

超重泥水のホウ素濃度による熱中性子線遮蔽性能の実験的評価

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, 学生会員 吉川 絵麻
国際会員 小峯 秀雄, 国際会員 後藤 茂
NB 研究所 正会員 成島 誠一, 国際会員 氏家 伸介
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において、燃料デブリ等から発生する放射線への対応が必要とされ、気中工法を念頭に置いた燃料デブリ取り出し方法が提案されている¹⁾。著者らは、放射線遮蔽と放射性物質の拡散防止の観点から、変形追従型充填材として、ガンマ線と中性子線の両方の遮蔽性能を有する超重泥水の開発とその特性評価を行っている²⁾。図1は、燃料デブリ取り出し作業のため、格納容器内で超重泥水を使用する様子を示すものである。既往の研究より、超重泥水は水に含まれる水素原子との衝突により、速中性子線を熱中性子線にエネルギーを減衰させる効果大きい³⁾。本研究では、熱中性子線の遮蔽性能を向上させることを目的として、ホウ素を添加した超重泥水の開発を試みた⁴⁾。今回、²⁵²Cfを線源として、ホウ素を添加した超重泥水の一次元的な遮蔽実験を行い、熱中性子線の低減効果を評価する観点から、実験結果を整理した。

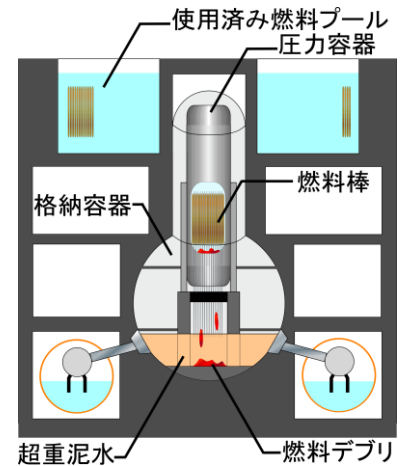


図1 超重泥水の使用イメージ

2. 超重泥水の概要

超重泥水は、ベントナイト懸濁液に対して、加重材であるバライトおよび無機系分散剤であるピロリン酸ナトリウムを混合した泥水である^{2),4)}。本実験で使用したベントナイトは、Na型ベントナイトであるスーパークレイ(ホージュン製)であり、バライトはテルパー(テルナイト製)である。超重泥水は、上記の材料配合を調整することにより、比重1.1~2.5の範囲で作製できる。本研究では、超重泥水の配合に対して、高い中性子線吸収性能を有するホウ素を添加するため、五ホウ酸ナトリウムを材料配合に加えた。表1は本実験で使用した超重泥水の材料配合を示す。

表1 本研究で使用した超重泥水の材料配合

ホウ素濃度 (%)	比重	水 (g)	五ホウ酸ナトリウム (g)	ピロリン酸ナトリウム (g)	ベントナイト (g)	バライト (g)
0	1.8	100	0	0.2	10	140
0.025			0.137		12	
0.050			0.273		12	
0.10			0.546		14	
0.20			1.092		14	
0.40			2.184		14	
0.80			4.368		14	
1.20			8.736		14	

3. 中性子線遮蔽の原理

放射線の一種である中性子線は、中性子が高速で運動する粒子線であり、主に燃料の核分裂によって生じる。中性子線はエネルギーの大きさによって、速中性子線と熱中性子線に分類される。速中性子線は0.1~1 MeV以上のエネルギーを有し、熱中性子線は約0.025 eVのエネルギーを有する⁵⁾。速中性子線は、弾性散乱によって衝突を繰り返す、熱中性子線に変化する。

中性子とほぼ同じ質量を有する水素原子は、中性子線の遮蔽に有効である。一方、熱中性子線は、このような水素原子との衝突による遮蔽効果に加え、ホウ素等の吸収断面積が大きい物質との吸収反応が発生する。図2はホウ素による熱中性子線の吸収反応を示し、熱中性子線は¹⁰Bの原子核に取り込まれ、α線と⁷Liを生成する⁶⁾。

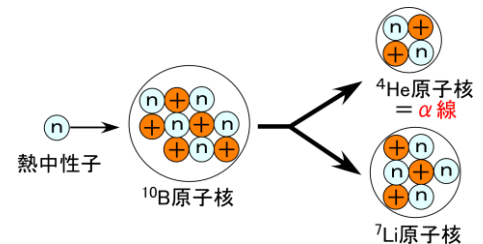


図2 熱中性子とホウ素の吸収反応

4. 放射線遮蔽実験の方法

本研究では、ホウ素含有超重泥水の熱中性子線低減性能を評価するため、一次元的な放射線遮蔽実験を行った。図3は本実験で使用した装置を示す。中性子線源と検出器の距離を水平方向に500 mmとし、超重泥水が充填されたアクリル製容器を中性子線源側から設置した。本実験では、一次元的に中性子線を放出するため、線源物質の周囲を遮蔽体で覆ったものを使用した。本実験で使用した線源は、2.30 MeVのエネルギーを有する²⁵²Cfである。これは、原子力発電

Evaluation on thermal neutron radiation shielding ability of heavy bentonite based slurry from the viewpoint of boron concentration in slurry

SEGAWA, Kazuyoshi YOSHIKAWA, Ema KOMINE, Hideo GOTO, Shigeru Waseda University NARUSHIMA, Seiichi UJIIE, Shinsuke NB Institute YOSHIMURA, Mitsugu SRE

所で使用される核燃料のエネルギーと比べ、比較的小さいエネルギーを有する放射線源である。本実験では、1 分間当たりに入射した熱中性子線量を計数率 (単位: cpm)として測定した。熱中性子線低減率は式 (1)のように算出した。

$$R_{red} = (1 - N/N') \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 R_{red} : 熱中性子線低減率、 N : 超重泥水を充填した容器を透過した計数率、 N' : アクリル製容器のみを透過した計数率である。

5. ホウ素濃度による熱中性子線低減率の評価

本実験の結果をホウ素質量濃度、超重泥水厚さ、熱中性子線低減率の3つの物理量で整理した。図4は、熱中性子線低減率とホウ素質量濃度の関係を示したものである。ホウ素質量濃度が0.4%付近を境に、熱中性子線低減率は異なる傾向が得られた。ホウ素質量濃度が0~0.4%の範囲において、ホウ素質量濃度の増加に伴い、熱中性子線低減率が上昇する傾向が認められた。一方、ホウ素質量濃度が0.4~1.2%の範囲において、熱中性子線低減率の上昇は認められなかった。

図5は、熱中性子線低減率と超重泥水厚さの関係を示したものである。超重泥水厚さが10cmの場合、ホウ素質量濃度が0~0.4%の範囲において、ホウ素の添加量の増加に伴い、約5~80%の範囲で熱中性子線低減率が上昇した。一方、超重泥水厚さが20cm以上の場合、ホウ素非含有の超重泥水であっても、約80%以上の高い熱中性子線低減率が得られた。

以上の結果から、超重泥水厚さが10cmの場合、熱中性子線低減効果の観点から、0.4%のホウ素質量濃度が最低限必要であると言える。超重泥水厚さが20cm以上の場合、ホウ素質量濃度の増加に伴う熱中性子線の遮蔽効果の向上よりも、水に含まれる水素原子との衝突によって生じる熱中性子線の遮蔽効果の方が大きいと考えられる。したがって、本実験で使用した線源に対し、層厚が十分確保できる箇所では、超重泥水にホウ素を添加する効果は少なく、超重泥水厚さを10cm以上確保できない箇所では、ホウ素質量濃度が0.4%以上である超重泥水が熱中性子線遮蔽に有効である。

6. 結論

本研究では、比較的微弱な放射線源を用いて、ホウ素を添加した超重泥水の一次的な遮蔽実験を行い、熱中性子線低減率とホウ素質量濃度の関係から、以下の結論を得た。

- 1) ホウ素質量濃度が0~0.4%の範囲では、ホウ素濃度の増加に伴い熱中性子線低減率が上昇する傾向が得られた。
- 2) ホウ素質量濃度が0.4~1.2%の範囲において、ホウ素濃度による熱中性子線低減率の上昇は認められなかった。
- 3) 超重泥水厚さが10cmの場合、ホウ素による熱中性子線の遮蔽効果が大きいと考えられる。しかし、超重泥水厚さの増加に伴い、ホウ素による遮蔽効果に比べ、水素原子との衝突による遮蔽効果が優位になると考えられる。

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新技术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：東京電力ホールディングス（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), 2017
- 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) 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
- 4) 瀬川一義, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 中村朋弘, 氏家伸介, 吉村貢：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, 第52回地盤工学研究室, 名古屋, 2017
- 5) 上原周三：放射線物理学, 株式会社南山堂, 2002, 4版1刷, pp.155-164
- 6) 齋藤一夫：無機化学全書10(硼素族)-2ホウ素・炭素・ゲルマニウム, 丸善株式会社, pp.186, 1965

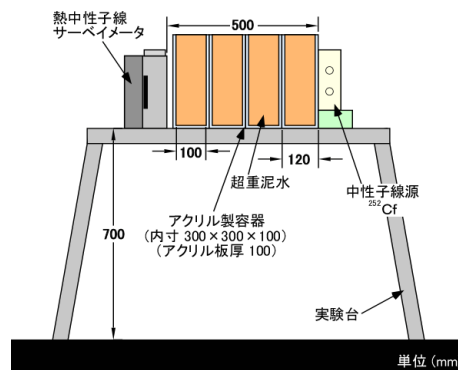


図3 放射線遮蔽実験の装置

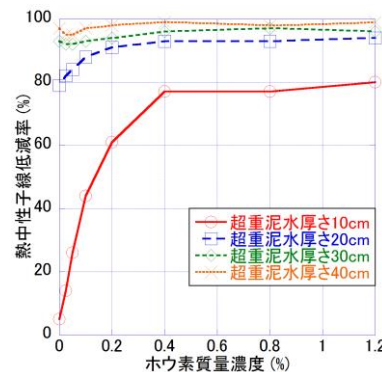


図4 熱中性子線低減率とホウ素濃度の関係

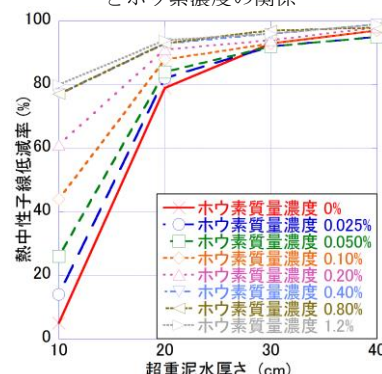


図5 熱中性子線低減率と超重泥水厚さの関係