

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

(受託者) 国立大学法人広島大学

(研究代表者) 加藤純一 大学院先端物質科学研究科

(再委託先) 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

(研究期間) 平成24年度～26年度

1. 研究の背景とねらい

福島第一原子力発電所の事故により広範囲の植物、農作物が放射線汚染を被っている。この膨大な量の植物バイオマスを処理するためには、まずはその減容化を図る必要がある。焼却処分は放射能汚染した植物バイオマスの減容化に有効な方法の一つである。焼却により植物バイオマス量は容量的にも重量的にも大幅に減容化できる。しかし、水分含有量が多い植物バイオマスの焼却では、水分存在下で十分な燃焼を成立させるために重油などの助燃剤を添加する必要があり、それに多大な経費がかかってしまう。より大きな問題は、放射性物質の飛散である。セシウムは比較的沸点が低い金属（沸点：641℃）であるので、焼却処理により容易に気化してしまうことが予想される。したがって、放射性セシウムの飛散を完全に防止する工夫を加えなければならない。そこで、我々は焼却に依存しない植物バイオマス減容化法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セシウム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。一方、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。そこで本研究では、主に湿式ミリング前処理、メタン発酵、放射性物質回収から構成される放射性物質汚染バイオマスの総合処理システムを開発し（図1）、どの程度までの減容化およびメタン生成が可能かを評価するとともに、それぞれの過程での放射性物質の動態について調査した。

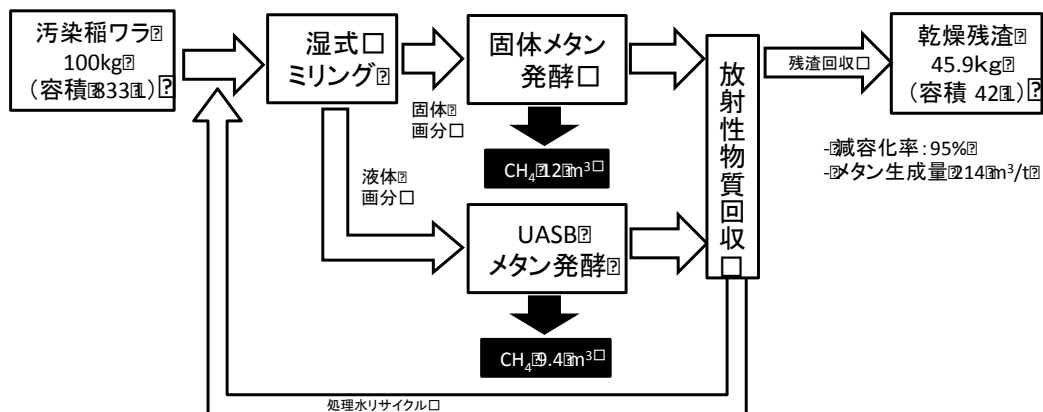


図1. 本研究プロジェクトのバイオマス減容化システムおよび実汚染稲ワラを用いた実証結果

2. これまでの研究成果

(1) 検討対象バイオマスの選定

まず処理対象となるバイオマスを把握するために、福島県全域の統計情報を用いたバイオマス賦存量調査、現地処理試験を予定していた福島県西郷村、及び南相馬市、飯舘村での現地聞き取り調査を行い、1) 福島県下で賦存量の多い稲ワラ、2) 福島県下で賦存量が多い雑草類、さらに現在仮置場に保管されており減容化処理が必要とされる牧草類、3) 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。

(2) 検討対象バイオマスのメタン発酵特性

上記調査から選定したバイオマスのメタン発酵特性を評価するために、稲ワラ、牧草類、スギ粉砕物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ところ、稲ワラ、牧草のメタン生成ポテンシャルはそれぞれ、234 ml/g-VS、185 ml/g-VS であり、大きな違いは見られなかった。さらに、牧草および稲ワラに非放射性セシウムを添加して嫌気消化を行い、発酵残渣を固液分離後、液画分の分配比率を調べたところ、添加非放射性セシウムの 50~60%が液画分に存在することがわかった。一方、スギ粉砕物のメタン生成ポテンシャルはほぼゼロであった。

(3) 湿式ミリング装置によるバイオマス前処理法

選定バイオマスについて、減容化率の向上を目的として湿式ミリング装置（図 2）による前処理法も同時に検討した。モデルバイオマスとしてスギ、シラカバ、稲ワラを用い、それぞれ 2mm 程度に粉砕したのち、試作した木材の湿式ミリング装置による糖化粉砕処理条件を検討した。その結果、ベッセル（粉砕槽）内を約 50℃に保持することにより、粉砕と糖化が協調的に働き高効率な糖化粉砕処理が可能となることが明らかとなった。また、糖化湿式粉砕処理における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。さらに 24 時間追加糖化処理（50℃）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処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。

ここで、未処理ではメタンが生成しなかったスギ粉砕物について、湿式ミリング処理後の固体残渣のメタン生成ポテンシャルを測定したところ、30 分程度の短い処理時間においても良好なメタン生成が見られたことから、湿式ミリング処理は木質系バイオマスの糖化法としてだけでなく、固体画分のメタン発酵特性を向上させることが分かった。また、ミリング処理スギ粉砕物についても非放射性セシウム動態を検討したところ、ミリング処理時間に関わらずセシウムの 20~30%が液画分に存在していた。

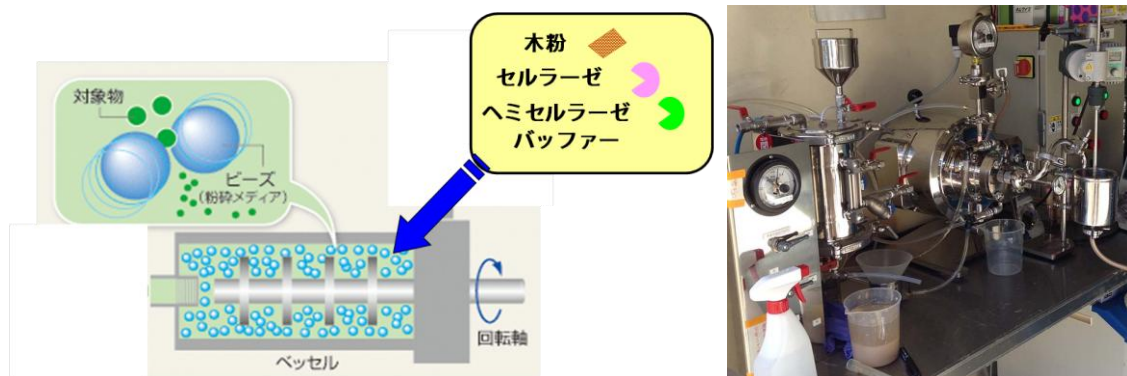


図 2. 湿式ミリングの原理（左）、および装置概観（右）

(4) 湿式ミリング糖化液の高速メタン発酵

湿式ミリング処理による糖化画分についても処理が必要であることから、非放射性セシウムを添加した後に、上向流嫌気汚泥床型（Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB）リアクターを用いた高速メタン発酵に適用したところ、非放射性セシウムの添加は発酵特性に影響を与えなかった。さらに、気・固・液各画分からセシウムを抽出し、その存在比の詳細を検討した結果、非放射性セシウムはメタンガス中には検出されず、発酵槽中のグラニューールにわずかに吸着した後、排水として排出された。

(5) メタン発酵残渣からの放射性物質回収技術の開発

メタン発酵廃液には放射性物質が残存しており、更なる濃縮減容化が求められる。そこで、水溶液中のセシウム、ストロンチウムの除去能を有する光合成細菌（SSI 株）を活用し、発酵排水中の放射性物質の除去並びに BOD/COD を除去する技術の開発を行った。ロータリードラム式、エアリフト式、多段式のバイオリアクター（図 3）の運転を行い、セシウムの除去並びに COD の除去について種々検討した結果、最適操作条件として多段式が最も効率よくセシウムと COD 除去が可能であり、最大でセシウムと COD ともに 95%以上の除去を示した。



図 3. 放射性物質回収多段式リアクター

(6) 福島県での現地実証試験

上記検討を踏まえて、福島県西郷村に湿式ミリング装置（図 2）、小型 UASB リアクター、ならびに固体メタン発酵装置（図 4）などを移設し、放射性物質汚染バイオマスである稲ワラを用いた実証試験を行った。汚染バイオマスを粉砕・湿式ミリング処理したのち、糖化液を UASB リアクターにより、固体画分を固体メタン発酵装置によりそれぞれメタン発酵処理した。その結果、固体メタン発酵装置において安定したメタン発酵が可能であった（図 5）。また、生産されたバイオガスには放射性物質は含まれていなかった。メタン発酵残渣からの光合成細菌による放射能回収試験において、稲ワラ粉末廃液処理において最大で約 75%の放射能を、COD, BOD は 95%以上除去できた。その他の廃液で放射能は 28-50%の除去率であったが、COD, BOD は全て 95%以上除去できた。



図 4. 固体メタン発酵槽

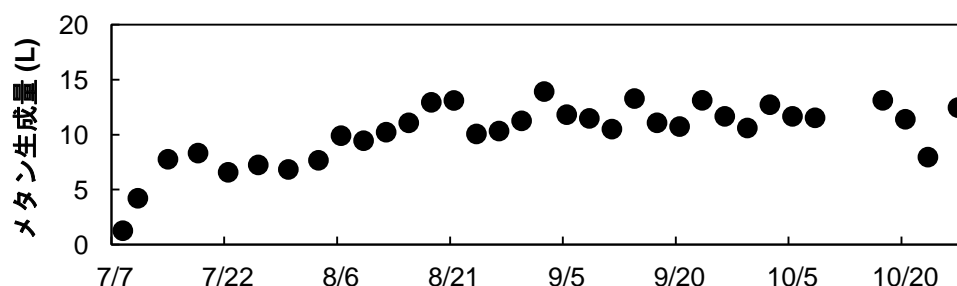


図 5 固体メタン発酵槽による汚染稲ワラ固形画分からのメタン生成

3. 今後の展望

福島県西郷村において実施した汚染稲ワラの減容化処理プロセスフローにおけるメタン生成収率、及び固形物の減量化・減容化率などを図1に示した。ここで、バイオマスの嵩密度は 120 kg/m^3 とし（農林水産技術会議/農地・森林等の放射性物質の除去・低減技術の開発報告書より）、湿式ミリング処理時間30分、酵素量 $10 \text{ mL}/50 \text{ g}$ -稲ワラの条件で湿式ミリング処理したバイオマスを用いた。本実証試験結果から計算した固形物減量化率、および全メタン収率はそれぞれ54%、 0.25 L/g-VS であった。通常メタン発酵法における減量化率は50~60%程度であり想定通りの結果といえる。さらに、バイオマスの主成分である炭水化物からのメタン収率は全量消費で $0.4 \sim 0.5 \text{ L/g}$ なので、減量化率を考慮すると今回のメタン収率も妥当なものと考えられる。乾燥処理した発酵残渣を放射性廃棄物として処理したとしても減容化率は95%以上であり、保管容積は約1/20に低減できる。あまりに高い減容化率は高濃度放射性廃棄物を生み出してしまうため、放射性Cs汚染廃棄物の処分が環境省のガイドライン通りに実施されるなら、開発システムは減容化処理法として十分な能力を持つと言える。

さらに今回の実証試験で得られた興味深い知見としては、汚染バイオマスの処理試験のいずれにおいても、生成バイオガスから放射能が検出されなかったことがある。これは、今回の処理システムで放射性物質汚染バイオマスから生産されるメタンは除染なしで用いることができることを示している。汚染バイオマス処理であっても処理コストを低減することは重要である。回収したメタンを通常天然ガス代替エネルギーとして用いることができるので、特別な放射線対策をおこなうことなくガス発電設備を導入し、FIT事業を活用した売電事業により処理コストを低減できる可能性が高い。しかし、今回の実証試験規模では詳細な処理コストの概算は難しい。従って、実用化に向けた今後の取り組みとしては、エネルギー消費の高い湿式ミリング工程の処理高効率・省エネルギー化、前処理法および発酵プロセスの最適化によるメタン生産収率の向上など、要素技術の更なる革新・最適化が必要とされる。さらに、より大規模な実証試験結果に基づくフューチャービリティスタディーを行い、実用化の必要十分条件を明確化してゆく必要がある。

4. 参考文献

- (1) 金原和秀ほか，“放射性物質で汚染された植物バイオマスの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) 加藤純一ほか，“放射能汚染植物バイオマス減容化バイオ技術の開発”，生物工学，92，287-290（2014）。
- (3) 佐々木健、竹野健次，“光合成細菌によるウラン、セシウム、ストロンチウム、有害金属の回収、および放射性セシウムの除去”，用水と廃水，56，60-68（2014）。
- (4) Sasaki, K *et. al.*, “Removal of radioactivity and recovery of radioactive Cs from sediment mud and soil in Fukushima, Japan using immobilized photosynthetic bacteria”，Advanced Materials Research, 1091, 125-130（2015）。