

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（技術実証型）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【3G-2103】

体系的番号： （J P M E E R F 2 0 2 1 3 G 0 3）

研究課題： 「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」

Research Title: Demonstration Development of Recycling Technology for Woody Biomass Combustion Ash for Geopolymer Concrete

研究代表者： 高巢 幸二

研究代表機関： 北九州市立大学

研究分担機関： 京都大学大学院、日本アイリッヒ株式会社、西松建設株式会社、九州工業大学大学院

研究協力機関： 九州大学大学院、響灘エネルギーパーク合同会社、日本木質バイオマスエネルギー協会、株式会社タクマ、九州電力株式会社、株式会社クレハ、日本製鉄株式会社、北九州市

研究領域： 資源循環領域

キーワード： 木質バイオマス燃焼灰、循環再生材料設計・生産、廃棄物処理システム、地域循環共生圏形成、グリーンプロダクト

令和6（2024）年5月

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	8
2. 研究開発目的	8
3. 研究目標	8
4. 研究開発内容	10
5. 研究成果	13
5-1. 成果の概要	13
5-2. 研究目標の達成状況	21
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	24
6. 研究成果の発表状況の概要	26
6-1. 成果の件数	26
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	26
7. 国際共同研究等の状況	27
8. 研究者略歴	28
II. 成果の詳細	29
II-1 サブテーマ1「木質バイオマス燃焼灰の類型化」	29
[サブテーマ1要旨]	29
1. サブテーマ1研究開発目的	29
2. サブテーマ1研究目標	30
3. サブテーマ1研究開発内容	30
4. サブテーマ1結果及び考察	31
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	43
II-2 サブテーマ2「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」	45
[サブテーマ2要旨]	45
1. サブテーマ2研究開発目的	45
2. サブテーマ2研究目標	46
3. サブテーマ2研究開発内容	46
4. サブテーマ2結果及び考察	49
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	62
II-3 サブテーマ3「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」	64
[サブテーマ3要旨]	64
1. サブテーマ3研究開発目的	64
2. サブテーマ3研究目標	64
3. サブテーマ3研究開発内容	65
4. サブテーマ3結果及び考察	71
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	79
III. 研究成果の発表状況の詳細	80
(1) 成果の件数	80
(2) 誌上発表	80
(3) 口頭発表	82
(4) 知的財産権	84
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	85
(6) マスメディア等への公表・報道等	85
(7) 研究成果による受賞	86

(8) その他の成果発表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86

付録 1、2

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要  
 <課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（技術実証型）
研究実施期間：	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号：	【3G-2103】
研究課題：	「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」
研究代表者：	高巢 幸二（北九州市立大学国際環境工学部、教授）
重点課題（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
重点課題（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
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	非該当
研究領域：	資源循環領域

<キーワード>

木質バイオマス燃焼灰
循環再生材料設計・生産
廃棄物処理システム
地域循環共生圏形成
グリーンプロダクト

<研究体制>

サブテーマ1「木質バイオマス燃焼灰の類型化」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
京都大学大学院	工学研究科都市環境工学専攻	教授	高岡昌輝	2021年度～2023年度

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
京都大学大学院	工学研究科都市環境工学専攻	技術専門職員	塩田憲司（2021～2023年度）

京都大学大学院	工学研究科都市環境工学専攻	博士課程2回生	池美乃里（2021～2023年度）
京都大学大学院	工学研究科都市環境工学専攻	修士課程2回生	裴 芸蘭（2021～2023年度）
京都大学大学院	工学部地球工学科	4回生	飯島 森（2021年度）
京都大学大学院	工学部地球工学科	4回生	中尾泰康（2023年度）
日本木質バイオマスエネルギー協会		専門調査員	川越裕之（2021年度）
株式会社タクマ	研究部		小中原亨（2021～2023年度）

## サブテーマ2 「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リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北九州市立大学	国際環境工学部建築デザイン学科	教授	高巢幸二	2021年度～2023年度
日本アイリッヒ株式会社	Mixing Technology Unit	Deputy General Manager	櫻井雄一	2021年度～2023年度
北九州市立大学	国際環境工学部建築デザイン学科	准教授	陶山裕樹	2021年度～2023年度
北九州市立大学	国際環境工学部環境化学工学科	教授	寺嶋光春	2021年度～2023年度
日本アイリッヒ株式会社	Nippon Eirich Core Competence	Senior Representative	幸永秀昭	2023年2月～2024年3月

## ＜サブテーマ2研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
北九州市立大学	国際環境工学部建築デザイン学科	特任研究員	達見清隆（2021年度）
北九州市立大学大学院	国際環境工学研究科環境工学専攻	RA	リュウジハオ（2022～2023年度）
北九州市立大学大学院	国際環境工学研究科環境工学専攻	博士前期課程2年	河崎尚哉（2021～2023年度）
北九州市立大学大学院	国際環境工学研究科環境工学専攻	博士前期課程2年	洲上貴史（2021～2023年度）
北九州市立大学大学院	国際環境工学研究科環境工学専攻	博士前期課程1年	廣瀬寛太（2022～2023年度）
北九州市立大学	国際環境工学部建築デザイン学科	学部4年	藤本優生人（2021年度）

北九州市立大学	国際環境工学部建築デザイン学科	学部4年	今林大翔（2023年度）
九州電力株式会社	土木建築本部	グループ長	垣内幸治（2021～2022年度）
響灘エネルギーパーク合同会社	ひびき灘石炭・バイオマス発電所	所長	藪見隆二（2021～2022年度）
響灘エネルギーパーク合同会社	ひびき灘石炭・バイオマス発電所	所長	眞下剛雄（2023年度）
九州電力株式会社	土木建築本部	グループ長	北島幸一郎（2022～2023年度）
九州電力株式会社	土木建築本部		陣内久雄（2021～2023年度）
株式会社クレハ	基礎化学品製造部	部長	吉田圭一（2021年度）
株式会社クレハ	基礎化学品製造部	部長	廣田陽一（2022～2023年度）
日本製鉄株式会社	土木建築技術部	課長	上村竜介（2021年度）
北九州市	環境局グリーン成長推進部	係長	佐藤禎一（2021年度）
北九州市	環境局グリーン成長推進部	係長	濱邊稔（2022～2023年度）

## サブテーマ3「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リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
西松建設株式会社	技術研究所	マイスター	原田耕司	2021年度～2023年度
九州工業大学大学院	工学研究院建設社会工学研究系	准教授	合田寛基	2021年4月～2024年1月

## ＜サブテーマ3研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
九州工業大学大学院	工学府工学専攻国土デザインコース	修士課程2回生	庄村 政紘
九州工業大学大学院	工学府工学専攻国土デザインコース	修士課程1回生	伊東 奈月

## ＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	25,459千円	3,329千円	28,788千円

【環境問題対応型3G-2103】

2022	25,356千円	3,355千円	28,746千円
2023	25,466千円	3,288千円	28,754千円
合計	76,281千円	9,972千円	86,288千円

## 1. はじめに（研究背景等）

再生可能エネルギーの導入が求められる中、近年我が国では、木質バイオマス発電が急速に設備容量を認定されており、投入バイオマス量の2～3%が燃焼灰であると見込むと、燃焼灰の発生量は現在の40万tレベルから2024年には70万tに上昇する可能性がある。

近年、二酸化炭素排出量が理論上セメントの約20%程度であるセメントフリーなジオポリマーコンクリートが開発されている。ジオポリマーは石炭灰や高炉スラグ微粉末のような活性フィラーが必要である。木質バイオマス燃焼灰を石炭灰の代わりにジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして活用できれば、資源循環を通じて地域循環共生圏の創造に寄与できる。

木質バイオマス燃焼灰をジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして使用するには、コンクリートの流動性や強度発現に悪影響を及ぼすので未燃炭素含有量を3%以下にするとともに大量使用に伴い重金属等を低減させておく必要がある。一部の木質バイオマス燃焼灰の未燃炭素含有量は3%を大きく超え重金属溶出量も環境基準を超えるものがあり、それらの多くは産廃処理されている。申請者らは、環境研究総合推進費によって独自の浮遊選鉱技術を利用して石炭灰から効果的に未燃炭素と重金属を除去する改質技術を構築し、15kg/batch 処理のラボ装置の研究開発に成功している。本技術を木質バイオマス燃焼灰に適用してそれを使用したジオポリマーコンクリートを開発できれば、木質バイオマス燃焼灰の資源循環とコンクリートの二酸化炭素排出量削減に寄与できる。

## 2. 研究開発目的

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の未燃炭素と重金属を除去する連続式改質装置を開発して、既存のラボ装置の10倍の製造量を有するパイロット装置として実用可能性を検証して木質バイオマス燃焼灰の資源循環を実現する。さらに、改質木質バイオマス燃焼灰を利用したジオポリマーコンクリートを開発して建設分野における二酸化炭素排出量の大幅な削減を目指す。

## 3. 研究目標

全体目標	木質バイオマス燃焼灰の資源循環を促進するため、全国から木質バイオマス燃焼灰を収集し、性状を分析し、データベースを構築する。木質バイオマス燃焼灰の資源循環を促進するため木質バイオマス燃焼灰の未燃炭素と重金属を除去する連続式改質装置を開発する。先行研究で得られたラボ装置の10倍の製造量を有する装置にすることによりパイロット装置として性能を確認して実用可能性を検証した後、社会実装へ繋げるプラントを設計する。パイロット装置で改質した木質バイオマス燃焼灰（MCAS：Modified Combustion Ash slurry）を利用したジオポリマーコンクリートを開発して二酸化炭素排出量の大幅な抑制を実現すると共に、建設分野における地域循環共生圏の構築を目指す。
サブテーマ1	木質バイオマス燃焼灰の類型化
サブテーマ1 実施機関	京都大学大学院
サブテーマ1 目標	①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統計が整備されていないことから、全国的なデータベースを作成する。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を実施し、各リサイクル用途に応じた将来的な資源量の見積もりを行い、改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を抽出する。

サブテーマ2	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実施機関	北九州市立大学、日本アイリッヒ株式会社
サブテーマ2目標	<p>①木質バイオマス燃焼灰発生元に対し、その発生量に見合う年間9,000tの処理能力を有するシステム（9,000t/yを3ラインで処理する。1ライン3,000t/y）の設計原案を構築する。先行研究で検証が終了しているラボ装置（処理量28.8t/年）に対して連続式を開発して同容積で10倍の製造量を実現する装置（処理量300t/年）を製造し、実機の1/10のパイロットプラントとして改質性能を確認して実機化への基礎データを収集する。</p> <p>②木質バイオマス燃焼灰の処理費用は概ね16,000円/t前後であることから、パイロットプラントでの処理費の目標は8,000円/t以下とし、現状の処理費の50%以上を削減するものとする。</p> <p>③事前攪拌処理の攪拌時間が短いほど装置をコンパクト化することができ、イニシャル、ランニング、メンテナンスコストを低減できるので、パイロットプラントの混練機による攪拌時間を3分/回として、150kg/hの事前攪拌装置を開発する。</p> <p>④浮遊選鉱処理後のテール灰の濃度は10wt%程度であり、ジオポリマーコンクリート用活性フィラーとしては75wt%以上に脱水する必要がある。そこで、デカンタ式遠心脱水機をベースに1時間以内で150kg（乾粉ベース）のテール灰を濃度75wt%以上のケーキ状に脱水できることを確認する。</p> <p>⑤浮遊選鉱水に溶出した重金属に関して安価で簡便な排水処理方法を提案する。</p> <p>⑥木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された数種のMCASに対して性能試験を実施し、建築用コンクリート混和材として使用するために建築技術性能評価認定を得るための基礎データを収集する。</p>
サブテーマ3	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実施機関	西松建設株式会社、九州工業大学大学院
サブテーマ3目標	<p>①パイロットプラントから製造されたMCASを利用したジオポリマーコンクリートを開発してその二酸化炭素排出量を同等性能の普通コンクリートに対して60%削減し、目標性能は設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>以上、アルカリシリカ反応抑制などの耐久性能の優れたものとする。</p> <p>②ジオポリマーコンクリートは蒸気養生を施すことが一般的である。二次製品タイプのジオポリマーコンクリートは、蒸気養生を前提とした製造手法として縁石・側溝等の小型製品を試作する。生コンタイプでは蒸気養生を施すことが難しいので、常温硬化型で60分程度の可使用時間を有する施工性の優れたジオポリマーコンクリートを開発して、生コンプラントで練混ぜ可能とする。</p> <p>③開発したジオポリマーコンクリートを普及させるため、MCASジオポリマーコンクリートの製造システムを構築すると共に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を示す。</p>

## 4. 研究開発内容

本研究では3つのサブテーマから研究開発を実施した。

サブテーマ1の研究開発内容は主にアンケート調査、性状調査、資源量の見積もり及びデータベース作成の3つに大別して実施した。

### 4.1.1 アンケート調査

木質バイオマス燃焼灰の推計ため、主燃料が木材またはパーム椰子殻（PKS）で出力1MW以上の固定価格買取制度（FIT）認定発電施設220件を灰発生量推計対象とした。日本木質バイオマスエネルギー協会の協力のもと稼働中および計画中の発電施設220件にアンケートを送付し103件（うち5件は1MW未満、推計対象外）より回答を得た。

103施設中特に「灰発生量」を回答したのは74施設（うち2施設は1MW未満）で、推計対象220施設のうち146施設については推計する必要があったので、アンケートの必要な項目を回答した46件について燃料由来の灰量（Ac）を計算し、Acから実際の灰発生量（A）を求める線形近似式を求めた。Aの不明な146施設それぞれのAcを計算し、近似式を用いてこれらの施設のAを計算した。燃料は木材チップ（WC）、木材ペレット（WP）、枝葉材（BR）、樹皮材（B）、廃木材（WW）、PKS、石炭（Coal）の7種類に分類し、以上のいずれであるか不明な場合、WCが用いられると仮定し、2013年から2026年までの燃焼灰発生量の推計を行った。

また、将来推計シナリオについては、環境研究総合推進費SⅡ-6-2「有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発」において、バイオマス発電の今後の推移が、リファレンスシナリオ（ベースライン）、2℃目標シナリオ、1.5℃目標シナリオで計算されていることから、国立環境研究所からデータの提供をいただき、燃焼灰発生量推計を2050年まで実施した。

### 4.1.2 燃焼灰の性状調査

木質バイオマス燃焼灰は62施設から協力をいただき、同一施設における複数回のサンプリングを行い、飛灰では総計106試料、主灰では50試料を収集した。試料は飛灰、主灰からなり、炉形式（循環流動床ボイラー：CFB、気泡流動床ボイラー：BFB、ストーカ炉：ST、ガス化炉：G）や燃料種により性状の違いが想定される。試料は様々な性状調査を行った。

主要元素分析データ及び燃焼灰の属性データ（燃料種、燃焼方式、灰種）を使用してJMP®Pro16を用いて、階層クラスター分析及び主成分分析を行い、灰の類型化を行った。また重金属含有量・溶出量データについては、数量化I類分析を行い、属性データの影響を調べた。Kの化学状態についても階層クラスター分析を実施し、考察を行った。

### 4.1.3 資源量の見積もり及びデータベース作成

燃焼灰の主組成、重金属含有量から各種有効利用の基準適合性をセメント原料利用、肥料利用などの用途別に整理し、その結果をディシジョンツリー分析し、炉形式及び燃料種により有効利用に適・不適のカテゴリーを見出し、燃焼灰の分析ができていない残りの施設の有効利用可能性を推定し、現時点での用途別資源量を推計した。その際、サブテーマ2の改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を見出すための実験を別途行い、本活性フィラーに不向きな燃焼灰特性を見出し、用途別資源量に加え、最終的に用途別資源量を都道府県ごとにポテンシャルとして表した。また、今後の有効利用促進のため、アンケート調査からの基本属性データ等と燃焼灰の提供をいただいた施設については、主灰、飛灰の主要成分のデータを入力したグーグルマップを作成し、データベース化を行うとともに可視化した。

サブテーマ2の研究開発内容は主に、連続式浮遊選鉱装置の開発、パイロットプラントの設計・製作および能力検証、連続式実機プラントの設計原案の作成、排水処理方法の検討、MCASの製品評価の5つに大別して実施した。

### 4.2.1 連続式浮遊選鉱装置の開発

**浮遊選鉱プロセスの検討：** 先ず、プロトタイプ装置を作成し、浮遊選鉱槽の形状や運転条件をパラメータとした実験を行い、その分離能力の改善について検討した。今回作成したプロトタイプ装置は、容量

(分離処理が行われる水槽の容積)が2.3Lの小型および18Lの中型の2種類である。最適な運転条件の検討を目的とし、①原料の投入速度(水槽内の原料スラリーの平均滞留時間)、②原料の投入速度に対するテール灰の取出速度の割合(テール灰とフロスの発生割合)、③浮遊選鉱水槽内のMBノズルの取付位置、④水槽の高さ、⑤水槽内への原料投入位置、⑥循環ポンプへの吸込位置、⑦水槽からのテール灰取出位置、⑧水槽内の渦流の消失・強化機構の有無、⑨水槽内の内蓋の有無および⑩内底の有無、⑪装置スケール(2.3L vs 18L)を操作し、装置の分離能力に与える影響を検討した。また、プロトタイプ装置での実験結果を活用し、数値流体力学(CFD解析)モデルを検討した。実験結果に基づき水の流れ状態に重要な影響を与える微細気泡の気泡径分布および導入量のパラメータをキャリブレーションにより決定した。

**事前攪拌プロセスの検討**：容量2.7Lのアイリッヒミキサーを用いた際の運転条件を検討した。試験対象の木質バイオマス燃焼灰に対し、事前攪拌時間、薬剤添加率および薬剤添加方法を実験因子とした検討を行った。

**脱水プロセスの検討**：テール灰の脱水プロセスの最適運転パラメータ究明のため、デカンタ式遠心分離機にて脱水濃縮性評価試験を実施した。

#### 4.2.2 パイロットプラントの設計・製作および能力検証

実機を提案する前段階として、設計処理速度150kg/hのパイロットプラントを設計・製作した。今回製作したパイロットプラントでは、原料となる燃焼灰が事前攪拌プロセス、浮遊選鉱プロセス、脱水プロセスの3工程を経て改質され、そのうちの浮遊選鉱プロセスでは連続処理が施される。

製造されたパイロットプラントの能力を検証した。装置の評価項目は、製造量(目標：300t/y機)、テール灰の未燃炭素量およびニュートン効率である。申請時点で両者の目標値を設定していなかったが、テール灰の未燃炭素量は3.0%以下、ニュートン効率は0.60以上を目標とした。なお、ニュートン効率は研究開始時点で目標に挙がっていなかったが、アドバイザーからのアドバイスに従って、独自目標に加えた。最後にパイロットプラントの運転条件をもとに改質処理費用を試算し、その額が目標の8,000円/t以下となることを確認した。

#### 4.2.3 連続式実機プラントの設計原案の作成

今回製作したパイロットプラント(300ton/h)の試験結果および試験運転を通じて明らかになった課題や課題解決の手懸りをもとに、1ライン3,000t/年の設計原案を作成した。

#### 4.2.4 排水処理方法の検討

木質バイオマス燃焼灰改質パイロット試験装置で原料として使用した燃焼灰(混焼灰)の排水規制対象有害物質元素の分析を行い組成比を調べた。さらに、運転中のバイオマスボイラ燃焼灰改質パイロット装置の遠心分離脱離液として排出された実排水について、限外濾過(UF)膜で濾過し、溶解性物質測定用試料を得た。固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の関係および固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の一律排水基準値との比の関係を明らかにすることで、フロス灰と排水中の重金属含有量および溶出量のマッピングを実施した。また、水バランス調査による排水水量を最適化することで、循環水利用の上限の試算を試みた。同時に排水中懸濁固形物を除去する方法について検討し、公共水域に排水することを可能にするための効果的な排水処理方法を検討した。さらに、当初の目標を超えた追加の検討として、将来は、改質燃焼灰中の溶出性有害物質濃度を低減させるために水洗を積極的に実施することやゼロリキッド排出(ZLD; zero liquid discharge)にすることの必要性が生じる可能性があり、これらのときには溶解性有害物質を水から分離するシステムとする必要があることから、本実排水について、ナノ濾過膜による処理性能を測定した。

#### 4.2.5 MCASの製品評価

バイオマス由来のMCASを改質し、セメントコンクリートへ混合した供試体を作成し、その圧縮強度(JIS A 1108)、静弾性係数(JIS A 1149)および乾燥収縮ひずみ(JIS A 1129-2、材齢7日から乾燥)を測定した。供試体には4種類のMCAS(A灰~D灰)の他に、普通ポルトランドセメント、海砂、碎石および高性能AE減水剤を使用した。使用したMCASの物性は表0-1(表2-2)の通りである。単位水量を180kg/m<sup>3</sup>、水粉体比を50%で一定としたうえで、普通ポルトランドセメントの15%もしくは30%をMCASに置換した。

表0-1 (表2-2) 使用したバイオマス由来のMCAS

物性	A灰	B灰	C灰	D灰
密度[g/cm <sup>3</sup> ]	2.22	1.91	1.99	2.09
強熱減量	3.02%	8.64%	15.90%	9.92%
pH	10.67	11.44	10.62	10.72
ブレーン比表面積[cm <sup>2</sup> /g]	4346	6470	7346	6848
未燃炭素量(塩酸処理後の強熱減量)	1.85%	3.72%	1.48%	0.94%

サブテーマ3の研究開発内容は主に、ジオポリマーコンクリート配合検討、曝露試験、実機ミキサを用いた小型製品の試作、専焼灰の検討、MCASを用いたジオポリマーコンクリートの総合優位性の検討の5つに大別して実施した。

#### 4.3.1 ジオポリマーコンクリート配合検討

MCASを利用したジオポリマーコンクリートについて、蒸気養生型と常温硬化型の2種類の配合の検討を実施した。配合の条件は、普通コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量に対して60%以上削減できることとした。それぞれの検討では、まずモルタルでの検討を行ってから、コンクリートの検討を実施した。なお、本検討で使用したMCASは混焼灰を対象とした。蒸気養生型および常温硬化型共にモルタルにて参考配合を確定し、コンクリートにて性状を確認して配合を確定した。可使時間を延長する方法としてアルカリ水比の検討と石灰石微粉末の混合を採用した。

#### 4.3.2 曝露試験

MCASを利用したジオポリマーコンクリートの耐久性を評価するため、実環境での曝露試験を実施した。曝露試験場所は釧路、北九州、沖縄の3か所とした。ジオポリマーコンクリートおよび比較用のセメントコンクリートの使用材料、配合、試験項目を以下に示す。

表0-2 (表3-10) ジオポリマーコンクリートの配合

%				kg/m <sup>3</sup>				
AS/P	BFS/P	s/a	空気量	AS	MCAS	BFS	S	G
65	30	47.0	2.0	236	254	138	786	938

表0-3 (表3-11) 比較用のセメントコンクリートの配合

%			kg/m <sup>3</sup>				g/m <sup>3</sup>	
W/C	s/a	空気量	W	C	S	G	AE剤	消泡剤
42	46.0	6.0	170	405	761	938	2.429	8.095

表0-4 (表3-12) 試験項目

<沖縄>	<北九州>	<釧路>
圧縮強度試験	圧縮強度試験	圧縮強度試験
自然電位測定	自然電位測定	
分極抵抗測定	分極抵抗測定	
中性化試験	中性化試験	
鉄筋外観観察	放射熱測定	
放射熱測定		

#### 4.3.3 実機ミキサを用いた小型製品の試作

MCASを使用したジオポリマーコンクリートの小型製品として縁石を試作した。使用した実機ミキサは、特殊コンクリート製造用ミキサである。本ミキサは高強度コンクリート等の特殊製品を製造する際に用いられている。MCASを利用したジオポリマーコンクリートの配合表を以下に示す。

表0-5 (表3-13) 配合

BFS/P (%)	LS/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
		AS	SH	W	MCAS	BFS	LS	S	G
18	12	150.6	20.4	86	257	66	44	709	917

#### 4.3.4 専焼灰の検討

これまでは、混焼灰を用いたジオポリマーコンクリートの検討を行ったが、専焼灰についても検討を行った。4種類の専焼灰を使用して小型改質装置で改質したMCASと原灰で比較した。BFS/Pは30%で固定して、灰種によってAS/Pを変化させて練り混ぜ可能性を検証した。なお、試験項目は、スランプフロー試験と圧縮強度試験であった。

#### 4.3.5 MCASを用いたジオポリマーコンクリートの総合優位性の検討

ジオポリマーコンクリートを普及させるため、MCASジオポリマーコンクリート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を検討した。

### 5. 研究成果

#### 5-1. 成果の概要

##### サブテーマ1

#### 5.1.1 アンケート調査

3年間のアンケートで、炉形式ごとに28 (BFB)、41 (CFB)、9 (SS)、17 (TS)、8 (G) 施設の回答を得た。このうち年間灰発生量を回答した74施設の木質バイオマス燃焼灰(3か年平均)は合計23万5200t-wetで、灰1tあたりの有効利用、廃棄にかかる平均費用はそれぞれ1万5100円、1万8700円であった。有効利用なされている灰の割合は43%であった。必要事項を回答した46施設の灰発生量A(t-wet)と燃料中の灰分Ac(t-dry)の関係から線形近似して炉形式及び燃料種、発電容量から燃焼灰量を推計する式を開発した。また、燃焼灰発生量のうち主灰が占める割合を炉形式ごとに分析すると主灰割合の平均値は0.21 (BFB)、0.42 (CFB)、0.55 (SS)、0.43 (TS)、0.37 (全体)であった。

以上より、開発した近似式を用いて全国の220発電施設から発生する灰を推計した。結果を図0-1 (図1-3)に示す。2026年度の灰発生量を推計すると、主灰32万t-wet、飛灰50万t-wetとなり、炉形式はCFBが最も多く、燃料としてはWCが38%、WPが33%、PKSが21%を占めると推計された。

有効利用率を43%とすると、82万t-wetの灰の有効利用・処理にかかる合計費用は139億円に上ると予想される。82万t-wetのうち57%が廃棄物として埋め立てられるとすると、その量は47万t-wetで、都市ごみ焼却残渣発生量405万t-wet、最終処分量267万t-wetのそれぞれ12%、18%にあたる。事業コストの増大や最終処分場ひっ迫及び循環経済の観点から木質バイオマス燃焼灰の有効利用率の向上は不可欠である

次いで、気候変動対策を考慮したシナリオ下での木質バイオマス燃焼灰発生量の将来予測を実施した。2020年での燃焼灰発生量(64.6万t-wet/年)を基準として、燃焼灰発生量の推移を計算した。2035年以降の新規導入については、現在の発電施設で最大発電容量の施設(200MW:CFB)で木質ペレットを燃料として発電すると仮定をして計算すると2050年には、2℃目標、1.5℃目標では燃焼灰発生量(t-wet)はそれぞれ、約160万t-wet/年程度、540万t-wet/年と見積もられることがわかった。

#### 5.1.2 燃焼灰の性状調査結果

各発電所より収集した木質バイオマス燃焼灰(飛灰、主灰)について試料の主要元素組成、重金属組成、重金属の溶出試験、粒径、化学種などの性状分析を行った。主要元素含有量は平均値で比較するとSi>Ca>TC>K>Al>Fe>Cl>S>Mg>Na>Pの順で含有量が高かった。灰の有効利用用途の筆頭であるセメント産業でのリサイクルを想定し、廃棄物焼却灰の受け入れ基準値と比較すると、S、Cl、Kの平均値が基準(それぞれ1.2%、0.1%、1.7%)を超過した。

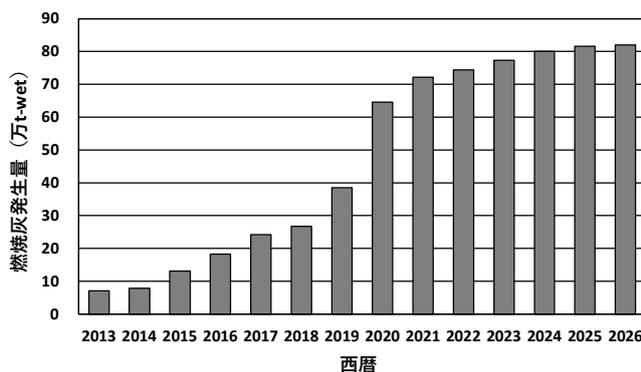


図0-1 (図1-3) 木質バイオマス燃焼灰発生量の推移

重金属含有量は約8割の燃焼飛灰は全ての元素で汚泥肥料中の有害金属類許容値を満たしたが、残りの飛灰ではAs、Cd、PbあるいはHgの含有量が基準値を上回った。溶出試験においては、安定化処理無しにほとんどの飛灰は埋立判定基準を満足していた。廃木材を燃料として利用した施設から排出される飛灰は明らかに重金属が高いことが統計解析から明らかとなった。

これらの主灰、飛灰の主要元素含有量データを元に階層クラスター分析を行い、燃焼灰を類型化した。結果を図0-2（図1-8）に示す。Ca含有量の高低により分岐があり、Caの高いクラスターはほぼ全て飛灰であった。それらの試料は、TCやSi、Cl、Na、Kなどの濃度により分岐するとともに、特定のクラスターでCFBやストーカといった炉形式が支配的になったことから、階層クラスター分析から炉形式等の違い、組成の違いにより燃焼灰を類型化できることが可視化された。

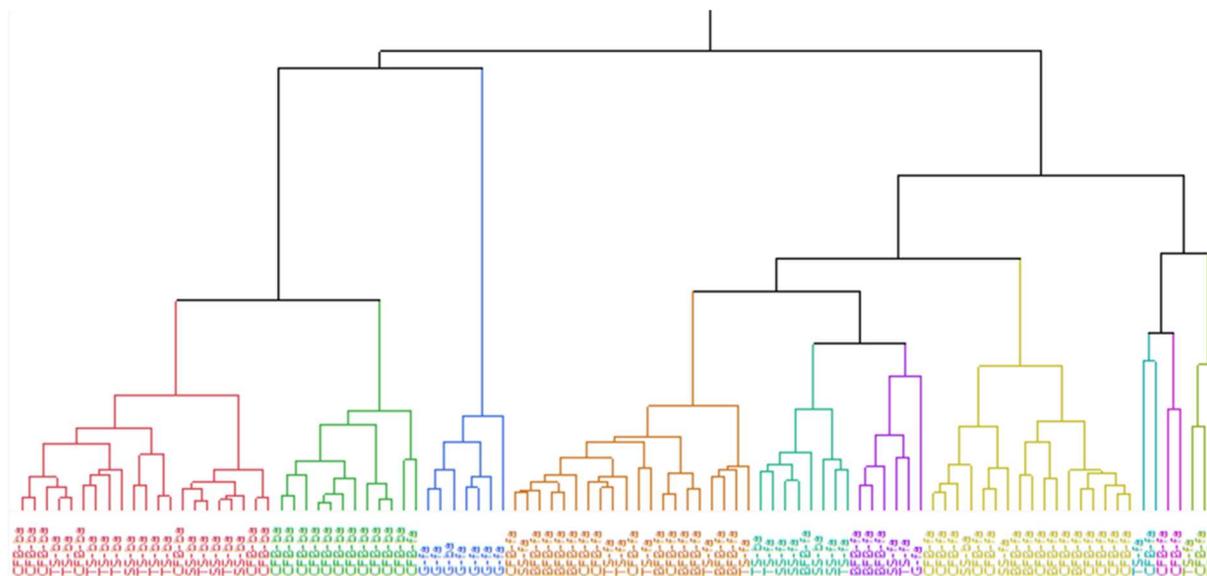


図0-2（図1-8） 全主灰・飛灰による主要元素含有量の階層クラスター分析

その他の性状として、粒径、結晶成分、カリウムの化学状態を把握した。カリウムのX線吸収端近傍構造スペクトルをベースにした階層クラスター分析からは、ある程度炉形式等の影響も認められたが、燃焼温度等を含む燃焼条件の影響を受けていた。主灰ではアルミノケイ酸塩が、飛灰では塩化物、炭酸塩、硫酸塩などが主な化学状態であった。

### 5.1.3 資源量の見積もり及びデータベース作成

上記で得られた燃焼灰の性状分析及びジオポリマー利用を想定試験結果を元に、ディシジョンツリー分析を行い、木質バイオマス燃焼灰の有効利用先を判断した。木質バイオマス燃焼灰総量82万トン/年のうち、肥料利用としては70万トン/年、セメント利用としては32万トン/年、ジオポリマー利用としては17万トン/年が利用可能と推定された。全国20施設の炉形式、使用燃料種などの属性から、上記で求めたそれぞれの有効利用用途を割り当て、地域ごとの資源量の見積もりを行った結果が図0-3（図1-16）である。木質系バイオマス燃焼灰発生量が多い福岡県、北海道、愛知県などが比較的いずれにおいても高い結果となっているが、肥料利用では山口県、セメント利用では兵庫県、山口県、ジオポリマー利用は岐阜をはじめとする中部北陸に多いことが示された。

今回アンケート調査及び提供いただいた燃焼灰の主要元素組成を広く発電事業者やリサイクラーに参照してもらい、有効利用を促進してもらうことを期待して、Googleマップの「マイマップ」機能を活用した「木質バイオマス燃焼灰」のデータベースを作成した。国内のFIT・FIP認定を受けた木質バイオマス発電所をマイマップ上に落とし込み、発生する燃焼灰の情報を掲載した。

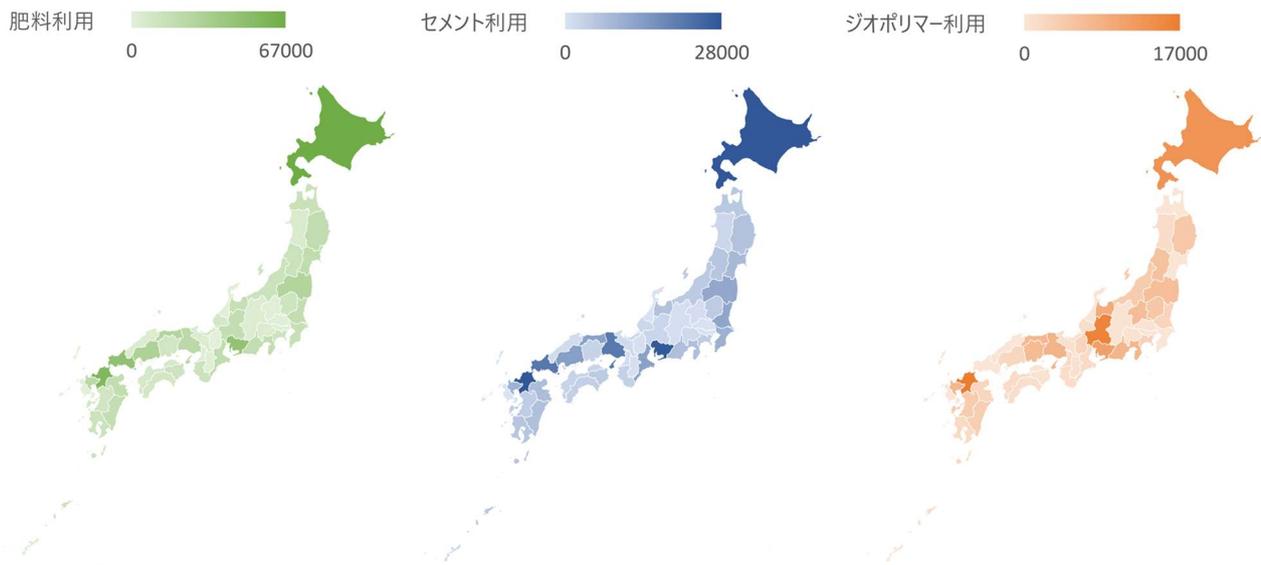


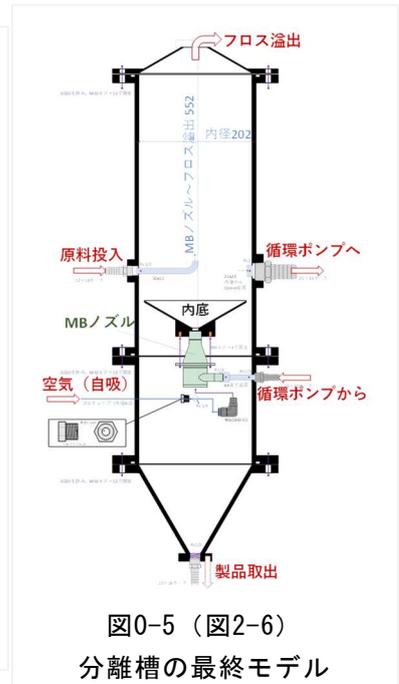
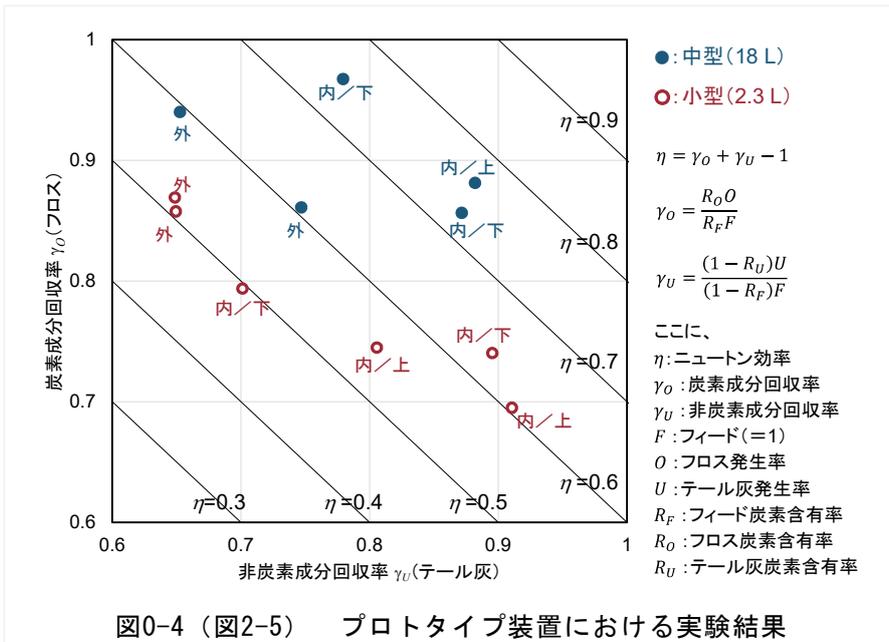
図0-3（図1-16） 各種有効利用用途別の木質バイオマス燃焼灰賦存量マップ

## サブテーマ2

### 5.2.1 連続式浮遊選鉱装置の開発

**浮遊選鉱プロセスの検討:** 小型 (2.3L) および相似形で2倍 (体積8倍) にスケールアップをした中型 (18L) のプロトタイプ装置で実験を行った。プロトタイプ装置のニュートン効率は、図0-4 (図2-5) に示す通り、水槽形状や運転条件の見直しを繰り返すことで0.70を超えるまで向上した。並行して、CFDによる数値解析も実施し、水槽の形状を改良するうえでの足掛かりとした。テール灰の強熱減量は、最終的に選定された水槽形状 (図0-5 (図2-6)) で1.9%~2.7%の範囲にあり、製品品質も問題ないことが伺えた。実験を通じて装置形状に関する以下の知見を得た。これらは、パイロットプラントの設計やMCAS製造の特許 (特開2022-89762) 中の発明の形態に反映された。

1. MBノズルを水槽の中に沈めて取り付けることで全般的に安定した分離処理が可能になった。この場合、テール灰は水槽の一番下から取り出すことになる。
2. フロスとして分離したい比較的軽い成分は、MBとともに、MBノズルから吐き出される上昇流に乗ってフロス溢出口付近にまで到達して滞留する。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るとテール灰の強熱減量が悪化した。
3. テール灰として取り出したい比較的重い成分は、MBと結びつかないため、装置の外周付近を下降する。このため、テール灰は水槽下部の外周もしくは一番下から取り出すことになる。また、水槽内で下降する成分を選別するための内底を設けることで分離能力が向上した。
4. 分離能力が最適となる、MBノズル吐出口からフロス溢出口までの距離 (小型では約300 mm、中型では約600 mm) が認められた。
5. 水槽内に投入された原料が直ちにMBに晒されるよう、原料を水槽の水平断面の中心から投入することで良好な処理効率が得られた。
6. 循環ポンプへの吸込口の取付け位置は、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ノズルの直下の2種類で効率よく処理することができた。
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・強化しても処理効率は向上しなかった。



事前攪拌プロセスの検討：ラボ装置に併設された事前攪拌ミキサ (R02) を用い、事前攪拌時間、薬剤添加率および薬剤添加方法について検討した。ラボ装置を用いて灯油の乳化などを検討した。また、ラボ装置の実績をもとにパイロットプラントの事前攪拌プロセスの装置 (ミキサ) の仕様を選定した。事前攪拌装置の仕様を表0-6 (表2-4)、写真を写真0-1、に示す。

表0-6(表2-4)：事前攪拌装置の仕様

	ラボ装置	パイロットプラント
機種	R02	R05T
呼び容量	~5L/バッチ	~40L/バッチ
混合工具型	スター型 (材質SUS304)	スター型 (材質SUS304)
混合工具径	φ 138mm	φ 280mm
混合工具回転数	3600rpm (実績)	1780rpm (計画)
混合パン	内径: φ 235mm 材質: SUS304、	内径: φ 550mm 材質: SUS304、安全カバー付
混合時間	3分	3分
実投入量	2.5kg (原料のみ)	25kg (原料のみ)
主電源	—	3相×220V×60Hz
その他	—	原料接粉部材質SUS304,半屋外仕様

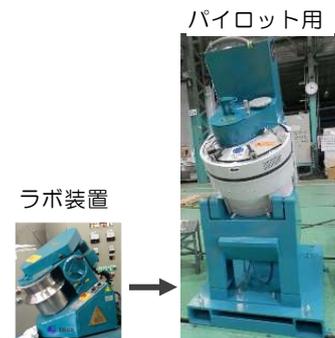


写真0-1

脱水プロセスの検討：脱水濃縮プロセスにおいては、ラボのデカンタ式遠心脱水機を流用しているため計画処理能力(150kg/h)に見合う動作を確認できなかったため、相当機をメーカーにて選定した。脱水後のスラリー濃度の目標は、石炭灰の実績である75wt%としていたが、濃度10wt%のスラリーを6~8L/minの流量でデカンタ式遠心脱水機に投入しても、得られた脱水ケーキの濃度は68.5wt% (目標の91%)にとどまった。脱水ケーキは硬い粘土状となっており、装置の機構上限界の濃度に達したと考えられる。これ以上の脱水、省エネおよび経済性の観点から、70%を超える濃度まで脱水するのではなく、今回得られた限界の濃度である70%弱程度のMCASの濃度を前提にジオポリマー製造時の配(調)合の検討が必要と考えられる。

### 5.2.2 パイロットプラントの設計・製作および能力検証

製作したパイロットプラント (計画処理量300t/年) の外観を写真0-2 (写真2-5) に示す。評価試験において、本プラントが目標の300t/年 (150kg/h、250日/年 x 8h/日) の処理能力を有していることを確認した。特に連続的に改良した浮選処理プロセスにおいては、濃度12wt%の燃焼灰スラリーを25L/minの速度で投入する運転条件で、テール灰の未燃炭素量 (3.0%以下) およびニュートン効率 (0.60以上) の目標を満足し、パイロットプラントは360t/年の処理量を達成できることが確認できた。さらに、運転条件を最適化して24時間運転を可能にする仕様を確定したので、最大1080t/年の処理効率を達成できる可能性を示した。その処理費は燃焼灰1tonあたり7,858円と試算され、目標 (8,000円/t) を2%減で達成した。

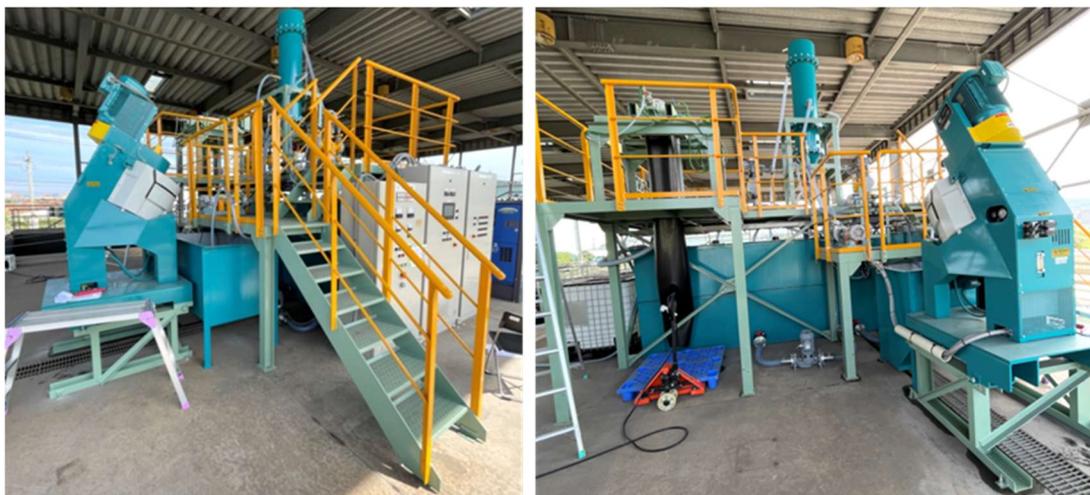


写真0-2（写真2-5）：パイロットプラントの外観

### 5.2.3 連続式実機プラントの設計

パイロットプラント（300t/h）の試験結果および試験運転で示された課題や課題解決の手懸りをもとに、1ライン3,000t/年の実機の設計原案を作成した。事前攪拌プロセスには燃焼灰・水・添加剤の計量投入の自動化、およびスラリー化の完全自動化が、実機化の課題としてあり、これに対応したシステムとする。浮遊選鉱プロセスにおいては、前後の事前攪拌プロセスと脱水濃縮システムの処理能力を考慮するとともに配管洗浄システムと各槽のレベル制御により、連続浮遊選鉱運転が担保できるシステムとする。これらの設計コンセプトをもとに作成した実機プラント（1ライン3,000 t/年）の設計原案を付録2に示す。その他、タンク形状等の課題を詳細に抽出してそれを改善した実機プラントとする。当初、9000t/年の実機装置スペックを設定したが、その後の調査で木質バイオマス発電ボイラーは5MW級が主力となっていることが判明、それらのボイラーの燃焼灰排出量は約500t/年である。今回開発したパイロットプラントを24時間連続運転に更新すれば、5MWボイラー級の実機プラントにすることが可能である。

### 5.2.4 排水処理方法の検討

**脱離液中の有害物質濃度：**運転中のバイオマスボイラ燃焼灰改質パイロット装置の遠心分離脱離液として排出された実排水（2023年11月10日採取）について限外濾過(UF)膜で濾過し、溶解性物質測定用試料を得た。この中の元の燃焼灰に含まれていた排水規制対象有害物質の分析結果を表0-7(表2-17)に示す。バイオマスボイラ燃焼灰改質システム脱離液中の溶解性の有害物質濃度は一律排水基準を満たしていることを確認した。図0-6(図2-10)に固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の関係と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の一律排水基準値との比の関係をそれぞれ示す。遠心分離脱離液中に、燃焼灰由来固形物がわずか4.8 g/L含まれるだけでPbの一律排水基準値を超過してしまう結果となった。

**有害物質排水処理方法の検討：**今回、木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水については、懸濁固形物を除去することにより、排水基準を満足することが明らかになったことから、除濁膜法によって除去することにした。除濁膜として限外濾過(UF; ultra filtration)膜を用いて、遠心分離脱離液の実排水を濾過する机上試験を実施した。運転回数と水透過流束の関係を図0-7(図2-11)に示す。5回の繰り返しの運転で水透過流束の変化はなかったことから、流速に影響を及ぼす膜面の汚れは生じていないと考えられる。また、遠心分離脱離液と水道水で水透過流束に違いは無かったことから、膜透過に及ぼす濁質の影響は無かったと考えられる。

以上のことから、本遠心分離脱離液の実排水は良好にUF膜で処理が可能であることが明らかになった。

表0-7（表2-17） バイオマスボイラ燃焼灰改質システム脱離液中の溶解性の有害物質濃度（限外濾過(UF)膜によって処理した透過液中の有害物質濃度）

有害物質元素	Cr	As	Cd	Pb	Hg
濃度 (mg/L)	0.05	0.005未満	0.001未満	0.005未満	0.0005未満
一律排水基準(mg/L)	0.5	0.1	0.03	0.1	0.005

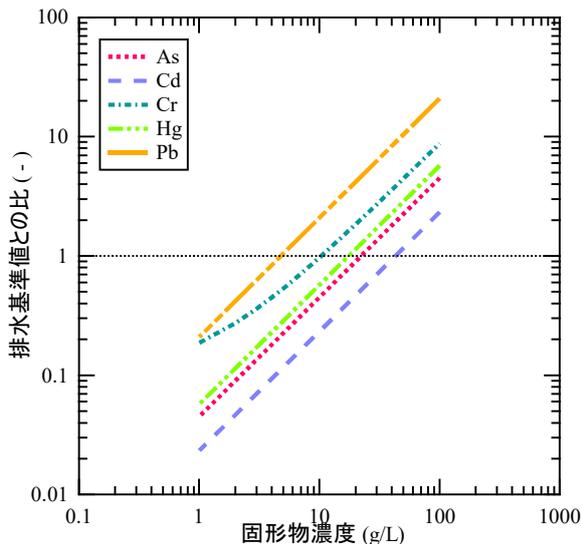


図0-6 (図2-10) 固形物濃度と排水中有毒物質濃度の関係(左)および排水基準値との比の関係

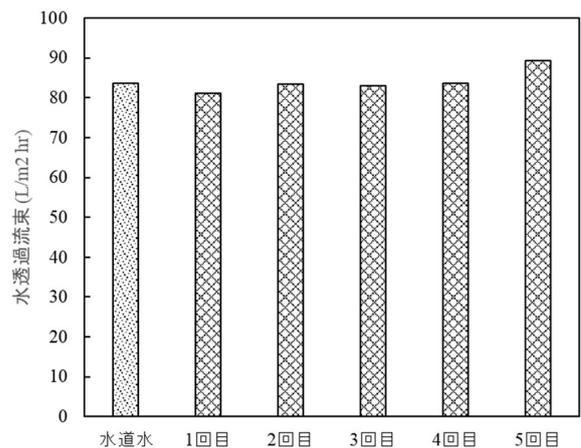


図0-7 (図2-11) UF膜による遠心分離脱離液の繰り返し過試験結果

水バランス調査による排水水量の最適化：実規模の連続式木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムにおけるMCAS中の目標溶解性重金属等濃度に応じたシステムからの排量を調べるために、システムの水バランスおよび固形物バランスを計算した。システム中の各プロセスの水量，固形物量の定義を図0-8 (図2-13) に示す。サイクロン・デカンタからの脱離液を膜分離して固形物は回収し透過水を排水処理することとした。

水バランスから式(1)が溶解性重金属等バランスから式(2)が得られる。

$$q_s = q_F + q_M + q_w \tag{1}$$

$$\eta_B w_B = C(q_F + q_M + q_w) \tag{2}$$

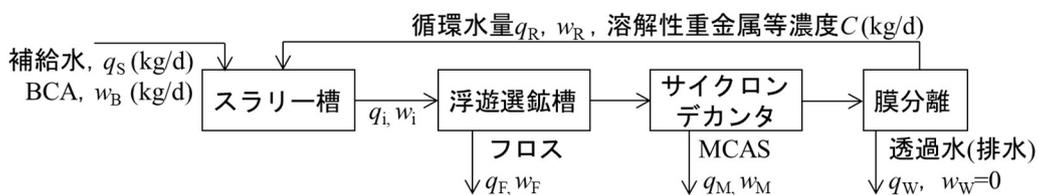


図0-8 (図2-13) 連続式木質バイオマス燃焼灰改質システムにおける各プロセスの水量固形物量

循環水量を増やす(排水量を減らす)とMCAS中溶解性重金属濃度が増加する定量的な関係が明らかになった。循環水量がゼロのときは排水量が最大値740 kg/dとなり、このときMCAS中溶解性重金属等濃度は原料中濃度の25%で最小になる。また、排水量がゼロのとき循環水量は740 kg/dとなり、MCAS中溶解性重金属等濃度は原料中濃度の95%で最大になる。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ことを示した。

### 5.2.5 MCASの製品評価

バイオマス燃焼灰から製造されたMCASを混合したセメントコンクリートの圧縮強度試験、静弾性係数および乾燥収縮ひずみを図0-9 (図2-15、16、17) に示す (NNはMCAS無混合の基準供試体)。一般的な混和材である石炭由来のフライアッシュと同様に、バイオマス由来のMCASも長期材齢でポズラン活性を示すことが確認された。静弾性係数は、New-RC式によって圧縮強度から予測される値より全体的に高い側に分布した。3種類のMCAS (B灰、C灰、D灰) を混合することで乾燥収縮ひずみが増加しており、収縮低減剤の併用などのひび割れ対策が必要といえる。

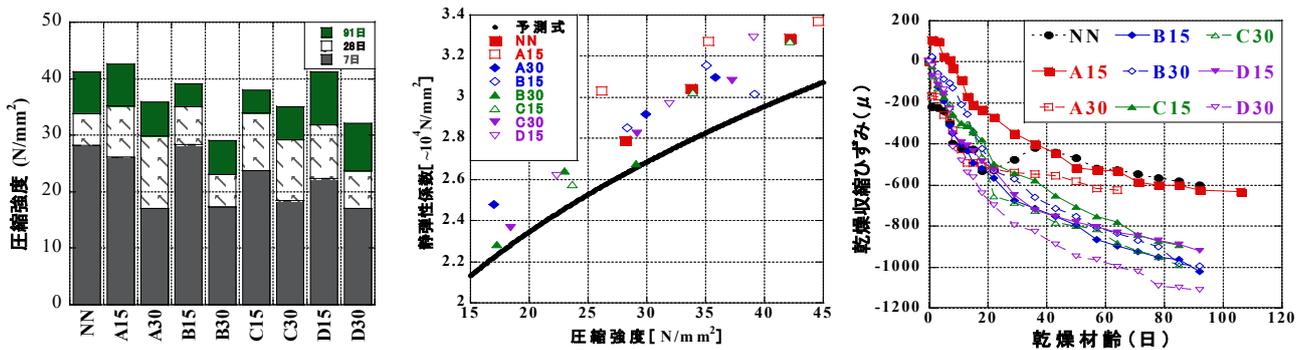


図0-9 (図2-15、16、17) MCASを混合したセメントコンクリート供試体の物性

サブテーマ3

5.3.1 ジオポリマーコンクリート配合検討

本検討では、MCASを利用したジオポリマーコンクリートについて、蒸気養生型と常温硬化型の2種類の配合の検討を実施した。それぞれの検討では、まずモルタルで傾向を把握してからコンクリートの検討を実施した。なお、本検討で使用したMCASは混焼灰を対象とした。

蒸気養生型のジオポリマーコンクリートは、表0-8 (表3-17) に示す配合を選定した。

表 0-8 (表 3-17) ジオポリマーコンクリートの配合

GPW/P (%)	BFS/P (%)	単位質量 (kg/m³)				
		GPW	MCAS	BFS	S	G
35	60	236	256	138	786	938

常温硬化型のジオポリマーコンクリートは、スランプフローの可使用時間が60分保持できる配合を満足させるため、アルカリ溶液のアルカリ水比 (モル比 : A/W) および石灰石微粉末の検討を行い、表0-9 (表3-8) に示す配合を選定した。

表0-9 (表3-8) 配合

Sample No.	単位量 (kg/m³)								CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m³)	GP/OPC*1 (%)
	AS	SH	W <sub>MCAS</sub>	MCAS	BFS	LS	S	G		
B18-L15	159.5	21.5	85	254	68	57	698	944	118.5	37.5

\*1: GPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量とOPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量の比OPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量 : 316.0(kg/m³)

5.3.2 曝露試験

MACSを利用したジオポリマーコンクリートの耐久性を評価するため、実環境での曝露試験を実施した。曝露試験場所は、凍結融解危険度が高い釧路、一般的な環境状況として北九州、塩害および高温・多湿環境として沖縄 (写真0-3 (写真3-3)) の3か所で実施した。

曝露試験の結果、例えば図0-10 (図3-14) に示すように、圧縮強度の低下等は見られず、鉄筋の腐食抵抗性以外は、セメントコンクリートと同等以上の性能を有することを確認した。なお、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは放射熱が低い傾向があることも確認できた。



写真0-3 (写真3-3)  
沖縄での曝露試験の状況

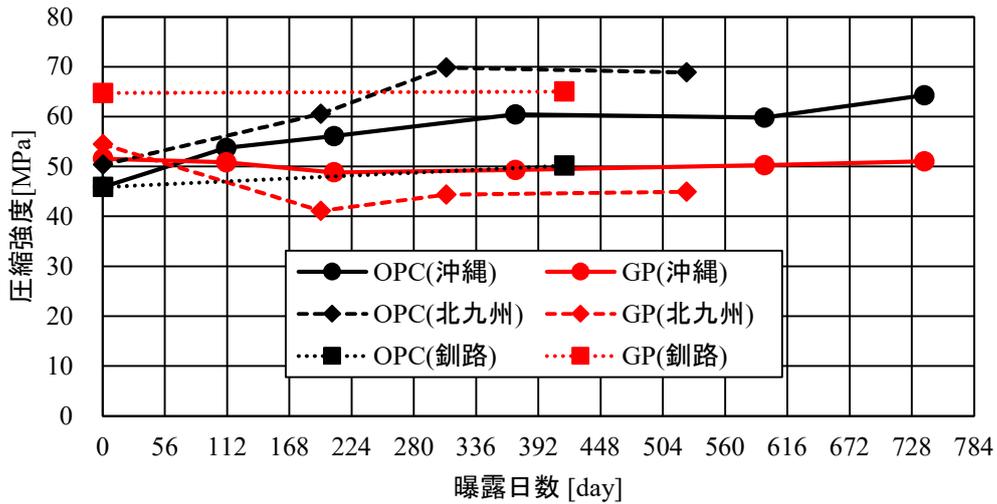


図0-10 (図3-14) 圧縮強度の推移

### 5.3.3 実機ミキサを用いた小型製品の試作

写真0-4 (写真3-4) に示す実機ミキサを用いて、写真0-5 (写真3-9) に示す小型製品を試作した。今回の試作で、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートの製造と同じ手順での製造が可能であることを確認できた。



写真0-4 (写真3-4) 使用したミキサ



写真0-5 (写真3-9) 試作品

### 5.3.4 専焼灰の検討

5.3.1~5.3.3では混焼灰を用いたジオポリマーコンクリートの検討を行ったが、専焼灰についても検討を行った。スランプフローは、専焼灰の種類により改質の効果は異なる結果となったが、図0-11 (図3-16) に示すように圧縮強度は改質することにより増加する傾向を確認できた。

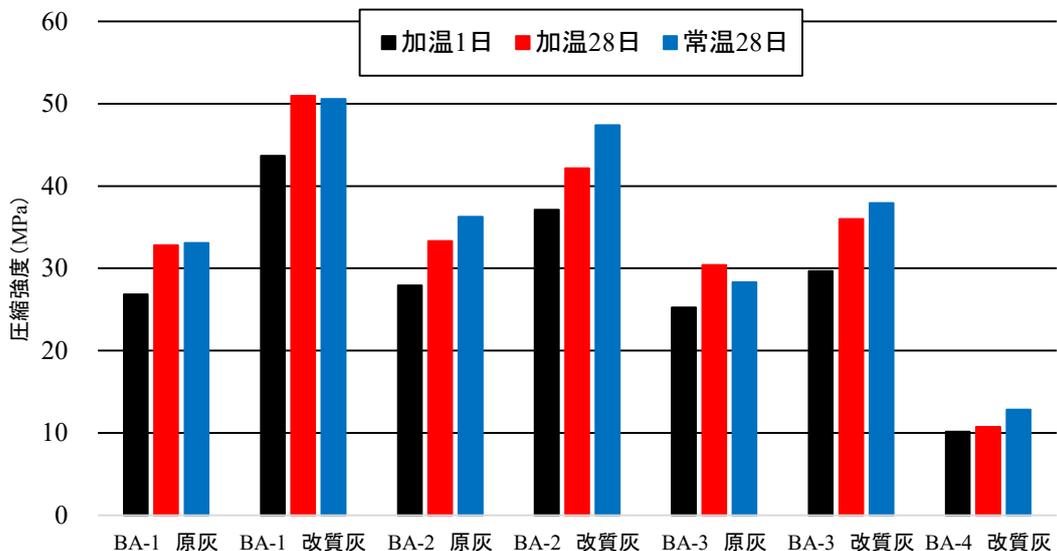


図0-11 (図3-16) 圧縮強度試験の結果

5.3.5 MCASを用いたジオポリマーコンクリートの総合優位性の検討

MACSを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートに比べCO<sub>2</sub>排出量を60%削減できることや、バイオマス灰を有効利用でき循環型社会の構築に貢献できることなどから、環境負荷低減性能は高いと言える。一方、実環境での曝露試験から、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートに比べて鉄筋の腐食が進行することが確認されたが、それ以外の耐久性に関してはセメントコンクリートより同等以上である結果となった。さらに、放射熱の低減効果があることも確認できた。以上より、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、コストは割高であるが環境負荷低減効果を期待でき、その高機能性を有効活用した製品であれば、十分に普及が図れるものと考えられる。なお、高機能性から考えられる応用製品をとしては、高い耐酸性特性から下水施設製品、放射熱が低い特性からヒートアイランド対策製品などが考えられる。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

全体目標	全体の達成状況
<p>木質バイオマス燃焼灰の資源循環を促進するため、全国から木質バイオマス燃焼灰を収集し、性状を分析し、データベースを構築する。木質バイオマス燃焼灰の資源循環を促進するため木質バイオマス燃焼灰の未燃炭素と重金属を除去する連続式改質装置を開発する。先行研究で得られたラボ装置の10倍の製造量を有する装置にすることによりパイロット装置として性能を確認して実用可能性を検証した後、社会実装へ繋げるプラントを設計する。パイロット装置で改質した木質バイオマス燃焼灰 (MCAS: Modified Combustion Ash slurry) を利用したジオポリマーコンクリートを開発して二酸化炭素排出量の大幅な抑制を実現すると共に、建設分野における地域循環共生圏の構築を目指す。</p>	<p>全国の64施設から木質バイオマス燃焼灰である飛灰を106試料、主灰を50試料収集して、類型化を実施して、データベースを構築した。2026年末までの燃焼灰発生量の推計と気候変動を考慮したシナリオ下で2050年までの発生量を予測した。類型化に伴い資源量の見積り改質処理後ジオポリマー利用として17万t-wet/年が有効利用されうると推定された。</p> <p>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連続式改質装置を小型装置から中型装置へとスケールアップして実機装置の1/10の処理量を有するパイロットプラントまで開発した。パイロットプラントは先行研究であられたラボ装置の10倍の製造量を達成したが、連続式であるので浮遊選鉱槽のサイズは同等で構築できた。未燃炭素は3.0%以下まで低下させることができ、処理効率の指標であるニュートン効率は0.6以上となり浮遊選鉱装置としては極めて効率の良い装置であることを確認した。これらの検証結果を基に1ライン3000t/年を処理できる実機装置の設計原案を作成した。研究開発当初は、実機装置の規模を9000t/年の処理を想定していたが、サブテーマ1の研究結果より、木質バイオマス発電所のボイラーは5MWが主力ラインであることが明らかになり、このときの年間燃焼灰排出量は500tであることが明らかとなり、パイロットプラントの運転条件を最適化すれば、実機装置として適用できる可能性が明らかになった。</p> <p>二酸化炭素排出量を普通コンクリートより60%以上削減できるMCASジオポリマーコンクリートを開発し、小型プレキャスト製品を製造した。これらの技術を組み合わせることによって、木質バイオマス燃焼灰を浮遊選鉱法によって改質して二酸化炭素排出量を60%以上低減できるコンクリート製品を供給して地域循環共生圏の実証モデルを提</p>

	<p>案できた。 以上の結果より当初の全体目標を上回る成果を上げたと考えている。</p>
--	--

< 【サブテーマ1】 達成状況 > . . . . . 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「木質バイオマス燃焼灰の類型化」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p>1. 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統計が整備されていないことから、全国的なデータベースを作成する。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を実施し、各リサイクル用途に応じた将来的な資源量の見積もりを行い、改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を抽出する。</p>	<p>○全国的なデータベースを作成に関して、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究開始当初の木質バイオマス専焼のFIT認定施設は191施設であったことから、半数以上の施設からアンケート回答を得ることを目標に実施し、103施設から回答を得た。</li> <li>2. 灰中主要元素濃度と有効利用の有無について、各発電施設に情報を付与して、Google Map形式でのデータベースを整備した。</li> </ol> <p>○木質バイオマス発電施設からの灰発生量の推計について</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. 炉形式及び燃料種、発電容量から燃焼灰量を推計する式を開発した。</li> <li>4. 過去から現在までの灰発生量の推移を見積もり、2026年末で木質バイオマス専焼の発電施設で約82万t-wet/年に達すると推定した。</li> <li>5. 2050年までの燃焼灰発生量について気候変動を考慮したシナリオ下で将来予測した。</li> </ol> <p>○燃焼灰の類型化について、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>6. 木質バイオマス燃焼灰の元素分析においてMP-AESを用いた方法を確立した。</li> <li>7. 得られた燃焼灰（64施設、156試料）に対して組成分析や用途に合わせた試験などを実施し、その結果に対して、数量化I類、階層クラスター分析、ディシジョンツリー分析により考察するとともに、類型化を実施した。</li> </ol> <p>○各リサイクル用途に応じた将来的な資源量の見積もりについて、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>8. 肥料・セメント利用などの基準をベースに全国220施設から排出される燃焼灰に対して、肥料利用、セメント原料利用、サブテーマ2で実施するジオポリマー利用可能と推定される資源量の見積もりを行った。現状では、82万t-wet/年の燃焼灰中肥料利用として70万t-wet/年、セメント原料利用として32万t-wet/年、改質処理後ジオポリマー利用として17万t-wet/年が有効利用されうると推定された。</li> </ol>

< 【サブテーマ2】 達成状況 > . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

「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 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>1. 木質バイオマス燃焼灰発生元に対し、その発生量に見合う年間9,000tの処理能力を有するシステム（9,000t/yを3ラインで処理する。1ライン</p>	<p>1. 浮遊選鉱装置を連続式にするため2.3Lの小型装置から検証を実施し、18Lの中型装置にサイズアップして、最終的に当初の予定通り150Lの連続</p>

<p>3,000t/y) の設計原案を構築する。先行研究で検証が終了しているラボ装置 (処理量28.8t/年) に対して連続式を開発して同容積で10倍の製造量を実現する装置 (処理量300t/年) を製造し、実機の1/10のパイロットプラントとして改質性能を確認して実機化への基礎データを収集する。</p> <p>2. 木質バイオマス燃焼灰の処理費用は概ね16,000円/t前後であることから、パイロットプラントでの処理費の目標は8,000円/t以下とし、現状の処理費の50%以上を削減するものとする。</p> <p>3. 事前攪拌処理の攪拌時間が短いほど装置をコンパクト化することができ、イニシャル、ランニング、メンテナンスコストを低減できるので、パイロットプラントの混練機による攪拌時間を3分/回として、150kg/hの事前攪拌装置を開発する。</p> <p>4. 浮遊選鉱処理後のテール灰の濃度は10wt%程度であり、ジオポリマーコンクリート用活性フィラーとしては75wt%以上に脱水する必要がある。そこで、デカンタ式遠心脱水機をベースに1時間以内で150kg (乾粉ベース) のテール灰を濃度75wt%以上のケーキ状に脱水できることを確認する。</p> <p>5. 浮遊選鉱水に溶出した重金属に関して安価で簡便な排水処理方法を提案する。</p> <p>6. 木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された数種のMCASに対して性能試験を実施し、建築用コンクリート混和材として使用するために建築技術性能評価認定を得るための基礎データを収集する。</p>	<p>式パイロットプラントを開発した。木質バイオマス燃焼灰の改質処理で運転パラメータの調整を繰り返して実機化への基礎データを収集すると共に、テール灰の未燃炭素量3.0%以下、ニュートン効率0.60以上の運転条件に到達した。さらに、濃度12wt%の燃焼灰スラリーを25L/minの速度で投入する運転条件で、テール灰の未燃炭素量およびニュートン効率を満足し、パイロットプラントは360t/年の処理量を達成できることが確認できた。さらに、運転条件を最適化して24時間運転を可能にする仕様を確定したので、最大1080t/年の処理効率を達成できる可能性を示した。従って、当初の目標値である300t/年を大幅に上回る結果を達成した。これらの実験データからタンク形状等の課題を詳細に抽出してそれを改善した1ライン3,000t/年の実機プラントの設計原案を示した。</p> <p>2. 昨今の電気料金の上昇により研究開始当初より60%アップの電気料金で処理費を試算したが、7,858円/tとなり当初目標の2%減で達成した。</p> <p>3. 攪拌時間は3分/回で目標とする製品を製造できることを確認した。事前攪拌プロセスの最適化により150kgを47分で処理できることが確認され、目標効率を27%アップすることができた。</p> <p>4. ラボ装置を流用したデカンタ式遠心脱水機に投入しても、得られた脱水ケーキの濃度は68.5wt% (目標の91%) にとどまった。しかしながら、脱水ケーキは硬い粘土状となっており、装置の機構上限界の濃度に達したと考えられる。木質バイオマス燃焼灰は石炭灰に比べて粒径が歪で保水しやすい性質を有しているため、石炭灰では達成できた濃度75wt%は、その特性上達成困難であることが判明した。</p> <p>5. 実証した木質バイオマス燃焼灰は重金属の溶出量は排水基準を満たしていたので、処理水の循環利用が最も安価で簡便な手法であることを見出した。排水処理する場合は、排水中懸濁固形物に重金属が含まれているので、除濁膜 (UF膜) でろ過した後、排水可能であることを示した。</p> <p>6. 木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された4種類のMCASに対して力学特性を評価する圧縮強度試験、静弾性係数試験および耐久性を評価する乾燥収縮試験を実施して、建築技術性能評価認定を得るための基礎データを収集した。</p>
---	---

< 【サブテーマ3】 達成状況 > . . . . . 3. 目標どおりの成果をあげた

「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 目標	サブテーマ3の達成状況
1. パイロットプラントから製造されたMCASを利用したジオポリマーコンクリートを開発してその二酸化炭素排出量を同等性能の普通コンクリートに対して60%削減し、目標性能は設計基準強度	1. 普通コンクリートより二酸化炭素排出量を62.5%削減し、圧縮強度29.7N/mm <sup>2</sup> を満足し、アルカリシリカ反応抑制効果が高く、硫酸抵抗性が高いジオポリマーコンクリートをパイロットプラン

<p>24N/mm<sup>2</sup>以上、アルカリシリカ反応抑制などの耐久性の優れたものとする。</p> <p>2. ジオポリマーコンクリートは蒸気養生を施すことが一般的である。二次製品タイプのジオポリマーコンクリートは、蒸気養生を前提とした製造手法として縁石・側溝等の小型製品を試作する。生コンタイプでは蒸気養生を施すことが難しいので、常温硬化型で60分程度の可使用時間を有する施工性の優れたジオポリマーコンクリートを開発して、生コンプラントで練混ぜ可能とする。</p> <p>3. 開発したジオポリマーコンクリートを普及させるため、MCASジオポリマーコンクリートの製造システムを構築すると共に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を示す。</p>	<p>トから製造されたMCASを利用して開発した。</p> <p>2. 蒸気養生を施し二次製品タイプのジオポリマーコンクリートの縁石を実機ミキサによって練り混ぜて試作した。また、可使用時間60分程度の常温硬化型ジオポリマーコンクリートを開発して、生コンプラントでの練混ぜを可能にした。</p> <p>3. 開発したジオポリマーコンクリートを普及させるため、環境負荷低減効果、高機能性およびコストを加味した総合的優位性を検討し、環境負荷低減性、高機能性に優れており、現時点では子雄と評価は若干劣るが、総合評価としては非常に優れていることを示した。製品例として、化学工場などの水処理施設、下水施設およびヒートアイランド対策製品を提案した。</p> <p>さらに当初の目的にはない専焼灰を使用したジオポリマーコンクリートの性状まで検討した。</p>
---	---

### 5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

#### <得られた研究成果の学術的意義>

サブテーマ1では、従来では各施設や各地域で散発的に調べられるだけで、全国的な調査はなされていなかった木質バイオマス発電施設から排出される燃焼灰の発生量、性状を包括的に把握した。次に、これまでは炉形式や燃料種に依らず、単に灰分のみを設定していた灰の発生量の推計を改良し、炉形式と燃料種の情報から精度よく灰発生量を推計する式を得たこともこれまで同様の試みはなされておらず、独創性は高いと言える。さらに、灰の発生量の将来推計については、他の推進費プロジェクトから得られた結果を用いて2050年までの推計を行ったことは、将来的な資源量の見積もりと有効利用の可能性、また限界を示した点から先導性があり、かつ発展的な内容を含む。燃焼灰の性状調査については、新しい省エネルギーな分析技術であるマイクロ波プラズマを適用し、実用的であることを示したことも先導的である。性状分析においてカリウムの化学状態を知るために放射光を用いたX線吸収端近傍構造分析を行い、化合形態を推定するとともに、スペクトルの類似性から燃焼灰の類型化を行い、情報を提示したことは、これまで世界的にも例がなく、極めて独創性が高いとともに、有効利用に有益な情報を提供している。木質バイオマス燃焼灰はアルカリ性であり、CO<sub>2</sub>を吸収固定可能でカーボンネガティブに寄与した上で緑化資材に使える可能性があり、そのポテンシャルを理論二酸化炭素吸収容量として求め提示した。このことは今後の炭素固定技術及び有効利用技術として発展性がある。

サブテーマ2では、石炭灰の未燃炭素除去として開発されていたシステムに対して、木質バイオマス燃焼灰においても適用できることを実証したことは先導性に富み独創性が高い成果である。サブテーマ1の類型化によってピックアップされた燃焼灰は石炭灰よりSi成分が少なく、Ca成分とK成分が多くなっていたが、改質により未燃炭素を3.0%以下にして重金属溶出量を低減できることを確認することによって、木質バイオマス燃焼灰をコンクリート混和材やアルミナシリカ粉末として適用できる可能性を見出しその発展性を示した。装置の連続化に成功することによって10倍の処理効率を達成させ、極めて高い革新性を示すと共に、パイロットプラントまで開発して社会実装を視野に入れ独創性の高い研究である。

サブテーマ3では、MCASを使用したジオポリマーコンクリートに対して沖縄・北九州・釧路地域で暴露試験を実施した。ジオポリマーコンクリートの寒冷地、標準地、温暖地での暴露データは非常に貴重であり独創性が高い。特に材料700日以上の圧縮強度データは、今後、実構造物へ適用した場合の耐久性に関して問題無しとの示差を与える結果であり、ジオポリマーコンクリートの発展性に多大なる貢献を与えている。また、水分を含有するMCASに対してアルカリ水比を増加させて石灰石微粉末を混和させてMCASの混合量を調整して水分供給を抑制する手法によって、構造物に適用可能な強度発現性を達成したことは革新性に富んだ研究成果である。4種類の専焼灰を使用したジオポリマーコンクリートの圧縮強

度は、浮遊選鉱法によって改質を施した方が大きな値となっており、改質技術の有用性を示している。これは浮遊選鉱法によって最初に水と接触させることによりコンクリートの練混ぜ水を奪うことなく、安定的に練混ぜ可能となったためであると考えている。

<行政等に既に貢献した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

サブテーマ1で求められた、木質バイオマス燃焼灰の発生量の推計については、2026年での総発生量が82万t-wet/年程度と、全国の都市ごみ焼却残渣総量の約20%程度と見込まれ、今後の有効利用や産業廃棄物としての処理の基礎的なデータになりうる。さらに、今回は全国220施設を各施設ごとに灰量を算出したことから各都道府県においても具体的な参考データとして使える。木質バイオマス燃焼灰量については、炉形式により異なること、また、性状については炉形式や燃料種等により大きく異なり、分類できることがわかった。これらの情報を整理することにより、未稼働の施設や今後建設される施設における灰発生量およびそれに基づく経費について推計することができ、木質バイオマス発電施設の事業運営に資する情報となる。またリサイクラーにとっては、地域における資源量が提示されたことにより、ある一定のリサイクル材の確保が想定されることからリサイクル費用の低減などにも繋がり、地域循環共生圏形成の一助となりうる。令和4年12月に経済安全保障推進法において肥料が追加されたことから、木質バイオマス燃焼灰としての利用に注目が集まるところ、その資源量（カリウムとして29,700トン）を示すことができたのは今後のリサイクルを促進上で有用であると考えられる。一方で、今回、廃木材を利用した施設から排出される飛灰においては明らかに重金属濃度が高い傾向にあり、注意すべき金属種が提示された。これにより、行政は効率的な確認・指導が行えると考えられる。また、水銀のような微量金属については木質バイオマス発電の影響が2050年に向けて大きくなることが他の推進費の研究（SII-6）からもわかっていることから、今回得られたデータはこれら微量金属のマテリアルフローの作成の基礎データとしても貢献しうる。

サブテーマ2で提案する浮遊選鉱法は、現時点で用途が限定的なバイオマス燃焼灰のリサイクル用途拡大に貢献するものである。化石燃料に代わるバイオマス灰を混焼および専焼条件下でジオポリマーコンクリートに活用可能な見通しがついたことから、サステナブルな資源の活用が可能となっており、安定的な建設材料の供給体制の構築が期待される。本研究開発の成果により、リサイクル手法が確立され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ジオポリマー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。

サブテーマ3で開発したジオポリマーコンクリートの二酸化炭素排出量の削減率は62.5%を達成しており、普通コンクリートの代替が可能となり将来的に40%代替すれば日本の二酸化炭素排出量を1%削減可能することができ、地球温暖化防止対策の材料として本研究で開発したジオポリマーコンクリートが貢献可能である。現段階においてコストは割高であるが、補修材は新設材料よりコストが高いため補修材としての適用にはすぐにでも貢献可能である。更に、本研究で開発したジオポリマーコンクリートは放射熱が低いので、ヒートアイランド対策として駐車場等の路盤材料に貢献可能である。

## 6. 研究成果の発表状況の概要

## 6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	7
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	2
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	11
口頭発表（学会等・査読なし）：	25
知的財産権：	5
「国民との科学・技術対話」の実施：	6
マスコミ等への公表・報道等：	3
研究成果による受賞：	4
その他の成果発表：	0

## 6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Ike, M., Kawagoe, H., Takaoka, M. (2021). An Estimation of the Ash Generated from Woody Biomass Power Generation in Japan Based on Types of Combustion Systems. Proceeding of 7th International Conference on Low Carbon Asia ICLCA 2021, 1-6
3	Lin, H., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H., Liu, S. (2022). A study on properties, static and dynamic elastic modulus of recycled concrete under the influence of modified fly ash. Construction and Building Materials, 347, 128585, 1-13. <a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585</a>
4	山崎勇輔, 高巢幸二, 陶山裕樹, 原田耕司, 小山田 英弘. (2022). 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素を除去する改質条件と混和材としての特性に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, 87, 798, 669-679. <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.87.669">https://doi.org/10.3130/aijs.87.669</a>
11	M. Ike, S. Iijima, Y. Pei, K. Shiota, M. Takaoka (2022): Principal component analysis of elemental composition for woody biomass ash recycling, 9th

	International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy
12	Y. Pei, M. Ike, K. Shiota and M. Takaoka (2024) Effects of Si/Al ratio on immobilization of Se in woody biomass fly ash based geopolymer, Proceeding of 10 <sup>th</sup> 3R International Scientific Conference, Sydney, Australia
16	Liu, S., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2022). A STUDY ON APPLICATION POSSIBILITY OF WOODEN BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION METHOD AS CONCRETE ADMIXTURE. EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURE, ENGINEERING & ENVIRONMENT, 1-6
18	S. Liu, K. Takasu, H. Koyamada, H. Suyama. (2023). POSSIBILITY RESEARCH ON THE APPLICATION OF WOODY BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION AS CONCRETE ADMIXTURE, Proceedings of the International fib Symposium on the Conceptual Design of Concrete Structures, 138-145
19	M. Xu, K. Takasu, H. Suyama, J. Zeng, J. Gao. (2024). Evaluating the Potential of Flotation-Modified Biomass Fly Ash for Cement Replacement. Journal of Asian Institute of Low Carbon Design, 223-226
20	Goda, H., Harada, K., Takasu, K., Suyama, H., Hibino, M. (2021). Flow Characteristics and Strength Characteristics of Geopolymers Using Fly Ash Modified by the Flotation Method. The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF), 1-10
38	廣瀬寛太, 高巢幸二, 陶山裕樹, 幸永秀昭, 河崎尚哉, 劉子浩. (2024). 木質バイオマス燃焼灰を対象とした浮遊選鉱法による連続式パイロット改質処理装置の開発研究. 日本建築学会九州支部研究報告

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

## 7. 国際共同研究等の状況

### <国際共同研究等の概要>

中華人民共和国の青島理工大学土木工程学院（于徳湖副学長らとの共同）において、研究分担機関の日本アイリッヒ㈱からラボ用改質実験装置を購入して、青島理工大学に設置して対象とするFAの基礎物性と改質効果の確認作業を実施している。浮遊選鉱法の中国特許を青島理工大学・蔣研究員のベンチャー企業（晟明(青島)环境科技有限公司）に譲渡し、中国国内で本技術を展開できる環境を整えると共に、平行して、中国での浮遊選鉱技術の展開を図るため、本技術に関心を寄せる中国企業と実用化に向けたFSを開始している。併せて研究代表者は、青島理工大学土木工程学院の客員教授に就任している。

英国のCentre for Climate Adaptation and Environment Research、University of Bath (Kevin Paine教授らとの共同) において浮遊選鉱法により燃焼灰から効果的に未燃炭素を除去する技術における日英のバイオマス燃焼灰への適用可能性、二酸化炭素排出量を大幅に削減可能なジオポリマーコンクリートの活性フィラーとしてのバイオマス燃焼灰の適用可能性およびバイオマス燃焼灰と細菌を混合した自己治癒コンクリートの製造可能性を検証し、材料工学と構造工学の視点から次世代型コンクリートの革新的な技術提案によりカーボンニュートラル社会を目指している。併せて研究代表者は、University of Bathの客員教授に就任している。

### <相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
青島理工大学土木工程学院	中華人民共和国・山東省・青島

Centre for Climate Adaptation and Environment Research、 University of Bath	英国・バース
---	--------

## 8. 研究者略歴

## ＜研究代表者略歴＞

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
高巢幸二	九州大学大学院人間環境学研究科博士後期課程単位修得退学 博士（工学） 北九州市立大学国際環境工学部講師、助教授、准教授を経て、 現在、北九州市立大学国際環境工学部教授 日本建築学会材料施工本委員会委員 専門は建築材料・施工学、研究テーマは主に燃焼灰の改質技術とそれを使用した 低炭素コンクリート特性解明

## ＜研究分担者（サブテマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 高岡昌輝	京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 京都大学工学部助手、工学研究科助教授、准教授を経て、 現在、京都大学大学院工学研究科教授 主に廃棄物リサイクル・処理・処分・管理に関する研究	2021年度 ～ 2023年度
2) 原田耕司	九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 財団法人先端建設技術センター参事（出向）、防衛大学校部 外協力助手（出向）、九州大学研究員（出向）、東京理科大学 大学院非常勤講、西松建設(株)建築および土木営業 他 現在、西松建設(株)技術研究所マイスター 材料工学、衝撃工学、維持管理工学	2021年度 ～ 2023年度

## Ⅱ. 成果の詳細

### Ⅱ-1 サブテーマ1「木質バイオマス燃焼灰の類型化」

#### [サブテーマ1要旨]

国内の木質バイオマス発電施設に対しアンケート調査を行い、まず、施設の情報及び発生する燃焼灰の現状（有効利用・廃棄物処理量）を把握した。得られた多くの調査データから使用される燃料種と炉形式を考慮し、先行研究よりも正確性の高い推計となるよう推計方法を改良した。この結果を元に、過去から現在までの燃焼灰発生量の推計を行い、2026年時点で82万t-wet/年の燃焼灰が発生することを推定した。さらに、今後の気候変動シナリオに応じたシナリオのもと、燃焼灰発生量の将来推計を行うと、50万～1050万t-wet/年と推定された。

次に、各発電所より収集した木質バイオマス燃焼灰（飛灰、主灰）について試料の主要元素組成、重金属組成、重金属の溶出試験、粒径、化学種などの性状分析を行った。これらの分析データをもとに、階層クラスター分析や主成分分析、ディシジョンツリー分析などを行い、燃焼灰を類型化した。廃木材を燃料として利用した施設から排出される飛灰は明らかに重金属が高いことが統計解析から明らかとなった。燃焼灰の主要元素や重金属が現状の有効利用や処分の基準と適合するかどうかを判断した。サブテーマ2の改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を見出すための実験を行った。これらの結果を用いてディシジョンツリー分析を行って、炉形式、燃料種を元に有効利用用途に応じた分類を実施した。分類に基づき、全国220施設から排出される燃焼灰の各種有効利用用途の資源量の見積もりを行った結果、肥料利用として70万t-wet/年、セメント利用として32万t-wet/年、改質処理後ジオポリマー利用として17万t-wet/年が見積もられた。最終的に、220施設の燃焼灰の発生量と主要元素のデータに関しては、データベースを作成し、グーグルマップで閲覧できるように整備した。これに基づき、各地域における各種資源量を把握できるようにした。以上により、燃焼灰量の推計及び類型化による各種有効利用用途の提示を行い、研究目標を達成した。

#### 1. サブテーマ1研究開発目的

近年増加が著しい木質バイオマス発電施設から排出される燃焼灰の有効利用を促進するために、燃焼灰の発生量及びその性状を明らかにすることが、サブテーマ1の研究開発目的である。気候変動対策としての再生可能エネルギーの導入促進（固定価格買取制度（FIT）による支援）により、日本においては急激に木質バイオマス発電施設が増加しており、2023年9月時点で516施設が認定されており、導入件数は277施設（5052MW）に達し、2015年と比べると認定施設数は約6倍、導入件数は約15倍に増加している（移行認定を含む）。さらに未稼働の施設も含むと木質バイオマスは516件、8233MWである[経済産業省]。つまり近い将来、未稼働の239件が稼働すれば木質バイオマス発電はさらに、現在の倍にまで増加が見込まれる。木質バイオマス発電施設からは燃焼灰が発生し、有効利用されなければ産業廃棄物となる一方、セメント原料や混和材、ジオポリマー材料としての建設資材 [Sigvardsen, 2019]や肥料等[前田, 2018]としてのリサイクルが期待される有用資源の側面も持つ。しかし現状、木質バイオマスエネルギー目的で利用する事業所（発電事業以外も含む）1,342件のうち、その燃焼灰を有効利用できている事業所は413件にとどまっており[農林水産省]、過半数は産業廃棄物として処理されている。

しかしながら、木質バイオマス燃焼灰は全国的な統計は未整備のうえ急成長の過程にあり、どこからどの程度の灰が発生するかが把握されていない。燃焼灰特性を事業の計画段階で大まかに把握できれば、よりコストや環境負荷の低い燃焼灰の有効利用方法を前もって選ぶことが可能だが、現状では困難である。多様な燃料種、炉形式、燃焼条件の違いから、「木質バイオマス燃焼灰」と一口に言ってもその特性はばらばらである。先行研究[池, 2020]においては、文献値から燃焼灰量の推計を行い、2023年には17～81万トン程度排出されると推計しているが、大きな幅があり、この精度を上げる必要があるとともに、実際の木質バイオマス燃焼灰を多く調査し、将来的に燃料種や燃焼炉形式といった情報から燃焼灰特性を推定し、有効利用を促進できるようにデータベースを作成することが望まれる。また、有効利用を行うには、一定の規模での処理を行わないと経済的には成立しないことも想定されるため、地域における用途別資源量が推計できることが望ましい。そこで、本研究では、燃焼灰の類型化を試み、各種有

効利用用途への資源量を地域別に示すことを目的とした。特に、サブテーマ2以降で木質バイオマス燃焼灰のジオポリマー利用を行うため、この用途への資源量の見積もりを行うことを目的とした。

## 2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「木質バイオマス燃焼灰の類型化」
サブテーマ1 実施機関	京都大学大学院
サブテーマ1 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統計が整備されていないことから、全国的なデータベースを作成する。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を実施し、各リサイクル用途に応じた将来的な資源量の見積もりを行い、改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を抽出する。

## 3. サブテーマ1 研究開発内容

本研究開発内容は主に、3つ（アンケート調査、性状調査、資源量の見積もり及びデータベース作成）に大別されることから、以下に分けて記載する。

### （1）アンケート調査

木質バイオマス燃焼灰の推計ため、主燃料が木材またはパーム椰子殻（PKS）で出力1MW以上のFIT認定発電施設220件を灰発生量推計対象とした。日本木質バイオマスエネルギー協会、バイオマス発電事業者協会、株式会社タクマの協力のもと稼働中および計画中の発電施設220件にアンケートを送付し103件（うち5件は1MW未満、推計対象外）より回答を得た。質問項目は発電開始時期、稼働日数、出力、発電方式・炉形式、燃料使用量、燃料樹種・形状、燃料性状（含水率、灰分、低位発熱量）、灰発生量、灰処理・有効利用費用、排ガス処理方式、灰回収方式である。アンケートの送付・回答の無い施設についても、ホームページ等より上記の項目を調査した。

103施設中特に「灰発生量」を回答したのは74施設（うち2施設は1MW未満）で、推計対象220施設のうち146施設については推計する必要があった。まずアンケートの必要な項目（燃料使用量（と複数種類の燃料の混合比）、燃料の灰分、灰発生量）を回答した46件について燃料由来の灰量（ $A_c$ ）を計算し、 $A_c$ から実際の灰発生量（ $A$ ）を求める線形近似式を求めた。 $A$ の不明な146施設それぞれの $A_c$ を計算し、近似式を用いてこれらの施設の $A$ を計算した。 $A_c$ を計算する際、燃料使用量の不明な70施設については、稼働日数、出力、燃料の低位発熱量より計算し求めた。その際発電効率は文献に従い計算した。さらに燃料性状（含水率、灰分、低位発熱量）が不明な場合、燃料の種類に応じてアンケートで回答された値の平均値（灰分は対数平均）を用いた。稼働日数の不明な施設については判明している施設の平均値を使用した。燃料は木材チップ（WC）、木材ペレット（WP）、枝葉材（BR）、樹皮材（B）、廃木材（WW）、PKS、石炭（Coal）の7種類に分類し、以上のいずれであるか不明な場合、WCが用いられると仮定し、2013年から2026年までの燃焼灰発生量の推計を行った。

また、将来推計シナリオについては、環境研究総合推進費SⅡ-6-2「有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発」において、バイオマス発電の今後の推移が、リファレンスシナリオ（ベースライン）、2℃目標シナリオ、1.5℃目標シナリオで計算されていることから、国立環境研究所からデータの提供をいただき、燃焼灰発生量推計を2050年まで実施した。

### （2）燃焼灰の性状調査

木質バイオマス燃焼灰は62施設から協力をいただき、同一施設における複数回のサンプリングを行い、飛灰では総計106試料、主灰では50試料を収集した。試料は飛灰、主灰からなり、炉形式（循環流動床ボ

イラー：CFB、気泡流動床ボイラー：BFB、ストーカ炉：ST、ガス化炉：G）や燃料種により性状の違いが想定される。試料は表1-1に示す様々な性状調査を行った。ただし、分析困難なものもあり、対象とする分析項目に応じて対象サンプル数が異なる。分析においては乾燥、粉碎、酸分解等の前処理を行い、分析を行った。分析手法としては、ICP（誘導結合プラズマ）発光分析を用いることが一般的であるが、本

表1-1 木質バイオマス燃焼灰の性状分析項目

性状分析項目	目的	分析方法	対象燃焼灰
主要元素	リサイクル性	蛍光X線分析、ICP発光分析、MP発光分析	飛灰・主灰
未燃炭素	浮選による分離対象・リサイクル阻害性	前処理+CHN分析計	飛灰・主灰
重金属含有量	リサイクル性・肥料基準との比較	ICP発光分析、ICP質量分析、水銀分析計	飛灰・主灰（一部）
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、水銀分析計	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線吸収端近傍構造分析	飛灰・主灰

研究では、MP（マイクロ波窒素プラズマ）発光分析による手法も検討した。また組成分析・重金属含有量の妥当性については、石炭灰NIST-1633c（米国国立標準技術研究所）を用いて保証値と比較し、回収率は良好であることを確認した。なお水銀については還元気化原子吸光法にて測定した。重金属溶出量については、環境庁告示13号法及び46号法にしたがって実施した。

粒径については、飛灰は主にレーザー回折粒度分布計（島津製作所製、SALD2200）を、主灰はふるい（2mm、1mm、500 $\mu$ m、250 $\mu$ m、150 $\mu$ m、75 $\mu$ mの6種類のステンレス製）及び電磁ふるい振とう機（FRITSCH製、BASIC）を使用して、分布を求め、平均値、中央値を求めた。結晶成分については試料水平型X線回折装置（XRD、株式会社リガク製、RINT-Ultima+/PCQ2）を使用して測定を行った。Kの化学状態については、Photon FactoryのBL-11Bにおいて電子収量法あるいは蛍光法にてX線吸収端近傍構造分析（XANES）を測定し、標準試料スペクトルの線形重ね合わせにより各サンプルの化学状態を推定した。

主要元素分析データ及び燃焼灰の属性データ（燃料種、燃焼方式、灰種）についてJMP@Pro16を用いて、階層クラスター分析及び主成分分析を行い、灰の類型化を行った。また重金属含有量・溶出量データについては、数量化I類分析を行い、属性データの影響を調べた。Kの化学状態についても階層クラスター分析を実施し、考察を行った。

### （3）資源量の見積もり及びデータベース作成

燃焼灰の主要元素組成、重金属含有量から各種有効利用の基準適合性を肥料利用、セメント原料利用などの用途別に整理し、その結果をディシジョンツリー分析した。炉形式及び燃料種により有効利用に適・不適のカテゴリを見出し、燃焼灰の分析ができていない残りの施設の有効利用可能性を推定し、日本全国での用途別資源量を推計した。その際、サブテーマ2の改質処理によりジオポリマーコンクリートの活性フィラーとして適用できる燃焼灰を見出すための実験を別途行い、その結果を利用して用途別資源量を見積もった。最終的に用途別資源量を都道府県ごとにポテンシャルとして表した。また、今後の有効利用促進のため、全国220施設の基本属性データをグーグルマップに落とし込み、アンケート調査に協力及び燃焼灰を提供いただいた施設については、主灰、飛灰の主要元素組成のデータを入力してデータベース化を行った。

## 4. サブテーマ1結果及び考察

### 4.1 アンケート調査結果

#### （1）木質バイオマス燃焼灰の発生量及び有効利用の現状

3年間のアンケートで、炉形式ごとに28（BFB）、41（CFB）、9（SS）、17（TS）、8（G）施設の回答を得た。このうち年間灰発生量を回答した74施設の木質バイオマス燃焼灰（3か年平均）は合計23万5200t-wetで、灰1tあたりの有効利用、廃棄にかかる平均費用はそれぞれ1万5100円、1万8700円であった。有効利用なされている灰の割合は43%であった。必要事項を回答した46施設の灰発生量A（t-wet）を燃料中の

灰分Ac(t-dry) で線形近似した結果を炉形式別 (BFB、CFB、SS、TS、G) に表1-2に示す。34施設全体の近似式の傾きは1.8で、燃料とともに混入する砂等の不純物、未燃炭素、水分等の影響がみられる。不完全燃焼で可燃性ガスを発生させるGは大量の未燃炭素の影響で傾きが2.8と最も高く、逆に傾きが最も小さいものはCFBで1.5であった。切片はCFBが1400と特に高い。CFBは炉に流動砂を投入するが、その量はAcに比例するものではないため、切片が増大したと考えられる。

表1-2 灰発生量の線形近似式

炉形式	データ数	近似式	施設数
BFB	14	$A = 1.7 Ac + 140$	36
CFB	16	$A = 1.5 Ac + 1400$	90
SS	4	$A = 1.9 Ac + 73$	14
TS	9	$A = 2.1 Ac + 270$	27
G	3	$A = 2.8 Ac + 5.4$	24
全体	34	$A = 1.8 Ac + 270$	(29)

燃焼灰発生量のうち主灰が占める割合を炉形式ごとに図1-1に示す。Gについては主灰と飛灰両方の値を回答した施設が無かったため除外した。

BFBにおける外れ値は回答施設による回答欄の間違いが生じたものと推察される。主灰割合の平均値は0.21 (BFB)、0.42 (CFB)、0.55 (SS)、0.43 (TS)、0.37 (全体) であった。

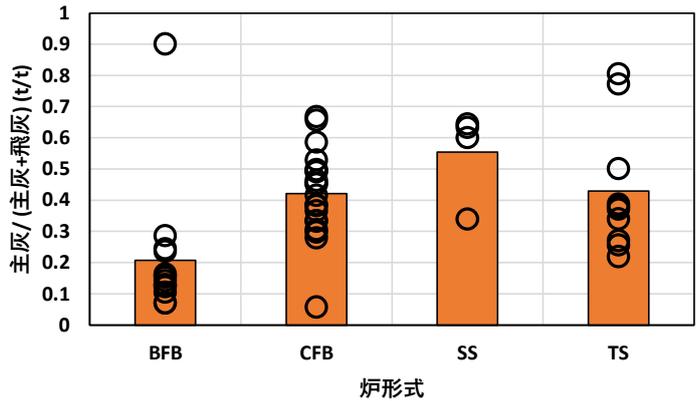


図1-1 燃焼灰発生量中の主灰の割合

推計対象である220施設の中には計画中の発電所もあり、灰が発生する時期、つまり運転開始時期の不明な施設が57施設あった。FIT制度の開始以降に稼働した施設の運転開始時期は、FIT認定から平均3年3か月後だったことから、これら57施設はFIT認定から3年3か月後に運転開始すると仮定すると、220施設の稼働は2026年までに完了し、総発電容量は4077MWとなる。一般社団法人木質バイオマスイエネ協会による推計においても、未利用木質、一般木質及び建築資材廃棄物による発電容量は2025年に4730MWに達する見通しであり[日本有機資源協会、2021]、ほぼ同じレベルであることが確認された。

以上の結果より、全国の220発電施設から発生する灰を推計した。2026年時点の合計燃料使用量は3200万t-wetで、WCが38%、WPが33%、PKSが21%を占めると推計された。ただし複数種類の燃料を混焼する施設については、各種類が等量ずつ混合され、PKSの場合のみ燃料使用量の10%の割合で投入されると仮定した。10%の仮定は、各年度のPKS輸入量を消費量推計が上回らないように決定した。調達の全てを輸入に頼るPKSは、消費量、輸入量ともに近年急増の一途をたどる。PKSの大量消費はパーム椰子プランテーションにかかる土地利用変化、海上輸送による温室効果ガス排出量の増大といった問題を孕んでいる。3200万t-wetの燃料には約1%にあたる39万t-dryの灰分が含まれる。そのうち40%は灰分が比較的高いPKS由来であり、次いでWP由来の灰分が19%、WC由来の灰分が15%を占める。日本で発生する灰は海外由来であるPKSの灰分組成の影響を大いに受けることが予想される。

表1-2の近似式を用いて2026年度の灰発生量を推計し、そのうち各炉形式で主灰の発生割合が図1-1に示す平均値であると仮定すると、主灰32万t-wet、飛灰50万t-wetとなり、その内訳は図1-2に示す結果となった。各炉形式を採用する施設数は図1-2に示す通りで、CFBが最も多い。炉形式が不明の29施設には全体46データに対応する近似式を適用した。

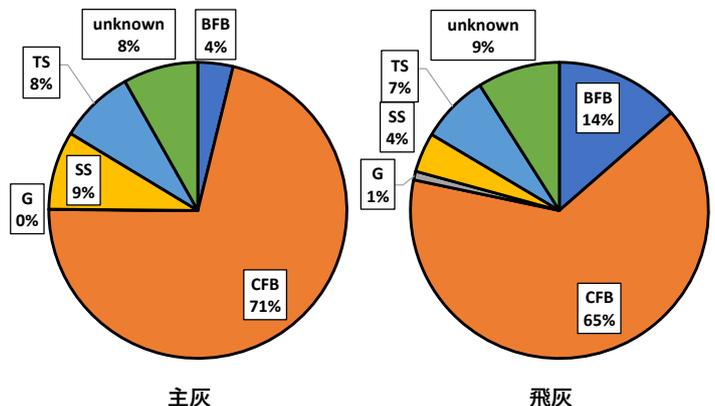


図1-2 燃焼灰推計量の内訳

都道府県別でみると、2026年時点で木質系

バイオマス燃焼灰発生量が最も多いのは福岡県（7.0万t-wet）、次いで北海道（6.7万t-wet）、愛知県（5.9万t-wet）であった

2013年以降の燃焼灰発生量の推移は図1-3に示すとおりである。2013年時点では7万t-wetであった発生量は2020年まで飛躍的に、その後は緩やかに増加し10年間で約10倍になっている。

有効利用率を43%とすると、82万t-wetの灰の有効利用・処理にかかる合計費用は139億円に上ると予想される。82万tのうち57%が廃棄物として埋め立てられるとすると、その量は47万t-wetで、都市ごみ焼却残渣発生量405万t-wet、最終処分量267万t-wetのそれぞれ12%、18%にあたる。事業コストの増大や最終処分場ひっ迫及び循環経済の観点から木質バイオマス燃焼灰の有効利用率の向上は不可欠である。

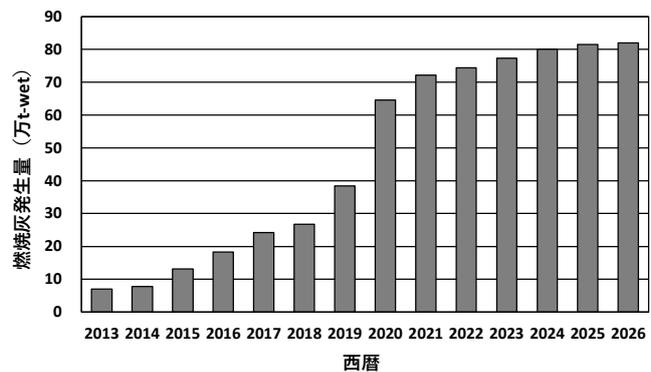


図1-3 木質バイオマス燃焼灰発生量の推移

有効利用率を43%とすると、82万t-wetの灰の有効利用・処理にかかる合計費用は139億円に上ると予想される。82万tのうち57%が廃棄物として埋め立てられるとすると、その量は47万t-wetで、都市ごみ焼却残渣発生量405万t-wet、最終処分量267万t-wetのそれぞれ12%、18%にあたる。事業コストの増大や最終処分場ひっ迫及び循環経済の観点から木質バイオマス燃焼灰の有効利用率の向上は不可欠である。

## （2）木質バイオマス燃焼灰発生量の将来予測

今後の気候変動対応を考慮したバイオマス発電量は2020年で37.97TWhと推計されているが、これは他のバイオマス発電も含んでいる可能性があり、2020年の今回対象としている施設での発電量（29.35TWh）で補正をし、対応する2020年での燃焼灰発生量（64.6万t-wet/年）を基準として、燃焼灰発生量の推移を計算した。結果を図1-4に示す。燃料・炉形式・規模等が現在のままで、そのまま発電量に応じた燃焼灰が発生すると仮定すると、リファレンスシナリオ（REF）では木質バイオマス燃焼灰はあまり変化がなく、2050年には減少する傾向を示した。これに対して、2℃目標シナリオ（2D）、1.5℃目標シナリオ（1.5D）では2045年から急激に上昇し、燃焼灰発生量はそれぞれ2050年には約250万t-wet/年、1000万t-wet/年強に増加することがわかった。材の供給が困難と思われることから1.5Dの値は過大すぎると考えられた。2030年で2D、1.5Dで80万t-wet/年程度の発生が見込まれ、すでに2025年にはそれを超える量が現実には発生すると想定されることから、2035年以降の新規導入については、現在の発電施設で最大発電容量の施設（200MW：CFB）で木質ペレットを燃料として発電する（燃焼灰の発生量としては最も抑えられるケース）と仮定して計算すると2050年には、2D（200MW\_WP）、1.5D（200MW\_WP）では燃焼灰発生量はそれぞれ160万t-wet/年、540万t-wet/年程度と見積もられた。

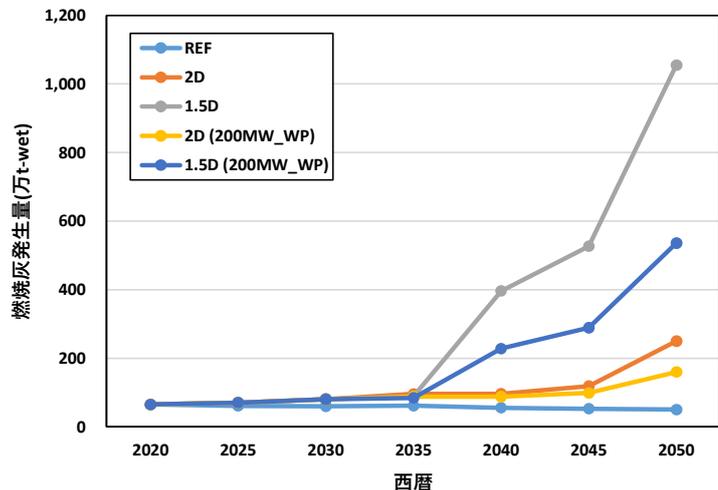


図1-4 木質バイオマス燃焼灰発生量の将来推移

## 4.2 燃焼灰の性状調査結果

### （1）主要元素

#### 1) 元素組成

62施設より提供を受けた木質バイオマス燃焼灰98試料（主灰36試料、飛灰62試料）の主要元素測定結果を図1-5に示す。TCは全炭素を意味する。平均値で比較するとSi > Ca > TC > K > Al > Fe > Cl > S > Mg > Na > Pの順で含有量が高かった。灰の有効利用用途の筆頭であるセメント産業でのリサイクルを想定し、廃棄物焼却灰の受け入れ基準値と比較すると、S、Cl、Kの平均値が基準（それぞれ1.2%、0.1%、1.7%）を

超過した[経済産業省, 2004]。木質バイオマス燃焼灰をセメント原料としてリサイクルする場合、これらの元素を低減する前処理が必要となることが予想される。Vassilevらによると木材の灰分中に平均1%以上含まれる主要元素は、Ca (31%) > Si (10%) > K (8.9%) > Mg (6.7%) > Al (2.7%) > Fe (2.4%) > Na (2.1%) > P (1.5%) > S (1.1%) である[Vassilev, 2013]。Al、Siの平均含有量が先行研究よりも高いことから、本研究の分析試料は先行研究より砂礫や流動媒体の砂由来の成分の影響が大きかったと考えられる。その分、Mg、P、K、Caといった木材自体が多く含む元素[Misra, 1993]の割合は低くなっていた。

表1-3に、炉形式及び主灰・飛灰ごとの各元素平均含有量を示す。平均Si含有量が最も高いのはCFB主灰、平均Ca含有量が最も高いのはBFB飛灰、TC含有量が最も高いのはG主灰であった。未燃炭素については、最大値78%、最小値は検出下限以下、平均値53%であった。炉形式及び主灰／飛灰の別で比較すると、G-ba > G-fa > SS-fa > TS-fa > BFB-fa > CFB-fa > 主灰であった。

表1-3 種類別木質バイオマス燃焼灰の平均主要元素含有量

	N	TC	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
BFB-fa	17	3.1	0.93	2.5	4.6	14	0.94	1.7	1.4	7.6	15	2.7
CFB-ba	18	0.27	0.81	1.5	3.4	30	0.44	0.065	N. D.	5	6.3	1.4
CFB-fa	21	1.7	1.3	2.6	3	16	1	1.8	2.4	6	17	2.3
G-ba	1	81	0.022	0.16	1.5	1.1	0.037	1.9	0.46	2.7	0.95	0.54
G-fa	7	52	0.19	0.72	0.68	0.95	0.23	1.4	2	8.7	6.3	0.31
SS-ba	6	3.9	1.1	1.4	4.5	24	0.42	0.3	0.099	3.9	7.9	3
SS-fa	6	9.5	0.75	1.8	3.1	9.7	0.86	2.1	1.8	5.4	15	2.2
TS-ba	11	1.4	1.3	1.7	5.4	24	0.42	0.26	0.12	3.8	8.4	3
TS-fa	11	5.1	0.95	1.6	3.5	12	0.8	2.2	4.4	9.6	13	2.7

2) 理論二酸化炭素結合容量 (TSC)

木質バイオマス燃焼灰を二酸化炭素の固定材として用いることが世界的に検討され始めており、そのポテンシャルを推定するために、Tamilselviらが石炭灰に対してTSC(理論二酸化炭素結合容量)として定義した以下の式(1)を用いてTSCを算出した[Tamilselvi, 2016]。また算出したTSCがある範囲内に分布する施設数を図1-6にまとめた。カルシウムが極端に少なく硫黄が多いサンプルではTSCが負の値となり、全98施設の中で1施設のみが該当した。

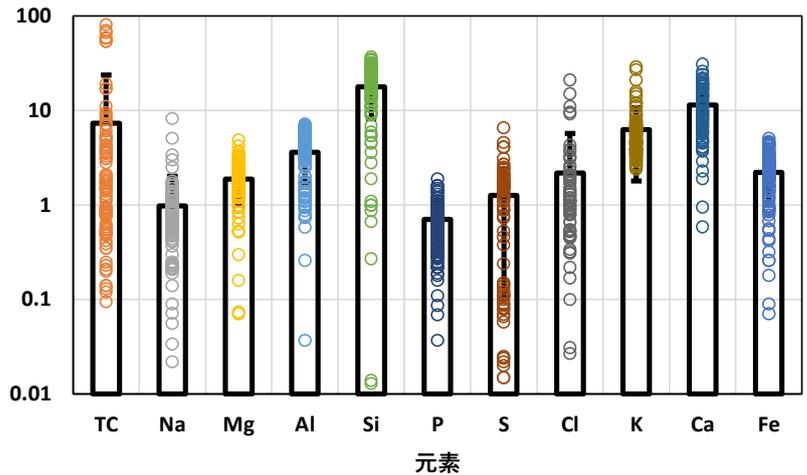


図1-5 木質バイオマス燃焼灰の主要元素含有量

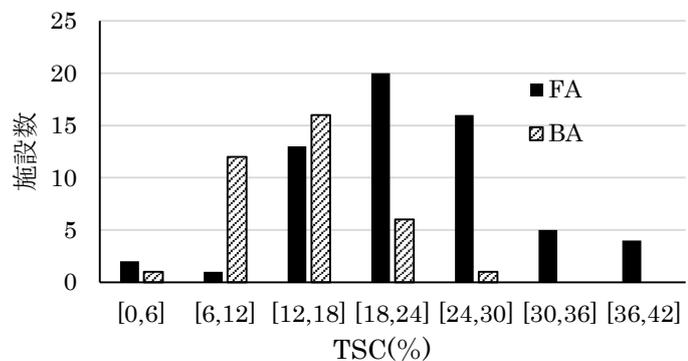


図1-6 TSCの分布

$$TSC = 0.785(CaO - 0.75SO_3) + 1.09MgO + 0.71Na_2O + 0.468K_2O \quad (1)$$

飛灰と主灰の平均はそれぞれ21.8%、13.6%となり、主灰よりも飛灰のほうが二酸化炭素の固定材として高いポテンシャルを有していることがわかった。木質バイオマス燃焼灰全体で94,750トン-CO<sub>2</sub>/年の吸収ポテンシャルがあると言える。灰種（飛灰、主灰）、炉形式、各燃料種がTSCの値に有意に影響を与えるかどうか数量化I類により判定したところ、飛灰は主灰と比較して有意にTSCが高かった。またCFBから発生する灰は他の炉形式のものと比較して有意にTSCが高く、逆にGの灰は有意にTSCが低かった。

### 3) 新しい分析方法（MP-AES）の適用

ICP-AESよりも省エネルギー・低コストで燃焼灰中の主要元素分析が可能となる方法として、マイクロ波プラズマ発光分光分析（MP-AES）の有用性を検討した。対象元素（Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe）について、検量線は良好な直線性（R<sup>2</sup> > 0.999）を示した。内部標準法として3つの元素の発光線の適用性を検討したところ、Cu（324.754 nm）補正による校正が最も直線性が優れていた。前処理として行ったマイクロ波酸分解では混合酸中にフッ化水素酸やホウ酸が含まれていたが、そのような前処理条件下においても物理的干渉は軽微であった。測定された7元素のMP-AESの検出限界は0.85～89 μg/Lで、ICP-AESの検出限界は元素により0.23～2.8倍と異なるが、ほぼ同等であった。MP-AESによって測定された石炭フライアッシュ標準物質中の元素の回収率は、0.80-1.08であった。MP-AESによる木質バイオマス燃焼灰試料の元素定量は、ICP-AESによる定量と強い相関を示した。しかし、Welchのt検定では、過半数の試料でKはMP-AESによる測定値がICP-AESによる測定値より有意に高く、AlとCaは有意に低かった。とはいえ、両者の結果の間に良好な相関があることを考慮すると、MP-AESは木質バイオマス燃焼灰の分析において有用なICP-AESの代替分析手法である。

### 4) 主要元素組成に対する統計解析

主灰、飛灰がそれぞれ主要元素組成からどのように分類されるかを調べるため、主成分分析及び階層クラスタ分析を行った。検出下限未満の値は0としてデータセットを作成した。主成分分析の結果を図1-7に示す。第1、第2主成分の寄与が合計54.8%であり、主灰は第1主成分が負の値、飛灰は正の値になる傾向が現れた。炭素含有量の高いガス化残渣が第2主成分の負の方向にプロットされていた。第1主成分が最も高い2試料はいずれもTS飛灰であった。階層クラスタ分析の結果を図1-8に示す。

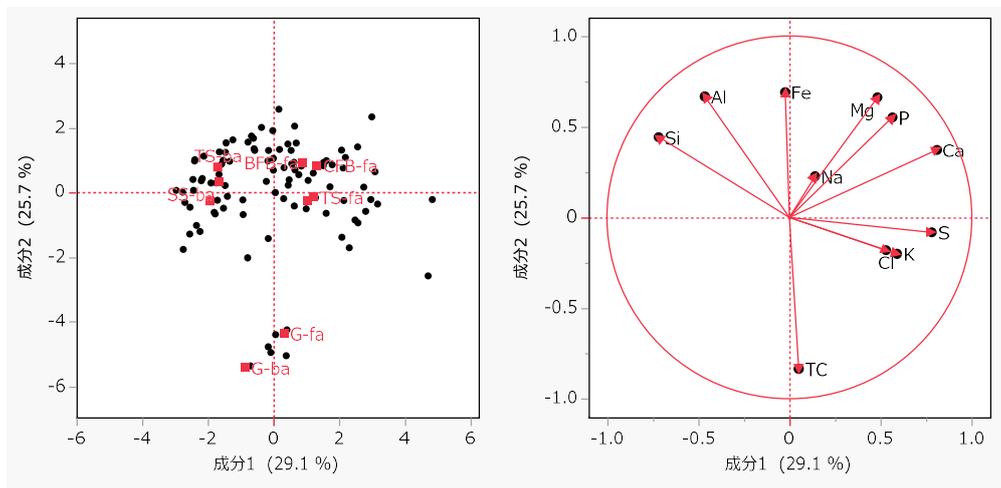


図1-7 全主灰・飛灰による主要元素含有量の主成分分析

最初にCa含有量の低い40試料とCa含有量の高い58試料に分岐した。後者はほぼ全て飛灰であった。40試料のうちG由来の残渣である7試料はTCが非常に高く、クラスター3（青）を形成した。次に残り33試料のうちSiの値がより高いCFB由来の12試料（うち11試料は主灰）がクラスター2（緑）を形成し、主灰21試料がクラスター1（赤）となった。Ca含有量の高い58試料からは7試料がクラスター8（青緑）、9（赤紫）、10（黄緑）に分岐した。これらはそれぞれNaとSとCa、ClとK、PとFeの平均値が最も高いクラスターである。残り51試料から約6割をCFB飛灰が占めるクラスター7（黄）が分岐し、次いで約半数をBFB飛灰が占めるクラスター4（橙）が分岐した。クラスター7はMg、Caが高く、クラスター4はAl、Feが高い。

最後にクラスター5（青緑）と6（紫）が形成された。クラスター5はストーカ飛灰が約9割を占め、Kの平均含有量が最も低かった。どこまで分類するかによるが、このような階層クラスター分析から炉形式等の違い、組成の違いにより燃焼灰を類型化できることが可視化された。

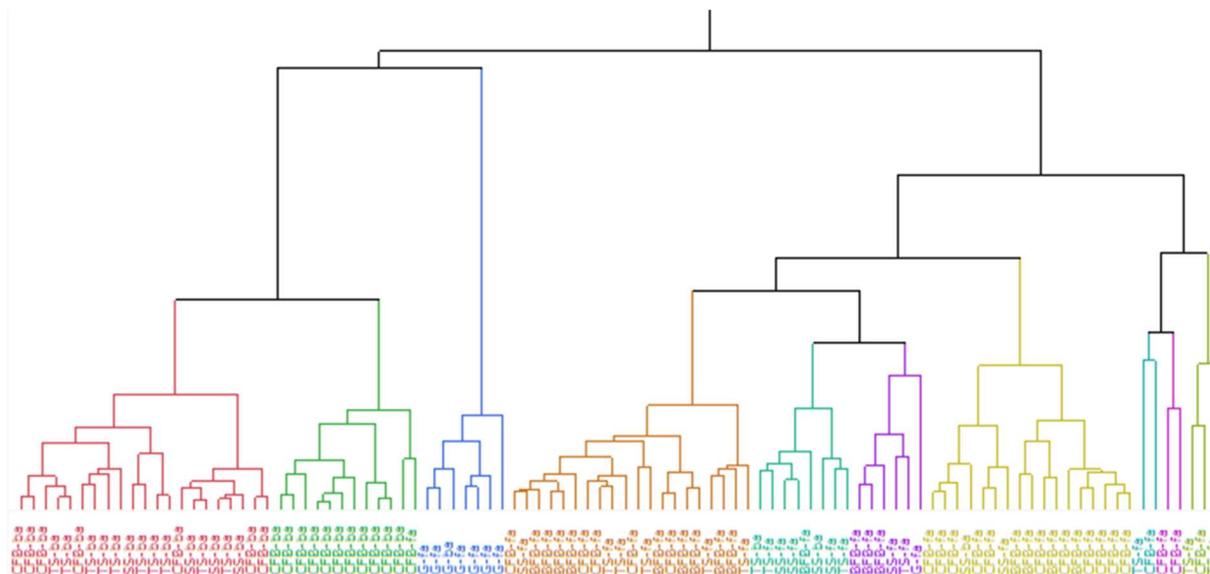


図1-8 全主灰・飛灰による主要元素含有量の階層クラスター分析

## （2）重金属

本研究では、日本国内64施設から発生した103種木質バイオマス燃焼飛灰の有害金属元素組成および溶出量を調査するとともに、結果に影響を与える因子を調べるため、統計解析を行った。

### 1) 含有量

個々の有害金属元素の含有量測定結果を最大値、最小値、平均値をまとめて図1-9に示した。定量下限値未満の元素をN. D. として表記した。平均値を計算した際、定量下限値未満の元素については定量下限値の1/2として扱い、検出下限以下の値を0として計算した。

肥料としての安全性を検討した結果、全ての元素において、平均値は日本の汚泥肥料中有害金属の許容値よりも低く、約8割の燃焼飛灰は全ての元素で汚泥肥料中の有害金属類許容値を満たしたが、残りの飛灰ではAs、Cd、PbあるいはHgの含有量が基準値を上回った。土壤汚染対策法に係る含有量基準、農用地に係る土壌の管理基準に広げると、約48%の飛灰がいずれの基準も満たしていた。肥料として再利用の際、処理や他原料との混合などが必要である。廃木材を原料として含んでいるか否かで整理すると、Se以外の元素の含有量が高い傾向が見られた。特にCu、As、Pb、Hgの含有量が非常に高く、廃木材不使用の灰の2倍以上であることがわかり、廃木材は薬剤等を含む場合があるため[浅利, 2003]、未利用材や一般材と比較して重金属の含有量が高いと考えられた。

この点について、飛灰を64施設ごとにデータを整理し直し、数量化I類を用いて炉形式と燃料の重金属含有量に対する影響度を調査した結果を表1-4に示す。ここでは石炭混焼：PCについても含めている。p値が0.05未満を有意差があるとした時、燃焼炉形式においては、ストーカ炉がAsに対する正の影響が見えるが、それ以外の元素に対しては統計的に有意な差は得られなかった。STでは揮発成分のみが飛灰に濃縮されることからAsは他方式に比べて高いと判定されたと考えられた。一方、同様に数量化I類を用い

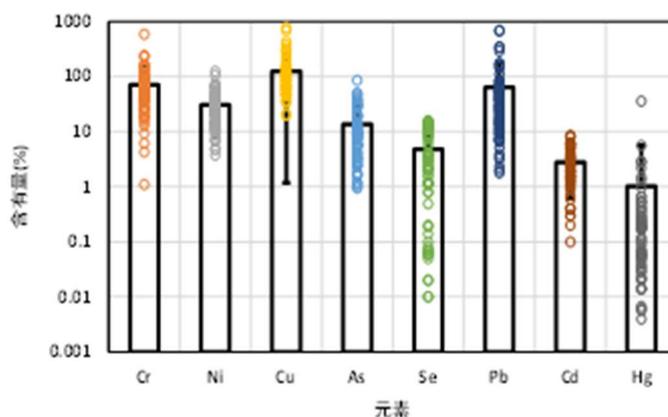


図1-9 木質バイオマス燃焼飛灰の各重金属含有量

て燃料（廃木材とそれ以外）の重金属含有量に対する影響度を調査した結果、廃木材を燃料に用いた飛灰は、Cr、Cu、As、Pb、Hgの含有量が有意に高いと判定された。これは先に述べた理由によると考えられ、統計的にも支持された。また、B（樹皮材）がCr含有量に正の影響を及ぼすことがわかった。植物の樹皮と葉は大気から直接汚染物質を蓄積し、主に表面に沈着するため、汚染地帯の樹

木ほど樹皮と木材の有害金属濃度比が高いことが知られており、一因と考えられた[Oliva, 2006]。なおそれ以外の元素に対しては統計的に有意な差は得られなかった。階層クラスター分析を実施した結果、明らかに廃木材のBFB飛灰が一つのカテゴリーとして分類されることも確認した。

## 2) 溶出試験結果

溶出試験は、13号試験と46号試験の両方について基準適合を検討するために実施した。結果を表1-5に示す。両者は主としてろ過する際の孔径による違いがあるのみで手法としては大きく異ならず、13号と46号試験の結果は全ての元素において相関係数が0.9以上であり、結果の信頼性はより高いものと考えられた。103種燃焼飛灰において、99種は全ての条件で特別管理産業廃棄物の判定基準（13号試験）を満たした。ほとんどの木質バイオマス燃焼飛灰が安定化処理無く、埋立処分が可能であった。Cr、

表1-4 炉形式と燃料の重金属含有量に対する影響度

カテゴリー	サンプル数	Cr	Ni	Cu	As	Se	Cd	Pb	Hg	
燃焼炉式	BFB	17	0.5157	0.9997	0.1063	0.5227	0.4270	0.1875	0.3168	0.3042
	CFB	21	0.9882	0.4242	0.6197	0.3339	0.4965	0.6963	0.6416	0.8643
	G	7	0.3436	0.5734	0.5597	0.6564	0.3355	0.1179	0.6278	0.9658
	S	17	0.3048	0.0496	0.8044	<b>0.0032</b>	0.8295	0.6044	0.4545	0.6727
	PC	2	0.6145	0.4763	0.6747	0.1620	0.8537	0.8968	0.9549	0.7942
燃料	WC	50	0.6457	0.2883	0.3131	0.2696	0.0696	0.2445	0.2721	0.4227
	WP	12	0.5424	0.9944	0.9435	0.4746	0.0254	0.7609	0.2701	0.4229
	PKS	24	0.3619	0.5054	0.7095	0.0718	0.3603	0.5022	0.8932	0.5234
	BR	6	0.3656	0.3353	0.8859	0.4227	0.2379	0.8777	0.2041	0.7775
	B	2	<b>0.0011</b>	0.4406	0.8144	0.9319	0.0587	0.4376	0.6856	0.9793
	COAL	3	0.5439	0.6621	0.9418	0.0612	0.9858	0.6877	0.7931	0.6693
	WW	13	<b>0.0034</b>	0.0402	<b>&lt;0.0001</b>	<b>0.0078</b>	0.6873	0.2642	<b>&lt;0.0001</b>	<b>0.0077</b>

赤塗り：正の影響  
青塗り：負の影響

表1-5 環告13号と46号溶出試験結果

	pH	B	Cr	Ni	Cu	As	Se	Cd	Pb	Hg		
環告13号	平均値 (mg/L)	12.3	1.12	0.291	0.001	0.02	0.009	0.06	0.0003	0.177	平均値 (μg/L)	3.870
	最大値 (mg/L)	13.9	13.2	4.646	0.08	0.86	0.178	0.29	0.0056	10.584	最大値 (μg/L)	405.3
	最小値 (mg/L)	10.4	<0.01	<0.007	<0.01	<0.02	<0.001	<0.02	<0.0005	<0.002	最小値 (μg/L)	<0.001
	Std4 (mg/L)			1.5* (3)			0.3	0.3	0.09	0.3 (4)	Std4 (μg/L)	5 (1)
	A/Std4						0.03	0.2	0.004	0.6	A/Std4	0.8
	溶出率 (%)			4.0	0.02	0.3	2.2	27.8	0.4	0.3	溶出率 (%)	0.1
環告46号	平均値 (mg/L)	12.3	1.10	0.288	0.001	0.02	0.009	0.06	0.0003	0.199	平均値 (μg/L)	2.195
	最大値 (mg/L)	13.9	13.9	4.467	0.08	0.77	0.174	0.30	0.0064	11.820	最大値 (μg/L)	229.3
	最小値 (mg/L)	10.1	<0.01	<0.007	<0.01	<0.02	<0.001	<0.02	<0.0005	<0.002	最小値 (μg/L)	<0.001
	Std5 (mg/L)		1 (24)	0.05* (77)			0.01 (18)	0.01 (81)	0.003 (1)	0.01 (18)	Std5 (μg/L)	0.5 (1)
	A/Std5		1.1				0.9	5.8	0.1	20	A/Std5	4.4
	溶出率 (%)			3.9	0.02	0.2	2.0	25.8	0.4	0.4	溶出率 (%)	0.1

\*6価クロムの基準値

(N):基準値を超えるサンプル数

Std4: 産業廃棄物の判定基準値

Std5: 土壌の汚染に係る土壌環境基準

PbとHgが処理阻害元素と見なされ、管理に特別な注意を要すると考えられた。Cr(VI)については62施設（2施設は測定不可）で平均0.330mg/L、総Crとの相関係数はR=0.98で、溶出した総CrはほとんどCr(VI)とみなしてよいことが分かった。

一方で、全ての元素で土壌環境基準値以内である飛灰は14種しかない。特に、B、As、Seは基準の十倍、Hgは基準の百倍、Pbは基準の千倍という高濃度の溶出が検出された燃焼飛灰があった。環境安全性を確保するため、土木資材や土壌改良材等として再利用の際には有害金属の除去あるいは溶出抑制・固定が必要である。Cr、Ni、Cu、As、Cd、Pb、Hgの溶出率が5%未満であるのに対して、Seの溶出率が25%を超えていた。木質バイオマス燃焼飛灰中のSeが環境に溶出しやすく、環境へのリスクポテンシャルが高いと考えられた。

炉形式と燃料が溶出量に影響を与える因子を含有量での解析と同様に数量化 I 類により調べた結果（環告 13 号）を表 1-6 に示す。炉形式においては、ガス化炉が B、Cu、Cd の溶出量に対して有意に正の影響があった。一方で、BFB、CFB、S について B に対して有意に負の相関があった。これらの元素は比較的揮発しやすい元素であり、還元雰囲気における化学状態の違いやガス化により共存無機元素が同伴しにくいこと等が影響を及ぼしたと想定され、Factsage による熱力学平衡計算を行ったが、大きく化学種が変わることはなく、本研究では統計的有意差の説明が困難であった。

燃料については、廃木材を燃料に用いた飛灰は、Pb の溶出量にのみ有意に正の影響があると判定された。含有量が高くなることで溶出量も高くなることが想定され、実際に、含有量と溶出量の相関を調べると明らかに正の相関があることが確認された。また、

pH が Cr、As に有意に正の影響を与えていた。Cr、As のオキソアニオンは pH が高いほど安定であることから妥当であると考えられた。

表1-6 炉形式と燃料の重金属溶出量に対する影響度

環告13号	サンプル数	B	Cr	Ni	Cu	As	Se	Cd	Pb	Hg	
燃焼炉式	BFB	17	0.0083	0.2914	0.6656	0.1694	0.4819	0.2331	0.7154	0.1624	0.3341
	CFB	21	0.0003	0.7592	0.2305	0.1694	0.2092	0.5889	0.9076	0.9279	0.9225
	G	7	0.0001	0.0850	0.6594	0.0003	0.9859	0.0532	0.0024	0.5558	0.8593
	S	17	0.0036	0.3268	0.2714	0.1395	0.1587	0.6587	0.8792	0.5190	0.6414
	PC	2	0.1233	0.4465	0.9492	0.9177	0.2543	0.6825	0.1591	0.9440	0.8847
燃料	WC	50	0.4362	0.5086	0.3590	0.3634	0.6815	0.8290	0.1871	0.4377	0.6223
	WP	12	0.0767	0.2958	0.3077	0.5053	0.4753	0.8201	0.6379	0.8267	0.4709
	PKS	24	0.2678	0.5812	0.7752	0.4616	0.7297	0.8218	0.8620	0.2326	0.4141
	BR	6	0.4203	0.0927	0.0226	0.6215	0.0298	0.0442	0.4677	0.8096	0.9242
	B	2	0.4261	0.9464	0.5067	0.8384	0.3667	0.5252	0.6048	0.9124	0.9547
	COAL	3	0.8096	0.4948	0.9656	0.9279	0.8668	0.9618	0.0303	0.9958	0.6962
	WW	13	0.1691	0.5606	0.0187	0.7749	0.3620	0.7684	0.4678	0.0011	0.0467
pH	64	0.0124	0.0025	0.2111	0.9860	0.0014	0.0194	0.5417	0.2363	0.4323	

赤塗り：正の影響  
青塗り：負の影響

(3) 粒径

粒径は土木資材利用において一つの指標となる。飛灰の中央値を炉形式別に図1-10にまとめた。中央値の中央値はBFB、CFB、SS、TSでそれぞれ76.6、39.3、322、143となり、中央値の平均はそれぞれ91.9、54.5、306、264となり、中央値、平均値ともにCFB<BFB<TS<SSという結果が得られた。またストーカ炉のほうが流動床炉よりもばらつきが大きかった。流動床炉とストーカ炉の飛灰について平均の積算分布から均等係数と曲率係数を算出した結果、流動床炉ではそれぞれ10.1、1.02、ストーカ炉については6.40、0.96であった。「均等係数が10より大きく、かつ曲率係数が1~3」という基準[土質工学会, 1991]を満たすものを土の締固めに対して「粒度分布が良い」とすると、流動床炉飛灰は満足していた。

主灰については篩により分布を求め、それぞれの試料の中央値を求め、その分布を表1-7にまとめた。BFB、PC、Gは試料数が少なかったため除外して中央値で比較するとCFB<SS<TSとなった。また、この3種類の炉形式において最大値と最小値の差を主灰と飛灰において比較するとその差はどの炉においても主灰の方が大きかった。つまり、主灰はばらつきが大きく、土木材料や石炭灰代替材として利用する場合、破碎・粒度調整を行うなどの処理が必要と考えられた。

(4) 結晶成分

木質バイオマス燃焼灰を原料として利用する場合、ある一定の品質が保たれていることが望ましい。それゆえ、飛灰81種類、主灰47種類の試料についてXRDによる結晶成分分析を行い、3種類以上の試料に含まれていた結晶成分について、表1-8にまとめた。

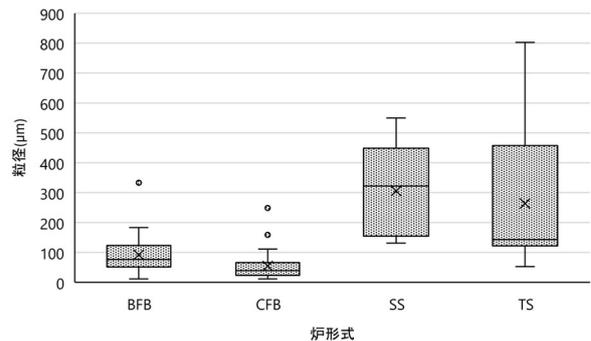


表1-10 炉形式ごとの飛灰の粒径

表1-7 主灰の粒径

炉形式	試料数	中央値(μm)	最大(μm)	最小(μm)
BFB	2	1394	1477	1310
CFB	21	173	1472	68
SS	8	614	1031	297
TS	14	735	1086	148
PC	2	445	671	218
G	1	1275	1275	1275

主灰、飛灰を問わず最も多くの試料で検出された結晶成分はSiO<sub>2</sub>であった。特に、主灰でSiO<sub>2</sub>が検出されなかった試料は1種類のみであった。次いでCaCO<sub>3</sub>が多く検出され、ほとんどが飛灰において検出された。主灰では複数種類の試料に含まれる結晶成分は全てアルカリ金属やアルカリ土類金属のアルミノケイ酸塩であった。これに対して、飛灰においては塩化物や硫酸塩、またCa(OH)<sub>2</sub>や複合炭酸塩等が検出された。また、一施設における複数試料の再現性を確認したところ、主なピーク (SiO<sub>2</sub>やCaCO<sub>3</sub>) について再現性はあったが、小さなピークであるアルミノケイ酸塩では微妙な違いがあった。

表1-8 木質バイオマス燃焼灰に含まれる結晶成分

炉形式	BFB		CFB		SS		TS		G		PC		合計	
燃焼灰種	飛灰	主灰	飛灰	主灰	飛灰	主灰	飛灰	主灰	飛灰	主灰	飛灰	主灰	飛灰	主灰
試料数	25	21	21	9	9	15	14	9	1	2	2	81	47	
SiO <sub>2</sub>	22	20	21	9	9	14	14	0	0	2	2	67	46	
CaCO <sub>3</sub>	10	14	0	5	1	7	2	3	0	0	0	39	3	
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	4	1	4	2	0	5	3	0	0	0	0	12	7	
Ca(OH) <sub>2</sub>	2	2	0	4	0	1	1	1	0	0	0	10	1	
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	9	
KCl	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	
K <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O)	0	1	1	4	0	1	0	0	0	0	0	6	1	
Ca <sub>0.8</sub> Na <sub>0.2</sub> Al <sub>1.8</sub> Si <sub>2.2</sub> O <sub>8</sub>	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	2	3	
(Na <sub>0.84</sub> Ca <sub>0.16</sub> )Al <sub>1.16</sub> Si <sub>2.84</sub> O <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4	0	
(Ca, Na)(Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	2	
K <sub>0.2</sub> Na <sub>0.8</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	
(Na, K)(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	
CaO	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
K <sub>2</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	

### (5) カリウムの化学状態

木質バイオマス燃焼灰にはカリウムが含まれ、肥料原料として期待されている。カリウムの化学状態は、燃料や炉形式、燃焼条件などを反映するものと考えられるが、これまで詳細に検討している例はなく、カリウムの化学状態をX線吸収端近傍構造 (K吸収端) により把握した。対象は、主灰46サンプル、飛灰100サンプルである。内訳は飛灰はBFB:28、CFB:25、G:12、PC:4、SS:8、TS:23、主灰はBFB:0、CFB:19、G:1、PC:3、SS:8、TS:15である。

カリウムのK吸収端スペクトルの一例として、BFBの飛灰の結果を図1-11に示す。3600~3630eVにおいて認められるスペクトルは様々で、いくつかの鋭いピークが明確に見えるものとなだらかなものなどがある。一つの施設から複数回にわたるサンプリングしたものでは、必ずしも同一ではなく、燃焼条件や同伴する元素 (塩素や硫黄など) にも依存すると考えられた。

標準サンプルのスペクトルを線形に重ね合わせて各飛灰中カリウムの化学形態を推定すると、表1-9となった。なお、R-factorとは小さいほど、実測定スペクトルと標準スペクトルを合成したスペクトルが一致していることを意味する。この表では、各炉形式の灰において含まれると推定される化合物が何試料選択されているかと平均的な組成を示す。つまり、BFB飛灰は全部で26試料あり、KClが15試料で選ばれている。図1-11に示したようにBFB飛灰では多様な化合物が含まれ、最も多い化合物でK<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>であり、16.5%となっている。一方で、CFB主灰であれば、Anorthoclase ((Na, K)AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) が19試料中18試料で含まれて、50%を超えていた。同じ炉形式で比較すると、表中の点線よりも上のアルミノケイ酸塩が主灰で多く、飛灰では少なかった。また、飛灰においては塩化物や硫酸塩などが増える傾向にあり、中和物として妥当であると考えられた。

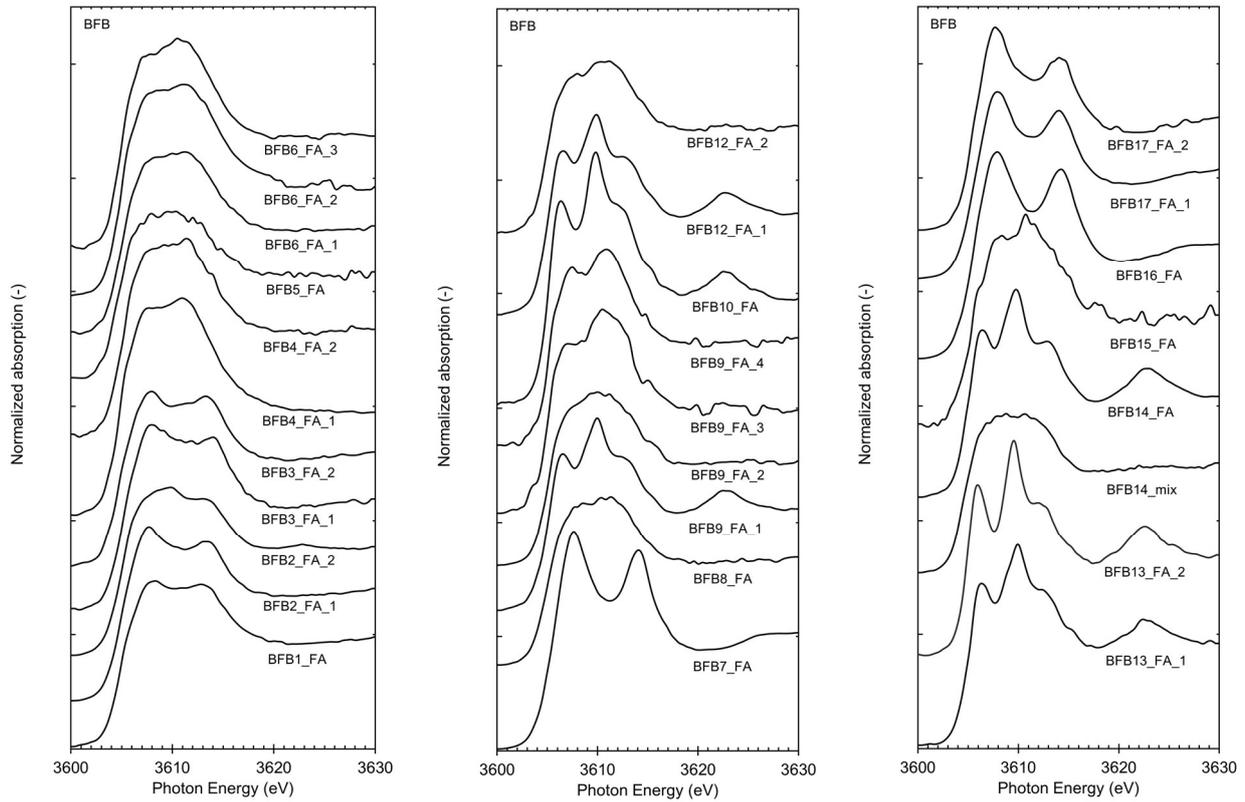


図1-11 木質バイオマス燃焼灰（BFB飛灰）中カリウムのK吸収端スペクトル

表1-9 カリウムK吸収端スペクトルの線形重ね合わせによる含有化合物の推定結果

Standards	BFB FA		CFB FA		CFB BA		TS FA		TS BA		SS FA		SS BA		G FA		G BA		PC FA		PC BA	
	26	14.8	27	23.3	19	52.2	23	9.4	15	27.9	8	3.3	8	26.5	12	7.4	1	1	4	18.5	3	33.0
Anorthoclase	12	14.8	19	23.3	18	52.2	10	9.4	15	27.9	2	3.3	7	26.5	7	7.4			2	18.5	3	33.0
Microcline	6	5.5	1	0.3	8	8.7	6	7.0	11	30.3	2	8.5	4	14.7	1	1.7			2	21.1	0	0.0
Orthoclase	3	2.5	6	5.9	4	7.2	0	0.0	1	1.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0			0	0.0	1	7.4
Sanidine	9	9.6	3	3.0	1	4.0	12	17.2	1	1.7	3	9.8	2	8.3	10	15.6	26		1	2.9	1	7.7
KL (aluminosilicate)	7	6.0	5	4.4	3	3.6	6	5.9	1	1.6	4	14.3	1	1.5	0	0.0			1	8.5	0	0.0
K2CO3	14	12.2	15	11.8	6	5.3	15	17.6	11	14.6	4	16.8	7	23.4	2	12.6	23.1		3	19.9	3	33.7
K2HPO4	5	7.0	1	1.8	6	6.1	0	0.0	2	2.5	0	0.0	3	9.1	0	0.0			0	0.0	0	0.0
K3PO4	12	16.5	1	2.0	1	0.6	10	16.8	2	3.9	3	17.3	0	0.0	10	47.5	42		0	0.0	0	0.0
K2SO4	5	5.6	5	4.4	0	0.0	12	10.9	2	1.4	2	7.3	1	1.8	8	10.6	8.9		0	0.0	0	0.0
K2Mg2(SO4)3	9	5.8	20	19.8	14	12.1	5	5.1	11	13.6	3	6.3	5	13.4	0	0.0			4	30.7	2	17.5
KCl	15	14.4	22	22.7	0	0.0	13	10.1	1	0.8	8	16.5	2	1.5	5	4.6			1	2.0	2	4.8
R-factor	0.0088		0.0121		0.0157		0.0051		0.0053		0.0072		0.007		0.0064		0.010		0.0228		0.0062	

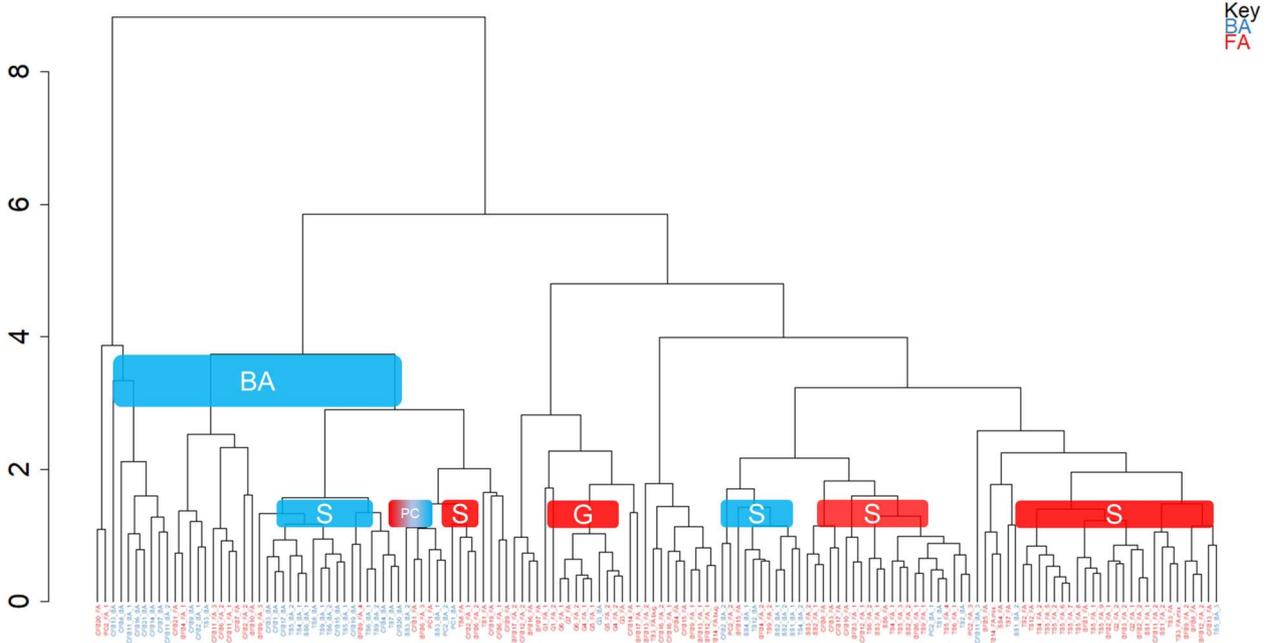


図1-12 全主灰・飛灰による主要元素含有量の階層クラスター分析

K吸収端スペクトルの情報を階層クラスター分析して、主灰、飛灰を類型化した結果を図1-12に示す。主灰の多くは左側に分かれたが、一部のストーカの飛灰が含まれた。一方で右側にはストーカ炉からの燃焼灰が多く含まれたが、飛灰と主灰でいくつかのグループにわかれた。PC、Gもそれぞれである程度近い距離にあり、特にガス化サンプルはほぼ同様のスペクトルであり、一つのカテゴリーに含まれた。BFB・CFB飛灰は図1-11で示したように様々であり、スペクトルから分けることは難しいことがわかった。

### 4.3 資源量の見積もり及びデータベース作成

#### (1) 肥料利用資源量

上記で得られた燃焼灰の組成から、木質バイオマス燃焼灰の有効利用先を判断した。肥料基準についてはKについてはすべてが $K_2O$ として1%以上であったことから肥料価値はあり、重金属含有量の基準を超えたものは廃木材を燃料として利用した試料であったことを考慮すると、廃木材の受入の場合は別途有効利用を考慮する必要がある。そこで、重金属含有量データのある83試料に対して、目的変数を肥料利用、説明変数を炉形式、各燃料種としてディシジョンツリー分析を行った。結果を図1-13に示す。廃木材を混焼しない施設の試料は肥料利用ができるとともに、BFB、CFB以外のTS、SSであれば廃木材を混焼していても肥料利用ができる結果となった。 $R^2=0.601$ であり、ある一定の適合があると考えられた。ただし、現時点では廃木材の割合はわかっていないため、肥料としての判断基準は廃木材を混焼する施設は利用不可として資源量を見積もった。結果として全国で82万トンあるうち、肥料利用可能量は70万t-wet/年であった。また、燃焼灰中のKに着目すると、全国燃焼灰中のK賦存量は約29,700tであり、肥料利用可能（廃木材不使用）K賦存量は約24,700tであった。JOGMECから日本の2020年カリウムの輸入量は22.7万トンとすると[JGMEC, 2021]、肥料利用可能カリウムの賦存量は10.9%を占めることになり、大きな価値がある。

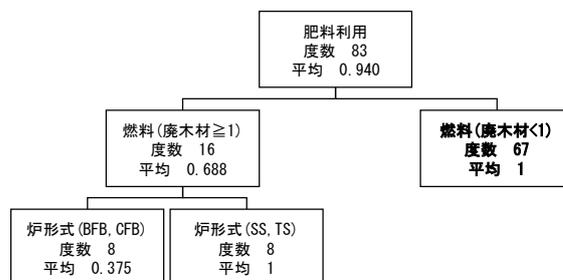


図1-13 ディシジョンツリー分析による肥料利用可能性の推定

#### (2) セメント利用資源量

セメント原料としての受け入れ基準においては、Kにおいてすべてが基準を超え、飛灰についてはC1、Sにおいても殆どが超えており、水洗処理等の何らかの前処理が必要である。現実にはすでにセメント施設での受入実績があり、セメント施設ではごみ焼却灰用の水洗処理施設を設置しているところもあることからKの基準については判断に入れず、測定結果のある83試料について目的変数をセメント利用(K除外)、説明変数を炉形式、各燃料種としてディシジョンツリー分析を行った。 $R^2=0.761$ であり、結果、飛灰およびG施設は不可、その他主灰は利用可能であった。この結果から、32万t-wet/年セメント利用可能であることが推定された。

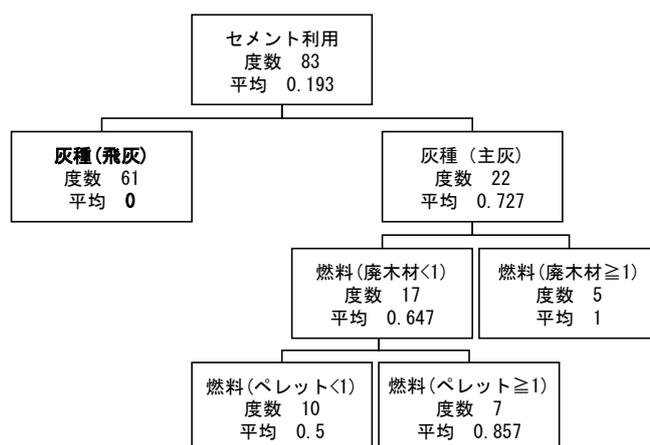


図1-14 ディシジョンツリー分析によるセメント利用可能性の推定

#### (3) 改質処理ジオポリマー利用

本研究では、サブテーマ2で実施した改質処理（浮選）に適合するか否かについて、北九州市立大学で実施した10サンプルの実験結果と当研究室で同様に実施した20サンプルの実験結果から、統計解析に

より浮選処理に適合しない飛灰を抽出することを目的にペースト試験を行った。

ペースト試験は、木質バイオマス燃焼飛灰を絶乾状態として、混合前に1.2mmにてふるい分けを行い、その後、各1:1（試料30g：水30g）で、薬さじで1分混ぜて、練り混ぜ後の状態を観察するとともに、5分後にも観察を行うとともに、各燃焼灰を次の3つの指標、かたさ（1：さらさら～5：固体）、吸水性（1：はじく～5：吸水）、混ざりやすさ（1：混ざらない～5：混ざりやすい）で評価した。北九州市立大学では、実際に浮選実験を行い、浮選後のサンプルをジオポリマー材として評価して、適・不適の判断を行った。判断材料としては、元の燃焼灰を練り混ぜた際のかたさはフローの観点からサラサラのものが良く、状態は練り混ぜ後、5分後ともにペーストに近いものが良いとしている。その結果を表1-10に

表1-10 ペースト試験結果

番号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30
かたさ	2	4	3	3	1	2	2	2	4	1	4	1	2	3	4	4	2	2	4	1	1	2	2	4	3	4	3	2	5	1
吸水性	2	3	3	3	2	1	1	1	5	2	4	2	2	3	4	4	3	3	5	1	1	2	3	4	3	4	3	2	5	1
混ざりやすさ	1	3	2	2	3	4	4	4	2	4	5	2	3	4	5	5	3	4	5	1	1	2	3	4	3	5	3	4	5	1

示す。このうち、P1～P10のサンプルは北九州市立大学で実施されたものであり、緑色は改質後のサンプルがジオポリマーに適していたものであり、赤色は不適であった。この結果からは不適なサンプルは共通して吸水性が悪く、混ざりやすいものであった。特に吸水性が良くないものは不適であるとした。

P11～P20は京都大学で実施したものであり、これらのデータも含めて、吸水性を被説明変数として、炉形式、粒径、主要元素濃度といったパラメータにより、吸水性を分類できるかディシジョンツリー分析を行った。その結果を図1-15に示す。R<sup>2</sup>=0.666であり、ある一定の適合があると考えられた。炉形式がCFBかそれ以外（ガス化はそもそも除いている）で分かれ、CFB飛灰の吸水性が低いことがわかった。ペースト実験からは吸水性が1ないしは2であったサンプルが改質処理には適合しないことから、炉形式として、CFBはあまり好ましくないと言える。さらに、Fe濃度が1.8%よりも小さいカテゴリーが吸水性の平均値が1.2であった。このことから成分データが得られた場合にはより詳細に分類でき、適・不適合が判断されることがわかった。ただし、Feは濃度としては小さく、主要元素としてその後のジオポリマー反応に対して阻害影響を及ぼす報告はほとんどなく、むしろ影響がないか強度に対して正の影響を及ぼすと言われていることから[Ngnintedem, 2021]、本要因では見えない要因で類型化されている可能性がある。主要元素と吸水性について主成分分析を行った場合、吸水性と反対の象限に現れたのがCaであることから、Caの寄与が大きいと考えられたが、ディシジョンツリー分析ではCaの濃度では分類されなかった。当初中間報告においては、成分データよりCaの濃度と未燃炭素濃度によりCFBが比較的望ましかったが、浮選適合を判断する試験により大きく結果は異なった。このことより具体的な有効利用想定試験が改めて重要であることがわかった。この結果から、17wt-wet/年が改質処理ジオポリマーとして利用可能であることが推定された。

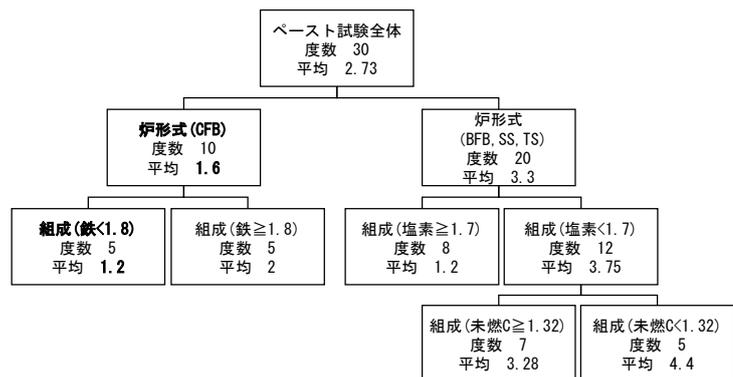


図1-15 ディシジョンツリー分析による改質処理ジオポリマー利用可能性の推定

#### 4.4 データベースと可視化

これらの220施設の炉形式、使用燃料種などの属性から、上記で求めたそれぞれの有効利用用途を割り当て、地域ごとの資源量の見積もりを行った結果が図1-16である。木質系バイオマス燃焼灰発生量が多い福岡県、北海道、愛知県などが比較的いずれにおいても高い結果となっているが、肥料利用では山口

県、セメント利用では兵庫県、山口県、ジオポリマー利用は岐阜をはじめとする中部北陸に多いことが示された。

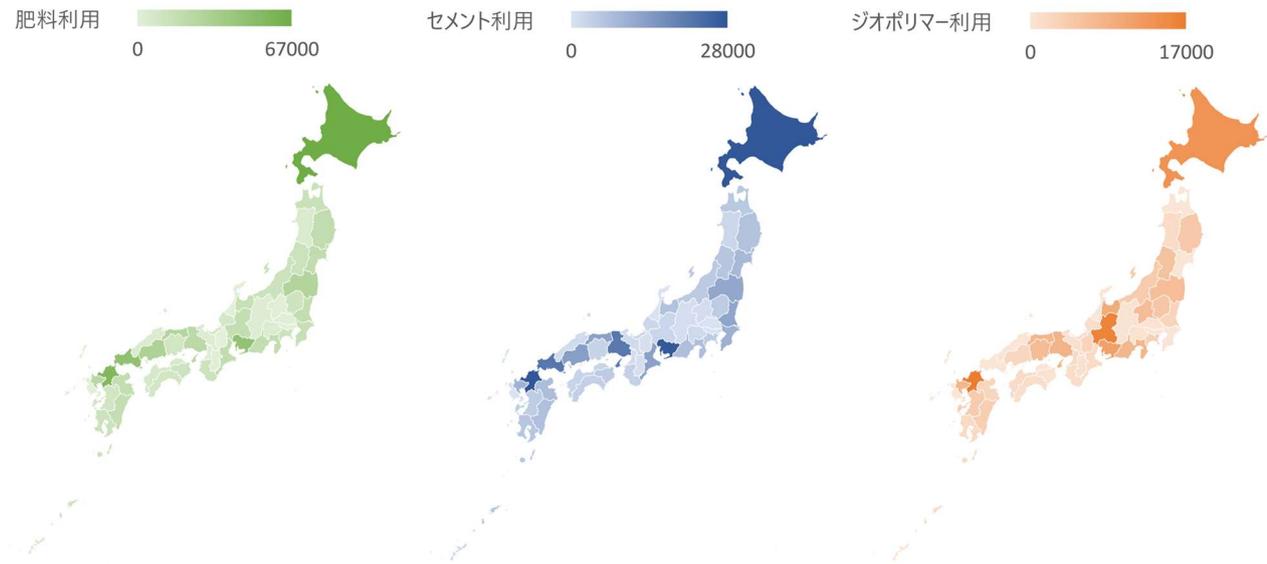


図1-16 各種有効利用用途別の木質バイオマス燃焼灰賦存量マップ

今回アンケート調査及び提供いただいた燃焼灰の主要元素組成を広く発電事業者やリサイクラーに参照してもらい、有効利用を促進してもらうことを期待して、Googleマップの「マイマップ」機能を活用した「木質バイオマス燃焼灰」のデータベースを作成した。国内のFIT・FIP認定を受けた木質バイオマス発電所（資源エネルギー庁が公表している事業計画認定情報 公表用ウェブサイト[経済産業省]）をマイマップ上に落とし込み、発生する燃焼灰の情報を掲載した（図1-17）。現在、それぞれの事業所に確認・許可をいただいている途中であり、完了後、当研究室にて公開予定である。

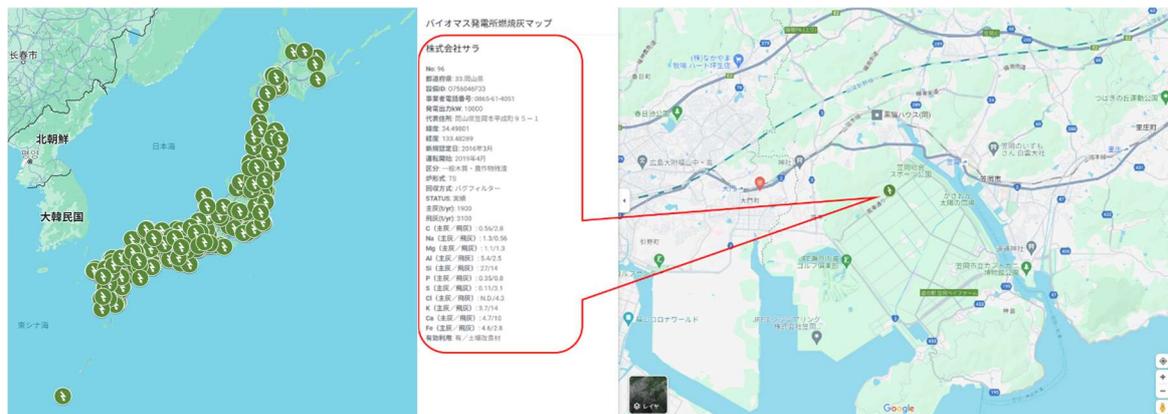


図1-17 木質バイオマス発電施設データマップ

## 5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1では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統計が整備されていないことから、全国的なデータベースを作成することを目指した。研究開始当初のFIT認定施設は191施設であったことから、100施設以上の施設からアンケート回答を得ることを目標に実施し、103施設から回答を得た。このデータを元に、炉形式及び燃料種、発電容量から燃焼灰量を推計する式を開発し、これにより過去から現在までの灰発生量の推移を求めた。木質バイオマス発電施設からの灰発生量は2026年時点で82万t-wet/年に達することを明らかにした。さらに2050年までの灰発生量は、気候変動を考慮したシナリオ（2℃目標）では、160-250万t-wet/年と推計された。これは当初研究目標に挙げていなかった追加的な成果といえる。

次に、得られた燃焼灰（64施設、156試料）に対して組成分析や用途に合わせた試験などを実施し、統計的手法により類型化を実施するとともに、肥料などの基準をベースに全国220施設から排出される燃焼灰に対して、肥料利用、セメント原料利用、サブテーマ2で実施するジオポリマー利用として利用可能と推定される資源量の見積もりを行った。現状では、肥料利用として70万t-wet、セメント原料利用として32万t-wet、ジオポリマー利用として17万t-wetと推定された。最終的にGoogle Map形式でのデータベースを整備した。当初設定した研究目標は達成されたと考えている。

## 参考文献

- ・経済産業省 資源エネルギー庁, 再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法 情報公表用ウェブサイト. <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>, (2024年4月19日閲覧)
- ・Sigvardsen NM, Kirkelund GM, Jensen PE, Geiker MR, Ottosen LM. (2019) Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials. *Resources, conservation and recycling*. Vol.145, pp.230-240. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.034.
- ・前田 典生 (2018) 木質バイオマス燃焼灰有効利用法の開発. 広島大学博士論文.
- ・農林水産省 林野庁, 木質バイオマスエネルギー利用動向調査, [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokusitu\\_biomass/](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokusitu_biomass/), (2024年4月19日閲覧)
- ・池美乃里, 大下和徹, 高岡昌輝, (2020) 国内のFIT認定木質バイオマス発電施設における燃焼灰発生量推計, *廃棄物資源循環学会論文誌*, Vol. 31, pp.169-178. <https://doi.org/10.3985/jjsmcwm.31.169>
- ・一般社団法人 日本有機資源協会, 一般社団法人木質バイオマスエネルギー協会, (2021) 国産バイオマス発電の導入見通し, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/030\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/030_03_00.pdf), (2024年4月19日閲覧)
- ・経済産業省, (2004) 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査報告書. [https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/pdf/150711-3\\_jilc\\_7.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/pdf/150711-3_jilc_7.pdf). (2024年4月19日閲覧)
- ・Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, (2013) An overview of the composition and application of biomass ash. *Fuel (Guildford)*. Vol.105, pp.19-39. doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.001.
- ・Misra M, Ragland K, Baker A, (1993) Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass & Bioenergy*. Vol. 4, No.2, pp.103-116. doi: 10.1016/0961-9534(93)90032-Y.
- ・Tamilselvi Dananjayan, R.R., Kandasamy, P., Andimuthu, R., (2016) Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO<sub>2</sub> sequestration. *J. Clean. Prod.* Vol.112, pp.4173-4182.
- ・浅利美鈴、平井康宏、高月紘、酒井伸一、(2003) 廃木材のリサイクリングに伴う重金属類、PCP、ダイオキシン類及び多環芳香族炭化水素への曝露、*環境化学*、Vol.13、No.1、pp.77-88
- ・S. Rossini Oliva and M. D. Mingorance (2006) ‘Assessment of airborne heavy metal pollution by aboveground plant parts’, *Chemosphere*, Vol. 65, No. 2, pp. 177-182, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2006.03.003.
- ・土質工学会 (編)、土の試験実習書 (1991)
- ・JGMEC: 鉱物 資源マテリアルフロー 2021 28.カリウム (K)
- ・Ngnintedem, D.L.V.; Lampe, M.; Tchakouté, H.K.; Rüscher, C.H. Effects of Iron Minerals on the Compressive Strengths and Microstructural Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Materials. *Gels* 2022, 8, 525. <https://doi.org/10.3390/gels8080525>
- ・経済産業省 資源エネルギー庁, 再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法 情報公表用ウェブサイト. <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>, (2022年6月2日閲覧)

## Ⅱ-2 サブテーマ2「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要旨]

浮遊選鉱プロセスの連続化を構築するため2.7L小型装置と18L中型装置を製造して、処理性能と処理効率を検証した。その結果、回式より未燃炭素除去効率が若干低下したが、未燃炭素量3.0%以下、ニュートン効率0.70以上（中型装置）を達成することができ、10倍の処理効率を確認した。その結果、装置サイズを1/10に縮小することが可能となった。

パイロットプラント製造に向けて各要素開発を実施した。事前攪拌プロセスでは、攪拌時間を3分/回で目標とする製品を製造できることを確認すると共に、運転プロセスの最適化により150kgを47分で処理できることが確認され、事前攪拌処理の目標効率を27%アップすることができた。脱水プロセスに関してはラボ装置を流用したデカンタ式遠心脱水機に投入しても、得られた脱水ケーキの濃度は68.5wt%（目標の91%）にとどまった。しかしながら、脱水ケーキは硬い粘土状となっており、装置の機構上限界の濃度に達したと考えられる。木質バイオマス燃焼灰は石炭灰に比べて粒径が歪で保水しやすい性質を有しているため、石炭灰では達成できた濃度75wt%は、その特性上達成困難であることが判明した。

要素技術を確立した後、北九州エコタウンにて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パイロットプラントを製造した。パイロットプラントで木質バイオマス燃焼灰を対象に運転パラメータの調整を繰り返し、最終的に目標としたテール灰の未燃炭素量3.0%以下、ニュートン効率0.60以上の運転条件に到達した。処理量は当初の目標を20%上回る360t/年を達成できることを確認した。更に、燃焼灰のスラリー濃度と処理流量をどちらも1.2倍にすることで処理能力向上の相乗効果が期待できる見通しを得た。パイロットプラントの運転条件を最適化すれば、木質バイオマス発電ボイラーの主力である5MW級の燃焼灰500t/年を処理できる実機プラントとしての可能性を見いだすことができた。

パイロットプラントの処理費は、昨今の電気料金の高騰を加味しても7,858円/tとなり当初目標の2%減で達成した。

今回、パイロットプラントで改質した製品であるMCASの含水率は31.5%であり、常に投入燃焼灰量に対して水を31.5%補給する必要がある。実証した木質バイオマス燃焼灰は重金属の溶出量は排水基準を満たしていたので、処理水の循環利用が最も安価で簡便な手法であることを見出した。排水処理する場合は、排水中懸濁固形物に重金属が含まれているので、除濁膜（UF膜）でろ過した後、排水可能であることを示した。今回使用した木質バイオマス燃焼灰に対してUF膜による実発水通水実験を行ったところフラックスの低下が無く、良好に処理が可能であることを確認した。

これらの実験データからタンク形状等の課題を詳細に抽出してそれを改善した1ライン3,000t/年で3ラインの実機プラントの設計原案を構築した。

木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された4種類のMCASに対して力学特性を評価する圧縮強度試験、静弾性係数試験および耐久性を評価する乾燥収縮試験を実施して、改質木質バイオマス燃焼灰を建築用コンクリート混和材として使用するために建築技術性能評価認定を得るための基礎データを取得した。

サブテーマ2では、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を検証して、本改質技術の社会実装のための課題と解決の対応策を示すことができた。

### 1. サブテーマ2 研究開発目的

サブテーマ2では、木質バイオマス燃焼灰のリサイクルシステムの実用可能性を検証した。従来技術において燃焼灰中の未燃炭素を分離する浮遊選鉱プロセスは回式であった。社会実装を想定し、連続式を開発して同容積で10倍の製造量を実現する装置（処理量3000t/年）を設計することを最終目標とした。本研究期間では、その前段階となる1/10スケールのパイロットプラントを設計製造し、その分離能力、処理速度およびランニングコストを検証することを目的とした。装置の分離能力については、MCAS製品となるテール灰の未燃炭素量およびニュートン効率で評価した。また、併せてプラントの排水処理、および製品として得られるMCASのセメントコンクリートへの適用性まで検討した。

## 2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	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 実施機関	北九州市立大学、日本アイリッヒ株式会社
サブテーマ2 目標	<p>①木質バイオマス燃焼灰発生元に対し、その発生量に見合う年間9,000tの処理能力を有するシステム（9,000t/yを3ラインで処理する。1ライン3,000t/y）の設計原案を構築する。先行研究で検証が終了しているラボ装置（処理量28.8t/年）に対して連続式を開発して同容積で10倍の製造量を実現する装置（処理量300t/年）を製造し、実機の1/10のパイロットプラントとして改質性能を確認して実機化への基礎データを収集する。</p> <p>②木質バイオマス燃焼灰の処理費用は概ね16,000円/t前後であることから、パイロットプラントでの処理費の目標は8,000円/t以下とし、現状の処理費の50%以上を削減するものとする。</p> <p>③事前攪拌処理の攪拌時間が短いほど装置をコンパクト化することができ、イニシャル、ランニング、メンテナンスコストを低減できるので、パイロットプラントの混練機による攪拌時間を3分/回として、150kg/hの事前攪拌装置を開発する。</p> <p>④浮遊選鉱処理後のテール灰の濃度は10wt%程度であり、ジオポリマーコンクリート用活性フィラーとしては75wt%以上に脱水する必要がある。そこで、デカンタ式遠心脱水機をベースに1時間以内で150kg（乾粉ベース）のテール灰を濃度75wt%以上のケーキ状に脱水できることを確認する。</p> <p>⑤浮遊選鉱水に溶出した重金属に関して安価で簡便な排水処理方法を提案する。</p> <p>⑥木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された数種のMCASに対して性能試験を実施し、建築用コンクリート混和材として使用するために建築技術性能評価認定を得るための基礎データを収集する。</p>

## 3. サブテーマ2 研究開発内容

### 3.1 連続式浮遊選鉱装置の開発

（浮遊選鉱プロセスの検討）

浮遊選鉱プロセスの連続化の構築を目的に、まず、プロトタイプ装置を作成し、浮遊選鉱槽の形状や運転条件をパラメータとした実験を行い、その分離能力の改善について検討した。今回作成したプロトタイプ装置は、容量（分離処理が行われる水槽の容積）が2.3Lの小型および18Lの中型の2種類である。プロトタイプ装置の概要を図2-1、外観を写真2-1、2-2に示す。両者とも、石炭灰の未燃カーボン除去を目的に開発された特許第4802305号（浮遊分離装置及び方法並びにその利用製品の製造方法）に基づく回式の従来装置を連続的に改修した試作機である。処理時間

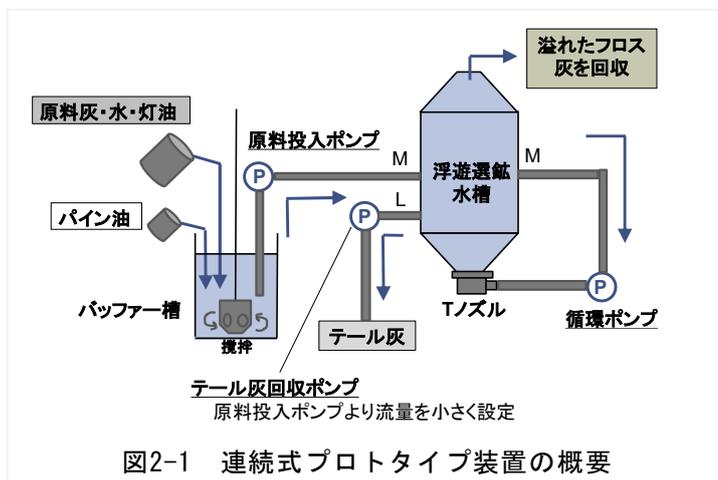


図2-1 連続式プロトタイプ装置の概要

の短縮のため、分離処理と同時に原料（燃焼灰、水、灯油およびパイン油を予め混合・攪拌した濃度10wt%のスラリー）の投入およびテール灰（製品）の取出ができる連続式の機構が組み込まれた。浮遊選鉱は上下にテーパーを設けられた円筒形の水槽内で施される。水槽に取り付けられたマイクロ（MB）ノズルは、旋回流によって気泡にせん断力が加えられる機構（従来装置のMBノズルはベンチュリー管内を通す機構）である。循環ポンプからMBノズルに水槽内のスラリーを循環供給し、同時に外気からMBノズルに空気を自吸させて水槽内にMBを発生させた。原料の投入およびテール灰の取出には、流量を操作できる送液ポンプを用いた。テール灰の取出速度を相対的に遅くすることで、解放された水槽の上部から未燃カーボンを多く含むフロスをMBとともに溢出させて分離した。また、原料の投入を途切れさせないため、約1分間の投入量の原料をバッファ槽で受けてから水槽に投入し続けた。



写真2-1 連続式プロトタイプ装置（小型2.3L）



写真2-2 連続式プロトタイプ装置（中型18L）

原料に使用した燃焼灰は、石炭フライアッシュ（非売電企業のプラント産）のFA-N、FA-P、FA-W、木質バイオマス混焼フライアッシュのFA-Hであり、これらの処理前の強熱減量は全て10%～25%の範囲にあった。燃焼灰、水および灯油による事前攪拌にはアイリッヒミキサーR02型を用い、3,000 rpmで3分間の攪拌を施した。灯油およびパイン油の添加率（燃焼灰に対する質量比）は、浮遊選鉱後に得られるテール灰の強熱減量が良好な条件で2%～5%になるよう、燃焼灰ごとに調整した。

最適な運転条件の検討を目的とし、①原料の投入速度（水槽内の原料スラリーの平均滞留時間）、②原料の投入速度に対するテール灰の取出速度の割合（テール灰とフロスの発生割合）、③浮遊選鉱水槽内のMBノズルの取付位置、④水槽の高さ、⑤水槽内への原料投入位置、⑥循環ポンプへの吸込位置、⑦水槽からのテール灰取出位置、⑧水槽内の渦流の消失・強化機構の有無、⑨水槽内の内蓋の有無および⑩内底の有無、⑪装置スケール（2.3L vs 18L）を操作し、装置の分離能力に与える影響を検討した。

実験では燃焼灰の浮遊選鉱を実施した。定常運転に達した後に排出されたテール灰を試料とし、その強熱減量および回収率を測定した。テール灰の強熱減量は、975℃に強熱したときの質量変化（JIS A 6201に準拠）から導出した。テール灰の回収率は、テール灰の濃度（105℃の乾燥器に24時間静置した後の質量変化から算出）を原料スラリーの濃度で除した値に、テール灰の取出速度と原料スラリーの投入速度の比を乗じて導出した。

また、プロトタイプ装置での実験結果を活用し、数値流体力学（CFD解析）モデルを検討した。実験結果に基づき水の流れ状態に重要な影響を与える微細気泡の気泡径分布および導入量のパラメータをキャリブレーションにより決定した。

（事前攪拌プロセスの検討）

事前攪拌プロセスの確立を目的に、先ず、容量2.7Lのアイリッヒミキサー（写真2-3）を用いた際の運転条件を検討した。試験対象の木質バイオマス燃焼灰に



写真2-3

対し、事前攪拌時間、薬剤添加率および薬剤添加方法を実験因子とした検討を行い、後述のパイロットプラントに組み込まれる事前攪拌プロセスを設計するための基礎データとした。装置のスケールアップにおいては、混合工具の周速と形状を合わせることでほぼ同じ処理が可能であるなどの経験則（アイリッヒ社の実績に基づく）を適用することとした。

（脱水プロセスの検討）

テル灰の脱水プロセスの最適運転パラメータ究明のため、デカンタ式遠心分離機にて表2-1の運転条件での脱水濃縮性評価試験を実施した。

これらの検討で得られた知見を、後述のパイロットプラントの設計の基礎資料とした。

表2-1：遠心分離機運転条件

型式	MD-10形
回転数	2210 ～ 3800 rpm
遠心効果	500 ～ 1500 G
差速	10 ～ 28 rpm
処理流量	0.4 m <sup>3</sup> /h(目標値)

### 3.2 パイロットプラントの設計・製作および能力検証

実機を提案する前段階として、設計処理速度150kg/hのパイロットプラントを設計・製作した。今回製作したパイロットプラントでは、原料となる燃焼灰が事前攪拌プロセス、浮遊選鉱プロセス、脱水プロセスの3工程を経て改質され、そのうちの浮遊選鉱プロセスでは連続処理が施される。パイロットプラントの容量（処理速度）は、これまでの検討に用いられたラボ装置の約8～10倍となる。設計においては、主に3.1～3.5の検討で得られた知見を活用した。なお、脱水プロセスについては、今回は予算の関係でラボ装置のものを流用した（貯槽容量だけのスケールアップとなった）。脱水機のスケールアップ実施の際は、処理量に応じて既存のデカンタ式遠心分離機のレパートリーの中から選定することになる。

製造されたパイロットプラントの能力を検証した。装置の評価項目は、製造量（目標：300t/y機）、テル灰の未燃炭素量およびニュートン効率である。申請時点で両者の目標値を設定していなかったが、テル灰の未燃炭素量は3.0%以下（JIS A 6201で一番厳しいI種に相当）、ニュートン効率は0.60以上を目標とした。なお、ニュートン効率は研究開始時点で目標に挙がっていなかったが、アドバイザーからのアドバイスに従って、独自目標に加えた。試験運転の過程で原料に応じた最適な運転パラメータを探索し、MCASの処理速度と品質（未燃炭素量）との関係、および装置のスケールアップ則についても検討した。最後にパイロットプラントの運転条件をもとに改質処理費用を試算し、その額が目標の8,000円/t以下となることを確認した。

### 3.3 連続式実機プラントの設計原案の作成

今回製作したパイロットプラント（300t/年）の試験結果および試験運転を通じて明らかになった課題や課題解決の手懸りをもとに、1ライン3,000t/年の設計原案を作成した。

### 3.4 排水処理方法の検討

遠心分離装置からは脱離液が排液として排出される。この脱離液は元の燃焼灰に由来する重金属等の排水規制成分が含有し、そのままでは公共用水域に排水できない。木質バイオマス燃焼灰改質パイロット試験装置で原料として使用した燃焼灰（混焼灰）の排水規制対象有害物質元素の分析を行い組成比を調べた。さらに、運転中のバイオマスボイラ燃焼灰改質パイロット装置の遠心分離脱離液として排出された実排水（2023年11月10日採取）について、限外濾過(UF)膜で濾過し、溶解性物質測定用試料を得た。この中の元の燃焼灰に含まれていた排水規制対象有害物質の濃度を調べることで、木質バイオマス燃焼灰改質システム脱離液中の溶解性の有害物質濃度を明らかにし、これにより、固形物として燃焼灰が含まれるときに想定される遠心分離脱離液中の有害物質濃度を試算した。固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の関係および固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の一律排水基準値との比の関係を明らかにすることで、フロス灰と排水中の重金属含有量および溶出量のマッピングを実施した。

今回の木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水については、懸濁固形物を除去することにより、排水基準を満足することが明らかになったものの、将来的には、溶解性有害物質が多いバイオマスボイラ燃焼灰を原料とする可能性があることから、水バランス調査による排水水量を最適

化することで、循環水利用の上限の試算を試みた。

効率とコストを考慮した排水処理方法の検討として、今回、木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水については、懸濁固形物を除去することにより、排水基準を満足することが明らかになったことから、排水中懸濁固形物（SS; suspended solid）を除去する方法について検討した。本検討では、元の燃焼灰に由来する重金属等の排水規制成分が含有し、そのままでは公共用水域に排水できない本システムの廃液（遠心分離装置脱離液）について、公共用水域に排水することを可能にするための効果的な排水処理方法を検討した。

さらに、当初の目標を超えた追加の検討として、将来は、改質燃焼灰中の溶出性有害物質濃度を低減させるために水洗を積極的に実施することやゼロリキッド排出（ZLD; zero liquid discharge）にすることの必要性が生じる可能性があり、これらのときには溶解性有害物質を水から分離するシステムとする必要があることから、本実排水について、ナノ濾過膜による処理性能を測定した。

### 3.5 MCASの製品評価

バイオマス由来のMCASを改質し、セメントコンクリートへ混合した供試体を作成し、その圧縮強度（JIS A 1108）、静弾性係数（JIS A 1149）および乾燥収縮ひずみ（JIS A 1129-2、材齢7日から乾燥）を測定した。供試体には4種類のMCAS（A灰～D灰）の他に、普通ポルトランドセメント、海砂、砕石および高性能AE減水剤を使用した。使用したMCASの物性は表2-2の通りである。供試体の調合は表2-3に示す通り、単位水量を180kg/m<sup>3</sup>、水粉体比を50%で一定としたうえで、普通ポルトランドセメントの15%もしくは30%をMCASに置換した。

表2-2 使用したバイオマス由来のMCAS

物性	A灰	B灰	C灰	D灰
密度[g/cm <sup>3</sup> ]	2.22	1.91	1.99	2.09
強熱減量	3.02%	8.64%	15.90%	9.92%
pH	10.67	11.44	10.62	10.72
ブレーン比表面積[cm <sup>2</sup> /g]	4346	6470	7346	6848
未燃炭素量(塩酸処理後の強熱減量)	1.85%	3.72%	1.48%	0.94%

表2-3 供試体の調合

調合	W/B	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					
	(%)	W	B	C	BFA	S	G
NN	50	180	360	360	0	805	945
A15				306	54	786	945
A30				252	108	767	945
B15				306	54	776	945
B30				252	108	746	945
C15				306	54	779	945
C30				252	108	752	945
D15				306	54	782	945
D30				252	108	759	945

## 4. サブテーマ2 結果及び考察

### 4.1 連続式浮遊選鉱装置の開発

(浮遊選鉱プロセスの検討)

小型(2.3L)のプロトタイプ装置における実験条件ごとのテール灰の強熱減量および回収率を図2-2に示す。小型のプロトタイプ装置では主に装置の形状について検討し、以下の知見を得た。これらの知見は、後のパイロットプラントの設計のほか、MCAS製造の特許(特開2024-30281)(成果番号48)中の発明を実施するための形態に反映された。

1. MBノズルを水槽の中に沈めて取り付けることで全般的に安定した分離処理が可能になった。この場

合、テール灰は水槽の一番下から取り出すことになる。

2. フロスとして分離したい比較的軽い成分は、MBとともに、MBノズルから吐き出される上昇流に乗ってフロス溢出口付近にまで到達して滞留する。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るとテール灰の強熱減量が悪化した。
3. テール灰として取り出したい比較的重い成分は、MBと結びつかないため、装置の外周付近を下降する。このため、テール灰は水槽下部の外周もしくは一番下から取り出すことになる。また、水槽内で下降する成分を選別するための内底を設けることで分離能力が向上した。
4. 分離能力が最適となる、MBノズル吐出口からフロス溢出口までの距離（小型では約300 mm）が認められた。この距離は使用するMBノズルの吐出速度によって変動すると考えられる。
5. 水槽内に投入された原料が直ちにMBに晒されるよう、原料を水槽の水平断面の中心から投入することで良好な処理効率が得られた。
6. 循環ポンプへの吸込口の取付け位置は、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ノズルの直下の2種類で効率よく処理することができた。テール灰に対して2回以上の繰り返し処理を施さない場合、後者の位置で効率が勝った。
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・強化しても処理効率は向上しなかった。

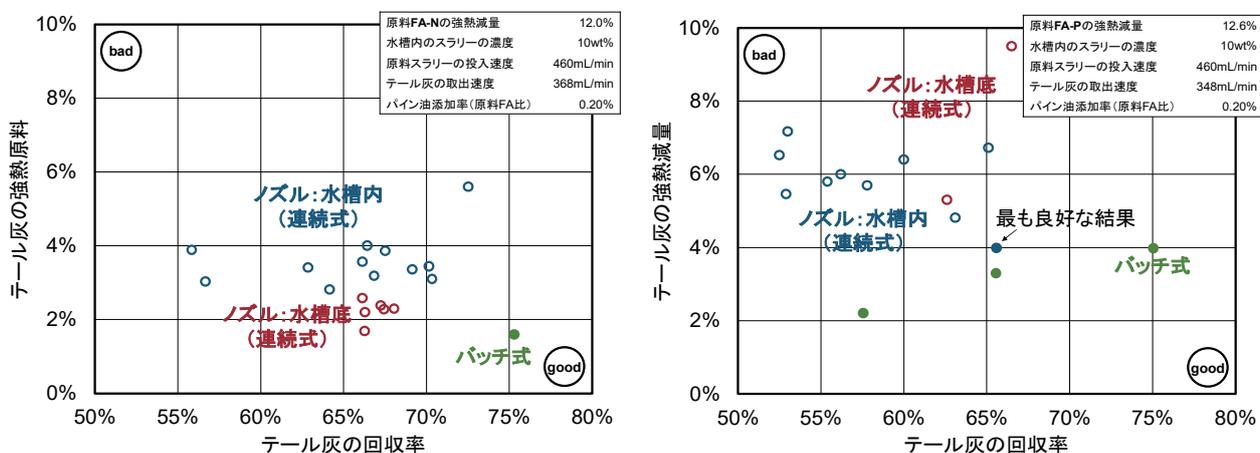


図2-2 小型（2.3L）プロトタイプ装置における実験結果（左：原料FA-N、右：原料FA-P）

プロトタイプ装置の実験結果をベースに、数値流体力学(CFD)モデルを検討した。マイクロバブル発生装置から発生する気泡の設定のために実験結果に基づきキャリブレーションした。実験では灰を投入せず清水でマイクロバブル生成ラインを循環運転した後、マイクロバブル生成ラインを停止し、その後の水面の低下の経時変化を測定した。液面の低下が完了した時点で気泡のボリュームフラクションがゼロであるとして、水面低下の経時変化から気泡ボリュームフラクションの経時変化を計算した。この実験と同じ運転をCFD解析でも実施し、気泡のボリュームフラクションの経時変化が実験結果に最も近くなるように気泡径を決定した。気泡は気泡径を3種類としたとき、その気泡径を小さい方から順に、 $48 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ および $d3 = 220 \mu\text{m}$ 、各気泡の割合をそれぞれ0.034、0.150および0.816としたときに実験結果に最もよく一致した。測定結果とCFD結果の気泡ボリュームフラクション経時変化を図2-3に示す。気泡が抜けていく様子を表す気泡の合計ボリュームフラクション分布の経時変化を図2-4に示す。CFD計算結果はボリュームフラクションの変化を良好に再現したことから、妥当な気泡径および分配の設定ができたと考えられる。

小型のプロトタイプ装置で比較的良好だった3つの形態をベースに、相似形で2倍（体積8倍）のスケールアップをした中型（18L）のプロトタイプ装置を作成した。中型のプロトタイプ装置で分離処理した際のニュートン効率を、小型の結果と併記して図2-5に示す。装置のスケールが大きくなることでニュートン効率が0.70を超えるまで向上した。また、中型のプロトタイプ装置で改質されたテール灰の強熱減量は、最終的に選定された形態で1.9%~2.7%の範囲にあり、製品品質も問題ないことが伺えた。装置のスケールアップによってニュートン効率が向上した理由として、分離槽内での乱流が抑制されたこと、原

料が投入されてから排出されるまでの距離が2倍になったこと、などが考察される。最終的にパイロットプラントに採用された中型プロトタイプ装置の分離槽の設計図を図2-6に示す。

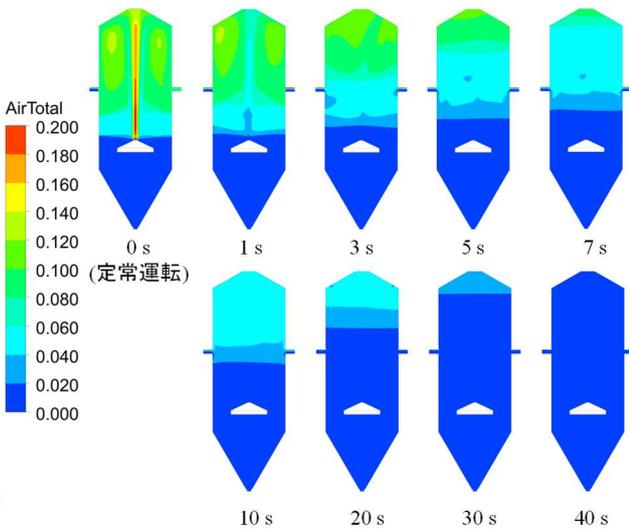
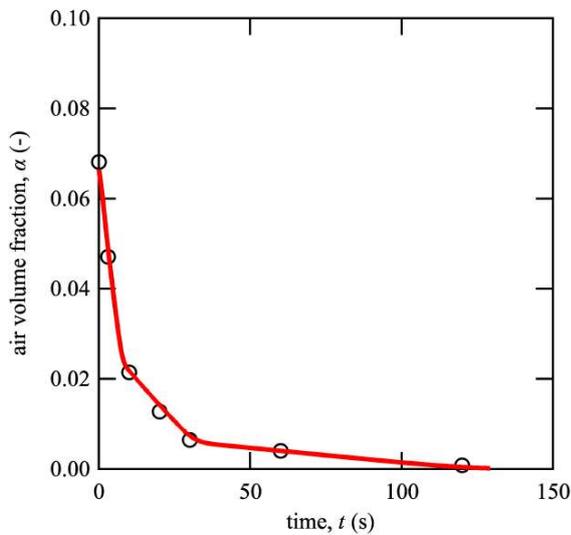


図2-3 気泡ボリュームフラクションの経時変化

図2-4 気泡ボリュームフラクション分布の経時変化

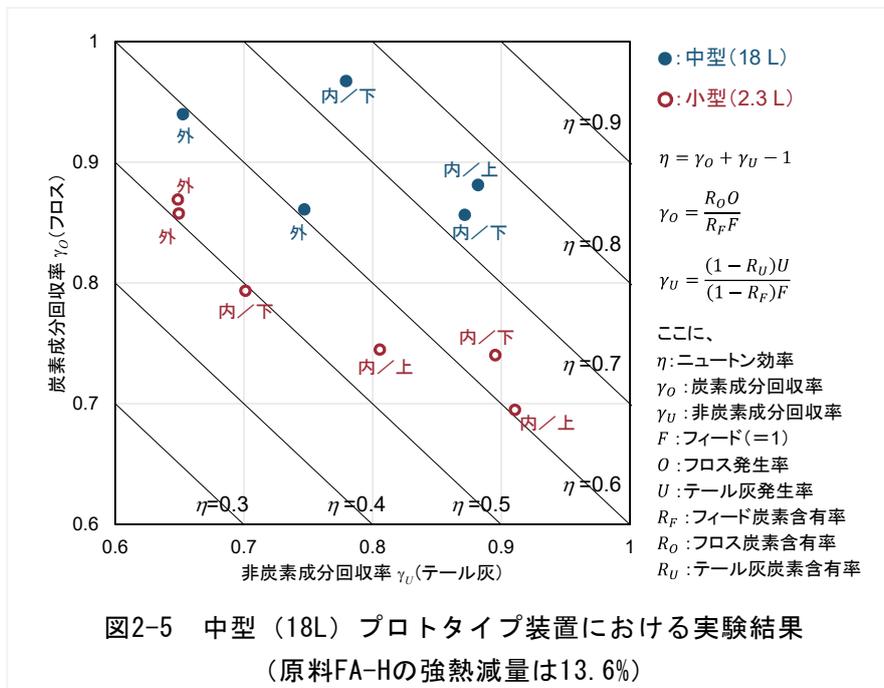


図2-5 中型 (18L) プロトタイプ装置における実験結果  
(原料FA-Hの強熱減量は13.6%)

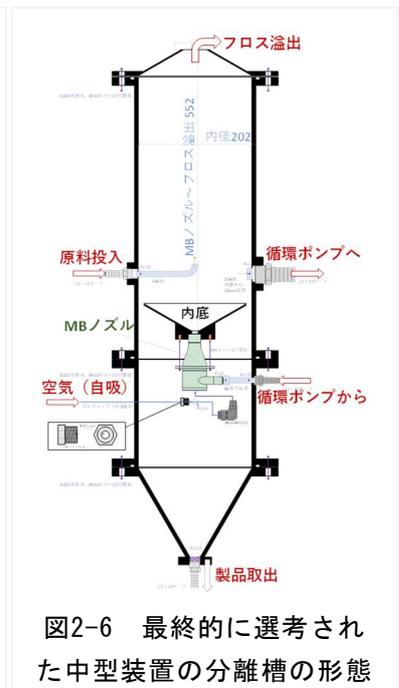


図2-6 最終的に選考された中型装置の分離槽の形態

(事前攪拌プロセスの検討)

ラボ装置に併設された事前攪拌ミキサ (R02) を用い、事前攪拌時間、薬剤添加率および薬剤添加方法について検討した。バイオマス灰はこれまでのフライアッシュと比較して、原灰に含まれるカーボン量が多いことに加え、浮遊選鉱処理でのカーボンの除去率が低い。目標とするMCAS未燃カーボン量2%を達成するには、「灯油5%×混合3分」または「灯油3.5%×混合6分」のいずれかが必要となる結果であった(図2-7参照)。攪拌方法、灯油添加方法等を見直し、灯油使用量の低減および混合時間の短縮を図ることとした。さらに、ラボ装置を用いて灯油やパイン

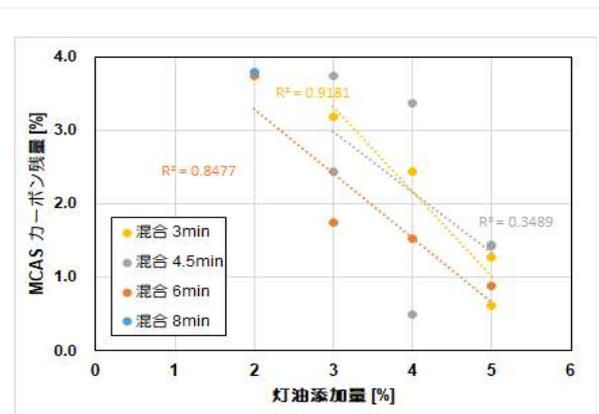


図2-7: 灯油添加量とカーボン残量との関係

油の乳化処理をおこないその効果を評価した。混焼灰について、添加剤による未燃炭素除去率の向上効果を確認できた。専焼灰については、本試験での添加剤乳化効果は明確には確認できなかった。

また、ラボ装置の実績をもとにパイロットプラントの事前攪拌プロセスの装置（ミキサ）の仕様を選定した。事前攪拌装置の仕様を表2-4、写真を写真2-4、混合工具および混合パンの概略図を図2-7に示す。

表2-4：事前攪拌装置の仕様

	ラボ装置	パイロットプラント
機種	R02	R05T
呼び容量	～5L/バッチ	～40L/バッチ
混合工具型	スター型（材質SUS304）	スター型（材質SUS304）
混合工具径	φ138mm	φ280mm
混合工具回転数	3600rpm（実績）	1780rpm（計画）
混合パン	内径：φ235mm 材質：SUS304、安全カバー付	内径：φ550mm 材質：SUS304、安全カバー付
混合時間	3分	3分
実投入量	2.0～2.5kg（原料のみ）	25kg（原料のみ）
主電源	3相×220V×60Hz	3相×220V×60Hz
その他	—	原料接粉部材質SUS304,半屋外仕様



写真2-4：事前攪拌装置（R05T）

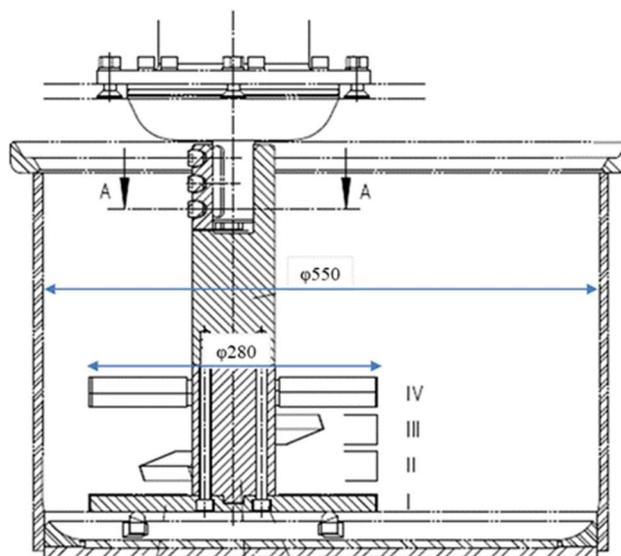


図2-8：混合工具および混合パン（R05T）

（脱水プロセスの検討）

脱水プロセスで用いられるデカンタ式遠心分離機の性能を評価した。

まず、ラボ装置のMD-10型デカンタ式遠心脱水機を使用しフライアッシュ（JISⅡ種）と木質バイオマス燃焼灰（混焼灰）の2種類の燃焼灰スラリーについて、遠心効果、差速、処理流量の運転パラメータが、脱水濃縮能力に与える影響を検討した。（2023/9/14, 15）

結果、フライアッシュ（JISⅡ種）スラリーの脱水濃縮後の固形分回収率が96.2%、含水率が25.0%（固形分回収率，含水率：95.4%、24.7%、99.3%、24.8%、93.5%、26.5%、93.7%、24.9%、98.2%、24.3%、97.2%、24.8%）で、木質燃焼バイオマス燃焼灰（混焼灰）スラリーの脱水濃縮後の固形分回収率が96.0%、含水率が32.9%（固形分回収率，含水率：90.3%、32.8%、98.0%、33.4%、99.8%、32.9%）となり、木質バイオマス燃焼灰スラリーの脱水濃縮については、目標としていた含水率25%以下に到達できていないが、そのなかでも最適と推察された運転条件を表2-1のように決めパイロットプラントにおいて脱水濃縮評価試験をおこなうこととした。

テール灰の脱水ケーキの含水率を図2-9に示す。含水率は、32.4～35.4wt%の範囲（平均33.5wt%）であ

った。できるだけ高い処理量とSS回収率でケーキの含水率を低く抑えられる運転条件として表2-5を推測し、これをパイロットプラントの運転パラメータとして採用した。

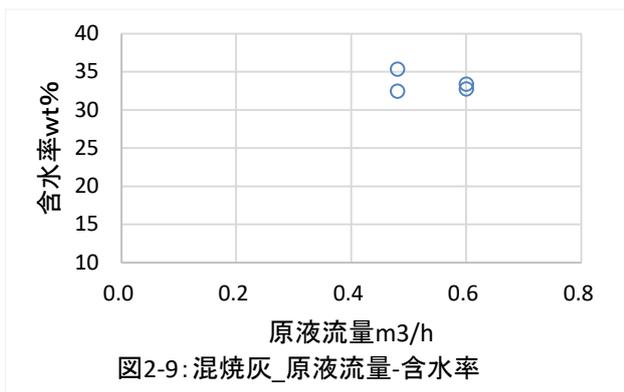


表2-5 : パイロットプラントの運転パラメータ

遠心効果	1000～1500G
差速	12～16min-1
処理量（流量）	0.4～0.6m³/h
原液SS濃度	10%

#### 4.2 パイロットプラントの設計・製作および能力検証

（設計・製作について）

ラボ装置の約10倍となる処理量150kg/hのパイロットプラントを設計・製作した。パイロットプラントの外観を写真2-5、主な仕様を表2-11、設計図を付録1に示す。パイロットプラントは、前述のプロトタイプ装置を相似形でスケールアップしたものである。

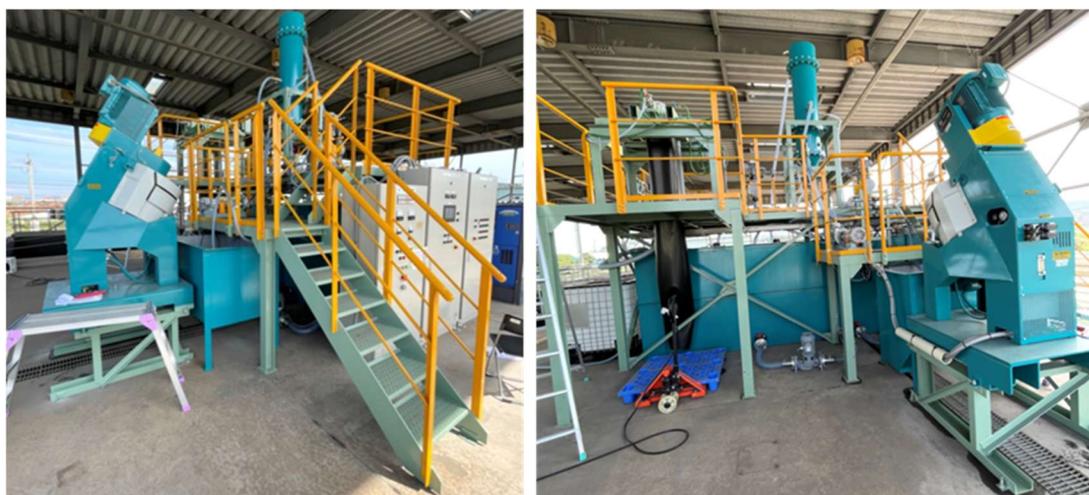


写真2-5 : パイロットプラントの外観

表2-11 : パイロットプラントの仕様（設計値）

処理量	300ton/年（250日/年×8h/日として）
時間処理量	150kg/h
スラリー内容物	燃焼灰、灯油、パイン油、水
スラリー濃度	10wt%
スラリー比重	1.05～1.10kg/L
供給量	1,500L/h（25L/min）

（運転パラメータの探索および装置の能力について）

パイロットプラントの試験運転の実績を表2-7に示す。バイオマス混焼灰の改質処理で運転パラメータの調整を繰り返し、最終的に目標としたテール灰の未燃炭素量3.0%以下、ニュートン効率0.60以上の運転条件に到達した。事前攪拌プロセスにおいては、ラボ試験の経験に基づいた運転パラメータでテール灰の強熱減量（未燃炭素）が目標に到達しなかったため、事前攪拌をおこなうアイリッヒミキサー攪

拌速度と混合容器の速度を当初の計画より増加させた。結果、強熱減量（未燃炭素）が目標の3.0%を下回った。攪拌時間については全試験で3分としている。パイロットプラントのニュートン効率 $\eta$ は、0.7を超えた中型（18L）プロトタイプ装置からスケールアップとともに悪化した。しかしながら、パイロットプラントは研究期間内での実験の機会が限られており、今後、試験運転を繰り返して最適な運転パラメータを探索することで、悪化したニュートン効率が改善されることが期待される。なお、バイオマス専焼灰については、混焼灰と同じ運転パラメータでテール灰の強熱減量（未燃炭素）を3.0%以下とすることができなかった。更なる運転パラメータの究明が必要な状況である。

表2-12 パイロットプラント（150L）の試験実績

No.	原料 強熱減量	水槽 形状	取出 投入	平均 滞留時 間, min	原料 スラリー 濃度	灯油 添加率	パイン油 添加率	テール灰 強熱減量	テール灰 濃度	テール灰 発生率	フロス 強熱減量	フロス 濃度	フロス 発生率	ニュート ン効率 $\eta$
0831-1	6.02%	内/上	0.7	10	10%	1.0%	0.3%	3.79%	10.8%	79.4%	17.29%	9.1%	20.6%	0.36
0831-2	6.02%	内/上	0.6	10	10%	1.0%	0.3%	3.42%	10.3%	53.1%	15.92%	9.2%	46.9%	0.37
0921-1	6.02%	内/上	0.7	10	10%	1.0%	0.3%	3.01%	3.1%	85.7%	29.70%	6.0%	14.3%	0.51
0921-2	6.02%	内/下	0.7	10	10%	1.0%	0.3%	4.73%	7.2%	89.5%	20.38%	6.2%	10.5%	0.25
0921-3	6.02%	内/下	0.8	10	10%	1.0%	0.3%	5.15%	7.3%	95.5%	24.16%	4.4%	4.5%	0.15
1013-1	6.02%	内/上	0.7	10	10%	0.5%	0.3%	<b>2.94%</b>	5.4%	84.6%	30.81%	4.2%	15.4%	0.54
1013-2	6.02%	内/上	0.7	10	10%	0.5%	0.3%	<b>2.67%</b>	6.3%	83.2%	28.43%	4.8%	16.8%	0.55
1102-1	6.93%	内/上	0.7	10	20%	0.5%	0.1%	3.38%	16.3%	74.6%	24.70%	14.2%	25.4%	0.50
1102-2	6.93%	内/上	0.7	10	20%	0.5%	0.2%	3.33%	16.3%	77.6%	21.81%	12.5%	22.4%	0.46
1102-3	6.93%	内/上	0.7	10	20%	0.5%	0.3%	3.25%	16.6%	73.7%	19.28%	13.6%	26.3%	0.45
1110-1	6.93%	内/上	0.7	10	10%	0.5%	0.05%	3.69%	7.7%	69.2%	30.66%	6.1%	30.8%	0.54
1110-2	6.93%	内/上	0.7	10	10%	0.5%	0.05%	3.43%	8.1%	66.4%	31.55%	6.4%	33.6%	0.56
1122-1	6.93%	内/上	0.7	10	12.5%	0.5%	0.05%	3.93%	7.7%	83.4%	31.54%	5.8%	16.6%	0.49
1122-2	6.93%	内/上	0.7	10	12.5%	0.5%	0.05%	3.94%	8.2%	84.6%	32.46%	6.3%	15.4%	0.49
1122-3	6.93%	内/上	0.7	10	12.5%	0.5%	0.05%	3.49%	8.3%	86.8%	29.37%	5.9%	13.2%	0.46
1213-1	6.93%	内/上	0.7	15	16%	0.5%	0.05%	5.73%	11.9%	79.4%	28.06%	8.6%	20.6%	0.39
1213-2	6.93%	内/上	0.7	15	16%	0.5%	0.05%	4.08%	11.8%	56.5%	21.16%	6.8%	43.5%	0.41
1213-3	6.93%	内/上	0.7	15	16%	0.5%	0.05%	3.76%	11.8%	68.2%	22.08%	7.3%	31.8%	0.46
1227-1	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.2%	3.23%	10.3%	80.4%	32.85%	8.9%	19.6%	0.57
1227-2	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.2%	3.05%	10.1%	86.2%	39.02%	9.4%	13.8%	0.58
0110-1	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.3%	<b>2.62%</b>	10.1%	74.9%	34.08%	9.1%	25.1%	<b>0.63</b>
0110-2	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.3%	<b>2.56%</b>	10.3%	74.6%	27.24%	9.2%	25.4%	<b>0.58</b>
0117-1	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.3%	3.34%	10.2%	70.7%	39.38%	11.0%	29.3%	<b>0.62</b>
0117-2	10.92%	内/上	0.7	10	12%	1.0%	0.3%	<b>2.72%</b>	10.1%	62.4%	40.59%	12.4%	37.6%	<b>0.63</b>
0117-3	10.92%	内/上	0.7	6	12%	1.0%	0.3%	<b>2.65%</b>	12.2%	62.1%	37.37%	12.6%	37.9%	<b>0.61</b>

ラボ装置を流用したデカンタ式遠心脱水機は、本来1時間で終わる処理をその10倍の時間をかけて処理する（実際は余裕を持たせてラボ装置を選定したため、10倍まで行かず、5~6倍である）。脱水プロセスについては、パイロットプラントの計画処理能力(150kg/h)に見合う動作を確認できなかったため、相当機をメーカーにて選定することとした。脱水能力の検証は、ラボ装置とパイロットプラントに設置したときの2回の検証をおこなった。脱水プロセス後のテール灰のスラリー濃度は、石炭灰（フライアッシュ）の脱水実績である75%を目標としていた。しかしながら、濃度10wt%のスラリーを6~8L/minの流量でデカンタ式遠心脱水機に投入しても、得られた脱水ケーキの濃度は68.5wt%（目標の91%）にとどまった（2024/3/5）。しかしながら、脱水ケーキは硬い粘土状となっており、装置の機構上限界の濃度に達したと考えられる。これ以上の脱水には熱エネルギーが必要となるため、省エネおよび経済性の観点から、70%を超える濃度まで脱水するのではなく、今回得られた限界の濃度である70%弱程度のMCASの濃度を前提にジオポリマー製造時の配（調）合を検討することが必要と考えられる。

#### （処理量について）

濃縮脱水プロセスを除き、パイロットプラントが目標の300t/年(150kg/h、250日/年 x 8h/日)の処理能力を有していることを確認した。回式とした事前攪拌プロセスについては、47分の運転時間で150kg（25kg/回x6回）の燃焼灰を処理できることを、表2-13の通り試験運転で確認した。連続的に改良した浮選処理プロセスについては、濃度12wt%の燃焼灰スラリーを25L/minの速度で投入する運転条件で、テール灰の未燃炭素量およびニュートン効率の目標を満足しつつ処理できたことを確認した。12wt%の燃焼灰スラリー濃度は計画を上回る設定であったが、燃焼灰3では、計画通り10wt%で運転したときよりもテ

ール灰の未燃炭素量が低減された。この濃度で運転した場合、浮遊選鉱プロセスの処理能力は目標の300 t/年の120%相当となる。一方、濃度を20%とした運転では、テル灰の強熱減量が3.0%を超える水準まで悪化した。ラボ装置では濃度10%で最もテル灰の強熱減量を低減できていたため、最適な燃焼灰スラリーの濃度は浮遊選鉱槽のサイズに応じて変動することが考察される。なお、処理流量を30L/minとした運転条件においてもテル灰の未燃炭素量が目標の3.0%を下回っており（実験実績有）、燃焼灰のスラリー濃度と処理流量をどちらも1.2倍の処理能力向上で360t/年の処理が期待できる（推定）。さらに、運転条件を最適化して24時間運転を可能にする仕様を確定したので、最大1080t/年の処理効率を達成できる可能性を示した（推定）。

#### （処理費について）

パイロットプラントにおける燃焼灰の改質処理費の試算結果を表2-14に記す。研究着手時に15円/kWhの電気料金を想定していたが、今般の電気料金上昇を考慮して見直した。実機プラントが原料の排出元となる発電所に併設されることを想定し、今回の試算では一般木質バイオマス・農産物の収穫に伴って生じるバイオマス固体燃料によるバイオマス発電10,000kW未満の2023年度の買取価格（24円/kWh）を電気料金の単価とした。実機は自動運転による無人操業を前提としているので、処理費に人件費は含まなかった。最終的にパイロットプラントの改質処理費は燃焼灰1tonあたり7,858円となり、目標（8,000円/t）を2%減で達成した。

表2-14 1tonあたりの木質バイオマス燃焼灰処理費の比較

	ラボ装置	パイロットプラント
電気料金 *1	4,891円	3,048円
事前攪拌プロセス	57.1kWh	47.5kW
アイリッヒミキサー	48kWh	22.3kWh
予備混合槽・混合槽	9.1kWh	25.2kWh
浮遊選鉱プロセス	66.8kWh	22.0kWh
浮遊選鉱槽	57.7kWh	4.0kWh
MCAS槽	9.1kWh	18.0kWh
脱水・濃縮プロセス	79.9kWh	57.5kWh
濃縮槽	28.2kWh	18.7kWh
デカンタ	51.7kWh	33.6kWh
循環水装置	*	5.2kWh
油脂類 *2	4,800円	4,800円
捕集剤	10kg	10kg
気泡剤	3kg	3kg
その他 ユーティリティ	10円	10円
水（工業用水30円/ton）	333kg	333kg
合計	9,701円	<b>7,858円</b>

\*1 電気代：2023年度のバイオマス発電（10,000kW未満）の買取価格、24円/kWh

\*2 油脂類：2023年9月の実勢価格、捕集剤（灯油）120円/kg、気泡剤（パイン油）1200円/kg

#### 4.3 連続式実機プラントの設計原案の作成

パイロットプラントの試験を通じて確認できた事項および発現した課題や解決の対応策を表2-15に示す。事前攪拌プロセスについては、目標の150kg/hの事前攪拌とスラリー化処理が可能であることを確認できた。実機の完全自動化において、浮遊選鉱プロセスへのスラリーおよび再利用水の供給が常時可能なよう、浮遊選鉱プロセス前段となる事前攪拌プロセスと脱水濃縮プロセスは、浮遊選鉱プロセスに勝

表2-13：製造効率調査（事前攪拌プロセス）

試験実施日：2023/9/21

試験人員：学生3名（1名補助）

事前攪拌工程：攪拌量25kg/回

10:44 1回目攪拌開始

10:50 2回目攪拌開始

11:04 3回目

11:10-11:15 予備混合槽ポンプ過負荷で停止

11:15 同過負荷復旧

11:20 4回目

11:29 5回目

11:36 6回目

11:40 事前攪拌終了

る処理能力とする必要があることを実機設計原案に反映した。事前攪拌プロセスにおいては、燃焼灰・水・添加剤の計量投入の自動化、およびスラリー化の完全自動化が実機化の課題としてあるので、これに対応したシステムとする。浮遊選鉱プロセスにおいては、前後の事前攪拌プロセスと脱水濃縮システムの処理能力を考慮するとともに配管洗浄システムと各槽のレベル制御により、連続浮遊選鉱運転が担保できるシステムとする。これらの設計コンセプトをもとに作成した実機プラント（1ライン3,000 t/年）の設計原案を付録2に示す。

表2-15 確認できた事項および発現した課題や解決の対応策

事前攪拌プロセス	パイロットプラント	実機設計原案	課題・対応策
計画処理量	300ton/年 150kg/hx250日/年x8h	3,000ton/年 1500kg/hx250日/年x8h	計画の処理量より10%程 大きい処理能力
燃焼灰計量投入	25kg計量し人手で投入 時間当たり6回実施 2分程度 ※攪拌処理中に計量	事前自動計量125kg投入 時間当たり13回実施 0.3分で投入	時間短縮と省力化 粉塵飛散防止
添加剤計量投入	人手により計量投入 灯油～0.25kg/回 パイン油～0.075kg/回 0.5分	自動減算計量投入 灯油～2.5kg/回 パイン油～7.5kg/回	時間短縮 省力化
計量投入	人手により計量投入 ～8kg/回 0.5分	適性を自動算出し計量 ～40kg/回 0.4分	適性の自動検出
攪拌	混合工具周速～31m/s 混合容器周速～1.1m/s 3分	混合工具周速～31m/s 混合容器周速～1.1m/s 3分	攪拌装置内の付着削減
攪拌容器内洗浄	人手で水を加え攪拌 2分程度	所定量を自動減算計量 0.3分	時間短縮と省力化
攪拌物排出	半自動排出 1分程度	自動排出 0.5分	時間短縮 省力化 容器内の付着除去
事前攪拌物 スラリー化	10%程度のスラリー化 ～225kg/回の加水 半自動	12%程度のスラリー化 ～900kg/回の加水 自動計量	省力化 スラリー均一化 動力削減
事前攪拌物 スラリーの移送	スラリーを浮遊選鉱槽 前段の混合槽に移送 手動	スラリーを浮遊選鉱槽前 段の混合槽に移送 自動制御	省力化 スラリー均一化 動力削減
計画処理量	300ton/年 150kg/hx250日/年x8h	3,000ton/年 1500kg/hx250日/年x8h	計画の処理量より余裕を もった処理能力
事前攪拌物 スラリー一時貯槽	3000L	3600L 12%濃度スラリー ～250L/min x 10min	省力化 スラリー均一化 動力削減
事前攪拌物 スラリー供給	10%濃度スラリーを 25L/minで連続供給 手動流量調整	12%濃度スラリーを ～250L/minで連続供給 自動流量調整	省力化 自動流量制御 動力削減 配管洗浄システム
浮遊選鉱槽内 スラリー循環	手動起動	起動条件自動検知で自動 起動	起動条件の自動検知
浮遊選鉱槽テール 灰(MCAS)排出	10%濃度スラリーを 17.5L/minで連続供給 手動流量調整	12%濃度スラリーを ～250L/minで連続供給 自動流量調整	省力化 自動流量制御 動力削減 配管洗浄システム
テール灰(MCAS)の 一時貯槽	2500L	1680L	槽内の付着削減 省力化 スラリー均一化 動力削減

## 4.4 排水処理方法の検討

(有害物質含有量のマッピング)

(バイオマスボイラ燃焼灰に含まれる有害物質)

バイオマスボイラ燃焼灰改質パイロット試験装置で原料として使用した燃焼灰（混焼灰）の排水規制対象有害物質元素の分析結果を表2-16に示す。

表2-16 バイオマスボイラ燃焼灰に含まれる有害物質

有害物質元素	Cr	As	Cd	Pb	Hg
燃焼灰中濃度 (mg/kg)	43.4	4.5	0.7	20.9	0.286

(脱離液中の有害物質濃度)

運転中のバイオマスボイラ燃焼灰改質パイロット装置の遠心分離脱離液として排出された実排水（2023年11月10日採取）について限外濾過(UF)膜で濾過し、溶解性物質測定用試料を得た。この中の元の燃焼灰に含まれていた排水規制対象有害物質の分析結果を表2-17に示す。限外濾過(UF)膜によって処理した透過液中の有害物質濃度、つまり、バイオマスボイラ燃焼灰改質システム脱離液中の溶解性の有害物質濃度は一律排水基準を満たしていることを確認した。

次に、固形物として燃焼灰が含まれるときに想定される遠心分離脱離液中の有害物質濃度を試算した。図2-10に固形物濃度と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の関係と遠心分離脱離液中の有害物質濃度の一律排水基準値との比の関係をそれぞれ示す。遠心分離脱離液中に、燃焼灰由来固形物がわずか4.8 g/L含まれるだけでPbの一律排水基準値を超過してしまう結果となった。

表2-17 バイオマスボイラ燃焼灰改質システム脱離液中の溶解性の有害物質濃度（限外濾過(UF)膜によって処理した透過液中の有害物質濃度）

有害物質元素	Cr	As	Cd	Pb	Hg
濃度 (mg/L)	0.05	0.005未満	0.001未満	0.005未満	0.0005未満
一律排水基準(mg/L)	0.5	0.1	0.03	0.1	0.005

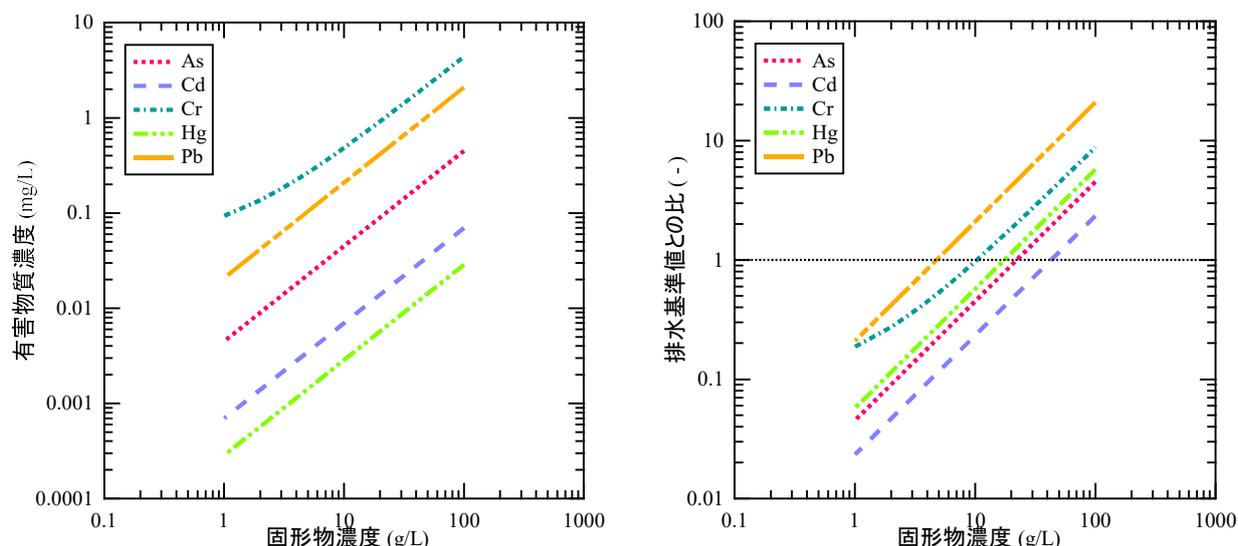


図2-10 固形物濃度と排水中有害物質濃度の関係(左)および排水基準値との比の関係(右)

(有害物質排水処理方法の検討)

前項の検討により、今回、木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水については、懸濁固形物を除去することにより、排水基準を満足することが明らかになったことから、排水中懸濁固

形物（SS; suspended solid）を除去する方法について検討した。排水中懸濁固形物を除去する方法について、それらの特徴を表2-18にまとめた。

重力式固液分離法（凝集沈殿法・凝集加圧浮上法）は、構造上今回の脱離液のように濃厚なSSを含む原水に適しており、価格も比較的安価であるため、良く用いられる方法であるが、突発的に固形物が流出した場合には基準値を超過してしまうため、有害物質を処理対象とする場合には注意を要す。また、分離した固形物には凝集剤が含まれるため原料として再利用することはできず、発生した汚泥は産業廃棄物として処分する必要がある。処理水に凝集剤由来の薬品が含まれるため、処理水を繰り返し用いる場合にはその影響を再利用箇所において十分に評価する必要がある。砂ろ過方法は、原水のSS濃度が高くなる可能性のある今回のような遠心分離脱離液には適用できない。除濁膜法は、中空内径よりも大きい粒子によって端面が詰まらなければ濃い原水に適用可能であり、膜の価格が他に比べると高いものの、膜が破けない限り固形物は流出しないため処理水の保証性が高く、薬品の添加無しで使用可能なため、分離した固形物は原料として再利用することが可能であり、さらに処理水を再利用するときの問題もない。以上の点から、本システムにおいては、有害物質を確実に処理するという、処理水保証性点、除去した固形物をそのまま原料として再利用する点、さらに将来的に処理水を再利用する可能性があるという点から、除濁膜法を採用することにした。

表2-18 固液分離の排水処理方法の比較

	原水適用性	価格	処理水保証性	除去固形物	処理水再利用性	総合評価
重力式	◎ かなり濃くても可	◎ 主に水槽のみ	△ 突発的に固形物が流出した場合には基準値を超過する	× 凝集剤が含まれるため再利用不可、産業廃棄物として処分が必要	△ 凝集剤由来の塩などが含まれてしまう	×
砂ろ過法	× 10 mg/L程度以下	○	○	◎ 原料として再利用可能	◎ 薬品の添加が無い	×
除濁膜 (限外ろ過膜)法	○ 中空内径よりも大きい粒子で端面が詰まらなければ可	△ 膜の価格次第	◎ 膜が破けない限り固形物は流出しない	◎ 原料として再利用可能	◎ 薬品の添加が無い	○

#### (遠心分離脱離液の限外濾過(UF)膜処理検討)

除濁膜として限外濾過(UF; ultra filtration)膜を用いて、遠心分離脱離液の実排水を濾過する机上試験を実施した。

原水として遠心分離脱離液を用いた。UF膜は、旭化成マイクロザSLP-1053を用いた。ポリスルホン製、膜内径1.4 mm、膜面積0.12 m<sup>2</sup>、公称分画分子量10,000 Da である。運転圧力100 kPaで、20 Lの原水を回分的に、2倍まで濃縮する操作を5回繰り返し、平均水透過流束を測定した。

運転回数と水透過流束の関係を図2-11に示す。5回の繰り返しの運転で水透過流束の変化はなかったことから、流速に影響を及ぼす膜面

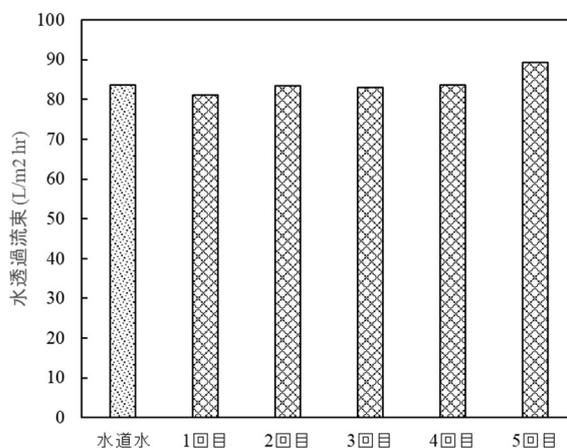


図2-11 UF膜による遠心分離脱離液の繰り返しろ過試験結果

表2-19 UF膜による遠心分離脱離液処理の水質分析結果

分析項目 (mg/L)	SS	TDS	Na	K
原水	981	414	44	40
透過水	-	442	43	35
濃縮水	2048	438	44	36

の汚れは生じていないと考えられる。また、遠心分離脱離液と水道水で水透過流束に違いは無かったことから、膜透過に及ぼす濁質の影響は無かったと考えられる。1回目濃縮の水質分析結果を表2-19に示す。懸濁物質濃度(SS; suspended solid)は濃縮倍率と概ね等しく約2倍に濃縮された。溶解性成分である全溶解固形物(TDS; total dissolved solid)、ナトリウムイオンおよびカリウムイオンの各濃度は原水、透過水および濃縮水で変化が無かった。

以上のことから、本遠心分離脱離液の実排水は良好にUF膜で処理が可能であることが明らかになった。

#### (溶解性有害物質濃度を除去するための処理方法の検討)

上記の検討により、今回の木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水については、UF膜によって好適に懸濁固形物を除去することが可能であり、またこの処理によって排水基準を満足し、公共水域に排水できることが明らかとなった。

しかしながら、今後起源の異なるバイオマスを原料とした場合には溶解性の有害物質濃度が排水基準を超過する可能性を否定できない。また、改質燃焼灰中の溶出性有害物質濃度を低減させるために水洗を積極的に実施することやゼロリキッド排出(ZLD; zero liquid discharge) にすることの必要性が生じる可能性がある。これらのときには溶解性有害物質を水から分離するシステムとする必要がある。このシステムは、下記のサブシステムによって構成される。

① 溶解性有害物質を濃縮する；溶解性有害物質を濃縮する方法としては、ナノ濾過膜やRO膜など膜分離により有害物質を排除して水（または、水および非有害物質）を透過させる方法、蒸発装置による方法やこれらの方法の組み合わせの方法がある。また、下の②溶解性有害物質を水から分離し固形物として分離することを効率的におこなうための前処理としてもこの濃縮法を用いる。

② 溶解性有害物質を水から分離し固形物として分離する；溶解性有害物質を水から分離し固形物として分離するための方法としては、市販キレート樹脂を用いる方法や蒸発乾燥させる方法がある。各種有害物質に対応したキレート樹脂が市販されており、必要により使用することができる。

③ 有害物質を廃棄する；最終的には有害物質を廃棄する必要がある。処理方法に応じて、有害物質を濃縮した液体、蒸発乾固した固形物、またはキレート樹脂の再生廃液（または有害物質が吸着したキレート樹脂）を、コンクリート固化法などによって、廃棄物処理業者により適切に廃棄する。

これらの方法は既に技術的に確立されており、実際の排水があれば適用が可能である。この中で、比較的新しい技術であり今後の展開が期待され、また、今回

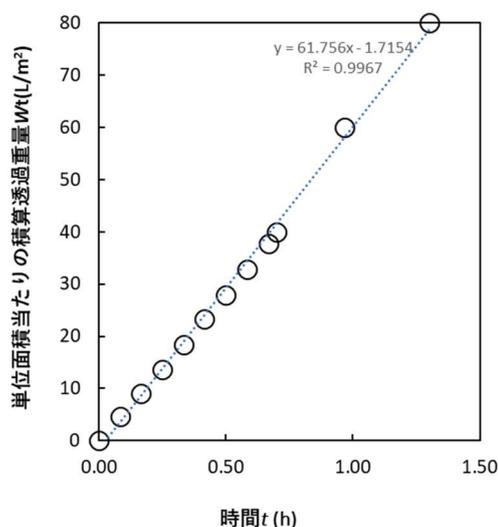


図2-12 NF膜による遠心分離脱離液の繰り返しろ過試験結果

の木質バイオマス燃焼灰改質パイロット装置から排出された排水のように溶解性有害物質が含まれていなくても評価試験が可能な、ナノ濾過膜法について机上試験をおこなった。

ナノ濾過膜の机上試験の原水としては、遠心分離脱離液の実排水をUF膜で処理した透過水を用いた。ナノ濾過膜としてはNF Filtration社のdNF40、膜面積0.05 m<sup>2</sup>を用い、圧力0.6 MPaで回分運転、5倍濃縮させた。運転経過時間と単位面積当たり積算透過重量の関係を図2-12に示す。時間と共に単位面積当たり積算透過重量は直線的に増加し、今回の実験期間においては、膜の閉塞は起こらず、良好に処理ができたと言える。直線の傾きから透過流束は62 L/m<sup>2</sup>hrを実現した。原水、透過水および濃縮水の水質分析結果を表2-20に示す。一価イオンは透過し、多価イオンは排除しており、ナノ濾過膜として有効に機能していることが明らかとなった。

表2-20 NF膜による遠心分離脱離液処理の水質分析結果

分析項目 (mg/L)	Na	K	Ca		Cr	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
原水	41	34	63		0.0264	20	61
透過水	20	14	6.4		0.0035	5.8	-
濃縮水	73	65	163		0.0808	23	201

#### (水バランス調査による排水水量の最適化)

実規模の連続式木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムにおけるMCAS中の目標溶解性重金属等濃度に応じたシステムからの排水量を調べるために、システムの水バランスおよび固形物バランスを計算した。システム中の各プロセスの水量、固形物量の定義を図2-13に示す。サイクロン・デカンタからの脱離液を膜分離して固形物は回収し透過水を排水処理することとした。

水バランスから式(1)が溶解性重金属等バランスから式(2)が得られる。

$$q_s = q_f + q_m + q_w \quad (1)$$

$$\eta_B w_B = C(q_f + q_m + q_w) \quad (2)$$



図2-13 連続式木質バイオマス燃焼灰改質システムにおける各プロセスの水量固形物量定義

式(1)及び式(2)を変形し、原料BSA 1000kg/d処理の実規模装置について流量の想定値を代入すると、循環水量 $q_R$ の浮遊選鉱槽投入水量 $q_i$ に対する比(循環比、 $q_R/q_i$ )とMCAS中溶解性重金属等含有比 $\eta_M$ のBCA中溶解性重金属等含有比 $\eta_B$ に対する比(移行率、 $\eta_M/\eta_B$ )の関係式を得ることができる。また、膜分離の透過水量(排水量) $q_w = q_i - q_f - q_m - q_R$ であり、循環水量と排水量は負の線形相関があるので、排水量 $q_w$ の浮遊選鉱槽投入水量 $q_i$ に対する比(排水率、 $q_w/q_i$ )と移行率 $\eta_M/\eta_B$ の関係が計算でき、これを図示すると図2-13となる。これにより循環水量を増やす(排水量を減らす)とMCAS中溶解性重金属濃度が増加する定量的な関係が明らかになった。循環水量がゼロのときは排水量が最大値740 kg/dとなり、このときMCAS中溶解性重金属等濃度は原料中濃度の25%で最小になる。また、排水量がゼロのとき循環水量は740 kg/dとなり、MCAS中溶解性重金属等濃度は原料中濃度の95%で最大になる。図2-14を用いることで好ましい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。

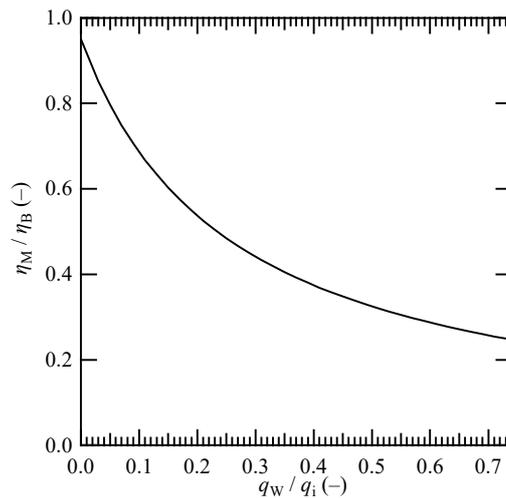


図2-14 排水量(右)とMCAS中溶解性重金属濃度

#### 4.6 MCASの製品評価

バイオマス燃焼灰から製造されたMCASを混合したセメントコンクリートの圧縮強度試験を図2-15に示す。MCASを15%添加した供試体の圧縮強度は、材齢7日においてセメント単味のNN供試体より低かったが、材齢91日においてNN供試体より高くなった。一般的な混和材である石炭由来のフライアッシュと同様に、バイオマス由来のMCASも長期材齢でポゾラン活性を示すことが確認された。化学組成を測定したところ、A灰はSiO<sub>2</sub>を40.5%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を13.4%、D灰はSiO<sub>2</sub>を39.5%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を10.4%含有しており、このことがA灰およびD灰のポゾラン活性を高め、圧縮強度に寄与したことが考察される。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図2-16に示す。静弾性係数の実験値は、New-RC式による予測値より全体的に高い側に分布した。一方、灰の種類に関わらずMCASを混合した供試体の静弾性係数は、15%置換のものより30%置換のものの方が小さくなった。これは、石炭由来のフライアッシュを混合した場合と同じ傾向である。

乾燥収縮ひずみの経時変化を図2-17に示す。日本建築学会では高耐久性コンクリートの基準として半年の乾燥収縮ひずみを $-800 \times 10^{-6}$ 以下とすることが規定されている。今回使用した3種類のMCAS (B灰、C灰、D灰) を混合した供試体の乾燥収縮ひずみは、同基準を90前後で既に満足しておらず、収縮低減剤の併用などのひび割れ対策が必要といえる。一方、A灰を混合した供試体の乾燥収縮ひずみは、NN供試体と同程度の水準で比較的小さい傾向を示した。A灰の強熱減量が3.02%と比較的低く、改質時に水に浸した際の吸水量が少なかったためと考えられる。また、これらの乾燥収縮の性質は、細孔構造の影響を受けていることが考えられる。先行の研究において、セメントコンクリート全般の乾燥収縮は、細孔量が小さいほど低減されることが報告されている。バイオマス由来のMCASを混合したセメントコンクリートにおいても、同様に細孔量が小さいほど乾燥収縮が低減される傾向が確認された。

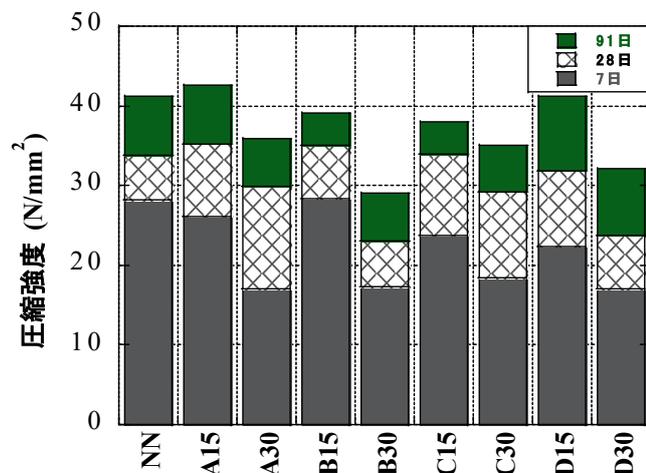


図2-15 バイオマス由来のMCASを混合したセメントコンクリートの圧縮強度

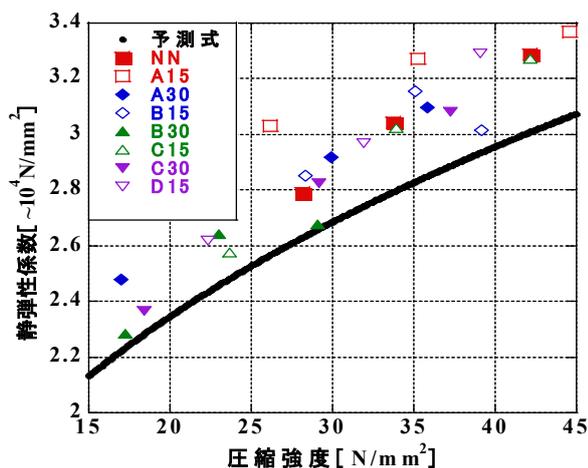


図2-16 圧縮強度と静弾性係数との関係

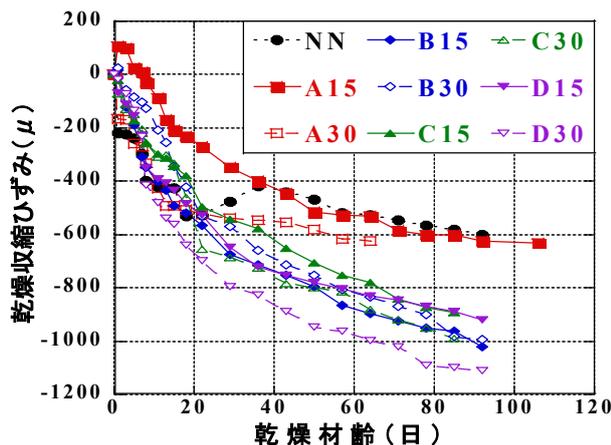


図2-17 乾燥収縮ひずみの経時変化

## 5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、6項目の目標を掲げて開発研究を実施した。浮遊選鉱装置を連続式にするため2.3Lの小型装置から検証を実施し、18Lの中型装置にサイズアップして、最終的に当初の予定通り150Lの連続式パイロットプラントを開発した。予算の減額によりフルバージョンによるパイロットプラントを開発することができなかったが、脱水設備を除いて当初想定していた機能を有したプラントとなった。連続式に関しては特許も出願している。

木質バイオマス燃焼灰の改質処理で運転パラメータの調整を繰り返し、最終的に目標としたテール灰の未燃炭素量3.0%以下、ニュートン効率0.60以上の運転条件に到達した。なお、ニュートン効率は当初の目標に掲げていなかったが、アドバイザーのアドバイスによりニュートン効率0.60以上を目標に追加した。

木質バイオマス燃焼灰の改質目標をクリアする条件で、パイロットプラントの運転パラメータを最適化した。攪拌時間を3分/回として、150kg/h処理の事前攪拌装置の開発を目標に掲げたが、攪拌時間は3分/回で目標とする製品を製造できることを確認した。更に、運転プロセスの最適化により150kgを47分で処理できることが確認され、事前攪拌処理の目標効率を27%アップすることができた。加えて、処理濃度は10wt%を想定していたが、12wt%でも目標に合致する製品が得られた。これらの成果を踏まえパイロットプラントの処理量を試算した結果、360t/年の処理量を達成できることが確認でき、当初の目標値である300t/年を大幅に上回る結果を達成した。更に、処理流量は25L/minで実施したが、30L/minとした運転条件においてもテール灰の未燃炭素量が目標の3.0%を下回っており、燃焼灰のスラリー濃度と処理流量をどちらも1.2倍にすることで処理能力向上の相乗効果が期待できる。さらに、運転条件を最適化して24時間運転を可能にする仕様を確定したので、最大1080t/年の処理効率を達成できる可能性を示した。

パイロットプラントの処理費の目標は8,000円/t以下とされていたが、昨今の電気料金の上昇により研究開始当初より60%アップの電気料金で試算した結果、7,858円/tとなり当初目標の2%減で達成した。

予算の減額によりデカンタ式遠心脱水機を購入出来なかったが、計画処理能力(150kg/h)に見合う相当機をメーカーにて選定した。ラボ装置を流用したデカンタ式遠心脱水機に投入しても、得られた脱水ケーキの濃度は68.5wt% (目標の91%)にとどまった。しかしながら、脱水ケーキは硬い粘土状となっており、装置の機構上限界の濃度に達したと考えられる。木質バイオマス燃焼灰は石炭灰に比べて粒径が歪で保水しやすい性質を有しているため、石炭灰では達成できた濃度75wt%は、その特性上達成困難であることが判明した。これ以上の脱水には熱エネルギーが必要となるため、省エネおよび経済性の観点か

ら、70%を超える濃度まで脱水するのではなく、今回得られた限界の濃度である70%弱程度のMCASの濃度を前提にジオポリマー製造時の配（調）合を検討することが必要と考えられた。

今回、パイロットプラントで改質した製品であるMCASの含水率は31.5%であり、常に投入燃焼灰量に対して水を31.5%補給する必要がある。実証した木質バイオマス燃焼灰は重金属の溶出量は排水基準を満たしていたので、処理水の循環利用が最も安価で簡便な手法であることを見出した。排水処理する場合は、排水中懸濁固形物に重金属が含まれているので、除濁膜（UF膜）でろ過した後、排水可能であることを示した。今回使用した木質バイオマス燃焼灰に対してUF膜による実発水通水実験を行ったところフラックスの低下が無く、良好に処理が可能であることを確認した。

これらの実験データからタンク形状等の課題を詳細に抽出してそれを改善した1ライン3,000t/年の実機プラントの設計原案を示した。当初、9000t/年の実機装置スペックを設定したが、その後の調査で木質バイオマス発電ボイラーは5MW級が主力となっていることが判明し、それらのボイラーの燃焼灰排出量は約500t/年である。今回開発したパイロットプラントを24時間連続運転に更新すれば、5MWボイラー級の実機プラントにすることが可能である。

木質バイオマス燃焼灰改質リサイクルシステムで製造された4種類のMCASに対して力学特性を評価する圧縮強度試験、静弾性係数試験および耐久性を評価する乾燥収縮試験を実施した。一般的な混和材である石炭由来のフライアッシュと同様に、バイオマス由来のMCASも長期材齢でポズラン活性を示すことが確認された。乾燥収縮については3種類の灰で日本建築学会高耐久性基準を満足せず、収縮低減剤の併用などのひび割れ対策が必要であった。これらの実験結果は、建築技術性能評価認定を得るための基礎データにすることができる。

以上の結果より、当初設定した研究目標を上回る成果を達成したと考えている。

## II-3 サブテーマ3「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要旨]

蒸気養生型のMACSを利用したジオポリマーコンクリートの配合を選定して、曝露供試体を作製して沖縄・北九州・釧路の曝露試験を実施するとともに室内での耐久性試験を実施した。配合の選定では、まずモルタル試験を実施してBFS/P（全粉体に対する高炉スラグ微粉末の比）およびGPW/P（全粉体に対するアルカリ溶液の比）の目安を見出し、続いてコンクリート試験からBFS/P=35%、GPW/P=60%の配合を選定した。寒冷環境（釧路）、温暖環境（沖縄）、平均環境（北九州）の曝露試験地を探し出し、土地の所有者に協力を頂き約3年間の貴重なデータを収集した。その結果、鉄筋の耐腐食性能が若干劣る傾向がある以外は、MCASを利用したジオポリマーコンクリートはセメントコンクリートと同等以上の性能を有していることを確認した。また、曝露試験では困難である耐久性の評価では室内耐久性試験を実施して、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、耐酸性に優れ、アルカリシリカ反応抑制効果があることを確認できた。

MACSを利用したジオポリマーコンクリートのさらなる普及を目指すために、常温硬化型の配合についても検討を実施した。常温硬化型では可使時間60分程度の目標を達成するため、アルカリ溶液のA/Wの最適値の検討と石灰石微粉末の混和について検討を実施した。蒸気養生型ジオポリマーコンクリートの検討と同様にモルタル試験を実施して目安を付けた後に、ジオポリマーコンクリートの配合を選定した。検討の結果、アルカリ溶液のA/Wは0.19、石灰石微粉末を全粉体に対して10%混和した配合が、常温硬化型として適していることを確認した。選定した配合の二酸化炭素排出量の削減率は62.5%であり目標（60%以上）を満足した。また、開発したMACSを利用したジオポリマーコンクリートを用いて、実機ミキサで実際に製品を製造して、セメントコンクリートと同じ製造設備で製造が可能であることを確認した。

なお、対象としたバイオマス灰は混焼灰を中心に検討を進めたが、専焼灰についても改質の効果等の検討も行った。

最後に、曝露試験、室内耐久性試験、製品製造などの結果を整理して、MCASを利用したジオポリマーコンクリートの環境負荷低減効果、高機能性およびコストを加味した総合的優位性の検討を実施して、その高機能性を利用した製品への応用について提案を行った。

### 1. サブテーマ3 研究開発目的

サブテーマ3では、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を目的として活動した。

### 2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ3	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 実施機関	西松建設株式会社、九州工業大学大学院
サブテーマ3 目標	<p>①パイロットプラントから製造されたMCASを利用したジオポリマーコンクリートを開発してその二酸化炭素排出量を同等性能の普通コンクリートに対して60%削減し、目標性能は設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>以上、アルカリシリカ反応抑制などの耐久性能の優れたものとする。</p> <p>②ジオポリマーコンクリートは蒸気養生を施すことが一般的である。二次製品タイプのジオポリマーコンクリートは、蒸気養生を前提とした製造手法として縁石・側溝等の小型製品を試作する。生コンタイプでは蒸気養生を施すことが難しいので、常温硬化型で60分程度の可使時間を有する施工性の優れたジオポリマーコンクリートを開発して、生コンプラントで練混</p>

	<p>ぜ可能とする。</p> <p>③開発したジオポリマーコンクリートを普及させるため、MCASジオポリマーコンクリートの製造システムを構築すると共に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を示す。</p>
--	--

### 3. サブテーマ3 研究開発内容

#### 3.1 ジオポリマーコンクリート配合検討

本検討では、MCASを利用したジオポリマーコンクリートについて、蒸気養生型と常温硬化型の2種類の配合の検討を実施した。それぞれの検討では、まずモルタルでの検討を行ってから、コンクリートの検討を実施した。なお、本検討で使用したMCASは混焼灰を対象とした。

その開発内容を以下に示す。

##### 3.1.1 蒸気養生型のジオポリマーコンクリートの配合検討

###### 1) モルタルでの検討

表 3-1 に示す使用材料を用いて、溶液粉体比 (GPW/P)、高炉スラグ微粉末置換率 (BFS/P) を変化させ、フロー試験 (施工性の検討) および強度試験を実施した。なお、配合例を表 3-2 に、写真 3-1 に絶乾状態の混焼バイオマス灰を示す (P=MCAS+BFS)。

表 3-1 使用材料

材料 (記号)	混焼改質バイオマス灰 (MCAS)	高炉スラグ微粉末 (BFS)	ジオポリマー溶液 (GPW)	砂 (S)
仕様	原料：響灘エネルギーパーク 形態：恒温槽で絶乾状態	原料：日鉄高炉セメントエスメント(石こう無し) 形態：恒温槽で絶乾状態	原料：東曹産業 GP-1(市販品) 形態：常温保存	原料：北部九州産除塩海砂 形態：常温表乾状態

表 3-2 配合例

%		kg/m <sup>3</sup>			
GPW/P	BFS/P	GPW	MCAS	BFS	S
65	35	387	387	208	1191
	30	386	416	178	1188
	10	381	528	59	1172
70	15	403	489	86	1151
65		382	500	88	1175
60		360	510	90	1200
55		338	522	92	1229



写真 3-1 混焼改質バイオマス灰

###### 2) コンクリートでの配合検討

モルタル試験の結果を参考に、コンクリートの配合を検討した。使用材料は表 3-1 に示した材料と粗骨材を用いた。配合の選定時には、施工性を評価するスランプフロー試験および圧縮強度試験を実施して、目標値をクリアする配合の選定を行った。選定した配合で曝露試験および室内耐久性試験を実施した。

なお、各材料の原単位を表 3-3 に示す。

表 3-3 各材料における CO<sub>2</sub> 排出量

材料	CO <sub>2</sub> 排出量(g/kg)
混焼灰	20.0
高炉スラグ微粉末 <sup>1)</sup>	20.9
石灰石微粉末	5.0
細骨材 <sup>2)</sup>	3.7

粗骨材 <sup>2)</sup>		2.9
珪酸アルカリ溶液	東曹GPII	534.0
水酸化ナトリウム		1000.0

1) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO<sub>2</sub>削減効果について、コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.62-65，2010

2) 井元晴丈，西村正：CO<sub>2</sub>削減の観点からの化学混和剤の役割，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.66-68，2010

### 3) 室内耐久性試験

選定した配合で、アルカリシリカ反応試験および耐酸性試験を実施した。試験方法は、表3-4に示す。

表3-4 試験方法

項目	試験方法	備考
アルカリシリカ反応試験	AAR3 (アルカリラッピング)	セメントコンクリート比較
硫酸抵抗性試験	5%硫酸溶液に8週間浸漬 (20℃)	セメントコンクリート比較

#### 3.1.2 常温硬化型のジオポリマーコンクリートの配合検討

##### 1) モルタルでの検討

常温硬化型では、蒸気養生型の要求性能にスランプフローの保持時間の性能が追加される。具体的には、スランプフローの可使時間が60分保持できる配合を検討した。

蒸気養生型のジオポリマーコンクリートと同様に、モルタルで検討を実施した。モルタルの使用材料を表3-5に示す。

表3-5 使用材料

使用材料	記号	密度(g/cm <sup>3</sup> )	備考
アルカリ溶液	AS	1.40	A/W=0.099 Si/W=0.113
水酸化ナトリウム	SH	2.13	顆粒
改質混焼灰	MCAS	2.26	絶乾状態
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	石こう無
細骨材	S	2.56	海砂

可使時間を延長する方法として、以下の2技術を採用した。

##### ① アルカリ溶液の検討

これまでの検討で、アルカリ溶液のアルカリ水比（モル比：A/W）が低くなると可使時間が短くなることが確認されていた。また、A/Wは圧縮強度等の強度特性にも大きく影響する傾向を確認していた。そこで、使用するアルカリ溶液のA/Wを変化させ、その材料特性を評価した。

本研究では、表3-6に示すA/Wが0.15、0.17および0.19のアルカリ溶液を使用してモルタルを作製した。

表3-6 配合

A/W	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	AS	SH	MCAS	W <sub>MCAS</sub>	BFS	S
0.15	213.8	16.2	425	142	106	1169
0.17	209.0	22.0	427	142	107	1173
0.19	204.4	27.6	428	143	107	1177

##### ② 石灰石微粉末の採用

可使時間を延長する方法として、石灰石微粉末(LS)に注目した。不活性フィラーである石灰石微粉末を粉体として混和することによって、MCASおよび高炉スラグ微粉末(BFS)の使用量を減らすことができる。MCASや高炉スラグ微粉末の使用量を減らすことによって粉体内のCa量が減り、可使時間が延長する可能性が考えられた。試験に使用した配合を表3-7に示す。

表 3-7 配合

質量 (g/L)						
AS	SH	MCAS	W <sub>MCAS</sub>	BFS	LS	S
204.4	27.6	428	143	107	0	1177
222.8	29.2	378	126	108	54	1189
222.8	29.2	378	126	81	81	1189
214.0	28.0	403	134	81	54	1182
228.1	29.9	363	121	98	81	1193

## 2) コンクリートでの検討

モルタルでの検討結果から、表3-8に示すジオポリマーコンクリートの配合を選定した。アルカリ溶液はA/W=0.19のものを使用した。BFS/PおよびLS/Pについては、CO<sub>2</sub>排出量が多いBFS/P=18%、LS/P=15%と、CO<sub>2</sub>排出量が少ないBFS/P=15%、LS/P=10%の2水準で検討した。

### <配合>

- ・溶液粉体比(質量比) : L/P=70% ・MCAS含水率 : 25% ・Paste vol. : 380(L/1000L)
- ・アルカリ水比(モル比) : A/W = 0.19 ・シリカ水比(モル比) : Si/W = 0.11

表3-8 配合

Sample No.	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )	GP/OPC* <sup>1</sup> (%)
	AS	SH	W <sub>MCAS</sub>	MCAS	BFS	LS	S	G		
B18-L15	159.5	21.5	85	254	68	57	698	944	118.5	37.5
B15-L10	148.0	20.0	93	280	56	37	698	944	111.1	35.2

\*1GPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量とOPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量の比OPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量 : 316.0(kg/m<sup>3</sup>)

## 3.2 曝露試験

MACSを利用したジオポリマーコンクリートの耐久性を評価するため、実環境での曝露試験を実施した。曝露試験場所は下記の3か所とした。

### ① 釧路

釧路は、図3-1に示すようにコンクリートの凍結融解危険度が大きく、ジオポリマーコンクリートの凍結融解の検討を実施するのに適した場所であった。図3-2には曝露地域の気温および降水量を、写真3-2には曝露状況の写真を示す。

\*実験ではユーラスエナジー(株)様のご協力を頂きました。



図3-1 凍結融解の危険度

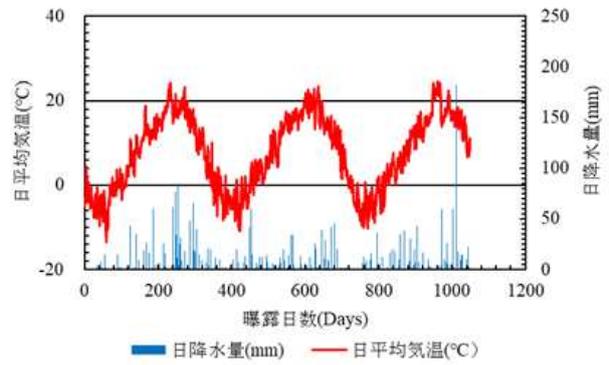


図3-2 釧路の平均気温と降水量



写真3-2 曝露試験状況

② 北九州

図3-3に示すように一般的な環境条件として、北九州の九工大キャンパス内で曝露試験を実施した。

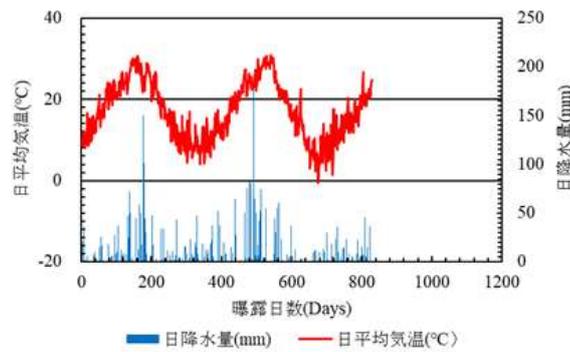


図3-3 北九州の平均気温と降水量

③ 沖縄

塩害および高温・多湿環境として、沖縄での曝露試験を実施した。以下に曝露状況および平均気温等のデータを示す。



写真3-3 沖縄での曝露試験の状況

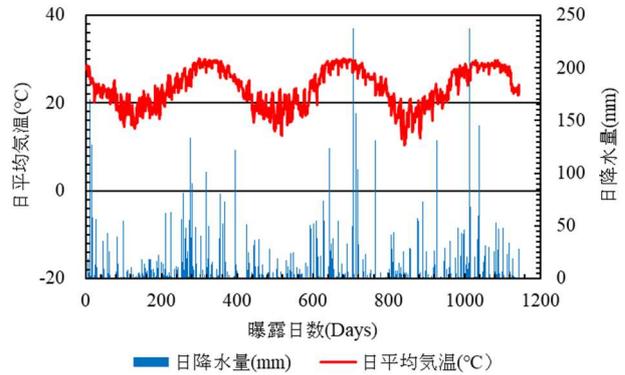


図3-4 沖縄の平均気温と降水量

1) 使用材料および配合

ジオポリマーコンクリートおよび比較用のセメントコンクリートの使用材料、配合を以下に示す。

表3-9 使用材料

材料	記号	密度(g/cm <sup>3</sup> )	備考
アルカリ溶液	AS	1.40	市販品
混焼灰	MCAS	2.26	絶乾状態
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	石膏なし
普通ポルトランドセメント	C	3.15	—
水	W	1.00	水道水
細骨材	S	2.58	海砂(表乾)
粗骨材	G	2.71	碎石(表乾)

表3-10 ジオポリマーコンクリートの配合

%				kg/m <sup>3</sup>				
AS/P	BFS/P	s/a	空気量	AS	MCAS	BFS	S	G
65	30	47.0	2.0	236	254	138	786	938

表3-11 比較用のセメントコンクリートの配合

%			kg/m <sup>3</sup>				g/m <sup>3</sup>	
W/C	s/a	空気量	W	C	S	G	AE剤	消泡剤
42	46.0	6.0	170	405	761	938	2.429	8.095

2) 試験項目

以下に、試験項目を示す。

表3-12 試験項目

<沖縄>	<北九州>	<釧路>
圧縮強度試験	圧縮強度試験	圧縮強度試験
自然電位測定	自然電位測定	
分極抵抗測定	分極抵抗測定	
中性化試験	中性化試験	
鉄筋外観観察	放射熱測定	
放射熱測定		

3.3 実機ミキサを用いた小型製品の試作

実機ミキサで小型製品を試作した。以下に、試作概要を示す。

1) 使用ミキサおよび練混ぜ手順

使用した実機ミキサは、写真3-4に示す特殊コンクリート製造用ミキサである。本ミキサは高強度コンクリート等の特殊製品を製造する際に用いられている。また、練混ぜ手順を、図3-5に示す。



写真3-4 使用したミキサ

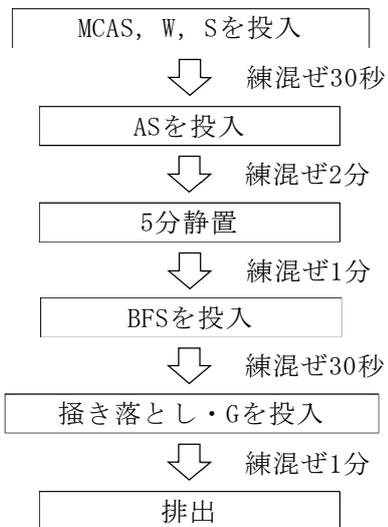


図3-5 練混ぜ手順

2) 養生方法

養生は、プログラム式恒温槽を用いて図3-6に示す最高温度60℃、保持時間12時間の養生を行った。

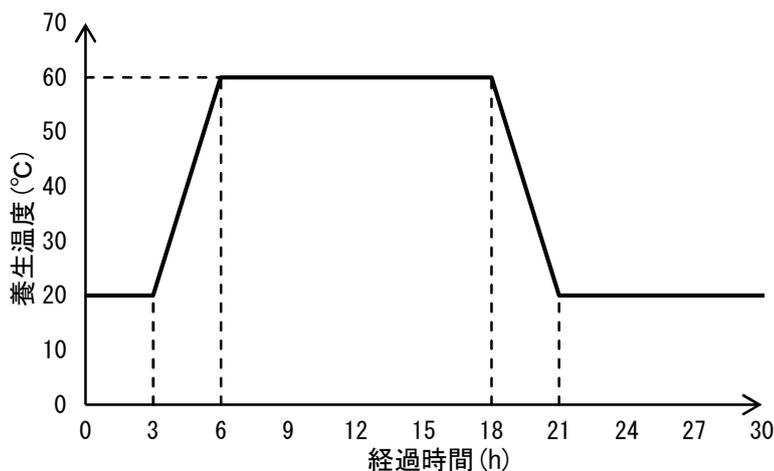


図3-6 養生温度設定

2) 配合

MCASを利用したジオポリマーコンクリートの配合表を以下に示す。

表3-13 配合

BFS/P (%)	LS/P (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )							
		AS	SH	W	MCAS	BFS	LS	S	G
18	12	150.6	20.4	86	257	66	44	709	917

3.4 専焼灰の検討

これまでは、混焼灰を用いたジオポリマーコンクリートの検討を行ったが、専焼灰についても検討を行った。表3-14に使用材料、表3-15に専焼灰の化学成分、表3-16に配合を示す。なお、試験項目は、スランプフロー試験と圧縮強度試験であった。

表3-14 使用材料

使用材料	記号	密度(g/cm <sup>3</sup> )	備考	
アルカリ溶液	AS	1.35	市販品	
活性フィラー	専焼灰	BA-1	2.56(原灰) 2.49(改質灰)	絶乾状態
		BA-2	2.52(原灰) 2.44(改質灰)	
		BA-3	2.32(原灰) 2.39(改質灰)	
		BA-4	2.56(改質灰)	
	高炉スラグ微粉末	BFS	2.92	石膏なし
細骨材	海砂	S	2.58	表乾状態
粗骨材	碎石	G	2.71	表乾状態

表3-15 化学成分

種類		化学成分(%)								
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
MCAS	改質灰	56.06	20.46	0.95	4.23	4.86	1.55	2.98	0.55	0.50
BA-1	原灰	27.12	3.78	1.38	14.03	34.28	0.81	5.40	—	—
	改質灰	27.38	8.13	1.61	16.96	26.92	2.54	5.54	—	—
BA-2	原灰	29.02	6.75	1.10	10.18	33.53	2.84	7.56	—	—
	改質灰	36.91	9.62	1.85	13.04	20.87	2.34	5.04	—	—
BA-3	原灰	23.40	3.93	1.45	12.36	26.62	0.96	9.97	—	—
	改質灰	23.61	7.33	1.56	16.42	24.99	0.49	4.12	—	—
BA-4	原灰	13.31	3.25	0.78	7.84	42.86	10.21	10.21	—	—
	改質灰	28.44	6.94	2.88	13.04	29.20	6.48	6.48	—	—
BFS		34.28	13.85	0.54	—	44.66	5.50	0.29	0.25	0.02

表3-16 配合

BAの種類		%			kg/m <sup>3</sup>				
		AS/P	BFS/P	s/a	AS	BA	BFS	S	G
BA-1	原灰	75	30	48	306	285	122	743	846
	改質灰	65			285	307	132	743	846
BA-2	原灰	70			296	296	127	743	846
	改質灰	65			284	305	131	743	846
BA-3	原灰	85			312	257	110	743	846
	改質灰	70			291	291	125	743	846
BA-4	改質灰	85			321	264	113	743	846

### 3.5 MCASを用いたジオポリマーコンクリートの総合優位性の検討

ジオポリマーコンクリートを普及させるため、MCASジオポリマーコンクリート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を検討した。

## 4. サブテーマ3結果及び考察

### 4.1 ジオポリマーコンクリート配合検討

#### 4.1.1 蒸気養生型のジオポリマーコンクリートの配合検討

##### 1) モルタルでの検討

図 3-7 に GPW/P とフロー値の関係を、図 3-8 に GPW/P と圧縮強度の関係を示す。まず、施工性の評価であるフロー値に関しては、一般的に 140mm～180mm 程度が適すと考えられており、今回のモルタル試験では、BFS/P が 35%あるいは 30%では GPW/P は 60%程度、BFS/P が 30%、15%および 10%では GPW/P が 65%程度必要であることが分かった。

続いて、圧縮強度に関しては、目標の 24N/mm<sup>2</sup>以上とするには、高炉スラグ微粉末置換率 10%のケース以外、GPW/P が 70%以下であればクリアすることが分かった。

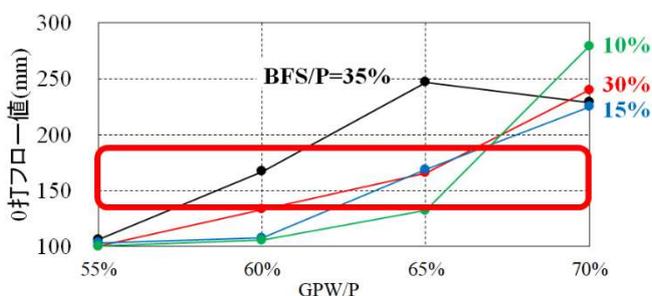


図 3-7 GPW/P とフロー値の関係

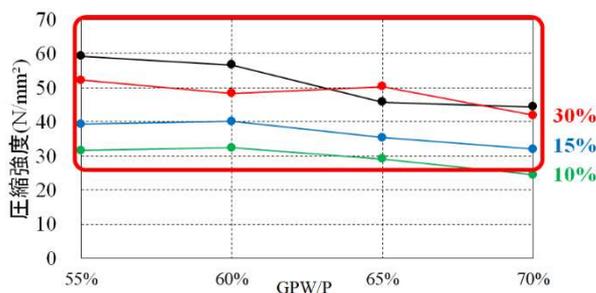


図 3-8 GPW/P と圧縮強度の関係

## 2) コンクリートでの検討結果

モルタル試験の結果を参考に、コンクリートでの試験を実施して、表 3-17 に示す配合を採用することとした。

本配合のスランブフローは 495mm となり、目標範囲内にあることを確認した。図 3-9 に、圧縮試験の結果を示す。養生条件としては、熱硬化型は 70℃で 1 日養生（圧縮試験は材齢 1 日で実施）、常温硬化型としては 20℃で 28 日養生（圧縮試験は材齢 28 日で実施）を行った。いずれの養生条件でも目標の 24N/mm<sup>2</sup>を超え、熱硬化型で 60N/mm<sup>2</sup>程度、常温硬化型で 50N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮強度が出ており、セメントコンクリートと同レベルの性能を確認できることを確認した。

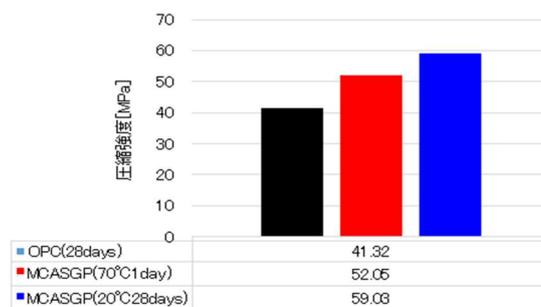


図3-9 養生条件毎の圧縮強度

表 3-17 ジオポリマーコンクリートの配合

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

## 3) 室内耐久性試験結果

### ①アルカリシリカ反応(ASR)抵抗性

図 3-10 に ASR 試験での促進期間と膨張率の関係を示す。図 3-10 に示すように、MCAS を利用した蒸気養生型および常温硬化型のジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートより膨張量が少なく、アルカリシリカ反応による膨張が生じないことを確認した。

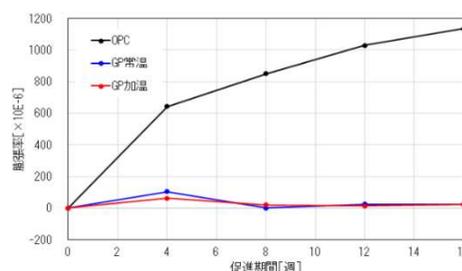


図3-10 膨張率の経時変化

### 4) 硫酸抵抗性

図 3-11 に 5%硫酸溶液に浸漬した供試体の質量変化の結果を示す。また、写真 3-5 には浸漬前後の供試体の状況を示す。図 3-11 および写真 3-5 から、MCAS を利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートより硫酸に対する抵抗性が高いことを確認した。

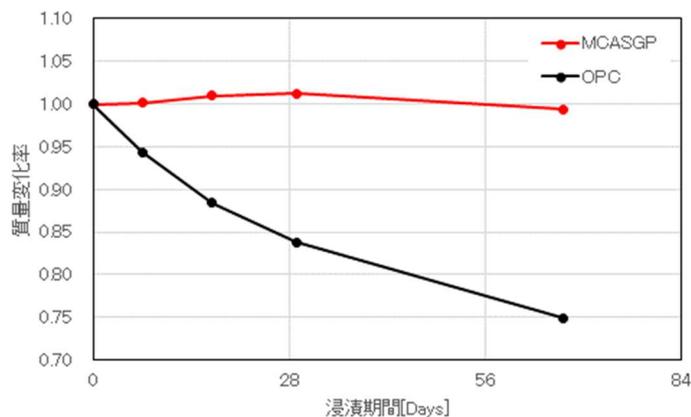


図 3-11 浸漬期間と質量変化の関係

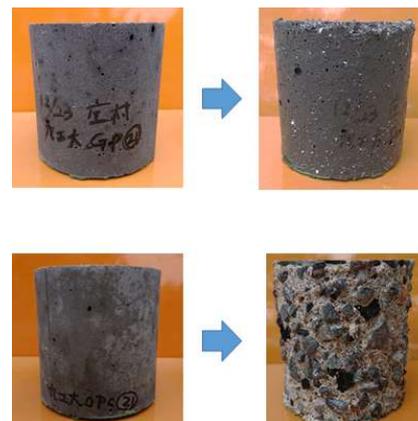


写真 3-5 硫酸浸漬前後の供試体  
上：ジオポリマー、下：セメント

#### 4.1.2 常温硬化型のジオポリマーコンクリートの配合検討

##### 1) モルタルでの検討

##### ① アルカリ溶液の検討

使用するアルカリ溶液のA/Wを変化させ、MCASを使用したジオポリマーモルタルの材料特性を評価した。試験の結果、表3-18に示すようにA/W=0.19が練混ぜ後45分までフローを計測することが出来た。また、圧縮強度も図3-12に示すように最も高い値を示した。

以上より、可使時間を延ばすために、アルカリ溶液のA/Wは0.19とした。

表3-18 フロー試験の結果

練混ぜ後の時間	A/W=0.15	A/W=0.17	A/W=0.19
0分	262	251	239
30分	不可	145	203
45分	不可	不可	110
60分	不可	不可	不可

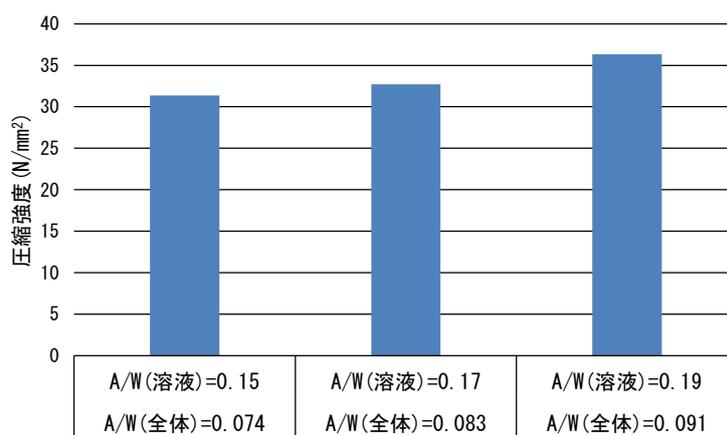


図3-12 圧縮強度試験結果

##### ③ 石灰石微粉末の採用

表3-19にフロー試験の結果を示す。表3-19の記号は、Bのあとの数字が高炉スラグ微粉末の置換率を、Lの後の数字が石灰石微粉末の置換率を示している（例えば、B20-L0は、高炉スラグ微粉末置換率20%、石灰石微粉末置換率0%を示す）。表3-19より、可使時間が最も優れているのはB15-L15、続いてB18-L15であった。また、図3-13に示すように、いずれの配合も圧縮強度24N/mm<sup>2</sup>以上発現していた。

表3-19 フロー試験結果

練上り後の時間	B20-L0 (M1)	B20-L10 (M2)	B15-L15 (M3)	B15-L10 (M4)	B18-L15 (M5)
0分	239	179	180	175	187
30分	203	213	218	218	221
45分	110	148	196	178	199
60分	不可	不可	156	132	154

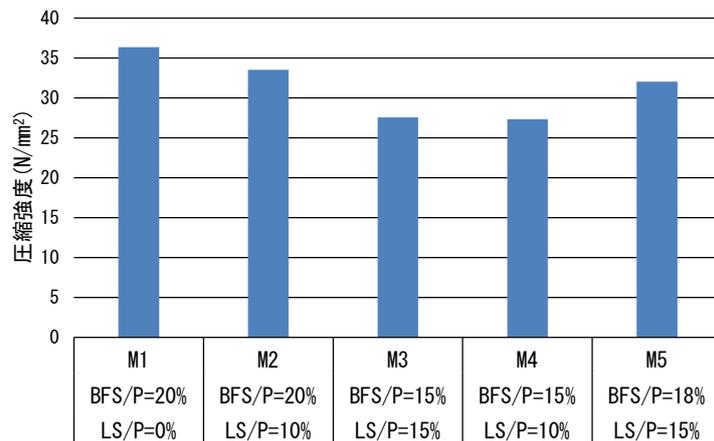


図3-13 圧縮強度試験結果

## 2) コンクリートでの検討

モルタルでの検討結果から、アルカリ溶液はA/W=0.19のものを使用した表3-20に示す配合を選定した。BFS/PおよびLS/Pについては、CO<sub>2</sub>排出量が多いBFS/P=18%、LS/P=15%と、CO<sub>2</sub>排出量が少ないBFS/P=15%、LS/P=10%の2水準で検討した。試験結果を表3-21に示す。B18-L15は60分後のスランプフローが450mmと可使時間の目標値を満足していた。また、圧縮強度も常温養生および加温養生ともに目標値の24N/mm<sup>2</sup>以上の値を示していた。一方、B15-L10は60分後のスランプフローが計測出来なかったがスランプは計測でき、その値は21.5cmであり施工できる値となっていた。圧縮強度は加温養生が目標強度を満足しなかったが、常温養生は満足していた。

以上の結果から、B18-L15およびB15-L10ともに、常温型のジオポリマーコンクリートとして使用できることを確認した。

表3-20 配合

Sample No.	質量 (g/L)								CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )	GP/OPC*1 (%)
	AS	SH	W <sub>MCAS</sub>	MCAS	BFS	LS	S	G		
B18-L15	159.5	21.5	85	254	68	57	698	944	118.5	37.5
B15-L10	148.0	20.0	93	280	56	37	698	944	111.1	35.2

\*1 GPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量と、OPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量の比。OPCコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量：316.0(kg/m<sup>3</sup>)

表3-21 試験結果

Sample No.	B18-L15		B15-L10	
	加温 (60°C 12h)	常温 (20°C)	加温 (60°C 12h)	常温 (20°C)
養生条件				
強度試験材齢	1日	28日	1日	28日
スランプフロー(mm) 0min	569.5		433.5	
スランプフロー(mm) 60min	450.0		21.5*3 (cm)	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	26.59	29.69	21.48	24.91

## 4.2 曝露試験結果

MACSを利用したジオポリマーコンクリートの耐久性を評価するため、実環境での曝露試験を実施した。以下にその結果を示す。

### 1) 圧縮強度

各曝露地域の圧縮強度の推移を図3-14に示す。沖縄と釧路のジオポリマーコンクリートは曝露日数が経過しても曝露初期と同程度の圧縮強度を示していた。北九州は曝露日数0日から約200日で圧縮強度が低下した。しかし、約200日以降はほぼ同じ値を示しており、曝露日数0日の供試体の圧縮強度が若干高かったため、値が小さくなったものであると考えられる。

以上より、MCASを利用したジオポリマーコンクリートの圧縮強度は、長期的に安定している傾向を確認できた。

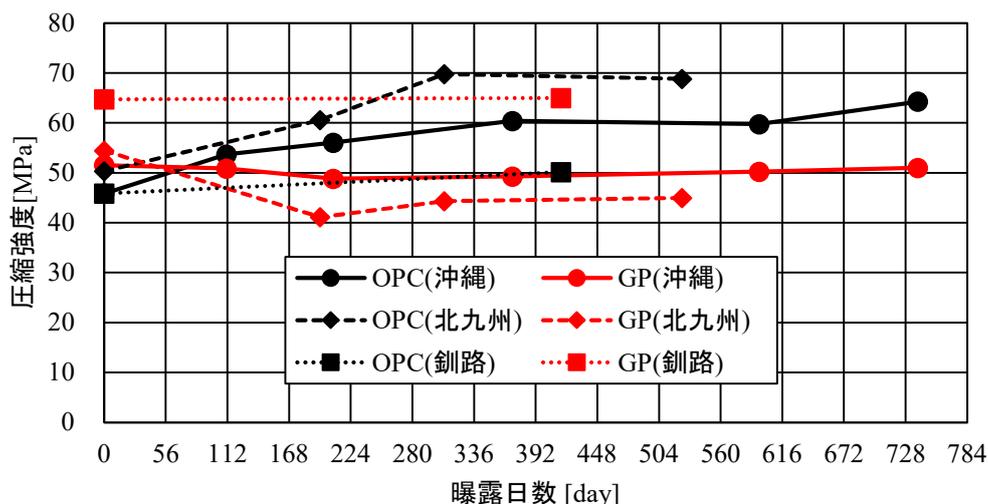


図3-14 圧縮強度の推移

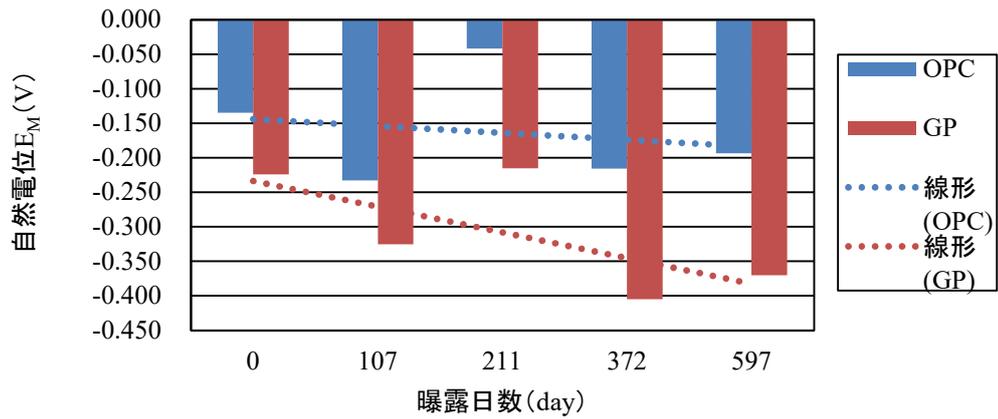
### 2) 鉄筋の腐食

代表例として沖縄の曝露結果を以下に示す。図3-15には沖縄の自然電位の推移と、表3-22にはASTMの腐食判定を示す。図3-15に示すように、ジオポリマーコンクリートはセメントコンクリートに比べ自然電位が大きくなっており、さらに、自然電位の増加率（線形の傾き）も大きくなっている。表3-22から0.35V以下になると90%以上の腐食している判定されるが、曝露日数372日でその値を超えており、かなりの確率で腐食している可能性が高いことがわかる。写真3-6には曝露日数372日の鉄筋の腐食状況を示す。セメントコンクリートも腐食しているが、ジオポリマーコンクリートの方が腐食している面積が大きいことが分かる。

以上より、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートより腐食抵抗性が低いことが分かった。

表3-22 飽和硫酸銅電極を用いた鉄筋の腐食判定 (ASTM C 876)

自然電位(E)(V vs CSE)	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり



(a) セメントコンクリート

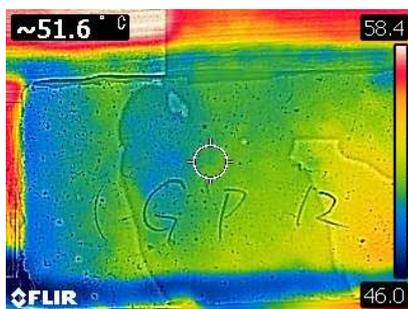


(b) ジオポリマーコンクリート

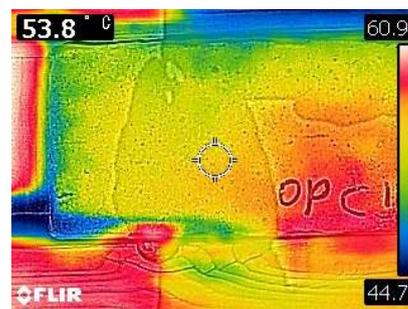
写真3-6 鉄筋の腐食状況

#### 4) 放射熱

実験中、供試体表面を触ったところ、ジオポリマーコンクリートとセメントコンクリートの表面温度が異なっていた。そこで、写真3-7のようにサーモカメラで供試体表面温度を測定したところ、ジオポリマーコンクリートが51.6℃でセメントコンクリートが53.8℃であった。ジオポリマーコンクリートの放射熱が、セメントコンクリートより低い傾向があることが分かった。



(a) ジオポリマーコンクリート



(b) セメントコンクリート

写真3-7 サーモカメラでの撮影画像

#### 4.3 実機ミキサを用いた小型製品の試作

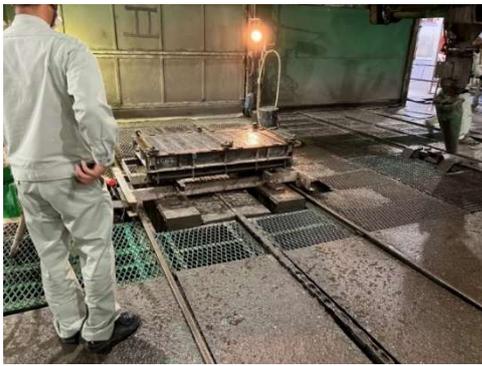
実機ミキサで小型製品を試作した。写真3-8に作製手順を、写真3-9に試作した製品を示す。今回の試作で、MCASを利用したジオポリマーに関しては、セメントコンクリートの製造と同じ手順での製造が可能であることを確認できた。



(a) 練混ぜ



(b) 打設



(c) 締固め



(b) 養生

写真3-8 試作手順



写真3-9 試作品

#### 4.4 専焼灰の検討

スランプフロー試験の結果を表3-22に、圧縮試験の結果を図3-16に示す。スランプフローはBA-1およびBA-2については改質により低下したが、BA-3は大きくなった。また、BA-4は、原灰では練混ぜが出来なかったが、改質により練混ぜが可能になり、スランプフローも673mmと良好な値を示した。圧縮強度は図3-16に示すように、全てのバイオマス灰で改質により増加した。

以上より、専焼灰に関しても改質の効果があり、ジオポリマーコンクリートへの適用が可能なものと考えられる。

表3-23 スランプフロー試験結果

BAの種類		スランプフロー(mm)
BA-1	原灰	564
	改質灰	484
BA-2	原灰	531
	改質灰	470
BA-3	原灰	508
	改質灰	517
BA-4	改質灰	673

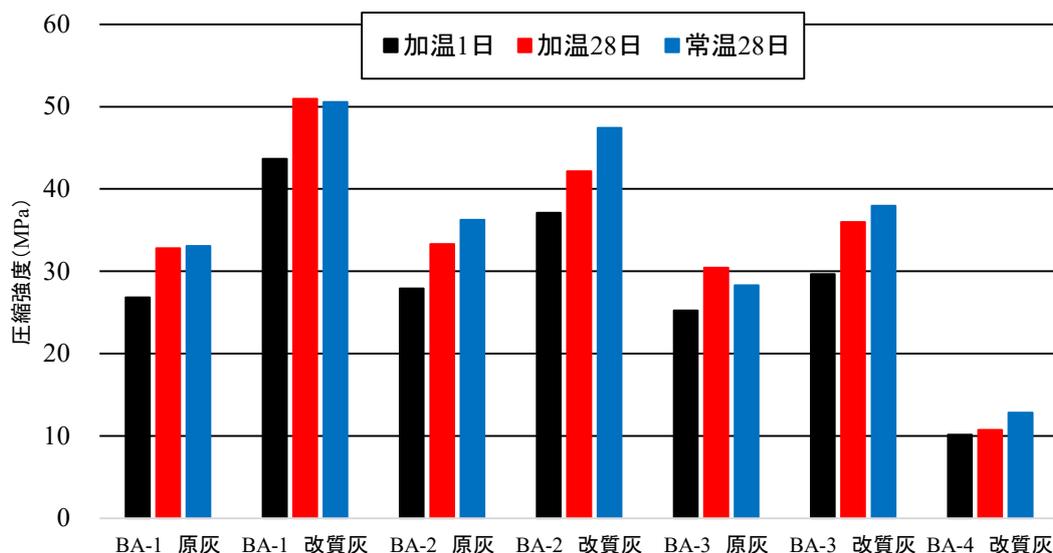


図3-16 圧縮強度試験の結果

#### 4.5 MCASを用いたジオポリマーコンクリートの総合優位性の検討

表3-24には、セメントコンクリートと比較した、MACSを利用したジオポリマーコンクリートの優位性を示す。MACSを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートに比べCO<sub>2</sub>排出量を60%削減できることや、バイオマス灰を有効利用でき循環型社会の構築に貢献できることなどから、環境負荷低減性能は高いと言える。一方、実環境での曝露試験から、MCASを利用したジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートに比べて鉄筋の腐食が進行することが確認されたが、それ以外の耐久性に関してはセメントコンクリートより同等以上である結果となった。さらに、放射熱の低減効果があることも確認できた。コストに関しては、セメントコンクリートに比べ割高になってしまうが、MACASを利用したいジオポリマーコンクリートは環境負荷低減効果が高く、その高機能性を活かせる製品であれば、十分に普及が図れるものと考えられる。なお、MCASを利用したジオポリマーコンクリートの高機能性から考えられる応用製品を表3-25に示す。

表3-24 総合評価

種類	環境負荷低減	高機能性	コスト	総合評価
MCASを利用したジオポリマーコンクリート	○ * 二酸化炭素を60%削減可能。 * 循環型社会に貢献	○ * アルカリ骨材反応の抑制効果、耐酸性等に優れる。	△ * 割高になる。	○ コストは割高であるが、環境負荷低減効果を期待でき、高機能性を有効活用すれば、普及が可能

\* 「○」⇒優れる、「△」⇒劣る

表3-25 高機機能性を活かした応製品例

機能	製品例	備考
高い耐酸性	① 化学工場などの水処理施設 ② 下水施設（下水管など） ③ 補修材   GP系補修材（GP MONDO K）	・補修材は、新設材料よりコストが高い。
アルカリ骨材反応の抑制効果	①低品質の骨材を利用した製品	構造物の長寿命化とともに、骨材の枯渇問題も解決できる。
低い放射熱	① ヒートアイランド対策製品 ② 屋外の駐車場  	高温な沖縄において「琉球ジオポリマー」を検討中。

### 5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

普通コンクリートより二酸化炭素排出量を62.5%削減し、圧縮強度29.7N/mm<sup>2</sup>を満足し、アルカリシリカ反応抑制効果が高く、硫酸抵抗性が高いジオポリマーコンクリートをパイロットプラントから製造されたMCASを利用して開発した。蒸気養生を施し二次製品タイプのジオポリマーコンクリートの縁石を実機ミキサによって練り混ぜて試作した。また、可使時間60分程度の常温硬化型ジオポリマーコンクリートを開発して、生コンプラントでの練混ぜを可能にした。開発したジオポリマーコンクリートを普及させるため、環境負荷低減効果、高機機能性およびコストを加味した総合的優位性を検討し、環境負荷低減性、高機機能性に優れており、現時点では子雄と評価は若干劣るが、総合評価としては非常に優れていることを示した。製品例として、化学工場などの水処理施設、下水施設およびヒートアイランド対策製品を提案した。

目標外の追加の実施事項として、混焼灰のみでなく専焼灰についても検討を実施した。

## Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

## (1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	7
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	2
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	11
口頭発表（学会等・査読なし）：	25
知的財産権：	5
「国民との科学・技術対話」の実施：	6
マスコミ等への公表・報道等：	3
研究成果による受賞：	4
その他の成果発表：	0

## (2) 誌上発表

## &lt; 査読付き論文 &gt;

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Ike, M., Kawagoe, H., Takaoka, M. (2021). An Estimation of the Ash Generated from Woody Biomass Power Generation in Japan Based on Types of Combustion Systems. Proceeding of 7th International Conference on Low Carbon Asia ICLCA 2021, 1-6

成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
2	Lin, H., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2021). Development of Flotation Device for Removing Unburnt Carbon in Fly Ash for Use in Hardened Cementitious Materials. Materials, 14, 6517, 1-16. <a href="https://doi.org/10.3390/ma14216517">https://doi.org/10.3390/ma14216517</a>
3	Lin, H., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H., Liu, S. (2022). A study on properties, static and dynamic elastic modulus of recycled concrete under the influence of modified fly ash. Construction and Building Materials, 347, 128585, 1-13. <a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585</a>

4	山崎勇輔, 高巢幸二, 陶山裕樹, 原田耕司, 小山田 英弘. (2022). 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素を除去する改質条件と混和材としての特性に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, 87, 798, 669-679. <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.87.669">https://doi.org/10.3130/aijs.87.669</a>
5	Liu, Z., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H., Liu, S., Hao, Q. (2022). The Effect of Cementitious Materials on the Engineering Properties and Pore Structure of Concrete with Recycled Fine Aggregate. Materials, 16, 305, 1-20. <a href="https://doi.org/10.3390/ma16010305">https://doi.org/10.3390/ma16010305</a>
6	Ji, X., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H. (2023). The Effects of Curing Temperature on CH-Based Fly Ash Composites. Materials, 16, 2645, 1-19. <a href="https://doi.org/10.3390/ma16072645">https://doi.org/10.3390/ma16072645</a>
7	Liu, S., Liu, Z., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2023). Study on the Effect of Recycled Fine Aggregate Qualities on Fly Ash/GGBS-Based Geopolymer Mortar. Materials, 16, 7289, 1-16. <a href="https://doi.org/10.3390/ma16237289">https://doi.org/10.3390/ma16237289</a>

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
8	高巢幸二, 原田耕司, 陶山裕樹, 櫻井雄一, 合田寛基, 吉田圭一. (2022). 浮遊選鉱法による改質フライアッシュを使用したジオポリマーコンクリート二次製品の開発. セメント・コンクリート, 900, 82-89
9	高巢幸二, 陶山裕樹, 幸永秀昭, 原田耕司. (2024). 木質バイオマス燃焼灰を資源化する一連の取り組み. 月刊コンクリートテクノ, 43, 1, 54-61

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない

## (3) 口頭発表

&lt;口頭発表（国際学会等・査読付き）&gt;

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
10	Ike, M., Kawagoe, H., Takaoka, M. (2021) An Estimation of the Ash Generated from Woody Biomass Power Generation in Japan Based on Types of Combustion Systems, 7th International Conference on Low Carbon Asia ICLCA 2021, Online
11	Ike, M., Iijima, S., Pei, Y., Shiota, K., Takaoka, M. (2022): Principal component analysis of elemental composition for woody biomass ash recycling, 9th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy
12	Pei, Y., Ike, M., Shiota, K., Takaoka, M. (2024) Effects of Si/Al ratio on immobilization of Se in woody biomass fly ash based geopolymer, Proceeding of 10 <sup>th</sup> 3R International Scientific Conference, Sydney, Australia

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
13	Liu, S., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2021). A Study on The Influence of Curing Program on Hydration Reaction and Mechanical Properties of Mortar with Modified Fly Ash by Flotation Method. Concrete 2021, 1-8
14	Ji, X., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2021). A study on the properties of modified fly ash produced from three kinds of coal by flotation method. Journal of Asian Urban Environment, 1-4
15	Ji, X., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2022). A STUDY ON PROPERTIES OF CONCRETE WITH DRY FLY ASH AND FLY ASH SLURRY STORED WITH STIRRING. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 1-7
16	Liu, S., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2022). A STUDY ON APPLICATION POSSIBILITY OF WOODEN BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION METHOD AS CONCRETE ADMIXTURE. EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURE, ENGINEERING & ENVIRONMENT, 1-6
17	Fuchigami, T., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2023). Study on Applicability of Woody Biomass Combustion Ash by Flotation Beneficiation Method as Admixture. Journal of Asian Institute of Low Carbon Design, 155-158
18	Liu, S., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2023). POSSIBILITY RESEARCH ON THE APPLICATION OF WOODY BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION AS CONCRETE ADMIXTURE, Proceedings of the International fib Symposium on the Conceptual Design of Concrete Structures, 138-145
19	Xu, M., Takasu, K., Suyama, H., Zeng, J., Gao, J. (2024). Evaluating the Potential of Flotation-Modified Biomass Fly Ash for Cement Replacement. Journal of Asian Institute of Low Carbon Design, 223-226

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
20	Goda, H., Harada, K., Takasu, K., Suyama, H., Hibino, M. (2021). Flow Characteristics and Strength Characteristics of Geopolymers Using Fly Ash

	Modified by the Flotation Method. The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF), 1-10
--	---

< 口頭発表 (学会等・査読なし) >

成果番号	【サブテーマ1】の口頭発表 (学会等・査読なし)
21	高岡昌輝 (2021) 国内FIT認定木質バイオマス発電施設における燃焼灰発生量の推計, 一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会 令和3年度第2回勉強会
22	Pei Yilan, 塩田憲司、日下部武敏、大下和徹、高岡昌輝 (2022) 木質系バイオマス燃焼灰中有害金属および溶出量の調査, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
23	山崎勇輔、高巢幸二、陶山裕樹、原田耕司、小山田英弘. (2022). 浮遊選鉱法により改質した木質バイオマス専焼灰のコンクリート混和材への使用可能性に関する研究. 日本建築学会九州支部研究報告
24	S. Liu、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹. (2022). The effect of recycled fine aggregate in the physical-mechanical properties and durability of fly ash/GGBS geopolymer mortar. 日本建築学会九州支部研究報告
25	S. Liu、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹. (2022). 浮遊選鉱法により改質した木質バイオマス燃焼灰の特性に関する研究 セメント硬化体の反応性状とモルタル性状との関係. 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道)、材料施工
26	H. Lin、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹. (2022). A fundamental study on static elastic moduli and compressive strength of recycled concrete with decarbonized fly ash. 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道)、材料施工
27	M. XU、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹. (2023). Study on the floating effect of biomass ash and its applicability to cement-based composites. 日本建築学会九州支部研究報告
28	廣瀬寛太、高巢幸二、陶山裕樹、小山田英弘、劉子浩、河崎尚哉. (2023). 木質バイオマス混焼灰の浮遊選鉱処理の連続化技術に関する開発研究. 日本建築学会九州支部研究報告
29	淵上瑞稀、淵上貴史、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹. (2023). 木質バイオマスを燃料種とする燃焼灰のコンクリート用混和材の適用に関する研究. 日本建築学会九州支部研究報告
30	石田大葵. (2023). 駆動液を用いない正浸透(FO)膜システムによるバイオマスボイラ燃焼灰洗浄廃液からの直接水回収. 第57回日本水環境学会年会
31	淵上瑞稀、高巢幸二、陶山裕樹、小山田英弘、淵上貴史. (2023). 木質バイオマス燃焼灰を使用したセメント硬化体の圧縮強度と化学組成に関する研究. 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿)、材料施工
32	Xu, M., TAKASU, K., KOYAMADA, H., SUYAMA, H. (2023). Study on the applicability of biomass fly ash as admixture for concrete. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architecture Institute of Japan, Building materials and construction
33	YANG, Y., TAKASU, K., KOYAMADA, H., SUYAMA, H. (2023). Research on Hydration Reaction of Biomass Fly Ash in Cementitious Composites. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architecture Institute of Japan, Building materials and construction
34	廣瀬寛太、高巢幸二、小山田英弘、陶山裕樹、リュウジハオ、河崎尚哉. (2023). 木質バイオマス混焼灰を対象とした浮遊選鉱法における連続式改質装置の開発研究. 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿)、材料施工
35	野中壘、高巢幸二、陶山裕樹、淵上貴史、淵上瑞稀. (2024). 木質バイオマス専焼灰における浮遊選鉱法の適用に関する研究その1-各物性とスラリー試験-. 日本建築学会九州支部研究報告
36	淵上瑞稀、淵上貴史、高巢幸二、陶山裕樹. (2024). 木質バイオマス専焼灰における浮遊選鉱法の適用に関する研究その2-モルタル性状. 日本建築学会九州支部研究報告

37	今林大翔, 高巢幸二, 陶山裕樹, 劉子浩, 河崎尚哉, 廣瀬寛太. (2024). 木質バイオマス専焼灰における浮遊選鉱法の適用に関する研究その3 コンクリート性状. 日本建築学会九州支部研究報告
38	廣瀬寛太, 高巢幸二, 陶山裕樹, 幸永秀昭, 河崎尚哉, 劉子浩. (2024). 木質バイオマス専焼灰を対象とした浮遊選鉱法による連続式パイロット改質処理装置の開発研究. 日本建築学会九州支部研究報告

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
39	原田耕司, 合田寛基, 高巢幸二, 陶山裕樹, 寺嶋光春, 高岡昌輝. (2022). 木質バイオマス専焼灰を使用したジオポリマーの材料特性に関する基礎的研究. 第77回土木学会年次学術講演会講演梗概集
40	庄村政紘, 合田寛基, 日比野誠, 原田耕司. (2022). 木質系混焼灰を用いたバイオマスジオポリマーの基礎物性および曝露試験. 第77回土木学会年次学術講演会講演梗概集
41	庄村政紘, 合田寛基, 原田耕司, 高巢幸二. (2023). バイオマス専焼灰を活性フィルターとしたジオポリマーの基礎的材料特性. 土木学会西部支部研究発表会講演概要集
42	伊東奈月, 合田寛基, 原田耕司, 高巢幸二. (2023). 材料由来の余剰水がジオポリマーの物理化学特性に及ぼす影響. 第11回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム
43	原田耕司, 合田寛基, 高巢幸二. (2024). 改質バイオマス灰を用いたジオポリマーの実機ミキサでの練混ぜについて. 土木学会西部支部沖縄会第13回研究発表会
44	庄村政紘, 合田寛基, 原田耕司, 高巢幸二. (2024). 木質系専焼灰を使用したジオポリマーの材料特性. 土木学会西部支部研究発表会講演概要集
45	伊東奈月, 合田寛基, 原田耕司, 高巢幸二. (2024). 改質混焼灰を用いたジオポリマーの実用配合選定に関する基礎的研究. 土木学会西部支部研究発表会講演概要集

## (4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
46	高巢幸二, 陶山裕樹	公立大学法人北 九州市立大学 日本アイリッヒ 株式会社	浮遊分離装置、改質フライアッシュスラリーの製造方法、および改質フライアッシュを利用した製品の製造方法	特願2021- 169823 特開2022-89762	2021年10 月15日
47	高巢幸二, 陶山裕樹	公立大学法人北 九州市立大学 日本アイリッヒ 株式会社	浮遊分離装置、改質フライアッシュスラリーの製造方法、および改質フライアッシュを利用した製品の製造方法	出願 202111458223.9 (中国) 公開 CN114602659A	2021年12 月1日
48	高巢幸二, 陶山裕樹	公立大学法人北 九州市立大学 日本アイリッヒ 株式会社	改質フライアッシュを連続して製造可能な浮遊分離装置	特願2022- 133053 特開2024-30281	2022年8 月24日
49	高巢幸二, 陶山裕樹	公立大学法人北 九州市立大学 日本アイリッヒ 株式会社	改質フライアッシュを連続して製造可能な浮遊分離装置	出願 202311060458.1 (中国) 公開 CN117619565A	2023年8 月22日

50	寺嶋光春、 高巢幸二、 陶山裕樹	公立大学法人北 九州市立大学	水分子移動システム、粉体湿 潤装置・充填剤洗浄装置及び コンクリートの 製造方法	特願2023- 061243	2023年4 月5日
----	------------------------	-------------------	---	-------------------	---------------

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
51	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～廃棄物処理における脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年5月27日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：京都大学大学院工学研究科 教授 高岡 昌輝

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
52	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～インフラ技術における脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年5月20日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：北九州市立大学国際環境工学部 教授 高巢 幸二
53	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～排水処理における脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年6月3日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：北九州市立大学国際環境工学部 教授 寺嶋 光春
54	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～コンクリート建築における脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年6月10日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：北九州市立大学国際環境工学部 准教授 陶山 裕樹

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
55	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～コンクリート橋における脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年6月17日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：九州工業大学大学院工学研究院 准教授 合田 寛基
56	2023	北九州市立大学公開講座「脱炭素に繋がる新しい豊かな暮らしを創る国民のためのインフラ技術 ～次世代コンクリートにおける脱炭素～」(主催：北九州市立大学、2023年6月24日、北九州市立大学北方キャンパス、観客約19名)にて講演 講師：西松建設株式会社技術研究所 主席研究員 原田 耕司

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等

57	NHK北九州（2023年10月25日、木質バイオマス発電で生じる灰 コンクリート材料に有効活用について5分ほど紹介） <a href="https://www3.nhk.or.jp/lnews/kitakyushu/20231025/5020014412.html">https://www3.nhk.or.jp/lnews/kitakyushu/20231025/5020014412.html</a>
58	共同通信（2023年11月3日、記事配信、「次世代コンクリに産廃活用 CO2削減、北九州で実験」） 産経新聞（2023年11月2日、WEB版、 <a href="https://www.sankei.com/article/20231102-FKD64YCV2FPQTEYS3QOHQBKA2I/">https://www.sankei.com/article/20231102-FKD64YCV2FPQTEYS3QOHQBKA2I/</a> ） 四国新聞（2023年11月3日、WEB版） 中経オンライン（2023年11月4日、WEB版、 <a href="https://chukei-online.com/article/OK000231104020106">https://chukei-online.com/article/OK000231104020106</a> ）
59	九建日報（2023年10月27日、九州全域・関東・関西、「コンクリCO2排出量を大幅削減北九州市立大学高巢教授ら研究G燃焼灰資源化装置が完成」）

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
60	池 美乃里:7th International Conference on Low Carbon on Asia & Beyondにおいて、BEST PRESENTER For the Sustainable Energy Systemsを受賞、2021年10月19日

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
61	原田耕司、高巢幸二、合田寛基、陶山裕樹、櫻井雄一、吉田圭一：第13回エンジニアリング奨励特別賞、一般財団法人エンジニアリング協会、2021.6.10

成果番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
62	伊東奈月：令和5年度土木学会西部支部研究発表会優秀講演賞
63	伊東奈月：第11回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム優秀発表賞

## (8) その他の成果発表

成果番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない

成果番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
------	-------------------

	特に記載すべき事項はない
--	--------------

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
----------	-------------------

	特に記載すべき事項はない
--	--------------

## Abstract

## [Research Title]

## Demonstration Development of Recycling Technology for Woody Biomass Combustion Ash for Geopolymer Concrete

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	TAKASU Koji
(PI ORCID) :	ORCID0000-0003-2168-351X
Principal Institution :	The University of Kitakyushu 1-1, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, JAPAN Tel: +81-93-695-3239 Fax: +81-93-695-3339 E-mail: takasu@kitakyu-u.ac.jp
Cooperated by :	Kyoto University, Nippon Eirich Co., Ltd., Nishimatsu Construction Co., Ltd., Kyushu Institute of Technology
Keywords :	Woody Biomass Combustion Ash, Circular recycled materials design and production, Waste treatment system, Formation of Regional Circular and Ecological Sphere, Green Products

## [Abstract]

In this research, we classified the types of wood biomass fly ash (WBFA) and selected WBFA suitable for this program. A continuous modification device to remove unburned carbon and heavy metals from WBFA was developed. We then verified the feasibility of the proposed method by developing a pilot plant with a production capacity ten times that of existing lab-scale equipment, thus achieving resource recycling of WBFA. We aimed to significantly reduce CO<sub>2</sub> emissions in the construction sector by developing geopolymers concrete utilizing modified combustion ash slurry (MCAS).

A questionnaire survey of woody biomass power generations in Japan estimated that 820,000 t-wet/year of combustion ash would be generated in 2026. Hierarchical cluster analysis, principal component analysis and decision tree analysis were performed on the collected woody biomass combustion ashes (fly ash, bottom ash) from each power plant to classify the ash types. Decision tree analysis estimated the resource quantities for various beneficial utilization purposes of combustion ash emitted from 220 facilities. The results showed an estimated 700,000 tons wet weight per year for fertilizer use, 320,000 tons wet weight per year for cement use and 170,000 tons wet weight per year for use in geopolymer after modification treatment.

A continuous flotation process was developed and a pilot plant for a continuous WBFA modification system was constructed in Kitakyushu Eco-town. It was confirmed that the processing capacity exceeded the initial target by 20%, reaching 360 tons per year. The processing cost of the pilot plant reached the initial goal with a 2% reduction, amounting to 7,858 yen per ton. The WBFA verified in the experiment met the discharge standards for heavy metals, leading to the discovery that recycling treated water is the most cost-effective and straightforward method. Detailed challenges were extracted from these experimental data and a preliminary design proposal for a full-scale plant consisting of three lines with a capacity of 3,000 tons per year each, totaling 9,000 tons per year, was developed.

The mix proportion of steam-cured geopolymer concrete with MCAS are determined and a three-year exposure test was conducted in Okinawa, Kitakyushu and Kushiro. The results confirmed that, except for a

slight tendency towards inferior corrosion resistance of steel reinforcement, geopolymer concrete with MCAS exhibits performance equal to or better than cement concrete. By optimizing the mix proportion of geopolymer concrete with MACS, a workable time of 60 minutes and a CO<sub>2</sub> emission reduction rate of 62.5% were achieved.

#### [References]

- Ike, M., Kawagoe, H., Takaoka, M. (2021). An Estimation of the Ash Generated from Woody Biomass Power Generation in Japan Based on Types of Combustion Systems. Proceeding of 7th International Conference on Low Carbon Asia ICLCA 2021, 1-6
- Lin, H., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2021). Development of Flotation Device for Removing Unburnt Carbon in Fly Ash for Use in Hardened Cementitious Materials. *Materials*, 14, 6517, 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma14216517>
- M. Ike, S. Iijima, Y. Pei, K. Shiota, M. Takaoka (2022): Principal component analysis of elemental composition for woody biomass ash recycling, 9th
- Y. Pei, M. Ike, K. Shiota and M. Takaoka (2024) Effects of Si/Al ratio on immobilization of Se in woody biomass fly ash based geopolymer, Proceeding of 10th 3R International Scientific Conference, Sydney, Australia
- Lin, H., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H., Liu, S. (2022). A study on properties, static and dynamic elastic modulus of recycled concrete under the influence of modified fly ash. *Construction and Building Materials*, 347, 128585, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128585>
- Liu, Z., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H., Liu, S., Hao, Q. (2022). The Effect of Cementitious Materials on the Engineering Properties and Pore Structure of Concrete with Recycled Fine Aggregate. *Materials*, 16, 305, 1-20. <https://doi.org/10.3390/ma16010305>
- Ji, X., Takasu, K., Suyama, H., Koyamada, H. (2023). The Effects of Curing Temperature on CH-Based Fly Ash Composites. *Materials*, 16, 2645, 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma16072645>
- Liu, S., Liu, Z., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2023). Study on the Effect of Recycled Fine Aggregate Qualities on Fly Ash/GGBS-Based Geopolymer Mortar. *Materials*, 16, 7289, 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma16237289>
- Liu, S., Takasu, K., Koyamada, H., Suyama, H. (2022). A STUDY ON APPLICATION POSSIBILITY OF WOODEN BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION METHOD AS CONCRETE ADMIXTURE. EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURE, ENGINEERING & ENVIRONMENT, 1-6
- S. Liu, K. Takasu, H. Koyamada, H. Suyama. (2023). POSSIBILITY RESEARCH ON THE APPLICATION OF WOODY BIOMASS COMBUSTION ASH MODIFIED BY FLOTATION AS CONCRETE ADMIXTURE, Proceedings of the International fib Symposium on the Conceptual Design of Concrete Structures, 138-145
- M. Xu, K. Takasu, H. Suyama, J. Zeng, J. Gao. (2024). Evaluating the Potential of Flotation-Modified Biomass Fly Ash for Cement Replacement. *Journal of Asian Institute of Low Carbon Design*, 223-226
- Goda, H., Harada, K., Takasu, K., Suyama, H., Hibino, M. (2021). Flow Characteristics and Strength Characteristics of Geopolymers Using Fly Ash Modified by the Flotation Method. The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF), 1-10

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).



## 別紙

## 【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「ジオポリマーコンクリート製造適用性に関する評価軸を定め木質バイオマス焼却灰を類型化すべきである。」	サブテーマ1と2共同で改質処理後のジオポリマー適用可否試験を実施し、その結果を用いてディシジョンツリー分析で判断基準を具体的に表して全国の木質バイオマス焼却灰のうち17万トンがジオポリマーのアルミナシリカ粉末として利用可能であることを見出した。
採択時コメント「未燃炭素発生原因の考察結果に基づいて、未燃炭素対策としての優位性を検証して欲しい。」	木質バイオマス焼却灰の組成は炉形式や燃料種で類型化した。石炭灰に比べて未燃炭素が優位に多い焼却灰はそれほど存在しなかったが、効果的に未燃炭素を除去しないとジオポリマーのアルミナシリカ粉末としての適用は難しいことを明らかにし、本改質技術の有用性を示した。
採択時コメント「現状に比べて新たに必要になる分離した重金属の排水処理についても、比較評価の対象範囲に含めて欲しい。」	実証した木質バイオマス焼却灰は重金属の溶出量は排水基準を満たしていたので、処理水の循環利用が最も安価で簡便な手法であることを見出した。排水処理する場合は、排水中懸濁固形物に重金属が含まれているので、除濁膜（UF膜）でろ過した後、排水可能であることを示した。いずれの場合も排水処理のランニングコストは安価であるかとを明らかにしている。
採択時コメント「技術実証の段階にあるにとしては、バイオマス焼却炉の賦存、その灰の特性などの事前準備が不足しており、それを分担研究者のいまからの連携で実証まで、システム構築していくのはやや準備不足と見受けられた。」	本アンケート調査は2020～2022年度までの3年間で実施しており、前倒しで進めた。灰の特性についてもジオポリマーに主要なデータはできるだけ早く分析し、サブテーマ2，3に提供した。
採択時コメント「特に飛灰の類型化は必要なので、このプロジェクトに参加されない組織からも情報をもらえる仕組みがあるといいと思われる。」	日本木質バイオマスエネルギー協会に加えてバイオマス発電事業者協会及び株式会社タクマに協力を得て、日本全国の220施設にアンケート調査を行った。また、研究プロジェクト終了後、灰発生量の把握について、FIT施設の定期報告に入れるように提言している。
採択時コメント「廃棄物の副生成物の再利用を視野に入れていると読めるが、最終的な出口戦略が重要となると思う。」	木質バイオマス焼却灰の再利用を促すため、ホームページ上において、各施設からどの程度の灰の量とリサイクルに重要な主要元素組成があるかを開示するためのホームページを作成した（公開は、各事業者に現在許可を取っている段階）。これにより焼却灰の受け手側であるリサイクラーはある地域においてある一定の物量の原料の調達がイメージできることから、有効利用

	が進むものと考えている。ただ、重金属の含有量や溶出量の具体的なデータを開示することは難しく、最終的にはリサイクラーと発電事業者間での交渉が必要となる。
中間評価コメント「CO <sub>2</sub> 削減効果については根拠を示して計算して頂きたい。今後のリファレンスになると思われる。」	表3-3に使用材料のCO <sub>2</sub> 排出量を示した。また、表3-8に計算結果を示した。
中間評価コメント「重金属分析も多く行っているが、この側面から留意すべき制御ポイントをどう考えるか、結果を受けての考察も期待したい。」	今回の調査において、木質バイオマス燃焼灰中重金属の含有量は明らかに廃木材を燃料に使用している施設において高いことが明らかになった。肥料利用においては廃木材を燃料に使用している施設を外すことが望ましい。また、Crについても懸念されるが、破碎機や機器の摩耗が主要因であることを考えると入口での制御は難しく、出口での不溶化技術の適用になると考えられる。
中間評価コメント「未燃炭素の除去が主な処理目標のように見えるが、除去だけではなく再燃焼もあるのではないか。排水処理から出る乾燥汚泥の量はどの程度か。また、その成分はどのようなものか。」	バイオマスボイラ燃焼灰改質パイロットプラントから排出されたフロスの発熱量は4.6kJ/gであったが、太陽熱利用乾燥促進システムを利用すると6.0kJ/g に1.3倍増加できた。いずれにしてもフロスは脱水するだけで低位発熱を有しているため、そのまま燃料として再利用できることを明らかにしている。排水処理から発生する汚泥の成分は、製品であるMCASと同党であるが、発生量は処理水に対して981mg/Lと微量であるため排水汚泥は全量原灰に混入できる。
中間評価コメント「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が社会実装されるための要求を満たせるということを、提示していただきたい。」	表3-25に社会実装の応用例を提示した。コストは割高であるが、環境負荷低減効果を期待でき、高機能性を有効活用すれば、普及が可能であることを示すと共に、高機能性を活かした製品を例示した。今後、炭素税等が導入されれば、コストメリットが生じるのでジオポリマーコンクリートの社会実装は加速すると考えられる。
中間評価コメント「研究の途中段階で、各サブテーマの成果を他のサブテーマの取り組みに反映させる仕組みを導入することが必要である。例えば、サブテーマ1の類型化を踏まえての、サブテーマ2でのリサイクルシステム設計、サブテーマ3でのジオポリマーコンクリートの設計等が考えられる。」	サブテーマ1と2共同で改質処理後のジオポリマー適用可否試験を実施し、その結果を用いてディシジョンツリー分析で判断基準を具体的に表して全国の木質バイオマス燃焼灰のうち17万トンが利用可能であることを見出した。これにより、ジオポリマーに適した燃焼灰は岐阜県から多いことがわかった。本研究ではサブテーマ2、サブテーマ3の設計には活かしきれていないが、今後は炉形式などを考慮して、併設するなど考えられる。
中間評価コメント「「本技術開発の遂行により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」とあるが、燃焼灰の組成ばらつきが大きく、「本技術開発」がカバーするあるいは目標とするばらつき範囲が不明瞭	確かに、木質バイオマス燃焼灰組成のばらつきは大きい。しかし、本研究により、それらがある程度、炉形式や燃料種で類型化できることが明らかにされた。また、有効利用の判断基準からも炉形式や燃料種で、有効利用可能

<p>との印象を受ける」</p>	<p>量が推定された。最終的に、改質処理後のジオポリマー適用であれば、全国の木質バイオマス燃焼灰のうち17万トンが利用可能であることを見出した。したがって、ばらつきの範囲は具体的に明示していないが、利用可能な範囲は明示した。</p>
------------------	--