

令和7年（2025）10月21日  
秋田県コンクリート製品協会 技術講演会

## 脱炭素とコンクリート

株式会社 錢高組  
技術本部 顧問 榊原 弘幸

1

## 講演内容

1. 自己紹介
2. 地球温暖化と温室効果ガス
3. 建設分野で排出されるCO<sub>2</sub>
4. セメントとCO<sub>2</sub>
5. 建設工事における脱炭素技術（錢高組）
  - (1)省電力コントロールシステム
  - (2)CO<sub>2</sub>回収、固定化技術（開発中）
  - (3)環境配慮型コンクリート
6. コンクリートプレキャスト製品分野に適用可能性がある脱炭素技術
7. おわりに

2

## 1. 自己紹介

3

### 【 主な学歴 】

■1957年 札幌生まれ

■1977年4月～1981年3月 • 秋田大学 鉱山学部 燃料化学科卒

■2008年3月 • 秋田大学 大学院 博士課程修了 博士（工学）

### 【 主な職歴 】

■1981年4月～2018年6月 • 住友大阪セメント（旧住友セメント）  
研究所～執行役員 研究所長（37年間）

■2018年7月～2021年6月 • 中研コンサルタント（住友大阪関係会社） 社長（3年間）

■2021年7月～2022年3月 • 中研コンサルタント 相談役

■2022年3月～（4年目） • 錢高組 技術本部 顧問

4

## 2025年9月25日 川上先生と

明石海峡大橋の主塔登頂@Polymers-in-Concrete委員会見学会

### 明石海峡大橋 1988年着工、1998年完成

※完成時、世界最大の吊橋。2022年ヤッカル1915橋@トルコ（支間長2023m）に次いで世界2位

- ・アンカーレイジ／コンクリート 1A 14万m<sup>3</sup> (35万t)、4A 15万m<sup>3</sup> (37万t)
  - ・主塔基礎／コンクリート 2P 35.5万m<sup>3</sup>、3P 32.2万m<sup>3</sup>
  - ・主塔／高さ 300m
  - ・ケーブル／延長 30万km ・補剛桁／重量 9万 t
- ※JB本四高速HPより引用

### 【阪神淡路大震災】1995年

- ・建設当初は全長3,910m、中央支間1,990m
- ・地震による地盤ズレ発生 ⇒ 全長1m伸張

5



※JB本四高速HPより引用

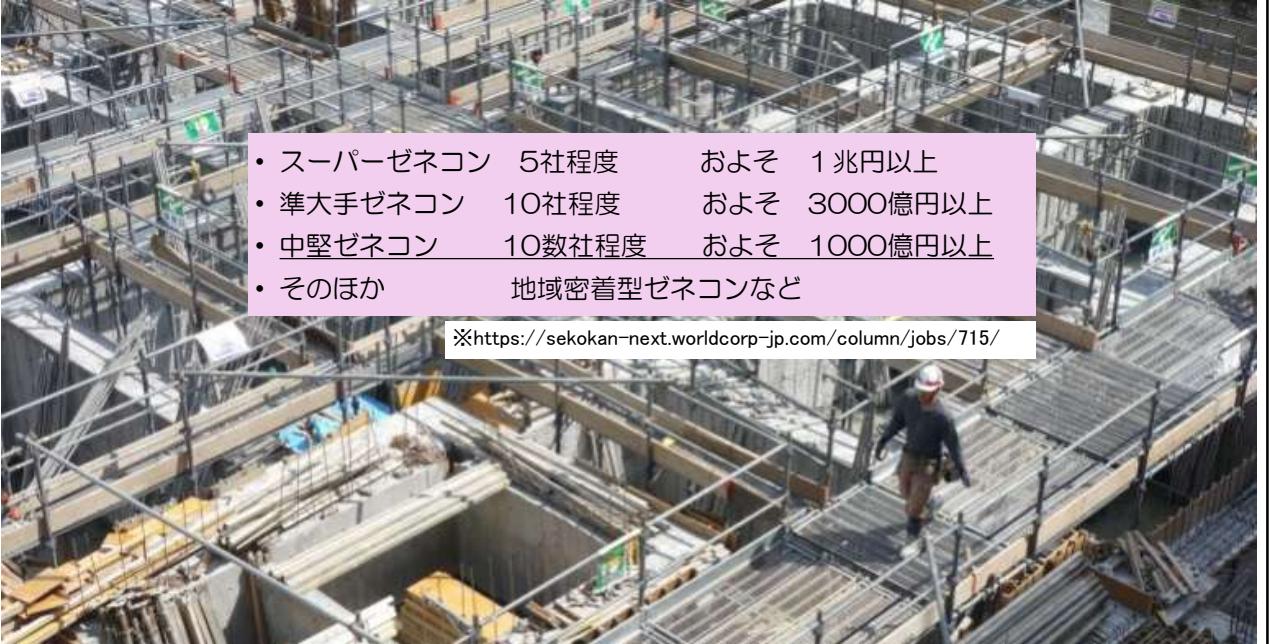


6

## 株式会社 錢高組

■所 在	本社／東京 本店／大阪
■代表者	社長 錢高久善
■創 業	<u>1705年（寶永2年）</u> <b>今年創業320年目</b>
■創 立	1887年（明治20年）
■設 立	1931年（昭和6年） 株式会社設立
■純資産	943億円（2025年3月）
■売 上	<u>1,205億円（2025年3月）</u>
■従業員数	<u>902名（2025年3月）</u>
■事業費率	<u>土木30% 建築68% 不動産2%（2025年3月）</u>

7

- 
- ・スーパーゼネコン 5社程度 およそ 1兆円以上
  - ・準大手ゼネコン 10社程度 およそ 3000億円以上
  - ・中堅ゼネコン 10数社程度 およそ 1000億円以上
  - ・そのほか 地域密着型ゼネコンなど

※<https://sekokan-next.worldcorp-jp.com/column/jobs/715/>

8

■建築事業 オフィスビル、マンション、商業施設、物流施設、学校 等

■土木事業 橋梁、トンネル、導水路、ダム、発電所 等

■施工実績

- |                                 |                   |                    |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|
| ・ <u>本願寺尾崎別院</u>                | ・東京都神田警察署         | ・ <u>種子島宇宙センター</u> |
| ・ <u>江戸東京博物館</u>                | ・ <u>あべのハルカス</u>  | ・学士会館              |
| ・京セラドーム                         | ・新余部橋梁            | ・しまなみ海道生口橋         |
| ・ <u>東京湾横断道中央トンネル</u>           | ・道路施設（NEXCO、国交省等） |                    |
| ・鉄道施設（新幹線橋梁、トンネル等）              |                   |                    |
| ・空港施設（福岡、関西、中部国際、羽田、成田等）        |                   |                    |
| ・ダム、調整池（ <u>首都圏外郭放水路排水機場等</u> ） |                   |                    |

9

## 【銭形平次誕生秘話】



- 野村胡堂氏の小説の主役に得意技がほしい。
- 主役の「平次」という名前が先に決定
- 「姓」と「得意技」を思案のある日、ビル建設現場に『設計 施工 錢高組』の看板と社章の『錢』を発見
- 得意技に投げ銭決定  
名前は、「錢高」の「タカ」を逆にして「ゼニカタ」に決定

10

## 2. 地球温暖化と温室効果ガス

11

### 講演のテーマ

地球温暖化抑制対策として、ほとんど企業が掲げている目標

「**2050年にはカーボンニュートラル (CO<sub>2</sub>排出量ゼロ)**」



すでに開発された、将来開発されるであろう脱炭素技術により

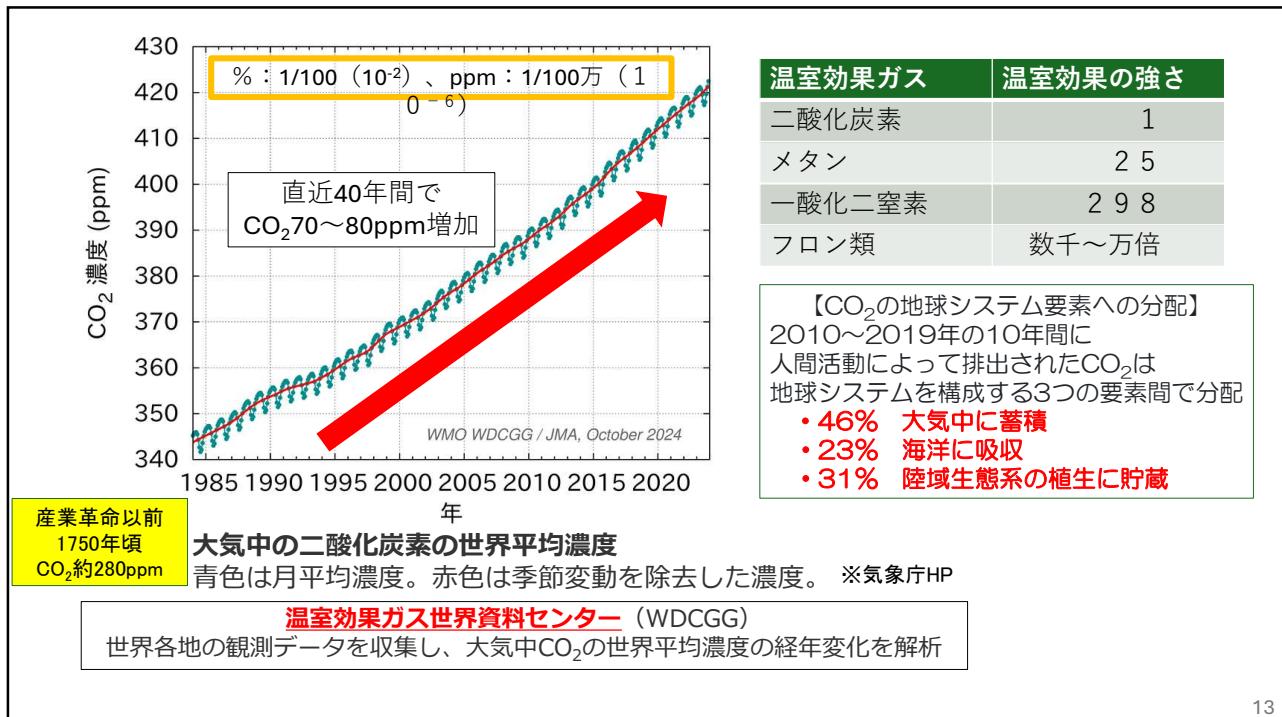
- カーボンニュートラル (CO<sub>2</sub>回収固定量 = 排出量)
- カーボンネガティブ (CO<sub>2</sub>回収固定量 > 排出量)

を達成することで地球大気中のCO<sub>2</sub>濃度を下げ、温暖化を抑制

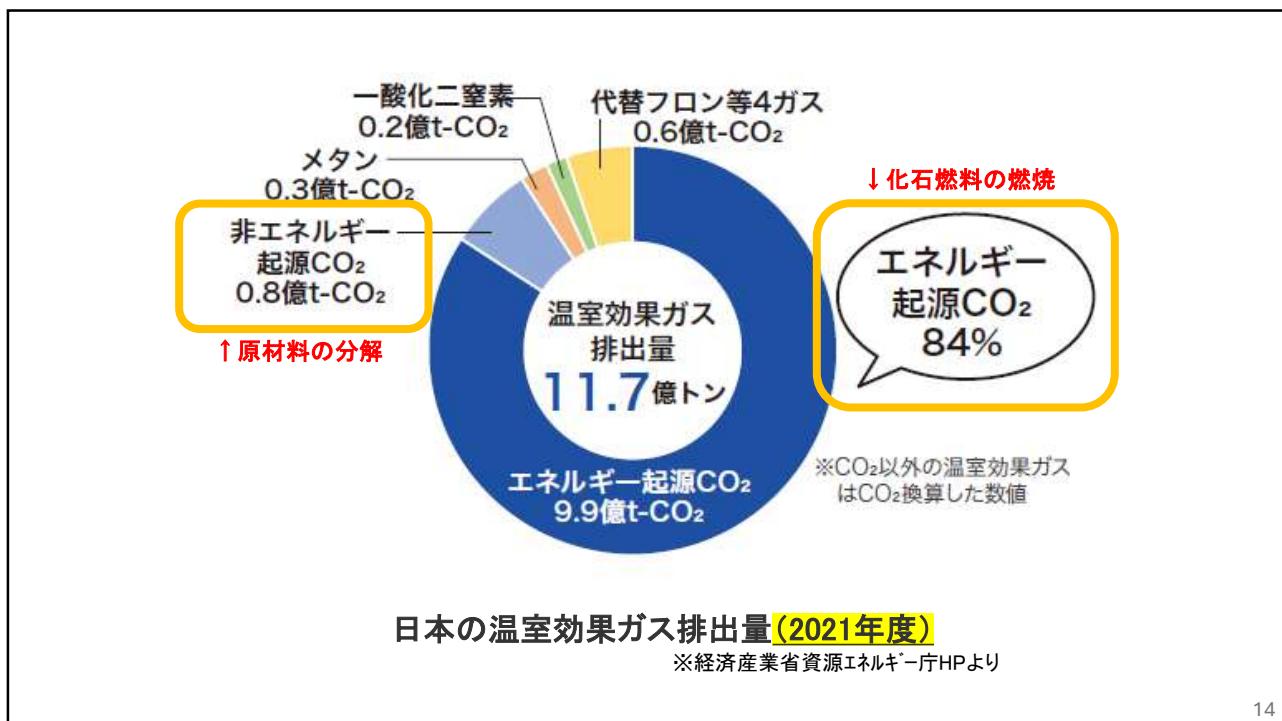


建設分野でどうやって達成していくのか？

12



13



14

## 地球温暖化の主な要因 温室効果ガス (Greenhouse Gas) GHG 温室

### ◇太陽で温められた大気

- ・ 地球は赤外線として熱を宇宙にある程度放出

### ◇温室効果ガス

- ・ 赤外線を蓄積する性質を保有 ⇒ 放出される熱を大気に留め温度を上昇
- ・ ただし、温室効果ガスがなければ、地球の平均温度はマイナス19°C ?!  
現在の地球で生物が繁栄できる環境が保たれているのは、温室効果ガスの働き
- ・ 種類：二酸化炭素CO<sub>2</sub>、メタンCH<sub>4</sub>、一酸化二窒素N<sub>2</sub>O、  
ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)  
六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)、三フッ化窒素(NF<sub>3</sub>)

### ◇地球温暖化

- ・ 産業革命以降、人類が排出する温室効果ガスの量が急増 ⇒ 地球温暖化の主な要因
- ・ 温室効果ガスの削減に向けて各国が取り組み中

※ケリラボHPより作成

15

## 【サプライチェーン排出量】

サプライチェーン排出量とは、モノが作られて廃棄されるまでの排出されたCO<sub>2</sub>総量

- ・ 事業者自らの排出だけでなく事業活動に関係するあらゆる排出を合計した排出量  
つまり、原材料調達・製造・物流・販売・廃棄など、一連の流れ全体から発生する温室効果ガス総排出量のこと

$$\text{・ サプライチェーン排出量} = \text{Scope1排出量} + \text{Scope2排出量} + \text{Scope3排出量}$$

GHG (Greenhouse Gas : 温室効果ガス) プロトコル（決めごと）とは、

世界資源研究所（WRI）と持続可能な発展のための世界経済人会議（WBCSD）により開発された、組織が温室効果ガス排出を測定し、報告するための国際基準です。

※経済産業省資源エネルギー庁HP

16

### 【企業が自社の活動を通じて排出しているGHG（温室効果ガス）の分類】

◆Scope1

「自社が直接排出するGHG」

燃料の燃焼、製品の製造などを通じて企業・組織が直接排出するGHG

◆Scope2

「自社が間接排出するGHG」

他社から供給された電気・熱・蒸気をすることで、間接的に排出されるGHG

### 【サプライチェーン上で発生する自社以外のGHG排出も対象】

◆Scope3

「原材料の仕入れや販売後に排出されるGHG」

自社から見た上流側、下流側から排出されるGHG

建物や製品の廃棄、社員の通勤・出張

※経済産業省資源エネルギー庁HP

17

### 上 流



- ①購入した製品（原材料など）・サービス
- ②資本財、③Scope1,2に含まれない燃料およびエネルギー関連活動、⑤廃棄物、⑥出張、⑧リース資産
- ④輸送・配送
- ⑦雇用者の通勤

その他：  
②資本財、③Scope1,2に含まれない燃料  
およびエネルギー関連活動、⑤廃棄物、⑥  
出張、⑧リース資産

### Scope3

Scope1、Scope2以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）

※○の数字はScope3のカテゴリ

### 自 社



### Scope1

事業者自らによる温  
室効果ガスの直接排  
出（燃料の燃焼、工  
業プロセス）



### Scope2

他社から供給された  
電気、熱・蒸気の使  
用に伴う間接排出

### 下 流



- ①販売した製品の使用
- ②製品の廃棄

その他：  
⑨輸送・配送、⑩製品の加工、⑪リース資  
産、⑫フランチャイズ、⑬投資

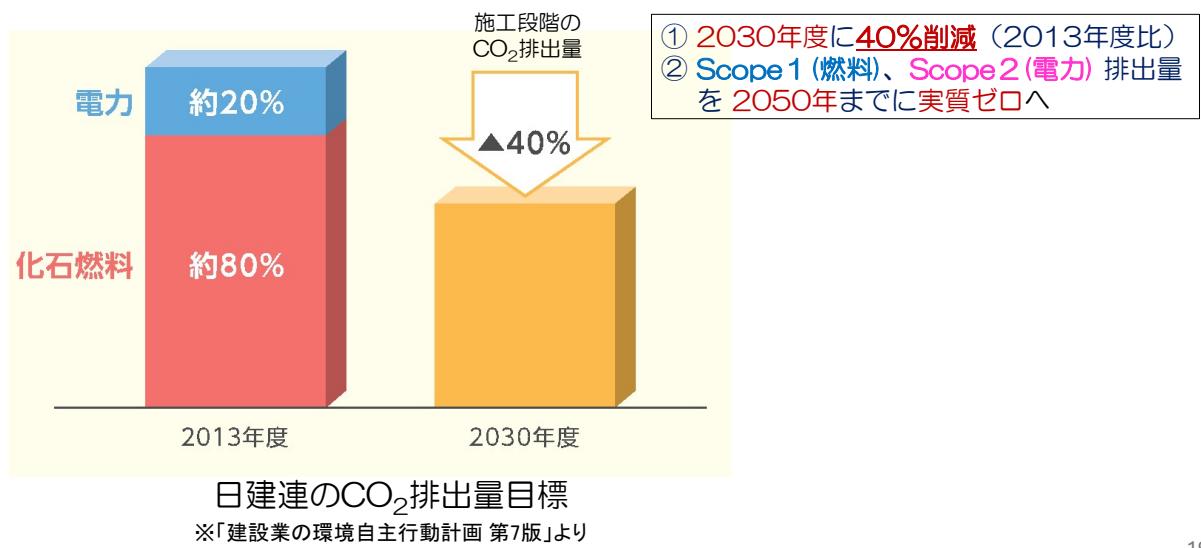
### Scope3

Scope1、Scope2以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）

※経済産業省資源エネルギー庁HP

18

### 「建設業の環境自主行動計画 第7版」（日建連）の目標

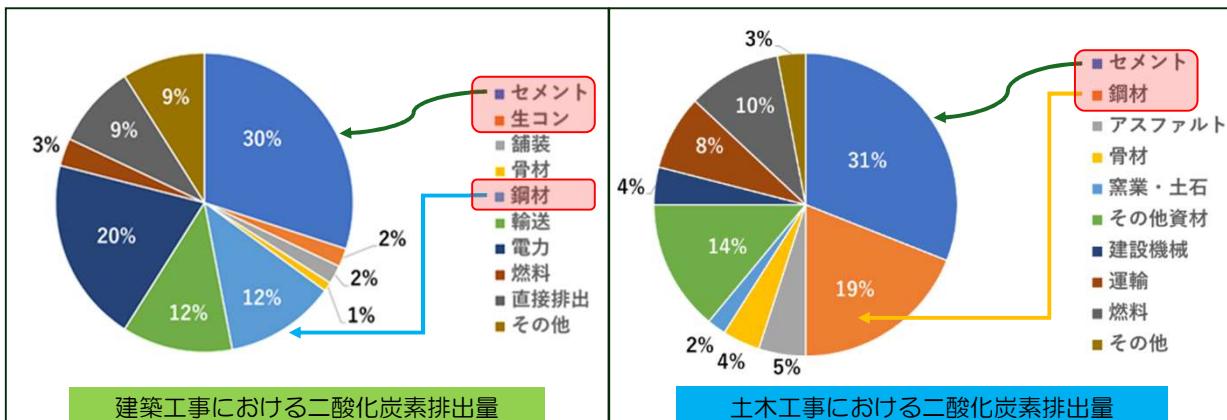


19

### 3. 建設分野で排出されるCO<sub>2</sub>

20

建設工事において大量に使用されるセメントコンクリートおよび鋼材は、構造用材料として必要不可欠も製造時にCO<sub>2</sub>を大量に排出



※コンクリートメディカルセンターHP  
「カーボンニュートラル(脱炭素)とコンクリート」(2021年2月8日)

21

例えば、建設分野で排出されるCO<sub>2</sub>は

(建設分野：建設工事、セメント・鋼材製造、コンクリート製品製造、内外装等 建物や構造物を建設する際に関わるものも含む)

### (1) 材料や製品を製造（原料、焼成、溶融、粉碎等々）する際に排出されるCO<sub>2</sub>

- ・セメント
- ・骨材
- ・化学混和剤
- ・混合材（高炉スラグ、微粉末、フライアッシュ、石灰石粉、シリカフューム等）
- ・鉄筋
- ・鉄骨
- ・鋼管
- ・生コンクリート
- ・プレキャストコンクリート製品
- ・木材
- ・プラスチック
- ・接着剤
- ・サッセ
- ・窯業系サイディング材
- ・非鉄金属（アルミニウム、銅など）
- 等々

### (2) 材料、機械、人を移動する際に 排出されるCO<sub>2</sub>

- ・プロダクトの稼働（燃料の燃焼、電力の消費）
- ・運搬、移動

### (3) 建設工事から 排出されるCO<sub>2</sub>

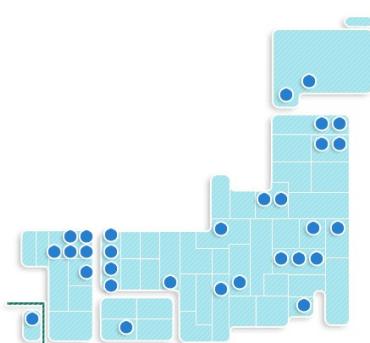
- ・重機の稼働（燃料の燃焼、電力の消費）
- ・運搬、移動

22

## 4. セメントとCO<sub>2</sub>

23

### 4-1. セメント、コンクリートの需要推移



#### ■製造会社 16社

ハ戸セメント	日鉄高炉セメント	日鉄セメント
東ソー	トクヤマ	琉球セメント
対田セメント	太平洋セメント	敦賀セメント
デイ・シイ	デンカ	麻生セメント
UBE三菱セメント	明星セメント	
日立セメント	住友大阪セメント	

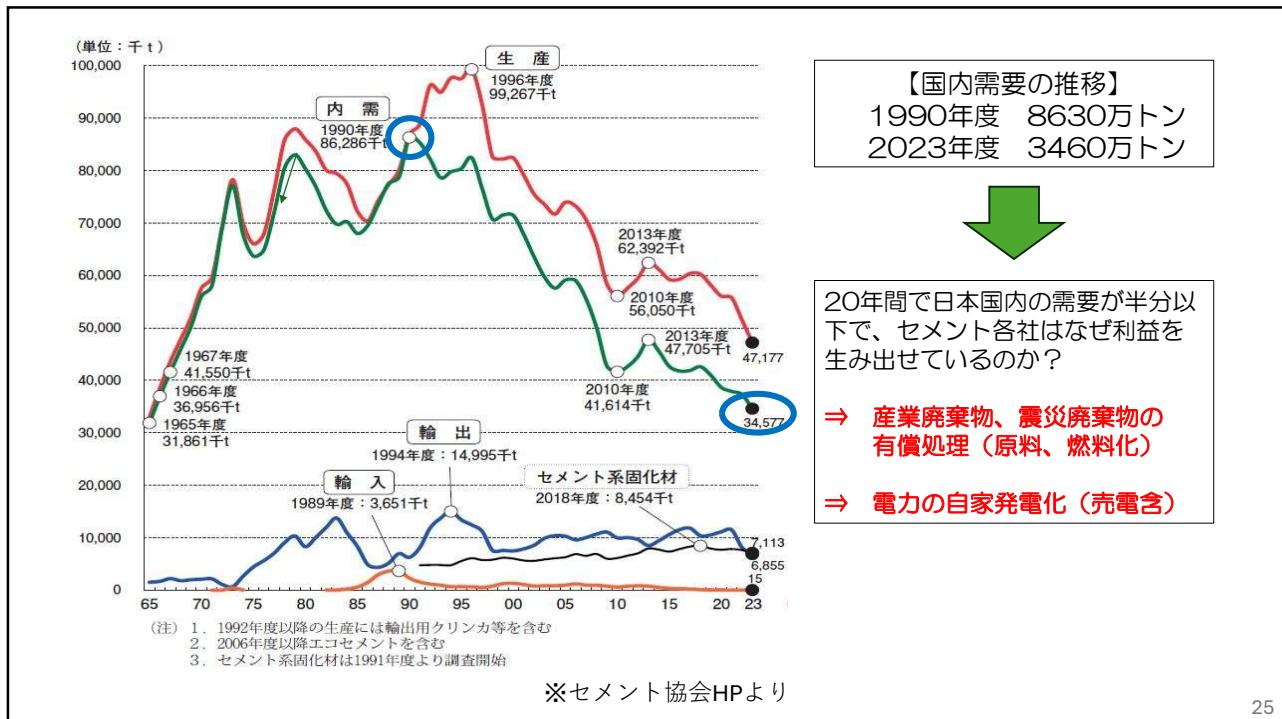
#### ■販売 9ブランド

日鉄高炉セメント	日鉄セメント	トクヤマ
琉球セメント	太平洋セメント	麻生セメント
UBE三菱セメント	日立セメント	住友大阪セメント

(イロハ順)

※セメント協会HPより

24



25

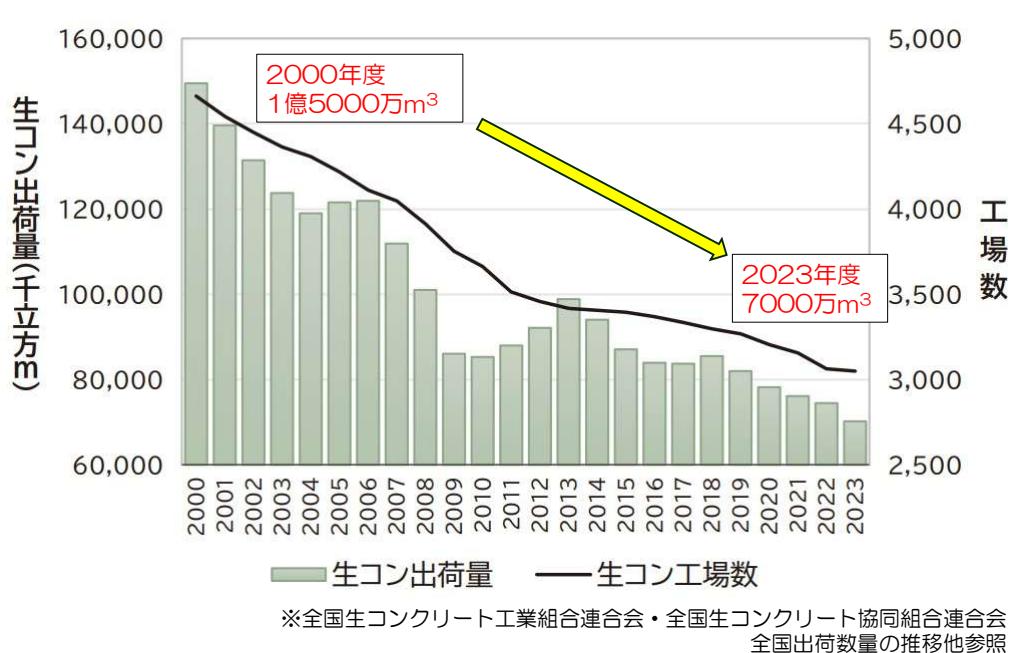
JISに規定されているセメントの種類	
名 称	備 考
普通ポルトランドセメント	・国内セメントの7割
早強ポルトランドセメント	・プレストレストコンクリート、寒中工事、工期短縮
超早強ポルトランドセメント	・緊急工事、寒中工事、グラウト
中庸熱ポルトランドセメント	・マスコンクリート、高流動コンクリート、高強度コンクリート
低熱ポルトランドセメント	・マスコンクリート、高流動コンクリート、高強度コンクリート
耐硫酸塩ポルトランドセメント	・硫酸塩を含む土壤用
高炉セメント（A,B,C種）	・普通セメント+高炉スラグを配合したセメント 鉄鉱石製造の際に高炉内で鐵鉱石から鐵以外の成分と副原料の石灰石やコークスの灰分が分離、回収された副産物。 主に水碎スラグ。 ・B種のみ生産、国内セメントの2割
混合セメント	
フライアッシュセメント（A,B,C種）	・普通セメント+フライアッシュを配合したセメント 石炭火力発電所等で回収された石炭灰
シリカセメント（A,B,C種）	・普通セメント+シリカ質混合材
エコセメント（普通、速）	・都市ゴミ焼却灰を原料としたセメント

26

- 日本のセメント生産量 / 2024年度 4,587万t
    - 普通61.9%、早強5.8%、中庸熱1.9%、低熱0.4%
    - B種高炉17.9%
    - 輸出10.3%
- ※セメント協会HPより
- 
- 国別のセメント生産量 / 2022年度 44億t (前年比4%増)
 

中国	25億t (世界シェア57%)
インド	3億3000万t
ベトナム	1億t
アメリカ	9200万t
日本	4700万t
- 約50倍

27



28

## 4-2. セメントの製造プロセスとCO<sub>2</sub>

### ■原料

主原料の天然石灰石（カルサイト：CaCO<sub>3</sub>）、粘土、珪石、鉄さいなどを調合

### ■焼成

タワーに設置した予熱機から巨大な回転窯キルンに原料を投入し、1450°Cの高温で焼成、空気で急冷してクリンカと呼ばれる1cm程度の火山岩のような黒い塊（半製品）



### ■粉碎

クリンカに2水石膏こうを加え粉碎してセメント

※主原料の石灰石は100%国内調達

※キルン内の温度は最高1450°Cにも達し、他産業から排出される廃棄物や副産物を原料や熱エネルギーの一部として取り込むことが可能。

※産業廃棄物を有償でリサイクル ⇒ 原料、燃料化 ⇒ 原価削減



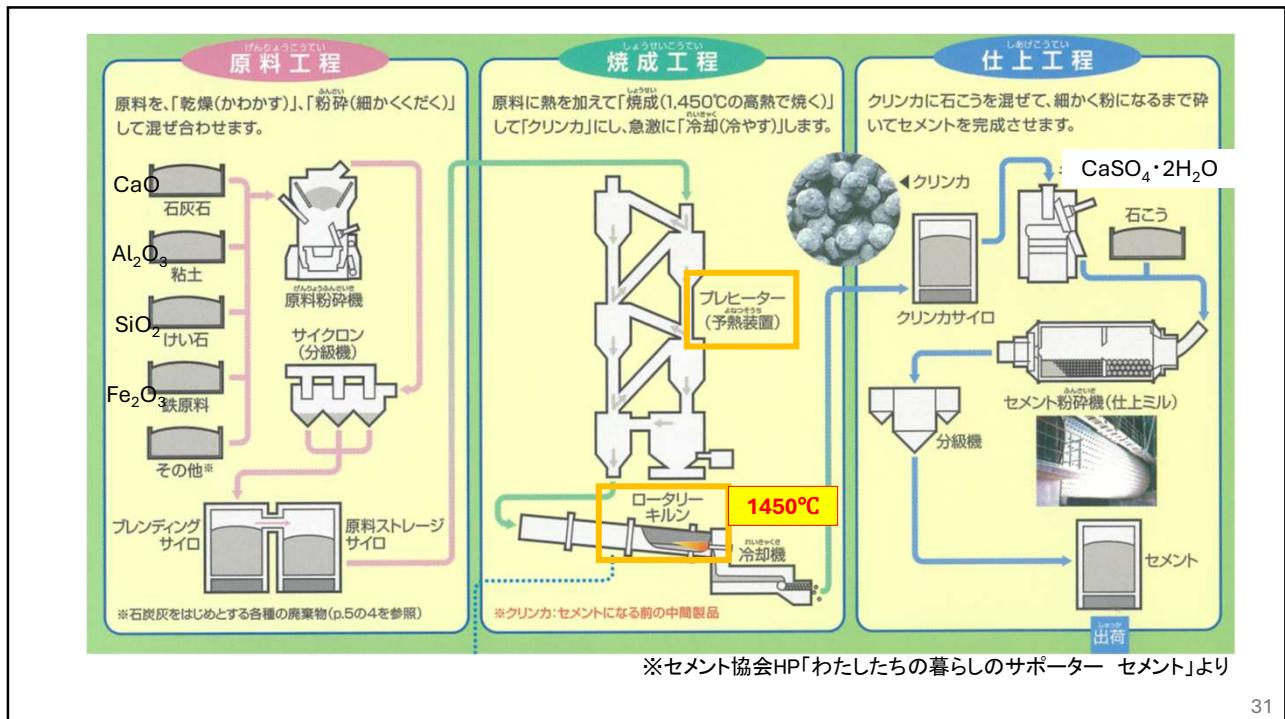
※セメント協会HPより

29

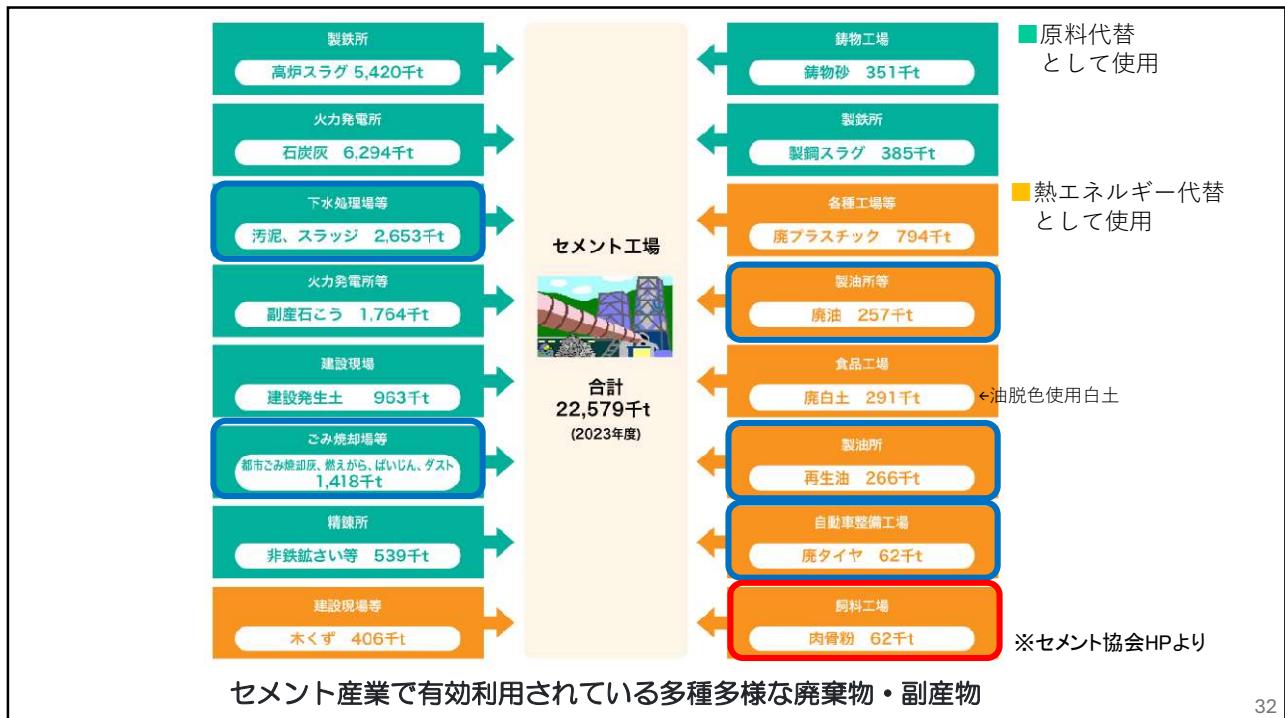


※住友大阪セメント株式会社HPより

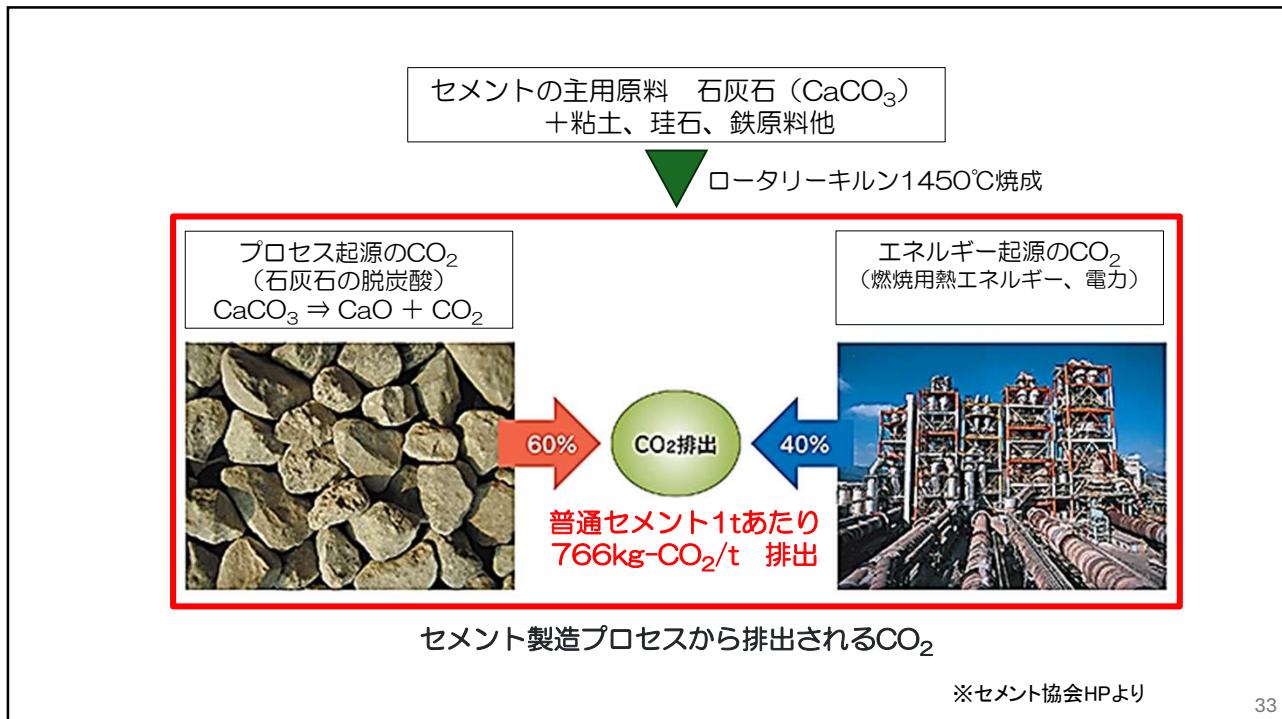
30



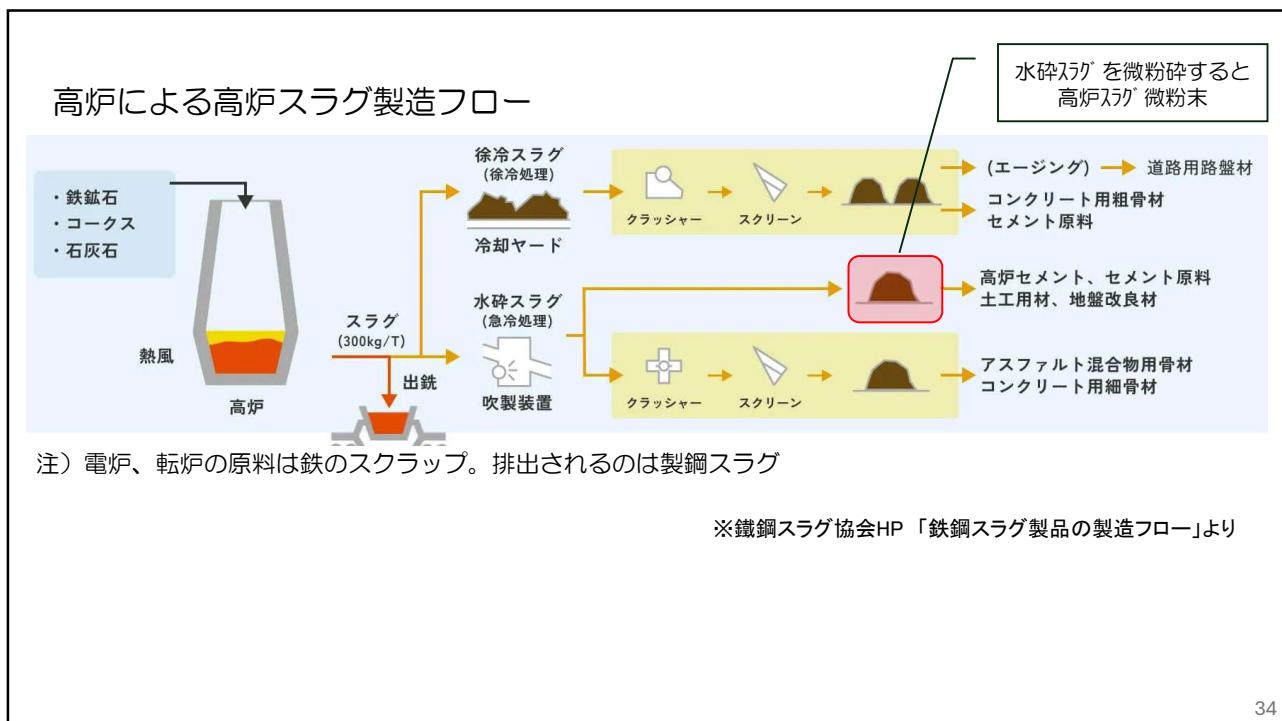
31



32



33



34

**ここで、高炉スラグ微粉末はCO<sub>2</sub>の排出量が少ないと言われる理由は？**

【高炉スラグは高炉での製鋼プロセスで排出される副産物】

高炉中の鉄鉱石に天然の石灰石を加えて加熱し、Fe（鉄）以外の不純物が高炉スラグ

【鉄のCO<sub>2</sub>排出量】

「高炉法」 約2 t-CO<sub>2</sub>/t

「電炉法」 約0.5~0.6 t-CO<sub>2</sub>/t ※鉄スクラップ再利用



**高炉スラグが製鋼プロセスで生成する副産物なので、  
排出されるCO<sub>2</sub>はすべてFe（鉄）にカウント**

高炉スラグ微粉末にする際の「粉碎や運搬の際に排出するCO<sub>2</sub>」は  
高炉スラグ微粉末にカウント ⇒ 約 36kg-CO<sub>2</sub>/t

※日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説、2017

普通セメント ⇒ 約766kg-CO<sub>2</sub>/t ※セメント協会HP

35

## 2021年度（令和3年度）温室効果ガス排出量

温室効果ガス排出量 (CO<sub>2</sub> 90.9%、ハイドロカルボン類 4.6%、メタ 2.3%、N<sub>2</sub>O 1.7%)



※環境省HPデータより作成

36

### 4-3. セメント鉱物と水和反応

#### (1) セメントの主要鉱物

鉱物名	略号	組成式	各種セメントの組成例			
			早強	普通	中庸熱	低熱
エーライト	C <sub>3</sub> S	3CaO·SiO <sub>2</sub>	65	50	42	25
ビーライト	C <sub>2</sub> S	2CaO·SiO <sub>2</sub>	11	25	36	56
アルミニネート	C <sub>3</sub> A	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	9	3	2
フェライト	C <sub>4</sub> AF	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	9	12	11
石膏	CS	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O				

#### (2) セメントの混合材 ※潜在水硬性保有 ※目的生産物に発生するCO<sub>2</sub>をすべて計上

一般名称	由来	SiO <sub>2</sub> 含有量(%)	使用セメント
高炉スラグ微粉末	銑鉄製造時に発生する副産物	33~35	高炉セメント
フライアッシュ	火力発電所等に	40~70	フライアッシュセメント
シリカフューム	珪藻土や金属シリコン製造時に発生する副産物	85以上	シリカフュームセメント

37

#### ■セメントの主要な水和反応 (C<sub>3</sub>S、 C<sub>2</sub>Sの水和反応：温度依存性大)

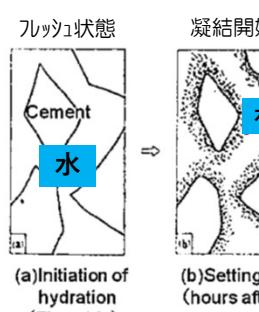
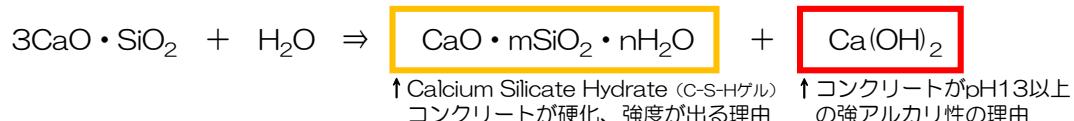
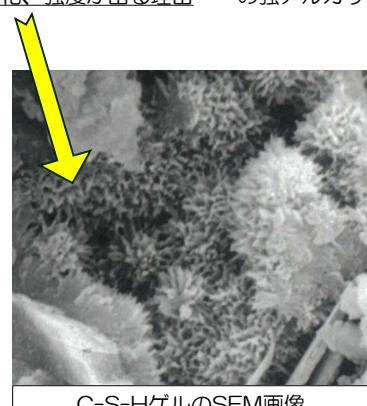
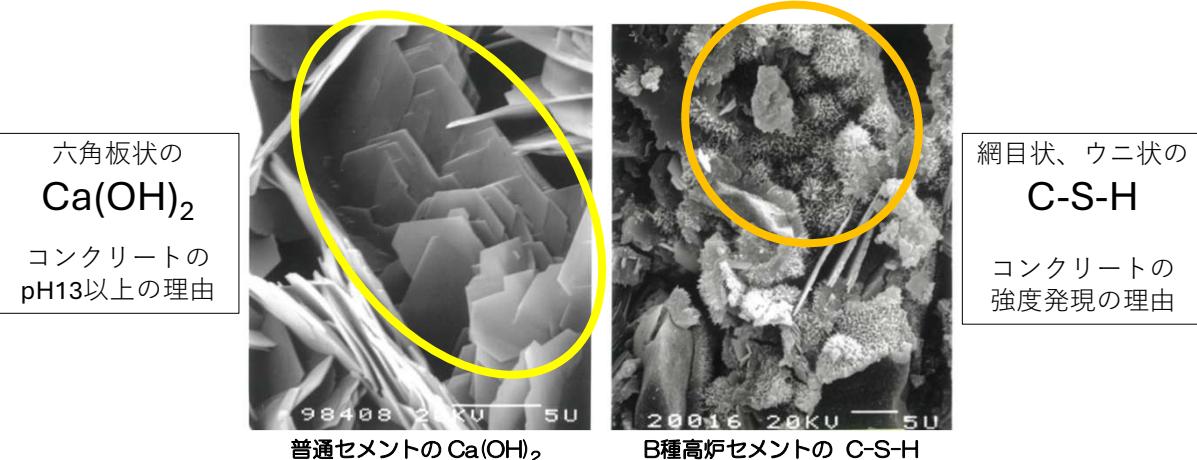


Fig.1 Schematic illustration for hardening and setting of cement.

※坂井悦郎: 热量测定とセメント・コンクリートの性能.  
Netsu Sokutei 39(1), 15-21(2012)



38



セメント硬化体のSEM画像

SEM観察する場合、試料を減圧乾燥するため、非晶質ゲルのC-S-Hは**干からびた寒天**を見ている状態

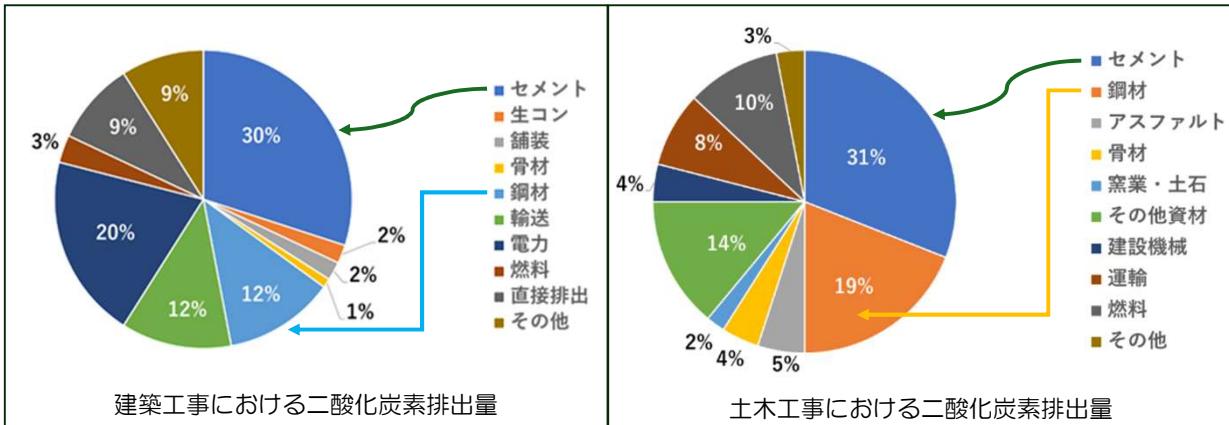
39

## 5. 建設工事における脱炭素技術（錢高組）

40

## (1) 省電力コントロールシステム

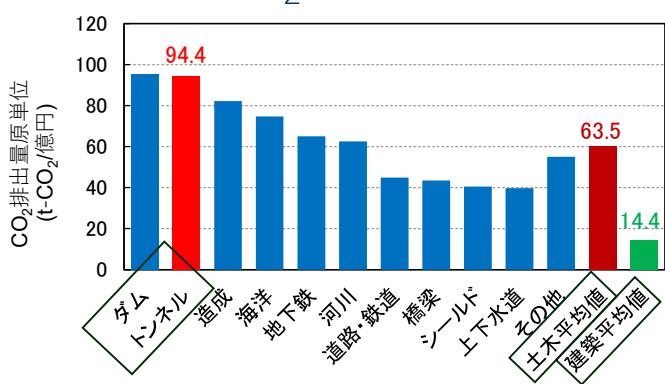
建設工事において大量に使用されるコンクリートおよび鉄は、構造用材料として必要不可欠も  
製造時にCO<sub>2</sub>を大量に排出



※コンクリートメディカルセンターHP「カーボンニュートラル（脱炭素）とコンクリート」（2021年2月8日）

41

### ■建設工事におけるCO<sub>2</sub>排出量



#### 【建設工事の特徴】

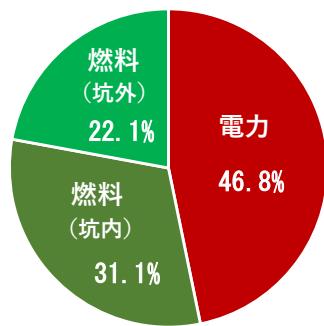
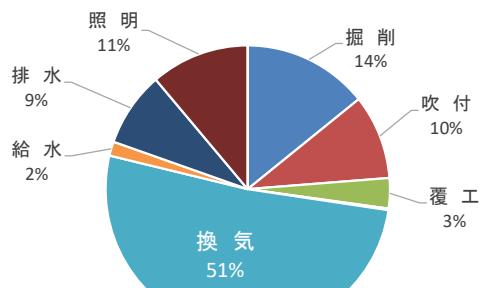
- セメント、コンクリートをよく使用する
- 化石燃料を消費する重機をよく使用する

どちらも  
間接的もしくは直接的に  
CO<sub>2</sub>を排出している

※土木学会: 第41回環境システム研究論文発表会論文集「建設工事における地球温暖化防止への取り組み」を参考に作成

42

### ■トンネル工事におけるCO<sub>2</sub>排出量

エネルギー別のCO<sub>2</sub>排出量比率

トンネル工事の電力比率

- ・トンネル工事のエネルギー別CO<sub>2</sub>排出量では、燃料と電力がほぼ同程度
- ・燃料では、トンネル坑内と坑外の比率が3：2程度
- ・電力においては換気設備の使用比率が**全体の半分**を占める

43

### ■トンネル工事の主な電気設備・機械



換気ファン (220kW)



集塵機 (110kW)

ドリルジャンボ  
(110kW)コンクリート吹付機  
(170kW)吹付プラント  
(40kW)

44

## ■なぜ トンネル工事がターゲット？

⇒建設工事のCO<sub>2</sub>排出量 土木工事（中でもダム、トンネル）>>建築工事

⇒トンネル工事の特徴

①電気機器 多い（省電力化必要）

②閉鎖空間の環境モニタリング（より安全が必要：CO<sub>2</sub>が滞留しやすく高濃度）  
電気機器の最適稼働、環境モニタリングシステムが必要

③軽油を使用した重機 多い【CO<sub>2</sub>排出量 大】

トンネルは閉鎖された空間（回収しやすい）

45

### ①トンネル工事における課題と問題点

●換気設備の運転は手動で切り替え

⇒作業工程毎に切り替える必要があり、切り替え忘れによる電力の浪費大  
(発破、すり出し、吹付・・・etc)

●トンネル坑内の作業環境を確保するため、こまめな風量調整が必要

⇒運転調整のタイミングが遅れると、粉塵の充満など作業環境が悪化



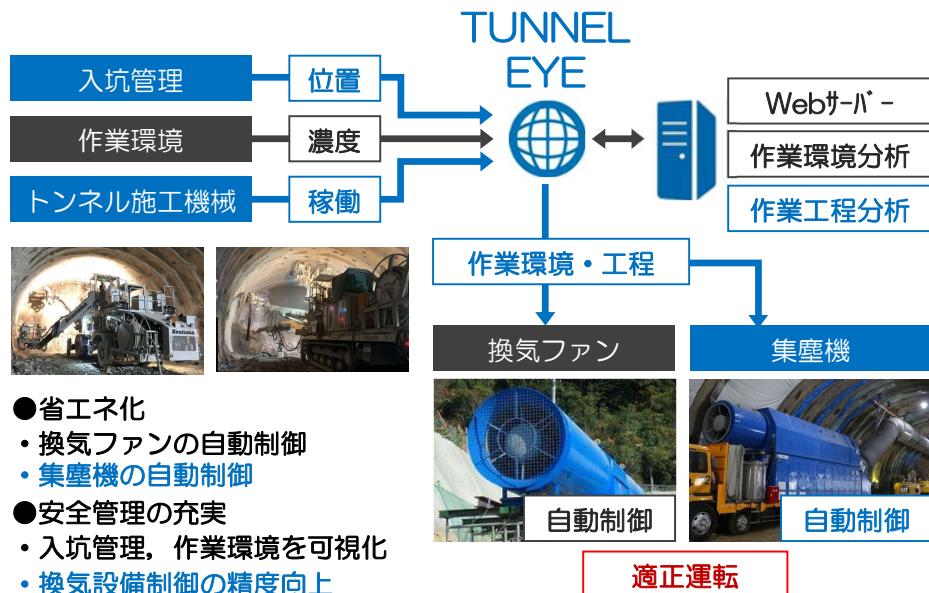
トンネル坑内の換気設備を自動制御するエネルギー管理システム

**TUNNEL EYE を開発**

作業環境の改善と消費電力および電力由来CO<sub>2</sub>の削減を図った

46

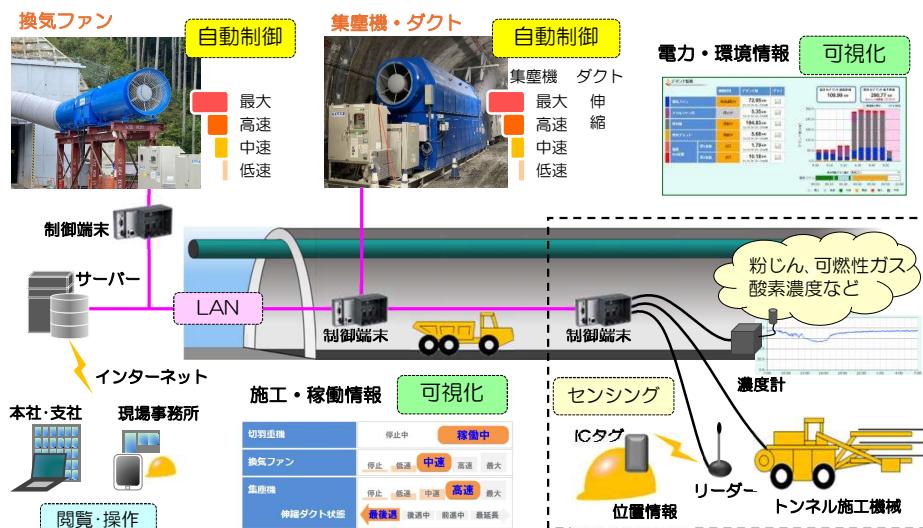
## ②開発システムの概要



47

## ③ 現場導入と効果

### ■システムの構築

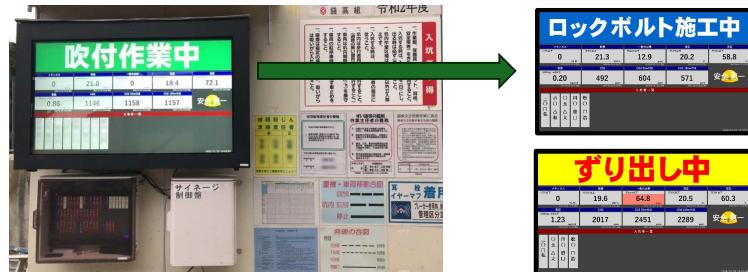


- ・現場内でLANを構築し、インターネットを介して遠隔地で閲覧、操作が可能なシステムを構築

48

## ■作業環境・情報の見える化

### ●デジタルサイネージへの情報表示



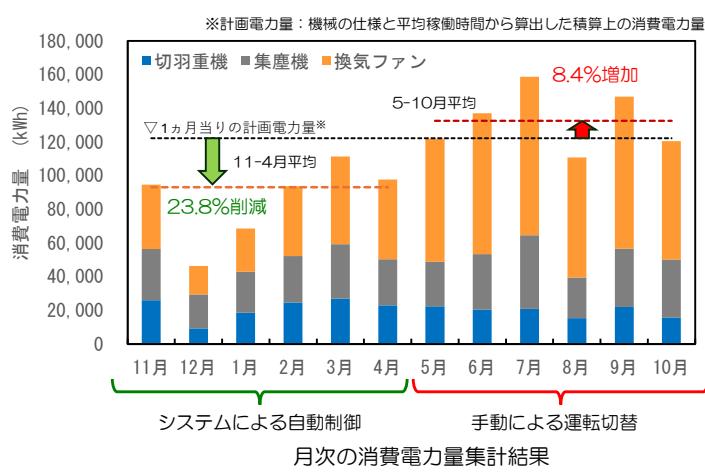
### ●PC・タブレットでの操作・閲覧



- トンネル坑内の作業情報を外部からも可視化することで、安全管理面を向上させた。

49

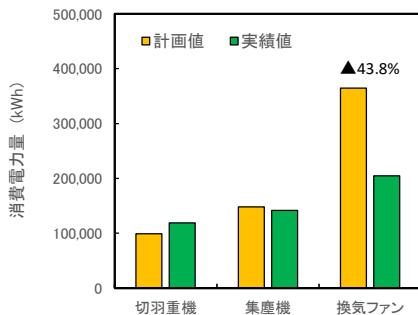
## ■システム運用による効果



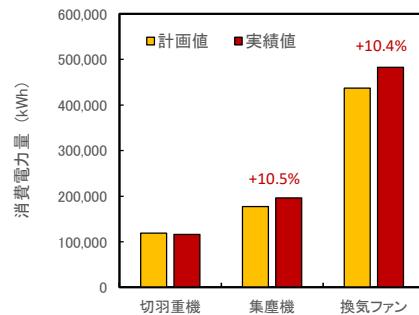
- 11月から4月にかけては、計画電力量に対して平均23.8%の電力削減
- 5月から10月は、換気ファンの消費電力量が大きく、平均8.4%電力量が増加  
⇒ 気温の高くなる夏期は、手動切替により換気ファンを長時間高速運転していた。

50

## ■機械別の消費電力量



自動制御期間の機械別消費電力量  
(11月～4月)

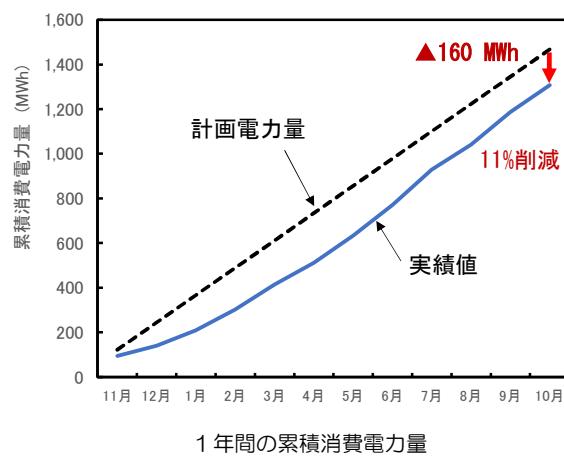


手動切替期間の機械別消費電力量  
(5月～10月)

- システムによる自動制御を行っていた期間では、**換気ファン**の電力量を**43.8%削減**できた
- 手動切替の期間では、**集塵機、換気ファン**とも消費電力量が**約10%増加**

51

## ■現場での電力削減量



- システム運用において、全体で**160MWhの電力削減**（11%削減）が行えた  
⇒ 電力由来CO<sub>2</sub>排出量 (Scope2) : 約75t-co<sub>2</sub>の排出量を削減

52

#### ④ 省エネ制御技術のまとめ

##### ■現場導入により確認できしたこと

- ◆TUNNEL EYE システムの運用により、換気設備を自動制御して適正運転を行うことで、約24%の消費電力と電力由来CO<sub>2</sub>排出量の削減が図れた。
- ◆夏期の運用では、気温や湿度を考慮し、作業環境に配慮した運転制御が必要など、年間を通して自動制御を行うにあたっての課題が抽出できた。

##### 今後の展開

TUNNEL EYEを積極的に現場導入して環境負荷低減を図るとともに、改良改善を行って、より良いシステムを構築していきたい。

53

## (2) CO<sub>2</sub>回収、固定化技術（開発中）

##### ①開発の基本コンセプトは

###### ⇒地産地消

- CO<sub>2</sub>が排出される現場でCO<sub>2</sub>を回収・固定  
「オンサイト DACS」 Direct Air Capture & Storage

直接回収

貯留

##### ②開発技術のポイントは？

###### ⇒廃棄物の利用

- 吹付けコンクリートのリバウンド、スラッジ等  
非常に **強アルカリ性** ⇒ Ca<sup>2+</sup>リッチ

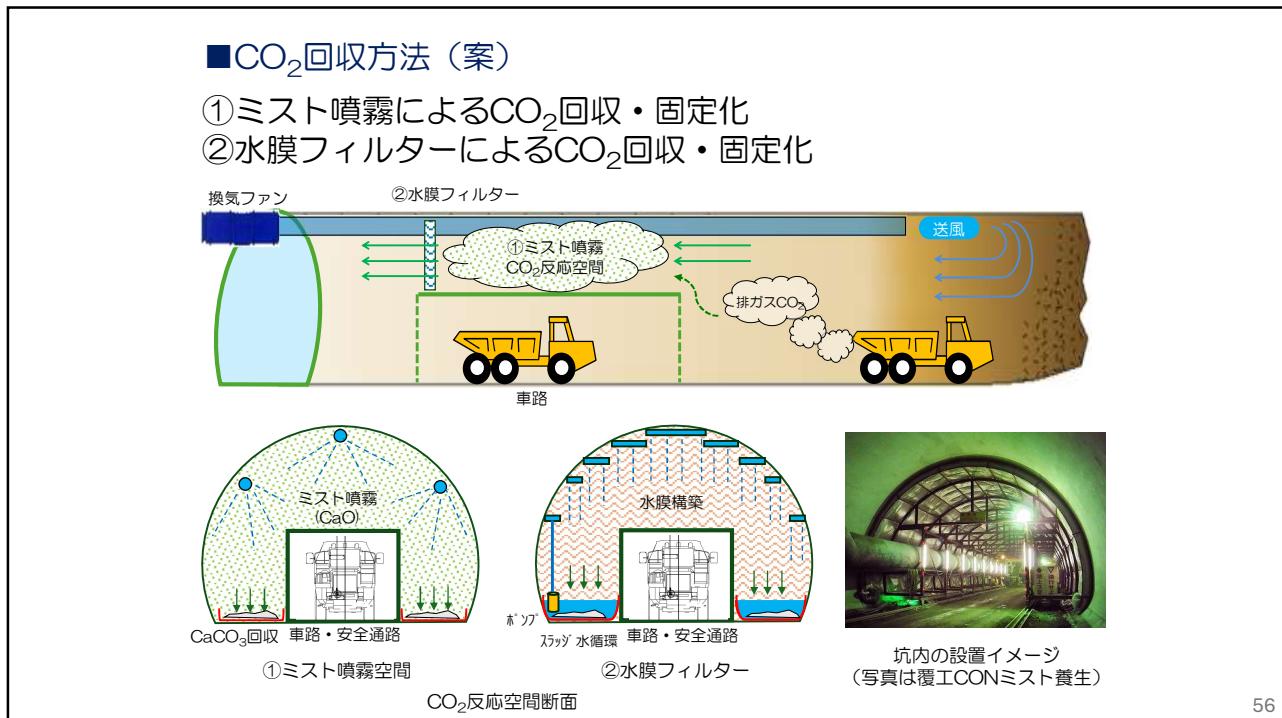
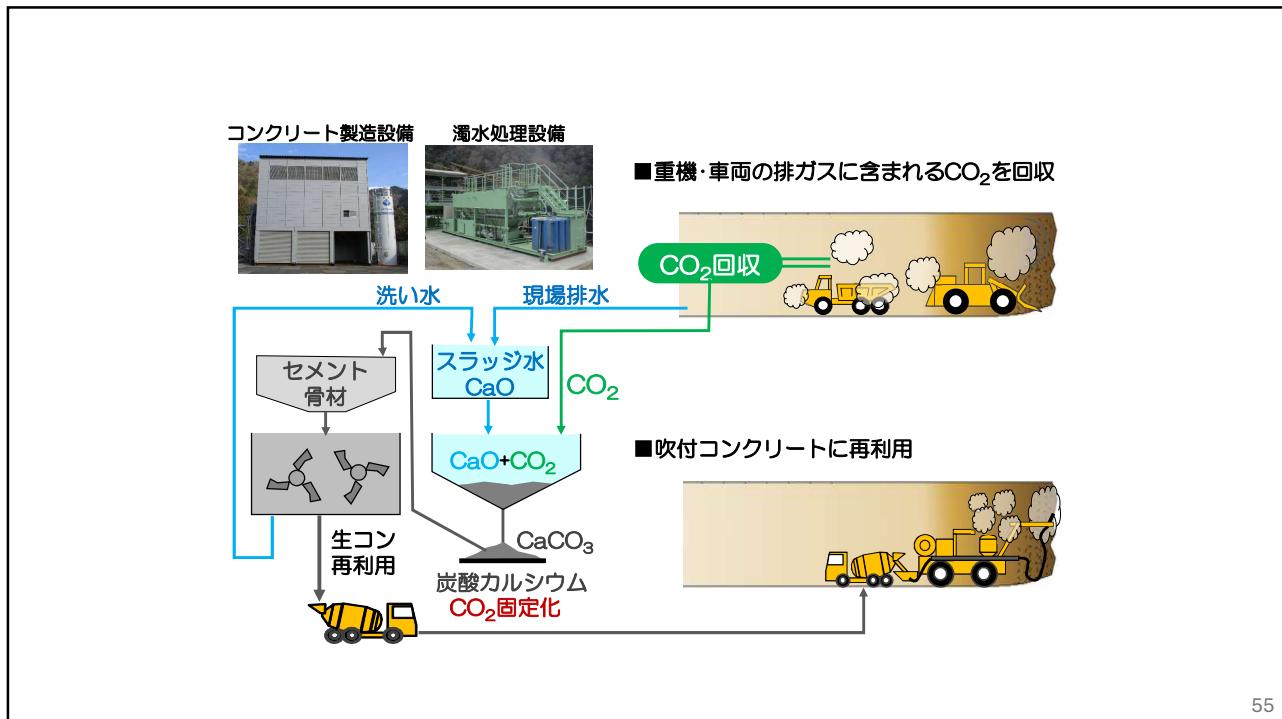
###### ⇒CO<sub>2</sub>の回収技術

- 化学反応でガスを固体化：人工石灰石CaCO<sub>3</sub>  
CaO + CO<sub>2</sub> **(酸性)** ⇒ CaCO<sub>3</sub>

人工石灰石CaCO<sub>3</sub>

高温で加熱分解させない限り2度と大気中に放出されない

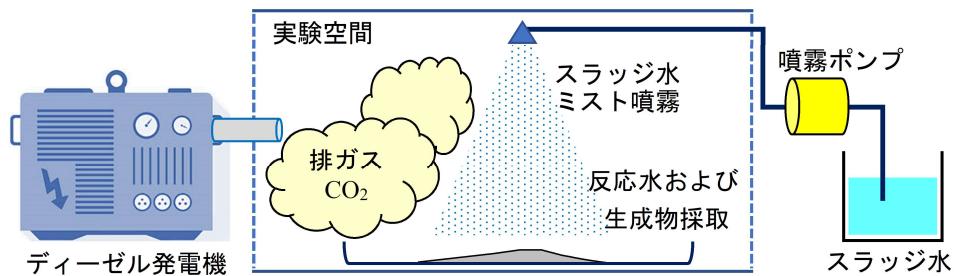
54



### ③実験による有用性の検証

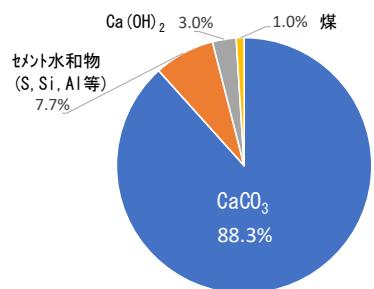
#### ■排ガスを用いた要素実験

- ・スラッジ水のミスト噴霧による排ガス中のCO<sub>2</sub>固定化効果の確認

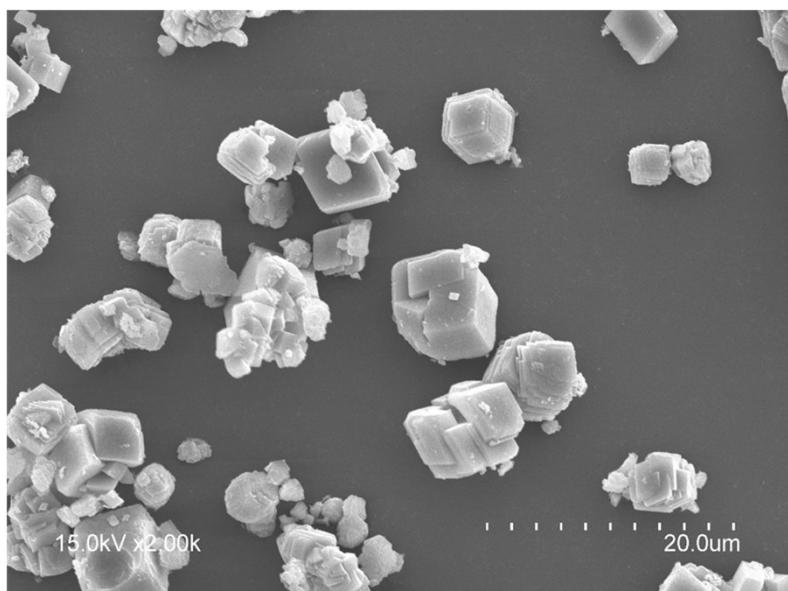


ミスト噴霧による要素実験

57



生成物の成分分析結果

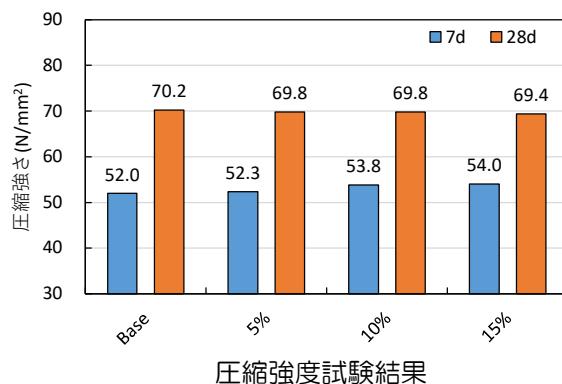


生成物（人工石灰石）走査型電子顕微鏡写真  
【人工石灰石のCO<sub>2</sub>固定量 計算上420kg/t】

58

### ■人工石灰石を使用したモルタルの品質

配合ケース	※人工石灰石をセメント比外割添加			
	普通セメント (g)	水 (g)	細骨材 (g)	排ガス生成物 $\text{CaCO}_3$ (g)
基準配合	450	225	1350.0	—
5%添加	450	225	1327.5	22.5
10%添加	450	225	1305.0	45.0
15%添加	450	225	1282.5	67.5



59

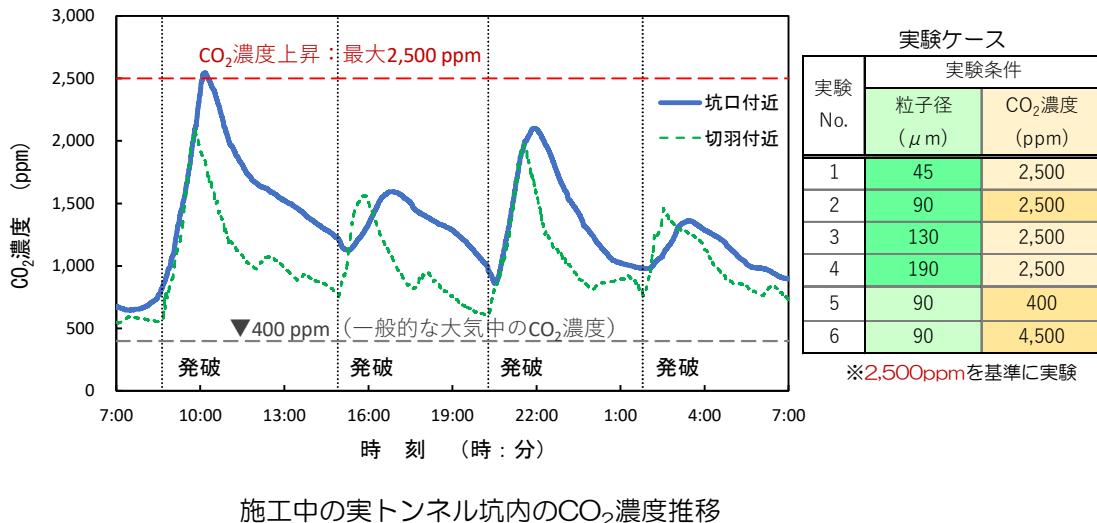
### ④模型実験による $\text{CO}_2$ 回収性能の確認

#### ■継続的に排出される $\text{CO}_2$ 固定化効果の確認



60

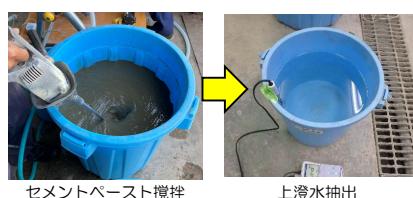
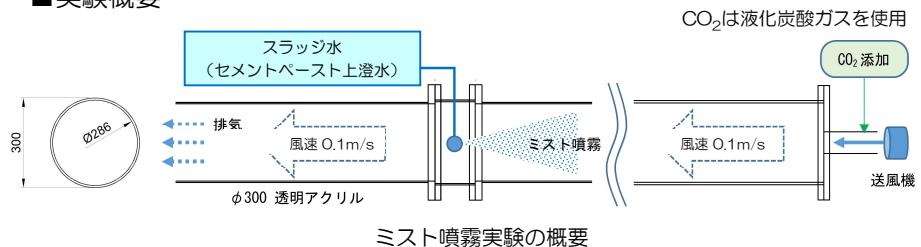
■実験条件 ミスト粒子径および初期のCO<sub>2</sub>濃度を因子に実験を実施



61

【ミスト噴霧実験】

■実験概要



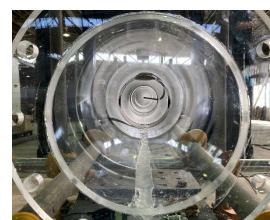
スラッジ水の作成



62

## ■実験状況

- ミスト噴霧の状況

粒子径 45  $\mu\text{m}$ 粒子径 90  $\mu\text{m}$ 粒子径 190  $\mu\text{m}$ 

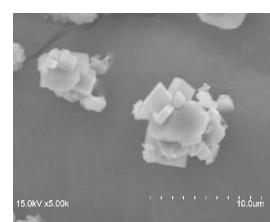
- 生成物の回収と分析



反応水の回収



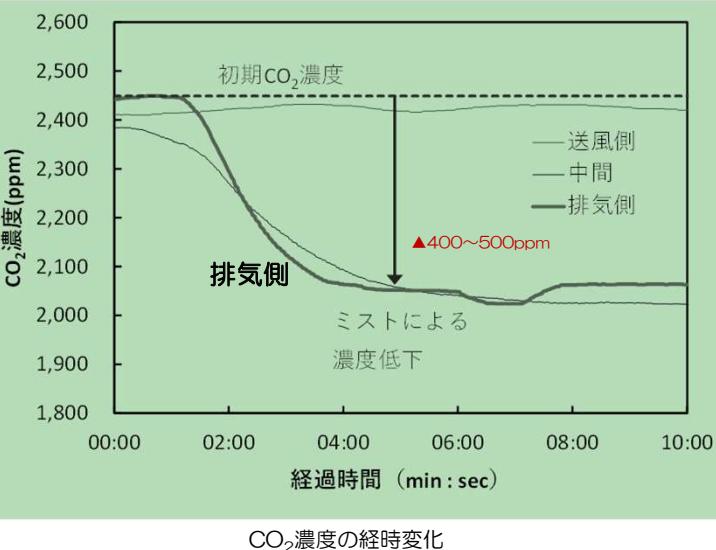
生成物の固液分離・計量



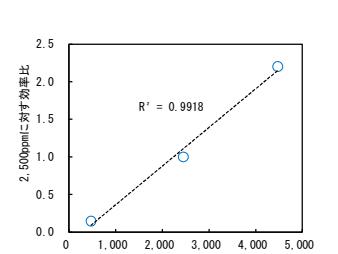
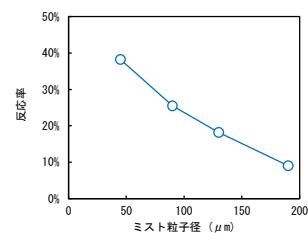
生成物の分析 (SEM像)

63

## ■実験結果



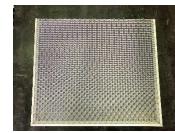
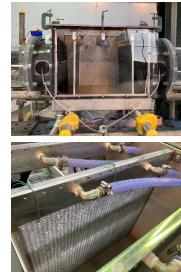
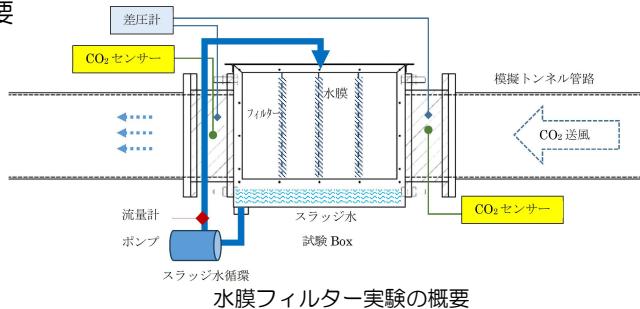
- 実験中はミストによるCO<sub>2</sub>濃度の低下（400~500ppm）を確認。



64

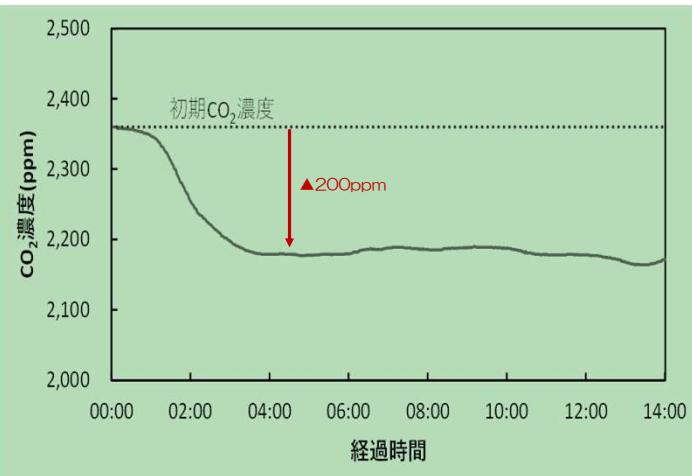
## 【水膜フィルター実験】

### ■実験概要

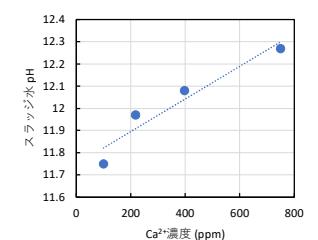
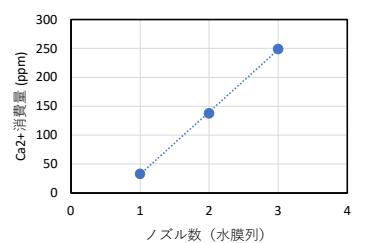


65

### ■実験結果



※水膜1列当たりCO<sub>2</sub>濃度は約100ppm低下



66

## ⑤トンネル工事におけるCO<sub>2</sub>回収、固定化技術のまとめ

### ■実験により確認できたこと

- ◆スラッジ水と排ガスの反応による生成物は、炭カル（CaCO<sub>3</sub>）が主成分  
コンクリートに添加しても強度的には問題ない  
⇒ 今後、長期的な強度特性や耐久性についても検証が必要。
- ◆通風条件下においても継続的に排出されるCO<sub>2</sub>の固定化によりCaCO<sub>3</sub>が生成  
(反応の即時性)
- ◆ミスト噴霧において粒子径の違いによる反応の程度と傾向を把握
- ◆スラッジ水の水膜を構築することでも通過するCO<sub>2</sub>を固定化  
水膜列数に応じて線形的に反応効果が高まる

67

## (3) 環境配慮型コンクリート

### ①各社で開発されている環境配慮型コンクリート

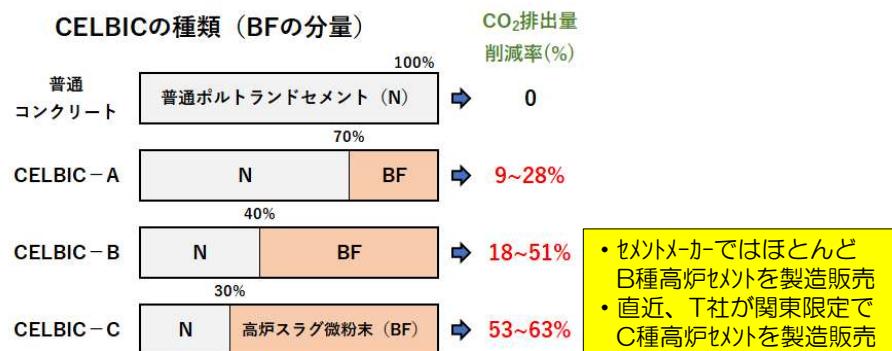
技術の分類	技術内容	コンクリート名称例
セメントの置換	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セメントを高炉スラグ微粉末、フライアッシュに置き換えたコンクリート</li> <li>・細骨材を碎砂から高炉スラグ細骨材に置き換えたコンクリート</li> </ul>	ECMコンクリート、クリーンコンクリート CELBIC、低炭素型コンクリート スラグリート、SaveWhite、Kcrete CLConcrete ハレーサルト
人工石灰石の添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃コンクリート粉、コンクリートスラッジ等とCO<sub>2</sub>を反応させた炭酸カルシウム微粉末、もしくは廃骨材とCO<sub>2</sub>を反応させ表面に炭酸カルシウムを生成させた再生骨材を添加したコンクリート</li> </ul>	カーボンリサイクル・コンクリート ブループラネット
アルカリ活性剤の添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高炉スラグ微粉末やフライアッシュ+アルカリ活性剤(NaOH、ケイ酸Na) ノンセメントコンクリート</li> </ul>	ジオポリマー、AMコンクリート T-e Concrete
炭酸化養生	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空気中から回収した液化CO<sub>2</sub>をコンクリート製造時に投入し炭酸カルシウムを生コン中に生成</li> </ul>	カーボンキュアコンクリート
CO <sub>2</sub> 吸収材料の添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>吸収材料(γ-C<sub>2</sub>S)を添加し炭酸化養生もしくは大気環境暴露を行い、CO<sub>2</sub>を反応・吸収し炭酸カルシウムとして固定化したコンクリート。CO<sub>2</sub>吸収固定量109kg/m<sup>3</sup></li> </ul>	CO <sub>2</sub> -SUICOM(スイコム)
バイオ炭の添加・固定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・おが屑、糊殻などのバイオ廃棄物を炭化し、過去に植物に固定化された炭素を添加したコンクリート (炭化により腐敗しにくく長期間固定)</li> </ul>	バイオ炭コンクリート

68

## ②環境配慮型コンクリート CELBIC の概要

Consideration for Environmental Load using Blast Furnace slag In Concrete : CELBIC (セルビック)

高炉スラグ微粉末（BF）の使用率を10～70%の範囲で調整することにより、建築物に求められる所要の品質を確保しつつ、コンクリート材料に由来するCO<sub>2</sub>排出量の約9～63%を削減する環境配慮型のコンクリート



69

## CELBICの呼称と高炉スラグ微粉末（BF）使用率と特徴、用途、適用部位・部材

CELBIC呼び名 (BF使用率)	CO <sub>2</sub> 排出量の 削減量(%)	特徴	主な用途	適用部位・部材
A種クラス (10% ≤ ≤30%)	約 9~28	普通ポルトランドセメントと同様の性質	普通ポルトランドセメントと同様の用途	地下（杭、基礎）および地上構造物
B種クラス (30% < ≤60%)	約 18~51	初期の強度発現がやや小さく、化学抵抗性は高い。	杭コンクリートに使用	
C種クラス (60% < ≤70%)	約 53~63	初期強度は小さいが長期強度は大きく、水和熱が小さい。	マスコンクリートや地下構造物に使用	地下構造物または直接外気と接しない部位・部材かつ、厚さが200mm以上

70

## (3) CELBIC+高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの適用例（土木：橋梁下部工）

表-2 使用材料

名称	種類	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	C
混和材	BF 4000	BF
細骨材	砂岩碎砂 山砂	S1 S2
粗骨材	高炉スラグ細骨材 砂岩碎石 1505 砂岩碎石 2010	SBF G1 G2
化学混和剤	AE 減水剤, 減水剤	Ad

表-3 配合表

呼び 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/B	水 W	結合材 B C BF	細骨材		粗骨材 G1 G2	化学 混和剤 Ad
				S1 S2	SBF		
24	57	167	88 205	430 210	221	487 487	2.93
27	52	167	96 225	417 202	216	487 487	3.21
30	49	167	102 239	409 200	210	487 487	3.41

(kg/m<sup>3</sup>)

表-6 受入れ時フレッシュ性状（実施工）

	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
目標性能	12.0±2.5	4.5±1.5	5~35
A2 橋台	12.5	5.6	22 (外気温 20)
A1 橋台	14.0	5.5	24 (外気温 23)

注：現地受け入れ時に試験

※コンクリート工学年次大会2025(盛岡) 錢高組  
「高炉スラグ混和材高含有コンクリートの橋梁下部工への適用」

71

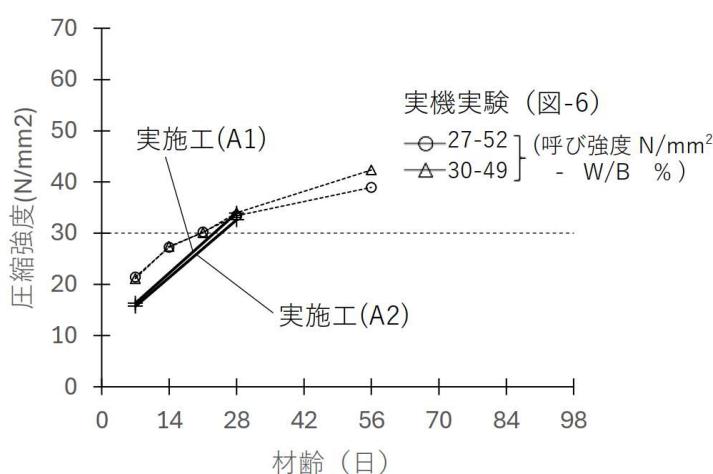


図-9 圧縮強度の経時変化（実機実験と実施工）

※コンクリート工学年次大会2025(盛岡) 錢高組  
「高炉スラグ混和材高含有コンクリートの橋梁下部工への適用」

72

打設状況 2024年10月、橋梁下部工（埋設）、打設量200m<sup>3</sup>

- ・晴天、最高温度23.8°C
- ・積載4m<sup>3</sup>アジアータ車使用 運搬時間10分
- ・ピストン式ポンプ車（ロングブーム） 平均30-40m<sup>3</sup>/h



※コンクリート工学年次大会2025(盛岡) 錢高組  
「高炉スラグ混和材高含有コンクリートの橋梁下部工への適用」

73

CO<sub>2</sub>排出量試算結果

	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	原単位 (kg-CO <sub>2</sub> )	排出量 <sup>*3</sup> (t-CO <sub>2</sub> )
24-12-20N <sup>*2</sup> (当初設計仕様)	C(293) S(835)	C(772) <sup>12)</sup> S(3.7) <sup>13)</sup>	45.9
27-12-20BF (本事例)	C(96) BF(225) S(619) SBF(216)	BF(35.6) <sup>12)</sup> SBF(2.4) <sup>13)</sup>	
削減量(t-CO <sub>2</sub> ) / 削減率(%)	—	—	28.8 / 62.9

<sup>\*1</sup> 結合材と細骨材の削減効果

<sup>\*2</sup> 結合材は全量普通ポルトランドセメント想定

<sup>\*3</sup> 200m<sup>3</sup> 分に換算

※コンクリート工学年次大会2025(盛岡) 錢高組  
「高炉スラグ混和材高含有コンクリートの橋梁下部工への適用」

74

### 【将来、環境配慮型コンクリートで留意すべきこと】

- (1) 国内セメントメーカーが2050年までにセメント自体のカーボンニュートラルを達成する見込み。
- (2) 高炉スラグ微粉末、フライアッシュを粉碎、運搬するためにもCO<sub>2</sub>は排出されている。セメント自体のカーボンニュートラルが達成されると産業副産物を利用したコンクリートによるCO<sub>2</sub>削減は実質上できなくなる。  
ただし、産業副産物の再資源化は可能。
- (3) 日本の粗鋼生産量減少傾向 ⇒ 高炉スラグの発生量減少  
石炭火力発電所の減少傾向 ⇒ フライアッシュの発生量減少
- (4) 空気中に排出されたCO<sub>2</sub>を低減させなければ温室効果ガスの削減にはならない。
  - ・高濃度CO<sub>2</sub>ガスの高効率回収技術が必要。
  - ・液化CO<sub>2</sub>ガスを製造するには多くのエネルギーが必要。

75

## 6. コンクリートプレキャスト製品分野に適用の可能性がある脱炭素減技術

76

## 6-1. 原材料

### (1) 高炉スラグ微粉末、フライアッシュの添加

- ① 将来的にセメントがカーボンニュートラルを達成したら脱炭素（CO<sub>2</sub>削減）では効果なし。副産物利用（省資源）では効果あり。
- ② 高炉スラグ微粉末、フライアッシュは潜在水硬性物質。  
セメントの水和で生成したCa(OH)<sub>2</sub>を消費するため多量添加はコンクリートの中性化を速める。
  - 使用したプレキャスト製品の耐久性を把握する必要あり。  
(強度発現性、長さ変化、耐中性化性等)

77

### (2) 人工石灰石の添加

- ① 空気中、排ガス中のCO<sub>2</sub>を回収して生成した人工石灰石（CaCO<sub>3</sub>）を添加できれば  
プレキャスト製品原材料、製造で排出されたCO<sub>2</sub>を削減可能。
  - いつ製造販売できるか? **【人工石灰石のCO<sub>2</sub>固定量 計算上420kg/t】**

#### ② 人工石灰石

- 生コンスラッジ、上澄水等セメント由来のCaイオンと空気中、排ガス中のCO<sub>2</sub>を反応、生成し回収する方法
  - 廃石膏ボードとNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>から反応、生成し回収する方法
- $$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$
- ( Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> NaOH溶液 に空気中、排ガス中のCO<sub>2</sub>を反応、生成 )

※住友大阪セメント三橋等：セメント・コンクリート論文集、Vol.78,pp.481-487,2024

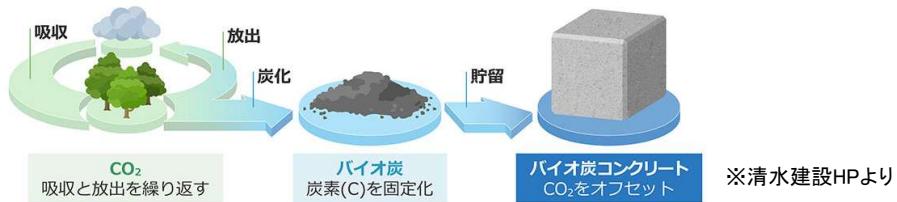
### (3) カーボンニュートラルに近づくセメントの使用

- ① セメントJIS改定へ（混合材10%まで増）
  - **混合材に人工石灰石も含まれる ⇒ セメント由来のCO<sub>2</sub>は減る**
  - **混合材10%のセメントがいつ製造販売できるか?**

78

#### (4)バイオ炭の添加

- ①バイオマス（オガ粉）を炭化した粒状、粉状バイオ炭をコンクリートに添加
- 通常は微生物分解や燃焼でオガ粉が含む炭素はCO<sub>2</sub>として空気中に放出も炭化した炭は非常分解されづらい固定炭素に変化。燃焼されない限りほとんどCO<sub>2</sub>に変化しない。穀殻灰等も同様で炭化することで分解難となり固定。
  - 原料や製造方法によるが固定炭素質量比は高比率のもので90%、多量の炭素を安定的固定可能。
  - バイオ炭：粒径1mm以下の粉状と2mm～5mmの粒状の2種類。細骨材置換で使用。バイオ炭のCO<sub>2</sub>固定2.7 t / t。※モル比CO<sub>2</sub>/C=3.7



79

#### (5)ゼロカーボンスチールの利用

従来の高炉法による製鉄から、水素を利用した鉄鉱石から酸素を取り除く水素還元による製鉄への革新的な技術開発中。

- ①高炉水素還元製鉄 (CO<sub>2</sub>排出を極限まで減らす)
- ②100%水素直接還元プロセス (究極のCO<sub>2</sub>排出ゼロを目指す)      ※日本製鉄HPより
- ③大型電気炉での高級鋼製造 (水素還元鉄を利用した量産技術の確立)

#### (6)セメントの硬化促進剤を利用した蒸気養生の低温化や時間短縮、蒸気養生しない方法

- ①C-S-H系、亜硝酸塩系・亜硝酸塩系 硬化促進剤の添加

80

## 6-2. 代替燃料、エネルギー

代替燃料とは主に石油、石炭などの化石燃料代替の再生可能な資源や技術を用いて製造される燃料全般。

地球温暖化対策やエネルギー安定供給を目的とし、CO<sub>2</sub>を排出しない、またはCO<sub>2</sub>を固定・再利用するカーボンニュートラルな燃料

### (1) 合成燃料 (e-fuel) : 2030年代～2040年代に実用化見込み

水素H<sub>2</sub>と二酸化炭素CO<sub>2</sub>を原料とし、ガソリンや灯油などに加工される「石油の代替燃料」。

製造プロセスで大気や排ガス中のCO<sub>2</sub>を回収・利用するため、ライフサイクル全体でCO<sub>2</sub>排出量を増やさないカーボンニュートラルな燃料として注目

- 水素は再生可能エネルギーで生成、CO<sub>2</sub>は空気中で回収し原料として使用
- 現在の製造コストは比較的高く、普及には技術革新とコスト削減が課題

81

### (2) バイオマス燃料

動植物由来の有機物を原料とする燃料。

- バイオエタノール  
植物の発酵・蒸留により製造される液体燃料、自動車燃料として利用
- バイオディーゼル燃料 (BDF)  
使用済み植物油や動物性油脂を原料、ディーゼルエンジンの代替燃料
- 航空燃料 (SAF : Sustainable aviation fuel)  
廃食油、微細藻類、木くず、サトウキビ、古紙を原料
- バイオガス  
家畜の排泄物や生ごみをメタン発酵させて得られるガス

### (3) 水素

燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しないゼロカーボン燃料。燃料電池やエンジンでの利用が期待

- 2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → 2H<sub>2</sub>O ※燃焼してもCO<sub>2</sub>を発生しない
- H<sub>2</sub>は再生可能エネルギー（太陽光、水力、風力等）で生成することが重要

82

## (4)電力

- ①化石燃料をなるべく使用しない電化
- ②再生可能エネルギー由来の電力を使用  
(太陽光発電、風力発電、小水力発電等)  
※小水力発電1000kW以下

	小水力発電	太陽光発電	風力発電
設備利用率	70%程度	12%程度	20%程度
発電原価	8~25円/kWh	37~46円/kWh (家庭用)	10~14円/kWh (陸域4.5MW以上)
特徴など	発電量の変動は 小さいのが一般的	瞬間のみ発電 日射量により発電量は変動	風況により発電量は変動

※環境省HPより

6-3. その他 本業以外に取り組み、企業として排出するCO<sub>2</sub>全体の削減

- (1)ブルーカーボン 藻場造成(磯焼け対策)
- (2)グリーンカーボン 計画的な伐採と植林

83

## 【他分野で検討されているカーボンニュートラル技術】

- (1) メタネーション (Methanation)  $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (2) CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)  
二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を分離・回収し地中深くに安定的に貯留する技術
- (3) ブルーカーボン ※海草・海藻の藻場、湿地/干潟、マングローブ林の4種類
  - ・海草・海藻など沿岸・海洋生態系が光合成により大気中のCO<sub>2</sub>を取り込み、海底や深海に長期間貯留する炭素。
  - ・ブルーカーボンも地球温暖化対策の新たな取り組みとして注目されており、藻場や干潟、マングローブ林等が主な吸収源
  - ・住友大阪セメント 藻場増殖礁事業（日本沿岸の磯焼け対策）
- (4) グリーンカーボン ※森林、山林、熱帯雨林など  
陸上の植物生態系が光合成により大気中のCO<sub>2</sub>を取り込み、貯留される炭素。  
・計画的な伐採、植林

※環境省HPより

84

## 7. おわりに

85

### 【建設分野におけるカーボンニュートラル技術開発の方向性】

#### (1) 「これから排出されるCO<sub>2</sub>」を低減する技術

- ① 環境負荷低減コンクリート
- ② 使用電力の効率的な制御
- ③ 再生油の使用
- ④ 再生可能エネルギー（太陽光・風力・地熱・中小水力・バイオマス）の使用等

#### (2) 「すでに排出されているCO<sub>2</sub>」を回収する技術

- ① 大気中からCO<sub>2</sub>を直接回収（アミン法）
- ② 大気中からCO<sub>2</sub>を直接回収（人工石灰石）
  - 廃コンクリート利用
  - 生コンスラッジ利用
  - 廃石膏ボード利用
- ③ CO<sub>2</sub>吸収材添加コンクリート
- ④ 人工石灰石添加コンクリート
- ⑤ 炭酸化養生 ※空気、排気ガスから回収したCO<sub>2</sub>使用条件

86

◆開発の未来

⇒ 地球上のどこでも 簡単に空気中からCO<sub>2</sub>を回収できれば・・・

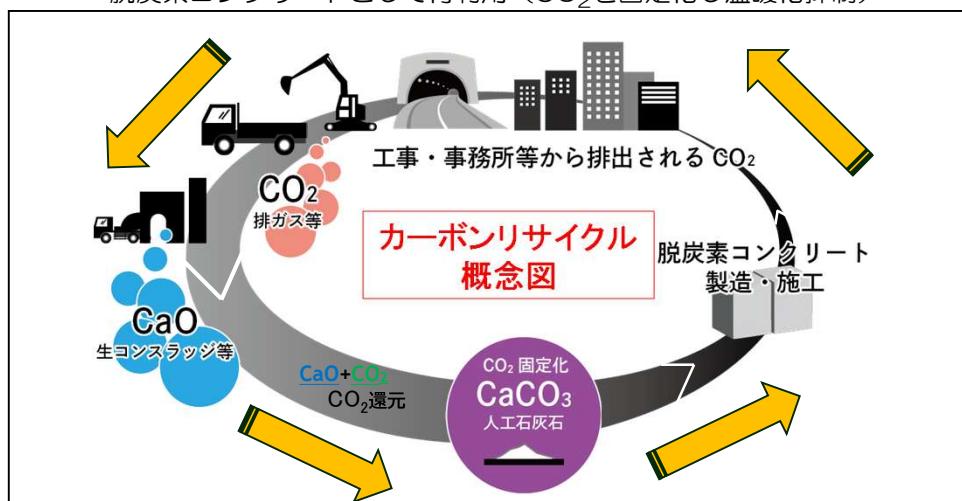
- ・建築現場、オフィス、外気・・・適用範囲の拡大



87

おわりに

建設分野特有のコンクリート廃材やスラッジにCO<sub>2</sub>を固定化し、脱炭素コンクリートとして再利用 (CO<sub>2</sub>を固定化し温暖化抑制)



脱炭素社会に向けた取り組み

【サイクルにすることが重要：天然石灰石を不使用】

88



ご清聴ありがとうございました。

大地への愛 人間への愛  
 錢高組