

令和4年度除去土壌等の減容等技術実証事業

除去土壌Cに対して20 μ mを分級点とする 分級と脱水処理システム



株式会社 不動テトラ

目次

1. はじめに
2. 実証実験ステップ
3. 技術概要
4. 成果目標
5. 有機物分解試験結果
6. 分級・脱水試験結果
7. まとめ
8. 今後の課題

1.はじめに

対象土壌 ・ 土壌C : 131.8万m³

農地由来が多い


(2mm以上の礫分等は少なく、75μm未満で約64.5万m³※1)

※本実証実験では、フィールド外で実施し、畑地で採取した低濃度放射性Cs (約4000Bq/kg) 含有土壌を使用

目的

20μmを分級点とした分級処理技術の確立

- ・ 75μm未満を多く含む土壌に対しての減容率の向上
- ・ 濃縮物の削減による**熱処理等の最終処分に係るコスト減**

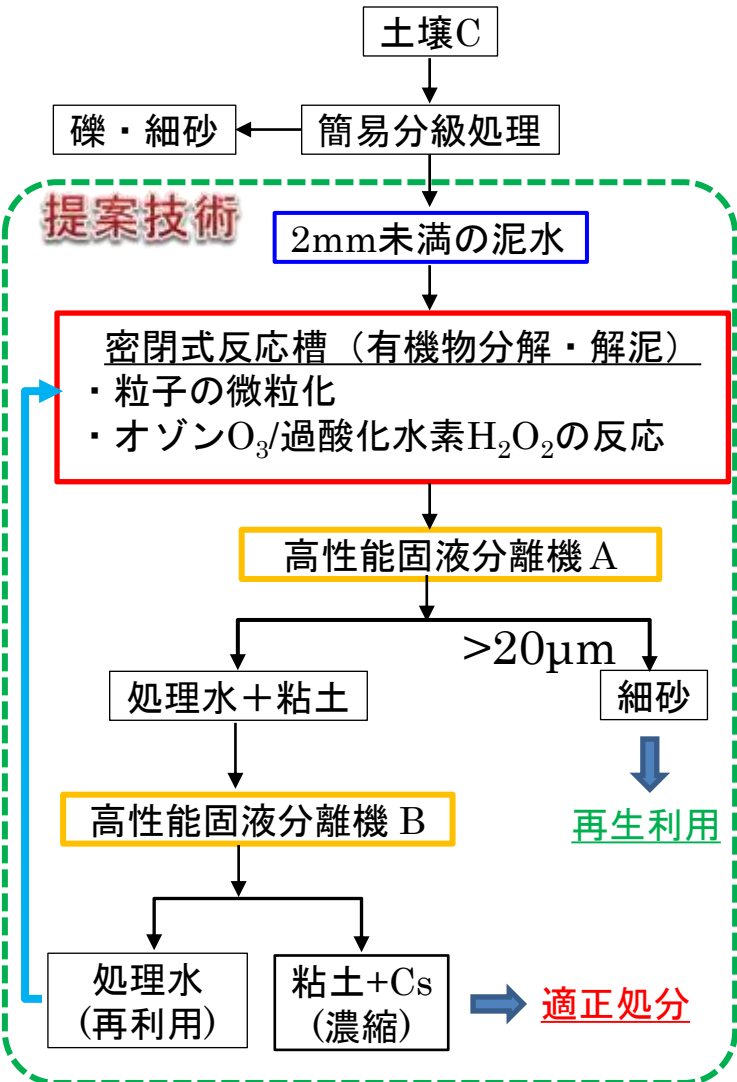
- 
- ・ 促進酸化処理での**有機物と高分子系土質改質剤の分解**
 - ・ 高性能固液分離機を用いた**分級点20μm**の分級処理
 - ・ 24時間連続運転可能な泥水の脱水処理

※1 第11回 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会 (資料3-1,p2)

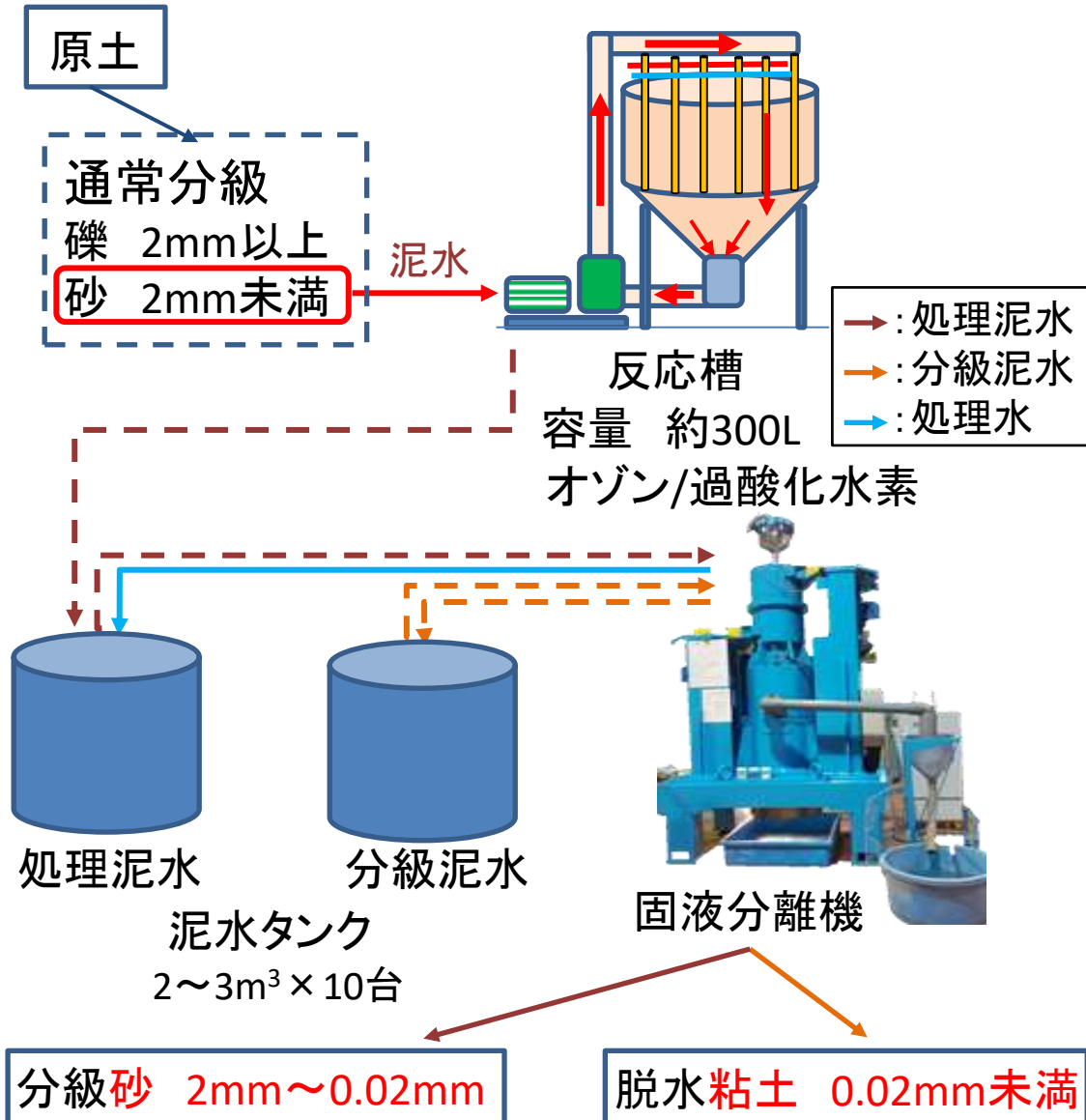
2.実証実験ステップ

ステップ	実験内容	使用土壌
ステップ ①	<p>■ 有機物分解(A反応槽)</p> <ul style="list-style-type: none">・反応槽とエジェクターの性能確認・O_3/H_2O_2添加量の最適比の確認・高分子系土質改質材の分解の確認 <p>※高分子系土質改質材の主成分:ポリアクリル酸ナトリウム(以下、SAP) 高分子系土質改質材:アースレフオール</p>	<p>通常土壌(つくば畑地土壌)</p> <ul style="list-style-type: none">・試料1:土壌・試料2:土壌+SAP・試料3:土壌+アースレフオール
ステップ ②	<p>■ 高性能固液分離機</p> <ul style="list-style-type: none">・処理手順、物質収支を確認・含泥率、投入量の最適値の確認	<p>通常土壌(つくば畑地土壌)</p>
ステップ ③	<p>■ 現地実証(A反応槽、B反応槽、高性能固液分離機)</p> <ul style="list-style-type: none">・有機物、高分子系土質改質材の分解率・細砂の回収による減容率・除染率	<p>低濃度放射性Cs含有土壌 (浪江町畑地土壌:4000Bq/kg)</p> <ul style="list-style-type: none">・試料4:土壌・試料5:土壌+SAP・試料6:土壌+アースレフオール

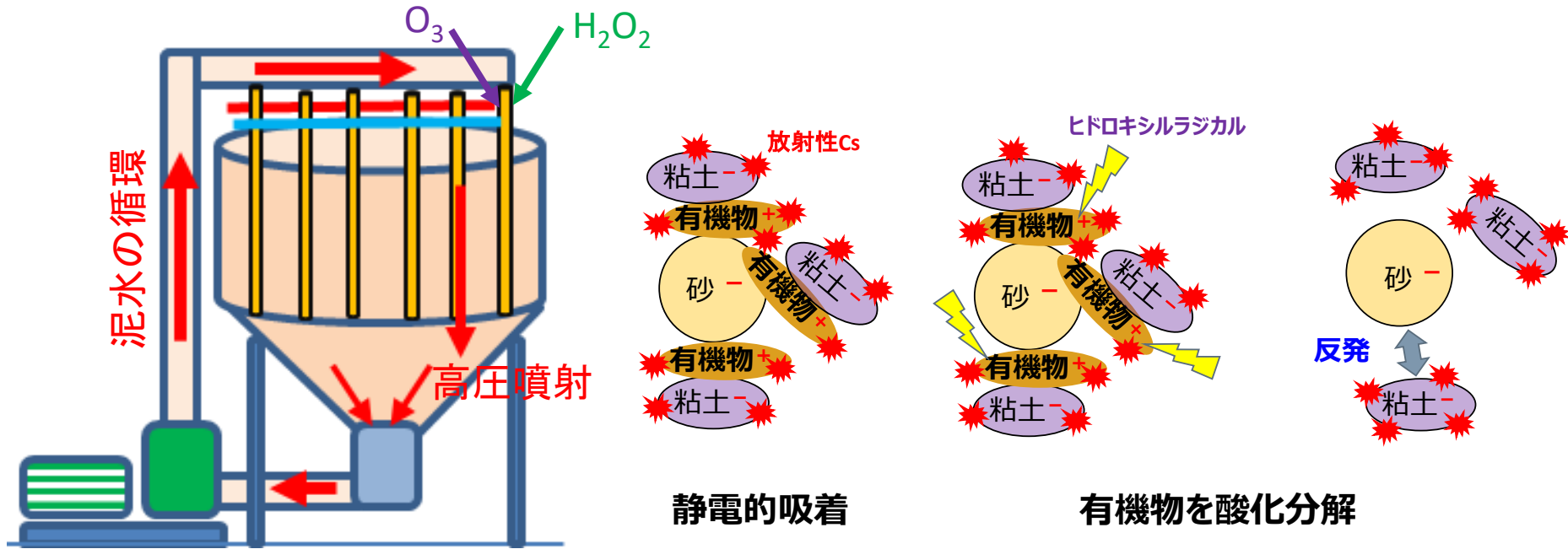
3. 技術概要



※事業化の際にはA,Bの2台使用するが、実証では遠心力Gと回転差の制御により1台で実施。



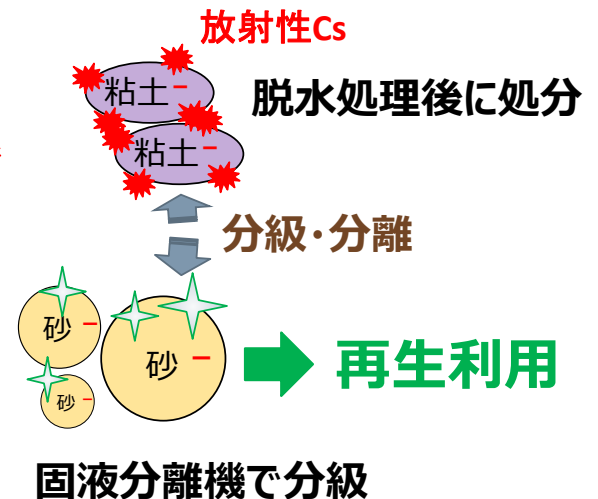
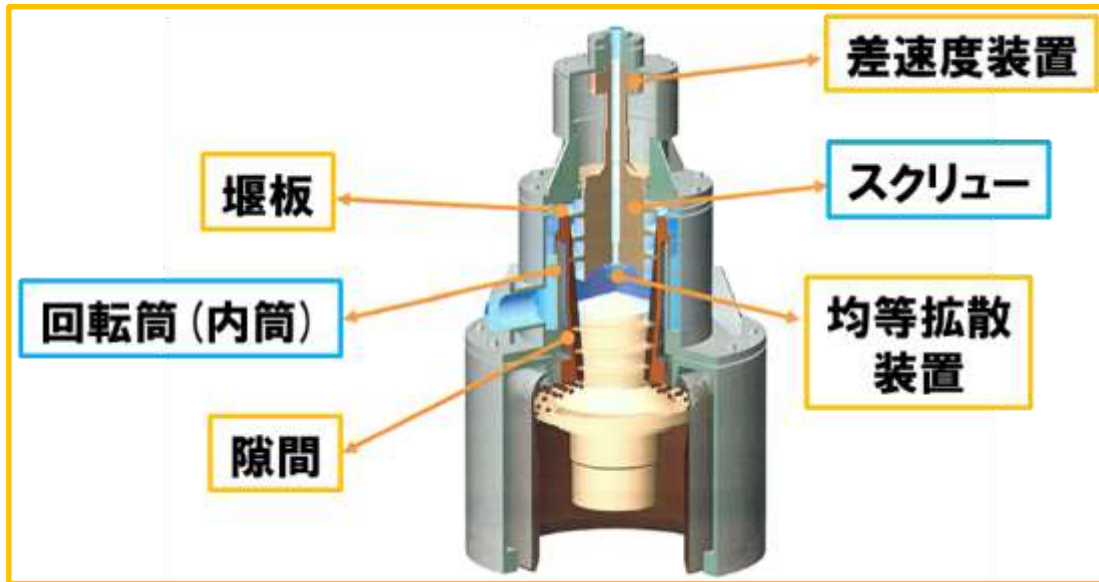
3. 技術概要-有機物分解-



【エジェクター噴射による促進酸化処理】

- 土粒子を高压喷射での物理的解泥と酸化分解での化学的解泥で微粒化
- エジェクターを介し O_3 と H_2O_2 を用いてヒドロキシルラジカル($OH\cdot$)を生成し、有機物を酸化分解

3. 技術概要-分級・脱水-



【高性能固液分離機】

スクリューと回転筒の遠心力および僅かな回転差の制御により、分級点・含水比を調整可能。これにより、分級点 $20\mu\text{m}$ での高性能分級処理と脱水処理が可能。また、24時間の連続運転が可能である。

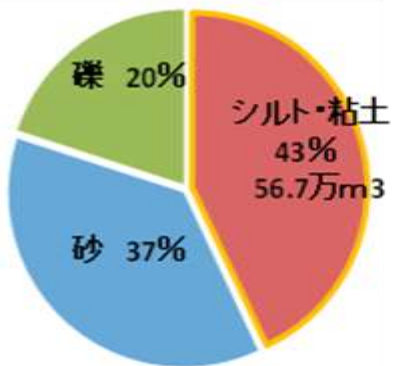
4.成果目標

- 有機物等の分解 : **80%**
- 減容率 : **68.5%**
(既存技術の51.1%に対して、2mm未満の土壌で68.5%まで向上)
- 除染率 : **88%**

【令和3年度実施結果】

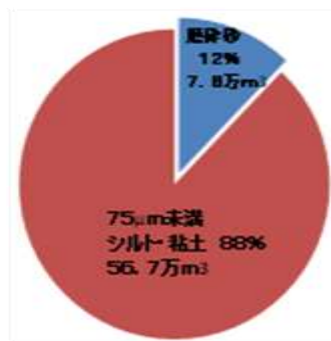
有機物分解 : 54%
減容率 : 60%
除染率 : 71.5%

土壌C
131.8万m³
2.57万Bq/kg ※1



想定した土質割合 ※2

分級処理濃縮物
64.5万m³
5.53万Bq/kg ※1



現状の減容率

51.1 (=1-64.5/131.8) × 100

高度分級処理



目標の減容率

68.5 (=1-41.5/131.8) × 100

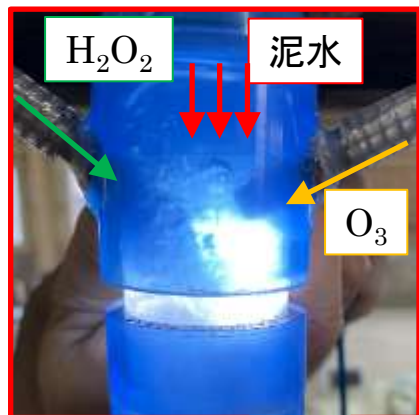
必要な除染率: **85.5%以上** (1-8000÷5.53万Bq/kg) × 100

減容化23万m³

※1 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会(第11回)資料3-1, p2

※2 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会(第11回)資料3-2, p7

5. 有機物分解試験-試験状況-

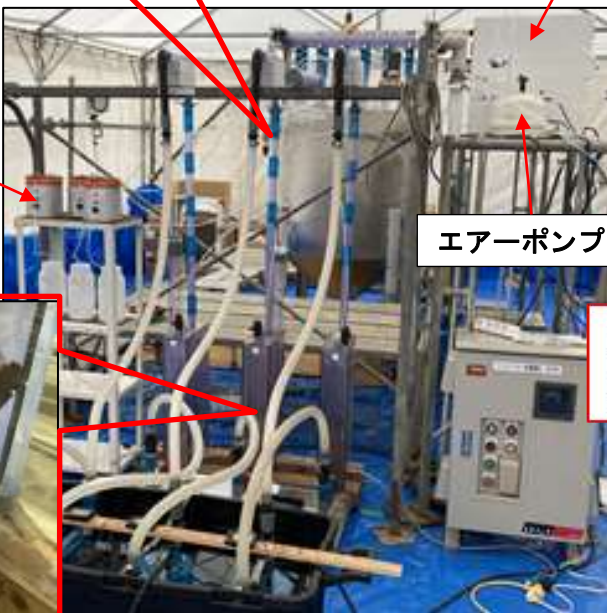


エジェクター
(拡大)

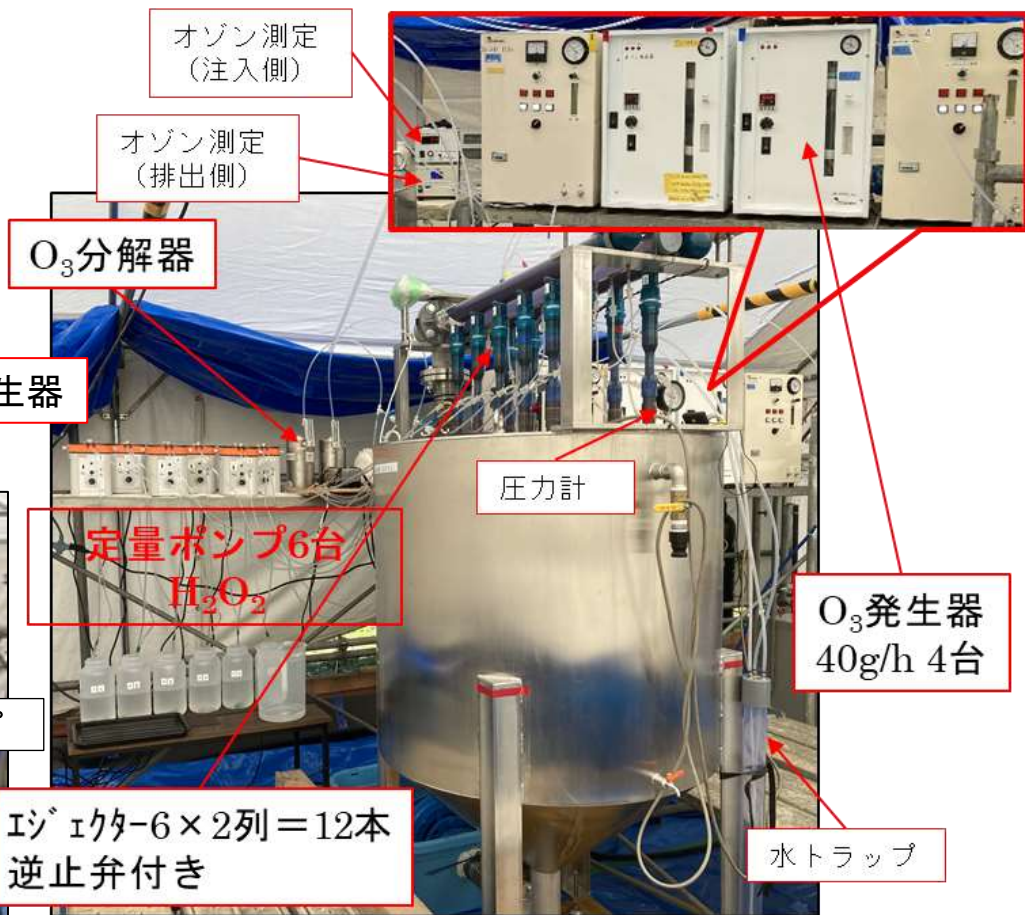
定量ポンプ
 H_2O_2



A反応槽 (拡大)



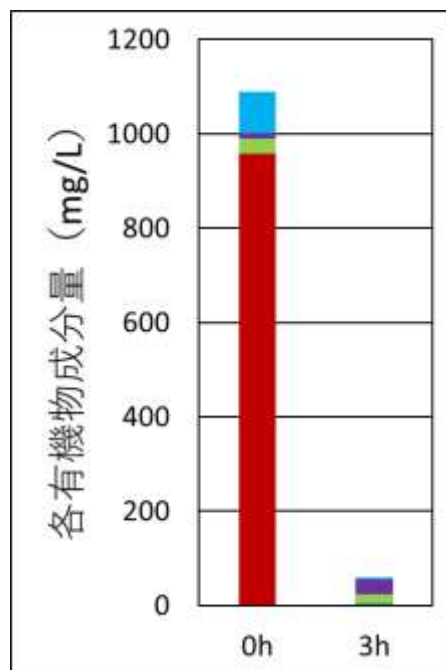
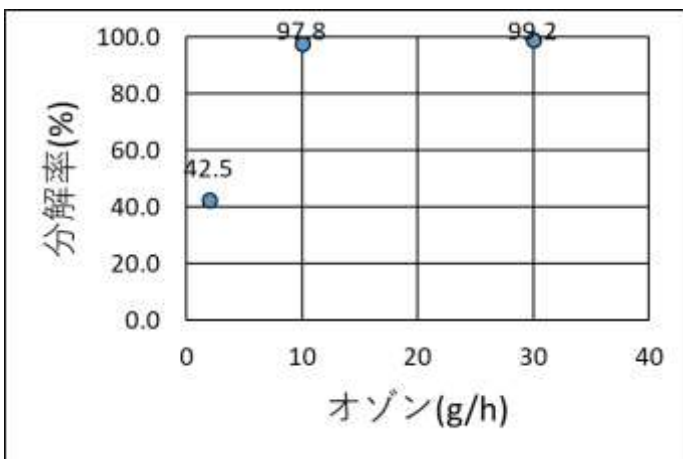
A反応槽 (泥水5L)



B反応槽 (泥水200L)

5. 有機物分解試験-高分子系改質材の分解 (A反応槽) -

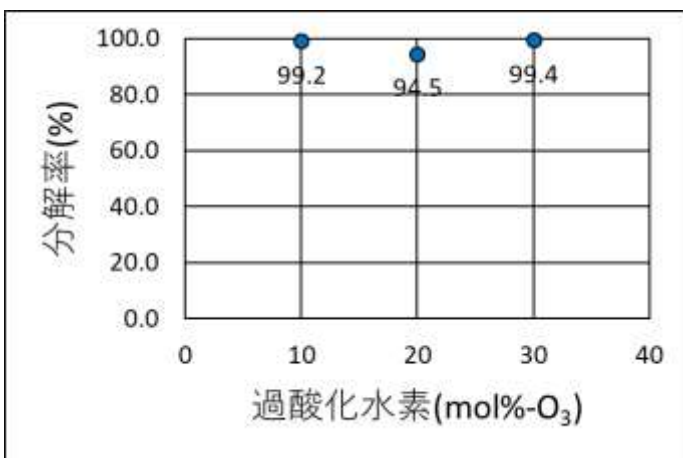
● 高分子剤の主成分であるポリアクリル酸ナトリウムに対して分解試験を実施



	分子量
疎水性有機化合物	-
高分子有機化合物	>>20,000
フミン酸類	~1,000
フミン酸崩壊物質	300~500
低分子有機化合物	<350
低分子有機酸	<350

LC-OCD (O₃:30g/h、H₂O₂:20mol%-O₃)

オゾンvs分解率 (H₂O₂:10mol%-O₃)



過酸化水素vs分解率 (O₃:30g/h)

- ・ オゾン注入量に伴い分解率増大
- ・ オゾン10g/hで3hの反応でTOCでほぼすべて分解
高分子化合物、低分子有機物・有機酸もほぼ残っていない
- ・ O₃/H₂O₂比に関係なく分解が進行

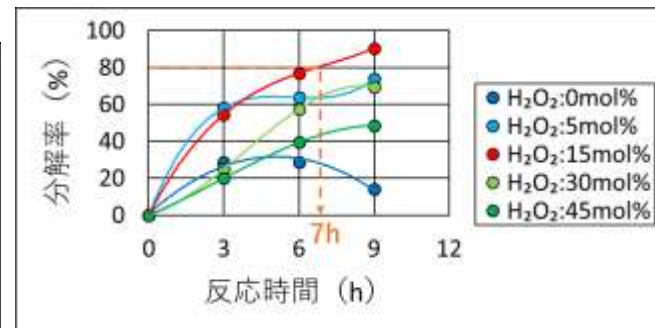
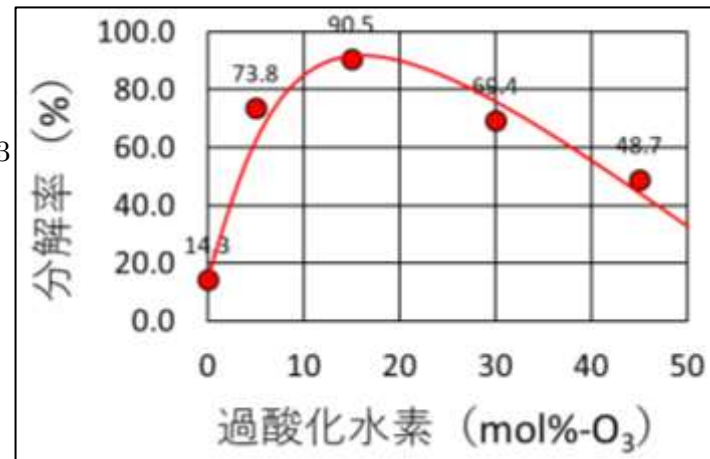
5. 有機物分解試験- O_3/H_2O_2 の最適比 (A反応槽) -

● 通常土壌 (つくば畑地) を用いて分解試験を実施

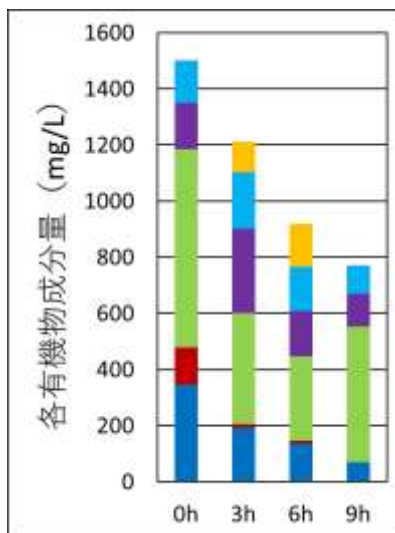
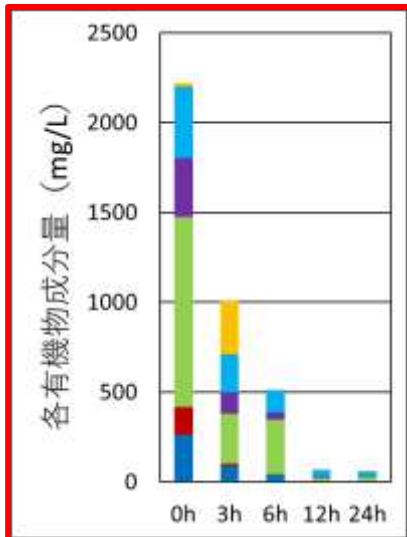
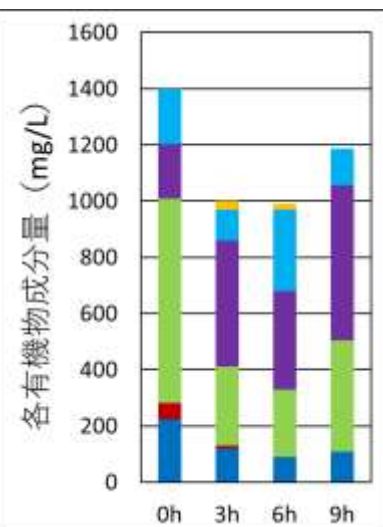
試験条件

- ・ 土壌 : 400g (含泥率8%,水5L)
- ・ オゾン : 120g/h
- ・ 過酸化水素 : 0,5,15,30,45mol%- O_3
- ・ 反応時間 : 9h

- ・ O_3/H_2O_2 の最適比は15mol%- O_3 付近
- ・ H_2O_2 が15mol% のとき、
反応時間7hで有機物80%分解
- ・ 最適比でのみフミン酸以降の分解が進行



	分子量
疎水性有機化合物	-
高分子有機化合物	>>20,000
フミン酸類	~1,000
フミン酸崩壊物質	300~500
低分子有機化合物	<350
低分子有機酸	<350

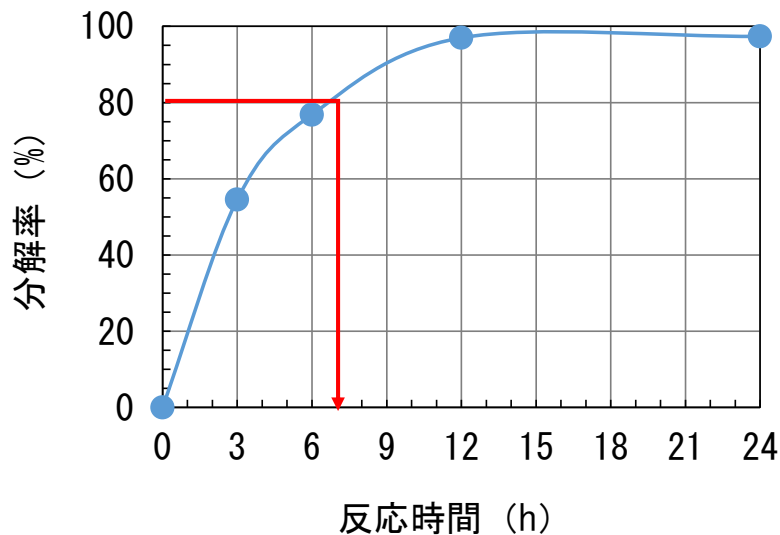


LC-OCD (左 O_3 のみ、中 $H_2O_2:15mol\%$ 、右 $H_2O_2:45mol\%$)

5. 有機物分解試験-有機物TOC1mg分解に必要なオゾン量-

$$\text{必要オゾン量 (mg)} = (\text{注入オゾン量} - \text{排出オゾン量}) / \text{有機物分解量 (mg)}$$

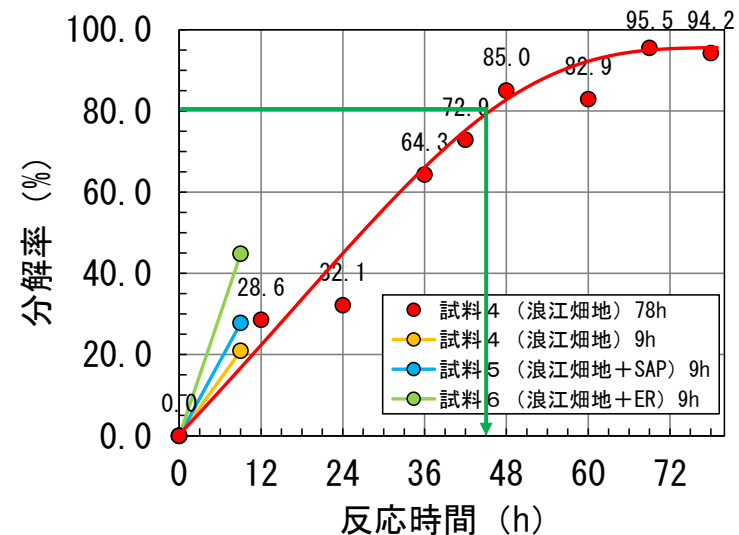
A反応槽 (5L)
つくば 畑地土壌



●80%分解(7h)
オゾン120g/h
過酸化水素15mol%

必要オゾン量 : 56.2 mg

B反応槽 (200L)
浪江町 畑地土壌

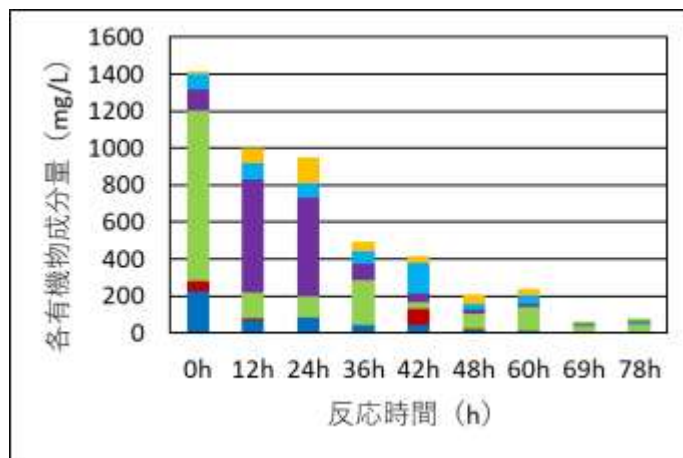


●80%分解(45h)
オゾン160g/h
過酸化水素15mol

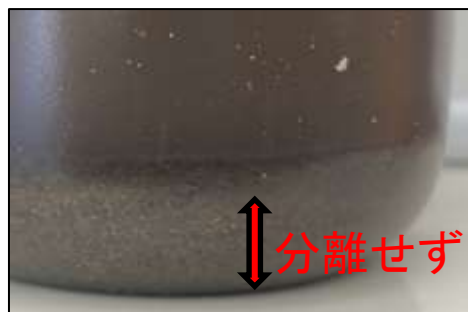
必要オゾン量 : 27.2 mg

5. 有機物分解試験-浪江町 (B反応槽) -

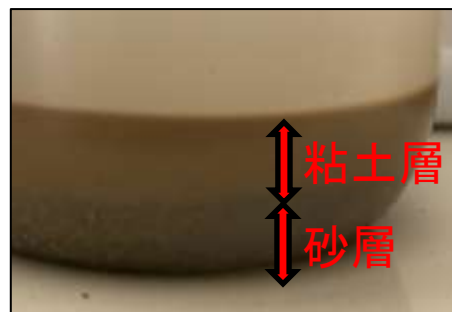
- ・ 低濃度Cs含有土壌でも**分解率80%に到達** (45h)
- ・ 12hでフミン酸類、36hフミン酸崩壊物質を分解
- ・ 分解率の増加で沈降速度も増加
- ・ 有機物分解により**沈殿物が砂層、粘土層に分離**



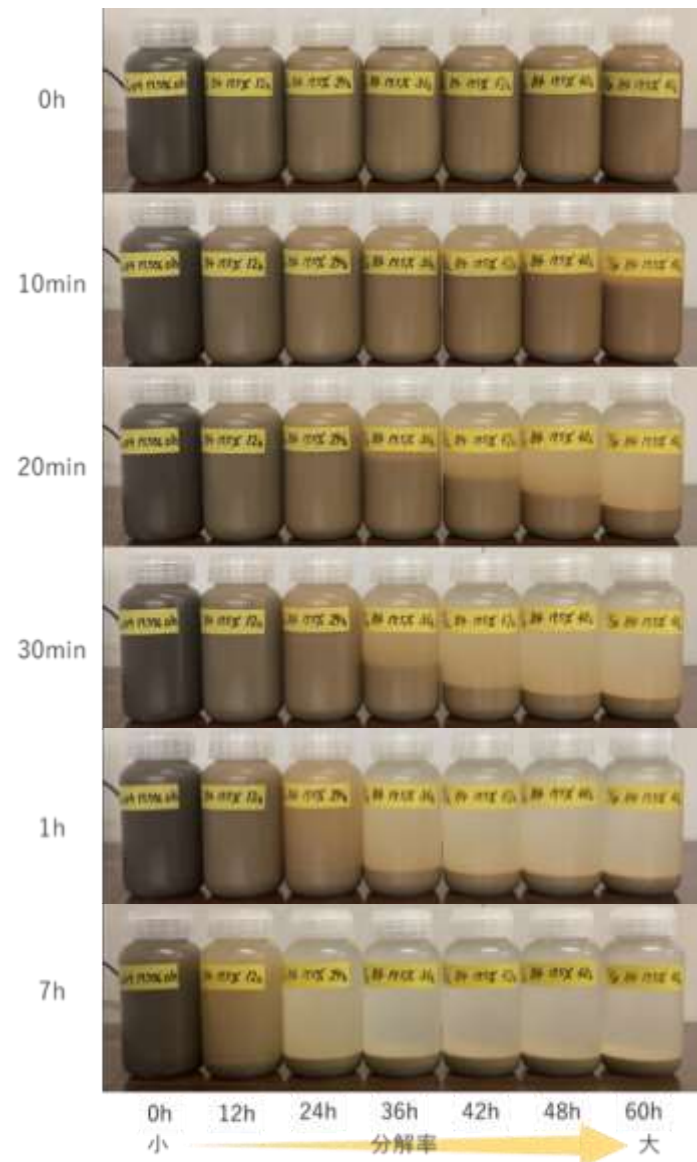
	分子量
■ 疎水性有機化合物	-
■ 高分子有機化合物	>>20,000
■ フミン酸類	~1,000
■ フミン酸崩壊物質	300~500
■ 低分子有機化合物	<350
■ 低分子有機酸	<350



反応0h(静置7h)



反応60h(静置7h)



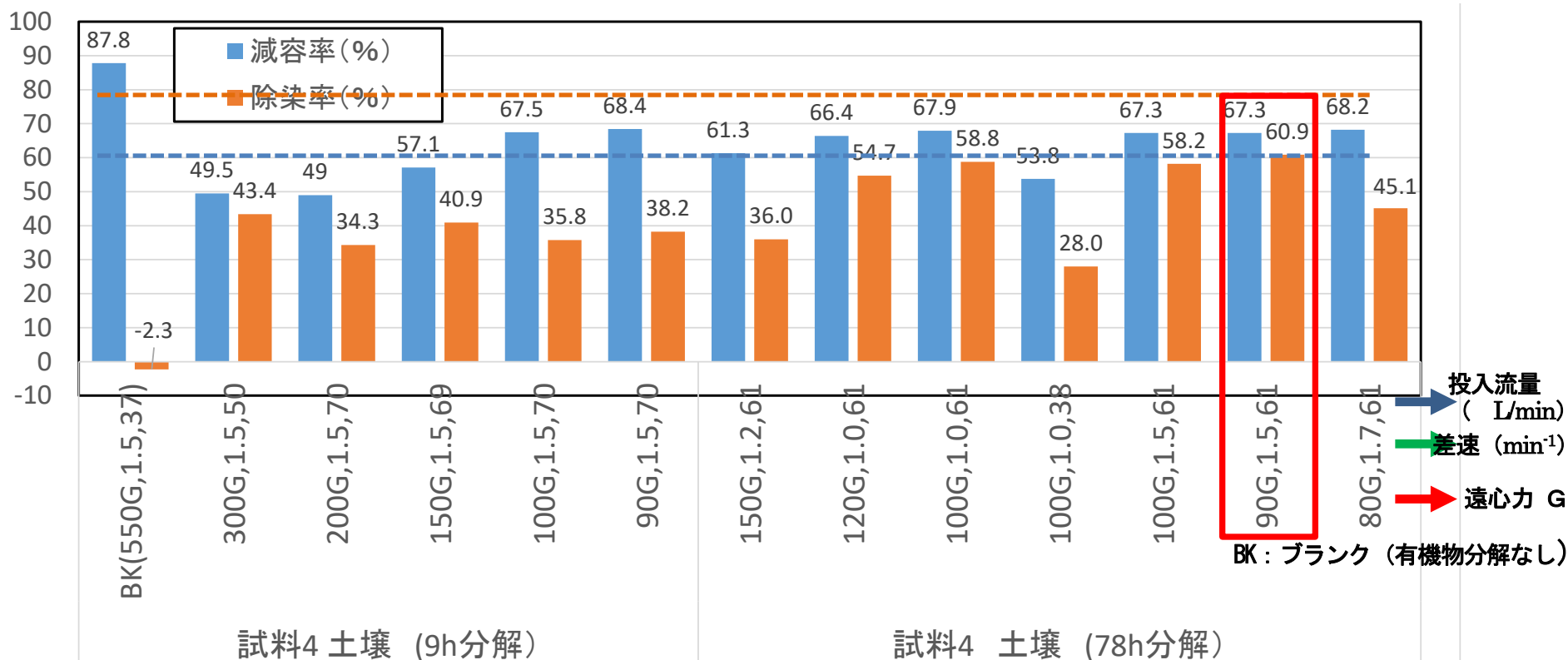
6. 低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(1) 固液分離機による分級試験 減容率と除染率

- ・ 有機物の分解率が高いほど除染率が向上
- ・ 試料4（土壌のみ）：減容率67.3%、除染率60.9%

----- 減容率目標:68.5%

----- 除染率目標:88%

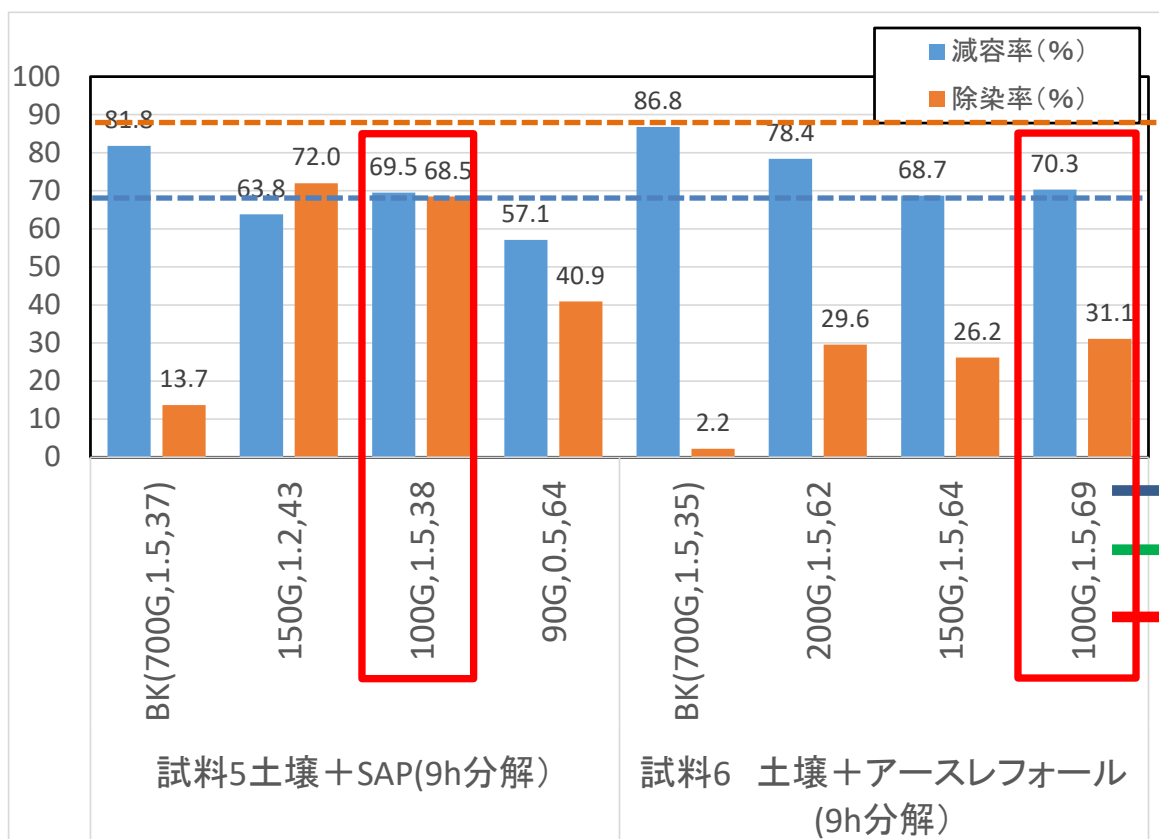


6. 低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(2) 固液分離機による分級試験

減容率と除染率

- ・ 試料5（土壌+SAP）：減容率69.5%、除染率68.5%
- ・ 試料6（土壌+アースレフォール）：減容率70.3%、除染率31.1%
- ・ 高分子材のみと比較して、土質改質材では除染率が低下



減容率目標: 68.5%

除染率目標: 88%

投入流量 (L/min)

差速 (min⁻¹)

遠心力 G

BK : ブランク (有機物分解なし)

6. 低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

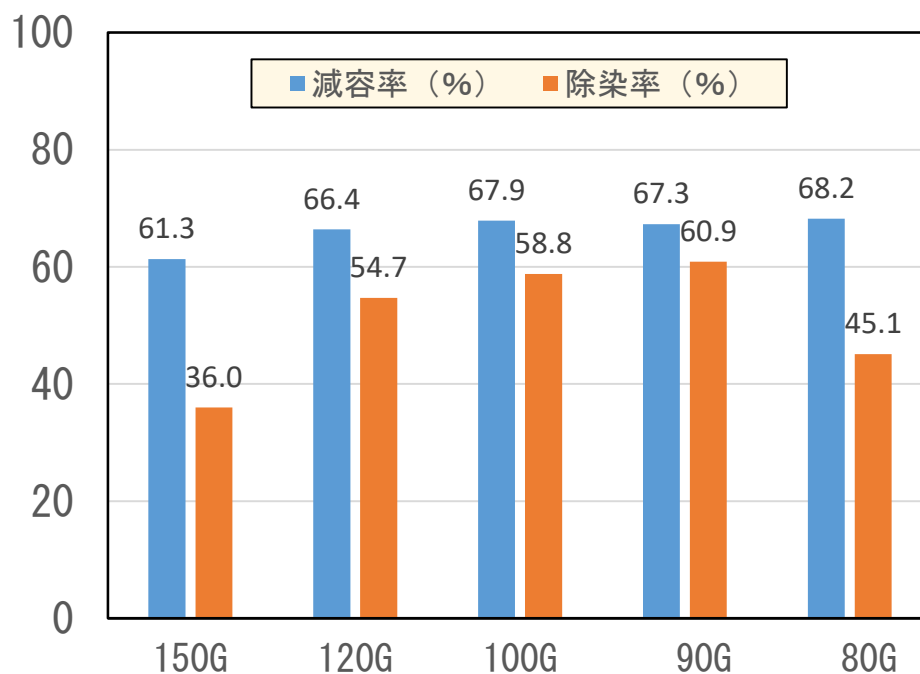
(3) 固液分離機による分級試験

減容率と除染率

遠心力Gによる影響

（試料4 78h分解処理：差速 1.0min^{-1} 、流量 $61\text{L}/\text{min}$ 統一）

- ◆ 減容率は、遠心力Gの低下に伴って微増
- ◆ 除染率は、遠心力Gが $100\text{G} \sim 90\text{G}$ で最大



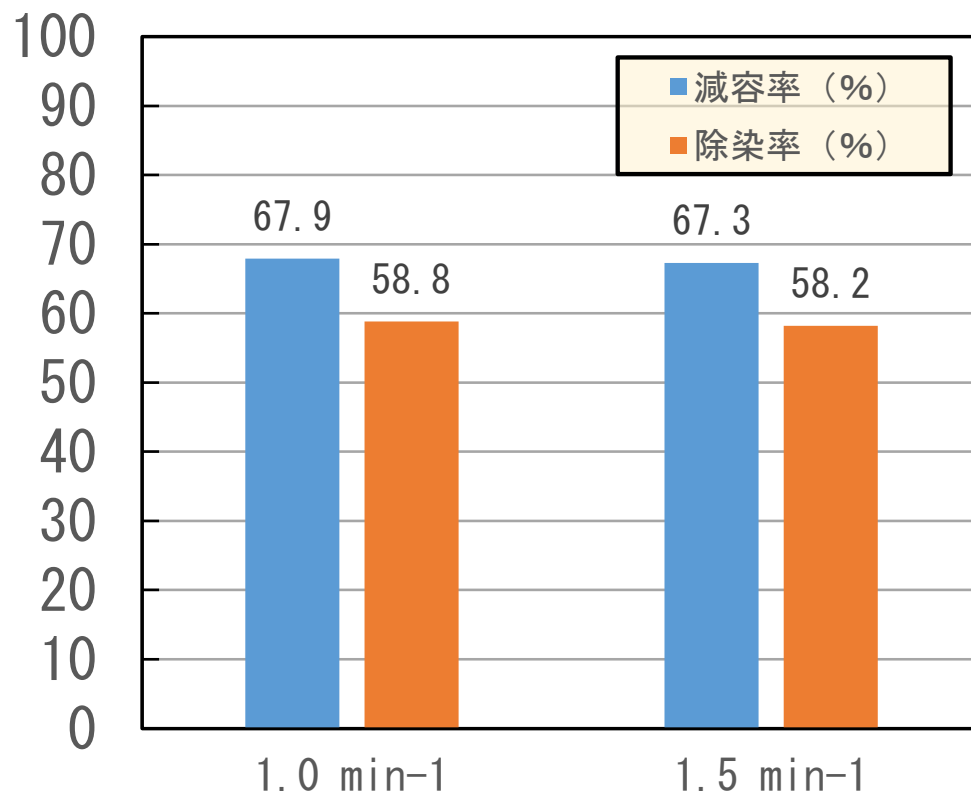
6. 低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(4) 固液分離機による分級試験 減容率と除染率

差速による影響

（試料4 78h分解処理：遠心力G100G、流量61L/min 統一）

◆ 減容率、除染率
ともに差速による
大きな変化はない。



6.低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

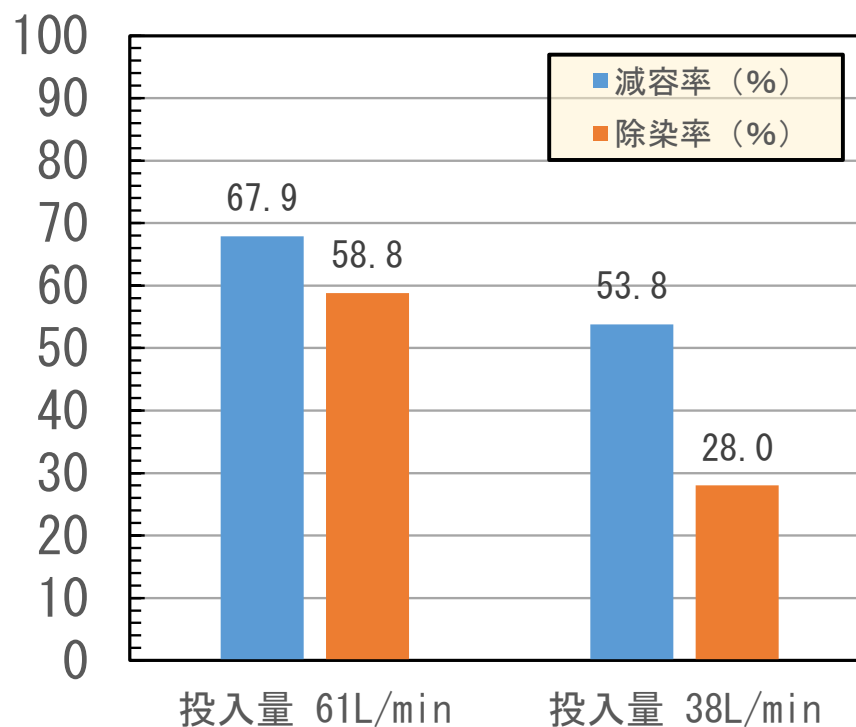
(5)固液分離機による分級試験

減容率と除染率

投入流量による影響

（試料4 78h分解処理：遠心力100G、差速 1.0min^{-1} 統一）

◆投入流量が低下すると、
減容率・除染率ともに減少

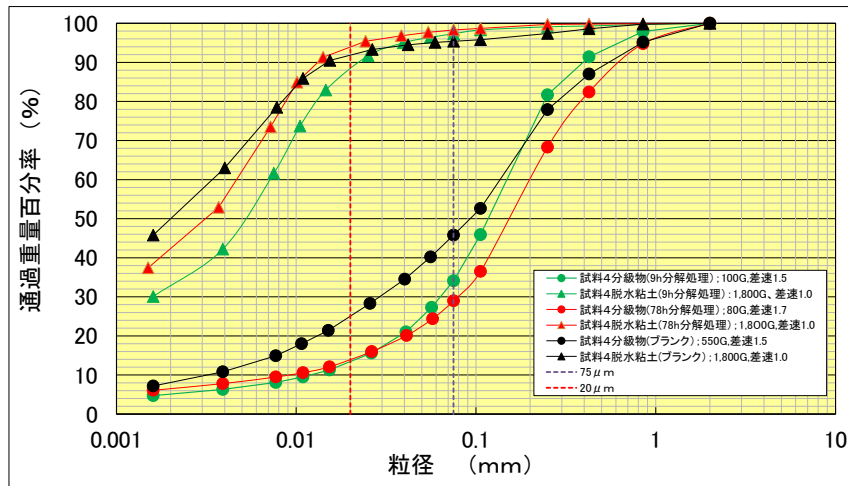


6. 低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

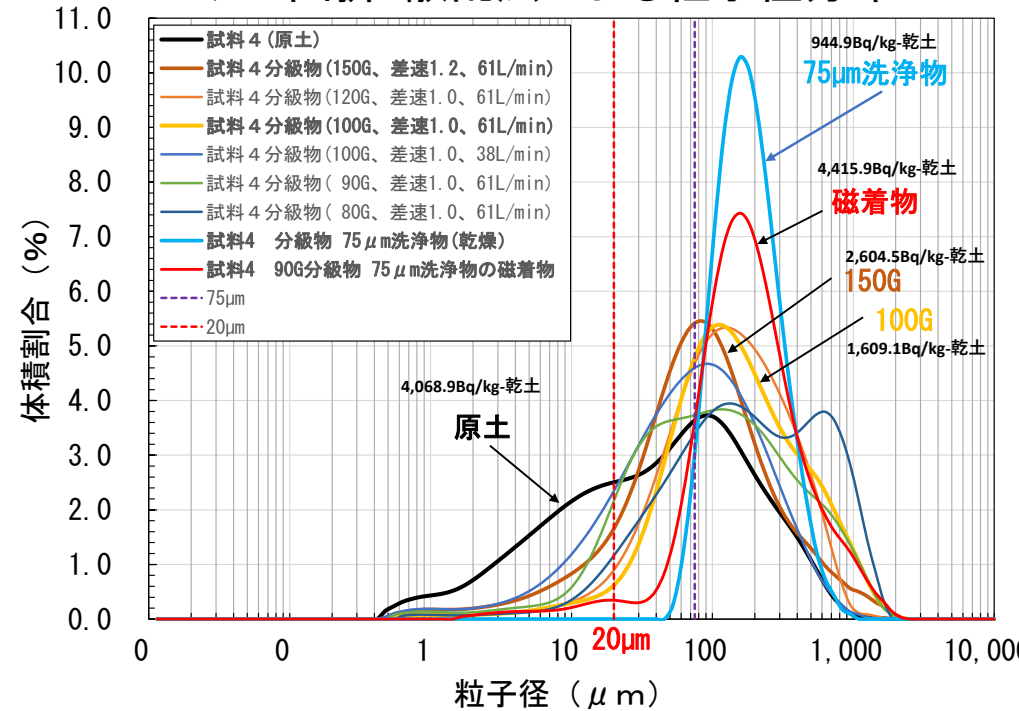
(6) 固液分離機による分級試験

分級物の粒子径分布

粒径加積曲線



レーザー回折/散乱法による粒子径分布



通過重量百分率 (%)

体積割合 (%)

遠心力G	20μm未満	遠心力G	20μm未満
80G	14%	80G	1.2%
90G		90G	2.2%
100G	(推定7%)※2	100G	0.6%
120G		120G	0.9%
150G		150G	1.6%

※1: 磁着物は分級物から8,000ガウスのマグネット棒で分離

※2: レーザー粒子径のみ実施

6.低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(6)固液分離機による分級試験 分級物の粒子径分布

■分級物中の20 μ m未満の混入率：重量割合約10%、体積割合0.6%

①更なる分級性能の向上が必要

②土壌に含有する黒雲母（金雲母・鉄雲母）に選択的に吸着された放射性Csによる影響が含まれる。

- ・黒雲母中の鉄雲母等の磁着物は磁力選別可能なため磁着物に着目
原土 Cs濃度（4,068.9Bq/kg-乾土）
磁着物Cs濃度（4,415.9Bq/kg-乾土）
- ・分級物と磁着物は同じ粒子径範囲にあるので分級困難。
- ・分級物から磁着物（黒雲母など）を取り除かない限り、分級物のCs濃度に限界がある。

下限値の可能性 磁着物のCs濃度と含有量で変化

6.低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(7)固液分離機による脱水処理試験

- ・有機物分解:フィルタープレスと同等の含水量 → **フィルタープレスは必要ない**
- ・有機物分解率が95%以上 → **pH、SS、Cs濃度が排水基準に適合**

試料	有機物分解処理	有機物分解率 (%)	投入流量 (L/min)	脱水粘土含水量 (%)	処理水			
					pH	浮遊物質 SS(mg/L)	濁度	放射性Cs濃度 (Bq/L)
4	blank	—	5	49.4	7.4	780	1,200	3.13
	9h	21.6	5	—	7.5	380	500	N.D.
	9h	21.6	10	44.3	7.3	580	980	2.33
	78h	94.2	2.3	—	7.4	80	99	N.D.
	78h	94.2	5	—	7.4	44	53	7.58
	78h	94.2	10	42.0	7.3	96	300	4.56
5	blank	—	5	50.1	7.5	850	1,600	10.2
	9h	27.8	10	32.6	7.1	300	660	5.76
6	blank	—	5	50.5	7.6	310	430	6.47
	9h	44.8	10	40.3	7.9	92	710	3.22

※ 赤字は、基準値を超過

7.まとめ（有機物分解）

- ① オゾンと過酸化水素の添加量を**最適比（15～20mol%）**とすることで、**土壌中の有機物を95%以上分解することが確認できた。**
- ② 促進酸化分解で有機物TOC1mg分解に**必要なオゾン量**を確認できた。
→**初期TOCよりオゾン発生器の能力と反応時間の設定が可能**
- ③ 除去土壌に使用されている**高分子系土質改質剤（SAP）**は、**有機物分解（難分解性のフミン酸）に比べて容易に酸化分解**できることが確認され、**再生利用の際の品質への影響がないことが確認できた。**

7.まとめ（固液分離機による分級・脱水処理）

- ①遠心力Gは90～100G、投入流量は大きくすることで、減容率は目標を達成できた。
- ②除染率は、最大で70%程度であり、目標に未達であった。これは、分級物に20 μ m未満の粘土が約10%程度混入していたこと、また、土壌に含有する**黒雲母等**が放射性Csを選択的に吸着することで分級物の放射性Cs濃度に下限値が存在する可能性があること、使用した畑地土壌が低濃度Cs含有土壌であったことが原因と思われる。
- ③減容率・除染率の向上と目標達成及び脱水処理の処理水の排水基準に適合するためには、**有機物分解率は95%以上必要**。
- ④固液分離機で、分級処理と脱水処理が可能であること、フィルタープレスも必要ないことが確認できた。これにより、**24h、365日の連続運転可能**となり、**遠隔操作も可能**となることから放射能に対する作業環境の**安全性の確保**と被ばく**リスク減少**が可能。

8. 今後の課題（1）

①～③の課題を解決した上で中間貯蔵施設に保管中の土壌Cで試験を実施することを目指す。

①分級精度の向上

20 μ m未満の混入率を現状の約10%から1～5%まで下げよう
に調整が必要

令和4年度に浪江町畑地土壌を用いて試験をした際に使用した固液分離機の上位機種種の固液分離機で、投入流量を更に上げて再度確認予定（2023年11～12月）

令和4年度使用の固液分離機の泥水の投入流量：61L/min限界

上位機種種の固液分離機 の泥水投入量：100～180L/min

投入流量の他、同時に

泥水の含泥率・遠心力G・差速の最適値の確認と

実用化時の処理対象土壌によるこれらの設定方法の確立

8. 今後の課題（2）

②密閉式反応槽での促進酸化分解による粒子径の変化の確認

促進酸化分解による粒径変化と、反応槽内の泥水循環により砂粒同士擦り合わせることで砂表面に付着した細粒分を分離する効果の確認

（高度分級A：機械式研磨と原理は同様）

8. 今後の課題 (3)

③ 粒子径ごとの放射性Cs濃度の把握と鉱物（黒雲母中の磁着物）含有量による放射性Cs濃度の関係を把握

- 20 μ m未満、20 μ m～75 μ m、75 μ m～2mmの放射性Cs濃度の確認

- 黒雲母（鉄雲母等の磁着物）含有量と放射性Cs濃度の関係を確認

※ 令和4年度に試料4で分級処理した分級物（粗粒分）に対して令和5年7月実施した結果

- 磁着物含有率 : 平均 : 1.6wt% → 放射性Cs濃度への影響小
- 磁着物Cs濃度 : 平均 : 5,495Bq/kg-乾土

- 20 μ m以上の黒雲母等の磁着物を破砕により20 μ mへ移行することが可能であるのかを確認（減容率は低下する）

参 考 資 料

成果目標の根拠

- 有機物等の分解 : **80%**
- 減容率 : **68.5%**
(既存技術の51.1%に対して、2mm未満の土壌で68.5%まで向上)
- 除染率 : **88%**

【令和3年度実施結果】

- 有機物分解 : 54%
- 減容率 : 60%
- 除染率 : 71.5%

土壌C

土壌C (131.8万m³、放射能濃度2.57万Bq/kg) ※1
 粒度分布 (室内試験) : 礫20% 砂37% シルト・粘土43%※2

礫・砂

分級処理

濃縮物は処理工程で磨砕砂が発生し7.8万m³増加する。
 磨砕砂7.8万m³ = 濃縮物64.5万m³ - 土壌C 131.8万m³ × 43%
 = 64.5万m³ - 56.7万m³

提案技術 (放射能5.53万Bq/kg)

反応槽

有機物の減容 : 約4万m³ (57 × 平均含有15% × 50%)

固液分離機

75μm未満の砂 : 19万m³ (131.8 × 平均含有9% + 7.8)
 必要な除染率 : 85.5%以上 (1 - 8千 ÷ 5.53万Bq/kg) × 100

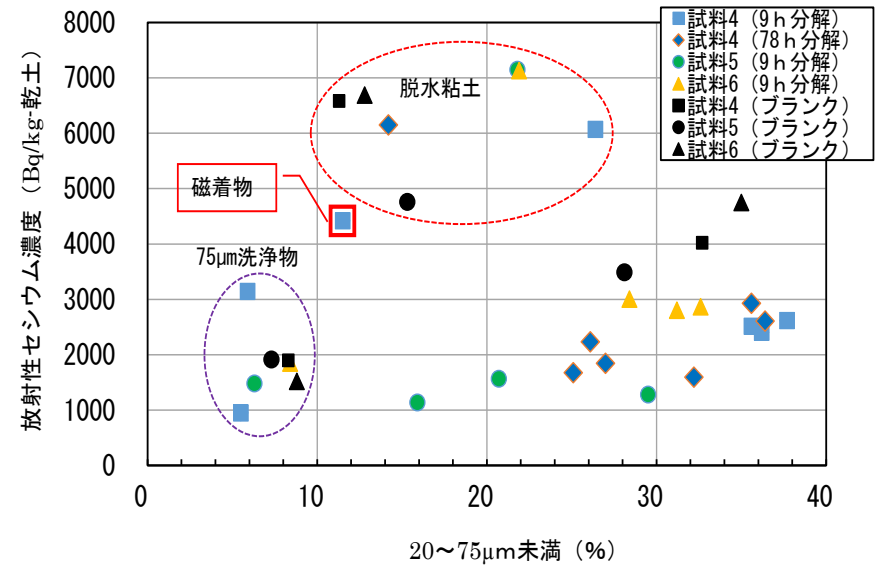
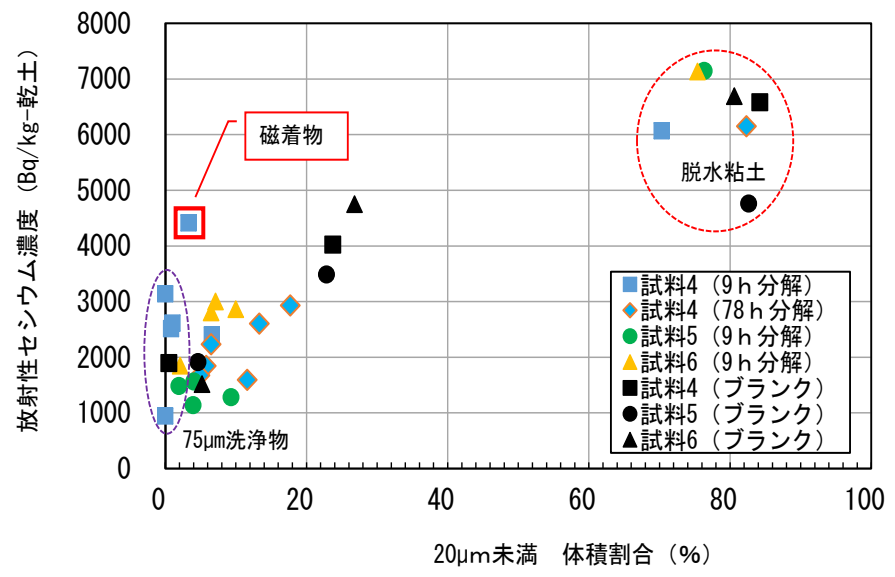
シルト・粘土

濃縮物 : 41.5万m³ (64.5 - 4 - 19)
 放射能濃度8.1万Bq/kg

現状の減容率 : 51.1% (1 - 64.5 ÷ 131.8) × 100
 見込み減容率 : 68.5% (1 - 41.5 ÷ 131.8) × 100

低濃度Cs含有土壌を用いた分級処理試験（浪江町）

(7) 固液分離機による分級試験 分級物の粒子径体積割合とCs濃度



除染率が目標を達成できなかった原因としての可能性

- ・ 土壌に含まれる粘土鉱物（黒雲母など）に放射性セシウムが選択的に吸着されており、**下限値**（1,000Bq/kg-乾土程度）があった。
- ・ 初期濃度が**低濃度**（4,068.9Bq/kg-乾土）であった。

土壌C（25,700Bq/kg）の高濃度Cs含有土壌での検証が必要