

アルミニウムリサイクルに関する将来構想

戸次 洋一郎 *

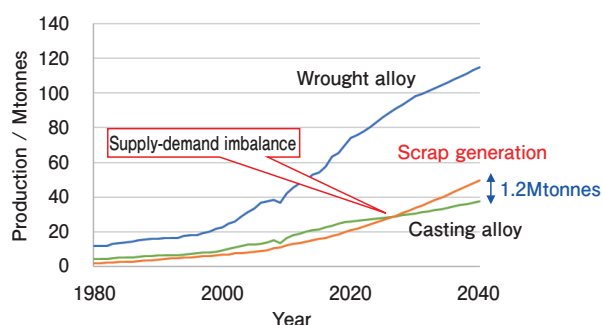
Future Vision for Aluminum Recycling

Yoichiro Bekki *

1. はじめに

近年、SDGsが広く世間的に知られるようになり、多くの業界、企業で持続可能な経済活動を進めることが必須事項となりつつある。金属素材としてのアルミニウムの持続可能性は、資源量の観点からは、地殻に存在する元素量を示すクラーク数が約8%と金属中最も大きく、枯渇する心配は少ない。他方、昨今特に重視されている気候変動対策の観点からは、アルミニウムは精錬に多くの電力を必要とするため、輸入される新地金のGHG(温室効果ガス)は11kg-CO₂-eq/kg程度と他の金属より大きいことが課題である。しかし融点が低いことからスクラップから再生した二次地金のGHGは0.5kg-CO₂-eq/kg以下と新地金の数%に過ぎず、他の金属と比較しても有利である¹⁾。

アルミニウムは軽量で比強度が高いため、航空機、自動車、鉄道車両、船舶などの軽量化に有効であり、これらの運用時の燃費改善によるGHG削減に寄与できる。また、熱伝導性に優れることから、熱交換器の小型軽量化に寄与し、熱エネルギーの有効活用を通じてもGHG削減に有効である。すなわち、LCAとしてGHG削減を考える場合、アルミニウム素材製造時にGHG排出量が多い新地金を極力減らし、リサイクルされた再生地金を多用することが極めて重要である。現状、日本で発生するアルミニウムスクラップは、ほぼすべて再生材として使用されているが、これは鋳物、ダイカスト用として使用される、いわゆるカスケードリサイクルが主で、展伸材はアルミニウム缶などの例外を除くと、ほとんど新地金が使用されており、リサイクルされていないのが実情である²⁾。Fig. 1²⁾に世界全体でのアルミニウム展伸材、鋳物・ダイカストの生産量およびスクラップ発生量の推移と今後の予想を示す。展伸材の生産量の増加が大きく、20年代後半に



Ref. International Aluminium Institute, Regional Aluminium Flow Model 2017(1)

Fig. 1 Production forecast of aluminium alloy (world)

はスクラップ発生量がカスケードリサイクルを実現していた鋳物・ダイカストの生産量を上回り、アルミニウムスクラップが余剰となり、廃棄物化する可能性がある。従って、今後アルミニウム産業を継続して発展させるためには、アルミニウム展伸材の水平リサイクル、さらには鋳物スクラップを含む低品位スクラップを展伸材に適用するアップグレードリサイクルを進めることが不可欠である。

2. アルミニウム展伸材のリサイクルの困難性

アルミニウム展伸材のリサイクルが進まない理由としては、展伸材は鋳物、ダイカストと比較して不純物の許容量が少ないこと、さらに展伸材は用途に応じて合金組成の仕様が細分化されていることが大きい。アルミニウム合金の代表的な不純物であるFeとSiを例にとると、これらの元素は鋳造時に粗大な晶出物を形成し、機械的特性、特に延性を低下させる。展伸材は素材製造過程において熱間及び冷間での加工が施され、さらに最終製品にするためにはプレス成形などの塑性加工を行うことが多い。従って延性は展伸材にとって重要な特性であり、これを悪化させるFe、Si等の不純

* (株)UACJ マーケティング・技術本部 R&Dセンター 第一研究部
Research Department I, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation

物は厳しく規制されている。一方、鋳物、ダイカストにおいては、鋳造後に切削加工等を行うが、塑性加工を行うことが無く、延性は問われないことが多い。さらに溶湯の湯流れ性改善、金型との焼付き防止のためにFe, Siは有効であり、積極的に添加されている。

Fig. 2²⁾に代表的な展伸材と鋳物、ダイカストおよびスクラップのSi, Fe, Cuの含有量を示す。これらの不純物量が展伸材と鋳物・ダイカストでは大きく異なっており、両者が混在したスクラップは、鋳物・ダイカストには容易に展開できるのに対し、展伸材への展開は困難である。また、鋳物を含まない比較的不純物が少ないスクラップを適用する場合でも、細分化された展伸材の合金規格に合わせるためには、スクラップの高度な選別が必要であり、利用可能なスクラップ量も限られる。これらの事情より展伸材の水平リサイクルは進んでいない。その中で、アルミニウム缶材は、世界的に合金が統一（ボディ3104、エンド5182が主）されており、かつ特殊な選別装置を使わずとも外観で容易に識別できる。さらにアルミニウム板材の中では生産量が最も多く、大量に流通している。この様に、アルミニウム缶材は、他の展伸材が抱えるリサイクルに関する課題をクリアすることができており、スクラップの価値が高いことから量産化が始まった初期の段階でリサイクルシステムが構築された。その結果、リサイクル率が向上し、現在ではCan to Canの水平リサイクル率が常に60%を超えている³⁾。このアルミニウム缶の例から、展伸材であっても不純物を多く許容する統一合金を設定し、大量に流通させることができれば、リサイクル率を大きく向上させることが可能と考えられる。

3. 新たなアルミニウムアップグレードリサイクルシステムの構築

日本ではアルミニウム鋳物・ダイカストを大量に使

用する自動車産業が発達しているため、世界平均よりアルミニウム全体に占める鋳物・ダイカストの比率が高く、日本で発生するスクラップだけでは不足し、海外から輸入しているのが現状である。しかし今後EVが普及すると大量にアルミニウムダイカストを使用するエンジンが減ることが予想され、カスケードリサイクルだけではアルミニウムスクラップの消費が不十分となる可能性がある。さらにアルミニウム製品の価値として、従来の品質、価格に加えてLCAとしてのGHGの少なさが求められるようになってきた。新地金のGHGは主に電力から発生しており、水力、原子力などで発電した場合、火力発電よりGHGが少ない。このような低GHGを売りにした地金はグリーンアルミニウムとして水力発電比率の高い新地金メーカーから各種名称で商品化され、差別化が図られている。一例としてノルウェーのHydro社ではREDUXAの名称で商品化されており、現時点のREDUXA4.0でもGHG排出量は4.0kg-CO₂-eq/kgと日本の輸入地金のGHGの1/2以下であり、将来のREDUXA2.0ではGHG2.0kg-CO₂-eq/kgまで低減できるとしている⁴⁾。新地金の生産を行っておらず、全量海外からの輸入に頼っている日本のアルミニウム製品の競争力を上げるためには、圧倒的な低GHG排出量を実現可能なリサイクルの促進が必須である。

このアルミニウムリサイクル促進のニーズに対応すべく、2019年度から2020年度にかけてNEDOの先導研究が実施され、次いで2021年度からは発展形として「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」の名称でNEDOの助成事業が進められている。これは鋳物を含む低グレードのアルミニウムスクラップから、汎用展伸材を製造するアップグレードリサイクルを目指しており、アルミニウム素材メーカーに加えて二次合金メーカー、ユーザ企業さらに共同研究先として多数の大学・国研も加わった大規模なプロジェクトである。

広くアップグレードリサイクルを実現するためには、

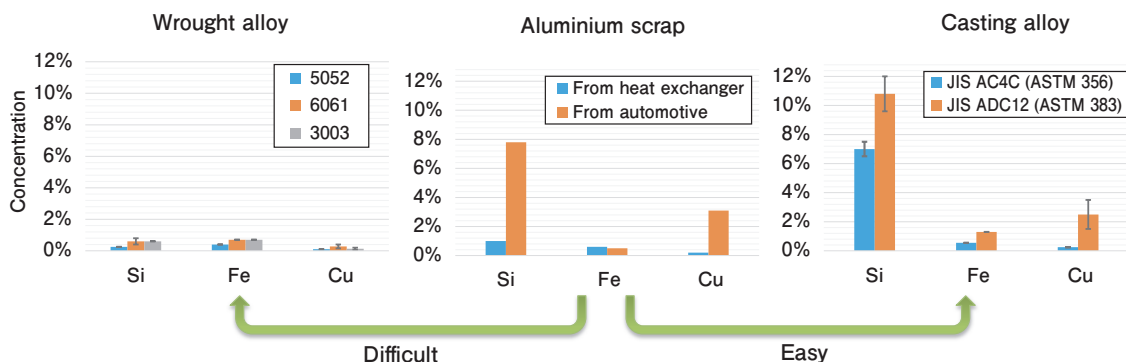


Fig. 2 Compositions of typical wrought alloy, aluminium scrap and cast and die-cast alloys

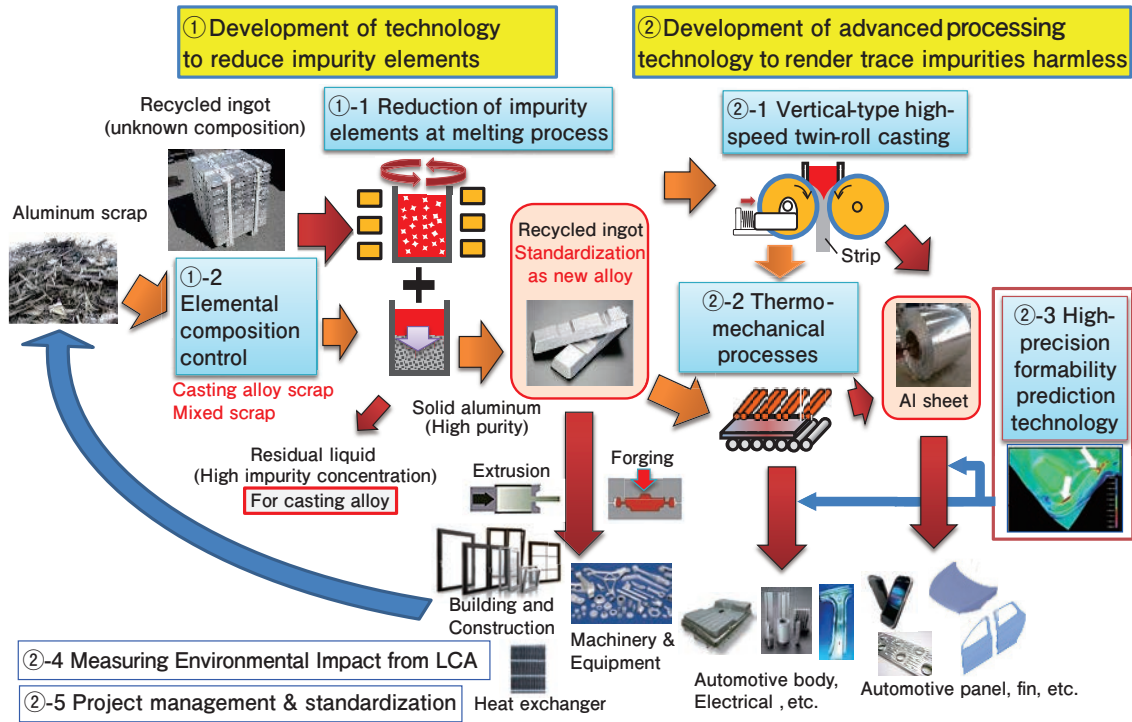


Fig. 3 R&D tasks and their interrelationships in the project “Development of Upgrade Recycling Technology of Aluminium for Resource Circular Society”

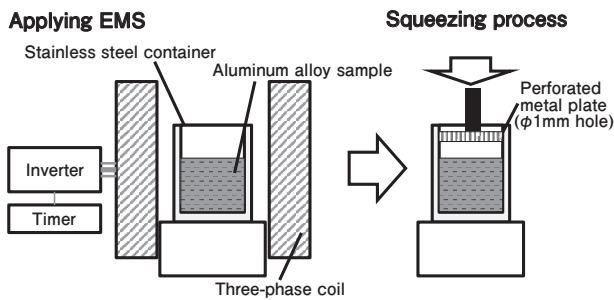


Fig. 4 Experimental setup for electromagnetic stirring and the following squeezing process.

対象とするアルミニウムスクラップを展伸材に限定することなく鋳物・ダイカストも含む雑多なものに拡張する必要がある。鋳物・ダイカストを含んだスクラップは、展伸材にとって過大な不純物を含んでおり、特にSiが非常に多くなる。そこで従来の展伸材を大きく超えるSiを含む新たな展伸材用合金を共通の汎用合金に設定し、その組成まで純化する「不純物元素低減技術の開発」と、不純物が多い組成でも性能を確保する「微量不純物元素を無害化する高度加工技術等の開発」の2テーマを設定している。Fig. 3²⁾にその全体の概要を示す。これらの中から、UACJが主要メンバーとして参加している「溶解工程における不純物元素除去」、「縦型高速双ロール casting」および「加工熱処理」について紹介する。

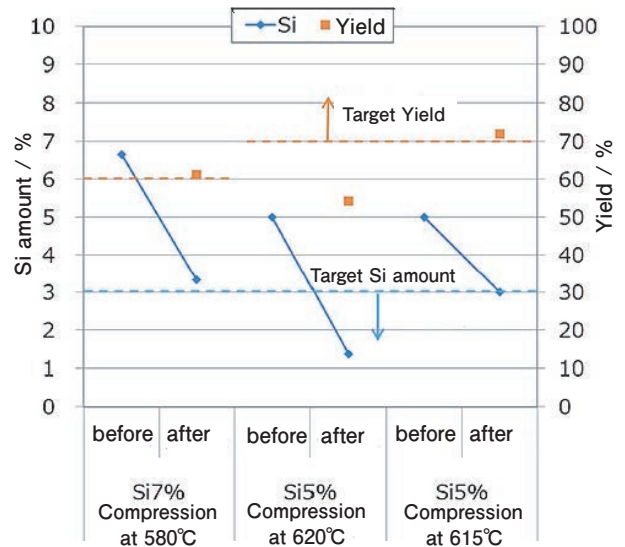


Fig. 5 Si amount before and after compression separation and solid phase yield obtained in small laboratory experiment

3.1 溶解工程における不純物元素除去

本技術はアルミニウム合金の溶湯が凝固する際、先に純度が高い固相が生成し、残液相の不純物元素が濃化する現象を用いており、分別結晶法と呼ばれている。ただしこの手法では、Si濃度が高い鋳物・ダイカストスクラップから純度の高い固相を取り出す場合、晶出する純度の高い固相の量が少なく、経済性に難点がある。その課題を克服するために、溶湯に流動を与え、固相率を上げる試みを実施している。Fig. 4²⁾に溶

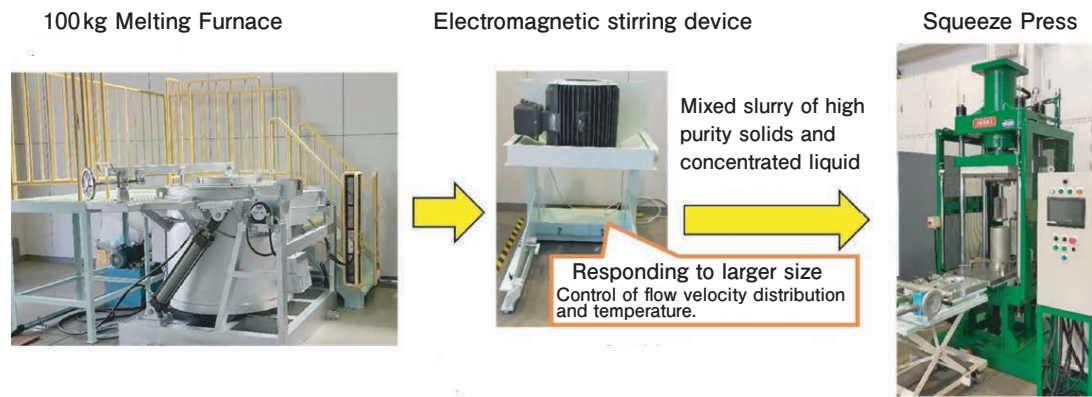


Fig. 6 Scaled-up molten metal electromagnetic stirring and squeezing equipment

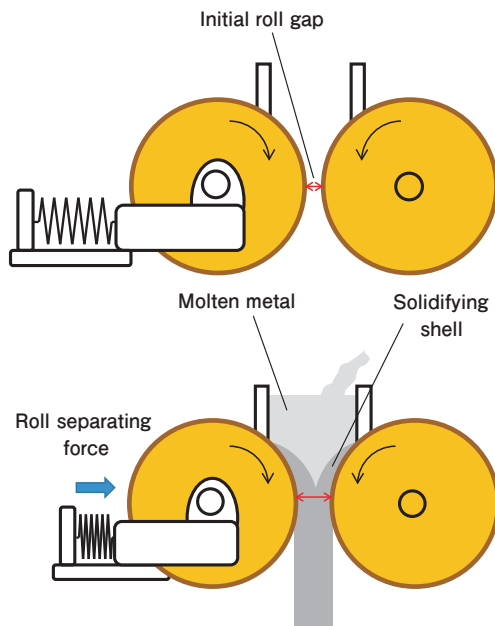


Fig. 7 Schematic of vertical-type high-speed twin-roll casting machine and casting process

湯を電磁攪拌し、その後圧搾で固相と液相を分離する手法の概念図を示す。この技術では7%のSiを含む溶湯から3%のSiの固相を70%の収率で得ることを最終的な目標としている。原料のSi量を7%まで許容すれば、展伸材と鋳物・ダイカストが混在した広範囲なスクラップの使用が可能となる。展伸材としては、Si量3%は従来になく多いが、後述の不純物無害化技術を用いて必要な特性を得ることを目指している。現在までに小型のラボ実験であるが、Fig. 5⁵⁾に示す通り、NEDO基本計画の中間目標（5% Si溶湯から3% Si固相を収率70%で回収）をほぼ達成することができた。さらにFig. 6⁵⁾に示すスケールアップした実験装置を製作し、実用化に向けた開発を進めている。

3.2 縦型高速双ロール鋳造

Si3%を含む材料は、単体Si、Fe-Si系化合物などの粗大な晶出物が生成し、機械的特性、特に伸びが低下し

ており、展伸材として使用する際の障害となっている。縦型高速双ロール鋳造は、従来のDC鋳造と比較して数百倍の冷却速度を有しており、晶出物を微細化して伸びの低下を抑えることが可能である。縦型高速双ロール鋳造はFig. 7²⁾に示すように横に並べた一対の回転する水冷銅合金製ロールにサイドダムとノズルを付け、ロール上面から溶湯を注ぎ、2-6mm程度の薄板を20-80mpmの高速で直接製造する薄板連続鋳造法であり、従来の横型双ロール鋳造圧延機と比較しても数十倍の冷却速度、鋳造速度を有している。これは縦型高速双ロール鋳造機の長い溶湯との接触長、ロール上面に形成される溶湯プールによる押湯効果、銅合金の高い熱伝導性等によるものである。このように縦型高速双ロール鋳造は多くの優れた特徴を有しているが、溶湯の均一な流れや板表面品質を決めるメニスカスの安定化などの制御が難しく、いまだ実用化されていない。本プロジェクトでは小型のラボ装置を使った基礎実験を行い、そのデータに基づき板幅は狭いものの、実機相当の各種制御機能を有し、熱的定常状態を実現した長尺実験機を製作している。Fig. 8⁵⁾にその概略図を示す。縦型高速双ロール鋳造では、多くの用途に使用可能な汎用展伸材の製造を目的としており、代表例として自動車ボディシートを想定した目標特性を定めている。23年度までの中間目標としてはUTS 250MPa、伸び24%、25年度までの最終目標はUTS 250MPa、伸び27%としている。小型ラボ実験機を用いたSi3%のリサイクル想定合金での実験で、ロール荷重を非常に小さくすることで伸びが向上することが確かめられ、Fig. 9⁵⁾に示す通り、中間目標を超える特性が得られている。

3.3 加工熱処理

前述の縦型高速双ロール鋳造では、溶湯からの急冷凝固によって晶出物の微細化を図っているが、加工熱処理では大ひずみ加工によって機械的に晶出物を微細

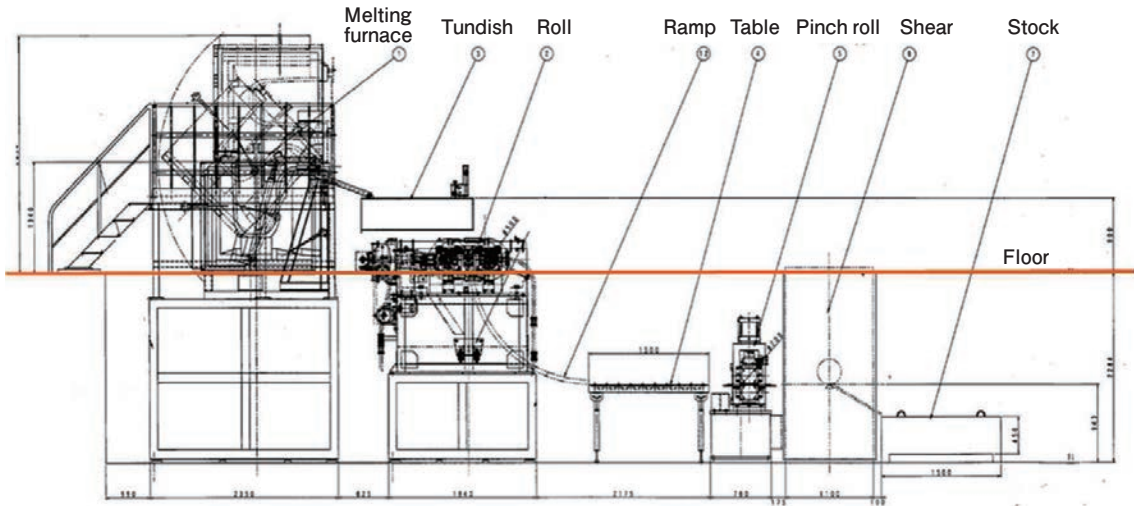


Fig. 8 Conceptual diagram of the new vertical high-speed twin roll casting machine

化することを狙っている。また、強加工を行うことで強度が増大するため、ターゲットとする製品は高強度構造用材料となる。実用を考慮して強度だけではなく適度な伸びを確保することも目指しており、そのための最適な熱処理法も同時に検討を行う。目標とする特性は2023年度までの中間目標でUTS 400MPa、伸び15%、2025年度までの最終目標でUTS 500MPa、伸び15%としている。大ひずみ加工法としては実用製品のサイズで実施可能なHPS（高圧スライド加工）とARB（繰返し重ね圧延）を選定している。これに加えて基礎実験のためのHPT（高圧ねじり加工）も実施する。Fig. 10²⁾にHPS、HPT、ARBの模式図を示す。なおHPSの大型化はIF-HPS（逐次繰出し高圧スライド加工）を用いる。Fig. 11⁵⁾にIF-HPSの模式図と作製した板材の外観を示す。加工熱処理のスタート材はDC casting、熱間圧延、冷間圧延を行う従来工程材でも縦型高速双ロール材でも構わない。まず、従来工程材を使った試作を行いHPS、ARBともに中間目標をほぼ達成することができた。Fig. 12⁵⁾にHPS加工材の機械的特性を示すが、Al-3Si-0.5Mg-1Fe (Cuレス) 材で、UTS 473MPa、伸び

C1-3 Roll Load : 5N/mm, Roll Velocity: 30m/min., Solidification length: 30mm
 C2-2 Roll Load :100N/mm, Roll Velocity: 30m/min., Solidification length: 30mm

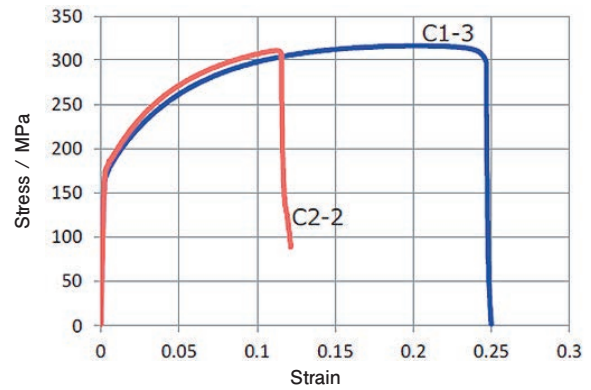


Fig. 9 Stress strain curves of recycled alloy sheets obtained using a small laboratory machine

14%が得られている。現在、最終目標達成を目指し、スタート材として縦型双ロール casting材も加えて開発を進めている。

4. おわりに

このNEDO助成事業を通じて開発した技術を用いる

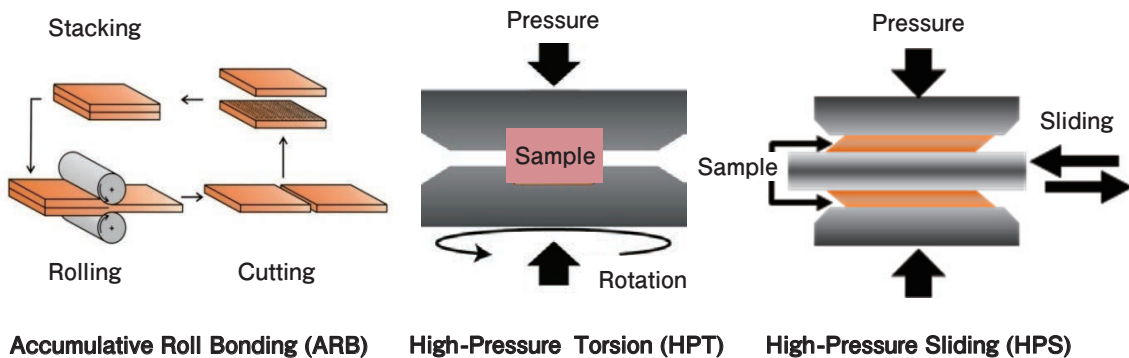


Fig. 10 Severe plastic deformation (SPD) processes using ARB, HPT and HPS

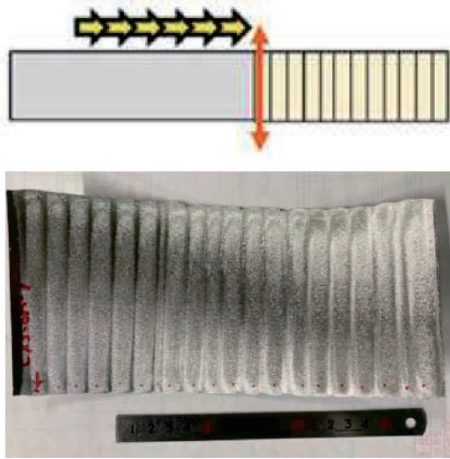


Fig. 11 Schematic diagram of IF-HPS and appearance of the manufactured sheet

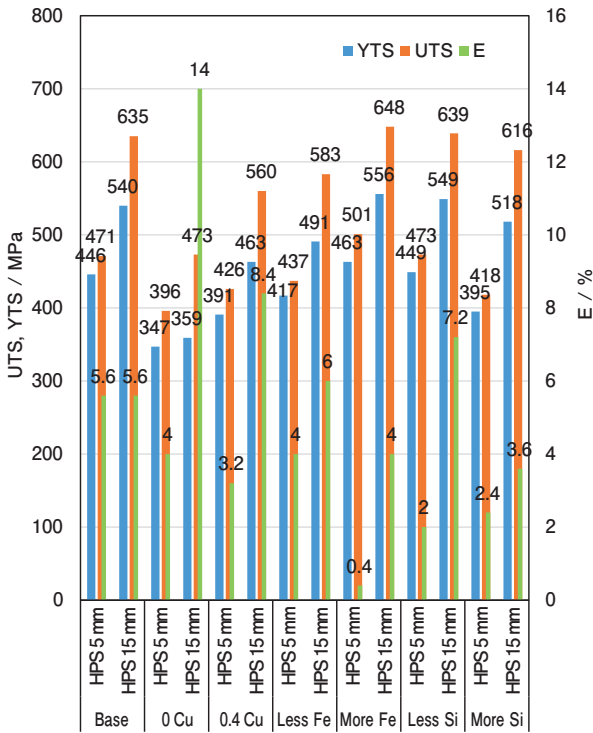


Fig. 12 Mechanical properties of HPS processed materials; DC-Hot rolling-Solid solution-Natural aging-HPS

ことで、海外から大量のアルミニウムスクラップや再生材を輸入し、新地金の輸入を極力抑えることが可能となる。将来的にはFig. 13²⁾に示すような新地金を使用しない完全リサイクルシステムの構築を目指している。これによりGHGの削減と共に、さらなるアルミニウム産業の発展に寄与していきたい。

5. 謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業

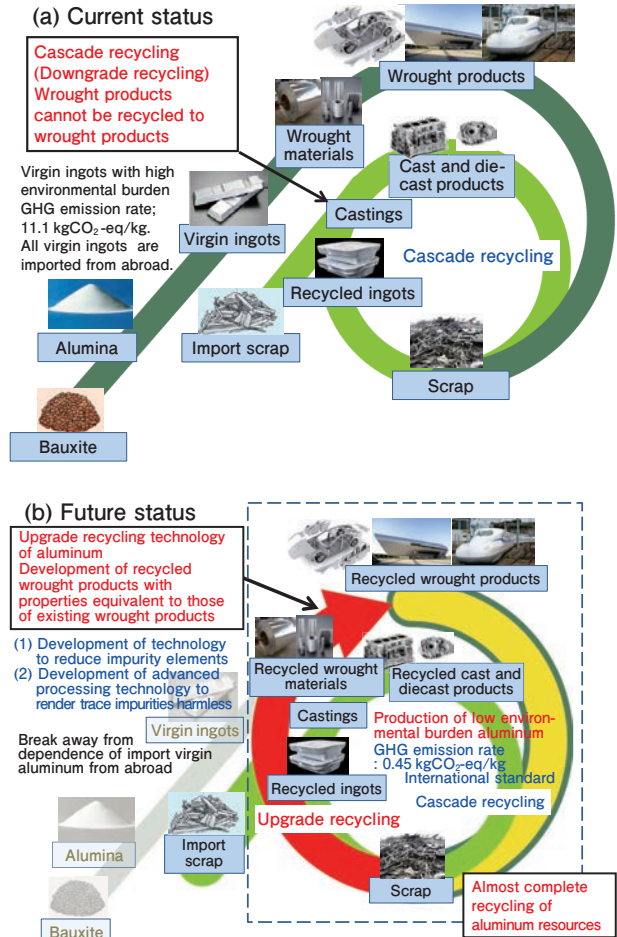


Fig. 13 (a) Current status of aluminium resource circulation and (b) the expected future status.

技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果得られたものです。

参考文献

- 1) “アルミニウム新地金および展伸材用再生地金の LCI データの概要 (平成 17 年 3 月 23 日)” 日本アルミニウム協会.pdf.p12 表 11 を元に計算
- 2) Shinji Kumai: Material Transactions, (2022), 2, 319-333
- 3) アルミニウム缶リサイクル協会 HP, <http://www.alumi-can.or.jp/publics/index/62/>
- 4) Hydro社 HP <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20REDUXA%20brochure.pdf?docId=548546>
- 5) 「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」事業原簿 <https://www.nedo.go.jp/content/100962503.pdf>



戸次 洋一郎 (Yoichiro Bekki)
(株)UACJ マーケティング・技術本部
R&D センター 第一研究部