

TK-26型キャスク型式証明申請
バスケット用ほう素添加アルミニウム合金
1B-A3J04-Oに関する説明

2021年6月14日

トランスニュークリア株式会社
株式会社神戸製鋼所

本日の説明内容



本申請で使用するほう素（B）を添加したAl-Mn-Mg合金（以下、「本アルミ合金」という）は、国内で初めて金属キャスクのバスケット用構造部材として使用するものである。本アルミ合金は、強化機構として、Mgの固溶強化及びMn化合物による粒子分散強化を利用している。

そのため、設計貯蔵期間（60年）における本アルミ合金の長期健全性及び機械的強度に関して、令和2年12月24日の審査会合において、以下2点の指摘があった。

- ① 60年後のほう素添加アルミニウム合金の組織変化について
- ② ほう素添加アルミニウム合金の機械的強度について

これらの指摘事項に関する対応状況を以下に整理してご説明する。

① 60年後のほう素添加アルミニウム合金の組織変化について (1/4)



- 結晶粒組織の観察

偏光顕微鏡の観察結果及び結晶粒径の評価から、B添加により結晶粒組織が微細かつ均一となりより安定した状態となっていることが確認された。
(参照：添付資料1 図1、表1)

これより、B添加が本アルミ合金の結晶粒組織に及ぼす影響により強度が低下することはない。

① 60年後のほう素添加アルミニウム合金の組織変化について (2/4)

- B化合物の安定性確認

Mgについては、その一部がB化合物中に固溶しているため、後述の加速試験及び時効処理試験の前後において、B化合物に対する電子線マイクロアナライザ（EPMA）による組織観察及びX線回折分析（XRD）による化合物同定分析を行った。

その結果、B化合物に組織変化及び相変化が認められないことから、当該化合物は、熱的に極めて安定しており、金属キャスクの使用条件で変化しないと判断した。

（参照：添付資料1 図2、図3）

これより、Mgによる固溶強化の効果が低下することはない。

- Mg化合物の析出速度

Al-Mn-Mg合金と同様に、本アルミ合金に過剰にMgを添加した供試材についてMg化合物の析出速度を評価した結果、Al-Mn-Mg合金の場合と同等であると確認されたことから、B添加により当該の析出速度が変化することはない。

（参照：添付資料1 図4）

したがって、60年後においてもMgの固溶強化は維持される。

① 60年後のほう素添加アルミニウム合金の組織変化について (3/4)

- B添加がMn化合物の分散粒子に及ぼす影響
Mnについては、透過型電子顕微鏡（TEM）による組織観察の結果、析出したMn化合物の分散粒子のサイズ・分布状態がB添加により変化しないことを確認した。
（参照：添付資料1 図5）

これより、B添加によりMn化合物の粒子分散強化の効果が低下することはない。

① 60年後のほう素添加アルミニウム合金の組織変化について (4/4)

- 熱履歴がMn化合物の分散粒子に及ぼす影響
本アルミ合金を用いてキャスクでの使用温度条件における時効処理試験(125,150,175,200°C×10,000h)及び60年間の熱履歴を模擬した加速試験(300°C×1,000h)を行った結果、本アルミ合金のMn化合物の分散粒子のサイズ・分布状態がこれらの試験前後で変化しないことが確認された。
(参照：添付資料1 図6)

このため、60年後においても当該強化機構は維持される。

60年間の熱履歴を模擬する加速試験条件の設定根拠

- Mn化合物の分散粒子は、熱曝露により数密度が低下すると、粒子分散強化の効果が低下する。このような現象は、アルミニウム母相におけるMn原子の拡散律速によって生じると考えられる。
- そこで、Mn原子の拡散距離に着目して、60年間の熱履歴を包絡する加速試験条件として300°C×1,000時間を設定した。

② ほう素添加アルミニウム合金の 機械的強度について

- 本アルミ合金の許容応力

先述の加速試験を経た供試材の引張試験データを用いて、「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」に準拠して本アルミ合金の許容応力の評価を行った。

(参照：添付資料1 表2)

- 機械的強度の誤差評価

当該供試材の機械的強度データの不確かさを、データ点数が限定されていることを適切に考慮した上で評価するため、標本毎に誤差範囲を求め、その下限値がいずれも当該許容応力を上回っていることを確認した。

これより、本アルミ合金の機械的強度は60年後においても当該許容応力を下回ることはないため、バスケットに使用する構造部材として適切であると判断している。

(参照：添付資料1 図7)

添付資料1

ほう素添加アルミニウム合金に関する試験データ

結晶粒組織について

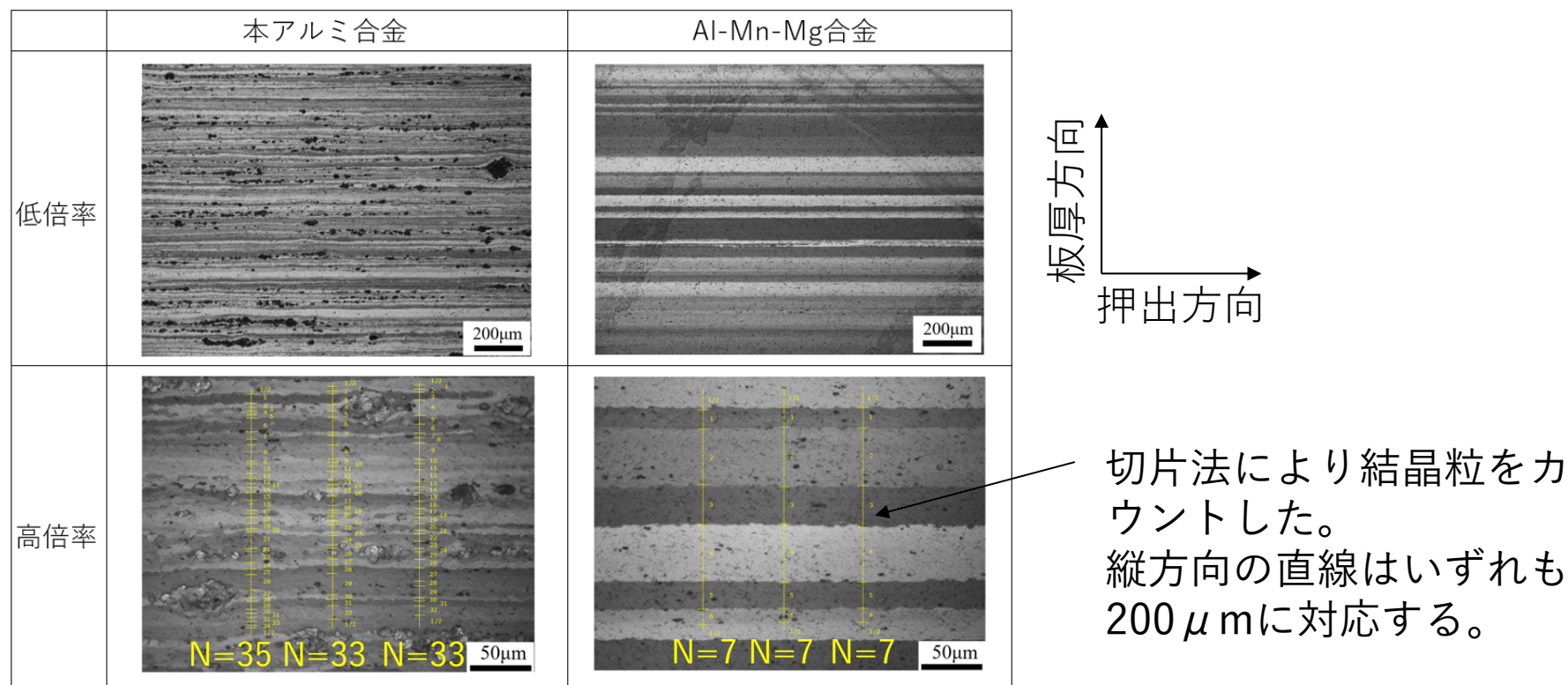


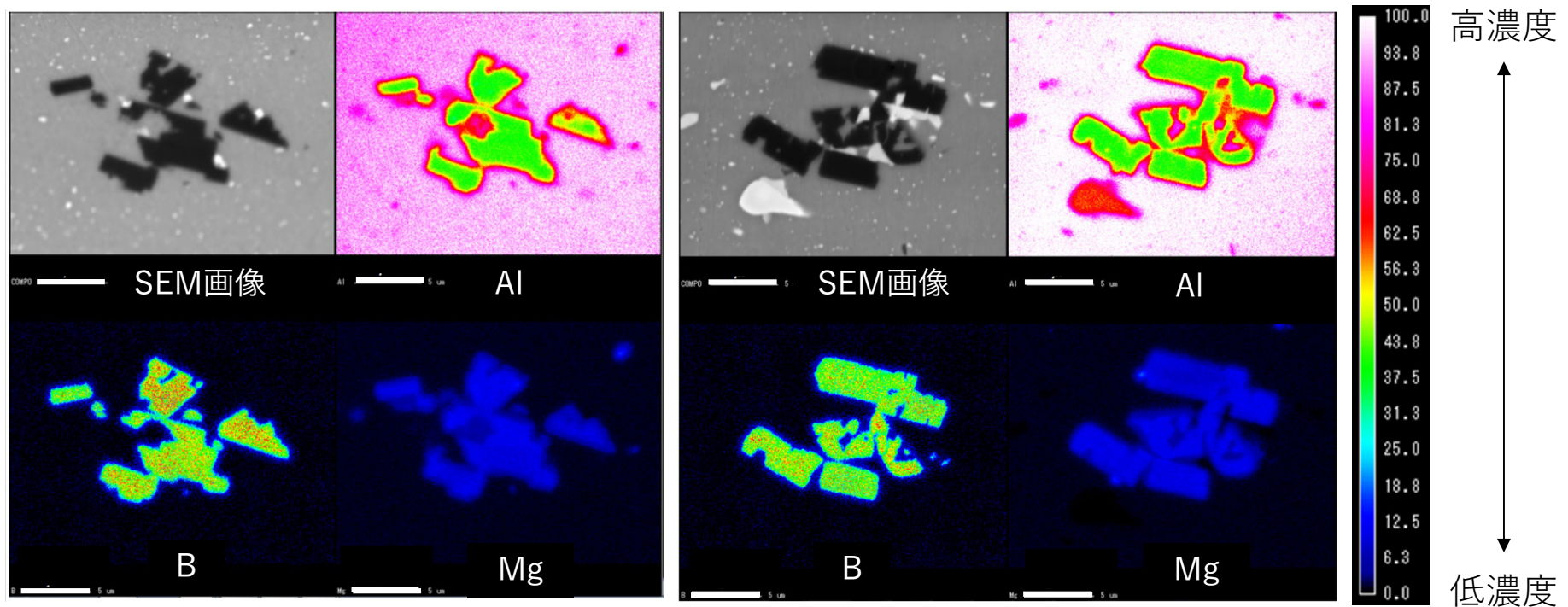
図1 本アルミ合金とAl-Mn-Mg合金の結晶粒組織

表1 本アルミ合金とAl-Mn-Mg合金の結晶粒径

供試材	測定粒子数N (個)			結晶粒径※ (μ m)			平均粒径 (μ m)
本アルミ合金	35	33	33	5.7	6.1	6.1	5.9
Al-Mn-Mg合金	7	7	7	28.6	28.6	28.6	28.6

Mgについて (1/3)

- Mgの一部は、B化合物中に固溶しているため、B化合物に対する電子線マイクロアナライザ（EPMA）による組織観察を行った。
- 加速試験（詳細は後述）の前後において、B化合物に組織変化は認められない。



(a)初期材

(b)加速試験材

図2 電子線マイクロアナライザによるB化合物の元素マッピング

Mgについて (2/3)

- B化合物についてX線回折分析 (XRD) による化合物同定分析を行ったが、加速試験 (詳細は後述) の前後において相変化は認められない。

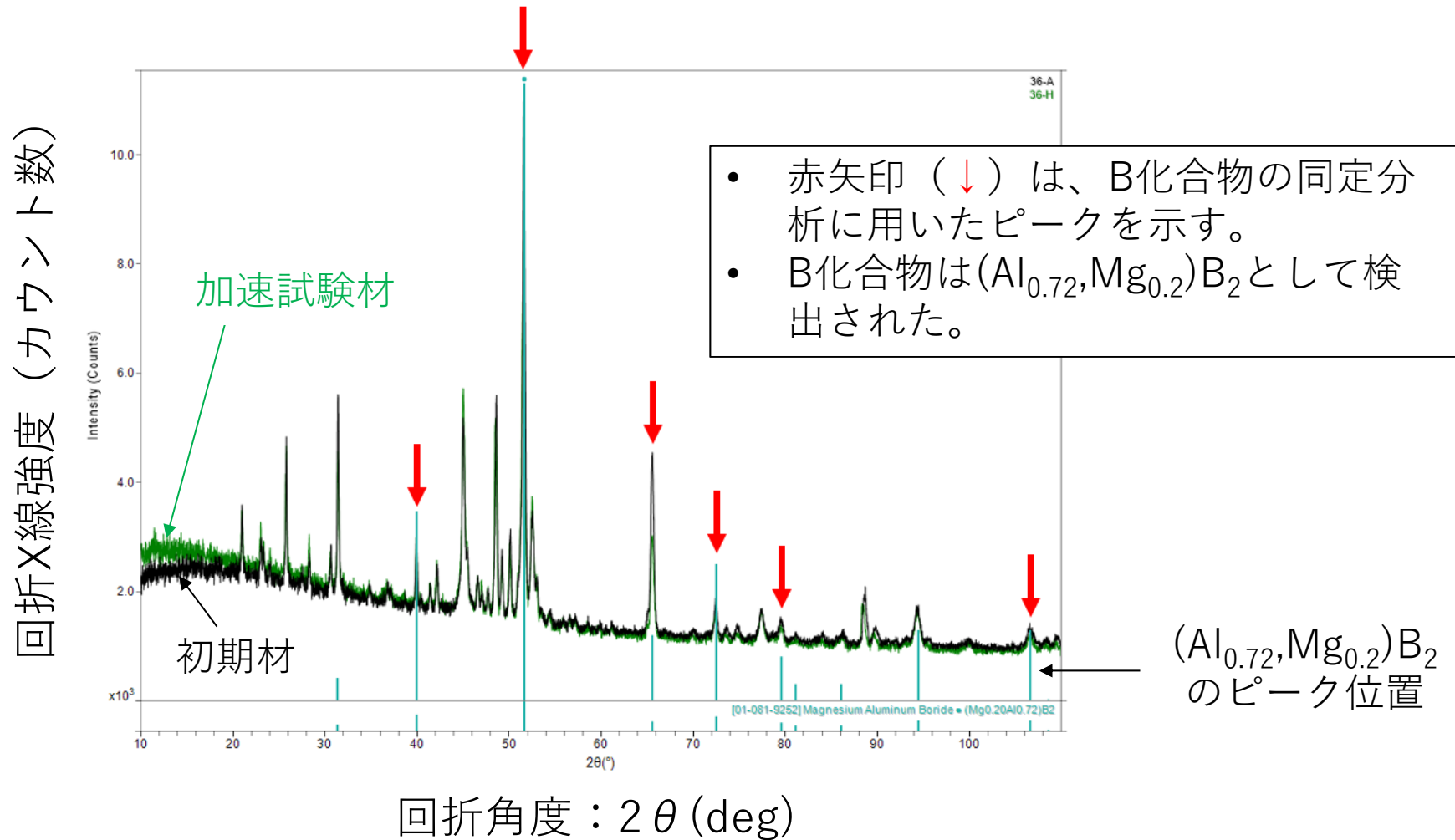


図3 X線回折分析によるB化合物の同定分析 (加速試験前後の比較)

Mgについて (3/3)

- B添加によりMg系化合物の析出速度に変化は認められない。

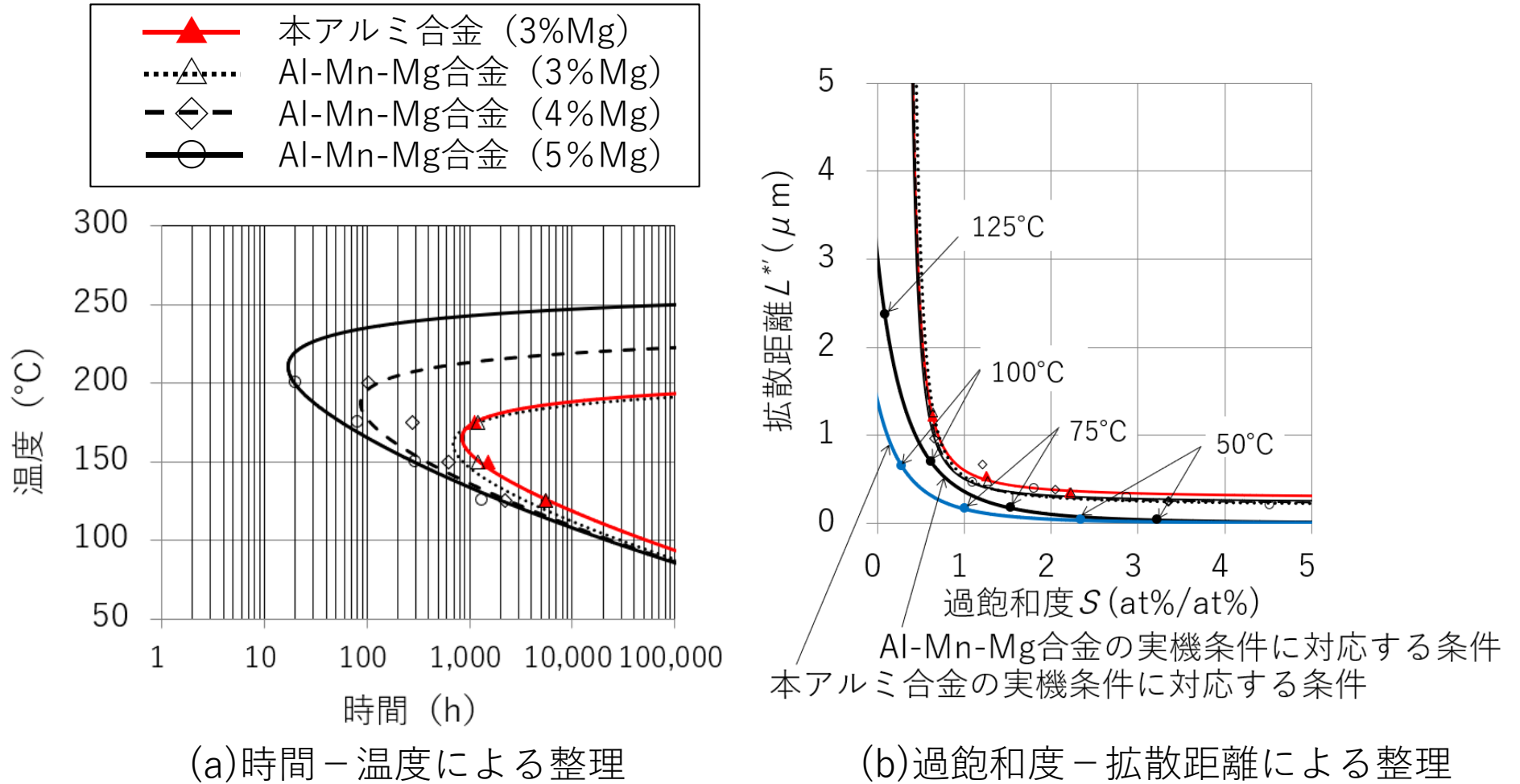


図4 析出開始条件の評価

Mnについて (1/2)

- 棒状の分散粒子（矢視）及び球状の分散粒子（破線囲み）は、ともにMn化合物であることを確認している。

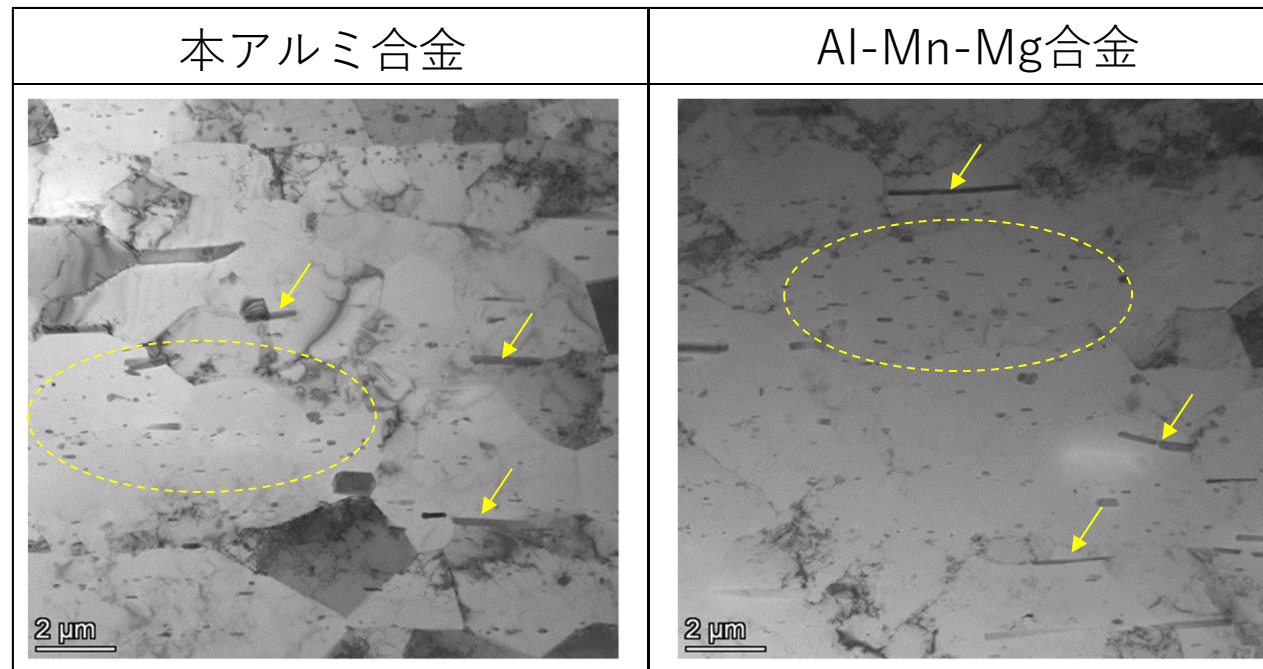


図5 透過型電子顕微鏡による観察結果（B添加の影響）

Mnについて (2/2)

- 加速試験 (300°C × 1,000h) 前後において、析出したMn系化合物のサイズ・分布状態に変化は認められない。これより、60年後も粒子分散強化の効果は維持される。

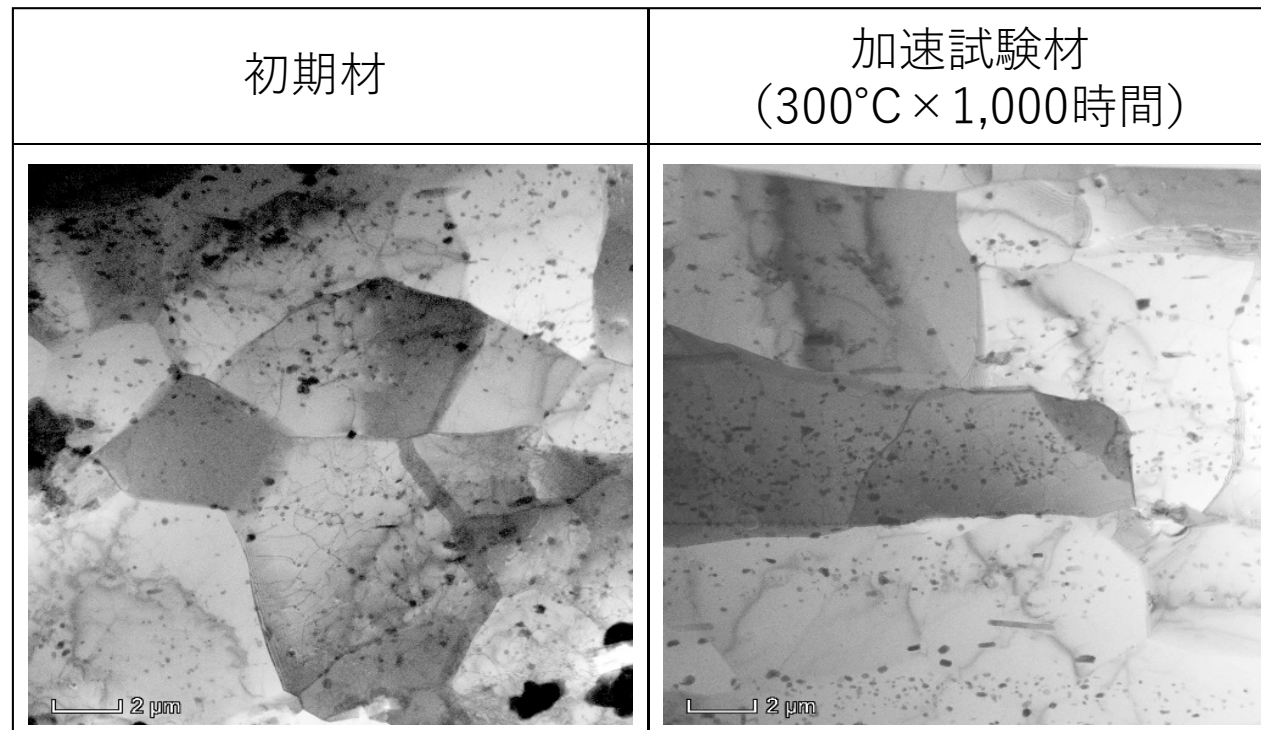


図6 透過型電子顕微鏡による観察結果 (加速試験の影響)

機械的強度について (1/2)

- 許容応力は、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格の新規材料採用ガイドライン」に準拠して設定した。

表2 許容応力 (Sy及びSu) の設定方法に関する規格に対する適合状況の確認

規格要求	本申請の実績	評価
標本数は、3標本とする。	常温の許容応力は、6標本より求めている。	適合
高温強度を各標本について求める。	高温強度は、3標本について求めている。	適合
高温の許容応力は、トレンド曲線による方法を用いて求める。	高温の許容応力は、左記の通り求めている。	適合

機械的強度について (2/2)

- 各標本について、誤差範囲の下限値が許容応力を上回っていることを確認した。

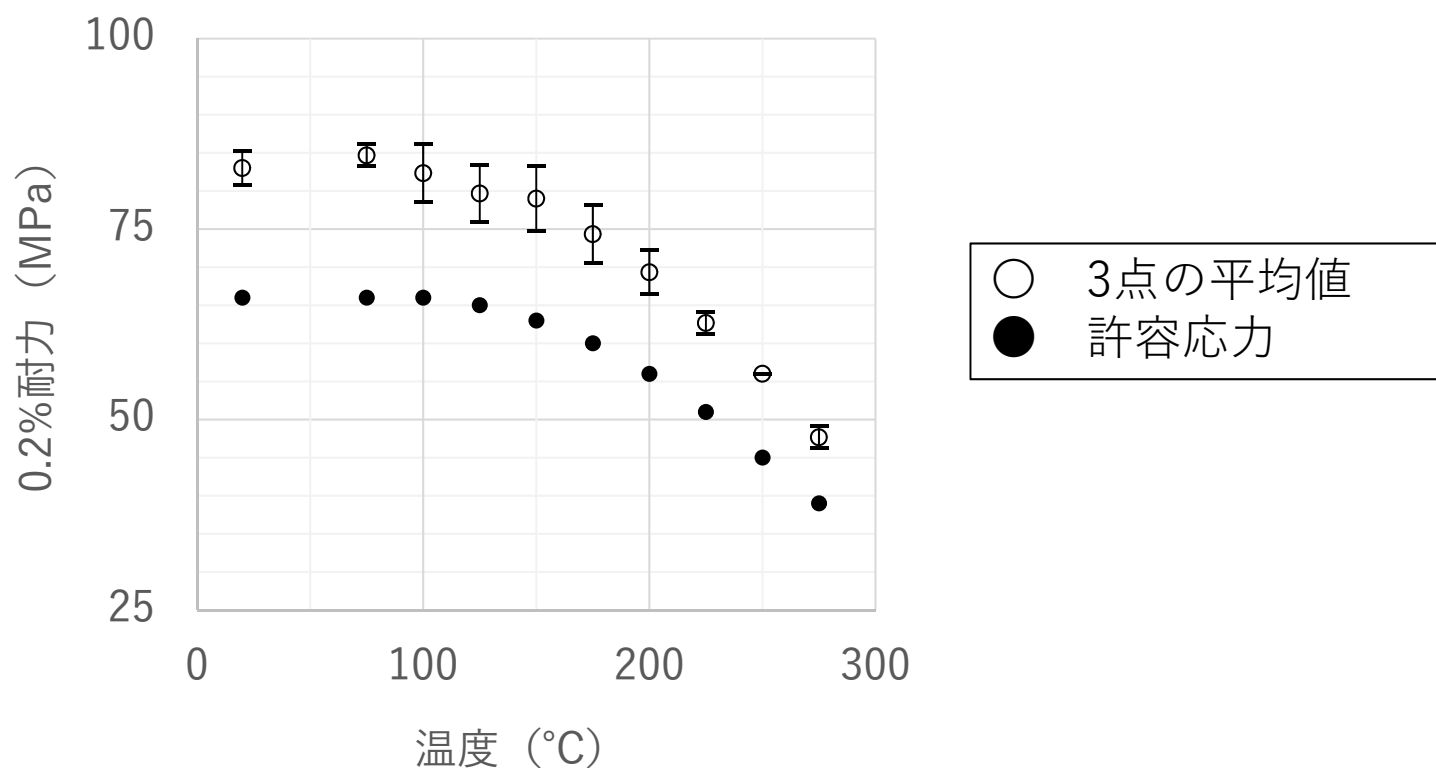


図7 本アルミ合金の機械的強度の誤差範囲と許容応力の比較例