

1. セシウム気化分離炉の実証計画

通常の減容化施設は除染土壌を仮設焼却炉に入れて、除染土壌に付着している可燃物を焼却して保管する汚染土壌の容積を減少させる設備である。容積の減少割合の期待値は約20%である。したがって、含有する放射能の濃度は焼却前とほぼ同程度である。

除染土壌を「資材化して再利用する」ということを目指す人々にとっては、それは不満であり、土壌に付着しているセシウムを気化分離すれば、保管する必要がある土壌の量を桁違いに減少することができるという考え方が提示され、その実証設備が飯舘村蕨平に建設され、実証試験が行われた¹。

その実証設備は「仮設資材化施設」という名称で建設され、2016年4月に運転開始、1年後の17年3月に運転終了、以後19年3月までに解体という短期間で実施された。この設備の容量は10 t/d という小規模であるが、この敷地には240t/d の通常の「仮設焼却炉」が併設されている。仮設焼却炉は120 t/d の設備が2系統建設されており、1系統はストーカ炉であり、もう1系統は流動床炉である。実証炉に供給するものは、飯舘村内から搬送された除去土壌と、隣接する仮設焼却灰で発生したストーカ炉からの「主灰」（焼却炉底部から排出された燃え殻）と、流動床炉からの「飛灰」（バグフィルタで補修したもの粉じん）である。その「仮設焼却炉」と「仮設資材化施設」の構成は、図1の通りである。

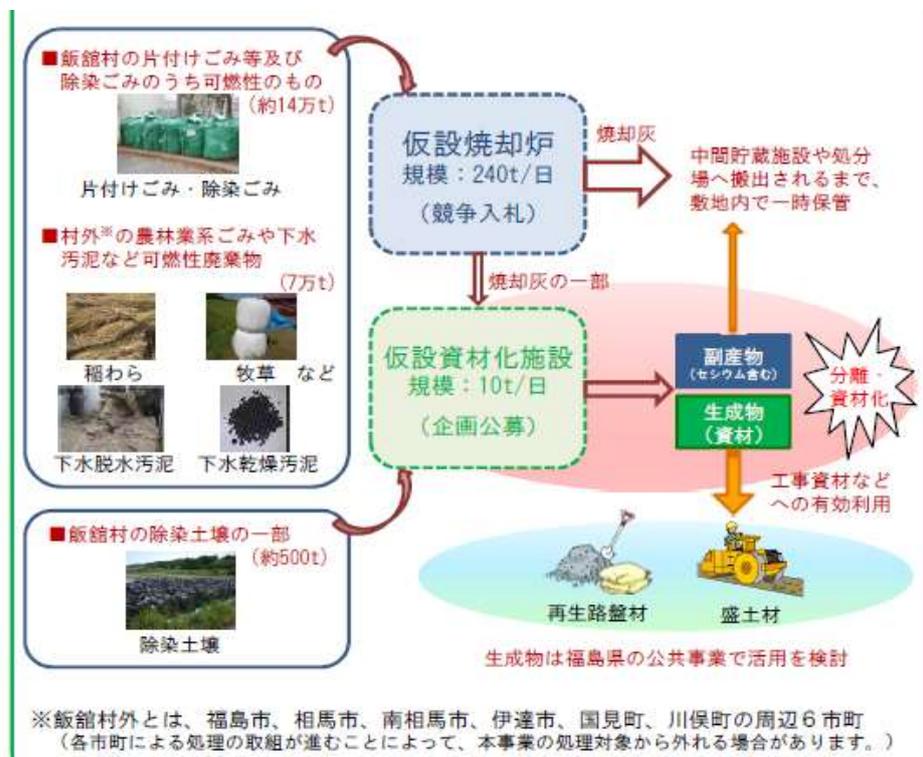


図 1. 飯舘村の仮設焼却炉と仮設資材化施設

¹ 児玉龍彦『放射能は取り除ける』幻冬舎新書、2013年、pp.184-187

出典：「飯舘村炭平地区における可燃性廃棄物減容化施設について」

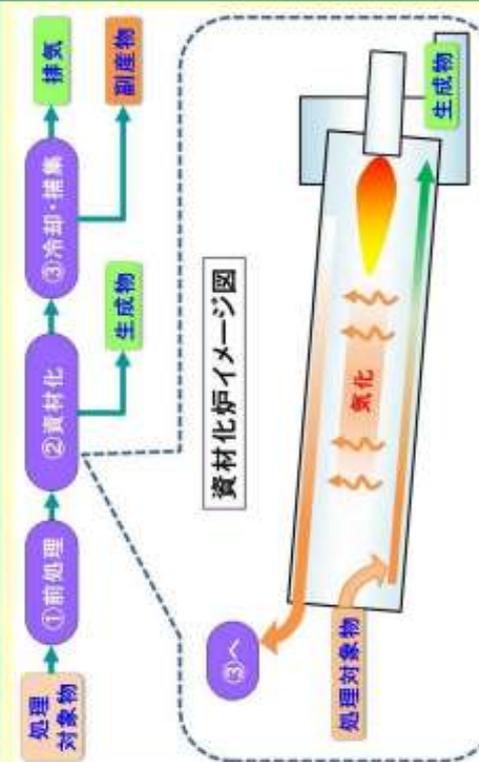
<http://www.vill.iitate.fukushima.jp/uploaded/attachment/2083.pdf>

「仮設資材化施設」の概要は、表1の説明書に示されている。

実証事業の概要

実証事業の目的
 本実証事業では、飯舘村炭平地区に仮設資材化施設を設置し、放射性セシウムが含まれる焼却灰および除去土壌(処理対象物)から放射性セシウムを分離させ、再生利用可能なレベルまで放射能濃度を低減させるための新技術を実証する調査を行います。

仮設資材化施設の概要



①処理対象物を乾燥・粉砕し、反応促進剤と混合します。
 ②処理対象物を資材化炉で加熱し、放射性セシウムを気化させます。放射性セシウムを気化させた後の処理対象物は、再生利用可能な生成物として資材化炉から排出されます。
 ③気化した放射性セシウムは冷却して固体化させ、バグフィルターで捕集します。捕集した放射性セシウム(副産物)は、飛散・潮解防止のため圧縮して固めた上で、コンクリート容器内に厳重に保管します。

仮設資材化施設の特徴

- 回転式の資材化炉(処理能力:10t/日程度)を用いた熱処理方式です。
- 1,350℃の高温熱処理で放射性セシウムを気化させて分離し、その後冷却してバグフィルターで捕集します。
- 放射性セシウムが高濃度に含まれるものでも、生成物中の放射性セシウム濃度を再生利用可能なレベルまで低減させることが可能です。
- 資材化炉内は、機械トラブルが生じないよう、機械的可動部がないシンプルな構造としています。

実証事業の経緯

平成25年度	2月	処理対象物の性状調査、および仮設資材化施設の基本設計に着手
平成26年度	6月	仮設資材化施設の実施設設計に着手
平成27年度	6月	仮設資材化施設の建設工事に着手
	12月	仮設資材化施設の完了
平成28年度	1月	試運転開始
平成29年度	4月	本格運転開始
平成29年度	3月	運転終了

※平成30年4月より仮設資材化施設の解体に着手し、平成31年3月に完了する予定です。

結果概要

- 再生利用可能なレベルまで放射能濃度を低減させた生成物を安定的に得ることができました。
- 生成物はコンクリートブロックや肥料として再生利用可能なことを確認しました。
- 排ガスや周辺空間線量の測定結果から、周辺への影響は確認されませんでした。

表1. 「仮設資材化施設」を用いた「実証事業の概要」

出典：「実証事業の概要」環境省

2. 処理対象物の性状

この設備の元請代表企業は日揮株式会社で、すでに同社が実証業務の「概要報告書」を環境省に提出している²。以下に、同報告書のデータを参照しながら考察を加える。

(1) 除去土壌と焼却灰の使用量と性状

この実証業務で使用した除去土壌と焼却灰（飛灰および主灰）の合計量は下記の通りであった³。

除去土壌	125.9t（湿）
流動床飛灰	106.4 t
ストーカ炉主灰	38.4 t

その性状は表2-1、表2-2、表2-3の通りである⁴。

表 II. 2-1 受入除去土壌の水分量、放射性 Cs 濃度及び化学組成

		水分量 mass%	放射性 Cs濃度* Bq/kg 湿	化学組成										強熱 減量
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	
				mass%										
Phase-2 平成 29年度	平均	33.8	11,600	57.8	15.2	3.9	1.5	0.9	0.1	1.4	2.5	0.4	0.0	15.9
	最大	44.5	28,300	63.8	17.5	6.1	2.0	1.1	0.2	2.1	3.2	0.5	0.0	19.9
	最小	24.3	7,800	53.3	13.5	3.0	1.0	0.6	0.0	0.7	2.0	0.1	0.0	10.5
	試験	5.8	3,700	2.3	0.9	0.7	0.2	0.1	0.0	0.3	0.3	0.1	0.0	2.2
Phase-2 平成 28年度 下期	平均	32.9	12,700	58.1	14.4	3.8	1.6	0.9	0.1	1.5	2.5	0.4	0.0	16.2
	最大	44.4	24,000	64.6	16.2	4.8	2.6	1.2	0.4	2.2	3.1	0.7	0.0	36.2
	最小	15.6	2,640	46.4	6.8	3.2	0.9	0.7	0.0	1.1	2.0	0.1	0.0	9.4
	試験	7.3	4,800	3.5	1.5	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.0	4.6
Phase-1 平成 28年度 上期	平均	32.9	15,600	54.2	16.8	5.6	2.3	2.1	0.2	1.3	1.8	0.3	0.0	14.6
	最大	46.9	59,900	58.7	18.4	7.2	3.8	4.1	0.4	1.7	2.4	0.4	0.0	19.9
	最小	15.1	1,290	48.6	15.1	4.7	1.7	1.4	0.2	0.9	1.3	0.2	0.0	10.2
	試験	5.7	8,370	2.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0	2.3

*放射性 Cs 濃度値は 2 桁のものは 2 桁、3 桁のものは上から 2 桁、4 桁以上のものは上から 3 桁にしている。

表2-1. 除去土壌の性状

² 「放射性物質の分離による焼却灰及び汚染土壌の資材化実証調査委託業務 Phase 2（平成28年度～29年度分） 概要報告書」日揮株式会社、2018年3月。環境省から開示を受けたもの。

³ 前掲書、p. 4

⁴ 前掲書、p p. 5-7

表 II. 2-2 流動床飛灰の水分量、放射性 Cs 濃度及び化学組成

			水分 量	放射性 Cs濃度	化学組成									
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl
					mass%									
Phase-2	平成 29年度	平均	13.8	78,700	51.0	16.2	5.7	8.6	1.7	1.2	1.3	3.2	0.6	2.2
		最大	16.1	130,000	65.2	19.2	6.6	17.4	2.6	4.3	1.8	5.0	0.7	5.2
		最小	11.3	29,000	38.3	12.2	4.0	4.1	1.1	0.5	0.7	2.5	0.4	0.3
		標準偏差	1.0	36,300	6.2	1.8	0.6	2.9	0.4	0.6	0.3	0.7	1.6	0.6
	平成 28年度 下期	平均	14.9	35,800	53.3	13.6	5.4	9.0	1.7	1.4	1.3	3.1	2.9	1.1
		最大	22.5	102,000	60.7	16.0	6.1	12.0	2.0	2.2	1.7	4.0	5.2	2.6
		最小	11.3	11,300	48.2	10.2	3.6	6.6	1.3	0.7	1.1	2.5	0.9	0.2
		標準偏差	2.5	29,400	2.8	1.6	0.7	1.4	0.2	0.4	0.2	0.5	1.3	0.8
Phase-1	平成 28年度 上期	平均	15.2	23,600	52.4	13.8	5.3	9.7	1.7	1.4	1.3	3.1	3.4	0.9
		最大	28.0	59,000	65.8	17.2	6.6	18.7	2.3	3.6	2.2	3.9	7.2	6.7
		最小	8.8	8,010	36.6	10.9	4.2	3.4	1.0	0.2	1.0	2.3	0.1	0.1
		標準偏差	4.2		5.4	1.8	0.6	2.9	0.3	0.7	0.2	0.4	1.8	1.2

表2-2. 流動床飛灰の性状

表 II. 2-3 ストーカ主灰の水分量、放射性 Cs 濃度及び化学組成

			水分 量	放射性 Cs濃度	化学組成									
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl
					mass%									
Phase-2	平成 29年度	平均	6.9	37,700	59.5	14.0	5.5	4.4	1.7	0.0	1.2	3.2	3.8	0.0
		最大	10.5	56,000	61.6	14.7	6.2	5.0	2.0	0.2	1.3	3.5	5.6	0.0
		最小	5.6	20,000	53.5	13.2	4.7	4.2	1.2	0.0	1.0	2.9	1.4	0.0
		標準偏差	1.8	6,440	2.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	0.0
Phase-1	平成 28年度 上期	平均	3.5	29,700	58.1	14.4	6.9	5.4	1.8	0.2	1.4	3.1	3.2	0.0
		最大	-	48,000	60.2	15.0	7.4	6.0	2.0	0.2	1.4	3.5	4.4	0.1
		最小	-	12,400	55.6	13.6	6.1	4.5	1.5	0.1	1.3	2.6	1.3	0.0
		標準偏差	-	14,700	2.0	0.6	0.6	0.6	0.2	0.1	0.1	0.4	1.3	0.0

表2-3. ストーカ主灰の性状

これらの処理対象物の性状で注目すべき点は、飛灰の放射性Csの放射能が平均で78,700Bq/kgと高いこと、および化学組成について、いずれの表においてもSiO₂が50～60%と高いのに対して、CaOが1～10%と低いことである。

なお、ストーカ炉の飛灰と流動床炉の主灰が試験対象として取り上げられていないが、飛灰および主灰は炉の型式によって大きな違いはないと考えられる。

3. 運転結果

(1) 運転概要

運転は、ほぼ7日間連続運転を行い、それを1サイクル(RUN)として、データをまとめている。運転が安定したのは後半の15回 (RUN 12～RUN26) で、その概要は表3のようにまとめられている⁵。

⁵ 前掲書、p.11

表 III. 3-2 RUN ごとの運転概要

RUN	日時	処理対象物			原料CaO	生成物			副産物	
		種類	放射性Cs濃度 (Bq/kg)	処理量 (t)		放射性Cs濃度 (Bq/kg)	生成量 (t)	良品率 (%)	放射性Cs濃度 (Bq/kg)	生成量 (t)
RUN2	H29.11.13-18	土壌90%:流動床飛灰40%	8,100~37,000	10.0	2.1	36~88	8.1	45.7	280,000~550,000	0.28
RUN3	H28.11.26-30	土壌90%:流動床飛灰40%	8,100~37,000	0.7	2.2	57~64	4	48.8	390,000~700,000	0.5
RUN4	H28.12.15-23	土壌90%:流動床飛灰40%	5,200~37,000	17.3	2.5	76~88	2.2	12.9	280,000~550,000	1.08
RUN5	H29.1.24-24	土壌100%	3,700~19,000	24.7	3.0	25~37	46.2	50.7	130,000~270,000	2.15
		流動床飛灰100%	7,600~20,000		3.2			56.4		
		土壌90%:流動床飛灰40%	8,700~41,000		3.4			67.6		
		ストロカ灰100%	12,000		3.1			73.6		
RUN6	H29.2.20-3.3	土壌100%	3,700~13,000	24.3	3.2	28~30	43.6	56.1	98,000~500,000	2.08
		ストロカ灰100%	12,000~25,000		3.8			66.2		
		流動床飛灰100% (埋込促進機)	10,000~37,000		3.2			84.7		
		流動床飛灰100%	10,000~37,000		3.2			91.8		
RUN7	H29.3.18-29	流動床飛灰100%	15,000~41,000	21.7	3.2	40~38	38.4	50.5	120,000~220,000	2.17
		土壌100%	2,600~19,000		3.4			74.5		
RUN8	H29.4.22-5.2	土壌100%	7,500~41,000	25.8	2.7	20~36	52	51.3	120,000~180,000	1.26
RUN9	H29.5.28-6.9	流動床飛灰100%	95,000~110,000	10.9	2.7	58~99	18.1	43	140,000~900,000	2.12
RUN10	H29.6.26-7.6	土壌100%	5,700~28,000	24.7	2.3	16~76	48.5	52.9	140,000~310,000	1.76
RUN11	H29.7.29-8.11	流動床飛灰100%	11,000~39,000	24.7	2.6	20~26	36.5	84.8	140,000~310,000	2.51
		ストロカ灰100%	36,000~41,000		3.2			62.1		
RUN12	2017.9.2~9.18	土壌100%	7,000~14,000	22.6	2.0	22~38	58.5	56.4	120,000~620,000	2.5
		流動床飛灰100%	87,000~100,000		3.1			88.8		
RUN13	H29.10.18~11.1	ストロカ灰100%	24,000~41,000	27.5	2.9	26~29	42.2	39	200,000~480,000	2.7
		流動床飛灰100%	27,000~110,000		2.5			83.9		
RUN14	H29.11.5~11.18	土壌100%	8,600~18,000	15.6	2.1	10~29	45.5	50.2	390,000~390,000	1.66
RUN15	H29.11.27~12.5	ストロカ灰100%	20,000~56,000	19.8	2.8	7~34	48.3	56.5	130,000~300,000	2.01
RUN16	H30.1.13~21	流動床飛灰100%	25,000~44,000	16.2	2.6	2~40	48.3	54.5	390,000~340,000	1.62

表 3. 運転概要

(2) 放射性Csの濃縮

このデータでもっとも顕著なことは、いずれの運転においても副産物の放射性Cs濃度は濃縮されて、処理対象物の5~10倍程度になっていることである。もっともその数値が高いのはRUN19で、対象物は流動床飛灰100%、放射性Cs濃度は85,000~110,000Bq/kg、副産物の放射性Cs濃度は140,000~900,000Bq/kgとなっている (RUN26流動床飛灰単体が供給されているが、供給時のCs濃度ははるかに低く、副産物のそれも低い)。流動床飛灰に次いでCs濃度が高いのはストロカ灰主灰であるが、単体で供給されている例は、RUN25で、供給時20,000~56,000Bq/kg、副産物130,000~300,000Bq/kgである。このように高い放射性廃棄物を扱うことはきわめて危険であり、わざわざこのような廃棄物を生み出す処理方法が実用化されることは決して許されることではない。

(3) 分散剤CaOの混入

この説明図で注目しなければならないのは、処理対象物 (汚染土壌) をロータリーキルンの中へ投入し、1350℃に熱して放射性セシウムを気化させるという点である。塩化セシ

ウムの沸点が1300℃ということが根拠になっている⁶。表1に示した環境省資料では「①前処理」工程をほとんど説明していないが、投入した土壌のあらゆる粒子に1350℃という温度を行き渡らせて、細かい土粒の表面に付着している塩化セシウム分子を蒸発させるためには、土粒をきわめて細かく砕き、熱がすべての土粒に行きわたるようにしなければならない。そして、ロータリーキルンの内部の火炎の温度が均一に行き渡るには、火炎温度に余裕を持たせて、1350℃以上に加熱しなければならない。

1350℃超の温度で天然の土壌の粒子を加熱すると、熔融して相互に付着する（ガラス化）。参考に典型的な土壌中の化合物の組成とその融点を表4に示す。

鉱物名	分子式	概略融点 (°C)	出典
珪酸塩鉱物	(Mg, Fe)SiO ₃	1500	(1)
鉄ザクロ石	Ca ₃ (Fe, Al) ₂ (SiO ₄) ₃	1150	(1)
斜長石	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ +NaAlSi ₃ O ₄	1300	(1)
アルミニウムザクロ石	(Mg, Fe) ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	1250	(1)
陶器 (焼成温度)	粘土・砂・岩石の粉末	1100-1200	(2)
磁器 (焼成温度)	粘土・砂・岩石の粉末	1200-1460	(2)
玄武岩の溶岩	SiO ₂ が約50%	1000~1200	(3)

表4. 代表的な土壌中鉱物の融点

出典 (1) 丹沢写真館『水晶と鉱物』2010年度版、「3. SiO₂と珪酸塩鉱物の基本構造」

http://www.asahi-net.or.jp/~up5s-andu/SUISHO/03_kouzou2.htm

(2) ノリタケ大倉陶園の食器とギフト「陶器と磁器の違い 焼き物の種類」

<http://www.noritakeshop.jp/knowledge-kindofchina.html>

(3) 石渡火山質問回答集「溶岩の粘り気」

<http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/ishiwata/kazanqa.htm>

この表の示すところは、1350℃超に炉内を加熱すると、多くの土壌成分が軟化し、熔融して土粒の細粒化や分散が困難になるということである。そうすると、土粒の分散を維持するために融点の高い粉末分散剤を混入する必要があるということである。そして、**陶器や磁器といった製品を表示したのは、これらも、**自然の土壌をほぼこの温度に焼成して一体の容器に成形したものであることを想起するためである。

表2-1、表2-2および表2-3で見たように、処理対象物は天然の除染土壌であり、SiO₂が50~60%である。そして、「概要報告書」の説明および表3の欄「C/S」が示すように、CaOをSiO₂の2.1~3.2倍を混入している（「C/S」とはCaO/SiO₂の重量比）。「概要

⁶ 「焼却処理の流れと放射性セシウム対策」環境省

http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/designated_waste/step_disposal/flow_of_incineration_process.html

報告書」の中では、安定した運転を行い、生成物の放射線量を100Bq/kg以下にするためには、下記の条件が必要であることを確かめたと記している⁷。

除染土壌	C/S=2.1
流動床飛灰	C/S=2.5
ストーカ主灰	C/S=2.7

このように2～3倍の処理物が発生する。筆者らは、除染土壌の資材化再利用に反対の立場であるが、仮に再利用するとしても、現状の除染土壌の量が過大で困難を来しているのに、さらに量を増やすことは、困難を増すことになる。

4. 排気と労働者被ばく

(1) 排ガス処理

この実証設備は図2の構成になっている。そして、排ガスの処理装置は、サイクロンとバグフィルタがあるのみである。この処理設備の排ガス中のセシウム濃度は、通常の減容化施設と比べてもはるかに高い。バグフィルタの効率が100%からほど遠いことは、上記3.4.5項に既述の通りである。したがって、HEPAフィルタを追加することが必須である。

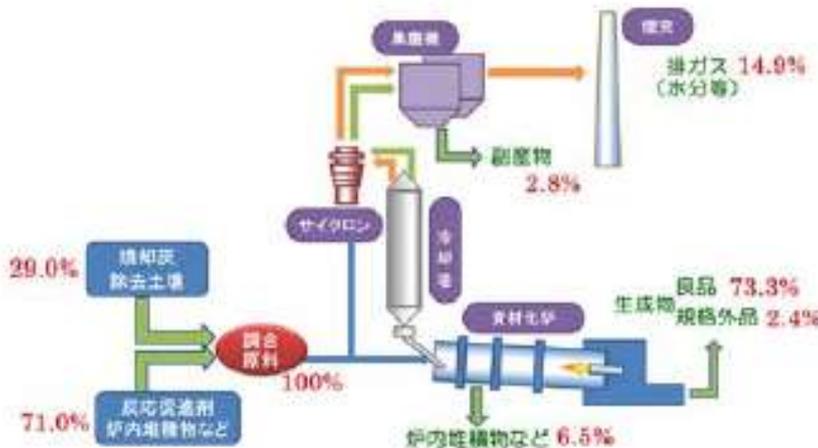


図 VI. 3-1 総合評価運転全体 (RUN24～26) における物質質量

図2. 実証設備と物質質量

(2) 労働者被ばく

この実証設備の運転に際して、様々な被ばく労働が行われたことが「概要報告書」に記載されている。

初期の運転 (RUN1～RUN11, 2016年4月～10月) においては、炉に投入する除去土壌の夾雑物を取り除いたり、焼却灰を破砕するために人海戦術で作業を行った旨の記述があり、

⁷ 前掲書、p. 10

放射能汚染物質を人手で取り扱ったことが窺われる⁸。

後半の運転（RUN12～RUN26。2016年11月～2017年1月）振動篩設備と破砕設備を導入して、さすがに人海戦術は解消したとのことであるが、前処理段階で焼却灰（「ストーカ主灰」と考えられる）をコンテナバッグごとにバックホウを用いて破砕し、それをバッグから取り出した後もさらにバックホウで破砕して、その後破砕した焼却灰をコンテナバッグに投入した、と記している⁹。このような過程では粉じんが作業環境に飛散することが常であり、作業者は被ばく環境を余儀なくされる。

さらに、この実証事業を元に設備が建設されたとすれば、効率の良い集じん設備の設置は必須であり、それに伴うバグフィルタのバグ交換や、HEPAフィルタのエレメント交換は大変な被ばく労働になり、実用設備としてはきわめて非人道的作業を強いることになる。

この設備に隣接する減容化施設において、はなはだしい被ばく労働が強いられた実例は、このシリーズ「その42」に記載した。

⁸ 前掲書、p. 12

⁹ 前掲書、p. 13