



鉍委23-03

鉍さいたい積場措置に向けた取組み

(2022.3.14 第23回 鉍山跡措置技術委員会 資料)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
人形峠環境技術センター



目次

【地下水導流工】

1. 鉍さいたい積場の地下水について
2. 地下水対策案と今後の予定

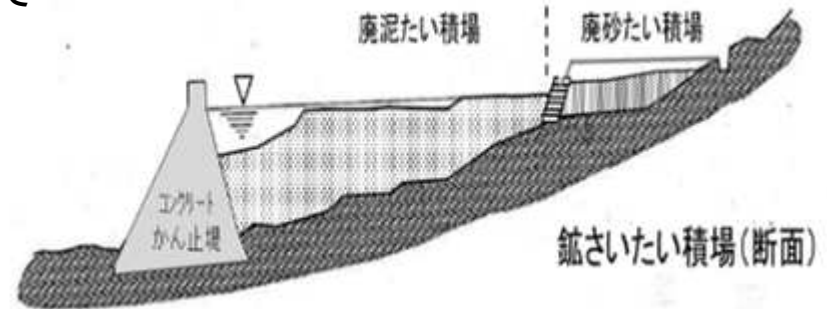
【固結処理】

3. 固結鉍さい試験で得られた試験結果
4. 過去の鉍さいの分析結果
5. 今後の固結鉍さい試験について
6. 鉍さいたい積場の固結処理について

鉱さいたい積場の措置

【人形峠鉱山閉山措置の課題】

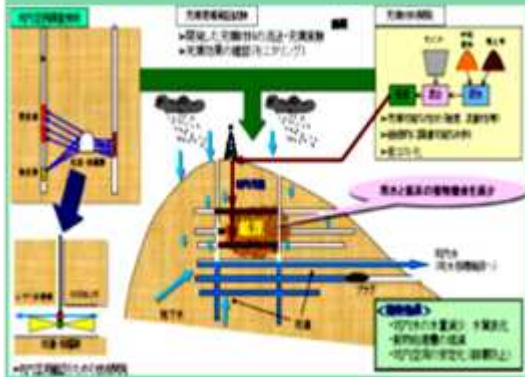
- 鉱さいたい積場の堆積量は年々増加し、あと約30年で許認可容量を超えると予想される。
- 新たなたい積場の建設は不可で、自然浄化機能をもつ鉱さいたい積場を失う
- 早急に坑水発生源対策、坑水処理対策、固結等の鉱さいたい積場の措置を行う必要である。
- 鉱さいたい積場の延命措置も同時に検討する。



人形峠鉱山の閉山措置(あと約30年)

坑水発生源対策

坑道充填などによる
水量低減・水質改善



* JOGMEC 坑産水水質改善技術開発事業資料より参照

坑水処理対策

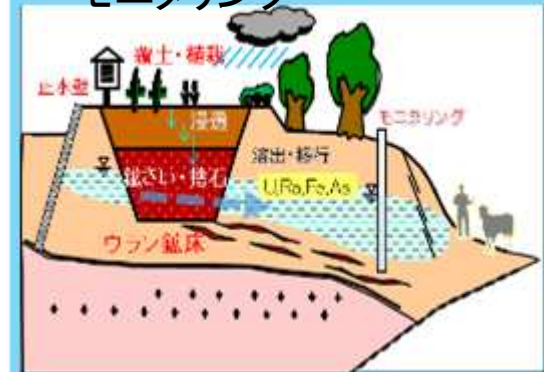
処理能力の向上した
新処理システム



概念図

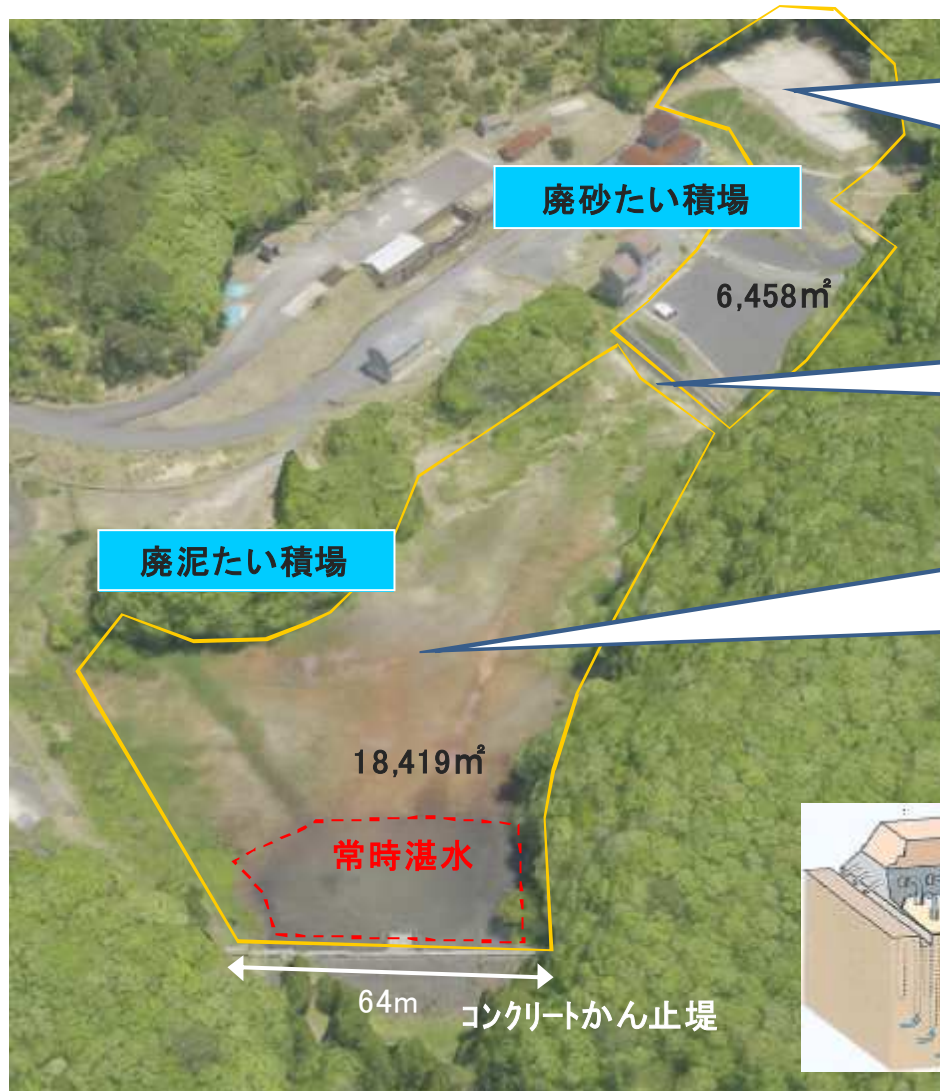
鉱さいたい積場の措置

地山化
(安定化、覆土、植栽)
モニタリング



概念図

鉱さいたい積場の現況



【廃砂たい積場】

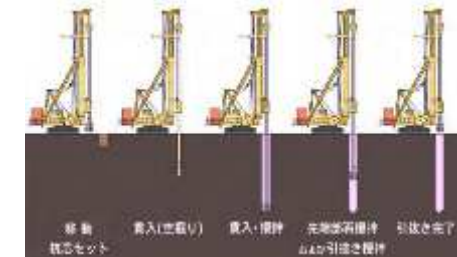
- ・覆土措置を実施。
- ・覆土は雨水を排水するため拌み構造(屋根上構造)とした。
- ・覆土はベントナイト混合土(ラドンバリア層)を保護する多重覆土構造とした。

【廃砂-廃泥境界】

- ・廃砂末端から湧水が発生し、廃泥たい積場へ排水している(常時)。

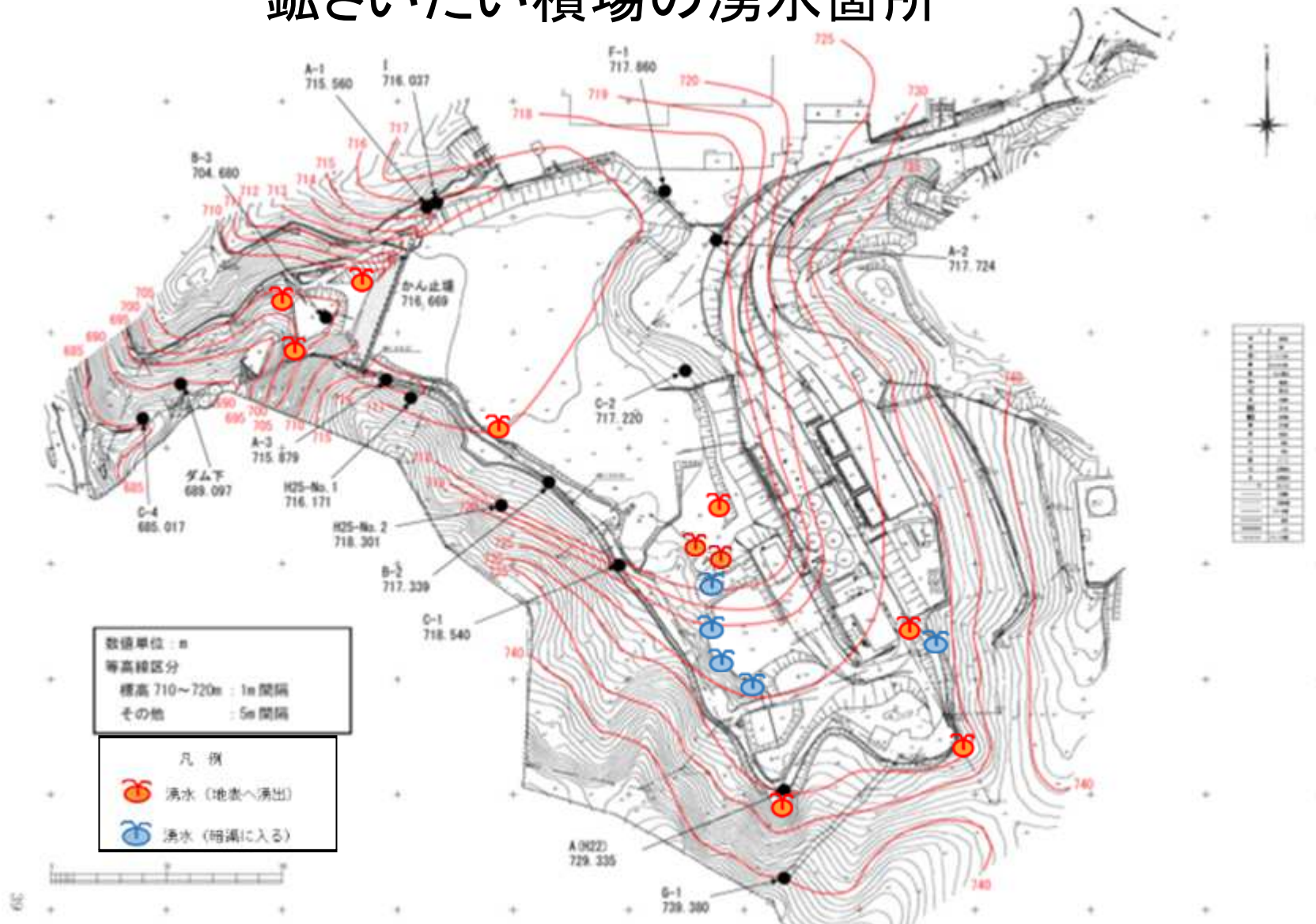
【廃泥たい積場たい積場】

- ・鉱さいは、常に水に浸っている(=水封)
- ・鉱さいは含水比が高いシルト
- ・廃泥たい積場たい積場を地山化するには、鉱さいを安定化させる必要があるため、固結工法や圧密工法を検討中。



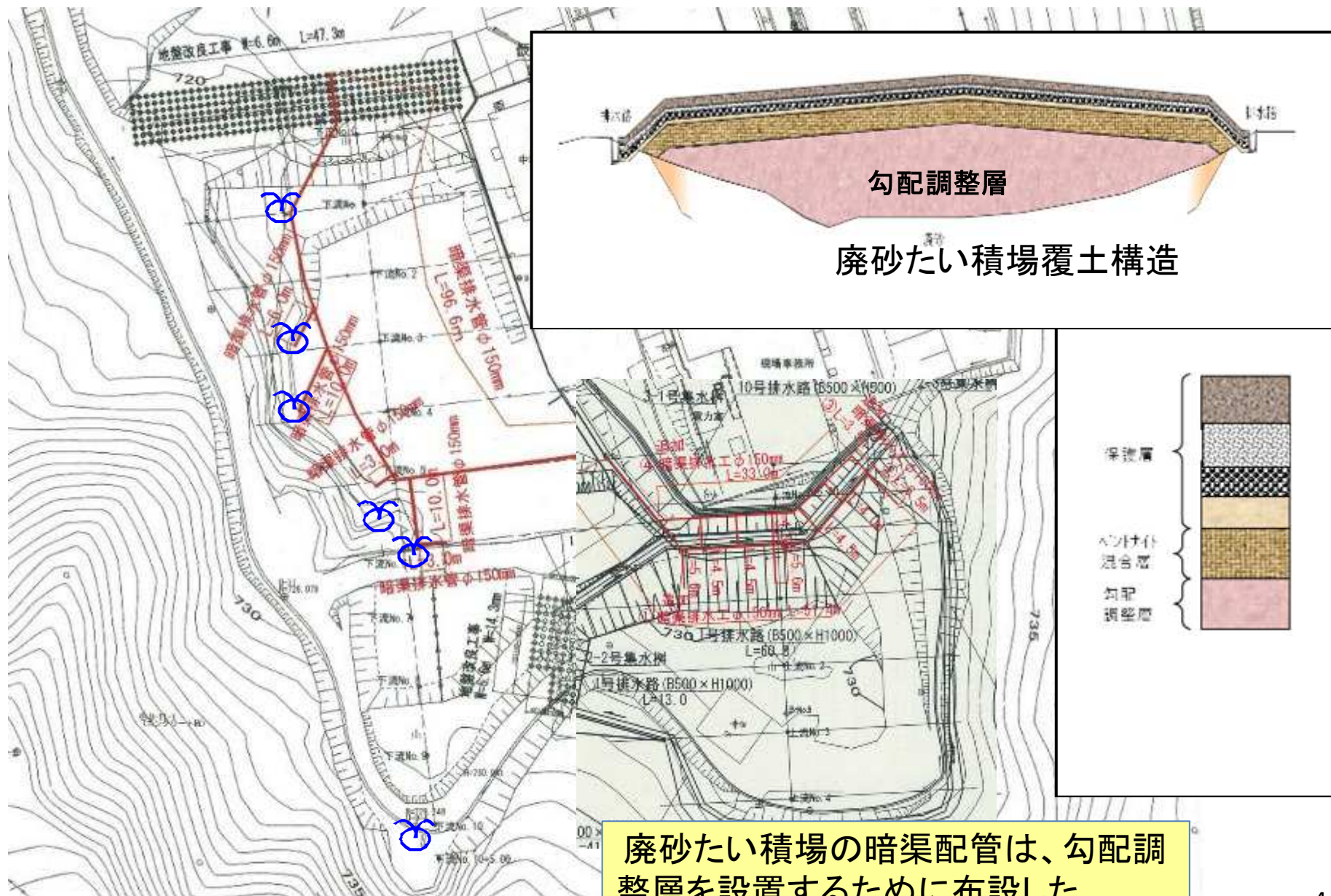
鉱さいたい積場は、周辺からの地下水が流入するため、廃砂たい積場のように覆土しても、地下水と鉱さいが接触する排水(ダム下湧水)が発生すると想定される。

鉱さいたい積場の湧水箇所



鉱さいたい積場周辺の湧水地点は、左岸側に多く認められる

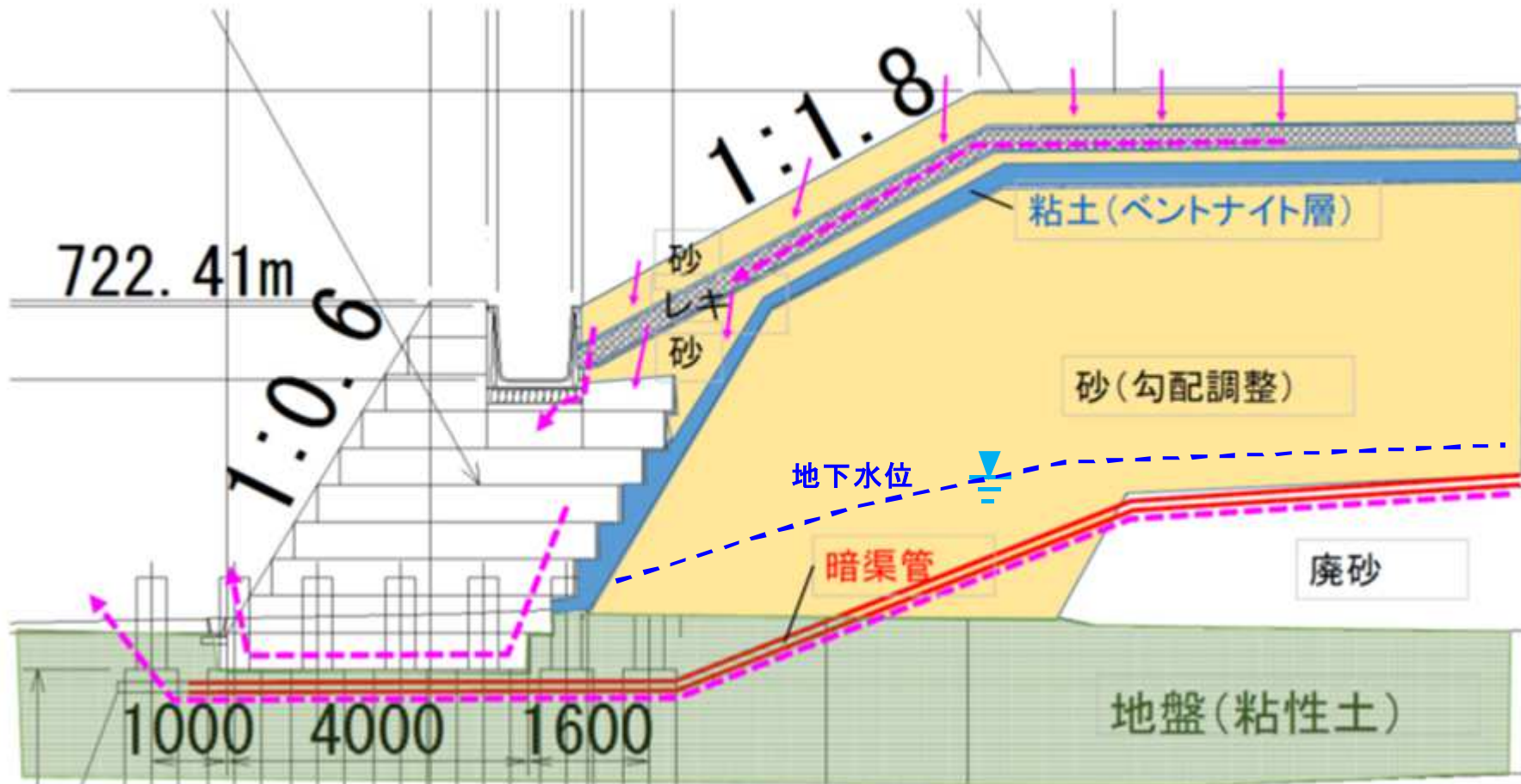
廃砂たい積場の暗渠配管



廃砂たい積場の暗渠配管は、勾配調整層を設置するために布設した。

廃砂たい積場の暗渠配管

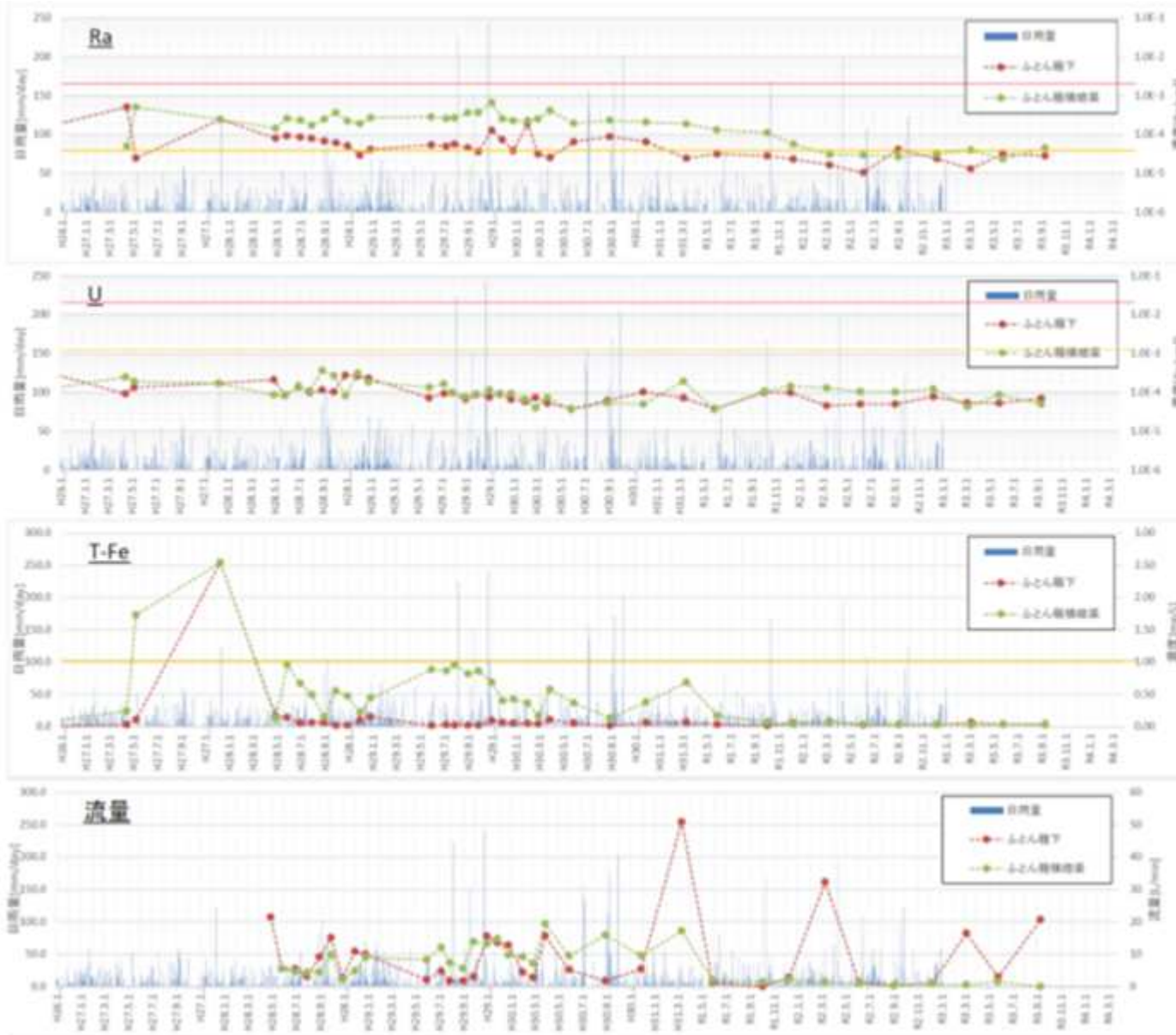
廃砂たい積場内の「鉱さい」は、常に地下水に接触した排水が廃泥たい積場たい積場へ流入している





1. 鉱さいたい積場の地下水について

廃砂－廃泥境界（ふとん籠）湧水の水質と水量



【Ra】
ふとん籠横は、R2年3月から、 10^{-4} Bp/cm³オーダーから 10^{-5} Bp/cm³に濃度低下する。

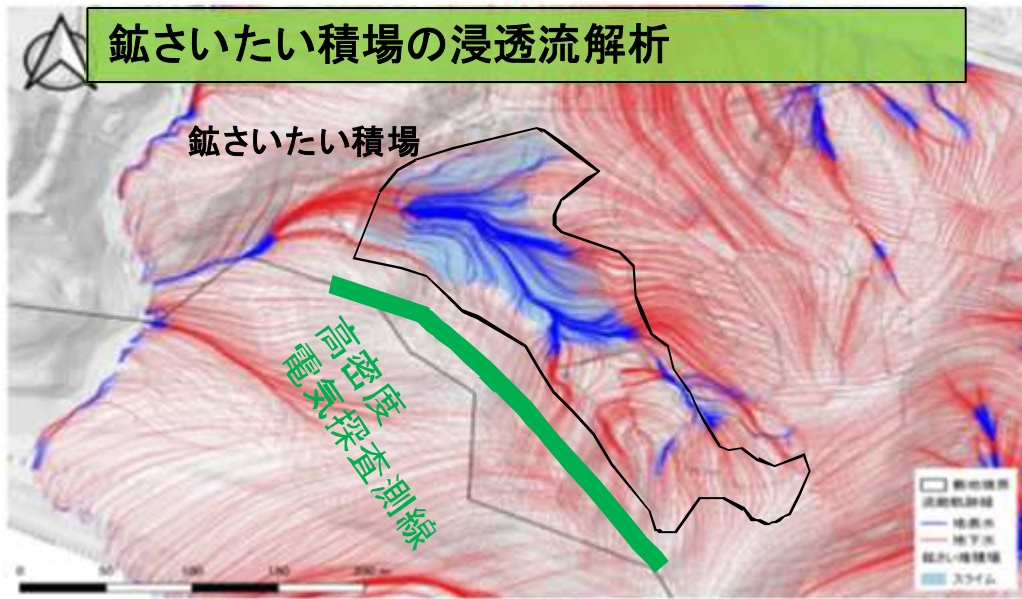
流量とFeがR1年10月末から減少傾向が継続していることから、湧出部の目詰まりも考えられる

【U】
ふとん籠横・下ともに 10^{-4} から 10^{-5} Bp/cm³に若干の減少傾向が認められる。

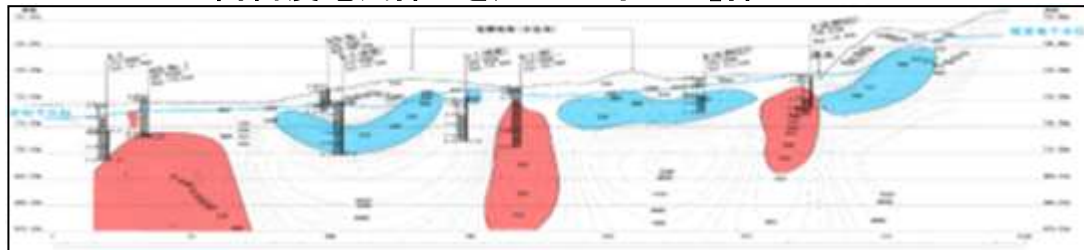
【Fe】
ふとん籠横はFe濃度が高い傾向にあったがR1年10月末頃から、ほぼ0mg/Lになった。

【流量】
ふとん籠横は約10L/minはあった水量がR1年10月末頃から、ほぼ0L/minになった。

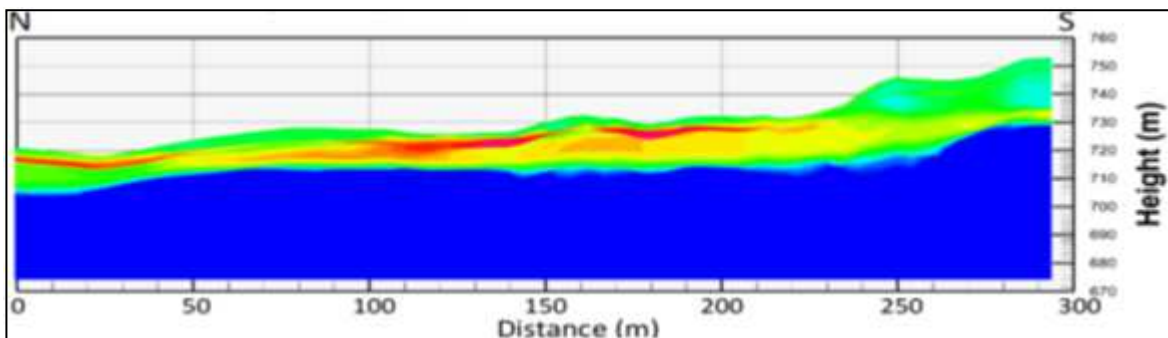
1. 鉱さいたい積場の地下水について



高密度電気探査を用いた「水みち」探査

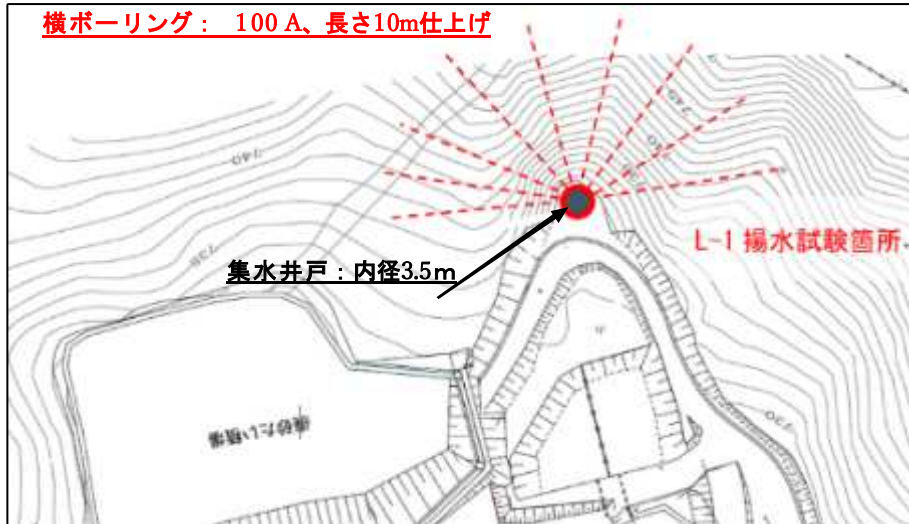


高密度電気探査(断面)

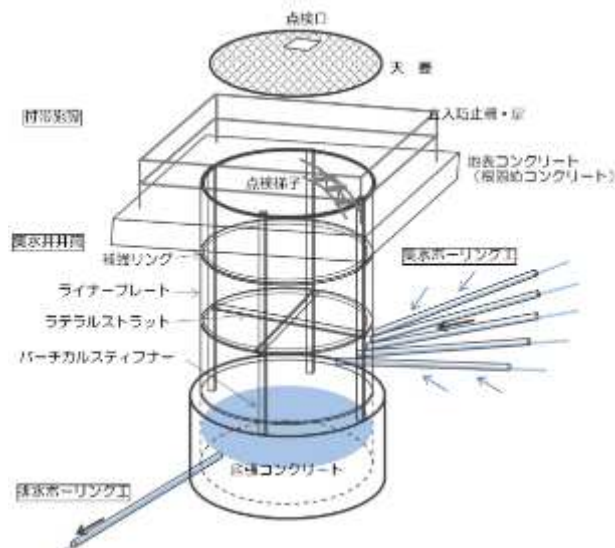


浸透流解析結果(断面)

鉱さいたい積場へ流入する地下水の排除の可能性



横ボーリング：100A、長さ10m仕上げ



揚水試験

- ・ 予定しているL-1集水井の仕様（ライニング管径、横ボーリングの径、長さ、配置）設計に必要な情報を得ることを目的として実施する
- ・ 揚水試験井戸の仕様；φ300mm掘削、150Aオールスクリーン仕上、深さ12.4m（強風化花崗岩（マサ）分布深度）



鉍さいたい積場の地下水問題のまとめ

【課題】

・ 鉍さいを廃砂たい積場のように覆土のみで封じ込めしても、地下水と接触することで、ラジウムを含む排水が発生する。今後、計画している鉍さいたい積場の安定化（固化・圧密）においても同様にラジウムを含む排水が発生する可能性がある。

【取組み】

・ 発生量（排水量）を質・量ともに減少させる対策工法の検討を継続する。

・ 環境への負荷をできる限り小さくすることを目標にする。

・ 人形峠の環境を的確に把握して持続可能な鉍さいたい積場の措置に取り組む。



3. 固結鉍さい試験で得られた試験結果

第20回鉍山跡措置技術委員会(2019年)

鉍さいたい積場については、固結工法を選択し、固結鉍さい試験結果を報告した。

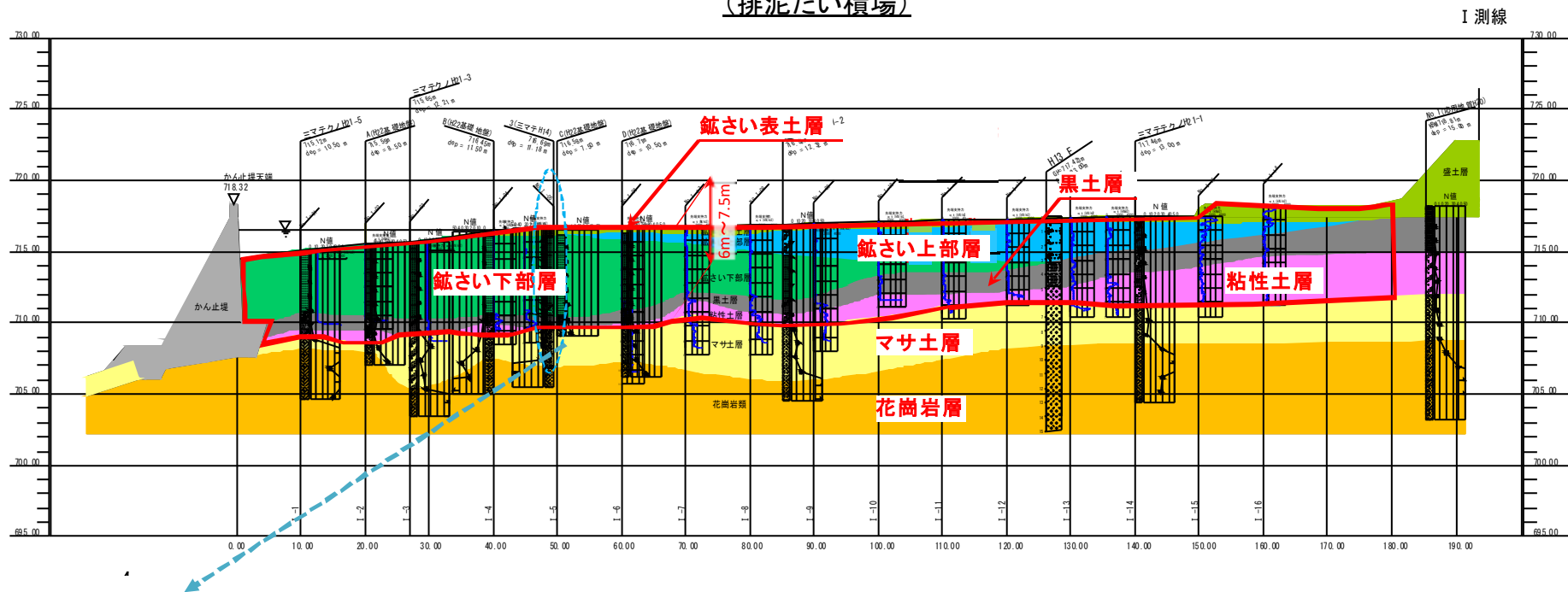
圧密工法と固結工法の比較

工法 比較項目	圧密工法 盛土荷重載荷工法併用 カードボードドレーン工法		固結工法 中層混合処理工法 (代表工法: パワーブレンダー工法)	
工事日数	42ヶ月	×	29ヶ月	○
工事費	1.2	△	1	○
施工時の推定 最大発生水量	523.5m ³ /日	×	102.4m ³ /日	○
施工時のRa 推定最大濃度	3.57 × 10 ⁻³ Bq/cm ³	×	2.41 × 10 ⁻³ Bq/cm ³	×
総合評価	×		○	
概念図				

3. 固結鈇さい試験で得られた試験結果

改良対象となる軟弱層は、鈇さい表土層、上部層、下部層、黒土層、粘性土層の5層となり、改良深度は約6m～7.5mとなる。(赤枠部)

夜次鈇さいたい積場地質縦断図
(排泥たい積場)



この部分からボーリングして均一化したものを対象に固結鈇さい試験を実施した。



3. 固結鈇さい試験で得られた試験結果

●これまで実施した固結鈇さい試験

➤ 固結鈇さいに必要な性能値

一軸圧縮強度(材齢28日)		Ra許容溶出量
目標室内配合強度	現場設計基準強度	
qul=900KN/m ²	quck=300KN/m ²	3.7 × 10 ⁻⁵ Bq/cm ³
深層混合処理工法・施工マニュアル 参考		環境基準協定値

➤ 固結鈇さい試験の配合条件

試験	試料	固 化 材				W/B	添加剤
		早強セメント(H)	普通セメント(N)	高炉セメントB種(BB)	NB46セメント(NB)		塩化バリウム
予備試験	鈇さい下部層	200・300kg/m ³ (200kg/m ³)	200・300kg/m ³ (300kg/m ³)	200・300kg/m ³ (300kg/m ³)	200・300kg/m ³ (200kg/m ³)	80%	・BaCl ₂ ・2H ₂ O 0・24.3・72.8 (g-BaCl ₂ /kg-鈇さい)
実用試験	鈇さい層・ 在来地盤層	-			200・300・400 kg/m ³	60%	・Ba成分量 0・13.5・40.5 (g-Ba/kg-鈇さい)

※()の値はRa溶出試験に用いる固化材配合量

3. 固結鉱さい試験で得られた試験結果

● 用いた固結材、添加剤の種類及び添加量

1. 固結材

固化材	添加量	特徴・選定理由
早強セメント	200kg/m ³ 300kg/m ³	C3S含有率を65%付近まで高、ブレン比表面積4000～4600cm ³ /gに微粉碎して、初期強さを高めたセメント。一般的に流通しているセメントのため選定。
普通セメント	200kg/m ³ 300kg/m ³	工事用として広く使用されているセメント。鉱物組成としてC3S51%、C2S25%、C3A9%、C4AF9%、CaSO44%が例示され、ブレン比表面積は3300cm ³ /g前後。一般的に流通しているセメントのため選定。
高炉セメントB種	200kg/m ³ 300kg/m ³	普通セメントに高炉スラグを45%程度配合したセメント。高炉スラグがセメントの水和反応で生成した水酸化カルシウムの刺激によって徐々に水和反応し、硬化体中の水酸化カルシウム量を減少させるとともに、緻密な硬化体組織を形成する。一般的に使用されるセメントであり、普通セメントより大きな強度を期待し選定。
高炉セメント (S:B=40:60)	200kg/m ³ 300kg/m ³	高炉セメントB種より高炉スラグの配合比率を高め、より緻密な硬化体組織の形成。しかし、強度発現は遅くなるが、長期強度は普通セメント、高炉B種セメントを上回る。また、高い溶出抑制効果を期待して選定。

2. 添加剤

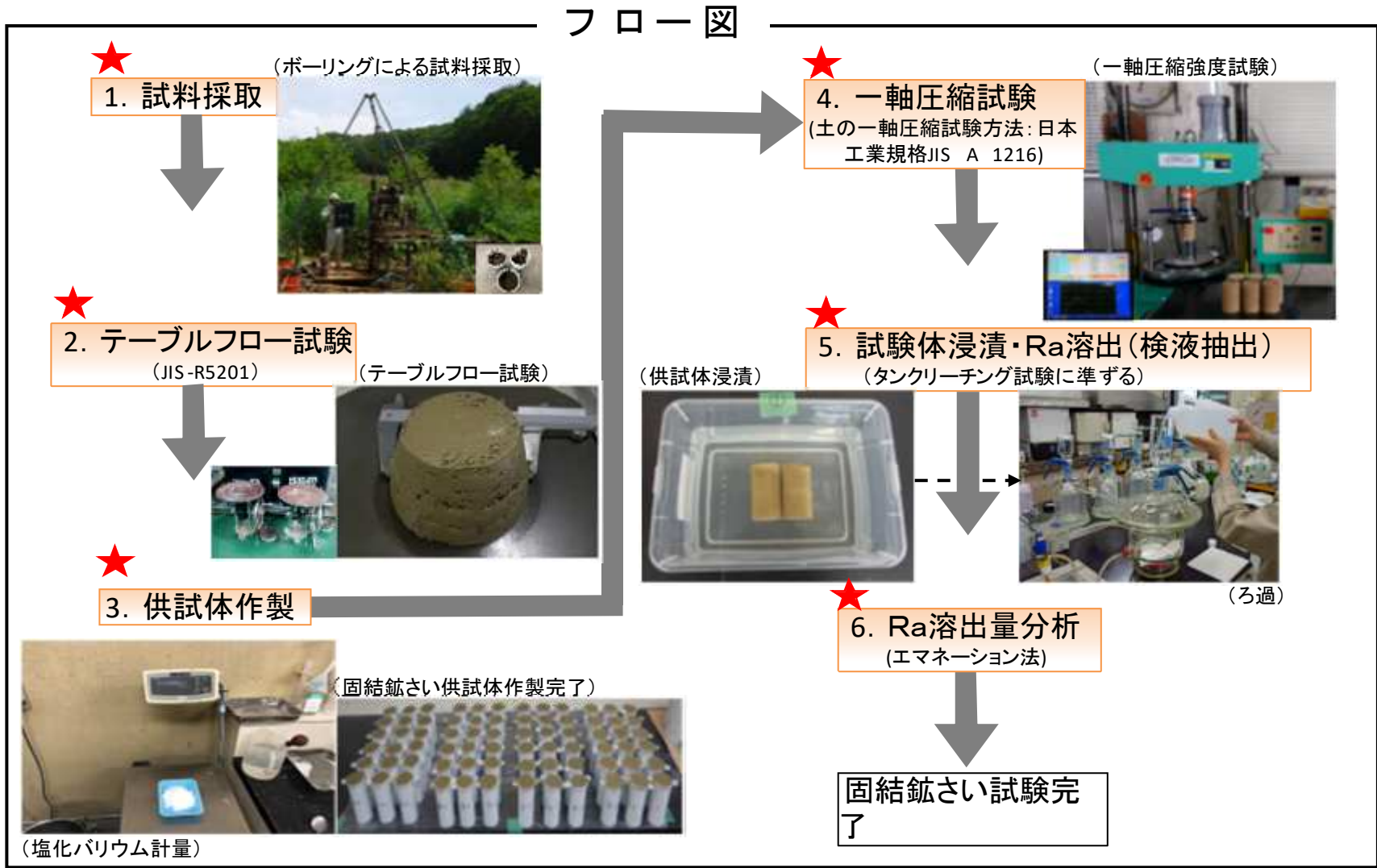
塩化バリウム (BaCl₂)

当センターの坑廃水処理場でラジウムを除去するため用いており、海外でも多くのウラン製錬所で採用され、実績をあげている。

塩化バリウムは廃水中に含まれる硫酸イオンと反応し、生成する硫酸バリウムが沈殿する際にラジウムを共沈することで知られている。

3. 固結鈷さい試験で得られた試験結果

➤ 固結鈷さい実用試験のフロー



※鈷山課では試験装置を所有しておらず、外注での対応となり、Raの分析に時間がかかることもあり、試験できるサンプル数が限られる。



3. 固結鈇さい試験で得られた試験結果

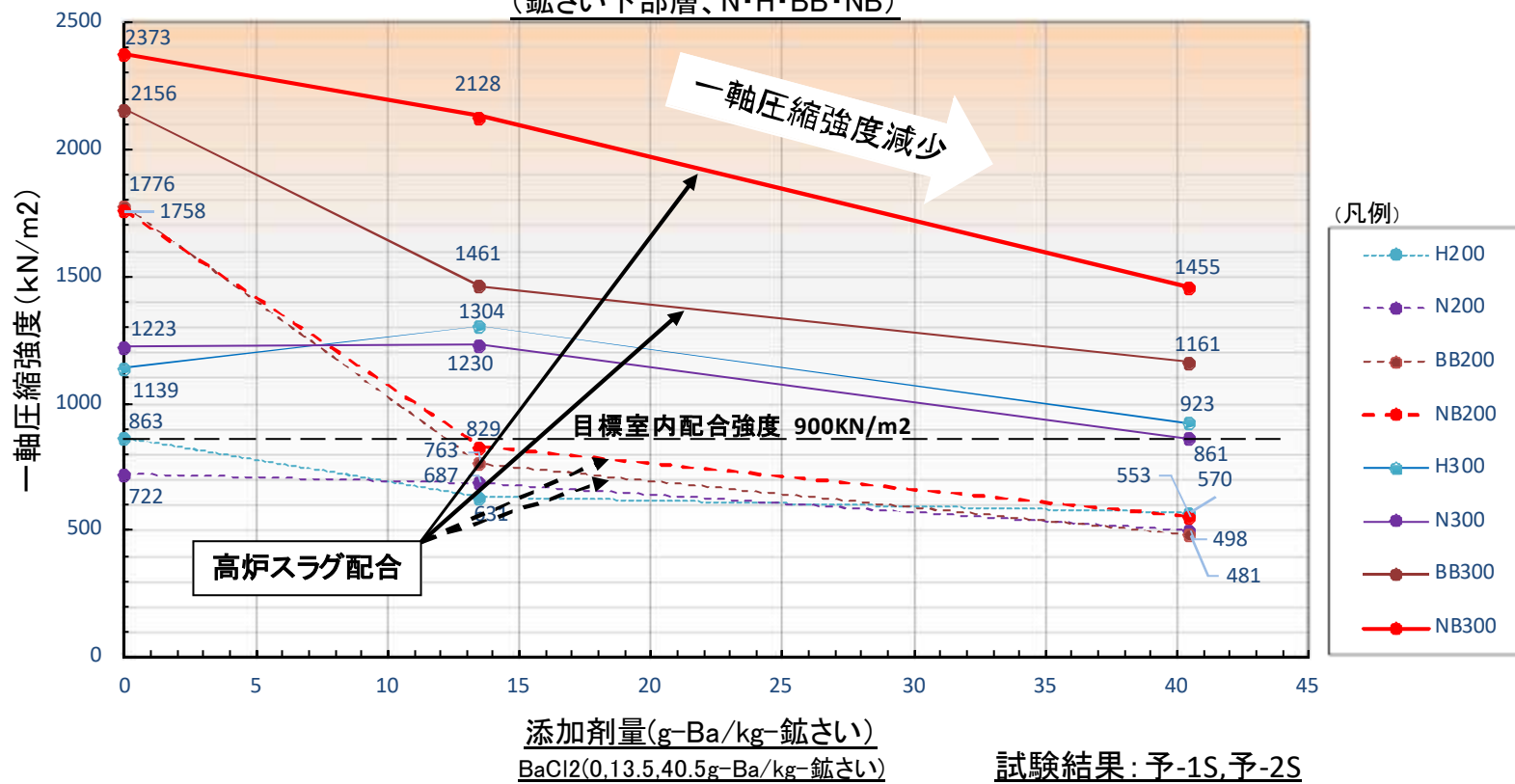
◆ 予備試験

➤ 一軸圧縮強度試験結果

BaCl₂を添加することで一軸圧縮強度が低下した。

添加剤量と一軸圧縮強度の関係

(鈇さい下部層、N・H・BB・NB)





3. 固結鉍さい試験で得られた試験結果

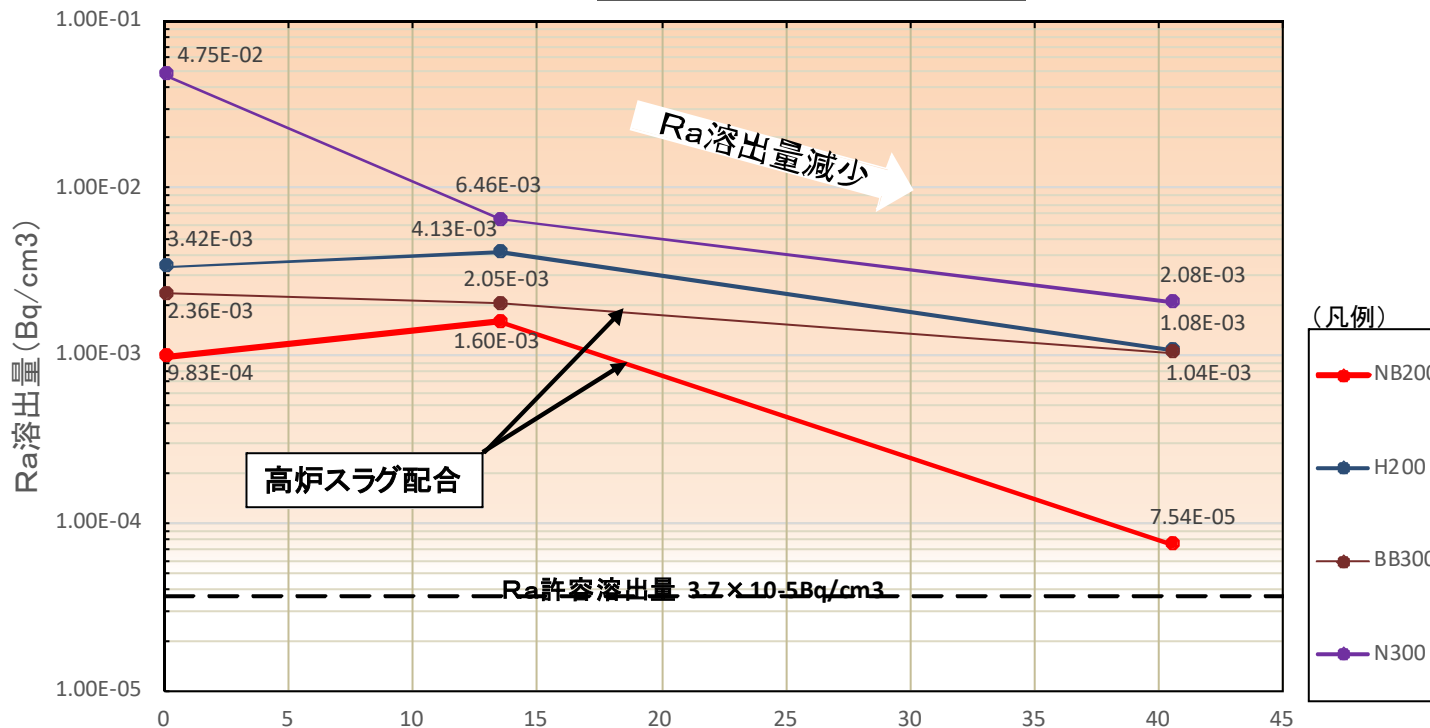
◆ 予備試験

➤ Ra溶出試験結果

BaCl₂を添加しても、目標とするRa許容溶出量には達していない。

添加剤量と溶出液のRa濃度の関係

(鉍さい下部層、N・H・BB・NB)



添加剤量(g-Ba/kg-鉍さい)
BaCl₂(0,13.5,40.5g-Ba/kg-鉍さい)

試験結果: 予-1R, 予-2R



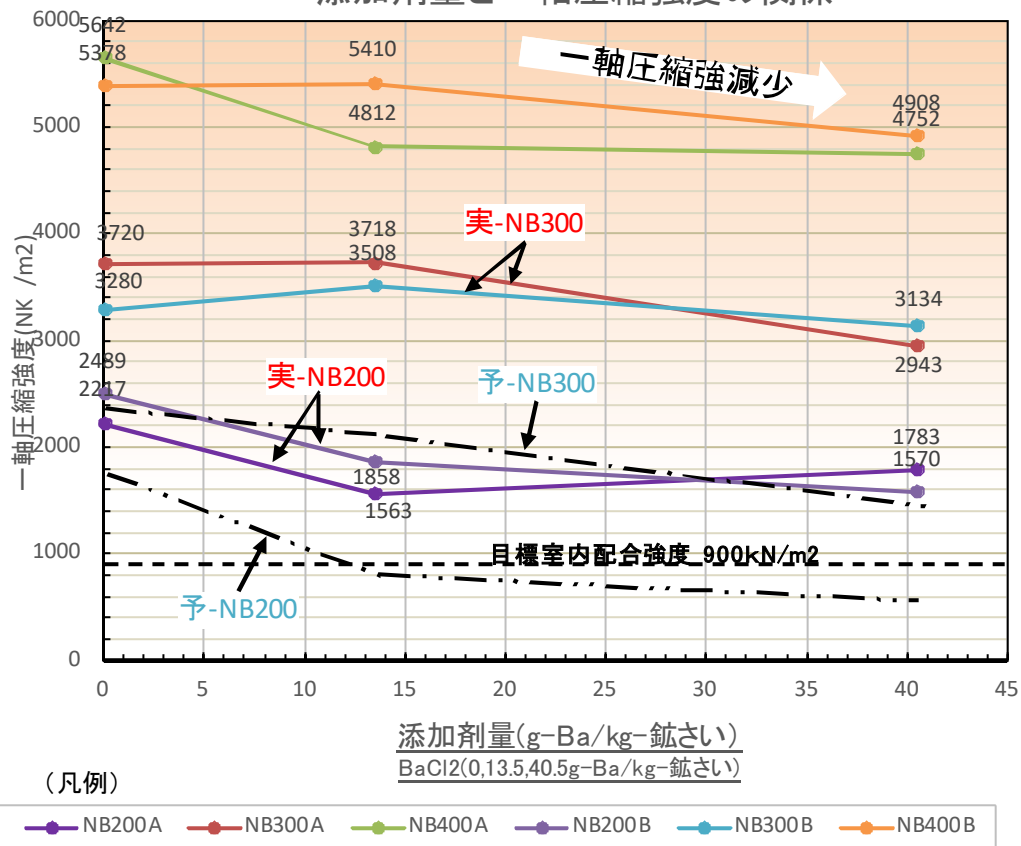
3. 固結鈷さい試験で得られた試験結果

◆ 実用試験

➤ 一軸圧縮強度試験結果

BaCl₂を添加することで一軸圧縮強度が低下した。

添加剤量と一軸圧縮強度の関係



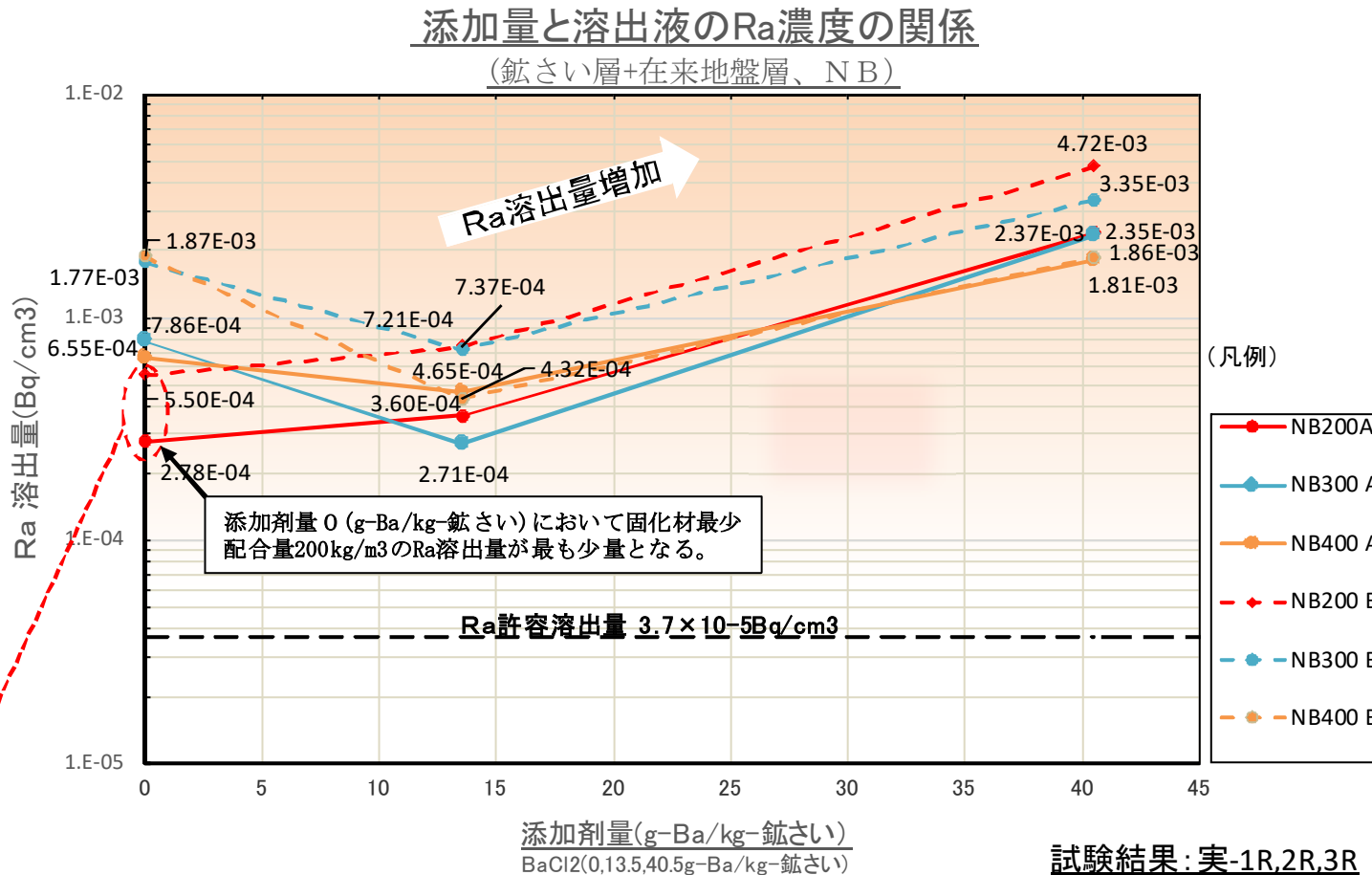
試験結果: 実-1S,2S,3S,4S

3. 固結鉍さい試験で得られた試験結果

◆ 実用試験

➤ Ra溶出試験結果

BaCl₂を添加すると、逆にRa許容溶出量が増加した。



BaCl₂を添加していない高炉セメント(NB)固化体については、鉍さいたい積場に埋設し、長期間経過後に一軸圧縮強度、針貫通試験、表面分析を実施している。一軸圧縮強度は増加しており、変質や膨張は確認されていない。



3. 固結鉍さい試験で得られた試験結果

➤ 過去の固結鉍さい試験についての意見

● BaCl₂添加の効果がなく、目標とするRa許容溶出量には達していない。

➡ Ra溶出量を抑制するような固化剤や添加剤を検討してはどうか。

➡ そもそも設定したRa許容溶出量は環境保全協定(放流水の基準)であるため、流入する地下水流量等を考慮してRa許容溶出量を設定すべきではないか。

➡ 鉍さい単体の溶出データがないので、固化剤で固化することで溶出をどれぐらい抑制しているのかわからない。

➡ 鉍さい自体が成分組成にバラツキがあり、1カ所の均一化サンプルを用いた固結試験でRaの溶出特性を判断できないのではないか？(今回のサンプルでは黒土層、粘土層の評価ができていない)

● 溶出試験について

➡ タンクリーチング試験は、施工後の品質管理等の際に確保した試料を、塊状のまま溶媒水中に水浸し、水中に溶出する六価クロムの濃度を測定するものである。

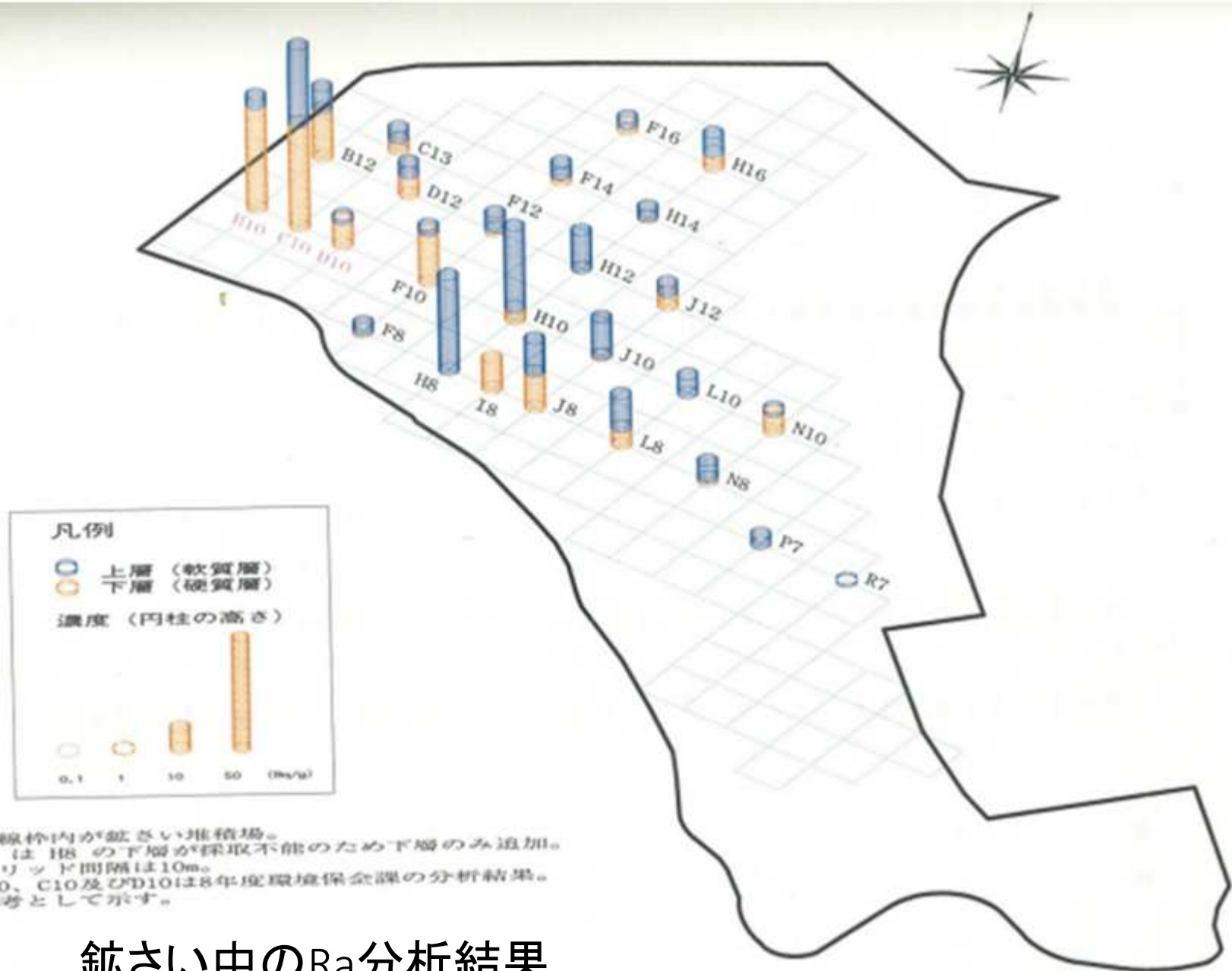
土壤の汚染に係る環境基準のための各成分に対する46号試験や溶出挙動を把握するためのシリアルバッチ溶出試験のデータも収集しておくべきだと考える。

● 固結鉍さいの膨張・亀裂について

➡ 鉍さい自体が成分組成にバラツキがあり、在来地盤層も含めて攪拌して固結しても成分的に不均一な部分が発生して、亀裂や膨張の原因にならないか心配である。

鉍さいたい積場の固結処理を実施するためには、固結鉍さい試験を実施してデータを収集する必要がある。

4. 過去の鉍さいの分析結果



鉍さい中のRa分析結果

4. 過去の鉍さいの分析結果

例としてF8、F10の外観を示す。
同じ場所でも上部と下部で性状が異なっている。



F8 上部



F10 上部



F8 下部



F10 下部



4. 過去の鉍さいの分析結果

場所によって組成が大きく異なっている。

全試料	含水比	密度	粒度試験				U	Th	Ra	Si	Al	Ca	Fe	K	Na	S	Mg	Mn	P	Ti	Ba	As
	%	g/cm ³	礫分	砂分	シルト分	粘土分	mg/kg	mg/kg	Bq/g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
平均	142.9	2.646	0.2	27.8	36.5	35.5	511	15.1	8.4	214568	44045	21686	35636	2212	589	9784	2751	865	1315	917	258.3	173.8
最大	672.9	2.942	4.0	92.1	65.2	65.8	1800	110.0	43.2	340000	98000	45000	140000	6000	2300	58000	5300	7700	3600	2500	1200.0	680.0
最小	19.8	2.374	0.0	1.0	5.2	0.1	66	2.4	0.2	10000	7000	770	11000	88	36	0	380	94	120	250	3.8	6.9
標準偏差	118.9	0.123	0.7	23.1	12.3	15.6	424	18.7	9.1	74254	22814	12904	22365	1357	403	12570	1287	1192	974	504	277.1	191.9
信頼区間(95.0%)	36.1	0.037	0.2	7.0	3.7	4.7	129	5.7	2.8	22575	6936	3923	6800	412	122	3822	391	362	296	153	84.2	58.3

上層	含水比	密度	粒度試験				U	Th	Ra	Si	Al	Ca	Fe	K	Na	S	Mg	Mn	P	Ti	Ba	As
	%	g/cm ³	礫分	砂分	シルト分	粘土分	mg/kg	mg/kg	Bq/g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
平均	179.8	2.684	0.3	28.0	36.2	35.5	639	18.2	10.5	205500	34455	25790	41091	1591	568	14827	2196	1123	1797	684	302.1	267.1
最大	672.9	2.942	4.0	92.1	62.0	65.8	1800	110.0	43.2	340000	68000	45000	140000	4000	1300	58000	4100	7700	3600	1300	1200.0	680.0
最小	19.8	2.374	0.0	1.0	5.2	0.1	100	2.4	1.5	10000	7000	770	11000	88	36	0	380	94	120	250	3.8	7.3
標準偏差	157.5	0.128	0.9	28.4	14.4	17.9	482	25.7	10.6	91224	14378	13784	29081	894	333	15073	928	1614	1060	295	296.2	216.6
信頼区間(95.0%)	69.8	0.057	0.4	12.6	6.4	7.9	214	11.4	4.7	40447	6375	6111	12894	397	148	6683	412	716	470	131	131.3	96.1

下層	含水比	密度	粒度試験				U	Th	Ra	Si	Al	Ca	Fe	K	Na	S	Mg	Mn	P	Ti	Ba	As
	%	g/cm ³	礫分	砂分	シルト分	粘土分	mg/kg	mg/kg	Bq/g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
平均	106.0	2.607	0.1	27.7	36.7	35.5	384	12.0	6.2	223636	53636	17582	30182	2832	611	4741	3305	607	833	1150	210.5	80.5
最大	208.5	2.752	1.1	64.9	65.2	59.1	1300	30.5	23.0	290000	98000	38000	65000	6000	2300	21000	5300	1600	2300	2500	1100.0	430.0
最小	54.4	2.405	0.0	3.5	20.6	13.3	66	6.0	0.2	30000	15000	1800	17000	900	180	0	820	170	270	390	38.0	6.9
標準偏差	35.5	0.106	0.3	17.0	10.1	13.4	320	5.9	6.9	52874	25812	10754	10778	1470	469	6562	1374	404	576	566	255.0	101.0
信頼区間(95.0%)	15.8	0.047	0.1	7.5	4.5	5.9	142	2.6	3.1	23443	11444	4768	4779	652	208	2910	609	179	256	251	113.1	44.8
定量下限値	-	-	-	-	-	-	1	0.1	0.05	500	10	10	10	10	10	1000	10	10	10	10	10	1



5. 今後の固結鉱さい試験について

R3年8月の組織改編で鉱山に関する分析が鉱山課の業務となった。
固結試験で使用できる分析装置や機器も鉱山課に移管することで、自社で固結試験を実施することができるようになった。



TG-DTA

(水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの定量)



EDS付き卓上SEM



マイクロカロリメーター

(水和熱、反応熱の測定)



蛍光X線分析装置



セメントミキサー



フロー試験機器



恒温振とう機



一軸圧縮強度
測定装置(手動)



X線回折装置

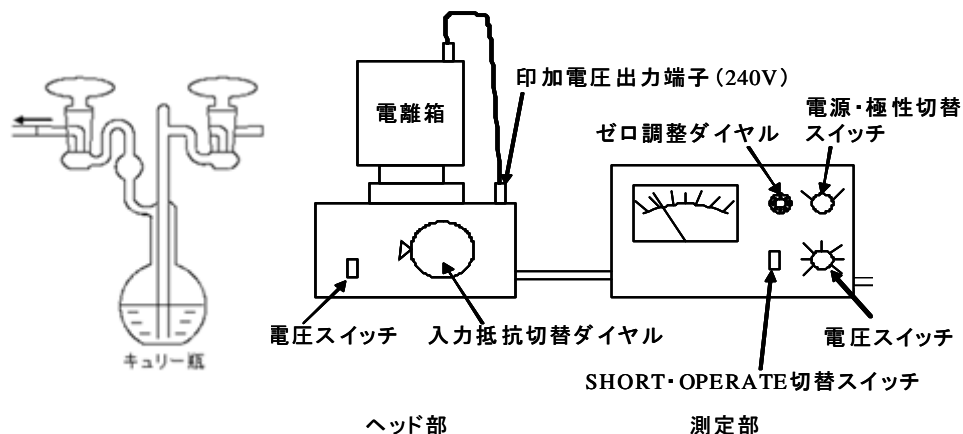
●参考

溶出試験を実施するうえで、Raの分析が大きなネックとなっているため、メーカーと共同でRaの迅速分析法を検討している。公募研究で(R4年度に購入予定)

【現在】

エマネーション法によるRa分析

- ① 鉍水を約5ℓ採取する。
- ② 加熱して濃縮する。(2日程度)
- ③ 薬品を加えてラジウムを沈殿させる。
- ④ 沈殿物をろ過・溶解して100mlにしてキュリー瓶に封入して放射平衡にする。(28日間放置)
- ⑥ キュリー瓶からガス成分を電離箱に移し替える。
- ⑦ 電位計でラドン測定して、ラジウム量を算出する。(最大1日3サンプル程度)



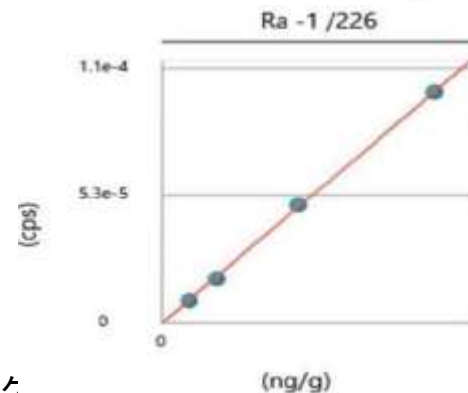
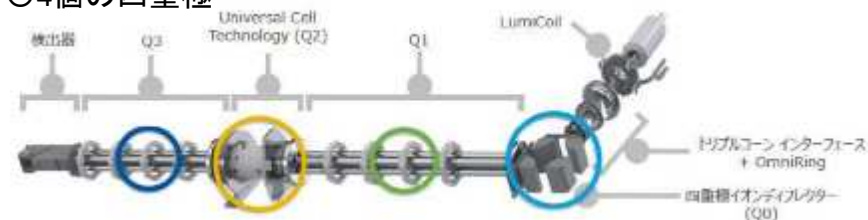
【検討中】

ICP-MSによるRa分析

(通常の四重極ICP-MSでは測定できない)

- ① 鉍水を数10ml採取する。
- ② 硝酸を加えてそのまま測定する。(1サンプル数分程度)

○4個の四重極



○脱溶媒器と高効率サイク
ンスプレーチャンパーを組み
合わせた試料導入システム

10⁻⁵Bq/mlオーダーで定量
できそうな見込みを得た。24



5. 今後の固結鉍さい試験について

(1) 固化剤による一軸圧縮強度、溶出特性データの整備

これまでの試験結果から、高炉スラグを添加したセメント固化剤が有効であると考えられるが、その他の土壌改良固化剤の基礎データを整備して固化剤を決定する。
(新たに石灰系固化剤、石膏系固化剤、酸化マグネシウム系固化剤等も検討する)

発生源対策の効果を考慮しても、Ra溶出の抑制が必要となる可能性もあるため、固化剤の試験結果を踏まえて、Ra溶出を抑制する固化剤、添加剤の検討も実施する。



(2) 性状・組成の異なる鉍さいの一軸圧縮強度、溶出特性データの整備

(3) 性状・組成の異なる鉍さいが混合された時の影響評価

(4) 従来地盤層(マサ土層、花崗岩層)が混合された時の影響評価

(5) 長期安定性評価

形状変化や化学形態の変化を確認する。

6. 鉱さいたい積場の固結処理について

実際に固結処理を実施するにあたっては、以下の考え方で取り組みたいと考えている。

● 群生しているヨシの対応

鉱さいたい積場にはヨシが群生しており、根部分にウランが集約していることが確認されている。

固結処理を実施するためには、以下の対応が考えられる。

ヨシ上部は刈り取って一般の草刈りと同様に処分する。

① 根部分を除去する。

➡ 洗浄や焼却が必要となる。焼却した場合高濃度の焼却灰となる可能性がある。

② 細断して鉱さいと一緒に固結する。

➡ 長期間経過すると空隙が発生し、強度が低下する可能性がある。

● 固結処理の施工

固結処理を一斉に実施した場合、鉱さいが攪拌されて有害物濃度が急激に変化したり、地下水の流れ、有害物濃度が急激に変化するおそれがある。

➡ 施工場所を絞って、小規模から段階的に実施して、影響を確認しながら進めたいと考えている。もし亀裂や膨張が発生しても小規模なら対応が可能である。

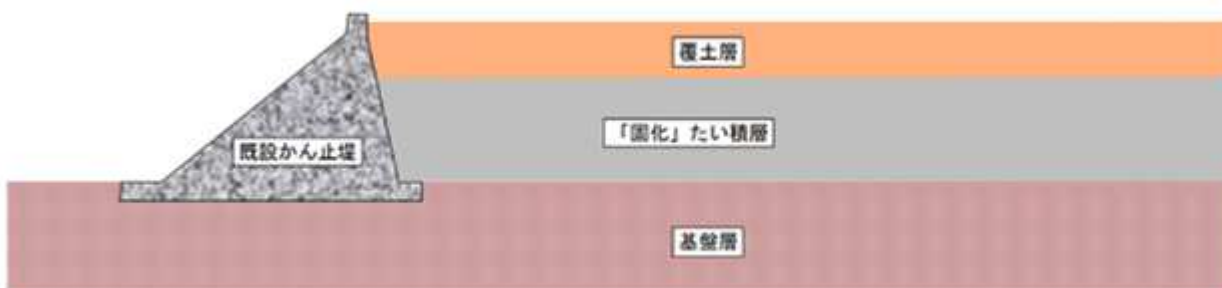
●かん止堤

固結処理ではかん止堤への圧力をどうするかという問題がある。

安定計算ではどちらの方法でも問題なかった。

かん止堤の将来的な老朽化、膨張・亀裂が発生した場合を考えると、かん止堤に圧力をかけない工法が良いと考えている。

(1)かん止堤に圧力をかける場合



(2)かん止堤に圧力をかけない場合

