

実施代表者の所属機関：株式会社神戸製鋼所

実証テーマ名： 焼却溶融システムの減容と除染に関する実証研究

事業の概要：放射性セシウム(Cs)汚染焼却灰の溶融試験を行い、処理による減容比と除染係数を評価する。また、除染係数から設定される焼却灰のレベル区分のしきい値を評価する。

実施内容：可搬式表面溶融装置とバグフィルタをもとみやクリーンセンターに仮設置し、保管中のCs汚染焼却灰の溶融試験を実施した。焼却灰、溶融スラグ及び飛灰の化学組成、Cs濃度等を分析し、溶融処理による減容比と除染係数を評価した。また、得られた除染係数からスラグの取り扱いを仕分けする焼却灰のCs濃度を算出し、Cs汚染焼却灰の処理方法を選定するための高/低濃度の2つにレベル区分する際のしきい値を評価した。

技術概要

試験目標

- 1) Cs 汚染焼却灰の溶融技術を実証する。
- 2) 溶融スラグ化による減容比と、その際の除染係数を評価する。
- 3) Cs 汚染焼却灰をレベル区分する際のしきい値を評価する。

試験フロー

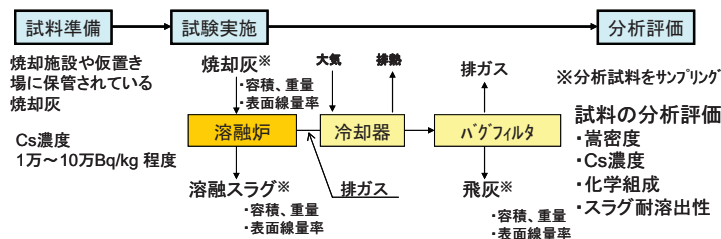


図1 実証試験の試験フローと可搬式表面溶融装置

(本試験装置は日本環境保全㈱との共同研究にて製作:補足資料2参照)

期待される効果

焼却灰のCs濃度に応じて溶融スラグ(以下、「スラグ」)は、除染(Cs濃度がしきい値より低い焼却灰の場合)、または、減容・安定化(同・高い焼却灰)が可能になる。これにより管理が必要となる焼却灰の減容化や輸送・保管時の安全性向上や経費節減につながる。

その他:溶融処理時における放射性Cs揮発抑制剤、揮発促進剤の添加効果を調べる。

得られたスラグの溶出特性を調べる

除染効果

- ① 原料灰の溶融試験(補足資料 7 参照) :主灰は、溶融処理(目標安定溶融温度 1,650℃)でスラグ化を確認した。減容比は 1/3.3、スラグからの放射性 Cs 除去率は 38%(DF=1.6)であった。飛灰はそのままでは溶融しなかったが、72%の放射性 Cs を除去できた(DF=3.6)。揮発除去された Cs は後段のバグフィルタで全量捕集した。
- ② 焼却灰の溶融処理における添加剤効果(補足資料 5, 6, 7 参照)
 - ・Cs 揮発抑制効果:主灰に B₂O₃を添加して溶融処理(同 1650℃)を行うと、放射性 Cs 除去率が 23%(DF=1.3)へ低下した。
 - ・Cs 揮発促進効果:主灰に CaCl₂を添加した溶融処理(同 1650℃)では放射性 Cs 除去率が 85%(DF=6.7)、CaI₂を添加した場合には 93%(DF=15)に上昇した。飛灰に CaCl₂を添加した場合は 99.3%(DF=147)に上昇した。
 - ・溶融挙動:各種添加剤効果を調べた結果では、主灰を用いた場合はいずれもスラグ化が確認できた(減容比:1/1.5~1/2.5)。飛灰では B₂O₃, CaCl₂を添加した場合で、溶融できた(減容比はそれぞれ 1/2.6, 1/2.8。)。B₂O₃を添加した場合にはスラグ化が確認できた。
- ③ 焼却灰のレベル区分(補足資料 9 参照) :放射性 Cs 濃度が 1×10⁴Bq/kg までの主灰であれば、溶融処理(同 1650℃)で 8,000Bq/kg 以下に低減でき、揮発促進剤(CaCl₂)を添加すれば 5×10⁴Bq/kg までの主灰に適用できる可能性がある。それ以上の高濃度の主灰では揮発抑制剤(B₂O₃)を添加することで、スラグ中に放射性 Cs を閉じ込めることが有効と考えられる。飛灰は 1×10⁶Bq/kg までであれば、揮発促進剤(CaCl₂)を添加することでスラグ化とともに 8,000Bq/kg 以下への揮発除去が可能と考えられる。
- ④ スラグからの放射性 Cs 溶出性(JIS K0058-1 溶出試験) :主灰および主灰を用いたスラグからは、放射性 Cs の溶出は認められなかった。飛灰のままでは 1.1×10³Bq/L 溶出するが、B₂O₃,CaCl₂を添加して得られたスラグでは溶出が認められなかった(補足資料 7 参照)。

除去物発生量評価 : 溶融により灰中の水分,有機成分等は消失するが、無機成分は重量が維持され、比重が 2 倍以上に増加する。これらの合計で容積は約 1/2~1/3 に減少する。

作業員被ばく量評価: 作業場所平均空間線量率:0.18 μ Sv/hr(作業時間:30 時間)

作業員最大被ばく量 :17 μ Sv(試験準備と実施の作業時間:42 時間)

作業員被ばく量 :13 μ Sv(作業員 7 名の平均値)

コスト評価 : 操業費は 500,000 円/ton、 撤去費は 50,000 円/ton	歩掛り :3 人工/30kg(=6 人×4 時間/30kg)
---------------------------------------------------------	---------------------------------------

コスト評価条件 : 主灰+飛灰 1 万 ton を 1000 日間で処理する事業費用のコスト試算

除染作業における安全上の注意 焼却灰取扱作業、溶融飛灰取扱作業には、防護服、防塵マスク、ゴーグル、ゴム手袋と綿手袋、オーバーシューズを装着した。

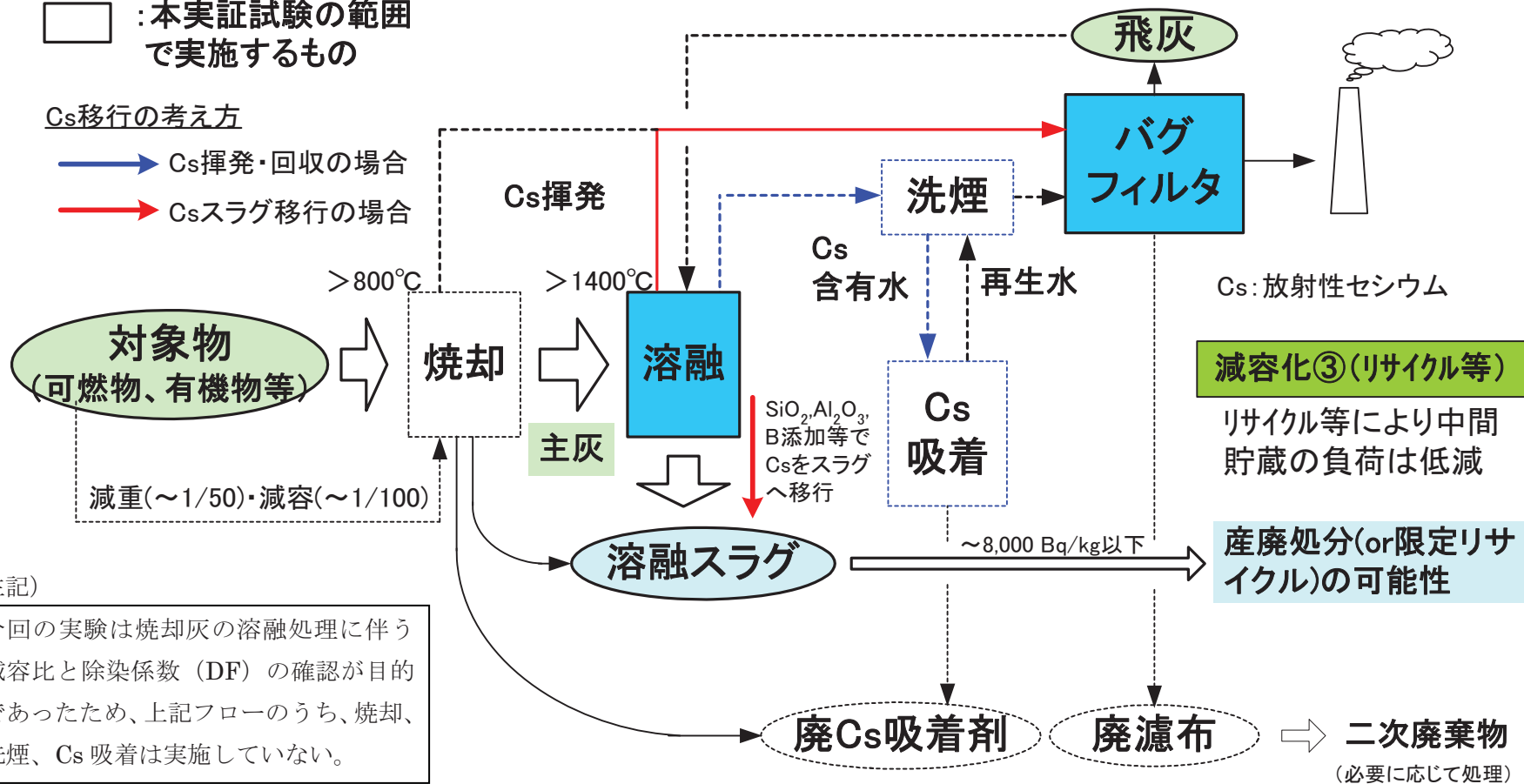
試験場所(住所) 福島県本宮市もとみやクリーンセンター 敷地内	除去物保管場所と保管状況 試験で発生した溶融スラグ及び溶融飛灰は元のフレコンバッグに戻して、元の廃棄物払い出し場所に返却した。
-------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------

補足資料1 焼却灰の溶融処理(Cs回収含む)フローと本実証試験の実施範囲

□ : 本実証試験の範囲
で実施するもの

Cs移行の考え方

- Cs揮発・回収の場合
- Csスラグ移行の場合



注記)

今回の実験は焼却灰の溶融処理に伴う減容比と除染係数 (DF) の確認が目的であったため、上記フローのうち、焼却、洗煙、Cs吸着は実施していない。

エマルジョンバーナー式表面溶融炉による焼却灰の溶融処理

溶融処理のメリット

放射能汚染された可燃物焼却灰や汚泥等の廃棄物を、溶融処理してスラグ(ガラス質)化する。

- ▶ 粉体や微粒子状の焼却灰や汚泥よりも取扱が容易
- ▶ 廃棄物を減容化できる
 - 輸送、保管、埋設処分及びそれらの安全対策等のコストを低減させることができる

→ **減容による負荷軽減**(経済的合理化)

- ▶ 溶融処理過程で放射性セシウムを揮発させる
廃棄物中の放射性セシウム濃度が低い場合、8,000Bq/kg以下に低減させることが見込まれる。
 - 揮発した放射性セシウムは吸着剤で回収して密封保管可能
 - スラグは産廃処分やリサイクルが期待できる。
 - PCB、ダイオキシン、アスベスト等の難分解性物質が含まれていても、同時に無害化できる。

→ **廃棄物の安定化(無害化処理)**

- ▶ 添加剤を加えることにより放射性セシウムの揮発抑制が見込まれる。

放射性セシウム濃度が高い場合は揮発抑制剤を添加して、放射性セシウムを難溶性マトリクスに閉じ込める。水と接触した場合にも、表面積が低減することにより、処分環境への溶出抑制が期待できる

→ **放射性セシウムの安定化**

低濃度放射性セシウム汚染実灰の溶融試験

エマルジョンバーナー式表面溶融炉(NK-100)で、草木灰(放射性セシウム:940Bq/kg)の溶融試験を行い、減容効果と放射性セシウムの揮発挙動を調べた。



実験試験に用いた草木灰



エマルジョンバーナー式表面溶融炉本体(NK-100 処理能力:100kg/h)



溶融状況(~1,500°C)



草木灰の溶融スラグ(水砕物)

溶融試験結果(~1,500°C)

試料	放射性セシウム**量 [Bq]	重量[kg]	かさ密度 [g/cm ³]
草木灰*	8.6 × 10 ⁴	154	1.1
溶融スラグ	2.4 × 10 ⁴	86	1.8

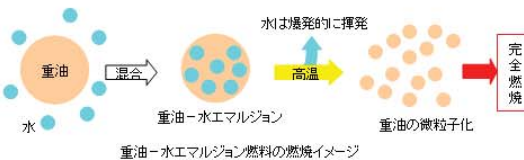
*: 試料中の水と未燃炭カーボン: 51wt%

** : 放射性セシウム=Cs-134+Cs-137

- 重量減少: 試料灰の水分、未燃炭炭素にほぼ相当
→ 有意な焼却灰成分の揮発は認められず
- 減容効果: かさ密度の上昇(1.1 → 1.8g/cm³) 確認、急冷(水砕)スラグの減容比: 0.6 (40%減容)
→ 徐冷スラグではさらに高減容化が見込まれる
- 放射性セシウムの揮発挙動: 約70%が揮発した
→ 各種条件での除染係数を評価しておくことにより、スラグから揮発させる(スラグの安定化)か、スラグに閉じ込める(放射性セシウムの安定化)かの処理方法を判断できると見込まれる

エマルジョンバーナーによる溶融処理

重油が水が均質分散した(油中水滴型)エマルジョン燃料を高温環境に噴霧することにより、微粒子化した重油が完全燃焼して1,650°Cでの安定した燃焼が可能となる。



- 一般的な燃料式溶融炉と比べて燃焼効率が高いため、
- CO、NOxの発生抑制
 - 低ランニングコスト
 - 設置用地の省スペース化 が可能

日本環境保全株式会社 日本国特許第3907243号、第4004181号ほか

エマルジョンバーナー式表面溶融炉*



エマルジョンバーナー式表面溶融炉NK-500(処理能力:500kg/h)

まとめ

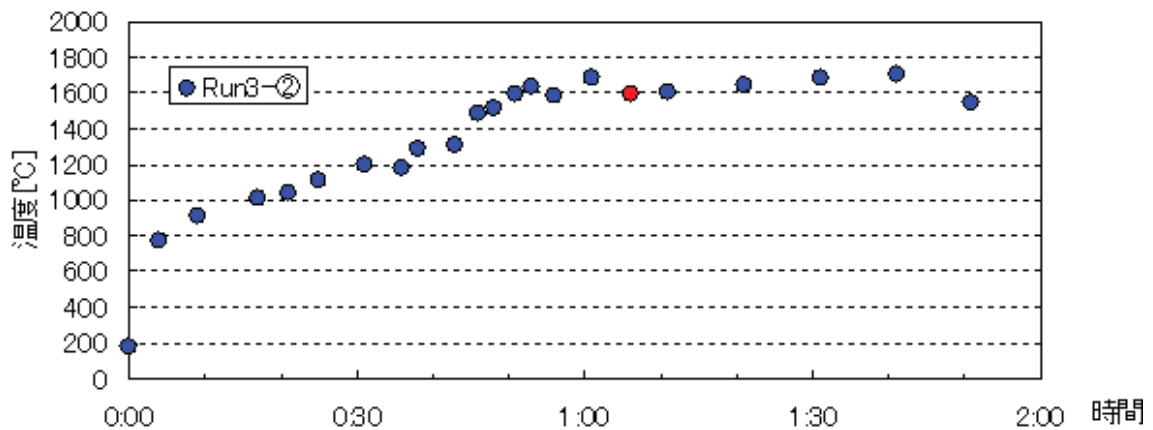
- (1) 1,650°Cで安定した燃焼が可能なエマルジョンバーナー式表面溶融炉により、焼却灰や汚泥の溶融固化(スラグ化)による減容処理が可能である。
- (2) 溶融処理過程での放射性セシウム揮発挙動を評価しておくことで、適切な処理方法を選択することが可能と見込まれる。
 - 低濃度の場合: スラグの無害化(8,000Bq/kg以下)
 - 高濃度の場合: 揮発抑制剤を加えた放射性セシウムの安定化処理(難溶性マトリクスへの閉じ込め)

* この溶融システムは、アスベスト等の溶融処理用に日本環境保全株式会社が開発したものに基つき、株式会社神戸製鋼所と日本環境保全株式会社が放射性セシウムを含む焼却灰、汚泥等の廃棄物の溶融処理に応用するために共同開発した成果である。

補足資料3 試験装置及び試験条件



実証試験に用いた可搬式表面溶融装置 全景



溶融試験の昇温パターン例 (炉内温度、赤のプロットはスラグ溶出開始した時点を示す)

試験に供した焼却灰の主要化学成分組成 (単位: wt%) と溶融性判定

組成	主灰	飛灰
MgO	1.7	0.8
Al ₂ O ₃	10.3	3.6
SiO ₂	26.6	12.6
P ₂ O ₅	2.4	0.7
CaO	20.0	29.2
Fe ₂ O ₃	8.1	1.4
過剰塩基度	-70	-7
溶融性判定	○	×

過剰塩基度は、ガラス網目構造をもたらす SiO₂, Al₂O₃ 等と網目中に包含される CaO, MgO 等との濃度の差を指標化した概念である。過剰塩基度 B により、以下の通り、溶融性を判定し、試験に供する組成を設定した。

- B > -40 溶融不良
- 40 > B > -70 溶融不十分
- B < -70 良好な溶融

補足資料4 実証試験状況



フレコンバッグからの焼却灰採取作業



溶融炉への焼却灰試料投入作業



溶融炉からのスラグ排出状況



主灰の溶融スラグ









バグフィルタからの溶融飛灰回収作業



主灰の溶融飛灰

補足資料5 主灰系の熔融スラグの外観

主灰	主灰の熔融物 (Run1-①) 熔融確認	15wt%-B ₂ O ₃ 添加主灰の熔融物 (Run2-①) → 熔融確認
		
27wt%-SiO ₂ , 13wt%-Al ₂ O ₃ 添加主灰の熔融物 (Run2-②) → 熔融確認	20wt%-CaCl ₂ 添加主灰の熔融物 (Run3-①) → 熔融確認	20wt%-CaI ₂ 添加主灰の熔融物 (Run3-②) → 熔融確認
		

→主灰では、すべてのケースにおいて熔融(スラグ化)確認

補足資料6 飛灰系の熔融物の外観

<p>飛灰</p>	<p>飛灰の熔融物 (Run1-②) → 熔融せず</p>	<p>20wt%-B₂O₃ 添加飛灰の熔融物 (Run2-③) → 熔融確認</p>
		
<p>33wt%-SiO₂, 17wt%-Al₂O₃ 添加飛灰の熔融物 (Run2-④) → 熔融不良 (岩石状)</p>	<p>22wt%-CaCl₂ 添加飛灰の熔融物 (Run3-③) → 熔融確認できたがスラグ化にいたらず</p>	
		

飛灰では B₂O₃, CaCl₂ を添加した場合に熔融確認

補足資料 7 試験条件及び試験結果一覧

焼却灰 種類	試験目的	試験番号	添加剤	熔融状態	減容率** [%]	減容比 **	(Cs-134+Cs-137) 濃度 [Bq/kg]	除去率 [%]	除染係数 (DF)	溶出濃度+ [Bq/L]
主灰	未処理(レファレンス)	—	—	—	—	—	6.6×10^3	—	—	<19
	熔融性確認	Run1-①	なし	熔融確認(スラグ)	69	1/3.3	4.1×10^3	38	1.6	<16
	揮発抑制効果の検討*	Run2-①	15wt%-B ₂ O ₃	熔融確認(スラグ)	57	1/2.3	5.1×10^3	23	1.3	<21
		Run2-②	27wt%-SiO ₂ , 13wt%-Al ₂ O ₃	熔融確認(スラグ)	34	1/1.5	4.1×10^3	38	1.6	<18
	揮発促進効果の検討	Run3-①	20wt%-CaCl ₂	熔融確認(スラグ)	57	1/2.3	9.8×10^2	85	6.7	<18
		Run3-②	20wt%-CaI ₂	熔融確認(スラグ)	60	1/2.5	4.3×10^2	93	15	<17
飛灰	未処理(レファレンス)	—	—	—	—	—	2.3×10^4	—	—	1.1×10^3
	熔融性確認	Run1-②	なし	熔融せず	44	1/1.8	6.4×10^3	72	3.6	3.3×10^2
	揮発抑制効果の検討*	Run2-③	20wt%-B ₂ O ₃	熔融確認(スラグ)	62	1/2.6	5.9×10^3	75	3.9	<18
		Run2-④	33wt%-SiO ₂ , 17wt%-Al ₂ O ₃	熔融不良 (岩石状)	-45	1/0.7	2.1×10^3	91	11	78
	揮発促進効果の検討	Run3-③	22wt%-CaCl ₂	熔融確認(スラグ 化には至らず)	64	1/2.8	1.6×10^2	99.3	147	<17

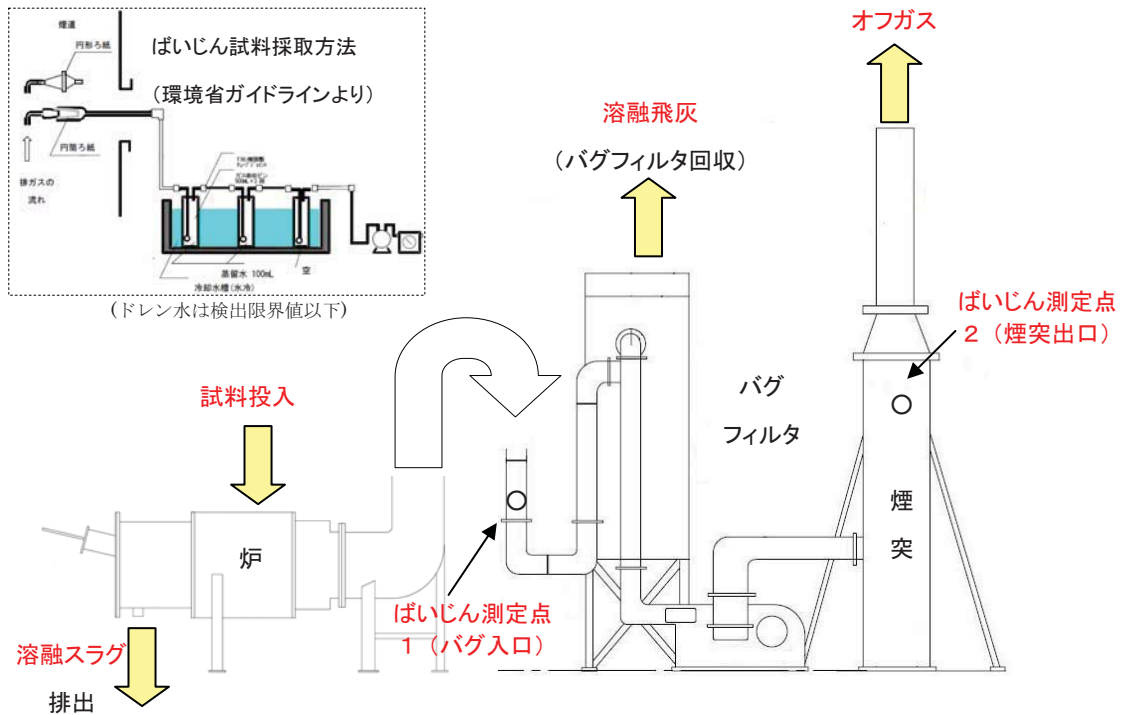
*揮発抑制剤の添加量は事前の焼却灰の過剰塩基度をもとに、主灰と飛灰で同程度の熔融状態になるように設定した。

**減容率＝焼却灰容積／熔融処理物の容積，減容比＝熔融処理により減少した容積／焼却灰容積

焼却灰容積は、水分及び強熱減量補正した重量とかさ密度から算出した。熔融物容積は徐冷スラグを回収容器に最密充填するとして算出した。

+ 溶出濃度：JIS K-0058-1 有姿溶出試験で得られた検液の放射性 Cs 分析結果

補足資料8 溶融実証試験におけるマス、放射能バランス検討



溶融実証試験における物質収支及び放射能収支の評価

表7-1 代表的な4条件での物質収支 (単位:kg)

試験 Run.	試料投入量	熔融スラグ量	熔融飛灰量	回収量合計	収支
2-①	23.9	22.3	0.2	22.5	94%
2-③	24.2	22.6	0.2	22.8	94%
2-④	26.4	21.6	0.8	22.4	85%
3-③	22.0	24.6	1.6	26.2	119%

上表は、試料投入量は灰を乾燥重量補正した値
煙突入口でのばいじん量は測定下限以下であり、熔融飛灰はバグフィルタで全量捕集したと考えられる。

表7-2 代表的な4条件での放射能収支 (単位:Bq)

試験 Run.	投入試料	熔融スラグ	熔融飛灰	回収物合計	収支
2-①主灰	1.3×10^5	1.1×10^5	2.1×10^3	1.2×10^5	90%
2-③飛灰	4.2×10^5	1.3×10^5	1.6×10^4	1.5×10^5	35%
2-④飛灰	2.6×10^5	4.4×10^4	7.8×10^4	1.2×10^5	47%
3-③飛灰	3.7×10^5	3.9×10^3	1.9×10^5	2.0×10^5	54%

煙突から大気放出される放射性 Cs は検出限界以下であった。
放射性 Cs の回収不足分はバグ濾布に付着したとして説明可能

補足資料 9 スラグの取扱に対する考え方と放射性 Cs 濃度のしきい値設定

焼却灰の溶融処理(安定最高温度 1,650℃)では、放射性 Cs 濃度の低減が確認できた。

主灰 : $6.6 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ → $4.1 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ (DF=1.6, 除去率=38%)
 飛灰 : $2.3 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ → $6.4 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ (DF=3.6, 除去率=72%)

この結果から、下記の放射性 Cs 濃度までの焼却灰であれば、溶融処理で放射性 Cs 濃度を 8,000Bq/kg 以下に低減させることが可能と考えられる。

主灰 : $1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ (= $8.0 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ / (1-0.38))
 飛灰 : $3 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ (= $8.0 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ / (1-0.72))

さらに主灰、飛灰ともに CaCl₂を添加することにより、放射性 Cs の揮発促進効果が確認できた。

表8-1 焼却灰の溶融処理における CaCl₂添加による放射性 Cs 除去効果

焼却灰	未添加	CaCl ₂ 添加(主灰:20wt%、飛灰:22wt%)
主灰 ($6.6 \times 10^3 \text{ Bq/kg}$)	$4.1 \times 10^3 \text{ Bq/kg}$ (DF=1.6, 除去率=38%)	$9.8 \times 10^2 \text{ Bq/kg}$ (DF=3.6, 除去率=85%)
飛灰 ($2.3 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$)	$6.4 \times 10^3 \text{ Bq/kg}$ (DF=3.6, 除去率=72%)	$1.6 \times 10^2 \text{ Bq/kg}$ (DF=147, 除去率=99.3%)

この結果から、下記の放射性 Cs 濃度までの焼却灰であれば、CaCl₂を添加する溶融処理で放射性 Cs 濃度を 8,000Bq/kg 以下に低減させることが可能と考えられる。

主灰 : $5 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ (= $8.0 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ / (1-0.85))
 飛灰 : $1 \times 10^6 \text{Bq/kg}$ (= $8.0 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ / (1-0.993))

以上の結果から、焼却灰スラグを産廃処理(または限定リサイクル)可能にする 8,000Bq/kg 以下に低減可能な放射性 Cs 濃度のしきい値は、下表のとおりと考えられる。

表8-2 焼却灰スラグの取扱を選定するための放射性 Cs 濃度のしきい値

焼却灰	添加剤なしの場合	CaCl ₂ 添加した場合
主灰	$1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$	$5 \times 10^4 \text{Bq/kg}$
飛灰	$3 \times 10^4 \text{Bq/kg}$	$1 \times 10^6 \text{Bq/kg}$

これ以上に放射性 Cs 濃度の高い焼却灰では、地下水等に対して難溶性であるスラグのマトリクス中に放射性 Cs を閉じ込めることが廃棄物管理を行ううえで有効と考えられる。主灰に対しては、B₂O₃の添加が放射性 Cs の閉じ込めに有効と考えられる。

補足資料 10 焼却溶融システムの減容と除染に関する実証研究 成果まとめ

1 焼却灰の溶融試験

エマルジョンバーナー式表面溶融装置を実験実施場所(福島県本宮市)に仮設置して、放射性 Cs 汚染焼却灰(主灰及び飛灰)の溶融試験を実施した。

目標安定温度を 1,650°C に設定した燃焼処理により、主灰はそのまま溶融スラグ化できることを確認した。この焼却灰の溶融性は、事前に化学組成から判定できることを確認した。

主灰または飛灰に CaCl_2 を添加すれば揮発促進効果が、主灰に B_2O_3 を添加すれば揮発抑制効果が確認できた。飛灰はそのままでは溶融しなかったが、 CaCl_2 等を添加すればスラグ化できた。

2 焼却灰のレベル区分

溶融スラグ中の Cs 濃度を 8,000Bq/kg 以下に揮発除去させることができる原料灰(主灰、飛灰)の濃度上限値(しきい値)は、Cs 除去率を用いて下式で計算する。

$$\text{焼却灰の Cs 濃度しきい値} = \frac{8,000[\text{Bq/kg}]}{1 - \text{Cs 除去率}}$$

主灰のみでの 8,000Bq/kg 以下へのしきい値: $1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ に対して、揮発促進剤として CaCl_2 を 20wt% 添加したしきい値は $5 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ となる。飛灰では、揮発促進剤として CaCl_2 を 22wt% 添加したしきい値は $1 \times 10^6 \text{Bq/kg}$ となる。

主灰の Cs 濃度がしきい値を超える高濃度の場合、揮発抑制剤である B_2O_3 を添加して Cs をスラグに閉じ込めることが有用と考えられる。

3 スラグの溶出性確認(JIS K00158-1 溶出試験)

主灰及びそのスラグからは、Cs の溶出は検出限界値以下であった。

飛灰はスラグ化することで Cs の溶出が検出限界値以下となった。

4 まとめ

本試験により、エマルジョンバーナー式表面溶融炉を用いた焼却灰溶融処理、および、事前の溶融性判定・溶融処理時の Cs 揮発促進等の添加効果等に見通しを得た。

また、全体物量と費用試算により処理・中間貯蔵・輸送・処分の総費用の経済的合理性を含めた成立性を評価した。

これらにより、本溶融処理法による焼却灰の減容化や輸送・保管時の安全性向上や経費節減効果を確認することができた。

以上