

## 災害廃棄物の広域処理における溶融処理の考え方について（案）

（広域処理推進ガイドラインに追加すべき内容）

### 1. 災害廃棄物の溶融処理について

災害廃棄物の広域処理を行う際、受入側地方公共団体において通常の焼却処理ではなく溶融処理が導入されている場合には、処理後には溶融スラグと溶融飛灰が生じることになる。溶融飛灰については、通常の焼却処理同様、処分の安全性を確認する必要がある一方、溶融スラグについては再生利用の観点も考慮する必要がある。

そこで、溶融炉から生じる溶融飛灰の処理と溶融スラグの再生利用の考え方について整理する（溶融スラグ、ガス化溶融炉の概要についてはそれぞれ別添1，2を参照）。

### 2. 溶融飛灰の処分の考え方

溶融飛灰の安全な処分の観点からは、広域処理推進ガイドラインで既に示している、「Ⅲ 災害廃棄物の焼却処理に関する評価」と同様に、溶融飛灰の濃縮率を設定し、すべての放射性物質が飛灰に移行するものとの安全側の仮定を置いて、飛灰中の放射性セシウム濃度を算定し、これが8,000Bq/kg以下であること確認することとなる。

この場合の溶融飛灰の発生割合は、どの種類の炉でも3%を超えている（別添3表2参照）ことから、ガス化溶融炉の放射性セシウムの濃縮率をストーカ式の焼却炉と同じ33.3倍とすれば安全側で評価できる。ただし、飛灰の発生を抑制しスラグの生成を増やすために溶融飛灰を再度炉に投入している場合は、濃縮率はこれより高くなる場合があるため、該当する施設は投入廃棄物量に対する溶融飛灰の発生割合を確認することが望ましい。

### 3. 溶融スラグの再生利用の考え方

溶融スラグの再生利用の観点については、広域処理推進ガイドラインで既に示している、「Ⅱ 災害廃棄物の再生利用に関する評価」を参考に、製品としてのスラグ中の放射性セシウム濃度がクリアランスレベル100Bq/kgを満足する場合について評価すると、次のようになる。

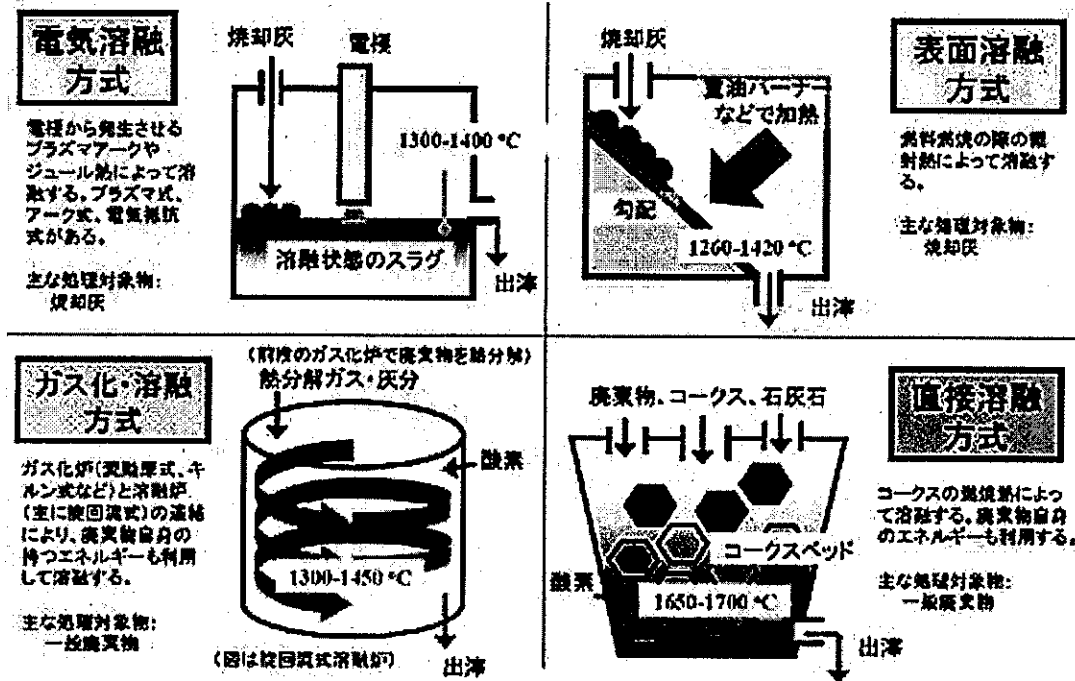
- ① 既存の溶融炉における実測データによれば（別添3表4参照）、溶融スラグへの放射性セシウムの分配率（廃棄物中に含まれる放射性セシウムがスラグに移行する割合）は、流動床式で約8%、シャフト式で約3%となっている。いずれの方式でも放射性セシウムの9割以上は溶融飛灰に移行しており、スラグに移行する割合は低い。
- ② 一方、これらの施設における溶融スラグの発生割合（投入廃棄物量に対するスラグ発生量の割合）は、流動床式で約5%、シャフト式で約10%となっており（別添3表2参照）、分配率と考え合わせると、溶融スラグ中の放射性セシウム濃度は、流動床式の場合、投入廃棄物中の放射性セシウム濃度から増加する可能性があるが、シャフト式の場合は、相当程度低下することが見込まれる（別添3表4参照）。
- ③ 例えば、広域処理対象となる岩手県の災害廃棄物の放射能濃度の測定結果は、可燃物で不検出～104 Bq/kgであり、シャフト式であれば全量災害廃棄物であっても、溶融スラグはクリアランスレベルを十分満足できると考えられ、また、流動床式であっても適切な災害廃棄物の混焼割合を設定すればクリアランスレベルを満足できると考えられる。

なお、溶融スラグは、そのまま利用されるのではなく、別添4に示すように、コンクリート骨材やアスファルト混合物として利用される場合も多く、その場合は、最終的に利用される製品（コンクリート、アスファルト）として、クリアランスレベルを満足すべきものであることに留意が必要である。

また、別添3に記載したように、ここでは溶融副資材（コークス、石灰等）の寄与は考慮されていないので、今後のデータ蓄積に応じて、適宜検討を加えることが必要である。

## 溶融スラグの概要

溶融スラグとは、廃棄物を約 1,300 度以上の高温に保った炉の中で溶融し、これを空气中や水中で冷却固化して得られる生成物を言う。炉の形式や熱の与え方の違いにより、様々な溶融方式があり（図 1）、そのいずれかによって、ほとんどの廃棄物を溶融スラグ化することが可能である。



出典：国立環境研究所ニュース、第 27 巻、4 号、環境問題基礎知識

図 1 様々な溶融方式

溶融処理技術は、特に、一般廃棄物（自治体が収集する廃棄物で、家庭ごみを中心）の処理において、溶融炉を焼却炉に併設したり（焼却灰溶融の場合）、焼却炉に置き換える形で（ガス化・溶融や直接溶融の場合）、近年急速に普及している。一般廃棄物溶融スラグの発生量は年間約 60 万トンで、一般廃棄物焼却灰（約 600 万トン）の 10%にも相当する。また、溶融施設の数は、一般廃棄物で 158 施設、下水汚泥、産業廃棄物を含めると約 200 施設\*と見積もられている（数字はいずれも 2005 年：(社) 日本産業機械工業会調べ）。

### 【引用文献】

国立環境研究所ニュース、第 27 巻、4 号、環境問題基礎知識

\* (社) 日本産業機械工業会の最新データ (2011 年版) によると溶融施設数は 237 施設

## ガス化溶融炉について

ガス化溶融とは、ごみを熱分解し、生成した可燃性ガスとチャー（炭状の未燃物）をさらに高温で燃焼させ、その燃焼熱で灰分・不燃物等を溶融する技術であり、ダイオキシンの発生を抑制し、廃棄物を減容化するとともに溶融固化物であるスラグも回収・リサイクルできる点が特長である。

ストーカ式などの廃棄物焼却施設においては、処理残さである焼却灰を溶融して資源化する場合、そのための焼却残さ溶融施設等を併設して処理する必要があるのに対し、ガス化溶融施設では、一つのプロセスでこの機能を達成することができる。

ガス化溶融施設は、1980年代以降のダイオキシン問題や最終処分場の逼迫を背景に、2000年代に入り相当数の施設が稼動し始めた。

ガス化溶融施設の種類を表1に示す。ガス化溶融施設は、ガス化と溶融を1つの炉で行う一体方式と別々に行う分離方式に大別される。加熱方式には、廃棄物を熱分解する際に、高温のガスで直接加熱する直接式と間接的に加熱する間接方式とがある。一体方式にはシャフト式があり、分離方式で直接加熱方式としては流動床式があり、間接加熱方式としてはキルン式がある。

表1 ガス化溶融施設分類

方式	代表的な形式	加熱方式
一体方式	シャフト式	直接
分離方式	流動床式	直接
	キルン式	間接

出典：(社)全国都市清掃会議「ごみ処理施設整備の計画・設計要領（2006改訂版）」

### (1) シャフト式

図1にシャフト式ガス化溶融設備のフローを示す。

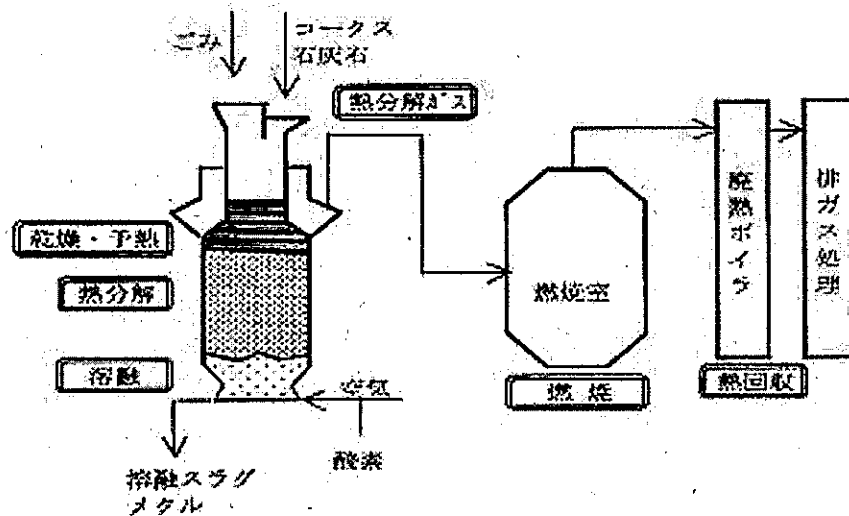
シャフト式ガス化溶融設備の特徴は、高炉技術を廃棄物焼却に応用した技術となっている点である。その代表的な処理工程では、ごみが、コークス、石灰石とともに炉の頂部から投入され、シャフト炉下部から上昇してくる高温排ガスで熱分解を受ける。不燃物は、熱分解カーボンとコークスを熱源として、1500℃以上の高温で溶融される。

シャフト式は、キルン式、流動床式とは異なり、シャフト炉の中でガス化と溶融を行う一体式となっている。その技術的な工夫としては以下の3点が挙げられる。

- [1] シャフト炉から発生する未燃物である飛灰を捕集し、シャフト炉下部から吹き込んで再利用することでコークス量を削減する。
- [2] 廃棄物を間欠的に投入することによって発生蒸気と発電の安定性を確保し、熱分解コ

ントロールを行う。

[3] コークスを熱源として用いるのととも、廃棄物を効率的にガス化するために、炉底部に形成させたコークス層の上に廃棄物を堆積させ、均一な空隙を持つ廃棄物層を形成させる。



出典：(社)全国都市清掃会議「ごみ処理施設整備の計画・設計要領(2006改訂版)」

図1 シャフト式ガス化溶融炉システムのフロー例

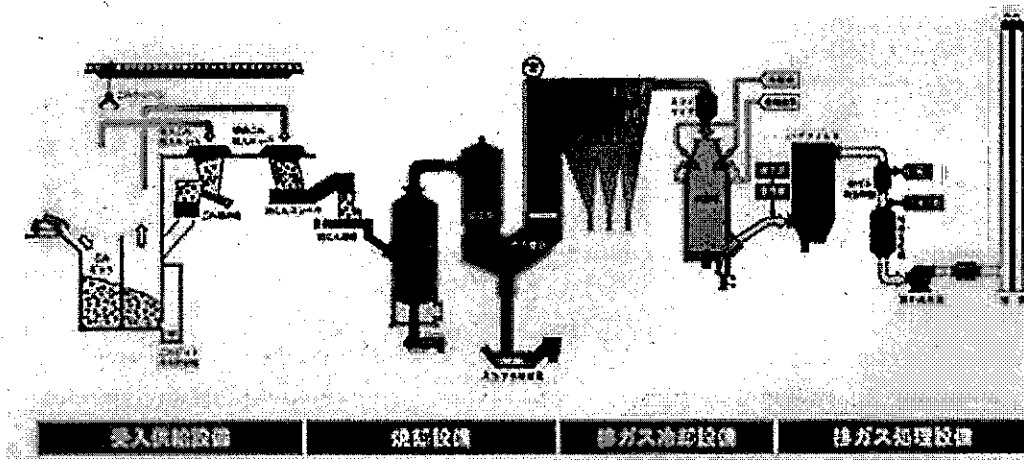
## (2) 流動床式

図2に流動床式ガス化溶融施設のフローを示す。

この方式では、ごみを流動床式ガス化炉(充填した砂に空気を吹き込んで砂を流動状態にした炉)に投入して、その一部を部分燃焼させ、燃焼熱を利用して可燃物を可燃ガスと灰に熱分解する。可燃ガス、未燃分を後段の溶融炉で完全燃焼させ、その燃焼熱によって灰を溶融スラグ化する。

流動床式ガス化溶融施設の主な特長として以下の点が挙げられる。

- [1] 砂は熱容量が大きいため高負荷で処理することできるとともに、堅型炉であることから、省スペース化を図ることができる。
- [2] ごみ中の鉄、アルミは合金メタルにならず、またガス化炉内の砂で磨かれるとともに酸化されずに分離できるため、資源価値の高い金属として回収できる。



出典：(株)神鋼環境ソリューション「流動床式ガス化溶融炉」

図2 流動床式ガス化溶融施設のプロセスフロー

### (3) キルン式

図3にキルン式ガス化溶融設備のフローを示す。

この方式では、ロータリーキルンと呼ばれる回転式の炉の中で廃棄物を間接的に加熱して分解し、後段の溶融炉で溶融する。廃熱は回収されて利用されるほか、溶融後に得られたスラグも回収して、路盤材等にリサイクルすることができる。

キルン式ガス化溶融設備の特徴は、ごみの滞留時間が1～2時間と長く、時間をかけてガス化を行うことから、廃棄物の組成の変動の影響をあまり受けずに均質的な熱分解生成物を得られることである。また、キルン式ガス化設備の必要熱量は概ねごみ発熱量の20～30%であり、次式で表される。

$$(\text{必要熱量}) = (\text{ごみ中の水分蒸発潜熱}) + (\text{ごみ自体の温度上昇顕熱}) + (\text{熱分解熱})$$

この必要熱量を得るためには、以下の3つの方法があり、これらの組合せによるものもある。

- [1] 燃焼溶融炉出口排ガスから熱回収する
- [2] 熱分解ガスを燃焼させた排ガスを熱源とする
- [3] 外部燃料を燃焼させた排ガスを熱源とする

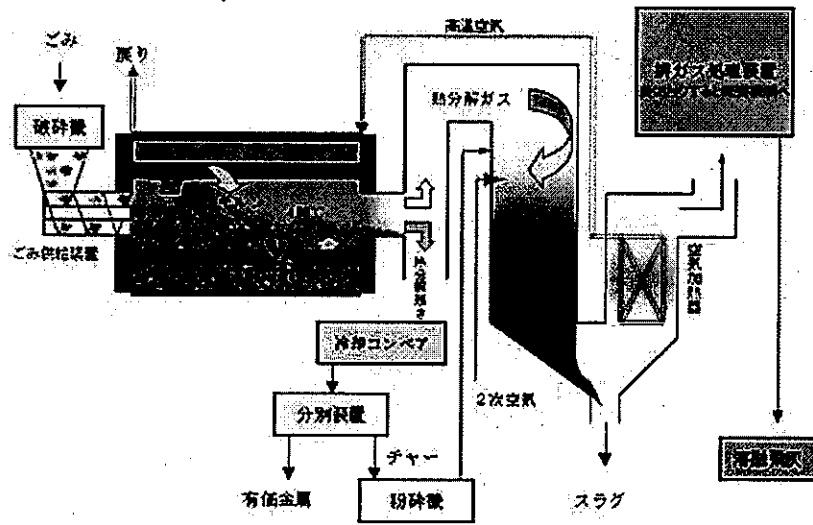


図3 キルン式ガス化溶融炉システムのフロー例

【引用文献】

国立環境研究所、環境技術解説

## 溶融スラグ、溶融飛灰の放射性物質濃度の推計方法

焼却灰等の放射性物質濃度は、処理する廃棄物の放射性物質濃度に、対象とする焼却灰等（スラグや溶融飛灰等）への濃縮率と放射性物質の分配率（移動率）を乗じて推計することが考えられ、スラグ、溶融飛灰の放射性物質濃度は以下のように定義できる。

### スラグの放射性物質濃度

＝災害廃棄物の放射性物質濃度×放射性セシウムのスラグへの濃縮率

×放射性セシウムの溶融飛灰への分配率

＝災害廃棄物の放射性物質濃度×（1/スラグの発生割合）

×放射性セシウムの溶融飛灰への分配率

ここに、スラグの発生割合＝スラグ発生量／ごみ焼却量

### 溶融飛灰の放射性物質濃度

＝災害廃棄物の放射性物質濃度×放射性セシウムの溶融飛灰への濃縮率

＝災害廃棄物の放射性物質濃度×（1/溶融飛灰の発生割合）

ここに、溶融飛灰の発生割合＝溶融飛灰発生量／ごみ焼却量

※ 溶融飛灰への分配率が極端に高く、すべての放射性物質が溶融飛灰に移行するものと安全側の仮定

以下では、統計データ<sup>1,2</sup>及び環境省が16都県から提供を受けた廃棄物処理施設の放射性物質濃度測定結果等をもとに、溶融方式別の発生割合、分配率を整理し、スラグ、溶融飛灰の放射性物質濃度の推計方法について考察する。

なお、以下の推計においては、溶融副資材（コークス、石灰等）の寄与は考慮されていないが、正確にはこれらの寄与について考慮することが必要となる。したがって、今後のデータ蓄積に応じて、適宜この推計方法について検討を加えることが必要である。

### 1 スラグ、溶融飛灰の発生量及び発生割合

「ごみ焼却施設台帳(平成21年度版)」をもとに、ガス化溶融施設のスラグ及び溶融飛灰の発生割合を整理した。

同台帳によると、全連続燃焼方式により廃棄物を処理している施設は全国で626施設あり、このうちガス化溶融施設を有している施設は101施設である。溶融方式別にはシャフト式48施設、流動床式36施設、キルン式14施設、その他3施設となっている。これらの

<sup>1</sup> ごみ焼却施設台帳(平成21年度版)、(財)廃棄物研究財団、平成23年3月

<sup>2</sup> 2010年度版 エコスラグ有効利用の現状とデータ集、(社)日本産業機械工業会エコスラグ利用普及委員会、平成23年6月



うち、ごみ焼却量及び（溶融）スラグ排出量、溶融飛灰排出量が把握可能であったのは、表 1 に示すように 68 施設であった。

表 1 廃棄物処理量等のデータが得られた施設数

溶融方式 \ 施設数	全データ※	スラグ等発生量 把握可能
シャフト式	48 施設	33 施設
流動床式	36 施設	26 施設
キルン式	14 施設	9 施設
その他	3 施設	
計	101 施設	68 施設

※「ごみ焼却施設台帳(平成 21 年度版)」より、全連続燃焼方式の焼却施設のうちガス化溶融施設を有する施設を抽出。

ごみ焼却量及びスラグ排出量等が把握可能であった 68 施設のデータは別紙 1 のとおりである。これらのデータより、スラグ及び溶融飛灰の発生割合を次のように定義すると、それぞれの発生割合は表 2 のとおりとなる。

$$\text{スラグ発生割合} = \text{スラグ発生量 [t/年]} / \text{ごみ焼却量 [t/年]}$$

$$\text{溶融飛灰発生割合} = \text{溶融飛灰発生量 [t/年]} / \text{ごみ焼却量 [t/年]}$$

表 2 に示すように、スラグの発生割合は、シャフト式で 9.6%であり、流動床式はシャフト式の約 1/2 の 4.6%であった。溶融飛灰の発生割合は各溶融方式とも 3~4%前後である。

なお、スラグの発生割合をメーカー団体にヒアリングした結果を表 2 に ( ) 書きで示しているが、今回整理した結果とほぼ同程度の発生割合であった。

表 2 スラグ、溶融飛灰の発生割合

溶融方式	スラグ (ヒアリング)	溶融飛灰
シャフト式	9.6% (11%)	4.0%
流動床式	4.6% (5%)	3.8%
キルン式	6.8% (7%)	3.4%

## 2 スラグ、溶融飛灰の分配率

分配率算定のためには、放射性物質濃度（ここでは放射性セシウム濃度）のデータが必要である。ここでは16都県からデータ提供を受けた各施設の放射性セシウム濃度測定結果を用いた。

別紙2は16都県のガス化溶融施設全24施設に、スラグ及び溶融飛灰の放射性セシウム濃度測定結果をマッチングして整理したものである。このうち、スラグ、溶融飛灰の放射性セシウム濃度が共に測定されており、かつ検出限界値以上の値が測定された施設は計8施設、19データであった（表3）。

別紙2よりスラグ及び溶融飛灰の放射性セシウム濃度の傾向を概観すると、以下のとおりとなる。

- ・シャフト式における放射性セシウム濃度は、溶融飛灰においては百オーダーから数千オーダーと差が大きい。スラグについてはいずれの施設においても数十 Bq/kg 程度であり、スラグへの残留濃度は一定量程度に収まっている。
- ・この傾向は、溶融飛灰の放射性セシウム濃度が極端に高い流山クリーンセンターを除けば流動床式においても見られ、スラグの放射性セシウム濃度は100～200Bq/kg程度でほぼ同レベルである。

表3 放射性セシウム濃度データが得られた施設数及びデータ数（16都県）

溶融方式 \ 施設数	施設数	データ数
シャフト式	4 施設	7
流動床式	4 施設	12
キルン式	0 施設	0
計	8 施設	19

放射性セシウムのスラグ及び溶融飛灰への分配率を次のように定義すると、スラグ、溶融飛灰の分配率は、別紙2及び表4のように整理できる。

なお、キルン式については、放射性物質濃度のデータが得られなかったため、分配率は空欄としている。さらに、表4には濃縮率も合わせて示した。

スラグの放射性物質質量[Bq/日]=

スラグの放射性セシウム濃度[Bq/t]×スラグ発生量[t/日]

溶融飛灰の放射性物質質量[Bq/日]=

溶融飛灰の放射性セシウム濃度[Bq/t]×溶融飛灰発生量[t/日]

放射性物質総量[Bq/日]=

スラグの放射性物質質量[Bq/日]+溶融飛灰の放射性物質質量[Bq/日]

$$\begin{aligned} \text{放射性セシウムのスラグへの分配率[\%]} &= \frac{\text{スラグの放射性物質質量[Bq/日]}}{\text{放射性物質総量[Bq/日]}} \\ \text{放射性セシウムの溶融飛灰への分配率[\%]} &= \frac{\text{溶融飛灰の放射性物質質量[Bq/日]}}{\text{放射性物質総量[Bq/日]}} \end{aligned}$$

表4 スラグ、溶融飛灰の放射性物質濃度推計のためのパラメータ

溶融方式	スラグ		溶融飛灰	
	発生割合	分配率	発生割合	分配率
シャフト式	9.6%	3.1%	4.0%	96.9%
流動床式	4.6%	8.4%	3.8%	91.6%
キルン式	6.8%	—	3.4%	—

これらのパラメータ（濃縮率、分配率）を用いることにより、対象とする災害廃棄物の放射性物質濃度が分かれば、ガス化溶融施設において処理後のスラグ、溶融飛灰の放射性物質濃度を推計することが可能と考える。

【再掲】

スラグの放射性物質濃度

$$\begin{aligned} &= \text{災害廃棄物の放射性物質濃度} \times \text{放射性セシウムのスラグへの濃縮率} \\ &\quad \times \text{放射性セシウムの溶融飛灰への分配率} \\ &= \text{災害廃棄物の放射性物質濃度} \times (1/\text{スラグの発生割合}) \\ &\quad \times \text{放射性セシウムの溶融飛灰への分配率} \end{aligned}$$

ここに、スラグの発生割合 = スラグ発生量 / ごみ焼却量

溶融飛灰の放射性物質濃度

$$\begin{aligned} &= \text{災害廃棄物の放射性物質濃度} \times \text{放射性セシウムの溶融飛灰への濃縮率} \\ &= \text{災害廃棄物の放射性物質濃度} \times (1/\text{溶融飛灰の発生割合}) \end{aligned}$$

ここに、溶融飛灰の発生割合 = 溶融飛灰発生量 / ごみ焼却量

※ 溶融飛灰への分配率が極端に高く、すべての放射性物質が溶融飛灰に移行するものと安全側の仮定

## 災害廃棄物を受け入れた場合のスラグの放射能濃度の評価

熔融スラグの再生利用については、「一般廃棄物の熔融固化物の再生利用に関する指針」(環境省、平成 19 年 9 月)により技術的な指導が行われている。

同指針によれば熔融スラグの用途は以下のものとされている。

- ①路盤材(下層路盤材、上層路盤材)、加熱アスファルト混合用骨材
- ②コンクリート用熔融スラグ骨材(コンクリート二次製品用材料含む)
- ③埋め戻し材、路床材等

また、再生利用に当って土壌や地下水の汚染等を生じることがないように、熔融スラグに係る目標基準が設定されている。これらは、日本工業規格と同レベルのものであり、これを満たせば当該用途に用いる場合に安全と考えられるものである。

- ①路盤材、加熱アスファルト混合物用骨材

日本工業規格 A5032 に適合していること。

- ②コンクリート用熔融スラグ骨材

日本工業規格 A5031 に適合していること。

- ③埋め戻し材、路床材等

日本工業規格 A5032 の 4.2(有害物質の溶出量と含有量)の基準に適合していること。

また、利用に当たっては、用途に応じて、強度、耐久性等の品質も満たす必要がある。

上記の日本工業規格については、重金属の溶出、含有量基準に適合していること、また物性(化学成分、物理性状、膨張性、アルカリシリカ反応性、粒度)について規定されている。

なお、再生利用される際のそれぞれの製品の混合率については以下のようなガイドラインの事例がある。これらの有効利用方法は自治体の公共事業に用いられる際には地域によって異なる基準が用いられているのが実情であるが、本資料が一応の目安となる。

表1 スラグの再利用用途別の混合率等

再利用用途	混合率	備考
①プレキャストコンクリート製品の細骨材	熔融スラグ細骨材混合率は、質量比 50%以下とすることを標準とする。 (JIS A 5031 解説)	熔融スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の水セメント比は 55%以下とする。
②アスファルト混合物	熔融スラグ細骨材混合率は、質量比 10%以下とすることを標準とする。	配合設計は、原則としてマーシャル安定度試験により行い、マーシャル特性値から最適アスファルト量を求める
③埋め戻し材等	熔融スラグは砂状であるため、スラグ単独または砂と混合して利用する。	スラグ単独で使用する場合は締め固め度が小さい傾向があるため、施工時に注意する必要がある。

出典) 熔融スラグの有効利用に係るガイドライン、ゼロエミッション社会を目指す技術開発委員会、  
廃棄物・熔融スラグ利用技術専門部会

上記のガイドラインに従うとした場合、プレキャストコンクリート製品に含まれる熔融スラグの割合は 50%以下であるから、コンクリート製品の放射線濃度は熔融スラグの放射線濃度の 1/2 以下となると判断される。同様にアスファルトの放射線濃度は熔融スラグの放射線濃度の 1/10 以下となる。さらに、埋め戻し材はスラグ単独で用いられる場合には希釈の効果はないことになる。

製品の安全度の評価は、上記の計算によって再製品中でどの程度の再生スラグが利用されるか（混入率）を評価して、製品中の濃度をクリアランスレベルと比較することで評価できる。

広域処理推進ガイドラインで示しているとおり、製品中の放射性物質濃度がクリアランスレベル（100Bq/kg）を満足していれば、広く一般に再生利用できることになるが、このクリアランスレベルを基準に考えると、プレキャストコンクリート製品に質量比 50%でスラグを再利用する場合、スラグの放射性物質濃度は 200Bq/kg まで利用可能。また、アスファルト混合物としての再利用する場合、スラグの質量比を 10%とすると、スラグの放射性物質濃度は 1,000Bq/kg 以下まで利用可能である。