

震災による災害廃棄物処理の 現状と課題

（独）国立環境研究所
資源循環・廃棄物研究センター
大迫政浩

災害廃棄物対策からみた特徴

1. 膨大かつ広域

災害廃棄物約2300万トン程度、津波堆積物（土砂・ヘドロ）
1,300～2,800万トン、青森県から千葉県まで

2. 異なる地域状況

三陸沿岸部、宮城県～福島県沿岸部、福島県原発事故による放射能
に汚染された災害廃棄物問題など

3. 経験知の通用しない災害廃棄物処理

津波廃棄物（混合状態、海水被り（塩分問題）、海底ヘドロ堆積、
有害物質混入、広域火災地域、etc.

4. 多くの制約

仮置き場スペースがない（特に三陸沿岸部）、地域内に処理の受け
皿がない、処理に関わる人材・ノウハウ、重機・ダンプがない、
etc.

5. 不十分な対応能力

壊滅的な被災により、行政機能が低下

災害廃棄物の発生量試算

被害情報

被害把握

発生量
原単位

災害廃棄物
発生量推定

衛星写真
(国土地理院等)

航空写真
(国土地理院等)

地震動分布 (K-NET)
(津波) 浸水地域
浸水深

被災棟数

被災世帯数

被災事業所数

被災区分別

発生量重量

全壊：113トン/棟
61.2トン/世帯

半壊：全壊の0.5 床
上浸水 4.6トン/世帯床
下浸水 0.62トン/世帯

福島

290万トン

岩手

600万トン

宮城

1600万トン

災害廃棄物推計量 (環境省)

引用：廃棄物資源循環学会

「災害廃棄物対策・復興タスクチーム」

災害廃棄物分別・処理戦略マニュアル

～東日本大震災において～ver.2

混合（ミンチ）状態の津波廃棄物



釜石市



地震による倒壊と異なり、津波の威力により破壊された建物は、ぐちゃぐちゃになる。

撤去されたガレキは、仮置き場に混合状態のまま山となっている



大船渡市

適切な処理・リサイクルに向けた分別処理が極めて困難

海水を被ったガレキ （木屑）の塩分問題



大船渡市



大船渡市

焼却処理時に有害物質生成の恐れ

海底のヘドロ・土砂 （津波堆積物）の処理



仙台市



石巻市

悪臭や飛散粉塵、有害物質の混入の恐れ

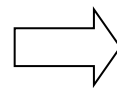
有害物質の混入、広域火災地域



大船渡市

柱上トランスの倒壊、油等有害物質
による汚染の恐れ（岩手県大船渡市）

広域火災が起こった地域では、
有害物質を含む焼却灰の残留や
土壤汚染の恐れ（岩手県大槌町）



大槌町



大槌町

困難な仮置き場スペースの確保

宮古市



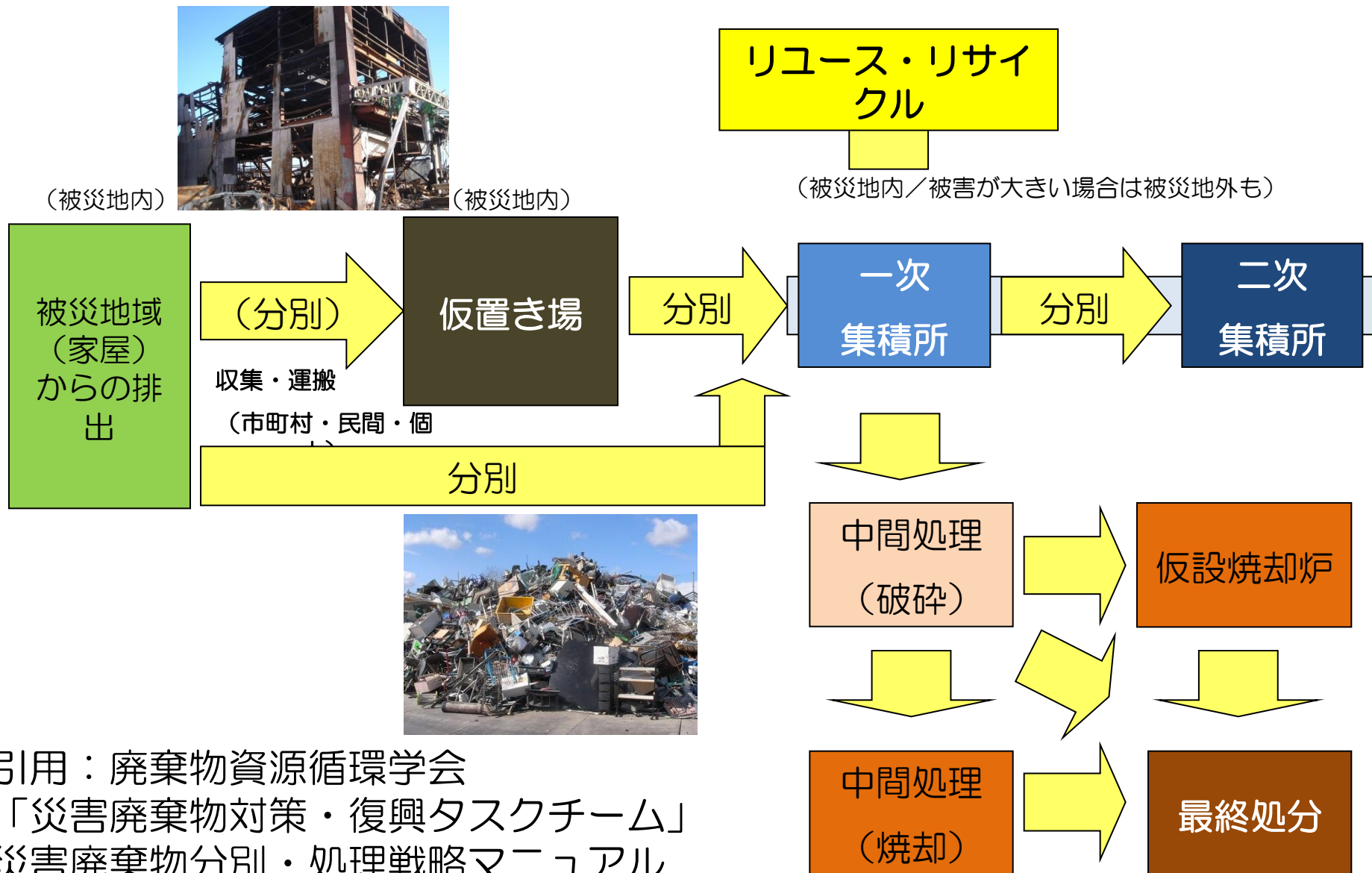
早急なガレキ撤去や適切な分別処理には、仮置き場として十分なスペースの確保が必要

釜石市



特に三陸沿岸部は平地が少なく、十分な仮置き場の確保が困難。仮設住宅建設と競合する場合も。生活する場の近くにある仮置き場では、飛散粉塵や悪臭が問題

基本的な災害廃棄物への対応フロー



引用：廃棄物資源循環学会
「災害廃棄物対策・復興タスクチーム」
災害廃棄物分別・処理戦略マニュアル
～東日本大震災において～ver.2

処理の方向性

出口（行き先）に応じた分別処理による
迅速・安全・経済性を目指す

- 広域連携による対応
- 重機等の効果的投入、海上輸送の利用・船舶の確保
- 復興の姿からみた地域内での廃棄物処理、活用
- 地域雇用の考慮、重視
- 復旧・復興を見すえた地域の人的資源育成・強化

国立環境所における具体的な
取組の例
(一部は廃棄物資源循環学会
の活動の一環として展開)

震災対応ネットワーク(廃棄物・し尿等分野)

・3～4月を中心に、廃棄物資源循環学会災害廃棄物対策・復興タスクチーム(<http://eprc.kyoto-u.ac.jp/saigai/>)と連携して活動。

・災害で発生した廃棄物や被災地の生活で発生する廃棄物等について、環境省や被災地域自治体等による現地対応を技術的観点から支援するため、全国の大学、国及び地方の研究機関、自治体、関連団体、民間等の知識・技能を有する方々から構成されるネットワーク。

・「水産廃棄物への対応について」、「津波堆積物への対応について」、「災害廃棄物の野焼きについて」など、これまでに15報以上の報告を発行

<https://sites.google.com/site/drnwwlink/>

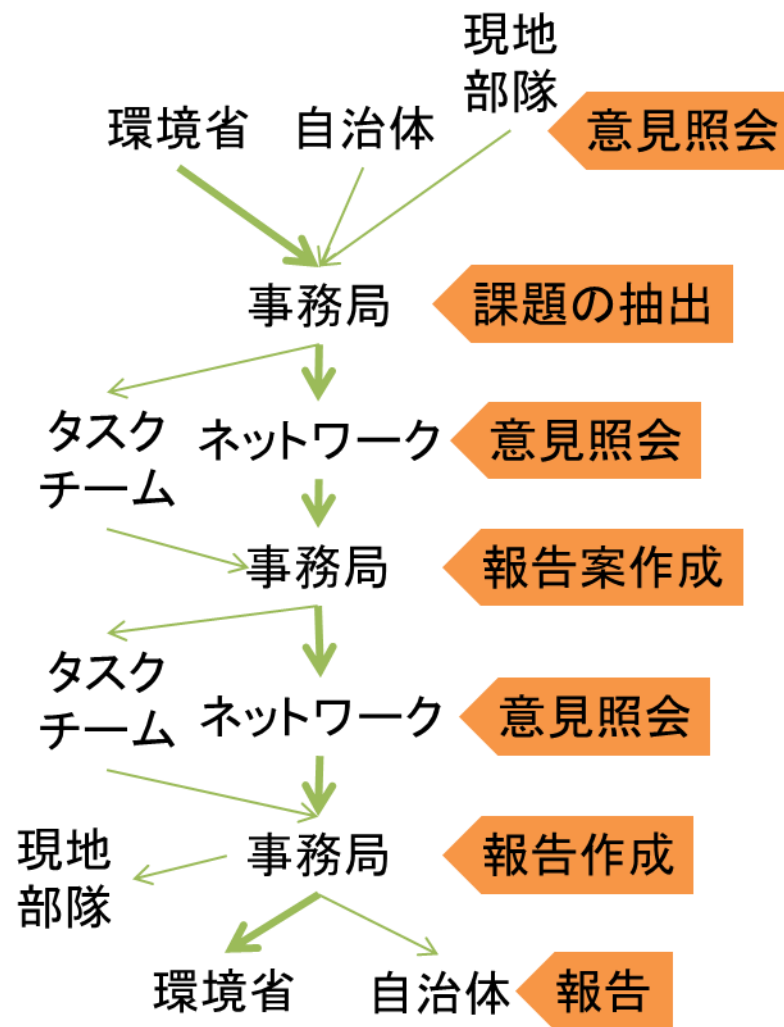
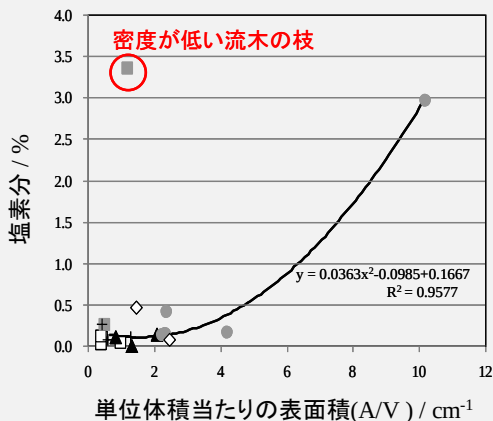


図 情報提供までの流れ

海水被り廃木材の塩素分の分析および燃焼試験

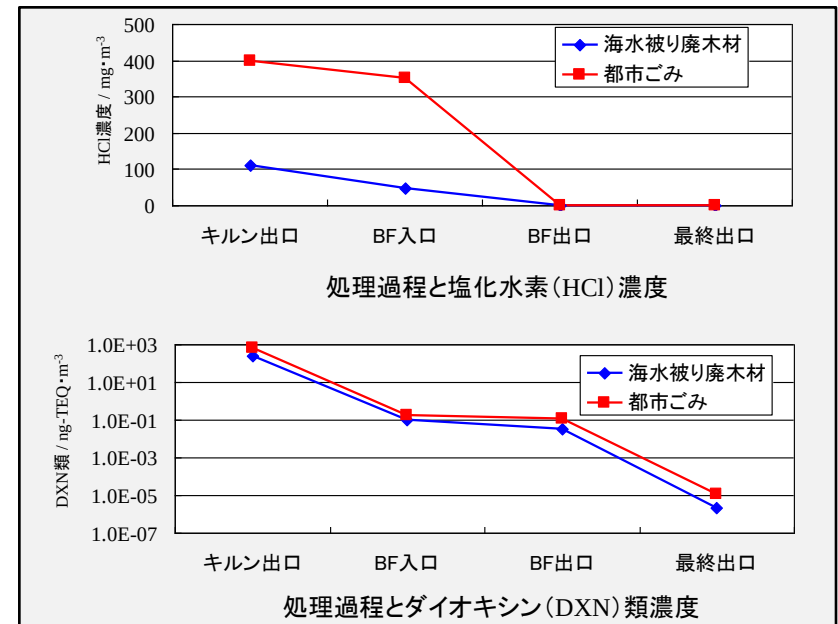
- ・様々な廃木材の塩素分を測定
- ・形状と塩素分の関係を考察
- ・簡易測定の適用性評価
- ・燃焼時の塩化水素、ダイオキシン類等の排出について検証
- ・塩分量、混在物質、燃焼温度を変化させて、その影響を把握



単位体積当たりの海水に接する表面積(A/V)と塩素分の関係

▲:小角材, +:倒木, ■:流木, ●:合板, □:柱材, ◇:板材

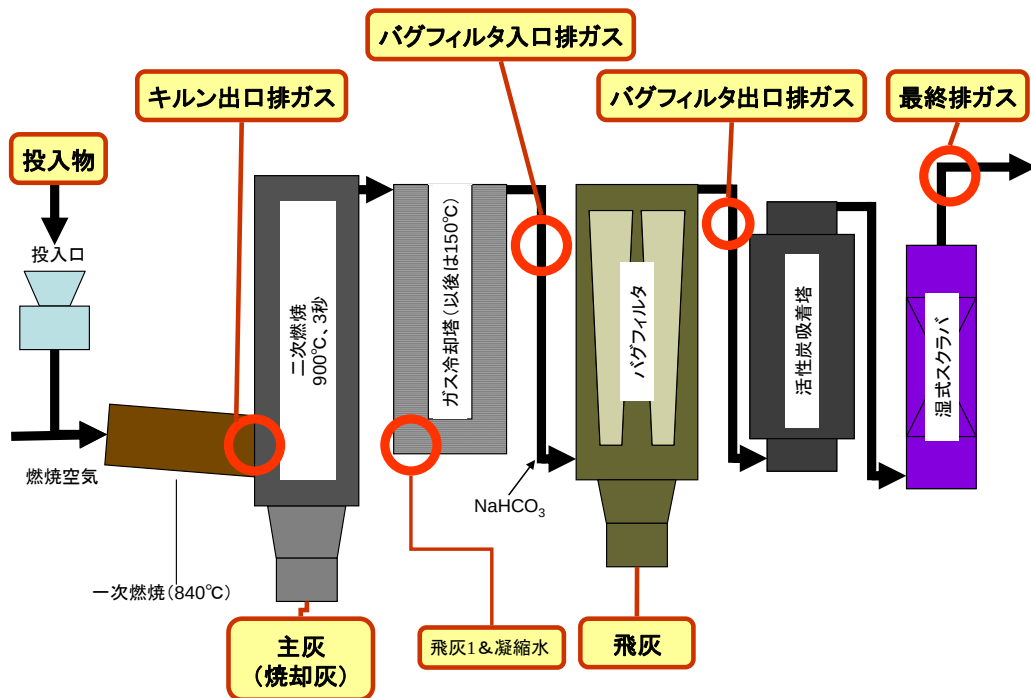
表面積と塩素分の関係



燃焼試験の結果(都市ごみと比較)

- ・**表面積の大きい合板や密度の低い流木は塩素分が高い。**一方、**表面積の小さい柱の塩素分は低い。**
- ・海水被り廃木材を燃焼しても**塩化水素やダイオキシン類の発生量は都市ごみの場合よりも低い。**

実際の燃焼試験のようす（平成23年5～8月）



投入口と一次燃焼炉



排ガス処理プロセス

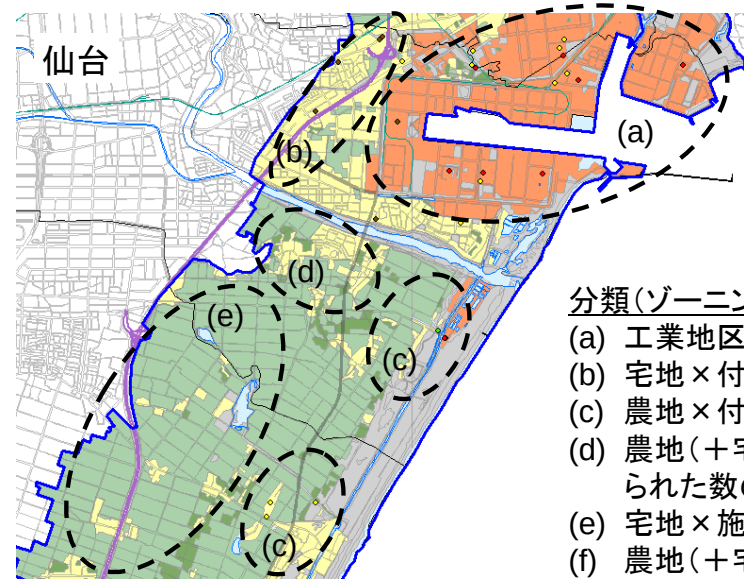


ダイオキシン類のサンプリング

津波堆積物の性状調査と適切な利用・処理の検討

津波堆積物の量は、被災地域で合計1,300～2,800万トンと推計されています。3月から6月にかけて、宮城県、岩手県の津波堆積物の現地調査と試料採取を実施しました。100検体を超える試料について様々な化学物質について分析を行いました。

また、地理情報システム(GIS)を活用して土地利用や施設の立地状況の情報を整理し、地域特性によって津波浸水地域を分類(ゾーニング)しました。



浸水地域の土地利用や立地施設の情報に基づいたゾーニングの例

地域特性によるゾーニングや詳細化学分析などの結果に基づいて、性状に応じて津波堆積物の適切な有効利用・処理方法を判断するための指針策定に参画しています。

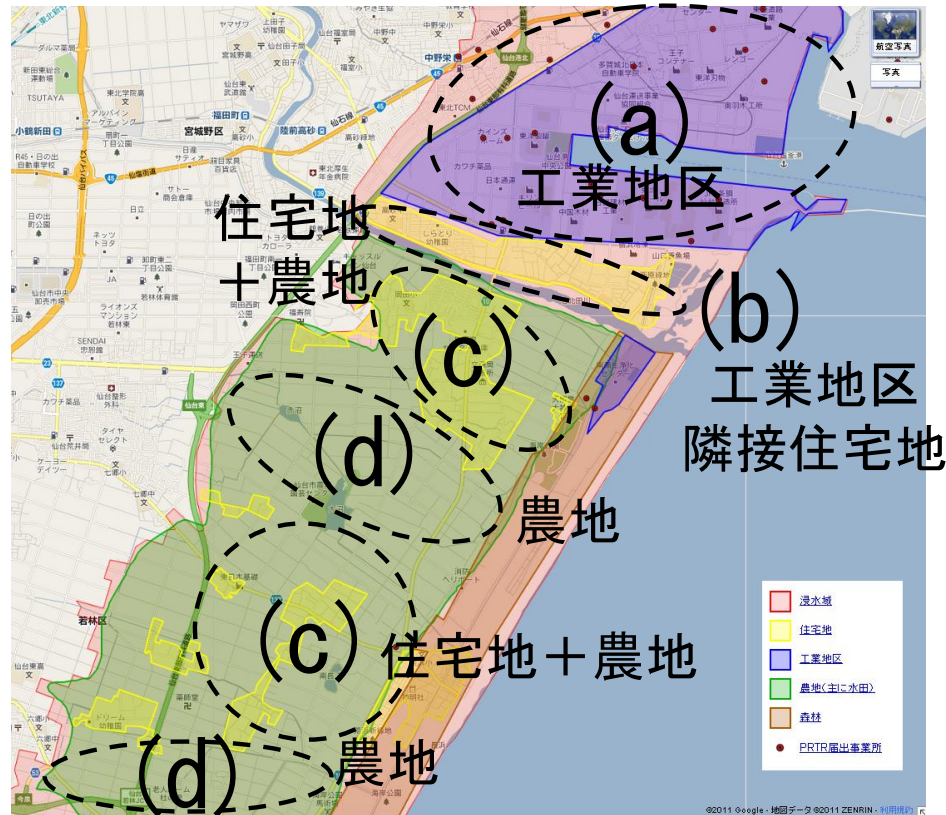


津波堆積物の例と現地調査の様子

堆積物の調査(ゾーニングと化学分析)

土地利用によるゾーン区分例(仙台市)

堆積物の採取箇所



浸水地域の土地利用や
立地施設の情報

採取した堆積物の化学性状調査

効率的に堆積物の性状を把握する取り組みをしており、土木資材化、無害化など性状に応じた適切な利用・処理方法を検討。

津波堆積物62検体の化学性状分析結果のサマリー

密度: 約2.7 g/cm³(真比重)であり、一般的な土壌と違いがない。

pH: ほぼ7.0 から9.0 の間にあるが、採取試料によっては強酸性、アルカリ性を示す。

電気伝導率: 塩分の指標として位置づけられるが、堆積物によって数mS/m から5,000 mS/m を超えるものまで幅がある。

熱しゃく減量: 主に有機物の指標となるものであるが、1.2%から16.3%まで広い幅がある。

油分(ノルマルヘキサン抽出物質、全石油系炭化水素(TPH)): ノルマルヘキサン抽出物質として0.1%を超えたものが幾つかあり、高いものでは9.8%を示した油泥もあった。

残留性有機汚染物質(ダイオキシン類やPCB、POPs農薬類): 含有量基準値(例えば、PCB処理物の卒業判定基準値、ダイオキシン類では土壌や水底底質中の環境基準値、その他の物質では設定されている参照指針値等)を超過するものはみられていない。規制基準値や指針値との比較のみならず、環境省が近年実施している近隣水域、地域における環境モニタリング調査(底質や土壌)の結果と比較しても概ね同じレベルにある。

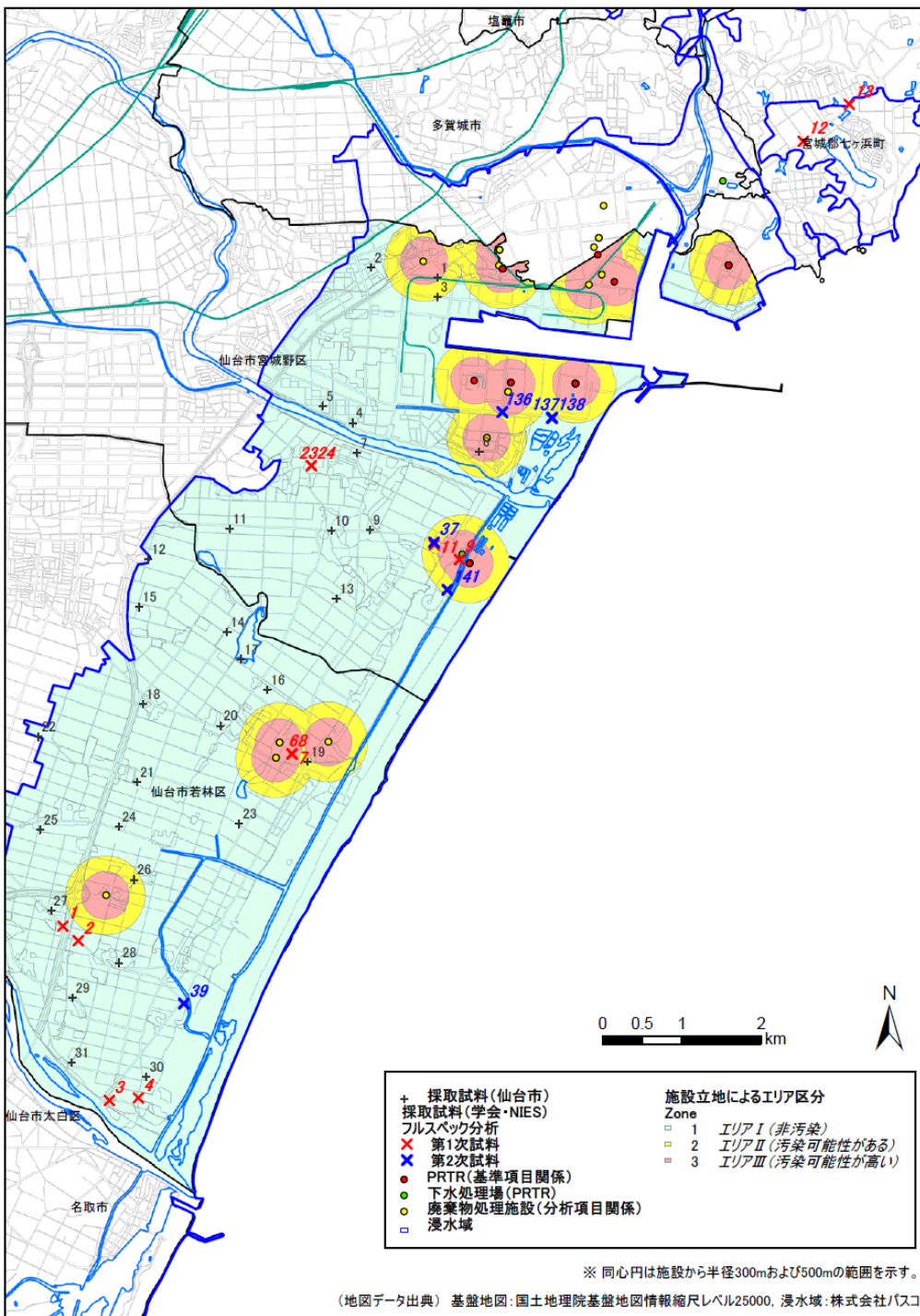
重金属類: 含有量は、多くの項目で不検出。鉛がmg/kg の範囲で多くの試料から検出(土壌汚染対策法含有量指定基準値150 mg/kg を下回るものがほとんどであったが、1試料のみ680 mg/kg 検出された)。砒素が2試料、カドミウムが1試料、ふっ素が1試料から検出されたが、指定基準値を超過していなかった。重金属類の溶出量(環境省告示第46号に準拠する方法)は、鉛、砒素、ふっ素、ほう素の4項目について土壌汚染に係る環境基準値を超過する事例がみられた。廃棄物の埋立処分に係る判定基準(環境省告示第13号に準拠する方法)についても、鉛が2試料において基準値(0.3 mg/L)をやや超過。

施設情報に基づく ゾーニングの基準案検討

・施設近傍は**エリアⅢ（汚染可能性が高い）**として分類（施設から300m程度の範囲）
施設の倒壊状況や堆積物の性状に関する現地予察情報，予備調査における化学分析結果等をふまえ判断。

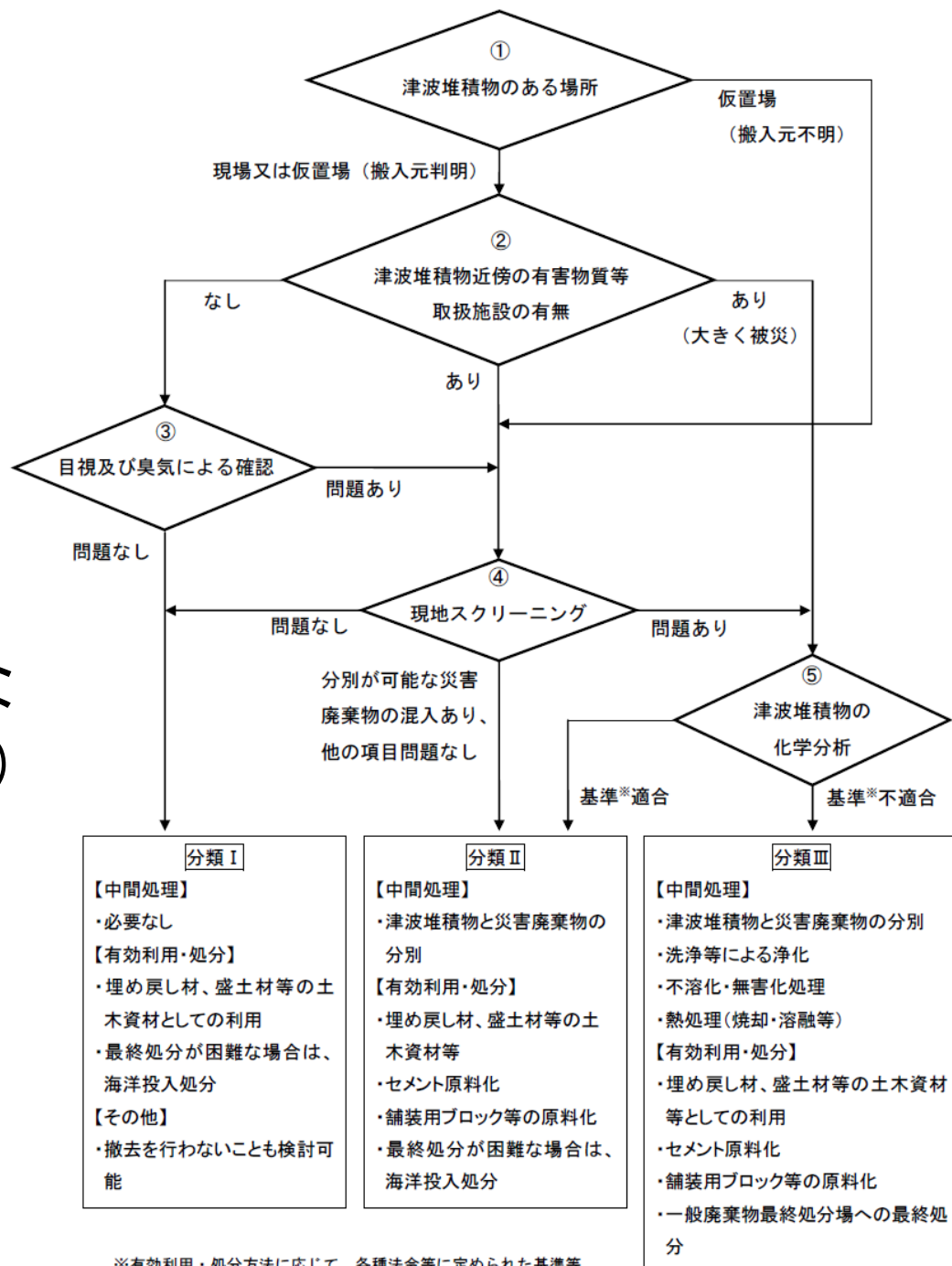
・施設周辺は**エリアⅡ（汚染可能性がある）**として分類。施設から300～500m程度の範囲を目安。施設の倒壊状況，残骸の存在，堆積物の性状に関する現地予察情報，予備調査における化学分析結果等をふまえ判断。

・上記以外のエリアは原則として**エリアⅠ（非汚染）**として分類。ただし，施設から津波の流線方向は化学物質等の流出があった可能性。施設から海岸線に垂直方向の幅1kmを目安とするエリアについては，汚染の蓋然性がある場合には，エリアⅡ（汚染可能性がある）として分類。



津波堆積物処理指針(案)の
公表(平成23 年7月5日)
廃棄物資源循環学会
⇒東日本大震災津波堆積物
処理指針の発出
(平成23 年7月12 日)環境省

津波堆積物の基本的な
処理フローチャート(右)



仮置場の廃棄物火災予防

仮置場に積み上げられたがれき(廃棄物)が発火しないように、適切に管理する必要があります。そこで、廃棄物温度の自動観測を行っています。



図1 温度モニタリングの様子

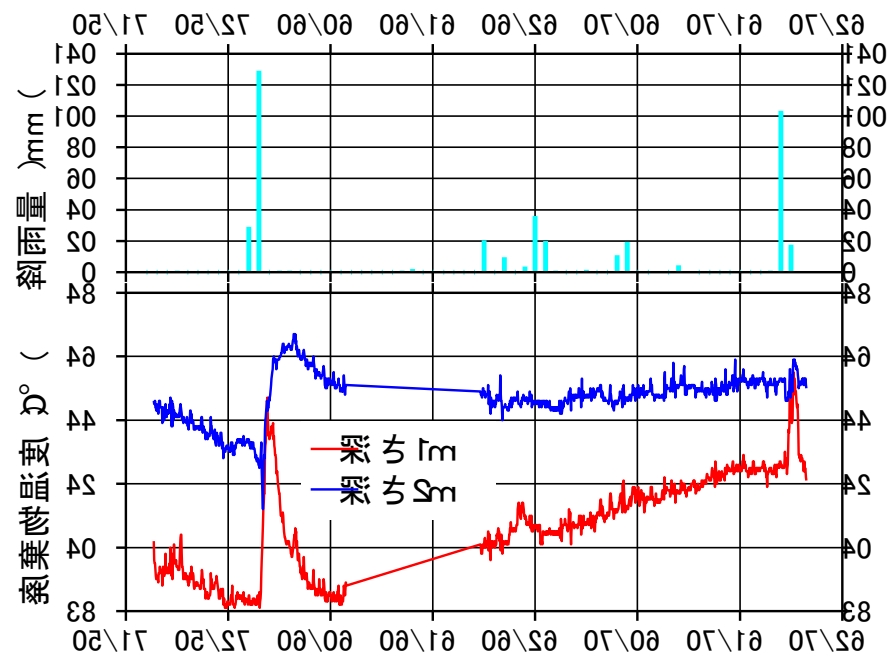


図2 温度モニタリングの結果

深さ1mと2mの温度を観測しています。降雨があると、温度が上昇する傾向があります。これは、熱の逃げ道がふさがれるためです。現在は60℃以下なので発火の危険性はありません。

災害廃棄物と放射能

- ・Cs-134・Cs-137が主に寄与
- ・土壌での関係性
- ・災害廃棄物は土壌より低い
- ・木材、金属等の組成の違い

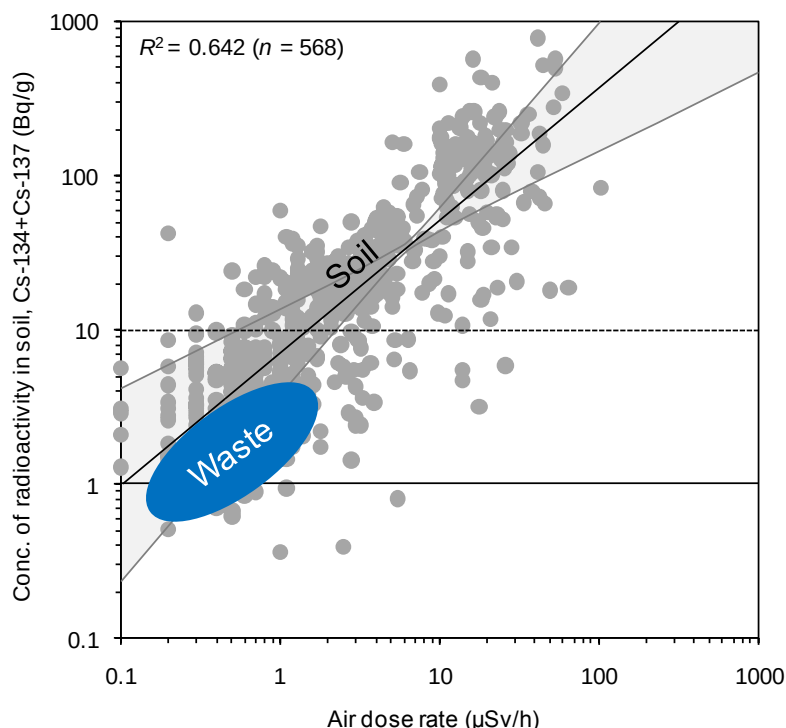


図1 空間線量率と放射能濃度

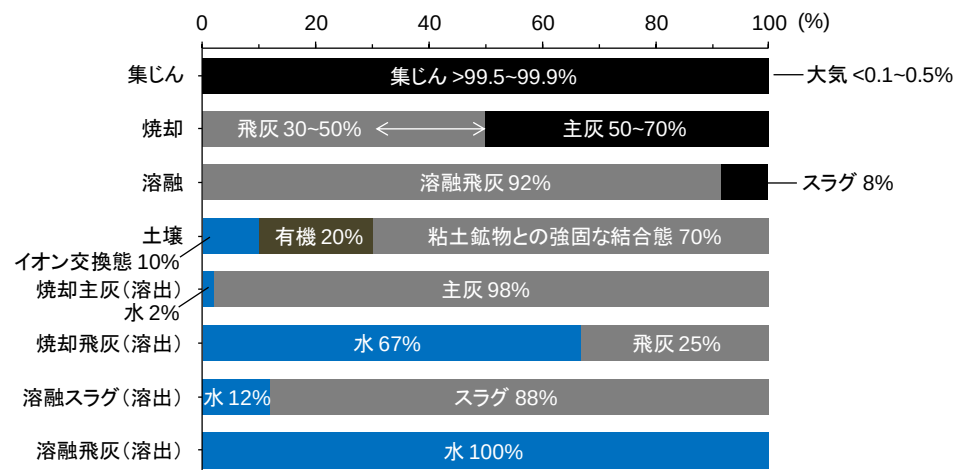


図2 放射性セシウムの挙動

- ・集じんにより除去
- ・主灰と飛灰に移動
- ・飛灰では水に溶けやすい
- ・溶融プロセスも類似



現在進行形で継続中

放射能を帯びた災害廃棄物の問題

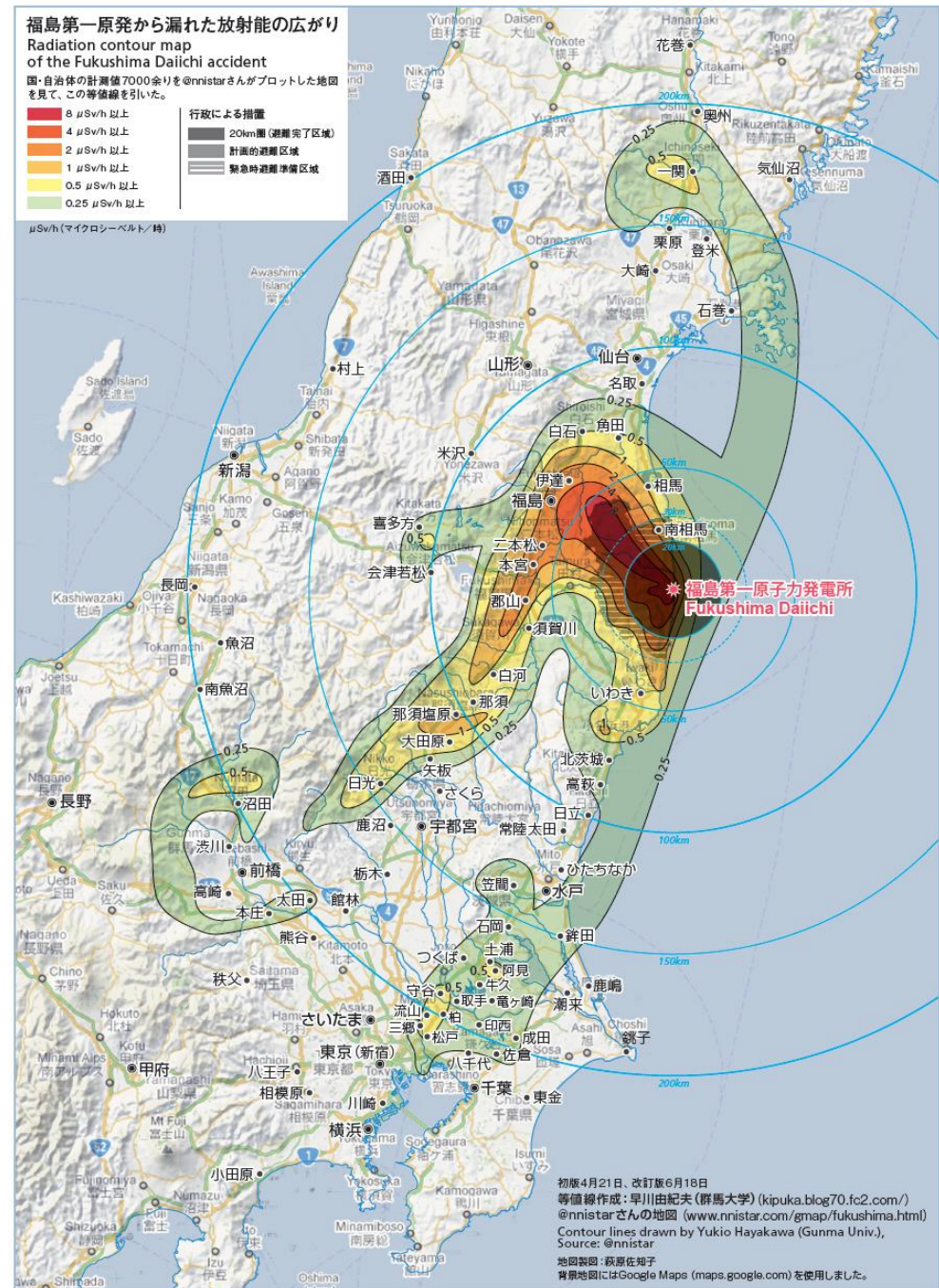
放射性物質を含む 廃棄物問題

1.福島県内の災害廃棄物
処理

2.福島県内外の上下水汚
泥の処理

3.福島県内外の一般廃棄
物、産業廃棄物の処理

4.その他



放射性物質放出 (Cs134・137)

移流・拡散

降雨

土壌等への沈着

浄水汚泥

Cs等沈着土壌粒子流出・濃集

下水管

下水処理場

下水汚泥

草木類

Cs付着・吸収

焼却・溶融施設

焼却主灰・飛灰

焼却減量に伴う濃集（主灰）、揮発・凝集による濃集（飛灰）

最終処分場

一般ごみ

ポンプ場

移流・拡散

降雨

土壌等への沈着

焼却減量に伴う濃集（主灰）、揮発・凝集による濃集（飛灰）

焼却主灰・飛灰

焼却・熔融施設

最終処分場

淨水污泥

草木類

Cs付着・吸収

下水管

下水污泥

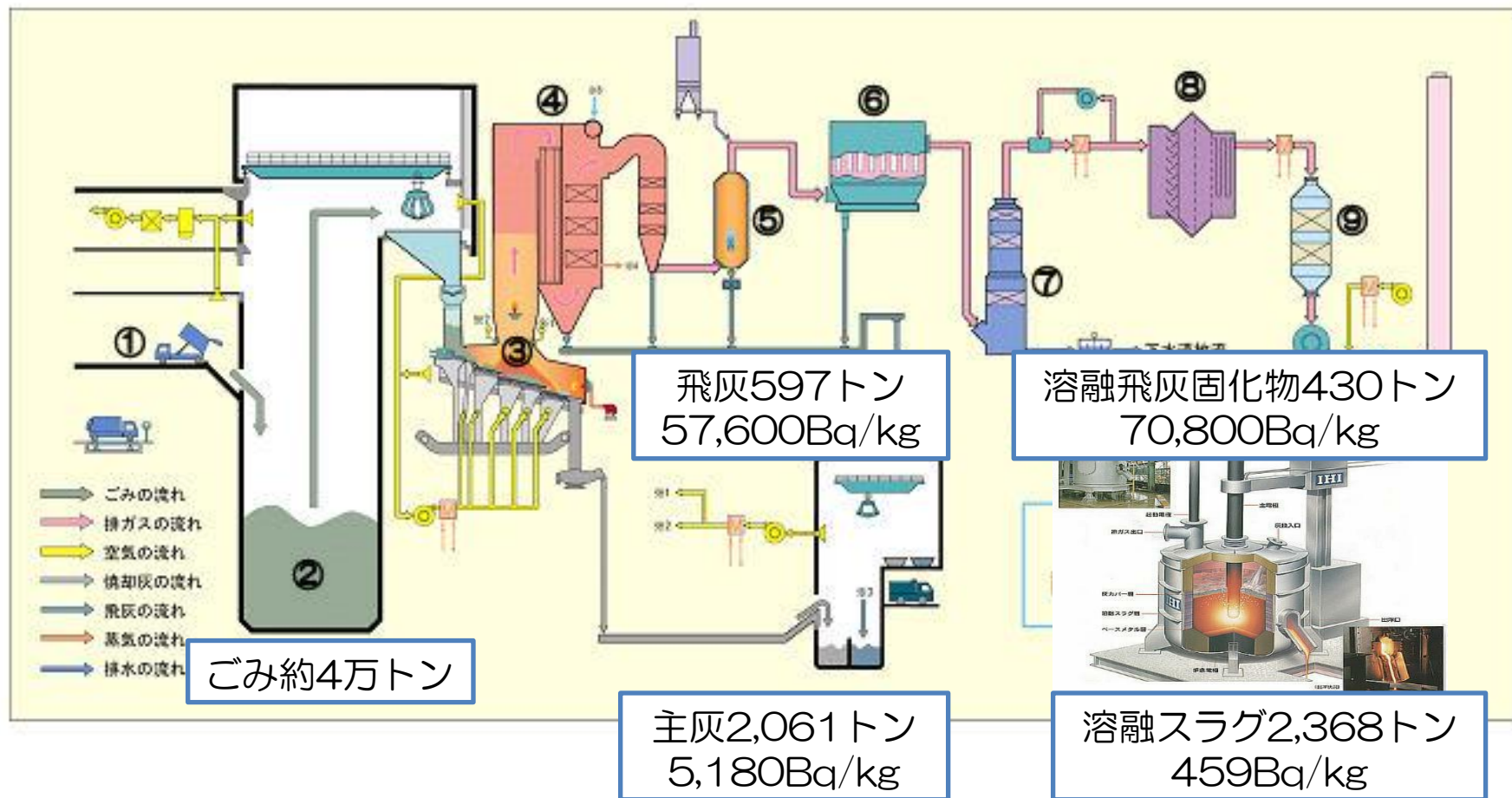
下水処理場

一般ごみ

Cs等沈着土壤粒子流出・濃集

ポンプ場

焼却・溶融施設における放射性Cs挙動 (柏市の事例)



8,000Bq/kgを超える焼却飛灰は防水 できる状況で一時保管



焼却飛灰の排出（フレコン
バッグへの詰め込み）



焼却飛灰の概観



焼却飛灰が詰め込まれた
フレコンバッグ

フレコンバッグ詰めの焼却飛灰の一時保管

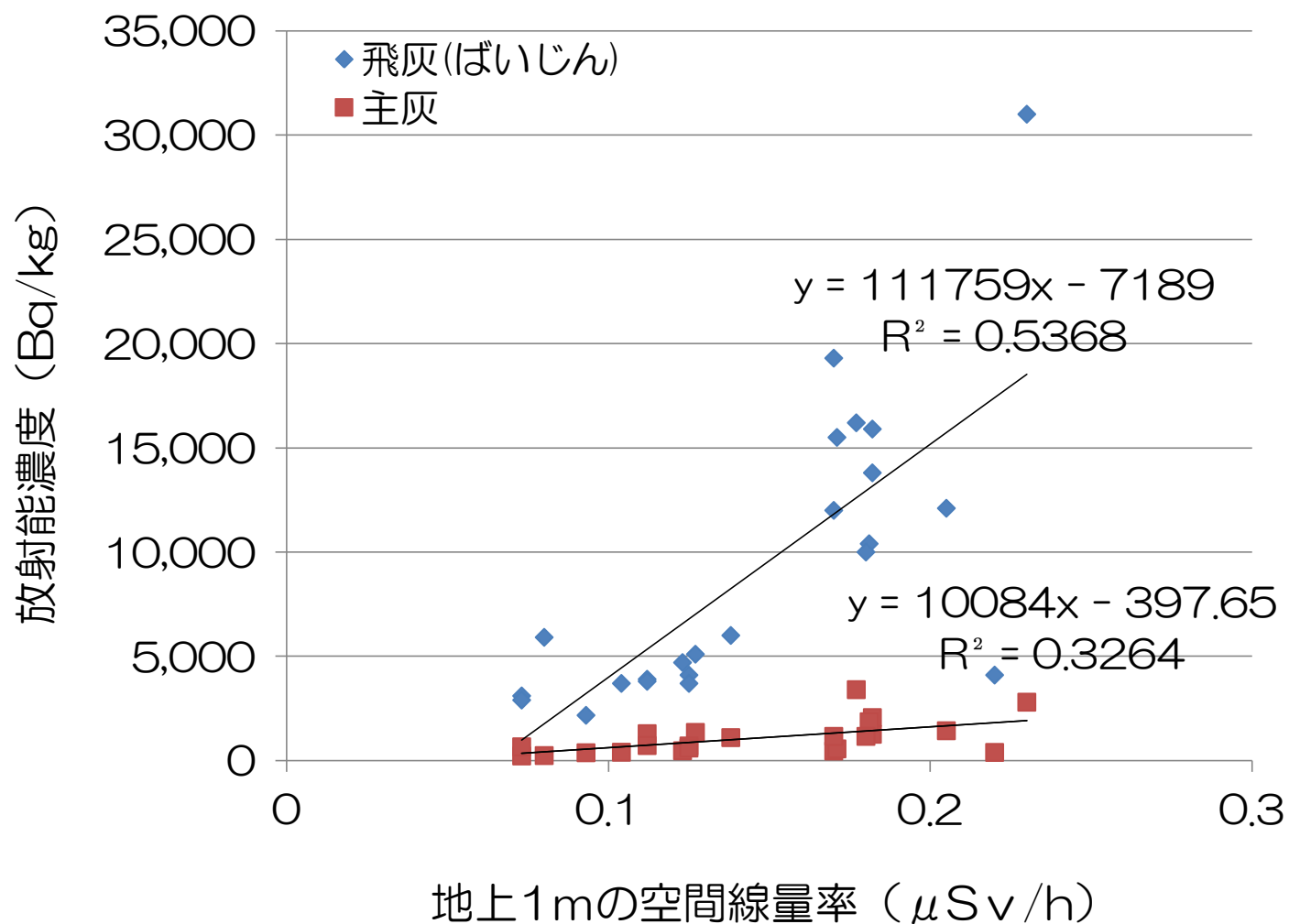


粗大ゴミ（家具類など）を
収納する建屋を用いて一時
保管しているが、あと1週
間しか持たない



屋外保管のために300本の
ドラム缶を急遽用意したが、
地域住民が屋外保管は許し
てくれない

地域の空間線量率と焼却灰濃度の関係 (茨城県の市町村の例)



放射性セシウムの ベクレルからモル質量への換算

放射性核種	半減期	T (sec)	M/B (mol/Bq)	
Sr-90	28.9y	9.1×10^8	2.2×10^{-15}	
I-131	8.0day	6.9×10^5	1.7×10^{-18}	
Cs-134	2.1y	6.6×10^7	1.6×10^{-16}	$2.1 \times 10^{-14} \text{ g/Bq} = 21\text{fg/Bq}$
Cs-137	30y	9.5×10^8	2.3×10^{-15}	$3.2 \times 10^{-13} \text{ g/Bq} = 320\text{fg/Bq}$

f:フェムト 10^{-15} 、ちなみに 10^{-12} はピコ(p)

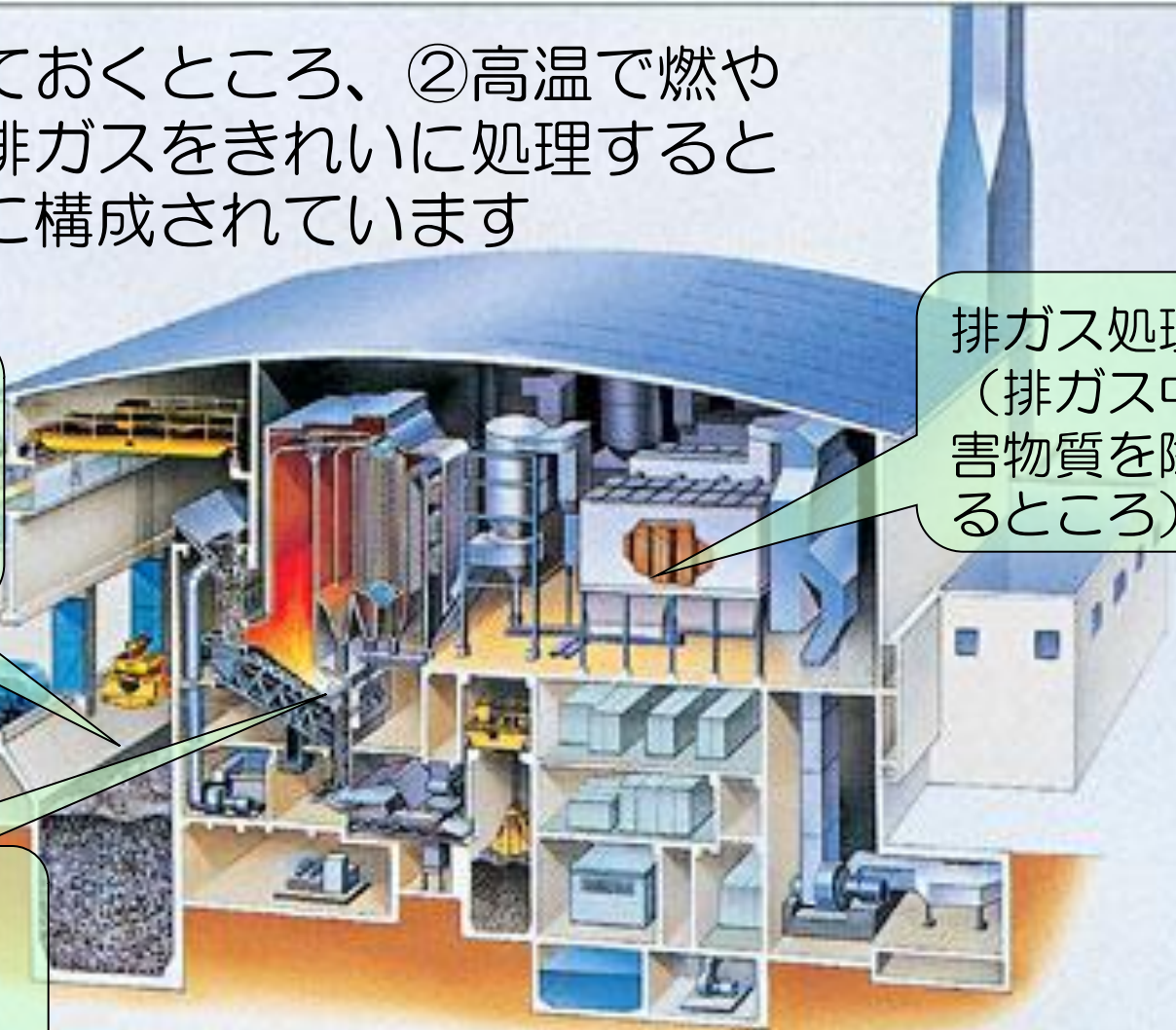
焼却処理施設の仕組みは？

①ごみを溜めておくところ、②高温で燃やすところ、③排ガスをきれいに処理するところ、から主に構成されています

ごみピット
(溜めておくところ)

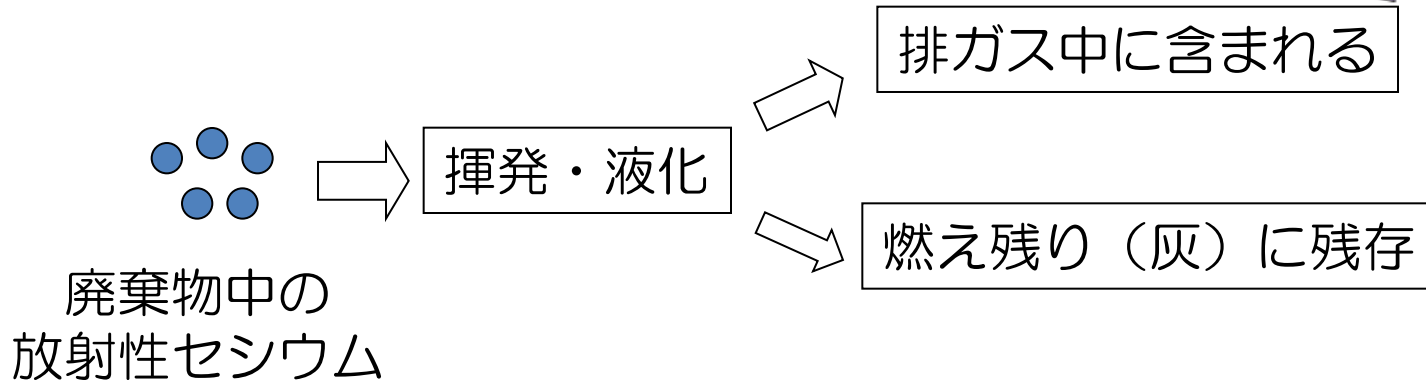
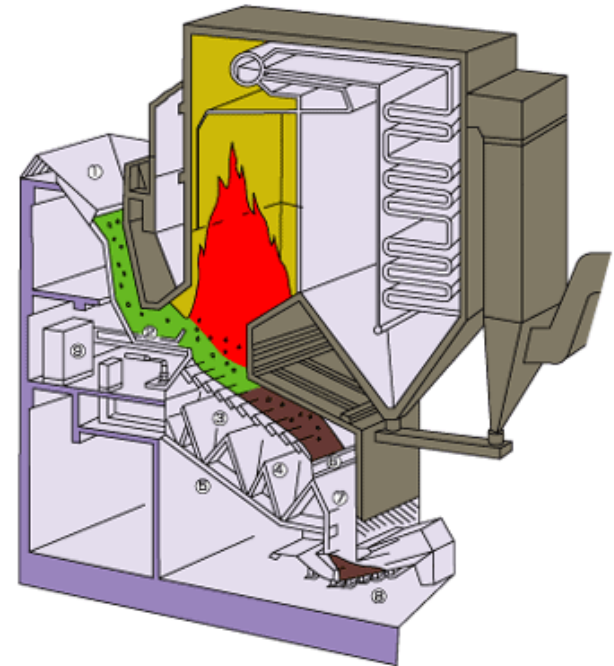
ストーカー焼却炉
(高温で燃やすところ)

排ガス処理設備
(排ガス中の有害物質を除去するところ)



焼却すると廃棄物中の放射性セシウム はどうなるか？

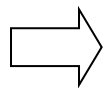
廃棄物の中の放射性セシウムは、 850°C 以上の高温の炎の中で**揮発したり**、小さな液滴となって**排ガスと一緒に流れていくもの**と、**燃え残りの灰に残るもの**に分かれます。



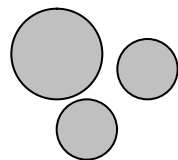
排ガス中の揮発した放射性セシウム はどうなるか？

排ガスは冷やされて、気体
状あるいは液状のセシウム
は、主に塩化セシウムとし
て固体状態になり、ばいじ
んに凝集したり吸着しま
す。

気体状の
塩化セシ
ウム等



凝集
・吸着



ばいじんの粒子
(平均は数十 μm)

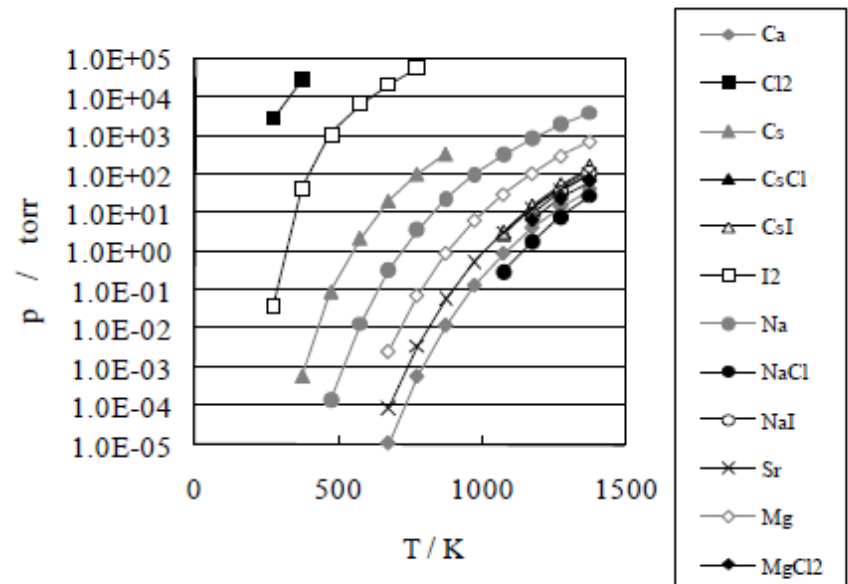


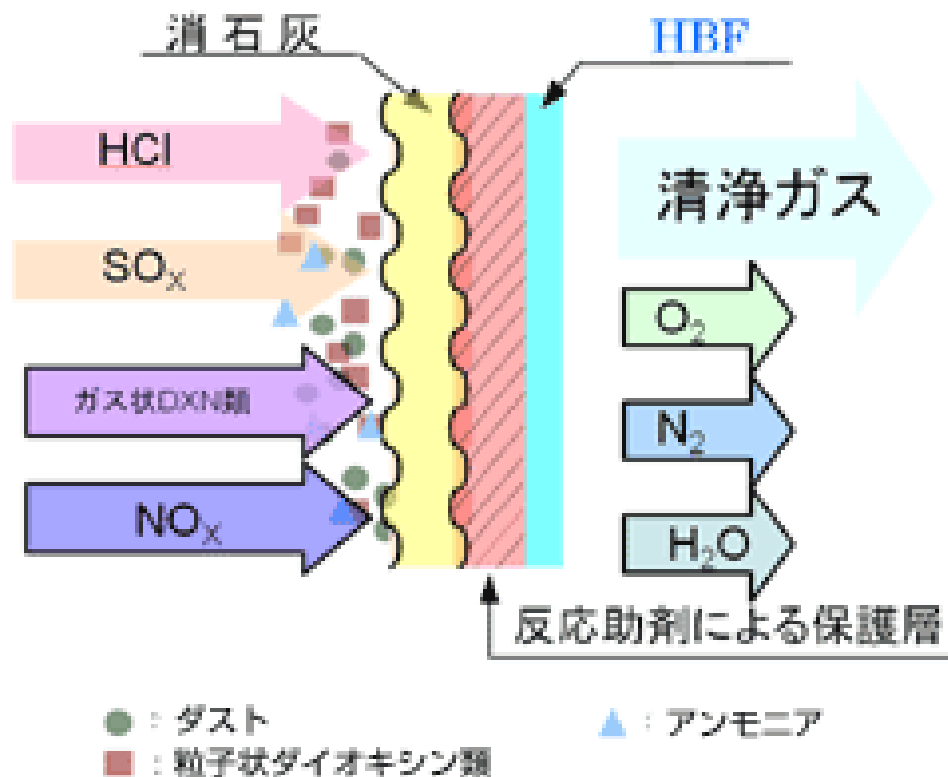
図1 $\text{I}_2, \text{Cs}, \text{Sr}$ およびそれらの塩類の蒸気圧

排ガス中の塩化セシウム (CsCl) は、
沸点 (液体から揮発する温度) 1300 $^{\circ}\text{C}$
融点 (固体から液体になる温度) 646 $^{\circ}\text{C}$

ばいじんに吸着した放射性セシウム はどうなるか？

○セシウムが吸着しているばいじんは、**バグフィルター**でほぼ完全に除去、捕集されます。

○きめ細かなろ布上に形成された**薬剤**や**ダスト**自身による層により、**サブミクロン**（ $1\mu\text{m}$ 以下）の粒子を濾（こ）しとって除去します。



バグフィルターによる除去の仕組み

安全性を確認する排ガス濃度の目安

原子力安全委員会は、排ガス中の濃度限度として、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」等で示された濃度限度を下回ることを確認することが重要であるとしています

（平成23年6月3日付け文書「東京電力株式会社福島第一原子炉事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」）

$^{134}\text{Cs} : 20\text{Bq}/\text{m}^3$

$^{137}\text{Cs} : 30\text{Bq}/\text{m}^3$

過去の調査で報告されているバグフィルターの除去性能や排ガス測定結果概要

- バグフィルター付きの焼却炉で、セシウムについて99.99%以上の除去率を確認（第3回環境省災害廃棄物安全評価検討会資料）
- 柏市の焼却施設等の排ガス測定結果では、いずれも検出下限未満であった。
- 福島県内の焼却施設（但し、電気集塵機付き）で災害廃棄物を混焼して測定した結果では、線量限度を定める告示で示される数値を十分下回った。
- その他、高濃度の焼却灰を排出する焼却施設（バグフィルター付き）で排ガス測定をした結果では、いずれも告示の数字を十分下回っている

大切なのは、排ガス中のばいじんの除去

焼却施設には、**ばいじんの規制**があります。**規制値を守って**い**れば**、放射性セシウムの**拡散の心配は全くありませ**

ん。

排ガス中のばいじんの規制基準値 もしくは南部清掃センター実測値 ($\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	ばいじんの放射性Cs濃度の仮定値 (Bq/kg)	ばいじん規制基準値における排ガスの放射性Cs濃度推定値 ($\text{Bq}/\text{m}^3\text{N}$) *	(参考) 線量限度を定める告示**
0.04 (4t/h以上)	8,000~100,000	0.32~4	^{134}Cs : $20\text{Bq}/\text{m}^3$ ^{137}Cs : $30\text{Bq}/\text{m}^3$ 排ガス濃度の基準の目安となる数値の 1/1000 程度になっています。
0.08 (2~4t/h)		0.64~8	
0.15 (2t/h以下)		1.2~15	
0.0008~0.0013 (H22年度のA清掃センター実績値)	23,100 (7/14採取試料の2号炉飛灰測定値)	0.018~0.030	

* 放射性Csはガス態で存在せず、ばいじんに全て含まれると仮定

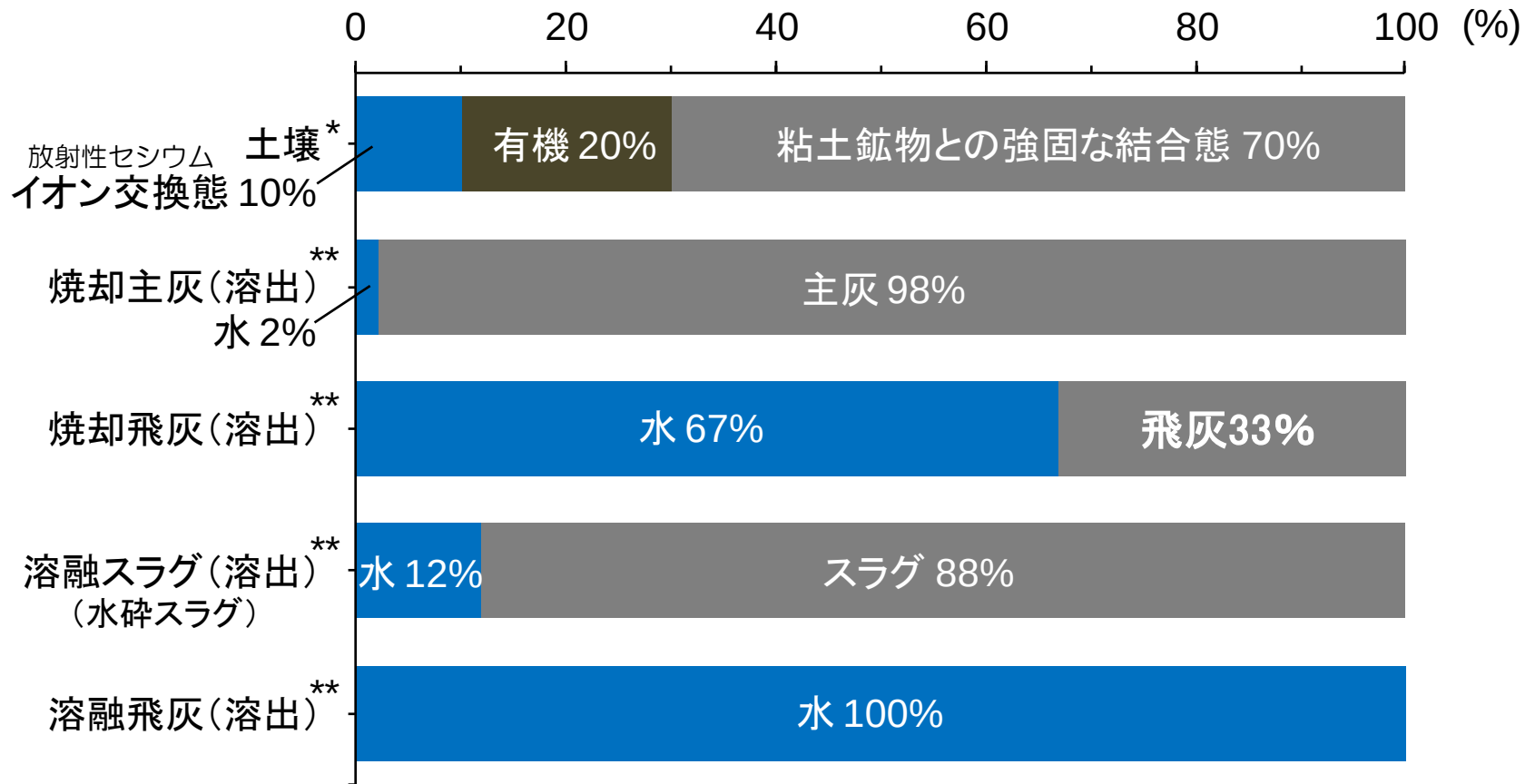
** 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示

焼却施設の安全性に関するまとめ

1. 焼却過程で揮発した放射性セシウムは、排ガスに移行して、冷やされながらばいじんに凝集・吸着する。
2. 排ガス中の放射性セシウムが吸着したばいじんは、バグフィルターでほぼ完全に除去される。
3. ばいじんの規制値を守っていれば、放射性セシウムがばら撒かれることは全くない。
(地域の環境に存在する放射性物質を分離して取り除く重要な役目をしている)

放射性物質を含む廃棄物の 埋立処分について

セシウムの溶出特性



**溶出試験：昭和48年環境省告示13号に準じる

50g/500mLを6時間反復振とう後、0.45 μ mメンブレンフィルターでろ過
日の一致した試料3日分を分析

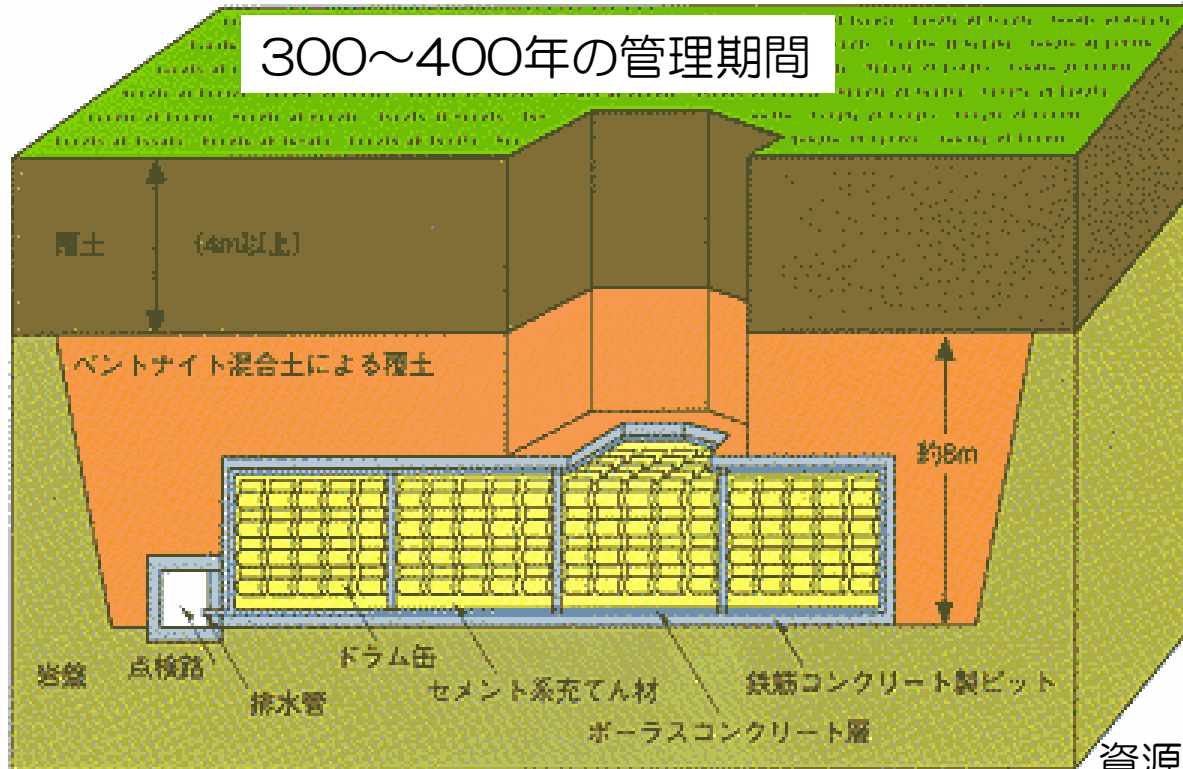
*Tsukada ら(2008) Journal of Environmental Radioactivity, 99, 875-881.

**当センター測定結果、水への溶出率(%) = 溶出量/含有量 $\times$ 100、固体への残存率は100% - 溶出率

現行の低レベル放射性廃棄物の処分方法

浅地中ピット処分（上限値：Cs-137 10^{14} Bq/ton）

1000億Bq/kg



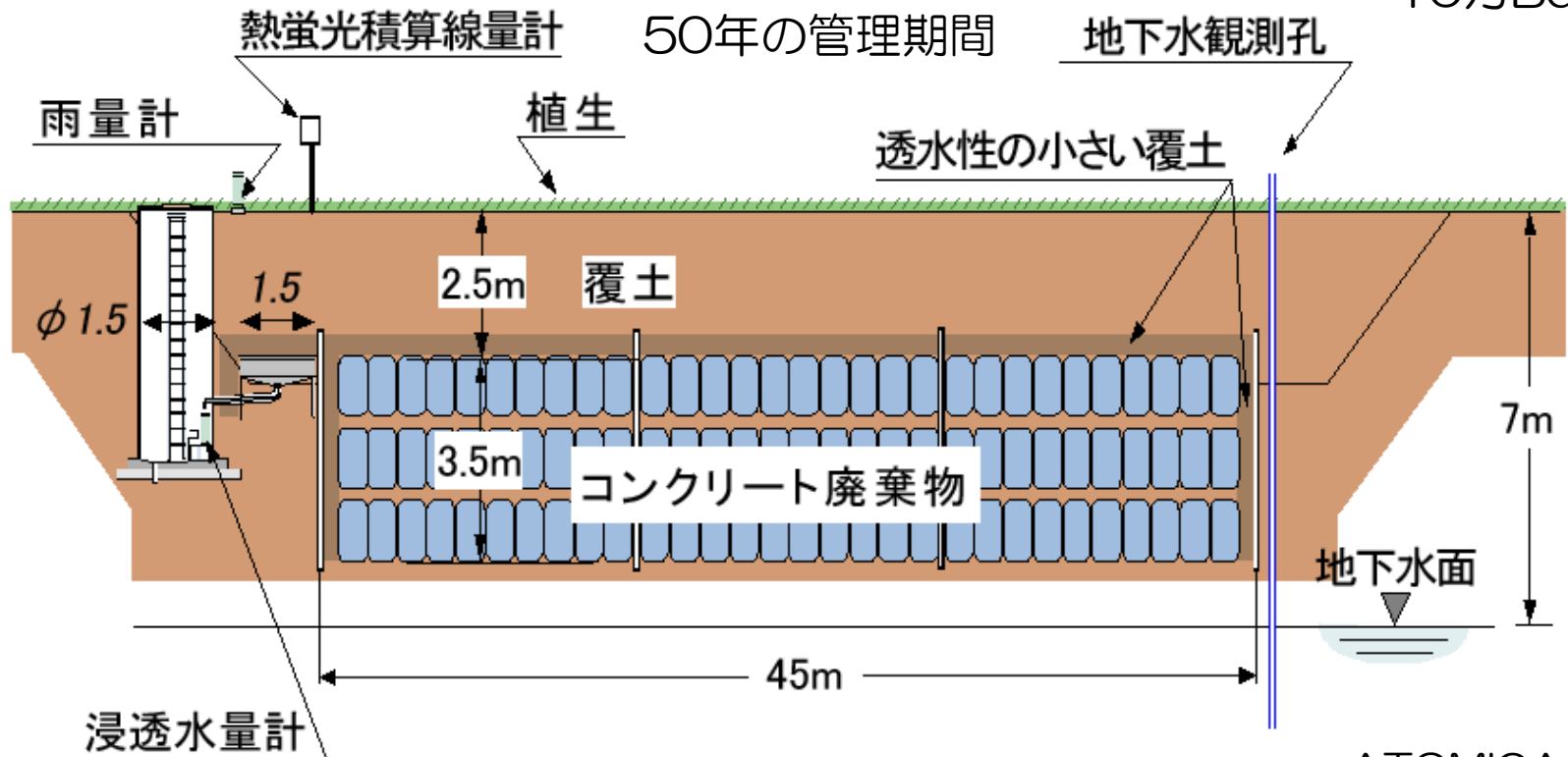
資源エネルギー庁HPより

液体廃棄物を濃縮した廃液や放射能レベルの低い使用済樹脂、可燃物を焼却した焼却灰などをセメントなどでドラム缶に固形化したものや、配管やフィルターなど固体状の廃棄物

現行の低レベル放射性廃棄物の処分方法

浅地中トレンチ処分（上限値：Cs-137 10^8 Bq/ton）

10万Bq/kg

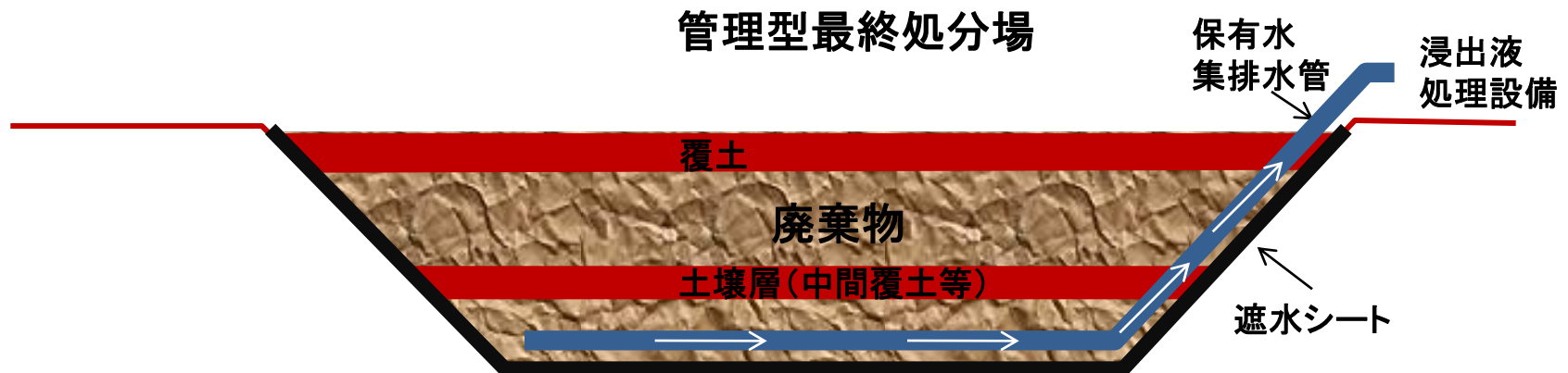


ATOMICAより

コンクリートや金属など、化学的、物理的に安定な性質の廃棄物

管理型最終処分場について

- 管理型最終処分場は、廃棄物処理法に基づき、廃棄物を適正に処理するための施設であり、県の許可を得て(市町村設置の場合は県に届け出て)設置されます。
- 地下水汚染を防止するために、二重構造の遮水工(粘土層、遮水シート等)によって処分場内部と外部を遮断しています。
- 埋立処分が終了した後、厚さが概ね50cm以上の土砂等の覆い(最終覆土)を行います。
- 処分場内に降って廃棄物層に染み込んだ雨は、廃棄物層底部の集排水管で集水され、浸出液処理設備で基準を満たすように処理された後、放流されています。



8,000ベクレル/kg以下の廃棄物の埋立処分

- 埋立中の周辺住民への影響は、埋立場所に隣接していても、公衆の許容レベル(1mSv/年)以下になります。
- 作業員の被ばくレベルは、通常の廃棄物処理施設と同様の作業方法であっても、公衆の許容レベル(1mSv/年)以下になります。
- 埋立処分終了後については、覆土(50cm)をし、跡地利用を居住等以外の用途に限定すれば、跡地利用者の被ばく線量が年間10 μ Sv(クリアランスレベル)を十分に下回ります。
- 処分場の排水処理や、跡地の利用制限など、一定の管理が必要になる場合があります。



8,000Bq/kgを超える焼却灰の埋立処分 に対応する技術

1. 水との接触を避け、溶け出さないようにする

コンクリート固化、容器封入、遮水性を有する隔離層設置、地下水上部に埋立、滞留水の排水

2. 吸着して自然減衰するまで流出を遅らせる

土壌吸着層（中間覆土層）設置

3. 浸出水処理によって除去する

ゼオライト等の凝集沈殿槽への添加、吸着塔の設置など

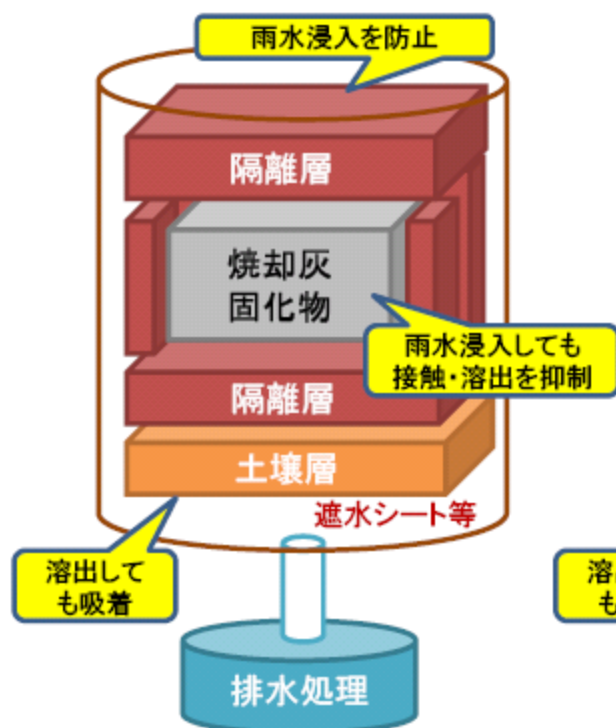


流出防止のための
フェイルセーフ・システム

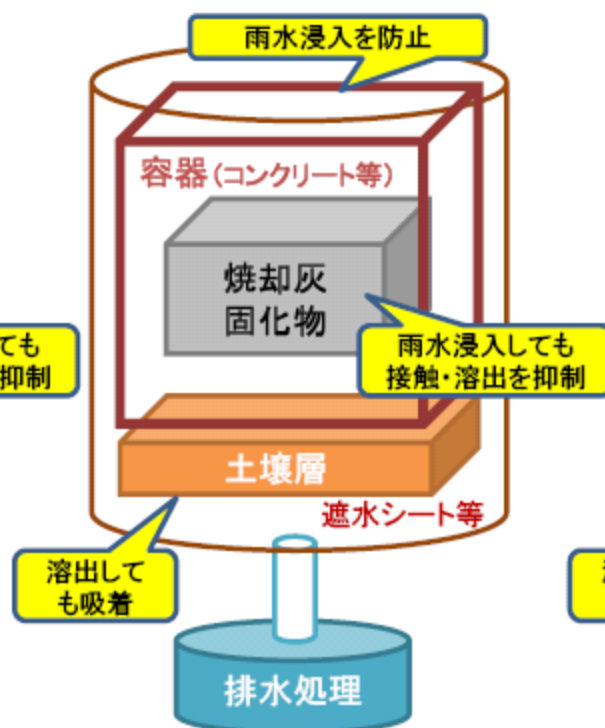
8,000Bq/kgを超え100,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法の概要 【一般廃棄物最終処分場(管理型最終処分場)での処理イメージ】

以下の1)～3)のいずれかによる。

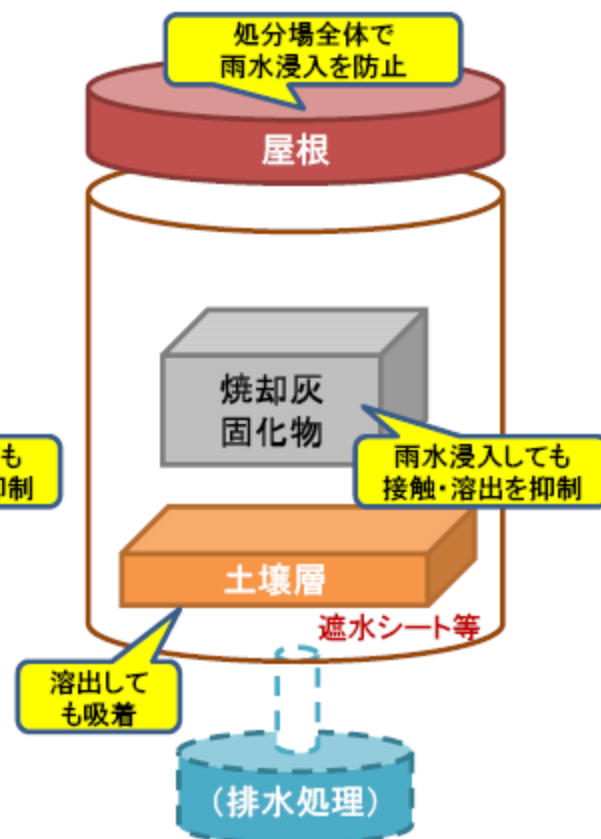
1) 隔離層の設置
による埋立て



2) 長期間の耐久性
のある容器等
による埋立て



3) 屋根付き処分場
での埋立て



さらにモニタリングによって安全性を確認していく

最終的には、敷地境界における空間線量率や浸出水放流水、周辺の地下水などの定期的なモニタリングによって、安全性を確認していくことになります

○モニタリングしていく際の日安案（第5回災害廃棄物安全評価検討会）

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則及び同規則に基づく線量限度等を定める告示

- ^{134}Cs : 60Bq/L
- ^{137}Cs : 90Bq/L
 - 複数の核種が存在する場合は各核種の（濃度／基準）比の合計値が1を超えないこと
 - 三月間についての平均濃度
- 根拠：そのまま70年間飲用（経口摂取）し続けても、年間平均1mSv未満

埋立処分の安全性に関するまとめ

1. 溶け出さないようにする、水に接触させない、吸着して流出を遅らせる、浸出水処理で除去する、という多重の防御技術で、技術的に安全確保は可能である。
2. 周辺環境や放流水のモニタリングをしっかりとやっていくことで安全性は確保できる。

今後に向けて

1. 出口戦略と社会における合意形成

地域にばら撒かれた放射性物質を除染する重要な機能をもつプロセスとして、廃棄物処理システムを積極的に位置づけ

2. 分散型処理と集中一括処理

	メリット	デメリット
分散型処理	処理容量確保は比較的容易	効率的なリスク管理が困難(人的体制等)、コスト高、住民同意が困難
集中一括処理	効率的なリスク管理が可能、公的関与により合意形成の可能性高	一箇所に大量の容量確保可能な場所は限定される

○分散型処理⇒大量・低濃度廃棄物、管理技術は易、管理期間短い

○集中一括処理⇒少量・高濃度廃棄物、管理技術は難、管理期間長い