

コンクリート用混和材

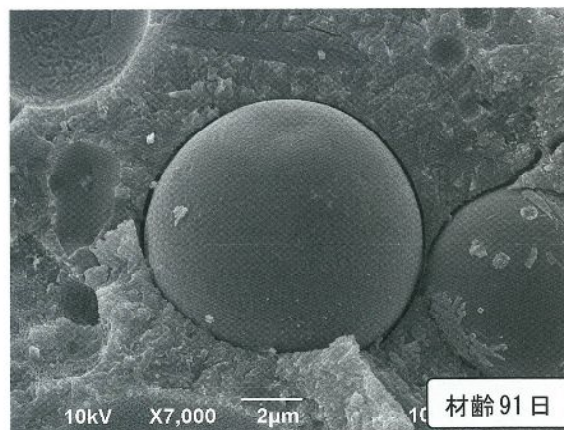
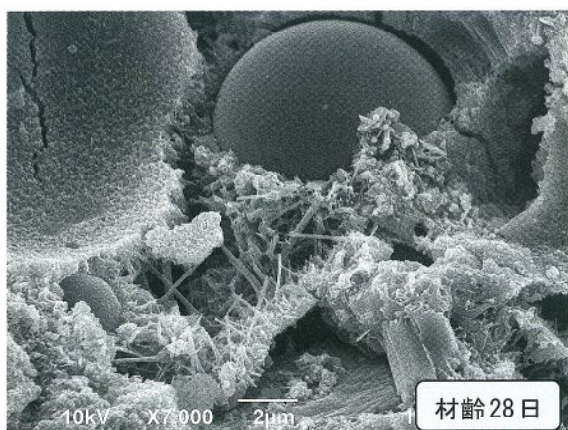
高品質フライアッシュ(CfFA)

国土交通省新技術情報提供システム NETIS 登録技術

技術名称 コンクリート混和材 (CfFA: 改質フライアッシュ)

登録番号 QS-100005-A

CfFA ポズラン反応の経時変化



研究・技術開発

大分大学工学部 コンクリート工学研究室

株式会社ゼロテクノ

製造・販売・事業化支援

株式会社ゼロテクノジャパン



人と地球に優しい技術を創造する

株式会社 **ゼロテクノ**
Zero-emission Technology

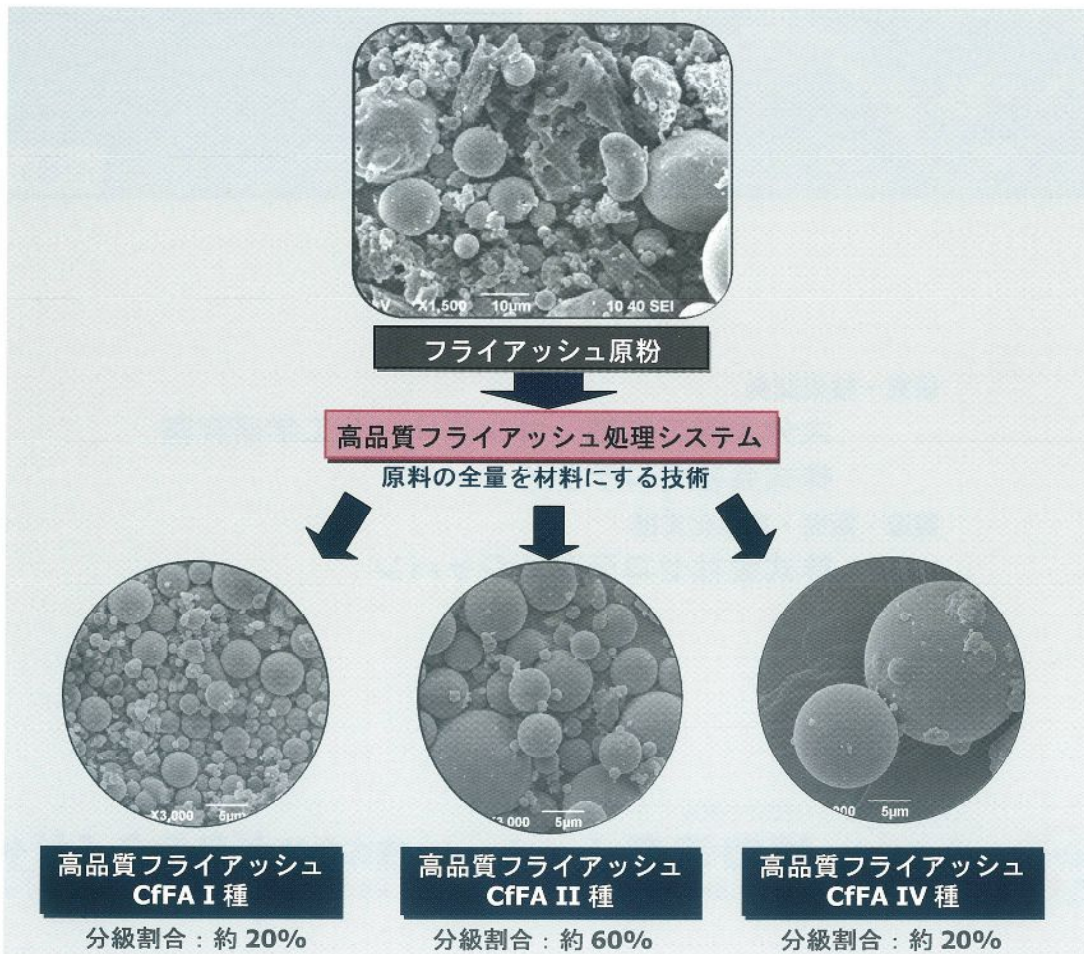


株式会社 **ゼロテクノジャパン**
Zero-emission Technology Japan

目次

1. フライアッシュとは？
2. コンクリート用フライアッシュ
3. フライアッシュを使用することの利点
4. フライアッシュの有効利用における課題
5. 高品質フライアッシュ（CfFA）処理システム
6. 高品質フライアッシュ（CfFA）の物性
7. 高品質フライアッシュ（CfFA）の効果
8. 現代のコンクリート問題と高品質フライアッシュ（CfFA）
9. コンクリート構造物の品質確保と耐久性向上に向けての展開
10. 高品質フライアッシュ（CfFA）コンクリート施工事例
11. ゼロテクノジャパン大分事業所

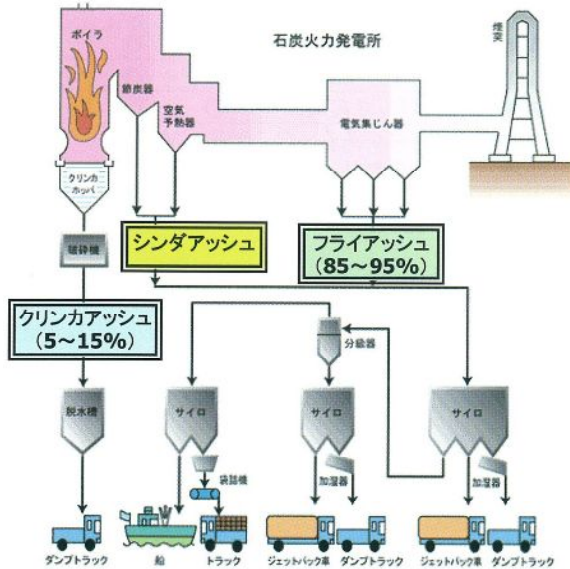
～石炭灰を高品質フライアッシュ（CfFA）にする技術～



1. フライアッシュとは？

石炭火力発電所では、電気を得るため微粉炭機で粉碎した石炭を燃焼させる際、石炭灰が副産される。その石炭灰のうち、微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから電気集塵器で採集された球状ガラス質の灰を「フライアッシュ（飛灰）」という。また、燃焼ガスが節炭器・空気予熱器などを通過する際に落下採取された石炭灰をシンダアッシュ、微粉炭燃焼ボイラ底部で回収された石炭灰を砕いたものをクリンカアッシュという。これらの石炭灰のうち、フライアッシュは85～95%を占める。

■石炭灰の生成過程



■石炭灰の分類

フライアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集じん器で採取された石炭灰
シンダアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスが、空気予熱器・節炭器などを通過する際に落下採取された石炭灰
クリンカアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの炉底に落下して採取された石炭灰

(参考：財団法人 石炭エネルギーセンター ホームページ)

2. コンクリート用フライアッシュ — JIS 規格 (JIS A 6021)

フライアッシュの用途は地盤改良材や道路材、農水産用資材等、多岐にわたるが、コンクリート材料としての利点は大きく、その一部はコンクリート用フライアッシュ (JIS A 6201)、フライアッシュセメント (JIS R 5213) として JIS (日本工業規格) 化されている。

■フライアッシュの用途

- コンクリート材料
(コンクリート用混和材・フライアッシュセメント・細骨材)
- 地盤改良材
- 道路材 (アスファルトフィーラー材)
- 建 材 (建築用内外装材・窯業材)
- 農水産 (肥料・人工漁礁材)
- その他 (スラリー材・排煙脱硫材等)

■コンクリート用フライアッシュ JIS 規格 (JIS A 6201)

項 目	フライアッシュ				
	I 種	II 種	III 種	IV 種	
二酸化ケイ素(%)	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	45μm ふるい残分(%) (網ふるい方法)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積(cm ² /g) (ブレン方法)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 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

3. フライアッシュを使用することの利点

フライアッシュを生コンに混和することにより、単位水量の低減、ワーカビリティの向上、ポゾラン反応による長期強度発現、アルカリ骨材反応の抑制等の効果が得られる。

■コンクリート材料としての利点

- 単位水量の低減
- 材料分離抵抗性の向上
- ブリーディングの抑制効果
- **ポゾラン反応**による長期強度発現性
- 組織の緻密化による水密性の向上
- アルカリ骨材反応の抑制効果
- ワーカビリティ改善によるポンプ圧送性向上
- コンクリート仕上がり面の綺麗さ

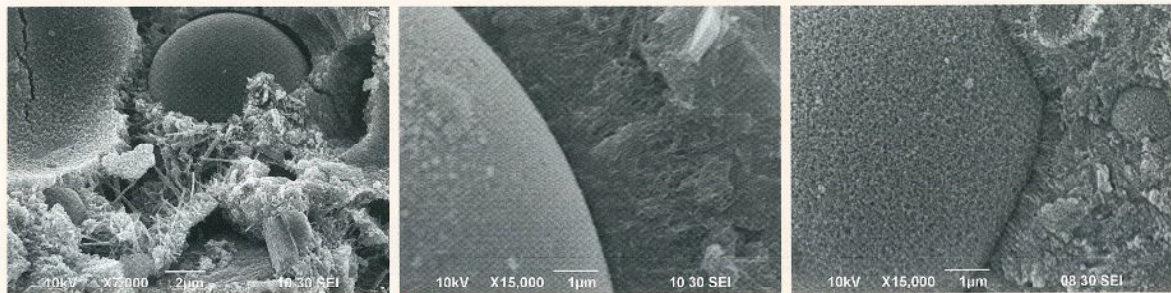
■フライアッシュの種類別使用目的

使用目的	フライアッシュの種類		
	I種	II種	IV種
①単位水量低減	◎	◎	○
②流動性の増大	◎	◎	○
③乾燥収縮ひび割れ抑制	◎	◎	◎
④水和熱の低減	◎	◎	—
⑤アルカリシリカ反応抑制	◎	◎	○
⑥細骨材の粒形・粒度の改善	○	◎	◎

◎：非常に効果がある，○：効果がある
I種、II種は結合材，IV種は結合材として用いない

■ポゾラン反応とは

それ自体に水硬性はないが、ポゾランに含まれている可溶性の二酸化珪素（ SiO_2 ）がセメントの水和の際に生成される水酸化カルシウム（ Ca(OH)_2 ）と常温で徐々に化合して、不溶性の安定的な珪酸カルシウム水和物等を生成する。これをポゾラン反応と言う。これによりコンクリートは長期的に強度を発現する。また細孔充填による組織の緻密化により密実な水和物組織を形成するため、外部からの劣化因子の浸入を妨げ耐久性向上につながる。

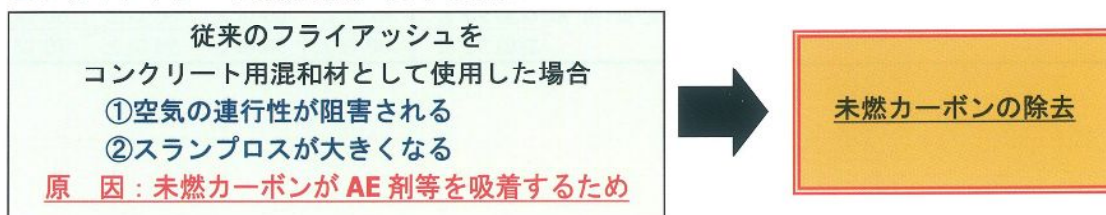


材齢 28 日 (7,000 倍) → 材齢 91 日 (15,000 倍) → 材齢 589 日 (15,000 倍)
CfFA 混和セメントペーストの経時変化 (電子顕微鏡 SEM 写真)

4. フライアッシュの有効利用における課題

このように、高いポゾラン活性を有するフライアッシュは、コンクリート材料として非常に有用であるため、JIS 規格化され、また、国土交通省のグリーン購入法では特定調達品目にも指定されている。しかし、現在まで日本では有効利用が促進されていないのが実状である。それは、フライアッシュ中に残存する未燃カーボンが、コンクリートのフレッシュ性状に悪影響を及ぼすからである。未燃カーボンはその多孔質な粒子により AE 剤（空気連行剤）等を吸着し、さらにその量の変動により空気連行に関して不規則な挙動に導くことがある。

■フライアッシュの有効利用における課題



JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」では、フライアッシュの特性に関して様々な規定値が決められているが、「強熱減量」(LOI)を未燃カーボン量の指標値としている。未燃カーボン量は通常、LOI とほぼ等しいと仮定されているが、図1からもわかるように、LOI にはフライアッシュに含まれる未水和物の脱水あるいは炭素化によって失われる結合水や二酸化炭素も含むことになるので、未燃カーボン量よりも常に大きな値となる。

■強熱減量と未燃カーボン量の関係

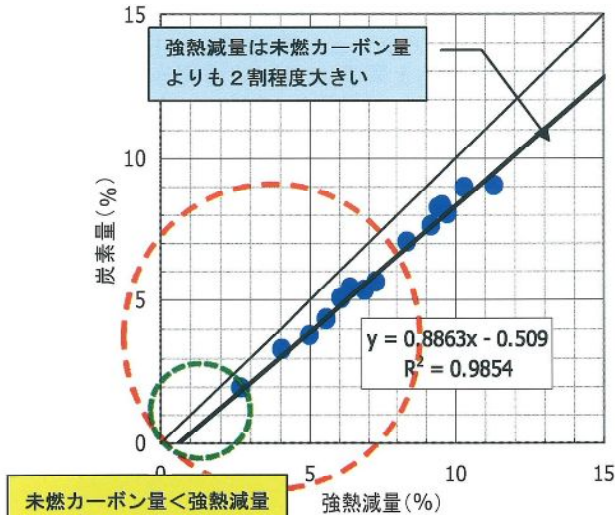


図1 強熱減量と未燃カーボンの関係

強熱減量は未燃カーボン量の指標値

未燃カーボン量は強熱減量と直線関係にあるが、両者は一対一に対応せず、強熱減量の方が常に大きな値を示す。これは、強熱減量には水和物の脱水あるいは炭素化によって失われる結合水や炭酸ガスの分解・逸散が含まれるからである。

注) 強熱減量: 蒸発可能水を除去(105~110°Cで乾燥)した後に、高温で強熱した際の試料の減少量であり、一般には、強熱前あるいは強熱後の試料の質量に対する百分率で表わされる。コンクリート用材料の強熱減量は、一般には、1000°C程度まで強熱して求められる。フライアッシュの場合は未燃炭素量を確認する指標として用いられる。

フライアッシュ中の未燃カーボン量は、排出元の発電所及びその排出時期により変動する。これは、石炭火力発電所にて使用される石炭の種類や起源が常に均でないこと、発電所では電力需要に応じて操作を変えること(日間変動)、石炭燃焼ボイラの設計や集塵機のタイプが各発電所によって異なることなどに、起因する。それ故、フライアッシュの品質の変動がコンクリートの品質管理をより困難なものにすることから、コンクリート製造者はフライアッシュをコンクリートには積極的に使用したがないのが実状であった。そこで、当研究室では、コンクリート用混和材として常に安定した品質のフライアッシュ(LOIを1.0%以下に低減した高品質フライアッシュ(CFFA))にする技術確立した。

図2は、フライアッシュ中の未燃カーボン量の変動と炭種の違いがコンクリートの空気量に及ぼす影響を示している。この図からは、LOIが高ければ高いほどコンクリートの空気連行はより低くなり、LOIが1.0%以下であれば、炭種に関わらず、悪影響を与えることなく安定した空気量が得られることがわかる。

■強熱減量と空気量の関係

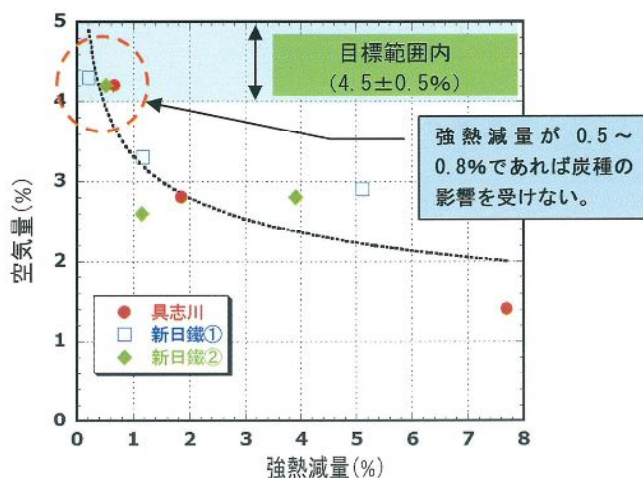


図2 強熱減量がコンクリートの空気量に及ぼす影響

強熱減量1.0%以下に低減する理由

各発電所から排出されたフライアッシュの強熱減量を変化させた場合について、強熱減量とコンクリートの空気量の関係を調査(同一のコンクリート配合)。強熱減量が大きい値を示すほど、すなわち、フライアッシュに含まれる未燃カーボン量が多いほど空気量は小さく、空気連行剤(AE剤)の効果が認められない。強熱減量が1.0%以下であれば、空気量にはほとんど影響を与えない。

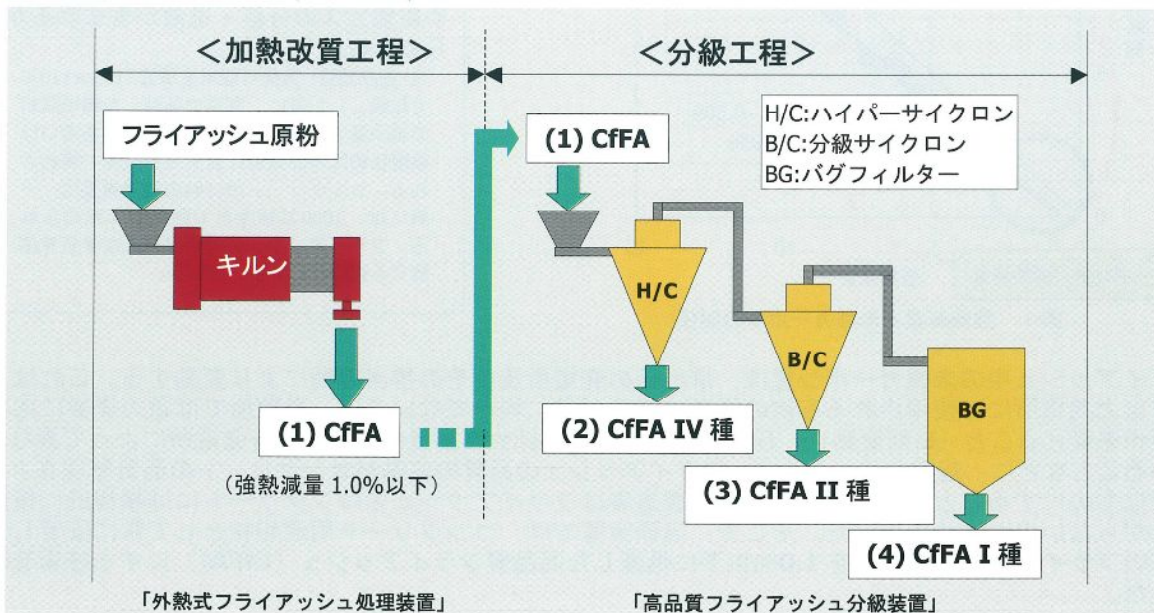
5. 高品質フライアッシュ (CfFA) 処理システム

高品質フライアッシュ (CfFA) 処理システムは、加熱改質工程と分級工程とで構成されている。フライアッシュ原粉は原料ホッパーに投入された後、ロータリーキルン「外熱式フライアッシュ処理装置」を通すことで加熱改質され、未燃カーボン量 (強熱減量) を 1.0% 以下に抑えた高品質フライアッシュ (CfFA : **Carbon-free Fly Ash**) にする。 (JIS II 種相当)

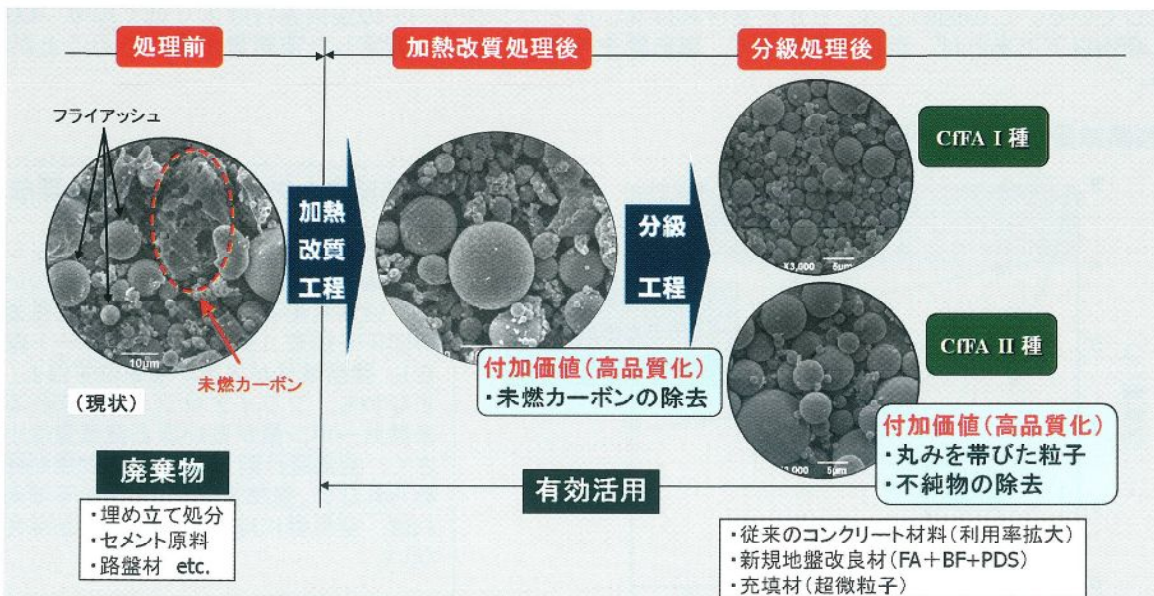
カーボン フリー フライ アッシュ

さらに粒度別に分級するため、加熱改質された CfFA を「高品質フライアッシュ分級装置」へ投入。この分級工程では、まずハイパーサイクロン (H/C) にて CfFA を風力解砕すると同時に JIS IV 種相当の CfFA IV 種を回収、次に分級サイクロン (B/C) にて JIS II 種相当の CfFA II 種、そして最後にバグフィルター (BG) で JIS I 種相当の CfFA I 種を回収する。これらの CfFA は未燃カーボンが除去されただけでなく、I 種、II 種においては、粒形の整った丸みを帯びた粒子となる。

■高品質フライアッシュ処理システム



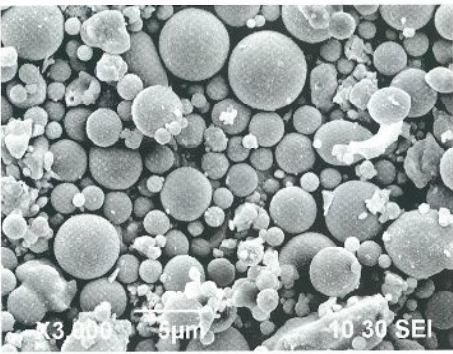
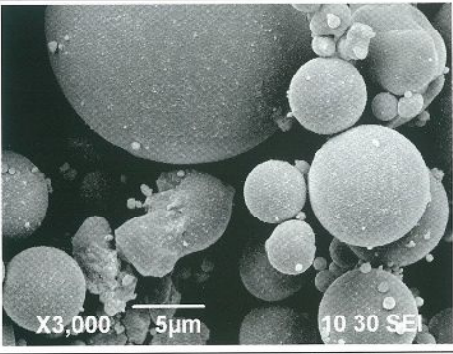
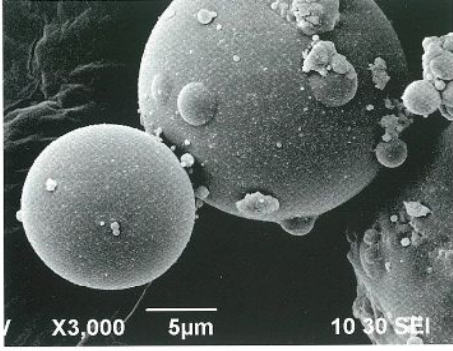
■産業廃棄物から高品質フライアッシュ (CfFA) へ



	短軸/長軸	円形度	真円度
原粉	0.61	0.82	1.52
高品質フライアッシュ	0.91	0.91	1.24

- 円形度は粒子が球ならば1となり、立方体なら0.65となる。
- 真円度は1に近いほど円に近く、値が大きいほど粒子が角ばっている事を示す。

6. 高品質フライアッシュ (CfFA) の物性 (参考例)

種類	電子顕微鏡 SEM 写真 (倍率: 3000)	物性
CfFA I 種		<p>平均粒径: 2~3 ミクロン程度 真密度: 2.3 g/cm³程度 強熱減量: 1.0%以下 比表面積: 約 9,100cm²/g <small>(ブレン方法)</small></p> <p>使用方法: 高流動コンクリート コンクリート補修材 コンクリートボード シリカフェーム代替等</p>
CfFA II 種		<p>平均粒径: 10~20 ミクロン程度 真密度: 2.3 g/cm³程度 強熱減量: 1.0%以下 比表面積: 約 4,200cm²/g <small>(ブレン方法)</small></p> <p>使用方法: 主にセメント一部代替等</p>
CfFA IV 種		<p>平均粒径: 30~60 ミクロン程度 真密度: 2.3 g/cm³程度 強熱減量: 1.0%以下 比表面積: 約 2,000cm²/g <small>(ブレン方法)</small></p> <p>使用方法: 細骨材(砂)一部代替等</p>

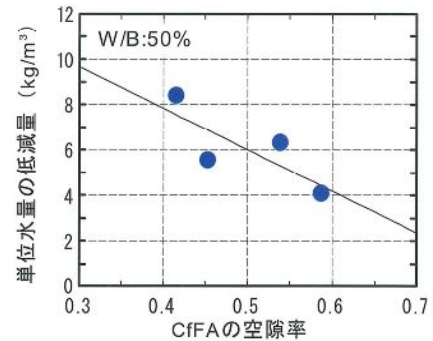
■参考例: CfFA の試験結果 (認証機関の試験成績書からの抜粋)

0.4 密度			
試験結果	試験項目		測定値
	二酸化けい素	(%)	67.7
	湿分	(%)	0.0
	強熱減量	(%)	0.9
	密度	(g/cm ³)	2.23
	粉末度 (比表面積)	(cm ² /g)	4310
	フロー値比	(%)	102
	活性度指数	材齢 28 日 (%)	83
材齢 91 日 (%)		97	

7. 高品質フライアッシュ (CfFA) の効果

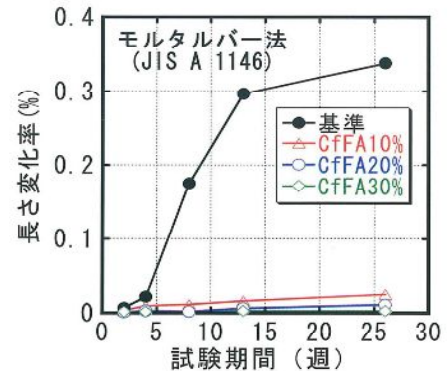
単位水量の低減

CfFA は微細な球状の粒子であるため、セメントと置換するとフレッシュコンクリートのワーカビリティを改善することから単位水量の低減ができる。水セメント比が 50% の通常のコンクリートに対して、セメントの 20% を CfFA に置換した場合、CfFA の種類によって差が生じるが、 $4\sim 8\text{kg/m}^3$ の単位水量を低減することができる。また、空隙率（粉体を一定方法で充填した場合の粒子間の空隙の比率）が小さいほど低減効果が大きい。



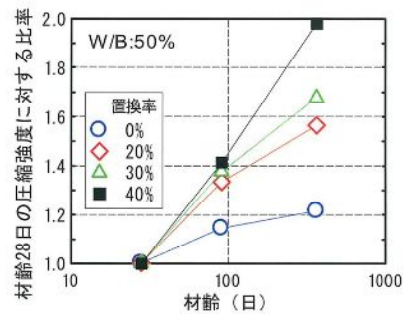
アルカリ骨材反応の抑制

CfFA のポズラン反応により、コンクリート中のアルカリ性である水酸化カルシウムが消費され、コンクリート中のアルカリ性が低下しアルカリ骨材反応を抑制する。図は化学法で「無害でない」と判定された骨材を使用した基準モルタル（CfFA 無混和）と CfFA 置換率 10, 20, 30% のモルタルで行ったモルタルパー法の結果である。CfFA 無混和の場合、膨張率（長さ変化率）が規定の 0.1 を大幅に超えるのに対し、CfFA を混和した場合は規定を大幅に下回ることがわかる。また、CfFA 混和率が高いほどその効果が高い。



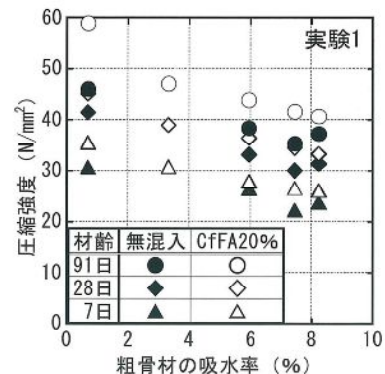
長期強度の増進

CfFA コンクリートは、ゆっくり継続するポズラン反応によって長期にわたって強度が増進する。図は材齢 28 日の圧縮強度に対する比率を示しているが、通常のコンクリートが材齢 1 年で 1.2 倍程度であるのに対して、CfFA を 20% 置換したコンクリートは 1.5 倍を超え、置換率が大きくなるほど強度の増進が大きい。また、通常のコンクリートは数年程度で強度は頭打ちとなるが、CfFA コンクリートは相当長期にわたって強度が増進する。



再生骨材の使用

天然骨材資源の枯渇が危惧され、再生骨材の利用に期待がかかる一方、再生骨材の吸水率が高いことにより、コンクリートの耐久性低下が懸念される。CfFA を混和することにより、低品質な再生骨材を使用した場合でも耐久性を低下することなく、使用が可能となる。図は吸水率が様々な再生骨材を使用した CfFA 無混和コンクリートと CfFA コンクリートの圧縮強度を調べた結果であるが、CfFA コンクリートは無混和に比べ常に強度が高くなっている。



仕上がり面の美しさ

CfFA を混和すると、マイクロフィラー（充填）効果及びポズラン反応の効果によりコンクリートが緻密になるため、コンクリートの表面が滑らかで美しくなる。



8. 現代のコンクリート問題と高品質フライアッシュ（CfFA）

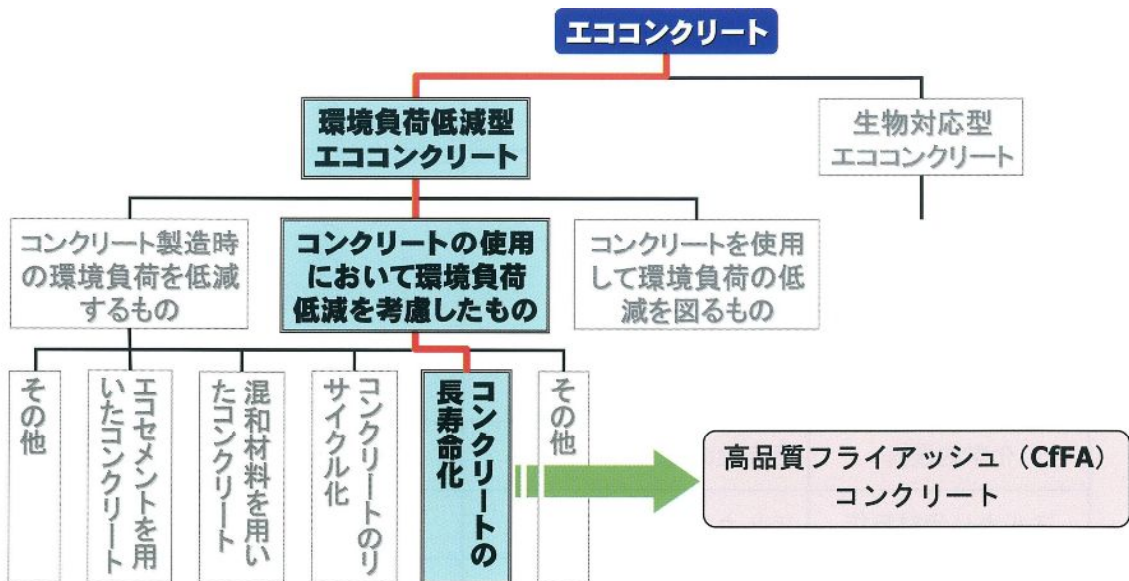
コンクリートの問題	主な対策	フライアッシュで解決可能かの可否			
		従来		高品質フライアッシュ (CfFA)	
加水問題	ポンパビリティーの向上 (空気量の確保)	△		○	
材料分離	単位水量の低減	○		○	
コールドジョイント	単位水量の低減	○		○	
沈下ひび割れ	単位水量の低減	○		○	
鉄筋腐食	炭酸化の抑制	○		○	
炭酸化	単位水量の低減	○		○	
	密実性の向上	○		○	
中性化	単位水量の低減	△*		△*	
塩害	密実性の向上	○		○	
化学的侵食	密実性の向上	○		○	
アルカリ骨材反応	アルカリ分の抑制	○		○	
凍害	空気量の確保	×	×	○	○
	単位水量の低減	○		○	○
温度ひび割れ	単位セメント量の低減	○		○	
乾燥収縮ひび割れ	単位水量の低減	○		○	
	単位セメント量の低減	○		○	
すりへり作用	密実性の向上	○		○	
その他の特性					
フィニッシュャビリティー		○		○	
長期強度の増進		○		○	
AE 剤の使用量		×		○	
フライアッシュの普及拡大		×		◎	

*中性化について：フライアッシュの混和によってコンクリート中のアルカリ総量が低下するため、中性化速度そのものは速くなる。しかし、ポゾラン反応によってコンクリート自体は密実になるため炭酸化は抑制されることから、鉄筋腐食への抵抗性は高くなる。

9. コンクリート構造物の品質確保と耐久性向上に向けての展開

公益社団法人 日本コンクリート工学協会の「エココンクリート研究委員会報告書」によると、地球環境への負荷を低減できるコンクリートを「環境負荷低減型エココンクリート」と言い、長寿命コンクリートやポゾラン質混和材を用いたコンクリート等がそれに該当するとしている。然もすれば産業廃棄物となり得る高炉スラグやポゾラン反応のあるフライアッシュなどの混和材をセメントの一部に代替して使用することにより、産業廃棄物の削減及びセメント製造時に伴う CO₂ 排出量の低減を配慮したコンクリートは、エコマテリアルである。高品質フライアッシュ (CfFA) はまさにその様な「エココンクリート」を造りだすコンクリート用混和材と云える。

■エココンクリートを造りだす高品質フライアッシュ (CfFA)



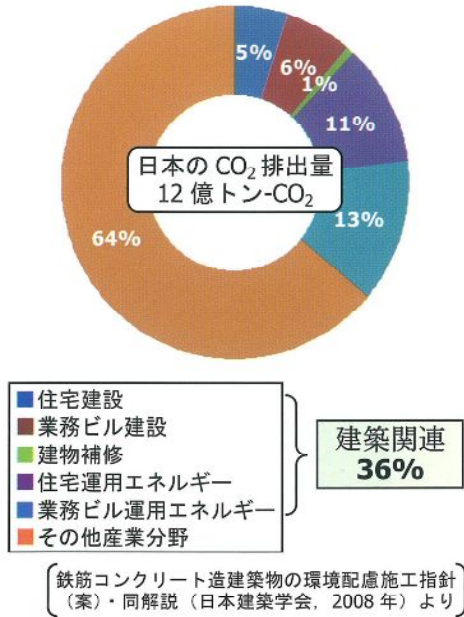
■CfFA 混和による耐久性の向上

<p>●ポゾラン (CfFA)</p> <p>「それ自体は水硬性をほとんど持たないが、水の存在のもとで水酸化カルシウムと常温で反応して不溶性の化合物を作って硬化する鉱物質の微粉末の材料</p> <p>CfFA + CH + H → C-S-H</p> <p>SLOW</p>	<p>(1) 組織の緻密化</p> <p>→ アルカリ性の低下 → 中性化促進</p> <p>⇒ ポゾラン反応で組織の緻密化 → 劣化因子浸入阻止</p> <p>→ 炭酸化の抑制 及び 鉄筋腐食への抵抗性向上</p>
	<p>(2) アルカリ性の低下</p> <p>→ アルカリ骨材反応抑制効果</p>

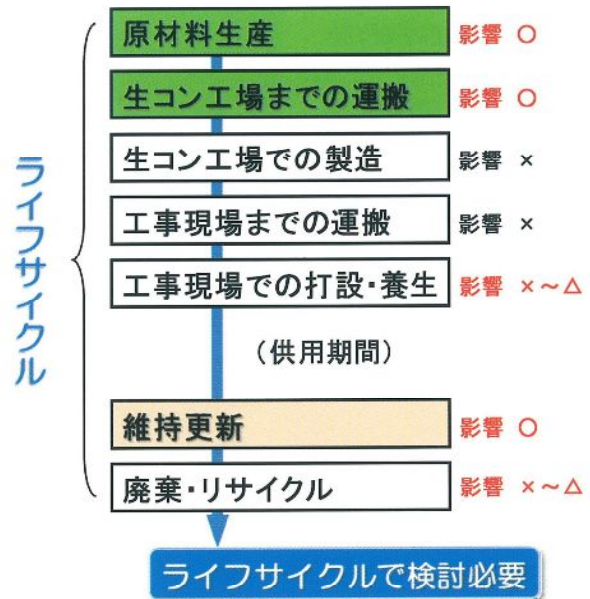


建築物の長寿命化技術
耐用年数を 100 年以上に設定可能なコンクリート

■ CO₂の排出量

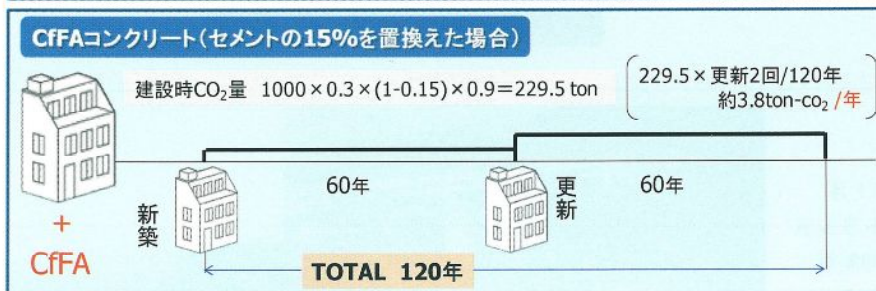
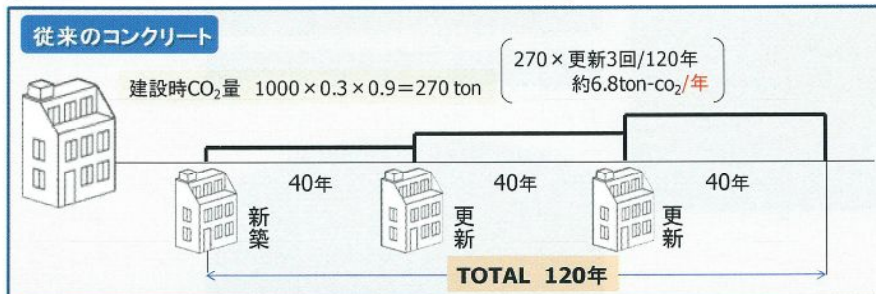


■ 建物のライフサイクルにおける影響



■ CFFA をセメント一部代替として混和した場合の CO₂ 削減効果の一例

セメント製造時 1ton 当たり CO₂0.9ton 排出
→（生コンのセメント量 300kg/m³と仮定）



40年比では 56% (=3.8/6.8)

年間 約 3ton を削減 (=6.8-3.8)

120年間で約 350ton を削減可能

- 建物のライフサイクルで考えればさらに多くの削減が可能
- 全国に建設されるコンクリート構造物を対象に考える必要有

→ 不確定な要素が多く、研究開発の課題の一つ

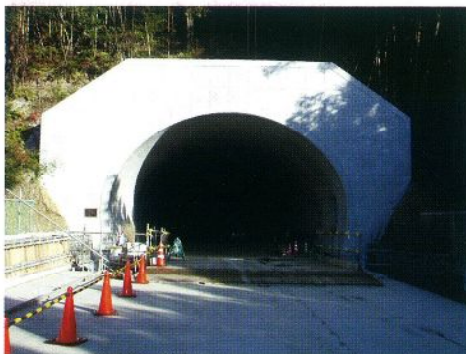
●橋梁下部工工事

【完成年度】平成22年3月
 【ペースメント】高炉セメントB種
 【使用目的】ひび割れ抑制等
 【CfFA使用量】45 kg/m³
 *セメント代替(内割)



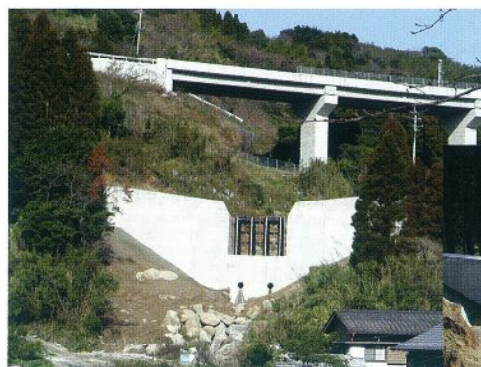
●トンネル新設工事

【完成年度】平成22年2月
 【ペースメント】高炉セメントB種
 【使用目的】ひび割れ抑制等
 【CfFA使用量】60 kg/m³
 *細骨材代替(外割)



●砂防ダム工事

【完成年度】平成23年1月
 【ペースメント】普通ポルトランド
 【使用目的】ひび割れ抑制等
 【CfFA使用量】30 kg/m³
 *セメント代替(内割)



●公共水産試験所

【完成年度】平成23年3月

【べーせメント】早強ポルトランド

【使用目的】ひび割れ抑制等

【CfFA 使用量】40 kg/m³

*セメント代替（内割）



●民間戸建住宅

【完成年度】平成23年7月

【べーせメント】普通ポルトランド

【使用目的】耐久性・美観等

【CfFA 使用量】47 kg/m³

*セメント代替（内割）

●公共消防庁舎

【完成年度】平成24年3月

【べーせメント】普通ポルトランド

【使用目的】耐久性等

【CfFA 使用量】74.8 kg/m³

*セメント代替（内割）



11. ゼロテクノジャパン大分事業所（モデル工場）



●大分事業所（モデル工場）



●外熱式フライアッシュ処理装置



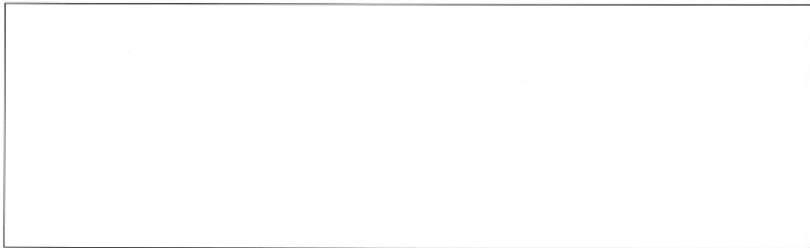
●高品質フライアッシュ分級装置



●実大模擬構造物-土木



●実大模擬構造物-建築



人と地球に優しい技術を創造する

株式会社 **ゼロテクノ**
Zero-emission Technology

本 社 : 〒870-0027 大分市末広町1丁目5番16号
TEL 097-538-6609 FAX 097-529-6687
福 岡 支 店 : 〒810-0073 福岡市中央区舞鶴1丁目4番7号
TEL 092-771-6699 FAX 092-771-6669

E m a i l : info@zerotechno.co.jp

U R L : <http://www.zerotechno.co.jp/>



株式会社 **ゼロテクノジャパン**
Zero-emission Technology Japan

本 社 : 〒870-0027 大分市末広町1丁目5番16号
TEL 097-594-1110 FAX 097-594-1109
大分事業所 : 〒879-7301 豊後大野市犬飼町久原1607-2
TEL 097-578-0004 FAX 097-578-0014

U R L : <http://www.zerotechno.co.jp/>