

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（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【1-2102】

体系的番号： （JPMEERF20211002）

研究課題： 「脱炭素化を目指した汚染バイオマスの先進的エネルギー変換技術システムの開発と実装シナリオの設計及び評価」

Research Title: Development of Advanced Energy Conversion Technology Systems for Utilization of Radioactively-contaminated Biomass and Implementation Scenarios Towards Decarbonized Society

研究代表者： 倉持 秀敏

研究代表機関： 国立研究開発法人国立環境研究所

研究分担機関： 1 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 2 福島県環境創造センター 3 国立研究開発法人森林研究・整備機構 4 学校法人東北工業大学

研究協力機関：

研究領域： 統合領域

キーワード： 木質バイオマス発電、カーボンサイクル、放射性セシウム挙動、復興シナリオ、地域循環共生圏

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）	7
2. 研究開発目的	7
3. 研究目標	7
4. 研究開発内容	9
5. 研究成果	12
5-1. 成果の概要	12
5-2. 研究目標の達成状況	16
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	20
6. 研究成果の発表状況の概要	22
6-1. 成果の件数	22
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	22
7. 国際共同研究等の状況	23
8. 研究者略歴	23
II. 成果の詳細	24
II-1 サブテーマ1「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」	24
〔サブテーマ1要旨〕	24
1. サブテーマ1研究開発目的	25
2. サブテーマ1研究目標	25
3. サブテーマ1研究開発内容	26
4. サブテーマ1結果及び考察	28
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	35
II-2 サブテーマ2「ガス化-発酵コンバインド型CO ₂ リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」	37
〔サブテーマ2要旨〕	37
1. サブテーマ2研究開発目的	38
2. サブテーマ2研究目標	38
3. サブテーマ2研究開発内容	39
4. サブテーマ2結果及び考察	40
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	48
II-3 サブテーマ3「脱炭素を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」	50
〔サブテーマ3要旨〕	50
1. サブテーマ3研究開発目的	50
2. サブテーマ3研究目標	50
3. サブテーマ3研究開発内容	50
4. サブテーマ3結果及び考察	55
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	65
III. 研究成果の発表状況の詳細	67
(2) 誌上発表	67
(3) 口頭発表	68
(4) 知的財産権	70
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	70
(6) マスメディア等への公表・報道等	72

(7) 研究成果による受賞.....	72
(8) その他の成果発表.....	72

I. 成果の概要
 <課題情報>

公 募 区 分 :	環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間 :	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課 題 番 号 :	【1-2102】
研 究 課 題 :	「脱炭素化を目指した汚染バイオマスの先進的エネルギー変換技術システムの開発と実装シナリオの設計及び評価」
研 究 代 表 者 :	倉持 秀敏（国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 副領域長）
重点課題（主）:	【重点課題⑤】災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発
重点課題（副）:	【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
行政要請研究テーマ （行政ニーズ）:	（1-5）原子力災害被災地域においてエネルギー・環境・リサイクル分野での復興モデル構築に繋がる研究・技術開発
研 究 領 域 :	統合領域

<キーワード>

木質バイオマス発電
カーボンサイクル
放射性セシウム挙動
復興シナリオ
地域循環共生圏

<研究体制>

サブテーマ1「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウム挙動解明」

<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
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	副領域長	倉持 秀敏	
国立研究開発法人 農業・食品産業技術 総合研究機構	農業環境研究部 門	上級研究員	万福 裕造	2021年度～2023 年度
福島県環境創造セ ンター	研究部	研究員	村沢 直治	2021年度～2023 年度

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所	木材加工・特性研 究領域 木材乾 燥研究室	主任研究員	小井土 賢二	2023年5月～2024 年3月
----------------------------------	-----------------------------	-------	--------	---------------------

＜サブテーマ1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
福島県環境創造センター	研究部	研究員	日下部 一晃

サブテーマ2「ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

＜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
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領 資源循環基盤技 術研究室	主幹研究員	小林 拓朗	

＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名

サブテーマ3「脱炭素を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」

＜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
学校法人東北工業 大学	ライフデザイン 学科生活デザイン 学科	教授	大場 真	
国立研究開発法人 国立環境研究所	福島地域協働研 究拠点 地域環 境創生研究室	主任研究員	中村 省吾	2021年度～2023 年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	福島地域協働研 究拠点 地域環 境創生研究室	主任研究員	大西 悟	2023年5月～2024 年3月

＜サブテーマ3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名

＜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	22,770千円	6,831千円	29,601千円
2022	22,770千円	6,831千円	29,601千円
2023	16,362.8千円	4,908.2千円	21,271千円
合計	61,902.8千円	18,570.2千円	80,473千円

1. はじめに（研究背景等）

2018 年8 月の「福島再生・未来志向プロジェクト」等により、福島県浜通り地域において脱炭素まちづくりの取り組みとして、森林資源を含めたバイオマスを活用した復興が始まりつつある。しかし、復興の計画では、原子力発電所の事故という経緯を踏まえた上で、SDGs、地域循環共生圏などの、広域マルチセクター連携による多目的達成が求められる。浜通りにおけるバイオマス利活用の喫緊の課題は、木質バイオマス発電施設の建設や稼働の遅延である。発電施設では放射性物質に汚染された樹皮や木質チップを燃焼・ガス化させるため、その際の放射性物質の挙動（放射性物質がどのような濃度レベルで残渣へ移行するのか）や汚染残渣の適正処分等に関する知見がなく、安全性等への懸念が遅延の原因となっている。これらの科学的知見無くして、発電事業の遅延は解消できない。一方で、震災以降、地域に滞留している家畜糞尿等の未利用なバイオマスをメタンへエネルギー変換させるメタン発酵施設のニーズも高く、先行の木質バイオマス発電と連携して地域の問題を解決できる分散型バイオマスエネルギーシステムとしての導入が期待されている。導入計画の検討では、安全性が確保された変換技術を基に、地域事情のニーズに沿った将来像を予測した導入シナリオが必要である。

2. 研究開発目的

上記の背景を踏まて、本課題では、汚染された木質バイオマスを対象に安定かつ安全なエネルギー転換技術の確立と、さらなる脱炭素化と地域活性化を志向して木質バイオマス発電技術と糞尿等のメタン発酵を連携させ、二酸化炭素（CO₂）発酵技術と炭素貯留を軸とした脱炭素型先進的連携発電システムを開発することを目的とする。さらにこれを踏まえ、原子力災害からの復興という特殊な事情を背景とする浜通り地域において、安定的なエネルギー原料の生産とその消費のシナリオについて分析を加える。また、発生する最終残渣の適正処理・処分を含めて具体的木質バイオマス発電や連携発電システムの導入シナリオの開発を行い、持続可能性等を評価し、社会実装における課題を整理して施策を提言することを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	稼働・建設予定の木質バイオマス発電施設における喫緊の課題解決として、汚染樹皮と木質チップから高温熱処理により発電するための安定燃焼及びガス化技術を開発し、放射性セシウムの挙動を明らかにして安全な熱処理技術を確立する。加えて、処理残渣の安全性の評価を通して残渣の適正処分法もしくは炭素貯留法を提案する。これらの熱処理技術に対して放射性物質を含めた物質・エネルギー収支モデルを提示する。また、ネットゼロカーボン志向した先進型連携発電システムの実現を目指して、バイオマスのメタン発酵技術に、CCUS技術として金属触媒を利用しつつ、ガス化や発酵において副生成するCO ₂ 等をメタンへ変換する技術（バイオメタネーション）を付加した新技術を開発するとともに、システムから排出される炭素系残渣の貯留における挙動を含めた炭素収支を明らかにする。また、放射性セシウムの挙動を解明し、放射性セシウムを安定的に制御する手法を構築する。さらに、これらの開発技術をキーとして、具体的対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。社会実装を検討するために必要な一次産業による地域資源データベースを構築し、サプライチェーンを提案する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域協働により導入計画を検証する。脱炭素化がもたらす総合的な地域創生効果を検討し、また成果を一般化し、災害からの復旧の際にバイオマスエネルギーを導入するための方法論を整理する。得られた成果については、施設・自治体等へ情報提供することに加えて、バイオマスと脱炭素に関わるセミナーや地域資源循環に関するワークショップを開催する等を企画し、地域住民の理解の醸成と地域ニーズ
------	--

	の把握を図る。
--	---------

サブテーマ 1	「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」
サブテーマ 1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、福島県環境創造センター、国立研究開発法人森林研究・整備機構
サブテーマ 1 目標	・汚染樹皮と木質チップの燃焼技術開発では、実施設調査及びラボ流動床炉等を用いて、安定燃焼条件の提示と、同条件で発生する無機系残渣における放射性セシウムの濃度を明らかにする。また、ガス化技術の開発ではラボ流動床炉を中心に安定なガス化条件とその生成ガスや炭素系残渣の質や量の制御性を把握することに加えて、残渣中の放射性セシウム濃度を明らかにする。なお、類似実機施設調査の結果を踏まえて両発電技術における放射性セシウムの挙動を解明する。 ・両技術から発生する残渣の元素組成や放射性セシウムの溶出性等の性状を明らかにし、無機系残渣の適正処分方法を提案し、一方、炭素系残渣については安全な土壌等への炭素貯留法を提案する。 ・さらに、ガス化技術についてはサブテーマ 2 と技術連携した際の生成ガスや炭素系残渣の質と量に対する制御性も明らかにする。 ・両技術を実装した施設に対する放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。 ・特に、稼働や計画が先行する燃焼発電に関する技術については、技術的な情報提供に留まらず、住民・自治体等との対話を行う。

サブテーマ 2	「ガス化-発酵コンバインド型CO ₂ リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」
サブテーマ 2 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ 2 目標	・今後福島県で普及が予想される再エネ電力、水素等の利活用も想定した、バイオマス利活用に由来するCO₂の隔離・利用のための連携システムを構築する。 ・バイオマス燃焼発電、バイオマスガス化発電及びメタン発酵において生成するCO₂を次の手法でメタン化ないし炭酸塩固定化するための技術システムの確立と導入シナリオ検討のためのエネルギー物質収支モデルを構築する。(1) バイオマス燃焼発電において生成する焼却灰を利用した炭酸塩化(2) 水素導入によるバイオマスガス化発電及びメタン発酵由来のCO、CO₂の微生物学的メタン化(3) 再エネ電力を利用した微生物電解によるCO、CO₂の微生物電気学的メタン化(4) ガス化炭素残渣と金属を触媒として用いたガス化-発酵連携型のCO、CO₂の微生物電気学的メタン化。 ・ガス化処理によって発生するガス及び残渣中に含まれる放射性セシウムを発酵装置へ導入した際の放射性セシウムの挙動と液相からの吸着濃縮・除去方法を構築する。 ・コンバインド型連携技術システムから排出される炭素系残渣は、サブテーマ 1 から提案される安全な炭素貯留法を応用し、炭素貯留を含めた

	連携技術システムにおける炭素収支を明らかにする。また、実機を想定して放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。また、実証に向けて浜通り地域等において成果に関する意見交換・対話等を行う。
--	--

サブテーマ3	「脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」
サブテーマ3 実施機関	学校法人東北工業大学、国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ3 目標	・サブテーマ1-2の開発技術をキーとして、具体の対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。 ・一次産業の現況把握と将来予測により、社会実装を検討するために必要な地域資源データベースを構築し、エネルギー拠点の持続可能な運転のために必要なサプライチェーンを提案する。 ・復興初期から将来における地域社会システムシナリオを開発し、エネルギー拠点の要件を地域ニーズと需要家サイドから推定する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域・協働により導入計画を検証する。 ・研究成果紹介や情報提供を通じて将来における地域社会システムや技術導入シナリオとその効果を示し、地域と共働した技術実装の事業化につなげる。

4. 研究開発内容

【サブテーマ1】汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明では、以下の4つの課題を実施した。

(1). 木質バイオマス燃焼における放射性Csの挙動及びクリンカの生成可能性

木質バイオマス燃焼発電施設において、放射性セシウム（r-Cs）の挙動解明に加えて、樹皮（バーク）も燃料対象とした場合の安全かつ安定燃焼の確立に向けて、実施施設における調査と燃焼試験、ラボ燃焼実験を行った。まず、r-Csの挙動については、流動床式燃焼発電施設（施設A）と火格子式燃焼発電施設（施設B）の2施設を対象とした。後者は調査予定ではなかったが、最終年度に調査の許可が得られたこと、国内では主要な燃焼炉形式であることから実施した。調査では、原料や残渣である飛灰等を採取し、r-Cs濃度を測定し、r-Cs濃縮率を求めた。また、施設の物質収支からr-Csのh飛灰等残渣への分配率を求めた。

実機によるバーク混焼試験では、バーク原料がr-Csの挙動へ与える影響を把握できないことから、流動床式のラボ燃焼実験装置を試作し、バークを原料とした専焼や混焼の燃焼試験を行い、原料中及び燃焼残渣中のr-Cs濃度を測定し、バーク原料が残渣の発生量及び残渣へのr-Cs濃縮率等へ及ぼす影響を明らかにした。

バーク混焼によるクリンカ（灰の溶融物）生成の可能性の評価では、西日本の流動床式燃焼発電施設（施設C）にてバーク混焼試験（木質チップ：バーク＝3：7）を実施し、残渣である飛灰等の灰を採取し、過年度の同施設調査の灰も含めて灰の軟化点（溶け始め温度）や融点（半液球になる温度）を測定し、以下のようにクリンカ生成能を評価した。1）施設内で低融点を有する、溶けやすい灰の発生ポイントの特定、2）バーク混焼した際に、軟化点及び融点の低温化の可否を評価した。

(2) 木質バイオマスガス化におけるガス化特性及びクリンカの生成制御

木質バイオマスガス化発電施設（施設D）では、木質ペレットを原料としているが、コスト削減に向けて以下の課題がある。1)ペレット工場で産業廃棄物となるバークを原料とする。2)発電施設で産廃廃

棄物となる残渣（バイオ炭）の有効利用である。それぞれについて以下の研究を行った。

ガス化実験装置を試作し、杉チップ（従来の主な原料想定）、杉バーク及び松バークを原料とし、20g/h程度の投入速度でガス化実験を行った。ガス化温度は800℃、900℃、1000℃とした。なお、ガス化の際には水蒸気をS（水蒸気の水のモル数）/C（原料中の炭素のモル数）=1で添加した。ガス化ガスはガスバックに捕集され、体積を測定するとともに、水素、一酸化炭素等の濃度を明らかにした。一方、炉内のバイオ炭については、その重量、r-Cs濃度及び炭素量を把握した。以上の結果より、ガス変換率、バイオ炭変換率、r-Csの挙動を明らかにした。また、本課題では、バイオ炭をサブテーマ2のメタン発酵の促進剤として利用することも検討することから、バイオ炭の比表面積も測定した。

ガス化におけるクリンカの生成制御については、心材部が赤いスギ材（赤心材）と、黒いスギ材（黒心材）を用い、それらの心材、辺材、樹皮を粉碎して得られた木粉に対して550℃で灰化（ISO21404準拠）した。また、各々の部位木粉を重量ベースで25、50、75%混合して550℃で灰化した。灰化試料に対し蛍光X線分析を行うことによって、化学組成を得た。灰試料を熔融試験（ISO21404に準拠、二酸化炭素雰囲気）へ供して、温度に対する灰の状態変化から、収縮開始点（SST）、軟化点（DT）、熔融点（HT）、流動点（FT）を求めた。また、灰熔融前後の挙動を解明するために、熱重量/示差熱分析（TG-DTA）を実施した。さらに、灰の軟化・熔融の原因を明らかにするために多成分系熱力学平衡計算を実施するとともに、この計算が実験と整合していることを確かめるために、X線回折を実施した。

(3) 残渣の安全性評価による管理方法と有効利用の検討

まず、残渣の安全性評価として、木質バイオマス発電施設から採取した燃焼灰（飛灰・主灰）及びバイオ炭を対象に、以下の有害元素（r-Cs、ヒ素（As）、カドミウム（Cd）、鉛（Pb）、セレン（Se）、クロム（Cr））の含有量及び溶出率を測定し、安全性の観点から以下の考察を行った。1）r-Csの溶出率から保管や処分上の注意を、2）重金属の含有量及び溶出液中濃度を実測し、土壤汚染対策法の含有量基準及び溶出基準や汚泥肥料の基準値を比較して、土壤改良剤の利用可能性を考察した。

バイオ炭の貯蔵時における安全性評価の研究では、福島県内にある木質バイオマスガス化発電施設（施設D）において採取したバイオ炭と、ラボ熱分解炉より得られたバーク由来のバイオ炭の合計5種類を用いて、様々な「高感度熱分析装置」等を組み合わせ、試料の火災危険性評価と安全策の立案を行う「熱危険性評価手法」により、バイオ炭の自然発火危険性評価を行った。また、上記した熱危険性評価手法による各結果を踏まえ、バイオ炭が貯蔵場所において、自然発火に至るメカニズムやその予防方法について考察した。

(4) 住民・自治体との対話

福島県飯舘村では、「木質バイオマス発電施設」整備の可能性について検討が進められ、この事業は、立地地区からの意見を十二分に踏まえて事業計画を進めることが前提になっている。そこで、研究分担者が本課題の成果を発信しながら住民や自治体との対話に積極的に関与し、対話で事業の安全性等の理解を得るための重要な点を整理した。

【サブテーマ2】ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明

熱分解ガス化とメタン発酵等の生物処理プロセスを組み合わせ、木質バイオマス、食品・草本残渣等の地域資源を統合的に利用する技術システムを構築することを目的として、バイオマス燃焼発電で派生する焼却灰、熱分解ガス化で派生するバイオ炭、メタン発酵で派生する発酵残渣固形分等を各技術で効果的に利用するための技法の開発に取り組んだ。

熱分解温度の上昇がバイオ炭の比表面積や導電性を改善させ、メタン発酵の促進させることを確認し、高温で処理する熱分解ガス化施設のバイオ炭は、メタン発酵の添加剤として有望であることを示した。また、CO₂の導入はバイオ炭をより発酵に適した性状に変化させることを明らかにした。さらに、燃焼灰の活用に関して、熱分解原料に浸透させ、原料中のカリウム濃度を高めることで、バイオマス中の炭素とCO₂との反応性が向上し、より低い温度でCO₂と炭素からのCO生成反応が進行することを確認し

た。杉バークを使った熱分解では、800℃で窒素雰囲気下の場合と比較し、燃焼灰を活用することでCO₂雰囲気下でのCO発生量は5倍以上に増大した。このことから、バイオマス燃焼灰由来のカリウムを触媒として利用することで、ガス化率の大幅な増大とCO₂リサイクルの促進が期待できることを示した。

種々のバイオマスについてCO₂雰囲気下での熱分解の反応性を調査したところ、原料のアルカリ金属やアルカリ土類金属濃度との間に相関性が認められ、Ca濃度が高いメタン発酵残渣はCO₂との反応性が極めて高いことを見出した。具体的には発酵残渣は杉バークよりも160℃以上低い温度で反応速度ピークを示し、800℃で熱分解した際に残渣の灰分率は100%であった。その結果、発酵残渣からのCO発生量は、窒素雰囲気下と比較してCO₂雰囲気下で11倍に増大した。残った無機残渣は、バイオ炭と同様の発酵促進効果を発揮することも確認でき、発酵残渣のCO₂導入式熱分解はCO₂リサイクルとメタン発酵促進に同時に寄与することを明らかとした。

サブテーマ3で検討する脱炭素産業拠点における技術の適用を想定し、周辺地域の利用可能な主要なバイオマスである食品残渣と草本バイオマスのメタン発酵連続実験と、それに対するバイオ炭添加の影響を評価した。連続実験においては、バイオ炭はメタン収率の増大とpH変動に対する安定性の増大に寄与することを確認した。さらに、比表面積の大きなCO₂雰囲気下で処理したバイオ炭を添加した系では、原料からのメタン収率も他の系と比較して20%程度増大させた。バイオ炭投入により発酵液内の固形分濃度は増大するが、粘性は逆に低下することから、原料に対して1%程度の添加率でバイオ炭を投入し続けることは運転の支障にはならないことが確認できた。以上のことから、産業拠点で想定する技術システムにおいてバイオ炭投入式のメタン発酵が有望であることを示すとともに、物質収支に係る熱分解-発酵統合システムの設計パラメータを提供することができた。

バイオ炭はメタン発酵だけでなく、CO₂バイオメタネーションにおいても活用が期待できる。湿潤担体を充填した塔にガスを通気し反応させるバイオフィルター型リアクターの担体にバイオ炭を使用し、ポリウレタン担体と対照実験を実施したところ、バイオガスと水素の混合ガスを想定した模擬ガスの処理において、バイオ炭担体の系では通気速度が20～25 L/L-槽/日の条件においても処理後のメタン濃度95%以上を維持できた。

発酵原料及び添加剤として投入するバイオ炭が放射性Csで汚染されていた場合を想定し、発酵液における放射性Csの分配を検討した。原料に汚染牧草を用いたメタン発酵連続実験においては、放射性Csは原料中の土壌に集中しており、発酵過程ではそれが溶出しないことを確認した。一方、バイオ炭からは発酵液の水相に放射性セシウムが放出され、17～39%が水相に溶存体として存在することがわかった。しかしながら、原料に対するバイオ炭添加率が1%の場合、発酵液中での放射性Cs濃度は12 Bq/kg程度で、そのうち液分に存在する溶存態の放射性Csは2～4 Bq/kgの濃度であると推算され、肥料に対する暫定許容値の400 Bq/kgと比較して十分に低い水準であった。バイオ炭を添加したメタン発酵を行なった場合にも、残渣の液肥としての利用には支障がないと考えられた。

【サブテーマ3】脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発

サブテーマ3では、まず、福島県におけるバイオマスポテンシャルと、その再生可能エネルギーポテンシャルについて、既報の国内研究、データベースを整理し、様々な種類のバイオマスポテンシャルを平易に推定できる手法としてまとめた。また国内で増加しつつある運転中のバイオマスエネルギー事業について、需要者側とセットになった事業を抽出し、幅広く知見を収集し、本課題で提案する浜通り地域におけるバイオマスによる分散エネルギー導入についてのレビューを行い、課題を整理した。復興まちづくりのエネルギー拠点の設計に向け浜通り地域の需要家の特定と創出にむけた推計手法を開発した。特定の自治体においては、その手法・モデルを活用し、特定の産業団地を対象に、電熱エネルギー需要推計を実施した。

さらに、これまでは大まかな地域での資源量が推定されてきた木質バイオマスは、現在、レーザー計測による機械学習技術の開発により、地理座標が付属した毎木の資源量が取得可能な段階にきている。浜通り地域の森林(磐城地域)では、さらに除染されていないため、現在でも立ち入りが著しく困難であるため、2011年の震災・事故後に全く立ち入ることができなかった森林が、その後どのような経過を経ているかを資源精査する技術を開発した。今後の木質バイオマス利用が本格化することに備えて、

浜通り地域における木質バイオマス利用可能量と需給量の推定を行い、福島県内で輸入燃料を使用しない木質バイオマス発電事業および燃料供給体制の現状および課題について整理した。

以上のサブテーマの成果及びサブテーマ1-2の研究開発を踏まえ、浜通りの自治体のうち、大熊町の地域将来シナリオを開発した。また、地域と共働した技術実装の事業化を見据え、関係者との地域・協働を実施し、地域ニーズの把握、調査結果・技術開発・社会実装研究の知見の提供を継続的に実施した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明

(1) 木質バイオマス燃焼における放射性Csの挙動及びクリンカの生成可能性

流動床式の施設Aから採取した原料及び燃焼飛灰に対するr-Cs濃度、飛灰へのr-Cs濃縮率は以下の通りである。木質燃料中のr-Cs濃度が14～38 Bq/kgであれば、飛灰中の濃度は4,000 Bq/kg未満であり、指定廃棄物（r-Cs濃度8,000 Bq/kg以上）にならず、産業廃棄物として処分できる濃度レベルになることがわかった。濃縮率は73～200倍と大きく変動したが、実機の処理量と燃焼飛灰の発生量に関するヒアリングからマクロ的な量で概算すると濃縮率は75～105倍程度と予想される。また、残渣として飛灰と不燃物が排出され、r-Cs分配率はそれぞれ99.5%と0.05%となり、r-Csのほとんどが飛灰へ移行することが推定された。一方、火格子式の施設Bから採取した原料中のr-Cs濃度は、1号機と2号機でそれぞれ20～51 Bq/kgと15～34 Bq/kgであった。1号機の主灰及び飛灰のr-Cs濃度は最大で1977 Bq/kg及び3603 Bq/kgであった。また、2号機の主灰及び飛灰のr-Cs濃度はそれぞれ最大で3269 Bq/kg及び7204 Bq/kgであった。1号機の原料中のr-Cs濃度の方が2号機のそれよりも高いが、主灰及び飛灰のr-Cs濃度は2号機のそれよりもかなり低かった。原料中の灰分が異なり、灰分の希釈効果により、1号機における両灰中のr-Cs濃度が低下したと考えられる。また、これは濃縮率の差にも影響を与え、2号機の飛灰への濃縮率は350倍を超え、流動床式よりも濃縮率がかなり高くなる点に留意が必要である。特に、切削チップ中のr-Cs濃度が34 Bq/kgを超えると、飛灰中のr-Cs濃度が指定廃棄物とされるr-Cs濃度（>8000 Bq/kg）に極めて近くなる。切削チップを原料とする場合には、原料の濃度管理は安全かつ安定運転において不可欠である。施設の処理実績と先述のr-Cs濃度から、主灰と飛灰へのr-Csの分配率を算出した。1号機と2号機の飛灰への分配率は、共に高いことがわかった。

パークの混焼によるr-Cs挙動への影響については、小型流動床燃焼装置による燃焼試験から、パークの燃焼では、その灰分が高いことから飛灰の処分量が増えるものの、飛灰中のr-Cs濃度は大きく低減されることがわかった。処分場のr-Cs濃度に係る受入基準を意識すると、パーク混焼によるr-Cs濃度の低減は運転・管理上の大きな利点と考えられる。

次に、パーク混焼におけるクリンカ生成能の評価では、過年度調査時に実施した通常運転（木質チップ燃焼）で採取した灰の溶融特性（軟化点と融点）を測定し、上流側の灰（炉底灰、ボイラ灰）が溶けやすいことがわかった。次に、木質チップとパークの割合が3:7になるように混焼した場合の原料灰分、炉底灰、飛灰の溶融特性を測定し、通常運転時のそれらの値と比較した。パークの添加により、炉底灰と飛灰の軟化点及び融点の低温化は観察されなかった。また、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ の状態図（組成と融点の関係）用いても低融点化されないことが示唆された。以上の結果より、パークの割合が70%になるように混焼しても懸念された灰の軟化点及び融点の低温化が起きず、つまりクリンカ生成能は変化せず、通常運転と同様に安定運転できると予想される。

(2) 木質バイオマスガス化におけるガス化特性及びクリンカの生成制御

杉チップ、杉パーク及び松パークをガス化した際のガス変換率、バイオ炭変換率、タール等変換率を求めた。温度の上昇とともに、ガス変換率が増加し、他の変化率は減少した。た。ガス化としては、タールの発生量が少なく、ガス発生量の多い1000℃の条件が望ましいと考えられる。木の部位で比較する

と、バークの方がタール等の発生が抑制され、ガス変換率も高いことがわかった。この点からバークを原料としても問題なく、むしろ運転の阻害となるタールの発生率が半減する点は大きな利点である。バークについて樹種間で比較すると、杉バークのガス化率が若干高い程度であり、松バークでも問題なく、杉チップと同様に原料として利用できると予想される。また、ガス化ガス中の水素や一酸化炭素のカロリーガスの濃度も樹種間で顕著な違いもないことから、この点からもバークを原料として利用することが可能と判断される。一方、バイオ炭との性状と温度の関係は、温度上昇に伴い、比表面積が増加することから、高温ほど機能性が高いと予想され、サブテーマ2のバイオ炭のメタン発酵促進剤としての検討においても、1000℃のバイオ炭を提供した。r-Csの挙動については、温度の上昇とともに、ガスへのr-Csの分配率が増加し、特に900℃と1000℃を境に急激に増加した。これはバイオ炭変換率が急激に低下したためであると考えられる。いずれにしても、実機相当の条件では、ガス化ガスへのr-Csの分配率は高く、ガス冷却過程においてr-Csはダストに凝結することから、ダストの高濃縮については、木質チップ燃焼の飛灰と同様に注意する必要がある。

ガス化におけるクリンカ制御の研究では、炉内での灰の熔融、すなわちクリンカ生成を再現するために、CO₂雰囲気下における杉材の灰に対して熔融試験を実施した。黒心材、赤心材・辺材の熔融点は800℃以下と低く、融点を上げる必要があり、高融点の樹皮を混合することによる融点上昇の効果を検討した。赤心材に対して樹皮を50%以上、赤辺材に対しては25%以上樹皮を混合すれば熔融点が1420℃以上まで上昇することが明らかとなった。樹皮を混合することで心材、辺材の熔融点を制御し、クリンカを抑制することが期待できる。

灰の軟化・熔融前後の挙動を把握するために熱分析、X線回折による結晶相解析、相平衡を含む多成分系熱力学平衡計算を行った。スギ材の灰の軟化・熔融においてK₂CO₃とCaCO₃が寄与していることが明らかになった。そこで、灰熔融点をK₂CO₃-CaCO₃系の相平衡状態図上で実験結果を整理し、以下の知見を得た。CaとKの炭酸塩比： $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3)$ が83%よりも小さい場合では熔融点は概ね共晶温度付近に位置しており、スギ灰の熔融がK₂CO₃-CaCO₃系の相平衡によって説明できることを意味している。これに対し、 $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3) \geq 83\%$ では熔融点が1420℃以上となり、高い熔融点を示した。これは、K₂CO₃-CaCO₃系の相平衡では説明がつかないが、熱分析等により、CaCO₃は950℃付近で急激な脱炭酸分解が起こると考えられ、比較的安定なCaOが生成し、高い熔融点が得られることが推察された。

以上により、CaとKの炭酸塩比である $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3)$ が83%以上となるまでスギ木部に樹皮を混合すれば、熔融点が1420℃以上まで高まり、クリンカの抑制が可能であることが示唆された。

(3) 残渣の安全性評価による管理方法と有効利用の検討

流動床式施設Aの飛灰からのr-Cs溶出率は26～61%であり、一方、火格子式施設Bの主灰と飛灰の溶出率は、全体的に流動床式の飛灰よりも溶出率が高く、原料により傾向が異なった。また、主灰の溶出率が高い点は、一般廃棄物や除染廃棄物の焼却で得られる主灰の溶出特性とはまったく異なる点に注意が必要である。元素分析結果と比較すると、塩基度（酸化カルシウム/シリカ=CaO/SiO₂）が高いほど、また、塩素含有量が高いほどr-Cs溶出率が高い傾向にあった。特に、流動床式の灰の溶出率では、塩基度に関しては、相関関係があった。この相関式を用いることにより、燃焼飛灰からのr-Csの溶出率を大まかに推定することが可能である。

一方、バイオ炭の溶出率は52～64%になり、比較的高い値であった。いずれにしても木質チップやペレットの燃焼及びガス化の残渣からのr-Csの溶出性は低いことはないため、残渣が水と接触した場合にr-Csが溶出する可能性があり、一時保管の際には遮水等の対策を行うことが望ましい。また、処分する際にもr-Csに汚染された焼却飛灰に対する対策、すなわち特定一般廃棄物・特定産業廃棄物の特別処理基準（埋立の場合には、土壌層の設置と層状埋立や飛灰の水との接触低減等）と同程度の対策は必要と考えられる。

次に、残渣に対して有害重金属に対する含有量及び溶出液中の有害重金属濃度を測定して、土壌汚染対策法の基準値及び汚泥肥料の規格値と比較した。バイオ炭はすべての基準値や規格値を満たすが、飛灰については、土壌汚染対策法の溶出基準のCr、Pb、As、Seが超過するケースがあった。バイオ炭は

土壌改良剤として、直接利用できる可能性が示唆された。バイオ炭は炭素が主要成分であることから、炭素貯留の機能も有する。これまでバイオ炭は産業廃棄物として処理・処分されていたが、土壌改良剤としてリサイクルされ、炭素貯留によりJ-クレジットも認められれば、施設Dの低コスト化やリサイクル率の向上が期待される。

バイオ炭の貯蔵時における安全性評価の研究では、まず双子型高感度熱量計による評価によると、40℃前後から空気との酸化によるものと推定される微小な発熱を開始することがわかった。この結果から、木質ペレットやバークを原料とするいずれのバイオ炭においても、40℃前後の室温環境で大量貯蔵され、外部との熱の出入りがない「断熱状態」であれば、微小発熱により、蓄熱後に温度上昇し（含有水分の蒸発や沸騰による吸熱を乗り越え）、熱分解開始温度に到達し、火災に至る危険性があると考えられる。次にJIS M8814に準じたボンベ型燃焼熱量計による評価では、温度上昇の過程で可燃性のガスが発生した場合には、貯蔵場所において爆発が発生することが想定できる。また、小ガス炎着火試験をした結果、バイオ炭は外部からの火炎によって比較的容易に着火する可能性があり、火災が発生した場合延焼拡大していくことがわかった。火災発生時には、延焼拡大防止措置（除去消火法：可燃物を取り除き燃焼を止める消火法）を講じた上で、窒息消火法あるいは冷却消火法を併用し、消火活動を行わなければならない可能性がある。さらに、放射性Csを含むバイオ炭が火災を発生させた場合、r-Csの飛散状況モニタリングや消火等（含：消火水によるr-Cs流出防止措置）、現場では様々な対応や意思決定を求められる可能性が高い。そのため、貯蔵場所でのバイオ炭の火災を防止し、バイオ炭を製品として有効活用していくためには、堆積高さや貯蔵量の制限、内部温度のモニタリング等の事前対策が必要となることが考えられる。

(4) 住民・自治体との対話

住民との対話では、木質燃料として活用する県内の木質バイオマスには放射性物質が付着または含有していることに対する不安が最も多く意見として述べられた。立地地区では、環境省による6年間にわたっての仮設減容化施設の運転実績や情報公開、福島県生活環境の保全等に関する条例に基づく成分分析等が行われていたが、加えて当該サブテーマの研究成果の結果及び予測値などを説明することにより、不安を払拭して発電事業に深い理解が得られた。また、本対話を通して、地域に信頼されている専門家が説明会に参加し、住民に分かり易く説明すること、質疑が無くなるまで丁寧に対応することが不安払拭には重要と考えられた。

【サブテーマ2】ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明

熱分解ガス化とメタン発酵等の生物処理プロセスを組み合わせ、木質バイオマス、食品・草本残渣等の地域資源を統合的に利用する技術システムを構築することを目的として、バイオマス燃焼発電で派生する焼却灰、熱分解ガス化で派生するバイオ炭、メタン発酵で派生する発酵残渣固形分等を各技術で効果的に利用するための技法の開発に取り組んだ。

発酵プロセスを促進するバイオ炭の生成に適した熱分解条件に関しては、熱分解温度の上昇がバイオ炭の比表面積や導電性を改善させ、メタン発酵の促進効果も拡大することを確認し、高温でバイオマスを処理する熱分解ガス化プラント由来のバイオ炭は、メタン発酵の添加剤として有望であることを示した。また、熱分解におけるCO₂の導入はバイオ炭の高い導電性を維持しつつ、比表面積と親水性を改善し、メタン発酵の添加剤としての効果も拡大することを確認した。

燃焼灰の熱分解での活用に関しては、燃焼灰洗浄水由来のミネラルを熱分解原料に浸透させ、原料中のカリウム濃度を高めることで、バイオマス中の炭素とCO₂との反応性が向上し、より低い温度（反応速度ピーク温度で140℃低下）でCO₂と炭素からCOを生成する反応が進行することを確認した。杉バークを使った熱分解では、800℃で窒素雰囲気下の場合と比較し、灰由来K負荷+CO₂雰囲気下でのCO発生量は5倍以上に増大した。このことから、バイオマス燃焼灰由来のカリウムを触媒として利用することで、ガス化率の大幅な増大とCO₂リサイクルの促進が図れることを明らかにした。さらに、その処理で生成したバイオ炭は、CO₂雰囲気下で生成した他のバイオ炭と同等のメタン発酵促進効果を持つこと

を確認した。

種々のバイオマスについてCO₂雰囲気下での熱分解の反応性を調査したところ、原料のアルカリ金属やアルカリ土類金属濃度との間に相関性が認められ、Ca濃度が高いメタン発酵残渣はCO₂との反応性が極めて高いことを見出した。具体的には発酵残渣は杉バークよりも160°C以上低い温度で反応速度ピークを示し、800°Cで熱分解した際には炭素が全て反応し、残渣の灰分率は100%であった。その結果、発酵残渣からのCO発生量は、窒素雰囲気下と比較してCO₂雰囲気下で11倍に増大した。残った無機残渣は、バイオ炭と同様の発酵促進効果を発揮することも確認でき、発酵残渣のCO₂導入式熱分解はCO₂リサイクルとメタン発酵促進に同時に寄与することを明らかとした。

サブテーマ3で検討する脱炭素産業拠点における技術の適用を想定し、周辺地域の利用可能な主要なバイオマスである食品残渣と草本バイオマスのメタン発酵連続実験と、それに対するバイオ炭添加の影響を評価した。連続実験においては、バイオ炭はメタン収率の増大とpH変動に対する安定性の増大に寄与することを確認した。特に草本のメタン発酵においてバイオ炭の効果が顕著で、この系は窒素分が乏しく代謝由来アルカリ度の供給が少ない発酵系であることから、中間体の有機酸の蓄積等によるpH変動の影響を受けやすい。バイオ炭投入無しの系では60日程度の運転後にpHの低下により運転が不安定化した。一方、バイオ炭添加系においては適正pH範囲が維持でき安定した運転が継続できた。さらに、比表面積の大きなCO₂雰囲気下で処理したバイオ炭を添加した系では、原料からのメタン収率も他の系と比較して20%程度増大させた。バイオ炭投入により発酵液内の固形分濃度は増大するが、粘性は逆に低下することから、原料に対して1%程度の添加率でバイオ炭を投入し続けることは運転の支障にはならないことが確認できた。以上のことから、産業拠点で想定する技術システムにおいてバイオ炭投入式のメタン発酵が有望であることを示すとともに、物質収支に係る熱分解-発酵統合システムの設計パラメータを提供することができた。

バイオ炭はメタン発酵だけでなく、CO₂バイオメタネーションにおいても活用が期待できる。湿潤担体を充填した塔にガスを通気し反応させるバイオフィルター型リアクターの担体にバイオ炭を使用し、ポリウレタン担体と対照実験を実施したところ、バイオガスと水素の混合ガスを想定した模擬ガスの処理において、バイオ炭担体の系では通気速度が20～25 L/L-槽/日の条件においても処理後のメタン濃度95%以上を維持できた。一方でウレタン担体の系では15 L/L-槽/日の条件において処理性能が悪化し、90%以上のメタン濃度が維持できなかった。

発酵原料及び添加剤として投入するバイオ炭が放射性Csで汚染されていた場合を想定し、発酵液における放射性Csの分配を検討した。原料および添加物を含む投入物の放射性Cs量と発酵液の放射性Cs量は釣り合っており、既に報告例があるようにガス側には移行していないことを示唆していた。原料に汚染牧草を用いたメタン発酵連続実験においては、放射性Csは原料中の土壌に集中しており、発酵過程ではそれが溶出しないことを確認した。一方、バイオ炭からは発酵液の水相に放射性セシウムが放出され、17～39%が水相に溶存体として存在することがわかった。しかしながら、原料に対するバイオ炭添加率が1%の場合、発酵液中での放射性Cs濃度は12 Bq/kg程度で、そのうち液分に存在する溶存態の放射性Csは2～4 Bq/kgの濃度であると推算され、肥料に対する暫定許容値の400 Bq/kgと比較して十分に低い水準であった。バイオ炭を添加したメタン発酵を行なった場合にも、残渣の液肥としての利用には支障がないと考えられた。

【サブテーマ3】脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発

サブテーマ3では、入手可能なデータに基づいた、より汎用性の高いバイオマスポテンシャル推定法を開発した。様々なバイオマス資源の利活用と資源量推定の研究が行われてきたが、バイオマスの種類が多岐に渡るため、方法論やデータが散在していた。既報の国内研究、データベースを整理し、様々な種類のバイオマスポテンシャルを平易に推定できる手法としてまとめた。これは今後の復興や一般的なまちづくりにも、そのまま適用可能である。木質バイオマスについてはバイオマスの詳細な生産地とDXに対応した資源査定技術を、浜通りに拠点を置く企業と共同で開発した。また現状でのバイオマスの

需給状況を明らかにし、浜通りにおける一次産業に貢献できるように整備した。

現在行われている、バイオマス発電・熱供給事業について、32事業を文献、直接調査した。燃料供給から地域連携、波及効果まで調査項目を設け精査し、現在の課題の整理と、今後必要とされるシステムの提案を行った。太陽光や風力などによる再生可能エネルギーと比較して、バイオマスによる再生可能エネルギーは、その燃料であるバイオマスを運転期間中事業者が調達しなければならないという困難を、持続可能な運転を続けている事業から解決する方法群をカタログとして示した。福島県全体および今後森林利活用が本格化することが想定される浜通り地域のバイオマス利用の需給調査からは、県内全域や隣接県で新たなバイオマス需要が増加し、100 Bq/kg未満の材は需給ひっ迫する可能性がある、製材、合板用材の需要低迷とそれに伴う針葉樹の伐採控え、優良材のバイオマス需要への転化発生を指摘した。また地域ニーズと需要家の類型化を行い、中核エネルギー事業との質的・量的関係を示した。浜通りの15市町村については、人口、産業誘致・地域振興、林業・漁業、インフラ整備政策の記述について、自治体ごとの特徴を整理、分析した。また、拠点整備として総合・復興計画に基づく事業92件、省庁補助事業11件、災害公営・復興住宅事業38件を事業名、事業補助省庁・県、事業時機、インフラ等ハード面整備の有無を調査し、表形式で構造的にデータベース化した。また、新産業創出に係る産業団地の入居状況について、造成状況、入居事業所を特定し、産業分類、施設面積、本社所在地、一部、雇用予定人数を調査し、地理情報システム内に格納した。加えて波及効果、地域の連携のあり方なども整理した。これらは全国的にも一般化できる手法である。

浜通りの自治体と実際に協議した上で、周辺に創出が想定される需要家を特定し、植物工場、食品加工産業、繊維、電子デバイス、有機化学工業の組み合わせで、4シナリオにおいて電熱エネルギー需要及びバイオマスでの代替可能性を推計した。

具体的な、地域復興の中核施設としてバイオマス燃焼とメタン発酵のコンバインドシステムを提案し、地域の未利用バイオマスに関するマスフロー、事業の経済性などを定量的に明らかにした。農業残渣の利用による農地における保全と吸収源の確保、メタン発酵による液肥の農地還元など、循環経済のモデルたるプランを提案した。最良シナリオでは、木質バイオマスガス化熱電供給システムにより、約20億円の初期費用が生じるものの、1/2補助、FITなしで、5年程度の投資回収年、5億円／年程度の地域経済効果、14,000t- CO_2 の脱炭素効果となった。サブテーマ1-2のコンバインドシステムによるメタン発酵の効果として、追加的に13億円の初期費用が必要であるが、年間420t- CO_2 の化石燃料削減による脱炭素効果、120t- CO_2 の炭素貯蔵効果がある。メタン発酵事業単体の場合、事業採算性は見込めないが、木質バイオマスガス化熱電供給システムと近接することで、採算性が向上し、脱炭素効果が増加することを示した。

これらの研究成果は、環境省「脱炭素×復興まちづくり」等とも連携し、いくつかの浜通り自治体と連携のための意見交換や打ち合わせを定期的に行った。

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

「脱炭素化を目指した汚染バイオマスの先進的エネルギー変換技術システムの開発と実装シナリオの設計及び評価」

全体目標	全体の達成状況
稼働・建設予定の木質バイオマス発電施設における喫緊の課題解決として、汚染樹皮と木質チップから高温熱処理により発電するための安定燃焼及びガス化技術を開発し、放射性セシウムの挙動を明らかにして安全な熱処理技術を確立する。加えて、処理残渣の安全性の評価を通して残渣の適正処分法もしくは炭素貯留法を提案する。これらの	サブテーマ1では、汚染樹皮と木質チップを原料に、実機調査・試験とラボ実験による燃焼及びガス化技術を開発研究した。その結果、懸念される放射性セシウムの挙動やクリンカの生成可能性を明らかにして安全な熱処理技術を確立した。また、熱処理残渣に対する溶出試験や熱分析を通して、両残渣の適正な貯蔵・処分法を提示した。さ

熱処理技術に対して放射性物質を含めた物質・エネルギー収支モデルを提示する。また、ネットゼロカーボンを志向した先進型連携発電システムの実現を目指して、バイオマスのメタン発酵技術に、CCUS技術として金属触媒を利用しつつ、ガス化や発酵において副生成するCO₂等をメタンへ変換する技術（バイオメタネーション）を付加した新技術を開発するとともに、システムから排出される炭素系残渣の貯留における挙動を含めた炭素収支を明らかにする。また、放射性セシウムの挙動を解明し、放射性セシウムを安定的に制御する手法を構築する。さらに、これらの開発技術をキーとして、具体の対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。社会実装を検討するために必要な一次産業による地域資源データベースを構築し、サプライチェーンを提案する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域協働により導入計画を検証する。脱炭素化がもたらす総合的な地域創生効果を検討し、また成果を一般化し、災害からの復旧の際にバイオマスエネルギーを導入するための方法論を整理する。得られた成果については、施設・自治体等へ情報提供することに加えて、バイオマスと脱炭素に関わるセミナーや地域資源循環に関するワークショップを開催する等を企画し、地域住民の理解の醸成と地域ニーズの把握を図る。	らに、ガス化残渣のバイオ炭については、炭素貯留も含めた土壌改良剤利用が安全に実施できる可能性を示した。複数施設の調査や土壌改良剤の利用の検討は計画にない成果である。 サブテーマ2では、連携発電システムとして、熱分解ガス化残渣のバイオ炭をメタン発酵やバイオメタネーションへ添加し、発酵促進剤として利用できることを示した。さらに、燃焼発電やメタン発酵それぞれの副生物を活用し、可燃性ガスへの変換率、CO₂リサイクル、バイオ炭のアップグレード等の相乗効果を生み出す連携システムを構築した。また、発酵における放射性セシウムの挙動、その除去対策や効果を提示した。メタン発酵における放射性物質の挙動及び放射性物質の除去方法に関する既往研究はないことから、貴重な知見が得られた。 サブテーマ3では、地域復興の中核施設としてバイオマス燃焼とメタン発酵のコンバインドシステムを提案し、地域の未利用バイオマスに関するマスマスフロー、事業の経済性などを定量的に明らかにした。バイオマスの詳細な生産地とDXに対応した資源査定技術を開発し、現状でのバイオマスの需給状況を明らかにした。汎用性の高いバイオマスポテンシャル推定法を開発した。地域ニーズと需要家の類型化を行い、中核エネルギー事業との質的・量的関係を示した。また波及効果、地域の連携のあり方なども整理した。環境省「脱炭素×復興まちづくり」等とも連携し、いくつかの浜通り自治体と連携のための意見交換や打ち合わせを定期的に行った。
---	---

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・

2. 目標を上回る成果をあげた

「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
1. 汚染樹皮と木質チップの燃焼技術開発では、実施調査及びラボ流動床炉等を用いて、安定燃焼条件の提示と、同条件で発生する無機系残渣における放射性セシウムの濃度を明らかにする。また、ガス化技術の開発ではラボ流動床炉を中心に安定なガス化条件とその生成ガスや炭素系残渣の質や量の制御性を把握することに加えて、残渣中の放射性セシウム濃度を明らかにする。なお、類似実機施設調査の結果を踏まえて両発電技術における放射性セシウムの挙動を解明する。 2. 両技術から発生する残渣の元素組成や放射性セシウムの溶出性等の性状を明らかにし、無機系残渣の適正処分方法を提案し、一方、炭	1. 汚染樹皮と木質チップの原料に対して、実機調査・試験とラボ流動床燃焼装置を用いて、安全面で懸念される放射性セシウム(r-Cs)の挙動や安定運転で懸念されるクリンカの生成可能性を明らかにし、安全かつ安定な燃焼技術を確立した(成果1)。また、ラボガス化実験装置を試作し、ガス変換率、カロリーガス濃度、炭素系残渣(バイオ炭)の発生量と性状等を把握した。また、クリンカの生成を抑制する条件も提示した(図1-15)。安定運転及び残渣の有効利用から最適なガス化温度条件を提示し、その際のr-Csの挙動を明らかにし、安全面での考察も行った。計画にない、別形式の施設調査も行い、有用な知見を得た(図1-2b、図1-2a)。 2. 燃焼灰やバイオ炭に対して性状を明らかにし、適正な貯蔵や処分方法を提案した(図1-21)。バイオ炭については炭素貯留法として、土壌改良剤として安全に利用できることを提案

素系残渣については安全な土壌等への炭素貯留法を提案する。 3. さらに、ガス化技術についてはサブテーマ2と技術連携した際の生成ガスや炭素系残渣の質と量に対する制御性も明らかにする。 4. 両技術を実装した施設に対する放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。 5. 特に、稼働や計画が先行する燃焼発電に関する技術については、技術的な情報提供に留まらず、住民・自治体等との対話を行う。	した。重金属の含有量とそれらの溶出率も明らかにした点は目標を上回る点である。(図1-18) 3. ガス化条件とバイオ炭の発生量と質の関係を明らかにした。(図1-6及び7) 4. 施設調査から、物質収支・エネルギー収支を整備し、ラボ試験等により、r-Csの分配挙動を明らかにした。(図1-8) 5. 住民・自治体との対話を積極的に行い、地域住民が燃焼発電施設に深い理解を得るための成果発信・対話の取り組みを考察した。再エネ導入計画等の取りまとめにも関与して大きな成果を得た。
---	--

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

「ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
1. 今後福島県で普及が予想される再エネ電力、水素等の利活用も想定した、バイオマス利活用に由来するCO₂の隔離・利用のための連携システムを構築する。 2. バイオマス燃焼発電、バイオマスガス化発電及びメタン発酵において生成するCO₂を次の手法でメタン化ないし炭酸塩固定化するための技術システムの確立と導入シナリオ検討のためのエネルギー物質収支モデルを構築する。(1)バイオマス燃焼発電において生成する焼却灰を利用した炭酸塩化(2)水素導入によるバイオマスガス化発電及びメタン発酵由来のCO、CO₂の微生物学的メタン化(3)再エネ電力を利用した微生物電解によるCO、CO₂の微生物電気学的メタン化(4)ガス化炭素残渣と金属を触媒として用いたガス化-発酵連携型のCO、CO₂の微生物電気学的メタン化。	1. 熱分解ガス化、燃焼発電、メタン発酵それぞれの副生物を活用し、可燃性ガスへの変換率、CO₂リサイクル、バイオ炭のアップグレード等の相乗効果を生み出す連携システムを構築できた。 2. バイオマス変換処理において派生するCO₂に関して、次の方法によるメタン化ないし有価物変換する技術システムの確立と物質収支を示し、サブテーマ3のバイオマス利用システムデザインに貢献できた。(1)では、当初メタン発酵への添加剤としての利用を検討したが、効果が小さいことから熱分解への利用に方向転換し、燃焼灰中の金属を熱分解原料に浸透させることにより、800℃でのCO₂のCOへの変換を数倍以上に促進すること、微生物電気化学的共生を強化するような、バイオ炭をメタン発酵にとってより適した性状にすることを可能とした(成果2-3、図2-1)。また、Caリッチなメタン発酵残渣は、CO₂導入下の熱分解での炭素変換効率が極めて優れており、CO₂のCOへの変換を促進する資材として有望であることを見出した(図2-2)(2)から(4)では、生物学的メタン化においてCOとCO₂では微生物による反応速度に1桁の違いがあることを確認し、微生物学的メタン化プロセスで同時に処理することが困難であると判断し、より高速で処理できるCO₂だけを対象とするプロセスとしてその効率の向上を試みた。処理装置の構成について、同時に基質として供給する必要となる水素の溶解が律速であり、ガスの循環による気泡導入量や培養槽内電解での水素供給等の対策を行ったものの、水槽式のバイオリアクターでは十分な気液界面積を確保することができず、気相部のメタン濃度を90%以上

3. ガス化処理によって発生するガス及び残渣中に含まれる放射性セシウムを発酵装置へ導入した際の放射性セシウムの挙動と液相からの吸着濃縮・除去方法を構築する。 4. コンバインド型連携技術システムから排出される炭素系残渣は、サブテーマ1から提案される安全な炭素貯留法を応用し、炭素貯留を含めた連携技術システムにおける炭素収支を明らかにする。また、実機を想定して放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。また、実証に向けて浜通り地域等において成果に関する意見交換・対話等を行う。	に高めることは困難であった。そこで、濡れ性に優れるCO₂雰囲気下で熱分解して生成するバイオ炭を利用し、ガスを通気するカラムに微生物を保持した湿潤バイオ炭を充填する湿潤担体ろ過式CO₂バイオメタネーションを構築し、15 L/L-槽/日以上以上の通気率、95%以上のメタン濃度といった優れた性能を示すプロセスを構築可能であることを明らかにした（図2-7）。 3. 実施設において放射性セシウムを含むバイオ炭を採取し、メタン発酵に対して原料に混合しつつ連続的に投入する実験を行い、発酵促進が期待できる投入率の範囲では、農地還元し得る液分には数 Bq/kgの放射性セシウムしか残留せず、上記の連携システムの阻害としないことを確認した。また、液中の放射性セシウムは発酵液のアンモニウムイオンとの吸着競合が起るため、プルシアンブルー等のCsイオン選択性の高い吸着剤を利用すればさらに固相へ濃縮できることも示した（図2-8）。 4. 上述のように構築したバイオマス利用連携システム及びその物質収支を、サブテーマ3において大熊町の脱炭素産業都市向けのシステムとしてデザインし、継続的に町と意見交換ができています。
---	---

< 【サブテーマ3】 達成状況 > 3. 目標どおりの成果をあげた

「脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
1. サブテーマ1-2の開発技術をキーとして、具体的対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。 2. 一次産業の現況把握と将来予測により、社会実装を検討するために必要な地域資源データベースを構築し、エネルギー拠点の持続可能な運転のために必要なサプライチェーンを提案する。 3. 復興初期から将来における地域社会システムシナリオを開発し、エネルギー拠点の要件を地域ニーズと需要家サイドから推定する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域・協働により導入計画を検証する。 4. 研究成果紹介や情報提供を通じて将来における地域社会システムや技術導入シナリオとその効果を示し、地域と共働した技術実装の事	1. 地域復興の中核施設としてバイオマス燃焼とメタン発酵のコンバインドシステムを提案し、地域の未利用バイオマスに関するマスマフロー、事業の経済性などを定量的に明らかにした（図3-8及び9）。 2. 1. の基礎となるバイオマスの詳細な生産地とDXに対応した資源査定技術を開発し（図3-2及び6）、現状でのバイオマスの需給状況を明らかにし（図3-7）、浜通りにおける一次産業に貢献できるように課題と対策を整理した。 3. 入手可能なデータに基づいた、より汎用性の高いバイオマスポテンシャル推定法を開発した（表3-1及び図3-4）。これを元に地域ニーズと需要家の類型化を行い（表3-4）、中核エネルギー事業との質的・量的関係を示した。また波及効果、地域の連携のあり方なども整理した（図3-3及び表3-5）。これらは全国的にも一般化できる手法である（図3-1）。 4. 環境省「脱炭素×復興まちづくり」等とも連携し、いくつかの浜通り自治体と連携のため

業化につなげる。	の意見交換や打ち合わせを定期的に行った (図3-5)。
----------	--------------------------------

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については、樹皮（バーク）を主要原料とした木質バイオマス発電施設の国内実績は少なく、研究も本申請課題が初めてである。海外に研究例はあるが、樹種が異なり福島での発電施設には応用できない。また、発電施設における放射性セシウムの挙動及び残渣からの溶出性等に関する知見もごく僅かであり、この点も新規性の高い研究である。さらに、樹種や部位の違い、燃焼炉形式の違いが放射性セシウムの挙動へ及ぼす影響も新規性がある。我々は、除染廃棄物の熱処理技術開発や放射性セシウムの挙動解明などを先導しており、本成果を基に汚染廃棄物の熱処理技術全般の学術的体系化が可能である。

サブテーマ2では、バイオメタネーションに関する既往研究知見の整理は、環境省2050年カーボンニュートラルに向けた中長期シナリオ案における今後の中間処理に関する検討の基礎資料となった。また、バイオメタネーションに関する研究成果について、ごみ処理施設や民間工場等でのバイオガス由来CO₂を対象とした技術の実装を目指して民間企業との共同研究に至った。

サブテーマ3では、バイオマスに絞ったポテンシャル推定法の整理と一般化を行った。精度に問題はあるが、今後必要とされる行政統計や研究についても展望を与えたと考えられる。木質バイオマスについては、そのポテンシャルと地域への波及効果の大きさから、より詳細な資源調査法を独創的な手法で開発した。また、地域のニーズに合った規模と目的による、地域産業構成とエネルギー供給についての関係を示したことは、現在、発電・発熱事業を、産業団地などと同時に設置する場合の先導的な指針を与えた。また地域循環経済という将来の主流を見越した、地域における森林や農地、生活系廃棄物などを循環させる中核としてコンバインドシステムを提案したことは、革新的であると考えられた。

<行政等に既に貢献した成果>

サブテーマ1では、環境省主催の「福島再生・未来志向プロジェクト」シンポジウム(令和3年12月3日)において、脱炭素に関する知見を含めて木質バイオマス燃焼に関する研究等について講演し、環境省の当該プロジェクトの推進に貢献した。また、飯舘村の蕨平等地区懇談会や森林組合における「木質バイオマス発電に関する技術的検討会」でサブテーマ1のr-Cs挙動に関する知見が紹介された。さらに、舘村農山村再生可能エネルギー法促進協議会に委員及び委員長として参画し、農山漁村再生可能エネルギー法に基づく基本計画の取りまとめに貢献した。

サブテーマ2では、バイオメタネーションに関する既往研究知見の整理は、環境省2050年カーボンニュートラルに向けた中長期シナリオ案における今後の中間処理に関する検討の基礎資料となった。また、バイオメタネーションに関する研究成果について、ごみ処理施設や民間工場等でのバイオガス由来CO₂を対象とした技術の実装を目指して民間企業との共同研究に至った。

サブテーマ3では、得られた成果を基に、主に大熊町において町役場との定例意見交換会、町関連団体との意見交換等を実施し、RE100産業団地を核とした地域の多面的価値の創出、安定電源としての再生可能エネルギーおよび放射線災害からの復興の象徴としてのバイオマス利活用などに関する施策資料を提供し、ゼロカーボンビジョンの具体化に向けて貢献した。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

サブテーマ1では、木質バイオマス燃焼発電施設におけるバーク混焼試験結果や類似の燃焼施設におけるr-Csの挙動に関する知見を、飯舘村にて稼働予定の発電施設の運営会社に紹介した。これらの知見は今後の運転計画等に利用される。また、バイオ炭に関する安全貯蔵や有効利用に関する知見は、バイオ炭が近年炭素貯留法や土壌改良剤として関心が高いことから、バイオ炭を

安全に利用する際に成果の活用が期待される。また、産業廃棄物として処理されているバークがガス化原料として十分利用できる可能性が示唆され、民間企業から実証に関する問い合わせを受けるなど、社会実装に向けた活用が見込まれる。

サブテーマ2では、メタン発酵におけるバイオ炭添加を通じた性能改善やその後の農地利用を通じた炭素貯留等に関して、公開成果発表会や県内関係企業が参加する勉強会、サブテーマ3でのRE100産業団地に係る意見交換等で情報共有している。浜通り地区でメタン発酵を実施している事業者においてもバイオ炭のメタン発酵への応用に関心が高く、研究成果の活用や専門家としての助言が期待される。

サブテーマ3では環境省の「脱炭素×復興まちづくり」プラットフォーム等とも連携し、いくつかの浜通り自治体と連携のための意見交換や打ち合わせを定期的に行った。これらを基に、復興計画やその他の計画に本成果が反映されると見込まれる。

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：	6
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	1
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	32
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	23
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	6
その他の成果発表：	1

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）
1-1	村沢直治、日下部一晃、倉持秀敏、万福裕造 木質バイオマス燃料利用施設での放射性Cs挙動調査 環境放射能除染学会誌、2023, 11(2)、pp. 47-60
2-1	Wu J., HU Y., MA H., Kobayashi T., Takahashi Y., XU K.Q., Kuramochi H. (2024) Biomass conversion and radiocaesium (Rad-Cs) leaching behaviors of radioactive grass in anaerobic wet fermentation systems: Effects of pre-treatments. Water Research, 252, 121228. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121228
2-2	Kobayashi T., Kuramochi H. (2023) Catalytic pyrolysis of biomass using fly ash leachate to increase carbon monoxide production and improve biochar properties to accelerate anaerobic digestion. Bioresource Technology, 387, 129583. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129583
2-3	Kobayashi T., Kuramochi H. (2022) Optimized production conditions and activation of biochar for effective promotion of long-chain fatty acid degradation in anaerobic digestion. Bioresource Technology, 358, 127393.

	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127393
3-1	Ooba, M., Nakamura, S., Togawa, T. (2021) Promoting local revitalization to solve issues on degraded forests in Japan: A case study in Oku-Aizu, Fukushima. Global Environmental Research, 24, 191-198.
3-2	Ohnishi, S., Osako, M., Nakamura, S., Tsuji, T., Togawa, T., Kawai, K., Suzuki, K., Yoshida, A., Gomi, K. (2023) A Framework Analyzing Co-Creation Value Chain Mechanism in Community-Based Approach: A Literature Review. Sustainability, (16, 7) https://doi.org/10.3390/su16072919
3-3	大西悟, 大迫政浩, 中村省吾, 辻岳史, 戸川卓哉, 河井紘輔, 鈴木薫, 吉田綾, 五味馨 (2023) 地域共創による価値連鎖メカニズムの分析にむけた理論的枠組みの提案—関連理論のナラティブレビューを基に—, 国立環境研究所・社会システム領域ディスカッションペーパー、2023-01、p. 1-13

※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＞

特に記載すべき事項はない。

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）
倉持 秀敏	東京都立大学工学研究科工業化学専攻博士課程修了 博士（工学） 筑波大学研究機関研究員等を経て、 現在、国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 副領域長 環境省 対策地域内廃棄物処理業務等に係るアドバイザー委員会委員 専門はリサイクル工学、環境化学工学

＜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) 小林 拓朗	東北大学大学院工学研究科修了 博士（工学） 国立環境研究所研究員、主任研究員を経て、 現在、国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 資源循環版技術研究室 主幹研究員 専門はメタン発酵、環境微生物工学	2021年度 ～ 2023年度
2) 大場 真	北海道大学大学院地球環境科学研究科単位取得済み退学、博士（地球環境科学）、国立研究開発法人国立環境研究所気候変動適応センター主席研究員、現在、学校法人東北工業大学ライフデザイン学部生活デザイン学科教授	2021年度 ～ 2023年度

Ⅱ. 成果の詳細

Ⅱ-1 サブテーマ1「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、汚染された木質バイオマスを原料に、燃焼発電施設及びガス化発電施設において、放射性セシウム（ r -Cs）の挙動を把握するとともに、未利用な樹皮（バーク）を原料した場合の r -Cs挙動への影響や、安定運転の阻害となる固体残渣の溶融物（クリンカ）の生成を抑制する研究を行った。燃焼発電施設とガス化発電施設では、残渣として燃焼灰とバイオ炭が排出されることから、それらの安全な貯蔵・処分、さらには有効利用するための研究を行った。

まず、流動床式燃焼発電施設Aから原料及び飛灰（ばいじん）を採取し、それらの r -Cs濃度を測定して、飛灰への r -Cs濃縮率（73～200倍）を明らかにした。原料中の r -Cs濃度が14～38 Bq/kgであれば、飛灰中の濃度は4,000 Bq/kg未満であり、指定廃棄物（ r -Cs濃度8,000 Bq/kg以上）にならず、産業廃棄物として処分できる濃度レベルになることがわかった。また、残渣としてごく少量の不燃物が排出されることから、飛灰と不燃物間の r -Cs分配率を調べた結果、飛灰に99.5%と分配すると推定された。一方、火格子式の施設Bから採取した原料、飛灰、主灰（燃え殻）を採取して同様の解析を行った。施設Bでは、1号機と2号機で異なる原料としていたことから原料の違いによる影響も把握した。灰分の高いピンチップの一部を原料としている1号機では、灰分の希釈効果で濃縮率が低く、両灰の r -Cs濃度は低かった。一方、灰分の低い切削チップのみを原料としている2号機では、飛灰へ高度に濃縮することがわかり、最大で濃縮率は350倍を超え、 r -Cs濃度は、8000 Bq/kgに近い値となった。切削チップの場合には、原料側の濃度管理が重要であることがわかった。

バークを原料とする場合の r -Cs挙動への影響を、小型流動床燃焼装置によって明らかにした。バークの燃焼では、その灰分が高いことから飛灰の処分量が増えるものの、飛灰中の r -Cs濃度は大きく低減されることがわかった。処分場の r -Cs濃度に係る受入基準、つまり濃度上限を意識すると、バーク混焼による r -Cs濃度の低減は運転管理上の大きな利点と考えられる。

また、バーク混焼におけるクリンカ生成能の評価を実機による混焼試験から明らかにした。通常運転時とバーク混焼時（バークの割合が70%）の施設内の飛灰等の灰を採取して、その溶融特性（軟化点と融点）を測定した。その結果、バーク混焼した場合の炉底灰、飛灰の溶融特性は、通常運転時のそれらの融解特性と同等、もしくは高融点化の傾向が得られた。また、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ の状態図（組成と融点の関係）用いても低融点化されないことが示唆された。以上の結果より、バークの割合が70%になるように混焼しても懸念された灰の軟化点及び融点の低温化が起きず、つまりクリンカ生成能は変化せず、通常運転と同様に安定運転できると予想された。

次にガス化に関する研究では、杉チップ、杉バーク及び松バークをガス化した際のガス変換率、バイオ炭変換率、タール等変換率を求めるとともに、バイオ炭の比表面積も測定した。温度の上昇とともに、ガス変換率が増加し、他の変換率は減少した。また、温度上昇とともに、比表面積が上昇し、バイオ炭の機能性も高まると予想された。カロリーガスの発生量、運転を阻害するタールの発生量、バイオ炭の機能性を踏まえると、最適なガス化温度は1000℃と考えられた。木の部位や樹種間で、ガス化特性に顕著な差がないことから、バークも原料として利用できると判断される。しかし、1000℃のガス化条件では、 r -Csはガス側へ主に分配されること、またその割合が原料によって異なり、ガス側の汚染には留意する必要がある。

ガス化炉の運転を阻害する、灰の溶融、すなわちクリンカ生成を抑制する検討を行った。クリンカ生成を再現するために、 CO_2 雰囲気下における杉材の灰に対して溶融試験を実施した。黒心材、赤心材・辺材の溶融点は800℃以下と低く、融点を上げる必要があり、高融点の樹皮を混合することによる融点上昇の効果を検討した。赤心材に対して樹皮を50%以上、赤辺材に対しては25%以上樹皮を混合すれば溶融点が1420℃以上まで上昇することが明らかとなった。樹皮を混合することで心材、辺材の溶融点を制御し、クリンカを抑制することが期待できる。また、灰の軟化・溶融前後の挙動を把握するために熱分析、X線回折による結晶相解析、相平衡を含む多成分系熱力学平衡計算を行い、以下の知見を得

た。CaとKの炭酸塩比： $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3)$ が83%より高い組成を有する灰であれば、比較的安定なCaOが生成し、高い溶融点（1420℃以上）が得られることが推察され、クリンカの抑制が可能であることが示唆された。

飛灰等の燃焼残渣やバイオ炭の環境安全性をr-Csの溶出率から評価した。いずれの残渣からもr-Cs溶出率は、比較的高いもしくは高い値であった。したがって、一時保管の際には遮水等の対策を行うことが望ましい。また、処分する際にもr-Csに汚染された焼却飛灰に対する対策、すなわち特定一般廃棄物・特定産業廃棄物の特別処理基準と同程度の対策は必要と考えられる。

次に、残渣に対して有害重金属に対する含有量及び溶出液中の有害重金属濃度を測定して、土壤汚染対策法の基準値及び汚泥肥料の規格値と比較した。バイオ炭はすべての基準値や規格値を満たすが、飛灰については、土壤汚染対策法の溶出基準のCr、Pb、As、Seが超過するケースがあった。バイオ炭は土壤改良剤として、直接利用できる可能性が示唆された。

バイオ炭の貯蔵時における安全性評価の研究では、高感度熱分析装置を組み合わせ、熱危険性を評価した。バイオ炭の貯蔵時において、大量に堆積貯蔵され、かつ断熱状態が良い場合には、40℃前後の貯蔵であっても発熱後温度上昇し、火災に至る可能性が考えられる。また、温度上昇の過程で可燃性のガスが発生した場合には、貯蔵場所において爆発が発生することも想定できる。特に、r-Csを含むバイオ炭が火災を発生させた場合、r-Csの飛散状況モニタリングや消火等（含：消火水によるr-Cs流出防止措置）、現場では様々な対応や意思決定を求められる可能性が高い。そのため、貯蔵場所でのバイオ炭の火災を防止し、バイオ炭を製品として有効活用していくためには、堆積高さや貯蔵量の制限、内部温度のモニタリング等の事前対策が必要となることが考えられる。

住民との対話では、木質燃料として活用する県内の木質バイオマスには放射性物質が付着または含有していることに対する不安が最も多く意見として述べられた。立地地区では、環境省による6年間にわたっての仮設減容化施設の運転実績や情報公開、福島県生活環境の保全等に関する条例に基づく成分分析等が行われていたが、加えて当該サブテーマの研究成果の結果及び予測値などを説明することにより、不安を払拭して発電事業に深い理解が得られた。また、本対話を通して、地域に信頼されている専門家が説明会に参加し、住民に分かり易く説明すること、質疑が無くなるまで丁寧に対応することが不安払拭には重要と考えられた。

1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では、まず、福島県内の木質バイオマス燃焼発電施設の稼働に向けた喫緊の課題、すなわち汚染された木質バイオマスを原料とした場合に、これまで燃料として利用しなかった樹皮（バーク）を含めた木質バイオマス燃焼における放射性セシウムの挙動及び原料中の灰分によるクリンカ（溶融物）の生成可能性を把握し、安全かつ安定なエネルギー転換技術の確立を目的とする。さらに、分散型の木質バイオマスガス化発電施設の導入に対する関心も高く、その普及においても先述の同種の2つの課題があり、バーク原料が放射性セシウム挙動へ及ぼす影響やクリンカ生成を抑制するための条件を明らかにすることも目的である。なお、放射性セシウムの挙動については、施設の物質収支と併せてサブテーマ3での実装システムの設計の基礎データとして提供することも目的である。さらに、燃焼及びガス化発電施設では、それぞれ燃焼灰やバイオ炭が残渣として排出されることから、その安全な貯蔵・処分法、さらには有効利用に係る安全性評価を行うことも目的としている。特に、バイオ炭の有効利用法については、サブテーマ2のメタン発酵との促進剤利用を考えており、ガス化とバイオ炭性状の関係も明らかにする必要がある。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動説明」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、福島県環境創造センター、国立研究開発法人森林研究・整備機構

サブテーマ1 目標	・汚染樹皮と木質チップの燃焼技術開発では、実施設調査及びラボ流動床炉等を用いて、安定燃焼条件の提示と、同条件で発生する無機系残渣における放射性セシウムの濃度を明らかにする。また、ガス化技術の開発ではラボ流動床炉を中心に安定なガス化条件とその生成ガスや炭素系残渣の質や量の制御性を把握することに加えて、残渣中の放射性セシウム濃度を明らかにする。なお、類似実機施設調査の結果を踏まえて両発電技術における放射性セシウムの挙動を解明する。 ・両技術から発生する残渣の元素組成や放射性セシウムの溶出性等の性状を明らかにし、無機系残渣の適正処分方法を提案し、一方、炭素系残渣については安全な土壌等への炭素貯留法を提案する。 ・さらに、ガス化技術についてはサブテーマ2と技術連携した際の生成ガスや炭素系残渣の質と量に対する制御性も明らかにする。 ・両技術を実装した施設に対する放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。 ・特に、稼働や計画が先行する燃焼発電に関する技術については、技術的な情報提供に留まらず、住民・自治体等との対話を行う。
-----------	--

3. サブテーマ1 研究開発内容

(1) 木質バイオマス燃焼における放射性Csの挙動及びクリンカの生成可能性

木質バイオマス燃焼発電施設において、放射性セシウム（r-Cs）の挙動解明に加えて、バーク（樹皮）も燃料対象とした場合の安全かつ安定燃焼の確立に向けて、実施設における調査と燃焼試験、ラボ燃焼実験を行った。まず、r-Csの挙動については、流動床式燃焼発電施設（施設A）と火格子式燃焼発電施設（施設B）の2施設を対象とした。後者は調査予定ではなかったが、最終年度に調査の許可が得られたこと、国内では主要な燃焼炉形式であることから実施した。バーク混焼によりクリンカ（灰の熔融物）の生成の検討については、福島県内の実機にてバーク混焼試験の許可が得られなかったことから、西日本の流動床式燃焼発電施設（施設C）にてバーク混焼試験を実施した。さらに、ラボ燃焼実験装置により、バークを原料とした専焼や混焼の燃焼試験を行い、バーク原料が放射性Csの挙動等へ及ぼす影響を明らかにした。具体的には、以下に説明する。

施設Aと施設Bの調査では、試験期間をそれぞれ9日間（連続9日）と3日間（月に一日を3ヶ月）とした。なお、施設Bでは、燃焼炉が2機あり、それぞれ異なる原料を燃焼していたことから、2機分の調査を行った。1日ごとにコンポジット採取した木質燃料、飛灰（排ガス中のばいじん）、不燃物（施設Aの炉底から排出される砂利等）もしくは主灰（施設Bの炉底から排出される燃え殻）に対して、放射性Cs濃度をゲルマニウム半導体検出器にて測定した。灰については、同日の1時間ごとの測定を行い、濃度の変更も把握した。r-Cs濃縮率（=飛灰のr-Cs濃度/木質燃料のr-Cs濃度）等を算出してr-Csの移行挙動を把握した。また、r-Csフローを解析し、各残渣への分配率を算出した。なお、r-Cs濃度は、検出下限値の観点から、Cs-137濃度とした。さらに、各種灰等に対して蛍光X線分析法にて元素組成を明らかにし、r-Csの挙動等を考察した。

ラボ燃焼試験では、数kg/hの木質燃料を処理可能な小型流動床燃焼実験装置を試作し、実機にて検証できなかったバーク専焼やバーク混焼（バーク割合50%）に関する燃焼試験を行い、バーク混焼が飛灰の発生量、飛灰へのr-Cs濃縮率や飛灰からのr-Cs溶出率に与える影響を解析した。

施設Cのバーク混焼試験では、クリンカ生成能を灰の軟化点（溶け始め温度）や融点（半液球になる温度）から検討した。まず、通常燃料（木質チップ）の燃焼時に排出される飛灰等の燃焼残渣（過年度調査にて採取）を対象に、JIS M8801灰の熔融特性試験にて、軟化点及び融点を測定し、低融点灰（高温時に溶けやすい灰）の発生個所を特定した。次に、主要元素の状態図からクリンカ生成抑制にはバークの割合を50%以上で混焼とするのが望ましいと考えられるため、施設と相談してバークの割合を

70%で混焼試験を行い、クリンカ生成能の変化と混焼による影響を検討した。また、過年度調査において安定セシウム（Cs）の移行挙動等を把握しており（倉持ら、2021）、混焼試験でも同様の分析を行った。

(2)木質バイオマスガス化におけるガス化特性及びクリンカの生成制御

福島県内で最も安定に運転されている木質バイオマスガス化発電施設（施設D）では、木質ペレットを原料としているが、コスト削減に向けて以下の課題がある。1)ペレット工場で産業廃棄物となるバークを原料とする。2)発電施設で産廃廃棄物となる残渣（バイオ炭）の有効利用である。前者では、原料を拡大させた場合のガス化特性及び不安定運転の原因となるクリンカの生成について研究し、(2)-①と(2)-②で報告する。また、後者の再利用に関する研究については、(3)-③で報告する。

(2)-①木質バイオマスガス化における原料種とガス化特性

まずは既往研究（Koido et al., 2021）を参考に、類似のガス化実験装置を試作し、以下の実験を行った。バイオマス原料は、杉チップ（従来の主な原料想定）、杉バーク及び松バークとした。それぞれの原料を粉砕し、篩にて2.0-2.8mmの大きさに調製し、スクリーフィーダからガス化反応管へ投入した。投入速度は概ね20g/hr程度とした。反応管の温度、すなわちガス化温度は800℃、900℃、1000℃とした。なお、ガス化の際には水蒸気をS（水蒸気の水のモル数）/C（原料中の炭素のモル数）=1で添加した。ガス化ガスはガスバックに捕集され、実験後のガスバックの体積の増加量からガス体積を求めた。また、ガスバック中の水素（H₂）、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）の濃度をGC-TCD（熱伝導度検出器付きガスクロマトグラフ）を用いて決定した。一方、炉内のバイオ炭については、その重量を測定するとともに、有機元素分析計にて炭素量を、ゲルマニウム半導体検出器にてr-Cs濃度を把握した。なお、原料も同分析計にて炭素量とr-Cs濃度を把握した。原料、ガス化ガス、バイオ炭の炭素量をベースに、ガス変換率（ X_{gas} ）、バイオ炭変換率（ X_{char} ）を計算し、他の変換率、すなわち $1 - X_{\text{gas}} - X_{\text{char}}$ をタール等変換率（ X_{others} ）とした。また、r-Csの挙動については、原料及びバイオ炭のr-Cs濃度と重量からバイオ炭への分配率を計算し、100%からバイオ炭の分配率を減じることでガスへの分配率とした。

本課題では、サブテーマ1のガス化残渣であるバイオ炭をサブテーマ2のメタン発酵の促進剤として利用することも検討する。バイオ炭の比表面積が大きいと発酵促進効果が優れていると予想されることから、実験で得られたバイオ炭の比表面積も測定した。

(2)-②木質バイオマスガス化におけるクリンカの生成制御

スギ材として、心材部が赤いスギ材（赤心材）と、黒いスギ材（黒心材）を用いた。赤心材を有するスギ材は宮城県（N38° 46′ 22.872″, E140° 51′ 3.2394″）から入手し、剥皮後に製材を行うことで得られた心材（赤心材）、辺材を原料とした。同様に黒心材を有するスギ材は茨城県（N36° 00′ 29.9″, E140° 07′ 54.1″）から入手し、剥皮後に製材を行い、心材（黒心材）、辺材、樹皮を分けて原料とした。これらの原料を用い、ハンマーミルによってそれぞれ粒径0.7 mm以下まで粉砕した。

粉砕して得られた木粉は550℃で灰化（ISO21404準拠（ISO 21404, 2020））した。赤心材を有するスギ材（宮城産）の心材と辺材の灰試料はそれぞれMH₁₀₀、MS₁₀₀と標記し、黒心材を有するスギ材（茨城産）の心材、辺材、樹皮はそれぞれIH₁₀₀、IS₁₀₀、IB₁₀₀と標記する。

赤心材木粉に対して辺材木粉を重量ベースで25, 50, 75%混合して550℃で灰化（ISO21404準拠（ISO 21404, 2020））した試料をそれぞれMS₂₅H₇₅、MS₅₀H₅₀、MS₇₅H₂₅と標記する。同様に赤心材に対して樹皮を25, 50, 75%混合して灰化した試料をMH₇₅B₂₅、MH₅₀B₅₀、MH₂₅B₇₅、辺材に対して樹皮を25, 50, 75%混合して灰化した試料をMS₇₅B₂₅、MS₅₀B₅₀、MS₂₅B₇₅とする。これらの灰試料に対し蛍光X線分析を行うことによって、化学組成を得た。黒心材を有するスギ材の木粉についても同様に標記する。

灰熔融試験はISO21404（ISO 21404, 2020）に準拠して、金型で直径3 mm・高さ3 mmにペレット成形した灰試料に、片側からハロゲンランプの光を当て、反対側から透過光を撮影しながら昇温することで、得られる影の形とその時の測定温度から、収縮開始点（SST）、軟化点（DT）、熔融点（HT）、流動点（FT）を求め

た。なお、ガス化により発生したCO₂ガスの影響下で評価を行うために、雰囲気ガスはCO₂とし流量は300 mL/minとした。

また、灰溶融前後の挙動を解明するために、熱重量/示差熱分析(TG-DTA)を実施した。雰囲気ガスはCO₂とし200 mL/minの流量の下で25℃から1300℃まで10 K/minで昇温した。

灰の軟化・溶融の原因を明らかにするために多成分系熱力学平衡計算を実施した。計算ソフトウェアにはFactSage 8.2を用い、前述の灰組成を初期値としてCO₂雰囲気下で700～1200℃まで10℃ごとに計算を行った。この計算が実験と整合していることを確かめるために、X線回折を実施した。

(3) 残渣の安全性評価による管理方法と有効利用の検討

(3)-①有害元素に着目した安全性評価と管理及び有効利用の検討

木質バイオマス発電施設から採取した燃焼灰（飛灰・主灰）及びバイオ炭を対象に、以下の有害元素（r-Cs、ヒ素(As)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、セレン(Se)、クロム(Cr)）の含有量及び溶出液中の濃度を測定し、安全性の観点から以下の考察を行った。1) r-Csの溶出率から保管や処分上の注意を、2) 重金属の含有量及び溶出液中の濃度から、土壌改良剤への利用の可能性を考察した。既往研究（森元ら、2017、北海道率総合研究機構、2019）を参考に、土壌汚染対策法の含有量基準及び溶出基準と污泥肥料の基準値と比較して、実測値がそれらを下回るかどうかで利用の可能性を評価した。r-Csの含有量は3.1の実測値を引用し、重金属の含有量は王水分解法やアルカリ融解法を行い、重金属を水溶液に溶解させ、ICP-AES（高周波誘導結合プラズマ発光分光分析計）及びICP-MS（高周波誘導結合プラズマ発光質量分析計）による水溶液に対する定量分析から重金属の含有量を求めた。溶出率については、JIS K0058-1に準拠した溶出試験により有害元素の溶出率（ $=[\text{灰溶出中の元素濃度}/(\text{灰中元素度} \times 10)] \times 100$ ））を評価した。なお、溶出液中の有害元素の分析法は、含有量分析と同じ分析機器を用いた。

(3)-②バイオ炭の貯蔵における安全性評価と管理方法の検討

バイオ炭の貯蔵時における安全性評価の研究では、特に貯蔵場所において「自然発火」を原因とした「火災」を発生させる可能性があるのかを明らかにするため、福島県内にある木質バイオマスガス化発電施設（施設D）において採取したバイオ炭と、ラボガス化炉より得られたバーク由来バイオ炭の合計5種類を用いて、様々な「高感度熱分析装置」等を組み合わせ、試料の火災危険性評価と安全策の立案を行う「熱危険性評価手法」により、バイオ炭の自然発火危険性評価を行った。

熱重量・示差熱分析装置を用いた試験では、バイオ炭の含有水分量と有炎燃焼を開始する温度（熱分解開始温度）、全体的な熱挙動も評価した。次に、バイオ炭は室温環境何℃の貯蔵状態で空気との酸化等による微小な発熱を開始するのかを双型高感度熱量計を用いて評価した。

また、バイオ炭が火災を発生させた際の燃焼の程度を把握するため、ボンベ型熱量計により、燃焼熱量を測定するとともに、既存のバイオマス燃料等の値との比較も行った。さらに、バイオ炭は外部からの火災により、比較的容易に着火する可能性があり火災が発生した場合延焼拡大しやすい性質を有するのかを把握するため、消防法に記される小ガス炎着火試験により評価した。

また、上記した熱危険性評価手法による各結果を踏まえ、バイオ炭が貯蔵場所において、自然発火に至るメカニズムやその予防方法について考察した。

(4) 住民・自治体との対話

福島県飯舘村では、村面積の約70%を占める森林を再生し、あわせて未来志向型の農業体系を構築することを目的とした「木質バイオマス発電施設」整備の可能性について検討が進められ、村の事業公募により令和2（2020）年7月、事業会社に「飯舘バイオパートナーズ株式会社」が選定された。この事業は、立地地区からの意見を十二分に踏まえて事業計画を進めることが前提になっている。

そこで、研究分担者が本課題の成果を発信しながら住民や自治体との対話に積極的に関与し、各の対話で事業の安全性等の理解を得るための重要な点を整理した。

4. サブテーマ1 結果及び考察

(1) 木質バイオマス燃焼における放射性Csの挙動及びクリンカの生成可能性

(1)-① 燃焼施設における放射性セシウム (r-Cs) の挙動

流動床式燃焼施設Aから採取した原料及び燃焼飛灰に対するr-Cs濃度、飛灰へのr-Cs濃縮率を図1-1に示す。木質燃料中のr-Cs濃度が14～38 Bq/kgであれば、飛灰中の濃度は4,000 Bq/kg未満であり、指定廃棄物（r-Cs濃度8,000 Bq/kg以上）にならず、産廃として処分できる濃度レベルになることがわかった。濃縮率は73～200倍であり、大きく変動した。そこで、一時間ごとの木質燃料と飛灰に対する濃度を測定した結果

(N=6)、木質燃料のr-Cs濃度の変動係数(CV)は0.25を超え、50%の誤差を持つ可能性もあり、これが伝搬し大きな濃縮率の変動に至ったと推察された。実機の処理量と燃焼飛灰の発生量に関するヒアリングからマクロ的な量で概算すると濃縮率は75～105倍程度と予想された。そこで、変動の少ない飛灰中のr-Cs濃度(CV=0.11)と処理量データからr-Csのフローを解析した。施設Aでは、残渣として飛灰と不燃物が排出され、r-Cs分配率はそれぞれ99.5%と0.05%となり、r-Csのほとんどが飛灰へ移行することが推定された。

流動床式の一般廃棄物焼却施設のr-Cs挙動と比較した。一般廃棄物施設の焼却飛灰の濃縮率は8.5～107倍となり、木質バイオマス燃焼の飛灰への濃縮率は焼却飛灰のそれよりも約2倍から9倍高いことがわかった。一般廃棄物の焼却飛灰と不燃物へのr-Cs分配率はそれぞれ88.5%と11.5%になり、木質バイオマス燃焼におけるr-Csの不燃物への分配が極めて少ないことがわかった。流動砂の取り扱いに違いはあるものの、これらの差は、木質バイオマスの灰分(1%以下)が一般廃棄物の灰分(7.2%(環境省、2020))よりも一桁低いことに加えて、不燃物の発生量が低いことが要因であると考えられる。

木質バイオマス燃焼では、r-Csが燃焼飛灰へ高く濃縮する傾向はあるものの、発生量で考えると、灰分の差から明らかなように、木質バイオマス燃焼における残渣発生量はかなり少なく、これは最終処分量が非常に少ないことを意味している。多くの場合、飛灰のr-Cs濃度と発生量にはこの種のトレードオフの関係があり、処理計画の検討の際にはこの関係に留意する必要がある。火格子式の施設Bから採取した原料中のr-Cs濃度、飛灰及び主灰に対するr-Cs濃度を図1-2に示す。木質原料中のr-Cs濃度が1号機と2号機でそれぞれ20～51 Bq/kgと15～34 Bq/kgであった。1号機の主灰及び飛灰のr-Cs濃度は最大で1977 Bq/kg及び3603 Bq/kgであった。一方、2号機の主灰及び飛灰のr-Cs濃度はそれぞれ最大で3269 Bq/kg及び7204 Bq/kgであった。1号機の原料中のr-Cs濃度は2号機のそれよりも高いが、主灰及び飛灰のr-Cs濃度は2号機のそれよりもかなり低かった。2号機の原料は切削チップのみであるが、2号機の原料は切削チップとピンチップを3:1で混合したものである。ピンチップの灰分(1.8%)は、切削チップの灰分(0.22%)よりも一桁大きいこ

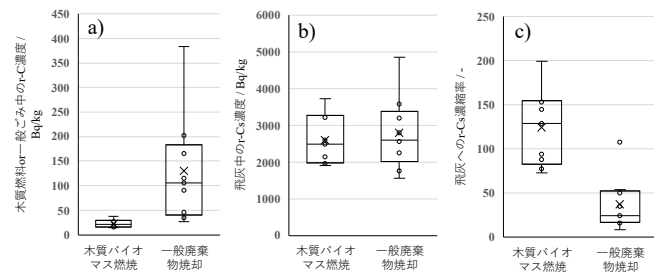


図1-1 木質バイオマス燃焼施設(施設A)と一般廃棄物焼却施設における原料中r-Cs濃度(a)及び飛灰中r-Cs濃度(b)、飛灰へのr-Cs濃縮率(c) (一般廃棄物焼却のデータ: Fujiwara et al., 2018)

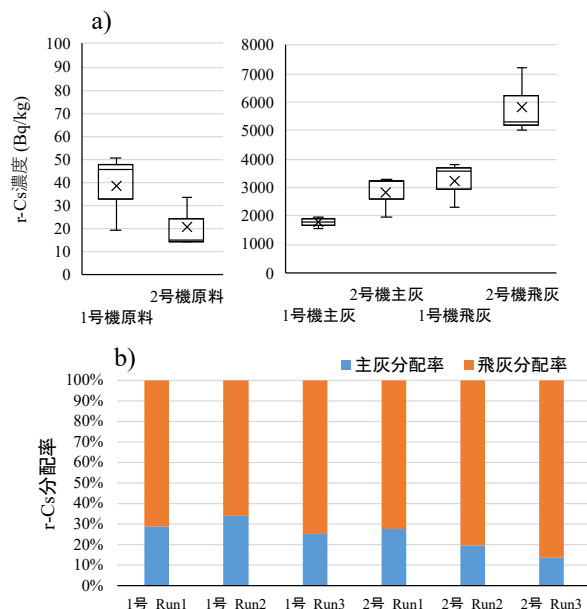


図1-2 火格子式木質バイオマス燃焼施設(施設B、1及び2号機)における原料及び飛灰中のr-Cs濃度(a)、r-Csの各種灰への分配率(b)

とから、灰分の希釈効果により、1号機における両灰中のr-Cs濃度が低下したと考えられる。また、これは濃縮率の差にも影響を与え、2号機の飛灰への濃縮率は350倍を超えた。図1-2のように、切削チップのみを原料とする2号機では、飛灰へ高濃縮されることに留意が必要である。特に、切削チップ中のr-Cs濃度が34 Bq/kgを超えると、飛灰中のr-Cs濃度が指定廃棄物とされるr-Cs濃度 (>8000 Bq/kg) に極めて近くなる。切削チップを原料とする場合には、入り口における原料濃度の管理が安全かつ安定運転において不可欠である。この点は、流動床式と異なる点でもあり、最終年度に調査した結果は大変重要な知見であった。また、施設の処理実績と先述のr-Cs濃度から、主灰と飛灰へのr-Csの分配率を算出した(図1-2)。1号機と2号機の飛灰への分配率は、共に高いが、2号機方が特に分配率は高くなった。すなわち1号機の飛灰への分配率が相対的に低い。排ガス中の揮発性元素は、排ガス冷却過程において飛灰表面に凝結することを踏まえると、1号機では、ピンチップの添加により、Csの揮発を抑制するシリカ(SiO₂)分が増加した結果、1号機のr-Csの揮発が抑制され、飛灰への分配率が低くなったと推察される。

(1)-② バーク混焼によるr-Csの挙動への影響

実機にてバーク単体での燃焼やバーク：木質チップ=1:1の混焼(実際の想定)ができなかったことから、試作した小型流動床燃焼装置にて燃焼試験を行った。実験後に、流動砂、中間灰1(フリーボード部)、中間灰2(空気予熱部)、サイクロン飛灰を採取し、各重量とr-Cs濃度を測定し、マスバランスと燃焼残渣等へのr-Cs濃縮率を解析した。その結果の一例を図1-3に示す。バークの灰分は先述のように木質チップに比較して一桁高いことから、飛灰の発生量も一桁多くなったが、濃縮率については逆に大きく低減された。つまり、バーク燃焼では、飛灰の処分量が増えるものの、飛灰中のr-Cs濃度は大きく低減されることがわかった。一方、木質チップでは、濃縮率が高いことから、

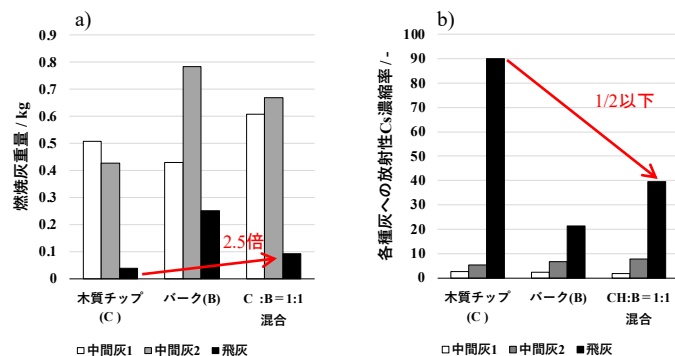


図1-3 小型流動床式燃焼実験における各種灰の発生量(a)と各種灰へのr-Cs濃縮率(b)

ら、処分場の受入基準を意識すると、飛灰中のr-Cs濃度をある上限(例えば、4,000 Bq/kg)でコントロールすることが求められ、この基準に対応するために受入燃料側でも比較的厳しくr-Cs濃度を制御する必要がある。しかし、バーク混焼の場合には受入濃度上限を数倍緩和できる可能性がある。飛灰については、後述するr-Csに関する溶出試験も行っており、バーク混焼によって溶出率が一桁低下することが観察された。以上の結果より、バークを混焼することで、燃料側の濃度制限を大きく緩和できる点に加えて、飛灰中のr-Cs濃度及びr-Cs溶出率の低減効果は、運転・管理上のメリットとして大きいと考えられる。しかし、飛灰の処分量が増える欠点には留意する必要がある。

(1)-③実機バーク混焼試験によるクリンカ生成能への影響

過年度調査時に実施した通常運転(木質チップ燃焼)で採取した灰の溶融特性(軟化点(T_s)と融点(T_m))を図1-4に示す。まず、各種灰の T_s と T_m の違いについては、図1-4 aのように上流側の灰(炉底灰、ボイラ灰)の値よりも下流側の灰(エコノマイザー灰、バグフィルタ灰、飛灰)の方が高い傾

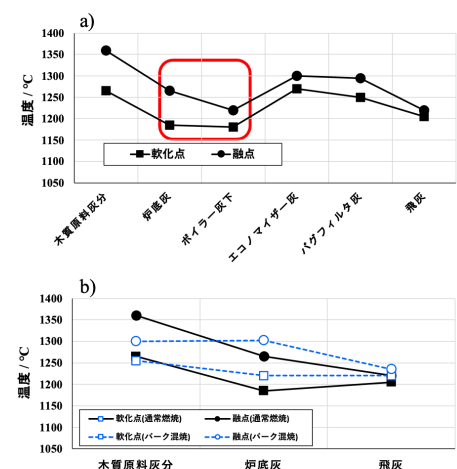


図1-4 各種灰の融点及び軟化点 (a) バーク混焼試験前、b) バーク混焼試験前後の比較)

向にあった。過年度調査の組成成分結果より（倉持ら、2020）、上流ではシリカ（ SiO_2 ）が、下流では酸化カルシウム（ CaO ）が多く、灰の熔融特性の差は元素組成の違いによるものと推察された。次に、木質チップとバークの割合が3:7になるように混焼試験した場合の原料灰分、炉底灰、飛灰の T_s と T_m を測定し、通常運転時のそれらの値と比較した（図1-4b）。バークの添加により、燃料灰分の T_s と T_m は木質チップよりも低温化を示したが、炉底灰と飛灰については T_s と T_m の低温化を示さなかった。むしろ木質チップ燃焼の両灰の T_s と T_m よりも上昇がみられた。そこで、FactSage Ver. 7.2 を用いて $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ の状態図（組成と T_m の関係）を作成し、通常運転時とバーク混焼時の両灰の組成をプロットし

た（図1-5）。図1-5中の矢印のように、バーク混焼時の灰の組成は低融点へシフトしないことが示唆された。以上の結果より、バークの割合が70%になるように混焼しても懸念された灰の T_s と T_m の低温化が起きず、つまりクリンカ生成能は変化せず、通常運転と同様に安定運転できる可能性が示唆された。

後述する溶出試験では、バーク混焼が飛灰及び不燃物からのCsの溶出性に与える影響を検討した。飛灰については、ラボ燃焼実験と同様に、バーク混焼することで飛灰からのCs溶出率が低下した。

(2) 木質バイオマスガス化におけるガス化特性及びクリンカの生成制御

(2)-① 木質バイオマスガス化における原料種とガス化特性

杉チップ、杉バーク及び松バークをガス化した際のガス変換率（ X_{gas} ）、バイオ炭変換率（ X_{char} ）、タール等変換率（ X_{others} ）を求めた。その結果、温度の上昇とともに、 X_{gas} が増加し、 X_{char} と X_{others} が減少した。特に、900℃と1000℃を境に X_{char} が急激に低下し、また800℃と900℃を境に X_{others} の低下も顕著であった。エネルギー回収を意図したガス化としては、タールの発生量が少なく、ガス発生量の多い1000℃の条件が望ましいと考えられる。施設Dでは杉のバーク以外を主成分としたペレットが950℃以上でガス化されており、タールの発生量が極めて低く、またバイオ炭収率も2～2.5%である。この実機の実態は、杉チップの結果と類似しており、本実験結果が妥当な結果であると考えられる。木の部位で比較すると、バークの方がタール等の発生が抑制され、 X_{gas} も高いことがわかった。この点からバークを原料としても問題なく、むしろ運転の阻害となるタールの発生率が半減する点は大きな利点でもある。バークについて樹種間で比較すると、杉バークの X_{gas} が若干高い程度であり、松バークでも問題なく、杉チップと同様に原料として利用できると予想される。ガス化における主要なガスの発生量については、温度の上昇とともに、水素（ H_2 ）や一酸化炭素（ CO ）のカロリーガスの濃度も増加し、その組成も部位や樹種間で顕著な違いもないことから、この点からもバークを原料として利用することが可能と判断される。一方、バイオ炭との性状と温度の関係は、温度上昇に伴い、比表面積が増加することから、高温ほど機能性が高いと予想され、サブテマ2のメタン発酵促進剤も1000℃のバイオ炭を提供した。ガス化ガスとバイオ炭へのr-Csの分配率については、温度の上昇とともにガスへのr-Cs分配率が増加し、特に900℃と1000℃を境に急激に増加した。これはバイオ炭変換率が急激に低下したためであると考えられる。チップとバークで比較すると、チップの方がガスへの分配率が高い、これはバークの灰分はチップのそれと比べて一桁高く、シリカ分も多いことから、そこにr-Csが固定化されたと推察される。いずれにしても、ガス化ガスへのr-Csの分配率は高く、ガス冷却過程においてr-Csはダストに凝結することから、ダストの高濃縮と高い溶出性については、木質チップ燃焼の飛灰と同様に注意する必要がある。

(2)-② 木質バイオマスガス化におけるクリンカの生成制御

ガス化炉内での灰の熔融を再現するために、 CO_2 雰囲気下における灰熔融試験を実施した。まず、黒心材を有するスギ材と、赤心材を有するスギ材の灰の熔融点について比較を行った。黒心材を有するスギ材では、心材の熔融点は709℃と低い、辺材は1172℃、樹皮は1420℃以上であり、高かった。これに対し、赤心材を有するスギ材では心材・辺材ともに熔融点は760℃ほどと低かった。黒心材を有するスギ材では心材のみ熔融点を高めれば良いが、赤心材を有するスギ材では心材と辺材の双方の熔融点を高める

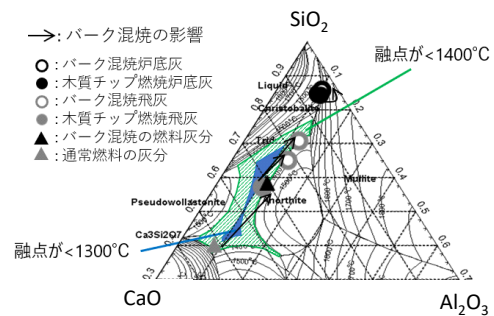


図1-5 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 成分系状態図（組成と融点の関係、FactSage7.2にて作成）によるバーク混焼が灰等の融点へ与える影響の解析

必要がある。ここでは一例として、一般的な材によく見られる赤心材を有するスギ材の心材、辺材のそれぞれに対して、樹皮を混合することによる効果について詳述する。

赤心材を有するスギ材の部位（心材、辺材、樹皮）を配合したときの配合率に対する熔融温度の変化については、赤心材と辺材の混合では熔融温度に大きな変化は見られない。しかし、赤心材に対して樹皮を50%以上、辺材に対しては25%以上樹皮を混合すれば熔融点が1420℃以上まで上昇することが明らかとなった。この結果から、樹皮を混合することで心材、辺材の熔融点を制御し、クリンカを抑制することが期待できる結果が得られた。

灰の軟化・熔融前後にどのような挙動を示すかを把握するためにTG-DTAを行った。その結果、赤心材／樹皮の灰試料のTG-DTAで、200～600℃において、重量減少と上に凸の示差熱分布が観測されたことから、残留有機物の酸化反応が生じたとみられる。樹皮の配合率が50%以下の灰試料では、760℃付近で示差熱分布に吸熱ピークが生じたことから、灰の軟化・熔融が起こったものと考えられる。その後800℃付近から徐々に重量減少し、950℃前後で急激な重量減少と吸熱ピークが観測されたが、 CaCO_3 の脱炭酸分解（ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ ）による。以上により、赤心材／樹皮の灰試料は600℃以下で有機物の酸化が起こり、760℃付近で軟化・熔融が起きたのち、950℃付近で CaCO_3 の脱炭酸分解が起こることが明らかになった。

灰の軟化・熔融点付近の生成物を詳細に解明するために、相平衡を含む多成分系熱力学平衡計算を行った。赤心材は820℃以上において、全体の7～8割ほどを液相が占めるが、赤心材50%/樹皮50%では液相成分が全体の2～4割ほどまで低下した。そこで、赤心材に対する樹皮の配合率を25～75%まで変化させた場合の平衡計算を行った。液相の割合は樹皮の配合率が増えると減少した。また、赤心材50%/樹皮50%の平衡計算結果における液相成分は、主に K_2CO_3 、 CaCO_3 であった。

一方、赤心材灰と赤心材50%/樹皮50%灰のXRDパターンを測定した。赤心材灰では熔融点よりも低い温度である650℃まで加熱して冷却した試料には、結晶質の生成物としてFairchildite ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$)を確認できた。一方、熔融点よりも高い温度である850℃まで加熱して冷却した試料には、FairchilditeとButschliite ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$)が含まれることが明らかになった。これに対し、赤心材50%/樹皮50%灰では、熔融点に関わらずFairchilditeとCalcite (CaCO_3)が生成した。温度の上昇に伴って、Calcite に対するFairchilditeのXRDピーク強度比が高まる。したがって、温度の上昇とともにFairchilditeに対してCalciteが減少することが示された。

以上により、スギ材の灰の軟化・熔融において K_2CO_3 と CaCO_3 が寄与していることが平衡計算およびXRDの結果から明らかになった。そこで、灰熔融点を K_2CO_3 - CaCO_3 系の相平衡状態図上で整理することとした。 K_2CO_3 - CaCO_3 系の平衡状態図に対して、赤心材を有するスギ材（宮城県産）と黒心材を有するスギ材（茨城県産）の部位を配合して得られた灰試料の熔融点をプロットすると、CaとKの炭酸塩比： $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3)$ が83%よりも小さい場合では熔融点は概ね共晶温度付近に位置しており、スギ灰の熔融が K_2CO_3 - CaCO_3 系の相平衡によって説明できることを意味している。これに対し、 $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3) \geq 83\%$ では熔融点が1420℃以上となり、高い熔融点を示した。これは、 K_2CO_3 - CaCO_3 系の相平衡では説明がつかないが、 CaCO_3 は950℃付近で急激な脱炭酸分解が起こるため、比較的安定なCaOが生成し、高い熔融点が得られることが推察された。

以上により、CaとKの炭酸塩比である $\text{CaCO}_3/(\text{CaCO}_3+\text{K}_2\text{CO}_3)$ が83%以上となるまでスギ木部に樹皮を混合すれば、熔融点が1420℃以上まで高まり、クリンカの抑制が可能であることが示唆された。

(3) 残渣の安全性評価による管理方法と有効利用の検討

(3)-① 有害重金属に着目した安全性評価と管理及び有効利用の検討

施設Aの飛灰からのr-Cs溶出率は26～61%であり、過年度調査による同じ流動床式の施設Cの飛灰からのCs溶出率と同等であった。一方、火格子式の主灰と飛灰の溶出率を測定したところ、全体的に流動床式の飛灰よりも溶出率が高く、また原料により傾向が異なった。1号機では、飛灰の溶出率は主灰より高いが、2号機では、両灰ともに高い溶出率であった。主灰の溶出率が高い点は、一般廃棄物や除染廃棄物の焼却で得られる主灰の溶出特性とはまったく異なる点に注意が必要である。実機での燃焼温度は

一般廃棄物焼却施設の焼却温度に比べて低いことから、ラボ試験ではあるが、切削チップを低温で燃焼させた。その結果、燃え殻（主灰相当）のr-Cs溶出率はかなり高いことがわかった。主灰にもかかわらず、高いr-Cs溶出率の原因の一つは低い燃焼温度と考えられる。

r-Cs溶出率の違いを熱力学的な観点から考察した。我々の焼却に対する熱力学平衡計算（Yui et al., 2018）では、塩基度（酸化カルシウム/シリカ=CaO/SiO₂）が高いほど、また、塩素(Cl)含有量が高いほどCsは水溶性形態になり易いと予想される。そこで、燃焼飛灰の元素分析を行い、塩基度とCl濃度に着目して溶出率との関係を整理した。塩基度やCl濃度が高いほど溶出率が高い傾向にあり、特に、流動床式では、塩基度に関しては、相関関係が観察された。したがって、Caが多い木質燃料由来の燃焼飛灰は比較的高いr-Cs溶出率を有すると推測された。

一方、バイオ炭の溶出率は52～64%になり、比較的高い値であった。いずれにしても木質チップやペレットの燃焼及びガス化の残渣からのr-Csの溶出性は低いことはないため、残渣が水と接触した場合にr-Csが溶出する可能性があり、一時保管の際には遮水等の対策を行うことが望ましい。また、処分する際にもr-Csに汚染された焼却飛灰に対する対策、すなわち特定一般廃棄物・特定産業廃棄物の特別処理基準（埋立の場合には、土壌層の設置と層状埋立や飛灰の水との接触低減等）と同程度の対策は必要と考えられる。

次に木質バイオマス燃焼灰及びバイオ炭の有効利用を検討するため、有害重金属に対する含有量及び溶出液中の有害重金属濃度を測定して、土壌汚染対策法の基準値及び汚泥肥料の規格値と比較した。その結果、バイオ炭はすべての基準値や規格値を満たすが、飛灰については、土壌汚染対策法の溶出基準のCr、Pb、As、Seが超過するケースがあった。バイオ炭は土壌改良剤として、直接利用できる可能性が示唆された。バイオ炭は炭素が主要成分であることから、炭素貯留の機能も有する。これまで産業廃棄物として処理・処分されていたが、土壌改良剤としてのリサイクルと、炭素貯留によりJ-クレジットも認められれば、施設Dの低コスト化やリサイクル率の向上が期待される。

(3)-②バイオ炭の貯蔵における安全性評価と管理方法の検討

熱重量・示差熱分析装置により、昇温速度2 K/minとしAir雰囲気中での測定と解析をした結果（図1-6を参照）、含有水分量は4.4～10.2%であり、何れのバイオ炭も200℃前後に達すると有炎燃焼を開始し、火災に至ることがわかった。また、最終的な重量減量率を踏まえると、今回試験に供したバイオ炭の場合、未燃分が多い結果となった。

そこで、双子型高感度熱量計によりバイオ炭の室温付近（25℃）～300℃までの温度領域における熱挙動の測定と解析をした結果（図1-7を参照）、40℃前後から空気との酸化によるものと推定される微小な発熱を開始することがわかった。この結果から、木質ペレットやバークを原料とするいずれのバイオ炭においても、40℃前後の室温環境で大量貯蔵され、外部との熱の出入りが無い「断熱状態」であれば、微小発熱により、蓄熱後に温度上昇し（含有水分の蒸発や沸騰による吸熱を乗り越え）、熱分解開始温度に到達し、火災に至る危険性があると考えられる。この40℃前後という室温環境は、近年の地球温暖化による気象状況を踏まえると、密閉性の良い倉庫内や特に夏の日中と夜間の温度差があまりない条件下では、自然発火による火災発生は十分起こりえるため、注意が必要となる。

次にJIS M8814に準じたボンベ型燃焼熱量計により燃焼熱量を測定した結果、バイオ炭の燃焼熱量は22,000～26,000 kJ/kgとなり、既存のバイオマス燃料の燃焼熱量と比較すると、木質ペレットが17,650～19,700 kJ/kg、RDFが16,800～21,800 kJ/kg、下水汚泥燃料が14,880～23,400 kJ/kgであるため、バイオ炭の燃焼熱量は既存のバイオマス燃料と同等の値となった。比較に用いた既存のバイオマス燃料は、過去から現在までに日本各地で「自然発火」とみられる火災を、発生させており、RDFに関しては、消火活動中に爆発が発生し、消防隊員2名が殉職している。このことから、バイオ炭が火災を発生させた場合、既存のバイオマス燃料と同等の火災被害となる可能性もあるため、貯蔵場所での火災予防と消火方法の事前検討が必要である。また、消防法第1章の総則第1条の4に記される小ガス炎着火試験をした結果、バイオ炭は外部からの火災によって比較的容易に着火する可能性があり、火災が発生した場合延焼拡大していくことがわかった。この結果からも、火災発生時には、延焼拡大防止措置（除去消火法：可燃物を取り除き燃焼を止める消火法）を講じた上で、窒息消火法あるいは冷却消火法を併用し、消火活動を行わなければならない可能性がある。さらに、日常から火気の近辺でバイオ炭の貯蔵を行わなければならない場合には、注意が必要である。

今回の熱危険性評価手法により得られた各結果から、図1-8に示すように、バイオ炭の場合、酸素が十分に存在し、大量に堆積貯蔵されており、かつ断熱状態が良い場合には、40℃前後の貯蔵であって

も発熱後温度上昇し、火災に至る可能性が考えられる。さらに、温度上昇の過程で可燃性のガスが発生した場合には、貯蔵場所において爆発が発生することも想定できる。特に、放射性Csを含むバイオ炭が火災を発生させた場合、放射性Csの飛散状況モニタリングや消火等（含：消火水による放射性セシウム流出防止措置）、現場では様々な対応や意思決定を求められる可能性が高い。そのため、貯蔵場所でのバイオ炭の火災を防止し、バイオ炭を製品として有効活用していくためには、堆積高さや貯蔵量の制限、内部温度のモニタリング等の事前対策が必要となることが考えられる。

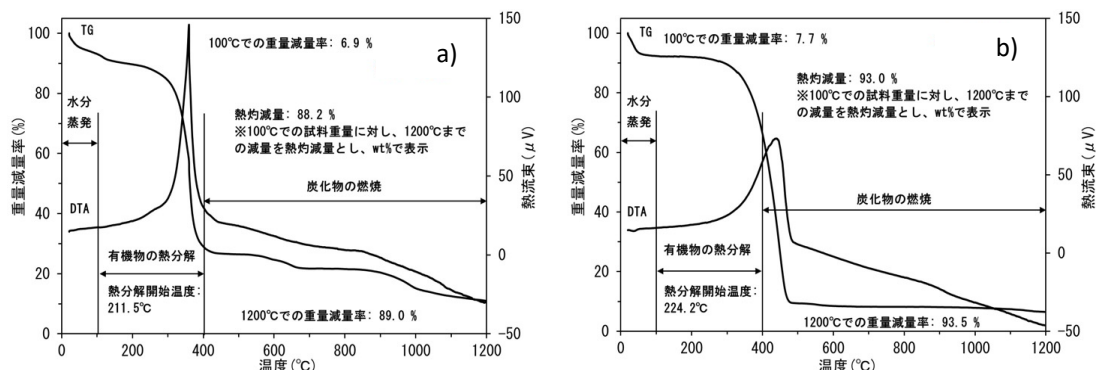


図 1-6 バイオ炭の熱分解開始温度と全体的な熱挙動（一例、a)実機バイオ炭（木質ペレット原料）、b) ラボ製造バイオ炭（バーク原料）

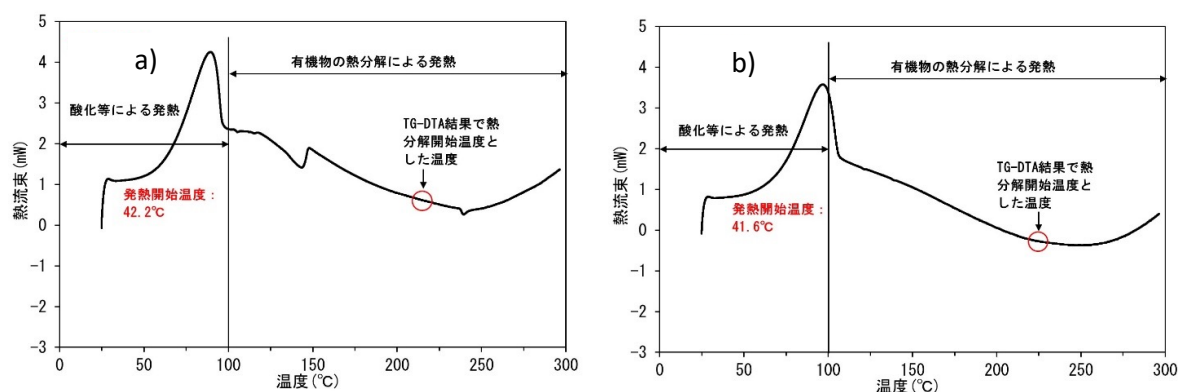


図 1-7 バイオ炭の微小発熱開始温度（一例、a)実機バイオ炭（木質ペレット原料）、b) ラボ製造バイオ炭（バーク原料）

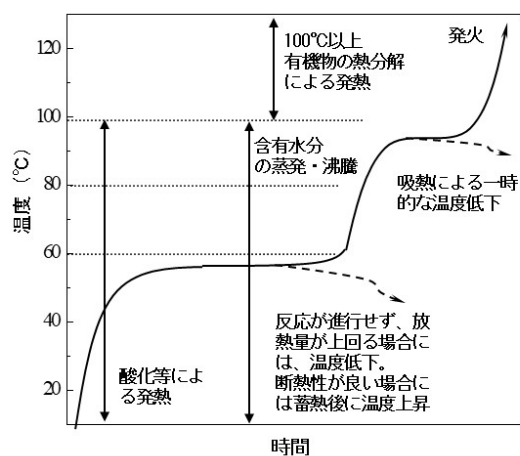


図 1-8 バイオ炭の自然発火による火災発生メカニズム

(4) 住民・自治体との対話

福島県飯舘村の木質バイオマス発電施設整備では、立地行政区から村に地区からの意見を踏まえる

こと前提になっている。そこで、研究分担者が住民や自治体との対話に関与し、意見の実態、事業理解に向けた対応、良い取り組みを整理した。住民との対話では、木質燃料として活用する県内の木質バイオマスには放射性物質が付着または含有していることに対する不安が最も多く意見として述べられた。立地地区では、環境省による6年間にわたっての仮設減容化施設の運転実績や情報公開、福島県生活環境の保全等に関する条例に基づく成分分析等が行われていたが、加えて当該サブテーマの研究成果の結果及び予測値などを説明することにより、不安を払拭して発電事業に深い理解が得られた。また、本対話を通して、地域に信頼されている専門家が説明会に参加し、住民に分かり易く説明すること、質疑が無くなるまで丁寧に対応することが不安払拭には重要と考えられた。

村外（地域外：関東圏から）から以下の不安も寄せられている。木質燃料（樹皮を含めて）の一部に放射性物質が付着していることから、燃焼によって高度に放射性物質が濃縮される主灰や飛灰の安全性、さらには飛灰を捕集するバグフィルタの安全性への懸念などがあった。当グループは、飯舘村役場と連携し、情報公開制度のあり方、不足の事態に対するリスク管理などを協議し、外部からの問い合わせに対し、科学的な根拠と研究成果を報告し、疑問・不安の払拭をした。

また、飯舘村広報誌、自治体研修（森林組合勉強会、牧野組合研修）、行政区懇談会に研究資料を提供している。この継続的な取り組みと研究代表者と分担者が現地に赴くことにより、飯舘村の再エネ導入等計画策定協議会における計画の取りまとめや飯舘村木質バイオマス事業「飯舘みらい発電所地域協議会」の設立が速やかに実現できた。

サブテーマ3で検討しているバイオマス利活用提案においても、本課題のメンバーが他の自治体担当者に対し、科学的な根拠と研究成果を基にした丁寧な住民対話の重要性を説明し、認識を共有した。なお、他のサブテーマの研究者間で社会実装時における留意点について意見交換し、協議体制の検討に活かしている。

参考文献

- H. Fujiwara, H. Kuramochi, T. Maeseto, K. Nomura, Y. Takeuchi, K. Kawamoto, S. Yamasaki, K. Kokubun, M. Osako (2018) Influence of the type of furnace on behavior of radioactive cesium in municipal solid waste thermal treatment. Waste Management 81, 41-52.
- K. Koido, T. Ogura, R. Matsumoto, K. Endo, M. Sato (2021) Spent mushroom substrate performance for pyrolysis, steam co-gasification and ash melting. Biomass and Bioenergy, 14, 105954
- K. Yui H. Kuramochi, M. Osako (2018) Understanding the Behavior of Radioactive Cesium during the Incineration of Contaminated Municipal Solid Waste and Sewage Sludge by Thermodynamic Equilibrium Calculation. ACS Omega, 3, 15086-15099
- ISO 21404 (2020) Solid biofuels — Determination of ash melting behavior
- 環境省 https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/
- 倉持秀敏、由井和子、万福裕造、小林拓朗、中川美加子、肴倉宏史、大迫政浩（2020）木質バイオマス発電施設における安定セシウムの挙動、第9回環境放射能除染研究発表会
- 森元愛里彩、崎田省吾、青柳充、増田泰三、西村和之（2017）木質ペレット焼却灰の性状調査と有効利用可能性の検討、第28回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 北海道立総合研究機構 <https://www.hro.or.jp/upload/13142/nensyoubai.pdf>

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

＜【サブテーマ1】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「汚染木質バイオマスの燃焼及びガス化技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
-----------	--------------

1. 汚染樹皮と木質チップの燃焼技術開発では、実施設調査及びラボ流動床炉等を用いて、安定燃焼条件の提示と、同条件で発生する無機系残渣における放射性セシウムの濃度を明らかにする。また、ガス化技術の開発ではラボ流動床炉を中心に安定なガス化条件とその生成ガスや炭素系残渣の質や量の制御性を把握することに加えて、残渣中の放射性セシウム濃度を明らかにする。なお、類似実機施設調査の結果を踏まえて両発電技術における放射性セシウムの挙動を解明する。 2. 両技術から発生する残渣の元素組成や放射性セシウムの溶出性等の性状を明らかにし、無機系残渣の適正処分方法を提案し、一方、炭素系残渣については安全な土壌等への炭素貯留法を提案する。 3. さらに、ガス化技術についてはサブテーマ2と技術連携した際の生成ガスや炭素系残渣の質と量に対する制御性も明らかにする。 4. 両技術を実装した施設に対する放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。 5. 特に、稼働や計画が先行する燃焼発電に関する技術については、技術的な情報提供に留まらず、住民・自治体等との対話を行う。	1. 汚染樹皮と木質チップ原料に、実機調査・試験とラボ流動床炉を用いて、安全面で懸念される放射性セシウム(r-Cs)の挙動や安定運転で懸念されるクリンカの生成可能性を明らかにし、安全かつ安定な燃焼技術を確立した(成果1-1)。また、ラボガス化実験装置を試作し、ガス変換率、カロリーガス濃度、炭素系残渣(バイオ炭)の発生量と性状等を把握した。また、クリンカの生成を回避する条件も提示した(図1-15)安定運転及び残渣の有効利用から最適な温度条件を提示し、その際のr-Csの挙動を明らかにし、安全面での考察も行った。計画にない、別形式の施設調査も行い、有用な知見を得た(図1-2b、図1-2a)。 2. 燃焼灰やバイオ炭に対して性状を明らかにし、適正な保管や処分方法を提案した(図1-21)。バイオ炭については炭素貯留法として、土壌改良剤として安全に利用できることを提案した。重金属の含有量とそれらの溶出率も明にした点は目標を上回る点である。(図1-18) 3. ガス化条件とバイオ炭の発生量と質の関係を明らかにした。(図1-6及び7) 4. 施設調査から、物質収支・エネルギー収支を整備し、ラボ試験等により、r-Csの分配挙動を明らかにした。(図1-8)) 5. 住民・自治体との対話を積極的に行い、地域住民が燃焼発電施設に深い理解を得るための成果発信・対話の取り組みを考察した。再エネ導入計画等の取りまとめにも関与して大きな成果を得た。
--	--

Ⅱ－２ サブテーマ２「ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

〔サブテーマ２要旨〕

熱分解ガス化とメタン発酵等の生物処理プロセスを組み合わせ、木質バイオマス、食品・草本残渣等の地域資源を統合的に利用する技術システムを構築することを目的として、バイオマス燃焼発電で派生する焼却灰、熱分解ガス化で派生するバイオ炭、メタン発酵で派生する発酵残渣固形分等を各技術で効果的に利用するための技法の開発に取り組んだ。

発酵プロセスを促進するバイオ炭の生成に適した熱分解条件に関しては、熱分解温度の上昇がバイオ炭の比表面積や導電性を改善させ、メタン発酵の促進効果も拡大することを確認し、高温でバイオマスを処理する熱分解ガス化プラント由来のバイオ炭は、メタン発酵の添加剤として有望であることを示した。また、熱分解におけるCO₂の導入はバイオ炭の高い導電性を維持しつつ、比表面積と親水性を改善し、メタン発酵の添加剤としての効果も拡大することを確認した。

燃焼灰の熱分解での活用に関しては、燃焼灰洗浄水由来のミネラルを熱分解原料に浸透させ、原料中のカリウム濃度を高めることで、バイオマス中の炭素とCO₂との反応性が向上し、より低い温度（反応速度ピーク温度で140℃低下）でCO₂と炭素からCOを生成する反応が進行することを確認した。杉バークを使った熱分解では、800℃で窒素雰囲気下の場合と比較し、灰由来K負荷+CO₂雰囲気下でのCO発生量は5倍以上に増大した。このことから、バイオマス燃焼灰由来のカリウムを触媒として利用することで、ガス化率の大幅な増大とCO₂リサイクルの促進が図れることを明らかにした。さらに、その処理で生成したバイオ炭は、CO₂雰囲気下で生成した他のバイオ炭と同等のメタン発酵促進効果を持つことを確認した。

種々のバイオマスについてCO₂雰囲気下での熱分解の反応性を調査したところ、原料のアルカリ金属やアルカリ土類金属濃度との間に相関性が認められ、Ca濃度が高いメタン発酵残渣はCO₂との反応性が極めて高いことを見出した。具体的には発酵残渣は杉バークよりも160℃以上低い温度で反応速度ピークを示し、800℃で熱分解した際には炭素が全て反応し、残渣の灰分率は100%であった。その結果、発酵残渣からのCO発生量は、窒素雰囲気下と比較してCO₂雰囲気下で11倍に増大した。残った無機残渣は、バイオ炭と同様の発酵促進効果を発揮することも確認でき、発酵残渣のCO₂導入式熱分解はCO₂リサイクルとメタン発酵促進に同時に寄与することを明らかとした。

サブテーマ3で検討する脱炭素産業拠点における技術の適用を想定し、周辺地域の利用可能な主要なバイオマスである食品残渣と草本バイオマスのメタン発酵連続実験と、それに対するバイオ炭添加の影響を評価した。連続実験においては、バイオ炭はメタン収率の増大とpH変動に対する安定性の増大に寄与することを確認した。特に草本のメタン発酵においてバイオ炭の効果が顕著で、この系は窒素分が乏しく代謝由来アルカリ度の供給が少ない発酵系であることから、中間体の有機酸の蓄積等によるpH変動の影響を受けやすい。バイオ炭投入無しの系では60日程度の運転後にpHの低下により運転が不安定化した。一方、バイオ炭添加系においては適正pH範囲が維持でき安定した運転が継続できた。さらに、比表面積の大きなCO₂雰囲気下で処理したバイオ炭を添加した系では、原料からのメタン収率も他の系と比較して20%程度増大させた。バイオ炭投入により発酵液内の固形分濃度は増大するが、粘性は逆に低下することから、原料に対して1%程度の添加率でバイオ炭を投入し続けることは運転の支障にはならないことが確認できた。以上のことから、産業拠点で想定する技術システムにおいてバイオ炭投入式のメタン発酵が有望であることを示すとともに、物質収支に係る熱分解-発酵統合システムの設計パラメータを提供することができた。

バイオ炭はメタン発酵だけでなく、CO₂バイオメタネーションにおいても活用が期待できる。湿潤担体を充填した塔にガスを通気し反応させるバイオフィルター型リアクターの担体にバイオ炭を使用し、ポリウレタン担体と対照実験を実施したところ、バイオガスと水素の混合ガスを想定した模擬ガスの処理において、バイオ炭担体の系では通気速度が20～25 L/L-槽/日の条件においても処理後のメタン濃度95%以上を維持できた。一方でウレタン担体の系では15 L/L-槽/日の条件において処理性能が悪化し、90%以上のメタン濃度が維持できなかった。

発酵原料及び添加剤として投入するバイオ炭が放射性Csで汚染されていた場合を想定し、発酵液における放射性Csの分配を検討した。原料および添加物を含む投入物の放射性Cs量と発酵液の放射性Cs量は釣り合っており、既に報告例があるようにガス側には移行していないことを示唆していた。原料に汚染牧草を用いたメタン発酵連続実験においては、放射性Csは原料中の土壌に集中しており、発酵過程ではそれが溶出しないことを確認した。一方、バイオ炭からは発酵液の水相に放射性セシウムが放出され、17～39%が水相に溶存体として存在することがわかった。しかしながら、原料に対するバイオ炭添加率が1%の場合、発酵液中での放射性Cs濃度は12 Bq/kg程度で、そのうち液分に存在する溶存態の放射性Csは2～4 Bq/kgの濃度であると推算され、肥料に対する暫定許容値の400 Bq/kgと比較して十分に低い水準であった。バイオ炭を添加したメタン発酵を行なった場合にも、残渣の液肥としての利用には支障がないと考えられた。

1. サブテーマ2 研究開発目的

サブテーマ1で検討する木質系バイオマスの燃焼発電および熱分解・ガス化において派生する副産物である灰やバイオ炭をカスケード利用しつつ、メタン発酵やバイオメタネーション等による湿式バイオマス由来炭素分のエネルギー化を促進する技法を開発する。他方、燃焼やメタン発酵における副産物を触媒として熱分解・ガス化で利用することによるCO₂の変換促進技法も開発する。また、サブテーマ3で検討する福島県双葉郡大熊町カーボンニュートラル産業拠点構想においてバイオマス利用システムを具体化するため、地域賦存量の点から主要なバイオマスである刈草や食品残渣を原料としたメタン発酵におけるバイオ炭添加効果を明らかにする。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「ガス化-発酵コンバインド型CO ₂ リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」
サブテーマ2 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ2 目標	・今後福島県で普及が予想される再エネ電力、水素等の利活用も想定した、バイオマス利活用によるCO₂の隔離・利用のための連携システムを構築する。 ・バイオマス燃焼発電、バイオマスガス化発電及びメタン発酵において生成するCO₂を次の手法でメタン化ないし炭酸塩固定化するための技術システムの確立と導入シナリオ検討のためのエネルギー物質収支モデルを構築する。(1)バイオマス燃焼発電において生成する焼却灰を利用した炭酸塩化(2)水素導入によるバイオマスガス化発電及びメタン発酵由来のCO、CO₂の微生物学的メタン化(3)再エネ電力を利用した微生物電解によるCO、CO₂の微生物電気学的メタン化(4)ガス化炭素残渣と金属を触媒として用いたガス化-発酵連携型のCO、CO₂の微生物電気学的メタン化。 ・ガス化処理によって発生するガス及び残渣中に含まれる放射性セシウムを発酵装置へ導入した際の放射性セシウムの挙動と液相からの吸着濃縮・除去方法を構築する。 ・コンバインド型連携技術システムから排出される炭素系残渣は、サブテーマ1から提案される安全な炭素貯留法を応用し、炭素貯留を含めた連携技術システムにおける炭素収支を明らかにする。また、実機を想定して放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。また、実証に向けて浜通り地域等において成果に関する意見交換・対話等を行う。

3. サブテーマ2 研究開発内容

(1) メタン発酵プロセスを促進するバイオ炭の製造に適した熱分解条件の解明

(1)-①熱分解温度、雰囲気及び含有無機元素の影響

木質バイオマス为原料とし、400、600、800℃の各温度条件、窒素とCO₂の二通りの雰囲気条件、木質バイオマスにバイオマス発電所の飛灰から溶出させたミネラル液を浸透させた無機元素濃度変動条件においてそれぞれバイオ炭を生成させた。灰からの溶出ミネラル液は3段階の濃度水準で用意した。すなわち灰：洗浄水の重量比を1:2（水準1）、1:3.3（水準2）、1:10（水準3）となるよう密封したプラスチック容器内でそれぞれ混合し、6時間200 rpmで振とう後にガラスろ紙を通過したろ液を実験に使用した。熱分解によるバイオ炭の生成は、約10 gのバイオマス原料を、雰囲気ガスを充満させた環状炉内に設置し、1時間設定温度に保持することで行った。炉から排出されたガスは、ガスメータで流量を測定するとともに、ガスクロマトグラフでガス組成を特定した。炉内温度が十分低下後に投入物を取り出し、残留した固形物をバイオ炭として実験及び分析に供した。

メタン発酵におけるバイオ炭添加影響の検討はバッチ実験によって行った。食品残渣を連続処理する実験室の中温メタン発酵槽（35℃）から採取した消化液とミネラル培地を1:1で混合し、基質/消化液VSが0.3となるよう基質となる油脂を投入した。バイアル瓶を用いて35℃、180 rpmで振とう培養を行った。生成ガス量およびガス組成を1～3日に一回分析し累積メタン生成量のデータから、Gompertz型のフィット式を使用してラグ時間、メタン生成量の収束値（メタン生成ポテンシャル）、同ポテンシャルの80%相当量に到達するまでの時間（t80）をそれぞれ算出した。

(2)-②メタン発酵残渣の熱分解およびCO₂還元の原料としての評価

原料として食品残渣を処理するバイオガスプラントの固液分離工程から採取した脱水汚泥を実験室にてオーブンで80℃で乾燥させたものを使用した。上記と同様に異なる温度条件、窒素とCO₂の雰囲気条件においてそれぞれ熱分解してバイオ炭を生成させた。メタン発酵における添加物としての影響は、バイオマス由来のバイオ炭との対照実験として、35℃でのバッチ実験を行った。基質にはメタン発酵の中間代謝物である酢酸、プロピオン酸をそれぞれ使用した。

(2) 食品、草本残渣のメタン発酵プロセスにおける木質バイオマス熱分解・ガス化施設由来バイオ炭添加の影響

(2)-① 食品及び草本残渣のメタン発酵連続実験

サブテーマ3においてゼロカーボン産業拠点予定地を含む周辺地域においてバイオマス賦存量を調査した結果刈草と食品残渣が利用可能である主要なバイオマス資源であったことから、食品及び草本原料を処理するメタン発酵の連続実験におけるバイオ炭の添加影響を検討した。使用したバイオ炭は、福島県内で木質ペレット为原料として熱分解ガス化発電を実施している施設から採取した（サンプル名：実施炭）。また、このバイオ炭を実験室の環状炉においてCO₂雰囲気800℃で再度分解したものも材料として使用した（名称：実施炭CO₂炭）。食品残渣は35℃の中温発酵で、刈草は中温では分解速度が小さく、発酵液が高粘度化することを確認したので、55℃の高温発酵での実験を実施した。それぞれ対照実験として、3台のバイオリアクターを使用して並列で実験を進めた。条件R1はバイオ炭の投入なし、R2は実施炭を原料に対して重量比1%で混合、R3は実施炭CO₂炭を原料に対して重量比1%で混合して投入した。発酵槽の滞留時間が30日になるよう、毎日発酵液の引き抜きと原料の投入を一回行った。

(2)-② 異なるバイオマス種の熱分解・ガス化由来バイオ炭の発酵促進効果

サブテーマ1において、ダウンドラフトガス化装置を使って杉チップ、杉バーク、松バークをそれぞれ処理後に残留したバイオ炭をメタン発酵添加剤として使用した。これらを1.5%の濃度で発酵液に添加し、実験①と同一の草本バイオマスを基質としたバッチメタン発酵実験を実施した。発酵温度も実験①と同様に55℃に設定した。

(3) バイオ炭を利用したCO₂バイオメタネーションの促進

塔状のバイオリアクター内に充填した湿潤状態の担体に微生物を生息させ、塔下部からガスを通気しながら搭上部の出口に向かって移動する過程で反応させるバイオフィルター方式のCO₂バイオメタネーションを検討した。対照実験として2種類の担体を使用した並行実験を行った。条件R1は担体にポリウレタンスポンジを使用し、R2は担体として強度に優れた杉バークを800℃で熱分解して得られたバイオ炭を使用した。通気ガスとしてバイオガスと水素との混合ガスを想定し、CH₄:CO₂が6:4、CO₂:H₂が1:4になるように混合された3種混合ガスを設定した流量で供給した。塔の上部には散水装置が備え付けられており、微生物に栄養素を供給する目的でタイマー制御されたポンプから1時間に1回1分間ミネラル培地が滴下された。反応することでガス体積は減少するため、リアクター流入前後にバイオガス向けのガスカウンターを設置し、累積のガス通気量を把握した。

(4) 発酵原料及びバイオ炭に由来する放射性Csのメタン発酵プロセスにおける挙動

(4)-① 汚染バイオマスのメタン発酵連続実験における放射性Cs溶出・分配挙動

(2)の実験と同様、メタン発酵連続実験を実施した。実験には、放射性Csを含む汚染牧草をフードプロセッサで粉砕して使用した。100日以上、中温メタン発酵による連続実験を実施し、運転が安定している時期において、別の日時に複数回引き抜いた発酵液の放射性Cs濃度を分析して平均値を算出した。発酵液は遠心分離とガラスろ紙、5~0.45μmの複数種類のメンブレンフィルターでろ過して固液分離した。固形分およびろ紙は、1M酢酸アンモニウム水溶液を使ったイオン交換によってイオン交換可能成分を溶出し、同様にフィルターで固液分離した。イオン交換成分溶出後の固形分およびろ紙の放射性Cs濃度を固形画分の放射性Cs、イオン交換成分を溶出・ろ過したろ液中の放射性Cs濃度をイオン交換画分の放射性Cs、最初に固液分離して得たろ液を溶解性画分の放射性Csとして物質収支を検討した。

(4)-② 放射性Csを含むバイオ炭を添加するメタン発酵連続実験における放射性Cs溶出・分配挙動

放射性Csを含む実施設のバイオ炭を添加しながら連続実験を行った(2)①の食品残渣を使用した実験において、添加するバイオ炭の放射性Cs濃度と連続実験を開始後60日以上経過し、運転が安定している時期において、異なる日時に複数回引き抜いた発酵液の放射性Cs濃度を上記と同じように分画して物質収支を検討した。

4. サブテーマ2 結果及び考察

(1) メタン発酵プロセスを促進するバイオ炭の製造に適した熱分解条件の解明

(1)-①木質バイオマス熱分解に係る温度、雰囲気及び含有無機元素のバイオ炭性状への影響

上述した異なる熱分解条件で作成したバイオ炭の性状を調査したところ、比表面積、親水性、電気化学的特性に関して、特徴的な違いがあることが明らかとなった。温度の上昇は比表面積の増大、親水性の減少、電気伝導率の上昇をもたらすことが確認できた。特に電気伝導率の上昇は著しく、林地残材及び杉バークで調査した結果では、400℃で生成したバイオ炭は全く通電しないが、600℃で生成したそれは0.01 S/cm未満の微導電性を示し、800℃で生成したそれは0.4~1.0 S/cmとカーボンブラック¹⁾と遜色ない高い導電性を示した。バイオ炭の元素比H/C、O/Cは温度の上昇に応じて減少し、C元素の占める割合が上昇することから、この高い導電性は黒鉛化の進行によるものと推察された。バイオ炭を用いたX線解析測定の結果からも、黒鉛化を示す炭素(002)面のピークが温度上昇に伴い増大しているのが確認できた。バイオ炭の投入がメタン発酵等のバイオペロセスを効率化するメカニズムの一つとして、微生物間の電子授受の促進が挙げられている。培養システムへの導電性物質の投入は、電子授受を介した有機物分解に係る共生系の形成を促すことが既に報告されている。メタン発酵においても律速段階となりやすい有機酸分解等の反応がそうした共生系に依存していることから、そのような効果は望ましいと考えられている。バイオ炭による電子授受の促進は、炭自体の導電性だけでなく、表面官能基の酸化還元にも依存するとされている。しかしながら、本研究で扱った木質由来バイオ炭は、FT-IRで分析した結果の範囲では、温度に関わらず官能基が乏しいことを示していた。従って、高温で生成したバイオ炭の高い導電性はメタン発酵等の促進において有利になると考えられた。

雰囲気ガスとしてのCO₂の影響は800°Cで熱分解した場合に顕著であった。CO₂と炭表面の炭素との反応 ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$) は以前から知られた現象であり、吸熱反応であることから700°C以上の高温でその反応が進行することも明らかとなっている²⁾。この結果はそうした知見と付合していた。CO₂の導入はバイオ炭の比表面積の増大と親水性の増大に寄与することが確認された。例として杉バークの場合では窒素雰囲気下生成したバイオ炭の平均比表面積137 m²/gであるのに対し、CO₂雰囲気下でそれは701 m²/gであった。親水性に関しても、液滴法で測定した接触角は、窒素雰囲気下で平均81°、CO₂雰囲気下で平均19°で親水性の向上が明らかであった。SEM-EDSでの観察やFT-IRでの分析の結果、CO₂雰囲気で生成したバイオ炭は表面にCaCO₃が豊富であることが確認された。このことはバイオマス中のCaと雰囲気ガスのCO₂との反応で形成されたこと、CO₂との相互作用でCが消費され無機分の濃度が上昇したことから関係していると推察された。CaCO₃は濡れ性に優れていることから、大きな比表面積と表面のCaCO₃の形成がCO₂雰囲気で生成したバイオ炭の親水性に寄与していると考えられた。バイオ炭のバイオプロセスでの機能に関して、比表面積や親水性はポジティブな影響をもたらす。比表面積の増大は表面における微生物との接触機会や付着して生物膜を形成する箇所をより多く提供する。そのことは電子伝達にも通じる。また、親水性は発酵液とバイオ炭との混和性を向上させ、上記の機能を速やかに発揮させる。このような理由から、高温かつCO₂雰囲気で生成したバイオ炭も発酵促進効果が期待される。このようなCO₂雰囲気でのバイオ炭の比表面積・親水性の拡大は他の原料でも可能であるかを調査した結果、稲わら、籾殻といった農業残渣、牧草や刈草のような草本バイオマスでは木質バイオマスと同様の大きなバイオ炭性状の変化が確認されるが、可燃ごみ、紙、廃プラスチックでは変化の程度が小さいことが確認された。

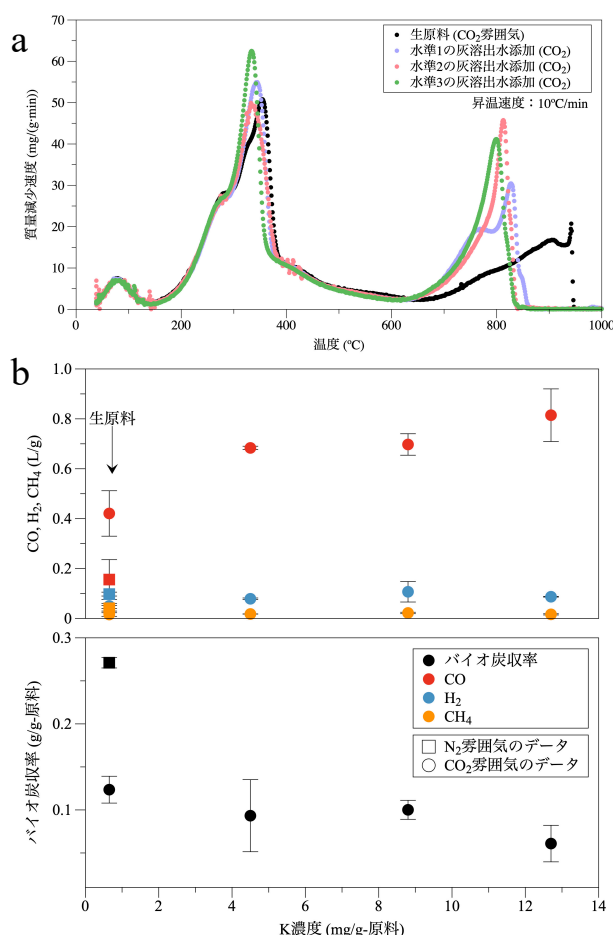


図2-1 灰由来ミネラルを添加した原料の熱分解

バイオマス燃焼灰から溶出させたミネラル液は、上述の通り3段階の濃度水準で用意した。それぞれカリウムが主要元素で、水準1では1802 mg/L、水準2では5114 mg/L、水準3では8654 mg/Lであった。それらを浸透させた杉パークを熱分解した場合の質量減少速度のプロファイル（DTA）は図2-1aの通りである。CO₂雰囲気では、650°C以上での質量変化の挙動が窒素雰囲気とは異なり、CO₂との反応により消費される炭素分の減少が起きる。対照系である生原料では、温度上昇に伴う質量減少速度の上昇が緩やかであり、ピークに到達したのは941°Cであった。それと比較して灰溶出水添加系ではピーク温度が100°C以上低温側に移行した。最もピーク温度が低い水準3では801°Cであった。800°Cにおいてそれぞれの原料を熱分解した際に生成するガス及びバイオ炭の収率は図2-1bの通りである。灰溶出水添加後の原料の元素組成にはカリウムを除いて顕著な濃度変化は見られず、濃度水準に応じて原料中のK濃度は上昇した。図から、カリウム濃度の増大に伴うCO生成量の顕著な増大が確認された。窒素雰囲気でのCO生成量に対して、濃度水準3溶出水+CO₂雰囲気でのCO生成量は5倍程度まで増大した。以上のことは、灰由来のカリウムが上述のCO₂ + C → 2COの反応において触媒として機能し、原料及びCO₂由来の炭素のCO変換率を向上させたことを示唆している。従って、バイオマス燃焼灰は、ガス化率の増大とCO₂リサイクルの促進するための資材として有効利用できることが明らかにできた。

このように様々な条件において生成したバイオ炭のメタン発酵添加物としての性能を評価するために、バイオ炭を添加した条件でのメタン発酵バッチ実験を行った。液中のバイオ炭濃度は、事前の実験で5～20 g/Lの範囲で検討し15及び20 g/Lが最もメタン生成速度が優れていたことから15 g/Lに設定した。発酵原料には、食品残渣の発酵において律速段階となる油脂を選び、35°Cの中温発酵を実施した。フィットモデルから得られたパラメータは図2-2に示す通りである。各パラメータはバイオ炭の性状のうち比表面積との間に最も高い相関を有していた。比表面積は上でも述べたように高い温度、CO₂雰囲気で増大する。灰溶出液の添加は若干の比表面積減少をもたらした。この図から、t₈₀は比表面積と負の相関関係にあり、比表面積の大きなバイオ炭共存時にはより早くメタン生成が進むことを示している。一方、メタンポテンシャルの点からは比表面積の大きなバイオ炭の共存は最終的なメタン生成量を減少させることが示唆された。比表面積の大きなバイオ炭は有機物の吸着能も大きく、発酵原料となる物質がバイオ炭への吸着することにより微生物にとっての利用性を低下させた可能性がある。総括すると、比表面積の大きなバイオ炭は速度の点でメタン発酵を促進するが、原料あたりのメタン収率を下げる可能性があることがわかった。ここで扱うメタン生成ポテンシャルの定義は十分な時間経過後に究極的に生成し得るメタン量である。実際のプラントは連続運転であり、投入原料は限られた滞留時間の下で処理されるので、速度を重視することが多いと思われる。速度増大の点では、より高温かつCO₂を導入して生成したバイオ炭が有望である。そのようなバイオ炭を得るには、低温で熱分解を行う炭化プロセスよりも高温かつ水蒸気やCO₂等のガス化剤の投入を伴うこともあるガス化プロセスの方が適していると考えられた。

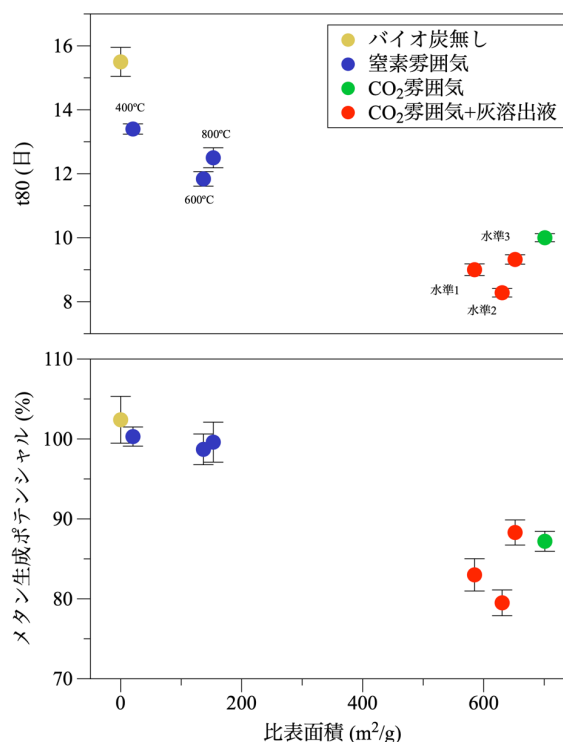


図2-2 メタン発酵の各条件での速度指標としてのt₈₀とメタン生成ポテンシャル（原料のCODに基づく理論的メタン生成量に対する%）

(1)-②メタン発酵残渣の熱分解およびCO₂リサイクル原料としての評価

メタン発酵において生成する残渣は、有効利用する場合も含めて通常は固液分離される。液分は液肥として利用され得るが、固形分の用途は堆肥、固形燃料、再生敷料と並んで熱分解炭化/ガス化原料がある。木質バイオマスと同様、発酵残渣について熱分解特性を調査したところ、①で検討した灰由来のミネラル添加なしに極めて高いCO₂との反応性を有していることが確認された。図2-3aには昇温速度10°C/minにおける質量減少速度ピーク温度を各バイオマス原料についてまとめ、図2-3bには800°Cにおいて発酵残渣、バークを窒素またはCO₂雰囲気中で熱分解した際の可燃性ガス及びバイオ炭の収率をまとめた。①で議論したKを含むNa、Mg、Ca等のアルカリ金属、アルカリ土類金属濃度とCO₂との反応に関わる質量減少速度のピーク温度との間に負の相関関係が認められた。中でも発酵残渣のそれは低く、バークや刳殻よりも100°C以上低い温度で反応し得る。本調査では異なる3箇所のバイオガスプラントから採取した発酵残渣を分析に供したが、同様の傾向であった。図2-3bに示すように、発酵残渣はN₂雰囲気ではガスへの転換率が木質バイオマスと比較して低いが、CO₂雰囲気ではCOへの転換が大きく促進される。図ではバイオ炭の収率と表記しているが、約0.15 g/g-原料の分解後の残留物は灰分が100%で、発酵残渣の炭素分は残らずガス及びタールに変換されたと考えられた。このようにメタン発酵残渣はCO₂共存を伴う条件で熱分解すれば、CO₂のCOへのリサイクル向けの原料として有望である可能性が示された。

窒素およびCO₂条件下で生成した発酵残渣由来バイオ炭/無機残渣に関して、メタン発酵への添加剤としての有効性を検討するため、①と同様にバッチ発酵実験を試みた。油脂を原料とした際には、N₂雰囲気、CO₂雰囲気中で生成したバイオ炭/無機残渣を添加した発酵系で、t₈₀がそれぞれ13.9、14.1日で、メタン生成ポテンシャルがともに96%であった。これらはバークを窒素雰囲気下で熱分解したバイオ炭と同程度の数値であり、無添加の場合と比較すると添加剤として有効であると考えられる。CO₂雰囲気中で炭素分が喪失された熱分解残渣であっても、発酵促進剤として利用可能であることがこの検討において確認された。

(2) 食品、草本残渣のメタン発酵プロセスにおける木質バイオマス熱分解・ガス化施設由来バイオ炭添加の影響

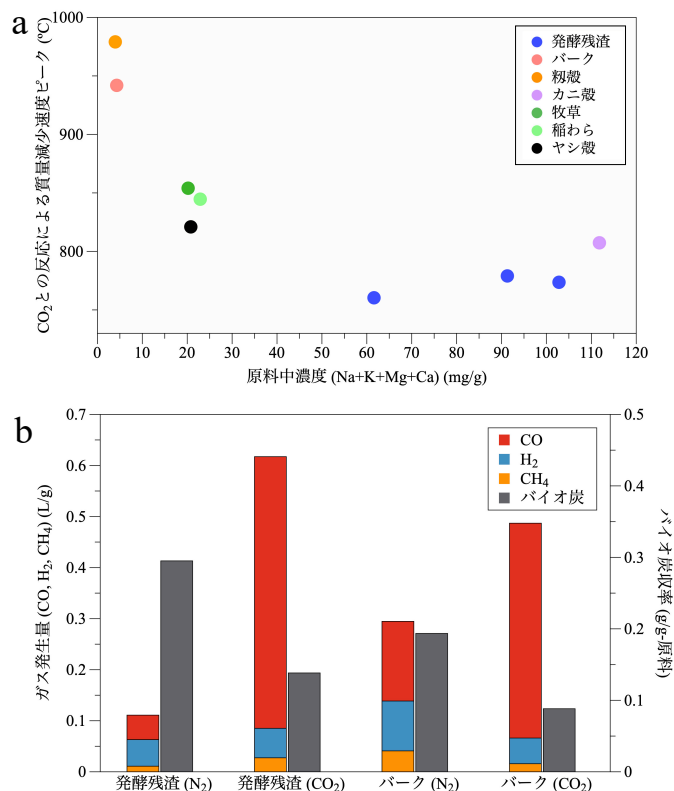


図2-3 各種バイオマスの熱分解におけるCO₂との反応に係る質量減少速度のピーク温度および発酵残渣等からのガス、炭収率

(2)-① 食品及び草本残渣のメタン発酵連続実験

実験に使用したバイオ炭は、上述の通り実施設から採取したバイオ炭と、それをCO₂雰囲気中で分解しなおしたものである。比表面積及び灰分は、前者が451±19 m²/gと26.7%、後者が862±37 m²/gと51.5%であった。施設では約1000°Cでの熱分解条件であるため、これらは(1)で検討したバイオ炭と比較して大きな比表面積を有していた。これらのバイオ炭を使用し、添加率を原料あたり1%とした食品及び草本残渣のメタン発酵連続実験を実施した。

まず食品残渣を原料として、上述の3条件（R1：炭添加無し、R2：実施設炭、R3：実施設CO₂炭）、滞留時間30日で3台の発酵タンクの運転を開始した。約120日の運転期間において、ガス生成速度、メタン濃度は安定して推移した。メタン濃度は62～68%程度、メタン生成速度は1～2 L/L-槽容積/日程度で推移した。90日目以降の平均値でみると、図2-4に示す通り、R3において他の条件よりも20%以上高いメタン生成速度が観察された。また、メタン濃度はバイオ炭を添加したR2、R3のそれがR1よりも6%ほど高かった。R1とR2のメタン生成速度の平均値の間には有意差はなかったが、R1、R2とR3の間には有意な差が存在する（p=0.05）。以上の結果は、CO₂雰囲気中で生成したバイオ炭の投入は原料からのメタン回収率を増大させる方法として有効であることを示している。(1)で議論したように、比表面積の大きなバイオ炭はそうでないバイオ炭よりメタン生成速度の向上に有利で、限られた滞留時間内での処理においてその向上は有効であることが確認された。

消化液中のTS、VS濃度に関しては、R1と比較してバイオ炭を投入したR2およびR3において大きな数値を示した。具体的には、R2、3のTS濃度は30～37 g/Lの範囲を示したのに対し、R1のTS濃度はそれよりも7～10 g/L程度低い23～27 g/Lの範囲であった。SS、VSS濃度でもその傾向は同様であった。以上の結果は、バイオ炭を添加した結果、消化液の固形物濃度が増加することを示している。固形分濃度の増加は、粘度の上昇により発酵槽の運転に望ましくない影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、粘度測定の結果、固形物濃度の増大と粘度との間には相関関係は確認されず、バイオ炭を添加したR2、R3の方が、R1（18.2 mPa・s）よりも低い粘度（12～15 mPa・s）を示した。バイオ炭が浮上または沈澱すれば次第に粘度が上昇する可能性もあり得るが、実験期間中にそれが増大する傾向も認められなかった。この点では、バイオ炭投入によるネガティブな影響がないことが確認できた。

消化液中のTS、VS濃度に関しては、R1と比較してバイオ炭を投入したR2およびR3において大きな数値を示した。具体的には、R2、3のTS濃度は30～37 g/Lの範囲を示したのに対し、R1のTS濃度はそれよりも7～10 g/L程度低い23～27 g/Lの範囲であった。SS、VSS濃度でもその傾向は同様であった。以上の結果は、バイオ炭を添加した結果、消化液の固形物濃度が増加することを示している。固形分濃度の増加は、粘度の上昇により発酵槽の運転に望ましくない影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、粘度測定の結果、固形物濃度の増大と粘度との間には相関関係は確認されず、バイオ炭を添加したR2、R3の方が、R1（18.2 mPa・s）よりも低い粘度（12～15 mPa・s）を示した。バイオ炭が浮上または沈澱すれば次第に粘度が上昇する可能性もあり得るが、実験期間中にそれが増大する傾向も認められなかった。この点では、バイオ炭投入によるネガティブな影響がないことが確認できた。

上述の食品残渣と同様の実験系において、草本原料のメタン発酵連続実験を実施した。筆者が過去に報告したように³⁾、草本バイオマスは食品や汚泥等と比較してアンモニウム生成量やミネラル濃度が小さく、メタン発酵液におけるpH緩衝容量が小さい。メタン発酵系においては中間体として蓄積すること

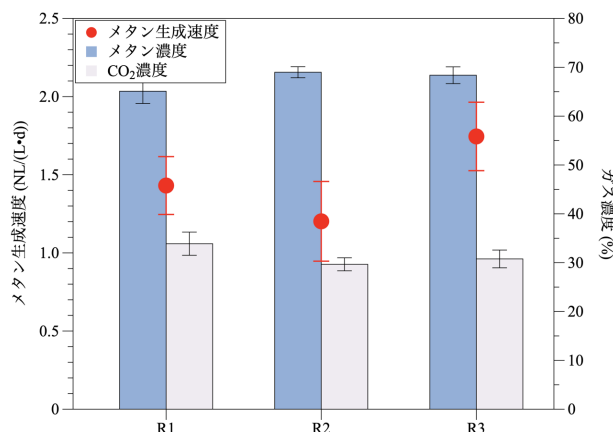


図2-4 食品残渣を処理する連続実験におけるメタン生成速度とガス組成の平均値

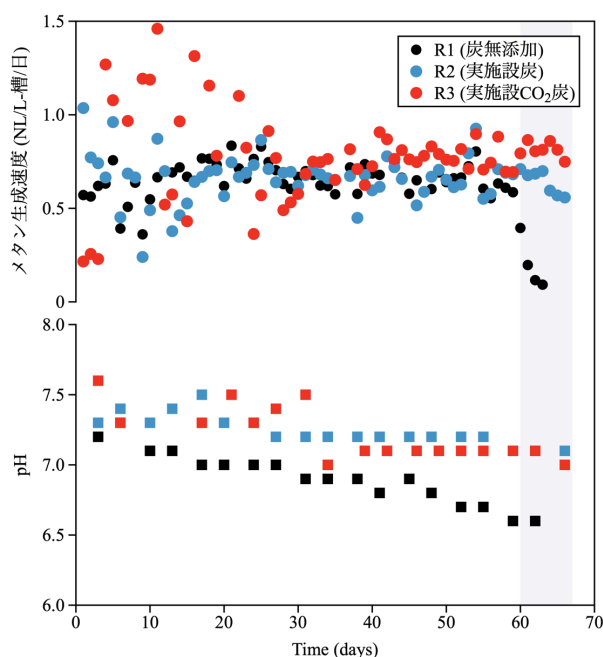


図2-5 草本残渣を処理する連続実験におけるメタン生成速度とpHの推移（色塗り部はR1への原料投入停止）

がある揮発性脂肪酸（酢酸、プロピオン酸等）と、40%程度の高いCO₂濃度に起因する分圧によって溶解するCO₂に対する一定程度のpH緩衝容量が求められる。それが不十分である場合、メタン発酵の適正pH域である6.8～7.6の範囲を逸脱し、微生物活性が低下する可能性がある。食品残渣同様、滞留時間30日で運転を開始したところ、R1のpHは徐々に低下し、60日程度でメタン発酵の適正水準を下回ったため、実験を停止した。そのため3条件を安定条件において比較することはできなかった。実験停止までのガス及びpHの推移を図2-5に示す。運転30～60日目期間は、R1～3のメタン生成速度は比較的安定していた。その時期においてはR1と2が同程度、R3は食品の場合と同様に20%程度高いメタン生成速度を示していた。草本の場合にも、CO₂雰囲気中で生成した比表面積の大きなバイオ炭の添加が、メタン生成の増大に有効であることを確認した。R2とR3ではメタン発酵にとって適正なpH水準である6.8以上を維持できていたことから、バイオ炭によって供給される追加のpH緩衝容量が、装置の安定運転に寄与することを示している。以上の結果から、メタン生成速度を向上させるにはCO₂雰囲気中で処理し、比表面積を拡大したバイオ炭が有効であること、草本残渣処理のようにpH緩衝容量が小さな処理系では2種類のバイオ炭どちらも安定運転に資することを明らかにした。また、原料に対して1%の濃度でバイオ炭を添加し続けることは、発酵液中の固形物濃度を増加させるが、粘度の上昇等の運転障害には繋がらないと考えられた。

(2)-② 異なるバイオマス種の熱分解・ガス化由来バイオ炭の発酵促進効果

サブテーマ1では、木質ペレットに限らず杉、松のバークを含めた熱分解ガス化実験を実施した。実験において生成したバイオ炭を回収し、これらを用いて①で検討したものと同一の草本残渣を原料として、メタン発酵バッチ実験を行い、異なる種類のバイオ炭の添加影響を検討した。1000℃で熱分解ガス化され、生成したバイオ炭の比表面積は、杉チップ

由来のバイオ炭が1027 m²/g、杉バーク由来が767 m²/g、松バーク由来が533 m²/gの表面積であった。実施設のバイオ炭と比較して比表面積が大きいのは、水蒸気をガス化剤として投入していることが理由であると考えられる。これらの炭に①で使用した実施設炭を加えた4種類のバイオ炭をそれぞれ添加した実験系で累積メタン生成量の推移を比較した。図2-6が示す通り、実施設炭と比較してサブテーマ1のラボ実験で生成した3種のバイオ炭はより早くメタン生成量が増大している。t₈₀は松バークが最も小さい6.0日で、次いで杉バーク9.2日、杉チップ10.0日、実施設炭12.6日であった。一方、杉チップバイオ炭の添加系はメタン生成ポテンシャルが他のバイオ炭の系と比較して15～20%程度大きい。以上のように、実施設で扱う木質ペレットに限らず、他のバイオマスを使用した場合にも草本バイオマスのメタン発酵において性能の向上が期待できることがわかった。

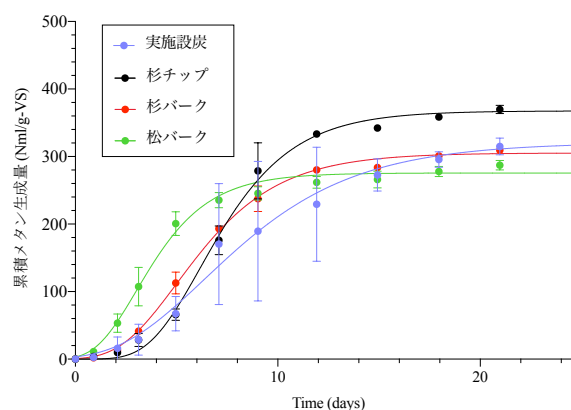


図2-6 異なるバイオマス種由来のガス化バイオ炭を使用した草本残渣メタン発酵における累積メタン生成量の推移

(3) バイオ炭を利用したCO₂バイオメタネーションの促進

塔状のバイオリアクター内に充填する微生物保持担体向けにポリウレタン（R1）とバイオ炭（R2）の2通りの資材を使用して、CO₂バイオメタネーションの連続実験を実施した。植種菌は（1）のメタン発酵実験に使用したものと同一の中温消化液で、スクリーニングを経ることなく、担体へ付着させた後すぐに運転を開始した。次第に通気速度を増加させ、バイオリアクター容積あたりのCO₂負荷を上昇させた。実験期間中のガス流量及び流出ガスの濃度の推移を整理した。R1は、ガス流入速度約12 NL/L/日までは流出ガス中にCO₂が検出されず、メタン濃度は95%以上が安定して維持された。しかしながら、流入速度15 L/L/日では次第にCO₂及びH₂濃度が増加し始め、メタン濃度は82%まで低下した。従って、R1にとってはガス流入速度15 NL/L/日は過負荷であると判断した。一方、R2では、機材不調時を除

き、全期間で流出ガス中のメタン濃度が95%以上を安定的に維持できた。検討した最大の流入速度は27 NL/L/日とR1での最大の許容流入速度の2倍以上であった。R1およびR2に関して、CO₂流入量 (NL) に対するCH₄流出量 (NL) のパーセントを算出すると、R1の流入速度15 L/L/日を除くと90～110%であった。バイオリアクター内の液中pHは7.0～7.4で適正水準であった。CO₂の非意図的な炭素変換で生じる揮発性脂肪酸濃度は、R1、R2の運転開始から60日程度までは200～1000 mg/L程度を記録することがあったが、90日目以降は400 mg/L未満であった。以上の結果から、R1、R2とも安定したガス濃度を示している期間には、流入した炭素はほとんどがメタンに変換されていると考えられた。このように、バイオ炭はバイオメタネーションの担体としての活用も期待できることが、上の検討から明らかとなった。

(4) 発酵原料及びバイオ炭に由来する放射性Csのメタン発酵プロセスにおける挙動

(4)-① 汚染バイオマスのメタン発酵連続実験における放射性Cs溶出・分配挙動

システムに対する放射性Csの混入の可能性として、メタン発酵原料が汚染されている場合を想定し、汚染バイオマスのメタン発酵について100日以上連続実験を実施し、安定期間内に採取した消化液を分画し、それぞれの画分における放射性Csの濃度を測定した。バイオマス中の有機物（強熱減量 (VS)）の分解率と発酵液中の液-固相における放射性Csの分配の関係を調査した。図2-8aに示すように、発酵液における水溶性の放射性セシウム濃度は、VS分解率との間に正の相関が存在した。このことは、発酵による分解に伴い、植物組織に保持されている放射性Csが水中に溶出したことを示唆している。メタン発酵では通常含水率90%以上の湿潤原料が発酵タンクに投入され、有機成分が分解した結果、含水率95～99%以上の発酵液が排出される。一定規模以上のプラントでは、発酵後、脱水さらには乾燥を追加で行い、固形分を濃縮する場合が多い。汚染バイオマスの発酵液には最大で80%程度の放射性Csが水溶性で存在することが明らかとなったため、吸着剤を用いて固相へ濃縮し、固化等安定化処理を行うことが効率的と考え、発酵液液相からの放射性Csの吸着除去特性を検討した。メタン発酵液は、イオン交換においてセシウムイオンと競合しやすいアンモニウムイオンを多量に含むことが特徴である。本研究では、セシウムに対する吸着選択性の高いプルシアンブルービーズ (PBB、高選

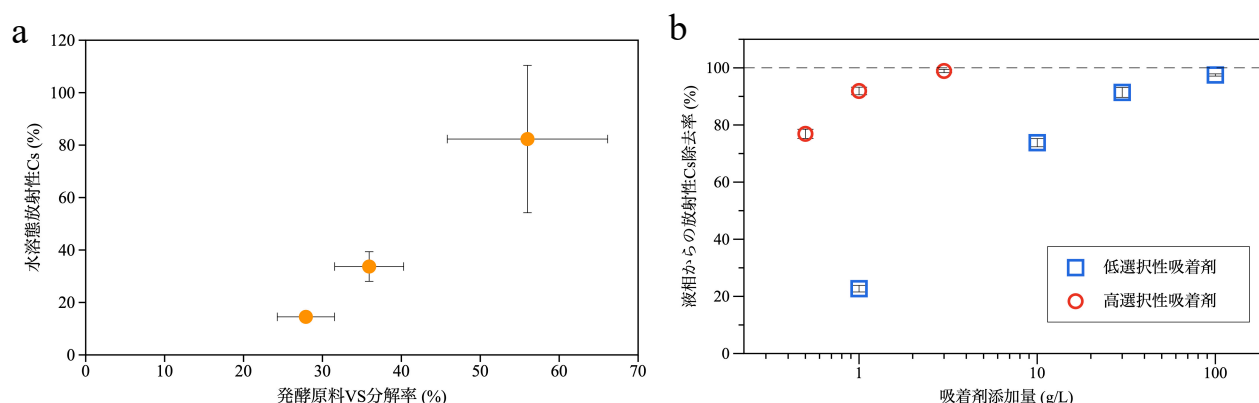


図2-8 汚染バイオマスメタン発酵連続実験における溶存態放射性Cs(134+137)の比率と原料の分解率の関係及び溶存Csの吸着除去特性

択性吸着剤) とその低いゼオライトを低選択性吸着剤として実験を行った。両者のアンモニウムイオンに対するセシウムイオンの吸着選択係数は下記で定義される。

$$K_{Cs^+}^{NH_4^+} = [NH_4^+]_{ad} [Cs^+]_{aq} / [NH_4^+]_{aq} [Cs^+]_{ad} \quad (式2-1)$$

実験結果から係数を測定したところ、PBBは0.0636、ゼオライトは0.246で約4倍差であった。水相のみを抽出したメタン発酵液中で、吸着剤と水相との間の放射性Csの分配係数を測定したところ、PBBは5.25 L/g、ゼオライトは0.287 L/gであって、PBB-水間ではより固相へ放射性Csが集中することが明らか

となった。仮に水中の放射性Csの除去率90%を達成しようとした場合、図2-8bのように、1 Lの発酵液に対してPBBは1 g、ゼオライトは30 gの投入量が必要となる。以上のことから、メタン発酵液中の放射性Csは吸着剤によって固相へ濃縮することが可能であるが、アンモニウムイオン濃度が高いという特徴を踏まえ、効率的に除去するためには選択性の高い吸着剤が必要であることが示唆された。以上をもとに、メタン発酵プラントにおいて汚染バイオマス进行处理した際の物質収支を算出した。仮に100 Bq/kg-湿重の放射性Cs濃度の植物をメタン発酵し、80%の放射性Csが溶出するとした場合には、1tあたり1.8 kgのPBBを投入することが必要で、脱水ろ液の放射性Cs濃度は8.7 Bq/kg、乾燥汚泥は117 kg生じ、汚染バイオマスだけを単独処理した場合でも放射性Cs濃度は746 Bq/kgとなることが予想された。従って、このとき汚染バイオマスは約1/10に濃縮され、放射性Csは1000 Bq/kg未満となり、安全に処理できると考えられた。

(4)-② 放射性Csを含むバイオ炭を添加するメタン発酵連続実験における放射性Cs溶出・分配挙動

添加物のバイオ炭に放射性セシウムが含まれる場合について、(2)の実験において使用した実施設炭には約1200 Bq/kgの放射性Csが含有されていたため、連続実験中に引き抜いた発酵液を①と同様に分画し、放射性Csの分配を調査した。図2-9には投入原料（1%が放射性Csを含むバイオ炭）と、R1、R2（実施設炭添加）、R3（実施設CO₂炭添加）それぞれについて、発酵液中での分画された存在形態別の放射性Cs濃度・割合を示している。バイオ炭を投入したR2、R3における放射性Cs濃度の合計値は、投入原料とほぼ釣り合っており、これまで報告されているように発酵過程で放射性Csがガスへは移行していないことを示唆している。発酵液中に対する添加率は1%であるため、液中においても12 Bq/kg程度であって低い水準であることが確認された。R2と比較してR3の方が溶存態の放射性Csの比率が大きいことがわかった。R3で用いたバイオ炭は、CO₂雰囲気中で処理することで炭素分が分解された結果、放射性Csがより水に溶出しやすい形態に変化したと考えられる。しかしながら、R2とR3ともに、イオン交換態を含めて6～8割に相当するほとんどの放射性Csが発酵液の固形分側に存在していた。液肥として利用され得る発酵液液分中の放射性Csは、どちらの場合であっても2～4 Bq/kgで、肥料に対する暫定許容値の400 Bq/kgと比較して十分に低い水準であった。以上のことから、(2)のように発酵液に対して1%の添加率で連続的にバイオ炭を添加した場合にも、残渣の液肥としての利用には支障を生じないと考えられた。

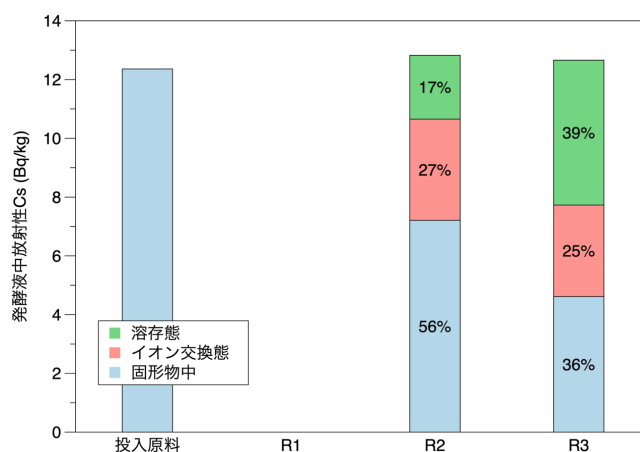


図2-9 バイオ炭を添加するメタン発酵槽における発酵液中での放射性Csの分配

引用文献

- 1) Kane S., Ulrich R., Harrington A., Stadie N.P., Ryan C. (2021) Physical and chemical mechanisms that influence the electrical conductivity of lignin-derived biochar, Carbon Trends, 5, 100088.
- 2) Roncancio, R., Gore, J.P. (2021) CO₂ char gasification: A systematic review from 2014 to 2020, Energy Convers. Manag.: X, 10, 100060.

3) Hu Y., Ma H., Shi C., Kobayashi T., Xu K-Q. (2021) Nutrient augmentation enhances biogas production from sorghum mono-digestion. Waste Management, 119, 63-71

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

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

「ガス化-発酵コンバインド型CO₂リサイクル技術の開発と放射性セシウムの挙動解明」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
1. 今後福島県で普及が予想される再エネ電力、水素等の利活用も想定した、バイオマス利活用によるCO₂の隔離・利用のための連携システムを構築する。 2. バイオマス燃焼発電、バイオマスガス化発電及びメタン発酵において生成するCO₂を次の手法でメタン化ないし炭酸塩固定化するための技術システムの確立と導入シナリオ検討のためのエネルギー物質収支モデルを構築する。(1)バイオマス燃焼発電において生成する焼却灰を利用した炭酸塩化(2)水素導入によるバイオマスガス化発電及びメタン発酵由来のCO、CO₂の微生物学的メタン化(3)再エネ電力を利用した微生物電解によるCO、CO₂の微生物電気学的メタン化(4)ガス化炭素残渣と金属を触媒として用いたガス化-発酵連携型のCO、CO₂の微生物電気学的メタン化。	1. 熱分解ガス化、燃焼発電、メタン発酵それぞれの副生物を活用し、可燃性ガスへの変換率、CO₂リサイクル、バイオ炭のアップグレード等の相乗効果を生み出す連携システムを構築できた。 2. バイオマス変換処理において派生するCO₂に関して、次の方法によるメタン化ないし有価物変換する技術システムの確立と物質収支を示し、サブテーマ3のバイオマス利用システムデザインに貢献できた。(1)では、当初メタン発酵への添加剤としての利用を検討したが、効果が小さいことから熱分解への利用に方向転換し、燃焼灰中の金属を熱分解原料に浸透させることにより、800°CでのCO₂のCOへの変換を数倍以上に促進すること、微生物電気化学的共生を強化するような、バイオ炭をメタン発酵にとってより適した性状にすることを可能とした(成果2-3、図2-1)。また、Caリッチなメタン発酵残渣は、CO₂導入下の熱分解での炭素変換効率が極めて優れており、CO₂のCOへの変換を促進する資材として有望であることを見出した(図2-2)(2)から(4)では、生物学的メタン化においてCOとCO₂では微生物による反応速度に1桁の違いがあることを確認し、微生物学的メタン化プロセスで同時に処理することが困難であると判断し、より高速で処理できるCO₂だけを対象とするプロセスとしてその効率の向上を試みた。処理装置の構成について、同時に基質として供給する必要となる水素の溶解が律速であり、ガスの循環による気泡導入量や培養槽内電解での水素供給等の対策を行ったものの、水槽式のバイオリクターでは十分な気液界面積を確保することができず、気相部のメタン濃度を90%以上に高めることは困難で

3. ガス化処理によって発生するガス及び残渣中に含まれる放射性セシウムを発酵装置へ導入した際の放射性セシウムの挙動と液相からの吸着濃縮・除去方法を構築する。 4. コンバインド型連携技術システムから排出される炭素系残渣は、サブテーマ1から提案される安全な炭素貯留法を応用し、炭素貯留を含めた連携技術システムにおける炭素収支を明らかにする。また、実機を想定して放射性物質を含む物質・エネルギー収支モデルを構築する。また、実証に向けて浜通り地域等において成果に関する意見交換・対話等を行う。	あった。そこで、濡れ性に優れるCO₂雰囲気下で熱分解して生成するバイオ炭を利用し、ガスを通気するカラムに微生物を保持した湿潤バイオ炭を充填する湿潤担体ろ過式CO₂バイオメタネーションを構築し、15 L/L-槽/日以上を通気率、95%以上のメタン濃度といった優れた性能を示すプロセスを構築可能であることを明らかにした（図2-7）。 3. 実施設において放射性セシウムを含むバイオ炭を採取し、メタン発酵に対して原料に混合しつつ連続的に投入する実験を行い、発酵促進が期待できる投入率の範囲では、農地還元し得る液分には数 Bq/kgの放射性セシウムしか残留せず、上記の連携システムの阻害としないことを確認した。また、液中の放射性セシウムは発酵液のアンモニウムイオンとの吸着競合が起こるため、プルシアンブルー等のCsイオン選択性の高い吸着剤を利用すればさらに固相へ濃縮できることも示した（図2-8）。 4. 上述のように構築したバイオマス利用連携システム及びその物質収支（図2-4等）を、サブテーマ3において大熊町の脱炭素産業都市向けのシステムとしてデザインし、継続的に町と意見交換ができています。
---	---

Ⅱ－３ サブテーマ３「脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」

〔サブテーマ３要旨〕

サブテーマ１－２の開発技術をキーとして、具体の対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。そのために、福島県内バイオマスポテンシャル推定法開発、木質バイオマスに関する詳細な生産ポテンシャル推定と実際の需給状況調査、国内バイオマス事業調査、需要家創出と分散エネルギーシステムのシナリオ設計技術開発とその提案を行った。研究進捗は環境省、浜通り自治体との意見交換や研究打ち合わせの形で継続的に提供した。成果の一部は産業団地の整備計画にも反映された。

１． サブテーマ３研究開発目的

浜通りの自治体を対象に、サブテーマ１－２の研究開発を踏まえた地域将来シナリオを開発する。復興してゆく街区におけるエネルギー需要に対する段階的なバイオマス生産・サプライチェーン整備に資する地域資源データベースを開発する。また木質バイオマス発電とCCUS付き連携発電システムを主軸とした復興まちづくりのエネルギー拠点を、周辺の需要家創出とともに設計する。この際、創生される地域循環共生圏における持続可能性等を評価し、社会実装における課題を整理し施策を提言する。これらの成果により、脱炭素まちづくりを支援し、浜通りの地域循環共生圏の形成にも貢献する。

２． サブテーマ３研究目標

サブテーマ３	「脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」
サブテーマ３実施機関	学校法人東北工業大学、国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ３目標	・サブテーマ１－２の開発技術をキーとして、具体の対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。 ・一次産業の現況把握と将来予測により、社会実装を検討するために必要な地域資源データベースを構築し、エネルギー拠点の持続可能な運転のために必要なサプライチェーンを提案する。 ・復興初期から将来における地域社会システムシナリオを開発し、エネルギー拠点の要件を地域ニーズと需要家サイドから推定する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域・協働により導入計画を検証する。 ・復興初期から将来における地域社会システムシナリオを開発し、エネルギー拠点の要件を地域ニーズと需要家サイドから推定する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナリオを提案する。地域・協働により導入計画を検証する。 ・研究成果紹介や情報提供を通じて将来における地域社会システムや技術導入シナリオとその効果を示し、地域と共働した技術実装の事業化につなげる。

３． サブテーマ３研究開発内容

(1) 浜通り、福島県内の地域資源の定量評価

バイオマスは生物体であるが、その指す内容は一次産業の残渣から下水処理の汚泥までを含む。再生可能エネルギーへの注目と比例して、様々なバイオマス資源の利活用と資源量推定の研究が行われてき

たが、バイオマスの種類が多岐に渡るため、方法論やデータが散在しているのが現状である。

本課題では、福島県におけるバイオマスポテンシャルと、その再生可能エネルギーポテンシャルについて、既報の国内研究、データベースを整理し、様々な種類のバイオマスポテンシャルを平易に推定できる手法としてまとめた。これは今後の復興や一般的なまちづくりにも、そのまま適用可能である。

バイオマスポテンシャルの推定、およびそれを燃料とした再生可能エネルギーのポテンシャル推定に関する既往文献を整理した(表3-1)。

次に、現時点で入手可能な統計データという判断基準を設け、ポテンシャル推計の空間解像度が異なるという困難が生じたが、福島県内での最善の推計法を提案した。これらを元に15種類のバイオマスについて、それぞれ賦存量を算出した。バイオマス賦存量は(表3-1-4)文献を基に推計した。当該報告書は、市町村別の各種バイオマス賦存量をデータベース化し、地理情報システムによって分布状況を把握した。

表3-1 国内バイオマスを対象としたポテンシャル推定法、データベースに関する既往文献

#	名称	発行元	年	全	木	農	畜	廃	再	URL
1	バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構	2011	○					○	http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/ (リンク切れ) https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201106/20110000000874.html
2	木質バイオマスエネルギーのポテンシャルの分布と考察	国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター	2018		○					https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-07.pdf https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-07-gaiyou.pdf
3	福島県木質バイオマス安定供給の手引き	福島県林業振興課	2013		○					https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/964630/www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/ringyoushinkou_biomass_tebiki.pdf
4	バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発—賦存量データベース及び収集コスト評価モデル	電力中央研究所	2004		○	○	○	○		https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y03023&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=6082
5	木質バイオマス利用技術	福島県林業研究センター	2007							https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploads/attachment/13348.pdf
6	福島県バイオマス活用推進計画	福島県	2018			○	○	○		http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploads/attachment/298460.pdf
7	持続地帯2020年度版報告書	環境エネルギー政策研究所(iseip)	2021						○	https://sustainable-zone.com/ https://www.iseip.or.jp/archives/library/13221
8	県内ポテンシャル量	福島県	-						○	http://www4.pref.fukushima.jp/redb/
9	再生可能エネルギー情報提供システム(REPOS)	環境省	-						○	https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/index.html
10	再生可能エネルギー資源等の賦存量等の調査についての統一的なガイドライン	緑の分権改革推進会議 第四分科会	2011						○	https://www.soumu.go.jp/main_content/000121161.pdf
11	一般廃棄物処理実態調査	環境省	-					○		http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/stats.html

表3-2 再生可能エネルギー推定に用いたバイオマス種類

木質系	農業系	畜産系	廃棄物系
林地残材 製材廃材 果樹剪定枝 造園廃棄物	稲わら もみ殻 麦わら	牛汚泥 豚汚泥 鶏汚泥	下水汚泥 農業集落排水汚泥 生活系厨芥 事業系厨芥 産業廃棄物 (汚泥、廃油、紙くず、木くず、動物性残渣、動物のふん尿、動物の死体)

(2) 国内バイオマスエネルギー利用事例と分析

福島発の再生可能エネルギーは、東日本大震災と原子力災害からの復興の象徴であり、2011年以降産官連携し地域産業としての基盤整備と社会実装が取り組まれてきた。しかし他の再生可能エネルギーと比較して、バイオマスによるエネルギーはまだ普及の途にあるといえる。

太陽光や風力などによる再生可能エネルギーと比較して、バイオマスによる再生可能エネルギーは、その燃料であるバイオマスを運転期間中事業者が調達しなければならない。この確保は、自然条件による変動だけでなく、社会的な変動も加わり、事業における不確実性が増加する。これ以外にも技術的課題は山積しているバイオマスエネルギー事業であるが、加えて経営という観点から見ても、用地選定と

地域調整に始まり、事業計画から、営業運転後のファイナンスなど、未知の部分が多い。

大規模な発電所と、熱電併給型小型施設は、事業目的が違うので地域における立ち位置も異なる。以下で示すが、系統供給のみ想定した発電事業だけでなく、地域循環経済を目指すべくエネルギー供給側と需要側が地域でセットとなった事業も少なくない。本課題で提案する復興シナリオは、バイオマスエネルギーと需要者事業をセットにし、地域循環経済の中核を担い、地域ぐるみの復興を可能とする。

本課題では、国内で増加しつつある運転中のバイオマスエネルギー事業について、需要者側とセットになった事業を抽出し、幅広く知見を収集し、本課題で提案する浜通り地域におけるバイオマスによる分散エネルギー導入についての基礎固めを行った。具体的には、①現在国内で実装されている熱利用も含む木質バイオマスエネルギーシステムで、特に他セクターとの連携を実現している先進モデルの事例調査を行い、導入に係る合意形成を含むプロセスや定量的・定性的な効果等を把握、また、②先進事例において活用されている木質バイオマス技術情報を整理した。エネルギー事業の調査(燃料調達方法、エネルギーの種類、内容、主なステークホルダー等)を行うと共に、農林水産業、観光業、建設業、製造業と連携する事例を文献により調査を行った。発電を行っている15事例と熱利用を行っている17事例(うち3事例を直接調査)について詳細調査を行った。

各事業の開始経緯・概要とその主体、エネルギー事業施設詳細(導入ボイラー、熱電併給システムなどの計画出力、メカニズム、副・補助ユニット、付帯設備)、使用燃料(入手先、仕入れ価格)、経済収支、波及効果など、設定項目についてデータの収集を努力した。このリストは現在利用可能な様々な事業スケールでのバイオマスエネルギー化に関する技術・事業カタログとして使用することが出来る。ヒアリングについては、事業メリットに加えて、デメリットなどについてできる限り聞き取りを行い、課題を整理した。

(3) 需要家創出と分散エネルギーシステム

復興まちづくりのエネルギー拠点の設計に向け浜通り地域の需要家の特定と創出にむけた推計手法を開発した。浜通り地域の復興事業を調査し、災害復興住宅、公共施設、震災遺構施設、産業団地、インキュベーション支援を特定した。今後、新産業創出など需要家の増加が見込まれ、かつ情勢によって変動が大きい産業部門のエネルギー需要については、中分類ごとに温度帯別の熱需要を推計する手法・モデルを開発した。さらに、特定の自治体においては、その手法・モデルを活用し、特定の産業団地を対象に、電熱エネルギー需要推計を実施した。

浜通りの15市町村については、人口、産業誘致・地域振興、林業・漁業、インフラ整備政策の記述について、自治体ごとの特徴を整理、分析した。また、拠点整備として総合・復興計画に基づく事業92件、省庁補助事業11件、災害公営・復興住宅事業38件を事業名、事業補助省庁・県、事業時機、インフラ等ハード面整備の有無を調査し、表形式で構造的にデータベース化した。また、新産業創出に係る産業団地の入居状況について、造成状況、入居事業所を特定し、産業分類、施設面積、本社所在地、一部、雇用予定人数を調査し、地理情報システム内に格納した。

産業団地でのエネルギー需要推計にむけて、図3-1に示すフローにて、産業部門のエネルギー消費に係る統計量、対象地区の情報を基に、産業中分類ごとの熱・電需エネルギー需要量を推計し、熱需要に関しては、温対法の企業規模のGHG排出量とエネルギー消費統計等の統計値、既往研究・調査を組み合わせ、温度帯も加味した推計方法を開発した。福島県の主要産業都市（いわき市、郡山広域圏）での推計に適用し、その妥当性を確認した。

将来的な産業立地の動向については、国機関（イノベーション・コースト機構含む）、県担当者、自治体担当者、立地事業者、インキュベーション施設運営者らにヒアリング調査を実施し、復興シナリオの定性的な基礎情報を得た。同時に、福島県大熊町においては、本研究の実施時期が産業団地の造成、設計、誘致時期と重なったこともあり、地域ニーズを十分に加味した形で、具体的な産業団地整備時のエネルギー需要推計を実施した。

(4) 福島県内における詳細なバイオマス量推定法の開発

本課題のバイオマスポテンシャル調査で示されるように、木質バイオマスは地域において量的に大きな資源である。また未利用材に限らず、利用する部位を拡大することにより、より大きなエネルギーの確保が可能となる。木質バイオマスのエネルギー化は、多くの研究と社会実装があるが、その上で困難な課題であることが認識されつつも、地域循環のためには必須の技術であると考えられる。なぜなら、世界的な潮流である循環経済やNbS(Nature-based solutions)の志向に合致するからである。これは、未だ残留の放射能が残る浜通りの森林においても同じであり、サブテーマ1-2の開発を通じて今後クリーンに利用できると期待される。

木質バイオマスは、これまでは大まかな地域での資源量が推定されてきた。しかし現在、無人飛行機やレーザー計測によるDX(Digital Transformation)技術の開発により、地理座標が付属した毎木の資源量が取得可能な段階に来ている。浜通り地域の森林(磐城地域)では、さらに除染されていないため、現在でも立ち入りが著しく困難であるものの、ドローンを飛行させる、ないしは短時間森林内に立ち入り地上レーザー計測を行うことは可能であり、2011年の震災・事故後に全く立ち入ることができなかった森林が、その後どのような経過かを、点群などで目の前に樹木があるように把握が可能である。さらに林業分野ではこれら精密データに基づく伐採ロボットの開発も行われており、浜通り地域のように立ち入りが困難な、あるいは一般に急斜面や見通しのきかない現場において、現在でも危険な林業作業を、より作業効率を上げ危険を低くすることが可能である。燃料材コストダウンにもつながる。

前述のDXにより、樹頂点の検出、林冠の推定などの処理がパッケージ化され、普及解説されている。現在までに膨大な点群データの取得がなされているが、個体サイズの把握が可能なシステムは、ごく限られている。本サブテーマでは、基本的に無料で使用可能な、人工林における個体サイズ推定システムを開発した。なお開発にあたっては株式会社ふたば(本社、福島県富岡町)と共同研究を行い、浜通り地域での社会実装を想定して技術開発を行った。

研究開発に使うデータとして、国立環境研究所が測定した、福島県三島町浅岐地区における地上、および同県田村市都路町岩井沢地区における上空からの、それぞれレーザー計測による点群データを用いた。株式会社ふたばと共同で開発した、R(4.2.2, R Core Team)における解析パッケージ(LiD)を用い

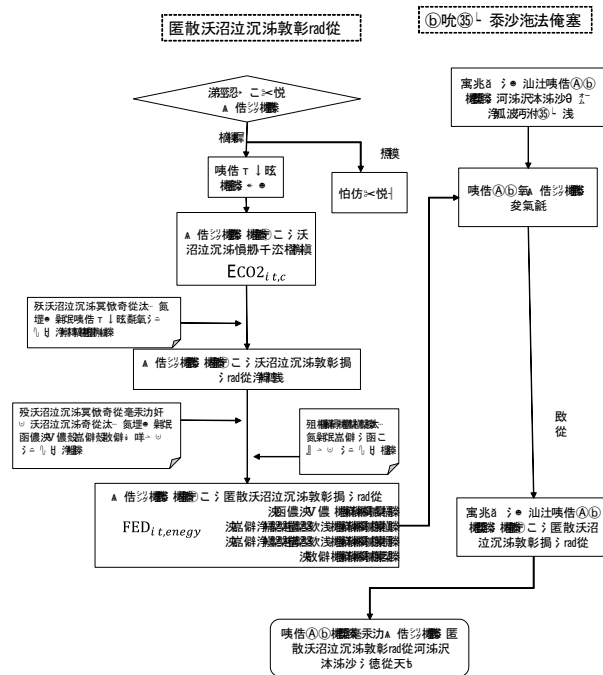


図3-1：産業団地での熱電エネルギー需要量推計フロー

た独自スクリプトを、R-Studio(2022.07.2 Build 576 , PBC)上にて開発している。このスクリプト(図3-2 las2tree)は、地表面の推定、樹冠の分布、樹頂点・樹高の推定を行う。

さらに点群を機械学習により自動的に部位セグメンテーションする(幹、枝葉、その他)ため、以下の処理を自動的に行うスクリプトも開発した(MATLAB 2023a, Math Works)ブロック化、正規化、リサンプリングなどを通して、点群分類機PointNet++(pnpp)が学習可能なデータに、生データを加工する(図3-2 pnpp2tree)。所定のエポック数、学習用データをランダムに提示し、pnppをトレーニングする。トレーニングの終わったPointNet++に検証用データを提示して、セグメンテーションを自動的行わせる。検証用データは既に手動でセグメンテーションされており、pnppのセグメンテーションの結果と比較する。密な点群をリサンプリングして間引いた上で、短時間でこれを分類することも可能である。

部位セグメンテーションが終わった個体データ点群を、1.5m高前後でスライスすると、胸高部分の幹が抽出され、これをフィッティングプログラムで胸高直径を自動計測する(図3-2 las4tree)。

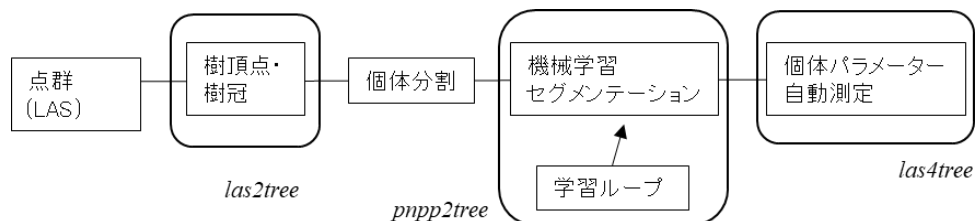


図3-2 森林点群データから個体サイズ計測までのフロー

(5) 福島県内におけるバイオマス需給推定

福島県では、「再生可能エネルギー推進ビジョン2021」において「2040年度頃を目途に県内エネルギー需要の100%に相当するエネルギーを再生可能エネルギーから生み出す」としており、再エネ導入量の内訳のうちバイオマス(木質以外も含む)の占める割合を2020年度の9.7%から2030年度には13.2%に拡大することを見込んでいる。一方、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故による放射性物質飛散のため県域の特に東部の森林が汚染され、森林資源の利活用が困難な状況が続いていた。その影響は木質バイオマス利用の観点からも大きく、震災直後から数年間は発電事業計画が地域住民の反対によって頓挫するケースも見られた。その後近年になって福島県独自の放射性物質対策も合わせた間伐事業である「ふくしま森林再生事業」も含めた森林整備が徐々に進み、それらによる地域産間伐材を使用する発電施設が複数稼働を開始しており、比較的規模の大きい発電施設の計画分も含めると直近で急速に燃料需要が高まることが予想される。しかし、県内の木質バイオマス燃料の流通量に関する情報は公開されておらず、持続可能性に関する検討も十分でない可能性がある。そこで本項では、福島県内で輸入燃料を使用しない木質バイオマス発電事業および燃料供給体制の現状および課題について整理するとともに、浜通り地域における木質バイオマス利用可能量の推定を行うことを目的とする。

方法としては、2023年1月1日現在で福島県内にて稼働中および計画が公開されている木質バイオマス発電施設(N=18)、木質バイオマス燃料製造施設(N=39)を対象に、2023年6月23日から7月7日にかけて郵送アンケート調査を実施する。主な調査項目を表111に示す。また、主要なステークホルダー計6者(福島県関連部署1者、流通団体1者、発電計画事業者1者、主な燃料製造事業者3者)に対してヒアリング調査を並行して実施する。

表 3-3 主なアンケート調査項目

取り扱っている燃料の種類(チップ・ペレット)、入手(販売)先、買取(販売)単価 直近の年間使用(販売)量 燃料(原料)の収集エリア(浜通り、中通り、会津、県外の4区分を設定)、樹種の内訳 燃料(原料)調達における課題と対応策、取組状況、望まれる行政施策など

最後に、浜通り地域において現在のふくしま森林再生事業による間伐実施量と同程度で推移した場

合（シナリオA）と、震災以前の素材生産量まで回復した場合（シナリオB）の2つのシナリオを設定し、どの程度のバイオマス利用可能量が見込めるか試算を行う。

（6）研究成果の浜通り、福島県内における社会実装に向けたシナリオ開発

1)～5)の成果及びサブテーマ1-2の研究開発を踏まえ、浜通りの自治体のうち、大熊町の地域将来シナリオを開発した。また、地域と共働した技術実装の事業化を見据え、関係者との地域・協働を実施し、地域ニーズの把握、調査結果・技術開発・社会実装研究の知見の提供を継続的に実施した。

シナリオ開発では、関係者と協議を重ね、自治体の復興状況・地域特性を分析し、シナリオ策定の論拠とした。大熊町では、図3-3に示すように、住宅、業務関連の施設建設が進行中であり、そこへの脱炭素施策として、ZEH（ゼロ・エネルギー・ハウス）の導入とPV及び蓄電池と需要家側を自営線で結ぶスマートコミュニティ事業が計画・整備される。その中で、将来の状況が不確実であり、かつ単位敷地面積当たりの温室効果ガス排出量が多い、産業部門に着目し、事業化・実装を踏まえた4つの立地シナリオを想定し、推計した。

需要推計を受けて、サブテーマ1-2の研究開発の結果を基に、バイオマス生産・サプライチェーン整備の調査結果、木質バイオマスの需給分析結果を踏まえて、木質バイオマス発電とメタン発酵施設の連携システムを主軸としたエネルギー拠点を設計し、マテリアル・エネルギーフローを特定するための制約条件等を整理した。これらの持続可能性評価を実施するため、温室効果ガス削減・経済性評価を実施した。これらの結果をもとに地域と共働し、事業化・社会実装にむけた協議を進め、脱炭素まちづくりを支援した。そして、浜通りの地域循環共生圏の形成にむけた知見を抽出し、今後の方向性を提示した。

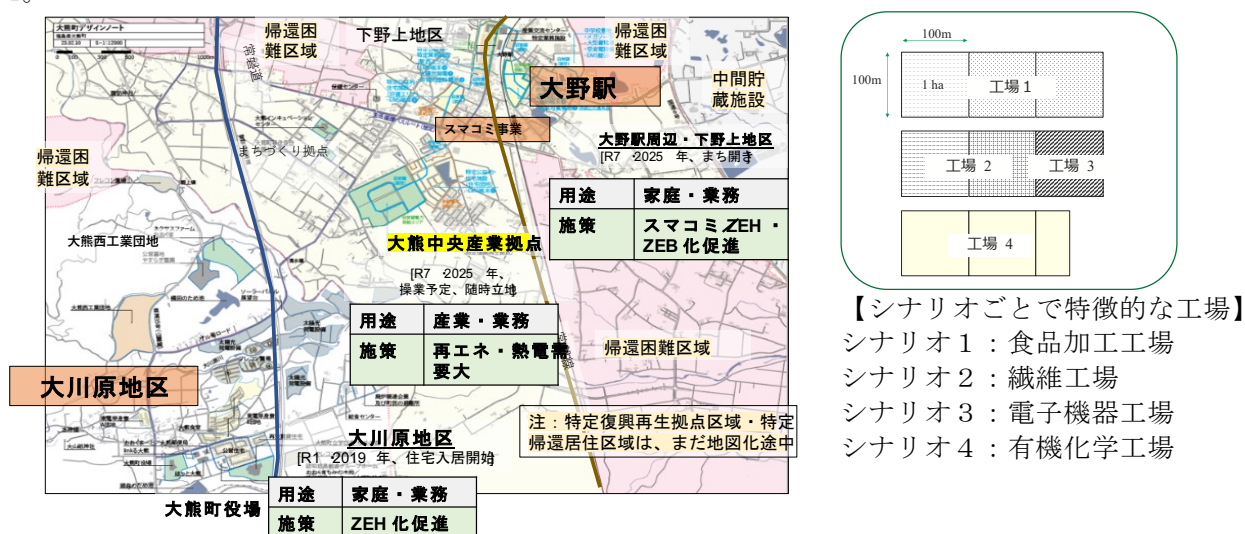


図3-3：大熊町の脱炭素施策と復興事業の関係と産業団地の位置づけ及びシナリオ策定

4. サブテーマ3 結果及び考察

（1）浜通り、福島県内の地域資源の定量評価

福島県内におけるバイオマスの総量について推定した。

a. 木質バイオマス

福島県の木質バイオマス賦存量については(表3-1-4)文献によれば、発生場所別バイオマス賦存量データベースの構築について、福島県の事例が記載されている。林地残材、製材廃材、公園剪定屑の賦存量の推計値は、それぞれ115,714 t/年、192,714 t/年、1,485 t/年だった。

(表3-1-5)文献では、所定の齢級以上のスギを皆伐した場合、福島県全体で約276万t林地残材が発生すると推計している。また、2002～2005年度の間伐実績から、1年間に発生する未利用間伐材は約75,000 tと推計している。

b. 農業系

(表3-1-4) 文献において農業系残渣として、稲わら・もみ殻・麦わら賦存量を合計した値(655,944 t/年)が推計されたいた。(表3-1-6) 文献において、稲わら発生量が839,680 t、もみ殻発生量が170,560 tと推計されていた(2015年度)。

c. 畜産系

(表3-1-4) 文献では、家畜系残渣の1%を利用可能量として推計している。また、(表3-1-6) 文献では、2015年度の年間の家畜排せつ物の発生量は約 1,095,000 t(乳用牛232,000 t、肉用牛407,000 t、豚219,000 t、採卵鶏202,000 t、ブロイラー36,000 t)であると示されている。

d. 有機系の一般廃棄物

(表3-1-4, 6) 文献では、有機系廃棄物として、下水汚泥(脱水汚泥発生量)、生活及び事業系厨芥類、動物性残渣(食料品製造工場等からの食品廃棄物)を、それぞれ13,250 t/年、202,754 t/年、9,592 t/年と推定し、農業集落排水汚泥と一般廃棄物(生ごみ)の発生量について、2015年度の推計値はそれぞれ31,826 t/年、63,465 t/年であると推計している。

e. バイオマスによる再生可能エネルギーポテンシャル推計法

(表3-1-4) 文献を中心に、15バイオマスの計算式を、利用可能なデータに基づき推定した。すべてを記載できないので、木質系バイオマスにのみ記載する。

林地残材は、市町村別素材生産量を用いて、以下の算定式により針葉樹と広葉樹それぞれの林地残材賦存量を算出し、それらの合計を福島県の林地残材賦存量とした。

製材廃材は地域別(県北・県中・県南・会津・南会津・相双・富岡・いわき)の製材用素材入荷量に主要樹種別木質残廃材発生係数を乗じて算出した。製材用素材入荷量には、国産材(針葉樹、広葉樹)及び外材(南洋材、米材、北洋材、その他)に分類されたものを用いた。市町村別製材廃材賦存量は、地域別製材廃材賦存量を地域別製造品出荷額等に対する市町村別製造品出荷額等の割合で按分して算出した。ただし、業種別の製造品出荷額等のデータがあるのは市のみで、町村は全ての製造品出荷額等の合計値しか入手できなかったため、按分にはすべての製造品出荷額の合計値を用いた。

果樹剪定枝は果樹(りんご、日本なし、もも、かき、ぶどう、など)の栽培面積に品目別剪定枝発生量を乗じて、果樹栽培により発生する剪定枝量を推計した。

造園廃棄物は市町村別都市公園面積に公園1 ha当たりの剪定枝発生量を乗じて算出した。

農業系、畜産系、廃棄物系バイオマスのエネルギー化についても、同様に入手可能なデータから推定する方法を整理した。

以上の手法を用いて、福島県内市町村別(一部地域別)15バイオマスのポテンシャル量を推定し、GIS化を行った(図3-4)。

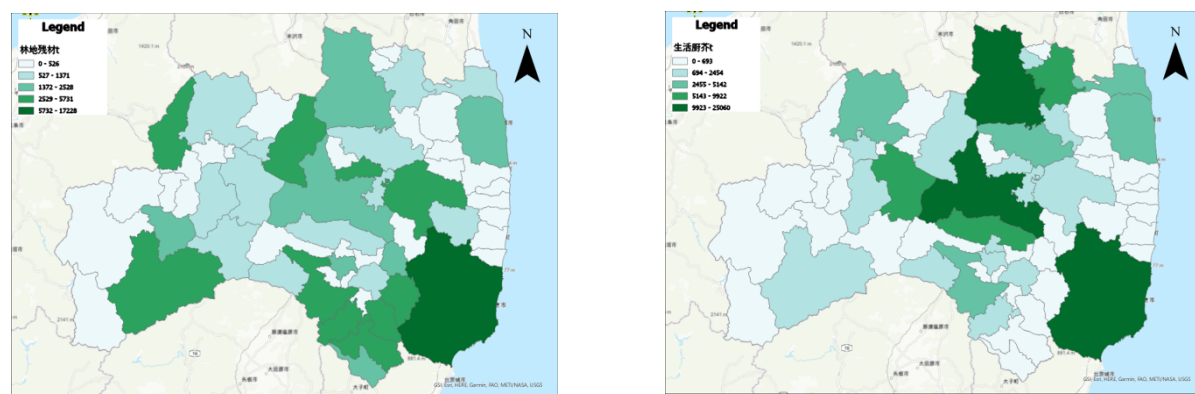


図3-4 福島県内市町村別バイオマスのポテンシャル量(左、林地残材、右、生活系厨芥)

(2) 国内バイオマスエネルギー利用事例と分析

文献・直接調査を32事業で行った(表3-4、名称、規模などは2021年当時)。すべての事例について記

載できないため、浜通りで事業を導入する際に、参考となると考えられたトリジェネレーション、宿泊施設への熱供給、小型熱電併給システム(Combined Heat and Power; CHP)並列例について記載する。

a. トリジェネレーション・スマートアグリ生産プラント(苫小牧市)農林水産業との連携

JFEエンジニアリング株式会社のガスエンジン・トリジェネレーションシステム(電気 230 kW、熱 350 kW、CO₂ 140 kg/h)、木質バイオマスボイラ(熱 300 kW、CO₂ 150 kg/h)、温泉熱ヒートポンプ(熱 263 kW)を使用している。施設の保守・点検は、同社が横浜の本拠地から遠隔で行っている。燃料は木材チップであり、年間供給量・価格・品質基準(水分値等)を定めた契約を結んだ地域の林業家から調達している。オランダPriva社が提供する高度栽培環境制御システムによりハウス内の環境を制御している。

発電した電力は自社農園のビニールハウスや加工施設で利用し、余剰分を売電する。排熱はハウスの暖房や融雪に利用、排気CO₂は作物の光合成促進に活用している。ベビーリーフ(1ha、年 100t)とミニトマト(1.5ha、年 150t)を栽培している。首都圏やシンガポール等に販路を確立しており、糖度9以上のミニトマトをブランド化、ジュースやジャム等加工品も製造・販売している。

東南アジアを中心に海外からも注目されており、年間約1万名が来訪する。北海道胆振東部地震の際は、ライフラインが停止しても天然ガスエンジンの発電により栽培を継続することができた。

b. 発電排熱によるチップ乾燥とホテル熱供給(気仙沼市)観光業、建設業と連携

気仙沼市震災復興計画において再生可能エネルギー促進が明記されたことを受け、地元企業3社の出資により、気仙沼地域エネルギー開発株式会社が設立された。発電は全量売電であるが、排熱は、燃料チップの乾燥、その余剰分は近隣ホテルへ温水として提供している。

表3-4 調査を行った事業主体と諸元

	都道府県	市町村	事業主体	連携先				発電規模(kW)
				農	観	建	製	
発電 ／ 熱供給	北海	苫小牧市	(株)Jファーム	o				230
	宮城	気仙沼市	気仙沼地域エネルギー開発(株)		o	o		800
	宮城	大崎市	株式会社ウェスタ・CHP			o		100
	秋田	北秋田市	たかのす道の駅発電所(ボルタージャパン(株))		o			40
	福島	会津若松市	(株)グリーン発電会津	o				5,700
	福島	西郷村	スパホテルあぶくま		o			75
	群馬	上野村	上野村	o				180
	長野	安曇野市	安曇野バイオマスエネルギーセンター(エア・ウォーター(株))	o				1,960
	岐阜	高山市	飛騨高山グリーンヒート合同会社		o			165
	三重	多気町	(株)中部プラントサービス、(株)ユージェレナ、多気町	o				6,750
	岡山	笠岡市	(株)サラ	o				10,000
	岡山	真庭市	真庭バイオマス発電(株)、真庭市		o		o	10,000
	大分	日田市	グリーン発電大分	o				5,700
	宮崎	串間市	くしま木質バイオマス(株)				o	1,940
	宮崎	串間市	串間市民病院					50
熱供給のみ	北海	下川町	下川町		o	o		-
	北海	知内町	知内町		o	o		-
	岩手	紫波町	紫波グリーンエネルギー(株)、紫波町、(一社)紫波町農林公社		o	o		-
	福島	南会津町	南会津町		o			-
	栃木	さくら市	(株)タカノ、(株)タカノ農園	o	o	o		-
	栃木	那珂川町	(株)那珂川バイオマス	o			o	-
	石川	小松市	小松市		o	o		-
	福井	あわら市 坂井市	あわら三国木質バイオマスエネルギー事業協議会		o	o		-
	山梨	北杜市	(株)レイクウッドコーポレーション		o	o		-
	三重	松阪市	松阪木質バイオマス熱利用協同組合	o			o	-

京都	京丹波町	京丹波町			o		-
島根	雲南市	合同会社グリーンパワーうんなん			o		-
岡山	津山市	津山市			o		-
山口	下関市	(株)安成工務店			o	o	-
高知	安芸市	安芸市	o				-
福岡	八女市	八女市		o			-
大分	日田市	日田資源開発事業協同組合				o	-

燃料は、気仙沼市森林組合や本吉町森林組合、(株)小山材木店、八瀬・森の救援隊、気仙沼ふるさとの森協同組合、個人林業家(約100名)から間伐材等を調達し、自社でチップ化している。

燃料支払額の50%は市内加盟店舗で使える地域通貨で支払われ、地元商店街等160店で利用できるようになっている。さらに、自伐林業家を養成する「森のアカデミー」を開催、延べ530名超が受講し、地域の林業活性化にも貢献している。

c. 小型CHP並列によるトリジェネレーション(安曇野市)農林水産業と連携

安曇野バイオマスエネルギーセンター(エア・ウォーター株式会社)は40台のCHPを並列させ、電気は全量売電しているが、排熱はチップ乾燥と、発電施設に隣接する別法人エア・ウォーター農園の温水を安価に供給し、トマトハウスに利用。

燃料となる地域の未利用材を長野県内の何か所かの森林組合から調達している。販売価格や供給量は、契約上で明確な取り決めはできない。県内には4ヶ所バイオマス発電所があり奪い合う状況となっている。燃料買い取り価格が、当初計画よりも1割ほど上がっており採算が厳しい。ただし長野県内には森林組合が多くあり、供給途絶は考えにくい。

トリジェネも行っておりCO₂を栽培にどのように生かすか独自のノウハウを蓄積したことからトマトの収穫量は格段に上がった。CO₂の量はその日の天気や湿度に合わせて毎朝調整している。波及効果としては地域材活用や雇用創出による地域活性に役立っている。

d. 地域新電力を中核としたバイオマス産業都市を目指して(真庭市)観光業、製造業と連携

真庭バイオマス発電株式会社は、地域内含む10団体により設立された。FIT売電のほか、地域小売電気事業者である「真庭バイオエネルギー株式会社」を通じ、市役所、小中学校等の施設に電力供給が行っている。真庭木材事業協同組合、真庭森林組合等から木質チップを調達している。

真庭市の観光協会である「一般社団法人真庭観光局」では、以下のバイオマス関連施設を見学するツアーを提供している。

発電事業と直接的関係ではないが、市では真庭市バイオマスリファイナリー事業推進協議会を発足させ、木質バイオマス資源等のマテリアル利用による高付加価値化と新産業創出に向け、域内外の民間企業を中心にセルロースナノファイバー等新素材やバイオマス製品の研究開発推進及び事業化を進めている。地域資源による電気の地産地消モデルとして全国的に注目を集め、域内外へのPRとしても効果が高かった。今後、環境教育・人材育成へつなげ、地域力の向上も目指す。

e. 課題整理と解決

ヒアリング調査で行ったエネルギー事業者からの観点でまとめた。

- i 燃料 燃料費が運転費の大半を占めることから理解できるように、バイオマスエネルギー事業において、量的質的に安定した供給を確保できるかが事業の行く末を決定している。必要な場合はチップ製造供給も、サプライチェーンの中に挟むことになる。地域の森林組合や林業事業体、ひいては山主や燃料製造業者との幅広い、合意と信頼関係が必要となっている。
- ii 設備 小型CHPは、すべて海外メーカーからの輸入となる。メンテナンスに関わる技術者が海外のため、言語、距離の問題が大きい。また、導入当初は原因不明であった、国産材にカリウムが多いことに起因するシステムの停止も、未だ大きな課題となっている。メーカー技術者や国内のエネルギー化に関わる技術者の連携が欠かせないと指摘できる。
- iii 熱利用 システムが発熱を明示的に行う場合と、発電の排熱を利用する場合の、2パターンの発生がある。どちらの場合も、少数の宿泊施設などの暖房・給湯、農業施設などの加温とし

て供給されるが、規模的には小さい。やや消極的に燃料の乾燥に用いられる例も多かった。従って、熱供給による収入は、補助的なものであり、事業の主力を支えるようなものではなかった。トリジェネレーションが一部で効果を上げていることも調査で分かっており、施設園芸の分野との連携が、相乗効果を増す可能性がある。

- iv 運営体制 地域が一丸となって合同事業を立ち上げるか、あるいは有志の民間企業が独自に、という2パターンに分かれてた。初期トラブルを乗り越えた事業にのみ調査を行ったので、ほとんどの運営体制は良好であった。今後は10年20年というスパンで持続的に運営ができるか、燃料確保と価格の問題やシステムの老朽化など、が課題となっている。熱供給は補助的であるので、事業経済フローはFITによる売電なしには成り立たない。それでも経営は不安定という、発電事業者が大半であった。燃料価格がそのまま経営に響いてくる点から、より低価格で質量安定した燃料供給が、FIT後のバイオマス発電事業には望まれている。
- v 波及効果など 雇用の創出等の地域経済への波及効果 直接的には、事業そのものや燃料製造に関わる場面での雇用創出が地域への貢献として大きく取り上げられている。ただし、数的には小さく、より副次的波及効果を狙った事業連携が望まれている。林業の活性化やエネルギー視察・観光による訪問者数増加も地域から歓迎されている。

以上の調査から、比較的成功していると考えられる、調査した範囲のバイオマスエネルギー事業においても、事業収益や事業安定性が低いということが理解される。しかし一方で、地域にもたらす波及効果や活性化、セクター連携の効果は小さくなかった。技術革新や国内外のエネルギーの状況によって、収益性などが向上する可能性もあるが、現時点では新規バイオマスエネルギー事業を立ち上げるとすると、地域における新たな中核と考え、地域にもたらす効果を最大限に価値付けられることによって、持続可能な事業となると考えられる。

注目が集まっている成功事例では、様々なステークホルダーが連携し、相乗効果的な役割分担が出来ている場合が多い。その際に、経済的収益性や単純労働の雇用創出という価値よりは、それぞれの地域を重んじる個人や企業が、ネットワーキングやノウハウなどの暗黙知を地域に蓄積させ、目に見えないストックを蓄積させている。これらのプレーヤーの存在が、次のステップ(事業の追加、地域連携の拡大)へと繋がっている。

また一般的な地域おこしによる製品・観光資源開発(1-2年スパン)と比較して、計画から事業の開始、持続的な運営から、事業拡大まで必要な時間は、10年近い時間が必要である。事業育成に必要な、いわば揺籃の時間を、資金的にも人的にもどう確保するかということも、課題である。

(3) 需要家創出と分散エネルギーシステム

浜通りの復興事業のうち、産業団地の造成状況、事業所の立地状況の調査結果を図3-5に示す。21の産業団地のうち、150事業所の立地（予定含む）があり、募集敷地面積の88%程度を占めている。製造業は、67で43%をしめ、その他、建設業が立地しているが、それぞれの小分類を見ると業種は多様であることがわかった。また、イノベーションコースト構想の主要業種は、特に南相馬市のロボット関連事業所の集積、浪江市の水素関連事業所の集積がみられるものの、まだ規模は小さい。広野町、楡葉町などは、常磐道の復旧も比較的早かったことから、首都圏のサプライチェーンの一部を担う部品工場の立地がある。福島第一原子力発電所、中間貯蔵施設が立地する大熊町、双葉町では、それぞれ特徴をもった産業政策をとり、立地事業所の特徴も異なる。大熊町では、RE100産業団地を産業政策に位置づけ、その集積を図っている。次世代グリーンCO₂燃料技術研究組合などバイオマス関連の研究開発拠点の整備が進むとともに、ゼロカーボンに資する事業展開を目指す企業立地がみられる。双葉町は、中野中央産業団地を整備しており、その中で建設業の事業所数が他の産業団地よりも多い。浅野燃糸など中規模の製造業も6事業所立地している。

浜通り地域の産業復興の現状を踏まえ、入居面積率が50%以下である大熊町の産業団地に着目し、需要家創出と分散型エネルギーシステムを検討した。

大熊町役場担当者と協議し、周辺に創出が想定される需要家を特定した。シナリオ1～4は、いずれも植物工場（トマト）の立地を想定し、それぞれ食品加工産業、繊維、電子デバイス、有機化学工業の組み合わせでシナリオを設定した。その電熱エネルギー需要及びバイオマスでの代替可能性を表3-5に示す。

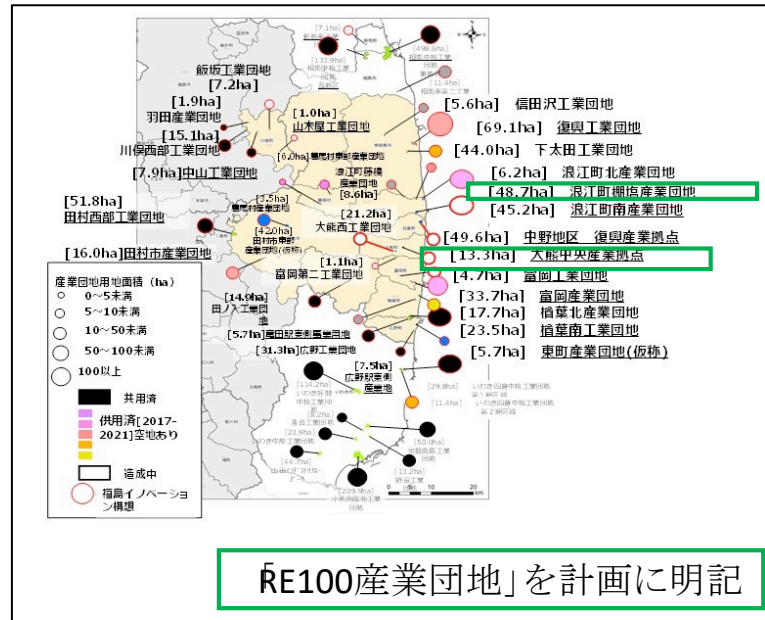


図3-5：浜通りの産業団地の造成状況

表 3-5：立地シナリオの設定と電熱エネルギー需要の推計

	事業所ID	Type of industry	Area	Electricity	Heat	Heat supply	Biomass Substitution
			ha	MWh/yr	TJ/yr		TJ/yr
シナリオ 1	S1-F1	Food processing	3.0	9,253	35	Steam	29
	S1-F2	Bread and snack	2.0	6,036	17	Steam	14
	S1-F3	Drink	1.0	1,040	5.2	Steam	4.5
	S1-F4	Plant factory (tomato)	2.5	—	27	Hot water	727
	Sum		8.5	16,339	85.4		75.3
シナリオ 2	S1-F1	Food processing	2	3,084	13.8	Steam	9.8
	S1-F2	Bread and snack	1	1,958	7.6	Steam	5.3
	S1-F3	Textile	3	1,040	5.2	Steam	4.5
	S1-F4	Plant factory (tomato)	2.5	—	27	Hot water	27
	Sum		8.5	12,047	61		54
シナリオ 3	S1-F1	Food processing	2	6,169	27	Steam	19.7
	S1-F2	Electric device	2	3,976	5.1	Steam	0
	S1-F3	Textile	2	5,818	2.2	Steam	4.6
	S1-F4	Plant factory (tomato)	2.5	—	27	Hot water	27
	Sum		8.5	15,964	62		51
シナリオ 4	S4-F1	Chemical	3.0	18,909	35	Steam	36
	S4-F2	Machine	2.0	4.96	7.8	Steam	7.8
	S4-F3	Electricity device	1.0	2.98	0.81	Steam	0
	S4-F4	Plant factory (tomato)	2.5	—	27	Hot water	27
	Sum		8.5	26.78	71.3		70.5

(4) 福島県内における詳細なバイオマス量推定法の開発

森林点群から樹木個体点群へ変換に際して、樹頂点は概ね精度良く推定ができた。次に樹木点群を部位に分割するため、教師データを作成する手動セグメンテーションにおいて、点群のスカラーフィールド(反射強度)を使うことにより、比較的容易に樹幹とそれ以外を分割できた。しかしこれは地上計測データの場合であり(福島県三島町データ)、上空からのレーザー計測(福島県田村市データ)では、樹幹が容易に認識できるほど計測されておらず、樹幹とそれ以外の分類はそれほど容易ではなかった。これは、現在、レーザー発射間隔を密にすることにより、一部解決できることが別の解析から分かっているものの、今後の課題として残った。

PointNet++(pnpp)の機械学習においては、三島町データは手動の分類が容易であることもあり、良好な結果が得られた。300エポック程度が最適であり(図3-6)、intel-i9(3GHz) NVIDIA Quadro GV100で30分の学習時間であった。学習しても幹がそれ以外に分類されてしまう場合があったが、幹の連続性など

の別の点群補間を行い、精度を補正可能である。研究中に明らかになったデメリットとして、樹冠等のデータが、地上計測であるため地上から見える部分のみのため、全体が把握できない。上空計測と、地上計測の連携によって樹冠の推定が必要と考えられた。これは今後成長量などを把握するさいに必要な情報である。田村市データは前述したように樹幹の判別が、樹幹の点が少ないため、困難であった。さらに林床植物も少なくないため、それと樹幹の判別は機械学習でも困難であった。逆に樹冠の判別は容易であった。

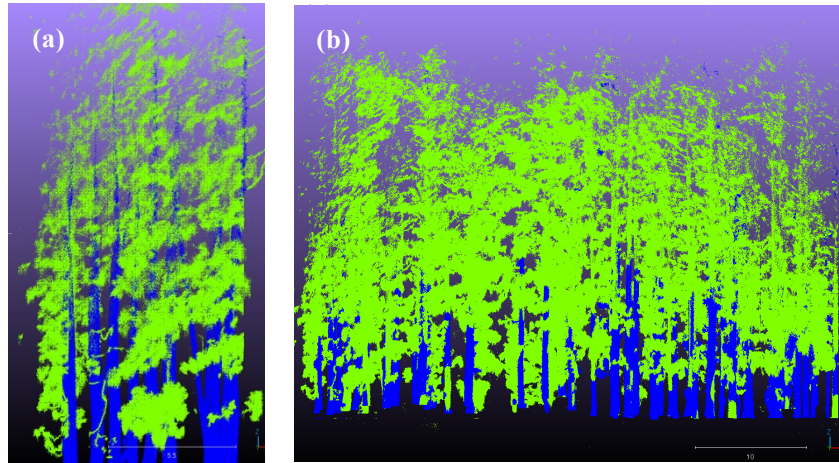


図3-6 三島町データによる部位セグメンテーション(a)学習データ(手動分類) (b) 自動分類結果

部位セグメンテーションされたデータを、幹だけ取り出し、地上1.5 mで点群を抽出すると、胸高直径を測定するためのデータが得られた。円形フィッティング方法として、RANSAC (Random Sample Consensus)法を用いた。既に毎木調査を行った結果と比較し、RMSE(Root Mean Square Error) 2.6 cm程度の誤差であった。誤差原因を解析すると、樹木が円形でないこと、一部樹皮の変形や不着植物をサンプルしてしまっていることがあった。樹木は工業製品ではないため、この程度の誤差はやむを得ないものと考えられたが、それらの誤差について、自動的に検出する必要性が確認された。

以上の開発スクリプトは、株式会社ふたばと共同で、無償で提供する等を検討している。復興が進むにつれて浜通り自治体、および林業事業者から地域の森林への関心が高まると推定される。浜通りにおける1自治体より本システムへの関心が寄せられている。今後、林業ロボットとの連携などを前提に、開発を進める予定である。

(5) 福島県内におけるバイオマス需給推定

アンケート調査の回答率は発電が44% (8/18)、燃料製造が49% (19/39)であった。燃料製造側は主要な事業者を概ね網羅できたが、発電側は一部回答が得られなかったため過小評価の可能性はある。

発電側の観点から見た場合、稼働中施設の年間燃料使用量の合計は226,761生tで、流通経路では「会津から会津」の50,933生tが最多であった。計画中施設の想定年間使用量は104,000生tで、流通経路では「浜通りから浜通り」の59,000生tが最多であった。両者を踏まえると今後1年間で年間燃料使用量が約1.5倍に増加することが明らかとなった(一に注意)。また、認識している課題としては「燃料の供給量不足」、「価格の高騰化」の回答が特に多かった一方、「燃料チップの放射性物質濃度の基準超え」や「発電プラント自体のトラブル」については挙げなかった。

燃料供給側の観点から見た場合、稼働中施設の年間燃料生産量の合計は758,204生tで、県内の流通経路では「浜通りから浜通り」の167,560生tが最多であったが、県外も含めると「県外から浜通り」の183,725生tが最多であった(図3-7)。

全区分（合計）		木質バイオマス燃料製造施設			丸太m3
		浜通り	中通り	会津	小計
入荷地域	浜通り	167,560	44,148	0	211,708
	中通り	38,255	170,710	158	209,123
	会津	22,750	4,588	111,398	138,736
	県外	183,725	1,296	13,616	198,637
	小計	412,290	220,742	125,172	758,204

図 3-7 福島県内における木質バイオマスの地域間流通量（燃料製造側視点）

固定価格買取制度の区分で見ると、「間伐材等」で中通りの 98,600 生 t、「建築資材廃棄物」で浜通りの 206,323 生 t がそれぞれ大きな割合を占めていた（流通経路で県外から浜通りで最多であった内容が建築資材廃棄物に相当）。認識している課題としては、「伐採量が少なく供給力不足」、「原木価格の高騰化」の回答が多かった一方、「原木の放射性物質濃度の基準超え」や「建築材等他の利用用途の需要と競合」については少数であった。

これら結果と並行して実施したヒアリング調査から福島県全体および今後森林利活用が本格化することが想定される浜通り地域のバイオマス利用について次のような課題が整理された。まず、福島県全体においては以下の 3 点が挙げられる。①県内全域や隣接県で新たなバイオマス需要が増加し、100Bq/kg 未満の材は需給ひっ迫する可能性がある、②製材、合板用材の需要低迷とそれに伴う針葉樹の伐採控え、優良材のバイオマス需要への転化が発生する恐れがある、③特定の地域での急激な需要増対応が県内全域の需給バランスに影響を及ぼす可能性がある。次に、浜通り地域においては以下の 2 点が挙げられる。①ふくしま森林再生事業を足がかりにした新たな体制づくりの必要性、②住民避難による所有者との合意形成の困難性や林業の担い手の流出、市町村林政部門のマンパワー不足の顕在化。

最後に浜通り地域における木質バイオマスの利用可能量について推定を行った。まずシナリオ A として、現在の森林再生事業による間伐実施量と同程度で推移した場合、浜通り中北部の相双地域内のみを考慮すると 2,291 湿量 t/年となった（浜通り南部のいわき周辺は原発事故の影響が軽微であることから木材の需給実績が存在しており、相双地域への供給が難しいと仮定した）。次にシナリオ B として、震災以前の素材生産量（8.5 万 m³）まで回復した場合、木質バイオマス利用率を 80%と仮定すると 9,400 湿量 t/年、震災以前から増産（10 万 m³）した場合、19,000 湿量 t/年となった。

(6) 浜通り、福島県内における社会実装に向けたシナリオ開発

サブテーマ1-2と連携し、3)の電熱エネルギー需要を満たす分散型木質バイオマス-メタン発酵コンバインドシステムの技術システムを設計した。マテリアル・エネルギーフローを図3-8に示す。廃棄物系バイオマスは、1)発生分布をもとに事業者情報等から推計し、5)の木質バイオマスの供給可能性を加味している。需給がともに不確実性があることから、技術システムの設計には十分な柔軟性をもたせた。ここで示すフローは、ある時点での情報をもとに設定したものであり、情報が精査されるとともに随時反映できるモデルを作成した。

3)で設定した4つのシナリオごとに温室効果ガス削減効果、経済性評価を推計した。結果を図3-9に示す。最良シナリオとなるシナリオ1では、木質バイオマスガス化熱電供給システムにより、約20億円の初期費用が生じるものの、1/2補助、FITなしで、5年程度の投資回収年、5億円/年程度の地域経済効果、14,000t-CO₂の脱炭素効果となった。このうち、さらに、サブテーマ1-2のコンバインドシステムによるメタン発酵の効果として、追加的に13億円の初期費用が必要となり、事業性が低下するが、年間420t-CO₂の化石燃料削減による脱炭素効果、120t-CO₂の炭素貯蔵効果がある。メタン発酵事業単体の場合、事業採算性は見込めないが、木質バイオマスガス化熱電供給システムと近接することで、採算性が向上し、脱炭素効果が増加することを示すことができた。通常、木質バイオマスガス化熱電供給システムとメタン発酵が、それぞれ発電を主とした事業を想定する場合よりも、需要が高い場所に近接しコンバインドシステムを適用することでより多くの効果が期待できる。また、発電のみならず、熱利用と資

源循環を考慮することができ、森林整備、営農再開、まちづくりといった地域ニーズへの対応も検討できる可能性を示すことができた。

これらの技術システムの社会実装に当って、課題も明確になってきた。第一に、対象とする産業団地が住宅地と近接することから、バイオマス施設における放射性Csの影響、大気汚染、臭気対策、景観への配慮等を十分に考慮する必要がある。この点、バイオマス施設の構想段階からステークホルダーとの協議をし、積極的に地域還元機能を特定することを意図し、町担当者及び一部住民と対話を進めた。産業団地に近接する際には、立地事業所の工場設計との連携を進めるために工業団地内の組合の創設時に協議体制を構築する必要性を確認した。また、木質チップ・ペレットの供給体制は、浜通り地域の需給バランスと林業事業者の経営方針を見据えた持続可能な体制構築が重要になるため、川下側の産業団地の需要創出とあわせた需給システムの設計が求められる。その際に、木質バイオマスの専焼炉は、早い段階で規模を設定し、安定供給を前提に事業計画を立てるが、今回の小型ガス化熱電併給システムは、小型炉の連結稼働ができることから、システム設計において柔軟さを持てる。

なお、本研究課題では、新規需要家の創出を前提にサブテーマ1-2の連携システムの社会実装を見据えて、システム設計したが、この設計プロセスは、他地域への応用も十分可能であり新規の需要創出あるいは需要家の再エネへの転換を機に地域循環共生圏づくりに貢献できる。

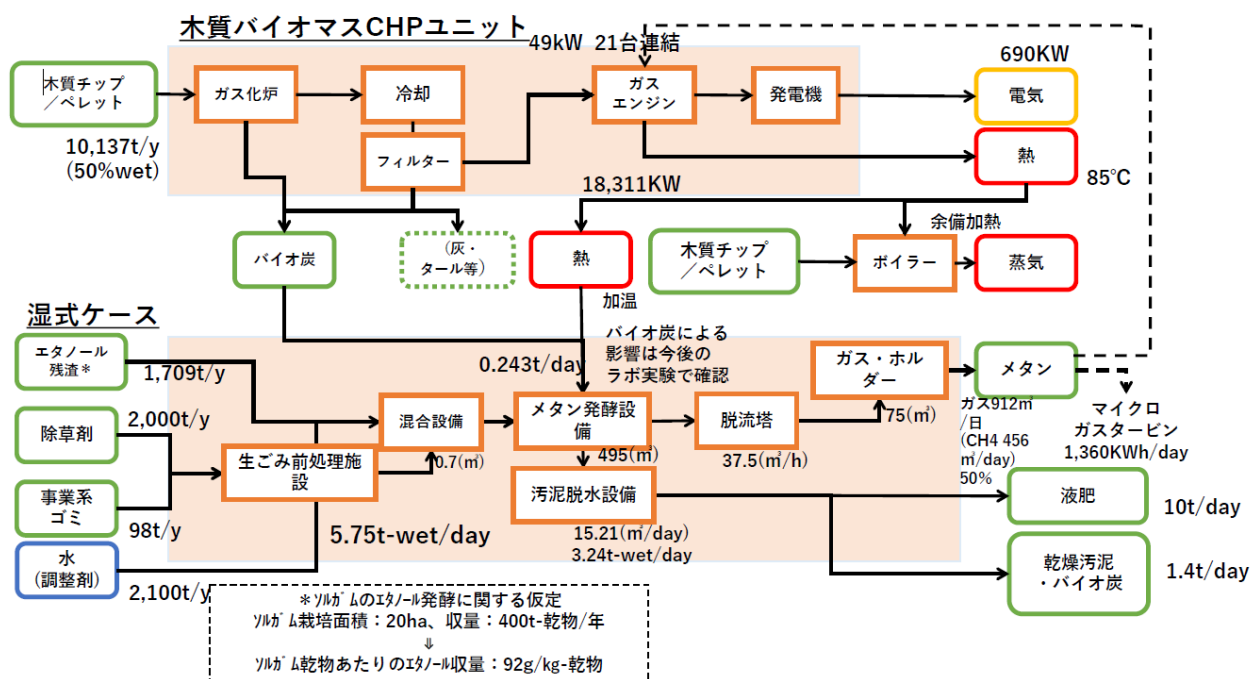


図3-8：エネルギー拠点の材料・エネルギーフロー

結果を受けて、社会実装にむけた課題が整理されてきた。第一に、バイオマス施設に対する地域の受容性について、丁寧な対処が必要である。特に、対象地域は、まだ住民は少なく、帰還者と移住者が今後増加していく地域である。復興事業と生活支援政策が同時進行で進む中、具体的な事業計画を提示する前に、関係者で構想を策定するプロセスが重要になる。これは、対象自治体の庁内調査や近隣勤務者との意見交換でも抽出された課題でもある。放射性Cs等への不安の払しょく以前に、町内で構想を検討することで、対立構造を回避することが望まれる。その先、飯舘村の飯舘バイオマスパートナーズでの社会実装プロセスからの知見を十分に活かし、事業化への道筋をつけていくことが課題になる。第二に、木質バイオマスガス化熱電併給システムに関しては、技術的な課題がまだ残っている。材料投入から、ガス化反応、灰・バイオ炭発生メカニズムを解明し、実機において高稼働率、高効率化を進める必要がある。さらに、メタン発酵とのコンバインドシステムは、実機での運転実績がまだなく事業化にむけて技術的な課題を引き続き研究していき、実証化事業等で精査していく必要がある。これは、採算

性と直結する課題のため、事業者との連携が欠かせない。第三に、事業主体の設計である。本事業の社会実装には、木質バイオマスと廃棄物系バイオマスの両方を扱い、なおかつ電気、熱及び副産物利用を手掛ける必要がある。例えば、対象地域の新電力会社が事業を担う場合、廃棄物処理事業者の取得をする必要があるなど事業体制を検討する必要がある。

事業化にむけた方向性の考察を示す。まず、個別の事業計画の検討よりも地域循環システムを見据えて、主体、フローを明確にし、中核となる事業とそれに付随して必要となる事業を分け、それぞれ協議会などを立ち上げていく。バイオマス供給に関しては、浜通り全体の森林整備と木質バイオマスの需給バランスに関して協議するよう準備していく。廃棄物系バイオマスに関しては、産業廃棄物の場合、排出者も明確であることから、CCUS等を含めた研究開発を絡めた協議体制を検討する。一方、需要側となる産業団地は、立地事業者を対象に脱炭素経営にむけたイニシアティブを提案し、工業団地の組合設立の目的に据えるなどし、事業所創業後も脱炭素にむけた連携ができるように働きかける。また、地域への説明はより積極的に多面的価値を特定し、事業性と同時に公共性を担保する仕組みを提案する。以上の協議を重ね、適切な事業主体を設立し、社会実装へと向かうように支援していく。

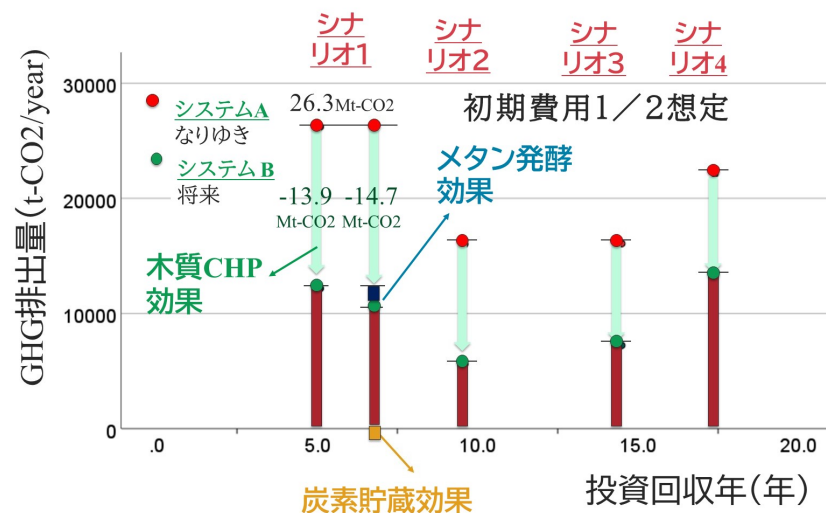


図3-9：シナリオごとGHG排出量と投資回収年

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

<【サブテーマ3】達成状況> 3. 目標どおりの成果をあげた

「脱炭素化を目指した分散エネルギーシステムの復興実装シナリオの開発」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
1. サブテーマ1-2の開発技術をキーとして、具体的対象地域において、脱炭素化に資するバイオマスエネルギー転換を中心とした復興実装シナリオを開発する。 2. 一次産業の現況把握と将来予測により、社会実装を検討するために必要な地域資源データベースを構築し、エネルギー拠点の持続可能な運転のために必要なサプライチェーンを提案する。 3. 復興初期から将来における地域社会システムシナリオを開発し、エネルギー拠点の要件を地域ニーズと需要家サイドから推定する。新産業創出も含め幅広い熱需要家・技術のカタログおよび復興の進展に伴う段階的導入シナ	1. 地域復興の中核施設としてバイオマス燃焼とメタン発酵のコンバインドシステムを提案し、地域の未利用バイオマスに関するマスフロー、事業の経済性などを定量的に明らかにした(図3-8及び9)。 2. 1.の基礎となるバイオマスの詳細な生産地とDXに対応した資源査定技術を開発し(図3-2及び6)、現状でのバイオマスの需給状況を明らかにし(図3-7)、浜通りにおける一次産業に貢献できるように課題と対策を整理した。 3. 入手可能なデータに基づいた、より汎用性の高いバイオマスポテンシャル推定法を開発した(表3-1及び図3-4)。これを元に地域ニーズと需要家の類型化を行い(表3-4)、中核エネ

リオを提案する。地域・協働により導入計画を検証する。 4. 研究成果紹介や情報提供を通じて将来における地域社会システムや技術導入シナリオとその効果を示し、地域と共働した技術実装の事業化につなげる。	ルギー事業との質的・量的関係を示した。また波及効果、地域の連携のあり方なども整理した(図3-3及び表3-5)。これらは全国的にも一般化できる手法である(図3-1)。 4. 環境省「脱炭素×復興まちづくり」等とも連携し、いくつかの浜通り自治体と連携のための意見交換や打ち合わせを定期的に行った(図3-5)。
--	--

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

成果の種別	件数
査読付き論文：	6
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	1
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	32
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	23
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	6
その他の成果発表：	1

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1-1	村沢直治、日下部一晃、倉持秀敏、万福裕造 木質バイオマス燃料利用施設での放射性Cs挙動調査 環境放射能除染学会誌、2023, 11(2)、p. 47-60

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
2-1	Wu J., HU Y., MA H., Kobayashi T., Takahashi Y., XU K.Q., Kuramochi H. (2024) Biomass conversion and radiocaesium (Rad-Cs) leaching behaviors of radioactive grass in anaerobic wet fermentation systems: Effects of pre-treatments. Water Research, 252, 121228. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121228
2-2	Kobayashi T., Kuramochi H. (2023) Catalytic pyrolysis of biomass using fly ash leachate to increase carbon monoxide production and improve biochar properties to accelerate anaerobic digestion. Bioresource Technology, 387, 129583. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129583

2-3	Kobayashi T., Kuramochi H. (2022) Optimized production conditions and activation of biochar for effective promotion of long-chain fatty acid degradation in anaerobic digestion. Bioresource Technology, 358, 127393. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127393
-----	--

成果番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
3-1	Ooba, M., Nakamura, S., Togawa, T. (2021), Promoting local revitalization to solve issues on degraded forests in Japan: A case study in Oku-Aizu, Fukushima. Global Environmental Research, 24, 191-198.
3-2	Ohnishi, S., Osako, M., Nakamura, S., Tsuji, T., Togawa, T., Kawai, K., Suzuki, K., Yoshida, A., Gomi, K. (2024) A Framework Analyzing Co-Creation Value Chain Mechanism in Community-Based Approach: A Literature Review. Sustainability, 16, 2919. https://doi.org/10.3390/su16072919

< 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3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
3-3	大西悟, 大迫政浩, 中村省吾, 辻岳史, 戸川卓哉, 河井紘輔, 鈴木薫, 吉田綾, 五味馨 (2023) 地域共創による価値連鎖メカニズムの分析にむけた理論的枠組みの提案—関連理論のナラティブレビューを基に—, 国立環境研究所・社会システム領域ディスカッションペーパー、2023-01、p. 1-13

< 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）
1-2	倉持秀敏, 小林拓朗 (2022) 二酸化炭素回収利用貯蔵 (CCUS) の現状と廃棄物分野の応用（焼却処理を中心に）. 都市清掃, 第75巻, 635号, p. 16-22
1-3	倉持秀敏 (2022) 廃棄物分野の脱炭素化へ向けた CCUS の現状と課題. INUDST, 37 巻、6 月号, p. 30-36

成果番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
3-4	大西悟 (2021) 地域循環共生圏の形成へのLCA研究の貢献にむけて, 特集「地域循環共生圏とライフサイクル思考」. 日本LCA学会誌, 17(4), 1-9

(3) 口頭発表

< 口頭発表（国際学会等・査読付き） >

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
2-4	Wu J., Kobayashi T., Kuramochi H, 4th International Conference for Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability (2023) Biomass reduction and radiocesium leaching performances of radioactively contaminated grass using anaerobic treatment: Effects of pretreatment.

成果 番号	【サブテーマ 3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
3-5	S. Ohnishi, H. Kuramochi, T. Kobayashi, S. Nakamura, M. Fujii, K. Gomi, 11th International Conference on Industrial Ecology (ISIE2023) (2023) Combining woody and waste biomass use for innovative urban symbiosis.
3-6	S. Ohnishi, The 2023 Ulsan International Symposium for Carbon Neutrality (2023) Carbon Neutrality Strategy of Fukushima Prefecture by innovative urban symbiosis.

<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）
1-4	倉持秀敏, 由井和子, 万福裕造, 小林拓朗, 大迫政浩, 第10回環境放射能除染研究発表会 (2021), 木質バイオマス発電施設の燃焼灰の融解特性とパークの影響
1-5	由井和子, 倉持秀敏, 大迫政浩, 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021), ストーカ炉を模擬した管状炉の作成と木質バイオマス燃焼試験への適用
1-6	倉持秀敏, 第18回講演会(環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会)「福島復興再生に向けた新たな展開」(2022), 脱炭素化を基調とした資源循環システム
1-7	村沢直治, 日下部一晃, 倉持秀敏, 万福裕造, 第11回環境放射能除染研究発表会 (2022), 木質燃料利用施設での放射性Cs移行挙動調査結果報告 (その1: 調査)
1-8	倉持秀敏, 村沢直治, 日下部一晃, 万福裕造, 第11回環境放射能除染研究発表会 (2022), 木質燃料利用施設での放射性Cs移行挙動調査結果報告 (その2: 解析)
1-9	倉持秀敏, 村沢直治, 日下部一晃, 小林拓朗, 第11回環境放射能除染研究発表会 (2022), 小型流動床式燃焼試験装置の開発と木質燃焼における放射性Csの挙動
1-10	村沢直治, 日下部一晃, 倉持秀敏, 万福裕造, 第45回全国都市清掃研究・事例発表会 2023年1月, 実施設での木質燃料利用時にける飛灰や排ガスへの放射性Cs移行状況
1-11	小井土賢二, 窪田碧唯, 山下香菜, 倉持秀敏, 第32回日本エネルギー学会大会 (2023), スギ燃料ガス化炉のクリンカ形成抑制のための心材、辺材および樹皮の配合効果
1-12	倉持秀敏, 第12回環境放射能除染研究発表会 (2023), 地域バイオマスの利活用による先進的エネルギー変換技術システムの開発と実装シナリオの研究 (環境研究総合推進費 (1-2102) の概要)
1-13	倉持秀敏, 大村成二, 松田宏, 小林拓朗, 村沢直治, 日下部一晃, 小井土賢二, 第12回環境放射能除染研究発表会 (2023), 同要旨集, 木質バイオマス発電残渣の有効利用に向けた規制重金属に関する調査
1-14	小井土賢二, 窪田碧唯, 山下香菜, 大村成二, 倉持秀敏, 第19回バイオマス科学会議 (2023), スギ燃料ガス化炉のクリンカ形成抑制のための心材、辺材および樹皮の配合効果—黒心材と赤心材の灰溶解性比較

成果 番号	【サブテーマ 2】の口頭発表（学会等・査読なし）
2-5	呉江, LI Yemei, 小林拓朗, 倉持秀敏, 第26回日本水環境学会シンポジウム (2023), 嫌気性処理とバイオ炭吸着による熱分解ガス凝縮廃液に含有する有機炭素の除去挙動
2-6	小林拓朗, 倉持秀敏, 第26回日本水環境学会シンポジウム (2023), 木質燃焼灰を負荷したバイオマス熱分解により生成したバイオ炭の特性と嫌気性微生物との相互作用
2-7	小林拓朗, 倉持秀敏, 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2023), 木質燃焼灰を負荷したバイオマス熱分解で生成したバイオ炭の特性とメタン発酵促進効果,
2-8	小林拓朗, 倉持秀敏, 第12回環境放射能除染研究発表会 (2023), バイオマス熱分解で生成したバイオ炭を利用したメタン発酵促進効果
2-9	WU Jiang, 小林拓朗, 高橋 勇介, 倉持秀敏, 第11回環境放射能除染研究発表会 (2022), 嫌気性処理技術による汚染牧草の減量効果および放射性セシウムの溶出挙動

2-10	小林拓朗，倉持秀敏，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会(2022)，メタン発酵の律速反応を促進する熱分解炭化物の生成条件
------	---

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
3-7	大西悟，藤井実，後藤尚弘，土木学会環境システム発表会(2021)，産業都市における地域循環共生圏形成にむけた障壁の実態解析と対応策の考察—熱EIP事業を対象として—
3-8	大場真，中村省吾，大西悟，日本エネルギー学会第17回バイオマス科学会議(2022)，木質バイオマスを利活用したエネルギーシステムの脱炭素効果評価—福島県浜通り地域でのケーススタディ
3-9	大場真，中村省吾，大西悟，日本農業気象学会2022年全国大会(2022)，スギ林内における直達短波放射量と樹木形状の関係：レーザー計測による生態系モデルパラメタリゼーション
3-10	大西悟，辻岳史，中村省吾，大場真ら，第11回環境放射能除染研究発表会(2022)，浜通りにおける産業政策・拠点整備データベースの設計と現況分析
3-11	大西悟，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会・若手の会 企画セッション(2022)，地域資源を活用した環境都市づくりを支援する研究：これまでの流れと今後の展開。
3-12	大西悟ら，第50回環境システム研究論文発表会(2022)，産業団地の熱電エネルギー需要の推計手法の開発と福島県地域でのケーススタディ
3-13	大西悟，中村省吾，戸川卓哉，五味馨，大場真，第66回土木計画学研究発表会・秋大会（企画提案型）(2022)，福島県浜通りにおけるカーボンニュートラル産業団地検討にむけた基礎的調査。
3-14	大場真，中村省吾，大西悟，日本農業気象学会2023年全国大会(2023)，森林点群データを用いた樹木個体モデルの開発
3-15	大場真，山田修吾，泉正寿，長谷川匡，中村省吾，大西悟，日本農業気象学会2023年東北支部大会(2023)，森林点群データの機械学習による樹木個体部位セグメンテーションと応用
3-16	大西悟，倉持秀敏，小林拓朗，中村省吾，藤井実，五味馨，第12回環境放射能除染研究発表会(2023)，浜通り産業団地における木質・廃棄物系コンバインドシステムの適用による脱炭素効果と経済性推計
3-17	大西悟，藤井実，牧誠也，中村省吾，越智裕士，藤原宏太，第51回環境システム研究論文発表会(2023)，中小規模工場のカーボンニュートラルにむけて—産業種別エネルギー特性分析—
3-18	大場真，中村省吾，大西悟，泉正寿，長谷川匡，山田修吾，第19回バイオマス科学会議(2023)，森林樹木可視化とバイオマス利活用
3-19	中村省吾，大西悟，第19回バイオマス科学会議発表論文集(2023)，福島県における燃料流通の観点から見た木質バイオマス発電事業の現状と課題
3-20	大西悟，第20回環境放射能除染学会講演会(2024)，福島環境再生の将来展望～技術から社会システムまで～
3-21	大場真，山田修吾，日本農業気象学会2024年全国大会(2024)，森林点群データと樹木個体モデルを用いた個体成長量推定

（４） 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（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
1-15	2021	倉持秀敏，由井和子，小林拓朗，大迫政浩，万福裕造：令和3年度環境創造センター成果報告会（主催：福島県、2021年10月29日、オンライン、アクセス数約130）にて成果紹介

1-16	2021	万福裕造, 飯舘村森林組合「木質バイオマス発電に関する技術的勉強会」(2021年12月1日、参加者約22名)にて成果紹介
1-17	2021	万福裕造, 飯舘村小宮地区懇談会「木質バイオマス発電に関する技術的勉強会」(2021年12月1日、参加者約19名)にて成果紹介
1-18	2021	倉持秀敏: 令和3年度福島再生・未来志向シンポジウム(主催: 環境省、2021年12月3日、linkる大熊町+オンライン、参加者332名)にて講演
1-19	2022	万福裕造, 飯舘村ゼロカーボン検討会「脱炭素・木質バイオマス発電に関する技術的検討会」(2022年12月16日、参加者約14名)にて成果紹介
1-20	2022	万福裕造, 飯舘村蔵平地区懇談会「木質バイオマス発電に関する技術的勉強会」(2022年5月30日、参加者約25名)にて成果紹介
1-21	2022	万福裕造, 飯舘村森林組合, 「木質バイオマス発電に関する技術的勉強会」(2022年5月30日、参加者約21名)にて成果紹介
1-22	2022	万福裕造, 飯舘村村議会(飯舘村)「木質バイオマス発電に関する報告」(2022年6月10日、参加者約26名)にて成果紹介
1-23	2022	万福裕造, 飯舘村村議会全員協議会, 「木質バイオマス発電に関する技術的勉強会」(2022年6月15日、参加者約19名)にて成果紹介
1-24	2022	万福裕造, 北海道大学工学院集中講義(北海道大学)「資源循環・木質バイオマス発電等の普及可能性」(2022年6月18日、参加者約24名)にて講義
1-25	2022	万福裕造, 檜葉町 「サステナ meeting」(2022年6月26日、参加者合計約90名)にてファシリテーター
1-26	2022	万福裕造, 南相馬市, 双葉町, 大熊町, 浪江町, 檜葉町「木質バイオマス発電に関する進捗状況説明と技術内容の説明」(2022年7月5日、参加者合計約40名)にて成果紹介
1-27	2022	倉持秀敏, 小林拓朗 福島県再生可能エネルギー推進研究会 「R4年度第二回バイオマス分科会」(約20名、2022年7月)、成果も含めて話題提供
1-28	2022	倉持秀敏, 村沢直治, 日下部一晃 木質燃料利用施設における放射性セシウム(Cs)の挙動 令和4年度福島県環境創造センター成果報告会(2022年9月30日、130名)
1-29	2023	除第12回環境放射能除染研究発表会企画セッション「浜通り地域の復興へ向けた脱炭素まちづくりの取り組みと今後の展開」(2023年8月30日、約40名)、自治体市長とパネルディスカッション
1-30	2023	倉持秀敏、小林拓朗、村沢直治、日下部一晃 「令和5年度環境創造センター成果報告会」(2023年10月3日、102名)
1-31	2023	村沢直治、日下部一晃、倉持秀敏、万福裕「令和5年度環境創造センター成果報告会」(2023年10月3日、102名)
1-32	2023	倉持秀敏, 万福裕造 6名、「飯舘村農山漁村再生可能エネルギー法促進協議会」(2023年10月17日、2024年3月26日、6名)木質バイオマス発電事業を含めた再生可能エネルギー導入に向けた議論と知見の紹介

成果番号	実施年度	【サブテーマ3】の実施状況
3-22	2022	大西悟、福島県環境創造センター、2023年3月、「バイオマス利活用によるカーボンニュートラル産業団地を核とした地域循環共生圏づくりにむけた研究」(福島県再生可能エネルギー関連産業推進研究会・2022年度第3回バイオマス分科会)
3-23	2022	大西悟ら、福島県環境創造センター、2023年2月、「中山間地域のカーボンニュートラルにむけた研究の取り組み」(福島県環境創造センター・創造部門セミナー)
3-24	2023	大場真: 国産木質バイオマス生産におけるGX-レーザ計測を使った森林資源量の自動推定法の開発 福島県再生可能エネルギー関連産業推進研究会R5第3回バイオマス分科会、福島、2024年3月
3-25	2023	大西悟: 福島県再生可能エネルギー推進研究会 バイオマス利活用によるカーボンニュートラル産業団地を核とした地域循環共生圏づくりにむけた研究-福島浜通りの復興を念頭に、三春、2023年3月

3-22	2022	大西悟、福島県環境創造センター、2023年3月、「バイオマス利活用によるカーボンニュートラル産業団地を核とした地域循環共生圏づくりにむけた研究」（福島県再生可能エネルギー関連産業推進研究会・2022年度第3回バイオマス分科会）
------	------	---

(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
1-33	福島民報(2021年12月4日、3面、「脱炭素「地元参加を」」)

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
3-26	福島民報(令和4年2月4日、23面、「研究部門に共通テーマー県環境創造センター」)
3-27	福島民友(2023年2月2日、web、「奥会津の脱炭素と山づくり 三島町と国立環境研究所がパネル討論」)
3-28	プレスリリース ふたばの森林コンサルティング技術開発について、株式会社ふたば、国立環境研究所、東北工業大学、2023年8月

(7) 研究成果による受賞

※本研究費の研究成果による受賞等があれば記載してください。

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
1-34	2021年6月22日 令和3年度環境保全功労者表彰(環境大臣賞), 万福裕造
1-35	2021年6月23日 令和3年度農業農村工学会賞(地域貢献賞), 万福裕造
1-36	2021年8月25日 学術賞 環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会 倉持秀敏
1-37	2022年10月 第11回環境放射能除染研究発表会 優秀口頭発表賞, 倉持秀敏
1-38	2023年11月 飯舘村 環境再生・森林再生等に関する感謝状、万福裕造,

成果番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
3-29	第17回バイオマス科学会議ポスター賞受賞、日本エネルギー学会、令和4年1月20日、大場真、中村省吾、大西悟

(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
------	-------------------

1-39	倉持秀敏 第12回環境放射能除染研究発表会企画セッション1「浜通り地域の復興へ向けた脱炭素まちづくりの取り組みと今後の展開」の報告、(2024) 環境放射能除染学会誌 11(4), 187-189
------	--

Abstract

[Research Title]

Development of Advanced Energy Conversion Technology Systems for Utilization of Radioactively-contaminated Biomass and Implementation Scenarios Towards Decarbonized Society

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Kuramochi Hidetoshi
(PI ORCID) :	ORCID0000-0003-2992-8358
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies Tsukuba City, Ibaarak, JAPAN Tel: +81-29-850-2841 Fax: +81-29-850-2840 E-mail: kuramochi.hidetoshi@nies.go.jp
Cooperated by :	Tohoku Institute of Technology, National Agriculture and Food Research Organization, Forestry and Forest Products Research Institute and Fukushima Prefectural Centre for Environmental Creation
Keywords :	Woody biomass power generation, Carbon recycle, Behavior of radioactive cesium, Circular and Ecological Economy

[Abstract]

In subtheme 1, we revealed the behavior of radioactive cesium (r-Cs), such as the r-Cs concentrations in two kinds of combustion residues and the partitioning ratio of r-Cs between the two residues, in woody biomass combustion power generation facilities dealing with conventional wood chips in Fukushima. These findings will be useful for similar facilities that are under construction in Fukushima. To use wood bark as a new feedstock for power generation, we built two types of laboratory-scale reactors for combustion and gasification and then investigated r-Cs behavior during the combustion and gasification of wood bark samples. The results indicate that the bark could be utilized as feedstock for woody biomass combustion or gasification. Furthermore, we suggest that it is useful for preventing biochar melting since with woody biomass gasification, biochar is produced as waste. Finally, we evaluated the possibility of utilizing the biochar as a soil additive. From two safety evaluation tests of biochar samples, we demonstrated that it can meet the domestic standards for soil additives.

In subtheme 2, we investigated the integrated carbon recycling processes of pyrolysis and gasification and biological treatment processes, such as anaerobic digestion, to effectively utilize residues, including carbon dioxide generated in each unit process. The use of biomass incineration ash, digestate residues, and CO₂ in the pyrolysis of biomass has been shown to result in a significant increase in combustible gas and a reduction in CO₂ during pyrolysis and gasification. In addition, the resulting pyrolysis residues, such as biochar, were found to enhance the fermentation-promoting effect through microbial electro-symbiosis in anaerobic digestion and CO₂ bio-methanation. Not only was the continuous addition of 1% biochar to anaerobic digestion effective in improving digestion performance, it was also found that even if the biochar was contaminated with r-Cs, most of that was present in the solids of the digestate, and only a small amount was in the water. The low concentrations of r-Cs in the water (a few Bq/kg) did not pose a significant safety problem.

In subtheme 3, using the technology developed in subtheme 1 and 2, we developed social scenarios that

were centered on a biomass energy system that can contribute to both recovery from the disaster and decarbonization of the coastal region (the town of Hamadori) in Fukushima Prefecture. We developed general estimation methods and a regional database of biomasses by reviewing numerous studies and regional social statistics for the potential amounts of woody, agricultural, and other biomasses in Fukushima Prefecture. Regarding social implementation and the supply chain, we proposed a sustainable scenario for installing biomass energy power generation facilities in the new industrial area in Hamadori. A catalog of case studies was also proposed for electric and heat technologies, including collaborations with other consumer sectors in Japan, and we stressed the installing scenario as recovery progresses. Finally, future local energy systems that combine a small-scale cogeneration plant with a methane fermentation system were designed and analyzed from the viewpoints of mass flows, the economics of the operations, and their social effects on the region.

[References]

- Wu J., HU Y., MA H., Kobayashi T., Takahashi Y., XU K.Q., Kuramochi H. (2024) Biomass conversion and radiocaesium (Rad-Cs) leaching behaviors of radioactive grass in anaerobic wet fermentation systems: Effects of pre-treatments. *Water Research*, 252, 121228. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121228>
- Kobayashi T., Kuramochi H. (2023) Catalytic pyrolysis of biomass using fly ash leachate to increase carbon monoxide production and improve biochar properties to accelerate anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 387, 129583. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129583>
- Kobayashi T., Kuramochi H. (2022) Optimized production conditions and activation of biochar for effective promotion of long-chain fatty acid degradation in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 358, 127393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127393>
- hnishi, S., Osako, M., Nakamura, S., Tsuji, T., Togawa, T., Kawai, K., Suzuki, K., Yoshida, A., Gomi, K.(2024) A Framework Analyzing Co-Creation Value Chain Mechanism in Community-Based Approach: A Literature Review. *Sustainability*, 16, 2919. <https://doi.org/10.3390/su16072919>

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

別添

【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
放射性物質の挙動に関する理論的解析に関するコメント： - 結果に関して、そのメカニズムの解析がまだ不十分であるように思われる。作業仮説をたてて実験を行っていくようなアプローチが欲しかった。 - 既存の燃焼実験の成果との兼ね合いで理論的検討をできれば行う必要がある。	放射性セシウム (Cs) の挙動の理論的解析ですが、例えば、原料の元素組成解析とこれまでの平衡計算の知見から、熱処理残渣からの放射性Csの溶出メカニズムを仮定し、原料及び残渣からの溶出率を基に仮説の検証をしています。具体的には、木質チップやペレットのみの熱処理残渣から放射性Csの溶出率が高い理由は、放射性Csを安定に固定化できるSi, Al等の元素が木質原料中に極めて少ないため、原料中の溶出性の放射性Csが残渣にそのまま残存し、溶出性が高くなっていることを考察しています。ただし、報告書への記載は少ないです。木質バイオマス発電の研究では、放射性Cs挙動とクリンカの生成抑制が重要な研究課題ですが、前者は原料自体の放射性Cs濃度がかなり低く（放射性Cs濃度レベルはクリアランスの1/10）、現状で大きな問題になりません。しかし、後者は運転中止に至る大きな問題になっており、特にガス化施設では稼働率が低くなるケースが多いです。したがって、クリンカ抑制を理論的に解析することに力点をおき、報告書を執筆しています。
サブテーマ間の連携及び最終実装システムに関するコメント： - サブテーマ1、2で基盤的には有効なデータが得られたと考える。今後、進められるサブテーマ3への展開を期待する。 - 実装のシナリオが明確でない。	サブテーマ間で連携については、木質バイオマスガス化—メタン発酵コンバインドシステム（残渣ゼロの再エネ複合連携発電システム）を浜通りへ導入すること最終目標に密に連携が取れています。具体的には、サブテーマ1では木質バイオマスガス化の残渣であるバイオ炭、特に高機能性を有するバイオ炭をサブテーマ2のメタン発酵促進剤として利用するための評価を実施しています。また、サブテーマ3におけるコンバインドシステムを導入する際の導入シナリオの作成では、地元自治体と意見交換をしながら、需給バランスを考慮して作成しています。また、コストや温室効果ガス排出削減効果に関する試算はサブテーマ1と2から提示された仕様がベースとなっています。