

(株) UACJの高機能アルミニウム 材料開発と将来展望*

渋江 和久**

UACJ's R&D Activities for the Functional Aluminum and its Future Vision*

Kazuhisa Shibue**

1. はじめに

株式会社UACJ (以後UACJ) は古河スカイと住友軽金属工業の二社が2013年に経営統合して誕生した軽圧メーカーである。UACJはアルミニウム関連事業において100年を超える歴史を有し、新合金の開発や製品化において日本の素材産業をリードしてきた。2018年時点で圧延板の生産量として世界第三位グループに属し、日本発のアルミニウムメジャーとしての歩みを始めている。本報ではUACJのアルミニウム研究開発のいくつかの事例を概説するとともに、今後の展望について述べる。

2. アルミニウム産業の世界動向とUACJの役割

世界におけるアルミニウム板の需要は年率3.9%で拡大し、2021年には年間3000万トンに達すると予想されている¹⁾。この急速な需要拡大は新興国における飲料缶や空調機器の普及、先進国における輸送機器へのアルミニウムの採用増加により説明づけられる。輸送機器の中では特に自動車用のパネル材の伸びが高く、各国の自動車燃費規制に伴い軽量かつ高強度のアルミニウムが採用されつつある。他方、EV (電気自動車) 化の流れは航続距離の延長のため軽量化が本質的であり、アルミニウムが多用されることが期待される。EVにはLIB (リチウムイオン電池) その他のバッテリーが多用されるため、電極材としてのアルミニウムが大きな新市場を形成し、2016年度の年間5万トンから10年間で約4倍の市場規模に達すると予想されている。

このようなアルミニウム材料の市場の拡大において

は、新たな製品用途向けのスペックに適応するため、合金開発や製品開発をグローバル競争の中で進めていく必要がある。また、飲料缶や空調機器用に代表される既存市場では、東南アジアなど新市場での顧客のビジネスへの対応が求められる。ここでは、研究開発活動もローカル適用およびグローバル化を避けることが出来ない。UACJでは社内生産技術および顧客支援をも含む研究開発機能をグローバル化するとともに、各分野でコアとなる技術の競争力を高め、製品を通じて世界の顧客に満足と信頼を与えることを目標としている。

本報では新技術が生み出す価値に着目し、自動車用材料をはじめとするいくつかの研究開発事例を紹介する。

3. 自動車用板材・構造材

地球温暖化対策として全世界的にCO₂排出量の低減が大きな目標となっている。日本におけるCO₂排出量は2016年の統計で年間約12億トンであり、そのうち、自動車走行時に排出するCO₂量は1億9000万トンと全体の約15%を占める。このように自動車の走行によるCO₂排出量は多く、その低減のため、燃費向上への要求は非常に大きいといえる。このため、各国ではそれぞれに燃費向上に向けた法規制を策定している。例えば米国では自動車メーカーごとに基準が設定される燃費目標 (CAFE) が定められ、その基準を満たさないと多額の罰則金を課せられる仕組みが採用されている。この燃費目標は燃費性能の向上がCO₂の総排出量に与える影響の大きい車種や部品を研究開発におけるターゲットとして明示する点で優れ、市況変化や競合とい

* 本稿は京都大学水曜会誌, 25 No.1 (2018), 3-13. に大会記念講演として掲載された内容を加筆修正したものである。

This paper was the revision of the paper published in Suiyokwai-Shi, Vol. 25 No.1 (2018) pp3-13, for Memorial lecture in the annual meeting of Suiyokwai, Kyoto University.

** (株) UACJ R&Dセンター 所長 取締役兼専務執行役員

Chief Executive, R&D Division, Director, Member of the Board, Senior Managing Executive Officer

った外部要因ではなく、研究課題の面で燃費向上を主題に据えることを促す仕組みであると考えられる。これらが契機となり、自動車メーカー各社は本質的な技術革新を通して燃費向上に取り組んできた。

日本においては2016年の全車平均燃費はJCO8と呼ばれるモードで21.9 km/Lとなっており、2000年当時の13.2 km/L (10・15モード) から66% (モードの差を考慮すると80%程度) も向上している。この向上はエンジン、トランスミッションの改良、ハイブリッド化など主にパワートレインの革新によるところが大きく、ここ4～5年は燃費向上が頭打ちとなっている。

自動車の軽量化は当然、燃費向上に有効であるが、衝突安全性強化への対応、各種快適化装備の充実など、むしろ必要となる車体構造の重量は増加傾向にあり、

それを補う目的でアルミなどの軽量化素材の使用量も増加している。今後もアルミや樹脂などの軽量化素材を多く使った思い切った軽量化はEV化と並ぶトレンドとなると予想される。

上述のCAFEに対応するため、米国で年間80万台以上の生産量がある北米最量産車種であるフォードF150シリーズのアップーボディは、Fig. 1に示すようにほぼオールアルミ化された²⁾。これを契機として北米での自動車用アルミ材の需要が急増しているが、多くの自動車では、主にフロントフード (ボンネット)、バックドア/リアゲート、フェンダー、ドアなどのパネル類のアルミ化が進んでいる。Table 1に自動車の部材ごとに要求される特性とそれを達成するために必要な各材料の物性と、それによって達成できる軽量化効果を示す。



Fig. 1 Material selection for each part of the upper body for Ford F150.

Table 1 Required property of each vehicle part and the comparison of its weight using both materials.

Items	Factors	Factors for thickness decision					Product, Remarks
		Tensile stiffness	Anti-dent strength	Component stiffness	Durable strength	Impact stiffness	
Outer Panel		◎	○		△	○	Hood, Door
Inner Panel		◎	△	○	○	○	Floor, Dashboard
Structure component	Stiffness			◎	○	○	Body side, Crossbar
	Durability			○	◎	○	Side demister mount bar
	Strength			○	○	◎	Door impact beam Sidebar, Bumper
Parameter		Et^3	$\sigma_y t^2$	Et	σTS	$\sigma_y^{0.6} t^{1.8}$	
		t w	t w	t w	t w	t w	
Normal steel		1 100	1 100	1 100	1 100	1 100	Thickness (t) and weight (w) comparison between Steel and Aluminum
High-tension steel	45 kg/mm ²	1 100	0.72 72	1 100	0.68 68	0.8 80	
	50 kg/mm ²	1 100	0.65 65	1 100	0.6 60	0.75 75	
	60 kg/mm ²	1 100	0.56 56	1 100	0.52 52	0.68 68	
	80 kg/mm ²	1 100	0.48 48	1 100	0.39 39	0.62 62	
Aluminum (Al-4.5Mg)		1.44 50	1.1 38	2.96 102	1.1 38	1.07 37	

パネルへの応用では張り剛性が重要であり、軟鋼板をハイテン化しても軽量化効果が少なく、アルミが有利な部材であるといえる。フードやドアなどは外板と内板の二重構造となっており、外板は飛来した石などでへこみ(デント)が生じないように剛性ととも高い耐力が必要である。パネル用材料として、当初は成形性が優れた5000系合金が使われていたが、塗装焼付け時に時効硬化で耐力が増加(ベークハード)する6000系合金は耐デント性に優れ、外板に特に適しているため、現在ではパネル用板材の主流となっている。

外板用6000系合金に求められる特性は、ベークハード性に加えてプレス成形時のリジングマークの抑制、ヘム曲げ時の割れ抑制などがある。特にヘム曲げ性は自動車外板への応用における大きな課題であった。Fig. 2にヘム曲げの概要を示すが、フードなどの外板と内板を繋ぐ際に、外板を折り曲げ、内板にかしめるヘミングと呼ばれる工程があり、この時の180°の曲げ加工で外板に割れが発生することがある。ヘム曲げ性

は材料の伸びと必ずしも対応せず、自然時効で強度が増大するにつれて悪化することが知られていた。この対策としては溶体化温度の低温化や第二相粒子を小さくするための高純度化などが行われてきたが、必ずしも充分ではなかった。

UACJではヘム曲げ性に及ぼす結晶方位の影響に関して、各種の方位を持つ単結晶板を作製して検討した結果、Cube方位が他の方位と比較して圧倒的にヘム曲げ性が良好であることを明らかにした。これは、Cube方位は曲げのような大ひずみ変形を与えても加工硬化が少なく、せん断帯が発生し難いためであることによるが、この知見を得てFig. 3に示すように通常が多結晶体においてもCube方位を持つ結晶粒を多くすることにより、ヘム曲げ性が向上することが確認された。この技術は量産材にも適用され、材料の組織制御により顧客工程で求められる加工性を担保する事例となっている。

アルミが有利なパネル類とは異なり、自動車の構造

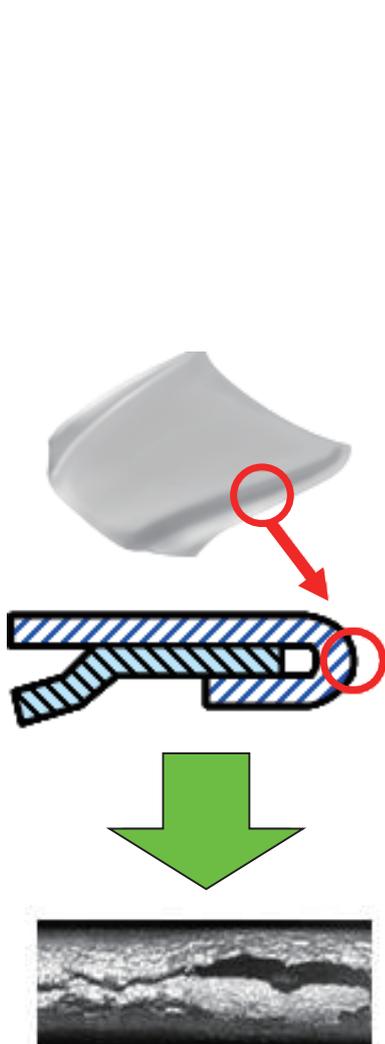


Fig. 2 Image of the hemming bend.

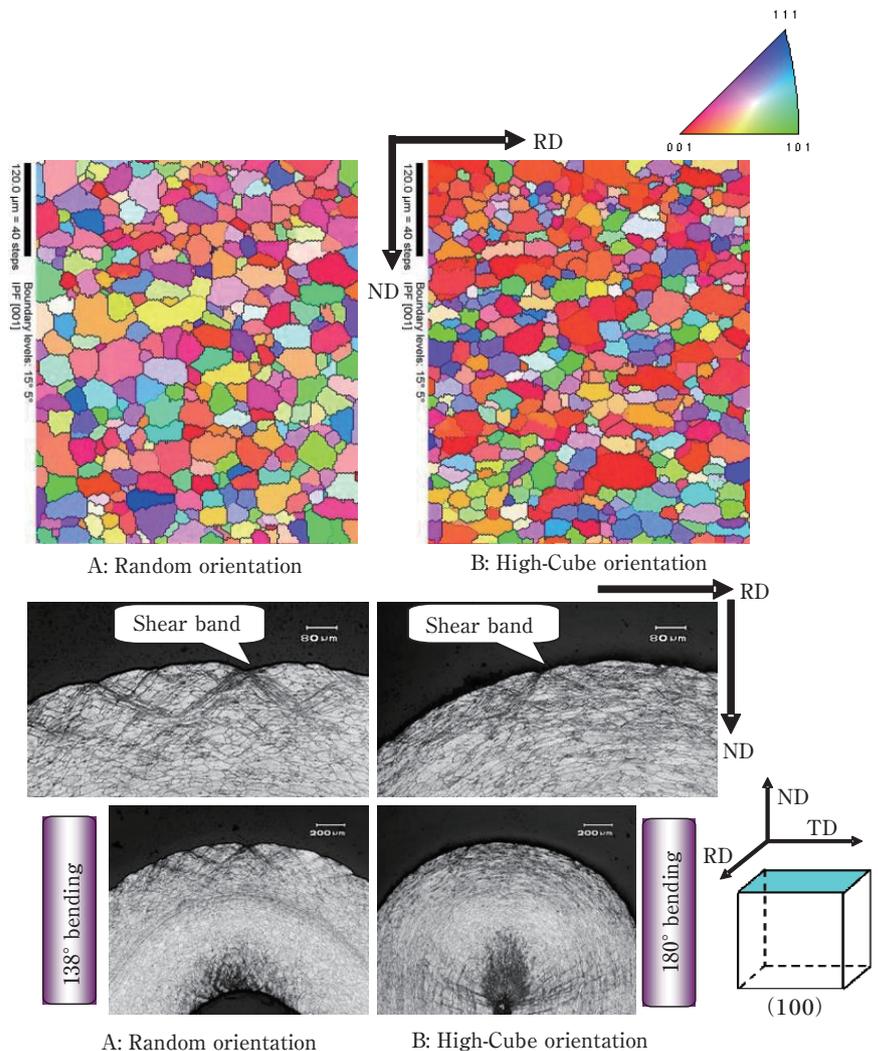


Fig. 3 Improvement of the hemming bendability by the crystal orientation control.

材は高い強度が要求されハイテンとの比強度と価格の上での直接の競争が生じる。近年、強度が1GPaを越える超ハイテンが実用化され、自動車の構造材として使用されるようになってきている。アルミで対抗するためには超ハイテンに匹敵する比強度を有する、いわゆる超々ジュラルミンと呼ばれるAl-Zn-Mg-Cu 4元系7000系合金が必要となる。超々ジュラルミンは主に航空機用に開発・使用されてきた。この合金では専用の溶体化・焼き入れ装置などが必要であり、自動車向けとしては価格的に折り合いをつけることが困難であるとされてきた。近年、超ハイテン用に高温でプレスし、そのまま焼きを入れるホットスタンプが普及してきており、この手法をアルミに利用することで超々ジュラルミンの自動車への適用の可能性が生まれた。これは加工技術の進展に伴い既存合金の用途が広がる好例であると言える。

一方で、アルミ押出材の特徴である自由な断面形状を使ってハイテンに対抗する試みも行われている。その一例として軽量バンパーシステムが挙げられる。バンパー付近の複雑な構造を加工自由度の高いアルミにより実現する動きである。Fig. 4にマツダ ロードスターに採用されたフロントバンパーを示すが、これは閉断面形状が可能なホロー押出で作製した7000系合金ZK-170のレインフォースと6063のクラッシュボックス、5052のセットプレートを組み合わせたものであり、従来の鋼製バンパーより2.4 kg軽量化することができた。これらの各部材は、Fig. 5に示すようにそれぞれの要求特性に合わせて組織を最適化しており、優れた衝突安全性を持っている。このように、合金の多様性を生かし、多面的な要求特性を満足する構造を高い生

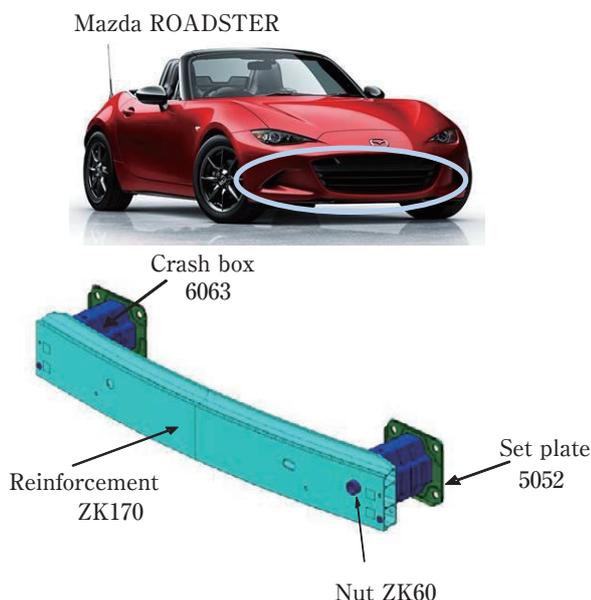


Fig. 4 Front bumper system with aluminum alloys.

産性の下で実現できる点にも、アルミ合金の優位性を見ることができる。

このような構造材としてのアルミの応用においては、他の部品との接合が重要となる。従来、アルミの溶接は鋼材と比較して難易度が高く、施工上の課題となっていた。その中で、1990年代にイギリスのTWIがアルミの高温での低い変形抵抗を活かしたFSW（摩擦かくはん接合：Friction Stir Welding）と呼ばれる手法を開発した。これはピンとショルダーのついた工具をアルミ材料中に挿入して回転させ、その摩擦熱でアルミ材料を塑性流動させることで接合するものである（Fig. 6）。FSWは溶融させない固相接合であるため、入熱が少なく“そり”などの溶接後の変形を低く抑えることが出来る画期的な手法と言える。また溶接に伴うスパッタの発生が無いなど、作業環境面からも優れた手法である。

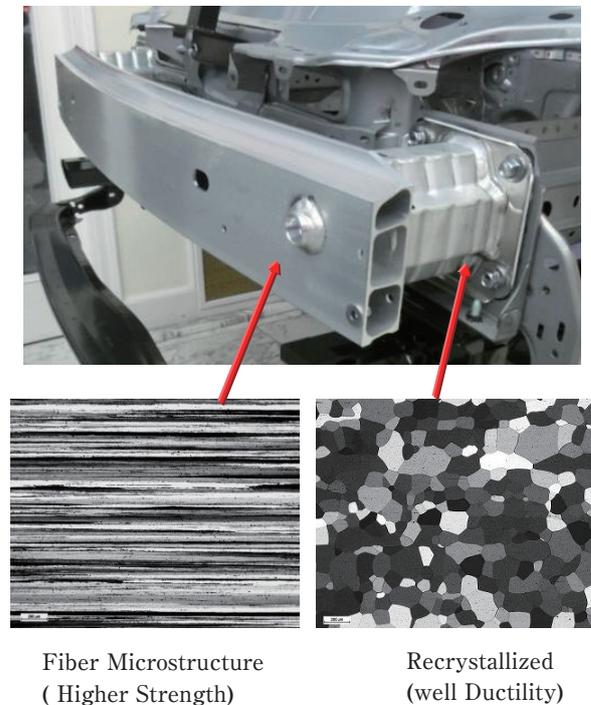


Fig. 5 Metallurgical structure of the aluminum alloys in the bumper system.

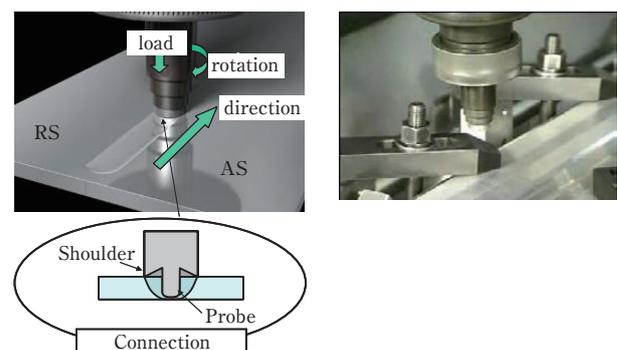


Fig. 6 Illustration of the friction stir welding (FSW).

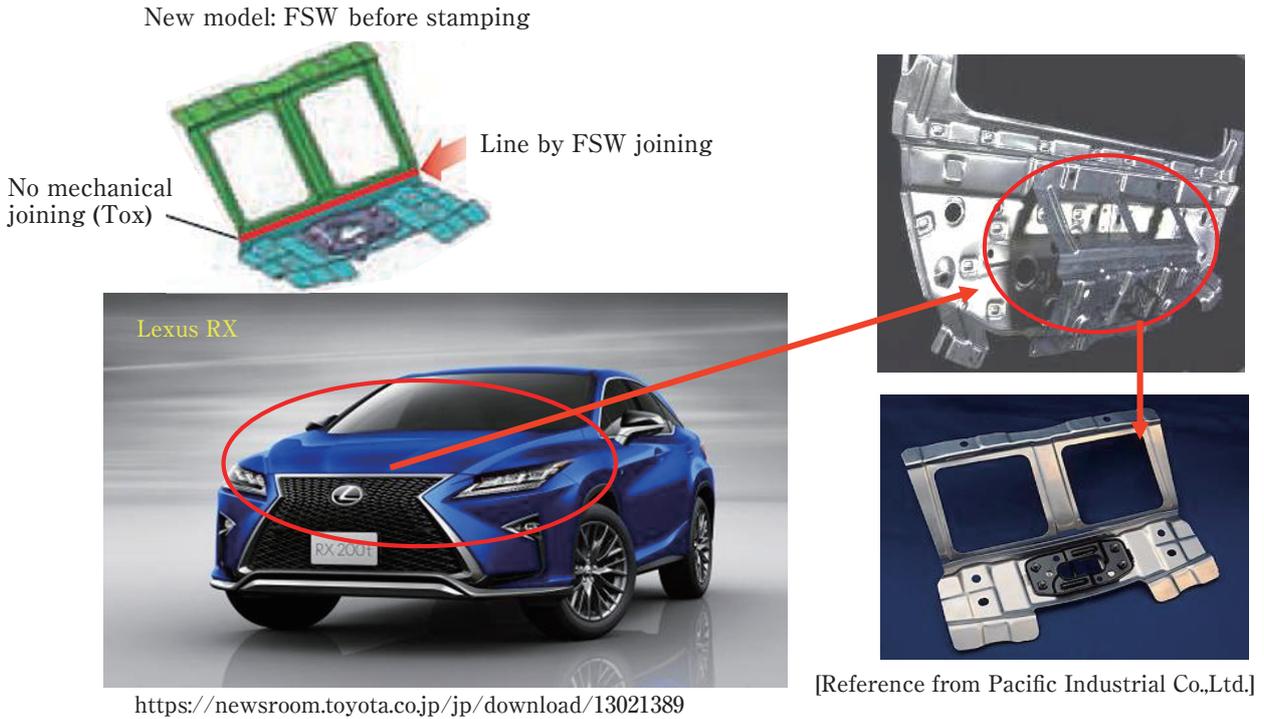


Fig. 7 Tailored blanking aluminum sheet welded by FSW.

現在このFSWを使った接合法がアルミの接合に広く用いられており、その一例としてFig. 7にフロントフード内のレインフォース部品をFSWで接合したテーラードブランクを示す。テーラードブランクは板厚および材質が異なる材料を事前に接合し、一体として成形する手法である。テーラードブランクは製造プロセスの簡素化およびコストダウンが可能であり、主に鋼材で使用されてきた。本例はアルミにおける最初のテーラードブランクの実用化であり、FSWの優れた特性を活かした事例であると言える。

今後、構造部材にアルミを適用する際はアルミ同士だけではなく他の材料との接合も必要となってくることから、信頼性とコストに優れた異材接合技術の開発が重要となりつつある。

4. リチウムイオン電池用アルミニウム材料 ー加工軟化現象の製品適用ー

上述のように環境保護の観点から自動車におけるEV化の動きも活発になっている。特にヨーロッパはその気運が高く、イギリス・フランスでは2040年以降はガソリン車の販売を認めない政府方針が示され、欧州自動車メーカーはEV開発に舵を切りつつある。

この商用車におけるEV化を実現したデバイスがLIB(リチウムイオン電池: Lithium-ion Battery)である。Table 2に示すように、LIBはこれまでの電池に比べ出

Table 2 Characteristics comparison on secondary batteries.

Battery	Specs	Nominal Voltage (V)	Energy density (Wh/kg)	Power (W/kg)	Charge-discharge efficiency (%)
Lead acid		2.1	30-40	180	50-92
NiFe		1.2	50	100	65
NiMH		1.2	30-80	250-1000	65
Li-ion		3.6	160	1800	80-90

力および単位重量あたりのエネルギー密度が高く、自動車の動力源として内燃機関を置き換える原動力となっている。LIBモジュールにはFig. 8に示す通り、多くの部品にアルミニウムが用いられる。LIBセル構造の一例をFig. 9に示す。この中でケース、封口板、正極板(箔)にアルミニウムが使われる。

ここで、材料学的な知見を活かしたLIB用の製品開発の一例を示す。集電体用極(箔)材はゲージダウンのために高強度化が求められる。また、通電性を考慮すると、電気抵抗の小さい(導電率の高い)特性が求められる。これまで高強度化のためにAl-Mn(3003)合金箔が利用されていたが、Mn添加により導電率は低下する。ここでは、Mn添加のない1000系合金の高強度化プロセスを開発し、Fig. 10に示す高強度・高導電性1000系アルミニウム合金箔の量産に成功した。

角型ケースは飲料缶ボディと同様、DI(しぼり、し

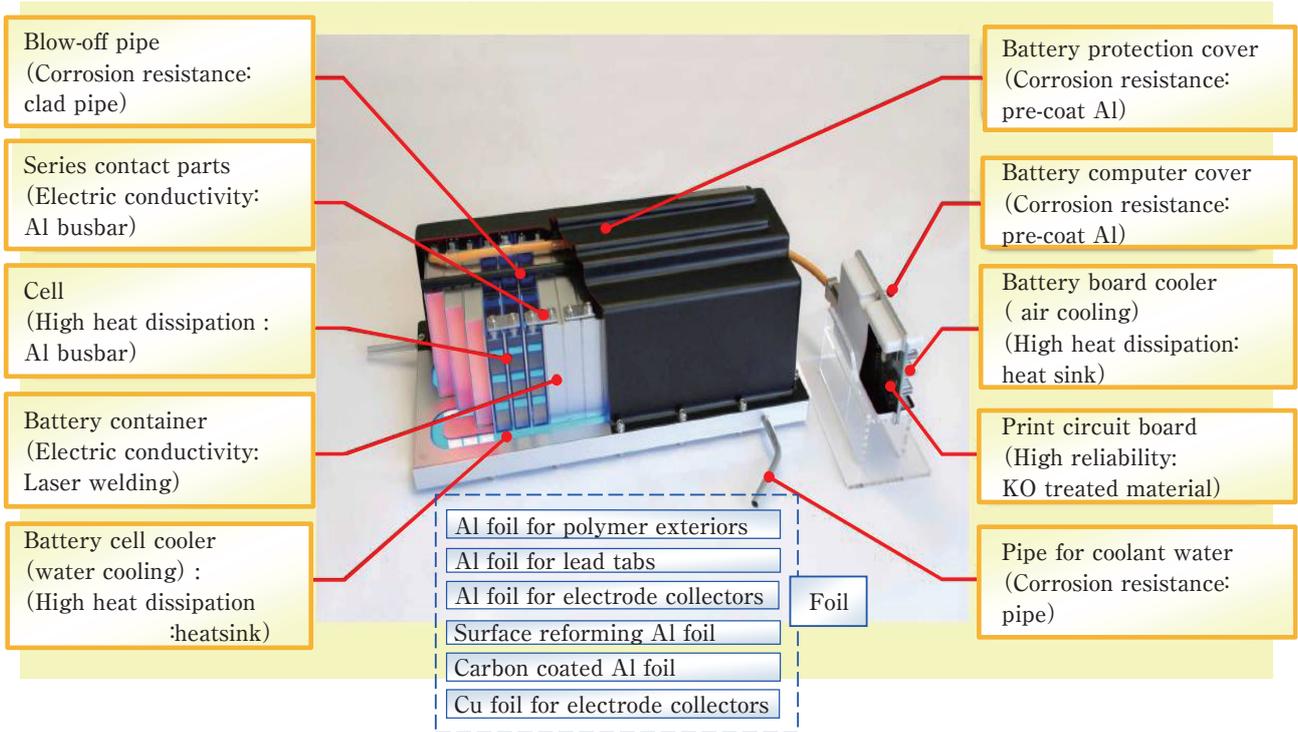


Fig. 8 Example of LIB module for an automobile.

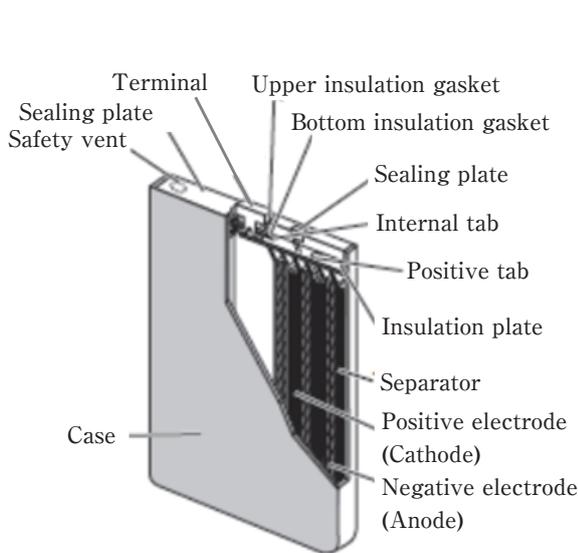


Fig. 9 Structure of prismatic LIB.

ごき)加工で成型される。ダイス鋼との焼付きを抑えるため、缶ボディ材と同じAl-Mn系合金が選ばれている。LIBは充放電を繰り返し使用するが、温度の上昇と内部構造体の膨張で、ケースが内圧を受けてクリープ変形することがある。このクリープ変形を抑制するにはMgやCu添加が有効で、これらを添加した合金成分調整がなされている。

ケースを密封するための封口板は所定の内圧に耐えるため、1000系アルミニウム合金よりも強度の高い3003

Realization of the reduction in thickness and the higher conductivity of the foil for the electrode collector.

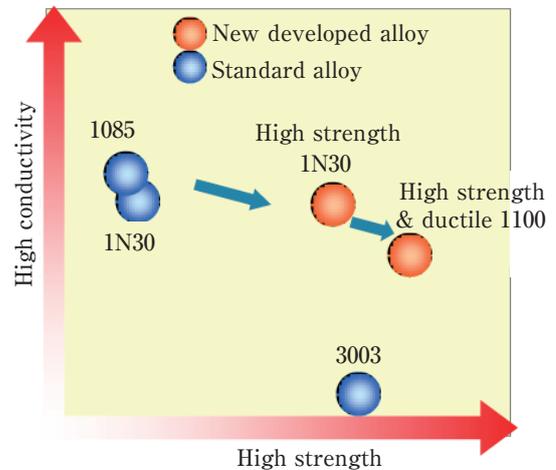


Fig. 10 The properties of the aluminum foil for the cathode current collector.

合金が用いられている。内圧が上限値以上に上昇する異常事態においてケースが破裂する事態を避けるため、封口板には防爆弁が設けられている。防爆弁は局部的に薄い領域を有し、内圧が高くなると部分的に亀裂が生じて内圧を開放するよう作動する。すなわち、ハードウェア的にも破裂や爆発を回避する仕組みが取り入れられている。この防爆弁を生産プロセスの上で形成する手順として、封口板相当部に穴を開け、内側に1000系合金箔をレーザー溶接する手順が採用されている。こ

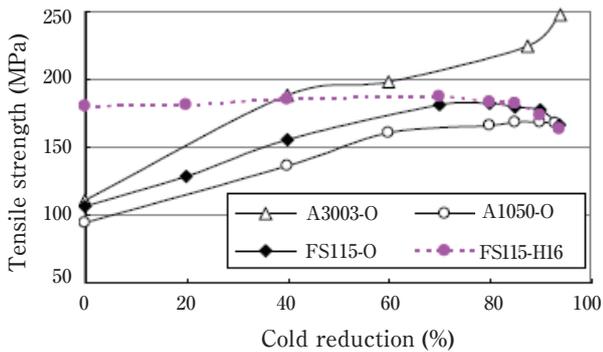


Fig. 11 Work hardening and work softening properties of each alloy.

の部品をプレス加工で成形できれば、溶接に比べて生産性は大幅に向上するが、3003合金は加工硬化能が高いため、プレス加工が採用できなかった。他方、1000系合金ではプレス加工によって防爆弁を成形することができるが、元板強度が低いため封口板として使用には適さなかった。この問題を解決するために、加工軟化現象を利用する材料設計を行った。

一般に冷間加工を加えると金属材料は加工硬化するが、前田³⁾は加工軟化現象を見出している。その発生機構には不明な点が多く、これまでに工業製品に積極的に利用されてこなかった。しかし、加工において局部的に軟化する特性は、封口板の防爆弁加工と使用に適すると考え、製造工程も含めた改良検討を行った。結果として、Fig. 11に示す特性の加工軟化材 (FS115) を量産することに成功し、一つの材料において、局部的に加工部が軟化することで防爆弁として機能する部品が実現された。

5. 熱交換器と防食設計 —耐食銅管“DANT[®]”の材料開発—

アルミニウムの優れた加工性と熱伝導性、耐食性から熱交換器用にアルミニウムが幅広く利用されている。特に軽量化が必要な自動車用の熱交換器には、冷媒循環のための押出多孔管と外気との熱交換のためのフィン材とがろう付けにより接合された、複雑かつ生産性の高い構造が用いられている。屋外で使用される熱交換器としては、製品全体の耐食性が重要な性能指標となる。アルミニウムは表面に緻密な酸化皮膜(不動態皮膜)が自然に形成されるために高い耐食性を示す。

しかしながら環境中に塩化物イオンが存在すると、この不動態皮膜の一部が破壊され、孔食といわれる局部的な腐食が発生することがある。孔食は、材料の厚さ方向への腐食速度が非常に高いため、貫通が製品の機能損失に直接かかわる熱交換器の冷媒流路において

は製品寿命を律速する腐食現象となる。アルミニウム熱交換器の孔食の防食方法として、犠牲防食(カソード防食)の技術が適用されている。犠牲防食とは、防食する側の電極電位を防食される側の溶解電位よりも卑に保ち、製品の厚さ方向への孔食発生を抑制する方法である。すなわち、一つの製品の中においても、板のクラッドや表面への異種材料の溶射および塗布などの技術の組み合わせにより、機能低下につながる腐食を抑制した熱交換器を実現することができる。

UACJでは、電気化学的知見に基づく防食技術および、幅広い腐食解析技術を組み合わせた防食設計技術を駆使し、使用環境において犠牲防食を最大限に発揮できる熱交換器用高耐食アルミニウム合金を開発している。

他方、エアコンなどに用いられる熱交換器においてはコストと生産性の両面から銅管が使用されている。銅における局部腐食の一種である蟻の巣状腐食は、ギ酸や酢酸といったカルボン酸との接触により発生することが知られている⁴⁾。腐食の断面形状は文字通り“蟻の巣”のように複雑に入り組んでおり、腐食の間口が数 μm ~数十 μm と非常に微小で肉眼で見つけることは困難な上、深さ方向への進行が速いという特徴がある。

エアコン用銅管については、給水・給湯用および冷凍空調用などの水道水や、冷却水が流れる場合と比較して発生する腐食の種類は少なく、蟻の巣状腐食が主要な腐食問題として位置づけられている。最近では環境要因によって、外面側から発生する蟻の巣状腐食が世界中で増加している。

これまで蟻の巣状腐食の発生機構は概ね明らかにされてきたが、有効な対策材は存在しなかった。蟻の巣状腐食の材料要因として銅中のリンの影響が指摘されており、リンを含まない無酸素銅(C1020)に比べて、リンを微量含むリン脱酸銅(C1220:0.015~0.040mass%P)では、蟻の巣状腐食が激しくなることが知られていた^{5)~7)}。

UACJでは蟻の巣状腐食の発生に及ぼす銅中のリン濃度の影響をより広く検討し、リンを一定量以上に増量すると蟻の巣状腐食に対する耐性が劇的に向上するという、新たな知見を発見し、耐食性に優れた銅管“DANT[®]”を開発し、市場に供給している。

本開発においてはまず、蟻の巣状腐食挙動に及ぼす銅中のリン添加濃度の影響を検討するため、リン濃度を0(無酸素銅)~1mass%の範囲で含有するCu-P合金板材を作製し、蟻の巣状腐食試験を行った。Fig. 12にギ酸暴露試験20日後の、銅中のリン添加濃度と最大腐食深さの関係を示す⁶⁾。従来の知見どおり、蟻の巣状

腐食による腐食深さは、無酸素銅 (C1020) よりもリンを微量含有するリン脱酸銅 (C1220) でより深くなった。しかしながら、リン濃度がさらに増加すると、腐食深さが大幅に抑制されることが見出された。実際に使用されている伝熱管の肉厚は0.25 mm程度であるため、リン添加量を0.2mass%以上とすることが蟻の巣状腐食による異常発生防止に有効であると結論付けられた。

この結果に基づき、本開発合金を用いた高耐食銅管 (DANT[®]) を試作し、その耐食性を前述の試験法にて評価した。リン添加濃度は従来材である0 (C1020), 0.027 (C1220) および0.22, 0.24, 0.29mass% (DANT[®]) として比較したところ、リン添加濃度が0.2mass%以上 (DANT[®]) では、80日経過後も腐食の進行が非常に緩慢であり、腐食深さは最大でも150 μm 未満に抑制されていた。一方、従来材であるC1220およびC1020では、わずか20日以内に肉厚を貫通する腐食が生じた。試験80日後の断面観察結果をFig. 13に示す⁶⁾。DANT[®]では浅い半球状の腐食形態を呈しており、蟻の巣状腐食が抑制されていることがわかる。

本開発事例においては、通常は腐食特性に悪影響を与えると考えられていたリンを想定以上に添加した場合の挙動というセレンディピティの発見が新製品開発の源となっている。腐食試験という長期の性能評価において、こうした予想外の結論を見出した点に材料開発と製品化の難しさと面白さを見ることができる。

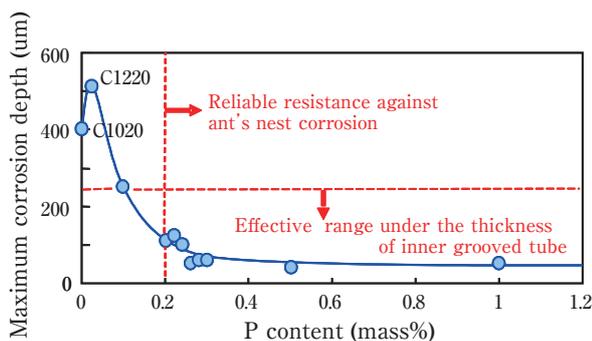


Fig. 12 Maximum corrosion depth of copper alloy tubes after 20 days exposure to 0.1% formic acid vapor as a function of the phosphorus content.⁶⁾

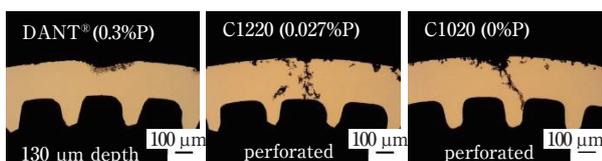


Fig. 13 Cross-section of the deepest corrosion pit occurred on the inner grooved copper tubes after 80 days exposure to 0.1mass% formic acid vapor.⁶⁾

6. 航空機用材料

従来、航空機用材料としては軽量で強度が高い2000系、および7000系アルミニウム合金が主に使用されており、代表的な長距離大型機であるボーイング777 (初飛行1994) では構造材料の70%をアルミニウム合金が占めている。

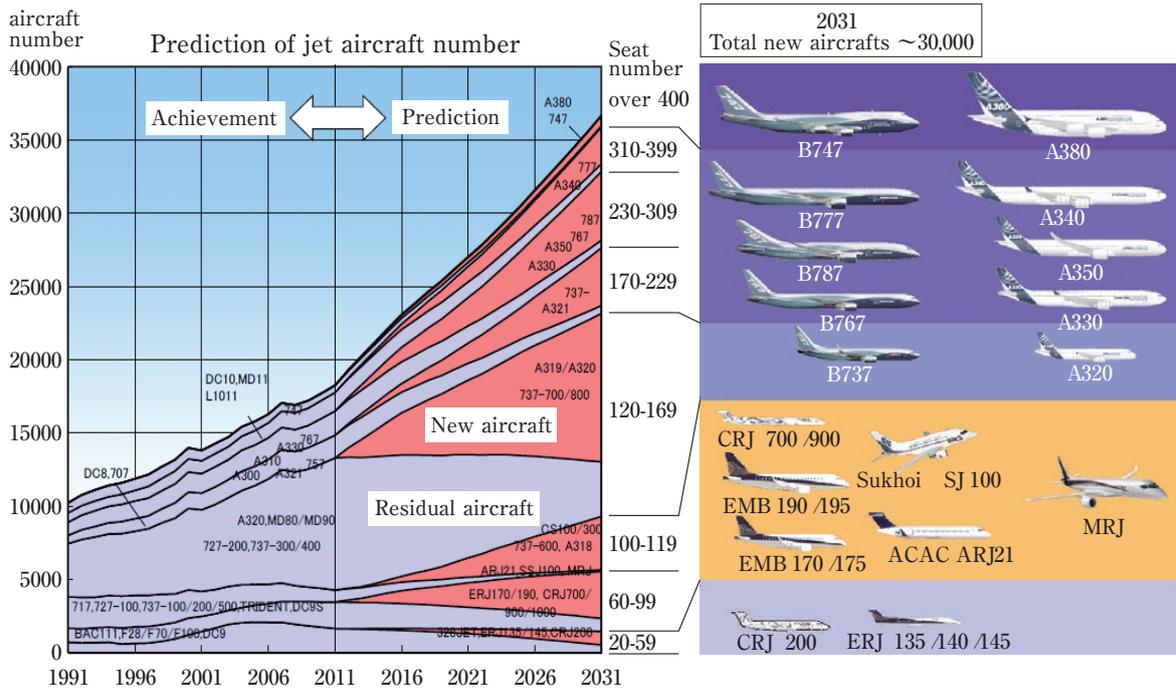
その一方でCFRPを始めとする繊維/樹脂複合材の開発が進み、年々構造材に占める比率を上げてきている。その中で2009年に初飛行したボーイング787では複合材の比率が50%となり、アルミニウム合金の20%を大きく超えた。続くエアバスA350WBにおいても複合材の比率が50%を超え、航空機の構造材の主流は複合材に移ったことが示されている。

これらの事例から航空機用としてのアルミニウム合金の利用が縮小する印象が強くなるが、実際にはこれとは反対の動きも多く見られる。例えば、開発中の国産リージョナルジェットであるMRJではアルミニウム合金が構造材料の83%を占め、アルミ合金製の航空機と言っても過言ではない。こうしたリージョナルジェットの分野ではシェアトップのエンブラエル社 (ブラジル) の次期主力機であるE-2シリーズでも同様にアルミニウム合金主体の設計がなされている。こうしたアルミニウム合金の多用は、小型機では複合材による軽量化効果が比較的小さいことに加えて、生涯経費における燃料費が大きい大型長距離機に対して、小型近距離機では機体取得費の比率が高いため、安価で実績のあるアルミニウム材料が選定されていることにより説明される。

Fig. 14に今後新造される旅客機の座席数ごとの数量予測を示すが、2031年までに製造される機体の60%が座席数169以下の小型機であり、このことから将来も多くのアルミニウム合金が使用され続けると予想される⁸⁾。

代表的な航空機用アルミニウム合金として7075合金が挙げられる。これは戦前、日本で開発されたESD合金と類似する合金であり、現在も焼入れ性や破壊靱性を改良した7050, 7150などの合金が航空機用材料の主流として使用されている。

一方、1950年代から旧ソ連や米国ではLiを添加したAl-Li合金が開発され、1980年代になると民間機にも適用されるようになってきた。Al-Li合金は比重が小さく、高い比強度と比剛性が得られるため航空宇宙機用材料として注目されてきたが、Liは化学的な反応性が高く、 castingに特殊な雰囲気制御が必須であるなど、量産には多くの技術開発と設備投資が必要となる。日本においても1989年に共同研究開発会社アリシウムが設



From "The current status and issues of Japan aircraft industry" (2013), METI.

Fig. 14 Demand trend of jet aircraft by number of seats⁸⁾.

立され、技術開発が行われ実用化の目処が立ったが、投資に見合う市場が無いとの判断で量産化には至らなかった。しかし航空機産業が大きい欧米ではその後もAl-Li合金の量産と開発が行われ、2000年代からはLi添加量が低く、比重の低下は少ないものの、多くの欠点を克服した第三世代Al-Li合金と呼ばれる2055、2195などが使用されるようになった。

このように日本と欧米ではAl-Li合金に関する実用化技術において大きな差が開いてしまった中、伝統の7000系合金によりAl-Liに対抗できる新合金を開発すべ

く2013年から10年計画で「革新的新構造材料等研究開発プロジェクト」が国のプロジェクトとして開始された。Fig. 15にその目標性能を示すが、新たな合金およびプロセスを用いることで、従来の強度-伸びの関係から一段上のラインの実用材料の開発を目指している。具体的な最終目標値としては引張強さ750 MPa以上、耐力700 MPa以上、伸び12%以上が掲げられている。これは従来の7000系合金の延性、靱性を維持したまま、強度を25%向上させるものであり、Fig. 16に示すように第三世代Al-Li合金である2055より高い比強度が得

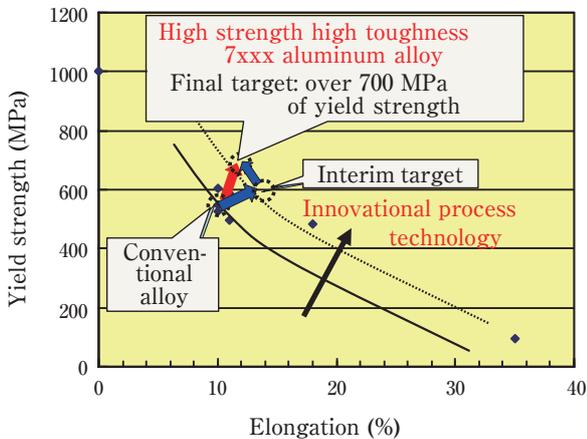


Fig. 15 Target of high strength and high toughness 7000 series aluminum alloy.

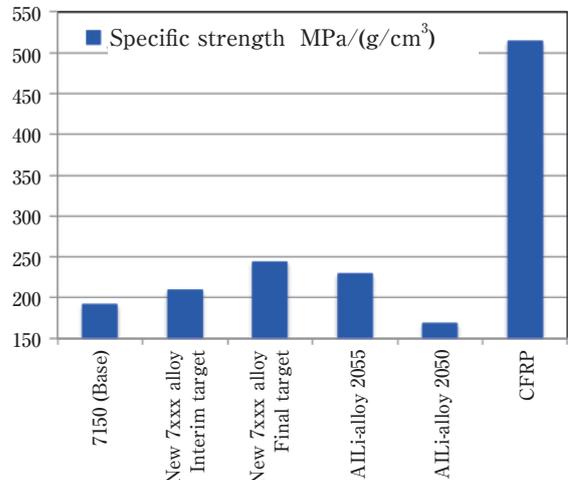


Fig. 16 Specific strength of the materials for aircrafts.

<Target> Benchmark was 7150 alloy with highest strength in current material.

	TS, MPa	YS, MPa	EL, %
7150-T77511	≥572	≥545	≥9
Interim target	≥660	≥600	≥14
Final target	≥750	≥700	≥12



Test mill: ISMA Chitose lab.(UACJ)



Size comparison between the rolled alloy sheet (TS : 735MPa, YS : 687MPa, EL : 10%) of 450 mm width and a beverage can.

Fig. 17 Sheet size and mechanical properties of new developed alloy.

られる。生産技術に関しては、既にFig. 17に示す比較的大きなサイズの板材が製造可能であることが実証されており、中間目標値を超える特性が得られている。小径のラボサイズに限れば最終目標をクリアした押出材も得られている。この開発合金はAl-Li合金よりも低コストで製造することが可能であり、欧米のAl-Li合金と充分競合できると期待されている。航空機材は自動車材ほどの市場規模は期待できないが、日本のアルミニウム製造業の国際競争力を維持するためには欠かせない製品のひとつとして、今後も研究開発を続けていく予定である。

7. 新製錬プロセス：イオン液体からの電解析出

各種アルミニウム材の使用拡大に伴い、膨大な電力を消費するAl新地金製錬（ホール・エルー法）の環境負荷低減と低コスト化が課題となっている。また、電気自動車の普及が進めば、これまでAlスクラップの主な用途であったエンジン用の鋳物合金の需要が減少し、再利用できないAlスクラップが増大することが予想される。

そこで、地金製造法として、エネルギー効率に優れたAl新地金の革新的な製法である室温電解製錬（イオン液体法）の開発、およびイオン液体を利用した独自のAlスクラップ再生技術の開発がおこなわれている。このAlの室温電解製錬プロセスでは、ボーキサイトから水酸化アルミニウム（ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ）を従来のバイヤー法により合成し、その後、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を経てAl地金を製造するものである（Fig. 18）。本プロセスにおいては、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の脱水反応により AlCl_3 を合成してからAl

地金を製造する方法と、 AlCl_3 を経由しないその他の方法とが考えられる。現在、①室温電解製錬のプロセス、②Alスクラップを高純化するプロセス、③電解液から箔状のAl地金の回収プロセス（Fig. 19）、の開発と生産性向上を進めている。

Alの析出電位（ -1.66 V vs. NHE ）は、水からの水素発生電位よりもかなり卑であるため、金属Alを電気化学的に得るためには非水系の電解液を用いる必要がある。従来のAl新地金製錬において用いられるホール・エルー法の電解液（フッ化物系溶融塩）も非水系であるが、これを室温において実施する点にプロセスとしての新規性と高い将来性がある。イオン液体法においては、金属Alの析出に寄与するイオン種の濃度を高くできる塩化アルミニウム（ AlCl_3 ）と1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロライド（1-ethyl-3-methylimidazolium chloride (EMIC))から構成されるイオン液体を主に使用する^{9),10)}。このEMIC- AlCl_3 イオン液体から金属Alを析出させると液中の AlCl_3 が消費されるが、外部から AlCl_3 を供給することで連続的に金属Alを析出させることが可能となる。

UACJが実現を目指す室温電解製錬（イオン液体法）の基本的な考え方は、ボーキサイトから容易に得られる $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ から、 AlCl_3 を合成するプロセスを開発し、 AlCl_3 を前述のEMIC- AlCl_3 イオン液体に供給して連続的に金属Alを析出させるものである。また、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ から直接、金属Alを析出させるプロセスも研究開発課題の一つとなっている。

EMIC- AlCl_3 イオン液体を用いた金属Al析出プロセスのもう一つの特徴として、アノード電極にAlを用いた場合にAlが電解液に溶出し、電解液中のAl濃度を一

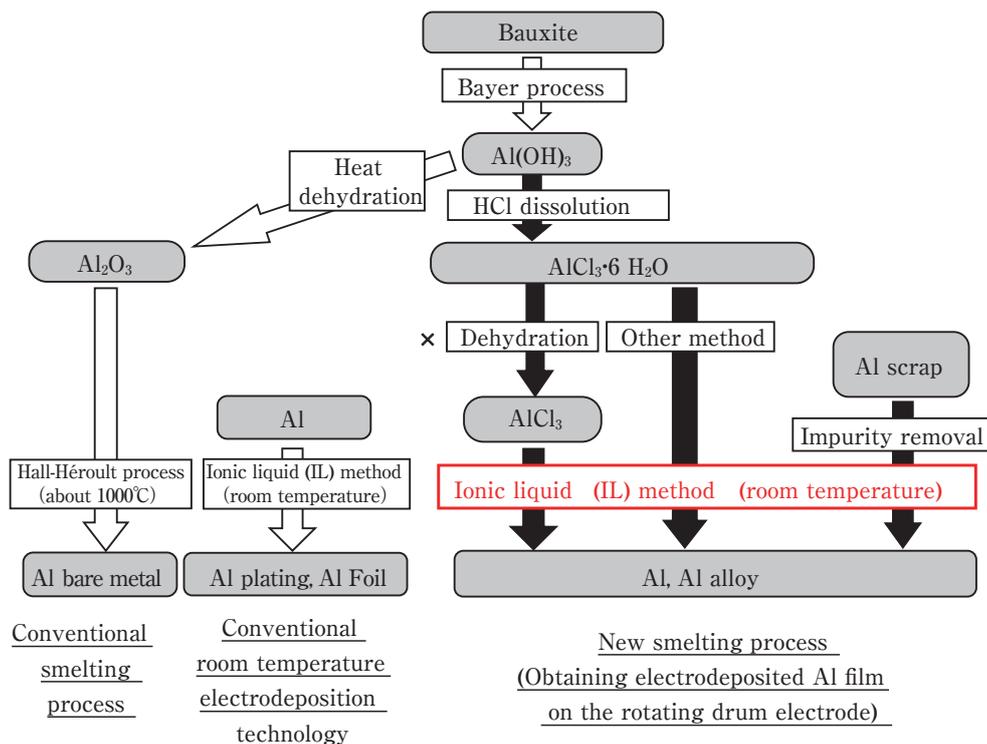


Fig. 18 Comparison between the conventional and new smelting process.

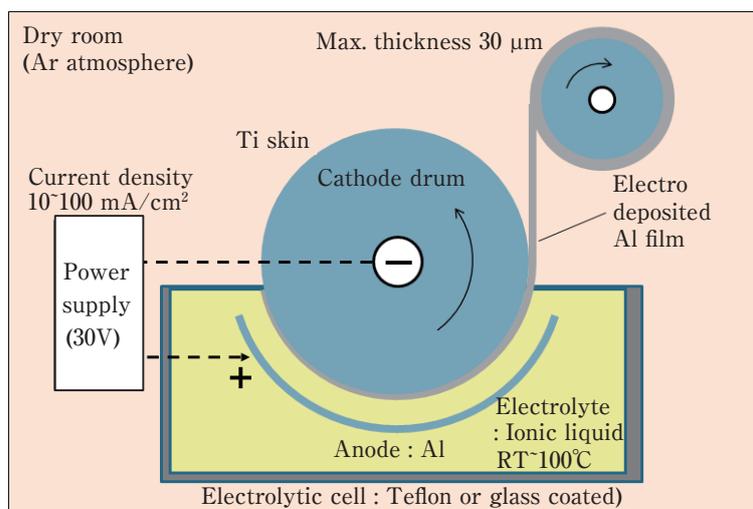


Fig. 19 Schematic illustration of continuous electrodeposition equipment.

定に保つことができる点が挙げられる。この特徴を利用して、アノード電極に低純度のAlを用いてAl供給源とすることで、カソード電極上に高純度のAlを析出させることができる。本手法により実際に得られた高純度Alを電子線マイクロアナライザー（EPMA）で分析したところ、溶出前のアノードよりもAl純度が向上することが確認されている。現在、電解セルの構造および浴成分の安定化手法を工夫することで、より効率の高い高純化技術を開発中である。

従来の製錬法であるホール・エルー法は、操業時の

槽内温度が約1000℃であり、製錬された液状のAl地金を連続的に槽の底部から取り出す。一方、室温電解製錬（イオン液体法）により得られるAl地金は固体であり、連続的に槽外へ取り出すためには、ドラム基板に電析させたAl薄膜を剥離し回収する手法が効率的であると考えられる。連続操業を想定し、チタン（Ti）製のカソードドラムを回転させながら析出したAl箔をカソードドラムから剥離させて回収する技術（Fig. 19）も同時に開発している。これらの検討により、ボーキサイト由来のAlCl₃・6H₂OからAlを含む電析物を回収する

プロセス確立の可能性を見出した。本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業総合開発機構 (NEDO) の委託業務として実施中である。

8. まとめ

－これからのアルミニウム材料開発－

本報ではアルミニウムの市場動向を概観し、新たなニーズに対応したUACJの材料開発の事例を紹介した。飲料缶用アルミニウムは第二次大戦後のエポックメイキングな製品であるが、ここではアルミニウム材料は高度に規格化された顧客工程に対して、比較的少数のアルミニウムメジャーが大量に板材を供給するという構図を有していた。これらの研究開発は開発要素が極めて強く、基礎研究からやや離れた存在であった。日本国内の大学や研究機関においてアルミニウムの研究が他の材料ほど盛んになされなかったのは、こうした産業構造にも由来すると考えられる。

他方、本講演では需要が伸びつつある自動車や電池用途において、基礎研究までさかのぼる技術開発が、市場における製品の競争力に直結する例が多数見受けられる。製品化の歴史が浅く、産業全体での最適化を目指した試行錯誤の途上にあるこれらの製品においては、普遍化された金属材料に関する知見の横展開が、製品開発においても重要となる段階にあると考えられる。これは、より多くの技術者に活躍の場が残されている分野であるともいえる。

関連分野の多くの研究者・技術者ともに、技術を通じて世界のアルミニウム産業の発展に寄与することを願い、本報のまとめとする。

謝 辞

本報は2018年6月1日、京都大学水曜会大会における発表「(株)UACJの高機能アルミニウム 材料開発と将来展望」をまとめたものである。伝統ある本会において発表の機会をいただきことを、関係者各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) CRU Aluminium Rolled Products Market Outlook November 2017.
- 2) <http://blog.caranddriver.com/in-depth-with-the-2015-ford-f-150s-aluminum>
- 3) 前田新平：軽金属, **11** (1961), 231-245.
- 4) 能登谷武紀, 河野浩三：伸銅技術研究会誌, **37** (1998), 27-33.
- 5) 宮一普：材料と環境, **61** (2012), 438-442.
- 6) 河野浩三, 鈴木忍, 金森康二, 玉川博一, 京良彦, 大谷良行：銅と銅合金, **55** (2016), 140-145.
- 7) 伊藤真一, 細木哲郎, 渡辺雅人, 土屋昭則：銅と銅合金, **55** (2016), 130-134.
- 8) 藤江壮 MRJの開発状況 <http://jasst.jp/archives/jasst11n/pdf/S1.pdf>
- 9) 上田幹人, 宇井幸一：表面技術, **60** (2009), 491-496.
- 10) J. S. Wilkes, J. A. Levisky, R. A. Wilson, and C. L. Hussey: Inorg. Chem., **21** (1982), 1263-1264.



渋江 和久 (Kazuhisa Shibue)

(株)UACJ R&Dセンター 所長,
取締役兼専務執行役員