

下水汚泥炭化システム及び
生成される炭化製品の諸物性の
技術評価に関する報告書

平成 15 年 11 月

日本下水道事業団 技術開発部

「下水汚泥炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性」
の技術評価について

地球温暖化防止や資源循環利用型の社会形成が求められているなか、下水道においても発生汚泥の減量化とともに、下水汚泥有効利用の促進が課題となっている。下水汚泥炭化システムは、従来の脱水汚泥、焼却灰、溶融スラグ等の下水汚泥処理処分形態に加わる新しい汚泥資源化技術として日本下水道事業団が民間との共同研究により開発したもので、炭化システムから生成される炭化物は多孔質、軽量で吸着能力を有するなど下水汚泥には無い新しい特性を有することから、土壤改良材、脱水助剤、脱臭材、ろ過材等多くの有効利用用途が考えられる新しい資材として注目されている。

今回、評価した炭化システムは、前段に乾燥機を有する乾留ガス噴出管付外熱式ロータリーキルン方式の炭化システムで、既に2箇所の団地で実機が稼動し生成した炭化物を土壤改良材および脱水助剤として有効利用している。今後とも下水汚泥有効利用を促進するための技術としての期待も大きなものがあることから、実施設計、運転管理手法および有効利用方法、炭化物の安全性等を体系的にまとめた本技術の評価が望まれた。

このような背景から平成14年10月に日本下水道事業団理事長より「下水汚泥炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性」について技術評価委員会に諮問がなされた。本委員会において、2箇所の実施設計と実証試験機での調査をもとにこの技術の評価対象範囲を炭化システム、生成される炭化製品の諸物性、緑農地利用等有効利用技術ならびに炭化物発熱安全性評価試験法とし、技術の特徴、施設設計および運転管理の留意事項を中心とした審議が行われた。こうした審議を踏まえ「下水汚泥炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性の技術評価」が平成15年11月に技術評価委員会より理事長に答申された。

下水汚泥炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性の技術評価に関する報告書とその別添資料をとりまとめたものが本報告書である。本報告書が下水汚泥炭化システムの施設設計、運転管理ならびに生成する炭化物を下水道資源として安全かつ有効に利用するために広く利用されることによって、下水汚泥を資源として有効利用の推進が図られることを期待している。

平成15年11月

日本下水道事業団技術開発部
部長 酒井 憲司

審議の経過

平成14年10月	第45回	技術評価委員会
平成14年12月	第39回	下水汚泥処理処分専門委員会
平成15年7月	第40回	下水汚泥処理処分専門委員会
平成15年9月	第41回	下水汚泥処理処分専門委員会
平成15年9月	第47回	技術評価委員会

委員の構成

(平成15年9月30日現在)

技術評価委員会

会 長	柏谷	衛	東京理科大学 理工学部 土木工学科教授
委 員	藤田	正憲	大阪大学大学院 工学研究科 環境工学専攻教授
"	松尾	友矩	東洋大学 学長
"	田中	和博	日本大学 理工学部 土木工学科教授
"	楠田	哲也	九州大学大学院 工学研究院 環境都市部門教授
"	谷戸	善彦	国土交通省 都市・地域整備局 下水道部長
"	宮原	茂	国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部長
"	大矢	爽治	東京都 下水道局技監
"	齋藤	正勝	横浜市 下水道局長
"	木葉	佳成	大阪市 都市環境局長
"	谷口	尚弘	(社)日本下水道協会理事
"	大貫	三郎	埼玉県 県土整備部下水道課長
"	鈴木	章	日本下水道事業団理事
旧委員	曾小川	久貴	国土交通省 都市・地域整備局 下水道部長
"	酒井	憲司	仙台市 下水道局長
"	鈴木	宏	東京都 下水道局長
"	横山	博一	日本下水道事業団理事

(旧委員の所属職名は委員委嘱当時のもの)

下水汚泥処理処分専門委員会

会 長	大迫	健一	千葉工業大学 工学部 土木工学科 教授
委 員	落	修一	独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ リサイクルチーム 主任研究員
"	笠倉	忠夫	豊橋技術科学大学 技術開発センター 科学技術コーディネーター
"	若倉	正英	神奈川県 産業技術総合研究所 資源生活工学部 専門研究員
"	伊藤	青史	滋賀県 琵琶湖環境部 下水道計画課 主幹
旧委員	谷口	秀治	滋賀県 琵琶湖環境部 下水道計画課 主幹

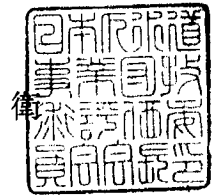
(旧委員の所属職名は委員委嘱当時のもの)



技 評 発 第 4 号
平成15年11月25日

日本下水道事業団
理事長 安中 徳二 殿

日本下水道事業団
技術評価委員会
会長 柏 谷



答 申

平成14年10月25日付け本技技発第117号をもって諮問されました「下水汚泥炭化システム及び生成される炭化製品の諸物性」について、添付のとおり、答申いたします。

目 次

(技術評価の経緯)	1
(技術評価の目的)	2
(評価対象技術と範囲)	2
(技術の特徴)	3
(炭化システム適用上の留意事項)	7
(施設設計上の留意事項)	7
(運転管理上の留意事項)	9
(建設費および運転管理費)	9
<用語集>	1 1

(技術評価の経緯)

下水汚泥の有効利用は、セメント利用の本格化を機に平成 9 年から大幅に増加している。大都市における汚泥有効利用が焼却、熔融を介した、建設資材化など多くのメニューを持つ一方、中小都市においてはコンポスト化による緑農地利用が頭打ちになるなど、有効利用が伸び悩んでいる。

下水汚泥炭化システムはこうした状況を背景に、新たに開発された汚泥資源化技術である。炭化システムから生成される炭化物は木炭に似た性質を持っている。基本物性として大きな比表面積、細孔容積を持ち、通気性、透水性、保水能力などに優れていることから、これらの特性を活かして様々な有効利用用途が提案できることが大きな特徴である。

今回、評価対象とする炭化システムは、前段に乾燥機を有する乾留ガス噴出管付外熱式ロータリーキルン方式の炭化システムで、日本下水道事業団と大同特殊鋼株式会社との共同研究により開発された。

平成 14 年 3 月末現在、滋賀県琵琶湖湖南中部浄化センターと長野県川西保健衛生施設組合にて実機が稼動中であるが、炭化システムの運転制御や投入される汚泥性状により、生成される炭化製品も物性が異なることが確認されている。

炭化製品の物性はその有効利用用途に大きく影響を与え、また近年の研究成果から炭化製品の発熱性（安全性）にも関連することが確認されている。

今後の炭化システム導入の要求に対応するため、現在までの同技術に関する実績や研究調査による知見を体系的に整理する必要がある。

このような理由から、平成 14 年 10 月、日本下水道事業団理事長より本委員会へ諮問があり、本技術の技術評価を行うこととなった。

(技術評価の目的)

本技術評価では、実証機及び実施設での運転実績、処理特性、生成される炭化物の物性及びその有効利用用途を整理するとともに、本施設の施設設計手法および運転管理手法を確立することを目的とする。

(評価対象技術と範囲)

1．対象技術の定義

下水汚泥炭化システムは、都市下水等から発生する有機汚泥を原料とする炭化物生成システムである。本技術評価では、以下の要件を満たすものを対象とする。

- (1) 脱水汚泥の投入から炭化製品の生成にかかる一連の運転を連続的に行う連続炭化システムとする。
- (2) 炭化システムは炭化炉前段に乾燥機を付けた乾燥炭化システムとする。
- (3) 炭化炉は乾留ガス噴出管付外熱式ロータリーキルン型とする。
- (4) 炭化工程において汚泥から発生する乾留ガスを燃料として利用するシステムとする。
- (5) 乾燥機は直接熱風攪拌翼付乾燥機とする。
- (6) 炭化の原料となる脱水汚泥は高分子系凝集剤を使用した脱水汚泥を原則とする。

2．評価の範囲

本技術評価では炭化システム、生成される炭化物の物性及び有効利用用途までを評価の範囲とする。炭化システムについては脱水汚泥の受け入れから生成炭化物の梱包システムまでのシステム基幹ラインと、付随する排気ガス処理ライン、熱交換ライン、燃料供給ラインなどを含む範囲とする。

炭化製品については炭化製品の物性を評価の対象とする。

有効利用については既に JS において調査実績のある緑農地利用、脱水助剤利用、脱臭剤利用の各有効利用用途について評価の対象とする。

また、「炭化物自己発熱特性評価試験マニュアル(案)」の作成・提案を評価の対象とする。

(技術の特徴)

本技術の特徴は以下のとおりである。

1. 炭化システム

- (1) 脱水汚泥を低酸素状態で加熱することで、水分及び乾留ガスを放出し炭素を主体とした資材(炭化物)を生成するシステムである。
- (2) 炭化システムでは乾燥工程、炭化工程を経ることで木炭に似た物性を持ち、安定した炭化物を生成することができる。
- (3) 炭化炉では 700～800 の温度で炭化物を生成する。
- (4) 炭化炉本体は炭化物生成過程で発生する乾留ガスを利用して運転するため、起動時を除き、燃料を必要としない。
- (5) 炭化炉排気ガス及び熱風炉排気ガスの排熱を、熱交換器で回収し乾燥用熱風炉で利用するため燃料消費量を削減することができる。
- (6) 炭化炉から発生する排気ガスは炉内に配置された排気ガス処理室で二次燃焼を行うことでガスの安定化と脱臭処理が行われる。
- (7) 炭化システムの地球温暖化に係る CO₂換算排出量は、約 310kgCO₂/wet-t である。また、炭化により汚泥中の有機炭素が無機炭素に固定化されるため、緑農地利用などにおいては、固定化された分を CO₂換算排出量から削減できる。更に炭化過程が還元性反応のため、N₂O 生成が抑制される。

- (8) 炉内レトルト壁面温度を制御し炭化物の乾留度合いを管理することで、自己発熱性の低い安定した炭化製品を得ることができる。

2 . 炭化製品

適切に運転管理されている炭化システムから得られる炭化製品の性状は以下のとおりである。

- (1) 黒色を呈し、粒径が 1mm ~ 5mm の範囲にある。
- (2) 炭化製品に含有される炭素 (C)、水素 (H)、酸素 (O)、窒素 (N) の組成は以下のとおりである。
- | | | | |
|---|---|-----------|----------|
| C | : | 25 ~ 45 | % (DS) |
| H | : | 0.7 ~ 1.4 | % (DS) |
| O | : | 2.3 ~ 4.5 | % (DS) |
| N | : | 2.2 ~ 4.5 | % (DS) |
- (3) 細孔構造を有した形態で、細孔構造の目安となる比表面積は概ね 10 ~ 90m²/g である。
- (4) 下水汚泥炭化物には他資材を原料とした炭化物と比べ下水由来の可給態りんが多く含まれるため、緑農地利用では植物への養分供給が可能である。
- (5) 炭化の進行程度 (乾留度合い) により炭化製品の自己発熱特性が左右される。炭化が十分に進行した炭化物は、熱的にも安定し発火温度は約 350 であり、木炭製品と同等の値を示す。一方炭化の進行が十分でない炭化物では、発火温度が約 200 と低く、自己発熱性も高い。炭化製品の自己発熱特性は炭化物の発火温度や炭化物中に含まれる水素 (H) と炭素 (C) の原子数比 H/C を測定することで確認ができる。簡易な指標として精錬度を用いることもできる。
- (6) 炭化温度は概ね 700 ~ 800 であるため、汚泥中に含まれる重金属のうち

沸点の高い重金属などは炭化製品中に残存する割合が多くなる。残存する重金属は脱水汚泥と比較し約 2～3 倍（DS 当り）に濃縮される。

（7）炭化製品中の重金属溶出量は、関連法令の基準値を満たすものである。また、重金属は約 90%以上が結晶態等の溶出しにくい形態で存在する。

3．有効利用

3.1 緑農地利用

炭化製品には透水性、通気性、保肥能力があり、土壌改良材、花卉植物の培土として利用できる。炭化製品は熱分解操作を受けることで、コンポスト汚泥、乾燥汚泥と異なる以下の特性を有する。

（1）炭化製品の化学特性

pH は中性付近を示し、酸性土壌の pH 改善に利用できる。土壌中の塩類濃度の指標となる電気伝導度（EC）は 0.5dS/m 程度であり、炭化製品を多量に施しても濃度障害が生じる可能性は少ない。

炭化製品は、木炭に比べて植物が利用しやすい有効態りん酸を多く含有している。

炭化製品の窒素含有率は土壌に比べ高く 3%（DS）程度であるが、その窒素は難溶解性であり植物には利用できない。炭化製品を施用した土壌においては、施肥される窒素分は炭化物に植物の利用可能な形態で吸収され、徐々に肥効が発現する特性を有する。また、栽培試験によれば、炭化製品は窒素供給を抑制する効果があり、炭化製品が土壌中の窒素を吸着し、植物への供給を抑制することが示唆される。

炭化製品の陽イオン交換容量（CEC）は概ね 5～15cmol(+)/kg の範囲であ

る。この観点からは CEC を高めるのに有効な資材とはいえないが、細孔構造を持つことや、表面官能基による交換によって栄養塩を保持できることから、保肥能力と緩衝能力（過剰な肥効を緩衝する）を持つ資材であるといえる。

（２）炭化製品の物理特性

炭化製品の混合により、土壌の透水性が改善される。

炭化製品単体の有効水分は 100 l/m³ である。炭化製品の混合は、保水性の改善に有効である。

炭化製品の混合により、土壌の通気性を改善することができる。

（３）花卉への適用性

栽培管理が容易なキンギョソウおよびより高度な栽培管理が必要なシクラメンの培土として利用した栽培試験の結果、炭化製品の適用性は以下のとおりである。

炭化製品の保肥能力と緩衝能力を利用して、多肥条件においても濃度障害を回避させるなど、養分供給をコントロールすることができる。

炭化製品の施用により均質な培土となり、植物の生育における個体差が少なくなる。

シクラメンの培養土として用いる場合は、出芽を妨げる場合があるため、施用時期に注意が必要である。

（４）重金属の影響

炭化製品には脱水汚泥中の重金属が濃縮されるため、関連法令を遵守するよう施用する必要がある。

炭化製品中の重金属は溶出しにくい形態であり、重金属の植物への移行はほとんど認められない。

3.2 脱水助剤利用

ベルトプレス脱水機、遠心脱水機、圧入式スクリュープレス脱水機、フィルタープレス脱水機の脱水助剤として炭化製品を利用することで、脱水汚泥含水率を低減する効果が期待できる。

3.3 脱臭剤利用

炭化製品の細孔構造を利用し、活性炭と同様に脱臭剤として利用することが可能である。硫化水素カラム試験によれば、総吸着量、破過時間は、市販活性炭の約 1/3 である。

(炭化システム適用上の留意事項)

炭化システムは有効利用を前提とした技術であるため、適用にあたっては以下の項目に留意する。

1. 下水汚泥炭化製品は他の炭化物同様に多孔質で比表面積が大きい。下水汚泥炭化物特有の物性は可給態りんを多く含むことである。このような炭化物の特徴を活かした利用先が製品の有望な市場となる。
2. 炭化は有効利用技術であるため炭化製品の有効利用用途、流通量を確定し、それに見合った施設規模を決定する。

(施設設計上の留意事項)

1. 炭化システムの設計に当たっては、発生汚泥量、生成炭化製品量、有効利用

用途及び、有効利用量の把握を行う必要がある。想定した有効利用用途に応じて、炭化製品の貯留、搬送形態の計画を行う。緑農地利用などでは流通量の季節変動に配慮することが重要である。

2. 炭化システムは 24 時間連続運転を基本とする。なお、汚泥投入量が少ない場合の対応として、間欠運転も可能である。
3. 炭化システム一基当たりの最大処理能力は、1 日 24 時間運転で脱水汚泥 40wet-t/日とする。
4. 炭化システム定格能力に対する運転負荷率は、炭化製品の品質保持の観点から 80%以上とする。
5. 一般的な下水汚泥では、炭化炉内部の二次燃焼室で排気ガスの安定化が図られるため、炭化炉排気ガス処理設備は特に必要ない。しかし、下水汚泥の性状が通常と異なるような場合や、し尿処理汚泥など下水汚泥以外の廃棄物を受け入れる場合には、事前に炭化試験を行い規制値との確認を行うことが望ましい。
6. 炭化製品中のダイオキシン濃度は検出限界以下であり、炭化システムの総合排気ガス中のダイオキシン濃度は規制値を満たしている。なお、ダイオキシン排出量を更に削減させる必要がある場合には、二次燃焼室の設計条件を適切に設定することによって対応が可能である。
7. 炭化製品は自己発熱特性を持つため、加湿装置を設け、貯留設備における温度管理を行うなど、十分な蓄熱防止対策をとる。また、製品として一般ユーザーに渡す場合は、PL 法に配慮し管理方法などについて十分な安全表記を行う。炭化製品の自己発熱特性の評価は、「炭化物自己発熱特性評価試験マニュアル(案)」により行う。

(運転管理上の留意事項)

- 1 . 炭化炉の間欠運転を行う場合、起動時に多量の燃料が消費されるだけでなく、生成される炭化物の性状が不安定になるため、極力連続運転時間を長く取ることが望ましい。
- 2 . 炭化製品の自己発熱特性を抑制するため、乾燥機、炭化炉の温度管理を行い炭化の進行程度を管理する。現場で採用できる簡易な指標として精錬度を用いる場合は、生成される炭化製品の精錬度を 3 以下に抑える。精錬度の測定方法は「炭化物自己発熱特性評価試験マニュアル(案)」によるものとする。また、搬送、貯留においては加湿状態で取扱い、温度管理に留意するなど製造から利用までの取り扱いに注意するほか、利用者にもこれを徹底する。

(建設費および運転管理費)

- 1 . 炭化システムの機械・電気設備建設費は、過去の実績では 5wet-t/日規模では約 6 億円、20wet-t/日規模では約 12 億円である。なお、この費用には、土木・建築施設、梱包設備等は含んでいない。また、本評価の前提としていない特殊条件がある場合には、別途追加費用が必要となる。
- 2 . 実機及び実証試験機の運転稼働実績から運転特性は以下のとおりである。
 - (1) ユーティリティの大部分を占める灯油使用量は、過去の実績では汚泥 1 wet-t 当り 5wet-t/日規模では約 160 l、20wet-t/日規模では約 80 l である。なおユーティリティ使用量は投入される汚泥含水率、連続運転時間、気候等の条件で変動する。
 - (2) 年間の点検補修費用は、炭化処理システム建設費の約 2 ~ 3 % である。
 - (3) 炭化システムの 運転要員数は、炭化炉の台数により変化し、4 直 3 交代で単独で運転管理する場合の標準的な運転要員数は、1 基の場合 10 人、2 基の場合 14 人 (炭化炉 40wet-t/日炉) である。ただし、他の水処理、汚泥

処理などの管理と共同化する場合には、運転要員数を削減することができる。

<用語集>

・原子数比 H/C

炭化物中の水素(H)と炭素(C)の原子数比をあらわしたもの。炭化物の炭化進行の程度を表す指標として利用できる。H/C が概ね 0.3 以下の炭化物では炭化の進行程度が高いといえる。

$$\begin{aligned} \text{H/C 比} &= \text{H 含有量\%} \times \text{C 原子量} / \text{C 含有量\%} / \text{H 原子量} \\ &= \text{H 含有量\%} \times 12.011 / \text{C 含有量\%} / 1.008 \end{aligned}$$

・精練度

木炭精練度計を用いて、粉碎したサンプルの電気抵抗値 (10^t /cm) を測定し、t 値を精練度とする。精練度は、電気抵抗の指標として木炭の分野で定義されており、精練度の値が低いほど、炭化の進行程度が高いことを表している。

・EC

電気伝導度は土壌水中の塩類濃度の指標として用いられる。塩類濃度が高すぎると、浸透圧の関係で、根からの吸水が妨げられてしまう。農業や植栽用の土壌の電気伝導度は、1.5dS/m以下が望ましいとされる。

・CEC

陽イオン交換容量 (CEC) は、土壌粒子が静電気力で吸着できるイオンの総量を表すもので、保肥力の指標としてよく用いられる。土壌粒子は通常マイナスに荷電しており、カルシウム、マグネシウムなどの陽イオンの養分を保持する。植栽用土壌として CEC が高いとされるものは 20cmol(+)/kg を越える。