

放射線遮蔽性能を有する超重泥水のホウ素濃度による中性子線低減効果の評価

泥水 物理化学的性質 廃棄物 早稲田大学 学生会員 ○瀬川 一義, 吉川絵麻, 国際会員 小峯秀雄, 後藤茂
(株)西武建設 正会員 中村 朋弘, (株)ホーゲン 正会員 氏家 伸介
(株)ソイルアンドロックエンジニアリング 国際会員 吉村 貢

1.はじめに

福島第一原子力発電所の廃止措置過程において、燃料デブリ取り出し作業時の放射線による影響を防ぐことが重要な課題である。燃料デブリ等から放出される放射線のうち、特にガンマ線と中性子線の放射線遮蔽性能を有する充填材料が求められる。中長期ロードマップによれば、格納容器に水を充填する冠水工法が有力とされている¹⁾。しかし、水と比べ高い放射線遮蔽性能と充填性を有する材料が求められる。そこで、放射線遮蔽性能を有する土質系充填材料である超重泥水が考案された²⁾。図1は、超重泥水を格納容器に充填するイメージ図である。一方、ホウ素は中性子を吸収する効果がある³⁾。本研究では、中性子線低減性能に注目し、超重泥水のホウ素濃度と中性子線低減率の関係を評価した。

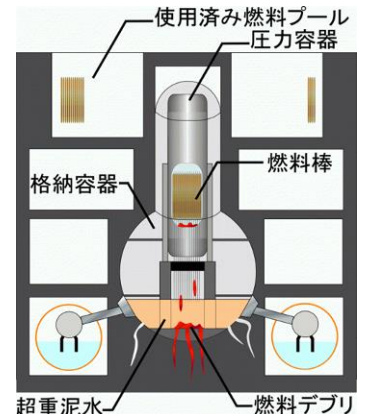


図1 超重泥水の施工イメージ

2.使用した超重泥水

超重泥水は、水、分散剤、ベントナイト、バライト、およびホウ素を混合したものである。各材料の配合割合により、比重を調整することができる。表1は、本研究において使用した超重泥水の材料配合である。分散剤は粒子の凝集や沈降を防ぎ、粘性を調整する効果を有する。ベントナイト懸濁液は、水と比べ高い粘性を有し、粒子沈降を防ぐ効果も有する。バライトは加重材であり、比重を調整するために使用する。ホウ素は中性子吸収剤として使用する。本研究では、分散剤としてピロリン酸ナトリウムを、ホウ素の添加剤として五ホウ酸ナトリウム十水和物を使用した。本研究では表1に示す3種類の配合の超重泥水について放射線遮蔽実験を行った。

表1 超重泥水の材料配合

比重	ホウ素濃度(ppm)	水道水(g)	ピロリン酸Na(g)	ベントナイト(g)	バライト(g)	五ホウ酸Na十水和物(g)
1.8	4,000	100	0.20	14	140	2.184
1.8	8,000	100	0.20	14	140	4.368
1.8	12,000	100	0.20	14	140	6.552

3.中性子線遮蔽の原理

中性子線とは、中性子が高速で移動している粒子線である。中性子線は、原子力発電所の燃料の核分裂によって生じる。中性子線は、そのエネルギーおよび速度の大きさによって主に速中性子線と熱中性子線に分類することができる⁴⁾。図2は速中性子線と熱中性子線のエネルギーおよび速度の分布である。速中性子線は、光と同程度の $10^7 \sim 10^8$ (m/s)程度の速度であり、熱中性子線は、 $10^3 \sim 10^4$ (m/s)程度の速度である。中性子は非荷電粒子であるため、他の物質との直接相互作用は生じない。速中性子は、弾性散乱によって衝突を繰り返し減速される。特に質量がほぼ等しい陽子との衝突による減速の効果が著しい。水素原子が速中性子の減速に有効である。さらに安全性を高めるため、ホウ素などの熱中性子線を吸収する物質を添加することがある。図3はホウ素と熱中性子の反応を示したものである。ホウ素は熱中性子を吸収後、 α 線とリチウムに変化する³⁾。以上のように、中性子線遮蔽の原理は、速中性子の減速と熱中性子の吸収の2点である。

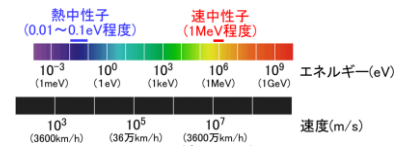


図2 中性子線のエネルギー分布

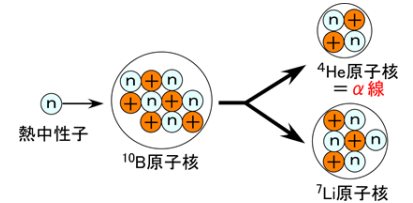


図3 ホウ素と熱中性子の反応の様子

4.放射線遮蔽実験の方法および条件

本研究では、超重泥水の放射線低減効果を評価するため放射線遮蔽実験を行った。図4は本実験で用いた装置の配置を示す。検出器と線源の間を直線距離で500 (mm)の距離と定め、その間に超重泥水を充填したアクリル容器 (内寸: 300×300×100 mm) を4個まで設置可能である。本実験では、試料厚さ10, 20, 30 および 40 (cm)における透過線量を測定した。また、地面で反射する放射線の影響を小さくするため、地面から700 (mm)の高さに実験装置を設置した。図5は、ホウ素4000 (ppm)の超重泥水について、全中性子線の測定を行う様子である。表2は、本実験で使用した中性子線源の詳細である。本実験では、全中性子線、速中性子線、および熱中性子線の透過線量を測定した。全中性子線は速中性子線から熱中性子線までの全の中性子線の総称である。全中性子線の測定単位は1cm線量等量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、速中性子線および熱中性子線の測定単位は、1分間あたりに入射する放射線の個数 (cpm)である。

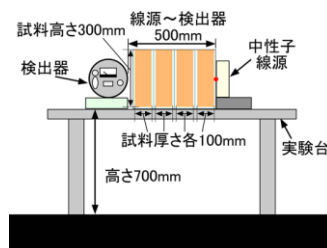


図4 実験装置の配置



図5 超重泥水の全中性子線透過線量測定の様子

5. ホウ素濃度および超重泥水の厚さによる中性子線低減率の評価

本研究では、放射線遮蔽実験の結果を中性子線低減率によって評価した。式(1)は、中性子線低減率の算出方法である。表3は、算出のために用いる記号を示したものである。本研究の結果を整理するにあたり、既往の研究で得られているホウ素を含まないの超重泥水および水についての放射線遮蔽実験の結果も図6, 7, 8に併記している⁵⁾。表4は、ホウ素を含まない超重泥水の材料配合を示す⁵⁾。

$$R_{red} = \left(1 - \frac{N'}{N_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

熱中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係を図6に示す。厚さ10 (cm)におけるホウ素濃度0 (ppm)の超重泥水の低減率は5.4 (%)であるのに対し、ホウ素を含む3種類の超重泥水の低減率は76.8~79.6 (%)の範囲であった。図3で示したように、熱中性子線はホウ素と反応し、 α 線とリチウムへに変化する。ホウ素を含む超重泥水は、熱中性子線低減率が大きく、ホウ素による熱中性子線低減効果が認められる。また、図6において、超重泥水の厚さが10 (cm)より大きい場合も、同様にホウ素による熱中性子線低減効果が認められた。

速中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係を図7に示す。本実験の結果からは、ホウ素による速中性子線低減率の違いは認められなかった。図3に示すように、ホウ素は熱中性子線と反応する。従って、図7からホウ素は速中性子線低減率に影響を与えないことが確認できた。

全中性子線低減率と超重泥水の厚さの関係を図8に示す。全中性子線低減率は熱中性子線や速中性子線などの中性子線を合わせて測定した結果から得られた値である。先の考察から、ホウ素を含む超重泥水は熱中性子線の低減率が大きいことが認められるのに対し、図8において、ホウ素の有無による全中性子線低減率の違いは認められなかった。現在、ホウ素濃度と全中性子線低減率の関係について、考察を深めている段階である。

また、超重泥水のホウ素濃度と熱中性子線低減率について以下のように考察した。ホウ素濃度4000, 8000, および12000 (ppm)の3種類の超重泥水について、各厚さにおける熱中性子線低減率の違いは小さいことが認められる。すなわち、4000 (ppm)より高いホウ素濃度では、熱中性子線低減効果はほぼ等しい。4000 (ppm)以下のホウ素濃度において、ホウ素と熱中性子線の反応する量が最大となっている可能性がある。ホウ素濃度と熱中性子線低減率の再現性を高めるため、今後はホウ素濃度が4000 (ppm)より低い超重泥水についても同様の実験を行う。

6. 結論

本研究では、ホウ素濃度による中性子線低減効果の評価を行った。その結果以下の結論を得た。

- (1) 熱中性子線は厚さ10 (cm)におけるホウ素の効果が大きく、ホウ素添加に伴い熱中性子線低減効果が認められた。
- (2) 全中性子線低減率はホウ素濃度による変化は認められなかった。
- (3) ホウ素濃度の違いによる熱中性子線低減効果の差は、今回実施した条件では認められなかった。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成水深事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の採択された地盤工学会における研究課題「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な新技術開発と人材育成プログラム」の研究により実施したものです。関係各位に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議：東京電力株式会社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
- 2) 氏家伸介, 長江泰史, 成島誠一, 新井靖典, 稲本裕二, 水野正之, 佐古田又規, 齋藤祐磨, 小峯秀雄：変形追従型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
- 3) 小野公二, 鈴木実, 増永慎一郎, 近藤夏子, 櫻井良憲, 田中浩基, 木梨友子, 丸橋晃：ホウ素中性子捕捉療法, RADIOISOTOPES, Vol.61, No.4, p.51-64, 2012
- 4) 吉村貢：放射線遮蔽の基礎知識 講演資料, 廃炉地盤工学委員会講習会「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』」, 東京, 2016
- 5) 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, 岡山, 2016

表2 使用した中性子線源

元素	半減期(年)	放射能(MBq)	エネルギー(MeV)	測定時期
²⁵² Cf	100	0.77	2.30	2016年12月

表3 中性子線低減率算出に用いる記号

記号	意味
N'	試料を置いた場合の測定値 ($\mu\text{Sv/h, cpm}$) (B.G.値を除いたもの)
N_0'	空容器のみを置いた場合の測定値 ($\mu\text{Sv/h, cpm}$) (B.G.値を除いたもの)

表4 ホウ素を含まない超重泥水の材料配合

比重	水道水(g)	ピロリン酸Na(g)	ベントナイト(g)	パライト(g)
1.8	100	0.20	10	140

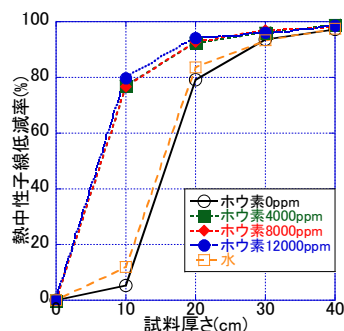


図6 ホウ素濃度の異なる超重泥水の厚さと熱中性子線低減率の関係

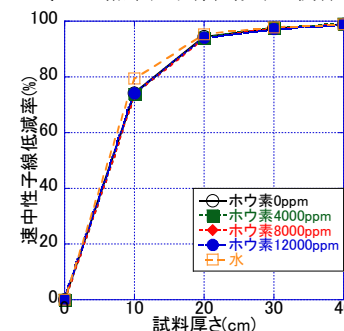


図7 ホウ素濃度の異なる超重泥水の厚さと速中性子線低減率の関係

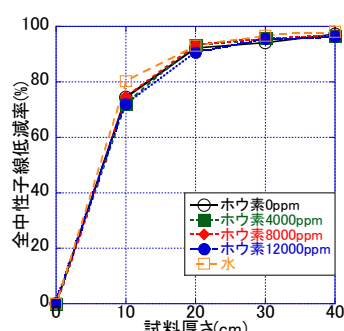


図8 ホウ素濃度の異なる超重泥水の厚さと全中性子線低減率の関係