

バイオ技術による放射能汚染植物の処理 —減容化/安定化とエネルギー生産—

加藤 純一^{*1}, 金原 和秀^{*2}, 中村 雅哉^{*3}, 大塚祐一郎^{*3},
Kato Junichi Kimbara Kazuhide Nakamura Masaya Ohtsuka Yuichiro
 佐々木 健^{*4}, 中島田 豊^{*1}, 佐々木 慧^{*4}, 松尾 健司^{*5}
Sasaki Ken Nakashimada Yutaka Sasaki Kei Matsuo Kenji

1. はじめに

2011年の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により、膨大な量の森林樹林、草本、農作物などの植物バイオマスが放射能汚染を被った。どれだけの量の植物バイオマスが汚染したかの数値的な手がかりとしてバイオマス賦存量をあげる。バイオマス賦存量は理論上1年間に発生、排出される動植物のバイオマス量を意味する。国等の統計資料によると、福島県の植物バイオマス賦存量で最も多いのは稲作残渣・稲わらで約3,010万t(乾燥重量)/年、ついで森林バイオマス(林地残材・切捨間伐材)(約13万t/年)、雑草(約10万t/年)と続く。植物バイオマスは放射性物質の大気沈着によって直接汚染されたり、放射能汚染した土壌などから放射性物質を取り込んで汚染した。3月の時点で稲は収穫済みで稲田には稲がない状況ではあったが、稲わらの一部は家畜飼料用に牧草ロールとして野外に放置されており、これも汚染した。賦存量は1年を通じての数字であるし、放射性物質が流入せず汚染しなかった植物もあるので、この数値をそのまま放射能汚染した植物バイオマス量として考えるわけにはいかない。しかし、実際に汚染した植物バイオマス

の量はこの賦存量から大きくかけ離れた数値ではないであろう。

被災地復興のためには当然ながらこれら放射能汚染した植物バイオマスを処分する必要がある。汚染植物バイオマスや汚染土壌は写真1で示すようなフレコンバッグ(フレキシブルコンテナバッグ)に詰められ、それぞれの市町村に設けられた仮貯蔵地に集積される。その後、これらフレコンバッグは中間貯蔵地に移送、集積され、放射活性が十分に減衰するまで長期間安定保存されることになっている。しかし、中間貯蔵地の面積は限られたものであるので、中間貯蔵地に移送する前になるべく容積を減らす(減容化)必要がある。また、貯蔵中に植物バイオマスが腐敗し、硫化水素やアンモニアなどの有害ガスが発生しないよう、植物バイオマスを安定化することも必須である。植物バイオマスの減容化と安定化で最も有効なのは焼却処分である。Csの沸点は比較的低温(641℃)なので、焼却にあたっては放射性Csの二次汚染を防ぐために気化したCsを完全にトラップする設備を設ける必要がある。日本の技術力を持ってすれば、放散するCsを確実に除去できる焼却設備を設置することは十分に可能であ



写真1 汚染植物バイオマスの処分

左図: 汚染した植木の打枝を詰めたフレコンバッグ。中図: 汚染した牧草ロールをビニールシートで包装したもの。
 右図: フレコンバッグを集積仮貯蔵する仮貯蔵地。この仮貯蔵地は2015年7月の時点で既に満杯になっていた。

るが、焼却設備を実際にどこの地域で稼働させるかについては、地域との合意などの問題がある。したがって、焼却に頼らない減容化技術も開発し、状況に応じて減容化技術を使い分けるのが得策であろう。

食品残渣、家畜糞尿、下水処理施設の余剰汚泥などの有機性廃棄物の処理法のひとつに嫌気消化法がある。嫌気消化法では有機性廃棄物の減容化と安定化が達成されるのに加え、燃料として利用可能なメタンを含むバイオガスを生産することができる。私たちは放射能汚染した植物バイオマスの減容化/安定化処理に嫌気消化法が利用できるのではないかと考え、その技術開発を行った。以下ではそれについて解説する。なお、本記事は文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「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」の成果に基づいている。

2. 嫌気消化

嫌気消化は酸素がない条件（嫌気条件）で有機性廃棄物をメタンと二酸化炭素にまで分解するバイオプロセスである¹⁾。多種多様な微生物から成る微生物群集によって行われる嫌気消化の生物化学的プロセスは、**図1**に示すように4段階ある。第1段階は有機性廃棄物の生物分解性の高分子有機物（多糖（デンプンやセルロース）、タンパク質、脂肪など）を加水分解して低分子の構成成分（単糖類、アミノ酸、高級脂肪酸など）に変換する。第2段階は低分子有機物を発酵してギ酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸などの揮発性脂肪酸を生成する酸生成ステップである。第3段階では第2段階で生じたプロピオン酸や酪酸をギ酸、酢酸、 H_2 および CO_2 に変換する酢酸生成ステップである。そして第4段階で酢酸もしくは H_2 と CO_2 からメタンを生成するメタン生成ステップである。単一の嫌気消化タンクの中で微生物群集が協調して有機物を分解しバイオガス（主にメタンと二酸化炭素の混合ガス）を生成する。バイオガスの約60%はメタン、約40%は二酸化炭素であり、燃料ガスとして利用することができる。廃棄物の生物分解性の有機物のたった10~20%が菌体増殖に用いられ、残りの80~90%はバイオガスに変換されるので、廃棄物の減量化が達成されるのである。運転のためのエネルギー投入量が他の処理技術

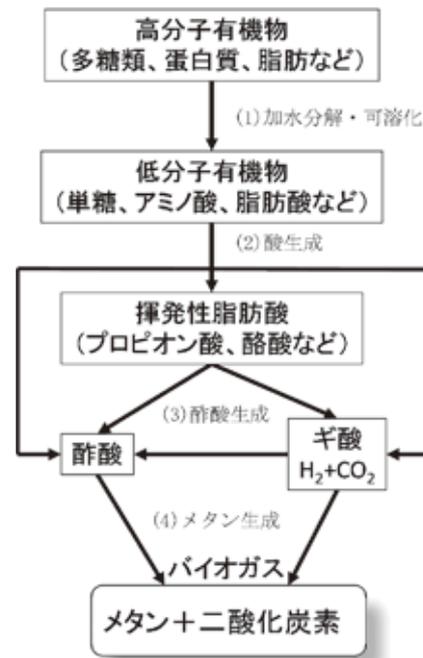


図1 嫌気消化における生物化学プロセス

よりも少なく済むこと、そしてエネルギー生産ができることから長年にわたって利用されており（特にヨーロッパ）、日本においても各所で大型の実機が稼働している。

植物バイオマスは“有機性廃棄物”に他ならないこと、嫌気消化タンクの運転温度は30~60℃程度なのでCsの蒸発の恐れがないこと、多くの実機がすでに開発されているので基本的なデータがとればスケールアップは容易であること、バイオガスの生産が可能なことから、放射能汚染植物バイオマスの減容化/安定化処理に嫌気消化法を適用することにした。

3. 福島県西郷村での実証試験

研究プロジェクト「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」は広島大学、静岡大学、森林総合研究所及び広島国際学院大学の4研究グループのコンソーシアで遂行した。平成24、25年には非汚染の稲わら、スギ材を用いて要素プロセスを検討し、**図2**に示すような処理システムを構築した。植物バイオマスはまず湿式ミリングによって前処理する。湿式ミリングとは、セルラーゼなどの多糖分解酵素を添加した植物バイオマス懸濁液をビーズで粉砕して、植物バイ

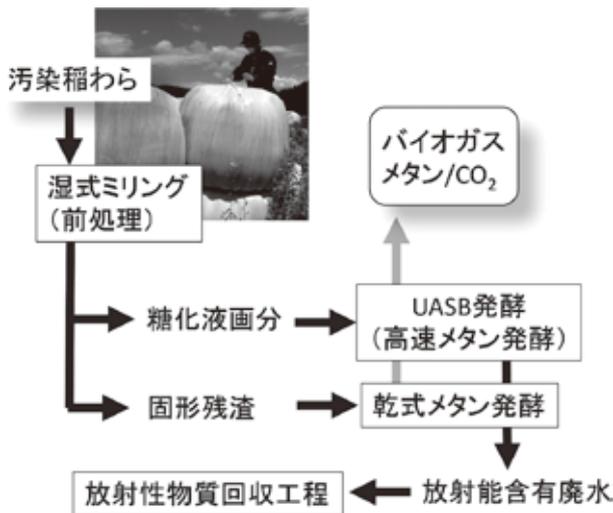


図2 放射能汚染植物バイオマス処理システム
UASB：上向流嫌気性汚泥床

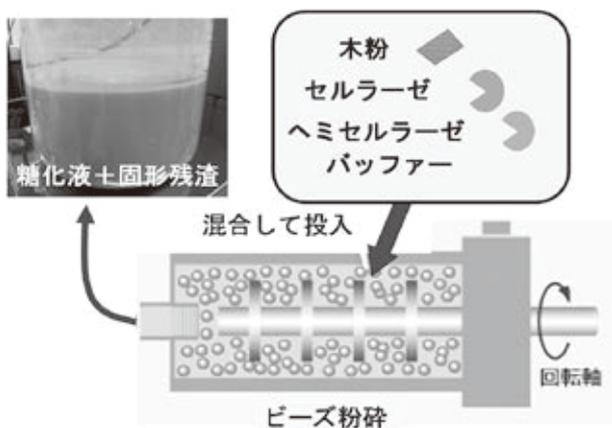


図3 湿式ミリング

オマスを物理的に破碎するとともに酵素的に加水分解/糖化する前処理である(図3)²⁾。この前処理により、嫌気消化で律速になりやすい図1の(1)のステップ(加水分解・可溶化)を大幅に加速することができる。湿式ミリングにより単糖を多量に含んだ糖化液画分と固形残渣が得られる。糖化液画分は高速にメタン発酵ができるUASB(上向流嫌気性汚泥床)法、固形残渣はタンク発酵槽を用いた乾式メタン発酵により嫌気消化しバイオガスを得る。嫌気消化プロセスで放射性物質を含んだ廃水が生じるが、光合成細菌というバクテリアを利用した放射性物質回収法³⁾により廃水から放射性Csを除去する。

平成26年に処理システムを構成する機材を福島県西郷村に持ち込み、西郷村役場の協力を得てベンチスケールの実証試験を行った。処理の対象は放射

能汚染した稲わら(図2の写真)である。実証試験の眼目は、1)放射性Csが嫌気消化プロセスに悪影響を及ぼすか、2)処理プロセスで放射能が気相、液相、固相のどこにどれだけ分布するか、である。平成24~25年の試験から非放射性のCsを添加しても嫌気消化の性能には影響がなかったことから、Cs自体は問題ではなく、放射能が影響するかが問題となる。2)の知見は、この処理システムをパイロット規模、実機規模にスケールアップするときに必須なものである。放射能汚染した稲わらの前処理試料を嫌気消化した時のバイオガス生産性は、UASB法でも乾式メタン発酵でも非放射性の試料を用いた時と同等であった。この結果から、稲わらの放射能汚染は嫌気消化には悪影響を及ぼさないことが分かった。2)は各ステップで生じる液画分、固形画分、気相画分(=バイオガス)の放射能をGe半導体検出器で定量することにより調べた。湿式ミリング前処理により稲わらの放射能の68%は固形残渣に、32%は糖化液画分に分布した。固形残渣を嫌気消化する乾式メタン発酵では固形残渣の放射能の90%が発酵残渣(固形分)に残留し、10%が発酵上清(液画分)に移行した。UASB法のリアクターは円筒状であり、その下半分に微生物群集の顆粒ビーズ(グラニュール)が充填されている。放射性物質が含まれる糖化液画分をUASBリアクターに連続供給すると処理開始24時間は微生物グラニュールに放射性物質が吸着するが、それ以降は吸着せずにすべてが嫌気消化排水として排出されることが分かった。重要な事に、嫌気消化で発生したバイオガスからは放射能は検出されなかった。

プロセス全体でまとめると、放射能汚染稲わらの減容化率：95%、減量化率：54%、メタン生成量：210L-メタン/tであった。さらに重要な知見として、生成したバイオガスからはまったく放射活性は検出されず、このバイオガスをバイオ燃料として使用できることが分かった。

4. 木質バイオマスの処理

植物バイオマスの賦存量で示されるように樹木(木質バイオマス)も重要な処分対象である。しかし、嫌気消化法は木質バイオマスを苦手とする。確かに、福島の森林の主要な樹種であるスギの心材の木粉を前処理せずに乾式メタン発酵で処理したとこ

る、バイオガスはほとんど生成されなかった。おそらく、細胞壁が強固で嫌気消化の微生物細胞が分解可能な有機成分にアクセスできないためか、木質バイオマスの主要成分であるリグニンが微生物活性を阻害しているかのいずれか、もしくはその双方が原因と考えられた。そこで、稲わらと同じように湿式ミリングによる前処理を行ったところ、乾式メタン発酵により処理後の固液分離しない試料（固形残渣+糖化液画分）および固形残渣いずれもから著量のバイオガスを生成することができた。このように、湿式ミリングは嫌気消化を加速するだけでなく、木質バイオマスの嫌気消化処理も可能にする優れた前処理法であることが分かった。

5. おわりに

ベンチトップ規模の試験とはいえ、本研究で開発したシステムは放射能汚染した稲わらの減容化とバイオ燃料生産に有効であることが示された。木質バイオマス（スギ材）は前処理なしではまったく嫌気消化できなかったが、湿式ミリングによる前処理で液画分（UASB法）、固形残渣画分（乾式メタン発酵）ともに嫌気消化ができ、バイオガスを生産することが分かった。今後、放射能汚染した木質バイオマスを用い、放射性Csの挙動を明らかにしなくてはならない。また、スケールアップした時の作業者の安全の確保をも視野にいれたパイロット規模の

実証試験を行い、実機規模の処理につなげていきたいと考えている。

最後に福島復興にバイオ技術が少しでも貢献できることを念じ、筆を置きたい。

【謝辞】

この研究プロジェクトの遂行にあたり、佐藤正博村長をはじめとする西郷村役場の皆様、兒玉徹東京大学名誉教授、室岡義勝大阪大学名誉教授に大変お世話になりました。特に、故・山縣民敏氏には西郷村を紹介していただく労を執っていただくとともに、常に激励をいただきました。この場を借りて、心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 李玉友, *JEFMA*, No.53, 4-18 (2005)
- 2) 大塚祐一郎, 他, 平成27年版 研究成果選集2015, 32-33, 森林総合研究所, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/2015/index.html>
- 3) K., Sasaki, et al., *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 1809-1814 (2012)

(*1 広島大学,

*2 静岡大学,

*3 森林総合研究所,

*4 広島国際学院大学,

*5 (株)アースソリューション)