論文

チリにおける銅生産システムの ライフサイクルインベントリ分析*

成田 暢彦¹ 一坪 幸輝² 匂坂 正幸³
茂呂 端生⁴ 稲葉 敦⁵

Life Cycle Inventory Analysis of Copper Production System in Chile

by Nobuhiko NARITA^a, Kohki ICHITSUBO^b,

Masayuki SAGISAKA^c, Tadao MORO^b and Atsushi INABA^c

a. Nippon Steel Technoresearch Corporation, Hon-machi 4-40, Naka-ku Yokohama, 231-0005, Japan

b. School of Science & Engineering, Waseda University

c. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan

CO₂ and SO₂ emissions from the copper production system in Chile were quantitatively evaluated using Life Cycle Assessment (LCA) technique. In this study, inventories such as the fuel consumption of the unit processes were based on published papers. The following observations were made based on LCI analysis:

(1) CO₂ emissions from the pyro- and hydro- metallurgical copper are about 0.88kg and 2.36 kg/kg-Cu, respectively. And, 1.9kWh and 3.0 kWh/kg-Cu were consumed for the electricity, respectively. There is much variance in the CO₂ emissions between pyro- and hydro- metallurgical copper, because sulfuric acid originated from the pyro-process is used for the leaching of hydro-process.

(2) SO₂ emissions from the pyro- and hydro- metallurgical copper are about 0.19kg and 0.23 kg/kg-Cu, respectively. The desulfurization ratio on pyro-metallurgical copper production in Chile is estimated to be 81%, which is lower than that of Japan.

(3) Pyro- and hydro-metallurgical coppers have a complementary relationship in the range of self-sufficient sulfuric acid.

The environmental burden to soil and water from the copper production system should be evaluated, because it is not covered in this study

KEY WORDS : Copper, Pyro-metallurgy, Hydro-metallurgy, Life Cycle Assessment, Sulfuric Acid, Chile

1. はじめに

著者らは、前報¹⁾で我が国における電気銅生産システムのCO₂排出についてライフサイクルインベントリ(LCI)分析を実施した。その結果、電気銅のCO₂排出に関する過去の研究では、銅生産システムの環境負荷を、硫酸原料となるSO₂に配分する方法が異なるので、電気銅のCO₂排出はSO₂を含めた生産システムとして評価することが重要であることなどを示した。しかしながら、我が国には国内で生産される電気銅ばかりでなく、チリなどから輸入された銅も供給されており、国内供給の約2割は輸入に依存している²⁾。一方、我が国に銅地金を輸出しているチリでは、乾式製錬による銅(以下、乾式銅)生産に加え、湿式製錬(SX-EW:溶媒抽出-電解採取法)による生産が急速に拡大している³⁾。しかしながら、湿式製錬で生産された銅(以下、湿式銅)生産までの環境負荷は、大規模の生産が近年普及したばかりなので、過去にLCI分析された事例がない。

したがって、我が国に供給される銅の環境負荷を把握するため

には、乾式製錬に加え湿式製錬で生産された銅の環境負荷の評価が欠かせない。そこで、本研究では代表的な銅の生産国であるチリにおける、乾式および湿式製錬による銅の環境負荷を明らかにすることを目的として、エネルギー消費量と密接な関係があるCO₂排出および酸性雨の原因となるSO₂排出を対象に、LCI分析を実施した。

2. チリにおける銅の需給状況

チリは、銅精鉱の供給国であるとともに、電気銅の最大の生産国である。Fig.1にはチリにおける鉱石(銅換算)および銅生産の推移を示した³⁾。硫化鉱を原料とする乾式銅の生産量は1990年以降、約100万tで大きな増加がないのに対し、主に酸化鉱を原料とする湿式銅の生産は1994年以降急激に増加し、1998年には乾式銅にほぼ匹敵する110万tが生産された。銅の浸出を利用する湿式製錬では、大量の硫酸が消費されるので、原料となる酸化鉱に加え、硫酸の供給体制が整っていることが必要である。そのため、チリでは乾式製錬で併産される硫酸の生産量は90万t(1990年)から290万t(1998年)へと急激に増加している⁴⁾(Fig.1)。この硫酸生産量の増加は、チリで1994年に制定された環境基本法に基づいたSO₂排出規制の強化に対応しており、チリの乾式銅製錬所における硫黄の硫酸への固定率(以下、脱硫率)は32%(1990年)から81%(1998年)へと大幅に向上したと推測される。(脱硫率は、鉱石中の硫黄量と回収硫酸中の硫黄量の比から算定した。)このように、チリにおける乾式銅、湿式銅生産は、それぞれ硫酸の供給元、需要先の関係を有しており、相互補完的な役割を果た

* 2000年10月30日受付 2001年3月6日受理

1. (株)日鐵テクノロジーサーチ研究開発部 技術主管(現 (社)産業環境管理協会)

2. 早稲田大学学生 理工学部

3. 正会員 工博 産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

4. 正会員 早稲田大学教授 理工学部環境資源工学科

5. 工博 産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

[著者連絡先] FAX 03-3832-2774 (産環協)

E-mail: narita@jemai.or.jp

キーワード: 銅, 乾式製錬, 湿式製錬, ライフサイクルアセスメント, 硫酸, チリ

Fig.1 Transition of the production of copper ore, copper and sulfuric acid in Chile.

している。しかしながら、チリでは銅製錬ガスを原料とする硫酸のみでは、湿式製錬を主体とする硫酸需要をまかなえないので、我が国などから年間消費量の12%に相当する40万tの硫酸を輸入している⁴⁾⁵⁾。ここで、チリでは原油脱硫などで生産される単体硫黄を原料とする硫酸は、製錬ガスを原料とするものの5%に相当する15万tしか生産されていないので⁴⁾、輸入以外の硫酸は乾式銅の生産工程で併産されていると考えることができる。なお、Fig.1で示される鉱石生産量と銅生産量の差は、海外に輸出されている銅精鉱に相当し、1998年には約140万t-Cu相当の銅精鉱が輸出されている。

一方、チリにおける銅の需要は小さいので、生産された乾式・湿式銅の90%がアジア、アメリカ地域を中心に輸出されている³⁾。

3. 銅生産のインベントリ

乾式および湿式銅生産までのCO₂、SO₂排出を定量的に評価するため、本研究では銅生産までの各素工程における環境負荷を計量する「積み上げ法」によるLCI分析を実施した。

3・1 システム境界

LCAの検討結果は、システム境界により大きく左右される。本研究では、最新のデータが揃っている1998年を対象に、「チリにおける鉱石等資材の採掘」から「チリにおける乾式・湿式銅生産システム」までを検討対象とした。ここで、銅生産システムとは、銅製錬で生産される銅に加え、併産される硫酸を含むシステム全体を意味する。ただし、乾式製錬で併産される金銀は、システムに含まれていない。

3・2 乾式製錬

チリにおける乾式銅生産に要するエネルギー消費原単位は、前報¹⁾で示した我が国の平均的な乾式製錬のマテリアルフローおよびエネルギー消費と同一であると仮定した。チリでは、近年反射炉から自溶炉への転換が急速に進み、エネルギー消費原単位が削減されており⁶⁾、またチリの代表的な乾式製錬所における電解精製工程の電力消費原単位は我が国のそれとほぼ等しいので⁷⁾、我が国の生産システムと同一と仮定することは妥当と考えられる。ここで、前報¹⁾と同様に、銅製錬で消費される酸素量は深冷分離方式により自家製造されていると仮定した。Fig.2に示した乾式製錬のマット工程、転炉工程で排出されるSO₂は、前報¹⁾と同様にTable 1に示した各中間製品の硫黄バランスから算定した。なお、硫酸原料として用いられるSO₂は環境への排出ではないので、硫酸生産量から推計されるSO₂は環境への排出から差し引いた。ここで、硫酸原料となるSO₂を併産するマット工程および転炉工程では、ISO-LCA⁸⁾に従い、物理的関係を反映する重量基準の配分手法を採用し、銅中間製品（マット、粗銅）とSO₂に原料を配分した。なお、電解精製工程で発生するアノードスライムからは金、銀などの貴金属が回収されるが、その量は約1%と少なく、

Fig.2 Material flow for producing pyro- and hydro-metallurgical copper in Chile.

Table 1 Constitution of primary ore and secondary products for pyro-metallurgical copper production

	primary ore	secondary products	
Material	Cu concentrate	Cu matte	Blister Cu
Cu	32%	60%	98%
Fe	23%	16%	
S	34%	23%	
CaO	0%		
SiO ₂	7%		
Al ₂ O ₃	3%		

電気銅の環境負荷に及ぼす影響は小さいので、前報と同様に配分の対象とはしなかった¹⁾。ただし、電解精製工程で発生するスライムに価格基準で原料を配分した場合には、電気銅のCO₂排出量は小さくなる可能性がある⁹⁾。

Fig.3には、前報¹⁾の分析に基づいたチリにおける乾式銅生産までの主要な原燃料のマテリアルバランスおよびエネルギーバランスを示す。この図の上段は硫酸の生産に、下段は乾式銅の生産に対応しており、乾式銅1kgを生産するとき、硫酸2.4kgが併産される。ここで、銅生産までに消費される電力は、前報¹⁾で示した我が国と同様に、自家発電が30%、購入電力が70%で構成されていると仮定した。これは、我が国と同様、チリにおいてもマット工程、転炉工程での廃熱が回収され、自家発電に有効利用されていると仮定したことを意味する。また、購入電力には水力発電が過半を占めるチリの電力構成¹⁰⁾に基づく環境負荷を適用した。

3・3 湿式製錬

湿式製錬による銅生産は、Fig.2に示すように、採掘・粉砕、塊状化、浸出・抽出・逆抽出、電解採取工程で構成され¹¹⁾、乾式製錬における硫酸などの併産物は産出されない。湿式製錬では、乾式製錬で必要とされるマット工程などが省略されるが、浸出工程などで乾式製錬の併産物である硫酸を大量に消費する。以下に、文献などに基づき作成した各工程における入出力データ（インベントリ）設定の考え方を示した。

Fig.3 Material and energy balance for producing pyro-metallurgical Cu and H₂SO₄ in Chile.

3・3・1 鉱石採掘・粉碎 湿式製錬では、主に酸化鉱が用いられるので、チリの代表的な酸化鉱山での操業データ¹²⁾から、採掘・粉碎にはFig.4のように鉱石1 kg当たり0.006 kWhの電力および0.001 kgの軽油が消費されると仮定した。ここで、乾式製錬の原料として用いられる銅精鉱は、浮選によって銅品位を高めるために、0.2 mm前後の微細粒まで粉碎されるが、湿式製錬の原料となる酸化鉱は約10 mmまでの粗粉碎で次工程に供されるので、この工程での電力消費は乾式製錬のそれより小さい。

3・3・2 塊状化(硫酸アグロメレーション) 塊状化は、浸出時の透水性の向上を図るとともに、浸出反応の迅速化を目的に実施されるが、塊鉱が浸出により崩壊する鉱石では採掘したままの鉱石(−100 mm)をそのまま浸出に供する場合もある¹³⁾。しかしながら、代表的な湿式製錬所の工程を調査した文献¹⁴⁾によれば、硫酸を添加する塊状化(硫酸アグロメレーション)が多くの製錬所で採用されているので、本研究では文献³⁾¹⁵⁾に示された原燃料消費に基づいて硫酸アグロメレーションがFig.5のように実施されていると仮定した。なお、ここでは水(約5%)も添加されるが¹⁵⁾、図中では省略した。

3・3・3 浸出・抽出・逆抽出 塊状化された酸化鉱は、主に平坦地に堆積された後、硫酸や水を散布することによって、銅イオンを含む浸出貴液が得られる(浸出工程)。この浸出貴液はpHを調整し、灯油で希釈された抽出剤と混合され、イオン交換反応により銅が選択的に抽出される(抽出工程)。この高濃度の銅を含む抽出液は、高濃度の硫酸を用いて逆抽出され、銅イオン濃度が高められる(逆抽出工程)。ここで、廃液処理や使用後の抽出剤の再精製によって、Fig.6に示すように硫酸および抽出剤は循環利用されるので、一つの単位工程として取り扱うことにした。

浸出から逆抽出を経て得られる電解液の生産までには、文献¹⁴⁾に示されているチリの代表的な湿式製錬所の消費電力からFig.6のエネルギーを消費すると仮定した。ここで、中間製品となる電解液は、銅1 kgを含む電解液と定義した。この単位工程で、浸出貴液中の銅濃度は2 kg/m³から、電解採取に供される電解液の50 kg/m³に高められるので³⁾、1 kgの銅を含んだ電解液を得るまでには膨大な量の硫酸が循環されていると推測できる。したがって、本工程で消費される電力は、硫酸および抽出剤の循環や再精製に要するエネルギーに相当すると考えられる。なお、抽出剤の消費

Fig.4 Inventory for the production of crushed ore for agglomerate.

Fig.5 Inventory for the production of agglomerate.

Fig.6 Inventory for the production of rich electrolyte.

Fig.7 Inventory for the production of hydro-metallurgical Cu.

Fig.8 Material and energy balance for producing hydro-metallurgical Copper in Chile.

量は湿式銅1 kg当たり1.5 gと小さく¹⁶⁾、基本的には循環利用されるので、その消費量は考慮しなかった。また、この単位工程では酸化鉱を主体とする廃棄物が約90 kg排出されるが、その処理方式は明らかにされていない。今後、廃棄物の処理工程を明らかにすることが課題である。

3・3・4 電解採取 高濃度の銅を含む電解液からは電解採取法により、高純度の銅が生産される。Fig.7に示した電解採取での電力消費原単位は、文献¹⁴⁾から1.77 kWh/kg-湿式銅と設定したが、これは下記の電力消費量の推測¹⁷⁾からもほぼ妥当な値である。

$P(\text{kWh/kg}) = Q_0 \times Vb / \varepsilon = 0.844 \times 2 / 0.90 = 1.88 \text{ kWh/kg-湿式銅}$

ここで、 Q_0 : 銅電気分解の理論電気量、 Vb : 浴電圧、 ε : 電流効率。Fig.8には、前項までに示した湿式銅生産までの主要な原燃料のマスマランスおよびエネルギーバランスを示す。湿式銅1 kg生産までには、3.0 kWhの電力および3 kgの硫酸を消費し、乾式銅の約1.9 kWhよりも電力消費が大きい。

採掘から製錬前処理工程までの電力消費量は、乾式、湿式製錬でそれぞれ0.82 kWh、0.51 kWhであった。これは、湿式製錬では浮選を経ないで微粉碎が不要であり、電力消費量が少ないことに対応している。一方、湿式製錬では電力を消費するイオン交換による銅の濃縮、電解採取工程を経るので、乾式製錬よりも電力消費量が多い。

ここで、湿式製錬では、乾式製錬のように副生される蒸気はないので、電力はすべて購入電力でまかなわれると仮定した。なお、硫酸の一部は各国から輸入されているが、チリの輸入硫酸の4割(1997年)を占める我が国からすべて輸入されていると仮定した。ここで輸入される硫酸は、我が国の硫酸生産の約5割を占める銅乾式製錬で併産され¹⁸⁾、そのCO₂排出原単位は前報¹⁾の分析結果からチリへの輸送を含め0.59 kg-CO₂/kgと仮定した。

また、塊状化工程および浸出から逆抽出までの工程における硫酸消費原単位(3 kg/kg-湿式銅)から算定した硫酸消費量は、チリにおける硫酸消費量の統計データ⁴⁾とほぼ一致した。

3・4 分析手法

Fig.3で示したように、乾式製錬ではマットおよび転炉の2つの工程で硫酸の原料となるSO₂が併産されるので、これらの工程における原燃料消費の取り扱いにより乾式銅および硫酸の環境負荷は大きく異なる。また、湿式製錬では、乾式製錬の併産物であるSO₂を原料とした硫酸を大量に消費するので、硫酸の環境負荷の評価手法により、湿式銅の環境負荷は異なると推測される。本研究では乾式製錬で併産される硫酸原料となるSO₂を製品と考え、乾式製錬に要する原燃料消費を銅中間製品(マット、粗銅)とSO₂に重量基準で配分した。一方、湿式製錬では銅以外に併産物はないので、原燃料消費はすべて銅に配分される。

上記の仮定に基づき、資源環境技術総合研究所の開発している

LCA ソフト「NIRE-LCA ver.3」¹⁹⁾を用いて、銅生産までの環境負荷を試算した。

4. 結 果

乾式および湿式製錬で生産される銅の環境負荷を比較した結果を Fig.9 に示す。乾式銅および湿式銅の CO₂ 排出量は、おのおの 0.88 kg、2.36 kg/kg-Cu と試算された。乾式銅の CO₂ 排出のうち、全体の約 4 割は電力に誘発された CO₂ 排出であり、ほかは採掘・選鉱時に消費される軽油を主体とする燃料の燃焼時の CO₂ 排出に相当する。

一方、湿式製錬の電力消費量は乾式製錬より大きいので、全体の CO₂ 排出の 5 割以上が電力に誘発され、ほかは乾式銅と同様に採掘時に消費された軽油の燃焼に相当している。また、輸入された硫酸の CO₂ 排出は、0.21 kg で全体の約 9 % に相当する。

ここで、乾式製錬で消費される電力の CO₂ 排出原単位は 0.35 kg-CO₂/kWh で、湿式製錬で消費されるチリの公共電力の原単位 (0.31 kg-CO₂/kWh) とほぼ等しい。湿式製錬では電力消費が大きく、乾式製錬で併産される硫酸を消費する場合には、乾式銅の 2.5 倍以上の CO₂ が排出されることになる。

乾式銅および湿式銅生産までの SO₂ 排出量は、おのおの 0.19 kg、0.23 kg であり、大きな差異はない。湿式製錬で発生する硫酸ミストは最終的には水圏、土壌に排出されると考えられるので、大気圏へ SO₂ は排出されないが、乾式製錬で排出される SO₂ 排出が硫酸に配分されるので、湿式銅も SO₂ を排出する。

5. 考 察

5・1 電力消費原単位の妥当性

湿式銅の生産までの CO₂ 排出のうち、電力に誘発されている割合が 5 割以上と大きい。しかし、湿式製錬での環境負荷については、過去に分析された事例がない。そこで、本研究で設定した湿式製錬の電力消費原単位の妥当性を検討した。

チリの電力消費量の内訳は、OECD の発行している統計資料¹⁰⁾により把握でき、1997 年のチリの全電力消費量 31 TWh の約 3 割を占める 9 TWh が、非鉄製錬業で消費されていることが示されている。チリでは銅製錬で併産される金、銀を初め、銅精鉱の併産物としてモリブデンが製錬されている²⁰⁾が、圧倒的に銅製錬の占める割合が高い²¹⁾。したがって、前章 4. までに得られた電力消費原単位と乾式・湿式銅生産量から銅生産までの電力消費量を推測することにより、設定された電力消費原単位の妥当性を検討することができる。ここでは、1990 年以降の非鉄製錬業の電力消費量の推移と、本研究で得られた乾式・湿式製錬の電力消費原単位から推測される電力消費量の関係を検討した。

その結果、Fig.10 に示すように、チリ国内での乾式・湿式製錬の電力消費量と、輸出される銅精鉱の粉碎・浮選電力消費量の総計は、チリでの非鉄製錬業の消費電力量増大の傾向をほぼ反映

Fig.10 Comparison of electricity consumption in statistics with estimated consumption of this study.

していることが示された。Fig.10 で、統計値と推測値の差異は金、銀、モリブデンなどの非鉄金属の採掘、製錬に要する電力に相当し、金、銀およびモリブデンの生産量はほぼ一定であるので²¹⁾、本研究で仮定した電力消費量が妥当であると考えられる。

5・2 銅の環境負荷の変動因子

5・2・1 配分手法の影響 本研究では、併産物のある工程での原燃料を、もっとも一般的な重量基準で配分した。しかし、併産される SO₂ を原料とする硫酸は「副産品」であるので、原燃料を配分せず、乾式銅のみに環境負荷を配分する手法も適用できる。そこで、以下には配分手法による CO₂ 排出量の差異について検討した。

その結果、硫酸に原燃料消費が配分されない場合の乾式銅の CO₂ 排出量は Fig.11 に示すように、1.68 kg/kg-Cu と試算された。ここで、乾式銅の CO₂ 排出量は、重量基準の配分法では硫酸に配分された原燃料消費を、乾式銅の CO₂ 排出量に加算することを意味するので、硫酸に原燃料消費を配分した場合の乾式銅の CO₂ 排出である 0.88 kg より大きく、1.68 kg と評価される。これは、単位重量 (1 kg) の乾式銅と付随した硫酸 (2.37 kg : Fig.3 参照) を生産する「乾式銅生産システム」全体の CO₂ 排出量に相当する。一方、湿式製錬で消費される硫酸の CO₂ 排出は、既に乾式銅に加算されているので、「0」である。したがって、湿式銅の CO₂ 排出量は、Fig.9 の 2.36 kg から硫酸の CO₂ 排出相当分が減ぜられ、1.27 kg/kg-Cu と評価される。

このように、乾式、湿式銅の CO₂ 排出量は、硫酸に原燃料消費を配分する手法によって異なる。しかし、現在では、湿式銅の品質は乾式銅のそれに劣らず、区別されないの、乾式銅、湿式銅それぞれの CO₂ 排出量を評価するよりも、「銅」生産システム全体の環境負荷を評価することが適切である。ここで「銅」は、乾式銅と湿式銅の生産量を考慮した平均的な銅を示す。1998 年には、

Fig.9 Comparison of CO₂, SO₂ emissions between pyro- and hydro-metallurgical copper.

Fig.11 Effects of the allocation on CO₂ emissions between pyro- and hydro-metallurgical coppers.

乾式、湿式銅の生産比は、それぞれ 52.5 %、47.5 % であるので、硫酸に原燃料消費が配分されない場合、「銅」の CO_2 排出量は、 $1.48 \text{ kg} (= 1.68 \times 0.525 + 1.27 \times 0.475)$ である。一方、硫酸に原燃料を配分した場合 (Fig.9) には、チリ国内で $1.48 \text{ kg} (= 0.88 \times 0.525 + (2.36 - 0.21) \times 0.475)$ の CO_2 が排出され、配分手法によらず、「銅」の CO_2 排出量は一定である。

5・2・2 湿式製錬増加による環境負荷の変化 チリでは、 SO_2 排出規制の強化に伴い、製錬ガス中の SO_2 を硫酸として固定化し、生産された硫酸は湿式製錬で消費されてきた。したがって、ほぼ硫酸需給はバランスし、硫酸生産量が湿式銅の生産量を支配してきた。1990 年以降、脱硫率が高まった結果、銅生産に占める湿式銅の生産比は増大し、1998 年にはそれらの生産量はほぼ等しくなっている。

そこで、1990 年以降の「銅」生産 1 kg 当たりの CO_2 、 SO_2 排出の変化を、銅生産に占める湿式銅の生産比を変数にして試算した。ここで、過去の銅生産の原燃料消費原単位は本研究で用いた条件と等しく、脱硫率（すなわち、硫酸生産量）のみが変化すると仮定した。

その結果、Fig.12 に示すように、「銅」1 kg 当たりの SO_2 排出量は脱硫率が高まったので、湿式銅生産比とともに急激に低下したと試算された。ここで、湿式銅生産比が 0.23 における SO_2 排出量（約 1 kg/kg-Cu ）は、脱硫率 32 %（1990 年）に相当している。また、湿式銅生産比が 0.5 では、鉱石中に含まれる硫黄のすべてが硫酸に固定される。したがって、湿式銅生産比が 0.5 以上では湿式製錬に必要な硫酸をチリの銅乾式製錬からは供給できないので、湿式製錬拡大のためには硫酸を外部から調達する必要がある。これは、湿式銅生産比が 0.5 未満では乾式製錬と湿式製錬は相互補完の関係を有していたことを意味している。

また、「銅」生産システムにおける CO_2 排出は湿式銅生産比とともに徐々に削減されたと試算された (Fig.12)。この理由は、次のように考えられる。脱硫率とともに硫酸生産量が高まると、湿式銅の生産比が高まるので、電力消費量は増大し、電力誘発の CO_2 排出量は増える。しかし、乾式製錬で消費されていたエネルギーに誘発される CO_2 が削減されるので、「銅」生産システム全体としての CO_2 排出量は削減される。

しかし、湿式銅生産比が 0.5 以上では、銅乾式製錬から硫酸が供給されないため、輸入などによって新たに供給される硫酸の CO_2 排出により、「銅」生産システム全体の CO_2 排出量は変化する。たとえば、仮想的にチリでの乾式製錬と同様なシステムで生産される硫酸に CO_2 排出が配分された場合には、Fig.12 中の (a) のように、「銅」の CO_2 排出は急激に増大する。しかし、外部調達される硫酸に CO_2 排出が配分されない場合には (b) のように、湿式銅の CO_2 排出量は 1.27 kg である。なお、(c) は本研究で仮定した「我が国から外部調達された硫酸」がある場合の CO_2 排出に相当し、輸入硫酸に誘発される CO_2 排出が加算されるので、湿式銅の CO_2 排出量は 2.36 kg と試算される。

このように、1990 年以降のチリの「銅」生産システム全体の CO_2 排出原単位が低下してきたのは、乾式製錬で消費されていたエネルギーに誘発される CO_2 排出が削減されたためである。しかし、湿式銅生産比が 0.5 以上では硫酸を銅製錬から供給できなくなるので、外部調達される硫酸に依存した湿式銅生産比の増大は、硫酸に原燃料が配分された場合 Fig.12 中の (a) のように「銅」1 kg 当たりの CO_2 排出量を急激に増加させることとなる。

一方、チリの電力供給の主力であった水力発電量は Fig.13 に示すように、1992 年以降ほぼ一定で、近年は火力発電量が急激に増大している¹⁰⁾。その結果、Fig.13 中に示したように、チリの電源構成に占める水力発電比率は、75 %（1992 年）から 55 %（1998 年）へと低下を続けているので、今後湿式製錬の拡大に伴う電力は火力発電によってまかなわれると考えられる。これは、電力の CO_2 排出原単位の増加を導くので、電力を多消費する湿式銅の CO_2 排

Fig.12 Relationship between CO_2 , SO_2 emissions and ratio of hydro-metallurgical copper.

出量が一層増大することを意味し、「銅」生産システムの CO_2 排出を増加させる。

5・3 我が国に供給される銅の環境負荷

我が国が輸入している銅（陰極銅相当）は、約 27 万 t であり（1998 年）、そのうちチリからは約 1/2 に相当する 13 万 t が輸入されている²⁾。残りは、ザンビア、ペルーなどから輸入されている。本節 5・3 では、我が国に輸入される銅の約 1/2 を占めるチリの銅と我が国で生産される乾式銅の環境負荷を比較した。

重量基準の配分を用いて、我が国で生産される乾式銅とチリから輸入される乾式・湿式銅の CO_2 排出原単位を比較した結果を Fig.14 に示した。ここで、チリから輸入される銅には、我が国への輸送に伴う公海上の CO_2 排出が付加されている。この図から、我が国の乾式製錬では、硫黄を硫酸に固定する比率が 90 % と高いので、乾式銅に配分される原燃料消費が小さいにもかかわらず、チリから輸入された乾式銅と CO_2 排出が等しい。これは、我が国とチリとの電源構成が異なり、我が国の公共電力の CO_2 排出原単位 (0.42 kg/kWh) とチリのそれ (0.31 kg/kWh) との差がチリの脱硫率の低さ (81 %) を補った結果と考えられる。また、チリから輸入される湿式銅の CO_2 排出原単位は、チリ国内での電力誘発 CO_2 排出が大きく、我が国から輸入される硫酸の CO_2 排出も加算されるので、乾式銅の 2.5 倍であった。一方、チリから輸入される乾式・湿式銅の SO_2 排出は、Fig.9 に示したように、約 0.2 kg/kg-Cu である。我が国では、鉱石中に含まれる硫黄の 99 % は、硫酸および石膏に固定され、残りの約 1 % が環境中に放出されると報告されているので²²⁾、乾式銅 1 kg 当たりの SO_2 排出量は下記から 0.01 kg と推測される。

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 \text{ 排出}(\text{kg/kg-Cu}) &= \text{銅精鉱量} \times \text{精鉱中の硫黄品位} \times (1 - \text{脱硫率}) \\ &\quad (\text{Fig.3 参照})(\text{Table1 参照}) \\ &= 2.89 \times 0.34 \times 0.01 = 0.01 \end{aligned}$$

したがって、チリから輸入される乾式銅、湿式銅生産までの SO_2 排出は我が国のその 20 倍にも相当する。

Fig.13 Transition of electricity supply in power system.

Fig.14 Comparison of CO₂ emission between coppers supplied to Japan.

このように、チリから輸入される乾式銅の環境負荷はCO₂排出では我が国とほぼ同等であるが、SO₂排出は大きいという特徴を有する。

5・4 本研究の課題

本研究では、チリでの乾式製錬における電力構成を、我が国の銅製錬と同様の自家発電が導入され、不足する電力はチリの公共電力から供給されると仮定した。しかしながら、一部の製錬所では石炭火力で発電された電力が採用されていると報告されている³⁾²³⁾。前述したように、電力を多消費する湿式銅のCO₂排出は電力に誘発される割合が5割以上と高いので、実際にチリの製錬所で用いられている発電システムによりCO₂排出は異なる。今後、製錬所の実態に即した電力構成を明らかにし、環境負荷の評価の精度を上げることが本研究の今後の課題である。

また、本研究では、湿式銅生産比が0.5以上になった場合には、銅製錬ガスを原料とする硫酸が外部調達されると仮定し、CO₂排出量が急激に増加する可能性を示した。しかしながら、単体硫黄を原料とする硫酸を調達した場合には、その発熱反応のエネルギーを回収することで、製錬ガスを原料とする硫酸よりもCO₂排出面で有利となることが想定される。今後、チリにおける硫酸の調達の在り方を提言していきたい。

チリにおける銅製錬に伴う大気圏へのSO₂排出は、環境規制の強化とともに、SO₂を原料とした硫酸需要の高まりもあり、着実に減少している。しかしながら、本研究では硫酸浸出後の残渣や廃液処理の環境負荷については明らかにできなかった。残渣や廃液は、土壌や水圏への環境負荷の増大をもたらしている可能性がある²⁴⁾、今後残渣および廃液処理の実態についても把握し、湿式製錬と乾式製錬の環境負荷を大気圏に加え、土壌、水圏の観点から評価することも必要である。

6. ま と め

文献および統計データに基づいて、チリにおける乾式銅および湿式銅生産システムのCO₂、SO₂排出をLCI分析した。その結果、

乾式、湿式銅のCO₂排出量はそれぞれ0.88 kg、2.36 kg/kg-Cuと試算された。それぞれの電力消費量は製錬の手法が異なるので、1.9 kWh、3.0 kWhと異なる。乾式製錬で併産されるSO₂を原料とする硫酸に原燃料を配分し、その硫酸が湿式製錬で消費される場合には、乾式および湿式銅のCO₂排出量には大きな差異が認められることになる。一方、乾式、湿式銅のSO₂排出量はそれぞれ0.19 kg、0.23 kg/kg-Cuで、大きな差異はなかった。チリの乾式銅製錬における脱硫率は81%で、我が国の99%よりも低いので、銅生産に伴うSO₂排出が大きいと推測された。

また、湿式銅生産比が0.5未満では、湿式製錬で消費される硫酸はチリの銅乾式製錬から供給されるので、乾式製錬と湿式製錬は相互補完の関係があり、乾式製錬における脱硫率の向上により、銅生産システムでのCO₂排出原単位は1.6 kg(1990年)から1.5 kg(1998年)へと削減されてきた。しかし、チリの電力構成は近年水力発電比率が下がっていることに加え、湿式銅生産比が0.5以上では硫酸を外部調達せざるを得ないので、湿式銅の生産拡大は単位重量当たりの銅のCO₂排出を増大させる可能性があることを指摘した。

本研究では、湿式製錬の残渣や廃液処理の環境負荷について明確にできなかったため、土壌や水圏への環境負荷の影響をも考慮したLCI分析を実施することが今後の課題である。

謝辞 資源環境技術総合研究所 素材資源部 田中幹也室長に、湿式製錬について議論いただき、感謝申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 成田暢彦・勾坂正幸・稲葉 敦：資源と素材，Vol. 117 p. 49-55, (2001)
- 2) 通商産業大臣官房調査統計部編：平成10年資源統計年報，通商産業調査会，(1999)
- 3) 麻植邦敏：SX-EW法の現状と展望，日本メタル経済研究所，(1999)
- 4) 硫酸協会編：硫酸手帳，p. 35，硫酸協会，(1999)
- 5) 鶴田利行：化学経済 2000年3月臨時増刊号，p. 128，化学工業日報社，(2000)
- 6) CodeLco: <http://www.codelcochile.com>
- 7) Davenport, W.G. et al.: Proceedings of the copper 99 international conference, Vol. III, p. 3, The Minerals, Metals & Materials Society, Pennsylvania, (1999)
- 8) JIS Q 14041 : (1999.11.20 制定)，日本規格協会
- 9) Sugita, K. et al.: Proceedings of 4th International Conf. on Ecomaterials, p. 323, Gifu, (1999)
- 10) IEA : Energy Statistics of Non-OECD Countries 1996-1997, OECD, (1999)
- 11) 田中幹也・六川暢了・小山和也：資源と環境，Vol. 4, p. 19, (1995)
- 12) Chapman P. F. and Roberts, F. : Metal Resources and Energy, p. 110, Butterworths, London, (1983)
- 13) 高橋聖之・木村悦治・岩崎 巖：資源処理技術，Vol. 41, p. 94, (1994)
- 14) Jenkins, J. et al.: Proceedings of the copper 99 international conference, Vol. IV, p. 493, The Minerals, Metals & Materials Society, Pennsylvania, (1999)
- 15) 国際鉱物資源開発協力協会編：チリ・ペルー調査団報告書，p. 25, (1995)
- 16) Garcia, C. et al.: Proceedings of the copper 99 international conference, Vol. IV, p. 27, The Minerals, Metals & Materials Society, Pennsylvania, (1999)
- 17) 日本金属学会編：非鉄金属製錬，p. 231，日本金属学会 (1980)
- 18) 成田暢彦・勾坂正幸・稲葉 敦：資源と素材，Vol. 116, p. 674, (2000)
- 19) 小林光雄：State-of-the-Art of LCA activities in Japanese Industry, p. 39, (2000)
- 20) 日本金属学会編：金属製錬工学，p. 168，日本金属学会，(1999)
- 21) 金属鉱業事業団：<http://www.mmaj.go.jp>
- 22) 資源環境技術総合研究所編：硫黄のパッケージ及び技術開発に関する調査研究報告書，p. 59, (1996)
- 23) 安達 毅・勾坂正幸：資源・素材 '99, A- 京都, p. 25，資源・素材学会，(1999)
- 24) Castro, S.H. et al.: Proceedings of the copper 99 international conference, Vol. II, p. 297, The Minerals, Metals & Materials Society, Pennsylvania, (1999)