

廃水処理して無害化しても、それにより発生した汚泥を適当に処分しなければ、廃水を十分に制御したことにはならない。廃水中の有害物質を大量の濃度の低い部分と、少量の濃度の高い部分(汚泥)に別ける Process が処理 (Treatment) であり、発生した濃度の高い部分を人間を含めた環境になるべく害がないように適当に始末するのが処分 (Disposal) である。また、二者を合わせて廃水の管理 (Management) という言葉が使われる¹⁾。従って処理ではいたずらに高い除染率を求めず、処分も考えた処理法を選ぶ²⁾必要があるが生じる。わが国で家庭下水として発生する BOD 負荷は、年間 10^6 ton 程度であろうと推定されるが、このうち約 7割が無処理で環境に放出されており、将来下水道が普及すればますます増加する下水汚泥の処分に困ることになる。

数字は BOD 負荷 10^3 ton/年

家庭下水による BOD 負荷発生 (1000)

無処理 (703)

下水処理 (297)

焚火 (100)

トイレ水 (30)

汚泥 (167)

埋立 (13)

陸地 (60)

再利用 (18)

堆肥化 (2)

焼却処理 (31)

環境

図-1 我国における下水汚泥の処分(家庭下水)

— 53 —

方がとられる。現在のところ、このような評価を行うに十分な資料が集積されているわけではなく、またまだ研究を重ねねばならぬ点が多いが、一方、環境の重金属濃度などが評価につながらない形で集積されていることもあり、ここに不完全ではあるが、あえて評価法を示すことにした。

方法は、処分された汚泥からの重金属の溶出→環境への移行→人間による摂取の経路を定量的に追うものであるが、どのような経路を考えるべきかは処分方法によって異なる。

表-1 下水汚泥中の重金属

処理場名	下水汚泥発生方式	生じ環境注	汚泥の水質	消化の方法	焼成の有無	Cu	Zn	Cd	Mn	Ni	Fe	Cr	Pb	Hg	As	参考文献
A ₁	分選	ナシ	0	焼成	有	413	3286	432	300	672	—	—	—	—	—	(4)
A ₂	分選	ナシ	33	ナシ	有	391	1262	297	1407	1089	—	—	—	—	—	
B	分選	有	10	焼成	有	293	709	355	—	—	—	—	—	—	—	
						480	2171	575	—	—	—	—	—	—	—	
C ₁	分選	ナシ	8	ナシ	有	570	555	6	—	465	—	790	119	—	—	
						850	790	6	—	523	—	1,970	166	—	—	
C ₂	分選	ナシ	0	野風	ナシ	179	627	7	—	99	—	50	44	—	—	
						251	800	8	—	100	—	55	55	—	—	
D	分選	有	—	焼成	ナシ	—	—	4318	—	—	—	—	—	—	—	
						—	—	3359	—	—	—	—	—	—	—	
						—	—	2765	—	—	—	—	—	—	—	
E	し尿のみ	—	—	焼成	ナシ	156	1,154	5.0	325	—	13300	65	135	492	22800	
F	分選	有	12	焼成	ナシ	13	630	2.0	—	—	—	—	2.0	—	—	
G ₁	分選	有	20	焼成	有	191	2,880	39	113	95	425	465	—	—	—	
						1,082	3,740	—	—	—	—	—	—	—	—	
H	分選	有	12	焼成	有	345	1,161	241	154	25	8,150	35	75	—	—	
						363	1,305	595	163	20	10,800	26	67	—	—	
						380	1,420	433	161	—	8,520	—	79	—	—	
						1154	1,437	489	—	—	—	—	—	—	—	
バックグラウンド						140	350	1	72	10	5990	41	18	12	—	(5)

2. 埋立処分

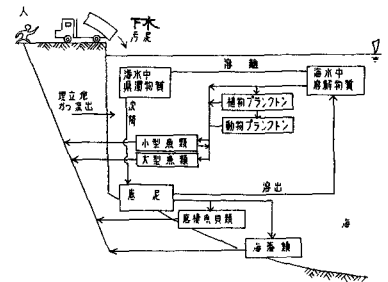
まず、海面埋立処分について考えてみよう。⁷⁾ 埋立地の造成は、以前は海面を埋立てから護岸を造成していたが、最近では護岸工事をすませてから海面埋立をするようになり、さらに、埋立地内の海水は、表面から気をしてから外海に放出するところも出てきた。これにより埋立の安全性は一段と上昇したと思われる。

2.1 食物連鎖 埋立に用いられた下水汚泥中の重金属が人間に入るまでの連絡は種々のものが考えられるが図-2 のようである。これを食物連鎖 (Food chain)、あるいはより複雑な場合食物網 (Food web) とよぶ。主な経路は、汚泥中重金属→海水中に溶解→植物プランクトン→動物プランクトン→小型魚類→大型魚類→人間のほか、汚泥→海底土→底棲魚貝類→人間や、汚泥埋立地→地下水→人間、汚泥埋立地→農作物→人間の経路なども考える必要がある。その他にも経路が考えられるが、考え方は同じなので主経路のみについて説明する。また、各種重金属の各々につき、このような検討をすべきであるが、ここではカドミウム (Cd) を例にとり、その考え方、計算手順、今後の問題点を詳しく述べ、ついで健康6項目といわれる他の元素 Pb, As, Cr⁶⁺, Hg についても計算結果と明らかにする。

2.2 化学形態 環境中での元素の移行を考える場合、その化学形態が大きく関係する。Cd はⅡ族の元素で亜鉛に比較的近似した性質を持ち、地球重量の 1.5×10^{-7} を占める。融点 321°C 、沸点 768°C で天然には硫化カドミウム鉱 (Greenockites, CdS) の形で産出するものが多い。環元性の場合、水に難溶性の CdS (溶解積 3.6×10^{-29} , 18°C ⁸⁾) として存在するが、酸素の存在下では Cd^{2+} のイオン CaCO_3 の溶解積 2.4×10^{-8} ⁹⁾) となる。このため、嫌気状態にある水田では Cd は溶出しにくい。水を抜いて畑地を耕作すると土壌が好氣的になるため、一度に Cd が溶出することが報告されている。⁷⁾ 25°C の水中における Cd の pH-Potential 平衡の関係を示すと図-3 のようになる。¹⁰⁾ これは Cd のみが水中に存在する一成分系の場合であり、他に共存塩が存在すると形が変ってくる。多様な共存下での平衡関係¹¹⁾や、湖水中での元素の存在形態などの研究¹²⁾があるが、まだ複雑な組成を有する天然における元素の存在形態と明瞭に示す平衡図は作成されていない。¹³⁾しかし、図-3 より大まかな Cd の存在形態は推量することができる。

2.3 汚泥中における Cd の化学形態 下水汚泥中で考えられる Cd の形態は

図-2 埋立における重金属の移行

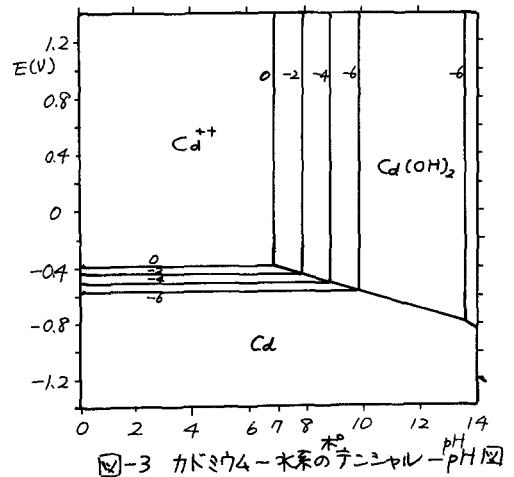


(a) 生体内に生化学的にとりまれている。

(b) 汚泥中に存在する粘土鉱物や、生物体表面に吸着されている。

(c) 生物の分解生成物と共に間隙水中に存在する。

などが考えられる。無機状態にある下水汚泥は還元性が強いから、無機物としては CdS の形で鉄、亜鉛などの硫化物と共存するものと考えられるが、一部は有機物の形となり、一部は生物体や粘土鉱物に吸着されているものと推定される。ここでは、汚泥の Cd 濃度を表-1より10ppmとして試算に採用することにする。ただし Cd の分析は汚泥を濃硝酸で処理して、含有する Cd のすべてを強制的に溶かさせて定量するので、10ppmの Cd がいかなる化学型で汚泥中に存在するかは明らかではない。



2.4 地下水および海水中への溶出 下水汚泥中の Cd の

環境への溶出は、汚泥を海水中へ投入した場合の海水への溶出と、埋立てが進んだ時等で、埋立土となった汚泥から地下水への溶出の2つについて考える必要がある。前者の場合、汚泥を海水中に投ずることによって、海水が数時間、平均濃度500ppmに濁ると仮定する。汚泥から海水中への金属の溶出は、土木学会下水汚泥処理処分委員会が報告した実験を行った結果、溶出は3〜6時間の振とうでほぼ平衡に達し、溶出率は表-2のようであったことを示している。⁽⁴⁾ Cd の溶出率は2.6%なのでこの数値を用いると、海水中 Cd 濃度は

$$500 \frac{\text{mg Cd}}{\text{kg 汚泥}} \times 10 \frac{\text{kg 汚泥}}{\text{kg 海水}} \times 0.026 = 1.3 \times 10^{-4} \text{ ppm}$$

となる。海水中の Cd の溶出は汚泥と海水との接触時間

が数時間程度であるから、表-2のような振とう実験による溶出率が使用可能であるが、埋立てが進んだ時等で、埋立土となった汚泥からの金属の溶出を推定するのに、表-2の値は使用できない。この場合は、かなり長期間にわたる溶出を考えねばならず、また、

汚泥中の有機物は分解されるので、有機物の形であった Cd は無機化するものと考えられる。ここでは安全側をとって、含有される Cd はすべて溶出するものとする。埋立土の最終含水率を50%とすると、 Cd の間隙水中濃度は空隙率を33%としたとき15ppmとなるものと推定される。

2.5 海産物への濃縮 海産物は海水中の微量元素を、ある一定比率でとり込む。これを評価するのに濃縮係数 (Concentration Factor) が使用される。濃縮係数 C.F. は

$$C.F. = \frac{\text{海産物のある元素の濃度 (湿重当り)}}{\text{環境水(海水)中のその元素の濃度}}$$

で定義される。C.F. は主として海産物の種類と元素により定まる定数で、各元素についての値は Blizkarpov の書⁽¹⁵⁾に詳しい。松山⁽¹⁶⁾は水槽に種々の海産物を飼育し、Tracer として放射性的な ^{115}Cd を与えて、濃縮係数を表-3のように求めている。しかし、重金属元素の濃縮係数も調査した奇島 泰⁽¹⁷⁾によれば、 Cd は蓄積毒であり、動物については内臓における濃縮が大きいこと、トレーサー実験による場合は濃縮が平衡に達しないものも多く、安定元素の化学分析による場合に比べて相対的に低い C.F. を示すことが注目されると述べている。松山⁽¹⁸⁾の示した安定同位元素の分析より求めた C.F. が表-4である。このように濃縮係数は測定方法等によ

表-2 実験汚泥からの各金属の溶出率

元 素	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
溶 出 率 (%)	5.1	9.2	0.2	2.6	4.9	≒0*

註 * 直接法では検出できなかった。

文献 (4) より

り極めてバラツキの大きいものであり、この数値をとれば良いのか迷うが、数週間以内の短期的な影響の評価には 20 を、また年オーダーの長期的な影響の評価は、甲殻類の内臓の最大値 2500 を採用する。

2.6. Cd の人体許容量 生活環境にかかわる環境基準として、Cd の濃度は 0.01 ppm、また水産用水基準は 0.03 ppm をあげている。(しかし、その基準は、飲料水の基準を準用したものであり、食物連鎖の考え方からすれば必ずしも安全であるとは云えない。山根、重松¹⁹⁾も Cd 中毒といわれる イタイイタイ病を起した神通川の輝中町附近で、流水中では Cd は検出限界の 0.0001 ppm 以上はほとんど検出されなかったと述べている。

Cd は表-5、表-6 に示すように、人体中に約 30mg あり、腎臓に比較的集中している。重松¹⁹⁾は日本人の平均食の Cd を表-7 のように分析して、健康人は平均 1 日 60 μ g の Cd を摂取しており、一方、輝中町では平均 600 μ g Cd/人・日 を摂取していたと見ている。FAO-WHO の合同専門委員会²¹⁾は腎臓値の Cd 濃度が 200mg/kg をこえると腎障害が起る可能性があるので、これを許容基準とし、Cd の腸管吸収率、排泄率より逆算して、1 週間の許容摂取量を 400~500 μ g とすべきことを提案している。また、横橋等も同様の研究を行い、腎臓値の Cd 濃度が 200ppm になるためには、1 日 200 μ g の Cd の摂取とすることを示した。FAO-WHO の提案した数値を用い、1 日許容量は約 70

mg/人・日となるが、Cd は米の中に多く含まれるので²²⁾許容量のうち、下水汚染の処分に對する割合をその割合として、許容許容量を 7 μ g/人・日にと、ておく。

表-6 標準人の臓器中の Cd

体組織	μ g Cd/g 湿重
腎臓	32
肝臓	2.44
脾臓	1.2
肺	0.7

文献 23) より

表-5 標準人の全身の組成

元素	重量 %	70kg の人の場合の標準重量 (g)
O	65.0	45,500
C	18.0	12,600
H	10.0	7,000
N	3.0	2,100
Ca	1.5	1,050
P	1.0	700
S	0.25	175
K	0.2	140
Na	0.15	105
Cl	0.15	105
Mg	0.05	35
Pb	1.1×10^{-4}	0.08
Cd	4.3×10^{-5}	0.03
As	$< 1.4 \times 10^{-4}$	< 0.1
Cr	$< 8.6 \times 10^{-6}$	< 0.006

文献 23) より

表-3 海洋生物による Cd の濃縮係数-1

種 類	濃縮係数	50%飽和に達するまでの時間 (日)
藻類 Ulva pertusa (アオサ)	11	4
軟体動物 Venerupis philippinarum (アサリ)		
外套膜	58	8
鰓	> 100	3
内臓筋	8.3	3
他の内臓	52	3
貝殻	> 3	
甲殻類 Leandersp (スジエビ)		
内臓	> 250	
筋肉	0.38	1
甲殻	> 25	
棘皮動物 Strongylocentrotus purpurinus (ウニ)		
胃管	110	1.5
卵	> 8	
歯	> 3	
外殻	> 10	
魚 Chamychthys gulosus (ドロマ)		
内臓	> 10	
鰓	> 6	
鰓	11	6
皮膚	0.92	6
歯	0.80	5
脊椎	0.22	3
筋肉	0.16	4
頭とヒレ	0.96	9

15Cd の HPLC-質量分析による値 (文献 16) より

表-4 海洋生物による Cd の濃縮係数-2

生 物	濃縮係数
藻類	
緑藻	500~1500
褐藻	200~3600
紅藻	600~1500
軟体動物	
筋肉	5000~10000
内臓	2~6 $\times 10^5$
殻	10~100
甲殻類	
内臓	250~2500
棘皮動物	
生殖巣	400~700
消化管	2000~2500

元素の化学分析によって得られた値 (文献 18) より

2.7 海水の汚染によるCdの摂取量の増加 下水汚泥を海水中に投ずると海水中のCd濃度が 1.3×10^{-9} ppm だけ増大する(2.4参照)。このCd濃度は秋田中では吸着、沈殿等により低下すると考えられるので、濃縮係数は20にとる(2.5参照)。日本人は1人1日約200gの海産物を食べるから、海水の汚染にもとづくCd摂取量の増加は

$$1.3 \times 10^{-9} \frac{\mu\text{g Cd}}{\text{ml 海水}} \times 20 \frac{\text{ml 海水}}{\text{g 海産物}} \times 200 \frac{\text{g 海産物}}{\text{人・日}} = 0.52 \frac{\mu\text{g Cd}}{\text{人・日}}$$

であると推定される。

2.8 地下水の汚染にもとづくCd摂取量の増加 埋立地の地下水は最大限15 ppmのCdを含む。埋立地を1 km × 1 kmの正方形として、その一辺で陸地につなぐとする。我が国の降雨量は約1500 mm/年このうち、1〜3%が地下浸透するが、ここでは降雨量の2%が地下に入るとする。埋立地から海へ入る地下水量は

$$10^3 \text{ m} \times 10^3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.02 \times \frac{1}{365} = 0.0082 \text{ m}^3/\text{日}$$

1日約8ℓにすぎない。海水中に護岸沿いに岸から10 mの範囲を考え、前海水深を10 mとし、護岸に平行に1 cm/sec (=864 m/日)の海水の流れがあるとすると、この10 mの平均Cd濃度増加量は

$$\frac{15 \frac{\mu\text{g Cd}}{\text{m}^3} \times \frac{0.0082 \text{ m}^3/\text{日}}{3}}{10^3 \text{ m} \times 10^3 \text{ m} \times 864 \text{ m/day}} = 4.8 \times 10^{-7} \text{ ppm}$$

この汚染は長期にわたって続くから、濃縮係数として2500をとると、地下水の汚染にもとづくCd摂取量の増加は

$$4.8 \times 10^{-7} \frac{\mu\text{g Cd}}{\text{ml 海水}} \times 2500 \frac{\text{ml 海水}}{\text{g 海産物}} \times 200 \frac{\text{g 海産物}}{\text{人・日}} = 0.24 \frac{\mu\text{g Cd}}{\text{人・日}}$$

2.9 安全性の評価 2.7と2.8の結果を加え合わせると、10 ppmのCdを含む下水汚泥の埋立にもとづくCd摂取量の増加は、対照とする海産物からの海産物を100%摂取する人に対しても

$$0.52 + 0.24 = 0.76 \text{ } \mu\text{g}/\text{人・日}$$

となり、部分許容量 $7 \mu\text{g}/\text{人・日}$ を越えない。しかし、Cdの濃度がもう1桁上って100 ppmとせば、部分許容量を越えることになる。

2.10 その他の場合 すでに与えられた紙数かつきたので、その他の場合は他の機会に発表したいと考えらるが、海洋処分の場合²⁴⁾、山間埋立の場合²⁵⁾について拙論文があるので、参照されたい。

表-7 食物中のカドミウム

分類	食 物	採取場所	Cd ppm/fresh
穀 類	精白米	全 国	0.07
	麦	北 陸	0.040~0.055
	白米	北 陸	0.022
	キャベツ	"	0.012
	大根	"	0.017
	玉ネギ	北海道	0.003
	馬鈴薯	"	0.041
	ネギ	北 陸	0.018
	法蓮草	関 東	0.095
	人参	中 部	0.050
果 物	リンゴ(デリシヤス)	東 北	0.004
	"(光玉)	"	0.002
	ミカン	九 州	0.002
	牛肉	不 明	0.052
	肝臓	関 東	0.22
	豚肉	北 陸	0.032
	肝臓	"	0.080
	ニワトリ	不 明	0.052
	肝臓	"	0.53
	モツ	"	0.20
魚 類	Saurel	北 陸	0.015
	内臓	"	0.14
	タイ	"	0.015
	内臓	"	0.14
	タラ	"	0.027
	スルメ	山 陰	0.12
	肝臓	"	94.0
	モンコイカ(乾燥)	アフリカ	0.18
	肝臓	"	110
	タコ	北 陸	<0.01
貝	肝臓	"	25
	ハマグリ	関 東	0.16
	カキ	北 陸	0.85
	アワビ	関 西	0.27
	マンゴ貝	北海道	0.034
	シジミ	山 陰	0.38
	バイ	北 陸	0.19
	肝臓	"	92~140
	カニ肉	山 陰	0.076~0.14
	ウニ	東 北	0.076
海 藻	ノリ(乾燥)	不 明	0.12
	コンブ	"	0.10
	ミン	北 陸	0.084
	ノコウユ	信 越	0.080
	"	不 明	0.024
	"	"	0.031
水 産加工物	ハマグリ佃煮	関 西	0.81
	"	四 国	0.84
	イカシオカラ	中 部	0.25
	"	関 東	0.96
	"	北海道	0.15
	"	北 陸	0.15
	イカクロズクリ	"	2.56
	"	"	2.00
	"	"	5.00
	カツオシオカラ	関 東	1.14
水 産加工物	コノワタ	北 陸	0.076

文献(1)より

3. まとめ

重金属を含む下水汚泥を海面埋立処分した場合の安全性の評価の方法を、Cdについて述べた。このように方法により重金属を含む下水汚泥の処分の安全性の評価ができるのであれば、それに従って資料を集める必要がある。たとえば環境水と底泥の重金属を別に測定したり、濃縮係数を測定する場合、水質測定しなかつたりすれば、折角の資料が無意味に生かすことは困難となろう。こういった意味から本論文では考え方を示したのであって、得られた数値を直接用いて環境基準や下水汚泥中の重金属許容濃度を定めようとするものではない。計

篇には実に多くの仮定を用いており、また資料も十分とはいえないことを著者は良く承知している。しかし資料の存在について断言しただけは幸である。なお、用いた仮定の妥当性の検討については、本論文では断言の関係で省略せざるをえなかったが、前論文⁷⁾で行っているので、参考にしたい。

参考文献

- 1) 井上 頼輝 放射性廃棄物の処理・処分、土木学会誌、57巻 2号、41-46頁、昭和47年2月
- 2) 和達嘉樹 廃棄のための除染、保健物理 6巻2号 101-102頁、昭和46年6月
- 3) 井上 頼輝 琵琶湖富栄養化のモデルについて— 人間活動と栄養塩寄生機構 — 土木学会 第二回環境問題シンポジウム講演集、昭和49年8月 土木学会
- 4) 土木学会衛生工学委員会、下水汚泥の処理処分小委員会、下水汚泥の処理・処分に關する研究報告書、昭和43、44、45、46、47年版 土木学会
- 5) 神山桂一、寺町和宏、坂元祐 活性汚泥中の重金属に關する一考察、— 汚泥のバックグラウンドについて — 土木学会 29 回年報 II-242 昭和49年10月
- 6) 環境衛生問題研究会、産業廃棄物の処理計画、昭和46年4月
- 7) 井上 頼輝 重金属を含む汚泥による埋立の安全性について(処分の研究-2) 水処理技術 13巻8号 17-25頁、昭和47年8月
- 8) Handbook of Chemistry and Physics, 40th ed., Chemical Rubber Publishing Co., (1960)
- 9) 青上一郎 重金属等による農作物の障害と判定、昭和45年予4回公害対策研究会テキスト、公害対策センター、昭和45年7月
- 10) E. Deltombo et al, "Cadmium" in Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon Press (1966)
- 11) Berner, R.A. Principles of Chemical Sedimentology, McGraw-Hill (1971)
- 12) Stumm, W. and Morgan, J.J., Aquatic Chemistry, Wiley Interscience, 1970
- 13) Gardiner, J. "The Chemistry of Cadmium in Natural Water," Water Research, Vol 8, No.1, pp23-30 (1974)
- 14) 文献'4) 昭和47年版 88頁
- 15) Polikarpov, G.G., Radioecology of Aquatic Organisms, North Holland Pub. Co., 1966
- 16) Hiyama Y. and Shimidzu M "On the Concentration Factors of Radioactive Cs, Cr, Cd, Zn and Ce in Marine Organisms, Records of Oceanographic Works in Japan, Vol. 7, No.2 (1964)
- 17) 幸島 泰 重金属元素の環境保全に關する文献調査、昭和44年度厚生省公害調査研究報告書、Ⅲ-5~Ⅱ-26頁、昭和45年3月
- 18) 松山義夫 水産生物の放射能汚染、原子力工業 10巻7号、10頁
- 19) 山本 登、重松透造 カドミウムによる環境汚染の展望、日本公衆衛生協会、昭和45年8月
- 20) FAO/WHO "Evaluation of Certain Food Additives and the Contaminants Hg, Pb, Cd" (1972)
- 21) 横橋五郎、鈴木庄亮、松原純子、生体を中心にしたCdのダイナミクス、人間生存と自然環境2、120-140頁、昭和48年 東大出版会
- 22) 浅見輝男 玄米中のCd濃度の許容基準1.0ppmの検討 日本の科学者 44号、35-39頁、昭和46年(Xの2) 同 9巻8号、39-43頁、昭和49年8月
- 23) Tipton, I.H. et al, Spectrographic Analysis of the Tissues from Autopsies, AEC Report ORNL-CF-54-12-66(1954)
- 24) 井上 頼輝 重金属を含む汚泥の速消処分の安全性について(処分の研究-4) 水処理技術 15巻8号、23-28頁、昭和49年8月
- 25) 井上 頼輝・赤木文行、山内都への都市廃棄物埋立による地下水の汚染について、水処理技術 14巻8号 21-32頁、昭和48年8月