

# フライアッシュに関する最近の動向

## — 利用拡大に向けた取組み —

高橋 守男\*

石炭火力は重要なベースロード電源として電力安定供給を担っている。今後、石炭火力発電設備容量が増加するなかで、副産するフライアッシュの有効利用先の確保が重要な課題である。サステナビリティ社会に向けて、混和材としてのフライアッシュへの期待も高く、質と量の確保、利用拡大への取組みが行われている。これらの状況について、概略を述べる。

キーワード：フライアッシュ、有効利用、コンクリート、石炭火力、電源、エネルギー供給

### 1. はじめに

石炭火力は、各種電源のなかでベースロード電源（季節や天候、昼夜を問わず一定量の電力を安定的に低コストで供給できる電源）として、継続稼働により電力を供給する重要な電源であり、2015年度現在においては、発電電力量の31.6%を担っている<sup>1,2)</sup>。また、石炭火力のベースロード電源としての位置付けは長期的に変わらないとされている<sup>3)</sup>。

発電に伴い石炭重量比で約10%の大量の石炭灰が発生するが、石炭灰の大部分が乾燥微粉末のフライアッシュである。この構内貯蔵量には限度があり、発電の継続を維持するために、安定した有効利用先の確保が必要である。

今後、石炭火力発電所の新增設が各地で計画されており、フライアッシュの有効利用先の確保が重要な課題となっている。一方で、サステナビリティ社会のなかで、コンクリート製造における環境負荷低減やコンクリート構造物の長期耐久性確保のニーズに対して、コンクリート用混和材としてのフライアッシュのもつ効果が期待されており、これに応えることが課題の解決に加えて、社会貢献につながるものと考えられる。

フライアッシュの発生状況とコンクリートへの利用拡大への取組み状況の概略を以下に述べる。

### 2. フライアッシュの発生・処理状況

日本の石炭火力発電に使用する石炭はほとんど海外から輸入されている。輸入先はオーストラリアが中心で（輸入比率は約70%）、インドネシア、ロシアが続いている。石炭は可採埋蔵量が豊富で、比較的政情が安定している国々

に広く存在しているため供給安定性に優れ、石油・LNGなどより相対的に安価であることから、石炭火力はCO<sub>2</sub>排出原単位が高いものの、重要な電源として発電効率向上の取組みやCO<sub>2</sub>回収・貯留技術の検討も行われている。

現在、石炭火力発電所は図-1に示すように全国に分布している。2011年の東北大震災後の原子力発電から火力発電へのシフトが進むなか、今後、表-1に示すように、多くの石炭火力発電所の新增設が計画され、設備容量の大幅な増加が見込まれている。

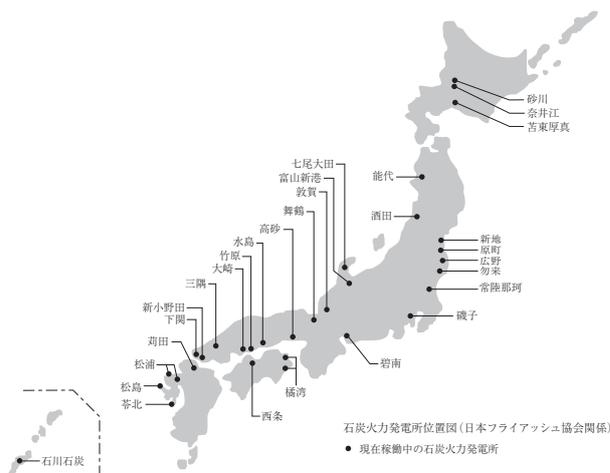


図-1 石炭火力発電所の分布<sup>4)</sup>

表-1 石炭火力発電所の新增設計画<sup>5)</sup>

発電設備	出力(万 kW)	運開時期	備考	
東北電力	能代3号	60	2020年度	
	勿来	54	2020年代初頭	
東京電力	広野	54	2020年代初頭	
	横須賀新1号・新2号	130	新1号：2023 新2号：2024	
中部電力	常陸那珂ジェネレーション	65	2021年前半	東京電力と共同出資
	武豊5号	107	2021年度	
中国電力	三隅2号	100	2022年度	
九州電力	松浦2号	100	2020年度	
	千葉袖ヶ浦エナジー	200	2020年代中頃	東京ガス・出光興産と共同出資
電源開発	山口宇部パワー	120	1号：2023年度 2号：2025年度	大阪ガス・宇部興産と共同出資
	鹿島パワー	65	2020年度	新日鉄住金と共同出資
	高砂新1号	60	2021年度	既設(25万kW)を更新
	高砂新2号	60	2027年度	既設(25万kW)を更新
計		1175		



\* Morio TAKAHASHI

日本フライアッシュ協会  
技術参与

石炭火力発電所では、石炭を微粉碎・燃焼して発電を行っている。図 - 2 に電気事業における石炭燃焼の副産物である石炭灰の発生量、利用量および埋立（廃棄）量の推移を示す。現在、発生量は2000年度に対して約1.5倍になっているが、埋立量は減少し、有効利用率98%で資源循環が行われている。

図 - 3 に2014年度の石炭灰有効利用の内訳を示す。現状はセメント分野（セメント原料、フライアッシュセメントおよび混和材）の割合が66%で、そのほとんどがセメント原料の一つである粘土の代替として利用されている。

今後、石炭火力発電設備容量が増加するなかで、石炭灰発生量については、原子力や太陽光や水力、風力などの再生可能エネルギーの供給状況も合わせてみていかなければならないが、電気事業者にはリサイクル法で、指定副産物として石炭灰の有効利用を確実に進めることが求められている。



図 - 2 石炭灰発生量と有効利用量<sup>6)</sup>

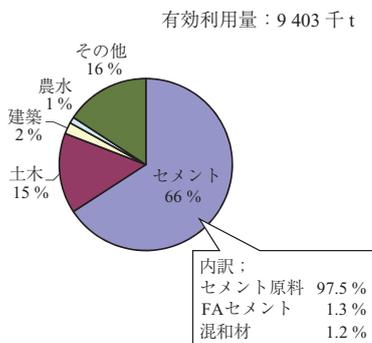


図 - 3 石炭灰有効利用の内訳 (2014年度)<sup>6)</sup>

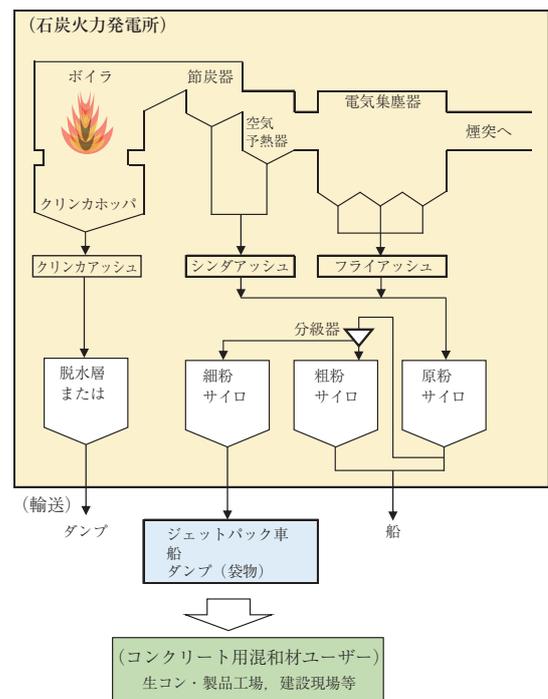
### 3. コンクリート用フライアッシュの生産と評価の状況

コンクリート用フライアッシュはほとんど石炭火力発電所内で生産される。その生産プロセスを図 - 4 に示す。石炭火力発電所では、ボイラー底部からは溶融固化した砂礫状のクリンカアッシュが、煙道途中の電気集塵器からは微粉末状のフライアッシュが排出する。

コンクリート用フライアッシュの生産プロセスは、この電気集塵器でのフライアッシュ原粉の選択的回収、これに

続く分級器による粗粒分の分離による細粉回収が一般的で、さらに近年、多くの発電所では、品質の均一化のために細粉サイロでのブレンディングを追加している。分級は細かな粒子の方がフライアッシュの性能が高くなるために行われる。このプロセスにおいては、細粉が表 - 2 に示す JIS A 6201 に適合するように生産管理が行われている。コンクリート用フライアッシュは、JIS A 6201 では、幅広い品質ニーズに対応する目的で、1999年から4種類に分類されているが、現在、供給されているものはほとんど JIS 規格のⅡ種品である。

フライアッシュの品質は、石炭の炭種（産地や石炭化程度による炭質）、石炭粉末度、燃焼運転条件により変動するため、発電所ごとでも品質が異なる。近年、炭種の広がりが見られ、従来からの瀝青炭に、より石炭化が進んでいない亜瀝青炭も加わるようになってきている。また、石炭に木質ペレットや木質バイオマスなどを混合したバイオマス混焼も進められている。この状況のなかで、石炭火力発電所はフライアッシュ原粉の品質変動に対応し、コンクリート用フライアッシュの質と量の確保に努めている状況である。



\* シンダアッシュとフライアッシュを総称してフライアッシュと呼ぶこともある。

図 - 4 フライアッシュの生産プロセスと供給

表 - 2 コンクリート用フライアッシュ (JIS A 6201)

項目	種類	フライアッシュ			
		I種	Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅳ種
二酸化けい素含有量	%	45.0以上			
水分	%	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 <sup>3</sup>	1.95以上			
粉末度	網ふるい方法 (45μmふるい残分)	10以下	40以下	40以下	70以下
	ブレン方法 (比表面積)	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

フライアッシュの性能評価を示す例として、実際の生コン工場で実施したフライアッシュを使用したコンクリートの品質試験の結果を表-3に示す。N+F（普通ポルトランドセメントNを15%フライアッシュに置換したコンクリート）のBB（高炉セメントB種を使用したコンクリート）、N+B（普通ポルトランドセメントNを42%高炉スラグに置換したコンクリート）およびN（普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート）に対する効果の比較において、フライアッシュが多くの優れたパフォーマンスを有することが示されている。とくに、顕著な項目は、BBに対しては発熱量抑制と中性化抑止性で、Nに対してはASR抑制、塩化物イオン浸透抑制である。

表-3 コンクリート用フライアッシュの性能<sup>7)</sup>

比較項目	比較対象		主な測定項目
	BB N+B	N	
(1) 施工性向上	◎	◎	ブリーディング
(2) 初期強度発現	◎	△	圧縮強度
(3) 長期強度増進	○	◎	
(4) 乾燥収縮抑制	◎	◎	乾燥収縮、自己収縮
(5) 発熱量抑制	☆	◎	完全断熱温度上昇量
(6) ASR抑制	◎	☆	モルタルパー法
耐久性向上	a. 透水抑止性	○	透水量
	b. 塩化物イオン浸透抑制	○	塩化物イオン浸透深さ
	c. 鉄筋腐食抑止性	○	鉄筋の腐食状況
	d. 凍害抵抗性	○	相対動弾性係数
	e. 中性化抑止性	☆	中性化深さ
	f. 細孔率	○	細孔率

☆：効果大 ◎：同等もしくは効果大 ○：同等 △：効果小

グリーン購入法（国等による環境物品等の調達推進等に関する法律）により、フライアッシュ関係で表-4の二品目が評価され、グリーン調達品に登録されている。この登録により、公共工事などへの採用拡大が図られている。吹付けコンクリートについては、フライアッシュの配合による粘性増加により、吹付け時のリバウンド率の低減効果（使用材料の節約、廃棄物削減）、さらに粉塵量の低減による作業環境の改善効果が認められている。

表-4 フライアッシュ関係のグリーン調達品

品目分類	品目名	判断基準
混合セメント	フライアッシュセメント	フライアッシュセメントであって原料に10%を超える分量のフライアッシュが使用されていること。
吹付けコンクリート	フライアッシュを用いた吹付けコンクリート	吹付けコンクリートであって、1m <sup>3</sup> あたり100kg以上のフライアッシュが混和材として使用されていること。

近年、地球温暖化対策として、CO<sub>2</sub>の排出量低減のためにコンクリート製造における混合セメントの利用促進が求められている<sup>8,9)</sup>。表-5のCO<sub>2</sub>排出量インベントリデータが示すようにフライアッシュや高炉スラグ微粉末がきわめて小さいため、これらをセメント代替として利用することはCO<sub>2</sub>排出量低減に大きく寄与するといえる。

表-5 CO<sub>2</sub>排出量のインベントリデータ<sup>10)</sup>

分類1	分類2	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
セメント	ポルトランドセメント	766.6
	フライアッシュセメントB種	624.0
	高炉セメントB種	458.7
混和材	フライアッシュ	19.6
	高炉スラグ微粉末	26.5

## 4. フライアッシュの利用拡大に向けた取組み状況

### 4.1 地産地消の取組み

フライアッシュは輸送コスト、供給力の制限により、地産地消が基本となり、地域ごとに地域事情に合わせた利用拡大の取組みが展開されている。生コンやコンクリート製品の関係での例を以下に示す。

（東北）

平成22年4月より、秋田県が発注する能代・山本地域（能代市・山本郡）の公共工事においては、県内の能代火力発電所フライアッシュを混合したコンクリートを標準使用している。自治体の公共事業において、このような取組みは、全国初で、地産地消の流通体系が確立されるとともに、県外からのセメントや混和材の搬入が抑制され、輸送に伴う環境負荷の低減の効果も得ている。

コンクリート製品では「秋田県フライアッシュ混合プレキャストコンクリート製品使用基準」が作成され、県のリサイクル製品の認定などで恒常的な利用に繋がっている。

岩手県内では国道283号釜石道路工事（向定内橋梁）で、寒冷地対策として塩分浸透抵抗性の増大とASR抑制によるRC床版の高耐久化、LCC削減を目的にフライアッシュが利用されている<sup>11)</sup>。

（北陸）

北陸地方では、フライアッシュの品質の安定化による利用促進と、とくにASR抑制目的でコンクリート構造物の長寿命化を図る観点からフライアッシュコンクリートの普及に産官学で取り組んできた<sup>7)</sup>。実証として、富山新港火力発電所LNG受入橋の高強度コンクリートを用いたプレキャストPC床版に採用され<sup>12)</sup>、また、PC電柱のASR対策としてH28年4月から全PC電柱にフライアッシュを混入している<sup>13)</sup>。

（四国）

土木学会四国支部では、フライアッシュを結合材として扱うように指針<sup>14)</sup>を制定し、フライアッシュの利用促進が図られている。

（九州）

長崎県土木部では、フライアッシュコンクリートの県の発注工事での普及を図るため、「長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針」<sup>15)</sup>を制定した上で、長崎県土木共通仕様書を改訂している。仕様書では、セメントの一部と置換して、フライアッシュを混和材として用いる場合には、水セメント比を水結合材比に読み替え可能としている。

（全国各地域での生コン、製品工場への供給）

消費地での中継サイロの設置や、生コンの標準化の取組み、フライアッシュコンクリートのJIS認証生コン工場の広がりなどで、多くの地域で出荷体制が整えられている。また、コンクリート製品工場でのフライアッシュの恒常的な利用も進められている。

### 4.2 地域での研究会活動

フライアッシュの利用拡大に向けて、地域では研究会活

動が継続されている。北海道では、産官学による技術検討委員会「産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会」(北海道土木技術会)が、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の品質や流通の仕組みを含めたシステムとしての利用技術構築を検討している。中部地域では、「グリーンクリート研究会」が、砕砂に高炉スラグ細骨材とフライアッシュを加えることによる骨材資源の枯渇、価格高騰などの課題に対応した環境負荷・ひび割れリスクの低い、高耐久な「グリーンクリート」の開発、普及に取り組んでいる。また、四国では、産官学による研究会「建設関連分野の環境負荷低減に関する研究会」が、フライアッシュと銅スラグの利用拡大を目的に活動している。

### 4.3 用途開発など

フライアッシュの適用拡大に繋がる用途開発などの取組みの例を以下に示す。

#### (1) 低炭素型コンクリート

低炭素型コンクリートはセメントの一部をCO<sub>2</sub>排出量の少ない高炉スラグ微粉末、フライアッシュに大量置換することで、一般的なコンクリートに比べてCO<sub>2</sub>排出量を大幅に低減させたコンクリートで、実績も増えている。国立研究開発法人土木研究所らは設計・施工ガイドライン(案)を作成している<sup>16)</sup>。また、(一社)日本建設業連合会では、施工高あたりの原単位(t-CO<sub>2</sub>/億円)に数値目標を掲げてCO<sub>2</sub>排出量の削減に取り組んでいる<sup>17)</sup>。

#### (2) ジオポリマー

ジオポリマーは高炉スラグやフライアッシュのようなシリカとアルミナを含む粉体とアルカリ刺激剤を使用した固化体でセメントを使用しないコンクリートである。すでに海外では、フライアッシュを水ガラスと水酸化ナトリウム溶液で混練する手法がプレキャスト材、現場打設で実用化段階であるといわれている。フライアッシュはCa含有量が低いことからフライアッシュを利用したジオポリマーは耐酸性が高いことが知られ、国内でも試験施工が行われている<sup>18)</sup>。

#### (3) 高品質フライアッシュ

フライアッシュ原粉をロータリーキルンによる加熱燃焼(未燃分の自然除去)処理して、強熱減量1%以下のJIS規格のフライアッシュを生産する技術が開発され、既に、実機生産により、コンクリート用に高品質フライアッシュとして供給されている<sup>19)</sup>。

## 5. おわりに

電気事業においては、電力の安定供給を果たすために、今後の石炭火力発電所の新增設、石炭灰のセメント原料での利用の限界の状況を見据え、石炭灰の安定した有効利用先を確保して行かなければならない。

60年の実績のあるコンクリート用フライアッシュは有効利用先として重視していかなければならない。石炭火力発電所での石炭、燃焼運転条件に起因するフライアッシュ

原粉の品質変動要因が増える状況で、コンクリート用フライアッシュの供給拡大を図るためには、コンクリートの長期耐久性、地球温暖化対策としての混合セメント・低炭素コンクリートへのニーズの高まりなどを理解して、以下の課題などに取り組む必要があると考える。

(生産面)

- 要求品質を確保したコンクリート用フライアッシュの回収量の確保、ブレンディングサイロなどによる品質の安定

(供給面)

- 生コンでの混和材利用拡大、フライアッシュセメントへの供給拡大

(利用技術面)

- 品質変動を吸収するコンクリート技術の高度化、仕様書への反映、規格・マニュアル類の改訂・整備

### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー基本計画，2014.4.
- 2) 電気事業連合会：電気事業のデータベース (INFOBASE 2016).
- 3) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し，2015.7.
- 4) 日本フライアッシュ協会：石炭火力発電所位置図，日本フライアッシュ協会HP.
- 5) (公社)日本コンクリート工学会：コンクリートにおける未利用資源の利用拡大に関する特別委員会報告書，p.15, 2016.8.
- 6) (一財)石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書(平成26年度実績)，2016.3.
- 7) 久保哲司ら：フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発－北陸地方での経緯と実績－，コンクリート工学，pp.914-919, 2016.9.
- 8) 閣議決定：地球温暖化対策計画，2016.5.
- 9) 都市の低炭素化の促進に関する法律(エコまち法)
- 10) 土木学会：コンクリートライブラリー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.
- 11) 榊原直樹ら：フライアッシュコンクリートを用いた高耐久床版の施工－国道283号 釜石道路工事 向定内橋(仮称)－，橋梁と基礎，2015.9.
- 12) 西田勝幸ら：富山新港火力発電所 LNG 受入棧橋の施工，電力土木，2016.11.
- 13) 参納千夏男ら：PC電柱のフライアッシュによるASR抑制対策，電力土木，2017.1.
- 14) 土木学会四国支部：四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針，2015.3.
- 15) 長崎県土木部：長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針，2015.1.
- 16) 国立研究開発法人土木研究所ら：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(I)－低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン(案)－
- 17) (一社)日本建設業連合会：低炭素型コンクリートの普及促進に向けて
- 18) 山本武志：フライアッシュに対する電力業界の取組み，土木学会誌，pp.16-19, 2017.7.
- 19) 佐藤喜昭：石炭灰利用に関する開発事例，土木学会誌，pp.28-29, 2017.7.

【2017年8月31日受付】