 熱処理及び強度特性

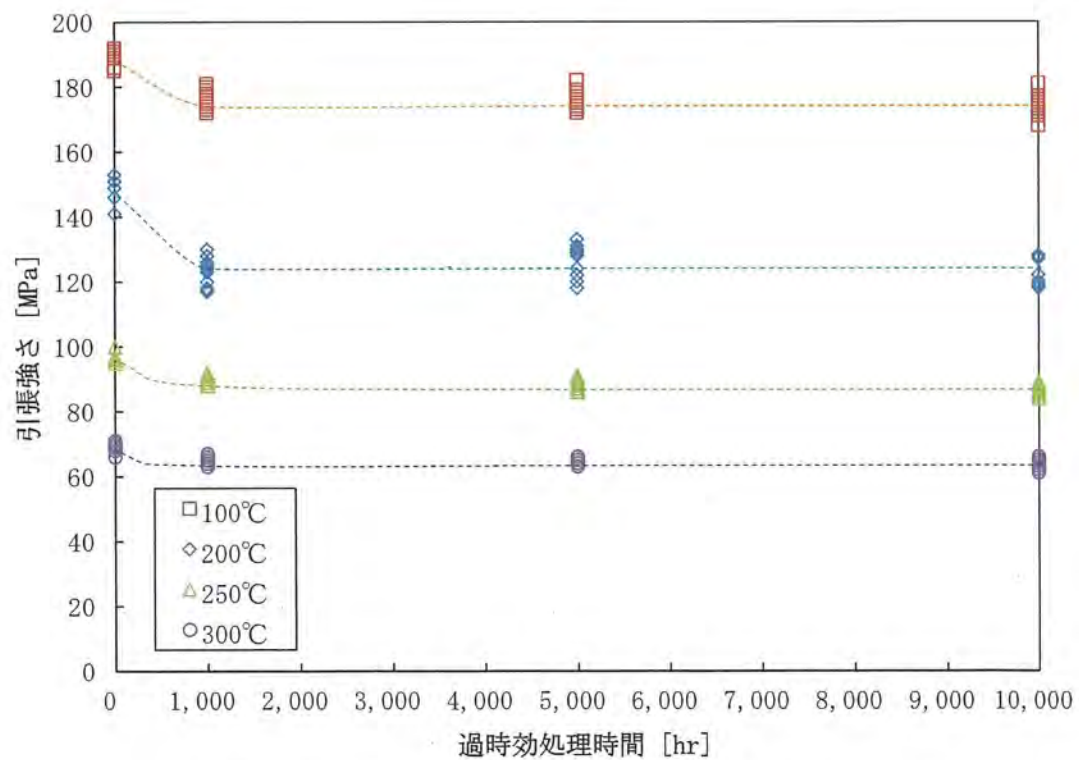
4.1 長時間過時効熱処理

MB-A3004 にて、初期材及び長時間過時効熱処理として、250℃及び 300℃にて 1,000hr、5,000hr 及び 10,000hr の処理を施し、強度特性確認を実施した。過時効処理時間による 0.2% 耐力及び引張強さの変化を別紙 1-21 図及び別紙 1-22 図に、試験値を別紙 1-4 表に示す。

別紙 1-21 図及び別紙 1-22 図に示すとおり、初期材から 1,000hr 時効により強度低下してから、より長時間の処理でほとんど強度変化がない安定状態となっていることを確認した。



別紙 1-21 図 各温度での 0.2%耐力と過時効時間の関係



別紙 1-22 図 各温度での引張強さと過時効時間の関係

別紙 1-4 表 長時間過時効熱処理材を用いた試験結果 (1/3)

熱処理		初期材	
供試材	試験温度 (°C)	L 方向	
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
A	100	100	192
	100	100	190
	200	91	141
	200	94	146
	250	73	97
	250	72	95
	300	51	70
	300	48	68
B	100	112	186
	100	111	185
	200	100	149
	200	98	149
	250	74	96
	250	76	97
	300	48	69
	300	49	66
C	100	117	191
	100	119	189
	200	102	151
	200	104	153
	250	74	96
	250	77	100
	300	52	71
	300	50	69

別紙 1-4 表 長時間過時効熱処理材を用いた試験結果 (2/3)

試験片方位		L方向					
熱処理		250°C×1,000hr		250°C×5,000hr		250°C×10,000hr	
供試材	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
A	100	89	179	87	175	85	175
	100	87	179	88	177	85	175
	200	78	118	78	118	78	120
	200	78	117	77	118	78	119
	250	65	88	65	90	63	88
	250	65	88	64	88	64	87
	300	46	64	47	65	45	65
	300	47	66	45	64	45	64
B	100	85	173	84	169	81	168
	100	84	172	84	168	82	168
	200	81	123	77	120	75	118
	200	78	120	79	124	75	119
	250	64	89	62	86	61	86
	250	64	89	62	86	60	84
	300	47	64	44	63	44	63
	300	46	66	46	64	44	63
C	100	86	178	84	173	84	172
	100	89	177	83	172	84	171
	200	83	126	78	122	78	122
	200	-	-	80	124	78	119
	250	65	91	65	89	63	89
	250	66	90	64	89	63	88
	300	48	66	47	65	46	66
	300	47	67	46	65	44	64

別紙 1-4 表 長時間過時効熱処理材を用いた試験結果 (3/3)

試験片方位		L方向					
熱処理		300°C×1,000hr		300°C×5,000hr		300°C×10,000hr	
供試材	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
A	100	87	181	86	182	84	181
	100	85	180	86	182	84	181
	200	79	126	79	128	78	128
	200	80	125	82	131	77	128
	250	64	91	64	89	62	88
	250	65	90	65	91	62	87
	300	46	65	45	63	41	61
	300	46	67	44	63	42	62
B	100	81	174	83	176	81	174
	100	80	173	80	174	80	173
	200	79	130	79	130	76	128
	200	76	124	80	133	76	128
	250	62	90	60	88	59	86
	250	64	89	62	87	58	84
	300	44	63	44	64	42	62
	300	44	65	45	64	41	61
C	100	81	176	84	179	81	177
	100	80	175	83	177	80	176
	200	79	128	80	129	77	128
	200	77	124	81	133	77	127
	250	65	92	63	88	59	85
	250	63	89	63	88	59	84
	300	44	65	46	66	41	61
	300	44	65	44	64	41	61

4.2 完全焼なまし条件（焼鈍温度）

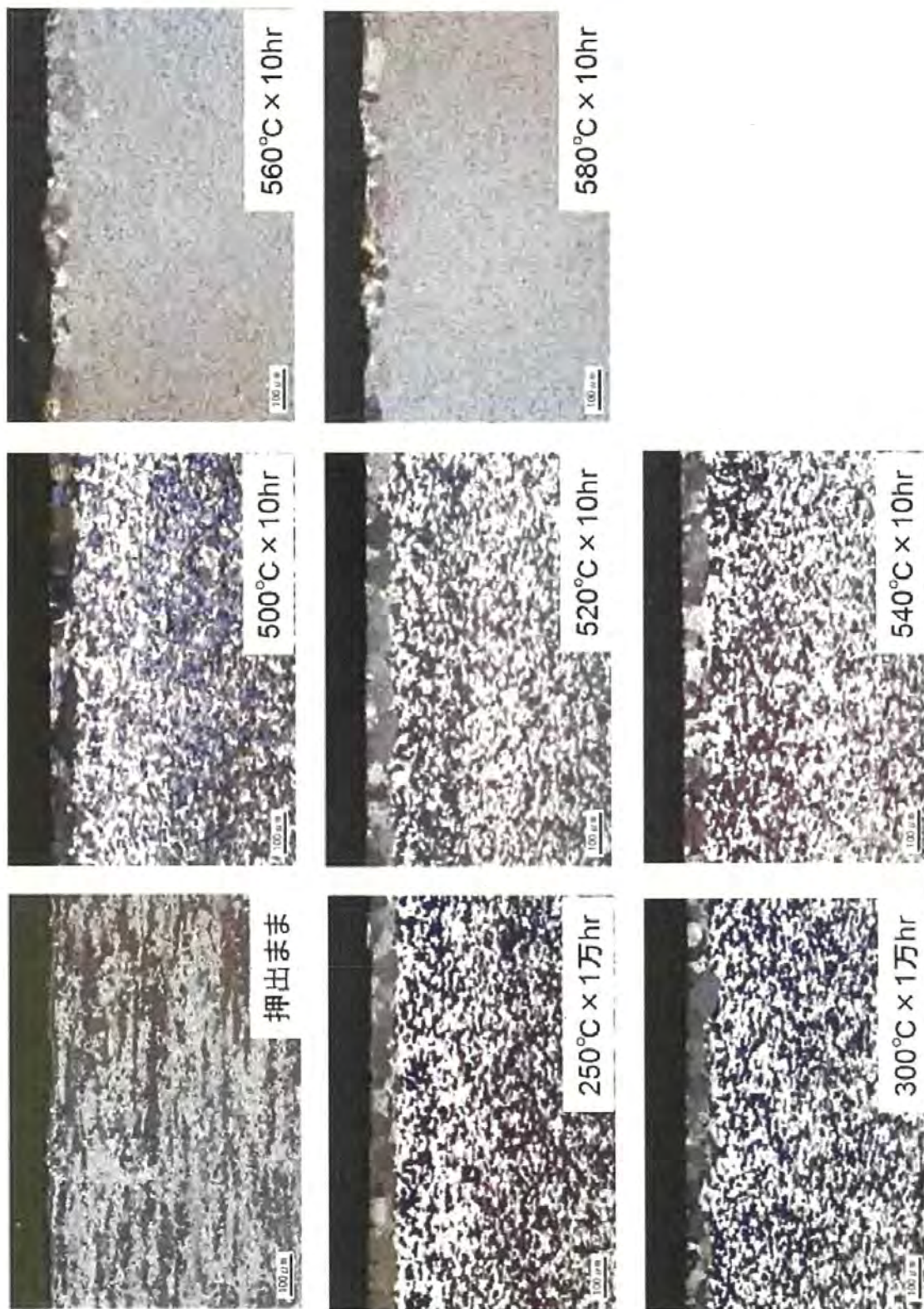
完全焼なまし処理条件を設定するため、高温焼鈍を 350℃から 580℃にて 10hr 保持し空冷した材料の組織観察を行い、初期材及び長時間過時効熱処理材（250℃及び 300℃にて 10,000hr 保持）と比較した。別紙 1-23 図に表層付近の観察結果を、別紙 1-24 図に板厚中央付近の観察結果を示す。

別紙 1-23 図及び別紙 1-24 図に示すとおり、初期材では押出組織が観察位置によらず確認されたが、長時間過時効材及び高温焼鈍材において、別紙 1-23 図に示す表層の極一部に粗大粒組織及び表層近傍に微細等軸粒組織が確認された。これは、押出時及び冷間整直する工程において、表層部に多くの転位が生成蓄積され、当該転位が熱処理により転位解放するため再結晶が生じたものと考えられる。別紙 1-24 図に示す板厚中央付近に再結晶組織が確認されなかったのは転位が表層近傍に比べ少ないためと考えられる。また、高温焼鈍条件において、560℃を超える条件においては、異常粒成長が確認された。

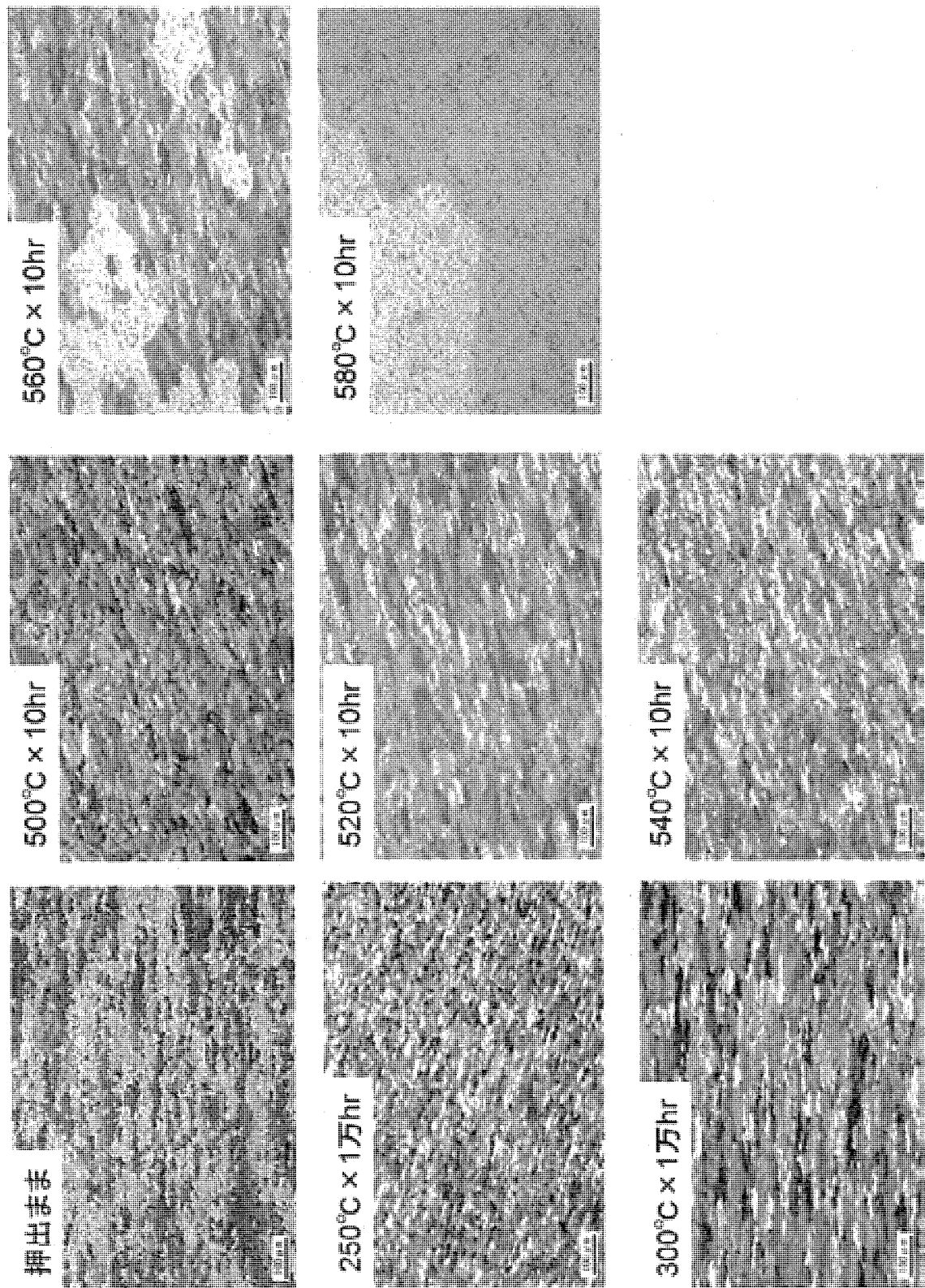
焼鈍温度と 0.2%耐力及び引張強さの関係を別紙 1-25 図及び別紙 1-26 図に示す。また、導電率を含む測定データを別紙 1-5 表に示す。0.2%耐力及び引張強さについても、異常粒成長が確認された 560℃以上の熱処理材では強度低下が確認された。組織観察の結果より、長時間過時効熱処理において、250℃及び 300℃の保持温度では表層付近での転位解放及び再結晶が生成されていることを確認されたが、板厚中央付近では再結晶や粒成長がほとんどないことから、キャスク供用期間中の組織粗大成長は 4.5 項に示す拡散の考え方を考慮しほとんど生じないものと考えられる。したがって、焼鈍温度は 540℃を下回る温度で設定することで評価可能であると判断した。

別紙 1-27 図に焼鈍温度と導電率の関係を示す。別紙 1-27 図より、初期材と比較し焼鈍温度の 350℃等の低温領域では初期材と同等であり、ほとんど固溶状態が変化していない。また、高温領域では、10hr 保持による析出物の再固溶が生じ固溶状態変化が生じたものと考えられる。なお、別紙 1-11 図に示すとおり、Mn 系析出物は 450℃付近で析出がし易い傾向が確認されており、450℃を境に高温では再固溶の影響により導電率が低下し、低温側では析出が導電率に影響するほど有意に生じなかったものと考えられる。⁽³⁾

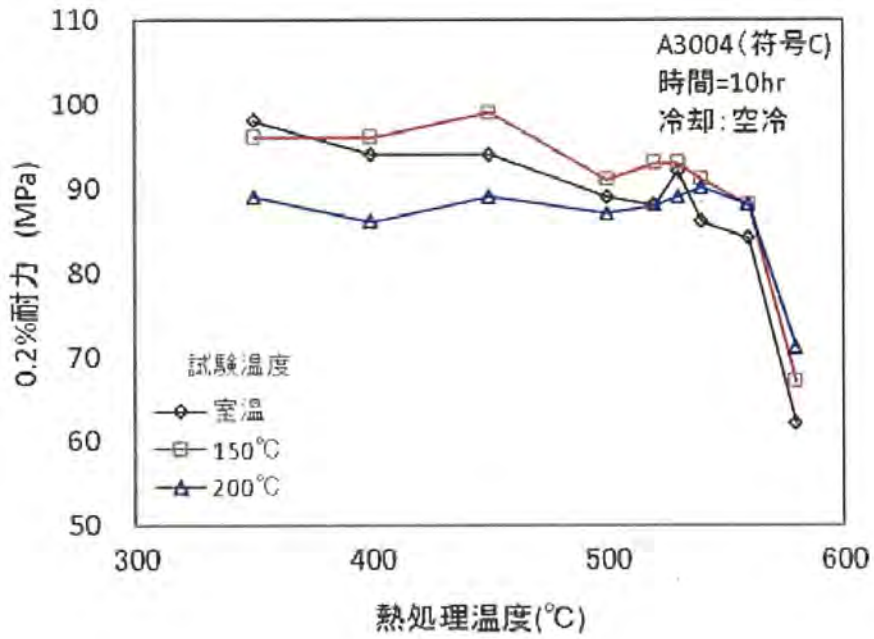
これらの試験結果及び押出製造条件等を考慮し、熱間押出により生じた冷却（自然放冷）中の熱歪みや整直（冷間加工）時の加工硬化を除去するため、完全焼なまし処理条件における高温焼鈍温度を 520℃に設定した。



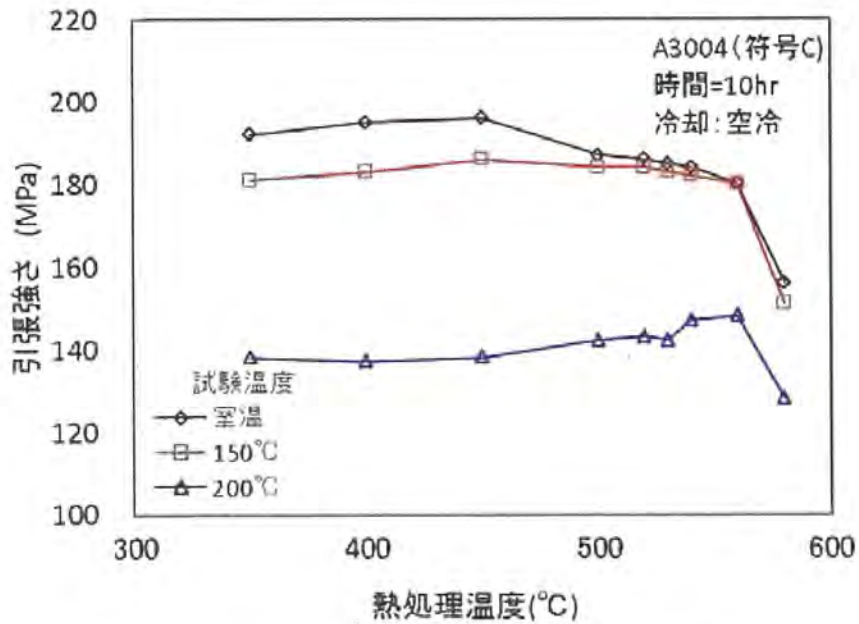
別紙 1-23 図 初期材、長時間過時効処理及び焼鈍による組織変化（表層）



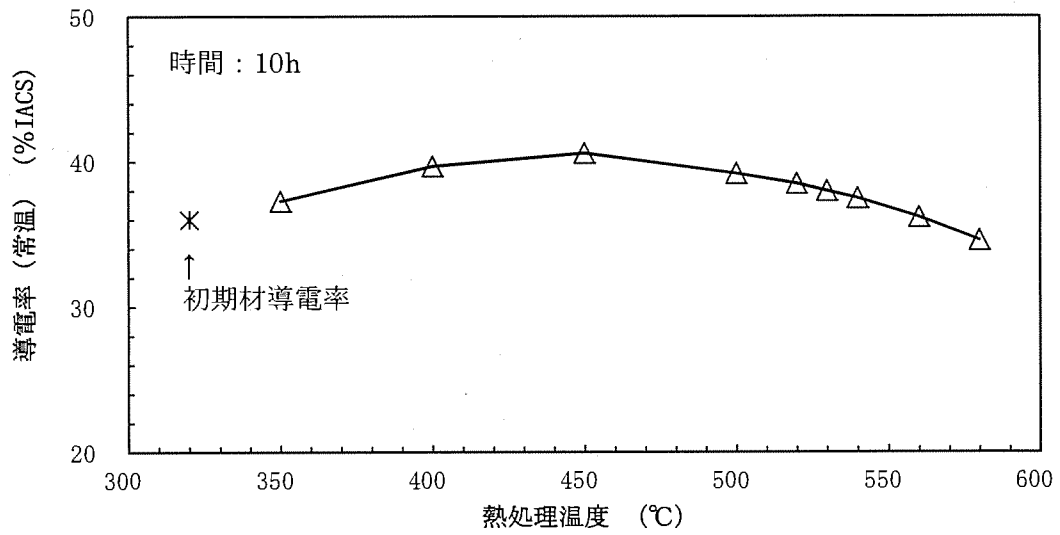
別紙 1-24 図 初期材、長時間過時効処理及び焼鈍による組織変化 (板厚中央)



別紙 1-25 図 焼鈍温度と 0.2%耐力の関係



別紙 1-26 図 焼鈍温度と引張強さの関係



(注1) 初期材導電率は焼なまししていないが、図示のため焼鈍温度 320°C付近に記載したものである。

別紙 1-27 図 焼鈍温度と導電率の関係

別紙 1-5 表 焼鈍温度と強度及び導電率の関係

焼鈍温度 (°C)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	導電率 (%IACS) 常温計測値
350	23	98	192	37.3
	150	96	181	
	200	89	138	
400	23	94	195	39.7
	150	96	183	
	200	86	137	
450	23	94	196	40.6
	150	99	186	
	200	89	138	
500	23	89	187	39.2
	150	91	184	
	200	87	142	
520	23	88	186	38.5
	150	93	184	
	200	88	143	
530	23	92	185	38.0
	150	93	183	
	200	89	142	
540	23	86	184	37.5
	150	91	182	
	200	90	147	
560	23	84	180	36.2
	150	88	180	
	200	88	148	
580	23	62	156	34.6
	150	67	151	
	200	71	128	

4.3 完全焼なまし条件（冷却速度）

4.2 項に示した高温焼鈍温度を基に、冷却速度を AC（空冷）、10°C/hr、5°C/hr、2°C/hr、1°C/hr、0.5°C/hr 及び 0.3°C/hr で制御し、組織観察、強度及び導電率の測定により完全焼なまし条件の確認を行った。

別紙 1-28 図及び別紙 1-29 図に各冷却速度により処理した材料の組織観察結果を示す。別紙 1-28 図に示すとおり、表層は再結晶による等軸粒組織及び一部異常粒成長している組織が確認された。表層の異常粒成長は、4.2 項に示す焼なまし条件調査時の 520°C×10hr 保持条件では確認されていないが、冷却速度を制御することにより高温領域に保持される時間帯が長期化するために生じたと考えられる。なお、別紙 1-29 図に示す板厚中央部においては、異常組織は無く有意な変化は確認されなかった。

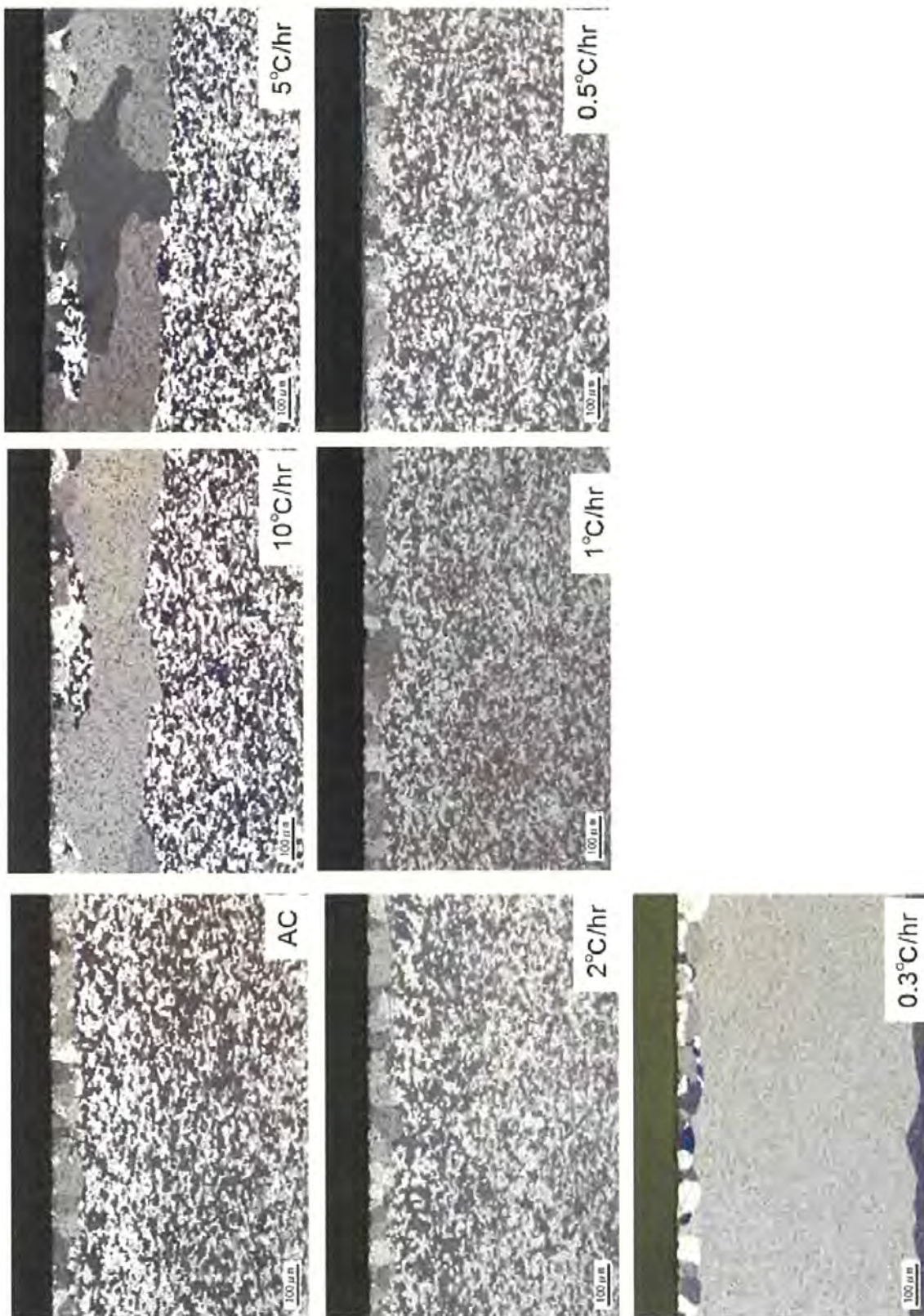
別紙 1-30 図及び別紙 1-31 図に TEM による組織観察及び EDS による析出物確認結果を示す。別紙 1-30 図及び別紙 1-31 図に示すとおり、MB-A3004 の主要な強化成分（析出（分散粒子）強化）である Mn による Mn 系析出物（Al₆Mn、他）に有意な変化は確認されなかった。したがって、Mn 系析出物は、供用期間及び当該焼鈍条件において有意な影響を受けず安定していると判断される。また、TEM により析出分布及び析出物の状態を複数視野にて観察した結果を別紙 1-32 図から別紙 1-35 図に示す。別紙 1-32 図から別紙 1-35 図に示すとおり、析出分布及び析出物の状態について、有意な変化は確認されなかった。

別紙 1-36 図及び別紙 1-37 図に 0.2%耐力及び引張強さと冷却速度の関係を示す。また、別紙 1-38 図に導電率と冷却速度の関係を、別紙 1-6 表にこれらの試験データを示す。

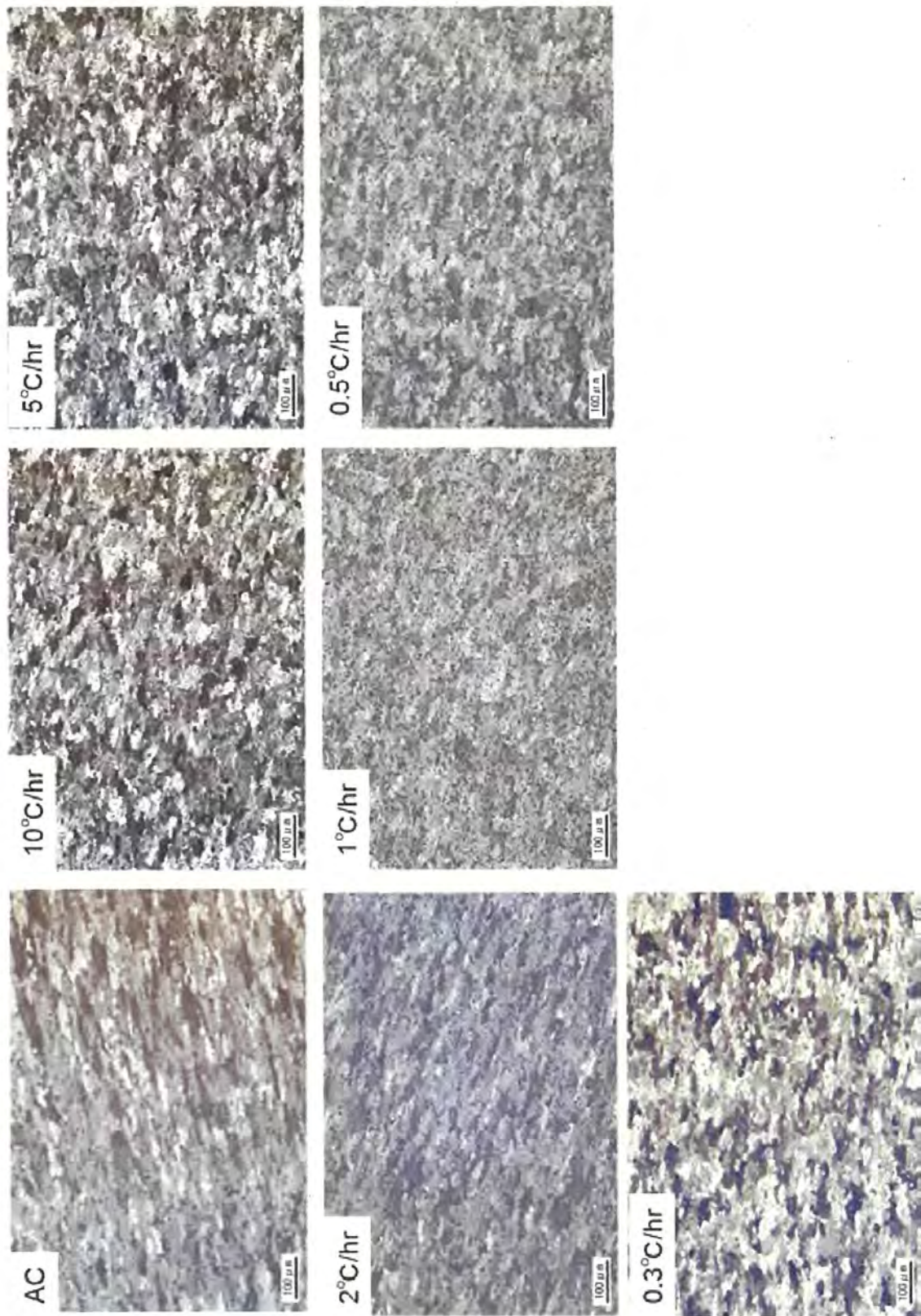
別紙 1-36 図及び別紙 1-37 図に示すとおり、引張強度特性は 0.5°C/hr 以下の冷却速度で変化がほとんどなくなり、また、別紙 1-38 図に示すとおり、導電率においても 0.5°C/hr 以下の冷却速度で変化がほとんどなくなっていることから、当該条件で組織、析出物、固溶等が平衡状態に達していると判断できる。

上記より、520°C×10hr 保持、0.5°C/hr 以下の冷却速度にて処理することにより平衡状態を示す完全焼なまし処理が可能であることを確認した。

また、別紙 1-36 図から別紙 1-38 図に併記している 10,000hr 長時間過時効熱処理材での試験結果は、完全焼なまし処理材と同等の結果であることから、長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理の両方法において評価可能であることを確認した。

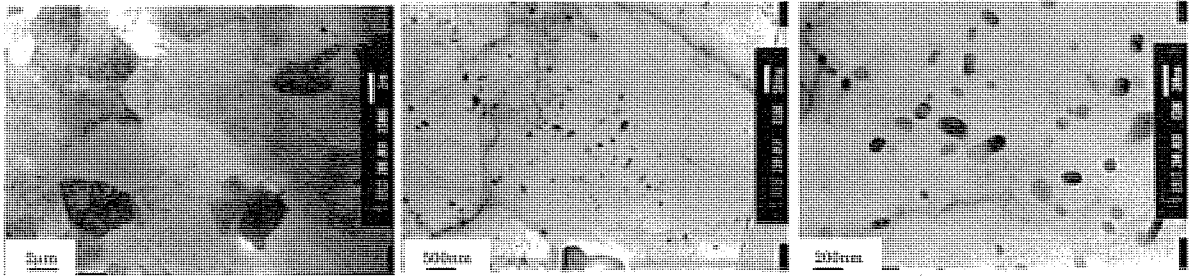


別紙 1-28 図 520°C × 10hr 保持後の冷却速度と組織の関係 (表層)

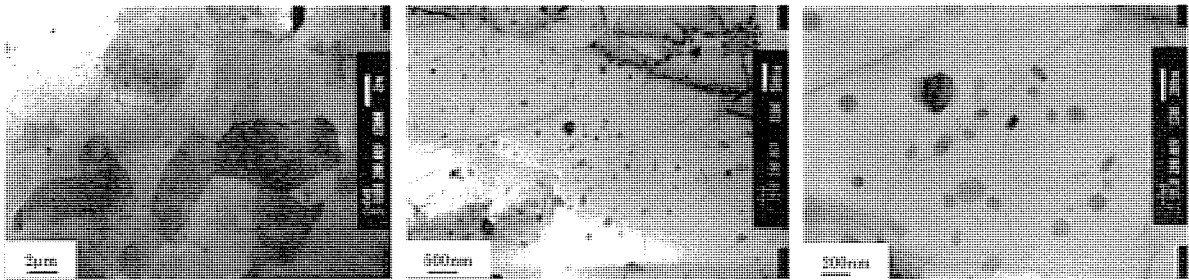


別紙 1-29 図 520°C×10hr 保持後の冷却速度と組織の関係 (板厚中央)

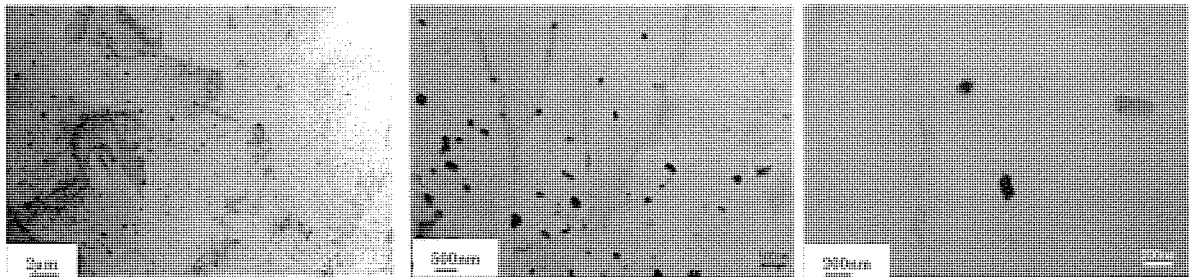
無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社



(a) 初期材

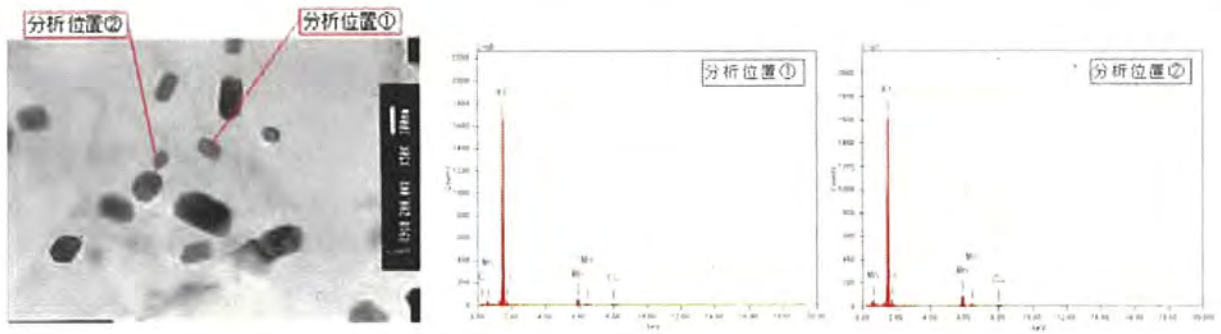


(b) 520°C × 10hr 保持 冷却速度 2°C/hr

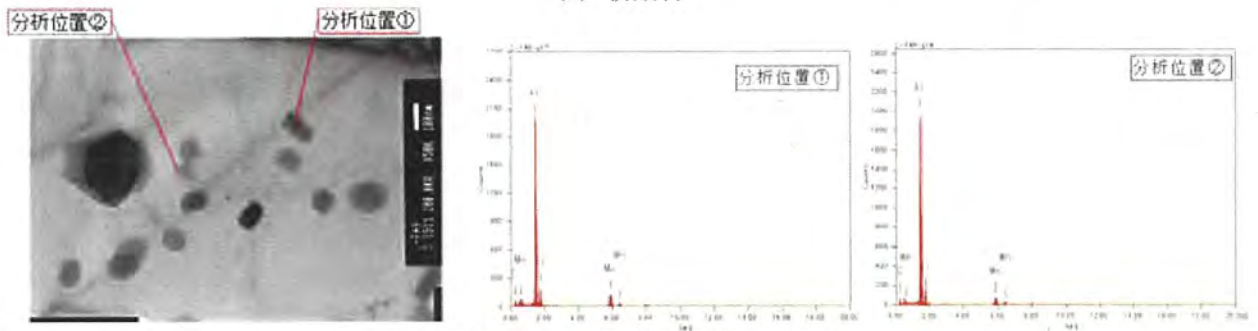


(c) 520°C × 10hr 保持 冷却速度 0.5°C/hr

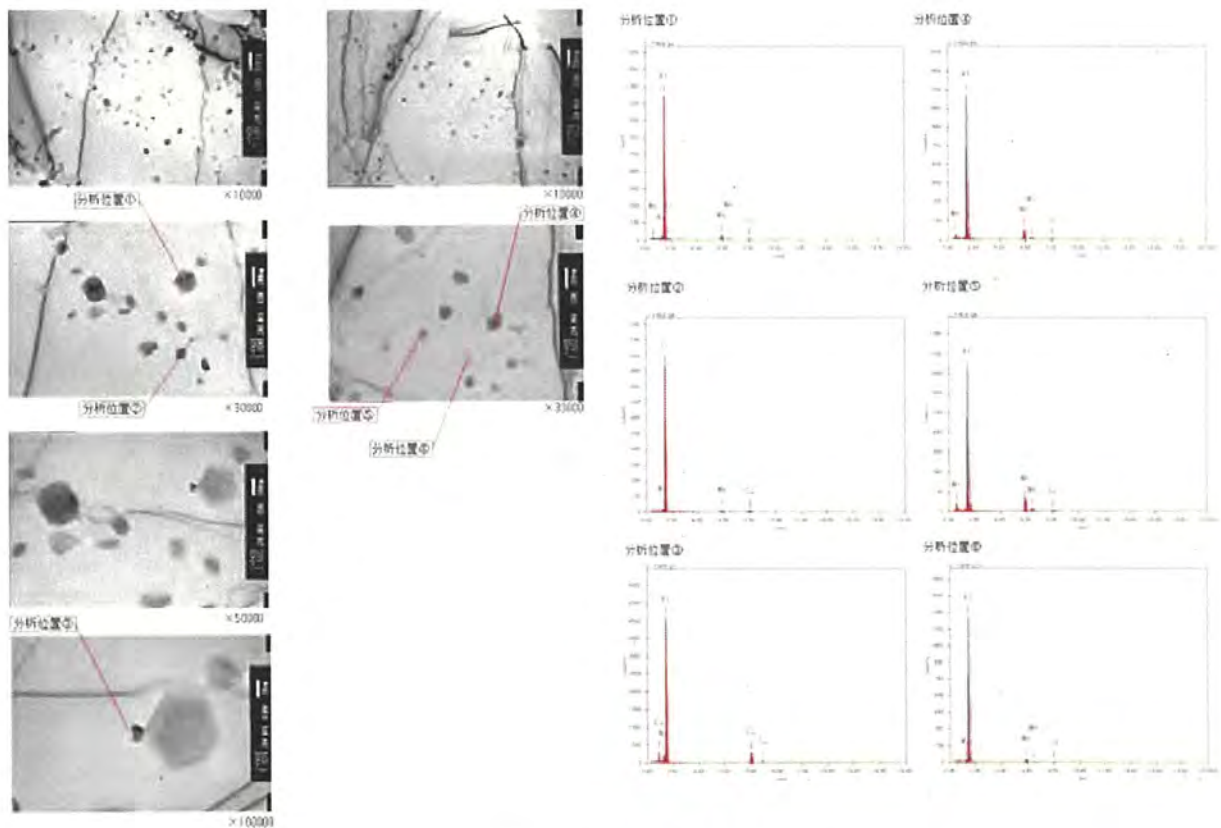
別紙 1-30 図 TEM 観察結果 (冷却速度の影響)



(a) 初期材

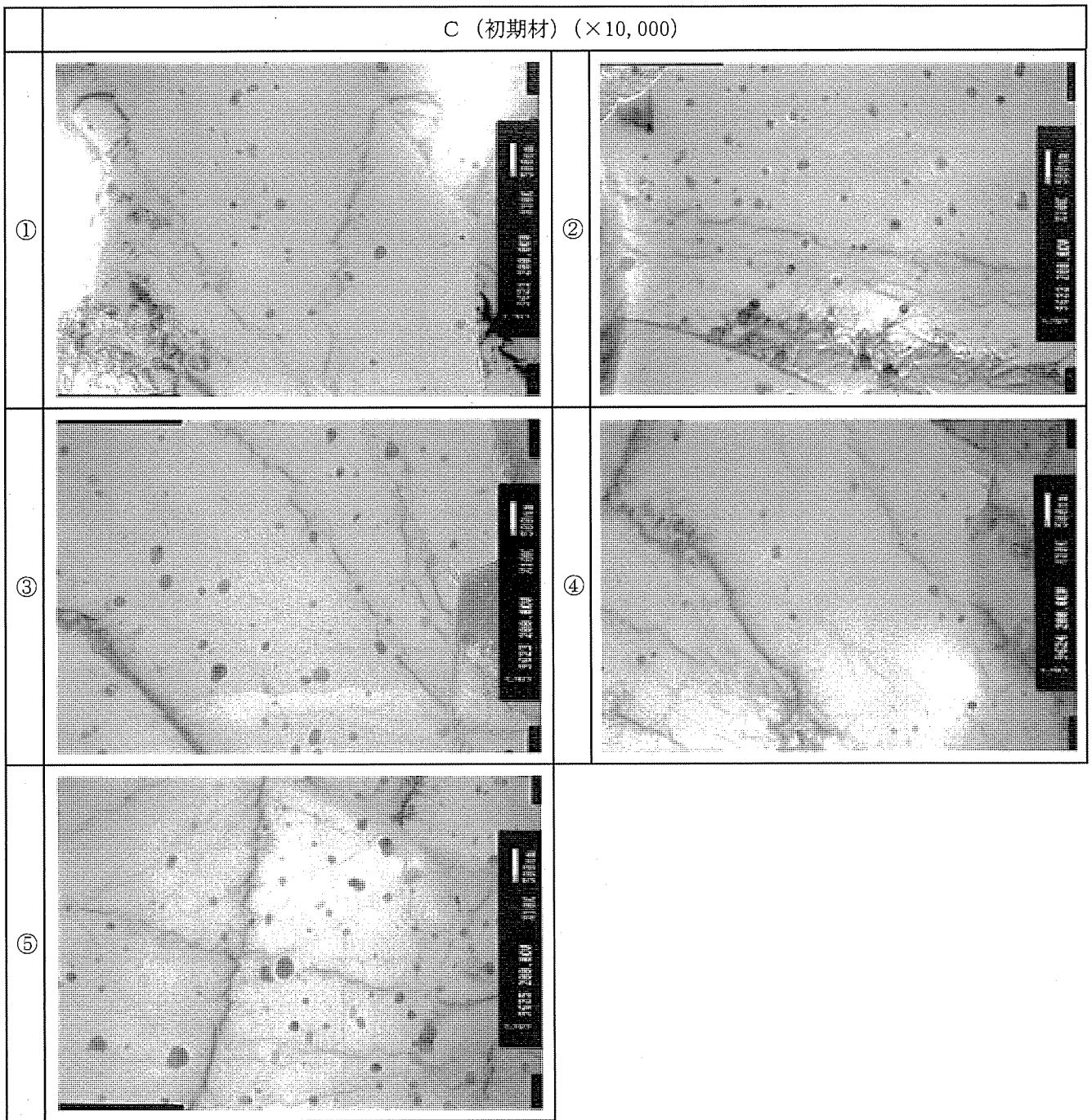


(b) 520°C×10hr 保持 冷却速度 2°C/hr



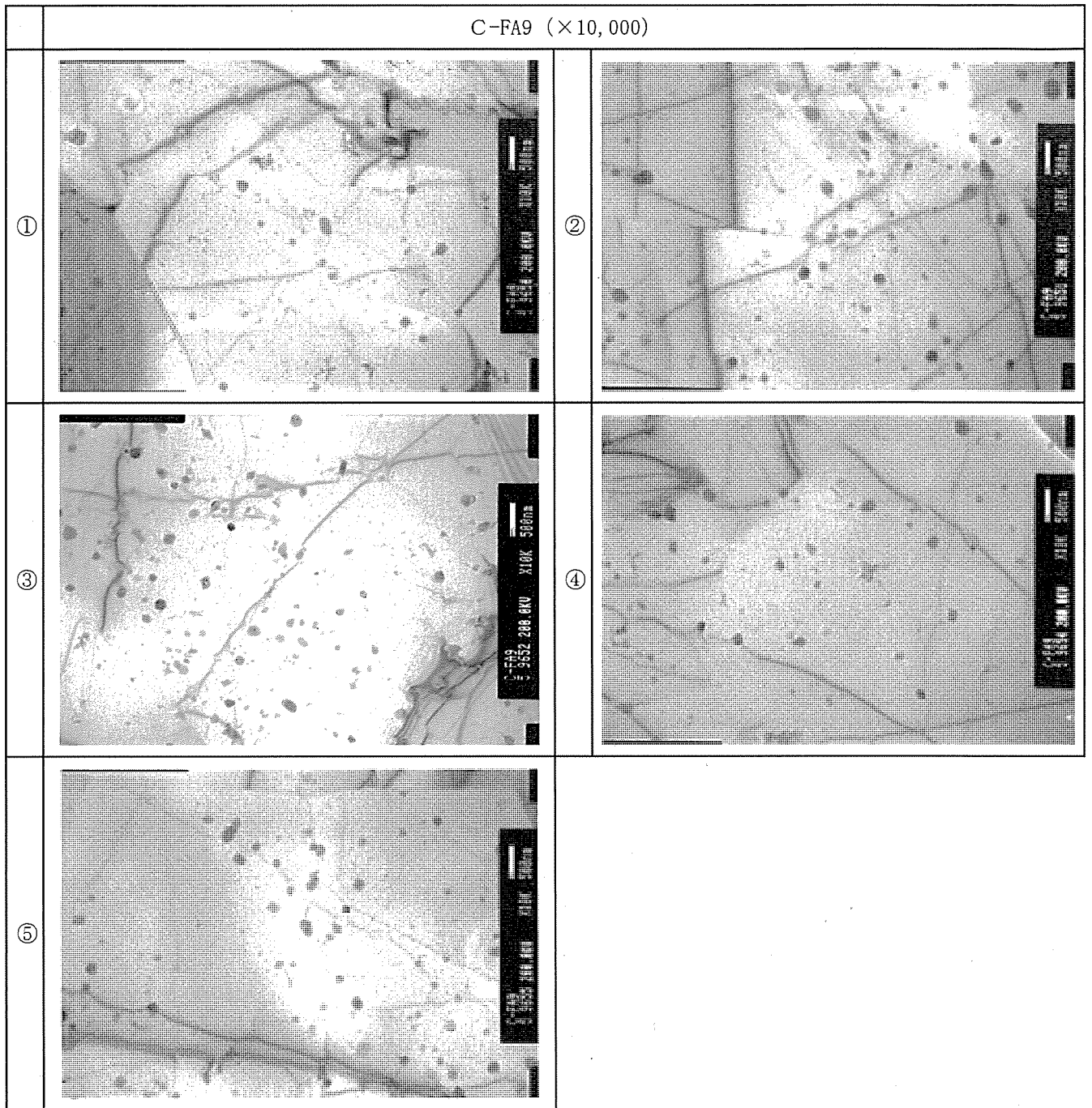
(c) 520°C×10hr 保持 冷却速度 0.3°C/hr

別紙 1-31 図 EDS による析出部確認結果 (冷却速度の影響)



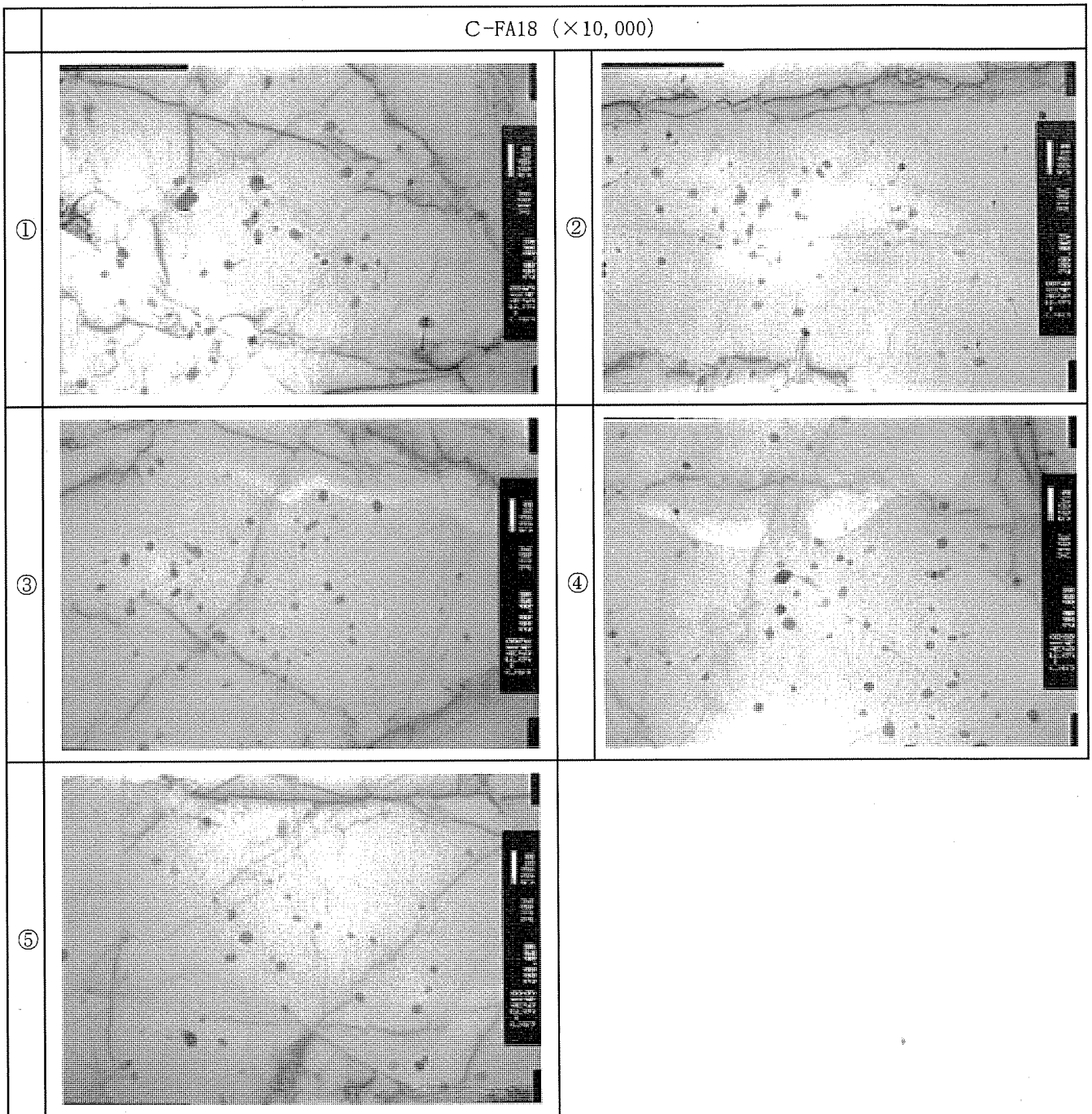
別紙 1-32 図 初期材の TEM 組織観察結果

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社



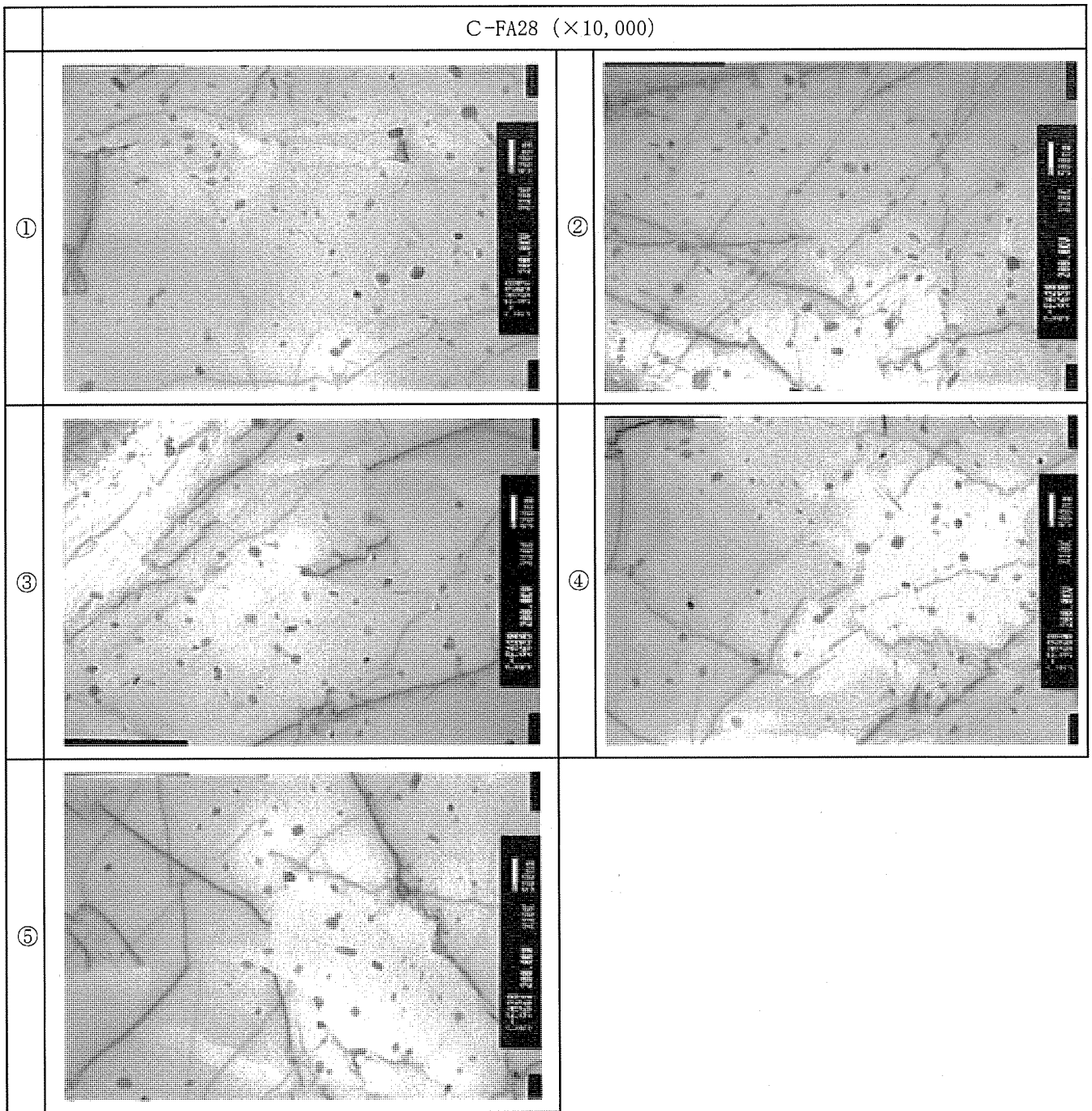
別紙 1-33 図 520°C×10hr 保持後 2.0°C/hr での制御冷却処理材の TEM 組織観察結果

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社



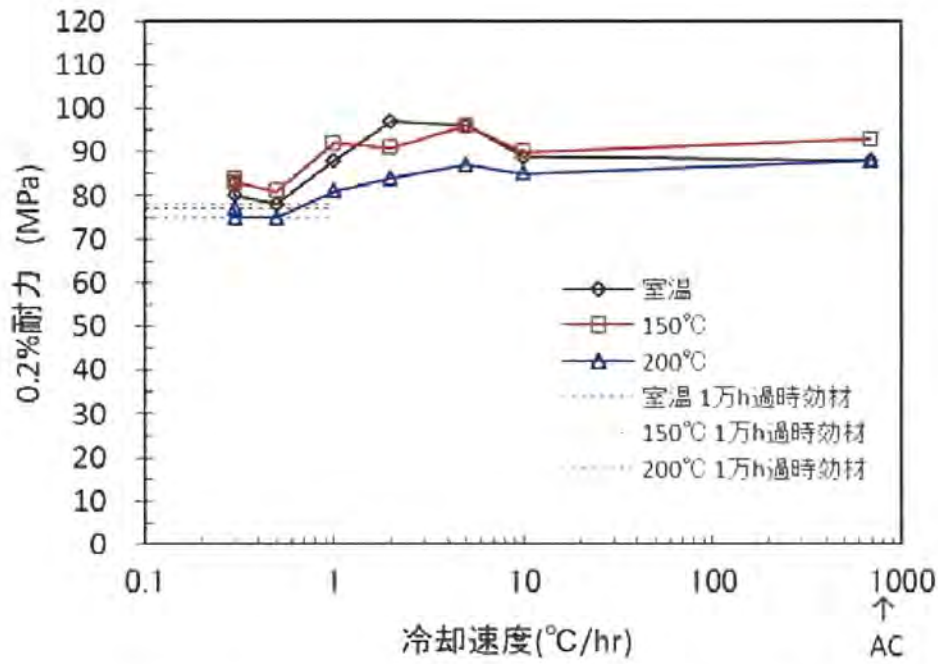
別紙 1-34 図 520°C×10hr 保持後 0.5°C/hr での制御冷却処理材の TEM 組織観察結果

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

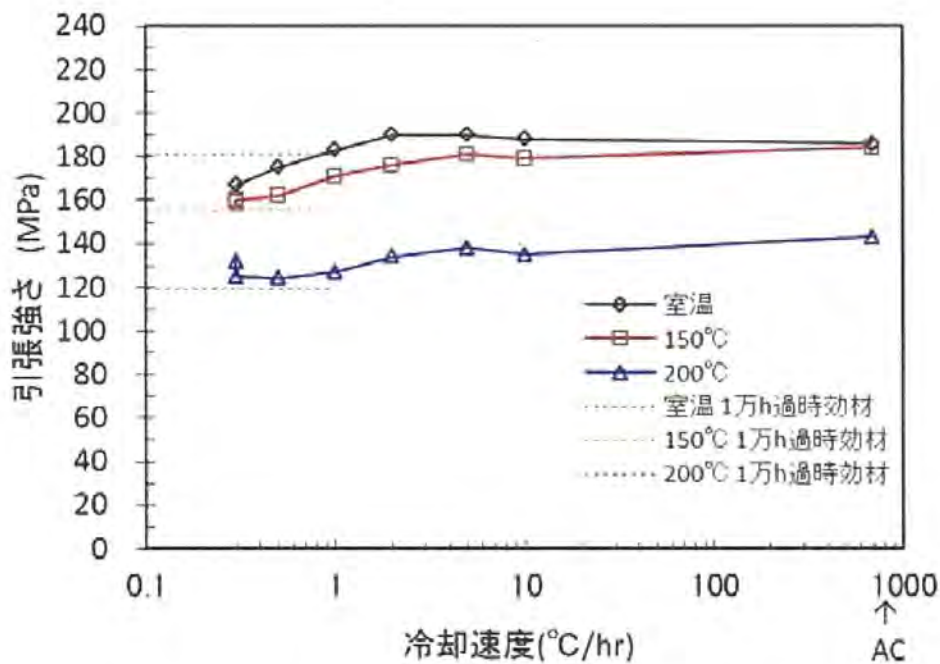


別紙 1-35 図 520°C×10hr 保持後 0.3°C/hr での制御冷却処理材の TEM 組織観察結果

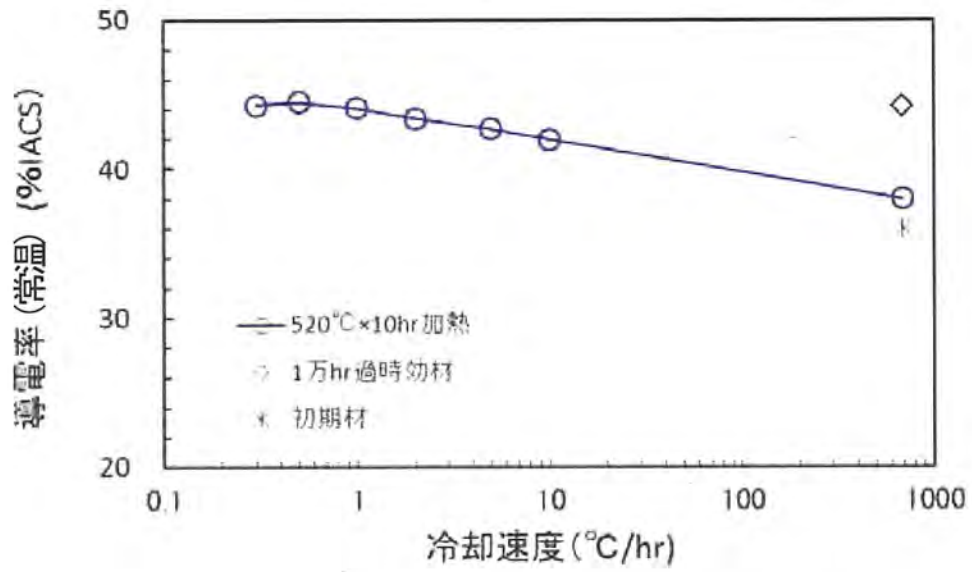
無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社



別紙 1-36 図 520°C×10hr 保持後の冷却速度と 0.2%耐力の関係



別紙 1-37 図 520°C×10hr 保持後の冷却速度と引張強さの関係



別紙 1-38 図 520°C×10hr 保持後の冷却速度と導電率の関係

別紙 1-6 表 冷却速度と強度及び導電率の関係 (520°C×10hr 保持)

冷却速度 (°C/hr)	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	導電率 (%IACS) 常温計測値
空冷	23	88	186	38.5
	150	93	184	
	200	88	143	
10	23	89	188	42.0
	150	90	179	
	200	85	135	
5	23	96	190	42.7
	150	96	181	
	200	87	138	
2	23	97	190	43.4
	150	91	176	
	200	84	134	
1	23	88	183	44.1
	150	92	171	
	200	81	127	
0.5	23	78	175	44.5
	150	81	162	
	200	75	124	
0.3	23	83	167	44.3
		80	167	
	150	83	160	
		84	159	
	200	77	132	
		75	125	

4.4 強度特性

前項までに確認した完全焼なまし条件（520℃×10hr 保持後、0.3℃/hr で制御冷却）にて処理した供試材（別紙 1-3 表に示す 3 標本）を用いて強度特性を確認した。



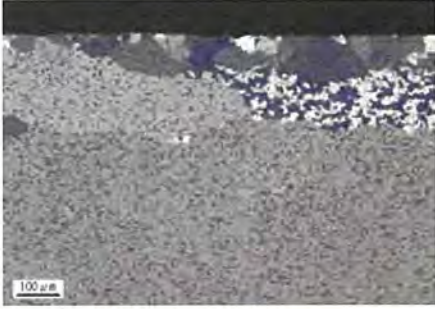
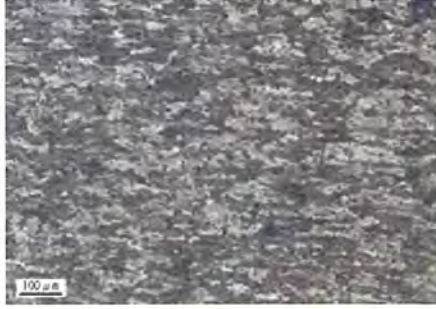


別紙 1-39 図に完全焼なまし処理後の組織を、別紙 1-40 図及び別紙 1-41 図に 10,000hr 長時間過時効熱処理材（250℃及び 300℃）及び完全焼なまし処理材の各試験温度における引張試験結果を示す。また、別紙 1-40 図及び別紙 1-41 図の試験データを別紙 1-7 表から別紙 1-9 表に示す。

別紙 1-39 図に示すとおり、表層においては、別紙 1-23 図及び別紙 1-24 図と同様に再結晶に伴う等軸粒及び異常粒成長組織が確認され、2.1 項に示す (3) 加工硬化及び (4) 組織微細化はキャスク供用期間中に想定される変化を、4.5 項に示す拡散現象を考慮しても十分再現できていると判断できる。

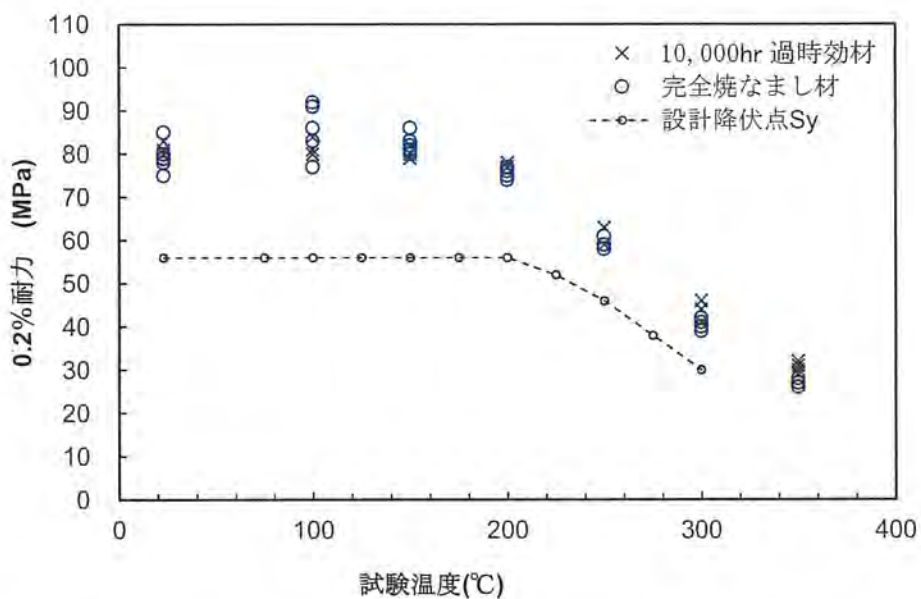
また、別紙 1-40 図及び別紙 1-41 図に示すとおり、10,000hr 長時間過時効熱処理材と完全焼なまし処理材の強度特性は同等である。ただし、長時間過時効熱処理材と完全焼なまし処理材の比較において、完全焼なまし処理材の低温領域での引張強さが若干低強度であることが確認された。これは、別紙 1-42 図から別紙 1-44 図に示す 10,000hr 長時間過時効熱処理に伴う組織変化（組織粗大成長）に比べ、別紙 1-39 図（関連：別紙 1-28 図）の完全焼なまし処理材の組織では、組織変化（異常粒成長）が過剰に生じているためと推定される。

MSF-21P 型は、バスケットに変形が生じない設計（技術的に想定されるいかなる場合でも未臨界機能を維持するため、臨界評価体系に影響するバスケットに塑性変形を許容しない設計）であり、設計降伏点（ S_y ）を重視した設計としている。設計降伏点（ S_y ）は、別紙 1-40 図に示すとおり、材料評価結果に比べ十分な裕度を有するため、当該長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理により得られた設計強度を MSF-21P 型の設計に適用することに問題は無いと判断できる。

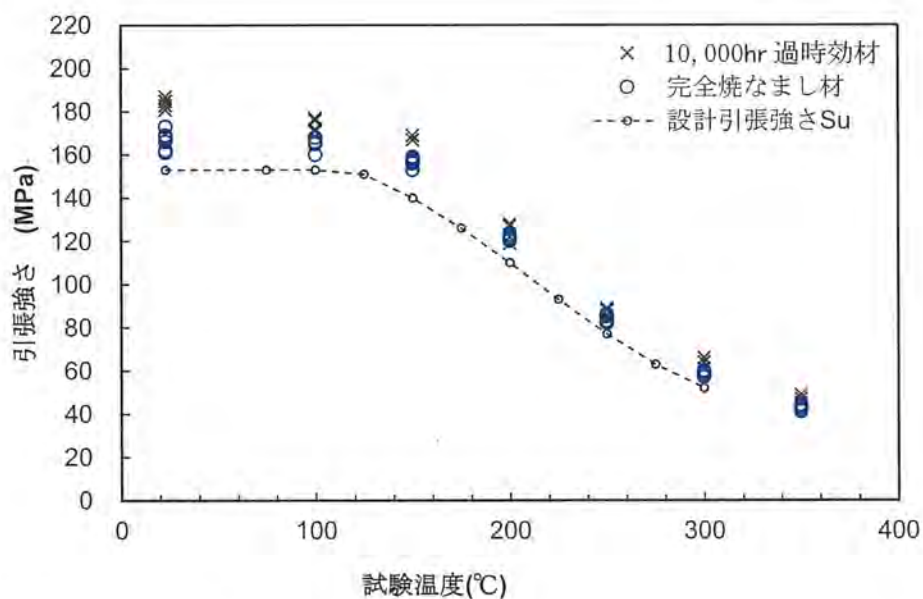
異常粒成長が確認されていない 520℃×10hr 保持後に 0.5℃/hr で冷却した完全焼なまし処理材と長時間過時効熱処理材との強度特性を比較した結果を別紙 1-45 図及び別紙 1-46 図に示す。別紙 1-45 図及び別紙 1-46 図に示すとおり、異常粒成長が生じていない場合は強度特性が有意に低下しないことが確認できた。したがって、異常粒成長を生じた 520℃×10hr 保持後に 0.3℃/hr で冷却した完全焼なまし処理材をもとに設計基準値を設定することは保守的な扱いとなる。

供試材 符号	表層	板厚中央
A		
B		
C		

別紙 1-39 図 520℃×10hr 保持 0.3℃/hr 冷却時の組織
(完全焼なまし処理材)



別紙 1-40 図 520°C×10hr 保持 0.3°C/hr 冷却処理材（完全焼なまし処理材）
及び 10,000hr 長時間過時効熱処理材の試験温度と 0.2%耐力の関係



別紙 1-41 図 520°C×10hr 保持 0.3°C/hr 冷却処理材（完全焼なまし処理材）
及び 10,000hr 長時間過時効熱処理材の試験温度と引張強さの関係

別紙 1-7 表 完全焼なまし処理材の引張強度特性

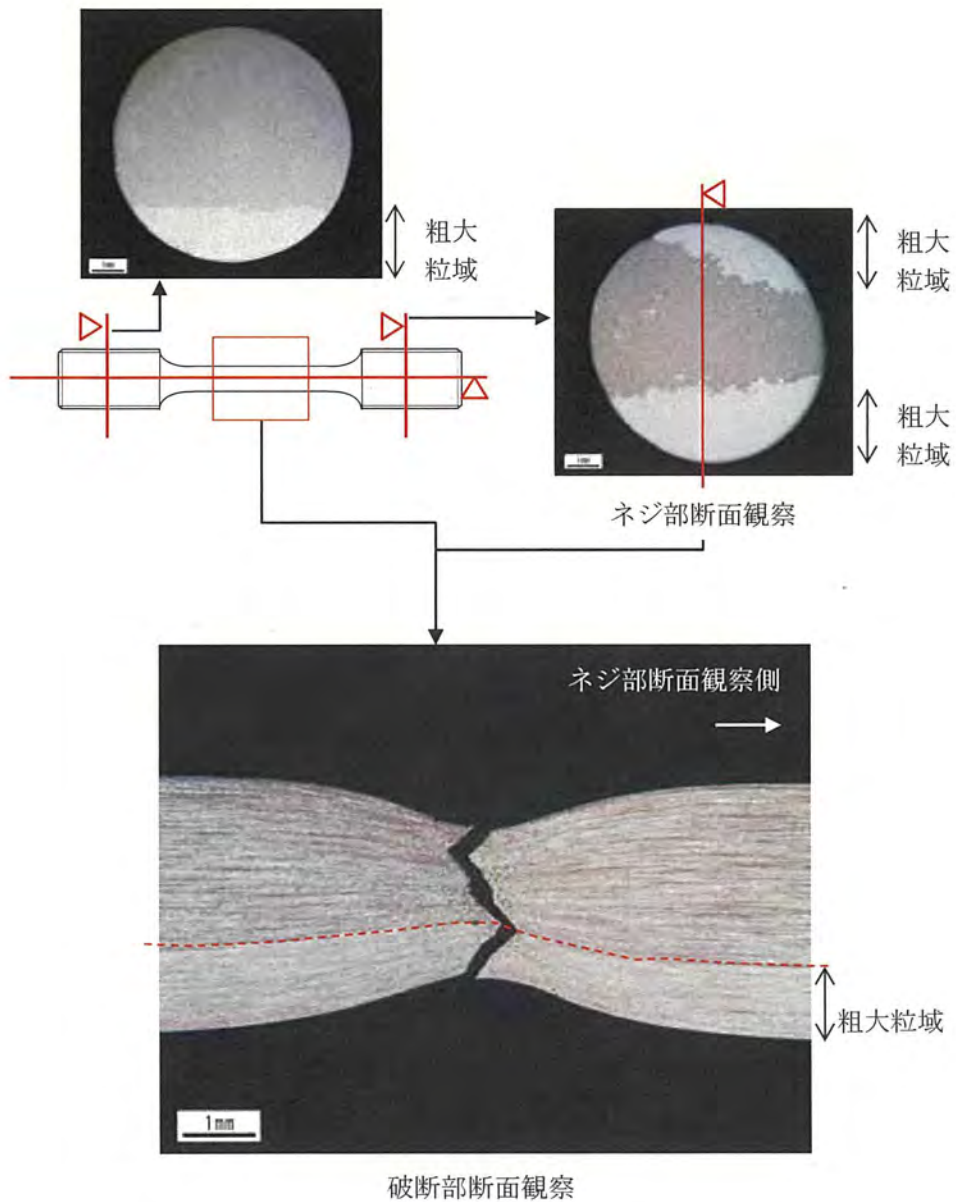
供試材 符号	A		B		C	
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
23	80	162	85	173	78	168
	75	161	85	169	79	166
100	77	160	91	168	83	165
	86	165	92	168	86	166
150	80	153	86	157	82	156
	83	153	86	159	81	158
200	75	121	77	121	74	122
	74	120	76	121	77	123
250	58	82	59	83	59	85
	58	83	59	83	61	86
300	39	57	41	59	41	60
	39	58	40	59	42	60
350	26	41	27	43	28	43
	27	41	27	42	28	44

別紙 1-8 表 長時間過時効熱処理材の引張強度特性
(250°C×10,000hr 保持)

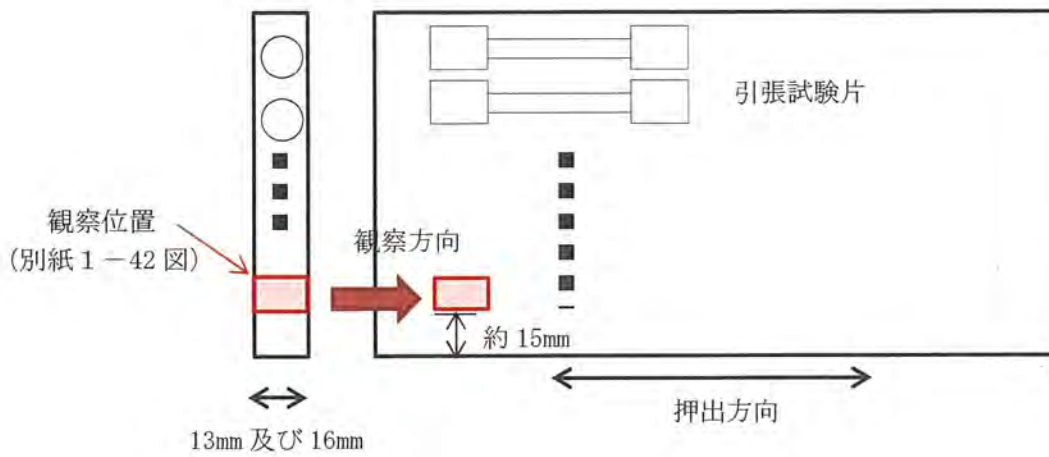
供試材 符号	A		B		C	
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
23	88	187	82	178	83	183
23	83	181	80	177	83	181
100	85	175	81	168	84	172
100	85	175	82	168	84	171
150	87	161	80	152	82	155
150	85	156	78	152	82	155
200	78	120	75	118	78	122
200	78	119	75	119	78	119
250	63	88	61	86	63	89
250	64	87	60	84	63	88
300	45	65	44	63	46	66
300	45	64	44	63	44	64
350	29	45	29	46	31	47
350	30	47	28	45	32	49

別紙 1-9 表 長時間過時効熱処理材の引張強度特性
(300°C×10,000hr 保持)

供試材 符号	A		B		C	
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
23	86	193	78	183	81	187
23	82	186	77	181	80	185
100	84	181	81	174	81	177
100	84	181	80	173	80	176
150	87	176	79	166	80	167
150	84	173	79	166	79	169
200	78	128	76	128	77	128
200	77	128	76	128	77	127
250	62	88	59	86	59	85
250	62	87	58	84	59	84
300	41	61	42	62	41	61
300	42	62	41	61	41	61
350	28	44	28	44	30	45
350	29	46	27	43	29	45

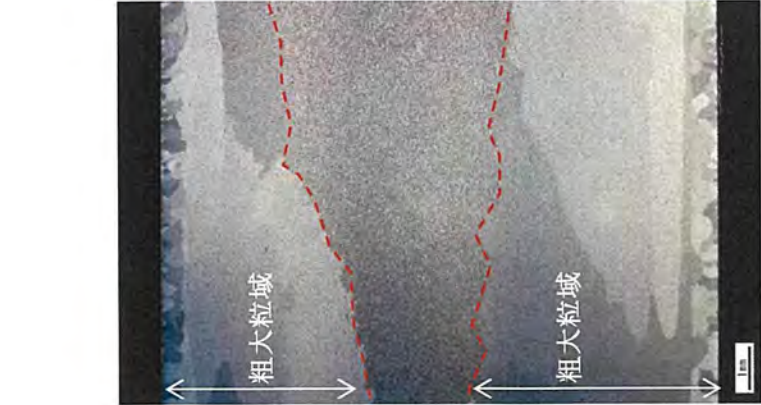
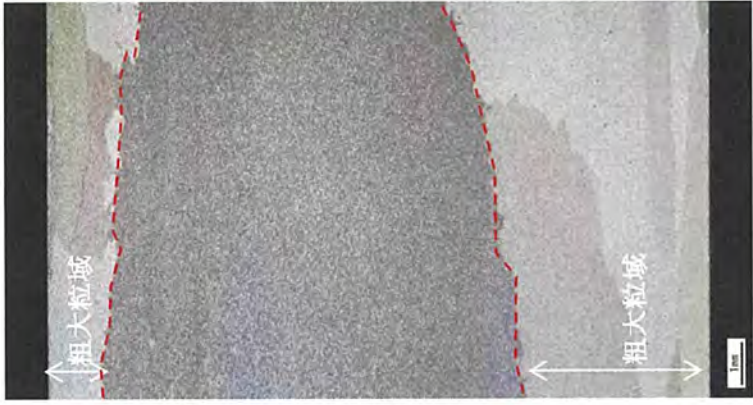
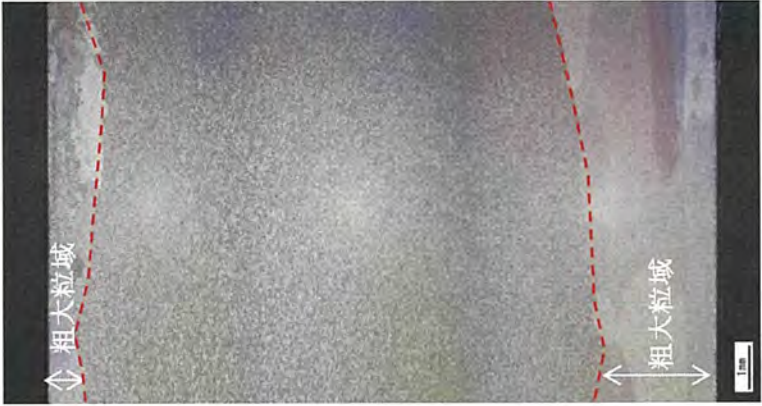


別紙 1-42 図 MB-A3004 (供試材 A) の常温引張試験突き合わせ断面の組織観察結果

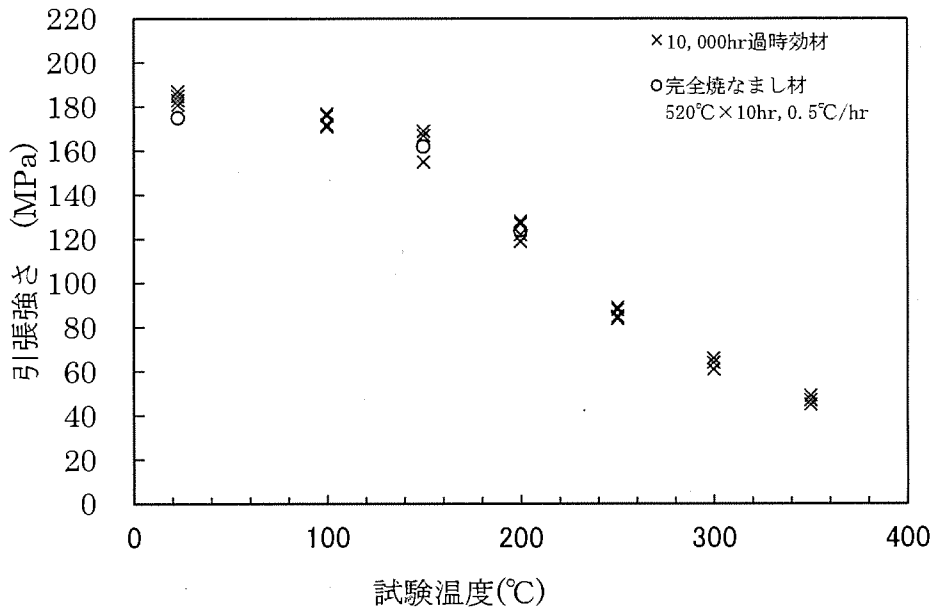


(注 1) 各種試験片は引張試験平行部が板厚中心部となるようサンプリングを行っている。

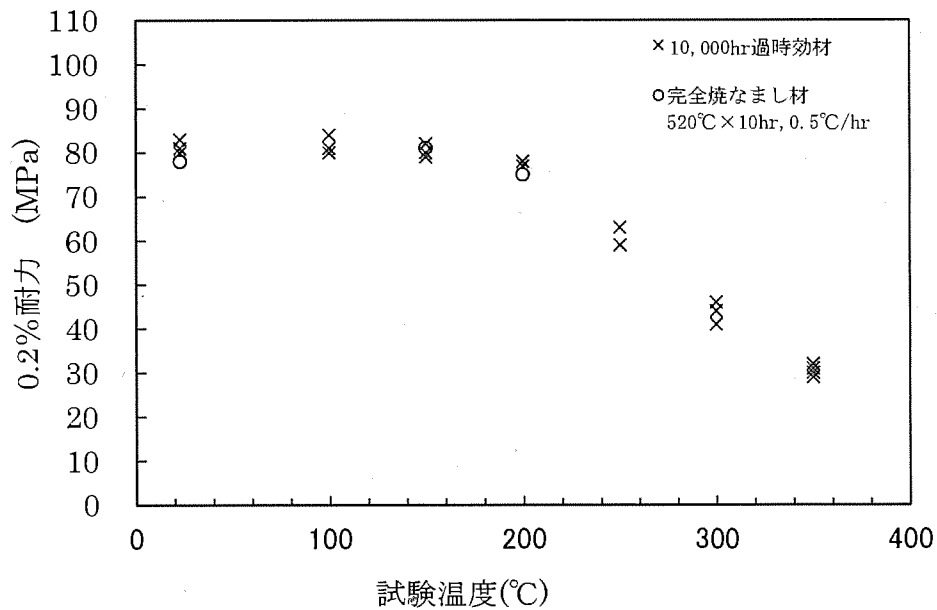
別紙 1-43 図 組織観察試験片採取位置

 <p>粗大粒域</p> <p>粗大粒域</p> <p>13mm</p>	 <p>粗大粒域</p> <p>粗大粒域</p> <p>16mm</p>	 <p>粗大粒域</p> <p>粗大粒域</p> <p>16mm</p>
供試材 A (13mmt)	供試材 B (16mmt)	供試材 C (16mmt)

別紙 I-44 図 MB-A3004 供試材組織観察結果 (板全厚)



別紙 1-45 図 完全焼なまし処理材 (520°C×10hr 保持、0.5°C/hr 冷却) と長時間過時効熱処理材の比較 (引張強さ)



別紙 1-46 図 完全焼なまし処理材 (520°C×10hr 保持、0.5°C/hr 冷却) と長時間過時効熱処理材の比較 (0.2%耐力)

4.5 熱処理条件の妥当性

別紙 1-1 図及び別紙 1-4 図に示す長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理において、供用期間中の主成分の拡散の観点から妥当性を評価した。

各成分における拡散距離の計算結果を別紙 1-10 表に示し、アルミニウム母相中の各元素の拡散データを別紙 1-11 表に示す。

各評価温度での拡散係数を下記 (1.1) 式に基づき算出し、フィックの法則により濃度依存しないものと仮定すると拡散距離は拡散係数と拡散時間の積に比例する (1.2) 式で表される。⁽³⁾ 本項では、厳密な拡散距離の算出ではなく、温度により拡散距離が、キャスク供用期間における拡散距離 < 熱処理による拡散距離 となっていることを確認のため実施したものである。

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- D : 拡散係数 (m²/s)
- D₀ : 振動数項 (m²/s)
- Q : 拡散の活性化エネルギー (kJ/mol)
- R : 気体定数 (8.3145 (J/mol・K))
- T : 温度 (K)

$$x \propto \sqrt{D t} \dots\dots\dots (1.2)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- x : 拡散距離 (m)
- D : 拡散係数 (m²/s)
- t : 拡散時間 (s)

別紙 1-10 表に示すとおり、60 年間の供用期間同一温度を想定 (60 年間 200°C 一定) した拡散距離と別紙 1-1 図に示す長期間過時効熱処理及び別紙 1-3 図に示す完全焼なまし処理の処理条件の拡散距離とを比較すると、供用期間中に想定される拡散距離に比べて各処理に伴う拡散距離が大きいことから、供用期間中の熱影響として拡散の観点から十分な熱ばく露を実施していると判断できる。

別紙 1-10 表 各構成成分におけるアルミニウム母相中の拡散距離(1/3) (200℃)

	保持時間における拡散距離 (μm) (注1)				
	10 hr	10,000hr (1.1年)	20,000hr (2.3年)	100,000hr (11.4年)	530,000hr (60.5年)
Al-Al	3.6E-02	1.1	1.6	3.6	8.2(1)
Al-Si	0.2	5.0	7.1	16.0	36.7(1)
Al-Fe	2.3E-02	0.7	1.0	2.3	5.3(1)
Al-Cu	8.1E-02	2.6	3.6	8.1	18.7(1)
Al-Mg	0.1	3.9	5.5	12.3	28.4(1)
Al-Mn	0.2	6.7	9.4	21.0	48.5(1)

(注1) ()内数値は、200℃×530,000hrの拡散距離を1と規格化した場合の比

別紙 1-10 表 各構成成分におけるアルミニウム母相中の拡散距離(2/3) (300℃)

	保持時間における拡散距離 (μm) (注1)				
	10 hr	10,000hr (1.1年)	20,000hr (2.3年)	100,000hr (11.4年)	530,000hr (60.5年)
Al-Al	0.8	26.4(3.2)	37.4(4.5)	83.6	192.4
Al-Si	2.5	79.1(2.2)	111.8(3.0)	250.1	575.7
Al-Fe	0.5	14.6(2.7)	20.6(3.9)	46.2	106.3
Al-Cu	1.3	42.0(2.2)	59.4(3.2)	132.7	305.5
Al-Mg	2.3	71.4(2.5)	101.0(3.6)	225.8	519.8
Al-Mn	3.0	95.4(2.0)	134.9(2.8)	301.7	694.6

(注1) ()内数値は、200℃×530,000hrの拡散距離を1と規格化した場合の比

別紙 1-10 表 各構成成分におけるアルミニウム母相中の拡散距離(3/3) (520℃)

	保持時間における拡散距離 (μm) (注1)				
	10 hr	10,000hr (1.1年)	20,000hr (2.3年)	100,000hr (11.4年)	530,000hr (60.5年)
Al-Al	52.2(6.3)	1651.0	2334.8	5220.8	12019.1
Al-Si	92.5(2.5)	2925.0	4136.5	9249.5	21294.0
Al-Fe	23.5(4.4)	743.7	1051.7	2351.7	5414.0
Al-Cu	52.0(2.8)	1645.4	2326.9	5203.1	11978.3
Al-Mg	102.4(3.6)	3237.8	4578.9	10238.7	23571.2
Al-Mn	99.3(2.0)	3140.8	4441.8	9932.1	22865.4

(注1) ()内数値は、200℃×530,000hrの拡散距離を1と規格化した場合の比

別紙 1-11 表 アルミニウム母相中の各元素の拡散データ⁽³⁾

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn
D_0 (m ² /s)	1.71×10^{-4}	3.5×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.24×10^{-4}	2.2×10^{-5}
Q (kJ/mol)	142	124	135	126	131	120
測定温度 (K)	729-916	617-904	293-915	623-903	667-928	723-923

5. 製造条件による影響

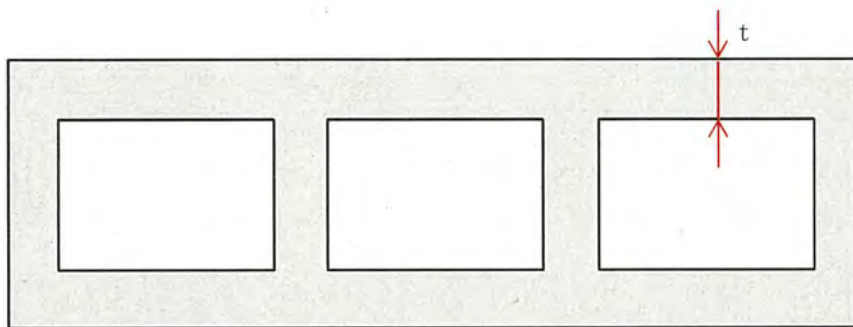
5.1 製造条件による影響

本材料と供試材の仕様について、形状、成分及び製造条件等の仕様比較を別紙 1-12 表に示す。また、バスケットプレート断面の形状図を別紙 1-47 図に示す。

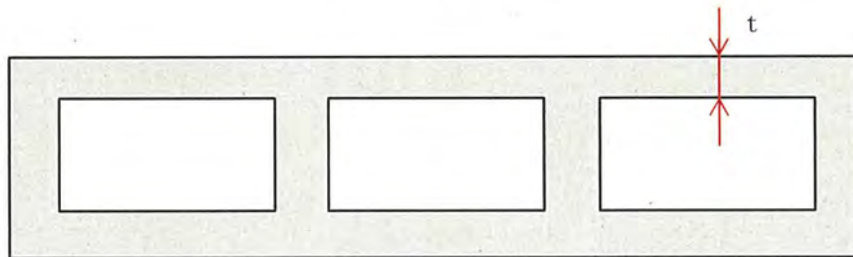
別紙 1-12 表に示すとおり、供試材は、MSF-21P 型のバスケットと同等の仕様で製造されており、本材料を代表している。

別紙 1-12 表 本材料と供試材仕様の比較

項目	本材料 (バスケットプレート)	供試材	
		(1)供試材 A	(2)供試材 B 及び C
記号	MB-A3004	MB-A3004	
断面形状	別紙 1-47 図(1)、(2)	別紙 1-18 図(1)	別紙 1-18 図(2)
成分 仕様	A3004	A3004	A3004
板厚 (t)	10.75mm 8.75mm (別紙 1-47 図参照)	13mm (別紙 1-18 図参照)	16mm (別紙 1-18 図参照)
押出比 (予定)	(16) 又は (20)	14	14
製 造 条 件			



(1) タイプ 1-1



(2) タイプ 1-2

別紙 1-47 図 バスケットプレート断面形状

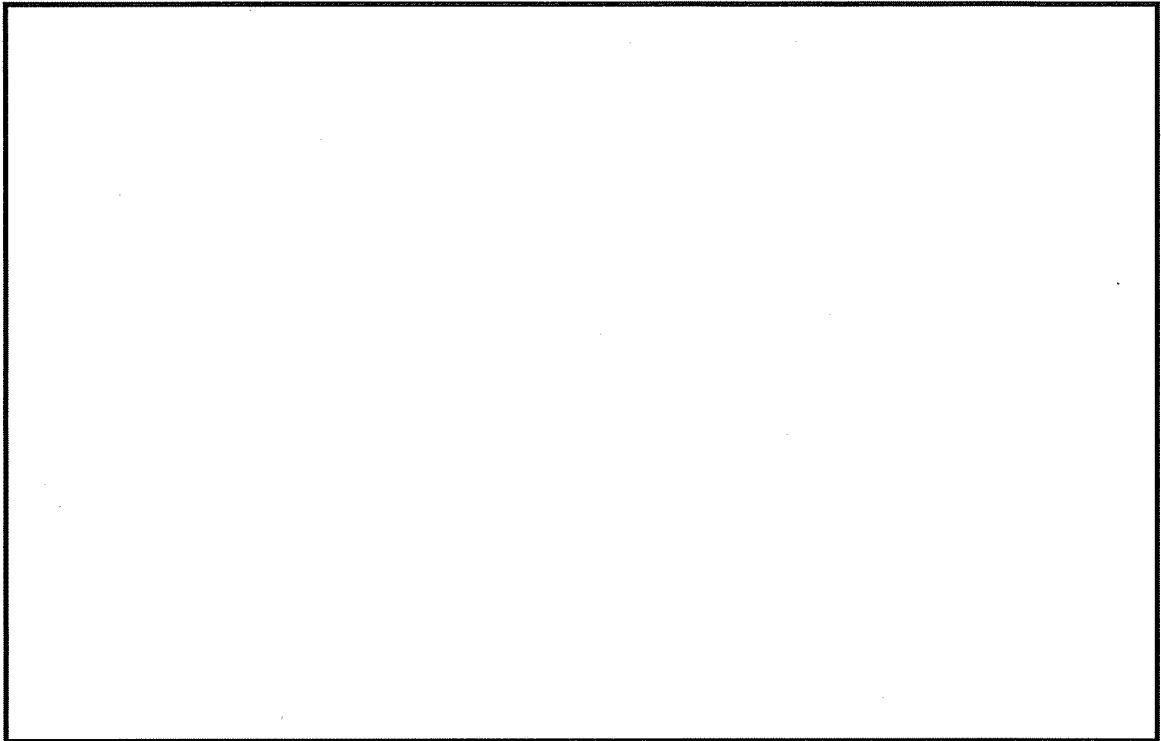
5.2 押出比の影響

引用文献(7)によれば、押出比は押出材の寸法精度及び表面状態を決める因子であり、製品形状により押出比が10から80の間となるように選択することが示されている。

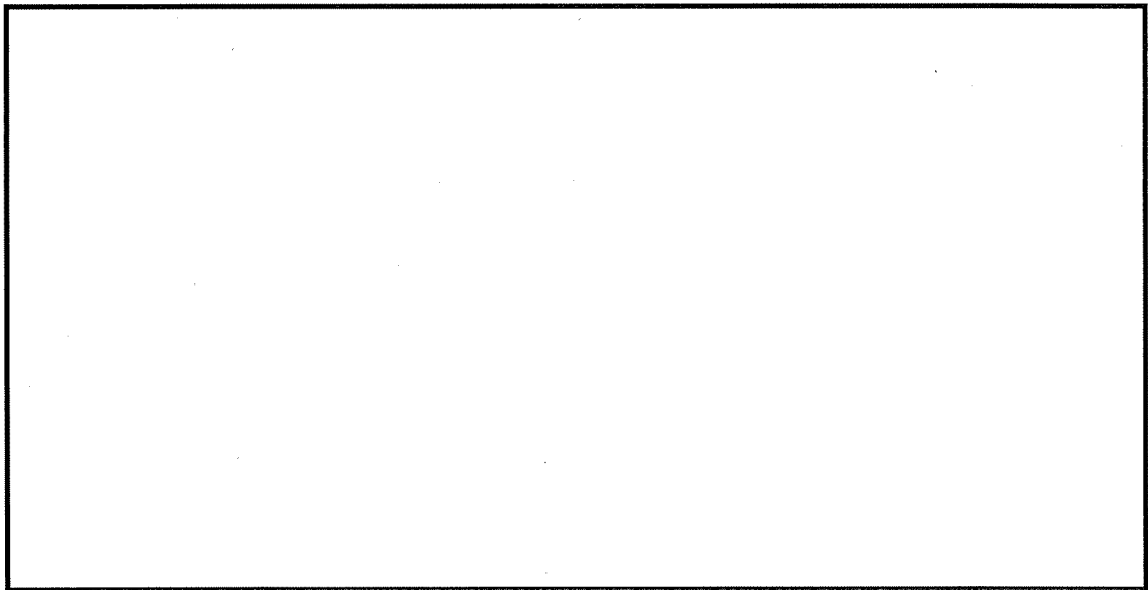
また、押出比が10以上にて材料特性が安定することが示されている例を別紙1-48図及び別紙1-49図に示す。これら文献評価により、押出比が10以上であれば、材料特性に影響しない。

供試材の押出比及び製造実績(工場生産のみ(ラボ試験を除く))を有する押出比を別紙1-13表に示す。別紙1-13表に示すとおり、幅広い押出比による製造及び材料特性確認を実施しており、規定のとおり押出比が10以上で問題無いことを確認している。

したがって、文献評価及び製造実績の結果、押出比が10以上であれば材料特性は変わらないとする規定は妥当である。



別紙 1-48 図 A7091-T7 合金の押出比と耐力及び破壊靱性値の関係⁽⁸⁾



別紙 1-49 図 A5056 基複合材の押出比と強度の関係⁽⁹⁾

別紙 1-13 表 供試材及び製造実績の押出比一覧 (注1)

項目	供試材形状	記号
		MB-A3004
特性評価供試材	別紙 1-47 図(1)	14
	別紙 1-47 図(2)	14
製造実績		14~35

(注1) 押出比は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であり、端数は四捨五入した整数表記とした。

製造実績の押出比は工場生産（押出材の寸法精度、表面状態確認のみ実施した生産を含む）の実績値であり、ラボ試験は除く。

5:3 押出温度・押出速度及び押出後の冷却速度の影響

一般的に、強度特性は、成分、押出後の熱処理及び冷間加工による影響が大きいことから、JIS等の関連規格において製造条件（押出温度及び押出速度）は規定されていない。

引用文献(7)、(10)によれば、押出温度及び押出速度は材料特性に影響せず、主に製品寸法精度及び表面状態に影響するとしている。

別紙 1-14 表に材料特性評価の供試材製造条件を示す。MB-A3004 及び BC-A6N01 の各供試材は、別紙 1-14 表に示すとおり広範囲の押出条件にて製造しており、本供試材を対象として長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理を施し材料評価を実施している。材料特性の評価結果からは、押出条件による有意な特性差は確認されていないことから、製造条件は材料特性に有意な影響は及ぼさないと判断している。

また、押出後の冷却速度の影響について、強制空冷等の強冷却を施した場合は、強度特性が向上する。BC-A6N01 材の 7%B₄C 材を対象として冷却速度の影響を確認した例として、引張試験結果を別紙 1-50 図及び別紙 1-15 表に示す。なお、試験に適用した試験片の採取位置は別紙 1-51 図及び別紙 1-52 図に、供試材の成分は別紙 1-16 表に示すとおりである。当該強度特性の向上は冷却ひずみ及び BC-A6N01 の場合は Mg₂Si の析出状態（微細化）により生じるものであり、供用期間中の熱ばく露により軟化（転位解放及び Mg₂Si の粗大化）するものであることから、押出後の冷却速度は 60 年間の供用期間経過後の強度設定に影響するものではない。

(参考)

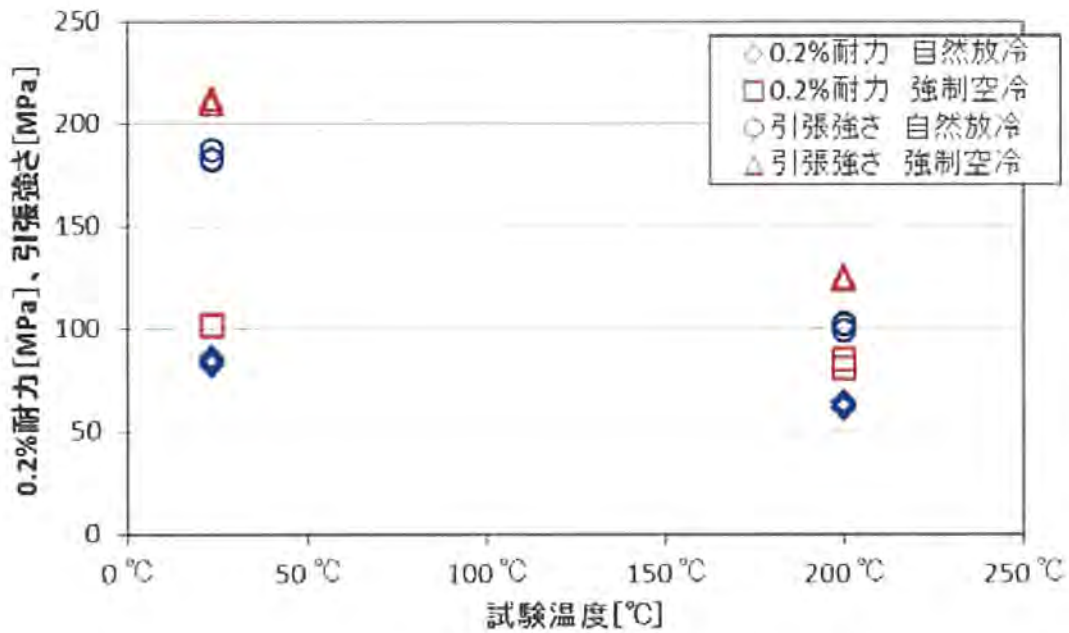
製造条件は押出設備によっても変わるものであり、材料特性に大きな影響を及ぼさないことから、生産性及び経済性の観点から安定して生産できる製造条件を選定している。

また、対象となる MB-A3004 及び BC-A6N01 に製造過程及び供用環境において考慮すべき相変化が無いことから、成分、押出後の処理（H112 及び T1）を規定することで材料管理が可能であると判断できる。

別紙 1-14 表 供試材の押出条件

供試材形状	MB-A3004			BC-A6N01		
	温度 (°C)	速度 (m/min)	冷却 方法	温度 (°C)	速度 (m/min)	冷却 方法
特性評価 供試材			自然 放冷			—
			—			—
			—			自然 放冷
			—			
			—			
製造実績			自然 放冷			自然 放冷
	—					

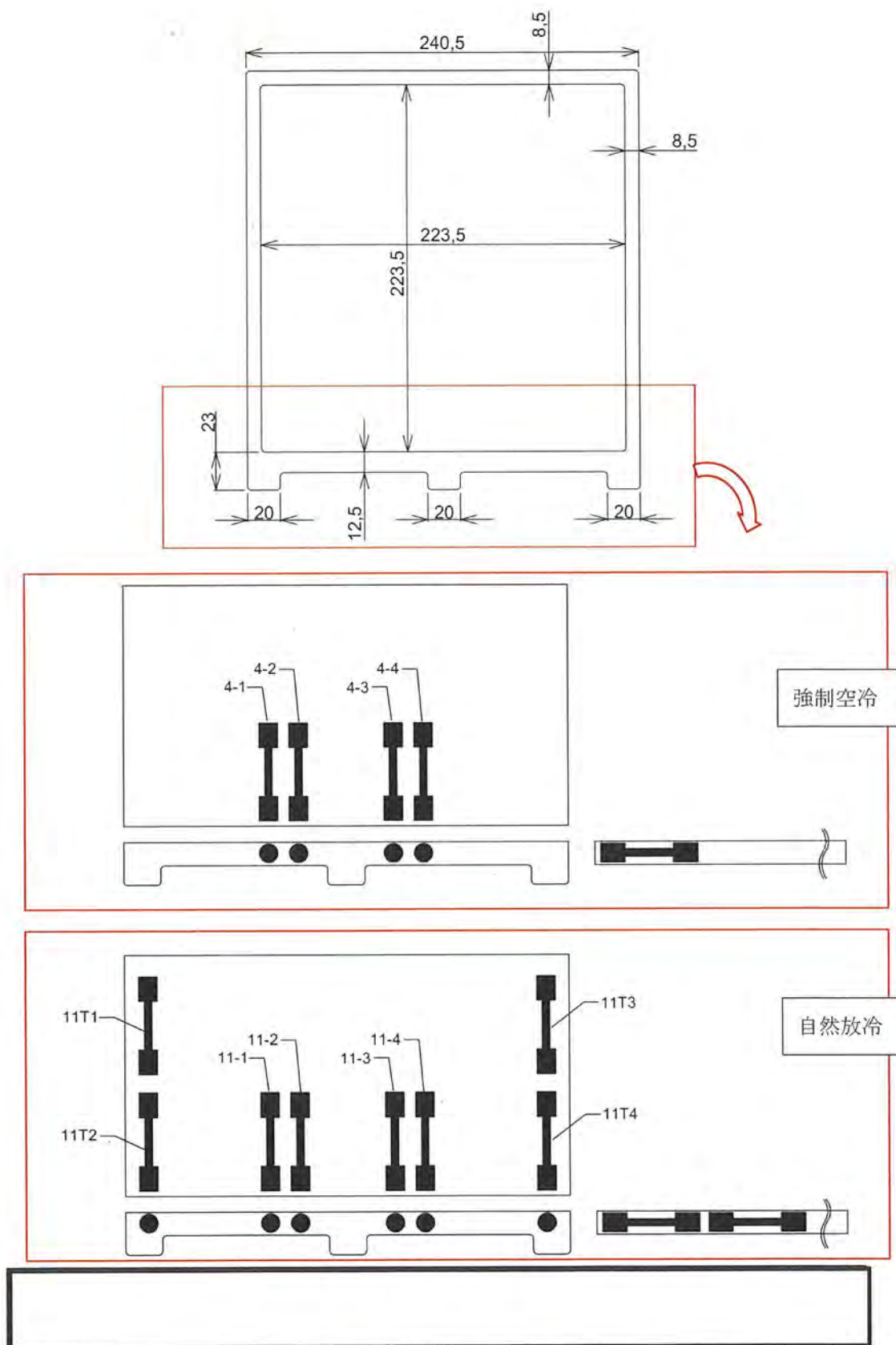
(注1) 条件は工場生産条件（押出材の寸法精度及び表面状態確認のみ実施した生産条件を含む）であり、ラボ試験条件は除く。



別紙 1-50 図 押出後冷却方式と強度特性の関係

別紙 1-15 表 押出後の冷却速度の影響 (BC-A6N01 ; 7%B₄C 材)

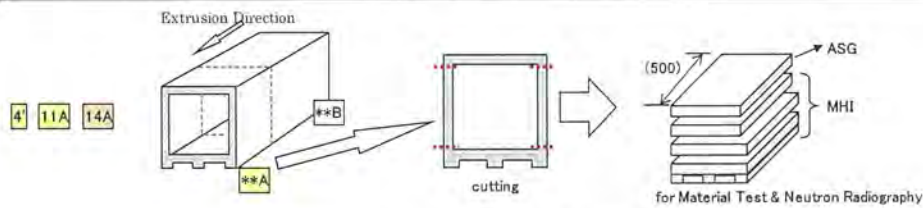
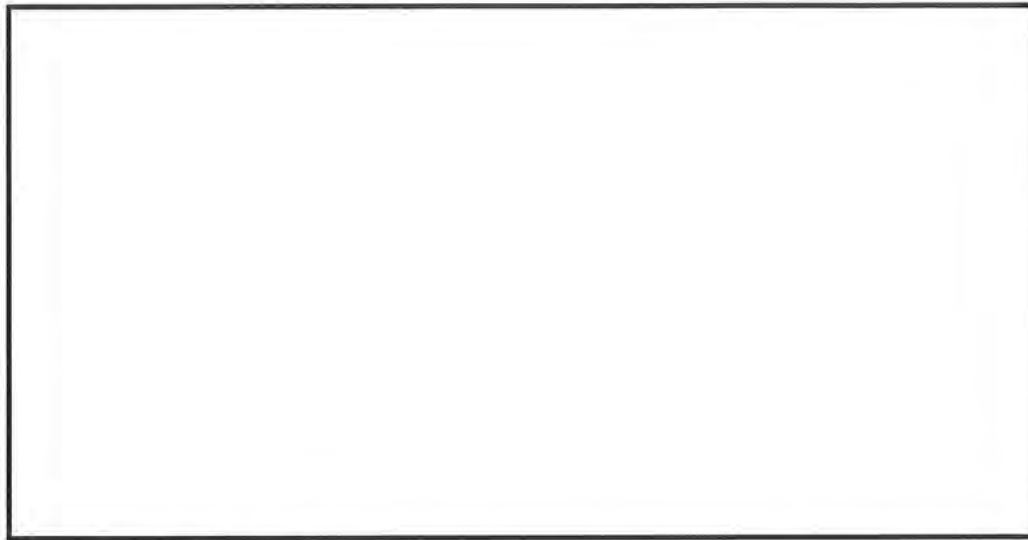
項目	試験温度 (°C)	試験片 No.	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
強制空冷	23	4-1	102	212	17.0	31.8
		4-2	101	210	17.3	35.5
自然放冷 肉厚部	23	11T1	85	187	17.3	34.5
		11T2	86	187	16.7	31.3
自然放冷 一般部	23	11-1	82	183	19.3	37.3
		11-2	84	182	19.3	36.4
強制空冷	200	4-3	81	124	31.7	62.2
		4-4	85	125	27.0	57.8
自然放冷 肉厚部	200	11T3	64	103	36.0	63.3
		11T4	64	103	32.3	62.3
自然放冷 一般部	200	11-3	62	102	38.0	66.6
		11-4	61	99	38.3	65.1



別紙 1-51 図 試験片採取位置

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1-52 図 押出全体概要図と試験片採取位置

別紙 1-16 表 供試材成分及びビレット仕様

化学成分	アルミニウム合金成分 (mass%)										添加成分	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	その他			Al
									個々	合計		
規格値	0.50 ~0.9	0.35 以下	0.35 以下	0.50 以下	0.40 ~0.8	0.30 以下	0.25 以下	0.10 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部	6.9 ~7.1
	0.82	0.19	0.001	0.002	0.69	0.002	0.004	0.007	—	—	残部	7.0
	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//

(注 1)

6. まとめ

MB-A3004において、供用期間（60年間）中の材料特性変化を長時間過時効熱処理及び完全焼なまし処理方法により確認した。

両方法ともに安定な状態まで各処理した材料にて材料特性評価した結果、供用期間中の有意な強度特性変化が無いものと判断できる。また、各設計強度を設定するにあたり、当該検証データを基に設定することに問題ないものと判断される。

7. 引用文献

- (1) 小林俊郎ら、アルミニウム合金の強度、内田老鶴圃、(2001)
- (2) 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)
- (3) 一般社団法人軽金属学会、アルミニウムの組織と性質、(1991)
- (4) 新版/アルミニウム技術便覧、軽金属協会、カロス出版
- (5) ASM International、Binary Alloy Phase Diagrams Second Edition Vol.1
- (6) 軽金属 第30巻 第6号(1980)、グエン・コン・ダンら著、Al-1.1%Mn 合金における析出・再結晶挙動および再結晶集合組織
- (7) Furukawa-Sky Review、No. 4、(2008)
- (8) 押出し加工、日本塑性加工学会編、コロナ社 (1992年)
- (9) 公開特許公報 特開平 11-36975 図1、本田技研工業㈱
- (10) 松岡ら、軽金属、第50巻第5号、(2000)

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

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の破壊靱性に係る特性をまとめたものである。

2. 設計の考え方

MSF-21P 型は、バスケットに変形が生じない設計 (技術的に想定されるいかなる場合でも未臨界機能を維持するため、臨界評価体系に影響するバスケットに塑性変形を許容しない設計) であり、設計降伏点 (S_y) を重視した設計としている。

3. 材料特性 (破壊靱性)

3.1 材料特性 (破壊靱性)

アルミニウム合金は、面心立方格子構造 (fcc : face-centered cubic) であり、体心立方格子構造 (bcc : body-centered cubic) に見られるへき開破壊及び温度変化に伴う脆性-延性遷移現象は無いことが知られている。⁽¹⁾

(1) シャルピー衝撃試験

材料特性確認として、初期材及び長時間過時効熱処理材に対して、JIS Z 2242 : 2005 に準拠しシャルピー衝撃試験を行った。その結果を別紙 2-1 表、別紙 2-1 図及び別紙 2-2 図に示す。

別紙 2-1 表、別紙 2-1 図及び別紙 2-2 図に示すとおり、初期材において横膨出量のばらつきが大きいものの、キャスク供用期間の熱劣化現象 (過時効) を模擬した長時間過時効熱処理材において有意な特性変化が無く、衝撃特性が安定していることを確認した。

(2) 破壊靱性試験

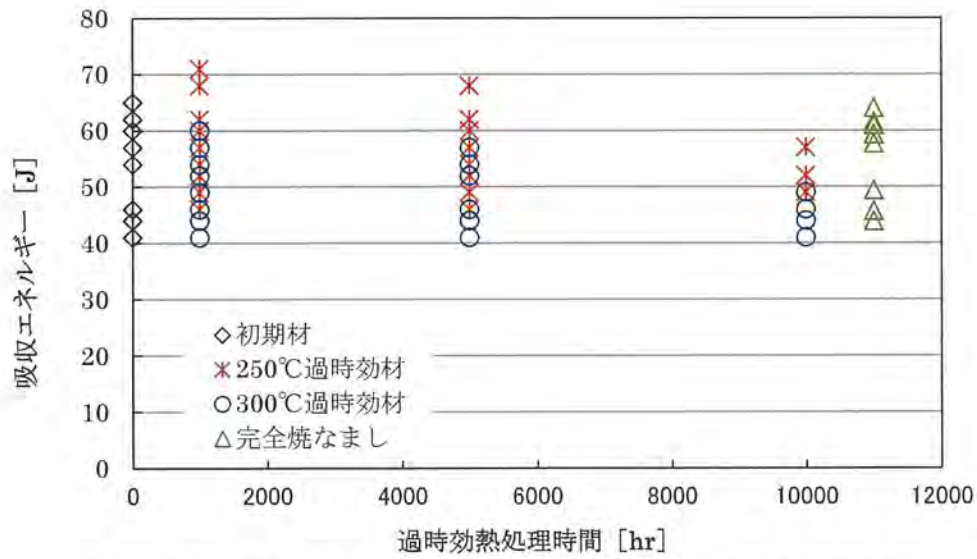
初期材に対して ASTM E1820-09 に準拠し、 -40°C 、 25°C 及び 200°C の温度条件において破壊靱性試験を実施した。その結果を別紙 2-2 表に、別紙 2-3 図に試験片写真、別紙 2-4 図に荷重-変位の関係、別紙 2-5 図に破壊靱性値 (J) -き裂進展の関係を示す。

また、破壊靱性特性における負荷速度依存性の有無を確認するため、常温での破壊靱性試験を実施し、別紙 2-6 図に負荷速度と開口変位との関係を、別紙 2-7 図に試験片の試験前後の状況写真を示す。別紙 2-6 図より、負荷速度依存性がほとんどないことを確認した。

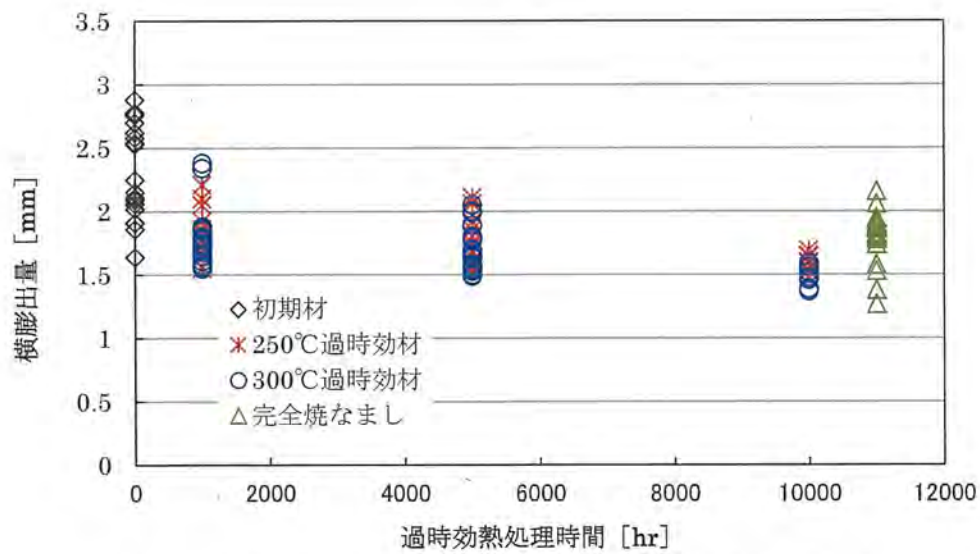
別紙 2-1 表 初期材及び熱処理材によるシャルピー衝撃試験結果 (平均値) (注1)

試験温度 -40 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
処理温度 処理時間	250°C			300°C		
0hr (初期材)	51.4	64.2	2.3	—	—	—
1,000hr	57.4	71.4	1.8	52.9	65.8	1.8
5,000hr	55.6	69.5	1.7	48.9	61.3	1.7
10,000hr	52.3	65.0	1.6	44.2	55.3	1.5
完全焼なまし 処理	52.0	65.0	1.8	—	—	—

(注1) 試験片はVノッチシャルピー衝撃試験片 (幅 10mm) であり、試験温度は-40°Cである。



別紙 2-1 図 過時効熱処理時間と吸収エネルギーの関係 (L、T方向)
(試験温度：-40°C)



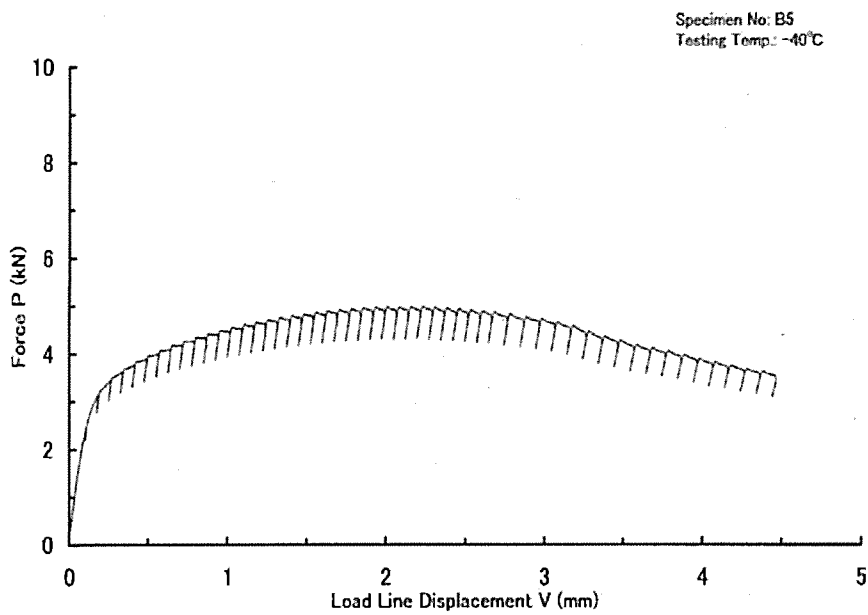
別紙 2-2 図 過時効熱処理時間と横膨出量の関係 (L、T方向)
(試験温度：-40°C)

別紙 2-2 表 MB-A3004 における破壊靱性試験結果

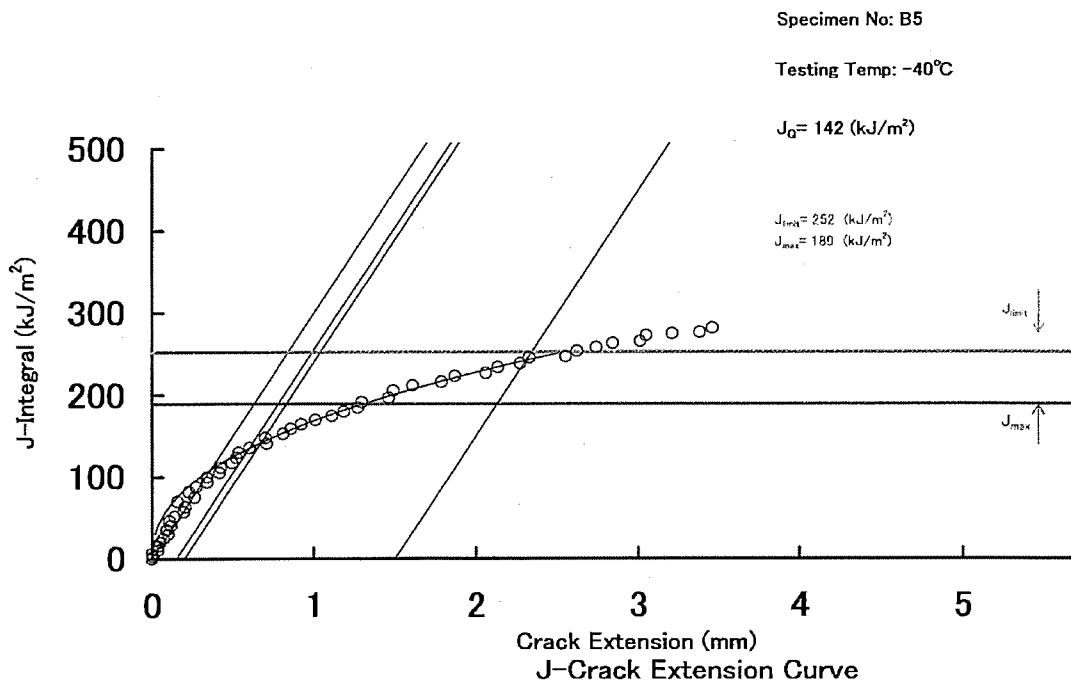
状態	供試材 符号	方向	試験 温度 (°C)	試験片寸法 (mm)				試験結果		破壊靱性値
				幅	板厚	正味 板厚	初期 き裂 長さ	最大 試験 力 (kN)	J_Q (kJ/m ²)	K_{JQ} MPa√m
完全焼 なまし 材	B	L	-40	25.4	12.7	10.16	12.7	4.46	≥ 162	≥ 118
		L	22	25.4	12.7	10.17	13.4	3.94	139	109
		L	200	25.4	12.0	9.52	13.3	2.51	≥ 118	≥ 97.3
	A	L	22	25.4	12.5	10.02	13.0	4.14	≥ 148	≥ 113
	C	L	22	25.4	12.7	10.19	12.9	4.07	126	102
初期材	B	L	-40	25.5	12.7	10.20	12.9	4.98	142	111
		L	-40	25.4	12.7	10.20	12.9	4.94	133	107
		L	25	25.4	12.7	10.20	13.0	4.73	159	116
		L	25	25.5	12.7	10.20	12.8	4.89	165	118
		L	200	25.4	12.7	10.20	12.9	4.45	> 151	—
		L	200	25.5	12.7	10.20	12.8	4.00	> 152	—



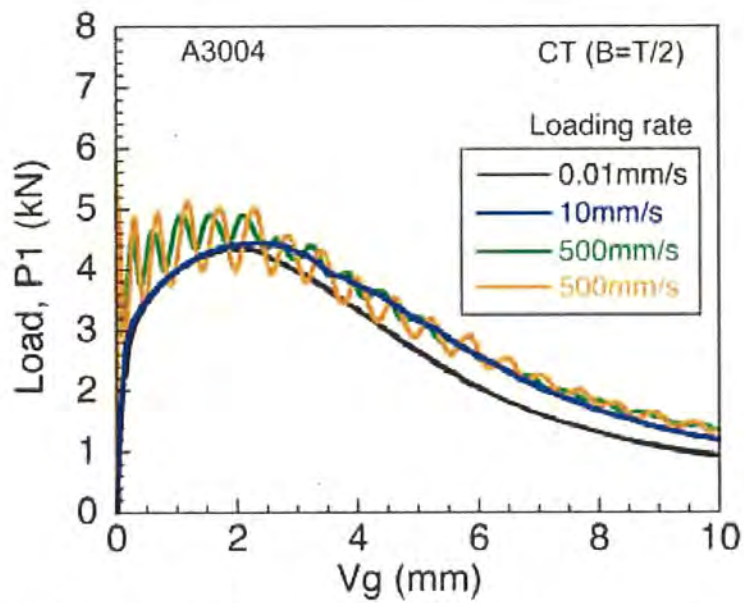
別紙 2-3 図 試験片写真 (初期材 200°C試験)



別紙 2-4 図 荷重-変位曲線 (初期材-40°C)



別紙 2-5 図 破壊靱性値 (J) -き裂進展 (初期材-40°C)



別紙 2-6 図 破壊靱性特性における負荷速度と開口変位の関係
(試験温度：常温)



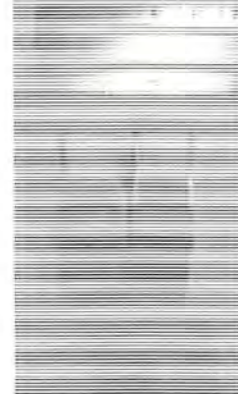
試験片



負荷速度
0.01 (mm/s)



負荷速度
10 (mm/s)



負荷速度
500 (mm/s)

別紙 2-7 図 試験片写真
(試験温度：常温)

3.2 許容欠陥寸法評価

本材料の製造方法には熱間押出法を用いている。本材料の主たる欠陥は金型との摩擦等による製造由来の傷である。そこで、一様線状の欠陥を想定し、3.1 項に示す破壊靱性値を基に、別紙 2-8 図に示す方法により許容欠陥寸法評価を行った。別紙 2-9 図に想定欠陥深さと J_Q 値との関係を示す。

別紙 2-9 図に示すとおり、想定欠陥深さ $1/2t$ (板厚の半分) 程度まで許容する結果となった。

また、バスケットプレートには各種検査に合格した材料を用いるため、許容欠陥寸法を超える欠陥を含む材料を用いることはないことから、問題ない。

- (a) 想定欠陥 : 一様深さの表面き裂 (線状欠陥)
- (b) 荷重 : 仮想的に設計降伏応力 ($S_y=57\text{MPa}(200^\circ\text{C})$) の引張応力を想定
- (c) 評価方法 : 別紙 2-8 図に示す評価式

$$J = \frac{K(a_e)^2}{E'} + \alpha \sigma_0 \epsilon_0 c (a/t) H_1 (P/P_0)^{n+1}$$

$$a_e = a + \phi \gamma_y$$

$$\gamma_y = \frac{1}{\beta \pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2$$

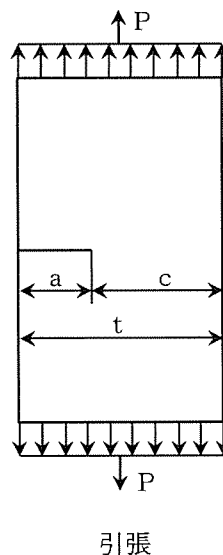
$$\phi = \frac{1}{1 + (P/P_0)^2}$$

$$\beta = \begin{cases} 2 & (\text{平面応力}) \\ 6 & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

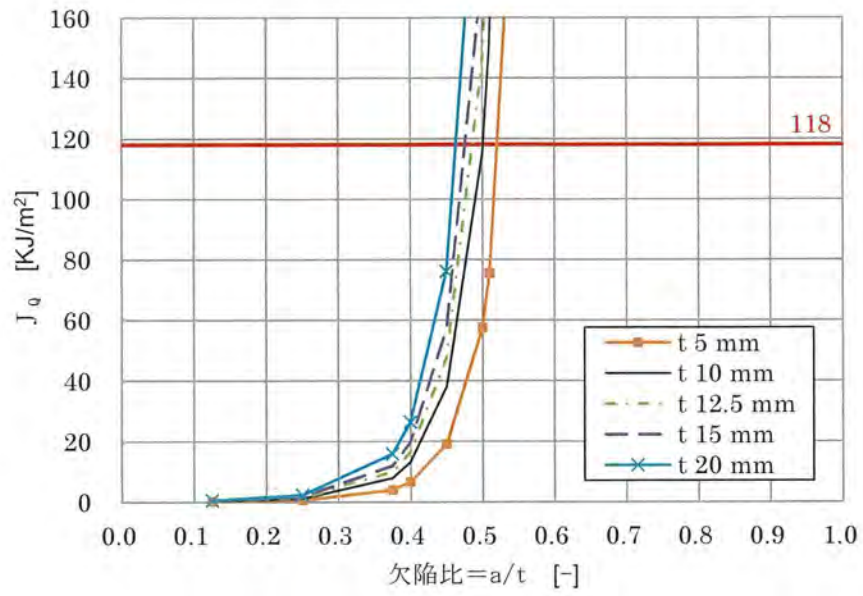
$$E' = \begin{cases} E & (\text{平面応力}) \\ E/(1-\nu^2) & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

$$P_0 = \begin{cases} 1.072 \eta c \sigma_0 & (\text{平面応力}) \\ 1.445 \eta c \sigma_0 & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

$$\eta = [1 + (a/c)^2]^{1/2} - a/c$$



別紙 2-8 図 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式⁽²⁾



別紙 2-9 図 想定欠陥深さと J_Q 値の関係

(注) 200℃試験結果（完全焼なまし材）の J_Q 値が最低値のため 118kJ/m² を設定

4. 引用文献

- (1) 小林俊郎ら、アルミニウム合金の強度、内田老鶴圃、(2001)
- (2) 小林英男ら、構造健全性評価ハンドブック、共立出版、(2005)

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

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) のクリープ特性をまとめたものである。

2. 材料特性 (クリープ特性)

2.1 材料特性 (クリープ特性)

MB-A3004 の初期材及び長時間過時効熱処理材のクリープ試験結果について、応力を下式で示されるラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) で整理した結果を別紙 3-1 図に、応力と破断時間の関係を別紙 3-2 図に示す。

$$LMP = (T + 273.15) (C + \log tr)$$

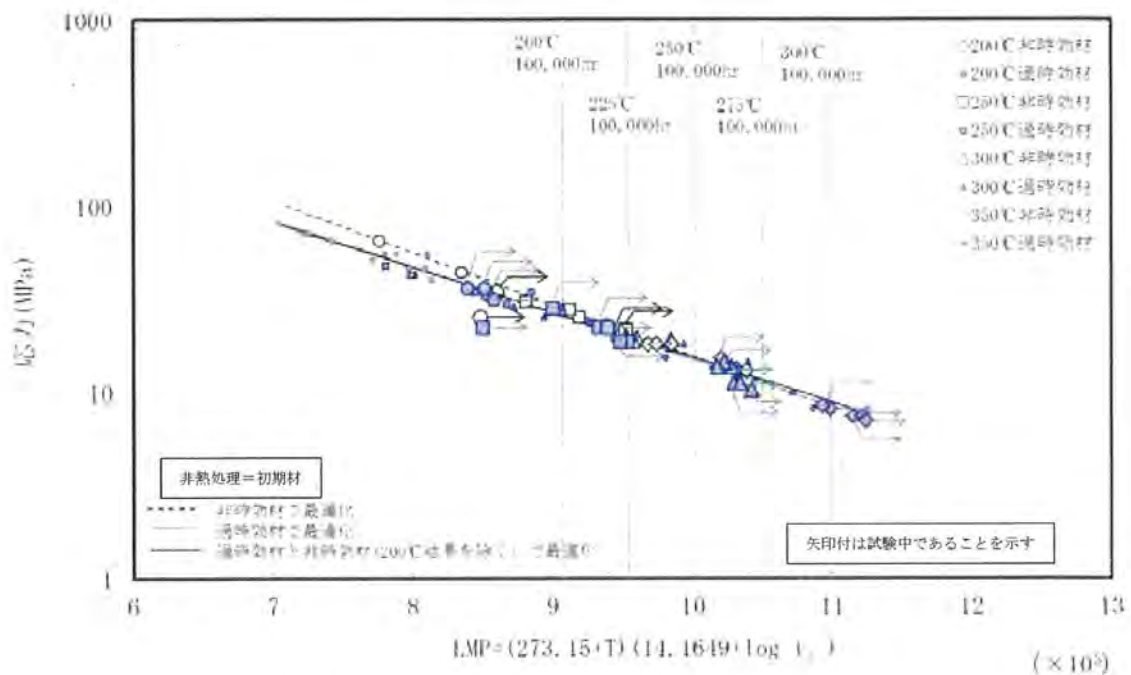
ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

T : 温度 (°C)

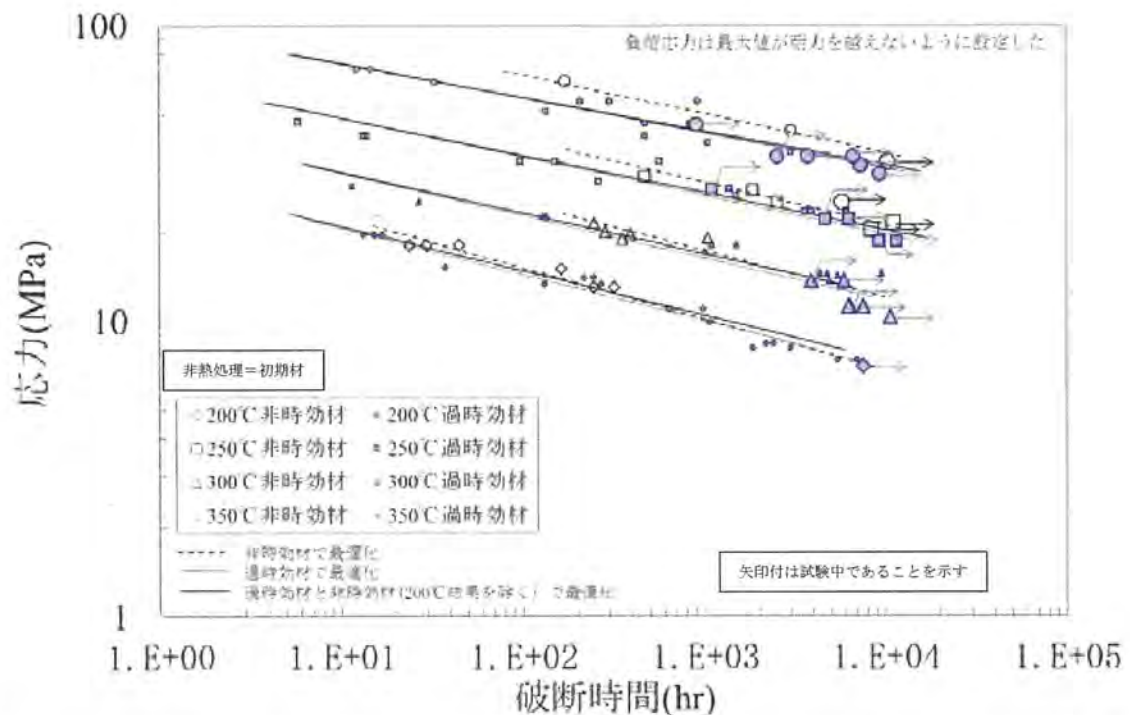
C : 定数

tr : 破断時間 (hr)

別紙 3-1 図及び別紙 3-2 図に示すとおり、初期材と長時間過時効熱処理材のクリープ試験結果が同等であることから、供用期間 (60 年間) 中においてクリープ特性の有意な変化はないと判断される。したがって、初期材の試験データを用いてクリープ特性を評価することに問題はない。



別紙 3-1 図 初期材データ（白抜）と長時間過時効材データ（青点）における応力と LMP との関係



別紙 3-2 図 初期材データ（白抜）と長時間過時効材データ（青点）における応力と破断時間との関係

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

2.2 クリープの影響

別紙 3-3 図に示すように、バスケットに適用される種々のアルミニウム合金において 0.1 から 1% 程度のクリープひずみが予め付与されている場合でも、クリープひずみが材料の機械的性質に影響を与えることはないことが報告されている。

また、別紙 3-4 図に示す MB-A3004 の応力-定常クリープ速度の関係より、保守的に初期温度 180°C が 60 年間継続すると仮定した場合のクリープひずみが 0.1% に到達するためには、以下に示すとおり 14MPa 以上の応力環境下に置かれ続ける必要がある。

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

ここで、以下のクリープ速度及び温度

$$\dot{\epsilon} = \frac{0.1}{100 \times 60 \times 365.25 \times 24}$$

$$= 1.9 \times 10^{-9} (\text{hr}^{-1})$$

$$T = 180 (\text{°C})$$

を上式に代入すると、右辺 (LMP) は、

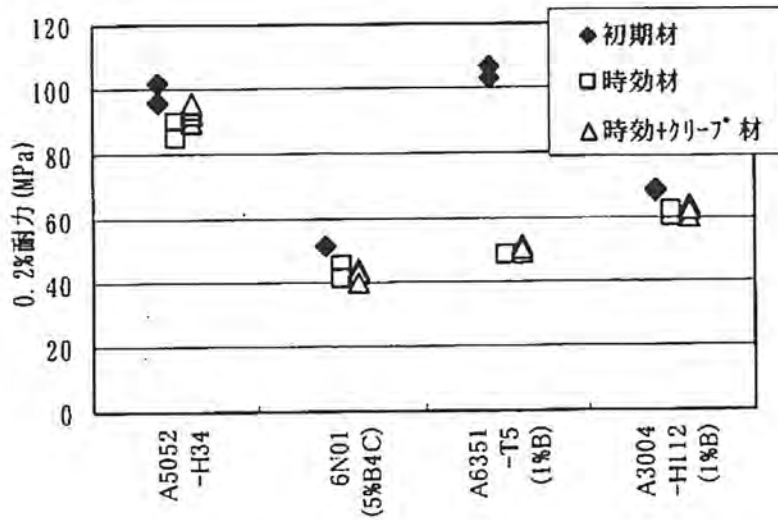
$$\text{LMP} = 9843$$

となり、

$$\sigma = 14.6 (\text{MPa})$$

となる。

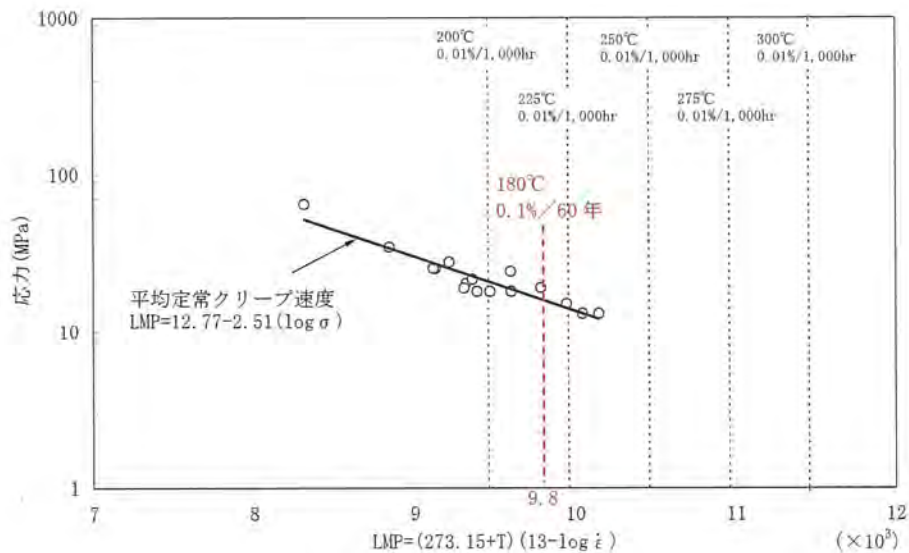
MSF-21P 型のバスケットは、複数の切り込みを施したバスケットプレートを 1 層ごとに 90° 回転させた状態で菓子折状に組立てる構造である。バスケットプレートどうしの嵌合部には組立に支障のないよう適度な隙間を有しており、また、バスケット外周部も拘束していないため、温度上昇時に熱応力が発生することはない。したがって、貯蔵期間中に考慮すべき長期荷重はバスケット自重のみであり、「添付資料 8-2-2 バスケットの応力計算書」第 2-1 表の貯蔵時の計算結果に示すように、バスケットに発生する応力は極めて小さい (1MPa 以下) ことから、クリープが設計上の制約条件とならない。



各材料のクリープ歪み量 (単位：%)

材料	クリープ歪み量
A5052-H34	0.220~0.998
A6N01 (5%B4C)	0.065~0.428
A6351-T5 (1%B)	0.105~0.340
A3004-H112 (1%B)	0.157~0.992

別紙 3-3 図 引張試験特性の比較 (0.2%耐力) (1)



別紙 3-4 図 MB-A3004 の応力-定常クリープ速度プロット例

3. 引用文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構、「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書」、(独)原子力安全基盤機構、(2004)

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

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の物性についてまとめたものである。

2. 材料特性 (物性)

MB-A3004 の初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ 及び $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ の長時間過時効熱処理材及び $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$ 保持後に 0.3°C/hr で制御冷却した完全焼なまし処理材の各物性が同等であることを確認した。また、供用期間 (60 年間) 中において縦弾性係数、熱物性及び線膨張係数について有意な物性変化が無いと判断されることから、初期材の試験結果を基にキャスク設計に適用する物性を設定することに問題は無いと判断される。

(1) 縦弾性係数

初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ 及び $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ の長時間過時効熱処理材及び $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$ 保持後に 0.3°C/hr で制御冷却した完全焼なまし処理材の縦弾性係数測定結果を別紙 4-1 図に示す。

別紙 4-1 図に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L 方向及び T 方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。

(2) 熱物性

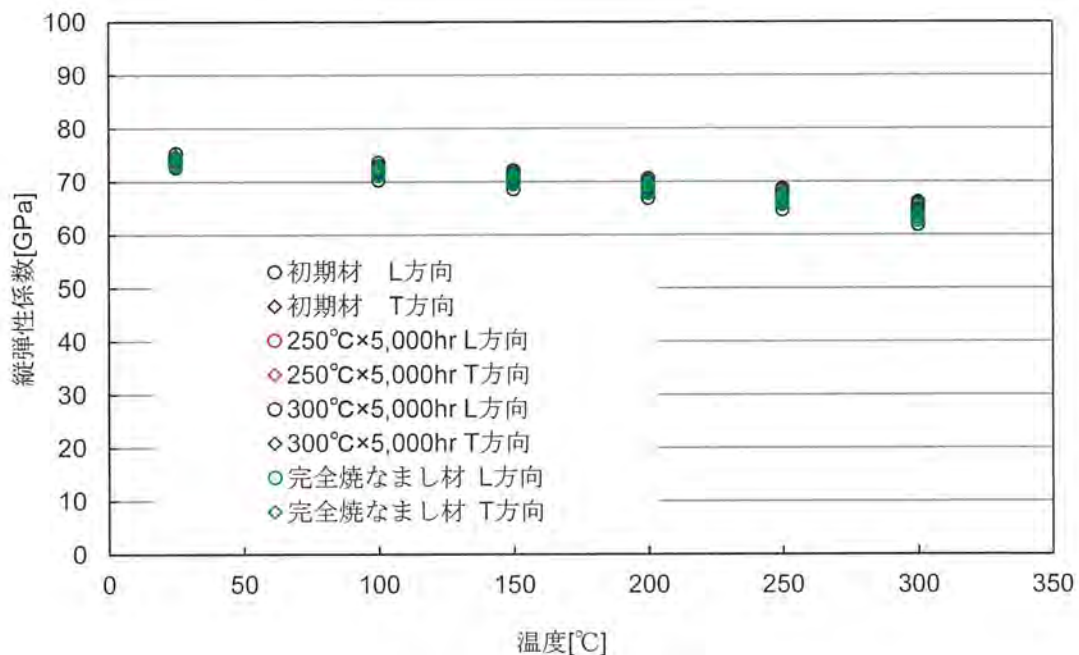
初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ 及び $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ の長時間過時効熱処理材及び $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$ 保持後に 0.3°C/hr で制御冷却した完全焼なまし処理材の熱物性試験結果について、比熱を別紙 4-2 図に、熱拡散率を別紙 4-3 図に、熱伝導率を別紙 4-4 図に示す。

別紙 4-2 図から別紙 4-4 図に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L 方向及び T 方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。

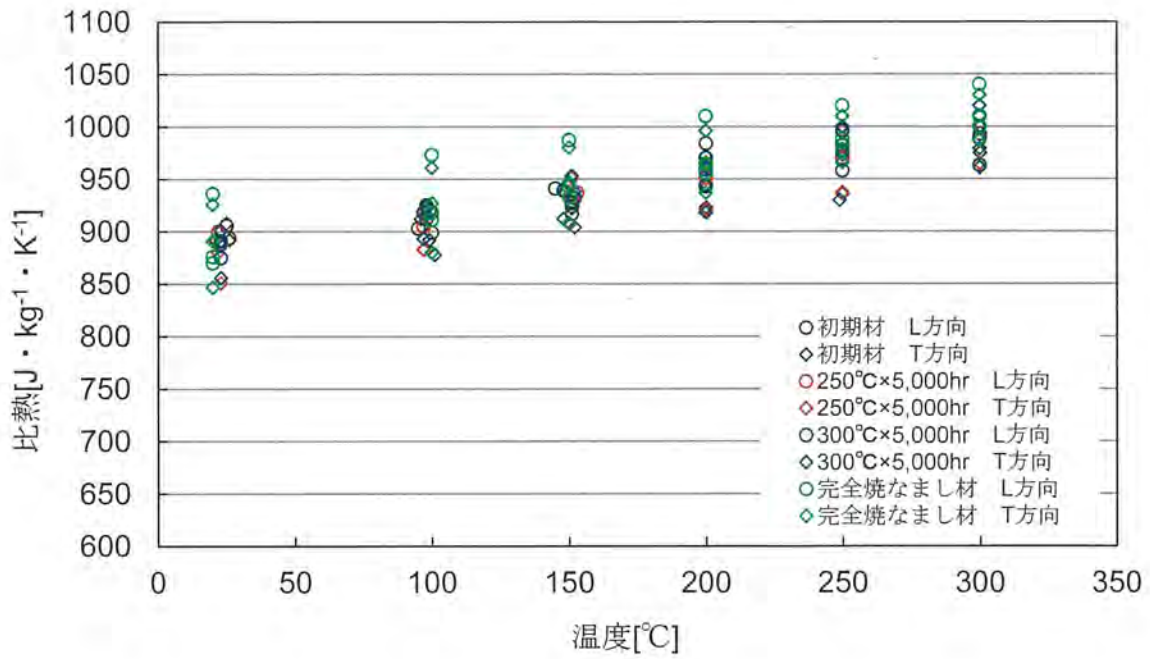
(3) 線膨張係数

初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ 及び $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$ の長時間過時効熱処理材及び $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$ 保持後に 0.3°C/hr で制御冷却した完全焼なまし処理材の線膨張係数試験結果を別紙 4-1 表に示す。

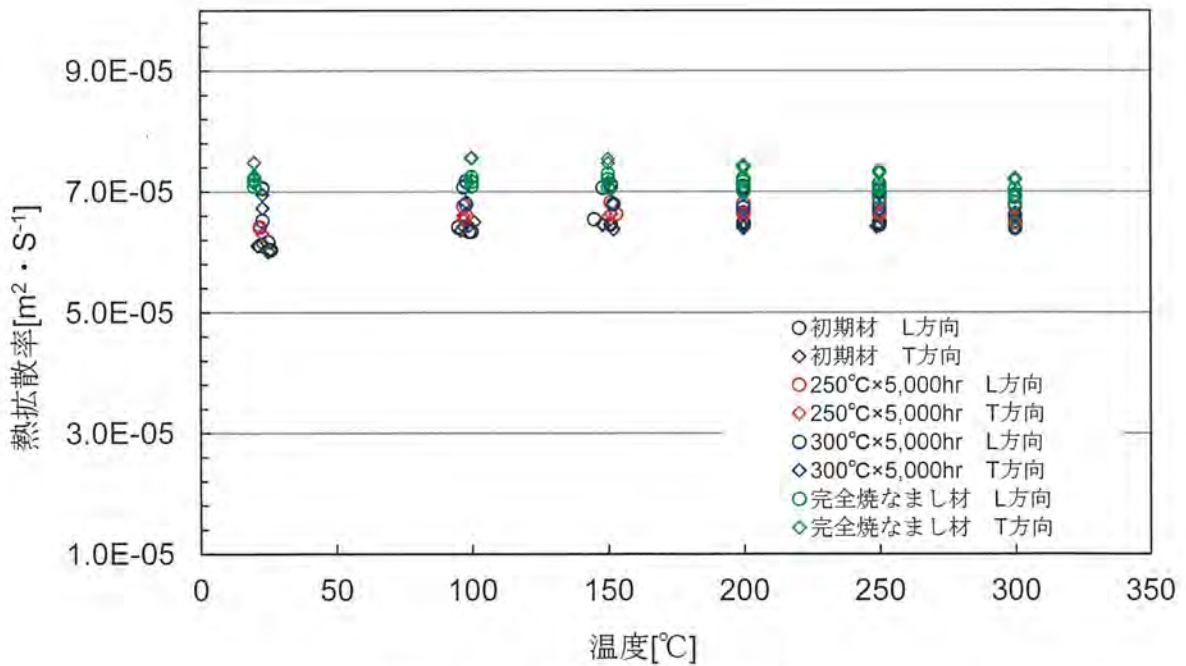
別紙 4-1 表に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L方向及びT方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。



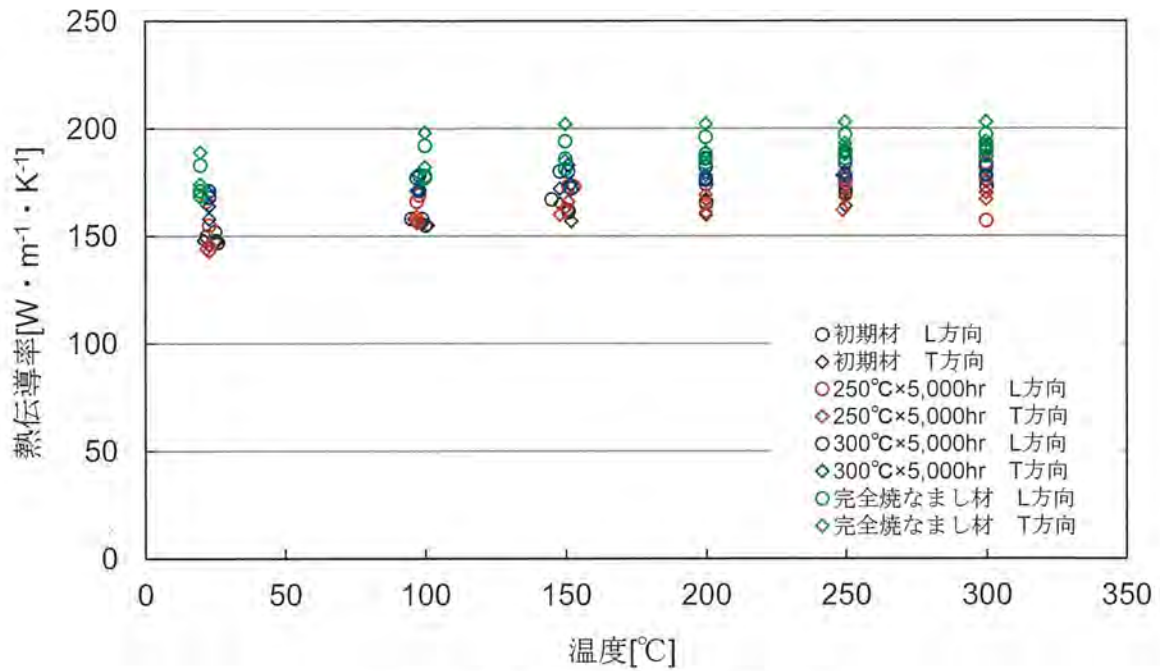
別紙 4-1 図 各温度における縦弾性係数



別紙 4-2 図 各温度における比熱



別紙 4-3 図 各温度における熱膨散率



別紙 4-4 図 各温度における熱伝導率

別紙 4-1 表 MB-A3004 の各温度における線膨張係数 (注1)

(単位: 1/°C)

温度 (°C)	初期材	長時間過時効 熱処理材 250°C×5,000hr	長時間過時効 熱処理材 300°C×5,000hr	完全焼なまし材 520°C×10hr 保持、 0.3°C/hr 冷却
50	23.13×10^{-6}	23.13×10^{-6}	23.03×10^{-6}	—
100	23.76×10^{-6}	23.77×10^{-6}	23.73×10^{-6}	23.33×10^{-6}
150	24.16×10^{-6}	24.17×10^{-6}	24.10×10^{-6}	23.73×10^{-6}
200	24.46×10^{-6}	24.47×10^{-6}	24.40×10^{-6}	24.07×10^{-6}
250	24.80×10^{-6}	24.80×10^{-6}	24.67×10^{-6}	24.37×10^{-6}
300	25.23×10^{-6}	25.23×10^{-6}	25.03×10^{-6}	24.73×10^{-6}

(注1) 常温から各温度までの平均線膨張係数を示す。

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

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の製造管理についてまとめたものである。

2. 製造管理について

MB-A3004 は、JIS H 4100 等の関連規格を参照し、別紙 5-1 表に示す製造管理項目リストに従い、安定した品質となるよう管理し、製造している。

別紙 5-1 表 MB-A3004 の製造管理項目

工程		細目	工程管理項目	検査項目	管理程度 (注1)			
概要	検査項目				材料保証	製造管理		
①	合金溶解 ピレット成型 (铸造)	溶解/検査	成分分析	化学組成	○	—		
		铸造	—	外觀、寸法	—	○		
②	熱間 押出 製造条件	押出条件	押出比	押出比	○	—		
			ピレット温度	ピレット温度	—	○		
			金型温度	金型温度	—	○		
			押出速度	押出速度	—	○		
			押出圧力	押出圧力	—	○		
			押出材冷却条件 (自然放冷)	押出材冷却条件 (自然放冷)	—	○		
			引き代	引き代	—	○		
③	切断・加工	検査	質別	質別	○	—		
			寸法	寸法	—	○		
			検査	—	寸法、外觀	—	○	
			試験片採取	採取位置と採取数	採取位置と採取数	—	○	
			製品加工	加工条件	—	—	○	
			梱包	マーキング	マーキング	—	○	
			製品検査	—	寸法、外觀、員数	—	○	
④	検査	材料特性 (初期材)	非破壊検査 (必要に応じ)	欠陥	—	○		
				引張試験	引張試験	0.2%耐力、引張強さ、伸び 絞り	—	○
				材料試験	シヤルピロー衝撃試験	吸収エネルギー	—	○
				組織試験	組織試験	横膨出量、衝撃値	—	○
				—	—	—	—	○

(注1) メーカー自主管理項目を含む。

添付書類 8-2-5 バスケットの設計基準値

目次

1. 概要	1
2. バスケットの構造、材料及び使用環境	2
3. 設計基準の設定方針	3
4. 設計基準の設定根拠	8
4.1 供用状態A	8
4.2 供用状態B	9
4.3 供用状態C	9
4.4 供用状態D	10

図表目次

第 3-1 表	MSF-21P 型のバスケット設計に適用する設計基準	4
第 3-2 表	一次一般膜応力強さに対する設計基準	5
第 3-3 表	一次一般膜＋一次曲げ応力強さに対する設計基準	5
第 3-4 表	一次＋二次応力に対する設計基準	6
第 3-5 表	せん断応力に対する設計基準	6
第 3-6 表	支圧応力に対する設計基準	7
第 3-7 表	圧縮応力に対する設計基準	7
第 4-1 図	供用状態 A 及び B における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界	12
第 4-2 図	曲げ荷重作用時の断面応力分布模式図	12
第 4-3 図	降伏点を超える場合のひずみ履歴	13
第 4-4 図	供用状態 C における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界	13
第 4-5 図	限界細長比と座屈限度（許容圧縮荷重又は座屈耐力）の関係	14
第 4-6 図	矩形梁の究極強さ及び各供用状態の設計基準	15
第 4-7 図	矩形梁の究極強さ及び MSF-21P 型の特別規定の設計基準	15

1. 概要

金属製の乾式キャスク（以下「キャスク」という。）は、貯蔵時、取扱い時及び地震時、さらに輸送法令に定める通常輸送時、BM型輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下を含め技術的に想定されるいかなる場合においても、使用済燃料の臨界を防止することを含めた4つの基本的安全機能の維持が求められる。

キャスクを構成する要素のうちバスケットは、キャスク内に配置され、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する機能を有するとともに、使用済燃料を支持し、かつ燃料間距離を保つことにより、使用済燃料の支持機能及び臨界防止機能を併せ持つ構成要素である。

本書は、上記の機能を考慮したMSF-21P型のバスケットの設計基準の設定根拠についてまとめたものである。

2. バスケットの構造、材料及び使用環境

MSF-21P 型のバスケットは、本文中の第 1 図に示すようにアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) 製の断面形状が中空状のバスケットプレートで構成されており、設計貯蔵期間 (60 年以下) を通じて使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するためにバスケット格子の構造健全性を保つ必要がある。

MSF-21P 型のバスケットは、貯蔵期間中、ヘリウム雰囲気で使用され、最高使用温度約 180°C から徐々に温度が低下し、最大 60 年の熱負荷を受ける。

バスケットの耐食性については、「添付書類 8-5 金属キャスクの耐食性に関する説明書」に示す。

3. 設計基準の設定方針

使用済燃料貯蔵施設規格（金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007）（日本機械学会 2007 年 12 月）（以下「構造規格」という。）では、過度の変形・破損を生じて臨界に至らしめないことを目標として、バスケットの設計基準が定められている。

MSF-21P 型のバスケットの設計基準としては、構造規格のバスケットの考え方を基本とし、クリープ特性を無視できない温度領域で使用することから、クリープを考慮した発電用原子力設備規格（設計・建設規格 < 第 II 編 高速炉規格 > JSME S NC2-2005）（日本機械学会 2005 年 9 月）（以下「高速炉規格」という。）の規定の考え方を取り入れることとした。さらに、技術的に想定されるいかなる場合においても使用済燃料が臨界に達することを防止するため、落下等の衝撃荷重が作用した場合においても、バスケット格子に未臨界体系に影響する塑性変形が残らないよう、MSF-21P 型の特別規定を設けることとした。

具体的には、供用状態 A、B、C 及び D に対応してバスケットが維持すべき安全機能の観点から設計基準をそれぞれ設定した。MSF-21P 型のバスケットの設計基準の設定方針及び設計基準を第 3-1 表に示すとともに、設計基準の設定根拠を 4 章に示す。

なお、アルミニウム合金は、長時間高温で使用されるので過時効特性（熱劣化に伴う強度低下）の考慮が必要であるが、「添付書類 8-2-3 バスケットプレート用材料 アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書」に示された材料規定の設定において過時効効果を十分に考慮しているため、設計基準での考慮は不要である。

設計基準の設定においては、構造規格のバスケット及び密封容器の設計基準、並びに発電用原子力設備規格（設計・建設規格 < 第 I 編 軽水炉規格 > JSME S NC1-2005）（日本機械学会 2005 年 9 月）（2007 年追補版含む）（以下「設計・建設規格」という。）の炉心支持構造物の設計基準を参考として比較した。それぞれの設計基準を第 3-2 表から第 3-7 表に示す。第 3-2 表から第 3-7 表に示すとおり、MSF-21P 型のバスケットの設計基準は、構造規格のバスケット及び密封容器、並びに設計・建設規格の炉心支持構造物の設計基準と同等又は保守的な基準となっている。

第 3-1 表 MSF-21P 型のバスケット設計に適用する設計基準

供用状態		A		B	C		D	
評価事象	貯蔵施設内	貯蔵時	吊上げ時	衝撃荷重作用時	貯蔵時 (S_d *相当地震力が作用する場合)		貯蔵時 (S_s 相当地震力が作用する場合)	
	輸送時	—	通常輸送時	0.3m落下等	—		9m落下等	
設計基準の設定方針	・クリープによる破断及び変形の進展を防止		・短期荷重による表面塑性を防止 (変形を防止)		・短期荷重による全断面降伏を防止 (形状を維持)		・短期荷重による破断を防止	
	<説明> 本事象は、長期荷重がバスケット格子へ作用する事象である。 MSF-21P 型のバスケットは、クリープ特性を無視できない温度領域で使用することから、クリープ破断及びクリープ変形を防止するよう設計基準を設定する。		<説明> 本事象は、通常使用状態又は繰り返し作業による荷重(短期繰り返し荷重)がバスケット格子へ作用する事象である。 本事象では、未臨界機能維持のため、バスケット格子形状の変形を防止するよう設計基準を設定する。		<説明> 本事象は、設計評価期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。 本事象では、未臨界機能維持のため、バスケット格子形状が維持されるよう設計基準を設定する。		<説明> 本事象は、設計評価期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。 本事象では、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、基本的安全機能を著しく損なうことが無いよう、バスケット格子の破断を防止するよう設計基準を設定する。	
設計基準	$P_m \leq S$ $P_m + P_b \leq K_0 S$ $\tau \leq 0.6 S$ $\sigma_p \leq S$ $\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$ $\epsilon_c \leq 0.001^{(注4)}$	4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1)	$P_m \leq S_m$ $P_m + P_b \leq \alpha S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5 S_m$ $\tau \leq 0.6 S_m$ $\sigma_p \leq S_y (1.5 S_y)^{(注1)}$ $\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.1(3) 4.1(3) 4.1(4) 4.1(3) 4.1(3) 4.1(5) 4.1(5)	$P_m \leq 1.2 S_m$ $P_m + P_b \leq 1.2 \alpha S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5 S_m$ $\tau \leq 0.9 S_m$ $\sigma_p \leq 1.5 S_y (2.25 S_y)^{(注1)}$ $\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.3(1) 4.3(1) 4.3(2) 4.3(3) 4.3(4) 4.3(5) 4.3(5)	$P_m \leq 2/3 S_u$ $P_m + P_b \leq 2/3 \alpha S_u$ $P_m + P_b + Q \leq 3 S_m$ $\tau \leq 1.2 S_m$ $\sigma_p \leq 2 S_y (3 S_y)^{(注1)}$ $\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^{*(注3)}$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.4(1) 4.4(1) 4.4(2) 4.4(3) 4.4(4) 4.4(5) 4.4(5)
MSF-21P 型 特別規定					バスケット格子の塑性変形を防止 (設計降伏点以下) ^(注2)	4.3(1)	バスケット格子の塑性変形を防止 (設計降伏点以下) ^(注2)	4.4(1)

S_m : 設計応力強さ、 S_u : 設計引張強さ、 S_y : 設計降伏点、 S : 許容引張応力、 P_m : 一次一般膜応力、 P_b : 一次曲げ応力、 Q : 二次応力、 τ : 平均せん断応力、

σ_p : 平均支圧応力、 σ_c : 圧縮応力、 f_c 及び f_c^* : 許容圧縮応力 (S_y 又は S_u の関数)、 ϵ_c : 長期荷重によるクリープひずみ

K_0 : $K_0 = 1 + k_s (1 - P_m/S)$ 、 k_s : $k_s = 0.5(\alpha - 1)$

α : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

(注1) () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

(注2) MSF-21P 型では、供用状態 C 及び D において未臨界機能維持の重要性を考慮し、設計降伏点以下を適用。

(注3) f_c^* の値は、 f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2 S_y$ と読み替えて算出した値。

(注4) MSF-21P 型のバスケットにおけるクリープひずみ評価は別紙 1 参照。

第3-2表 一次一般膜応力強さに対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	S	—	—	—
A (吊上げ時) B	S_m	S_m	S_m	S_m
C	$1.2 S_m$	$1.5 S_m$	MIN[S_y 、 $2/3 S_u$] ^(注1) $1.2 S_m$ ^(注2)	$1.5 S_m$
D	$2/3 S_u$	$2/3 S_u$ ^(注1) MIN[$2.4 S_m$ 、 $2/3 S_u$] ^(注2)	$2/3 S_u$ ^(注1) MIN[$2.4 S_m$ 、 $2/3 S_u$] ^(注2)	$2/3 S_u$ ^(注1) MIN[$2.4 S_m$ 、 $2/3 S_u$] ^(注2)

(注1) オーステナイト系ステンレス鋼以外の材料の場合

(注2) オーステナイト系ステンレス鋼の材料の場合

第3-3表 一次一般膜＋一次曲げ応力強さに対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$K_0 S$	—	—	—
A (吊上げ時) B	αS_m	$1.5 S_m$	αS_m	$1.5 S_m$
C	$1.2 \alpha S_m$	$2.25 S_m$	MIN[αS_y 、 $2/3 \alpha S_u$] ^(注1) $1.2 \alpha S_m$ ^(注2)	$2.25 S_m$
D	$2/3 \alpha S_u$	S_u ^(注1) MIN[$3.6 S_m$ 、 S_u] ^(注2)	$2/3 \alpha S_u$ ^(注1) MIN[$2.4 \alpha S_m$ 、 $2/3 \alpha S_u$] ^(注2)	S_u ^(注1) MIN[$3.6 S_m$ 、 S_u] ^(注2)

α : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

K_0 : $K_0 = 1 + k_s (1 - P_m / S)$ 、 k_s : $k_s = 0.5 (\alpha - 1)$

(注1) オーステナイト系ステンレス鋼以外の材料の場合

(注2) オーステナイト系ステンレス鋼の材料の場合

第3-4表 一次+二次応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$\varepsilon_c \leq 0.001$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$1.5 S_m$	$3 S_m$	$3 S_m$	$3 S_m$
C	$1.5 S_m$	—	$3 S_m^{(注1)}$	—
D	$3 S_m$	—	$3 S_m^{(注1)}$	—

(注1) 短期繰り返し荷重(地震力を想定)のみによる応力振幅について評価する。

第3-5表 せん断応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$0.6 S$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$
C	$0.9 S_m$	$0.9 S_m$	$0.6 S_m$	$0.9 S_m$
D	$1.2 S_m$	$1.2 S_m$	$0.4 S_u$	$1.2 S_m$

第3-6表 支圧応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	S	—	—	—
A (吊上げ時) B	S_y ($1.5 S_y$)	S_y ($1.5 S_y$)	S_y ($1.5 S_y$)	S_y ($1.5 S_y$)
C	$1.5 S_y$ ($2.25 S_y$)	$1.5 S_y$ ($2.25 S_y$)	S_y ($1.5 S_y$)	$1.5 S_y$ ($2.25 S_y$)
D	$2 S_y$ ($3 S_y$)	$2 S_y$ ($3 S_y$)	S_u ($1.5 S_u$)	$2 S_y$ ($3 S_y$)

(注1) () 内は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

第3-7表 圧縮応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	— $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq \text{MIN}[S_m, B]$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$
C	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq \text{MIN}[1.2 S_m, 1.2 B]$ —	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ —
D	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq \text{MIN}[1.5 S_m, 1.5 B]$ —	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ —

(注1) f_c^* の値は、 f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2 S_y$ と読み替えて算出した値。

(注2) Bは、構造規格の別図により求めた値。

4. 設計基準の設定根拠

4.1 供用状態A

供用状態Aは、貯蔵時及び吊上げ時が該当し、長期的な荷重又は吊上げ時の衝撃荷重が作用する状態である。貯蔵時は、長期荷重がバスケット格子へ作用する事象である。吊上げ時は、通常使用状態又は繰り返し作業による荷重（短期繰り返し荷重）がバスケット格子へ作用する事象である。

これらの事象に対しては、長期荷重に対してクリープによる破断及び変形の進展を防止、また、短期荷重に対しては表面塑性を防止するよう基準を設定する。

- (1) 長期荷重による一次一般膜応力 (P_m)、一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)、せん断応力 (τ)、支圧応力 (σ_p) 及び圧縮応力 (σ_c)

長期荷重による一次一般膜応力 (P_m)、一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)、せん断応力 (τ) 及び支圧応力 (σ_p) に対しては、クリープ強度を考慮した許容値として許容引張応力 S に基づく設計基準を採用した。なお、MSF-21P 型のバスケットにおいて、係数 K_0 は 1.0 を適用した。

長期荷重による圧縮応力 (σ_c) に対しては、構造規格の MCD-2000 (バスケット) と同様の設計基準を採用した。

- (2) 長期荷重によるクリープひずみ (ε_c)

長期荷重によるクリープひずみ (ε_c) に対しては、「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」別紙 3 に示す通り材料特性に影響のない範囲のクリープひずみとして、十分な裕度を考慮して 0.1% を設計基準とする。

- (3) 長期＋短期荷重による一次一般膜応力 (P_m)、一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)、せん断応力 (τ)、支圧応力 (σ_p) 及び圧縮応力 (σ_c)

長期＋短期荷重による一次一般膜応力 (P_m)、一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)、せん断応力 (τ)、支圧応力 (σ_p) 及び圧縮応力 (σ_c) に対しては、クリープ支配ではないことから、設計応力強さ S_m に基づく設計基準を採用した。設計応力強さ S_m に基づく設計基準は、構造規格の MCD-2000 (バスケット) と同様である。ただし、一次一般膜＋一次曲げ応力に対しては、バスケットプレートの断面形状が中空状であることを考慮し、構造規格の MCD-1000 (密封容器) と同様に係数として α (純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値) を適用した。なお、MSF-21P 型のバスケットについては、評価位置①、②及び③における α はそれぞれ 1.0、1.26 及び 1.30 を適用した。

供用状態Aにおいて、引張荷重と曲げ荷重が同時に作用した時の部材を単純な矩形断面梁と仮定した設計限界との関係を第4-1図に示す。同図に示すとおり、崩壊応力に対して、 P_m については安全率を1.5とし、 $P_m + P_b$ に対しては安全率が一定ではないものの、十分安全側に設計限界を定めている。ここで、崩壊応力とは、第4-2図(c)に示すように塑性領域が全断面に発達し、崩壊に至る応力である。

(4) 長期+短期荷重による一次+二次応力 ($P_m + P_b + Q$)

長期+短期荷重による一次+二次応力 ($P_m + P_b + Q$) に対しては、第4-3図(a)に示すように、 $1.5 S_m (= S_y)$ を設計基準とし、弾性挙動に制限した。

(5) 長期+短期荷重による圧縮応力 (σ_c)

長期+短期荷重による圧縮応力の評価は、構造規格のMCD-2317に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度の関係を第4-5図に示す。供用状態Aにおいて、圧縮応力に対する設計基準 (f_c) は、座屈耐力 (σ_{cr}) に対して安全率 ν をとったものとした。なお、MSF-21P型のバスケットにおいて、安全率 ν は約1.5である。

4.2 供用状態B

供用状態Bは、衝撃荷重作用時や0.3m落下が該当する。本事象は、通常使用状態又は繰り返し作業による荷重（短期繰り返し荷重）がバスケット格子へ作用する事象である。

この事象に対しては、短期荷重に対して表面塑性を防止するよう基準を設定することとし、供用状態Aの長期+短期荷重時と同じ設計基準とした。

4.3 供用状態C

供用状態Cは、 S_d *相当地震力がバスケット格子へ作用する事象であり、本事象は、設計評価期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。

この事象に対しては、臨界機能維持のため、バスケット格子形状が維持されるよう、短期荷重による全断面降伏を防止するための設計基準を設定するものとする。さらに、MSF-21P型のバスケットに対しては、バスケット格子の塑性変形を防止するための設計基準も設定した。

(1) 一次一般膜応力 (P_m) 及び一次一般膜+一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)

一次一般膜応力 (P_m) 及び一次一般膜+一次曲げ応力 ($P_m + P_b$) の設計基準は、供用状態A及びBと同様に S_m をベースとした。その割増係数は、構造規格のMCD-1311.2（密封容器）とMCD-2313（バスケット）の値とを比較し、より保守的に1.2を採用した。供用状態Cにおいて、引張荷重と曲げ荷重が同時に作用した時の部材を単純な矩形断面梁

と仮定した設計限界との関係を第 4-4 図に示す。同図に示すとおり、崩壊応力に対して、 P_m については安全率を 1.25 とし、 $P_m + P_b$ に対しては安全率が一定ではないが、十分安全側に設計限界を定めており、バスケット格子が全断面降伏することはない。

さらに、MSF-21P 型のバスケットプレートの断面形状が中空状であることから、一次一般膜+一次曲げ応力に対しても梁が塑性変形しないように、降伏応力 S_y とする設計基準を追加した。

(2) 一次+二次応力 ($P_m + P_b + Q$)

一次+二次応力 ($P_m + P_b + Q$) の評価については、供用状態 A 及び B と同様に第 4-2 図(a)に示すように、 $1.5 S_m (= S_y)$ を設計基準とし、弾性挙動に制限した。

(3) 平均せん断応力 (τ)

平均せん断応力に対する設計基準としては、構造規格の MCD-2315 (バスケット) に基づき、供用状態 A 及び B に対する設計基準の 1.5 倍である $0.9 S_m$ とした。これは、せん断ひずみエネルギー説に基づく降伏条件 (ミーゼスの降伏条件) に従うと、引張応力とせん断降伏応力との比は $1:1/\sqrt{3}$ であることから、平均せん断応力の設計基準は、 $0.6 (=1/\sqrt{3}) S_m$ の 1.5 倍である $0.9 S_m$ となる。

(4) 平均支圧応力 (σ_p)

平均支圧応力に対する設計基準も構造規格と同様に供用状態 A 及び B に対する設計基準の 1.5 倍である $2.25 S_y$ (支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合) 又は $1.5 S_y$ (それ以外の場合) を適用した。

(5) 圧縮応力 (σ_c)

圧縮荷重の評価は、構造規格の MCD-2317 に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度 (許容圧縮荷重又は座屈耐力) の関係を第 4-5 図に示す。供用状態 C における圧縮応力に対する設計基準 ($1.5 f_c$) は、同図に示すとおり座屈耐力以内であることから、バスケット格子形状は維持可能である。

4.4 供用状態 D

供用状態 D は、 S_s 相当地震力が作用する場合又は 9 m 落下時である。本事象は、設計評価期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。

この事象に対しては、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、基本的安全機能を著しく損

なうことが無いよう、バスケット格子の破断を防止するよう設計基準を設定する。さらに、MSF-21P型のバスケットでは、保守側の評価とすべく、バスケット格子の塑性変形を防止するための特別規定も設けている。

(1) 一次一般膜応力 (P_m) 及び一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)

究極状態である供用状態Dにおける一次一般膜応力 (P_m) 及び一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$) の設計基準は、構造規格の MCD-2324 (バスケット) に従い、材料の究極強度である設計引張強さ S_u をベースとした。参考として、究極強さと各供用状態の設計基準との関係を第 4-6 図に示す。同図に示すとおり、供用状態Dにおいては、 $P_m + P_b$ に対する設計基準 S_u は、究極強さに対して余裕がなくなる。そこで、MSF-21P 型の特別規定として、降伏応力 S_y とする設計基準を追加し、究極強さに対して十分な安全率を確保するとともに、断面形状が中空状であるバスケットプレートの塑性変形を防止する。究極強さと MSF-21P 型の特別規定として設定した設計基準との関係を第 4-7 図に示す。

(2) 一次＋二次応力 ($P_m + P_b + Q$)

一次＋二次応力 ($P_m + P_b + Q$) の評価については、第 4-3 図(b)に示す $3S_m (=2S_y)$ を設計基準とし、変形が累積しないよう制限した。

(3) 平均せん断応力 (τ)

平均せん断応力 (τ) に対する設計基準は、構造規格の MCD-2315 (バスケット) に基づき供用状態A及びBの $0.6S_m$ の2倍である $1.2S_m$ とした。

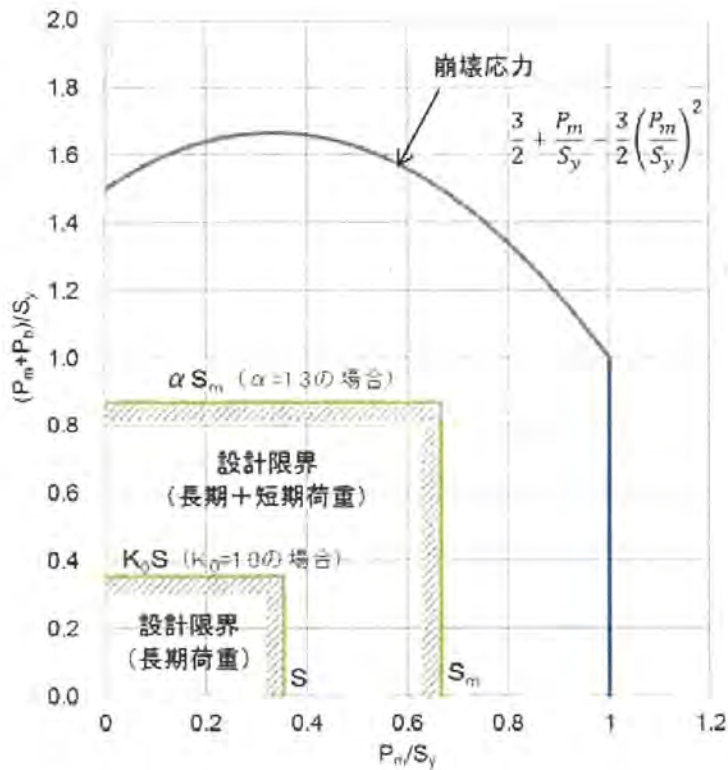
(4) 平均支圧応力 (σ_p)

平均支圧応力に対する設計基準 (σ_p) は、構造規格の MCD-2316 (バスケット) に基づき供用状態A及びBの S_y の2倍である $2S_y$ とした。

(5) 圧縮応力 (σ_c)

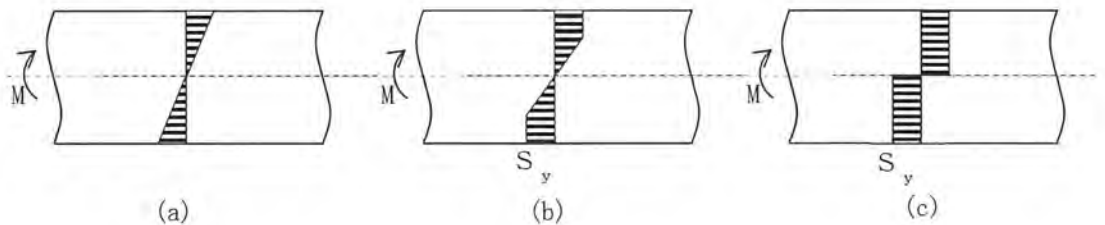
圧縮荷重の評価は、構造規格の MCD-2317 に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

なお、供用状態Dの荷重は事故時の衝撃荷重が主でひずみ速度が大であること及び通常材料の実降伏点は設計値に対して余裕があることを考慮して、圧縮応力 (一次) の f_c の値を算出する際は、 S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替える。



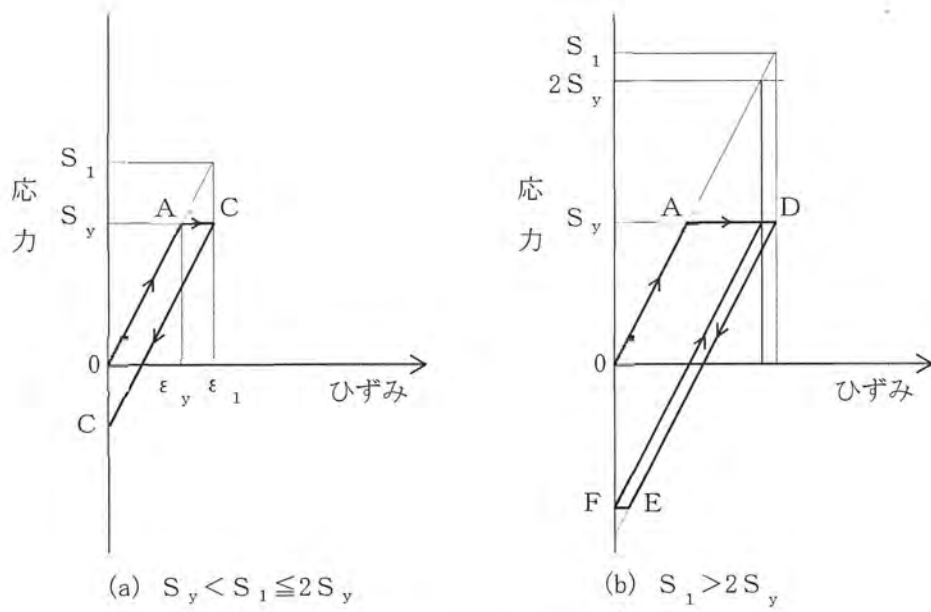
(注) 長期荷重の設計限界は、使用温度 180℃における設計降伏点 S_y と許容引張応力 S との比とした。

第 4-1 図 供用状態 A 及び B における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

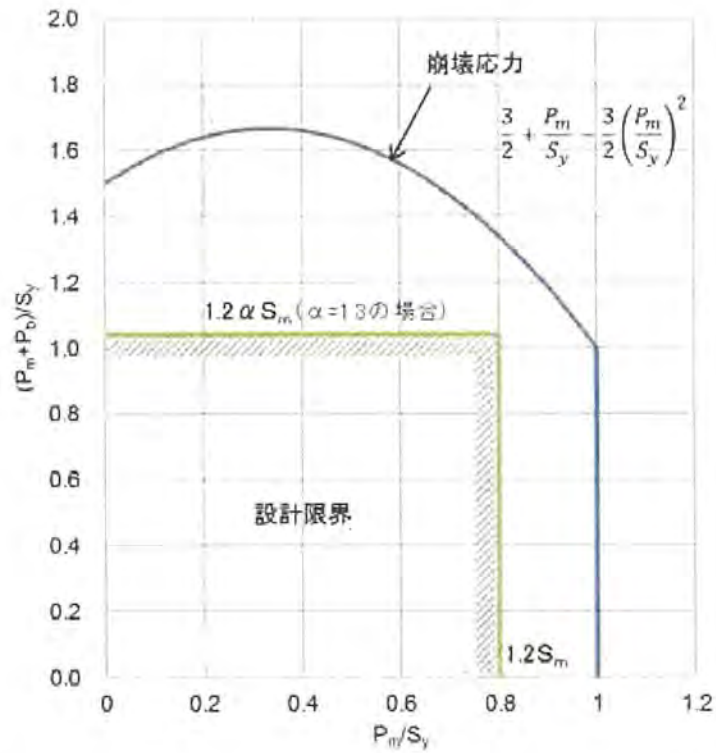


- (a) の場合は、応力は中心軸からの距離及び曲げモーメントの大きさに比例し増大する。
- (b) の場合は、材料の表面が降伏点に達し、塑性領域が断面の内部へと進行してくる。
- (c) の場合は、塑性領域が全断面に発達し、崩壊に至る。

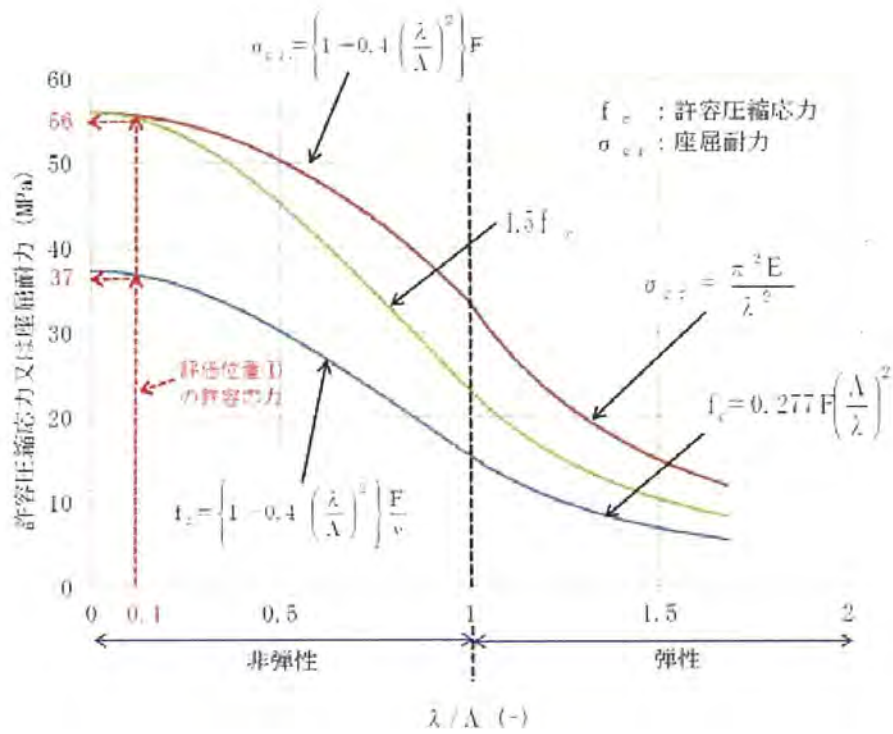
第 4-2 図 曲げ荷重作用時の断面応力分布模式図



第 4-3 図 降伏点を超える場合のひずみ履歴

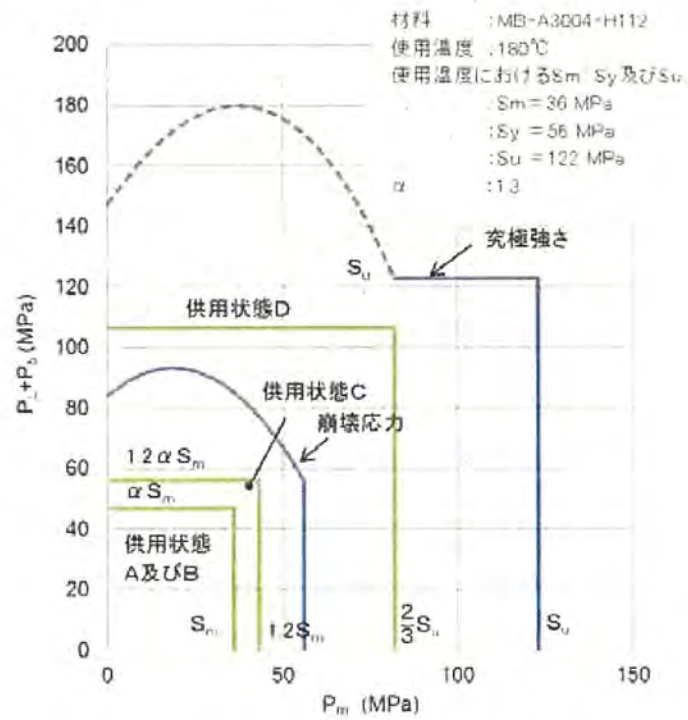


第 4-4 図 供用状態 C における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

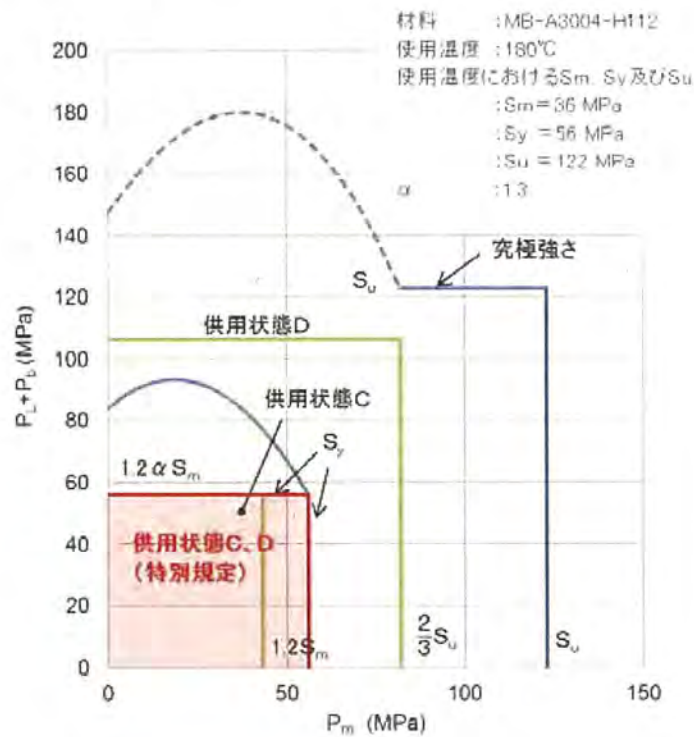


λ / Λ	0~1 (非弾性座屈範囲)	1~ (弾性座屈領域)
項目		
許容圧縮応力 f_c	$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$	$f_c = 0.277 F \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$
座屈耐力 σ_{cr}	$\sigma_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F$	$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$

第 4-5 図 限界細長比と座屈限度（許容圧縮荷重又は座屈耐力）の関係



第 4-6 図 矩形梁の究極強さ及び各供用状態の設計基準



第 4-7 図 矩形梁の究極強さ及び MSF-21P 型の特別規定の設計基準