

B-14 地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究

(4) エネルギー分野における重点対策の普及に当たっての技術的評価

③化石燃料供給利用技術の評価

研究代表者 資源環境技術総合研究所エネルギー資源部 稲葉 敦

通産省 資源環境技術総合研究所

エネルギー資源部 燃料物性研究室 稲葉 敦・近藤康彦・松野泰也

研究調査官 小林光雄

安全工学部 安全システム研究室 匂坂正幸

平成6-8年度合計予算額 12,153千円

(平成8年度予算額 4,046千円)

〔要旨〕わが国での石炭の産出に必要なエネルギー、資・機材、施設類を1993年度の値を基に抽出し、二酸化炭素とメタンの環境への排出量を算出した結果、石炭1トンの出炭に対し、排出される二酸化炭素が111kg、メタンが21m³となった。わが国では、二酸化炭素の排出の約92%がエネルギー利用に起因しその83%が自家発電のための二酸化炭素排出となっている。

わが国での石油・天然ガスの産出に必要なエネルギー、施設類を1994年度の値を基に抽出し、二酸化炭素の排出量を算出した。その結果、石油・天然ガス1PJあたり、排出される二酸化炭素が約4200トンと推計された。このうち、2720トンは産出されるガスに含まれる二酸化炭素の分離による排出である。

上記の結果を踏まえ、海外の資源採掘に係わるエネルギー消費を文献により調査し、我が国でのアルミニウム、粗鋼、電気銅、ポリエチレンの製造に係わる二酸化炭素排出量への資源採掘の二酸化炭素排出量の寄与を分析した。アルミニウムの生産は電気の消費に起因する二酸化炭素の排出が大きいため、資源採掘による二酸化炭素排出は無視できる。電気銅では約30%、ポリエチレンでは約10%の二酸化炭素が資源採掘時に排出される。粗鋼生産では、少なくとも5%の二酸化炭素が資源採掘時に排出されると推定された。

〔キーワード〕石炭、石油、天然ガス、採掘、エネルギー、LCA

1. 序

地球温暖化防止技術を総合的に評価するためには、温暖化ガスが排出される構造を知る必要がある。我が国における温暖化防止技術の二酸化炭素排出削減効果についてのこれまでの研究は、各産業での二酸化炭素の削減可能量を算出することを目的として、対象とされる産業に化石燃料が入手されてから以降の技術について分析されて来た¹⁾。したがって、化石燃料の採掘から各産業での使用までを一貫して分析し、化石燃料の供給のために排出される二酸化炭素の量が、各産業の二酸化炭素排出量に対してどの程度の寄与を持つのか分析した研究は少ない。わずかに、発電技術の評価にその例を見ることができるのみである^{2, 3)}。また、そこで使用されている採掘時

の二酸化炭素排出量は、文献値^{2) 3)}または仮定されたモデルによる算出結果⁴⁾であり、データとしての信頼性を検討することが必要となっている。

一方、近年、各種の工業製品の製造に必要な原材料の採掘からその製品の廃棄に至るライフサイクルでの排出物を算定し、環境への影響を評価する手法が「ライフサイクルアセスメント（ＬＣＡ）」として内外で検討されている⁵⁾。一般に、工業製品は各種素材の集合体として製造されることが多く、素材を製造する資源の採掘による環境排出物の定量が必要となる。しかし、既往のＬＣＡの研究でも、資源の採掘については概略的な値が与えられているのみで、その根拠が明らかにされていない⁵⁾。

したがって、化石燃料の採掘に関する二酸化炭素排出量を信頼できる統計データまたは、実際の測定データから算出することが必要である。その上で、電力などエネルギー供給技術の二酸化炭素排出量およびそれぞれの産業でのエネルギー使用状況を分析し、化石燃料の供給時における二酸化炭素排出の各産業の製品製造における二酸化炭素排出量に対する寄与を分析することが必要である。

2. 研究目的

本研究では、我が国の石炭、石油および天然ガスの採掘時の二酸化炭素排出量を算定することを目的とする。

さらに、その算定結果を基に、基礎素材の製造に係わる二酸化炭素排出量のうち資源の採掘に起因する二酸化炭素排出量の寄与を推定することを目的とする。

平成6年度に石炭、平成7年度に石油・天然ガスについて調査し、平成8年度に基礎素材の製造に係わる二酸化炭素排出量に対する資源採掘時の二酸化炭素排出量の寄与を分析した。

3. 結果

3. 1 我が国の石炭の採掘時の二酸化炭素およびメタンの排出量の算定

平成6年度は各方面でのエネルギー需給予測でも今後主体を占める石炭を取り上げ、国内の石炭鉱山の採掘のライフサイクルインベントリー（ＬＣＩ）の作成を試み、地球温暖化に寄与する二酸化炭素、メタンの単位出炭あたりの環境放出量を算出した。

3. 1. 1 出炭に伴うエネルギー・資材の消費量調査

（１）調査項目

石炭の産出に必要なエネルギーおよび使用資材を以下の４つに分類する。

①エネルギー類：鉱業所、坑内・外、選炭場など、採掘から運搬、選炭、積み込みの各段階で消費される電力、石油燃料、石炭、ガス、火薬類。②消耗性資材類：石炭生産のために消費される資材。軌条、鋼管等の鉄材、支保や矢木となる木材、充てん等に用いられるセメント、砂・砂利、フライアッシュ、選炭に使われる薬剤など。③耐久性機材類：石炭の生産のために使われる設備、機械類。採炭・掘進機械、運搬・積込機械、保安機器、選炭機械がこれにあたる。電力ケーブル、コンベヤベルトについても参照した統計の分類からここに含めた。④施設類：鉱業所、坑内外に設置される建物、施設であり、鉱業所、扇風機室、選炭工場、厚生施設、住宅等。

（２）調査の方法

1993年度の国内の年度間稼働炭鉱数は17であり、生産量は 7.206×10^6 トンになっている。本調査では、可能な限り公表されている統計値^{6)・7)・8)}を基にデータを収集した。統計値で不十分な点は、1995年3月に国内の主要な三つの石炭鉱山（三井石炭鉱業三池鉱業所、太平洋炭鉱釧路鉱業所、松島炭鉱池島鉱業所）の本社あてに文書によるアンケート調査を実施し、文書で回答を得た。これら三山からの出炭量は1993年度では全国出炭量の78%を占めており、公式統計に準じてその結果を用いることとする。さらに、これらを補完するため、随時、各山元や関係機関への聞き取り調査を行った。

3. 1. 2 調査結果および解析

（１）二酸化炭素排出量

調査結果を基に、出炭トンあたりに換算したエネルギー・資材の消費量を表1に示す。また、表2にはエネルギー類の二酸化炭素排出原単位、資材製造の二酸化炭素排出原単位を用いて算出した出炭トンあたりの二酸化炭素排出量も示した。二酸化炭素の排出原単位は、主として産業環境管理協会エネルギー使用合理化手法国際調査小委員会で報告^{9)・10)}されいる値を参照した。この報告では、輸入される鉱工業製品は産出国の港からの積み出された後を計算の対象としている。また、国内到着後の陸上輸送は考慮されていない。したがって、電気の製造に伴う二酸化炭素排出量421.8g/kWhには火力発電で燃焼される石炭、石油、天然ガスの採掘による排出、それらの国内輸送に関する排出は含まれていない。

商品となる石炭を1トン生産するのに対し、二酸化炭素重量で約110kgが排出される。このうち、エネルギー類の生産、使用により排出されるものが92%でほとんどを占めている。エネルギーの多くは電力として投入され、購入電力で10%、自家発電で67%が排出される。

購入電力の二酸化炭素排出原単位は421.8g/kWhであるが、自家発電に使われた燃料と自家発電量から同原単位を求めると、1329.9g/kWhとなる。自家発電の効率の向上が必要である。仮に、自家発電をすべて電力会社からの買電に置き換えると、出炭トンあたりの二酸化炭素排出量は50.67kg減少し、60.66kg-CO₂/トン-石炭と半減する。

消耗性資材は6.6%を占める。坑内でよく見る耐久機材類は1%未満、施設類は0.2%と出炭トンあたりの二酸化炭素排出量にはほとんど影響していない。

（２）メタン

1993年度には坑内採掘を行っている鉱山の総排気から127百万m³（純メタン換算）のメタンが排出されている⁶⁾。その他ガス抜きガスのうち未利用で放出されるメタンが4百万トンある⁶⁾。これを合計するとメタンの大気への放出は坑内出炭1トンあたり21.2m³になる。

3. 1. 3 海外の石炭採掘データとの比較

海外の石炭採掘に関する二酸化炭素排出量のデータを表2に示す。使用資材の製造に関するデータは含まれていない。

表1 二酸化炭素排出量算出結果

項 目	出炭ト当使用量		C02排出原単位	C02排出量, kg	排出割合, %	備 考
エネルギー類						
電力(購入)	30.5	kWh	421.8 g/kWh	12.86	11.55	
電力(自家発電)	55.8	kWh		74.21	66.65	
石炭	27.8	kg	1910.3 g/kg	(53.11)	(47.70)	
微粉炭	12.0	kg	1337.2 g/kg	(16.05)	(14.41)	
メタン	2.59	m ³	1928.4 g/kg	(5.00)	(4.49)	
重油	0.0178	l	3059.4 g/l	(0.05)	(0.04)	
灯 油	1.36	l	2750.2 g/l	3.71	3.36	
軽 油	1.60	l	2750.2 g/l	4.40	3.95	
重 油	0.279	l	3059.4 g/l	0.85	0.76	
石 炭	1.29	kg	1910.3 g/kg	2.46	2.21	
メタン	2.17	m ³	1928.4 g/m ³	4.18	3.75	
火 薬	86.2	g	—	—	—	*1
小 計				102.70	92.24	
消耗性資材類						
鉄	4.39	kg	1171.5 g/kg	5.14	4.62	
木材	9.06 × 10 ⁻³	m ³	74620. g/m ³	0.68	0.61	
セメント	2.18	kg	712.7 g/kg	1.55	1.39	
砂・砂利	7.38	kg	—	—	—	*2
フライアッシュ	3.13	kg	—	—	—	*3
選炭用クロソソ	0.014	l	28.47g/l	0.00	0.00	*4
小 計				7.37	6.62	
耐久性機材類						
鉄	683.	g	1171.5 g/kg	0.8001	0.72	
ジュラルミン	1.24	g	2019.7 g/kg	0.0025	0.00	*5
銅	3.19	g	1264.9 g/kg	0.0040	0.00	
ゴム	67.2	g	3375.1 g/kg	0.2268	0.20	*6
小 計				1.0334	0.93	
施設類(除、住宅)						
木 造	0.519	cm ²	0.82664 g/cm ²	0.0004	0.00	
鉄筋・鉄骨造	5.11	cm ²	46.14 g/cm ²	0.2358	0.21	
小 計				0.2362	0.21	
合 計				111.34	100	

*1:含炭素が少ないので無視, 製造過程を考慮せず。 *2:採掘を考慮せず。

*3:発電の廃棄物として無視 *4:製造工程のみを考慮 *5:アルミニウムで代用 *6:ポリウレタンで代用

表2 海外の石炭採掘データとの比較

炭種	ブラウン	発電用	ブラウン	発電用	ハート	ハート	
産地	オーストラリア		USA				日本
坑内/露天の比率	0.053/1	0/1	0/1	1/0	1/0	1/0.053	1/0.12
出典	PIRA ^{1,2)}	GHG ⁴⁾	BUWAL ^{1,2)}	GHG ⁴⁾	BUWAL ^{1,2)}	PIRA ^{1,2)}	本研究
投入(石炭トあたり)							
電気	kWh	31.17		13.00	124.20	35.00	30.50
石炭	kg			15.00			41.09
重油	kg	(1.62)	8.00		1.20	(0.09)	27.10
軽油	kg						2.37
メタン	kg			10.3			3.40
ガス(18MJ, m ³)	m ³				44.50		
炭化水素ガス	kg			1.2			
排出(石炭トあたり)							
CO2	kg	4.86	0.08	1.94		0.26	
メタン	kg		0.37	6.64			15.07
炭化水素ガス	kg	2.75	0.03	0.02	26.4	9.84	
CO2総排出量 ^{*1)}	kg	18.0	22.4	44.2	35.0	107.9	102.7

*1:使用エネルギーを日本のCO2排出原単位を用いて評価。電力のCO2排出原単位は0.4218kg kWh

GHGのデータ⁴⁾は露天掘によるオーストラリアの発電用石炭の採掘を想定している。これを日本に輸送することを考えると、オーストラリア国内の貨車輸送で1.87kg/kg-石炭、海上輸送で24.05kg/kg-石炭の二酸化炭素が放出されるので、日本着までの二酸化炭素総排出量は約50kg/トン-石炭となる。日本の採炭のエネルギー消費に基づく二酸化炭素総排出量は102.7kg/トン-石炭であるが、前述したように自家発電を購入電力で置き換えることで約50kgの二酸化炭素の排出が抑制され、オーストラリアから輸送される発電用石炭とほぼ同等の二酸化炭素排出量となることが見込まれる。二酸化炭素排出抑制の観点からは自家発電の効率向上が重要な課題となる。

3. 2 我が国の石油・天然ガス採掘時の二酸化炭素排出量

平成7年度は、エネルギー需給の中核をなす石油、天然ガスを取り上げ、国内の代表的産地の採掘および生産のLCIの作成を試み、地球温暖化に寄与する二酸化炭素放出量を算出し、前年度調査した石炭の採掘データおよびLCA研究で多用されるスイスのBUWALのデータと比較した。

3. 2. 1 国産原油、天然ガスの採掘と生産

石油、天然ガスは両方でわが国では一次エネルギーの3分の2以上を占めているが、そのうち国産はわずかであり、総一次エネルギー供給量の1%未満であるにすぎない。

石油・天然ガスの生産とここでの調査の範囲は次のようである。

① 探査 地下の鉱床の存在を調査するもので、その対象となる規模から、広域探査と地域探査に分類できる。広域探査はわが国の場合、国が行う基礎試錐が主であるが、その他、重力地図、衛星データの利用などもこの広域探査に用いられることもある。地域探査は主に火薬や起震機を震源にした地震探査が行われており、探査した測線の長さ、起震箇所のデータが公表されている。探査と生産の関係が不明確であると判断し、調査からは除外した。

② 試掘・採掘 試掘は鉱床の存在が確認され、鉱床の規模を確認するために行われており、探査に含まれることがあるが、ここでは統計上、生産井の掘削と同等に扱うため、ここに分類した。生産のための採掘では確認された鉱床にボーリングをし、製品となる産物を採取する。わが国ではもっぱら自噴するものを回収しているが、ポンプ吸引やガス・水圧入等の強制回収も取られる例が多い。ここでは調査対象とした日本の代表的な油・ガス田では二・三次回収を行っておらず、これらは考慮されていない。

③ 生産 採掘された石油・天然ガスは水や不要成分の分離を行い出荷する。その工程で排出、消費される資・機材、エネルギーを対象とした。

④ 終掘 寿命の終わった坑井は閉栓され、環境汚染等の防止のため管理されるが、特に資・機材、エネルギーの消費はないため、ここでは省略した。

全体として、採掘から製品としてパイプラインに送り込むまで、あるいはタンクローリーに積み込むまでを対象とした。

3. 2. 2 ライフサイクルインベントリの作成

(1) 試掘・採掘

採掘段階では、探鉱で有望と見られた箇所にボーリング（試掘）し、石油、ガスの存在と埋蔵量を確認した後、生産用の坑井を削井して石油、ガスを採取する。試掘用のボーリングも生産用

と同様の規格をしており、試掘井が生産井に移行することも多く、ここでは試掘井と生産井を統合して扱うことにする。国内の全ガス油田の坑井、生産施設についてその消費資機材、エネルギー等を調査することは困難であるため、代表例として1994年度の国内生産量のうち、天然ガスで12%、石油で5%の生産を行ったA生産施設が受け持つ地域の採掘を抽出し調査を行った。

ここでは12本の5000m級生産井と6本の同試掘井（一部は生産を行っている）から年間約 11×10^{15} Jの天然ガスと 1.6×10^{15} Jの原油の生産を行っている。5000m級のボーリングの掘削には基礎試錐と同様に、1本あたり鉄鋼300t、セメント1500t、軽油1300klが消費されると推計され、これに二酸化炭素排出原単位を乗ずると、約5000 tの二酸化炭素排出となる。また、坑井が掘削されたあと、井戸の能力を試験するため、大気中にガスを噴出、燃焼させる工程があり、ここで約 0.41×10^{12} Jの天然ガスが燃焼され二酸化炭素として放出される。

これらによる18本の坑井の生産期間を30年と仮定し、またその間の生産量には変動があるが1994年の生産量で一定と仮定すると、全体からの総排出量を石油と天然ガスの生産量で除すと二酸化炭素排出量は表1のように推計される。

（2）生産

井戸から噴出した石油、天然ガスは生産プラントで石油と天然ガスに分離される他、含有される水分や他の不要成分が取り除かれる。このプラントでは施設で消費されるエネルギー、施設自体の償却のほか、除去された成分起源の排出物が生ずる。天然ガス中には通常、千ppm程度から数%以上の二酸化炭素が含まれており、濃度が高い場合にはパイプラインの腐食防止と熱量確保のためプラントで除去され排出されている。ここで取り上げたA生産施設に集約される天然ガス中には平均6%程度の二酸化炭素が含有されている。

これらを総合し、生産段階で消費されるエネルギー起源の二酸化炭素排出量または天然ガス成分から除去排出される二酸化炭素量は、1994年は表3のように推算される。また、生産施設を鉄とステンレスで評価し、耐用期間を30年として二酸化炭素排出量を算出した結果も表3に示す。

表3 原油・天然ガスの採掘に係わる二酸化炭素排出量算出結果

項 目	PJ当使用量		CO2排出原単位	CO2排出量, t	CO2排出割合, %	CO2排出割合, %
試掘・採掘						
鉄	14.3	t	1.17 t/t	16.7	0.4	1.1
セメント	71.4	t	0.173 t/t	12.4	0.3	0.9
軽油	61.9	kl	2.75 t/t	170.	4.1	11.7
天然ガス	0.02	TJ	47.1 t/GJ	0.94	0.02	0.06
小計				200.	4.8	13.8
生産						
エネルギー						
電力(購入)	68.3	MWh	0.422 t/MWh	28.8	0.7	1.9
天然ガス	24.9	TJ	47.1 t/TJ	1170.	28.0	80.5
設備						
鉄	67	t	1.17 t/t	43.3	1.0	3.0
ステンレス	3.3	t	3.27 t/t	10.8	0.3	0.7
小計(ガス中CO2除)				1252.9	30.0	86.2
合計(ガス中CO2除)				1452.9		100
CO2排出(6%含有)				2720	65.1	
合計(ガス中CO2含)				4172.9	100	

3. 2. 3 評価

表1から解るように、天然ガス中に含まれる二酸化炭素が分離され、大気中に放出されることによる排出量が約3分の2を占めている。地域によっては天然ガス中の二酸化炭素は1%未満の場合もあり、その場合はガス成分起源の排出二酸化炭素は6分の1以下に減少することになり、総計で2000t以下になる試算が成り立つ。石油、天然ガスの採掘に伴う環境負荷についてはガス成分中の二酸化炭素によるものが大きく左右するため、その含有率に注意を払う必要がある。

一方、天然ガスの採掘の際にはガスフレアと呼ばれる不要ガスの放出が懸念されるが、わが国の場合、需要先も近く、設備も整備していることから不要ガスの系内での吸収が容易である上、周辺環境維持のためにも放出することは極力避けていることから、統計上は天然ガスの放出はなく、また燃焼放出量は生産設備内の自然ガス量に加算されているがごく僅かであり、その値だけを分離することはできなかった。

3. 2. 4 比較

表2に示す石炭採掘時の排出量3980t-CO₂/PJ-coalと比較してみると、今回の結果はほぼ同様な値であるが、メタンの排出が石炭採掘の場合、660t-CH₄/PJ-coalあり、石油・天然ガスの採掘時のメタン排出は統計に上がってこない。GWPを考慮するとこの石炭採掘からのメタン排出はその二酸化炭素排出の10倍程度の温暖化寄与をすることが推察されており、石油・天然ガスは生産時の環境負荷の面からは石炭より優れていることになる。

表4、表5にLCA研究で多用されるBUWALのデータを示す。天然ガスの採掘ではパイプラインに送る前の加工の軽油使用量が大きい。含有されるCO₂の排出は加算されていない。石油はOPECと北海が等量として平均されている。石油生産のCO₂排出量はわが国での表3と比較するとかなり小さい。

表4 BUWAL^{1,2)}による天然ガスの二酸化炭素排出量算出結果

項 目	tonn当使用量	PJ当使用量	CO ₂ 排出原単位	CO ₂ 排出量, t
生産段階				
電力(購入)	42.3 kWh	919.6 MWh	0.422 t/MWh	390
天然ガス	284.75 MJ	6.19 TJ	47.1 t/TJ	290
軽油	2.84 l	56.2 t	2.75 t/t	154
合計(ガス中CO ₂ 除)				680
加工段階				
電力(購入)	5.29 kWh	115 MWh	0.422 t/MWh	50
軽油	45.6 l	902 t	2.75 t/t	2480
合計(ガス中CO ₂ 除)				3160

天然ガス:46MJ/kg=46GJ/t=0.046TJ/t

表5 BUWAL^{1,2)}による石油の二酸化炭素排出量算出結果

項 目	tonn当使用量	PJ当使用量	CO ₂ 排出原単位	CO ₂ 排出量, t
生産段階				
電力(購入)	22.3 kWh	544 MWh	0.422 t/MWh	230
天然ガス	149.33 MJ	3.64 TJ	47.1 t/TJ	170
軽油	0.17 l	3.77 t	2.75 t/t	10
合計(ガス中CO ₂ 除)				410

石油:41MJ/kg=41GJ/t=0.041TJ/t

3. 3 基礎素材の製造に係わる二酸化炭素の排出量への資源採掘時の二酸化炭素排出量の寄与
平成8年度は、基礎素材の製造に係わる二酸化炭素の排出量への資源採掘時の二酸化炭素排出量の寄与を推定することを目的とした。

我が国で製造される基礎素材は、原料となる資源の多くを海外から輸入している。したがって、資源採掘については海外のデータが必要となるが、海外での資源の採掘に伴う二酸化炭素排出量を調査した文献は著者らが知る限りはない。本研究では、素材として、鉄、銅、アルミニウムを取り上げ、それらの原料の我が国への主たる輸出国について文献を調査し、海外での資源生産時の二酸化炭素排出量を推定する手法を示す。

また、我が国にエネルギーとして輸入される石炭、石油、LNGを取り上げ、我が国での素材製造に係わる二酸化炭素排出量に対するこれらの資源採掘時の二酸化炭素排出量の寄与を分析する。

さらに、平成6年度および7年度の調査で得た我が国の石炭、石油および天然ガスの採掘時の二酸化炭素排出量のデータを加味し、化石燃料の供給が、素材の製造に係わる二酸化炭素排出量に与える影響について分析する。

3. 3. 1 資源採掘時のエネルギー消費原単位と二酸化炭素排出量の推定

(1) アルミニウム

我が国では、アルミニウムの生産地金の生産は少なく地金のほとんどは輸入である¹⁷⁾。輸入先はオーストラリア、米国、ブラジルがほぼ等量で最も多く、この3ヶ国で総輸入量の約65%になっている¹⁷⁾。ここでは、後述する石炭、鉄鉱石の最大の輸入先となってるオーストラリアを分析の対象とした。

アルミニウム地金の生産は、ボーキサイトの採掘、アルミナの生産、アルミニウムの精錬に大きく分けることができる。オーストラリアはアルミニウムの地金だけではなく、アルミナやボーキサイトも輸出しているが、これらの生産および輸出入統計より、オーストラリア国内でアルミニウムを1トン生産するために、アルミナ1.93トン、ボーキサイト5.54トンが消費されていると推定できる¹⁸⁾。

アルミニウムの精錬工程での電力消費量は、世界の地域別アルミ新地金製錬の電力消費原単位¹⁹⁾から、1987年～1991年の平均として、15,500kWh/トン-アルミニウムと推定できる。精錬工程でのエネルギー投入は電気が大部分である^{20)・21)}。電気のエネルギーを860.5kcal/kWhで換算すれば、日本のアルミニウム製錬工程ではエネルギー投入量の78.7%が電気と分析されている²¹⁾。

したがって、二酸化炭素排出量の算出では精錬工程で使用される電気の発電形式が問題になることが多い。ここでは、大洋州のアルミニウム精錬用電源構成比(1991年)¹⁹⁾を用い、水力、石炭、石油をそれぞれ26.5、72.7、0.9%とした。さらに、石炭、石油火力の発電効率は、OECD統計²²⁾より、それぞれ31.7、38.1%とした。また、電力以外のエネルギー消費は、上記の日本の割合と同等と仮定し、オーストラリアの産業別エネルギー消費構成の非鉄金属産業の電力外燃料構成²²⁾と同様と仮定し、石炭、石油製品、天然ガスがそれぞれ28.8%、18.4%、52.8%であるとした。

オーストラリアのアルミニウム生産量の約35%を占めるAlcoa of Australia Ltd では、アルミニウムの一貫製造に関する工程別エネルギー消費割合を、アルミニウム製品製造、アルミニウム精錬、アルミナ製造、ボーキサイトの採掘にそれぞれ14.68、17.1%であると公表している²³⁾。一

般に企業の公表値は、絶対値ではなく比較値として与えられることが多い。この工程別割合を、上述の精錬工程のエネルギーを基準として参照し、さらに上述したようにアルミニウム1トンあたりアルミナ1.93トンを使用すると仮定すると、オーストラリアでのアルミナ製造のエネルギー消費原単位は $2,194 \times 10^3 \text{kcal/t}$ アルミナとなる。アルミニウムの精錬工程の電気と電気以外のエネルギー割合の算出に使用したモデルによる計算²¹⁾では、アルミニウム1トンあたり1.92トンのアルミナを使用しアルミナ製造のエネルギー消費原単位を $2,957 \times 10^3 \text{kcal/t}$ アルミナと推定している。また、我が国の統計²⁴⁾、およびライフサイクルアセスメントの研究でよく使用されるスイスの研究事例(以下BUWAL¹²⁾)でもほぼ同様のエネルギー消費原単位となっている。これらを表6に示す。したがって、工程別のエネルギー消費量の算出には、上述のAlcoa of Australia Ltdの数値が使用できると考えられる。

ボーキサイトの採掘のエネルギー消費量も、同様の手法で算出すれば、 $45 \times 10^3 \text{kcal/t}$ ボーキサイトと算出できる。BUWAL¹²⁾では、ボーキサイトの採掘のエネルギーを $128 \times 10^3 \text{kcal/t}$ としている。また、我が国の金属鉱物の採掘に係わるエネルギー消費量¹⁷⁾を粗鉱基準で換算すると $102 \times 10^3 \text{kcal/t}$ 粗鉱となり、精鉱基準で換算すると $225 \times 10^3 \text{kcal/t}$ 精鉱となる。また石灰石などの非金属鉱物¹⁷⁾では、 $10 \times 10^3 \text{kcal/t}$ 鉱物となる。これらを表6に示す。上述の企業の公表値から推定したボーキサイトの採掘のエネルギー消費原単位は、我が国の粗鉱基準の金属鉱物の採掘よりも小さく、非金属鉱物の採掘よりは大きい。

ここでは、アルミナ製造の電気と電気以外のエネルギー消費割合が我が国の統計²⁴⁾と同等である仮定し、それぞれの二酸化炭素排出量はアルミニウムの精錬工程と同様とした。ボーキサイトの採掘のエネルギー消費の内訳は、オーストラリアの鉱業全体のエネルギー消費構成²²⁾と同様とし、発電電源構成にはオーストラリア全体の電源構成²⁵⁾を使用した。

表6 アルミナ製造の原材料消費原単位

対象国 出典		オーストラリア 企業 ²³⁾	日本 統計値 ²⁴⁾	日本 モデル ²¹⁾	BUWAL ¹²⁾
電気	kWh/t	510	524	355	233
重油	$\times 10^3 \text{kcal/t}$	1,756	1,813	2,652	2,067
合計*)	$\times 10^3 \text{kcal/t}$	2,194	2,264	2,957	2,267

*)1kWh=860.5kcal

表7 資源採掘・選鉱のエネルギー投入原単位

鉱物 対象国/出典		ボーキサイト オーストラリア 企業 ²³⁾	ボーキサイト BUWAL ¹²⁾	金属鉱物(粗鋼鉱物) 日本 統計 ²⁴⁾	金属鉱物(精鉱) 日本 統計 ²⁴⁾	非金属鉱物 日本 統計 ²⁴⁾
電気	kWh/t	27	2	62	136	3
電気以外	$\times 10^3 \text{kcal/t}$	21	126	49	108	7
合計*)	$\times 10^3 \text{kcal/t}$	45	128	102	225	10

(3) 鉄および石炭

1993年におけるわが国の鉄鉱石輸入の約50%¹⁷⁾、石炭輸入の約55%²⁶⁾をオーストラリアが占める。BUWAL¹²⁾では、表7に示すように鉄鉱石の採掘のエネルギー消費量は $150 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ としており、ボーキサイトとはほぼ同等である。

我が国の石炭の採掘の二酸化炭素排出量は、本研究で平成6年度に調査され、海外の文献値と比較されている。これをエネルギー投入量として再度まとめ直し表8に示す。BUWALでは、石炭のエネルギー消費量を露天掘りと坑内掘りでそれぞれ $101 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ 、 $310 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ としており、坑内掘が主体である我が国の $135 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ と比較すると、若干大きなエネルギー消費量となっている。

ここでは、アルミニウム製造企業の公表値を基に推算されたボーキサイトの採掘のエネルギー消費量を、石炭と鉄鉱石に適用した。推算されたボーキサイト採掘の消費エネルギーは、スイスの研究事例および我が国の統計から試算した鉱物の採掘に関するエネルギー消費量の1/3~1/5になっている。したがって、後述する二酸化炭素の排出量に占める採掘の寄与もこの範囲の誤差を含むものと理解されなければならない。

オーストラリアでは、採炭される石炭の内、7割が露天掘り方式、3割が坑内掘り方式である²⁶⁾が、ここでは石炭は全量が露天掘りであるとした。

表8 鉄鉱石、石炭、銅精鉱の生産エネルギー原単位

		鉄鉱石 BUWAL ¹²⁾	褐炭(露天) BUWAL ¹²⁾	一般炭(坑内) BUWAL ¹²⁾	石炭(88%坑内) 本研究(3.1節)	銅精鉱 統計 ²⁷⁾
電気	kWh/t	31	13	124	86.3	420
電気以外	$\times 10^3 \text{ kcal/t}$	124	90	204	59.6	-
合計	$\times 10^3 \text{ kcal/t}$	151	101	310	134.8	361

(3) 銅精鉱

1994年におけるわが国の精鉱銅の最大輸入先はチリであり、総輸入量に占める割合は、24.7%になっている²⁷⁾。我が国は銅精鉱を輸入する。チリの代表的な銅山(Chuquibambilla)における工程別電力原単位は、銅地金1トンあたり、採鉱・選鉱で1,356kWhとなっている²⁸⁾。銅精鉱の品位をChuquibambilla銅山の精鉱品位の中間値²⁹⁾31%と仮定すれば、銅精鉱1トンあたりの電力原単位は420kWhと算出できる。銅精鋼の電力以外のエネルギー投入量に関するデータが得られなかったため、ここでは電力以外の投入エネルギーはないものと仮定した。表8に示す。電気の生産のための二酸化炭素排出量はチリの平均値を用いた²⁵⁾。

(4) 石油および天然ガス

原油の採掘では余剰ガスがフレアガスとして燃焼されている。ここでは、各国のフレアガスの燃焼量³⁰⁾を原油生産のエネルギー投入量と見て、各国の原油生産量³⁰⁾で除すことで投入エネルギー原単位を算出した。さらに、日本の原油輸入割合³¹⁾から、日本に輸入される石油に関する投入エネルギー原単位を算出した。

内山らは、天然ガス液化プラントでは、生産される天然ガス量の10-15%が、運転エネルギーに利用されている^{2)・3)}と報告している。採掘・液化工程の投入エネルギーを生産される天然ガス量の12.5%とすると、 $1.625 \times 10^3 \text{ kcal/t-LNG}$ となる。

我が国の石油および天然ガスの生産時のCO₂排出量は平成7年度に算出され、文献値と比較されている。我が国では原油と天然ガスが同時に採掘されるので、平成7年度の分析では生産される原油と天然ガスの熱量あたりの投入エネルギーが分析されている。これをそれぞれの重量あたりに換算し、表9に上記の算出と比較して示す。

フレア量から推算された原油の生産の投入エネルギー量は、スイスの研究事例の7倍、我が国の分析の1.5倍となっている。LNG生産の投入エネルギー量は、我が国の天然ガスの生産の投入エネルギー量の約6倍と計算されている。天然ガスを液化するためのエネルギー消費量が大いと考えられる。さらに詳細な調査が必要である。

表9 原油および天然ガス、LNGの採掘の投入エネルギー

		原油 FL ³⁾⁰⁾	原油 日本	原油 BUWAL ¹⁾²⁾	原油 内山 ³⁾²⁾	天然ガス 日本	天然ガス BUWAL ¹⁾²⁾	LNG 内山 ³⁾²⁾
電気	kWh/t	-	-	22.3	n.a.	-	47.59	n.a.
電気以外	$\times 10^3 \text{ kcal/t}$	379	244	37.4	n.a.	274	542	n.a.
合計	$\times 10^3 \text{ kcal/t}$	379	244	57	102	274	583	1625

3. 3. 2 我が国に輸入されるまでの二酸化炭素排出量の推定

(1) 海上輸送

本研究で調査した素材および化石燃料の6種が我が国に輸入されるまでの二酸化炭素排出量を算出する。上述したように、それぞれの物質の生産のための投入エネルギーは、アルミニウム地金、鉄鉱石および石炭がオーストラリアから、また銅精鉱がチリから輸入される前提になっている。石油の採掘は輸入割合により各国に配分され、天然ガスは輸入国によらずエネルギー投入量が一定とされている。

輸入に必要となる海上輸送の投入エネルギーは、生産国が特定されているアルミニウム地金、鉄鉱石、石炭、銅は、それぞれ生産国からの輸送のエネルギー消費原単位²⁾¹⁾を用い、生産国が特定されない原油とLNGについては輸入割合に応じて平均化されたエネルギー消費原単位³⁾²⁾を用いた。表10に上に示した計算の主たる前提条件を示す。

表10 我が国に輸入されるまでの二酸化炭素排出量の計算手法

	生産国	採掘の投入エネルギー算出方法	海上輸送 $\times 10^3 \text{ kcal/t}$	生産国内輸送 $\times 10^3 \text{ kcal/t}$
アルミニウム地金	オーストラリア	公表データから推定	487	
鉄鉱石	オーストラリア	ボーサイト相当	76	70.5
銅精鉱	チリ	公表データから推定	500	
石炭	オーストラリア	ボーサイト相当	80	40
原油	輸入割合加重平均	FL ³⁾²⁾ 量	158	
LNG	不特定	生産されるLNGの12.5%	473	

(2) 資源生産国での国内輸送

それぞれの生産国での輸出港までの国内輸送は無視することにする。しかし、国内輸送の大きさを評価する参考として、鉄鉱石と石炭については、オーストラリアの主要鉄鉱石鉱山³³⁾および炭田³⁴⁾からの日本向け輸出量および積出港までの

距離を文献により算出し、鉄道輸送のトンキロあたりの輸送時エネルギー消費量を、日本の「太平洋石炭販売輸送」のエネルギー消費原単位(0.89 MJ/ton/km)³⁵⁾と同じであると仮定して算出した。

国内輸送に係わる二酸化炭素排出量は、鉄鉱石では採掘のCO₂排出量とほぼ同程度となる。

表11 輸入までのCO₂排出量(t-CO₂/t)

	海上輸送	国内輸送	採掘
鉄鉱石	0.0023	0.0020	0.0022
石炭	0.0024	0.0011	0.0022

3. 3. 3 我が国での素材の製造に係わる二酸化炭素排出量への資源採掘の影響

表12にアルミニウムの地金を我が国に輸入するまでの二酸化炭素排出量を示す。アルミニウム地金の製造では精錬の電気の排出が大きく、ボーキサイトの採掘の二酸化炭素排出の寄与は1%に満たない。

我が国の発電による二酸化炭素排出への資源採掘の寄与を表13に示す。ここでは、我が国の電源構成と発電効率によりそれぞれの化石燃料の使用割合を算出している^{9, 10)}。水力および原子力発電の二酸化炭素排出量はないものとした。化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出が94%であり、採掘の寄与は約5%となる。採掘の二酸化炭素排出量はLNGの製造が大半である。LNGの製造に係わるエネルギー消費量を詳細に調査することが必要である。

我が国でのアルミニウム、電気銅、粗鋼、ポリエチレンの製造に係わる二酸化炭素の排出量を表14~17に示す。我が国の生産工程の原料およびエネルギー消費原単位は文献^{9, 10)}による。

アルミニウムの生産では採掘の寄与が約1%となる。ボーキサイトの採掘の寄与が最も大きい。本研究でのボーキサイト採掘のエネルギー消費原単位は、BUWAL¹²⁾の約1/3である。これを考慮しても採掘の二酸化炭素排出の寄与は2%以下と考えられる。

電気銅の製造では、銅精鉱の生産の二酸化炭素排出量が約30%となる。本研究では銅精鉱の製造エネルギーに電気の消費しか考慮していない。さらに調査する必要がある。

粗鋼生産における採掘の寄与は約4%となる。鉄鉱石と石炭がその大部分をしめる。本研究の鉄鉱石および石炭の採掘のエネルギー消費原単位はBUWAL⁶⁾の1/3となっている。さらに、これらのオーストラリアでの国内輸送による二酸化炭素排出量は採掘のそれとほぼ同等と考えられる。したがって、オーストラリアでの鉄鉱石と石炭の生産に係わる二酸化炭素排出は、日本の粗鋼生産に20%程度の寄与となる可能性がある。

ポリエチレンの製造の二酸化炭素排出に対する原油生産の寄与は約9%である。本研究の原油生産の二酸化炭素排出量はフレアガスの燃焼から求めており、内山ら³²⁾の4倍、BUWAL¹²⁾の8倍となっている。したがって、これより寄与が大きい可能性は少ない。しかし、原油や天然ガスの生産は随伴する可燃性ガスや二酸化炭素の取り扱いが不明確なことが多い。今後の研究課題と言える。

表12 アルミニウムの輸入に係わるCO2排出量(kgCO2/t地金)表13 日本の発電のCO2排出量(kgCO2/kWh)

	合計	海上輸送	精錬	アルミ製造	採掘
電力起因	13,945	—	12,044	1,807	94
燃料起因	2,171	146	980	1,017	28
その他	1,845		1,845		
合計	17,961	146	14,869	2,824	122
割合(%)	100	0.8	82.8	15.7	0.8

	国内排出	海上輸送	採掘
原油	0.203	0.0032	0.0050
石炭	0.098	0.0010	0.0009
LNG	0.109	0.0040	0.0136
合計	0.410	0.0082	0.0195
割合(%)	93.7	1.9	4.5

表14 アルミニウムの生産のCO2排出量(t-CO2/t-地金)

	国内排出	海上輸送	海外生産	採掘
電気	0.33	0.0653		0.0157
その他	1.55			
アルミニウム地金		0.0945	11.454	0.0790
原油		0.0245		0.0386
LNG		0.0005		0.0017
合計	1.86	0.1848	11.454	0.1350
割合(%)	13.6	1.4	84.0	1.0

表15 日本の銅生産のCO2排出量(t-CO2/t)

	国内排出	海上輸送	採掘
電気	0.291	0.0058	0.0139
その他	0.779		
精鉱		0.4468	0.6256
原油		0.0063	0.0100
石炭		0.0033	0.0029
LNG		0.0004	0.0014
合計	1.070	0.4626	0.7438
割合(%)	47.0	20.3	32.7

表16 日本の粗鋼生産のCO2排出量(t-CO2/t)

	国内排出	海上輸送	採掘
電気	0.133	0.0264	0.0063
その他	0.843		
鉄鉱石		0.0256	0.0245
原油		0.0004	0.0006
石炭		0.0124	0.0114
合計	0.976	0.0648	0.0428
割合(%)	90.1	6.0	3.9

表17 日本のポリレソンのCO2排出量(t-CO2/t)

	国内排出	海上輸送	採掘
電気	0.182	0.0361	0.0087
その他	0.958		
原油		0.0774	0.1220
合計	1.140	0.1134	0.1307
割合(%)	82.4	8.2	9.4

4. まとめ

日本は化石燃料の多くを資源を輸入している。したがって、化石燃料の使用に係わる二酸化炭素の排出に及ぼす化石燃料の供給時の排出の寄与を明確にするためには、化石燃料の生産国における情報が不可欠である。本研究では、その端緒として、我が国の化石燃料供給における二酸化炭素排出量を調査し、海外で使用する文献値と比較した。さらに、化石燃料の利用の例として、我が国での素材の製造に係わる二酸化炭素の排出への資源採掘時の二酸化炭素排出の寄与、特に、化石燃料の採掘時の二酸化炭素排出の寄与を分析した。海外の資源採掘に係わる二酸化炭素の排出量については、基礎となるエネルギー消費量が不明確であり、推定の域を出ない。しかし、我が国の化石燃料の採掘時のエネルギー消費量と比較することで、推定値の妥当性を検討することが可能となった。今後、海外の統計データなどをさらに分析することが必要と考えられる。

特に、化石燃料の採掘では、随伴する可燃性ガスや二酸化炭素の産出量が生産地により異なることが問題となる。石炭の採掘時のメタンの漏洩、天然ガスの採掘時の二酸化炭素の放出は、採掘時のエネルギー消費による二酸化炭素の排出よりも地球温暖化への寄与が大きい可能性もある。今後さらに詳細に調査することが必要である。

6. 外部発表一覧

- 1)稲葉ら:太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント,エネルギー・資源,16,(5),525-531(1995)
- 2)稲葉ら:太陽光発電システムの導入によるCO2削減効果,エネルギー・資源,16,(5),532-537(1995)
- 3)匂坂ら:国内炭の生産に伴う地球温暖化ガスの排出量評価,資源と素材,111,975-981(1995)
- 4)田原ら:データおよび手法の相違によるイベントリへの影響,日誌,75(12)1043-1049(1996)
- 5)田原ら:LCA手法による発電プラントの評価,化学工学論文集,23(1),88-94(1997)

7. 参考文献

- 1)環境庁企画調整局地球環境部編「地球温暖化防止対策ハートブック2-産業編」,第一法規(1992)
- 2)内山洋司,山本博巳:「発電プラントのエネルギー収支分析」,電力中央研究所報告Y90015(1991)
- 3)内山洋司,山本博巳:「発電プラントの温暖化影響分析」,電力中央研究所報告Y91005(1992)
- 4)"Full Fuel Cycle Study on Power Generation Schemes: Incorporating Capture and Disposal of Carbon Dioxide, Volume5:Pulverised Coal Super-Critical Steam Cycle with Offset Forestry CO2 Mitigation", the IEA Greenhouse Gas R&D Programme,(1994)
- 5)稲葉敦:「LCA用データとソフトウェア」,エネルギー・資源,17(6)539-545(1997)
- 6)通商産業省大臣官房調査統計部:「エネルギー生産・需給統計年報」,p102-127(1993)
- 7)通商産業省環境立地局編:「鉱山保安年報平成5年版」,p.87(1994)
- 8)通商産業省大臣官房調査統計部編:「炭鉱設備等調査」平成6年3月(1994)
- 9)エネルギー使用合理化手法国際調査小委員会,環境管理,31(7)91(1995)
- 10)エネルギー使用合理化手法国際調査小委員会,環境管理,31(6)72(1995)
- 11)PEMS"Life Cycle Assessment Computer Model" User Manual, Pira.(1994)
- 12)"OEKOBILANZ VON PACKSTOFFEN STAND 1990", Schriftenreihe Umwelt Nr.132,herausgegeben vom Bundessamt für Umwelt, Wald und Landschaft(BUWAL), Bern, Februar(1991)
- 13)資源エネルギーデータ集1995年版,資源エネルギー庁,電力新報社(1995)
- 14)石油開発資料;石油公団・石油鉱業連盟,石油通信社(1996)
- 15)本邦鉱業の趨勢;通商産業省(1989-1994)
- 16)天然ガスと石油開発の現況;新潟県(1995)
- 17)資源統計年報平成4年,通商産業大臣官房調査統計部編,(社)通産統計協会,(1993)
- 18)"Metal Statistics";1981年~1991年版
- 19)IPAI(International Primary Aluminium Institute)資料
- 20)未踏科学技術協会:「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書(別冊)(1995)
- 21)化学経済研究所:「基礎素材のエネルギー解析調査報告書」,平成5年9月(1993)
- 22)OECD/IEA;"Energy Balances of OECD Countries 1992-1993", (1995)
- 23)Alcoa Australia Limited;"Alcoa Australia 1992", 1992年12月(1992)
- 24)(社)日本アルミニウム連盟:「軽金属工業統計年報」,1989年
- 25)世界エネルギー会議;"National Energy Profile", (1995)
- 26)資源産業新聞社:「コールノット昭和62年版」,(1987)
- 27)"World Metal Statistics Vol48, No.5, May 1995"
- 28)金属鉱業事業団資料センター:「最近のチリの鉱業事情(その1)」,1980年7月
- 29)Mining & metal industry consultants ;"Copper Smelters & Commercial Analysis"; 1994edition 30)OECD/IEA ;"Oil & Gas Information 1994"; 1995年
- 31)The secretariat OPEC ;"Organization of Petroleum Exporting Countries-Annual Statistical Bulletin"; Obere Donaustrasse 93
- 32)本藤祐樹,西村一彦,内山洋司:「産業連関分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量とCO2排出-産業連関表のLCAへの適用について-」,電力中央研究所報告Y95013(1996)
- 33)テックスレポート:「鉄鉱石年鑑1995」,1995年
- 34)テックスレポート:「石炭年鑑」,1988年
- 35)運輸省鉄道局監修:「鉄道統計年報」,1991年度