

鑄造用難燃耐熱マグネシウム合金KEHMAの開発

Development of Flame-Retardant and Heat-Resistant Magnesium Alloy KEHMA for Casting

閻師昭彦* 金津安秀** 宮本武明* 廖金孫***

Akihiko Koshi Yasuhide Kanatsu Takeaki Miyamoto Jinsun Liao

自動車部品には ADC12 を代表とするさまざまなアルミニウム合金が採用されているが、二酸化炭素の排出規制が 2020 年に欧州を中心に強化され軽量化ニーズがますます高まる中、マグネシウム合金は比重がアルミニウム合金より小さいことから、マグネシウム合金の適用拡大が喫急の課題になっている。一方、マグネシウム合金の普及はアルミニウム合金に遠く及んでいない。適用拡大のための技術的な課題はさまざまあるが、自動車エンジン周りの部品などに適用される場合、①中高温域での耐熱性の向上、②難燃性の保有、③合金製造コストの低減および、④鑄造時の流動性向上、などの課題を解決する必要がある。当社はこれらの課題を克服し、ADC12 相当の中高温域での耐熱性を有する難燃マグネシウム合金「KEHMA」の開発に成功した。本文では鑄造用難燃耐熱マグネシウム合金 KEHMA の特性を詳細に報告する。

While various aluminum alloys such as ADC 12 have been adopted for automobile components, the regulation of carbon dioxide emissions will be further strengthened in Europe in 2020, and thus practical application of magnesium alloys with a lower specific gravity than aluminum alloys has become an urgent issue. However, magnesium alloys have still not become widespread compared to aluminum alloys. There are various technical challenges in the practical use of magnesium alloys, and the main challenges, including the (1) improvement of heat resistance in the medium and high temperature ranges, (2) retention of flame-retardant, (3) the cost reduction of alloy production, and (4) manufacturing stability, exemplified by the improvement of the flowability of molten alloys during casting, have to be dealt with in order to employ magnesium alloys in the components around automobile engines. We have solved the above technical issues and succeeded in developing the flame-retardant magnesium alloy KEHMA which is heat-resistant and excellent for product manufacturing. In this paper, the characteristics of KEHMA are reported in detail.

1 はじめに

世界的に排出ガス規制が強化される中、自動車業界において排出ガス低減につながる燃費向上を実現するためには軽量化が必須とされているが、既存部材の薄肉化などの限界から材料置換による軽量化が期待される¹⁻³⁾。図 1 に示しているように、マグネシウムは実用金属の中で最も軽量の金属であるため、自動車部品用材料としてアルミニウム合金からマグネシウム合金への材料置換が検討されている。しかしながら、既存の ADC12 に代表されるアルミニウム合金製エンジンやトランスミッションケースなどへ適用するためには、高温環境下でのボルト締結力が維持できる耐熱特性が課題である⁴⁾。また、従来マグネシウム合金の普及が進まなかった理由として、燃焼し易く高コストなためモノづくりにおいて敬遠されてきたという背景がある。燃焼するメカニズムとしてはマグネシウム溶湯が空気中の酸素と接触することにより酸化燃焼反応が起こることが報告されている。従来の燃焼抑制対策としては塩化物系フラックスの散布や亜硫酸ガス、SF₆ ガスおよび同程度の特性を有する環境対応防燃ガスにて覆うことで空気との絶縁が実施されてきたが、近年では Be、Ca 及び Y などの微量元素添加に

よるマグネシウム合金の難燃性向上が提案されている。特に日本、欧州並びに韓国においては難燃マグネシウム合金の開発と難燃性評価が積極的に行われている。

本研究は合金元素の添加による難燃性向上と高融点金属化合物の粒界への晶出による耐熱特性向上を目指して、鑄造用難燃耐熱マグネシウム合金 KEHMA を開発した。本報告では KEHMA の諸特性を詳述する。

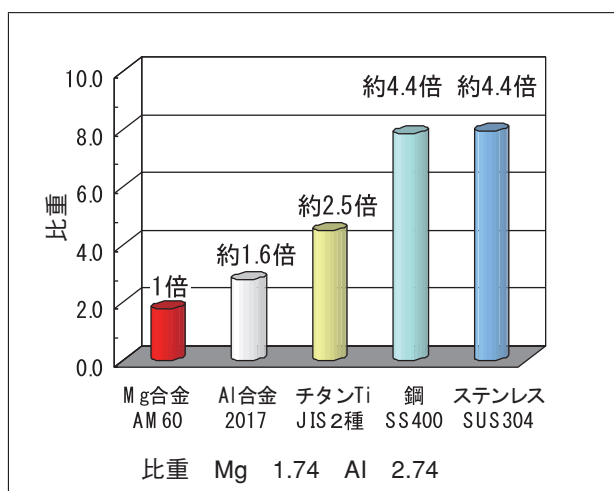


図 1 実用金属の比重

2 開発合金 (KEHMA) の特徴

開発した合金は従来の汎用マグネシウム合金と比較して相違点としては下記が挙げられる。

- (1) 175℃程度の中温域において ADC12 と同等の耐熱性 (耐クリープ特性) がある。
- (2) 1,000℃付近までは発火しにくく、鑄造作業や旋盤加工等の機械加工に適している。
- (3) 汎用マグネシウム合金 (AZ91 系) と比較して鑄造性 (流動性) が向上した。
- (4) 希土類元素を使用しておらず、低コスト化が可能な材料である。

3 実験方法

3.1 供試材の作製

KEHMA 合金は、工業用純 Mg、Al、Ca および Mn などの合金組成材料を、Ar ガスを主成分とするシールドガスを用いて大気中にて溶解を行った後、重力鑄造法にて作製した。

引張試験片および引張クリープ試験片は、KEHMA 合金インゴットを 350t コールドチャンバー式ダイカストマシンにて試験用金型を用いてダイカストを行い作製した。

圧縮クリープ試験片は、図 2 に示す JIS H5203 金型試験片鑄型を用いて重力鑄造したインゴットから採取した。

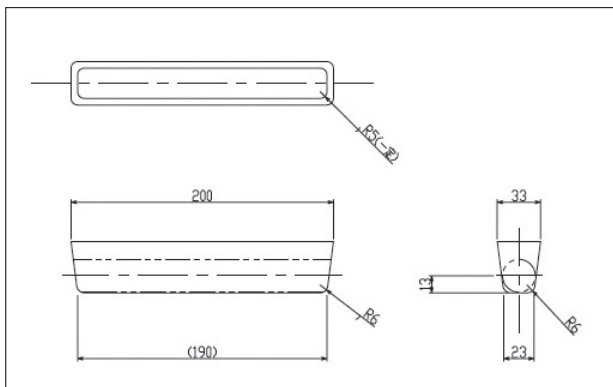


図2 圧縮クリープ試験片重力鑄造インゴットの形状

3.2 金属組織観察

ダイカストで得られた引張試験片の断面を鏡面に研磨し、ピクリン酸腐食液でエッチングした後、光学顕微鏡観察および SEM-EDS 分析を実施した。

3.3 引張試験

JIS H5301 に準拠したダイカスト合金引張試験片に対して (株) 島津製作所製万能試験機を用いて JIS Z2241 に準じて引張試験を行い、引張強さおよび伸びを測定した。引張速度は 1 mm/min であった。

3.4 引張クリープ試験

耐熱性を確認するために、ダイカスト試験材から図 3 に示すクリープ試験片に加工した後に JIS Z2271 に準じて 175℃にてクリープ試験を行い、クリープ特性を測定した。本文に示しているクリープ特性は 2 本の試験片の平均値とした。

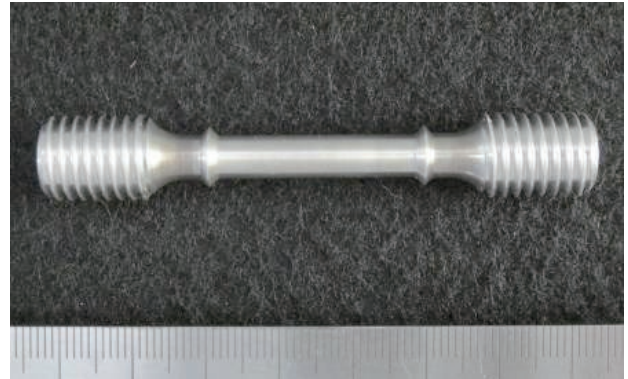


図3 引張クリープ試験片形状

3.5 圧縮クリープ特性

実際のボルト締結状態を模擬するため下記の手順で試験を行った。

- (1) 常温にてアルミ製台座にリング状試験片をワッシャー (A5056 製) および、ひずみゲージ付きのボルト (M8、SCM435 製) を用いて 8kN の定荷重 (≒ 42MPa) にて締結した。締結状況を図 4 に示す。
- (2) 試験体を 175℃の加熱炉内にて 300h 保持した。
- (3) 試験体を加熱炉から取出し、室温に冷却した後、軸力を測定した。また、加熱前の初期締結軸力に対する加熱後の軸力の比を軸力保持率として算出した。

本文に示している軸力保持率は 2 本試験片の平均値とした。

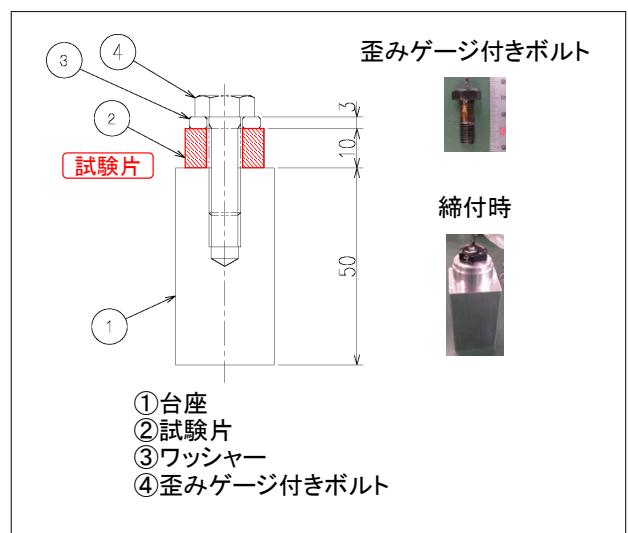


図4 圧縮クリープ試験組立図

3.6 湯流れ性評価

湯流れ性評価は、渦巻き試験片（砂型）に大気中で鑄造した際の流動長によって評価した。鑄込み温度は合金の液相線温度より約 100℃ 高い温度とした。

3.7 燃焼試験

(1) 発火温度を測定するための燃焼試験

重力鑄造した KEHMA ブロック材（辺の長さ 15mm の立方体）に熱電対を挿入し、大気中にてアセチレンバーナをあててブロック材の加熱燃焼状況を目視にて確認し、発火時の温度を記録した。また、比較のために汎用マグネシウム合金である AZ31 についても実施した。

(2) 規格に準拠した燃焼試験

米国連邦航空局（FAA）規格⁵⁾に基づく評価試験は以下の手順で行った。KEHMA ビレットを押し出し加工により板材とし、長さ 50.8cm × 幅 3.81cm × 厚さ 0.64cm（20 × 5 × 0.25 インチ）の長方体に加工し試験体とした。これを約 930℃ のオイルバーナで 4 分間加熱し、加熱終了後 3 分以内に自己消火し、重量損失が初期重量の 10% 以内であることを確認した。試験片設置状況を図 5 に示す。この試験は米国連邦航空局の認定機関にて実施した。

鉄道車両用材料燃焼試験は日本鉄道車両機械技術協会の規定に従い実施した。試験片は KEHMA の押し出材（幅 75 mm、厚さ 4 mm）を加工して B5 サイズに並べたものとした。この試験は日本鉄道車両機械技術協会の認定機関にて実施した。

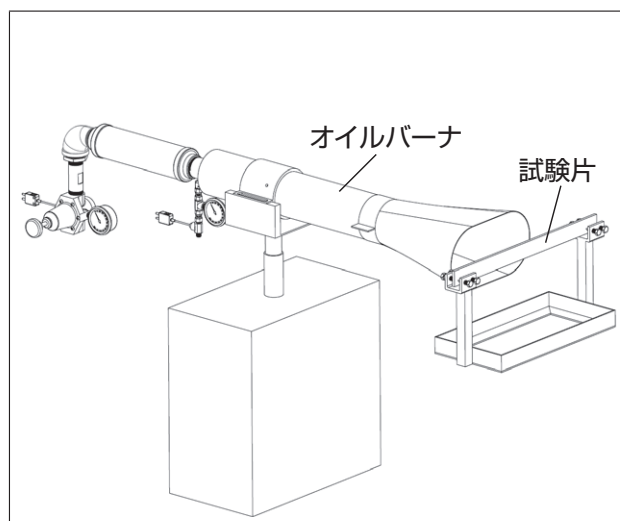


図5 FAA燃焼試験状況

チップ材燃焼試験は危険物保安協会の規定に従い実施した。試験片は KEHMA のチップ材（4 mm）とした。この試験は危険物保安技術協会の認定機関にて実施した。

4 試験結果および考察

4.1 引張特性

KEHMA ダイカスト合金の引張試験結果を図 6 に示す。引張強度は温度の上昇に伴い低下する傾向が見られるものの、0.2% 耐力は 175℃ まであまり低下していない。伸びは 150℃ までは温度の上昇に伴い大きく増加するが、175℃ では若干低下した。175℃ での伸びの低下については原因が明らかではないが、試験片中の引け巣などの欠陥が存在していた可能性がある。150℃ まで 0.2% 耐力がほとんど変化せず伸びが大きく増加しているにもかかわらず引張強度が逆に低下したことから、KEHMA ダイカスト合金は降伏後のひずみ硬化性が温度上昇に伴い低下すると推測される。

また、室温における ADC12 ダイカスト合金の引張強度、0.2% 耐力および伸びはそれぞれ 311MPa、159 MPa、2.7% であり、KEHMA の耐力は ADC12 と同程度で、伸びは大きい。

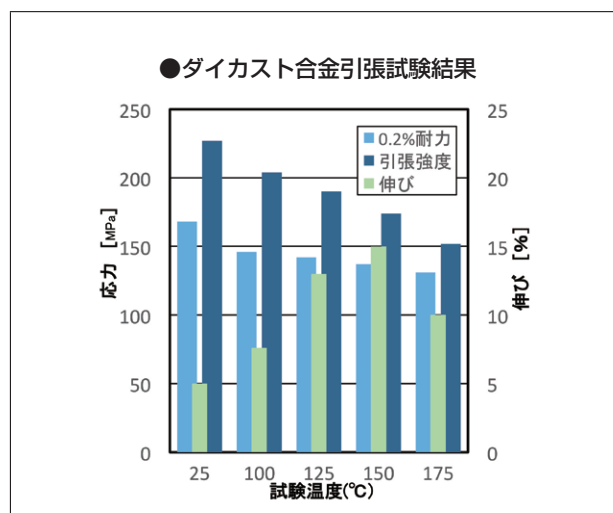


図6 KEHMA ダイカスト合金の引張試験結果

4.2 引張クリープ特性

175℃にて引張応力 50MPa を加えて 100h 保持した KEHMA 及び ADC12 ダイカスト合金のひずみを図 7 に示す。自動車エンジン周辺の温度は 175℃ 程度であるといわれているため⁶⁾、本実験は 175℃ で実施した。同図から分かるように、100h 保持後の ADC12 ダイカスト合金の歪みは 0.14% であることに対して、KEHMA ダイカスト合金の歪みは 0.13% で ADC12 ダイカスト合金より若干少なかった。これらの試験結果から、KEHMA ダイカスト合金は 175℃ 程度の中温域において ADC12 と同等の耐熱性（クリープ特性）を持つことが分かる。AZ91 については試験途中の 25h にて破断した。

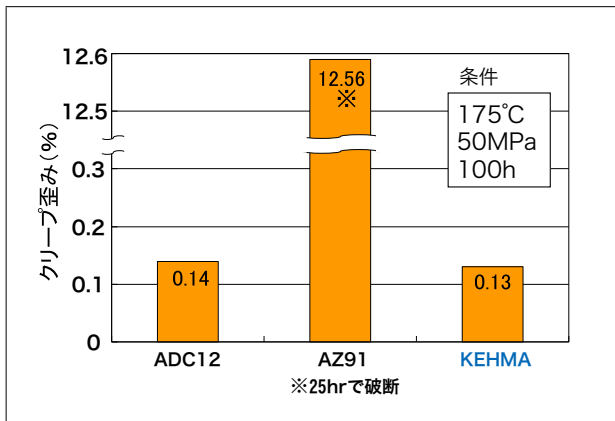


図7 引張クリープ試験結果

4.3 圧縮クリープ特性

KEHMAを自動車部品などの製品へ適用する場合、ボルト締結の軸力維持が重要な課題であるため、圧縮クリープ特性を評価する必要がある。175℃におけるKEHMAおよびADC12重力鋳造合金の圧縮クリープ試験結果を図8に示す。

室温で8kNで締結したボルト軸力が175℃の環境雰囲気置かれた直後に約10kNまで上昇したのは、アルミニウム合金とマグネシウム合金の熱膨張率が締結用ボルト(鋼材SCM435)より大きいためである。

軸力保持率を、初期締結軸力(8kN)に対する175℃にて300h保持後の軸力の比とした場合、ADC12の軸力保持率65.4%に対しKEHMAの軸力保持率は65.7%であり、KEHMAはADC12と同等の軸力保持能力を有することが確認された。

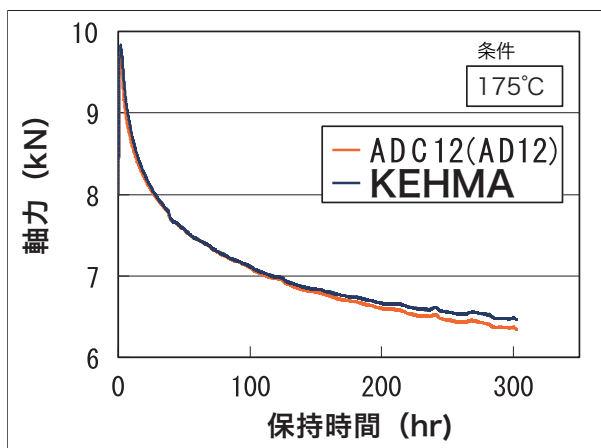


図8 圧縮クリープ試験結果

4.4 金属組織観察

KEHMAダイカスト合金組織の代表的な光学顕微鏡写真を図9に示す。融点の高い金属間化合物が粒界にネットワーク状に生成し、また粒内にも確認された。これらの金属間化合物が、KEHMAのADC12

相当の耐熱性に寄与していると考えられる。本試験で得られたダイカスト試験片の結晶粒平均粒径は約5μmであった。ダイカスト合金の結晶粒サイズはダイカスト時の金型温度およびダイカスト製品の寸法に影響されるほか、製品の部位によっても異なる。図9に示しているKEHMAダイカスト合金組織は引張試験片断面中央部の組織であるが、引張試験片表面近傍の組織はより微細であった。

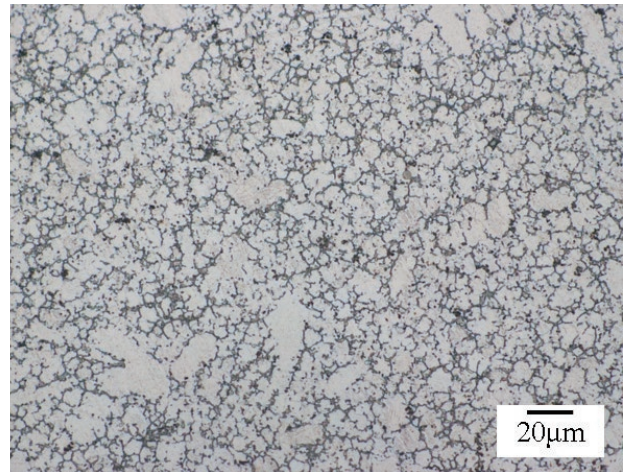


図9 KEHMAダイカスト合金の組織

4.5 湯流れ性評価

重力鋳造にて得られた渦巻試験片を図10に示す。KEHMAの渦巻試験片の長さは汎用鋳造用マグネシウム合金AZ91より長かった。この結果から、KEHMAの湯流れ性はAZ91合金と同等以上といえる。



図10 湯流れ試験結果

4.6 難燃性試験

(1) 発火温度の測定

ガスバーナによる加熱燃焼試験の状況を図11に示す。一般汎用マグネシウム合金AZ31は溶融直後に約650℃付近から燃焼を開始したのに対し、KEHMAは溶融後にも発火せず約980℃に達するまで燃えなかった。

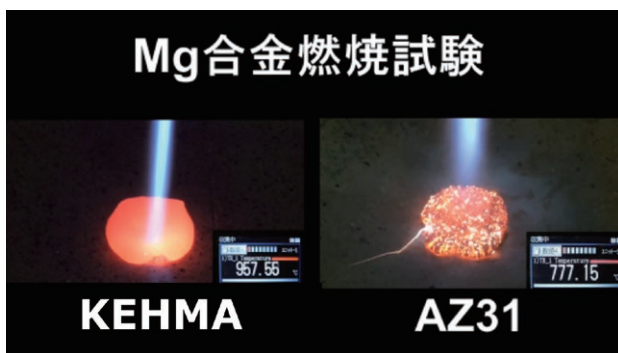


図11 パーナ試験状況

(2) 規格に準拠した燃焼試験

FAA 規格に準拠する燃焼試験時の様子を図 12 に示す。本試験の結果、KEHMA は航空材料としての基準を満たしていると判定された。

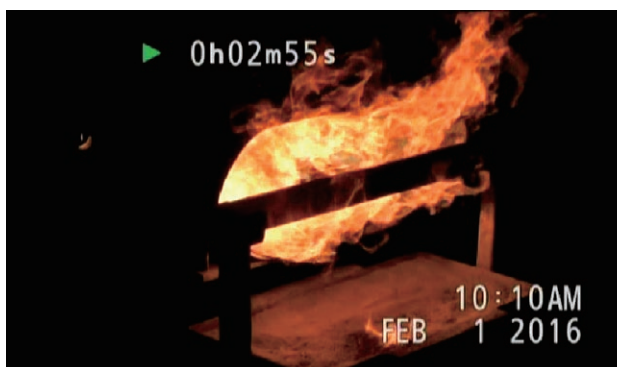


図12 FAA燃焼試験状況

日本鉄道車両機械技術協会の規定に基づく鉄道車両用材料燃焼試験の結果、KEHMA は不燃性であると判定された。

その他、KEHMA のチップ材 (4mm チップ材) についても危険物保安技術協会の試験にて非危険物との確認がなされた。

5 KEHMAの実用化に向けた検証

(1) 製品試作

小型軽量汎用エンジン部材メーカーなど数社にサンプル出荷を行い、難燃性や重力鑄造材による基本検討に加え、先方のダイカスト設備によるモノづくりに関する試験を重ねた結果、良好な鑄造性および耐熱性を示し、現行のアルミ製品用ダイカスト金型に軽微な修正を加えることで対応可能であることが確認された。

(2) 旋盤加工

KEHMA の機械加工時の安全性を確認するため、鑄造インゴットを旋盤にて機械加工を行った。この時の様子を図 13 に示す。旋盤加工時に発火すること

がなく、機械加工の安全性が確認できた。但し、機械加工後の微粉は他の金属微粉と同様に粉じん爆発を発生しないように厳重な管理が必要である。



図13 旋盤加工状況

6 まとめ

当社が開発した鑄造用難燃耐熱マグネシウム合金 KEHMA について各種試験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 温度の上昇に伴い、KEHMA の 0.2% 耐力はほぼ一定に維持したまま伸びが大きく増加した。室温における KEHMA の 0.2% 耐力は ADC12 と同程度で、伸びは ADC12 と比べて優れていることが分かった。
- 2) KEHMA の引張クリープ特性と圧縮クリープ特性 (軸力保持特性) は自動車エンジン周辺温度である約 175℃において ADC12 相当であり、既存汎用マグネシウム合金 AZ91 と比べて遙かに優れていることが分かった。
- 3) 湯流れ性は AZ91 と比較して同等以上であることを確認した。
- 4) 約 980℃以下において良好な難燃性を確認した。また、米国連邦航空局 (FAA) 規格に準拠した燃焼試験、および日本鉄道車両機械技術協会の鉄道車両用材料燃焼試験に合格した。さらに、旋盤等による機械加工は十分可能であることを実証した。

7 最後に

本開発における製品試作では、燃焼しにくく、良好な湯流れ性を示した。今後、鑄造用素材 (インゴット、図 14 参照) の供給を中心とし、展伸用素材 (ビレット、図 14 参照) や粉末素材など多様なニーズに対応した供給体制を整えていく予定である。また、これまで弊社で培った材料・防食・接合など、マグネシウム合金の普及に不可欠な要素技術を含め、安全で安心なモノづくりに関連するソリューションの提供と軽量化ニーズに貢献する研究開発活動をしていきたい。



図 14 KEHMA のインゴットとビレット

参考文献：

- 1) 小原久：難燃性マグネシウム合金や 耐熱マグネシウム合金の開発と応用、軽金属、第 66 巻 第 5 号 (2016)、pp.233-239
- 2) 大楠恵美：自動車構造材の軽量化と多様化、三井物産戦略研究所レポート (2014) http://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/10/21/140728m_ohkusu.pdf (2017.04.28 閲覧)
- 3) 経済産業省：重要技術分野に関する技術動向等調査報告書 (2014) http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E004083.pdf (2017.04.28 閲覧)
- 4) 武田秀：自動車用マグネシウムダイキャスト技術動向、まてりあ、第 53 巻、12 号 (2014)、pp.594-598
- 5) Federal Aviation Administration：Fire Safety Group Handbook、(2014)、Chapter 25 Oil Burner Flammability Test for Magnesium Alloy Seat Structure https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/handbook/00-12_ch25.pdf (2017.04.28 閲覧)
- 6) 小島陽：高性能マグネシウム合金の新展開、軽金属、第 58 巻 第 10 号 (2008)、pp.526-548

執筆者：

閻師昭彦

1998 年入社

Mg 合金の研究開発に従事



金津安秀

2015 年入社

Mg 合金の研究開発に従事



宮本武明

2011 年入社

Mg 合金の研究開発に従事



廖 金孫

1996 年入社

銅構造物の生産技術・防食技術
および Mg 合金とその溶接技術の
研究開発に従事

工学博士

