

課題番号：3G-2103

## 研究課題名

# ジオポリマーコンクリートに資する木質 バイオマス燃焼灰の資源化技術の実証開発

体系的番号：JPMEERF20213G03

- 主：【重点課題⑩】 地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発
- 副：【重点課題⑫】 社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発

研究代表者：高巢 幸二（教授）

研究代表機関：北九州市立大学 国際環境工学部

研究実施期間：令和3年度～令和5年度

研究分担機関：京都大学、西松建設、日本アイリッヒ、九州工業大学大学院



## 【目次】

1. 研究の背景・目的
2. 研究の目標・内容・結果および考察
3. 研究の進捗状況
4. 環境政策等への貢献
5. 研究成果の発表状況
6. 研究経費の内訳



# 1. 研究の背景・目的

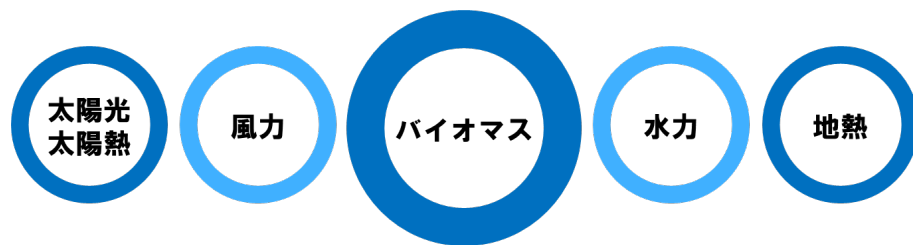
# 【木質バイオマス燃焼灰の活用】

「パリ協定」の目標達成

→2050年に温室効果ガスを実質ゼロ

高まる木質バイオマス発電事業への関心

再生可能エネルギーの利活用：地球温暖化対策の一つ



発電容量：2015年度 375MW程度  
 →2019年度 1,670MW程度  
 →2023年度 4,690MWへ上昇

→木質バイオマス燃焼灰の急増  
 →現状の40万tから**70万t** (2023年度)

木質バイオマス燃焼灰の現状



重金属溶出の可能性あり

→**利用法が確立されていない**

現在：**産廃処理費 (16,000円/t程度)** を支払ってほとんどが**埋立or最終処分**

→ **有効活用方法の確立が急務**



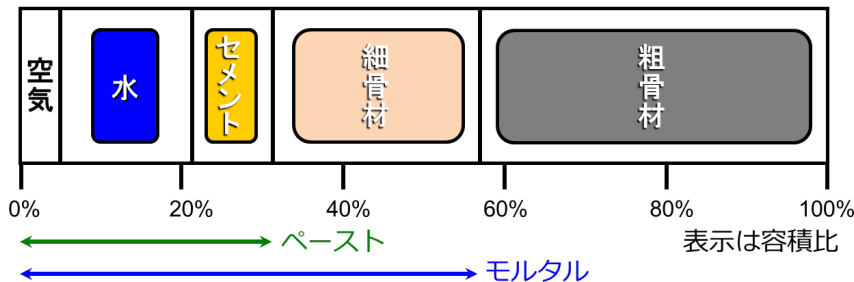
# 【SDGsを指向したコンクリートの方向性】

① 持続可能な生産消費形態を確保



② 天然資源の使用を抑制して廃棄物・副産物の大量有効活用

普通コンクリートの材料構成比



③ コンクリートに適用できるように廃棄物・副産物を高品質化

④ セメント製造によるCO<sub>2</sub>排出削減

コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量

$$= \text{セメント} (194.9 \text{ (91.7\%)}) + \text{粗骨材} (7.8 \text{ (3.7\%)}) + \text{細骨材} (10.0 \text{ (4.6\%)})$$

$$= 212.6 \text{ kg/m}^3$$

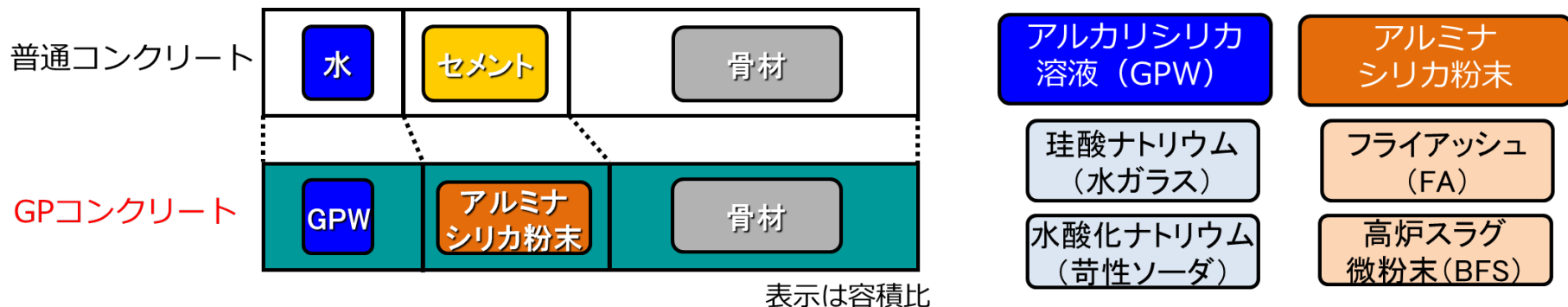
セメント製造時のCO<sub>2</sub>排出量：  
全世界の総排出量の約6%  
日本においては約5%

今後

- セメントの使用量を低下させCO<sub>2</sub>排出量を抑制
- 天然資源の使用を抑制して廃棄物・副産物の大量有効活用を推進
- 廃棄物・副産物の高品質化を指向。

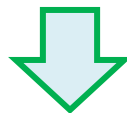
# 【ジオポリマーコンクリート】

ジオポリマー：1978年にフランスのDavidovitsが提唱したアルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末との反応によって形成される非晶質のポリマー（縮重合体）の総称



## コンクリート混和材としての利活用の条件

- ・ 強熱減量（未燃炭素量）が3%を超えるとコンクリートの凝結不良、AE剤の吸着が問題となり、コンクリートへの直接利用が困難となる。



## バイオマス燃焼灰の活用

GPコンクリートのアルミナシリカ粉末として利用するには

- ・ フライアッシュと同様に適用可能であるかの検討
- ・ 未燃炭素除去の検討（予備調査では未燃炭素の高い燃焼灰が存在）

## 【研究目的】

本研究開発では、**木質バイオマス燃焼灰の類型化**を行うとともに、本提案方式に合致した燃焼灰を選択し、**木質バイオマス燃焼灰から未燃炭素と重金属を除去する装置を連続式**にすることによって装置サイズを1/10にコンパクト化して、300ton/yの製造量を有するパイロット装置を開発することによって実用可能性を検証する。パイロット装置で製造した改質灰を使用したジオポリマーコンクリートに対して暴露試験により実環境下での耐久性能評価を実施し、**改質木質バイオマス燃焼灰 (MCAS : Modified Combustion Ash)**を使用したジオポリマーコンクリートの実用可能性を検証する。

### サブテーマ

#### I 木質バイオマス燃焼灰の類型化

(サブテーマ①)

#### II 連続式木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムの実用可能性検証

(サブテーマ②)

#### III 改質木質バイオマス燃焼灰を使用したジオポリマーコンクリートの開発

(サブテーマ③)

# 【研究体制】

研究代表者 (ST②リーダー)

北九州市立大学  
高巢幸二

研究協力機関

響灘エネルギー  
パーク

燃焼灰提供

木質バイオマス燃  
焼灰資源化P.P.の  
設置およびMCAS  
原灰提供

タクマ

日本木質BE協会

サブテーマ①

サブテーマ②

サブテーマ③

ST①リーダー

京都大学  
高岡昌輝

木質バイオマス燃焼  
灰の類型化

研究分担者

日本アイリッヒ  
櫻井雄一

連続化パイロットプラ  
ント設計・性能評価

研究分担者

北九州市立大学  
陶山裕樹

連続化機構の開発及  
びMCAS性能評価

研究分担者

北九州市立大学  
寺嶋光春

連続化流動解析及び  
排水処理方法の検討

ST③リーダー

西松建設  
原田耕司

MCASジオポリマー  
コンクリートの実用  
可能性検証  
研究分担者

九州工業大学  
合田寛基

MCASジオポリマー  
コンクリートの開発及  
び性能評価





## 2. 研究の目標・内容・結果および考察

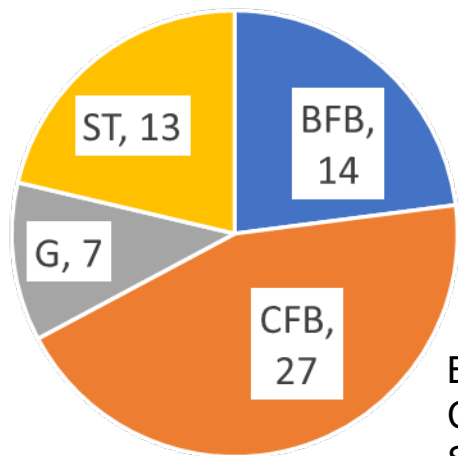
## サブテーマ①: 京都大学 木質バイオマス燃焼灰の類型化

### 研究内容・目標:

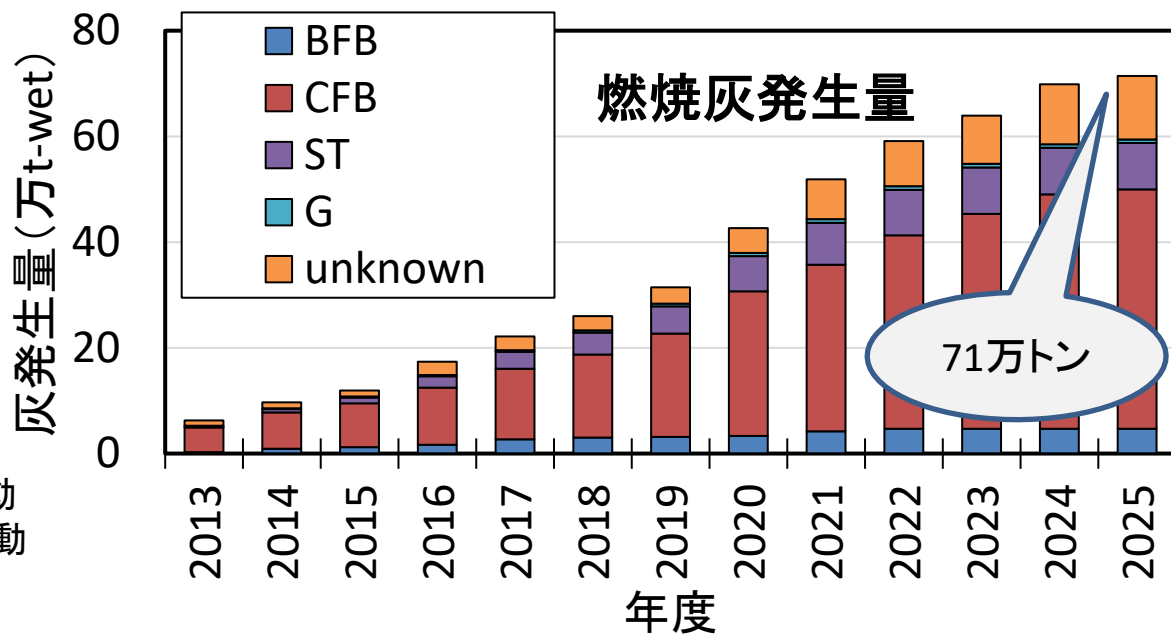
- ・木質バイオマス発電施設からの燃焼灰の発生量に関する全国的なデータベースを作成 (難易度中)
- ・木質バイオマス発電施設からの灰の発生量の推計及び燃焼灰の類型化および活性フィラーとして適用できる燃焼灰を抽出 (難易度小)

# 【サブテーマ1：アンケート調査と性状調査方法】

## アンケート調査:61施設

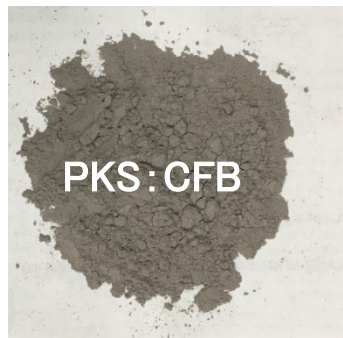


BFB:気泡流動  
CFB:循環流動  
ST:ストーカ  
G:ガス化



## 性状調査方法

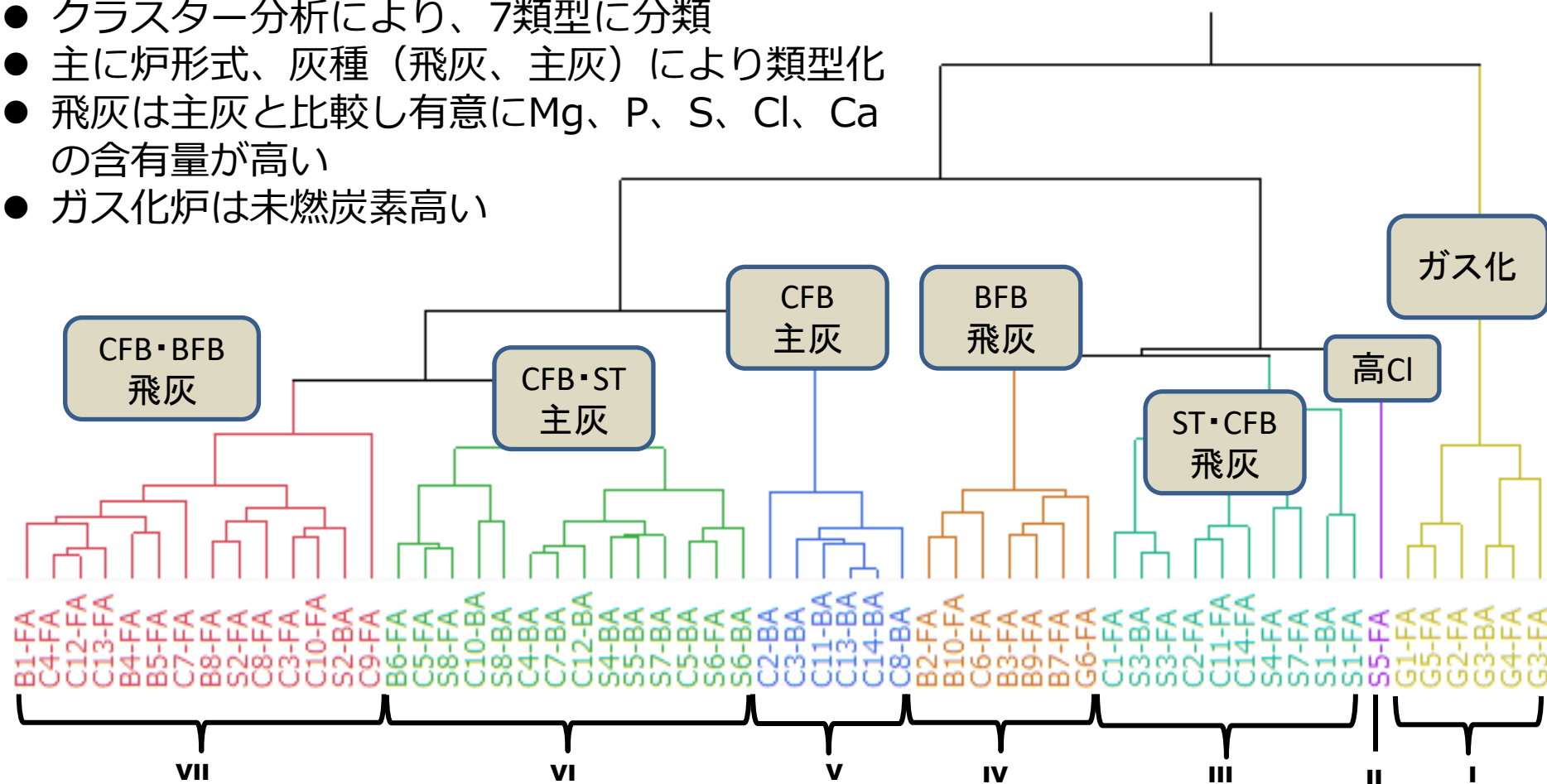
## 木質バイオマス 燃焼灰 39施設:58試料



性状分析項目	目的	分析方法	対象燃焼灰
主成分組成	リサイクル性	蛍光X線分析、誘導結合プラズマ(ICP)発光分析	飛灰・主灰
未燃炭素	浮遊選鉱による分離対象・リサイクル阻害性	前処理+CHNコーダ	飛灰・主灰
重金属含有量	リサイクル・肥料基準との比較	ICP発光分析、ICP質量分析	飛灰
重金属溶出量	処分基準との比較	環告13号、環告46号法で溶出、ICP質量分析	飛灰
粒径	リサイクル性	ふるい、レーザー回折	飛灰・主灰
結晶成分	リサイクル性	X線回折分析	飛灰・主灰
Kの化学状態	リサイクル性	X線吸収微細構造分析	飛灰・主灰

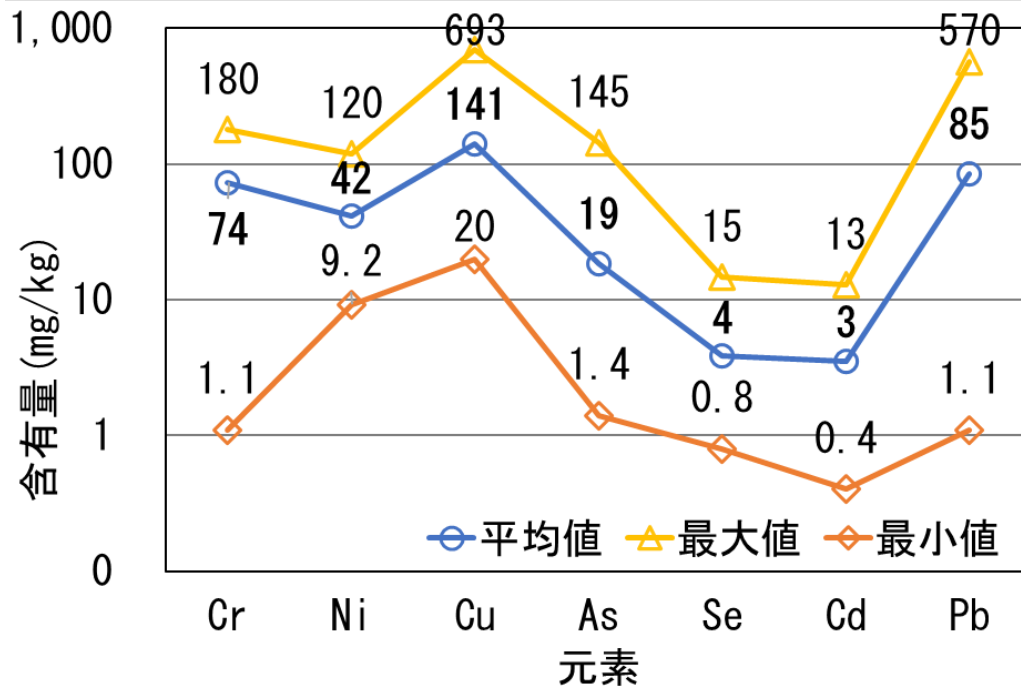
# 【サブテーマ1： 燃焼灰の性状及び類型化】

- 木質バイオマス燃焼灰58試料の主要元素
- Si > C > Ca > K > Al > Fe > Cl > S > Mg > Na > P
- クラスタ分析により、7類型に分類
- 主に炉形式、灰種（飛灰、主灰）により類型化
- 飛灰は主灰と比較し有意にMg、P、S、Cl、Caの含有量が高い
- ガス化炉は未燃炭素高い



# 【サブテーマ1：重金属と組成からの有効利用適合判定】

## 木質バイオマス飛灰中重金属含有量



- 木質バイオマス飛灰37試料の各重金属は概ね文献で報告されている範囲内 (Niのみ高い)
- 燃料種として廃木材の場合に含有量が高いケースが認められる。
- 環告13号溶出試験では、すべてが埋立判定基準をクリア (土壌環境基準はクリアできていない)
- K濃度が高いため、セメント原料利用はそのままでは不可
- ジオポリマー利用は約半数が組成から可能

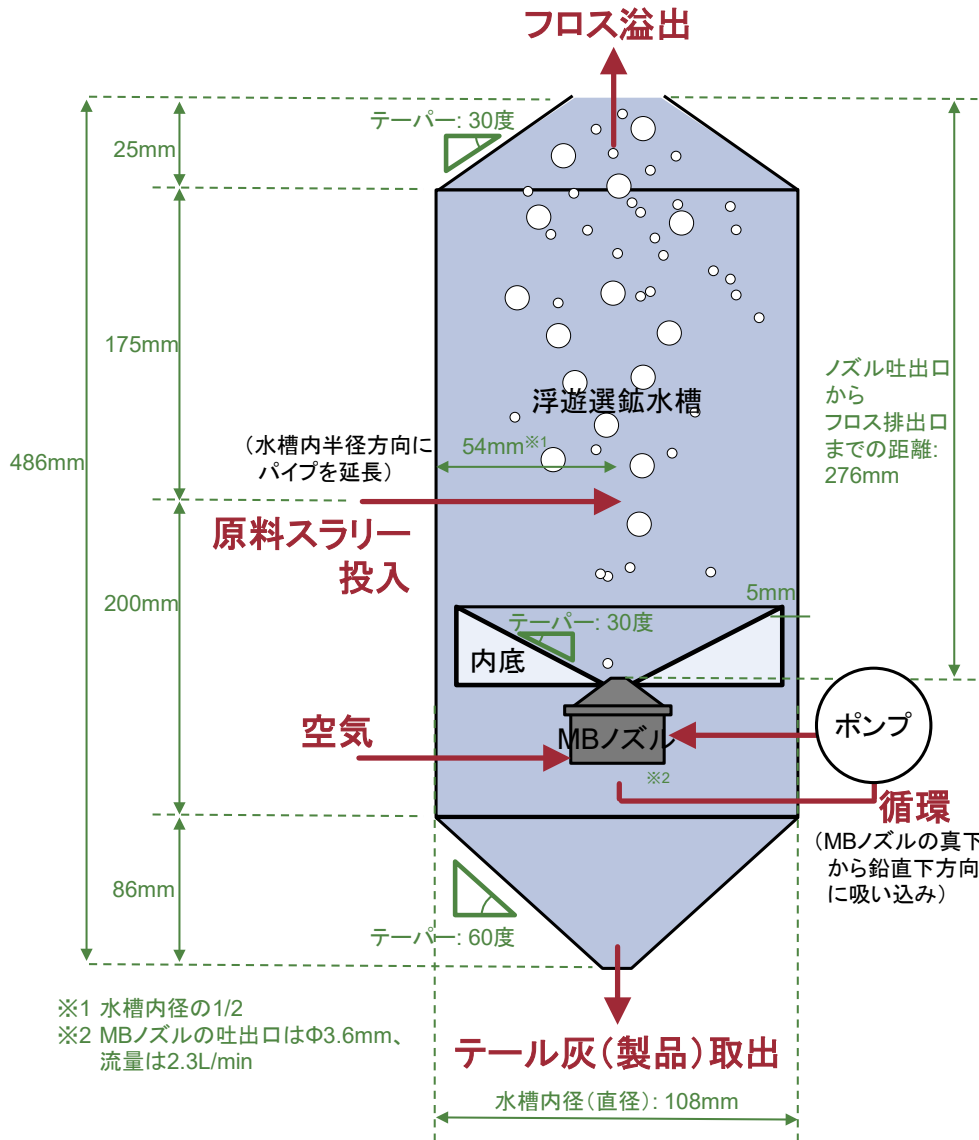
有効利用用途	判断組成	BFB	CFB	G	ST	合計	対象試料数
セメント原料利用	K, Cl, S, Mg, Cr, UC	0	0	0	0	0	58
ジオポリマー利用	UC, Ca	4	20	0	7	31	58
肥料利用(カリ肥料)	K <sub>2</sub> O, Cd, Pb	9	12	5	7	33	37
肥料利用(汚泥肥料)	As, Cd, Pb	7	12	5	5	29	37

## サブテーマ②: 北九州市立大学、日本アイリッヒ 連続式木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムの 実用可能性検証

### 研究内容・目標:

- ・ 10倍の効率を要する連続式処理装置の開発および実機の1/10のパイロットプラント (300t/y) での性能検証 (**難易度高**)
- ・ 処理費の目標は8,000円/t以下とし、現状の処理費の50%以上を削減 (**難易度中**)
- ・ 攪拌時間を3分/回として、150kg/hの事前攪拌装置および1時間以内で150kgのテール灰を濃度75wt%以上のケーキ状に脱水する装置の確認 (**難易度小**)
- ・ 重金属に関して安価で簡便な排水処理方法の提案 (**難易度中**)

# 【サブテーマ2：浮遊選鉱装置の連続化】



## 【主な仕様】

- ・ 水槽内容積: 3.5L
- ・ 見掛けの滞留時間: 5min (従来回式の処理時間: 30min)
- ・ 処理量: 原料0.23kg/5min

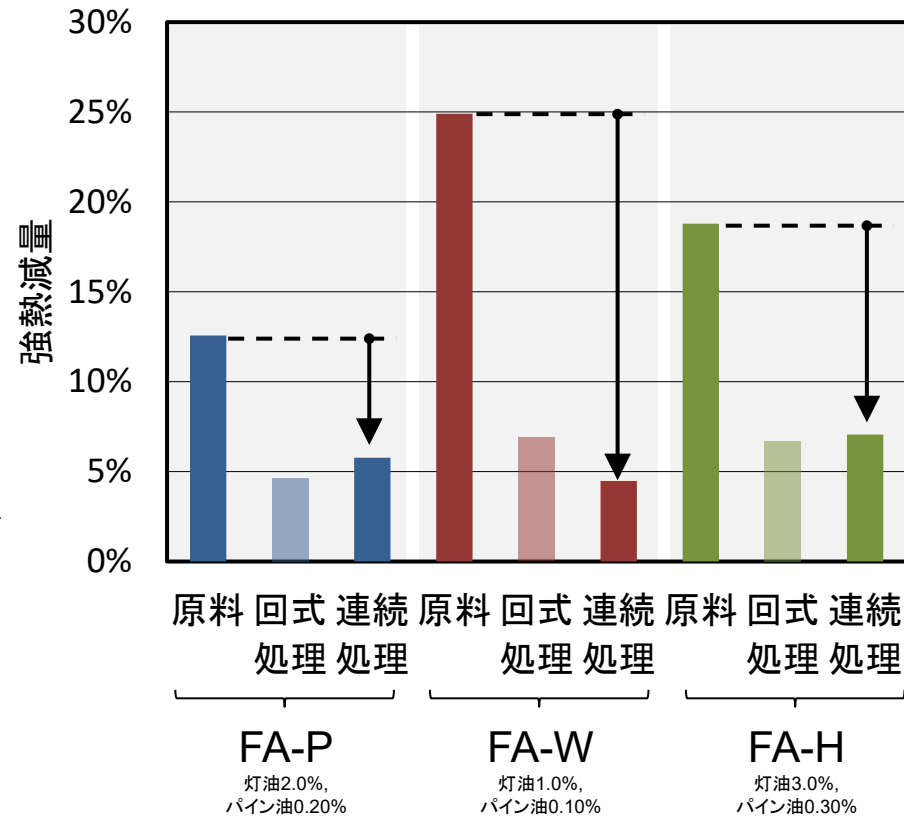


図 試作した連続処理装置(一例)

図 得られた改質効果

# 【サブテーマ2：浮遊選鉱装置の連続化】



写真 試作装置の外観

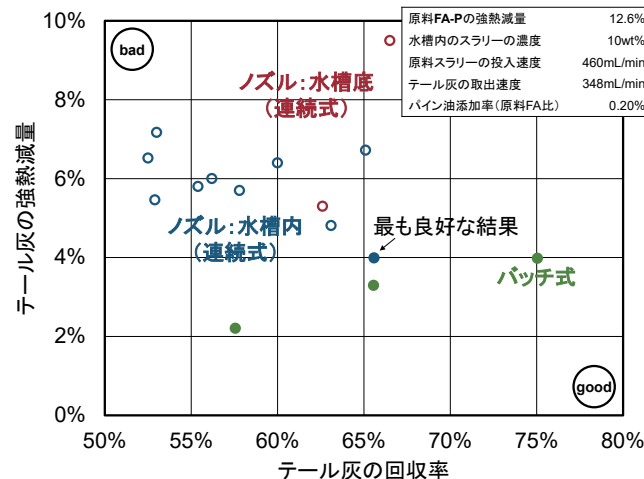


図 実験結果の一例

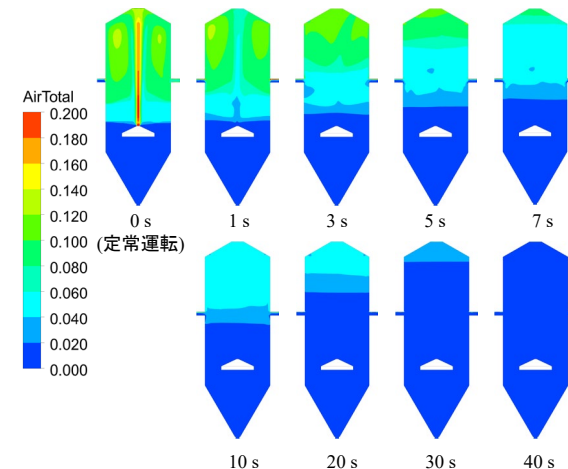


図 数値解析の一例

## 【効率的な連続処理に必要な機構】

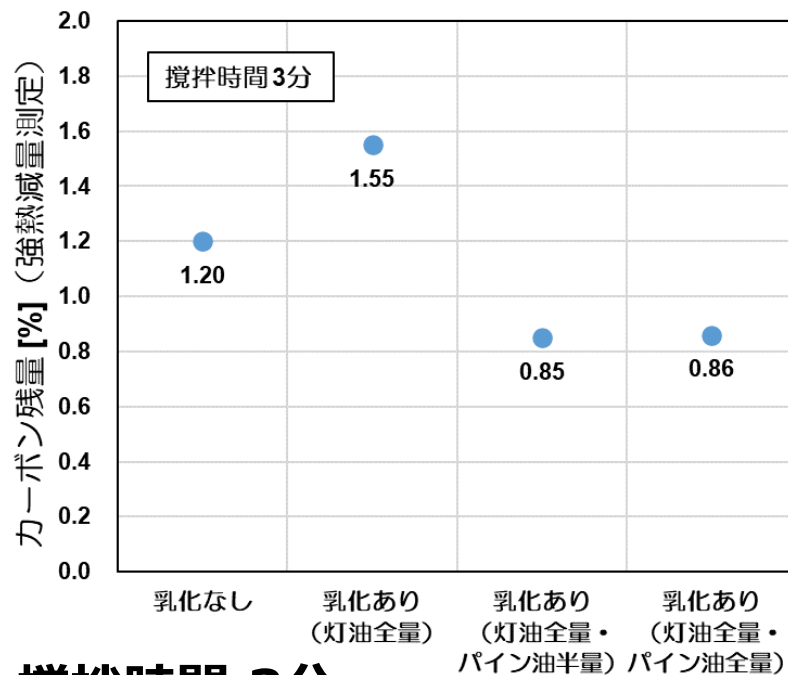
➤ 特許化

1. MBノズルは水槽内に沈めて取り付け、テール灰は水槽の一番下から取り出す。
2. MBノズル吐出口からフロス溢出口の間の水槽の中心に流れを妨げるものを設けない。
3. 水槽内で下降する成分を選別するための内底を設ける。
4. MBノズル吐出口からフロス溢出口までの距離を、MBノズルの吐出速度に応じて適切な値に設定する。
5. 原料を水槽の水平断面の中心から投入する。
6. 循環ポンプへの吸込口は、内底より上の水槽の外周から中心に向かって水槽内径の1/6離れた場所、もしくは内底より下のMBノズルの直下に設ける。
7. MBノズルによって生じる水槽内の渦流を積極的に消失・強化する必要はない。

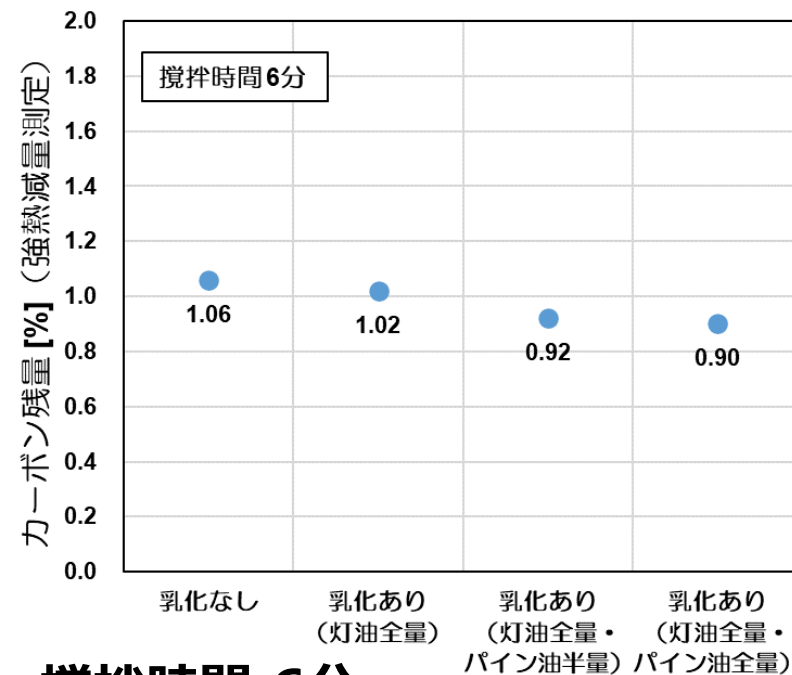


# 【サブテーマ2：事前攪拌処理の最適化】

## 事前攪拌プロセスにおける添加剤の乳化による未燃炭素除去効果



**攪拌時間 3分**

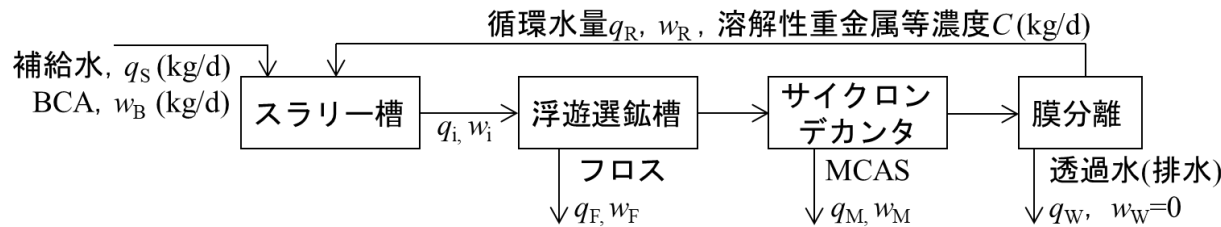


**攪拌時間 6分**

- バッチ処理にて木質バイオマス混焼灰1種について添加剤の乳化による未燃炭素除去効果を確認した。今後、事前攪拌プロセスの運転条件を最適化し、添加剤乳化の効果を検証する。
- また、連続式システムおよびパイロットプラントでの事前攪拌プロセスについても、運転条件の最適化を進める。

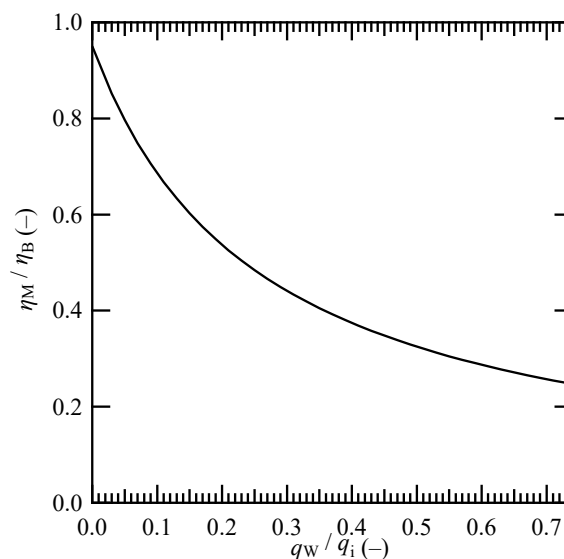
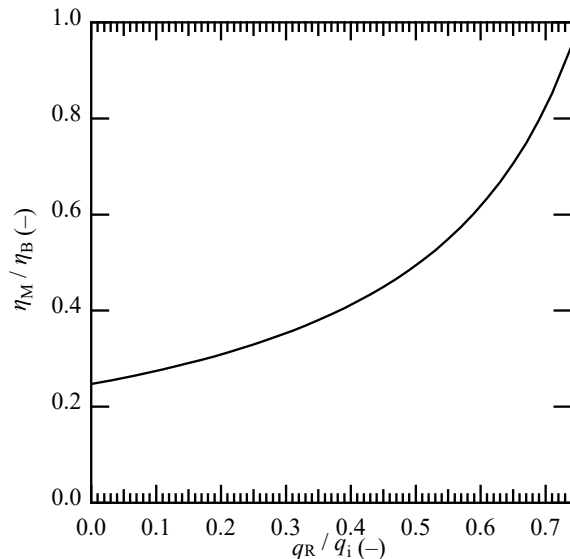
# 【サブテーマ2：排水処理の最適化】

## (1) 水バランス調査による排水水量の最適化



$$q_S = q_F + q_M + q_W$$

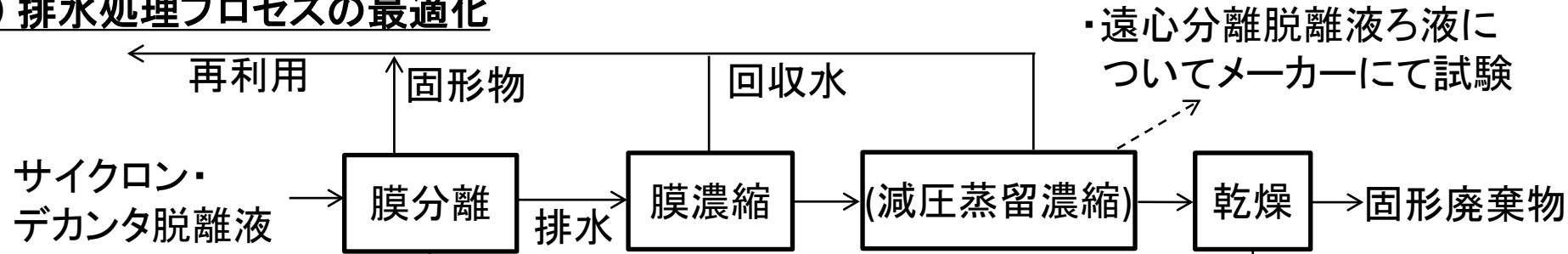
$$\eta_B w_B = C (q_F + q_M + q_W)$$



- 原料BSA 1000kg/d処理の実規模装置について水バランスを調べた。排水処理を行わず水を全量循環使用する場合、MCAS中の溶解性重金属等濃度は原料中濃度の95%になる。水の循環使用を行わず全量排水処理する場合はMCAS中の溶解性重金属等濃度は原料中濃度の25%になり、排水処理量は740 kg/dになると予想された。
- 排水量とMCAS中溶解性金属濃度の関係が計算できたことにより、好ましいMCAS中の溶解性重金属等濃度に応じて最適な排水水量を決定することができる。

# 【サブテーマ2：排水処理の最適化】

## (2) 排水処理プロセスの最適化

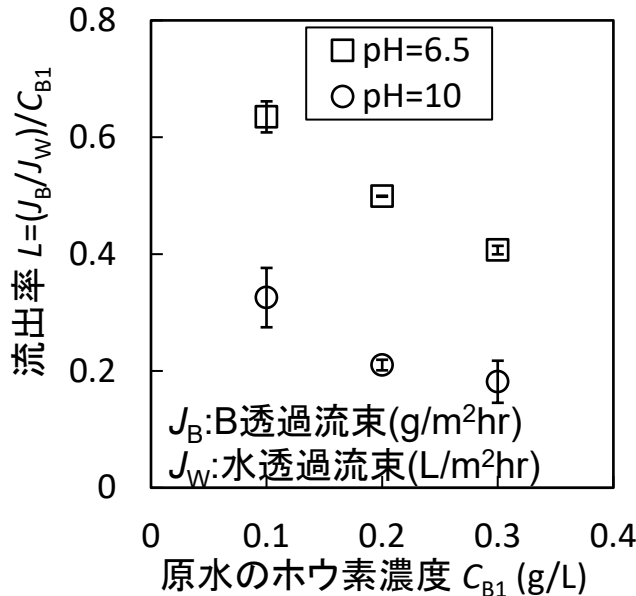


- ・パイロット試験からの排水を膜濃縮する予定
- ・試験装置の組み立て

- ・FO膜での分離性能(2021)
- ・RO膜での分離性能も検討予定



太陽光蓄熱乾燥装置  
濃縮水の乾燥  
(フロスの乾燥)

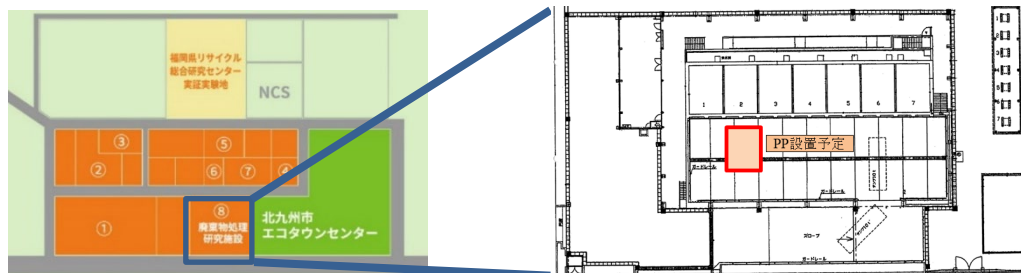


FO膜での分離性能試験結果

・3種類の燃焼灰について溶出試験を実施，クロム(Cr)およびホウ素(B)が溶出することが分かった。  
 ・排水の低エネルギーな濃縮方法としてFO膜プロセスを検討した。特にBで懸念されるFO膜排除性を実験で調べた。中性域では排除率が低かったが、溶出液として想定される高pH条件では陰イオンとなり排除率が高くなった(流出率が低くなった)。

# 【サブテーマ2：パイロットプラントの計画】

内容精査および論文検討のため図表は非公開



全体フローシート

**PP設置予定場所**  
**北九州市エコタウン**

## サブテーマ③: 西松建設、九州工業大学大学院 改質木質バイオマス燃焼灰を使用したジオポリマーコンクリートの開発

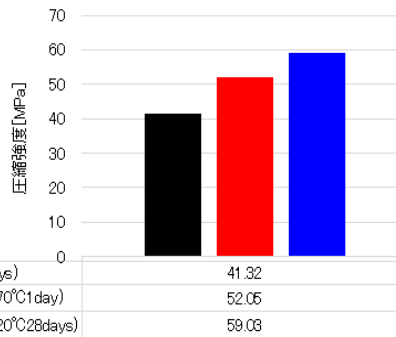
### 研究内容・目標:

- ・ 普通コンクリートに対してCO<sub>2</sub>排出量を60%削減し、目標性能は設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>以上、耐久性能の優れたもの（**難易度中**）
- ・ 常温硬化型で60分程度の可使用時間を有する生コンプラントで練混ぜ可能なGPコンクリートの開発（**難易度高**）
- ・ 製品の環境負荷低減効果、高機能性およびコストを加味して総合的優位性の提示（**難易度中**）

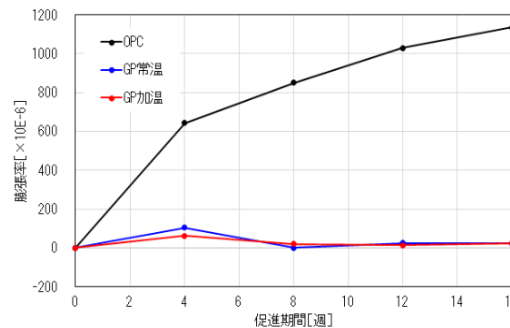
# 【サブテーマ3 : 混焼MCAS・GPコンクリートの性状】

## 基準配(調)合

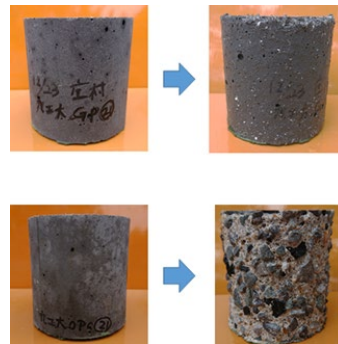
GPW/P	BFS/P	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		GPW	MCS	BFS	S	G
35	60	236	256	138	786	938



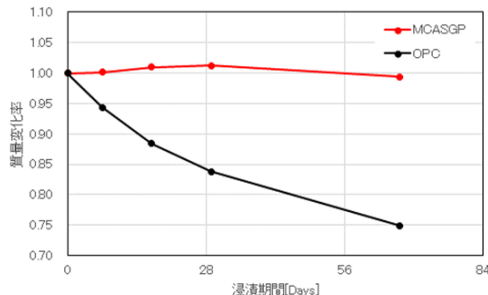
養生条件毎の圧縮強度



膨張率の経時変化



硫酸浸漬前後の供試体  
上:ジオポリマ、下:セメント



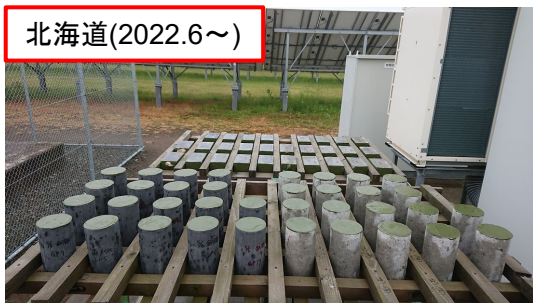
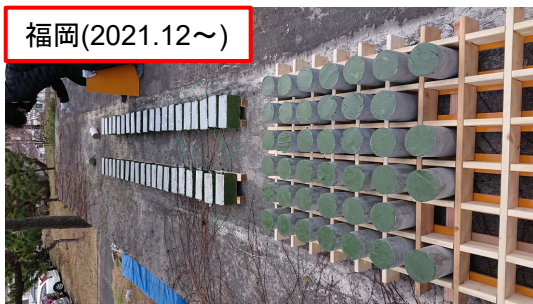
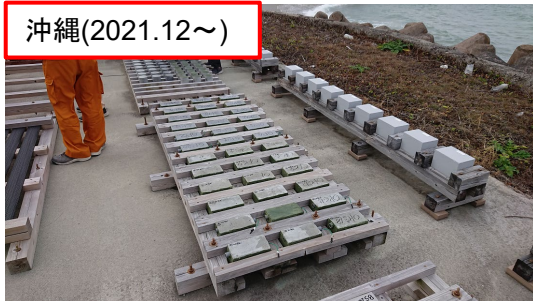
硫酸浸漬期間と質量変化  
の関係

## タンクリーチング試験結果

項目名	試料番号 試料名	基準 上限値	21C6220	21C6221	21C6222	定量下限値	単位
			GP-20°C	GP-70°C12hr	GP-70°C18hr		
ガドリウム		0.01mg/L	0.0003未満	0.0003未満	0.0003未満	0.0003	mg/L
全シアン		不検出	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.1	mg/L
鉛		0.01mg/L	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005	mg/L
六価クロム		0.05mg/L	0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.02	mg/L
砒素		0.01mg/L	0.032	0.11	0.099	0.005	mg/L
総水銀		<0.0005mg/L	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005	mg/L
アルキル水銀		不検出	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005	mg/L
セレン		0.01mg/L	0.016	0.005未満	0.010	0.005	mg/L

- 混焼MCASを使用して圧縮強度 24N/mm<sup>2</sup>以上、二酸化炭素排出量を OPCコンより60%削減出来た。
- ASR・硫酸抵抗性に優れていた。
- 砒素とセレンが基準値を超える結果となったので、今後防止策を検討する。

# 【サブテーマ3：曝露試験（沖縄・福岡・北海道）】



## 【沖縄での進捗状況】

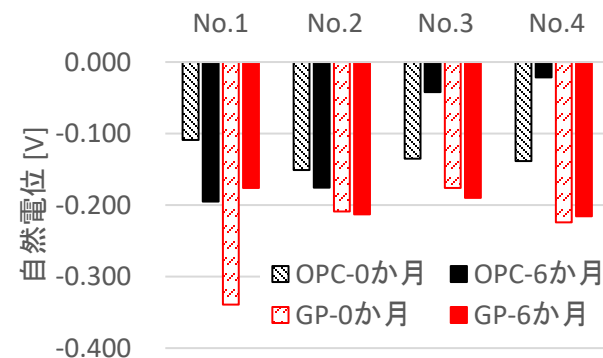
### 1. 外観変化(6か月時点)



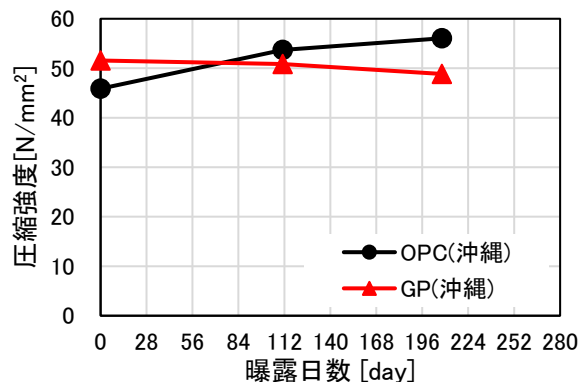
GP

OPC

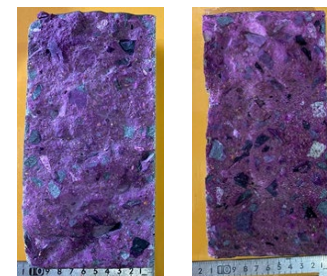
### 2. 自然電位



### 3. 圧縮強度



### 4. 中性化深さ (6か月時点)



GP  
2.3mm

OPC  
0mm

## 【サブテーマ3 : 専焼MCAS・GPモルタルの性状】

	県	炉の種類	原料	原灰or改質灰	色	Lol	塩酸溶解 未燃炭素	GP	
								0打フロー	15打フロー
①				原灰	灰	3.92	1.64		
				改質灰	灰	5.78	1.54		
②				原灰	灰	8.13	12.75		
				改質灰	灰	15.42	7.49		
③				原灰	灰	31.28	8.31		
				改質灰	灰	20.22	6.49		
④		気泡流動床炉	木材チップ	原灰	灰	16.28	9.95		
				改質灰	灰	14.62	13.51		
⑤		気泡流動床炉	木材チップ	原灰	灰	1.32	1.57		
				改質灰	灰	2.73	4.21		
⑥		気泡流動床炉	木材チップ	原灰	灰	5.50	3.15		
				改質灰	灰	5.55	1.65		
⑦		気泡流動床炉	木材チップとPKS	原灰	灰	31.03	4.27		
				改質灰	灰	7.82	1.65		
⑧		気泡流動床炉	木材チップ	原灰	黒	24.65	1.41		
				改質灰	灰	3.38	1.84		
⑨		トラベリングストーカ	木材チップとPKS	原灰	黒	17.60	10.24		
				改質灰	灰	9.07	7.34		
⑩		トラベリングストーカ	木材チップ	原灰	黒	24.75	10.65		
				改質灰	灰	18.32	7.01		
⑪				原灰	灰	28.58	17.32		
				改質灰	灰	25.86	15.48		
⑫				原灰	黒	22.85	16.85		
				改質灰	黒	7.54	3.59		
⑬				原灰	灰	5.82	0.91		
				改質灰	灰	3.34	0.36		

内容精査および論文検討  
のため図表は非公開



⑥⑧⑩⑫について、浮遊選鉱法による改質効果が顕著にみられ、  
実用性の高いジオポリマーを製造可能であることが確認された





## 3. 研究進捗状況

## 【研究進捗状況】

### I 木質バイオマス燃焼灰の類型化（サブテーマ①）

- 2025年には71万トンの木質バイオマス燃焼灰が発生することを推計した。得られたデータを基に統計的解析を進め、数量化1類により属性データが組成に与える影響を把握するとともに、クラスター分析を実施し、類型化を行った。セメント原料利用、ジオポリマー利用、肥料利用などの有効利用用途別に基準適合灰を整理した。令和4年度の研究までを進めており、研究は計画以上に進捗している。

### II 連続式木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムの実用可能性検証（サブテーマ②）

- 連続式浮遊選鉱を実施する容量約3Lのプロトタイプ装置の試作が完了し、その処理能力を検証すると共に知財化にも取り組んだ。MCAS中の溶解性重金属等濃度に応じて最適な排水水量を決定することができるの水量固形物量定義フローを作成した。ZLDのための排水の濃縮法としてFO膜法を検討した。パイロットプラント計画では、全体フローが完成した。研究は当初の計画通りに進捗している。当初予算が確保できればフルプロセスでパイロットプラントにおいて製造検証が可能となる。

### III 改質木質バイオマス燃焼灰を使用したジオポリマーコンクリートの開発（サブテーマ③）

- 木質バイオマス燃焼灰(混焼灰)を使用して普通コンに対して二酸化炭素排出量60%削減し、フレッシュ・強度・耐久性能について目標を満足するGPコンを開発した。ジオポリマーの曝露実験(沖縄、九州)を半年繰り上げて実施し、釧路についても曝露を開始している。専焼灰を使用したジオポリマーモルタルは改質効果と強度影響について明らかにしている。研究は計画以上に進捗している。



## 4. 環境政策への貢献

## 【環境政策への貢献】

- 未稼働の施設や今後の施設建設における目安としての係数を算出することができ、木質バイオマス発電施設を事業化していく上で重要な情報を示すことができる。
- 木質バイオマス発電は、必ずしも燃焼方法が確立されているとはいえ、その燃焼灰の品質が不安定である。現在、バイオマス燃焼灰はその性状が未解明で再利用が限定的で、埋め立て処分されているものも多い。バイオマス燃焼灰から効率よく未燃炭素を除去する技術が確立されれば、ジオポリマーコンクリートだけでなく従来のセメントコンクリートにもバイオマス燃焼灰を活用することが容易となる。
- 本研究開発が成功すればMCASをGPコンクリートに適用することによって、コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量を最大約60%削減可能。現場打設対応型MCAS・GPコンを開発できれば、普通コンクリートの代替が可能となり将来的に40%代替すれば日本のCO<sub>2</sub>排出量を1%削減可能。

⇒ 本技術開発の遂行により、リサイクル手法の確立していない木質バイオマス燃焼灰から未燃炭素と重金属を除去して改質することによってGPコンクリートの活性フィラーとして地域内で資源循環を可能にすると共にコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量を抑制しパリ協定の削減目標の一部となし温暖化対策に貢献できる。





## 5. 研究成果の発表状況

**論文（査読あり）：**

**【サブテーマ1】 1編、【サブテーマ2】 9編、【サブテーマ3】 1編**

**その他誌上発表（査読なし）：【サブテーマ2】 2編**

**口頭発表（学会等）：**

**【サブテーマ1】 4回、【サブテーマ2】 9回、【サブテーマ3】 1回**

**知的財産権：【サブテーマ2】 2件**

**マスコミ等への公表・報道等：【サブテーマ2】 1件**

**受賞：2件**