

B-16 地球温暖化抑制のためのCH₄、N₂Oの対策技術開発と評価に関する研究
(9) 東北アジア地域におけるCH₄、N₂O抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発
②韓国におけるCH₄、N₂O抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発

研究代表者 国立環境研究所地域環境研究グループ
開発途上国環境改善(水質)研究チーム 稲森悠平

環境庁国立環境研究所

地域環境研究グループ 開発途上国環境改善(水質)研究チーム 稲森悠平・水落元之
姜 昌敏(EFフェロー)
張 盛皓(EFフェロー)
朴 紘建(EFフェロー)

平成7-9年度合計予算額 9,813千円
(平成9年度予算額 3,271千円)

[要旨] 韓国においては近年の著しい経済発展により生活水準の向上が成し遂げられている。また、それに伴う社会資本整備も急進している。特に下水道を含む生活排水処理施設の整備が積極的に推進されており、特に農山村地域に位置するダム湖等の水源域においては近年の急激な水環境の悪化に対応するために生活および畜産排水処理に関する法整備が進められている。したがってこれら地域では、今後、我が国と同様に分散型の小規模処理場の増加が予想されている。この場合、排水処理に伴って発生する汚泥について、これまでの規模の大きな処理手法ではなく、小規模処理手法の開発が急務である。また生活水準の向上とともに畜産の振興も著しく、これらに伴う高濃度有機性排水の処理もその大部分が小規模であり同様な開発が必要である。本研究は上記を鑑み、これまでよく知られているコンポスト化反応を基本原理とし、有機物の完全分解が可能な高温好気発酵法について汚泥、畜産系高濃度有機性排水処理への応用を検討した。その結果、これらの有機物は水分の含有量が多く、廃食油のような熱源の添加が必要であり、添加量によっては反応に必要な窒素が不足することから、C/W(水分)比およびC/N比の適正化が重要であった。また、発酵ガス中におけるCH₄、N₂Oの挙動についても検討したが、CH₄については発生が認められなかったが、N₂Oについては反応の初期に発生量が増加する傾向にあり、今後、C/N比等との関係を検討する必要性が認められた。

[キーワード] 汚泥、畜産排水、小規模処理、高温好気発酵、温室効果気体

1. 序

最近、韓国はめざましい経済発展による生活水準の向上を成し遂げている。しかし、一方で生活下水と産業・畜産廃水の量が増加し、その汚染防止のための下・廃水処理場が増えつつある。1994年12月には、全国57カ所の下水終末処理場で9,391,000m³・d⁻¹の生活下水を処理しており、1997年には、全国294カ所の処理場で20,724,000m³・d⁻¹の下水を処理する計画が立てられている。

従って、必然的に発生する汚泥の量が急激に増加しつつある。しかし、現在発生している汚泥の大部分は汚泥自身もつ潜在的なエネルギーを無視して処理されており、逆に廃棄物として埋立処理されることによって、地下水、地表水、土壤汚染および悪臭のような2次的な環境汚染や埋め立て地の不足等の問題を招いている。従って、下水汚泥の適切な処理は廃棄物の再利用及び減量化の面から緊急の研究課題と言える。

また、近年、水源域における水環境保全を目的とし、小規模生活排水処理施設および畜産排水処理施設に対する法整備が急ピッチで進められている。このような社会状況から韓国においても我が国と同様に、今後は農山村地域における環境保全が重要な位置づけになるものと予想されるが、生活排水処理に伴う汚泥と同様に農山村地域の主要な産業としての農業、畜産業等の活動により生ずる廃棄物である作物残渣、家畜糞尿等の高濃度液状有機廃棄物に関しては効果的な処理処分法は未だ確立されていない。本研究では上記の点を鑑み汚泥、畜産排液等の農山村集落から発生する廃棄物の高度処理処分法としての高温好気発酵法に着目し、養豚畜舎排液および小規模生活排水処理施設としての浄化槽からの汚泥の処理特性を把握し、韓国における農山村地域における有機廃棄物の処理処分資源化システムを確立する上での基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 研究方法

高温好気発酵法の原理は図1に示すとおりで、有機物を60℃前後の高い温度で好氣的に分解させるという原理はコンポスト化と同じである。すなわち、本法は従来のコンポスト化装置に排液の供給装置、ドレン回収装置などを付設した高度処理改善技術である。コンポスト化法と高温好気発酵法の相違点を表1に示す。コンポスト化は主に含水率の低い固形有機物を対象としているが高温好気発酵法は液状高濃度有機排液を処理対象とする。反応槽に充填されたおがくず等はコンポスト化の副資材としてではなく有機物分解を促進するための通気性の保持、水分調整、微生物の住み家としての担体の役割を有しており、槽内を混合、均一化し分解を促進させるために排液注入

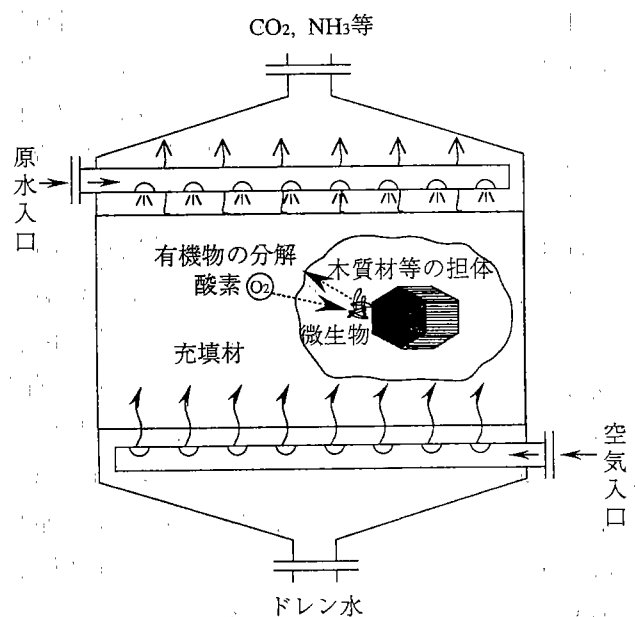


図1 高温好気発酵法の原理

時等に切り返し攪拌を行い、反応槽の底部から強制的に連続通気を行うようになっている。このような操作を繰り返すことにより担体に付着する高温好気微生物が有機物をCO₂まで効率的に分解させ分解過程で発生した熱により水分の蒸発が行われ、反応槽に連続的に排液を注入しても、処理水が排出されないシステムが達成できることになる。

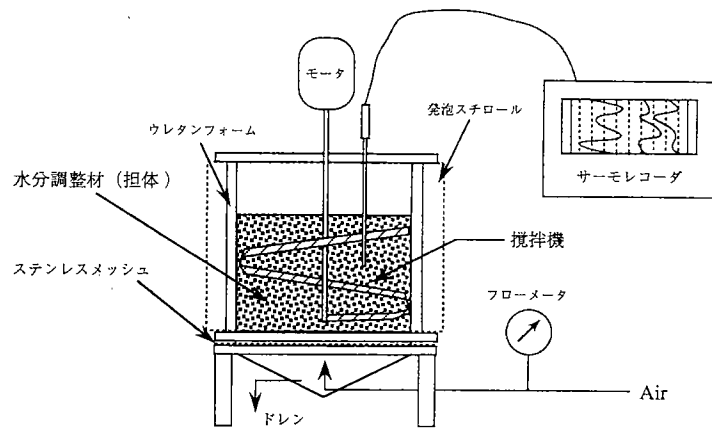
実験に用いた高温好気発酵のミニプラントは図2に示すとおりであり、内径200mm、高さ220mmの円筒形で有効容積は4L、槽内混合にら旋状の攪拌器が用いられ、実処理施設では必要

表1 コンポスト化法と高温好気発酵法との比較

項目	高温好気発酵法	コンポスト化法
処理対象物質	高濃度液状有機物	水分含量の低い固型有機物
副資材の占める重量割合 (%)	90	30
反応期間	短い (1日以上)	長い (1カ月以上)
適正温度 (°C)	70	70

ないと考えられるが、ここでは熱損失を防ぐために反応槽全体は 40mm 厚の発泡スチロールで保温がなされている。なお、汚泥の分解能については直接装置を天秤にのせ測定し、担体はサイズの異なる 2 種の廃木材チップ (粒径 1 ~ 1.5mm および 5 ~ 10mm 四方の厚さ約 0.2mm) を用い、供試排液は糞尿分離の困難な養豚畜舎から採取したものおよび小規模浄化槽汚泥を用いた。

また、装置は 30 °C 恒温室に設置し、運転開始時に反応槽に 3L の担体を充填し、そこに種菌として豚糞あるいは下水汚泥のコンポストを 100g 添加した後、含水率が 50 % になるように排液を混合し、供試排液を 1 日 1 回の頻度でそれぞれの系に注入するようにした。なお、槽内の担体と排液の混合物 (以後、混合物と称す) の攪拌は排液注入後 30 分間行うようにした。



反応容積：3L 内径：200mm φ 高さ：220mm
 材質：耐熱ポリ塩化ビニル 保温材：発泡スチロール
 ウレタンフォーム

図2 高温好気発酵反応装置

3. 結果および考察

3.1 養豚排液処理

有機物等の分解に関与する微生物は好熱菌であり一般に好熱菌は 55 °C 以上の高温で生育することが知られていることから、排液を効果的に処理するためには発熱が進行する条件を見いだすことが重要である。発熱の進行は通気量、有機物負荷量に大きく左右されることから、まずこれら温度上昇につながる最適な組み合わせの検討が必要となる。養豚排液処理における通気量、BOD 負荷と最高温度の関係を図 3 に示す。本法において有機物分解が活発に行われる条件は、発酵温度が 60 °C 付近に到達した BOD 負荷 $3.0\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ 、通気量 $100\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であることがわかった。試料注入時から発生した CO_2 ガス濃度より、1 サイクルの有機炭素収支を計算した結果、有機物の 80 % が CO_2 に分解されたが、この反応は、初期の 5 日間程度で停止し、反応槽内の温度の低下が顕著に見られ、反応槽底部にはドレン水の存在こそ認められなかったものの、混

混合物の含水率は初期の 50 % から徐々に増加する傾向を示した。このことから、養豚排液の分解および水分蒸発を促進するためには補助熱源が必要になるものと考えられた。

高温好気発酵法は、有機物の分解と同時に処理水の完全蒸発を目指しており、有機物の生分解で発生する熱により処理水を蒸発させることを目的としているので、廃液の熱量は高いほど有利であり、高度処理を行うためには放熱による熱損失を少なくし、有機物の分解熱量と水の蒸発熱量を等しくすることが重要となる。

醸造廃液処理では、有機物分解および水分蒸発を促進させる上で電気代などのコストはかかるものの 60 °C 程度の温風供給が効果的であることが知られているが、養豚排液のみを単独処理すると、熱量不足により混合物の含水率が上昇する。このことから、BOD が 200 万 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上である使用済廃食用油を養豚排液に混合し、熱量/水比率を高めて処理すれば熱風を使用することなしに高度処理のできる可能性がある。そこで、BOD 負荷 $3.0 \text{Kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ の養豚排液に、廃食用油を排液量の 10% 添加したものを 1 日 1 回注入し、 $100 \text{L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ で通気を行うようにした。ここでは熱源として有機物を添加しているため有機物分解と水分蒸発の程度は注入排液の重量と混合物の重量および含水率で評価した。廃食用油添加系の混合物の最高温度、重量、含水率の変化を図 4 に示す。

実験開始から 4 日間で混合物の最高温度は 70 °C 付近に達し、それ以後からは排液注入後、3 時間程度で最高温度は 60 ~ 70 °C を定常的に示し、分解終了時の含水率は 30 ~ 50 % 程度で安定し、ドレン水の流出は認められなかった。また、混合物の

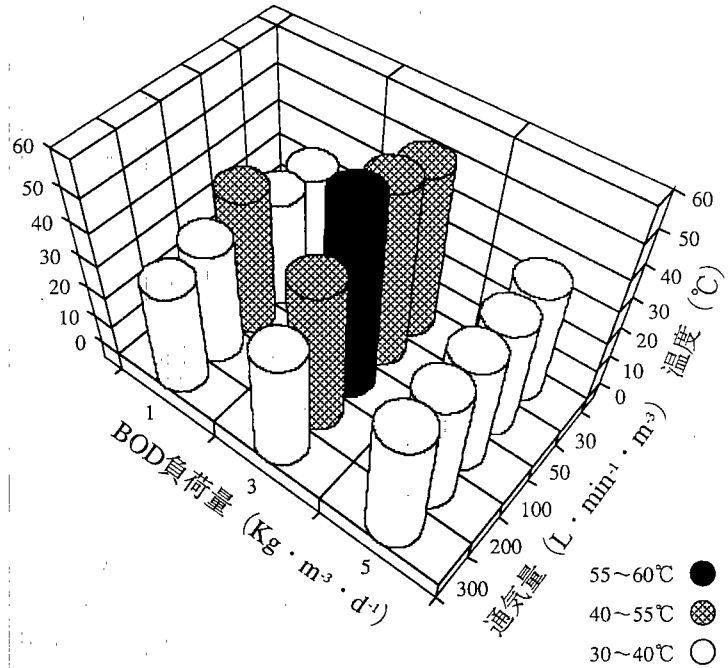


図3 補助熱源無添加時の通気量、BOD負荷と最高温度の関係

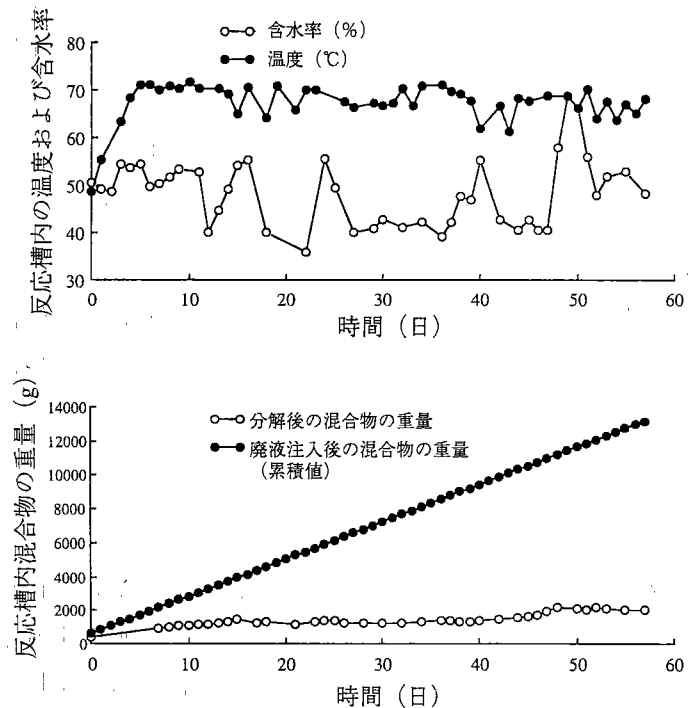


図4 廃食用油添加系における最高温度、重量、含水率の経日変化

重量も増加しなかった。このことから、4日目以後の定常状態において廃食用油を含む注入排液中の有機物はほとんど分解され、その際、生成された熱により水分が完全に蒸発し、且つ、余剰汚泥はほとんど生成されないことが明らかとなった。

高温好気発酵条件においては排液の処理は 60 °C以上で行われるため、有機物分解には好熱性微生物が貢献することになる。電子顕微鏡を用いた担体表面の観察によると、使用前の担体では比較的滑らかな表面に大小の孔が観察されたが、高温好気発酵処理が進行した担体では、これらの表面構造に無数の桿菌の集積・付着が確認された。この桿菌は全て好熱菌であると考えられた。処理時間の経過に伴う高熱菌の個体数の変化を図 5 に示す。槽内温度が 60 °C以上に上昇した熱源添加系では初期の乾燥担体重量 1g あたり 10^6 N から 5 日程度で 4×10^{10} N まで急増し、処理が定常的に行われはじめた 5 日目以後、初期の 1 万から 10 万倍の $10^{10} \sim 10^{11}$ N の安定した菌数を保たれることがわかった。一方、温度上昇が認められなかった熱源無添加系では好熱菌の初期個体数から 10 倍程度は増加したものの前者と比較するとかなり少なく乾燥担体重量 1g あたり 10^7 N 程度であった。しかし、ここに木チップを再添加し含水率を整え、廃食用油を混合すると、温度の上昇とともに菌数は急速に増加した。

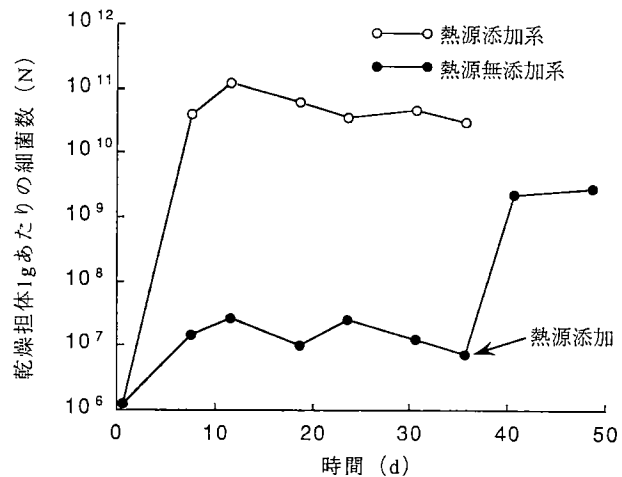


図5 高温好気発酵槽内の高熱細菌数の経日変化

このように、本法における効率的な有機物の分解と水分蒸発は熱量、含水率などの条件を適正にコントロールし好熱菌を乾燥担体重量 1g あたり $10^{10} \sim 10^{11}$ N に保持することによって安定して行えるものと考えられる。なお、無機塩類の蓄積を防止する上では、一定のサイクルで担体の引き抜きと補充は必要になるものと考えられる。

3. 2 浄化槽汚泥処理

養豚排液処理の実験結果から最適と考えられた負荷条件、補助熱源としての食用油の添加量、装置への空気吹き込み量を用いて浄化槽汚泥の処理特性を検討した。ただし浄化槽汚泥の場合は養豚排液に比べ窒素含量が少ないため、窒素を含まない食用油の添加量によってはシステム全体としての C/N 比の増加によって発酵が制限される可能性がある。通常のコンプオスト化プロセスでは有機物の分解が速やかに進行する領域は 10-30 であり、ここでは C/N 比の影響を検討するために尿素を適量添加することによって C/N 比を 12 および 24 に設定した。

浄化槽汚泥についても C/N 比 12 の系では養豚排液の場合とほぼ同様な処理特性が得られたが、C/N 比 24 では発酵の進行が遅く、発酵温度も C/N 比 12 の 70 °C に比べ 50 °C と低く、有機物の分解率も投入量に対して 50%程度にとまった。また、発生するアンモニア濃度も C/N 比 12 の場合は平均 300ppmv と高濃度を示し、発酵に対して十分な窒素が確保されていることが示された。反対に C/N 比 24 の場合は排気中にアンモニアが全く検出されず、システム全体として窒素が不足していることが示唆された。しかしこの結果は C/N の異なる廃棄物の適正な組み合わせ

による C/N 比調整により悪臭物質である排気中のアンモニアの削減が可能になることを示しており、今後、廃棄物の適正な組み合わせに関する検討が必要であると考えられる。

排ガス中の N₂O 濃度は処理の開始直後に 2ppmv とピークを示しその後 2-3 日で大気濃度の 0.3ppmv 程度まで減少した。この傾向は C/N 比には影響されなかった。また、N₂O 発生については下水汚泥を同様な手法で処理していた発酵槽容積 10m³ のパイロットスケールの実験装置でもスポット的に試料を採取し、検討したが排気中の濃度は大気濃度とほぼ同程度であった。

4. 総括および展望

4. 1 有機廃棄物の新たな高度処理処分技術の必要性

農山村地域から排出される有機廃棄物は農村集落排水処理施設から発生する汚泥および畜舎系の廃棄物、作物残渣等であるが、いずれも、農業利用できる形態を考慮して処理処分資源化することが重要である。これらの処理処分として従来よりコンポスト化が行われている。コンポスト化は廃棄物の処理処分と資源化を両立させる方法として有効な手段であるが、コンポスト化を持続していくためにはいくつかの制約がある。それは、①コンポスト化を行う設備、敷地等が確保され管理体制が十分とられていること、②悪臭、害虫等の駆除対策が十分であること、③コンポストを還元する圃場面積が十分であること、もしくは経営外の利用者への流通が確立されていること、④コンポスト化に必要となる分の糞がらやおがくず等の副資材を安定して確保できること、などがあげられる。また、コンポスト化を行う上でその対象となる廃棄物の性状も難易を左右特に今回検討した畜舎廃棄物および浄化槽汚泥は BOD および SS 濃度が極めて高いスラリー状である。このような排液をコンポスト化する場合は乾燥、脱水等により含水率を下げるか、もしくは含水率の低い廃棄物をコンポスト化するよりも多量の副資材が必要となり事実上困難である。

一方、これらの処理をたとえば活性汚泥法で行う場合、固液分離プロセスを付加し固形物 (SS、ごみ等) を取り除いたあと処理することになるが、処理にともなう大量の発生汚泥するので汚泥の処理処分が必要となり、従って、設備コスト、維持管理コストは高くなる可能性がある。また高濃度の有機性排水処理に適する方法として上向流嫌気スラッジ法 (UASB 法) があるが、養豚排液のような SS の高い排水に対しては適用できない。また、これらの方式はコストが高いことから、とくに小規模経営および小町村の畜産農家および地方自治体においては適用することは困難と考えられる。これらのことを考慮すると新たな経済的な処理法として今回検討した高温好気発酵法があげられ、本法は従来より SS 濃度の高い高濃度有機排液である食品加工排液、醸造排液、食堂残飯スラリー等の処理処分に活用されてきており、効率的な生分解が可能で汚泥等の発生量を極めて低く抑えることの可能な処理手法であることが実証されている。

4. 2 高温好気発酵法による有機廃棄物の処理処分資源化システムの構築

生活活動によって生じる廃棄物としては下水汚泥、浄化槽汚泥、生ゴミ、食品等の加工工程で排出される高濃度有機排液、糞ガラ、作物残渣、間伐材、廃材およびオガクズなどがあげられる。これらの廃棄物には年間を通してほぼ定常的に排出される下水汚泥、浄化槽汚泥、生ゴミ、畜舎廃棄物などもあれば、地域および時期によって排出量が著しく増減するものもある。例えば、農業からの作物残渣、糞ガラなどは作物の収穫時期に限られる。また、一部の食品加工業では、作物の収穫期および収穫量により有機廃棄物の排出量が左右されるものもある。この場合、廃棄物

はある時期に限り多量に排出される。

上述したように、これらの廃棄物をそれぞれの地域で単独で処理処分を行う場合、手間がかかり、個別の処理施設を設けるなどコストは極めて高くなる。このため、韓国においては特に焼却処分のシステムの確立の遅れから有機廃棄物の処分を埋め立てや海洋投棄に依存しているケースがほとんどである。したがって閉鎖性水域あるいは地下水の汚濁の未然防止を図る上では地域システムとしての有機廃棄物の処理処分資源化システムを可能な限り確立する必要がある。

図6は効率よい処理処分と資源化を考慮した各地域の有機廃棄物を一箇所に収集して処理することを目的とした我が国および韓国の国情に適した農山村地域における総合処理処分資源化システムへの提案である。すなわち下水汚泥、生ゴミ等は糞ガラ、廃木材等と組み合わせることにより効果的に分解可能となる。例えば、養豚排液の場合、廃食用油を混合し廃木材チップに浸透させ有機物負荷、通気量などを適正に調整することで処理水が出ない有機物の高効率な高度処理が可能となるのである。

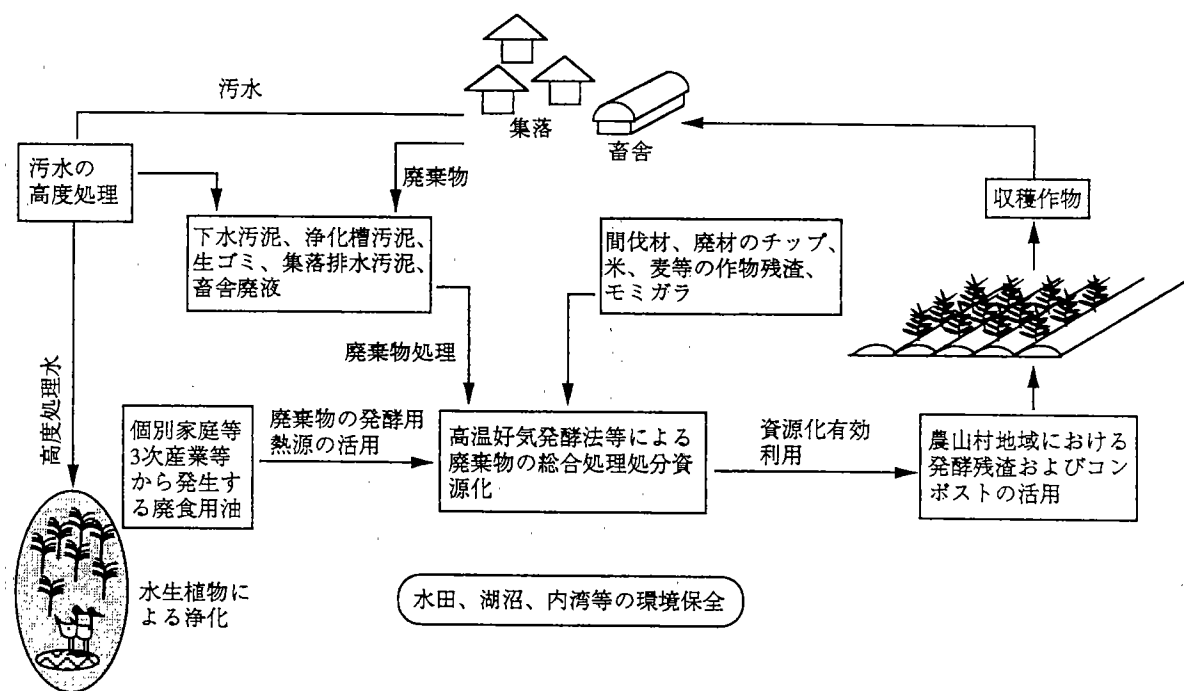


図6 韓国における環境負荷の少ない持続可能な発展を目指した農山村地域社会作りのための有機廃棄物の総合処理処分資源化リサイクルシステムの提言

高温好気発酵法は運転操作条件の設定によってはコンポスト化も完全分解も可能であることからコンポストの需要期にはコンポストの生産を行い、非需要期には廃棄物の高度な分解処理を可能とした総合的な処理処分資源化システムの開発につながるものと考えられる。また、高温好気発酵法は畜舎排液、浄化槽汚泥のみならず集積アオコ等の処理処分資源化への活用も期待できることから、このような観点にたって検討を行い、更なる知見の集積を図る必要がある。それと同時に、廃食用油を高温好気発酵法の熱源として活用する地域システムが確立できれば環境負荷の少ない持続可能な社会の構築にもつながるものと考えられることから、それらのシステム創りはこれからも極めて重要な位置づけになるものと考えられる。

韓国は我が国同様、歴史的に見て尿尿等の生産システムとしての農業活動への積極的な有効利

用が図られてきたが、化成肥料の流通に伴い、結果として生活排水に由来する N、P が生産システムに取り込まれずオーバーフローしている。これにより地域システム内の C、N 量が増加し、これらが CH₄、N₂O として放出される可能性がある。したがって今後はこれまで述べてきたように韓国のみならず我が国においても持続可能な地域システムの確立が急務であり、本研究がその一助となるものと考えられた。

6. 参考文献

- 1) 中野拓治：農業集落排水事業の現状と今後の展開方向 環境技術 Vol.23, No.1, 63-68 (1994)
- 2) 押田敏雄：養豚排水の公共下水道への直接放流に関する調査研究、畜産の研究、46 (9), 998-1002
- 3) 中央畜産会：家畜排せつ物の処理・利用の手引き、p.2 (1978)
- 4) Liu Bao Gang, Shuji Noda and Tadahiro Mori: Complete Decomposition of Organic Matter in High BOD Wastewater by Thermophilic Oxidic Process, Proc. of Environmental Engineering Research, Vol.29, (1992)
- 5) 森 忠洋、劉 宝鋼、趙 敬淑：高温・好気法による高濃度有機排水処理、化学工業、11, 52-58 (1993)
- 6) Kyeoung-Suk Cho, Bao Gang Liu, Yoshihiro Agari, Kazuko Sumiguchi, Masaki Takai and Tadahiro Mori: Function of Thermophilic Bacteria for the Complete Treatment of Organic Wastes in Thermophilic Oxidic Process, 1st International Specialized Conference on Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Process, IAWQ, 435-438 (1993)
- 7) 森 忠洋：有機物緑農地利用のための課題、用水と廃水、Vol.35, No.10, 875-880
- 8) 森 忠洋：下水汚泥緑農地利用の新たな展開のために、再生と利用、Vol.15, 9-15 (1992)
- 9) 藤田賢二：コンポスト化技術、技報堂出版 (1993)
- 10) 金 秀生、張 盛皓：韓国における廃棄物管理、環境技術、23, 681-687 (1994)
- 11) JICA 韓国水質改善システム開発プロジェクト編、訳：韓国の水環境 (1996)
- 12) JICA 韓国水質改善システム開発プロジェクト編、訳：韓国の生活排水・尿尿・畜産排水関連法 (1997)

[国際共同研究等の状況]

国際協力事業団「韓国水質改善技術開発プロジェクト」を韓国国立環境研究院をカウンターパートナーとして平成5年から5ヶ年の予定で実施している。

[研究発表の状況]

(1) 口頭発表

- ① 姜昌敏、水落元之、稲森悠平：第30回日本水環境学会年会 (1996)
「高温好気発酵法における有機汚濁物質の分解能と発生ガス特性」
- ② 張盛皓、水落元之、稲森悠平：第31回日本水環境学会年会 (1997)
「高温好気発酵法における有機廃棄物の処理と温室効果ガス発生特性」
- ③ 朴絃建、水落元之、稲森悠平：第32回日本水環境学会年会 (1998)
「高温好気発酵法における浄化槽汚泥の処理と温室効果ガス発生特性」

(2) 論文発表

- ①稲森悠平、岩見徳雄、兪 順珠、近山憲幸：用水と廃水，37,50-56(1995)
「農産地域における有機廃棄物の高温好気発酵法による資源循環高度処理」