

コークスベッド式下水汚泥熔融再資源化プロセスについて COKE-BED TYPE SEWAGE SLUDGE MELTING & RECYCLING PROCESS

市川宗春*・堤福生**・八木喜之雄***

By Muneharu ICHIKAWA, Fukuo TSUTSUMI and
Kino-o YAGI

1. はじめに

下水道普及率の向上および水処理の高度化に伴い、下水処理場から発生する下水汚泥量は増加の一途をたどり、その処理処分が重要な社会問題となっている。従来、下水汚泥の処理法として埋立処理が行われて来たが、埋立処分地の確保難から焼却により下水汚泥の体積を減らす処理法が行われるようになった。

焼却法では、焼却灰の飛散等のハンドリング性、焼却灰に含まれる重金属の溶出に加えて依然として必要な埋立処分地等の問題があり、現行の焼却法にかわるより完全な処理法の開発が必要であった。これらの背景のもと大阪ガスでは、明治31年日本で最初の金属鉄溶解用鋳物コークスを製造して以来、蓄積した鋳鉄溶解技術と、石炭を原料とする石炭ガス中に含まれる硫化水素、アンモニアなどの微量の不純物の除去プロセスを都市ガス製造工場で永年にわたり使用してきた精製技術をもちいて、地金を下水汚泥に置換え、炉の形状、コークス充填方法、燃焼用空気の吹き込み方法、炉内空塔速度等の操作因子を下水汚泥の熔融に適した熔融炉及び排ガス処理設備を含む下水汚泥熔融再資源化プロセスを開発した。本プロセスは、下水汚泥と少量のコークスを堅型シャフト炉に投入し灼熱したコークスベッドで汚泥中の可燃分を焼却し、不燃分(灰分)を熔融して無害かつ安全なスラグとして回収し、道路材、コンクリート骨材として再資源化できる方法であり、大阪府をはじめ日本下水道事業団が実施している下水汚泥広域処理事業(ACE PLAN)等に採用されている。

2. 開発経過について

本技術は、昭和52年度通産省工業技術院重要技術研究開発費補助金の交付を受け、当社西島製造所内にパイロットプラントを建設し、工業化試験を行い成功認定を受けた。昭和56年大阪府「下水汚泥の処理処分対策研究専門部会(部会長 京都大学平岡正勝教授)」殿により、熱回収系を含むコークスベッド式汚泥熔融システム全体の

評価と生成スラグの再資源化調査を目的とした「代替エネルギーによる熔融プロセスとスラグ再利用に関する研究」(昭和57年度の研究テーマ)として取り上げられ、実証プラント(常用36Ton-WS/D、最大50Ton-WS/D)を昭和57年1月末に建設し、約2年間の実証運転を行った。実証運転においては、大阪府「代替エネルギーによる熔融プロセスとスラグ再利用に関する研究調査委員会」殿の指導のもと、各種運転データを取得し、所定の成果を上げることが出来た。これらの結果が評価され、大阪府中央処理場殿初め、日本下水道事業団の大阪北東エースセンター、兵庫西エースセンターに採用されるに至った。

3. コークスベッド式下水汚泥熔融

再資源法の熔融原理

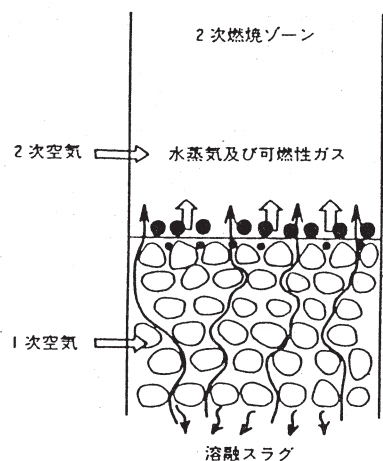
本プロセスの特徴は、炉下部に燃焼したコークスの高温ベッドを形成させて、ロストル(火格子)の役割をもたせ、熔融物(スラグ)を下部に流下させることにより、下水汚泥を安定して熔融処理ができることである。心臓部である熔融炉の構造は、下水汚泥という可燃性の粉体を熔融するために、鋳鉄を溶解するキュボラや製鉄用の高炉などとは構造的に異なった円筒型の堅型炉で、上部には下水汚泥、コークス及び塩基度調整剤の投入口と燃焼排ガスの排出口、下部には空気送込用のノズル(羽口)とスラグの取り出し口を有する簡単なものである。炉内の反応モデルを図1に示す。コークスは、一次空気により燃焼し炉下部において灼熱したコークスベッドとなり、ロストル(火格子)を形成して灰等の熔融に最適な状態を作る。下水汚泥はコークスベッド上部において、ベッドを通過する高温の燃焼排ガスにより、水分が蒸発すると同時に汚泥中の可燃分は熱分解し、可燃性ガスが発生する。この可燃性ガスは、二次空気により、炉内で完全燃焼される。NOx制御法として、還元二段燃焼方式を採用しており、そのため二次空気は多段送風を行っている。一方、下水汚泥中の灰分は、コークスベッドの高温部で熔融し、スラグとなりコークス粒子間を流下し連続して排出される。

* 大阪ガスエンジニアリング株式会社

環境エンジニアリング部 副部長

(〒533 大阪府大阪市東淀川区菅原7丁目7-5)

図1 コークスベッド式溶融炉の反応モデル

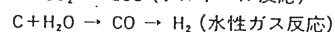
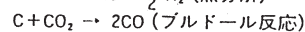
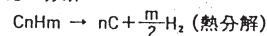


↑：燃焼排ガス

●：汚 泥

○：コークス

汚泥の分解



4. コークスベッド式汚泥溶融再資源化

プロセスの概要

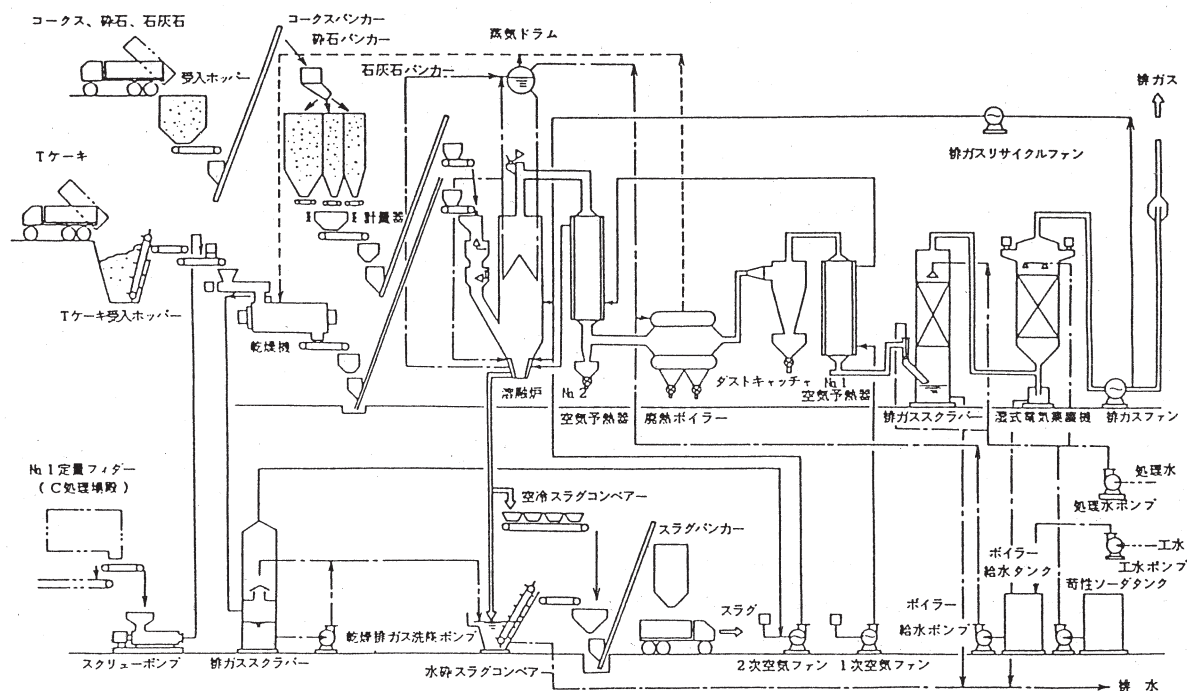
実施例として大阪府中央処理場殿の汚泥処理能力40 Ton-WS/D(脱水ケーキ水分80%として)規模の溶融処理設備について説明する。

本設備は、コークスベッド式溶融炉本体と汚泥を高温排ガスからの回収スチームにより予備乾燥を行う間接加熱型乾燥機、スラグを冷却するスラグ処理設備及び公害防止を行う排ガス処理設備から成る。溶融設備のフローシートを図2に示す。また、溶融設備の基本設計データを表1に示す。

表1 基本設計データ

条 件	設 計 値
溶 融 方 法	コークスベッド式
処 理 量	40Ton-80%水分/日
投 入 ケーキ	乾燥ケーキ
水 分	40～50%
発 熱 量 (高 位)	3540kcal/kg
燃 温度(1次空気のみ)	550℃
料 空 気 比	1.15
用 空 1 次 空 気	1800kg/H
空 2 次 空 気	2210kg/H
気 量 合 計	4010kg/H
炉 炉 出 口 温 度	900℃
出 口 乾 機 ガ ス 量	4200kg/Hr
排 ガ ス 水 分 量	660kg/Hr
合 計	4860kg/Hr
炉 か ら の 放 熱 量	$6.7 \times 10^5 \text{ kcal/Hr}$
コークス投入量	185kg/hr
砕 石	40kg/hr

図2 コークスベッド式下水汚泥溶融再資源化プロセスフローシート(大阪府中央処理場殿溶融設備)



4. 1 汚泥及びコークスの供給

中央処理場は、処理場水処理系からの石灰・塩鉄薬注ケーキと他処理場からの高分子凝集剤薬注ケーキを受け入れ同時に処理している。受け入れホッパーに貯えられた高分子凝集剤薬注ケーキと、Na₂多段炉定量ホッパーに貯えられた石灰・塩鉄薬注ケーキは、計量された後、コンベア上で一緒になり、更に計量コンベアで加算計量後、スチームを加熱源とする間接加熱型乾燥機に供給される。乾燥機で水分を40～45%程度まで乾燥された汚泥は、コークス及び汚泥の融点を下げ、熔融スラグの流動性を確保するための塩基度調整剤(碎石、又は石灰石)と共に熔融炉へ供給される。塩基度調整剤の投入量は、排出スラグの塩基度(CaO/SiO₂)が、1.0になるように設定している。

4. 2 熔融炉における汚泥の焼却・熔融

乾燥汚泥とコークス(塩基度調整剤を含む)は、コークスベッド上部に投入される。コークス及び汚泥の焼却に必要な空気は、一次空気、二次空気にわけて供給している。二次空気は、多段に供給すると共に、炉内酸素濃度と炉内燃焼温度を制御することによりNO_xの低減をはかっている。コークス燃焼用の一次空気は、排ガスと熱交換することにより予熱して送風している。コークスベッド上の汚泥は、乾燥、可燃分の熱分解が起こり可燃性ガスを生成する。この可燃性ガスは、二次空気により炉内で完全燃焼させているので、二次燃焼設備は不要である。コークスベッドは、火格子(ロストル)の役目をなし、汚泥の熔融に必要な1600℃以上の安定した高温ゾーンを形成する。汚泥中の灰分及び塩基度調整剤は、コークスベッド内で熔融し、スラグとなりコークス粒子間を流下して排出口(出滓口)に達する。コークスベッドが形成されている熔融炉下部は、炉体保護のためジャケットボイラー構造を採用しており、汚泥乾燥用スチームとして熱回収を行っている。一方、熔融炉の上部空間は、可燃性ガスの二次燃焼ゾーンであると共に、ダスト飛散を防止するためのものである。

又、炉上部にもボイラー水管を配し、スチームとして熱回収を行っている。更に、熔融炉出口排ガス温度が、900℃になるように冷排ガスを炉内に送風することによりコントロールしている。

4. 3 熔融スラグの処理

熔融炉より連続して排出される熔融スラグは、水砕装置(磁選機を含む)又は空冷装置により砂状或いは、礫状のスラグとして取り出され、スラグバンカーに一次貯留後、スラグの製品化施設に送られる。

4. 4 排ガス処理

熔融炉出口排ガスは、高温であるためコークス燃焼用空気(一次空気)との熱交換、及び廃熱ボイラーにより汚泥乾燥用スチームとして熱回収される。排ガス中のダス

トは、廃熱ボイラー出口側のサイクロンにより除去される。捕集したダストは、廃熱ボイラーダストと共に下水汚泥と混合として、再び炉へ投入し熔融処理される。汚泥・コークス中の硫黄は、熔融処理過程で硫黄分の10～30%は、硫酸塩としてスラグ中に固定され、他はSO_xとなり排ガス中に移行するため、苛性ソーダ水溶液を使用した脱硫設備により除去される。最終段の湿式電気集塵機による除塵後、排ガスはスタックから大気へ放出される。

5. 中央処理場熔融設備性能運転結果

以下本処理設備の性能試験結果について示す。

5. 1 供給汚泥及びコークス性状

供給汚泥及びコークス性状を表2に示す。

性能試験時の汚泥性状は、設計汚泥性状とはほぼ同様の値であるが、本処理設備は2種の汚泥を処理するため変動しやすい。

表2 汚泥及びコークス性状

		混 合 汚 泥	コークス
		高分子+石灰・塩鉄	
含 水 率 [%]		80.2	2.0
発熱量(高位)[kcal/kg]		3490	7010
可 燃 分 [wt%]		68.5	89.0
可 燃 分 組 成 [wt%]	C	32.9	86.9
	H	5.1	0.3
	N	3.5	1.2
	S	0.8	0.6
	Cl	0.6	—
	O	25.6	—
灰 分 [wt%]		31.5	11.0
塩 基 度 CaO/SiO ₂		1.34	0.03
溶 流 点 [℃]		1350	1500

5. 2 性能試験結果

性能試験結果は、設計条件である40Ton-WS/Dを主条件とし、高負荷及び低負荷条件についても実施した。性能試験運転条件の実績値を表3に示す。運転条件は、各条件とも定常状態における8時間の単位時間当りの算術平均値を使用した。当プロセスの特徴として、コークスベッド層を形成させるため一定量のコークスを必要とし、汚泥処理負荷の増加に伴いコークス原単位は減少している。

基本設計値と比べた場合、若干炉からの放熱量が大きい以外は、ほぼ設計値どおりの処理性能が得られた。

表3 性能試験運転条件

項 目		処 理 規 模		
		31.2Ton/D	40.8Ton/D	46.6Ton/D
脱水ケーキ ^{*1)}	処理速度 [kg/H]	1300	1700	1940
	含水率 [wt%]	79.8	80.2	77.9
乾燥ケーキ	処理速度 [kg/H]	468	808	781
	含水率 [wt%]	44.0	44.6	45.1
生成スラグ [kg/H]		130	146	190
一次空気	流量 [Nm ³ /H]	1459	1451	1547
	予熱温度 [°C]	454	511	491
二次空気流量 [Nm ³ /H]		1438	1674	1611
ボイラー発生	炉体 [kg/Hr]	1325	1501	1723
	スチーム 廃熱 [kg/Hr]	683	884	846
乾燥機消費スチーム量 [kg/Hr]		1160	1514	1600
余剰スチーム発生量 [kg/Hr]		848	871	969
ユーティリティ使用量	投入速度 [kg/H]	182	180	180
		2.0	2.0	2.0
	含水率 [wt%]	14.0	10.6	9.3
	コークス比(対脱水ケーキ) [%]	2.0	2.0	2.0
	砕石 [kg/H]	1.2	1.0	1.1
	工水 [m ³ /H]	117.7	132.2	133.4
	電力 ^{*2)} [kwh/H]	15.6	18.2	20.8
	NaOH(as48%) [kg/H]			

*1) 脱水ケーキ=Tケーキ+Cケーキ *2) 処理水ポンプ(18.5kw)を除く

5. 3 プロセス排出物の性状

設計値である40.8Ton/Dの排ガス及び排水の性状を表4、表5に示す。

規制値に関しては、すべて満足しており、特に、NOx濃度は還元多段燃焼法による抑制効果としてO₂12%換算において76ppm程度である。排ガス中の酸素濃度が高いのは、電気集塵機のパージェアーの後流で測定している為と考えられる。又、プロセス排水は、返流水として処理場に戻しているが、排水性状から水処理系の負荷としては問題とならない値である。

表4 排ガス性状(EP出口)

分析項目		処理規模
		40.8Ton/D
温	度 [°C]	34
水	分 [%]	0.8
ガス組成 [%]	O ₂	7.6
	N ₂	80.7
	CO	—
	CO ₂	11.7
ダスト	O ₂ 12%換算 [g/m ³ N]	0.003
	SOx [ppm]	1.2
HCl ["]		0.9
HCN ["]		ND
NOx	O ₂ 12%換算 ["]	76

表5 排水性状(総排水)

分析項目		処理規模
		40.8Ton/D
水素イオン濃度 [PH/25°C]		7.6
生物化学的酸素要求量 [mg/ℓ]		4
化学的酸素要求量 ["]		12
浮遊物質 ["]		10

6. スラグの再資源化

性能試験時に得られたスラグの性状及び溶融プロセスの特徴であるスラグの有効利用について述べる。

6. 1 スラグの性状

スラグは、冷却方法により水冷方式の場合には砂状物として、又空冷方式の場合には岩石として回収することが出来る。いずれの方法を用いてもスラグ化により容積比(対脱水ケーキ)で1/15～1/40に減容化できる。空冷スラグの性状及び減容化率を表6に示す。このスラグを用いて環境庁告示13号による溶出試験を行なった結果、有害金属の溶出は見られない。

表6 スラグの性状

分析項目		処理規模
		40.8Ton/D
灰分組成 [wt%]	SiO ₂	36.2
	Al ₂ O ₃	13.9
	CaO	33.7
	MgO	2.24
	Fe ₂ O ₃	10.4
	TiO ₂	0.91
	P ₂ O ₅	6.11
	MnO	0.55
	その他	—
	塩基度	CaO/SiO ₂
比重 [—]	嵩比重	1.49 ^{*3)}
	真比重	2.72

*3) スラグ化することによる体積減少率

(対脱水ケーキ) 1/17

6. 2 メタルの分離

汚泥中に含まれている各種金属酸化物はコークスベッド内での強い還元作用によりメタルとなり、スラグとの比重差より分離することが出来る。磁選により5~15%の収率で純度80%前後の鉄を含む磁選物が分離できた。磁選物の利用法についても検討中である。

6. 3 スラグの有効利用

スラグの有効利用としては、砂又は岩石の代替品としての用途開発が考えられ、図3に検討中及び一部実用化された用途を示す。

スラグの有効利用の検討は、実証プラント段階では、大阪府「代替エネルギーによる熔融プロセスとスラグ再利用に関する研究調査委員会」殿により道路材、コンクリート骨材を中心に、屋内試験から、屋外試験までの多岐にわたる研究が行われ、多くの成果が得られ一部実用化の目処がたった。実用化段階からは、大阪府「熔融スラグ有効利用検討分科会」殿により、実用化研究が行われており、建設省が行った総合開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術の開発」の報告書の中に研究成果の一部が盛り込まれている。

6. 3. 1 道路用路盤材

上層路盤材への適用試験について屋内試験の結果を表7に示す。規格値を満足したため、引き続き屋外試験を実施した。施工性については、少々締め固め回数を多く必要とする以外は、粒調碎石と遜色ない値を示した。

現在、駐車場から車道に至る数箇所に施工し追跡調査が行なわれている。道路材は、多量に使用される材料であり有望な用途の一つと考えられている。

6. 3. 2 道路舗装用コンクリート製品

空冷スラグをコンクリート骨材とする二次製品の1つとして、透水性インターロッキングブロック(ILB)を開発した。透水性ILBは、雨水の地下侵入を促進し、街路樹などの成育と下水道への雨水流入を減少させることによるポンプ場負荷の削減効果をねらった製品であり、需用が期待できる商品と考えられている。透水性ILBは、目地透水と表面透水の2種類があり、透水機構を図4に示す。目地透水タイプは、目地から浸透した雨水をポーラスな基層部を通じてブロック底面より地中へ浸透させ、又表面透水タイプは、ブロック表面もポーラスにし、より透水機能を重視している。

図3 スラグの用途一覧

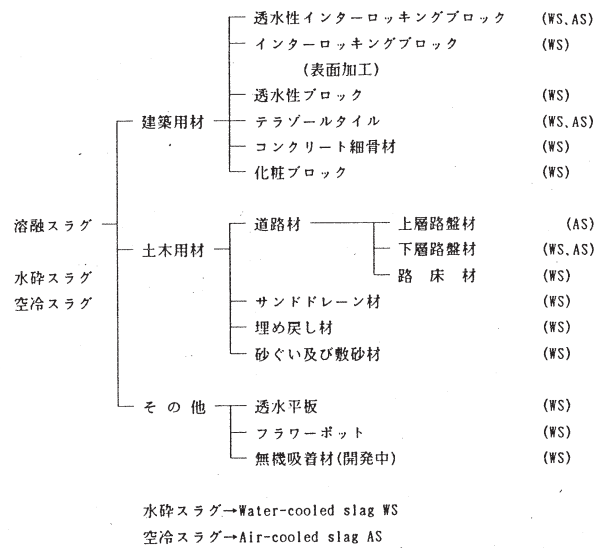
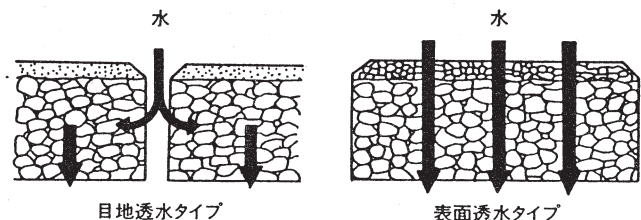


表7 舗装用材料屋内試験結果

試験項目	試験場所		目標値	試験方法
	駐車場	場内道路		
粒 度 加 積 通 過 百 分 率	30	100	100	JISA 1102
	25	100	100	
	20			
	13	83	64	
	5	58	37	
	2.5	44	28	
	0.4	20	13	
	0.074	9	4	
表 乾 比 重	2.790	2.820		JISA 1110
絶 乾 比 重	2.780	2.810		
吸 水 率	0.358	0.398		JISA 1104
単 位 容 積 重 量	—	1.970		
実 績 率	—	70.2		JISA 1121
す り へ り	32.1	32.7	50%以下	JISA 1205-1206
塑 性 指 数	N.P	N.P		アスファルト 舗装要綱
修正CBR	最適含水比	4.8	5.0	
	最大乾燥密度	2.381	2.321	
	締 固 め 度	95	95	
	修 正 CBR	106.0	83	

図4 透水性ILBの透水機構



空冷スラグを用いた透水性ILBの性能試験の結果を以下に示す。

使用した骨材の試験結果を表8に、又骨材の配合量を表9に示す。

骨材の配合量に対する透水性インターロッキングブロックの試験結果を表10に示す。

本試験結果より空冷スラグの骨材としての最大配合比は約50%と考えられる。

又、凍結融解試験結果も良好な値を示している。

透水性ILBは、つぎに示すように大阪府日本下水道事業団等の工事現場で施工されており、現在まで約5,000㎡の施工実績がある。

透水性ILB施工実績

・大阪府摂津ポンプ場	460㎡
・大阪府小山ポンプ場	60㎡
・神奈川県相模原市	75㎡
・神奈川県大和処理場	270㎡
・兵庫県兵庫西広域	1,300㎡
・大阪府大阪北東広域	50㎡
・大阪府中央処理場歩道舗装	280㎡
・大阪府鴻池処理場	800㎡
・大阪府高槻市玉川	100㎡
・大阪府大阪南広域	350㎡
・北部流域下水道事務所 駐車場舗装	200㎡
・茨田アクアテラス	120㎡
・寺島ポンプ場歩道舗装	130㎡
・北部処理場歩道舗装	400㎡

また、小野田、住友、秩父、日本、三菱鉱業セメント5社の近畿圏における年度別インターロッキングブロックの販売実績は次の通りで、今後年率20～30%の伸びが予測される。

現状では、歩道、公園が主な利用先であるが、駐車場等への利用が進めば更に飛躍的な伸びが見込まれ、この分野におけるスラグの有効利用は有望と考えられる。

昭和59年	378,006㎡/年	対前年伸び率	125%
昭和60年	429,736㎡/年	〃	114%
昭和61年	525,947㎡/年	〃	122%
昭和62年	736,555㎡/年	〃	140%
昭和63年	889,241㎡/年	〃	121%

表8 骨材試験結果

種 類	フ ル イ 通 過 量 (%)								
	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	FM
下水汚泥溶融スラグ	100	54	21	14	—	—	—	—	6.11
6 号 砕 石	100	78	12	2	—	—	—	—	6.08
7 号 砕 石	—	100	87	14	3	2	2	1	4.91

比 重		吸 水 率	単 位 容 重	実 績 率	洗 い	安 定 性
表 乾	絶 乾	(%)	(kg/ℓ)	(%)	(%)	(%)
2.72	2.71	0.36	1.72	63.5	0.34	1.6
2.68	2.67	0.54	1.52	57.0	1.88	1.1
2.66	2.63	1.29	1.45	55.2	3.20	0.1

表9 使用材料と配合量

使 用 材 料	配合量(1)	配合量(2)	配合量(3)
普通ポルトランドセメント	400kg/m ³	400kg/m ³	400kg/m ³
水	92 "	92 "	92 "
空 冷 ス ラ グ	531 "	1,063 "	1,194 "
天 然 6 号 砕 石	398 "	—	—
天 然 7 号 砕 石	1,164 "	1,039 "	520 "
混 合 剤	6 "	6 "	6 "
スラグ配合割合(骨材に対し)	約 25 %	約 50 %	約 75 %

表10 試 験 結 果

項 目	規 格 値	配合量(1)	配合量(2)	配合量(3)
曲げ強度 (kgf/cm ²)	35	55	40	35
空 隙 率 (%)	17	20.5	21	21.5
透水係数 (cm/sec)	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²
ス ラ グ 配 合 割 合		約25%	約50%	約75%

7. おわりに

コークスベッド式下水汚泥溶融再資源化プロセスの概要と本プロセスで製造されるスラグの有効利用について報告した。スラグの再資源化に関しては、各地で実用化が始められているが、大阪府「溶融スラグ有効利用検討分科会」殿及び日本下水道事業団殿指導のもとに実績の積み重ねを行うと共に、更に付加価値の高い利用方法について引き続き研究開発を行っている。

本プロセスは、建設省・日本下水道事業団殿が強力に推進されている汚泥の集中処理、汚泥の建設資材化を目的とした下水汚泥広域処理事業の第一期工事である兵庫西エースセンター汚泥溶融設備(処理能力40Ton-DS/Dx2系列;汚泥固形物基準)及び大阪北東部エースセンター汚泥溶融設備(処理能力10Ton-DS/Dx2系列)に採用され、平成元年11月より稼働し、更に、平成2年7月から、6号機である大阪府中央処理場殿汚泥溶融設備(処理能力15Ton-DS/D)が順調に稼働しており、現在、兵庫西エースセンターでは3号炉が建設中である。

尚、兵庫西汚泥溶融設備はスチームタービン発電設備を有する世界最大規模のプラントである。本プロセスが、汚泥溶融処理の1つの方法として、少しでもお役に立てるように改良を重ねていく所存である。最後に、本研究開発に対し、ご指導賜った京都大学平岡正勝教授、大阪府殿、安威川流域下水道組合殿及び日本下水道事業団殿の関係各位に感謝の意を表します。

《参考文献》

- (1) 玉瀬富夫、大屋弘一、宮畑敏三;下水汚泥溶融スラグの有効利用についての基礎実験(水冷スラグ)
第20回下水道研究発表会
PP741-743(1983)
- (2) 平岡正勝、酒井伸一、織田稔幸;代替エネルギーによる汚泥プロセスとスラグの再利用に関する研究-冬季汚泥に対する実験的検討-
第20回下水道研究発表会
PP744-746(1983)
- (3) 平岡正勝、酒井伸一、小林信博;代替エネルギーによる汚泥溶融プロセスとスラグの再利用に関する研究
-実証研究結果の統括-
第21回下水道研究発表会
PP662-664(1984)
- (4) 平岡正勝、織田稔幸、玉瀬富夫;下水汚泥溶融スラグの有効利用に関する研究
第21回下水道研究発表会
PP659-661(1984)
- (5) 浜弘和、小林信博;溶融スラグの使用例について
第24回下水道研究発表会
PP691-693(1987)
- (6) 常深武志;汚泥溶融技術について
-コークスベッド式汚泥溶融処理プロセス-
日刊工業新聞社セミナー
PP81-93(1988)
- (7) 横山明彦、常深武志、市川宗春;コークスベッド溶融法による下水汚泥の溶融システム
環境技術 PP24-31 Vol.17
No.6(1988)