

アルミニウム技術戦略ロードマップ

2020



一般社団法人 日本アルミニウム協会

序文

昨年の国内の経済動向は「海外経済の減速等を背景に外需が弱いものの、雇用・所得環境の改善等により、内需を中心に緩やかに回復している」との見解が内閣府から示されていた。アルミニウム産業についても、世界のアルミニウム地金の過半数を生産する中国の動向とともに、世界経済全体に影響を及ぼす米国の保護主義的政策、英国のEU離脱、北朝鮮・中東などの地政学的リスク、また改めて認識された地球温暖化に起因する異常気象など、多くの懸念事項はあるが、軽量化ニーズの強い輸送分野を中心に、国内アルミニウム総需要はここ数年連続して400万トンを超える高い水準を維持していた。

しかし、年末年始に始まった新型コロナウイルス感染症は急速な広がりを見せ、世界各国の状況を一変させた。その結果、生活様式の変容が求められるとともに、グローバル経済への深刻な影響が懸念されている。内需の拡大が期待されている東京オリンピック・パラリンピックは中止ではなく、来年に延期されることが決まった。ここでの聖火リレーのトーチには、東日本大震災の復興仮設住宅のアルミ建築廃材が素材の一部として再利用されている。アルミニウムが被災者の生活を建材として支え、見守り、その後世界的な感染症の被害からの復興の意味も加わった象徴として、桜花の形のトーチに姿を変えて蘇ることになる。20周年を迎えた日本アルミニウム協会でも、アルミニウムが循環型社会、低炭素社会や安全安心快適な社会の構築に重要な役割を果たすものと考えている。目指す社会の実現には企業間のサプライチェーンはもとより、関係官庁や研究拠点となる大学などの中長期的な連携が重要となる。そこで「アルミニウム技術戦略ロードマップ」を作成し、当協会が考えるアルミニウムの将来の姿やその実現に向けたマイルストーンを公開し、共有化を図ることとした。昨年度は本ロードマップを参考にして「アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」の提案を取りまとめ、NEDOの先導研究プログラム事業に採択いただいた。

ロードマップは、社会環境の変化や新技術・新製品の開発の進展に応じた見直しが必要となる。そのため日本アルミニウム協会では、隔年で改訂版を発行することとした。令和の時代を迎えた今回も、第一線で活躍するアルミニウム関連研究者を中心とした「ロードマップ小委員会」を設け、検討を重ねて「アルミニウム技術戦略ロードマップ2020」を策定した。

本ロードマップが持続的社会発展に向けた取り組みの円滑かつ効率的な推進に資するように、各界からのご意見やご鞭撻を賜れば幸いである。

令和2年4月24日

一般社団法人 日本アルミニウム協会
会長 石原 美幸



目 次

I. 概説	3
II. アルミニウム産業の現状と取り巻く課題	4
II-1 日本の社会・産業界の動き	5
II-2 日本の科学・技術開発の動き	7
III. アルミニウムの技術戦略のシナリオ	9
III-1 市場の動向・マーケティング	9
III-2 アルミニウム需要統計	19
III-3 未来に向けたアルミニウム産業の技術開発の基本戦略	21
III-4 アルミニウム産業の未来に向けた技術開発の進捗状況	24
III-5 人材育成・社会への仕掛け	27
IV. アルミニウム技術戦略ロードマップの解説	29
IV-1 ロードマップ作成のコンセプト	29
IV-2 アルミニウム技術戦略マップ	31
IV-3 アルミニウムビジネスロードマップ	32
IV-4 アルミニウム要素技術マップ	32
IV-5 アルミニウム技術ロードマップ	32
別表1 アルミニウム技術戦略マップ（技術開発戦略の俯瞰図）	33
別表2 アルミニウムビジネスロードマップ（製品開発、プロセス開発のスケジューラ一覧表）	34
別表3 アルミニウム要素技術マップ（要素技術と製品分野の関連一覧表）	36
別表4 アルミニウム技術ロードマップ1（技術開発スケジューラの一覧表）	37
別表5 アルミニウム技術ロードマップ2（技術開発スケジューラの一覧表）	38
別表6 アルミニウム技術ロードマップ3（技術開発スケジューラの一覧表）	39
ロードマップ作成小委員会委員名簿	40
（別資料）	
●開発目標値の設定	41
●技術キーワード個別ロードマップ	44
（補足資料）	
●2019年度、2020年度アルミニウム研究助成テーマ一覧	64
（参考資料）	
●軽金属ロードマップ2019（（一社）軽金属学会）	66

I. 概説

アルミニウム産業の日本経済への貢献を一層効率的に推進するために、産学官連携は不可欠である。この連携を円滑に効率的に進めるための共通認識として2009年に「アルミニウム技術戦略ロードマップ」を策定した。本ロードマップは一般社団法人軽金属学会のロードマップと補完関係にあり、今後のアルミニウム産業の研究開発の方向性を示すものである。

本ロードマップでは将来にわたっての社会の変化とそこでのアルミニウムの需要を分析し、その将来像からバックキャストすることで、今後取り組みが必要な技術課題と研究開発の出口の根拠を明確に示すよう努めた。また、関連する世の中の研究開発の進捗状況を整理し、定期的な改訂を通して最新の研究開発の目標値を継続的に示してきた。

今回は初版発行から8回目の改訂に当たり、前回から二年間におけるアルミニウム産業を取り巻く社会環境およびアルミニウム主要分野のニーズの変化、研究開発テーマの進展などを新たに盛り込んだ。協会として産学共同での研究プロジェクトの立ち上げや産学での若手研究者への支援や人材育成など本ロードマップを実現するための取り組みも行っており、その活動状況についても報告している。また、軽金属学会の最新のロードマップも巻末に収録した。

アルミニウムの将来像とそのため技術課題を公開することで、産学の研究者にその実現に向けた研究開発に参画いただき、そこで開発された技術を基盤とした製品を世に送り出す、そのような流れを効果的に創り出すことを願っている。

Ⅱ. アルミニウム産業の現状と取り巻く環境

日本のアルミニウム産業を取り巻く環境は、経済のグローバル化の進展により、大きく変化してきている。TPP11など多国間での市場統合が進む一方で、米中を始めとした保護主義的な動きも台頭しつつあり、ポピュリズム的な傾向が今後世界的に波及していくのか、新たなリスクとなって現れている。

今世紀に入り日本を含めた先進諸国は新たな成長市場として中国市場をターゲットとしたビジネスを展開してきたが、昨年米国によって提起された米中経済摩擦により大きな影響を受けている。この問題は民主主義や市場原理に対する価値観の違いなど構造的な要因に根差していることから、長期化する可能性もあり状況を注視していかなければならない。これまで「ものづくり」で経済成長を遂げてきた日本であるが、グローバルな競争の激化と大国間の対立といった不安定要素が共存する中で、引き続き世界の主要先進国としての存在感を維持していくためには、これまでとは違った新たな視点による戦略の遂行が必要となっている。

日本のアルミニウム産業は、2度のオイルショックによる電力高騰を受け製錬業から撤退したことで、1980年代以降、加工を主体とするビジネスモデルへと転換を余儀なくされた。原料（地金）調達を海外からの輸入に依存するために、地金から加工まで垂直統合型モデルを展開してきた欧米・中国企業に比べ国際競争力の面では不利にならざるを得なかった。最近では、中国の過剰生産による地金価格の低迷を受け、米メジャー・アルコア社による上下部門分離と自動車・航空機向けなど下流工程へのシフトなど、業界構造は変化しているものの、日本のアルミニウム産業にとって原料を持たないことが弱みであることには変わりがない。今後の原料の需給動向や加工業における競争激化などの諸条件を踏まえ、常に最適なビジネスモデルを追求していく必要がある。一方で、国内ユーザーの厳しい要求を満足する高品質な製品を提供してきた加工技術力・ユーザー対応力は日本のアルミニウム産業の強みであり、今後より一層磨きをかけていかなければならない。

日本のアルミニウム総需要は、2006年に約450万トン記録したがその後低下傾向にあり、圧延品については1996年に約250万トン記録してから減少が続いていたが、直近では5年連続で総需要が400万トン超えを維持できている。しかしながら、今後の少子高齢化と人口減少を考えると、現状の構造のままでは需要の増加を期待することは難しく、新規の需要開拓は喫緊の課題である。

日本のアルミニウム産業としては変化に適切に対応した取り組みが必要である。足元、自動車や航空機など輸送機器の分野では、燃費向上・省エネを背景に軽量化を始めとした素材の高度化ニーズが高まっており、今後継続して需要の拡大が期待される。

中長期的な視点に立つと2015年に国連で採択された持続可能な開発目標（SDGs）は、グローバルに社会を変えていくインパクトがあり、それらを達成していく過程で様々な新しい産業分野を創出するものとして注目される。

アルミニウム産業にとって取り分け期待されるのは環境分野である。アルミニウムはリサイクルが可能な素材であり資源循環、温室効果ガス排出削減に大きく寄与できる。リサイクルの取り組みは欧米が先行している。一例としては、米アップルはスマートフォンやPCなどに使用されるアルミニウム合金の環境負荷を低減させることを目的とし、アルコアやリオ・ティントと共同で温室効果ガス排出を大幅に削減する革新的な製錬プロセスの開発を進めている。また、リサイクルの面では、英自動車メーカーのジャガー・ランドローバーはアルミニウム層をボディパネルなどにリサイクルするプロジェクトを進めている。国際イニシアティブASI（Aluminum Stewardship Initiative）は、温室効果ガス削減を含めアルミニウム産業全体のESG（環境（Environment）、社会（Social）、ガバナンス（Governance）の頭文字）パフォーマンス向上のための取り組みを行っている。これらの動きは、今後わが国のアルミニウム素材のみならずそれを使用した完成品にまで影響を及ぼす可能性が高い。日本アルミニウム協会も2019年9月にこれに加盟した。今後世界の潮流をウォッチしていく。

アルミニウム産業に限らず、このような持続可能な社会の実現はすべての産業にとって課題であるとともに、経済的には、環境・エネルギー分野を筆頭に成長分野でもある。たとえば世界人口が80億人を目前にして資源問題は重要性を増しているが、資源循環のようなサステナビリティのための社会的な仕組みづくりは、現状では必ずしも経済的に成り立つものとなっていない。国際的な共通課題へのソリューションをいち早く開発・社会導入しそのビジネスモデルを普及させていくことは国家として意義が大きい。そこには、ブレークスルーとなるイノベーションが必要であり、政府および民間のESG投資による技術開発と優れたビジネスモデルの研究を進めていかなければならない。

少子・高齢化は、日本だけでなく先進国共通の課題である。IoT、ビッグデータ、AI（人工知能）などの情報技術の爆発的な発達を背景に、たとえば医療、モビリティ、ロボットなどはこれまでの姿を変えるものとみられる。それらを支える通信を始めとしたインフラも同様である。アルミニウムが素材としてこのような社会課題の解決に貢献できる部分は少なくない。需要の変化に合わせた技術開発を進め、使われる素材としてのアルミニウムを世に出していくことが業界の使命である。

II-1 日本の社会・産業界の動き

（1）低炭素社会への貢献：

地球温暖化問題の解決は待ったなしの対応を迫られており、また化石燃料はいずれ枯渇するとも言われていることから、より一層の省エネルギーの推進およびCO₂を排出しない再生可能エネルギーや原子力エネルギー等の利用推進が求められてきた。しかし東日本大震災に伴う原発事故の発生により、原子力発電の安全性に対する国民の信頼が揺らいでおり、再生可能エネルギーへの期待がより一層高まることが予想される。一方で、当面のエネルギー供給における再生可能エネルギーの占める割合は僅かであることから、高効率化された石炭、石油や天然ガス火力に頼らざるを得ないのが現状である。

日本アルミニウム協会では、日本経団連への「地球環境保全の自主行動計画」の提出等の地球環境問題に係る自主的な行動表明を行ってきた。また、経済産業省および日本経団

連が取り組む「低炭素社会実行計画」にもアルミニウム圧延業界として参画し、2005年度を基準年とした2020年度（フェーズⅠ）および2030年度（フェーズⅡ）のそれぞれにおけるエネルギー原単位目標を設定し、取り組んでいる。

わが国は、「地球温暖化対策計画」（2016年5月13日閣議決定）において「パリ協定を踏まえ、すべての主要国が参加する公平かつ実効性ある国際的枠組みの下、主要排出国がその能力に応じた排出削減に取り組むよう国際社会を主導し、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」としている。政府は2019年6月11日に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定した。日本鉄鋼連盟でも2018年11月に、日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『ゼロカーボンスチールへの挑戦』を公表している。

アルミニウム業界においても「温暖化対策長期ビジョン（2050年）」の策定に着手し、2020年3月に公開した。

日本アルミニウム協会の低炭素社会実現に向けての決意表明

“温暖化防止はアルミニウムが決め手”

アルミニウムはこの世に一旦デビューすると、その軽量性やリサイクル性などの特徴により、CO₂排出抑制に大きく貢献し、地球温暖化防止のエースとなる素材である。製造段階やリサイクルによるCO₂削減はもとより、製品使用段階において、大きな削減効果が期待される。エネルギー政策の見直し作業も踏まえ、「低炭素社会実行計画」において中長期的な目標を立て、地球温暖化防止のための絶え間ない努力を続ける。

（2）循環型社会への貢献：

資源・エネルギーに乏しい日本は、その殆どを輸入に依存しており、資源・エネルギーの安定供給確保の観点からも一刻も早い循環型社会システムの構築が課題となっている。そのためにも、都市鉱山とも言われる廃棄家電製品・情報化製品に含まれる有用金属の回収技術や高度なリサイクル技術の確立が必要とされている。

日本アルミニウム協会では、2014-2015年度経済産業省「エネルギー使用合理化技術開発費補助金」事業において、LIBSソーティング実証事業を推進し、アルミ合金系スクラップの相互選別の事業性を実証した。更に、本技術は2016-2018年度NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）のアジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業に、「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業として採択され、終了した。この実証事業を通じて、アルミ合金を合金系別に選別し、水平リサイクルを可能にする選別技術開発と、動静脈一体スキームの認証規格化を図り、電車車両リサイクルシステムの研究開発を促進した。

また、2019年にはNEDO先導研究プログラムとして「アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」が採択された。これにより、今後アルミニウムの水平リサイクルが実現していくことが期待される。

(3) 安全・安心社会への貢献：

「令和元年高齢社会白書」によると、2018年10月1日時点の日本の総人口は1億2,644万人で前年より49万人減り、一方、65歳以上の高齢者人口は3,558万人で総人口に占める割合（高齢化率）は28.1%と過去最高となった。また、2065年には人口8,808万人に減少し、65歳以上の人々が38.4%に、75歳以上の人々が25.5%に達すると予測されている。このような状況の下では、医療、介護、福祉等への負荷が相当高まるものと予測され、遠隔医療システムや介護福祉ロボットの開発など社会システムもそれに対応して整備されていく必要がある。

II-2 日本の科学・技術開発の動き

(1) 2005～2010年：第3期科学技術基本計画の実態と反省

日本における材料開発は世界最高水準のレベルに達していると言える。またナノテクでのシーズや元素戦略・希少金属代替ではそれなりの成果が出ているものと考えられる。しかし材料分野の成果は見え難く、金属・無機・有機材料の融合等が課題として指摘されている。

(2) 2011～2016年：第4期科学技術基本計画

科学・技術・イノベーション政策を、他の重要政策と密接な連携を図りつつ、官民の総力を挙げて推進することを基本方針に、第4期科学技術基本計画が策定された。グリーン・イノベーションとライフ・イノベーションを大きな柱とし、科学・技術が成長を支えるプラットフォームと位置付けられる。

“材料”という言葉は姿を消したが、材料はグリーン・イノベーションやライフ・イノベーションに貢献する、無くてはならない分野である。アルミニウムは科学・技術を支えるベースメタルの一つであり、蓄電池、次世代自動車、医療機器、介護機器など出口を見据えた新たな材料、利用技術の提案が求められる。

(3) 2016～2020年度：第5期科学技術基本計画

「先を見通し戦略的に手を打っていく力と、どのような変化にも的確に対応していく力を重視」との基本方針に基づき、「未来の産業創造と社会変革」、「経済・社会的な課題への対応」、「基盤的な力の強化」、「人材、知、資金の好循環システムの構築」を4本柱として推進される。日本を「世界で最もイノベーションに適した国」へと導くと位置付けられている。“材料”については、「経済・社会的な課題への対応」の中で「ものづくり・コトづくりの競争力向上」と表現されている。また、「持続的な成長と地域社会の自律的発展」として、「資源の安定的な確保と循環的な利用」がうたわれている。更に世界に先駆けた超スマート社会の実現（Society 5.0）を進めると表現されている。

アルミニウムは、Can to Can に代表されるように、リサイクル性に優れたベースメタルであるが、更なる資源循環社会構築のためには、アップグレードリサイクル、水平リサイクルを目指した技術や社会システムの開発が求められている。一方、Society5.0を

念頭において、ビッグデータの活用、各種オンラインモニタリング等による生産体制の効率化、またマテリアルズ・インフォマティクスといった計算科学の推進がアルミニウム産業としても期待できる。

(4) 経済産業省産業構造ビジョンとアルミニウム技術戦略

2007年および2008年の経済産業省技術戦略マップにアルミニウム関連研究開発テーマが掲載されなかったことから、アルミニウム関連の国家プロジェクトは5年間皆無に等しかった。このような状況を反省して策定された「アルミニウム技術戦略ロードマップ2009」は、2010年6月に公表された経済産業省「産業構造ビジョン2010」のアルミニウム産業のアクションプランで取り上げられた。そこでは、取り組む具体的施策として、i) アルミニウムの特性を活かした成長分野の需要開拓、ii) 新興国需要の取り込み、iii) 高度なリサイクルシステムの実現、iv) アルミニウム資源の安定調達、v) 企業基盤の強化、が挙げられ、実現に向けて革新的な技術開発の取組が求められている。

経済産業省は2015年6月に金属素材競争力強化プランを策定し、それをフォローアップするという位置付けで非鉄金属製造産業戦略が作成、とりまとめられた。

アルミニウム材料としては、最終製品のマルチマテリアル設計を念頭に置いた異種材料接合技術の開発が重要になってくる。またデジタルデータを活用した3D積層造形技術（Additive Manufacturing技術）による新製品や新合金開発にも期待が持たれる。

デジタルデータの活用としては、材料や設備の寿命予測技術の開発に加え、リアルタイムの最適生産管理や設備リスク管理の高度化による製造コストダウンも期待できる。

Ⅲ. アルミニウム技術戦略のシナリオ

数多く存在する物質の中で、実際に利用されるものが材料であり、「使われてこそ材料」が本質である。そこでマーケットイン志向から、未来の想定のために、ユーザー業界ヒアリングを継続的に実行して、市場の潜在的なニーズ動向を把握し、技術戦略のシナリオ化することでアルミニウム新用途・新技術探索に反映することとした。

Ⅲ-1 市場の動向・マーケティング

アルミニウムの主要需要分野

分野	市場規模 (兆円/年)	将来 性 ¹³⁾	期待用途
自動車	72.5 ¹⁾	↑	車体(パネル、骨格、足回り)、熱交、EV、HV
住宅・土木、建築	62.9 ²⁾	↗	橋梁材料
灯り	1.0 ³⁾	↗	LED照明
家電	7.1 ⁴⁾	→	空調機器(オールアルミ熱交)
エネルギー	105.4 ⁵⁾	↑	再生可能エネルギー、燃料電池、蓄電池、超伝導
ロボット	9.7 ⁶⁾	↑	軽量構造部材
食	99.0 ⁷⁾	→	飲料缶、植物工場
半導体	5.0 ⁸⁾	↗	半導体素子、集積回路
情報通信	94.4 ⁹⁾	↑	タブレット、中継基地
医療、介護	101.3 ¹⁰⁾	↑	CT、MRI、軽量高強度介護器具
航空宇宙	2.1 ¹¹⁾	↗	構造部材、宇宙ステーション
鉄道	0.2 ¹²⁾	→	車両

1) 自動車・同附属品製造業・2018年度売上高(法人企業統計調査 年次別調査2018年度統計表・財務省)

2) 令和元年度建設投資(国土交通省)

3) 照明市場に関する調査結果 2019(矢野経済研究所)

4) 2018年家電・IT市場動向(GfKジャパン)

5) 2017年度国内環境産業市場規模(環境省)

6) 平成22年度ロボット産業将来市場調査(経済産業省・NEDO)

7) 平成29年度食品産業の国内生産額(農林水産省)

8) 調査統計ガイドブック 2018-2019 半導体(電子情報技術産業協会)

9) 平成30年度情報通信白書 産業市場規模:名目国内生産額(総務省)

10) 高齢者向け医療・医薬・介護・生活産業市場2025年推計(みずほ情報総研)

11) 航空宇宙産業データベース 令和元年7月(日本航空宇宙工業会)

12) 平成30年度車両生産金額(日本鉄道車輛工業会)

13) → ↗ ↑
 (小) -----> (大)

(1) 自動車の未来

「100年に一度の大変革期」と言われ、技術では電動化、自動運転化の発展、コネクテッドカー、更に新サービス領域となるシェアリングの革新が進むとされる中、地球環境への配慮として、CO₂排出規制の強化に対応するための軽量化と今後更に厳しくなる衝突安全性能向上を目的とした機能性のためのグローバルに対応した車体骨格構造の新たな提案が進められている。

電動化については、各社市販化を視野に入れた電気自動車（BEV）の開発が進められており、特に、日産自動車（リーフ）や三菱自動車（i-MiEV）といった先行して実用化を進めていた自動車メーカー以外に本田技研工業でも欧州を先行にHONDA eを発売予定とし、また、トヨタでも同様にBEVの市販化での参入を図る計画である。更に、欧州においてもVW、アウディ、BMW（MINI）等でBEVがすでに市販化されている。もちろん、ハイブリッドやプラグインハイブリッドも今後実用化技術が更に進み、世界的にも自動車の電動化が促進され実用化が進む傾向にある。

この背景には、欧州では、乗用車の新車においてCO₂排出量を2030年までに21年目標比で37.5%削減する規制案が決議され、販売台数のうちBEVを含む電動化の割合を大きく引き上げる必要があるためと考えられる。しかし、電動化においても、電気を製造するエネルギーが再生可能エネルギーでない場合、BEVが本質的な地球環境保護につながるかが課題となっている。一方、北米では、米トランプ政権がパリ協定離脱を正式に国連に通告し、2020年11月に離脱することになった。CO₂排出量の多い米国が、地球環境保護に対して、どのような対応をとるかが課題になると考える。

自動運転化技術の開発も欧州、日本で進められており、アウディが先行して2018年モデルのA8でレベル3を実用化し、日産でも2019年モデルのスカイラインがレベル3に限りなく近い自動運転を可能にした車として市販化された。このように、自動車の電動化、自動運転化が進んでいるが、一方で2019年には衝突安全基準が厳しくなり、側面衝突基準、オフセット衝突の見直しなどにより安全性の高い自動車が要求されている。更にコンパチビリティの導入により、乗員保護だけでなく相手側の自動車の乗員や歩行者を保護することなども考慮した車体設計が必要となり、車体骨格構造の進化が必要になると考えられる。

これらは、前述した電動化とともに、より車体重量を増加させる傾向にあることは容易に予測される。これら電動化や自動運転化が進む次世代車は、航続距離をより長くすることが課題となり、そのために、車体の軽量化技術が求められ、軽量素材への置換、関心が高まっていると考えられる。軽量素材の利用が高まる中で、鋼板ではハイテン、超ハイテンやホットスタンプ材の骨格系部材への適用、アルミニウム合金展伸材のパネル系、骨格系部材への適用、樹脂等の適用等による適材適所化（マルチマテリアル化）が更に進むと考えられる。アルミニウム合金の需要拡大が予測され、更に、熱交換器用のアルミニウム合金や新しい部品へのアルミニウム合金の適用が期待される。

また、公用としての輸送機の電動化も進むと考えられ、バスやトラック、鉄道等においては、自動車以上に軽量化のニーズが高く、アルミニウムの利用が拡大すると考えられる。

(2) 建築・住宅の未来

世界レベルでの国や都市間競争、人口減少と少子高齢化、インフラ老朽化、地球環境問題等の相互作用により、社会構造の大きな転換期を迎える中で、価値の多様化を再構築し、豊かさや安心が持続する国土の実現が求められている。

これを受け、AIやIoT等の技術革新を活用し、効率・最適化指向によるコンパクト化した地域圏を高速交通手段で繋げ、更に国境付近の海洋や離島も含めて国土全体を維持可能な形で利用する中長期的な国家施策も検討されている所である。

第四次産業革命を契機とし、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society5.0）実現を目指している。

上記を踏まえた建築市場動向としては、新築着工が減少する中、良質な建築ストックの有効活用を基本とし、ユニバーサルデザイン、レジリエンス（※）、環境負荷低減をキーワードとした開発が進展すると考えられる。

特に住宅やビルは、発電・蓄電・消費電力を一括で管理し、実質的なエネルギー使用量をゼロ以下にするゼロエネルギー住宅（ZEH）やゼロエネルギービル（ZEB）の普及に向けた取り組みが加速しており、職場管理、健康管理、防災、防犯など日常生活をサポートする様々な技術導入も飛躍的に発展することが期待される。

更に、スマートメーターを含めスマートハウスでの系統電力とEVや再生可能エネルギーとの連携、および発光ダイオード（LED）の普及も踏まえ、直流化の動きが進展しており、新しいエコ住宅の試みとして「EV付き住宅」の販売も開始されている。

このような状況下でアルミ建築材に対しては、資源循環型素材、適材適所のハイブリッド活用の概念をベースに、省エネルギーおよびゼロエミッションに貢献し、安全で快適な空間を実現すべく、高機能・高性能材としての地位確立が期待されている。

また、アルミニウム建材製造メーカーに対しては、クラウド環境でのBIM（Building Information Modeling）連携や、ものづくり技術における積層造形技術の活用など、多品種小ロットニーズに品質を担保しながら短納期・低コストで供給出来る体制を構築し、グローバルな視点で変革する時代の潮流を捉えた取り組みが望まれる。

※レジリエンス・・・災害への粘り強くしなやかな対応

（国土交通省；新たな「国土のグランドデザイン2050」2016年）

(3) 土木製品・土木構造物の未来

2013年11月のインフラ長寿命化基本計画、2014年5月の国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）の決定、2020年東京オリンピック開催、更には、昨今の防災・減災への関心の高まりなどにより、土木分野は今後大きく注目される。

アルミニウムのメリットは、軽量である点と耐食性に優れている点である。軽量である点は耐震性や移送利便性の向上につながり、防災対策ならびにしなやかな（レジリエンス）構造物の構築に適している。また、腐食しにくいことはメンテナンス費用の削減によるライフサイクルコストの低減に結びつく。これらの利点を生かして、防護柵、高欄、水門、橋梁検

査車、橋梁点検車、照明柱、トラス屋根、耐震ブレース、床版など広い範囲で利用されてきている。

今後、少子・高齢化が急速に進むわが国においては、メンテナンス費用および要員の確保がますます困難になり、トータルコストダウンに結びつくアルミニウムは大変有利と言えるが、更に需要を拡大するためには、土木構造物として広く使用されている鉄鋼材やコンクリートに比べて、アルミニウムの初期コストが高い点や、設計基準類の整備が不十分な点を克服する必要がある。

2000年頃からアルミニウム歩道橋や拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設され始めている。最近では、道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼製橋も建設されるようになってきており、2015年には国土交通省近畿地方整備局で60m級の緊急架設橋用の床版として採用された。2015年には最新の研究結果を盛り込んだ「アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）」が完成した。この指針（案）の最大の特徴は、摩擦攪拌接合を考慮した構造設計法を与えたことである。更に高速道路の建設・管理に関する研究開発も行っている（株）高速道路総合技術研究所発行の「高速道路設計要領」2017年7月版に「橋梁用アルミニウム合金製検査路」規格が掲載されるなど、各種設計基準の策定とともに土木分野へのアルミニウムの更なる活用が期待される。

（４） 灯りの未来

政府は脱炭素社会づくりに貢献する「製品への買い換え」、「サービスの利用」、「ライフスタイルの選択」など地球温暖化対策に資するあらゆる「賢い選択」を促す国民運動「COOL CHOICE」を推進している。照明の分野においても、環境省および経済産業省も節電・温暖化対策のための高効率照明普及キャンペーン「あかり未来計画」を実施している。省エネで環境にやさしい“あかり”として白熱電球からLED照明や有機EL照明等の高効率な照明製品への切替えが進んでいる。政府は省エネを推進する立場から2020年までにLEDを始めとする次世代照明の出荷率を100%に、2030年で設置比率を100%にすることを目標としており、2020年には、政府の目標に近い出荷比率に近づきつつある。世界市場も人口増加に伴う新興国での照明市場は増加すると予想されている。LED照明では、アルミニウムの優れた加工性と熱伝導性を活かして放熱素材として利用されている。またLED基板としても適用されており、アルミニウムはLEDに欠かせない素材として、今後の展開が期待される。

また、有機ELは、平面で発光する光源デバイスであるため大面積化が可能であり、紫外線レス、水銀レスという点で環境にもやさしい。また、近年の材料・デバイス技術の進展により、LEDを超える高効率、長寿命が期待できるようになってきた。有機ELは、平面での発光であることから一般的には放熱性に優れるものの、熱の逃げ難い構造の場合には他の光源と同様に発熱するため、放熱性に優れるアルミニウムの基板およびヒートシンクとの組合せにより、より効率的な照明にできる可能性がある。今後、アルミニウムの適用が期待される。

一方、自然光を反射の連続で室内に運び、そのまま室内照明として使う採光システム「光ダクトシステム」の採光部、導光部、放光部には、軽量性、反射性、耐久性の観点からアル

ミニウムが多く用いられている。本システムは古くから実用化されているものの、一般住宅用として大きく需要が伸びるまでには至っていなかったが、近年、環境負荷軽減の高まりに伴い徐々に普及し始めている。今後も省エネ・温暖化対策の有力なアイテムとして大きく市場が拡大することが期待される。

(5) 家電の未来

猛暑になった2018年は、エアコン、冷蔵庫、洗濯機を中心とする白物家電の国内売上が2.4兆円と若干持ち直しを見せた。人口減少の中、AV機器類の2018年度の国内売上額も約1.3兆円と横ばい状態にある。12月に新4K8Kの本放送が開始され、対応するテレビやチューナの立ち上がり時期に当たるとともに、高価格帯の大型薄型テレビや有機ELテレビの販売台数が伸びた。一方、働き方改革や2020年1月のWindows7のサポート終了が近づいたことなどの影響で、法人向けパソコンの出荷台数が増加し、情報機器に類するパソコンの2018年度国内売上額は約1.1兆円で前年度比18.7%増を示した。

家電の省エネ推進の施策として導入された「トップランナー制度」で、各々の製品毎にエネルギー消費効率の優劣が明確になるため、メーカー各社は、基本機器の性能向上とともに、赤外線センサー等を活用した効率的な運転のための制御技術の開発にしのぎを削っている。更に、スマートフォンの機能としてはじまった音声認識技術は新たなインターフェイスとして、AI技術とともにスマートスピーカーや携帯用自動翻訳機などへの活用がはじまった。今後、幅広い家電に組み込まれることで、人と家電との距離が縮まるものと期待されている。

国内家電向けアルミニウム展伸材の出荷量も基本的に横ばい状態ではあるが、2018年度は若干増えて5万トンを超えた。板材出荷量の4.3万トン内、約8割が熱交換器用フィン材で占められている。優れた熱伝導性を有するアルミニウム材料は、熱交換器やヒートシンク等とともに、廃熱のこもりを防ぐために電気・電子機器の支持体や筐体として活用されている。家電のさらなる高機能化やコンパクト化を図るためにも、アルミニウム材料には熱伝導性の向上が今後も求められるものと考えられる。

(6) エネルギーの未来

2018年7月に第5次エネルギー基本計画が閣議決定された。この基本計画では、エネルギーの「3E+S」※の原則を更に発展させ、「より高度な3E+S」※を目指すため、以下の4つの目標を掲げている。

- ①安全の革新を図ること
- ②資源自給率に加え、技術自給率とエネルギー選択の多様性を確保すること
- ③「脱炭素化」への挑戦
- ④コストの抑制に加えて日本の産業競争力の強化につなげること

そして、この方針の下、2030年に向けて、2030年のエネルギーの姿を示した「エネルギーミックス」の確実な実現を目指しており、一次エネルギーについては、太陽光、風力、地熱、水力、木質バイオマス等の再生可能エネルギーを2017年の16%から2030

年に22～24%へ、原子力については同3%から22～20%へ、石炭、天然ガス等の化石燃料を同74%から53%へすることを目標としている（数値は資源エネルギー庁「2019エネルギー白書について」から）。

再生可能エネルギーの比率を大幅に高め、主力電源化するためには、発電コストを削減しFIT制度などによる負担の軽減が不可欠である。アルミニウムは軽量、耐食性、加工性、導電性、熱伝導率に優れており、現在でもエネルギーの生産・調達から流通消費までのサプライチェーン全体にわたって活用されているが、更なる性能向上、使用範囲の拡大等により、コストダウンへの貢献が期待できる。

また、水素社会実現に向けた取り組みの抜本強化、二次エネルギー構造の改善等の政策対応についても、その特長を活かした貢献が期待できる。

※ 「3E+S」	⇒	「より高度な3E+S」
○安全優先 (Safety)	+	技術・ガバナンス改革による安全の革新
○資源自給率 (Energy security)	+	技術自給率向上/選択肢の多様化確保
○環境適合 (Environment)	+	脱炭素化への挑戦
○国民負担抑制 (Economic efficiency)	+	本国産業競争力の強化

(7) ロボットの未来

ロボットの市場は拡大を続けている。世界の産業用ロボットの販売台数は2017年に38万台であり直近の5年間で倍増している。今後も年率14%の高い伸び率で推移すると見られている。産業用ロボットは、その国の製造業の競争力を左右する非常に重要な産業である。日本はこの分野で6割（21万台）のシェアを持っている。政府の発表した「ロボット新戦略」（2015年）では、日本を世界のロボットイノベーションの拠点にし、世界一のロボット利用社会とすることを目指すとともに、ロボットの市場規模を2014年当時における6,600億円（製造・非製造業分野合計）から2020年には2兆4,000億円へと成長させることを目標に掲げている。

ロボットの導入は、従来は自動車産業など大企業を中心であったが、少子高齢化・労働力不足を背景に今後は中小企業への導入が進むものと見られる。また、利用分野としてはこれまでの部品組み立て業に加え、食品工場や物流におけるピッキング・仕分・検品作業、あるいはインフラの検査作業、宿泊業などへ拡大が期待される。

課題としては、ハードウェアの面ではボルトレス、ケーブルレスなど構造の簡素化が求められている。アルミニウムは軽量かつ高強度・高剛性で、高い寸法精度での加工も可能なため、ロボットアームや構造フレームの材料を始めさまざまな部品へ採用されている。また、コンパクト化に伴い電装系からの放熱も問題となっており、熱設計の分野においてもヒートシンク、ヒートパイプなどソリューションを提案できる。

(8) 食の未来

食文化は経済のグローバル化、国内の高齢社会の進展、家庭環境へのAIロボット採用、訪日外客数の急速な増加（日本政府観光局調査（JNTO）2018年1～12月計：3

1、192千人、対前年比+8.7%)に伴い、ますます多様化していくことが明らかである。新しい食品の製造や容器包装の分野で新たな需要が出るのが予想される。機能性(健康)食品・飲料製品や高齢者向け食品の急速増加、観光客向けの食品・飲料製品の開発により、消費者の心を上手に捉えるデザイン食品包装やロボットの扱いやすい食品包装の商品開発は大きな商機をもたらす可能性が現われてくるだろう。また、食料自給率向上の観点から植物工場の建設や運転も始まり栽培棚などの構造部位にアルミニウムが用いられている。更に、地震等の緊急時保存用としての米や水を保存する容器に遮光性の観点からもアルミニウムの利用が増えることも期待できる。また近年の使用済み容器包装プラスチックゴミによる深刻な環境問題から、リサイクル性の良いアルミニウム容器包装への需要増加が見込まれる。

(9) 半導体の未来

半導体分野は、電化社会、高度情報化社会だけでなく、現代生活のあらゆる面で欠くことのできない電子テクノロジーを支えるものである。移動通信ネットワークでは第5世代移動通信システム(5G)とともに、IoTモジュールの小型化、低コスト、低消費電力、通信エリアの適切化などに対応したLPWA(Low Power Wide Area)やPAN(Personal Area Network)といった新たな無線技術が注目されている。また2021年に延期された東京オリンピック・パラリンピックでは、5G、新4K8K、人工知能(AI)、ロボット(AI搭載のドローンやカメラ)技術などを組み合わせて、世界中にアピールする機会になると予測される。そしてこれらの技術に対応するべく設備の増強や新設が必要となる。更に先を見据えると、5Gの特性を生かしたアプリケーションの開発や導入、普及が進むものと見込まれ、自動車(コネクテッドカー)やその他の産業、医療分野などへの展開も予測される。

こうした技術の飛躍的な発展に伴い、半導体やその製造装置の技術革新が必要不可欠となる。この流れに貢献する材料として、厚板を始めとしたアルミニウムの利用拡大と新規採用が期待される。また表面処理技術の開発により、皮膜性能の向上や、皮膜のクラックを抑制して汚染を防止するなど、用途に応じた取り組みが今後も求められる。

(10) 情報通信の未来

2020年からサービスが開始される5Gは、従来に比べ飛躍的に高速大容量かつ低遅延で、同時多接続可能な通信を社会にもたらす。交通・移動・物流、スマートシティー(エネルギー)、医療・健康・介護を始めとし社会のあらゆる分野でIoT化が進み、これまでにないビジネスが創出されていく。

スマートフォン、タブレットなどの端末においては、2Gから4Gも含めた多数のアンテナを配置する必要があり、電波の受発信を容易にするため、筐体ではアルミニウムに代わり樹脂やガラスといった電波を通す素材を使用する部分が増えていく。ただ、剛性や強度が必要な骨格部分には今後もアルミニウムの採用が続くと見られ、高強度のアルミニウム合金の開発が求められていく。

基地局や中継器などの機器においては、電子基板の放熱部品としてアルミヒートシンクが、筐体部品としてアルミダイカストが使用されており、5Gのインフラ整備に伴う需要の増加が期待される。ストレージの分野では、データセンターで引き続きアルミニウム基板を

使用したハードディスクドライブが使用されると見られ、更なる大容量化のための高強度アルミニウム合金基板への期待が大きい。

(11) 医療・介護・バイオ・健康の未来

令和元年度版高齢社会白書によれば、少子高齢化の進行によりわが国の高齢化率（65歳以上の割合）は2018年の28.1%から、2030年には31.2%を超え、人口的には0.4%増加することが予想されている。これに対し、生産年齢人口（15～64歳人口）の比率は59.7%から57.7%に、人口的には8.9%低下することが予想されている。

また、厚生労働省と経済産業省が合同で開催する、2040年頃における人と先端技術が共生する未来の医療福祉分野の在り方を検討する「未来イノベーションワーキング・グループ」では、IoT、AI、ロボット技術など、第4次産業革命を踏まえた変革が急速に進展すると見込んでいる。

特にロボット技術については、高齢者の増加と生産年齢人口の減少に伴う、医療・介護サービスなどの分野での需要拡大により、その担い手となる労働力の確保、生産性の向上の観点から、介護用ロボット活用の期待が高まるものと予想される。

アルミニウム材料は軽量であることはもちろんであるが、無臭・無害の毒性のない金属であり、磁気を帯びない、腐食し難い等の特長を持っており、これらの分野での用途拡大が期待される。

(12) 航空の未来

2018年度の国内航空機生産額は前年度比0.8%増の1.73兆円となった。世界の民間航空機需要は拡大傾向にあり、特に150席クラスの旅客機を中心に長期に亘って年率約5%の需要の伸びが予測されている。日本の民間航空機産業は世界的航空機メーカーであるボーイング社等との共同開発や製造分担が主である。日本メーカー比率が約35%のボーイング787の受注は好調に推移し、約21%のボーイング777Xについても2020年納入に向け生産準備作業が進められている。更に、日本にとって40年ぶりとなる国産旅客機の三菱リージョナルジェット(MRJ)がファンボロー航空ショーで初の飛行展示を行うとともに、国土交通省航空局(JCAB)の型式証明取得に向けた飛行試験が開始された。なおMRJは三菱スペースジェットと改名し、88席の機体(M90)とともに、今後北米路線を中心に76席以下の機体(M100)の多くの受注が見込まれている。また、ホンダジェットは2018年も引き続き、世界で最も多く出荷された小型ビジネスジェット機となった。

防衛機分野では、国内生産額が2012年以降若干減少傾向にあるが、防衛省より新たに防衛装備品の調達に関する一連の政策が打ち出されたことで市場の拡大が期待されている。米国ロッキード・マーティン社製の次期戦闘機F-35Aの導入や国内先進技術実証機X-2の開発とともに、国産大型戦術輸送機C-2の部隊配備や先行している姉妹機の哨戒機P-1の長期に亘る安定した受注が引き続き予定されている。更に防衛省の2020年概算要求において「我国主導の将来戦闘機の開発」に着手する意向が示された。現戦闘機F-2が退役を迎える2035年に、後継戦闘機として実戦配備できるように、必要となる各種要素技術の研究開発が進められることになる。

一方、物の輸送あるいは人の移動の新たな手段として、ドローンの活用が検討されている。日本でも、経済産業省／国土交通省の声掛けで「空の移動革命に向けた官民協議会」が設立された。ここでは、ドローンによる物の輸送の実用化とともに、2020年代には地方で、2030年代には都市部でも人の移動手段として空飛ぶクルマの実用化を目指すロードマップが示された。ベンチャー企業を含め、多くの業種の民間企業が興味を示すとともに、官でもインフラや法制度等の整備について検討が開始された。

軽量化が求められる航空機では古くから高強度アルミニウム合金材料が使用されており、既存の大型民間航空機の機体の約7～8割を占める。また三菱スペースジェットやホンダジェットなどの最新の中・小型の旅客機の主翼にも実績のあるアルミニウム材料が採用された。一方、地球温暖化対策とともに、運航コスト削減のために燃費向上が更に強く求められる中、新たな軽量材料の使用が試みられている。最近の大型民間旅客機ボーイング787やエアバスA380では、樹脂複合材の使用比率が高まった。またアルミニウム材料が主体である現行のボーイング777も、777Xへの改良に伴って主翼が樹脂複合材に置き換わることが決まった。樹脂複合材には、素材コストとともに、生産性や信頼性等の課題が指摘されていることから、内閣府革新的イノベーション創造プログラム（SIP）の「革新的構造材料」のテーマの一つとしてこれらの検討が並行して行われた。また、マグネシウム材料についても、難燃性が米連邦航空局（FAA）に認められたことから、2020年以降の航空機への採用を目指して熊本大学を中心に研究開発が精力的に進められている。

燃費を含め航空機性能の向上のため、今後も機体の軽量化が強く求められるものと思われる。そのため、個々の素材の特性向上や生産技術の改良とともに、最適設計による航空機体のマルチマテリアル化の検討も自動車と同様に不可欠と考えられている。新構造材料技術研究組合（ISMA）では、マルチマテリアル化の検討を中核的な課題と位置付け、総合的な取り組みが引き続き進められている。

（13） 宇宙の未来

人工衛星やロケット等の宇宙機は、将来において、高性能化とともに小型化・軽量化が要求され、更には、信頼性の向上も求められている。宇宙機において重要な基盤技術は、誘導・制御、軌道・航法、電子部品、電源、通信データ処理などがある。経済産業省・航空機武器宇宙産業課宇宙産業室において、「宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業」等を進めており、超小型衛星の開発や小型・軽量・高性能なロケットエンジンの開発を行っている。これら宇宙開発事業を進めるにあたり、小型化・軽量化のために重要な技術のひとつに部材を支える材料開発がある。近年は、ロケットモーターケースにCFRTP（熱可塑性樹脂含浸カーボン繊維複合材料）を適用するために低コスト製造技術の開発が進められているが、現在も低コストかつ軽量で加工性に優れた特性を持つアルミニウムには今後の適用が期待される。たとえば、アルミニウムは、軽量、非磁性等の特性からロケットや人工衛星等宇宙機に部分的に使用されており、更に、高機能性材料として、内部に多数の空隙あるいは気孔を入れたポーラス材が着目され、特にアルミニウムポーラス材は、軽量かつ衝撃吸収能があることから、小型探査機のピンポイント着陸にも適用の可能性があると見て着陸脚システムの一部に検討された例がある。

アルミニウム業界では、宇宙機へのアルミニウムの適用は、市場規模に大きく影響は与えないものの、軽量、高剛性、非磁性という特徴を持ち、機能性の高いことから、宇宙機分野にも一部部材として活用されるであろうと期待することができる。

(14) 鉄道車両の未来

1962年山陽電鉄に日本で初めてアルミニウム合金製車両が導入されて60年近く経過し、その軽量性、耐食性、リサイクル性が鉄道関係者に広く認識されている。昨今では毎年製造される車両の約半数がアルミニウム合金製車両を占め、今後も通勤車両から新幹線車両まで幅広く普及することが期待される。

全国新幹線鉄道整備法に基づき整備計画が定められた5路線の整備新幹線のうち、一部あるいは全線が未開業の3路線、北陸新幹線（2015年3月長野-金沢間が開業）、北海道新幹線（2016年3月新青森-新函館北斗間が開業）、九州新幹線（長崎ルート）（2022年度から可能な限り前倒しして全線開業予定）にも、アルミニウム合金製新幹線車両が導入される予定である。

更に、1997年から山梨リニア実験線でアルミニウム合金製車両を用いた超電導磁気浮上方式（超電導リニア方式）の走行試験が進められている。そして、2011年の全国新幹線鉄道整備法において、東京-大阪間を結ぶ中央新幹線はこの超電導リニア方式を正式に採用することになった。なお、首都圏-中京圏間が2027年に先行開業し、東京-大阪間の全線開業は2045年を予定している。

Ⅲ－２ アルミニウム需要統計

(1) 現状整理

- ① 2009年日本のアルミニウム総需要は過去にない落ち込みとなった。
その後回復基調にあり、リーマンショック前のレベルに戻りつつある。
- ② 全世界のアルミニウムの消費量は今後も増加が予想される。特に2000年以降の中国での伸びが大きい。
- ③ 一方、日・米・ドイツは2000年以降停滞状態である。
- ④ 人口1人当たりのアルミニウム消費量について、1980年までは米国の消費量が多かったが、1990年以降、米は下降傾向。近年、日・米・ドイツは停滞しているが、中国は増加継続。
- ⑤ 尚、わが国は人口1人当たりで見ると世界有数のアルミニウム消費国である。
- ⑥ 用途別日米比較（上位4用途）
日本：輸送、建設、金属製品（箔、PS版）、食料品
米国：輸送、容器包装、輸出、建設
(輸送関係が共通してトップ、日本は高品質の金属製品が、また米国では容器包装分野でのアルミニウムの大量使用とコスト競争力を生かした輸出が特徴的。)

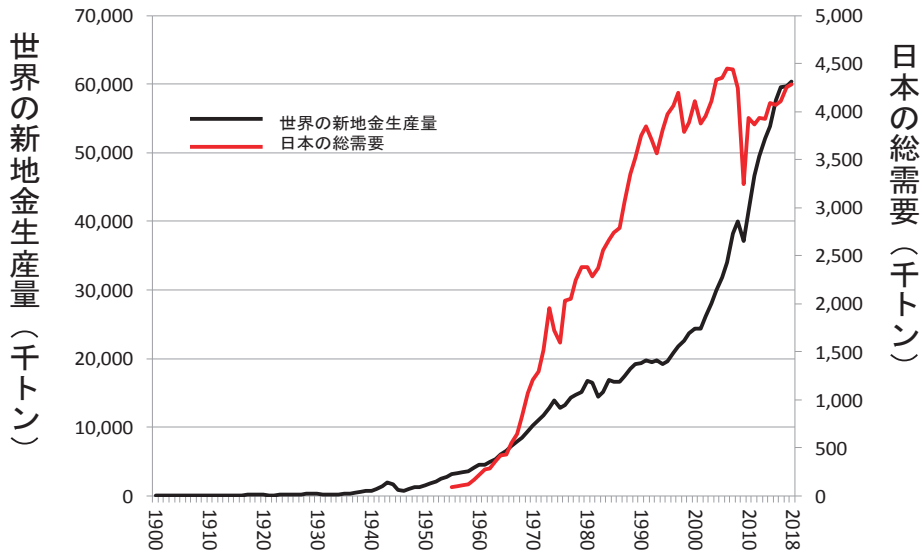
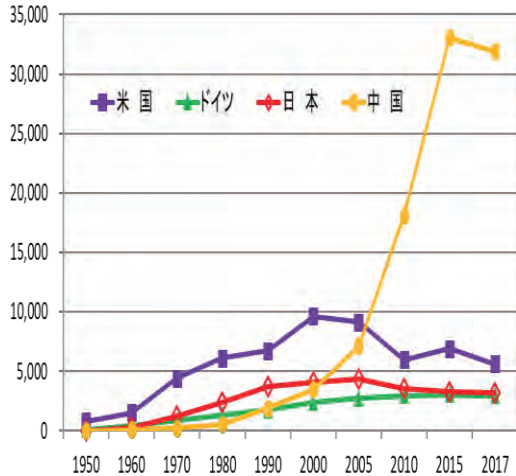


図1 世界の新地金生産と日本の総需要（～2018）

(a) 日米独中のアルミ消費量推移 (千トン)



(b) 日米独中の一人当たりのアルミ消費量推移 (kg)

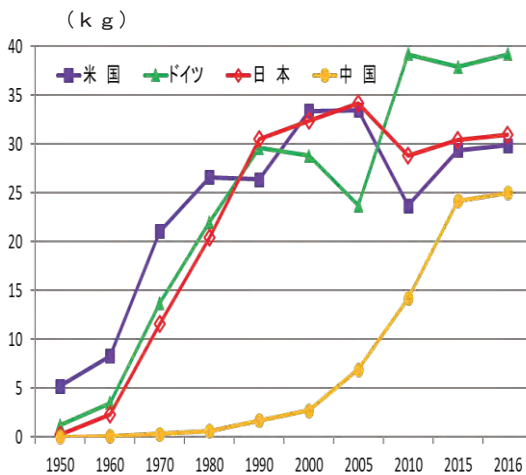
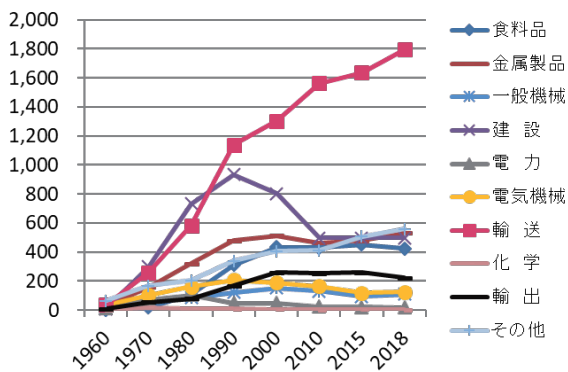


図2 アルミニウム消費量の日米独中の比較

出典：Metal Statistics World population prospects, 世界人口白書、総務省統計

(a) 日本のアルミ需要用途別推移 (千トン)



(b) 米国のアルミ需要用途別推移 (千トン)

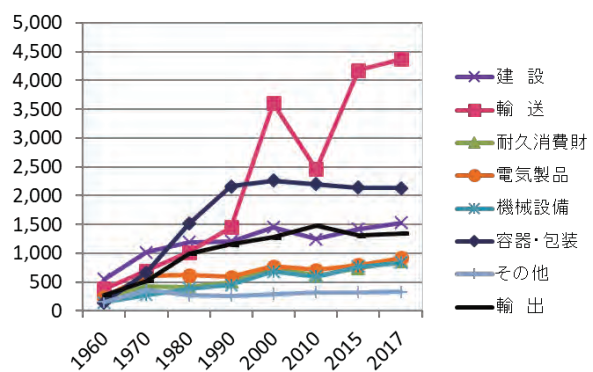


図3 日米のアルミニウム需要用途別推移

出典：日本アルミニウム協会統計年表、米国アルミニウム協会統計年表

☆日本の開発製品☆

これまでに多くの世界NO. 1製品やオンリーワン製品を生み出してきたが、そのいくつかを紹介する。

《JAA世界NO. 1、オンリーワン製品》 * JAA：日本アルミニウム協会

アルミ熱交換器、アルミ新幹線車両、PV電極、バックシート、LIBケース・正極、アルミ缶、HD基板、アンテナ、電波方式個体認識(RFID)、感光ドラム 等

《開発中の製品》

- ① JAA：燃料電池車(FCV)水素タンク用アルミライナー：NEDOプロジェクト
2003～2009年
水素用アルミニウム材料評価・開発：NEDOプロジェクト
2010～2011年
- ② 物質・材料研究機構：アルミ陽極酸化不揮発メモリー：文部科学省元素戦略 2007～2011年
レアメタルを用いない、オールアルミ系抵抗変化型メモリー素子の集積化プロセスの開発に成功、次世代半導体デバイスとして期待される。

(2) 今後への期待

日本のアルミニウム産業は、これまで欧米からの技術導入により発展してきたが、人口1人当たりで見ると、すでにドイツ、米国と並び世界屈指のアルミニウム消費国である。今後は世界をリードする独自の材料開発、用途開発が望まれる。また、コスト競争力を向上させる工夫が必要である。

Ⅲ-3 未来に向けたアルミニウム産業の技術開発の基本戦略

●弱みを強みに変える技術開発

わが国のアルミニウム産業は、新地金を全面的に海外に依存しており、原料である地金の価格変動によるリスクを構造的に抱えている。地金価格はここ数年比較的安定して推移しているが、中長期的なアルミニウムの消費量は中国を中心に世界全体で年率5%で増加すると予測されており将来的には不透明である。また、地金に添加して使用する銅、亜鉛、マグネシウム、マンガンなどの金属も海外に依存しており、消費量増加による価格の高騰、枯渇の懸念、あるいは産出国の資源ナショナリズムの高まりなど、調達の上で不安定要因が横たわっている。

これらの原料を巡る問題への対応として、まず、鍵となるのはリサイクルである。製錬業を持たないわが国にとっては、国内の都市鉱山でもあるアルミニウムスクラップのリサイクルを最大限進めることが有効な対策となる。現在、アルミニウムスクラップから作られる再生地金は、9割が鋳物・ダイカスト用途に用いられ、展伸材への使用は1割程度に留まっている。リサイクルの課題は、スクラップを展伸材へ再生可能にする技術の開発である。それ

にはスクラップを合金別に選別する技術、Fe、Siなどリサイクルする過程で不可避免的に混入する不純物元素を除去、無害化、あるいは巧みに有効活用するプロセス技術である。

リサイクルによるメリットは資源循環だけではない。アルミニウムは、新地金製造時に多量のエネルギーを消費しCO₂排出をするが、スクラップをリサイクルして再生地金を製造する際には、エネルギー消費量・CO₂排出量は共に新地金製造時の3～5%と極めて少なくて済む。国連のSDGsや国際イニシアティブASIの活動など、世界的に低炭素・循環型社会への転換が迫られる中、製品の製造に使用される原材料に対しても環境負荷の小さいものを求める傾向が強まっている。ASIに加盟する企業・団体は増え続けている。その中でもアップルやジャガー・ランドローバーなど消費者に敏感なメーカーの間では積極的な取り組みがなされ、アルコアやノルスク・ハイドロなど材料供給で貢献するメーカーも加わるなど、先駆的な企業によってサプライチェーンの構築が進められている。

2019年、日本アルミニウム協会は国研、大学および軽圧各社と共同でアルミニウム資源循環の要素技術開発のための先導研究を開始した。日本が欧米勢に先んじてスクラップを展伸材にリサイクルするための一連の要素技術を開発しリサイクルシステムを構築することの意義は大きい。

●アルミニウムの需要拡大を目指した研究開発

需要拡大の点では自動車などの輸送機器分野への期待が大きい。アルミニウムは鉄に替わる軽量構造材料として有力で、強度・延性を始め種々の特性の更なる向上が求められている。この要求に応えられるよう合金・加工技術の開発を加速しなければならない。また、マルチマテリアル化も急速に浸透している。異種材料と組み合わせた使われ方への対応も欠かせない。異種金属や樹脂との接着・接合技術や防食技術の開発も進めていく必要がある。

こと自動車に関しては、近年製造段階から使用、廃車、リサイクルに至るまでのライフサイクルにわたる環境負荷が重視されるようになってきている。材料に対しては軽量・高強度といった直接的な目的特性だけでなく、製造に際しての環境負荷が小さいこと、リサイクル性に優れることも求められるようになってきている。このような傾向は、企業活動の環境負荷に対する社会的要求に根差していることから、今後は自動車産業に限らず広範に波及していくものと考えられる。アルミニウム製品の需要拡大のためには環境負荷が少ないことも必須要素となり、再生可能エネルギーで製錬した地金あるいはスクラップ由来の再生地金など環境負荷の少ない地金の確保が課題となっていく。

自動車以外の新しい用途領域への進展については、インフラ整備と防災・減災対応が進みつつある土木・建築分野、クラウド・コンピューティングなどの情報通信技術（ICT）、電力ネットワーク（スマートグリッド、環境共生スマートシティ、次世代エネルギー社会システムの実証プロジェクト）、更には新産業としての植物工場・次世代農業等が挙げられ、この領域へのアルミニウム材料の用途開発も推進する。

いずれの分野においても需要・要求特性の変化に対応して的確な材料を開発していくことが強みとなる。従来は実験や経験の蓄積によるアナログ的なすり合わせ技術で差別化を図ってきたが、近年のマテリアルズ・インフォマティクスやAIなど情報技術の発達により、材

料開発におけるデータ駆動科学の存在感が急速に増している。このようなデジタル的なアプローチは、材料分野で日本に後れを取る国々にとっては低コスト・短時間でキャッチアップする手段として強力に推進して来ることは容易に想像できる。我々もこれまでの技術の蓄積に加え、積極的に取り入れていかなければならない。すでに、いくつかのアルミニウムメーカーでは合金開発や製造プロセス管理にAIを活用することが発表されている。更なる競争力強化につながることを期待したい。

●人材育成の強化； 高い専門力、創造力、国際感覚

日本のアルミニウム産業は、高性能・高付加価値製品を製造できる技術力を競争力の源泉として来た。グローバルでは中国の台頭など近年ますます競争が激化しているが、日本のアルミニウム産業が持続的に発展していくためには、この優れた製造技術を維持・深化させていかなければならない。しかしながら、それを担う人材の面では、大学等高等教育における金属工学系学科は減少傾向にあり、金属分野の高度な専門知識を持った人材を確保することが難しくなっている。また、産業界におけるベテラン労働者の高齢化も相まってこれまで培ってきた製造技術をいかに継承していくかは焦眉の課題である。

このような背景に鑑み、日本アルミニウム協会では金属系材料研究開発センター（JRCM）と共同で経済産業省の委託事業としてアルミニウム産業の研究・技術を担う人材の教育プログラムを開発し、その成果を踏まえ2010年度より「中核人材育成講座」を開講し若手技術者の育成に取り組んでいる。このプログラムは、大学の学問とアルミニウム産業の製造技術の融合、材料系学問と機械系学問の融合、そしてアルミニウム企業間の技術の融合という3つの融合により完成したものであり、企業の中堅研究者・技術者を対象に材料と加工プロセスの両面から系統的な教育が行われている。

アルミニウム産業の門を叩く人材を増やしていくことも重要である。学生を対象とした人材育成としては、従来のインターンシップ制度および特別出張講座に加え、2011年度から毎年「アルミニウム・夏の学校／初春の学校」を開催している。関東と関西の2か所で行われる。材料系の学生に限らず、電気、機械、化学等の学生も対象に加え、毎回多くの学生の参加がある。ここでは、講師に企業の若手技術者を起用し、学生が企業側の技術者と直に討論することを通じてアルミニウム産業に興味を持ち理解を深めていただいている。

直近2年間の活動実績をⅢ-5節に記載した。今後も引き続きこのような活動を通じてアルミニウム産業の将来を担う人材の裾野を広げていく所存である。

Ⅲ-4 アルミニウム産業の未来に向けた技術開発の進捗状況

(1) アルミニウムの製品技術開発（組織制御）

添加元素（Mg、Mn、Zn、Cu）低減合金と、不純物であるFeの活用技術を開発する。ナノ組織制御による引張強さと伸びをバランスさせた超軽量、高強度部材の開発を目指す。またユビキタス元素（Si、Fe等）ベースの部材開発を行い、用途モノアロイ化（6000系合金）への布石（Mg、Mn、Cu、Zn低減）とする。

目標 2025年：従来の限界を越えた500MPa～30%の軽量・高強度部材の開発
2035年：800MPa～40%の軽量・高強度部材の開発

(1) - 1 ナノ組織制御でのブレークスルー

- ・ D-S S F（Deformation -Semi Solid Forming）プロセス（里：東工大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2011～2013
「鉄を活用した新規ナノヘテロ構造アルミニウム合金の創製と3D構造解析」
- ・ 微細粒強化、転位強化と時効析出強化の並立
（廣澤：横国大、寺田：千葉工大、堀田：九大、松田：富山大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2011～2015
「超微細粒強化と時効析出強化を並立させる新規アルミニウム合金展伸材の開発とその合金設計指導原理の確立」
- ・ 水素化脱水素化による微細組織化（文科省元素戦略 2007～2011：東北大）
- ・ 水素ポア制御による力学特性向上
（戸田：九大、山口：原研、松田：富山大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2014～2019
「水素分配制御によるアルミニウム合金の力学特性最適化」
- ・ 超塑性変形挙動（佐藤：宇宙研、鶴飼：北大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2015～2017
「協調的粒界すべりのすべり群サイズの決定機構（超塑性変形速度向上の指導原理）の解明」
- ・ ヘテロ凝固核による組織微細化（渡辺：名工大、中野：産総研、鈴木：早大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2016～2019
「ヘテロ凝固機構により高造形性・高強度を実現する積層造形用金属粉末の開発」
- ・ 水蒸気を利用した強度と耐食性の向上（芹澤：芝浦工大、石崎：芝浦工大、阿相：工学院大、高田：名大）
科学技術振興機構「産学共創基礎基盤研究」プログラム2016～2019
「階層的マルチヘテロ構造の創出によるアルミニウム合金の多機能化と

その指導原理の解明」

- (1) - 2 強歪加工プロセス開発によるブレークスルー（堀田：九大、向井：神戸大）
- ・溶解／ダイキャストプロセス
 - ・押出プロセス～捻り押出 ・圧延プロセス～溝圧延
 - ・強歪せん断～E C A P（Equal Channel Angular Pressing）、H P T（High Pressure Torsion）など

- (1) - 3 外部力による組織微細化
- ・急速冷却 ・電磁力 ・超音波

- (1) - 4 半熔融技術の活用
- 半熔融技術の活用による高性能材料開発の可能性を探索する。
- ・チクソ・ランナーレス射出押出技術組織制御（三輪：産総研）
 - ・展伸材D-SSF（里：東工大）Fe 1%含有高強度材の組織制御

(2) アルミニウムの生産技術開発（プロセス）

- (2) - 1 新溶解鑄造法の開発
- 省エネと溶解ロスの低減を目指した、新たな溶解法と非金属介在物ゼロを目指した新たな耐火物コーティング技術を探索する。
- ① 炉の省エネ：1/5～1/20にする。
 - ② ドロス低減溶解：1/5～1/10にする。
 - ③ 耐火物コーティング技術：非金属介在物ゼロ

- (2) - 2 他の材料との融合
- 他材料との融合により高機能、新機能の発現を目指すとともに、低コスト化を探索する。

- ① 複合材料
 - アルミ粉末とカーボンナノチューブ（CNT）：強度3倍・高熱伝導性
 - バイエルとアルキャン：1000MPa
 - アルミと樹脂（接合）
 - アルミと異種金属（接合）
- ② 摩擦攪拌接合（FSW）での異種材料接合

- (2) - 3 連続プロセス化
- 双ロールキャスターによるFe、Mn含有率増加合金の実用化（熊井：東工大）を目指す。
（Fe無害化、高強度化）
- 2019年～ NEDO先導研究「アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」に採択。

(2) - 4 アルミニウムの安定ソース確保

低コスト原料の安定確保を目指して、新製錬法開発に向けた探索を行う。

- ① 極低酸素雰囲気によるアルミニウム直接還元（池田：産総研） J A A 2 0 0 8 年
- ② イオン液体によるアルミニウム製錬（野平：京大、津田：大阪大）

(2) - 5 リサイクル合金選別技術

展伸材から展伸材へのリサイクル技術開発に取り組む。

アルミニウム新リサイクル技術開発事業 J A A 2 0 0 9 年 N E D O 事前研究

2 0 1 0 ~ 2 0 1 2 年 N E D O 実用化開発研究実施

2 0 1 4 ~ 2 0 1 5 年 省エネ型アルミ水平リサイクル L I B S ソーティング実証事業
として経済産業省事業に採択

2 0 1 6 ~ 2 0 1 8 年 「動静脈一体車両リサイクルシステムの実現による省エネ実証
事業」として N E D O（国立研究開発法人新エネルギー・産業
技術総合開発機構）のアジア省エネルギー型資源循環制度導入
実証事業に採択。

2 0 1 9 年 ~ N E D O 先導研究「アルミニウム素材の高度資源循環システム
構築」に採択。

(2) - 6 3 D 積層造形技術への対応

近年、鋳型を必要とせず、中空構造や複雑な構造物を一体成型できる金属粉末 3 D 積層造形技術の発展が著しい。アルミニウム合金粉末を原料として複雑形状のアルミニウム製品が作製できれば、アルミニウムの用途拡大が見込まれる。今後、3 D 積層造形に対応可能なアルミニウム合金粉末の開発、上記造形法による製品の特性・信頼性評価の必要性が出てくるものと予測される。

(3) 大型国家プロジェクトへの参画

(3) - 1 革新的新構造材料等技術開発（平成 2 5 年度経済産業省公募事業）

輸送機器の抜本的軽量化に向け、機能とコスト競争力を同時に向上させたアルミニウム材の開発と、これら材料を適材適所に使用するために必要な接合技術の開発に取り組む。

① 革新的アルミニウム材の開発

- i) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発
- ii) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発

② 接合技術開発

- i) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術）
- ii) アルミニウム／CFRP 接合技術開発

(3) - 2 水素除去による各種力学的特性向上

水素マイクロポアを低減することによる各種力学的特性の向上に取り組む。

① 水素ポア制御によるアルミニウムの力学特性向上 (戸田：九大) JAA2012

② 水素ポア制御による航空機用アルミニウム合金の力学特性向上

(戸田：九大) JAA2013

③ 水素分配制御によるアルミニウム合金の力学特性最適化

(戸田：九大、山口：原研、松田：富山大)

JST産学共創基礎基盤研究プログラム2014～2019

(3) - 3 革新的な熱伝達制御及び境界面設計技術開発

最新の数値シミュレーションや計測技術を駆使して熱交換設計を革新することで、ドライアウト防止・凝縮水排出性向上・二相流分配等の課題を克服し、アルミニウム熱交換器を産業および民生用途に展開することを目的とする。

2018年～NEDO先導研究「革新的な熱伝達制御及び境界面設計技術開発」に採択。

(3) - 4 アルミニウム素材の高度資源循環システム構築

アルミニウム素材、特に展伸材の水平リサイクルを目指した技術開発に取り組む。

2019年～NEDO先導研究「アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」に採択。

(4) アルミニウム業界進化のための技術探索

性能向上や新規機能を付加しアルミニウム材料の進化を目指した技術探索を行う。

① 機能材：熱伝導性、電気伝導性、非磁性、光反射性、化学的腐食性、

ガスバリアー性（水蒸気、水素、・・・）など

② 機能性発現：ナノ、生体融合、光物性など

③ 材料融合：ナノ材料、セラミックス、プラスチック、異種金属など

Ⅲ-5 人材育成・社会への仕掛け

アルミニウム材料立国を支える、新教育システムの構築と実施

○ 経済産業省委託事業 JRCM&JAA：2007～2009年

製造中核人材育成プログラム作成と実証

○ 日本アルミニウム協会：2018年度「アルミニウム産業中核人材育成講座」開講

① 溶解鋳造：(安田：京都大学、8月30日～9月1日)、25名参加

② 熱処理：(熊井：東京工業大学、9月13日～15日)、18名参加

③ 材料の強度-強化メカニクス：(渋谷：大阪大学、9月21日～22日)、18名参加

④ 加工(圧延・押出)：(吉田：岐阜大学、9月27日～29日)、18名参加

○ 日本アルミニウム協会：2019年度「アルミニウム産業中核人材育成講座」開講

⑤ 溶解鋳造：(安田：京都大学、9月4日～6日)、19名参加

⑥ 熱処理：(熊井：東京工業大学、9月17日～19日)、18名参加

- ⑦ 材料の強度-強化メカニクス：(渋谷：大阪大学、7月12日～13日)、27名参加
- ⑧ 加工(圧延・押出)：(吉田：岐阜大学、9月25日～27日)、19名参加

- 日本アルミニウム協会：2018年度「アルミニウム・夏の学校」開催
 - ① 関西地区：(京都、9月11日)、4大学、学生17名参加
 - ② 関東地区：(東京、8月30日)、7大学、学生20名参加
- 日本アルミニウム協会：2019年度「アルミニウム・初春の学校」開催
 - ① 中部地区：(名古屋、2020年1月17日)、4大学、学生17名参加
 - ② 関東地区：(東京、2020年1月9日)、6大学、学生13名参加
- 日本アルミニウム協会：「特別出張講座」開講
 - 2018年度
 - ① 富山大学、 ② 大阪大学
 - 2019年度
 - ① 富山大学、 ② 大阪大学、 ③ 名古屋工業大学、 ④ 東北大学

IV. アルミニウム技術戦略ロードマップの解説

IV-1 ロードマップ作成のコンセプト

日本はこれから低炭素社会、循環型社会、安全・安心の社会の実現を目指す。アルミニウムを、その一翼を担う材料に位置づけるべく技術戦略マップの実現の道筋(ロードマップ)を作成した。2009年版を初版として、アルミニウム協会を中心に定期的に見直しを実施する。

アルミニウムは、環境負荷の小さい、軽量化構造を実現する高強度、高靱性/高成形性素材の提供、製品開発/製造/リサイクル(PPRサイクル)の完全循環型素材として確立し、様々な顧客製品に対して、信頼性の高い、構造素材であることが必要である。この未来のアルミニウムの姿を実現するために、次の3つの大きな柱を中心にロードマップに展開した。

① 材料技術・組織制御技術・成形加工技術の確立

使われる目的に最適な金属組織を、事前にその組織を設計し、その設計どおりに製造できるプロセスを確立する。出来上がる材料は、添加元素を枯渇元素からユビキタス元素(Fe、Si)に代替する合金設計でかつ高強度、高靱性/高成形性(高伸び)を有する。高強度材は、2035年以降において、展伸材で引張強さ800MPa、伸び40%以上を目指す。

出来上がった材料を目的の形状へ成形加工出来る技術を有する。

② 資源生成・循環技術の確立

輸送機材分野、エネルギー分野でのアルミニウムの適用が進展している中、資源生成・循環技術の重要度が増してきている。リサイクル、リユース技術の確立(回収と再生の技術の確立)および新精錬技術の確立により、アルミニウムの完全循環型社会を実現するため、現状の総需要420万トン/年に対して当面70万トン/年回収を増加させることを目指す。将来的にはリサイクル率100%を目指し、現在、「カスケードリサイクル」からバージン材を必要とせず資源循環に制約のない「水平リサイクル」へとシステムを転換するため、NEDOの先導研究プログラムとして「NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」のテーマで開発を進めており、更にナショプロとしての活動を計画する。

③ 利用拡大技術の確立(アルミニウムの高性能化と新機能の発現)

国内でのアルミニウム需要の拡大には、新しい需要分野の開拓が不可欠である。その需要拡大には、アルミニウムの高性能化と新機能の発現が必要である。アルミニウムを構造材料の第一選択素材とするために、品質と高付加価値と低コストを併せ持つ、革新的なものづくり技術を確立する。その結果として、2035年で190万トン/年の需要増(総需要610万トン/年)を設定する。

このアルミニウムの将来像を実現するために、大分類を更に要素技術まで分類しそれを確立するロードマップを検討した。

図4、図5に全体のコンセプト図を示す。

アルミニウム産業のエコロジーモデル構築

アルミニウムの完全ライフサイクル化(循環型社会への貢献)



PPRサイクル: Product-Process-Recycle サイクルの略

図4 アルミニウム産業のエコロジーモデル構築

アルミニウムがつくる低炭素社会

海外精錬時のCO2大幅削減への貢献

アルミニウムを構造材料のファースト・チョイスに!
・構造物の軽量化 ・輸送機器の省エネ

アルミニウムを機能性物質に!



図5 アルミニウムが作る低炭素社会

IV-2 アルミニウム技術戦略マップ（別表1）

今後のアルミニウム産業の研究開発を推進するに当たり、戦略目標、社会的要求、技術的要求、要素技術、技術開発の出口としての製品・用途について俯瞰的にまとめた。

戦略目標および特性

- ① 他材料からの代替ではなく、アルミニウムを構造材料のファーストチョイスにするため、鉄鋼材料並みの高強度、高靱性を目指す。
- ② NO. 1エコマテリアルとしての地位確立のため、近い将来枯渇が懸念される合金添加元素（Zn、Cu、Mn）の低減と資源生成・循環を強化し、同時に国際競争力の向上を目指す。
- ③ 熱や電気の導伝性、耐食性、光学特性、放射線遮蔽性等の性能向上と新たな機能発現により、アルミニウムの利用拡大を目指す。

社会的要求・技術的要求

低炭素社会の実現、循環型社会の実現、安全安心快適社会の実現への貢献

- ① 構造物の軽量化、輸送機器の省エネ、CO₂排出量削減による低炭素社会の実現
- ② 希少元素の使用低減、合金添加元素量の低減、再生アルミニウム資源の付加価値向上による循環型社会の実現
- ③ 安全安心快適社会実現に寄与する機能材の開発

要素技術

大分類として材料・組織制御技術、資源生成・循環技術、利用拡大技術とし、各分野において新たな要素技術の開発を目指す。

材料・組織制御技術 : ナノテクノロジーを応用した組織制御技術、巨大歪加工、急冷凝固、半溶融凝固などを利用した新プロセス技術の開発

資源生成・循環技術 : 省エネ、低コスト新製錬技術への取り組み
展伸材から展伸材へのリサイクルプロセスの確立を目指した回収技術、再生技術の開発

利用拡大技術 : 新製品、新用途開発を目指し、接合、表面処理、成形加工法など新たな製品技術の開発
導電性、耐食性、耐熱性、光学特性、放射線遮蔽性、伝熱性の向上と新たな機能性探索

製品・用途

新たな技術開発を推進、アルミニウムの軽量性と機能性を活用した新製品、新用途を提案し、利用拡大を目指す。

輸送分野：EV、プラグインハイブリッド車（PHV）、FCVなど従来にも増して軽量化が求められる環境対応車の普及、超高速輸送手段としてリニアモーターカーの実現

建築・土木分野：アルミエコハウスの普及、超高層ビル、未来都市の実現

電気・機械分野：少子高齢化社会に貢献するロボットの普及、低炭素社会を実現するための

エネルギー開発（再生可能エネルギー、燃料電池）、次世代空調システム
容器・包装分野：素材の安定供給を保證するMnレス缶胴材

IV-3 アルミニウムビジネスロードマップ（別表2）

2011年に大幅な見直しを実施し、ユーザーヒアリングや、他分野のロードマップ等を参考に、製品分野毎に予想される用途開発や新製品開発のシナリオを2035年までの時間軸上に設定した。また、アルミニウム素材の製造プロセスやリサイクルシステムの技術開発についても、開発目標を時間軸上に示した。2015&2016年に主に建築・土木製品分野、2018年に主に自動車、航空機、宇宙等製品分野の見直しを実施した。

IV-4 アルミニウム要素技術マップ（別表3）

アルミニウム要素技術の大分類、中分類、小分類を更にキーテクノロジーまで細分化し、アルミニウムビジネスロードマップに取り上げた製品や用途との関係を明確に示した。製品、用途に適した材料の開発や、プロセス開発において、特に必要とされるキーテクノロジーに○印をつけて関連付けた。

IV-5 アルミニウム技術ロードマップ（別表4、5、6）

技術ロードマップの左欄より要素技術を、上に示す大分類から、中、小に分解し、小分類では、今後解決していく課題の技術要素テーマを具体的に示す。要素技術課題の達成構想は、2010年から2035年までの期間でまとめた。各技術要素（テクノロジーテーマ）で、上段（黄色の色抜き）に達成する姿、下段に、実行する主な研究開発テーマ（手段）を記し、その期間を矢印で示した。

要素技術の達成計画詳細については、「個別ロードマップ」で示すので、ご参考いただきたい。個別ロードマップ化している要素は、管理No. を斜・太文字で記す。