

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2023」

ジオポリマーを含むアルカリ活性材料(AAMs)の研究開発の現状

2023年8月31日

大分工業高等専門学校
一宮 一夫

本日の講演内容

- 導入
 - 1. 「セメントはどうするつもりか」
 - 2. 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
 - 3. ジオポリマーの基礎知識は「2021講演動画」でご覧いただけます
 - 4. 「土木の 이슈-31」に選ばれました（取り組むべき根本的な課題）
 - 5. AAMsは多機能
 - 6. わが国初のGP研究委員会は、2014年にJCI九州に設けられた
 - 7. 土木学会のGP研究委員会報告書は「自由に閲覧」できる！
- 材料配合養生
 - 8. アルカリ溶液の基本は「水ガラス（ケイ酸ナトリウム）」
 - 9. 反応生成物は「ナッシュ」と「キャッシュ」
 - 10. 「溶けやすければよい」というわけではない
 - 11. 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」
- 実績展開
 - 12. 施工事例
 - 13. 課題と達成度
 - 14. 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))

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 (ジオポリマー)	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

ジオポリマーの基礎知識は「2021講演動画」でご覧いただけます



一般社団法人
コンクリートメンテナンス協会

Googleサイト内検索

トップページ
新着情報
当協会について
フォーラム
プレスリリース
技術資料
Q&A
お問い合わせ

トップページ

▶ 新着情報

当協会について

▶ 会長挨拶

▶ 当協会の歩み

▶ 当協会の活動

▶ 組織図

▶ 会員名簿と入会申し込み

フォーラム

2023フォーラム 案内

講師紹介ページ

▶ CPD・CPDSについて

▶ 2023フォーラム開催状況

▶ 2022フォーラム開催状況

▶ 2021フォーラム講演動画

▶ 2020フォーラム講演動画

▶ 2019フォーラム開催状況

▶ 2018フォーラム開催状況

トップページ / コンクリート構造物の補修補強に関するフォーラム～オンラインフォーラム～
/ コンクリート構造物の補修補強に関するフォーラム2021 講演動画配信ページ

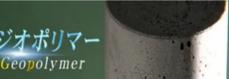
「コンクリート構造物の補修補強に関するフォーラム2021 講演動画配信ページ」

■開催期間： 2021年6月30日～2022年3月31日

※CPD申請の受付は終了しました。

演題	講師	講演時間	CPD単位	動画	CPD申請フォーム
「コンクリート構造物の健康寿命を確保するために」	宮川 豊草 先生 (京都大学 名誉教授)	60分	1.0		
「見えないものは非破壊で診る」	鎌田 敏郎 先生 (大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授)	60分	1.0		





コンクリートメンテナンス協会

コンクリート構造物の高耐久化を目的とした
新しい無機系補修材料(ジオポリマー)の開発

2021年8月

大分工業高等専門学校
一宮 一夫


0:03 / 59:05



2021オンラインフォーラム「コンクリート構造物の高耐久化を目的とした新しい無機系補修材料（ジオポリマー）の開発」



本日の講演内容

1. ジオポリマーの基本
2. 耐久性
 - 耐酸性
 - 中性化
 - ASR
 - 耐高温性
 - 表層の変状(エフロレッセンスなど)
3. 今後の展開


0:31 / 59:05



2021オンラインフォーラム「コンクリート構造物の高耐久化を目的とした新しい無機系補修材料（ジオポリマー）の開発」

「土木の 이슈-31」に選ばれました（取り組むべき根本的な課題）



特集

土木の 이슈-31

The 31 Issues for Civil Engineers

土木学会誌 Vol.107

No.12 December 2022

1. 人と業界文化

1-1	Ally へ繋がる途	三木 那由他
1-2	縮小を前提とした生き残り戦略	北島 義斉
1-3	地域建設業の継続	段下 剛志
1-4	既存の土木業界の体質の改善	辛嶋 亨
1-5	これからの働き方	浜田 紗織

2. ガバナンスと維持管理

2-1	市民参画のあり方	柄沢 祐子
2-2	維持管理ビジネスの成立	石川 雅美
2-3	地方におけるインフラの継続	余湖 典昭
2-4	海外との技術制度の相互認証	Thi Ha
2-5	土木における歴史との向き合い方	知野 泰明
2-6	大規模建設事業の長期評価 1	片山 茜
2-7	大規模建設事業の長期評価 2	梶木 洋子
2-8	国土構造の転換1	山崎 幹根
2-9	国土構造の転換2	福田 峻
2-10	コンパクトシティ政策のレビュー	谷口 守
2-11	地政学とインフラ整備	Torben Liborius
2-12	中央と地方のエネルギー偏在	山下 祐介

3. 気候変動と防災

3-1	ソフトとハードを繋ぐ防災研究	村上 亮
3-2	気候変動への対応方針	原田 文代
3-3	流域治水の実現可能性	瀧 健太郎
3-4	グリーンインフラの社会実装の可能性	竹本 祥子
3-5	木材利用構造物の環境へのインパクト評価	加用 千裕
3-6	災害とモビリティ	中居 楓子
3-7	カーボンニュートラルの技術開発	取達 剛
3-8	福島復興	伊澤 史朗

4. 新技術

4-1	ICTの土木における必要性	建山 和由
4-2	材料の持続可能性	鶴澤 潔
4-3	進まない新技術の導入	前川 亮太
4-4	高度地下利用	大沢 昌玄
4-5	DXによるインフラの管理	西尾 真由子
4-6	量子コンピュータの活用	吉田 広顕
4-7	鉄とコンクリート	一宮 一夫
4-8	モビリティのデータと社会	日下部 貴彦

注：イシューの表記は編集委員会が執筆者に提案したものである。本文中は、著者による表題を示すため、一致しないものがある。

いま建設材料が熱い

―次世代につながる新材料―

A A M S

▼シン・セメント

多様性は社会の活性度を左右する重要なキーワードである。セメントに代表される無機系建設材料の世界でも、多様化が進んでいる。その一つがジオポリマーを含むアルカリ活性材料（A A M S）である。固化に必ずしもカルシウムを必要としない A A M S には低炭素、耐酸性、耐高温性、有害物質固定などが期待できる。A A M S の生成では、フライアッシュ（F A）等の活性ファイラーを水ガラスなどのアルカリ溶液で固化させる。固化メカニズムは、セメントの水和反応に対して A A M S は縮重合反応を基本とする。生成物も両者で異なる。

▼いまこそ A A M S

A A M S の特徴・用途は多岐にわたる。具体的には、①セメントの代替使用に加えて、②脱石灰石による低炭素・省資源、③副産物の全量使用、④超耐久コンクリート製造、⑤放射性物質固定や地盤環境改善、などがある。また、月や火星での基地建設などでの適

用性も検討されている⁽¹⁾。

▼逆風は前進する力に変わる

カーボンニュートラル宣言と、それに伴う石炭火力発電の縮小・廃止計画は、F A を主原料とする A A M S 研究にとって大きな逆風となった。さらに、CO₂ 吸収コンクリートの登場で、A A M S の 이슈度（必要性）は急激に低下したように思えた。

かたむねいせうぶつ

しかし、実際には火山砕屑物などの F A 代替材料開発の呼び水となった。その結果、大型の研究助成採択につながり、学術面での期待の大きさを実感した。これまでのべ110名を超える研究委員会活動を共にした技術者・研究者の存在も大きな支えである。

学生たちに A A M S 開発の話をする時、彼らの目はより一層輝く。引き続き、強い信念を持ち A A M S 開発にまい進していきたい。

参考文献

(1) 土木学会ホームページ…2021年度重点研究課題 https://committees.jscc.or.jp/s_research/taxonomy/term/6

一宮 一夫 正会員

大分工業高等専門学校 都市・環境工学科 教授

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			○	○	△		△

AAMsは多機能：SWOT分析

プラス

マイナス

内部要因

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)

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)

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?

脅威 (Threats)

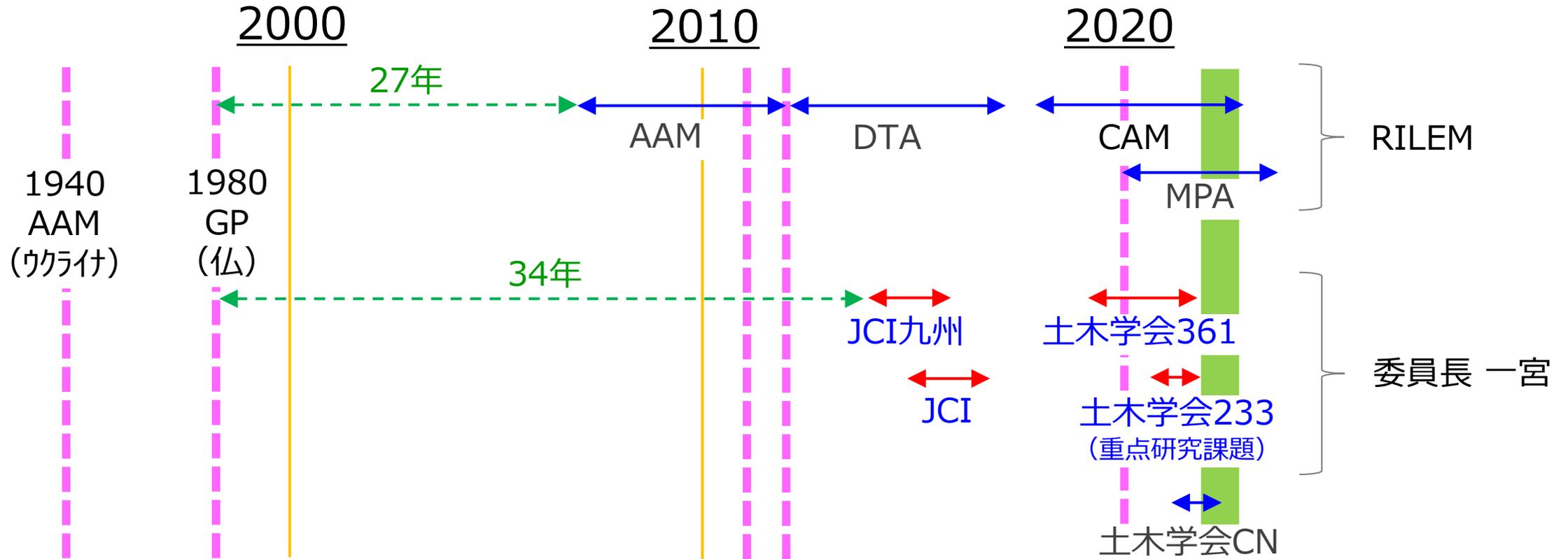
- 石炭火力発電の縮小 (FAの減産)
- 高炉水素還元技術 (BSの減産?)
- 既存技術からの脱却に対する社会の反応

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研究委員会は，2014年にJCI九州に設けられた



2016, フランスのご自宅を訪問

'12 笹子トンネル事故
(高耐久コンクリートのニーズ増加)

'11 原発事故
(FA増産, 放射性物質固定)

'20 CN宣言 (FA減産)

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](#)

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](#)

添付

 [土木分野ジオポリマー技術実用化推進成果報告会スケジュール（配布用）.pdf](#)

 [コンクリート技術シリーズ_132号.pdf](#)

アルカリ溶液の基本は「水ガラス（ケイ酸ナトリウム）」



- ・主材料
- ・接着剤や耐火塗料
- ・高粘性

- ・反応促進
- ・強アルカリ
(劇物指定)

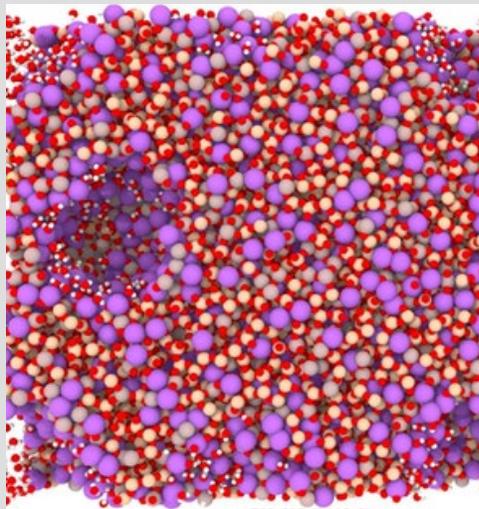
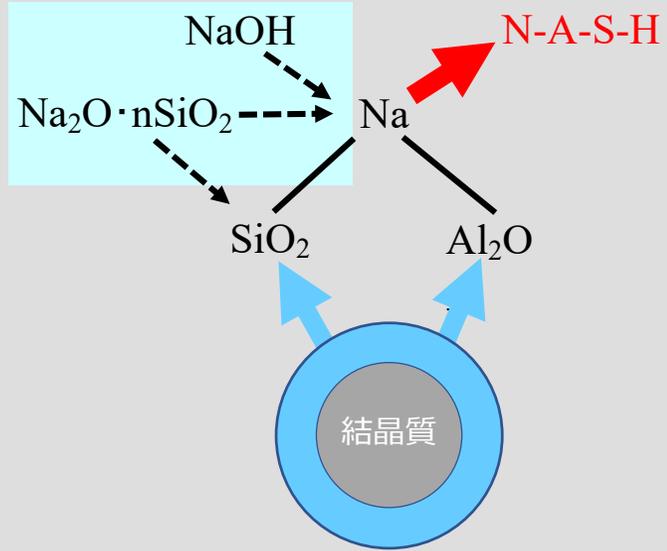
- ・作業性付与

- ・粘性の低下
- ・危険度の低下

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

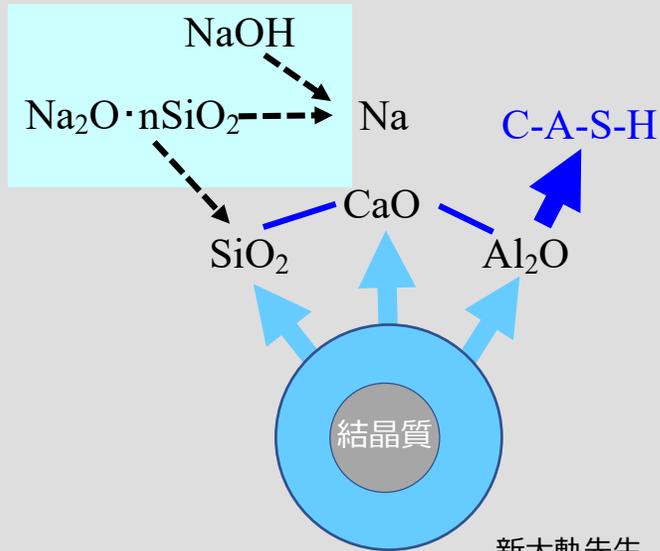
反応生成物は「ナッシュ」と「キャッシュ」

フライアッシュ → **N-A-S-H**

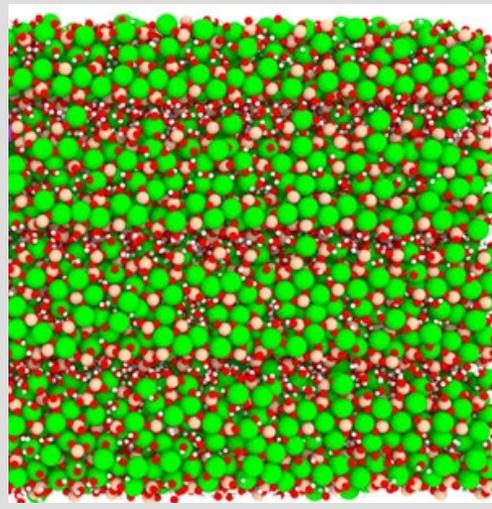


- Na
- Si
- Al
- Ca
- O
- H

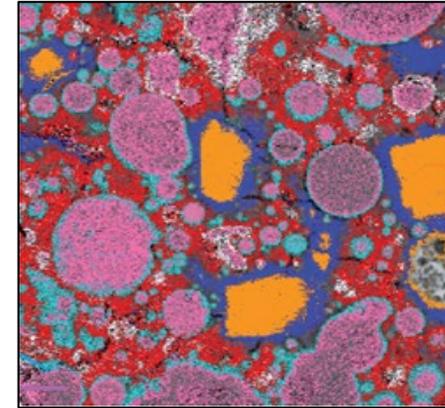
高炉スラグ微粉末 → **C-A-S-H**



新大軌先生



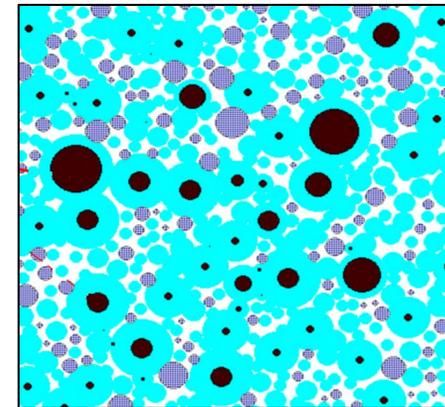
FA-BS併用系GP



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

山本武志氏

OPC(C₃S)



- C₃S (セメント粒子)
- 空隙
- CH
- C-S-H

魚本健人先生

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

「溶けやすければよい」というわけではない

主 剤

アルカリ溶液

水ガラス
苛性ソーダ
水



+

硬化剤

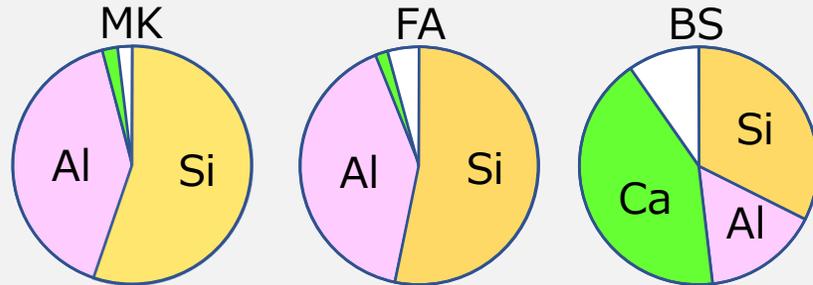
活性フィラー

フライアッシュ(FA)
高炉スラグ微粉末(BS)



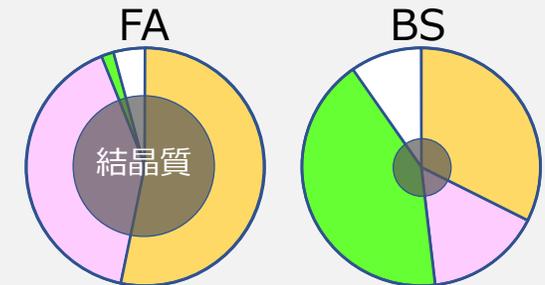
(活性フィラーの) 溶けやすさ = f (化学組成, ガラス化率, 比表面積, その他)

FAはMKによく似た化学組成 (GPに有利)



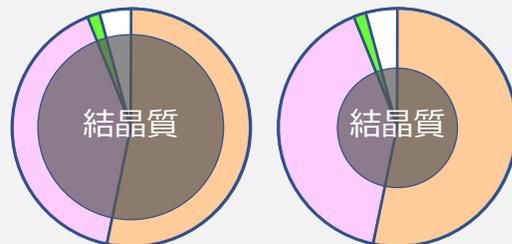
BSは非晶質が多く, FAよりも溶けやすい

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

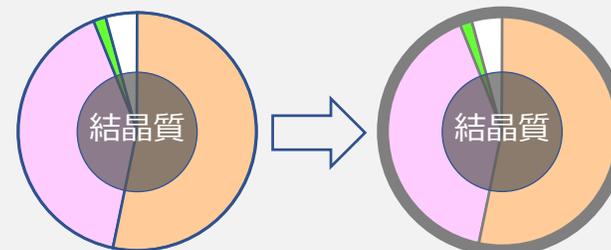


ガラス化率は, 原料品質や燃焼条件で変動する

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。しかし, 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

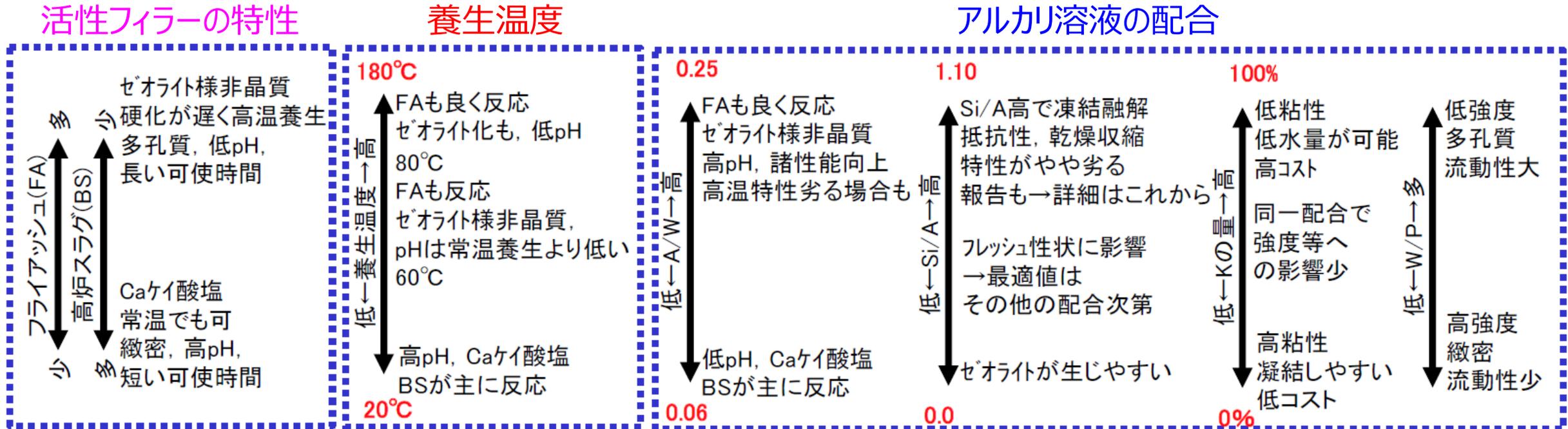


溶出が速すぎると粒子表層にバリアを形成し, その後の反応 (溶出) を阻害

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



- 「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

施工事例

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：別府温泉はジオポリマーにとっても「地獄」



1期
2015



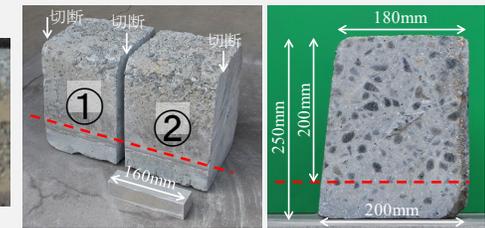
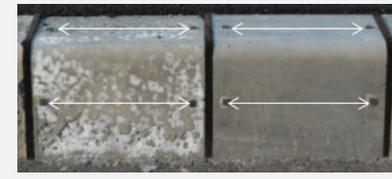
劣化発生 → 応急処置として現場で刷毛でシラン系含浸剤を塗布

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



- 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

- 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ない 

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



① 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計値(C_d)

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

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

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

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



② 鉄筋腐食発生限界濃度(C_{lim})

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

③ 塩化物イオンの浸入に伴う鉄筋腐食に関する照査

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

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。

今後の展開：性能規定型設計法



- 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

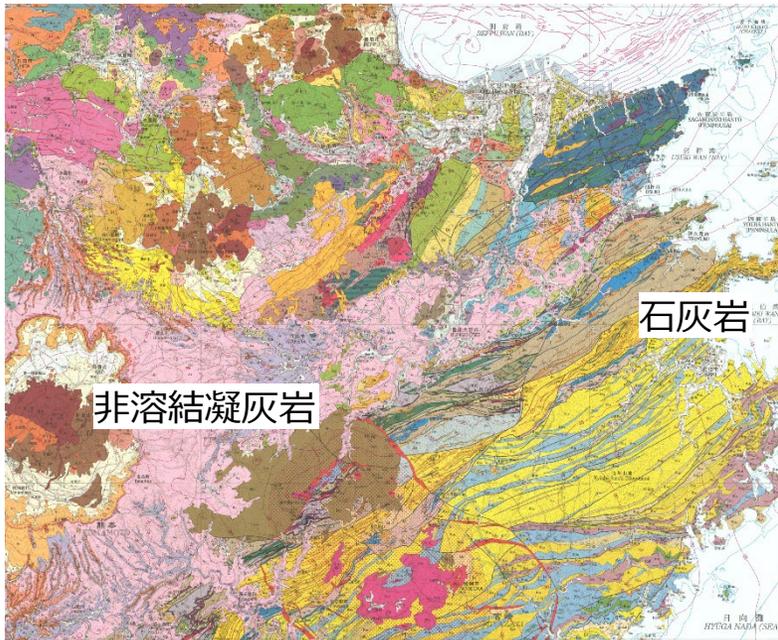
世界初の本体施工にRCD工法を本格採用



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

非溶結凝灰岩 TUFF

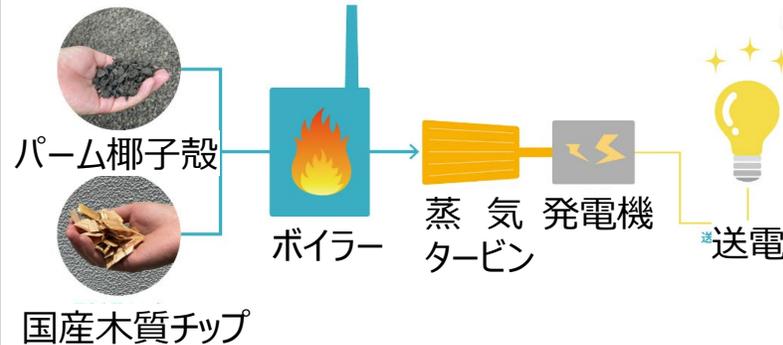


産総研「みんなの地質図」

(非溶結) 凝灰岩と溶結凝灰岩

https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_028.pdf

木質バイオマス燃焼灰 Woody Biomass Ash



<https://oita-bio.com/what/>

石炭ガス化スラグ微粉末 Coal Gasification Slag

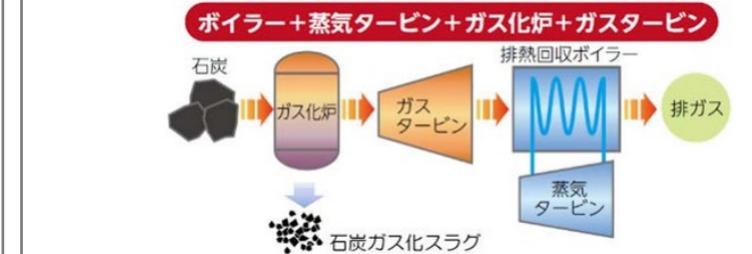


図1 IGCCの設備構成

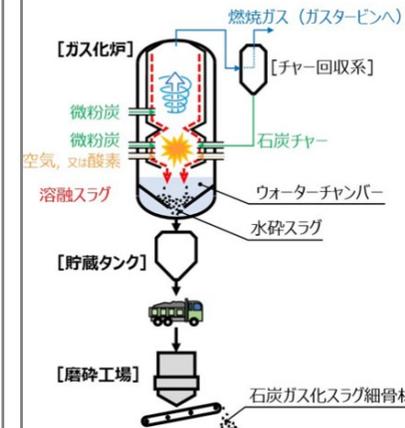
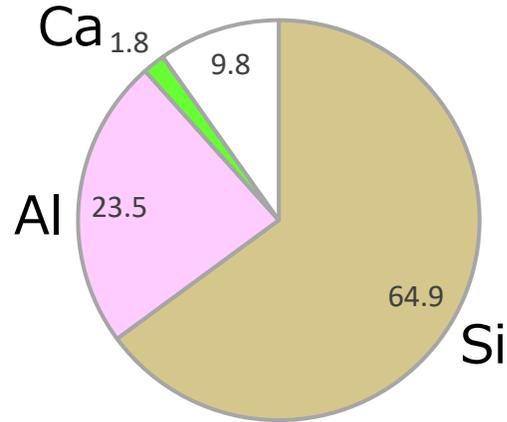


図3 石炭ガス化スラグ細骨材の製造工程 図4 石炭ガス化スラグ細骨材の外観

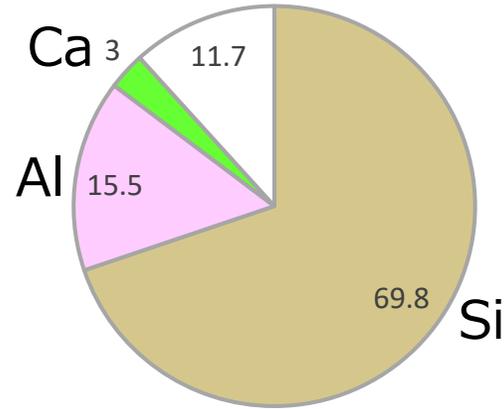
<https://www.meti.go.jp/press/2020/10/20201020001/20201020001-2.pdf>

今後の展開：石炭火力発電縮小への対応

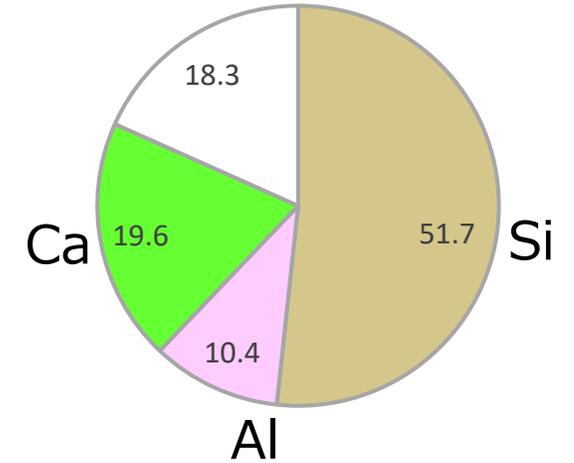
フライアッシュ：FA



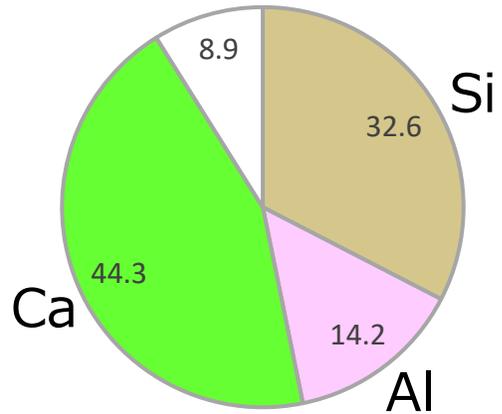
非溶結凝灰岩：TU



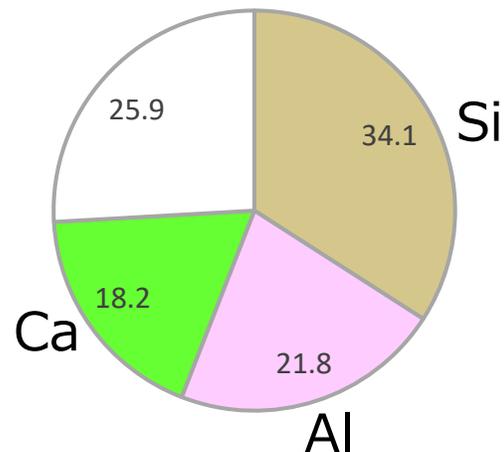
木質バイオマス焼却灰：WBA



高炉スラグ微粉末：BS



石炭ガス化発電スラグ：CGS



- 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？？**
- ○○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

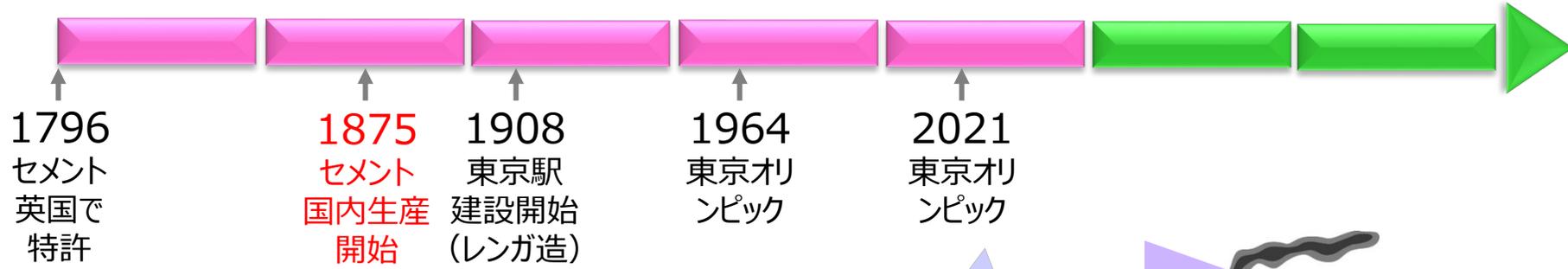
配布資料では画像は非表示にしています

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っている**。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。

今後の展開

150年



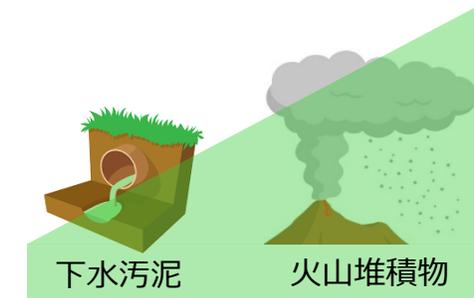
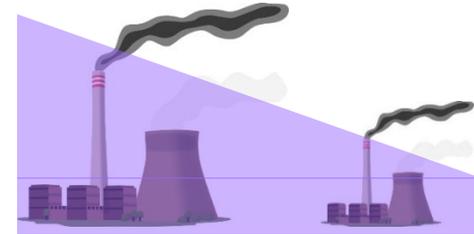
1914竣工, 2012復原



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



下水汚泥

火山堆積物

ご清聴ありがとうございました

