

# 化学反応理論に基づいた太陽光パネル廃ガラスの コンクリート分野へのリサイクルに関する研究



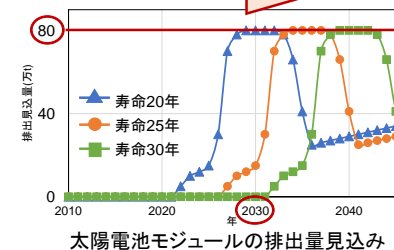
2024年10月24日  
李春鶴

## 研究背景

### ◆ 太陽光パネルの廃棄問題



2030年以降 約80万t/年の  
太陽光発電設備が廃棄



### ◆ リサイクル促進

- ・ 再使用
- ・ 舗装材, 埋め戻し材
- ・ 埋め立て処理



コンクリート分野でリサイクル

環境省, 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン

## 太陽光パネルガラスの化学組成とアルカリシリカ反応 (ASR)

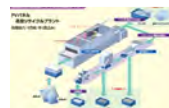
wt%		SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
世界主要な太陽光パネルの化学組成	メーカー								
	S社	70	13	-	8.7	4.2	1.3	0.2	0.2
	C社	68	13	-	8.6	4.0	1.2	0.2	0.2
	P社	72	13	-	8.9	4.0	1.3	0.2	0.2
	T社	72	13	-	9.7	3.6	1.2	0.2	0.2
	M社	71	13	-	8.4	4.7	1.1	0.2	0.1
	J社	71	13	-	8.8	4.1	1.4	0.2	0.2
	H社	72	13	-	9.7	3.5	0	0.2	0.2
平均	71	13	-	9.0	4.0	1.2	0.2	0.2	

リサイクルコンクリート分野で可能性有



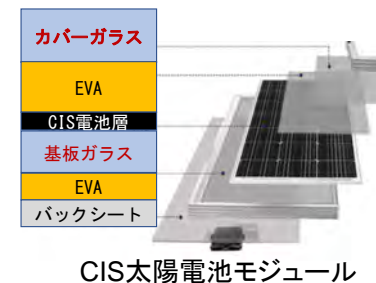
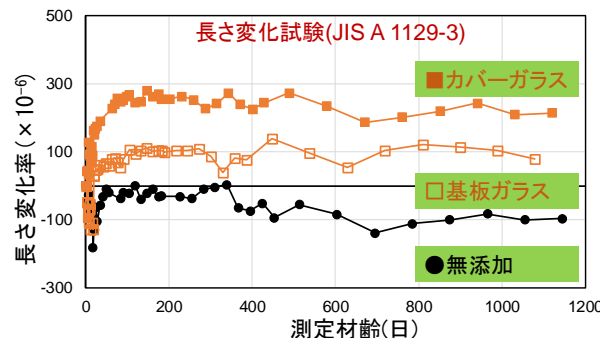
リスク:  
ASR反応が生じる可能性大

事実:  
品質安定、安定供給可能



## 先行研究

wt%	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
カバー	72.5	13.5	0.5	9	3.5	1.5	≤0.009	≤0.009
基板	49.9	6.3	4.7	5.5	-	13.0	0.1	0



アルカリシリカ反応(ASR)性試験の判定基準

- ✓ 材齢91日で500μ以下
- ✓ 材齢182日で1000μ以下

⇒ 無害な膨張

- なぜ膨張?
- 膨張を制御・有効活用できる?
- 実用化の可能性?

## 研究目的（膨張生成物の有効利用のコンセプト）

### 提案1: ガラス反応生成物量の制御による無収縮・高強度コンクリートの開発

**混和材** ... 反応性骨材のASR抑制対策  
→ フライアッシュ + 廃ガラス

**酸処理** ... 太陽光パネル処理の一般プロセス  
廃ガラス50kgに対して52ppmの硝酸溶液150gで処理

### 提案2: ガラス反応生成物の生成時期の制御によるプレキャストコンクリート製品の開発

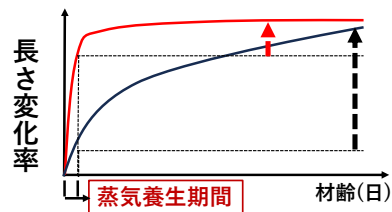


蒸気養生装置



製品例

- 膨張性骨材の制御  
⇒ 空隙充填  
⇒ 無収縮・高強度



- 早期の膨張生成物の生成  
⇒ 膨張の潜在能力を低減

## 実験概要：配合設計

### ◆ モルタル供試体の配合 (kg/m<sup>3</sup>)

		20%置換		☆60%置換			
記号		C	FA	W	S	GP	
PL		612	0	306	1340	0	
F20		476	119	297	1340	0	
カバー 基板	酸なし	G60	612	0	306	536	729
		G60F20	476	119	297	536	729
	酸あり	G60	611	0	307	536	728
		G60F20	475	119	299	535	727

☆添加率60%付近でベシマムを確認 李ら, JSCE2021 Annual Meeting

## 実験概要：養生条件

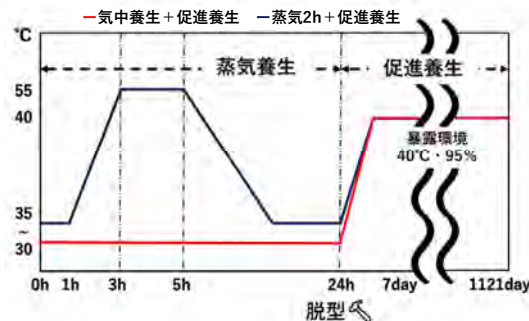
### ◆ 蒸気養生および促進養生

- ✓ 蒸気養生：早期反応促進

工場の温度履歴を模擬



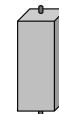
- 前置き時間：1h
- 最高温度：55°C
- 最高温度継続時間：2h



## 実験概要：実験項目

### 長さ変化試験 (JIS A 1129-3-2010)

- 40 × 40 × 160mm
- 40°C95%で養生
- 材齢0~1000日



### 圧縮強度試験 (JSCE-G 505-2018)

- φ50 × 100mm
- 20, 40°Cの水中養生
- 材齢7, 14, 28, 91日



### 化学法 (JIS A 1145-2017)

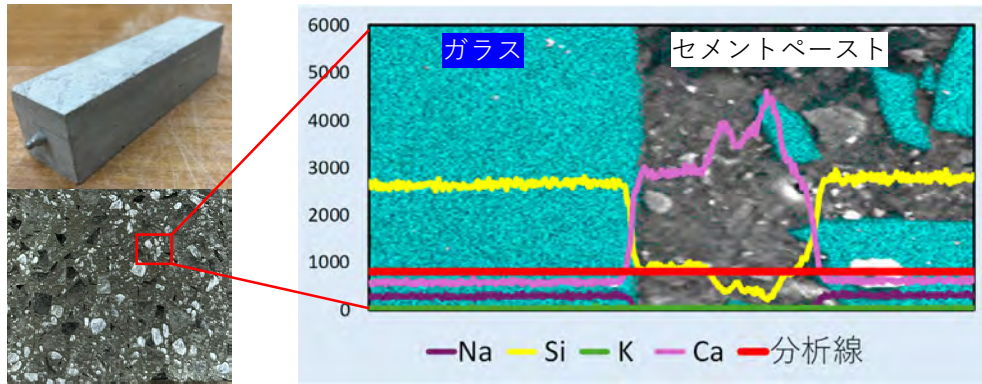
アルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)から、骨材の潜在的アルカリ反応性を判定

### X線光電子分光法 (XPS) 走査電子顕微鏡 (SEM-EDX)

廃ガラス単体、供試体に対して表面観察と組成分析

# セメント環境における廃ガラスの反応性の確認

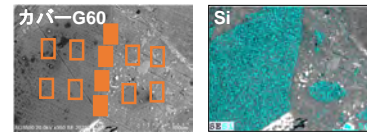
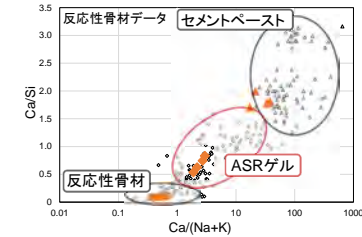
・ 40°C、95%で養生 ・ 暴露期間4年程度 ・ SEM-EDX分析



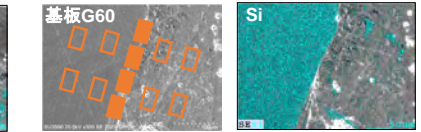
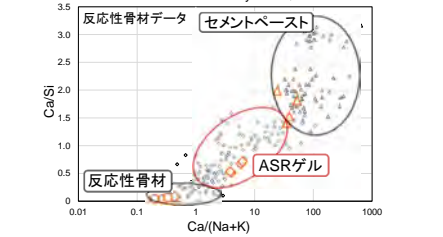
ガラスとセメントペーストの境界において、Si、Naは減少し、Caは増加

# 実験結果 ASR反応の検討

## ◆ カバーガラス



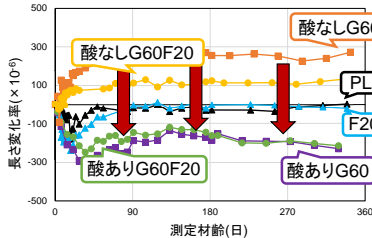
## ◆ 基板ガラス



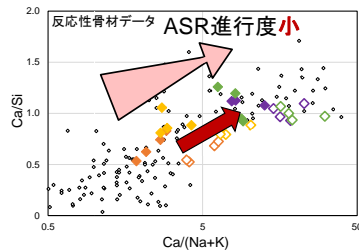
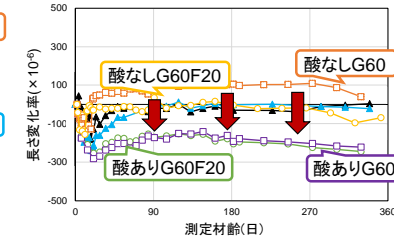
▶ 境界面でASRゲルを確認→ 供試体は膨張傾向

# 化学反応と長さ変化

## ◆ カバーガラス



## ◆ 基板ガラス



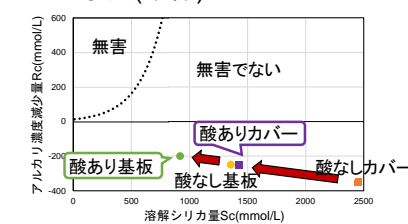
▶ FA添加によるASR抑制傾向

▶ 酸処理によってASR抑制傾向

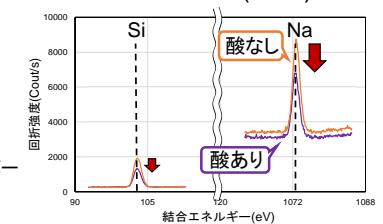
▶ 酸処理の抑制効果は顕著

# 実験結果 酸処理効果

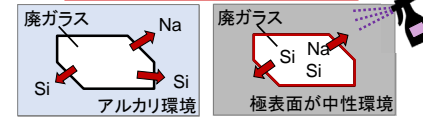
## ◆ 化学法(単体)



## ◆ XPSによる計測(単体)

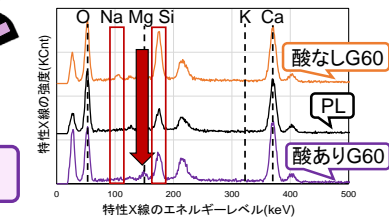


## ◆ 廃ガラスからの溶解メカニズム



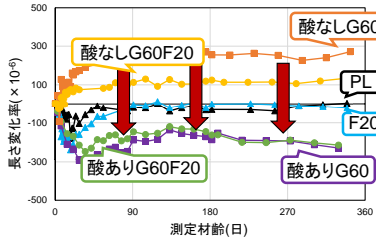
▶ 酸処理でSiとNaの溶解抑制

## ◆ EDX分析(供試体)

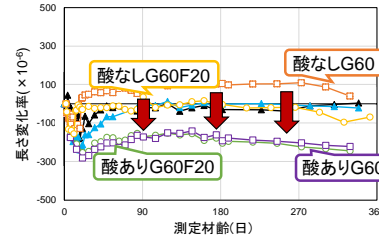


## 化学反応と長さ変化

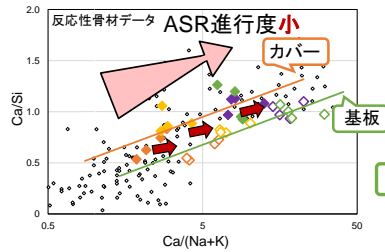
### ◆ カバーガラス



### ◆ 基板ガラス



%	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
カバー	72.5	0.5	13.5
基板	49.9	4.7	6.3

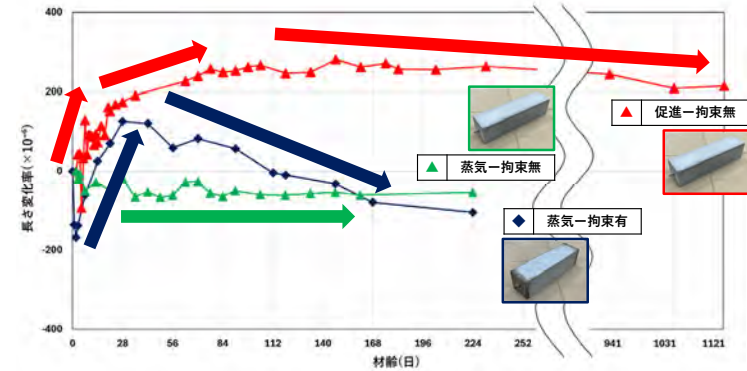


▶ FA添加によるASR抑制傾向

▶ 酸処理によってASR抑制傾向  
▶ 酸処理の抑制効果は顕著

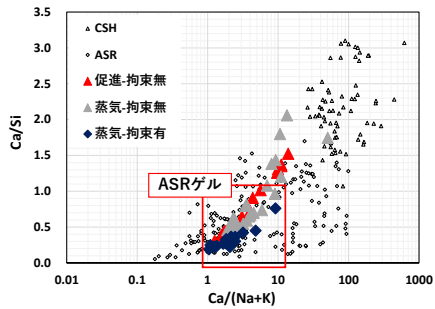
▶ 組成よりSi, アルカリ量が少  
→ ASRの潜在性低

## 異なる養生の効果：長さ変化



- ▶ 促進-拘束無はASRによる膨張(約300 $\mu$ )、材齢1000日～膨張継続
- ▶ 蒸気-拘束無は安定、材齢極初期にASRによる反応が生じた
- ▶ 蒸気養生による材齢極初期からのASRの膨張傾向、その後はASRの早期反応終了に伴い収縮、安定傾向

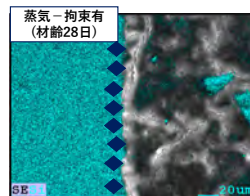
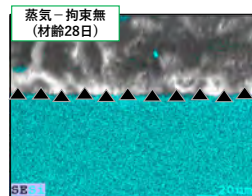
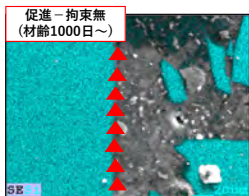
## 組成分析



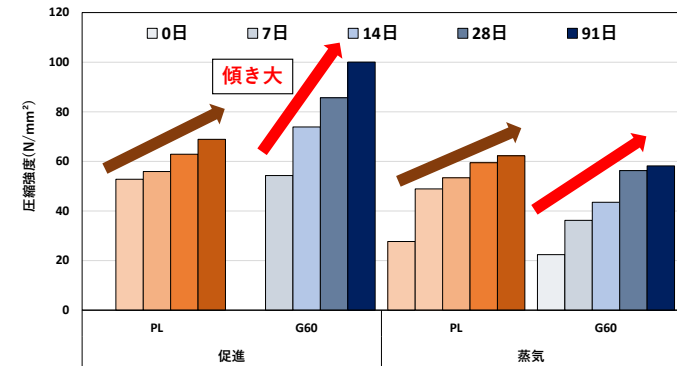
廃ガラスを添加した供試体はASRゲルを生成

蒸気養生により促進養生(材齢1000日～)と同等のASR生成

蒸気養生より反応が極初期に促進、ASRの潜在能力が減少



## 異なる養生の効果：圧縮強度



- ▶ 促進G60は硬化後にASRが生じたことにより空隙が埋められ強度が大きく増加
- ▶ 蒸気G60はASRの終了に伴い強度増加が減少、PLと同程度の強度

## まとめ

- 廃ガラスのコンクリートのようなアルカリ環境におけるASR反応メカニズムを解明  
廃ガラスの膨張メカニズムの解明→ ASRによる膨張生成物の生成  
廃ガラスの膨張抑制メカニズムの解明→ 酸処理, FA添加によるASR抑制
- 促進養生により、無収縮・高強度コンクリートの製造可能
- 蒸気養生により、早期に膨張を収束可能、強度の低下ほとんど無

太陽光パネル廃ガラスは  
コンクリート分野でのリサイクルが可能

## 深く御礼申し上げます。

2017年～2018年度助成金: 環境作用と $\text{LiNO}_2$ 化学反応の強  
連成に基づいた鉄筋コンクリート構造物の補修に関する研究

2020年～2022年度 科学研究補助金 基盤研究 (B)

2022年～2023年度助成金: 化学反応理論に基づいた太陽光  
パネル廃ガラスのコンクリート分野へのリサイクルに関する研究

英論ジャーナルへ投稿中