

# 除去土壌を分級処理した砂を コンクリート用細骨材に利用するための技術実証

---

○山本 達生・木川田 一弥・保坂 幸一



除去土壌等減容化・再生利用技術研究組合

Technology Research Association for Volume Reduction and Recycling of Waste and Removed Soil

# 発表内容

1. 技術実証の目的と実施概要
2. 試験対象とした分級砂の種類
3. 細骨材品質試験
4. 配合・強度試験
5. 耐久性試験
6. 放射能濃度測定
7. 追加被ばく線量
8. まとめ

# 1. 技術実証の目的と実施概要

## 背景

湿式分級による除去土壌の減容化技術の検討事例：**多い**  
 分級砂の再利用技術の検討：**少ない**

## 目的

湿式分級処理した**分級砂**の**コンクリート用細骨材**への**適用性**を実証

※中間貯蔵施設内における除去土壌の分級処理システム実証試験（平成30年度，平成31年度）  
 ※本成果は、中間貯蔵・環境安全事業株式会社が環境省より受託した令和4・5年度の中間貯蔵施設の管理等に関する業務成果の一部である



# 2. 試験対象とした分級砂の種類

**試験対象** 2種類の除去土壌(実証①, 受分②)  
2種類の分級処理(通常③, 高度④)

(①×③) **実証通常砂** 6検体, (①×④) **実証高度砂** 6検体  
(②×③) **受分通常砂** 3検体, (②×④) **受分高度砂** 3検体

## ①実証事業の除去土壌(H30, 31年度)

既往実証事業の除去土壌(H30, 31年度)



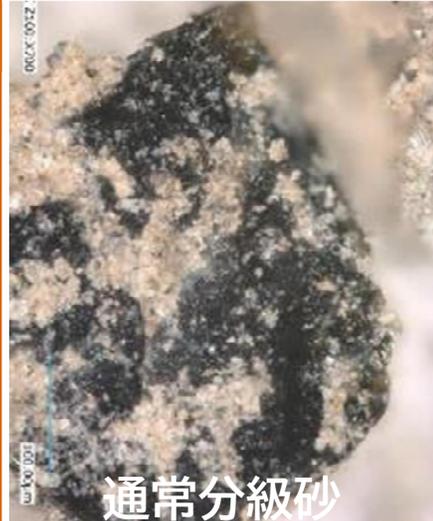
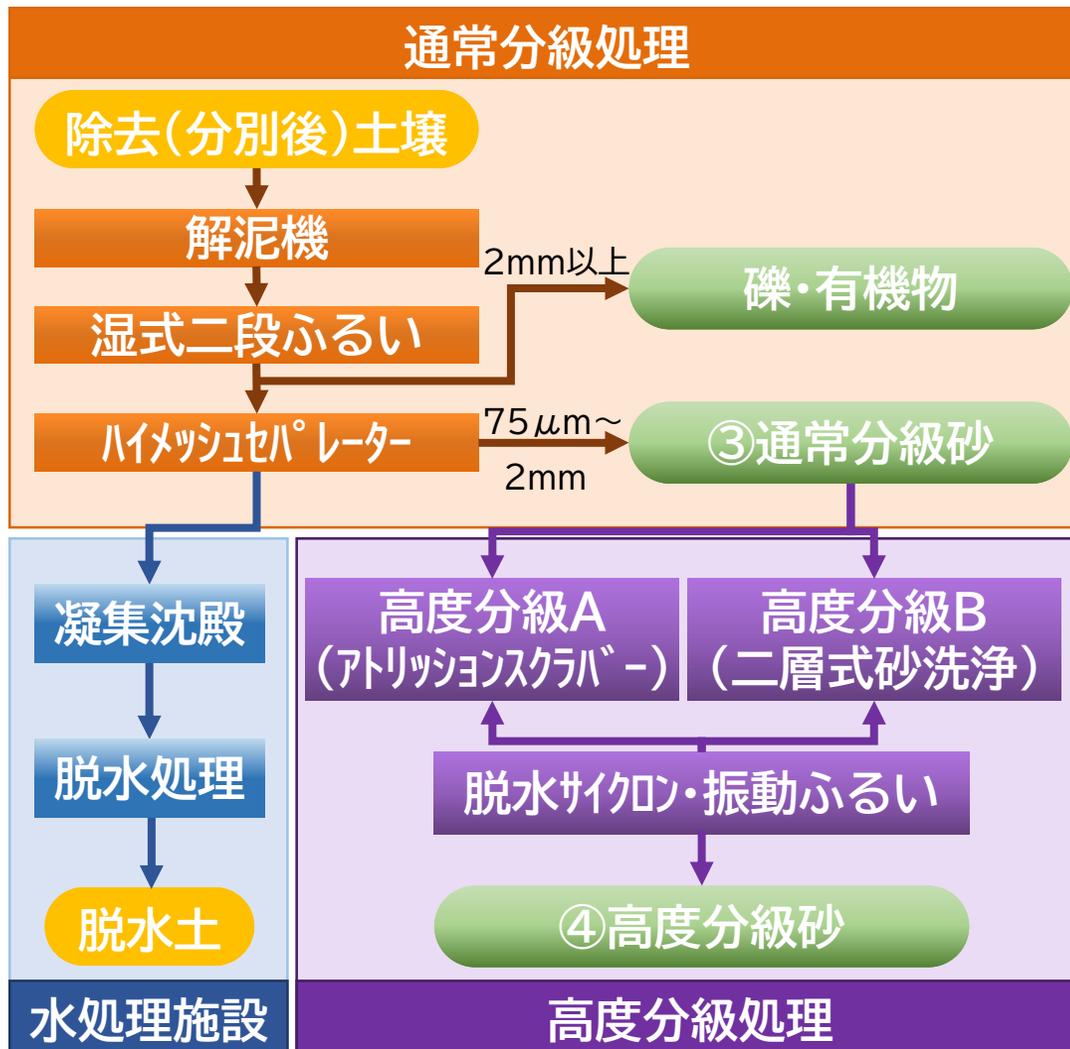
中間貯蔵施設内における除去土壌の分級処理システム実証試験(平成30年度, 平成31年度)

## ②受入・分別施設の分別後土壌(R4年度)

受入分別施設から採取した分別後土壌



[受入分別施設]  
大熊2期2工区  
大熊3期4工区  
双葉2期1工区  
[分級処理]  
技術実証フィールド内  
試験室内で実施



### 3. 細骨材品質試験 ～結果の一覧～

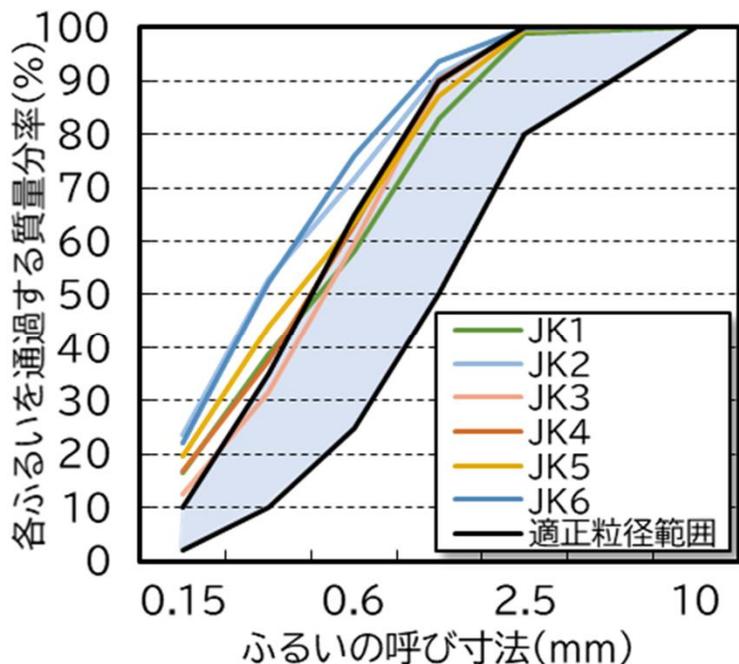
- ・骨材ふるい分け試験 分級砂は**粒度調整**が必要であることが分かった
- ・粘土塊量 基準**適合** : 「実証高度砂(JK)」「受分高度砂(UK)」  
基準**不適合** : 「実証通常砂(JT)」「受分通常砂(UT)」
- ・塩化物量 基準**適合** : 「受分通常砂(UT)」「受分高度砂(UK)」  
基準**不適合** : 「実証通常砂(JT)」「実証高度砂(JK)」
- ・有機不純物 基準**適合** : 「実証高度砂」で2試料のみ

試験項目	実証通常砂 (JT)	実証高度砂 (JK)	受分通常砂 (UT)	受分高度砂 (UK)
骨材のふるい分け試験	要調整	要調整	要調整	要調整
絶乾密度	6/6	6/6	3/3	3/3
吸水率	6/6	6/6	3/3	3/3
粘土塊量	5/6	5/5 ※	2/3	3/3
塩化物量	0/6	0/6	3/3	3/3
有機不純物	0/6	2/6	0/3	0/3
安定性試験	6/6	6/6	3/3	3/3
微粒分量	6/6	6/6	3/3	3/3
アルカリ骨材反応(化学法)	6/6	6/6	3/3	3/3

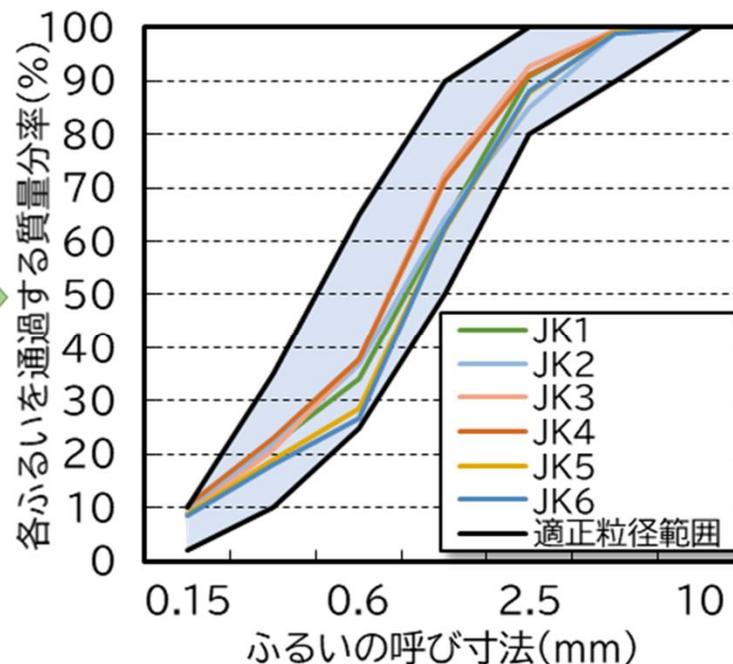
※1検体のデータエラーを含むため基準適合データ数が5検体となった

### 3. 細骨材品質試験 ～骨材のふるい分け試験～

- **実証高度砂**の粒度試験結果を代表例として示す
- 分級砂は粒径が細かく、**粒度調整が必要**であった
- 山砂(静岡県掛川市産)の混合により、粒度を適正範囲に調整できた



粒度調整

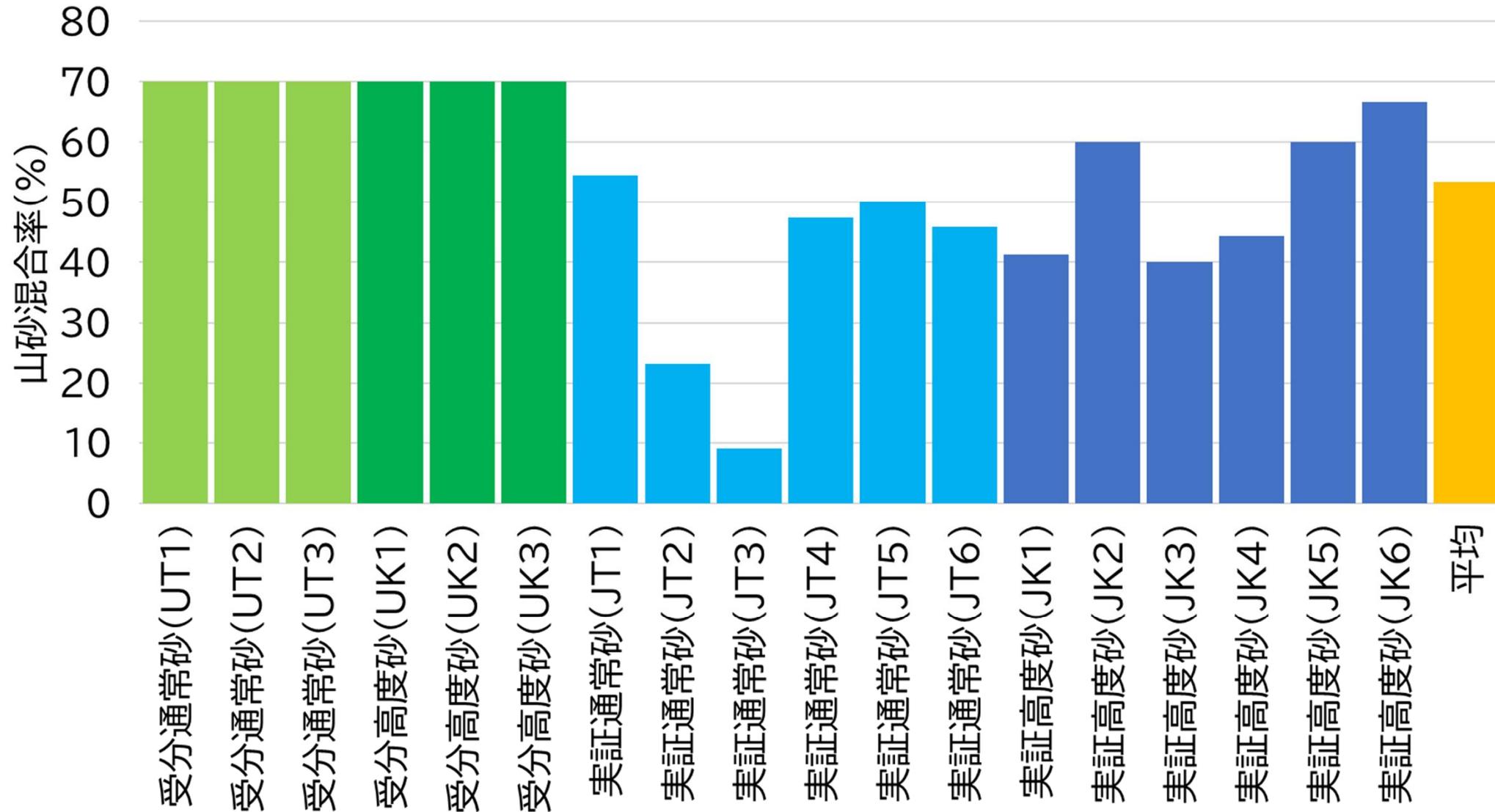


試料名	分級砂重量 (kg)	山砂添加量 (kg)	混合後重量 (kg)	山砂混合率 (%)
JK1	17.6	12.4	30.0	41
JK2	12.0	18.0	30.0	60
JK3	18.0	12.0	30.0	40
JK4	16.7	13.3	30.0	44
JK5	12.0	18.0	30.0	60
JK6	10.0	20.0	30.0	67

$$\text{山砂混合率(\%)} = \frac{\text{山砂質量}}{\text{分級砂質量} + \text{山砂質量}} \times 100$$

### 3. 細骨材品質試験 ～骨材のふるい分け試験～

- 試料毎に粒度調整に必要な山砂の量は異なるが、**平均混合率は50%程度**であった



### 3. 細骨材品質試験 ～骨材のふるい分け試験(混合前品質)～

- 骨材を複数種混合する際、混合前の各細骨材が、絶乾密度・吸水率・安定性試験のJIS規格に適合していることが必要
- 各分級砂から代表試料を無差別に選択し、上記品質試験を実施した
- 実証通常砂(JT1')の絶乾密度で購入者の承認が必要だったがその他は基準を満足した

	受分通常砂(UT1)		受分高度砂(UK1)		実証通常砂(JT6)		実証高度砂(JK3)		基準
	山砂混合前	山砂混合後	山砂混合前	山砂混合後	山砂混合前	山砂混合後	山砂混合前	山砂混合後	
絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.45	2.46	2.56	2.52	2.44	2.46	2.48	2.46	2.5g/cm <sup>3</sup> 以上※
吸水率(%)	2.71	2.71	1.67	2.11	3.54	2.98	2.72	3.03	3.5%以下
安定性試験(%)	3.5	3.1	2.3	2.3	3.8	3.9	3.6	3.5	10%以下

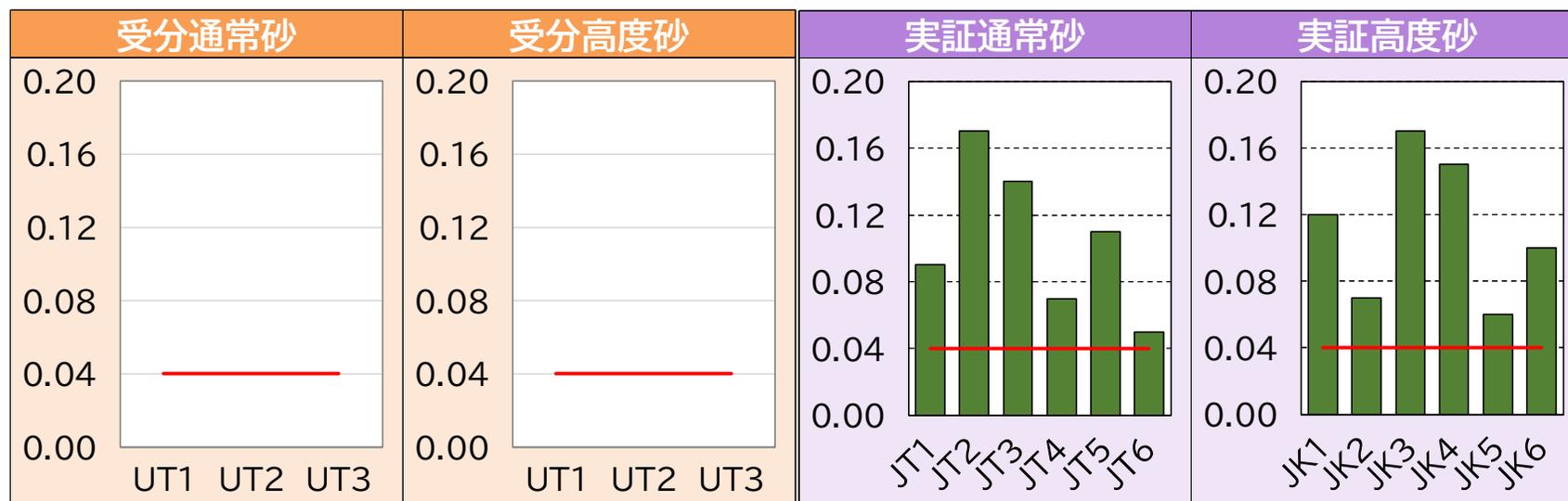
※ 購入者の承認を得て、2.4以上とすることが出来る

### 3. 細骨材品質品質 ～塩化物量～

**結果** ①受分通常砂・受分高度砂⇒基準適合 相 ①受分通常砂・受分高度砂の分級水「使い捨て」  
 ②実証通常砂・実証高度砂⇒基準不適合 違 ②実証通常砂・実証高度砂の分級水「循環利用」

**考察** 除去土壌は、津波、肥料、農薬、融雪剤由来の塩化物が蓄積している可能性が高い  
 土壌吸着力の低い塩化物が分級水の循環利用で蓄積し、分級砂の塩化物濃度が高くなった

**結論** 実事業で分級処理するには、洗浄水中の塩化物量管理が必要



### 3. 細骨材品質試験 ～有機不純物～

- 有機不純物の基準適合は、既往実証事業の実証高度砂で2試料のみであった
- 試験溶液の呈色は、

**通常分級砂 > 高度分級砂 > ジグ選別砂**

- 洗浄手法を高度化することで有機不純物は少なくなるが、基準適合に至らなかった

#### [対策]

- ① 圧縮強度比率試験を行い、購入者の承認を得て使用する
- ② ジグ選別処理に加えて、追加の有機不純物対策を行う(exアルカリ洗浄)

通常分級処理



高度分級処理



ジグ選別処理



### 3. 細骨材品質試験 ～有機不純物～

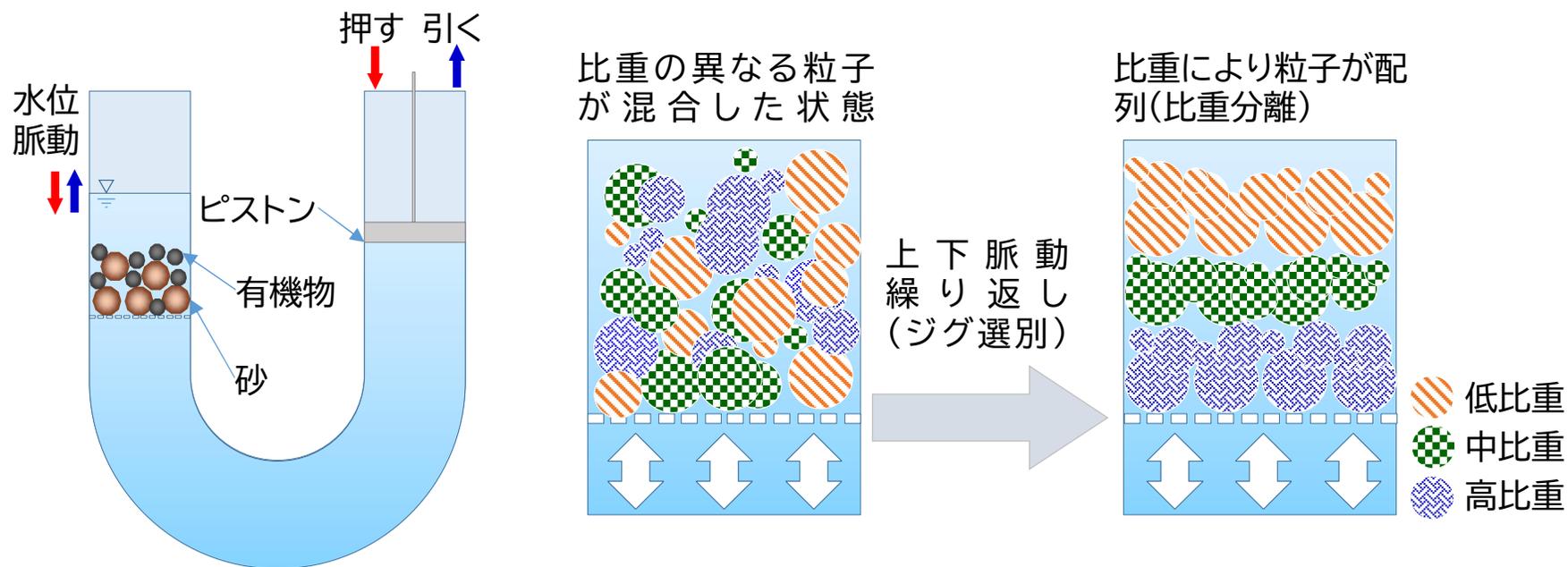


写真2 ジグ選別機(例)

U字管内の水をピストンで上下運動させると、他方の砂や有機物も上下に脈動する。この脈動を繰り返すと、比重の高い粒子は上層から下層へ、比重の低い粒子は下層から上層へと移動する。『ジグ選別』は、比重差に基づき粒子が上下に配列・成層する原理を利用した湿式比重分離技術である。

### 3. 細骨材品質試験 ～有機不純物～

#### [圧縮強度比率試験結果]

- 有機不純物が基準未達の場合、圧縮強度比率試験を満足することが必要
- 実証高度砂(JK2):基準適合、実証高度砂(JK4):基準不適合の結果となった
- 有機不純物が高いと圧縮強度比率が低くなると思われる

試料名		計量値(g)			絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	強熱減量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		圧縮強度比率 (%)	
		水	セメント	細骨材					7日	28日	7日	28日
JK2	アルカリ洗浄前	400	800	1,750	2.52	2.33	0.7	2.2	26.7	36.2	93	90
	アルカリ洗浄後	400	800	1,750					28.8	40.4		
JK4	アルカリ洗浄前	400	800	1,650	2.44	3.47	2.5	3.8	19.5	26.0	80	77
	アルカリ洗浄後	400	800	1,650					24.3	33.7		

### 3. 細骨材品質試験 ～まとめ～

試験に供した4種類の**分級砂はコンクリート用細骨材として適用可能**

#### [留意点]

- 分級砂の粒径が細かく、山砂混合による粒度調整が必要
- 塩化物量は、湿式分級時の洗浄水の塩化物量管理が必要
- 有機不純物超過は、圧縮強度比率試験による確認が必要
- 粘土塊量の基準適合には高度分級までの処理が有効

# 4. 配合・強度試験 ～配合試験～

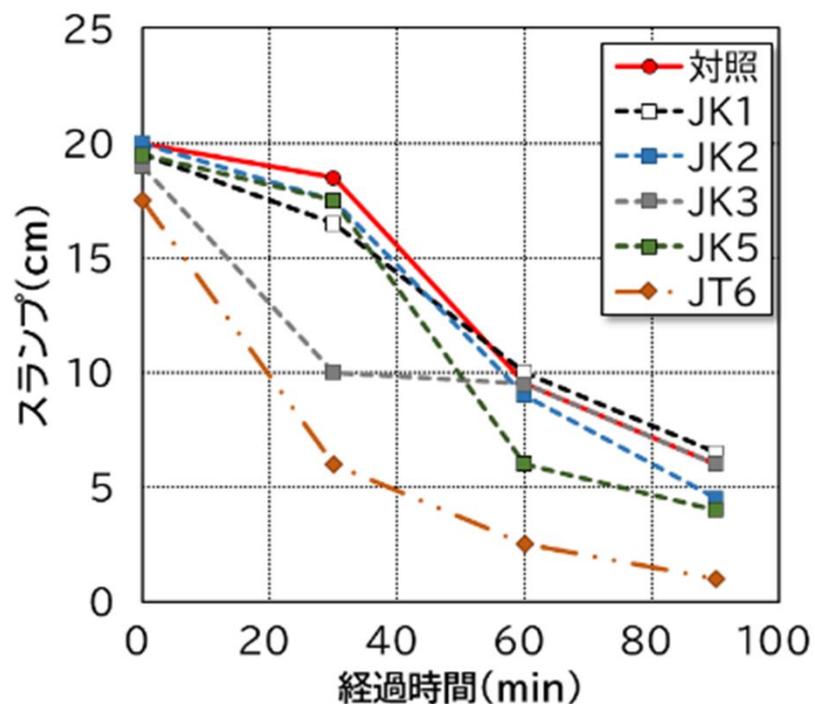
- 土間コン等の標準的なコンクリート配合(W/C、セメント量等)で、所定のスランプ、空気量となる混和剤(高性能AE減水剤(SP)、AE減水剤(AE)、消泡剤(DF))の最適添加量を検討
- 分級砂を含まない山砂のみを配合したコンクリートを「対照」とした
- 実証高度砂(JK3):高性能AE減水剤(SP)の添加量が多くなった
- 実証高度砂(JK1,2,5)+実証通常砂(JT6):対照とほぼ同等

配合名	単位水量(W) (kg/m <sup>3</sup> )	単位セメント量(C) (kg/m <sup>3</sup> )	単位細骨材量(S) (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	単位粗骨材量(G) (kg/m <sup>3</sup> )	SP (C×%)	AE (C×%)	DF (C×%)
対照	165	300	826	2.58	983	0.70	0.0010	0.0000
JK1	165	300	838	2.53	983	0.65	0.0010	0.0010
JK2	165	300	826	2.62	983	0.65	0.0010	0.0010
<b>JK3</b>	165	300	810	2.58	983	<b>1.40</b>	0.0010	0.0015
JK5	165	300	835	2.61	983	0.55	0.0015	0.0010
JT6	165	300	810	2.53	983	0.75	0.0010	0.0025
使用セメント	セメント密度(g/cm <sup>3</sup> )	粗骨材表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	水密度(g/cm <sup>3</sup> )	W/C(%)	s/a(%)			
NC	3.16	2.62	1.0	55	46			
目標スランプ(cm)		目標空気量(%)		ミキサー		練量		
18.0±2.5		4.5±1.5		55L強制練パン型ミキサー		30L		

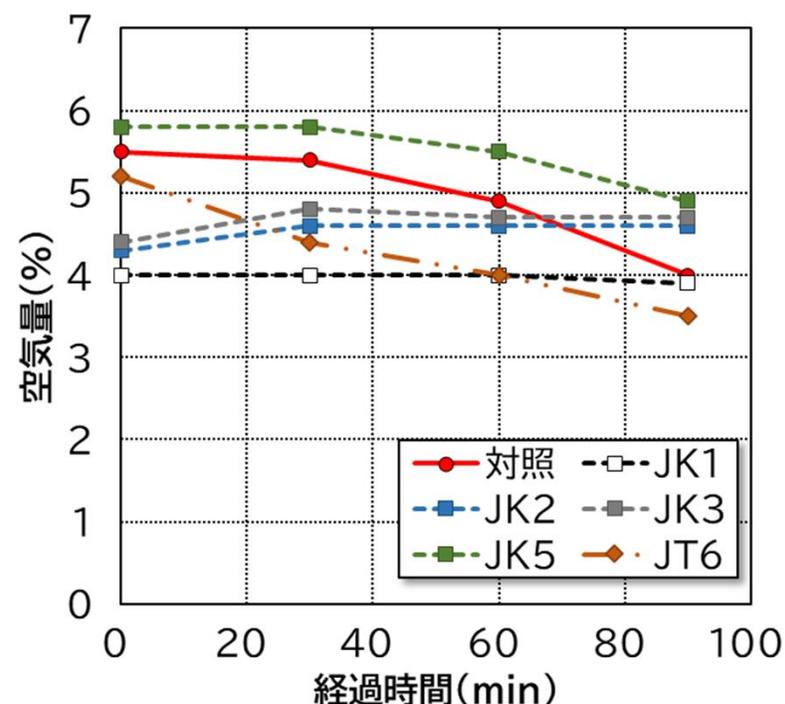


## 4. 配合・強度試験 ～経時変化（スランプ・空気量）～

- JT6(実証通常砂)でスランプが急激に低下した
- スランプの低下要因の特定は困難だが、粘土塊量(0.87%)、強熱減量(2.5%)が高いことが一つの要因と考えた
- 分級砂を配合するコンクリート製造を実事業規模で実施する際は、**遅延剤やスランプ保持型混和剤の利用**でスランプの急激な低下を防止出来ると判断



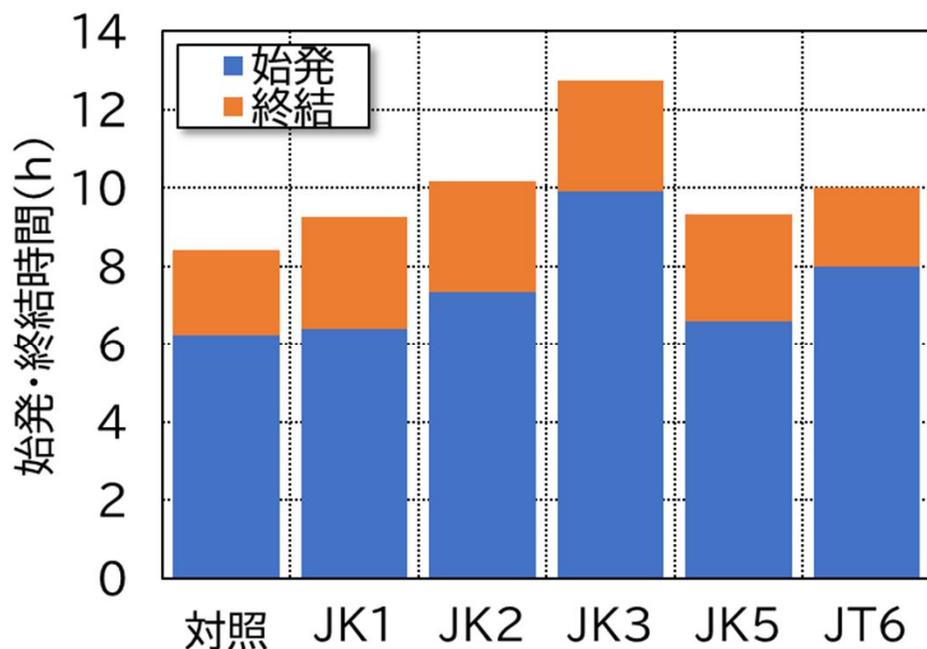
スランプの経時変化結果



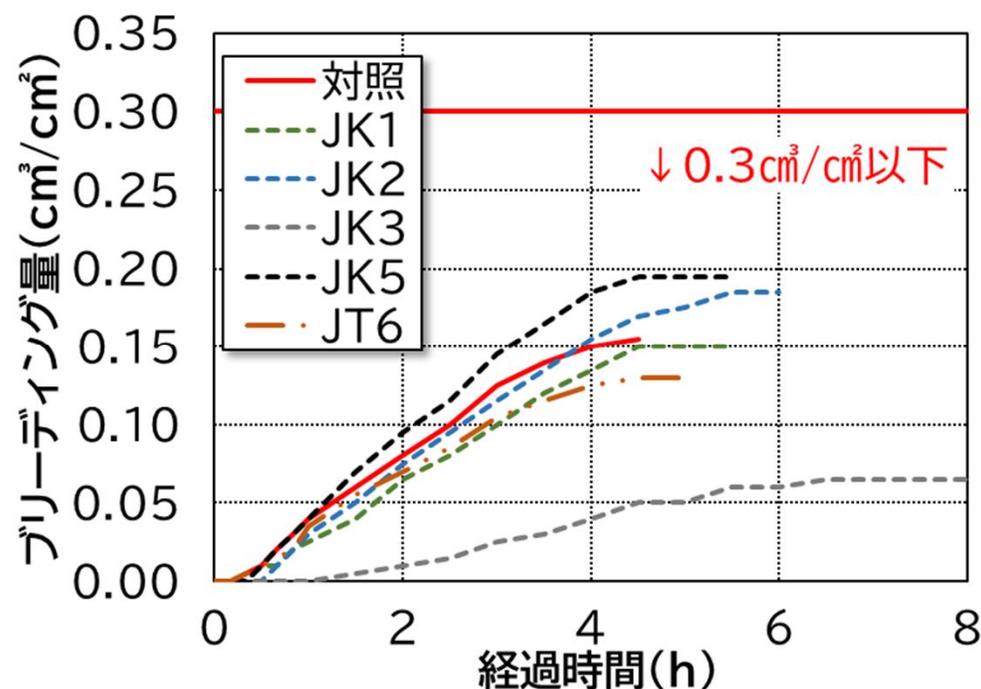
空気量の経時変化結果

## 4. 配合・強度試験 ～凝結・ブリーディング～

高性能AE減水剤の配合量が多かったJK3で、始発・凝結時間の長期化、ブリーディング量が低下したが、コンクリートの品質に悪影響はないと判断



凝結試験結果

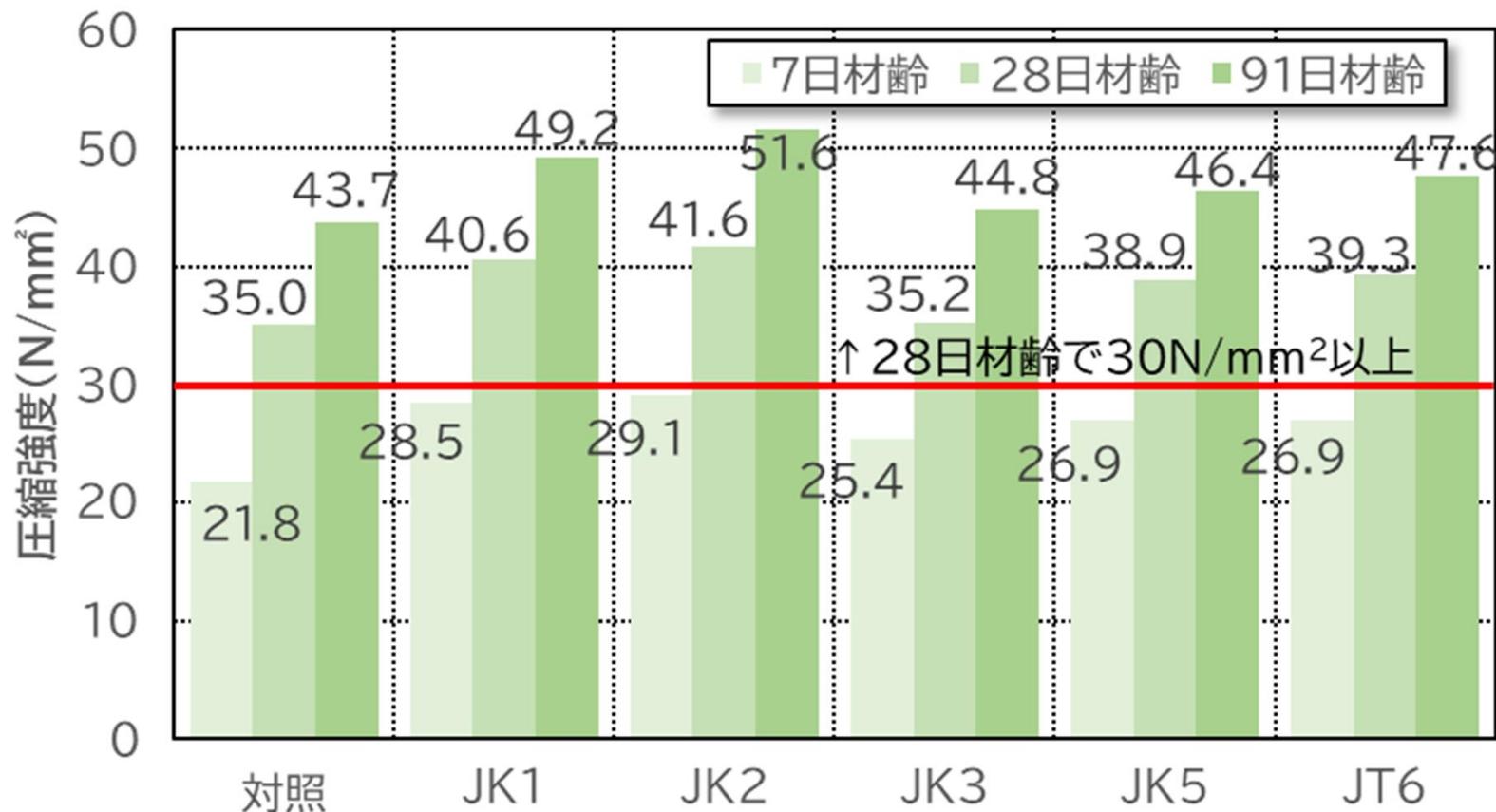


ブリーディング試験結果

※建築学会 建築工事標準仕様書 同解説JASS5 鉄筋コンクリート工事2022で、水密コンクリートや凍結融解作用を受けるコンクリートのブリーディング量は、 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下

## 4. 配合・強度試験 ～圧縮強度～

- 28日材齢の圧縮強度は、全て**30N/mm<sup>2</sup>以上**を示し基準適合した
- 分級砂を配合したコンクリートは、対照と**同等以上の強度**を発現



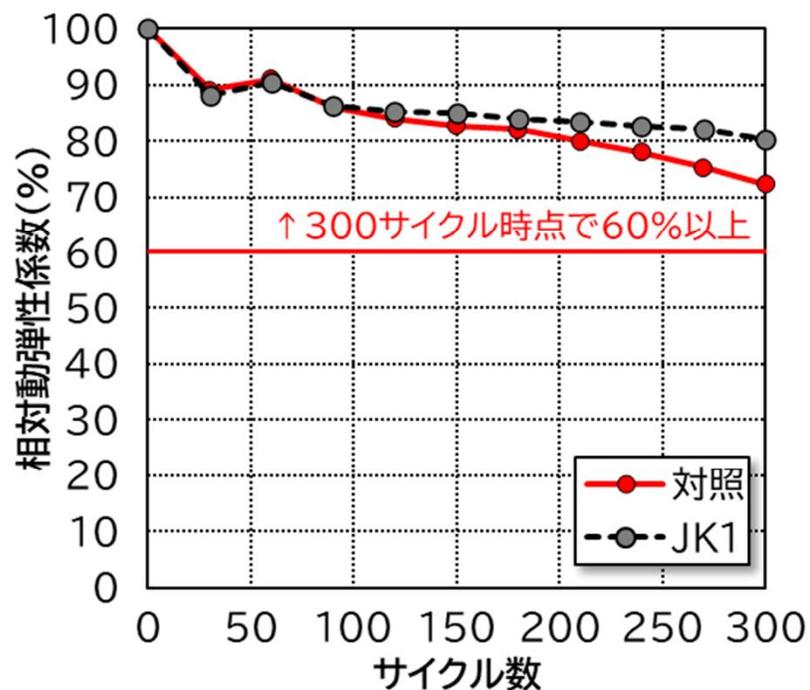
圧縮強度試験結果



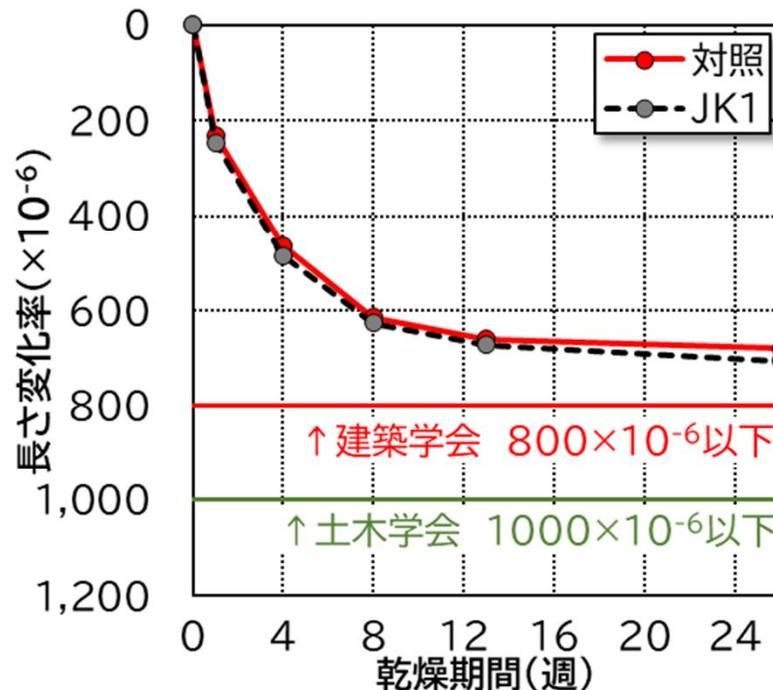
圧縮強度試験状況

# 5. 耐久性試験

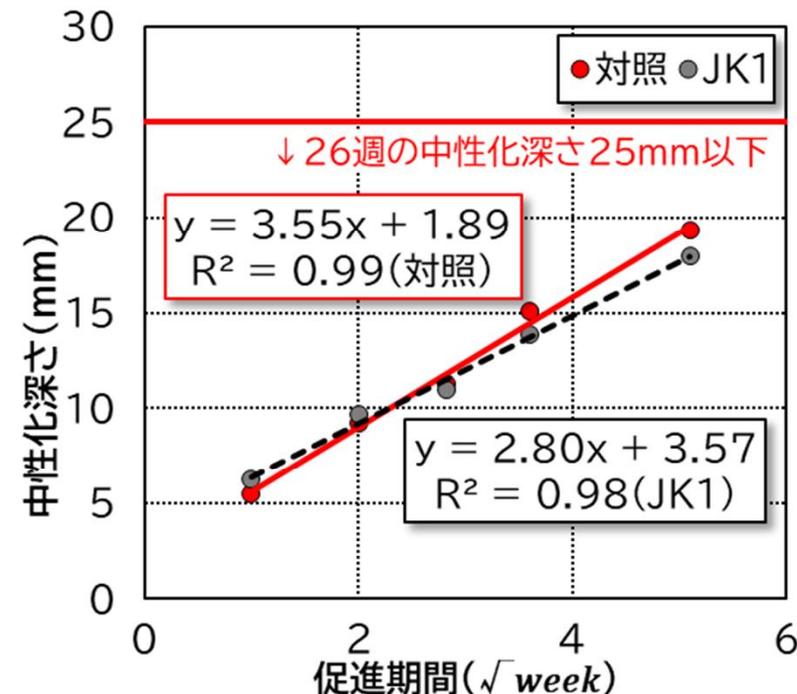
実証高度砂(JK1)を配合したコンクリートは、全ての**基準に適合**



凍結融解試験結果(相対弾性係数)



長さ変化率試験結果

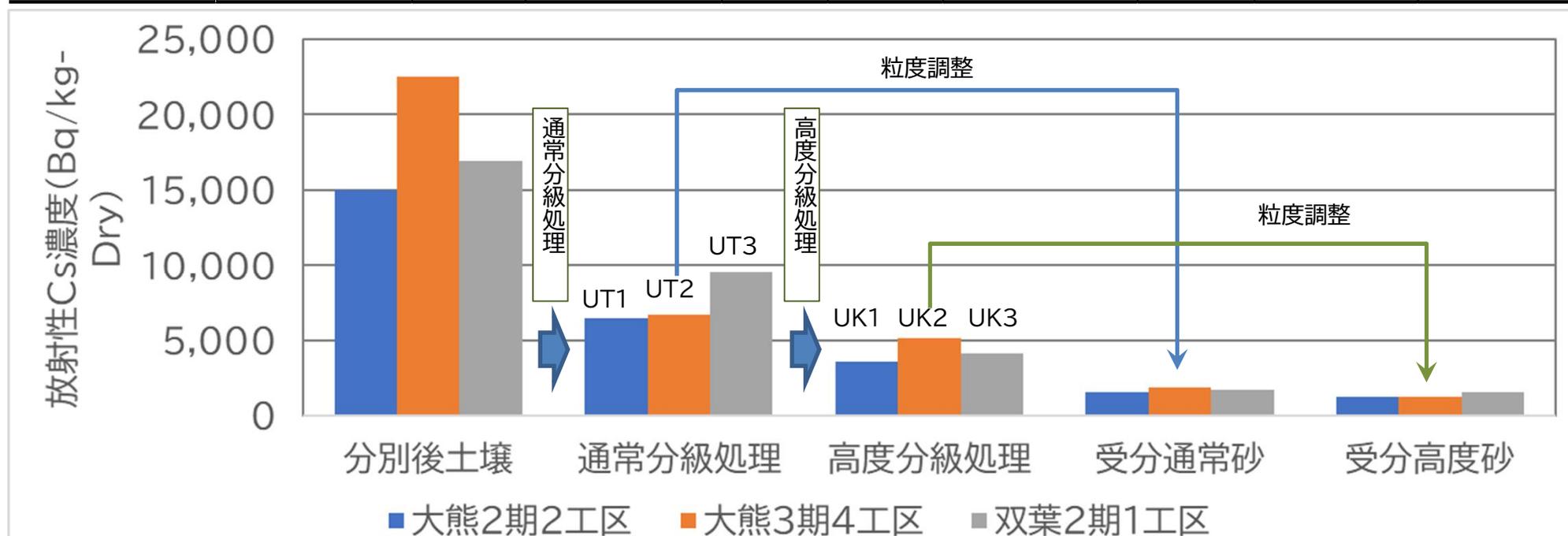


促進中性化試験結果

# 6. 放射能濃度測定

- 除染率:通常分級処理40~70%, 高度分級処理80%程度
- 山砂混合の粒度調整で放射性Cs濃度は低下(平均50%)

受入・分別施設	分別後土壌	通常分級処理			高度分級処理			粒度調整	
	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	試料名	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)	試料名	放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	除染率 (%)	受分通常砂	受分高度砂
								放射性Cs濃度 (Bq/kg-Dry)	
大熊2期2工区	14,974	(UT1)	6,440	57.0	(UK1)	3,563	76.2	1,509	1,239
大熊3期4工区	22,489	(UT2)	6,640	70.5	(UK2)	5,130	77.2	1,845	1,243
双葉2期1工区	16,952	(UT3)	9,550	43.7	(UK3)	4,071	76.0	1,710	1,545



# 7. 放射能濃度測定

表面線量率は0.01  $\mu\text{Sv/h}$ 程度

溶出量(JIS K0058-1有姿攪拌試験)は非検出

コンクリート中細骨材質量比率36% ÷ 28日材齢供試体放射能濃度低減率

	放射性Cs濃度(Bq/kg)					表面 <sup>※1</sup> 線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	溶出量 (Bq/L)
	Cs <sub>134</sub> ①	Cs <sub>137</sub> ②	Cs <sub>134</sub> ③	Cs <sub>137</sub> ④	低減率 <sup>※2</sup> (%)		
JK1	<18	1,117	<28	432	40	0.01	ND
JK2	37	1,521	<28	546	37	0.01	ND
JK3	46	2,657	<38	1,095	42	0.02	ND
JK5	<27	1,013	<28	430	44	0.01	ND
JT6	34	1,734	<29	641	38	0.01	ND
対象	分級砂		28日材齢供試体				



青色ハッチング:28日材齢供試体  
緑色ハッチング:細骨材

※1 コリメータあり, ※2 (③+④)/(①+②)×100

# 7. 放射能濃度測定

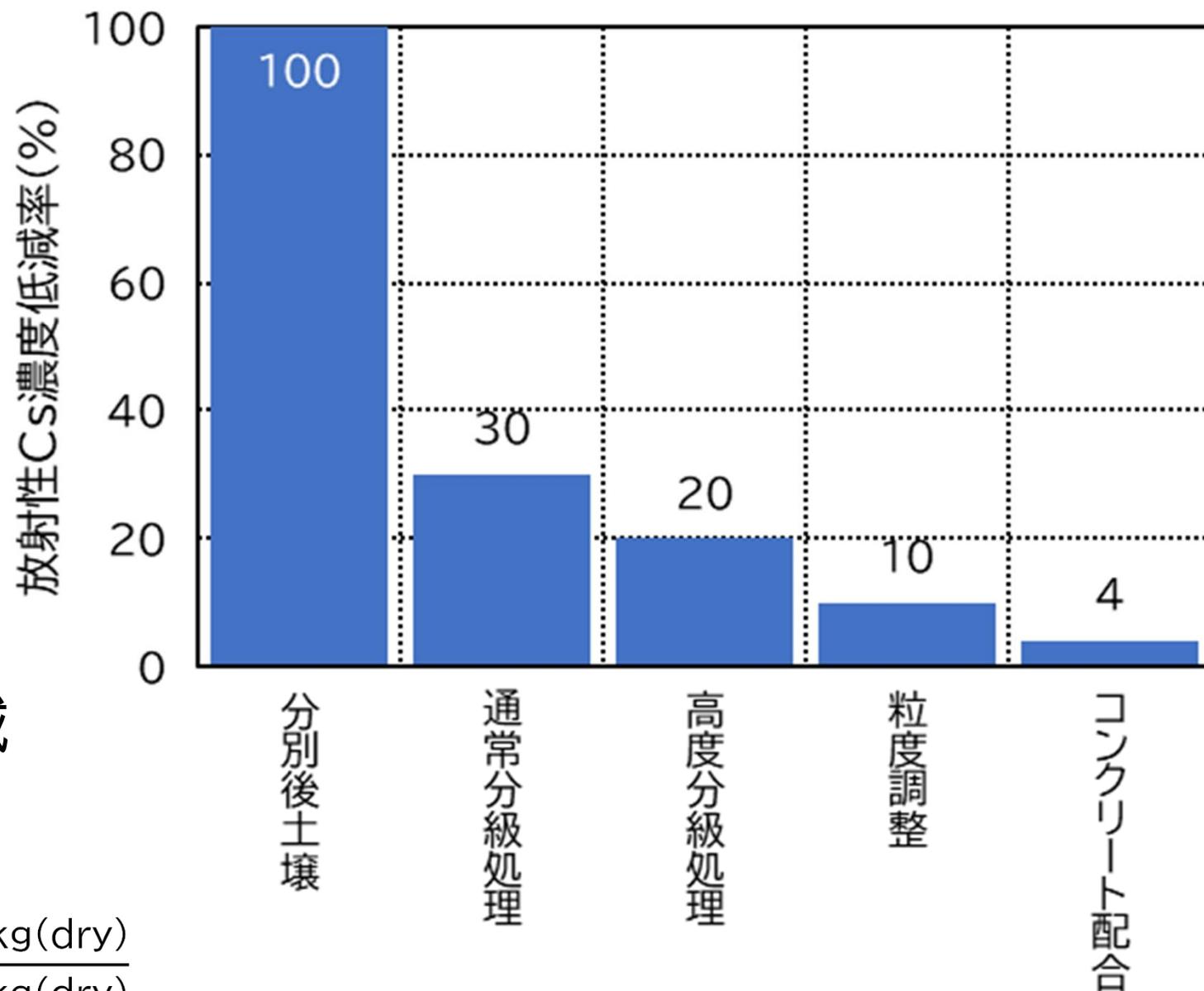
放射性Cs濃度低減率

分級処理 : 20%

粒度調整 : 10%

Co 配合 : 4%

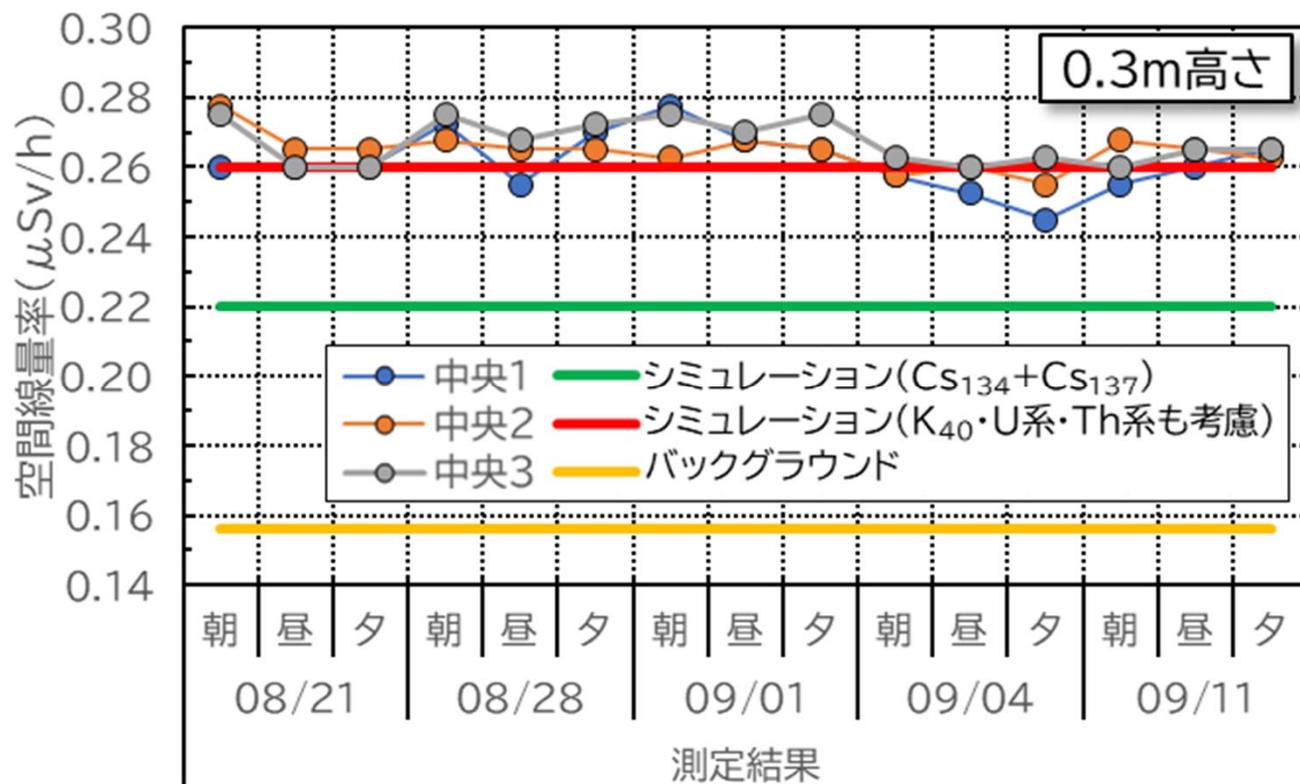
放射性Cs濃度は1/25に低減  
することが見込まれる



※ 低減率(%) =  $\frac{\text{各工程産物の放射性Cs濃度(Bq/kg(dry))}}{\text{分別後土壌の放射性Cs濃度(Bq/kg(dry))}}$

## 8. 追加被ばく線量

- **空間線量率**: 0.16 $\mu$ Sv/hから**0.24~0.28 $\mu$ Sv/h**に上昇
- 放射性Csのみの**シミュレーション結果(緑線)** < 実測値
- **放射性K<sub>40</sub>, U系・Th系放射能濃度も考慮した解析結果(赤線)**は  
実測値と**良く一致**



## 8. まとめ

① 試験に供した4種類の**分級砂はコンクリート用細骨材として適用可能**

1)分級砂の粒径が細かく、山砂の混合による粒度調整が必要

2)塩化物量の基準超過は、湿式分級時の洗浄水の管理で対応可能

3)有機不純物で基準超過は、購入者の承認により利用可能と考えられる

4)粘土塊量の基準適合には高度分級までの処理が有効

② **分級砂を配合したコンクリート**は、対照と**同等以上の強度発現、耐久性**を示した

③ 分級砂を配合したコンクリート製品からの空間線量率は、放射性Cs、放射性K<sub>40</sub>、U系・Th系を考慮すると実測値とよく一致した。

④ これにより、**追加被ばく線量のシミュレーションが可能**なことから、有効利用の条件に応じてコンクリート製品からの追加被ばく線量を管理できる可能性が示された

[参考]分別後土壌をコンクリート用細骨材に加工(分級処理・粒度調整)し、コンクリートに配合することで、**放射性Cs濃度の低減率は1/25程度**が見込まれる(各工程での放射性Cs濃度低減率:通常・高度分級処理0.2倍、粒度調整0.5倍、コンクリート配合0.4倍)



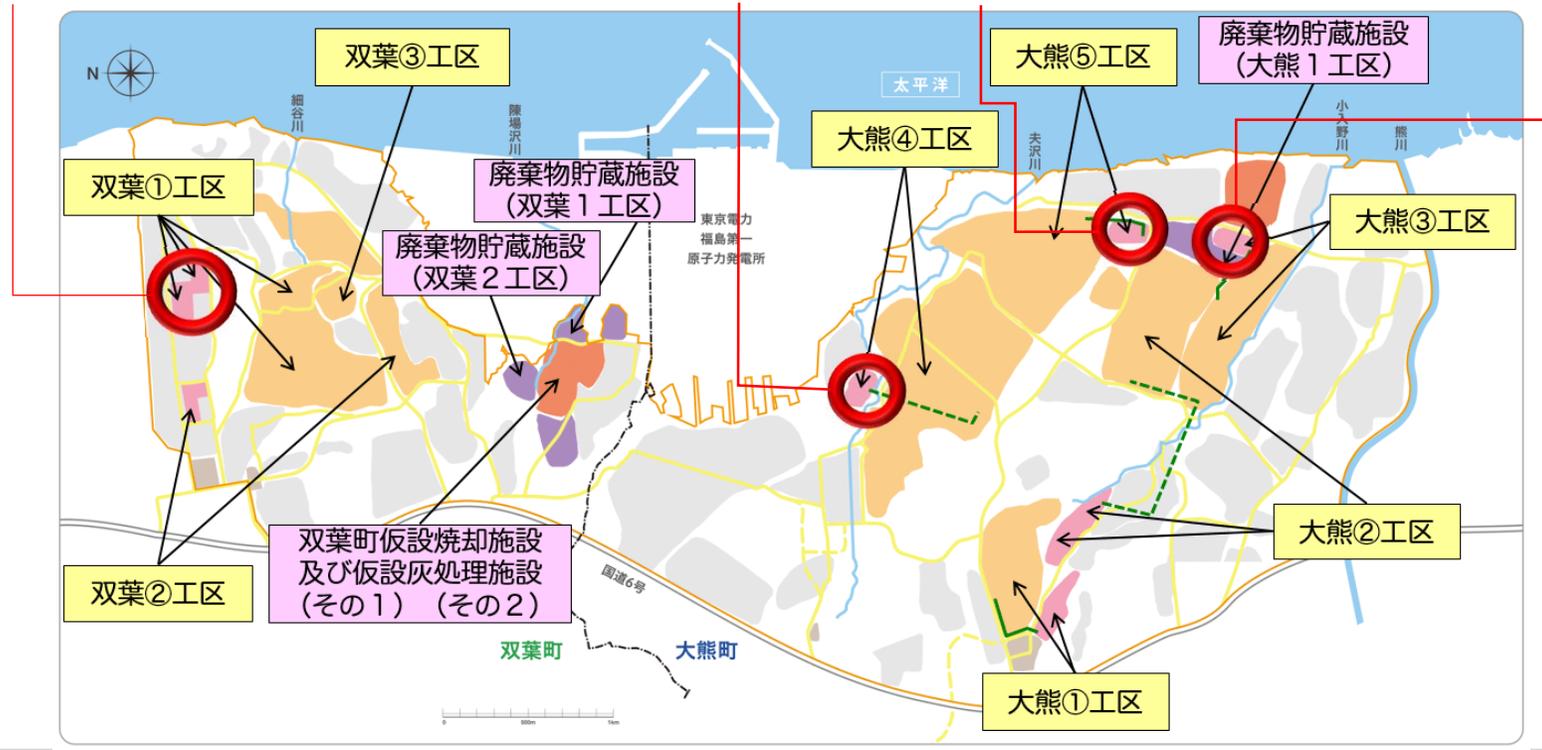
以上、ご清聴ありがとうございました。  
Thank you for your attention.

# [参考]井戸水の練混ぜ水適合性

各受入・分別施設に併設した井戸より3回地下水を採取(令和4年10月11,17,24日)

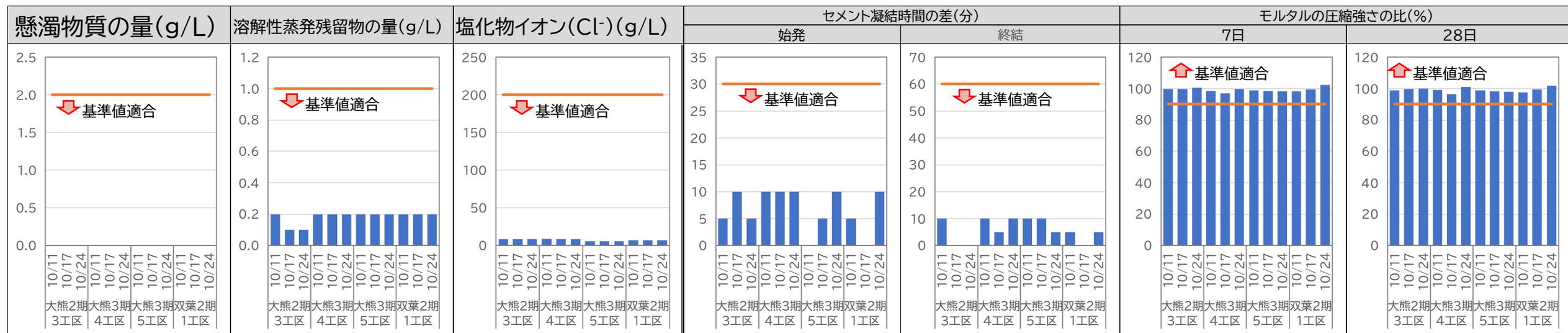


双葉2期1工区      大熊3期4工区      大熊3期5工区      大熊2期3工区



# [参考]井戸水の練混ぜ水適合性

- 全試料, 全項目で基準適合
- 帰還困難区域内の地下水が, コンクリート練混ぜ水に使用可能の判断
- 双葉2期1工区の地下水を, コンクリート用練り混ぜ水に使用



# [参考]ジグ選別処理

検討

ジグ選別処理の効果を検証するため、有機不純物と関係性が強いと考えられる強熱減量を指標とした検討を行った。

結果

ジグ選別処理前の強熱減量と、ジグ選別処理による強熱減量の低減率には、強い相関が存在した。

結論

ジグ選別処理は、高濃度の有機物除去には効果があるが、有機不純物を基準適合とするまでの能力は有していないため、追加の対策を併用することが必要と判断した

表3 結果一覧

試料名	有機不純物		強熱減量		低減率 (%)
	ジグ選別前	ジグ選別後	ジグ選別前	ジグ選別後	
JT1	濃い	濃い	2.5	2.1	16.0
JT2	濃い	濃い	2.0	1.8	10.0
JT4	濃い	濃い	2.3	1.9	17.4
JK3	濃い	濃い	2.8	2.1	25.0
JK4	濃い	濃い	3.8	2.0	47.4
JK6	濃い	濃い	2.0	1.7	15.0
UK1	濃い	濃い	1.6	1.5	6.3
UK2	濃い	濃い	1.8	1.5	16.7
UK3	濃い	濃い	1.7	1.6	5.9

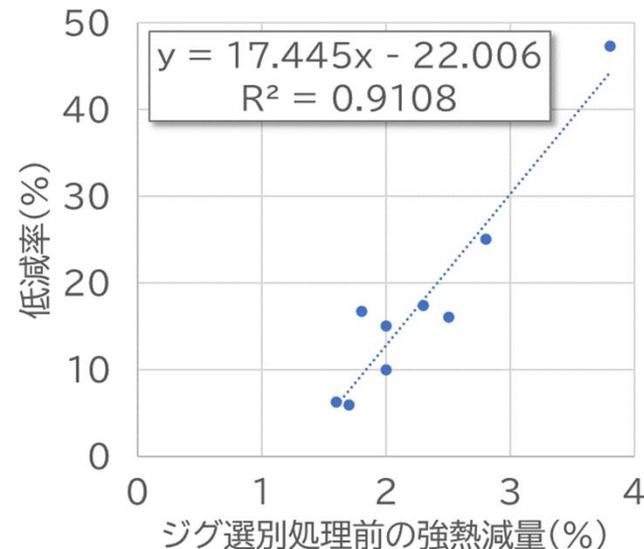
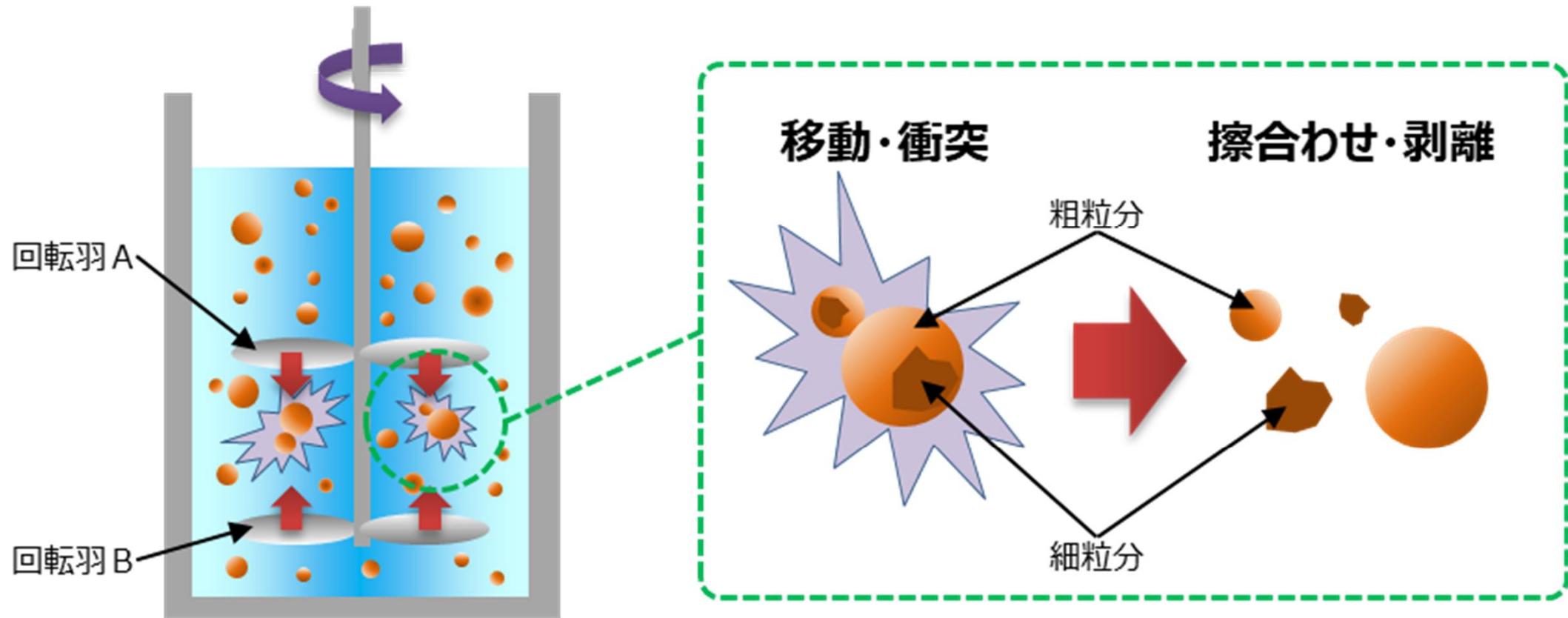


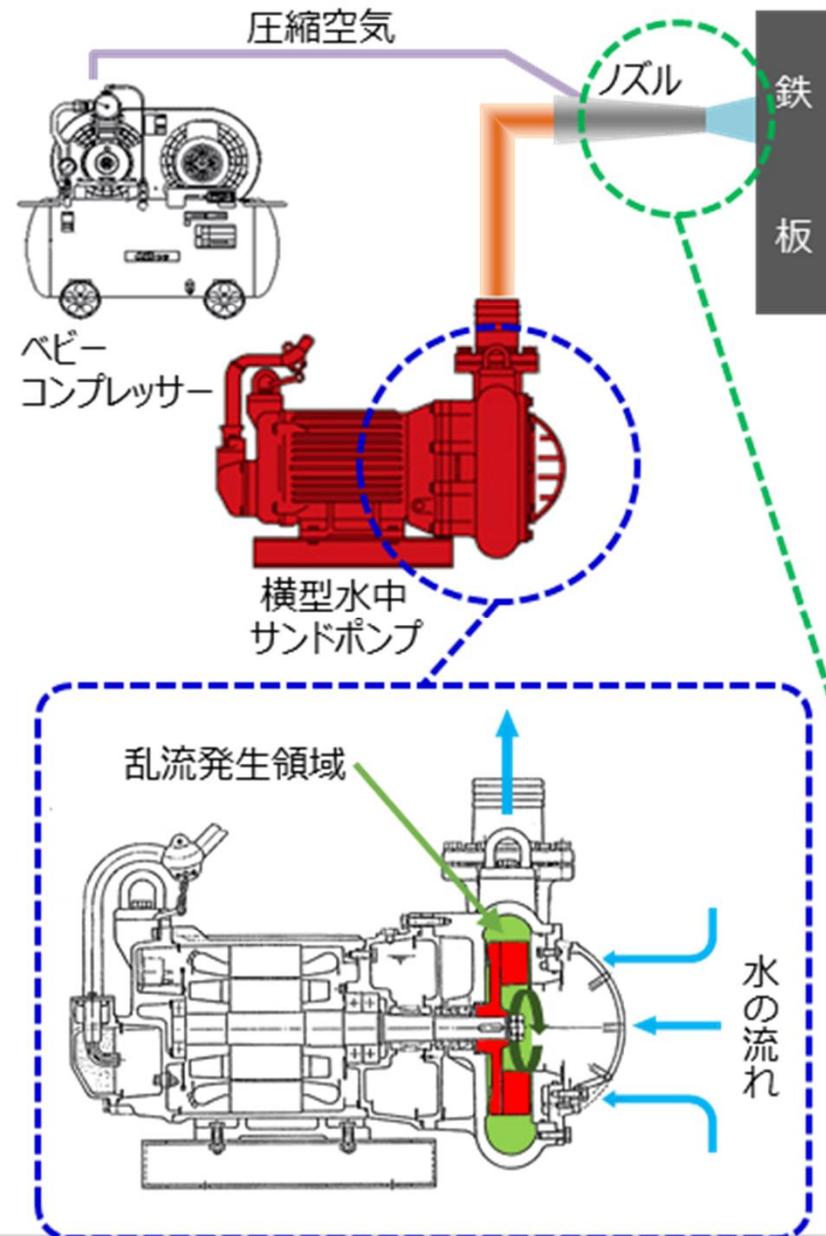
図7 強熱減量と除去率の関係

# [参考]高度分級A

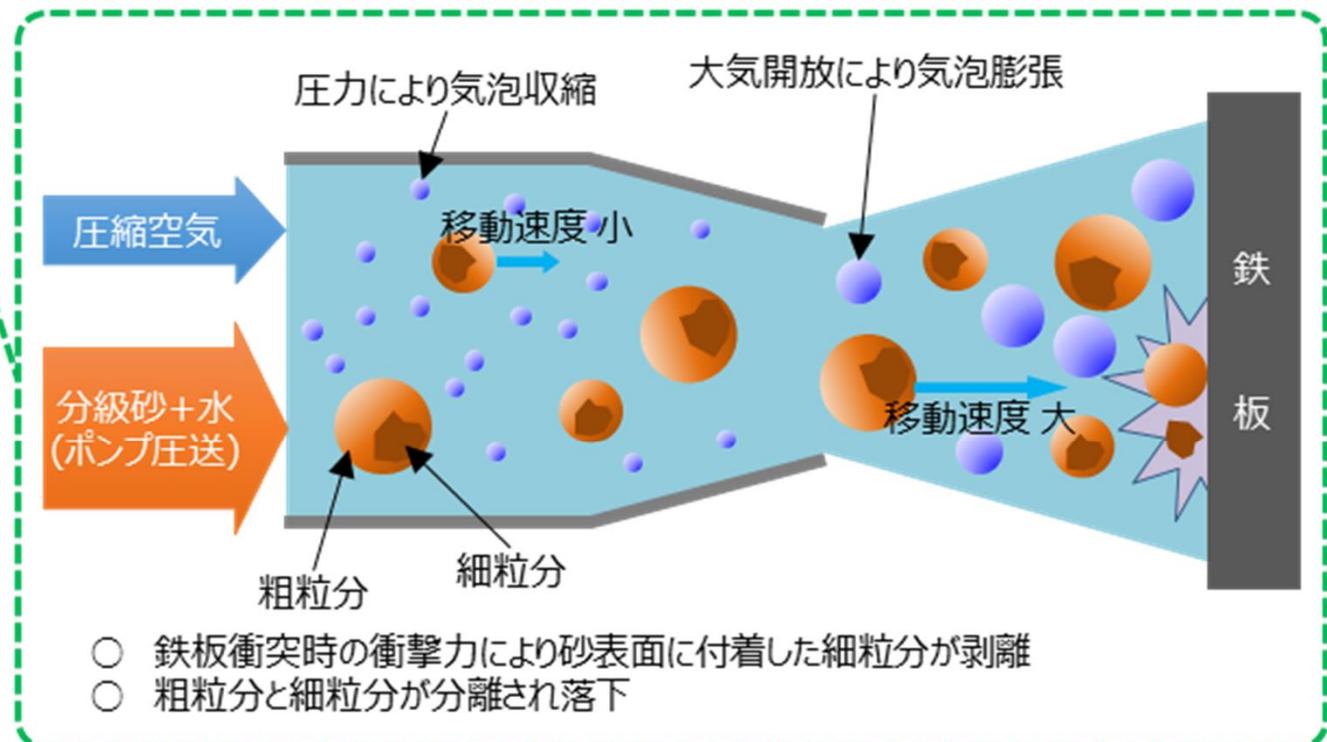


- ① 回転羽Aより下の砂は下（↓）に移動、回転羽Bより上の砂は上（↑）に移動
- ② 砂粒が衝突
- ③ 砂粒表面を擦合わせ
- ④ 砂粒表面の細粒分(セシウム付着)が剥離

# [参考]高度分級B



- ① 横型水中ポンプ内の乱流発生領域で砂粒が衝突
- ② ノズル吐出口より高速・高圧で砂粒を鉄板に衝突
- ③ 上述2つの作用により砂表面から粘土分を剥離
- ④ 汎用品の組合せで処理設備の設置が可能
- ⑤ 無薬注処理のため、環境影響が小さい



## [参考]実証事業の概要

- (1)事業名：令和4・5年度 除去土壌等の減容等技術実証事業(その3, その1)  
除去土壌を分級処理した砂をコンクリート用細骨材に利用するための技術実証
- (2)委託者：中間貯蔵・環境安全事業株式会社
- (3)受託者：除去土壌等減容化・再生利用技術研究組合
- (4)場 所：中間貯蔵施設技術実証フィールド  
(福島県双葉郡大熊町大字夫沢字長者原731-1)
- (5)期 間：令和4年9月7日～令和5年3月31日

# [参考]骨材品質試験結果一覧

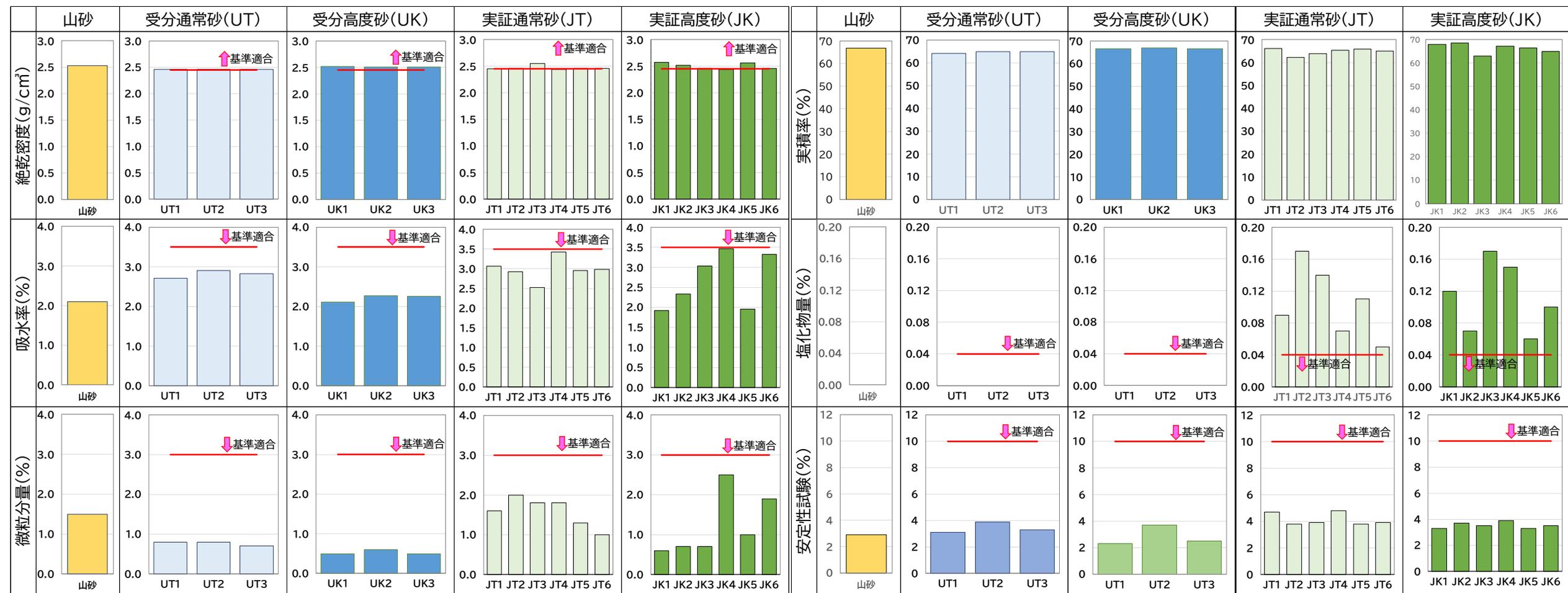
		山砂	受分通常砂			受分高度砂			実証通常砂						実証高度砂						基準
			UT1	UT2	UT3	UK1	UK2	UK3	JT1	JT2	JT3	JT4	JT5	JT6	JK1	JK2	JK3	JK4	JK5	JK6	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	絶乾	2.53	2.46	2.46	2.46	2.52	2.51	2.51	2.45	2.46	2.55	2.44	2.46	2.46	2.57	2.52	2.46	2.44	2.56	2.46	2.5g/cm <sup>3</sup> 以上 <sup>※1</sup>
	表乾	2.58	2.53	2.53	2.53	2.57	2.57	2.57	2.53	2.53	2.62	2.52	2.53	2.53	2.62	2.58	2.53	2.52	2.61	2.54	—
吸水率(%)		2.10	2.71	2.90	2.82	2.11	2.27	2.25	3.06	2.92	2.53	3.42	2.95	2.98	1.92	2.33	3.03	3.47	1.96	3.32	3.5%以下
微粒分量(%)		1.5	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	1.6	2.0	1.8	1.8	1.3	1.0	0.6	0.7	0.7	2.5	1.0	1.9	3.0%以下(すり減りを受ける場合)、5.0%以下
粘土塊量(%)		0.60	0.93	0.97	1.14	0.53	0.88	0.96	0.92	1.36	0.87	0.77	0.79	0.87	0.15	0.43	0.36	—	0.26	0.24	1.0%以下
単位容積質量(g/cm <sup>3</sup> )		1.69	1.58	1.60	1.60	1.68	1.68	1.67	1.62	1.53	1.63	1.60	1.62	1.60	1.75	1.73	1.55	1.64	1.70	1.60	—
実積率(%)		66.8	64.2	65.0	65.0	66.5	66.9	66.5	66.1	62.2	63.9	65.4	65.9	65.0	67.9	68.5	63.0	67.2	66.4	65.0	—
有機不純物		薄い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	濃い	0	0	0	0	0	0	同じ	濃い	濃い	濃い	同じ	濃い	溶液の色が標準色に対し、同じまたは薄い <sup>※2</sup>
塩化物量(%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.17	0.14	0.07	0.11	0.05	0.12	0.07	0.17	0.15	0.06	0.10	0.04%以下
安定性試験(%)		2.9	3.1	3.9	3.3	2.3	3.7	2.5	4.7	3.8	3.9	4.8	3.8	3.9	3.3	3.7	3.5	3.9	3.3	3.5	10%以下
アルカリ骨材 反応(化学法)	Rc-Sc(mmol/L)	120-43	137-38	122-33	120-39	125-37	159-36	122-42	193-19	123-25	120-23	127-32	107-32	153-30	116-29	131-35	182-24	148-35	121-32	135-27	表2-9参照 <sup>※3</sup>
	区分	A無害																			
強熱減量(%)		1.6	2.6	2.4	2.5	1.6	1.8	1.7	2.5	2.0	2.5	2.3	1.8	2.5	2.0	2.2	2.8	3.8	1.5	2.0	
放射性Cs濃度(Bq/kg-dry)		ND	1,509	1,845	1,710	1,239	1,243	1,545	2,785	3,833	1,871	2,476	1,647	1,846	1,349	2,218	3,827	2,072	1,210	3,306	—

※1 購入者の承認を得て、2.4以上とすることができる

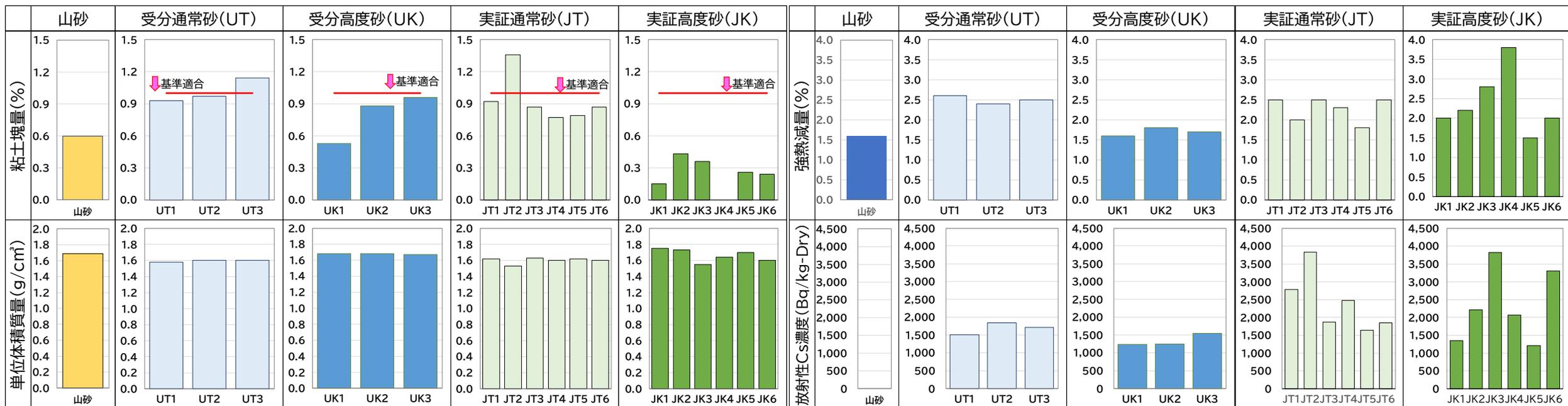
※2 標準色より濃い場合でも、JIS A 1142に規定する圧縮強度比率が90%以上であれば、購入者の承認を得て用いても良い

※3 表2-9に示す判定基準により、無害、無害でない、評価しないを判定

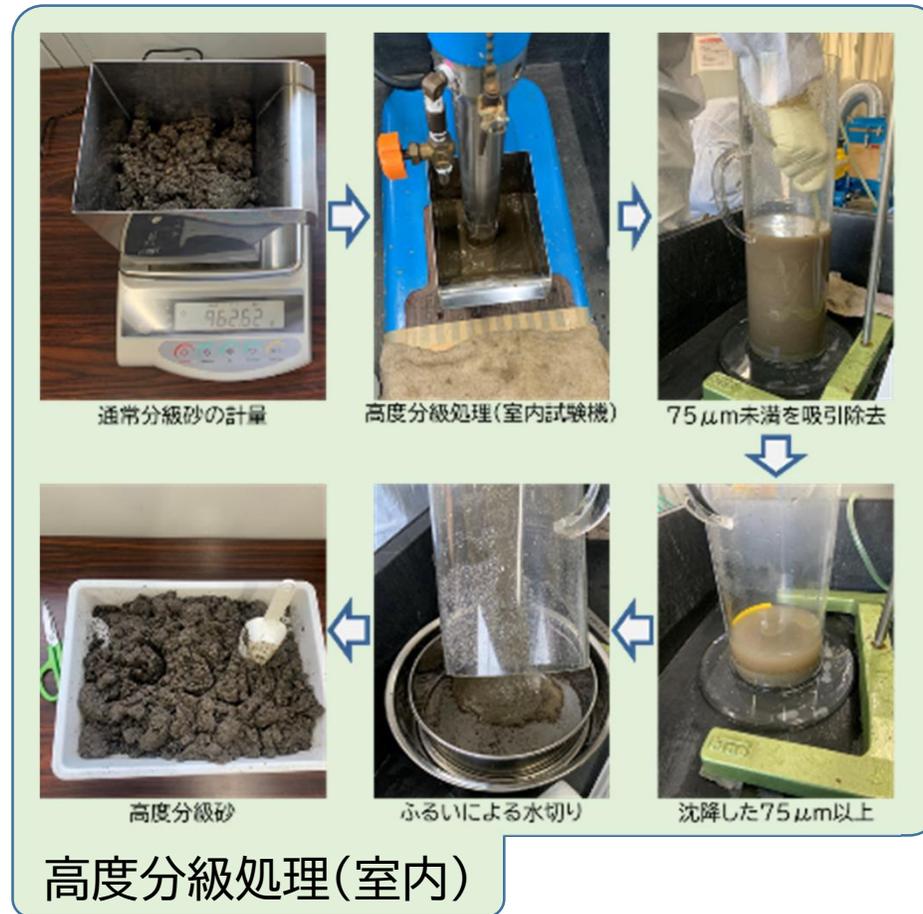
# [参考]骨材品質試験結果一覽



# [参考] 骨材品質試験結果一覽



# [参考]室内分級処理状況



# [参考]各材料のホ社能濃度測定結果

項目	放射能濃度(Bq/kg(Dry))				配合		放射能濃度(Bq/kg(Dry))	
	Cs <sub>134</sub>	Cs <sub>137</sub>	K <sub>40</sub>	Pb <sub>212</sub>	重量(kg)	割合(%)	各材料毎	合計
練混ぜ水	<0.5	<0.6	<7.9	<1.0	6	7	0.7	1,216
セメント	<29	<33	<434	<43	11	13	71	
分級砂(JK1,3,5)	56	2,606	443	<60	16	20	636	
粒度調整用山砂	8.6	8.2	26	600	13	16	106	
粗骨材	<21	<26	843	44	34	43	402	
コンクリートタイル	<32	540	604	<46	—	—	—	1,222

### 3. 細骨材品質試験 ～単位容積質量・実積率～

