

付録

混和材用フライアッシュのCO₂等排出量の算定例（20170110）

1. 石炭灰から得られる混和材用フライアッシュ

(1) 混和材用フライアッシュの規格

JIS A 0203（コンクリート用語）でフライアッシュは、「石炭火力発電所において、微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集じん器で捕集されるアッシュ」と定義されている。コンクリートまたはモルタルに混和材料として用いるフライアッシュについては、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）で品質が表-1.1に示すように規格化されている。

表-1.1 JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）

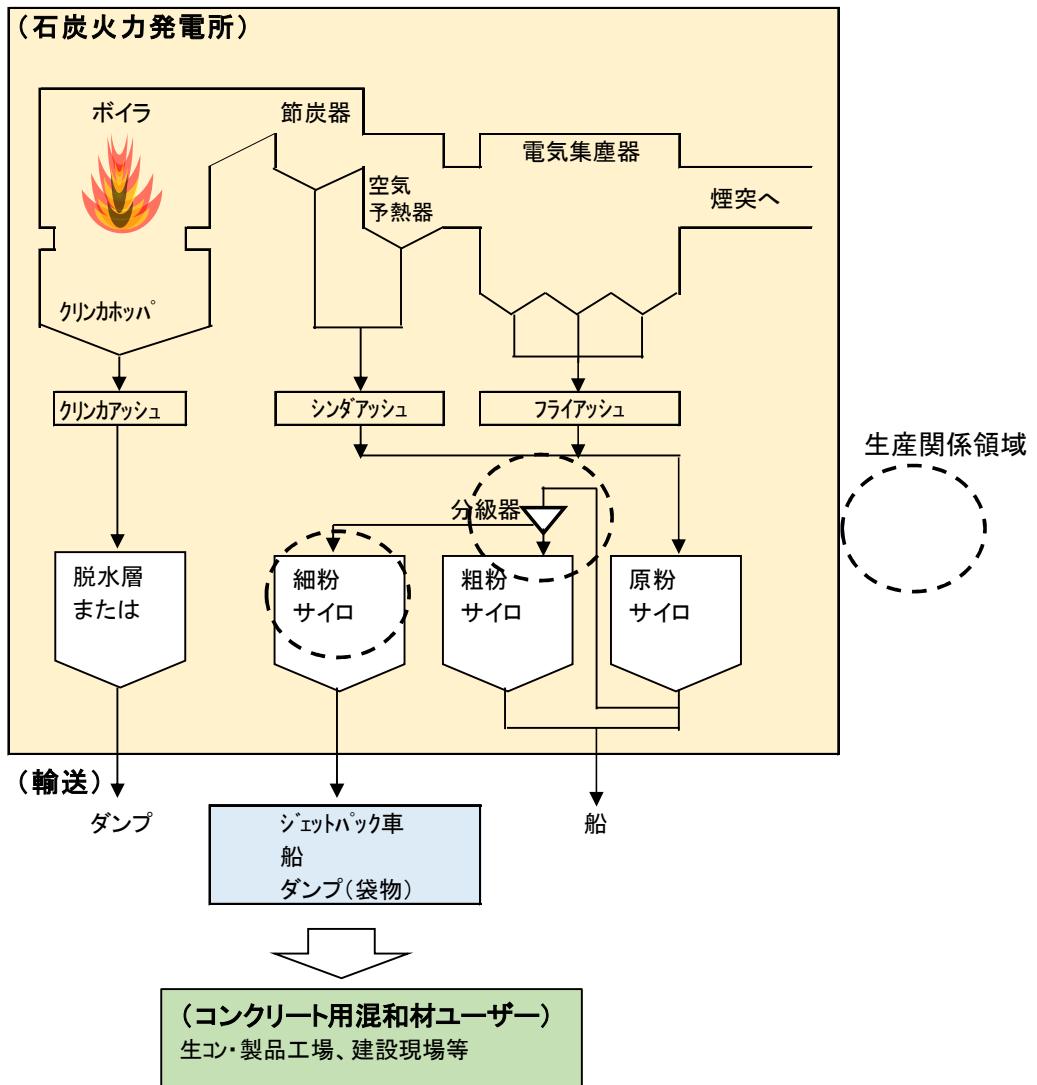
項目	種類	フライアッシュ I種	フライアッシュ II種	フライアッシュ III種	フライアッシュ IV種
二酸化けい素含有量	%	45.0以上			
湿分	%	1.0以下			
強熱減量	%	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
密度	g/cm ³	1.95以上			
粉末度	網ふるい方法 (45 μmふるい残分)%	10以下	40以下	40以下	70以下
	フーレン方法（比表面積）cm ² /g	5,000以上	2,500以上	2,500以上	1,500以上
フロー値比	%	105以上	95以上	85以上	75以上
活性度指数	材齢28日	90以上	80以上	80以上	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上

フライアッシュセメント用混合材、各種セメントの少量混合成分として用いられるフライアッシュはセメントのJIS規格により、フライアッシュI種とII種に制限されている。レディーミクストコンクリートやコンクリート製品にはこの制限はない。

(2) 混和材用フライアッシュの生産と供給

図-1.1に示すように、JIS規格に適合する混和材用フライアッシュは、JIS注文に応じて、発電所内で排出するフライアッシュから、構内設備で分級、ブレンド等により生産され、構外のユーザーに向けて搬出されるのが一般的である。分級ではフライアッシュ原粉から気流分級機により、細粉を分離して粉末度を高める。ブレンドは、細粉（製品）サイロ内で、均質化のためにエアーブレンディング等が行われる。フライアッシュの生産に関係する領域は、構内の分級器と細粉（製品）サイロ部分である。

表-1.2に混和材用フライアッシュの生産技術を示す。現在、気流分級が普及しているが、未燃分除去の新しい技術として加熱燃焼や静電分離が実用化されている。



※シンダッシュとフライッシュを総称してフライッシュと呼ぶこともある。

図-1.1 混和材用フライッシュの生産と供給

表-1.2 混和材用フライッシュの生産技術

生産方法	手段	採用状況	内容	使用エネルギー	インプット		環境負荷
					直接	間接	
分級	気流分級	電力会社に普及	フライッシュは粉末度が高いほど性能が高いために、電気集塵器で捕集した原粉をファンにより発生させた気流に乗せて、遠心力により小さな粒子（細粉）を分別採取する。	電力	電力 （所内又は購入） ①分級機 ②ブレンド	—	CO ₂ , SOx, NOx, ばいじん
未燃分除去	加熱燃焼	電力会社以外4事業所	フライッシュ中の未燃分が少ないほど性能が高いために、キルンを通してフライッシュ中未燃分を燃焼させ、未燃分の殆どないフライッシュに加工する。	燃料 (灯油)	電力 燃料運搬 燃料燃焼	未燃分(石炭)燃焼	CO ₂ , SOx, NOx, ばいじん
静電分離	静電気	研究段階	日本では実用化していないが、正と負の電極間に帯電したフライッシュを通過させて、正に帯電した未燃分を負電極に付着分離する。	電力	電力	—	CO ₂ , SOx, NOx, ばいじん

付録

2. フライアッシュの輸送による CO₂ 排出量のカウント

発電所構内での混和材用フライアッシュの生産のためのフライアッシュ原粉の輸送に係る CO₂ 排出量はカウントしないが、発電所の外での生産のためのフライアッシュ原粉輸送に係る CO₂ 排出量については、以下の様に行う。

原粉を購入する場合： 輸送に伴う CO₂ 排出量をカウント

原粉を産廃として引取る場合： 輸送に伴う CO₂ 排出量のカウントは不要

製品となった混和材用フライアッシュの輸送に係る CO₂ 排出量は利用側でカウントする。

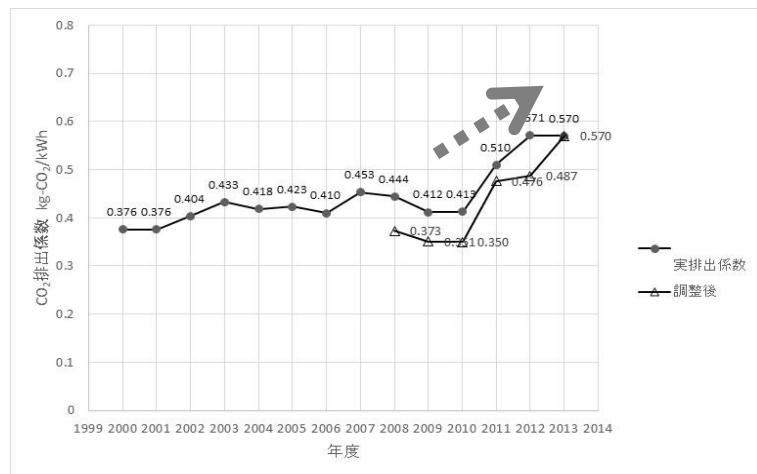
3. フライアッシュの CO₂ 排出原単位選定に関する参考

現在のフライアッシュ等の一般的な CO₂ 排出原単位を表-1.3 に示す。フライアッシュの CO₂ 排出原単位 19.6 kg-CO₂/t は、分級時電力消費量 48.2 kWh/t に対して、10 年程前の電力 CO₂ 排出係数(kg-CO₂/kWh) 0.41 により算定したものである [2]。

表-1.3 一般的な CO₂ 排出原単位 [1], [2]

結合材	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t	SOx排出量 kg-SOx/t	NOx排出量 kg-NOx/t	ばいじん排出量 kg-PM/t
ホルトランドセメント	766.6	0.122	1.55	0.0358
フライアッシュセメント	624.0	0.0984	1.25	0.0289
フライアッシュ	19.6	0.0062	0.00754	0.00125

図-1.2 に電力の CO₂ 排出係数（全国平均）の推移を示す。現在は電力の CO₂ 排出係数が 0.57 に増加している。これによるとフライアッシュの CO₂ 排出原単位は 19.6 kg-CO₂/t → 27.5 kg-CO₂/t (40%増加) に見直さなければならないとみられる。



*調整後排出係数：再生可能エネルギーの固定価格買取制度などに伴う調整後の値

図-1.2 電力の CO₂ 排出係数の推移 [3]

付録

また、表-1.4に示すように、分級とブレンディングに要する消費電力の実測例では、ブレンディングを含めても CO₂ 排出量インベントリデータは相当小さい。

表-1.4 分級とブレンディングに要する消費電力の実測例 [4]

フライアッシュの規格	発電所	電力消費量 kWh/t	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t
JIS II 種	A発電所	24.8	10.1
	B発電所	8.4	3.42

さらに、図-1.3に示すように、電源別に排出係数が異なり、石炭火力は最も高く、1kg·CO₂/kWh 近い排出がある。フライアッシュの生産が石炭火力発電所内で行われ、所内電源を使用することから、石炭火力の排出係数 0.94kg-CO₂/kWh を使用する（火力発電所の外での製造については、平均の排出係数でもよい）という考え方もできる。

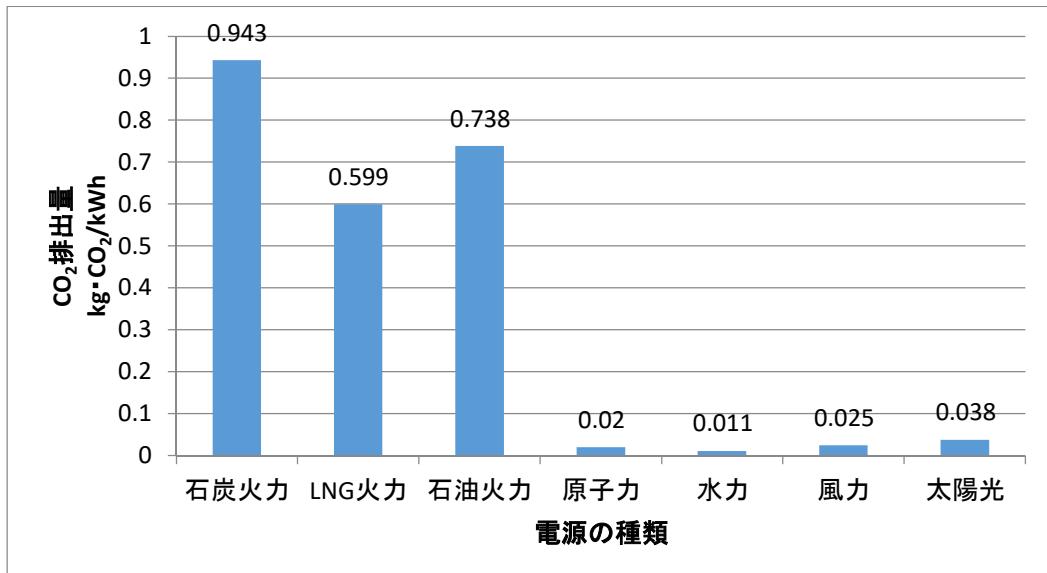


図-1.3 電源別排出係数 [5]

これらのことから、排出係数の数値の採用については、インベントリデータが一律ではなく、個々の発電所で、また年代で異なること、さらに電源の種類で異なることに留意する。

新たな加工として、未燃分分離等が採用されると、フライアッシュの CO₂ 排出原単位はさらに増加するといえる。

加熱燃焼は未燃分を 1%以下に削減する方法であるが、灰中未燃分と燃料の燃焼による CO₂ の排出が追加される。

付録

2. フライアッシュを使用したコンクリートの CO₂ 等環境負荷排出量の計算例（製造から生コンの輸送まで）

(1) 原子力発電所建設工事における CO₂ 等環境負荷排出量の計算例

原子力発電所建設工事におけるコンクリート製造から生コンの輸送までの CO₂ 等環境負荷排出量の計算例 [4] を以下に紹介する。

なお、輸送に伴う CO₂ 排出量はコンクリートの製造者と購入者が負担するものであるが、製造から輸送までの全体でのフライアッシュ利用による CO₂ 排出量の変化をみるために輸送も含めて紹介する。

表-1.5 に計算条件を、表-1.6 に計算に用いた CO₂ 等環境負荷排出原単位、図-1.4 にフライアッシュを使用したコンクリートの製造と、原料および生コンの運搬内容の関係を示す。

表-1.5 計算条件

(構成材料)

	配合 t/m ³	工事名	コンクリート量 m ³	セメント	種類	普通ポルトランドセメント
セメント	0.222	泊原発 3号機取 水設備工 事	28,658	フライアッシュ	種類	JIS II 種
フライアッシュ	0.094				置換率	30% (内割)
細骨材	0.778				使用方法	混和材として現場ブロックで混合
粗骨材	1.056				使用目的	温度ひび割れ抑制 (水和熱抑制)

(運搬)

材料	手段	距離
セメント	20t トレーラー	120km
フライアッシュ	20t トレーラー	170km
細骨材	船、10tダンプ	6-357km 4ルート
粗骨材	船、10tダンプ	200-357km 3ルート
生コン	4m ³ アジテータ車	1km

表-1.6 計算に用いた CO₂ 等環境負荷排出原単位

(構成材料)

	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t	SOx排出量 kg-SOx/t	NOx排出量 kg-NOx/t	ばいじん排出量 kg-PM/t
普通ポルトランドセメント	766.6	0.122	1.55	0.0358
フライアッシュ	19.6	0.00620	0.00754	0.00125
細骨材	3.7	0.00860	0.00586	0.00199
粗骨材	2.9	0.00607	0.00415	0.00141

(運搬)

車両	単位 (※)	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /※	SOx排出量 kg-SOx/※	NOx排出量 kg-NOx/※	ばいじん排出量 kg-PM/※
トラック ディーゼル 20t	km・t	7.14×10^{-2}	5.49×10^{-5}	5.34×10^{-4}	4.48×10^{-5}
ダンプトラック ディーゼル 10t	km・t	1.17×10^{-1}	9.01×10^{-5}	8.75×10^{-4}	7.35×10^{-5}
生コンアジテータ車 4.4-4.5m ³	km・m ³	2.53×10^{-1}	1.95×10^{-4}	3.79×10^{-3}	1.92×10^{-4}
船舶 2000t級	km・m ³	6.15×10^{-2}	1.06×10^{-3}	1.78×10^{-3}	2.73×10^{-5}

付録

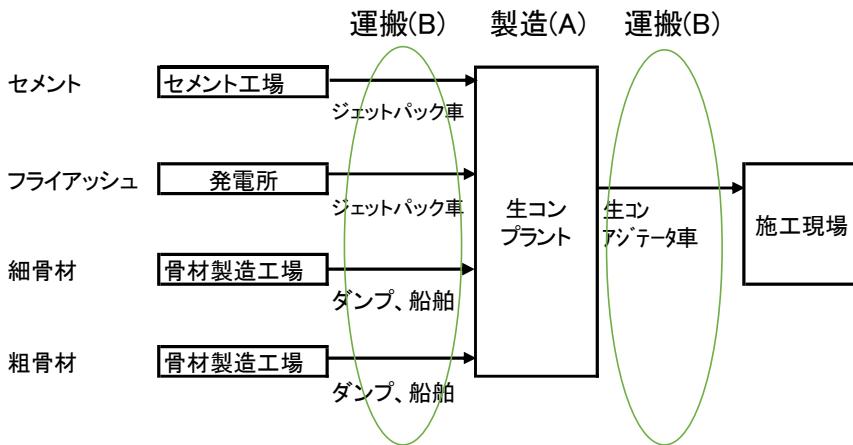


図-1.4 フライアッシュを使用したコンクリートの製造と運搬

計算結果を表-1.7に示す。コンクリート製造においてフライアッシュ無配合に対するCO₂をはじめとする環境負荷の排出低減効果が大きいこと、また、輸送においてはフライアッシュ配合有無の差が殆どないが示されている。

表-1.7 計算結果（フライアッシュ無配合との比較）

		環境負荷量	フライアッシュ使用	フライアッシュ無使用
A	構成材料の製造に伴う 環境負荷量	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	5,100	7,113
		SO _x 排出量(kg-SO _x)	1,168	1,480
		NO _x 排出量(kg-NO _x)	10,138	14,293
		ばいじん排出量(kg-PM)	318	411
B	輸送に伴う環境負荷量	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	1,136	1,126
		SO _x 排出量(kg-SO _x)	11,125	11,117
		NO _x 排出量(kg-NO _x)	21,912	21,840
		ばいじん排出量(kg-PM)	600	594
A+B	構成材料の製造に伴う 環境負荷量	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	6,236	8,239
		SO _x 排出量(kg-SO _x)	12,293	12,597
		NO _x 排出量(kg-NO _x)	32,050	36,133
		ばいじん排出量(kg-PM)	918	1,005

(2) フライアッシュ CO₂ 排出原単位のコンクリート製造での CO₂ 排出量への影響

石炭火力発電所での電力の CO₂ 排出原単位(0.94kg·CO₂/kWh)と従来の分級時電力消費量 (48.2kWh/t) を想定すると、石炭火力発電所でのフライアッシュ生産時の CO₂ 排出原単位は 45.3 kg·CO₂/t になる。従来の 19.6kg·CO₂/t に対して約 2 倍である。従来およびこの CO₂ 排出原単位により上記計算例のコンクリートについて CO₂ 排出量を検討した結果が表-1.8 である。コンクリート製造において、フライアッシュの分級での使用電力量、電源の影響は殆どないことが示されている。

付録

表-1.6 コンクリート製造時の CO₂ 排出量比較（フライアッシュ CO₂ 排出原単位の影響）
(従来の原単位)

構成材料	配合 t/m ³	コンクリート 打設量 m ³	使用量 t	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t	CO ₂ 排出量 t
				フライアッシュは 従来の原単位	
セメント	0.222	28,658	6,362	766.6	4,877
フライアッシュ	0.094	28,658	2,694	19.6	53
細骨材	0.778	28,658	22,296	3.7	82
粗骨材	1.056	28,658	30,263	2.9	88
計					5,100

(石炭火力発電所での排出係数と従来の分級機消費電力を想定した原単位)

構成材料	配合 t/m ³	コンクリート 打設量 m ³	使用量 t	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t	CO ₂ 排出量 t
				フライアッシュは 現状の石炭火力 の電力CO ₂ 排出 係数による。	
セメント	0.222	28,658	6,362	766.6	4,877
フライアッシュ	0.094	28,658	2,694	45.3	122
細骨材	0.778	28,658	22,296	3.7	82
粗骨材	1.056	28,658	30,263	2.9	88
計					5,169

<参考文献>

- [1] 土木学会:コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価(その2), 2004.
- [2] 玉重宇幹他 : フライアッシュの分級設備の操業実績, セメント製造技術シンポジウム報告集, 49, 1992.
- [3] 電事連 : 電気事業における環境行動計画, 2015.
- [4] 土木学会 : コンクリートライブラー132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術—利用拡大に向けた設計施工指針試案—, 土木学会, 2009.
- [5] 電気事業連合会 : 「原子力・エネルギー」図面集 2015

以上