

Doc No. 18-180-I-174 Rev. 4

2021年5月25日

トランスニュークリア株式会社

株式会社神戸製鋼所

バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-A3J04-0)  
に関する強化機構の維持に係る説明資料

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。



## 1. はじめに

本図書では、ほう素添加アルミニウム合金（1B-A3J04-0）（以下、「本アルミ合金」という。）に使用した材料の強化機構が供用期間（最大 60 年）維持されることについて説明する。また、本図書の改訂 2 版にて、2021 年 3 月 5 日付け説明資料「TK-26 型キャスク型式証明 ほう素添加アルミニウム合金の説明方針について（Doc No. 18-180-I-178 Rev.1）」の 6 項、7 項及び 8 項に対応した内容を追記した。

## 2. 供用期間中の強化機構の維持

本アルミ合金は、供用期間（最大 60 年）中に強度低下を生じない強化機構として Mg の固溶強化と Mn 系化合物（ $Al_6(Mn, Fe)$  及び  $Al_{12}(Mn, Fe)_3Si$  など）の粒子分散強化を使用している。

### 2.1 Mg の固溶強化の維持について（参照：補足説明資料 1-7 別紙 3）

本アルミ合金に固溶している Mg の固溶強化については、添加量を 1.0mass% に設定すれば供用期間中（最大 60 年間）の低下は生じないと判断した<sup>1),2)</sup>。この Mg 添加量の妥当性の評価に係る概要を以下に示す。

Mg は本アルミ合金の供用期間中の温度低下により、その固溶限が低下し、過飽和状態を生じる可能性がある。その場合、過飽和分の固溶 Mg 量は、Mg 系化合物（ $Al_3Mg_2$ ）を生じ、結果として固溶強化の効果が低下することが懸念される。しかしながら、本アルミ合金では Mg 添加量を高々 1mass% 程度に制限しているため過飽和状態（Mg の添加量が固溶限を上回った状態）となる温度は 100℃ 付近となることから、Mg 系化合物の析出の駆動力となる過飽和度は非常に小さく、固溶 Mg のアルミニウム母相における拡散係数も非常に小さい。このため、現実的な試験時間で 60 年後においても固溶強化を維持できる Mg 添加量を評価することは極めて困難である。そこで本申請では、まず Mg 系化合物の析出挙動に関する数理モデルを構築した。次に、約 1~5mass% の Mg 添加量を有する試料を用いて 10,000h までの長時間時効処理試験を実施し、この試験結果に基づき当該モデルの妥当性を確認した。次にこのモデルを用いて、Mg 系化合物の析出開始条件が過飽和度と拡散距離により定まることを確認した。この評価を行うダイアグラムを、本申請では「S-L 平面」と称している。図 1 に示す S-L 平面より、Mg の添加量が 1.0mass% であれば 60 年基準線（実機条件を想定し 60 年間一定温度で保持した条件）が、試験により得られた Mg の析出開始線よりも原点側の領域にあり、Mg 系化合物が析出しないことが分かる。本評価から、供用期間中に想定されるいかなる熱履歴においても、貯蔵初期の固溶強化が維持できると判断される。

なお、本アルミ合金には Mg 添加量 1.0mass% を確保するため 1.0~1.4mass% の Mg が含まれているが、保守的な評価とするために許容応力は、Mg 添加量を 1.0mass% とした機械試験用供試材<sup>\*1</sup> に対して設定されている<sup>3)</sup>。

※1) 許容応力を保守的に評価するため、添加元素量をほぼ下限値に調整した供試材。

## 2.2 Mn 系化合物の粒子分散強化の維持について (参照：補足説明資料 1-7 別紙 2)

Mn 系化合物の粒子分散強化については、アルミニウム中の Mn の不純物拡散係数に基づき評価した拡散距離を用いて、供用期間 (最大 60 年) の熱履歴に対応する拡散距離を保守的に評価した加速試験条件として  $300^{\circ}\text{C} \times 1,000\text{h}$  を設定し、本アルミ合金に有意な強度変化がないことを確認した<sup>4)</sup>。以下に  $300^{\circ}\text{C} \times 1,000\text{h}$  を設定した理由を示す。

Mn 系化合物の析出物は、熱暴露による粒成長に伴い数密度が低下し、粒子分散強化の効果が低下する可能性がある。このような現象は、Mn の拡散律速によって生じると考えられる。そこで、供用期間である 60 年間の熱履歴による拡散距離を Mn の拡散係数により評価し、これを包絡する加速試験条件を定めることとした。供用期間中の熱履歴は、保守的に TK-26 型におけるバスケットの最高使用温度 ( $225^{\circ}\text{C}$ ) が 60 年間継続するものとした。Mn の拡散度合いは、(1)式で表される拡散距離  $L$  を用いて評価した。

$$L = \sqrt{2Dt} \cdots (1)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdots (2)$$

ここで、 $D$ : 拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $t$ : 時間 ( $\text{s}$ )、 $D_0$ : 振動数因子  $380 (\text{cm}^2/\text{s})$ <sup>5)</sup>、 $Q$ : 活性化エネルギー  $221 (\text{kJ}/\text{mol})$ <sup>5)</sup>、 $R$ : 気体定数  $8.314 (\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol}))$ 、 $T$ : 温度 ( $\text{K}$ ) である。なお、この拡散距離は、異なる熱履歴の条件を相対比較するための指標として用いるものであり、その絶対値を議論するものではない。表 1 に、拡散距離の計算結果を示す。この表には、供用期間中の熱履歴を包絡するように設定した加速試験条件 ( $300^{\circ}\text{C} \times 1,000\text{h}$ ) における Mn の拡散距離も合わせて示す。ここで、温度条件となっている  $300^{\circ}\text{C}$  は、本アルミ合金の最終熱処理温度   ( $^{\circ}\text{C}$ ) とバスケットの最高使用温度 ( $225^{\circ}\text{C}$ ) の中間値として設定した。なお、Al-Mn 系状態図によれば、 $400^{\circ}\text{C}$  程度以下の温度領域では、アルミニウム母相における Mn の固溶限はゼロに漸近してくる<sup>6)</sup>。つまり  $400^{\circ}\text{C}$  程度以下であれば、供用期間中と同様に Mn の再固溶を極力抑制できているため、任意の温度で  $225^{\circ}\text{C} \times 60$  年間に対応する時間を保持することにより、実機における熱履歴を温度加速により模擬できる。表 1 に示す通り、 $300^{\circ}\text{C} \times 1,000\text{h}$  の Mn の拡散距離は、 $225^{\circ}\text{C} \times 60$  年間 ( $525,960\text{h}$ ) のそれよりも十分大きく設定されており、Mn 系化合物による粒子分散強化を維持する観点からは保守的な条件となる。

今回加速試験 ( $300^{\circ}\text{C} \times 1,000\text{h}$ ) に供した本アルミ合金の供試材の化学成分分析値を表 2 に示す。加速試験前後の本アルミ合金について、TEM 観察を実施した。ここでは、供試材 No. 20 で代表させた。この結果を図 2 に示す。アルミニウム母相中に分散した Mn 系化合物のサイズ、及び数密度に有意な変化は認められない。次に、この供試材の加速試験前後における室温引張試験を表 3 に示す条件で実施した。この結果得られた強度特性

(0.2%耐力及び引張強さ)を表4、図3及び図4に示す。図3では、加速試験による強度変化を比較するため、各供試材について初期材の強度(貯蔵初期に相当)で規格化した。表4では、各試験条件の標本平均及び標準偏差から、 $t$ 分布を用いて母平均の95%信頼区間を求めた<sup>※2</sup>。図4では、この標本平均と母平均の95%信頼区間を室温における許容応力( $S_y$ 、 $S_u$ )<sup>※3</sup>と比較した。この図より、許容応力は、いずれの試料の95%信頼区間の下限値よりも小さい値となっており、設定の妥当性が確認された。さらに、加速試験後において材料強度が維持されているかどうかを判定するため、 $t$ 検定<sup>※4</sup>を実施した。帰無仮説は、「加速試験前後の強度特性は等しい」とした。さらに、ここで問題となるのは強度低下であるため片側検定とした。なお、有意水準は5%とした。以上の条件により、各標本について $t$ 検定を実施した結果を表5に示す。まず、引張強さはいずれの標本についても帰無仮説が採択されたため、加速試験により有意な強度低下は無いと判断される。次に、0.2%耐力については、6標本中5標本で帰無仮説が棄却されたため、加速試験により強度低下している可能性がある。

次に、0.2%耐力の低下度合いを定量的に把握するため、標本平均を用いて0.2%耐力の変化量を評価した。この結果を、表6に示す。この表より、帰無仮説が棄却された標本の減少量はいずれも3MPa未満と非常に小さいものの、0.2%耐力が減少した理由について以下のように考察した。

本アルミ合金は押出後、引張矯正による加工硬化をO材処理により除去しているが、図2のTEM組織より、僅かに転位の残存が認められる。加速試験により、この転位が減少し0.2%耐力に反映されたとすれば、引張強さに有意差が認められなかったこととも整合するため合理的である。なお、本アルミ合金のMg添加量は1mass%程度であるため、この固溶強化が加速試験の温度条件である300°Cで低下しないことは本図書2.1項で説明した図1より明らかである。また、Mn系化合物の析出組織が変化したのであれば、引張強さも同様に低下するはずであるから、この可能性も除外できる。なお、前口ら<sup>7)</sup>は、A3004-H112<sup>※5</sup> 押出型材について300°C×1,000hの熱処理により加工硬化を除去できるとしている。この熱処理条件は、本申請の加速試験と同一であることから、加工硬化に着目した場合においても60年後の状態を適切に模擬できていると考えられる。

なお、本アルミ合金の許容応力は、60年間の熱履歴を保守的に模擬した加速試験後の材料に対する引張試験及びクリープ試験に基づき設定されている<sup>3)</sup>。つまり、当該の加速試験による0.2%耐力の低下は許容応力の設定に適切に反映されている。

以上の検討結果から、加速試験により転位密度の減少による0.2%耐力の低下が僅かに生じた可能性があるが、Mn系化合物の粒子分散強化は供用期間(最大60年)維持されると判断される。

※2)  $t$ 分布を用いた信頼区間は下式により計算できる<sup>8),9)</sup>。

$$\bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n-1}} < \mu < \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n-1}}$$

ここで、標本平均： $\bar{x}$ 、標準偏差： $s$ 、試験N数： $n$ である。 $t$ の値については、本説明資料の付録を参照のこと。

※3) 許容応力は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格 新規材料採用ガイドラインに準拠して設定した。この詳細は4章にて後述する。

※4)  $t$ 検定に用いた式を以下に示す<sup>9)</sup>。

$$T = \frac{\sqrt{m+n-2}\{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)\}}{\sqrt{\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n}\right)(mS_x^2 + nS_y^2)}}$$

ここで、 $m, n$ ：試験N数、 $\bar{X}, \bar{Y}$ ：標本平均、 $\mu_x, \mu_y$ ：母平均、 $S_x, S_y$ ：標準偏差、である。なお、この確率変数  $T$ は、自由度  $m+n-2$  の  $t$ 分布に従う。また、本文中で説明した帰無仮説「加速試験前後の強度特性は等しい」より、 $\mu_x - \mu_y = 0$ とした。

※5) 質別 H112 の押出形材は、押出工程の後、製品の曲がりを機械的に矯正している（引張矯正）ため、加工硬化により 0.2%耐力のみが強化された状態になっている。

### 3. 10,000h 後の強度特性について（参照：補足説明資料 1-7 別紙 10）

本申請では、本アルミ合金の実機温度を想定した 4 温度条件（125℃、150℃、175℃、200℃）で 10,000h 保持する時効処理試験を実施している。表 7 に供試材の化学成分分析値を示す。さらに、時効処理試験前後に室温引張試験を実施した。試験条件を表 8、試験結果を表 9 及び図 5 にそれぞれ示す。表 7 では、各条件の標本平均と標準偏差を用いて  $t$ 分布による母平均の 95%信頼区間を求めた。この結果を図 6 に示す。さらに、時効処理試験後に強度変化が有意に生じているかを検討するため、2 章と同じ条件で  $t$ 検定を実施した。帰無仮説は、「時効処理試験前後の強度特性は等しい」とした。この結果を表 9 に追記して示す。いずれの試験条件についても帰無仮説は採択されたため、10,000h を通じて有意な強度変化は生じていないと判断される。以上より、本図書 2 章で説明した本アルミ合金の強化機構の維持に関する評価は実機温度条件において妥当であることが確認された。

### 4. 高温の許容応力設定の妥当性について（参照：補足説明資料 1-7 11.2 項、15 章、16 章）

本申請では、許容応力 ( $S_y, S_u$ ) を日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格 新規材料採用ガイドラインに準拠して設定している。表 10 に、当該規格で要求されている  $S_y$  の設定方法と本申請の実績を比較して示す。この表に示すように、本申請における  $S_y$  の設定方法は当該規格に適合している。なお、 $S_u$  は  $S_y$  と同じ設定方法であるため、ここでは割愛した。高温の許容応力 ( $S_y$  及び  $S_u$ ) は、表 11 に示す室温及び高温の引張試験条件より得ら

れた試験結果（表 12）から評価したトレンド曲線を用いて設定した。なお、詳細は、補足説明資料 1-7 の 10.1.2 及び 11.3 に記載のとおりである。



次に、高温の許容応力と各標本の 95%信頼区間を比較するため、 $t$  分布による解析を実施した。表 12 に、この試験結果を  $t$  分布による解析結果と合わせて示す。この表に示す解析結果と許容応力とを比較した結果を図 7 に示す。この図より、いずれの標本及び温度条件においても、95%信頼下限値は許容応力を上回っていることが確認された。さらに、試験片方向を押し出し方向とした室温及び高温引張試験の条件を表 13 に示す。この試験結果と  $t$  分布による解析結果を表 14 に示す。この表に示す解析結果と許容応力とを比較した結果を図 8 に示す。この図より、いずれの標本及び温度条件においても、95%信頼下限値は許容応力を上回っていることが確認された。



以上より、本アルミ合金の高温における許容応力の設定は妥当と判断される。

#### 5. 本アルミ合金の適用温度条件について（参照：補足説明資料 1-7 3.2 項）

本図書の 1 章では、TK-26 型のバスケットの最高使用温度 225°C が 60 年間継続しても、加速試験条件の 300°C × 1,000h により包絡されることを示した。本申請では、本アルミ合金の適用温度範囲を -40°C から 250°C に規定していることから、本章では、適用温度範囲の上限値 250°C を踏まえた熱履歴条件について検討した。

本アルミ合金は、キャスクのバスケット構造材に使用することを前提にしているため、貯蔵初期に 250°C であっても、使用済燃料の発熱量低減に伴い温度低下する。この温度低下を前提に、最高使用温度を 250°C とした場合の熱履歴を以下のように設定した。

図 9 に、TK-26 型のバスケット最高使用温度を黒色の曲線で示す<sup>※6</sup>。まず、この熱履歴を保守的な条件として直線に置き換える（図 9 に示す緑色の直線）。TK-26 型の最高使用温度は 225°C であるから、この直線を 25°C 高温側に平行移動すると、60 年かけて 250°C から 150°C まで直線低下する熱履歴となる（図 9 に示す青色の直線）。



表 15 に、これら直線低下の熱履歴に対応する Mn の拡散距離の計算結果を、表 1 の結果と合わせて示す。なお、拡散距離の計算は、直線低下に対して更に保守側となるよう 1 年毎の温度ステップ（図 9 に示す黄色及び赤色のステップ）により計算した。この表より、Mn の拡散距離は、いずれの条件についても当該の加速試験条件により包絡されている。したがって、本アルミ合金は TK-26 型のバスケットの最高使用温度が仮に 250°C となった場合においても適用可能と判断される。なお、250°C について温度一定で評価した場合は、300°C × 1,000h に対応する時間は約 9 年半になる。

※6) この温度履歴は、収納物の ORIGEN2 により評価した発熱量と外筒側面の放熱量（対流及び放射による放熱量をそれぞれ計算した）が、バランスするとして求めた外筒表面温度を基準として、バスケット最高温度を簡易的に計算して評価した結果である。な



お、60年後のバスケット最高温度は、ORIGEN2による収納物の発熱量を用いて ABAQUS  
で解析し、当該の簡易評価と同等の結果になることを確認している。



以上のように、本アルミ合金の適用性は、バスケットの温度低下を Mn の拡散距離を用いて適切に評価することによっても確認できる。



参考文献)

- 1) 篠崎崇、下条純、松本克史、新谷智彦、赤松博史、“使用済燃料輸送・貯蔵兼用キャスクのバスケット用 Al-Mn-Mg 系合金の Mg 添加量の設定方法”、軽金属学会第 135 回秋期大会講演概要、No. 9、(2018)
- 2) 篠崎崇、下条純、赤松博史、松本克史、新谷智彦、水谷淳、中林洋右、“Al-Mn-Mg 合金における  $\beta$  相の析出挙動に及ぼす Mg 添加量の影響とそのモデル化”、軽金属、Vol. 70、No. 2、(2020)
- 3) J. Shimojo, T. Shinozaki, T. Shinya, H. Akamatsu, “Development of Aluminum Extruded Alloy for Basket of Transport/Storage Casks (2) - Properties and allowable stress of the borated aluminum alloy 1B-A3J04-0 -”, Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Paper No.1331, (2019)
- 4) T. Shinozaki, J. Shimojo, K. Matsumoto, H. Akamatsu, T. Shinya, J. Mizutani, Y. Nakabayashi, “Development of Aluminum Extruded Alloy for Basket of Transport/Storage Casks (1) - Strengthening mechanism after long term storage and design of chemical composition -”, Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Paper No. 1316, (2019)
- 5) 平野賢一、“アルミニウム中の拡散”、軽金属、29 巻、p249、(1979)
- 6) 梶山毅、深田和博、“Al-Mn 系合金”、軽金属、38 巻、p362、(1988)
- 7) 前口貴治、川原慶幸、山本隆一、崎間公久、玉置廣紀、“A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼なましの影響”、軽金属、68 巻、p653、(2018)
- 8) 大村平、“統計のはなし—基礎・応用・娯楽—【改訂版】”、日科技連、(2002)
- 9) 薩摩順吉、“確率・統計”、岩波書店、(1989)

表 1 実機条件と加速試験条件における Mn の拡散距離

	実機条件	加速試験条件
熱処理条件	225°C×60年 (525,960h)	300°C×1,000h (225°C×約120年に相当)
拡散距離(μm)	$3.10 \times 10^{-2}$	$4.44 \times 10^{-2}$

表 2 機械試験用供試材<sup>※1</sup>の化学成分の分析結果

供試材 No.	断面 形状	分析結果(mass%)								
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	B	その他 (Ti)	Al
No. 22	フラット バー									残部
No. 24										残部
No. 26										残部
No. 20	中空材									残部
No. 28										残部
No. 30										残部
1B-A3J04-O の規定範囲		0.25 以下	0.25 以下	0.05 以下	1.0 以上 1.6 以下	1.0 以上 1.4 以下	0.05 以下	0.8 以上 1.3 以下	※2	残部

※1) 材料強度を保守的に設定するための供試材。

※2) 個々の元素で0.05以下、合計で0.15以下。

表 3 加速試験前後の引張試験条件

材質	1B-A3J04-0 (機械試験用供試材)
<u>加速試験の有無</u>	無し (初期材)、有り (300°C×1,000h)
供試材 No.	フラットバー ; No. 22、24、26 中空材 ; No. 20、28、30
試験片形状	JIS Z 2241 14A 号試験片
試験片方向	押出方向
試験温度	室温
試験方法	JIS Z 2241 準用
試験 N 数	<u>初期材</u> : 各供試材当り 4 個 <u>加速試験材</u> : 各供試材当り 3 個

4

4

表 4 (1/2) 実機材の引張試験データに関する 95%信頼区間の計算

供試材 No.	初期材		統計処理 ( $t=3.182$ )		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
No. 22					
No. 24					
No. 26					
No. 20					
No. 28					
No. 30					

注) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限値は小数点第1位までとした。

表 4 (2/2) 実機材の引張試験データに関する 95%信頼区間の計算



供試材 No.	加速試験材		統計処理 ( $t=4.303$ )		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
No. 22					
No. 24					
No. 26					
No. 20					
No. 28					
No. 30					

注) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限值は小数点第1位までとした。

表 5 加速試験前後の強度特性に関する  $t$  検定

標本	$t$ 検定 ( $t=-2.015$ ) ※			
	0.2%耐力		引張強さ	
No. 22		採択		採択
No. 24		棄却		採択
No. 26		棄却		採択
No. 20		棄却		採択
No. 28		棄却		採択
No. 30		棄却		採択

※)  $t$  分布表より、有意水準 5%の片側検定に対応する-2.015 未満を棄却域とした (自由度 5)。

表 6 標本平均より求めた加速試験後の 0.2%耐力変化量

断面形状	供試材	0.2%耐力変化量 (MPa)	$t$ 検定
フラットバー	No. 22		採択
	No. 24		棄却
	No. 26		棄却
中空材	No. 20		棄却
	No. 28		棄却
	No. 30		棄却
棄却標本のみ			—

表7 実用温度で時効処理試験に使用した材料



(mass%)

供試材 No.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	B	Al
1-1B								残部
1B-A3J04-0	0.25 以下	0.25 以下	0.05 以下	1.2 以上 1.6 以下	1.0 以上 1.4 以下	0.05 以下	0.8 以上 1.3 以下	残部

表8 実用温度で時効処理試験した材料の引張試験条件（室温）



材質	ラボスケール材（機械試験用供試材相当）
時効処理の有無	無し（初期材） 有り（125/150/175/200℃）×（50/200/1,000/2,500/5,000/10,000h）※
供試材 No.	No. 1-1B
試験片形状	JIS Z 2241 14A 号試験片
試験片方向	押出方向
試験温度	室温
試験方法	JIS Z 2241 準用
試験 N 数	各供試材当り 3 個



※) 目標保持時間

表 9 実用温度での時効処理試験後引張試験に関する 95%信頼区間の計算<sup>※1</sup> (1/4)

(a) 125°C

保持時間 (h)															
0.2%耐力 (MPa)															
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均														
	標準偏差														
	上限値														
	下限値														
$t$ 検定 <sup>※2</sup>	$T$														
( $t=-2.132$ )	検定結果								—	採択	採択	採択	採択	採択	採択
引張強さ (MPa)															
0.2%耐力 (MPa)															
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均														
	標準偏差														
	上限値														
	下限値														
$t$ 検定 <sup>※2</sup>	$T$														
( $t=-2.132$ )	検定結果	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択							

※1) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限値は小数点第1位までとした。

※2)  $t$  分布表より、有意水準 5% の片側検定に対応する -2.132 未満を棄却域とした (自由度 4)。確率変数  $T$  の値は、有効数字を小数点第3位までとした。



表9 実用温度での時効処理試験後引張試験に関する95%信頼区間の計算<sup>※1</sup> (2/4)

(b) 150°C

保持時間(h)								
0.2%耐力(MPa)								
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均							
	標準偏差							
	上限値							
	下限値							
$t$ 検定 <sup>※2</sup> ( $t=-2.132$ )	$T$	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択
引張強さ(MPa)								
0.2%耐力(MPa)								
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均							
	標準偏差							
	上限値							
	下限値							
$t$ 検定 <sup>※2</sup> ( $t=-2.132$ )	$T$	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択

※1) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限値は小数点第1位までとした。

※2)  $t$  分布表より、有意水準5%の片側検定に対応する-2.132未満を棄却域とした(自由度4)。

表9 実用温度での時効処理試験後引張試験に関する95%信頼区間の計算<sup>※1</sup> (3/4)

(c) 175°C

保持時間(h)															
0.2%耐力(MPa)															
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均														
	標準偏差														
	上限値														
	下限値														
$t$ 検定 <sup>※2</sup>	$T$														
( $t=-2.132$ )	検定結果								—	採択	採択	採択	採択	採択	採択
引張強さ(MPa)															
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均														
	標準偏差														
	上限値														
	下限値														
$t$ 検定 <sup>※2</sup>	$T$														
( $t=-2.132$ )	検定結果	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択							

※1) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限値は小数点第1位までとした。

※2)  $t$ 分布表より、有意水準5%の片側検定に対応する-2.132未満を棄却域とした(自由度4)。

表 9 実用温度での時効処理試験後引張試験に関する 95%信頼区間の計算<sup>※1</sup> (4/4)

(d) 200°C

保持時間 (h)								
0.2%耐力 (MPa)								
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均							
	標準偏差							
	上限値							
	下限値							
$t$ 検定 <sup>※2</sup> ( $t=-2.132$ )	$T$	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択
引張強さ (MPa)								
0.2%耐力 (MPa)								
統計処理 ( $t=4.303$ )	標本平均							
	標準偏差							
	上限値							
	下限値							
$t$ 検定 <sup>※2</sup> ( $t=-2.132$ )	$T$	—	採択	採択	採択	採択	採択	採択

※1) 有効数字は、算出過程における誤差を考慮し、標準偏差については小数点第2位まで、標本平均及び上下限値は小数点第1位までとした。

※2)  $t$  分布表より、有意水準 5%の片側検定に対応する-2.132未満を棄却域とした (自由度 4)。

表 10 日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格の新規材料採用ガイドラインにおける  
 $S_y$  の設定方法に関する要求と本申請の実績の比較

$S_y$ の設定方法に関する規格要求	本申請の実績	評価
<p>標本数は、3 標本とする。</p> <p>なお、2.1 提出資料に含まれる情報では、供試材標本数が最小 3 標本とすることが規定されている。</p>	<p>常温の耐力の規格値は、6 標本（フラットバー：3 標本、中空材：3 標本）より求めている。</p> <p>（参照：補足説明資料 1-7、10.1.2 節）</p>	<p>適合</p>
<p>高温強度を各標本について求める。</p>	<p>トレンド曲線は、3 標本（フラットバー：2 標本、中空材 1 標本）より求めている。</p> <p>（参照：補足説明資料 1-7、11.2 項）</p>	<p>適合</p>
<p>各温度における強度を常温の強度で規準化したトレンド曲線による方法を用いて設計降伏点を求める。</p> <p><math>S_y</math> 値の設定方法</p> <p>①：常温の降伏点（耐力）の規格値</p> <p>②：<math>R_T \times</math> 常温の降伏点（耐力）の規格値</p> <p><math>R_T =</math> 当該温度での降伏点（耐力） / 常温の降伏点（耐力）</p> <p>各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。</p> <p>上記①と②の小さい方の値を設計降伏点（<math>S_y</math> 値）とする。</p>	<p>左記のとおり実施している。</p> <p>（参照：補足説明資料 1-7、11.3 項及び 15 章）</p>	<p>適合</p>

表 11 高温の引張試験条件（押出直角方向）※

材質	1B-A3J04-0（機械試験用供試材）
加速試験の有無	有り（300℃×1,000h）
供試材 No.	フラットバー；No. 22、24 中空材；No. 20
試験方法	JIS G 0567 準用
試験片形状	JIS Z 2241 14A 号試験片
試験片方向	押出直角方向
試験温度	室温、75～275℃（25℃刻み）
評価項目	0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞り
試験 N 数	室温：各供試材当り 4 個 高温：各供試材当り 3 個

※) 本アルミ合金に関する強度の温度依存性（表 10 で説明したトレンド曲線に対応する）  
を評価するための試験である。表 10 に示した規格要求（3 標本）を満足している。



表 12 (1/6) 押出直角方向の高温引張試験データ

(a) 供試材 No. 22、フラットバー

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
室温					
75					
100					
125					
150					
175					
200					



表 12 (2/6) 押出直角方向の高温引張試験データ  
 (a) 供試材 No. 22、フラットバー

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
225					
250					
275					



※)  $t$ 分布表より、室温は  $t=3.182$ 、高温は  $t=4.303$  を用いて 95%信頼区間の上下限値を求めた。

表 12 (3/6) 押出直角方向の高温引張試験データ  
 (b) 供試材 No. 24、フラットバー

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
室温					
75					
100					
125					
150					
175					
200					





表 12 (4/6) 押出直角方向の高温引張試験データ  
 (b) 供試材 No. 24、フラットバー

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
225					
250					
275					



※)  $t$ 分布表より、室温は  $t=3.182$ 、高温は  $t=4.303$  を用いて 95%信頼区間の上下限値を求めた。

表 12 (5/6) 押出直角方向の高温引張試験データ  
(c) 供試材 No. 20、中空材

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
室温					
75					
100					
125					
150					
175					
200					



表 12 (6/6) 押出直角方向の高温引張試験データ  
(c) 供試材 No. 20、中空材

温度 (°C)	加速試験材		統計処理※		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
225					
250					
275					



※)  $t$ 分布表より、室温は  $t=3.182$ 、高温は  $t=4.303$  を用いて 95%信頼区間の上下限値を求めた。

表 13 高温の引張試験条件（押出方向）※

材質	1B-A3J04-0（機械試験用供試材）
加速試験の有無	有り（300℃×1,000h）
供試材 No.	フラットバー；No. 22 中空材；No. 20
試験方法	JIS G 0567 準用
試験片形状	JIS Z 2241 14A 号試験片
試験片方向	押出方向
試験温度	室温、100～250℃（50℃刻み）
評価項目	0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞り
試験 N 数	各供試材当り 3 個

※) 表 11 に示した試験条件で評価したトレンド曲線を用いて設定した高温の許容応力の妥当性を確認するために実施した試験である。その試験結果は、本アルミ合金の許容応力設定に使用していないため、参考扱いとする。

表 14 (1/2) 押出方向の高温引張試験データ  
 (a) 供試材 No. 22、フラットバー

温度 (°C)	加速試験材		統計処理 (t=4.303)		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
室温					
100					
150					
200					
250					



表 14 (2/2) 押出方向の高温引張試験データ  
 (b) 供試材 No. 20、中空材

温度 (°C)	加速試験材		統計処理 (t=4.303)		
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	—	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)
室温					
100					
150					
200					
250					



表 15 熱履歴の諸条件と Mn の拡散距離に関する整理

	直線低下① <sup>※1</sup>	直線低下② <sup>※2</sup>	一定温度 <sup>※3</sup>	加速試験 <sup>※4</sup>
熱履歴	60年間かけて 225℃から125℃ に直線低下	60年間かけて 250℃から150℃ に直線低下	225℃×60年 (525,960h)	300℃×1,000h (225℃×約120 年に相当)
拡散距離 ( $\mu\text{m}$ )	$9.75 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^{-2}$	$4.44 \times 10^{-2}$

※1) TK-26型の最高温度に関する熱履歴を直線に置き換えた条件。

※2) 直線低下①の熱履歴を、25℃高温側に平行移動した条件。

※3) TK-26型のバスケット最高使用温度225℃が60年間継続される条件。

※4) 60年間の熱履歴を保守側に模擬した加速試験条件。

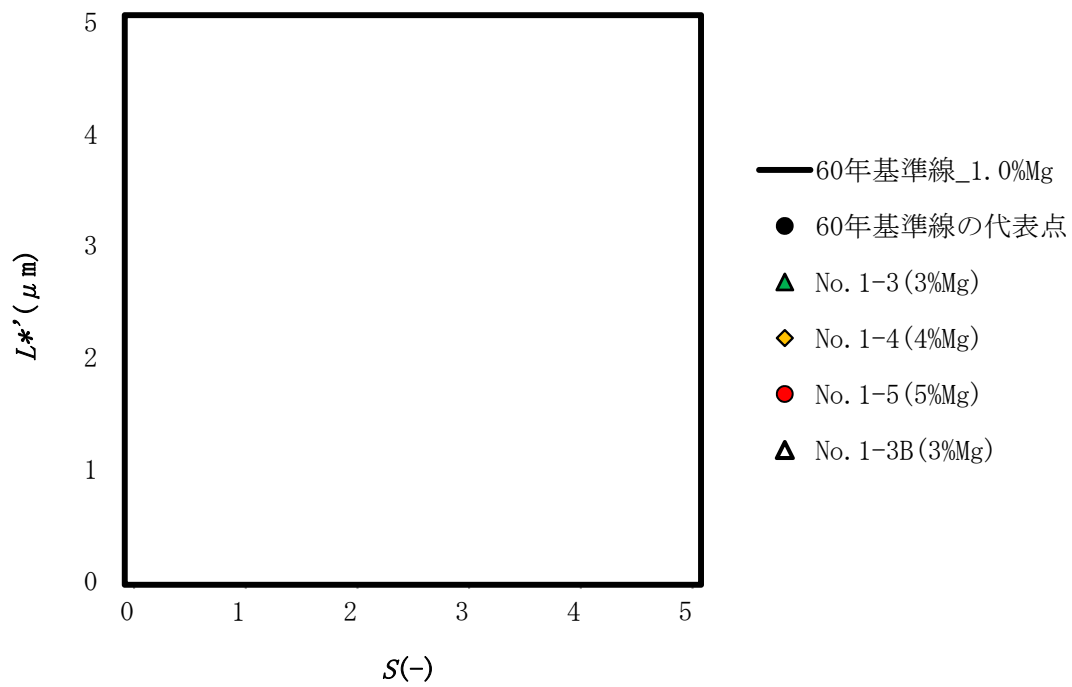


図1 過飽和度と拡散距離による析出開始条件の評価 (S-L 平面)



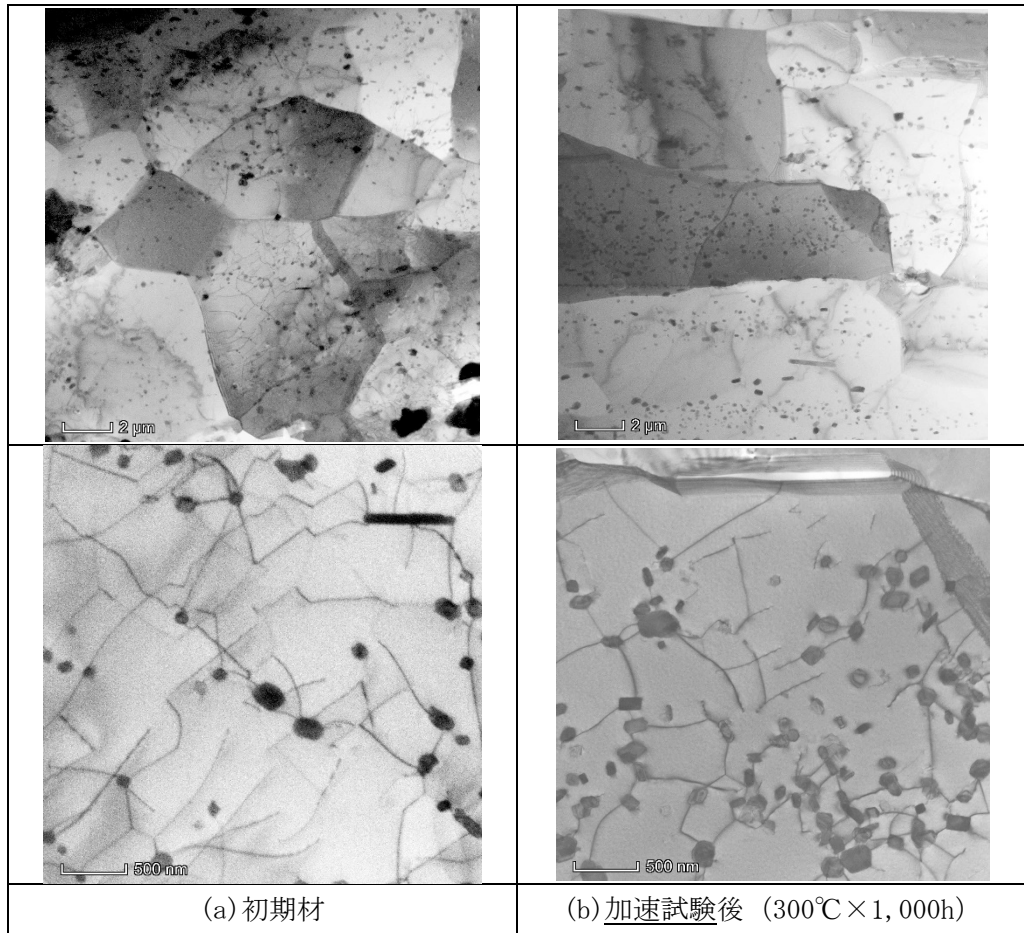
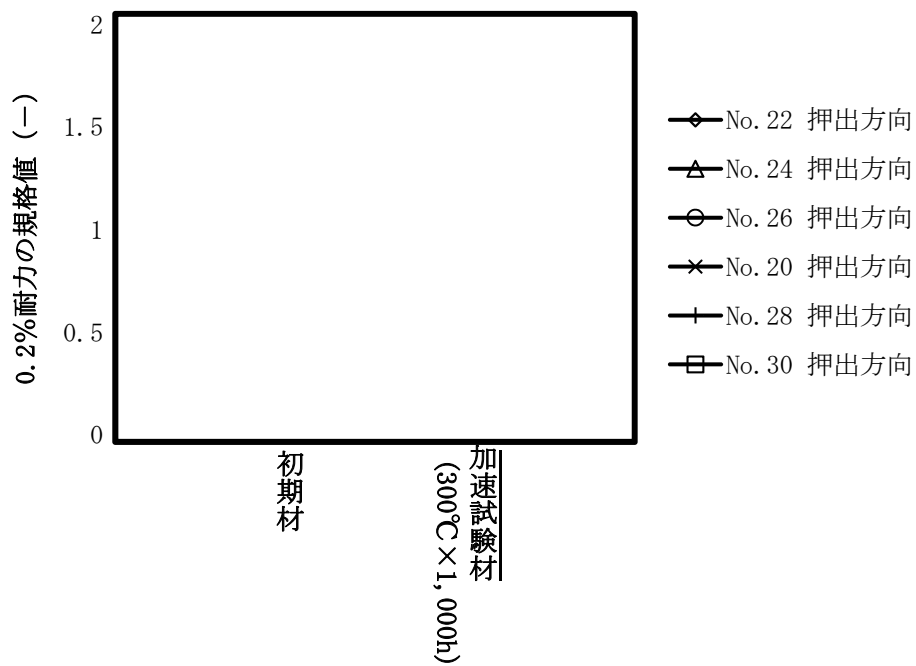
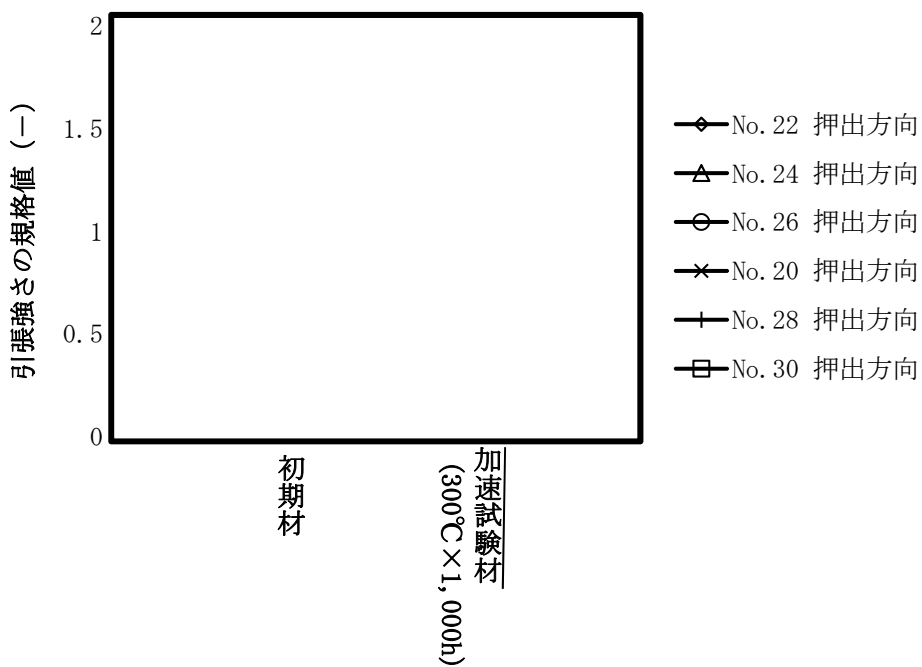


図2 加速試験後のTEM組織比較 (供試材 No. 20)

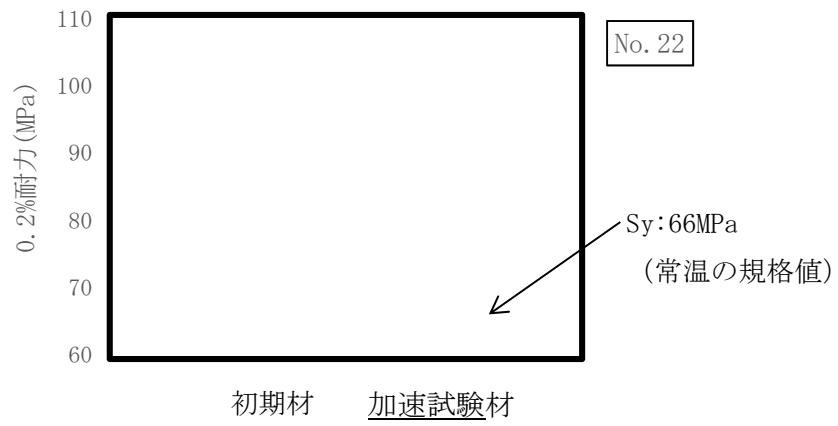


(a) 0.2%耐力の変化率 (機械試験用供試材、押出方向)

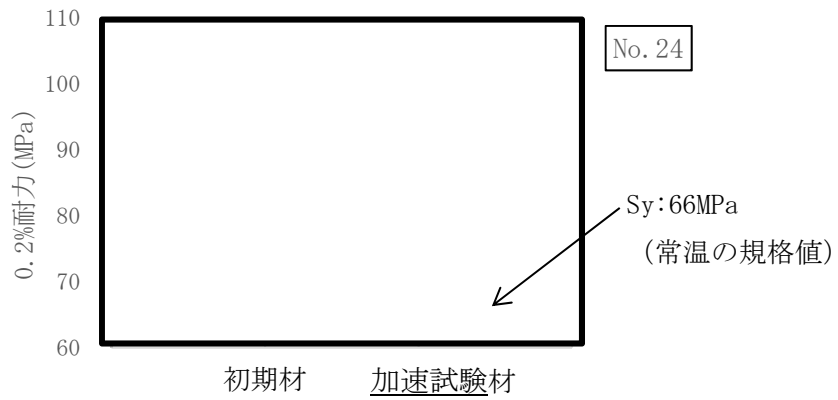


(b) 引張強さの変化率 (機械試験用供試材、押出方向)

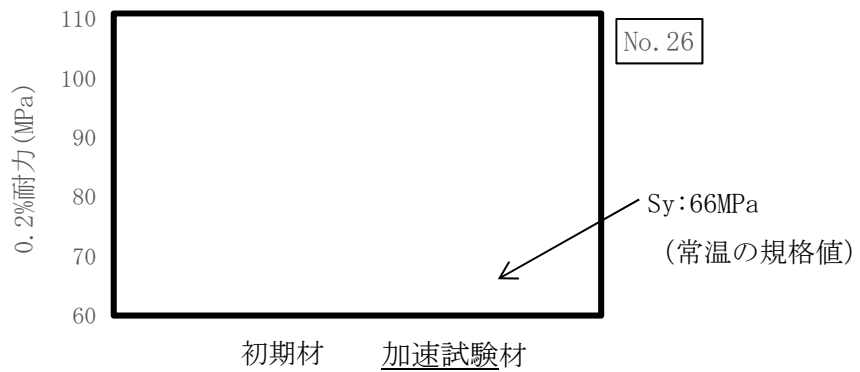
図 3 加速試験後の室温強度の比較



(a) フラットバー (No. 22) 、0.2%耐力

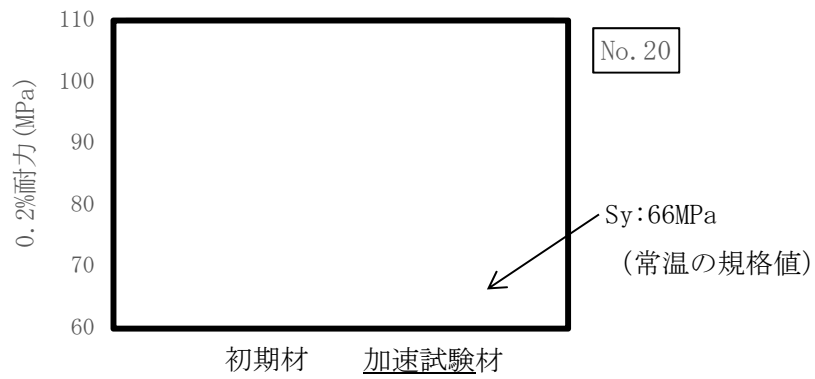


(b) フラットバー (No. 24) 、0.2%耐力

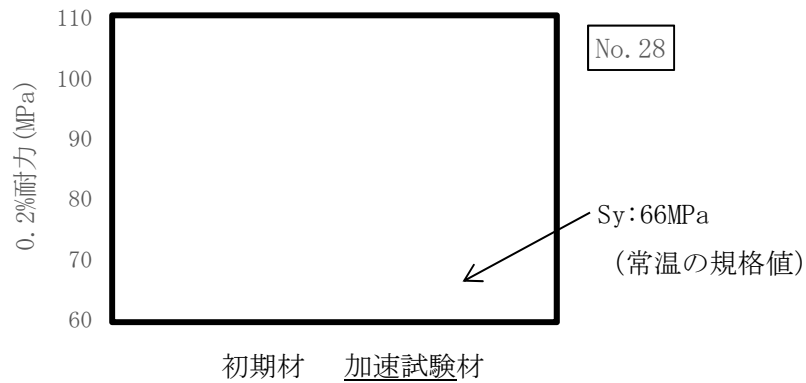


(c) フラットバー (No. 26) 、0.2%耐力

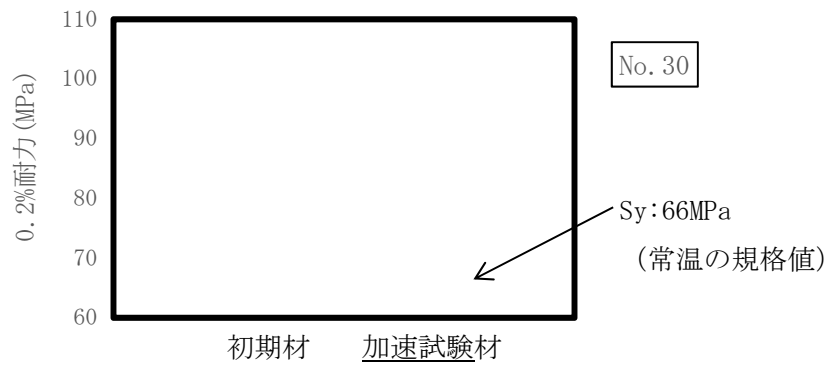
図4 加速試験前後の室温強度特性の比較 (0.2%耐力) (1/4)



(d) 中空材 (No. 20) 、0.2%耐力



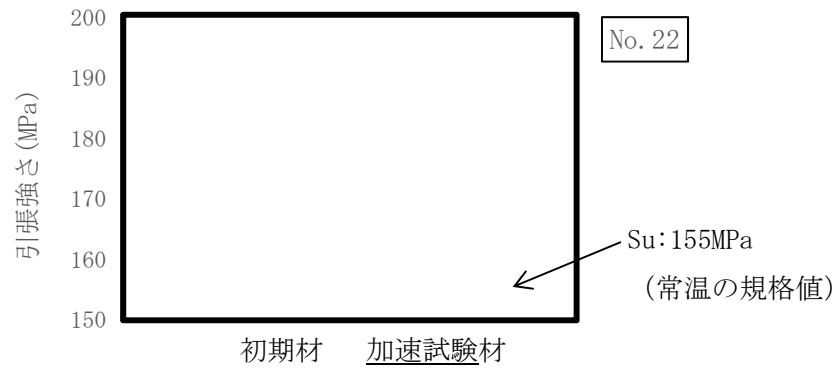
(e) 中空材 (No. 28) 、0.2%耐力



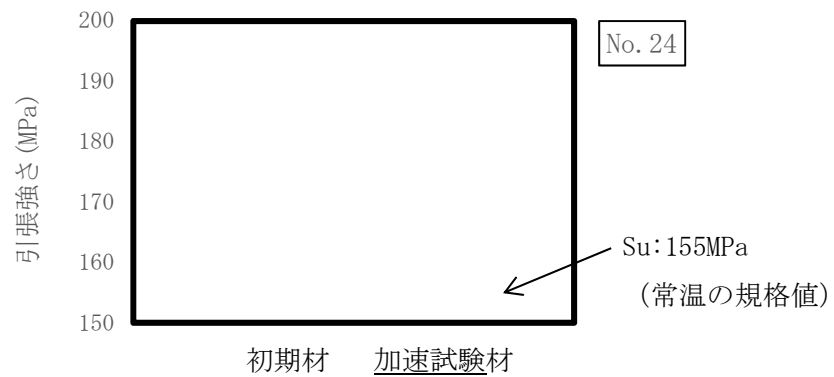
(f) 中空材 (No. 30) 、0.2%耐力



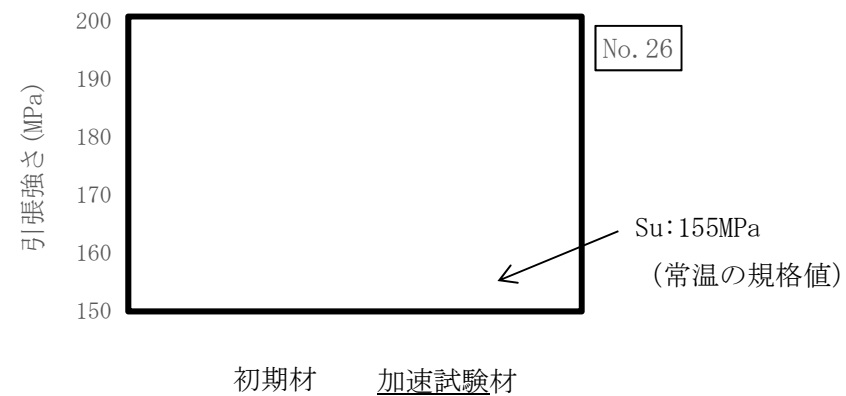
図4 加速試験前後の室温強度特性の比較 (0.2%耐力) (2/4)



(a) フラットバー (No. 22) 、引張強さ

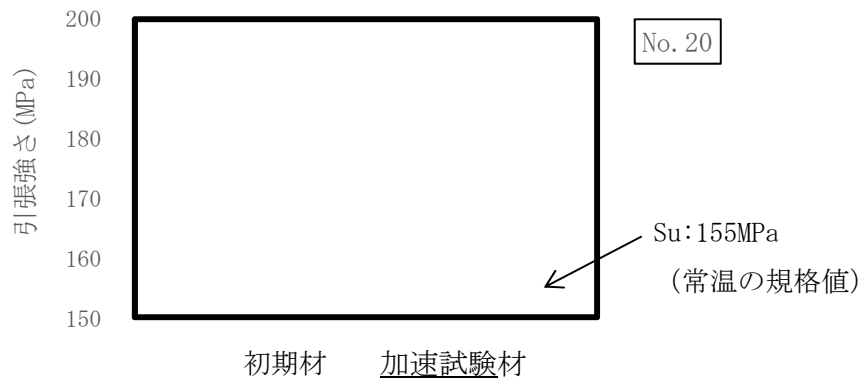


(b) フラットバー (No. 24) 、引張強さ

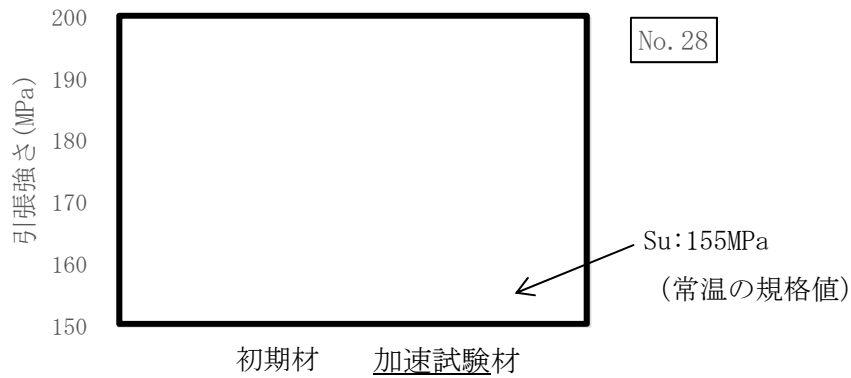


(c) フラットバー (No. 26) 、引張強さ

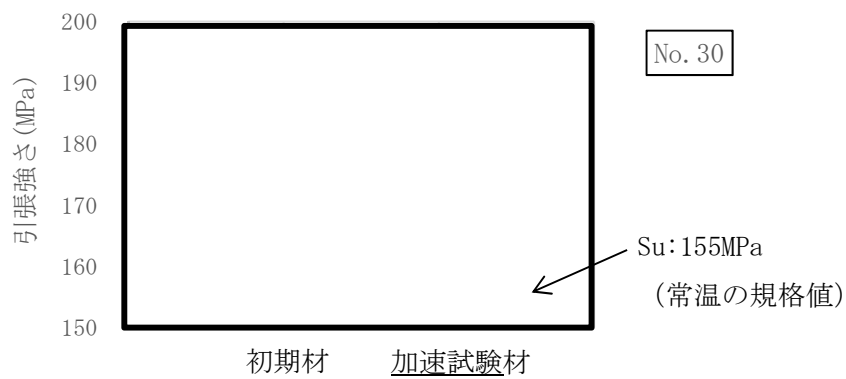
図 4 加速試験前後の室温強度特性の比較 (引張強さ) (3/4)



(d) 中空材 (No. 20) 、引張強さ

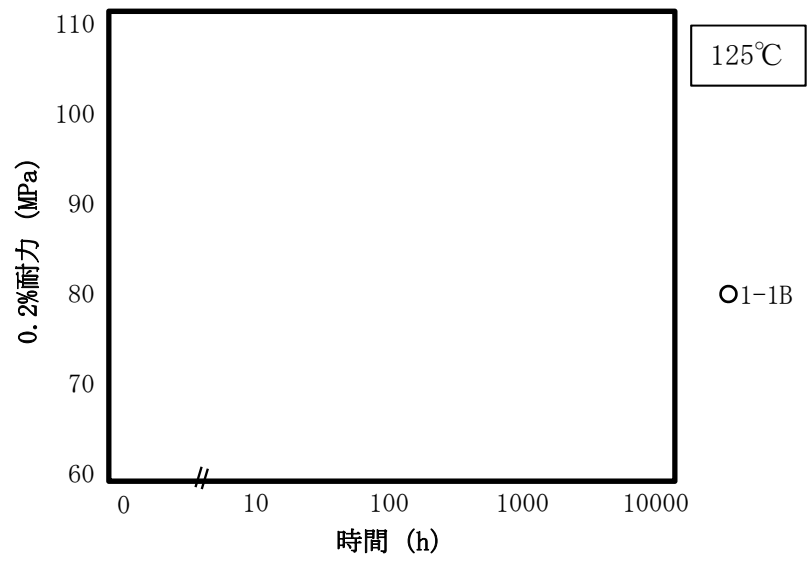


(e) 中空材 (No. 28) 、引張強さ

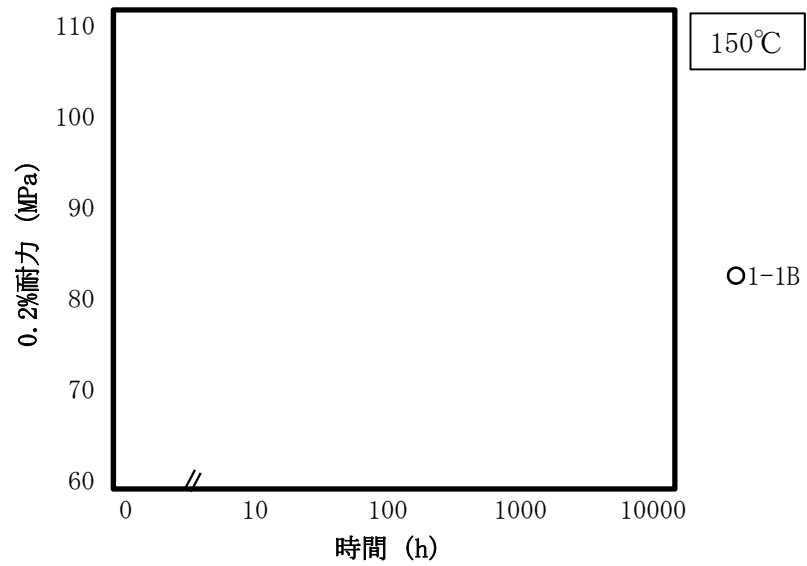


(f) 中空材 (No. 30) 、引張強さ

図 4 加速試験前後の室温強度特性の比較 (引張強さ) (4/4)

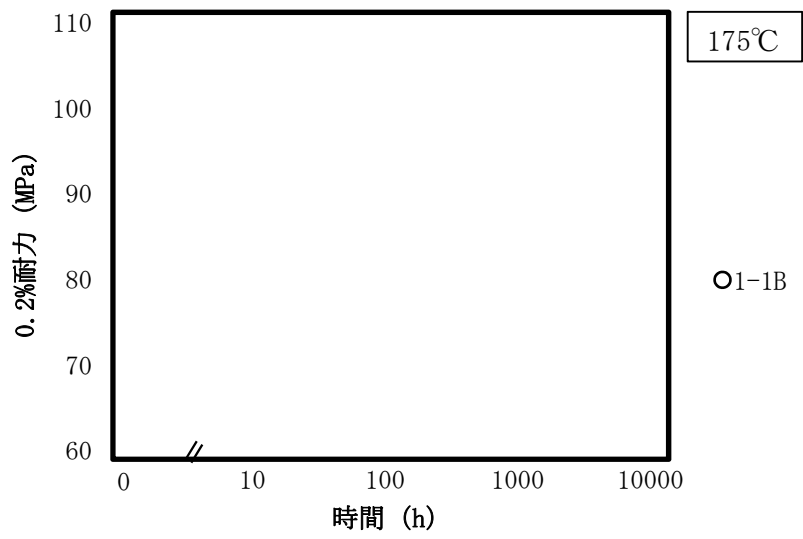


(a) 保持温度：125°C、0.2%耐力

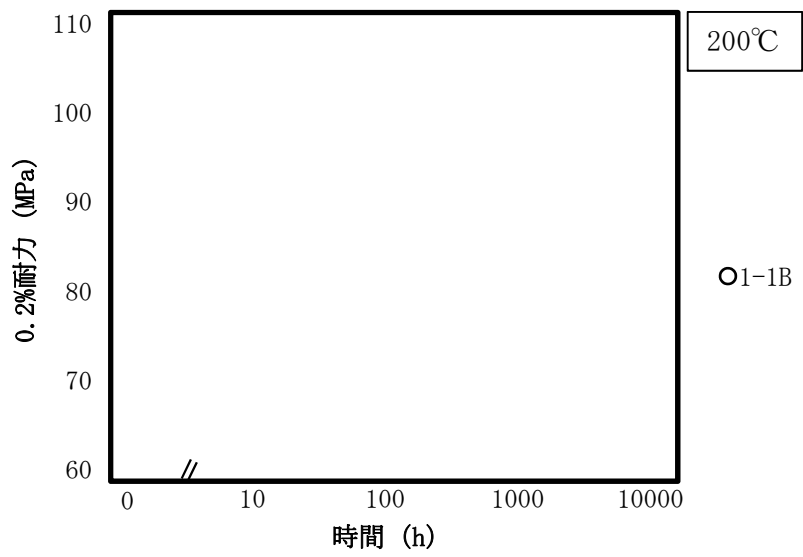


(b) 保持温度：150°C、0.2%耐力

図5 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（0.2%耐力）（1/4）



(c) 保持温度：175°C、0.2%耐力

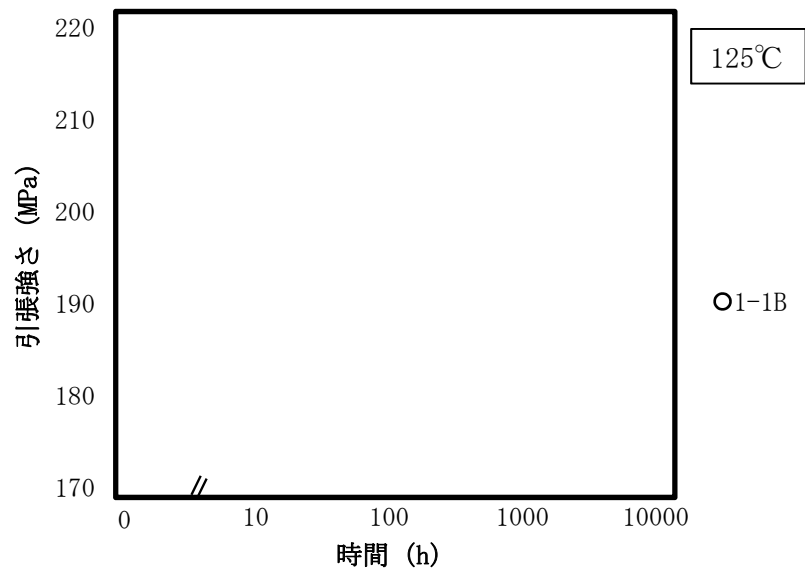


(d) 保持温度：200°C、0.2%耐力

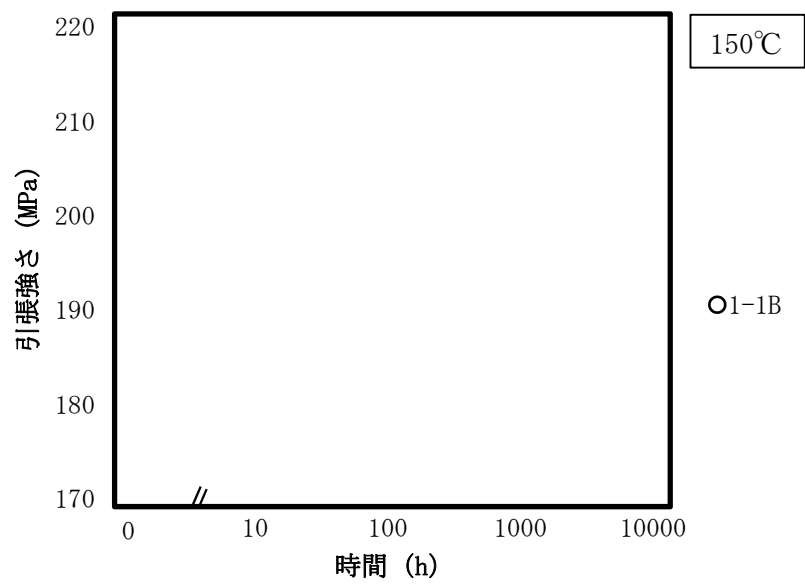
図5 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向 (0.2%耐力) (2/4)







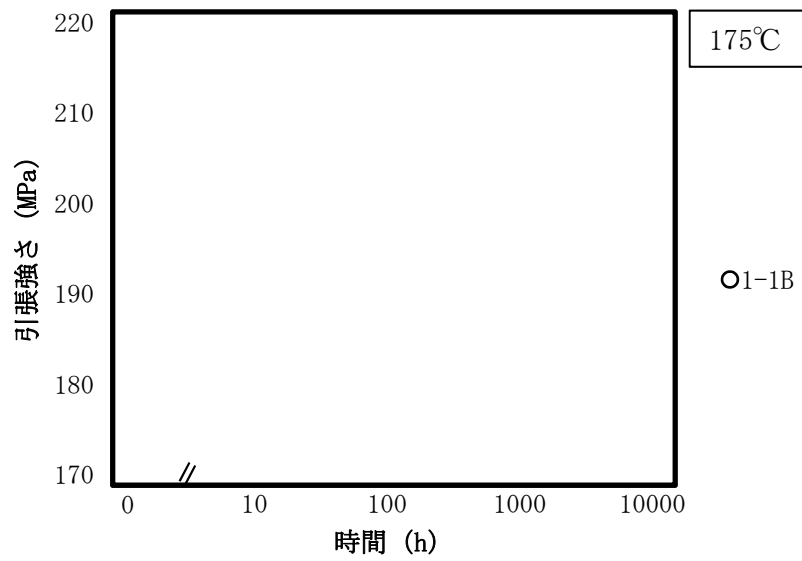
(e) 保持温度：125°C、引張強さ



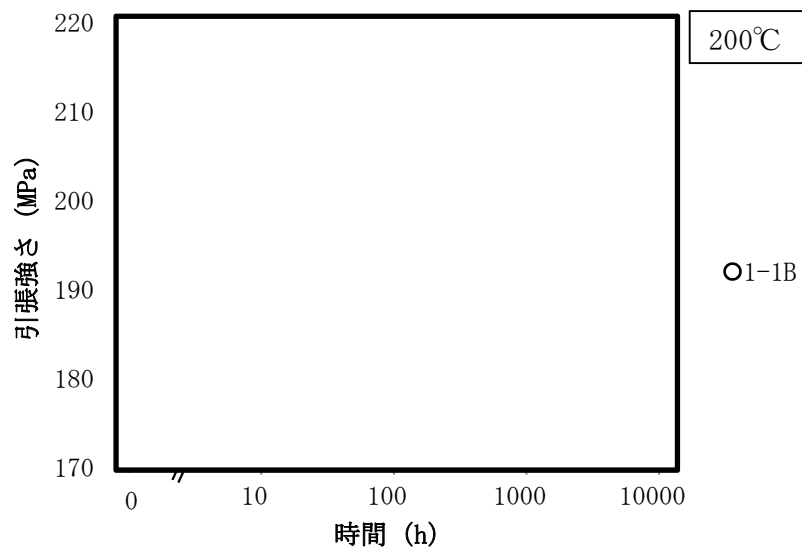
(f) 保持温度：150°C、引張強さ

図5 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（引張強さ）（3/4）



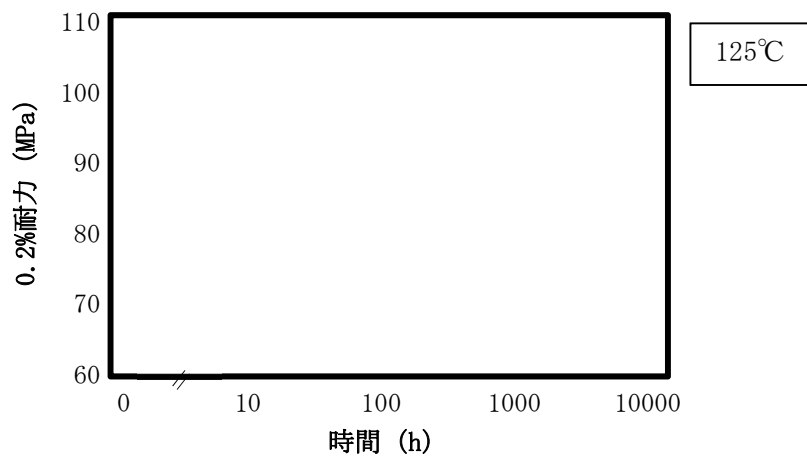


(g) 保持温度：175°C、引張強さ

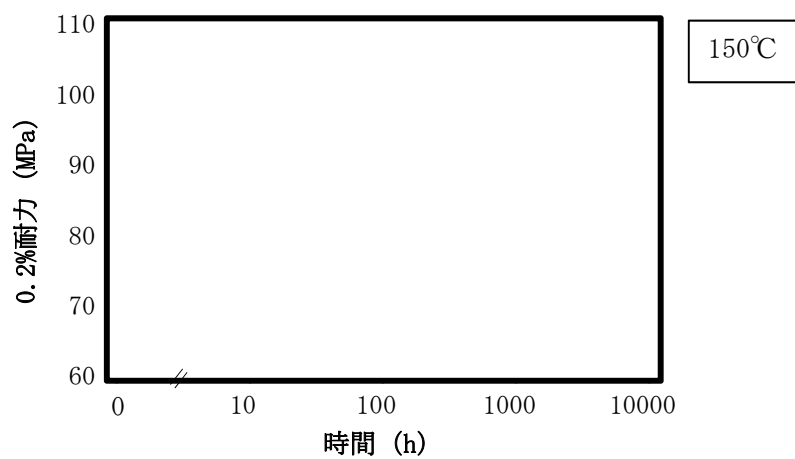


(h) 保持温度：200°C、引張強さ

図 5 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（引張強さ）（4/4）

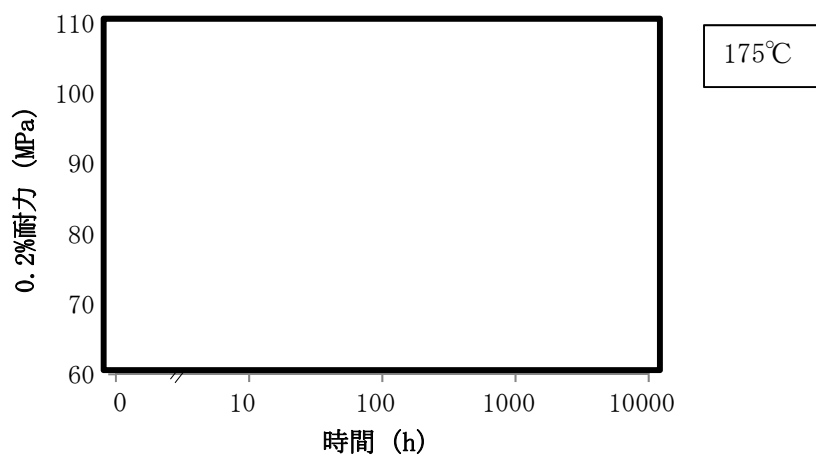


(a) 保持温度：125°C、0.2%耐力

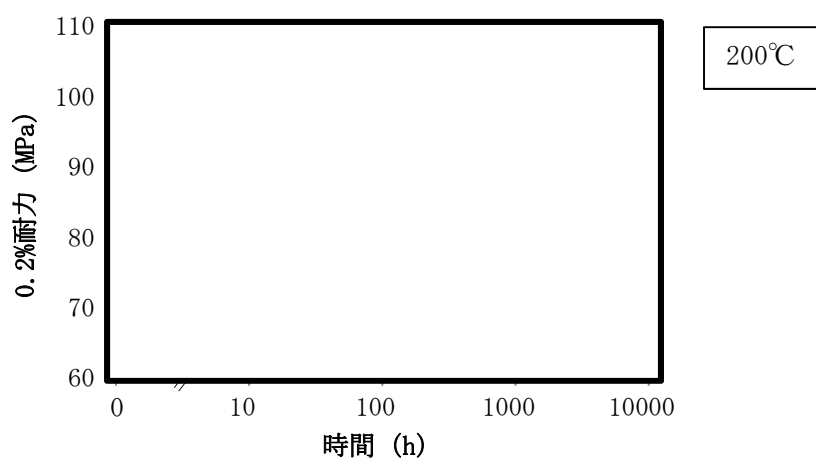


(b) 保持温度：150°C、0.2%耐力

図6 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（0.2%耐力- $t$ 分布）（1/4）

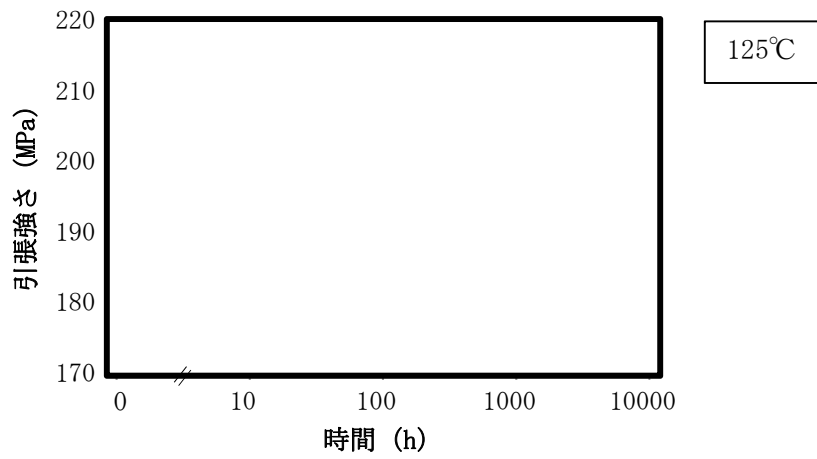


(c) 保持温度：175°C、0.2%耐力

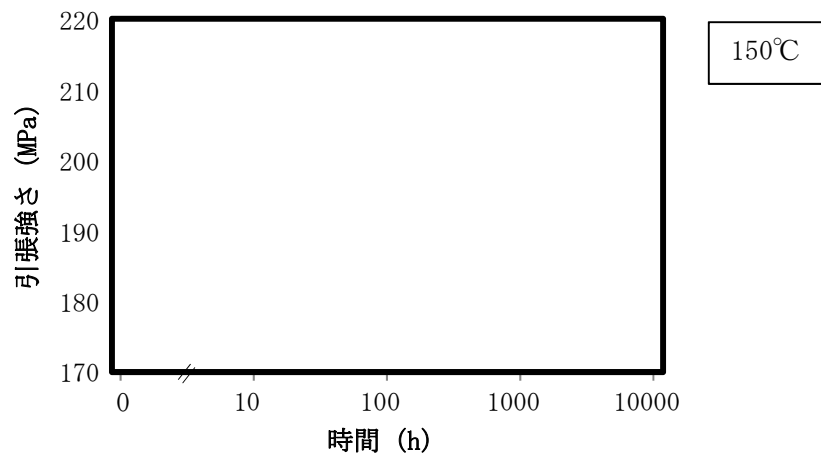


(d) 保持温度：200°C、0.2%耐力

図6 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（0.2%耐力- $t$ 分布）（2/4）

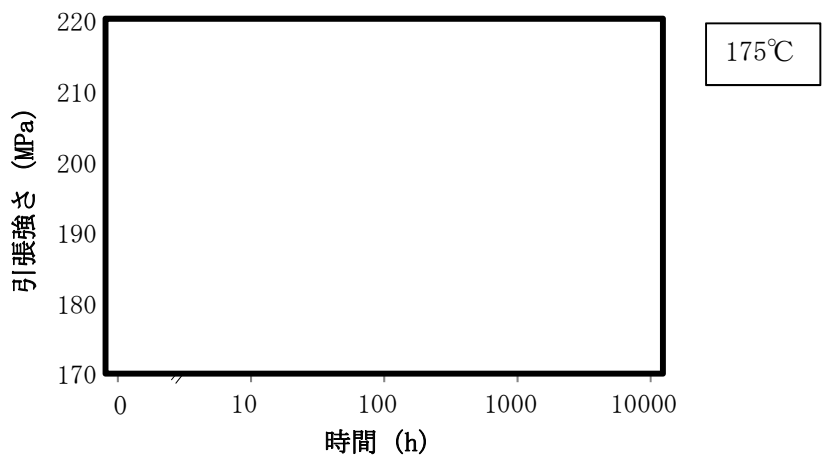


(e) 保持温度：125°C、引張強さ

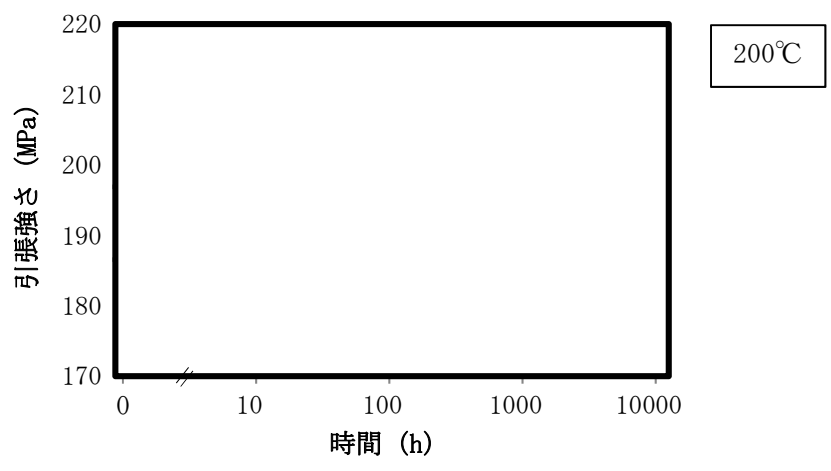


(f) 保持温度：150°C、引張強さ

図 6 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（引張強さ- $t$ 分布）（3/4）

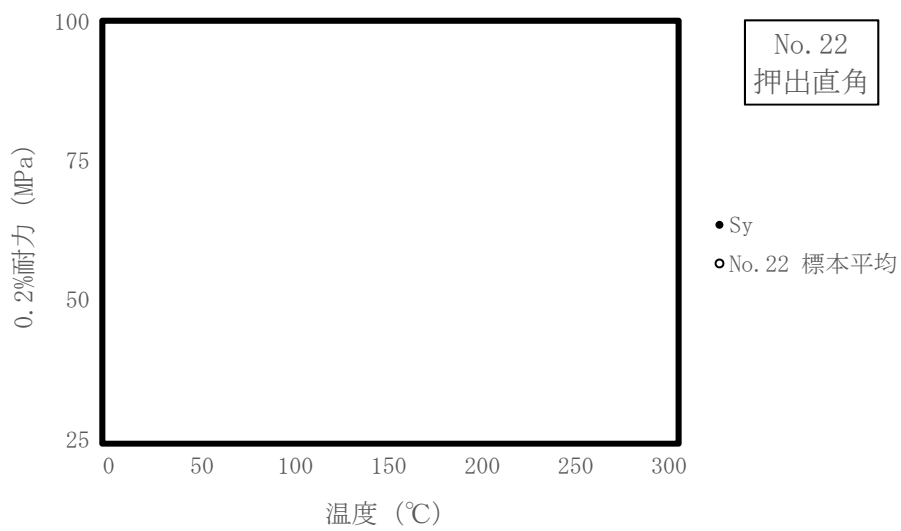


(g) 保持温度：175°C、引張強さ

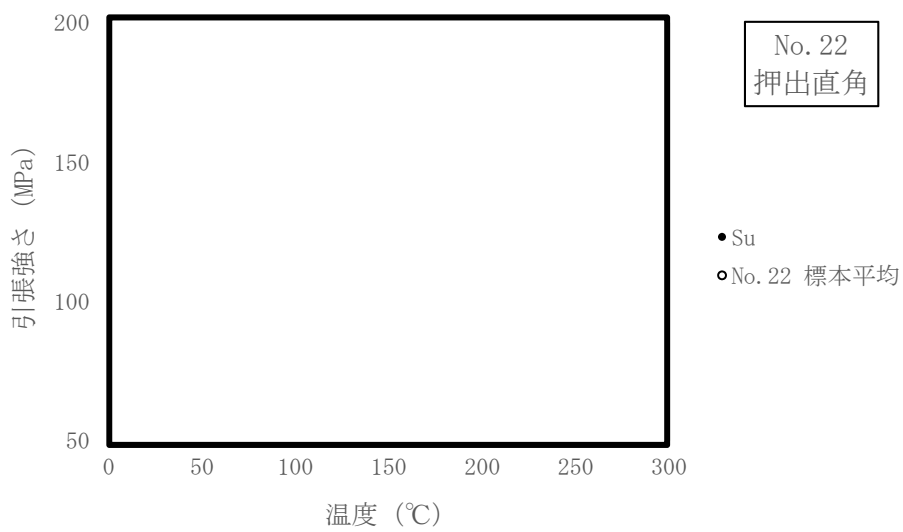


(h) 保持温度：200°C、引張強さ

図6 時効処理試験による室温強度特性の変化傾向（引張強さ- $t$ 分布）（4/4）

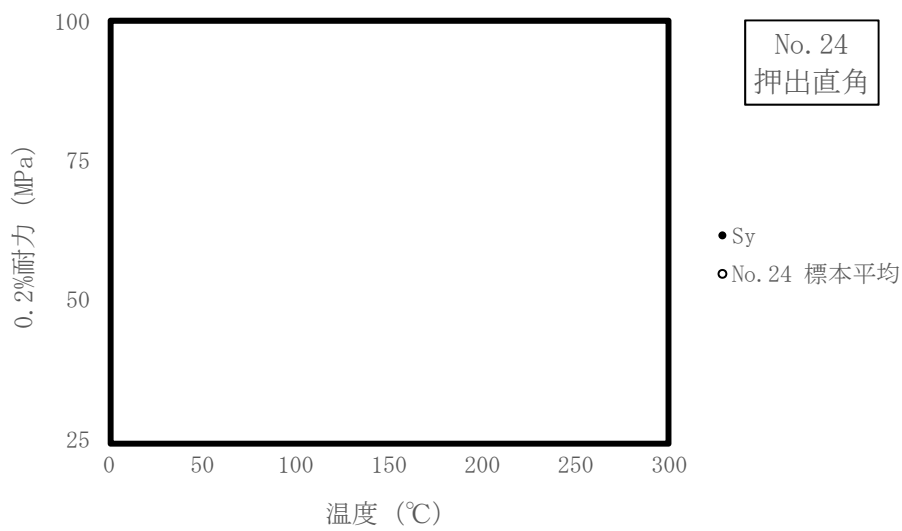


(a) フラットバー (No. 22) 、0.2%耐力

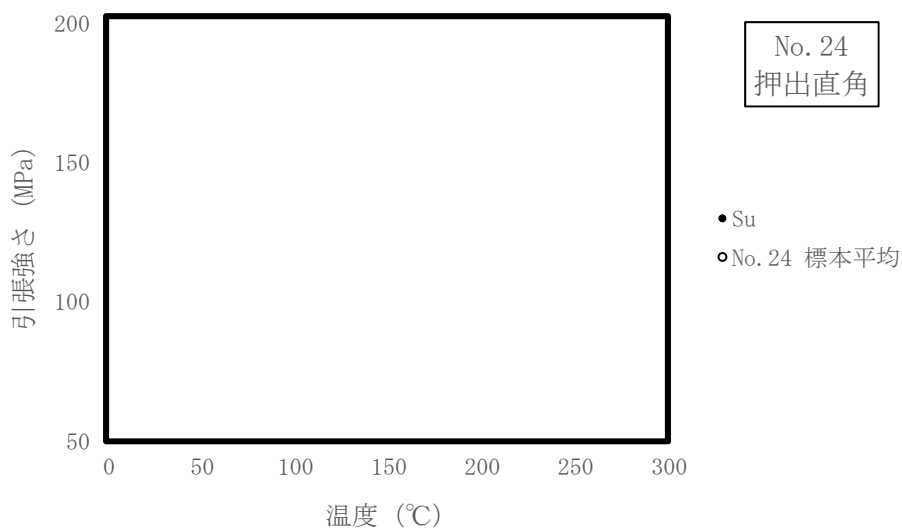


(b) フラットバー (No. 22) 、引張強さ

図7 高温の許容応力と各標本の95%信頼区間との比較 (押出直角方向) (1/3)



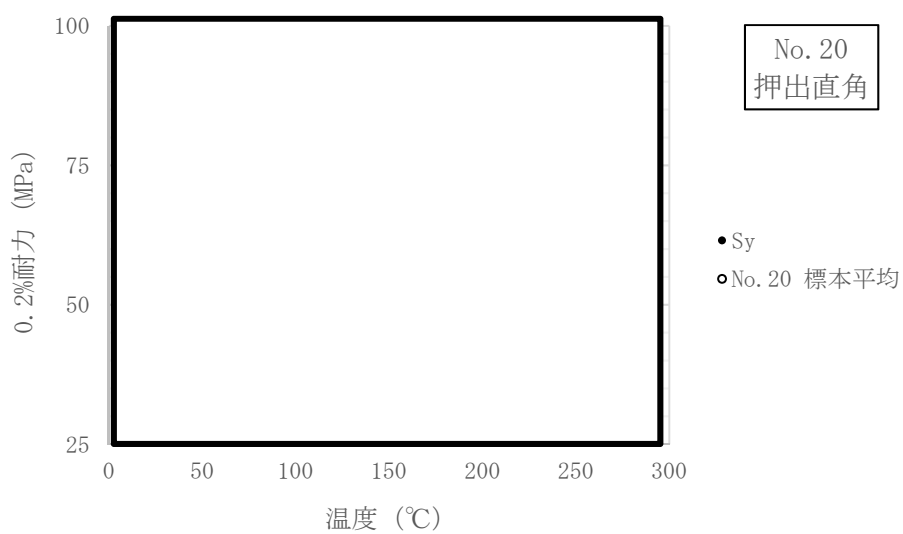
(c) フラットバー (No. 24) 、0.2%耐力



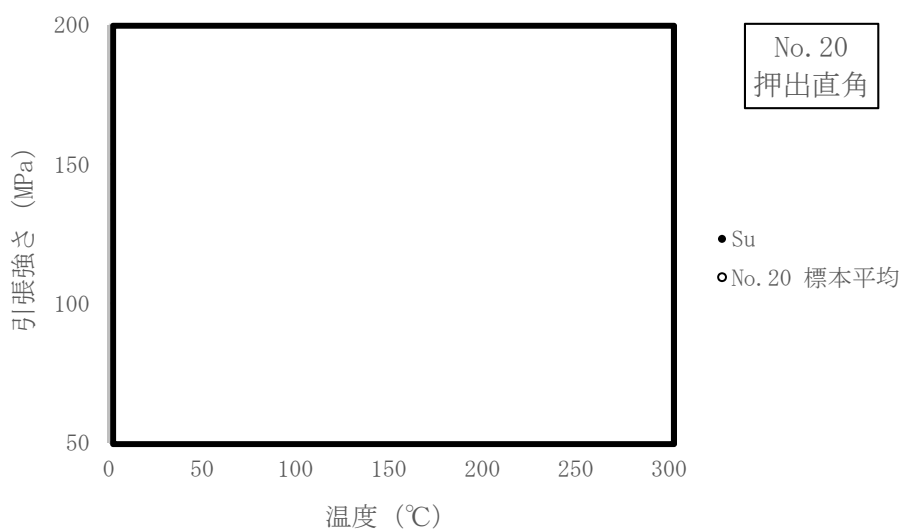
(d) フラットバー (No. 24) 、引張強さ

図7 高温の許容応力と各標本の95%信頼区間との比較 (押出直角方向) (2/3)



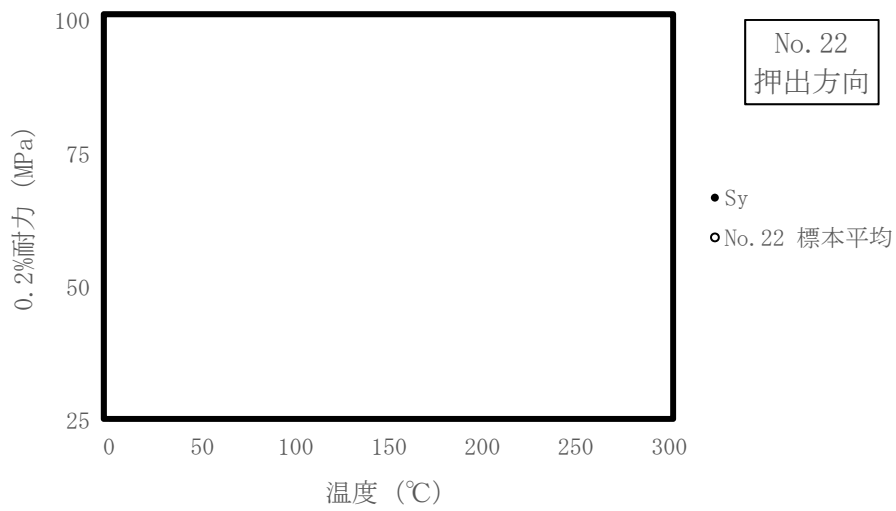


(e) 中空材 (No. 20) 、0.2%耐力

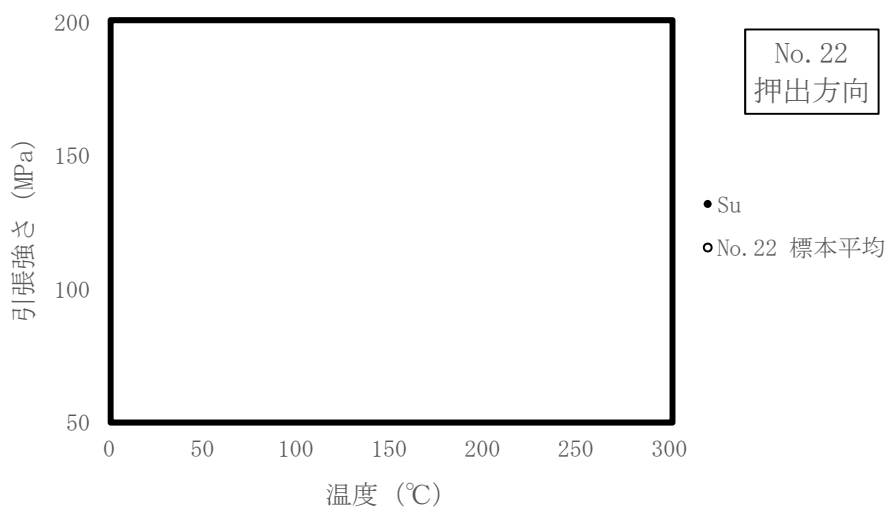


(f) 中空材 (No. 20) 、引張強さ

図7 高温の許容応力と各標本の95%信頼区間との比較 (押出直角方向) (3/3)

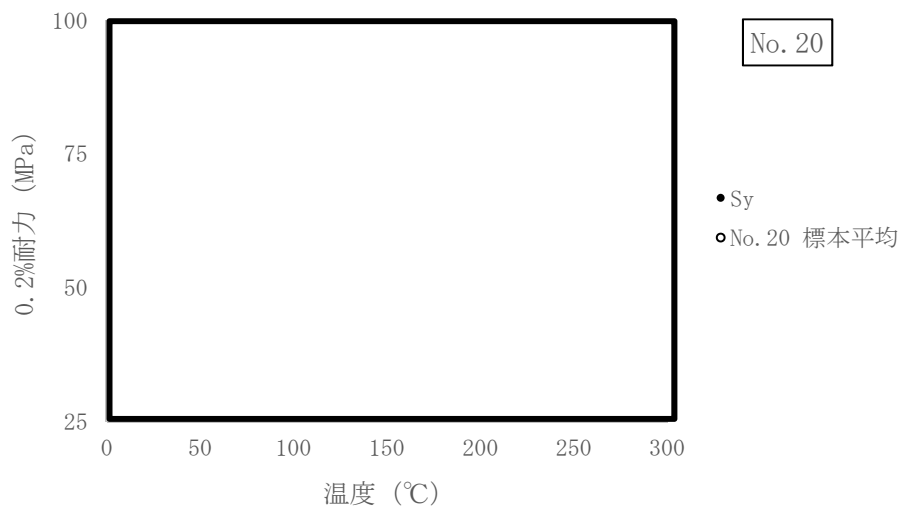


(a) フラットバー (No. 22) 、0.2%耐力

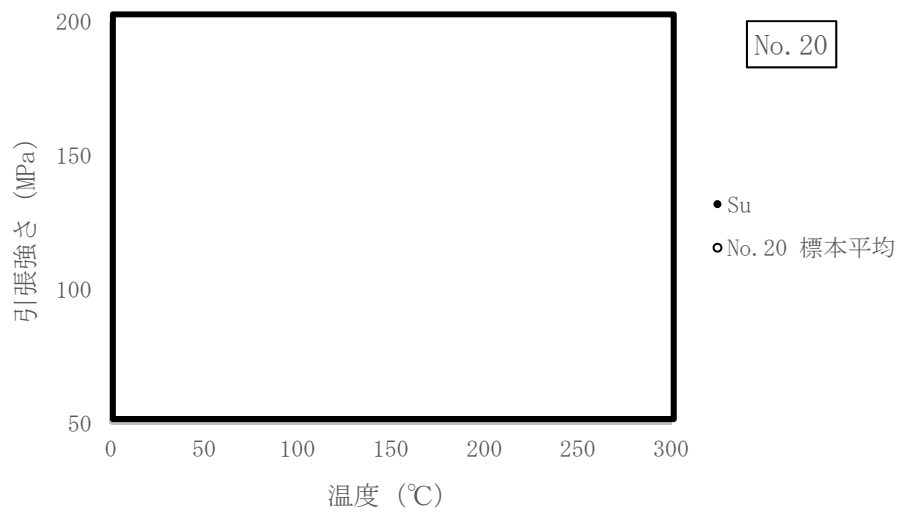


(b) フラットバー (No. 22) 、引張強さ

図 8 高温の許容応力と各標本の 95%信頼区間との比較 (押出方向) (1/2)



(c) 中空材 (No. 20) 、0.2%耐力



(d) 中空材 (No. 20) 、引張強さ

図 8 高温の許容応力と各標本の 95%信頼区間との比較 (押出方向) (2/2)

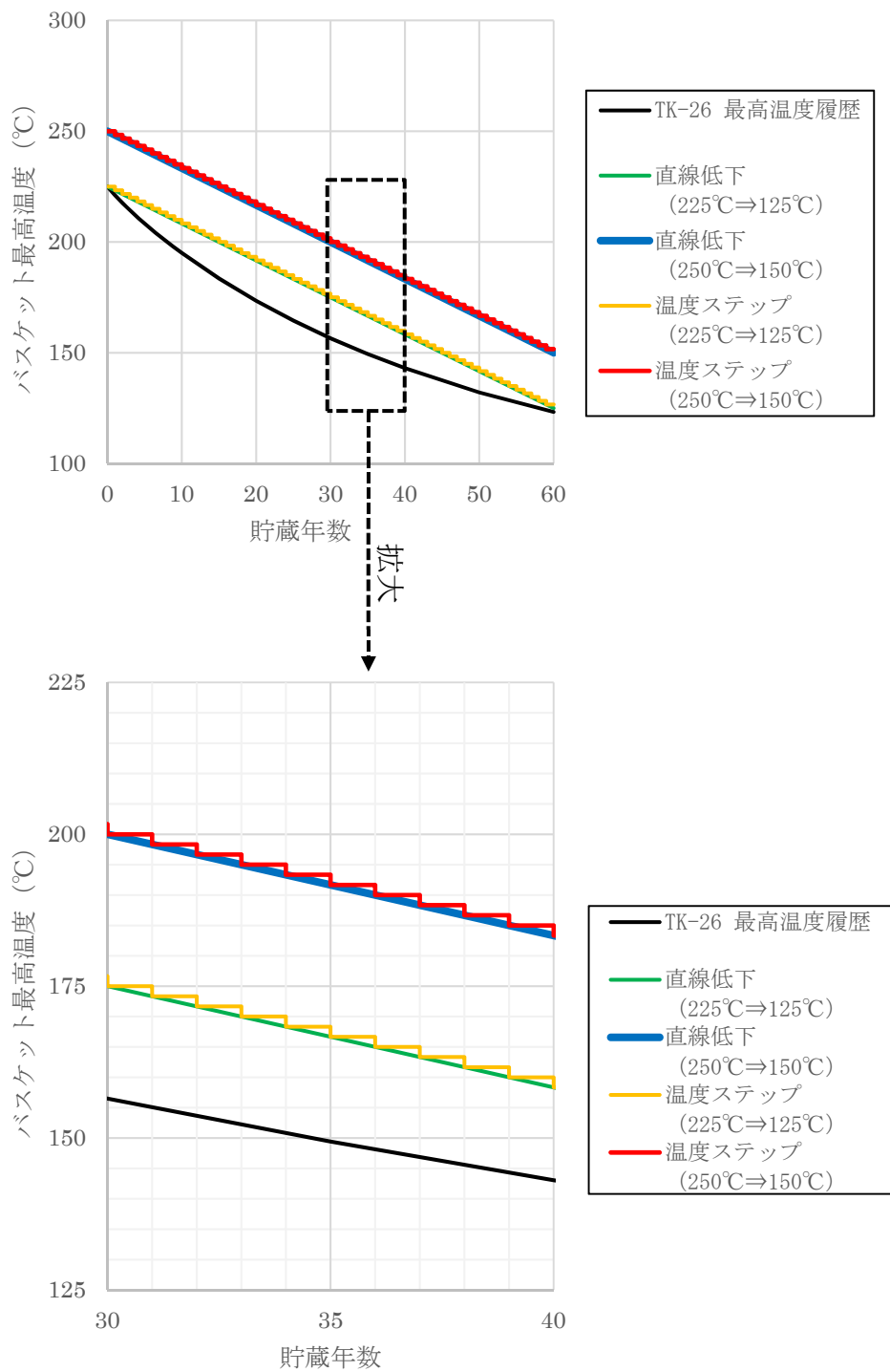


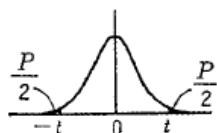
図9 TK-26型キャスクのバスケット最高使用温度を包絡する熱履歴条件の設定

本説明資料で 95%信頼区間の計算に用いた  $t$  の値は下表から引用した。 $P=0.05$  の列に、95%信頼区間に対応する  $t$  の値が記載されている。また、自由度  $\phi=n-1$  である。したがって、試験 N 数 3 のとき  $\phi=2$  であるから、この場合 95%信頼区間に対応する  $t$  の値は 4.303 である。同様に試験 N 数 4 のとき、 $t=3.182$  である。

$t$  検定により 2 つの母集団に関する母平均の差について評価したが、その際に判断基準に用いた  $t$  の値も下表を参照した。 $P=0.10$  の列に、片側検定 (有意水準 5%) に対応する  $t$  の値が記載されている。また、自由度  $\phi=m+n-2$  である。ここに、 $m$  及び  $n$  は、2 つの母集団についてのそれぞれのサンプル数である。

付表 2  $t$  分布表

両すその面積が  $P$  になるような  $t$  の値



$\phi$	$P$	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001	$P$	$\phi$
1		1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619		1
2		0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598		2
3		0.756	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941		3
4		0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610		4
5		0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859		5
6		0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959		6
7		0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405		7
8		0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041		8
9		0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781		9
10		0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587		10
11		0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437		11
12		0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318		12
13		0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221		13
14		0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140		14
15		0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073		15
16		0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015		16
17		0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965		17
18		0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922		18
19		0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883		19
20		0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850		20
21		0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819		21
22		0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792		22
23		0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767		23
24		0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745		24
25		0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725		25
26		0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707		26
27		0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690		27
28		0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674		28
29		0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659		29
30		0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646		30
40		0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551		40
60		0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460		60
120		0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373		120
$\infty$		0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291		$\infty$

本申請で使用した  $t$  値

(付録 2) 本資料で説明した引張試験条件一覧

	試験目的			
	加速試験前後における強度特性変化の確認 (表 3)	実用温度による時効処理試験前後における強度特性変化の確認 (表 8)	トレンド曲線の評価及び許容応力の妥当性確認 (表 11)	許容応力の妥当性確認 (試験片方向の違い) (表 13)
材質	1B-A3J04-O (実機材) (機械試験用供試材)	1B-A3J04-O (ラボスケール材) (機械試験用供試材)	1B-A3J04-O (実機材) (機械試験用供試材)	1B-A3J04-O (実機材) (機械試験用供試材)
熱処理の有無 (加速試験又は時効処理試験)※	無し (初期材) 有り (300℃×1,000h)	無し (初期材) 有り (125/150/175/200℃) × (50/200/1,000/2,500/5,000 /10,000h)	有り (300℃×1,000h)	有り (300℃×1,000h)
供試材 No.	フラットバー; No. 22、24、26 中空材; No. 20、28、30	No. 1-1B	フラットバー; No. 22、24 中空材; No. 20	フラットバー; No. 22 中空材; No. 20
試験片形状	JIS Z 2241 14A 号試験片	JIS Z 2241 14A 号試験片	JIS Z 2241 14A 号試験片	JIS Z 2241 14A 号試験片
試験片方向	押出方向	押出方向	押出直角方向	押出方向
試験温度	室温	室温	室温 75~275℃ (25℃刻み)	室温 100~250℃ (50℃刻み)
試験方法	JIS Z 2241 準用	JIS Z 2241 準用	JIS G 0567 準用	JIS G 0567 準用
試験 N 数	初期材: 各供試材当り 4 個 加速試験材: 各供試材当り 3 個	各供試材当り 3 個	室温: 各供試材当り 4 個 高温: 各供試材当り 3 個	各供試材当り 3 個

※加速試験: 300℃×1,000h、時効処理試験: (125/150/175/200℃) × (50/200/1,000/2,500/5,000/10,000h)