

Doc No. 18-180-1-173 Rev. 0

2020年11月4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)  
に関する論点の整理と今後の説明方針

## 1. 論点の整理と説明方針

本章では、本申請におけるヒアリングでの説明対応において、論点となった主な2点について整理した上で、これらに対する説明方針を示す。

### 1.1 ほう素化合物の熱的安定性について

#### 【論点の整理】

図1に、本申請で議論の対象となったAl-B系状態図<sup>1)</sup>を示す。この状態図では、213℃に等温線が破線で示されている。この等温線より、本アルミ合金に含有されるほう素化合物のAlB<sub>2</sub>が、貯蔵中にAlB<sub>12</sub>に相変化する可能性が示されている。また本申請では、長時間熱処理条件として300℃×1,000hを採用していることから、213℃以下と安定相が異なる条件を採用していることに対する説明を求められている。

#### 【説明方針】

参考文献1の内容を調査した結果から、当該のAl-B系状態図の評価に使用した実験データに問題点があることが判明した。当該文献では、AlB<sub>2</sub>をAlB<sub>12</sub>に相変化させた際の反応熱を測定し、そのデータに基づいて状態図を評価している。しかしながら、参考文献1では、熱分解の生成物に対するX線回折分析（以下、「XRD分析」という）の結果に基づく記述より、目的の生成物であるAlB<sub>12</sub>は生成されていない。このことから、当該の反応熱は適切に評価されていないと判断される。213℃の等温線が破線となっているのは、このような実験の不完全性を反映していると推察される。したがって、その反応熱を基に評価したAl-B系状態図を使用して本アルミ合金の熱的安定性を議論することはできない。

この点を踏まえ、Al-B系状態図に関して改めて文献調査したところ、新たに見つかった状態図では213℃以下の温度領域においてもAlB<sub>2</sub>が安定相となっていた<sup>2)</sup>。この状態図を図2に示す。この図は、文献値を用いて再評価したAlB<sub>2</sub>の標準生成エンタルピー<sup>\*1)</sup>により評価されたものである。このデータには、文献値の中間的な値が採用されているが、参考文献1のデータを除けば最も大きな値となっており、これはAlB<sub>2</sub>の熱的安定性の観点で保守側の設定である。したがって、図2の状態図は、本アルミ合金の熱的安定性を評価する上で適切と判断される。これよりAlB<sub>2</sub>は213℃以下でも安定相と認められるため、長時間熱処理の温度条件を300℃とすることは妥当である。

以上の文献調査に基づく説明に加え、200℃以下の温度条件における10,000hまでの長時間熱処理試験<sup>\*2)</sup>に基づいた説明を実施する。この試験では、ほう素化合物に着目したXRD分析及び電子線マイクロアナライザによる調査を実施し、10,000hを通じて、組織変化が認められないことが確認されている。加えて、材料強度を確認するため引張試験を実施しており、10,000hの前後で有意な変化が無いことが確認されている。

- ※1) 化合物に特有の材料特性値であり、状態図、化合物の相安定性を評価する際に使用される。
- ※2) 125℃、150℃、175℃、200℃の4温度条件で10,000hの長時間熱処理を実施している。

## 1.2 長時間熱処理条件 (300℃×1,000h) の妥当性について

### 【論点の整理】

長時間熱処理条件 (300℃×1,000h) の妥当性には、次に述べる2つの観点での説明が必要である。一つ目は、上述したほう素化合物の熱的安定性に関連するものである。この点については前項で説明したのでここでは割愛する。二つ目は、最大60年間の供用期間における強化機構の維持についてである。

### 【説明方針】

本アルミ合金は、Mgの固溶強化及びMn系化合物 (Al<sub>6</sub>Mn など) の粒子分散強化により強度を高めた材料であることから、これらの強化機構が60年間維持されることを説明する。まず、Mgの固溶強化については、補足説明資料1-7別紙3にて説明したように、最大60年間の供用期間において固溶強化を維持できる添加量 (1.0mass%)<sup>3),4)</sup> に対して許容応力が設定されている<sup>5)</sup> ため、長時間熱処理により評価する必要は無い。次にMnの粒子分散強化について、補足説明資料1-7別紙2にて、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、60年間の熱履歴に対し保守側の条件として300℃×1,000hを設定した<sup>6),\*3)</sup> ことを説明している。本アルミ合金の許容応力は、この長時間熱処理を実施した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おり妥当である<sup>5)</sup>。

- ※3) 300℃という温度水準は、Mnの再固溶など貯蔵期間中にほとんど生じない組織変化を抑止できる範囲で、かつ本アルミ合金の熱劣化を加速するための温度条件として設定したものである。

## 2. Al-B系状態図に関するその他の文献について

参考文献2の他にも、213℃以下でAlB<sub>2</sub>が安定相であることを示す状態図が存在している<sup>7),8),9)</sup>。参考文献7及び参考文献8のそれは、状態図計算ソフトウェアを用いて評価されたものである。参考文献9は、1989年までに発表されたAl-B系状態図に関連する文献を基にしたレビュー論文である。参考文献10では、室温におけるAlB<sub>2</sub>の安定性を確認するための実験を実施している。この文献では、AlB<sub>2</sub>を室温で約1年半保持した後、相変化が認められなかったことから、AlB<sub>2</sub>は室温で安定な化合物であると結論している。

## 参考文献) ※4

- 1) D. Mirkovic, J. Grobner, R. S. Fetzer, O. Fabrichnaya, H. L. Lukas, "Experimental study and thermodynamic re-assessment of the Al-B system", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 384, Issues 1-2, p168, (2004)
- 2) J. Cho, S. Kim, "Mechanical Behaviors and Stability of Al-rich Al-Mg-B Alloys", *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Aluminum Alloys*, p1757, (2010)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) M. Park, J. Cho, S. Lee, C. Kim, "Effect of Boron on Electrical and Thermal Conductivities of Aluminum", *Journal of Korea Foundry Society*, Vol. 36, No. 5, p147, (2016)
- 8) N. A. Belov, M. E. Samoshina, A. N. Alabin, K. Y. Chervyakova, "Effect of Copper and Magnesium on the Structure and the Phase Composition of Boron/Aluminum Composite Ingots", *Russian Metallurgy*, Vol. 2016, No. 1, p76, (2016)
- 9) O. N. Carlson, "The Al-B (Aluminum-Boron) System", *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, Vol. 11, No. 6, (1990)
- 10) V. T. Serebryanskii, V. A. Epel'baum, "PHASE DIAGRAM OF THE ALUMINUM - BORON SYSTEM", *Journal of Structural Chemistry*, Vol. 2, p692, (1961)

※4) 参考文献 4)-6) については、本申請後に発表したものである。また、参考文献 9)

及び 10) については、昨年 8 月にコメント回答資料を提出した後で見つかったものである。

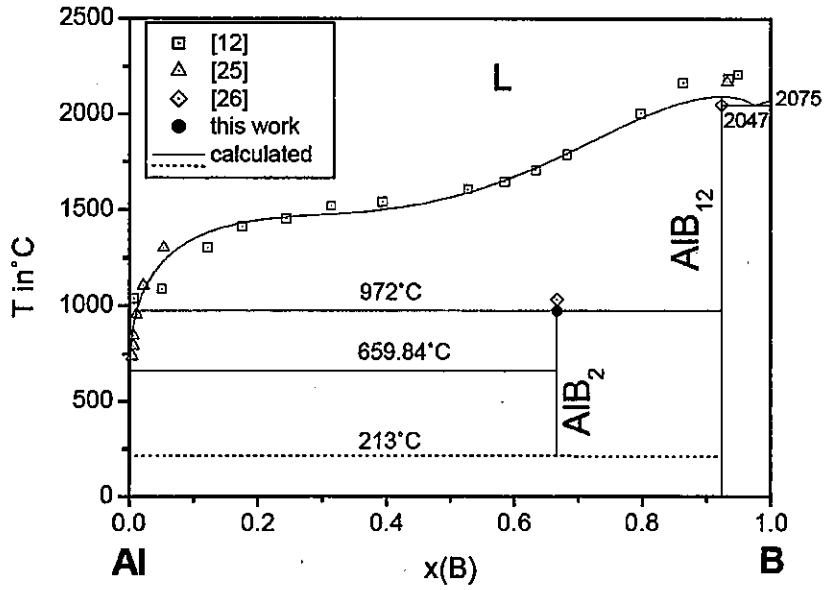


図 1 議論の対象となった Al-B 系状態図<sup>1)</sup>

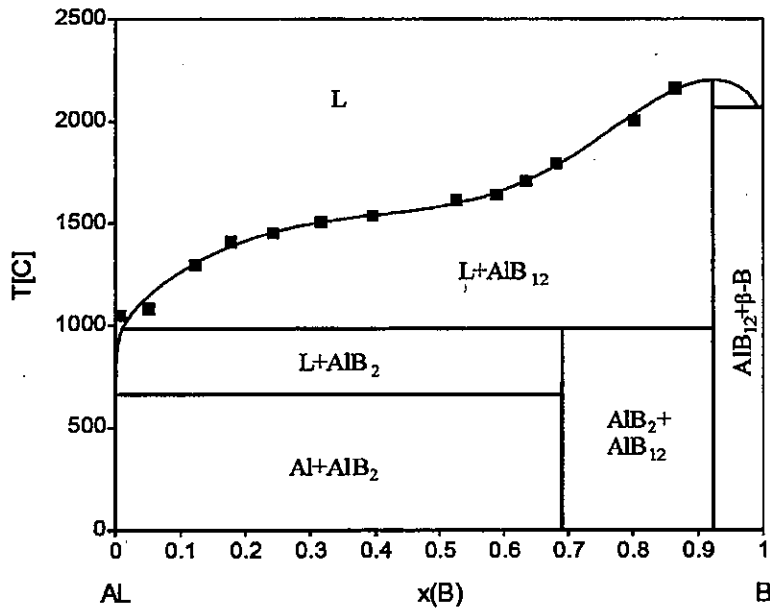


図 2 新たに見つかった Al-B 系状態図<sup>2)</sup>