

資料 1-2

Doc No. MA035B-SC-Z01 rev.5

2023 年 2 月 1 日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-1

バスケット用アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）について

目次

1. 概要	1
2. アルミニウム合金 (HZ-A3004) の設計基準	1
3. 材料の用途	1
4. 材料の仕様	1
4.1 適合規格	1
4.2 化学成分	2
4.3 機械的性質	2
4.4 寸法の許容差	3
4.5 使用温度範囲	3
5. HZ-A3004 の特徴及び使用上の留意事項	4
5.1 特徴	4
5.2 特許及びライセンス	4
5.3 加工性及び加工条件	4
6. 製造工程及び製造条件	5
6.1 製造方法	5
6.2 質別	5
6.3 品質管理	5
7. 材料試験	6
7.1 供試材	6
7.2 供試材の評価試験項目	8
7.3 化学成分分析	10
7.4 ミクロ組織	12
7.5 機械的性質	19
7.5.1 常温引張特性	19
7.5.2 高温引張特性	37
7.5.3 硬さ	46
7.5.4 衝撃特性	47
7.5.5 クリープ特性	56
8. 設計用強度	63
8.1 設計降伏点	63
8.2 設計引張強さ	64
8.3 設計応力強さ	65
8.4 許容引張応力	66

9. その他の物性	67
9.1 熱物性	67
9.2 弾性定数	71
9.3 線膨張係数	76
10. 参考文献	81

別紙1 バスケットに用いるアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の経年変化を考慮した強度特性について	
別紙2 バスケットに用いるアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の考え方と評価方法について	
別紙3 バスケット用材料 アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の破壊靱性に係る特性について	

図表目次

第 4-1 表	化学成分規定	2
第 4-2 表	機械的性質	2
第 4-3 表	材料の幅寸法ならびにその許容差	3
第 4-4 表	材料の長さ寸法ならびにその許容差	3
第 4-5 表	材料の厚さ寸法ならびにその許容差	3
第 6-1 表	品質管理表	5
第 7-1 表	供試材の仕様	7
第 7-2 表	供試材の熱処理条件	7
第 7-3 表	供試材の評価試験項目	8
第 7-4 表	評価試験に用いる供試材の適用理由	9
第 7-5 表	供試材の化学成分分析結果	11
第 7-6 表	常温における引張試験結果	20
第 7-7 表	HZ-A3004 の試験結果 (L 方向)	33
第 7-8 表	HZ-A3004 の試験結果 (T 方向)	34
第 7-9 表	機械試験用供試材の試験結果 (L 方向)	35
第 7-10 表	機械試験用供試材の試験結果 (T 方向)	36
第 7-11 表	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)	38
第 7-12 表	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)	39
第 7-13 表	機械試験用供試材 (過時効熱処理材) の高温引張試験結果詳細(1/3)	40
第 7-14 表	機械試験用供試材 (過時効熱処理材) の高温引張試験結果詳細(2/3)	41
第 7-15 表	機械試験用供試材 (過時効熱処理材) の高温引張試験結果詳細(3/3)	42
第 7-16 表	ビッカース硬さ測定結果	46
第 7-17 表	シャルピー衝撃試験結果	48
第 7-18 表	各温度における 10 万時間破断強さ	59
第 7-19 表	各温度における 0.01% / 1,000h クリープ強さ	60
第 7-20 表	クリープ試験結果における応力-破断時間データ	61
第 7-21 表	クリープ試験結果における応力-定常クリープ速度データ	62
第 8-1 表	各温度における設計降伏点 S_y	63
第 8-2 表	各温度における設計引張強さ S_u	64
第 8-3 表	各温度における設計応力強さ S_m	65
第 8-4 表	各温度における許容引張応力 S	66
第 9-1 表	熱物性測定結果のまとめ	68
第 9-2 表	熱物性測定結果の詳細(1/2)	69
第 9-3 表	熱物性測定結果の詳細(2/2)	70
第 9-4 表	弾性定数測定結果の詳細(1/3)	72

第 9-5 表	弾性定数測定結果の詳細(2/3)	73
第 9-6 表	弾性定数測定結果の詳細(3/3)	74
第 9-7 表	弾性定数測定結果のまとめ	75
第 9-8 表	線膨張係数測定結果のまとめ	77
第 9-9 表	線膨張係数測定結果の詳細(1/3)	78
第 9-10 表	線膨張係数測定結果の詳細(2/3)	79
第 9-11 表	線膨張係数測定結果の詳細(3/3)	80

図表目次

第 6-1 図	製造フロー	5
第 7-1 図	断面マイクロ組織の観察位置	12
第 7-2 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 A: 熱処理なし)	13
第 7-3 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 B: 熱処理なし)	14
第 7-4 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 C: 熱処理なし)	15
第 7-5 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 D: 熱処理あり)	16
第 7-6 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 E: 熱処理あり)	17
第 7-7 図	供試材 (1/4t 代表部) の断面マイクロ組織 (供試材 F: 熱処理あり)	18
第 7-8 図	HZ-A3004 における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット	21
第 7-9 図	HZ-A3004 における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット	22
第 7-10 図	HZ-A3004 における耐力 (L 方向) の正規分布プロット	23
第 7-11 図	HZ-A3004 における耐力 (T 方向) の正規分布プロット	24
第 7-12 図	HZ-A3004 における伸び (L 方向) の正規分布プロット	25
第 7-13 図	HZ-A3004 における伸び (T 方向) の正規分布プロット	26
第 7-14 図	機械試験用供試材における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット	27
第 7-15 図	機械試験用供試材における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット	28
第 7-16 図	機械試験用供試材における耐力 (L 方向) の正規分布プロット	29
第 7-17 図	機械試験用供試材における耐力 (T 方向) の正規分布プロット	30
第 7-18 図	機械試験用供試材における伸び (L 方向) の正規分布プロット	31
第 7-19 図	機械試験用供試材における伸び (T 方向) の正規分布プロット	32
第 7-20 図	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)	43
第 7-21 図	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)	44
第 7-22 図	耐力に関する機械試験用供試材 (過時効熱処理材) のトレンド曲線	45
第 7-23 図	引張強さに関する機械試験用供試材 (過時効熱処理材) のトレンド曲線	45
第 7-24 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(1/7)	49
第 7-25 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(2/7)	50
第 7-26 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(3/7)	51
第 7-27 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(4/7)	52
第 7-28 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(5/7)	53
第 7-29 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(6/7)	54
第 7-30 図	走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真(7/7)	55
第 7-31 図	応力-破断時間プロット	58
第 7-32 図	応力-一定常クリープ速度プロット	58

1. 概要

本資料は、Hitz-P24 型キャスクのバスケットに使用するアルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) (以下「HZ-A3004」という。) に関する補足説明を示す。

HZ-A3004 の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効による強度低下を考慮し、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効条件 (200℃→100℃×60 年) を模擬した機械試験用供試材の材料試験により得られた機械的性質を保守的に包絡するように設定した。また、Hitz-P24 型の「発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の型式証明申請書」に附属する別添 1-1「バスケット用材料 アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) に関する説明書」は、HZ-A3004 をバスケットに使用するための適用範囲と設計用強度 (設計応力強さ、許容引張応力、設計降伏点、設計引張強さ、縦弾性係数、熱膨張係数) を示している。

2. アルミニウム合金 (HZ-A3004) の設計基準

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「金属キャスク構造規格」という。) では、バスケットに過度の変形、破損が生じて臨界に至らないように設計基準が定められている。

バスケットの設計基準は、金属キャスク構造規格の考え方を基本としており、クリープ特性が無視できない温度域でを使用することから、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) の考え方を取り入れている。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集合体が臨界に達することを防止するため、落下時の衝撃荷重が作用した場合においても、未臨界体系に影響する過度の変形、破損が生じないことを設計基準としている。

アルミニウム合金を高温下で長時間使用する場合、時効特性の考慮が必要であり、本資料に示す材料では、時効特性を保守的に考慮している。したがって、設計基準において時効特性を考慮する必要はない。

3. 材料の用途

HZ-A3004 は、Hitz-P24 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に適用する。

4. 材料の仕様

4.1 適合規格

HZ-A3004 は、圧延したアルミニウム合金の厚板であり、材料の仕様は JIS H 4000:2014(追補 1:2017)「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条(追補 1 含む)」(以下「JIS H 4000」という。) に準ずる。

4.2 化学成分

HZ-A3004 の化学成分規定を第 4-1 表に示す。

第 4-1 表 化学成分規定

材料名称	化学成分 (質量%)								Al (注1)
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		
							個々	合計	
HZ-A3004	0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 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 ~1.5	0.8 ~1.3	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。

4.3 機械的性質

HZ-A3004 の常温の機械的性質に関する製造管理規定を第 4-2 表に示す。

第 4-2 表 機械的性質 (注1)

材料名称	引張試験 (試験温度：常温)		
	引張強さ MPa	耐力 MPa	伸び %
HZ-A3004-H112	180 以上	84 以上	15 以上

(注1) 時効特性を考慮しない機械的性質 (製造管理値) を示す。

4.4 寸法の許容差

製品の寸法の許容差は、第 4-3 表から第 4-5 表及び JIS H 4000 を満たすものとする。

第 4-3 表 材料の幅寸法ならびにその許容差

幅 mm	
1300 以上 1500 以下 -0/+8	1500 を超え 1800 以下 -0/+10

第 4-4 表 材料の長さ寸法ならびにその許容差

長さ mm	
1300 以上 1500 以下 -0/+8	1500 を超え 1800 以下 -0/+10

第 4-5 表 材料の厚さ寸法ならびにその許容差

厚さ mm				
40 を超え 50 以下 ±1.3	50 を超え 55 以下 ±1.5	55 を超え 70 以下 ±1.9	70 を超え 75 以下 ±2.3	75 を超え 100 以下 ±2.8

4.5 使用温度範囲

HZ-A3004 及びこれを使用するバスケットの使用温度範囲について以下に規定する。

- ・最高使用温度：250℃
- ・最低使用温度：-40℃

5. HZ-A3004 の特徴及び使用上の留意事項

5.1 特徴

JIS H 4000 A3004 材は、成形性や耐食性が良好なアルミニウム合金であり、飲料缶、建築用材、船舶用材など広く用いられている。HZ-A3004 は、第 4-1 表の化学成分規定に示すように、JIS H 4000 A3004 材と比較して化学成分の規定範囲を狭めた材料である。

5.2 特許及びライセンス

なし。

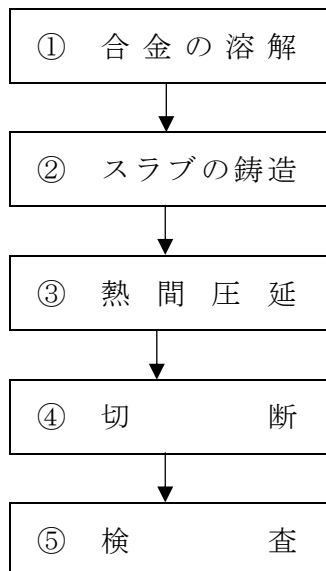
5.3 加工性及び加工条件

HZ-A3004 は圧延材を機械加工してバスケットに用いる。HZ-A3004 は切削性に優れるため、様々な機械加工が可能である。HZ-A3004 に溶接は行わない。また、防食を目的に酸化被膜などの表面処理を行う場合がある。

6. 製造工程及び製造条件

6.1 製造方法

HZ-A3004 の製造方法は、第 6-1 図に示す製造フローによる。



第 6-1 図 製造フロー

6.2 質別

HZ-A3004 の質別は JIS H0001:1998 における H112 とする。

6.3 品質管理

HZ-A3004 は、第 6-1 図の製造フローの各階層において、第 6-1 表に示す品質管理を行う。

第 6-1 表 品質管理表 (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		機械的性質	○	—
		寸法	○	—
		外観	○	—
③熱間圧延	製造条件	質別	○	—

(注 1) 設計貯蔵期間における設計用強度の特性保証に係る品質管理一覧である。

(注 2) 製造工程は第 6-1 図の製造フローに対応する。

7. 材料試験

7.1 供試材

材料試験には、第 7-1 表に示す実製品相当の材料 (HZ-A3004 A、B、C) 及びバスケットの設計貯蔵期間後を想定して [] 第 7-2 表の過時効熱処理を施した材料 (機械試験用供試材 D、E、F) を用いた。HZ-A3004 は、JIS H 4000 に規定された A3004 合金をベースとし、以下の考え方に基づいて成分範囲を狭めた合金である。

(1) 不純物元素 : バスケットに用いる HZ-A3004 においては、不純物元素 (Si、Fe、Cu、Zn) による固溶強化、析出強化は期待していない。また、不純物元素が Mg と金属間化合物を形成した場合、不用意に材料の Mg 固容量が減少し、強度が低下する恐れがある。そのため、不純物元素は製造可能な範囲で添加量の許容値を低く設定した。

(2) Mn : Mn 系分散相による分散強化は、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 においても期待できる。そのため、HZ-A3004 の成分規定範囲は、JIS H 4000 A3004 合金の成分規定範囲内で、下限値を高く設定した。

(3) Mg : 設計貯蔵期間の熱ばく露を受けた HZ-A3004 においては、Al 母相中に一定量の Mg が固溶していると考えられ、固溶強化が期待できる。そのため、HZ-A3004 の成分規定範囲は、JIS H 4000 A3004 合金の成分規定範囲内で、下限値を高く設定した。

一方、Al 母相中の Mg 固溶限度は温度低下とともに減少するが、過時効熱処理は貯蔵時よりも高温で実施する。そのため、過時効熱処理した HZ-A3004 は、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 より Mg 固容量が多くなり、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 を保守的に模擬できない。

そこで、 []

[]

[]

[] より、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 における Al 母相中の Mg 固容量の変化量を推定し、設計貯蔵期間後の HZ-A3004 を保守的に模擬できる機械試験用供試材の成分範囲を決定した。(詳細は別紙 1 に記載)

第 7-1 表 供試材の仕様

名称	供試材	製造加工	質別	供試材の寸法
HZ- A3004	A	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板
	B	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板
	C	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板
機械試験 用供試材	D	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板
	E	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板
	F	熱間圧延	H112	長さ 1400×幅 1400 ×厚さ 100mm の圧延板

第 7-2 表 供試材の熱処理条件

O 材処理 → 過時効熱処理 <input type="text"/>

7.2 供試材の評価試験項目

供試材の評価試験項目を第 7-3 表に示す。また、評価試験に用いる供試材の適用理由を第 7-4 表に示す。

アルミニウム合金に添加された Mg は母相中に固溶され、過飽和に固溶された Mg は、時間の経過とともに平衡固溶度まで徐々に減少し、固溶限を超える Mg は、Mg₂Si 等の金属間化合物を形成して析出する。これに伴い、過飽和から平衡固溶度まで Mg 固溶量が減少することにより、Mg による固溶強化が低下し、材料強度が低下する恐れがある。1) 2)

60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露 (200℃→100℃×60 年) を模擬するための加熱処理が過時効熱処理であり、HZ-A3004 は、60 年の設計貯蔵期間経過後の Mg 固溶量を計算材料科学に基づく計算により推定し (詳細については別紙 1 を参照)、設計貯蔵期間経過後に固溶強化に寄与する Mg 固溶量が最小値となる Mg 添加量に調整した機械試験用供試材に対し、過時効熱処理を施したものを供試材として材料試験に用いることにより、保守的な設計用強度を規定する。

また、アルミニウム合金に添加された Mn と Fe は、製造過程において Al₆(Mn,Fe) として析出する。2) Al₆(Mn,Fe) は過時効熱処理による模擬が可能であり、60 年の設計貯蔵期間を経ても粗大化しないことを過時効熱処理後の組織観察で確認し、設計貯蔵期間経過後も分散強化として材料強度に寄与することが期待できることを確認する。

HZ-A3004 は、不純物元素 (Si、Fe、Cu、Zn) による強化に期待しておらず、Si、Cu、Zn 等の不純物元素が Mg と金属間化合物を形成する場合、不用意に母相中の Mg 固溶量が減少し、材料強度が低下する恐れがある。したがって、不純物元素の添加許容値は、製造可能な範囲で低く設定している。

微量の不純物元素からなる金属間化合物の体積率は微小であり、強度特性に与える影響は無視し得るほどに小さいと考えられる。

第 7-3 表 供試材の評価試験項目

名称	供試材	熱処理 (注1)	試験項目								
			化学 成分	ミクロ 組織	引張 試験	時効後 引張 試験	衝撃 試験	クリープ 試験	熱物性	弾性 定数	線膨張 係数
HZ- A3004	A	無	○	○	○	-	○	-	○	○	-
		有	-	-	-	-	○	-	○	○	○
	B	無	○	○	○	-	○	-	○	○	-
		有	-	-	-	-	○	-	○	○	○
	C	無	○	○	○	-	○	-	○	○	-
		有	-	-	-	-	○	-	○	○	○
機械 試験用 供試材	D	有	○	○	-	○	-	○	-	-	-
	E	有	○	○	-	○	-	○	-	-	-
	F	有	○	○	-	○	-	○	-	-	-

(注1) 熱処理条件：JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに [] で

[] 過時効熱処理を施す。

第 7-4 表 評価試験に用いる供試材の適用理由

試験項目	内容	供試材 (注 1)			
		HZ-A3004 (規格材)		機械試験用 供試材	
		初期材	過時効 熱処理	初期材	過時効 熱処理
化学成分分析	供試材の化学成分が規定を満足するか確認する。	○	—	—	○
マイクロ組織観察	過時効熱処理でマイクロ組織に有意な変化が生じないことを確認する。	○	—	—	○
引張試験 (常温)	常温の設計用強度 ($S_T (RT)$ 、 $S_y (RT)$) を規定するために実施する。各供試材の試験結果より求めた 99%信頼下限値のうち、絶対値の小さいものを常温の設計用強度として規定する。	○	—	—	○
引張試験 (高温)	高温の設計用強度 (S_y 、 S_u 、 S_m) を規定するために実施する。	—	—	—	○
クリープ試験	設計用強度の許容引張応力 (S) を規定するために実施する。	—	—	—	○
衝撃試験	規格材は、機械試験用供試材と比較して、合金元素の添加量が多いことから靱性が劣ると推測される。そこで衝撃試験は、過時効熱処理した HZ-A3004 を用いる。	○	○	—	—
熱物性 弾性定数 線膨張係数	バスケット製品の物性値を求めるために実施する。 機械試験用供試材では、製品の物性値を模擬できない。そこで材料は HZ-A3004 を用い、設計貯蔵期間の熱ばく露の影響を考慮するために、過時効熱処理を施す。	○	○	—	—

(注 1) 供試材として HZ-A3004 の初期材は、質別を H112 とし圧延のままのものを用いる。

7.3 化学成分分析

(1) 試験条件

- ・供試材 : 第 7-1 表に示す 6 標本 (供試材 A~F) を試験に用いた。試験片は JIS H 4000 に準拠して、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・熱処理 : HZ-A3004 (供試材 A、B、C)、機械試験用供試材 (供試材 D、E、F) とも、初期材 (H112 材、圧延のまま) を試験に用いた。
- ・試験片 : 50mmL×50mmW×50mmt の試験片を用いた。
- ・分析元素 : Si、Fe、Cu、Mn、Mg、Zn を分析した。
- ・分析方法 : 製品分析及び溶湯分析を実施した。製品分析において、Si は吸光光度法、その他の元素は原子吸光法により分析した。

(2) 分析結果

第 7-5 表は供試材の化学成分分析結果を示す。HZ-A3004 及び機械試験用供試材とも、化学成分は JIS H 4000 A3004 合金の成分規定範囲内にある。また、機械試験用供試材は、 ことがわかる。

第 7-5 表 供試材の化学成分分析結果

材料名称	供試材 (注 1)		化学成分 (mass%)					
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
HZ- A3004	A	i	0.08	0.37	0.02	1.26	1.08	<0.01
		ii	0.08	0.36	0.02	1.28	1.11	0.01
	B	i	0.09	0.37	0.02	1.22	1.08	<0.01
		ii	0.09	0.38	0.02	1.27	1.16	0.01
	C	i	0.09	0.35	0.02	1.37	1.12	<0.01
		ii	0.09	0.36	0.02	1.43	1.20	0.01
機械試験 用供試材	D	i						
		ii						
	E	i						
		ii						
	F	i						
		ii						
規定値 HZ-A3004			0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 以下
(参考) JIS H 4000 A3004			0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下

(注 1) i 欄は製品分析値、ii 欄はミルシートに記載された溶湯分析値を示す。

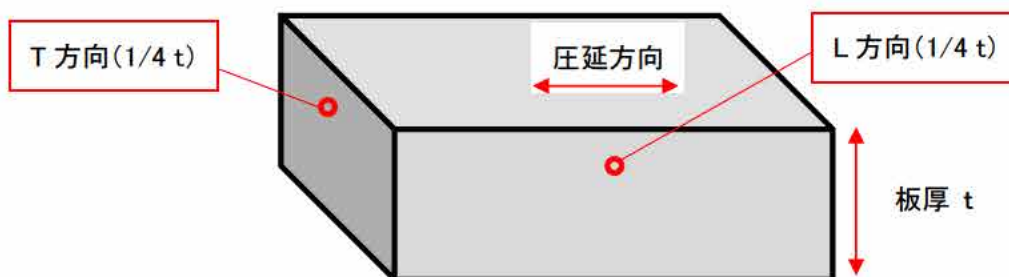
7.4 ミクロ組織

(1) 観察条件

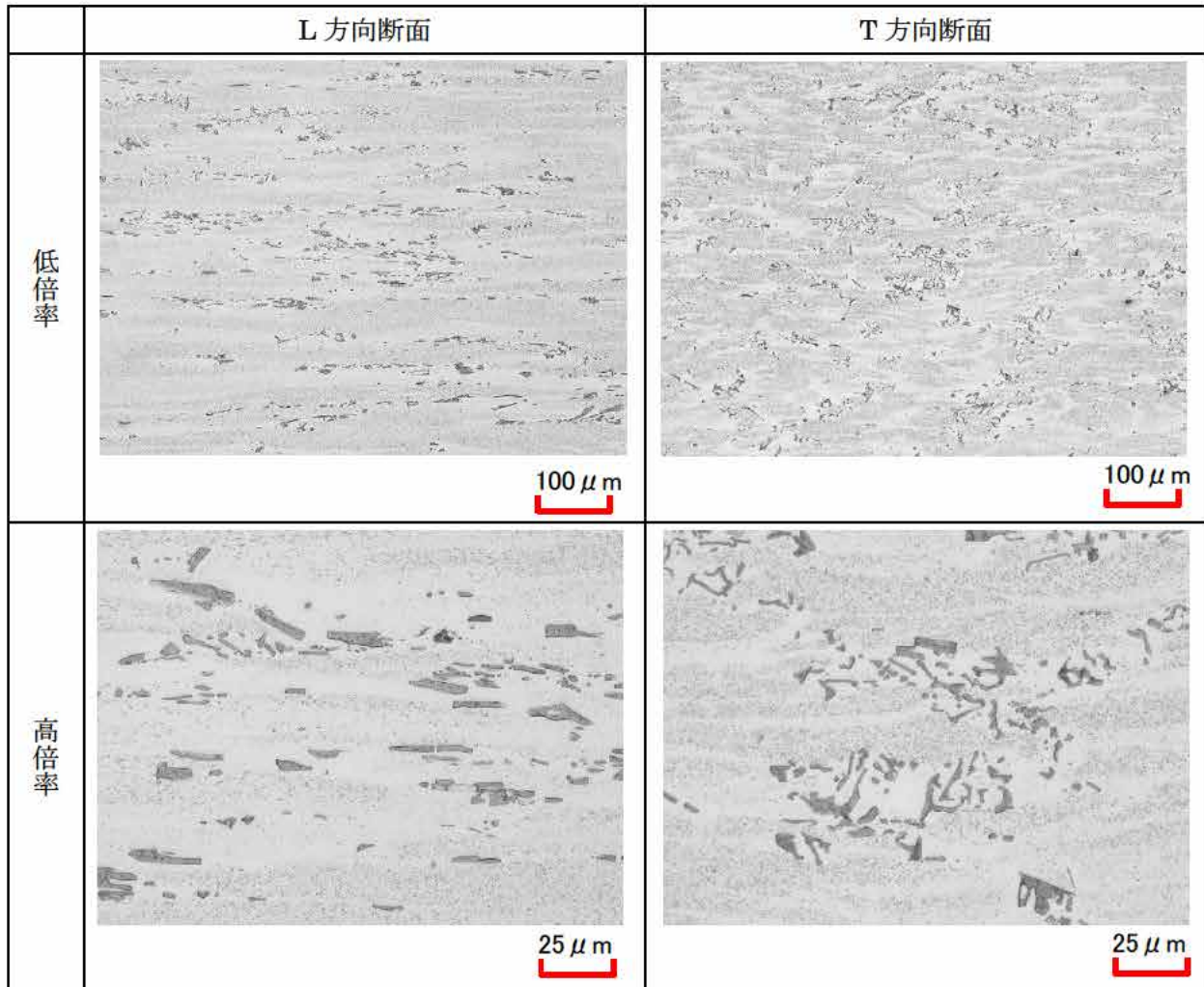
- ・供試材 : 第 7-1 表に示す 6 標本 (供試材 A~F) を試験に用いた。試験片は板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・熱処理 : HZ-A3004 (供試材 A、B、C) は、JIS H0001:1998 における H112 材とし、機械試験用供試材 (供試材 D、E、F) は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した。
- ・試験片 : 30mm×30mm の試験片を用いた。
- ・観察方法 : 光学顕微鏡により観察した。
- ・観察温度 : 常温で実施した。
- ・観察方向 : 第 7-1 図に示す圧延方向に対し平行な方向 (L 方向) 及び直角な方向 (T 方向) とした。

(2) 観察結果

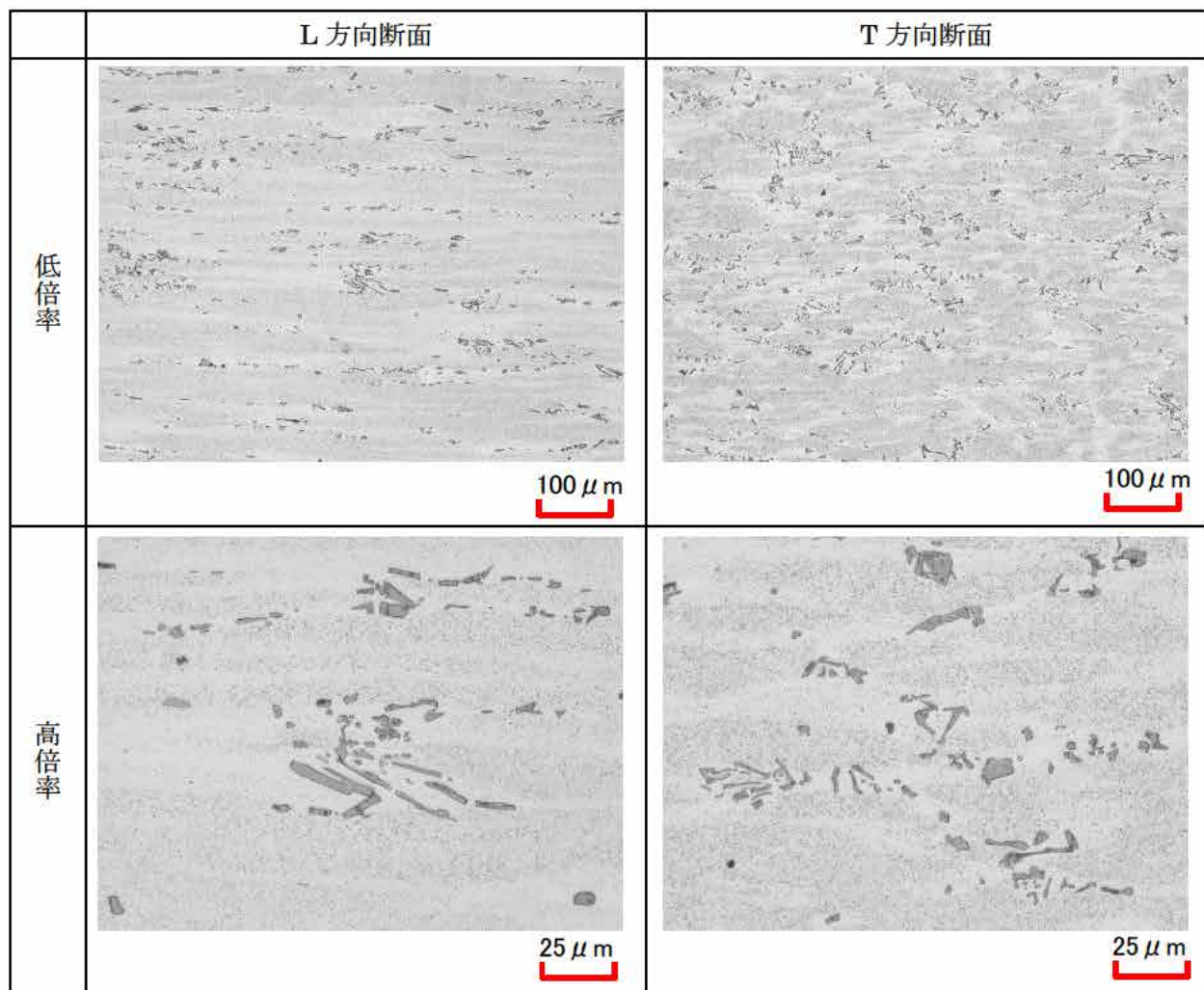
第 7-2 図から第 7-4 図は HZ-A3004 初期材の断面ミクロ組織を示す。また、第 7-5 図から第 7-7 図は機械試験用供試材の断面ミクロ組織を示す。各供試材のミクロ組織は、粗大な板状の Mn 系晶出物及び微細な粒状の Mn 系析出物が観察され、圧延方向及び板幅方向に伸長している。各供試材の結晶粒や晶出物の大きさに差異は認められない。



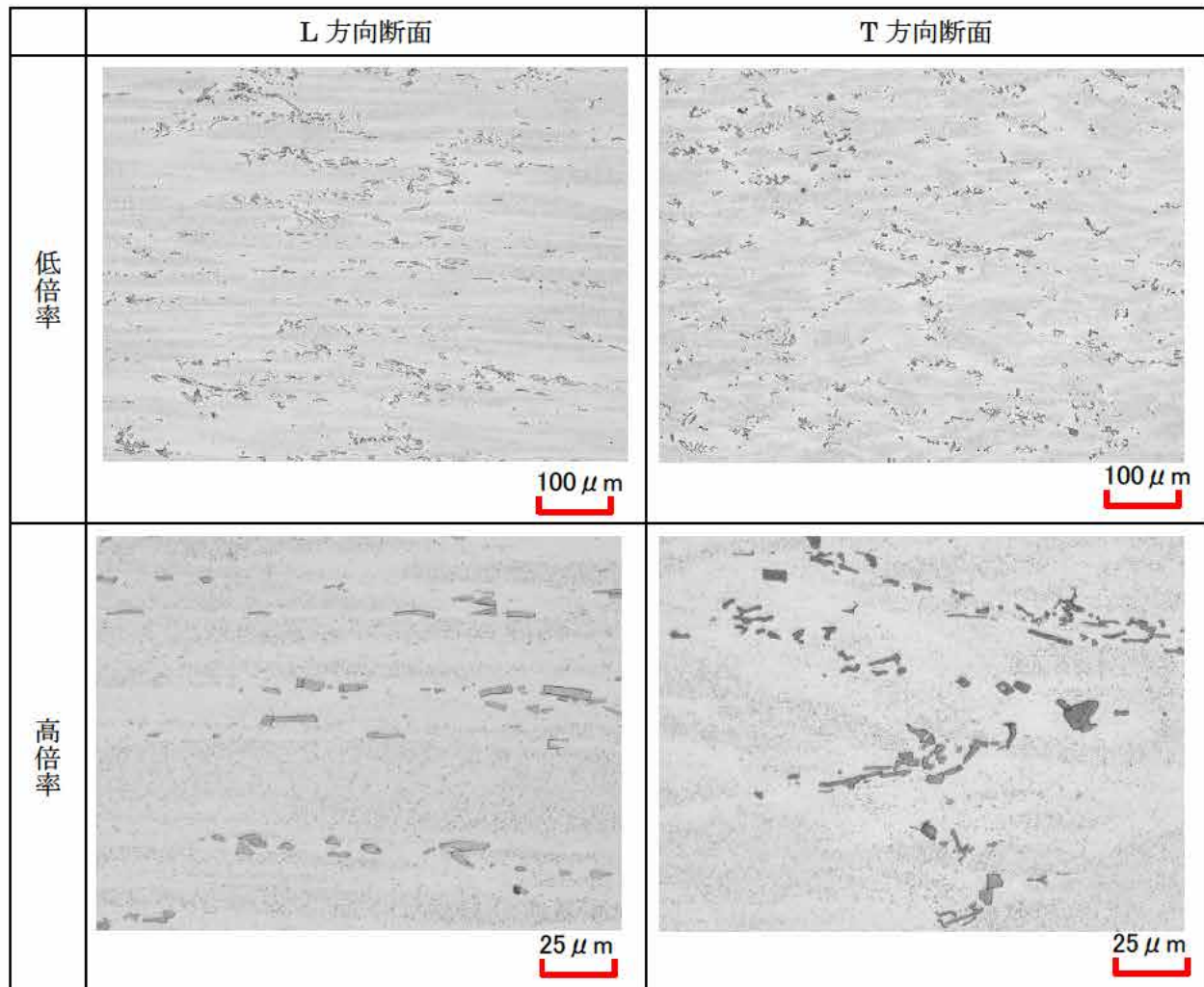
第 7-1 図 断面ミクロ組織の観察位置



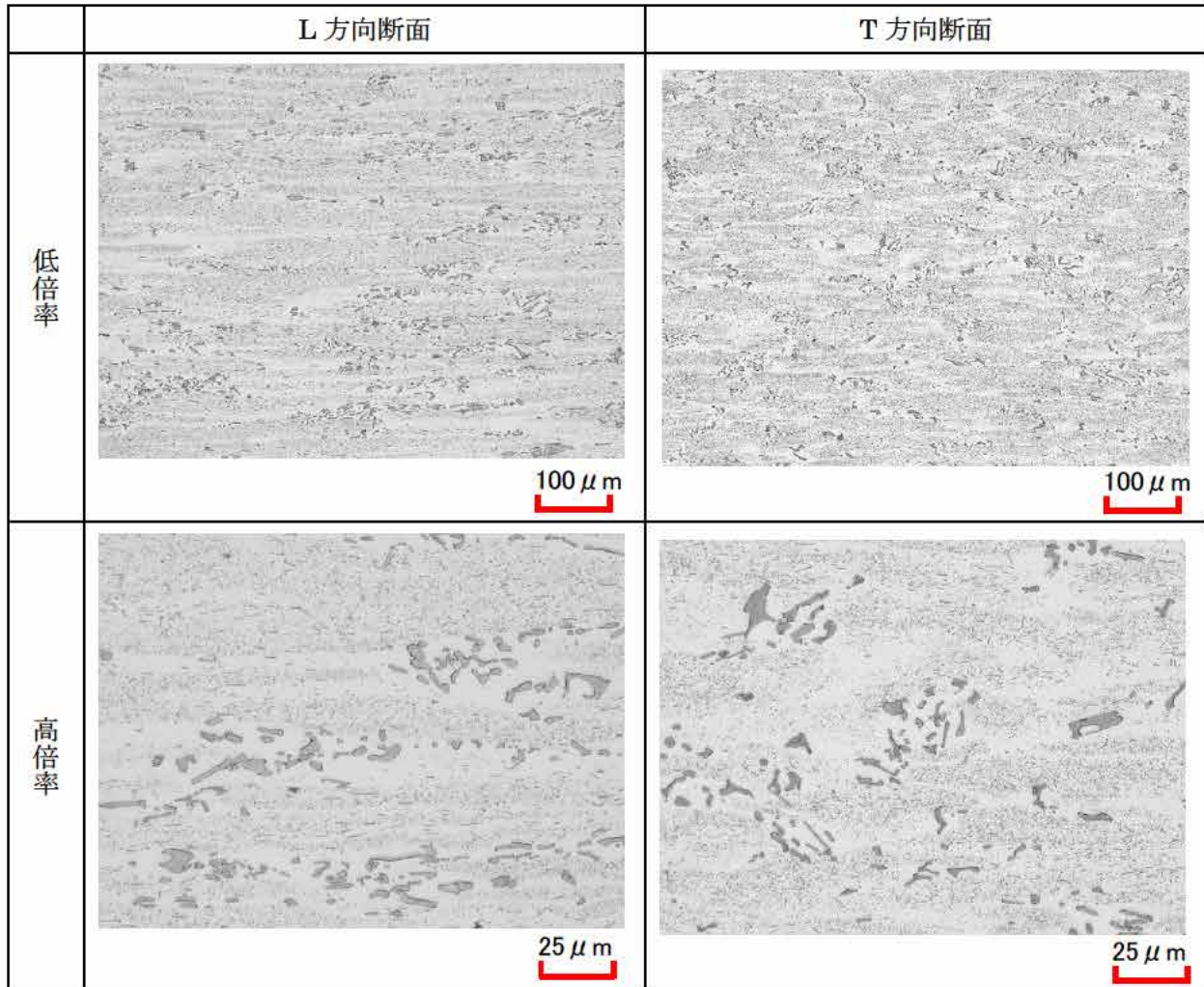
第 7-2 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 A : 熱処理なし)



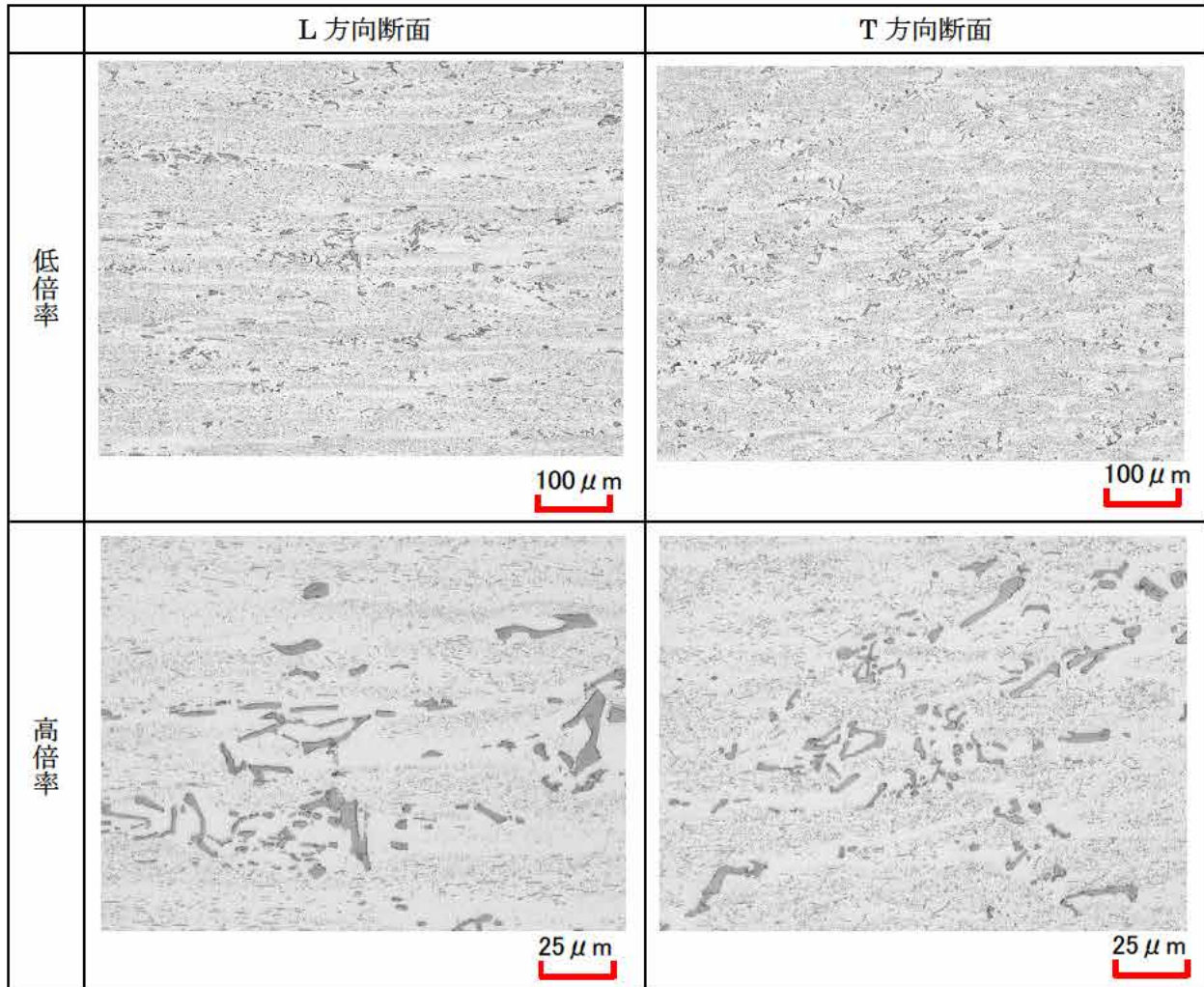
第 7-3 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 B : 熱処理なし)



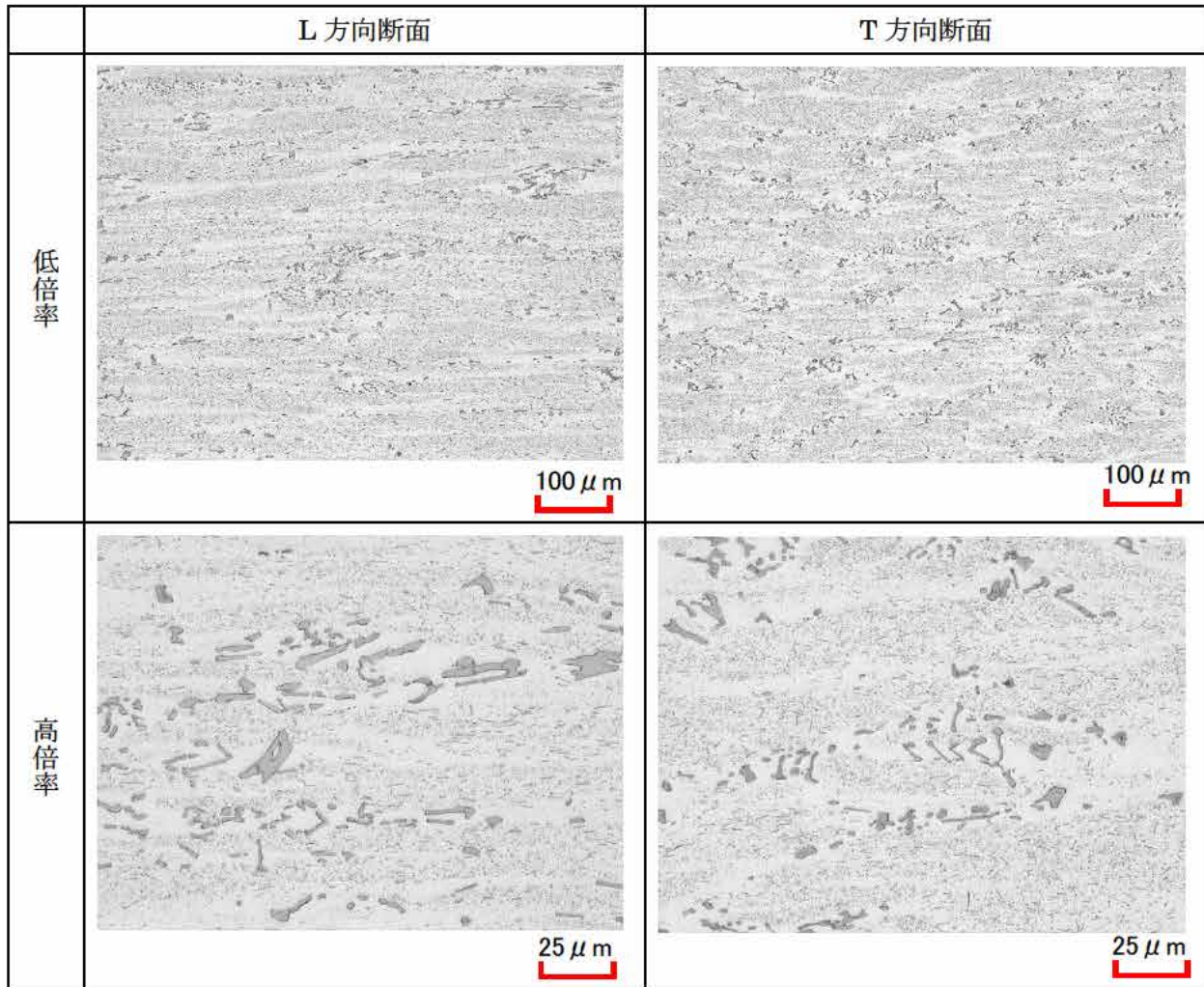
第 7-4 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 C : 熱処理なし)



第 7-5 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 D : 熱処理あり)



第 7-6 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織観察結果
(供試材 E : 熱処理あり)



第 7-7 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織観察結果
(供試材 F : 熱処理あり)

7.5 機械的性質

7.5.1 常温引張特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 7-1 表に示す 6 標本 (供試材 A~F) を試験に用いた。試験片は JIS H 4000 に準拠して、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : HZ-A3004 (供試材 A、B、C) は、JIS H0001:1998 における H112 材とし、機械試験用供試材 (供試材 D、E、F) は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した。
- ・ 試験片 : JIS G 0567:2012 による直径 10mm の棒状試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241:2011 により実施した。
- ・ 試験温度 : 常温で実施した。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向 (L 方向) 及び直角な方向 (T 方向)
- ・ 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 7-6 表に常温における引張試験結果を示す。また、正規分布プロットによる処理結果を第 7-8 図から第 7-19 図及び第 7-7 表から第 7-10 表に示す。

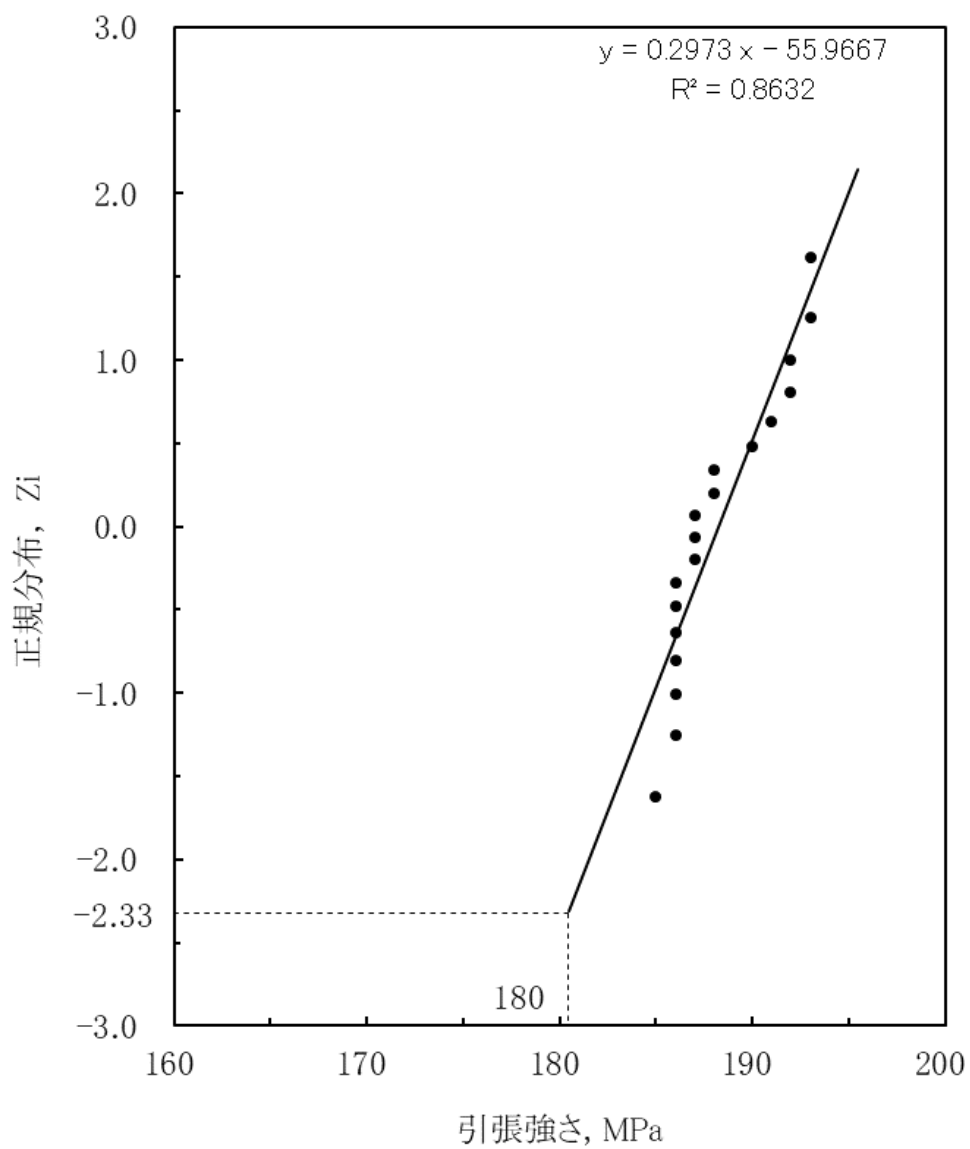
設計用強度の設定に用いる規格値は、試験データにおける 99%信頼下限の強度として、平均値から標準誤差の 2.33 倍を減じ、小数点以下を切り捨てることで安全側に丸めた。さらに HZ-A3004 及び機械試験用供試材に対する各方向の試験結果より求めた 99%信頼下限値のうち、絶対値が小さいものを採用した。

製造管理値は、HZ-A3004 に対する試験結果のうち、JIS H 4000 に定められた試験方向 (L 方向) における 99%信頼下限値を採用した。

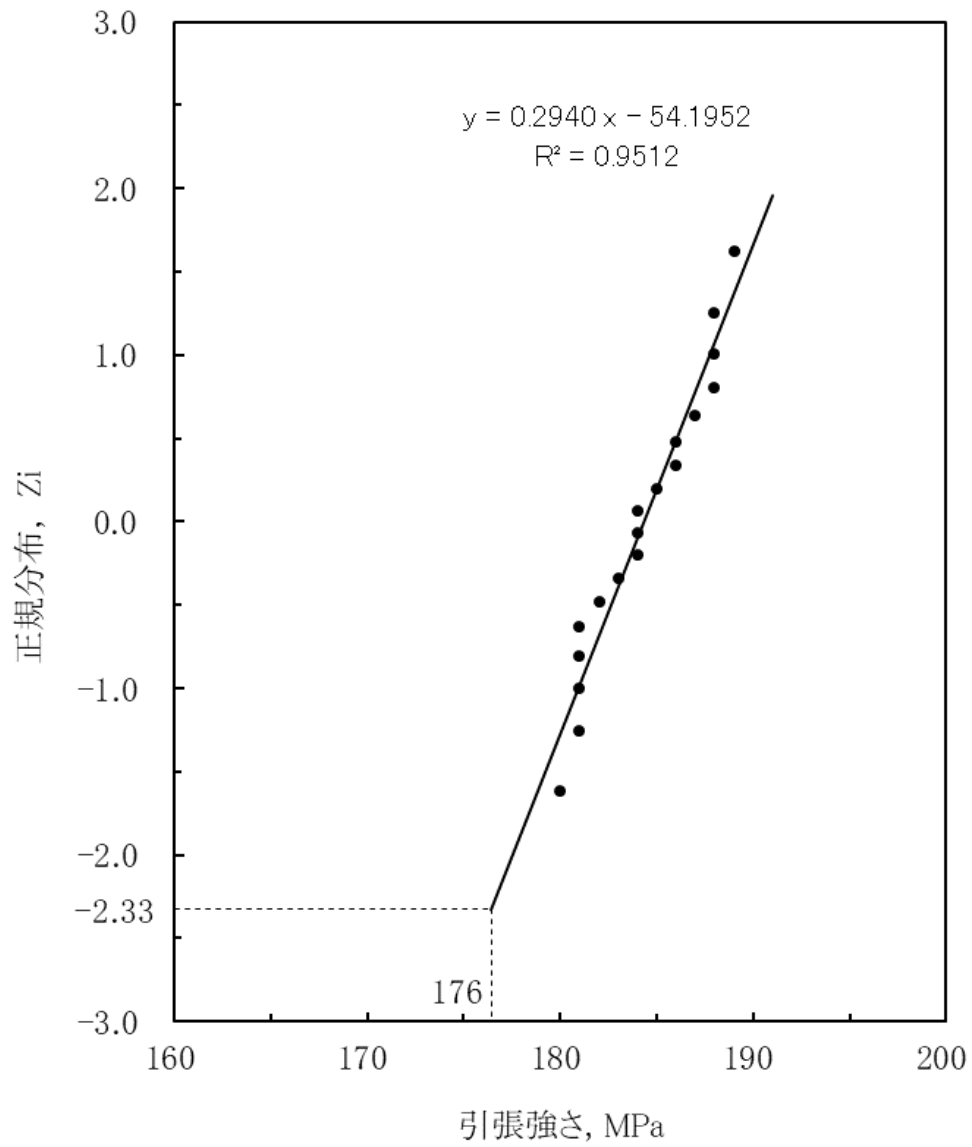
常温における伸びの 99%信頼下限値は、各試験条件において 18~22%を示すものの、後述の高温引張試験において 100℃程度では常温より伸びが低くなる特性があることを考慮して 15%に設定した。

第 7-6 表 常温における引張試験結果

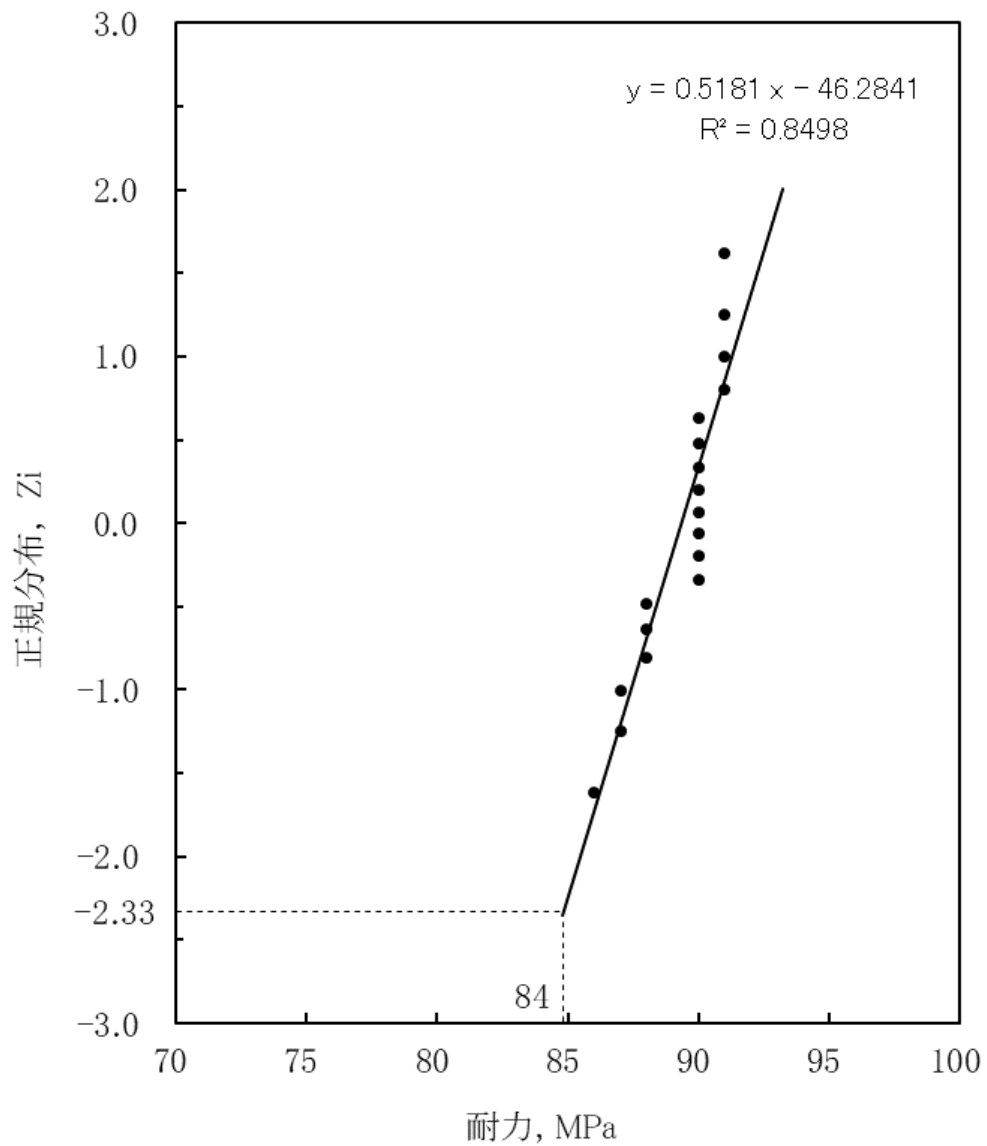
材料名称	項目	試験 方向	n 数	平均値	標準 偏差	99%信頼 下限値
HZ-A3004 (初期材)	引張強さ(MPa)	L 方向	18	188	2.7	180
		T 方向	18	184	2.8	176
	0.2%耐力(MPa)	L 方向	18	89	1.5	84
		T 方向	18	92	1.6	87
	伸び(%)	L 方向	18	22	0.5	20
		T 方向	18	20	0.4	18
機械試験用供試材 (過時効熱処理材)	引張強さ(MPa)	L 方向	18	175	1.2	172
		T 方向	18	170	1.0	166
	0.2%耐力(MPa)	L 方向	18	81	0.8	78
		T 方向	18	82	0.6	81
	伸び(%)	L 方向	18	24	0.4	22
		T 方向	18	22	0.5	20
規格値	引張強さ(MPa)					166
	0.2%耐力(MPa)					78
	伸び(%)					15
製造管理値	引張強さ(MPa)					180
	0.2%耐力(MPa)					84
	伸び(%)					15



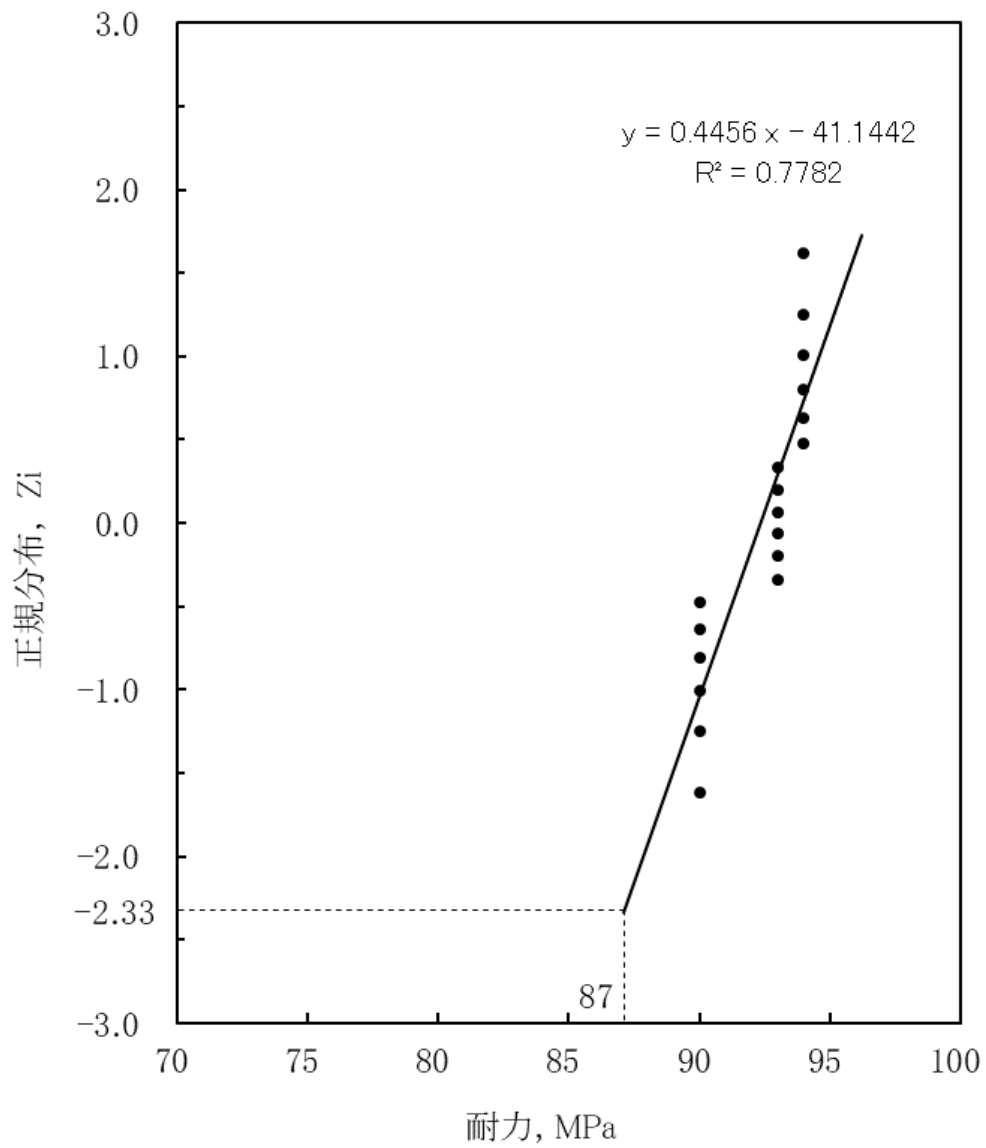
第 7-8 図 HZ-A3004 における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット



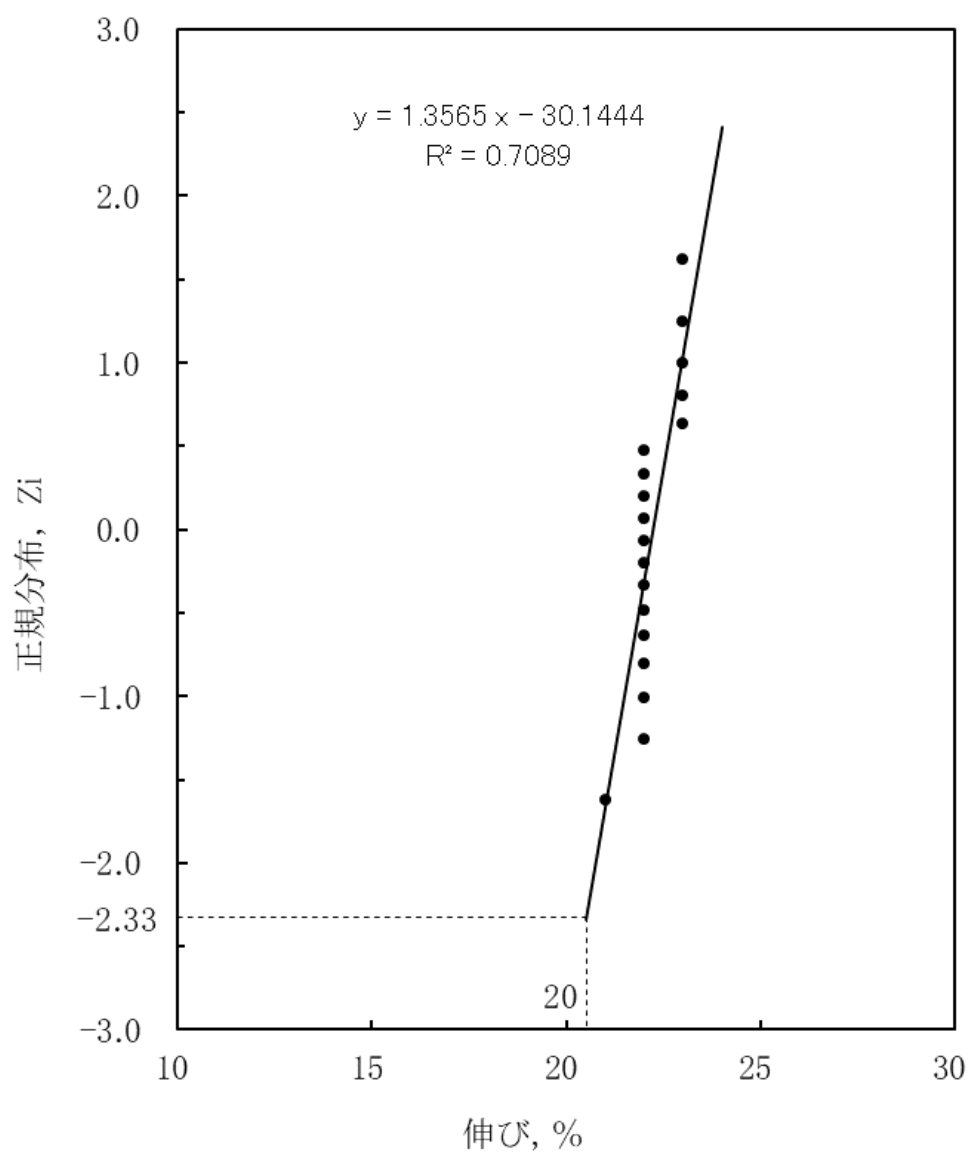
第 7-9 図 HZ-A3004 における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット



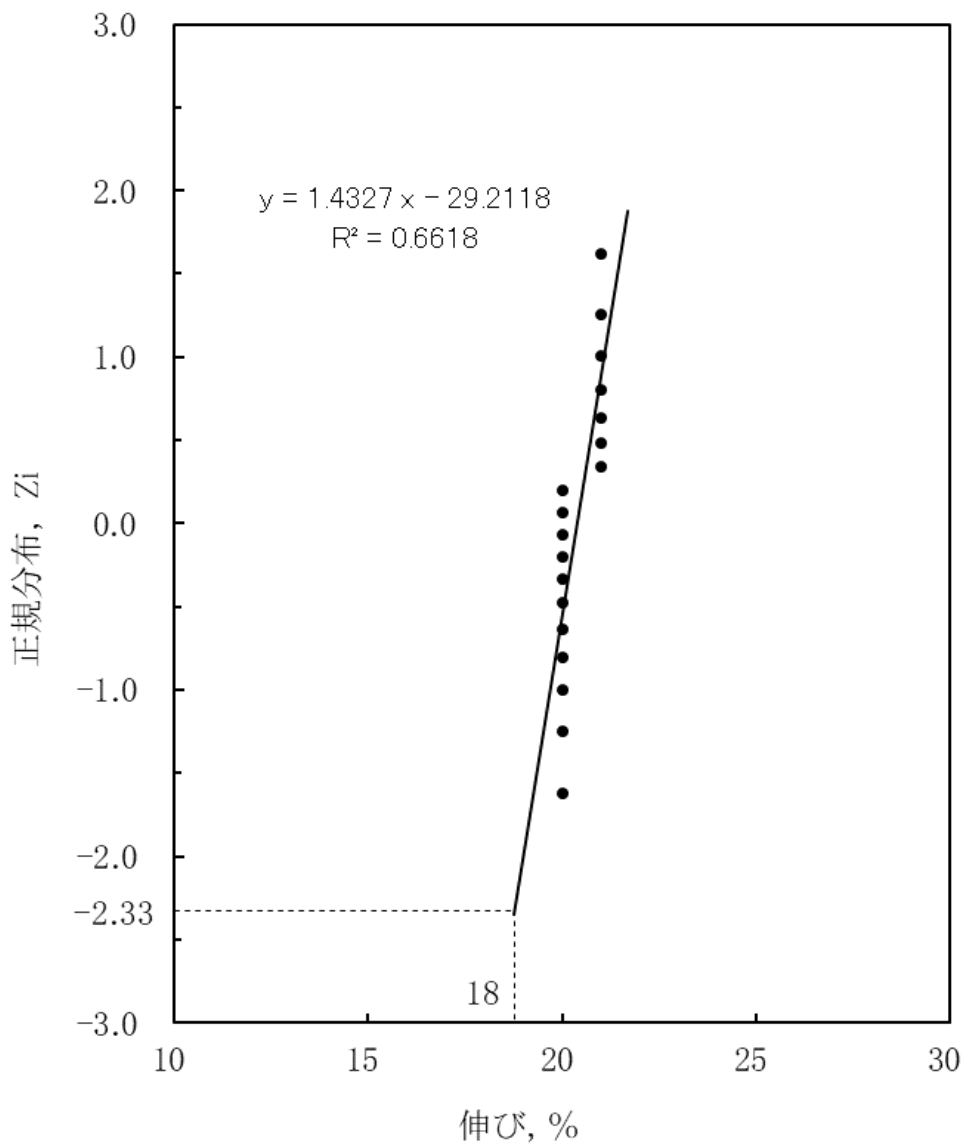
第 7-10 図 HZ-A3004 における耐力 (L 方向) の正規分布プロット



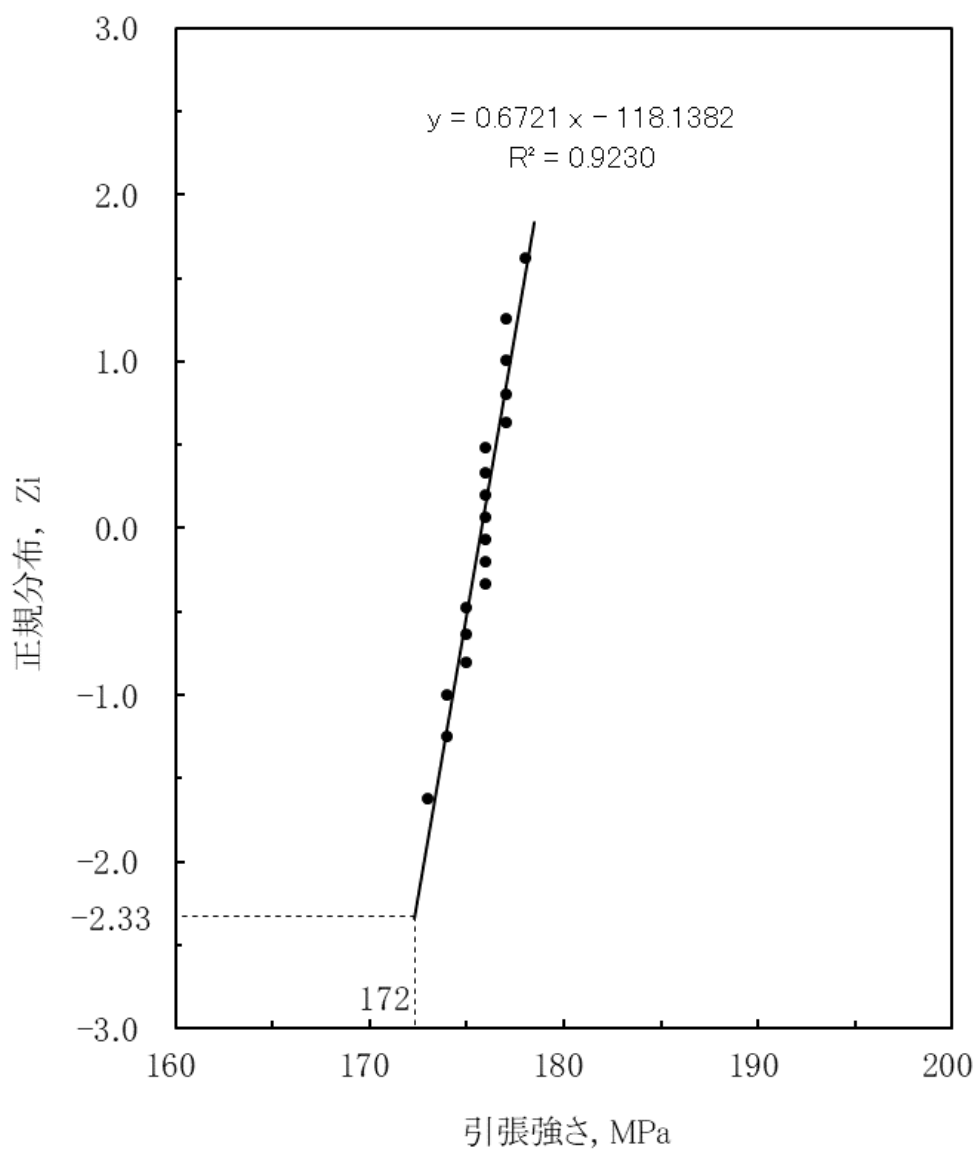
第 7-11 図 HZ-A3004 における耐力 (T 方向) の正規分布プロット



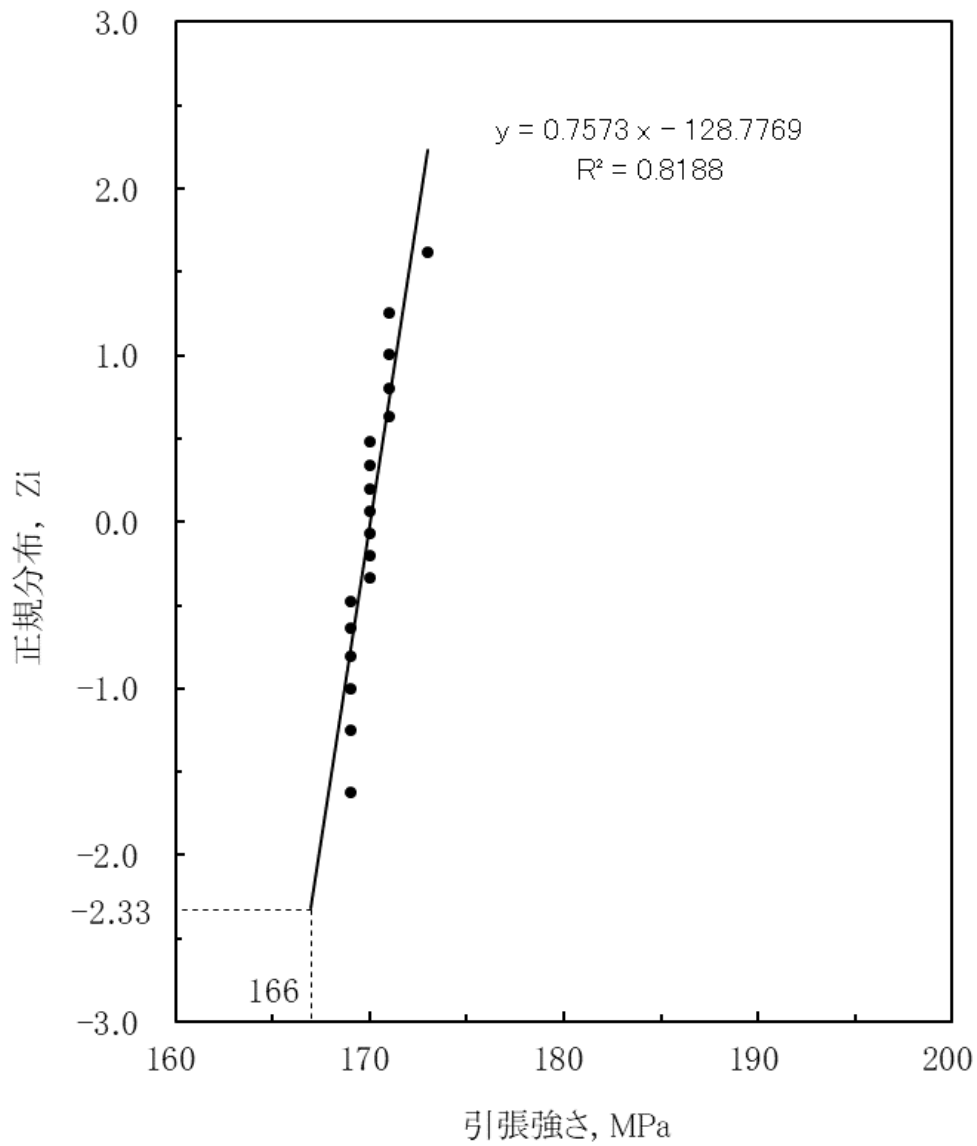
第 7-12 図 HZ-A3004 における伸び (L 方向) の正規分布プロット



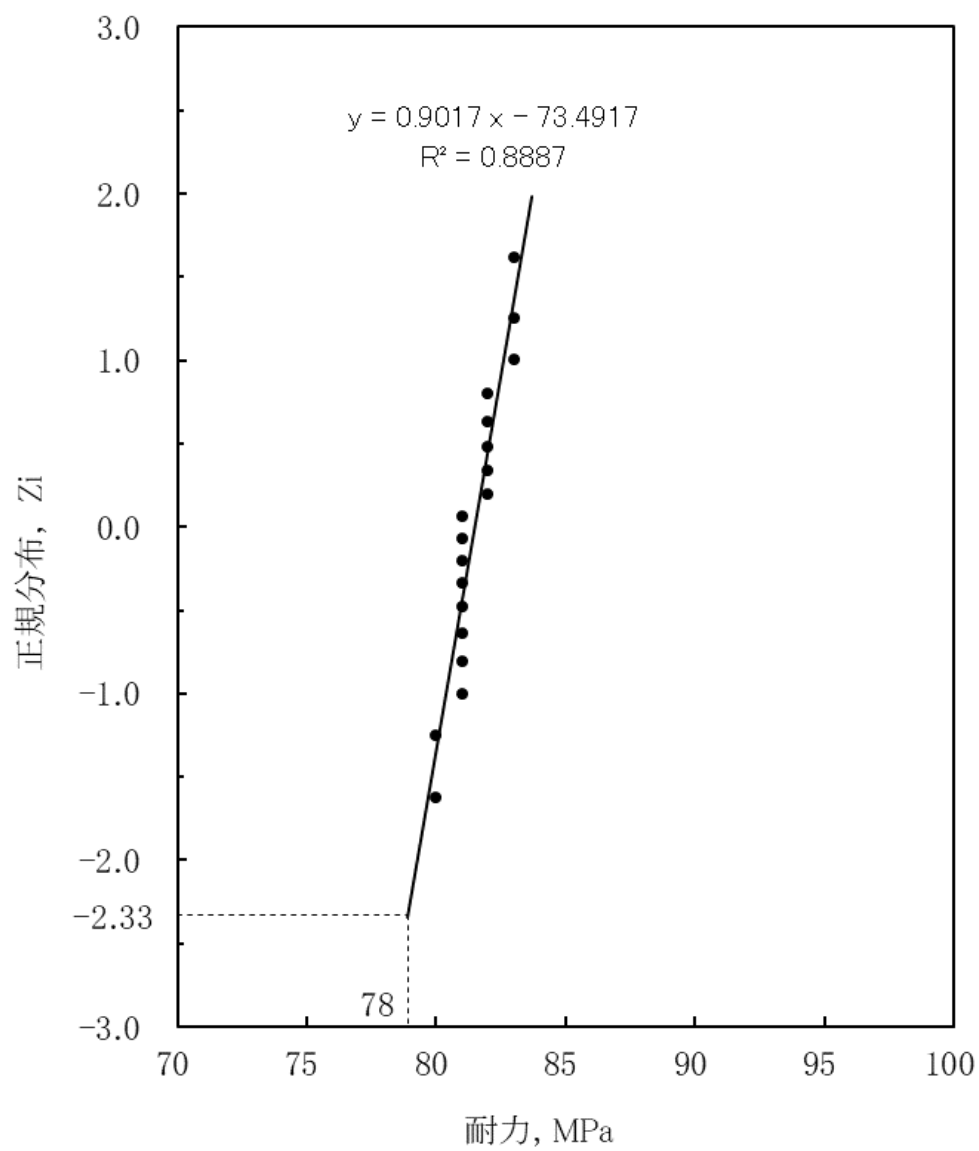
第 7-13 図 HZ-A3004 における伸び (T 方向) の正規分布プロット



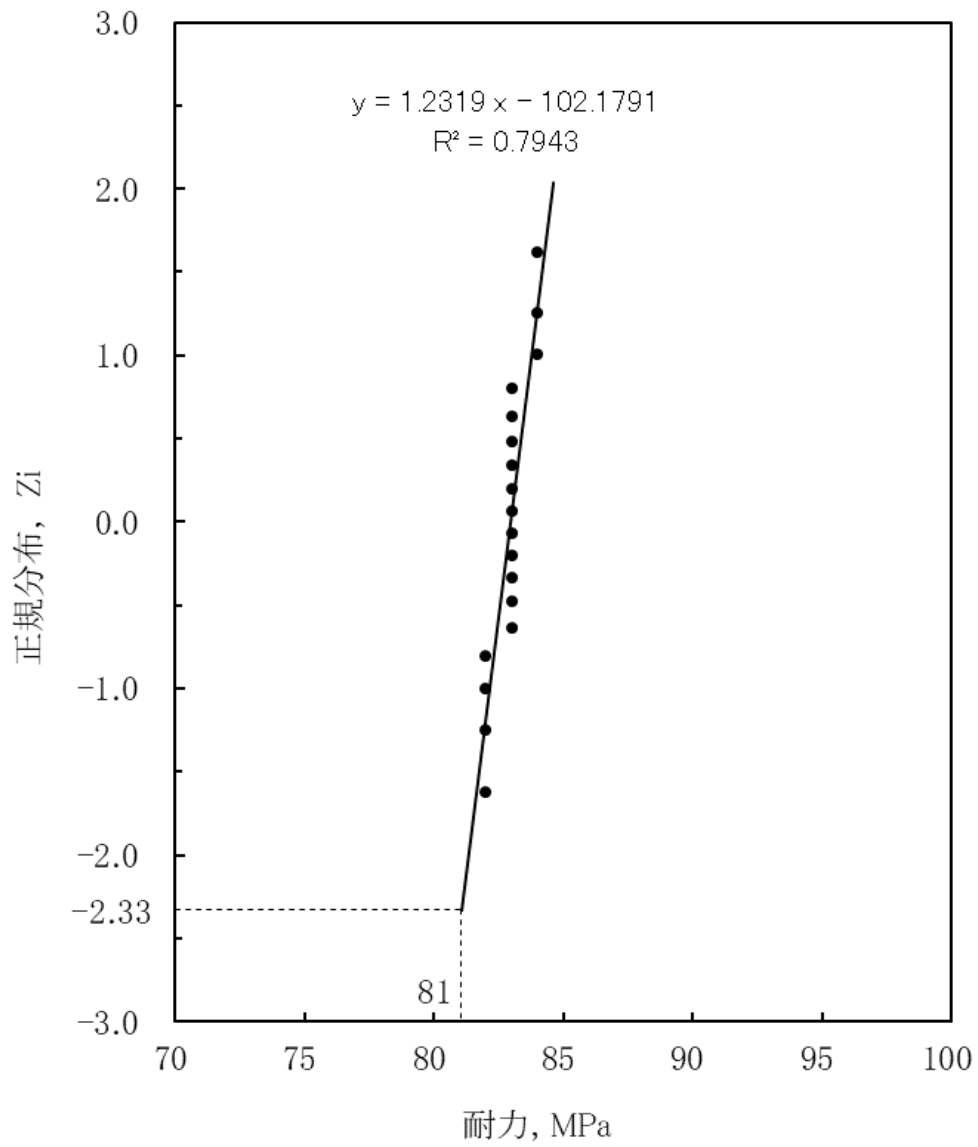
第 7-14 図 機械試験用供試材における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット



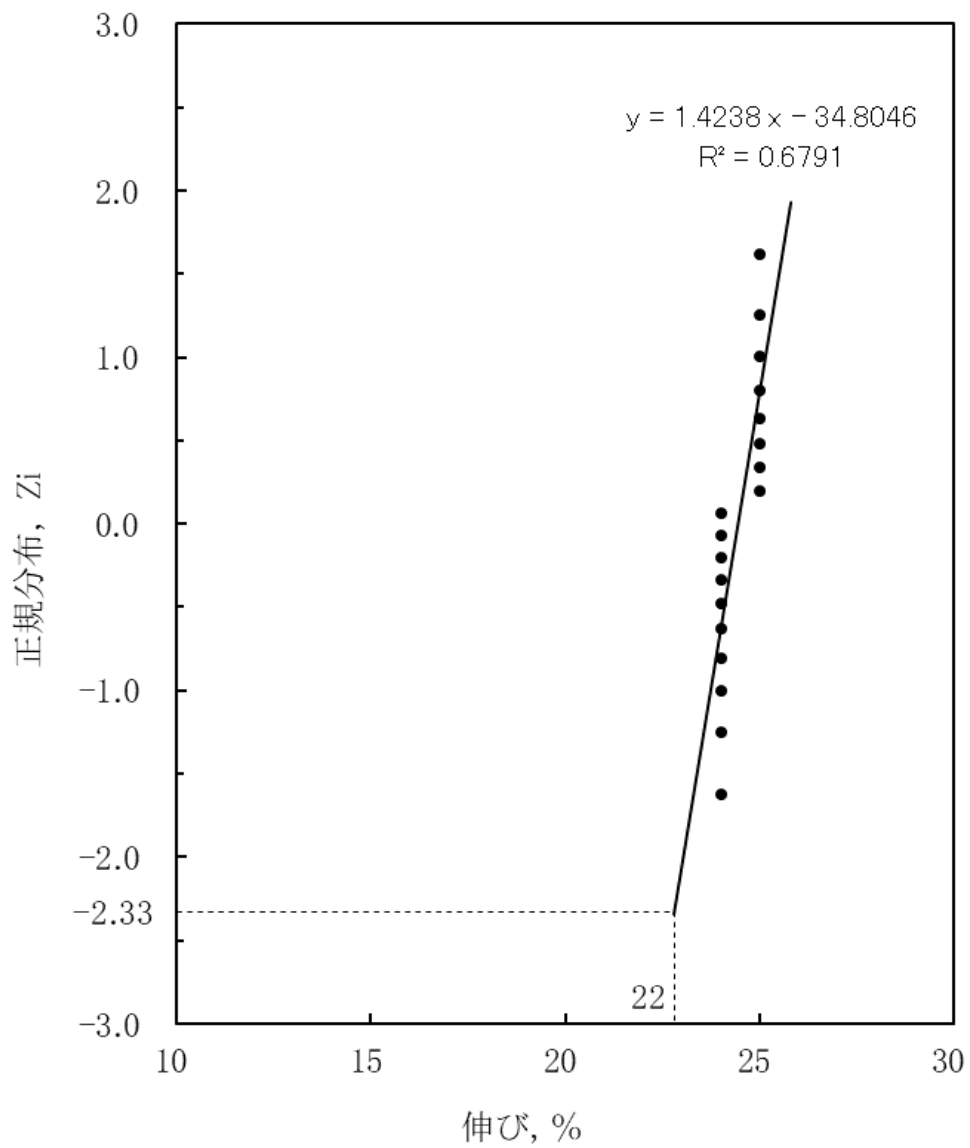
第 7-15 図 機械試験用供試材における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット



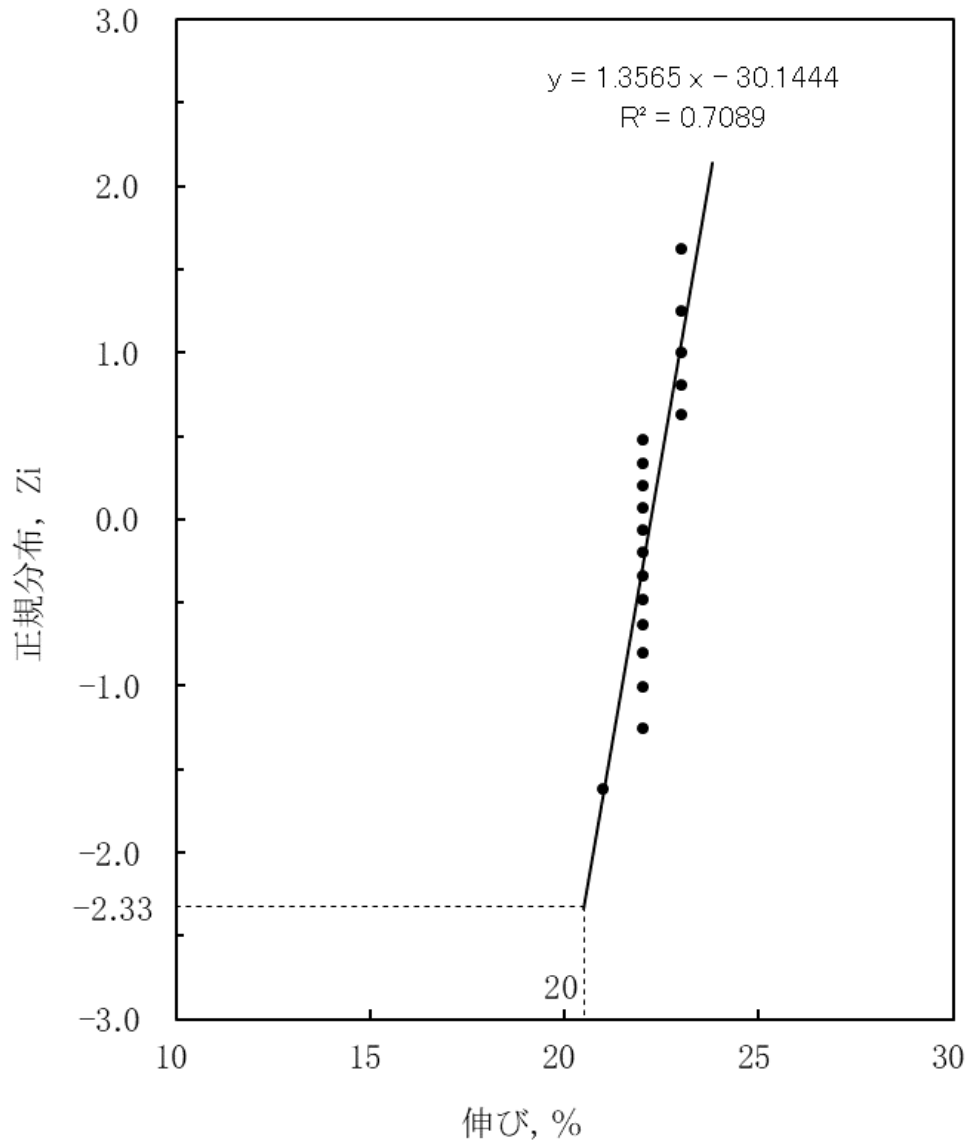
第 7-16 図 機械試験用供試材における耐力 (L 方向) の正規分布プロット



第 7-17 図 機械試験用供試材における耐力 (T 方向) の正規分布プロット



第 7-18 図 機械試験用供試材における伸び (L 方向) の正規分布プロット



第 7-19 図 機械試験用供試材における伸び (T 方向) の正規分布プロット

第 7-7 表 HZ-A3004 の試験結果 (L 方向)

引張強さ		0.2%耐力		伸び	
引張強さ [MPa]	標準正規 分布偏差	0.2%耐力 [MPa]	標準正規 分布偏差	伸び [%]	標準正規 分布偏差
185	-1.62	86	-1.62	21	-1.62
186	-1.25	87	-1.25	22	-1.25
186	-1.00	87	-1.00	22	-1.00
186	-0.80	88	-0.80	22	-0.80
186	-0.63	88	-0.63	22	-0.63
186	-0.48	88	-0.48	22	-0.48
186	-0.34	90	-0.34	22	-0.34
187	-0.20	90	-0.20	22	-0.20
187	-0.07	90	-0.07	22	-0.07
187	0.07	90	0.07	22	0.07
188	0.20	90	0.20	22	0.20
188	0.34	90	0.34	22	0.34
190	0.48	90	0.48	22	0.48
191	0.63	90	0.63	23	0.63
192	0.80	91	0.80	23	0.80
192	1.00	91	1.00	23	1.00
193	1.25	91	1.25	23	1.25
193	1.62	91	1.62	23	1.62

第 7-8 表 HZ-A3004 の試験結果 (T 方向)

引張強さ		0.2%耐力		伸び	
引張強さ [MPa]	標準正規 分布偏差	0.2%耐力 [MPa]	標準正規 分布偏差	伸び [%]	標準正規 分布偏差
180	-1.62	90	-1.62	20	-1.62
181	-1.25	90	-1.25	20	-1.25
181	-1.00	90	-1.00	20	-1.00
181	-0.80	90	-0.80	20	-0.80
181	-0.63	90	-0.63	20	-0.63
182	-0.48	90	-0.48	20	-0.48
183	-0.34	93	-0.34	20	-0.34
184	-0.20	93	-0.20	20	-0.20
184	-0.07	93	-0.07	20	-0.07
184	0.07	93	0.07	20	0.07
185	0.20	93	0.20	20	0.20
186	0.34	93	0.34	21	0.34
186	0.48	94	0.48	21	0.48
187	0.63	94	0.63	21	0.63
188	0.80	94	0.80	21	0.80
188	1.00	94	1.00	21	1.00
188	1.25	94	1.25	21	1.25
189	1.62	94	1.62	21	1.62

第 7-9 表 機械試験用供試材の試験結果 (L 方向)

引張強さ		0.2%耐力		伸び	
引張強さ [MPa]	標準正規 分布偏差	0.2%耐力 [MPa]	標準正規 分布偏差	伸び [%]	標準正規 分布偏差
173	-1.62	80	-1.62	24	-1.62
174	-1.25	80	-1.25	24	-1.25
174	-1.00	81	-1.00	24	-1.00
175	-0.80	81	-0.80	24	-0.80
175	-0.63	81	-0.63	24	-0.63
175	-0.48	81	-0.48	24	-0.48
176	-0.34	81	-0.34	24	-0.34
176	-0.20	81	-0.20	24	-0.20
176	-0.07	81	-0.07	24	-0.07
176	0.07	81	0.07	24	0.07
176	0.20	82	0.20	25	0.20
176	0.34	82	0.34	25	0.34
176	0.48	82	0.48	25	0.48
177	0.63	82	0.63	25	0.63
177	0.80	82	0.80	25	0.80
177	1.00	83	1.00	25	1.00
177	1.25	83	1.25	25	1.25
178	1.62	83	1.62	25	1.62

第 7-10 表 機械試験用供試材の試験結果 (T 方向)

引張強さ		0.2%耐力		伸び	
引張強さ [MPa]	標準正規 分布偏差	0.2%耐力 [MPa]	標準正規 分布偏差	伸び [%]	標準正規 分布偏差
169	-1.62	82	-1.62	21	-1.62
169	-1.25	82	-1.25	22	-1.25
169	-1.00	82	-1.00	22	-1.00
169	-0.80	82	-0.80	22	-0.80
169	-0.63	83	-0.63	22	-0.63
169	-0.48	83	-0.48	22	-0.48
170	-0.34	83	-0.34	22	-0.34
170	-0.20	83	-0.20	22	-0.20
170	-0.07	83	-0.07	22	-0.07
170	0.07	83	0.07	22	0.07
170	0.20	83	0.20	22	0.20
170	0.34	83	0.34	22	0.34
170	0.48	83	0.48	22	0.48
171	0.63	83	0.63	23	0.63
171	0.80	83	0.80	23	0.80
171	1.00	84	1.00	23	1.00
171	1.25	84	1.25	23	1.25
173	1.62	84	1.62	23	1.62

7.5.2 高温引張特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 供試材は機械試験用供試材（過時効熱処理材）とし、第 7-1 表に示す 3 標本（供試材 D、E、F）を試験に用いた。試験片は JIS H 4000 に準拠して、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : 供試材は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した。
- ・ 試験片 : JIS G 0567:2012 による直径 10mm の棒状試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241:2011 により実施した。
- ・ 試験温度 : 常温、50℃、65℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃とした。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に平行な方向（L 方向）及び直角な方向（T 方向）とした。
- ・ 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 7-11 表から第 7-15 表、第 7-20 図及び第 7-21 図は、機械試験用供試材（過時効熱処理材）に対する高温引張試験結果を示す。これらのデータに基づき、過時効後における強度の温度依存性を常温の強度で基準化したトレンド曲線による方法を用いて定式化することで評価した。評価には強度の低い方向（耐力：L 方向、引張強さ：T 方向）の試験データを用いた。

第 7-22 図及び第 7-23 図は耐力（L 方向）及び引張強さ（T 方向）に関するトレンド曲線を示す。

$K(S_y)$: 耐力（L 方向）の温度トレンド曲線

$$= 9.97461 \times 10^{-13} T^5 - 6.98055 \times 10^{-10} T^4 + 1.34436 \times 10^{-7} T^3 - 1.44655 \times 10^{-5} T^2 + 1.36540 \times 10^{-3} T + 0.97718$$

$K(S_u)$: 引張強さの温度トレンド曲線

$$= -4.22753 \times 10^{-12} T^5 + 3.53427 \times 10^{-9} T^4 - 1.02703 \times 10^{-6} T^3 + 1.13742 \times 10^{-4} T^2 - 5.30291 \times 10^{-3} T + 1.06876$$

ここで、T : 温度（℃）

第 7-11 表 機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)

供試材	機械試験用供試材 (D、E、F)			
質別	O			
試験方向	圧延方向に平行な方向(L方向)			
熱処理			(過時効熱処理)	
温度[°C]	n数	試験結果の平均値		
		引張強さ [MPa]	0.2%耐力 [MPa]	伸び [%]
室温	18	176	82	24
50	9	173	84	23
65	9	172	85	23
75	9	172	85	24
100	18	169	85	26
125	9	160	85	29
150	9	146	85	42
175	9	129	82	56
200	18	113	78	70
225	9	98	71	78
250	9	84	62	91
275	9	72	52	105

第 7-12 表 機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)

供試材	機械試験用供試材 (D、E、F)			
質別	O			
試験方向	圧延方向に直角な方向(T方向)			
熱処理	[] (過時効熱処理)			
温度[°C]	n数	試験結果の平均値		
		引張強さ [MPa]	0.2%耐力 [MPa]	伸び [%]
室温	18	170	83	24
50	9	167	85	22
65	9	166	85	22
75	9	166	86	22
100	18	163	87	24
125	9	155	86	28
150	9	142	85	40
175	9	126	83	55
200	18	109	79	69
225	9	95	72	79
250	9	82	64	87
275	9	71	54	97
300	9	61	43	95

第 7-13 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の高温引張試験結果詳細（1/3）

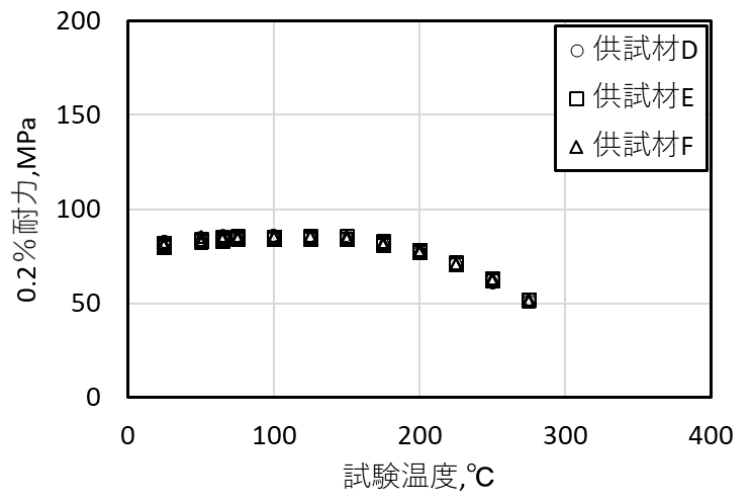
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
D	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	24	84	169	23
	25	81	174	24	83	169	23
	25	82	173	24	83	169	24
	25	82	174	24	83	170	23
	50	83	171	23	86	166	21
	50	84	172	23	86	166	21
	50	85	174	23	87	167	22
	65	84	170	23	86	165	21
	65	85	170	23	86	166	22
	65	86	172	22	86	165	23
	75	84	171	24	86	164	22
	75	85	170	23	87	164	21
	75	86	171	24	87	165	23
	100	86	168	25	88	164	23
	100	86	167	26	87	162	23
	100	86	167	26	88	162	24
	100	85	168	25	87	162	23
	100	85	167	26	87	162	24
	100	85	167	26	87	161	25
	125	85	158	30	86	154	27
	125	86	159	29	87	155	28
	125	85	158	29	87	154	29
	150	84	145	40	86	141	38
	150	85	144	41	87	141	38
	150	86	146	41	85	141	41
	175	82	128	54	83	125	51
	175	82	128	57	84	125	51
	175	82	128	58	83	125	59
	200	77	112	66	79	108	68
	200	78	112	67	79	108	67
	200	78	112	69	79	109	64
	200	77	111	70	79	108	78
	200	78	112	70	78	108	72
	200	78	112	68	79	108	67
	225	71	97	78	72	94	76
	225	71	97	79	73	94	70
	225	71	97	78	72	94	92
	250	63	84	85	64	81	80
250	63	83	90	64	82	82	
250	61	83	86	64	82	93	
275	52	72	118	54	71	89	
275	51	71	110	54	71	92	
275	52	72	101	54	70	99	
300				43	61	96	
300				43	61	98	
300				43	61	126	

第 7-14 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の高温引張試験結果詳細（2/3）

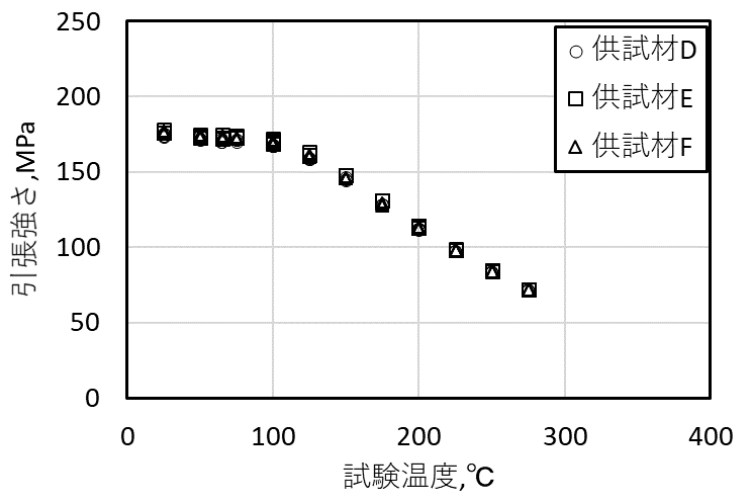
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
E	25	82	178	25	83	171	23
	25	81	176	25	82	171	24
	25	82	176	25	83	169	23
	25	81	176	24	82	173	24
	25	80	176	25	82	171	24
	25	80	176	25	82	170	24
	50	83	174	24	84	168	23
	50	83	173	23	84	168	22
	50	84	175	23	85	168	22
	65	83	172	24	85	167	23
	65	84	173	22	85	167	22
	65	85	175	23	85	167	22
	75	84	173	24	85	166	23
	75	85	173	23	85	168	23
	75	86	174	24	85	166	23
	100	85	171	27	86	164	24
	100	85	172	26	87	164	23
	100	85	171	27	86	164	23
	100	85	170	26	86	163	25
	100	84	170	26	86	164	24
	100	84	169	26	86	163	23
	125	84	161	30	86	156	28
	125	86	163	29	86	157	28
	125	85	161	30	86	156	28
	150	84	148	42	84	143	43
	150	84	148	43	86	143	39
	150	86	148	43	85	143	38
	175	81	131	57	83	127	52
	175	83	131	53	83	127	57
	175	82	131	54	83	126	58
	200	78	114	69	79	111	67
	200	78	114	68	79	111	64
	200	78	114	70	78	110	69
	200	77	114	74	78	110	67
	200	77	113	71	78	110	72
	200	78	114	73	78	109	71
	225	71	98	66	72	95	90
	225	72	99	81	73	95	78
	225	71	98	74	72	95	72
	250	63	84	91	64	82	84
	250	63	85	102	64	82	84
	250	62	85	95	64	83	94
275	52	72	123	54	71	105	
275	52	72	98	54	71	93	
275	52	72	101	54	71	104	
300				43	62	90	
300				43	62	89	
300				44	62	87	

第 7-15 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の高温引張試験結果詳細（3/3）

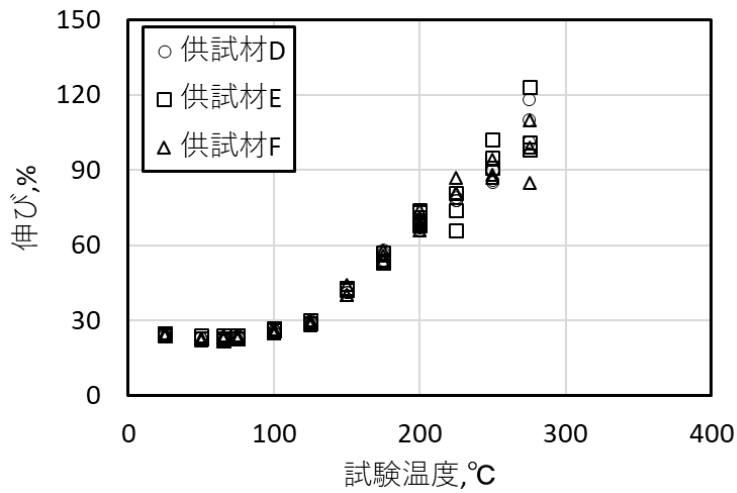
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
F	25	81	177	24	83	170	24
	25	82	177	25	83	170	24
	25	81	176	24	83	170	23
	25	81	177	24	83	170	24
	25	81	176	24	83	171	24
	25	81	177	24	83	170	24
	50	82	174	23	85	167	21
	50	83	173	22	85	168	21
	50	85	175	23	86	168	21
	65	84	173	23	85	166	20
	65	84	172	24	85	166	21
	65	86	174	23	86	167	21
	75	84	172	23	86	166	22
	75	85	172	23	86	166	22
	75	86	173	24	86	166	22
	100	86	169	25	87	163	24
	100	86	169	26	87	164	24
	100	85	170	25	87	164	25
	100	85	169	26	87	163	24
	100	85	170	25	87	163	24
	100	85	170	26	86	163	24
	125	85	160	29	86	155	28
	125	86	161	28	86	156	27
	125	86	160	30	86	155	29
	150	84	146	40	85	142	41
	150	85	146	40	86	142	41
	150	85	146	44	85	142	42
	175	81	128	56	83	125	55
	175	82	129	54	83	125	56
	175	82	129	58	83	125	55
	200	78	112	69	79	110	70
	200	78	113	71	79	109	77
	200	78	113	66	79	109	76
	200	77	113	68	78	109	65
	200	77	113	74	78	109	65
	200	77	113	68	78	109	68
	225	71	98	81	72	95	73
	225	71	98	81	73	95	75
	225	71	98	87	72	95	83
	250	63	84	88	63	82	81
	250	62	84	87	64	82	95
	250	62	84	94	64	81	89
275	52	72	85	53	70	94	
275	52	72	99	54	71	109	
275	51	72	110	53	71	85	
300				43	61	87	
300				43	61	88	
300				43	61	92	



(a) 0.2%耐力

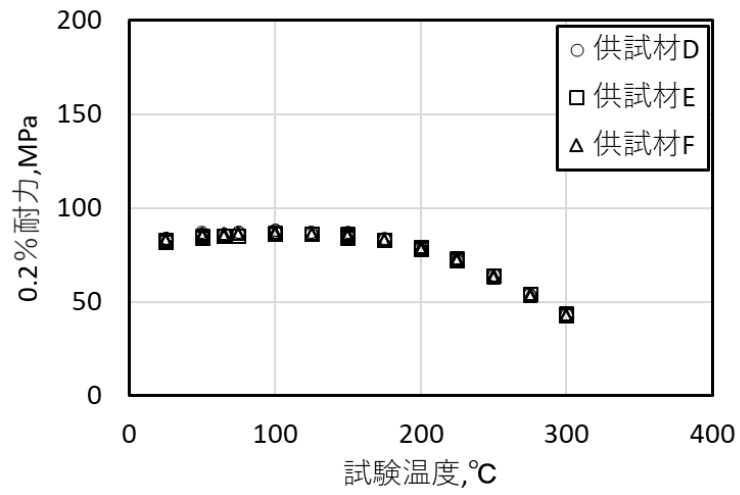


(b) 引張強さ

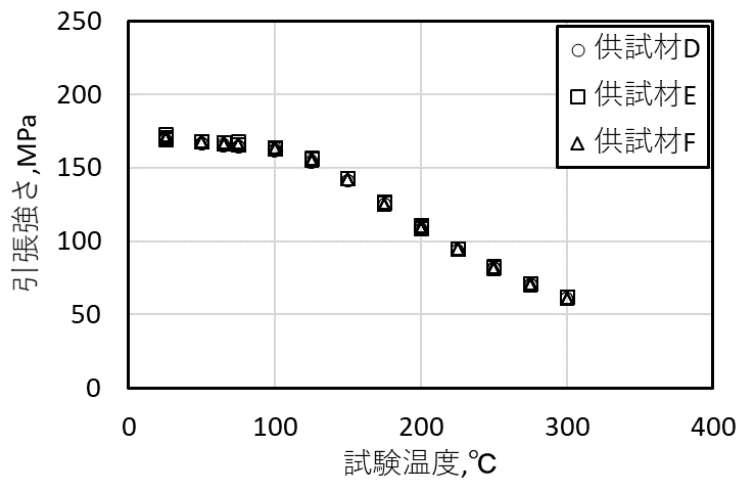


(c) 伸び

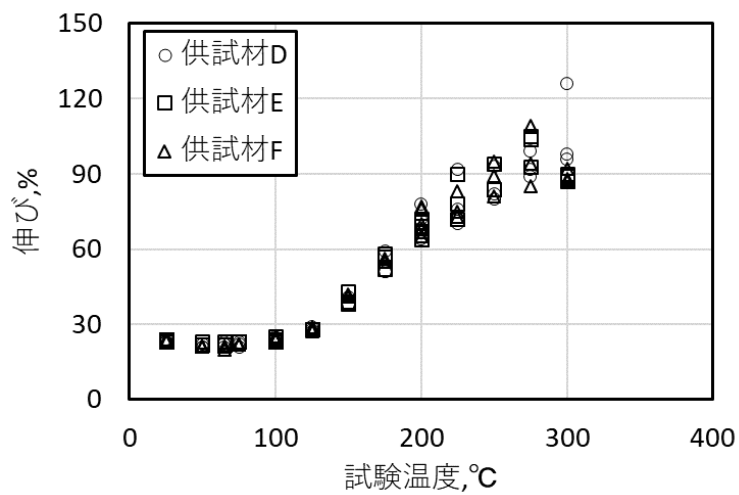
第 7-20 図 機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)



(a) 0.2%耐力

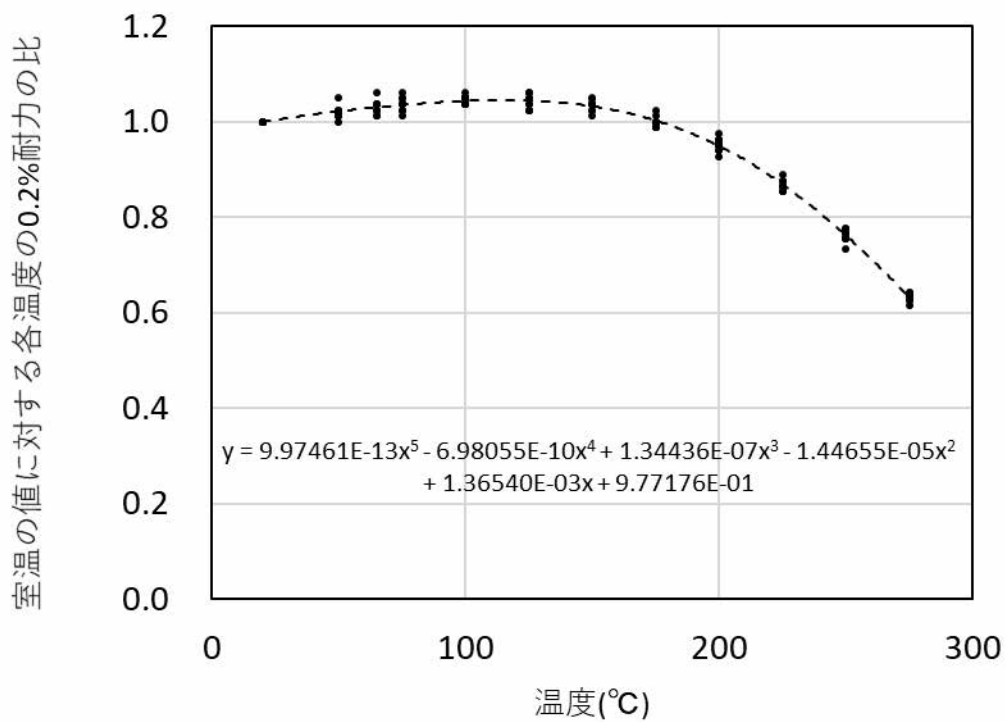


(b) 引張強さ

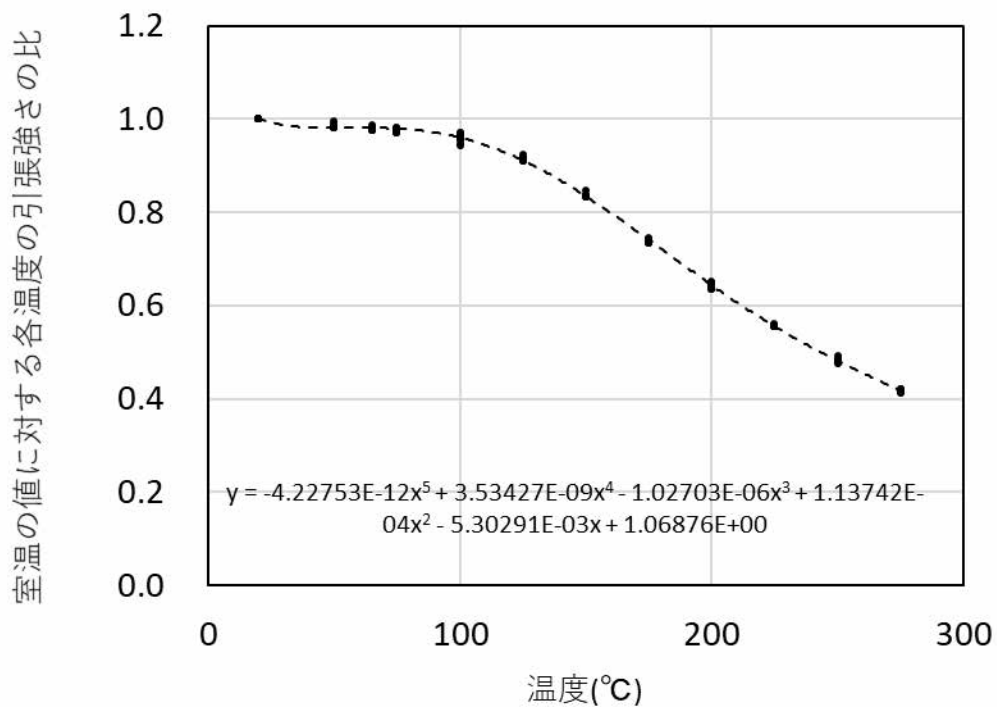


(c) 伸び

第 7-21 図 機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)



第 7-22 図 耐力に関する機械試験用供試材（過時効熱処理材）のトレンド曲線



第 7-23 図 引張強さに関する機械試験用供試材（過時効熱処理材）のトレンド曲線

7.5.3 硬さ

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 7-1 表に示す 6 標本を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : HZ-A3004 (供試材 A、B、C) は、JIS H0001:1998 における H112 材を試験に用いた。
機械試験用供試材 (供試材 D、E、F) は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2244:2009 により実施した。
- ・ 試験温度 : 常温で実施した。
- ・ 記録 : 98N の試験によるビッカース硬さを測定した。

(2) 試験結果

第 7-16 表にビッカース硬さ測定結果を参考値として示す。

第 7-16 表 ビッカース硬さ測定結果

供試材	n 数	平均硬さ HV(10)
HZ-A3004 初期材	3	56
機械試験用供試材 過時効熱処理材	3	51

7.5.4 衝撃特性

(1) 試験条件

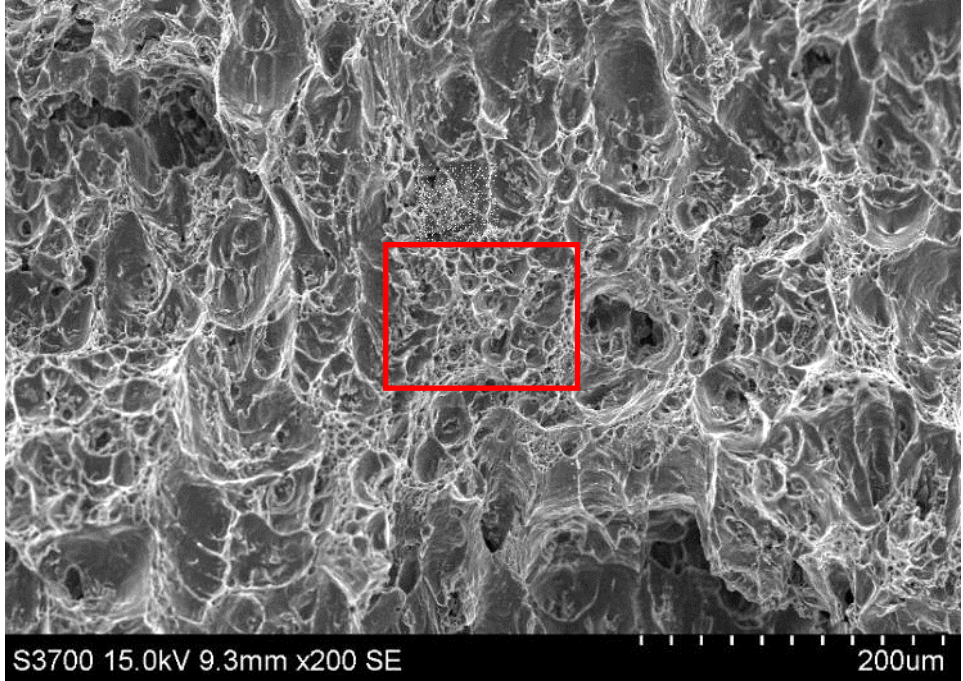
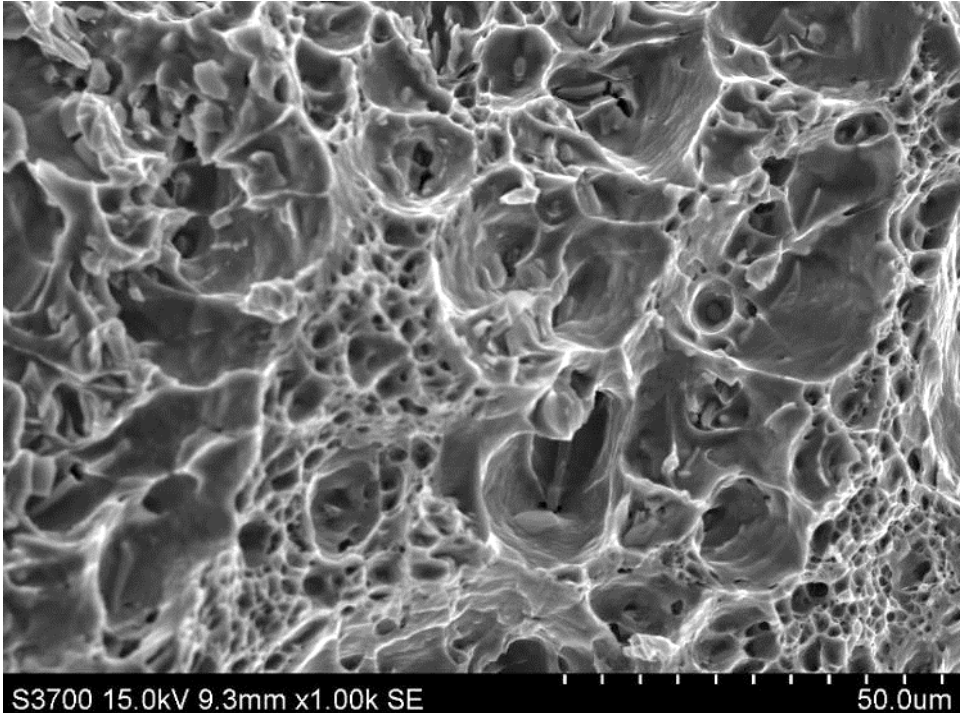
- ・ 供試材 : HZ-A3004 は機械試験用供試材に比較して、合金元素の量が多いことから靱性が劣ると推測される。そこで供試材は HZ-A3004 とし、第 7-1 表に示す 3 標本（供試材 A、B、C）を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材（初期材）及び O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した材料（過時効熱処理材）を試験に用いた。
- ・ 試験片 : JIS Z 2242:2018 による V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2242:2018 により実施した。
- ・ 試験温度 : 常温、250℃とした。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向（L 方向）及び直角な方向（T 方向）
- ・ 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

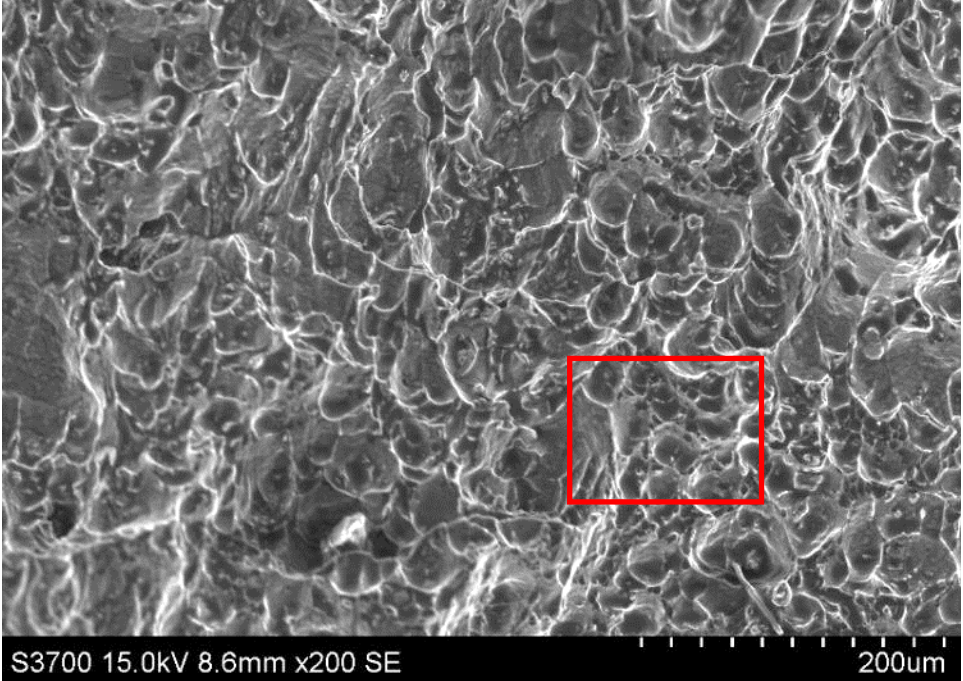
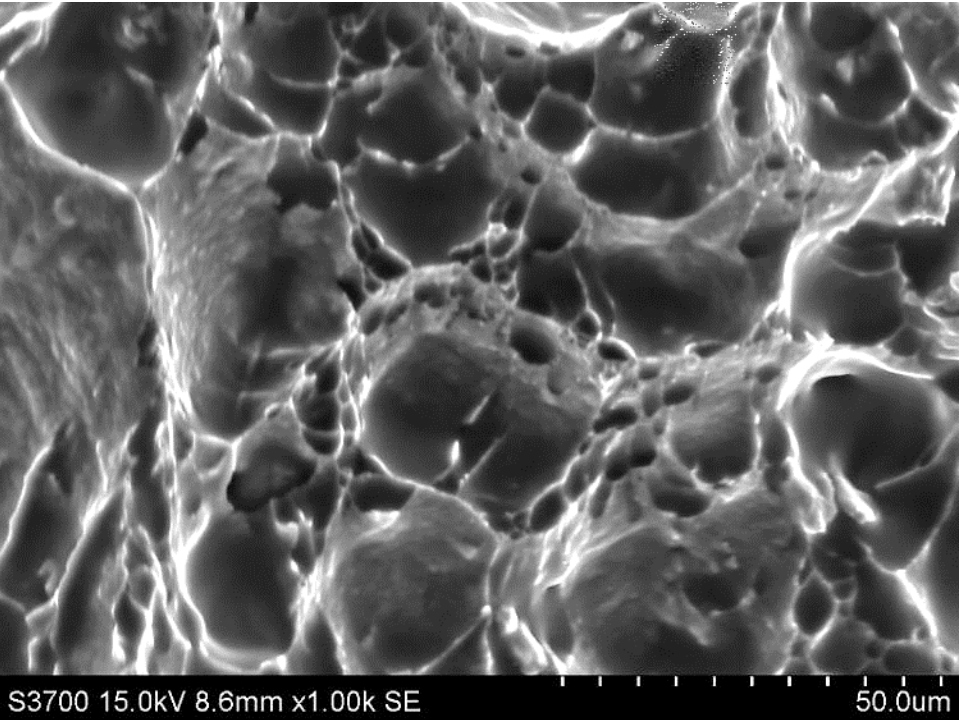
第 7-17 表にシャルピー衝撃試験結果を示す。第 7-24 図から第 7-30 図に代表して供試材 A の走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真を示す。全ての試験片において延性破面率は 100%であり、脆性破壊は認められない。

第 7-17 表 シャルピー衝撃試験結果

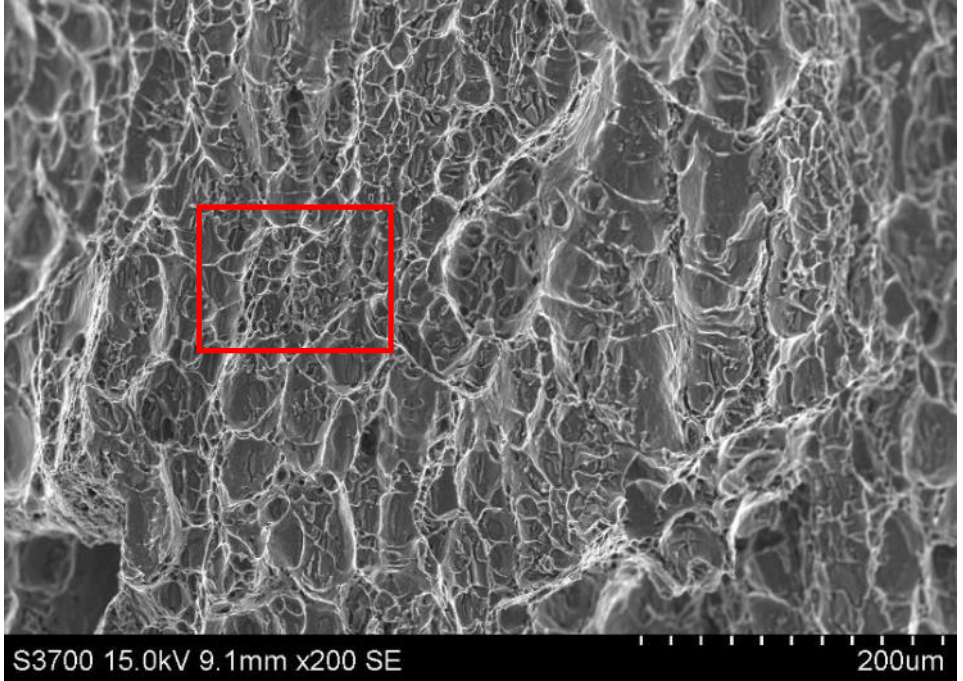
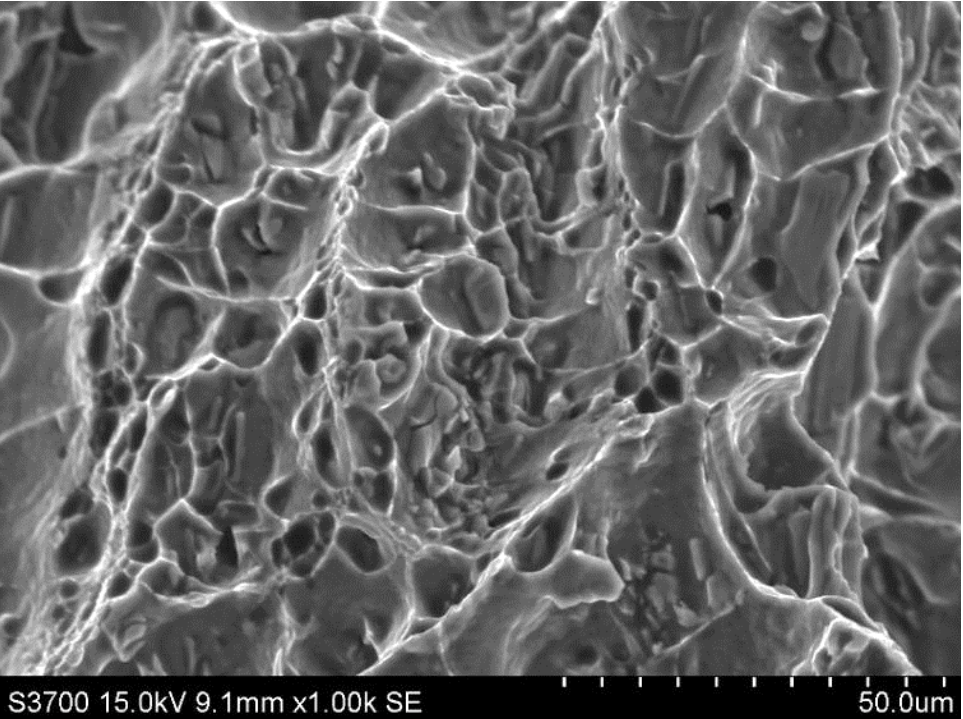
供試材	熱処理	採取方向	試験温度 [°C]	吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
A	なし	L方向	25	44	56	2.51
			250	46	58	2.55
		T方向	25	26	33	1.68
			250	29	37	2.02
	過時効熱処理 □	L方向	25	40	50	2.13
		T方向	25	26	33	1.59
B	なし	L方向	25	44	55	2.50
			250	45	56	2.67
		T方向	25	26	33	1.59
			250	27	34	1.92
	過時効熱処理 □	L方向	25	42	53	2.09
		T方向	25	29	36	1.75
C	なし	L方向	25	43	54	2.46
			250	41	52	2.61
		T方向	25	25	31	1.57
			250	27	34	1.91
	過時効熱処理 □	L方向	25	42	53	1.93
		T方向	25	28	35	1.40
3 標本の 平均値	なし	L方向	25	43	55	2.49
			250	44	55	2.61
		T方向	25	25	32	1.61
			250	28	35	1.95
	過時効熱処理 □	L方向	25	41	52	2.05
		T方向	25	28	34	1.58
			250	25	31	2.05

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：なし（初期材） 試験片採取方向：L 方向 試験温度：常温</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

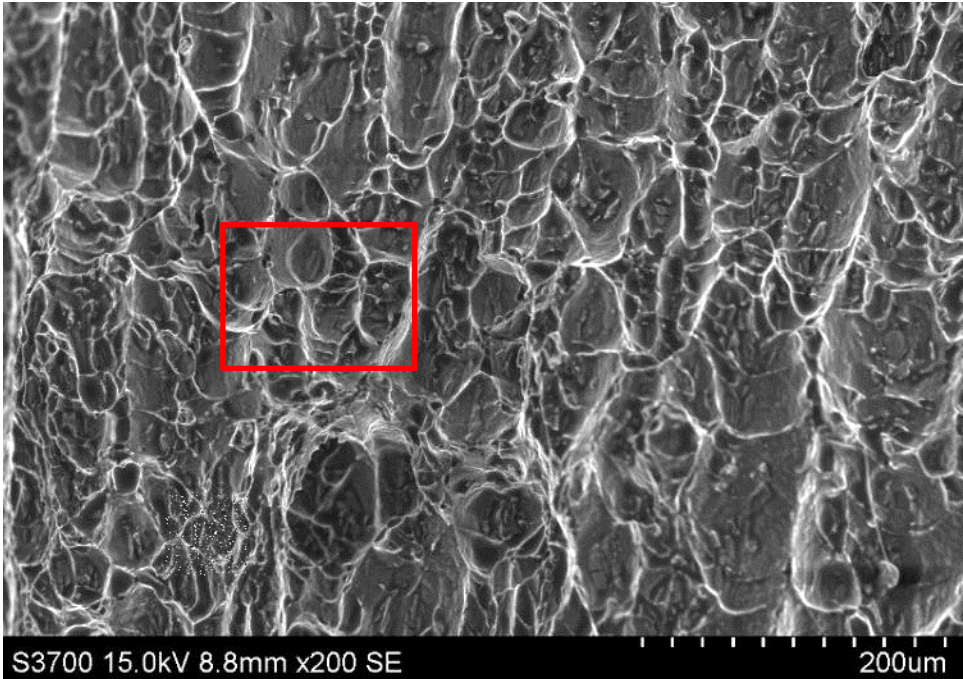
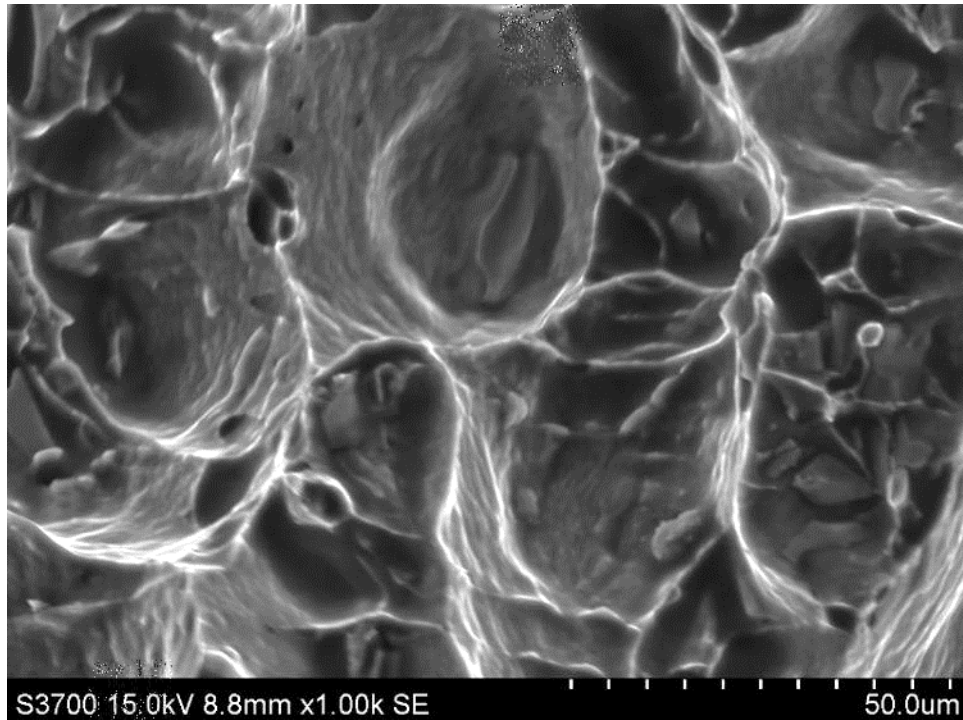
第 7-24 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真（1/7）

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：なし（初期材） 試験片採取方向：L 方向 試験温度：250℃</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

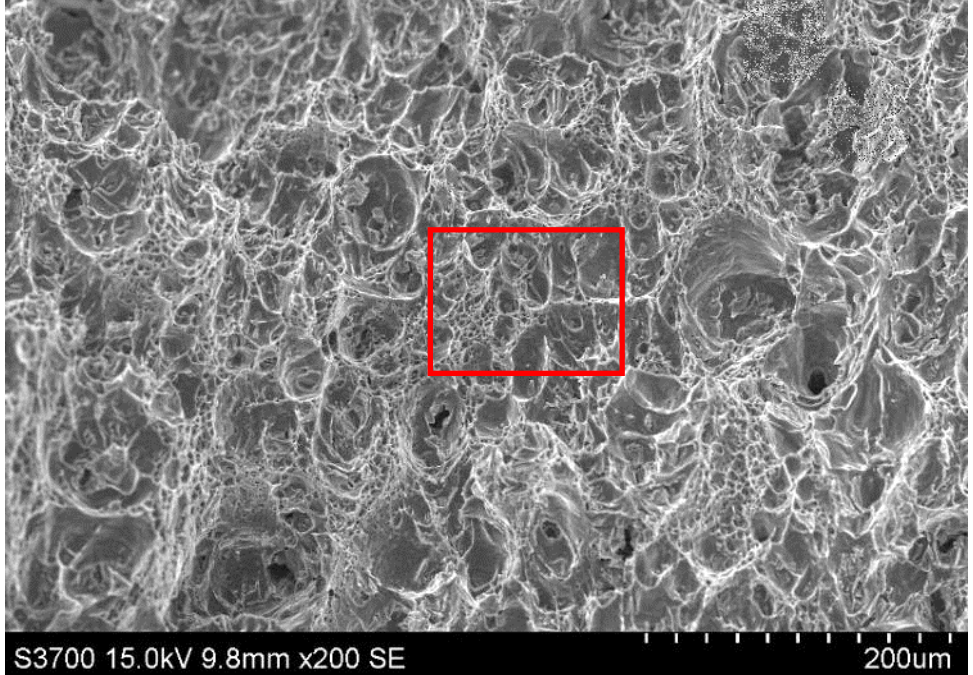
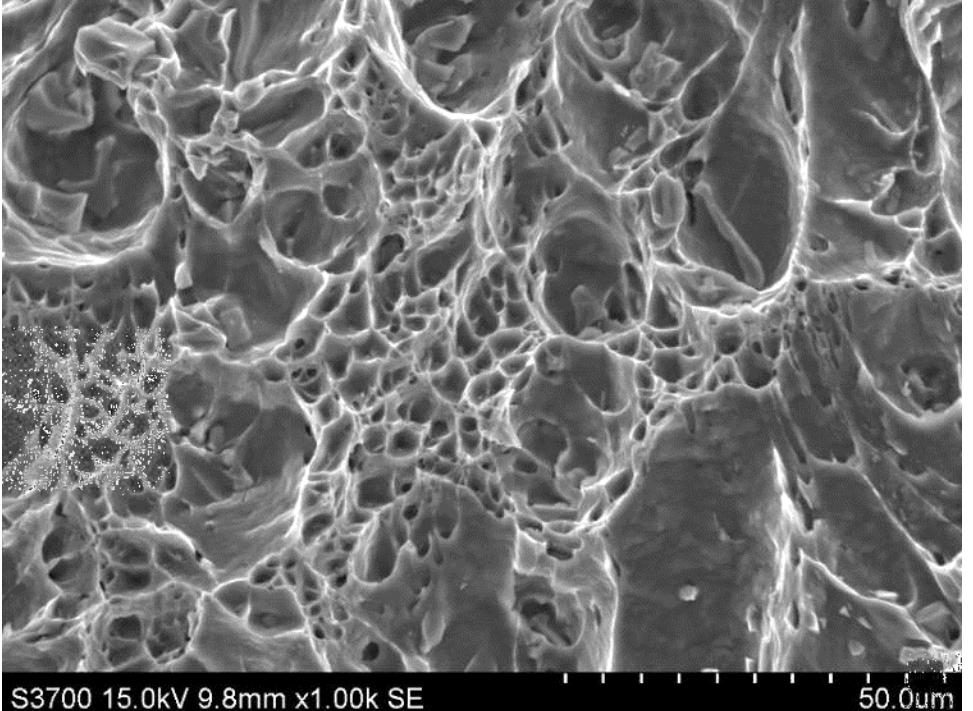
第 7-25 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (2/7)

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：なし（初期材） 試験片採取方向：T 方向 試験温度：常温</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

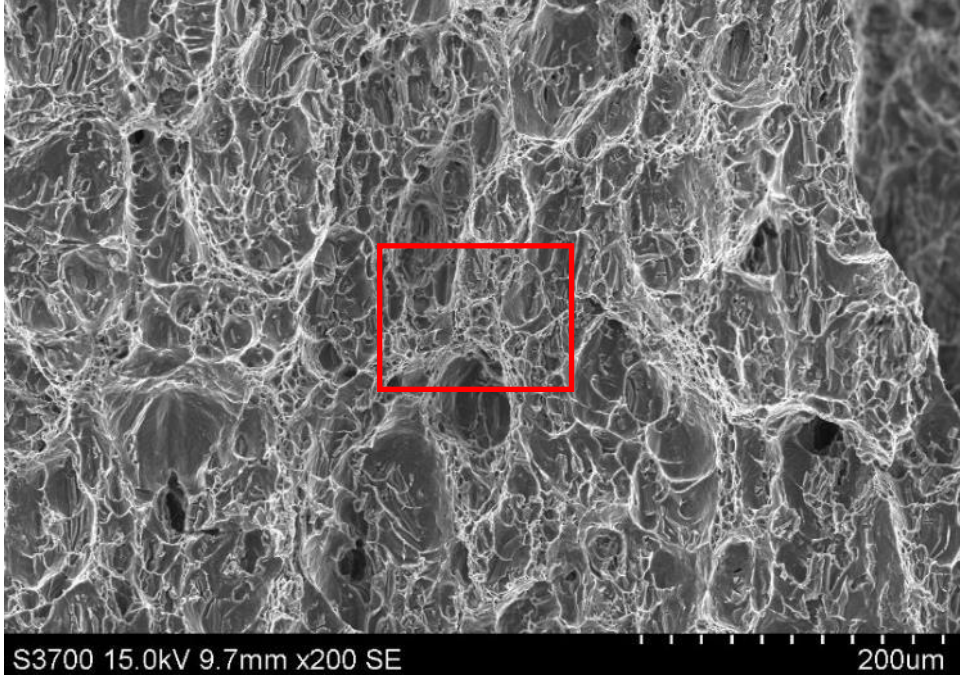
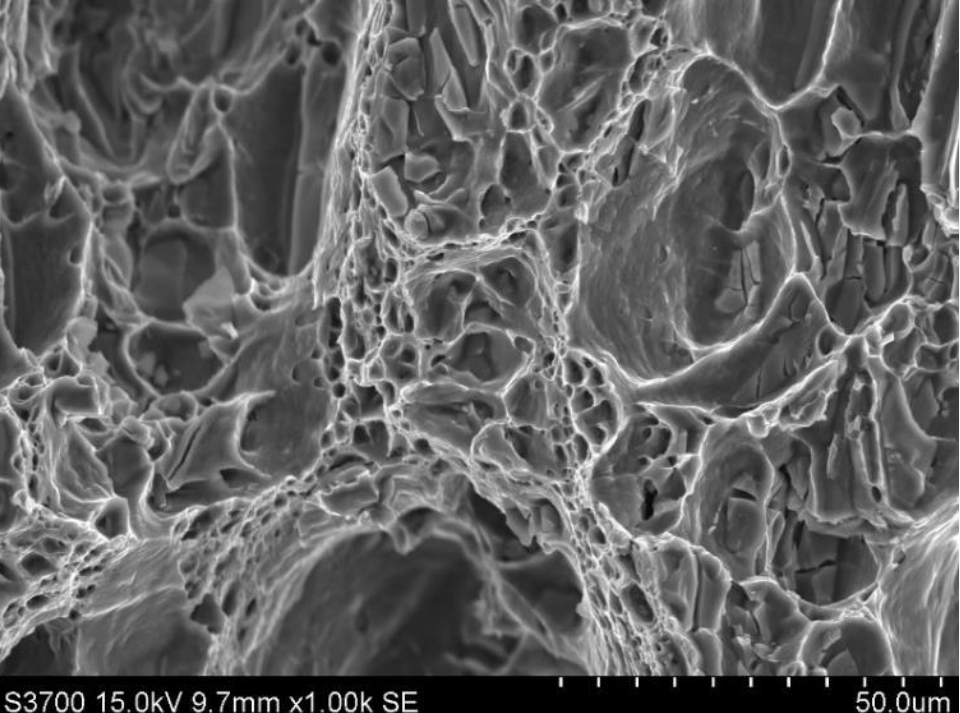
第 7-26 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (3/7)

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：なし（初期材） 試験片採取方向：T 方向 試験温度：250℃</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

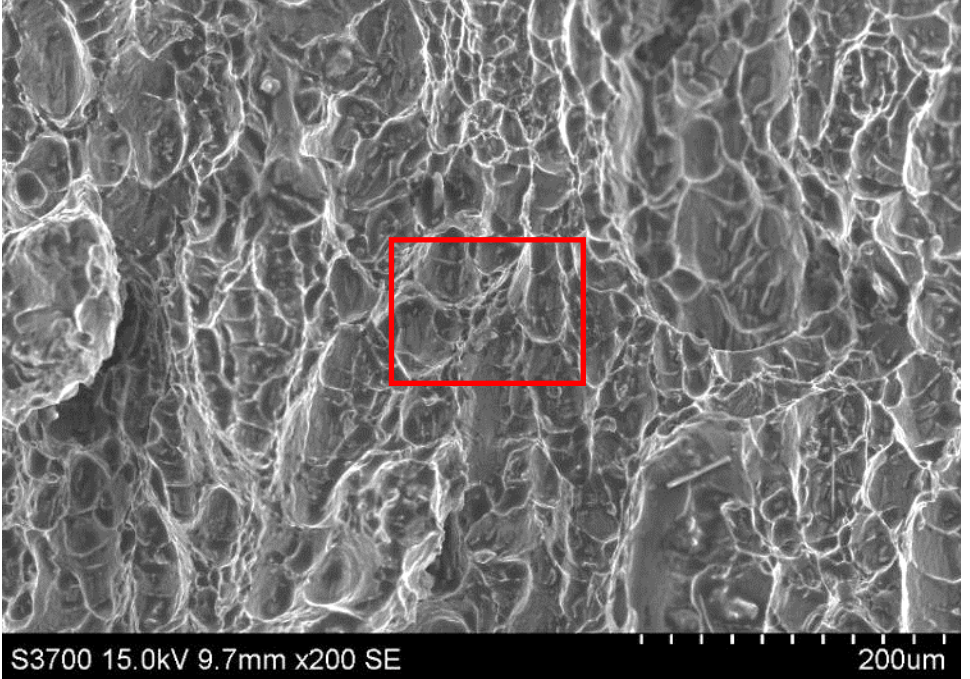
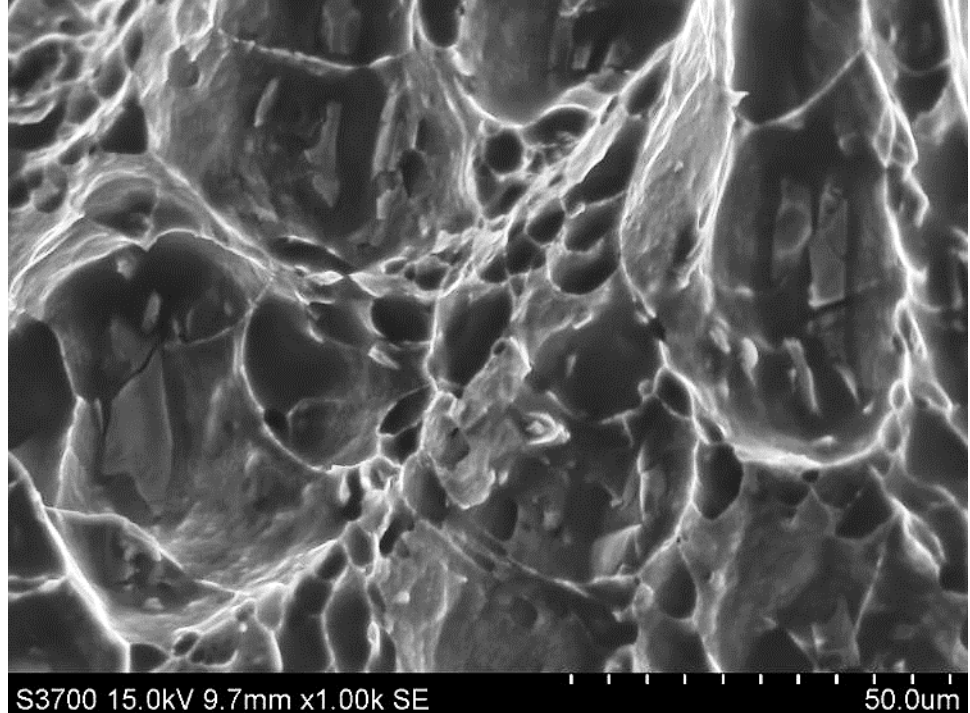
第 7-27 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (4/7)

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理 : 過時効熱処理材 試験片採取方向 : L 方向 試験温度 : 常温</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

第 7-28 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (5/7)

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：過時効熱処理材 試験片採取方向：T 方向 試験温度：常温</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

第 7-29 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (6/7)

<p>試験片</p>	<p>供試材 A 熱処理：過時効熱処理材 試験片採取方向：T 方向 試験温度：250℃</p>
<p>き裂進展方向↑ ×200 倍</p>	
<p>×1,000 倍</p>	

第 7-30 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (7/7)

7.5.5 クリープ特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 供試材は機械試験用供試材（過時効熱処理材）とし、第 7-1 表に示す 3 標本（供試材 D、E、F）を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : 供試材は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2271:2010 による直径 6mm の棒状試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2271:2010 により実施した。
- ・ 試験温度 : 150°C、200°C、250°C、300°C、350°C とした。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に対し直角な方向（T 方向）とした。
- ・ 記録 : クリープ破断時間、定常クリープ速度を測定した。

(2) 試験結果

クリープ試験を実施し、試験データの整理結果から「平均クリープ破断強さと Larson-Miller パラメータ（LMP）の関係」及び「最小クリープ破断強さと LMP の関係」、「定常クリープ速度と LMP の関係」を求めた。

第 7-31 図及び第 7-18 表に平均クリープ破断強さ及び最小クリープ破断強さと LMP の関係を示す。最小二乗法により 1 次式で近似するとともに、LMP に用いる定数 C の値も同時に最小二乗法により求め、 $C=14.71$ を得た。

平均クリープ破断強さと LMP の関係は以下のとおりである。

$$\text{LMP}/1000 = (T + 273.15) (14.71 + \log t_r) / 1000 = 14.293 - 3.651(\log \sigma)$$

ここで、T : 温度 (°C)

t_r : 破断時間 (h)

σ : 応力 (MPa)

最小クリープ破断強さは、95%信頼区間（破損確率 5%）、95%信頼水準の片側許容限界（下限値）として設定した。片側許容限界は $\hat{\mu} - k \times \text{SEE}$ で表される（ $\hat{\mu}$: サンプルにおけるクリープ破断強さの平均値、k : 係数、SEE : Standard Error of Estimate、標準誤差）。クリープ試験のデータサンプル数が $n=75$ であるため、片側許容限界係数 k の値は、 $k=1.977$ とした。また、LMP の標準誤差 SEE は 62.36 である。

最小クリープ破断強さと LMP の関係は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{LMP}/1000 &= (T + 273.15) (14.71 + \log t_r) / 1000 \\ &= 14.293 - 3.651(\log \sigma) - k \times \text{SEE} / 1000 \\ &= 14.293 - 3.651(\log \sigma) - 1.977 \times 62.36 / 1000 \end{aligned}$$

ここで、T : 温度 (°C)
t_r : 破断時間 (h)
σ : 応力 (MPa)
k : 破損確率より強度の片側許容限界を求める場合の係数
SEE : 標準誤差

第 7-32 図及び第 7-19 表は定常クリープ速度と LMP の関係を示す。最小二乗法により 1 次式で近似するとともに、LMP に用いる定数 C の値も同時に最小二乗法により求め、C=15.31 を得た。

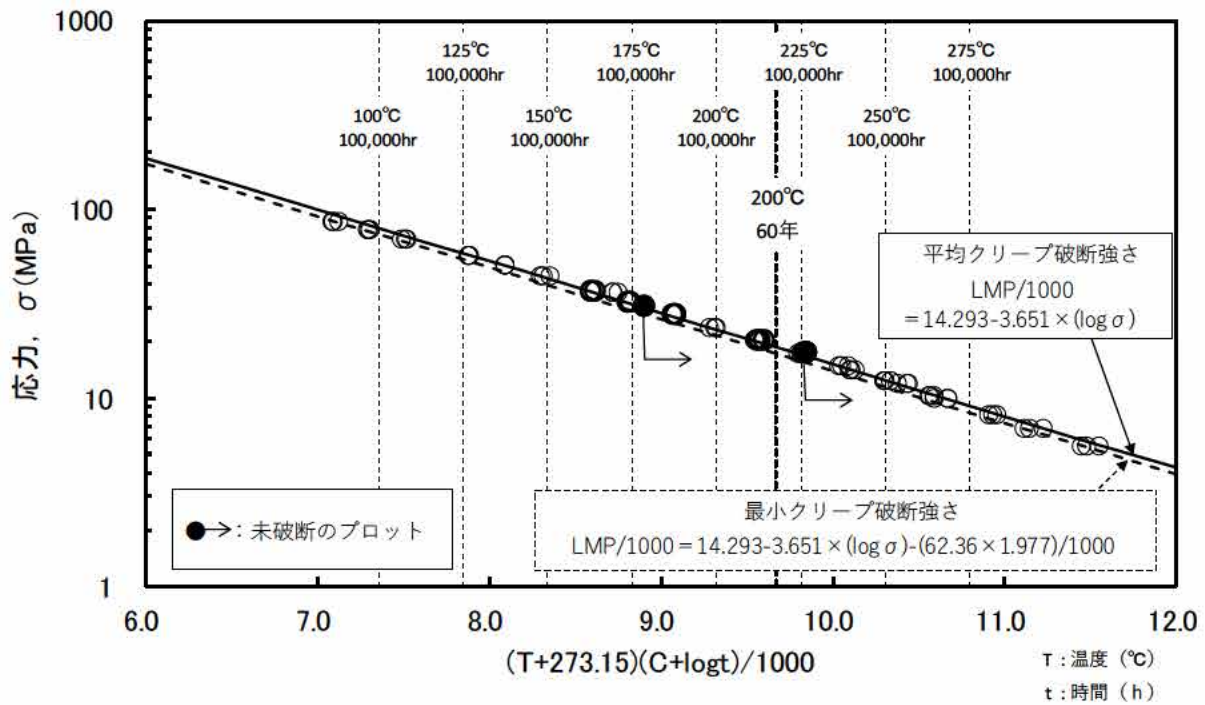
定常クリープ速度と LMP の関係は以下のとおりである。

$$\text{LMP}/1000 = (T + 273.15) (15.31 - \log \dot{\epsilon}) / 1000 = 15.434 - 3.898 (\log \sigma)$$

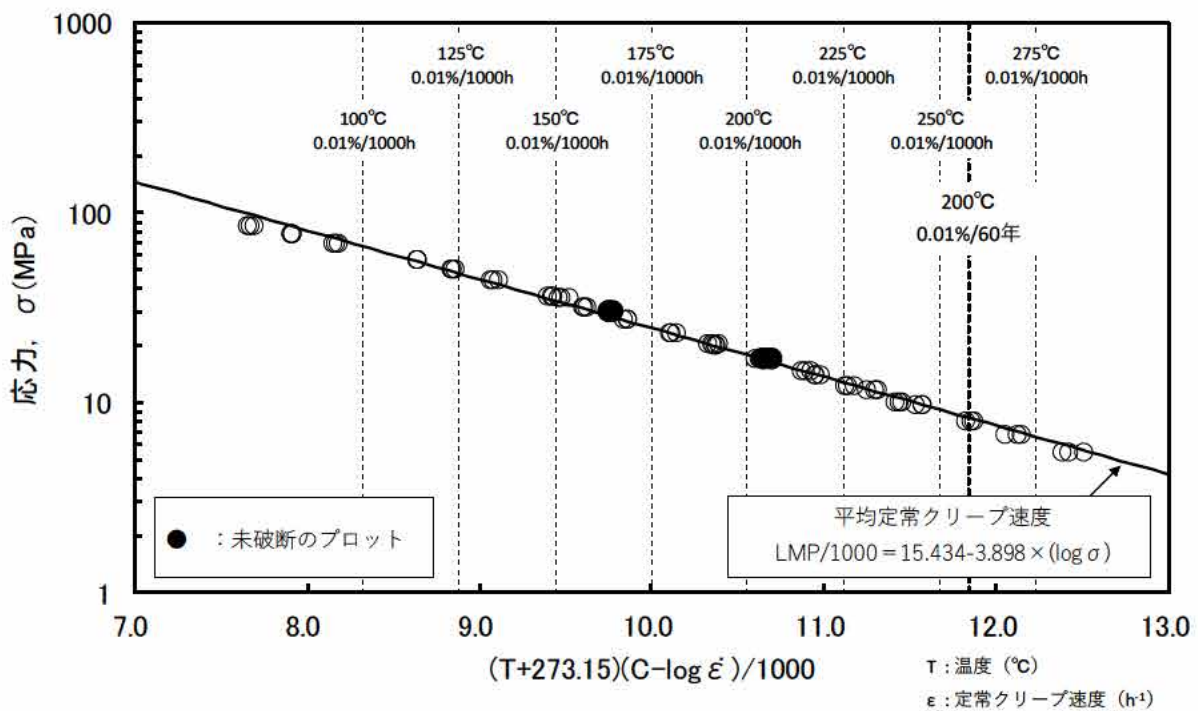
ここで、T : 温度 (°C)
ε̇ : 定常クリープ速度 (h⁻¹)
σ : 応力 (MPa)

第 7-20 表はクリープ試験結果における応力-破断時間データを、第 7-21 表はクリープ試験結果における応力-定常クリープ速度データを示す。

なお、クリープ試験は一部の試験片が未破断であるが、残存する全ての試験片が 10,000 時間を経過しており、クリープ速度が定常クリープ域から加速クリープ域に遷移していることから、許容引張応力の評価に必要な定常クリープ域のクリープ速度 (定常クリープ速度) の取得が完了しているものと判断できるため、2023 年 1 月 17 日 (試験時間 : 12,648h) までのデータを用いて整理するものとする。



第 7-31 図 応力-破断時間プロット



第 7-32 図 応力-定常クリーブ速度プロット

第 7-18 表 各温度における 10 万時間破断強さ

温度 [°C]	LMP/1000	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)
50	6.37	(148)	(136)
65	6.66	(122)	(113)
75	6.86	(108)	(100)
100	7.35	(79)	(73)
125	7.85	(58)	(53)
150	8.34	42	39
175	8.83	31	28
200	9.33	22	21
225	9.82	16	15
250	10.31	12	11
275	10.80	9	8

(注1) () 内は、クリープ破断試験を実施した温度以下における
外挿値である。

第 7-19 表 各温度における 0.01%/1,000h クリープ強さ

温度 [°C]	LMP/1000	0.01%/1000h クリープ強さ [MPa] ^(注1)
50	7.21	(128)
65	7.54	(105)
75	7.77	(92)
100	8.32	(66)
125	8.88	(47)
150	9.44	34
175	10.00	24
200	10.56	17
225	11.11	12
250	11.67	9
275	12.23	6

(注1) () 内は、クリープ破断試験を実施した温度以下における外挿値である。

第 7-20 表 クリーブ試験結果における応力-破断時間データ

供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [h]	LMP/1000 (C=14.71)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [h]	LMP/1000 (C=14.71)
D	150	85.5	108.2	7.09	F	150	85.5	114.6	7.10
	150	77.4	339.3	7.30		150	77.4	350.8	7.30
	150	69.3	1152.1	7.52		150	69.3	1125.1	7.52
	200	56.5	91.3	7.89		200	56.5	88.8	7.88
	200	50.3	250.4	8.09		200	50.3	249.6	8.09
	200	44.3	731.1	8.32		200	44.3	686.9	8.30
	200	35.8	5300.2	8.72		200	35.8	5240.7	8.72
	200	30.7	12648(未破断)	8.90		200	30.7	12648(未破断)	8.90
	250	36.7	51.9	8.59		250	36.7	51.4	8.59
	250	32.2	133.9	8.81		250	32.2	143.5	8.82
	250	27.7	440.5	9.08		250	27.7	419.9	9.07
	250	20.5	3962.1	9.58		250	20.5	3585.4	9.56
	250	17.4	12648(未破断)	9.84		250	17.4	11785.6	9.83
	300	23.5	36.6	9.33		300	23.5	30.9	9.29
	300	20.1	91.1	9.55		300	20.1	88.4	9.55
	300	17.0	281.9	9.84		300	17.0	248.9	9.80
	300	11.8	3104.7	10.43		300	11.8	2539.7	10.38
	300	9.8	8304.2	10.68		300	9.8	6036.5	10.60
	300	14.0	843.3	10.11		300	14.0	814.9	10.10
	350	14.7	31.0	10.10		350	14.7	25.4	10.04
	350	12.3	76.9	10.34		350	12.3	66.7	10.30
	350	10.2	178.9	10.57		350	10.2	176.2	10.57
	350	5.5	5256.3	11.49		350	8.1	639.3	10.91
	350	8.1	691.4	10.94		350	6.8	1360.0	11.12
	350	6.8	1538.9	11.15		350	5.5	4689.7	11.45
	E	150	85.5	133.4		7.12			
150		77.4	370.6	7.31					
150		69.3	1000.4	7.49					
200		56.5	87.0	7.88					
200		50.3	247.9	8.09					
200		44.3	881.7	8.35					
200		35.8	6223.5	8.76					
200		30.7	12648(未破断)	8.90					
250		36.7	56.8	8.61					
250		32.2	133.2	8.81					
250		27.7	448.3	9.08					
250		20.5	4301.9	9.60					
250		17.4	12648(未破断)	9.84					
300		23.5	34.9	9.32					
300		20.1	90.2	9.55					
300		17.0	259.4	9.81					
300		11.8	3197.7	10.44					
300		9.8	8116.9	10.67					
300		14.0	927.6	10.13					
350		14.7	26.7	10.06					
350		12.3	67.8	10.31					
350	10.2	194.2	10.59						
350	8.1	744.3	10.96						
350	5.5	6741.6	11.55						
350	6.8	2021.8	11.23						

第7-21表 クリープ試験結果における応力-定常クリープ速度データ

供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	定常クリープ速度 [1/h]	LMP/1000 (C = 15.31)
D	150	85.5	1.5.E-03	7.67
	150	77.4	4.1.E-04	7.91
	150	69.3	9.3.E-05	8.18
	200	56.5	1.1.E-03	8.64
	200	50.3	4.2.E-04	8.84
	200	44.3	1.3.E-04	9.08
	200	35.8	2.0.E-05	9.47
	200	30.7	4.8.E-06(未破断)	9.76
	250	36.7	2.2.E-03	9.40
	250	32.2	8.5.E-04	9.62
	250	27.7	2.8.E-04	9.87
	250	20.5	3.3.E-05	10.35
	250	17.4	9.0.E-06(未破断)	10.65
	300	23.5	4.0.E-03	10.15
	300	20.1	1.6.E-03	10.38
	300	17.0	5.6.E-04	10.64
	300	11.8	3.9.E-05	11.30
	300	9.8	1.3.E-05	11.58
	300	14.0	1.6.E-04	10.95
	350	14.7	5.8.E-03	10.93
350	12.3	2.3.E-03	11.18	
350	10.2	8.3.E-04	11.46	
350	5.5	2.3.E-05	12.43	
350	8.1	1.9.E-04	11.86	
350	6.8	7.0.E-05	12.13	
E	150	85.5	1.3.E-03	7.70
	150	77.4	3.9.E-04	7.92
	150	69.3	1.1.E-04	8.15
	200	56.5	1.1.E-03	8.64
	200	50.3	4.0.E-04	8.85
	200	44.3	1.1.E-04	9.12
	200	35.8	1.5.E-05	9.53
	200	30.7	4.4.E-06(未破断)	9.78
	250	36.7	1.9.E-03	9.43
	250	32.2	9.0.E-04	9.60
	250	27.7	2.8.E-04	9.87
	250	20.5	2.8.E-05	10.39
	250	17.4	7.3.E-06(未破断)	10.70
	300	23.5	4.6.E-03	10.11
	300	20.1	1.7.E-03	10.36
	300	17.0	5.7.E-04	10.63
	300	11.8	3.7.E-05	11.32
	300	9.8	1.30E-05	11.58
	300	14.0	1.4.E-04	10.98
	350	14.7	6.6.E-03	10.90
350	12.3	2.7.E-03	11.14	
350	10.2	8.8.E-04	11.44	
350	8.1	1.8.E-04	11.87	
350	5.5	1.70E-05	12.51	
350	6.8	6.4.E-05	12.15	

供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	定常クリープ速度 [1/h]	LMP/1000 (C = 15.31)
F	150	85.5	1.6.E-03	7.66
	150	77.4	4.0.E-04	7.92
	150	69.3	1.0.E-04	8.17
	200	56.5	1.1.E-03	8.64
	200	50.3	3.8.E-04	8.86
	200	44.3	1.4.E-04	9.07
	200	35.8	1.9.E-05	9.48
	200	30.7	5.0.E-06(未破断)	9.75
	250	36.7	2.0.E-03	9.42
	250	32.2	8.1.E-04	9.63
	250	27.7	3.1.E-04	9.84
	250	20.5	3.6.E-05	10.33
	250	17.4	8.60E-06	10.66
	300	23.5	4.5.E-03	10.12
	300	20.1	1.6.E-03	10.38
	300	17.0	6.3.E-04	10.61
	300	11.8	4.8.E-05	11.25
	300	9.8	1.5.E-05	11.54
	300	14.0	1.6.E-04	10.95
	350	14.7	7.3.E-03	10.87
350	12.3	2.8.E-03	11.13	
350	10.2	9.6.E-04	11.42	
350	8.1	2.1.E-04	11.83	
350	6.8	9.2.E-05	12.06	
350	5.5	2.7.E-05	12.39	

8. 設計用強度

HZ-A3004 の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効による強度低下を考慮し、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効条件（200℃→100℃×60年）を模擬した機械試験用供試材の材料試験により得られた機械的性質を保守的に包絡するように設定する。

8.1 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7-4表に示す規格値に第7-21図に示すトレンド曲線から設計降伏点を算出した結果を第8-1表に示す。

第8-1表 各温度における設計降伏点 S_y

項目	試験温度[°C]												
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275	
① S_y (RT) [MPa]	78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
② $K(S_y)$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.949	0.870	0.762	0.631	
③ $K(S_y) S_y$ (RT) [MPa]	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	74.0	67.9	59.4	49.2	
④ ①および③の最小値 [MPa]	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	74.0	67.9	59.4	49.2	
⑤ S_y 値 (④を超えない整数) [MPa]	78	78	78	78	78	78	78	78	74	67	59	49	

ここで、

S_y (RT) : 過時効熱処理後の常温の設計降伏点（耐力） [MPa]

$K(S_y)$: 温度トレンド曲線（各温度での値が低温の値を超えないように修正）

$$= 9.97461 \times 10^{-13} T^5 - 6.98055 \times 10^{-10} T^4 + 1.34436 \times 10^{-7} T^3 - 1.44655 \times 10^{-5} T^2 + 1.36540 \times 10^{-3} T + 0.97718$$

S_y 値 : $K(S_y) \cdot S_y$ (RT) [MPa]

8.2 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 7-4 表に示す規格値に第 7-22 図に示すトレンド曲線から設計引張強さを算出した結果を第 8-2 表に示す。

第 8-2 表 各温度における設計引張強さ S_u

項目	試験温度[°C]												
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275	
① $S_T(RT)$ [MPa]	166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
② $K(S_u)$	1.000	0.980	0.981	0.979	0.960	0.911	0.834	0.741	0.644	0.555	0.482	0.417	
③ $K(S_u) \cdot S_T(RT)$ [MPa]	166.0	162.7	162.8	162.5	159.3	151.2	138.5	122.9	106.8	92.2	79.9	69.2	
④ ①および③の最小値 [MPa]	166.0	162.7	162.8	162.5	159.3	151.2	138.5	122.9	106.8	92.2	79.9	69.2	
⑤ S_u 値 (④を超えない整数) [MPa]	166	162	162	162	159	151	138	122	106	92	79	69	

ここで、

$S_T(RT)$: 過時効熱処理後の常温の引張強さ [MPa]

$K(S_u)$: 温度トレンド曲線 (各温度での値が低温の値を超えないように修正)

$$= -4.22753 \times 10^{-12} T^5 + 3.53427 \times 10^{-9} T^4 - 1.02703 \times 10^{-6} T^3 + 1.13742 \times 10^{-4} T^2 - 5.30291 \times 10^{-3} T + 1.06876$$

S_u 値 : $K(S_u) \cdot S_T(RT)$ [MPa]

8.3 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、第 8-1 表及び第 8-2 表を引用して設計応力強さを算出した結果を第 8-3 表に示す。

材料規格の新規材料採用ガイドラインでは、引張強さに係る $(1/3) \cdot S_T(RT) \cdot K(S_u)$ に係数 1.1 を乗じることが定められている。これは鉄鋼材料における高温特性を考慮して設定されたものと推察されるため、保守的な評価となるよう係数に 1.0 を採用した。

第 8-3 表 各温度における設計応力強さ S_m

項目	試験温度[°C]	-40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
	~40												
① $(1/3) S_T(RT)$ [MPa]		57.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
② $(1/3) S_T(RT) K(S_u)$ [MPa]		—	56.3	56.3	56.2	55.0	52.1	47.7	42.3	36.7	31.7	27.5	23.4
③ $(2/3) S_y(RT)$ [MPa]		52.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④ $(2/3) S_y(RT) K(S_y)$ [MPa]		—	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	49.3	45.2	39.6	32.8
⑤ ①~④の最小値 [MPa]		52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	47.7	42.3	36.7	31.7	27.5	23.4
⑥ S_m 値 (⑤を超えない整数) [MPa]		52	52	52	52	52	52	47	42	36	31	27	23

ここで、

$S_T(RT)$: 過時効熱処理後の常温の引張強さ [MPa]

$K(S_u)$: 過時効熱処理後の温度 T の引張強さ / 過時効熱処理後の常温の引張強さ

$S_y(RT)$: 過時効熱処理後の常温の設計降伏点 (耐力) [MPa]

$K(S_y)$: 過時効熱処理後の温度 T の設計降伏点 / 過時効熱処理後の常温の設計降伏点

また、各温度での値が低温の値を超えないように修正した。

8.4 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、第 7-16 表、第 7-17 表、第 8-1 表及び第 8-2 表の結果を引用し、算出した結果を第 8-4 表に示す。

材料規格の新規材料採用ガイドラインでは、引張強さに係る $(1/3) \cdot S_T(RT) \cdot K(S_u)$ に係数 1.1 を乗じることが定められている。これは鉄鋼材料における高温特性を考慮して設定されたものと推察されるため、保守的な評価となるよう係数に 1.0 を採用した。

第 8-4 表 各温度における許容引張応力 S

項目	試験温度[°C]	-40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
	~40												
① (1/3.5) $S_T(RT)$ [MPa]		47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
② (1/3.5) $S_T(RT) K(S_u)$ [MPa]		-	46	46	46	45	43	39	35	30	26	22	19
③ (2/3) $S_y(RT)$ [MPa]		52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
④ (2/3) $S_y(RT) K(S_y)$ [MPa]		-	52	52	52	52	52	52	52	49	45	39	32
⑤ S_{Ravg} [MPa]		-	148.0	122.8	108.4	79.4	58.2	42.7	31.2	22.9	16.8	12.3	9.0
⑥ S_{Rmin} [MPa]		-	136.9	113.6	100.3	73.5	53.9	39.5	28.9	21.2	15.5	11.3	8.3
⑦ $10^{(1/n)}$		-	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71
⑧ F_{avg}		-	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
⑨ $F_{avg} S_{Ravg}$ [MPa]		-	99.2	82.3	72.6	53.2	39.0	28.6	20.9	15.3	11.3	8.2	6.0
⑩ $0.8 S_{Rmin}$ [MPa]		-	109.5	90.9	80.2	58.8	43.1	31.6	23.1	17.0	12.4	9.0	6.6
⑪ $1.0 S_C$ [MPa]		-	128.8	105.7	92.6	66.6	47.9	34.4	24.8	17.8	12.8	9.2	6.6
⑫ ①~④および⑨~⑪の最小値 [MPa]		47.0	46.0	46.0	46.0	45.0	39.0	28.6	20.9	15.3	11.3	8.2	6.0
⑬ S値 (⑫を超えない整数) [MPa]		47	46	46	46	45	38	28	20	15	11	8	6

ここで、

S_{Ravg} : 100,000h で破断を生じる平均応力 [MPa]

S_{Rmin} : 100,000h で破断を生じる最小応力 [MPa]

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

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。

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

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

また、各温度での値が低温の値を超えないように修正した。

9. その他の物性

9.1 熱物性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 供試材は HZ-A3004 とし、第 7-1 表に示す 1 標本 (供試材 B) を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材 (初期材)、さらに O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した材料 (過時効熱処理材) を試験に用いた。
- ・ 試験片 : JIS H 7801:2005 による直径 10mm×厚さ 1mm の試験片を用いた。
- ・ 試験温度 : 25℃、50℃、65℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃、350℃とした。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向 (L 方向) 及び直角な方向 (T 方向)
- ・ 記録 : 熱拡散率、比熱、熱伝導率、密度を測定した。
- ・ 測定方法 :

熱拡散率測定

測定方法 : レーザフラッシュ法 (JIS H 7801:2005)

測定雰囲気 : 真空中

比熱測定

測定方法 : レーザフラッシュ法 (JIS H 7801:2005)

測定雰囲気 : 大気中 (室温)、真空中 (高温)

密度測定

測定方法 : 液中ひょう量法 (アルキメデス法) (JIS Z 8804:2012)


標準物質 : 精製水

(2) 試験結果

熱伝導率、比熱、熱拡散率を測定した結果を第 9-1 表から第 9-3 表に示す。

試験の結果、供試材の HZ-A3004 の熱物性値について、初期材と過時効熱処理材で有意な差はない。

第 9-1 表 熱物性測定結果のまとめ

熱物性測定条件				熱物性測定結果			
材料	供試材	熱処理	試験温度 [°C]	比熱 (J/(kg · K))	熱拡散率 (cm ² /s)	熱伝導率 (W/(m · K))	密度 ^(注1) (g/cm ³)
HZ- A3004	B	なし	25	893	0.604	147	2.72
			50	909	0.610	151	
			65	915	0.614	153	
			75	919	0.619	154	
			100	929	0.623	157	
			125	944	0.627	161	
			150	958	0.631	164	
			175	967	0.632	166	
			200	975	0.632	168	
			225	979	0.631	168	
			250	981	0.631	170	
			275	985	0.630	171	
			300	987	0.625	171	
			350	997	0.619	173	
		過時効熱処理 	25	897	0.606	148	2.72
			50	912	0.613	152	
			65	928	0.618	156	
			75	931	0.622	157	
			100	940	0.627	161	
			125	956	0.631	164	
			150	968	0.632	167	
			175	971	0.631	167	
			200	986	0.631	169	
			225	992	0.631	170	
			250	1000	0.629	172	
			275	1010	0.627	172	
300	1015	0.624	173				
350	1035	0.618	174				

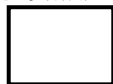
(注 1) 密度の測定は常温にて実施した。

第 9-2 表 熱物性測定結果の詳細 (1/2)

熱物性測定条件				熱物性測定結果				
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度	比熱 (J/(kg・K))	熱拡散率 (cm ² /s)	熱伝導率 (W/(m・K))	密度 ^(注1) (g/cm ³)
HZ-A3004	B	なし	L方向	25°C	894	0.613	149	2.71
				50°C	908	0.621	153	
				65°C	915	0.623	154	
				75°C	918	0.629	156	
				100°C	925	0.633	159	
				125°C	935	0.635	161	
				150°C	947	0.640	164	
				175°C	952	0.642	166	
				200°C	953	0.642	166	
				225°C	957	0.641	166	
				250°C	959	0.641	167	
				275°C	966	0.640	168	
				300°C	969	0.635	167	
				350°C	987	0.629	168	
			T方向	25°C	892	0.595	144	2.72
				50°C	909	0.599	148	
				65°C	915	0.605	151	
				75°C	919	0.609	152	
				100°C	932	0.613	155	
				125°C	952	0.618	160	
				150°C	968	0.621	164	
				175°C	982	0.622	166	
				200°C	996	0.622	169	
				225°C	1001	0.620	170	
				250°C	1002	0.620	172	
				275°C	1003	0.619	173	
300°C	1004	0.615	174					
350°C	1007	0.609	177					

(注 1) 密度の測定は常温にて実施した。

第 9-3 表 熱物性測定結果の詳細 (2/2)

熱物性測定条件				熱物性測定結果				
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	比熱 (J/(kg・K))	熱拡散率 (cm ² /s)	熱伝導率 (W/(m・K))	密度 ^(注1) (g/cm ³)
HZ-A3004	B	過時効熱処理 	L方向	25	897	0.609	149	2.72
				50	912	0.617	153	
				65	928	0.619	156	
				75	929	0.623	157	
				100	939	0.629	161	
				125	961	0.633	165	
				150	967	0.634	167	
				175	972	0.633	167	
				200	987	0.634	170	
				225	994	0.633	171	
				250	1000	0.631	172	
				275	1010	0.629	173	
				300	1010	0.625	172	
			350	1040	0.618	175		
			T方向	25	897	0.603	147	2.72
				50	911	0.609	151	
				65	928	0.616	155	
				75	932	0.621	157	
				100	941	0.624	160	
				125	951	0.629	163	
				150	968	0.630	166	
				175	969	0.629	166	
				200	985	0.627	168	
				225	989	0.629	169	
				250	1000	0.627	171	
				275	1010	0.624	171	
300	1020	0.623		173				
350	1030	0.617	173					

(注 1) 密度の測定は常温にて実施した。

9.2 弾性定数

(1) 試験条件

- ・供試材 : 供試材は HZ-A3004 とし、第 7-1 表に示す 1 標本 (供試材 B) を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材及び O 材 (初期材)、さらに O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した材料 (過時効熱処理材) を試験に用いた。
- ・試験片 : 長さ 40mm×幅 5mm×厚さ 1mm の試験片を用いた。
- ・試験温度 : 25°C、50°C、65°C、75°C、100°C、125°C、150°C、175°C、200°C、225°C、250°C、275°C、300°C、350°C とした。
- ・試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向 (L 方向) 及び直角な方向 (T 方向)
- ・記録 : 縦弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比を測定した。
- ・測定方法 : 片持ち共振法 (Ar ガス中) で実施した。

(2) 試験結果

縦弾性係数、せん断弾性係数及びポアソン比を測定した結果の詳細を第 9-4 表から第 9-6 表に示す。

この結果を整理して第 9-7 表に示す。縦弾性係数 E 及びせん断弾性係数 τ は二次多項式を用いて、試験温度 (常温~350°C) における温度依存性を求めた。ポアソン比 ν は温度に対してほぼ一定であり、平均値を用いた。なお、常温の試験温度は 25°C であるが、材料規定では常温の物性値を 20°C で規定するため、下式から 20°C の値を算出して表記した。

・初期材 (H112 及び O)

縦弾性係数 E : $-6.962 \times 10^{-5} T^2 - 8.584 \times 10^{-3} T + 73.60$ (GPa)

せん断弾性係数 τ : $-2.214 \times 10^{-5} T^2 - 3.087 \times 10^{-3} T + 26.11$ (GPa)

ポアソン比 ν : 0.40

・過時効熱処理材

縦弾性係数 E : $-6.702 \times 10^{-5} T^2 - 8.988 \times 10^{-3} T + 74.03$ (GPa)

せん断弾性係数 τ : $-1.987 \times 10^{-5} T^2 - 4.755 \times 10^{-3} T + 26.71$ (GPa)

ポアソン比 ν : 0.39

ここで、

T : 温度 (°C)


第 9-4 表 弾性定数測定結果の詳細 (1/3)

弾性定数測定条件				弾性定数測定結果			
材料	供試材 符号	熱処理	方向	試験温度 [°C]	縦弾性 係数 (GPa)	せん断 弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
HZ-A3004	B	初期 (H112)	L方向	25	73.3	26.3	0.39
				50	72.9	26.2	0.39
				65	72.3	26.1	0.39
				75	72.0	26.0	0.39
				100	71.4	25.8	0.39
				125	70.7	25.5	0.38
				150	70.0	25.3	0.38
				175	69.3	25.0	0.38
				200	68.6	24.7	0.39
				225	67.8	24.4	0.39
				250	66.7	24.1	0.38
				275	65.5	23.7	0.38
			300	64.2	23.2	0.38	
			350	61.1	22.1	0.38	
			T方向	25	74.1	26.5	0.40
				50	73.8	26.2	0.41
				65	73.3	26.2	0.40
				75	73.2	26.0	0.40
				100	72.6	25.8	0.41
				125	72.0	25.6	0.41
				150	71.3	25.4	0.41
				175	70.6	25.1	0.41
				200	69.8	24.9	0.40
				225	68.7	24.6	0.40
250	67.8	24.3		0.39			
275	66.7	23.9		0.39			
300	65.4	23.4	0.40				
350	62.5	22.4	0.39				


第 9-5 表 弾性定数測定結果の詳細 (2/3)

弾性定数測定条件					弾性定数測定結果		
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	縦弾性 係数 (GPa)	せん断 弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
HZ-A3004	B	初期 (O)	L方向	25	72.9	25.3	0.44
				50	72.4	25.1	0.44
				65	72.2	25.0	0.45
				75	71.9	24.9	0.44
				100	71.3	24.8	0.44
				125	70.7	24.6	0.44
				150	70.1	24.5	0.43
				175	69.6	24.2	0.44
				200	68.9	24.1	0.43
				225	68.2	23.9	0.43
				250	67.1	23.6	0.42
				275	66.0	23.4	0.41
				300	64.8	23.0	0.41
				350	61.9	22.1	0.40
			T方向	25	73.8	26.4	0.40
				50	73.2	26.2	0.40
				65	73.0	26.0	0.40
				75	72.9	25.9	0.40
				100	72.3	25.7	0.40
				125	71.6	25.5	0.40
				150	70.9	25.3	0.40
				175	70.2	25.0	0.40
				200	69.4	24.8	0.40
				225	68.5	24.5	0.40
				250	67.3	24.2	0.39
				275	66.3	23.8	0.39
300	64.8	23.3	0.39				
350	61.9	22.2	0.39				

第 9-6 表 弾性定数測定結果の詳細 (3/3)

弾性定数測定条件				弾性定数測定結果			
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	縦弾性 係数 (GPa)	せん断 弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
HZ-A3004	B	過時効熱処理 	L方向	25	73.5	26.7	0.38
				50	73.1	26.5	0.38
				65	72.8	26.4	0.38
				75	72.6	26.2	0.38
				100	71.9	26.0	0.38
				125	71.2	25.8	0.38
				150	70.6	25.5	0.38
				175	69.9	25.2	0.39
				200	69.0	25.0	0.38
				225	68.2	24.7	0.38
				250	67.3	24.3	0.38
				275	66.1	24.0	0.38
			300	65.0	23.5	0.38	
			350	61.6	22.4	0.37	
			T方向	25	74.3	26.6	0.40
				50	74.0	26.4	0.40
				65	73.5	26.3	0.40
				75	73.3	26.2	0.40
				100	72.8	26.0	0.40
				125	72.2	25.7	0.40
				150	71.5	25.5	0.40
				175	70.8	25.2	0.40
				200	70.0	25.0	0.40
				225	69.1	24.7	0.40
250	68.4	24.4		0.40			
275	67.3	24.0		0.40			
300	66.0	23.6	0.40				
350	63.1	22.6	0.40				

第 9-7 表 弾性定数測定結果のまとめ

弾性定数測定				弾性定数測定結果		
材料	供試材	熱処理	温度 [°C]	縦弾性 係数 (GPa)	せん断 弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
HZ-A3004	B	初期 (H112,O)	20	73.4	26.0	0.40
			50	72.9	25.9	0.40
			65	72.7	25.8	0.40
			75	72.5	25.7	0.40
			100	72.0	25.5	0.40
			125	71.4	25.3	0.40
			150	70.7	25.1	0.40
			175	69.9	24.8	0.40
			200	69.1	24.6	0.40
			225	68.1	24.2	0.40
			250	67.1	23.9	0.40
			275	65.9	23.5	0.40
			300	64.7	23.1	0.40
			350	62.0	22.3	0.40
		過時効熱処理 	20	73.8	26.6	0.39
			50	73.4	26.4	0.39
			65	73.2	26.3	0.39
			75	73.0	26.2	0.39
			100	72.5	26.0	0.39
			125	71.9	25.8	0.39
			150	71.2	25.5	0.39
			175	70.4	25.3	0.39
			200	69.6	25.0	0.39
			225	68.6	24.6	0.39
			250	67.6	24.3	0.39
			275	66.5	23.9	0.39
300	65.3	23.5	0.39			
350	62.7	22.6	0.39			

9.3 線膨張係数


(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 供試材は HZ-A3004 とし、表 7-1 に示す 3 標本（供試材 A、B、C）を試験に用いた。試験片は、板の表面とその中心との中央部から採取した。
- ・ 熱処理 : JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに [] の過時効熱処理を施した材料（過時効熱処理材）を試験に用いた。
- ・ 試験片 : JIS Z 2285 による長さ 20mm×直径 5mm 試験片を用いた。
- ・ 試験温度 : 20℃、50℃、65℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃とした。
- ・ 試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向（L 方向）及び直角な方向（T 方向）
- ・ 記録 : 瞬時線膨張係数及び平均線膨張係数を測定した。

(2) 試験結果


線膨張係数を測定した結果を第 9-8 表から第 9-11 表に示す。

第 9-8 表 線膨張係数測定結果のまとめ

測定条件			測定結果	
材料	熱処理	試験温度 [°C]	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)	
			区分A ^(注1)	区分B ^(注1)
HZ-A3004	過時効熱処理 	50	23.6	23.2
		65	23.9	23.3
		75	24.1	23.5
		100	24.6	23.7
		125	24.9	24.0
		150	25.3	24.2
		175	25.8	24.4
		200	26.2	24.6
		225	26.6	24.8
		250	27.0	25.0
		275	27.4	25.2
		300	27.7	25.4


(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示す。

第 9-9 表 線膨張係数測定結果の詳細 (1/3)

測定条件					測定結果	
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)	
					区分A ^(注1)	区分B ^(注1)
HZ-A3004	A	過時効熱処理 	L	50	23.6	23.1
				65	23.9	23.2
				75	24.1	23.4
				100	24.5	23.6
				125	24.9	23.9
				150	25.2	24.1
				175	25.7	24.3
				200	26.1	24.5
				225	26.5	24.7
				250	26.9	24.9
				275	27.3	25.1
				300	27.6	25.3
			T	50	23.7	23.2
				65	23.9	23.3
				75	24.2	23.4
				100	24.6	23.7
				125	25.0	23.9
				150	25.4	24.1
				175	25.9	24.4
				200	26.3	24.6
				225	26.6	24.8
				250	26.9	25.0
				275	27.4	25.2
				300	27.6	25.4


(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示す。

第 9-10 表 線膨張係数測定結果の詳細 (2/3)

測定条件					測定結果	
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)	
					区分A ^(注1)	区分B ^(注1)
HZ-A3004	B	過時効熱処理 	L	50	23.5	23.2
				65	23.9	23.4
				75	24.1	23.6
				100	24.5	23.9
				125	24.8	24.1
				150	25.3	24.3
				175	25.7	24.5
				200	26.1	24.7
				225	26.6	24.9
				250	26.9	25.1
				275	27.3	25.3
				300	27.7	23.3
			T	50	23.6	23.3
				65	23.8	23.4
				75	24.1	23.7
				100	24.6	23.9
				125	24.8	24.1
				150	25.4	24.4
				175	25.9	24.6
				200	26.3	24.8
				225	26.7	25.0
				250	27.1	25.2
				275	27.5	25.5
				300	27.9	27.9

(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示す。

第 9-11 表 線膨張係数測定結果の詳細 (3/3)

測定条件					測定結果	
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度 [°C]	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)	
					区分A ^(注1)	区分B ^(注1)
HZ-A3004	C	過時効熱処理 	L	50	23.6	23.1
				65	23.9	23.2
				75	24.1	23.4
				100	24.4	23.6
				125	24.7	23.8
				150	25.2	24.0
				175	25.7	24.3
				200	26.1	24.5
				225	26.5	24.7
				250	26.9	24.9
				275	27.2	25.1
				300	27.4	25.3
			T	50	23.6	23.1
				65	23.9	23.3
				75	24.2	23.4
				100	24.7	23.7
				125	24.9	24.0
				150	25.4	24.2
				175	25.9	24.4
				200	26.2	24.6
				225	26.7	24.8
				250	27.1	25.0
				275	27.6	25.3
				300	27.8	25.5

(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示す。

10. 参考文献

- 1) 天野英隆, 小松伸也, 池田勝彦, 河本知広, アルミニウム中の Mg の 523K 以下の平衡固溶度, 軽金属, 第 52 卷 第 5 号, (2002), p210-p215
- 2) 梶山毅, 深田和博, Al-Mn 系合金, 軽金属, 第 38 卷 第 6 号, (1988), p362-p373

バスケットに用いるアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の
経年変化を考慮した強度特性について

1. 概要

特定兼用キャスクは、設計貯蔵期間（60 年間）に渡り貯蔵する使用済燃料集合体の崩壊熱にさらされる。特にバスケットに用いるアルミニウム合金は、長期間の熱ばく露に伴う過時効により、機械的性質が変化すると考えられる。

本書は、Hitz-P24 型キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）（以下「HZ-A3004」と称する。）について、設計貯蔵期間の熱ばく露に伴う材質変化の模擬方法について検討した。さらに、設計貯蔵期間の熱ばく露を模擬した供試材の作製方法及び作製した供試材の強度試験結果について述べる。

2. バスケット用アルミニウム合金について

2.1 「金属キャスクバスケット用アルミニウム合金事例規格の廃止」について¹⁾

（一社）日本機械学会（以下「JSME」という。）は、「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格（2007 年版）」（JSME S FA1-2007）（以下「金属キャスク構造規格」という。）を 2008 年 2 月に発行しており、その中でバスケット用アルミニウム合金の規格として、添付 3-3「バスケット材料としてアルミニウム合金及びボロン添加アルミニウム合金を使用する場合の規定」を定めている。

また、その中に新規アルミニウム合金をバスケット材料として登録するための「アルミニウム合金バスケット用新規材料採用ガイドライン」も含まれており、このガイドラインに基づき、これまで、別紙 1-1 表に示す 7 件の事例規格が登録されていた。

別紙 1-1 表 事例規格として登録されたアルミニウム合金

事例規格番号	標題	発行時期
JSME S FA-CC-001	バスケット用ボロン添加アルミニウム合金 1%B-A6061-T6, 1%B-A6061-T651 に関する規定	2009 年 4 月
JSME S FA-CC-002	バスケット用アルミニウム合金 A6061-T6, A6061-T651 に関する規定	2009 年 4 月
JSME S FA-CC-003	バスケット用アルミニウム合金 A5083FH-0 に関する規定	2009 年 4 月
JSME S FA-CC-005	バスケット用ボロン添加アルミニウム合金 BC-A6N01SS-T1 に関する規定	2009 年 4 月
JSME S FA-CC-008	バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 1%B-A3004N-H112 に関する規定	2013 年 6 月
JSME S FA-CC-009	バスケット用アルミニウム合金 A3004N-H112 に関する規定	2013 年 6 月
JSME S FA-CC-010	バスケット用アルミニウム合金 A3004-H112 に関する規定	2013 年 6 月

2.1.1 添付 3-3 及び事例規格が廃止された理由

JSME は、これまで登録された事例規格のバスケット用アルミニウム合金について、強度及び破壊靱性・耐衝撃特性に係る性能が必ずしも十分な保守性を担保できないことから、添付 3-3 及び事例規格を 2015 年 10 月 1 日に廃止した。

(1) 破壊靱性及び耐衝撃特性に関する懸念

金属キャスク構造規格では、アルミニウム合金の破壊靱性及び耐衝撃特性の指標として、鉄鋼材料に準じた横膨出量を採用しているが、その根拠が不十分であることが判明した。(アルミニウム合金の場合は鉄鋼材料のような脆性破壊は生じないが、横膨出量に対応した吸収エネルギーは鉄鋼材料より 1 桁小さく、同じ横膨出量でもエネルギー吸収能は鉄鋼材料より数段低い。)

そのため、アルミニウム合金に適した独自の破壊靱性及び耐衝撃特性の判定指標を新たに制定する必要がある。

(2) 強度（設計降伏点[Sy 値]、設計引張強さ[Su 値]の設定）に関する懸念

合金系ごとの強度に関する懸念事項を別紙 1-2 表に示す。

別紙 1-2 表 合金系ごとの強度に関する懸念事項

合金系	懸念事項
6000 系 (Al-Mg-Si 系合金)	Si、Cu の析出強化は長期間の入熱による粗大化の進行に伴い効果を失うと予想され、Mg が Si-Cu 析出物に取られて Mg 固溶強化も期待できないため、60 年後の状態でも期待しうる合金元素の強化機構はないと判断される。 また、材料試験時の過時効熱処理が不適切で強度の過大評価となっている。
5000 系 (Al-Mg 系合金)	長期間の入熱により過飽和 Mg が析出すると Mg の溶解度が減少しその時点の Mg 溶解度相当の強度しかなくなるが、事例規格値は、Mg 過飽和が解消されていない状態での数値であり、過大評価となっている。
3000 系 (Al-Mn 系合金)	強化機構は Mg 固溶強化と Mn 析出強化なので 60 年後でも効果は期待できるが、試験に Cu 等が高い濃度の供試材が使用されており、Cu 析出強化効果による嵩上げが含まれている可能性が高い。

2.2 HZ-A3004 について

別紙 1-3 表に HZ-A3004 の化学成分を示す。Hitz-P24 型金属キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金 (HZ-A3004) は、JIS H 4000 : 2014 「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」 (以下「JIS H 4000」という。) の A3004 の成分を基本とし、設計貯蔵期間を経た材料の強度への寄与が期待できる元素 (Mg、Mn) を、規定の範囲内において多めに設定した。また、事例規格の廃止理由である不純物元素を、製造可能な範囲で添加量を少なく設定した。

なお、A3004 は非熱処理型の 3000 系 (Al-Mn 系) 合金に分類され、Mg 及び Mn を 1 mass% 程度添加することで、加工性、耐食性を維持しつつ、構造強度を改善した材料であり、A3004 は、主に 500~600℃ の均質化処理で析出した Mn 系分散相が強度の向上を担う。Mn 系分散相は、300℃ 以下において比較的安定であり、設計貯蔵期間の熱ばく露 (200~100℃) を受けた材料においても析出強化が期待できる。また、A3004 は、設計貯蔵期間において過時効を経ても、母相中に一定量の Mg が固溶することから固溶強化が期待できる。

2.3 強化機構

以下は、HZ-A3004 における代表的な 4 つの強化機構を示す。併せて、設計貯蔵期間の熱ばく露が各強化機構に及ぼす影響を示す。

(1) 転位強化 (加工硬化) : HZ-A3004 などのアルミニウム合金は、圧延加工などにより転位密度が大きくなると、強度が高くなる。一方、材料を加熱すると転位の消滅や再配列が起こる (回復)。設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 においては、熱ばく露により転位強化が消失すると考えられる。

(2) 結晶粒微細化 : 結晶粒が微細化することで強度が高くなるが、高温に加熱されて再結晶が生じると結晶粒が粗大化し、結晶粒微細化による強化は低減する。一方、Mn や Mg が 0.01at% 以上添加されたアルミニウム合金は、再結晶温度が 200℃ を上回ると考えられる²⁾。したがって、設計貯蔵期間の熱ばく露を受けた HZ-A3004 においては、結晶粒微細化による強化機構は低減するものの、一部残存すると考えられる。

- (3) 分散強化 : 母相中に微細に析出した分散相により、転位の移動を妨げる。別紙 1-1 図に Al-Mn 2 元系平衡状態図を示す²⁾。HZ-A3004 においては、主に Mn 系分散相 (Al₆Mn) が分散強化を担う。Mn は 300℃以下において Al 母相中にほとんど固溶せず、第二相 (Al₆Mn など) として比較的安定的に存在する。したがって、設計貯蔵期間の熱ばく露を受けた HZ-A3004 においては、Mn 系分散相による分散強化は低減するものの一部残存すると考えられる。
- (4) 固溶強化 : 母相金属原子と大きさの異なる原子が固溶すると、周囲の結晶格子がひずみ、転位の移動を妨げる。別紙 1-2 図に Al-Mg 2 元系平衡状態図を示す²⁾。HZ-A3004 においては、主に Mg が固溶強化を担う。共晶温度 (450℃) 以下において、Al 母相中の Mg 固溶限度は温度低下とともに減少する。設計貯蔵期間の熱ばく露を受けた HZ-A3004 においては、Al 母相中に一定量の Mg が固溶していると考えられ、固溶強化が期待できる。

2.4 化学成分

先述した通り、HZ-A3004 は JIS H 4000 に規定された A3004 をベースとしており、以下の考え方に基づいて成分規定範囲を狭めている。

- (1) 不純物元素 : HZ-A3004 においては、不純物元素 (Si、Fe、Cu、Zn) による固溶強化、析出強化は期待していない。また、不純物元素が Mg と金属間化合物を形成した場合、母相の Mg 固溶量が減少し、強度が低下する恐れがある。したがって、不純物元素については製造可能な範囲で添加量の許容値を低く設定した。
- (2) Mn : Mn 系分散相による分散強化は、設計貯蔵期間を経た材料でも期待できるため、JIS H 4000 A3004 の成分規定範囲内で、成分規定範囲の下限値を高く設定した。
- (3) Mg : Mg による固溶強化は、設計貯蔵期間を経た材料でも期待できるため、JIS H 4000 A3004 の成分規定範囲内で、成分規定範囲の下限値を高く設定した。

2.5 製造プロセス

別紙 1-3 図に HZ-A3004 の製造プロセスを示す。HZ-A3004 は JIS H 4000 に準拠して製造し、質別は H112 とする。

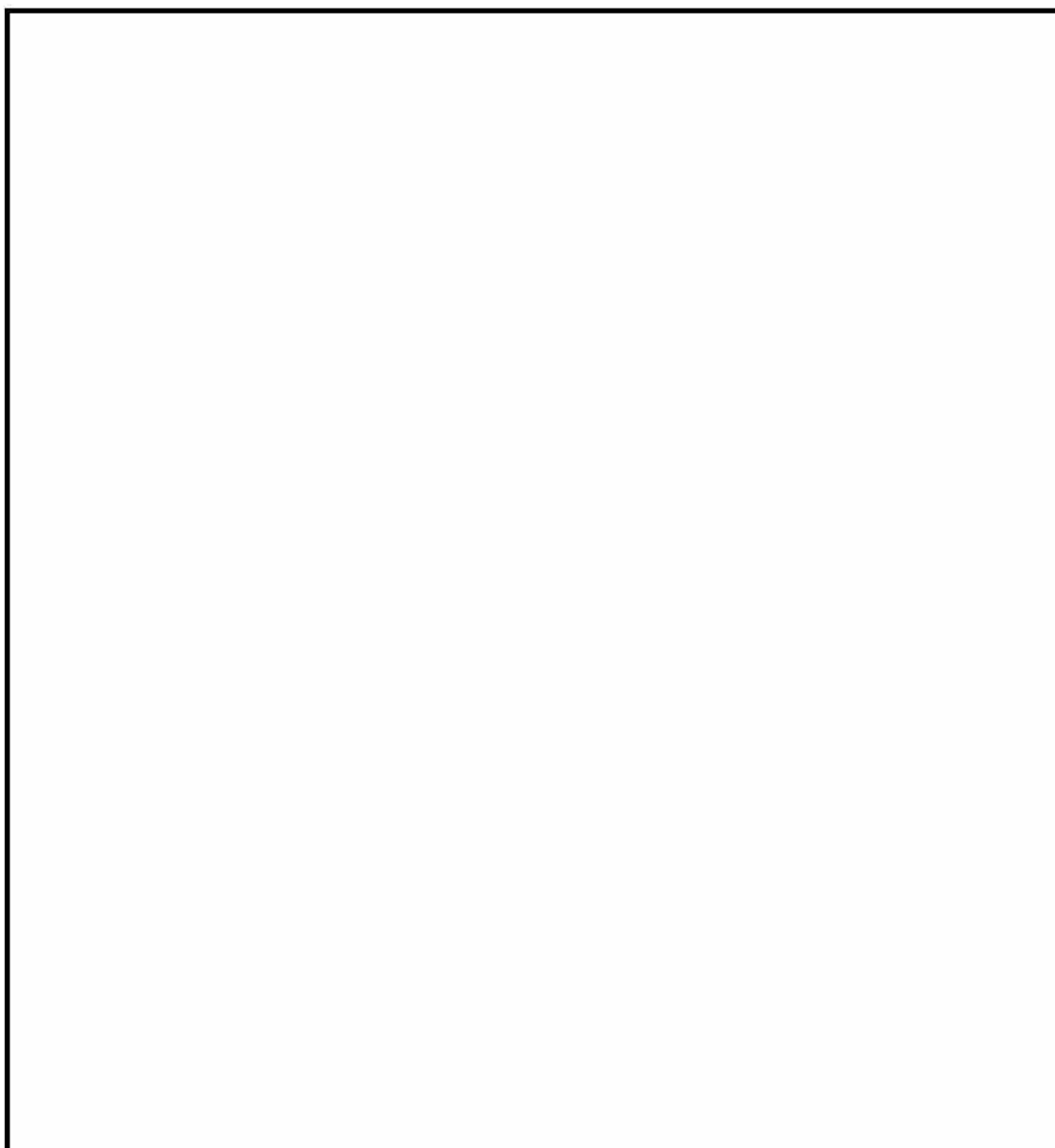
2.6 使用環境

特定兼用キャスクに装荷される使用済燃料集合体は貯蔵初期から末期にかけて崩壊熱が減衰し、バスケットの温度は、約 200℃から約 100℃まで低下すると想定される。バスケットはこのような温度環境に貯蔵前後の輸送を含めて最大 60 年間さらされる。

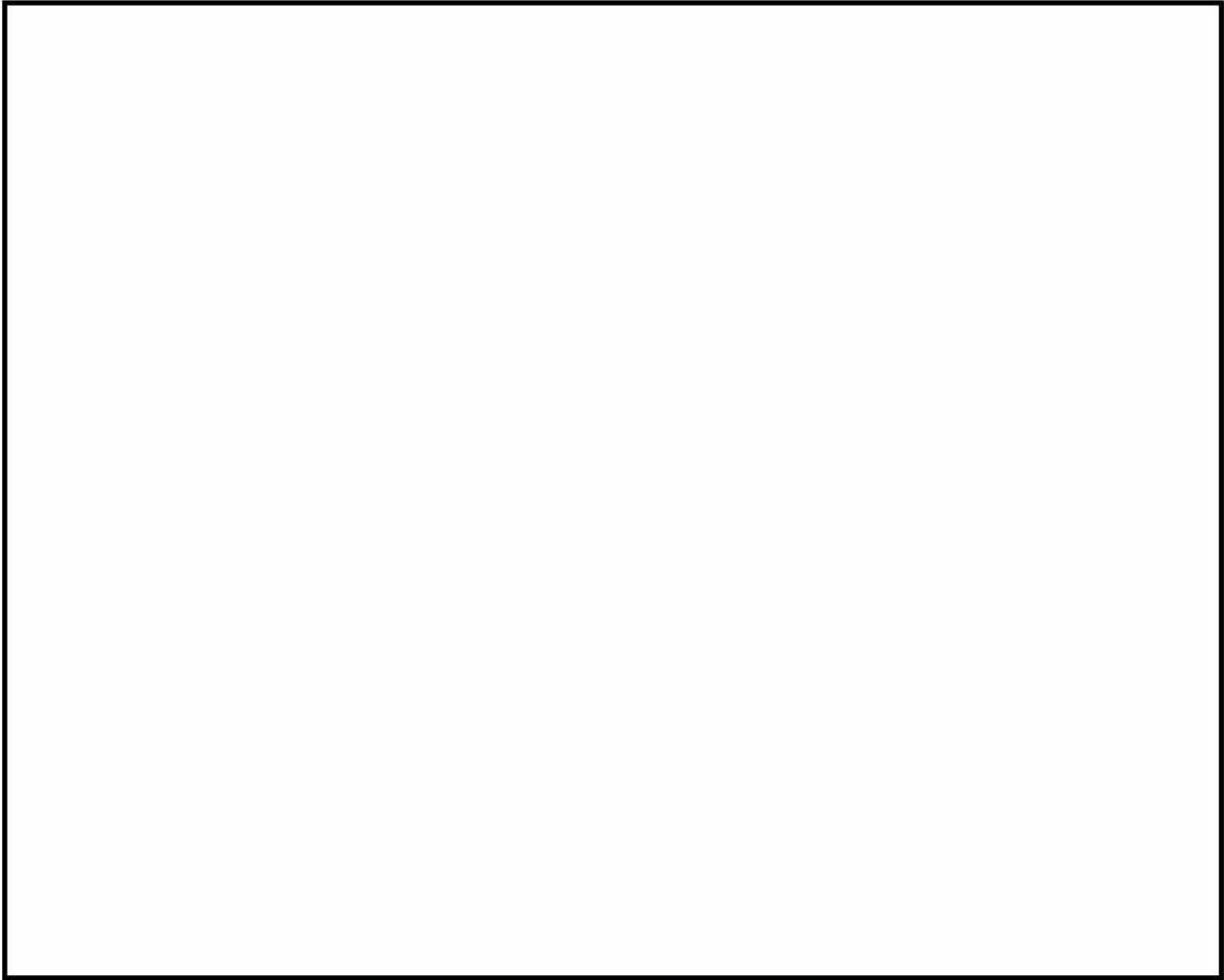
HZ-A3004 は、設計貯蔵期間中の熱ばく露により材質変化（金属組織変化）が生じ、強度が低下すると考えられる。次項では、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の材料強度を模擬した供試材の作製方法について検討した。

別紙 1-3 表 HZ-A3004 の化学成分規定値

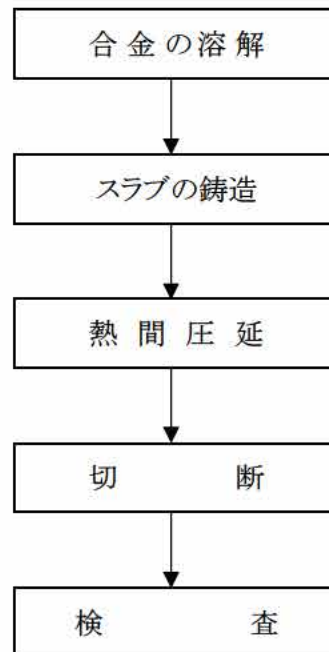
材料名称	化学成分 (mass%)					
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
規定値	0.15	0.7	0.05	1.1	1.0	0.05
HZ-A3004	以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下
(参考)	0.30	0.7	0.25	1.0	0.8	0.25
JIS H 4000 A3004	以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下



別紙 1-1 図 Al-Mn 2 元系平衡状態図²⁾



別紙 1-2 図 Al-Mg 2 元系平衡状態図²⁾



別紙 1-3 図 HZ-A3004 の製造プロセス

3. 設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の模擬

設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 は、熱ばく露に伴う以下の事象によって、強度が低下すると考えられる。

- (1) 圧延加工などで結晶内部に蓄えられたひずみエネルギーが解放される現象（回復）が起こり、転位密度が低下する。
- (2) 熱ばく露により Mn 系分散相が粗大化して分散相の数密度が減少する。
- (3) 設計貯蔵期間の温度低下に伴って Mg が析出し、母相の Mg 固容量が減少する。

(1)、(2)については、設計貯蔵期間（60 年間）の熱履歴と同等な過時効熱処理を施すことで模擬できると考えられる。一方、過時効熱処理は貯蔵時よりも高温で実施されるため、過時効熱処理された HZ-A3004 は設計貯蔵期間後よりも母相の Mg 固容量が多くなる。そのため、HZ-A3004 を過時効熱処理するのみでは、設計貯蔵期間後よりも母相の Mg 固容量が多くなるため HZ-A3004 の強度を保守的に模擬することができない。そこで、計算材料科学に基づく計算により設計貯蔵期間である 60 年間の Mg 固容量の変化量を推定するとともに、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の Mg 固容量を保守的に模擬した機械試験用供試材の組成（Mg 添加量）を検討した。

3.1 機械試験用供試材の過時効熱処理条件の検討

(1) 検討方法

HZ-A3004 の設計貯蔵期間中の材質変化を模擬するため、時間-温度パラメータ法のひとつである Larson-Miller パラメータ (LMP) を用い、設計貯蔵期間の熱履歴と保守的に同等の過時効熱処理条件を検討した。LMP は以下により与えられる。

$$LMP = T \times (\log t + C)$$

ここで、 t は時間[h]、 T は温度[°C]、 C は材料定数である。材料定数 C は、独立行政法人 原子力安全基盤機構が実施した試験³⁾の値を参考に 14.0 とした。^(注1) また、設計貯蔵期間の熱履歴は 200°C×60 年とし、アルミニウム母相中の構成元素に生じる拡散の影響を保守的に考慮した。さらに、Mn は 300°C以下において、Al 中にはほとんど固溶しない。Mn の固溶と析出状態が設計貯蔵期間 (200°C~100°C程度) と同等になるように、過時効熱処理温度は 200°C~300°Cの範囲から選択した。

(注 1) 原子力安全基盤機構が実施した試験で用いられた LMP の定数 $C=14.0$ は、3000 系アルミニウム合金よりも強度に劣る純アルミニウム (A1100-O) のクリープデータにより定められた値。

(2) 検討結果

別紙 1-4 表に設計貯蔵期間中の熱履歴に対する各種の過時効熱処理温度における等価保持時間の検討結果を示す。設計貯蔵期間の熱履歴 (200°C×60 年) に対し、の過時効熱処理では等価保持時間がとなる。そこで、過時効熱処理温度はとし、過時効熱処理時間はに対し安全率を見込んでとした。過時効熱処理条件を以下に示す。

過時効熱処理条件：

参考として、別紙 1-4 表に設計貯蔵期間中の温度低下を考慮した 200°C→100°C×60 年を想定した場合の検討結果を併記した。この 200°C→100°C×60 年の場合、設計貯蔵期間に対するでの等価保持時間はである。したがって、の過時効熱処理時間は、十分に保守的な数値であると考えられる。

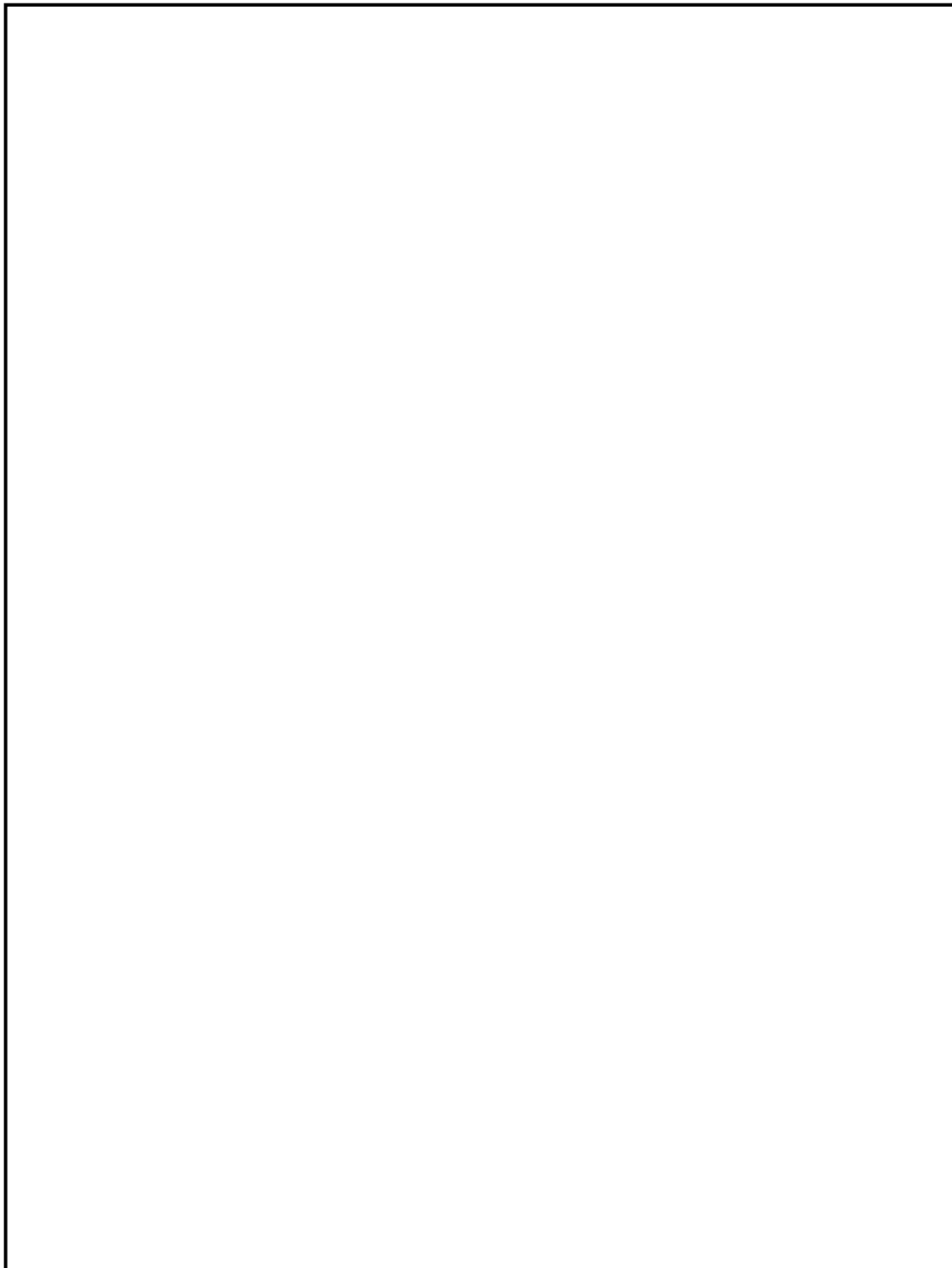
別紙 1-4 表 設計貯蔵期間中の熱履歴に対する各種の過時効熱処理温度における等価保持時間

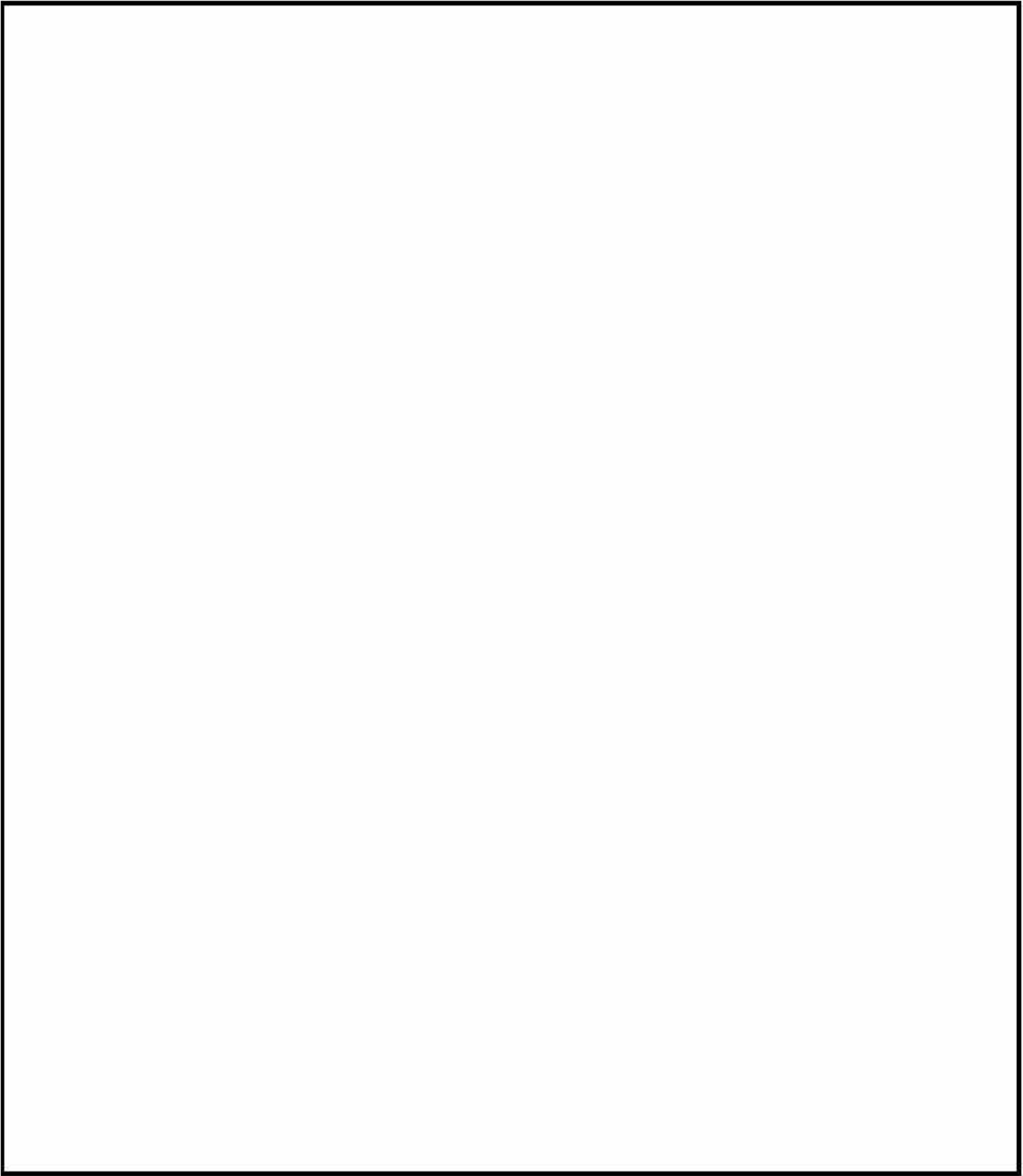
設計貯蔵期間の熱履歴	各種の過時効熱処理温度における等価保持時間				
	200°C	225°C	250°C	275°C	300°C
200°C × 60 年	525,600h (60 年)	53,857h	6,857h	1,054h	191h
(参考)200°C→100°C×60 年	61,320h (7 年)	7,308h	1,024h	172h	34h


3.2 Mg 添加量の検討

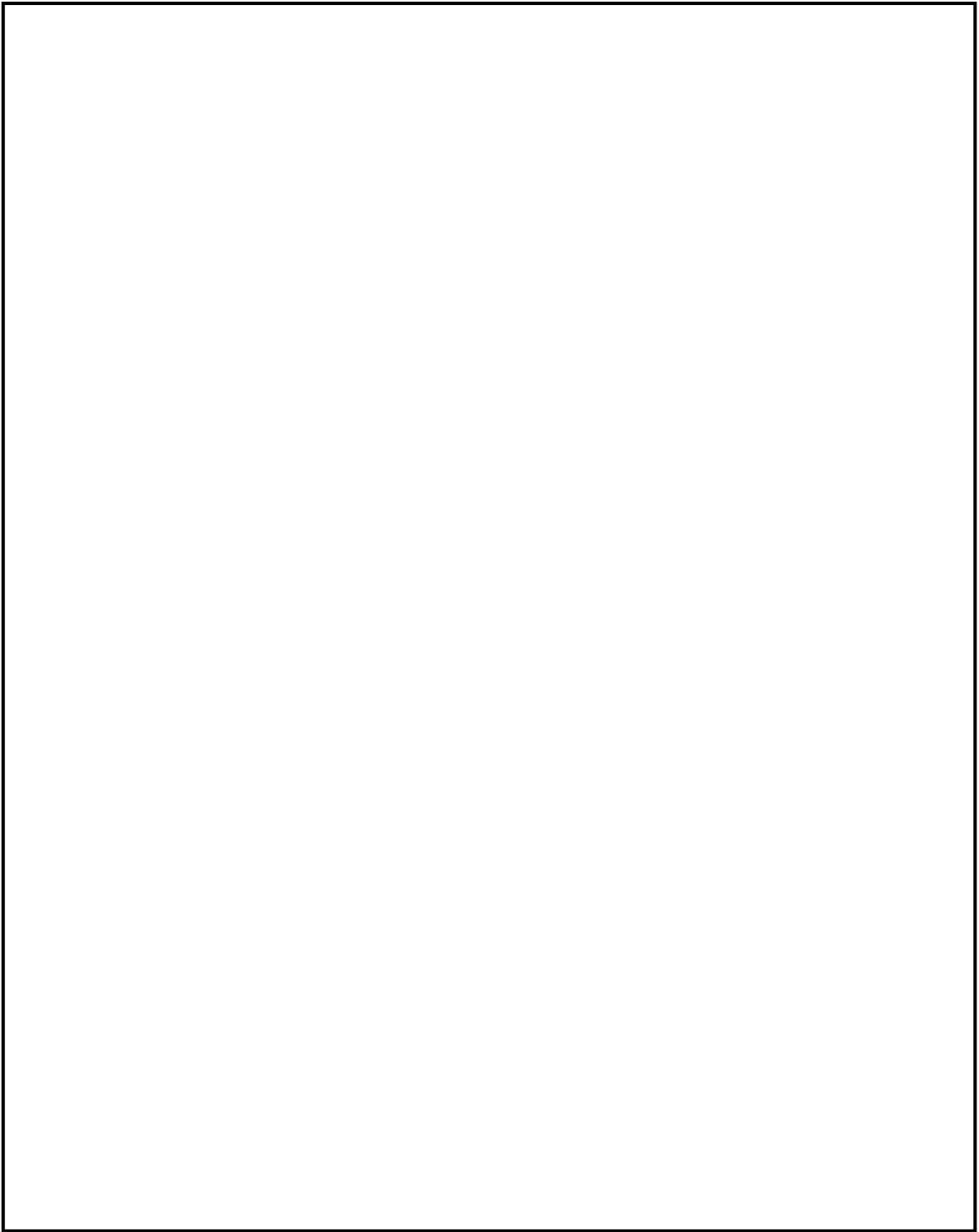
機械試験に用いる機械試験用供試材の Mg 添加量を決定するため、

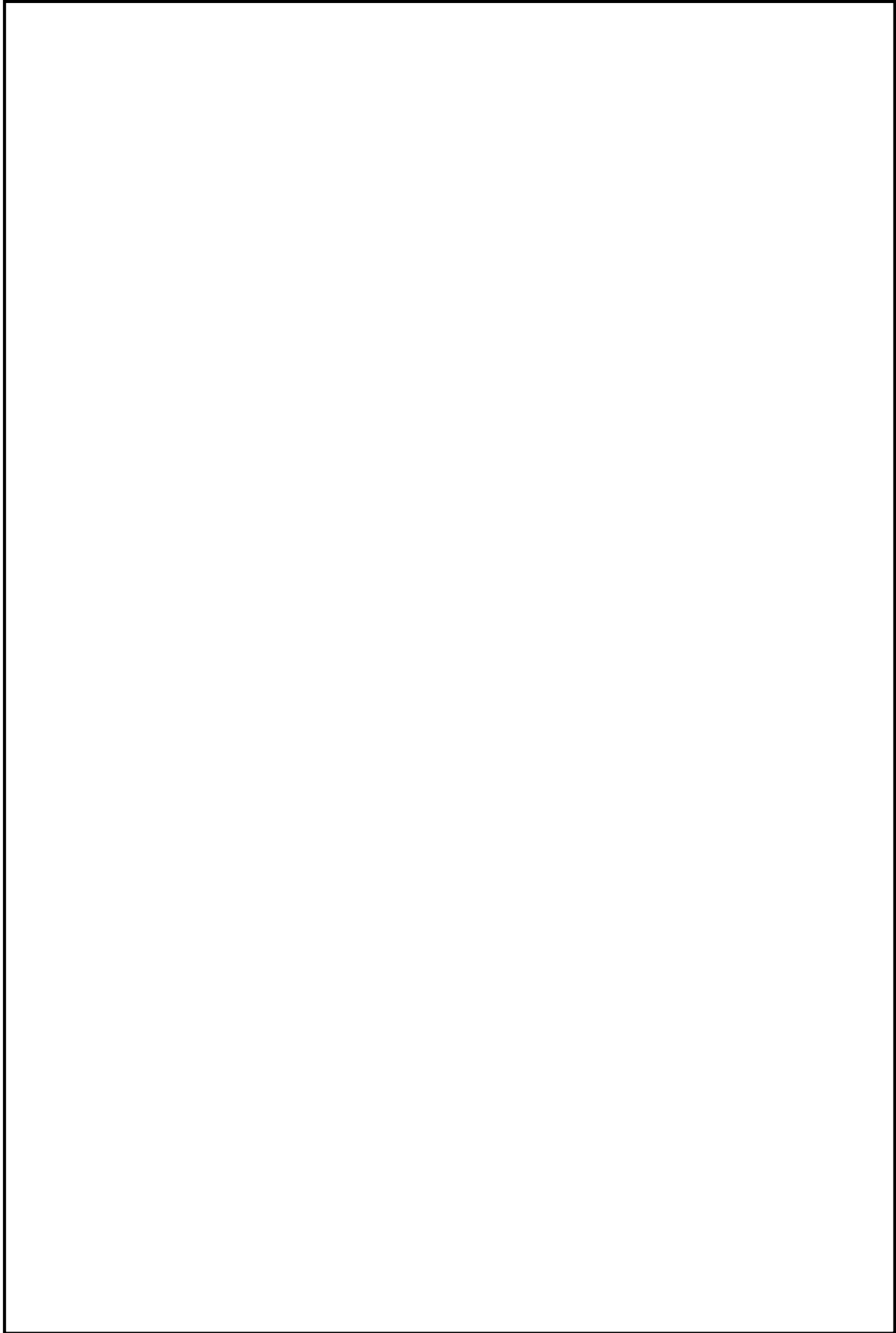
計算材料科学により、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の金属組織、特に Mg 固溶量を推定した。以下には、検討に用いた理論の概要を説明する。

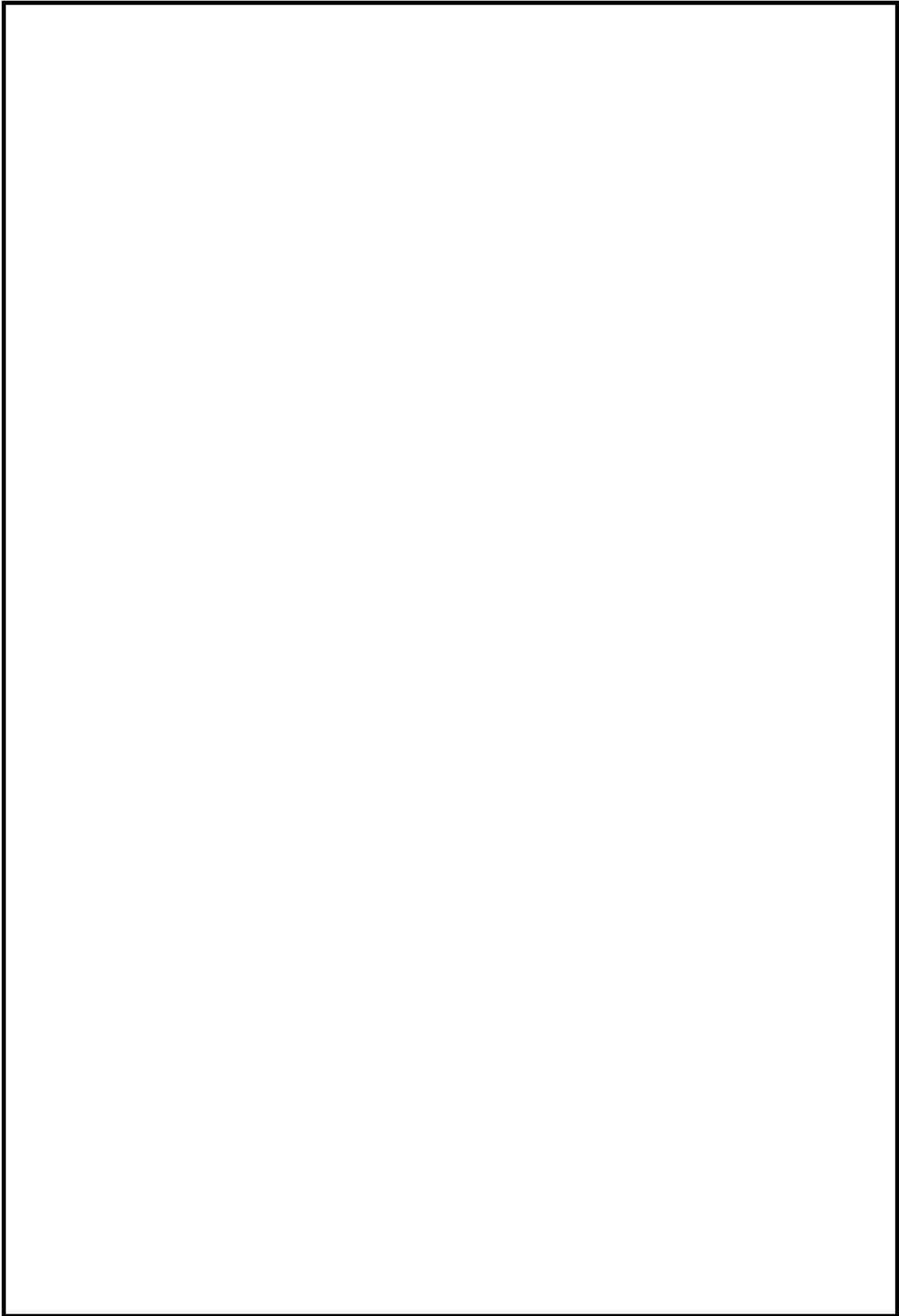


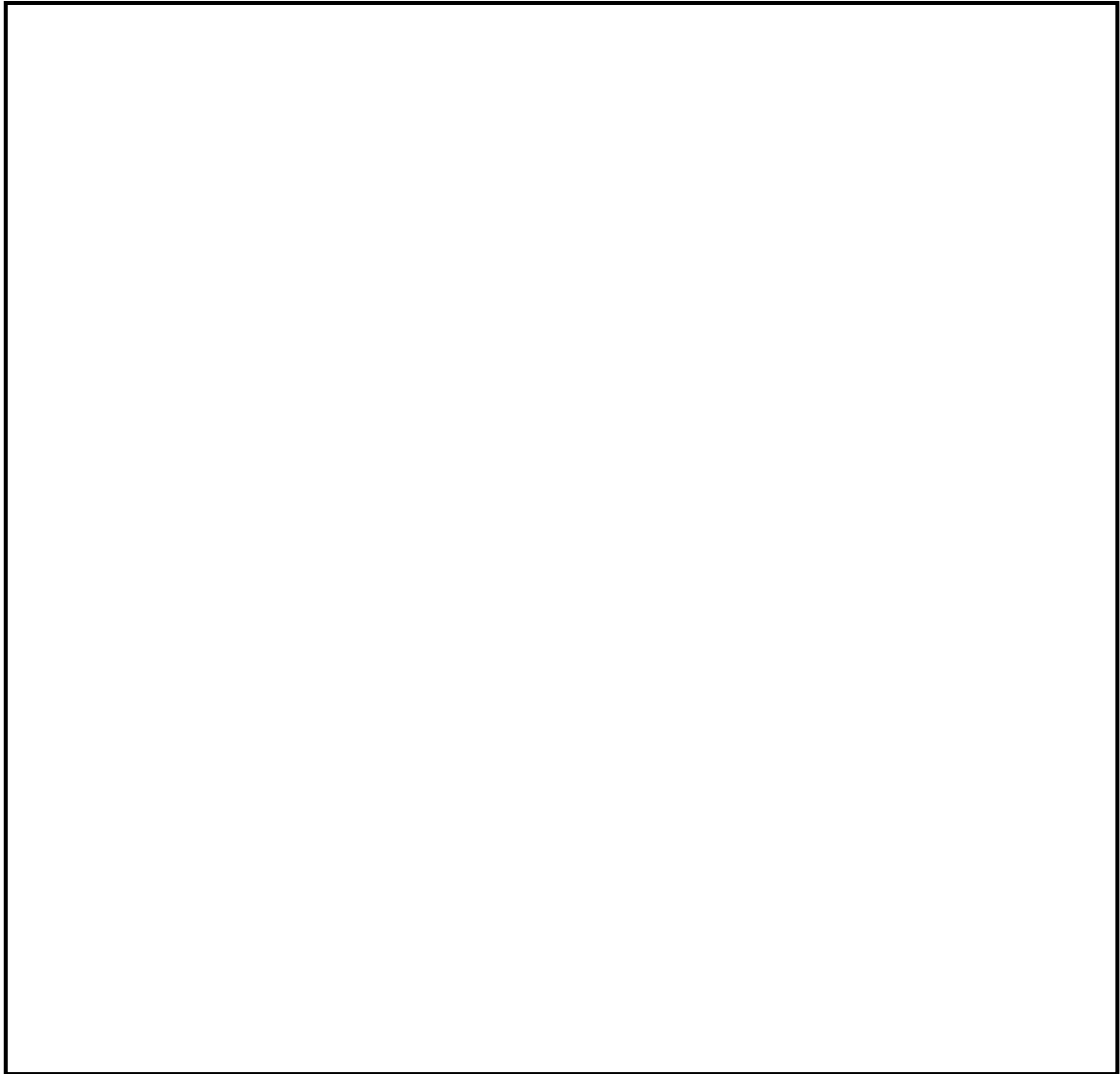


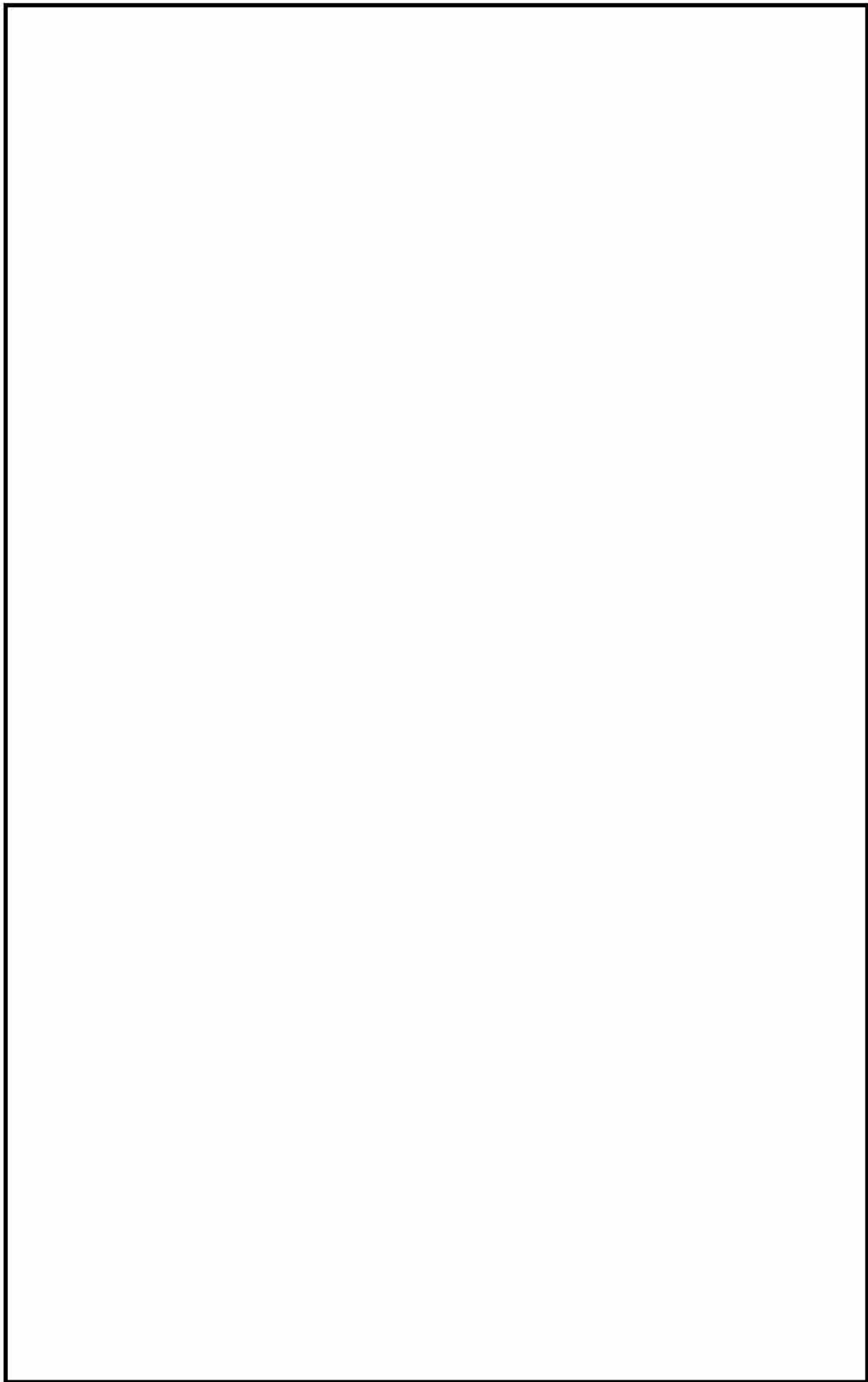
 内は商業機密のため、非公開とします。

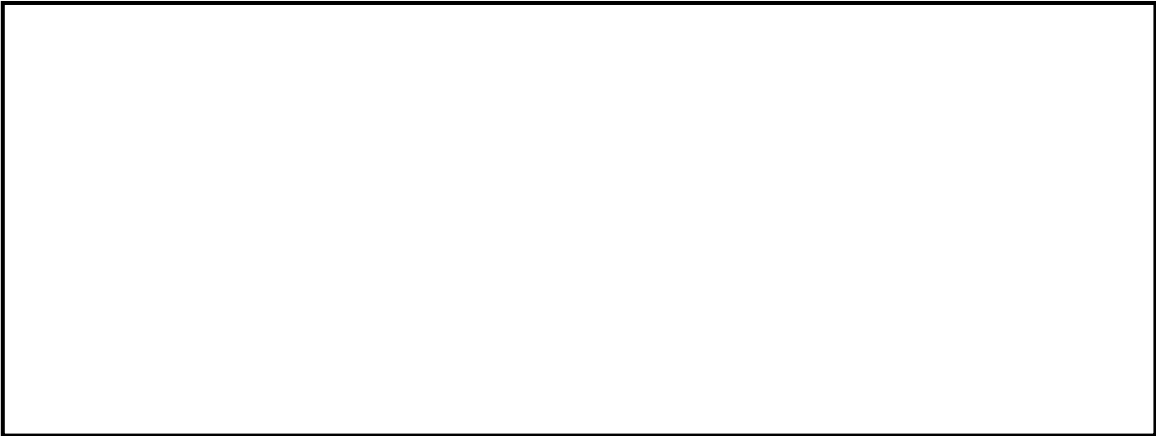












3.2.1 計算の妥当性確認

アルミニウム合金の加熱に伴う固溶元素量の変化を調査した文献に対し、同一の合金成分と熱履歴の計算を行い、結果の整合性を確認した。さらに HZ-A3004 についても熱処理試験及び計算を実施し、整合性を確認することで、
妥当性を確認した。

(1) 文献による妥当性確認

Al-Mg 系の A5083 を対象とした文献^{13) 14)}と同じ化学成分や熱処理条件で計算を行い、結果の整合性を確認した。

(a) 妥当性の確認方法

(i) 別紙 1-5 表に文献で試験に用いられた供試材の化学成分を示す。

を用いて供試材 (A5083) の 供試材 を予測した。

(ii) を用いて熱処理条件 (180°C×3,000h) における供試材の した。

(iii) 文献の実測値を用いて した。

を得た。

別紙 1-5 表 文献で試験に用いられた供試材の化学成分^{13) 14)}

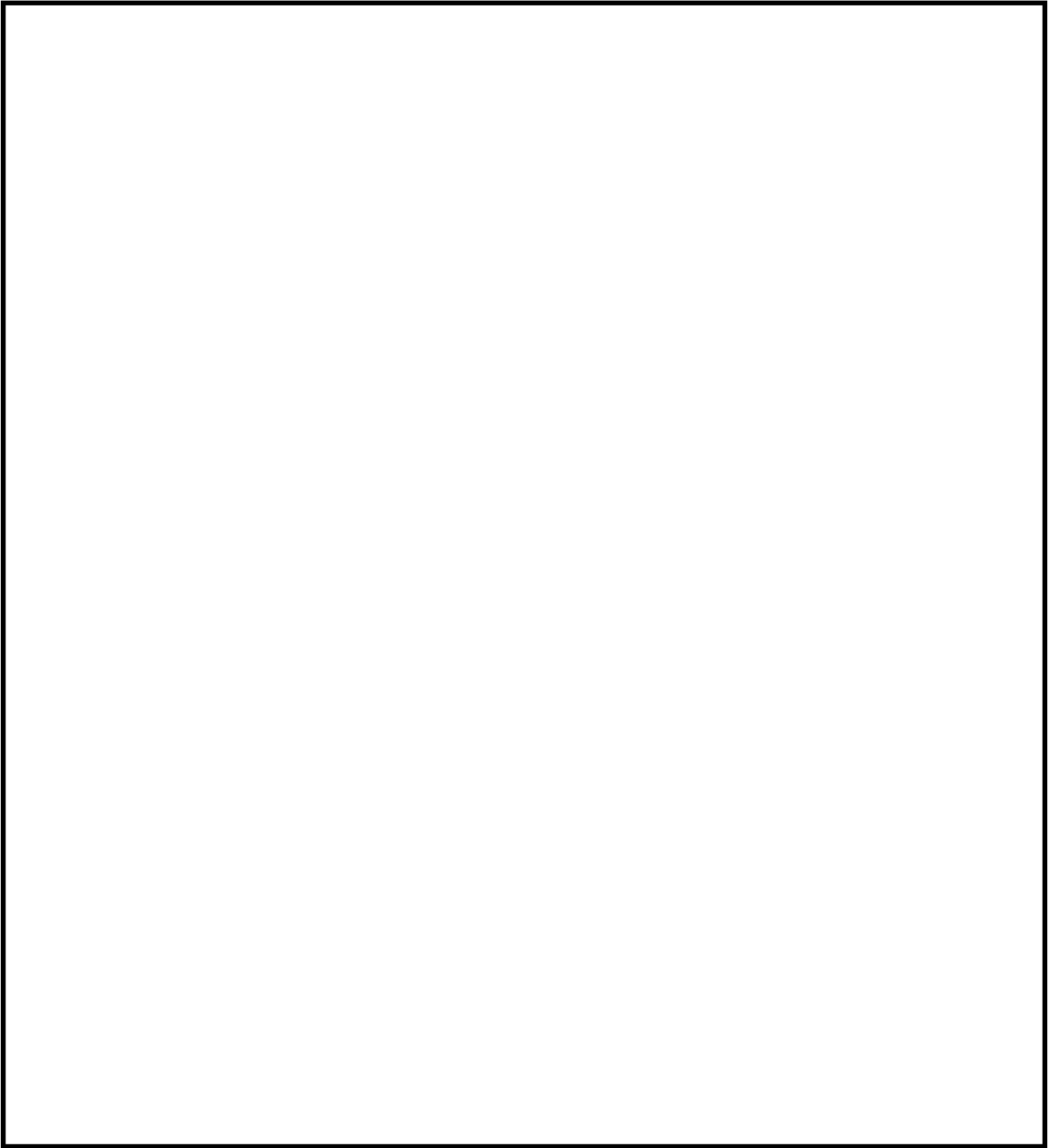
	化学成分(mass%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
供試材	0.14	0.19	0.03	0.69	4.68	0.01	0.08	0.01	残り
(参考) JIS H4000 A5083	0.40 以下	0.40 以下	0.10 以下	0.40 ~1.00	4.0 ~4.9	0.25 以下	0.05 ~0.25	0.15 以下	残り

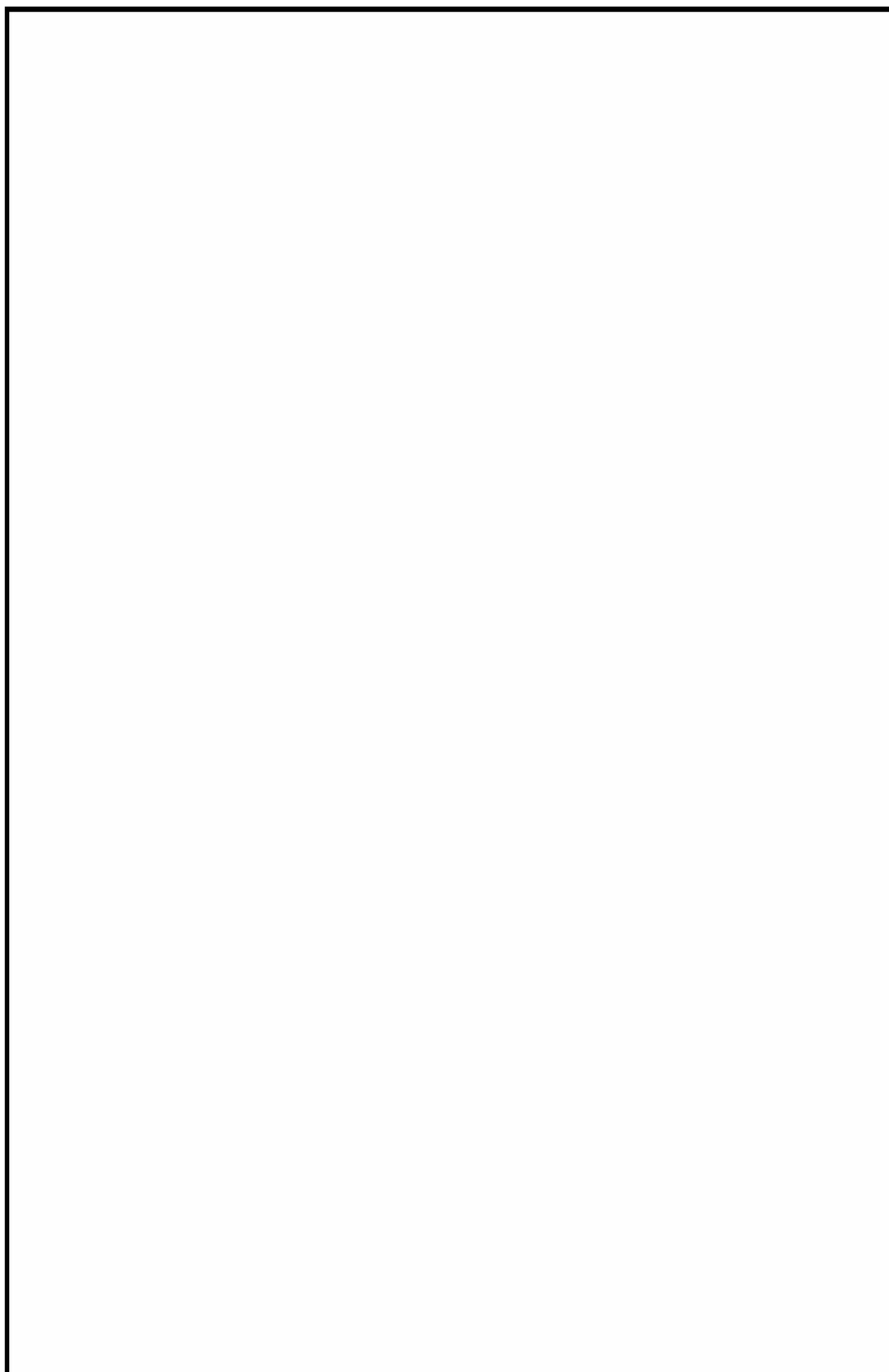
(b) 妥当性の確認結果

別紙 1-9 図に [] により計算した供試材 (A5083) の [] を示す。 [] の [] する。

別紙 1-6 表に [] [] 実験結果は整合した。

[] を用いた供試材の熱処理に伴う [] [] 別紙 1-11 図に [] を示す。供試材を 180℃で熱処理すると、 [] [] した。 [] [] 文献と概ね一致することが分かった。





(2) HZ-A3004 による妥当性確認

HZ-A3004 を熱処理するとともに、同一条件の計算を行い、結果の整合性を確認した。

(a) 実験方法

別紙 1-7 表に試験に用いた HZ-A3004 の化学成分を示す。別紙 1-8 表にアルミニウム合金の電気伝導率に及ぼす添加元素の影響を示す¹⁴⁾。電気伝導率とは、物質中における電気の伝わりやすさを示す物理量である。アルミニウム合金における電気伝導率は、合金中に固溶、あるいは析出した添加元素の量に依存することが知られている¹⁵⁾。合金中に固溶した添加元素の量を実験的に求めることは難しいため、熱処理した HZ-A3004 の電気伝導率変化を測定し、別紙 1-8 表を用いて Mg 固溶量の変化に換算した。さらに電気伝導率の測定結果から換算した Mg 固溶量と計算結果における Mg 固溶量を比較することで、計算の妥当性を確認した。

HZ-A3004 には 500°C で 2h の溶体化処理を行い、水中で急冷した。さらに 200°C で最長 3,000h までの時効処理を行い、電気伝導率の変化を測定した。電気伝導率は導電率計 (Fischer 製シグマスコープ SMP350) を用い、IACS% (純銅に対する電気伝導率の比) として測定した。

(b) 妥当性の確認方法

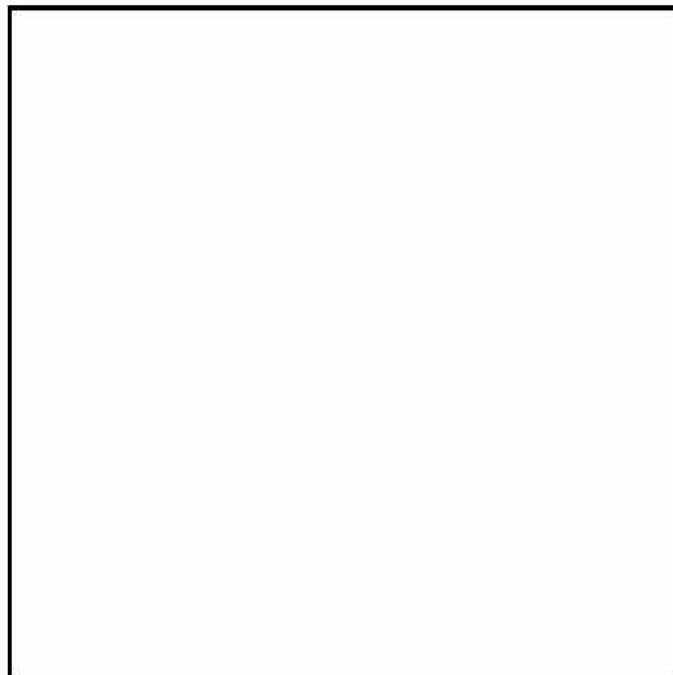


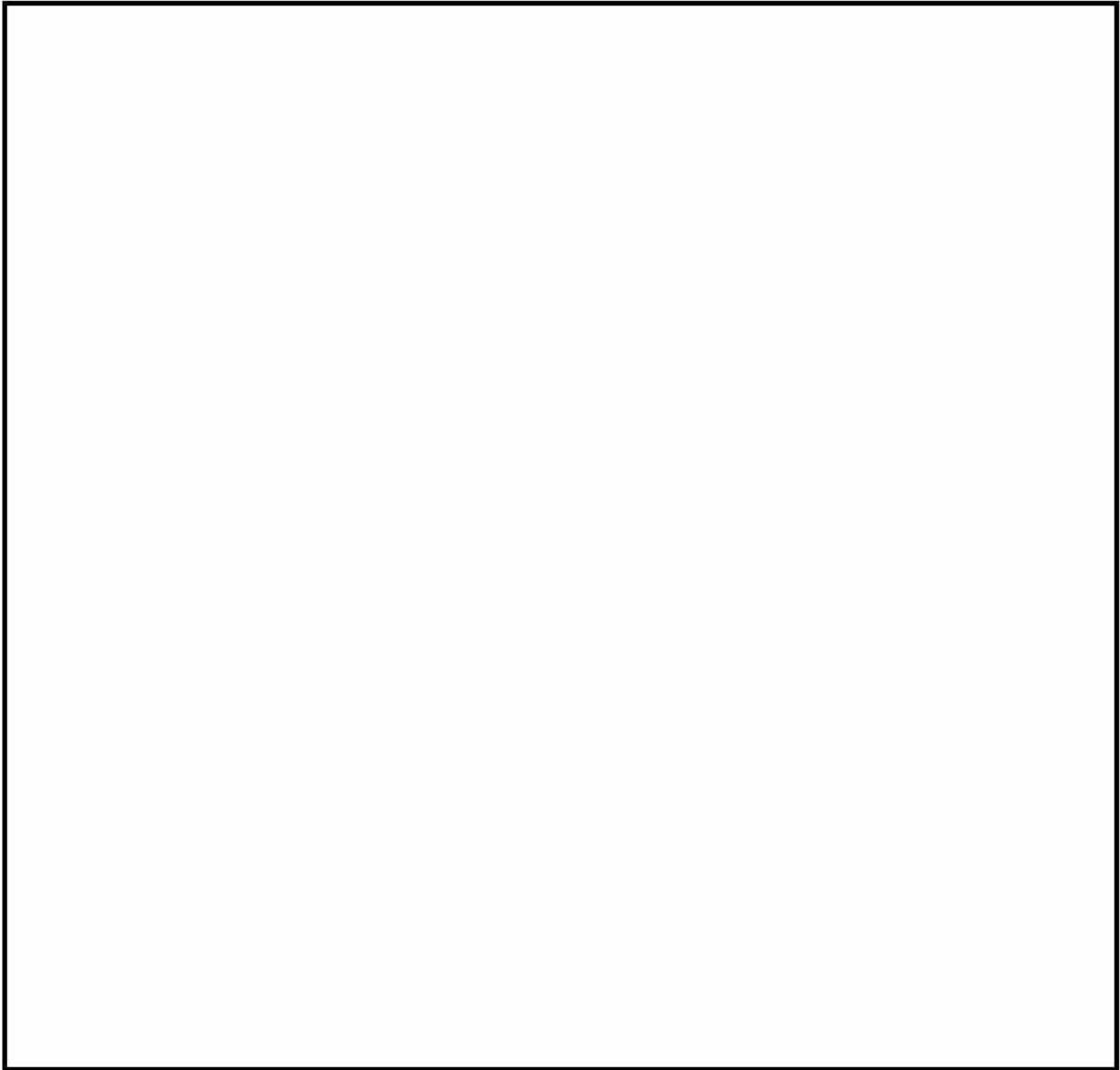


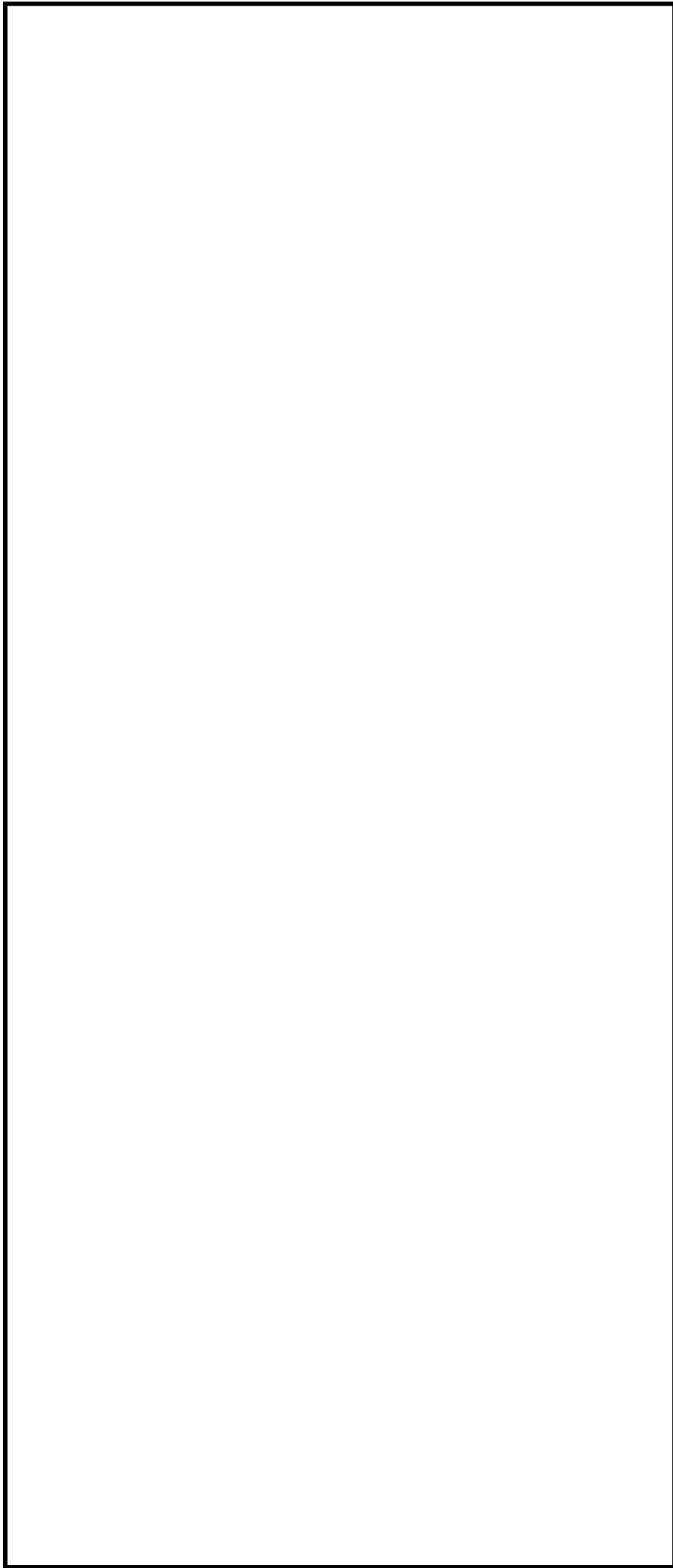
別紙 1-7 表 試験に用いた HZ-A3004 の化学成分

	化学成分(mass%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
(参考) JIS H4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下	残部

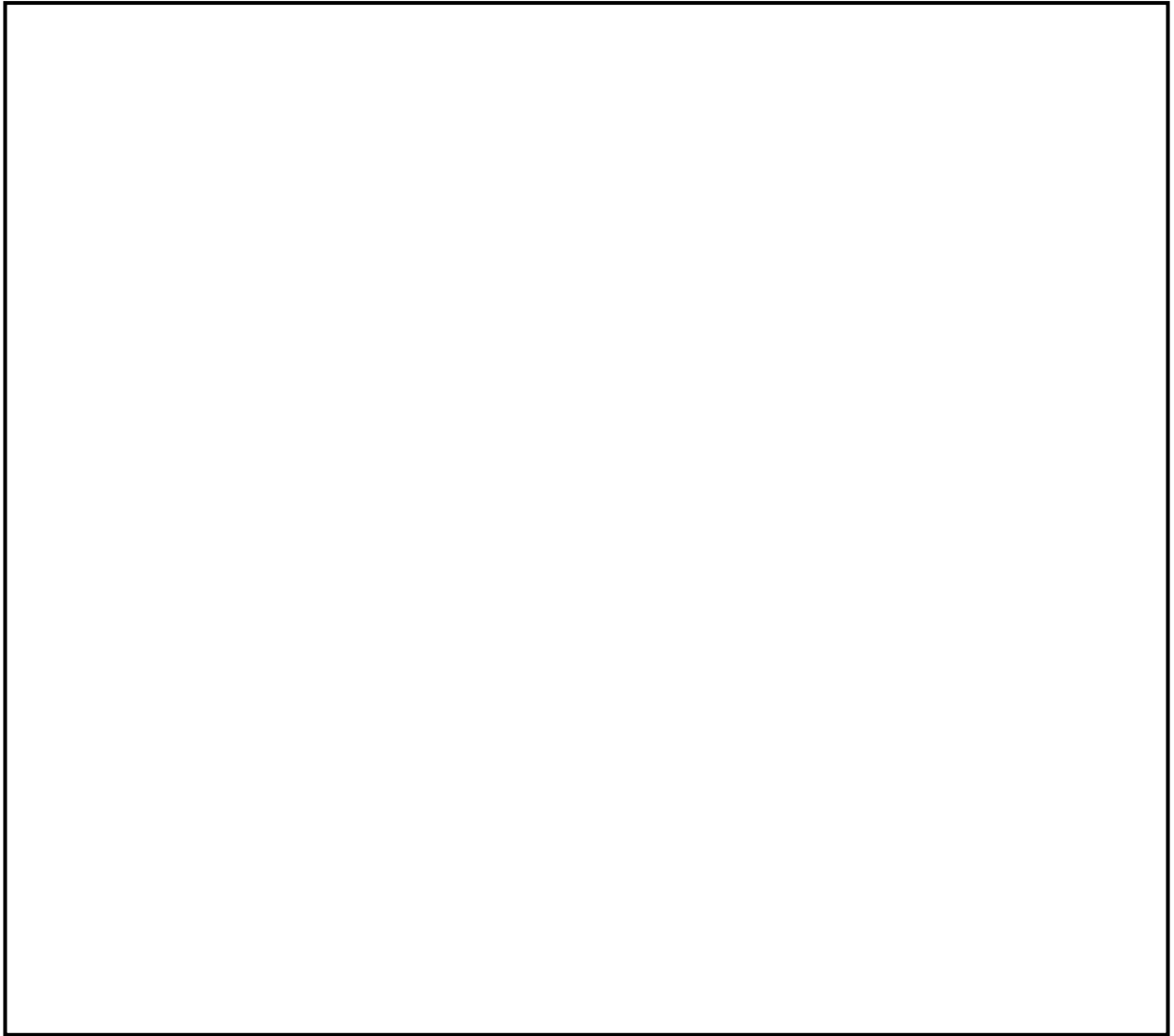
別紙 1-8 表 アルミニウム合金の電気伝導率に及ぼす添加元素の影響¹⁵⁾

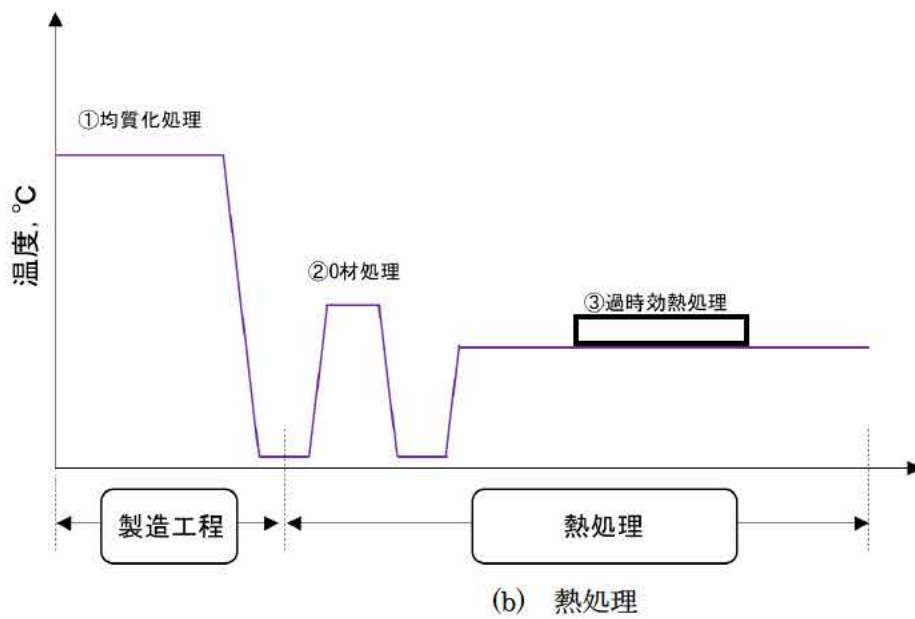
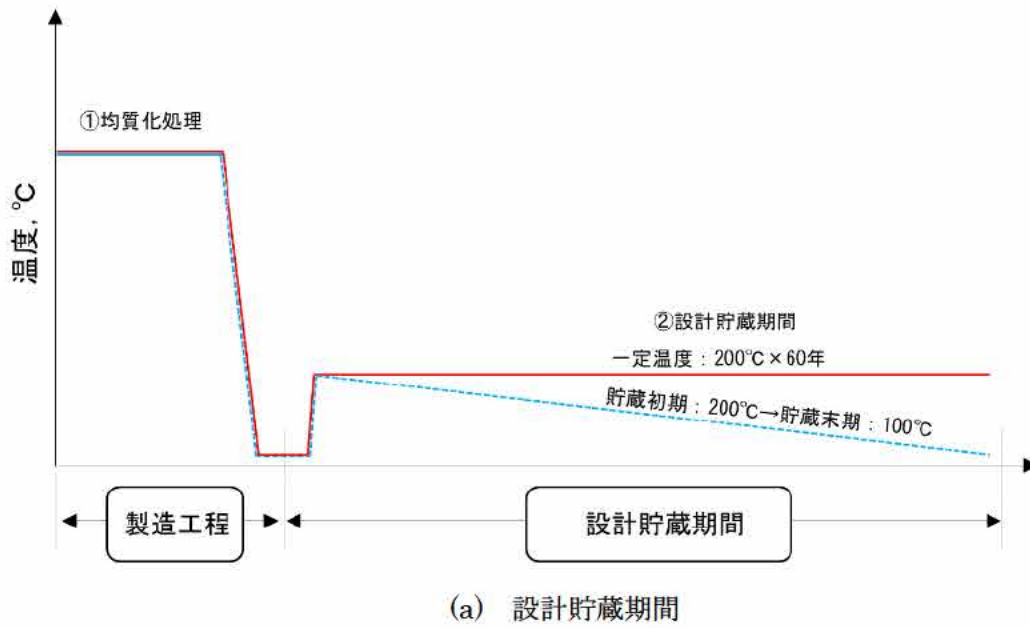




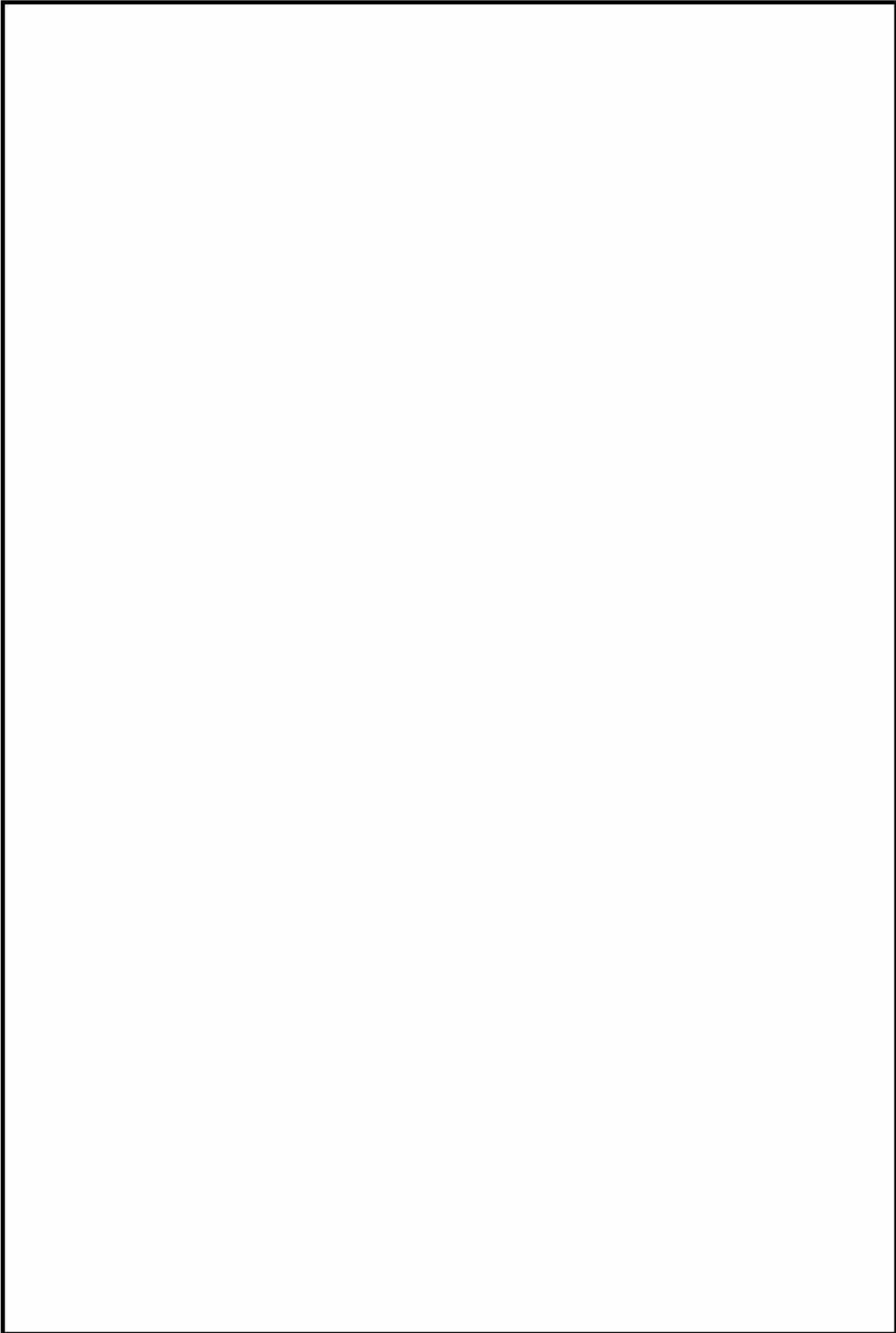


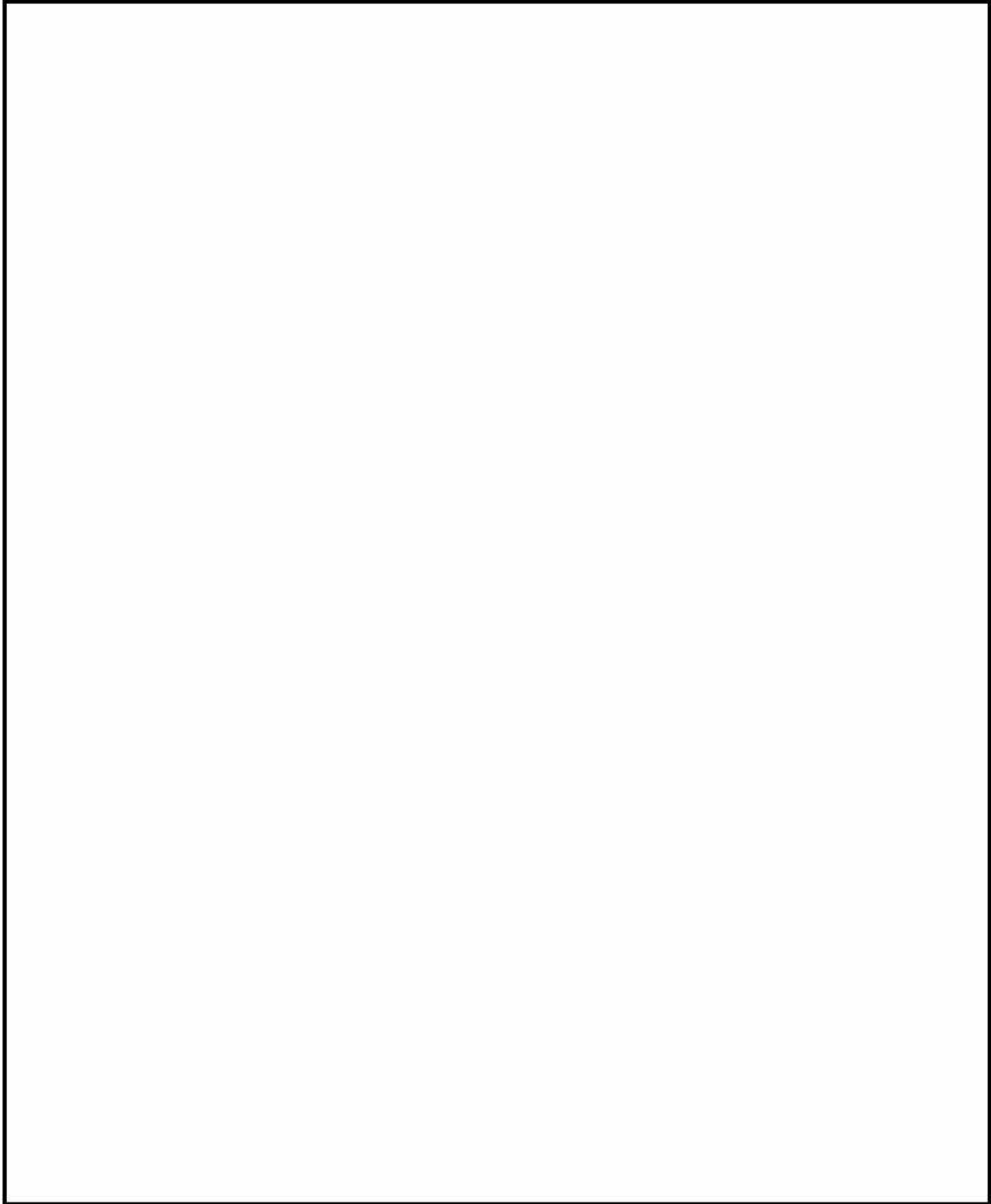






別紙 1-16 図 計算に適用した設計貯蔵期間の熱ばく露条件と熱処理の加熱条件



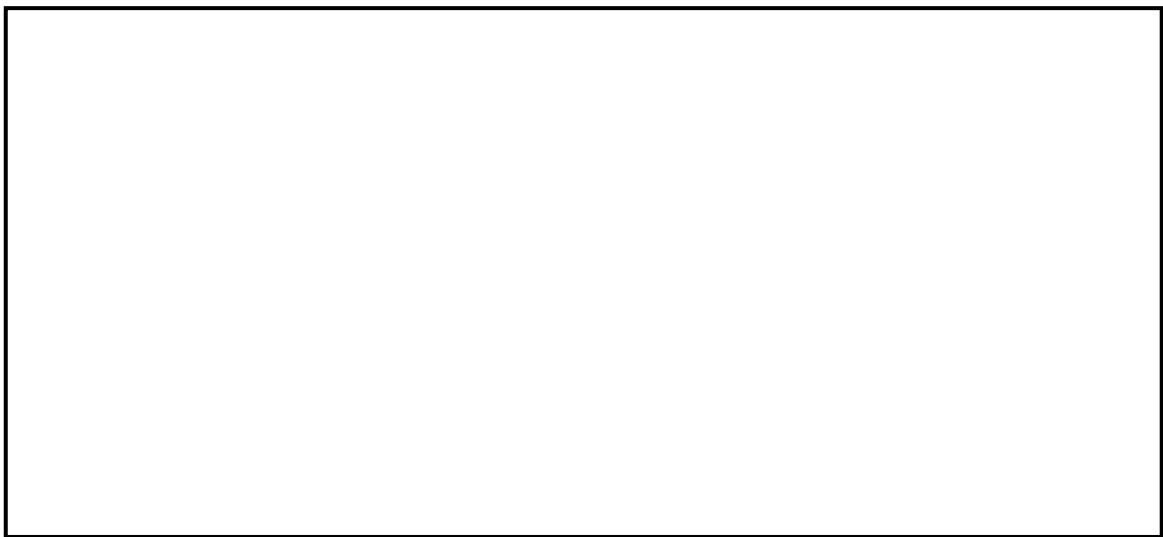


4. 材料特性評価試験

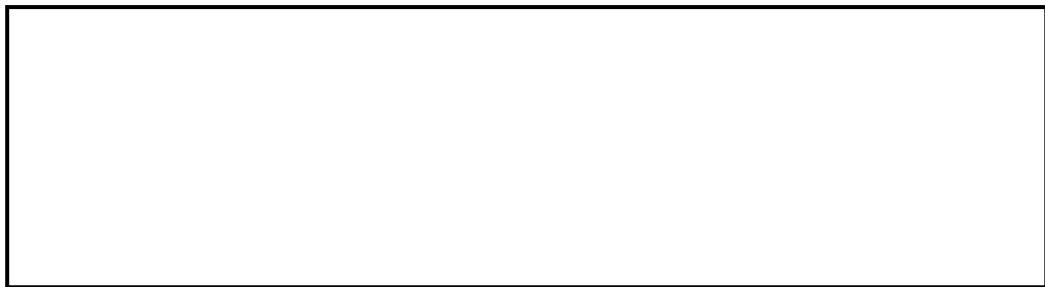
4.1 供試材

別紙 1-13 表に作製した HZ-A3004 及び機械試験用供試材の化学成分を示す。3.項の検討結果を踏まえ、機械試験用供試材の Mg 添加量は [] とした。HZ-A3004 の化学成分は規定値の範囲内にある。機械試験用供試材は、作製した 3 標本とも Mg 添加量が狙い値の [] 付近にある。

別紙 1-20 図に機械試験用供試材の作製条件を示す。バスケット材料は H112 材であるが、強度を保守的に評価するため、O 材処理 [] を実施した後に、3.項で決定した過時効熱処理 [] を施し、材料特性評価試験に用いた。



(2) 確認結果

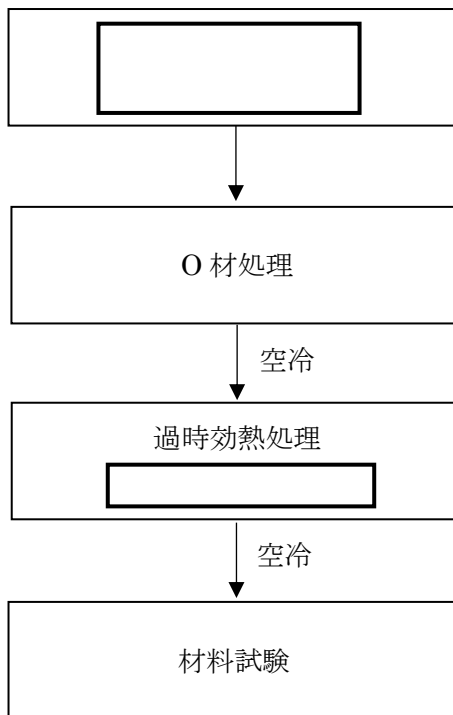


別紙 1-22 図及び別紙 1-23 図に析出物の体積率変化を計算した結果を示す。HZ-A3004 及び機械試験用供試材に生成する析出物の種類に違いは見られず、保持後における析出物の量は概ね一致しており、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の Mn 系分散相による分散強化も模擬できていると考えられる。

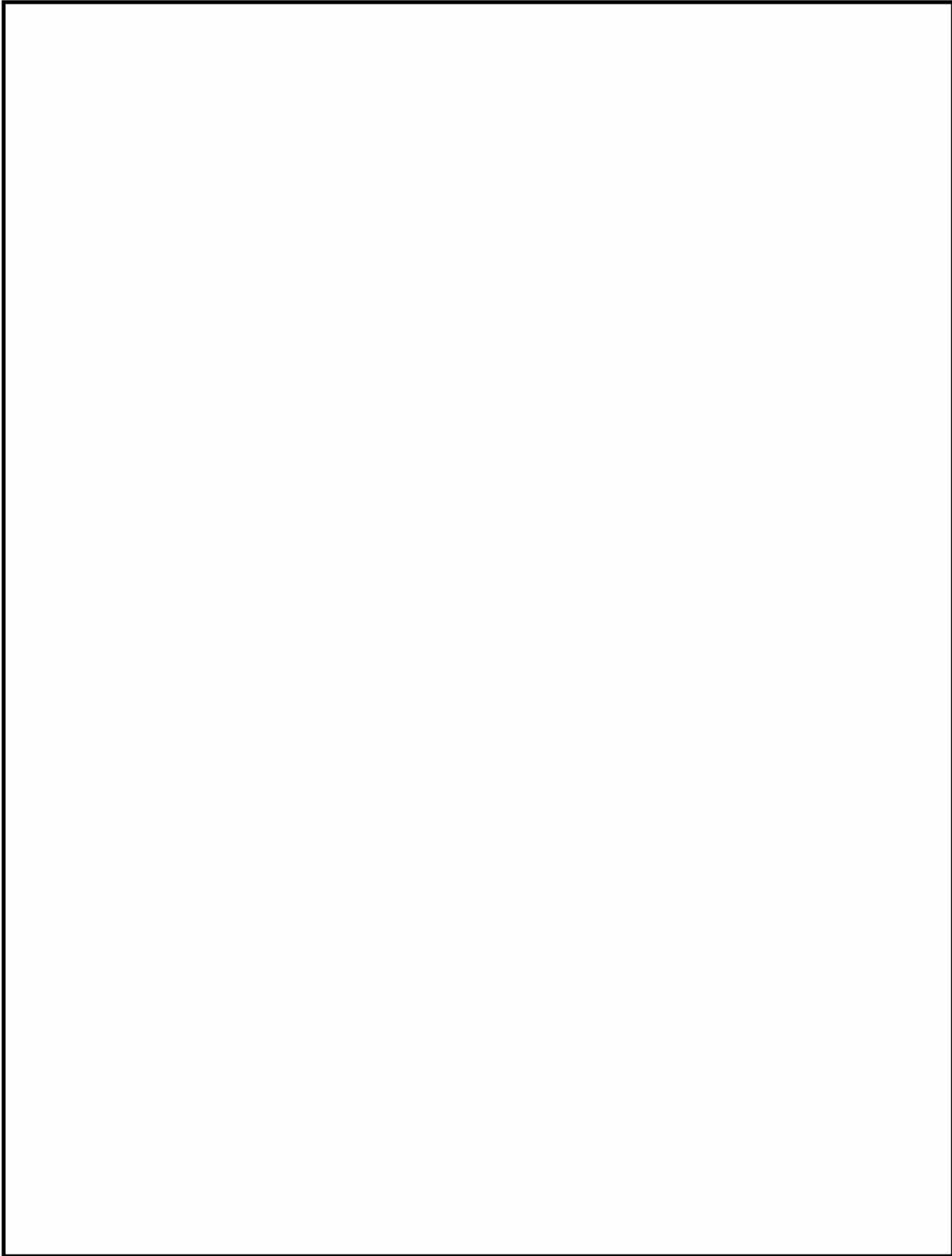
以上から、作製した機械試験用供試材に過時効熱処理を考慮した熱処理を施すことで、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の強度を保守的に模擬できたと考えられる。

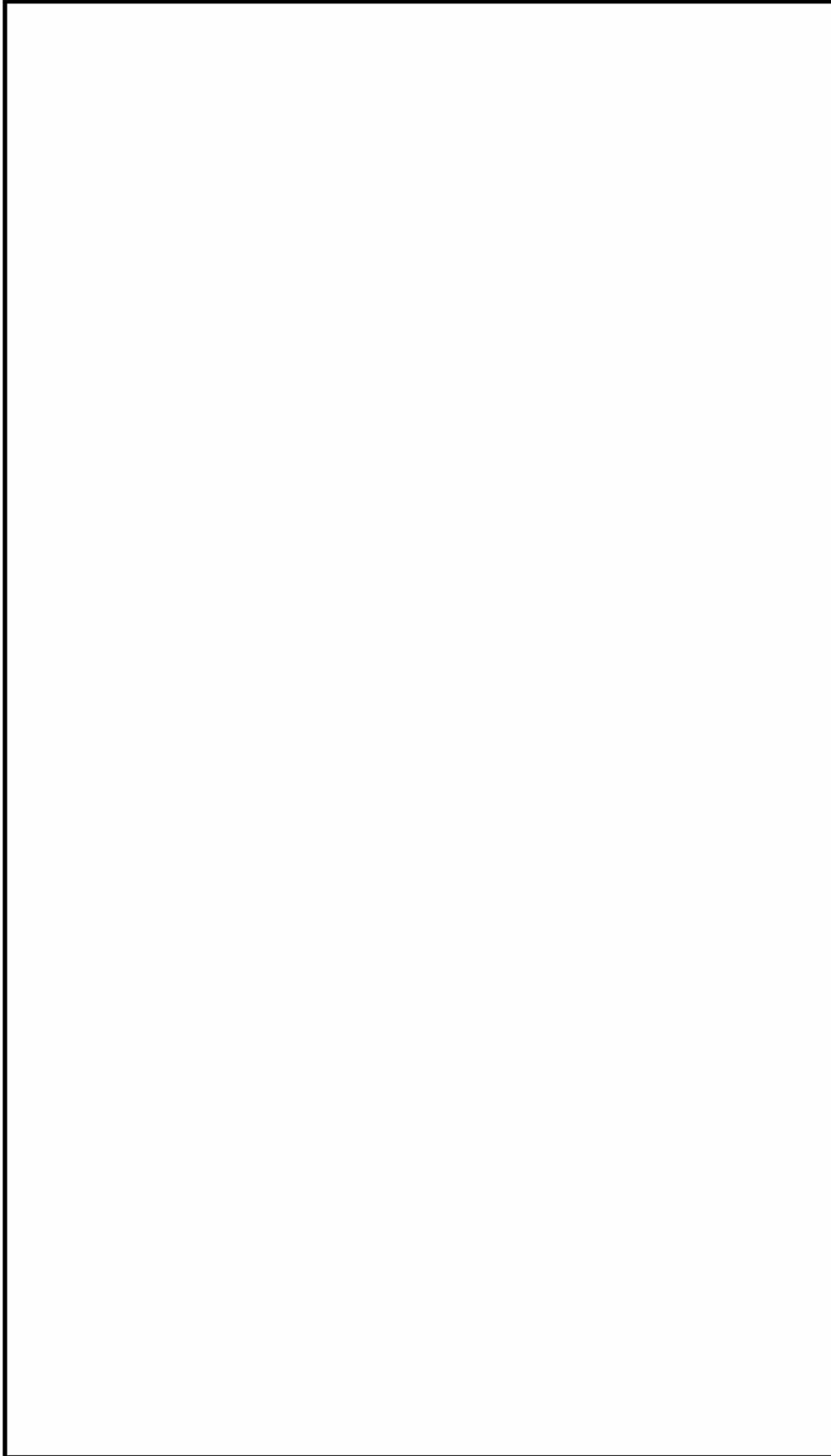
別紙 1-13 表 作製した HZ-A3004 及び機械試験用供試材の化学成分

材料	供試材	化学成分 (mass%)					
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
HZ-A3004	A	0.08	0.36	0.02	1.28	1.11	0.01
	B	0.09	0.38	0.02	1.27	1.16	0.01
	C	0.09	0.36	0.02	1.43	1.20	0.01
機械試験用供試材	D						
	E						
	F						
規定値 HZ-A3004		0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 以下
(参考) JIS H 4000 A3004		0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下



別紙 1-20 図 設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の材料強度を模擬した機械試験用供試材の作製手順





4.2 材料特性評価試験結果

HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）を用いて引張特性を確認した。

(1) 試験方法

(a)供試材 : 別紙 1-13 表に示す 6 標本（供試材 A～F）を試験に用いた。試験片は JIS H 4000 に準拠して、板の表面とその中心との中央部から採取した。

(b)時効条件 : HZ-A3004（供試材符号 A～C）は初期材（H112 材）を、機械試験用供試材（供試材符号 D～F）は O 材処理したのち、の過時効熱処理を施した試験片を試験に用いた。

(c)試験片 : JIS G 0567 による直径 10mm の棒状試験片を用いた。

(d)試験方法 : JIS Z 2241 により実施した。

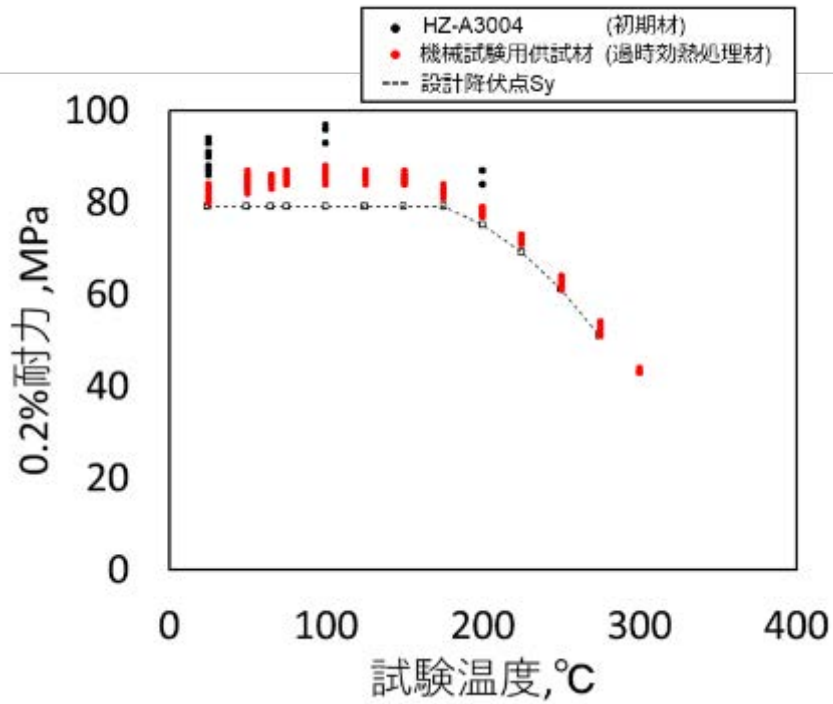
(e)試験温度 : 常温、50℃、65℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃とした。

(f)試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向（L 方向）及び直角な方向（T 方向）とした。

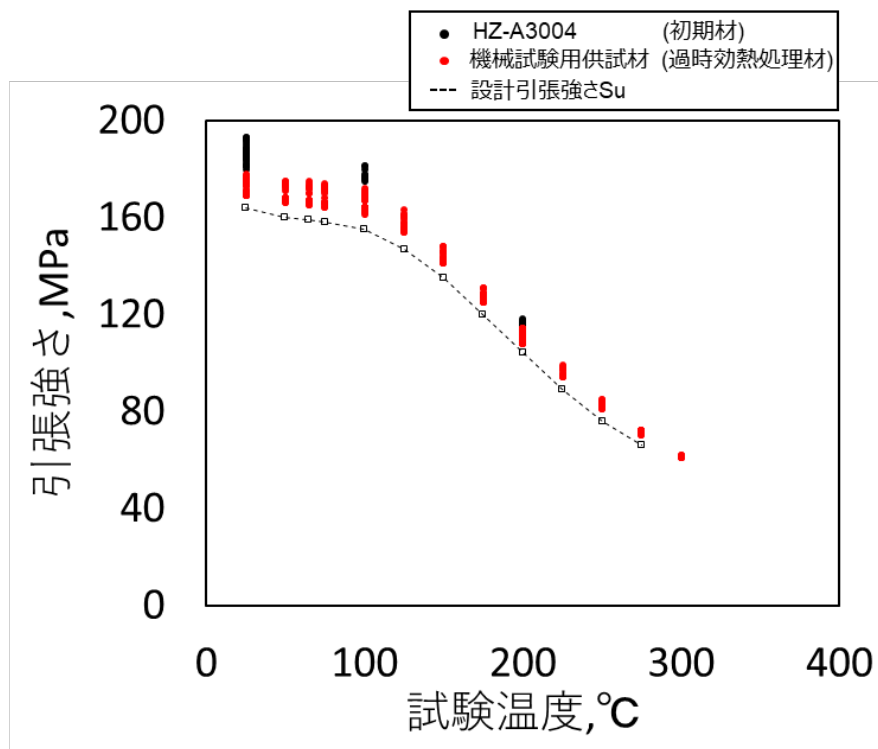
(g)記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

別紙 1-24 図及び別紙 1-25 図に HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）の各試験温度における引張試験結果を示す。別紙 1-16 表及び別紙 1-17 表に引張試験結果をまとめて示す。別紙 1-18 表から別紙 1-21 表に試験データを示す。



別紙 1-24 図 HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）の試験温度と 0.2%耐力の関係



別紙 1-25 図 HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）の試験温度と引張強さの関係

別紙 1-16 表 HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）の
試験温度と 0.2%耐力の関係

[MPa]

材料	試験温度		
	常温	100℃	200℃
①HZ-A3004（初期材）	92.3	95.1	86.0
②機械試験用供試材（過時効熱処理材）	82.9	86.8	78.6
①と②の差分	9.4	8.3	7.4

別紙 1-17 表 HZ-A3004（初期材）及び機械試験用供試材（過時効熱処理材）の
試験温度と引張強さの関係

[MPa]

材料	試験温度		
	常温	100℃	200℃
①HZ-A3004（初期材）	184.3	177.9	115.8
②機械試験用供試材（過時効熱処理材）	170.1	163.1	109.2
①と②の差分	14.2	14.8	6.6

別紙 1-18 表 HZ-A3004（初期材）の引張試験結果

供試材	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	25	88	187	23	90	181	21
	25	88	186	22	90	182	21
	25	88	188	22	90	180	20
	25	87	186	23	90	181	20
	25	86	185	22	90	181	20
	25	87	186	23	90	181	21
	100				93	175	22
	100				93	176	22
	100				93	176	20
	200				84	114	63
200	84				115	58	
200	84				114	60	
B	25	90	188	22	94	184	21
	25	91	187	22	94	184	20
	25	90	186	22	94	186	20
	25	90	187	22	94	183	20
	25	90	186	22	94	185	20
	25	91	186	22	94	184	21
	100				96	178	20
	100				96	177	22
	100				97	177	22
	200				87	115	55
200	87				116	52	
200	87				116	52	
C	25	91	193	21	93	188	20
	25	90	190	22	93	189	21
	25	90	192	23	93	186	20
	25	91	192	22	93	188	20
	25	90	191	22	93	188	20
	25	90	193	23	93	187	21
	100				96	181	22
	100				96	181	23
	100				96	180	24
	200				87	117	64
200	87				117	62	
200	87				118	64	

別紙 1-19 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の引張試験結果（1/3）

供試材	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 [%]
D	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	24	84	169	23
	25	81	174	24	83	169	23
	25	82	173	24	83	169	24
	25	82	174	24	83	170	23
	50	83	171	23	86	166	21
	50	84	172	23	86	166	21
	50	85	174	23	87	167	22
	65	84	170	23	86	165	21
	65	85	170	23	86	166	22
	65	86	172	22	86	165	23
	75	84	171	24	86	164	22
	75	85	170	23	87	164	21
	75	86	171	24	87	165	23
	100	86	168	25	88	164	23
	100	86	167	26	87	162	23
	100	86	167	26	88	162	24
	100	85	168	25	87	162	23
	100	85	167	26	87	162	24
	100	85	167	26	87	161	25
	125	85	158	30	86	154	27
	125	86	159	29	87	155	28
	125	85	158	29	87	154	29
	150	84	145	40	86	141	38
	150	85	144	41	87	141	38
	150	86	146	41	85	141	41
	175	82	128	54	83	125	51
	175	82	128	57	84	125	51
	175	82	128	58	83	125	59
	200	77	112	66	79	108	68
	200	78	112	67	79	108	67
	200	78	112	69	79	109	64
	200	77	111	70	79	108	78
	200	78	112	70	78	108	72
	200	78	112	68	79	108	67
	225	71	97	78	72	94	76
	225	71	97	79	73	94	70
	225	71	97	78	72	94	92
	250	63	84	85	64	81	80
	250	63	83	90	64	82	82
	250	61	83	86	64	82	93
275	52	72	118	54	71	89	
275	51	71	110	54	71	92	
275	52	72	101	54	70	99	
300				43	61	96	
300				43	61	98	
300				43	61	126	

別紙 1-20 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の引張試験結果（2/3）

供試材	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 [%]
E	25	82	178	25	83	171	23
	25	81	176	25	82	171	24
	25	82	176	25	83	169	23
	25	81	176	24	82	173	24
	25	80	176	25	82	171	24
	25	80	176	25	82	170	24
	50	83	174	24	84	168	23
	50	83	173	23	84	168	22
	50	84	175	23	85	168	22
	65	83	172	24	85	167	23
	65	84	173	22	85	167	22
	65	85	175	23	85	167	22
	75	84	173	24	85	166	23
	75	85	173	23	85	168	23
	75	86	174	24	85	166	23
	100	85	171	27	86	164	24
	100	85	172	26	87	164	23
	100	85	171	27	86	164	23
	100	85	170	26	86	163	25
	100	84	170	26	86	164	24
	100	84	169	26	86	163	23
	125	84	161	30	86	156	28
	125	86	163	29	86	157	28
	125	85	161	30	86	156	28
	150	84	148	42	84	143	43
	150	84	148	43	86	143	39
	150	86	148	43	85	143	38
	175	81	131	57	83	127	52
	175	83	131	53	83	127	57
	175	82	131	54	83	126	58
	200	78	114	69	79	111	67
	200	78	114	68	79	111	64
	200	78	114	70	78	110	69
	200	77	114	74	78	110	67
	200	77	113	71	78	110	72
	200	78	114	73	78	109	71
	225	71	98	66	72	95	90
	225	72	99	81	73	95	78
	225	71	98	74	72	95	72
	250	63	84	91	64	82	84
250	63	85	102	64	82	84	
250	62	85	95	64	83	94	
275	52	72	123	54	71	105	
275	52	72	98	54	71	93	
275	52	72	101	54	71	104	
300				43	62	90	
300				43	62	89	
300				44	62	87	

別紙 1-21 表 機械試験用供試材（過時効熱処理材）の引張試験結果（3/3）

供試材	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 [%]
F	25	81	177	24	83	170	24
	25	82	177	25	83	170	24
	25	81	176	24	83	170	23
	25	81	177	24	83	170	24
	25	81	176	24	83	171	24
	25	81	177	24	83	170	24
	50	82	174	23	85	167	21
	50	83	173	22	85	168	21
	50	85	175	23	86	168	21
	65	84	173	23	85	166	20
	65	84	172	24	85	166	21
	65	86	174	23	86	167	21
	75	84	172	23	86	166	22
	75	85	172	23	86	166	22
	75	86	173	24	86	166	22
	100	86	169	25	87	163	24
	100	86	169	26	87	164	24
	100	85	170	25	87	164	25
	100	85	169	26	87	163	24
	100	85	170	25	87	163	24
	100	85	170	26	86	163	24
	125	85	160	29	86	155	28
	125	86	161	28	86	156	27
	125	86	160	30	86	155	29
	150	84	146	40	85	142	41
	150	85	146	40	86	142	41
	150	85	146	44	85	142	42
	175	81	128	56	83	125	55
	175	82	129	54	83	125	56
	175	82	129	58	83	125	55
	200	78	112	69	79	110	70
	200	78	113	71	79	109	77
	200	78	113	66	79	109	76
	200	77	113	68	78	109	65
	200	77	113	74	78	109	65
	200	77	113	68	78	109	68
	225	71	98	81	72	95	73
	225	71	98	81	73	95	75
	225	71	98	87	72	95	83
	250	63	84	88	63	82	81
250	62	84	87	64	82	95	
250	62	84	94	64	81	89	
275	52	72	85	53	70	94	
275	52	72	99	54	71	109	
275	51	72	110	53	71	85	
300				43	61	87	
300				43	61	88	
300				43	61	92	

5. まとめ

HZ-A3004において、設計貯蔵期間（60年間）を想定した材質変化を計算した。さらに設計貯蔵期間経過後を模擬した機械試験用供試材を作製し、材料特性評価試験を実施した。以下にその結果を示す。

- (1) Larson-Miller パラメータ（LMP）を用いて設計貯蔵期間の熱履歴と保守的に同等な熱処理条件を検討し、機械試験用供試材の過時効熱処理条件を O 材処理→過時効熱処理 [] と決定した。
- (2) [] 機械試験用供試材へ添加する Mg 量を検討した。機械試験用供試材への Mg 添加量を [] と決定した。
- (3) 上記の条件にて作製、熱処理した機械試験用供試材を用いて材料特性評価試験を実施し、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 に相当する強度を取得した。

以上

6. 参考文献

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
1)	原子力規制庁 原子力規制企画課, 資料 4-1「金属キャスクバスケット用 アルミニウム合金事例規格の廃止」につ いて, (2015), p2-p4	日本機械学会が発行する「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (2007 年版)」(JSME S FA1-2007) において、これまで登録された事例規 格のバスケット用アルミニウム合金及び添付 3-3 「バスケット材料としてアルミニウム合金及びボ ロン添加アルミニウム合金を使用する場合の規定」 の廃止について説明する内容を原子力規制庁 原子 力規制企画課が開示した文献。	

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
2)	(一社)日本軽金属学会,アルミニウムの組織と性質,(1991),p160,161,218,256	<ul style="list-style-type: none"> ・ (p160-161) : Al は合金元素が添加(不純物元素が混入)されると、純 Al に比べて再結晶温度が上昇する。99.99%の純 Al に 0.01at%の Si、Mg、Cu、Mn、Fe、Cr を単独に添加した場合の再結晶温度の上昇分は、Si : 50℃、Mg : 70℃、Cu : 80℃、Mn : 180℃、Fe : 190℃、Cr : 200℃である。このような合金元素(不純物元素)の再結晶遅滞作用は、これらの元素の粒界移動阻止作用に基づく。特に Mn、Fe、Cr などの元素は Al 中の不純物拡散速度が遅いことがその理由として挙げられる。 ・ (p218,256) : Al-Mn₂ 元系平衡状態図および Al-Mg₂ 元系平衡状態図が掲載されている。 	<p>○(p160-161) : 合金元素(不純物元素)による Al の再結晶遅滞作用は、実験に基づき確認されたものである。本文献の報告では純 Al に 0.01at% の Mn が添加された場合、Al 合金の再結晶温度は 200℃を上回るが、HZ-A3004 は、1.0mass%(文献値の 100 倍)程度の Mn を添加しており、同様の効果に期待できる。従って、本文献を適用し、設計貯蔵期間の熱ばく露を受けた HZ-A3004 において、結晶粒微細化による強化機構が残存すると考えることは妥当である。</p> <p>○ (p218,256)2 元系平衡状態図の出典は American Society for Metals (ASM : アメリカ金属協会) であり、参考文献として妥当である。</p>

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
3)	(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,(2004),p265	<p>・金属キャスクにおける金属ガスケットの経年劣化特性を調査する目的でクリープおよびクリープ破断試験を実施している。</p> <p>クリープ変形率などの経年変化の指標は、ラーソンミラーパラメータ(LMP)により試験データを整理することで評価している。</p> <p>LMP は以下の式で表され、クリープ現象などの内外挿評価に一般的に使用される。</p> $LMP = T (\log t + C)$ <p>T : 温度(K) C : LMP の定数 t : 時間(h)</p> <p>ここで、LMP に使用する定数 C の値は、Al 材のクリープデータ(1%クリープひずみを生じる応力と時間の関係)から C=14 を算出している。</p>	<p>○材料のクリープ変形挙動にはアレニウスの式が適用でき、LMP で評価可能である。</p> <p>本補足説明資料では、HZ-A3004 の設計貯蔵期間中の材質変化を模擬するため、LMP を用い、設計貯蔵期間の熱履歴と保守的に同等の過時効熱処理条件を検討しており、その際の定数 C には本文献の 14 を適用している。</p> <p>本文献の定数 C=14 の値は、3000 系アルミニウム合金よりも強度の低い A1100-O 材の試験結果に基づいて算出されたものであり、参考文献として妥当である。</p>
4)			
5)			

内は商業機密のため、非公開とします。

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
6)			
7)			
8)			
9)			

内は商業機密のため、非公開とします。

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
10)			
11)			
12)			

内は商業機密のため、非公開とします。

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
13)	中山ら,5083 アルミニウム合金におけるβ相の析出挙動,軽金属,第 60 巻第 2 号,(1996),p135-140	<p>・ 5083 系(Al-Mg 系)アルミニウム合金に 180℃で 10⁷秒(約 2778 時間)の時効熱処理を行うとともに固溶原子濃度の変化ならびに β 相(Al₃Mg₂)の析出状態を調査した結果を報告している。</p> <p>熱処理した試料に対し、析出物の数や寸法を測定することに加え、示差熱量計 (DSC) による分析を行い、β 相の析出状態を評価している。また、27℃ および -196℃ で試料の電位差を測定し、これらの値の比から時効に伴う固溶原子濃度の変化を定性的に評価している。</p> <p>画像処理の結果ならびに DSC の分析結果、電気比抵抗の測定結果から、10⁶ 秒を超える時効時間から、β 相の大きさは急激に増加する傾向を示し、さらに β 相が占める面積割合も増大することを報告している。</p>	○文献では、5083 系アルミニウム合金を 180℃ で約 2778 時間にわたる時効熱処理した際の Mg 固溶量変化を定量的に推定し、結果を報告している。
14)	中山ら,Al-5,10mass%Mg 合金の時効処理に伴う組織変化,軽金属,第 61 巻第 1 号,(1997),p34-40	<p>・ 13 の文献で時効熱処理した 5083 系(Al-Mg 系)アルミニウム合金の固溶 Mg 濃度の変化を定量的に推定、報告している。時効熱処理に伴う固溶 Mg 濃</p>	5083 系アルミニウム合金の時効熱処理に伴う電気比抵抗の変化は、β 相の析出に伴う DSC の吸熱反応と定性的に一致している。従って電気比抵抗の変化は β 相の析出、換言すれば固溶 Mg 濃度の変化と実質的に対応していると判断でき、参考文献として妥当である。

内は商業機密のため、非公開とします。

番号	参考文献		参考文献としての妥当性
	文献名	文献概要	
		度の変化は電気比抵抗の変化から算出している。	
15)	小松ら,アルミニウム合金中の溶質濃度の推定方法,軽金属,第 50 巻第 10 号,(2000),p518-526	<p>・アルミニウム合金中の溶質元素の固容量の推定方法が説明されている。</p> <p>溶質濃度の変化に敏感な物性値としては、電気比抵抗、メスバウアー吸収スペクトル、格子定数、熱電能がある。中でも比抵抗データは現在最もよく集積されている。固溶体中の溶質原子としての比抵抗への寄与が、析出した場合の最大数十倍大きいいため、比抵抗測定値から溶質濃度を推測することは有利である。</p> <p>アルミニウム合金の比抵抗に及ぼすMg添加の影響としては、固溶体内で 5.4[nΩ m/mass%]、固溶体外で 2.2[nΩ m/mass%]である。</p>	<p>○本文献は、アルミニウム合金中の溶質元素(Mg など)の固容量の推定方法やその妥当性を示すものである。</p> <p>アルミニウム合金において、電気比抵抗の値から溶質濃度を推測する手法は広く一般的に行われており、参考文献として妥当である。</p>

内は商業機密のため、非公開とします。

バスケットに用いるアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の
考え方と評価方法について

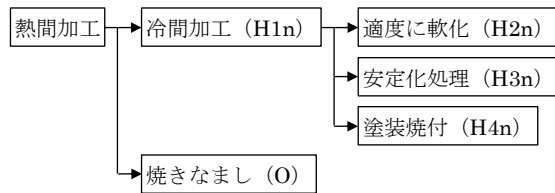
1. はじめに

特定兼用キャスクは、60年の設計貯蔵期間にわたり、不活性ガスであるヘリウムガスを充填して使用済燃料を貯蔵する貯蔵方式に用いられる。

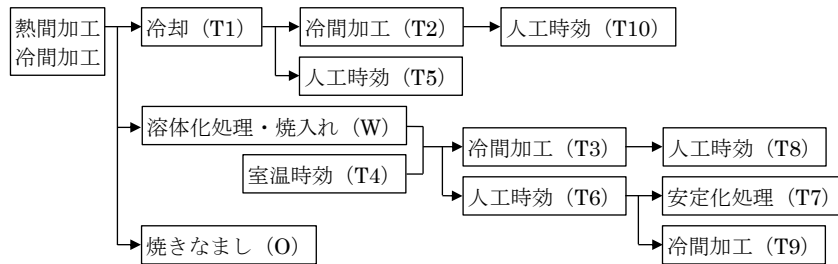
バスケットは、特定兼用キャスクのキャビティ内で個々の使用済燃料集合体を所定の位置に収納するためのものであり、基本的安全機能のうち、臨界防止機能、除熱機能及びこれらの機能を維持するための構造強度が求められる。

バスケットに用いる材料として、ステンレス鋼や炭素鋼などが挙げられるが、比強度及び伝熱特性に優れるアルミニウム合金は、バスケットの材料として期待されている。アルミニウム合金の大別には展伸材と鋳造材があり、それぞれ非熱処理型合金と熱処理型合金に分類され、別紙 2-1 図に示すように非熱処理型合金は圧延加工などの冷間加工によって、熱処理合金は焼きなましや時効処理などによって、質別に応じた所定の強度を得ている。

アルミニウム合金（展伸材）には 1000 系、2000 系、3000 系、4000 系、5000 系、6000 系及び 7000 系などの合金系があり、その一般的な性質と特徴を別紙 2-1 表に示す。



(a) 非熱処理型合金



(b) 熱処理型合金

別紙 2-1 図 アルミニウム合金の製造条件と調質記号 ¹⁾

別紙 2-1 表 アルミニウム及びアルミニウム合金（展伸材）の一般的性質と特徴

製造方法	合金系	性質					特徴
		強度	耐食性	成形性	切削性	溶接性	
非熱処理 型合金	1000系（純Al）	×	○	○		○	
	3000系（Al-Mn系合金）	○	○	△		○	Mn：再結晶温度上昇、分散強化
	4000系（Al-Si系合金）	○					Si：熱膨張率低減、耐熱性向上
	5000系（Al-Mg系合金）	○	△	△	△	○	Mg：固溶強化
熱処理 型合金	2000系（Al-Cu系合金）	○	×			○	Cu：析出強化（ジュラルミン）
	6000系（Al-Mg-Si系合金）			△	△	△	Mg ₂ Si：析出強化
	7000系（Al-Zn-Mg系合金）	○	×			△	Mg ₂ Zn ₁₁ ・(Al,Zn) ₄₉ Mg ₃₂ ：析出強化

2. アルミニウム合金の特性

アルミニウム合金は Cu、Si、Mn、Mg 及び Zn などの合金元素や焼きなましや時効処理などの熱処理によって強化機構やその特性が異なり、機械的性質等に影響を及ぼす。

2.1 熱処理

アルミニウム合金は非熱処理型合金と熱処理型合金に分類され、一般に非熱処理型合金は加工による転位強化と焼きなましの組合せにより所定の強度を得ており、熱処理型合金は Cu、Si、Mn、Mg 及び Zn などの合金元素を時効処理などの熱処理により母相中に金属間化合物として析出させ強度を得ている。

アルミニウム合金の代表的な熱処理を以下に示す。

- (1) 溶体化処理（固溶化処理） : 溶体化処理とは、試料を高温（たとえば 500℃前後）に加熱し、母相中に合金元素を固溶させる熱処理のことをいう。主に、その後の時効処理による析出強化を促進させる目的で実施する。
- (2) 時効処理（析出硬化処理） : 時効とは、母相に過飽和に固溶した元素が時間経過とともに析出し、硬さなどの機械的性質が変化することをいう。時効処理とは、室温又は 200℃程度までの熱を加えて析出物の生成を促進させる処理である。
- (3) 安定化処理 : 加工硬化させた Al-Mn 系合金は、室温で放置すると時間経過とともに強度が低下する「時効軟化」を生じる。安定化処理とは、時効軟化を防止する目的で、材料を 120～175℃にあらかじめ加熱する熱処理のことをいう。
- (4) 焼きなまし（O 材処理） : 焼きなましとは、金属組織が完全に再結晶し、焼入れなどの効果をなくした最も軟化した状態を得る目的で、300～400℃程度で熱処理することをいう。

2.2 各合金系の特性

アルミニウム合金（展伸材）には 1000 系、2000 系、3000 系、4000 系、5000 系、6000 系及び 7000 系などの合金系があり、各合金系の特徴を以下に示す。

(1) 1000 系（純 Al）

1000 系は、99.00%以上の工業用純アルミニウムであり、加工性、耐食性、溶接性などに優れるが、強度が低く構造材には適さない。ただし、電気伝導性、熱伝導性に優れるため、送配電用材料や放熱材として多く用いられている。

不純物として Fe、Si などを含有し、平衡相や準安定相として Al_3Fe や Al_6Fe などを析出するが、加工硬化が主な強化機構となる。

(2) 2000 系（Al-Cu 系合金）

2000 系アルミニウム合金はジュラルミンの名称で知られ、鋼材に匹敵する強度を持つ。しかし、比較的多くの Cu を含有するため耐食性に劣り、溶接性も他の合金に比較して劣る。

主な強化機構は、時効によって母相中にあらわれる溶質原子の集合体（GP ゾーン）による析出強化である。ただし、時効が進みすぎると析出相が粗大化し、転位が動きやすくなることによる軟化が起こる。（過時効）

(3) 3000 系（Al-Mn 系合金）

3000 系アルミニウム合金は、Mn の添加により加工性、耐食性を低下させずに 1000 系（純 Al）の強度を増加させたものである。主な強化機構は、スラブの均質化処理などで析出した Mn 系分散相（ Al_6Mn ）による分散強化である。

(4) 4000 系（Al-Si 系合金）

4000 系アルミニウム合金は、Si の添加により熱膨張率を抑え耐摩耗性を改善したものであり、Si の固容量は温度の低下とともに減少し、この固容量の減少によって Si 相が析出するが、析出強化は非常に低い。共晶で晶出する Si 相はアルミニウムをほとんど固溶せず、硬度が高く熱膨張係数が小さい。

(5) 5000 系（Al-Mg 系合金）

5000 系アルミニウム合金は、Mg 添加量により合金の種類が多く、非熱処理型合金の中で最も強度に優れている。主な強化機構は、母相中に固溶した Mg による固溶強化である。

(6) 6000系 (Al-Mg-Si系合金)

6000系アルミニウム合金は、強度と耐食性に優れた代表的な構造材であり、押出し加工性に優れている。主な強化機構は、母相中に固溶した Mg の固溶強化と時効によって析出した Mg_2Si の分散による析出強化である。ただし、時効が進みすぎると析出相が粗大化し、転位が動きやすくなることによる軟化が起こる。(過時効)

(7) 7000系 (Al-Zn-Mg系合金)

7000系アルミニウム合金は時効硬化性に優れ、Cu を含むものはアルミニウム合金中で最も高い強度を有する。主な強化機構は、母相中に固溶した Mg の固溶強化と時効によって析出した Mg_2Zn_{11} 及び $(Al,Zn)_{49}Mg_{32}$ などの分散による分散強化(析出強化)である。ただし、時効が進みすぎると析出相が粗大化し、転位が動きやすくなることによる軟化が起こる。(過時効)

3. バスケット用アルミニウム合金への要求事項

特定兼用キャスクは、60年の設計貯蔵期間にわたり使用済燃料集合体を貯蔵するため、バスケットは200℃程度の崩壊熱に曝される。

さらに特定兼用キャスクは、貯蔵後の輸送において特別の試験条件などの輸送法令に定められた安全機能が要求されることから、設計貯蔵期間における経年変化を考慮した長期健全性が求められる。

バスケット用アルミニウム合金の設計要求事項を以下に示す。

- ① 臨界防止機能を担保するため個々の使用済燃料集合体を所定の位置に保持する強度
- ② 使用済燃料集合体の崩壊熱の除熱機能を担保するための熱伝導率性
- ③ 使用済燃料集合体の収納量を確保するための小質量
- ④ 60年経過後の貯蔵後輸送に耐えられる長期健全性

バスケット用アルミニウム合金には、転位強化（加工硬化）、結晶粒微細化、析出強化（分散強化）、固溶強化などの強化機構を付与することが可能であるが、転位強化は長期的な入熱で加工時に付与されたひずみが除去されることにより消失し、結晶粒微細化は再結晶化に伴って、その効果が失われるものと推定される。

したがって、供用終期まで残存し、効果の期待できる強化機構は、分散強化（析出強化）及び固溶強化であると考えられる。

しかし、熱処理型合金に分類される2000系（Al-Cu系合金）、6000系（Al-Mg-Si系合金）、7000系（Al-Zn-Mg系合金）の時効処理による析出強化は、過時効による析出相の粗大化に伴う強度低下が懸念される。

また、母相中の合金元素の固溶による固溶強化は、設計貯蔵期間における長期的な入熱により、過飽和に固溶した合金元素が析出し、その効果の低減が懸念される。

バスケット用アルミニウム合金は、これらの特性を踏まえた上で経年変化に配慮し、長期健全性を保守的に考慮した特性（強度、靱性）の評価が求められる。

4. HZ-A3004 の考え方

特定兼用キャスクのバスケット用アルミニウム合金として、Hitz-P24 型のバスケット材料に HZ-A3004-H112（以下「HZ-A3004」という。）を適用している。

設計貯蔵期間における使用条件及びアルミニウム合金の特性を踏まえ、HZ-A3004 に適用した長期健全性、試験条件及び強度の考え方を以下に示す。

なお、HZ-A3004 は許認可実績がないため、必要と考えられる材料評価試験を実施し、その性能を確認することとする。

4.1 3000 系（Al-Mn 系合金）を選択した考え方

アルミニウムの強度を高めるなどの性質の改善のために合金元素を添加したアルミニウム合金のうち、熱処理型合金に分類される 2000 系（Al-Cu 系合金）、6000 系（Al-Mg-Si 系合金）及び 7000 系（Al-Zn-Mg 系合金）は、主な強化機構が時効処理による析出強化であるが、長期的に加熱される環境下では過時効に至る可能性が高く、析出相の粗大化に伴って大幅な強度の低下が懸念されることから除外する。

非熱処理型合金のうち、4000 系（Al-Si-Cu-Mg 系合金）は、主な強化機構が CuAl_2 や Mg_2Si による析出強化であるが、長期的に加熱される環境下では過時効に至る可能性が高く、析出相の粗大化に伴って大幅な強度の低下が懸念されることから除外する。

また、同じく非熱処理型合金の 5000 系（Al-Mg 系合金）は、Mg の含有量が多く、過飽和に固溶した Mg による固溶強化が主な強化機構であるが、長期的な入熱を受けると Mg の固溶量が低下し、大幅な強度の低下が懸念されることに加え、高温脆性が懸念される²⁾ ことから除外する。

したがって、長期健全性が求められるバスケット用アルミニウム合金は、非熱処理型合金の中で Mn 系分散相による分散強化と Mg による固溶強化が期待できる 3000 系（Al-Mn 系合金）の化学成分を基本とする。

4.2 HZ-A3004 の化学成分規定の考え方

HZ-A3004 の化学成分は、JIS H 4000 : 2014 (以下「JIS H 4000」という。) に規定されている合金番号 3004 (記号 A3004P) の範囲内で、Mn 及び Mg の下限値は製造可能な範囲で高めに規定し、長期的に強化が期待できない不要な析出相の核生成、核成長を排除するため、Si、Cu 及び Zn などの不純物元素は、製造可能な範囲の中で化学成分を可能な限り低く規定する。

別紙 2-2 表に HZ-A3004 の化学成分規定を示す。

別紙 2-2 表 HZ-A3004 の化学成分規定

材料名称	化学成分 (mass%)					
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
規定値 HZ-A3004	0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 以下
(参考) JIS H 4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下

4.3 Mg 固容量の変化量の推定に計算材料科学を適用した考え方

特定兼用キャスクの設計貯蔵期間（60 年）における経年変化を考慮する場合、バスケット用アルミニウム合金は、使用済燃料の崩壊熱の減少に伴って、200℃から 100℃程度まで徐々に低下する温度環境下にばく露される。

Mg の平衡固溶度は温度に依存し、固相では温度の低下に伴って減少することから、母相中に過飽和に固溶された Mg は、低温で放置すると時間の経過とともに、その温度の平衡固溶度まで徐々に減少し、固溶強化が低下するものと予想される。³⁾

したがって、供用終期の HZ-A3004 の設計用強度を評価する場合、バスケットの温度低下に伴う母相中の Mg 固容量の減少を適切に評価する必要がある。

材料の経年変化を評価する加速試験は、使用温度より高温で材料を加熱する方法が一般的であるが、この方法では Mg 固容量の減少を適切に評価することができない。

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted] 計算材料科学により、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 における Al 母相中の Mg 固容量の変化量を推定し、設計貯蔵期間後の HZ-A3004 を保守的に模擬できる機械試験用供試材の成分範囲を決定した。（詳細は別紙 1 に記載）

なお、[Redacted]

[Redacted]

[Redacted] 計算材料科学の発展はめざましく、多くの材料開発や研究の現場で活用されている。⁷⁾⁸⁾

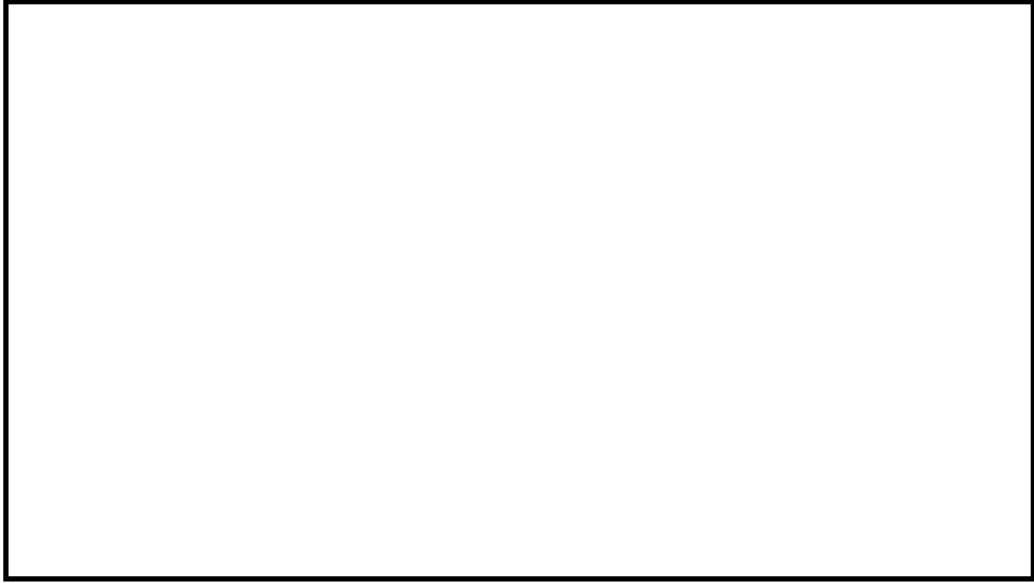
[Redacted] 別紙 2-2 図に示す。

[Redacted]

[Redacted] を別紙 2-3 図に示す。

金属組織変化の予測に対する計算材料科学の適用の妥当性については、既知試験文献⁹⁾の化学組成と加熱条件により同文献で報告された母相の Mg 固容量の変化量と比較し、概ね模擬できることを確認した。（詳細は別紙 1 に記載）

また、HZ-A3004 の実機相当材を用いた加熱実験（加熱条件：200℃×3000 Hr）を実施し、電気伝導率の測定などを基に Mg 固容量の変化量が概ね模擬できることを確認している。（詳細は別紙 1 に記載）



別紙 2-2 図



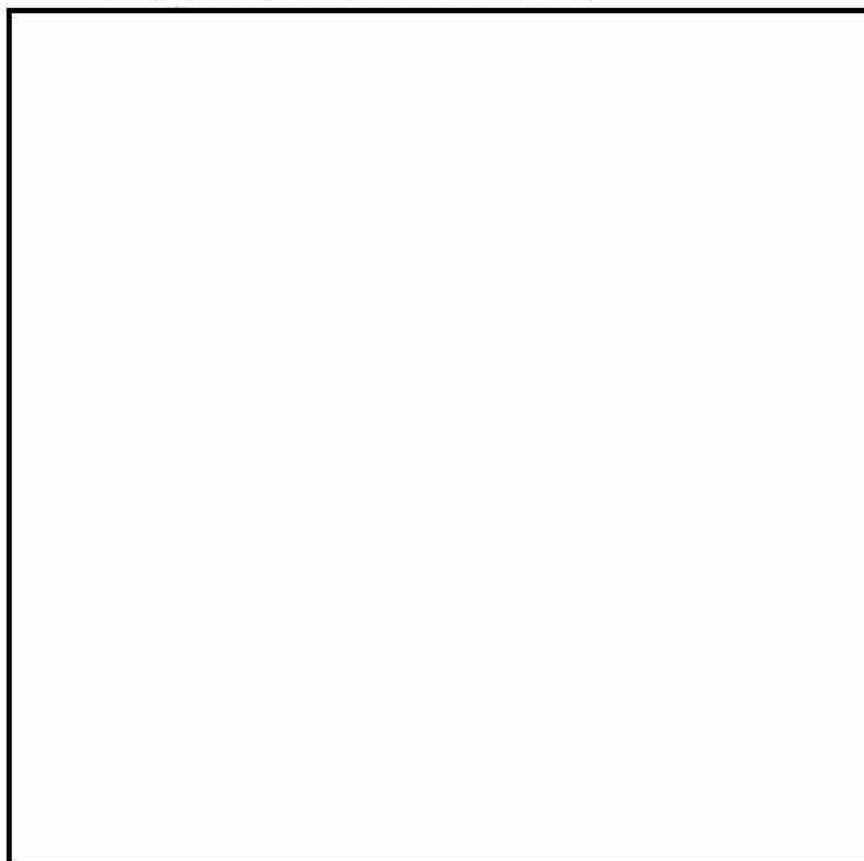
別紙 2-3 図



母相中の Fe 及び Mn は、 $Al_6(Mn, Fe)$ として析出するため、母相中の Mn が析出を完了した時点でほぼ変化しないと推定され、Zn および Cu の不純物元素は、T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) として析出するが、析出に [] 程度を要する計算結果が得られており、短時間では変化しないものと推察される。

Si と Mg の 2 つの固溶元素は Mg_2Si として共通の析出物を生成し、Si の析出が完了した時点で Mg の固溶量が平衡することから、HZ-A3004 の Mg の固溶量は、供試材の電気伝導率の変化を計測することにより、高い精度で推定することが可能と考えられる。

別紙 2-3 表 固溶体内および固溶体外(a)の合金元素の比抵抗への単位濃度当たりの寄与 ($n\Omega m \text{ mass}^{-1}$) とその比率 (内/外) ¹⁰⁾



4.6 過時効熱処理条件の設定に LMP を適用した考え方

アレニウスの式は、ある温度での化学反応の速度を予測する式であり、この式に基づく Larson-Miller パラメータ（以下「LMP」という。）は、金属材料のクリープ試験の評価などに用いられている。¹¹⁾

過時効熱処理条件は、60 年の設計貯蔵期間に相当する LMP を求め、この LMP から供用温度より高い温度の加熱時間を求める。この時、設計貯蔵期間の熱履歴は $200^{\circ}\text{C} \times 60$ 年とし、アルミニウム母相中の合金元素の拡散の影響を保守的に考慮する。

なお、アルミニウム合金は、 300°C 以上になると Mn が母相中に再固溶する可能性があり、Mn 系分散相の粗大化を保守的に模擬できない可能性があることから、過時効熱処理温度は 300°C 未満に制限することとする。

HZ-A3004 の供用終期には、計算材料科学に基づく計算結果から $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 、 Mg_2Si 及び T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) の析出が予測される。

別紙 2-5 図に示す 平衡状態図から、 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 及び Mg_2Si は総入熱量を包絡する LMP を考慮した過時効熱処理 により、析出物の粗大化が保守的に模擬できるものと考えられる。



別紙 2-5 図 HZ-A3004 の平衡状態図

4.7 機械試験用供試材の Mg 添加量を低減した考え方

機械試験用供試材は、HZ-A3004 の経年変化を考慮する上で、60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露による Mg 固容量の減少を保守的に考慮するため、設計貯蔵期間経過後と同等の Mg 固容量となるように Mg 添加量を調整したものである。

したがって、HZ-A3004 より Mg による固溶強化が低いことから、設計用強度の規定に用いることに問題はない。

また、HZ-A3004 は Cu、Si 及び Zn などの不純物元素の添加量を製造可能な範囲内で可能な限り抑制しており、Mg の添加量以外で機械試験用供試材と HZ-A3004 に違いはない。

HZ-A3004 は、60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露により、計算材料科学に基づく計算結果から、主に $Al_6(Mn, Fe)$ 、 Mg_2Si 及び T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) を析出し、母相中の Mg 固容量は平衡固溶度に近づいて減少するものと推察される。

Mg の平衡固溶度は温度に依存し固相では温度の上昇に伴って増加することから、過時効熱処理の温度は、貯蔵時よりも高温であるため、過時効熱処理された HZ-A3004 の母相中の Mg 固容量は、設計貯蔵期間経過後よりも多くなるものと推察される。

したがって、過時効熱処理だけでは Mg の析出に伴う母相中の Mg 固容量の減少を模擬できないことから、HZ-A3004 の強度特性を保守的に評価できない。

また、T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) の析出は別紙 2-5 図から 250℃以下と予想され、 であることから、短期間の材料試験で模擬することが困難となる。

したがって、HZ-A3004 の設計貯蔵期間 (60 年) の熱ばく露による経年変化を考慮するにあたり、Mg の固容量を模擬するため、T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) の析出により減少する Mg 固容量を製造時の Mg 添加量から減らして機械試験用供試材を製作し、 $Al_6(Mn, Fe)$ 及び Mg_2Si の析出及び粗大化 (Mg_2Si の析出に伴う母相中の Mg 固容量の減少を含む) を模擬するため、O 材処理と過時効熱処理 を施すこととする。

なお、短期間で模擬することができない T 相 (Al-Cu-Mg-Zn) の体積率は微小であり、強度特性に及ぼす影響は無視しうるほどに小さいと考えられる。

4.8 熱物性等に対する合金元素と経年変化の影響の考え方

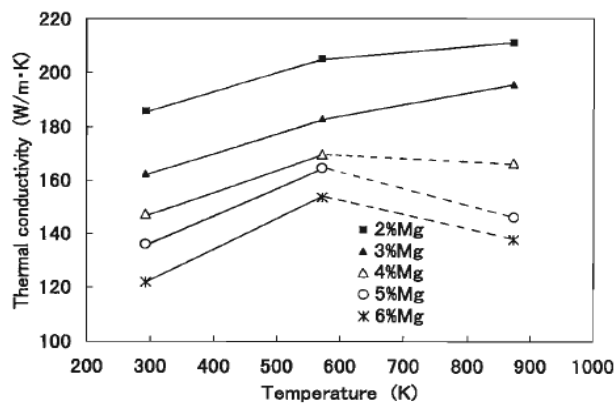
アルミニウムの導電率、熱伝導率などの物理的性質は、アルミニウムの純度の影響が大きく、純度が高くなるほど、導電率、熱伝導率は高くなる。¹²⁾

別紙 2-6 図に Al-Mg 合金の熱伝導率と温度の関係に及ぼす Mg 添加量の影響を示す。経年変化によりアルミニウム合金の純度が変化することはなく、熱伝導率などの物理的性質に有意な変化は生じない。

また、熱物性に対する 60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露に伴う過時効の影響については、補足説明資料 1-1 9.1 項において HZ-A3004 の初期材と過時効熱処理材の熱物性値が試験で確認されており、試験結果から初期材と過時効熱処理材の熱物性値に有意な差のないことを確認している。

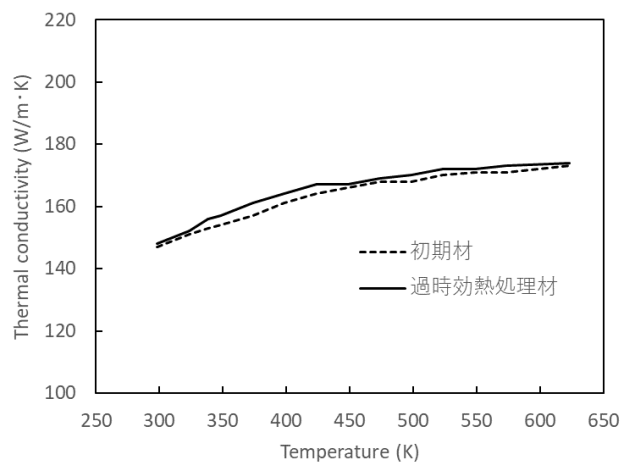
別紙 2-7 図に HZ-A3004 の初期材と過時効熱処理材の熱伝導率と温度の関係を示す。

したがって、熱物性に対する 60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露に伴う過時効の影響は、無視し得るほどに小さいと推察されることから伝熱機能への影響はない。



注) 873K は固液共存域内の温度であり、熱伝導率に減少傾向が見られる。

別紙 2-6 図 Al-Mg 合金の熱伝導率と温度の関係に及ぼす Mg 添加量の影響¹³⁾



別紙 2-7 図 HZ-A3004 の初期材と過時効熱処理材の熱伝導率と温度の関係

6. HZ-A3004 の試験方法の考え方

HZ-A3004 は以下の材料試験により、設計用強度を評価する。

HZ-A3004 の材料試験項目は、JSME の金属キャスク構造規格などでは規定されていない材料であることから、核原燃料、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 項の規定により許認可を取得している、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式指定（原規規発第 1709261 号、指定の番号：T-DPC17001）の添付書類 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」¹⁴⁾ を参考とする。

① 物性試験

- ・ ミクロ組織観察 【HZ-A3004 規格材／機械試験用供試材】
- ・ 縦弾性係数 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ せん断弾性係数 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ ポアソン比 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ 線膨張係数 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】

② 機械試験

- ・ 常温引張試験 【HZ-A3004 規格材／機械試験用供試材】
- ・ 高温引張試験 【機械試験用供試材（RT～300℃）】
- ・ ビッカース硬さ試験 【HZ-A3004 規格材／機械試験用供試材】
- ・ シャルピー衝撃試験 【HZ-A3004 規格材（RT, 250℃）】
- ・ クリーブ試験 【機械試験用供試材（150℃～350℃）】

③ その他物性試験

- ・ 熱拡散率 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ 比熱 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ 密度 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】
- ・ 熱伝導率 【HZ-A3004 規格材（25℃～350℃）】

④ 参考試験

- ・ 破壊靱性試験 【HZ-A3004 規格材／機械試験用供試材（-40℃、RT、200℃）】

6.1 試験に適用する供試材の考え方

HZ-A3004 の材料試験に使用する供試材には、HZ-A3004 規格材（以下「規格材」という。）と機械試験用供試材がある。

5.7 項で説明した通り、機械試験用供試材は、HZ-A3004 の設計貯蔵期間（60 年）の熱ばく露による経年変化を模擬した材料であり、規格材は供用前の経年変化のない材料として機械試験に使用する。

(1) 試験に適用する規格材の考え方

規格材は、供用前の HZ-A3004 の基本物性の指標を示す供試材であり、各物性試験、機械試験、その他物性試験に使用する。

なお、機械試験においては、常温引張試験、ビッカース硬さ試験及びシャルピー衝撃試験に使用し、常温引張試験で規格材と機械試験用供試材の引張強度や降伏点を比較することで、規格材より機械試験用供試材の方が強度の低いことを確認する。また、ビッカース硬さ試験では、機械試験用供試材より規格材の方が硬いことを確認し、より硬い規格材の靱性をシャルピー衝撃試験で確認する。

(2) 試験に適用する機械試験用供試材の考え方

機械試験用供試材は、60 年の設計貯蔵期間における熱ばく露を模擬した材料であり、経年変化により加工硬化や Mg による固溶強化などの強化機構が消失又は減少し、強度の低下した HZ-A3004 の強度指標を示す供試材である。

機械試験用供試材は、マイクロ組織観察、常温引張試験、高温引張試験及びビッカース硬さ試験に使用しており、マイクロ組織観察では結晶粒や晶出物の大きさに違いがないことを確認し、常温引張試験及び高温引張試験の評価結果は、経年変化した HZ-A3004 の設計用強度を規定するために使用する。

6.2 HZ-A3004 の破壊靱性

HZ-A3004 は J_{IC} 破壊靱性試験により、 -40°C 、常温、 200°C で靱性を有することと許容欠陥寸法を確認する。

HZ-A3004 の破壊靱性に係る特性については、「補足説明資料 1-1 バスケット用アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）について」（Doc No. MA035B-SC-Z01）の「別紙 3 バスケット用材料 アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の破壊靱性に係る特性について」を参照。

6.3 HZ-A3004 の設計用強度 (Sy 値, Su 値, Sm 値)

HZ-A3004 は機械試験用供試材の機械試験の結果を用いて、「発電用原子力設備規格材料規格 (2008 年版)」(JSME S NJ1-2008) の「添付 1. 新規材料採用ガイドライン」に準じた各設計用強度を規定する。

HZ-A3004 の設計用強度の規定については、「補足説明資料 1-1 バスケット用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) について」(Doc. No. MA035B-SC-Z01) の「8. 設計用強度」を参照のこと。

7. まとめ

HZ-A3004 の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効による強度低下を考慮するため、アルミニウム合金の特性を考慮した計算材料科学に基づく Mg 添加量及び LMP に基づく過時効熱処理により、設計貯蔵期間中の HZ-A3004 の経年変化を模擬した機械試験用供試材を製作し、その材料試験によって得られた機械的性質を保守的に包絡するように設定している。

したがって、HZ-A3004 は長期健全性を有する設計用強度を規定している。

別紙 2-8 図に HZ-A3004 の考え方と評価方法の体系を示す。

【Hitz-P24 型のバスケット使用条件】(設計要求)
 ①設計貯蔵期間：60年
 ②使用温度：供用初期 約 200℃→供用終期 約 100℃
 ③短期荷重：9m 落下事故時 負荷荷重 (発生応力=69MPa)
 ④長期荷重：バスケット自重 (発生応力<1MPa) のみ ※
 ※構造的にほとんど熱応力が発生しない設計を採用

【Hitz-P24 型のバスケット設計の考え方】
 ①9m 落下時の発生応力 69MPa<設計引張強さ (S_u) (=106MPa)
 ②貯蔵時の発生応力 1MPa 未満<許容引張応力 (S) (=15MPa)
 ③供用期間中、温度低下がないものとして評価

【規格材及び機械試験用供試材の考え方】
 計算材料科学に基づく計算結果から、母相の Mg 固溶量は 60 年経過後に [] まで減少することが推定される。母相の Mg 固溶量は加熱条件が異なると模擬が困難となるため、機械試験用供試材の [] 程度に低減する。

成分規定 (mass%)		強化機構に寄与する化学成分
試験用規格材	規格材	[]
供試材機械試験用	機械試験用供試材	

※各試験用供試材の化学成分は、機械試験用供試材の [] 規定範囲内に設定している。

【確認すべき課題】
 60 年間の供用期間中における熱ばく露による強度低下 (強化機構のキャンセル) を適切に考慮したアルミ材の設計用強度

【経年変化の評価】
 ◎Mg 固溶量の評価
 アルミニウム合金は、加熱に伴う母相中の固溶元素の析出により、電気伝導率及び機械特性が変化する。HZ-A3004 では主に Si、Fe、Mn、Mg が析出し $Al_6(Mn, Fe)$ や Mg_2Si などの生成が予想される。60 年の設計貯蔵期間に 200℃ の一定温度で熱ばく露される条件、及び 200℃ から 100℃ に徐々に低下する温度環境下で熱ばく露される条件について、HZ-A3004 の母相中の合金元素の固溶量を計算材料科学に基づく計算により推定する。

【結果】
 ・Mn と Si は [] 析出する。
 ・「200℃×60 年」と「200→100℃×60 年」の加熱条件における母相中の Mg 固溶量は概ね同じだった。
 ・製造時の Mg 添加量が下限値 1.0mass% の HZ-A3004 は、母相中に Mg を過飽和に固溶するが、60 年経過後には固溶量が []

【HZ-A3004 主な化学成分】(mass%)

記号	化学成分 (mass%)								その他		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	個々	合計		
HZ-A3004	0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	-	0.05 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部	

【HZ-A3004 の主な強化機構】

強化機構	供用初期	供用終期 (60 年経過後)
	固溶強化	Mg
析出強化	$Al_6(Mn, Fe)$ *	$Al_6(Mn, Fe)$ *
加工硬化	あり	なし
結晶粒微細化	圧延組織	圧延組織又は回復再結晶組織

※共晶温度は 658.5℃ であり、かつ熱的に安定。

【妥当性確認】
 ◎加熱に伴う金属組織変化に対する計算材料科学の妥当性
 加熱に伴う金属組織変化に対して、[] 計算材料科学を適用することの妥当性について、既知試験文献で報告された母相の Mg 固溶量の変化を模擬できることを確認。また、HZ-A3004 (規格材) に過時効熱処理 (200℃×3,000 h) を施し、Mg 固溶量の変化を模擬できることを確認。なお、母相の合金元素固溶量と析出状態を電気伝導率で評価する手法は、一般的に用いられている。

【結果】
 ・既知試験文献及び HZ-A3004 (規格材) の過時効熱処理実験の結果が、計算材料科学に基づく計算結果と概ね一致することから、母相の Mg 固溶量及び析出状態の模擬が可能であると判断できる。

設計用強度 S_y , S_u , S_m

破壊靱性

許容引張応力 S

腐食・長期劣化

【設定方法】
 ◎機械試験用供試材の機械試験
 O 材処理+ [] 機械試験用供試材に O 材処理を施し加工硬化を回復させた後、[] の過時効熱処理を施す。規格材より機械試験用供試材の方が強度の低いことを確認。【指標：強度特性】

【結果】
 O 材処理+過時効熱処理 [] を施した機械試験用供試材は、規格材より強度の低いことを確認。

【加熱条件の考え方】
 ◎LMP による過時効熱処理条件の設定
 アレニウスの式は、ある温度での化学反応の速度を予測する式であり、この式に基づく LMP は、金属材料のクリープ試験の評価などに用いられている。60 年の設計貯蔵期間に相当する LMP を求め、この LMP から供用温度より高い温度での加熱時間を求める。この時、供用温度は拡散の影響を保守的に考慮し、200℃ の一定温度で熱ばく露されるものと仮定する。なお、アルミニウム合金は、300℃ 以上になると Mn が母相中に再固溶する可能性があるため、過時効熱処理温度は 300℃ 未満とする。

【結果】
 設計貯蔵期間に相当する LMP から求められた加熱時間は、[] で [] であり、過時効熱処理条件は保守的に [] とした。

【設定の考え方と材料特性】
 ①HZ-A3004 の結晶構造は、単位胞が fcc であり、バスケットの使用条件において延性を失わず脆性破壊を生じない。(シャルピー衝撃試験でも延性破面を確認済)
 ②HZ-A3004 は、使用温度域において靱性を有する。したがって、HZ-A3004 は靱性不足による破壊に対して特別な配慮は不要。

【参考確認試験】
 ①シャルピー衝撃試験 (規格材の初期材及び過時効熱処理材)
 ②破壊靱性試験 (規格材の初期材及び過時効熱処理材)

【結果】
 ①初期材と過時効熱処理材の衝撃吸収特性に差はない。
 ② J_{IC} 値破壊靱性試験の結果、HZ-A3004 は使用温度域で靱性を有し、許容欠陥寸法は板厚の 33% までとなり、外観検査で十分に検出可能。

【評価】
 破壊靱性試験の結果、HZ-A3004 は -40、RT、200℃ で靱性を有し、圧延製法では板厚の 33% 深さの欠陥は考えられず外観検査で十分に検出可能。したがって、靱性不足による破壊に対して特別な配慮は不要。

【製品検査】
 ①外観検査 (必要に応じて非破壊検査)
 ②シャルピー衝撃試験 (参考/供試材との同等性確認)

【設定方法】
 ◎機械試験用供試材のクリープ試験

【結果】
 クリープを考慮した設計用強度 15MPa@200℃ (S 値)

【評価】
 S 値は 200℃ において 15MPa を有し、貯蔵中のバスケットの発生応力が 1MPa 未満であるのに対して十分な安全裕度を有している。

【製品検査】
 不要

特定兼用キャスクのキャビティ内は、不活性ガスであるヘリウムガスを充填しており、不活性雰囲気は維持される限り、バスケットは腐食しない。なお、特定兼用キャスク内部に残留する酸素を考慮しても、腐食による構造強度への影響はない。

【評価 (強度設定)】
 機械試験用供試材を用いて JSME 新規材料採用ガイドラインに準じた各設計用強度を規定。

【製品検査】
 ①化学成分、②質別 (H112)、③製造時初期材の機械特性 (設計には過時効後の強度を使用するため、初期材の機械試験結果は、直接設計用強度を確認するためのものではないが、製品材料の初期特性と供試材に有意な差異がないことを確認するために実施する。)

別紙 2-8 図 HZ-A3004 の考え方と評価方法

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

7. 参考文献

- 1) 吉田英雄, 内田秀俊, アルミニウムの熱処理, 軽金属, Vol. 45 No.1, (1995), p42
- 2) 一般社団法人日本軽金属学会, アルミニウムの組織と性質 付録, (1991), p155
- 3) 天野英隆, 小松伸也, 池田勝彦, 河本知広, アルミニウム中の Mg の 523K 以下での平衡固溶度, 軽金属, 第 52 巻 第 5 号, (2002), p210-p215

4)
5)
6)
7)
8)

- 9) 中山栄浩, 鷹合徹也, 金 大洲, 山田雄司, Al-5, 10 mass%Mg 合金の時効処理に伴う組織変化, 日本金属学会誌 第 61 巻 第 1 号, (1997), p34-p40
- 10) 小松伸也, 村松俊樹, アルミニウム合金中の溶質濃度の推定方法, 軽金属, 第 50 巻 第 10 号, (2000), p518-p526
- 11) 丸山公一, 高温長時間クリープ特性の推定での信頼性向上, 一般社団法人 日本鉄鋼協会, 鉄と鋼 Tetsu-to-Hagané Vol. 105 No. 8, (2019), p767-p777
- 12) 遠藤昌也, 渡辺英雄, 高純度アルミニウム,, 軽金属, 第 61 巻 第 5 号, (2011), p226-p236
- 13) 長海博文, Al-Mg 合金の高温物性値に及ぼす Mg 添加量の影響, 軽金属, 第 50 巻 第 2 号, (2000), p49-p53
- 14) 三菱重工業株式会社, 型式設計特定容器等の型式指定申請書添付書類の一部補正について, Doc No. L5-95HU13, (2017), 添付書類 8-2-4

バスケット用材料

アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の破壊靱性に係る特性について

1. はじめに

特定兼用キャスクは、設計貯蔵期間（60 年間）に渡り使用済燃料集合体の崩壊熱にさらされる。特にバスケットに用いるアルミニウム合金は、長期間の熱ばく露に伴う過時効により、機械的強度や靱性の低下が懸念される。

本書は、Hitz-P24 型キャスクのバスケットに適用するアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の耐衝撃性および破壊靱性について検討した結果を述べる。

2. 供試材

2.1 供試材の材質および熱処理条件の選定

（一社）日本機械学会は、2015 年 10 月 1 日に、使用済燃料貯蔵規格のうち、金属キャスクバスケット用アルミニウム合金事例規格を廃止した。廃止に至った理由のうち、耐衝撃性および破壊靱性に関する事項（要約）を以下に示す。

- ・アルミニウム合金の耐衝撃性および破壊靱性の指標として、鉄鋼材料に準じた横膨出量を採用していた。しかし、アルミニウム合金は、横膨出量に対応した吸収エネルギーが鉄鋼材料よりも 1 桁小さく、判定指標としての保守性が十分でない。
- ・判定指標としては J_{1c} 値が適切と判断される。一方、3000 系や 6000 系などのアルミニウム合金は、過飽和に固溶した Mg が析出することで、破壊靱性値の低下が予想される。規格廃止時においては、設計貯蔵期間を考慮したアルミニウム合金の J_{1c} 値の測定結果が不足していると判断された。

HZ-A3004 は、機械試験用供試材と比較して合金元素の添加量が多いことから靱性が劣ると推測される。そこで、保守的となるように、耐衝撃性および破壊靱性は、過時効熱処理した HZ-A3004 に対してシャルピー衝撃試験および破壊靱性試験を実施することにより評価した。

2.2 供試材の化学成分

第1表は、供試材の化学成分を示す。材料の評価試験に使用する供試材は、第1表に示す実製品相当の材料（HZ-A3004 A、B、C）とした。

2.3 供試材の熱処理条件

第2表は、供試材の熱処理条件を示す。供試材はHZ-A3004とし、JIS H0001:1998におけるH112材（初期材）および設計貯蔵期間の熱曝露に相当する過時効熱処理を施した材料（過時効熱処理材）を用いた。ここで、過時効熱処理材は、設計貯蔵期間においてバスケットに加わる熱エネルギーを保守的に模擬するため、HZ-A3004をO材処理したのち、設計貯蔵期間の熱曝露に相当する の過時効熱処理を施した。

第 1 表 供試材の化学成分

材料名称	供試材	化学成分 (mass%)					
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
HZ-A3004	A	0.08	0.37	0.02	1.26	1.08	<0.01
	B	0.09	0.37	0.02	1.22	1.08	<0.01
	C	0.09	0.35	0.02	1.37	1.12	<0.01
規定値		0.15	0.7	0.05	1.1	1.0	0.05
HZ-A3004		以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下
(参考)		0.30	0.7	0.25	1.0	0.8	0.25
JIS H 4000 A3004		以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下

第 2 表 供試材の熱処理条件

材料	熱処理	
	名称	条件
HZ-A3004	初期材	H112 材(圧延まま)
	過時効熱処理材	○ 材処理→ 過時効熱処理 <input type="text"/>

2.4 HZ-A3004 の靱性

金属材料の靱性は、①転位を動かすために必要な応力、②結晶のへき開強度、③結晶粒界強度の大小によって決まる。転位を動かすために必要な応力が他の2つに比較して著しく小さいときには材料は延性を示す。逆に、へき開強度が転位を動かすために必要な応力よりも低ければ、材料はへき開破壊する¹⁾。

鉄鋼材料の結晶構造は、単位胞が体心立方格子 (body-centered cubic lattice, bcc) であり、低温におけるへき開強度が低いため、温度が低くなるとすべりによる延性破壊からへき開によるぜい性破壊に遷移する。一方、アルミニウム合金の結晶構造は、単位胞が面心立方格子 (face-centered cubic lattice, fcc) であり、へき開強度が著しく高いため、ぜい性破壊を生じないことが知られている¹⁾。HZ-A3004 はアルミニウム合金であり、耐衝撃性や破壊靱性に優れた材料であると考えられる。

3. 材料の評価試験（耐衝撃性および破壊靱性）

HZ-A3004 に対してシャルピー衝撃試験および破壊靱性試験を実施した。以下に各々の試験条件および試験結果を示す。

3.1 シャルピー衝撃試験

(1) 試験条件

- ・供試材 : 第3表は、シャルピー衝撃試験の条件および試験数を示す。供試材は HZ-A3004 とし、3 標本（供試材 A、B、C）を試験に供した。試験片は、軸が板の表面とその中心との中央部にあるように採取した。
- ・熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材（初期材）および O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した材料（過時効熱処理材）を試験に供した。
- ・試験片 : JIS Z 2242:2018 による V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・試験方法 : JIS Z 2242:2018 により実施した。
- ・試験温度 : 常温、250℃とした。
- ・試験方向 : 圧延方向に対し平行な方向（L 方向）および直角な方向（T 方向）とした。
- ・記録 : 吸収エネルギー、衝撃値および横膨出量を測定した。

(2) 試験結果

第4表から第6表、第1図および第2図は、シャルピー衝撃試験結果を示す。過時効熱処理材のシャルピー衝撃特性は、初期材と有意な差が無い。また、全ての試験片において延性破面率は 100%であった。

第3表 シャルピー衝撃試験の条件および試験数

材料	熱処理	試験温度	試験方向	標本数	1標本あたりの試験数
HZ-A3004	初期材 (H112材)	常温	L	3	6
		常温	T	3	6
		250°C	L	3	6
		250°C	T	3	6
	過時効熱処理材 (O材→ <input type="text"/>)	常温	L	3	6
		常温	T	3	6
		250°C	T	3	6

第4表 シャルピー衝撃試験結果 (注1)

材料	熱処理	試験温度	試験方向	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
HZ-A3004	初期材 (H112材)	常温	L	43	55	2.49	100
		常温	T	25	32	1.61	100
		250°C	L	44	55	2.61	100
		250°C	T	28	35	1.95	100
	過時効熱処理材 (O材→ <input type="text"/>)	常温	L	41	52	2.05	100
		常温	T	28	34	1.58	100
		250°C	T	25	31	2.05	100

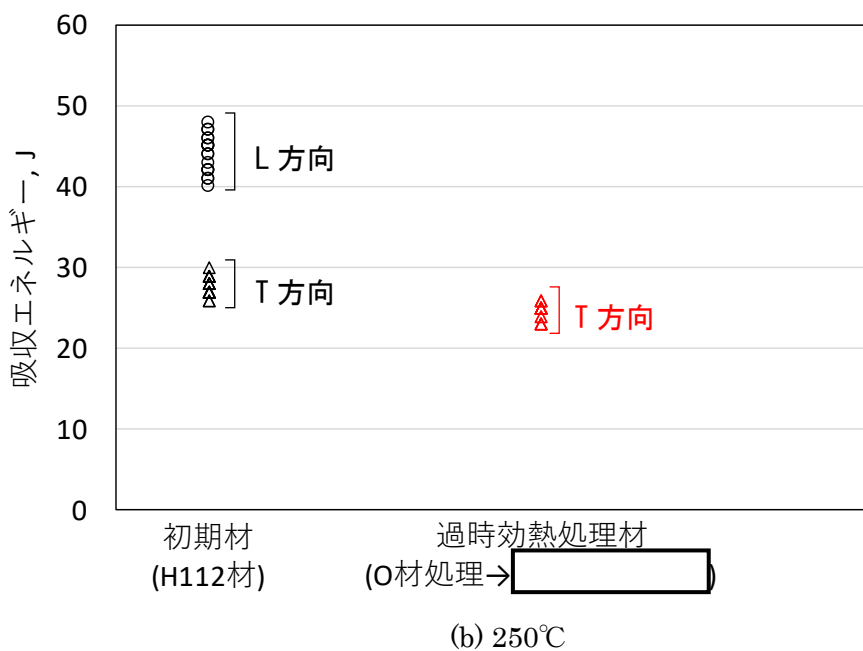
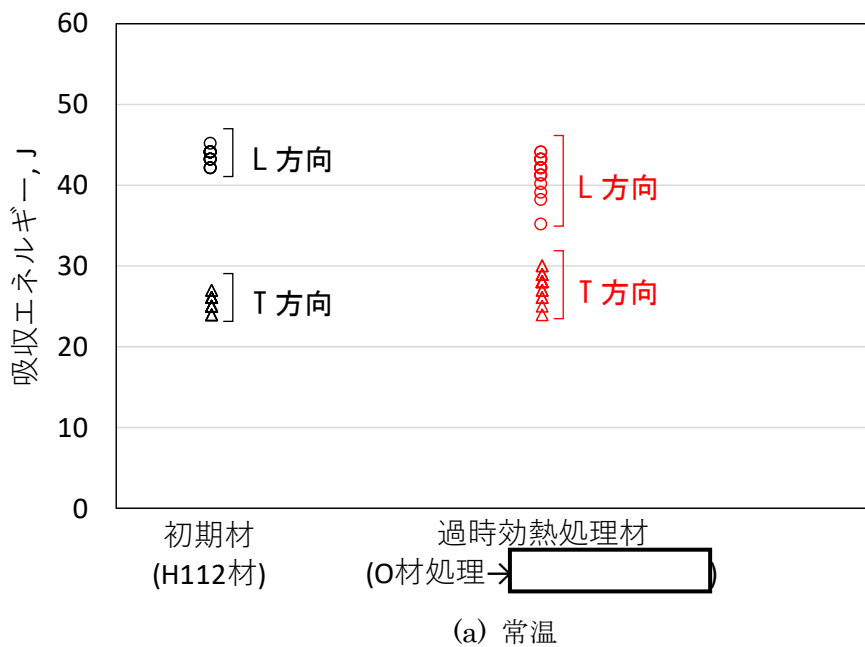
(注1) 試験結果は3標本の平均値を記載した。

第5表 HZ-A3004（初期材、H112）に対するシャルピー衝撃試験結果詳細

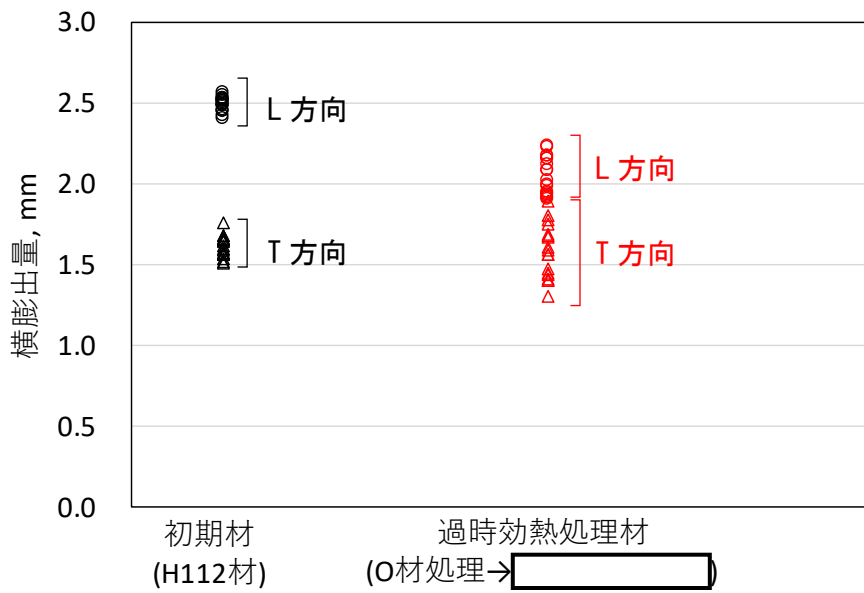
試験条件				試験結果				
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度	吸収エネルギー(J)	衝撃値(J/cm ²)	延性破面率(%)	横膨出量(mm)
HZ-A3004	A	初期(H112)	L	常温	44	56	100	2.48
					44	56	100	2.51
					44	55	100	2.53
					44	55	100	2.53
					45	56	100	2.52
					44	55	100	2.51
				250°C	47	59	100	2.57
					45	56	100	2.64
					46	57	100	2.54
					46	57	100	2.52
					48	60	100	2.44
					45	57	100	2.56
			T	常温	26	33	100	1.66
					26	33	100	1.68
					26	32	100	1.68
					26	32	100	1.66
					27	34	100	1.76
					26	33	100	1.62
				250°C	29	37	100	2.08
					30	37	100	2.02
					29	37	100	1.97
					29	37	100	2.06
					29	36	100	1.93
					28	36	100	2.03
HZ-A3004	B	初期(H112)	L	常温	43	54	100	2.45
					43	54	100	2.46
					44	55	100	2.56
					44	56	100	2.55
					44	54	100	2.50
					43	54	100	2.48
				250°C	44	55	100	2.69
					45	56	100	2.7
					43	54	100	2.66
					47	59	100	2.69
					45	56	100	2.64
					44	55	100	2.61
			T	常温	25	32	100	1.57
					26	32	100	1.59
					27	34	100	1.65
					25	32	100	1.54
					26	33	100	1.65
					25	32	100	1.56
				250°C	27	34	100	1.92
					27	34	100	1.91
					28	35	100	1.93
					27	34	100	1.93
					27	34	100	1.88
					28	34	100	1.95
HZ-A3004	C	初期(H112)	L	常温	42	53	100	2.49
					43	54	100	2.45
					42	52	100	2.48
					42	53	100	2.52
					43	54	100	2.40
					44	55	100	2.42
				250°C	42	52	100	2.60
					40	50	100	2.54
					41	51	100	2.64
					42	53	100	2.64
					42	52	100	2.62
					41	51	100	2.59
			T	常温	25	31	100	1.60
					25	31	100	1.51
					24	31	100	1.57
					24	30	100	1.52
					25	31	100	1.64
					24	30	100	1.56
				250°C	27	34	100	1.92
					26	33	100	1.96
					28	35	100	1.85
					26	33	100	1.89
					27	33	100	1.91
					27	33	100	1.90

第6表 HZ-A3004（過時効熱処理材）に対するシャルピー衝撃試験結果詳細

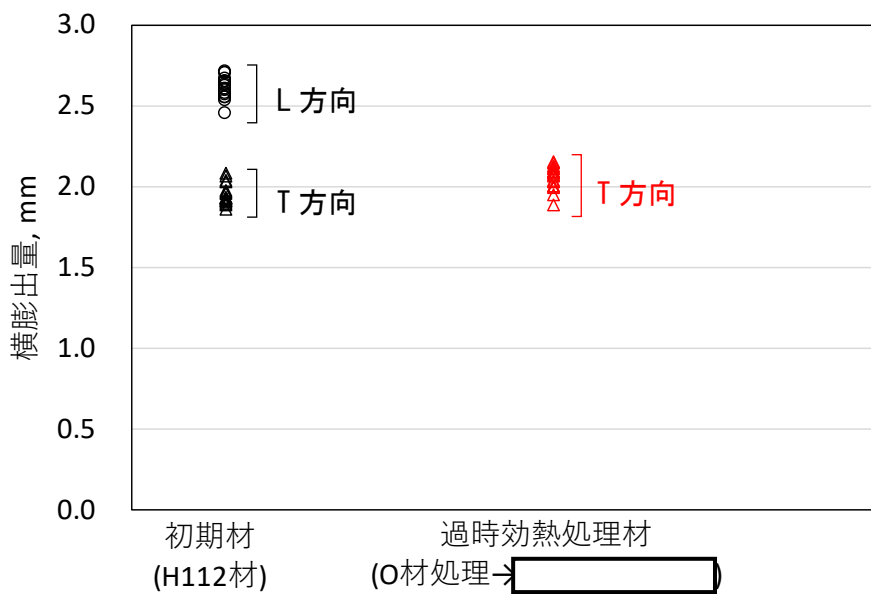
試験条件				試験結果				
材料	供試材	熱処理	方向	試験温度	吸収エネルギー(J)	衝撃値(J/cm ²)	延性破面率(%)	横膨出量(mm)
HZ-A3004	A	過時効熱処理	L	常温	35	44	100	2.12
					38	48	100	1.98
					41	51	100	2.22
					40	50	100	2.08
					43	54	100	2.17
					43	54	100	2.23
			T	常温	26	33	100	1.56
					24	29	100	1.45
					25	31	100	1.59
					28	35	100	1.69
					26	33	100	1.56
					27	34	100	1.67
				250°C	25	32	100	2.07
					25	32	100	2.15
					25	31	100	2.09
					25	31	100	2.08
					25	32	100	2.09
					25	31	100	2.10
HZ-A3004	B	過時効熱処理	L	常温	42	52	100	2.08
					43	54	100	2.02
					44	56	100	1.99
					39	49	100	2.15
					41	52	100	2.17
					44	55	100	2.15
			T	常温	28	35	100	1.68
					29	37	100	1.61
					27	33	100	1.75
					29	36	100	1.89
					30	37	100	1.80
					30	37	100	1.78
				250°C	25	32	100	2.03
					26	32	100	2.12
					26	33	100	2.11
					25	31	100	2.06
					26	32	100	2.14
					25	31	100	2.09
HZ-A3004	C	過時効熱処理	L	常温	41	52	100	1.90
					42	52	100	1.95
					43	53	100	1.92
					42	53	100	1.94
					42	53	100	1.91
					42	52	100	1.93
			T	常温	28	35	100	1.40
					28	35	100	1.44
					28	34	100	1.30
					28	35	100	1.40
					29	36	100	1.47
					28	35	100	1.41
				250°C	24	30	100	1.99
					23	29	100	1.88
					23	29	100	1.94
					23	29	100	2.02
					23	29	100	2.00
					24	29	100	2.00



第1図 HZ-A3004 のシャルピー衝撃試験結果 (吸収エネルギー)



(a) 常温



(b) 250°C

第2図 HZ-A3004 のシャルピー衝撃試験結果 (横膨出量)

3.2 破壊靱性試験

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第7表は、破壊靱性試験の条件および試験数を示す。供試材は HZ-A3004 とし、3 標本（供試材 A～C）を試験に供した。試験片は、軸が板の表面とその中心との中央部にあるように採取した。
- ・ 熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材（初期材）および O 材処理を施したのちに の過時効熱処理を施した材料（過時効熱処理材）を試験に供した。
- ・ 試験片 : ASTM E 1820 による 2TC(T)試験片とした。
- ・ 試験方法 : ASTM E 1820 に記載された単一試験片手法である除荷弾性コンプライアンス法とした。
- ・ 試験温度 : -40°C 、常温、 200°C とした。
- ・ 試験方向 : き裂の向きが圧延方向に対し平行な方向（T-L 方向）および直角な方向（L-T 方向）とした。
- ・ 試験数 : 1 つの条件に対し 3 本の試験を実施した。
- ・ 記録 : J_Q 値を測定した。さらに、得られた J_Q 値 が ASTM E 1820 の Annex A9.10.1 から 9.10.2 の条件を満足したとき、これを試験温度における材料の弾塑性破壊靱性値(J_{IC} 値)として記録した。

(2) 試験結果

第8表から第10表、第3図は、破壊靱性試験結果を示す。また、第4図は過時効熱処理材（T-L 方向）における試験体の破面を示す。さらに、第5図から第12図は荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線を示す。試験温度が 200°C の場合など、一部の試験は供試材の延性が高く、試験に伴う負荷方向への伸びが大きいため、 J_{IC} 値が得られなかった。そこで、試験結果は J_Q 値で評価した。試験結果から、過時効熱処理材の J_Q 値は、初期材と有意な差が無いことがわかり、HZ-A3004 は設計貯蔵期間に渡り靱性の低下が生じないと考えられる。

第7表 破壊靱性試験の条件および試験数

材料	熱処理	試験温度	試験方向	標本数	1標本あたりの試験数
HZ-A3004	初期材 (H112材)	常温	T-L	3	3
		常温	L-T	3	3
		200°C	T-L	3	3
		-40°C	T-L	3	3
	過時効熱処理材 (O材→ <input type="text"/>)	常温	T-L	3	3
		常温	L-T	3	3
		200°C	T-L	3	3
		-40°C	T-L	3	3

第8表 破壊靱性試験結果 (注1) (注2)

材料	熱処理	試験温度	試験方向	J _Q [kJ/m ²]
HZ-A3004	初期材 (H112材)	常温	T-L	34.5
		常温	L-T	74.1
		200°C	T-L	183.0
		-40°C	T-L	35.9
	過時効熱処理材 (O材→ <input type="text"/>)	常温	T-L	34.5
		常温	L-T	70.7
		200°C	T-L	227.2
		-40°C	T-L	40.0

(注1) 試験結果は3標本の平均値を記載した。

(注2) 一部の試験はJ_{IC}値が得られなかったため、本表はJ_Q値についてまとめた。

第9表 HZ-A3004（初期材、H112）に対する破壊靱性試験結果詳細（注）

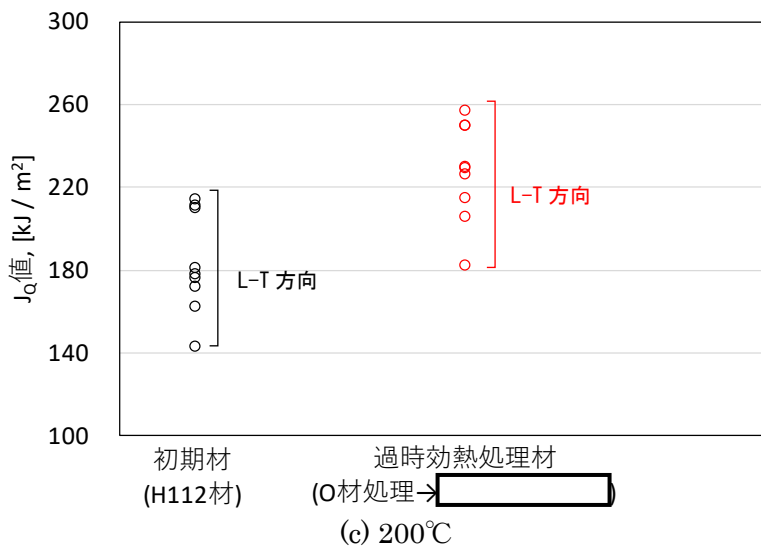
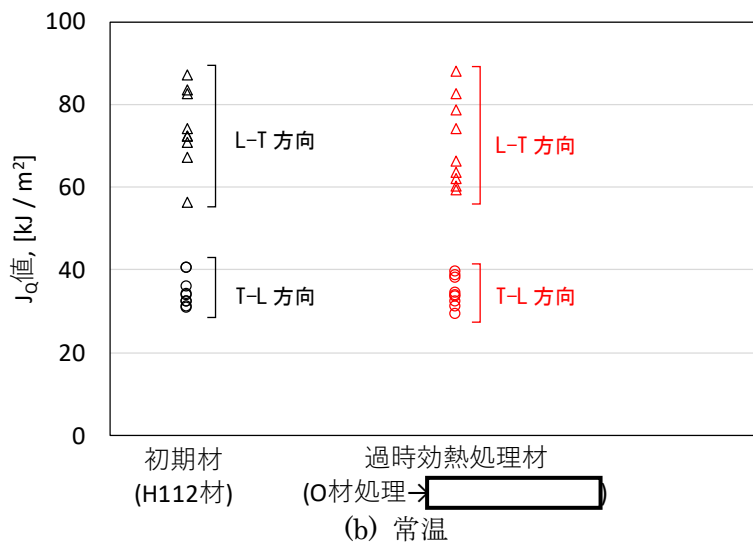
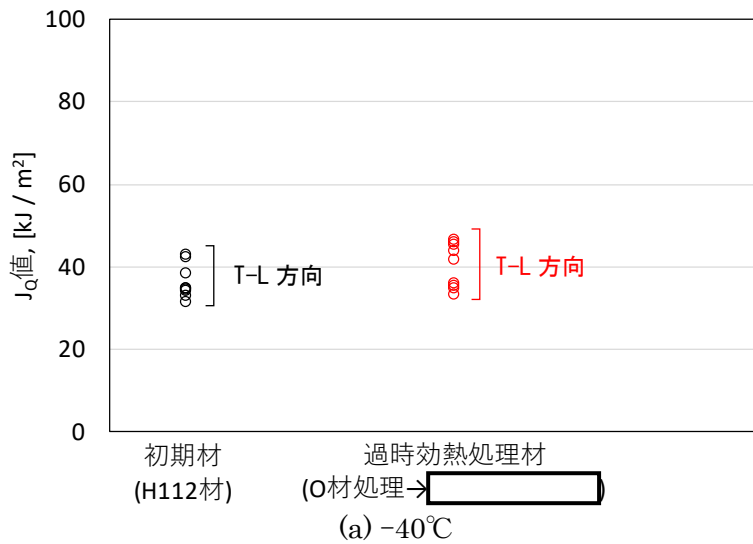
材料	供試材	熱処理	試験方向	試験温度	試験結果			破壊靱性値	
					最大試験力 [kN]	J_Q [kJ/m ²]	J_{1C} [kJ/m ²]	$K(J_Q)$ or $K(J_{1C})$ [MPa√m]	
HZ-A3004	A	初期材	T-L	-40℃	33.4	41.9	41.9	$K(J_{1C})$	61.0
					32.7	31.3	31.3	$K(J_{1C})$	52.7
					32.1	42.5	42.5	$K(J_{1C})$	61.5
				常温	32.5	31.1	31.1	$K(J_{1C})$	52.4
					32.6	32.4	-	$K(J_Q)$	53.4
					33.3	40.3	-	$K(J_Q)$	59.6
			200℃	26.2	172.0	172	$K(J_{1C})$	120.0	
				25.6	178.0	-	$K(J_Q)$	122.0	
				26.8	181.0	-	$K(J_Q)$	123.0	
			L-T	常温	38.0	83.5	-	$K(J_Q)$	85.0
					37.5	87.1	-	$K(J_Q)$	86.8
					37.7	74.1	-	$K(J_Q)$	80.0
	B	初期材	T-L	-40℃	32.9	38.0	-	$K(J_Q)$	58.1
					33.8	32.7	32.7	$K(J_{1C})$	53.8
					32.7	34.1	34.1	$K(J_{1C})$	55.0
				常温	32.4	30.8	-	$K(J_Q)$	52.1
					32.0	35.9	35.9	$K(J_{1C})$	56.3
					32.3	33.8	33.8	$K(J_{1C})$	54.6
			200℃	26.5	176.0	-	$K(J_Q)$	121.0	
				26.3	162.0	-	$K(J_Q)$	116.0	
				27.0	143.0	143.0	$K(J_{1C})$	109.0	
			L-T	常温	38.4	70.8	-	$K(J_Q)$	78.2
					38.1	72.3	-	$K(J_Q)$	79.1
					38.1	82.7	-	$K(J_Q)$	84.6
	C	初期材	T-L	-40℃	33.6	34.6	34.6	$K(J_{1C})$	55.1
					33.2	33.8	33.8	$K(J_{1C})$	54.5
					33.5	34.6	34.6	$K(J_{1C})$	55.2
				常温	33.0	34.0	-	$K(J_Q)$	54.8
					32.5	32.2	32.2	$K(J_{1C})$	53.3
					32.6	40.3	40.3	$K(J_{1C})$	59.6
			200℃	27.2	211.0	-	$K(J_Q)$	132.0	
				27.2	210.0	-	$K(J_Q)$	132.0	
				26.9	214.0	-	$K(J_Q)$	133.0	
			L-T	常温	37.5	72.4	72.4	$K(J_{1C})$	79.1
					36.7	67.4	67.4	$K(J_{1C})$	76.4
					37.6	56.5	56.5	$K(J_{1C})$	69.9

（注） J_Q 値はすべての試験で取得できた。 J_{1C} 値は一部の試験で取得できなかったため、取得できた値のみを記載した。

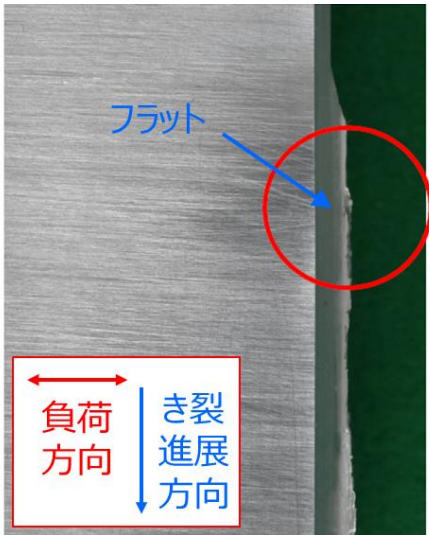
第 10 表 HZ-A3004 (過時効熱処理材) に対する破壊靱性試験結果詳細 (注)

材料	供試材	熱処理	試験方向	試験温度	試験結果			破壊靱性値	
					最大試験力 [kN]	J_Q [kJ/m ²]	J_{1C} [kJ/m ²]	$K(J_Q)$ or $K(J_{1C})$ [MPa√m]	
HZ-A3004	A	過時効熱処理材	T-L	-40℃	32.8	41.4	41.4	$K(J_{1C})$	60.3
					33.6	43.4	43.4	$K(J_{1C})$	61.8
					33.5	45.7	45.7	$K(J_{1C})$	63.4
				常温	32.4	38.6	38.6	$K(J_{1C})$	58.5
					32.7	37.9	37.9	$K(J_{1C})$	57.9
					33.0	32.2	32.2	$K(J_{1C})$	53.3
			200℃	24.4	230.0	-	$K(J_Q)$	138.0	
				21.9	226.0	-	$K(J_Q)$	137.0	
				24.0	229.0	-	$K(J_Q)$	138.0	
			L-T	常温	37.5	74.3	74.3	$K(J_{1C})$	79.9
					35.3	88.0	88.0	$K(J_{1C})$	86.9
					36.4	82.8	82.8	$K(J_{1C})$	84.3
	B	過時効熱処理材	T-L	-40℃	31.5	46.2	-	$K(J_Q)$	64.1
					32.7	35.2	35.2	$K(J_{1C})$	55.9
					32.4	35.8	35.8	$K(J_{1C})$	56.4
				常温	33.4	39.6	39.6	$K(J_{1C})$	59.2
					32.4	29.3	29.3	$K(J_{1C})$	50.9
					32.8	34.3	34.3	$K(J_{1C})$	55.1
			200℃	26.0	182.0	-	$K(J_Q)$	123.0	
				24.7	206.0	-	$K(J_Q)$	131.0	
				25.6	215.0	-	$K(J_Q)$	134.0	
			L-T	常温	36.6	66.3	66.3	$K(J_{1C})$	75.5
					36.9	62.3	62.3	$K(J_{1C})$	73.2
					36.7	78.8	78.8	$K(J_{1C})$	82.3
	C	過時効熱処理材	T-L	-40℃	31.4	34.6	34.6	$K(J_{1C})$	55.5
					31.4	32.9	32.9	$K(J_{1C})$	54.2
					32.9	45.0	-	$K(J_Q)$	63.3
				常温	32.3	33.9	-	$K(J_Q)$	54.8
					32.1	30.9	30.9	$K(J_{1C})$	52.3
					31.1	33.6	33.6	$K(J_{1C})$	54.5
			200℃	25.1	250.0	-	$K(J_Q)$	144.0	
				26.5	257.0	-	$K(J_Q)$	146.0	
				26.3	250.0	-	$K(J_Q)$	144.0	
			L-T	常温	36.9	59.5	59.5	$K(J_{1C})$	71.5
					36.8	63.6	63.6	$K(J_{1C})$	73.9
					36.5	60.4	60.4	$K(J_{1C})$	72.0

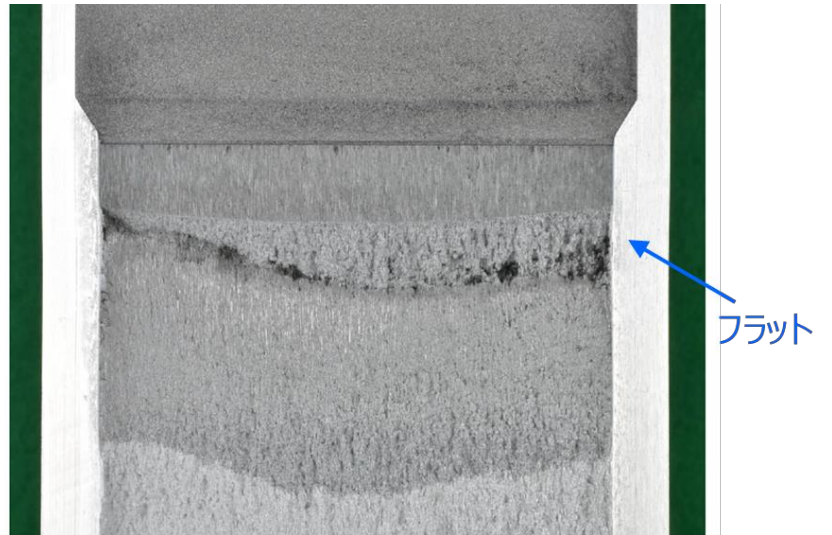
(注) J_Q 値はすべての試験で取得できた。 J_{1C} 値は一部の試験で取得できなかったため、取得できた値のみを記載した。



第3図 HZ-A3004 の破壊靱性試験結果

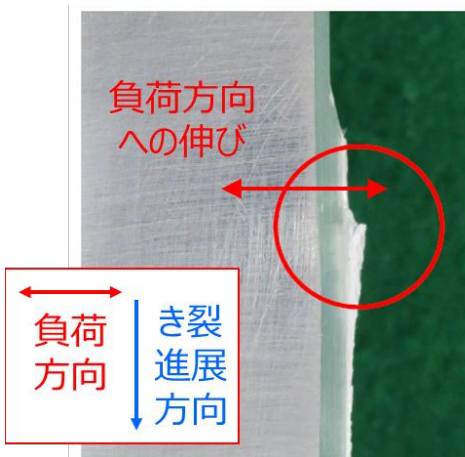


[破面の側面]



[破面]

(a) 常温



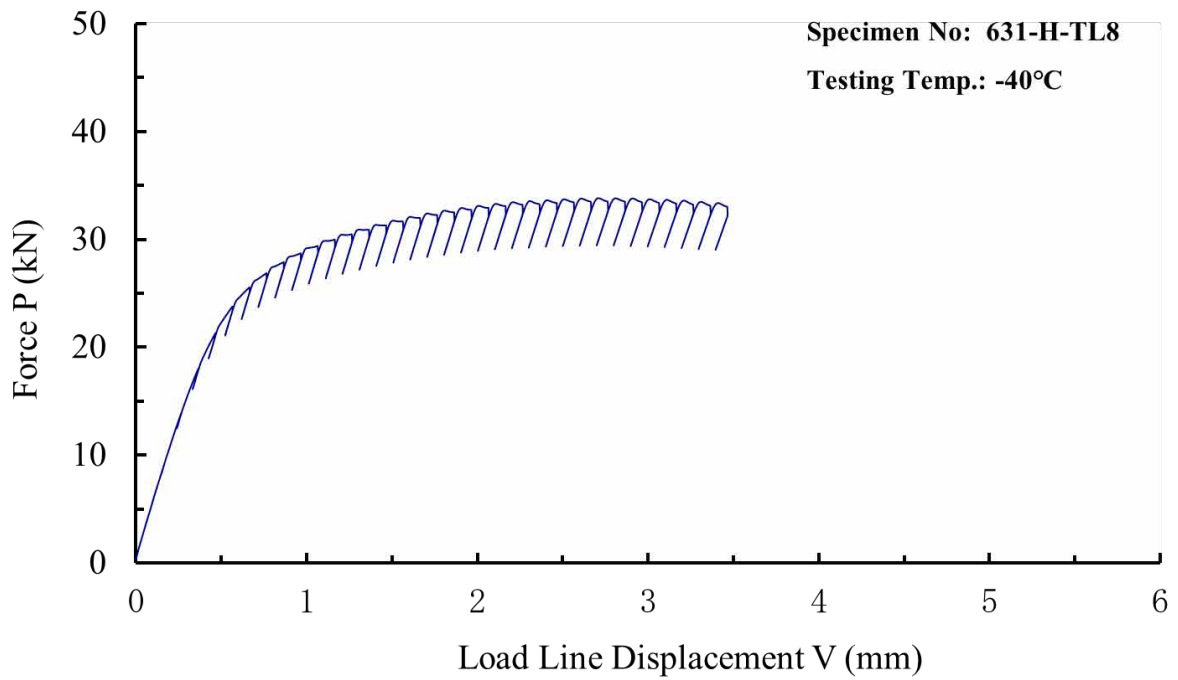
[破面の側面]



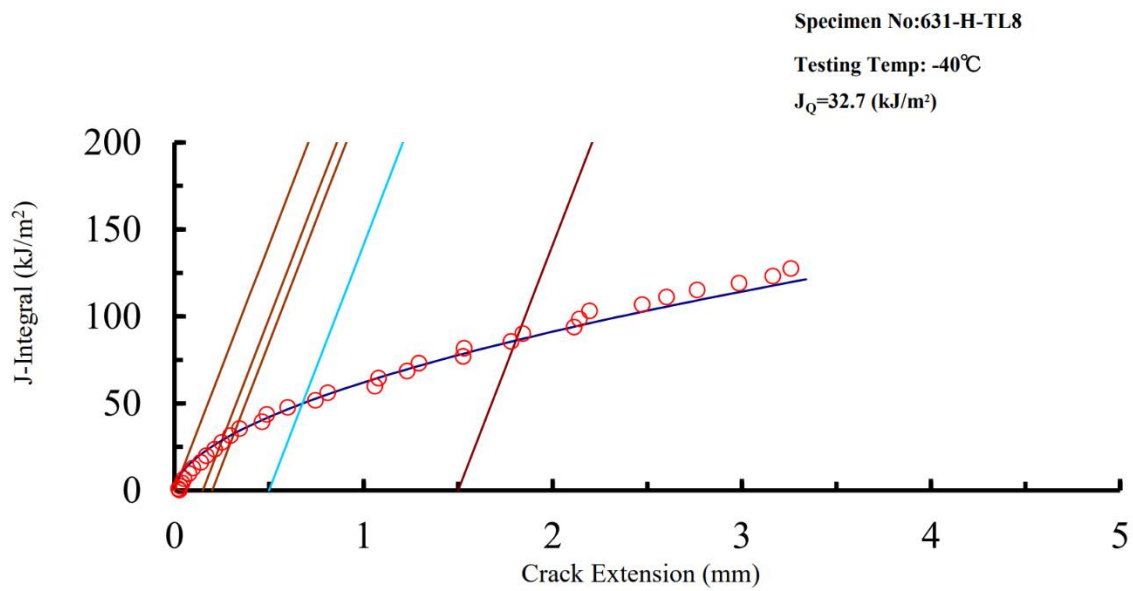
[破面]

(b) 200°C

第4図 HZ-A3004（過時効熱処理材、T-L方向）の破壊靱性試験後の破面

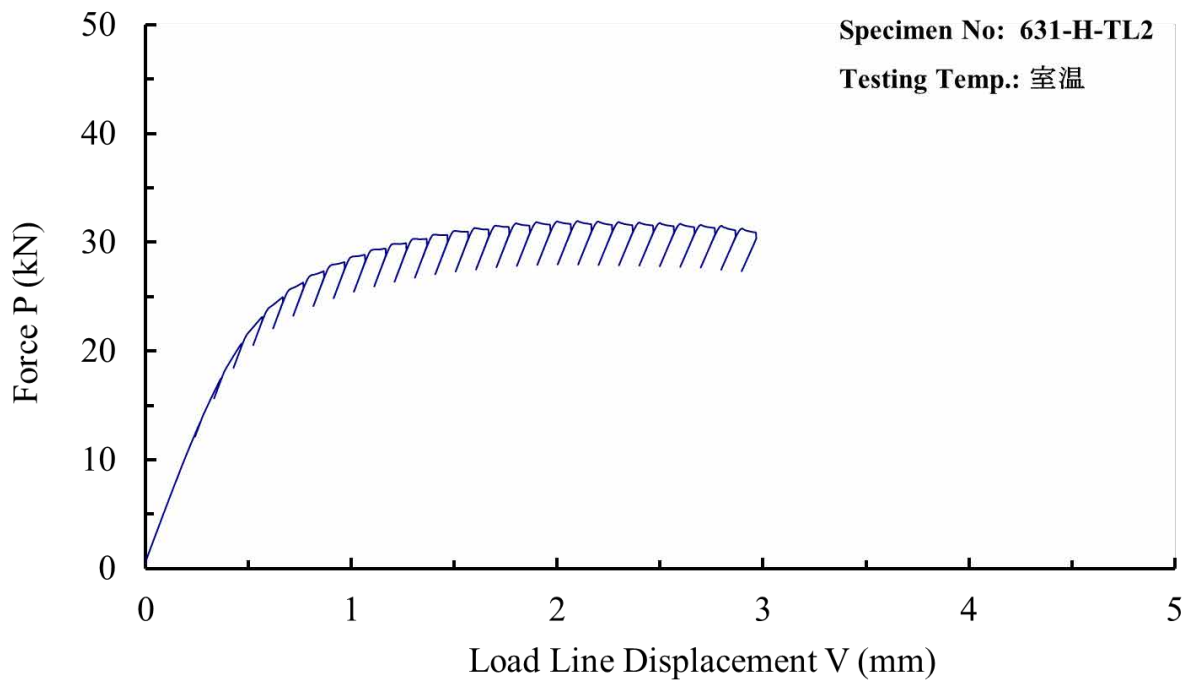


(a) 荷重-変位曲線

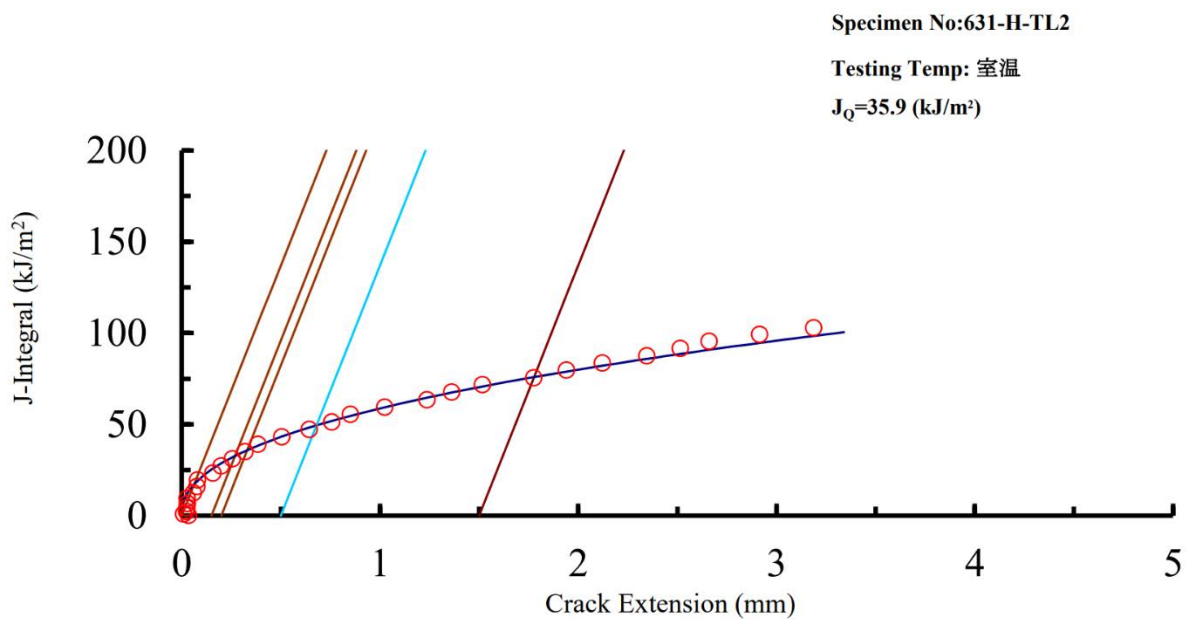


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第5図 HZ-A3004 (初期材 (H112)、-40°C、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

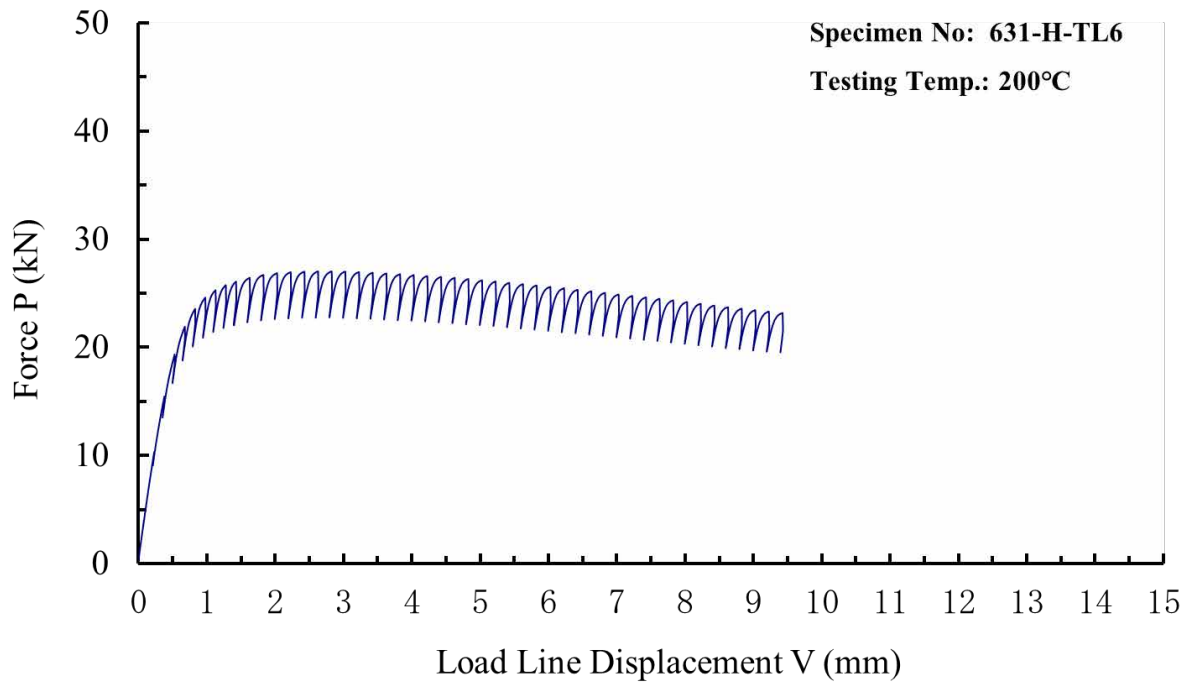


(a) 荷重-変位曲線

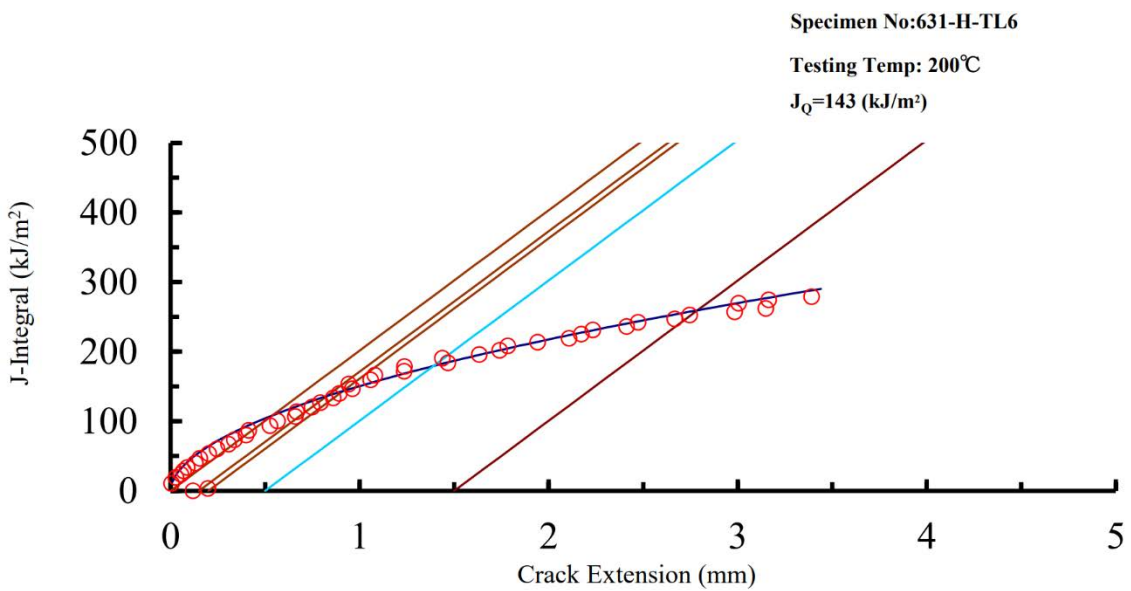


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第 6 図 HZ-A3004 (初期材 (H112)、常温、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

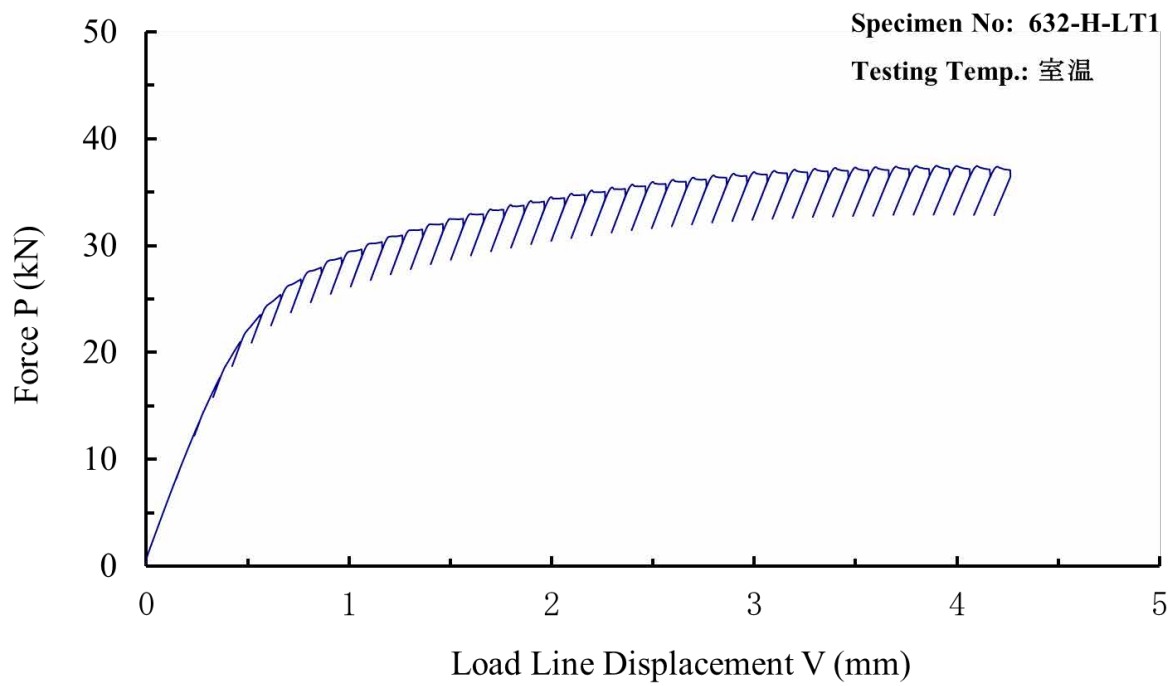


(a) 荷重-変位曲線

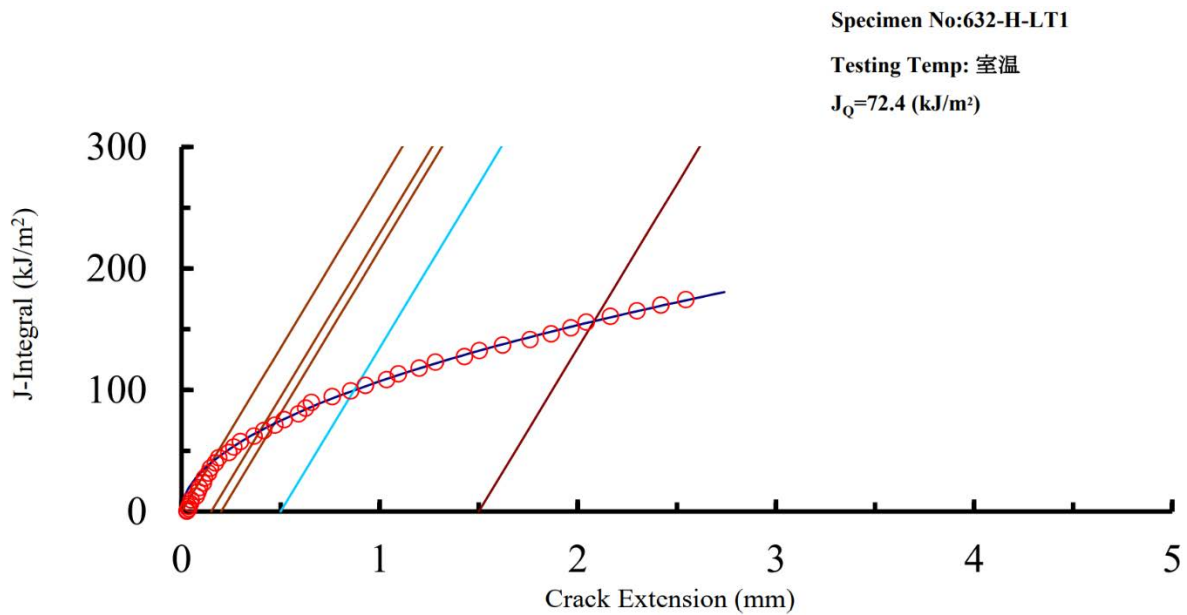


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第7図 HZ-A3004 (初期材 (H112)、200°C、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

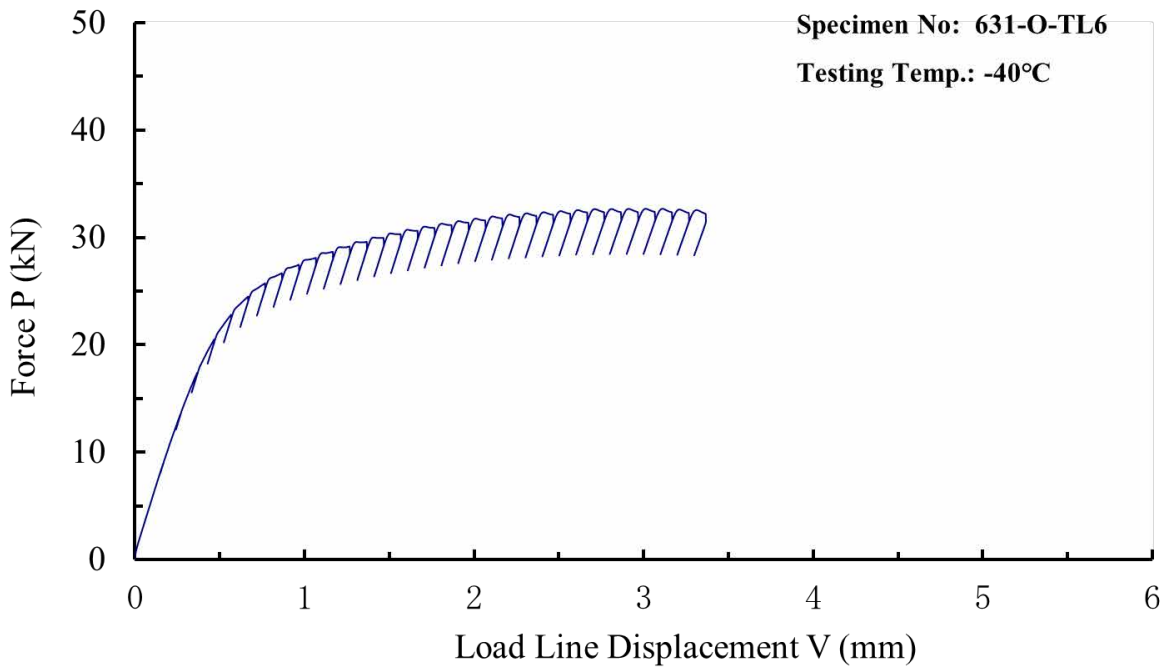


(a) 荷重-変位曲線

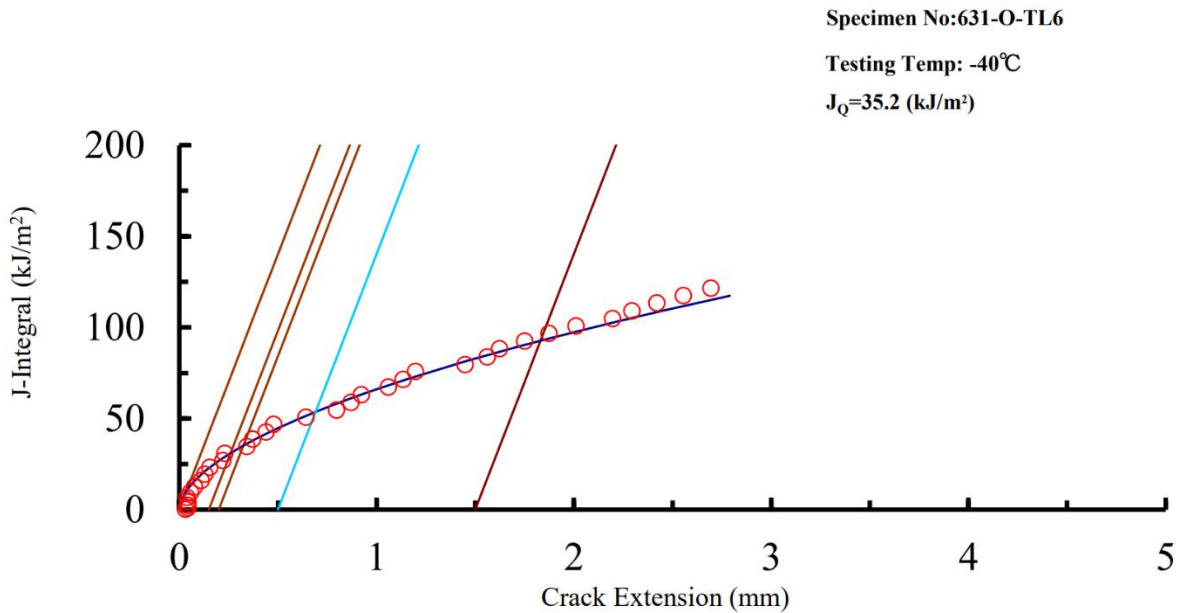


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第 8 図 HZ-A3004 (初期材 (H112)、常温、L-T 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

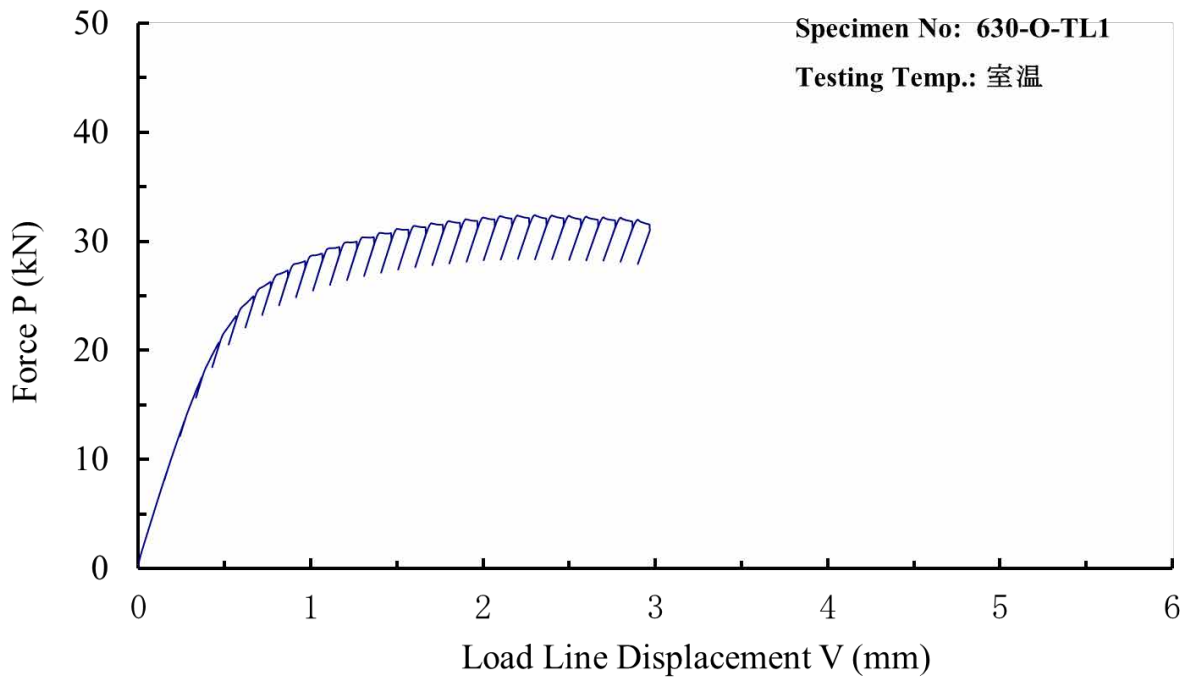


(a) 荷重-変位曲線

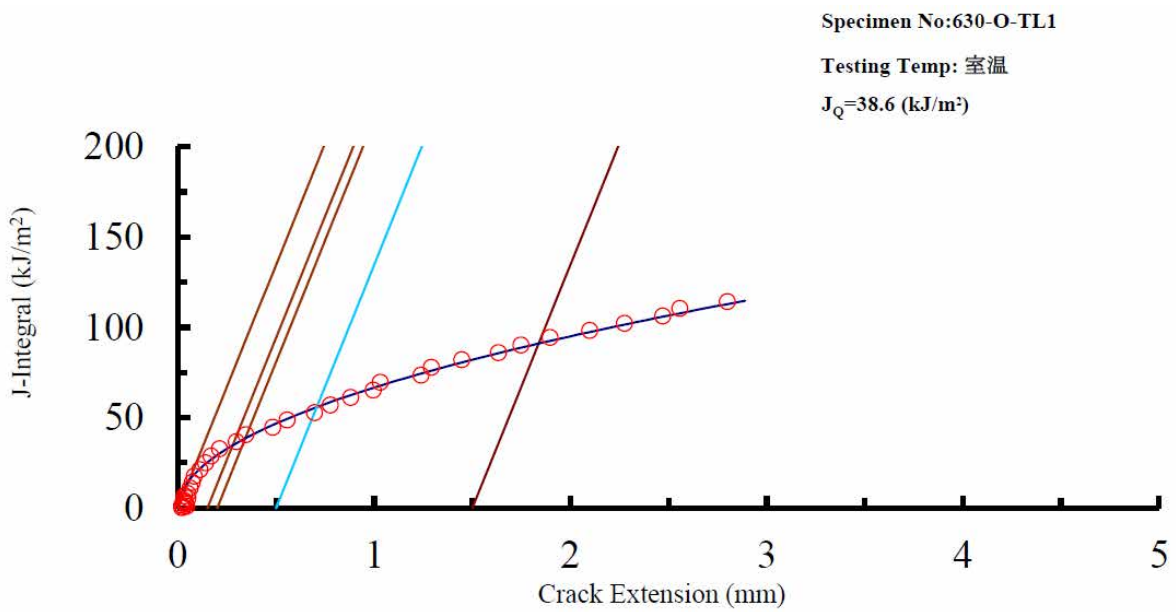


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第9図 HZ-A3004 (過時効熱処理材、-40°C、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

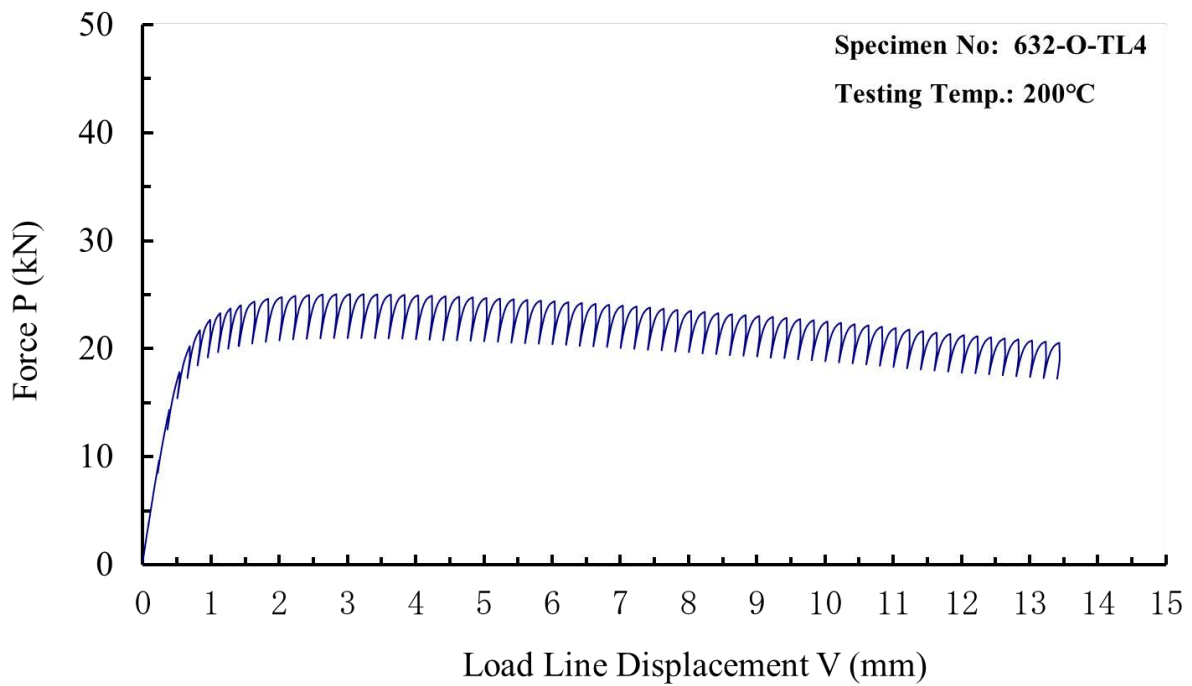


(a) 荷重-変位曲線

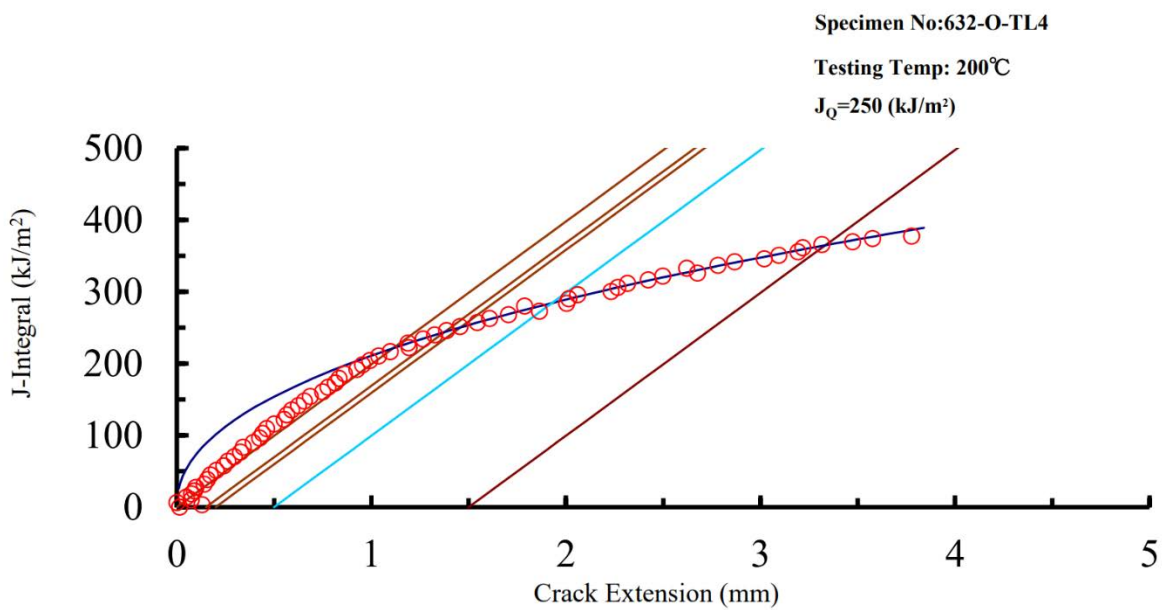


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第 10 図 HZ-A3004 (過時効熱処理材、常温、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

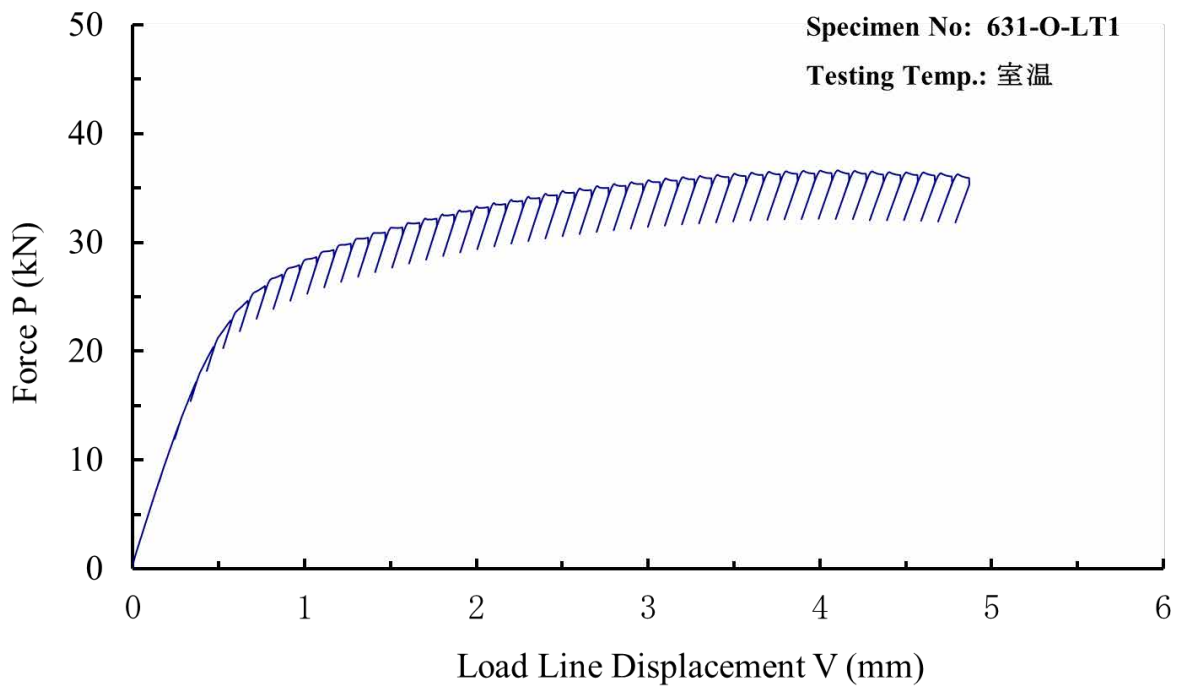


(a) 荷重-変位曲線

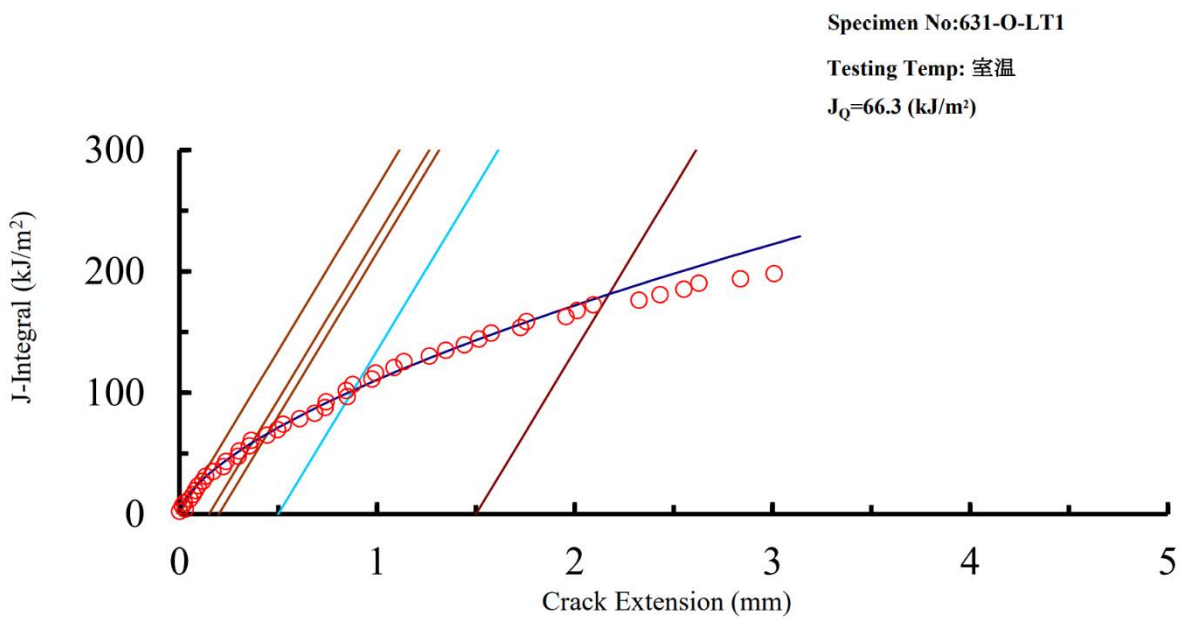


(b) J 積分-き裂進展量曲線

第 11 図 HZ-A3004 (過時効熱処理材、200°C、T-L 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線



(a) 荷重-変位曲線



(b) J 積分-き裂進展量曲線

第 1 2 図 HZ-A3004 (過時効熱処理材、常温、L-T 方向) の破壊靱性試験における荷重-変位曲線および J 積分-き裂進展量曲線

5. 許容欠陥寸法の評価

5.1 評価条件

第 1 1 表は、アルミニウムの圧延工程で発生する主な欠陥を示す。欠陥には、ワニグチ欠陥や耳割れなどの表面欠陥、ふくれやラミネーションなどの内部欠陥が想定される。Al-Mg 系合金の熱間加工では、Mg 添加量が増えると変形抵抗が高くなり、押出加工や圧延加工が難しくなる。特に、Mg 添加量が 5% を越すと耳割れや表面割れあるいはワニグチ欠陥が生じやすくなる²⁾。HZ-A3004 は、熱間圧延により製造されるアルミニウム合金の厚板であるが、Mg 添加量は最大 1.3% であり、これらの欠陥を生じる可能性は低い。一方、HZ-A3004 に想定される欠陥は、製造時や運搬時の扱い疵や、異物の飛び込みによる押込み疵などであるが、これらの大きさは数 mm 程度までと考えられる。

以上のように、HZ-A3004 においては著しく大きな欠陥が生じる可能性は低いですが、ここでは最も保守的な欠陥として、板幅の全長にわたる一様線状の表面欠陥を想定した。想定した欠陥に対し、3.3 項に示す破壊靱性値をもとに、第 1 3 図に示す評価式と評価モデルで J 値を計算して許容欠陥寸法を評価した。

第 1 4 図は、Hitz-P24 型キャスクのバスケット格子に引張応力の発生が予想されるケースを示す。また、第 1 5 図は、Hitz-P24 型キャスクのバスケット格子における許容欠陥寸法の評価モデルを示す。キャスクの水平落下時に、バスケット格子は第 1 4 図に示す引張応力が生じる。バスケット格子の薄肉部（板幅 10mm）において、板幅の全長にわたる表面欠陥が存在する場合、格子の破壊による未臨界維持機能の消失が懸念される。そこで、第 1 5 図のモデルを定義して、バスケット格子薄肉部の許容欠陥寸法を評価した。

[想定欠陥、荷重、評価方法]

- ・ 想定欠陥：一様深さの線状表面欠陥（製造プロセスから発生が予想される方向と直角方向の欠陥）
- ・ 荷重：設計降伏応力 ($S_y(\text{RT}) : 78[\text{MPa}]$) の引張応力を想定
- ・ 評価方法：第 1 3 図に示す評価式

第 1 1 表 アルミニウムの圧延工程で発生する主な欠陥³⁾

欠 陥	内 容
ワニグチ欠陥	熱間粗圧延時に圧延板の頭尾部端に発生する 2枚板状の欠陥で、1パス圧下代を大にしても基本的には防止はできないので適切な切捨が必要である。
ふくれ	熱延板の表面に内蔵ガスによって板表面の一部がふくれ上つたもので、溶湯の脱ガス処理不良或いは鑄造中のガス吸収によるものである。
耳割れ	圧延中に縁部に生ずる割れで、耳割れが大であるとサイドトリミング代が大になり、圧延歩留りが低下する。 薄板コイルの場合はコイル切れの原因になる。 耳割れは高力合金の場合の様に防止困難のものもあるが、一般に成分組成の不純物管理と均熱処理、中鈍条件等に問題のあることが多い。
層割れ (ラミネーション)	製品の圧延板に平行な内部割れである。
へリンボンマーク	圧延板の圧延方向に対してある角度で光沢のある面とない面が杉綾形に生じた模様である。 エマルジョンが劣化し油膜強度が不足した時に発生する。対策としては油分濃度のアップ、エマルジョンの20~30%取替或いは全量取替が必要となる場合もある。
チャターマーク	圧延方向に直角に縞紋様が表われる現象で、一般に圧延油の潤滑性不足によつて生ずることが多い。油性向上剤の添加によつて改善する。
オイルピット	アルミニウム的高速圧延に際し接触弧内に引き込まれた圧延油によつて表面に生成したピット状の欠陥で、圧延速度が速く圧延油の粘度が高い場合に発生し易い。
押し込み	圧延板の表面に異物が押し込まれているもの。またはそれが脱落してくぼみとなつたものをいう。
圧延疵	製造または運搬中に生じた疵をそのまま圧延したもの
ストップマーク	製造機械を一時停止した時製品表面に生ずる幅方向の不良
ロールマーク	圧延中にロール面の疵が製品の表面にプリントされたもの
熱間焼付 (ピックアップ)	熱延油の潤滑性の不足が進行すると、アルミ粉が板表面から剝離してロールに付着しその程度が大きい場合は圧延油をまきこんで熱間焼付を生成する。またロールコーティングを形成するアルミ薄板がロール表面から脱落し板表面に押し込まれ同じく熱間焼付となる。 これ等の焼付を防止するにはエマルジョンの潤滑性の管理、ブラシロールの適切な使用、アルミ材の品種、スラブ幅等を考慮した圧延順序等が重要である。熱間焼付欠陥は陽極酸化で容易に検出が可能である。
オイルステン	圧延油の酸化、劣化或いは外部油の混入により焼鈍時に発生する油の焼付である。 オイルステンを防止するためには、キャンテストにより圧延油のステン性を常時把握しておくこと、外部油の混入を防止すること、圧延油の部分的或いは全面的取替を適確に実施すること等である。

$$J = \frac{K(a_e)^2}{E'} + \alpha\sigma_0\varepsilon_0c(a/t)H_1(P/P_0)^{n+1}$$

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

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

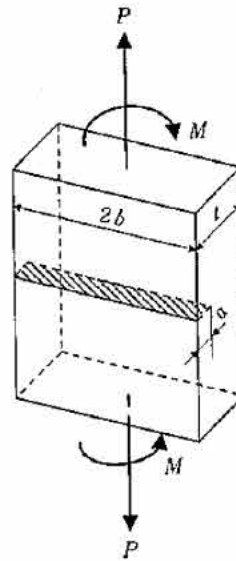
$$\phi = \frac{1}{1 + (P/P_0)^2}$$

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

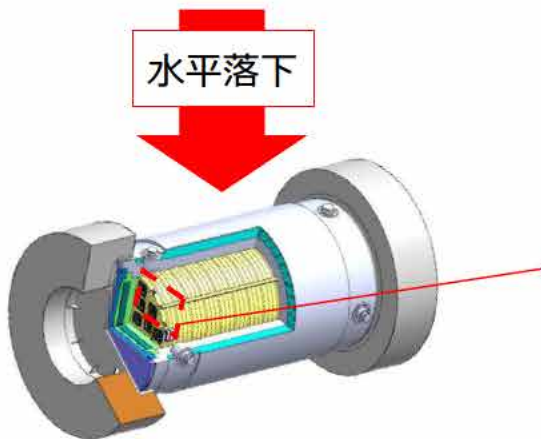
$$E' = \begin{cases} E & \text{(平面応力)} \\ E/(1-\nu^2) & \text{(平面ひずみ)} \end{cases}$$

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

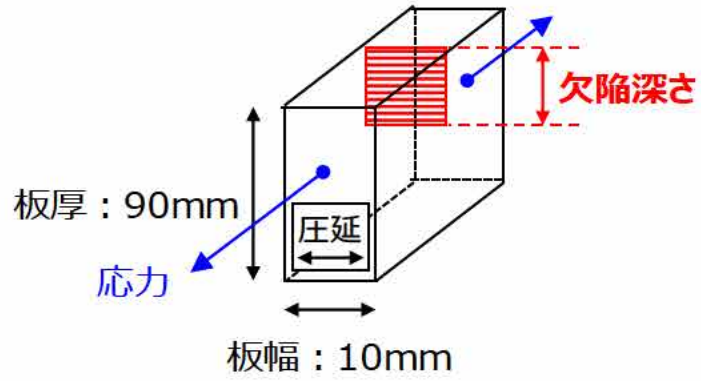
$$\eta = [1 + (a/c)^2]^{1/2} - a/c$$



第13図 許容欠陥寸法評価の評価式および評価モデル⁴⁾



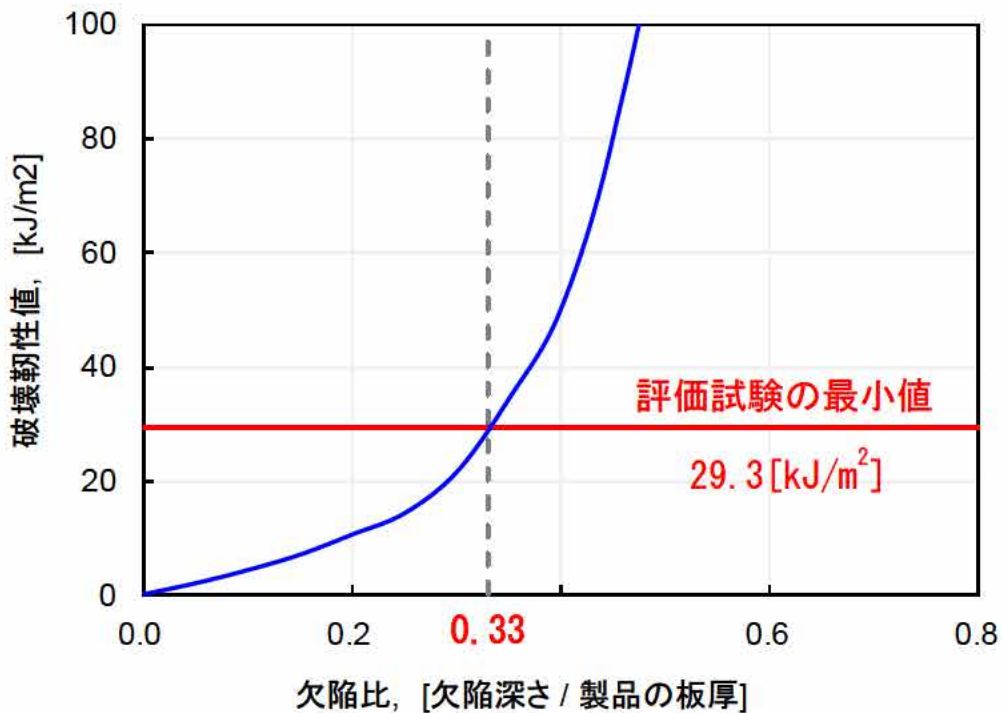
第14図 Hitz-P24型キャスクのバスケット格子に引張応力の発生が予想されるケース



第15図 Hitz-P24型キャスクのバスケット格子における
許容欠陥寸法の評価モデル

4.2 評価結果

第16図は、Hitz-P24型キャスクのバスケット格子における許容欠陥寸法の評価結果を示す。許容欠陥寸法は板厚の33%までとなった。HZ-A3004はMg添加量が最大1.3%と低いため加工性が良好であり、許容欠陥寸法を超える欠陥は製造工程では生じないと考えられる。また、許容欠陥寸法を超える欠陥は、製造工程における目視検査で十分に検出が可能である。以上から、HZ-A3004に許容値を超える深さの欠陥が含まれることはない。



第16図 想定欠陥深さと J_{1c} 値の関係 (注)

(注) HZ-A3004 (過時効熱処理材、常温、T-L 方向) に対する J_{1c} 値が最小値のため、 29.3kJ/m^2 を設定した。

5. まとめ

設計貯蔵期間の熱曝露を考慮した HZ-A3004 に対し、シャルピー衝撃試験および破壊靱性試験を実施した。さらに、破壊靱性試験結果を踏まえて Hitz-P24 型キャスクのバスケット格子に許容される欠陥寸法を評価した。

評価の結果、許容欠陥寸法は板厚の 33% までとなった。HZ-A3004 は Mg 添加量が最大 1.3% と低いため加工性が良好であり、許容欠陥寸法を超える欠陥は製造工程では生じないと考えられる。また、許容欠陥寸法を超える欠陥は、製造工程における目視検査で十分に検出が可能であり、HZ-A3004 に許容値を超える深さの欠陥が含まれることはない。

以上から、Hitz-P24 型キャスクのバスケット格子に HZ-A3004 を用いる場合、靱性不足による破壊を懸念する必要はないと考えられる。

以上

6. 参考文献

- 1) 田中ら, 脆い材料の加工, 鉄と鋼, 13(1968), pp1367-1380.
- 2) 一般社団法人軽金属学会, アルミニウムの組織と性質, (1991), p260.
- 3) 広瀬, アルミニウムの圧延, 軽金属, 30(1980), pp287-297.
- 4) 小林ら, 構造健全性評価ハンドブック, 2005, 共立出版