

# チリ銅産業におけるエネルギー消費の単位係数 1995～2004年

サンティアゴ事務所 副所長 平井 浩二  
hirai-koji@jogmec.go.jp

## はじめに

本レポートはチリ銅委員会（COCHILCO）2006年発行の“Merucado del Cobre y Desarrollo Susutentable en la Minería”に掲載された“Coeficientes Unitarios de Consumo de Energia de la Minería del Cobre 1995-2004”（国際・環境業務班〈Unidad de Asuntos Internacionales y Medio Ambiente〉作成、チリ知的所有権登録第52,178号）をJOGMECサンティアゴ事務所にて翻訳し、チリ銅委員会の許可を得て、金属資源レポートに掲載するものである。

2006年のチリ鉱業は金属価格の高騰に支えられ、鉱産物輸出額が過去最大を記録、産銅各社の売上・営業利益が大幅に増加するなど、好調な生産活動が行われた。また、鉱業投資も積極的に行われ、新たにSpence鉱山の操業やEscondida鉱山のバイオリーチングプラントによる生産が開始された。

順調な生産活動、鉱業投資を続けるチリにおいて、電力・エネルギー問題は鉱業活動を阻害する大きな要因であるとされている。チリは天然ガスの供給を100%アルゼンチンに依存しているが、2006年冬期にはアルゼンチンからの天然ガスの供給停止が頻発化し、チリの産業界は深刻な影響を受けることとなった。今後、アルゼンチンの天然ガス埋蔵量は急激に減少すると予測されており、これまでと同様に順調な鉱業投資が行われた場合、チリ北部を中心に深刻な電力不足が生じる危険性がある。天然ガスの供給不安と電力不足に対処するため、チリ政府、産銅企業は国内で独自に電力・エネルギー確保を進めようとしている。

本レポートは1995～2004年の10年間のチリの銅産業における燃料・電力エネルギーの消費動向を分析し、10年間に起こった技術改革、販売製品の変化等により、燃料・電力エネルギーの消費がどのように推移したかを明らかにするものであるが、チリが抱える電力・エネルギー問題の現状を把握する上で非常に有益な情報を提供している。注目すべき点は、調査・分析を行うに当たり、銅生産プロセスを採鉱工程（露天掘り、坑内掘り）、選鉱工程、製錬工程、電解工程、リーチング工程（溶媒抽出、EW含む）、サービス業務に分類し、それぞれの工程における燃料・電力エネルギーの消費量を算出し、分析の基礎としていることである。また、チリで操業するほとんどの事業所（30事業所）を対象に情報収集を行っており、調査した事業所の2004年の銅生産量はチリの銅生産総量の99.2%を占めている。

本レポートの解析結果によれば、調査対象とした10年間で銅生産量は117.5%増加したが、同期間の燃料消費量の上昇が47.3%であったのに対し、電力消費量は142.4%増加しており、この急激な電力消費量の増加が、現在の電力問題の一因であると考えられる。

また、硫化鉱を乾式製錬して電解カソード1tを生産するのに必要なエネルギー消費量と湿式製錬によりSX-EWカソード1tを生産するのに必要なエネルギー消費量を比較し、湿式製錬のエネルギー消費量が22.4%低い（乾式：24,477MJ（：Megajoule以下同）/t、湿式：19,014MJ/t）という興味深い結果が得られている。

チリの銅鉱業における燃料・電力エネルギーの消費動向を把握する上で有益であると考えられる本報告が関係者の参考となれば幸いである。

## 要約

本論文では、1995～2004年の銅産業におけるエネルギー、即ち、燃料エネルギー及び電力エネルギー消費の推移を分析する。

この分析には幾つかの目的がある。最初の目的は情報を分析し、技術的な変革、一般に販売される製品の変化その他エネルギー消費面での変化により、この10年間に（エネルギー消費が）どのように推移して来たかを見ることである。

収集した情報により、もう一つ別の調査を行うことも出来る。チリの銅産業における温室効果ガス排出総量を特定し、銅産業が販売する製品の温室効果ガス単位排出量を特定することである。そうすることにより、本調査は、チリが2007年に協定事務局に提出すること

を義務付けられている気候の変化に関する第二回全国通知情報を作成する場合の手助けにすることが出来るのである。

また、出来上がった情報は全て全国エネルギー委員会（Comisión Nacional de Energía）と共有することになっている。全国エネルギー委員会は、エネルギーの節約量を計算し、効率性という観点からエネルギー資源の使用を評価するための産業別エネルギー効率指標を開発した機関である。エネルギー効率を評価するためには、情報を定期的に更新し、公共政策の策定に寄与出来るようにしておかなければならない。

更に、国際社会に銅の一次産業におけるエネルギー消費に関する情報を提供し、現存する情報不足を解消することも本調査の目的の一つである。銅産業のエネ

ルギー消費に関する情報不足は“Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD)”<sup>1</sup>プロジェクトで提出された報告書に指摘されている。

作業を行うに当たって、代表的な物質の流れを示す生産工程、段階及びプロセスを定義して、銅の生産プロセスを概念化することにした。なお、これら代表的な物質の量は当該物質の精製度が上がるに従って減って行くものである。

上記の定義を行うに当たっては、調査票を作成し、主要な全ての鉱山会社及び製錬会社へ送付した。調査票を作成するに当たっては、COCHILCOにあるデータに基づいて、各企業の代表的な生産工程、段階及びプロセスを考慮し、区分、特定した。

1 Energy and Sustainable Development in the Mining and Minerals Industries, K.R. Róbagó, A.B: Lovins & T.E. Feiler. Rocky Mountain Institute, Colorado, USA.

調査票には、エネルギー（電力エネルギー及び燃料エネルギー）の消費、工程間の物質の流れ、技術、各段階における生産、廃棄物の発生量とその処理、そのほかのデータに関してできるだけ細かく記載して貰うようにした。

企業から提供された情報は、調査期間の銅生産の各工程別の燃料及び電力エネルギー消費に関するもので、2004年度におけるチリの銅生産の99%をカバーしている。これらの情報を使って、使用した燃料別に各事業所の工程別に特定単位係数を計算した。処理した物質の単位、生産した物質、処理した物質に含まれる純銅量別に計算しており、電力エネルギーについても同様である。

総係数 (Coeficientes Globales) は各燃料の最高特定カロリー量<sup>2</sup>をベースにして定めた。次いで、チリの銅生産プロセスの各工程別に単位総係数の各年年間加重平均値を求めた。

2 Balance Nacional de Energía 1979-1998 Chile. Comisión Nacional de Energía.

これらの数値は、調査期間のエネルギー（燃料及び/または電力エネルギー）消費情報を提供してくれた鉱業事業所における個別の数値の加重平均値であることを強調しておきたい。

得られた結果を下記の表1、2に示す：

表1 工程別燃料消費の単位総係数

	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
露天掘り鉱山 (MJ/元鉱TMF)	4,739.8	4,379.1	4,128.8	4,213.8	3,885.5	3,984.6	4,323.1	4,654.8	4,491.0	4,464.8
坑内掘り鉱山 (MJ/元鉱TMF)	587.1	524.7	424.8	481.9	549.9	753.3	667.9	705.3	715.6	712.6
選鉱場 (MJ/精鉱TMF)	341.9	259.4	225.3	246.0	217.6	191.6	222.5	188.8	204.4	182.6
製錬所 (MJ/アノードTMF)	9,901.6	9,168.3	8,557.3	7,910.0	6,925.0	7,189.4	6,375.0	5,608.8	5,382.1	4,985.8
電解工場 (MJ/カソードTMF)	1,254.4	1,225.3	948.3	953.3	1,260.2	1,267.9	936.8	1,028.3	1,035.8	1,093.7
LX・SX/EW (MJ/SX-EWカソードTMF)	3,139.9	2,998.1	2,469.2	2,406.7	3,662.1	3,612.1	2,360.3	2,401.9	2,694.5	2,756.5
サービス (MJ/全製品TMF)	349.1	270.9	264.6	364.9	273.5	294.1	357.7	377.0	510.8	321.4

MJ: Megajoule TMF: Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:チリ銅委員会作成

表2 工程別電力エネルギー消費単位係数

	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
露天掘り鉱山 (MJ/元鉱TMF)	750.0	710.3	581.2	585.8	539.2	453.5	437.5	473.9	534.1	579.7
坑内掘り鉱山 (MJ/元鉱TMF)	1,023.5	973.7	895.4	938.3	1,152.2	1,195.2	1,435.7	1,566.0	1,502.5	1,353.5
選鉱場 (MJ/精鉱TMF)	5,564.1	5,023.9	5,067.3	5,452.3	5,816.4	6,146.4	6,213.0	6,996.1	7,244.5	7,037.8
製錬所 (MJ/アノードTMF)	2,706.4	2,631.3	2,817.4	3,036.3	3,227.7	3,303.6	3,494.1	3,694.0	3,792.0	3,836.2
電解工場 (MJ/ERカソードTMF)	1,195.5	1,200.9	1,205.9	1,210.1	1,240.9	1,251.2	1,234.8	1,232.0	1,226.7	1,265.2
LX・SX/EW (MJ/SX/EWカソードTMF)	10,849.1	9,904.7	9,520.2	9,650.1	9,844.1	10,100.0	9,621.7	9,976.7	10,255.6	10,428.6
サービス業務 (MJ/全製品TMF)	459.5	466.0	432.1	488.4	455.1	423.2	457.2	482.8	431.2	451.1

MJ: Megajoule TMF: Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:チリ銅委員会作成

銅及び中間製品生産プロセスの各工程別に算出した燃料エネルギー及び電力エネルギー消費のこれら総単位係数をベースに、副産物を含めた銅産業全体におけ

る燃料及び電力エネルギーの消費量を推定した。また、銅産業の平均単位総係数も計算した。

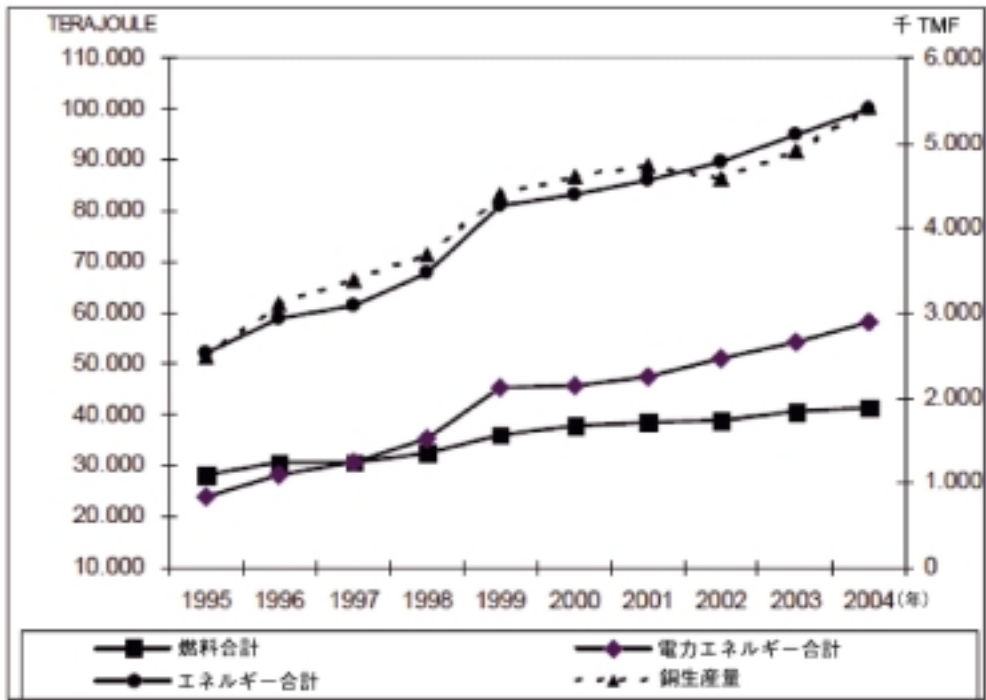


図1 銅鉱山業におけるエネルギー消費 1995～2004年

この図に見られるように、銅産業におけるエネルギー総消費量は1995年から2004年までに91%増えている。また、同じ期間にチリの銅の金属生産量が

117.5%増えていることは特筆に値する。

燃料エネルギーの消費量は上記10年間で47.3%、電力エネルギーは同じく142.4%増加している(図1)。

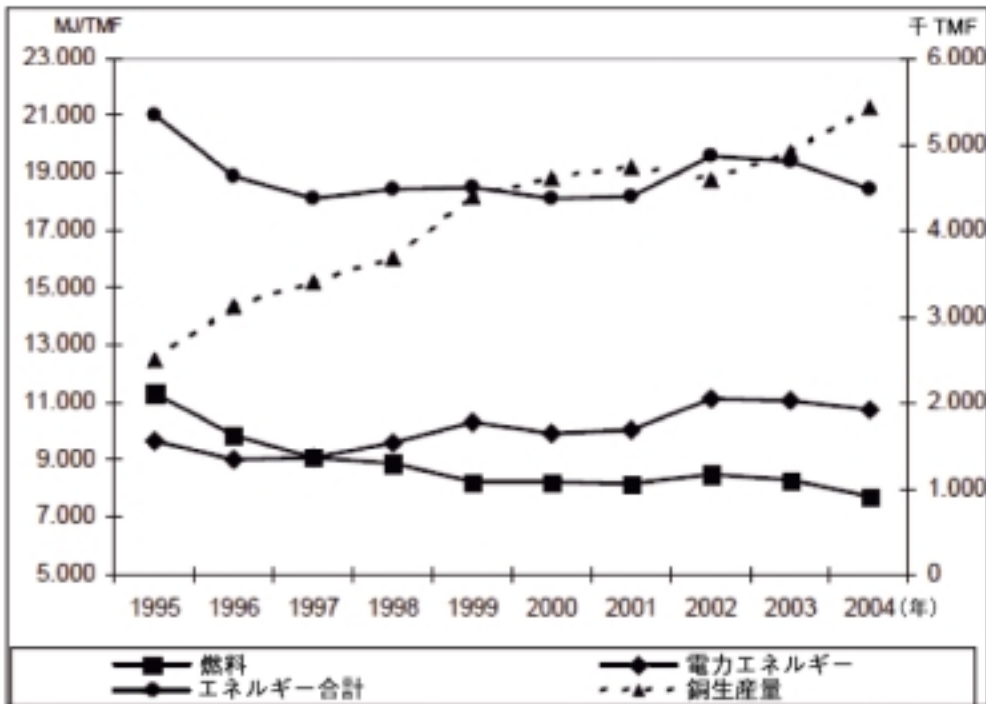


図2 銅産業における総単位消費 1995～2004年

燃料消費単位総係数は常に低下傾向を示しており、同期中に32.3%下がっている。

電力エネルギーの場合は、逆に増えており、同期間に11.5%上昇している。

燃料と電力エネルギー消費単位係数の和は比較的安定した曲線で、1995年を除いた平均値は18,625MJ/TMFである(図2)。

このような結果が得られたのは、販売する製品が変わったことと技術的変革によると思われる。1995～2004年の間に、SX-EWカソードの生産は339%増加。また、精鉱の販売量が175%増加している一方、硫化

鉱出の銅地金生産は78.5%増に止まっている。

技術変革の内、主要なものとしては、反射炉の廃止、各種ガスの捕捉・管理系統の設置、硫酸プラント、酸素プラント、精鉱の機械的乾燥システム、大型機械の使用増傾向等が挙げられる。更に、この期間に、二次硫化鉱処理にリーチングを使うようになったことも挙げられる。

最後に、生産プロセスの各工程別のエネルギー消費量が(エネルギー全消費量に)占める割合を計算した。図3に、同期間中における、各工程別の(エネルギー)消費量(と全体に占めるその比率)の推移を示す。

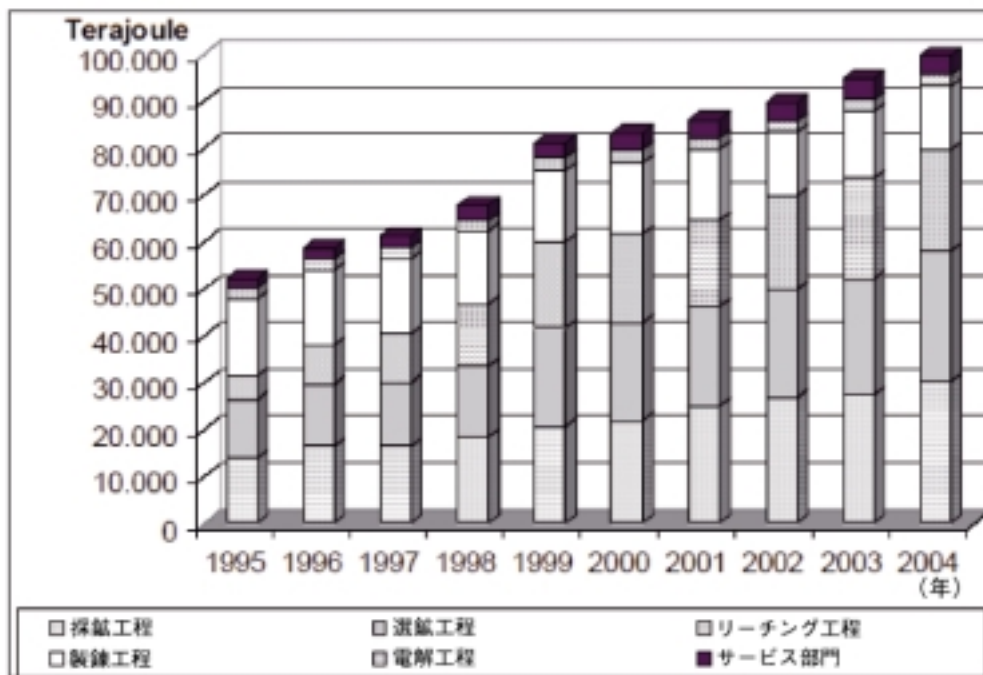


図3 工程別エネルギー消費量

チリにおける銅の生産プロセスの内、次の4工程で消費エネルギーの約93%を占めている：採鉱工程、硫化鉱の選鉱工程、リーチング工程(リーチング可能な鉱石の処理工程)、精鉱の製錬工程(含む硫酸プラント)。

一番重要な点は、1995年から2004年の間にエネルギー全消費量に占める製錬工程の割合が30.9%から13.5%に落ちた一方、リーチング工程が10%から

21.6%に増えたことである。

銅産業のエネルギー総消費量に占める電解工場の比率は低く、1995年の4.6%から2004年には2.5%に低下している。低下した原因は販売製品中に占める電解カソードの比率が下がったためである。

サービス部門は全期間を通じて約4%と比較的安定した率を占めている(図4)。

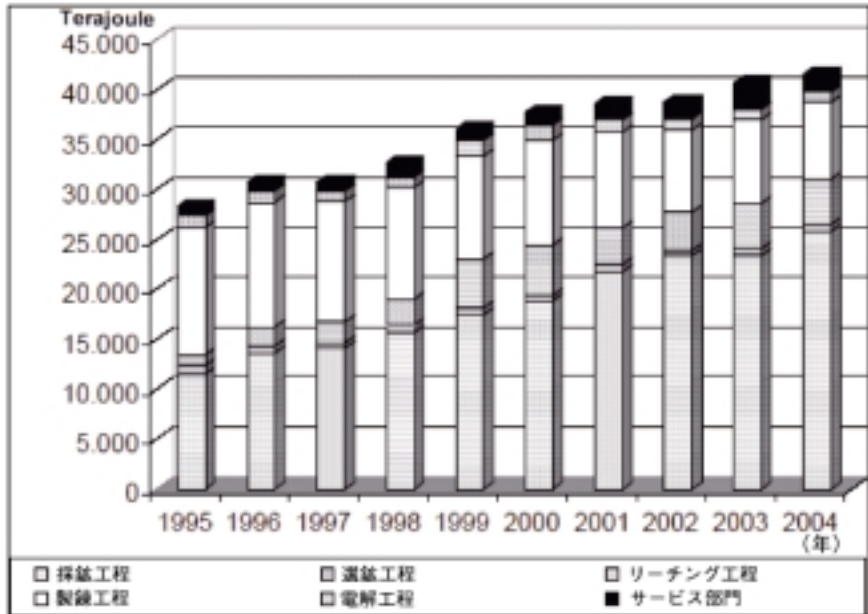


図4 工程別燃料消費量

1995年には、精鉱の製錬工程は銅産業における燃料総消費量の41%を占めていたが、その率を増加して行き、2004年には62.2%に達している。このように増加した主な理由は、この期間に操業を開始した新規鉱山が露天掘りであり、露天掘り採掘が進むにつれ、鉱石

及びズリの運搬距離が増え、傾斜もきつくなるためトラックの燃料消費が増えたからである。

リーチング工程も全体の燃料総消費量に占める比率が4%から11%に増加している。

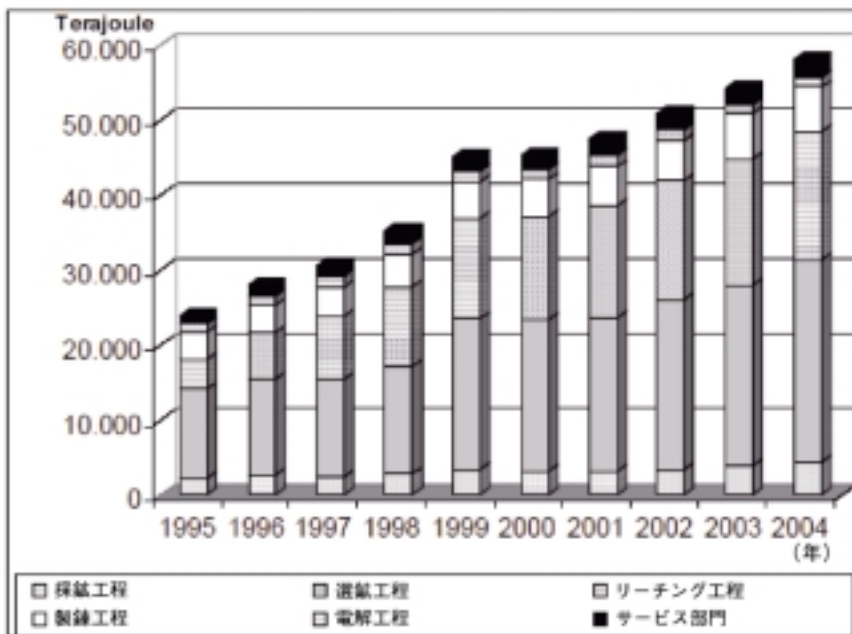


図5 工程別電力エネルギー消費量

銅産業における電力エネルギー消費を分析すると、硫化鉍の選鉍工程で電力総消費量の約半分を使っていることが分かる。但し、1995年に49.5%であったものが2004年には46.4%に低下している。

もう一つ大事なことは、リーチング工程の消費割合が上昇していることである。1995年の16.8%から2004年には29.3%に上がっており、これは、この種鉍石（主に酸化鉍）から生産する銅の量が増えている上、様々な生産段階の中でもリーチングが電力消費量の最も多い工程だからである（リーチング、溶媒抽出及びEWの各段階における溶液のポンプ流送）（図5）。

精鉍の製錬工程は、ガスの捕捉系統及び管理系統、酸素プラントや硫酸プラント等、電力エネルギーの多消費施設を含むが、消費割合は14.4%から10.1%に下がっている。

電解工程は、これも本質的には電力エネルギーの多消費工程であるが、率は4.8%から2.3%に低下している。

銅産業におけるエネルギー消費パターンもこの10年間に大きく変わってきている。

1995年にはエネルギー総消費量の54%が燃料エネルギーであったものが、2004年には総消費量の58%が電力エネルギーになっているのである。

我が国のエネルギー製品の最終消費（最終使用に適した形、即ち、水力発電も火力発電も含めて）を調べてみると、2003年<sup>3</sup>に消費したエネルギー総量の18.9%が電力エネルギーで、81.1%が様々なタイプの燃料エネルギーであった。しかし、銅産業においては全国の平均値よりかなり電力エネルギーの使用割合が多く、2003年には電力エネルギーが57.3%（2004年は58.3%）、燃料エネルギーが42.7%であった。

銅産業で使用された主な燃料は：ディーゼルオイル（69%）、ENAP6（15%）、天然ガス（13%）で、他の燃料（石炭、ケロセン、液化ガス及びガソリン）の使用割合は僅少である。

エネルギーのタイプ別全国最終消費量に占める銅産業の率に関しては、銅産業界の企業は2003年に全国で消費した電力エネルギー総量の34.1%を消費したが、燃料の総消費量に占める割合は僅かに5.9%であった。

持続性と云う観点から見て興味深いのは、乾式冶金法を用いる硫化鉍出の電解カソード1tを生産するために必要な各種エネルギーの消費量と湿式冶金法を用いるSX-EWのカソード1tを生産するためのエネルギー消費量を比較してみたことである。

この比較を行うため、電解カソードだけを生産している事業所とSX-EWのカソードだけを生産している事業所の情報を使用した。最近4年間の平均値とSX-EWカソードの追加生産量919,000tから、SX-EWカソードの単位係数19,014MJ/TMFが算出された。電解カソードについては、平均追加生産量は1,117,000t、単位係数は24,477MJ/TMFと算出された。従って、エネルギー消費という観点から見れば、SX-EWカソードの生産は

電解カソードの生産より持続可能性がより高いということである。

販売製品を100%精製した場合に与える影響度を調べるため、2004年度の生産量を全て精製する場合、即ち、販売したプリスターや精鉍を精製した場合に必要なエネルギーの追加消費量を計算してみた。これによると、銅産業の2004年度のエネルギー消費量を25%増やさなければならないとの結果が出た。その内訳は電力エネルギー19.7%増、燃料32.7%増である。

3 2004年のエネルギーバランスが入手できなかったため、2003年のデータで計算した。

## 1. 経緯

チリ銅委員会は1998年に銅産業のエネルギー消費に関する調査を行った。この調査は1993年と1994年の2年間のエネルギー消費について調べ、温室効果を伴うガス発生の全国一覽資料を作成するために必要な情報を収集することが目的であった。

近年の銅産業におけるエネルギー消費を計算するための信頼できる情報を入手するのが難しかったことと、90年代後半に起こった技術改革が（エネルギー消費に）及ぼした効果を数値化することが難しかったため、COCHILCOは2000年に1990～1998年に亘る期間を対象に新しい調査<sup>4</sup>を行った。なお、この調査では鉍業所に提供して貰った情報を使用した。情報を提供した全鉍業所の産銅量は1998年の銅の総生産量の84%に相当する。

2002年には、大鉍山会社のクリーンプロダクション、エネルギーの効果的利用に関する基本協定に基づき、Consejo Minero<sup>5</sup>の会員企業である大鉍山会社から提供された1999年及び2000年に関する情報を分析して前述の調査の補充を行った。

本調査では、1995～2004年の期間における銅産業の燃料及び電力エネルギー消費の推移を分析する。

この調査には幾つかの目的がある。まず、必要な情報を集め、上記10年間に起こった技術改革、販売製品の変化、その他銅産業のエネルギー消費に影響を与えるような変革により、エネルギー消費がどのように推移したかを見ることが出来るようにすることである。

また、収集した情報を使って他の調査を行うことも可能である。例えば、チリの銅産業界が排出する温室効果を伴うガスの総量を特定することが可能であるし、銅産業における販売製品別GEIの単位排出量を把握することも出来る。更に、本調査はチリ国が2007年に条約事務局に提出しなければならない気候の変化に関する我が国の第2回連絡文書作成にも寄与することが可能である。

4 “Consumos de Energía en la Minería del Cobre 1990～1998”、チリ銅委員会

[http://www.cochilco.cl/fr\\_estudios.html](http://www.cochilco.cl/fr_estudios.html)

5 AMPL- Uso eficiente de Energía. Consejo Minero.

<http://www.consejominero.cl/biblioteca/biblioteca.asp>

そしてもう一つ、作成した情報は全国エネルギー委員会と共有することになっている。

全国エネルギー委員会は、エネルギーの節約量を計算し、効率性という観点からエネルギー資源の使用を評価するための産業別エネルギー効率指標を開発した機関である。

エネルギー効率を評価するためには、情報を定期的に更新し、公共政策の策定に寄与出来るようにしておかなければならない。

最後に、本調査は、銅の一次産業におけるエネルギー消費面に関する情報の不足や誤りを補足する一連の情報を国際社会に提供しようという試みも兼ねている。銅産業のエネルギー消費に関する情報が不足していることは、“Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD)”プロジェクトの報告書<sup>6</sup>でも指摘されている。

6 “Energy and Sustainable Development in the Mining and Minerals Industries”, K. R. Robago, A. B. Lovins & T. e. Feiler. Rocky Mountain Institute, Colorado, USA.

## 2. 調査法

本調査では、現在までに行った複数の調査で使用したのと同じ調査方法を用い、銅の生産プロセスを単純化して、銅原料の代表的な流れを構成する幾つかの工程に分ける方法を用いた。なお、銅の精製度が増す毎に銅原料の量は減少して行く。

次の生産工程に分けた：採鉱工程（露天掘り、坑内掘り別）；選鉱工程；製錬工程；電解工程；リーチング工程（リーチング可能な鉱石の処理工程、リーチング、溶媒抽出及びEWを含む）；サービス業務。

収集した情報は、銅産業の30の事業所のエネルギー消費及び銅原料の流れに関するものであり、これら30事業所の2004年度の銅生産量はチリの銅金属生産総量の99.2%を占める。

各事業所別、各生産段階別に各燃料（生産した銅金属生産トン当りに使用したkg、m<sup>3</sup>またはt）毎の消費特定単位係数を計算し、続いて、各燃料別によるその特定カロリー<sup>7</sup>をベースに、燃料消費量（生産された銅金属生産トン当りのMJ）の単位総係数を求めた。電力エネルギーについては、電力エネルギーに相応する特定単位係数（生産した銅金属生産トン当りのkWh及びMJ）を計算した。

7 Balance Nacional de Energía 1979～1998 Chile, Aneso A. Comisión Nacional de Energía.

各鉱業事業所の単位数値は当該事業所の生産量をベースに加重計算し、銅生産工程毎の平均値を求めた。

各年及び各生産段階別に求めた単位数値を基に銅産業のエネルギー総使用量（燃料及び電力エネルギー）を推

計した。なお、この計算に当っては、COCHILCOが所有する銅生産プロセスの各工程別データを使用した。

なお、Consejo Mineroの調査による1995～2000期間の単位係数の数値は本調査の数値とは対比出来ないことを強調しておく必要がある。Cosejo Mineroの調査は銅産業界の一部、即ち、会員企業だけに限られた世界の調査だからである。

## 3. 生産工程別単位係数の計算

### 3-1. 銅原料の処理フロー

鉱業事業所から提出された採掘鉱量、鉱石/ズリ比率、処理した鉱石の種類、鉱業事業所のタイプ、製品の種類と量、鉱石品位等に関する情報を基に、本調査の対象期間の年毎に、主要原料別のフローを作成した。

下記に2004年度の各生産工程における原料の流れを大まかに示し単純化したフローシート（図6）を記す。フローシートに記入されている数値はストックの変化及び生産工程毎の代表的な実取率を示したものである。

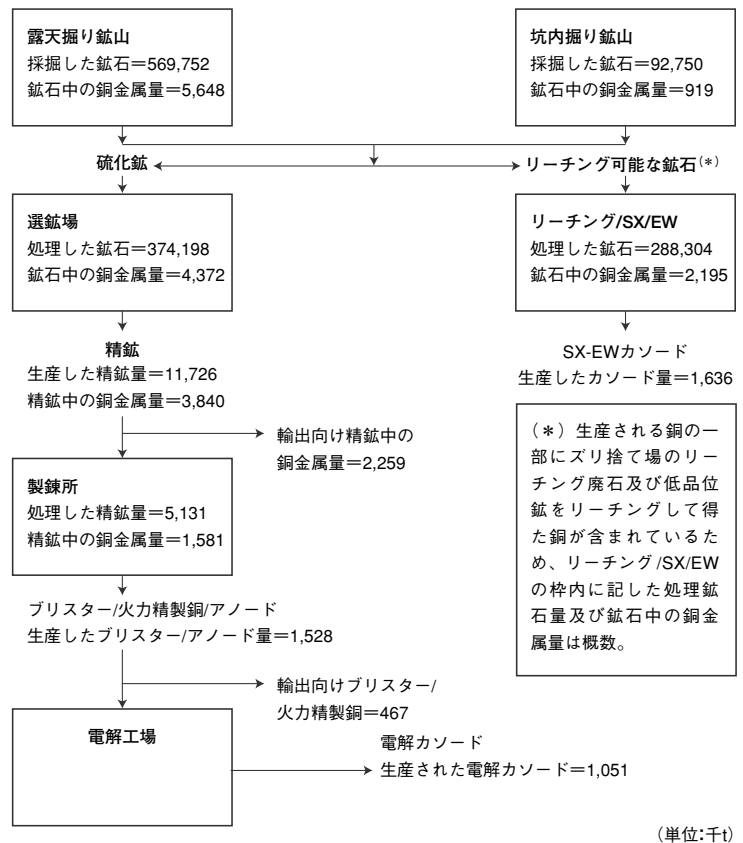


図6 2004年、原料のフロー

### 3-1-1. 露天掘り鉱山（全採掘量の86%）

表3に（調査対象）期間における燃料及び電力エネルギーの消費に関する情報を提供した露天掘り鉱山の加重平均単位総係数を次頁に示す。

表3

年	露天掘り鉱山の燃料単位総係数 (MJ/鉱石中のTMF)	露天掘り鉱山の電力エネルギー単位総係数 (MJ/鉱石中のTMF)
1995	4,739.8	750.0
1996	4,379.1	710.3
1997	4,128.8	581.2
1998	4,213.8	585.8
1999	3,885.5	539.2
2000	3,984.6	453.5
2001	4,323.1	437.5
2002	4,654.8	473.9
2003	4,491.0	534.1
2004	4,464.8	579.7

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:企業の提出した情報を基にチリ銅委員会作成

採掘した鉱石中に含有される銅金属量に対する燃料消費量の単位係数は、調査対象期間の半ばまで (1999～2000) 低減傾向を示しているが、その後再度増加し始め、10年間で6%程度低下している。事業所により燃料の消費が異なるのはズリ/鉱石比率、鉱石の運搬距離、鉱床の形、母岩の硬さ及び鉱石、ズリの運搬に用いる機械の技術的ファクターが異なることが主な原因である。

一方、電力エネルギーの消費単位総係数ははっきりとした低下傾向を示しており、調査対象期間中に平均して23%近く下がっている。

調査対象期間中に、鉱石中に含まれる銅金属量で計った露天掘り鉱山生産量は137%近く増えている。

### 3-1-2. 坑内掘り鉱山 (鉱山総生産量の14%)

燃料及び電力エネルギーの消費単位総係数は採掘した鉱石中に含まれる銅金属量単位で計算した。表4に期間中の加重平均数値を示す。

表4

年	坑内掘り鉱山の燃料単位総係数 (MJ/鉱石中のTMF)	坑内掘り鉱山の電力エネルギー単位総係数 (MJ/鉱石中のTMF)
1995	587.1	1,023.5
1996	524.7	973.7
1997	424.8	895.4
1998	481.9	938.3
1999	549.9	1,152.2
2000	753.3	1,195.2
2001	667.9	1,435.7
2002	705.3	1,566.0
2003	715.6	1,502.5
2004	712.6	1,353.5

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会作成

この表で分かるように、坑内掘り鉱山の燃料消費単位数値は露天掘り鉱山に比して非常に低いが、これは露天掘り鉱山では大量のズリと採掘対象外の低品位鉱を捨て場まで運搬しなければならず、そのためにトラックが消費するディーゼル油が多いからである。

調査対象期間では、採掘した鉱石中に含まれる銅金属量に対する単位係数は約21%の上昇傾向を示している。

燃料の消費とは逆に、鉱石中に含まれた銅金属単位で表した坑内掘り鉱山の電力エネルギーの消費単位係数は露天掘り鉱山のその2倍以上に達している。これは、坑内掘り鉱山においては圧縮空気を大量に使うのと通気にも電力エネルギーを大量に使うことがその主な理由である。調査対象期間における平均的な推移から、32%以上の増加傾向が見られる。

1995年から2004年の間に、採掘した鉱石中に含まれる銅金属量で計算した坑内掘り鉱山の生産量は76%増加している。

### 3-1-3. 選鉱工程

単位総係数は各選鉱場で生産された精鉱中に含まれる銅金属単位別に計算した。

選鉱工程の燃料消費量はここまでの銅生産段階で消費するエネルギー総量のたった2.5%に過ぎない。

選鉱工程で使用する燃料と電力エネルギーにはモリブデンプラントのものも含まれていることを強調しておく。実際には、これらエネルギーは銅の生産だけでなくモリブデンの生産にも使われているため、選鉱工程の係数には“貸し”があると云える。

今後行う調査では、各製品別のエネルギー消費量を捉えられる方式を取り入れたい。

表5

年	選鉱工程における燃料の単位総係数 (MJ/精鉱中のTMF)	選鉱工程における電力エネルギーの単位総係数 (MJ/精鉱中のTMF)
1995	341.9	5,564.1
1996	259.4	5,023.9
1997	225.3	5,067.3
1998	246.0	5,452.3
1999	217.6	5,816.4
2000	191.6	6,146.4
2001	222.5	6,213.0
2002	188.8	6,996.1
2003	204.4	7,244.5
2004	182.6	7,037.8

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:企業からの情報を基にチリ銅委員会作成

選鉱場で生産された精鉱中に含まれる銅金属単位の燃料消費単位数値は、調査期間中に大幅に減少 (47%) している。これは、90年代に大抵の選鉱場で技術変革が行われ、精鉱中の水分を8～10%に落とすため使用していたロータリーキルン (熱乾燥機) に変えて電力エネルギーを使用して、より効率の高いフィルターを使用するようになったからである。

表5を見ると分かる通り、選鉱工程は銅の生産工程の中でも電力エネルギーの消費量が最も多い箇所であるが、これは鉱石の破碎及び粉碎工程で特に電力エネルギーを多く使うためである。調査対象期間中に平均して26%の増加傾向が見られる。



### 3-1-4. 製錬工程

2000年までの単位係数は6製錬所から報告を受けた消費量の加重平均値であるが、最後の4年間は我が国に存在する7製錬所の情報に基づく数値である。

これらの係数を計算するに当っては、硫酸工場の操業を製錬所の操業を構成する1系統と捉えて行った。環境基準を遵守するためには硫酸工場を設置しなければならないのが現在では製錬所の常識になっていると判断したからである。

製錬工程における燃料と電力エネルギーの消費単位係数はこれら製錬所で生産されたプリスター/アノード中に含まれる銅金属単位で計算した。

表6

年	製錬工程の燃料単位 総係数(MJ/プリスター/ アノード中のTMF)	製錬工程電力エネルギー単位 総係数(MJ/プリスター/ アノード中のTMF)
1995	9,901.6	2,706.4
1996	9,168.3	2,631.3
1997	8,557.3	2,817.4
1998	7,910.0	3,036.3
1999	6,925.0	3,227.7
2000	7,189.4	3,303.6
2001	6,375.0	3,494.1
2002	5,608.8	3,694.0
2003	5,382.1	3,792.0
2004	4,985.8	3,836.2

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)  
出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会作成

表6で分かるとおり、製錬工程の燃料単位消費量はかなり高いが、調査対象期間中に50%近くと大きく低下している。これは大気の状態の環境基準を遵守するために製錬所が取り入れた技術変革(反射炉の廃止と自溶炉の利用)に負うところが多い。

一方、製錬工程の電力エネルギー消費量はこの期間に上昇している(42%)。これは、一つには、酸素の使用に関して導入した技術的強化対策(フラッシュ炉、Teniente型転炉及びNoranda型転炉)により、電力エネルギーを大量に使う酸素プラントの設置を行ったためである。もう一つ、大気の状態の基準が設定されたため、精錬所はガスの捕捉系統、管理系統や硫酸プラントを設置しなければならなくなり、その結果、電力エネルギーの消費が増えたからである。

この他にも、幾つかの精錬所では近代化計画を実行し、輸送系統や乾燥した精鉱を注入する施設・装置を導入したり、カラミの乾式処理のための電気炉を設置しなければならなかったことも電力エネルギー消費増の理由である。

製品中に含まれる銅金属量で示した、調査対象期間中の製錬所の生産量は、他の工程に比べると非常に低い増加率を示しており、僅か19.4%である。

表7

年	電解工程 燃料単位総係数 (MJ・電解カソード中のTMF)	電解工程 電力エネルギー単位総係数 (MJ/電解カソード中のTMF)
1995	1,254.4	1,195.5
1996	1,225.3	1,200.9
1997	948.3	1,205.9
1998	953.3	1,210.1
1999	1,260.2	1,240.9
2000	1,267.9	1,251.2
2001	936.8	1,234.8
2002	1,028.3	1,232.0
2003	1,035.8	1,226.7
2004	1,093.7	1,265.2

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)  
出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会作成

### 3-1-5. 電解工程

電解工程の電解カソード生産単位当り燃料消費と電力エネルギー消費の係数を表7に示すが、かなり似たような数値である：

電解工程では、燃料は電解液の保温のために使われる。

調査対象期間中の単位係数は、多少の変動はあるものの、平均的に見ると減少傾向を示している(13%)。

電力エネルギーの消費については、単位係数は期間中かなり安定した数値を示しているが、約6%と僅かながら上昇している。これらの数値を見ると、我が国の電解工場においてはこの期間たいした変化が無かったことが分かる。全ての電解工場でコンベンショナルなタイプの技術を使用しており、差があるとすれば、使用している電流密度が違うことと生産するカソードの大きさが違う程度である。

1995年と2004年の電解カソードの生産量は僅か8%増えたに過ぎない。

### 3-1-6. リーチング工程(リーチング可能な鉱石の処理工程)

硫化鉱、酸化鉱及び混合鉱を採掘している鉱業事業所が鉱石のタイプ別燃料消費データを報告してくれなかったため、リーチング可能な鉱石を生産している鉱山における採掘部門の燃料消費量は採鉱工程で計算した。

リーチング工程では、燃料はリーチングダンプの積み上げ、取り崩しに使うほか、時には鉱石及びリーチング・ソリューションの保温、電解液のヒーティングに使用する。SX-EWカソード中の銅金属単位当りで計算した燃料の単位消費量は調査対象期間中に12%程度の上昇傾向を示している。

電力エネルギーの消費量は、同期間中に多少の変動はあるものの、やや低下傾向を示している(4%)。本工程においては、電力エネルギーは鉱石の準備、条件

付け（練り合わせ = agglomeration）、リーチング・ダンプの積み上げ、取り崩し、溶液（solutions）の管理・循環、EW工程で使われる（表8）。

調査対象期間中に大型リーチング・プロジェクトが多数開発されたため、SX-EWカソードの生産量は340%近く増加している。

表8

年	リーチング工程 燃料単位総係数 (MJ/SX-EWカソード中のTMF)	リーチング工程 電力エネルギー単位総係数 (MJ/SX-EWカソード中のTMF)
1995	3,139.9	10,849.1
1996	2,998.1	9,904.7
1997	2,469.2	9,520.2
1998	2,406.7	9,650.1
1999	3,662.1	9,844.1
2000	3,612.1	10,101.0
2001	2,360.3	9,621.7
2002	2,401.9	9,976.7
2003	2,694.5	10,255.6
2004	2,756.5	10,428.6

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)

出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会作成

### 3-1-7. サービス業務

この分野におけるエネルギー消費は生産に関わるサービス業務、即ち、補修工場、サービス設備類、用水の流送、及び一般サービス業務で使われる他、従業員

宿舎・社宅でも使用される。

銅の全生産量当りの単位係数を計算した（表9）。

表9

年	サービス部門 燃料単位総係数 (MJ/全生産量当りTMF)	サービス部門 電力エネルギー単位総係数 (MJ/全生産量当りTMF)
1995	349.1	459.5
1996	270.9	466.0
1997	264.6	432.1
1998	364.9	488.4
1999	273.5	455.1
2000	294.1	423.2
2001	357.7	457.2
2002	377.0	482.8
2003	510.8	431.2
2004	321.4	451.1

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)

出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会作成

燃料消費の単位数値は調査対象期間中に多少の変動があるが、僅かながら8%程度の減少傾向が見られる。

一方、電力エネルギーの消費単位係数は非常に安定しており、期間中ほとんど変化が見られない。

## 4. 最終結果

銅の生産工程別に得られた総合的な結果を表10、11に示す。

表10 工程別燃料消費単位係数

	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
露天掘り採鉱工程 (MJ/鉱石中のTMF)	4,739.8	4,379.1	4,128.8	4,213.8	3,885.5	3,984.6	4,323.1	4,654.8	4,491.0	4,464.8
坑内掘り採鉱工程 (MJ/鉱石中のTMF)	587.1	524.7	424.8	481.9	549.9	753.3	667.9	705.3	715.6	712.6
選鉱工程 (MJ/精鉱中のTMF)	341.9	259.4	225.3	246.0	217.6	191.6	222.5	188.8	204.4	182.6
製錬工程 (MJ/アノード中のTMF)	9,901.6	9,168.3	8,557.3	7,910.0	6,925.0	7,189.4	6,375.0	5,608.8	5,382.1	4,985.8
電解工程 (MJ/電解カソード中のTMF)	1,254.4	1,225.3	948.3	953.3	1,260.2	1,267.9	936.8	1,028.3	1,035.8	1,093.7
リーチング/SX/EW工程 (MJ/SX-EWカソード中のTMF)	3,139.9	2,998.1	2,469.2	2,406.7	3,662.1	3,612.1	2,360.3	2,401.9	2,694.5	2,756.5
サービス部門 (MJ/全生産量中のTMF)	349.1	270.9	264.6	364.9	273.5	294.1	357.7	377.0	510.8	321.4

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)

出典:チリ銅委員会作成

表11 工程別電力エネルギー消費単位係数

	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
露天掘り採鉱工程 (MJ/鉱石中のTMF)	750.0	710.3	581.2	585.8	539.2	453.5	437.5	473.9	534.1	579.7
坑内掘り採鉱工程 (MJ/鉱石中のTMF)	1,023.5	973.7	895.4	938.3	1,152.2	1,195.2	1,435.7	1,566.0	1,502.5	1,353.5
選鉱工程 (MJ/精鉱中のTMF)	5,564.1	5,023.9	5,067.3	5,452.3	5,816.4	6,146.4	6,213.0	6,996.1	7,244.5	7,037.8
製錬工程 (MJ/アノード中のTMF)	2,706.4	2,631.3	2,817.4	3,036.3	3,227.7	3,303.6	3,494.1	3,694.0	3,792.0	3,836.2
電解工程 (MJ/電解カソード中のTMF)	1,195.5	1,200.9	1,205.9	1,210.1	1,240.9	1,251.2	1,234.8	1,232.0	1,226.7	1,265.2
リーチング/SX/EW工程 (MJ/SX-EWカソード中のTMF)	10,849.1	9,904.7	9,520.2	9,650.1	9,844.1	10,101.0	9,621.7	9,976.7	10,255.6	10,428.6
サービス部門 (MJ/全生産量中のTMF)	459.5	466.0	432.1	488.4	455.1	423.2	457.2	482.8	431.2	451.1

MJ:Megajoule TMF:Fine Metric Ton=銅金属量換算(t)

出典:企業の情報に基づきチリ銅委員会が作成

銅生産の工程別及び各工程で生産される中間製品別に、COCHILCO の手持ちデータに基づいて計算された、これら燃料及び電力エネルギー消費の単位総係数を用

いて、モリブデン、貴金属等の副産物を含めた銅産業界全体のエネルギー消費量を推計した。また、チリ銅産業界の平均単位総係数も計算した（表 12、図 7）。

表12 銅産業界のエネルギー消費量推計 1995～2004年

年	燃料(Terajoule)	電力エネルギー(Terajoule)	合計(Terajoule)	銅生産量(千TMF)
1995	28,232.9	24,023.5	52,256.4	2,488.6
1996	30,754.6	28,055.6	58,810.2	3,115.8
1997	30,738.2	30,727.0	61,465.2	3,392.0
1998	32,607.8	35,356.3	67,964.1	3,686.9
1999	36,027.0	45,221.3	81,248.3	4,391.2
2000	37,756.5	45,537.1	83,293.6	4,602.0
2001	38,645.2	47,505.0	86,150.2	4,739.0
2002	38,817.0	50,989.0	89,805.9	4,580.6
2003	40,600.2	54,381.6	94,981.9	4,904.2
2004	41,592.4	58,241.8	99,834.2	5,412.5

出典:チリ銅委員会作成

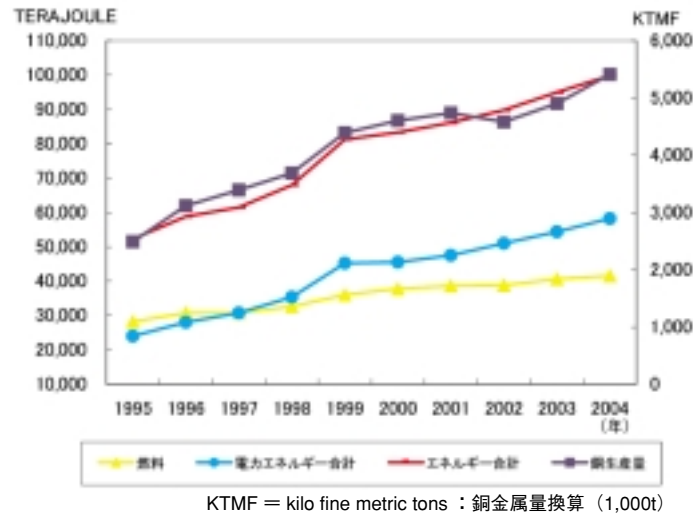


図 7 チリの銅生産とエネルギー消費推移

この図で分かるように、チリ銅産業界のエネルギー消費総量は 1995 年から 2004 年の間に 91 % 上昇している。なお、同じ期間に銅の生産量（銅金属量）は 117.5 % 増加している。

燃料エネルギーの消費量は上記 10 年間に 47.3 %、電力エネルギーの消費量は同じく 142.4 % 上昇している（表 13）。

表13 銅産業界のエネルギー単位消費の推計 1995～2004年

年	燃料(MJ/TMF)	電力エネルギー(MJ/TMF)	合計(MJ/TMF)	銅生産量(千TMF)
1995	11,344.9	9,653.4	20,998.3	2,488.6
1996	9,870.5	9,004.3	18,874.8	3,115.8
1997	9,062.0	9,058.7	18,120.6	3,392.0
1998	8,844.2	9,589.7	18,433.9	3,686.9
1999	8,204.4	10,298.2	18,502.5	4,391.2
2000	8,204.4	9,895.1	18,099.4	4,602.0
2001	8,154.7	10,024.3	18,179.0	4,739.0
2002	8,474.2	11,131.5	19,605.7	4,580.6
2003	8,278.7	11,088.8	19,367.5	4,904.2
2004	7,684.5	10,760.6	18,445.1	5,412.5

MJ: Megajoule TMF: Fine Metric Ton=銅金属量換算 (t)

出典:チリ銅委員会作成

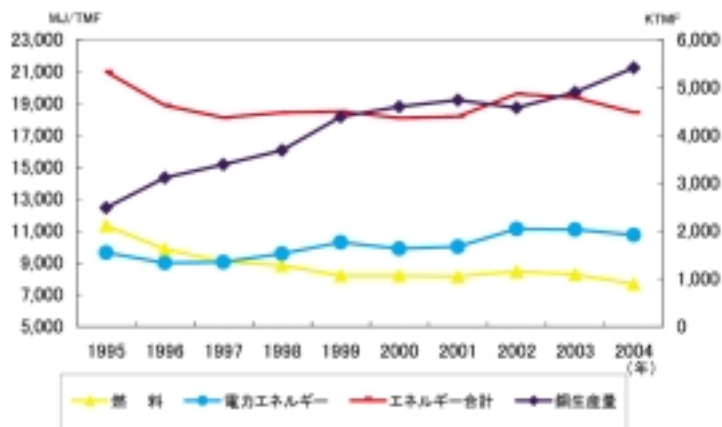


図8 チリの銅生産とエネルギー消費量単位総計数の推移

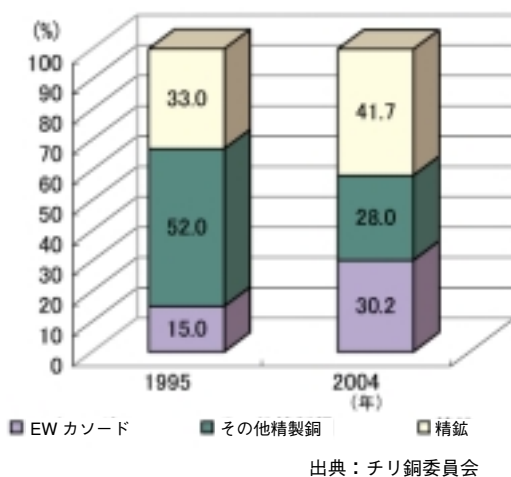
燃料消費量の単位総係数は全体的に低下傾向を示しており、調査対象期間に32.3%減少している。電力エネルギーについては、逆の傾向で、調査対象期間に11.5%上昇している(図8)。

燃料と電力エネルギーの消費量単位係数の和は比較的安定した線を描いており、1995年を除いた平均値は18,625MJ/TMFである。1995年は幾つかの新規プロジェクトが操業を開始した年であるので、本調査の分析を行うに当たって同年を除外することとした。

銅の生産方式の変化及び技術革新があったため、こ

のような結果が現れたものと思われる。

1995年から2004年までの間に、SX-EWによるカソード生産量は339%上昇。また、硫化鉍を処理して生産された銅は78.5%の上昇に留まっている一方、輸出された精鉍量は175%増を記録している。主な技術変革としては、反射炉の廃止、ガスの捕捉・管理工程の設置、硫酸プラント、酸素プラント、精鉍乾燥設備の導入、大型設備類の設置増加傾向等があげられる。また、調査対象期間に、2次硫化鉍の処理にリーチングを行うプロジェクトが操業を開始している(図9)。



出典：チリ銅委員会

図9 販売製品別構成比

前述のとおり、最終製品の構成比が変わり、技術変革が起こった。技術変革の中には環境上の必要性から行われたものもある。そしてその結果、銅生産の工程別エネルギーの相対的消費量にも変化が生じた(図10)。

銅生産の4工程がチリの銅産業界が消費するエネルギー総量の93%近くを消費している。これら4つの工程とは：採鉱工程、硫化鉱の選鉱工程、リーチング工程及び硫酸工場を含めた製錬工程である。

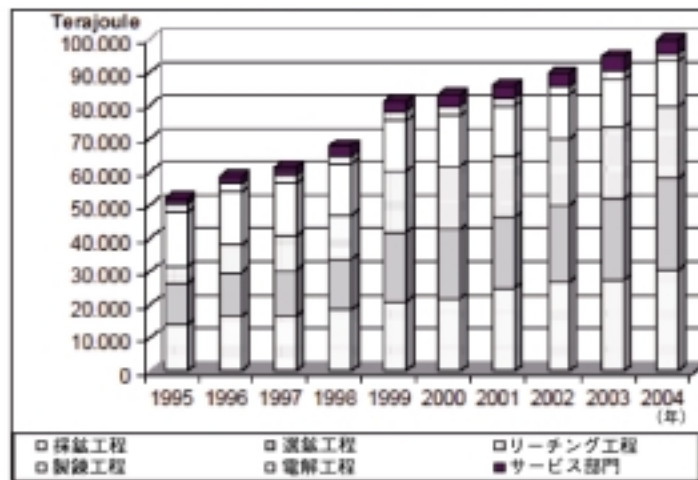
ここで最も重要なことは、1995年から2004年までの間に、銅生産のエネルギー消費全量に占める製錬工程の比率が30.9%から13.5%に低下している一方、リーチング工程の比率は10%から21.6%に上昇してい

ることである。

銅産業のエネルギー消費全量に占める電解工程の比率は低い上、1995年の4.6%から2004年には2.5%に低下している。これは販売製品中に占める電解カソードの比率が下がったためである。

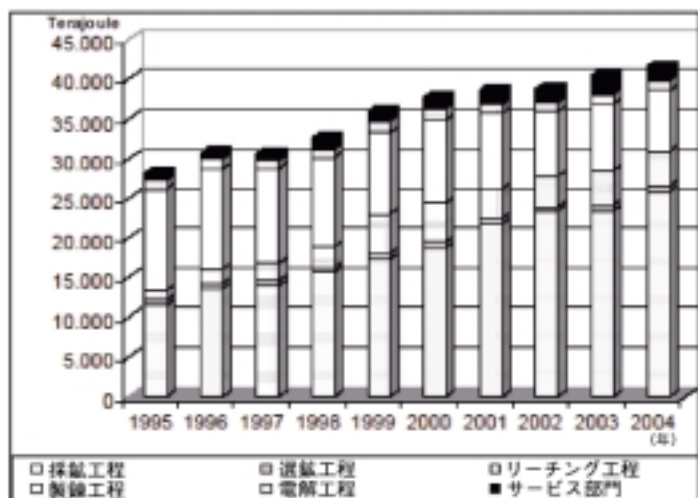
サービス部門エネルギー消費の全体に占める比率は比較的安定しており、全期間中、約4%である。

1995年には、製錬工程は銅産業界全消費燃料の45%を占めていたが、製錬の技術革新によって、年を追うごとにその比率は低下して行き、2004年には全体の僅か18.3%に減少している(図11)。



出典：チリ銅委員会作成

図10 工程別エネルギー総消費量



出典：チリ銅委員会作成

図11 工程別燃料消費

一方、採鉱工程の方は、当初燃料全消費量の41%を占めていたが、年々その率は上昇して行き、2004年には62.2%に達している。これは、主に、調査対象期間に操業を開始した新規鉱山が露天掘り鉱山であったことと、露天掘り鉱山の採掘が進むに連れて、鉱石やズリの運搬距離やピットの傾斜が増えて行き、そのためにトラックの燃料消費が増えたからである。

リーチング工程も銅産業界の全消費燃料中に占める消費比率が増加して行き、当初の4%から11%に上昇している。

銅産業界の電力エネルギー消費を分析して気付くことは、硫化鉱の選鉱工程が銅産業界の電力エネルギー全消費量の約半分を消費しているという点である。但し、全体に占める比率は1995年の49.5%から2004年には46.4%に下がっている(図12)。

もう一つ重要な点は、リーチング工程の消費比率がかなり増えていることで、1995年の16.8%から2004年には29.3%に上昇している。これは、この工程を使

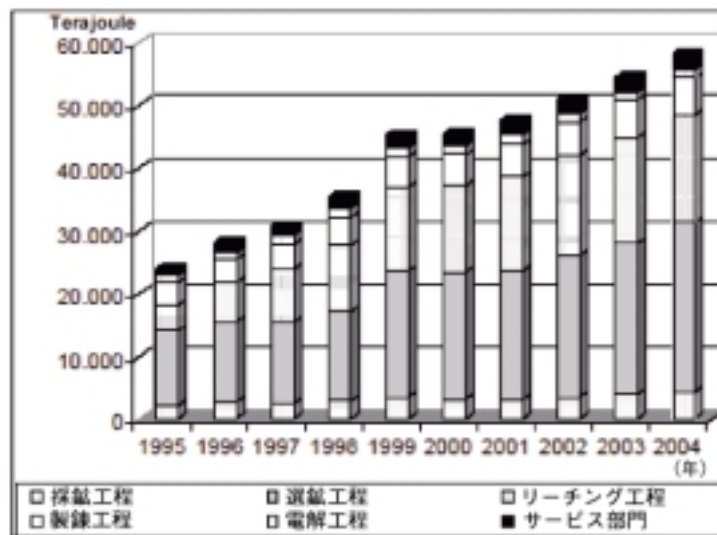
用して生産する銅の量が大幅に増加したことと、この工程の各生産段階が何れも大量の電力エネルギーを消費するタイプだからである(リーチング及び溶媒抽出段階における溶液のポンプ流送、それにEW)。

製錬工程は、ガスの捕捉・管理系統設備、酸素プラント、硫酸プラント等の電力エネルギー大量消費型設備を持っているが、全体に占める比率は下がっており、14.4%から10.1%に低下している。

電解工程も電力エネルギー多消費型設備と云えるが、同じく、全体に占める比率は4.8%から2.3%に下がっている。

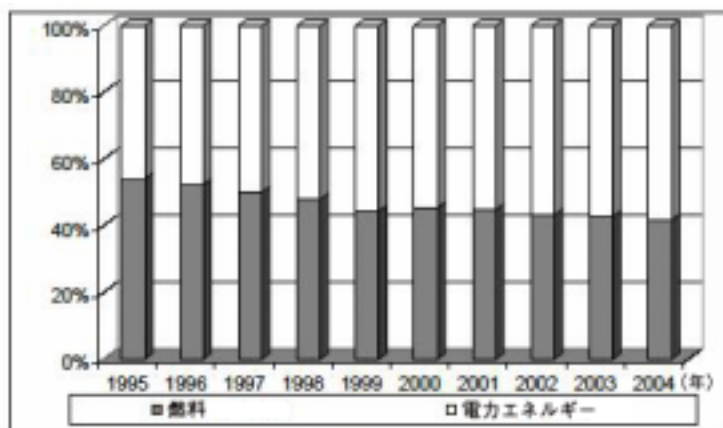
銅産業界のエネルギー消費パターンも調査対象期間の10年間に大きく変わっている(図13)。

1995年には、銅産業界が消費した全エネルギーの内54%が燃料エネルギーであったが、2004年には電力エネルギーがエネルギー消費全量の58%を占めるようになっていく。



出典：チリ銅委員会作成

図12 工程別電力エネルギー消費量



出典：チリ銅委員会作成

図13 エネルギー消費全量に占める比率

我が国におけるエネルギー製品（即ち、水力発電、火力発電を含む電力エネルギーで、最終使用に適した形）の最終消費を分析すると、2003年<sup>8</sup>に消費された全エネルギーの18.9%は電力エネルギーで、81.1%は各種燃料エネルギーであった。一方、銅産業界の消費は電力エネルギーの消費が全国平均よりもかなり多く、2003年には電力エネルギーが57.3%（2004年には58.3%）、燃料エネルギーが42.7%であった。

8 2004年のエネルギー・バランスが入手出来なかったため、2003年のデータを使用。

2004年に銅産業界で使用された各種燃料別の消費率は図14に示すとおりである。

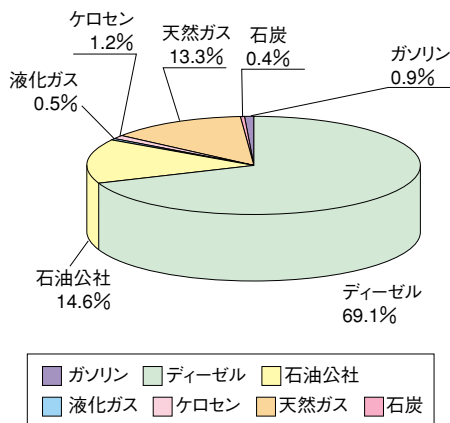


図14 チリ銅産業界の各種燃料消費率

2003年度の我が国の総消費量に占める銅産業界の比率をエネルギーのタイプ別に見ると、電力エネルギーが34.1%、燃料エネルギーについては全体の僅か5.9%である。

持続性という観点から見て興味深いことは、硫化鋳を乾式製錬して電解カソード1tを生産するのに要するエネルギー消費量と湿式で行うSX-EWのカソード生産方式を比較してみたことである。

この比較を行うに当たっては、電解カソードだけを生産する事業所及びSX-EWカソードだけを生産する事業所から得たデータを使用した。過去4年間のエネルギー消費平均値とSX-EWカソードの年間平均生産量919,000tを用いて、同タイプのカソードの生産に必要な単位係数19,014MJ/TMFを求めることが出来る。

電解カソードについては、平均生産量は1,117,000t、単位係数は24,477MJ/TMFという結果が得られた。これを見ると、エネルギー消費という観点からは、SX-EWカソードの生産の方が電解カソード生産より持続可能性が高いということが云える。

2004年度に販売した製品を100%精製した場合にどのような結果になるかを計算するため、全量精製銅を生産した場合、即ち、実際には中間製品として販売したブリストアや精鋳を全て精製したものと仮定した場

合に必要なエネルギーの追加消費量を推計してみた。その結果、銅産業界の2004年度のエネルギー消費量は25%増加するとの結論が得られた。この数値の内訳は電力エネルギー19.7%増、燃料エネルギー32.7%増である。

(2007.1.29)

## ANEX I

本調査の対象にした銅鋳業事業所

- Anglo American Chile Ltda.
  - División El Salado
  - División Los Bronces
  - División Mantos Blancos
  - División Manto Verde
  - Fundición Chagres
- CODELCO-Chile
  - División Codelco Norte
  - División Salvador
  - División Andina
  - División El Teniente
  - División Las Ventanas
- Compañía Contractual Minera Candlaria
- Compañía Minera Carmen de Andacollo
- Compañía Minera Cerro Colorado
- Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
- Compañía Minera Falconbridge Lomas Bayas
- Compañía Minera Quebrada Blanca
- Compañía Minera Zaldívar
- Empresa Nacional de Minería
  - Fundición Hernán Videla Lira
  - Planta Manuel Antonio Matta
  - Planta José Antonio Moreno - Taltal
  - Planta Osvaldo Martínez - El Salado
- Falconbridge Chile Ltda. - Fundición Altonorte
- Minera El Tesoro
- Minera Escondida Ltda.
- Minera Los Pelambres
- Minera Michilla
- Minera Raylock Ltda.
- Sociedad Contractual Minera Atacama Kosan
- Sociedad Contractual Minera El Abra
- Sociedad Punta del Cobre

本調査は下記の者が実施した：

Sara Ines Pimental Hunt  
Pedro Santic Contreras

2005年12月

