記念講演

アルミニウム溶融塩電解の発展と将来*

高橋 正雄**

Centennial aluminum electrowinning and the future

Masao TAKAHASHI**

1. はじめに

アルミニウムは全世界では年間2千万トンも消費されるようになり、その伸びは年率で、先進国の2%, 発展途上国での5~10%, 平均で2~3%を示し、鉄鋼に次ぎ、これを補完する21世紀の金属である。この膨大な消費に応える供給は、再生地金の比重が大きくなつてはきたが、年間1,500万トンもの新地金の生産によつてい

る。アルミニウム新地金はすべて、酸化アルミニウムを原料とする電解採取法によつて生産されている。1986年は軽金属時代の基となつた、このアルミナの電解法が発明されてから100年目を迎える記念すべき年である。1886年、アメリカでは2月23日に22才のC. M. Hallが溶融氷晶石にアルミナを溶かして電解、初めてアルミナからの金属アルミニウムの電解採取に成功、7月9日特許の出願をした。また、大西洋を隔ててフランスでは、8カ月ちがいで23歳となつていたP. L. T. Héroultが氷晶石を電解浴とするアルミナの溶融塩電解に成功、4月23日に特許を出願したといわれている。以来、アルミニウムはすべてこの方法で工業生産され、ここに100年目を迎え、次の100年へと踏み出したこととなる。その間、1886年のわずか16トンの生産は現在その百万倍となり、これを生産する電解炉の大きさは電解電流容量で40倍、炉底面積で400倍に増大したが、この100年間、プロセスの本質は変わらず、正極の炭素が初期は焼成電極で始まり、これが大型化に応じて自焼成式となり、再び合理化された焼成電極に戻つただけで、100年前の発明になる方法が忠実に守られ大規模、大工業に成長しただけである。

科学技術が驚異的な進歩をとげたこの100年間にわたつて、アルミニウム製錬関係者は100年前に発明されたプロセスを遵守して今日を迎えたのは、進取の積極性に欠け研究心が乏しいためではない。若い両偉人が独立に同時に発明したこのホール・エルー法電解プロセスは、

300億トン以上の埋蔵が確認され、これだけでも今後300年の消費が賄えるボーキサイトを資源とするアルミニウムの製造法としてきわめて合理的で完全であるために100年にわたる数々の新製錬法の挑戦に耐え防衛をまつとうし100年目を迎えてしまつたといえよう。

アルミニウム資源はそのクラーク数が示すように、地殻中に酸素、ケイ素に次いで豊富であり、酸素・ケイ素と結びついて存在するが、アルミナ分はアルカリに可溶性な形態でしかも、ケイ酸分はアルカリに難溶性な形態であるボーキサイトとよばれる鉱石の確定鉱量は314億トン、別に1072億トンの推定鉱量があるとされ、アルミニウム新地金を毎年2千万トン生産しても確定鉱量だけで300年、推定鉱量まで考えればさらに千年以上を賄うことができる。

従つて、過去の100年間と同様に次の100年間さらに末ながく、異常な事態のもとでもなければ、アルミニウムはすべてボーキサイトからつくられるであろう。高アルミナの石炭の灰などをアルミニウム資源としようとする意図はボーキサイトの枯渇を憂うためでなく廃棄物の処理やさまざまな政策的な目的から出たものである。

ボーキサイトは鉄、ケイ素、チタンなどの酸化物を含む酸化アルミニウムの水和物である。これから高純度のアルミナを抽出するベストな方法は、ホール・エルー法の発明で、アルミニウムを電解採取するための原料としてアルミニウム酸化物の地位が確立されたその2年後に生まれたバイヤー法である。バイヤー法はボーキサイトからアルミナ分を高純度で抽出するための工程液に水酸化ナトリウム溶液を用い、これを濃厚、高温にすることによりアルミナ分だけを溶解、他に不溶解残渣として分離、温度を下げ希釈して高純度の酸化アルミニウムを析出させ、分離、脱水、焼成して氷晶石浴での電解に適したアルミナとするものである。このようにバイヤー法は目的とするアルミナ分抽出の溶媒としてアルカリ溶液を用い、加熱、冷却と濃縮、希釈および分離だけの原理的

* 第71回秋期大会におけるアルミニウム製錬ホール・エルー法発明100周年記念特別講演（原稿受理：昭和61年9月29日）

** 横浜国立大学工学部（横浜市）。Yokohama National University Faculty of Engineering (Yokohama).

には化学反応らしい工程を一切利用しない物理操作だけで高純度のアルミナが得られるので、エネルギー的にも資源的にも装置的にもあらゆる点で、これより優れたプロセスは考えられない。ただ、アルミナ分はアルカリに溶け、ケイ酸分は溶けない形態のボーキサイトを原料とすることがこの高能率のバイヤー法成立の条件であるから、このようなボーキサイトの鉱量を考えることは必要である。

このようにして、鉄鉱石と同様に豊富なボーキサイトを原料とし、その中に存在していた状態のままのアルミナから金属アルミニウムを電解採取するホール・エルー法、その原料アルミナをボーキサイトから抽出するバイヤー法の組合せである「ボーキサイト—バイヤー—H・H法」によつて、鉄鋼を補完する第2位の金属、非鉄金属の中でその4割を占め、21世紀の軽金属時代をになうアルミニウムの地位が確立された。

アルミニウムの原料となるその酸化物のアルミナは、アルミニウム化合物の中で有効エネルギー（エクセルギー）が最も小さいもので、それゆえに地殻の中にボーキサイトとして安定に存在している。このアルミナを基準の零とした金属アルミニウムの有効エネルギーは1モル当りで188.39 kcal, アルミニウム1トンでは8,116 kWhとなる。従つて、ボーキサイトからのアルミナへの段階では水和物を無水物にはするがエネルギー的には変化はなく、ただ分離、精製を行つただけで、これを金属アルミニウムにする段階でその有効エネルギーに相当するエネルギーを外から注入する必要がある。

2. 酸化アルミニウムの還元反応とホール・エルー電解法

バイヤー法によりボーキサイトから得られるアルミナは不純物としての鉄、ケイ素およびチタンの酸化物を合計でわずかに0.05%含むだけの極めて品位の高いものであり、このアルミナの酸素を除けば99.9%純度のアルミニウム金属が得られるはずで、精製工程はすべてバイヤー法においてすまされている。電解工程ではかえつてこれに不純物が入るおそれがある。

酸化アルミニウムから酸素を除く反応は

で示されるアルミナの分解反応と炭素のような還元剤を用いる

で示されるアルミナの還元反応のどちらかとなる。(1)、(2)の量論式でアルミニウム金属を製造するにはアルミニウム重量の1.8895倍のアルミナを、(2)の炭素還元では0.33387倍の還元剤炭素を必要とする。

一般の化学反応では、目的の方向に反応を進行させる

には、その方向への反応の親和力が正になるよう温度や圧力をととのえる必要がある。アルミナの分解(1)は常温、常圧下での分解方向の親和力は-378 kcal も負で進行せず、炭素を還元剤とするアルミナの還元反応(2)でもその親和力は-273 kcal も負で進行しない。両反応ともに生成系に O_2 と CO_2 の気体があり、気体のエントロピーは大きく、分解・還元反応方向のエントロピー変化は大きく正となる。この場合は反応系の温度を上げれば負であつた親和力は次第に負の値が小さくなり、ついには零となり正となる。アルミナの分解反応が常圧で進行する温度は、常温の測熱値だけで略算して5000°Cもの高温となる。炭素還元が進行する温度は分解よりは低いが、2000°Cを超える。このように、アルミニウム金属をアルミナの熱分解あるいは、アルミナの炭素熱還元で製造することは実施が困難である。この点、鉄の場合はアルミナとおなじ Fe_2O_3 を原料として、その熱分解は実施の困難な2500°Cであるが、炭素熱還元は数百度で進行する。鉄の場合は鉄鉱石をそのまま炭素熱還元し、鉄の金属を得るとともに融解したスラグを用いて必要な精製を行うため、溶鉄の状態が必要で、還元に必要な温度以上にする。アルミナの炭素還元は精製の必要はなく、分離のために熔融状態にするとしても、その温度は低いのに反応の進行に必要な温度が高いという不都合がある。

以上のようにアルミナの熱分解はいうまでもなく、炭素熱還元でさえ、鉄のように行うことはできない。従つてホール・エルー法発明以前のアルミニウムは常温でも還元反応の親和力が大きく正となる金属ナトリウム還元で製造された。アルミナの分解や炭素還元のような吸熱反応を、その反応方向の親和力が正となるような温度にして、外部から熱を供給しこれを吸熱させて、反応を進行させる熱化学反応はすべて原理上親和力が正でなければ進行させることはできない。

親和力が負であつても反応を進行させることができるユニークな方法として、親和力の不足である化学エネルギーを電気エネルギーによつて補い、これを外部から反応系に注入して反応を進行させる方法がある。このプロセスはエネルギー形態の変換としてみれば、電気と化学の両エネルギー形態の間での変換で「電気化学エネルギー変換」とよばれるものである。

アルミナの分解(1)、アルミナの炭素還元(2)によるアルミニウムの製造は電気エネルギーが利用できればエネルギー論的には常温で行うことも可能となる。生成するアルミニウムの分離や採取の便を考えアルミニウムが融体である932K(659°C)で行うとすれば、アルミナの分解で金属アルミニウムを得るには、アルミニウム1トン当り、親和力不足を補うための電気エネルギーが7,121

kWh 必要で、他に反応の進行に伴う吸熱が932 Kの熱として1,522 kWh だけ必要となる。炭素が保有している化学エネルギーを利用するアルミナの炭素還元を932 Kで進行させるには親和力の不足を補う電気エネルギーは、4,062 kWh で炭素を還元剤とすることで7,121–4,064 = 3,057 kWh だけ切下げられる。反応の進行に伴う吸熱は932 Kの熱として1,533 kWh となる。炭素還元剤のエネルギー論的役割は、アルミニウム1トンの製造に炭素を0.33387 トンを必要として、これが保有する化学エネルギーが3,057 kWh の電気エネルギーへ変換され有効利用される。

化学（熱化学）反応では反応を進行させるための親和力は反応系の温度、圧力や濃度の調節で制御できるだけであるが、電気と化学のエネルギー変換ができる電気化学反応では全く自由自在に親和力を制御することができる。しかし、化学反応の自由と可能性を限りなく広げることができる電気化学反応系は、その機能の中心である電気と化学のエネルギー交換を行わせる仕掛が特殊なものに限られる。熱化学反応器（リアクター）ではエネルギーの出入は熱エネルギーだけであるから、単純で簡単な熱交換器を備えるだけである。しかし、電気化学リアクターには反応熱のための熱交換器だけでなく、その機能の中心となる電気と化学の両エネルギーの交換器が必要であり、これが特殊である。

電気化学エネルギー変換は、電子伝導性の材質とイオン伝導性の材質との接合部での電子の移行（電流の通過）によつてなされ、これ以外の仕掛、プロセスでは行うことはできない。電子伝導性材質は「電極」とよばれ、イオン伝導性材質は「電解質」とよばれ、それらの界面がエネルギー変換の場である。外部の電気系の電子が電極に入り、電解質との界面に存在する化学種に付加する。この電子の流れは電解質中では正と負の電荷をもつたイオンの泳動へと電極界面で非連続的にかわり、他方の電極界面に至つて、そこに存在する化学種から電子を奪つて電極中を外部へ出て一巡する。従つて、電気と化学のエネルギー交換はいつぼうの電極界面で電子が付加する「還元反応」、他の電極界面では電子が奪われる「酸化反応」が必ず起こる酸化・還元反応をとおして行われるものである。

アルミナから金属アルミニウムの製造はアルミナの分解であるが、これはアルミナの中のアルミニウムイオン (Al^{3+}) がその金属 (Al^0) へ還元される反応と、アルミナの中の酸化物イオン (O^{2-}) が酸素 (O_2) へと酸化される反応の組合せで、これらが別々の電極界面で起こることとなる。アルミナの炭素還元によるアルミニウム金属の生成も、アルミナ中の Al^{3+} の金属への還元と、炭素 (C^0) の C^{4+} への酸化（これはアルミナ中の O^{2-} に

より CO_2 ガスとなる）が別々の電極で起こることとなる。

このようにして、反応(1)、(2)はその親和力が負で自発的に進行し得ない温度でも、電気エネルギーの力で進行させることができる。しかし、それには電極/電解質/電極という特殊なリアクターを必要とする。このような仕掛による電気と化学のエネルギー変換を初めて科学的に観察し記録したのはホール・エルー法電解が発明された1886年の丁度100年前の1786年10月、L. Galvani によつてである。この現象は A. Volta による有益な認識により「電池」という静電気しか使えなかつた当時に量として使える電気エネルギーを供給する新しい発電器を世に送り出すこととなつた。電池が産み出す電気エネルギーは化学エネルギーが変換されたもので、電池の中で自発的に進行する酸化・還元反応の正の親和力が大きい程、生み出される電気エネルギーの出力電圧は大きくなる。電池により化学エネルギーを電気エネルギーへ変換利用することの当時としての最も新しく重要な特徴は電池の出力電圧を直列に接続すれば高い電圧が思いのままに得られることである。

アルミニウムやアルカリ金属のようにその有効エネルギーが極めて大きい金属は、天然に安定に存在するそれらの化合物を分解あるいは炭素などで還元して金属を生成させる反応の親和力は通常に実施できる反応温度では負の大きな値である。この不足を電気エネルギーで補い進行させる「電気分解」を行うには、その負の大きい親和力に相当する電圧の印加を必要とする。ここに、普通の化学（熱化学）反応で製造した物質の化学エネルギーを電池で電気エネルギーとし、普通の電圧出力しかなくても、これを直列に接続して必要とする高電圧を得ることの画期的な意義がある。いわば、化学エネルギーの量を多く使つて質の高い化学エネルギーとしたこととなる。このようにして、金属元素単離の歴史年譜には電池の出現で有効エネルギーの大きい金属が一举に世に出たことが明らかである。発電機の発明で機械エネルギーから電気エネルギーが自由に大量に生み出されるようになり、熱化学反応の困難を電気化学反応の応用で回避することの有用、優位性が確立された。

金属アルミニウムを電解で製造することは1854年に塩化物を原料として行われており、これはホール・エルー法発明の32年も前である。ホール・エルー法発明の意義は「アルミナからの電解採取」にあり、これに到達するのに32年を必要としたこととなる。

電気分解はふたつの電極界面での酸化・還元反応であり、二次元的な表面反応である。従つて、原料のアルミナと製品のアルミニウムはともに電極の表面へ供給、採取されることとなるので、その物質移行をも能率的に行

う必要があり、原料のアルミナは液体状態で電極と接する必要がある。アルミニウム金属の融点は932 K で適当な温度であるが、アルミナの融点は2315 K で実施不能である。融点の低い塩化物電解が先に行われた理由はここにある。アルミナの融点が不都合に高いとすれば、これを溶媒に溶かし溶液とすることが考えられ、アルミニウムの融点以上で安定で蒸気圧も低い液体はイオン性融体に限られる。

Hall はカレッジに入学した16歳の秋から金属アルミニウムの限らない夢に魅せられ目的意識をもった勉学にいそしみつつアルミニウムの電解採取を次々と試みたが成功には至らない。熔融塩電解へと進んだのは卒業後であり、古びたピアノをひいて楽しんでいた時に熔融塩を溶媒とするという重要な着想が頭をよぎったといわれており1885年もおわりに近いころと思われる。これからの研究の進展は速く、フッ化物さらに水晶石へとしばられ、翌1886年2月10日には熔融水晶石がアルミナを溶かすことを実験的に確認、16日には最初の電解実験を試みている。外熱式の粘土でライニングした電解槽を使つたため成功に至らず、直ちにその原因をみぬき、粘土ライニングの内側に小さい黒鉛ルツボを挿入して行い、ついに23日に銀色に輝く金属アルミニウムを得た。このようにして、1886年2月23日がアルミナからの金属アルミニウムの電解採取に初めて成功した日として記録されている。

Hall の優れた先見は、当時のナトリウム還元法に都合のよいアルミニウム塩化物を原料としていては電解法が成立したとしても製造コストの画期的な切下げとそれに伴うアルミニウム金属の大量需要の拡大は全く望めないとし、電解原料はアルミナに限られるとの信念で進んだ点にある。これに反してHérault はアルミナを溶かし得る電解浴をさがして水晶石に到達したのではなく、塩化物より安定で取扱いの上で都合のよいアルミニウム化合物の電解浴としてフッ化物を検討し、なかでも融点が低く安定な水晶石にいたり、熔融水晶石を電解してアルミニウムを採取しようとした。これが困難と知ると、水晶石浴に塩化アルミニウムを溶かして電解しようとする。今日、塩化アルミニウムからのアルミニウムの電解採取は、アルミニウムが融体となる高温電解で行われ、電解浴はアルカリ塩化物である。このプロセスの特徴は塩化アルミニウムが水分により分解せぬよう制御することで、電解浴中のアルミニウム酸化物やオキソ塩化物の溶解度は極めて小さいため、わずかでも不溶解物となり順調な電解採取に重大な支障となる。従つてこれら酸化物の含有量を極めて低く制御する必要がある。水晶石浴では塩化アルミニウムの加水分解生成物がよく溶け、この点では好都合であることを知り、さらに進んで加水分

解生成物のアルミニウム酸化物そのものも熔融水晶石浴をつかえば電解原料とすることもできると考えるにいたつた。このエルー法電解プロセスは1886年4月23日に特許出願されており、Hall の実験成功が記録された丁度2カ月後である。Hérault の実験はいつ行われたかは明らかでない。Hall の特許出願は7月9日とされているので、これはHérault におくれること約2カ月となる。このようにしてホール・エルー法が発明された。

このようにして、塩化物にかわり酸化物のアルミナを金属アルミニウム製造の原料とすることができるようになったが、Hall の信念であつた、クラーク数が示すとおり豊富なボーキサイト中のアルミニウムをその形態のまま原料とすることができれば、鉱石からの単なる抽出だけであり、これ以上に合理的なプロセスはあり得ないという考えに基づき、このアルミナの抽出、精製を最も能率よく行いHall の原理的な信念を実証したのはホール・エルー法の発明の2年後、1888年に初めてドイツ特許にあらわれたK. J. Bayer の発明であり、ここにボーキサイトーバイヤー—H・H 法が誕生したことになる。

アルミナの熱分解はいうまでもなく、炭素による還元でアルミニウムを生成させる反応を自発的に進行させるために必要な温度は実施が不能あるいは困難な高温である。この困難を回避するには自発的に反応を進行させる方針を捨てることで、反応の親和力が負で大きく不足する温度、圧力のもとでも、化学エネルギーの不足を外部から電気エネルギーを注入して反応を進行させる電気分解法の採用である。この方針をとれば高温反応の必要は一切なくなり常温でもアルミニウムを製造することができる。反応温度の選択は、金属を熔融状態で生成させ採取を合理的にするとして932 K となるが、原料アルミナを溶かした熔融水晶石を熔融状態に保つため、例えば1,250 K となる。

以上のような数々の背景のもとに発明されたホール・エルー法アルミナの電解を1,250 K、アルミナが水晶石浴に飽和している電解浴について、理論エネルギーの面から考察してみよう。

(1) アルミナの分解による金属アルミニウムの電解採取は正極での酸化反応を酸素発生とするもので、Hall は実験室的な成功を工業化するにあつてその初期にこのプロセスを試みて失敗に終つた。この場合には、溶存アルミナの酸化物イオンは存在するが、高温フッ化物の水晶石浴中で酸化反応を行い酸素を発生できて消耗することのない正極となる電極材料が必要であり、Hall は銅の酸化物を電極として結果は不成功に終つている。今日まで、この非消耗寸法安定アノード材料の商業的に使えるものは完成していない。1,250 K でアルミナを分解する反応の親和力の不足分は電解の理論エネルギーであ

り、アルミニウム1トン当りで6,583 kWhとなる。また電気量としては、アルミニウム1モル当り3ファラデーであるから、1トン当りの電気量(理論電解電気量原単位)は2,980 kWhとなる。上述の理論電解エネルギー6,583 kWh/t = $2.209 \text{ V} \times 2,980 \text{ kWh/t}$ となり、電解エネルギーを構成する電圧因子を理論分解電圧とよび、親和力が不足している反応をその方向へ駆動するのに必要な電圧で、親和力が不足している反応ほど大きくなる。電解の所要エネルギーは反応量(生産量)に応ずる電気量kAhと反応の親和力できまる分解電圧Vとの積である。アルミナを分解するには2.209 Vの電圧をもつ2,980 kWhの電気量を必要とし、これとは別にアルミナの分解反応の進行にともなう反応熱として、1,250 Kの熱エネルギーを2,112 kWhだけ必要とし、合計でアルミニウムの生産に必要な理論エネルギーとして、電気6,583 kWh/t (内 訳 $2.209 \text{ V} \times 2,080 \text{ kWh}$) + 熱(1,250 K) 2,112 kWhとなり、電気と熱という質的に異なり加算することができないものを合計してしまえば8,694 kWh/tとなり、これを2,980 kWh/tの電気量のもとでの電圧とすれば2.917 Vとなる。これを反応熱までも電気で供給するとした内熱式電解槽の理論分解電圧ならぬ理論稼動電圧とよぶことにする。このアルミナの分解は、もし融点の自由な溶媒溶融塩がこの世にあつて、アルミニウムの融点で電解するとすれば、これは先に示した電解エネルギー7,121 kWh/t (内 訳 $2.390 \text{ V} \times 2,980 \text{ kWh/t}$) + 熱(932 K) 1,522 kWh/tであり、合計8,643 kWh/t = $2.900 \text{ V} \times 2,980 \text{ kWh/t}$ で理論電解エネルギーはかえつて増し、反応吸熱量は減少する。

Hallの発明の基となつた電解実験は正極には炭素を用いて行われアルミニウムの生成にともなう炭素の酸化消耗を認めた。その不都合を避けようとして不完全な非消耗電極を採用したが失敗に終ると直ちに消耗性炭素電極に戻り着々と工業化を進めた。ここにアルミナの分解は遠のきアルミナの炭素電解還元法が確立され、この100年が経過し次の100年間も前半あるいはかなりの間はこのままであろう。

(2) アルミナの炭素電解還元法の理論所要エネルギーは1,250 Kにおいて、理論電解エネルギー3,523 kWh/t = $1.182 \text{ V} \times 2,980 \text{ kWh/t}$ 、反応の吸熱は1,250 Kの熱として2,120 kWh/t、形式的な合計は5,643 kWh/t = $1.893 \text{ V} \times 2,980 \text{ kWh/t}$ となる。アルミナ分解における炭素が保有する化学エネルギーの役割をみれば、(1)にくらべ理論分解電圧を2.209 Vから1.182 Vへと1,027 V切下げ、理論稼動電圧では2.917 Vを1.893 Vへと1.024 V切下げている。これはアルミニウム1トン当り0.334トンの炭素の消費とひきかえである。

3. ホール・エルー法電解の発展

塩化物のナトリウム還元で製造されたアルミニウムはコストが高く、有名な H. Y. Castner が塩化アルミニウムとナトリウムの両原料を製造するプロセスに画期的な技術改良を加えて合理化しても、年間1~2トンの生産が数倍になつただけで、1886年の生産は16トンであつた。これがホール・エルー法の発明と実施で、1896年には1,800トン、20年後の1906年には14,500トンに発展、100年後の今日の1500万トンとなり、鉄鋼に次ぎ、非鉄金属の4割以上を占める未来成長型金属材料として重要視されるまでになつた。

Hallの最初の工業化試験は当時の需要を考へて銅—アルミニウム合金をアルミナから電解採取することから始まつた。そのためか、非消耗性の酸化銅アノードを用い、外熱式の250 Aで電流効率は20%、数日間の操業ができただけで失敗に終つた。直ちに消耗性炭素アノードに戻つたが、やはり外熱式の1800 Aに大型化し、電解槽電圧は現在とおなじ4 Vで操業することができたが、7日間しか続かず、電流効率はわずか16%で、エネルギー原単位は74 kWh/kgであつたという。槽電圧を8 Vにすれば外熱の必要がなく浴温が維持できることを知り、1889年1月、1800 Aの電解を8 Vで行い、78%の電流効率、30 kWh/kgのエネルギー消費でアルミニウムをアルミナから電解採取することができた。ここにホール法が確立され、発明以来3年目である。

Héraultは発明の初期から水冷の炭素ライニングを行つた天然黒鉛ルツボを電解槽とし、高電圧、従つて高電流密度の電解を行つて内熱式で浴温を維持した。1本の炭素アノードで4000 Aを流し、アノードの電流密度は6 A/cm²を超え、これは現在の10倍にもなる。しかし、この内熱方式はHallの外熱式の4 Vの倍の8~10 Vの電圧を必要としたものの電流効率は75%と外熱式の5倍にも向上した。Héraultは1890年には鉄製のポットを炭素ライニングして電解槽とし、内熱、空冷で37.5 kWh/kgのエネルギー消費で電解に成功した。エルー法は丸型のポットに1極の形式で始まり、これが現在でもアルミニウムの電解炉をポットとよぶ起源となつている。Hallは長方形の電解槽で多極式であつたがHéraultは丸型の単極式で始めた。しかしその優を認めて多極式とし、アノード電流密度もそれに伴い、6.2 A/cm²から1.6 A/cm²へ下げることができ、槽電圧も10 Vから5 Vへ切下げることができた。1892年には4000 Aで、5 V、75%、19.8 kWh/kgのエネルギー消費でアルミニウムが製造されるまでになつた。

ここに両法は原理はいうまでもなく、電解槽もおなじとなり、ホール・エルー法とよばれることとなる。カソ

ードは熔融アルミニウム、アノードは電解反応の進行に伴つて量論的に酸化消耗する炭素、電解浴は熔融氷晶石に原料アルミナを溶かし、内熱方式とし、電解槽の内側側壁は電解浴の凍結塩でライニングする方式に到達して電解のために流した電気量の80%以上にも相当するアルミニウムを採取することのできる電解法となつた。しかし電圧は5V以上を必要とし、先に述べたアルミナの炭素電解還元反応の理論分解電圧の1.18Vの5倍、便宜上、電圧効率という表現を使えば20%で電流効率の80%以上にくらべ著しく劣り向上の余裕が大きく残されている。内熱式リアクターであるから反応吸熱も電解電力で供給するとしての理論稼動電圧の1.89Vにくらべても40%に達しない。これらの無効電圧と無効電気量による電気エネルギーはすべて電解炉内で発熱、熱エネルギーとなり、炉壁から外部への熱損失をとらなつて電解浴温度を維持する。電解炉が小型であれば炉内容積にくらべ表面積が大きく電解電流当りの熱損失が大きく、これを補うために必要以上の電圧がかかるようアノードとカソードの電極間隔を拡大し、この間の浴抵抗を大きくして対応する。初期の小型炉での電解槽電圧が高いのはこのためである。このエネルギー損失を切下げる方策は電解炉の大型化であり、その変遷は次のようである。

年 代 (アノード)	電流 (kA)	電圧 (V)	電流効率 (%)	電力原 (kWh/t)
1889 (焼成)	4	9.4	70	40,000
1893 (")	5	6.7	77	26,000
1914 (")	20	6.5	74	26,000
1934 (")	50	5.6	80	21,000
1950 (自焼)	30	5.5	87	19,000
1952 (")	100	4.8	90	16,000
1956 (")	150	4.3	88	14,500
1982 (焼成)	150	3.9	92	12,600
1983 (")	270	4.2	90	13,900
1986 (")	280	4.16	95	13,050

(焼成)は焼成電極式、(自焼)は連続自焼成式

1914年代の20 kA, 6.5 V で電解している電解炉の入力は $6.5 \text{ V} \times 20 \text{ kA} = 130 \text{ kW}$ であり、アルミニウム生成反応に必要な出力は $1.9 \text{ V} \times 20 \text{ kA} \times 0.74 = 28 \text{ kW}$ と近似すれば、放熱は102 kW となつている。1952年代の100 kA, 4.8 V で電解している電解炉は入力480 kW のうち250 kW は反応に使われ、230 kW が放熱ということになり、電流が5倍になるよう炉底を5倍以上に大型化しても炉壁からの放熱は2.3倍にとどまることを示している。さらに1982年代の150 kA の電流を3.9 V の電圧で流すことのできる電解炉は電流密度を下げていたので炉底は100 kA の1.5倍となつているのに、全入力585 kW のう

ち放熱は276 kW と1.2倍に過ぎない。このように内容積当りの表面積の関係から電解炉は大型化で無効な放熱量を切下げ、無用な所要電圧を切下げられるようになった。

大型炉の設計と築炉、操炉には数々の回避せねばならない難点があるが、これらは科学技術の進展に支援されて解決され280 kA もの大型炉が出現した。しかし、このような大型炉でも生産能力は1日当り $280 \text{ kA} \times 24 \text{ h} \times 0.9 / 2980 \text{ kAh/t} = 2.03 \text{ t}$ であり、これは反応が電極界面で起こる平面リアクターの宿命と最適生産速度が低く 0.05 t/日 m^2 であるためである。製鉄の大型高炉の生産速度は 2.5 t/日 m^3 であり、内容積が4000 m^3 の高炉は1日に1万トンの鉄を生産することを思い鉄のように三次元リアクターでアルミニウムが製造できないかと誰もが思いをめぐらすところである。しかし、おなじような酸化物でありながらその炭素還元は鉄が数百度で進行するのにアルミナは2千度以上でやつと進行し、さまざまな副反応を伴う実施困難な反応である。

現在まで、さらに将来にわたつてもアルミニウムを商業的に生産する唯一の方法であるホール・エルー電解法に戻ると、電解炉に供給された電流は、その90%が目的のアルミニウムの生産に使われ変換効率は満足できるが、その電流を流すのに必要な駆動力である所要電圧は電解に必要な1.18 V と反応熱の発生のための0.71 V を加えた1.89 V であるが、その2倍以上の4 V 近い電圧を必要とし、電圧効率としては40%に過ぎず、大きな向上余裕が残されている。既に述べたように、アルミニウムの生成に必要なこの1.89 V 以外に炉壁からの放熱のための電圧が必要で、小型炉の時代はこの部分が大きく、電解炉は所要エネルギー（出力）支配で、電極間隔を必要以上に拡大して電圧がかかるようにして入力を増大して熱収支をとつた。従つて電圧効率は低くエネルギー消費は大きく、大部分の貴重な電気エネルギーは放熱となつて消えた。数々の困難を解決して炉を大型化するにつれ、この放熱部分は電解電流当りで減少し、この電圧は次第に切下げられた。今度は、所定の電解電流を流すのにどこまで電圧が下げられるかという入力支配となる。いま、 0.7 A/cm^2 の電流密度で炭素アノードの酸化反応とカソードでのアルミニウムの生成反応が進行するとして、それに必要な電圧は理論分解電圧の1.18 V に両極の過電圧が加わり、約1.7 V とする。この他に電極間隔4 cm の電解浴中を電解電流が流れる電圧降下がどうしても必要となり、浴の抵抗率を $0.5 \Omega \text{cm}$ として4 cm で $2 \Omega \text{cm}^2$ 、この間を 0.7 A/cm^2 の電流が流れるとして、1.4 V の電圧降下となる。この他に導体、電極の抵抗による電圧降下が合計0.8 V にもおよび、電解炉電圧は $1.7 \text{ V} + 1.4 \text{ V} + 0.8 \text{ V} = 3.9 \text{ V}$ となる。反応熱をも含め

て必要な電解エネルギーは1.9 Vであり、2 Vの部分は放熱を賄うこととなる。電解電流を流す技術上の制約から3.9 Vを必要とするので、この入力に見合う放熱の2 V分が設計電解温度での放熱となれば入力と出力とが釣合う。150 kA 炉以下ではより大きい放熱を必要とし、3.9 Vでも電解できるのに、それを生み出すためにより大きい電圧をかけるため電極間隔を広げた。150 kA 位でこの両者は丁度釣合うが、さらに炉の大型化その他の改良で、内熱方式の必要悪ともいうべきこの放熱が切下げられたとすれば今度は入力である電解電圧をそれだけ切下げることができる、いや切下げなくてはならなくなる。両極界面の電圧の1.7 Vはどうにもならないので、浴抵抗の切下げとなり、水晶石のナトリウムカチオンの一部を導電性のよいリチウムイオンにかえるか、電極間隔を縮めるかである。

しかし、炉底の炭素の上にカソードとなる溶融アルミニウムをおきその上に電解浴、はげしく炭素が酸化消耗して二酸化炭素ガスが発生しているアノードが位置する電解炉にあつて、電解浴より溶融アルミニウムがわずかに0.2だけ比重が大きいだけに大きな電解電流による強い磁場におかれるためアルミニウムは表面が隆起したりはげしい流動をするので、アルミニウムカソードの表面から炭素アノード下面までの距離が4 cm以内になると電解生成したアルミニウムが再酸化される速度が大きくなり、4 cmで85~90%であつた電流効率が、極間短縮で急に低下することとなる。ここに電流効率を低下させずに入力電圧を下げられる限度がある。

以上、消耗性炭素アノードと炉底炭素上に30 cmもの厚さにためられたアルミニウムカソードというホール・エルー法電解炉のエネルギー消費面での技術的境界は電流効率では95%を達成、ただし電圧は4.1 V、極間を縮めて電圧を3.9 Vにすれば電流効率は少し低下して92%となり、電解エネルギー原単位として1万2千kWh台が限界である。これ以上の改良は、カソードやアノード材料の機能特性を合目的に変更して初めて可能となり、ホール・エルー法のブレイクスルーはここにある。

4. ホール・エルー法電解プロセスのブレイクスルー

アルミニウム電解炉のような電気化学リアクターの技術目標は、大きい生産速度での優れたエネルギー変換効率ということになる。これは電解電流密度を上げてても電流効率は下がらず、電解槽電圧の増大が小さいことで、電流密度の上昇で増大する電圧降下の原因となるリアクターの抵抗分である電圧勾配を切下げることである。

電流密度の上昇は電解槽電圧の増大となり、電解製品の製造コスト中の電力費を増大させ、この増大は電流密

度に比例している。しかし、電流密度の上昇は生産速度の増大となり、製造コスト中の固定費を切下げ、固定費は電流密度に反比例する。操業電流密度はこのように製造コストの中に、それに正比例する電力費と反比例する固定費とに影響を与えるので、電力単価、建設費、償却方式、金利によつてきまる最経済的な電流密度がきまる。電気化学リアクターはこの電流密度で操業するのが最経済的であり、ここでの製造コストを支配する技術的因子は、両極の過電圧とあらゆる抵抗からなる電圧勾配の切下げ、建設費の切下げである。電気化学リアクターを構成する機能材料はアノードとカソードの両電極材料、電解質材料、両極での生成物の隔離のための隔膜材料の4材料である。これらはその時代での最も目的にかなつたものが選ばれ採用され、これを基に電気工学的、化学工学的、熱工学的な最適設計がなされ建設される。

ホール・エルー法電解炉100年の発展・進歩もこのとおりであり、100年前から現在まで商業的な実用材料としてベストな材料、アノードには消耗性炭素、炉底カソードも炭素、電解質は原料アルミナを溶かした溶融水晶石、電解電流のジュール発熱を利用する内熱方式のもとにその時代における工学の粋を集めた設計、建設がなされ今日に至つた。各因子をひとつだけ独立に摘出すれば、電流容量としては280 kAの日産2 t、電流効率は95%まで到達、電解炉電圧は3.8 V、エネルギー消費はアルミニウム1トン当りの直接電解電力として12,000 kWh台にまで切下げられて、この方式の限界に到達してしまつた。

この技術的な壁の打破は、より優れた各機能材料の開発とその採用によつて初めて実現できる。アルミニウム電解炉はエネルギー入力と出力が釣合つた状態で稼動する。生産速度がきまる電流がきまつている場合のエネルギー入力は電圧で左右され、両過電圧と電圧勾配に抗する電圧降下で左右される。炭素アノードの0.4 Vの過電圧を切下げようとし炭素の反応性を上げれば、熱力学的に優先する一酸化炭素となる酸化消耗が優先し、わずかな過電圧の切下げと引きかえにアノード炭素原単位を悪化させる。アルミニウムが析出する過電圧は極めて小さく問題にはならない。電解電流を電極界面へ供給して反応を起こさせるまでの電解炉への電解電流の供給と排出のための電圧降下は全く無用なもので切下げられはしたが0.8 Vにもなる。しかし、最も大きいのは両極間隔の4 cmの浴中を電解電流が流れるための1.4 Vもの電圧降下である。既に述べたように、極間4 cmは生成アルミニウムの再酸化による電流効率の低下を防ぐために必要である。電極、導体の電圧降下切下げは固定費増大との兼ねあいで最適化されるとして、残るは浴抵抗の切下げ、電流効率の低下を伴ふ極間距離の短縮である。

ホウ化チタン (TiB_2) のような電導性のよい、熔融アルミニウムによくぬれる材質をカソードとすれば、炭素カソード上の厚さ 30 cm の熔融アルミニウムが 4 cm の浴と接した場合と同等な界面の安定性を、極間 2 cm にしても確保できるという。アルミニウムは炉底セラミックスをぬらす薄い層となり、炉底の傾斜に従って湯だまりへ移る。実施例として、145 kA の焼成電極式電解炉が、極間 4.45 cm、 0.9 A/cm^2 で電解し、電解炉電圧は 4.33 V、電流効率 90%、エネルギー原単位 $14,337 \text{ kWh/t}$ の操業をしていたとする。これをセラミックカソードとし、極間 1.91 cm で電解したところ、電圧は 3.54 V へと 0.79 V の切下げを実現、電流効率は 85% を維持することができ、5% のわずかな減少に止まつた。エネルギー原単位は $12,411 \text{ kWh/t}$ へと 87% へ切下げることができた。ところで、入力 87% への切下げは、従前は $(4.33 - 1.9) \text{ V} \times 145 \text{ kA} = 352 \text{ kW}$ であつた放熱分を $(3.54 - 1.9) \text{ V} \times 145 \text{ kA} = 238 \text{ kW}$ へと減少させたこととなり、68% の放熱で浴温が維持できるような保温強化を必要とする。極間が 4.45 cm での電圧降下は 1.38 V であつたのが、1.91 cm への短縮で 0.59 V へと切下げられた。極間を短縮しても従前の放熱のままとするには電解電流の増大しかなく、170 kA に増流すれば、これは電流密度で 1.04 A/cm^2 となり、電圧は 3.86 V、電流効率は 85% とかわらず、エネルギー原単位は $13,533 \text{ kWh/t}$ となる。放熱分は $(3.86 - 1.9) \text{ V} \times 170 \text{ kA} = 333 \text{ kW}$ となり、従前に近い放熱が確保された。以上、カソード材料の機能を改良し、電流効率を低下させることなく極間短縮ができれば従来は限界であつたエネルギー消費切下げ技術的にもはやの壁が破られたこととなる。しかし、この場合には新たな保温強化を同時に行う必要がある。この放熱分切下げができない場合にはエネルギー消費を増大させることなく増流ができ生産速度が増大、固定費が切下げられる。

次は消耗性炭素アノードに目を転ずれば、これは電極であるとともに還元剤であり、アルミニウム 1 トン当りの原単位は理論で 0.334 トン、現実には 0.45 トン、1 日で約 2 cm も底面が消耗する。全世界のアルミニウム地金の生産を年間 1500 万トンとすれば、700 万トンものアノード炭素が消費されていることになり、製鉄用コークスには及びもつかないが、これに次ぐ大量消費の炭素材であろう。これを非消耗性電極にかえ、アノード反応を炭素の酸化反応から酸素の発生反応にすることは、アルミニウムの製造をできることならば鉄のような炭素還元で行いたいと願う向きには全くの逆行である。また、電気エネルギーだけでアルミナからアルミニウムを電解採りたいと願う向きには理想の実現である。Hall, Héroult の初期の電解実験から耐久性がありそうな唯一

の材料として炭素が選ばれ、これが酸化消耗し還元剤として働くことがわかつた。Hall は工業化にあたり酸化銅を非消耗アノードとしようとして失敗するや直ちに炭素アノードへ戻っている。このように、適当な材料がないための偶然から 100 年間炭素アノードが用いられ次の 100 年間かなりの期間はこれであろう。消耗性炭素アノードは炭素が保有する化学エネルギーを電解炉の中で電気エネルギーへ有効に変換しており、炭素固体燃料極を電解リアクターへ応用したことになる。

1,250 K でのアルミナの分解に要する理論エネルギーは $2.209 \text{ V} \times 2,980 \text{ kAh/t} = 6,583 \text{ kWh/t}$ 、反応の吸熱まで含めた理論稼動エネルギーは $2.918 \text{ V} \times 2,980 \text{ kAh/t} = 8,694 \text{ kWh/t}$ である。これがアルミナの炭素電解還元ではこれらはそれぞれ $1.182 \text{ V} \times 2,980 \text{ kAh/t} = 3,523 \text{ kWh/t}$ 、 $1.893 \text{ V} \times 2,980 \text{ kAh/t} = 5,643 \text{ kWh/t}$ となる。これから 0.334 トンの炭素は理論電解エネルギーで 3,060 kWh、理論稼動エネルギーで 3,051 kWh の電気エネルギーを肩がわりし、炭素 1 トン当りでは 9,000 kWh となる。アノード炭素を仮に 8 万円/t とすれば、9 円/kWh につくことになる。より現実には則した試算は、電流効率が 90%、炭素の原単位 0.45 トンとして、炭素アノードの過電圧を 0.4 V とすればアノード炭素 1 トンが生み出す正味の電気エネルギーは、理論稼動電圧を 2.918 V から 1.893 V へと 1.025 V だけ切下げるところを 0.4 V の過電圧を空費し、有効な電圧切下げは 0.6 V となつて $0.6 \text{ V} \times (2,980/0.9) \text{ kAh}/0.45 \text{ t} = 4,415 \text{ kWh/t}$ となつて、8 万円の炭素アノードからは 18 円/kWh の電気が生み出されることとなる。電解炉の中で炭素から生み出される電気は、送配電、変圧、変流による損失のない正味の電解電力となるものではあるが、比例費だけでみてもこの程度のコストについている。

電気の缶詰といわれるアルミニウムは非枯渇の水力発電などへき遠の地で需要がないため価格が低い電力で製造されるものとすれば炭素から生み出される電気は安くはない。さらに炭素を還元剤とするための量論的消耗は電極の位置調整を必要とし、熱バランス、電流効率などに大きな影響を与える極間調節に複雑な操作を強いることとなる。また、自焼成式はいうまでもなく焼成電極式でも電極の抵抗が大きいのも欠点である。

耐久性のある材料がないために始まつた炭素アノード、これにかわる非消耗アノード材料にはホール・エルー法 100 年に対し半世紀にわたる開発の歴史があるが、その初期から試みられたフェライト、特に高ニッケルフェライトが現在でも検討され、2.5 kA のパイロット試験も行われている。まだ完成までの一里塚であるが、その効果はセラミックカソードの採用とともに両電極は dimensionally stable (寸法安定) となり操炉は簡単で安

定し、カソードの改良で高い電流効率を保つたまま極間を短縮させ得て電圧を切下げたことによる入熱の不足を、保温、断熱強化で補う場合に、炉上部の電極構造の一新で充分に対応できる副次的であるが不可欠な重要な効果が期待される。

5. おわりに

Hérault と 8 カ月だけ若い同年輩の Hall が大西洋を隔てて、全く独立に燃やした新金属アルミニウム製錬法確立への情熱によつてホール・エルー電解法が発明された。この方法は、クラーク数が示すとおりに資源的に恵まれたアルミニウムをその地殻中に存在するままの化学状態である酸化物のアルミナを原料として電気分解により一挙に金属として採取できるストレートなプロセスであり、これの右に出るものは将来ともありえない。ここにバイヤー・H・H 法によりアルミニウムの商業生産が100年にわたつて行われ、バイヤー法で処理できるボーキサイトを原料とする限り、次の100年、さらに末長く続くものである。

この100年間、年間16トンの生産が1,500万トンと百万倍にもなつたが、それを支えたバイヤー法、ホール・エルー電解法の技術的発展は目覚ましいものがある。

また、この間、非バイヤー法、非ホール・エルー法の開発にも多大の努力が傾注されてきた。これは一見、バイヤー法、ホール・エルー法に不都合、欠点があるためこれを改良、革新するための努力と誤解されやすいが、全く相違している。

非バイヤー法の開発は、バイヤー法に適したボーキサイトが入手できないという条件下で役に立つもので、ボーキサイトの確定鉱量から、その全部がバイヤー法に適すとは限らないが、現在の消費で300年を十分に賄い、推定鉱量まで考えれば千年間を賄うというので、自由な交易ができない異常な事態に備えてのことか、原料費が負の勘定となる大量に排出される廃棄物を処理してのアルミニウムの原料化をねらうものである。従つて、バイヤー法の技術的、工学的改良を進めることは有用であるが、非バイヤー法の開発は特殊な意図による場合以外には数百年間はすべて必要がない。

次は非ホール・エルー法について考えれば、まず非電解法を開発しファラデーの法則、平面リアクターからの脱却という画期的な合理化をねらう。鉄とちがい酸化アルミニウムの炭素熱還元には2,000°C以上の反応温度を必要とする原理的な壁がある。不都合な副反応の生起はさておき、反応温度を得るために電気炉を用い非電解法といいながら電気エネルギーを使うか、ガス発生炉のように大量の炭材を燃焼させるかであり、高炉で鉄をつくるようにはいかぬ。また、このような苦労の上に得られ

るものはアルミニウムの粗金属であり、困難な精製工程を必要とする。次には非ホール・エルー法の電解であり代表的なものはアルミニウムの融点以上の温度での塩化物電解である。バイヤーアルミナがそのまま電解原料とならない重大な欠点とひきかえに、ホール・エルー法電解炉では電流効率の維持のために電極間隔を4 cm もとり、この部分の電圧降下の1.4 Vはアルミニウム1トン当りで5,000 kWhに近いエネルギー消費となるところを水晶石浴より密度の小さい塩化物浴により、電流効率を低下させることなく1 cm 位にまで短縮して合理化しようとするものである。さらに、アノード反応が塩素発生となるので黒鉛電極が原理的には非消耗となり寸法安定の電極構造と複極式による電極抵抗を徹底して低下させられる数々の合理化が可能となる。

以上、ホール・エルーの電解法100年のあゆみをたどつたが、そのリアクターの機能が電気と化学の両エネルギーの変換であり、アルミニウム製造コストに占める電解電力費の割合が大きいこともあり、エネルギー変換の効率や消費に重点をおいてきた。電解電力費の切下げは電力原単位の向上だけでなく電力単価の切下げで直接的、大幅に達成できる。電解工場が消費した電解電力と補助電力の総和をアルミニウムの生産量で割つた電力原単位は1980年自由世界加重平均16,951 kWh/tといわれ、わが国が属する東アジアは14,984 kWh/tで最も優れていた。1984年には全自由世界平均16,676 kWh/tと2%ほど向上したが、生産を縮小したわが国が属する東アジアの原単位は15,499 kWh/tへと3%も悪くなつている。電力原単位向上の限度を全電力として13,000 kWh/tとすれば、平均を16,500 kWh/tとしても、電力消費を79%に切下げたに過ぎない。しかし、電力単価は自由世界加重平均17ミル/kWhのうち、最も高い56ミル/kWhから最も安い3ミル/kWhまで20倍もの格差がある。電力単価最高のわが国は平均からみてもその3.3倍であり、最高の技術を駆使して消費電力を平均の79%にしても到底競争できるものではない。ここで、電力にたよらない製造法への渴望が再燃するが、これは電気は使わなくても他のエネルギーを大量に消費する、わが国には平均より安いエネルギー資源などあろうはずもなく全く実現性はない。

ホール・エルー法発明100年の年に、1975年以来、年産1.5万トンの能力での中間規模試験が実施されてきた塩化物法電解工場が所期の目標を達成したとして閉鎖され、再びアルミニウムの商業生産はホール・エルー法だけで行われるようになって次の100年へと踏み出した。

ボーキサイト資源は偏在するところから、ボーキサイト以外の原料から電解用アルミナを製造する非バイヤー法の開発は有時に備えて行われてきたが、電解法によら

ずに金属アルミニウムを得る画期的なプロセスが開発されると耳目をにぎわし始めたのは戦後である。これは、指導的立場にある国際影響力絶大な業者による活発で着実な研究成果である。しかし、華々しい宣伝が始まるこれらの研究は2～3年、長くても数年ですべてうたかたと消え去っていった。これは、パイヤー-H・H法が他を寄せつけない優れたプロセスであることと、研究開発の動機が、アルミニウムの生産技術にいまにも一大革新が起こることを思わせ、新規業者の参入と資源ナショナリズムへの強力なけん制、さまざまな政策、政略的な意図によるもので、プロセスの成功は二の次であつて、従つて、その意図は十分に達成されその意味では研究は成功であつたというべきである。

わが国のアルミニウム新地金の消費は1970年以来全世界第3位であり、その1割を消費している。わが国の経済活動の急激な伸びが必要としたアルミニウム新地金の需要に応えるため、国内では工期の短い火力発電所を建設して電解を行い、消費第3位にみあう国内生産世界第3位を続けてきた。しかし、エネルギー立地の優れた海外に建設していた製錬工場もようやく稼動を始め、また外国の供給能力も増強され、これらで賄うこととなり、1981年の国内生産は全世界の第4位に下がり、1982年は、米国、ソ連、カナダ、西独、ノルウェー、フランス、中国、オーストラリア、スペインに次ぐ第10位にまで縮小、1983年からは、さらにはるか下位となつて、特殊な条件下の工場を除きすべて国内生産は閉ざされる。その結果、現在わが国は最も安い価格でアルミニウム地金を輸入することができるようになり、それだけ工業活動を益し、国益に貢献している。

1977年、118.8万トンの生産を行い年産161万トンの生産能力を保有し、関連人口10万人といわれた国内のアルミニウム製錬業は構造不況業種としてひろく耳目をにぎわしたため、そのプロセスである100年前からの旧態依然たる電解法が不都合であるとの誤解を招きかねない。しかし、これは将来ともにベストなプロセスであることを力説してきた。限りあるエネルギー資源を有効に使用

することは次世代へのかけがえのないつとめである。必ず枯渇するエネルギー資源をできる限り抑え、非枯渇の自然エネルギーを積極的に利用すべきである。この最も有力なものは電気の利用と同時に始まつた水力利用である。しかし、建設資材が有効に生かせ、環境保全と両立する地点はへき遠の地であり、折角生み出された電力を利用する需要がなく、電気の缶詰ができればとの嘆きがある。電気化学的エネルギー変換は電気エネルギーを化学エネルギーとして物質に蓄え、電気の缶詰である。

単位の電気エネルギー、例えば1,000 kWhを有効利用するのにどれだけの重量の原料を運搬するかを運搬率という。水電解で水素を製造すれば原料は水で、特に運搬する必要はない。水素1トンには理論原単位でも3万3千kWhもの電気が缶詰にされている。しかし運搬には具合が悪く、燃料の枯渇が相当に進まなければエネルギー媒体としての水素はかえりみられない。この点、アルミニウムはもともと電解でつくられ、年間1,500万トンも必要とする。アルミナ2トンとアノード炭素0.5トンの合計2.5トン運び、16,000 kWhを消費するとして運搬率は0.16と極めて低い。これは将来、非消耗アノードとなればアルミナだけの2トンとなり、その場合の電力原単位はカソード材の改良による極間短縮、電極抵抗切下げ、過電圧切下げ、これは同時に電解炉の断熱強化の達成も行い、炭素還元材の助けがなくても、16,000 kWhで済ませることができたとすれば0.13となり、アルミナと電気だけからアルミニウムが製造される。

必ず枯渇する化石燃料は有用な化学品製造の原料とし、自然の恵みである非枯渇の水力発電を主たるエネルギー源としてアルミニウムは製造され軽金属文明は末永く我々の生活を豊かにしてくれる。ホール・エルー電解法はいよいよ重要な意味をもつこととなる。

参 考 文 献

- W. S. Peterson, R. E. Miller 編, Hall-Héroult Centennial-First Century of Aluminum Process Technology 1886-1986, AIME (1986)