過熱蒸気を用いたダイオキシン類汚染土壌浄化技術の開発
Development of The Purification Method of Dioxins Pollution Soils Using A Superheated Steam

石渡　寛之*　　稲葉　力**
Hiroyuki Ishiwata　　Tsutomu Inaba

要　約

ダイオキシン類対策特別措置法の施行を端緒に，土壌等のダイオキシン類汚染に対する対策技術の需要が高まっている．対策技術の中で，熱による分解・無害化技術が数多く検討されているが，処理に伴うエネルギー投入量が大きく，処理コストが高くなる．そのため，ダイオキシン類汚染土壌等の処理対策には，処理コストおよび環境負荷の低減が大きな課題となっている．そこで，処理コストおよび環境負荷の低減を主目的に，過熱蒸気を利用した技術に着目した．今回，これまでの基礎的な検討の成果を踏まえ，実装置の約 10 分の 1 規模のパイロット装置を製作し，実証実験を行った．その結果，本技術によって，高濃度から低濃度までの幅広いダイオキシン類汚染土壌を対象に，除去率 99.9％以上で，確実かつ安定して処理できることを実証することができた．

目　次

§ 1. はじめに
§ 2. 技術の概要
§ 3. 実験内容
§ 4. 実験結果
§ 5. まとめと展望
参考文献

§1. はじめに

平成 12 年 1 月に，ダイオキシン類対策特別措置法が施行され，土壌中ダイオキシン類の環境基準が制定された．その後，平成 14 年 9 月には，水底底質の汚染に係る環境基準（底質の環境基準）が追加された．また，その底質の環境基準の制定を受け，国土交通省港湾局では，ダイオキシン類による底質の汚染に係る技術的対応方策「港湾における底質ダイオキシン類対策技術指針」（以下，指針という）を平成 15 年 3 月に取りまとめている．その後，海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の改正に伴い，同年 12 月に指針[1)] の内容を一部改定している．その中で，重要な技術開発課題として，ダイオキシン類の分解・無害化処理技術を挙げている．

このように，ダイオキシン類対策特別措置法の施行を端緒に，土壌および底質のダイオキシン類汚染に対する対策技術の需要が高まっている．

土壌や底質，廃棄物中のダイオキシン類を分解・無害化する処理技術は，①熱による分解，②化学反応による分解，および③生物作用による分解の 3 種類に大別され，方式によって分類されている（**表―1**）．

それらの処理技術の中で，熱による分解・無害化技術が数多く検討され，実用に近い段階にある．しかしなが

表―1　ダイオキシン類の分解・無害化処理技術

分類		技術の概要
熱分解	溶融方式	溶融炉またはそれに準じた処理容器を用い，1,300℃～2,000℃程度で土壌とともに汚染土壌中のダイオキシン類を熱分解し，除去する方法．
	高温処理方式	セメント工場等によるロータリーキルン等の焼却炉を用い，汚染土壌を 900℃～1,400℃程度で加熱し，ダイオキシン類を熱分解，除去する方法．
	低温処理方式	ダイオキシン類汚染土壌を酸素欠乏状態・減圧あるいは真空に近い状態等の条件下で，400℃～850℃程度で加熱し，ダイオキシン類を熱分解し，除去する方法．
化学分解	触媒方式	ダイオキシン類汚染土壌に金属ナトリウム等の触媒を添加・混合して脱塩素を図り無害化する方法．処理温度は，300℃～500℃程度で様々な方法が発表されている．
生物分解	バイオレメディエーション	ダイオキシン類汚染土壌中の微生物あるいは他から微生物を導入して，微生物の力でダイオキシン類を分解する方法．

* 技術研究所技術研究部環境技術研究課
**技術研究所技術研究部

ら，熱による分解・無害化技術は，処理に伴うエネルギー投入量が大きく，処理コストが高くなる．そのため，ダイオキシン類汚染土壌等の処理対策には，処理コストおよび環境負荷の低減が大きな課題となっている．

そこで，ダイオキシン類汚染土壌等の処理対策の上で，大きな課題となっている処理コストおよび環境負荷の低減を主目的に，空気に比べ単位面積あたりの熱容量が大きく，対象物を乾燥させる能力が高い，さらには高温域で高活性になるといわれている過熱蒸気[2]を利用した技術に着目した．これまでに，フロン分解技術として実用化された過熱蒸気法[3]を基に基礎的な検討を進め，その過熱蒸気法がダイオキシン類汚染土壌の分解・無害化処理に有効であることを確認した[4]．今回，それら基礎的な検討の成果を踏まえ，実装置の約 10 分の 1 規模のパイロット装置を製作し，実証実験を行った．本報告では，その結果を報告する．

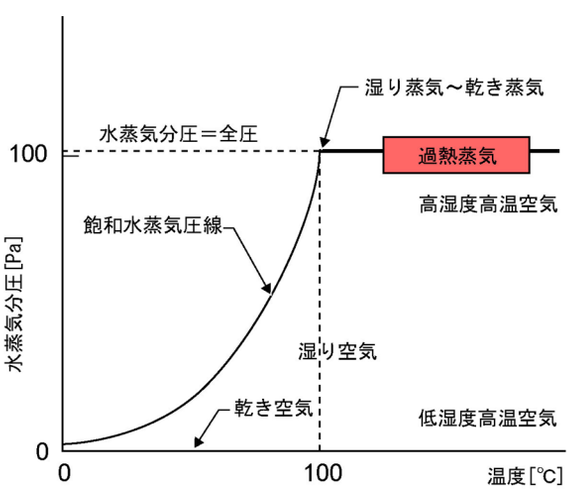
§2. 技術の概要

2—1　技術の原理

過熱蒸気は，操作圧力下で沸騰気化した水をさらに加熱して沸点以上の温度とした完全に気体状態の水を意味する（**図—1**）．すなわち，厳密ではないが，慣習的に水の沸点を 100℃ とすれば，常圧で 100℃ 以上の水蒸気が過熱蒸気であるといえる．

過熱蒸気は，先にも述べたとおり，加熱蒸気に比べ単位面積あたりの熱容量が大きく，対象物を乾燥させる能力が高い等，優れた熱伝達特性を有している．また，水に溶存する酸素量は 6 mℓ/kg 程度であることから，水から生成された過熱蒸気中には数 ppm の酸素しか存在しない．したがって，100％過熱蒸気雰囲気は，酸素が含んでいないとみなせるため，ほぼ無酸素状態すなわち還元雰囲気での熱分解が可能となる．

本技術の処理原理は，このような過熱蒸気の熱伝達特性や還元雰囲気での熱分解といった優れた特性を利用したものである．

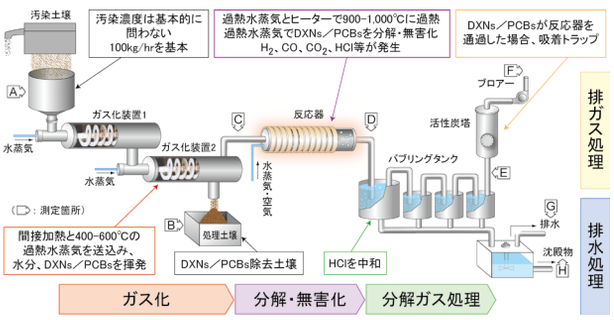


図—1　過熱蒸気の説明線図（大気圧＝全圧）

2—2　技術のプロセス

本技術では，間接加熱を行いながら過熱蒸気雰囲気下でダイオキシン類汚染土壌からダイオキシン類を気化（ガス化）させ，ガス化したダイオキシン類を過熱蒸気によって分解・無害化する．

今回，製作したパイロット装置のシステム構成図および写真をそれぞれ**図—2**，**写真—1** および **写真—2** に示す．



図—2　パイロット装置のシステム構成図

写真—1　パイロット装置の写真（ガス化装置部）

写真—2　パイロット装置の写真（反応器部）

⑴　間接加熱熱脱着プロセス

①　ガス化装置1：汚染土壌を間接加熱し，汚染土壌中の水分を蒸発させるとともに，その水分を過熱蒸気として利用する．

②　ガス化装置2：汚染土壌を過熱蒸気雰囲気下で600℃～700℃に間接加熱し，汚染土壌中のダイオキシン類等をガス化させる．

⑵　分解・無害化プロセス

反応器：ガス化したダイオキシン類等を900℃～1,000℃に間接加熱し，過熱蒸気と2秒前後接触させる．加水分解および熱分解を主とした反応で，ダイオキシン類は，COやH_2，CH_4，CO_2，HCl等に分解・無害化される．COやH_2等は，反応器の後段で空気と接触させCO_2，H_2Oに転換される．

⑶　排ガス処理プロセス

バブリングタンク：分解・無害化ガスをバブリングによって急冷するとともに，ガス中に含まれる微細な土粒子等のダストを除去する．HClはバブリング水に溶解させた$Ca(OH)_2$で中和する．なお，最終的に排ガスは，活性炭を通して大気へ放出する．

⑷　排水処理プロセス

凝集沈殿槽：バブリング水中の微細な土粒子等のダスト等を凝集沈殿分離によって除去，回収する．凝集沈殿物を除去，回収後のバブリング水は，ダイオキシン類濃度を確認後，排水する．

2―3　技術の特徴

本技術（本パイロット装置）は，国内外において豊富な実績を有するフロン分解技術の応用である．本技術の大きな特徴は，処理プロセスにおいて，ダイオキシン類等の有害物質の抽出から分解・無害化まで密閉系（システム内が約50 mm Aqの微負圧状態）であることから，抽出濃縮されたダイオキシン類等を取り扱う必要がない点である．

また，以下に示す特徴を有する．

⑴　過熱蒸気の利用

間接加熱熱脱着プロセスでは，過熱蒸気をダイオキシン類等の有機物の揮発を誘発する熱媒体，分解・無害化プロセスでは，揮発したダイオキシン類等の有機物の分解に利用する．

⑵　2段式ガス化装置の活用

幅広い含水率の汚染土壌に対して対応可能で，なおかつ高濃度から低濃度の幅広いダイオキシン類汚染土壌等の処理に対応可能である．

⑶　可搬式でオンサイト処理が可能

排ガスの2次燃焼処理や特別な排水処理等の処理プロセスがなく，主反応を過熱蒸気のみによるきわめてシンプルな処理システムである．したがって，処理装置は小型で移動運搬ができ，オンサイト処理にも適用することができる．

§3. 実験内容

3―1　パイロット装置の概要

各実験に用いたパイロット装置の主要諸元を**表―2**に示す．

本パイロット装置の処理能力は，実装置の約10分の1規模を想定した100 kg/h ～ 150 kg/hである．なお，本パイロット装置のシステム構成図および写真は，前述の**図―2**，**写真―1**および**写真―2**に示したとおりである．

3―2　試料土壌

各実験に供した汚染土壌の性状を**表―3**に示す．

ダイオキシン類汚染土壌は，環境省の協力をいただき，豊能郡環境施設組合から相対的に高濃度（実験Aと実験Bに供試）および低濃度（実験Cに供試）の2種類を入手した．それら高濃度および低濃度ダイオキシン類汚染土壌中のダイオキシン類濃度は，それぞれ52,000～93,000 pg-TEQ/g，1,900～3,200 pg-TEQ/gであった．

表―2　パイロット装置の主要諸元

プロセス・装置名		数量	仕　　様
間接加熱熱脱着プロセス			
	土壌ホッパ	1	V = 0.1 m^3（W = 150 kg）
	ガス化装置	2	Φ 250 mm，L = 3,300 mm
	処理土ボックス	1	V=1 m^3
分解・無害化プロセス			
	反応器	1	Φ 150 mm，L = 2,200mm
排ガス処理プロセス			
	バブリングタンク	4	全水量= 620 ℓ
	活性炭塔	1	活性炭量= 2 kg
排水処理プロセス			
	凝集沈殿槽	1	V = 1 m^3
共通			
	ボイラ	1	
	ブロア	1	最大吐出量= 4 m^3/min

表―3　汚染土壌の性状

実験名		DXNs*（pg-TEQ/g）	含水率（%）	平均粒径（μm）	強熱減量（%）
実験A	A–1	58,000	12.7	2,070	3.6
	A–2	76,000	14.0	2,120	3.3
実験B	B–1	93,000	12.9	1,510	3.2
	B–2	52,000	13.4	1,770	3.1
実験C	C–1	1,900	14.6	1,520	6.3
	C–2	3,200	16.2	1,170	6.5

*：DXNsは，ダイオキシン類の略．

3—3　実験方法

⑴　実験目的と処理条件

これまでの基礎実験に基づいた処理条件における本技術の確実性や安全性等を実証するため，間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置（第1ガス化装置および第2ガス化装置）での滞留時間および加熱制御温度を変動させ，各実験を行った．また，本パイロット装置での処理性能での安定性を実証するため，長時間連続運転による実験を行った（**表—4**）．

⑵　モニタリング

各実験において，処理土壌（測定箇所：B）のダイオキシン類濃度を測定した．また，本パイロット装置全体でのダイオキシン類の分解・無害化率を確認するため，処理中ガス（測定箇所：C，DおよびE），排ガス（測定箇所：F），排水（測定箇所：G），および排水中沈殿物（測定箇所：H）中のダイオキシン類濃度も確認した．なお，各測定箇所の位置は，前記した**図—2**の本パイロット装置のシステム構成図に示したとおりである．

各実験で行った測定および分析の方法を**表—5**に示す．また，ダイオキシン類等汚染土壌の熱処理において，副生成物として懸念される水酸化PCBおよび全有機ハロゲン化合物は，実験Aの A–1 Runのみではあるが，汚染土壌（A），処理土壌（B）および沈殿物（H）で測定した．なお，水酸化PCBについては，排ガス（F）および排水（G）でも測定した．

表—4　実験目的と処理条件

	実験A		実験B		実験C	
	A–1	A–2	B–1	B–2	C–1	C–2
実験目的	処理時間による効果確認		処理温度による効果確認		長時間運転での確認	
運転時間	1時間				6時間	
加熱温度	700℃*		600℃	500℃	700℃	500℃
滞留時間	30分*	20分	30分		30分	20分
反応器温度	1,000℃					

*：基礎実験に基づく処理条件で，標準条件とした．

表—5　各実験で行った測定方法および分析方法

測定箇所	対象物	測定・分析項目	測定・分析方法
A	土壌（汚染土壌）	ダイオキシン類	HRGC-HRMS法*
		含水率	JIS A 1203
		強熱減量	昭63環水管127号
		粒度組成	JIS A 1204
B	土壌（処理土壌）	ダイオキシン類	HRGC-HRMS法
		含水率	JIS A 1203
		強熱減量	昭63環水管127号
		粒度組成	JIS A 1204
C	処理中ガス	ダイオキシン類	JIS K 0311（2005）
D	処理中ガス	ダイオキシン類	JIS K 0311（2005）
E	処理中ガス	ダイオキシン類	JIS K 0311（2005）
F	排ガス	ダイオキシン類	JIS K 0311（2005）
		大気汚染防止項目	JIS K 0103他
G	排水	ダイオキシン類	JIS K 0312（2005）
		排水基準項目	JIS K 0102他
H	沈殿物	ダイオキシン類	平4厚告第192号
		含水率	JIS A 1203

*：ダイオキシン類に係る土壌調査マニュアル（平成12年1月環境庁水質保全局土壌農薬課）に即した方法

§4. 実験結果

4—1　処理性能

ダイオキシン類濃度が1,900～93,000 pg-TEQ/gの汚染土壌を対象に，計6回（実験A，実験Bおよび実験Cで各2Run）の浄化実験を行った．その結果を**表—6**に示す．

処理土壌中のダイオキシン類濃度は，定量下限値未満～27 pg-TEQ/gとなり，土壌環境基準（1,000 pg-TEQ/g）を大きく下回る濃度まで浄化された．また，ダイオキシン類等汚染土壌の熱処理において，副生成物として懸念される水酸化PCBおよび全有機ハロゲン化合物は，処理土壌および系外への排出物の排ガス，排水，沈殿物において，すべて定量下限値未満であった．なお，汚染土壌中の水酸化PCBおよび全有機ハロゲン化合物は，それぞれ21 ng/g，9 μg/gであった．この結果から，本技術での処理において，水酸化PCBおよび全有機ハロゲン化合物の副生成の可能性は，きわめて少ないと考えられた．

間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置（第1ガス化装置および第2ガス化装置）での滞留時間を30分とした標準条件での処理に対して，20分と滞留時間を33％短縮させた処理条件でも同様の浄化結果が得られた．また，同プロセスの間接加熱の制御温度を700℃とした標準条件での処理に対して，500℃まで下げた処理条件でも同様の浄化結果が得られた．さらに，長時間連続運転においても，1時間の運転と同様な浄化結果が得られ，安定的な処理性能を実証することができた．ただし，高濃度ダイオキシン類汚染土壌を対象に，間接加熱の制御温度を500℃とした処理条件の場合，処理土壌は環境基準以下まで十分に浄化されるが，系外への排出物のうち，排ガスおよび沈殿物中のダイオキシン類濃度がそれぞれ排出基準，土壌環境基準を超過した．したがって，高濃度ダイオキシン類汚染土壌を対象とする場合，処理条件の設計において，間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置の加熱制御温度の設定に留意が必要であることがわかった．

表―6　ダイオキシン類の分析結果

対象物	実験 A		実験 B		実験 C	
	A–1	A–2	B–1	B–2	C–1	C–2
汚染土壌 A* (pg-TEQ/g)	58,000	76,000	93,000	52,000	1,900	3,200
処理土壌 B (pg-TEQ/g)	27	0.027	1.3	16	0.0014	ND
	土壌環境基準：1,000 pg-TEQ/g					
排ガス F ($ng\text{-}TEQ/m^3$)	0.0038	0.0089	0.021	0.28	0.025	0.021
	排ガス基準：0.05 $ng\text{-}TEQ/m^3$					
排水 G (pg-TEQ/ℓ)	1.7	6.0	1.7	6.7	2.4	2.4
	排水基準：10 pg-TEQ/ℓ					
沈殿物 H (pg-TEQ/g)	510	520	320	4,600	430	64
	土壌環境基準：1,000 pg-TEQ/g					

*：A，B，F，G および H は，測定箇所の位置（図―２）を示す．
ND：不検出（定量下限値未満）

4―2　汚染土壌からのダイオキシン類除去率

各実験において，汚染土壌の投入土量と処理土量の乾燥重量，およびそれらのダイオキシン類濃度から，ダイオキシン類総量を求め，以下の式に基づき，汚染土壌からのダイオキシン類除去率を算出した．

除去率（%）＝（①－②）÷①×100
①：汚染土壌中のダイオキシン類総量
②：処理土壌中のダイオキシン類総量

実験 A，実験 B および実験 C で各 2Run，合計 6 回の浄化実験を行った．その結果を**表―7** に示す．

汚染土壌からのダイオキシン類除去率は，99.95～100［99.92～99.997］%であった．なお，［　］内はダイオキシン類検出値が定量下限値未満であった場合，定量下限値を用いて除去率を算出した値である．

間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置での滞留時間や加熱制御温度を変動させた各処理条件で，除去率は少なくとも 99.9%以上となり，大きな相違は見られなかった．また，本パイロット装置での処理性能での安定性を実証するための長時間連続運転でも，1 時間運転と同等以上の除去率が示された．

ここで，環境省の「平成 17 年度低コスト．低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査及びダイオキシン類汚染土壌浄化技術等確立調査報告書」対象技術の評価結果[5] から，熱処理技術の間接加熱酸化分解法（以下，技術 A という）および間接熱脱着＋水蒸気分解法（以下，技術 B という）を選定し，本技術と比較する．技術 A および技術 B の汚染土壌からのダイオキシン類除去率は，それぞれ 99.90～99.9996［99.84～99.94］%，99.986～99.99995［99.94～99.996］%と報告されている．このことから，本技術も同程度の除去性能を有していることがわかった．

表―7　汚染土壌からのダイオキシン類除去率

実験名		汚染土壌中の DXNs* 総量 (ng-TEQ)	処理土壌中の DXNs 総量 (ng-TEQ)	除去率 (%)
実験 A	A–1	4,200,000	1,900 ［2,000］	99.95 ［99.95］
	A–2	4,300,000	1.4 ［210］	99.99997 ［99.995］
実験 B	B–1	8,100,000	120 ［220］	9.9985 ［99,997］
	B–2	3,900,000	1,200	99.97
実験 C	C–1	730,000	0.51 ［580］	99.99993 ［99.92］
	C–2	810,000	0 ［380］	100 ［99.95］

*：DXNs は，ダイオキシン類の略．

以上の結果から，本技術は，高濃度から低濃度の幅広いダイオキシン類汚染土壌からダイオキシン類を，確実かつ安定して除去できる性能を実証することができた．

4―3　処理プロセス全体でのダイオキシン類分解率

各実験において，汚染土壌と系外へ排出される処理土壌，排ガス，排水および沈殿物中のダイオキシン類総量から，以下の式に基づき，処理プロセス全体でのダイオキシン類分解率を算出した．

分解率（%）＝｛①－（②＋③＋④＋⑤）｝÷①× 100
①：汚染土壌中のダイオキシン類総量
②：処理土壌中のダイオキシン類総量
③：排ガス中のダイオキシン類総量
④：排水中のダイオキシン類総量
⑤：沈殿物中のダイオキシン類総量

実験 A，実験 B および実験 C で各 2 Run，合計 6 回の浄化実験を行った．その結果を**表―8** に示す．

処理プロセス全体でのダイオキシン類分解率は，99.89～99.9987［99.87～99.993］%であった．なお，［　］内の分解率は，除去率の場合と同様に算出した値である．

間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置での滞留時間を 30 分とした標準条件での処理に対して，20 分と滞留時間を 33%短縮させた処理条件でも 99.9%以上の分解率が得られた．また，長時間連続運転でも，間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置での滞留時間 20 分，加熱制御温度 500℃としたもっとも厳しい処理条件で，99.9%以上の分解率が得られた．ただし，長時間連続運転では，低濃度ダイオキシン類汚染土壌を対象にしている．

表－8　処理プロセス全体でのダイオキシン類分解率

実験名		ダイオキシン類総量（ng-TEQ）					分解率（%）
		汚染土壌	処理土壌	排ガス	排水	沈殿物	
実験A	A–1	4,200,000	1,900［2,000］	0.24［0.62］	1.2［1.4］	920	99.93［99.93］
	A–2	4,300,000	1.4［210］	0.45［0.70］	4.1	94	99.998［99.993］
実験B	B–1	8,100,000	120［220］	1.4［1.8］	1.2［3.1］	380	99.994［99.993］
	B–2	3,900,000	1,200	15	4.6［5.6］	3,100	99.89［99.89］
実験C	C–1	730,000	0.51［580］	5.2［6.3］	1.9［3.0］	380	99.95［99.87］
	C–2	810,000	0［380］	4.1［4.5］	1.8［3.0］	28	99.996［99.95］

高濃度ダイオキシン類汚染土壌を対象に，加熱制御温度を 500℃まで下げた処理条件では，他の処理条件と比べ，若干分解率（99.89［99.89］%）が低くなる結果となった．この処理条件（滞留時間 30 分，加熱制御温度 500℃）では，先にも述べたとおり，系外への排出物のうち，排ガスおよび沈殿物中のダイオキシン類濃度がそれぞれ排出基準，土壌環境基準を超過している．

ここで，除去率と同様に分解率についても，技術 A と技術 B と本技術を比較する．技術 A および技術 B の処理プロセス全体でのダイオキシン類分解率は，99.93～99.99［99.89～99.96］%，99.986～99.998［99.94～99.996］%と報告されている．このことから，本技術も同程度の分解性能を有していることがわかった．

以上の結果から，本技術は，高濃度から低濃度の幅広いダイオキシン類汚染土壌を対象にした場合，間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置での滞留時間 20 分，加熱制御温度 600℃が，確実かつ安定して処理できる効率的な条件であると判断される．

4―4　処理におけるエネルギー投入量

今回の実証実験に使用したパイロット装置の使用エネルギーは電気である．各実験において，パイロット装置の制御盤に表示される電圧と電流の記録から電気使用量を算出した．その電気使用量を処理土量（乾燥重量）で除して，土壌 1 t あたりの処理に要するエネルギー投入量を求めた．その結果を**表―9** に示す．

今回の実証実験における各実験のエネルギー投入量は，2,450 MJ/t～4,150 MJ/t（平均 2,980 MJ/t）であった．技術 A および技術 B でのエネルギー投入量は，それぞれ 3,400 MJ/t，4,600 MJ/t と報告されている．本技術でのエネルギー投入量は，技術 A および技術 B と単純に比較すると，65%～88%程度となった．したがって，本技術では，処理に伴うエネルギー投入量を既存技術よりも抑えられ，処理コストの低減を図ることができると考えられる．

表－9　各実験でのエネルギー投入量

実験名	実験 A		実験 B		実験 C	
	A–1	A–2	B–1	B–2	C–1	C–2
エネルギー投入量（MJ/t）	3,930	4,150	3,320	3,500	2,450	3,430
	平均：2,980					

§5. まとめと展望

今回，本技術によって，高濃度から低濃度までのダイオキシン類汚染土壌を確実かつ安定して処理できることを実証できた．また，処理条件の設計において，高濃度ダイオキシン類汚染土壌を対象にした場合，間接加熱熱脱着プロセスのガス化装置の加熱制御温度の設定に留意が必要であるといった有用な知見を得られた．

今後，実際の浄化工事では，今回製作したパイロット装置を用いたトリータビリティ試験によって，確実かつ安定して処理できる処理条件を個別設計し，より低コスト・低環境負荷となる技術提案を行い，受注に繋げたいと考える．なお，本報告は，環境省の「平成 18 年度低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査及びダイオキシン類汚染土浄化技術等確立調査」の技術として採択され，実施した成果の一部である．本報告の内容は，環境省の取りまとめや見解ではなく，共同研究開発先の大旺建設㈱の担当者および筆者らの責任において取りまとめたものである．

謝辞：本研究開発は，大旺建設㈱と共同で実施したものである．この場を借りて，大旺建設㈱の金澤氏，清水氏，百代氏，前田氏，篠原氏にお礼申し上げます．

参考文献

1）国土交通省港湾局：港湾における底質ダイオキシン類対策技術指針，平成 15 年 12 月
2）過熱水蒸気技術集成，㈱ NTS，2005.
3）金澤正澄：有機化合物の分解処理方法及びその装置（特願 2001−021398），2001.
4）石渡寛之ほか：第 13 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 94～97，2007.
5）環境省水・大気環境局：「平成 17 年度低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査及びダイオキシン類汚染土壌浄化技術等確立調査」対象技術の評価結果，平成 19 年 2 月