

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会(JCMA)  
「コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム2024」

# ジオポリマーを含むアルカリ活性材料開発の現状

2024年6月6日

大分工業高等専門学校  
一宮 一夫

## 本日の講演内容

1. 研究開発のモチベーション
2. 基礎情報（硬化メカニズム，材料，配合，養生など）
3. 施工事例
4. 課題と達成度
5. 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性
6. 今後の展開

## 「セメントはどうするつもりか」



### 第3章 気候について論じるときの五つの問い

- 1 五二〇億トンのうちのどれだけなのか
- 2 **セメントはどうするつもりか**
- 3 どれだけの電力なのか
- 4 どれだけの空間が必要か
- 5 費用はいくらかかるのか

セメント製造にともない発生するCO<sub>2</sub>は総排出量の約8%  
(1トンのセメント製造で約800kgのCO<sub>2</sub>が排出)



- 作戦1 : 原料の石灰石から分離したCO<sub>2</sub>をコンクリート製造時に再び固定  
(CO<sub>2</sub>吸収コンクリート : カーボンニュートラル / ネガティブ)
- 作戦2 : **セメントを使用しないコンクリート**  
(ジオポリマー (GP) , アルカリ活性材料 (AAM) )

## ジオポリマーは、FAから溶出する金属元素と水ガラスが反応した硬化体

系統	結合材	CO <sub>2</sub> 排出量	材料	主な硬化メカニズム	主な生成物
セメント系	OPC	高	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
	混合セメント	中	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
	OPC (CO <sub>2</sub> 吸収型)	低	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
AAMs系	GP	低	FA, アルカリ溶液	縮重合反応	N-A-S-H
	FA-BS併用GP	低	FA, BS, アルカリ溶液	縮重合反応 水和反応	N-A-S-H C-A-S-H
	AAM	低	BS, アルカリ溶液	水和反応	C-A-S-H

- FA : フライアッシュ
- BS : 高炉スラグ微粉末
- アルカリ溶液 : 水ガラス + 苛性ソーダ + 水

## AAMsは多機能

炭素量	区分	バインダー	材料	機能					
				使用実績	構造安全性	低炭素	耐酸性	耐高温性	有害物質固定
高炭素	セメント コンクリート	セメント	C+W	◎	○				△
中炭素	混合セメント	セメント 混和材	例えば C+BS+W	◎	○	△			△
低炭素	CO <sub>2</sub> 吸収型 コンクリート	セメント	C+W	△	○	○			△
	AAMs	GP	FA+ アルカリ溶液		○	○	○	○	○
		FA-BS 併用系GP	FA+BS+ アルカリ溶液		○	○	○	○	○
		AAM	BS+ アルカリ溶液		○	○	△		△

# AAMsは多機能：SWOT分析

内部要因

プラス

## 強み (Strengths)

- 低炭素
- 産業副産物の大量使用
- 耐酸性
- 耐高温性
- 耐ASR性
- 調湿性
- 有害物質の固定
- 低温でのセラミックス製造
- 高い粘性 (→3Dプリント)

外部要因

## 機会 (Opportunities)

- カーボンニュートラル (現在は「脅威」)
- エネルギーミックスの必要性
- 電力自由化
- 福島原発事故 (放射性物質固定)
- インフラ長寿命化 (耐酸性, 耐ASR性)
- 省資源 (石灰石採取制限?)
- 世界的な研究開発の機運の高まり
- GP用化学混和剤の登場?

マイナス

## 弱み (Weaknesses)

- 施工実績の不足
- 材料コスト高
- 高アルカリ材料の使用
- 材料品質のばらつき
- 性能評価方法がない
- 材料・構造設計法がない
- 溶出の可能性
- 反応メカニズムの詳細が不明
- 高い粘性 (低作業性)

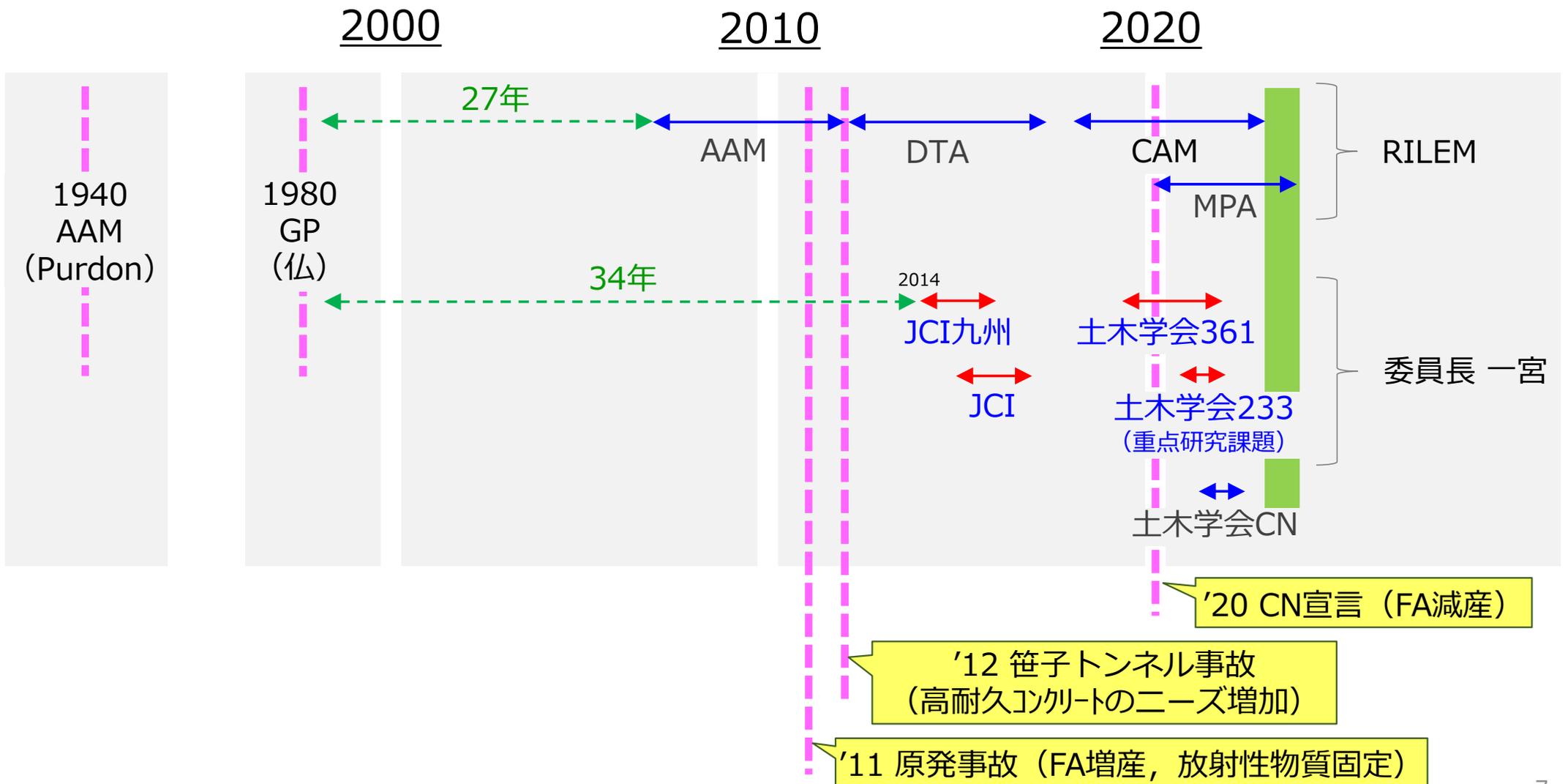
## 脅威 (Threats)

- 石炭火力発電の縮小 (FAの減産)
- 高炉水素還元技術 (BSの減産?)
- 既存技術からの脱却に対する社会の反応

高炉水素還元技術  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johot/eikyo/course50.html>

※「強み」の一部はジオポリマーの特徴が発揮できる配合の場合に限る

# わが国初のGP研究委員会活動開始から「まだ10年／もう10年」



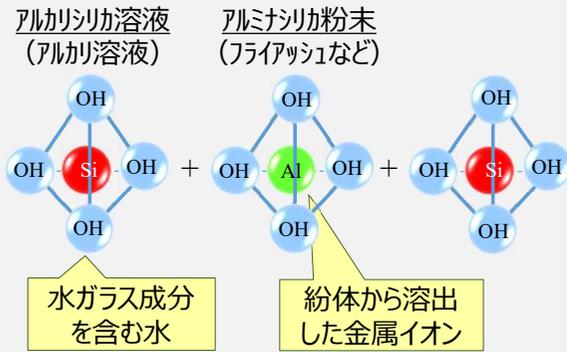
## アルカリ溶液：基本は「水ガラス（ケイ酸ナトリウム）」

分類	名称	材料	備考
1	Na系	水ガラス（ケイ酸Na）, 苛性ソーダ（水酸化Na）, 水	
	K系	ケイ酸カリウム, 水酸化カリウム, 水	
2	一般法	水ガラス, 苛性ソーダ, 水	
	溶解法	シリカフューム（SF）, 苛性ソーダ, 水	SFと苛性ソーダから水ガラス成分を生成
3	苛性ソーダを使用しない方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭酸ナトリウムを用いる方法</li> <li>オルトケイ酸ナトリウムを用いる方法</li> <li>その他</li> </ul>	今後の発展に期待

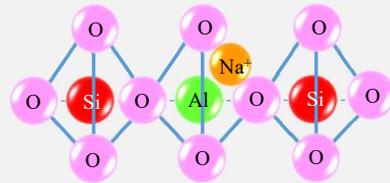


# AAMsの反応生成物（「ナッシュ」と「キャッシュ」）

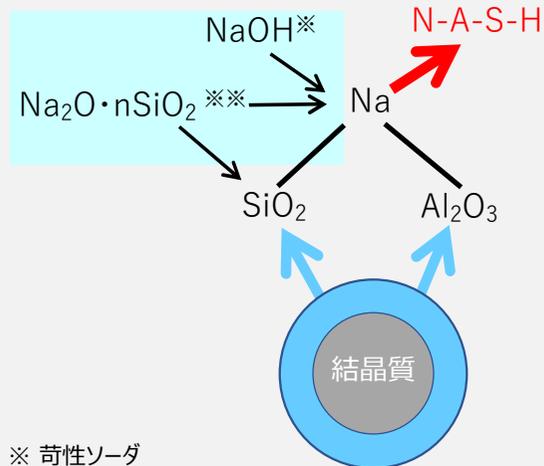
## フライアッシュ → N-A-S-H



ジオポリマー (N-A-S-H)

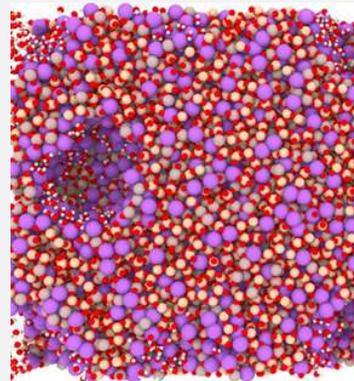


ケイ酸錯体を架橋しポリマー化 (Alの周りは負電荷を帯びることから陽イオンのNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等が必要放射性物質のCs<sup>+</sup>などはNa<sup>+</sup>と置き換わる)。

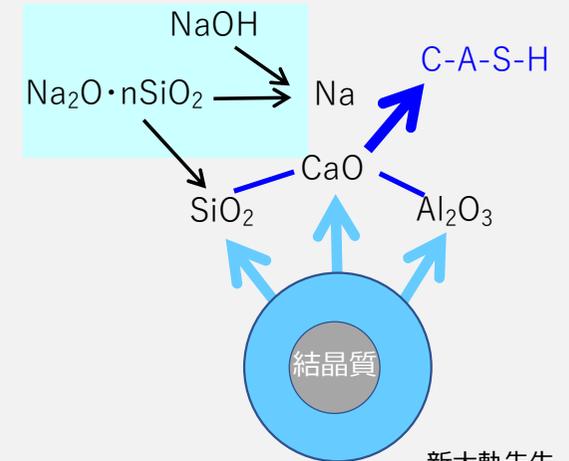


※ 苛性ソーダ

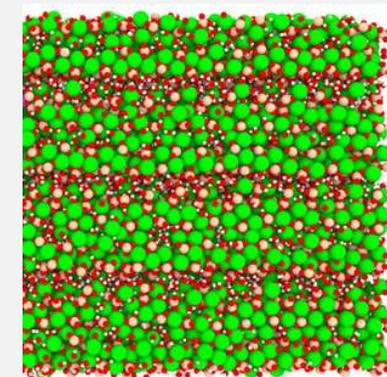
※※ 水ガラス: Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>·mH<sub>2</sub>O



## 高炉スラグ微粉末 → C-A-S-H



新大軌先生



● Na  
● Si  
● Al  
● Ca  
● O  
● H

# GPの特徴・性質 = 「活性フィラーの特性」×「アルカリ溶液の配合」×「養生温度」

GPの特徴・性質 = 活性フィラーの特性 × アルカリ溶液の配合 × 養生温度

→ 要求性能に応じて様々な材料設計が可能

## 活性フィラーの特性

多 少

↑ ↑

FA BS

- ゼラチン様非晶質
- 高温養生が基本
- 多孔質, 低pH
- 長い可使用時間

↓ ↓

- Caケイ酸塩
- 常温固化も可
- 緻密, 高pH
- 短い可使用時間

少 多

## アルカリ溶液の配合

0% 100%

↑ ↑

Na K

- 低粘性
- 低水量が可能
- 高コスト

同一配合で強度等への影響小

↓ ↓

- 高粘性
- 凝結しやすい
- 低コスト

100% 0%

0.25

↑ ↓

A/W

- FAもよく反応
- ゼラチン用非晶質
- 諸性能向上
- 高pH, 高温特性劣る場合も

0.06

1.10

↑ ↓

Si/A

- 凍結融解抵抗性や乾燥収縮特性がやや劣る?

フレッシュ性状に影響→最適値はその他の配合次第

0.0

多

↑ ↓

W

- 低強度
- 多孔質
- 流動性大

強度→配合や養生による例外も

- 高強度
- 緻密
- 流動性小

少

## 養生温度

180°C

↑

- FAも良く反応
- ゼラチン化も, 低pHに

80°C

↓

- FAも反応
- ゼラチン様非晶質
- pHは常温養生より低

60°C

↓

- BSが主に反応
- Caケイ酸塩, 高pH

20°C

鉄道総研 上原 元樹 氏

# 活性フィラー：ガラスの量とガラスの質

主剤

アルカリ溶液

水ガラス, 苛性ソーダ, 水

+

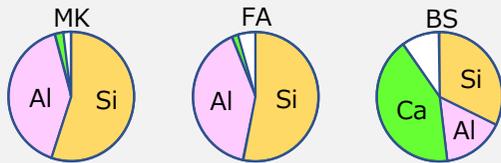
硬化剤

活性フィラー

フライアッシュ(FA)  
高炉スラグ微粉末(BS)

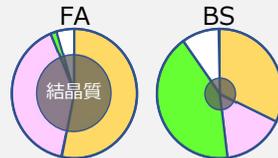
(活性フィラーの) 溶けやすさ = f (化学組成, ガラス化率, 比表面積, その他)

FAはMKによく似た化学組成 (GPに有利)



BSは非晶質が多く, FAよりも溶けやすい

BSの方がガラス化率が高い (非晶質量が大きい)  
※ 結晶質は溶け難い

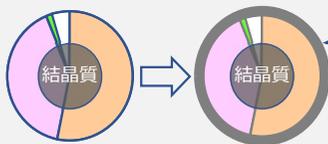


ガラス化率は, 原料品質や燃焼条件で変動する

FAのセメント溶液に対する溶けやすさは, API法 (山本ほか) が有効。  
AAMsへの適用性は??



「溶けやすければよい」というわけではない



溶出が速すぎると粒子表面にバリアを形成し, その後の反応 (溶出) を阻害

GPを生成するためのフィラー材料は, Si, Alを主成分とした非晶質である必要があり, 粉体中の結晶相は反応には寄与しないと考えられる。その意味で, 活性フィラー中の非晶質量(ガラス化率)を把握しておくことが重要である。近年では, 粉末X線回折(XRD)/リートベルト法等により, 試料中のガラス化率を測定することが比較的簡便に行うことができる。一般に, BSはほぼ全量が非晶質であるのに対し, 国内のFAのガラス化率は60-80 %程度であり, FAのガラス化率は, 原料である石炭の品質や燃焼条件で変動することが指摘されている。

また, 「ガラスの量」であるガラス化率のみならず, 「ガラスの質」ともいべき非晶質中のCaやSi, Alなどの量の相違による反応のしやすさの程度の差を把握することも重要である。これは, ガラス相の化学組成から塩基度を算定して評価したり, FAのポゾラン反応性を評価する手法として提案されているAPI法のGPの活性フィラーの評価への適用性についての検討など, 今後の研究が期待されている。

ガラス化率はXRDで評価

強度で総合評価

「サプリメント」による調整?  
(フィラーの混合使用もその一例)。

## AAMsの基礎知識は講演動画などで閲覧可能

### ① コンクリートメンテナンス協会



▶ 2024フォーラム講演動画



▶ 2023フォーラム講演動画



▶ 2021フォーラム講演動画

### ② 2021年度 重点研究課題

新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究報告書



土木学会 重点研究課題

### ③ 土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361委員会）成果報告書



土木学会 コンクリート委員会 ジオポリマー

# オーストラリアの取り組み：LOW CARBON LIVING CRC

[RP1020: Field Performance of Geopolymer Concrete Structures | Low Carbon Living CRC \(unsw.edu.au\)](#)

[crclcl rp1020 final report gpc field testing final 260218](#)



The screenshot shows the website interface for the Low Carbon Living CRC. At the top, there is a navigation bar with the CRC logo, a search bar, and a 'Login' button. Below the navigation bar, there are menu items: Home, Research, Partners, Research Nodes, Resources, Archived News, and About us. The main content area displays the breadcrumb trail: Home > Resources > CRC Publications > CRCLCL Project Reports > RP1020: Field Performance of Geopolymer Concrete Structures. The title 'RP1020: Field Performance of Geopolymer Concrete Structures' is prominently displayed. Below the title, there is a paragraph of Japanese text describing the project's goals and findings. At the bottom of the page, there is a 'Projects:' section listing two related projects: 'RP1020: Reducing Barriers for Commercial Adaptation of Construction Materials with Low-Embodied-Carbon' and 'RP1020u1: Demonstrating the practical use of geopolymer concrete: high density coastal protection units'.

LOW CARBON LIVING  
CRC

Login

Search

Home > Resources > CRC Publications > CRCLCL Project Reports > RP1020: Field Performance of Geopolymer Concrete Structures

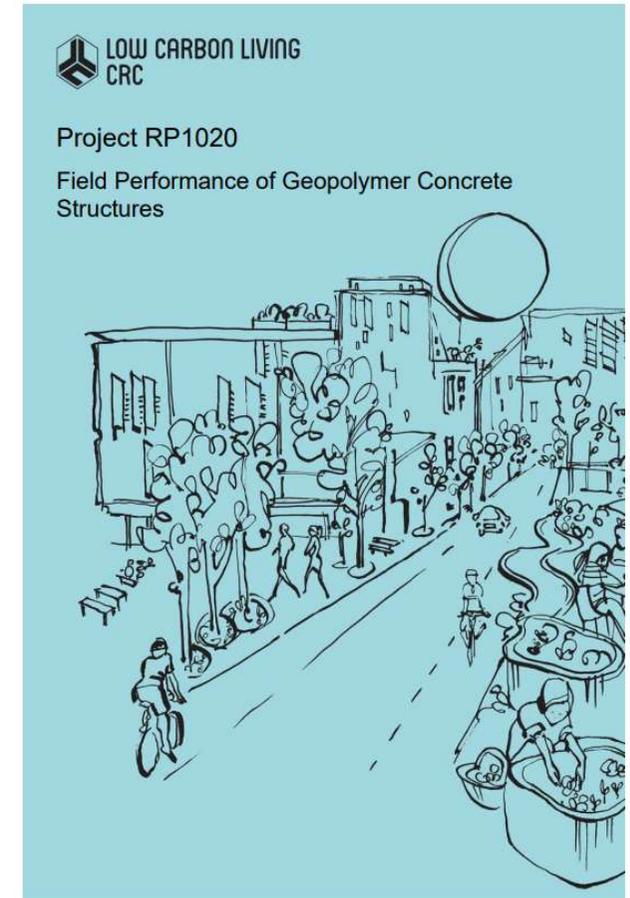
## RP1020: Field Performance of Geopolymer Concrete Structures

ジオポリマーコンクリートを建設に採用する際の大きな障壁は、長期的な性能データが不足していることである。実地試験によって、さまざまな使用環境におけるジオポリマーの挙動を明らかにし、知識のギャップを解消することができる。ニューサウスウェールズ大学とスウィンバーン工科大学は、炭酸化、塩化物の浸入、補強材の腐食、酸による腐食などの耐久性を調べるため、実地試験を実施した。本報告書では、オーストラリア全土の4つの現場におけるジオポリマーコンクリートの原位置試験とコアサンプリング、2つのジオポリマーコンクリート構造物の長期性能モニタリング、モルタル試験片の生物起源腐食を調査するための原位置試験手順について述べる。

[crclcl rp1020 final report gpc field testing final 260218 \(23378406 PDF\)](#)

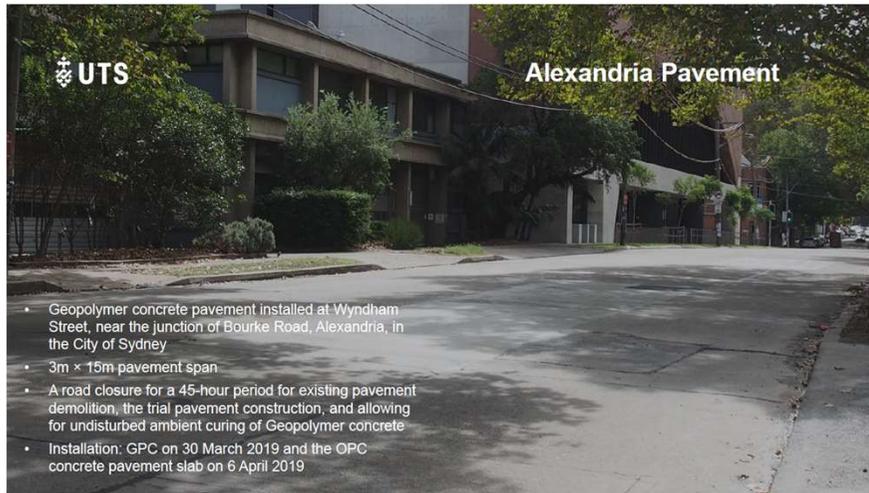
**Projects:**

- RP1020: Reducing Barriers for Commercial Adaptation of Construction Materials with Low-Embodied-Carbon
- RP1020u1: Demonstrating the practical use of geopolymer concrete: high density coastal protection units



# 施工事例 1 : 道路舗装 (シドニー)

シドニー工科大学 (UTS) 提供



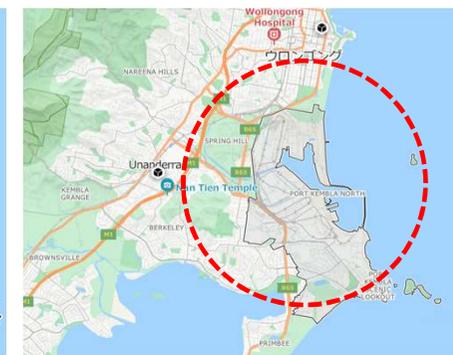
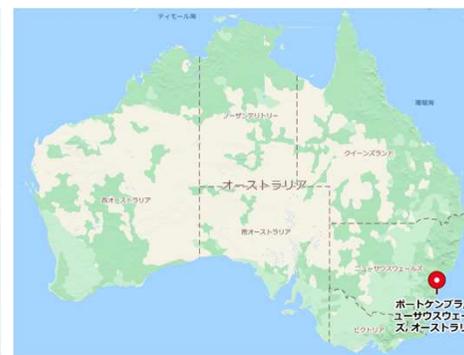
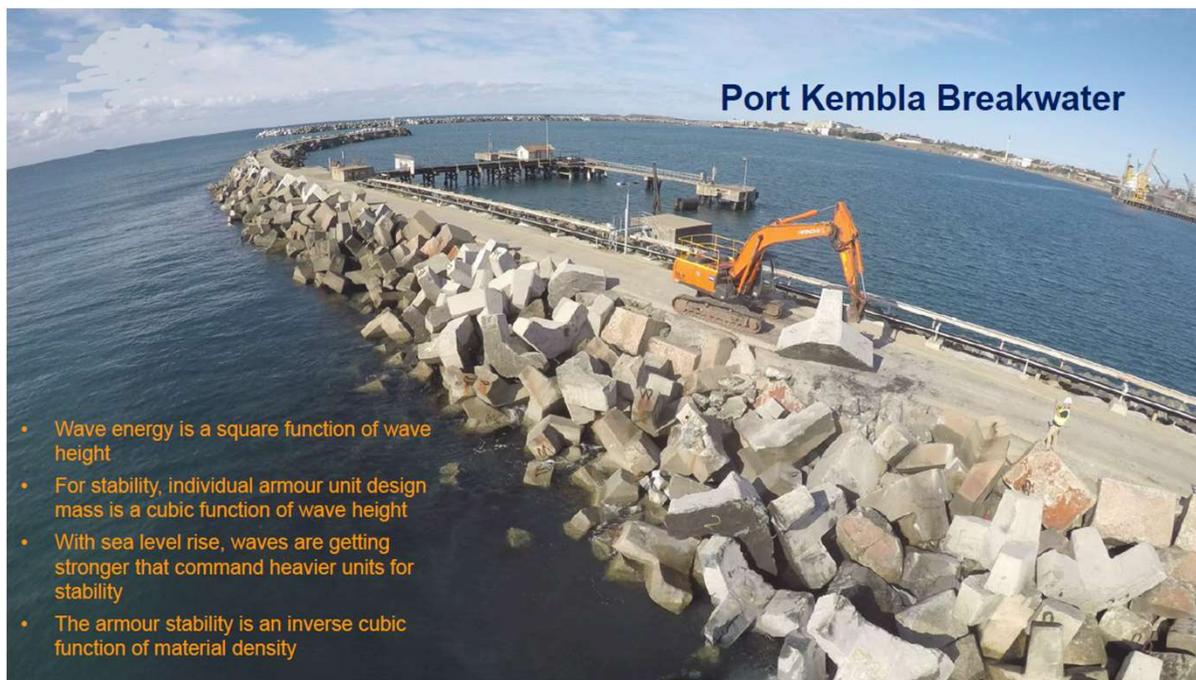
[CRCLCL drives world-first green concrete trial on Sydney road | Low Carbon Living CRC \(unsw.edu.au\)](https://www.unsw.edu.au/news/stories/crclcl-drives-world-first-green-concrete-trial-on-sydney-road)

- 2019年3月30日に施工
- シドニー市アレクサンドリア、バーク・ロード交差点近くのウィンダム・ストリートに設置されたGPコンクリート舗装
- 舗装スパン3m×15m
- 既存舗装の取り壊し、試験舗装の施工、ジオポリマー・コンクリートの環境養生のため、45時間の通行止め



## 施工事例 2 : ポート・ケンブラ港防波堤 (シドニー)

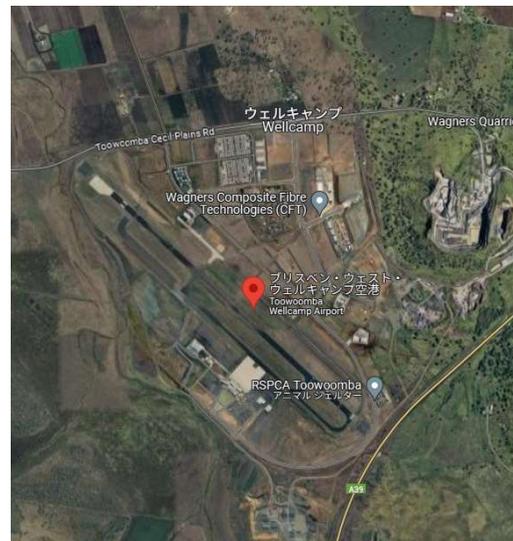
シドニー工科大学 (UTS) 提供



- 高密度GPコンクリート製消波ブロック, 13基
- 可使用時間は約120分
- スランプは11cm
- 圧縮強度は45 Mpa (28日)
- 引裂強度は3.5 MPa (28日)
- ヤング係数は36GPa (28日)



## 施工事例 3 : ウェスト・ウェルキャンプ空港のエプロン (ブリスベン)



- 2013年
- オーストラリアのトゥーンバ, ウェスト・ウェルキャンプ空港のエプロン部
- アースフレンドリーコンクリート (EFC) = GPコンクリート
- ポルトランドセメント不使用
- 二酸化炭素排出量の削減 (プロジェクト全体で約6,600トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減)
- 舗装は、スリップフォーム・ペーパー・マシンを使って施工され、スケジュールが30%改善され、現場密度試験の結果も優れていた。

## 施工事例 4 : 製鉄所構内の耐熱壁

[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330_1.html)



- 2021年
- 製鉄所構内の高温環境の擁壁（RC構造）補修工事に適用
- 一般的なコンクリートと同様の施工方法で大断面かつ狭あいな擁壁補修での打ち込み成功
- 「耐高温性」「2時間以上の可使用時間」「現場でのポンプ圧送」を実現
- 新開発の特殊混和剤を使用
- 施工に適した流動性を保ちつつ、常温養生でも強度の確保が可能

## 施工事例 5, 6 : マンホール, まくらぎ

### 実プラントを使用したマンホール製造



電中研 菊地道生 氏

### まくらぎ



鉄道総研 上原元樹 氏

# 施工事例 7 : 歩車道境界ブロック (別府温泉はGPにとっても「地獄」)

※「地獄めぐり」は別府観光の目玉



1期  
2015



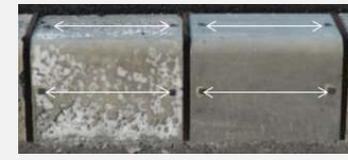
劣化発生 → 応急処置として現場で刷毛でシラン系含浸剤を塗布

2期  
2016

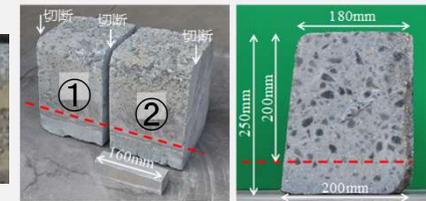


含浸剤を出荷前に全面にスプレーガンで塗布

3期  
2018



塗布なし 塗布あり



1期 2015

- 2期と同じ方法で製作し, カッターで分割
- 上面と側面に, 長さ変化測定用チップを貼付

4期  
2022



ショットブラストで表面のペースト層を除去

## 課題と達成度

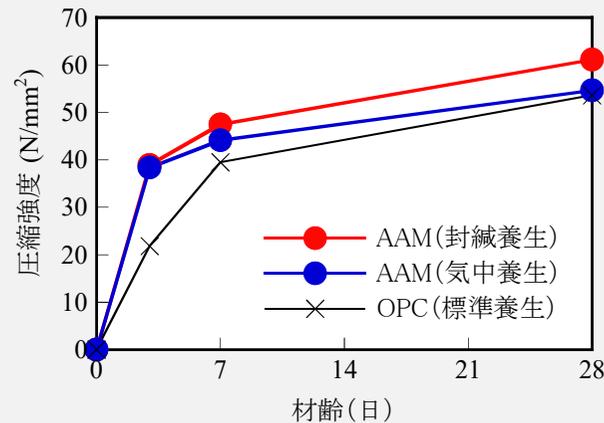
- 現場打ちに使うために常温固化させたい 
- 硬化（可使）時間を長くしたい 
- 専用の化学混和剤が欲しい 
- 配合理論や構造設計法を完成させたい 
- 材料コストを下げたい 
- 長期強度や耐久性を担保したい 
- FAやBSに代わる粉体材料を見つけたい 

# 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性

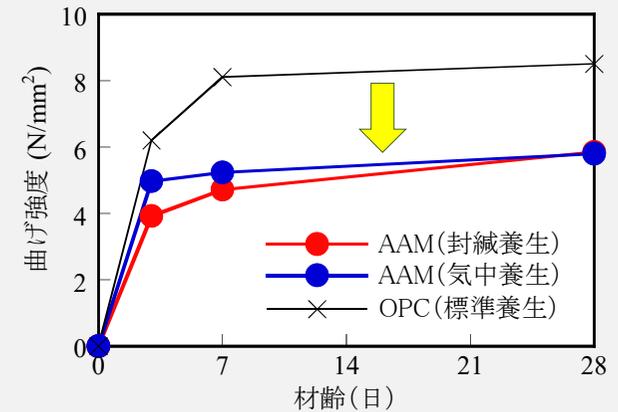


	FA-BS併用系GP	AAM
BS置換率(%)	0%~30%	100%
アルカリ溶液濃度(A/W)	0.095~0.187 (0.126)	0.055
生成物	N-A-S-H, C-A-S-H	C-A-S-H

## 強度



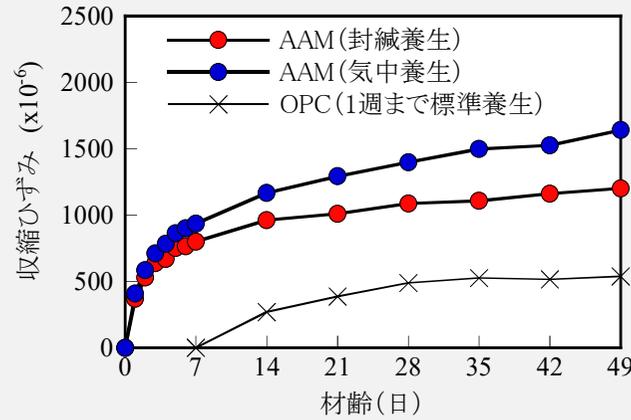
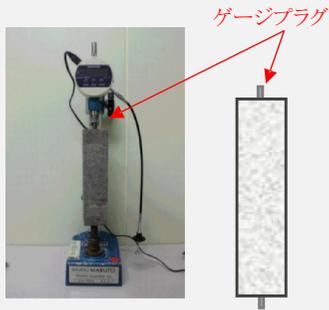
圧縮強度 (モルタル)



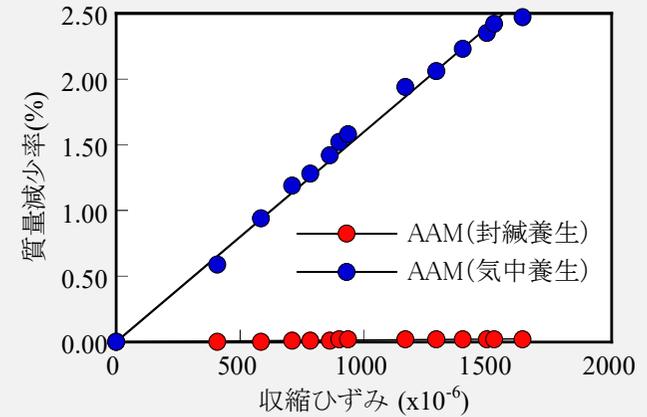
曲げ強度 (モルタル)

# 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性

## 収縮ひずみ

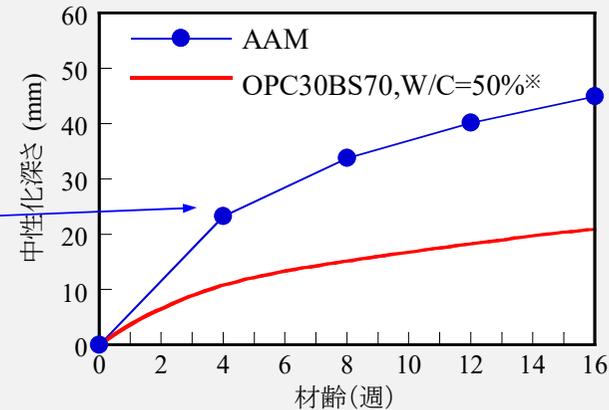
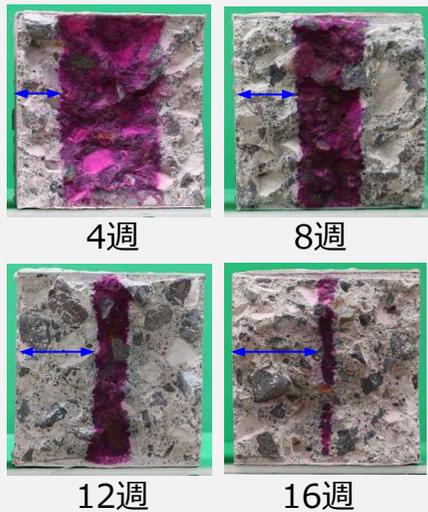


収縮ひずみと材齢の関係 (モルタル)



質量減少率と収縮ひずみの関係 (モルタル)

## 中性化



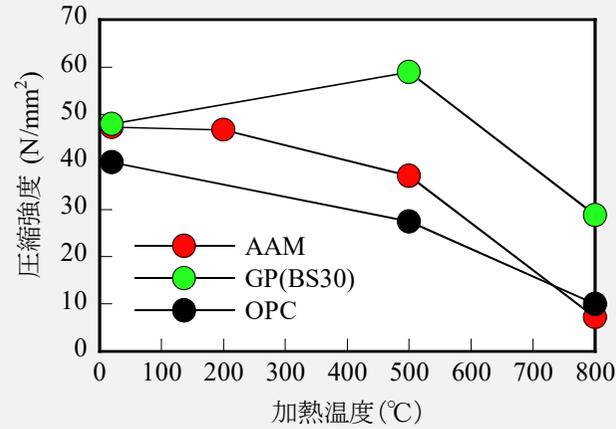
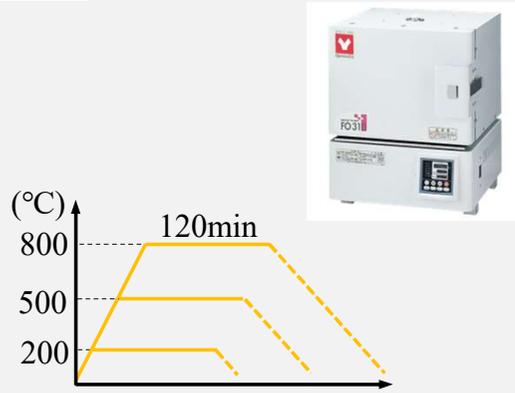
中性化深さと試験材齢の関係 (コンクリート)

AAMは中性化が速い  
(OPCの2.5倍)  
↓  
CO<sub>2</sub>吸収能力に優れる

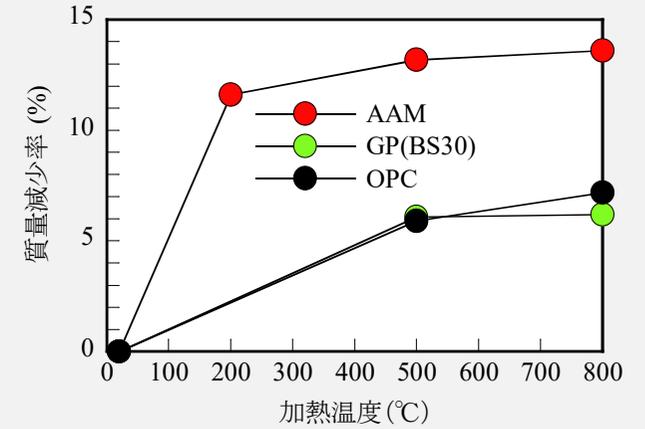
※ 内藤哉良, 松下博通, 鶴田浩章, 佐川康貴, 福田諭士: 各種混和材を混入したコンクリートの中性化に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.25-26, 2003

# 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性

## 耐高温性

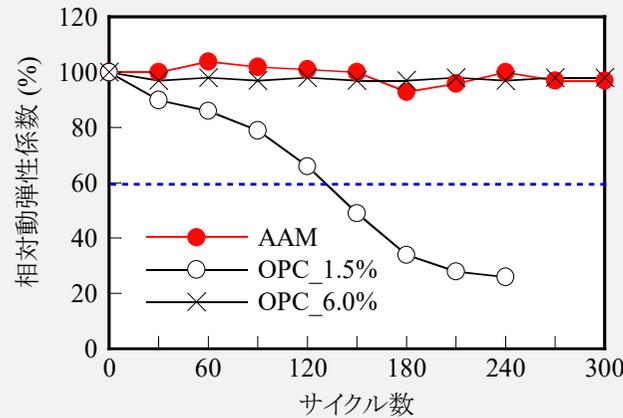


冷却後の圧縮強度 (モルタル)



質量減少率 (モルタル)

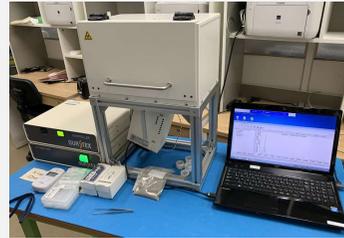
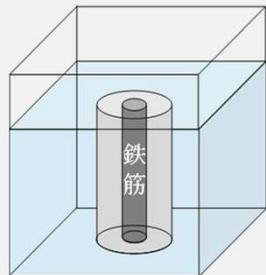
## 耐凍害性



300サイクル終了後の供試体表面 (AAMコンクリート)

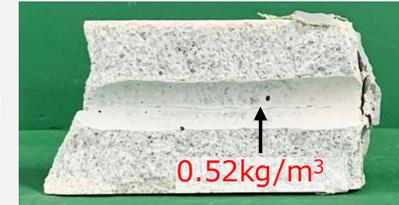
# 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性

## 塩化物イオン透過性

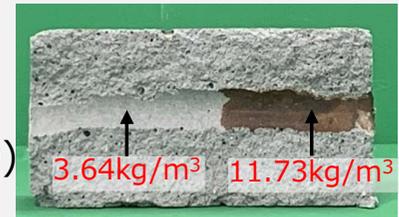


<http://www.ourstex.co.jp/jp/product/product-2/ourstex101fa/>

AAM

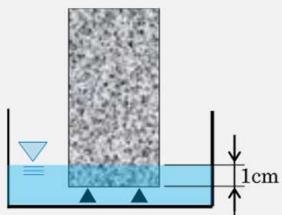


GP (BS10)



[https://www.taisei.co.jp/giken/report/2009\\_42/paper/A042\\_008.pdf](https://www.taisei.co.jp/giken/report/2009_42/paper/A042_008.pdf)

## 白華



	0日	1週	2週	6週	10週
AAM					
GP (BS10)					

AAM



外観



割裂面



割裂面

GP (BS10)



外観



割裂面

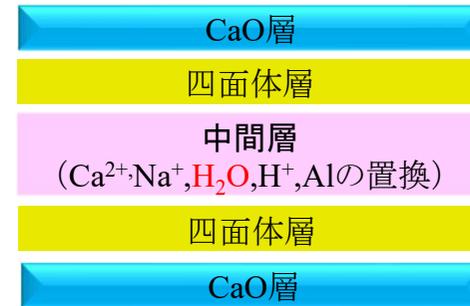
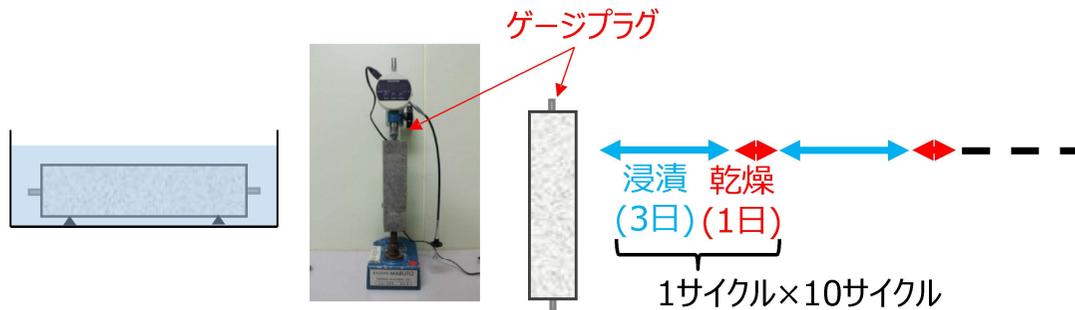
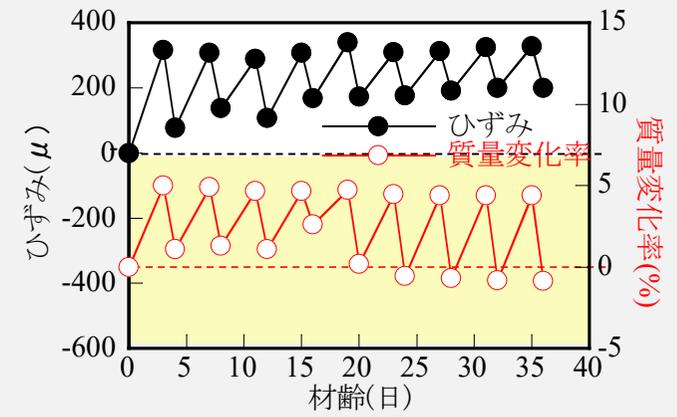
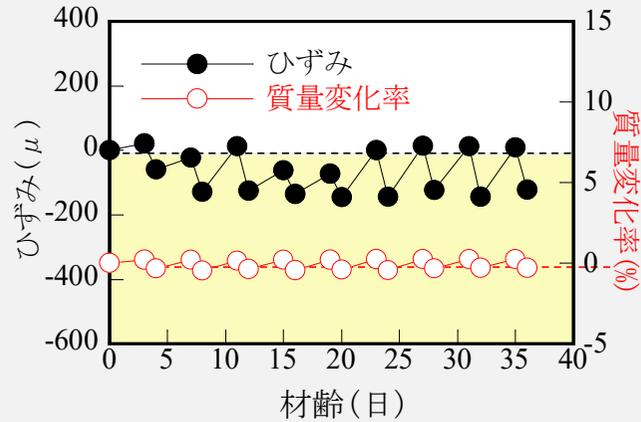
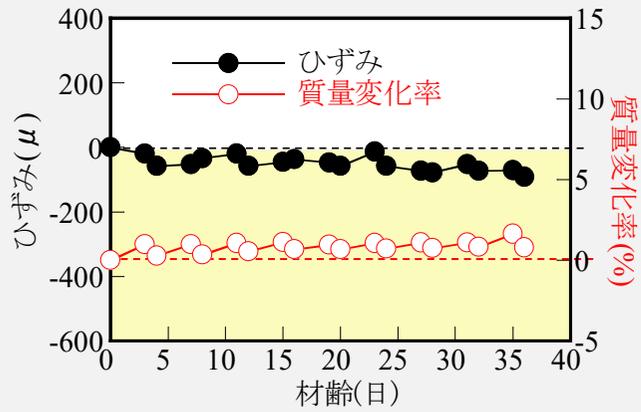


乾燥域

水

# 高炉スラグ微粉末ベースのAAMの基本物性

## 乾湿繰り返しによる長さ変化



C-A-S-Hの構造イメージ  
(中間層 (ピンク) は吸水膨張ならびに乾燥収縮をする)

## 今後の展開：性能規定型設計法で対応



- 強みを強化
- 弱みを克服
- 高度化と尖鋭化



- 使用目的や材料を限定したうえで規準類を作成し、実績を増やす
- 「性能規定型設計法」の適用

既存の設計基準類の適用が出来なかった状況下で「性能照査」の考え方で建設された構造物の例



島地川ダム (しまじがわダム)

山口県、1978着工

世界初の本体施工にRCD工法を本格採用



羽田空港D滑走路

世界初の人工島と栈橋のハイブリッド滑走路

# 今後の展開：石炭火力発電縮小への対応

## 石炭ガス化スラグ微粉末 Coal Gasification Slag

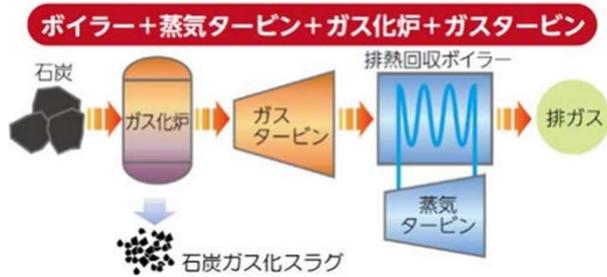
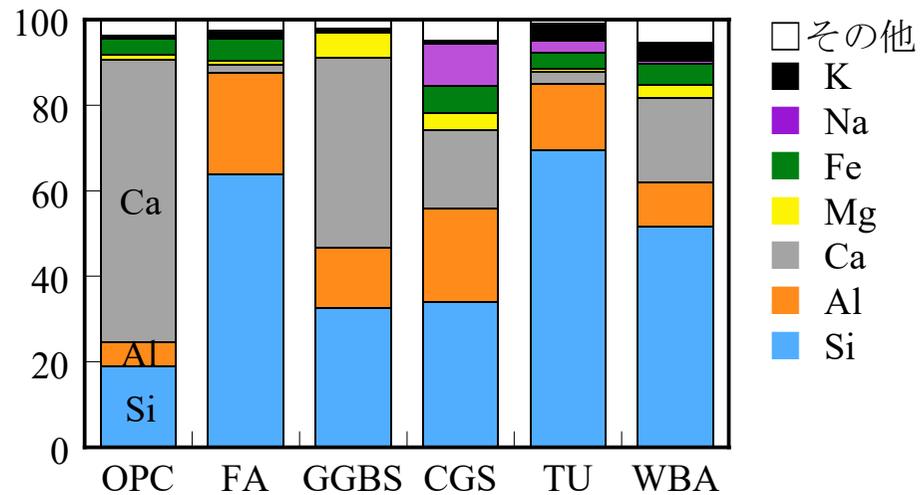
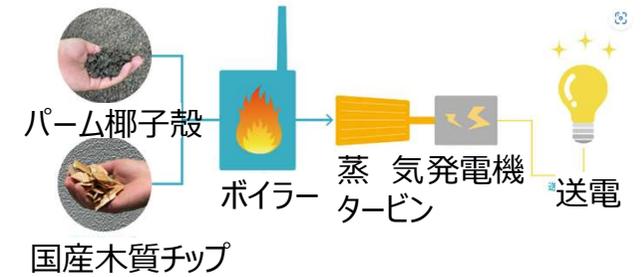


図1 IGCCの設備構成

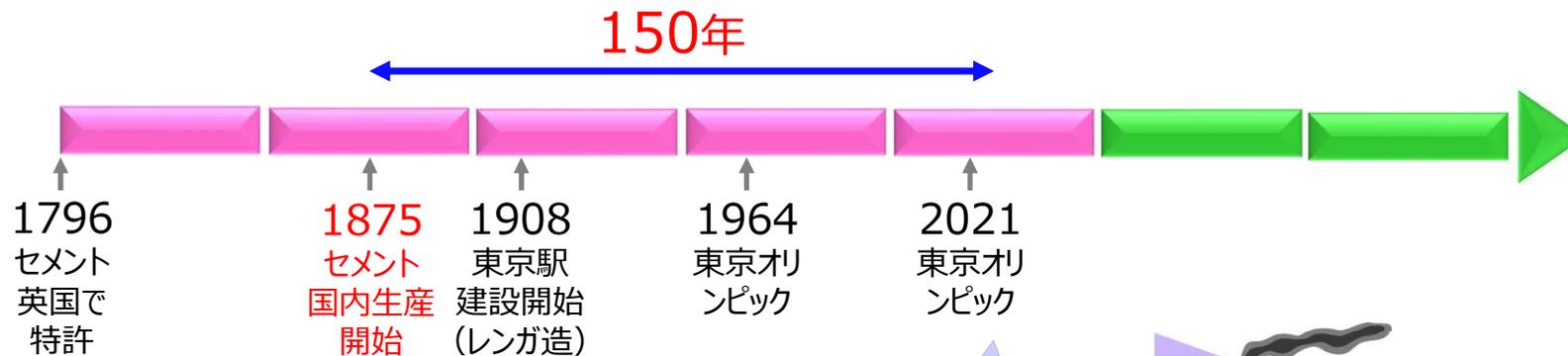
## 非溶結凝灰岩 TUFF



## 木質バイオマス燃焼灰 Woody Biomass Ash



# 今後の展開



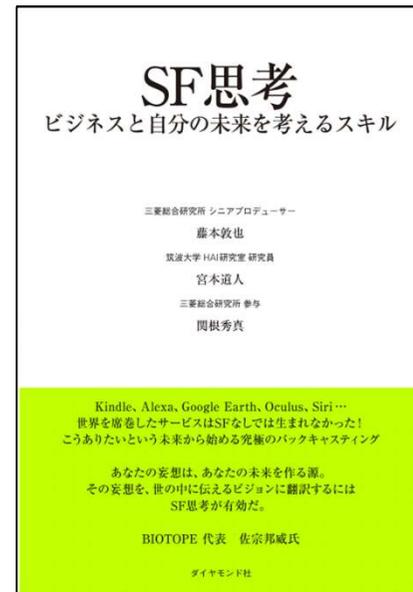
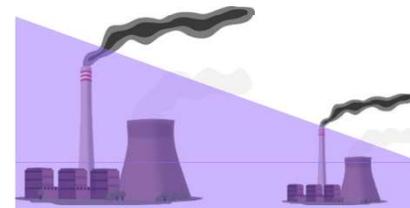
1914竣工, 2012復原



当時 (セメント国内生産開始からすでに33年経過), 長期性能が不明であったコンクリートの導入は見送られた → 今のGPも同じような状況??

辰野金吾, NHK「独占公開! 東京駅復活大作戦」

2025 大阪万博



- 化学混和剤
- 締固め不要コンクリート
- セメント不要コンクリート (ジオポリマー)
- CO2吸収コンクリート
- 3Dプリンティング
- もしもセメントが使えない社会が来たら...

ご清聴ありがとうございました

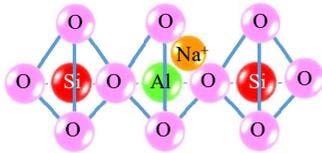


アルカリシリカ溶液 (アルカリ溶液) + アルミナシリカ粉末 (フライアッシュなど)



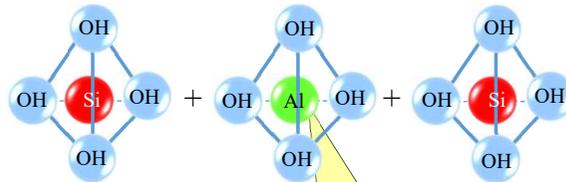
水ガラス成分を含む水 (left) / 紛体から溶出した金属イオン (right)

ジオポリマー (N-A-S-H)



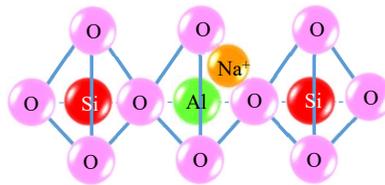
ケイ酸錯体を架橋しポリマー化 (Alの周りは負電荷を帯びることから陽イオンのNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等が必要。放射性物質のCs<sup>+</sup>などはNa<sup>+</sup>と置き換わる)。

アルカリシリカ溶液 (アルカリ溶液) + アルミナシリカ粉末 (フライアッシュなど)



水ガラス成分を含む水 (left) / 紛体から溶出した金属イオン (right)

ジオポリマー (N-A-S-H)



ケイ酸錯体を架橋しポリマー化 (Alの周りは負電荷を帯びることから陽イオンのNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等が必要。放射性物質のCs<sup>+</sup>などはNa<sup>+</sup>と置き換わる)。

