

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

放射線 泥水 ベントナイト

早稲田大学 学生会員 ○吉川絵麻, 国際会員 小峯秀雄, 後藤茂
(株)ホーゲン 正会員 氏家 伸介, (株)西武建設 正会員 成島 誠一
(株)テルナイト 正会員 長江 泰史, ソイルアンドロック E 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、特に燃料デブリ取り出しに伴う作業員の安全確保が重要な課題である。中長期ロードマップ¹⁾によると、デブリ取り出し技術として、図1に示す原子炉核納容器に水を充填する冠水工法が有力とされている。しかし、被曝回避をより確実にするためには、通常の水よりも高い放射線遮蔽性能を発揮する充填材料の使用が望ましい。そこで、透過力の大きいガンマ線および中性子線の遮蔽に有効である高比重、高含水の特性を持つ充填型土質系遮蔽材料「超重泥水」が考案された。現在、廃炉措置への導入に向けて、施工に必要な各特性の研究が進められている。本研究では、上記に示した充填材料を想定して、超重泥水の放射線遮蔽性能を定量的に評価した。比重と透過厚さを変化させて、その透過線量を測定した結果、ガンマ線低減率は比重に正比例し、中性子線低減率は体積含水率に依存することを明らかにした。

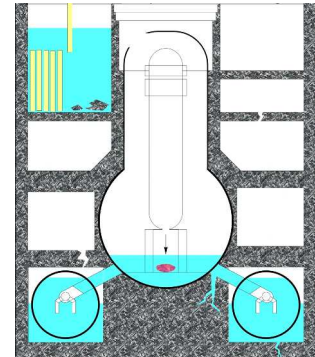


図1 建屋1号機

2. 実験に使用した超重泥水および放射線遮蔽実験の条件

本研究において使用した超重泥水の様子を図2に示す。超重泥水は組成配合により、液体から固体に近いものまで流動挙動が著しく異なるため、充填型遮蔽材料としての要求性能に応じて、適切な配合の超重泥水を作製することが可能である。実際の使用においては、要求性能のうち最も優先される性能が放射線遮蔽性であることから、超重泥水の組成配合と放射線遮蔽の関係を定量的に把握することが肝要である。表1は、本実験で使用した超重泥水の組成配合を示す。超重泥水は粒子沈降を防ぐベントナイト懸濁液に、高比重を維持するための加重材バライトおよび、粘性の調整と安定を保つための分散剤ピロリン酸ナトリウムを加えた泥水である。本研究では、表1に示す超重泥水に加えて、熱中性子の遮蔽に有効であるホウ素濃度が3000 mg/Lになるよう調整した3種類を含めた合計6種類の試料を用いた。



図2 超重泥水の様子

表2は遮蔽実験に使用した線源を示す。ガンマ線は、周波数 $10^{19} \sim 10^{23}$ Hz帯の電磁波の一種である。放射性壊変後の原子核は、多くの場合、励起状態にあるが、ガンマ線を放出することにより安定状態に遷移する。また、中性子線は、燃料が核分裂を起こす際に放出される中性子の粒子線である。中性子線はその速度によって、光と同等の速度を持つ高速中性子線と、高速中性子線が $v=2.2$ km/sまで減速した熱中性子線、および全ての速度を対象とする全中性子線に分類される。本論文では全中性子線の測定結果を紹介する。ただし、放射性壊変の際、放射性物質から前述の2種類の放射線に加えてアルファ線およびベータ線が放出される。しかし、これらの放射線は電荷を持つため、物質との相互作用が生じやすく、物質透過力が極めて小さいことから、本実験の対象から除外した。

図3は放射線遮蔽実験の様子を示す。本実験では、超重泥水を充填したアクリル容器（内寸：30 cm×30 cm×10 cm）を複数用意し、図3のように配列することにより、遮蔽体厚さ10 cm, 20 cm, 30 cmおよび40 cmにおける透過線量を測定した。土台高さは地面から約1 mであり、地面による放射線反射作用の影響を受けないことを確認している。実験は、各線源をアクリル容器の放射線透過面に接するように設置し、線源位置から50 cmの地点に固定した各検出器により透過線量の測定を行った。

3. 各放射線低減に寄与する状態量の特定および厚さに伴う透過線量の変化

図4および図5は、遮蔽体厚さ10 cmにおける実験結果を示す。これらの結果から、ガンマ線および中性子線の遮蔽

表1 超重泥水の組成配合

種類	比重 (g/cm ³)	水道水 (g)	ピロリン酸 Na (g)	Na型ベントナイト (g)	バライト (g)
A	2.5	100	0.2	7	400
B	1.8	100	0.2	10	140
C	1.1	100	0.2	12	10

それぞれの配合においてホウ素濃度 3000 mg/L に調整した

表2 使用線源

対象放射線	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

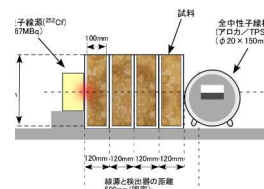


図3 放射線遮蔽実験の様子（全中性子）



性能に寄与する状態量の特定を試みた。検出した放射線の強度は、比較を容易にするために、物質透過中に低減する線量の割合である放射線低減率 R_{rad} % として整理した。超重泥水を充填していない空のアクリル容器の透過線量を基準としており、低減率 R_{rad} が 100% のとき、透過線量が 0 であることを示す。

図 4 より、ガンマ線低減率が超重泥水の比重に対して正比例的に増加することが確認された。電磁波であるガンマ線は、物質中の原子核にある電子との衝突によりエネルギーを低減させるため、電子の存在度が大きい物質、つまり密度が大きい物質による遮蔽が有効であることを示す。ここで、放射線遮蔽における密度とは、試料全体の平均密度であり、土質材料の湿潤密度に相当する。一方で、中性子線は個別の中性子の粒子線である。したがって、運動量保存の法則により、中性子と質量がほとんど同等である水素原子との衝突が、エネルギーの低減に対して最も効果的である。図 5 は水素原子の存在度を水分子として捉えて、体積含水率で整理した測定結果である。図 5 より、体積含水率 50% 以上を有する超重泥水において、全中性子線低減率が体積含水率に寄与する傾向が確認できなかった。ここで、図 5 において確認される値のばらつきに関しては、速度ごとに異なる中性子粒子の物質に対する挙動や、各物質固有の熱中性子吸収・散乱断面積が影響していると考えられる。

図 6 および図 7 は、超重泥水の厚さの変化に伴う放射線低減率の測定結果を示す。厚さに伴うガンマ線低減率の変化は、上記の湿潤密度との関係に従い、かつ遮蔽体厚さの増加に伴い低減率が増加することが分かる。また、図 6 から超重泥水が水道水よりも優れたガンマ線遮蔽性能を有することが認められる。それに対して、図 7 より超重泥水的全中性子線低減率は、おおむね水道水と同等の性能を示した。図 6 および図 7 から、超重泥水 A および B の遮蔽体厚さ 40 cm において、ガンマ線低減率および全中性子線低減率 99% 以上を示した。超重泥水 C は、水道水とほぼ同比重であることから、ガンマ線低減率が水道水と同様の 95% を示した。また、図 4 および図 5 に示した各状態量による低減率の差が、遮蔽体厚さの増加に伴い、徐々に小さくなることが確認された。したがって、放射線エネルギーの減衰に関して、物質の湿潤密度および体積含水率と共に、放射線の透過距離が重要な要素であることが分かった。

4. 結論

本研究では、超重泥水のガンマ線および中性子線遮蔽性能の定量的評価を行うことで、次の結論を得た。

- (1) 遮蔽材料が同じ厚さの場合、ガンマ線低減率は土質材料の湿潤密度に正比例する。
- (2) 遮蔽材料が同じ厚さの場合、中性子線低減率は土質材料の体積含水率に伴い増加する傾向が認められるが、体積含水率が 50% 以上である超重泥水においては、傾向が顕著でない。また、複数のエネルギー減衰現象が生じることで、材料ごとに固有の相違や、データのばらつきが生じた。
- (3) 高比重である超重泥水は、水道水よりも優れたガンマ線遮蔽性能を有し、遮蔽体厚さ 40 cm において 95% 以上のガンマ線低減率を示した。
- (4) 高含水である超重泥水は、水道水と同等の中性子線遮蔽性能を有し、遮蔽体厚さ 40 cm において 99% 以上の全中性子線低減率を示した。

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・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の採択課題「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術開発と人材育成プログラム（地盤工学会）」の支援により得られたものである。ここに感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 原子力災害対策本部：東京電力(株)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，2015
- 2) Komine, H. : "Radiation shielding experiments of geo-material for recovery from the Fukushima I nuclear power plant accident", Geo-Environmental Engineering 2015 (to be published).
- 3) 氏家伸介, 長江泰史, 成島誠一, 新井靖典, 稲元祐二, 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
- 4) 稲元祐二, 成島誠一, 長江泰史, 水野正之, 氏家伸介: 高比重変形追従材を用いた放射能汚染貯蔵技術の開発, 第 11 回地盤工学シンポジウム発表論文集, 2015

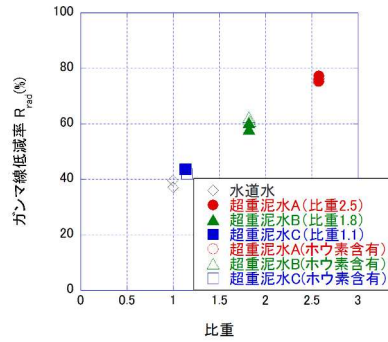


図 4 ガンマ線低減率と比重の関係

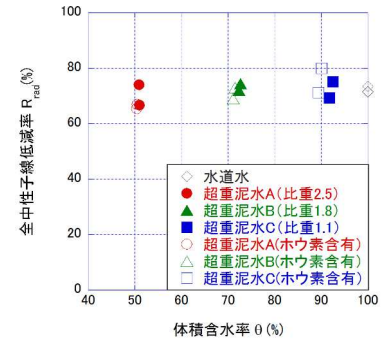


図 5 全中性子線低減率と体積含水率の関係

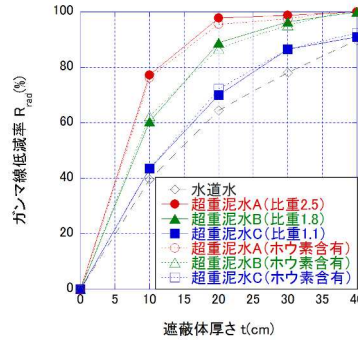


図 6 超重泥水に関するガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係

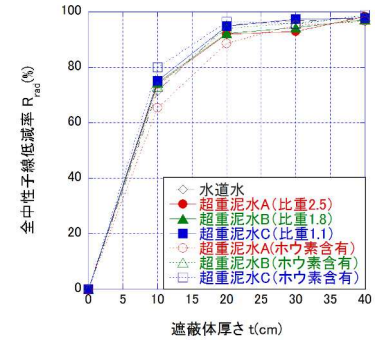


図 7 超重泥水に関する全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係

放射線遮蔽性能を有する超重泥水の線量低減効果の評価および遮蔽設計に向けた試み

早稲田大学 学生会員 ○吉川 絵麻 正会員 小峯秀雄
 早稲田大学 フェロー会員 後藤 茂 (株)ホージュン 正会員 氏家伸介
 (株)西武建設 正会員 成島誠一 (株)テルナイト 正会員 長江泰史
 ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 正会員 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、燃料デブリ取り出しに伴う作業員の安全確保が重要な課題である。中長期ロードマップ¹⁾によると、デブリ取り出しの補助技術として、図1に示す原子炉核納容器に水を充填する冠水工法が有力とされている。しかし、汚染水漏洩や被曝回避の観点から、水に代わる充填材料の使用が望ましい。そこで、特に透過力の大きいガンマ線および中性子線の遮蔽に有効である高比重、高含水の特性を持つ充填型土質系遮蔽材料「超重泥水」が考案された。図2に超重泥水の様子を示す。本研究では、充填型遮蔽材料としての放射線遮蔽性能を定量的に評価した。参考文献2)において、遮蔽体厚さが同じ場合、ガンマ線低減率は遮蔽体の湿潤密度に正比例し、中性子線低減率は体積含水率に依存することを明らかにした。ここで、放射線エネルギーの減衰において、上記に示した状態量とともに透過物質の厚さが重要な要素である。したがって、湿潤密度に放射線の透過距離を乗じることで、ガンマ線低減率に関する一義的な関係を示した。また、中性子線低減率は体積含水率に放射線透過距離を乗じた値に依存する結果を得た。

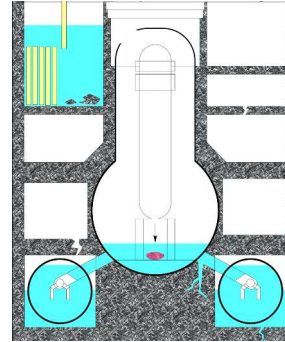


図1 原子炉建屋 図2 超重泥水の様子

2. 実験に使用した超重泥水および放射線遮蔽実験の条件

表1は、本実験で使用した超重泥水の比重および組成配合を示す。超重泥水は粒子沈降を防ぐベントナイト懸濁液に、高比重を維持するための加重材バライトおよび、粘性の調整と安定を保つための分散剤ピロリン酸ナトリウムを加えた泥水である。本研究では、表1に示す超重泥水および同配合の超重泥水に熱中性子の遮蔽に有効であるホウ素（五ホウ酸ナトリウム）を添加したものの合計6種類の試料を用いた。

表1 超重泥水の組成配合

種類	比重	水道水 (g)	ピロリン酸 Na (g)	Na型ベントナイト (g)	バライト (g)
A	2.5	100	0.2	7	400
B	1.8	100	0.2	10	140
C	1.1	100	0.2	12	10

(それぞれに五ホウ酸ナトリウム 4.37 g を添加)

表2 使用線源

対象放射線	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

表2は遮放射線遮蔽実験に使用した線源を示す。本研究では、物質透過力の大きいガンマ線および中性子線を対象とした。中性子線は、エネルギーによりいくつかに分けられるが、本研究では全てのエネルギーレンジの中性子（全中性子と呼ぶ）について測定結果を整理した。

図3は放射線遮蔽実験の様子を示す。本実験では、超重泥水を充填したアクリル容器(内寸:30 cm×30 cm×10 cm)を複数用意し、図3のように配列することにより、遮蔽体厚さ10 cm, 20 cm, 30 cm および40 cmにおける透過線量を測定した。ステージの高さは地面から約1 mであり、地面

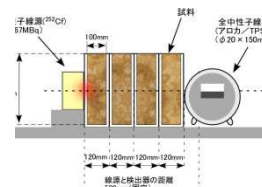


図3 放射線遮蔽実験の様子 (全中性子)

による放射線反射作用の影響を受けないことを確認している。実験は、各線源をアクリル容器の放射線透過面に接するように設置し、線源位置から 50 cm の地点に固定した各検出器により透過線量の測定を行った。

3. 放射線遮蔽材料の厚さに伴う透過線量の変化

図 4 および図 5 に超重泥水の厚さの変化に伴う放射線透過線量の測定結果を示す。検出した放射線の強度は、比較を容易にするために、物質透過中に低減する線量の割合である放射線低減率 R_{rad} (%) として整理した。試料を充填していない空のアクリル容器の透過線量を基準としており、放射線低減率 R_{rad} が 100% のとき、透過線量が 0 であることを示す。厚さに伴うガンマ線低減率の変化は、湿潤密度の大きさに関係し、かつ遮蔽体厚さに伴い増加することが分かる。また、図 4 から超重泥水が水道水よりも優れたガンマ線遮蔽性能を有することが認められる。それに対して、図 5 より超重泥水の全中性子線低減率は、おおむね水道水と同等の性能を示した。また、遮蔽体厚さの増加に伴い、各状態量やホウ素含有による放射線低減率の差が、徐々に小さくなることが確認された。したがって、放射線エネルギーの減衰に関して、物質の湿潤密度および体積含水率と共に、放射線の透過距離が重要な要素であることが分かった。

4. 遮蔽設計に向けた測定結果の整理

超重泥水による遮蔽設計を試みるにあたり、各放射線低減率と一義的な関係にある物理量を特定する。そこで、放射線が透過した全ての物質に関して、湿潤密度に厚さを乗じた値の総和を「総透過密度」として定義する。また、放射線が透過した全ての物質の水分密度（体積含水率/100×水の密度）に厚さを乗じた値の総和を「総透過水分密度」として定義する。ここで、総透過密度は放射線が材料透過中に衝突する電子の存在度を表しており、図 6 はガンマ線低減率との関係を示す。総透過水分密度は水分子の存在度と関係しており、図 7 は中性子線低減率との関係を示す。図 6 より、ガンマ線低減率の関係は総透過密度により一義的に表せることが分かった。一方で、図 7 より全中性子線低減率は、総透過水分密度に依存する傾向があるが、値のばらつきが認められる。したがって、設計に適用するためには、熱中性子反応断面積や強熱減量水分など、材料ごとに固有の値により補正する必要があると考えられる。

5. 結論

本研究では、超重泥水の放射線遮蔽性能について次の結論を得た。

- (1) 超重泥水は、水道水よりも優れたガンマ線遮蔽性能を有するとともに、水道水と同等の中性子線遮蔽性能を有する。
- (2) ガンマ線低減率は、総透過密度で整理することにより、超重泥水の配合によらず一義的な関係性を得た。
- (3) 中性子線低減率は、総透過水分密度に依存する傾向が見られた。しかし、複数のエネルギー減衰現象が生じることで、値のばらつきが生じた。

参考文献

- 1)原子力災害対策本部 (2015) : 東京電力 (株) 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, 2015.
- 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)齋藤祐磨, 小峯秀雄, 成島誠一, 新井靖典, 水野正之, 氏家伸介, 佐古田又規, 吉村貢ら: 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

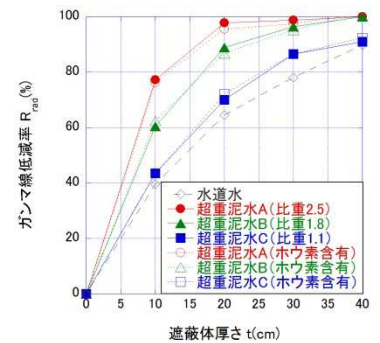


図 4 ガンマ線低減率と遮蔽体厚さの関係

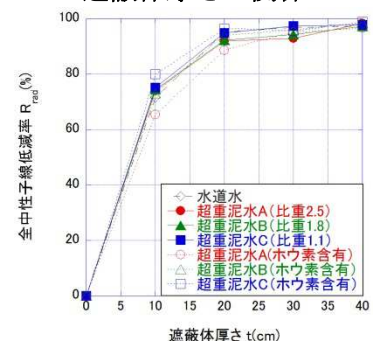


図 5 全中性子線低減率と遮蔽体厚さの関係

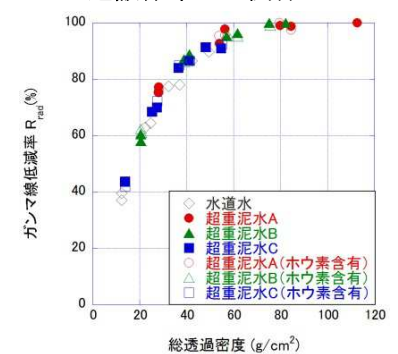


図 6 ガンマ線低減率と総透過密度の関係

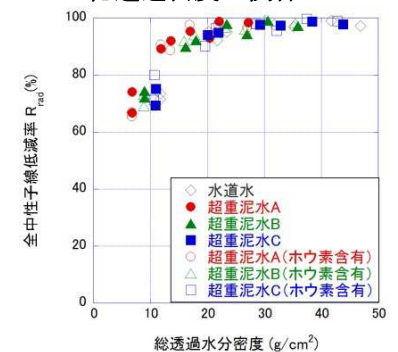


図 7 全中性子線低減率と総透過水分密度の関係