石炭火力発電所建物建設に伴う環境負荷及びフライアッシュセメント利用 による環境負荷低減効果の評価

産業連関表による建築物の評価 (その9)

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL LOADINGS DUE TO THE CONSTRUCTION OF COAL-FIRED THERMAL POWER PLANT BUILDINGS AND IT'S REDUCTION BY THE FLY-ASH CEMENT USE

Application of input/output analysis to buildings (Part 9)

吉田 公夫*, 高橋 章*, 横尾昇剛**, 高久香織***, 岡 建雄****

Kimio YOSHIDA, Akira TAKAHASHI, Noriyoshi YOKOO,

Kaori TAKAKU and Tatsuo OKA

In this report we show the effect when we use fly-ash (typical by-product from coal-fired thermal power plants) as fly-ash cement (FAC) to reduce environmental loadings. Major findings that have been acquired are as follows; 1) When compared with the manufacture of ordinary portland cement, the manufacture of FAC containing 20% fly ash produces the following reduction effects: 17% fewer energy consumption, 19% fewer CO₂ emissions, 15% fewer NO_x emissions, and 9% fewer SO_x emissions; 2) As the effects of using FAC containing 20% fly-ash instead of ordinary portland cement in the construction of coal-fired thermal power plant buildings, the consumption of energy, CO₂, NO_x and SO_x emissions have been cut by 5%, 9%, 13% and 7% respectively.

Keywords: i/o table, environmental loadings, fly-ash cement, coal-fired thermal power plant

産業連関表、環境負荷、フライアッシュセメント、石炭火力発電所

1. はじめに

国内の石炭火力発電所等から排出されるフライアッシュ（燃焼灰）は年間約 730 万 t にも達し今後更に増大する傾向にある¹⁾。このフライアッシュの約 2/3 はセメント原料、土木建築分野等に活用されているが、残りの約 1/3 は有効に活用されずに埋立処分されているのが現状である^{1) 注1)}。

一方このフライアッシュを普通ポルトランドセメントの一部代替として使用する（フライアッシュセメント、以下 FAC）ことにより、ワーカビリティの改善、水和熱の低減、アルカリ骨材反応の抑制及び水密性の向上等の効果が得られることが確認されている^{2) 3)}。しかしながらこの FAC の活用は全セメント量の 1% にも満たないのが現状である⁴⁾。

本報では、エネルギー消費量及び環境負荷低減の切り口からセメントへのフライアッシュ混入効果を定量化した。また石炭火力発電所の建築工事における環境負荷を算出するとともに、そこに FAC を適用した場合の導入効果を合わせて試算した。

尚、所要資材に関わるエネルギー消費量及び環境負荷は「産業連関分析法」により算定した。輸送については輸送手段別に燃料の購入に関わるエネルギー消費量及び環境負荷を算定した後、後述する方法によりこれに燃料以外の要素に起因する環境負荷を加算

した。また産業連関表基本表の品目別環境負荷原単位として、1990 年産業連関表と物量表を組み合わせ筆者らが 1998、1999 年に取りまとめた業種別購入者価格百万円のエネルギー消費量及びその他の環境負荷原単位^{5), 6)}の国内誘発量を採用した。これらの原単位には工場等の資本形成に伴う環境負荷及び海外誘発分は含まれていない。^{注2)} 本論文で扱うエネルギー消費原単位は、引用データを含めすべて 1 次エネルギー換算表示とした。

2. 環境負荷算出の前提条件

2-1 FAC 製造に伴うエネルギー消費量及び環境負荷原単位の算出

1) 計算概要

FAC の中で建築分野において比較的採用実績の多い FAC-B 種（フライアッシュ混合率 20%）について、製造に伴うエネルギー消費量、CO₂ 排出量、NO_x 排出量及び SO_x 排出量それぞれの原単位を算出し、普通ポルトランドセメントとの比較を行った。^{注3)} この際 CO₂ 排出量は燃料中の炭素の全量が完全燃焼して CO₂ になったものと仮定して算出した。原単位算出の対象範囲は、石炭火力発電所でフライアッシュが発生した時点からとし、セメント会社までのフライアッシュの輸送、FAC の製造及びコンクリートの配合までとした。またフライアッシュが FAC に活用されない場合の埋

* 電源開発新事業開発部 工修

** 宇都宮大学工学部 助手・工博

*** 宇都宮大学大学院博士(前期)課程 大学院生

**** 宇都宮大学工学部 教授・工博

Business Development Dept. of Electric Power Development Co. Ltd., M. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ.
Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

図1. 普通ポルトランドセメント及び FAC の製造フロー

立処分に関わる輸送におけるエネルギー消費量、環境負荷を差し引いた。尚、埋立処分されるフライアッシュは廃棄物として扱い、その排出に係わるエネルギー消費量、環境負荷はゼロとした。

2) FAC 製造フロー

図1に普通ポルトランドセメント及び FAC の製造フローを示す。⁴⁾ 石炭火力発電所から発生するフライアッシュをFACとして用いる場合、分級、ブレンド等が必要となり、石炭火力発電所内ではフライアッシュ1t 当り約 40kWh の電力を消費する。¹⁰⁾ ここで品質管理されたフライアッシュはセメント工場へ運ばれ、普通ポルトランドセメントと混合され、FAC となる。

3) セメント原料・燃料・電力消費量及び輸送距離

表1に今回原単位の算定を行った普通ポルトランドセメント及び FAC1t 当りの原料、燃料(石炭)、電力消費量^{注4)} またそれぞれの輸送手段と距離を示す。^{注5)} 発電所からセメント工場へのフライアッシュの輸送距離については、現在電源開発(株)の各発電所からセメント原料用粘土代替として石炭灰を出荷している近傍のセメント工場までの輸送手段の平均をとり、片道 207km とした。フライアッシュの埋立処分に係る輸送距離についても電源開発(株)の各火力発電所から埋立処分場までの輸送距離の平均をとり 57km とした。^{注6)}

今回算定対象とした FAC (B 種) はフライアッシュ混合率 20% のため、セメントの主原料等の 2 割がフライアッシュに置換されるものと仮定した。^{注7)}

4) 輸送時のエネルギー消費量・環境負荷の算定

輸送については往復分を対象とし、まず輸送に要する燃料についてそれぞれの輸送手段毎の t・km 当りの燃料消費量(往復平均)を仮定した。仮定した輸送手段毎の t・km 当りの燃料消費量を表2に示す。次に輸送に要する燃料の購入・消費に関わる環境負荷(DD)を算定し、これに燃料以外の要素に起因する環境負荷を以下の手順で加算した。具体的には「沿海・内水面輸送」及び「道路貨物輸送」それぞれの環境負荷原単位における燃料の購入・消費に起因する環境負荷(D)に対する燃料以外の要素を含めた環境負荷原単位(全体)(T)の倍率 T/D を求め、DD×T/D を輸送全体の環境負荷と仮定した。(表3参照) また「外洋輸送」

表1. セメント1t当りの原料、燃料、電力消費量^{注4)}

		消費量		輸送	
		ポルトランドセメント	FAC	輸送距離(km)	輸送手段
原料(kg)	石灰石	1088	870	152	道路輸送
	ケイ石	70	56	40	道路輸送
	粘土	216	173	140	内水面輸送
	石膏	35	28	660	内水面輸送
	鉄さい	26	21	700	内水面輸送
	フライアッシュ	0	287	207	内水面輸送
燃料(kg)		114	91	14070	外洋輸送
電力(kWh)		108.1	97.5	—	—

表2. 輸送手段別のt・km当りの燃料消費量

輸送手段	燃料種別	燃料消費量 (kg/t・km)
道路貨物輸送	軽油	0.033
沿海・内水面輸送	A重油	0.0045
	C重油	0.019
外洋輸送	A重油	0.000023
	C重油	0.00098

注)燃料消費量は往復の平均値。道路貨物輸送は10tジェットパック車データ。船舶輸送は電源開発(株)における石炭、フライアッシュ輸送の実績より設定。

表3. 輸送手段別環境負荷原単位の燃料購入・消費に起因する環境負荷に対する倍率(購入者価格百万円当り)

輸送手段	環境負荷項目	燃料の購入・消費に起因する環境負荷(D)	燃料以外の要素も含めた環境負荷原単位(全体)(T)	T/D 倍率
沿海・内水面輸送	エネルギー消費量(MJ)	136,400	172,300	1.26
	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	9,614	12,210	1.27
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	331.40	343.20	1.04
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	90.70	86.26	1.00
	エネルギー消費量(MJ)	32,170	58,980	1.83
道路貨物輸送	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	2,225	4,147	1.86
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	22.39	26.91	1.20
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	5.58	6.84	1.23
	エネルギー消費量(MJ)	136,400	172,300	1.26

注)90年度産業連関表 物量表、算出表及び文献(6)より算出。尚、沿海・内水面輸送のSO_xのT/D値は1.0以下(0.96)となるが、これは物量表と投入表の対応による燃料消費量と燃料購入額の換算に伴う誤差と判断し、T/D=1.00とした。エネルギー消費量は一次エネルギー換算値。

についてはT/D値として国内の「沿海・内水面輸送」の数値を流用した。この値は表4及び表5に示す最終過程で消費されるエネルギー消費量及び環境負荷を含んでいる。尚、燃料消費量と購入者価格の換算には1990年度産業連関表の物量表⁹⁾を用いた。物量表記載の軽油、A重油、C重油は輸送時の燃料消費だけでなく、その他波及効果が及ぶ産業での燃料消費量を含むが、ここではその割合は少ないものとして分離せずに算定した。

5) セメント製造に係るNO_x及びSO_x排出量

セメント製造に係るNO_x及びSO_x排出量については、太平洋セメント(株)環境報告書2000より、セメント1t当りのNO_x排出量原単位を1.75kg、SO_x排出量原単位を0.260kgとした。

注9) SO_xについてはプレヒーターにおける原料中のCaとの反応等で排出量が低減されている。

2.2 石炭火力発電所建築工事におけるFAC適用時の試算結果

1) 計算概要

石炭火力発電所建築工事にFACを適用した場合の建設に関わるエネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量及びSO_x排出量低減効果を試算した。表6に今回試算の対象としたI石炭火力発電所本館(タービン棟・ボイラ棟)、石炭貯蔵サイロ、煙突の概要を示す。また今回の建築工事に使用された主要資材量を表7に示す。

2) 石炭火力発電所建築工事におけるFAC適用

FACを適用する場合、一般にコンクリートの中硬化速度が速くなり、この対応として基準強度の割増、設計かぶり厚さ割増の方策が提案されている³⁾。火力発電所コンクリート建築物では塩害対策よりかぶり厚さを標準値より10mm増していること等より、本報では普通ポルトランドセメントとFAC利用コンクリートの水/結合材(セメント+フライアッシュ)比は同等(2.1と同様にセメントのフライアッシュへの置換率20%)として試算を行った。

3. 試算結果

3.1 FAC製造に係わる環境負荷原単位

図2に本報の手順で算出された普通ポルトランドセメント及びFAC(フライアッシュ混合率20%)を1t製造する際のエネルギー消費量、CO₂、NO_x及びSO_xそれぞれの排出量原単位を示す。石炭及び電力はセメント工場における焼成及び粉砕工程で消費される。尚、本原単位は購入者価格ベースで計算しているため消費の流通過程における環境負荷を含んでいる。またここではフライアッシュが埋立される場合の船舶輸送における航行距離を算定し、FACのエネルギー消費量及び環境負荷から差し引いたものを原単位としている。

3.2 FAC適用時のエネルギー消費量・環境負荷低減効果

石炭火力発電所建築工事におけるエネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量及びSO_x排出量算出結果(普通ポルトランドセメント採用)を表8から表11に、また普通ポルトランドセメントをFAC(フライアッシュ混合率20%)に置換した場合のそれぞれの環境負荷低減効果を図3に示す。

表4. 各種燃料の発熱量原単位とCO₂排出量原単位

エネルギー源	発熱量	CO ₂ 排出量
石炭	25,980KJ/kg	2.750kg/kg
軽油	38,680KJ/l	2.643kg/l
A重油	39,240KJ/l	2.718kg/l
C重油	42,390KJ/l	3.020kg/l

注) 高位発熱ベース。石炭は6,200kcal/kg、炭素75%(無水基準)。石油関連は文献(12)による。

表5. 移動排出源からのNO_x、SO_x排出量

	NO _x 排出量	SO _x 排出量
貨物自動車(軽油)	17.4 g/l	8.50 g/l
沿海・内水		
A重油	74.0 g/l	8.60 g/l
C重油	85.5 g/l	47.5 g/l
面輸送		
外洋輸送(重油)	82.7 g/l	57.0 g/l

注) データの出典については注8)参照(1990年推定値)

表6. I石炭火力発電所概要

	1号機	2号機
出力	15.6万kW	15.6万kW
屋内貯炭場	サイロ型 3.1万t/基×4基	
煙突(外筒RC造)	2缶集合 高さ170m	

表7. I石炭火力発電所建築工事主要資材表

	構造種別	延床面積(m ²)	鉄骨(t)	鉄筋(t)	コンクリート(m ³)
本館	S造	25,809	8,418	2,090	26,541
サイロ	RC造	1,134	816	4,632	43,346
煙突	RC造	-	261	939	6,546
付属建屋	RC造	17,611	1,096	1,320	11,281

図2. 普通ポルトランドセメントとFAC製造に係わる

エネルギー消費量及び環境負荷原単位

4. 考察

4-1 セメントの環境負荷原単位

1) 普通ポルトランドセメントの環境負荷原単位

図2に示す原単位を従来の文献のエネルギー消費量及びCO₂排出量原単位と比較する。文献(7)によると、産業連関分析による国内の資本形成分・流通分及び海外誘発分を含まない普通ポルトランドセメント1t当りのエネルギー消費原単位、CO₂、NO_x及びSO_x排出量原単位はそれぞれ4,556MJ、847kg-CO₂、1.65kg及び0.231kg^{注10)}であり、海外誘発分を含む場合はそれぞれ4699MJ、857kg-CO₂、1.79kg及び0.292kgである。一方本報では普通ポルトランドセメント1t当りの原単位はそれぞれ4,212MJ、802kg-CO₂、2.21kg及び0.524kgとなり、エネルギーとCO₂では数%の減、NO_xとSO_xでは20から80%の増となっている。これは主に文献(7)には普通ポルトランドセメントの他高炉セメント等が対象として含まれていること及び輸送に関わる計算条件の設定の違いによるものと考えられる。特に今回の試算ではNO_xとSO_xについて、原料の国内輸送に関する負荷が普通ポルトランドセメント1t当りそれぞれ0.26kg、0.138kg、石炭の外洋輸送に関する負荷がそれぞれ0.135kg、0.086kgと大きな値になっている。^{注8)}

尚、エネルギー、CO₂及びNO_xの各原単位は1990年と現在であまり変化していないが、道路貨物輸送のSO_x排出係数は1/10に、石炭燃焼に係わるSO_x排出係数も半分程度に減少しているためデータの取り扱いには注意を要する。^{注14)} ^{注8)}

2) FACの環境負荷原単位

FAC製造に係わるエネルギー消費量については石炭によるものが2,376MJ/tとなり全体の68%を占める。フライアッシュの輸送の占める割合は1.6%と少ない。FAC全体では普通ポルトランドセメントに比べて、17%減少する結果となった。

表8. 発電所本館工事におけるエネルギー消費量及び環境負荷

	エネルギー消費量 (GJ)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	NO _x (kg)	SO _x (kg)
基礎・地業工事	60,592	7,891	14,217	4,385
鉄骨工事	109,353	10,537	8,672	4,846
上部建物工事	39,197	4,728	6,445	2,520
タービン台工事	6,346	732	1,425	483
その他工事	9,703	1,208	2,659	852
共通仮設費	5,452	497	896	375
間接費	5,657	410	562	355
合計	236,299	26,004	34,877	13,818
延床面積当り (単位)	9,156 (MJ/m ²)	1,008 (kg-CO ₂ /m ²)	1,351 (g/m ²)	535 (g/m ²)

注) エネルギー消費量は1次エネルギー換算値

表10. 石炭貯蔵サイロ工事におけるエネルギー消費量及び環境負荷

	エネルギー消費量 (GJ)	炭素排出量 (t-C)	NO _x (kg)	SO _x (kg)
基礎・地業工事	13,770	414	2,754	870
サイロ工事	186,543	4,437	25,677	8,538
地下トンネル工事	31,136	2,379	11,132	4,431
その他工事	6,450	206	1,245	400
共通仮設費	5,544	135	1,047	413
間接費	5,909	117	569	365
合計	249,352	7,687	42,423	15,016
石炭貯蔵t当り (単位)	8,044 (MJ/t)	248 (kg-c/t)	1,368 (g/t)	484 (g/t)

注) エネルギー消費量は1次エネルギー換算値

□ 発電所本館 □ サイロ ■ 煙突 ■ 付属建物

注) 同一グラフ内の環境負荷の差は、石炭の外洋輸送を含めたFAC採用による環境負荷の低減効果と建設工事全体に対するその比率を示すもので、環境負荷の国内誘発量を示すものではない。

図3. 石炭火力発電所建物建設に係わるエネルギー消費量

・環境負荷及びFAC採用による低減効果

表9. 付属建屋のエネルギー消費量及び環境負荷

	エネルギー消費量 (GJ)	炭素排出量 (t-C)	NO _x (kg)	SO _x (kg)
地業工事	5,366	156	1,882	553
躯体工事	61,587	1,863	10,889	3,913
仕上げ工事	59,992	1,186	3,954	1,527
設備工事	19,338	371	1,760	680
共通仮設費	609	15	115	45
間接費	840	17	81	52
合計	147,731	3,607	18,680	6,770
延床面積当り (単位)	7,635 (MJ/m ²)	186 (kg-c/m ²)	965 (g/m ²)	350 (g/m ²)

注) エネルギー消費量は1次エネルギー換算値

表11. 煙突工事におけるエネルギー消費量及び環境負荷

	エネルギー消費量 (GJ)	炭素排出量 (t-C)	NO _x (kg)	SO _x (kg)
杭工事	5,005	171	1,099	338
基礎板工事	12,361	401	2,421	762
外筒工事	12,820	381	1,907	769
内筒工事	4,330	110	456	264
共通仮設費	3,530	86	667	263
間接費	2,368	47	228	146
合計	40,414	1,195	6,778	2,541

注) エネルギー消費量は1次エネルギー換算値

CO₂排出量についてはセメント焼成過程での排出量が最も大きく全体の49%を占める。^{注1)} FACのCO₂排出量は普通ポルトランドセメントに比べて、19%減少する結果となった。

またNO_x、SO_x排出量は、普通ポルトランドセメントに比べてそれぞれ15%、9%減少する結果となった。エネルギー消費量、CO₂排出量に比べてこの減少率が小さいのは、フライアッシュの船舶輸送によるNO_x、SO_x排出量の増があるためである。

4.2 石炭火力発電所建築工事にFACを適用した場合の環境負荷低減効果

表8から表11及び図3より、発電所建築工事中においてはエネルギー消費量、環境負荷とも発電所本館、石炭貯蔵サイロ及び付属建物群の3つが量的にほぼ拮抗していることがわかる。

1) エネルギー消費量

発電所本館建築工事及び付属建物工事に普通ポルトランドセメントを用いた場合のエネルギー消費量はそれぞれ9,156MJ/m²、7,635MJ/m²となった。文献(17)によると、事務所ビルの場合、建設時エネルギー消費量は平均8,950MJ/m²であり、延べ床面積あたりのエネルギー消費原単位は事務所ビル建設と比べてそれぞれ2%増、15%減となった。付属建物の原単位が小さいのは事務所ビルと比べ仕上げ及び設備工事費が小さいことに起因する。また各建造物にFACを適用した場合のエネルギー消費の削減効果は4%から8%であった。発電所本館及び付属建物における削減量は軽油の一次エネルギー換算で約10リットル/m²に相当する。FAC利用によるプラント建築工事全体に対するエネルギー削減量は約36,500GJ、率にして約5%減であった。

2) CO₂排出量

発電所本館建築工事及び付属建物工事に普通ポルトランドセメントを用いた場合のCO₂排出量はそれぞれ1,008kg・CO₂/m²、684kg・CO₂/m²となった。文献(17)によると事務所ビル建築工事におけるCO₂排出量は平均788kg CO₂/m²であり、これらの建物の延べ床面積あたりのエネルギー消費原単位は事務所ビルと比べてそれぞれ28%増、13%減となった。発電所本館の傾向がエネルギー消費と比べて異なるのは本館の鉄骨消費量が大きいことによる。またFACを適用した場合はそれぞれ7%、11%の排出量低減効果が得られた。FAC利用によるプラント建築工事全体に対するCO₂排出量削減量は6,713t・CO₂、率にして9%減であった。

3) NO_x排出量

FACを適用した場合プラント建築物全体で13%のNO_x低減となった。

4) SO_x排出量

FACを適用した場合プラント建築物全体で7%のSO_x低減となった。

5. まとめ

本報では、フライアッシュセメント(FAC)のエネルギー消費量及び環境負荷の低減効果について、産業連関分析及び積み上げ法により定量化した。また発電所建築工事にFACを適用した場合のエネルギー消費量及び環境負荷低減効果の試算を行った。そ

の結果以下の知見が得られた。

1) フライアッシュ混合率20%のFAC製造に係わるエネルギー消費量は普通ポルトランドセメントに比べて17%、CO₂排出量は19%、NO_x排出量は15%、SO_x排出量は9%減少する。

2) 建物面積当たりで比較すると、発電所建物の建設に係わるエネルギー消費量及び環境負荷は、事務所ビルに比べて同等かやや小さいが、鉄骨消費量の多い発電所本館のCO₂排出量は28%大きい。

3) 発電所建築工事にフライアッシュ混入率20%のFACを使用した場合の効果を試算した結果、プラント建築工事全体のエネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量及びSO_x排出量それぞれについて5%、9%、13%及び7%の低減となった。

6. 今後の課題

FACは強度の発現速度は遅いものの、フライアッシュ混合率が30%以下の場合、普通ポルトランドセメントに比べて長期強度の増進が期待できる。これにフライアッシュの持つ遮塩性向上、水和熱の低減メリット及び中性化助長のデメリットを総合的に考慮した建物部位毎の要求性能に合わせた最適な配合を細かく規定し、試算の精度を上げていくことが必要と考える。^{注12)}

最後にフライアッシュの流通についてはまだその流通経路が確立されていない。1日も早い流通機構の整備を期待したい。

注記

注1) フライアッシュの約1/3が有効に利用されずに埋立処分されている主因は、①資源としてのフライアッシュの有効な大量活用策創出の遅れと②これと対を成すフライアッシュ流通機構の未整備である。一言でフライアッシュと言っても石炭の種別、燃焼方法によりその性状は微妙に異なる。フライアッシュの特性に合った需要開発とともに、需要サイドのニーズに適した品質のフライアッシュを需要地・需要時期に合わせ供給する仕組み作りが課題となっている。

注2) 逆行列として(I-(I-M)A)⁻¹を採用。

注3) 本文で述べたように本報では文献(5)(p78、79)、文献(6)(p94、95)の購入者価格百万円当りのエネルギー消費量及び環境負荷原単位を採用した。この際、資材数量と購入者価格の換算には1990年度産業連関表の物量表を用いた。セメント原材料のうちケイ石及び粘土は「窯業原料鉱物」に、石膏は「その他の建設用土石製品」に該当させた。また文献(5)、(6)に記載のない石灰石については、文献(5)、(6)と同一の手法で算出した以下の環境負荷原単位(購入者価格百万円当り)を採用した。

エネルギー消費量; 66.30GJ、CO₂; 4.686t、SO_x; 7.87kg、NO_x; 24.99kg

また鉄原料については投入資材量が小さく生産過程での環境負荷も小さいことから、輸送に関わる環境負荷のみを算定の対象とした。

「事業用電力」に関わるエネルギー消費量としては、文献(5)の最終消費分を補正し337.2GJ/百万円を採用した。

注4) セメント製造用燃料としては石炭の他、石油コークス、重油等が少量用いられるケースがあるが、90%以上は石炭のため石

炭で特性を代表し得ると判断し、表 1 中には記載していない。ちなみに筆者が調査した首都圏の工場の例では、燃料の月平均使用料は、石炭 13,000t、A 重油 25k リットルであった。また数値を引用した文献(4)では、石炭換算（発熱量 6,200kcal/kg）した燃料消費量原単位が示されている。

電力消費量原単位には自家発電分を含んでおり、燃料消費量との重複はない。1995 年以前は約 40%だった自家発電依存率は近年では約 60%に上昇している。尚、セメント製造に要する原料及び 1 次エネルギー消費量の経年変化幅は小さい。

また文献(4)中の燃料消費量原単位及び電力消費量原単位は、普通ポルトランドセメントの他に高炉セメント、フライアッシュセメント等を含んだ全セメントの平均値のため、このうち 20%が高炉スラグ 45%を混入した高炉セメント、1%がフライアッシュ 20%を混入した FAC と想定し、セメント製造に要する燃料、電力消費量及び混合に要する電力消費量を補正して普通ポルトランドセメントの原単位を設定した。

注 5) 輸送手段・輸送距離については公表されたデータがないため、首都圏に立地する特定工場のデータをセメント会社より聞き取り調査した値を採用し表 1 に示した。国内のセメント工場全般で見ると、最も消費量が多い石灰石は道路輸送主体、燃料石炭は外洋輸送によっており、その他の原材料であるケイ石・粘土（及び粘土代替）・石膏及び鉄原料については国内船舶輸送ないし道路輸送によっている例が多い。

注 6) 近年発電所用地の確保難より、従来多かった発電所と灰埋立処分場の併設は困難となりつつある。また発電所の延命活用により隣接灰処分場が満杯となり、新たな処分場を手当てせざるを得ないケースも増加すると思われる。電源開発（株）の場合、現在平均 57km の発電所・灰埋立処分場間の輸送距離が 2001 年には平均約 160km になると想定されている。（2000 年に運転を開始した T 発電所からの平均輸送距離は約 400km）尚、国内のフライアッシュ排出量の 20%強を電源開発（株）が排出している。

注 7) フライアッシュセメントの配合設計は、試験練りによる強度（性能）確認が原則であり、コンクリートの要求性能及び環境条件等により、最適配合は異なる。本報では普通ポルトランドセメント量 20%減、これをフライアッシュで全量置換するケースを試算対象とした。

注 8) NO_xについては「環境庁編：温暖化する地球・日本の取り組み、大蔵省印刷局、1994.12（p68、73、74）より貨物車（バスを含む）の排出係数を計算した。また船舶の NO_x 排出係数については文献(13)（表 3.4-8、3.4-10）より、内水面輸送については A 重油 86g/kg-Fuel、C 重油 90 g/kg-Fuel 及び外洋輸送については重油（C 主体）で 87 g/kg-Fuel と設定した。

SO_xについては軽油、重油の S 分含有量がすべて排出されるものとして排出係数を求めた。軽油については石油連盟資料より S 分含有率を 1990 年 JIS 規格値の 0.5 質量%と設定した。尚、1997 年の JIS 規格値改訂により、軽油の S 分含有率は 0.05%まで低減されている。船舶燃料用重油については文献(13)（表 3.4-11、3.4-12）より、燃料の平均硫黄分を内水面輸送では A 重油 0.5%、C 重油 2.5%、外洋輸送では重油（C 主体）3%と設定した。

本報で述べた 1990 年レベルの普通ポルトランドセメント 1t 当

りの SO_x 原単位 0.524kg を現状レベルに補正（工場の脱硫設備強化、経由の JIS 改訂を織り込む）すると 0.351kg となり 33%の低減が図られている。

注 9) セメント業界全体としての公表データがないため、国内市場占有率が最大（約 40%）の太平洋セメント（株）の公表データを採用した。

注 10) 1990 年における購入者価格百万円当りのセメント量を 70.5t と設定した。⁵⁾

注 11) セメント焼成過程では $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ という化学反応により、石灰石 1t 当り約 422kg（※）の CO₂ が発生する。

（※）（社）セメント協会公表データ

注 12) 現在建設中の石炭火力発電所では本館基礎工事にはフライアッシュ混合率 25%、石炭貯蔵サイロ工事には混合率 10%の FAC を採用している。

参考文献

- 1) (財)石炭利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 9 年度分）1999.3
- 2) 笠井芳夫、小林正凡：改訂版 セメント・コンクリート用混和材料、技術書院、1993.9
- 3) (社)日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施行指針（案）・同解説、1999.2
- 4) セメント協会：セメントハンドブック 1999 年度版、1999.6
- 5) 林英明、岡建雄、小玉祐一郎：1990 年表によるエネルギー消費量と炭素排出量の原単位、産業連関表による建築物の評価（その 5）、日本建築学会計画系論文集、No.511、pp.75~81、1998.9
- 6) 吉田公夫、横尾昇剛、岡建雄：1990 年表による大気汚染量、工場排水負荷、産業廃棄物の原単位、産業連関表による建築物の評価（その 6）、日本建築学会計画系論文集、No.520、pp.91~97、1999.6
- 7) (社)日本建築学会、建物の LCA 指針（案）、1999. 11
- 8) 本藤祐樹、外岡豊、内山洋司：（財）電力中央研究所、産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析——データ集——、1998. 10
- 9) 総務庁：平成 2 年産業連関表、計数編（1）、（2）、（財）全国統計協会連合会、1994.3
- 10) 電源開発（株）実績による。
- 11) 環境庁：温暖化する地球・日本の取り組み、大蔵省印刷局、1994.12
- 12) (社)火力原子力発電技術協会：火力原子力発電必携、通商産業省資源エネルギー庁監修、1992
- 13) シップ・アンド・オーシャン財団：船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査、1998
- 14) 東京都環境保全局：船舶に係る大気汚染物質排出実態調査、1991.3
- 15) 日本船舶機関学会：船舶から排出される大気汚染物質の削減方策について、1995.3
- 16) 太平洋セメント（株）環境報告書 2000
- 17) 鈴木道哉、岡建雄他：事務所ビルの建設・運用に関わるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量、産業連関分析による建築物の評価（その 4）、日本建築学会計画系論文集、No.476、pp.37~43、1999. 10
- 18) 通商産業大臣官房調査統計部：平成 2 年石油等消費構造統計表、通産統計協会、1996

（2000 年 5 月 10 日原稿受理、2001 年 1 月 16 日採用決定）