アルミニウム製錬技術の現状

増子 昇*・眞尾 紘一郎**

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 65, No. 2 (2015), 66-71
© 2015 The Japan Institute of Light Metals

Present aluminum smelting technology

Noboru MASUKO* and Koichiro MASIO**

1. ま え が き

現在すべてのアルミニウム一次生産は、1886年にホールとエルーがそれぞれ独立に発明したふっ化物溶融塩を使う電解技術で行われている。ボーキサイトから純アルミナを製造する技術は1888年と1894年にバイヤーが出した二つの特許から始まるバイヤー法が使われている。

戦後1948年に再開されたわが国のアルミニウム製錬産業は、年産163万トンの設備を備える規模まで成長したが、1983年には日本軽金属(株)蒲原製造所の2万トンの設備を残してすべて撤退した。その蒲原製造所も2014年3月に生産を止めた。今後は、一次地金はすべて、ジャパン・プレミアムを上乗せした価格で海外から調達しなければならない。

われわれの恩師 高橋正雄先生が2014年4月に90才で他界され、日本語でホール・エルー法を解説できる識者は数少なくなってしまったようである。高橋先生が最後まで情熱を注いで取り組まれたアルミニウム製錬技術¹⁾について、世界の現状を紹介することで先生の想いに報いることとした。

2. アルミニウム電解槽の現状

ホール・エルー法(Hall-Héroult法)の発明後130年を迎えようとしている。これまで、さまざまな新しいアルミニウム製錬法の研究開発が試みられた。しかし、いずれも成功には至っていない。現在新製錬法として研究の話題が残されているのは、消耗性の炭素アノードに変えて、酸素発生型の非消耗アノードを使うもので、2017年には100kAの商業炉をつくるという見通しを語る報告²⁾もある。しかし、もし条件を満たすアノードができたとしても、さまざまな理由で、現行法に代わって広く実用化される見込みはないと思われる。

著者の一人は日本での一次製錬が到達した技術水準を背景としてホール・エルー法の解説を書いたことがある^{3),4)}。当時、Grjotheimは基礎研究の集録⁵⁾および、電解法の技術全般についての解説書⁶⁾を出版している。これらの解説書は、ホール・エルー法による電解法がすでに飽和に近い技術水準に達していたことを示している。この解説書から当時の技術水準を示す諸元を表1に引用した。同時にここ30年の間に变化した技術進歩の状況を表1に併記した。

2.1 大型化

アルミニウム一次地金の世界生産量は、30年前(1984年)には1,600万トンであったが、現在(2013年)では5,050万トンと3倍強に伸びている。表1で目につく変化の項目に*印をつけた。第一には電解槽の大型化であり、300kAレベルの電解槽が主流になっている。最近では600kAの電解槽も出現している。成熟の域に達した技術水準を落とさずに大型化を達成したことが、ここ30年の技術努力の成果であると言えよう。

大型化に伴う課題の第1は電磁流体力学(MHD; magnetohydro-dynamics)的影響の克服であり、工場内の電解槽配置は、縦並び(end to end)から横並び(side by side)、縦給電(end riser)から横給電(side-riser)に変わっている。第2は電解浴中のアルミナ濃度を、2.0~3.5%の範囲に制御することで、ポイント・フィーダ(point feeder)と呼ばれる装置を使って自動制御されている。電解浴の電気伝導度を下げないためには、アルミナ濃度の上限を3.5%程度にしておきたいが、2.0%を切るとアノード効果(AE; anode-effect)が起こる。この供給装置の自動制御のためには、原料アルミナの性状(粒度、安息角、など)への要求が厳しくなる。

大型化に伴い一つの電解槽当たりの電流、すなわち生産量は大きくなったが、電解電流密度の範囲は $0.7\text{A}/\text{cm}^2$ ($7\text{kA}/\text{m}^2$)~ $1.2\text{A}/\text{cm}^2$ ($12\text{kA}/\text{m}^2$)と変化はない。これは、それぞ

*東京大学名誉教授、軽金属学会名誉会員 Professor Emeritus, The University of Tokyo

**有限会社眞尾ASCS(〒142-0063 東京都品川区荏原4-8-10) Mashio ASCS Ltd. (Aluminium Smelting & Carbon Specialist) (4-8-10 Ebara, Shinagawa-ku, Tokyo 142-0063) E-mail: kmashio@aol.com

受付日:平成26年8月26日 受理日:平成26年10月21日

表1 アルミニウム電解技術の進歩

	技術諸元	単位	1980年水準		2010年水準
I 電解槽					
①	電流容量	kA	150	*	300~600
②	Al生産量	ton/day	1	*	2.3~4.6
③	電流密度	A/cm ²	0.7~1.2		0.7~1.2
④	電流効率	%	88~92	*	93~96.5
⑤	電力原単位	kWh/kg-Al	13~15	*	13~14
II アノード炭素					
⑥	炭素原単位	kg-C/kg-Al	0.46~0.54	*	0.40~0.41
⑦	排ガス中CO ₂ 分率		0.7~0.8	*	0.80~0.85
III 電解浴					
⑧	温度	°C	965~980	*	960~965
⑨	過剰AlF ₃	mass%	3~10	*	15
⑩	クリオライト比	NaF/AlF ₃	2.8~2.3	*	2.1
⑪	アルミナ濃度	mass%	2~8	*	2.0~3.5
⑫	A/C極間距離	cm	4~5		4~5

*印 30年間での進歩が著しい項目

表2 アルミニウム電解槽の標準設計, 実績

	技術諸元	単位	HAL275* ¹	EMAL* ²	40 DX+* ³
①	電流容量	kA	275	362.8	439.7
②	電解槽電圧	V	4.14	4.21	4.24
③	電流密度	A/cm ²	0.87	~0.9	~0.9
④	電流効率	%	95.0	95.7	94.5
⑤	電力原単位	kWh/kg-Al	13	13.11	13.37
⑥	炭素原単位	kg-C/kg-Al	0.405	0.415	0.404
⑦	アノード効果頻度	AE/槽-日	0.07	0.17	0.071
⑧	製品不純物: Fe	%	—	—	0.043
	: Si	%	—	—	0.027

*¹ ノルウェー, Hydro社, 標準設計 (A. Tabereaux⁷⁾)*² アブダビ, Emal工場, 操業実績: Jan '12~Sept '12 Potline 1&2 (M. Reverly⁸⁾)*³ ドバイ, Dubal工場, 試験操業実績: Mar '12~Sept '12 40 DC改良 (M. Reverly⁸⁾)

れ工場の置かれているコスト環境の最適化に見合うように設定されている。電流密度が高くなれば、生産性は上がるが、槽電圧も高くなり電力原単位も上がる。技術全体でのトレード・オフを解決しなければならない。

2.2 電流効率

もう一つの大きな進歩は電流効率(ϵ_F)の向上である。後で述べるように電解浴に溶解したAlがアノードで発生するCO₂によって酸化されるのが電流効率低下の原因である。このため97%を超える効率は無理であると推測されている。現在、96.5%辺りが最高の到達レベルである。電流効率を上げるために電解浴の組成としては、AlF₃過剰の状態が選ばれており、Na₃AlF₆に対して15%過剰、クリオライト比(C.R.: NaF/AlF₃)に換算して2.1程度の浴が使われている。しかしAlF₃過剰は電解浴の電気伝導度を低下させ、槽電圧を増加させる。このためアルミナ濃度をアノード効果を起こさないような限度(2mass%)ぎりぎりまで管理する技術が発達した。

アノード炭素原単位は0.41 kg/kg-Al程度に切り下げ

られている。理論反応炭素量は電流効率の上限97%では(0.334/0.97)=0.344, 94%の効率でも0.355 kg-C/kg-Alとなる。しかし、アノード界面でのブドワー反応と空気酸化を原因として炭素過剰消費が起こる。最近の進歩した電解槽では、限界とされている0.40 kg/kg-Al辺りの領域まで炭素原単位を下けている。

2.3 環境技術

1970年代頃より環境技術の進歩で、電解工場から排出されるふっ化物はサンデイ・アルミナを使う閉鎖系技術(Dry Scrubber法)によって回収処理されている。このことは一方で、アノード炭素および原料アルミナに含まれる不純物が皆製品に移行するということを意味する。製品純度の維持のためには、より一層厳しい原料の純度管理が必要になる。一次地金を自製せず外部からの購入に頼る場合、いたずらに過剰の品質を要求することは得策ではない。

それ以前の水溶液で排ガスを処理(Wet Scrubber法)していた時代の方が製品純度の達成は容易であったので、製品純

度を一般的な技術指標にすることには注意がいる。

2.4 電解槽設計, 操業実績の例

2013年には全世界で5,400万トンの生産設備が保有され, 5,050万トンの一次地金の生産が行われた。主力はプリベークアノードを使う大型電解槽である。表2に, ノルウェーのAadal工場(年産233,000トン), カタールのQatalum工場(年産625,000トン)に設置されたHydro社のHAL-275(表2^{*1})電解槽設計の例を引用した⁷⁾。現在この設計の流れにある420kA炉(HA420)がAadal工場の主力になっている。

さらにアラブ首長国連邦のEmal工場(年産1,050,000トン)のライン1&2の, ある期間での実績例(表2^{*2}), およびドバイのDubal工場(年産1,400,000トン)で使われているDXを改良してDX+にするための試験操業(表2^{*3})の実施例を引用した⁸⁾。

以下, 表1の諸元を理解する上で必要なホール・エルー法の化学について解説する。

3. ホール・エルー法の化学

ホール・エルー法では, 氷晶石を主成分とするふっ化物溶融塩浴を使い, 次の式(1)で示される反応を3ファラデーの電気量の通過によって行わせることで溶融金属アルミニウムを生成させる。1ファラデーの電気量は96,485クーロン=26.8AhであるからAlを1モル(26.98g)を電解析出させるには80.40Ahの電気量を必要とする。Alを1kg析出させるには, $Q_0=2,980\text{Ah}$ の電気量を必要とする。

もし300kAの電解槽を, 100%の電流効率で24時間運転すれば, 通過電気量は7,200kAhとなり, 2,418トンのアルミニウムが生産できる。年当たりになると882トンになる。電流効率96%, 装置の稼働率90%とすると762トンとなり, 年に50万トンの生産を行うには, 660炉が必要となる。

この式(1)で生成したAlが化学的に酸化されて Al_2O_3 に戻ることが電流効率の損失となる。電解還元で生成した溶融金属アルミニウムはごくわずかに電解浴に溶解する。この溶解した金属アルミニウムが CO_2 を発生しているアノード界面で次の式(2)に示される酸化反応によって Al_2O_3 に戻ることが電流効率低下の原因である。

式(1)で生成した CO_2 ガスが式(2)によってCOガスに変化するので, 反応で生成する気体の CO_2 分率を $X^0(\text{CO}_2)$ と置いて電流効率 ε_F との関係を求めると次式が得られる。

$$X^0(\text{CO}_2) = 2\varepsilon_F - 1 \quad \text{or} \quad \varepsilon_F = 0.5\{1 + X^0(\text{CO}_2)\} \quad (3)$$

この式(3)はPearsonの式とよばれ, アルミニウム電解における基本式の一つである。

式(3)を使って, 式(1)と式(2)を結合し, 電流効率 ε_F (小数表示)の条件下でアルミニウムを1モル生成する化学反応のモル基準の量論式を作ると次のように表される。

電流効率 ε_F は $Q_0=2,980\text{Ah}$ の電気量で(ε_F)kgのアルミニウ

ムしか生産できないということであり, 逆に1kgのAlの生産のためには $(2.98/\varepsilon_F)\text{kAh}$ の電気量を必要とすることを意味する。電力原単位 U_0 は次の式(5)で計算される。

$$U_0 = 2.98 \times V_{\text{pot}}/\varepsilon_F \quad \text{kWh/kg-Al} \quad (5)$$

もし電解槽電圧 $V_{\text{pot}}=4.2\text{V}$, $\varepsilon_F=0.96$ で操業したとすれば, 13.0kWh/kg-Al , すなわち, $13,000\text{kWh}$ の電力でアルミニウム1トンが製造される。

余談であるが, エルーの発明は, 丸型のアーク炉型式の電解槽を使ったので, アルミニウム電解槽に限っては, 一般的な“cell”の代わりに“pot”という言葉が使われる。槽電圧に対しても通常 V_{pot} という記号が使われる。

4. アルミニウム電解の必要エネルギー

式(4)に基づいて, 電解反応に必要なエネルギーを計算する。

ホール・エルー電解槽は, ふっ化物溶融塩浴に耐食性があり, かつ電流が逃げないように電気絶縁性の材料で側壁をつくることができればよいのだが, そのような材料はないので, 浴自身の凍結塩(ledge)で電解槽の側壁を保護(self lining)する内熱方式をとる。このため電解反応ではあるが, 反応に必要なエネルギーは自由エネルギー変化 $\Delta G(4)$ ではなく, エンタルピー変化 $\Delta H(4)$ となる。さらに原料の $0.5\text{Al}_2\text{O}_3$ および $(0.75/\varepsilon_F)\text{C}$ を常温から反応温度に加熱するエネルギーを加算する必要がある。

式(4)の反応に基づく, 1250K (977°C) のエンタルピー変化 $\Delta H(4)$ をJANAFのデータをもとに計算すると次のようになる。

$$\Delta H(4)(1250\text{K}) = 422.980 + (126.050/\varepsilon_F) \quad \text{kJ/mol-Al} \quad (6)$$

さらに式(3)の原料 $\{0.5\text{Al}_2\text{O}_3 + \{0.75/\varepsilon_F\}\text{C}\}$ について反応温度まで加熱するに要する熱量, $H(1250)$ を計算すると次のようになる。

$$H(1250) = 54.865 + (13.043/\varepsilon_F) \quad \text{kJ/mol-Al} \quad (7)$$

式(6)と式(7)との和として, 必要最低エネルギー $\Delta H_{\min}$ は, 次のように与えられる。エネルギーの換算では, 3.6kJ が 1Wh に相当するので kJ/mol-Al は 10.296Wh/kg-Al になる。

$$\Delta H_{\min}(1250) = 477.845 + (139.093/\varepsilon_F) \quad \text{kJ/mol-Al} \\ = 4920 + (1432/\varepsilon_F) \quad \text{Wh/kg-Al} \quad (8)$$

この $\Delta H_{\min}$ を1kgのAl生産に要する電気量 $(2,980\text{Ah}/\varepsilon_F)$ で割ると, 必要エネルギーを供給するに要する電解電圧 $V_{\min}$ に換算でき, 式(9)が得られる。

$$V_{\min}(1250) = 1.65\varepsilon_F + 0.48 \quad \text{V} \quad (9)$$

この式(9)は, 「工業電解の化学」³⁾では式(36.13)として与えられている。この式(9)は式(5)とともに, アルミニウム電解技術者には, “Well Known” の関係式である。

電解槽にかかる全電圧 V_{pot} と全電流 I との積が電解槽へ入力されるパワー(動力) P_{in} であり, そのうち式(9)に相当する電圧が反応に必要なパワー $P_{\min}$ である。電解槽の熱バランスは $P_{\text{loss}} (= P_{\text{in}} - P_{\min})$ と $P_{\min}$ とのバランスになる。電解槽の構造およびそれを構成する材料によって P_{loss} を下げて $P_{\min}$ を

図1 電解槽の構造と電圧分布

下げられなければ、その時間積分である U_0 を下げることはできない。 P_{in} を下げることに成功しても、 P_{loss} が下げられなければ結果として U_0 を大きくせざるを得ない。

5. アノード炭素の原単位

電流効率 ε_F の下でのホール・エルー法の化学反応を表す式(4)は通常のもル基準の式であるが、これを質量基準の式に変換すると次の式(10)になる。

$$1.889\text{Al}_2\text{O}_3 + \{0.334/\varepsilon_F\}\text{C} \\ = 1.000\text{Al} + \{1.223(2\varepsilon_F - 1)/\varepsilon_F\}\text{CO}_2 + \{1.557(1 - \varepsilon_F)/\varepsilon_F\}\text{CO} \quad (10)$$

質量基準の量論式では、反応系の量論係数の和と生成系の量論係数の和とが一致しなければならない。この式は、電流効率 ε_F の条件下で 1.000 kg の Al を生成させるためには、電流効率に関係なく 1.889 kg のアルミナと、炭素を $\{0.334/\varepsilon_F\}$ kg 必要とすることを示している。この電解反応で必要とされる炭素量を W_C^0 とおき、炭素原単位 W_C との差を過剰炭素 $W_C^*(=W_C - W_C^0)$ とする。式(10)の量論係数は 1 kg の Al 当たりの質量を意味するので W_C の単位は kg-C/kg-Al となる。この過剰炭素は次の二つの理由で生じる。

一つめは、①アノード炭素の空気酸化で消費するもので、 $\text{C (アノード)} + \text{O}_2 \text{ (空気)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ (排ガス)}$ の反応による(過剰消費量①)。二つめは、②アノード炭素が反応ガス中の CO_2 ガスと反応して消費するもので、 $\text{C (アノード)} + \text{CO}_2 \text{ (反応ガス)} \rightarrow 2\text{CO (排ガス)}$ の反応による(過剰消費量②)。

この両者のもル基準の反応量の比を λ (=過剰消費量①/過剰消費量②)とおくと、近年のプリベークアノードでは、経験的に λ は 1~2 の値をとる。①の反応は冶金学ではブドワー反応、もしくはカーボン・ソリューション反応として知られるもので、アノード炭素の材質に依存する。①と②とは異なるメカニズムによるものであるが、幸い $\lambda > 1$ であるので、排ガス中に入る炭素消費量の計算では双方を一緒にして、排ガス中 CO_2 分の過剰炭素分 $W_C^*(\text{CO}_2)$ は $\{(\lambda - 1)/(\lambda + 1)\}W_C^*$ 、CO

分の過剰炭素分 $W_C^*(\text{CO})$ は $\{2/(\lambda + 1)\}W_C^*$ として処理することができる。

反応に必要な $\{0.334/\varepsilon_F\}$ のうち、反応ガス中の CO_2 に含まれる炭素分率は $(2\varepsilon_F - 1)$ であり、 CO_2 に変化した炭素は $W_C^0(\text{CO}_2) = \{0.334(2\varepsilon_F - 1)/\varepsilon_F\}$ となる。排ガス中の CO_2 分率 $X(\text{CO}_2)$ は、 $X(\text{CO}_2) = \{W_C^0(\text{CO}_2) + W_C^*(\text{CO}_2)\}/W_C$ で与えられる。電流効率 ε_F が与えられると、炭素原単位 W_C と排ガス中分率 $X(\text{CO}_2)$ とから λ が求まる。逆に λ を仮定すれば、 $X(\text{CO}_2)$ が求まる。

表1の1980年水準では、 $\varepsilon_F = 0.90$ 、 $W_C = 0.45 \text{ kg-C/kg-Al}$ 、とすれば、 $\lambda = 1.5$ として、 $X(\text{CO}_2) = 0.70$ となる。近年の技術水準では、 $\varepsilon_F = 0.96$ 、 $W_C = 0.41 \text{ kg-C/kg-Al}$ 、とすれば、 $\lambda = 1.5$ として、 $X(\text{CO}_2) = 0.81$ となり、プリベークアノードの消費量に関しては大きな進歩がみられる。

6. 電解槽電圧と電流効率

2014年8月時点のアルミニウムのLME価格はトン当たり2,000ドル程度である。生産コストの内訳は生産地域の経済環境や生産の規模で変化するが、おおざっぱに言ってアルミナ代金が600ドル、電力料金が600ドル、炭素材料費が200ドル、その他(労務費、償却費、利潤、など)600ドル、といったところである。電解用精製アルミナの価格はトン当たり300ドルであるが、電解では2トン必要である。

電力料金が600ドルということは、電力消費量をアルミニウムトン当たり14,000 kWh として電力料金は0.043ドル/kWh、1ドル100円として4.3円/kWh程度でないと産業としては成り立たないということになる。とはいっても、電力料金6円/kWhでも操業できる工場もある。欧州の一部にみられるように自家製の一次地金をベースにして、他工場の地金や客先からの回収地金などをブレンドして、客先の細かい要望に応える商品に仕上げるビジネスである。しかし日本のように12円/kWhでは到底成り立たない。

電解電力消費量は式(5)で示されるように、 $2980 \times V_{pot}/\varepsilon_F \text{ kWh/ton-Al}$ 、で与えられる。電解技術は、とどのつまりは V_{pot} の減少、 ε_F の増加を目的とする。

図1にGrjotheim⁶⁾から引用したアルミニウム電解槽の構造の模式図とそれぞれの構成部分での電圧分布の例を示した。電流密度 i は $0.7\text{A}/\text{cm}^2 (=7\text{kA}/\text{m}^2)$ である。全電圧は 4.24V であり、電流効率 ε_F を 0.90 とすると電力原単位 U_0 は $14,000\text{kWh}/\text{ton-Al} (=14.0\text{kWh}/\text{kg-Al})$ となる。電解槽電圧 V_{pot} は式(11)に示すように、電流密度 i の一次式で近似できる。

$$V_{\text{pot}} = \alpha + \beta i \quad (11)$$

アノード分極 η_A は 0.48V であり、アノード反応が遅い反応のため大きな過電圧を必要とすることを示している。この分極は非線型であるが電流密度 $0.7\text{A}/\text{cm}^2$ の近傍で線型近似すると式(12)で表される。

$$\eta_A = 0.426 + 0.078i \quad \text{V} \quad (12)$$

カソード分極 η_C は金属アルミニウム析出反応であり、早い反応なので過電圧は小さい。電流密度 $0.7\text{A}/\text{cm}^2$ の近傍で線型近似すると式(13)で表される。

$$\eta_C = 0.025 + 0.036i \quad \text{V} \quad (13)$$

両者合わせると $\eta = 0.45 + 0.11i = 0.53\text{V}$ となる。総合して電極反応の α 項は大きい、電流密度依存性は、電解槽を構成する材料のオーム抵抗に比べると小さい。アノードの反応性を高めることで η_A を下げる試みには、あまり望みはない。

理論分解電圧としては、この図1では 1.18V が計上してある。アルミナ飽和の浴での標準理論分解電圧は 1.17V であり、 0.01V の加算はアルミナ濃度に基づく活量補正項である。式(11)における α は 1.63V となる。

オーム抵抗による電圧降下の総和は $\beta_{\text{①}}i + \beta_{\text{②}}i + \beta_{\text{③}}i + \beta_{\text{④}}i + \beta_{\text{⑤}}i + \beta_{\text{⑥}}i = 2.53 = 3.61 \times 0.7\text{V}$ となる。これらを総合すると、式(11)における β は $3.73\Omega\text{cm}^2$ となる。

図1に計上されている電解槽の特性は、 $V_{\text{pot}} = 1.63 + 3.73i$ で表され、電圧の総和 4.24V はこの式に $i = 0.7\text{A}/\text{cm}^2$ を代入して得られる。この例での ε_F は 0.9 であり、式(5)から、電力原単位 U_0 は、 $14.0\text{kWh}/\text{kg-Al}$ になる。この電解槽を電流密度 $0.8\text{A}/\text{cm}^2$ で運転すれば生産量は 14% 増加できるが、 $V_{\text{pot}} = 4.61\text{V}$ となり、この操作で ε_F に変化がないものとすれば電力原単位は $15.3\text{kWh}/\text{kg-Al}$ に増加する。

式(11)の α 項で低下できる部分はアノード分極抵抗の定数項だけであり、それを下げるにはアノードの反応性を高める必要がある。しかしその変更は、おそらく過剰炭素消費量を大きくするのであまり期待はできない。結局のところ、技術的にはいかに ε_F を下げずに、 β 項を低下させることができるかが関心事となる。

式(11)の α 項を低下させることは難しいが、表2のHAL275電解槽では電流密度を $0.87\text{A}/\text{cm}^2$ まで増加させながら電解電圧を 4.14V で抑えてある。このことは電解電圧が $V_{\text{pot}} = 1.63 + 2.89i$ で表されていることを意味している。HAL275に代表される近年の電解槽技術の進歩は、このような β 項の大幅な低下と電流効率 ε_F の増加の結果である。

構成材料それぞれの β は比抵抗 ρ と電流通路の長さ h との積で表される。炭素材料の比抵抗 $\rho_{\text{③}}, \rho_{\text{④}}$ に比べて電解浴の比抵抗 $\rho_{\text{⑥}}$ は一桁大きいので、電解浴のオーム降下 $\beta_{\text{⑥}}i$ 項に対するアノードとカソードとの極間距離 h (ACD; Anode-Cathode Distance) が全体の β に対して大きな影響を持つ。ACDを

4cm 以下にすると β 項の低下には効果的であるが、 ε_F も低下する。またアノードの消耗速度を均一にするためにはACDは下げない方がよい。このようなトレード・オフ関係にある技術手段の選択と克服が残された課題である。

近代的な工場の標準形は、電流容量 300kA の炉 300 を 150 炉ずつ2列に配置し、 1350V の直流電源で駆動する。これで年産 25 万トンの設備能力となる。この規模の工場をフル操業に立ち上げるには、半年以上かかる。当然電解炉の寿命が大きな技術課題となる。現在の欧米での標準寿命は $2,500$ 日 (6.8 年)とされている。大型炉では予熱・スタートから正常運転までの管理技術も大きな課題である。

7. 今後の展望

2013年は、世界合計で年産 $5,825$ 万トンの公称能力のうち、 423 万トンが閉鎖され、 $5,402$ 万トンの生産能力が存在した。閉鎖されたものの多くは生産規模 20 万トン以下の設備である⁹⁾。2013年の生産実績は $5,050$ 万トンであるので、経済環境によって生産を見合わせている部分も多い。

30年前 (1984年) の世界生産額は年産 $1,600$ 万トンで、そのうち北米 (USA+カナダ) で 536 万トン、欧州で 429 万トン、と両者合わせて全体の 60% の生産を受け持っていた。現在でも北米で 492 万トン、欧州で 427 万トンと量的には変わらないが、総生産量に対する割合は 18% まで低下した。

現在世界の工場数 212 のうち、半数を超える 110 が中国に存在する。2013年の生産量も $2,480$ 万トンと世界総生産の 49% を占めている。中国では、年産 100 万トンを超える生産設備を持つものが2工場、 60 万トン以上が7工場、 40 万トン以上が21工場、 20 万トン以上が25工場、と半数の55工場が 20 万トン以上の設備を持っている。しかし、2014年から生産設備適正化の動きが始まっており、電力原単位 $13.7\text{kWh}/\text{kg-Al}$ 以上の工場には電力料金にペナルティを課金することになった。小規模、高コストの工場は生き残れなくなり、来年には多くの工場が閉鎖され、工場数は $20 \sim 30$ に減少すると予測する向きもある。

電力原単位削減のための最後の切り札とされていたのが2000年ごろに研究された TiB_2 を塗布または貼付したドレーン・カソード技術であるが、現在この研究は中断されている。代わりにメタル流動を抑えるためカソード上面に突起を設けた異型カソード技術について、中国に注目される特許が生まれている¹⁰⁾。

ゼーダーベルグ方式の電解炉は、中国では2004年、インドでは2008年に全廃止となっている。現在ロシアの 160kA 大型炉による4工場、計 260 万トン、ブラジルの 120kA 中型炉による 40 万トンを除いてはすべて停止すると考えられている。隆盛を極めたゼーダーベルグ方式ではあるがふっ化物の排出基準を守るのが難しいこと、および作業環境が劣ることからいずれ絶滅する技術と評価されている。

エネルギー価格の上昇による生産コストの上昇と、LME在庫が現在 500 万トンにも及ぶことからくる市場価格の動きがないことで、古い、生産効率の悪い電解槽の淘汰の勢いは止まらない。しかし、2016年には $6,000$ 万トンの生産が必要になるという強気の見通しもあり、UAE、オマーンなどの中東産油国、アイスランドなど水力、地熱などの自然エネルギーに余剰のある国などでの設備投資意欲は旺盛である。

同時に、電解技術の漸近的な改良への要請は大きく、TMSの年次大会は毎年2,000人を超えるアルミニウム製錬技術者の参加で活況を呈している。ちなみに、2014年の大会での話題は、「アルミニウム製錬の革新的技術開発は存在するか」であったが目新しい解説はなく、唯一「非消耗アノードを使う製錬技術の実用化は当分あり得ない」が会場の意見であった。

8. おわりに

日本は2013年度一次地金185万トン、二次地金73万トンを入力し世界第2位のアルミニウム地金輸入大国であった。これまでは、ほぼ希望する品位の地金を輸入できた。しかし今後はエネルギー価格の高騰を受けて自国内での製錬を止めて輸入地金に頼る国が続発する見込みであり、輸入競争が激化することは明白である。限られた輸出可能国と対応するにはその国情、製錬会社の生い立ちや社風、製錬技術を熟知する必要がある。しかしながら現状は物流を中心とした商

流 (commercial stream) のみが重視され、技術的な配慮が欠けていると思われる。この機会にアルミニウム製錬の技術的背景を解説して読者の注意を喚起できれば幸いである。

参考文献

- 1) 高橋正雄：続電解百話集 (I) 第101話 (2012)～(III) 第117話 (2013), 電気化学会, 電解科学技術委員会資料.
- 2) R. P. Pawlek: Light Metals 2014, TMS, (2014), 1309.
- 3) 高橋正雄, 増子 昇：工業電解の化学, アグネ, (1979).
- 4) 増子 昇：岩波講座 岩波現代科学24 資源・エネルギーの化学 第2章 アルミニウム, (1980).
- 5) K. Grjotheim et al.: Aluminium Electrolysis (The Chemistry of the Hall-Héroult Process), Aluminium-Verlag Düsseldorf, (1977).
- 6) K. Grjotheim and B. J. Welch: Aluminium Smelter Technology, Aluminium-Verlag Düsseldorf, (1980).
- 7) A. Tabereaux; Light Metal Age, February 2010, (2010), 1309.
- 8) M. Reverdy et al.: Light Metals 2013, TMS, (2013), 553.
- 9) Light Metal Age, February 2014, (2014), 6-8.
- 10) Yan Feiya et al.: Light Metals 2013, TMS, (2013), 537.