

アルミニウムの製錬

松村 浩幸*

1. はじめに

アルミニウムは軽量性、耐食性、熱伝導性などの優れた特性によって、自動車・鉄道車両・建築材料・飲料缶・日用品等様々な用途で幅広く使用されており、我々の生活に欠かすことのできない重要な金属の一つとなっている。図1に示すように2019年の世界アルミニウム新地金生産量はおよそ6200万t/年と2005年と比較しおよそ15年で約2倍へと成長している。

図2に2019年の地域別アルミニウム新地金生産量を示す。特に中国でのアルミニウム生産量は目覚ましく増加し、現在では世界のアルミニウム生産量の約半数を占めるようになっている。世界のアルミニウム新地金生産量約6200万tの

うち中国での生産量は約3600万tである。

かつては日本国内においてもアルミニウム製錬によるアルミニウム新地金の生産が行われ、最盛期には年産約160万t

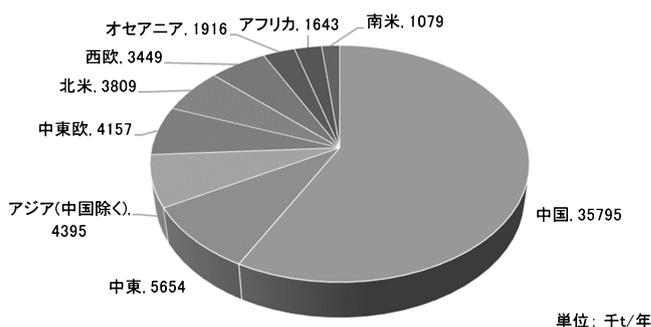


図2 地域別アルミニウム新地金生産量(2019).

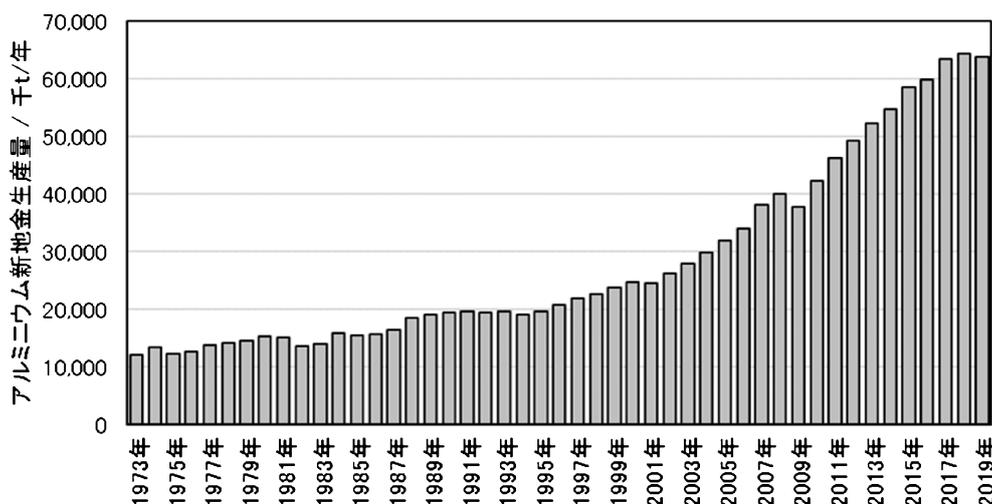


図1 世界アルミニウム新地金生産量推移.

* 日本軽金属株式会社 グループ素材センタービレットビジネスユニット(〒421-3297 静岡県清水区蒲原161)
 Aluminium Smelting Technology; Hiroyuki Matsumura(Group Casting Center, Nippon Light Metal Co, Ltd., Shizuoka)
 Keywords: aluminium, smelting, reduction, Hall-Heroult, pre-bake, sodberg
 2021年3月11日受理[doi:10.2320/materia.60.399]

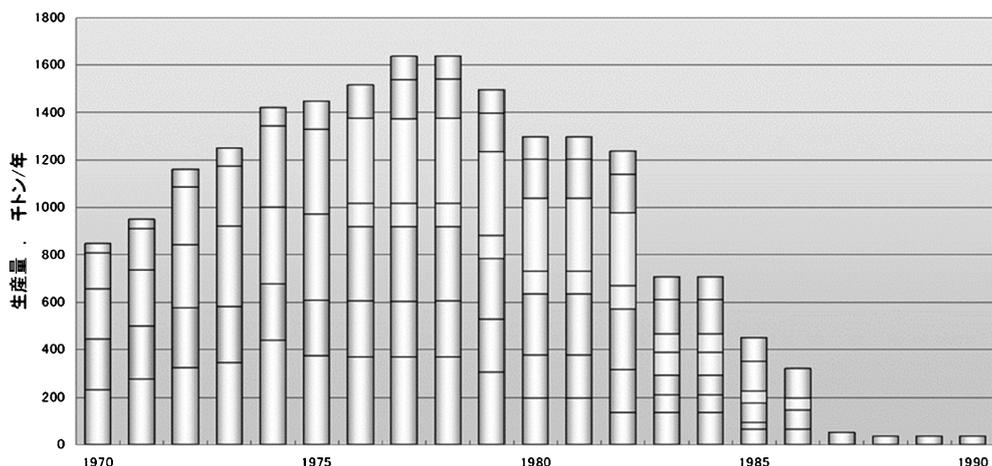


図3 日本国内アルミニウム新地金生産量推移.

の能力を有していた(図3)⁽¹⁾。しかし、1970年代の2度にわたるオイルショックによってエネルギーコストが上昇し、また、アルミニウム市況低迷の影響により国内のアルミニウム製錬事業は国際的な競争力を失い、1987年に日本軽金属1社を残しアルミニウム製錬事業より撤退した。

その日本軽金属も設備老朽化により2014年にアルミニウム製錬事業から撤退したため、日本国内には工業的アルミニウム製錬工場は完全に無くなった。

アルミニウムは1886年に開発されたホール・エルー法により工業的に製造されており、135年を経た現在においても、基本となる製造原理については変わっていない。今後、日本国内でのアルミニウム製錬技術者は数少なくなっていくため、アルミニウム製錬について紹介し技術継承の一助としたい。

2. アルミニウムの歴史

紀元前、古代エジプトにてミョウバン($K_2SO_4 + Al_2(SO_4)_3$)が添加材・医薬品として使用されていた。アルミニウムの語源はこのミョウバンのラテン名である“Almen”，英語の“Alum”に由来し、Alumen, Alumium などを経て、Aluminum(米), Aluminium(欧・日)と呼ばれるようになった。

1782年、フランスの Lavoisier は“ミョウバン石は何らかの金属の酸化物である可能性が高い”との説を発表した。1807年にイギリスの Davy がミョウバン石を電気化学的手法により分離を試み、金属アルミニウムとしての存在を確認したが、単独のアルミニウムを得ることはできなかった。1825年、Oersted は塩化アルミニウムをカリウムアマルガムで還元し、アルミニウム粉末を得た。1855年、フランスの Deville は塩化アルミニウムの化学的還元による工業規模のアルミニウム製錬を開始、1886年にアメリカの Charies Martin Hall とフランスの Paul Heroult によって氷晶石を熔融塩として利用した酸化アルミニウム(アルミナ)の熔融塩電解によるアルミニウム製錬手法が個々に開発された。この手

法は開発者両者の名前を取り、ホール・エルー法と呼ばれ、工業的に発展を遂げた。ちなみに Hall と Heroult は共に同じ1864年に生まれ、1886年に製錬技術を開発、1914年に共に没した。

1887年、オーストリアの Bayer によりボーキサイト鉱石から NaOH 溶液を用いてアルミナ分を溶解・抽出し、水酸化アルミニウムを析出させるバイヤー法が開発された。これにより、ボーキサイト鉱石から金属アルミニウムまでの工業的製造法が確立された。

3. アルミニウム製錬

これまでに試験されたアルミニウムの製錬法には炭素による還元、塩化物の電解など様々な手法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾があるが、生産設備の腐食や複雑な工程により工業的なアルミニウム製錬法としては発展せず、今日においてもホール・エルー法によるアルミニウム製錬が主な金属アルミニウム生産プロセスである。

原料のアルミナはバイヤー法によりボーキサイトから製造される。図4にバイヤー法の簡略化した工程図を示す。

鉱山より運ばれたボーキサイトはボールミル等の粉碎機で粉碎され、ダイジェスターにおいて加温・加圧の上、苛性ソーダを用い、アルミナ分を溶解・抽出される。ボーキサイト残渣(赤泥)をシックナーにて分離した後、アルミナ分を抽出したアルミン酸ソーダ液に、種結晶として水酸化アルミニウムを添加して水酸化アルミニウムの結晶を析出させる。次いで水酸化アルミニウムを分離、洗浄しロータリーキルンにて焼成することでアルミナとなる。これらのバイヤー工程にてボーキサイト中の Fe_2O_3 、 TiO_2 など不純物のほとんどが除去され、アルミナの純度が決定し、後の金属アルミニウム純度に大きく影響する。

ボーキサイト 4t からアルミナは約 2t、アルミニウムは約 1t 製造される。アルミナは融点が $2054^{\circ}C$ と非常に高く、固体では電気を通さない絶縁体である。そこで、氷晶石(Na_3AlF_6)が主成分である約 $1000^{\circ}C$ の熔融塩電解浴に溶解さ

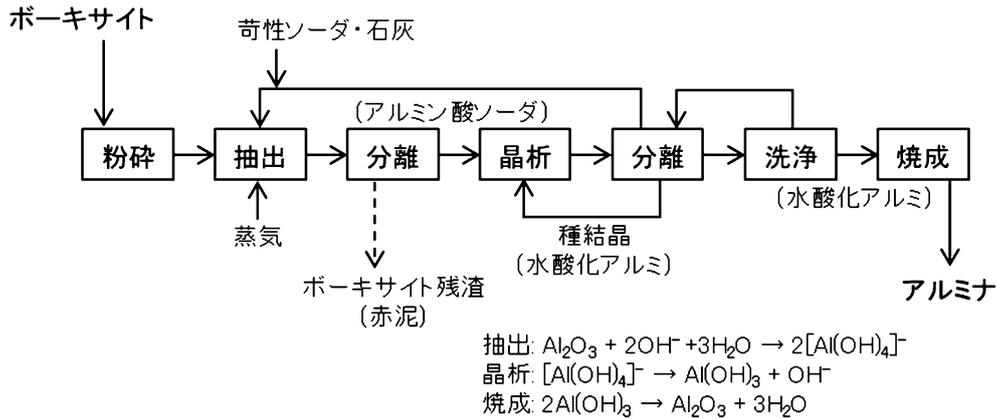


図4 バイヤー法工程図.

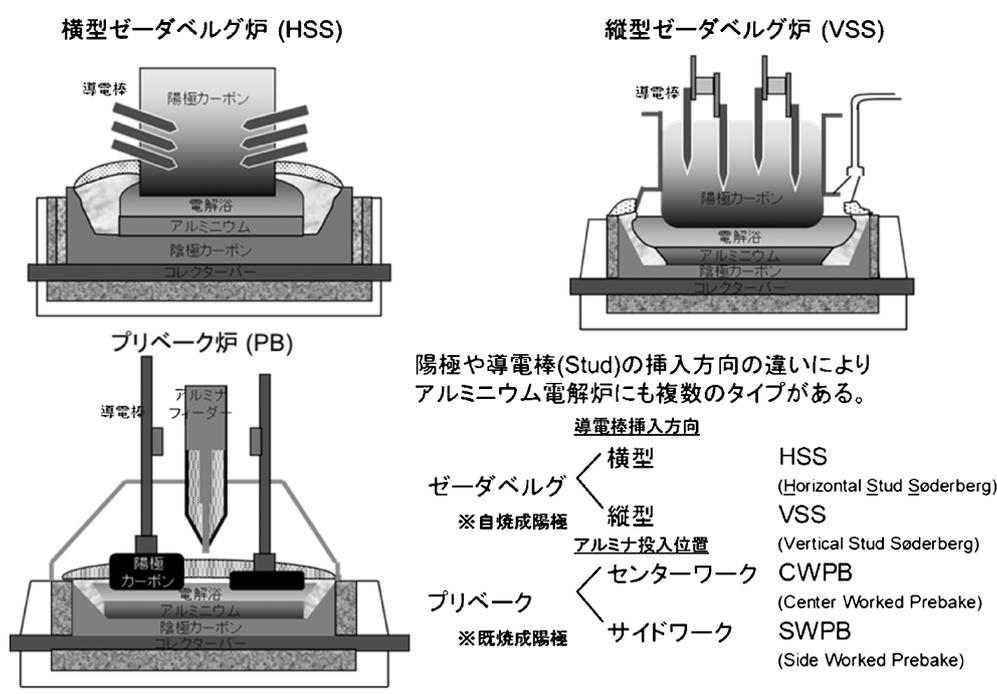
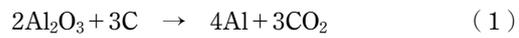


図5 アルミニウム電解炉模式図.

せ、電気を通じることで電気分解反応式(1)が起こり、アルミニウムが生成する。



アルミナの電気分解には1tのアルミニウム生成あたり12,000 kWh から15,000 kWh という大量の電力が必要であり、アルミニウムが「電気の缶詰」と称される所以である。

図5にアルミニウム電解炉の種類別模式図を示す。電解炉は、上部から陽極カーボン・電解浴・生成したアルミニウム・陰極カーボン・コレクターバーで構成される。陽極カーボンの種類により、自焼成タイプのゼーダベルグ炉と既焼成タイプのプリベーク炉に大別され、ゼーダベルグ炉は導電棒の挿入方向により、横型ゼーダベルグ炉と縦型ゼーダベルグ炉に分けられる。ゼーダベルグ炉では陽極カーボンは電解炉自身の熱で焼成され、陽極カーボンが下面より消耗して

いくと、炉上部より陽極ペーストを投入する。陽極ペーストはピッチとコークスを混練し、握りこぶし大に成形され、製造される。一方、プリベーク炉の陽極カーボンは予め別工場にて成型し高温下で焼成することで製造され、陽極カーボンが消耗すると、導電棒と共に部分的に交換される。

図6に電解炉タイプ別のアルミニウム生産割合を示す。近年ではアルミニウム生産性が高く大電流化に有利なプリベーク炉の割合が増加し、主流となっている。プリベーク炉では電解炉を密閉しやすく、陽極由来の有機揮発物質の発生が無いなど環境面においても優位である。

図7にアルミニウム電解炉の模式図を示す。電流は陽極カーボンに水平に挿入されている導電棒、陽極カーボン、電解浴、アルミニウム、陰極カーボン、コレクターバーの順に流れ、隣に配置された電解炉へと流れていく。

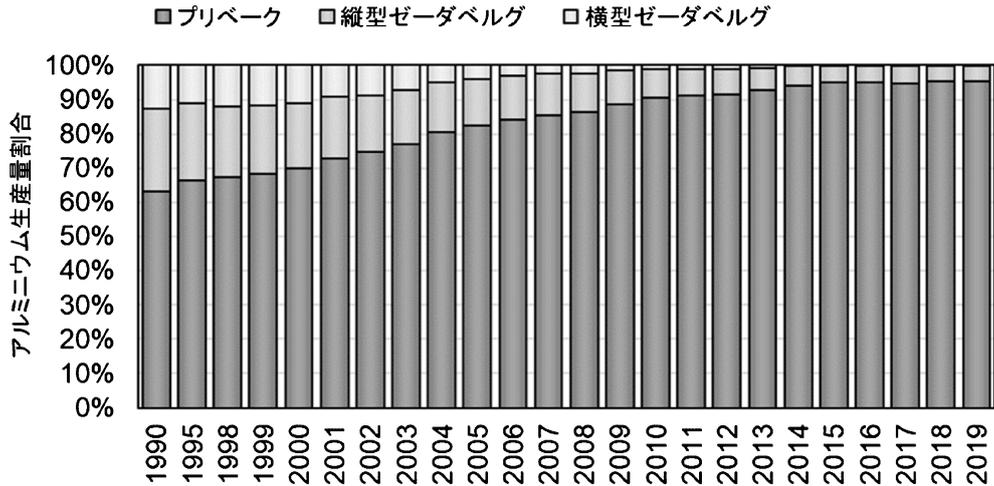


図6 電解炉タイプ別アルミニウム生産量割合.

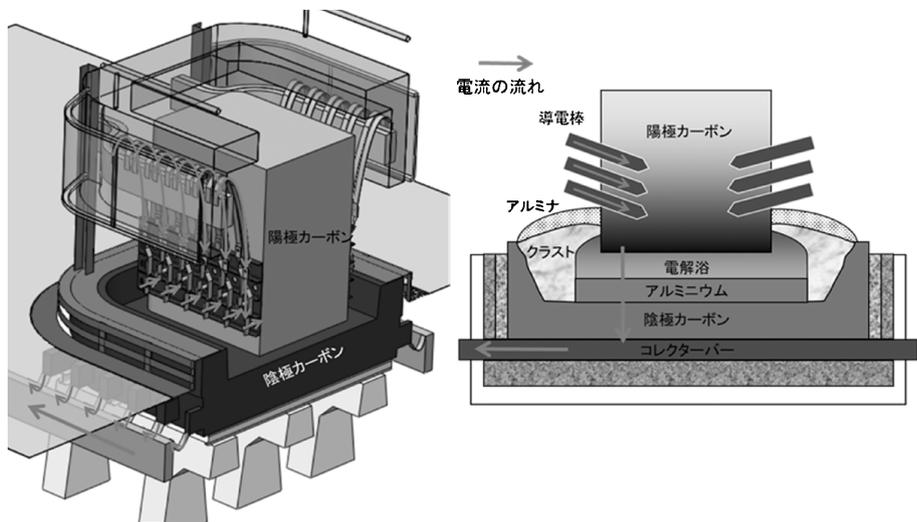


図7 アルミニウム電解炉(日本軽金属浦原)模式図.

図8に電解炉にかかる電圧を示す.

陽極カーボン下面からアルミニウム溶湯上面までの距離は極間距離と呼ばれ、約4cmである。電解炉にかかる電圧は1炉あたり約4.5Vであり電気分解反応に必要な理論分解電圧は1.2Vである。理論分解電圧は人為的に削減することはできないため、その他の電気抵抗に起因する電圧ロスをいかに小さくするかという改善・努力がなされてきた。電解炉の熱源は電解浴での電気抵抗に起因するジュール熱である。極間距離を狭くすると、発熱量が減少するためクラストと呼ばれる電解浴が冷え固まったセルフライニングが厚くなり、極間距離を広げると、発熱量が増加し熱バランスが崩れ、最悪の場合、操業不能となる。したがって、電解炉の電圧は極間距離を一定に保つように制御されている。

アルミニウム生産量を増加させるため、電流量を増加すると電流による強い電磁場が発生し、電解炉内のアルミニウム溶湯および電解浴に強く影響する。電磁力により、アルミニウム溶湯の隆起・流動が発生し、結果として極間距離を一定

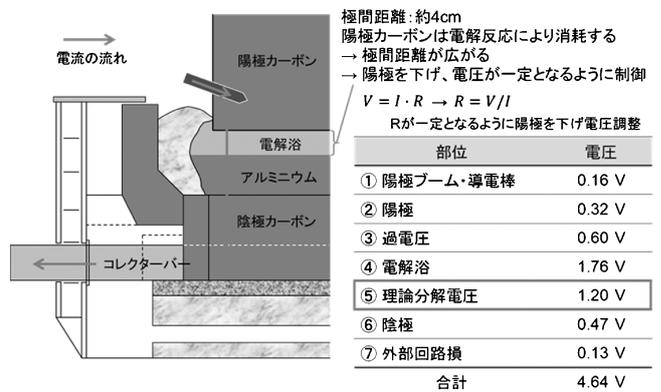


図8 電解炉電圧.

に保つことが困難となるため、操業不能となる場合がある。磁場の強さや分布は、電流量、陰極ブームの配列、陽極ブームへの立ち上がり位置、隣接する電解炉の影響など多数の

