

資料 1-2

Doc No. MA035B-SC-Z01 rev.0

2022年8月25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. 特徴および使用上の留意事項	3
5.1 特徴	3
5.2 特許およびライセンス	3
6. 製造工程および製造条件	4
6.1 製造方法	4
6.2 質別	4
6.3 品質管理	4
7. 材料の評価試験	5
7.1 供試材の仕様	5
7.2 ミクロ組織	8
7.3 加工性および加工条件	15
7.4 機械的性質	15
7.4.1 常温引張特性	15
7.4.2 高温引張特性	33
7.4.3 硬さ	42
7.4.4 靱性	43
7.4.5 クリープ特性	52
8. 設計用強度	59
8.1 設計降伏点	59
8.2 設計引張強さ	60
8.3 設計応力強さ	61
8.4 許容引張応力	62

9. その他の物性	63
9.1 熱物性	63
9.2 弾性定数	67
9.3 線膨張係数	72

別紙1 バスケット用アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の材質変化予測手法および 強度特性について	
---	--

図表目次

第 4-1 表	化学成分仕様	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	4
第 7-1 表	供試材の仕様	5
第 7-2 表	供試材の化学成分	6
第 7-3 表	供試材の熱処理条件	6
第 7-4 表	供試材の評価試験実施項目	7
第 7-5 表	常温における引張試験結果	16
第 7-6 表	HZ-A3004 の試験結果 (L 方向)	29
第 7-7 表	HZ-A3004 の試験結果 (T 方向)	30
第 7-8 表	機械試験用供試材の試験結果 (L 方向)	31
第 7-9 表	機械試験用供試材の試験結果 (T 方向)	32
第 7-10 表	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)	34
第 7-11 表	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)	35
第 7-12 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)	36
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(2/3)	37
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(3/3)	38
第 7-15 表	ビッカース硬さ測定結果	42
第 7-16 表	シャルピー衝撃試験結果	43
第 7-17 表	各温度における 10 万時間破断強さ	55
第 7-18 表	各温度における 0.01% / 1,000h クリープ強さ	56
第 7-19 表	クリープ試験結果における応力-破断時間データ	57
第 7-20 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	58
第 8-1 表	各温度における設計降伏点 S_y	59
第 8-2 表	各温度における設計引張強さ S_u	60
第 8-3 表	各温度における設計応力強さ S_m	61
第 8-4 表	各温度における許容引張応力 S	62
第 9-1 表	熱物性測定結果のまとめ	64
第 9-2 表	熱物性測定結果の詳細(1/2)	65
第 9-3 表	熱物性測定結果の詳細(2/2)	66
第 9-4 表	弾性定数測定結果の詳細(1/3)	68
第 9-5 表	弾性定数測定結果の詳細(2/3)	69

第 9-6 表	弾性定数測定結果の詳細(3/3)	70
第 9-7 表	弾性定数測定結果のまとめ	71
第 9-8 表	線膨張係数測定結果のまとめ	73
第 9-9 表	線膨張係数測定結果の詳細(1/3)	74
第 9-10 表	線膨張係数測定結果の詳細(2/3)	75
第 9-11 表	線膨張係数測定結果の詳細(3/3)	76

図表目次

第 6-1 図	製造フロー	4
第 7-1 図	断面マイクロ組織の観察位置	8
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)	9
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)	10
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)	11
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)	12
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)	13
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)	14
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	17
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	18
第 7-10 図	HZ-A3004 における耐力 (L 方向) の正規分布プロット	19
第 7-11 図	HZ-A3004 における耐力 (T 方向) の正規分布プロット	20
第 7-12 図	HZ-A3004 における伸び (L 方向) の正規分布プロット	21
第 7-13 図	HZ-A3004 における伸び (T 方向) の正規分布プロット	22
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	23
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	24
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	25
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	26
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	27
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	28
第 7-20 図	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)	39
第 7-21 図	機械試験用供試材の高温引張試験結果 (T 方向)	40
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	41
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	41
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)	45
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)	46
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)	47
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)	48
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)	49
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)	50
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)	51
第 7-31 図	応力-破断時間プロット	54
第 7-32 図	応力-一定常クリープ速度プロット	54

1. 概要

本資料は、Hitz-P24 型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 は、設計貯蔵期間、熱ばく露された HZ-A3004 の機械的性質を保守的に包括するように設計用強度を設定した。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としては、金属キャスク構造規格のバスケットの考え方を基本とし、クリープ特性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) の規定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。

なお、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、本資料に示す材料の規定の設定では、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用材料に適用する。

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 の化学成分仕様を第 4-1 表に規定する。

第 4-1 表 化学成分仕様

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は、第 4-2 表に示す値に適合すること。

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 表および JIS H 4000 を満たす。

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 およ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. 特徴およ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 表に示すとおり 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り、JIS H 4000 A3004 材と同等の材料である。

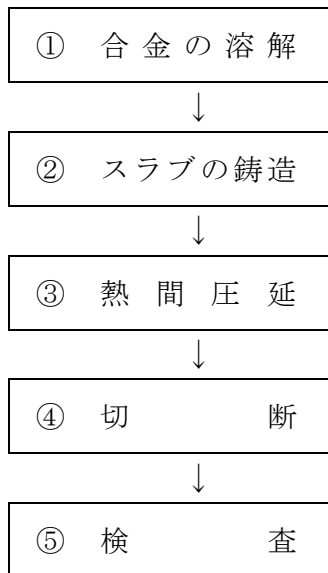
5.2 特許およびライセンス

なし。

6. 製造工程および製造条件

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 (温度)	—	○
		質別 (加工度)	—	○

(注1) 設計貯蔵期間における設計強度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. 材料の評価試験

7.1 供試材の仕様

材料の評価試験に使用する供試材は、第 7-1 表に示す実製品相当の材料 (HZ-A3004 A、B、C) およびバスケットの設計貯蔵期間後を想定し、
 (機械試験用供試材 D、E、F) とした。これら 6 標本の化学成分を第 7-2 表に示す。また、供試材の熱処理条件を第 7-3 表に示す。さらに、供試材の評価試験実施項目を第 7-4 表に示す。

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 供試材の化学成分

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 欄はミルシート記載値を示す。

第 7-3 表 供試材の熱処理条件

--

第 7-4 表 供試材の評価試験実施項目

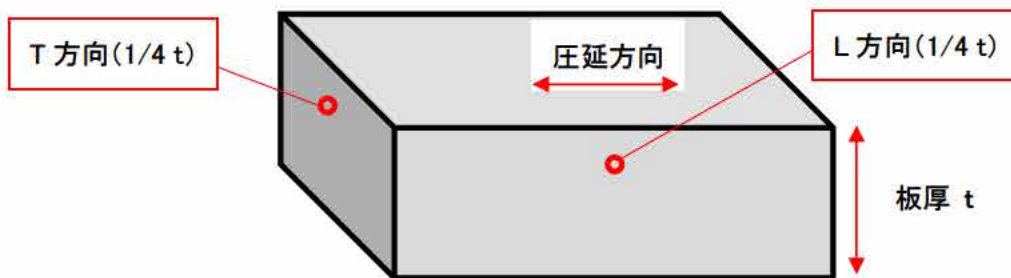
名称	供試材	熱処理 (注 1)	試験項目							
			化学成分	引張試験	時効後引張試験	衝撃試験	クリープ / クリープ破断試験	熱物性	弾性定数	線膨張係数
HZ-A3004	A	無	○	○	—	○	—	○	○	—
		有	—	—	—	○	—	○	○	○
	B	無	○	○	—	○	—	○	○	—
		有	—	—	—	○	—	○	○	○
	C	無	○	○	—	○	—	○	○	—
		有	—	—	—	○	—	○	○	○
機械試験用供試材	D	有	○	—	○	—	○	—	—	—
	E	有	○	—	○	—	○	—	—	—
	F	有	○	—	○	—	○	—	—	—

(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

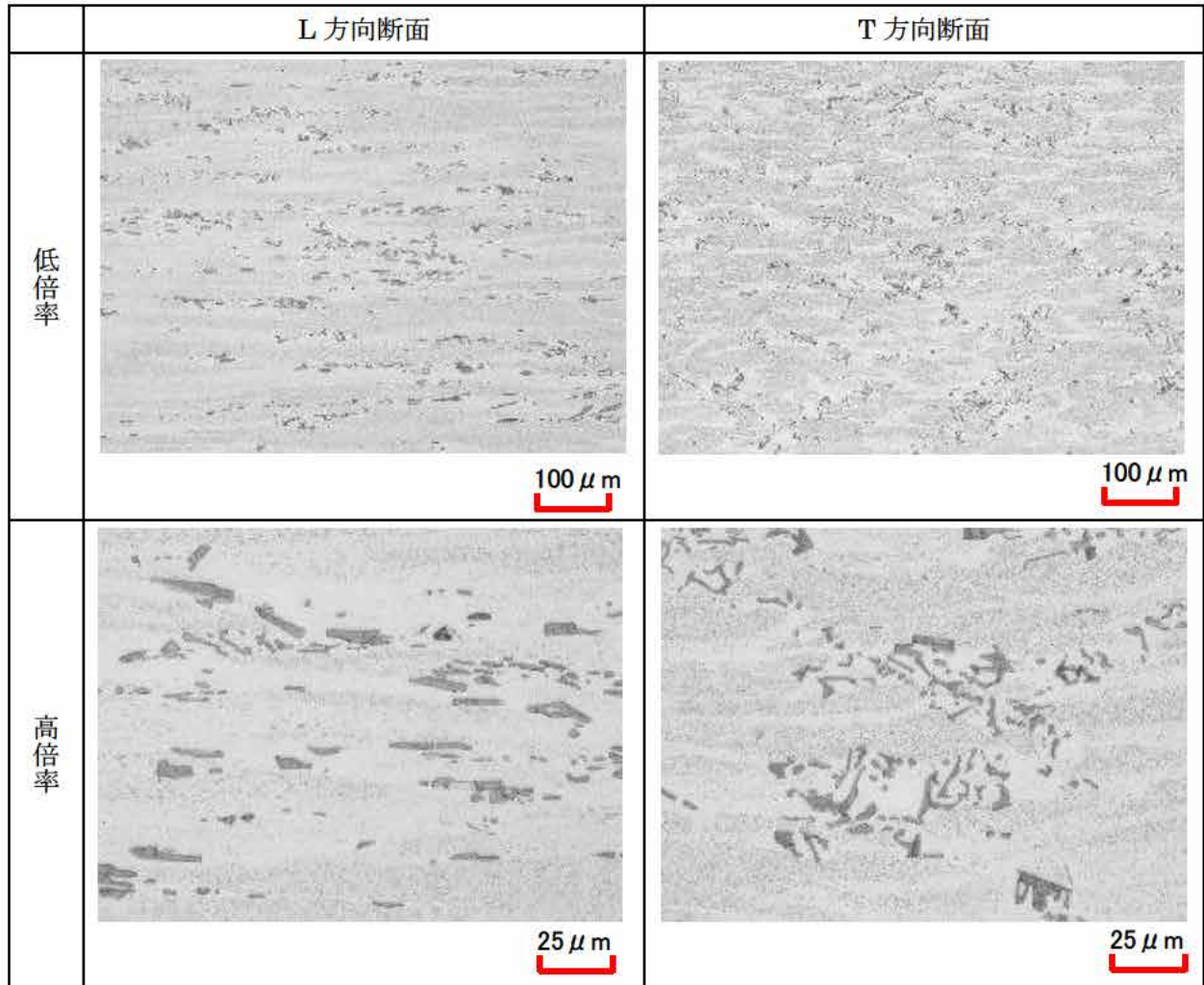
の過時効熱処理を施す。

7.2 ミクロ組織

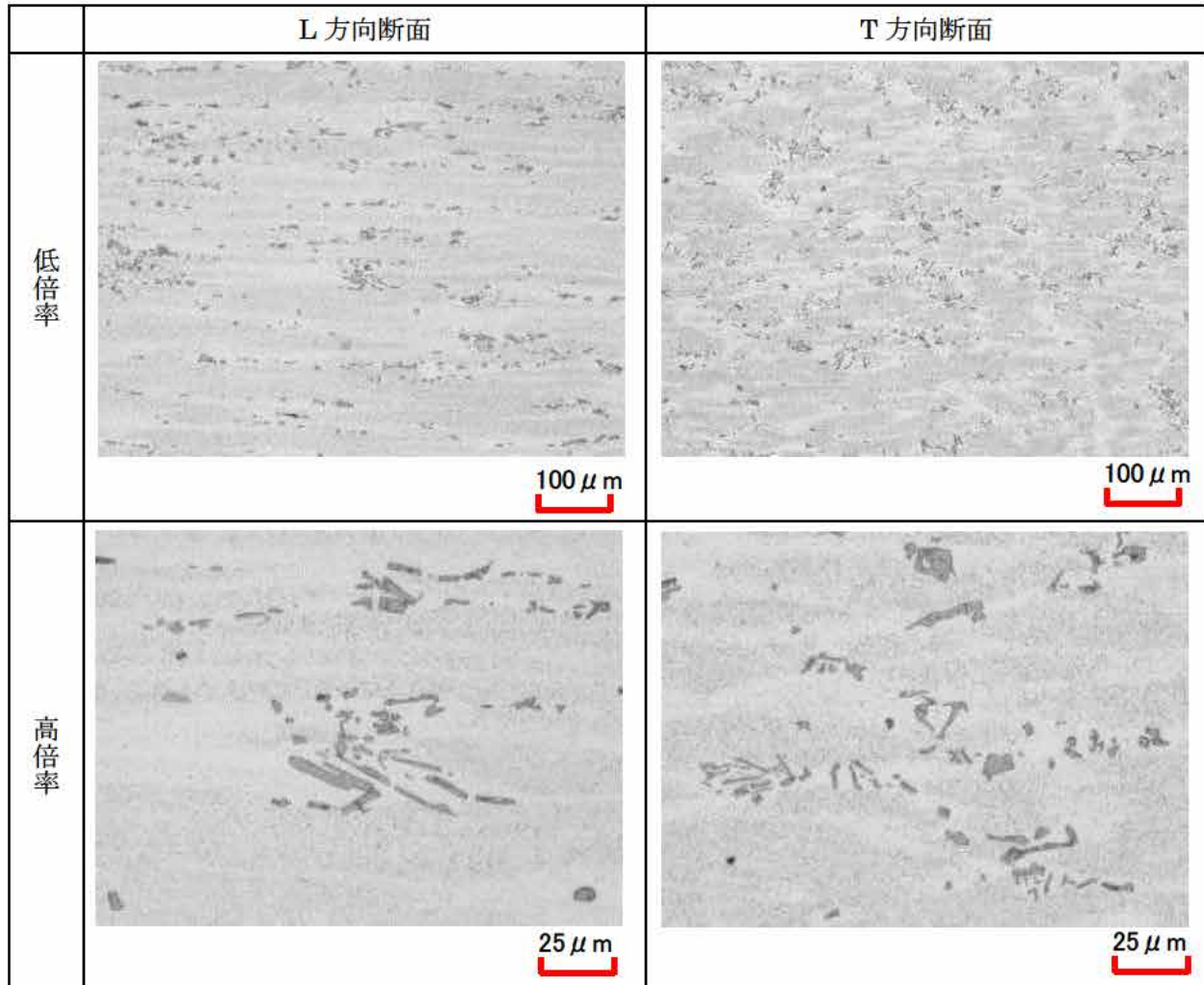
第 7-1 図は断面ミクロ組織の観察位置を示す。板厚の $1/4 t$ 位置、圧延方向に平行な方向 (L 方向) および圧延方向に直角な方向 (T 方向) から供試材を採取して、断面ミクロ組織を観察した。第 7-2 図から第 7-4 図は HZ-A3004 初期材の断面ミクロ組織を示す。また、第 7-5 図から第 7-7 図は機械試験用供試材の断面ミクロ組織を示す。各供試材のミクロ組織は、粗大な板状の Mn 系晶出物および微細な粒状の Mn 系析出物が観察され、圧延方向および板幅方向に伸長している。各供試材の結晶粒や晶出物の大きさに差異は認められない。



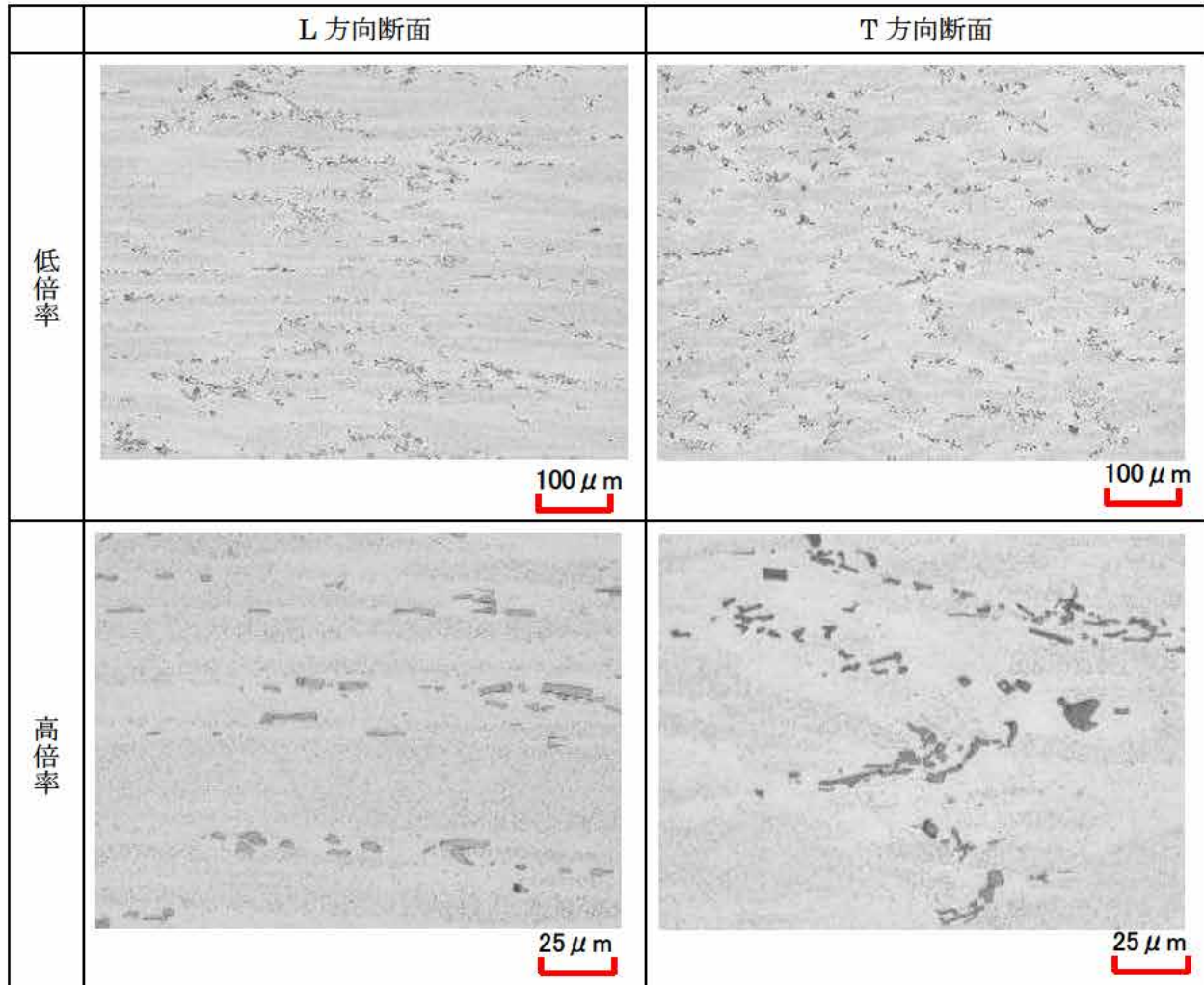
第 7-1 図 断面ミクロ組織の観察位置



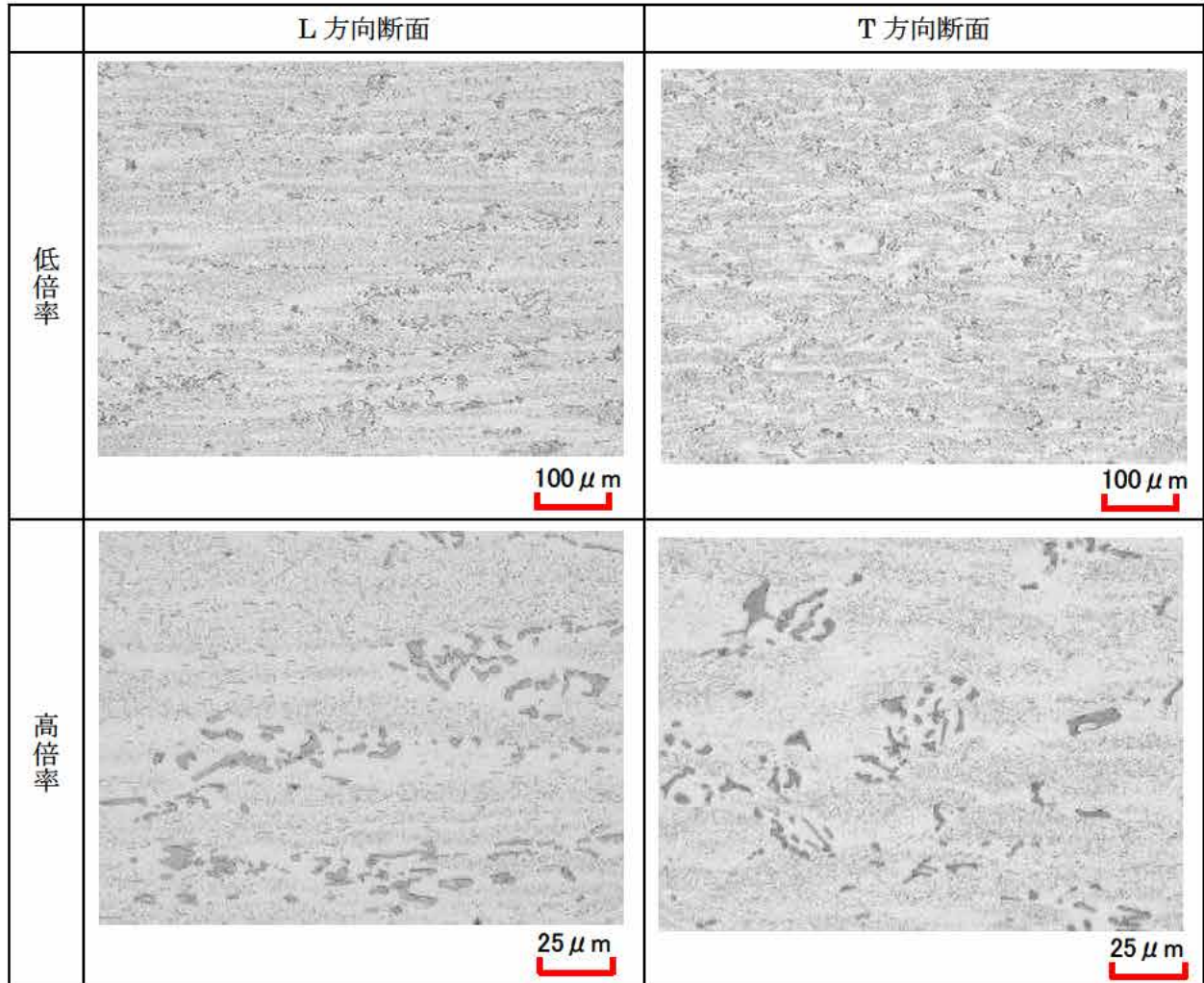
第 7-2 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 A : 熱処理なし)



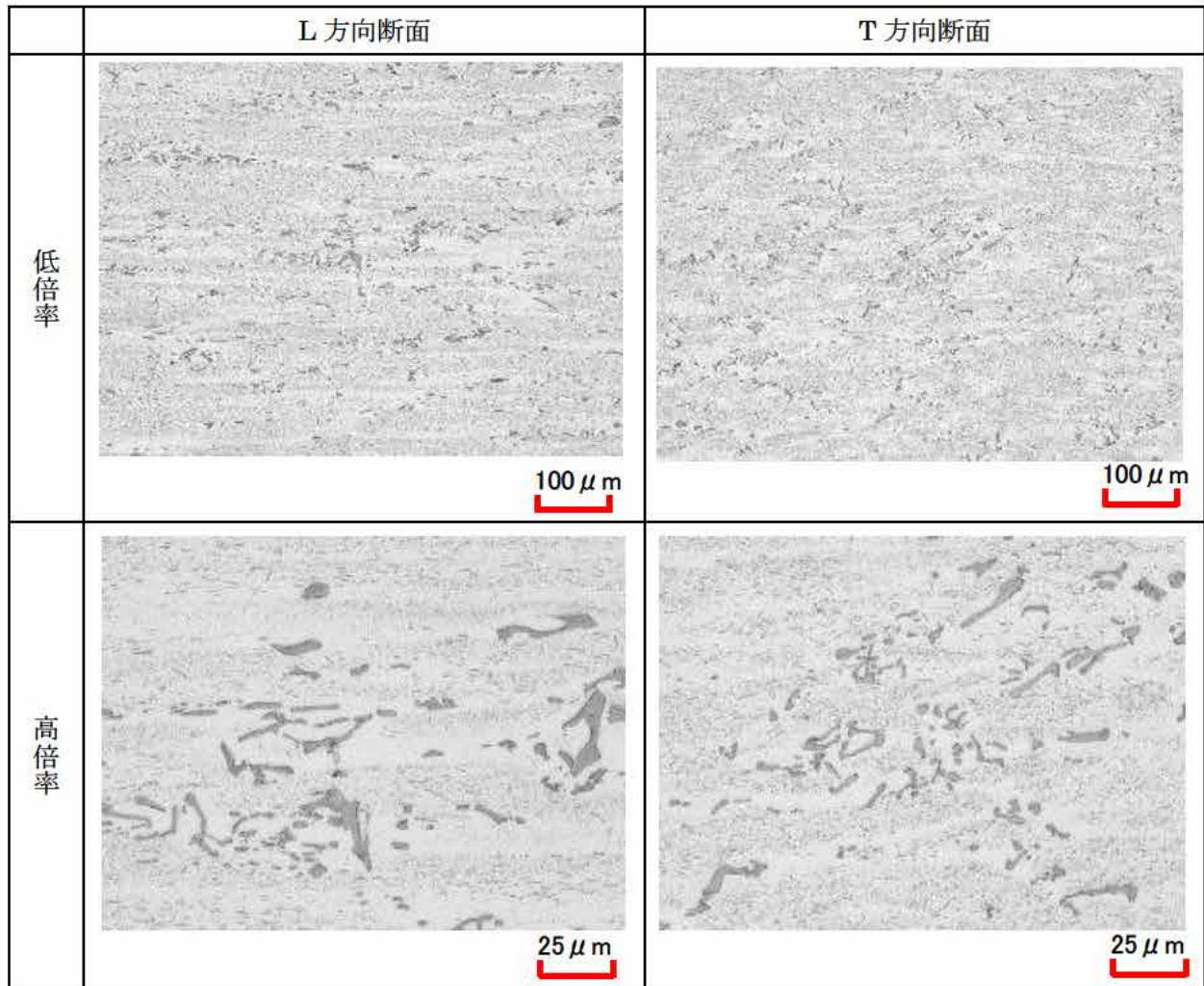
第 7-3 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 B : 熱処理なし)



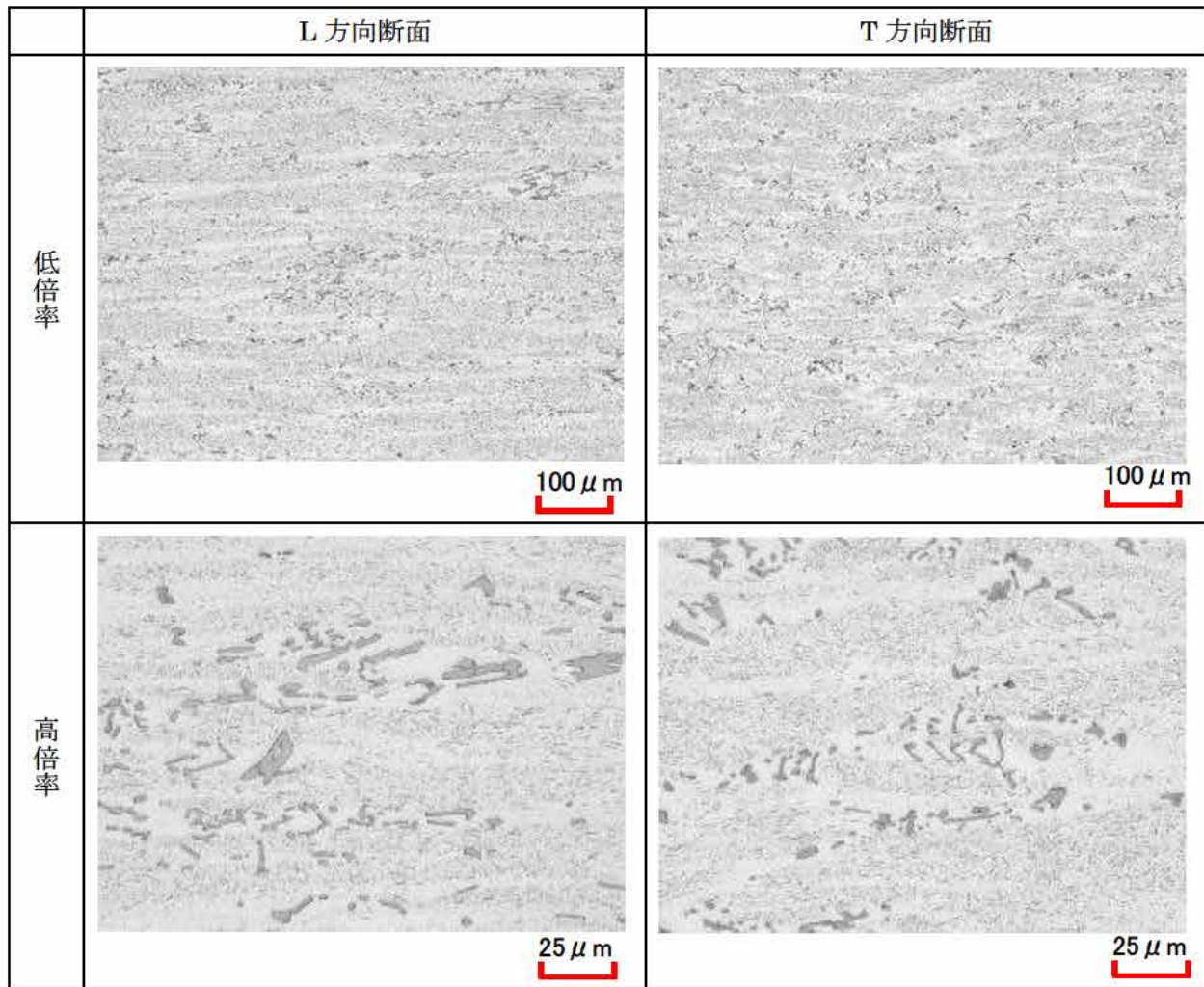
第 7-4 図 供試材 (1/4 t 代表部) の断面マイクロ組織
(供試材 C : 熱処理なし)



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)

7.3 加工性および加工条件

HZ-A3004 は圧延板を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。

7.4 機械的性質

7.4.1 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) を試験に供した。試験片は JIS H 4000 に従って、試験片の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 : 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 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) および直角な方向 (T 方向)
- ・記録 : 引張強さ、0.2%耐力および伸びを測定した。

(2) 試験結果

第 7-5 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 図および第 7-6 表から第 7-9 表に示す。

設計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 およ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。

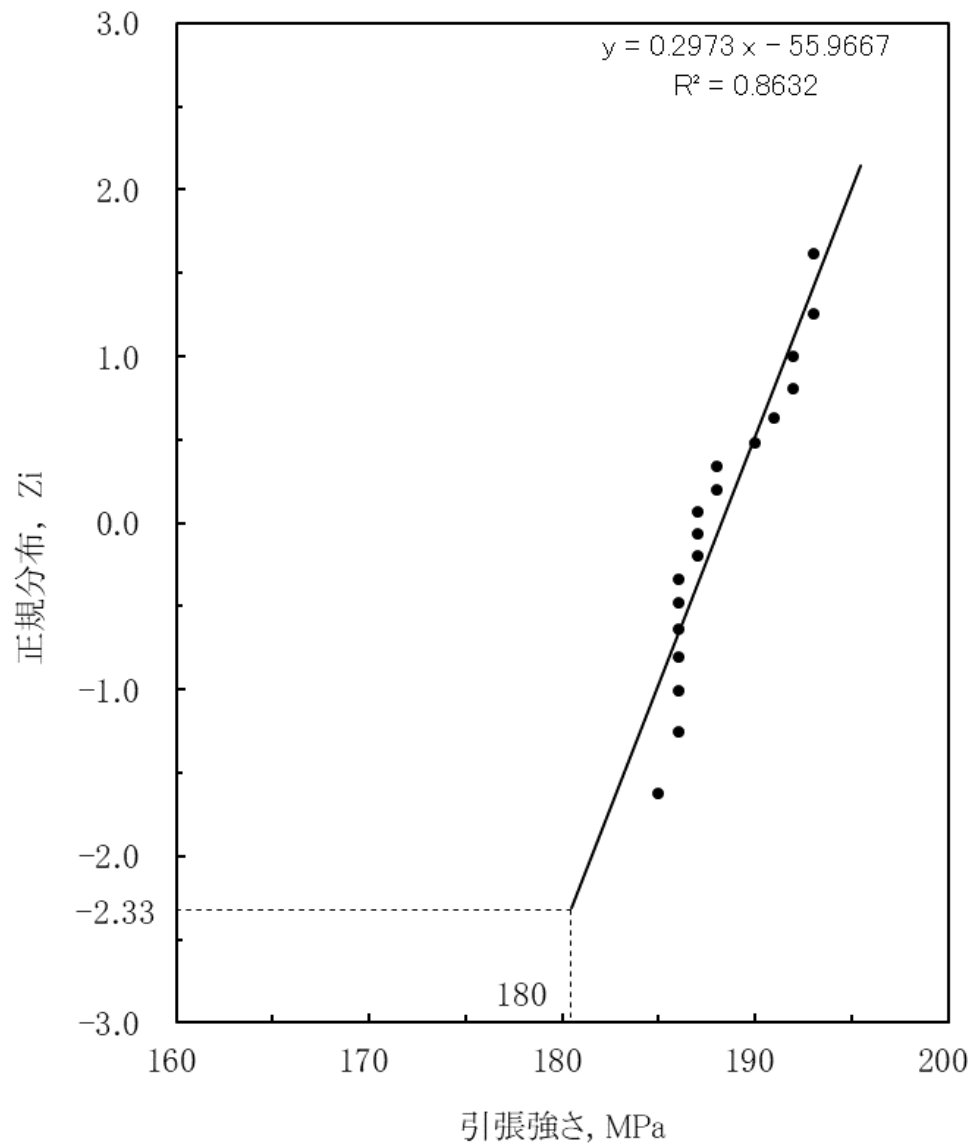
第 7-5 表 常温における引張試験結果

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 (注1)	引張強さ(MPa)					166
	0.2%耐力(MPa)					78
	伸び(%) (注3)					15
製造管理値 (注2)	引張強さ(MPa)					180
	0.2%耐力(MPa)					84
	伸び(%) (注3)					15

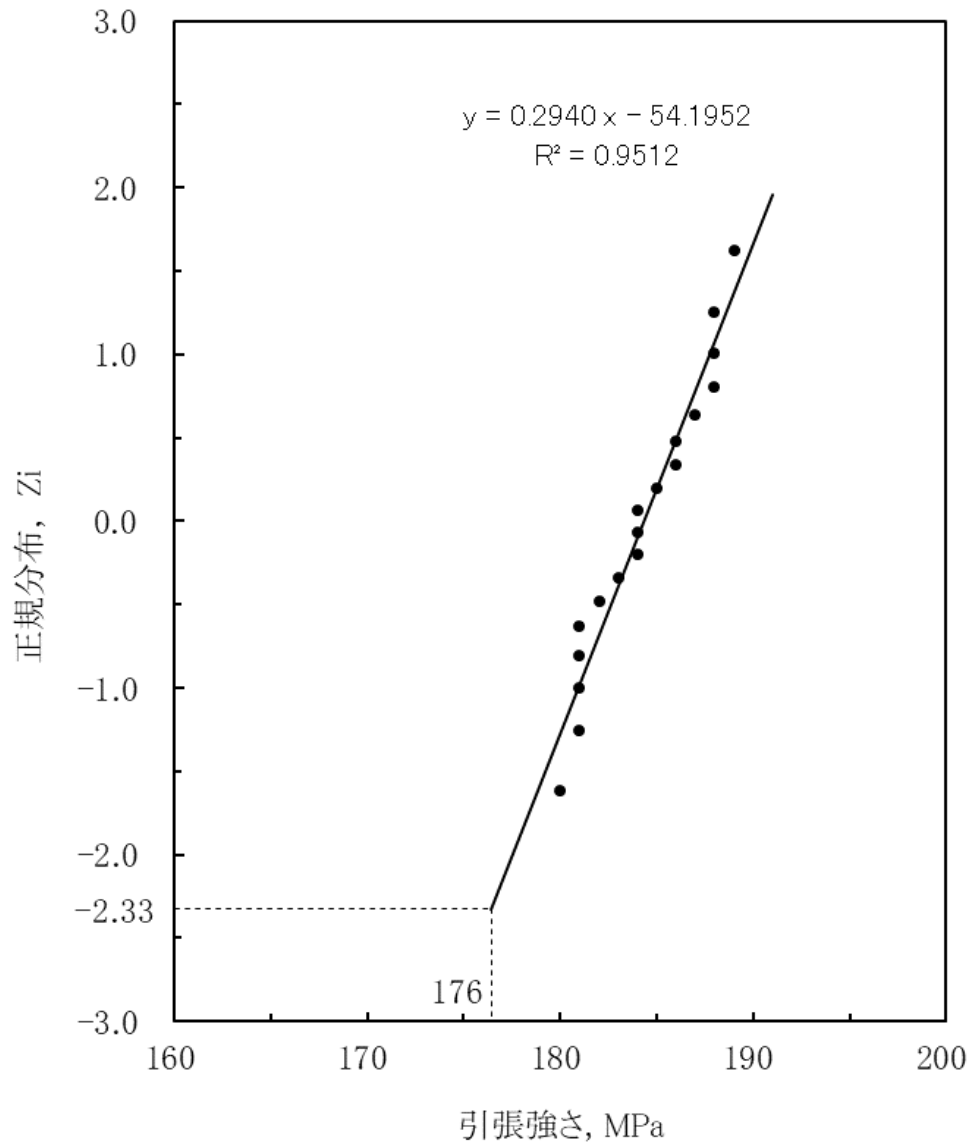
(注1) 設計強度の設定に用いる規格値は、HZ-A3004 および機械試験用供試材における各方向の試験結果より求めた 99%信頼下限値のうち、絶対値が小さいものを採用した。

(注2) 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。

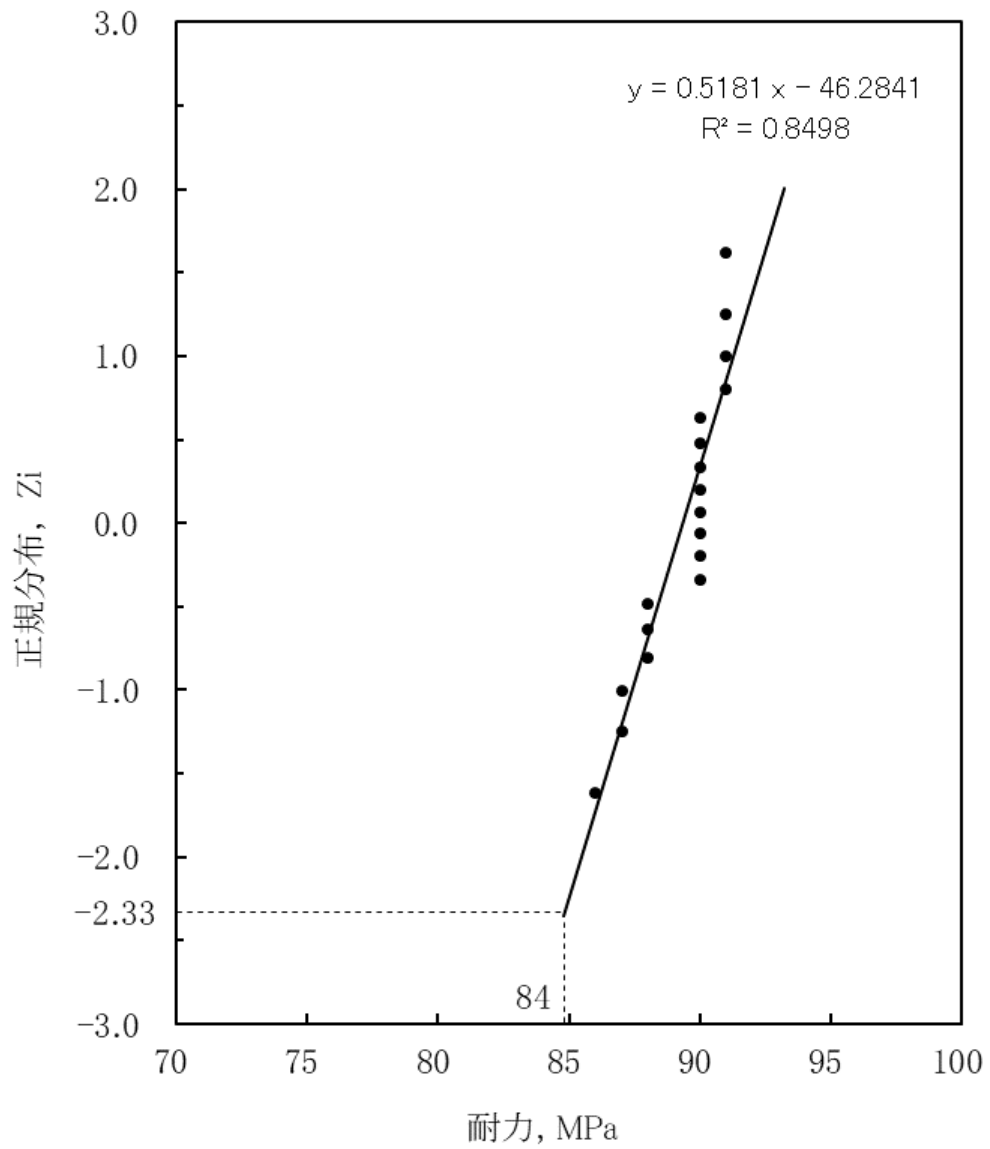
(注3) 伸びの 99%信頼下限値は、各試験条件において 18~22%を示すものの、後述の高温引張試験において 100℃程度では常温より伸びが低くなる特性があることを考慮して 15%に設定した。



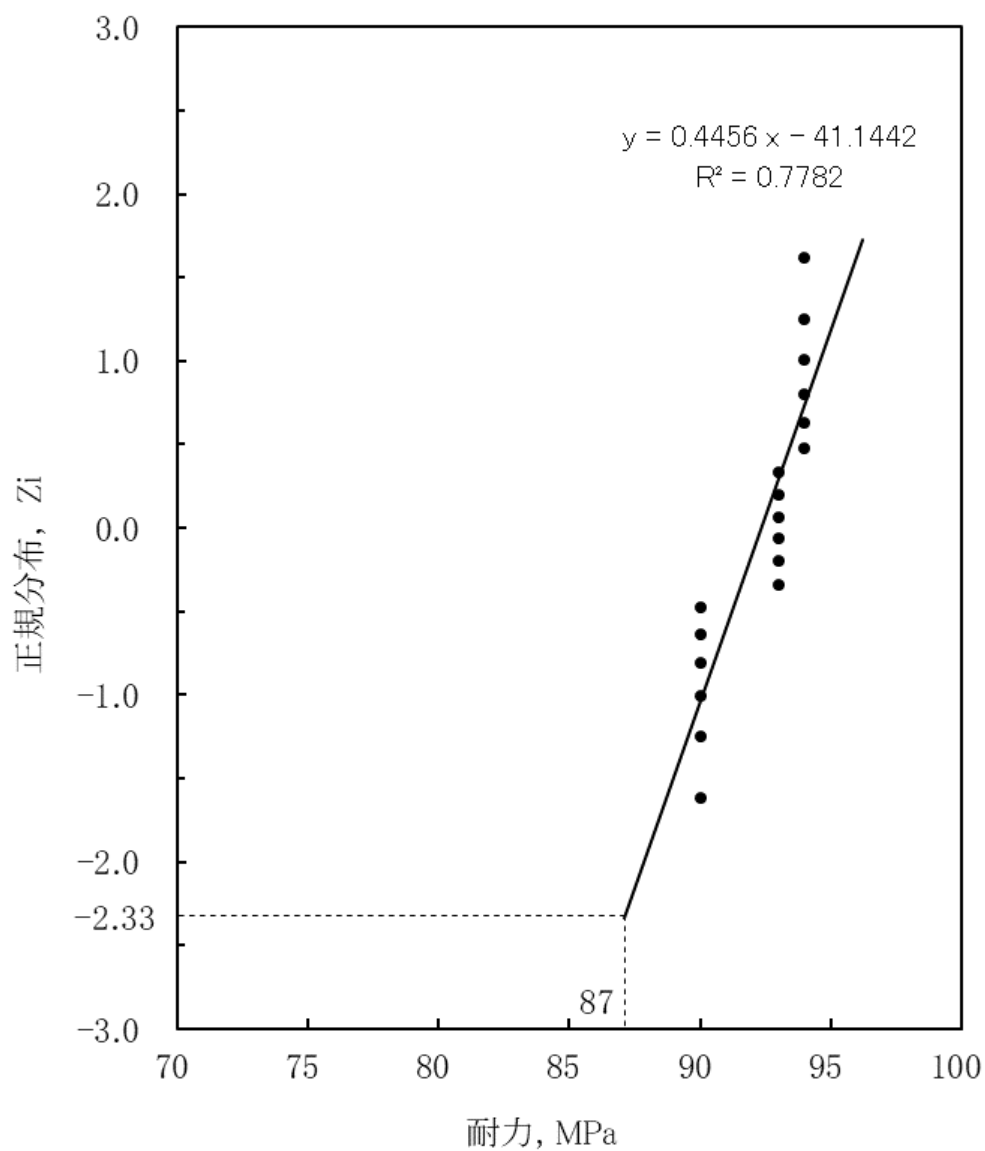
第 7-8 図 HZ-A3004 における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット



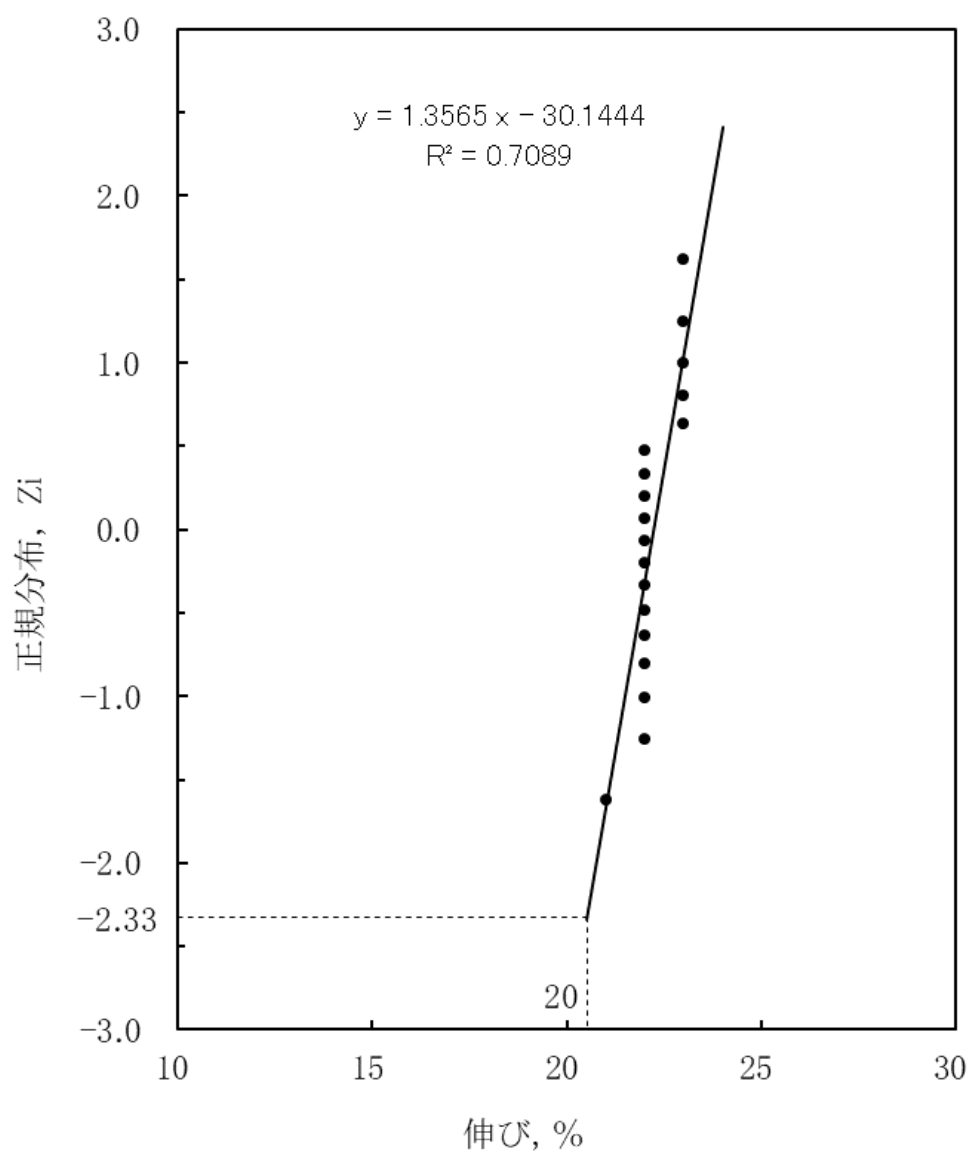
第 7-9 図 HZ-A3004 における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット



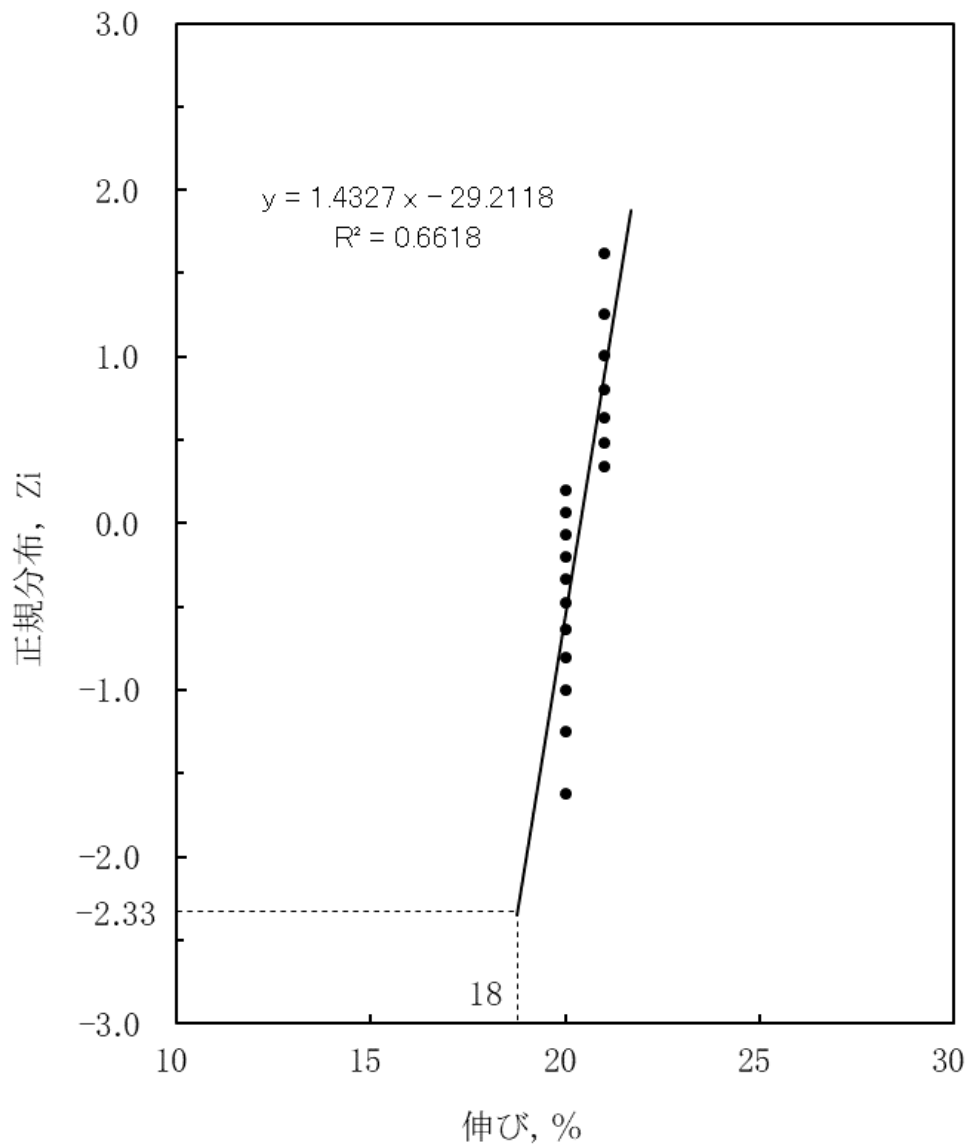
第 7-10 図 HZ-A3004 における耐力 (L 方向) の正規分布プロット



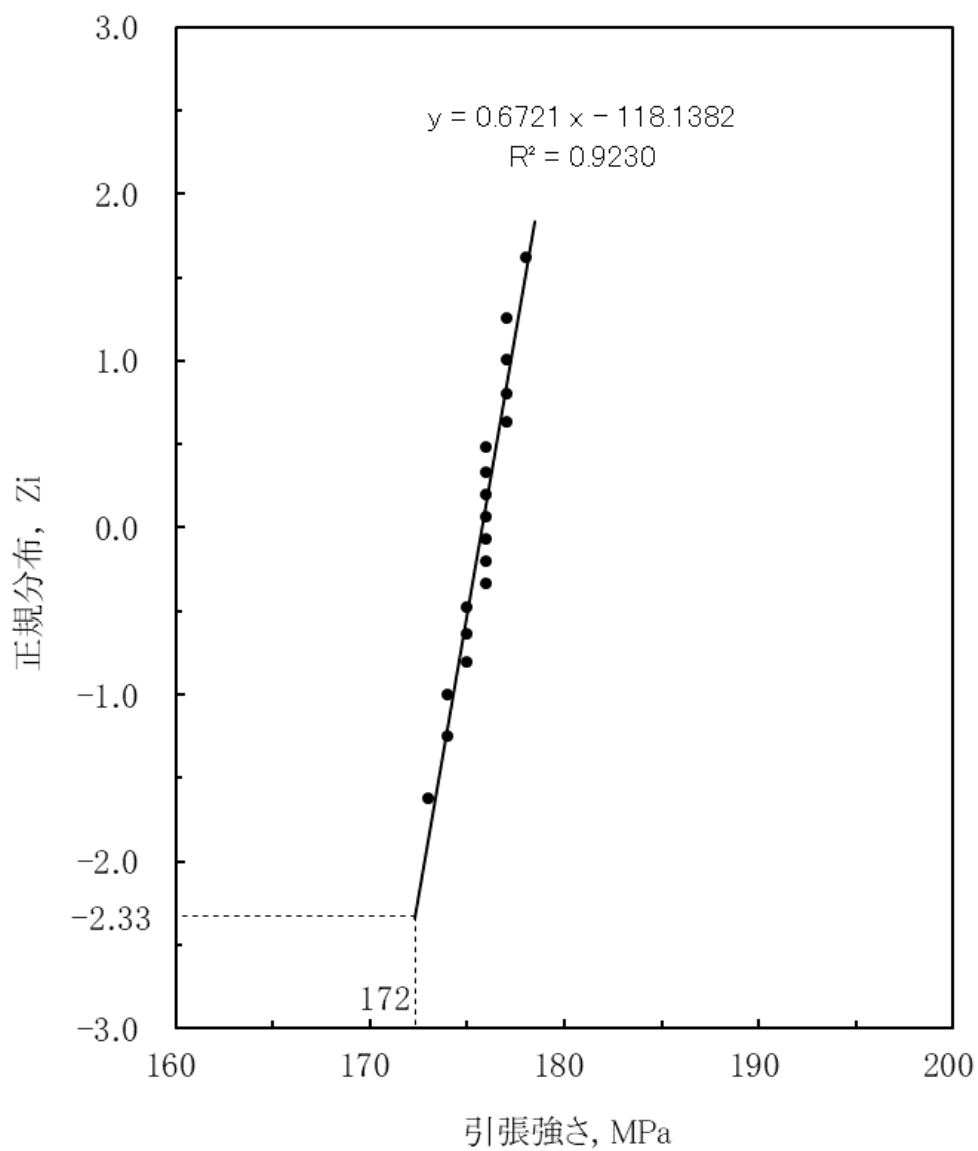
第 7-11 図 HZ-A3004 における耐力 (T 方向) の正規分布プロット



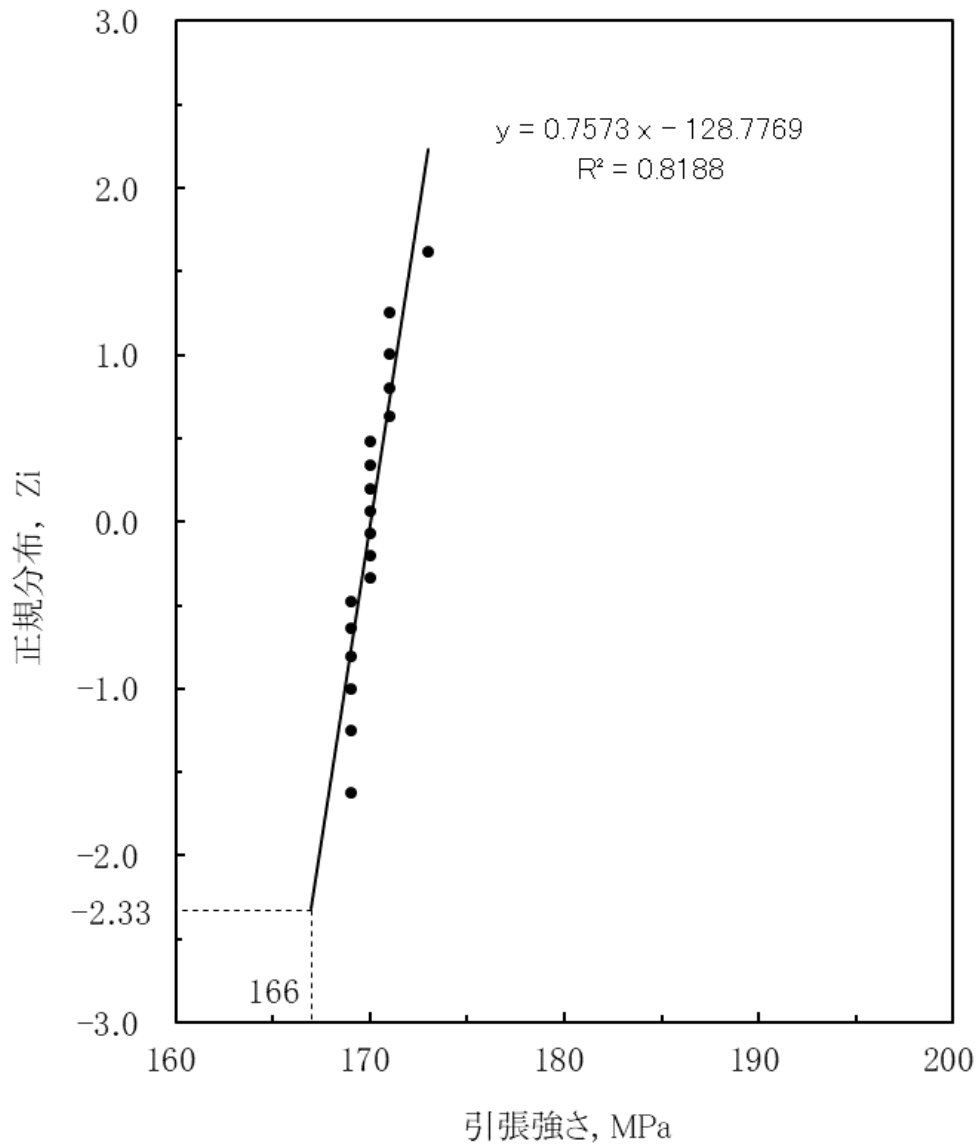
第 7-12 図 HZ-A3004 における伸び (L 方向) の正規分布プロット



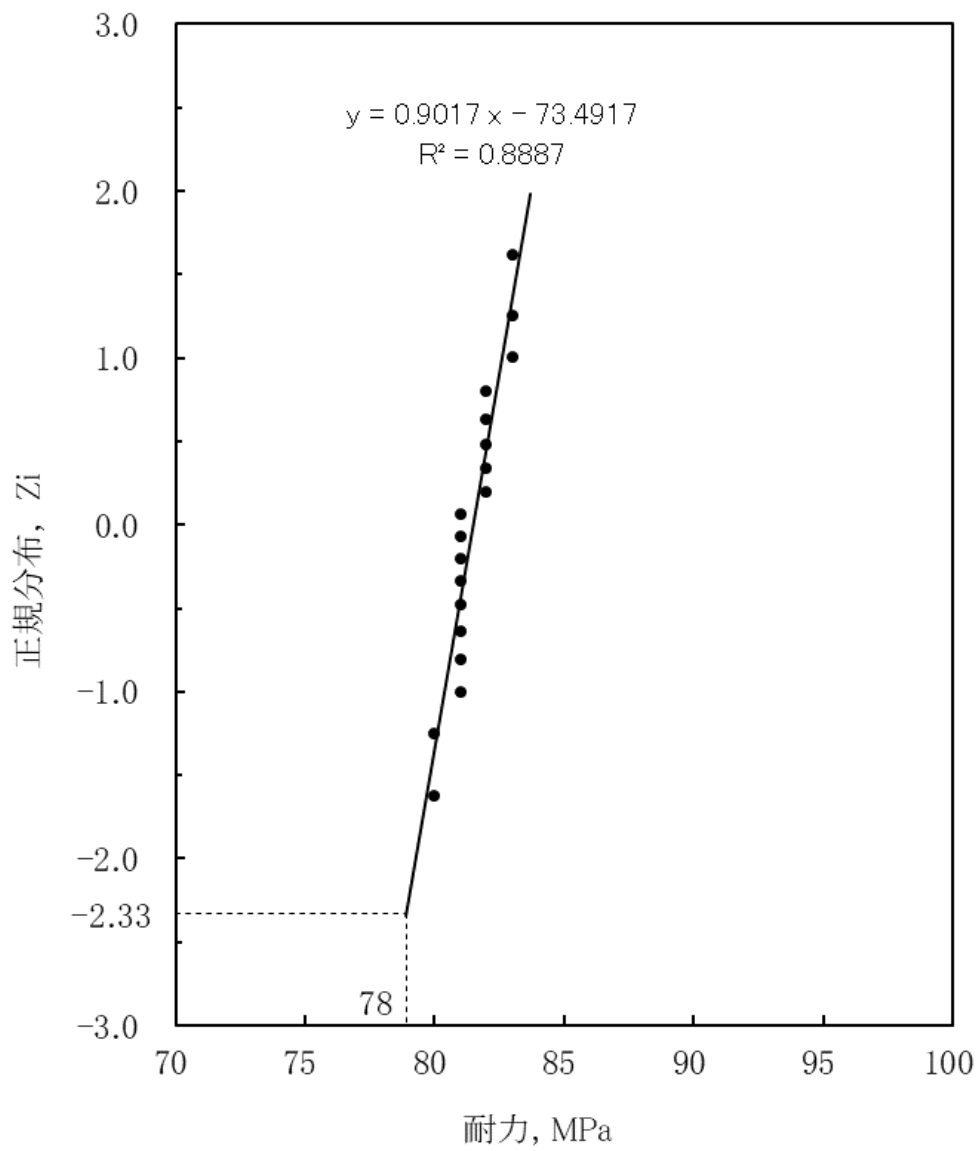
第 7-13 図 HZ-A3004 における伸び (T 方向) の正規分布プロット



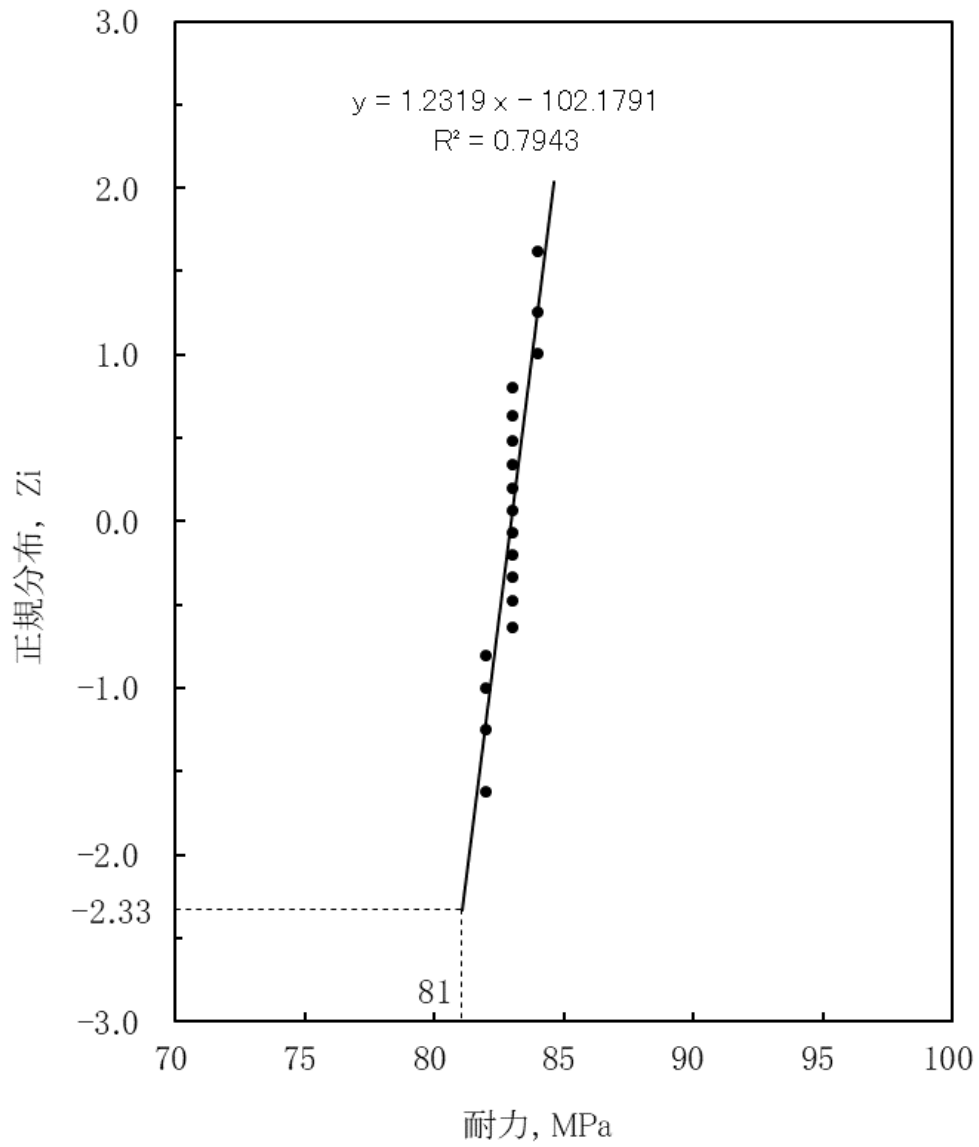
第 7-14 図 機械試験用供試材における引張強さ (L 方向) の正規分布プロット



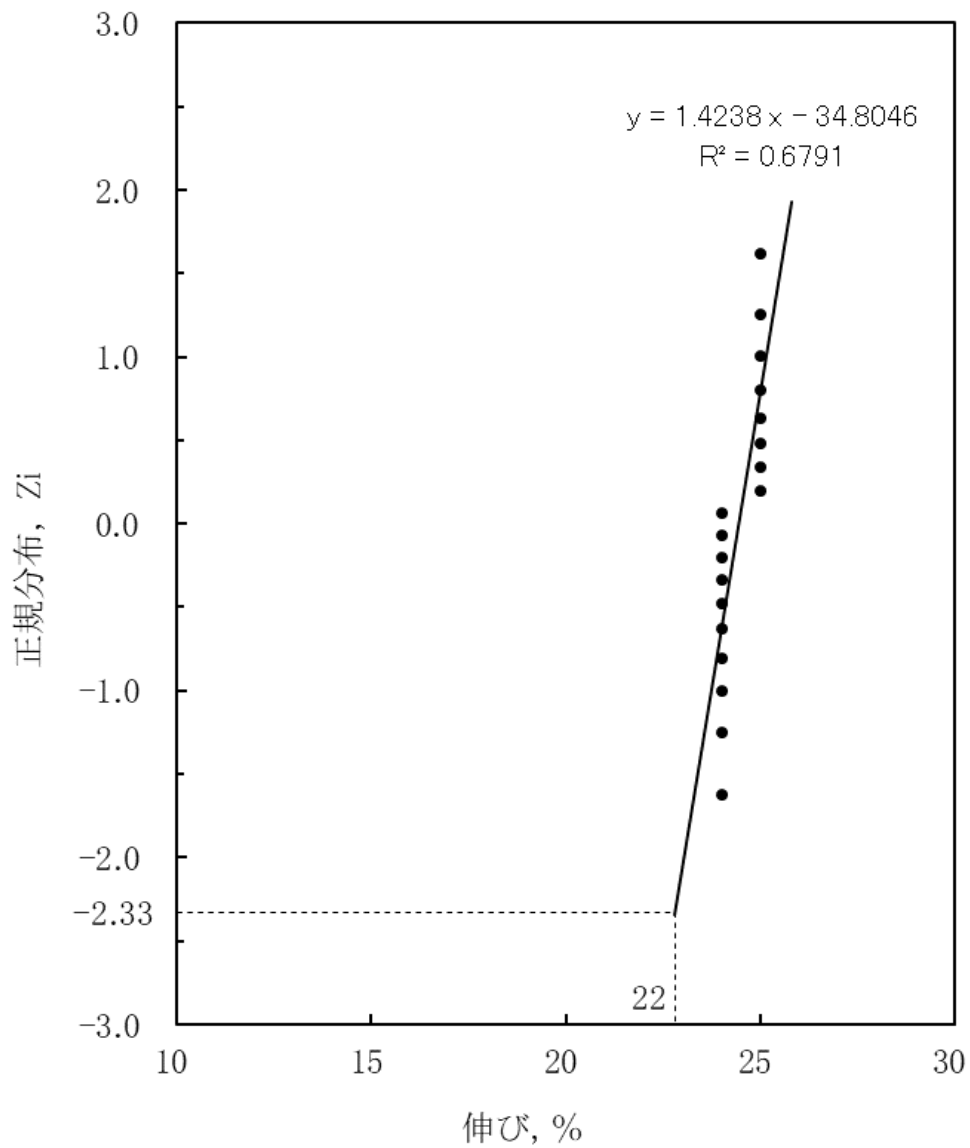
第 7-15 図 機械試験用供試材における引張強さ (T 方向) の正規分布プロット



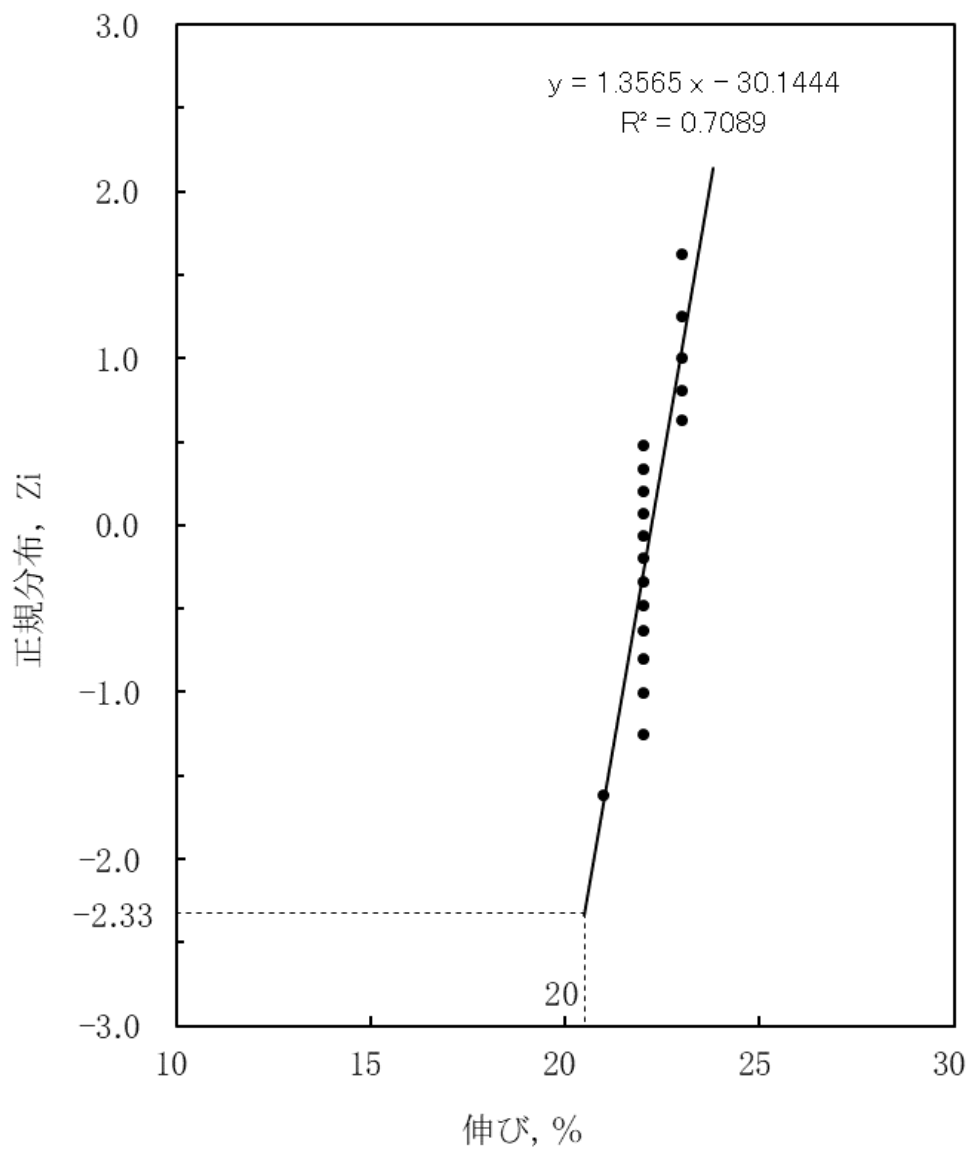
第 7-16 図 機械試験用供試材における耐力 (L 方向) の正規分布プロット



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 7-6 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 7-7 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 7-8 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 7-9 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

7.4.2 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）を試験に供した。試験片は JIS H 4000 に従って、試験片の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 : 供試材は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに 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）および直角な方向（T 方向）
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2% 耐力および伸びを測定した。

(2) 試験結果

第 7-10 表から第 7-14 表、第 7-20 図および第 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 図および第 7-23 図は耐力（L 方向）および引張強さ（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 7-10 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 7-11 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 7-12 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）

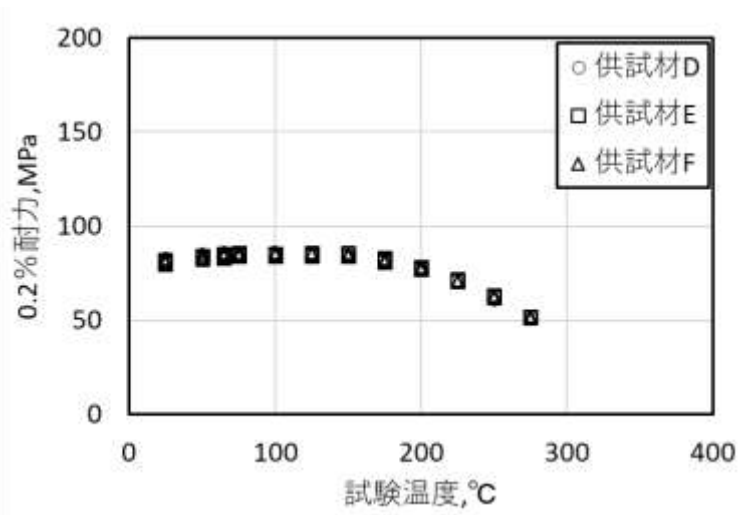
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
D	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	25	84	169	23
	25	83	175	24	84	169	23
	25	81	174	24	83	169	23
	25	82	173	24	83	169	24
	25	82	174	24	83	170	23
	50	83	171	23	86	166	21
	50	84	172	23	86	166	21
	50	85	174	23	87	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 7-13 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（2/3）

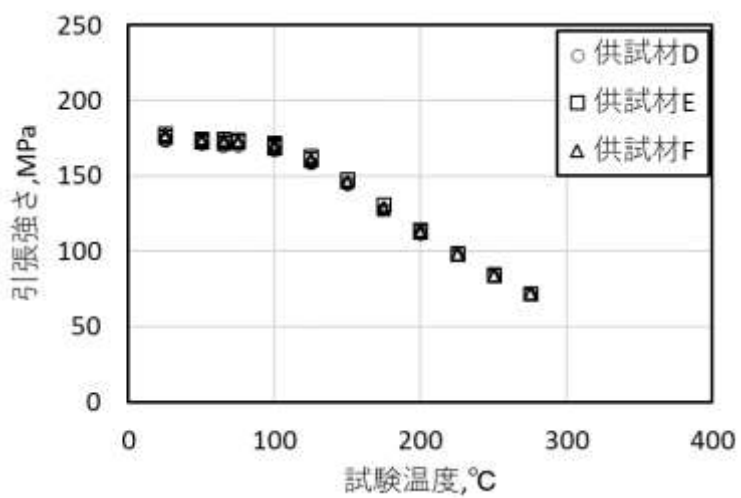
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
E	25	82	178	25	83	171	23
	25	81	176	25	82	171	24
	25	82	176	25	83	169	23
	25	81	176	24	82	173	24
	25	80	176	25	82	171	24
	25	80	176	25	82	170	24
	50	83	174	24	84	168	23
	50	83	173	23	84	168	22
	50	84	175	23	85	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 7-14 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（3/3）

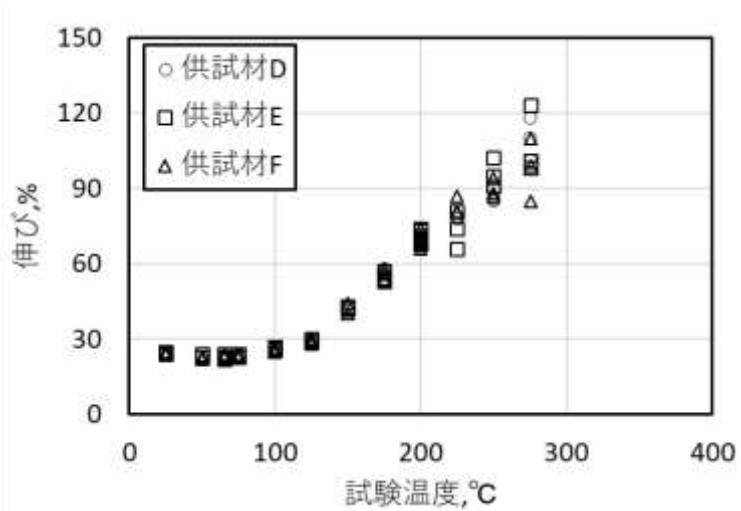
供試材	試験 温度 [°C]	L方向			T方向		
		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
F	25	81	177	24	83	170	24
	25	82	177	25	83	170	24
	25	81	176	24	83	170	23
	25	81	177	24	83	170	24
	25	81	176	24	83	171	24
	25	81	177	24	83	170	24
	50	82	174	23	85	167	21
	50	83	173	22	85	168	21
	50	85	175	23	86	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

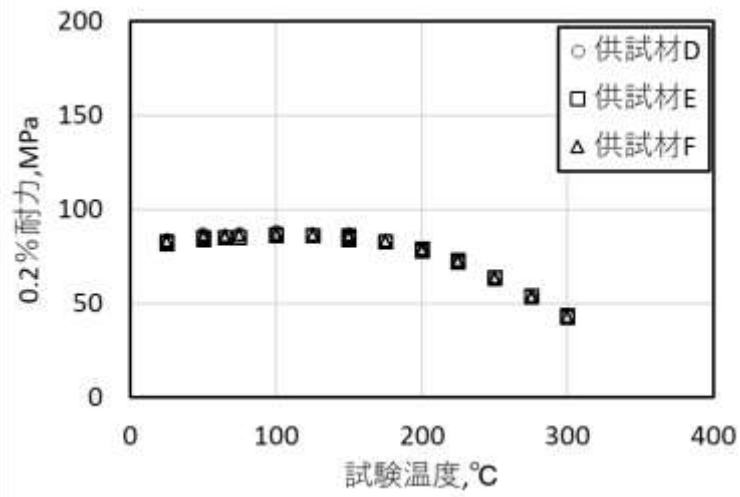


(b) 引張強さ

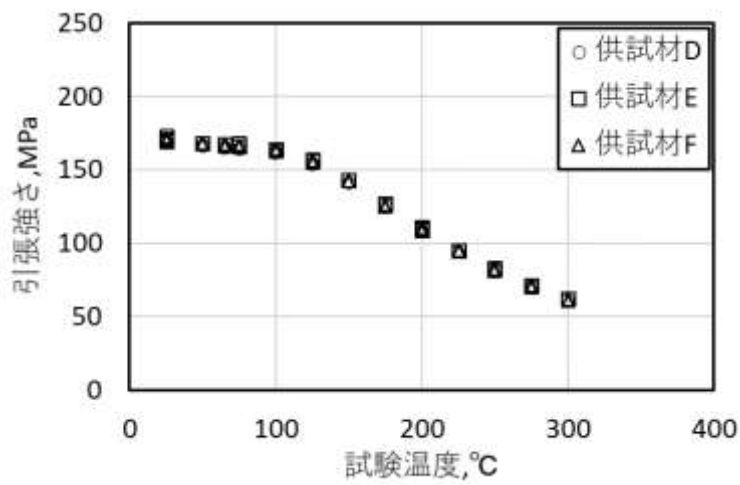


(c) 伸び

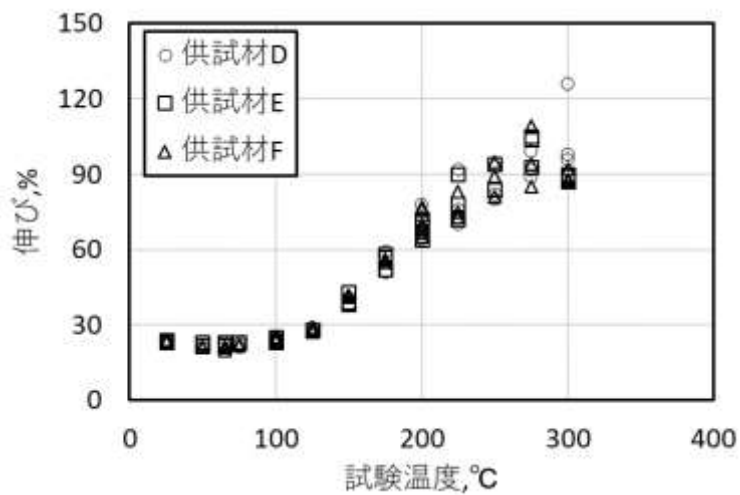
第 7-20 図 機械試験用供試材の高温引張試験結果 (L 方向)



(a) 0.2%耐力

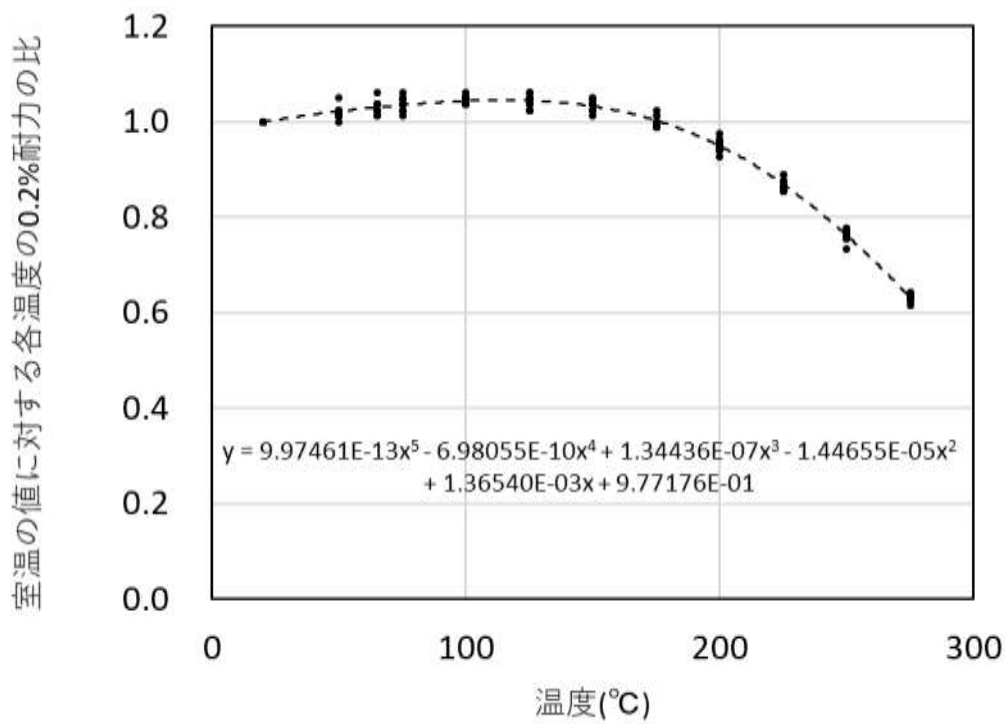


(b) 引張強さ

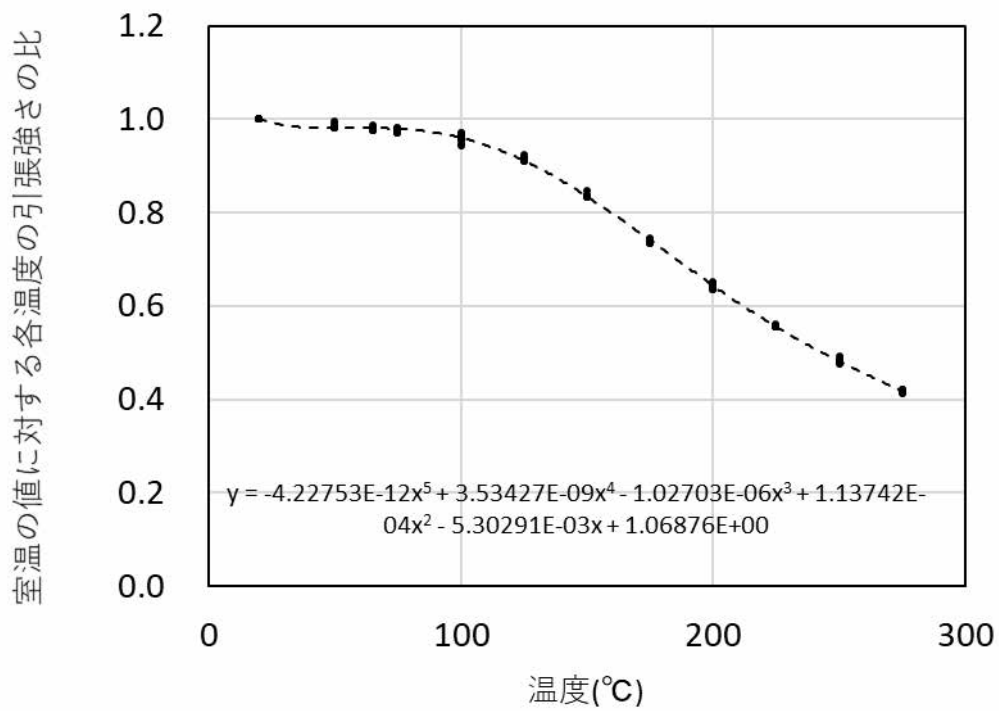


(c) 伸び

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

7.4.3 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 : HZ-A3004 (供試材 A、B、C) は、JIS H0001:1998 における H112 材を試験に供した。
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 [] 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 7-15 表にビッカース硬さ測定結果を参考値として示す。

第 7-15 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

7.4.4 韌性

(1) 試験条件

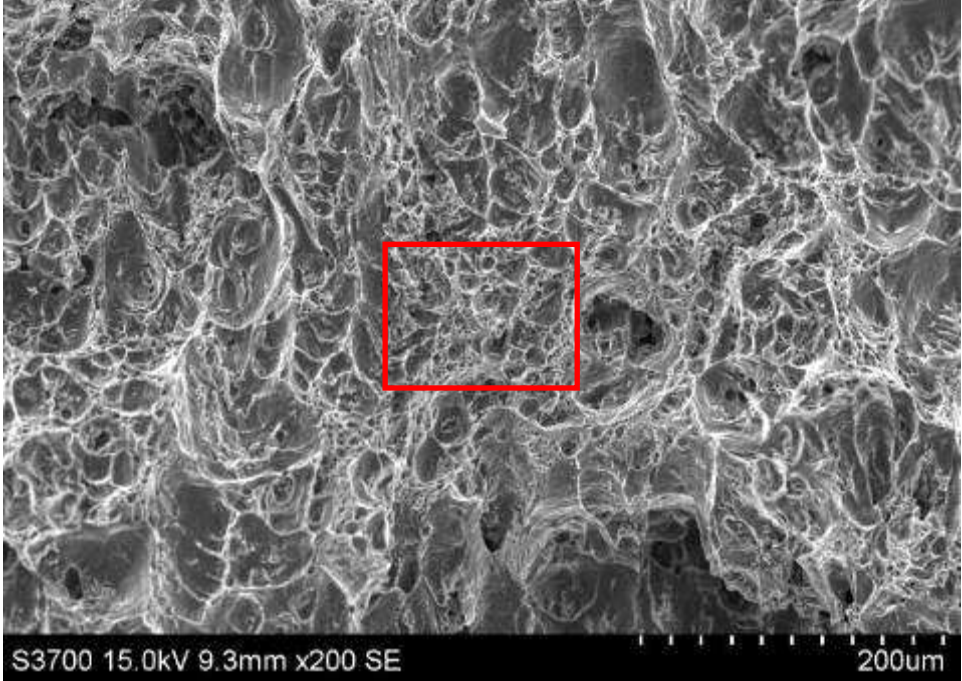
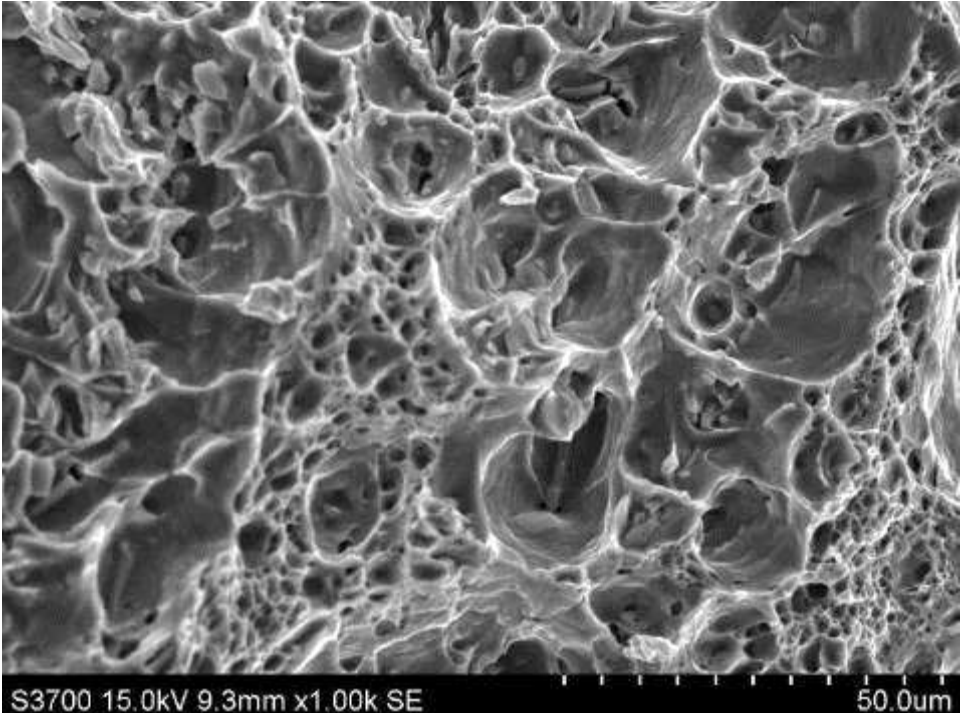
- ・供試材 : HZ-A3004 は機械試験用供試材に比較して、合金元素の量が多いことから韌性が劣ると推測される。そこで供試材は HZ-A3004 とし、第 7-1 表に示す 3 標本 (供試材 A、B、C) を試験に供した。試験片は、軸が板の表面とその中心との中央部にあるように採取した。
- ・熱処理 : JIS H0001:1998 における H112 材 (初期材) および O 材処理を施したのちに 過時効熱処理を施した材料 (過時効熱処理材) を試験に供した。
- ・試験片 : JIS Z 2242:2018 による V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・試験方法 : JIS 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)
- ・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

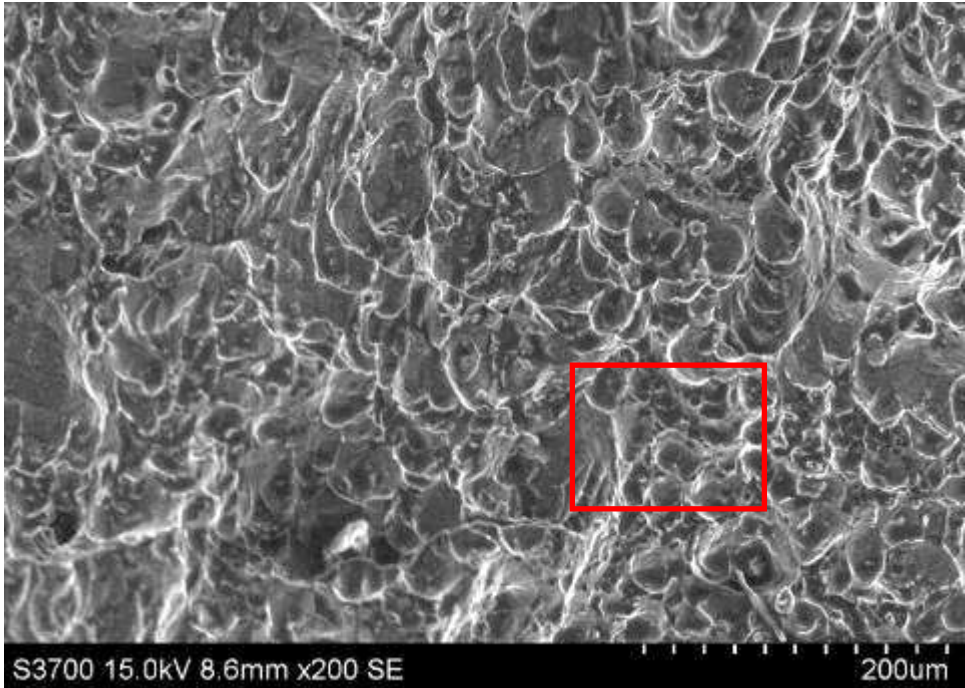
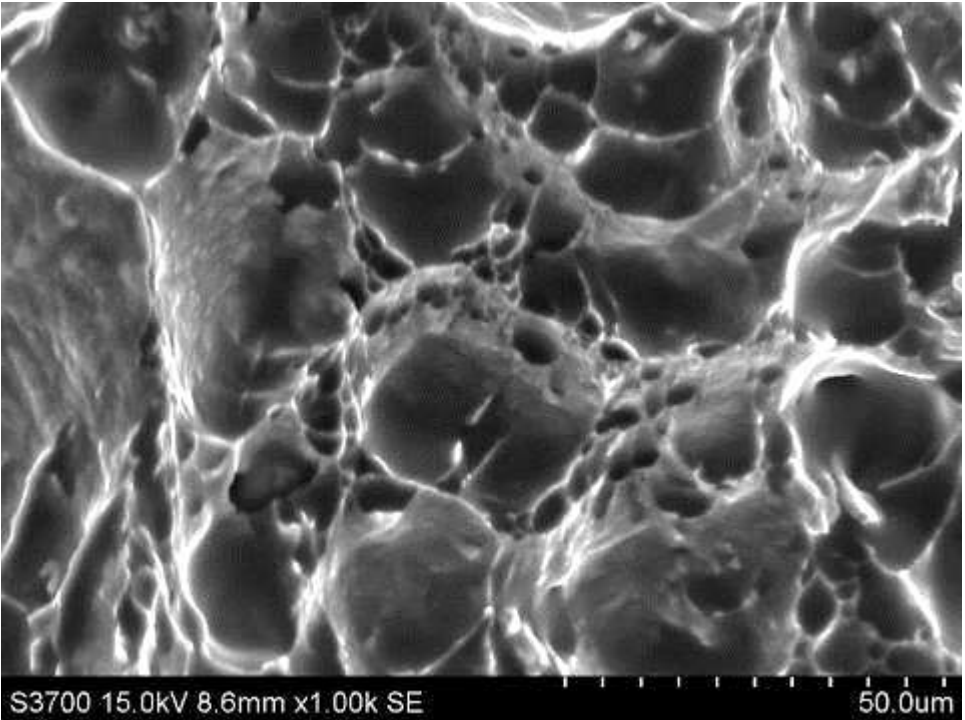
第 7-16 表にシャルピー衝撃試験結果を示す。第 7-24 図から第 7-30 図に代表して供試材 A の走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真を示す。全ての試験片において延性破面率は 100%であり、脆性破壊は認められない。

第 7-16 表 シャルピー衝撃試験結果

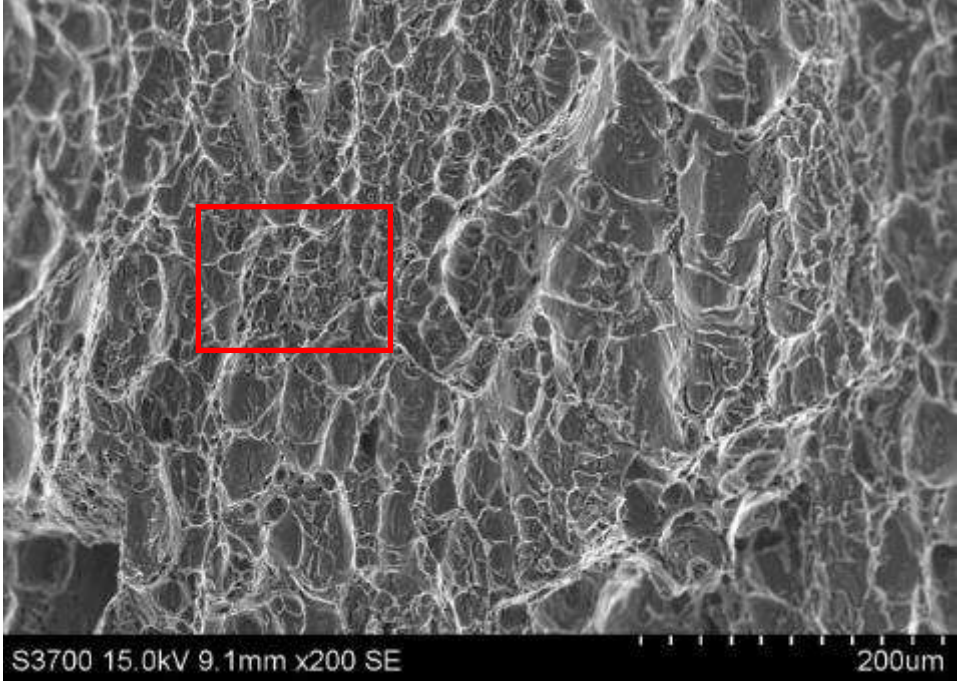
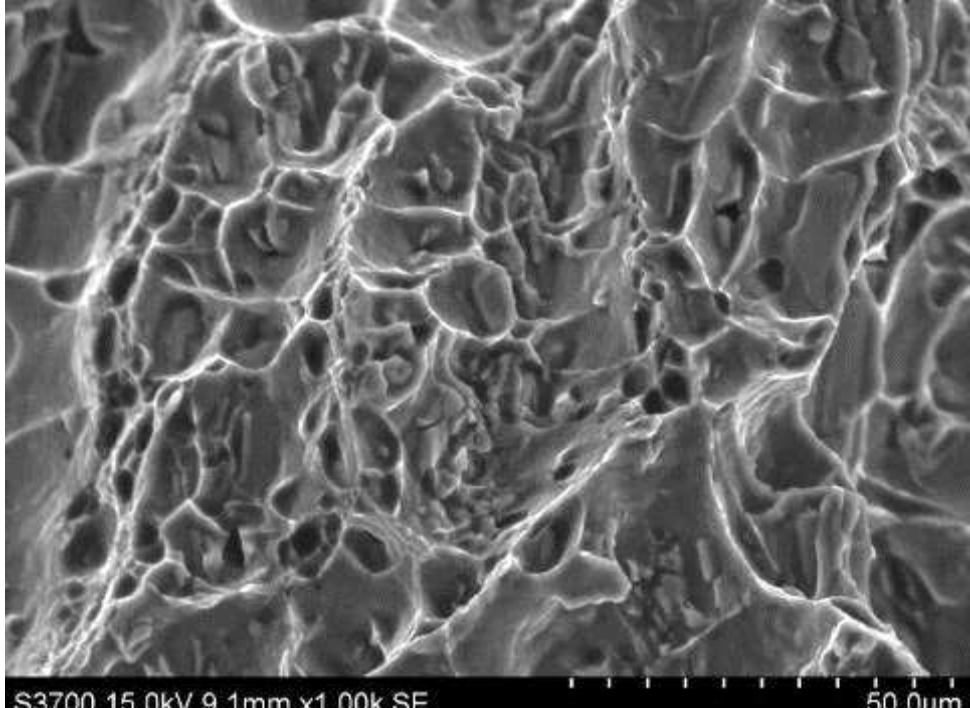
供試材	熱処理	採取方向	試験温度 [°C]	吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)
A	なし	L方向	25	44	56	2.51
			250	46	58	2.55
		T方向	25	26	33	1.68
			250	29	37	2.02
	過時効熱処理 □	L方向	25	40	50	2.13
		T方向	25	26	33	1.59
B	なし	L方向	25	44	55	2.50
			250	45	56	2.67
		T方向	25	26	33	1.59
			250	27	34	1.92
	過時効熱処理 □	L方向	25	42	53	2.09
		T方向	25	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>	

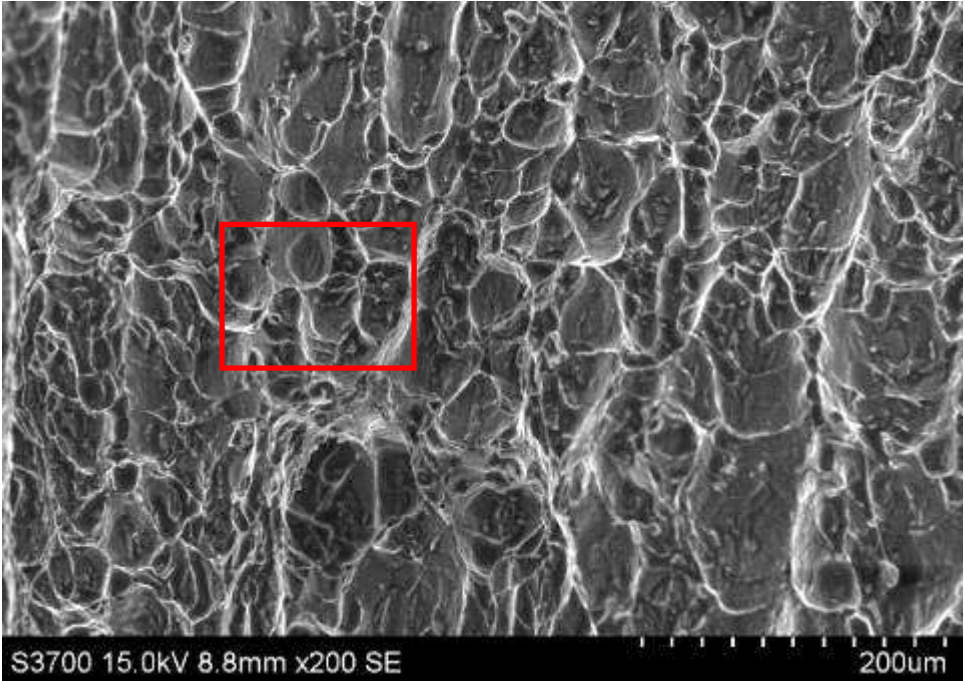
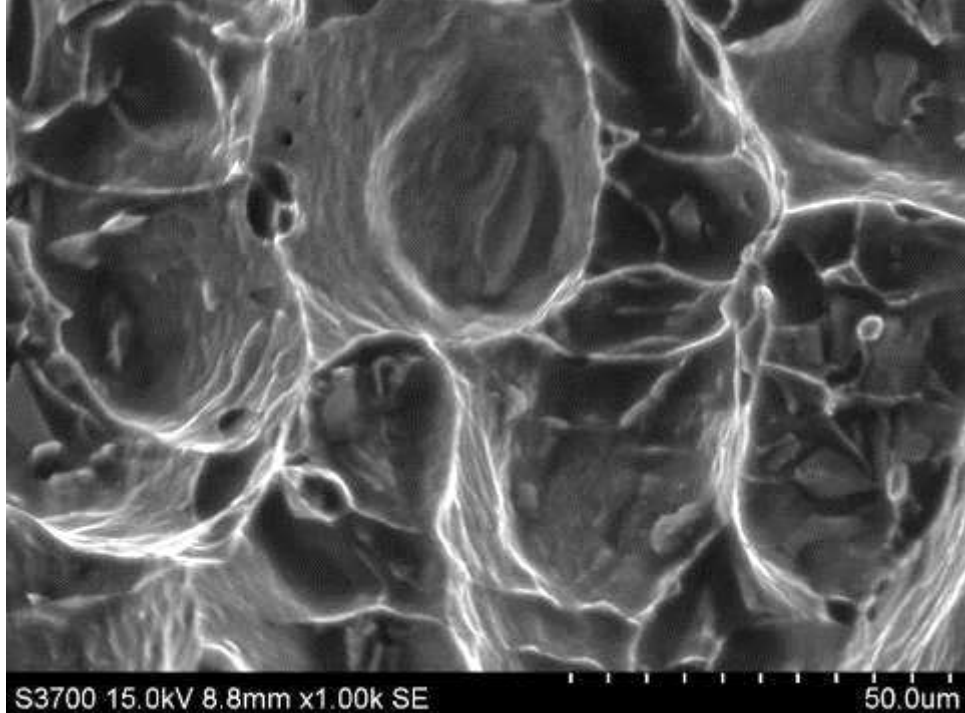
第 7-24 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真（1/7）

<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>	

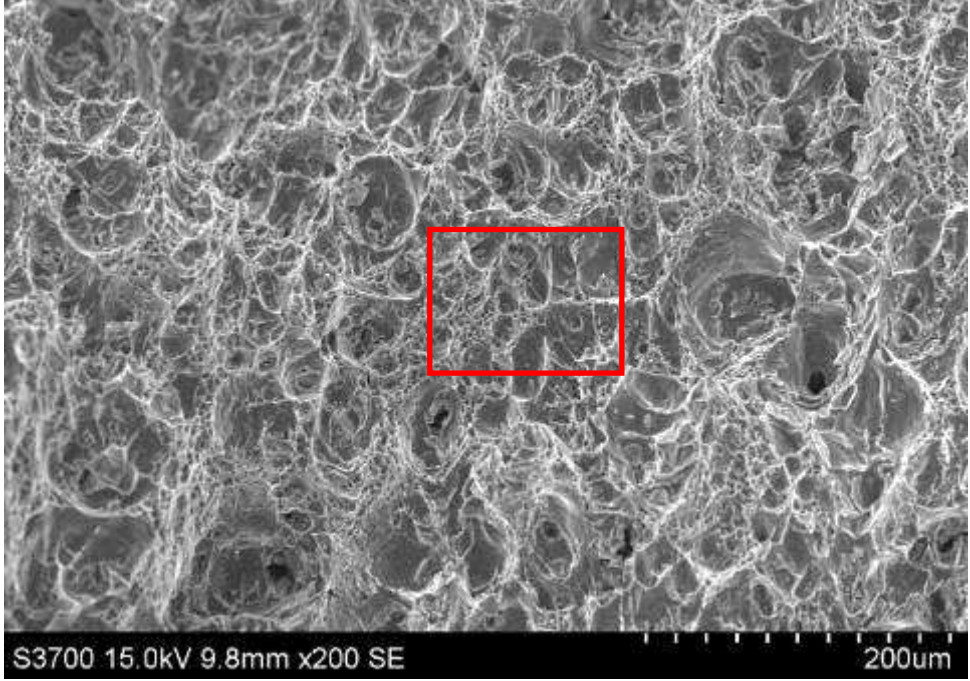
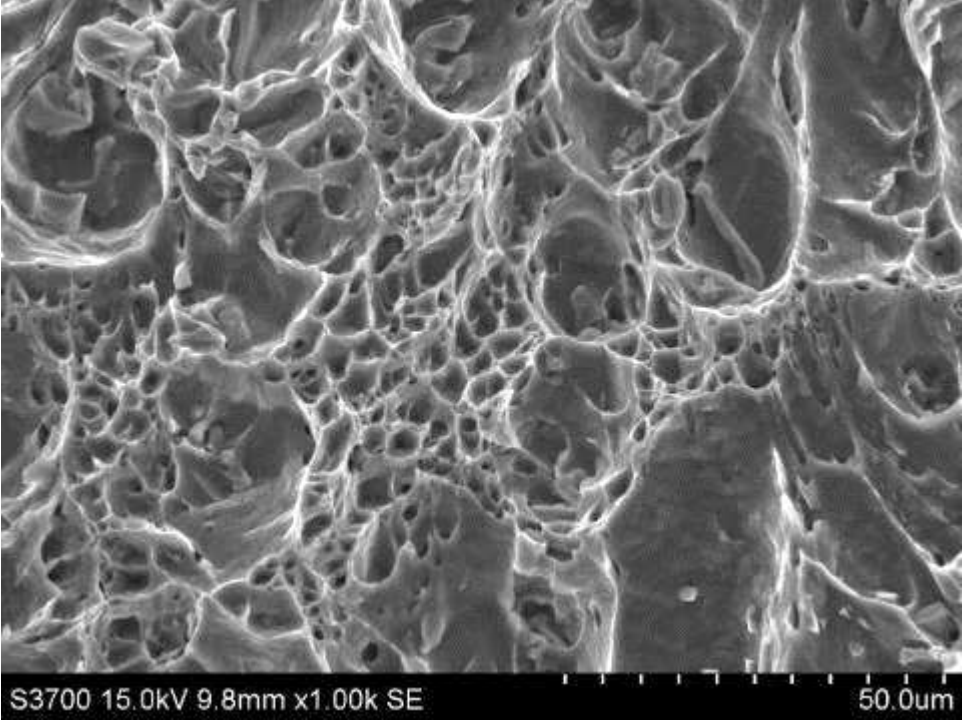
第 7-25 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (2/7)

<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>	

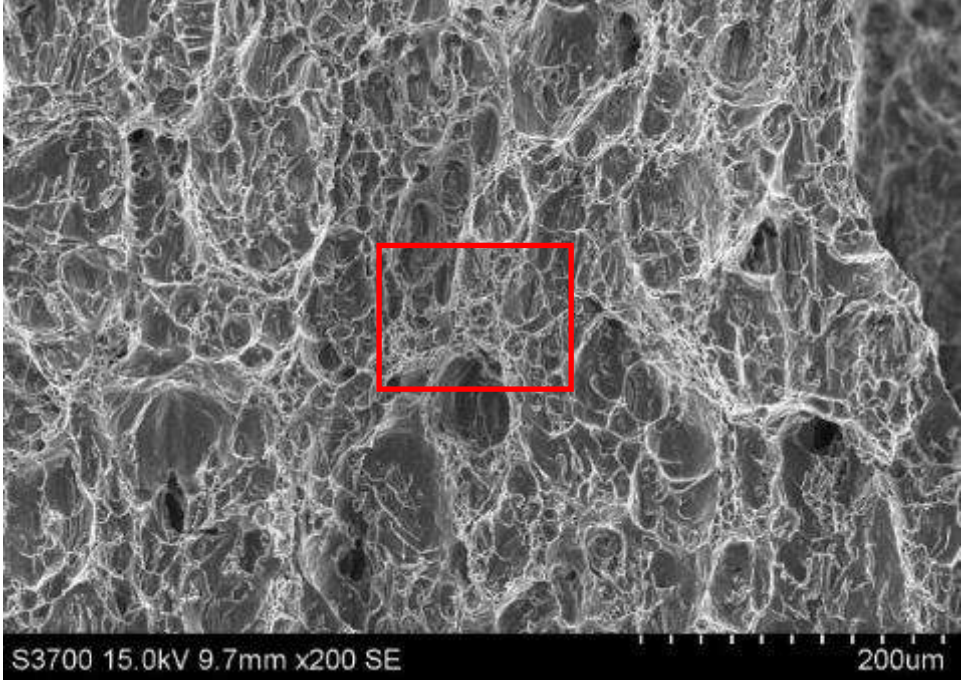
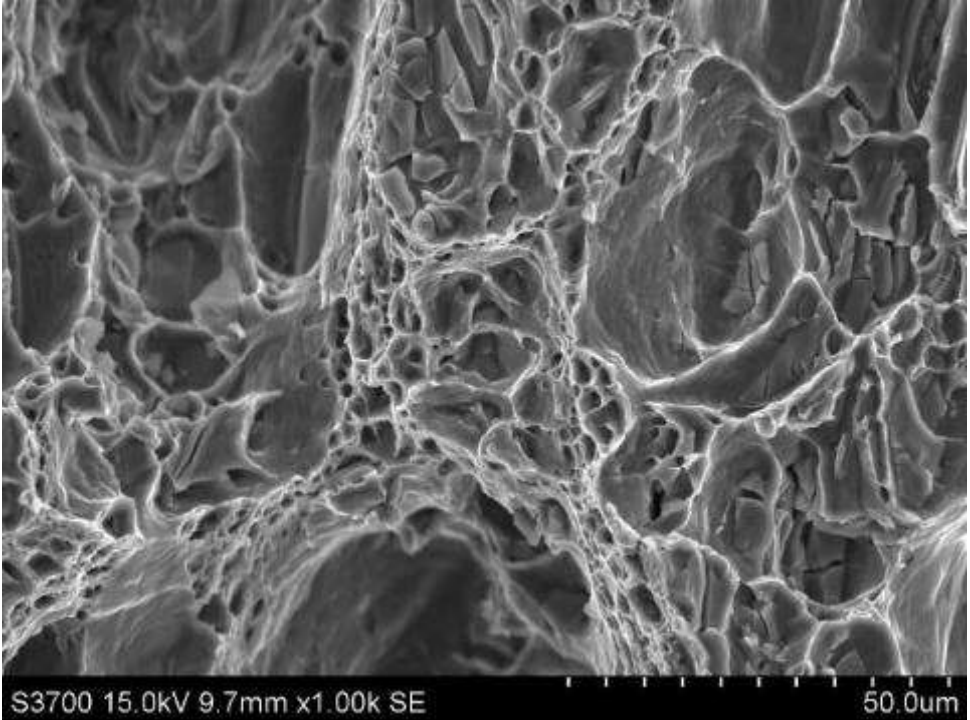
第 7-26 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真 (3/7)

<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>	

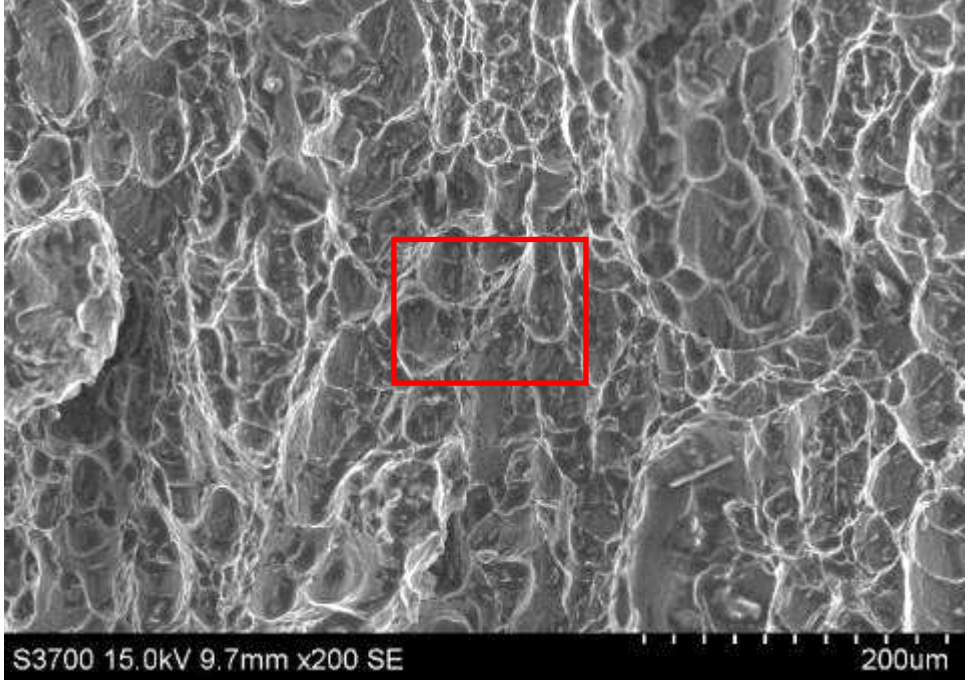
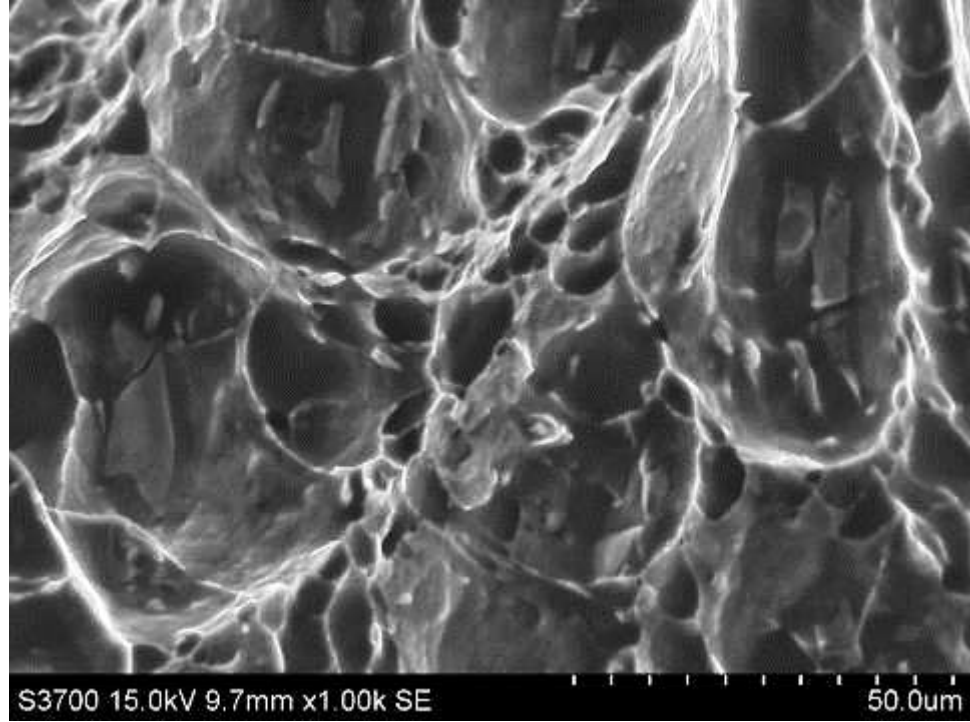
第 7-27 図 走査型電子顕微鏡によるシャルピー衝撃試験片の SEM 破面写真（4/7）

<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)

7.4.5 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 : 供試材は、JIS H0001:1998 における O 材処理を施したのちに 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℃、200℃、250℃、300℃、350℃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」および「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 図および第 7-17 表に平均クリープ破断強さおよ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、 $C=14.27$ 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。

$$\text{LMP}/1000 = (T + 273.15) (14.27 + \log t_r) / 1000 = 13.935 - 3.566 (\log \sigma)$$

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、 $\log t_r$ に対する回帰の標準誤差）。クリープ試験のデータサンプル数が $n=68$ であるため、片側許容限界係数 k の値は、 $k=1.996$ とした。また、LMP の標準誤差 SEE は 61.85 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。

$$\begin{aligned} \text{LMP}/1000 &= (T + 273.15) (14.27 + \log t_r) / 1000 \\ &= 13.935 - 3.566 (\log \sigma) - k \times \text{SEE} \\ &= 13.935 - 3.566 (\log \sigma) - 1.996 \times 61.85 \end{aligned}$$

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 : log t_r に対する回帰の標準誤差

第 7-32 図および第 7-18 表は定常クリーブ速度と 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=14.46 を得た。

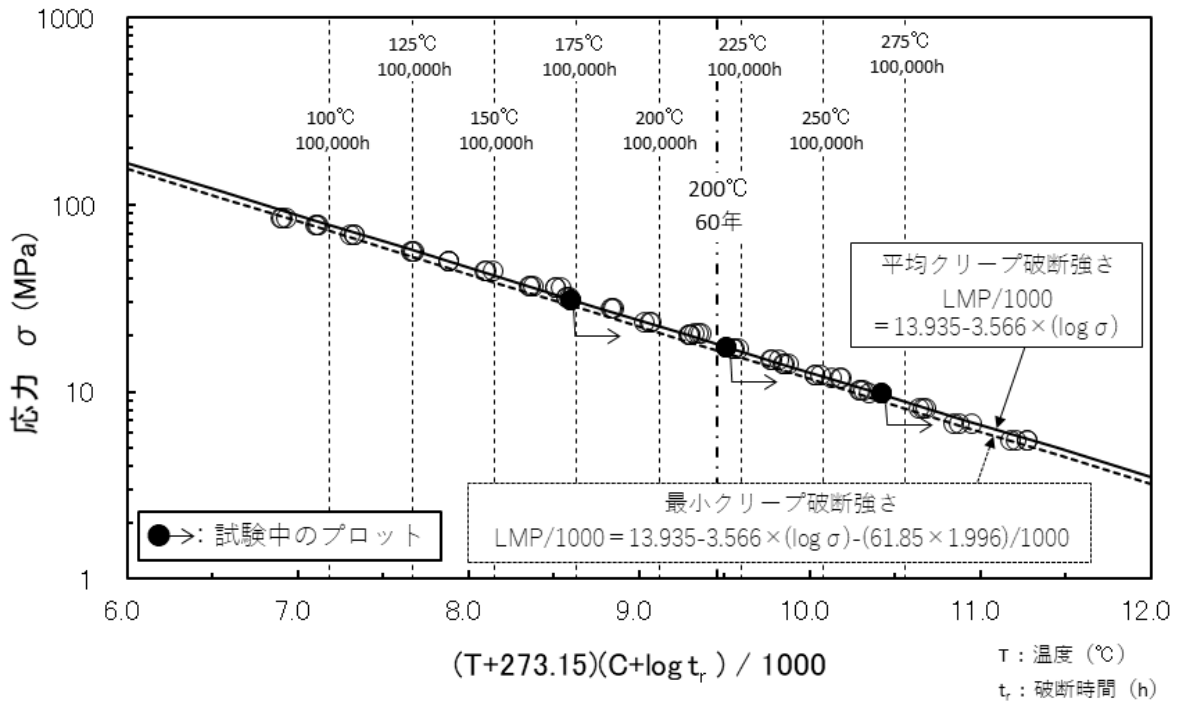
定常クリーブ速度と LMP の関係は以下のとおりである。

$$\text{LMP}/1000 = (T + 273.15) (14.46 - \log \dot{\epsilon})/1000 = 14.751 - 3.739 (\log \sigma)$$

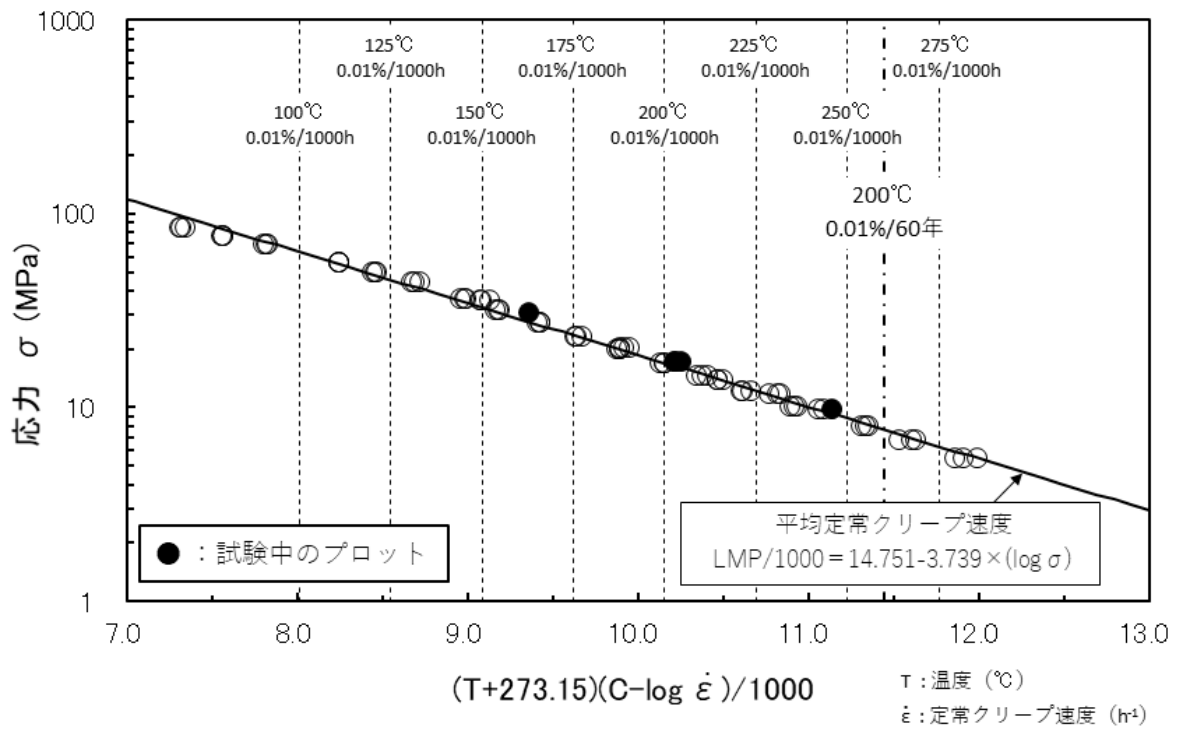
ここで、T : 温度 (°C)
ε̇ : 定常クリーブ速度 (h⁻¹)
σ : 応力 (MPa)

第 7-19 表はクリーブ試験結果における応力-破断時間データを、第 7-20 表はクリーブ試験結果における応力-定常クリーブ速度データを示す。

なお、クリーブ試験は継続中であり、全て完了したのち再整理する。



第 7-31 図 応力-破断時間プロット



第 7-32 図 応力-定常クリープ速度プロット

第 7-17 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	6.23	(145)	(133)
65	6.52	(120)	(111)
75	6.71	(106)	(98)
100	7.19	(77)	(71)
125	7.67	(57)	(52)
150	8.15	41	38
175	8.64	30	28
200	9.12	22	20
225	9.60	16	15
250	10.08	12	11
275	10.56	8	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 7-18 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%/1,000h クリープ強さ [MPa] ^(注1)
50	6.93	(123)
65	7.26	(101)
75	7.47	(88)
100	8.01	(63)
125	8.54	(45)
150	9.08	32
175	9.62	23
200	10.15	16
225	10.69	12
250	11.23	8
275	11.76	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 7-19 表 クリープ試験結果における応力-破断時間データ

供試材	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [h]	LMP/1000 (C=14.27)
D	150	85.5	108.2	6.90
	150	77.4	339.3	7.11
	150	69.3	1152.1	7.33
	200	56.5	91.3	7.68
	200	50.3	250.4	7.89
	200	44.3	731.1	8.11
	200	35.8	5300.2	8.51
	200	30.7	8177.0(未破断)	8.60
	250	36.7	51.9	8.36
	250	32.2	133.9	8.58
	250	27.7	440.5	8.85
	250	20.5	3962.1	9.35
	250	17.4	8176.0(未破断)	9.51
	300	23.5	36.6	9.07
	300	20.1	91.1	9.30
	300	17.0	281.9	9.58
	300	11.8	3104.7	10.18
	300	9.8	8176.0(未破断)	10.42
	300	14.0	843.3	9.86
	350	14.7	31.0	9.82
	350	12.3	76.9	10.07
	350	10.2	178.9	10.30
	350	5.5	5256.3	11.21
	350	8.1	691.4	10.66
	350	6.8	1538.9	10.88
	E	150	85.5	133.4
150		77.4	370.6	7.13
150		69.3	1000.4	7.31
200		56.5	87.0	7.67
200		50.3	247.9	7.88
200		44.3	881.7	8.15
200		35.8	6223.5	8.55
200		30.7	8176.0(未破断)	8.60
250		36.7	56.8	8.38
250		32.2	133.2	8.58
250		27.7	448.3	8.85
250		20.5	4301.9	9.37
250		17.4	8176.0(未破断)	9.51
300		23.5	34.9	9.06
300		20.1	90.2	9.30
300		17.0	259.4	9.56
300		11.8	3197.7	10.19
300		9.8	8116.9	10.42
300		14.0	927.6	9.88
350		14.7	26.7	9.78
350		12.3	67.8	10.03
350		10.2	194.2	10.32
350		8.1	744.3	10.68
350		5.5	6741.6	11.28
350		6.8	2021.8	10.95

供試材	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [h]	LMP/1000 (C=14.27)
F	150	85.5	114.6	6.91
	150	77.4	350.8	7.12
	150	69.3	1125.1	7.33
	200	56.5	88.8	7.67
	200	50.3	249.6	7.89
	200	44.3	686.9	8.09
	200	35.8	5240.7	8.51
	200	30.7	8176.0(未破断)	8.60
	250	36.7	51.4	8.36
	250	32.2	143.5	8.59
	250	27.7	419.9	8.84
	250	20.5	3585.4	9.32
	250	17.4	8176.0(未破断)	9.51
	300	23.5	30.9	9.03
	300	20.1	88.4	9.29
	300	17.0	248.9	9.55
	300	11.8	2539.7	10.13
	300	9.8	6036.5	10.35
	300	14.0	814.9	9.85
	350	14.7	25.4	9.77
	350	12.3	66.7	10.03
	350	10.2	176.2	10.29
	350	8.1	639.3	10.64
	350	6.8	1360.0	10.85
	350	5.5	4689.7	11.18

第 7-20 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	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	定常クリープ速度 [h ⁻¹]	LMP/1000 (C=14.46)	
D	150	85.5	1.5.E-03	7.31	
	150	77.4	4.1.E-04	7.55	
	150	69.3	9.3.E-05	7.82	
	200	56.5	1.1.E-03	8.24	
	200	50.3	4.2.E-04	8.44	
	200	44.3	1.3.E-04	8.68	
	200	35.8	2.0.E-05	9.07	
	200	30.7	4.8.E-6(未破断)	9.36	
	250	36.7	2.2.E-03	8.96	
	250	32.2	8.5.E-04	9.17	
	250	27.7	2.8.E-04	9.42	
	250	20.5	3.3.E-05	9.91	
	250	17.4	9.0.E-6(未破断)	10.20	
	300	23.5	4.0.E-03	9.66	
	300	20.1	1.6.E-03	9.89	
	300	17	5.6.E-04	10.15	
	300	11.8	3.9.E-05	10.81	
	300	9.8	1.1.E-5(未破断)	11.13	
	300	14	1.6.E-04	10.46	
	350	14.7	5.8.E-03	10.40	
	350	12.3	2.3.E-03	10.65	
	350	10.2	8.3.E-04	10.93	
	350	5.5	2.3.E-05	11.90	
	350	8.1	1.9.E-04	11.33	
	350	6.8	7.0.E-05	11.60	
	E	150	85.5	1.3.E-03	7.34
		150	77.4	3.9.E-04	7.56
		150	69.3	1.1.E-04	7.79
200		56.5	1.1.E-03	8.24	
200		50.3	4.0.E-04	8.45	
200		44.3	1.1.E-04	8.71	
200		35.8	1.5.E-05	9.12	
200		30.7	- (未破断)	-	
250		36.7	1.9.E-03	8.99	
250		32.2	9.0.E-04	9.16	
250		27.7	2.8.E-04	9.42	
250		20.5	2.8.E-05	9.95	
250		17.4	7.3.E-6(未破断)	10.25	
300		23.5	4.6.E-03	9.63	
300		20.1	1.7.E-03	9.88	
300		17	5.7.E-04	10.15	
300		11.8	3.7.E-05	10.83	
300		9.8	1.3.E-05	11.09	
300		14	1.4.E-04	10.50	
350		14.7	6.6.E-03	10.37	
350		12.3	2.7.E-03	10.61	
350		10.2	8.8.E-04	10.91	
350		8.1	1.8.E-04	11.34	
350		5.5	1.7.E-05	11.98	
350		6.8	6.4.E-05	11.62	

供試材	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	定常クリープ速度 [h ⁻¹]	LMP/1000 (C=14.46)
F	150	85.5	1.6.E-03	7.30
	150	77.4	4.0.E-04	7.56
	150	69.3	1.0.E-04	7.81
	200	56.5	1.1.E-03	8.24
	200	50.3	3.8.E-04	8.46
	200	44.3	1.4.E-04	8.67
	200	35.8	1.9.E-05	9.08
	200	30.7	- (未破断)	-
	250	36.7	2.0.E-03	8.98
	250	32.2	8.1.E-04	9.18
	250	27.7	3.1.E-04	9.40
	250	20.5	3.6.E-05	9.89
	250	17.4	8.6.E-6(未破断)	10.21
	300	23.5	4.5.E-03	9.63
	300	20.1	1.6.E-03	9.89
	300	17	6.3.E-04	10.12
	300	11.8	4.8.E-05	10.76
	300	9.8	1.5.E-05	11.05
	300	14	1.6.E-04	10.46
	350	14.7	7.3.E-03	10.34
	350	12.3	2.8.E-03	10.60
	350	10.2	9.6.E-04	10.89
	350	8.1	2.1.E-04	11.30
	350	6.8	9.2.E-05	11.53
	350	5.5	2.7.E-05	11.86

8. 設計用強度

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た設定方法により、
 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た設定方法により、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た設定方法により、第 8-1 表および第 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た設定方法により、第 7-16 表、第 7-17 表、第 8-1 表および第 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]		-	145.0	120.3	106.2	77.8	57.0	41.7	30.6	22.4	16.4	12.0	8.8
⑥ S_{Rmin} [MPa]		-	133.9	111.1	98.1	71.8	52.6	38.5	28.2	20.7	15.1	11.1	8.1
⑦ $10^{(1/n)}$		-	0.81	0.80	0.80	0.79	0.77	0.76	0.75	0.74	0.72	0.71	0.70
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]		-	97.2	80.6	71.2	52.1	38.2	27.9	20.5	15.0	11.0	8.0	5.9
⑩ $0.8 S_{Rmin}$ [MPa]		-	107.1	88.9	78.5	57.4	42.1	30.8	22.6	16.6	12.1	8.9	6.5
⑪ $1.0 S_C$ [MPa]		-	123.1	101.0	88.5	63.6	45.7	32.8	23.6	16.9	12.1	8.7	6.2
⑫ ①~④および⑨~⑪の最小値 [MPa]		47.0	46.0	46.0	46.0	45.0	38.2	27.9	20.5	15.0	11.0	8.0	5.9
⑬ S値 (⑫を超えない整数) [MPa]		47	46	46	46	45	38	27	20	15	10	8	5

ここで、

S_{Ravg} : 100,000 時間で破断を生じる平均応力 [MPa]

S_{Rmin} : 100,000 時間で破断を生じる最小応力 [MPa]

S_C : 0.01% / 1,000 時間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）、さらに O 材処理を施したのちに 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 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）および直角な方向（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。

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 材および O 材 (初期材)、さらに O 材処理を施したのちに 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 : 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) および直角な方向 (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、せん断弾性係数およ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 およびせん断弾性係数 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 および 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 []
[] 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 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）および直角な方向（T 方向）
- ・ 記録 : 瞬時線膨張係数およ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。

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については、長期間の熱ばく露に伴う過時効が予想され、機械的性質に有意な変化の生じることが想定される。

本書は、Hitz-P24 型のバスケットに適用するアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）（以下「HZ-A3004」という。）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ならび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およびその強度試験の結果について述べる。

2. HZ-A3004 について

HZ-A3004 は非熱処理型の 3000 系合金（Al-Mn 系）合金に分類され、Mg および Mn を 1mass%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る。以下に HZ-A3004 の化学成分、製造プロセス、使用環境、強化機構を示す。

2.1 化学成分

第 1 表に HZ-A3004 の化学成分を示す。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。）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規定範囲を狭めた材料である。

- (1) 不純物元素：不純物元素による固溶強化、析出強化の影響を考慮して、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に期待し、JIS H 4000 A3004 合金の成分規定範囲内で、成分規定範囲の下限值を高く設定した。
- (3) Mg：Mg による固溶強化に期待し、JIS H 4000 A3004 合金の成分規定範囲内で、成分規定範囲の下限值を高く設定した。

2.2 製造プロセス

第 1 図に HZ-A3004 の製造プロセスを示す。バスケットに適用される材料は JIS H 4000 に基づき製造され、質別は H112 である。

2.3 強化機構

HZ-A3004 における代表的な 4 つの強化機構を以下に示す。

- (1) 転位強化 (加工硬化) : 加工により転位密度が高くなり、転位の移動を妨げる。
- (2) 結晶粒微細化 : 結晶粒が微細化されることで、転位の移動を妨げる。
- (3) 分散強化 : 母相中に微細に析出した分散相や、分散相の析出により周囲に生じた弾性的な結晶格子のひずみにより、転位の移動を妨げる。

第 2 図に Al-Mn 2 元系平衡状態図を示す¹⁾。HZ-A3004 においては、主に Mn 系分散相 (Al_6Mn) が分散強化を担う。Mn は 300°C 以下において Al 中にほとんど固溶せず、第二相 (Al_6Mn など) として安定的に存在する。

- (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。第 3 図に Al-Mg 2 元系平衡状態図を示す¹⁾。HZ-A3004 においては、主に Mg が固溶強化を担う。共晶温度 (450°C) 以下において、Al 中の Mg 固溶限度は温度低下とともに減少する。

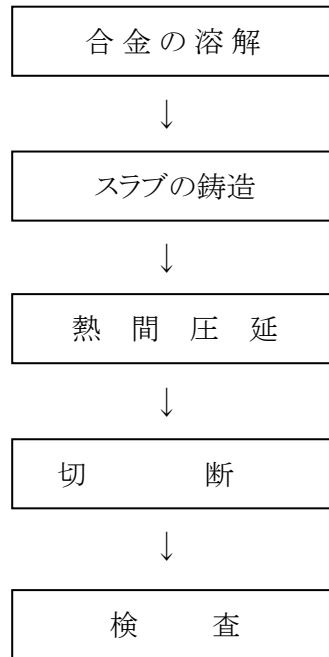
2.4 使用環境

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°C から約 100°C 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。

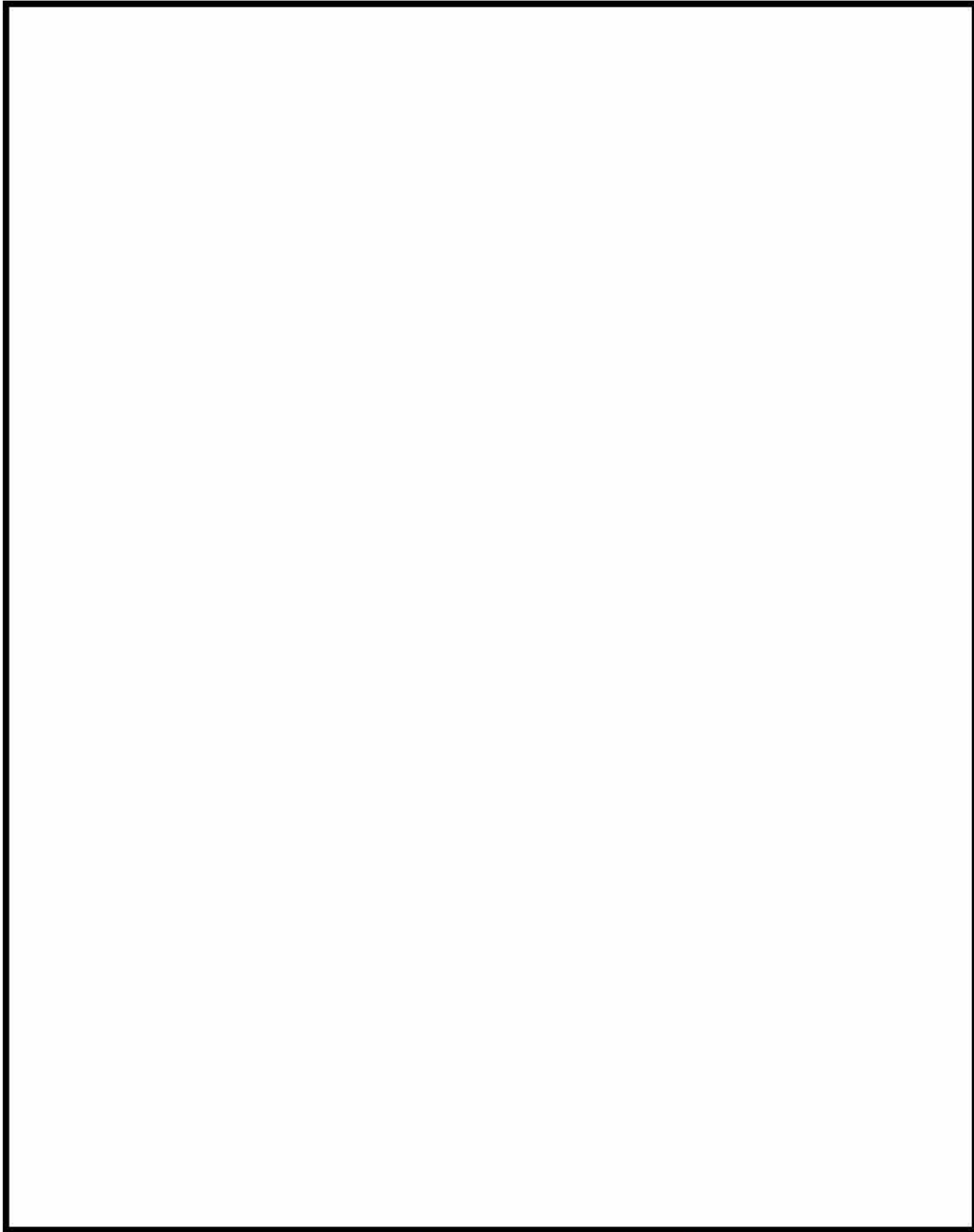
HZ-A3004 は、設計貯蔵期間中の熱ばく露により材質変化 (金属組織変化) が生じ、強度が低下すると考えられる。次項は、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の材料強度を模擬した供試材の作製方法について検討した。

第 1 表 HZ-A3004 の化学成分規定値

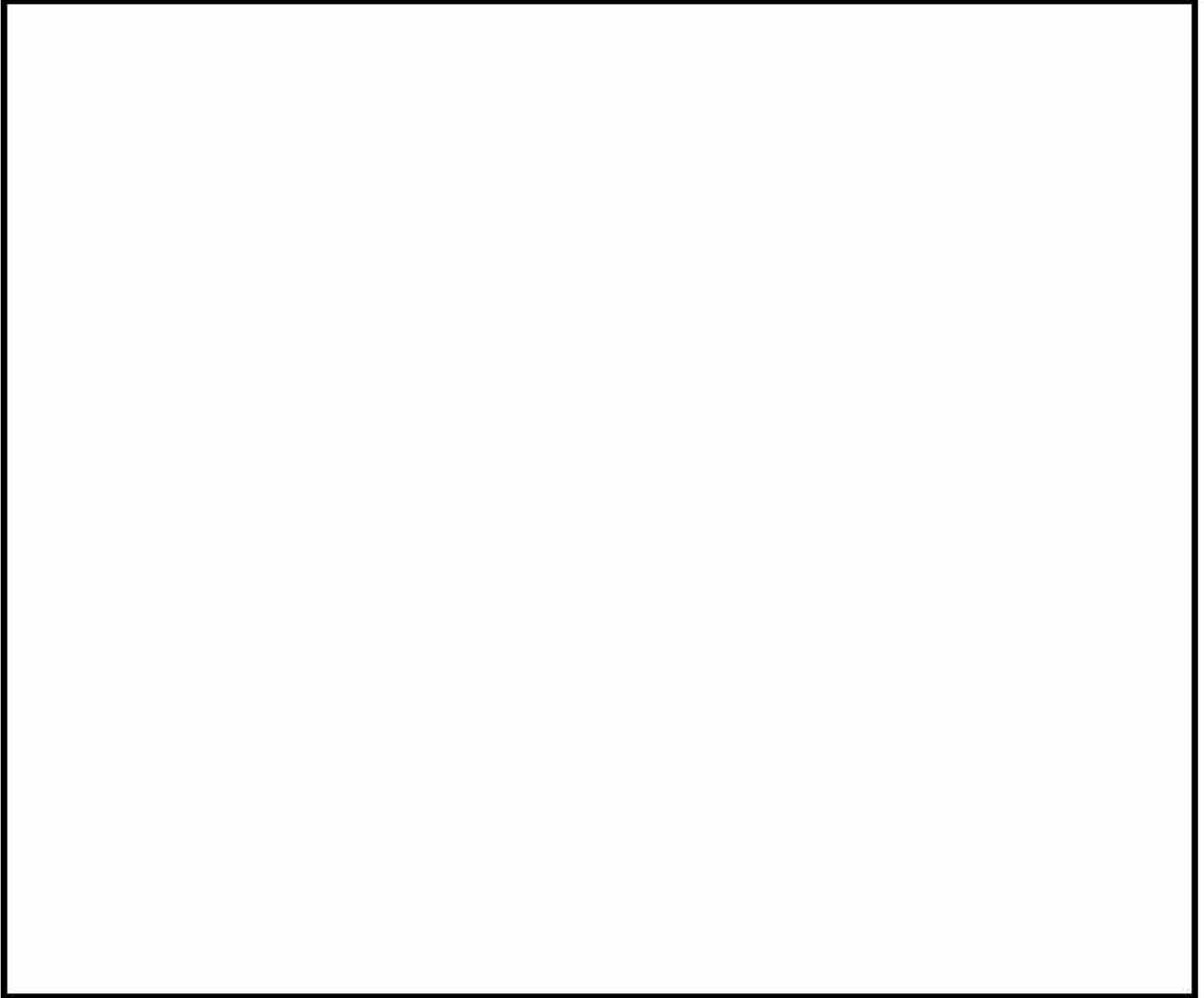
材料名称	化学成分 (mass%)					
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
規定値	0.15	0.7	0.05	1.1	1.0	0.05
HZ-A3004	以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下
(参考)	0.30	0.7	0.25	1.0	0.8	0.25
JIS H 4000 A3004	以下	以下	以下	~1.5	~1.3	以下



第 1 図 HZ-A3004 の製造プロセス



第 2 図 Al-Mn 2 元系平衡状態図¹⁾



第3図 Al-Mg 2 元系平衡状態図¹⁾

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) 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) 加工によって乱された組織にひずみのない新しい結晶が生成、成長（再結晶）し、結晶粒が粗大化する。
- (3) 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。
- (4) 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)～(3)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 Mg 固容量が増加する。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 の強度を保守的に評価することができない。

そこで、

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²⁾の値を参考に 14.0 とした。

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。

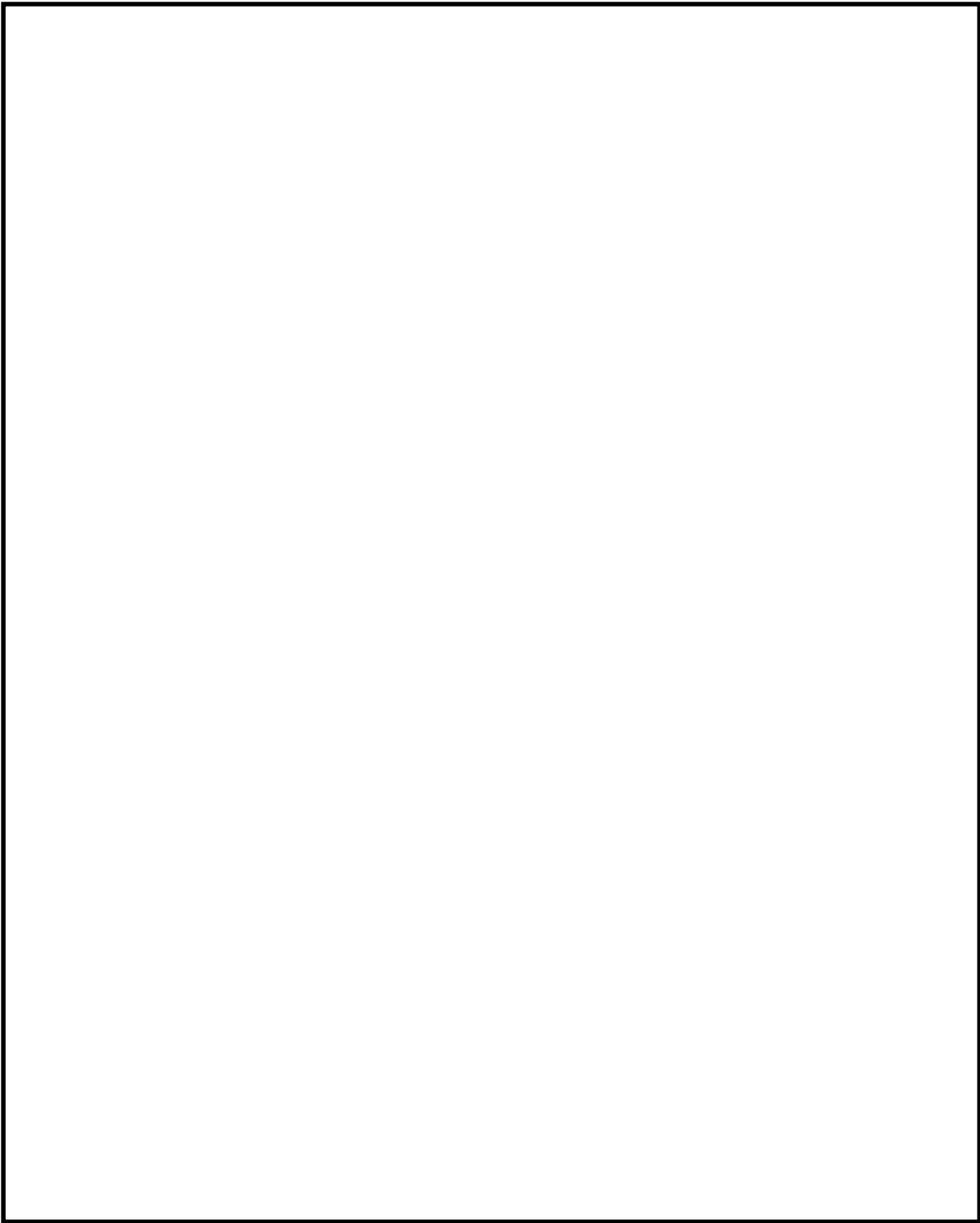
(2) 検討結果

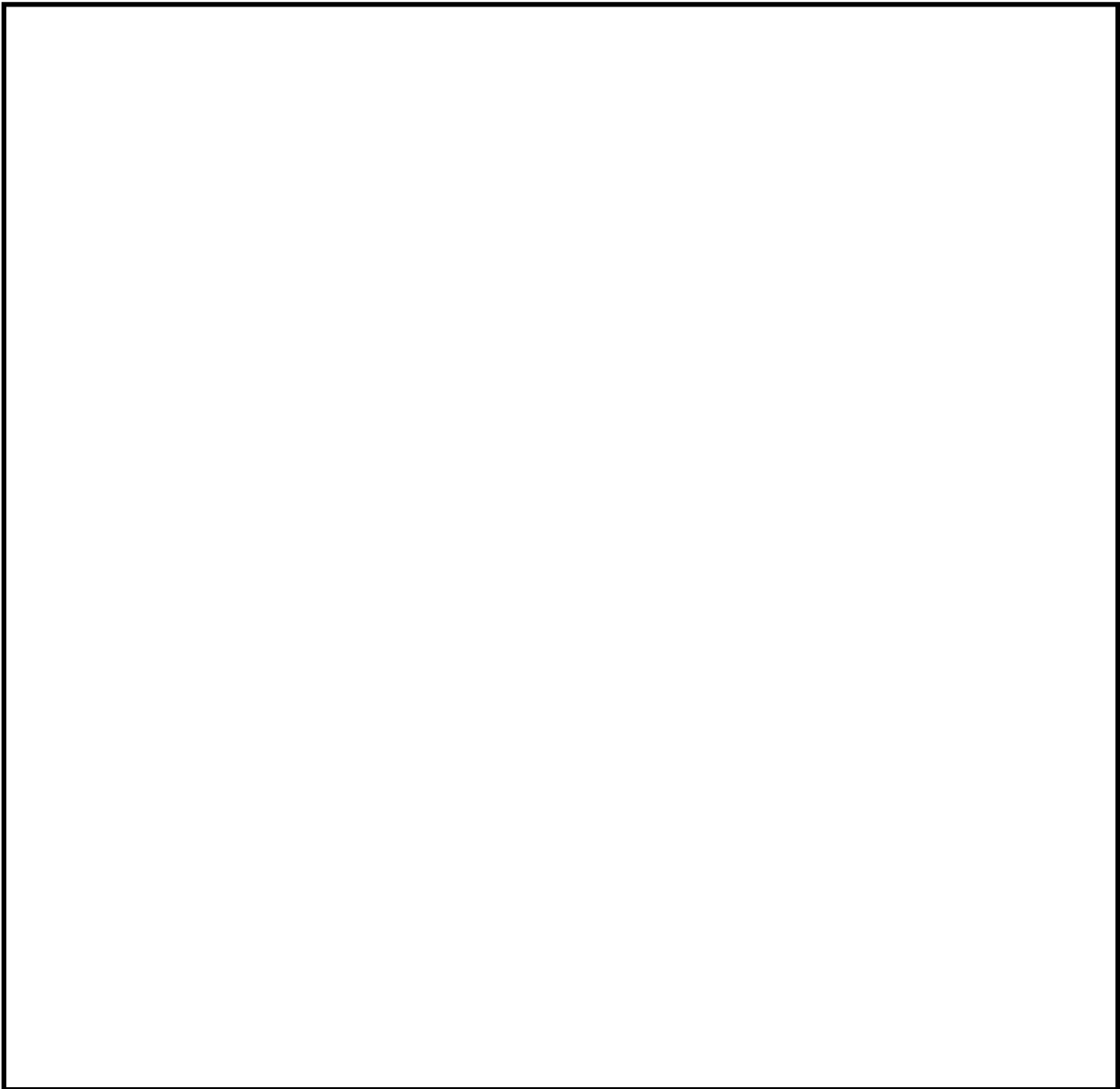
第 2 表に設計貯蔵期間中の熱履歴に対する各種の過時効熱処理温度における等価保持時間の検討結果を示す。



第 2 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	60 年	53,857 時間	6,857 時間	1,054 時間	191 時間
(参考)200°C→100°C×60 年	7 年	7,308 時間	1,024 時間	172 時間	34 時間



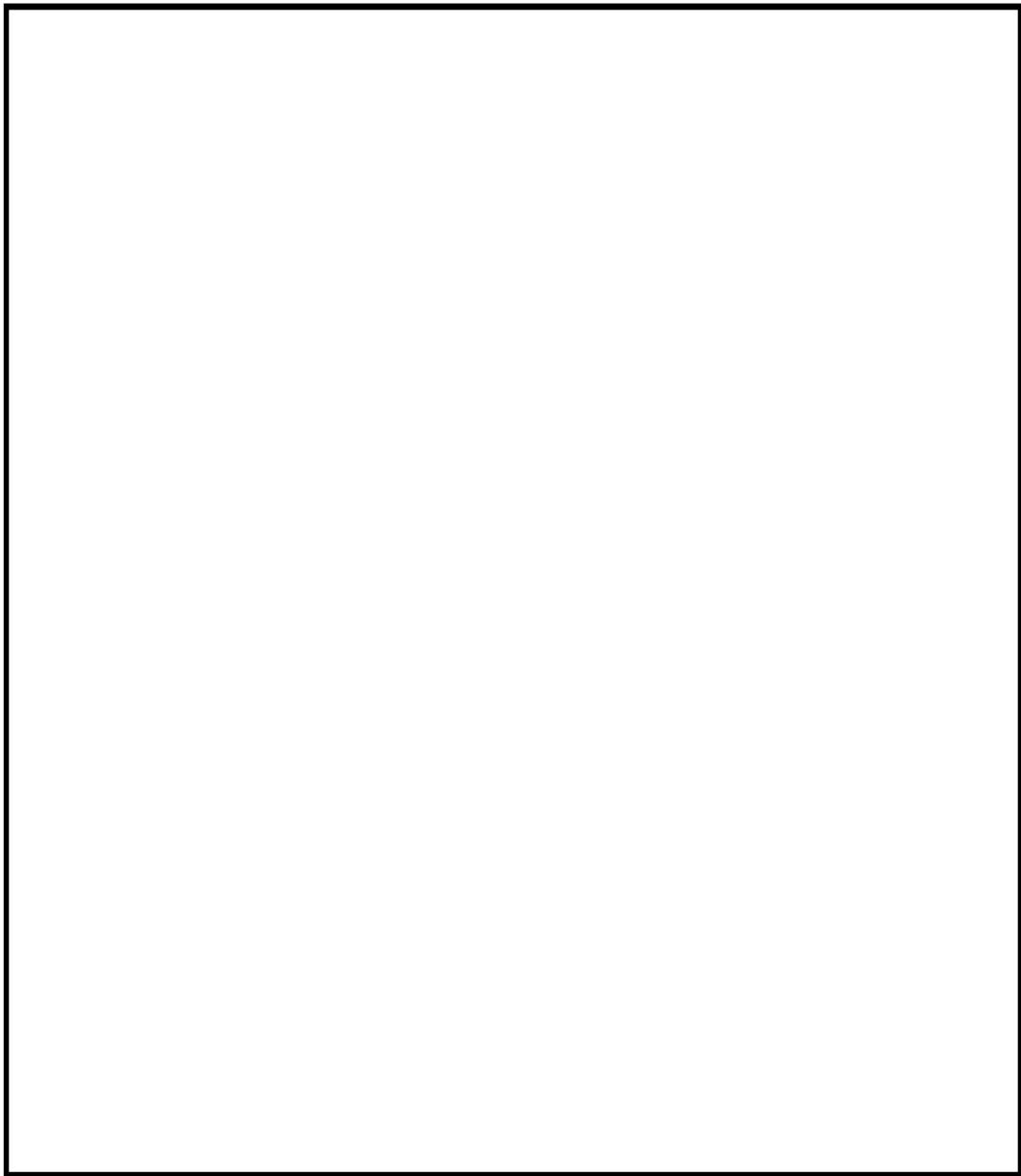


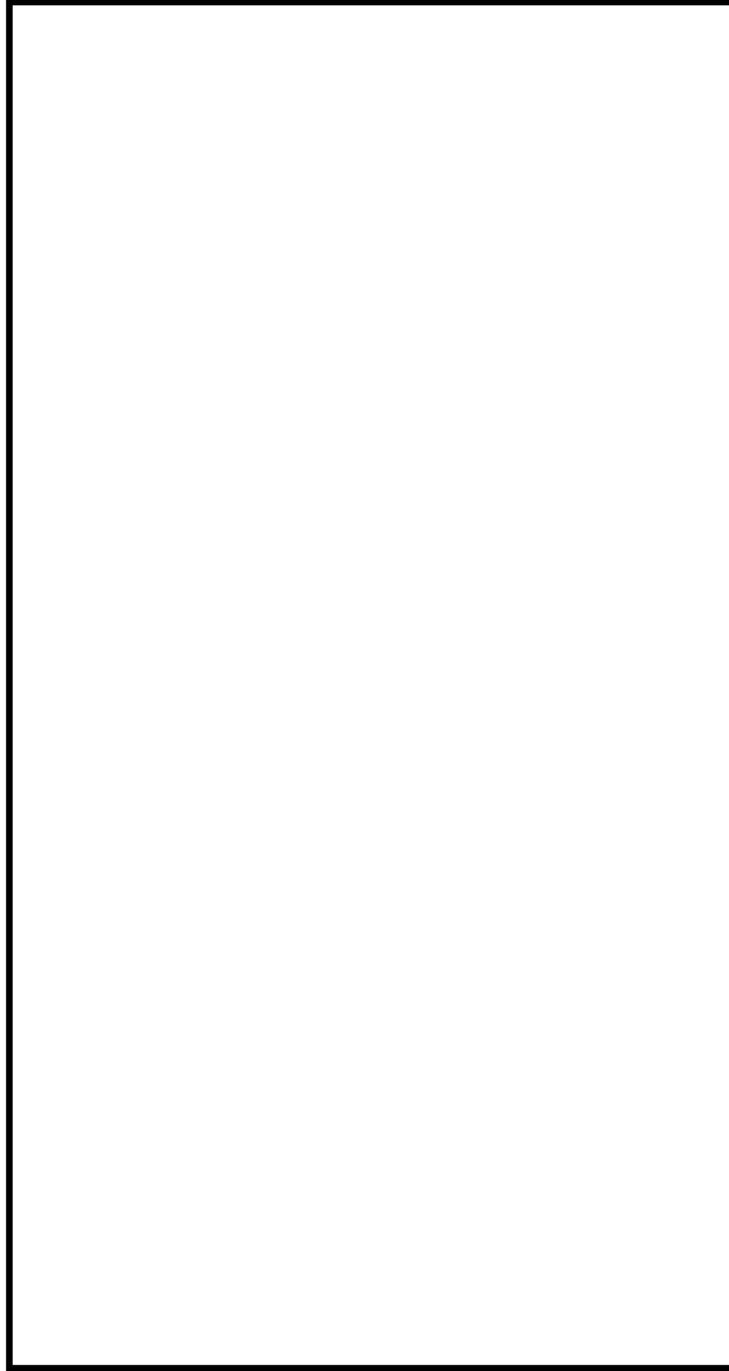
第3表 文献で試験に供された供試材の化学成分⁷⁾

	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

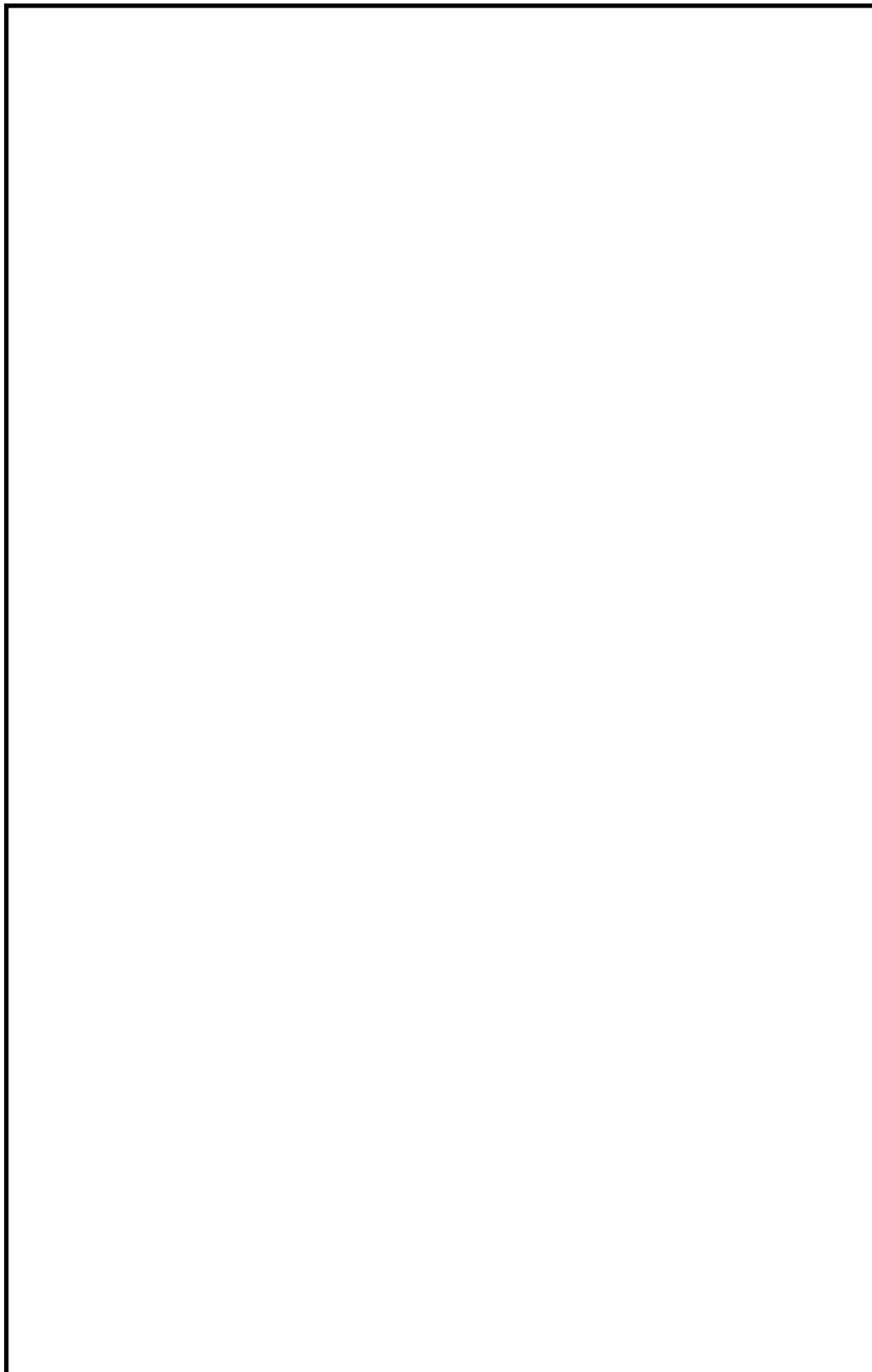
(b) 妥当性の確認結果

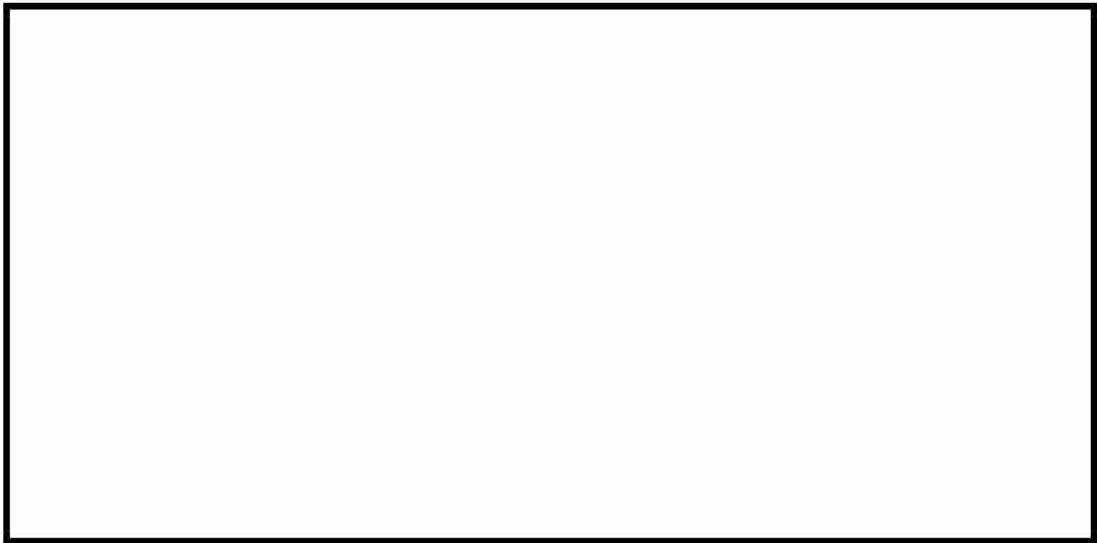






(2) HZ-A3004 による妥当性確認



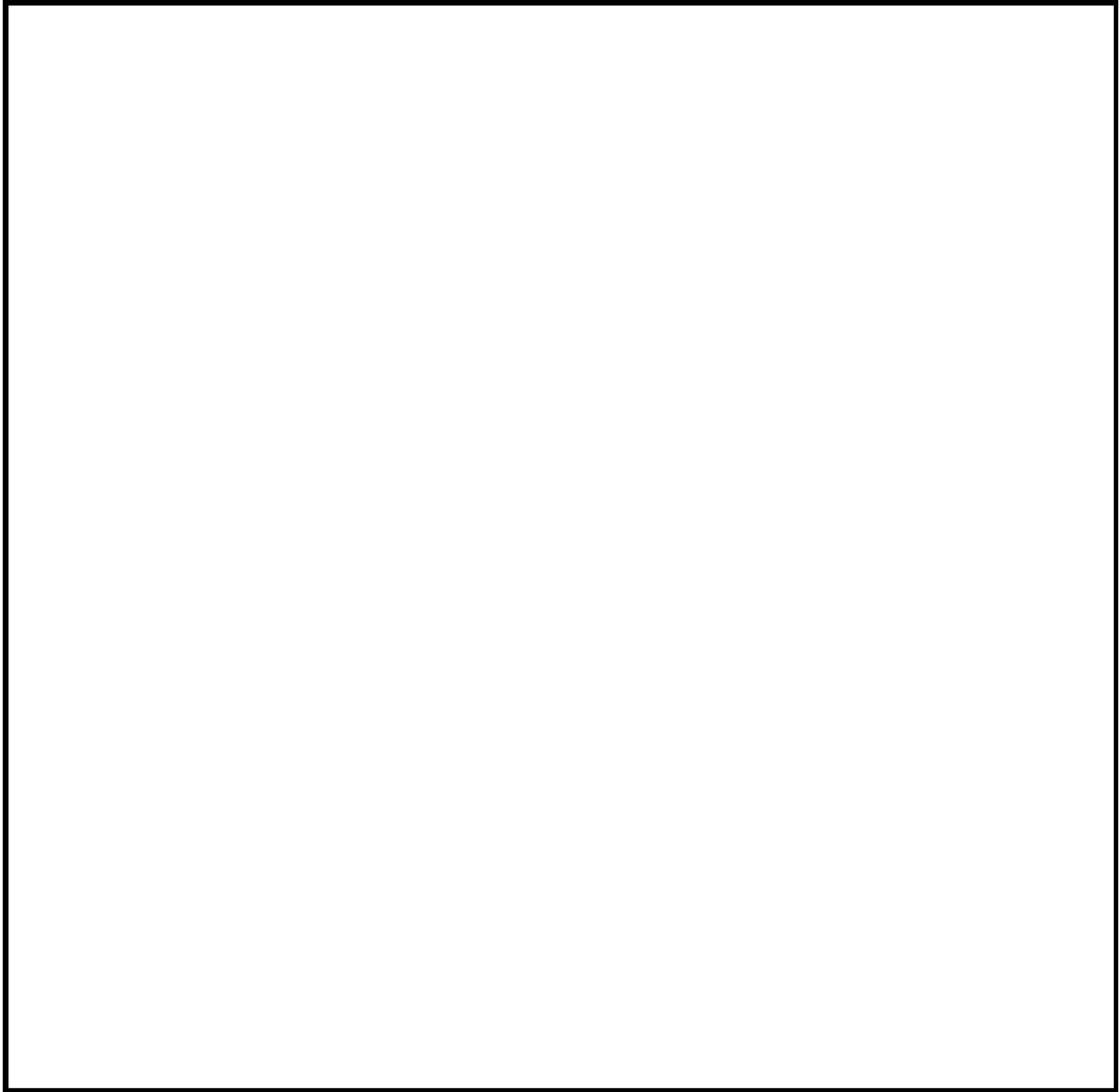


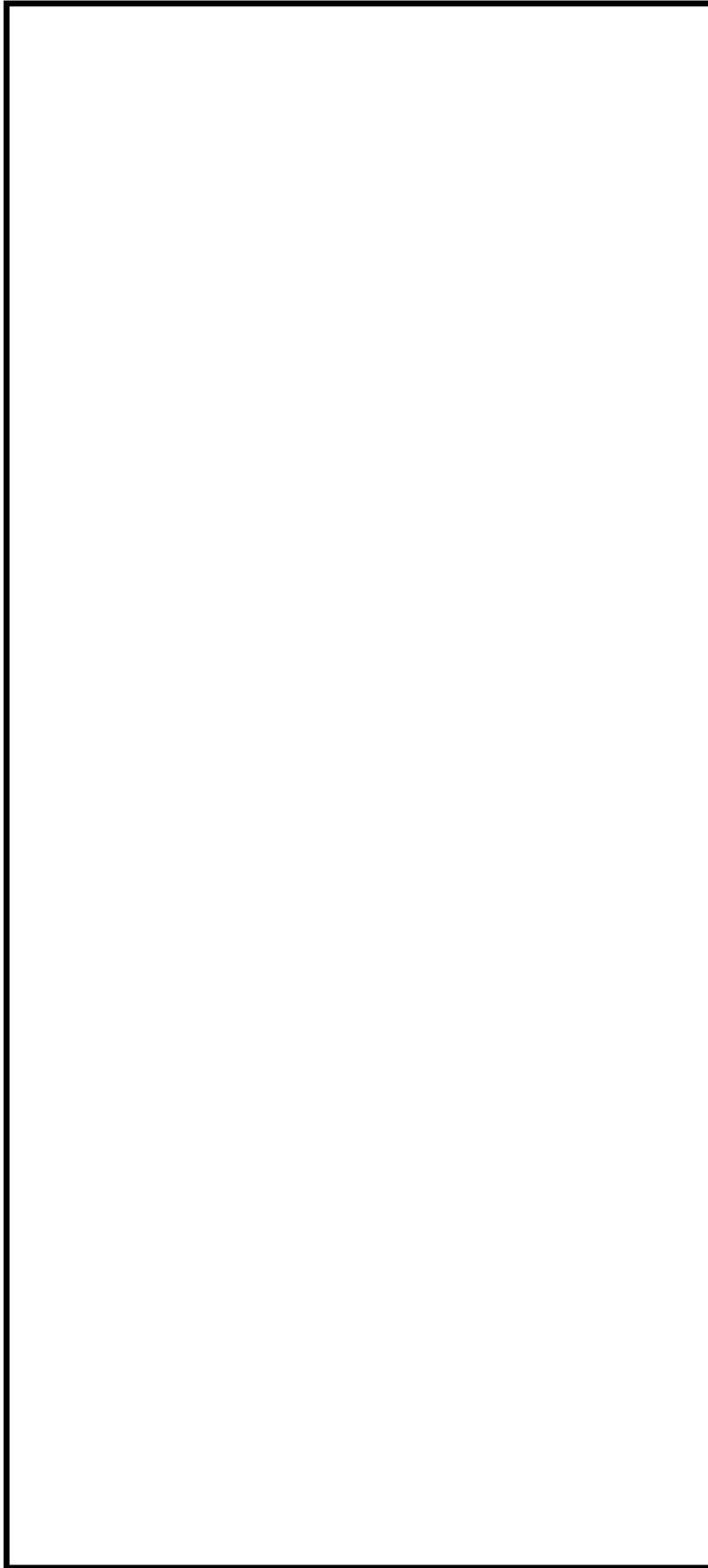
第 5 表 供試材の化学成分

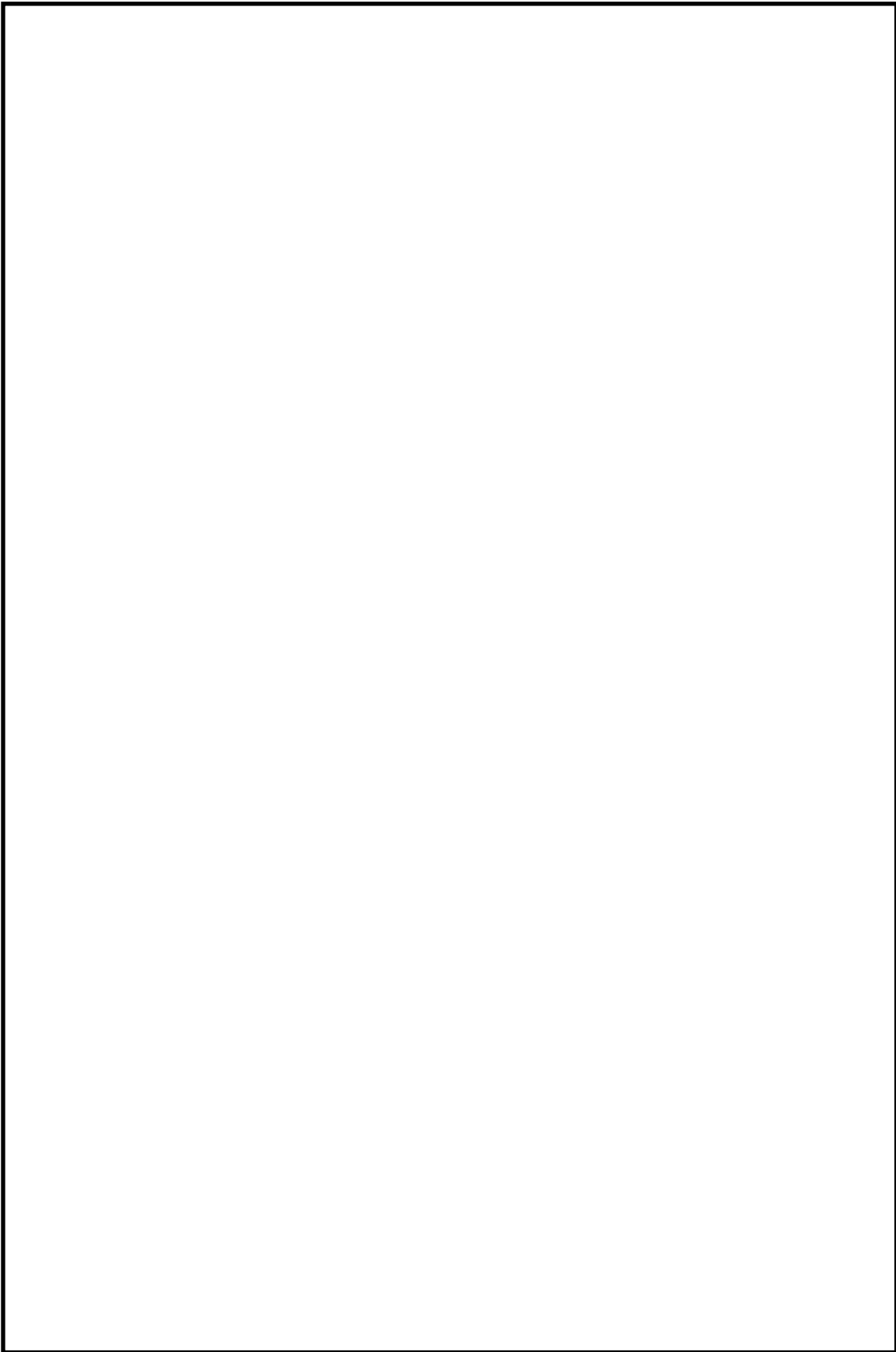
	化学成分(mass%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
(参考) JIS H4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下	残部

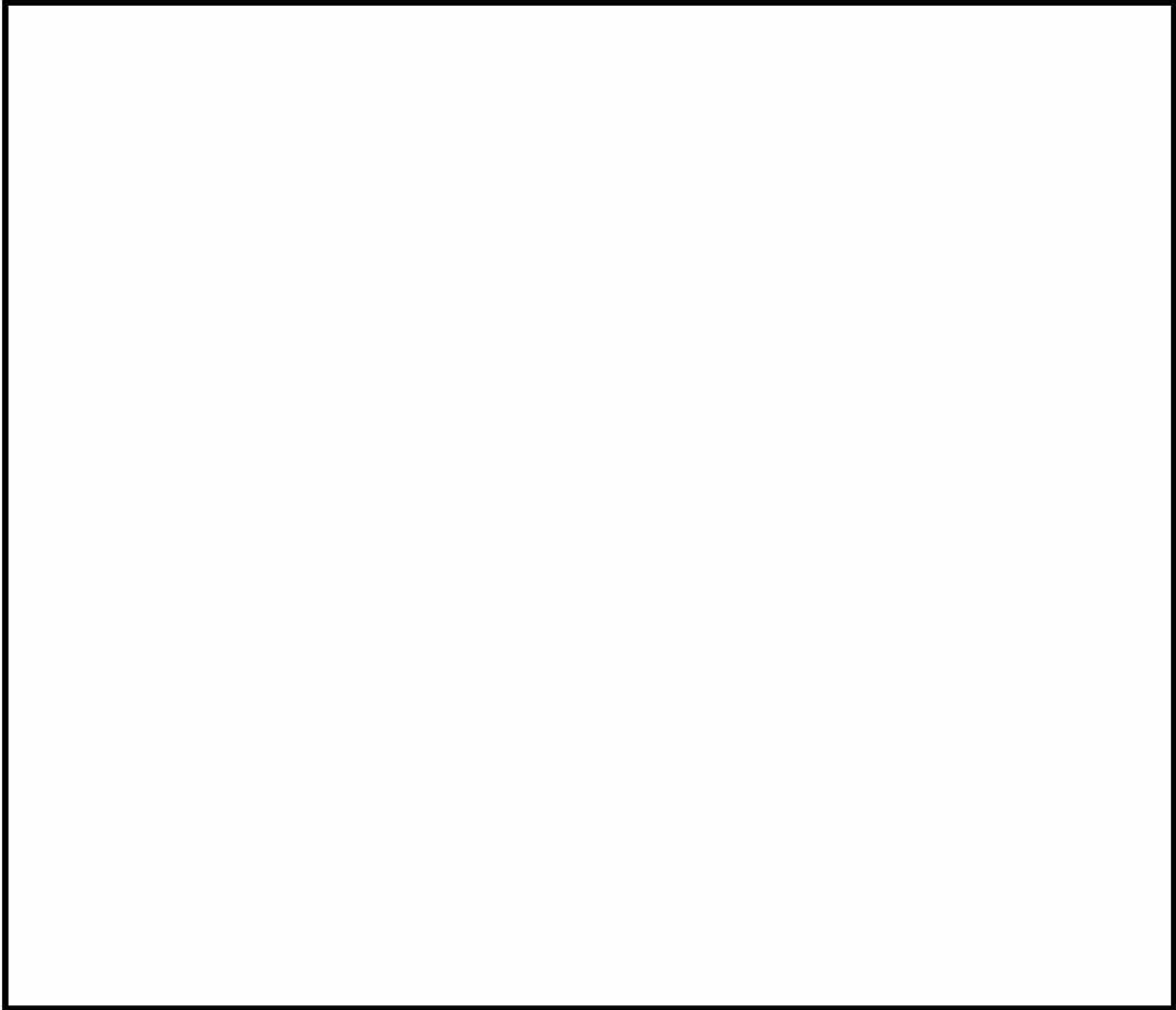
第 6 表 Al 合金の電気伝導率におよぼす添加元素の影響¹⁾

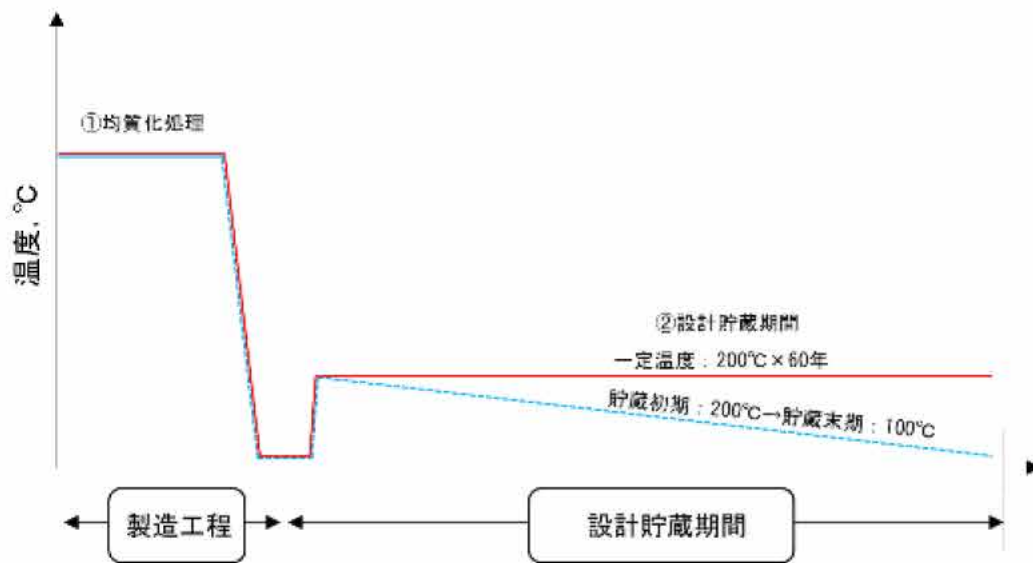




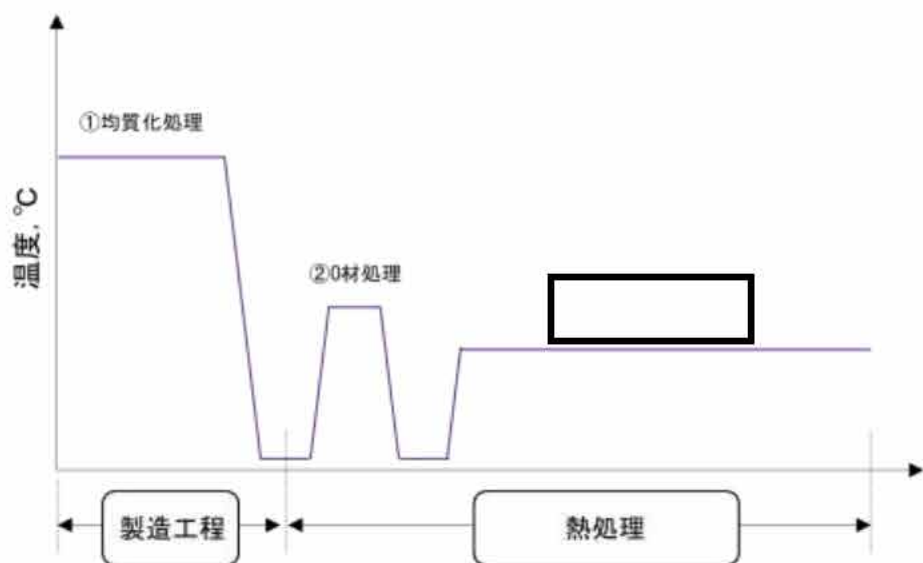






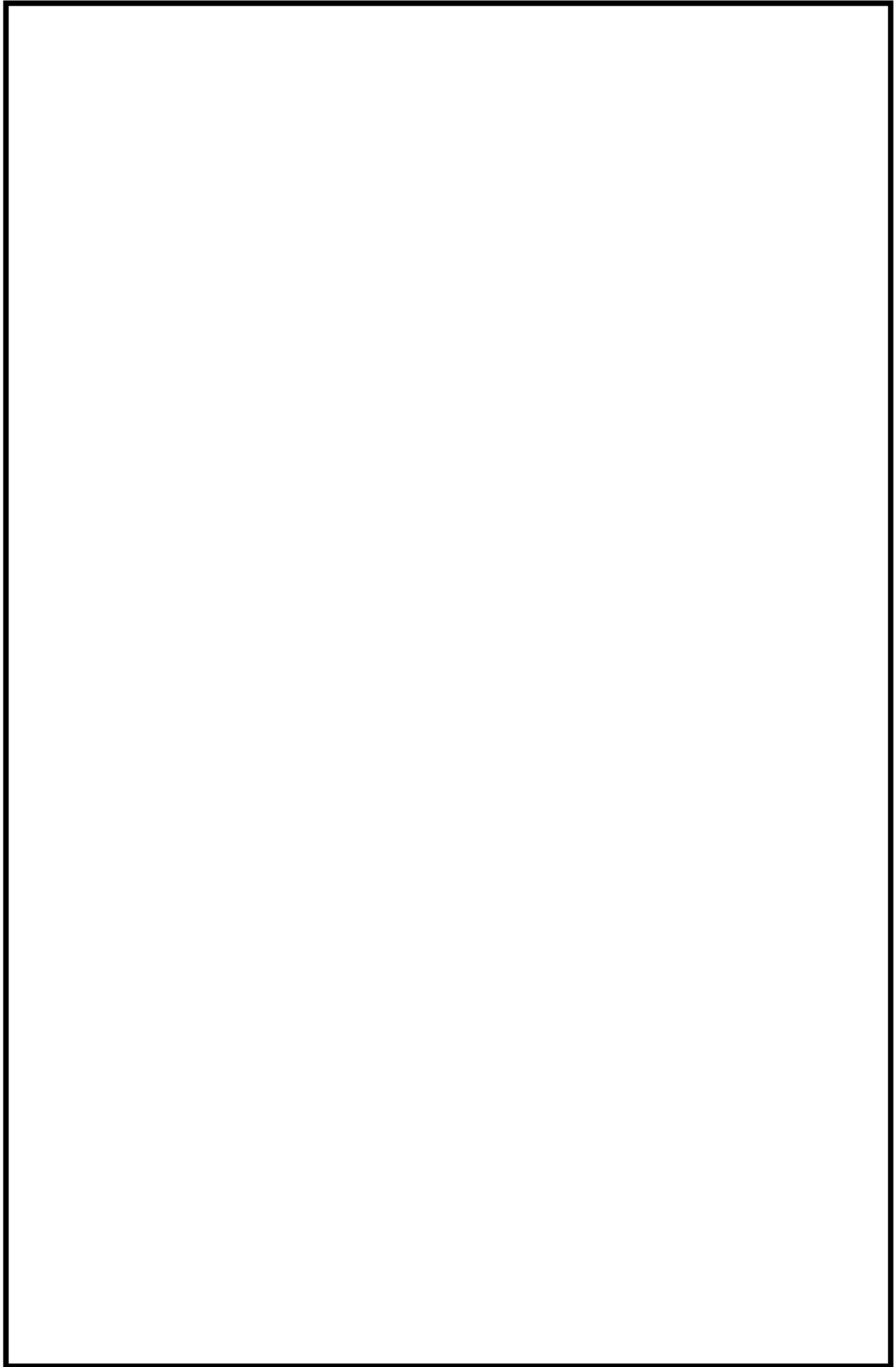


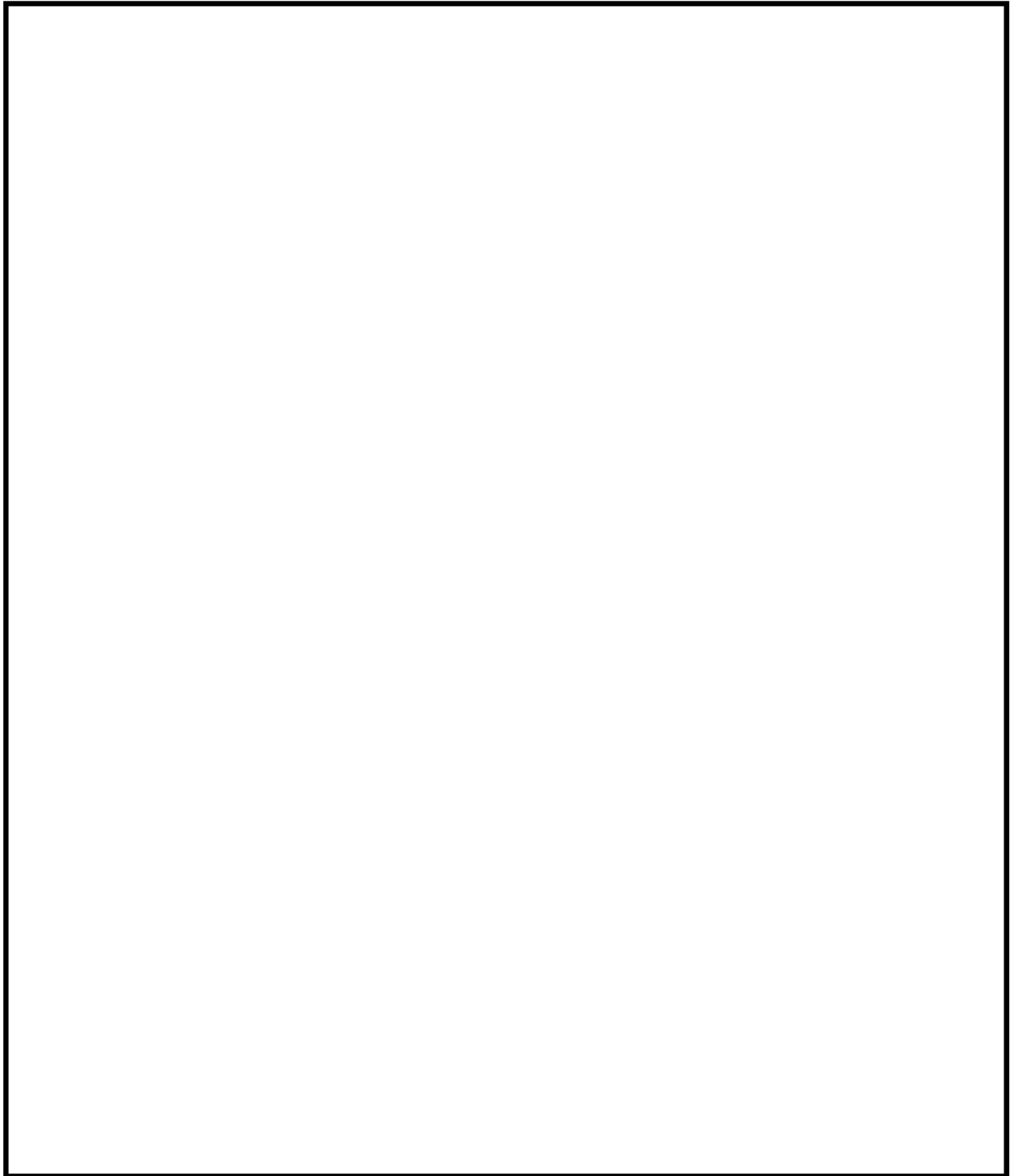
(a) 設計貯蔵期間



(b) 熱処理





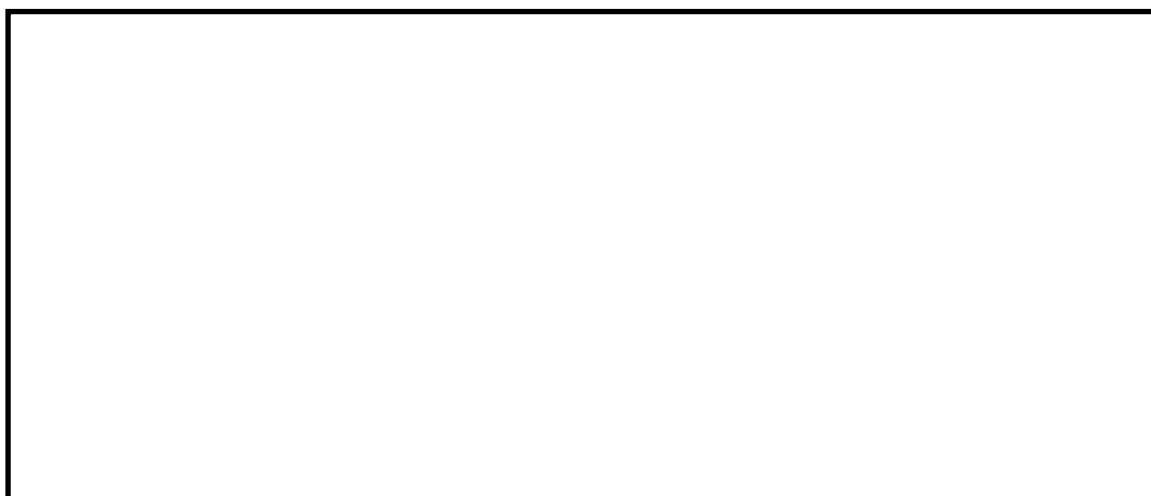


4. 材料特性評価試験

4.1 供試材

第 11 表に作製した供試材を示す。3.項の検討結果を踏まえ、機械試験用供試材の [] [] として、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 [] 付近にある。

第 15 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 HZ-A3004-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.で決定した過時効熱処理 [] を施し、材料特性評価試験に供した。



(2) 確認結果

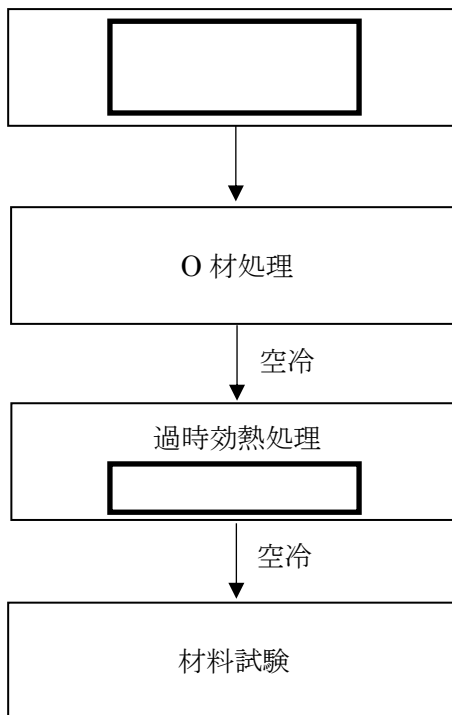


第 17 図および第 18 図に [] 示す。HZ-A3004 および機械試験用供試材に生成する析出物の種類に違いは見られず、保持後における析出物の量は概ね一致しており、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の Mn 系分散相による分散強化も模擬できていると考えられる。

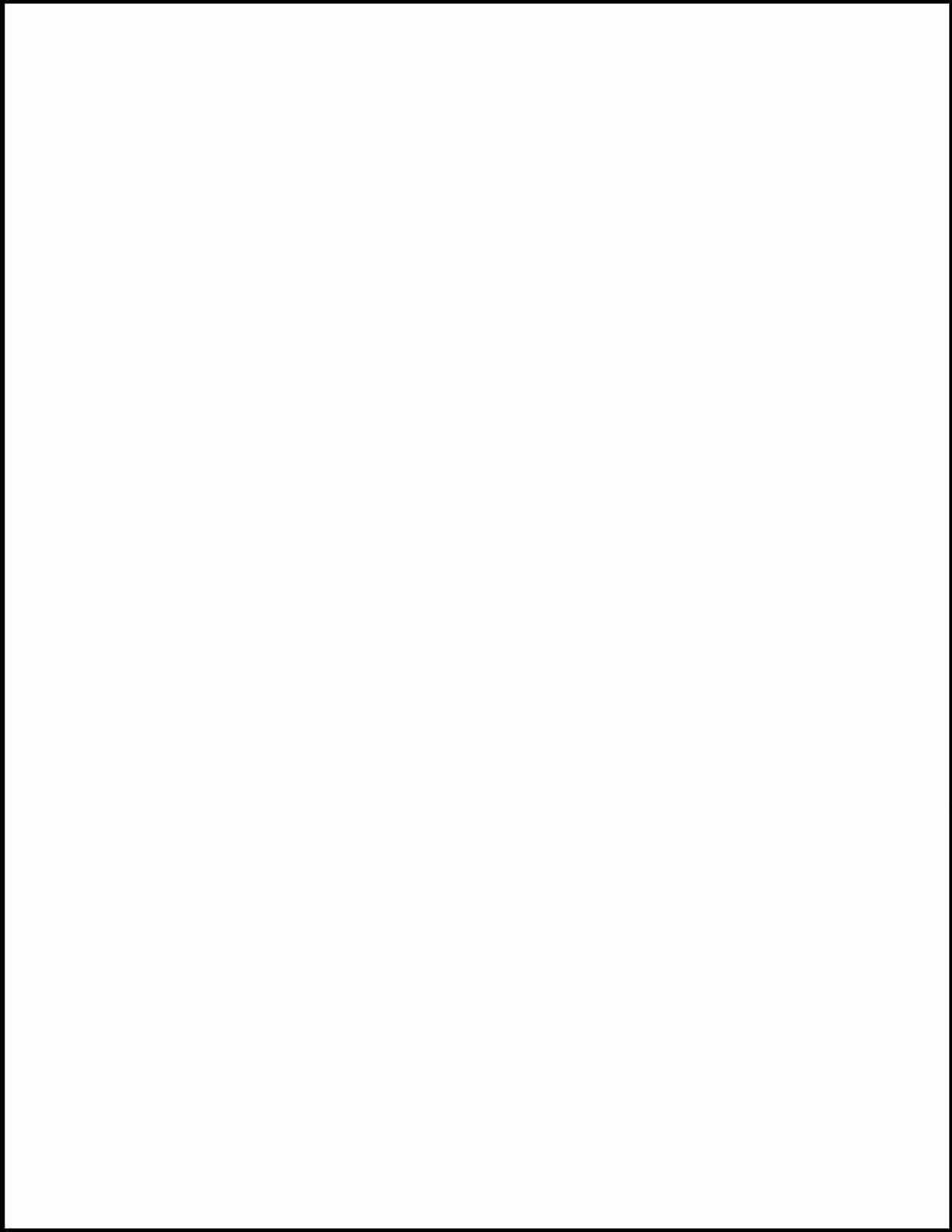
以上から、作製した機械試験用供試材に過時効熱処理を考慮した熱処理を施すことで、設計貯蔵期間を経た HZ-A3004 の強度を保守的に模擬できたと考えられる。

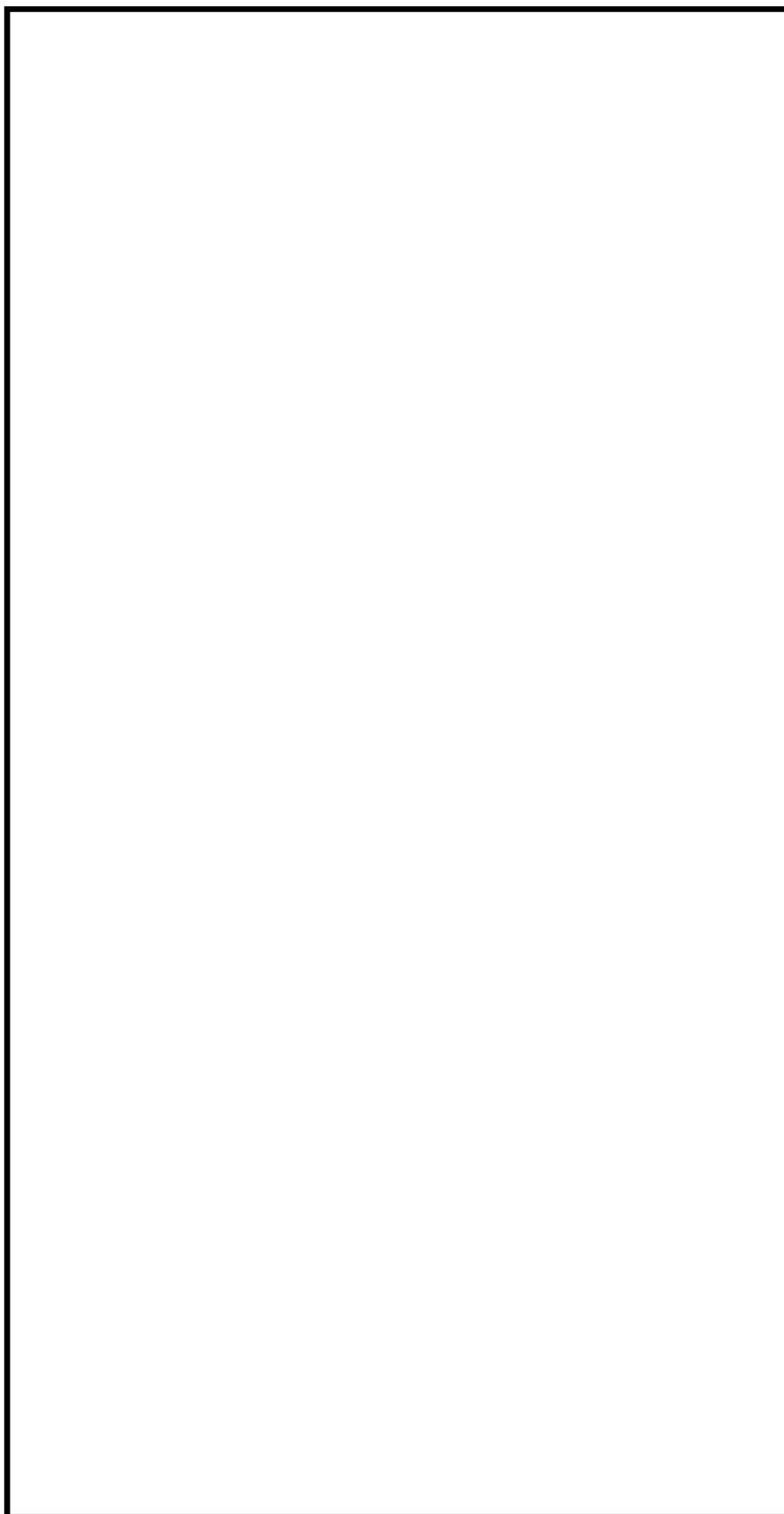
第 11 表 作製した供試材

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



第 15 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

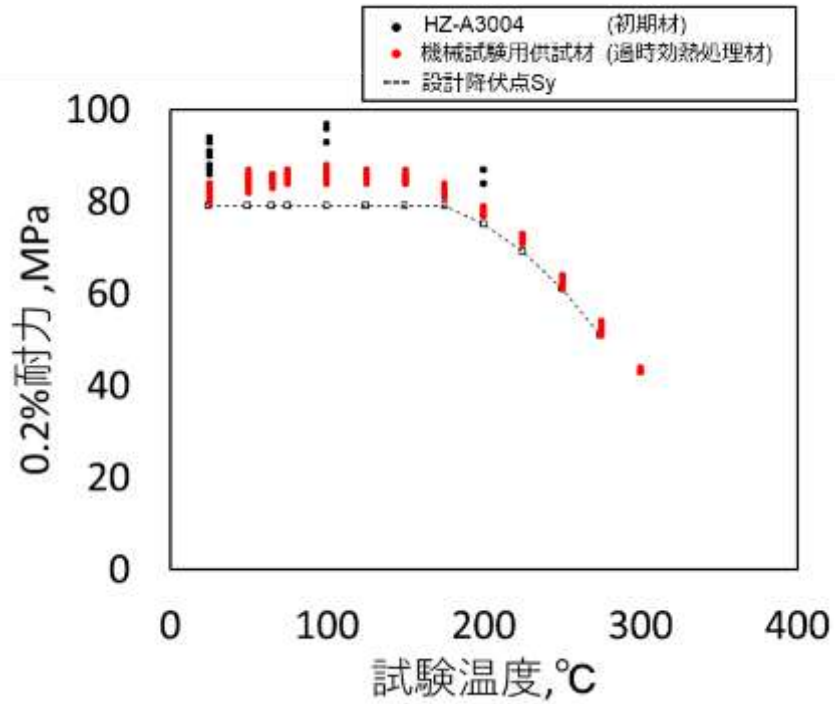
HZ-A3004（初期材）および機械試験用供試材（過時効熱処理材）を用いて引張特性を確認した。

(1) 試験方法

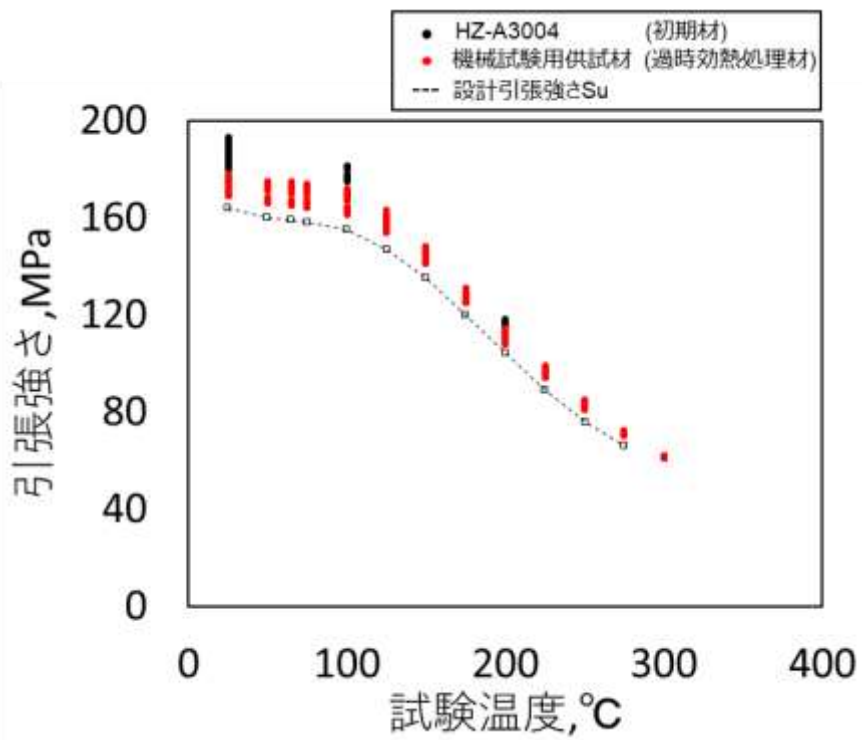
- (a)供試材 : 第 8 表に示す 6 標本（供試材 A～F）を試験に供した。試験片は JIS H 4000 に従って、試験片の軸が板の表面とその中心との中央部にあるように採取した。
- (b)時効条件 : HZ-A3004（供試材符号 A～C）は初期材（H112 材）を、機械試験用供試材（供試材符号 D～F）は O 材処理したのち、 過時効熱処理を施した試験片を試験に供した。
- (c)試験片 : JIS G 0567 による直径 10mm の棒状試験片を用いた。
- (d)試験方法 : JIS Z 2241 により実施した。
- (e)試験温度 : 常温、50℃、65℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃
- (f)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）
- (g)記録 : 引張強さ、0.2%耐力および伸びを測定した。

(2) 試験結果

第 19 図および第 20 図に HZ-A3004（初期材）およ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。第 14 表および第 15 表に引張試験結果をまとめて示す。第 16 表から第 19 表に試験データを示す。



第 19 図 HZ-A3004（初期材）およ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



第 20 図 HZ-A3004（初期材）およ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

第 14 表 HZ-A3004（初期材）およ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)	90.8	95.1	86.0
②機械試験用供試材 (過時効熱処理材)	82.2	86.0	78.1
①と②の差分	8.6	9.1	7.9

第 15 表 HZ-A3004（初期材）およ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)	186.3	177.9	115.8
②機械試験用供試材 (過時効熱処理材)	172.9	166.1	111.0
①と②の差分	13.4	11.8	4.8

第 16 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	

第 17 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	

第 18 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	

第 19 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

。

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過時効熱処理条件を検討し、熱処理条件を以下の通り決定した。

熱処理条件：O 材処理→過時効熱処理

- (2) 機械試験用供試材を下記の通り決定した。

- (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

- 1) 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,(1991),p160,218,256
- 2) 独立行政法人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

3)

4)

5)

6)

- 7) 中山ら,軽金属,第 60 巻第 2 号,(1996),p135-140