

下水汚泥の処理・処分および利用に関する研究

下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会委員長 寺 島 重 雄

1. は し が き

下水処理場において発生する下水汚泥は従来から埋立などの陸地処分に付されていたが、近年はその適地の確保が困難になったばかりでなく、大都市における交通事情の悪化に伴ない下水汚泥の運搬にも支障を来たしている。さらに公共下水道の整備が促進されるにつれ、下水汚泥の発生量も次第に増加してくるので下水汚泥の処理・処分およびその利用についての問題は早急に解決されなければならない。

昭和43年に、建設省は「下水汚泥の農業利用に関する調査研究」を土木学会に委託した。土木学会は衛生工学委員会に「下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会」を設置して調査研究を開始した。

昭和44年には、東京都から「下水汚泥の海洋処分に関する調査研究」を、昭和45年には大阪府、札幌市および藤沢市から「脱水の前処理としての熱処理に関する調査研究」を委託されることになったので、小委員会に「農業利用」、「海洋処分」および「脱水等」に関する3分科会を設けて調査研究の分担とその促進を図ることになった。

昭和43年度より昭和47年度までの各年度の報告書は既に公刊されている。これらの報告書に基づいて各分科会がまとめた結論の主な部分をまとめたのがこの報告である。

2. 下水処理および下水汚泥の処分の現状

昭和45年度のわが国における323カ所の下水処理場の現状を規模別、処理方式別にまとめたものが表一1である。活性汚泥法とその変法によるものが71%である。また、総流入下水水量36億6700万 m^3 /年の約77%は高級処理あるいは中級処理となっている。

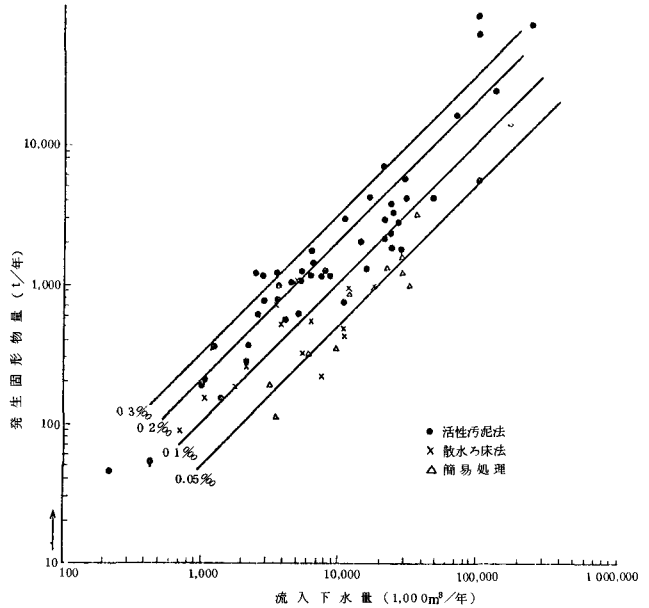
表一1 下水処理場の規模別・処理方式別分類

昭和45年度末現在

処理水量千 m^3 /日		～1	1～5	5～10	10～30	30～100	100～200	200以上	合 計	全体に占める割合 (%)
処理方式										
活性汚泥法	標準活性汚泥法	10	16	7	12	11	6	3	65	280
	ステップエアレーション法	2	7	4	10	16	4	5	48	207
	コンタクト・スタビリゼーション法	2	4	1	1				8	34
	長時間エアレーション法	8	2						10	43
	モディファイド・エアレーション法		1		1		1		3	13
	高速エアレーション沈殿池	2	9	4	7	6			28	121
	オキシデーション・デイツ	1	2						3	13
小 計		25	41	16	31	33	11	8	165	711
高 速 散 水 ろ 床 法		4	13	5	16	4			42	181
二 階 槽		1							1	04
沈 殿 池			1	5	6	7	3	2	24	103
合 計		30	55	26	53	44	14	10	232	100

下水流量に対する下水汚泥（固形物量）の発生割合は図－１のように活性汚泥法で0.1～0.3‰，散水ろ床で0.05～0.2‰，沈殿放流の簡易処理で0.05‰となっている。

下水汚泥の処理・処分の実態は表－２のとおりであり，カ所数では嫌気性消化－乾燥床 25，嫌気性消化－機械脱水 53，でこの両方で全体の58％を占めている。処分方法では埋立が97カ所で全体の60％となっている。



図－１ 流入下水流量と発生固形物量

表－２ 汚泥処理処分の実態

(昭和45年末現在)

処理法分類 ⁵⁾		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	計
処理法 ¹⁾	嫌気性消化					○	○	○	○	○	○	○	
	好気性消化												
	機械脱水			○	○			○			○	○	
	乾燥床焼却		○		○		○			○		○	
処理場数 ²⁾	設計規模(㎡/日)												
	0～100	4	5	2		8	4	3	2	15	12		55
	100～300	4	1	1				2	3	2	18	1	32
	300～1,000			2	2				1	7	13	2	27
	1,000～		1	4						1	10	5	21
計		6	7	9	2	8	4	5	6	25	53	8	135 ²⁾
処分法	海洋還元	1				1				1	3		9
	埋立	3	7	8	2	1	4	5	1	18	41	7	97
	肥料，土壌改良材			2						7	19	2	30
	その他 ⁴⁾	4	1			6			2	4	5		22
計		8	8	10	2	8	4	5	3	30	68	9	158 ³⁾

注1) 処理法欄の○印は該当施設が存在することを示す。

2) 嫌気性消化のあと一部を脱水，一部を乾燥床に送って処理する場合その都市の実情に応じ，主要な施設を決定してI，Jどちらかに分類した。

3) 処分法の計がカ所数の計を上まわる理由は，同一処理場で二つ以上の処分法をとっているものがあるからである。

4) その他には，処理場内の一隅に穴を掘って埋める。他の処理場へ輸送して処分する等を含む。

5) A～Kの付号はつぎの処理方式を表わす。

A (生汚泥) — (無処理) — (処分)
 B (") — (") — (乾燥床) — (")
 C (") — (") — (脱水機) — (")
 D (") — (") — (脱水機) — (焼却) — (")
 E (") — (好気性消化) — (")
 F (") — (") — (乾燥床) — (")
 G (") — (") — (脱水機) — (")
 H (") — (嫌気性消化) — (")
 I (") — (") — (乾燥床) — (")
 J (") — (") — (脱水機) — (")
 K (") — (") — (脱水機) — (焼却) — (")

3. 下水汚泥の農業利用

3.1 試験件数と供試作物

昭和44年度～昭和46年度までに実施した試験は表－3に示すように合計82件であり、下水汚泥の施用量の検討を主目的とするものは64件（78％）、下水汚泥施用の残効を検討するもの2件、連用の累積効果を検討するもの4件、単純に下水汚泥の施用効果を検討するもの3件、各種汚泥の効果比較試験が3件、その他4件となっている。

表－3 目的別、作物別試験件数一覧表

試験の目的とする内容	供試作物の種類																								
	水稲	小麦	かん えん し	青 刈 えん し	ば れ い し	大豆 (枝豆)	大 ん い	か ん い	は く らん	ほ れ さん	真 ま ね	た ろ 菜	正 タ 菜	大 月 根	に ん じ	ご ん ほ	さ と い	き ゆ う	な ろ	メ ロ	ブ リ ン ス メ ロ ン	ス イ ー ト コ ン	み かん (幼木)	ポ ット マ ム	合 計
(1) 汚泥の施用量を検討することを主体とする試験	18 (9)	1	2			1	1	1	1	0	4		1	1	1	3	4	1		1	2	1		1	64 (70)
(1) - a 単純に当作に対する施用量試験	11								9	8	3		1	1		1	4			1	1	1		1	42
(1) - b 前作(あるいは前年)に施用したものの 残効としての施用量試験	1							1	1					1	1				1						6 (8)
(1) - c 前作(あるいは前年)につづいて連用し た場合の施用量試験	1 (2)	1	1	1		1	1	1	1	1	1				1										9 (12)
(1) - d 多因子解析の中の1要因としての施 用量試験	4		1																						5 (6)
(2) 汚泥施用の残効を検討する試験	1																	1							2
(3) 汚泥の連用による累積の効果の検討を主体と する試験	1	1 (1)						1 (2)	1 (1)							1 (1)			1				1 (1)		4 (9)
(4) 汚泥施用効果(単純に)を検討する試験						1														1		1	1		4
(5) 汚泥の施用法の検討を主体とする試験								2							1										3
(6) 各種汚泥の効果比較試験	2									1 (1)															3 (4)
(7) そ の 他								1	1						1										1 4
合 計	21 (22)	2	2 (3)		2 (2)	1	12 (14)	13 (14)	6 (1)		1	1	1	3 (5)	6 (7)	1	1	1	2	1	1		2 (1)	1	182 (204)

注）（ ）内は、ほかの作物と一緒に同じ試験で供試されたものを含んだ数である。

供試作物については、水稻に関するもの21件、白菜に関するもの13件、かんらんに関するもの12件、ほうれん草とにんじんにに関するものがそれぞれ6件およびその他である。

圃場は、札幌市、仙台市、川越市、川崎市、長野市、富山市、福井市、豊橋市、岐阜市、鹿児島市の10都市におけるもので試験された。

3.2 供試汚泥の性状

供試汚泥の大部分は嫌気性消化処理をうけているが、品質形状はいちじるしく異なり、同一下水処理場からの汚泥でも時期によってばらつきがある。作物の生育収量に最も大きな影響をもつと思われる窒素成分はもちろんリン酸、石灰、鉄などの含量についても変動が大きい。

しかしながら、下水汚泥が窒素およびリン酸に比較的富んだ有機物資材であって、分解特性は堆肥

に近いやや速やかであり、窒素成分の無機化放出が初期からスムーズに行なわれるということが共通点といえよう。

3.3 汚泥の施用効果

3.3.1 作物の生育に対する効果

下水汚泥の施用はおおむねすべての作物の生育を良好にした。しかし、施用量が多過ぎる場合は生育が抑制される。この原因は塩類濃度障害と土壌 pH の極端な下降あるいは上昇が主であると考えられるが、過干、あるいは過湿によると思われる事例もあった。

下水汚泥の成分組成がまちまちであるから、濃度障害によると思われる生育阻害を引きおこす限界も下水汚泥ごとに異なる。たとえば、凝集剤としての石灰添加の有無によって土壌 pH におよぼす影響が異なるのである。

生育を良好にする要因は数多くあるが、汚泥の窒素成分による効果が大きいので、窒素要求量の多い作物ほど効果が出やすい。

3.3.2 作物の収量に対する効果

下水汚泥の施用によって収量に対する効果のある作物は葉菜類である。果菜類も効果が出やすいが、これは汚泥からの窒素養分が長期にわたって発現するというのに栄養生理要求が適合しているからで、なす、きゅうりに対して大きな効果がみられた。子実生産を目的とする稲、麦に対しては窒素過剰になりやすく、収量についての効果はあがりにくい。これは施用適量が非常に低いということで、適量の範囲内では効果があがりやすいともいえよう。子実を目的としない青刈えん麦については収量に対する効果が出やすい。根菜類は窒素要求量がそれほど大でなく、窒素に対するレスポンスも低いものが多いので収量に対する効果が比較的あらわれにくい。また、いも類の中で、かんしょはとくにそうであり、汚泥施用によって地上部が繁茂し過ぎると、いもの収量は低下する。さといもにもそうした傾向がみられた。

3.3.3 作物の品質に対する効果

水稻については、施用量が多過ぎると稔実が不良となって屑米が増加し、品質が低下したが、施用量が適量であると、もみの熟色が良好となった事例もあった。

小麦については水稻と同様、施用量が多過ぎると品質は低下するが、施用量が適切であれば問題はない。

葉菜類については品質の調査をしなかったが、生育が良好で収量が高いということは個体が充実していて、しかも揃っていることになるので品質はすぐれているはずである。また、かんらの甘味が増加したとか、白菜の硼素欠乏症状による品質低下の軽減した事例が報告されている。

根菜類については、にんじんが施用量が多過ぎて色が黒すみ、分岐根、裂根が増える事例があったが、適量施用の場合は、同じ場所でも味もよくなっているし、別の都市では堆肥施用区に比べて岐根、裂根が少なく品質が向上したと報告があった。また、他方では汚泥施用により収量は増大したが着色が悪く、品質はやや劣化したという報告もあって評価はまちまちであった。

大根を含めて根菜類については、有機物資材の施用は一般に主根の伸長が物理的に阻害されることで岐根、曲根を増やすといわれ、汚泥の場合も、ごろごろした塊状だとうことが考えられるが、粉状で土とよく混和されていれば問題はないであろう。施用法を変えて、畦間溝施用とすると主根がぶつ

からず、にんじんの岐根、曲根が少なかった事例は裏付けとなるであろう。

果菜類については、とくに品質が重要視されるメロンについては汚泥の施用により果実が大きく、形状やネットの発現も良好であり、果肉の状態や糖度もすぐれたという事例がある。また、なすの果肉がやわらかくなり、肌つやも良好で品質も向上したとの報告もある。果菜類については全般的に収量、品質ともに効果が大きい。

3.3.4 土壌条件に対する影響

下水汚泥の施用によって明らかに土壌の耐水性団粒が増大し、それに伴って三相分布における固相率の低下、孔隙量の増大が認められた。汚泥の施用量が多いと1mmあるいは2.5mm以上の大粒径の団粒が増大し、施用量が少ないと1mm以下の粒径区分の増大が目立った。下水汚泥を毎作100kg/a程度、数作連用することによって、農具を使うのにかなり困難な粘質の土壌が非常に楽に作業ができるようになったという事例が報告されている。いずれにせよ、汚泥施用が土壌の物理性に対して好影響を与えることは間違いない。

下水汚泥の施用が土壌のpHを変えるが、汚泥の性状によってまちまちの結果を示し、一定の傾向を示さない。水田の場合は、汚泥の施用量があまり多くないし、また、湛水条件がpHの変動に対してかなり緩衝的に働らくことが考えられるのでpHの変動は小さい。畑の場合、pHを上昇させたものは、汚泥の脱水工程で消石灰を加えた汚泥を施用したときである。一般に、下水汚泥の施用は、窒素の無機化に伴う硝酸の生成や硫化物の酸化による硫酸の生成により、本質的には土壌のpHを低下せしめる方向に働らくものと考えられる。

汚泥の施用により、土壌の全炭素含量および全窒素含量はほぼ例外なく上昇を示した。C/N比についてははっきりした傾向を示さなかった。また、無機態窒素含量、電気伝導度、可給態リン酸含量、塩基置換容量などは増加し、置換性塩基については苦土含量はおおむね増大したが、石灰含量および加里含量はやや減少したところと増大したところがあって一定でなかった。

以上の結果から、下水汚泥の施用によって土壌の化学性がおおむね良好となることを示し、とくに養分的には著しい富化が認められ、これが生育と収量に対する効果のあらわれる主要因と考えられるが、成分間のバランスのうえから加里および石灰（石灰の添加されていない汚泥の場合）の施用に留意しなければならない。

3.3.5 施用効果の持続性

残効の大きさは施用当初の効果より当然小さいが、水稻、かんらん、白菜、大根、ごぼう、きゅうりなどの作物ではその効果が確認された。また、施用量の多いほど残効が大きい傾向が認められた。

残効の持続性も各種条件によって一定でないが、250kg/aおよび500kg/a施用の3年目残効として、白菜で6%および12%の収量増がみられた。また、800kg/aの施用だと4年8作目でもなお10%の増収がみられたが、100kg/a程度の施用だと3年6作目ではほとんど効果が消失したという事例があった。

3.4 汚泥の施用量

水稻については、標準的な施肥を行なう場合の下水汚泥の施用適量は乾物で40～50kg/aが安全である。ただし、2年連用の場合は20～30kg/aが限界である。窒素肥料の施用量を減らせば汚泥の施用量を増やすことができるが、60kg/aどまりである。さらに無肥料とする場合には、120～150kg/aまで施用し得るが、還元障害がおきやすいので化学肥料と併用して施用量を少なくする方がよい。

また、寒冷地より温暖地の方が、砂質土よりも粘質土の方が施用量を多くすることができるし、品質的には窒素に対して敏感なものよりも耐肥性の高いものの方が施用量を多くすることができる。また、作期については、晩植えより早植えの方が施用量を増加させ得る。

畑作物については、下水汚泥の施用限界量は全般に高いが、窒素成分に対する感応と要求量によって大きくつぎの3種類に区分できる。

- ① 窒素要求量が小の作物（窒素施肥量1 kg/a以下）：かんしょ、豆類など
- ② 窒素要求量の中の作物（窒素施肥量1～2 kg/a）：麦類、多くの根菜類、ばれいしょなど
- ③ 窒素要求量が大の作物（窒素施肥量2～3 kg/a あるいはそれ以上のもの：多くの葉菜類、多くの飼料作物など

①の種類については単作施用で約100 kg/a、連用の場合は50 kg/a程度が適当と推定される。

②の種類については単作施用で150 kg/a、連用で80 kg/aが適当と考えられる。

③の種類については単作施用で250 kg/a、連用で100 kg/a程度である。

果樹については単年施用で400 kg/a、長年連用で100 kg/a程度が基準となろう。

3.5 汚泥の種類と施用効果

各種汚泥の施用効果を検討した試験が、副目的としたものを含めて6件あるが、少ない事例であるがまとめるとつぎのことがいえる。

作物に対する施用効果は、微生物処理による汚泥の方が、化学処理による汚泥よりも高い。また、消化汚泥の方が、生汚泥よりも効果が高く、し尿消化汚泥が下水消化汚泥よりも効果が高い。

3.6 汚泥の施用上留意すべき事項

3.6.1 施用法

今回の調査では施用効果の検討を主目的としたので、ほとんどが圃場の全面に下水汚泥を散布して作土とよく混和する施用法をとった。したがって、汚泥の土壌改良効果が発揮され、また、局所的に障害となる条件をつくることなくるので基本的な施用法と考えられる。そのため、汚泥の形状も土壌とよく混和しやすいものにすることが要求される。

施用法としては、根菜類などに対しては、主根の伸長する区域をさけ、吸収根だけが接触するように畦間に条肥する方が収量と品質に対して有効であるという事例もあった。

3.6.2 窒素肥料の調節

下水汚泥を有機物質材として化学肥料とは別個に施用するものであっても、土壌の地力を高め窒素を中心とした各種養分が富化することは間違いがない。したがって、窒素に敏感な作物には基肥や追肥の施用量を加減しなければならない。とくに後期にあまり窒素を必要としない作物について考慮する必要がある。

3.6.3 土壌pHの矯正と塩基の補給

下水汚泥の施用は本質的には土壌のpHを低下させる働きがある。それは同時に塩基の溶脱をひきおこすことになろう。したがって、汚泥施用跡地のpHには常に留意して、低下の場合には石灰質資材の施用が必要である。

3.6.4 養分のバランス

汚泥の成分組成のうちで不足するのは加里であり、石灰の添加されていない汚泥では石灰および苦土が不足するので、これらの成分を補給する必要がある。

また、リン酸吸収係数の高い土壌、未耕地、心土とかを対象とする場合には、汚泥のリン酸だけでは不足するので、リン酸質資材の補給が必要となる。

3.7 汚泥の農業利用に対する促進策

水田、畑、または作物によって下水汚泥の施用量に差はあるが、いずれにしても下水汚泥の施用効果はあるので、可能な限り下水汚泥の農業利用を促進すべきである。

農業利用の可能性を大きくする条件として、下水処理場側と農家側との両方にある。

まず、処理場側の条件としては、(1)立地的に耕地帯に近いこと。(2)汚泥中に工場排水による有害物の混入が少ないこと。(3)汚泥の種類として作物に対する施用効果の高いものであること。(4)汚泥の形状は細かく、悪臭の少ないこと。

つぎに農家側の条件としては、(1)農耕地が広いこと。(2)水田よりも畑の多いこと。(3)地力が低く、有機物施用効果の高い土壌地域であること。(4)栽培作物は、汚泥の施用適量が高く、効果も出やすいこと。(5)農家の生産性向上に意欲のあること。

以上から、汚泥輸送の容易さから、大都市よりも中小都市が農業利用の可能性が大である。地域的にいえば、農耕地が広く畑地率の高い北海道、東北、九州および野菜生産の多い関東、東海などが前記の条件に適合するものと思われる。

3.8 重金属の影響

3.8.1 目的および試験条件

下水汚泥にはかなりの重金属を含有していることは表-4の分析結果からも明らかである。今までの調査研究から、下水汚泥の適正な施用はかなり顕著に土壌の生産力を高め、作物の生育・収量を増大せしめるものであることが結論付けられている。したがって、重金属が作物の生育・収量に与える影響は総合的に評価すれば問題は少ないといえる。

表-4 汚泥中の重金属含有率(乾物当り ppm)

項目 都市名	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Fe	Mn
千葉	16	235	1,520	—	47	29,000	500
長野	227	568	7,948	121	173	2,760	—
豊橋	42	1,086	2,421	924	94	42,000	205
福井	48	308	2,480	160	52	25,200	
鹿児島	76	262	2,200	96	72	553	

重金属の中でも銅、亜鉛、鉄およびマンガンは作物の栄養生理上必要な成分であるので、これらの功罪は土壌中におけるこれら成分の過不足、作物の種類によるこれら成分の要求度の大小によって左右されるので、下水汚泥施用による土壌への持込みを直ちに有害であると断定することはできない。これら成分については適正な施用量の範囲内であれば有害な作用はなく、むしろ有益な作用の期待される方が大きい。したがって、作物の生育・収量におよぼす影響についての問題は、下水汚泥を毎作あるいは毎

年連用した場合に土壤中に重金属が蓄積し、いつかは作物に対して障害を与える限度量をこえるのではないかという点についてである。この点については、下水汚泥施用に伴う重金属が可給態の形にどの程度変わり、また、一作栽培後どの程度土壤中に残存するかを明らかにして土壌蓄積の限界量を推定しなければならない。

つぎに、作物によって吸収された重金属が、それを摂取する人間や家畜にとって有害となるような高い含有量に達する危険性がないかという点である。この点については、作物中の含有濃度がどれだけ以上ではいけないという基準が現在のところ米のカドミウム含有量以外には設けられていないので判定に困ることになる。しかし、一応、作物中の含有率を求め、吸収量および吸収率を算出し、下水汚泥施用により重金属がどの程度作物に吸収され、どの程度含有率を高めるか、また、いろいろな条件が含有率に対してどのように影響するかなどを明らかにする必要がある。

3.8.2 作物の生育および収量

千葉、長野、豊橋、福井、鹿児島県の5都市における生育・収量に関する成績からは、汚泥に含有されている重金属がこれら供試作物の生育・収量に対して何らかの影響をおよぼしたとみられる形跡は認められなかった。

3.8.3 作物による重金属の吸収

作物の重金属含有率は表-5に示すとおりである。

表-5 作物の重金属含有率（乾物当り ppm）

都市名	作物 および部位	項目	C d	C u	Z n
千 葉	コ カ ブ	地上部	0.43 ～ 0.64	3.8 ～ 65	33 ～ 77
		地下部	0.21 ～ 0.50	2.0 ～ 48	36 ～ 69
長 野	水 稻	わ ら	0.12 ～ 0.31	5.2 ～ 13.2	31.3 ～ 55.9
		精 粍	0.02 ～ 0.05	3.9 ～ 47	17.4 ～ 21.9
		玄 米	0.02 ～ 0.03	3.9 ～ 50	21.8 ～ 24.6
豊 橋	カンラン	外 葉	0.133～0.352	3.067～ 43.23	88.60～156.78
		結 球	0.236～0.385	3.356～ 47.66	72.86～119.10
		根 株	0.211～0.443	4.278～ 60.75	63.26～114.52
福 井	ホウレンソウ	地上部	1.87 ～ 2.50	11.9 ～ 25.0	49.0 ～ 65.0
鹿 児 島	ニンジン	地上部	0.32 ～ 0.71	9.16 ～ 15.1	35.6 ～ 100.8
		地下部	0.29 ～ 0.51	7.92 ～ 17.2	22.4 ～ 41.8

- (1) 部位別の含有率：カドミウム、銅および亜鉛の3元素とも同様の傾向を示すが、コカブとニンジンは地上部の方が地下部よりおおむね高い含有量であり、カンランでは、カドミウムおよび銅は外葉部より結球部、さらに根株部と内部に向うほど高い含有率を示したが、亜鉛は逆に内部に向うほど低い含有率であった。
- (2) 含有率におよぼす各要因の影響：3元素の重金属の含有率におよぼす汚泥施用量、土壌のpHおよび窒素施用量の効果を調べた結果、カドミウムに対するこれらの要因の影響は意外と少なかった。
- (3) 吸収量と吸収率：作物による重金属3元素の吸収量（mg/m²）は、作物によって単位面積当りの乾物生産量が大きく異なるので最大値と最小値の幅が大きくなった。しかし、吸収量は3元素ごとに大体

同じところに収まるようで、カドミウムではコンマ以下1～2桁の範囲、銅では数mg、亜鉛では数十mgであった。

これら吸収量が施用した汚泥中の含有量とか土壌中の含有量に対してどの程度の割合のものであるかをみるために吸収率を算出した。

当初の含有量（土壌中および施用汚泥中の含有量）に対する全吸収量の百分比を吸収率としたものが一番信頼性が高かったが、これらの値はいずれもコンマ以下1桁あるいは2桁と極めて低く、作物に吸収され持出される量は僅かであるといえよう。

3.8.4 土壌の重金属含有量

試験開始前および跡地の土壌中の重金属含有量は表－6に示すとおりである。カドミウムについては試験前はコンマ以下数ppmであり、跡地については僅か増加しているが大差ない含有量である。銅につ

表－6 土壌の重金属含有量（風乾土当りppm）

項目 都市名	Cd		Cu		Zn	
	試験前	跡地	試験前	跡地	試験前	跡地
千葉	0.4	0.4	98.0	87.5～93.1	100.0	90.4～141.8
長野	0.31	0.32～0.36	22.0	23.4～28.1	74.0	74.7～95.9
豊橋	0.19	0.20～0.25	3.7	4.7～13.6	49.0	56.5～77.0
福井	0.22	0.22～0.23	28.0	27.6～33.2	126.0	116.0～145.0
鹿児島	—	6.0～14.3	15.4	16.2～26.7	99.5	43.4～77.8

いては、試験前は数ppmから数十ppmとややばらつきが大きく、跡地ではおおむね汚泥施用に伴う増加が認められる。亜鉛については、含有量が一番多く、試験前で数十ppmから百ppmをこすものがあり、跡地では汚泥施用に伴う増加が明らかに認められた。

3.8.5 汚泥施用による重金属の土壌への持込み

汚泥の重金属含有量（乾物当りppm）に施用量を乗じてアール当りの重金属持込量を求め、これを土壌量に対するppmに換算した値と、これら持込量がもともと土壌に含有されている量に対してどの程度の割合を占めるものであるかをみるために試験開始前の土壌中含有量に対する百分率を求めたのが表－7である。

表－7 汚泥施用に伴う持込量の原土中含量に対する%

項目 都市名	施用量	Cd			Cu			Zn		
		100kg	200kg	300kg	100kg	200kg	300kg	100kg	200kg	300kg
千葉		33	65	98	20	40	60	127	253	380
長野		1839	3677	5484	645	1291	1936	2685	5370	8055
豊橋		1567	3139	4706	204.1	408.3	612.4	3467	6933	10400
福井		1455	2909	4364	732	1464	2200	1312	2625	3937
鹿児島		—	—	—	1289	2578	3867	1669	3339	5008

汚泥100kg施用による重金属の持込量は、カドミウムで土壌当りppmにしてコンマ2桁目の値であり、銅で数ppm、亜鉛で十数ppmであった。これら持込量の原土含有量に対する百分率は、カドミウムと銅で数%から十数%程度であり、亜鉛はやや大きく十数%から30%の範囲であった。

3.8.6 肥料その他による重金属の土壌への持込み

化学肥料や石灰質資材にはかなりの含有量がみられるが、施用量が少ないので、土壌の含有量を高めることにはほとんど関与しない。カドミウムについては土壌への含有量を数%高める計算となるので多少考慮を要する。

肥料その他資材施用と汚泥施用との影響の程度をみるために前者と後者の比率を求めたところ、カドミウムについては千葉、長野において 100 kg/a の下水汚泥の施用では肥料などの影響の方が大きい計算となった。しかし、銅と亜鉛についてはいずれも汚泥施用による持込量がはるかに大きいことを示している。

4. 下水汚泥の海洋処分

4.1 汚泥の成分、性状等

実験に供した汚泥は、生汚泥、活性汚泥、消化汚泥などを目的に応じて使用した。

- (1) 生汚泥の成分については、総脂質にかなり多量の高沸点炭化水素物質（重油、廃油などと推定される）が含まれていること、アミノ酸は自然水中に存在する量の 350 倍以上である。
- (2) 乾物量約 5 %，強熱減量 56 % である生汚泥を海水に入れ，2 % 濃度で，67 時間の溶出で， $\text{NH}_4\text{-N}$ が 4 ppm， $\text{P O}_4\text{-P}$ が 0.8 ppm となった。
- (3) 生汚泥の沈降速度は 5 ～ 20 m/時であり，24 時間後も約 10 % は沈降しなかった。

4.2 プランクトンに対する影響

- (1) 植物プランクトンについて：Skeletonema は 1 % 以上で，緑色藻類は 0.05 % 以上の濃度でよく繁殖するが，希薄ではそのような効果がなかった。
- (2) 動物プランクトンについて：Oithona に対し，48 時間 TLm が 1 % の濃度という結果となった。
- (3) 有害物の存在は否定できないが，拡散を含めて考えると影響は少ないといえる。
- (4) 汚泥を餌としていることが Lopepoda でみられ，ブラインシュリンプでは 5 % 濃度が極めてすぐれた成長を示した。

4.3 有用生物に対する下水汚泥の影響

4.3.1 魚類に対する影響

- (1) 卵の発生については，クロダイ，マダイとも送気の場合は 1 % 以上，無送気の場合は 0.1 % で影響があらわれた。
- (2) 卵ふ化直後の幼生については，クロダイ，マダイとも，送気の場合は 1 % 以上で，無送気の場合は 0.01 % で影響がある。
- (3) 稚魚については，送気の場合，クロダイ，ニジマス，シラスウナギ（日本産とフランス産）は 1 % 以上，サケは 0.1 % 以上で，無送気の場合はクロダイ，サケは 0.01 % 以上，ニジマス，シラスウナギは 0.001 % で影響がある。
- (4) 成魚については，メジナは 2 % 以上で死亡し，ヒメダカは消化汚泥のときは 0.1 % 以上，生汚泥のときは 0.03 % 以上で嫌忌行動を示す。
- (5) 送気と無送気とで差異があるのは，送気によって除かれる有害物があることを示す。魚類にもよる

が影響の生じない最低の濃度は 0.001 % であり、嫌忌濃度は 0.03 % と考えてよいであろう。

- (6) 実験において死亡したシラスウナギとサケの稚魚について組織学的な検討の結果、鰓、腎臓、胃、腸がとくに影響をうけ、組織の崩壊などがみられた。

4.3.2 貝類その他に対する影響

- (1) 卵の発生については、カキは 0.025 % 以上、チョーセンハマグリ、アカガイ、アワビ、パフンウニは 0.01 % で影響があらわれる。
- (2) 幼生については、アワビとクルマエビは 0.01 % 以上、ムラサキウニは 0.02 % 以上、カキとチョーセンハマグリは 0.025 % 以上、アサリとアカガイは 0.1 % 以上で影響があらわれる。
- (3) 稚魚については、アサリが 1 % 以上で影響があらわれ、3 % で着臭がある。

4.4 有害物の生物体内への蓄積

ハマチを 3 カ月、シラスウナギを 4 カ月飼育して重金属の蓄積を調べたが、汚泥に含まれている水銀が少なかったためか、水銀については蓄積はなかった。鉛については、ハマチにいくらか増加したが、極めて微量で問題にされる量ではなかった。

4.5 生物に対する飼料効果

生汚泥は、ボラに対してはほとんど飼料効果はないが、メジナに対しては練り餌に生汚泥を 2～5 % まぜると餌として役立っている。ハマチに対しては生汚泥を混合した練り餌は効率を低下させる。しかし、活性汚泥は 2.5 % 以下を練り餌に混合すればハマチの餌として役立つ。

池に生汚泥を入れ、アサリ、クルマエビ、ナマコを入れると、それによって成長することが認められた。

4.6 汚泥の底質への影響

生汚泥を沈降させて底質の変化を検討した結果、汚泥が 0.6 mm 以下に沈積した条件、すなわち 600 g/m² 以下では底質は悪化しない。

消化汚泥については、600 g/m² 以下で変化はないが、1,000 g/m² ではいくらか泥の着色があり、3,000 g/m² では硫化物が 0.2 mg/g をこえて明らかな変化を示した。

4.7 重金属と PCB の汚泥への濃縮と海水への溶出

PCB は 1～10 ppb という低濃度では活性汚泥の処理能力にほとんど影響を与えないが、酸素消費量の増加、菌相の変化、酸素吸収活性の変化がみられる。水中の PCB は活性汚泥に吸着され、10⁴ オーダーの蓄積係数を示すが、吸着された PCB は好気性、嫌気性いずれの条件の下においてもほとんど分解されない。

通常の海水 (pH 8.3) に汚泥が投棄された場合、汚泥の金属の 0～10 % が海水に溶出する。pH が 7 以下および 10 以上になると金属の溶出量は急激に増大するが、pH 8～10 の範囲内での溶出量は極めて少ないという結果となった。

4.8 海洋投棄実験

4.8.1 昭和44年の投棄実験

昭和44・11・8に大島沖で潮流にのせて含水率96%の濃縮生汚泥500 m³を30分で投棄した調査結果は、1時間後に276 ha（長軸610 m，短軸210 m），2時間22分後に52.5 haであり，4時間後にも明らかに汚濁面が認められた。

音響測深器の記録は，明らかに水面に近く汚泥の拡散を示し，1時間後に10 mぐらいの深さにおよぶ表層での拡散が認められた。

4.8.2 昭和46年の投棄実験

昭和46・10・16に前回と同様に含水率96%の濃縮生汚泥1,000 m³を1時間で投棄した調査結果は，1時間後に幅170 m，長さ1,700 mの帯状になっていたが，2時間後にはもはや識別できないほど拡散し，3時間後には航空写真でも確認できないほどになっていた。

深さの方向には1時間ぐらいまでに10～30 m（場所により50 m）に懸濁物が一様に分布し，その後，沈降するものは沈降し，10 mまでの深さに微細なものが滞留しているように思われた。

4.8.3 投入汚泥の拡散シミュレーション

潮流に対する相対速度4 km/時で潮流と直角方向に航行する投棄船から含水率96%の汚泥20,000 m³を4時間にわたって投棄した際の汚泥拡散についてシミュレーション解析を行ない，等濃度曲線もしくは等希釈倍率曲線で囲まれる影響ゾーンの大きさとその時間的变化を求めた。これら影響ゾーンの消滅時間，最大拡散面積および最大拡散体積を明らかにしたが，海洋生物におよぼす影響を考慮して希釈倍率10,000倍を一つの目安にとれば，図-2に示すとおり投棄汚泥の全てが10,000倍以上に希釈されるには少なくとも6時間が必要である。また，10,000倍以下，つまり浮遊物濃度が4 ppm以上を示す影響ゾーンが最も大きく拡散した場合の面積は 3×10^6 m²，体積は 4×10^7 m³になるものと推定される。

5. 下水汚泥の脱水等

5.1 下水汚泥の熱処理

下水汚泥を機械脱水する際には，効率をあげるため予備処理として凝集剤を添加して汚泥粒子を凝集させる必要がある。ところが，生汚泥，とくに有機物含有量の多い生汚泥の場合は凝集剤の添加率を高めないと脱水が困難である。したがって，薬品費が大となり，汚泥量も凝集剤の添加分だけ増加するので，処理と処分の費用が増加することになる。

生汚泥を熱処理すれば，ゲル構造が破壊して水分が分離するし，有機物は熱により加水分解して液化

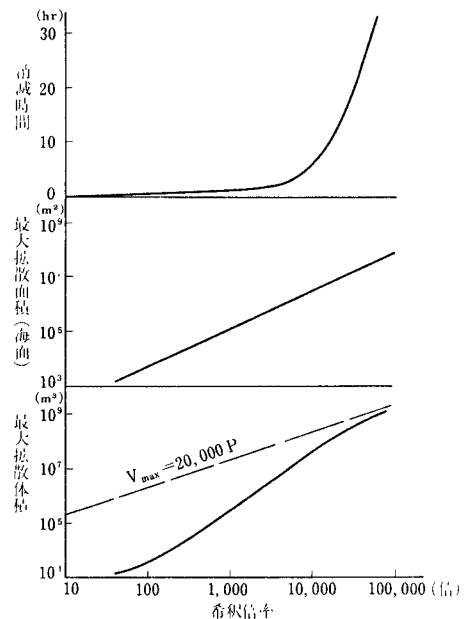


図-2 希釈倍率と消滅時間，最大拡散面積，最大拡散体積との関係

が進行する。したがって、熱処理をうけた下水汚泥は沈降分離がよくなり、脱水性も改善され、病原菌や寄生虫卵が死滅して衛生的な脱水ケーキが得られる。しかし、熱処理過程において悪臭が発生すること、濃縮槽の脱離液や脱水機からのろ液などからなる分離液は多量の溶解性有機物を含有するので、BODは非常に高い値を示し、この分離液の処理に難点がある。

既に、吹田市正雀下水処理場をはじめ、札幌市豊平川下水処理場、藤沢市南下水処理場、大阪府泉北下水処理場において、下水汚泥の熱処理装置が設置されて、運転実績の積重ねもあり、さらに実験室や下水処理場における研究調査にもある程度の成果が得られたので、下水汚泥の熱処理法に対する現段階における考え方をここにまとめた。

5.2 摩耗、腐食および有機物の付着とその対策

直接方式の熱交換器（内管に生汚泥、外管に熱処理汚泥が流れる方式）の内管の外側の一部と下部のT字管付近に図-3のごとく摩耗が生じた。

また、汚泥破砕機の刃と熱処理汚泥排泥弁に摩耗があった。札幌市豊平川下水処理場では、18ヵ月間の運転後（運転時間7,000時間、処理汚泥固形物量7,600t）、熱交換器下部のT字管（厚7.7mm）の一部に孔があいたので応急的に開孔部にさや管をあてた。藤沢市南下水処理場では6ヵ月間の運転後、高温部の内管2カ所に0.7mmの摩耗が生じたので新管と交換した。大阪府泉北下水処理場では、1年間の運転後、内管108本のうち1本に約0.2mmの摩耗が生じたので、低温側のものといれかえた。

また、熱交換器の高温部に焼付がおこり、中温部以下の内管にやわらかい有機物の付着がみられ、重油の消費量が増加した。

摩耗、腐食および有機物付着に対する恒久的対策としては、つぎの方法がある。(1)除砂装置の改造、

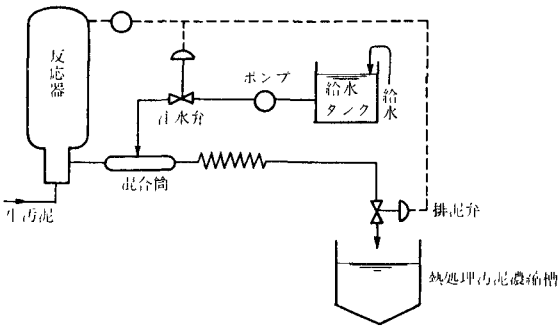


図-4 反応器出口における汚泥の注水冷却装置

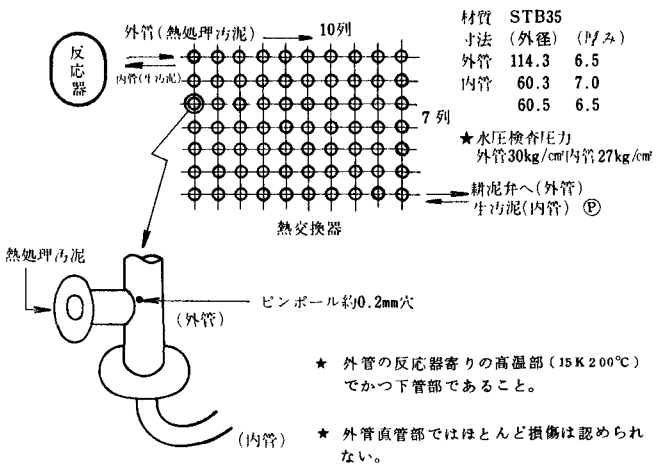


図-3 熱交換器の配置と損耗箇所

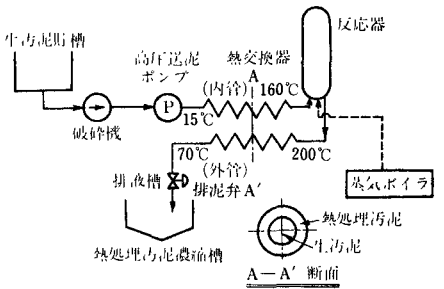


図-5 直接式熱交換方式のフローシート

(2)クッションタンクの設置, (3)注水による反応器出口温度の低下を行なうこと(図-4), (4)熱交換器を直接式(図-5)から間接式(図-6)すなわち内管にそれぞれ生汚泥, 熱処理汚泥を流し, 外管に清水を流す方式に改造すること。

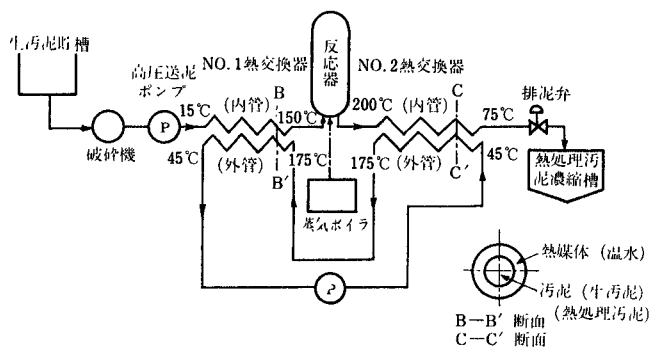


図-6 間接式熱交換方式のフローシート

5.3 騒音の発生とその対策

高圧送泥ポンプ, 空気圧縮機, ボイラ, 反応器の排泥弁（開弁時）が騒音の発生源である。これらの機器は地下室に入れ, しかも, 空気圧縮機はなるべく別室に入れることが望ましい。室の天井と壁に吸音材を使用すれば外部に対して問題はなくなるが, 室内の作業員に対しては多少問題が残る。

5.4 臭気の発生とその対策

臭気の出発源のうちとくに臭気の強いものは, 反応器の排ガスと熱処理汚泥濃縮槽であり, 臭気やや強いものとしては脱水機室, 脱水ケーキホッパがある。

これらの対策としては, 熱処理汚泥を下水処理水で冷却して温度を下げるのと同時に, とくに臭気の強い反応器の排ガスはガスセパレータを通し, 濃縮槽より発生するガスと一緒に, 重油専焼ボイラおよび焼却炉で燃焼することである。臭気やや強い脱水機室および脱水ケーキ・ホッパ上部の臭気は一部を焼却炉で燃焼し, 一部を煙突より大気中に放出させるが, ダクトで強制的に吸込み, 水洗および脱臭剤の噴霧によって脱臭するか, オゾン反応塔で酸化した後水洗によって脱臭することである。

5.5 分離液の処理

5.5.1 分離液の性状

生汚泥の性状, 熱処理条件, 濃縮・脱水の程度によって変化するが, 一般にはつぎの範囲にある。pH : 5 ~ 6, COD (KMnO₄) : 2,000 ~ 4,000 ppm, COD (K₂Cr₂O₇) : 6,000 ~ 12,000 ppm, BOD : 5,000 ~ 8,000 ppm, T-N : 300 ~ 600 ppm, NH₃-N : 200 ~ 400 ppm。

5.5.2 分離液の量

熱処理条件, 濃縮の程度によって異なるが, 実績からは流入下水量の0.5%程度である。

5.5.3 パイロット・プラントによる分離液と流入下水との混合処理

分離液を返送して活性汚泥法によって1ℓ/分の流入下水と混合処理した場合, BOD-SS負荷が0.19kg/kg・MLSS/日程度であればBOD除去率は90%以上で, 処理水のBODは分離液を混合しない対照との差は認められないが, 淡黄褐色の色相を呈し, 総窒素およびCOD（重クロム酸法）は対照よりも高く, 汚泥の増殖量も対照よりも大である。しかし, BOD負荷が0.23kg/kg・MLSS/日の場合には活性汚泥の膨化が認められた。

5.5.4 分離液の長時間曝気処理

予備曝気槽（容量 806 m³）に分離液 200 m³/日を連続注入して長時間曝気した結果、無希釈の場合は発泡が著しく維持管理が困難であったが、希釈曝気の場合は 3 倍希釈のときに汚泥の沈降分離により BOD は 84 %、COD は 28 % 除去され、BOD を 100 mg/ℓ 以下にすることが可能である。

5.5.5 分離液のステップエアレーション変法による処理

容量 3,080 m³の曝気槽のうち 470 m³を分離液用曝気槽として、分離液（平均 BOD 7,172 ppm）58 m³/日を曝気し、残余の部分で返送汚泥量と分離液量を合わせて 470 m³/日となるように汚泥を返送し、流入下水（平均 BOD 47.2 ppm）10,550 m³/日をステップエアレーション変法による処理をした結果、処理水は BOD 11 ppm、COD 18 ppm、アンモニア性窒素 12 ppm、色相は極微黄灰色となった。

5.5.6 重金属類の分離液中への溶出

測定例は少ないが重金属類の分離液中への溶出は数パーセント程度である。

5.5.7 処理施設に余裕のある場合

分離液を返送して流入下水と混合処理すれば、処理水質に若干の影響はあるが大きな支障はない。また、分離液の長時間曝気などの処理によって水質の改善は可能である。しかし、熱処理脱水方式の計画設計に際しては分離液の混合処理のための余裕を見込むべきである。とくに、今後放流水の水質に対する要求が厳しくなることが予想されるので、分離液の別途処理を考慮しておく必要がある。

5.6 維持管理

5.6.1 運転に必要な有資格者

熱処理プラントの運転には、ボイラおよび圧力容器安全規則によるボイラ取扱主任者、重油の取扱いに伴う危険物取扱主任者、反応器液面制御のための r 線を使用する場合の放射線取扱主任者など法規に定められた有資格者が必要である。現状では札幌市を除いて、会社に運転を委託している。

5.6.2 事故ならびに定期点検による休止とその対策

熱交換器に孔があいたとか、摩耗による取替えなどの事故による 7 ～ 10 日の運転休止、定期点検による 7 ～ 19 日の運転休止があった。この休止期間は汚泥の処理ができないから、予備の系列を設けるか、休止期間中の汚泥の貯留施設を設ける必要がある。

5.7 建設費と維持費の比較

熱処理脱水方式と消化脱水方式の建設費と維持費を算定した結果によると、建設費は表-8 に示すとおり、札幌市を除いて藤沢市南部下水処理場も大阪府泉北下水処理場も、脱水まで処理する場合と焼却まで処理する場合のいずれもほとんど同じである。

維持管理費は償却費を含めて、表-9 のとおり脱水まで処理する藤沢市の場合は熱処理脱水方式が高くつくが、焼却まで処理する札幌市と大阪府は消化脱水方式の方が高くなっている。

表－８ 熱処理方式と消化薬注脱水方式における建設費の比較

処理場名	処理汚泥量 (DS-T/日)	熱 処 理 方 式			消 化 薬 注 脱 水 方 式		
		脱 水 ま で 百万円(百万円/DS-T)	焼 却 ま で 百万円(百万円/DS-T)	施 設 面 積 (m^2)	脱 水 ま で 百万円(百万円/DS-T)	焼 却 ま で 百万円(百万円/DS-T)	施 設 面 積 (m^2)
豊 平 川	403	985 (244)	1,331 (330)	3,150	1,390 (345)	1,801 (447)	5,000
南 部	173	820 (474)	—	2,460	811 (469)	1,039 (601)	3,000
泉 北	235	1,114 (474)	1,234 (525)	2,730	1,051 (447)	1,329 (566)	4,200

注 かつこ内は、1日の処理汚泥量(DS)1ton当りの数値である

表－９ 熱処理方式と消化薬注脱水方式における維持管理費と償却費の比較

(円/DS-T・年)

処理場名	熱 処 理 方 式						消 化 薬 注 脱 水 方 式					
	脱 水 ま で			焼 却 ま で			脱 水 ま で			焼 却 ま で		
	維持管理費	償 却 費	計	維持管理費	償 却 費	計	維持管理費	償 却 費	計	維持管理費	償 却 費	計
豊 平 川	—	—	—	7,130	4,950	12,080	7,000	4,070	11,070	9,000	6,160	15,160
南 部	11,370	6,630	18,000	—	—	—	10,640	5,590	16,230	12,600	8,300	20,900
泉 北	—	—	—	6,860	7,640	14,500	9,140	5,220	14,360	11,100	7,650	18,750

5.8 総 括 的 意 見

熱処理法はいまだ開発段階にある污泥処理法であり、多くの問題点があるが、熱処理装置そのものについては、腐食、摩耗および有機物付着の問題点は解消されるものと考えられる。しかし、(1)熱処理過程より出る悪臭対策、(2)分離液の処理（重金属および窒素の除去を含む）、(3)維持管理体制の確立などにはなお問題点が存在する。しかし、(1)熱処理污泥の脱水性が極めてよく、ケーキ量の少ないこと、(2)病原菌、寄生虫卵が死滅していて衛生上安全な污泥ケーキであること、(3)焼却処分をするときに自然が可能であること、などの長所もあるので、熱処理法を採用する場合には、下水污泥の焼却処分の要否、処理場用地の広さ、維持要員の確保の見通しおよび建設と維持管理の費用などの経済性を慎重に検討する必要がある。

6. お わ り に

下水污泥は下水から分離された固形物であるが、含水率が高くその容積が大であり、有機物含有量も高く、腐敗し易いなどその処理・処分は大変厄介で多額の経費を要する仕事である。

下水污泥をいたずらに投棄せず、土壌改良材として再利用を図ることは、有機物から無機物へ、無機物から再び有機物へと循環させるという天然のサイクルからみても合理的な方法であるとして、農業利用から出発し、海洋処分、熱処理へと調査研究を進めてそれぞれ一応の成果をあげたが、いずれも今後の研究の積重ねが必要である。