

## 2.6 除染廃棄物の減容

放射能汚染された廃棄物や除染により発生する2次廃棄物の処理・処分において、減容は全体の発生量を低下させ、保管用地の確保において必要不可欠である。一方で減容作業過程における放射性物質の挙動や、放射性物質の濃縮による廃棄物の取扱いに注意を要する。

汚染廃棄物の減容に関しては、「原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」では国による指定廃棄物の処理の実施（第19条）や、特定廃棄物の処理の基準（第20条）や廃棄物処理法の適用（第21条）が示され、具体的な処理方法については、同施行規則25条に特定廃棄物に対する、焼却処理や破砕処理とそれに伴う排気および排水、粉じんの対策が示されている。以下、いくつかの代表的な減容方法の分類と特徴を述べ、実際の作業について述べる。

### （1）減容方法の分類

表2.6-1には、種々の減容に効果があると思われる方法について特長や課題を比較した。減容は、汚染物から特定成分を物理的あるいは化学的に分離して、汚染物の容積を減らすか、形状を変化させることにより占有体積を減少させる技術である。前者では（ア）揮発成分を加熱により分離する方法と、（イ）その他非加熱による方法に分けられ、（ア）の方法には、利用する温度により①溶融、②高温焼却、③低温焼却、④乾燥がある。また、（イ）には⑤洗浄、⑥分級、⑦圧縮、⑧粉砕がある。減容化により、重量変化や放射性物質の移動を伴うことがあり、その結果、残留物の放射能が増加する場合には、放射性廃棄物の分類と対策を講じる必要がある。また、残留物の放射能が低下する場には、排ガス、排水等二次廃棄物の発生と対策が必要となる。

表 2.6-1 減容方法の比較

	方法	減容効果	除染効果	作業性	減容率(%)	対策	二次廃棄物
①	溶融	○	○	△	～99	排ガス	多
②	高温焼却	○	○	△	～90	排ガス	多
③	低温焼却	○	△	○	50～80	排ガス	少
④	乾燥	△	×	○	5-30	---	無
⑤	洗浄	△	△	○	5～10	排水	多
⑥	分級	○	△	△	10～90	排水	小
⑦	圧縮	△	×	○	20～50	---	無
⑧	破砕	△	×	△	～50	粉じん	少

上記の方法を対象物毎に分類してみると表2.6-2のようになる。

表 2.6-2 対象物による減容化方法の分類

対象物	減容化方法	重量減少	Cs 移動	放射能	減容効果
土壌	溶融	有	有	減少	大
	焼却	有	無	増加	大
	洗浄	有	有	減少	小
	分級	有	有	減少	中
木材	焼却	有	無	増加	大
	低温焼却	有	無	増加	中
	洗浄	有	有	減少	小
	圧縮	無	無	同程度	中
草, 稲わら	焼却	有	無	増加	大
	低温燃焼	有	無	増加	中
	洗浄	有	有	減少	小
	圧縮	無	無	増加	大
コンクリート	圧縮	無	無	同程度	小
	破碎	無	無	同程度	中
汚泥	乾燥	有	無	増加	中
	洗浄	有	有	減少	小

#### ①溶融法

溶融法は、プラズマ加熱等により固体状の廃棄物を超高温（1200℃以上）に加熱して、減容を図る方法であり、セシウムが殆ど揮発し、除染効果は大きく、安定な溶融固化物が得られる。しかし、ケイ酸等まで揮発させるため、残渣量が少なく、一方で揮発・回収された二次廃棄物が多く発生し、その処理が必要となる。さらに超高温における作業性や、加熱費を考慮すると、大量の汚染廃棄物処理への適用は難しい。

#### ②高温焼却法

次に高温焼却法については、汚染廃棄物を空気中において 1000℃程度の加熱（重油燃焼等）により可燃成分を燃焼させるもので、含有水分や揮発性酸化物が揮発することにより減容する。セシウムの揮発は抑制されるものの、燃焼温度や条件によっては、飛散し、焼却炉上部等を汚染する可能性がある。焼却炉として普及しており、大量の廃棄物の処理が可能である。

#### ③低温焼却法

低温焼却法は、600℃から 800℃において材木等を還元雰囲気において燃焼することにより、炭化を図り、減容を図る方法である。廃棄物中の炭素分、水素分が揮発除去されるため、減容率は 90%程度であるが、セシウム揮発は抑制されるため、二次汚染物は発生しない。しかし、一方でセシウムが濃縮するため、廃棄物の放射能濃度が高まり、取扱量は減るものの、取扱方法、保管方法等の対応が必要となる。とくに、8,000 Bq/kg を基準として、対応が変わってくるので、注意する必要がある。

#### ④乾燥

乾燥は、常温あるいは 100℃以下の加熱により、汚染廃棄物中の水分を蒸発させるもので、含水量の多いスラッジにおいて減容効果とともに減量効果が大きい。また、草木等では、乾燥によりある程度の減容が図られるとともに、腐敗等に対する二次処理が不要となる。

## ⑤洗浄

洗浄法は、汚染廃棄物を高圧水や、浸漬により、可溶性成分を溶解し、また、微粉を懸濁させて固体から分離し、ろ過等の固液分離により固体を回収して、減容化を図る。放射性セシウムが溶解し、また、セシウムが付着した微粉は分離されるので、本方法による除染効果がみられるものの、回収する廃棄物は含水率が高く、乾燥等による減容化処理が必要となる。また、回収液中には放射性セシウムが濃縮されているので、吸着・分離する汚染水処理が必要となる。

## ⑥分級

分級法は放射性セシウムが付着している粘土などの微細粒子を篩などにより分離・分別し、汚染土壌を減容する方法である。分級には水中における沈降差を利用する湿式分級と、篩分けを行う乾式分級がある。湿式法は、分離性能がよいが、汚染水などの二次廃棄物が多くなる。これに対し、乾式法は、粗分離ではあるものの、二次廃棄物が発生しない利点があり、粒子サイズによる分画において、所定の放射能除染効果がえられれば、前処理法として有効である。

## ⑦圧縮

圧縮法は、傘密度の低い汚染廃棄物を、プレス機等により圧縮し、減容化を図る方法である。放射性物質の移動を伴わないため、処理後の廃棄物は高密度となり、単位重量あたりの放射能が高くなるので、取扱方法、保管方法等の対応が必要となる。本方法は、材木や草木などの汚染廃棄物に効果的である。

## ⑧破碎

粉碎法は、矩形や円形等の形状を有する汚染廃棄物について、そのまま保管すると広い保管容積を必要とするため、粉碎によりサイズを低下させて、緻密化により減容を図り、廃棄物の保管容積を低減させる方法である。放射性物質は移動しないので、除染効果はないが、破碎、粉碎時に飛散しないよう注意を要する。

### (2) 減容化に関するモデル事業

減容化に関する事業については、環境省の除染モデル実証事業を日本原子力研究開発機構が指定公共機関として公募し、汚染した土壌の処理・処分に関する試験が H23-25 において、汚染された汚泥や土壌、木材等の減容化試験が 10 件程度行われている。また、農林省により稲わら等の減容化試験が 2 件実施されている。(これらの実証事業については 2.5 項の (2) 環境修復モデル事業と (3) 除染技術実証試験に掲載されている。また、詳細は環境省の除染技術実証事業については、独立行政法人日本原子力研究開発機構福島技術本部 HP

([http://www.jaea.go.jp/fukushima/techdemo/h23/h23\\_techdemo\\_report.html](http://www.jaea.go.jp/fukushima/techdemo/h23/h23_techdemo_report.html)) に、農林省については [http://www.s.affrc.go.jp/docs/nogyo\\_gizyutu/pdf/2\\_3.pdf](http://www.s.affrc.go.jp/docs/nogyo_gizyutu/pdf/2_3.pdf) に掲載されているので参照されたい。) 以下にいくつかの例を示す。

### ①乾式分級と表面研磨を組み合わせた土壌洗浄処理技術

事業期間：平成 23 年 9 月から平成 23 年 12 月まで

事業場所：福島県いわき市

事業概要：放射性物質を含む汚染土壌に対して、安価な汎用設備を組み合わせて「乾式分級」と「表面研磨」処理を施し、汚染土壌の減容化を図る。

本事業では、汚染土壌中のセシウムが、粒子の表面に付着して存在していることから、表面研磨によりセシウム付着部分を細粒化して、セシウムが付着していない部分を分級により分離し、減容化を達成する方法である。図 2.6-1 に本試験のフローを示す。田んぼ、畑から汚染土壌を採取する。その後、解

砕, 分級に影響しないよう乾燥する。まず, 最大粒径を小さくするための一時解砕を行う。次の二次解砕では, 細粒分の解砕および粗粒子表面の研磨を行い, 細粒側へ放射性物質を集め, 分級する。



図 2.6-1 乾式分級と表面研磨を組み合わせた土壌洗浄処理フロー

表 2.6-3 には各種の土壌に対して異なる分級点にて分離したときの, 除染率と減量率を示す。田んぼや畑の土壌に対して, 分級点を 75  $\mu\text{m}$  として行くと, 80 以上の除染率と 50%程度の減量率が得られている。

表 2.6-3 各種土壌に対する除染率と減量率

土壌	分級点 ( $\mu\text{m}$ )	除染率 (%)	減量率 (%)
細粒・褐色低地土 (田んぼ)	32	38	57
	75	80	30
礫質・褐色低地土 (畑)	32	74	48
	75	86	34
細粒・褐色森林土 (森林)	32	53	36
	75	63	27

本事業のような乾式減容法は、湿式減容法に対して、1)機器フローが簡単であり、可搬型にして現場での除染が可能である。2)乾式処理のため、廃液が発生しない。3)分級粒度調整は、比較的容易であり、かつ範囲が広いのが特長である。

②放射能汚染されたバークの圧縮成型による減容化

事業期間：平成23年9月から平成23年12月まで

事業場所：福島県南相馬市

事業内容：放射能汚染されたバーク（樹皮）を圧縮成型することで保管性・輸送を改善する。また、前処理・洗浄を行うことでバークの再利用を可能にする。

本事業は、圧縮成型試験と水洗試験から成り、バークの前処理としての水洗試験や粉砕により、バークの除染・有効利用を図るとともに、バークの圧縮成型試験において、圧縮率の向上と安全な貯蔵方法を確立することを実証している。試験フローを図2.6-2に示す。

原料バークをそのまま、あるいは粉砕して圧縮成型器へ投入し、減容化を行う。本試験によりバークの処理・利用体系が確立され、木材の有効利用・バイオマス利用の促進、さらには除染や復興・復旧、地球温暖化対策への貢献が期待できる。具体的には水洗、圧縮成型の各種条件、組み合わせを検証し、効率的な利用・処理のフローを構築することになる。

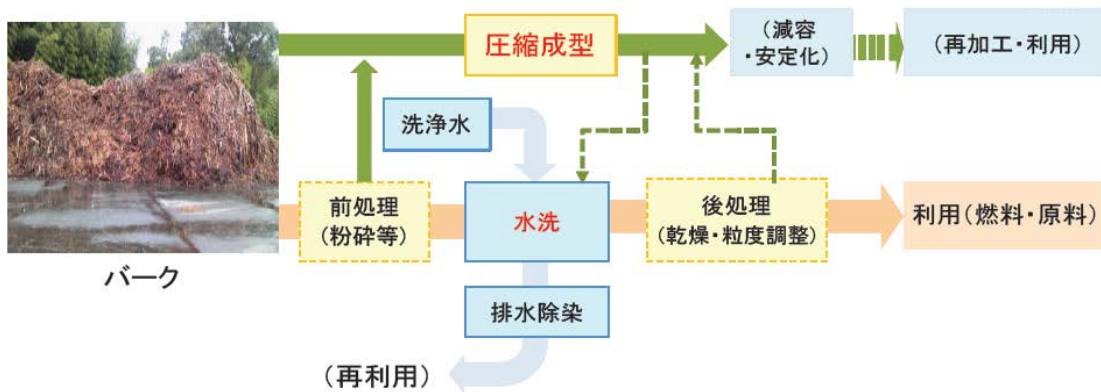


図 2.6-2 圧縮成型による減容化・水洗処理工程

表 2.6-4 には種類の異なるバークについて、圧縮成型試験を行った結果を示す。ここでは、杉・新バーク入は荷後数日以内のものであり、杉・古バークは昨年入荷したもの、雑木バークは広葉樹を指す。試験結果から、1) バークのかさ比重と水分率に相関がみられ、杉・新バークは水分率が低く、かさ比重も小さい。これに対し、杉・古バークは高い水分率と、小さい比重を示している。2)減容化率については、杉・新バークが最も高く、60%以上であった。3)減容化の一方で、表面汚染密度は2倍程度に高くなり、セシウム放射能が濃集した形になっている。

表 2.6-4 種類の異なるバーク材の圧縮成型試験結果

試料	重量(kg)	かさ比重	水分率 (%)	減容化率 (%)	表面汚染密度変化(%)
杉・新バーク	483	0.355	40.1	62.7	215
杉・古バーク	857	0.565	61.0	55.6	230
雑木バーク	680	0.543	51.4	57.4	181

このように、圧縮による減容は、簡便で 60%程度の高い減容化率を示している。特に水洗工程を含まず、乾式での圧縮による減容では、多くの二次廃棄物を出さず、保管容量を増加することができるので、中間貯蔵等においては、有効であると思われる。

### ③低温燃焼による放射能汚染菜の花・稲わら等の減容化・安全処理技術

事業期間：平成 23 年 7 月から平成 23 年 9 月まで

事業場所：宮城県大崎市

事業内容：放射性セシウム(Cs)で汚染された菜の花・稲わら等（原料）を低温加熱処理により、見掛け体積を 1/300 程度に減容化させつつ放射性 Cs を稲わら含有のシリカと反応させて Cs-Si-O 系物質として固定し、固体残渣（灰）に濃縮させて、それを安全に保管する技術を実証した。

本方法は、①原料の粉碎（裁断）、②加熱処理、③灰の安全保管処理、の 3 つの工程からなる。裁断（粉碎）処理は現地で、高速回転型カッター粉碎機により行う。加熱処理の実証試験は、現地に加熱装置を、トラックに積載して現地に設置し、稼働させる。灰とフィルターからの回収した微粉ダストは、重量、放射線量等を計測し、現地で安全に保管処分する。粉碎、加熱処理は、いずれも常圧下で行い、また、水処理もなく、簡便かつ効率的、安全性に優れた処理方法である。本処理工程図を図 2.6-3 に示す。まず、汚染菜の花・稲わら等（原料）を、加熱炉に移送して処分できるように、高速回転型カッターミルにより適宜な長さ（数 mm 程度）に裁断する。裁断した汚染菜の花・稲わらを加熱炉に移送して焼却処理する。ここで、重要な点は、裁断時の放射性 Cs の飛散を抑制し、さらに加熱処理では、加熱炉の温度を最高でも 600℃とし、Cs の揮発を抑制している。さらに、焼却炉出口には、フィルターを設置し、量はわずかながら微粉が外界に排出するのを防止し、フィルターで捕集された微粉を回収する。また、加熱装置の残渣（灰）（主成分はシリカやアルミナ）も回収する。このようにして回収された微粉と灰の放射線量を計測して基準値（8000 Bq/kg）以下を確認して安全に処分・保管する。

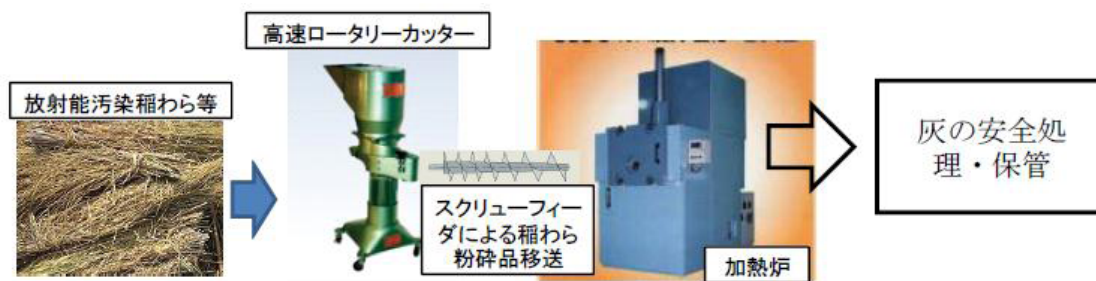
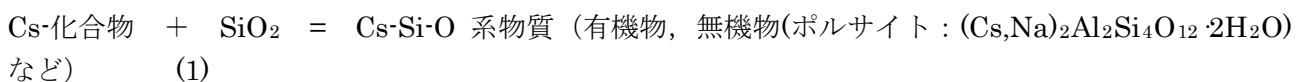


図 2.6-3 低温燃焼法による放射能汚染菜の花・稲わらなどの減容化・安全処理工程

放射性 Cs 汚染菜の花・稲わらの加熱炉（温度 600℃以下）での反応は、以下のようになる。



なお、ここで生成する Cs-Si-O 系物質（有機物，無機物）は，600℃以下では揮発しないことを実験的に確認し，400℃，600℃における実証試験と，空気供給による燃焼試験も実施し，以下の成果を得ている。

表 2.6-5 低温燃焼法による減容化試験結果

試料	処理温度 (°C)	処理時間 (h)	重量減少 (%)	体積減少 (%)	処理前後の放射能変化	備考
菜の花	400	2	60~66	77	3.0	
菜の花+稲わら	400	2	66	77	2.0	
菜の花	600	2	85	~80	3.4	
菜の花+稲わら	600	2	74	~80	2.7	
稲わら	600	1	86	90	5.4	空気供給
菜の花+稲わら	600	1	85	~90	9.7	空気供給

試験結果より、低温加熱処理により、重量および体積が減少し、減容率 80%程度を達成するとともに、処理前後においてセシウム放射能濃度は同程度であり、その結果、放射能が 2~3 倍濃縮されることを確認した。さらに、空気を供給しながら加熱処理を行うことにより、燃焼を促進し、減容化は 90 %程度になり、かつより放射能が濃縮されることがわかった。これについては、菜の花および稲わらの混合比を調整することにより、実証試験処理後の試料の放射能濃度は 8000 Bq/kg 以下に抑制することが可能であった。

以上のように、稲わら等にたいしては低温加熱処理により、減容化を行うことが可能であることを実証している。

#### ④汚泥等から除染除去物の減容化技術

事業期間：平成 23 年 11 月から平成 24 年 2 月まで

事業場所：福島県

事業内容：放射性セシウム (Cs) を含む下水処理施設の汚泥等から、汚泥可溶化剤 (酸またはアルカリ溶液) を使用して Cs を溶出し、特殊な吸着材で吸着回収する。吸着した Cs を溶離剤により脱着させることで、吸着剤の再利用を図った。

本事業で行った汚泥の処理工程を図 2.6-4 に示す。貯留槽の汚泥をセシウム溶出槽において可溶化させたのち減容化を図る。続いて、溶出した Cs をグラフト重合布吸着材へ吸着させて、セシウムを溶離回収し、吸着材の再利用を図っている。

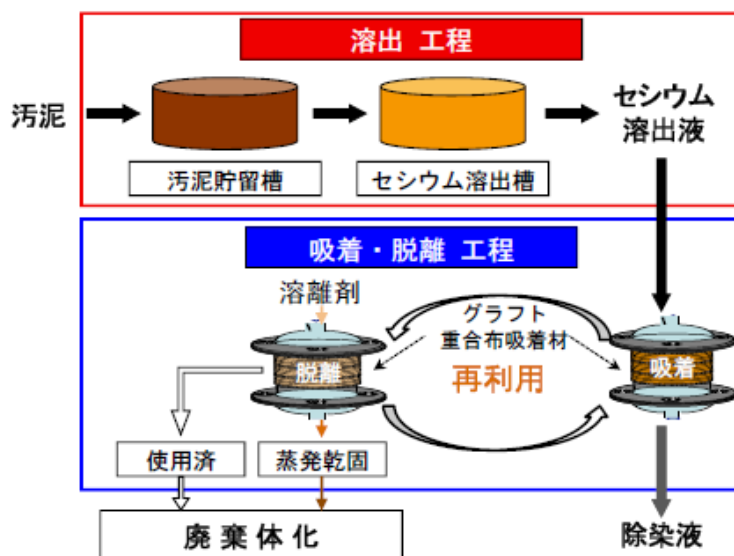


図 2.6-4 汚泥からの除染除去物減容化処理工程

ここでは、模擬汚泥に安定性 Cs を添加した試料を用いたテーブルテストと、実際の福島県内の汚染汚泥を用いた実証試験を行い、比較している。表 2.6-6 に試験結果を示す。汚泥減容率、Cs 溶出率はテーブルテストでは 90%以上であったが、実証試験では低下していた。

表 2.6-6 汚泥からの除染除去物減容化処理試験結果

試験	汚泥減容率 (%)	Cs 溶出率 (%)	Cs 吸着率 (%)
テーブルテスト (模擬汚泥+安定性 Cs)	91	92	44
実証試験 (汚染汚泥)	50	69	>55

本試験事業では、汚泥可溶化により汚染汚泥を 50%減容化できた。また、可溶化処理により溶出した Cs をグラフト重合布吸着材により吸着し、さらにこの吸着材から Cs の脱離を行うことで再利用できることがわかった。

⑤放射性物質汚染土壌等からの乾式 Cs 除去技術の開発

事業期間：平成 23 年 11 月から平成 24 年 2 月まで

事業場所：福島県

事業内容：放射性セシウムを含む土壌等に高性能反応促進材を添加して加熱し、セシウムを昇華させて冷却回収することにより、除染で生じた除物壤効率華の去（汚染土）よりセシウムを熱処理によりよく昇らせて分離し、クリアランスレベル（100 Bq/kg）以下とする。

本事業の試験工程を図 2.6-5 に示す。ここでは、汚染土壌等に高性能反応促進剤を添加後、回転式昇華装置に導入して加熱し、揮発した Cs を冷却して回収し、土壌の除染を行う。

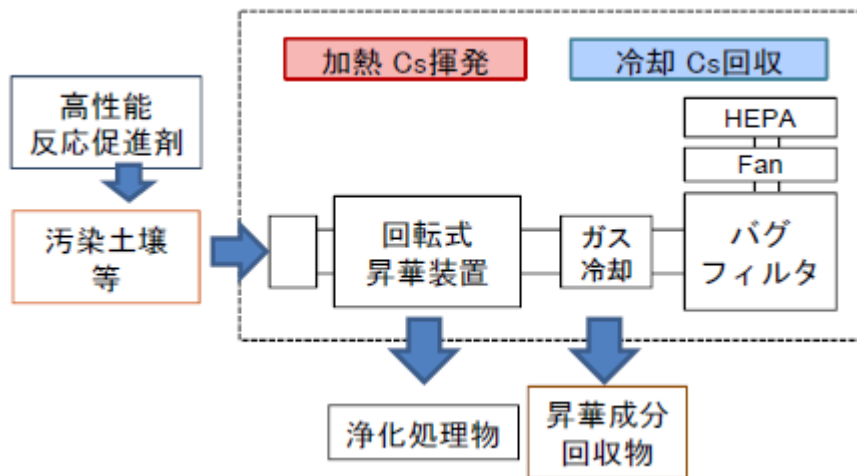


図 2.6-5 汚染土壌からの乾式 Cs 除去工程

回転式昇華装置を用いて Cs 揮発試験を行い、焼成温度に対する Cs 揮発率を図 2.6-6 に示す。土壌のみで昇華試験を行った場合や、反応促進剤として CaCl<sub>2</sub> を添加した場合には、高温に加熱してもほとんど揮発しない。これに対し、高性能反応促進剤を添加した場合には、焼成温度とともに Cs 揮発率も増加し、1300℃ではほぼ 100%揮発することがわかる。本試験では、約 60,000 Bq/kg の汚染土壌を 100 Bq/kg 以下に浄化できている。



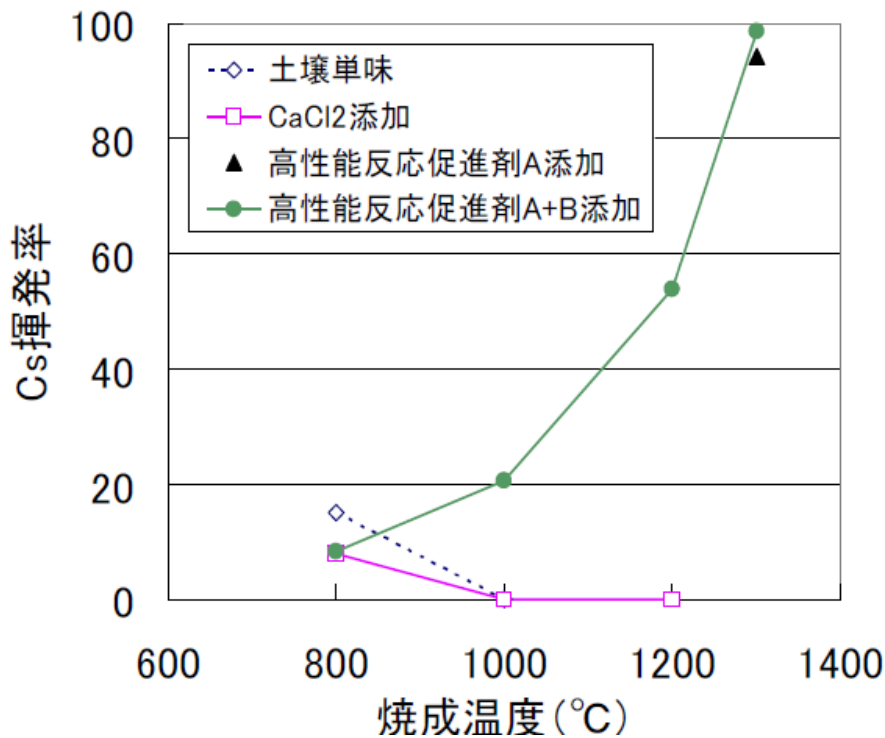


図 2.6-6 焼成温度に対する Cs の揮発率

本事業では 1300°C という高温を必要とするほか、揮発した Cs の焼却炉等への二次汚染を考慮する必要がある。

### (3) まとめ

以上、汚染廃棄物に対する減容法についてまとめてみた。汚染廃棄物は仮置き場から、中間貯蔵へ、さらには最終処分場にて管理することになる。この流れにおいて、移動する物量が少なくなればなるほど、対応しやすくなる。現場における減容法としては簡便かつ、減量率、除染効果が大きい方法が効果的であり、中間貯蔵や最終処分場への過程においては、保管スペースを確保する点から減容率を優先した方法が効果的と思われる。今後の課題としては以下のようなものがあげられる。

- ・減容化の実施に当たっては、コスト等の要因も考慮し、廃棄物処理・処分を合理的に達成させるためのフロー全体の最適化が必要となる。
- ・焼却飛灰や処理排水など、二次廃棄物が発生する方法については対象とする汚染物の発生量を考慮して行う必要がある。
- ・放射能低減効果を上げるための処理剤等化学物質使用による二次汚染を引き起こす可能性についても検討する。
- ・浸出、分級等の減容化処理により放射性物質が減少した構造材や木材、土壌等の廃棄物について回収とともにリサイクルを図る。
- ・半減期 30 年の Cs-137 の減衰により放射性物質が減少する廃棄物についても、通常廃棄物としての処理・処分やリサイクルについて検討する。