

②中間評価結果と研究推進アドバイザーの指摘、並びにその反映

中間評価において、委員から「大量溶解・連続鋳造装置を設置し、KUMADAI Mg合金のスケールアップをするなど基盤技術の開発から実用化技術の開発へ順調に推移している。今後はトータルコストを考慮したプロセス開発、及び品質標準化に対するなお一層の取り組みが求められる。」というコメントを頂いた。また、研究推進アドバイザーから「共有ロードマップを作成すべきである。トータルコストやコスト要因を把握することが重要である。半連続鋳造技術開発は直径300mmの大型化まで広げるのではなく、直径200mmまで大型化すれば直径300mmへの拡大も容易なので、本プログラムでは直径200mmでより深く技術開発することに精力を注ぐべきである。」などのコメントを頂いた。

そこで、大量溶解・半連続鋳造技術開発並びに試作品供給システムと試作品特性データベースの構築を強化して進めた。特に、半連続鋳造技術開発は直径200mmに特化して技術開発を実施することに変更した。また、原料費の大半を占める希土類金属含有母合金を使用しないで希土類金属を直接溶解する技術開発を進めて低コスト化を図ることとした。さらに、試作品製造の作業標準書の作成、並びに分析・評価技術の確立と分析・評価作業標準書の作成と品質管理システムの確立を強化して進めた。

さらに、本プログラム終了時までのロードマップを作成した上で、研究開発の全体的な進捗よく状況を基にロードマップを毎年改定するとともに、そのロードマップを基に各サブテーマの事業終了までの研究計画書と四半期毎に分けた年間研究計画書を毎年作成して、研究開発を進めることにした。なお、各サブテーマの事業終了までの研究計画書と四半期毎に分けた年間研究計画書は、各サブテーマを構成する小テーマに分けて、研究開発責任者と担当者を明確にして作成した。これに合わせて四半期毎にサブリーダー会議を開催することにした結果、正確に研究開発の進捗よく状況を共有できるようになるとともに、研究計画の軌道修正や研究開発資源の配分を適切にできるようになった。

(3) 研究開発成果

①研究開発成果の総括

高強度と高耐食性を併せ持つ合金成分などを開発するとともに、溶解・鋳造から塑性加工・接合加工、表面処理に至るモノづくりのための製造基盤技術を実用サイズで確立することができた。また、機械的特性や耐食性の合金成分依存性や組織制御依存性並びに強化メカニズムなどの製造基盤技術開発を科学的に裏付けるための基礎的データや知見を蓄積することができた。これらの結果、実用サイズで機械的特性と耐食性並びに接合強度の目標値を達成することができた。さらに、挑戦的な開発テーマであったダイカスト材の開発においても、目標値を達成する特性が得られた。その一方で、研究開発を進める上で重要な分析・評価技術、安全管理技術、データベース管理システムを確立することによって、本プログラムの研究開発を推進することができた。また、試作品供給システムを確立することによって、試作品供給によるアプリケーション開発を順調に進めることができた。これら以外に、想定外の研究開発成果として、展伸 Mg合金における機械的特性の世界記録を更新する合金や発火温度の世界記録を更新する高強度展伸合金を開発することができた。

本プログラムで確立された技術・知見並びに育成された人材は、フェーズⅢ以降も、「次世代 Mg合金実用化プラットフォーム」や「熊本大学先進 Mg研究センター」並びに不二ライトメタル(株)等の参画企業や参画研究機関に継承されて発展・成長していくものと期待できる。

②主な研究開発成果

【合金組成の開発】

- 一般に高強度と高耐食性の両立は困難であるが、高強度と高耐食性を併せ持つ展伸材用合金組成 ($Mg_{95.75}Zn_2Y_{1.9}La_{0.1}Al_{0.25}$) の開発に成功して、本プログラムの目的達成に大いに貢献した。
- 希土類金属を低減した合金組成や混合希土類を適用した合金組成による合金の低コスト化の可能性を明らかにし、今後のアプリケーション開発で重要となる合金組成の基礎データを蓄積することができた。
- 挑戦的な課題としてダイカスト材用の合金成分の開発も試み、ダイカスト用として実用可

能性のある合金成分を開発することができた。

【製造基盤技術の開発】

- 希土類金属の溶解技術の確立、溶解条件・工程の確立、合金成分や不純物濃度制御技術の確立、新規フィルターの開発やフィルタリング技術の開発による介在物制御技術の確立、新規インペラの開発と攪拌・バブリング条件の開発による攪拌・バブリング技術の確立などによって、溶解・精製技術を確立することができた。その結果、実用的な 400kg 溶解量で、不純物濃度 (Fe+Ni+Cu) が 50ppm 以下、合金成分が目標成分の±0.5%以内、介在物量が清浄と評価される Al 合金並みに少ない高潔な溶湯を得ることができるようになった。
- 一般的に希土類金属添加合金は高濃度の希土類金属を含んだ高価な Mg 母合金を購入して製造されるが、希土類金属を直接溶解する技術を開発した結果、合金原料コストを約 5 分の 1 以下に低減することができた。
- 簡易溶解鑄造技術の確立、電磁攪拌による組織制御技術の確立、半連続鑄造装置の開発と半連続鑄造技術・条件の確立などによって、鑄造技術を確立することができた。その結果、成分の均一性が±0.1at.%以下、ロット間の成分のバラツキが±0.1at.%以下、結晶粒径が 500 μ m 以下の実用サイズの大型鑄造ビレット (直径 200mm、長さ 1400mm) を得ることができた。
- 押出加工条件の確立、押出ダイスの開発、潤滑剤の最適化、押出直後の冷却技術の開発などによって、押出加工技術を確立した。その結果、大型鑄造ビレット (ϕ 177) の押出加工によって、室温耐力 310MPa 以上、室温引張伸び 5%以上、高温耐力 (250 $^{\circ}$ C) 230MPa 以上の優れた機械的特性を有する大型押出丸棒材 (ϕ 55)、直径 55mm で肉厚 10mm の大型押出パイプ材 (ϕ 55)、幅 150mm で板厚 5mm の大型押出厚板材 (幅 150mm) を得ることができた。
- 押出厚板材の熱処理条件の確立、圧延加工条件の確立によって、押出厚板材の圧延加工技術を確立することができた。その結果、室温耐 350MPa 以上、室温引張伸び 7%以上、高温耐力 (250 $^{\circ}$ C) 230MPa 以上の優れた機械的特性を有する幅 150mm で板厚 1mm の大型薄板圧延材 (幅 150mm) を得ることができた。
- 独自に開発したカバープレートを用いるスポット溶接技術の開発とその溶接条件の確立によって、プラグタイプの破断しか起こらないような良好な溶接継ぎ手が得られるスポット溶接技術を確立することができた。さらに、摩擦攪拌接合条件の確立によって、母材強度と同じ強度を有する良好な溶接継ぎ手が得られる摩擦攪拌接合技術を確立することができた。
- 下地化成処理技術の開発とその条件の確立、並びにアクリル系塗装技術の開発とその条件の確立によって、塗装の密着性が良く、クロスカット塩水噴霧試験 (1%食塩水で 48hr) においても腐食及びフクレが発生せず、また基盤の目塩水噴霧試験 (1%食塩水で 98hr) においてもレイティングナンバー10 という優れた耐食性を持つ表面処理技術を確立することができた。

【分析・評価技術の確立、品質管理・安全管理・試作品供給システムの構築】

- 主成分・不純物濃度分析技術、組織解析技術、内部欠陥分析技術、機械的特性評価技術、介在物分析技術、腐食特性分析技術、国内では分析が困難であると言われていた水素分析技術などの分析・評価技術を確立することができた。その結果、原材料から、溶湯、ビレット、展伸材、ダイカスト材までの検査による品質管理システムを確立することができた。
- 安全講習会や定期的な安全会議による安全教育、定期的な安全点検、設備の安全対策、外部の専門家による安全診断によって、安全管理システムを確立することができた。その結果、無事故で本プログラムを実施することができた。
- 効率的な試作品供給システムを確立し、毎月 1 回の生産会議による試作品生産可否の判断及び生産スケジュールの調整によって、これまで 105 本以上の試作品を内外に供給した。

【データベースの構築】

- 特性データベース、論文データベース、特許情報データベース、試作品特性データベースからなるデータベース管理システムを構築するとともに、最新論文や最新公開特許の配信を月 2 回のペースで実施することによって、本プログラムの研究開発の推進に貢献するとともに、アプリケーション開発で重要となる基礎データを蓄積することができた。本データベース管理システムは、フェーズⅢでも引き続き活用して、データの蓄積によって充実

していく予定である。

【組織制御技術の開発・強化メカニズムの解明、組織形成メカニズムの解明】

- 凝固（凝固速度、微細化剤添加、電磁攪拌）、熱処理（熱的安定性、熱処理組織制御）、加工（押出加工条件、二次加工性）の観点から、モノづくりにおいて基本となる組織制御技術を確立した。ここで得られた知見は、鑄造技術、押出加工技術、圧延加工技術、溶接技術の開発に貢献した。特に、押出厚板材の圧延加工は、熱処理組織制御の成果を活用することによって初めて可能にすることができた。
- LPSO型Mg合金は、塑性加工によってα-Mg相が再結晶して微細化するとともに、LPSO相にキンク変形が導入されて強化するという基本的な強化メカニズムを明らかにすることができた。この成果は、合金成分の開発と塑性加工技術の開発に活用された。また、疲労特性などの破壊メカニクスを解明し、アプリケーション開発で重要となる機械的特性の基礎データを蓄積することができた。
- 今後の合金組成開発で基礎なるLPSO相の形成メカニズムの解明を進めることができた。
- 強化メカニズム解明と組織形成メカニズム解明の成果は、科研費の新学術領域研究「シクロ型LPSO構造の材料科学」の研究課題に展開することができた。

③想定外の研究開発成果

【超高強度押出加工材の開発】

室温耐力 512MPa、伸び 8%を持つ Mg_{93.5}Ni₃Y_{3.5} 合金（ラボサイズ）を開発し、展伸 Mg 合金における機械的特性の世界チャンピオンデータを更新した。本合金は、高強度 Al 合金である超々ジュラルミン（7075-T6）を凌駕するものであり、超高強度 LPSO 型 Mg 合金の高強度化のポテンシャルを明らかにすることができた。

【不燃性の高強度押出加工材の開発】

発火温度が 1100℃を超えるとともに、室温耐力 450MPa、伸び 3.3%を持つ合金（ラボサイズ）を開発した。この発火温度は、従来の難燃性 Mg 合金（Mg-Al-Zn-Ca 合金）の発火温度（680℃程度）は言うに及ばず、韓国で開発された難燃性 Mg 合金（Mg-Al-Zn-Ca-Ce 合金）の発火温度（790℃程度）の世界記録を大幅に更新するものであり、不燃性を持つ高強度 Mg 合金が世界で初めて開発できたと言っても過言ではない。（社）日本鉄道車両機械技術協会の鉄道車両用材料燃焼試験では、不燃性の判定を得ている（図 3-6）。今後は、合金組成の改良、押出加工条件や熱処理条件の確立によって、延性も改善できるものと期待できる。本合金は、不燃性が求められる鉄道車両や航空機用の材料として実用化が期待できる。

図 3-6 不燃合金の成績表

④目標値の達成度

図 3-7 に示す目標値を達成することができた。展伸材製造技術、接合技術、表面処理技術の開発は、平成 22 年度までは、モデル合金（Mg₉₆Zn₂Y₂ 合金）を対象にして各要素技術開発を行うとともに、高強度と高耐食性を併せ持つ合金組成の開発を行った。平成 23 年度からは、高強度と高耐食性を併せ持つ最終合金（Mg_{95.75}Zn₂Y_{1.9}La_{0.1}Al_{0.25} 合金）を対象にして、各要素技術を統合した製造基盤技術の開発を行い、目標値達成の確認試験を行った。その結果、大型押出丸棒材（φ55）、大型押出厚板材（幅 150mm）、大型押出パイプ材（φ55）、大型薄板圧延材（幅 150mm）で（図 3-8）、目標とする機械的特性と耐食性を達成することができた（図 3-9、図 3-10）。さらに、大型押出厚板材（幅 150mm）を用いた接合技術の開発においても、摩擦攪拌接合とカバープレートスポット溶接を用いて接合強度の目標値を達成することができた（図 3-11）。さらに、大型押出厚板材（幅 150mm）を用いた表面処理技術開

目標値		
■ 展伸材製造技術	形状 丸棒材、パイプ材、板材 サイズ 直径55mm(丸棒材)、直径55mm(パイプ材) 幅150mm(板材)	主要目標
特性	室温降伏強さ280MPa以上伸び5%以上 高温(250℃)降伏強さ230MPa以上 腐食速度10mm/year以下 (1%NaCl水溶液浸漬試験)	チャレンジ的 目標
■ ダイカスト材製造技術	形状 複雑形状材 サイズ 長さ100mm以上、肉厚5mm以下	
特性	室温降伏強さ180MPa以上伸び3%以上 高温(250℃)降伏強さ140MPa以上 腐食速度10mm/year以下 (1%NaCl水溶液浸漬試験)	主要目標
■ 接合技術	接合強度 被接合材の80%以上の強度	主要目標
■ 表面処理技術	耐食性 レイティングナンバー6以上 (クロスカットや番線の目カット) (1%NaCl水溶液、塩水噴霧48時間以上)	主要目標

図 3-7 研究開発の目標値

発においても、下地化成処理+アクリル系塗装処理で目標値を達成することができた（図3-12）。

一方、挑戦的な研究開発課題であったダイカスト材の開発では、 $Mg_{96-x}Zn_2Y_2X_m$ 合金で、目標値を達成することができた（図3-13）。

このように目標値を達成することができたことから、LPSO型Mg合金の製造基盤技術が開発できたものと言える。

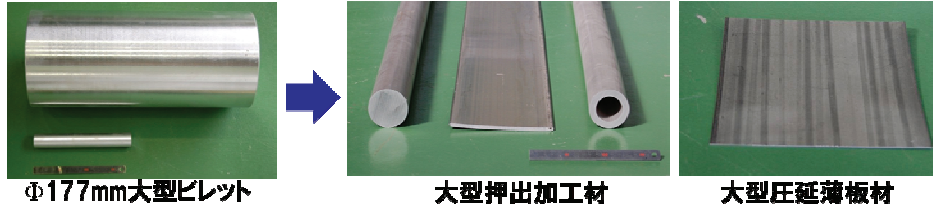


図3-8 大型鋳造ビレット(φ177)並びに大型押出加工材(φ55)と大型薄板圧延材(幅150mm)

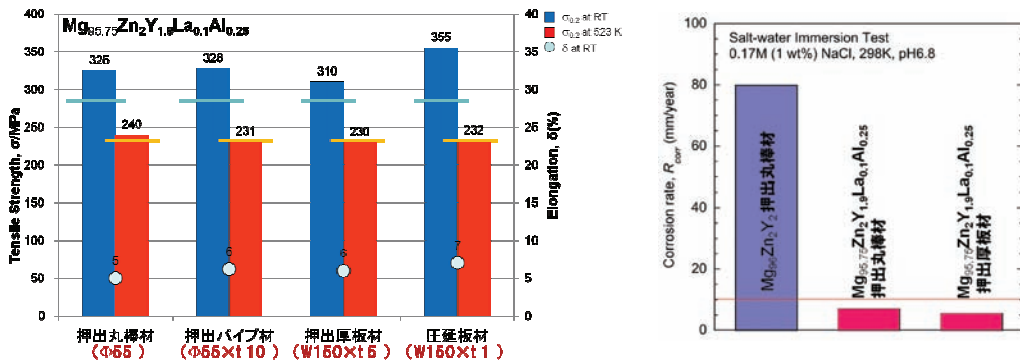


図3-9 大型押出加工材と大型薄板圧延材の機械的特性と耐食性

Mg _{95.75} Zn ₂ Y _{1.9} La _{0.1} Al _{0.25}				
φ177ビレット	押出丸棒材 (φ55)	押出パイプ材 (φ55×肉厚10)	押出厚板材 (W150×厚さ5)	圧延薄板材 (W150×厚さ1.0)
	機械特性	機械特性	機械特性	機械特性
形状	○	○	○	○
機械的特性	○	○	○	○
耐食性	○	—	○	—

図3-10 大型展伸材の目標値達成度



図3-11 表面処理材の耐食性

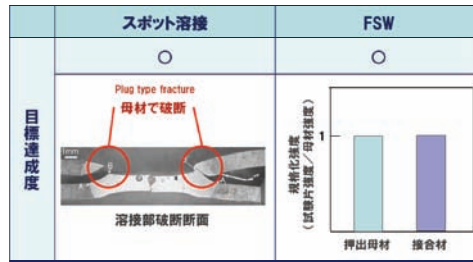


図 3-12 接合技術の目標値達成度



	機械的特性		耐食性	鑄込み性
	室温	高温		
Mg _{96-x-m} Zn ₂ Y ₂ X _x M _m (黒皮有)	○	○	○	○
Mg _{96-x-m} Zn ₂ Y ₂ X _x M _m (黒皮無)	○	△	○	○
Mg _{97-x-b} Zn ₁ Gd ₂ X _x B _b	△	○	△	○

図 3-13 ダイカスト材の目標値達成度