

■ 特 集 ■ 省エネルギー

工業電解の省エネルギー

Energy Saving for Industrial Electrolysis

高 橋 正 雄*

Masao Takahashi

1. はじめに

工業電解は、化学工業の基礎原料であるアルカリと塩素を供給するソーダ電解や、アルミニウム、マグネシウム、ナトリウム、亜鉛、鉛などの電解採取および銅やアルミニウムの電解精製などに大規模に応用されている。これらの製造を電解以外のプロセスに変更することは困難であって、電解法は現在も勿論、将来とも最も合理的である。

電気分解は、自発的には進行し得ない、親和力が負の反応を外から電気エネルギーを注入することにより進行させるものであるから、生産量に応じて原料とともに電気エネルギーを必要とすることは避けられない。電解工業では、電解の電気エネルギーは消費されたのではなく製品の中に化学エネルギーとして変換され貯蔵されることになる。

基礎原料として機械、金属、化学の全産業から大量に要求されるアルミニウム、ソーダと塩素、亜鉛、銅の各電解工業が必要とする電力は、これらの大きな需要に応ずる生産を行うために大きくなり、我国の総発電量の6%に近い年間250億 kWh以上の消費となっている。エネルギー資源の枯渇を迎えて、その徹底した有効利用をしなければならぬ今日、電気エネルギーは現行の発電方式では一次エネルギーからの変換効率が約35%に過ぎないので特に貴重なエネルギーであるから、その有効利用は特に重視される。この貴重な電気エネルギーの大量消費を行う、産業構造上、欠くことができない電解工業におけるエネルギーの有効利用は

極めて重要な意義をもつ。

2. 電解工業の現状と電力消費

1974年度における米国と日本の主要電気化学製品の生産高、それらの電力原単位(直接的な電解用電力)、両者の積である電力消費量を表1、表2に示すが、生産量が大きく電力原単位も大きいアルミニウムが全消費の66~60%を占めている。この最大手のアルミニウム製錬が消費した電力を100として、それぞれの電解で使用された電力を比率で示すとともに、総発電量(米国で1兆9,410億 kWh、日本で4,590億 kWh)に対する使用比率をも示している。電解工業はこれらの合計で、総発電量に対し米国では6.12%、日本では5.69%(海外でのアルミニウム製錬および輸入地金分をも考慮すると7%を越える)となっている。

アルミニウム製錬が電解工業の全電力消費の6割以上、塩素・アルカリ電解が3割近い消費を行う大手であり、我国では世界第1位の生産を行っている亜鉛がアルミニウム、塩素につぐ第3位の消費を行い、これら3業種で95%を消費している。したがって、これら3業種のエネルギー有効利用を推進することが最も効果的であることがわかる。

3. 電解プロセスの省エネルギーの理論

工業電解製品の生産に必要な全エネルギーの中で、生産に直接必要な電解用電力の比重が最も大きいので、その省エネルギーが重要である。

電解電力(直流)原単位 W (kWh/t) は電解槽の電圧 V_t (V) と電解電気量原単位 Q (kAh/t) との積で

$$W = V_t \cdot Q \quad (1)$$

*横浜国立大学工学部エネルギー材料研究施設 教授

☎ 240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156

表 1 1974 年度電気化学製品生産高と電力消費 (米国)*1

品名	生産高 (10 ³ t)	電力原単位 (D.CkWh/t)	電力消費量 (10 ⁶ kWh)	電力消費係数 (A1: 100)	対総発電量*2 (%)
アルミニウム	4,450	17,550	78,100	100	4.02
塩素	9,860	3,440	33,920	43	1.74
マグネシウム	150	18,520	2,820	3.6	0.15
ナトリウム	160	10,580	1,660	2.1	0.08
塩素酸ソーダ	180	6,170	1,130	1.4	0.06
亜鉛	220	3,530	760	0.9	0.04
銅	1,740	200	360	0.5	0.02
マンガン	24	11,020	270	0.3	0.01
合計	-	-	118,920	152	6.12

*1 R. E. Meredith (日根文男訳) ソーダと塩素 Vol. 30, No 3, 110~122 (1979)

*2 総発電量 1,941,000 (10⁶ kWh)

表 2 1974 年度電気化学製品生産高*1 電力消費 (日本)

品名	生産高 (10 ³ t)	電力原単位 (D.CkWh/t)	電力消費量 (10 ⁶ kWh)	電力消費指数 (A1: 100)	対総発電量*2 (%)
アルミニウム	1,120	14,000	15,680	100	3.42
塩素	2,700	2,800	7,560	48	1.65
亜鉛	520	3,300	1,720	11	0.37
マグネシウム	22	16,400	360	2.3	0.08
塩素酸ソーダ	50	6,200	310	2.0	0.07
銅	1,000	300	300	1.9	0.07
マンガン	10	9,000	90	0.6	0.02
ニッケル	21	2,700	60	0.4	0.01
クロム	3	16,500	50	0.3	0.01
ナトリウム	3	9,700	30	0.2	0.01
合計	-	-	26,160	167	5.69

*1 生産高: 矢野一郎, 日本国勢図会

*2 総発電量 459,000 (10⁶ kWh)

総消費量 416,000

産業用 310,000 (鉱工業 230,000)

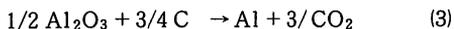
民生用 106,000

である。したがって、電解電力の省エネルギーは V_t と Q の切下げにつくる。槽電圧と電気量原単位の切下げの限界は、それぞれの理論値であり、槽電圧の理論値は理論分解電圧 V_r [V] であって、電気量原単位の理論値は理論電解電気量原単位 Q° [kAh/t] である。これらの積が電解電力原単位の理論値であり、その切下げの限界値である理論電解電力原単位 W° [kWh/t] である。これらの理論値が省エネルギーの目標値である。

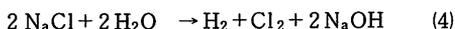
$$W^\circ = V_r \cdot Q^\circ \quad (2)$$

表 3 は、アルミニウム、塩素・アルカリ (隔膜法ソーダ電解) と亜鉛の各電解についてのこれらの理論値および代表的な操業例の諸元を示している。

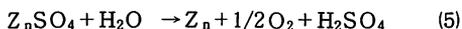
アルミニウム電解の全反応は



隔膜法ソーダ電解は



亜鉛電解は

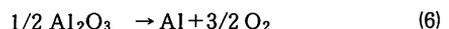


である。アルミニウム、塩素、亜鉛などを電解採取することを目的とするこれらの反応において、それぞれ

の製品の理論電解電気量原単位 Q° は原料と製品との酸化数のちがいで決まるので、 Al_2O_3 であれ $AlCl_3$ であれ Al^{3+} を原料とする限り Q°_{Al} の 2,980 [kAh/t] はかわらず、 $NaCl$ の Cl^- を原料とする限りどのような電解プロセスによっても $Q^\circ_{Cl_2}$ の 756 [kAh/t] はかわらず、 $ZnSO_4$ であれ $ZnCl_2$ であれ Zn^{2+} を原料とする限り Q°_{Zn} の 820 [kAh/t] はかわらない。

しかし、理論電解電力原単位 W° [kWh/t] は、 Al^{3+} 、 Cl^- 、 Zn^{2+} を原料とするアルミニウム、塩素、亜鉛の電解採取であっても、全反応を変更させることによりその反応の親和力の大小に応じて決まる理論分解電圧 V_r を変化させることができるので $W^\circ = V_r \cdot Q^\circ$ の関係にあるエネルギー原単位の理論的限界値をかえることができる。

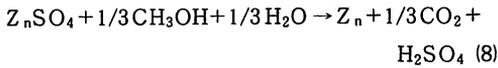
アルミナの電気分解を



とすれば、1,250 k において V_r は 2.21 [V] となり $W^\circ_{Al} = 2.21 \times 2,980 = 6,586$ [kWh/t] となるべきところを、炭素のもつ化学エネルギーを有効に利用する反応(3)では $W^\circ_{Al} = 1.18 \times 2,980 = 3,520$ [kWh/t] と電力

原単位は半分ちかくまで切下げられる。同様に隔膜法ソーダ電解では、水素が生成しない反応に変更して、水素の化学エネルギーを有効利用すれば

$2\text{NaCl} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 + 2\text{NaOH}$ (7)
 となり、 V_r の約1.2[V]の切下げが可能で理論電力原単位の切下げ $\Delta W^\circ = \Delta V_r \cdot Q^\circ$ は $\Delta W^\circ_{\text{Cl}_2} = 1.2 \times 756 = 907$ (kWh) となって、水素を併産する塩素とアルカリの製造プロセスにくらべ理論ベースでは5割以上の省エネルギーとなる。また、亜鉛の電解でもメタノールの化学エネルギーが有効利用できるとすれば、反応は



となって、この場合も理論分解電圧の切下げ ΔV_r は約1.2[V]となる。したがって、理論電解電力原単位の切下げは $\Delta W^\circ_{\text{Zn}} = 1.2 \times 820 = 984$ (kWh/t) となるので6割の省エネルギーとなる。

しかし、(3)、(7)、(8)の量論関係から明らかのようにアルミニウム電解では、アルミニウム1[t]の生産あたり、理論電力原単位を $\Delta W^\circ_{\text{Al}} = 6,586 - 3,520 = 3,066$ (kWh/t) だけ切下げる省エネルギーとひきかえに炭素を334[kg]消費し、ソーダ電解では塩素1[t]の生産あたり907(kWh)の省エネルギーとひきかえに28(kg)(314[Nm³])の水素の副生を犠牲にし、亜鉛電解では亜鉛1[t]の生産あたり984(kWh)の省エネルギーとひきかえにメタノール136[kg]を消費する。

ところで、これらプロセスによって決まる理論エネルギーの限界値を基準にしたエネルギーの有効利用度を示すエネルギー効率 ϵ_w は

$$\epsilon_w = W^\circ / W = (V_t / V_r) \cdot (Q^\circ / Q)$$
 (9)

であり、

$$\epsilon_v = V_t / V_r$$
 (10)

を電圧効率

$$\epsilon_F = Q^\circ / Q$$
 (11)

を電流効率(ファラデー効率)とよべばエネルギー効率 ϵ_w はこれら ϵ_v と ϵ_F の積

$$\epsilon_w = \epsilon_v \cdot \epsilon_F$$
 (12)

となる。電圧と電流の両効率の向上がエネルギー効率の向上、エネルギーの有効利用の達成となる。

また、電解電力原単位 W (kWh/t) は

$$W = (W^\circ / \epsilon_w) = \frac{V_t \cdot Q^\circ}{\epsilon_F}$$
 (13)

であるから、 W の切下げは槽電圧 V_t の理論値 V_r への切下げと電流効率 ϵ_F の1への接近につきる。

工業電解プロセスの中心である酸化・還元反応をとおして電気エネルギーを化学エネルギーへ変換する電解槽(炉)は電気化学リアクターであって、エネルギー変換と酸化・還元反応は電極の表面で生起する2次元のリアクターである。したがって、単位リアクター規模あたりのエネルギー変換速度(生産速度)は反応とエネルギー変換が起こる電極の単位面積あたりの速度で示される。これを電流密度 i (kA/m²)とよべば、一般に槽電圧 V_t の一部がこのレートプロセスの駆動力として必要となるので変換速度である電流密度 i (kA/m²)の増大に応じて槽電圧は増大する。

槽電圧 V_t と電流密度 i との関係は非線形であるが、ある操業電流密度を中心とするあまり広くない電流密度範囲では

$$V_t = V_r + \alpha' + \beta i$$
 (14)

の直線式で近似される。ここで、 $V_t \sim i$ 直線を $i \rightarrow 0$ へ外挿した場合の槽電圧が $V_r + \alpha'$ であり、 $V_t \sim i$ 直線の勾配が β (m Ω m²) で電圧勾配とよぶ。

表3には、アルミニウム、塩素・アルカリ、亜鉛の

表3 工業電解槽のエネルギー特性

諸元	プロセス		
	アルミニウム電解	塩素・アルカリ電解	亜鉛電解
理論分解電圧 V_r [V]	1.18	2.2	2.0
理論電解電気量 Q° [kAh/t]	2,980	756 (Cl ₂)	820
理論電解電力原単位 W° [kWh/t]	3,520	1,663 (Cl ₂)	1,640
槽電圧 V_t [V]	4.2	3.5	3.5
電解電気量原単位 Q [kAh/t]	3,330	794 (Cl ₂)	910
電解電力原単位 W [kWh/t]	14,000	2,780	3,190
エネルギー効率 $\epsilon_w = W^\circ / W$	0.25	0.60	0.51
電圧効率 $\epsilon_v = V_r / V_t$	0.28	0.63	0.57
電流効率 $\epsilon_F = Q^\circ / Q$	0.89	0.95	0.91
操業電流密度 i [kA/m ²]	7	2	0.45
槽電圧特性 $V_t = V_r + \alpha' + \beta i$ [V]	1.6 + 0.37 i	2.6 + 0.5 i	2.7 + 1.7 i
α' [V]	0.4	0.4	0.7
β (m Ω m ²)	0.37	0.5	1.7

各電解についてのこれらの諸元が示されている。

槽電圧の切下げは (i) α' および β の切下げという技術的な改良と (ii) 電流密度 i の低下という操業条件の変更によって達成できるが、電流密度の低下は生産速度の低下となるので、生産コストに占めるエネルギー費は切下げられても、その代償に固定費の増大を招き、省エネルギーは達成されても省資源に逆行することになる。この問題については 4 で取扱う。

したがって、 α' と β の切下げこそ省エネルギー技術の課題であり、電気量原単位については電流効率の 1 への向上である。電解電力原単位 W は (13) と (14) から

$$W = (V_r + \alpha' + \beta i) \cdot Q^\circ / \epsilon_F \quad (15)$$

となり、 α' と β の 0 への切下げと ϵ_F の 1 への向上が省エネルギーの技術目標である。

我国の現状は表 3 に示され、エネルギー効率 ϵ_w は 0.60~0.25 であって、理論的に必要最小限の電気エネルギーの 2~4 倍が消費され、その 1~3 倍の貴重な電気エネルギーが無駄に放熱されていることを示すとともに、理論ベースではエネルギーの有効利用の余地が大きく残されていることを示している。そのエネルギー効率向上の余地としては、まず電流効率はすでに 0.95~0.89 と 1 に近いので向上の余地は少ないが、電圧効率は 0.63~0.25 と低く、これが低いエネルギー効率を決定づけている。理論的に必要な槽電圧の 1.5~4 倍もの電圧を必要としており、理論値の 0.5~3 倍もの電圧降下が電流を流すために必要とされている。これは α' と βi によるものであるから α' と β の徹底した切下げが必要である。

4. 電解プロセスの最適化

電極の全表面積が S [㎡] の電解リアクターが設置されている電解工場で、電流密度 i [kA/㎡] で操業したとして生産能力は全電流 I (kA) = S (㎡) \cdot i (kA/㎡) に対応している。ここで時間 τ だけ操業した場合に要する全費用を P_c とすれば、これは時間に比例して必要となる経費である固定費と電気量に対応する生産量に比例して必要となる経費の比例費とに大別され、比例費は直接労務費と電解電力費以外の原料費および電解電力費とに別けて示され、

$$P_c = AS\tau + \underbrace{BQ + CQ(V_r + \alpha' + \beta i)}_{\text{比例費}} \quad (16)$$

全生産コスト 固定費

となる。ここで、 A は電解槽およびすべての付属設備、建物、敷地の費用を電極表面積あたりで示した建設費単価 [円/㎡] に金利、償却年限などで決まる係数 [1/

時間] を乗じた [円/㎡時間] 単位の固定費単価で、この外に時間に比例して必要な間接労務費や管理費の単価も [円/㎡時間] の単位で含まれる。

B は生産量に比例して必要となる原料費、電解電力以外の諸エネルギーや動力および生産量に比例して必要な労務費などのすべてを含む単価 [円/kAh] である。 Q なる電気量での生産量 W_j は $W_j = (Q/Q^\circ) \epsilon_F$ であるから

$$Q = W_j \cdot Q^\circ / \epsilon_F = S \cdot i \cdot \tau \quad (17)$$

であり、 $BQ = BW_j Q^\circ / \epsilon_F = (BQ^\circ / \epsilon_F) W_j = B' W_j$ となるので電解電力費以外の全比例費単価 B' [円/t] と B [円/kAh] とは $B' = BQ^\circ / \epsilon_F$ の関係にある。

C は電力単価で [円/kWh] である。

(16) は τ 時間の操業に要する全費用であるから、その間の電気量 $Q = S \cdot i \cdot \tau$ を代入して、 $S \cdot \tau = Q/i$ から

$$P_c = Q \{ A/i + B + C(V_r + \alpha' + \beta i) \} \quad (18)$$

となり、電流密度 i の減少で減少する経費である比例費の中での電解電力費と増大する経費の固定費を示すとともに、単位生産量あたりのコスト P'_c [円/t] は τ 時間操業の生産量 W_j から $P'_c = P_c / W_j$ 、 $W_j = (Q/Q^\circ) \epsilon_F$ であるので

$$P'_c = (Q^\circ / \epsilon_F) \{ A/i + B + C(V_r + \alpha' + \beta i) \} \quad (19)$$

となる。電流密度 i に正比例する項と反比例する項の和からなる生産コスト P'_c を最小にする電流密度 i_{opt} は $(dP'_c/di) = 0$ となる値で

$$i_{opt} = \sqrt{A/C\beta} \quad (20)$$

であり、この場合の最小のコスト $(P'_c)_{opt}$ は

$$(P'_c)_{opt} = (Q^\circ / \epsilon_F) (\sqrt{AC\beta} + B + C(V_r + \alpha') + \sqrt{AC\beta}) \quad (21)$$

となる。 i_{opt} は固定費と比例費の和である全生産コストを最小にする最経済的な電流密度である。

この最適電流密度は (20) から A が増大し、 C 、 β が減少すれば増大するが、電力単価 C が増大すれば減少する。最近のように、建設費の増大よりエネルギーコストの上昇が大きい場合は (A/C) は小さくなるので i_{opt} は低下し、電流密度を下げて操業するのが経済的である。

固定費と比例費の和が最小となるような最経済電流密度で操業した場合の生産コスト $(P'_c)_{opt}$ の切下げは、(i) 電流効率 ϵ_F の 1 への向上、(ii) α' 、 β の切下げという電解用電力の切下げ努力と (iii) C の切下げという電力単価の切下げによる電解電力費の切下げと (iv) 固定費の切下げによってなされることを (21) が示している。したがって、電解槽の省エネルギー化の改良で、 α' と

β を切下げの場合にも、これが電解槽の建設費単価の上昇を招かないようにしなければ生産コストは省エネルギーを行ってもかえって上昇する。 $(A \cdot \beta)$ が低下するようにしなければならない。以上の i_{opt} 、 $(P'c)_{opt}$ の考え方は単にトータルコストミニマムという経済的関心だけでなく、Aを電解設備に要する資源(エネルギー)の重要度指数、Cを電気エネルギーの重要度指数とした場合に省資源と省エネルギーを両立させ、それらのトータルをミニマムにする電流密度および生産量あたりに必要とする設備に投入された資源と生産に必要なエネルギーのトータルを示す点でも有用である。

5. 省エネルギー化の技術的限界とそのブレークスルー

表3に示される我国の代表的な工業電解のエネルギー原単位とエネルギー効率は米国をはじめとし諸外国にくらべ最もすぐれている。これは我国の電解工業がおかれている最もきびしいエネルギー立地の反映でもある。しかし、エネルギー効率が0.25~0.60ということは、まだ大巾な省エネルギーが可能な余裕が残されていることを示している。しかし、もはやこれ以上の省エネルギーはプロセスの本質を旧態のままにしておいて、単に化学工学的、電気工学的な改良を加えても推進できない壁に遭遇するまでになっている。

各電解について、電流効率のいっそうの向上と α' および β の切下げによる電圧効率の向上の推進に立ちはだかる障害を摘出すれば、そのあらまは次のとおりである。

(i) アルミニウム電解

(a)カソード(炉底)に析出した製品となるアルミニウムの一部が熔融塩中へ移行して、アノードで発生する炭酸ガスにより再酸化させるための約10%の電流効率の低下の抑止。これには電解浴組成、合目的なカソード構造と新しい炉材の採用を要す。(b)0.4[V]に及ぶ α' の切下げとしては、これが炭素アノードに原因があるところから、この過電圧が小さくて、しかもCO₂による高温酸化消耗の少ない炭素材料の探究。(c) β の0.37[mΩm²]の切下げはアノードとカソードとの電極間隔の現状4cmによる部分が約0.2[mΩm²]と大半を占めているので、この極間4cmを(a)の電流効率を低下させることなく切下げられるかどうかにかかっており、(a)の改良の成否が関係する。この4cmには約1.4[V]の電圧降下、アルミニウム1[t]あたり4,600

[kWh]以上のエネルギー損失がある。この極間1cmの短縮が実現すれば、アルミニウム年産10万トンの工場において年間1億[kWh]以上の省電力、15億円もの節約となるところから経済効果は大きい。

(ii) 塩素・アルカリ電解

(a)電流効率は隔膜あるいはイオン交換膜の機能特性できまるところから、いっそうの向上はこれらの改良にかかっている。(b)0.4[V]の α' は主として現用の軟鋼カソードの水素発生反応に原因があるので、その電極材料の改良に関心が集まっている。(c) β の0.5[mΩm²]は主として隔膜の抵抗によるもので、その切下げは抵抗がより小さい隔膜・イオン交換膜で、しかも電流効率のよいものの開発にかかっている。さらに、電極間隔の徹底的な短縮ができるような電極構造の改良が行われる。

(iii) 亜鉛電解

(a)電流効率の向上は、電解液の浄液管理の徹底により向上の余地がある。(b) α' の0.7[V]は現用の鉛アノードによる酸素発生にあるので、電極材料の改良を避けては省エネルギーは達成できない。(c) β の1.7[mΩm²]は電解液組成、液温の変更による導電率の向上と電極間隔の短縮などにより多少の切下げは可能であるが、これらの変更による電流効率の低下に留意した上で総合的に検討する必要がある。

6. 工業電解の実現可能な省エネルギー

以上の検討から、そのための研究開発は必要とするものの、実現が見込まれる省エネルギーを行なった場合の電力原単位の予測値を現状と並べて示せば表4となる。また、表1、2に示した1974年度の生産を、

表4 現在の原単位及び将来の実行可能な原単位予測

	Meredith 報告*1		日本における値		
	現状 (kWh/t)	将来 (kWh/t)	現状 (kWh/t)	将来 (kWh/t)	
アルミニウム	17,550	9,040	14,000	12,300	(11,000)
塩素	3,440	1,980	2,800	2,300	
マグネシウム	18,520	16,090	16,400	13,000	
ナトリウム	10,580	9,480	9,700	6,000	
塩素酸カリ	6,170	4,410	6,200		
亜鉛	3,530	2,870	3,300	2,800	
マンガン	11,020	7,940	9,000	8,000	
クロム			16,500	15,000	
ニッケル			2,700	2,100	
節約量推定*2 (10 ⁶ kWh)	54,104	45%	3,920 (5,376)	15% (21%)	

*1 R. E. Meredith, 日根文男訳ソーダと塩素 Vol. 30, No. 3, 110~122(1979)

*2 1974年生産量を実行可能な将来の原単位で生産したと仮定したときの電力総消費量を求め、節約量を算出した。

もしこの省エネルギーを行ったと仮定した場合の直接電解電力の節約量をも示している。これは261.6億kWhの15%にも及ぶ39.2億kWhに達し、日本国有鉄道の年間消費電力の約4割をまかないうるものである。Meredith報告にある。これと同様な米国の予測と比較すると、我国の3倍に達する45%もの節約率となっている。この大きな差異は、アルミニウム電解にみられるように現状の原単位が米国では古い設備に引きずられて悪く、日本ではすでに省エネルギーが進んでいるためである。また、最大手のアルミニウム電解の将来について、米国は9,040[kWh/t]と予測しているのに、日本では12,300[kWh/t]に止めているのが大きな差異となっている。米国の予測は塩化アルミニウムの電解法の採用という現行のプロセスの本質的変更を含むもので、日本の予測では、商業的な実現性のないプロセス変更は採用せず現行法の省エネルギーだけを推進し、しかも極間の4cmの短縮には触れないことにして、12,300[kWh/t]を目標値としている。これを1cmだけ短縮すれば11,000[kWh/t]となり、表4の()内数値のように約15億[kWh]の節約がさらに推進されて、工業電解全体で21%の節約が達成される。

7. おわりに

基幹産業の生産活動、国民生活に不可欠な原料、資材のうちアルミニウム、塩素・アルカリ、亜鉛、銅などは工業電解プロセス以外の方法で工業的に大量生産はできない。これらの生産の最も省エネルギー、省資源の方法が工業電解法であり、このプロセスのいっそうの省エネルギーについて論じている。

工業電解は電気化学リアクターで行なわれるが、このリアクターは (i)アノード、(ii)カソードの2種の電極材料とこれと接する (iii)電解質材料および (iv)隔膜材料の4種の機能材料(エネルギー材料)によってその機能が決定される。電気化学リアクターを本質的に省エネルギー的に改良するためには、その機能を左右するこれらのエネルギー材料の改良によって初めて可能となる。

化石燃料の化学エネルギーを燃焼熱とし、これを熱機関によって機械エネルギー、電気エネルギーへと変換する火力発電方式では化学エネルギーは約35%の低い変換効率でしか電気エネルギーにならない。化学エネルギーを理論的には100%の効率で電気エネルギーへ変換することが可能な発電方式として電気化学リアクターを利用する燃料電池発電がある。また、電気化

学リアクターを利用する電気エネルギーと化学エネルギーの相互の直接変換は電気エネルギーの貯蔵方式としても将来のエネルギーシステムの注目するところであるが、これらの問題はさておき、この変換の理論効率の高い燃料電池発電方式を電解槽の内部に組込んで、電解槽が電解による生産に必要な電気エネルギーの一部だけでも化学エネルギーを直接に電力として自給することができれば、その部分については低効率の火力発電による電力の肩代りをするので合理的である。

燃料電池発電とは燃料極であるアノードにおける燃料の酸化反応と酸素極であるカソードにおける酸化剤の還元反応として燃料の燃焼反応を行なわせるものである。これを電解槽の中に組み込むことは、別に新しいことではなく、すでに1889年に現行のアルミニウム電解製錬プロセスが誕生した時から行なわれている。

2で述べたようにアルミナの直接電解の反応(6)に比べ炭素の化学エネルギーを利用する現行の反応(3)でアルミニウム1トンあたり理論ベースで0.334[t]の炭素とひきかえに3,066[kWh]の電力を節約することになる。同様な考え方は、反応(5)に示す亜鉛電解のアノードでの酸素発生を、亜鉛鉱石の製錬で必ず副生する二酸化イオウの硫酸への酸化反応や反応(8)で示されるメタノールの炭酸ガスへの酸化反応として、それらの化学エネルギーの利用で大幅な理論電力の切下げを実現しようとしている。隔膜法・イオン交換膜の塩素・アルカリ電解において反応(7)に示す酸素極の利用は現行の反応(4)の水素発生のカソード反応を酸素の還元による水の生成反応に置きかえて理論電力を切下げることであり、現行法で得られる水素の化学エネルギーを電解槽の中で電力に変換して利用するものである。

以上の発想は、アルミニウム電解において固体炭素燃料極の利用として実現されている一実際にはこのような化学エネルギーの利用をねらってプロセスが発明されたのではなく、酸素発生を行いうる非消耗のアノード材料が当時は勿論、現在でもないため考えだされた一。このアルミニウム電解以外では気体または液体の燃料極または酸素極を利用しようとするもので、その商業的な成否は、それらの電解プロセスの最適な電流密度を負担できて、長寿命で貴重な資源を有効に利用した燃料極および酸素極の開発如何が条件となり、これまたエネルギー材料の問題である。

また、ここで留意すべきは、以上の化学エネルギーの利用は二酸化イオウのように無価値な副生物の有効利用は末長く有意義であるが、炭素、メタノール、水

素の利用は、現在を中心とする化石燃料主流の発電世代での化石燃料の有効利用としての意義に限られ、化石燃料が枯渇し、発電方式が核エネルギー主流となる世代では電気エネルギーだけで行う本来の直接電解が主役となり、アルミニウム電解の酸素発生を行いうる非消耗のアノード材料もこの時期に備えて開発が望まれる。

世に、貴重な電気エネルギーの使用をやめて、非電解的な方法でアルミニウムや塩素・アルカリ、亜鉛などを製造すべしという夢をそそる魅力的な議論がある。しかし、これらの製造プロセスとしては電解法が原理的に最も省資源的で環境汚染も少なくエネルギーの有効利用度も高いことが、詳しく検討すればするほど明確となる。非電解法については直観的な安易な発想ではなく慎重な検討が望まれる。

また、我国の極めて不利なエネルギー立地、海外に比べ最高の電気化学用電力単価により、省エネルギー技術による多少の電力原単位の切下げがなされたとしても、これでは到底、電解電力費の海外との格差を吸収することができないので技術的な解決の限界を感じるのあまり、省エネルギー技術の推進そのものに対してもその意義を過小評価する向きもある。

しかし、これらの産業の基幹となる原料、資材をすべて、エネルギー立地のよい海外で調達することはナショナル セキュリティーの面から問題があり、アルミニウムでは年産100万トンの国内製錬が必要とされるとのことである。これらの国内で行う電解工業に対してはエネルギー原単位の切下げしか途はない。我国の工業活動がアルミニウム、塩素・アルカリ、亜鉛を初めとする各種の電解製品を大量に消費して支えられる限り、国内での電解を縮小した分だけ海外での電解で調達することになり、全世界的にみれば我国が消費する電解製品に必要な電気エネルギーはかわらない。工業電解に必要な貴重な電気エネルギーの有効利用技術を確立して海外へも供与することがエネルギーを海外に依存する我国の責務であり、意義はここにある。

文 献

一般的なもの。

高橋正雄，増子昇，工業電解の化学 (株) アグネ (昭和54年) 我国の現状について，

(社) 電気化学協会：エネルギー会議 省エネルギー委員会報告書，「電気化学工業の省エネルギーとエネルギー管理 (昭和54年)」昭和55年5月15日。

