

近未来コンクリート研究会協議会

セメントを使用しない低炭素型コンクリート開発の現状
(ジオポリマーを含むアルカリ活性材料を中心に)

2024年1月16日

大分工業高等専門学校
一宮 一夫

1

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. GGBSベースのAAMの基本物性（2023 JCI九州での発表から）
6. 今後の展開

2

「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CO₂は総排出量の約8%
(1トンのセメント製造で約800kgのCO₂が排出)



- 作戦1 : 原料の石灰石から分離したCO₂をコンクリート製造時に再び固定
(CO₂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))

3

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

炭素量	区分	バインダー	材料	硬化メカニズム	生成物
高炭素	セメント コンクリート	セメント	C+W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
低炭素	CO ₂ 吸収型 コンクリート	セメント	C+W	水和反応	C-S-H CH
	AAMs (アルカリ活性材料)	GP (ジ ^シ 林 ^リ マ ^ー)	FA + アルカリ溶液	縮重合反応	N-A-S-H
		FA-BS併用系 GP	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	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

4

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	◎	○				△
低炭素	CO ₂ 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		○	○	△		△	

5

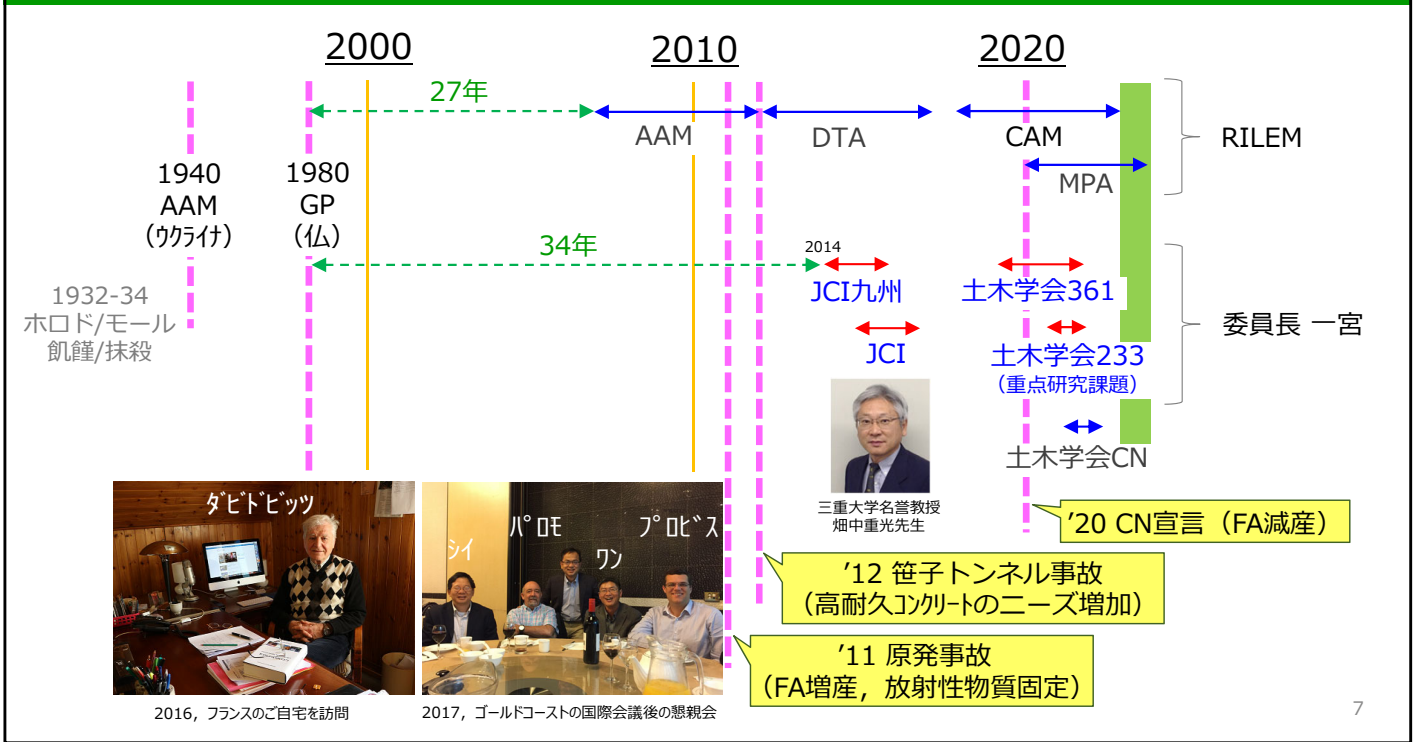
AAMsは多機能 : SWOT分析

	プラス	マイナス
内部要因	強み (Strengths)	弱み (Weaknesses)
	<ul style="list-style-type: none"> •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) 	<ul style="list-style-type: none"> •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)
外部要因	機会 (Opportunities)	脅威 (Threats)
	<ul style="list-style-type: none"> •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? 	<ul style="list-style-type: none"> •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 <p style="font-size: small;">高炉水素還元技術 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johot/eikyo/course50.html</p>

※「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

6

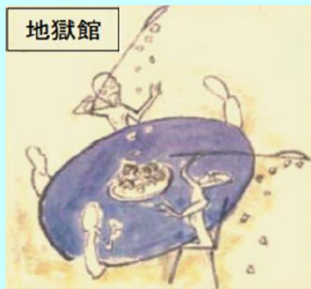
わが国初のGP研究委員会活動開始から「まだ10年／もう10年」



土木学会GP研究委員会のフィロソフィー

引用：長崎大学インフラ長寿命化センター 平成28年度活動報告書 長崎大学教授 松田 浩 先生
(九州工大名誉教授 渡邊 明 先生より)

山田無文師の「むもん法話集」より



「地獄に閻魔大王が・赤鬼・青鬼などがいると言うのは全く嘘で、真中にテーブルが置いてあり、その上にはご馳走が一杯盛られていた。周りの椅子に娑婆(しゃば)から来た旧人間たちが腰掛けていて、彼らの左手を椅子にしばられ、右手には匙が括り付けてあった。
地獄館の住人たちが骨と皮に痩せ細り、罵り合っていたのに対し、極楽館の人たちは極めて血色が良く、ふくよかに談笑していた。なぜだろうとよく観察してみたら、地獄館の住人たちは自分だけがご馳走を食べようと長い匙をたぐり寄せようとするものだから、途中でほとんど落ちてしまい、自分の口には入らないのに対し、極楽館の人たちは、それぞれに長い匙で向かいの相手とお互いに食べさせ合っていた。」

これは、あの世に行って帰された人間の生還話で、己が、己がのミーイズムと、相手のことを思いやり共生を計る生き方の差を明快に教えている。

いしかわ りきのすけ
 秋田県の「老農」石川 理紀之助 翁
 (秋田の二宮尊徳)



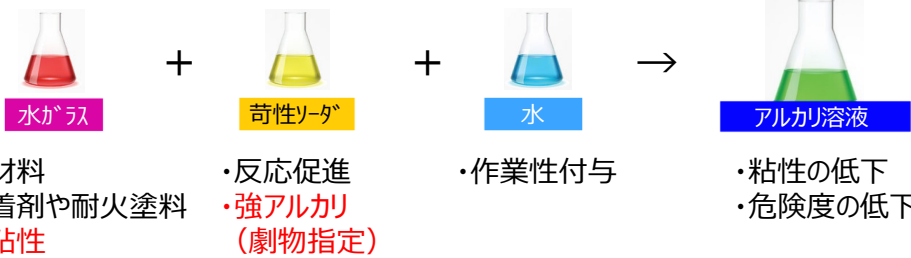
出典: ウィキペディア

「井戸を掘るなら、水が湧くまで掘れ」, 「何よりも得難いものは信頼だ。信頼は包み隠さず教えあうことから生まれる。

進歩とは、厚い信頼でできた巣の中ですくすく育つのだ」

目的をもって事を起こし、粘り強く結果を出すまで努力する。
 信頼しあい、協力して事を行う、共に学ぶ、教えあう。

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"> ・炭酸ナトリウムを用いる方法 ・オルトケイ酸ナトリウムを用いる方法 ・その他 	今後の発展に期待

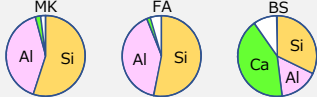
活性フィラー：ガラスの量とガラスの質

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)

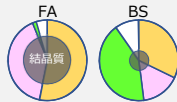
(活性フィラーの) 溶けやすさ = f(化学組成, ガラス化率, 比表面積, その他)

FAはMKによく似た化学組成 (GPIに有利)



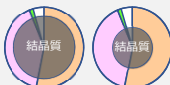
BSは非晶質が多く, FAよりも溶けやすい

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

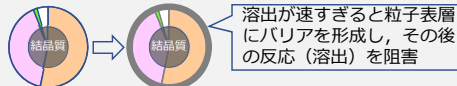


ガラス化率は, 原料品質や燃焼条件で変動する

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



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る**とあり, 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

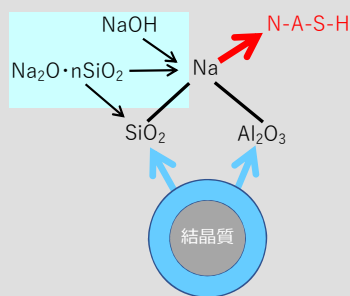
「サブリメント」による調整?
(フィラーの混合使用もその一例)。

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取組み: 一宮一夫, 山本武志, 佐川孝広, 藤山知加子, 佐川康真, コンクリート工学/61 巻 (2023) 10号

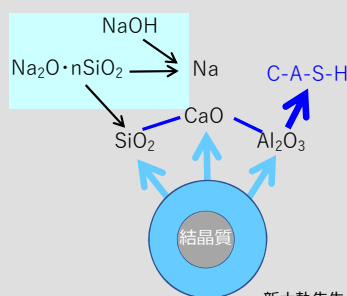
11

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**

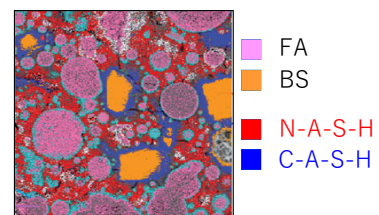


高炉スラグ微粉末 → **C-A-S-H**



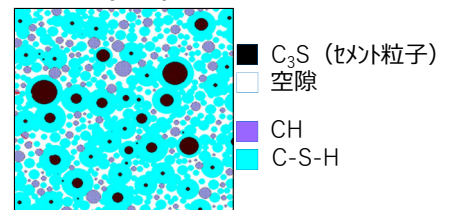
新大軌先生

FA-BS併用系GP



FA
BS
N-A-S-H
C-A-S-H

OPC(C₃S)



<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/sapporo/pdf/s9.pdf>

Reactive molecular dynamics simulation of the mechanical behavior of sodium aluminosilicate geopolymer and calcium silicate hydrate composites, Mohammad Rafat Sadata, Krishna Muralidharanb, Lianyang Zhang. *Computational Materials Science*, Volume 150, July 2018, Pages 500-509

12

AAMsの反応生成物（「ナッシュ」と「キャッシュ」）

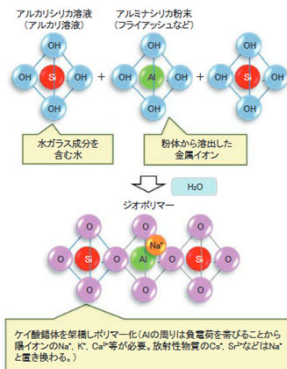
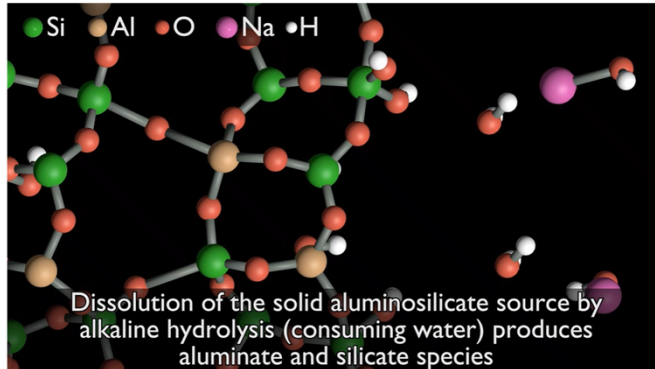


図4 FAとアルカリ溶液の反応



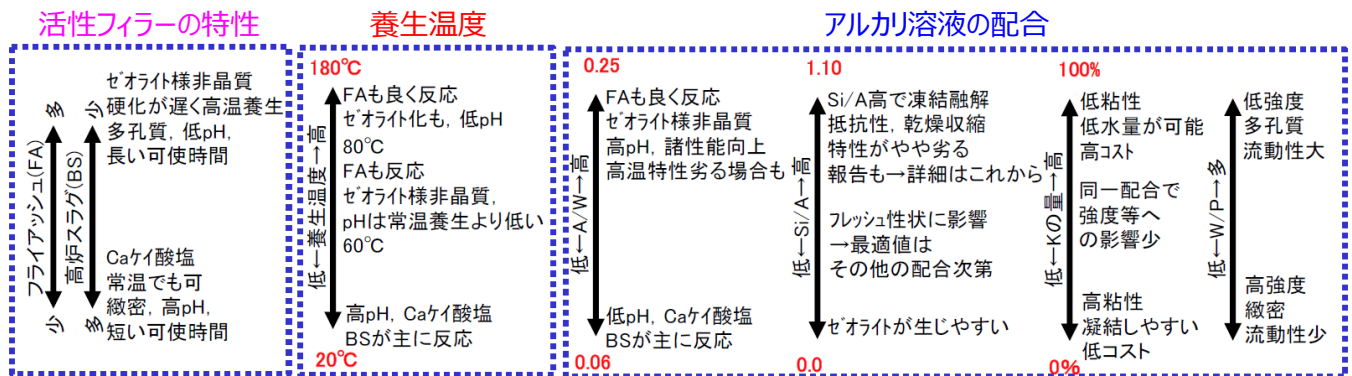
引用: https://www.youtube.com/watch?v=_BX8E0IEkVI

- ・ アルカリ加水分解（水を使う）により、固体のアルミノシリケート源を分解すると、アルミン酸塩とケイ酸塩が生成する。
- ・ シリケート、アルミン酸塩、アルミノシリケートの複雑な混合物が形成される。
- ・ 非晶質アルミノケイ酸塩の分解は高pHで急速に進み、過飽和のアルミノケイ酸塩の魂が形成される。
- ・ 濃厚な溶液では、水相のオリゴマーが縮合して大きなネットワークを形成するため、ゲルが形成される。
- ・ ゲル化後、ゲルネットワークの接続性が高まるにつれて、システムは再連続し、再編成され続ける。
- ・ その結果、ジオポリマーによく見られる3次元のアルミノシリケートネットワークが形成される。

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

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

→ 要求性能に応じて様々な材料設計が可能



鉄道総研 上原 元樹 氏

副産物の積極利用によるカーボンニュートラルへの取組み — 低炭素材料としてのジオポリマーの普及・活用 —
一宮 一夫, 池田 攻, 上原 元樹, コンクリート工学/59 巻 (2021) 9 号

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



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

🔍

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

🔍

15

施工事例 1

https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330_1.html



- 2021年
- 「**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
- 製鉄所構内の高温環境の擁壁（RC構造）**補修工事**に適用
- **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
- **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に成功

16

施工事例 2, 3, 4

空港エプロン (オーストラリア)

ブリスベンに2013年に建設されたウエスト・ウェルキャンプ空港



<https://www.wagner.com.au/main/our-projects/efc-geopolymer-pavements-in-wellcamp-airport/>

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 17

施工事例 5 : 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



温泉噴気による劣化

地盤の影響による劣化



別府明礬橋



1期
2015



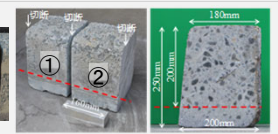
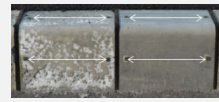
劣化発生 → 応急処置として現場で刷毛でシラン系含浸剤を塗布

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



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

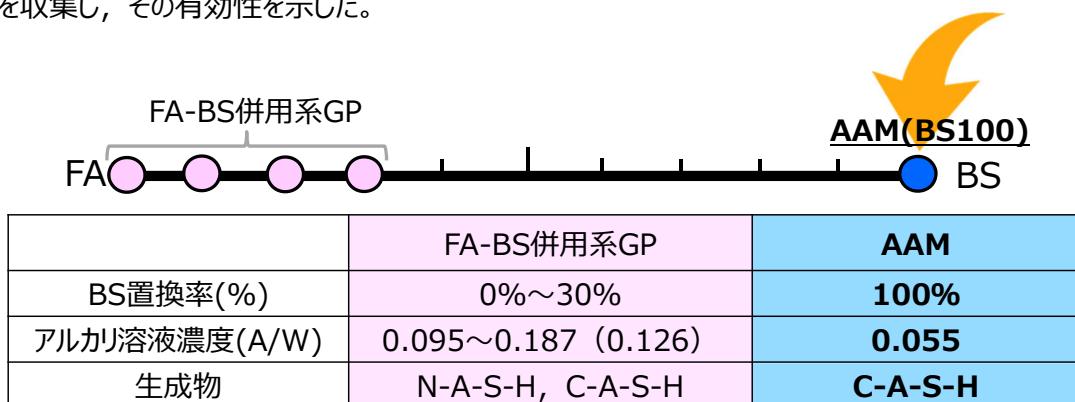


19

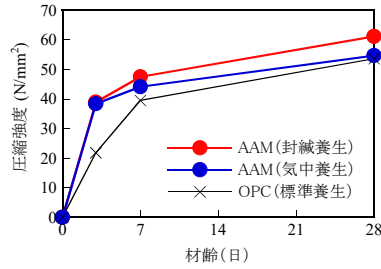
2023 JCI九州

高炉スラグ微粉末ベースのアルカリ活性材料の基本物性

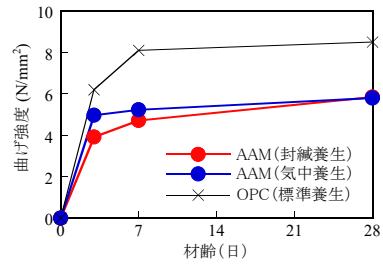
本研究では今後の石炭火力発電の縮小を見据え、BS(GGBS)とアルカリシリカ溶液との硬化体を対象とし、強度、長さ変化、高温抵抗性、白華、乾湿繰返しの影響、中性化、凍結融解抵抗性に関する基本的知見を収集し、その有効性を示した。



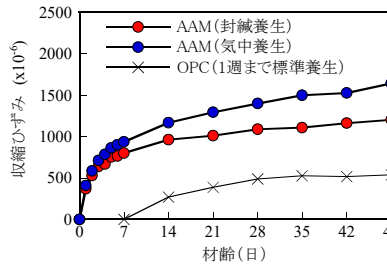
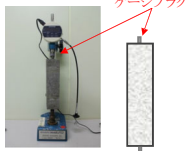
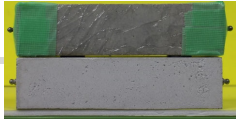
2023 JCI九州：強度 ○，長さ変化 ×？（OPCとの比較）



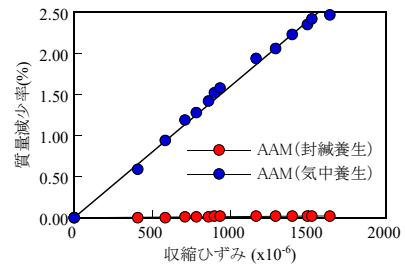
圧縮強度と材齢の関係 (モルタル)



曲げ強度と材齢の関係 (モルタル)

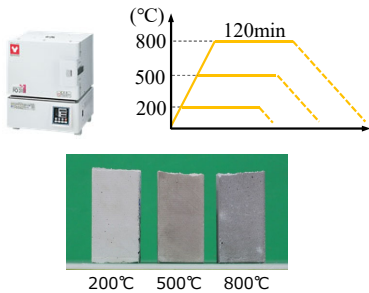


収縮ひずみと材齢の関係 (モルタル)

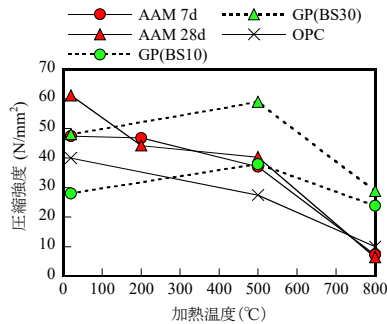


AAMモルタルの質量減少率と収縮ひずみの関係

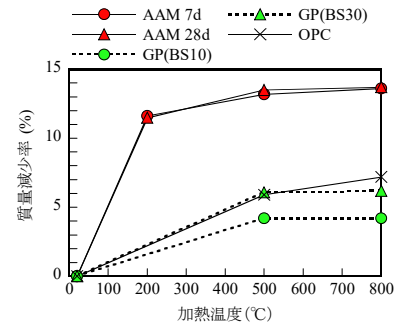
2023 JCI九州：高温抵抗性 ○，中性化 ×，凍結融解 ○



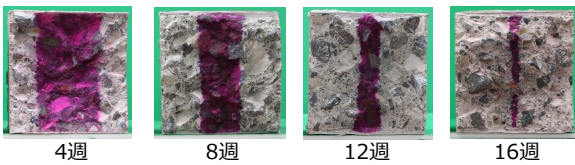
AAMモルタルの加熱冷却後の供試体の外観



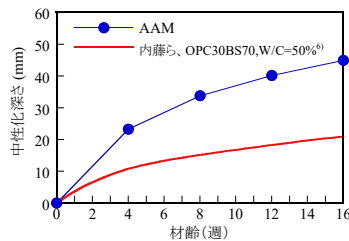
冷却後の圧縮強度と加熱温度の関係 (モルタル)



質量減少率と加熱温度の関係 (モルタル)



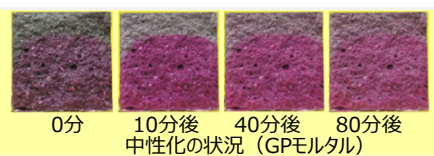
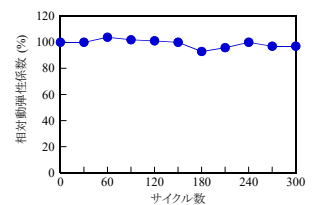
中性化の状況 (AAMコンクリート)



中性化深さと試験材齢の関係 (コンクリート)

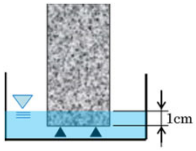


300サイクル終了後の供試体表面 (AAMコンクリート)

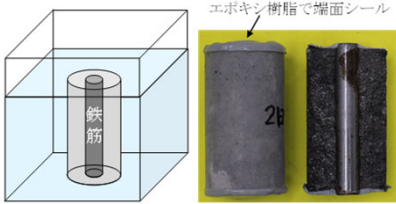
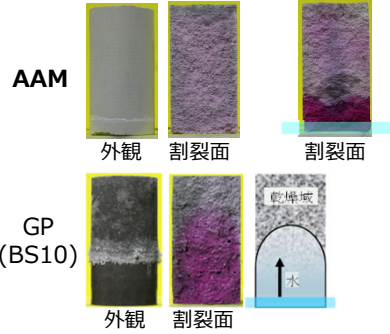


中性化の状況 (GPモルタル)

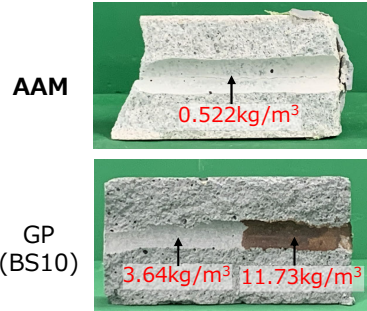
2023 JCI九州：白華 ○，鉄筋腐食性 ○？



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

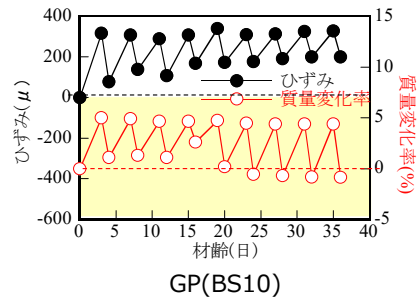
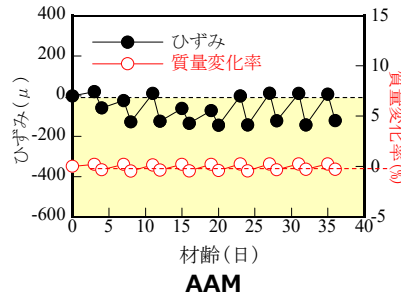
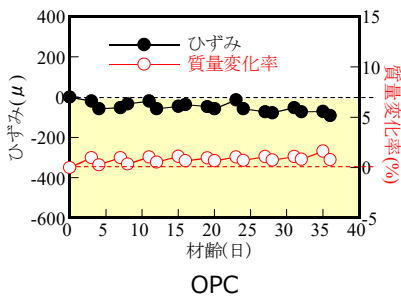


<http://www.ourstex.co.jp/jp/product/product-2/fourstex101fa/>

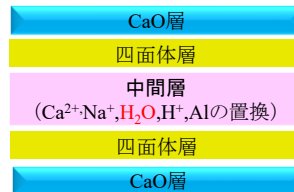
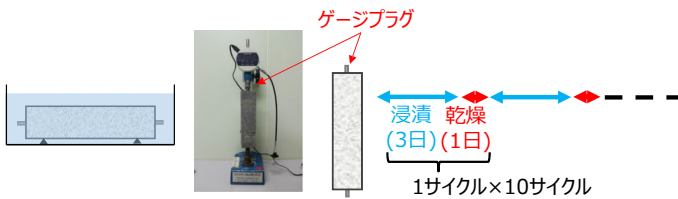


https://www.taisei.co.jp/giken/report/2009_42/paper/A042_008.pdf

2023 JCI九州：乾湿繰返しによる長さ変化 ×？



乾湿繰返しによるひずみならびに質量の変化 (モルタル)



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：現行の示方書を適用できない例

乾燥しやすく、通常環境下の九州地方で、海岸から距離1.0kmに位置する重要構造物の、設計耐用年数100年での塩化物イオンの侵入にともなう鉄筋腐食に対する照査

要
検
討

① 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計値(C_d)

$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.8 = -0.45$$

$$\therefore D_k = 10^{-0.45} = 0.355 \text{ cm}^2 / \text{year}$$

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot (w/l) \cdot D_0$$

$$C_d = \gamma_d \cdot C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{0.1c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C_i = 0.858 \text{ kg} / \text{m}^3$$

要
検
討

② 鉄筋腐食発生限界濃度(C_{lim})

$$C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4 = 2.05 \text{ kg} / \text{m}^3$$

③ 塩化物イオンの浸入に伴う鉄筋腐食に関する照査

$$\gamma_i \cdot \frac{C_d}{C_{\text{lim}}} = 1.0 \times \frac{0.858}{2.05} = 0.419 < 1.0$$

よって、塩化物イオンの浸入による鉄筋腐食に対して安全である。

25

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

26

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

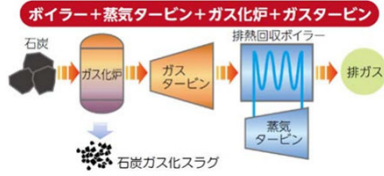
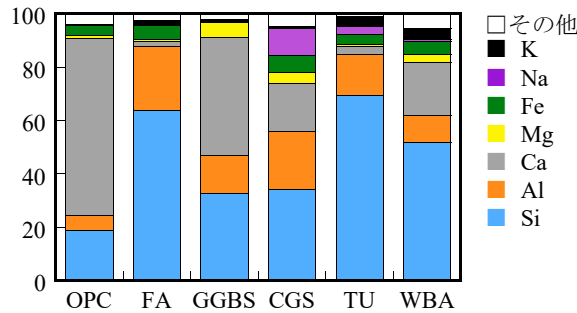
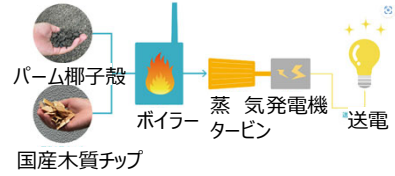


図1 IGCCの設備構成

非溶結凝灰岩 TUFF



木質バイオマス燃焼灰 Woody Biomass Ash



27

今後の展開

- セメントと比べてジオポリマーの優れているところはどこですか？
→ 「**環境材料**（省資源，副産物の有効利用，低炭素）」 **環境対策は十分か？？**
- 〇〇さんの話では，ジオポリマーは世界中で研究されているが，実用化は難しいと聞きました → 古い知識で判断（**流言**），技術は急速に進歩，**日本がけん引する！！**

サイエンスZERO “ChatGPT”徹底解剖！AIと歩む未来を探る 2023年6月11日放送

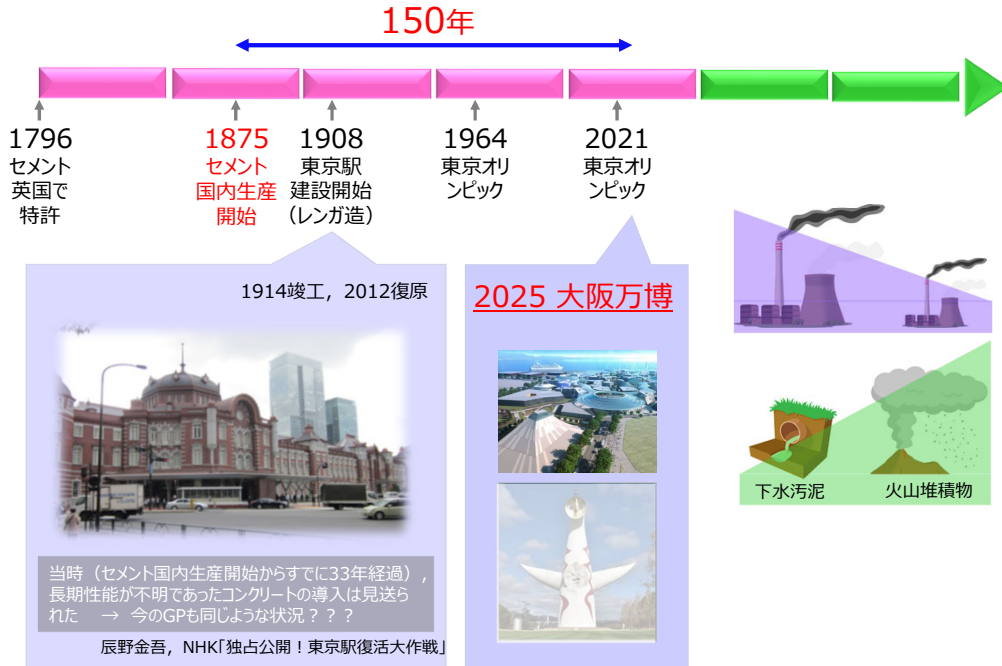
配布資料では画像は非表示にしています

司会者： ChatGPTのような技術が日本からも出てきてほしいなと思うんですが

松尾豊教授： そうですね。日本からも出したいですね。一つのポイントはChatGPTには**巨大資本**が入っているんですね。だから研究室に閉じこもって研究するだけではもはや太刀打ちできない時代に，**もう何十年も前から**はいつている。**だからアカデミアと社会全体をいかにつないでいくかが大切**と思っています。

29

今後の展開



ご清聴ありがとうございました