

実施代表者の所属機関：鉄建建設株式会社
実証テーマ名：熱分解による放射性有機廃棄物の減容処理技術の実証
事業の概要：放射性有機廃棄物を熱分解し、生成するタール及びチャーを水蒸気ガス化して減容する。減容施設としてガス化と焼却を比較し、その優劣を検証する。
実施内容：1. 広野町パ イロットプラント；①放射性有機廃棄物（原料）、チャー、タール（凝縮液）及び活性炭、洗浄水の重量、水分、放射能濃度（Bq/kg）。②ガスの容積と組成。2. 産総研パ イロットプラント及び石英管；①チャーの投入量、排出量、水蒸気量。②ガスの容積と組成。
<p>技術概要：パイロットプラントのフローと試験目標、試験項目</p> <p>【熱分解試験】放射能で汚染された樹木（ペレット化したもの）を、外熱式水平回転円筒炉に送入して熱分解し、得られたガスを冷却して凝縮液（タール+水）と乾ガスにする。固形残渣（チャー）、凝縮液及び乾ガスの重量と放射能量を把握し、熱分解の物質収支と放射能収支データを取得した（添付資料参照）。</p> <p>【ガスの放射性セシウム測定】「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料第二版）」（国立環境研、平成 24 年 3 月 26 日）p. 90 を参考に、乾ガスを蒸留水及び活性炭充填層に通して放射性セシウムを吸着し、その放射能を測定した。</p> <p>【溶出試験】JIS K0058-1 に準拠して、チャーの放射性セシウム溶出試験を行った。</p> <p>【水蒸気ガス化試験】チャーに水蒸気を送入・水蒸気ガス化によりチャーをガス化した。</p> <p>【試験目標】①熱分解ガスに移行する放射性物質の量は、焼却ガスに移行する放射性物質の量と比べると極めて少ないこと。②熱分解ガスを冷却して得た乾ガスには放射性物質が含まれていないこと（放射性物質はすべてチャーに移行する）。③本熱分解プロセスによる放射性廃棄物減容率$=100 \times \{1 - (\text{チャーの容積}) / (\text{原料の容積})\}$は 95%以上であること。</p> <p>【期待される効果】1. 焼却による減容と比べると、①発生ガスの量が少ない。②発生ガスに含まれるばいじん（放射性物質）量が少ない。③ばいじんのほぼ全量を冷却したタール液とともに除去できる。2. ばいじんを含むタール液をガス化炉に戻し乾ガスとチャーに分解することで、放射性物質をすべてチャーに移行させることができる。3. チャーを水蒸気ガス化してより一層の減容化を図り、隔離保管コストを削減できる。4. 減容が、大気及び水環境への放射性物質の排出なしに実施できる。5. 放射性有機廃棄物から得た汚染のない乾ガスを燃料としてエンジンを駆動して発電することにより、運転コストを削減できる。</p> <p>その他：</p>

除染効果：

表 1 主な除染効果データ

	伐採樹木 破砕物	圧縮固化		熱分解		水蒸気ガス化	
		木質ペレット	チャー	残渣			
		850℃約50分		900℃約60分			
体積 m ³	1	0.256	0.076	0.001			
減容率 %	0	74.4	92.4	99.9			
乾物重量 kg	100	100	17.2	1.0			
減量率 %	0	0	82.8	99.0			
濃縮率 倍(体積ベース)	---	1	2.3	71.2			

除去物発生量評価：

表 1 に示したように、残渣の発生量は、伐採樹木破砕物 100kg あたり 1.0kg であった。体積に換算すると、伐採樹木破砕物 1m³ あたり 0.001m³ であった。

作業員被ばく量評価：作業場所平均空間線量率 0.278 μSv/hr、作業時間 200 時間
 作業員最大被ばく量 100 μSv (熱分解実験、200 時間)
 作業員平均被ばく量 100 μSv

コスト評価：(添付資料)

放射能有り：30,063 円/t 2,817 円/m³
 放射能なし：21,797 円/t 2,042 円/m³

歩掛り (作業人工、作業速度)：

10t/日×330 日/年×15 年 = 49,500t
 2 人/直×4 直 = 8 人
 エネルギー収支比：408

コスト評価条件：

プラント規模：発電出力 100kW、(放射能なし 300kW)
 処理量 3,300t/年、35,200m³/年
 プラント建設費：放射能有り 7 億 1,200 万円、(放射能なし 7 億 7,200 万円)
 維持管理費：建設費の 1.5%/年 人件費：400 万円/人・年 (共通)
 固形残渣処分費：放射能有り 5 万円/t、(放射能なし 2 万円/t)

エネルギー収支比 (添付資料)

インプット：A 重油 400kWh/年
 アウトプット：売電 163,000kWh/年

除染作業における安全上の注意：定常運転時における放射性有機廃棄物の破砕作業及びチャー容器の取り外し搬出時には、マスクをする。定期修理時のチャークーラー及びタールコンデンサーの清掃時にはマスクを着用する。

試験場所 (住所)：

福島県双葉郡広野町下北迫東町 109-3
 広野町災害廃棄物処理事業分別場内

除去物保管場所と保管状況 (写真)：

耐放射線環境ゴムエスコんに収納して、広野町災害廃棄物処理事業分別場内に保管。



【添付資料】

広野町における放射性有機廃棄物熱分解減容施設の 物質・エネルギーおよびコスト収支

目的

熱分解による放射性有機廃棄物の減容処理コストを試算する。試算は、広野町に設置した熱分解ガス化試験装置（パイロットプラント）での実験結果等を用いて、広野町内に設置する商用プラント（コマーシャルプラント）の試設計を行い、その建設費、運転費及び維持費を算出する方法で行う。



処理対象廃棄物

放射能で汚染された樹木等有機廃棄物(以下、放射性有機廃棄物)

水分（湿基準）	30%
発熱量（乾基準）	高位発熱量 4,490kcal/kg-df 低位発熱量 4,041kcal/kg-df
かさ密度（湿基準）	0.0937 トン／m ³

処理量及び処理能力

年間処理量	3,300トン/年 、 35,200m ³ /年
プラント稼働時間	330 日/年×24 時間/日=7920 時間、(稼働率 90%)
プラント公称能力	10 トン/日 (10 トン/24 時間=416.7kg/時間)
熱分解施設設計能力	乾基準 416.7kg/時間×(1-0.3)=291.7 kg/時間 (kg-df/h)

プロセスフロー

原料（放射性有機廃棄物）を破碎チップ化して乾燥し、これを外部加熱式の水平回転円筒炉に投入する。キルン内は 800℃の無酸素状態に保たれている。ここで、有機物は熱分解して、①乾ガス(常温で気体状の可燃性物質)と②タール(水を含む常温で液体の炭化水素化合物)と③チャー(固体炭化物)になる。チャーの一部は水蒸気と反応してガス化する(水性ガス反応： $C+H_2O\rightarrow CO+H_2$)。

キルンはステンレス製の水平円筒で、熱は外から伝熱壁（ステンレス）を通して伝えられるから、キルン内は 800℃以下で温度差は少なく、焼却の場合と異なり高温ホットスポットがないから、放射性セシウムはその大半がガス化することなく固体(チャー)側に移行する。

キルンを出たガスは乾ガスとタール蒸気と水蒸気の混合ガスであり、これに微細粒子(放射性セシウムを含む粉じん)が含まれている。これをタールコンデンサーで冷却し、タールと水を凝縮液化する。このとき粉じんは凝縮の核となりその大半が液にトラップされ、

出口ガスは乾ガス(常温で平衡な水蒸気を含む)となる。乾ガスには、放射性セシウムは含まれていないことは、パイロットプラントで実証されている。

乾ガスを燃焼してキルンの加熱に用い、余剰の乾ガスでエンジンを駆動して発電する。プロセスフローを図—1（最終ページ）に示す。

熱分解の物資収支

インプット	有機廃棄物	$10\text{t}/24\text{h}=416.7\text{kg}/\text{h}$ (水分 30%) $416.7\text{kg}/\text{h}\times(1-0.3)=291.6\text{kg}/\text{df}/\text{h}$
アウトプット	乾ガス	$0.957\text{Nm}^3/\text{kg-dg}\times 291.6\text{kg}/\text{df}/\text{h}=279.1\text{Nm}^3/\text{h}$
	チャー	$0.12\text{kg-C}/\text{kg-df}\times 291.6\text{kg-df}/\text{h}=35.0\text{kg-C}/\text{h}$

エネルギー収支

インプット	有機廃棄物	$291.6\text{kg-df}/\text{h}\times 4,490\text{kcal}/\text{kg-df}=1.309\times 10^6\text{kcal}/\text{h}$ $=312.6\text{MJ}/\text{h}$
アウトプット	乾ガス	$279.1\text{Nm}^3/\text{h}\times 2,842\text{kcal}/\text{Nm}^3=7.93\times 10^5\text{kcal}/\text{h}$ $=189.4\text{MJ}/\text{h}$ (ガス化効率 $189.4/312.6=0.61$) 発熱量高位 $3,133\text{kcal}/\text{Nm}^3$ 低位 $2,842\text{kcal}/\text{Nm}^3$
	チャー	$35.0\text{kg-C}/\text{h}\times 7,838\text{kcal}/\text{kg-C}=2.74\times 10^5\text{kcal}/\text{h}$ $=65.5\text{MJ}/\text{h}$

$$\begin{aligned} \text{冷ガス効率} &= (\text{生成ガス中の生成ガス中の可燃性分の高位発熱量}) \\ &\quad / (\text{投入したバイオマス原料の高位発熱量}) \\ &= 3,133\text{kcal}/\text{Nm}^3 \times 0.957\text{Nm}^3/\text{kg-dg} / 4,490\text{kcal}/\text{kg-df} = 66.8\% \end{aligned}$$

<熱分解に供給する熱量>

キルンの熱収支計算により、加熱ガスによるキルンの加熱量は
 $0.225\text{kg-c}/\text{kg-df}\times 7,838\text{kcal}/\text{kg-c}\times 291.6\text{kg-df}/\text{h}=5.14\times 10^5\text{kcal}/\text{h}$

<熱分解の加熱源>

チャーは放射性セシウムを含むから燃焼すると大量の放射能をもつ煤じんが発生する。フィルターで除去できるが、大量の飛灰が発生する。そこで、本プラントの加熱源は熱分解で得た乾ガスの一部を用いる。

必要乾ガス量は、 $(5.14\times 10^5\text{kcal}/\text{h})/(2,842\text{kcal}/\text{Nm}^3)=180.9\text{Nm}^3/\text{h}$
 これは発生乾ガスの 64.8% ($=180.9/279.1$) に相当する。

<エネルギー収支比>

エネルギーとして有効利用できるのは、乾ガス $279.1-180.9=98.2\text{Nm}^3/\text{h}$
 のみで、チャーは有効利用できない。

エネルギー効率

$$= \text{有効利用できる乾ガスのエネルギー} / \text{投入した放射性有機物のもつエネルギー}$$

$$= 98.2 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2842 \text{ kcal/Nm}^3 / (291.6 \text{ kd-df/h} \times 4490 \text{ kcal/kg-df}) = 21.3\%$$

<発電>

余剰の乾ガスでエンジンを駆動して発電する。エンジン発電機の発電効率は、31% (低位発熱量基準)。

発電出力 =

$$98.2 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2,842 \text{ kcal/Nm}^3 \times 0.31 / (860 \text{ kcal/kwh}) = 100.6 \text{ kw} (\rightarrow 100 \text{ kw})$$

プラントでの消費電力 80kW

外部供給電力量

$$(100.6 - 80) \text{ kW} \times (330 \times 24) \text{ h/y} = 163,000 \text{ kWh/y}$$

プロセスの物質収支

		時間処理量	日処理量	年間処理量
インプット	木質チップ	416.7kg/h	10t/d	3,300t/y
アウトプット	チャー	35.0kg/h	0.84t/d	277t/y
	電気	18kWh/h	430kWh/d	143MWh/y

地域のエネルギー産出/投入比

		備考
インプット	400kWh/y	100kW × 2h/回 × 2回/y
アウトプット	163,000 kWh/y	20.6kW × (24 × 330) h/y
産出/投入比	408	163,000/400

主要装置仕様

(1) 水平回転円筒式熱分解・水蒸気改質炉(ハイブリッドキルン)

- 1) インプット
 - 破砕乾燥可燃物 291.6kg-df/h
 - 過熱水蒸気 7.9kg/h (温度 700℃)
- 2) アウトプット
 - 改質ガス 279.1 Nm³/h
 - チャー 35.0kg/h(放射能をもつ)
- 3) 温度
 - 外筒加熱ガス (入)1,000℃ (出)850℃
 - キルン内部 max 800℃
- 4) 装置(図 2)
 - 水平円筒 内径 1.2m、長さ 4.2m
 - 内部螺旋円筒 内径 0.5m×長さ 2.1m
 - 本数 4
 - 材質 SUS310S

(2) 加熱ガス発生炉

- 1) 燃料
 - 乾ガス 低位発熱量 2,842kcal/kg
- 2) 装置寸法
 - 横型水平円筒炉
 - 内径 0.8m
 - 長さ 2.5m

(3) 発電装置

- 発電出力 100kw
- 燃料 乾ガス (85% 発熱量基準)
A 重油 (15%)
- 形式 デュアルフェルディーゼルエンジン

コスト収支

(1) プラント建設費

外熱式水平回転円筒炉を用いた熱分解ガス化プラントが東北自動車道那須高原サービスエリア内で稼働している。この建設費を用いて概算建設費を算出する。



〈那須高原 S C 熱分解発電プラント〉

規模 5ト/日(発電出力 100kw)

建設費 4億 5,000 万円(ガス化施設 4億 2,000 万円、発電施設 3,000 万円)

〈広野町 熱分解・改質発電プラント〉

規模 10ト/日(発電出力 100kw)

建設費 ガス化施設 4.2 億円 $\times((10/5)^{0.7}=6$ 億 8,200 万円

発電施設 3,000 万円

計 7 億 1,200 万円

(2) 維持管理費(M 費)

プラントの修理、部品交換等のコストで稼働期間が長くなる程増えてくる。稼働期間 15 年とし、類似熱処理プラントの実績から年平均で建設費の 1.5%とする。

7 億 1,200 万円 $\times 0.015=1,068$ 万円(年平均)

$1,068$ 万円/年 $\times 15$ 年 $=1$ 億 6,020 万円(累計)

(3) 運転管理(O 費)

熱処理施設は、運転開始および停止時の温度の上げ下げで劣化が進むので、可能な限り連続運転を行い、温度を一定に保つ必要がある。24 時間連続運転とし年稼働日数は 330 日(運転停止は、定期修理、年末年始の 35 日間)とする。

1) 人件費

運転員は 4 シフト、1 シフト 2 人、計 8 名。人件費を 400 万円/人年とする。

2) ユーティリティ(電力)

本プラントの必要動力は 85kw。その全量を自己発電でまかなう。(購入電力量ゼロ)

3) 固体残渣処理費

チャーの発生量は、 $35.0\text{kg/h}\times(24\times 330)\text{h/y}=277\text{t/y}$

チャーは高濃度の放射能をもつ。原料の放射能が 8,000Bq/kg のとき、

$$8,000\text{Bq} \times (291.6/35.0) = 78,385\text{Bq/kg}$$

隔離保管施設に運び処分する。

中間処理【隔離保管】施設ができるまで、本施設内で保管する。

< 隔離保管のコスト試算 >

本プラントで発生するチャー（高濃度放射性有機廃棄物）および、ゼオライト等高濃度放射性無機廃棄物を防護壁で囲われた蓋付地上容器内に隔離保管する。

貯留物

① 熱分解・改質で発生する固体残渣（15年）

$$35.0\text{kg/h} \times (24 \times 330) \text{ h/y} \times 15\text{y} \div (0.157\text{kg/l}) = 26,500 \text{ m}^3$$

隔離保管施設の概算工事費 13億2500万円（別途算出）として、

$$\text{処分単価} \quad 13 \text{億} 2500 \text{万円} / 26500 \text{ m}^3 = 5 \text{万円/m}^3$$

比較検討

<放射能で汚染されていない有機廃棄物の熱分解発電>

1. 処理対象廃棄物

木質等可燃廃棄物(水分 30%) 10t/d

2. 処理能力

公称能力 10t/日 設計能力 291.7 kg-df/時間

3. プロセスフロー

基本フローは同じ。相違点は、

キルン加熱ガスは、チャー及び木質チップの燃焼によって供給し、乾ガスはその全量を発電に用いる。

4. 物資収支

同じ

5. エネルギー収支

$$\begin{aligned} \text{発電出力} &= 279.1\text{Nm}^3/\text{h} \times 2,842\text{kcal}/\text{Nm}^3 \times 0.31 / (860 \text{kcal/kwh}) \\ &= 286\text{kw}(\rightarrow 300\text{kw}) \end{aligned}$$

<エネルギー収支比>

エネルギーとして発生乾ガスの全量を有効利用できる。

一方、投入する有機廃棄物は、乾燥装置に投入する木質等可燃廃棄物と、加熱ガス発生炉

へ投入する「おがくず」である。

おがくずは、チャーの燃焼熱の不足熱量分を賄う燃料として用いる。

熱分解・改質炉に供給する熱量は $5.14 \times 10^5 \text{kcal/h}$ だから、

おがくず投入量

$$= (5.14 \times 10^5 \text{kcal/h} - 35.0 \text{kg-C/h} \times 7,838 \text{kcal/kg-C}) / (4490 \text{kcal/kg-df})$$

$$= 2.40 \times 10^5 \text{kcal/h} / (4490 \text{kcal/kg-df})$$

$$= 53.4 \text{kg-df/h} \quad \text{となる。}$$

エネルギー効率

$$= \text{乾ガスのエネルギー} / (\text{木質等可燃廃棄物} + \text{おがくず}) \text{のエネルギー}$$

$$= 279.1 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2842 \text{kcal/Nm}^3 / \{(291.6 + 53.4) \text{ kg-df/h} \times 4490 \text{kcal/kg-df}\}$$

$$= 51.2\%$$

6. 主要装置

発電装置

発電出力 300kw

7. コスト収支

1) プラント建設費

発電施設 30 万円/kW \times 300kW = 9,000 万円

ガス化施設 6 億 8,200 万円

計 7 億 7,200 万円

2) 維持管理費(M 費)

7 億 7,200 万円 \times 0.015 = 1,158 万円(年平均)

1,158 万円/年 \times 15 年 = 1 億 7,370 万円(累計)

3) 運転管理(O 費)

1) 人件費

同じ

2) ユーティリティ(電力)

余剰電力を FIT により電力会社に売却する。

$$(287 - 80) \text{kw} \times (24 \times 330) \text{h/y} \times 15.5 \text{ 円/kwh} = 2,531 \text{ 万円/y}$$

これをマイナスの運転経費として計上する。

3) 固体残渣処理費

最終処分場への搬入処分費を 2 万円/トとする。

以上より、放射能有無のコスト収支比較を行い表 1 にまとめた。

表1 コスト収支

		放射能あり	放射能なし	備 考
インプット 破砕木質チップ		3,300 t / y 35,219 m ³ /y		かさ密度 0.0937 t / m ³
アウトプット 固体残渣		224 t / y	46 t / y	灰分 2%df
プラント建設費	ガス化	682,000 千円	682,000 千円	
	発 電	30,000 千円	90,000 千円	
	計	712,000 千円	772,000 千円	
維持管理費(M 費)		10,680 千円/年	11,580 千円/年	15 年平均
運転管理費(O 費)				
	人 件 費	32,000 千円/年	32,000 千円/年	
	電 力 費	0	0	自己供給
	残渣処分費	11,200 千円/年	2,240 千円/年	
	売電収入	0	—25,310 千円/年	買取り価 15.5 円/kWh
MO 費 合 計		53,880 千円/年	20,460 千円/年	
処分経費(MO 費)	容積当り	1,530 円/m ³	580 円/m ³	
	重量当り	16,327 円/ t	6,200 円/ t	
プラント費年平均		45,330 千円/年	51,470 千円/年	15 年均等割り
処分単価 (プラント費を含 む)	容積当り	2,817 円/m ³	2,042 円/m ³	
	重量当り	30,063 円/ t	21,797 円/ t	

図1 プロセスフロー(PFD)

