

「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す

『廃炉地盤工学』 講演会資料

日時：2016年12月22日 14:00～17:30

場所：地盤工学会会館

主催

公益社団法人 地盤工学会

福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技術と人材育成に関する
検討委員会（略称：廃炉地盤工学委員会）

資料の内容

講演 PPT のプリントアウト

- ① 廃炉地盤工学設立の目的と概要 後藤 茂 早稲田大学
- ② 放射線遮蔽の基礎知識 吉村 貢 ソイルアンドロックエンジニアリング
- ③ 地盤環境学 鈴木誠 千葉工業大学
- ④ 地盤材料学(デブリ取出し関連) 小峯 秀雄 早稲田大学
- ⑤ 地盤材料学(処理・処分、デコミッションング関連) 渡邊 保貴 電力中央研究所
- ⑥ 地盤施工学 後藤 茂 早稲田大学

添付資料

「福島第一原子力発電所廃止処置における地盤工学的技術の活用—廃炉地盤工学創設の必要性」、2016年地盤工学会年次大会

「21世紀の原子力土木における「廃炉地盤工学」の構築と廃炉プロセスへの提言」、2016年土木学会年次大会

廃炉地盤工学設立の目的と概要

2016/12/22 廃炉地盤工学に関する講演会
 廃炉地盤工学委員会
 幹事長 後藤茂(早稲田大学)

周知の背景

福島第一原子力発電所事故
 2011年3月11日

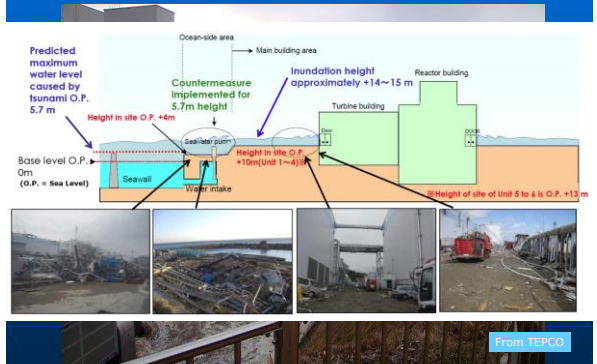


■ 2011年3月11日、東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所は、甚大な被害を受け、人類史上経験のない厳しい状況に陥り、当時よりも環境改善はなされているものの、今なお、厳しい状況は続いている。

2011年3月11日以前の福島第一原子力発電所



2011年3月11日、福島第一原子力発電所の状況



このシビアアクシデントの解決に向けて

- 被災した福島第一原子力発電所の廃止措置
 - 高放射線環境への対応
 - 汚染拡大の防止
 - 放射性物質で汚染されたエリアの修復
 - 廃止措置に伴い発生する廃棄物対策
- ▼
- 地盤工学的技術の貢献の場がある！！

地盤工学会の委員会設立と廃炉地盤工学

- 文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」に地盤工学会の提案が採択された(2015年度より5年間)。
- 「福島第一原子力発電所廃止措置に向けた地盤工学的新技术と人材育成に関する検討委員会;略称:廃炉地盤工学委員会」を組織して活動中。
- 原子力分野の技術者と協働できる新しい地盤工学技術者の育成プログラム「**廃炉地盤工学**」を構築する。

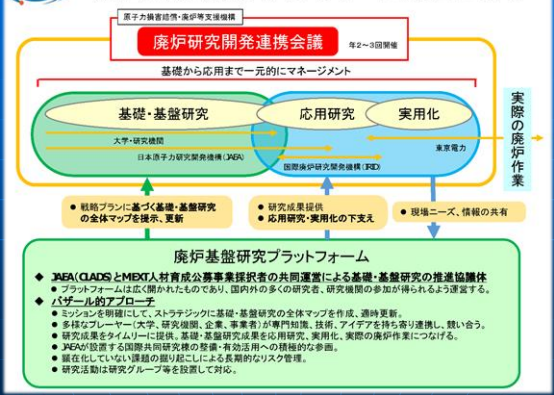
廃炉地盤工学委員会設立の経緯

- 文科省「英知を結集した原子力科学技術人材育成推進事業」40年かかるといわれている福島原発廃炉のために文科省が技術人材育成プログラムを公募。2015年度より5年間。
- 「地盤工学会の「地盤工学的技術活用」を主体にした提案が採択。
- 原子力分野の技術者と地盤工学分野の技術者が「廃炉地盤工学」を確立。

廃炉地盤工学創設の目的(1)

- 廃炉技術の明日を担う地盤関連技術者の教育内容を整備する。
- 廃炉に関連するプロセスや技術の要求性能（使われ方）を明確にすることにより、新技術を提案しやすくする。
- 廃炉に貢献する（既に貢献中の）地盤関連技術の位置付けを明確にすることにより、技術のアピールや相互関連をしやすくする。
- 検討した廃炉関連の地盤技術は廃炉基盤研究プラットフォーム等を通じて廃炉事業者や官庁への展開をおこなう。

廃炉基盤研究プラットフォームの位置付け



廃炉地盤工学創設の目的(2)

- 廃炉技術に関して原子力分野と地盤工学分野をつなぐ橋渡し。
- 地盤工学的技術が原子力(廃炉)分野へ入っていく入り口。
- 原子力(廃炉)関係者が地盤工学的技術を知る窓口。
- 原子力(廃炉)と地盤工学相互の見える化(何が必要か、何ができるか)が必要。

廃炉地盤工学創設の目的

- (事故) 原子力発電所の廃止過程において活用可能な地盤工学的技術を明確にする。
- 地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価(何ができるか)。
 - 作業空間改善のための空間放射線量の低減
 - 周辺環境の防護のための放射能汚染物質の拡散防止
 - 廃止処置に関連する他分野技術の活用容易化のための補助
- 廃止過程を時間軸で区分し、地盤工学的技術を位置付ける(何が必要か)。
 - 原子力発電所建屋周辺の汚染水・地下水環境の制御
 - デブリの取出し(補助)
 - 処理・処分・デコミッションング

廃炉地盤工学創設の目的

- (事故) 原子力発電所の廃止過程において活用可能な地盤工学的技術を明確にする。
- 地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価(何ができるか?)。
 - 作業空間改善のための空間放射線量の低減
 - 空間放射線量の低減(遮蔽)
 - 放射能汚染物質の拡散防止(遮水)
- 廃止過程を時間軸で区分し、地盤工学的技術を位置付ける(何が必要か)。
 - 他分野技術の活用容易化のための補助
 - の補助
 - 処理・処分・デコミッションング
- 地盤工学的技術を活かした廃炉シナリオの創設につなげる。

技術マップ (技術の顕在化)

	汚染水・地下水環境	デブリ取出し	デコミッション
地盤力学	汚染水・地下水環境 ・汚染水・地下水環境 ・地下水環境 ・汚染水・地下水環境	地盤力学 (構造物・地盤の安定性評価)	地盤力学 (構造物・地盤の安定性評価)
地盤環境学	原子力発電所周辺の時間的変化に対応した地下水・放射能汚染シミュレーション	地盤環境学 (地下水・地下空間の環境評価)	地盤環境学 (地下水・地下空間の環境評価)
地盤材料学	汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発 ・汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発 ・汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発	地盤材料学 (地盤系材料の評価、開発)	地盤材料学 (地盤系材料の評価、開発)
地盤施工学	地下水の流入を止める信頼性の高い止水壁の構築工法 ・地下水の流入を止める信頼性の高い止水壁の構築工法 ・地下水の流入を止める信頼性の高い止水壁の構築工法	地盤施工学 (地盤系施工技術のマネジメントと評価・改良)	地盤施工学 (地盤系施工技術のマネジメントと評価・改良)

技術マップ (rev.08)

原子力発電所に係る技術マップ (rev.08) - 1/3
廃炉地盤工学における技術マップ (rev.08) - 2/3
廃炉地盤工学における技術マップ (rev.08) - 3/3

	(A) 廃炉・廃止措置、廃炉後	(B) 廃炉プロセスの進展	(C) 廃炉・廃止措置プロセス
地盤力学	地盤力学 (構造物・地盤の安定性評価)	地盤力学 (構造物・地盤の安定性評価)	地盤力学 (構造物・地盤の安定性評価)
地盤環境学	地盤環境学 (地下水・地下空間の環境評価)	地盤環境学 (地下水・地下空間の環境評価)	地盤環境学 (地下水・地下空間の環境評価)
地盤材料学	地盤材料学 (地盤系材料の評価、開発)	地盤材料学 (地盤系材料の評価、開発)	地盤材料学 (地盤系材料の評価、開発)
地盤施工学	地盤施工学 (地盤系施工技術のマネジメントと評価・改良)	地盤施工学 (地盤系施工技術のマネジメントと評価・改良)	地盤施工学 (地盤系施工技術のマネジメントと評価・改良)

- ### 廃炉地盤工学創設の目的
- 廃炉に貢献する地盤工学的技術の立場をしっかりとしたものとする (技術の伝承、活用可能技術の拡大) ためには学問的な位置付けが必要。
 - 40年かかるといわれている事故原発の廃炉期間は学問の寿命としては長くない。(短期的なもので後継者が育つか・続くか?)
 - まず、学問的な流れを構築し、その活用場面の一つとして事故原発の廃炉を捉える。
 - 通常の廃炉 (事故原発以外の廃炉) を含むか否かは学問の流れの中で見えてくる。

我々の意味する連携とは、 原子力工学と地盤工学の連携 学問(文化)の連携である!

実は、地盤工学そのものが、学際的な分野である。
土木工学、建築学、農学、地質学、資源工学、地球化学、物理探査、粘土科学、化学、衛生工学、セメント化学・・・(順不同)

- ### 原子力工学と地盤工学の 協働・連携のために
- 原子力工学者が考える廃止措置の中長期ロードマップ、戦略プランの本質的な考えを、土木・地盤の専門家は読み解く努力を。
 - 建設・対策技術の専門家の立場から協働して、実施可能な技術の観点から、より現実的な技術提案とロードマップの策定、そしてそれらの実践を進めるべき。
 - 建設技術・対策技術の観点から積極的に廃止措置に係わり、具体的な技術提案のできる人材育成を。

End of Presentation

放射線遮蔽の基礎知識

平成28年12月22日

ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

吉村 貢

もくじ

1. 準備・・・放射線物理学の入り口
2. ガンマ線(γ 線)は電磁波
3. 捕捉できるのは熱中性子

放射線(放射能)の科学史

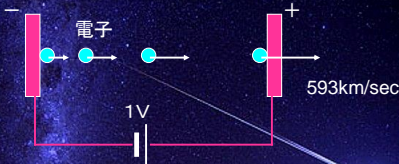
- 1895 ヴィルヘルム・レントゲンがX線を発見
この頃、真空放電や陰極線の研究がさかん。クルックス管に20kVを印加した時に蛍光線に暗線を認め、管から未知(X)のが放射されていることを発見
- 1896 アンリ・ベクレルが放射線と放射能を発見
物質に光を当てて、X線を放射しないか、を研究。X線ではない放射線を発見。その強度が物質の質量に比例することを確認⇒放射能の発見
- 1898 マリー・キュリーがポロニウム、ラジウムを発見
放射線の電離作用を観察しているときにトリウムを発見。さらにウラン鉱石中に別の元素=ポロニウム、ラジウム、を発見。これらの功績によってノーベル物理学賞を2回受けている。放射性線ばくによる再生不良性貧血により病死
- 1902 アーネスト・ラザフォードが原子核変換の仮説を提示
物質の根源である原子が変化するという、当時の常識では考えられない仮説を発表
- 1905 アーネスト・ラザフォードが α 線がヘリウム原子核であることを提唱
- 1911 同 が原子模型(構造)を提案
- 1942 核兵器開発のためのマンハッタン計画に着手
- 1945 広島、長崎に原子爆弾投下
- 2011 福島第一原子力発電所被災

放射線に関する用語

放射線	運動エネルギーを持って空間を移動する微小な粒子(素粒子)。波動の性質が強い(X線、 γ 線)もの、粒子の性質が強い(α 線、 β 線)ものがある。
放射能	放射性崩壊を起こして別の元素に変化する能力(性質)。放射性崩壊(壊変)には放射線の放出を伴う。
放射性同位元素	ある元素の中で放射能をもつ元素を表す。 Radio-Isotope ⇒ RI
放射性物質	放射性同位元素の物質、あるいはそれを含む物質。
線源	放射線を照射するための放射線発生装置。放射性同位元素を含む物質を容器に入れたものという。

単位①: 原子核物理のエネルギー ⇒ [eV]

eV : electron volt : 電子ボルト



電子を1Vの電圧で加速したときの
運動エネルギーが $1eV = 3.82 \times 10^{-20} \text{ cal}$.

単位②: 放射能, 放射線量

放射能の単位		
ベクレル	Bq	放射線を放出する物質(放射能)が毎秒1個壊変するとき、その放射能の量を1Bqと定義する。
放射線量の単位		1ジュール=0.239 cal.
シーベルト	Sv	人体への放射線の影響の大きさを示す単位。日本の法律では1cm線量当量、3mm線量当量、70 μ m線量当量が規定されている。線量当量の前の数値は人体の表面からの深さにおける影響を意味する。放射線として γ 線を対象とした場合、また特に「ことわりがない」場合には1cm線量当量。
グレイ	Gy	放射線によって1kgの物質に1ジュールの放射性エネルギーが吸収された時の吸収線量。 γ 線場合1cm線量当量のシーベルトに等しい。

放射線の種類(1)

放射線の種類(1)

α: +の電荷を持つ
β: -の電荷を持つ
γ: 電荷を持たない

質量: $\alpha > \beta > \gamma$
 $\gamma \div 0$

磁場
表から裏

放射性物質

遮蔽箱

ラザフォードの実験

7

放射線の種類(2)

種類	線名	実体	
粒子線	α線	ヘリウム原子核	+電荷
	β線	電子	-電荷
	中性子線	中性子	電荷なし
	陽子線	陽子	+電荷
	電子線	電子	-電荷
電磁波	γ線	光子	電荷なし
	特性X線	光子	電荷なし
	制動X線	光子	電荷なし

(注) 粒子線にはこれらの他、イオン線や重粒子線など

8

放射線の定義

広義の放射線:

- 高いエネルギーをもって運動する粒子と、高エネルギーの電磁波の総称。
- 物質との相互作用によって、相手を電離させるエネルギーの高いものを電離放射線という。
- 電離させることがないものを非電離放射線という。たとえば、電子レンジの加熱に用いられる電磁波(マイクロ波)や可視光線など。

狭義の放射線:

- 電離を引き起こす粒子線と電磁波をいう。つまり、電離放射線を単に放射線と呼ぶ。

9

放射線の透過力

放射線の透過力

アルミ板、厚さ数mm

紙1枚

鉛、厚さ10cm

水、数10cm以上

α線

β線

γ線

中性子線

10

原子の構成

- 原子は、原子核とその周囲を回る軌道電子から構成される。
- 原子核は、+の電荷を持つ陽子と、電気的に中性の中性子から構成される。この2つを併せて核子。
- 原子の質量 ≒ 原子核の質量

質量比
電子: 陽子: 中性子 = 1: 1836: 1839

軌道電子

原子核

ボーアの原子模型

11

原子は広大な空間を持つ

甲子園球場に例えると

原子核はソフトボール

軌道電子はマンチの頭

12

原子の隙間をなくしたら・・・



超新星爆発で生まれる
中性星のように軌道電子が
陽子に飲み込まれてすべての
核子が中性子になったら・・・
地球はリンゴの大きさになる。



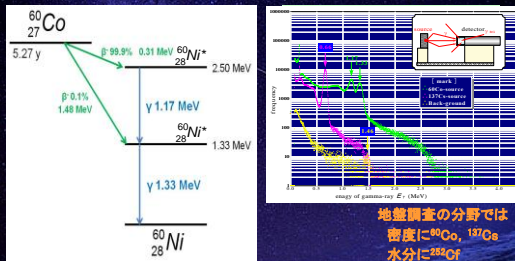
放射性同位元素(RI)とは

1 (1A)	2 (2A)	3 (3A)	4 (4A)	5 (5A)	6 (6A)	7 (7A)	8 (8)	9 (9)	10 (10)
1									
H 1.00794									
2									
Li 6.941	4 Be 9.012182								
31									
Na 22.989769	12 Mg 24.30509								
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
K 39.0983	Ca 40.078	Sc 44.9559124	Ti 47.88	V 50.9415	Cr 51.9961	Mn 54.938044	Fe 55.845	Co 58.9332	Ni 58.6934
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
Rb 85.4678	Sr 87.62	Y 88.90585	Zr 91.224	Nb 92.90638	Mo 95.94	Tc 98.90625	Ru 101.07	Rh 102.90550	Pd 106.42
55	56	57-58	72	73	74	75	76	77	78
Cs 132.9054519	Ba 137.327	La	Hf 178.49	Ta 180.94788	W 183.84	Re 186.207	Os 193.224	Ir 192.222	Pt 195.084

27
Co
58.9332
原子番号
元素記号
原子量

同位体: 化学的性質が同じで質量が異なる。
化学的性質: 陽子の数 質量: 陽子+中性子
Co (コバルト)・・・質量数が56, 57, 58, 59, 60が存在。

放射性同位元素・・・壊れる時に放射線を出す (Radio-Isotope)

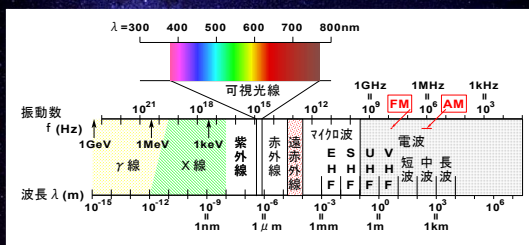


地盤調査の分野では
密度に⁶⁰Co, ¹³⁷Cs
水分に²²²Rn

もくじ

1. 準備・・・放射線物理学の入り口
2. ガンマ線(γ線)は電磁波
3. 捕捉できるのは熱中性子

電磁波の区分

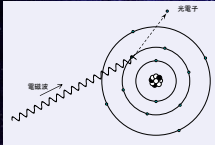


γ線と物質との相互作用: 3つの作用

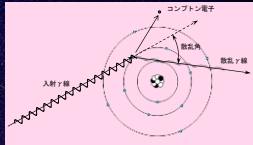
- ①光電効果
入射したγ線(γ線よりエネルギーが小さい電磁波の場合もある)が軌道電子と衝突し、自らはエネルギーを失って消え、電子は反跳して軌道外に飛び出してしまふ(光電子)相互作用。電子を1個はぎ取られた原子は電離(イオン化)する。
- ②コンプトン散乱
入射したγ線が軌道電子と衝突して、電子を跳ね飛ばし、自らはエネルギーを減じ、進行方向も変えられるというプロセス。飛び出した電子を「コンプトン電子」と呼んで、「光電子」と区別する。電子をはぎ取られた原子は電離状態となる。
- ③電子対生成
入射したγ線が原子核近傍のようなエネルギー場で、電子と、その反粒子である陽電子の対を生成するプロセス。アインシュタインの特殊相対理論に示された質量とエネルギーの等価原理により、電子対生成に必要なγ線のエネルギーは電子2個分の質量以上のエネルギー
($0.51\text{MeV} \times 2 = 1.02\text{MeV}$)。

相互作用の模式図

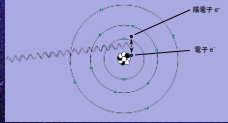
光電効果



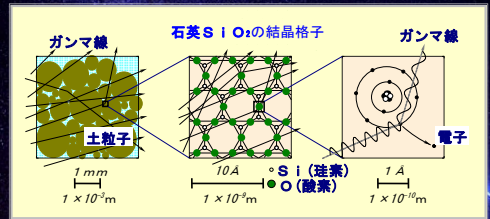
コンプトン散乱



電子対生成



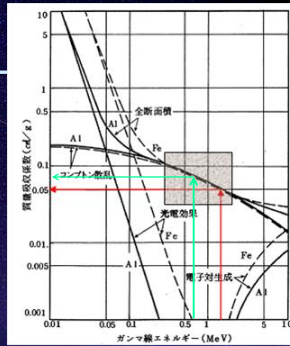
γ線(ガンマ線)の透過・散乱



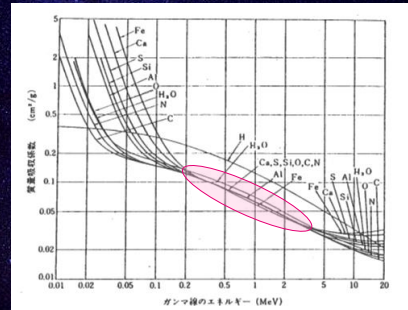
3つのモードは γ線のエネルギー に依存

密度計として利用している
線源のγエネルギーの範囲では
コンプトン散乱が支配的

赤線は⁶⁰Coのγ線
緑線は¹³⁷Csのγ線



地盤材料構成元素の質量吸収係数



γ線の遮蔽は電子との相互作用

高エネルギー領域のγ線がエネルギー・質量変換によって直接消滅する電子対生成を別にすれば、γ線の消滅過程は、

- ①コンプトン散乱によるエネルギー減衰
- ②光電効果によるγ線消滅、あるいは電子による光子吸収

である。①、②の過程は、どちらもγ線飛程における電子の空間存在度に依存する。

➡ 電子の空間存在度 ∝ 質量密度

γ線遮蔽は電子濃度に依存

電子の空間存在度 = 電子の濃度

∝
質量密度 = 湿潤密度

質量の空間存在度 (質量数 A) → 湿潤密度

陽子の空間存在度 (原子番号 Z)

+ 中性子の空間存在度

↓ Z = 電子の数

軽い元素は
同数

軌道電子の空間存在度

↑ 関連付け
パラメータ
Z/A

各種元素のZ/A ≈ 0.5 が密度計として重要

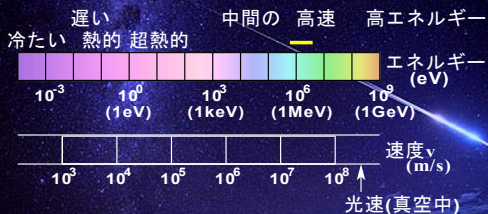
元素	原子番号 Z	質量数 A	Z/A	地球表面(地殻) 存在量 Mass (ppm)
H	1	1.008	0.9921	1400
C	6	12.010	0.4996	200
N	7	14.010	0.4996	20
O	8	16.000	0.5000	466000
Al	13	26.980	0.4818	81300
Si	14	28.090	0.4984	277200
S	16	32.070	0.4989	260
Ca	20	40.080	0.4990	36300
Fe	26	55.850	0.4655	50000
H ₂ O	(1 × 2 + 8) = 10	18.016	0.5551	-
				912680
Ba	56	137.3	0.4079	

もくじ

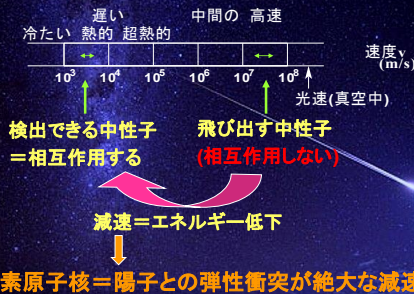
1. 準備・・・放射線物理学の入り口
2. ガンマ線(γ線)は電磁波
3. 捕捉できるのは熱中性子

中性子線： 粒子線 (実体は中性子)

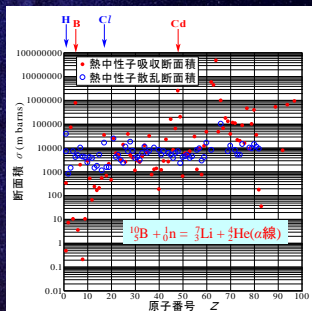
中性子線は核分裂反応でしか放射されない



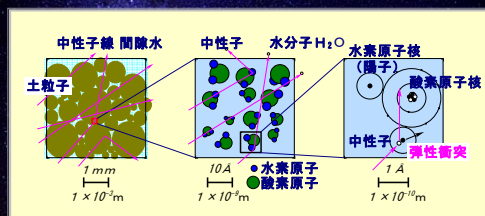
飛び出す中性子は高速



熱中性子の吸収・散乱断面積

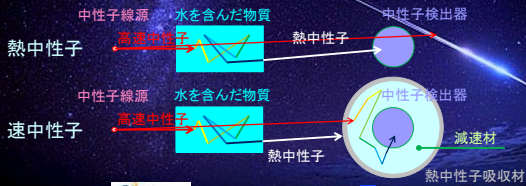


中性子線の透過・散乱

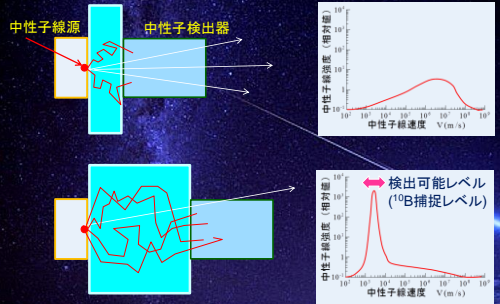


中性子線の計測方法

- 電荷を持たない中性子は他の物質とほとんど相互作用(反応)しない。
- 熱中性子のレベルまでエネルギーを減じたら他の原子核と相互作用する。
➡ 熱中性子だけが計測できる。



中性子は十分に減速しないと検出不能



ご清聴ありがとうございました

放射線の生体への影響: step1=電離

放射線の定義:

進行途中の物質と相互作用して電離作用を生じる高エネルギーの粒子線、あるいは電磁波。

- α線**: +2の荷電粒子。電離作用は大きい飛程が小さく(1mm程度)。紙一枚で遮蔽可能。内部被ばくが問題。
- β線**: -1の荷電粒子。エネルギーによって飛程は1~10mm。皮膚表面の損傷(火傷)や内部被ばくが問題。
- γ線**: 電荷を持たない電磁波。飛程が大きい。コンプトン散乱で軌道電子を1個飛ばされた原子はイオン化(電離)する。
- 中性子線**: 電荷なしの粒子線。原子核に作用して電離、あるいは原子の離脱を発生。人体の70%(質量)は水。中性子は水を構成する水素原子の核との衝突断面が大きい。

表1 放射線荷重係数

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線荷重係数 W_R
光子(X線・γ線): 全てのエネルギー	1
電子(β線)およびミュー粒子: 全てのエネルギー	1
中性子: 10keV以下	5
10keV~100keV	10
100keV~2MeV	20
2MeV~20MeV	10
20MeV以上	5
反跳陽子以外の陽子: エネルギー 2MeV以上	5
アルファ粒子(α線)	20
核分裂片	20
重原子核	20

[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60, 国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

放射線の生体への影響: step2=DNA損傷

- ・地球上の生命は長い進化の間、地球地殻や宇宙などの環境からの放射線を受け続け、DNAに化学的な構造変化(損傷)が高い頻度で生じている。生命は進化の過程で、DNA損傷を効率よく修復する機構を備えている。

しかし、

- ・DNAの二重らせんの鎖を一度に2本とも断ち切られたり、局所的にクラスター化して複数の損傷が生じるケースでは、修復酵素が損傷部位に結合できない。損傷を抱えたまま細胞分裂が進むと癌化など、生体の存続に支障が出たり、遺伝形質に異常が発生したりすることになる。

DNAの損傷

高LETの中性子線
 飛程途中で原子の励起や電離を発生させ、DNAの2本鎖をクラスター破断させる。修復は難しく、異常DNAが細胞内に残る。

低LETのガンマ線
 DNAの1本鎖を破断させる。修復は比較的容易だが、修復できずに、異常DNAが細胞内に残るケースもある。

LET: 放射線の飛跡に沿って単位長さあたりに局所的に与えられるエネルギー量, Linear Energy Transfer

37

同位体

質量数: A
 元素記号
 原子番号: Z

1
H
1.00794

水素

 ${}^1_1\text{H}$

**重水素
デュテリウム**

 ${}^2_1\text{H} \equiv {}^2_1\text{D}$

**三重水素
トリテウム**

 ${}^3_1\text{H} \equiv {}^3_1\text{T}$

水素には3つの同位体がある。原子量が1.00794と端数を持つのは同位体が存在するため

38

「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技術開発と人材育成プログラム」

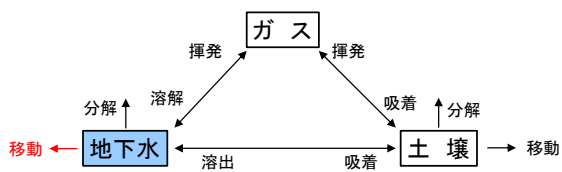
地盤環境学

鈴木 誠 (千葉工業大学)

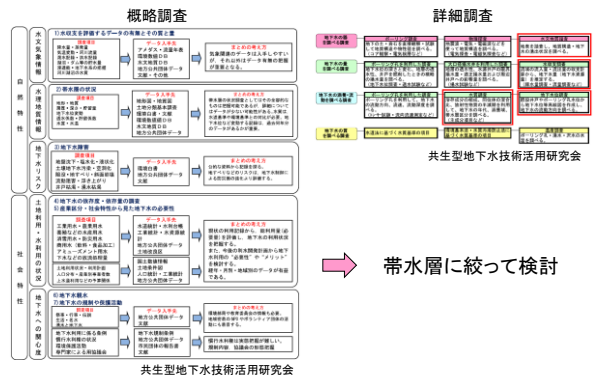
地盤環境学

- 福島第一原子力発電所の事故に伴い、
 - 放射性物質が周辺に飛散
 - 格納容器から漏れ出した放射性物質が施設内に滞留
 - 降雨や地下水流動に伴って、放射性物質が移動
- ↓
- 作業環境の暴露リスク
 - 域外への拡散リスク
-
- 処分・デコミッションング
 - 放射性廃棄物処分における放射性物質の暴露リスク

土壌地下水中の物質の動態



地下水調査法



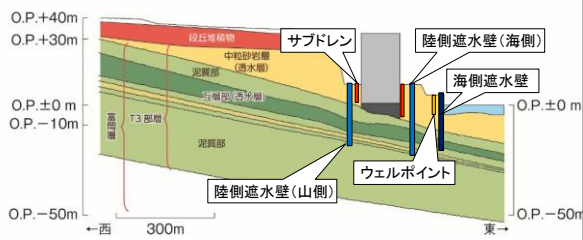
最終的な目的

- サイト周辺の地下水環境の現況・将来予測 (天気予報のように)
 - 地下水・放射性物質の移行調査技術と流動解析技術による広域な現況評価と将来予測
 - ⇒ 不確実性の高い水理モデルの構築への対応 (透水係数、分散係数、流速、境界条件などの設定方法)
 - ⇒ 広域からサイト周辺への水理モデルの接続 (ネスティング)
 - ⇒ 観測データとのマッチング (データ同化技術)
 - ⇒ 核種移行考慮の可能性 (長期解析)
 - 多重バリアを含む高信頼性の地下水流遮断技術の提案
 - ⇒ 遮水壁の水理特性の把握
- 処分・デコミッションング
 - 放射性廃棄物処分での地下水・放射性物質の移行予測への展開

サイト周辺の地下水状況予測



概略断面図



平成28年度実施内容(中間)

① 室内土層実験による実流速の測定精度の検証

浸透模型水槽(土層実験水槽)を用い、地下水の流向流速計の計測精度を検証するとともに、色素トレーサー試験を実施し、実流速の推算方法を検討

② 実験井戸による現場試験

ボーリング孔2本を現場に設置し、流向流速計で測定するとともに、単孔式透水試験、孔間透水試験、土質試料の粒度分析も実施した。これら複数の試験から地盤の透水係数と地下水流速の整合性を検証し、単孔式透水試験をシミュレーションすることにより、解析精度も検証した。

③ 透流解析・物質移行解析のための環境整備の構築

広域の概略地下水流動解析を実施するため、北は請戸川、南は熊川、西は双葉断層で区切られた範囲の地盤モデルの作成した。

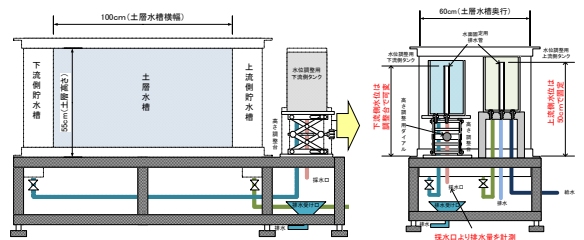
① 室内土層実験による実流速の測定精度の検証

- 放射性汚染物質は地下水流により移動・拡散する?
- 地下水流速とは何か?
- 核種汚染濃度と経過時間の関係は?

放射性汚染物質の移流分散を精度よく予測する。



～実験装置の概要～



<動水勾配の与え方>

- 土層水槽の動水勾配は、両側貯水槽の水面高さの差と100cmで固定されている土層水槽の横幅より求めることができる。
- 土層水槽の両側の貯水槽の水位は、貯水部と連結した水位調整用タンク中央に配置した排水管の高さと同じであり、上流側のタンクの水位(上流側貯水槽)は水槽高さ50cmで固定されているため、下流側のタンク下の高さ調整台のダイヤルを回転することで水位差を作ることができる。
- 水位差は、両貯水槽の水面をスケールで計測することで求める。

～地下水流速とは?～

- ダルシー流速 v : 全断面が流通可能と仮定した時の見かけの流速



$$v = Q / A$$

A : 土と間隙の両方を合わせた面積

- 実流速 v' : 有効間隙のみが流通可能の時の流速



$$v' / v = n_e$$

n_e : 有効間隙率

～間隙率 n と有効間隙率 n_e ～

間隙率 n : 土の全体積に対する間隙体積の比

有効間隙率 n_e : 間隙のうち水が動ける部分のみを有効とした間隙率

～ダルシーの法則と透水係数～

- 単位時間当たりの流量 Q

$$Q = kiA$$

A : 浸透断面積, k : 透水係数, 動水勾配 i

$$i = \Delta h / L \quad \Delta h: \text{水頭差}, L: \text{試料長さ}$$

現場では、**流速流向計**



測定精度

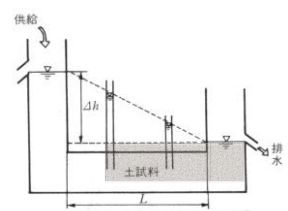
- 見かけの流速 v

$$v = \frac{Q}{A} = ki = k \left(-\frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

- 真の流速(実流速) v'

$$v' = \frac{Q}{A_e} = \frac{kiA}{A_e} = \frac{ki}{n}$$

n : 間隙率



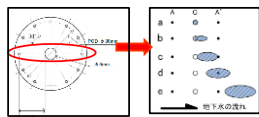
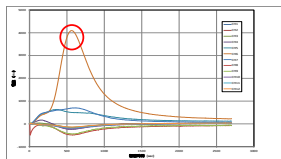
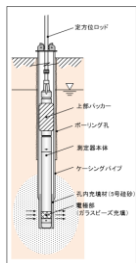
～流向流速計～

測定原理

- トレーサーとして蒸留水を用いて電気抵抗値の変化で流速 v_2 を評価する
- 流速の解析式

$$v_2 = (L/2)/(t_1 - t_0) \times \beta$$

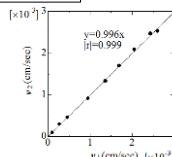
- L:電極間の長さ(cm)
- t_0 :測定開始時間(sec)
- t_1 :ピーク時間(sec)
- β :透水係数による係数(一般値は0.2)



～流向流速計の測定結果～

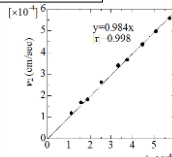
珪砂5号(間隙率:0.40)

水位差(cm)	v_1 (cm/sec)	v_2 (cm/sec)
0.19	1.02×10^{-4}	9.67×10^{-5}
0.46	2.72×10^{-4}	3.02×10^{-4}
0.6	4.58×10^{-4}	4.61×10^{-4}
1.22	9.50×10^{-4}	9.13×10^{-4}
1.69	1.36×10^{-3}	1.33×10^{-3}
2.09	1.69×10^{-3}	1.70×10^{-3}
2.5	2.05×10^{-3}	2.08×10^{-3}
2.93	2.43×10^{-3}	2.46×10^{-3}
3.11	2.60×10^{-3}	2.53×10^{-3}



ガラスビーズ(間隙率:0.38)

水位差(cm)	v_1 (cm/sec)	v_2 (cm/sec)
1.22	1.12×10^{-4}	1.18×10^{-4}
1.74	1.56×10^{-4}	1.68×10^{-4}
2	1.81×10^{-4}	1.82×10^{-4}
2.69	2.51×10^{-4}	2.61×10^{-4}
3.57	3.38×10^{-4}	3.39×10^{-4}
4.15	3.84×10^{-4}	3.65×10^{-4}
4.8	4.50×10^{-4}	4.36×10^{-4}
5.41	5.12×10^{-4}	4.97×10^{-4}
5.79	5.73×10^{-4}	5.57×10^{-4}



⇒ 精度がいいのは 1.0×10^{-4} cm/sec以上

～トレーサー試験の測定結果～

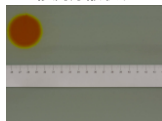
ガラスビーズ(間隙率0.38)の結果

水位差(cm)	ダルシー流速(cm/s)	実流速	有効間隙率
5.58	3.530E-04	8.310E-04	4.248E-01
5.06	3.511E-04	7.777E-04	4.515E-01
4.46	3.082E-04	6.953E-04	4.432E-01
3.73	2.597E-04	6.262E-04	4.147E-01
3.47	2.340E-04	5.718E-04	4.093E-01
2.93	1.908E-04	4.352E-04	4.384E-01
2.08	1.359E-04	3.380E-04	4.022E-01
1.74	1.004E-04	2.639E-04	3.803E-01
		平均	4.206E-01

ウラン溶液(濃度1%)



移流分散状況



～有効間隙率～

単位: %					
地層	間隙率	有効間隙率	地層	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

土木学会編:水理公式集, 1974.

ガラスビーズに色素トレーサー:間隙率38%

⇕ ???
有効間隙率42%

～まとめ～

- 流向流速計で、珪砂5号、ガラスビーズ共に精度よく流速の測定ができたが、水位差が小さく流速が遅い(10^{-4} cm/sec以下)部分では精度よく測定できなかった
- ⇒ 流向流速計の機構上、流速が遅くなったことで**拡散の影響**を強く受けるようになったため
- 同程度の水位差、間隙率でも流速に差があった
- ⇒ 間隙率は同程度だが、流れる流量に差があることから、**粘性抵抗**や**屈曲率**に関係している
- 実験水槽で、色素トレーサー試験を実施し、**間隙率と有効間隙率の関係**を確認したら、**間隙率<有効間隙率?**
- ⇒ ガラス面近くの流速が早い可能性があるため、**再検討要**

② 実験井戸による現場試験

- 地下水層の把握:
どこに地下水が卓越して流れるかの選定(コア、電気検層)
 - 流向流速測定:
地下水の方向、流速を把握
(流向流速計の測定)
 - 透水係数の推定:
 - ✓ 土の粒度分布からの推定
 - ✓ 単孔式透水試験
 - ✓ 孔間透水試験
- } 整合性の検討

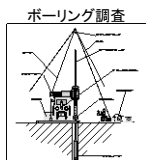
～現場状況～



試験地点



電気検層



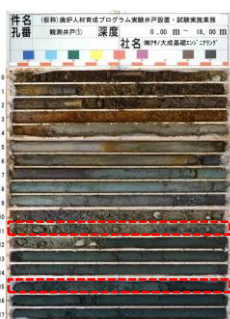
ボーリング調査



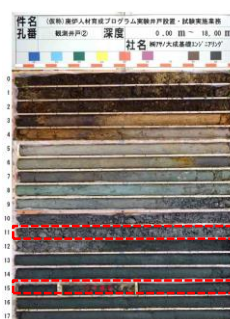
単孔透水試験

～ボーリングのコア写真～

観測井戸①

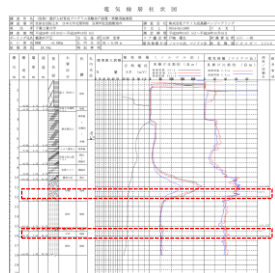


観測井戸②

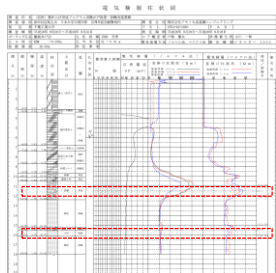


～土質柱状図と電気検層～

観測井戸①



観測井戸②



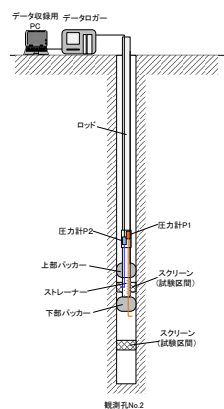
ストレーナー位置
対象透水層 GL-11～12m
GL-15～16m

～試験孔の仕様～

- 塩化ビニル管で孔壁保護
- 試験区間にスクリーン

長期間使用可能

- 試験に合わせて、
- 圧力計(透水試験)
 - 流向流速計

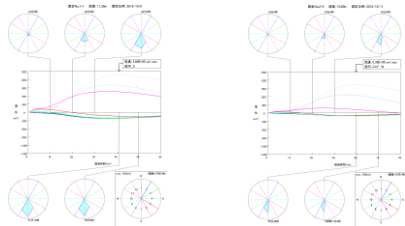


～流向流速計の測定結果～

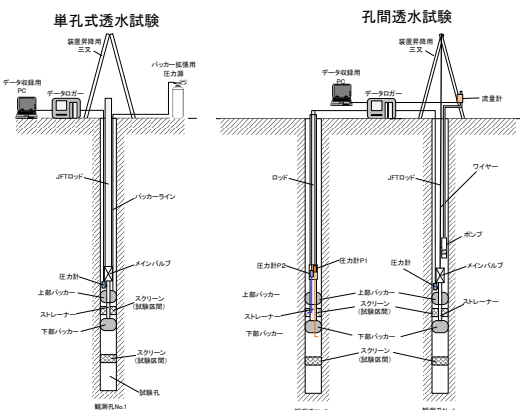
測定No.	深度(m)	日時	流速(cm/sec)	流向
1-1	11.3	2016/10/8	4.86×10^{-5}	S
1-2	11.7	2016/10/8	3.61×10^{-5}	S
2-1	15.3	2016/10/10	2.37×10^{-5}	S
2-2	15.8	2016/10/11	3.35×10^{-5}	S15° W

上部透水層
下部透水層

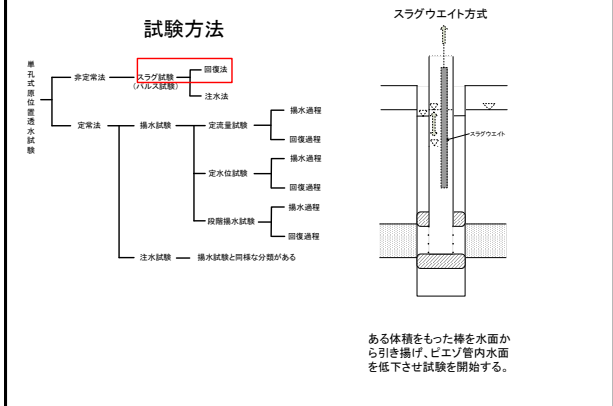
測定結果の一例



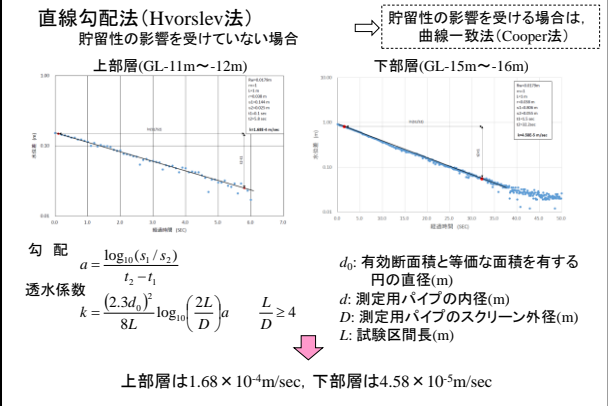
～現場透水試験～



～今回の単孔式透水試験～



～単孔式透水試験の結果～



～孔間透水試験の結果～

定常法 (定流量試験)

試験深度	試験孔	試験区間	揚水量平均 L/min	揚水過程 (Jacob)		回復過程 (Agarwell)	
				Shut-in水位 cm	透水係数T m ² /sec	貯留係数S	透水係数S m ² /sec
15m ~ 16m	観測孔No.1	揚水	3.15	41	2.54×10^{-4}	6.29×10^{-6}	2.78×10^{-4}
	観測孔No.2	観測	3.6		1.52×10^{-3}	8.04×10^{-5}	1.83×10^{-3}
11m ~ 12m	観測孔No.1	揚水	14.15	23	2.00×10^{-3}	2.08×10^{-7}	2.96×10^{-3}
	観測孔No.2	観測	6.2		3.80×10^{-3}	8.14×10^{-7}	3.84×10^{-3}

スリット幅1mから、透水係数は、
上部層は 2.00×10^{-3} m/sec, 下部層は 1.52×10^{-3} m/sec

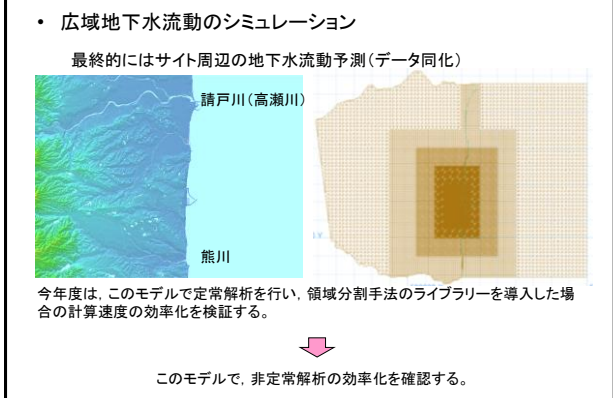
単孔式透水試験は、透水性が高いために試験装置のパルプ等での圧力損失抵抗を受けているため、回復過程の後半より透水量係数を求めた。
 単孔式透水試験 (スラッグ試験) から透水係数は、
 上部層は 1.68×10^{-4} m/sec, 下部層は 4.58×10^{-5} m/sec

孔間透水試験では、長時間揚水を行うことで、近傍から遠方までの透水性が得られる。また、上下部層は単孔式透水試験より透水性が高いことが判明した。

～現場試験の課題～

- ① 地盤調査技術の確からしさを室内と現場の環境を用いて吟味できるデータ品質を確保
- ② 単一孔試験から複数孔試験と段階的なアプローチにより、地下水場を定量的に把握
- ③ トレーサー試験を実施内容に組み込み、収着・吸着等の現象を定量的に把握
- ④ 長期モニタリングに備えた基本的原理や将来的な課題を検討できる環境

③ 浸透流・物質移行解析のための環境整備の構築



まとめと今後の予定

- ① 室内土層実験による実流速の測定精度の検証
 - ② 実験井戸を2孔設置し、現場透水試験を実施
 - ③ 広域3次元数値解析モデルの作成
- 今年度実施予定
- ① 実流速算定のための間隙率の適用性の疑問点の解決
 - ② 現場透水試験のまとめと数値シミュレーション
 - ③ 3次元定常浸透流解析の試算

地盤材料学 (デブリ取り出し関連) ～遮蔽と閉じ込め～

早稲田大学 理工学術院
小峯秀雄

内容

- 周知の背景と原子力工学と協働するために
- 「遮蔽」と「閉じ込め」、そして「隔離」
- 燃料デブリ取り出しのための材料学
- 放射線遮蔽性能の観点からの材料学
- 閉じ込め性能の観点からの材料学(ポイント)
- 隔離性能の観点からの材料学(ポイント)
- 地盤環境学、地盤施工学との関連
- まとめ: 廃炉地盤工学への貢献

周知の背景と原子力工学 と協働するために

原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF): 戦略プラン
<http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/index.html>
東京電力ホールディングス: 福島第一原子力発電所の廃止措置等
に向けた中長期ロードマップ
<http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/roadmap/index-j.html>

周知の背景

- 2011年3月11日、
東日本大震災に伴い、
福島第一原子力発電
所は、甚大な被害を
受け、人類史上経験
のない厳しい状況に
陥り、当時よりも環境
改善はなされている
ものの、今なお、厳し
い状況は続いている。

福島第一原子力発電所事故
2011年3月11日



このシビアアクシデントの解決に 向けて

- 被災した福島第一原子力発電所の廃止措置
- 放射性物質で汚染されたエリアの修復
- 廃止措置に伴い発生する廃棄物対策
- 汚染拡大の防止
- 高放射線環境への対応

必読の情報は、

- 原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF):
戦略プラン
- <http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/index.html>
- 東京電力ホールディングス: 福島第一原子
力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロー
ドマップ
- <http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/roadmap/index-j.html>

「遮蔽」と「閉じ込め」、 そして「隔離」

放射性廃棄物の埋設事業に関する安全審査の基本的考え方

- 第一種廃棄物埋設の事業(地層処分)に関する安全審査の基本的考え方
- 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方
- を参考に

廃止措置のための地盤材料学におけるポイント

- 遮蔽機能
- 閉じ込め機能
- 移行抑制機能
- 隔離機能

の観点から、①材料の要求性能を規定すること。
また、②材料仕様の設計を行うこと。

各性能の意味(含む、小峯の解釈)

- 遮蔽機能:対象領域において、放射性物質からの線量が限度を超えないようにすること。
- 閉じ込め機能:放射性物質の漏出がないこと。
- 移行抑制機能:放射性物質の移行抑制機能が適切に機能していること。
- 隔離機能:放射性物質を一般環境から物理的に隔離すること。

燃料デブリ取り出しの ための材料学

参考文献

- Yoshikawa E., Komine H., Saito Y., Goto S., Narushima S., Arai Y., Mizuno M., Ujile S., Sakoda Y., Nagae Y., Yoshimura M., Suzuki S.: Radiation Shielding Properties of Heavy Bentonite Based Slurry for Decommissioning of the Fukushima First Nuclear Power Plant, GeoChicago2016, 2016.8, p.292-297
- 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 齋藤祐磨, 氏家伸介, 成島誠一, 長江泰史, 吉村貢: 放射線遮蔽性能を有する超重泥水の透過厚さによる線量低減効果の評価, 第51回地盤工学研究発表会, 2016. 9, p.2167-2168
- 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 氏家伸介, 成島誠一: 放射線遮蔽性能を有する超重泥水の透過厚さによる線量低減効果の評価, 土木学会第71回年次学術講演会講演, 2016. 9, p.383-384
- Yoshikawa E., Komine H., Goto S., Saito Y.: The evaluation for radiation shielding ability of the soil materials on the point of view of pass length in the materials and application to design for construction, 19th ICSMGE, 2017. 9 (to be published)

研究背景

平成23年東北地方太平洋沖地震
 ⇒福島第一原子力発電所における事故
 ⇒「燃料デブリ」の取り出しが重要な課題

<燃料デブリ取り出し工法>

気中工法

冠水工法

→作業被ばく

→汚染水の漏洩

水に代わる充填材料の必要性
 (放射線遮蔽・止水)



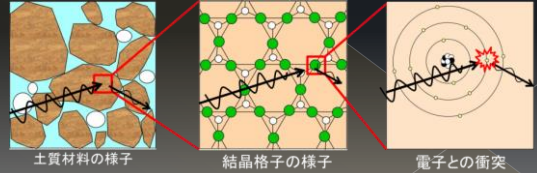
遮蔽材料に必要な特性①

◎ ガンマ線: 電磁波の一種

電子との衝突⇒エネルギー減衰

遮蔽能力が大きい材料=電子の存在度が大きい物質

=高密度な物質



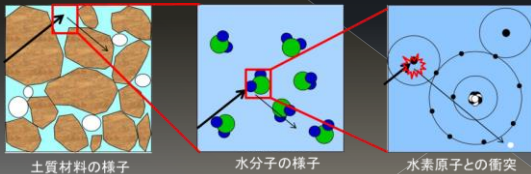
遮蔽材料に必要な特性②

- ◎ 高速中性子線 ($v \approx c$)
 - ◎ 熱中性子線 ($v=2.2 \text{ km/s}$)
- 全中性子線

物質の原子核との衝突⇒エネルギー減衰

遮蔽性能が大きい物質=水素を多く含む(運動量保存)

⇒水分子を多く含有する材料



吉川絵麻らの研究のポイント

- ソイルアンドロックエンジニアリング吉村貢氏の放射線と地盤工学に関する基礎をベースとし、
- ホージュン氏家氏の粘土鉱物学的知見と
- 西武建設との実施も念頭に、
- 放射線遮蔽特性の定量評価
- 放射線遮蔽特性の観点からの材料設計への展開

考案された充填型遮蔽材料 「超重泥水」

- ◎ 高比重(ガンマ線遮蔽)
- ◎ 高含水(中性子線遮蔽)

粘土による高粘性
 ⇒汚染水の漏洩防止

⇒現在、IRIDが**止水補助材**として検討



廃炉・施工を意識した材料特性評価項目

超重泥水

1. 充填時(排出時)
 - 流動性・粘性特性評価
 - ✓ B型粘度試験
 - ✓ SEMIによる観察
 - ✓ ペーンゼン断試験
2. デブリ取り出し時
 - 放射線遮蔽性能評価
 - ✓ 放射線遮蔽実験
 - ✓ 遮蔽性能の間接的評価
3. 取り出し後
 - 処分技術の検討
 - ✓ 各方法による減溶化の検討

各遮蔽材の廃炉に向けたシナリオへの適用の検討

放射線遮蔽実験



使用線源と検出器

検出放射線	線源	放射能 (MBq)	線量 (μSv/h)	エネルギー (MeV)
ガンマ線	¹³⁷ Cs	3.68	1.13	0.662
中性子線	²⁵² Cf	1.067	5.18	1.406



ガンマ線
アロカ製TCS-172

高速～速中性子線
SRE製ANDES

全中性子線
アロカ製TPS-451C

熱中性子線
SRE製WARP



重泥水の組成配合

種類	比重	流動性	分散	沈降防止	加重材
		水道水 (g)	ピロリン酸Na (g)	Na型ベントナイト (g)	パライト (g)
超重泥水A	2.5	100	0.2	7	400
超重泥水B	1.8	100	0.2	10	140
超重泥水C	1.1	100	0.2	12	10



蒸留水

ベントナイト

パライト

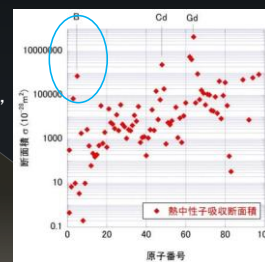
加えて、それぞれに五ホウ酸ナトリウムを添加したもの = 計6種類

ホウ素を添加する理由は？

原子炉の出力制御にも使用

“運動エネルギーが小さい中性子”
→原子核内に留まることがある。
⇒ **中性子吸収**

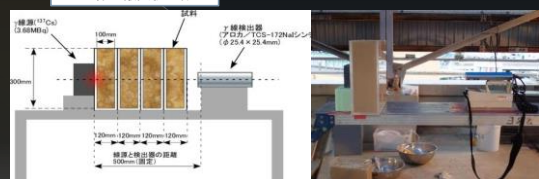
原子核内への留まりやすさ
= 「**中性子吸収断面積**」



ホウ素Bは熱中性子線の吸収断面積が大きい!
→中性子線遮蔽性能の向上が期待される。

実験条件

ガンマ線遮蔽実験の様子



容器 (30 cm × 30 cm × 10 cm) を4個用意
⇒ 厚さ: 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm に変化

放射線遮蔽実験のポイント

- 高放射線環境における土木工事の状況から、
- これからの土木技術者、地盤工学者も、**放射線遮蔽の基本的な実験を、基礎学問として、履修しておく必要がある**と考える。
- 結果の整理において、
- 土質力学の基本である「**土の状態量**」による整理を行うことにより、**材料設計に連結**できる。

結果の整理方法 (Y軸) 放射線強度

◎ 放射線低減率 ⇒ 100%で透過線量=0

$$R_{rad} = (1 - R) \times 100 = \left(1 - \frac{N}{N_0}\right) \times 100$$

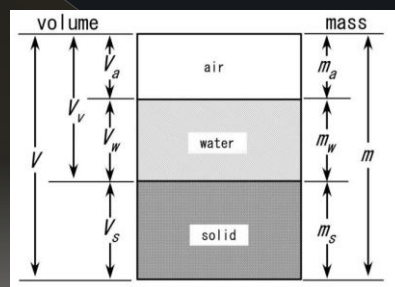
ここに, R_{rad} :放射線低減率(%)

N : 試料を充填した状態の透過線量

N_0 : 空容器のみの透過線量

結果の整理方法 (X軸)

放射線遮蔽性能 ⇒ 土の状態量により評価

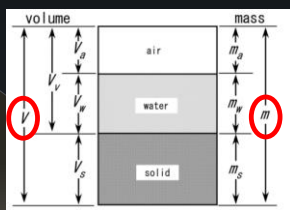


<土の三相構成モデル>

結果の整理方法 (X軸) ガンマ線

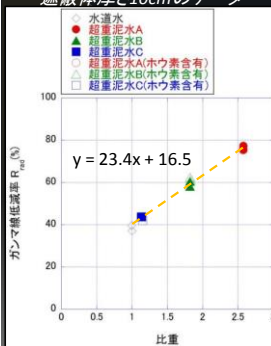
電子の存在度
= 遮蔽材の平均密度

→ 比重
= 湿潤密度 ρ_t



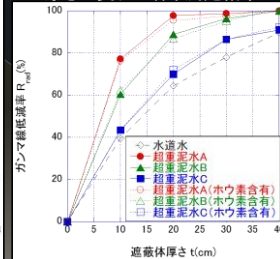
$$\rho_t = \frac{m}{V}$$

遮蔽体厚さ10cmのデータ



超重泥水 ガンマ線

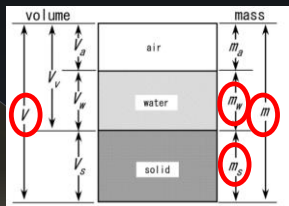
厚さの変化に伴う測定結果



結果の整理方法 (X軸) 中性子線

水素原子の存在度
= 水分子の存在度

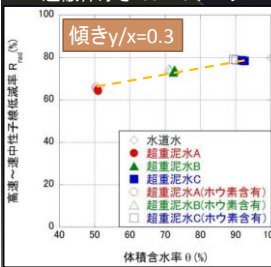
全体の体積のうち、
水が占める割合
→ 体積含水率 θ %



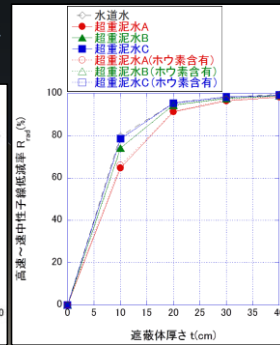
$$\theta = \rho_a \times w = \frac{m_w}{m_s} \times \frac{m}{V} \times 100$$

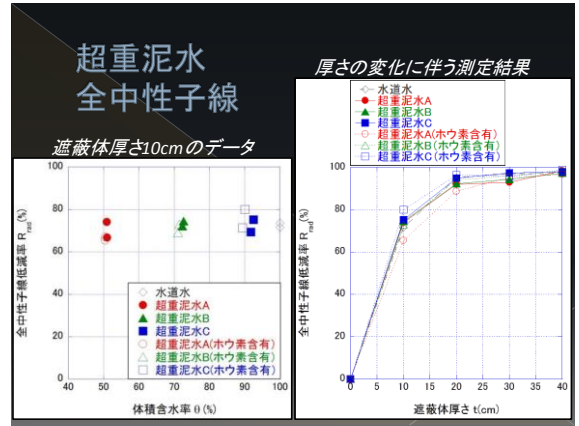
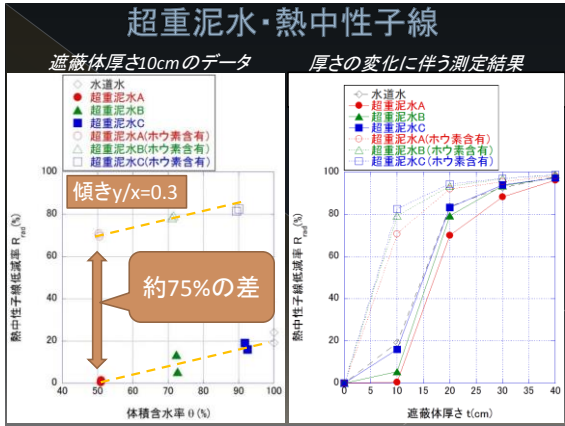
超重泥水 高速～速中性子線

遮蔽体厚さ10cmのデータ



厚さの変化に伴う測定結果





- ### 吉川絵麻らの研究のまとめ
- 土質材料のガンマ線、中性子線遮蔽性能は、土の状態量による評価が可能である。
 - 同じ厚さの場合、ガンマ線低減率は湿润密度に正比例する。
 - 同じ厚さの場合、中性子線低減率は体積含水率に依存する傾向がある。
 - ホウ素は熱中性子線の遮蔽に効果的である。
 - 超重泥水は、水道水以上のガンマ線遮蔽性能を持つ。
 - 超重泥水は、水道水と同等の中性子線遮蔽性能を持つ。

参考文献

- 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議、東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(案)、2015
- 原子力災害対策本部、東京電力㈱福島第一原子力発電所1～4号機の廃炉措置等に向けた中長期ロードマップ、2013
- 東京電力株式会社、福島第一原子力発電所覆土式一時保管施設の増設について、2015
- Komine, H., "Radiation shielding experiments of geo-material for recovery from the Fukushima I nuclear power plant accident", Geo-Environmental Engineering 2015.
- 齋藤祐磨、小峯秀雄ら、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し、事故由来廃棄物を想定した重泥水・土質材料の放射線遮蔽効果の評価、第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、p483-488、2015
- 氏家伸介、長江英典、成島誠一、新井謙典、稲元祐二、水野正之、佐古田又規、齋藤祐磨、小峯秀雄、放射線遮蔽材の開発、第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、p.471-478、2015
- 稲元祐二、成島誠一、長江英典、水野正之、氏家伸介、高比重量形遮蔽材を用いた放射能汚染防護技術の開発、第11回地盤工学シンポジウム発表論文集、2015
- 河田 燕、物理工学実験9放射線計測技術、東京大学出版会、p.1-157、19

閉じ込め性能の観点からの材料学

今回は、電中研・渡邊保貴博士がご担当

- ### 閉じ込め性能の観点から
- 超重泥水の透水係数の設計
 - 遮水材の透水係数の設計
- #### 研究・技術開発テーマ案
- 低透水係数測定技術の開発
 - 測定精度の観点からの透水係数設計
 - 透水係数測定値の変動傾向を踏まえた材料設計→隔離性能とも関係

隔離性能の観点からの材料学

隔離性能の観点から

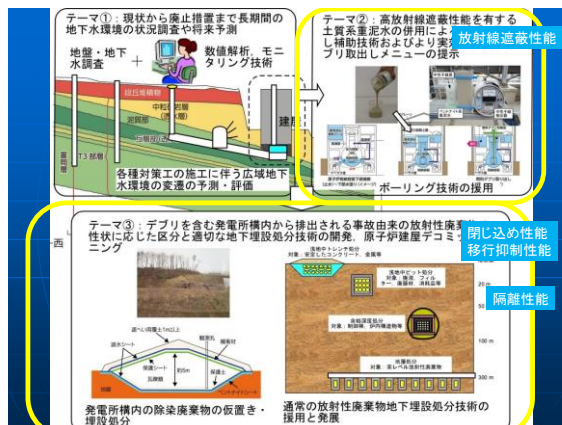
- 超重泥水の層厚の設計
- 遮水材の層厚の設計

材料の層厚は、想定外の事象発生に対する断片的効果があるので、とても重要である。

研究・技術開発テーマ案

- 放射線遮蔽性能を踏まえた層厚設計法の開発
- 透水係数測定値の変動傾向を踏まえた層厚設計法の開発

地盤環境学, 地盤施工学との関連



放射線遮蔽性能, 閉じ込め性能と隔離性能の観点からの材料設計と照査

- 超重泥水材料仕様設計(配合)
- 遮水材材料仕様設計(材料配合, 乾燥密度)

地盤材料学は、原子力工学の要求を理解し、材料仕様に反映できるように設計方法を構築すること！

まとめ: 廃炉地盤工学への貢献

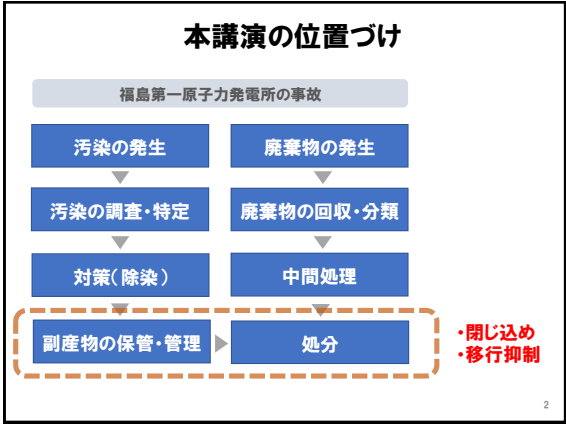
- 廃炉地盤工学委員会において、原子力工学の技術者を招いて、デブリ取出し方法や廃棄物のインベントリなどについて情報提供をしてもらう予定です。
- これらを、地盤工学者として学習し、要求性能を、原子力工学者と協働して明確にする。
- 地盤工学者だからできることは、その要求性能の観点から材料仕様を設計することにある。
- 新しい学問分野なので、大いに技術提案をお願いしたい。

「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』」に関する講演会

地盤材料学
(処理・処分、デコミッションング関連)

(一財)電力中央研究所
濠邊保貴
(委員会幹事)

1



廃炉地盤工学における地盤材料学の観点

放射線、長期性能の観点から、従来の地盤材料とはやや異なる見方、材料品質の評価となる。

- ✓放射線遮へい
- ✓長期耐久性(性能維持)
 - ・特殊な埋設環境条件
 - ・材料そのものの変化(変質)

3

言葉の定義

廃炉(decommissioning)
老朽化などにより、使用しなくなった原子炉を解体・撤去すること。

廃止措置
発電所の運転停止後に行われる施設の解体、保有する核燃料物質を譲渡し、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄、その他の措置のこと。廃止措置を開始する際には、発電所の運転を停止するとともに、再び運転することが出来ない措置をとる。

4

廃止措置の例

(敦賀1号機、日本原子力発電株式会社)

5

放射性廃棄物の種類

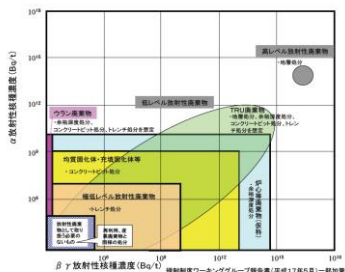
発生した廃棄物は、放射能レベルに応じた深度や処分形態により処分することが計画されているため、分類(ex.回収・分別)が重要になる。

発生場所	種類	処分方法
原子力発電所	低レベル放射性廃棄物 中レベル放射性廃棄物 高レベル放射性廃棄物	低レベル放射性廃棄物: 埋設 中レベル放射性廃棄物: 埋設 高レベル放射性廃棄物: 深地層処分
ウラン濃縮工場 ウラン燃料加工工場	ウラン廃棄物	深地層処分
軽水炉燃料加工工場	TRISPO廃棄物	深地層処分
再処理工場	高レベル放射性廃棄物	深地層処分

電気事業連合会HPより引用
<http://www.fepc.or.jp/nuclear/halkibutsu/about/index.html>

6

放射能区分



【資料】総合資源エネルギー開発会 原子力安全・保安部 廃棄物安全委員会報告書「低レベル放射性廃棄物の廃棄物処分に関する規制について(中核報告)」(平成18年7月20日)、23頁
http://www.iaea.org/publications/Products/MSR/MSR_TPR/MSR_A20080401.pdf#page=23
 ©ICRP

基本安全機能と言葉の定義

要求機能	機能の内容
基本安全機能	閉じ込め 放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏出を防止すること
	遮へい 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること
	移行抑制 放射性核種の拡散による移行を抑制すること 放射性核種を吸着すること 低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと 連続した地下水移行経路を形成しないこと
	隔離 隔離距離を確保すること 容易な侵入を防止すること

建設・
操業
埋戻し後

放射線障害防止上、何が要求されるのか？

参考文献
International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)

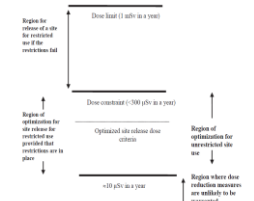
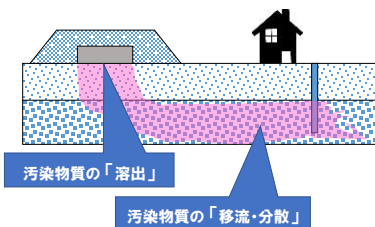


FIG. 1. Optimized optimization and regions of effective dose for members of the critical group in the release of sites.

- シナリオを作成し、被ばく線量評価を実施する。
- 安全確保のためやすくなる線量を満足するようにバリア材を設計する。

閉じ込め・移行抑制の評価の考え方

- 地盤環境に係るリスク評価 (ex. 重金属)
 - 汚染源と輸送経路を特定し、汚染の広がりを予測
 - レセプターへの曝露量を求め、発ガン率等により定量化



基本的な
考え方は近い

閉じ込め・移行抑制の評価における2つの観点



http://www.iaea.org/atom/atom_3-2.html
 【資料】『原子力文化センター』(2008)

閉じ込め・移行抑制の観点からの地盤材料学

- 設計仕様項目
 - 透水係数
 - 材料の厚さ

例えば、中間貯蔵施設を例にすると、約30年の間、Csを閉じ込めるための設計は？

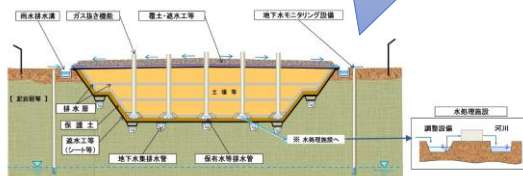
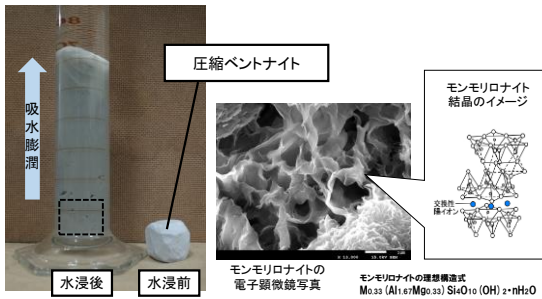


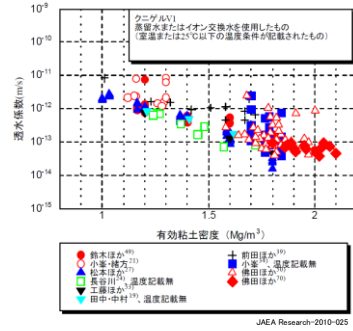
図6 土壌貯蔵施設(Ⅱ型Aタイプ)の構造等のイメージ(貯蔵時)

低透水性の土質材料



13

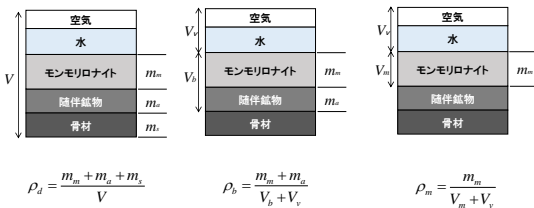
ベントナイトの透水係数



14

ベントナイトの透水性評価に用いる指標

乾燥密度 有効粘土密度 有効モンモリロナイト密度



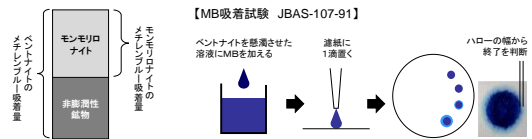
✓上記の評価指標を用いることでベントナイトと骨材の配合設計が容易になる。

15

モンモリロナイト含有率

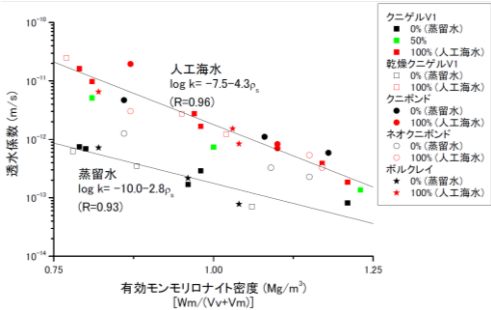
メチレンブルー吸着量を用いたモンモリロナイト含有率の推定

$$\text{モンモリロナイト含有率} = \frac{\text{未知試料のMB吸着量}}{\text{純モンモリロナイトのMB吸着量}} \times 100(\%)$$



16

有効モンモリロナイト密度を用いたデータ整理



電力中央研究所報告 N04005

17

品質管理

要求機能	設計仕様項目	材料管理	状態管理	
基本 安全 機能	閉じ込め	透水係数	モンモリロナイト含有率 層間陽イオン組成 粒度分布 含水比 組成限界	乾燥密度
		厚さ	—	部材寸法
移行抑制	閉じ込め	透水係数	閉じ込めと同じ	閉じ込めと同じ
		厚さ	閉じ込めと同じ	閉じ込めと同じ

土木学会「余裕深度範囲における地下施設設計、品質管理および検査の考え方」(2009)をもとに作成

➢ 処分環境条件(水質、温度等)を加味して、室内試験をもとに予め定められた値を現場で達成できるかが重要。

例えば、透水係数 10^{-11} m/s以下の材料に対応することが求められ、試験法の整備も必要になる。
⇒低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する委員会 報告書(第60回地盤工学会シンポジウム論文集)

18

材料特性の変化

▶ 長期的な状態変化

放射性廃棄物処分の安全評価では、長期（処分形態によっては数千年以上）の状態変化を対象とすることがある。

▶ ベントナイトの特性変化

- ✓ 交換性陽イオンの変化 (ex. Ca型化)
- ✓ 高いイオン強度による凝集
(：周辺地下水の塩水化、廃棄体中の硝酸塩や硫酸塩などの可溶性塩)
- ✓ モンモリロナイトや随伴鉱物の溶解
- ✓ 二次生成物の生成

化学的影響

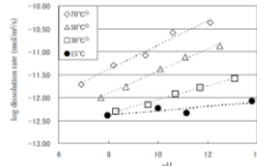
土木学会「余熱深度処分安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」(2008)をもとに作成

19

アルカリ環境におけるベントナイトの変質

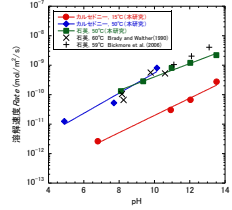
- ✓ 土粒子は溶解して、体積や質量を変えることも想定される。
- ✓ 鉱物の溶解速度を知ること、時間軸の評価に結びつく。

モンモリロナイトの溶解速度



電力中央研究所報告 N07006

石英やカルセドニーの溶解速度

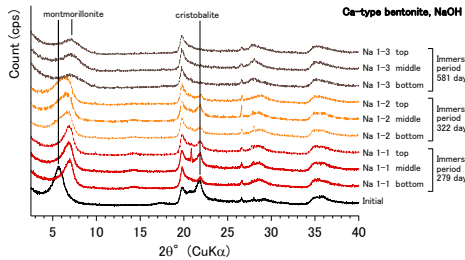


電力中央研究所報告 N15008

20

アルカリ環境におけるベントナイトの変質

✓ ベントナイトに含まれる鉱物の溶解、鉱物組成の変化が生じる。

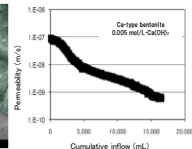
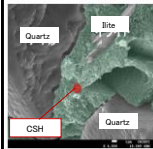


Watanabe and Yokoyama (2016) Proc. of Geo-Chicago 2016.

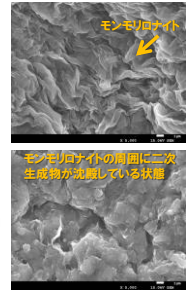
21

アルカリ環境におけるベントナイトの変質

✓ 二次生成物の沈殿が生じることで間隙構造に変化が生じることが想定される。



電力中央研究所報告 N10037

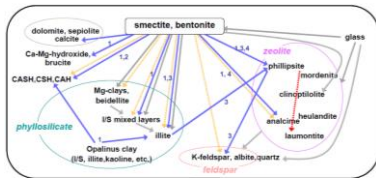


Watanabe and Yokoyama (2016) Proc. of Geo-Chicago 2016.

22

ベントナイトの鉱物変遷

✓ 天然事例から土や材料の長期的な変化を学習することも一つの研究アプローチになる（ナチュラルアナログ）。



Experimental findings: higher pH, lower temperature → K_f , higher temperature. Natural systems (pH 7-11) → K_f . It is recognized zeolite zonation with increasing depth or age in burial diagenetic deposits. A typical zeolite sequence is shown along the dashed red arrow in this figure.

図1 実験的研究および天然事例に基づく鉱物変化の様子
核種移行評価機構 研究報告「JNC TR0400 2005-020

23

廃炉地盤工学における材料の考え方（私案）

▶ 核種の閉じ込め、移行抑制

- 放射性核種の「閉じ込め」または「移行抑制」の評価では、移行距離と移行時間が重要になる。所定の期間、所定範囲内に物質移行を留めることを実現するための材料仕様を検討する必要がある。
- 時間軸での評価が重要になる。透水性の低い材料を使うこともあり、透水係数の測定（現地での検査を含む）は技術的課題の一つ。溶解速度のように、変化の速度を測定する技術の開発も重要になる。

▶ 特殊な環境条件

- 放射線、放射性元素、廃棄体発熱、地下深部の応力状態といった一般土木構造物では想定しない条件を加味する必要も出てくる。処分施設は複合構造物であるため、土だけの評価では足りないこともある。

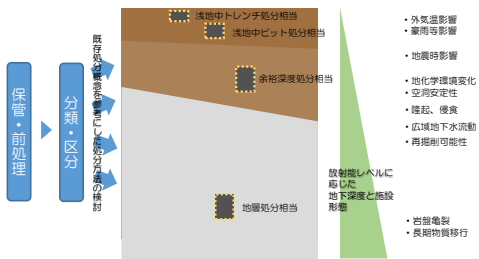
▶ 材料の変質

- 評価期間が長期に及ぶため、埋設環境条件次第では材料が変質することが想定される。変質した後の材料特性も視野に入れて材料仕様を検討することが求められる。

24

1F構内から排出される廃棄物の処分について(私案)

今後、廃棄物の性状・インベントリの解明を注視しつつ、既存の処分概念の適用性について検討しておくことが肝要である。



廃炉地盤工学での 地盤施工学 Geotechnical Construction Management

2016/12/22 廃炉地盤工学に関する講演会
廃炉地盤工学委員会
幹事長 後藤茂(早稲田大学)

各学問単元の内容

■ 地盤力学

原子炉廃止措置での各段階で生じる構造物および地盤の形態変化について、地震等に対する安定性を検討するための技術群。

■ 地盤環境学

廃止措置過程において必要な地盤内(地下水、地下空洞等)の放射線環境を予測・評価・改善するための技術群。

■ 地盤材料学

廃止措置に有効な地盤系材料(ポーリング補助液、止水材、グラウト材、覆土材料等)を開発・改良する技術群。

■ 地盤施工学

廃止措置における環境的・構造的条件を考慮して、最適な工法・材料を選択し、廃止措置過程を実体化させるための技術群。

一般的な施工とは

- 上流概念である設計・計画を具現化する建設行為であり、施工計画の作成、施工管理の実施も含む。
- 施工計画とは、使用する材料とそれを用いた建設(施工)方法や建設機械・労務などを実施時間軸に沿って具体的に記述したものである。
- 施工管理とは施工が計画に則っておこなわれていることを管理するものである。

地盤施工学で習得を目指す能力

- 工事完了までの流れをイメージし、全体及び各段階での制約条件を想定(把握)する能力
- 問題を解決するため要求性能を作る・提案する能力
- 問題に直面した場合に、その問題に対する最適解となる施工計画を作成する能力
 - 事故原子力発電所廃止措置は経験の無い状況下の作業であるため、要求性能や制約条件の明確化も困難を伴う。
 - 施工計画の作成は輻輳する要求機能・要求性能と制約条件の関係を工期・工費に基づいた判断で整理する必要があり、要求される技術レベルは高い。

要求機能・要求性能と制約条件

- 要求機能とはその建設要素が果たすべき役割。
- 要求性能とは最終的に建設物が目的に沿うために必要な性能。
- 制約条件とはそれぞれの建設段階の実施を制約する条件(入手、搬入・搬出、保管空間、活動空間、ステークホルダーの意見等)。
- 各建設段階・建設行為に要求機能・要求性能・制約条件がある。

博多の道路陥没の例(想像)

1. 要求機能
 - 地盤の陥没を拡大させない
 - 地盤を早急に交通に使えるようにする。
 - 地盤内の工事(トンネル構築)を再度行えるようにする。
 -
2. 埋め戻し材の要求性能
 - 地下水の移動が生じさせないように水中施工を行なう。(地下水の移動地盤の崩壊につながる)
 - 水中施工できるもの → 埋め戻し。(栈橋の構築?)
 - 埋め戻し材の選定: 水中施工性(水中での変質危険性)、多量入手の可能性、空隙充填性、再掘削可能
 - 流動化処理土

施工の手順(要素)

1. 材料の選択 最適な材料
2. 施工方法・施工機械の選択 最適な方法
3. 施工順序の組み立て 最適なタイミング

- 「最適」とは何を持って決めるのか？
- 品質・性能
- コスト
- 工期(納期)
- 確実性(常識的・経験的に判断できる範囲)

施工の管理項目 工事の品質を支配する4大要素

- Q: Quality(狭い意味の品質)
- C: Cost(原価)
- D: Delivery(工期)
- S: Safety(安全)
- [R: Reliability(確実性)]

施工管理とは

- 品質管理(出来型管理) Quality
発注者が要求する品質目標を達成するために行う手段。
- 原価管理(労務管理, 調達管理) Cost
要求される品質を合理的なコストで達成するための労務費や資材調達費の管理。
- 工程管理(出来高管理) Delivery
工事途上で計画と実際の進捗を確認し, 不備なところに必要な是正措置をとる管理。
- 安全管理 Safety
工事に伴って発生する災害や職業性疾病を絶滅する目的で, 組織的な施策を立てて実践活動を行うこと。

施工管理とは

- 品質管理(出来型管理) Quality
発注者が要求する品質目標を達成するために行う手段。
Reliability(確実性)は通常では経験的に判断できる。
- 工程管理(出来高管理) Delivery
廃炉では上流側概念に参画することにより工法・材料選択の確実性が上昇する。
- 安全管理 Safety
工事に伴って発生する災害や職業性疾病を絶滅する目的で, 組織的な施策を立てて実践活動を行うこと。

施工計画・管理の範囲

- 方法・機械(Method, Machine)
施工の方法を決め, 必要な機械等を手配する。
- 材料(Material)
工事に必要な材料の決定や手配をおこなう。
- 人・労務(Man)
施工に必要な人員を予測し, 時期に合わせた手配をおこなう。



これらのすべてを含むことにより具体性が備わる。(5W1H)

施工計画の作成 (経験的判断の内容)

- 工事完了までの流れをイメージする。
- 全体および各段階での要求機能や制約条件を想定(把握)する。
- それぞれの構成要素(材料、方法、機械)の要求性能を明確にし、最適な要素を選択(想定)する。
- 構成要素の相互の良関係・悪関係を確認し、できるだけ良関係になるように要素の変更・手順の組み替えなどをおこなう。
- 目的に対して最適な要素の組合せを決定し、実施上の問題点を再検討する。

(事故廃炉)地盤施工学の特殊性

- 追加される評価基準(遮蔽・閉じ込め)
 - 地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価。
 - 作業空間改善のための**空間放射線量の低減**
 - 周辺環境の防護のための**放射能汚染物質の拡散防止**
 - 廃止処置に関する**他分野技術の活用容易化**のための補助
- **未経験な環境**
(状況把握の困難さ、最適判断の基準が不明確)

廃炉地盤工学での課題

- 各施工要素の要求性能の把握(具体化)
 - 最終形態の具体性欠如
 - 次工程の性能(制約条件への対応能力)の不明確さ
- 制約条件の把握
 - 原子炉施設に関する知識の欠如
 - 事故後の原子炉内部の状況の不明確さ
 - 要求性能不明確に伴う建設要素の具体性の欠如
- 建設要素相互の関連の把握
 - 他分野要素(技術)との協働経験の欠如

(廃炉)地盤施工学の課題と対応

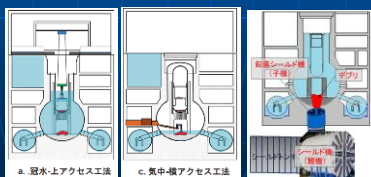
- 確実性:実施できるか(事故廃炉問題では**常識的**に判断できない)。
- 施工の最適性は**事象の終了後(収束後)**にしか評価できない。
- 廃炉地盤工学・地盤施工学は福島原発の廃炉が終わった後でしか出来上がらない(これではダメ)。
- **事象を設定(想像)して答えを探す努力が必要**。
- スリーマイルズ島は参考になるか?(チェルノブイリではダメ)
- **経験のある事態での代替**ができるか(異常環境と正常環境の技術のすり合わせ)。

各種の例 遮水壁(地下水コントロール) デブリ取出し 廃棄物処理

デブリの取り出しにおいて地盤工学的技術は何ができるか?

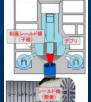
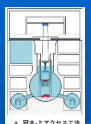
- 何をしなければならないか?
デブリから出る放射線から人間を守る(**遮蔽**)。
- 何をしてはならないか?
デブリ(放射性汚染物質)を意図しない形で外へ出さない(**閉じ込め**)。

デブリへのアプローチ方法



デブリへのアプローチ方法

- 上部からのアプローチ
 - ✓ 開口部がすでにある。
 - ✓ 遮蔽するものが必要
 - ✓ 意図外の漏洩の可能性小(重力が助けになる)
- 側部からのアプローチ
 - ✓ 開口を新たに設けなければならない(寸法、方法)。
 - ✓ 開口を設けるまでは格納容器の壁が遮蔽。
 - ✓ 格納容器と作業空間が連続する。
 - ✓ 意図外の漏洩の可能性中(開口部のシール方法)。
- 下部からのアプローチ
 - ✓ 格納容器に接続するまでは遮蔽性大(地盤)
 - ✓ 格納容器と作業空間が連続する。
 - ✓ 意図外の漏洩の可能性大(重力が障害)



デブリへのアプローチ方法

放射線遮蔽能力の高い地盤工学的材料(超重泥水およびそれを用いた流動化処理土)が活躍できる？

- 下部からのアプローチ
 - ✓ 格納容器に接続するまでは遮蔽性大(地盤)
 - ✓ 格納容器と作業空間が連続する。
 - ✓ 意図外の漏洩の可能性大(重力が障害)

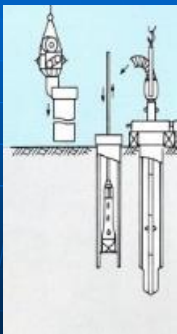
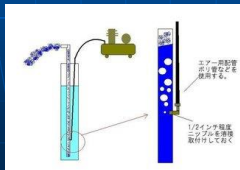


取出し時のデブリの形態と工法

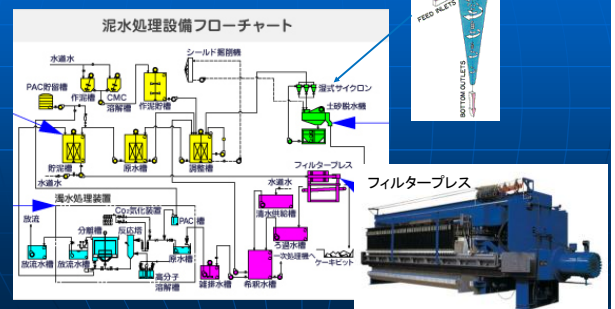
- デブリは取出し時に形態が変化する可能性がある(大命題:再臨界させない)。
- デブリはコアで抜くのか、削り取るのか？
 - コア抜きの詳細方法(底部の縁切り他)
- 削り取りの切削ズリの拡散防止と後処理方法
- (ズリを拡散させない)ズリ揚げ方法
 - リバースサーキュレーション、エアリフト
- 泥水と混合したズリの分離
 - 泥水シールドの処理プラント
 - サイクロン フィルタープレスで濃縮(再臨界?)

リバースサーキュレーション工法 エアリフト

- リバースサーキュレーション工法 ビットを回転させ地盤を切削し、その土砂を孔内水とともにサクシオンポンプまたはエアリフト方式等により地上に排出する。



泥水処理プラントの例



廃炉地盤工学での課題の克服

- 各施工要素の要求性能の把握(具体化)
 - 最終形態の具体性欠如
 - 最終形態のイメージ強化
 - 放射性廃棄物、デブリ、汚染土壌、汚染された格納容器等の具体化
 - 次工程の性能(制約条件に対する対応能力)の不明確さ
 - 次工程構成要素のイメージ強化
 - 全体工程の堅実化
 - 個別要素の性能の明確化
 - 当該施工段階後の状態イメージ強化

廃炉地盤工学での課題の克服

- 制約条件の把握
 - 原子炉施設に関する知識の欠如
 - 原子炉施設の知識の強化
 - 文科省プログラム参加組織の活用
 - 事故後の原子炉内部の状況の不明確さ
 - 炉内状況の情報入力力の強化
 - 東電、IRID、JAEA等との関係強化
 - 要求性能不明確に伴う建設要素の具体性の欠如
 - 廃炉手順の分析力の強化
 - 廃炉地盤工学・技術マップの活用

廃炉地盤工学での課題の克服

- 建設要素相互の関連の把握
 - 他分野要素(技術)との協働経験の欠如
 - 文科省プログラム組織の活用
 - 他企業技術との協働の機会の欠如
 - 廃炉地盤工学の活用

原子力工学と地盤工学の連携
により課題を克服！

廃炉地盤工学はその手助け
になりたい！！

有用なご意見をお待ちして
ます！！

26

福島第一原子力発電所廃止処置における地盤工学的技術の活用 廃炉地盤工学創設の必要性

原子力発電所 廃止処置 地盤工学

早稲田大学 国際 ○後藤 茂 国際 小峯秀雄

関東学院大学 国際 東畑郁生 千葉工業大学 国際 鈴木誠

電力中央研究所 国際 渡邊保貴 日揮 国際 高尾肇

パシフィックコンサルタンツ 国際 斉藤泰久 国際 菱岡宗介 黒崎ひろみ

1.はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う津波により福島第一原子力発電所は未曾有の被害を受け、周辺領域に放射線汚染を引き起こしただけでなく、原子炉自体も核燃料の融解等により損傷を生じた。この事故原子力発電所は再生や修理が不能の状態になっており、廃止処置されることが決定しているものの、放射性汚染物の拡散防止や溶融した核燃料デブリの取り出しおよび原子炉の解体等を含むデコミッションングにおいて解決しなければならない技術的課題が山積している。これらの技術課題の解決は国民生活の安全確保や環境汚染の防止などの面から重要だけでなく、日本技術の威信回復のためにもきわめて重要である。

一方、放射性汚染水の増加防止のための地下水遮断対策や放射線汚染された瓦礫や樹木の仮置き処理にも見られるように、地盤工学的技術は事故原子力発電所の処理で重要な役割を果たしており、これからの廃止処置過程でも大いに活用できるものが数多くあると考えられる。しかし、地盤工学的技術を原子力発電所廃止処置で活用していくためには、原子力工学と地盤工学の双方に渡る知識が必要であるが、原子力工学の領域での地盤工学に関する認知度は高くなく、また地盤工学の領域での原子力発電関連の知識は十分とはいえない。

今回、地盤工学会を主体とした提案が福島第一原子力発電所の廃止処置を対象とした文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」に採択された。この提案では福島第一原子力発電所廃止処置への地盤工学的技術の活用と人材育成を目的として「廃炉地盤工学」の創設を目指している。廃炉地盤工学とは原子力関係者と地盤工学関係者が協働できる技術領域の形成を目指しており、原子力も地盤工学もわかる人材の育成のための基盤となることが期待されている。本論文では廃炉地盤工学の概念を説明する。

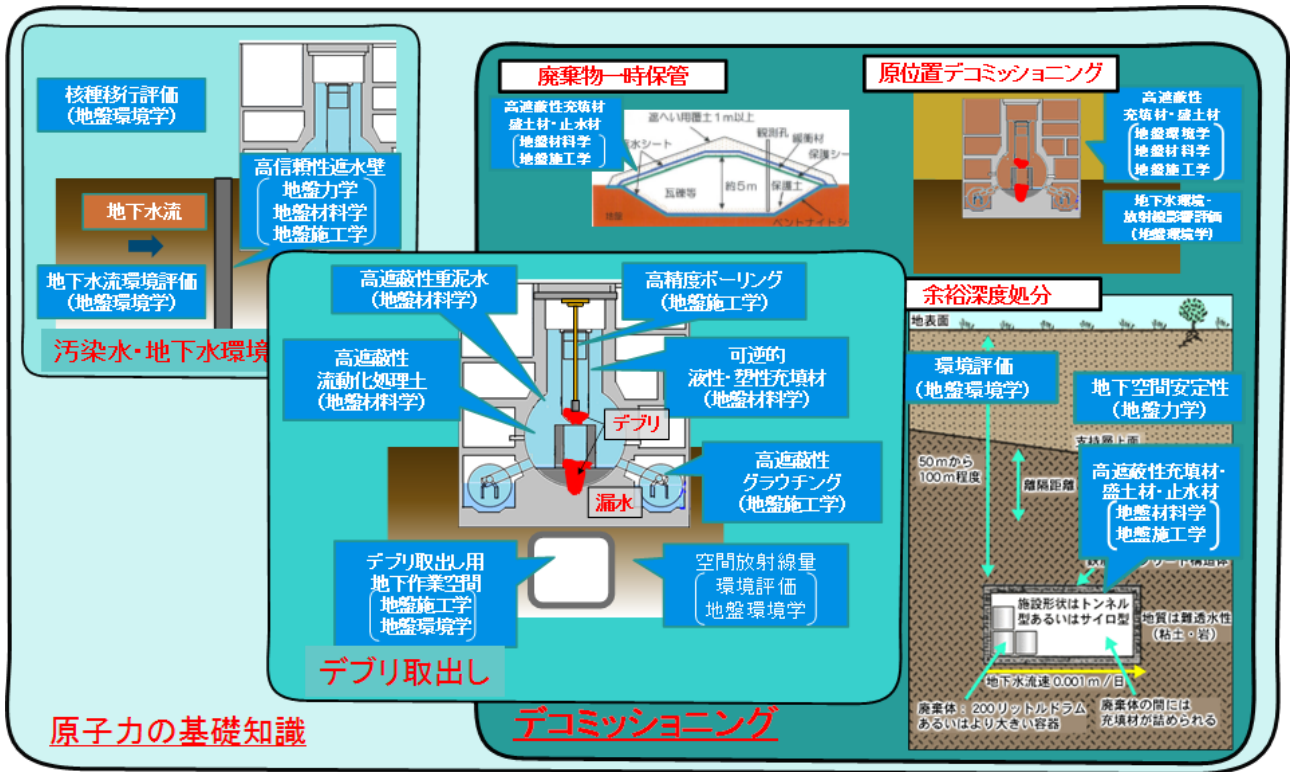


図1 廃炉地盤工学の構成のイメージ

表 1 廃炉地盤工学で位置付けされる技術例（技術マップ）

	(A)汚染水・地下水環境	(B)デブリ取出し	(C)処置・処分・デコミッションング
①地盤力学	<ul style="list-style-type: none"> 汚染水貯留施設の安定性評価技術 遮水壁設置地盤の地震時震動特性評価技術 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力建屋下部の放射線漏洩防止処置のための地下基地の安定性評価技術 	<ul style="list-style-type: none"> デコミッションングの段階に沿った地盤・建屋系の安定性評価技術
②地盤環境学	<ul style="list-style-type: none"> 地下水・核種拡散シミュレーションを活用した原子力建屋周囲の時間的変化に対応した評価技術 広域水循環を評価できる解析プログラム群(GET FLOWS) 	<ul style="list-style-type: none"> 上記地下基地の空間放射線量の環境評価技術 	<ul style="list-style-type: none"> デコミッションング段階に沿った建屋周囲の地下水環境・放射線環境予測と評価技術 余裕深度処分対応の地下水環境評価技術
③地盤材料学	<ul style="list-style-type: none"> 汚染水貯留プールに適用可能な高性能止水材料の開発 遮水壁の信頼性を高める高性能遮水壁材料の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 空間放射線量を低減する高遮蔽性超重泥水の開発 デブリ視認可能な可視性重泥水の開発 格納容器水漏れ箇所対応可能な高遮蔽性固化泥水の開発 デブリ一時的封じ込め対応可能な可逆的液性・塑性(高遮蔽性)充填材の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 瓦礫・伐採材保管に適した高遮蔽性覆土材料と止水材料の開発 余裕深度処分に対応した廃棄物空間充填材料の開発 原位置デコミッションングに対応できる格納容器用高遮蔽性充填材料の開発 原位置デコミッションングで建屋全体を覆う高遮蔽性盛土材料の開発
④地盤施工学	<ul style="list-style-type: none"> 電気比抵抗計測を活用した凍土遮水壁のモニタリング技術 地下水の流入を止める信頼性の高い遮水壁の構築工法 輻輳する地下埋設物に対応できる遮水壁構築工法 汚染水プールに敷設する自己診断機能付き遮水幕工法 	<ul style="list-style-type: none"> デブリ取出しのため高精度ボーリング工法 上記地下基地の構築工法 格納容器水漏れ箇所封鎖のため高遮蔽性グラウチング工法 	<ul style="list-style-type: none"> キャピラリーバリアを利用した信頼性の高い瓦礫・伐採材の保管施設構築工法 海面処分場の建設工法 余裕深度施設の構築工法 原位置デコミッションングでの格納容器用高遮蔽性充填工法 同上での建屋全体の中詰めベントナイトを併用した鋼製外殻による封じ込め工法

2.廃炉地盤工学とは

廃炉地盤工学の趣意：廃炉地盤工学とは「原子力発電所廃止処置の過程」毎に活用が期待できる地盤工学的技術を「学問単元」を軸として整理することにより、廃止処置過程での地盤工学的技術の位置付けや要求性能等を明確にしようとするものであり、更には技術の高度化や新技術の創出を促進することが期待できるものである。人材教育においては学問単元を明確にして実際の技術を位置付けることにより、実効的な教育の基盤になることを期待している。ここで言う廃止処置の過程とは(A)原子力発電所建屋周辺の汚染水・地下水環境の制御、(B)デブリの取出し、(C)処理・処分及びデコミッションングであり、学問単元とは①地盤力学、②地盤環境学、③地盤材料学、④地盤施工学である。各学問単元の詳細は紙面の都合で述べないが、地盤施工学とは通常言われる「工法の実施方法である施工」のみを指すのではなく、作業環境と工法の特性を考慮して最適の工法の選択を行う、所謂、「施工計画の策定」をできる能力の養成を目指す。

廃炉地盤工学の対象：廃炉地盤工学では廃止処置の行われる原子力発電所を対象とするが、当面は2011年東北地方太平洋沖地震に起因する事故を受けた福島第一原子力発電所を対象とする。個別の研究対象としては原子力建屋などの施設及び周辺環境も対象とし、また、廃止処置で発生する建設廃棄物を含む各種放射線汚染物も対象とする。

地盤系技術の評価軸：廃炉地盤工学で検討する地盤工学的技術の高度化の評価軸は①空間放射線量の低減性能、②放射能汚染物質の拡散防止性能、(③廃止処置に関連する他分野技術の活用容易化のための補助、)などである。但し、一般的な評価軸である品質安定性や取り扱い(施工)の容易性なども考慮する必要がある。

廃炉地盤工学で位置付ける技術例：図1に廃炉地盤工学の概念図を示す。地下水・汚染水の制御、デブリの取出し(補助)、デコミッションング等で地盤工学的技術が活用される可能性は高い。表1は廃炉過程で活用が期待できる地盤系技術を廃炉段階と学問単元とのもとに位置付けた技術マップである。現時点では具体的内容が明確でなく要望のみのも記載されているが、具体的な内容の備わったもの(赤字で記入)に置き換えていくため検討を進める予定である。

参考文献 1)H. Komine et, al(2015): Environmental geotechnics and education initiatives for recovery from the Fukushima I Nuclear Power Plant accident, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2)小峯他(2015)：事故を起こした原子力発電所の廃止措置に向けた地盤工学的技術開発と土木技術者育成の必要性、第50回地盤工学研究発表会, pp.2353-2354、3)小峯他(2015): 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた技術者育成における放射線遮蔽実験の有用性、土木学会第70回年次学術講演会、pp.71-72

21世紀の原子力土木における「廃炉地盤工学」の構築と廃炉プロセスへの提言

早稲田大学 正会員 ○小峯 秀雄 フェロー会員 後藤 茂
 関東学院大学 フェロー会員 東畑郁生
 千葉工業大学 フェロー会員 鈴木 誠
 パシフィックコンサルタンツ 正会員 菱岡宗介
 電力中央研究所 正会員 渡邊保貴

1. 目的

土木工学は、原子力発電所の立地・建設技術に大きく貢献してきた。また、放射性廃棄物処分事業においても、建設工学の観点から数多くの技術的支援を行うとともに、新しい技術の開発を行っている。一方、2011年3月11日の東日本大震災において事故を生じた福島第一原子力発電所に関しても、土木工学は、今後行わなければならない廃止措置へも貢献することが求められている。このような背景から、土木工学のうち特に地盤工学の観点から、廃止措置に貢献するべく地盤工学会では、著者らを幹事団とする「廃炉地盤工学委員会」を設立しスタートさせた。福島第一原子力発電所の廃止措置は現在、多くの原子力工学分野の技術者たちを中心に技術的なプランの議論がなされている¹⁾。本論文では、参考文献1)で示されている廃炉のための技術戦略プランについて、先の「廃炉地盤工学」の観点から概略的な検討を行い、技術戦略プランを実現するために必要と思われる学術や技術開発の各項目を明らかにする。

2. 技術戦略プランから考えられる学術および技術開発の各項目

参考文献1)の技術戦略プランでは、「福島第一原子力発電所の廃炉作業は、事故に由来する通常の原子力発電所にはない放射性物質によるリスクを継続的に下げるための取り組みであり、当該戦略プランは中長期のリスク低減戦略の設計と言え、その策定に当たり、安全、確実、合理的、迅速、現場指向という5つの基本的考え方を定め、リスク低減の優先順位付けをして今後の取り組みをまとめている」とされている。そして具体的には、主要なリスク源を優先順位により3つに分類し、そのうち、可及的速やかに対処すべき汚染水等のリスクについては既に対策が進められているという認識の下、戦略プランでは周到な準備が必要であり、数多くの課題にチャレンジしなければならない「燃料デブリ取り出し」と「長期的な措置を要する廃棄物対策」の検討を実施するとされている。前者の「燃料デブリ取り出し」は、原子力工学をはじめとするすべての工学分野はもちろんのこと、土木工学においても、いまだ経験したこともなく、かつ、非常に難しい課題であることは明らかである。一方、後者の「長期的な措置を要する廃棄物対策」については、各種放射性廃棄物の処分事業や環境省が主導している除染事業において、多くの土木工学技術が活用されるとともに、さらなる最適化を目指した新しい土木技術として進められている。

以上のような背景と参考文献1)の論点から、図1~3に、地盤工学分野において優先されるべき学術および技術開発事項を、技術戦略プランの廃炉プロセスの時間経過を想定して概念図として示した。

図1は、現状から廃止措置完了までの期間、安全な作業環境を確保するために必要となる地盤工学の学術項目の概念図である。放射性物質の移動は主に、地下水流動に依存することから、高精度に地下水移行を予測することが求められる。特に、廃止措置に向けて様々な対策工が施されることが予想されるが、それに伴う作業環境の改変による環境変化を予測し、事前に危険な個所などを抽出することが求められる。また、単に将来の環境変化予測だけでなく、実際の環境状況を測定する高精度なモニタリング技術も必要となる。

図2は、燃料デブリ取り出し技術と必要な地盤工学の学術項目を示した。燃料デブリ取り出し技術自身は、おそらく原子力工学や機械工学の分野が主体的に行うものと思われる。しかし、現在の技術戦略プランでは、

キーワード 福島第一原子力発電所, 廃止措置, 廃炉地盤工学, 燃料デブリ, 廃棄物処分

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院 社会環境工学科 TEL 03-5286-2940

燃料デブリの取り出しに、地盤・地質調査で使用されるボーリング技術や切削等で使用されるウォータージェットやレーザー切削を援用することが考えられている。ボーリング技術において地盤工学では、その補助技術として様々な泥水作製技術が開発されている。今般の原子炉格納容器から燃料デブリを取り出す際の大きな課題は、高放射線環境での切削になる点にある。そこで、デブリ取り出しの際に使用する泥水に高い放射線遮蔽性能を有する技術開発等が必要となる。早稲田大学の研究チームは、土質系材料の保有する放射線遮蔽性能の観点から、高放射線遮蔽性能を有する超重泥水の開発などを進めている²⁾。

図3は、長期的な廃棄物対策と必要となる地盤工学の学術項目を示した。図2に示した燃料デブリ取り出しに向けた工事において、発電所構内で進められている除染工事で発生する廃棄物の処理・処分が未解決の課題になっている。また、取り出されるデブリも含め、解体される原子炉建屋の処分、すなわちデブリ取り出し後の原子炉建屋のデコミッションングも解決しなければならない課題である。これらについては、福島県で実践された除染土の処理技術⁴⁾や土木工学・地盤工学分野で開発された放射性廃棄物処分技術を起点に、実現可能なデコミッションング技術と処分シナリオの構築が必要となる。

図1~3に示す廃炉プロセスを支える地盤工学の学術項目を大別すると「地盤力学」、「地盤材料学」、「地盤環境学」に加え、今まで大学教育において力が注がれにくかった「地盤施工学」が重要であると考えられる。

3. 廃炉プロセスへの土木工学・地盤工学の観点からの提言

参考文献1)に示される技術戦略プラン、そしてそれを基とする中長期ロードマップは、廃炉プロセスの基本である。しかし、土木工学や地盤工学の観点から、中長期ロードマップの作業工程における不確実性またはリスクの高い事象を洗い出し、代替案やより実効性のある対策技術を提言することも重要である。例えば参考文献2)で開発されている技術を封じ込め技術として利用する等、中長期ロードマップの実施が困難になった場合には有効になる可能性もある。このような提言が、より確実性の高いプランに結び付くと考える。

参考文献

- 1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (2015) : 東京電力 (株) 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015~2015年中長期ロードマップの改訂に向けて~, 平成27年4月30日
- 2) 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 氏家伸介, 成島誠一, 長江泰史, 吉村貢 : 放射線遮蔽性能を有する超重泥水の透過厚さによる線量低減効果の評価, 第51回地盤工学研究発表会 (投稿中)
- 3) 高畑修, 熊田正次郎, 安藤淳也, 宮口新治, 石山宏二, 保高徹生, 小峯秀雄 (2015) : 道路維持管理に伴い発生する放射性物質含有土への土壌洗浄工法の適用性評価, 地盤工学ジャーナル Vol.10, No.4, 489-502.

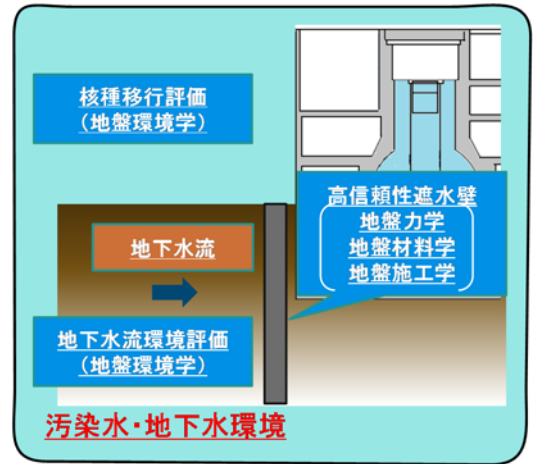


図1 作業環境保全のための地下・地盤環境評価と必要な地盤工学の学術項目

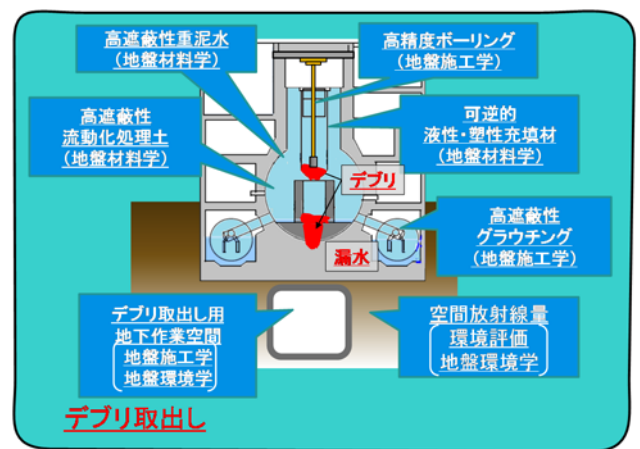


図2 燃料デブリ取り出し技術と必要な地盤工学の学術項目

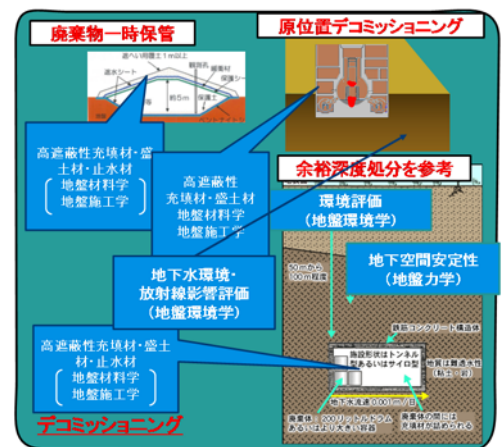


図3 長期的な廃棄物対策と必要な地盤工学の学術項目