



(一社)日本アルミニウム協会 アルミニウム車両委員会 (一社)日本鉄道車輛工業会
第20回講演会 アルミ車両 技術と情報
2023年9月27日 WEB開催



Tokyo Tech

アルミニウムの天分を活かそう ーカーボンニュートラルに向けたアップグレードリサイクルー

東京工業大学 物質理工学院 特任教授／名誉教授

熊井 真次

はじめに

本講演では、主要なベースメタルであるアルミニウムならびにその合金がカーボンニュートラル実現に向けて果たすべき役割と可能性について述べる。

また、CO₂をはじめとする温室効果ガス(GHG)排出量の大幅削減を目指した国家プロジェクトのひとつである、NEDO環境部「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業(2021年度～2025年度(5年間))」において、日本アルミニウム協会、企業、大学、国研がチームを組んで推進している「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」の概要を紹介する。

地球温暖化とカーボンニュートラル

カーボンニュートラル社会実現の必要性

国連・気候変動に関する政府間パネル(IPCC)報告書(2018年)

地球温暖化は世界的な問題

気温上昇を1.5°C以内に抑えるためには、2050年までにCO₂排出を正味ゼロ、2050年以降はマイナス排出が必要

2050年カーボンニュートラル

パリ協定の努力目標である1.5°C目標を達成するために求められる、

“人為起源の排出量と除去量が釣り合い、大気中のGHGの排出が正味ゼロ”の状態

このため、CO₂の排出量削減のみならずCO₂を除去する“炭素除去(カーボンリムーバル)”が必要

ESG(環境(Environment)、社会(Social)、ガバナンス(Governance))投資

今や各国政府のみならず、投資家、金融機関がカーボンニュートラルを目指すことを宣言

GAFAMやMicrosoft等のIT企業はもとより、CO₂多排出企業であるエネルギー関連企業もネットゼロを宣言

経済覇権の鍵

政府、金融、企業が挙って2050年カーボンニュートラルに取り組むのは、気候変動の影響を回避するためであるが、同時にこの取り組みが次の「経済覇権の鍵」となるから

我が国のグリーン成長戦略

2050年カーボンニュートラル宣言

菅前総理の所信表明演説(2020年10月26日)「2050年カーボンニュートラルの実現を目指す」

グリーン成長戦略の発表 (経済産業省)

カーボンニュートラル実現を機会
とした経済的成長戦略

魅力的な国内市場を創出すること
により国内外の投資を呼び込み、
競争力があり強靱なサプライ
チェーンを構築することを宣言

- ・成長が期待される14分野
- ・分野横断の8政策ツールを提示

We have selected 14 sectors that are expected to grow toward the year 2050.

- ・ Strengthening international competitiveness by setting high goals and steadily implementing action plans according to the phase of technology.
- ・ The economic effect in 2050 is estimated to be about 290 trillion yen, and the employment effect about 18 million people.



We will leverage all of our policies and do our best to encourage companies to take on positive challenges toward innovation.



グリーン成長戦略

成長が期待される14分野

エネルギー関連産業

- 1) 洋上風力・太陽光・地熱産業
(次世代再生可能エネルギー)
- 2) 水素・燃料アンモニア産業
- 3) 次世代熱エネルギー産業
- 4) 原子力産業

輸送・製造関連産業

- 5) 自動車・蓄電池産業
- 6) 半導体・情報通信産業
- 7) 船舶産業
- 8) 物流・人流・土木インフラ産業
- 9) 食料・農林水産業
- 10) 航空機産業
- 11) カーボンリサイクル・マテリアル産業

家庭・オフィス関連産業

- 12) 住宅・建築物産業・次世代電力
マネジメント産業
- 13) 資源循環関連産業
- 14) ライフスタイル関連産業

分野横断の8政策ツール

- 1) 予算(10年間で2兆円の基金を造成)
- 2) 税制(投資送信税制の創設)
- 3) 金融(トランジションファイナンスの日本版基本方針やロードマップ等を策定)
- 4) 税制改革・標準化(カーボンプライシング、排出量取引、炭素税、国境調整措置等)
- 5) 国際連携
- 6) 大学における取組の推進等
- 7) 2025年日本国際博覧会
- 8) 若手ワーキンググループ

We have selected 14 sectors that are expected to grow toward the year 2050.

- Strengthening international competitiveness by setting high goals and steadily implementing action plans according to the phase of technology.
- The economic effect in 2050 is estimated to be about 290 trillion yen, and the employment effect about 18 million people.

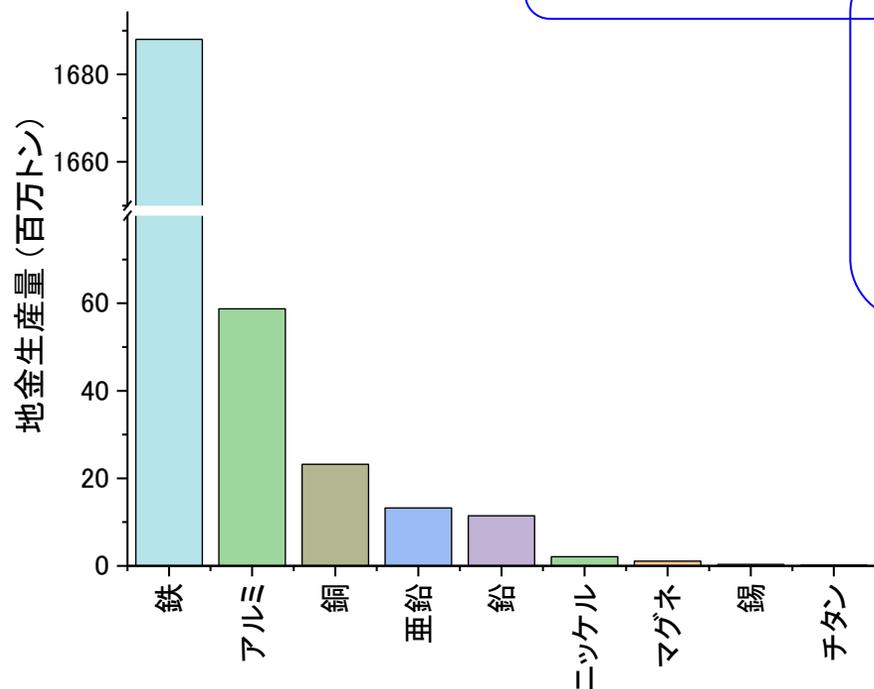
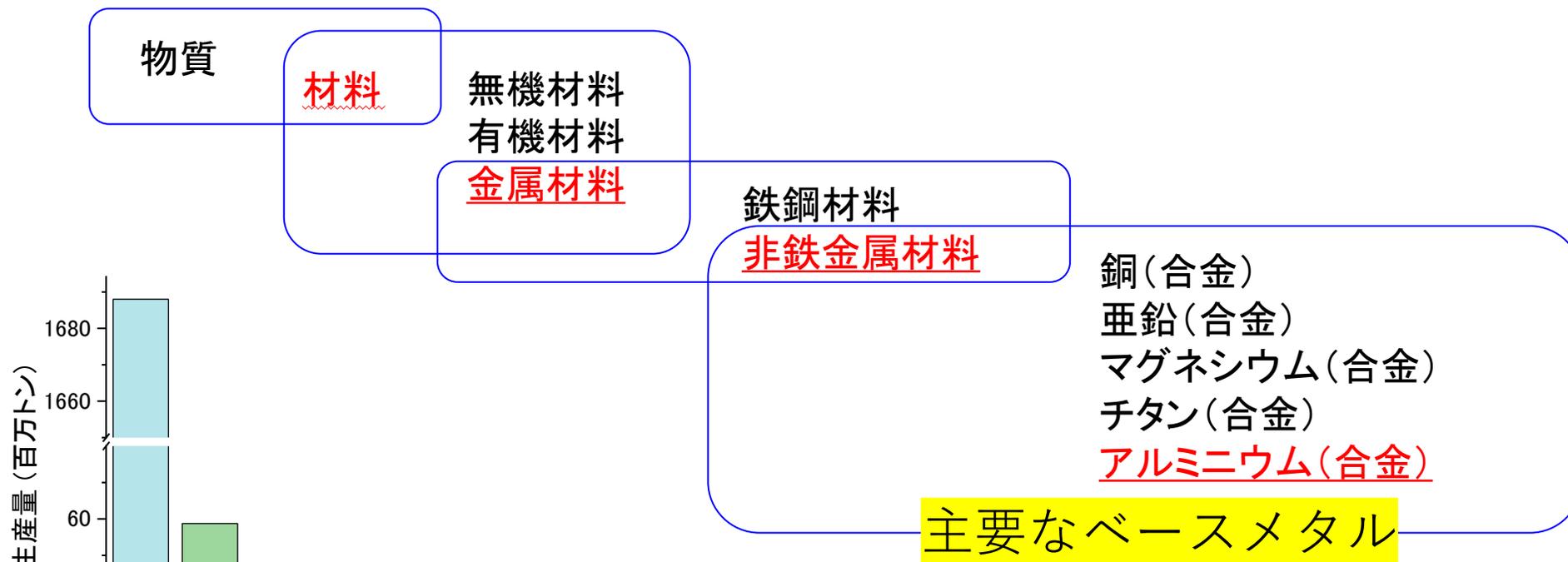


We will leverage all of our policies and do our best to encourage companies to take on positive challenges toward innovation.



アルミニウムの役割と可能性

アルミニウムの位置づけ



世界のベースメタルの生産量 (2017年)

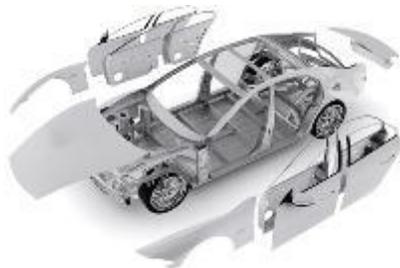
出典：JOGMEC 鉱物資源マテリアルフロー2018

- ・ アルミニウム元素の発見 1807年
- ・ 工業生産の開始 1886年
- ・ 工業化されてからまだ約130年の若い金属
- ・ 現在の年間総需要は約400万吨規模
- ・ 現在、日本では使用するアルミニウム新地金のすべてを輸入

アルミニウムの利点と温室効果ガス(GHG)削減への寄与

輸送機器: 高比強度・比剛性

⇒軽量化による燃費向上



建材: 高耐食性・耐候性, 光・熱反射性

⇒長寿命化, 空調効率の改善



英・ファーンボロー空港



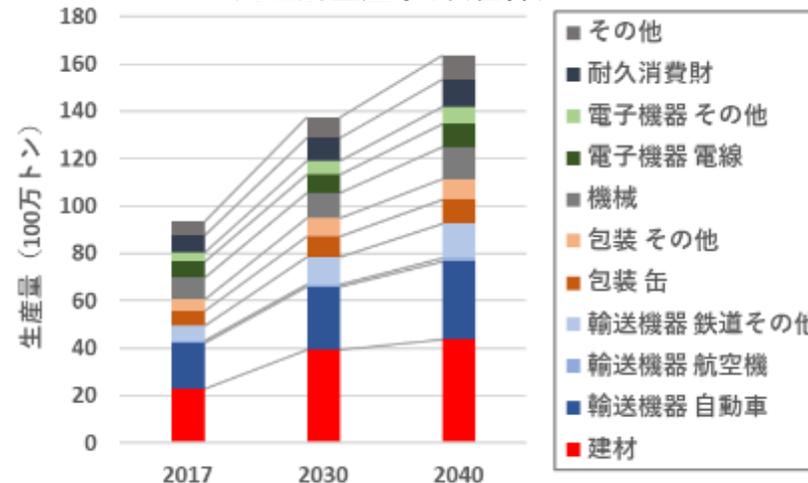
中国・SIEEB

包装材: 高耐食性, 光・熱反射性・密閉性

⇒商品の消費期限延長



用途別生産予測(世界)



- アルミニウムを適切に利用することによって、温室効果ガスの排出量削減が可能
- 今後各種用途(建材、輸送機器、包装容器など)において需要は増加する見込み

グリーン成長戦略とアルミニウム

「グリーン成長戦略」においてアルミニウムの貢献が期待できる分野



洋上風力発電

- 洋上風力発電設備建設用構造材やケーブルの素材としてアルミニウムの高い比強度や導電性は有用



自動車・蓄電池

- 自動車の燃費向上、EV用蓄電池の重量低減に軽量なアルミニウムは有用



電力網の増加

- 電化促進により、2050年の電力需要は2018年に比べ30～50%増加の見込みであり、電力網の増加によりアルミニウムの需要は増加



太陽光パネル

- 既存の太陽電池では設置困難な場所への太陽光パネル設置には、軽量で高強度、耐候性に優れたアルミニウムは有用



暖房器具の電化

- 暖房・給湯機器も電化が進み、ヒートポンプ技術の利用拡大が想定されており、熱伝導性に優れたアルミニウムの需要が増加する可能性あり

アルミニウムは温室効果ガス(GHG)排出量削減のための鍵となる材料

アルミニウム展伸材と鋳造材

アルミニウムの製造工程と新地金、再生地金、展伸材、鋳造材、スクラップの位置づけ

温室効果ガス排出係数 大
11.1 kgCO₂-eq/kg (※1)

鋳石から製錬

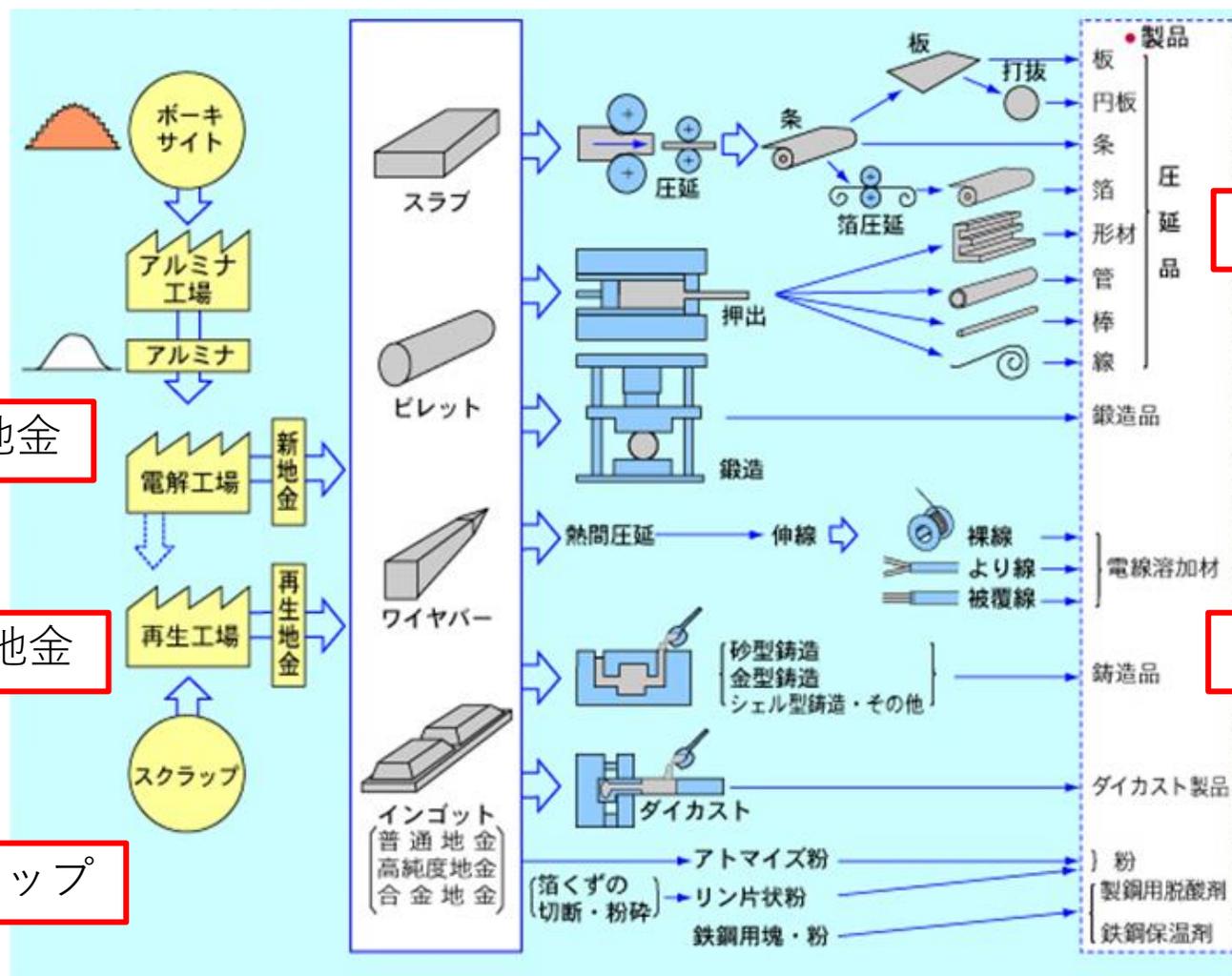
新地金

スクラップから製造

温室効果ガス排出係数 小
0.45 kgCO₂-eq/kg (※2)

再生地金

スクラップ



展伸材

多くの工程を経て製造
板、箔、型材等
純度に厳しい
高品質
高価

鋳造材

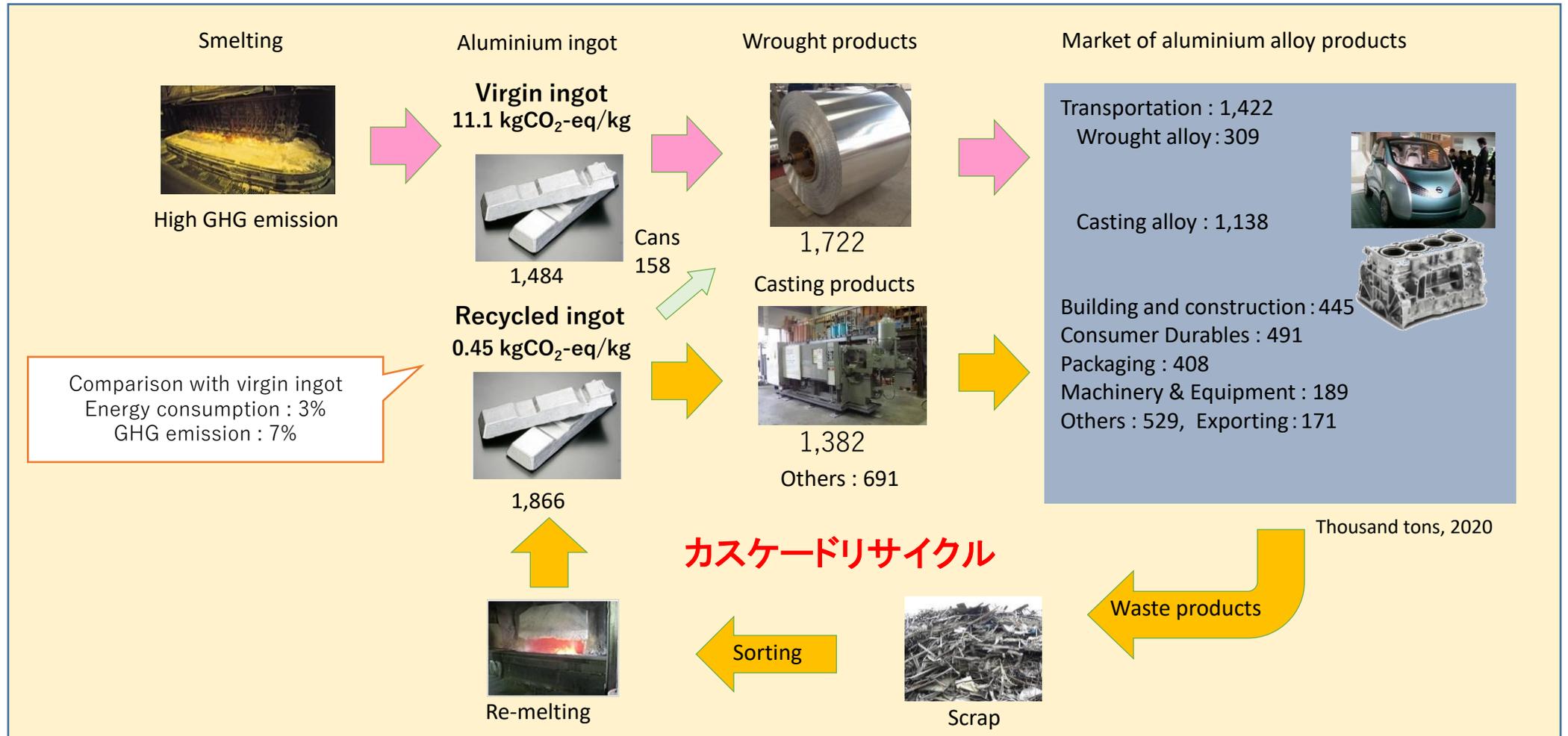
溶融金属から直接製造
不純物に寛容
低品質
安価

(※1) 日本アルミニウム協会「わが国の輸入アルミニウム新地金のインベントリ 2014年3月」から計算
(※2) 日本アルミニウム協会「アルミニウム新地金および展伸用再生地金のLCIデータの概要 2005年3月」から計算

アルミニウム資源循環の現状とカスケードリサイクル

- アルミニウムはリサイクルの優等生と呼ばれている(飲料缶のCAN TO CANリサイクル率は93%程度)
- しかし、このような展伸材スクラップを元の展伸材として再利用する「水平リサイクル」の量はごく僅か
- アルミニウムスクラップから製造された再生地金のほとんどは、海外からの輸入再生地金とともに鋳物・ダイカスト用に「カスケードリサイクル」されている ⇒ **今後も有効に機能できるか？**

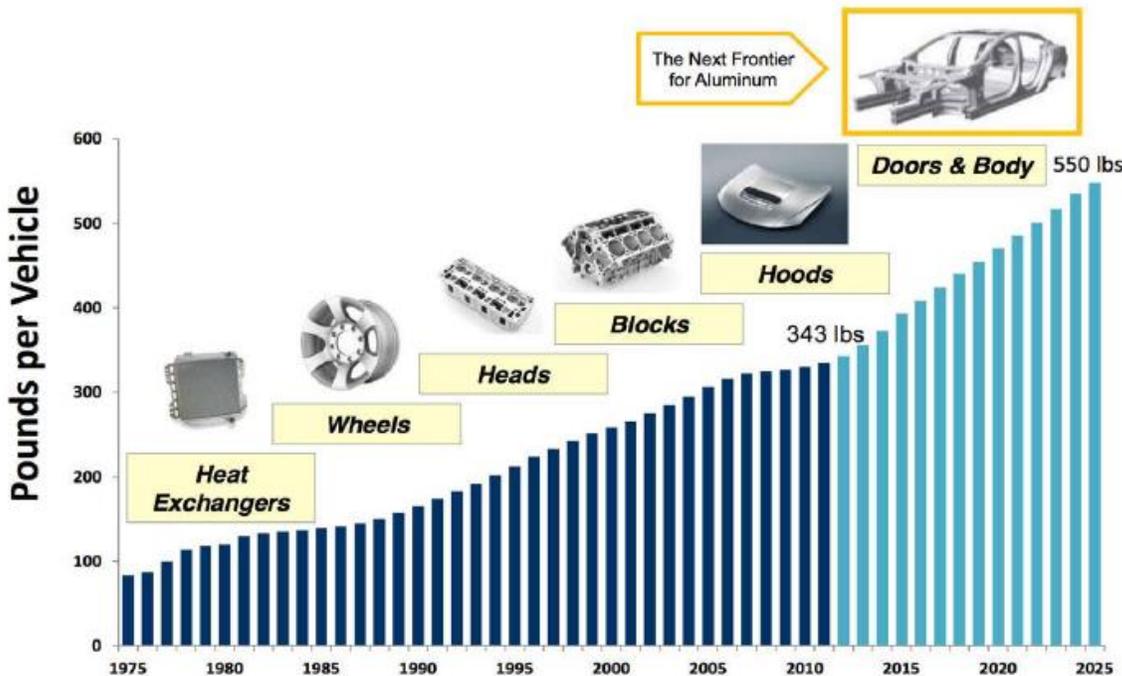
日本国内における
アルミニウム素材
リサイクルの現状



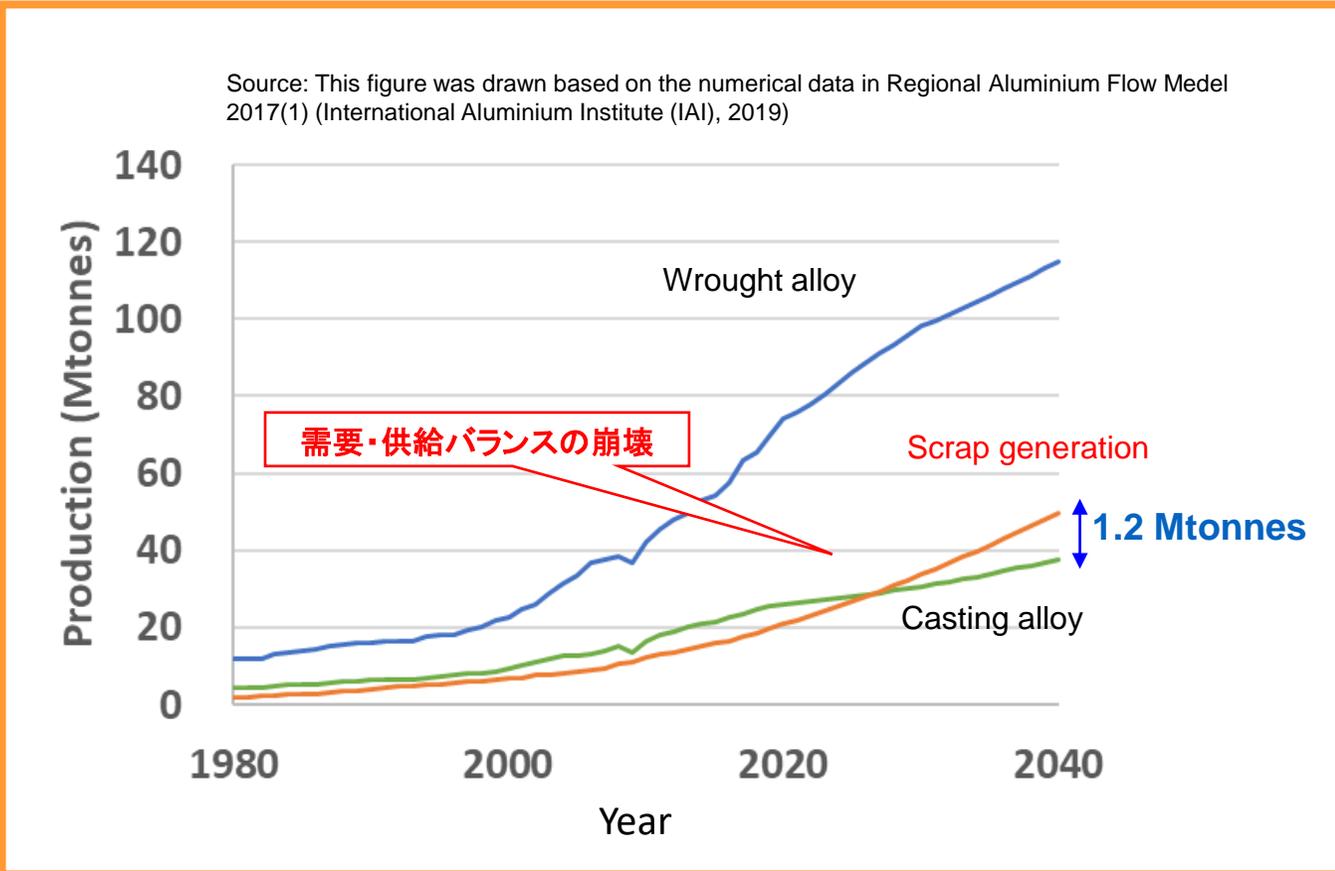
今後のアルミニウムスクラップ発生量ならびに鋳造材の需要量の変化

- GHG排出量削減のため自動車軽量化の要求はさらに高まり、ボディパネルに使用されるようなアルミニウム展伸材の需要が増加
- これに伴いスクラップの発生量も増加
- 自動車の電動化促進により、従来のエンジンブロック用鋳造材等の伸びは鈍化
- スクラップ発生量が鋳造材の生産量を上回る可能性あり ⇒ **需要・供給バランスの崩壊**

本問題解決のために、スクラップを展伸材製造に活用できるようにすること、新たな再生展伸材の需要先を生み出すことが必要



自動車用アルミニウムの需要増加と将来予測



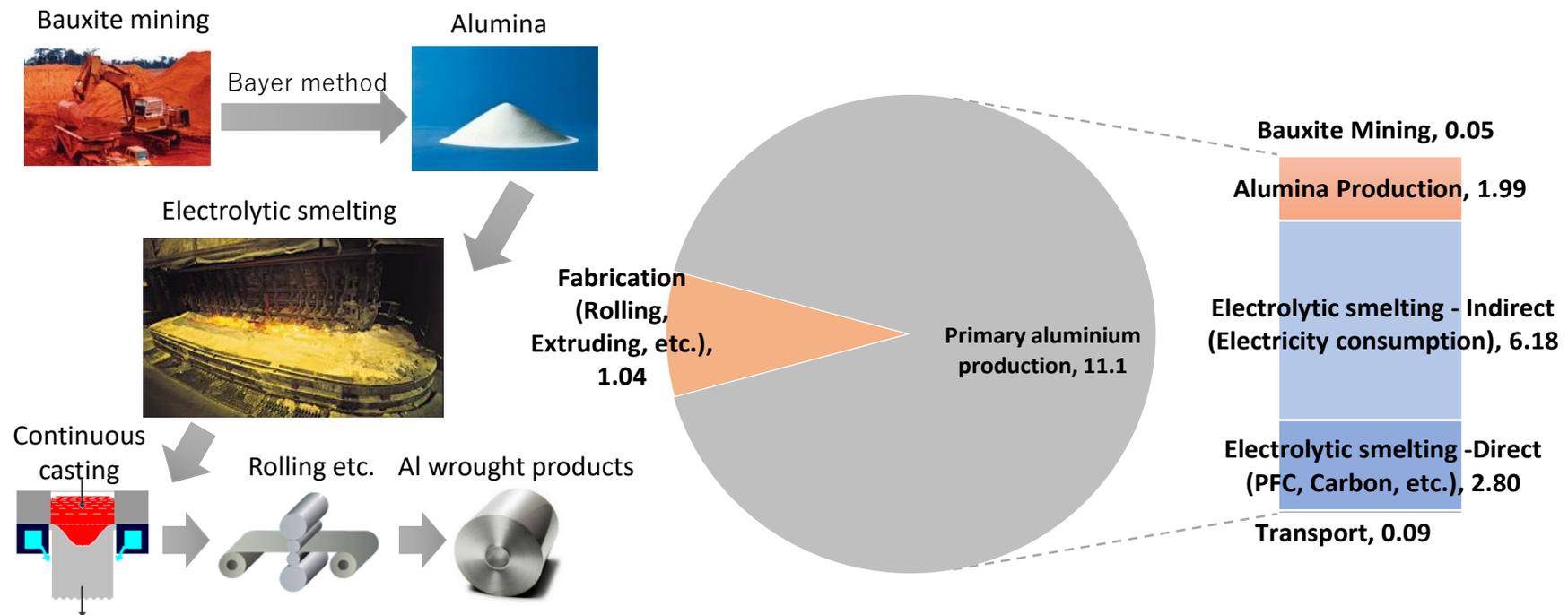
今後の世界のアルミニウムの生産量、スクラップ発生量ならびに鋳造材需要量の比較

International Aluminium Institute (IAI)による世界のアルミニウム生産量予測に基づく推算

アルミニウムの使用量増加はカーボンニュートラル実現に寄与できるのか？

アルミニウム製造に係る温室効果ガス排出

- アルミニウム新地金製造には膨大な電気エネルギーを消費
- 特に火力発電を電力源として使用するような場合には、大量のGHGを排出
- **アルミニウムの適用範囲拡大や使用量増加が本当にGHG削減に役立ち、カーボンニュートラル実現に寄与できるかは、製品の使用時だけではなく、原料採掘から製品の製造、使用、廃棄までのライフサイクル全体でのGHG排出(LC-GHG)削減効果について正しく把握し、その有効性を判断する必要あり**

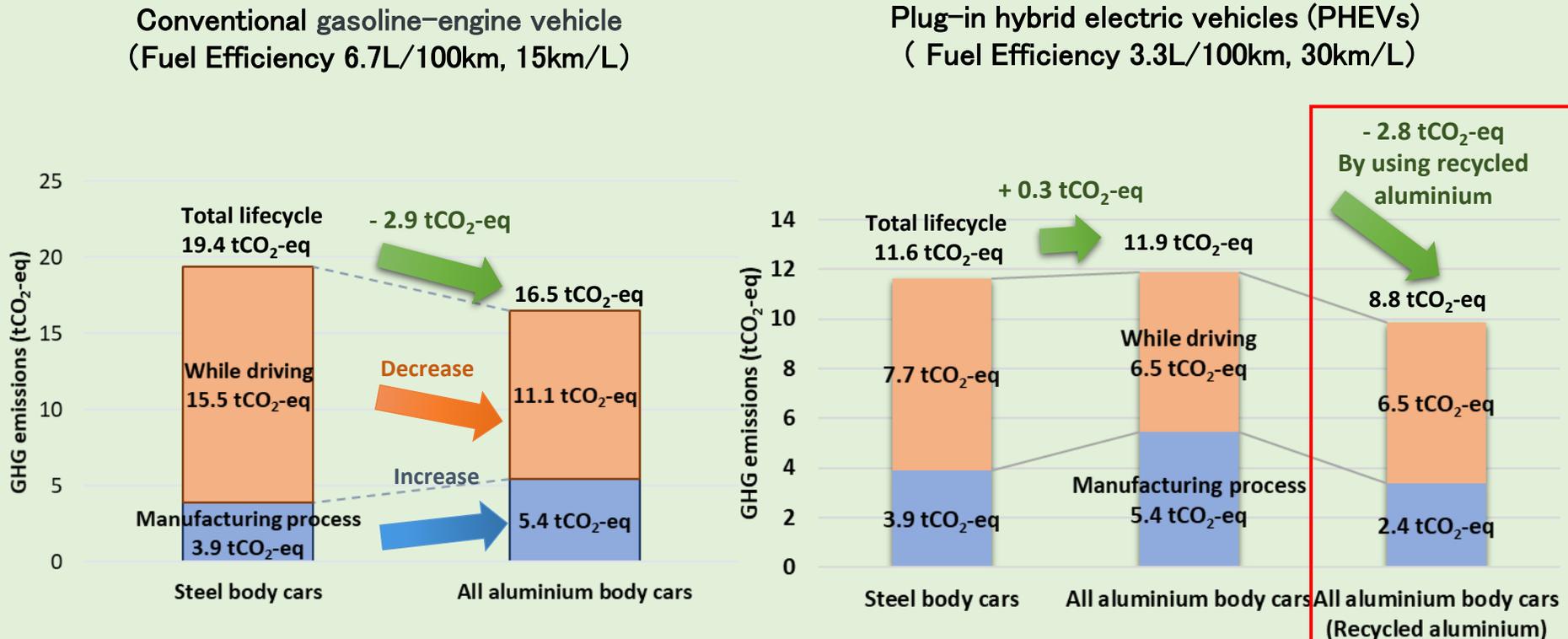


アルミニウム新地金製造に係るGHG排出係数 (kgCO₂-eq/kg)

鋼からアルミニウムへの材料置換がGHG削減に及ぼす効果

再生地金、再生展伸材の必要性に関する検討（自動車軽量化の例）

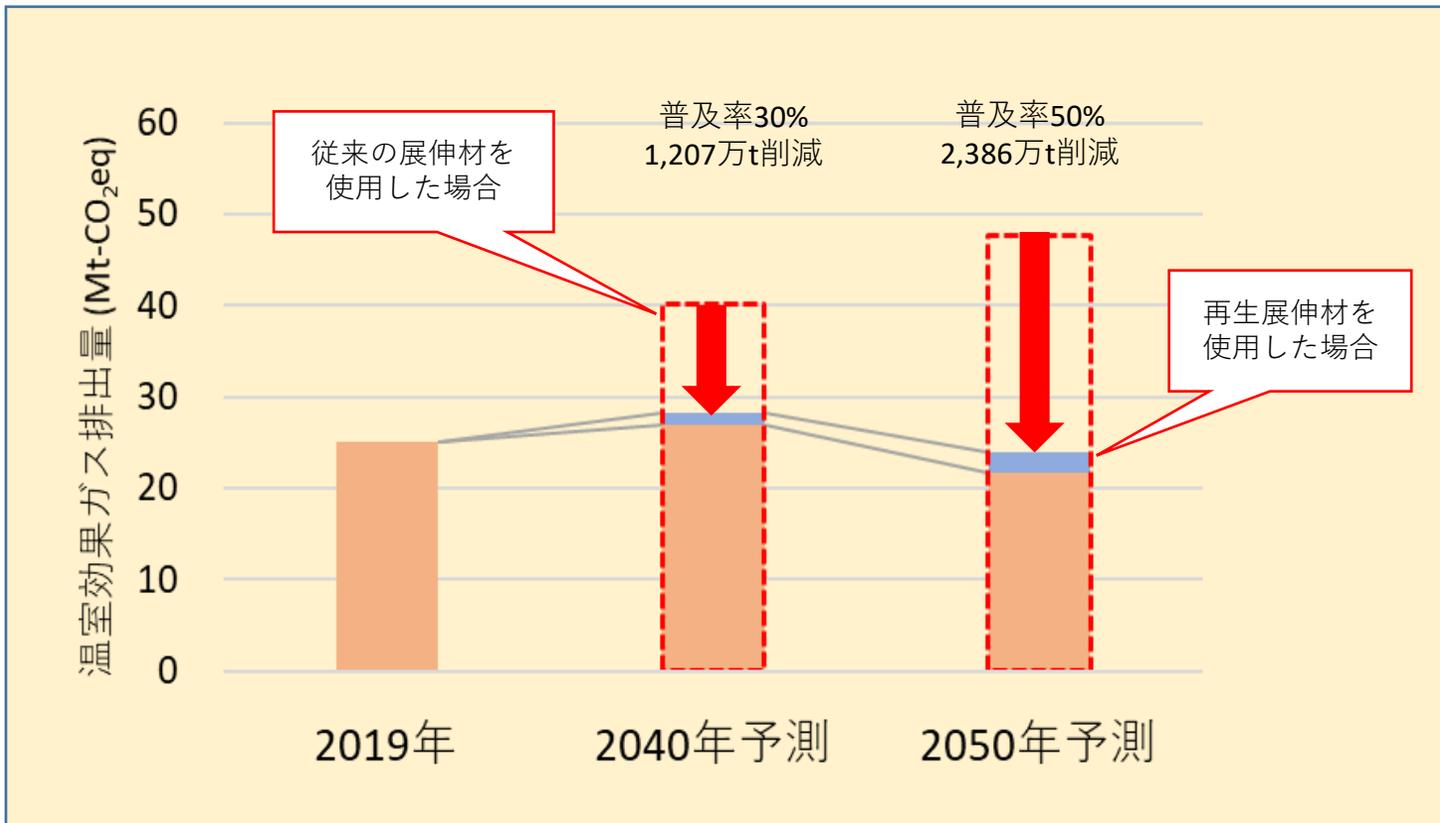
- 鋼に代えてアルミニウムを使用した場合のライフサイクルにおけるGHG排出量(LC-GHG)を「走行時」と「製造時」に分けて比較
- 従来のガソリン車(低燃費): 新地金で製造する展伸材使用量増加のため製造時のGHG排出量が増加するが、走行時のGHG排出量は減少、全体として削減効果が発揮される
- プラグインハイブリッド車(高燃費): **アルミニウム使用量増加によりLC-GHG排出量はかえって増加**



- GHG排出係数が極めて低い「再生地金から製造した展伸材」を使用できれば、製造時のGHG排出量の大幅削減が可能
- **鋼からアルミニウムへの材料置換によってLC-GHGを削減するには、再生展伸材の利用が不可欠**

再生地金を使用することによるGHG削減効果

- 自動車製造分野における要求: 今後さらなる軽量化の要求に応えるため、従来の鋳物・ダイカストに加え、ボディ材向け展伸材の用途が高まると予測
- 日本国内におけるアルミニウム展伸材生産量: 2019年 269万トン、IAI予測に基づけば、2040年 432万トン、2050年 513万トンに増加



- 赤の破線: 展伸材使用量増加によるGHG排出量の増加
- 展伸材製造に使用される新地金の使用量が増加するため、GHG排出量も大きく増加
- 一方、スクラップから製造した再生展伸材が利用可能となり、その普及率を2040年に30%、2050年に50%にすることができると仮定すると、GHGは、2040年で1207万トン、2050年で2386万トン削減可能
- この他、製品使用段階(走行時)の削減効果は2050年で205万トン
- 再生展伸材が実現すれば、2050年におけるGHG排出量を現在のレベルに維持可能
- 再生展伸材の開発はカーボンニュートラル実現に大きく寄与できる

GHG排出量削減に向けた海外での取り組み

○グリーンアルミ、低炭素アルミの開発

(Elysis, Alcoa-Rio Tintoのジョイントベンチャー)

- 従来: カーボン電極を用いて還元、CO₂発生
- 対策: 不活性電極を用いることによりCO₂発生削減
- 再生可能エネルギーと組み合わせカーボンフリーに
- ただし、アルミナ製造時にはGHG発生

○自社製品のリサイクル

(Apple)

- MacBook Airに100%リサイクルアルミニウムを使用
- リサイクル作業ロボットを開発
- 下取りによる使用済み製品回収
→ 自社製品の回収によるクローズドループを構築



○航空機のリサイクル

(PAMELAプロジェクト(エアバス))

(AFRAプログラム(ボーイング))

- 解体技術の高度化により水平リサイクルを目指す



○自動車のリサイクル

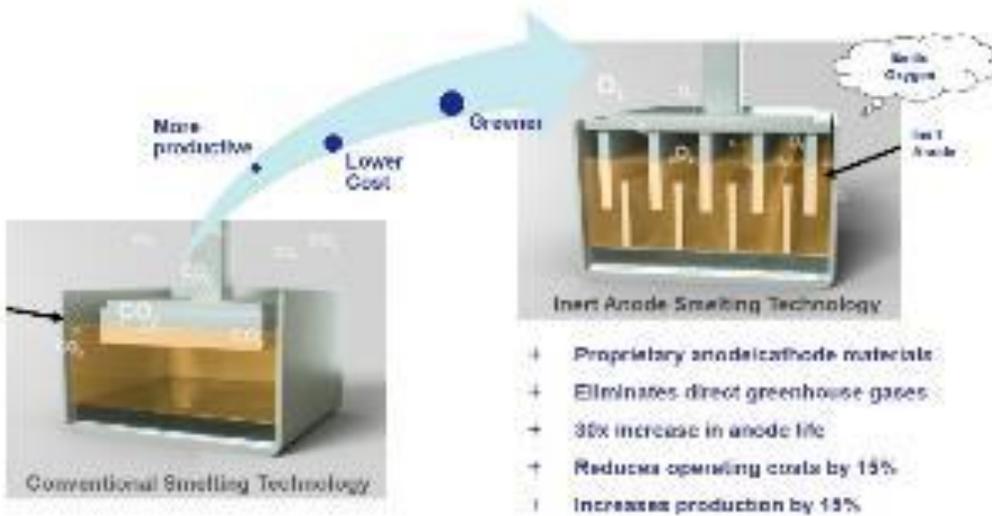
(REALCAR (JAGUAR LANDRVER))

- 一部に市場屑を用いるが、プレス端材と廃車のクローズドリサイクルが基本

□ 自社製品のクローズドリサイクルの確立や徹底したスクラップ選別技術の開発

□ 環境先進企業であることのアピールや限られた範囲での水平リサイクルに留まる

A breakthrough aluminum smelting technology

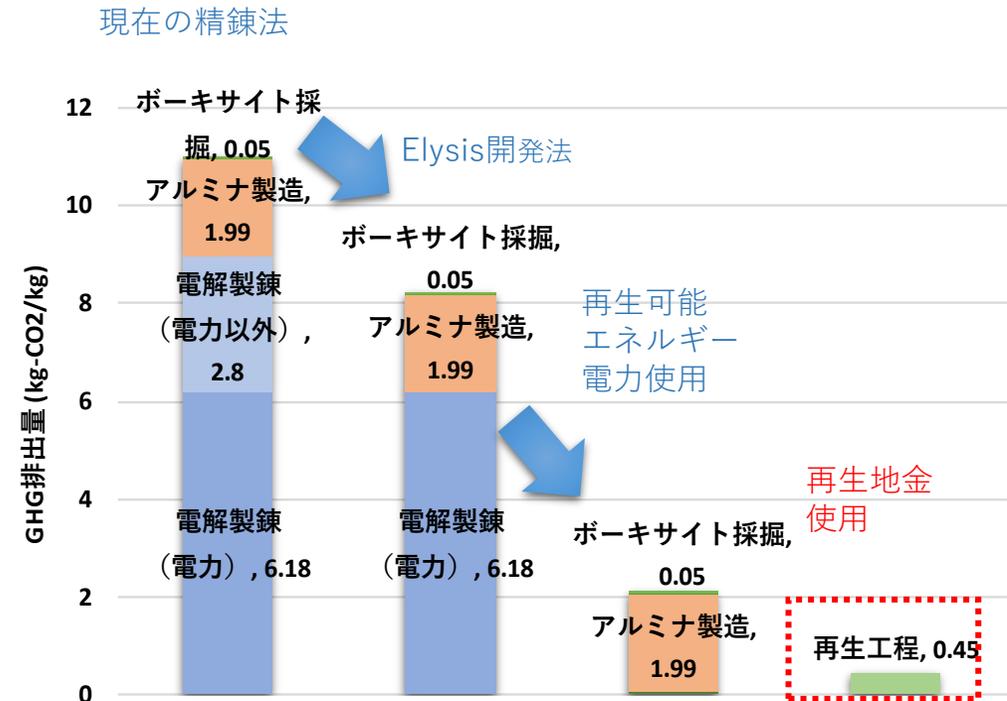


GHG排出量削減に向けた日本独自の取組み

アルミニウムをカーボンニュートラルに寄与できる“真のリサイクルの優等生”にするには、従来のカスケードリサイクルや水平リサイクルに止まらない新規な取組み“アップグレードリサイクル”の実現が必要

アップグレードリサイクルの概念とその意図

- アルミニウムスクラップから再生展伸材を製造できるようにすること
- 従来の展伸材スクラップを元の展伸用合金に戻すという水平リサイクルの高度化といった発想ではなく、展伸材、鋳造材等多種多様な大量のスクラップを原料として、新たなタイプの展伸材向け再生地金を製造し、これを新規加工プロセスによって加工することによって、ある程度不純物が含まれていても従来材と同等な特性を有する再生展伸材を量産可能とし、この低環境負荷展伸材を積極的に各種製品の製造に使用できるようにする
- 世界に先駆けて資源循環システムを構築にすることにより低環境負荷型社会を実現する



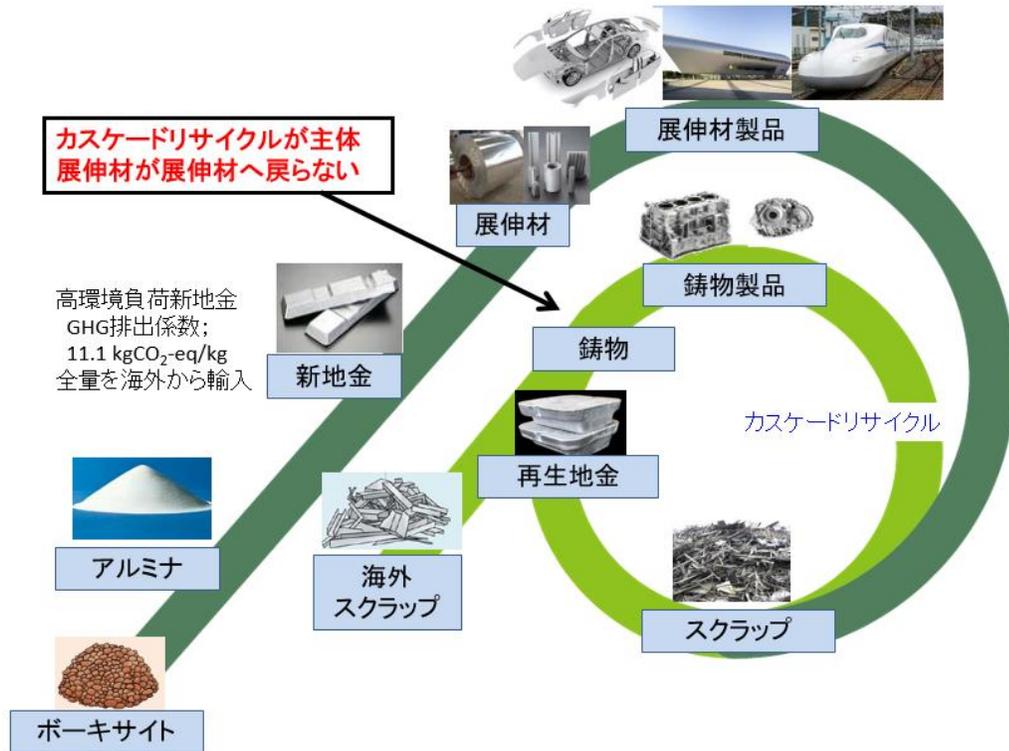
- 国内では製錬を行っていない
→ 国内にある資源を有効に利用する必要あり
- 再生地金を用いる手法はカーボンフリー製錬に比べGHG排出量は1/4と優位

アルミニウムリサイクルの現状と将来像

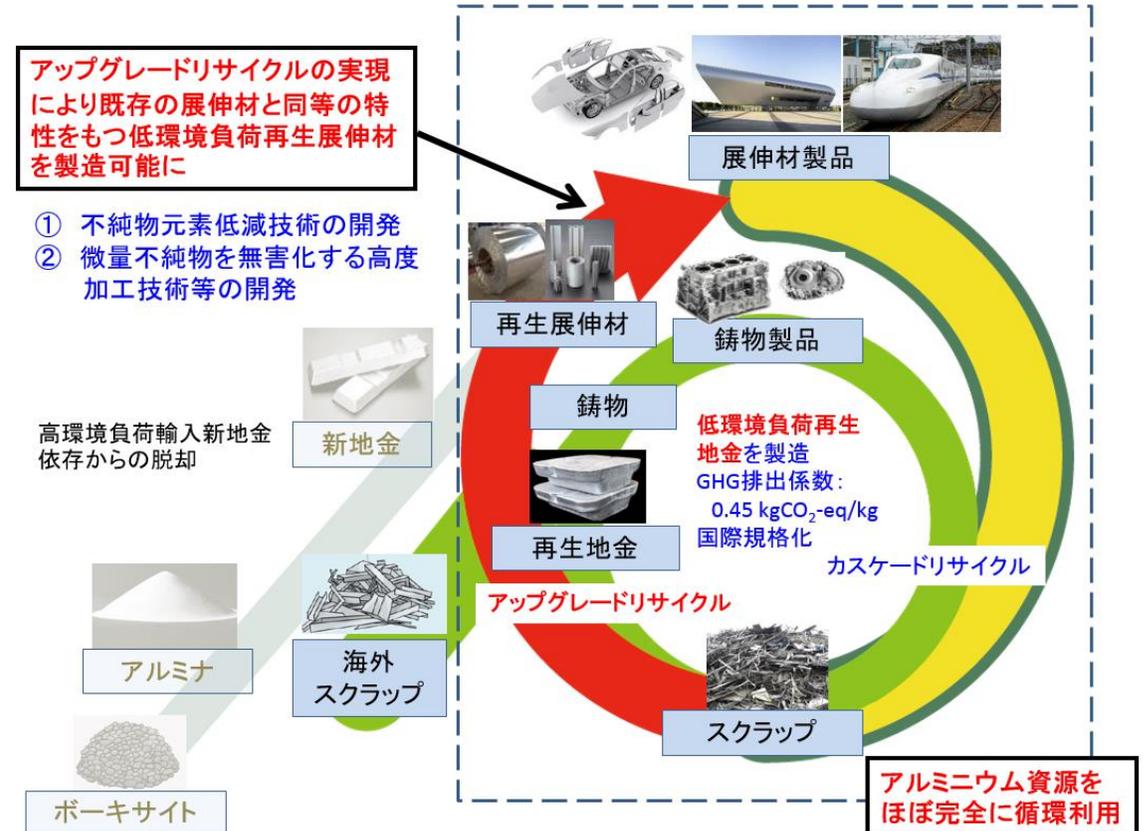
現 状: アルミニウムは循環利用されているが、カスケードリサイクルが主体であり、環境負荷が高い新地金を用いて製造される展伸材は元の展伸材に戻っておらず、リサイクルループは閉じていない

将来像: 多種多様なアルミニウムスクラップから、低環境負荷再生展伸材を製造できるアップグレードリサイクルが実現できれば、アルミニウム資源をほぼ完全に循環利用できる、大規模な、閉じたりサイクルループが構築できる
⇒ 海外からの新地金輸入量の大幅削減、アルミニウムを使用する産業全体の国際競争力の向上に繋がる

現 状



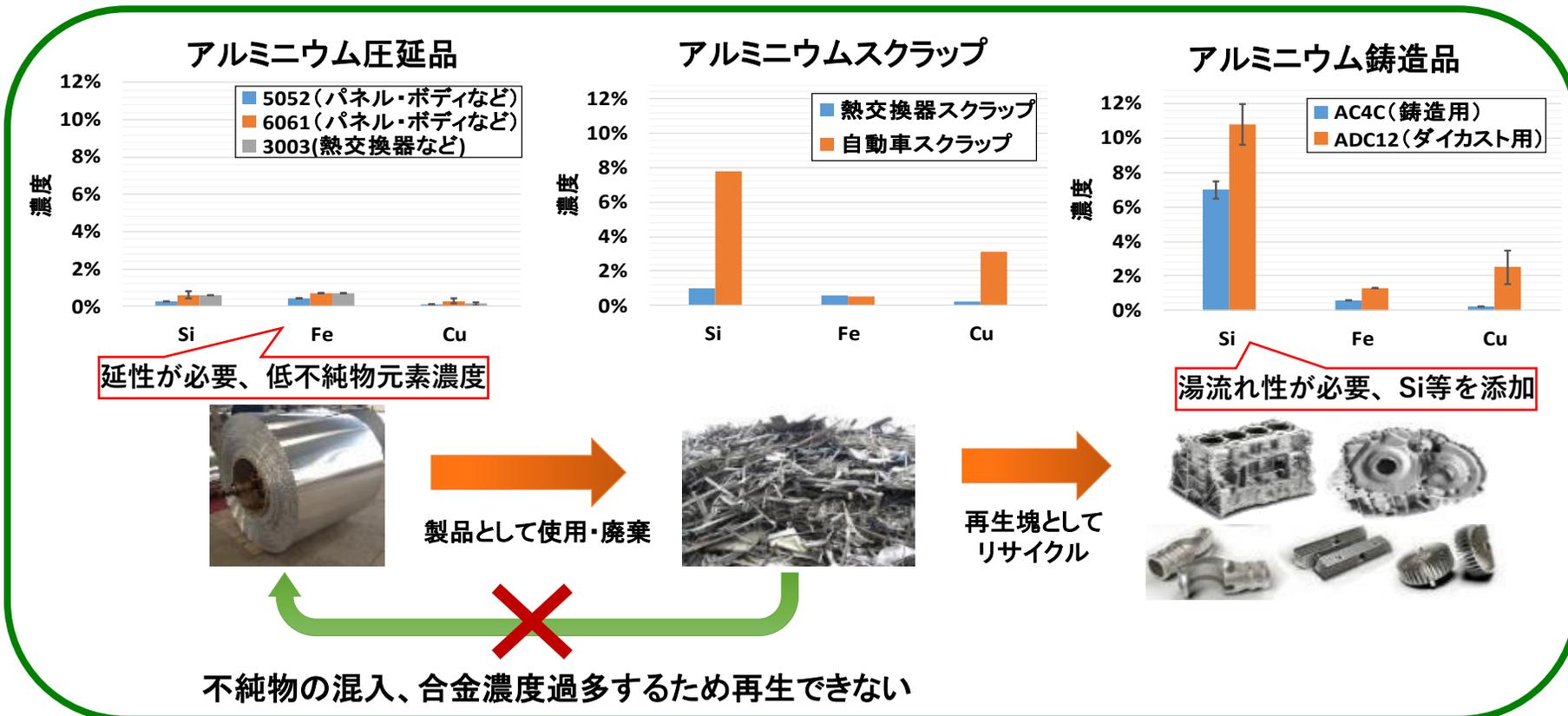
将来像



アップグレードリサイクル実現に必要な新たな取り組み

アップグレードリサイクルの実現には、

- 不純物の混入を前提としたリサイクルシステムの構築
- 不純物の混入量増加を想定した、アルミニウム合金スクラップの不純物許容・不純物無害化技術の開発が必要



- 展伸材用の合金に含まれる合金成分の種類や量は少ない
また、FeやSi等の不純物の含有量を厳しく制限
- アルミニウム合金鋳物・ダイカストは鋳造性確保のためSiを多く含有 Fe量も多い(ダイカスト)
- アルミニウム製品は鉄鋼材料とともに使用 ⇒ スクラップには多くの合金成分やFeが混入
- 素性が明確なごく一部の展伸材スクラップ以外は、スクラップを元の展伸材にリサイクルすることは困難

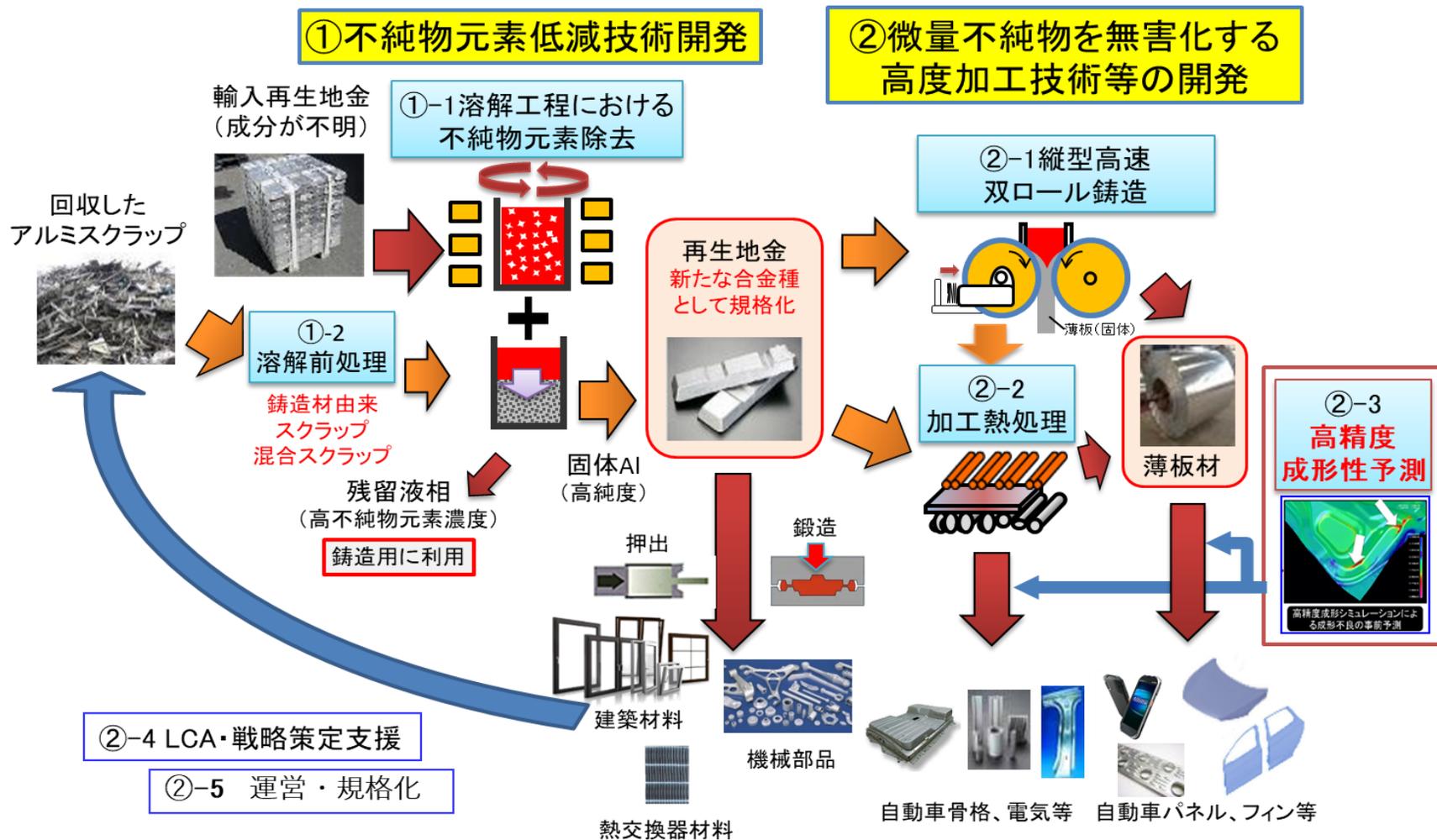
国家プロジェクトへの発展

経済産業省・NEDO アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業に採択(2021年8月開始 JPNP21003)

「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

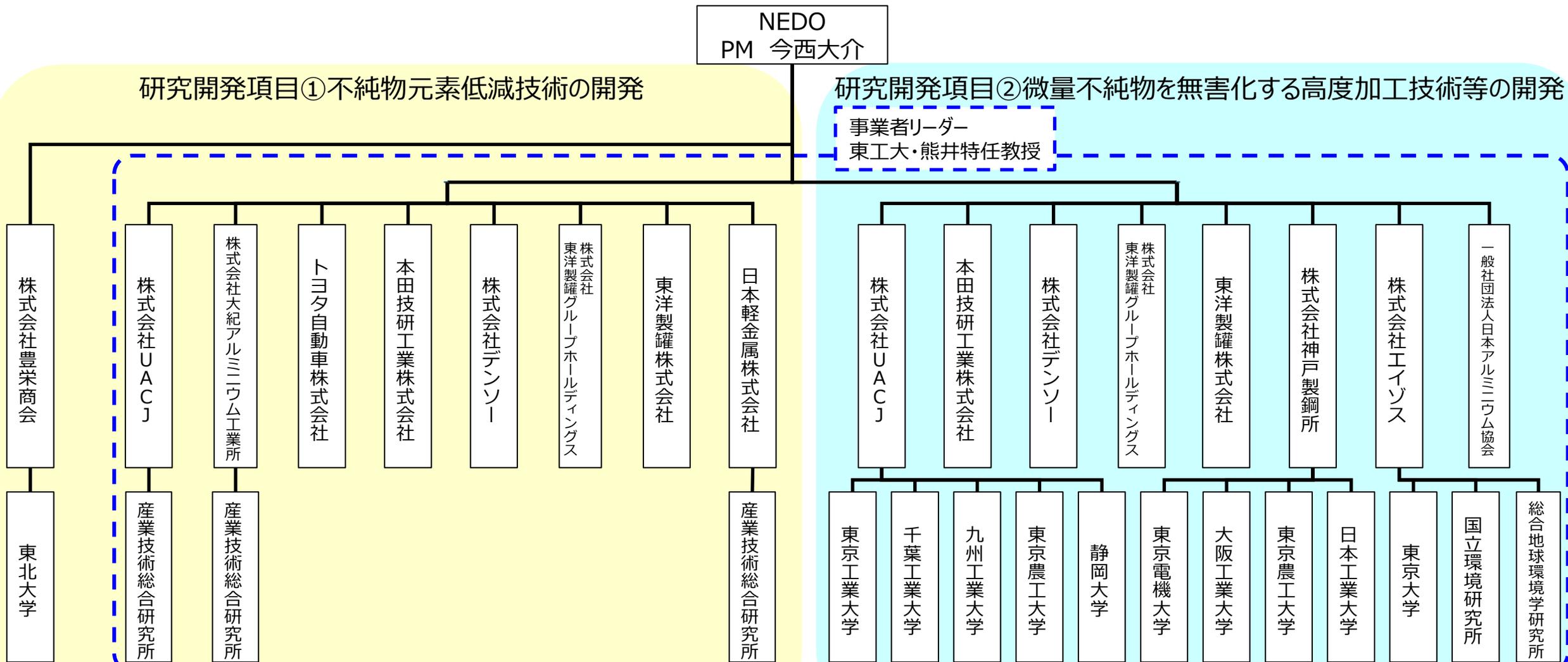
- 鋳造材由来のスクラップを展伸材用途へ再生可能にする
- 現在新地金ベースのアルミニウム合金が使用されている用途の多くで、再生展伸材を使用可能にする
- スクラップ供給の安定と広範な普及を可能にする

- 将来の社会実装・実用化を目指した、基盤技術の大型化に向けた取り組みを実施
- 研究開発の内容は、リサイクル産業、二次合金メーカー、アルミニウム圧延メーカー、各種ユーザー企業等、多くの業界にまたがる
⇒ 業界横断的な取り組みが必要
- 再生展伸材の用途拡大が重要 ⇒ 先導研究の研究項目に、成形性予測、開発技術のLCA評価、国際標準化等の戦略策定支援を追加



国家プロジェクトの研究開発体制

企業、大学、国研等が参画するオールジャパンの研究体制を構築



ユーザー企業も参画した体制で研究開発を実施

研究開発項目と目標

①不純物元素低減技術開発

スクラップから再生展伸材の原料として使用可能な地金を製造できる不純物元素低減技術(溶解技術)を開発

①-1 溶解技術:高度化した分別結晶法(流動付与)により高純度固体を高い収率で回収し、再生展伸材用原料として使用可能な新たな合金(再生地金)を製造

①-2 溶解前処理:選別によりスクラップ組成を制御し、開発する溶解技術に適したスクラップの安定供給を図る

● 鋳物・ダイカストのスクラップを想定したSiを7%以上含むスクラップからSi量が3%以下の再生アルミニウムを、60%以上回収できる技術を確立する

②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

②-1 縦型高速双ロール鋳造:再生地金として想定される微量不純物含有合金を原料として、急冷能に優れた縦型高速双ロール鋳造法により不純物の悪影響を低減し、再生展伸材の出発材となる成形性に富む薄板材を製造する技術を開発

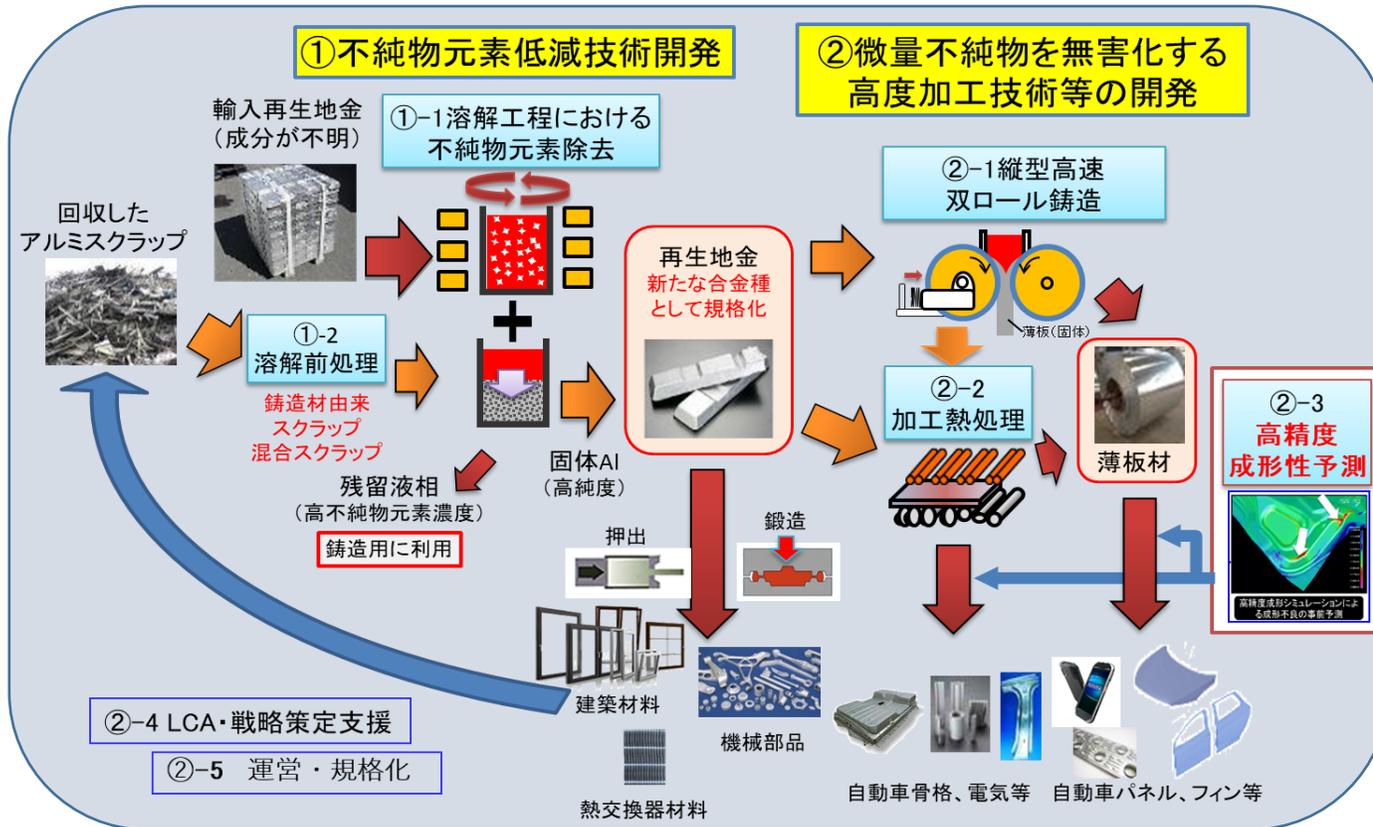
②-2 加工熱処理:再生地金や双ロール鋳造で製造した薄板を巨大ひずみ加工することにより高強度の再生展伸材を製造する技術を開発

②-3 高精度成形性予測:計算科学を活用し、展伸材の機械的特性を予測、成形性向上のための組織制御、加工プロセス条件改善へフィードバックすることによって再生展伸材開発を支援

②-4 LCA・戦略策定支援:各開発技術のLCA解析や作業条件と特性に関するAI解析等によって循環プロセスが有効に機能するための方策を検討し、将来の実用化に向けての戦略策定を支援

②-5 運営・規格化:研究開発推進委員会等の運営、知財関係の情報管理を担当し、再生地金・再生展伸材の国内・国際規格化を推進

● 不純物低減技術を用いて得られる再生地金の組成を模擬したSi 3%、Fe 1%を含むAl-Mg-Si合金で、既存の展伸材と同等の強度と伸びを有する再生展伸材を開発する



おわりに

本講演ではカーボンニュートラル社会の構築に向けて、主要なベースメタルのひとつであるアルミニウムが果たすべき役割とその可能性について述べるとともに、現在推進中のアルミニウム素材高度資源循環システム構築に関する国家プロジェクトの概要について紹介した。

従来のカスケードリサイクル、水平リサイクルに加え、アルミニウムスクラップを再生展伸材として利用できるようにするアップグレードリサイクルが実現できれば、GHG排出量削減に多大な貢献をすることが可能である。また、これは展伸用、鋳造用という垣根を越えたバリアフリー合金の開発や、アルミニウムスクラップという、一種の”人工的な天然資源“を取り扱うリサイクラーや二次合金メーカーの新たな事業展開にも繋がるものと考えられる。

近い将来再生展伸材が自動車のみならず、車両、建材、各種インフラ等で活用されることにより、アルミニウムがそのライフサイクル全体に渡って環境負荷低減に貢献できることを願っている。

謝 辞

本講演を行うにあたり、NEDO先導研究(JPNP14004)ならびに後継国家プロジェクト(JPNP21003)に参画する関係各位との貴重な議論を活用させていただいた。ここに記して謝意を表す。



ご清聴ありがとうございました



Tokyo Tech