論文

石灰石鉱山における採掘プロセスの CO₂ 排出量に関するインベントリ分析*

安達 毅¹ 茂木 源人² 山 富 二 郎³

Inventory Analysis for CO₂ Emission of Mining Process in Limestone Quarries

by Tsuyoshi ADACHI^a, Gento MOGI^a and Jiro YAMATOMI^a

a. Department of Geosystem, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Life Cycle Assessment (LCA) has been broadly discussed, recently. However, LCA data in the mining operation, which should be the starting point of the material flow, isn't evaluated sufficiently.

The purpose of this study is to calculate and evaluate the amount of CO₂ emission due to limestone production at Japanese limestone quarries based on three kinds of statistical data, and to compare the result with other types of open pit mines. In Japanese limestone quarries, principal mining method is bench-cut in which the deposit will be sliced down from top using orepass system.

Consequently, the total amount of CO₂ emission from limestone quarries in Japan is estimated to be 428,780 t in 1998, which equals to 2.31 kg-CO₂/t of limestone. It has been varying between 2.1 to 2.3 kg-CO₂/t during this 15 years and tends to increase slightly after 1991. 55.9% of CO₂ emission is caused by diesel fuel consumption, and 32.3% by purchased electric power consumption. The most part of CO₂ emission in the mining process is originated by the diesel fuel consumption.

For the limestone quarries producing more than million tons ore per 1 year, the diesel oil consumption rate at the most fuel efficient mines was 0.25 l/t, independently of the mining scale. The amount of CO₂ emission by the haulage operation at a Chilean copper mine was found out to be nine times more than that of a limestone quarry in Japan. The bench-cut mining method has a possibility to considerably decrease the energy consumption in mining compared to other mining methods.

KEY WORDS : LCA, LCI, CO₂ Emission, Mining Process, Energy Consumption, Limestone Quarry

1. は じ め に

地球温暖化防止に向け、1997年に京都で開催された第3回気候変動枠組条約締約国会議(COP3)において、わが国は2008年から2012年までの温室効果ガスの年平均排出量を1990年レベルに比べて6%削減することを数値目標とすることを発表した。これを受けて産業界ごとに自主的なCO₂排出削減目標が設定され、達成するための削減努力が始まっている。

製品製造やサービス活動による環境への負荷を定量的に評価する手法としてはLCA(Life Cycle Assessment)が広く用いられている。LCAは、製品やサービスのライフサイクル(原料調達から廃棄まで)における様々な環境負荷を計量し、環境への影響を総合的に評価する手法である。評価に先立ち、生産活動時の投入物と産出物を定量的に把握する作業はライフサイクルインベントリ分析(LCI)と呼ばれている。本来は多くの環境負荷物質を評価する必要があるが、データ収集が困難なことが多いため、比較的計量が容易なCO₂の排出量を把握することから始められている場合が

多い。本研究でもCO₂排出量のみを対象としている。

最終製品や基礎素材に関するLCAもしくはLCIの研究事例はここ数年、増加してきているが、ライフサイクルの出発点である資源採掘時のCO₂排出量までを計算に含んでいる事例は少ない^{1)–6)}。これは、金属鉱山の大部分が海外生産であることからデータの把握が困難なため、資源採掘時のLCIが未整備であることが主な原因だと考えられる。しかし、より正確で現実的なLCAのために、採掘時のLCIから系統的に整える必要がある。

資源の採掘法には大きく分けて露天掘採掘と坑内掘採掘があるが、本論文では露天掘採掘法におけるCO₂排出量の把握を試みる。なかでも、国内で資源自給率が高く、大型の露天掘鉱山が多い石灰石鉱山を主な対象として、採掘時の燃料消費原単位を調査し、その結果から単位生産当りのCO₂排出量を算出した。調査範囲が異なる3種類の資料を比較することで詳細な検討を行っている。また、石灰石鉱山と似た採掘法を採用している鉱山として、砕骨材採取場を取り上げ、石灰石鉱山で得た結果との比較を行った。

国内のほとんどの石灰石鉱山はベンチカット方式の露天掘採掘法を採用しているため、地表面から掘り下げる方式を取る通常の露天掘採掘を行う鉱山とはCO₂排出量が大きく異なることが予想される。本論文では、海外の大規模露天掘銅鉱山を調査した事例と比較することで、露天掘採掘の形態によるCO₂排出量の差についても言及した。

* 2000年11月20日受付 2001年1月25日受理

1. 正会員 東京大学助手 大学院工学系研究科地球システム工学専攻
2. 正会員 工博 東京大学助教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻
3. 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻
〔著者連絡先〕FAX 03-5841-7035 (東大・地球システム)
キーワード: LCA, LCI, CO₂ 排出量, 採掘プロセス, エネルギー消費, 石灰石鉱山

図1 石灰石鉱山でのベンチカット採掘法と立坑

表1 石灰石鉱山の作業プロセス

プロセス名	作業名	使用重機・設備	消費エネルギー
採掘	せん孔	せん孔機	軽油
	発破		ANFO
	小割	小割機	軽油
	積込	ホイールローダー・ショベル	軽油
	運搬	ダンプトラック	軽油
	立坑投入		
破碎選別	破碎	クラッシャー	電力
	篩分	篩分機	電力
	集塵機	集塵機	電力
	運搬	ベルトコンベア	電力
	貯鉱場		

2. 石灰石生産のインベントリ

2・1 石灰石鉱山の概要

国内では非鉄金属・石炭とともに数鉱山のみが操業している状況から、わが国の主な鉱山は石灰石・砕骨材といった非金属鉱山である。石灰石は平成10年の統計⁷⁾で185,700,000tの生産が行われており、事業所数は238か所、国内自給率は100%である。石灰石の使用用途はセメント用が42%、砕石・土建用が28%、鉄鋼用が10%であり、近年では骨材・建設用途が増加する傾向にある。

わが国石灰石鉱山の採掘の特徴は、ほとんどの鉱山においてベンチカット方式の露天掘採掘が採用されている点にあると言える。この採掘方式では鉱床部分を高さ10~15mで水平方向にスライスするように、鉱床上部から採掘を進め、ベンチを形成する。国内の大型石灰石鉱山の多くは、図1に示すように、切羽面で発破された原石をホイールローダー等の積込機でダンプトラックに載せ、切羽から鉱床中央付近に掘さくされた立坑に運搬、投入する方式を採用している。立坑の直径は5m程度で、切羽から鉱床下部に設けられたクラッシャー室へとつながっている。重力による鉱石運搬方式のため、鉱石運搬のエネルギーは最小限に抑えられる特徴がある。

LCI分析では調査の対象範囲を明確にする必要がある。今回はシステム境界を、ベンチでの発破から破碎選別された鉱石の貯鉱までを範囲とし、製品の出荷段階以降は考慮しないことにした。表1に示すように石灰石鉱山の工程は大きく分けて、採掘プロセスと選鉱プロセスから成り立っている。ここでは、切羽から立坑下までを採掘プロセスとし、破碎プロセスから製品として貯鉱されるまでを選鉱プロセスとする。切羽での主な工程は、せん孔・発破・積込・立坑への運搬・投入から成り、この中では積込・運搬工程における軽油消費が大きい。選鉱プロセスでは、破碎・ふるい分・ベルトコンベアによる輸送が主な工程で、このプロセス

表2 エネルギー種別CO₂排出原単位

エネルギー種別	単位	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /Unit)
ガソリン	l	2.36
軽油	l	2.64
灯油	l	2.53
重油 (A重油)	l	2.70
重油 (B重油)	l	2.83
重油 (C重油)	l	2.94
石炭 (輸入炭)	kg	2.25
潤滑油	l	3.06
ANFO	kg	0.60
鋼材	kg	1.21

出典⁴⁾¹¹⁾¹²⁾表3 国内電力のCO₂排出原単位 (kg-CO₂/kWh)

1980~1985	1986~1994	1995~1998
0.4	0.37	0.33

出所: 東京電力(株)資料

でのエネルギー消費のほとんどが電力である。石灰石鉱山における耐久性設備には事務所、工場施設、採掘に用いる重機や選鉱プラントなどがあるが、それら生産時のCO₂排出量はこれまでの同種の調査結果(例えば、文献4))から操業時の排出量に比して無視しうる程度であることから今回の調査でも対象から除外した。

2・2 データ調査方法

石灰石生産時の消費財および燃料消費量を調査単位の異なる3種類の資料から得た。日本全国の平均値を得るにはマクロレベルでの統計を扱っている資料が便利である。本研究では、石油等消費構造統計表⁸⁾と本邦鉱業の趨勢⁹⁾を用いた。鉱山ごとの公表されているより詳細な統計データは石灰石鉱山表¹⁰⁾から得た。さらに詳しい重機種ごとのデータについては鉱山会社からの資料提供によって補った。以下ではそれぞれの資料の特徴を生かした、インベントリデータの収集および分析を試みる。

本論文で用いたエネルギー燃焼時のCO₂排出原単位を表2に示す。購入電力のCO₂排出原単位は国内の電源構成によって長期的には変化するので、東京電力(株)の資料から原単位が大きく変動する期間に区分けし、表3に示すように、その期間の平均値を用いることにした。CO₂排出量を算出するには、燃料等の消費量にCO₂排出原単位を掛け合わせることで求める。

2・3 マクロ統計データによるCO₂排出量

はじめに、マクロ統計データを用いて、国内の石灰石鉱山全体での平均値を算出する。エネルギー消費量は石油等消費構造統計表⁸⁾および本邦鉱業の趨勢⁹⁾から、生産量は本邦鉱業の趨勢⁹⁾の値を引用している。石油等消費構造統計表と本邦鉱業の趨勢では統計の調査事業所範囲が同一であるので、他の生産量統計を用い

表4 燃料種別、石灰石単位生産量当たりエネルギー消費量(全国平均)

単位	生産量 1000t	軽油 l/t	A重油 l/t	購入電力 kWh/t
1984	171,255	0.453	0.009	2.30
1985	163,511	0.476	0.013	2.31
1986	162,971	0.487	0.014	2.33
1987	167,672	0.484	0.014	2.29
1988	184,270	0.462	0.017	2.21
1989	188,852	0.451	0.019	2.20
1990	200,444	0.432	0.024	2.18
1991	209,431	0.432	0.030	2.15
1992	205,932	0.438	0.033	2.18
1993	200,811	0.445	0.030	2.30
1994	204,722	0.456	0.037	2.31
1995	201,419	0.471	0.035	2.36
1996	203,458	0.475	0.042	2.26
1997	202,710	0.478	0.064	2.17
1998	185,697	0.489	0.050	2.27

表5 燃料種別、石灰石単位生産当たりのCO₂排出量(全国平均)
(単位: kg-CO₂/t)

年	合計	軽油	A重油	購入電力	ANFO	その他
1984	2.25	1.20	0.024	0.919	0.06	0.044
1985	2.32	1.26	0.034	0.923	0.06	0.039
1986	2.28	1.29	0.038	0.861	0.06	0.036
1987	2.26	1.28	0.037	0.846	0.06	0.036
1988	2.18	1.22	0.045	0.816	0.06	0.034
1989	2.14	1.19	0.051	0.814	0.06	0.026
1990	2.10	1.14	0.064	0.808	0.06	0.021
1991	2.10	1.14	0.080	0.795	0.06	0.022
1992	2.14	1.16	0.089	0.808	0.06	0.025
1993	2.20	1.18	0.082	0.849	0.06	0.028
1994	2.25	1.21	0.100	0.856	0.06	0.027
1995	2.20	1.24	0.095	0.777	0.06	0.028
1996	2.20	1.26	0.112	0.745	0.06	0.026
1997	2.32	1.26	0.172	0.716	0.06	0.105
1998	2.31	1.29	0.134	0.749	0.06	0.078

るよりも整合性がある。生産活動の際に消耗する資材使用量を特定する資料はないので、計算には含んでいない。ただし発破の際に爆薬として主に使われているANFOに関しては石灰石鉱山表¹⁰⁾から、登録されている全鉱山のANFO消費原単位を算出したところ平均値で100 g-ANFO/t-oreとなり、この値を全期間にわたり適用させた。

1984年から15年間の石灰石生産量1t当たりの消費量の推移を表4に示す。自家発電電力は発電燃料を考慮しているため除外し、購入電力の値のみを表記した。また、その他の燃料には揮発油・灯油・B重油・C重油・石炭が含まれている。全国平均で見るとこの15年間の単位生産当たりのエネルギー消費構造は、A重油の消費が増加していることを除いて、大きな変動はない。1tの鉱石生産に必要な軽油は1998年で0.489 l/t、購入電力は2.27 kWh/tとなった。ただし、単位当たり軽油消費は1991年を最小に年間1～3%の増加率で上昇に転じている。これは生産量が減少を始める時期と一致している。鉱山での軽油の使用用途は主に重機用燃料であるので、生産に合わせた変動的な軽油消費が大半を占める。軽油消費原単位が上昇傾向にある原因としては、近年の生産量減少が生産容量に余裕を生じさせ、ベンチの整形や鉱床周辺部等の採掘にエネルギーをより多く消費する切羽を採掘する機会が多くなってきているのではないかと推察される。

表5にはCO₂排出原単位を用いて算定した石灰石生産1t当たりのCO₂排出量を示す。1998年の単位生産当たりのCO₂排出量は2.31 kg-CO₂/tであった。この15年間では2.1～2.3 kg-CO₂/t程度で推移しており大きな変動はないが、1991年以降は若干の増加傾向にある。1991年以降は一方で軽油とA重油の消費量が増加することによってCO₂排出量が増加したのに対して、年々CO₂排出原単位が低下している購入電力元の排出量が減少しているため、

表6 燃料種別、砕石単位生産当たりのCO₂排出量(全国平均)
(単位: kg-CO₂/t)

年	生産量 (1000t)	軽油	重油	購入電力	ANFO	灯油	合計
1989	449,232	2.10	0.040	0.865	0.06	0.085	3.15
1990	468,336	2.07	0.045	0.845	0.06	0.071	3.09
1991	461,620	2.09	0.060	0.844	0.06	0.095	3.15
1992	456,980	2.16	0.065	0.858	0.06	0.089	3.23
1993	435,849	2.25	0.076	0.884	0.06	0.097	3.37
1994	424,287	2.31	0.084	0.885	0.06	0.094	3.44
1995	410,325	2.37	0.105	0.814	0.06	0.107	3.46
1996	440,839	2.35	0.123	0.820	0.06	0.103	3.46
1997	422,656	2.46	0.156	0.839	0.06	0.097	3.61
1998	375,433	2.63	0.197	0.895	0.06	0.119	3.90

図2 石灰石鉱山、燃料種別CO₂排出比率
(全国平均, 1998年)

これらが相殺して合計の排出量をほぼ一定に保っていると考えられる。

1998年の燃料種別CO₂排出比率を表2に示す。55.9%の排出源が軽油で、32.3%が購入電力によるものであった。この比率は、採掘プロセスと選鉱プロセスでのCO₂排出量比とほぼ等しい。A重油は主に自家発電で消費されていると考えられるが、比率で5.8%と低く、ANFOとその他の燃料はそれぞれ数%ずつを占めるに過ぎない。採掘プロセスでのCO₂排出量をみるときに、軽油の消費量のみに注目したとしても大きな誤差は生じないことが期待できる。

2・4 砕骨材採取場との比較

一般的に砕骨材採取場は製品出荷までのプロセス・作業が石灰石鉱山と同一であり、採掘方法もベンチカット方式を採用している鉱山が多く石灰石鉱山との共通点が多い。しかし、切羽からの立坑投入方式を取る砕骨材採取場の数は比較的少ない。1998年の生産量は3億7,543万tで、そのうち50.0%は道路用に出荷され、39.1%がコンクリート骨材用に出荷されている。石灰石と比較すると、その生産量は2倍程度あるが、砕石事業所数は1,453か所と石灰石業の238か所の6.1倍あることから、その生産規模は比較的小さい。砕骨材採取場について、全国平均での単位生産当たりのCO₂排出量をマクロ統計データを用いて求めたのが表6となる。使用した10年間の統計データはすべて砕石統計年報¹³⁾によるものである。石灰石で用いた統計書とは消費燃料区分が異なり、対象となる燃料種が少ないので厳密な比較はできない。しかし、CO₂排出量の大部分を占める軽油と購入電力のデータが存在するので、比較を行っても大きな誤差はないと考えられる。なお、ANFOの消費量に関しては石灰石鉱山と同じく100g/tと置いて算定した。

石灰石鉱山と比較して、軽油の消費量が1.8～2倍になっている点が大きく異なっている。重油に関しては平均すると差がなく、電力は3～20%、砕骨材採取場で多く消費されている。最終的な原石単位生産当たりのCO₂排出量では3.09～3.90 CO₂-kg/tとなっており、1.5～1.7倍多くのCO₂が排出されている。これは石灰石鉱山と比べると鉱床規模が小さい事業所が多いことが原因だと考えられる。鉱床規模が小さいことで、表土処理が多くなること、立坑を設置するほど山を大きく切り崩さないことになる。しかしながら、消費地までの輸送を考慮に入れると、小規模な生産地が分散しているほうがライフサイクル的には有利な場合もあると考えられる。時系列でみると、単位生産当たりCO₂排出量は年々増加傾向にある。石灰石の場合と同様に1991年以降の需要の減少率がエネルギー消費量

図3 生産量 100 万 t 以上の石灰石鉱山の軽油消費原単位

表7 生産量 100 万 t 以上の石灰石鉱山のエネルギー消費量

		消費量計	消費原単位(Unit/t)
軽油(kl)	採掘	59,624	0.373
	その他	9,960	0.062
	計	69,572	0.436
電力(1000kWh)		424,584	2.60
生産量計(1000t)		165,067	

の減少率を上回っているためであり、砕骨材採取場全体からのCO₂の総排出量自体は減少している。

2・5 採掘プロセスでのエネルギー消費構造の傾向

石灰石鉱山についてのさらに詳細な資料には石灰石鉱業協会編集の石灰石鉱山表¹⁰⁾がある。この資料は石灰石鉱業協会に所属する会員鉱山のみが掲載されているが、国内の大型石灰石鉱山がほぼ網羅されていることから、平成9年度の生産量が100万t以上である鉱山についてエネルギー消費量の検討を行った。対象となる鉱山数は38で、国内鉱山数の16%を占めるに過ぎないが、生産量では81.4%がこれらの鉱山で占められている。この資料を用いて、石灰石鉱山におけるエネルギー消費構造の傾向をつかむことを試みる。

石灰石鉱山表のエネルギー消費データは、採掘とその他の軽油消費、および破碎選別工程を含む鉱山全体での電力消費が鉱山ごとに記載されている。採掘以外のその他の軽油消費とは、表土除去、捨石堆積作業に使用した消費量を指している。対象鉱山について採掘のみの軽油消費原単位を縦軸に、横軸には生産量をプロットすると図3になる。消費原単位の平均値は表7に示すように、0.373 l/tとなった。CO₂排出量に換算すると0.99 kg-CO₂/tである。

生産量と消費原単位の両者には明確な傾向はないが、生産量が300万t以下の鉱山では、軽油消費原単位のばらつきが大きくなっており、500万t以上の大型鉱山では0.2～0.5 l/tに収まる。生産規模にかかわらず最小の消費原単位はほぼ一定で、0.25 l/t付近である。個々の鉱山の地質や地形によって原単位の差が現れてくるが、鉱石の積込と運搬に負荷をかける要因が少ない場合には、0.25 l/tが生産に必要な最小限の軽油消費量であると考えられる。

電力消費量について同様に生産量との関係をプロットすると図4が得られる。生産規模による原単位の変化はないが、ほとんどの鉱山が粗鉱1t当たり4.0 kWh/t以下で処理していることが明らかになった。電力消費の多くが鉱石の破碎と選別、ベルトコンベヤによるものであり、鉱石の岩質とベルトコンベヤでの輸送距離が電力消費に大きな変動を与えると考えられる。これらの要因は個々の鉱山の特徵から来るもので、電力消費についての一般的な傾向をつかむにはさらに詳細な資料が必要となる。

2・3の表4で示したマクロ統計データの結果と比較すると、鉱山全体での軽油消費の平均値は0.042 l/t(▲8.9%)少なくなっている。生産規模の小さな鉱山には軽油消費原単位が大きなものが

図4 生産量 100 万 t 以上の石灰石鉱山の電力消費原単位

比較的多く、100万t以上の鉱山を集めた場合には消費量が小さくなる傾向にある。採掘以外の表土除去、捨石堆積作業には平均で0.062 l/tの軽油が消費されており、これは全消費量の14%に当たる。また、購入と自家発を合わせた電力消費量の平均値は2.60 kWh/tとなり、マクロデータの2.35 kWh/tと比較して0.25 kWh/t(▲11%)大きくなっている。

採掘プロセスを個々の作業に分割すると、せん孔(せん孔機、軽油)―発破(ANFO)―小割(小割機、軽油)―積込(ホイールローダ・ショベル、軽油)―運搬(ダンプトラック、軽油)―立坑投入の順に作業が進行するのが一般的である。せん孔・発破・小割については、岩石の強度・地質状況によって消費エネルギーが変動するが、ここでは各鉱山で単位生産当たりの消費量は一定であると仮定する。重機メーカーのコマツの資料によると、各鉱山の積込作業で主に使用されているバケット容量が11 m³以下のホイールローダの定格燃料消費量は、重機に対する負荷が同じなら、ほぼ線形に推移することが示されている。これより積込作業時の単位生産当たりの軽油消費量も一定であると仮定する。最後の運搬作業が採掘プロセス中で最も鉱山の地形および丁場形状の影響を受ける。上記の仮定の下、切羽形状を表現する代表値として、切羽から立坑までの平均運搬距離D(m)と鉱山が保有するダンプトラックの総容量L(t)を用いて、1方当たり(8h)の軽油消費量E(l)を推定すると次式のようになった。

$$E = 0.865 \cdot D^{0.230} \cdot L^{-0.125} \cdot P^{0.834} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(3.16)(-1.02)(6.09) \quad R^2 = 0.796$$

ここで、P(t)は1方当たりの生産量で、括弧内はt値である。推定に用いた鉱山サンプルはダンプトラック運搬によって8割以上を生産する鉱山に限定したため、サンプル数は27である。図5には1方当たりの軽油消費量の実績値と式(1)から得られる推定値を示す。式(1)では、当然ながら生産量の影響が最も大きい、運搬距離の長短によって燃料消費が正に変動し、影響は小さいもののダンプトラック容量が大きな鉱山ほど燃料消費が抑えられている傾向が表現されている。2・6で詳述するように採掘プロセス中

図5 1方当たりの軽油消費量の実績値と推定値

図6 国内A石灰石鉱山でのCO₂排出比率 図7 国内A石灰石鉱山での採掘プロセス内CO₂排出比率

に占めるダンプトラックの消費燃料が4分の1程度であった場合、1%の運搬距離の伸びがダンプトラックの燃料消費量を0.9%押し上げる要因となっている。

2・6 ある石灰石鉱山での作業種ごとの調査結果

採掘プロセスのさらに詳細なエネルギー消費構造を知るには、統計資料からではなく、鉱山ごとの聞き取り調査が必要となってくる。今回は事例としてA鉱山でのLCI分析を試みる。ただし、この種のデータは鉱山のコスト評価に直接かわるので、加工したデータの形で示すことにする。

調査を行ったA鉱山は国内の大型石灰石鉱山で、標準的なベンチカット採掘法ならびにトラック運搬による立坑投入によって採掘を行っている。まず、燃料種別のCO₂排出の比率を図6に示す。軽油が46.3%で最も多く、電力によるCO₂排出量はほぼ同率の44.6%になっており、この2種で9割のCO₂を排出する。ANFOと重油の比率はそれぞれ数%程度であり寄与は少ない。今回は選鉱プロセスで消耗する打撃板や篩網等の鋼材と重機の潤滑油の消費量も算定に含んだが、それぞれ1%程度であり、他の結果と同様にこれらの消耗性資材からのCO₂排出は無視してよい程度であることがわかる。この鉱山の場合、全工程での鉱石1t生産当たりのCO₂排出量は1.44 kg-CO₂/tであった。

次に、採掘プロセス内の作業種別にCO₂排出量の比率を示すと図7となる。最も排出量が多いのは積込作業の44.9%であり、ダンプトラックによる運搬元の排出量は25.5%であった。立坑投入のベンチカット採掘の場合、鉱石の運搬で斜面を走行することが最小限で済むために、運搬よりも積込作業に燃料を消費することがわかる。

3. 海外露天掘銅鉱山との比較

ベンチカット方式で採掘する鉱山は切羽から破砕場までの運搬時に消費するエネルギー量を最小にする可能性がある。本章では、地表面から掘り下げる方式を取る通常の露天掘銅鉱山と比較することで、CO₂排出量にどれほどの差が生じるかをみる。国内には石灰石鉱山に匹敵する大きさを持つ露天掘銅鉱山はないため、海外の

表8 チュキカマタ鉱山生産量データ

内容	数値	備考
年間採掘量	2億4千万t	
内訳		
鉱石(硫化鉱)	11万t/日	
鉱石(酸化鉱)	5万t/日	
ズリ	50万t/日	
鉱石の平均品位	1.15%	銅品位
銅精鉱量	4,600t/日	年間168万t
銅アノード	1,260t/日	年間46万t
電気銅	1,780t/日	年間65万t うち約30%はSX/EW法による生産
鉱業所内全電力	6,720MWh/日	全て石炭火力発電所から購入

銅露天掘銅鉱山を事例に挙げる。今回、対象とする鉱山はチリ共和国、CODELCO社のチュキカマタ鉱山である。チリの1997年の鉱石生産量(含銅金属量)は305万tで、これは世界銅生産の28%に当たる点、現在の銅鉱石のほとんどが大型露天掘銅鉱山からの産出である点から、銅の露天掘銅鉱山の標準的な例として同鉱山は良いサンプルとなると考える。以下では既報¹⁴⁾¹⁵⁾に基づき、1999年3月にチュキカマタ鉱山で行った聞き取り調査の結果をまとめる。

3・1 銅鉱山事業所概要

主要産物は銅で、他に副産物としてモリブデンと金を産出している。鉱山は2つの鉱床を有しており、それぞれ別のピットで露天掘採掘を行っている。2つの鉱床のうち古くから開発され、硫化鉱を産出するメイン鉱床は、現在では地表での径で4.3km×3kmと巨大なピットを形成している。ベンチ高は15mから30mで、ピット最深部は地表面から750mに達する。採掘された鉱石は破砕選鉱プロセス・乾式製錬を経て、銅カソードとして同じ事業所内にある銅電解工場に出荷される。もう一方の鉱床は酸化鉱を産出し、リーチング後にSX/EW法にて処理されており、この方式による銅生産は全体の3割強を占める。

3・2 システム境界

チュキカマタ鉱山の生産物は銅、モリブデン、金の3種類があるが、今回は主産物である銅のみに着目して調査を行った。事業所内には電解工程まで同一敷地内にあるため、既報¹⁴⁾¹⁵⁾では採掘から電気銅産出までの生産プロセスを一貫して調査しているが、今回は発破からクラッシャ投入前までの採掘プロセスのみを報告範囲とする。調査項目はエネルギー類およびダンプトラックの消耗材のみに限っており、施設・プラント・重機といった固定・耐久材については計算から除外している。

3・3 エネルギー消費構造

まず、鉱山の生産量等の基礎データを表8に示し、後に、消費エネルギー量と消耗材消費量を作業ごとに算定条件を示しながら列挙する。なお同鉱山は1日24時間、年間365日の稼働体制を取っている。以下では特に断りが無い場合、時間単位を1日として計算を行っている。

発破作業: 爆薬にはANFOを使用している。1日当たり60～130tの消費量で、平均では95t/日のANFOを消費している。

運搬作業: ズリの一部はベルトコンベヤでピット外に搬出され、残りのズリと鉱石はダンプトラックによって堆積場まで運搬される。ダンプトラックは全機種ディーゼルエンジンであり、1台の運搬容量は170～330tである。現場担当者からの聞き取りの結果、ダンプトラック1台当たり平均で3.0kℓ/日の軽油を消費する。同鉱山では105台のダンプトラックを所有しているが、その内、平均87台のダンプトラックが運行(稼働率82.8%)している。よって全体では1日当たり261kℓ/日の軽油を消費するとした。ピット内でのズリ搬出用クラッシャおよびベルトコンベヤで消費される

電力は 360 MWh/日であった。

積込作業：トラックへの積込はすべて油圧ショベルで行っており、常時 13 台が稼働している。使用機種の詳しい内訳や燃料消費量のデータは得られなかったため、前節の A 石灰石鉱山と 1t の鉱石を積込むのに消費する軽油は同じであると仮定して算出したところ 74.7 k l/日との結果を得た。

さく孔作業：さく孔機についても消費量がわからなかったため、ショベル同様に A 鉱山と同等の燃料消費があるとした。

ダンプトラックメンテナンス：

潤滑油消費：ダンプトラックのオイル交換について聞き取り調査を行ったところ、エンジン・デフ・ミッションオイルを合わせた年間使用量は 1,176 k l で、1 日当たりでは 3.22 k l/日となる。ショベル等の他の重機についての潤滑油消費は、今回の調査項目からは除外している。

鋼材消費：ダンプトラックの荷台部分(鉄)は使用とともに磨耗するため交換または補強が必要となってくる。トラック機種によってメンテナンス方法が異なるので、機種ごとに分けて鋼材消費量の計算した。トラックの荷台全体は約 5 年ごとに交換され、適宜 800 ~ 1,000 kg の鉄補強材を荷台に埋め込まれる。トラック全体での平均鋼材消費量は、1.59 t/日の消費量となった。

ゴム消費：ダンプトラックのタイヤは 35,000 ~ 45,000 マイルごと(平均 8 か月ごと)に交換される。タイヤ 1 本の使用ゴム重量は 2.5 ~ 3.5 t(平均 3 t)で、1 台当たり 6 本のタイヤを使用している。1 日あたりに換算すると 5.18 t/日のゴム消費である。

3・4 採掘プロセスのインベントリ

以上のデータはチュキカマタ鉱山の 2 つのピットに関して、別々の値を得られなかったため、両ピットでの消費量の合計値になっている。ピットが異なれば特に軽油や電力の消費量が異なってくるが、今回は両ピットで同一の投入構造を持っているものとして扱う。採掘プロセスに関しての調査結果をまとめると表 9 のようになる。

採掘プロセスでの CO₂ 排出のうち、ダンプトラックの軽油消費によるものが採掘量 1t 当たりで 0.395 l/t となり、採掘プロセスで発生する CO₂ 量の 51.2% を占めることが図 8 よりわかる。電力と合わせると両方で 76% の CO₂ 排出源であり、ほとんどのエネルギーが鉱石の搬出に消費されている。これに対して、さく孔や積込の比率は石灰石鉱山に比べて相対的に低くなり、両者を合わせても CO₂ 排出比率で 18% である。運搬に使用するエネルギー消費の多さは、銅の大型露天掘鉱山の特徴として捉えることができる。つまりピットの広さ深度ともかなり大きく、それによって鉱石の搬出距離がたいへん長くなるためである。エネルギー消費を抑えるには、車道勾配を保ちながら搬出距離を短くするような消費エネルギーを抑えることを念頭に置いたピット設計や採掘手法の検討が必要になってくる。

軽油・電力以外の素材に伴う CO₂ 排出では、ANFO が 4.2% と

最も大きくなっている。トラックの消耗品であるゴムや鋼材、潤滑油に起因する排出量は、採掘プロセス全体に比べ、2% に収まり、たいへん少ない。しかし重機や設備の生産に排出された量を加味していないため、さらに正確な値を知るにはこれらの値を加える必要がある。

年生産 100 万 t 以上の石灰石鉱山の値と比較すると、採掘プロセスのエネルギー消費から発生する CO₂ 量は約 2 倍となっている。チュキカマタ鉱山と調査項目を調整した石灰石 A 鉱山との比較では、およそ 3 倍強の CO₂ を排出している。その差は鉱石(・ズリ)運搬時の排出量の差がほとんどで、運搬時のみではチュキカマタ鉱山が石灰石 A 鉱山のおよそ 9 倍もの CO₂ 排出量があった。また、チュキカマタ鉱山は全量石炭火力発電の電力を使用していること、鉱山の地表面の標高が 2,800 m と高所にあるため、内燃機関の効率が悪いことも大きな差となる原因の一つであろうと考えられる。

4. ま と め

露天掘鉱山での資源採掘時の CO₂ 排出量を算定するため、わが国の石灰石鉱山を取り上げた。採掘プロセスに主眼を置き、プロセス内の作業種ごとのエネルギー消費構造の検討を行った。また、石灰石鉱山と砕骨材採取場・海外銅鉱山との比較も行った。

その結果、国内石灰石鉱山では 1998 年の全国の CO₂ 総排出量で 428,780 t が見込まれ、鉱石生産当たりに換算すると 2.31 kg-CO₂/t となった。15 年間の時系列でみた場合、2.1 ~ 2.3 kg-CO₂/t の間で推移しており大きな変動はないが、1991 年以降は若干の増加傾向にある。排出もとの内訳は 55.9% が軽油で、32.3% が購入電力によるものであり、採掘プロセスでの CO₂ 排出量は軽油の消費量に大部分を依存していることがわかった。

砕骨材採取場の単位生産当たり CO₂ 排出量は、総排出量は低下しているにもかかわらず、この 10 年間で 3.09 ~ 3.90 CO₂-kg/t と推移していることがわかった。石灰石鉱山に比べ特に軽油消費原

図8 チュキカマタ鉱山での採掘プロセス内 CO₂ 排出比率

表9 チュキカマタ鉱山での採掘プロセス投入表(採掘量：660,000 t/日)

種類	作業	消費量 (1日あたり)	採掘 1t あたりの 消費量	CO ₂ 排出原単位	採掘 1t あたり CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出比率 (%)
火薬(ANFO)	発破	95 t	0.144 kg	0.6	0.086	4.2
軽油	さく孔	16.9 k l	0.026 l	2.64	0.068	3.3
	積込	74.5 k l	0.113 l	2.64	0.299	14.6
	運搬	261 k l	0.395 l	2.64	1.05	51.2
	軽油計	352 k l	0.534 l	2.64	1.41	69.1
電力(石炭火力)	運搬	360 MWh	0.545 kWh	0.916	0.50	24.5
潤滑油	トラックメンテナンス	3.2 k l	0.0049 l	3.06	0.015	0.7
鋼材		1.59 t	0.0024 kg	1.17	0.003	0.1
ゴム		5.18 t	0.0078 kg	3.38	0.027	1.3
				合計	2.03	100

単位が多くなっているのが特徴で、鉱山規模が小さなことが主要因ではないかと考察した。

個々の鉱山のエネルギー消費構造をみるために、年間生産量が100万t以上の38鉱山について検討した。採掘のみでの軽油消費原単位は、規模の小さな鉱山ほどばらつきが大きくなることがわかった。軽油消費原単位の最小値は規模によらず一定で0.251/tであった。

ある石灰石鉱山で聞き取り調査を行い、採掘プロセス作業種ごとのCO₂排出量を算定したところ、積込で44.9%、運搬で25.5%と、積込作業のほうがCO₂排出比率が高い結果となった。同様に聞き取り調査を行った銅露天掘鉱山と比較すると、運搬時のCO₂排出量で9倍の差があった。この違いは主に鉱床の貯存状況による露天掘採掘法の形態の違いから来ており、鉱石の立坑投入とベンチカット方式を組み合わせが可能な鉱床での採掘は、通常の露天掘採掘に比べ、単位採掘量当たりのCO₂排出量はかなり少なくなる。通常の露天掘採掘でCO₂排出量を抑えるには、車道勾配を保ちながら搬出距離を短くするような鉱石運搬時の消費エネルギーを抑えることを考慮したビット設計が必要になってくるであろう。

今後、環境問題への意識の高まりとともに炭素税等のCO₂排出

に対する規制が設けられる場合には、エネルギー消費量を抑えることを目的としたビット設計や採掘計画が必要になってくるであろう。鉱山は落石や騒音の防止といった周辺環境との調和を保ちつつ、地球規模の環境にも配慮した対応が求められる。これは石灰石鉱山に限らず他の鉱物を産出する鉱山でも同様であり、その際には、本研究で行った以上の詳細なLCI調査が継続的に必要になってくると考えられる。

引用文献

- 1) 伊坪徳弘・山本良一：日本金属学会誌，Vol. 63, p. 208-214, (1999)
- 2) 松野泰也・稲葉 敦：日本エネルギー学会誌，Vol. 77, p. 1070-1079, (1998)
- 3) 成田暢彦・匂坂正幸・稲葉 敦：資源と素材，Vol. 116, p. 674-681, (2000)
- 4) 匂坂正幸・田原聖隆・稲葉 敦：資源と素材，Vol. 111, p. 975-981, (1995)
- 5) Yoshiki-Gravelsins, K.S. et al. : JOM, p. 15-20, May, (1993)
- 6) 成田暢彦・稲葉 敦：日本エネルギー学会誌，Vol. 77, p. 1148-1161, (1998)
- 7) 資源エネルギー庁長官官房鉱業課監修：鉱業便覧平成12年版，(2000)
- 8) 通商産業大臣官房調査統計部編：石油等消費構造統計表（商鉱工業），(1984-1998)
- 9) 通商産業大臣官房調査統計部編：本邦鉱業の趨勢，(1984-1998)
- 10) 石灰石鉱業協会：石灰石鉱山表（第8版），(1999)
- 11) 環境庁：二酸化炭素排出量調査報告書，(1990)
- 12) 資源環境技術総合研究所：NIRE-LCA Ver. 2, (1996)
- 13) 通商産業省生活産業局窯業室編：砕石統計年報，(1990-1998)
- 14) 安達 毅・匂坂正幸：資源・素材'99(京都)企画発表資料，p. 25-28, (1999)
- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：金属鉱業における国際協力による省エネルギー対策実施の可能性調査，(1998)