

放射性物質により汚染された植物バイオマスの減量化総合処理システムの開発研究

研究代表者 加藤 純一 国立大学法人広島大学大学院先端物質科学研究科
参画機関 国立大学法人広島大学、国立大学法人静岡大学、学校法人広島国際学院・広島国際学院大学、
独立行政法人森林総合研究所
研究開発期間 平成24年度～26年度

1. 研究開発の背景とねらい

2011年の福島第一原子力発電所の事故は膨大な量の放射能汚染した樹木、草類、農作物を残した。これら放射能汚染した植物バイオマスは、除染の重要な対象である。今のところ、放射能汚染植物バイオマスを伐採・収集し、最終的には中間貯蔵地で保管する計画が立てられている。除染対象となる植物バイオマスの量は莫大なものであるため、保管する前に大幅に容積を減量することが必須となる。

本事業では放射能汚染植物バイオマスの減量化技術としてメタン発酵に着目した。その理由は、1)メタン発酵は下水余剰汚泥や農産廃棄物などのバイオマスの減量化技術としてすでに確立されており実用化が容易である、2)低温(30～60℃)で処理が可能なので焼却処理で不安視される放射性Csの気化の問題を回避できる、3)処理産物は腐敗に対し耐性となり長期貯蔵に適する、ことが挙げられる。確かにメタン発酵は確立された技術であるが、そのまま放射能汚染植物バイオマスの減量化に適用することはできない。なぜなら、これまで放射能汚染したバイオマスをメタン発酵した実績はなく、その処理により放射性物質がどの画分(ガス、固形、液状のそれぞれの画分)にどれだけ移行するかについてのデータはまったくない。したがって、本事業ではまず植物バイオマスのメタン発酵処理に最適なシステムを構築し、そのシステムで放射能汚染植物バイオマスを処理するときの放射性物質のフラックスを明らかにすることを目的とする。本事業で検討するシステムは、樹木を含む植物バイオマスのメタン発酵処理を加速するための前処理(湿式ミリング)、前処理後の固形画分をメタン発酵する乾式メタン発酵、液状画分をメタン発酵するUASB、さらにメタン発酵で生じる廃水から細菌を用いて放射性物質を除去する技術から構成される(図1)。そしてメタン発酵処理で減量化したバイオマスは中間貯蔵地で保管し、放射性物質を除去した廃水は廃棄する。また生じたメタンガスは、システムの運転エネルギーとして利用する。

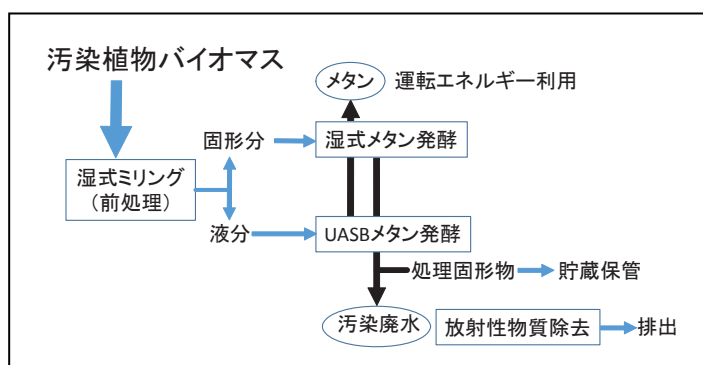


図1 本事業の検討する汚染バイオマス減量化システム

平成24年度は各要素技術の確立、平成25年度は要素技術を組み合わせたシステムの最適化、平成26年度は実際の放射能汚染植物バイオマスを用いたシステム性能の検証を行う計画である。

2. 研究開発成果

2. 1 植物バイオマス前処理のための湿式ミリング技術の開発

本研究では木質バイオマスに含まれるリグニンを未変性のまま抽出する技術（特願2009-251872）を適用して小型湿式ミリング装置を試作し、放射性セシウムに汚染された草本系ソフトバイオマス、木質系ハードバイオマスの同時糖化湿式粉碎による減容化処理の基礎的諸条件を検討した。

大流量循環運転が可能な小型湿式ミリング装置（容量 0.15L、バッチ量 0.5L、セラミック仕様、アシザワ・ファインテック製）を試作した。木質系モデルバイオマスとしてスギ、シラカバ、草本系モデルバイオマスとしてイナワラを選定し、カッターミルによる粉碎後、篩い分けを行い、100 μ m スクリーン通過画分を湿式ミリング装置で同時糖化湿式粉碎に供した。すべてのモデルバイオマスに於いて2時間処理後の粒度は1 μ m 以下となった。まず、湿式ミリング処理条件を検討するためにスギを試料として構成成分の経時変化（同時糖化ミリング処理時間 0, 30, 60, 90, 120 分）を追跡した。その結果、処理時間に伴ってホロセルロースが減少し、リグニンが増える傾向が見られた。抽出分量にはほとんど変化がなかった。さらに24時間追加糖化处理（50 $^{\circ}$ C）を行うことにより、ホロセルロース成分は著しく減少し、リグニン量は増加したことから、ミリング処理後の追加糖化处理は成分分離効率を飛躍的に向上させるものと考えられた。

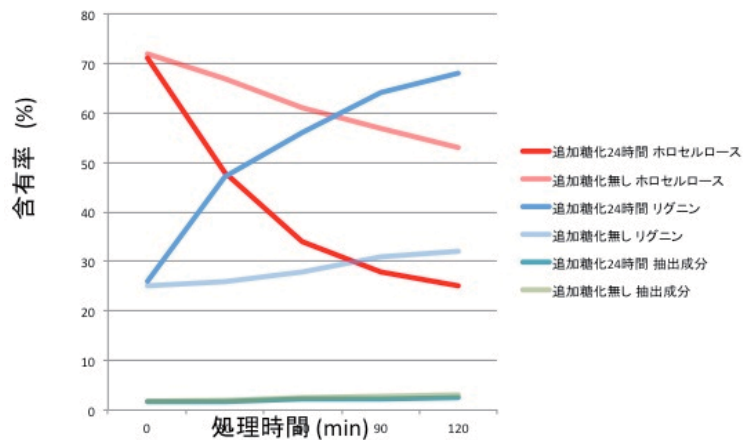


図2 湿式ミリング処理によるスギ構成成分の経時変化

2. 2 乾式メタン発酵の開発

本研究では、被災地域にて汚染環境修復時に排出される有機廃棄物資源からの高効率乾式嫌気消化（メタン発酵）法の開発を行う。この目的のために平成24年度は、汚染地域、特に福島県内の処理対象バイオマスの選定、及び対象バイオマスのメタン発酵ポテンシャルを調査した。

まず、福島県全域と現地処理試験を予定している福島県西郷村におけるバイオマス賦存量統計調査、および現地での聞き取り調査などから、本プロジェクトにて検討対象とするバイオマスとして、福島県下で賦存量の多い稲ワラ、雑草・牧草類、そして、枝打ちなどで大量に排出されると予想される木質系バイオマスを選定した。

選定したバイオマスについてそれぞれ、1) 稲ワラ、2) 牧草（バミューダヘイ）、3) スギ粉碎粉末をモデルバイオマスとしてメタン生成ポテンシャルを測定した。広島県内の下水浄化センターから採取した高温嫌気消化汚泥と上記バイオマスを混合し、55 $^{\circ}$ C、無酸素条件下でメタンガス生成の経時変化を測定したところ、使用した高温嫌気消化汚泥がこれらバイオマスを分解し、メタン生成する能力を持つことが見いだされた。さらに、バイオマス中のVS当たりのメタン生成ポテンシャル計算したところ、1) 稲ワラ、2) 牧草ではそれぞれ、234 ml/g-VS、185 ml/g-VS であ

り、大きな違いは見られなかった。一方、3) スギ粉砕物（森林総合研究所より供試）のメタン生成ポテンシャルは27ml/g-VS となり稲ワラ、牧草と比較して顕著に低くなった。そこで、予備的ながら森林総合研究所において湿式ミリングにより処理されたスギサンプルのメタン生成ポテンシャルを測定したところ、81ml/g-VS に向上したことから、スギなどの木質系バイオマスの湿式ミリングによる処理の有効性が示唆された。

2. 3 UASB メタン発酵技術の開発

本研究では、上向流式嫌気性汚泥床(UASB)メタン発酵による糖化バイオマスの分解とエネルギー回収、ならびに白色腐朽菌を用いたバイオマス減容化の高速化を目的として実験を行った。特に、供給する糖化バイオマスに非放射性的セシウムを添加して、メタン発酵におけるセシウムの動態を解析した。

スギ糖化液を基質としてUASB（上向流式嫌気性汚泥床）メタン発酵の安定化を行った後、塩化セシウムを添加し、反応器の供給液、排出液のセシウム濃度を原子吸光で測定した（図3）。その結果、供給液、排出液ともにセシウム濃度はほぼ同値であった。経時変化を測定すると、添加後1日未満で菌体グラニュールへのセシウムの吸着が平衡状態になり、以降は供給されたセシウムはすべて排出されたものと示唆された。また、バイオガスを約15Lの蒸留水にトラップし、水に溶解したセシウムを原子吸光で測定した。その結果、ブランクとほぼ同値であったことから、バイオガス中にはセシウムは移行していないということが示唆された。

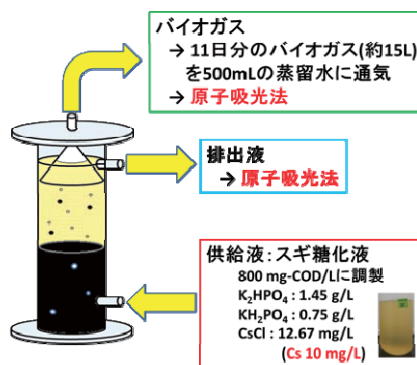


図3 UASB メタン発酵試験



図4 固体培養試験

ガラス瓶を用いた回分試験の結果を基に、湿潤空気を連続供給する固体培養装置で白色腐朽菌 YK-624 株を6日間培養した（図4）。その結果、リグニン分解に直接寄与する酸化酵素の活性上昇が認められ、リグニンを高選択的に分解することに成功した。この結果から、エアレーションにより酸素を供給することで、リグニン分解酵素活性が増加し、リグニン分解が促進することが示唆された。

2. 4 光合成細菌を用いる放射性物質除去技術の開発

本研究は放射性バイオマスのメタン発酵消化液の光合成細菌固定化ビーズによるセシウム除去と排水処理を効率よく行うため、特に粘性がある消化液の好気処理に、通気効率の良い3種のバイオリクター（エアリフト型、多段エアリフト型、ロータリードラム型）を設計試作し、種々の運転条件でのセシウム除去、COD、BOD 除去効率について検討した。

酢酸、プロピオン酸（各 2-4 g/L）を炭素源とした人工消化液（人工下水）にセシウム 5-10mg/L を添加して、エアリフト型、多



図5 多段エアリフト型

段型バイオリアクターに3-6L入れ、アルギン酸で固定化した光合成細菌ビーズを2-4メッシュ袋(各袋200個ビーズ)に投入し、0.5-1vvmで通気しつつ4日間(30°C)浄化を行った。図5および6に実験の様子を示す。その結果、多段式では2メッシュ袋/6Lで、4日で約20%除去された。CODは酢酸、プロピオン酸基質なので、最初は低く、その後ビーズの崩壊に伴い約800mg/Lほどに上昇した。エアリフト式では4日で約60%減少し、CODはやはりビーズの崩壊に伴い上昇した。これらの結果から、試作したバイオリアクターでの消化液からのセシウム除去の可能性が認められた。ロータリードラム型では光合成細菌の培養試験を行い、好気条件で無殺菌でも増殖することを認め、好気培養が可能なリアクターであることを確認した(図7)。



図6 エアリフト型

3. 今後の展望

事業は計画通り進展している。静岡大学担当の研究で、外部からのCsスパイクではあるものの、メタン発酵で生じたバイオガス(メタン及び二酸化炭素の混合物)のCsが検出限界以下であることが分かった。これは、放射能汚染した植物バイオマス进行处理して生じるメタンを安全に運転エネルギーとして利用できることを示唆する重要な成果である。



図7 ロータリー型

本年度は種々の処理時間で植物バイオマスを湿式ミリング処理した試料を広島大学および静岡大学でメタン発酵(乾式法およびUASB法)処理し、その結果に基づいてシステムの最適化を図る計画である。また、広島国際学院大学は放射能汚染した植物バイオマスを実際に用いて放射性物質除去の試験を行う予定ある。そして平成26年度は、現地に処理システムを構築し、現地の放射能汚染した植物バイオマスを用いてシステム性能の検証を行う計画となっている。

「研究開発の背景とねらい」に記載したように、メタン発酵はすでに大型の装置が作られ様々なバイオマスの減量化に利用されている。また、ミリングも鉱業で大型の装置が活用されている。したがって、我々の事業により、湿式ミリング-メタン発酵-放射性物質除去処理からなる放射能汚染植物バイオマス減量化システムの最適化がなされれば、その実機規模へのスケールアップは容易である。また、本事業で明らかにするシステム内での放射性物質の動態に関するデータを活用することにより、放射能汚染植物バイオマスの減量化処理を安全に行うことができよう。

4. 参考文献

- (1) 金原和秀、平井浩文、大塚祐一郎、中村雅哉、佐々木健、中島田豊、加藤純一、「放射性物質で汚染された植物バイオマス減容化総合処理システムの開発」、環境バイオテクノロジー学会誌、16, 31-38 (2013).
- (2) 佐々木健、岸部貴、竹野健次、三上綾香、原田敏彦、大田雅博、「光合成細菌による水環境中のセシウム、ストロンチウム、有害金属の回収、および水、底質、土壌の放射能の実用的除染」、生物工学会誌、91, 432-446 (2013).