

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

1. 本申請で使用するバスケット用ほう素添加アルミニウム合金（以下、「本アルミ合金」という）は、強化機構として、Mg の固溶強化及び Mn 系化合物の分散強化を用いている。このうち、Mg の固溶強化については、Mg 添加量を適切に設定すれば、母相中の Mg 固溶量はキャスクの使用環境で変化しないと判断できるため、固溶強化も変化しないことを説明する。一方、Mn 系化合物の分散強化については、60 年間の熱履歴により低下する可能性がある。このため、加速試験^{※1}により 60 年後の状態を適切に模擬した上で許容応力が設定されていることを説明する必要がある。
2. Mg の固溶強化については、軽金属学会誌に投稿した研究論文に示された Mg 添加量に基づき許容応力を設定したため、60 年後においても強度低下が生じることはない^{※2}。ただし、当該論文はほう素を添加していない Al-Mn-Mg 合金のデータによるものであることから、本アルミ合金に対してその結果を適用して良いことを以下のように確認した。
3. 本アルミ合金と当該論文の材料を用いて、ほう素添加の影響を以下のように評価した。
 - 1) 本アルミ合金は、ほう素添加により結晶粒が微細化する。これは、当該論文において適切な Mg 添加量の結論を導き出すために実験的に求めた Mg 系化合物の析出速度を定性的には増加させる方向の組織変化であるが、本アルミ合金に過剰に Mg を添加した試料（約 3mass%）を用いた時効処理試験^{※3}の結果を、同等の Mg 量を添加した Al-Mn-Mg 合金と比較し、析出速度に結晶粒微細化が影響を及ぼさないことを確認した。なお、結晶粒微細化の確認方法としては、偏光顕微鏡の観察結果並びに切片法による結晶粒径の比較を実施した。
 - 2) 本アルミ合金のほう素化合物は、溶解工程（製造時）において Mg を僅かに吸収するが、製造後は、ほう素化合物に含有される Mg 量が変わらないことを本アルミ合金の加速試験及び時効処理試験前後の X 線回折分析（以下、「XRD 分析」という）と電子線マイクロアナライザ（以下、「EPMA」という）により確認した。このことから、キャスクの供用期間において、ほう素化合物が Mg を吸収することによるアルミ母相中の Mg 固溶量の減少は生じないことを説明する。以上の結果から、本アルミ合金に当該論文の結論を適用できると判断した。
4. Mn 系化合物の析出物は、熱曝露による粒成長に伴い数密度が低下し、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、アルミニウム母相における Mn 原子の拡散により律速されると考えられる。そこで、加速試験条件（300℃×1,000h）は、Mn の拡散距離を指標とし 60 年間の熱履歴を保守的に包絡するように設定した。なお、この条件は、本申請におけるバスケットの最高使用温度 ℃ が約 年継続する場合に相当する。
5. 当該加速試験の前後比較において、以下の事項を確認した。
 - 1) Mn 系化合物の析出組織を透過電子顕微鏡観察により比較し、析出物のサイズや分布状態に有意な変化が認められないことを確認した。また、Mn 系化合物の組成を XRD 分析により比較し変化がないことを確認した。
 - 2) 結晶粒組織について、偏光顕微鏡の観察結果と切片法による結晶粒径の評価により比較し、変化が認められないことを確認した。なお、本アルミ合金は最終熱処理として焼なまし処理（O材処理）を実施

施するため、再結晶の駆動力となる転位組織はほとんど除去されており、キャスクの温度条件により結晶粒組織が変化することは無い。

- 3) ほう素化合物に着目した EPMA の観察結果を比較し、分布状態及び組成に有意な変化が認められないことを確認する。なお、当該のほう素化合物は Al-B 系状態図より、室温から約 970°C まで相変化しない極めて安定な化合物である。さらに、先述の通り当該のほう素化合物が僅かに Mg を吸収していることを踏まえ、Al-B-Mg 系状態図によりキャスクの温度条件で安定相と認められることを示す。
6. 本アルミ合金の許容応力は、当該加速試験後、すなわち 60 年後の組織状態を保守的に模擬した試料の試験データにより決定した。また、日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格に準拠して決定した。
7. 当該加速試験前後の機械特性について、t 分布による区間推定の結果を比較し、本アルミ合金が 60 年後においても強度低下しない、熱的安定性に優れた材料であることを確認した。
8. さらに、許容応力について、当該の区間推定の結果と比較し、適切に設定されていることを確認した。



※1) 60 年間の熱履歴を保守的に模擬する熱処理試験であり、Mn の拡散距離を用いて、300°C×1,000h と設定した。

※2) 当該論文では、まず Al-Mn-Mg 合金における Mg 系化合物の析出挙動（速度）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 までの時効処理試験^{※3}を実施し、この結果得られる Mg 系化合物の析出開始時間を用いて、当該モデルの妥当性を確認している。このモデルと、過飽和度及び拡散距離の評価式を組み合わせ得られる Mg 系化合物の析出開始条件により、Mg の添加量が 1.0mass% であれば、供用期間 60 年で想定されるいかなる熱履歴においても Mg 系化合物の析出による固溶強化の低下は生じないと判断している。

※3) (125、150、175、200) °C×10,000h の熱処理試験であり、Mg 添加量を決定するために実施したものである。