

# 重コンクリート遮へい性能試験

1998年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 重コンクリート遮へい性能試験

江花 稔\*、野田 喜美雄\*、小林 博英\*  
相馬 丞\*、三上 智\*、豊田 素子\*  
大柳 勝美\*\*

### 要 旨

原子力施設においてコンクリートは、放射線に対しての遮へい体として使用されている。その中でも主に原子炉などの遮へい体には、普通コンクリート（密度  $2.35 \text{ g/cm}^3$ ）より密度の大きいコンクリート（約  $3.0 \sim 3.5 \text{ g/cm}^3$ ）が使用されており、遮へい効果が大きいのが特徴である。

今回、遮へい性能を試験した重コンクリートは、密度が普通コンクリートに比べ約2倍 ( $4.99 \text{ g/cm}^3$ ) と大きいため、遮へい体として利用した場合、放射線に対する遮へい性能の更なる向上が期待できる。

本試験では、新しい重コンクリートおよび普通コンクリートについて厚さを10cm、20 cm、30 cmと変えて照射試験を行い、その遮へい性能を比較した。

また、照射試験だけでなく遮へい計算コードを用いた評価や散乱線評価試験を行った。その結果、今回試験した重コンクリートは普通コンクリートに比べ、 $\gamma$ 線に対して2倍、中性子に対してはおよそ1.2倍の遮へい性能を示した。

通常 $\gamma$ 線に対する遮へい性能は遮へい体の密度に比例するため、 $\gamma$ 線についての遮へい結果は妥当である。また、重コンクリートの組成成分中の鉄などによる非弾性散乱の寄与で、中性子の遮へい性能にも向上がみられたものと考えられる。

---

\*放射線管理第一課

\*\*日本放射線エンジニアリング株式会社

## ＜目次＞

1. はじめに . . . . .	1
2. 遮へい試験の概要 . . . . .	2
2.1 放射線の遮へいによる減衰 . . . . .	2
3. 試験体および放射線源等 . . . . .	3
3.1 試験体 . . . . .	3
3.2 使用線源 . . . . .	5
3.3 放射線測定器 . . . . .	5
4. 遮へい性能試験 . . . . .	6
4.1 $\gamma$ 線遮へい性能試験 . . . . .	7
4.2 中性子遮へい性能試験 . . . . .	17
5. まとめ . . . . .	24
5.1 $\gamma$ 線に対しての遮へい性能 . . . . .	24
5.2 中性子に対しての遮へい性能 . . . . .	24
6. 謝辞 . . . . .	25
7. 参考文献 . . . . .	26
付録 散乱線評価試験 . . . . .	27

## ＜表 目次＞

表 3-1 重コンクリートの元素組成 . . . . .	4
表 3-2 普通コンクリートの元素組成 . . . . .	4
表 3-3 試験装置および放射線源 . . . . .	5
表 4-1 $\gamma$ 線照射による試験結果 . . . . .	8
表 4-2 $\gamma$ 線遮へい計算結果 . . . . .	12
表 4-3 ビルドアップと散乱線を考慮した試験結果 . . . . .	15
表 4-4 中性子照射による試験結果 . . . . .	18
表 4-5 中性子遮へい計算結果 . . . . .	21

## <図 目次>

図 2.1 遮へい体と放射線との相互作用 . . . . .	3
図 3.1 $\gamma$ 線用放射線測定器 . . . . .	5
図 3.2 中性子用放射線測定器 . . . . .	5
図 4.1 遮へい性能試験方法の概要 . . . . .	6
図 4.2 $^{137}\text{Cs}$ 照射試験の様子 . . . . .	9
図 4.3 $^{60}\text{Co}$ 照射試験の様子 . . . . .	9
図 4.4 $^{1137}\text{Cs}$ 照射 2 mによる遮へい体透過率 . . . . .	10
図 4.5 $^{137}\text{Cs}$ 照射 2 mによる遮へい体透過率（散乱線補正） . . . . .	10
図 4.6 $^{137}\text{Cs}$ 照射 3.5 mによる遮へい体透過率 . . . . .	11
図 4.7 $^{60}\text{Co}$ 照射による遮へい体透過率 . . . . .	11
図 4.8 $^{137}\text{Cs}$ による実測値と計算値との透過率解析 . . . . .	13
図 4.9 $^{60}\text{Co}$ による実測値と計算値との透過率解析 . . . . .	13
図 4.10 中性子照射試験の様子 . . . . .	19
図 4.11 $^{241}\text{Am-Be}$ 照射による遮へい体透過率 . . . . .	20
図 4.12 $^{252}\text{Cf}$ 照射による遮へい体透過率 . . . . .	20
図 4.13 $^{241}\text{Am-Be}$ による実測値と計算値との透過率解析 . . . . .	22
図 4.14 $^{252}\text{Cf}$ による実測値と計算値との透過率解析 . . . . .	22

## 1. はじめに

原子力施設においてコンクリートは、放射線に対しての遮へい体として使用されている。その中でも主に原子炉などの遮へい体には、普通コンクリート（密度  $2.35 \text{ g/cm}^3$ ）より密度の大きいコンクリート（約  $3.0\sim3.5 \text{ g/cm}^3$ ）が使用されており、遮へい効果が大きいのが特徴である。

今回、遮へい性能を試験した重コンクリート（密度  $4.99 \text{ g/cm}^3$ 、以下、重コンクリートと言う場合はこれを指すものとする）は、密度が普通コンクリートに比べ約2倍と大きいため、遮へい体として利用した場合、放射線に対する遮へい性能の更なる向上が期待できる。

本試験は、計測機器校正施設内の照射室A、Bにおいて数種の線源および照射装置を用い試験を行った。その結果、試験体である重コンクリートは遮へい体として優れた性能を示すことを確認できた。また、遮へい計算コードを用いての評価においても実験値と同等の性能を確認した。

本書は遮へい体の遮へい性能や試験の方法および結果を示したものである。

試験方法および得られたデータは、今後同様の試験や遮へい性能評価における参考となれば幸いである。

## 2. 遮へい試験の概要

### 2.1 放射線の遮へいによる減衰<sup>1)</sup>

単一エネルギーの光子（ $\gamma$ 線）の狭い平行線束が、垂直な吸收層（遮へい体）に入射した場合、入射光子数（ $\gamma$ 線の本数、あるいは放射線の強さ、すなわち照射線量率） $I_0$ と通過光子数 $I$ との関係は、一般的に次式で表すことができる。

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

$\mu$  : 線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )

$x$  : 遮へい体の厚さ (cm)

式(2.1)に示される $\mu$ は線減弱係数と呼ばれ、単位長さで光子の数が減少する割合を意味する。また、この値から吸収層の遮へい能力を評価することができる。すなわち、放射線源と放射線測定器間の距離を一定に保ち、その間に遮へい体を置いた場合と遮へい体のない場合での放射線測定器による測定結果から $\mu$ の値を評価することができる。

$\mu$ は一般的に遮へい体の密度に比例し、 $\gamma$ 線のエネルギーに反比例する。図2.1に示すように、放射線測定器に入射したものには、遮へい体を通過した放射線（直接線）①に加え、遮へい体で散乱した成分④、照射室内の空気、床、壁で散乱してくる成分⑤、宇宙線や大地からの自然放射線であるバックグラウンド（以下、BGと記す）成分⑥が含まれている。このうち④および⑤は散乱線成分と呼ばれるものであり、特に④の成分は遮へい体の密度や厚さに比例して大きくなる。このため(2.1)式は次式により散乱線の補正を行うことがある。

$$I = I_0 B e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

ここで、Bはビルドアップ係数（おおよそ $\mu x$ に比例する）である。

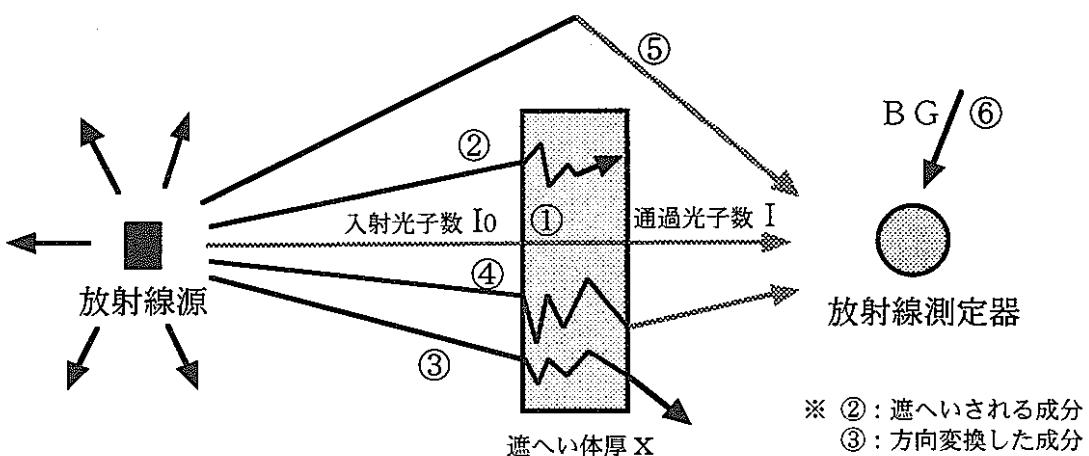


図 2.1 遮へい体と放射線の相互作用

遮へい体の遮へい性能は、線源から放射される放射線のうち遮へい体に入射する直接線がどの程度減衰したかにより決定される。

ただし、中性子については遮へい体の中で起こる現象が $\gamma$ 線とは異なることから、式(2.1)を適用することができないが、今回は便宜上 $\gamma$ 線と同様の考え方を用い遮へい性能の評価の参考とした。

### 3. 試験体および放射線源等

本試験において使用した放射線源および器材等を以下に示す。

#### 3.1 試験体

##### 3.1.1 重コンクリート

試験体数：3体

密度 :  $4.99 \text{ g/cm}^3$

形状 : (W)400 mm × (H)400 mm × (D)100 mm

##### 3.1.2 普通コンクリート

試験体数：3体

密度 :  $2.34 \text{ g/cm}^3$

形状 : (W)400 mm × (H)400 mm × (D)100 mm

表3-1に重コンクリート、表3-2に普通コンクリートの元素組成を示す。

表 3-1 重コンクリートの元素組成 (密度 4.99 g/cm<sup>3</sup>)

材 料	種 類	単位容積 重量 (gm/cm <sup>3</sup> )	組 成 (Weight %)																			
			H	O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Na	K	Ti	P	Mn	C	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	合 計
粗骨材	鉄球	2.96			0.2		96.94			0.12				0.16	0.87	0.82	0.89	0.01	0.02	0.01	0.01	100
細骨材	鉄粉	1.12		0.5	0.2		98.62	0.01		0.013				0.16	0.23	0.183	0.03					99.45
セメント	ポルトランド	0.50	0	35.38	10.24	2.75	2.10	45.45	0.96	0.80	0.26	0.40	0.26	0.04	0.12							98.78
フライッシュ	海外炭	0.17	0.08	48.24	27.58	14.18	3.22	2.22	0.72	0.24	0.45	0.40	0.94			2.30						100.57
水	結合水	0.24	11.11	88.89																		100
計		4.99	0.027	0.478	0.107	0.038	3.995	0.231	0.006	0.008	0.002	0.003	0.003	0.007	0.29	0.030	0.27	0.000	0.000	0.000	4.99	

(前田建設工業株 提供)

—

表 3-2 普通コンクリートの元素組成 (密度 2.34 g/cm<sup>3</sup>)

材 料	種 類	単位容積 重量 (gm/cm <sup>3</sup> )	組 成 (Weight %)																			
			H	O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Na	K	Ti	P	Mn	C	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	合 計
粗骨材	砂利	1.03	0.21	47.1	27.4	8.49	5.88	4.2	2		2.75	1.64	0.35									100
細骨材	砂	0.87	0.23	49.9	34.4	5.95	2.09	1.83	1.28		1.81	2.26	0.25									100
セメント	ポルトランド	0.28	0	35.38	10.24	2.75	2.10	45.45	0.96	0.80	0.26	0.40	0.26	0.04	0.12							98.78
フライッシュ	海外炭	0.00	0.08	48.24	27.58	14.18	3.22	2.22	0.72	0.24	0.45	0.40	0.94			2.30						100.6
水	結合水	0.16	11.11	88.9																		100
計		2.34	0.021	1.158	0.612	0.147	0.085	0.187	0.034	0.002	0.045	0.038	0.007	0.007	0.29	0.030	0.27	0.000	0.000	0.000	2.34	

(前田建設工業株 提供)

### 3.2 使用線源

本試験に使用した放射線源等を表 3-3 に示す。

表 3-3 試験装置および放射線源

照射装置	試験場所	線 源	強 度 (Bq)	照射線量率 (mR/h)*	照射距離 (m)	エネルギー (MeV)	半減期 (年)
<sup>137</sup> Cs照射装置	照射室A	<sup>137</sup> Cs	1.11 T	1878.82	2	0.662	30.1
<sup>137</sup> Cs照射装置	照射室A	<sup>137</sup> Cs	1.11 T	611.98	3.5	0.662	30.1
γ線照射装置	照射室B	<sup>60</sup> Co	3.7 G	10.85	1	1.17,1.33	5.27
中性子線照射装置	照射室B	<sup>241</sup> Am-Be	37 G	24.85 *	1	4.46	432.2
中性子線照射装置	照射室B	<sup>252</sup> Cf	999 M	491.53*	1	2.37	2.65

\* 中性子については線量当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )

### 3.3 放射線測定器

以下に遮へい性能試験に用いた放射線測定器を記す。

#### 3.3.1 γ線用放射線測定器

- 電離箱（ラドコン線量計 500型）

測定器：MODEL 550-101

検出器：MODEL 550-3

容積 330 cc

測定範囲：0 ~ 2,000 mR/h

製造元：VICTOREEN（ビクトリーン）社

- タイムカウンタ（TMC-101）

製造元：東洋メディック株式会社

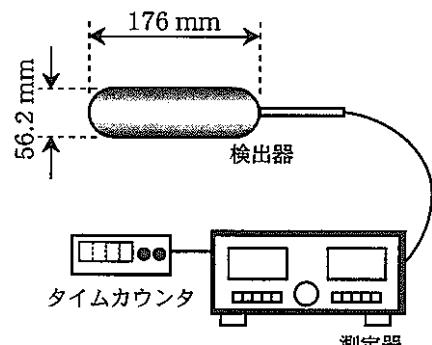


図 3.1 γ 線用放射線測定器

#### 3.3.2 中性子用放射線測定器

- レムカウンタ（TYPE 2020D）

測定範囲： $1 \sim 10^5 \mu\text{Sv}/\text{h}$

製造元：Studsvik 社製

- カウンタスケーラー(MODEL TDC-105)

製造元：Aloka株式会社

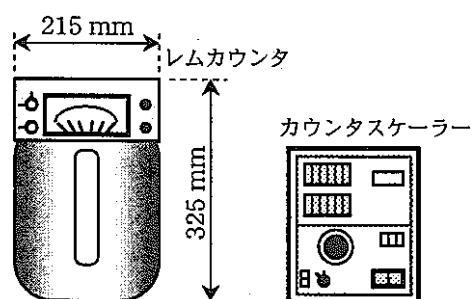


図 3.2 中性子用放射線測定器

#### 4. 遮へい性能試験

重コンクリートと普通コンクリートの遮へい性能を比較するため、以下に示す試験を行い遮へい体としての性能を調査した。

- ・放射線源を用いた照射試験
- ・計算コードを用いた解析評価
- ・散乱線の影響試験

図 4.1 の遮へい性能試験方法の概要に示すように、放射線源と放射線測定器の間に遮へい体を設置し、遮へい体の厚さを変化させた時の線量率を測定した。

さらに、本試験結果の整合性を確認するために図 4.1 の試験条件をモデリングし計算コードによる解析を行った。また、照射試験時に影響が考えられる散乱線についても試験を行い評価した（試験方法等については付録に示す）。本試験ではそれぞれ、 $\gamma$ 線と中性子について行った。以下に試験内容についての詳細を説明する。

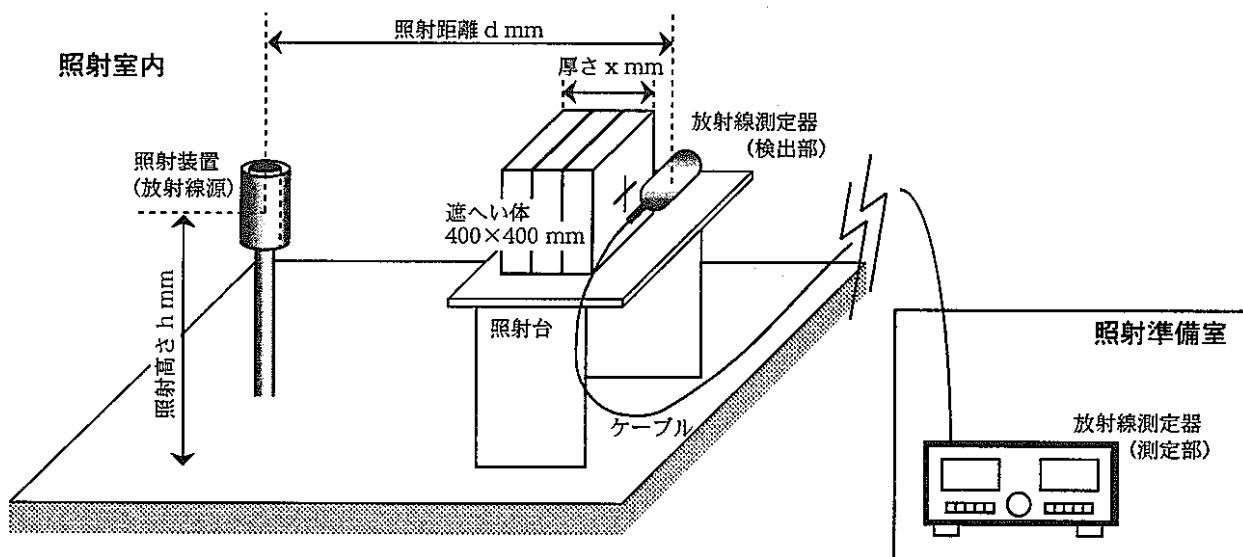


図 4.1 遮へい性能試験方法の概要

## 4.1 $\gamma$ 線遮へい性能試験

### 4.1.1 $\gamma$ 線照射試験

$\gamma$ 線源と放射線測定器の間に遮へい体のコンクリートを設置し、厚さを 10 cm ~30 cmに変化させた時の照射線量率を放射線測定器により測定した。なお、 $\gamma$ 線源は表 3-3 に示す  $^{137}\text{Cs}$  (1.11 TBq) と  $^{60}\text{Co}$  (3.7 GBq) を使用した。

#### (1) 試験方法

$\gamma$ 線源と放射線測定器間の距離は、 $^{137}\text{Cs}$  で 2 mおよび 3.5 mの 2 点、 $^{60}\text{Co}$  では 1 mとした。また、床からの照射位置（高さ）は、それぞれの線源中心位置である 1.27 m、1.45 mとした。照射線量率の測定は、各遮へい厚毎に数回測定し平均値を測定結果とした。また、各遮へい厚毎の測定時間は照射線量率に応じて決め、指示値の読み取りにはエレクトロメータを用い、タイムカウンタにより測定時間を制御した。

図 4.2 に  $^{137}\text{Cs}$  照射試験、図 4.3 に  $^{60}\text{Co}$  照射試験の様子を示す。

#### (2) 評価方法

$\gamma$ 線照射による各遮へい体の透過率は次式 (4.1) で求めた。

$$\text{透過率} (\%) = \frac{\text{遮へい体設置時の照射線量率} - \text{BG}}{\text{遮へい体無しの時の照射線量率} - \text{BG}} \times 100 \quad \dots \quad (4.1)$$

また、重コンクリートと普通コンクリートの遮へい性能を比較するため、式 (2.1) より遮へい体の遮へい厚毎の線減弱係数を求め次式 (4.2) を用い線減弱係数比 ( $R_\gamma$ ) を求めた。

$$\text{線減弱係数比} (R_\gamma) = \frac{\text{線減弱係数} (\mu_{\gamma A})}{\text{線減弱係数} (\mu_{\gamma B})} \quad \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

ここで、 $\mu_{\gamma A}$  :  $\gamma$ 線照射における重コンクリートの線減弱係数

$\mu_{\gamma B}$  :  $\gamma$ 線照射における普通コンクリートの線減弱係数

とする。

## (3) 試験結果

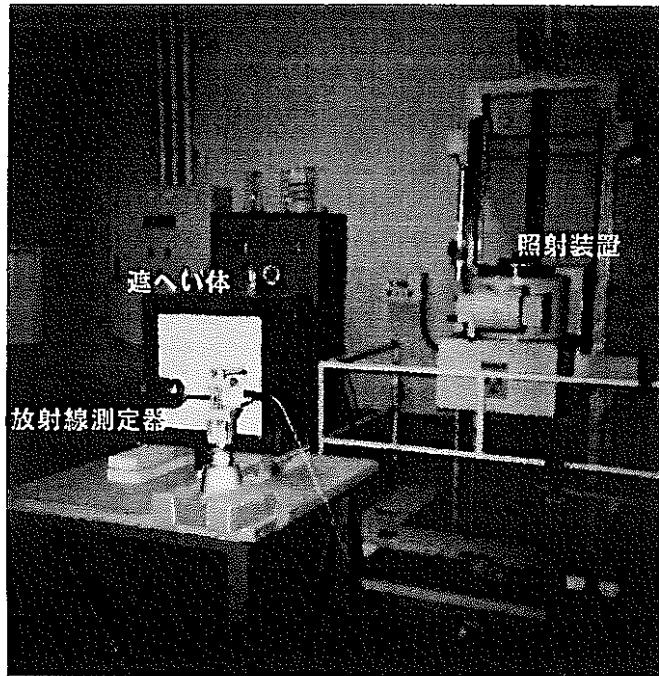
表 4-1 に  $\gamma$  線照射による試験結果を示す。なお、線減弱係数比は式 4.2 での評価方法に沿って算出したものである。表中の値は、少數点以下第 2 位まで表示した。また、本表には考察に述べる理由により散乱線成分の補正をしない値を示した（参考として  $^{137}\text{Cs}$  2 mについては散乱線の補正をし評価してみた。散乱線の試験方法および評価等は付録に示す）。

図 4.4 に  $^{137}\text{Cs}$  照射 2 m、図 4.5 に  $^{137}\text{Cs}$  照射 2 m（散乱線補正）、図 4.6 に  $^{137}\text{Cs}$  照射 3.5 m、図 4.7 に  $^{60}\text{Co}$  照射による遮へい体透過率を示す。

表 4-1  $\gamma$  線照射による試験結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート			普通コンクリート			線減弱係数比 $R_r$	備 考
		透過照射* 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma A}$ (cm <sup>-1</sup> )	透過照射* 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma B}$ (cm <sup>-1</sup> )		
$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	0	1878.82	100	—	1878.82	100	—	—	散乱線補正 散乱線の値は 3.95 mR/hで ある
	10	107.41	5.72	0.29	470.50	25.04	0.14	2.07	
	20	17.50	0.93	0.23	126.48	6.73	0.13	1.73	
	30	7.93	0.42	0.18	—	—	—	—	
$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	0	1874.87	100	—	1874.87	100	—	—	散乱線補正 散乱線の値は 3.95 mR/hで ある
	10	103.46	5.52	0.29	466.55	24.88	0.14	2.08	
	20	13.55	0.72	0.23	122.53	6.54	0.13	1.81	
	30	3.98	0.21	0.21	—	—	0.12	—	
$^{137}\text{Cs}$ (3.5 m)	0	611.98	100	—	611.98	100	—	—	
	10	42.85	7.00	0.27	157.61	25.75	0.14	1.96	
	20	10.25	1.67	0.20	45.52	7.44	0.13	1.57	
	30	5.32	0.87	0.16	15.34	2.51	0.12	1.33	
$^{60}\text{Co}$ (1 m)	0	10.85	100	—	10.85	100	—	—	
	10	1.73	15.94	0.18	4.81	44.33	0.08	2.26	
	20	0.27	2.49	0.18	1.84	16.96	0.09	2.07	
	30	—	—	—	0.67	6.18	0.09	—	

\* 各遮へい体の厚さを通過した照射線量率。



- ・試験条件

γ線源： $^{137}\text{Cs}$

照射距離：2 mおよび3.5 m

照射位置：1.27 m

図 4.2  $^{137}\text{Cs}$  照射試験の様子



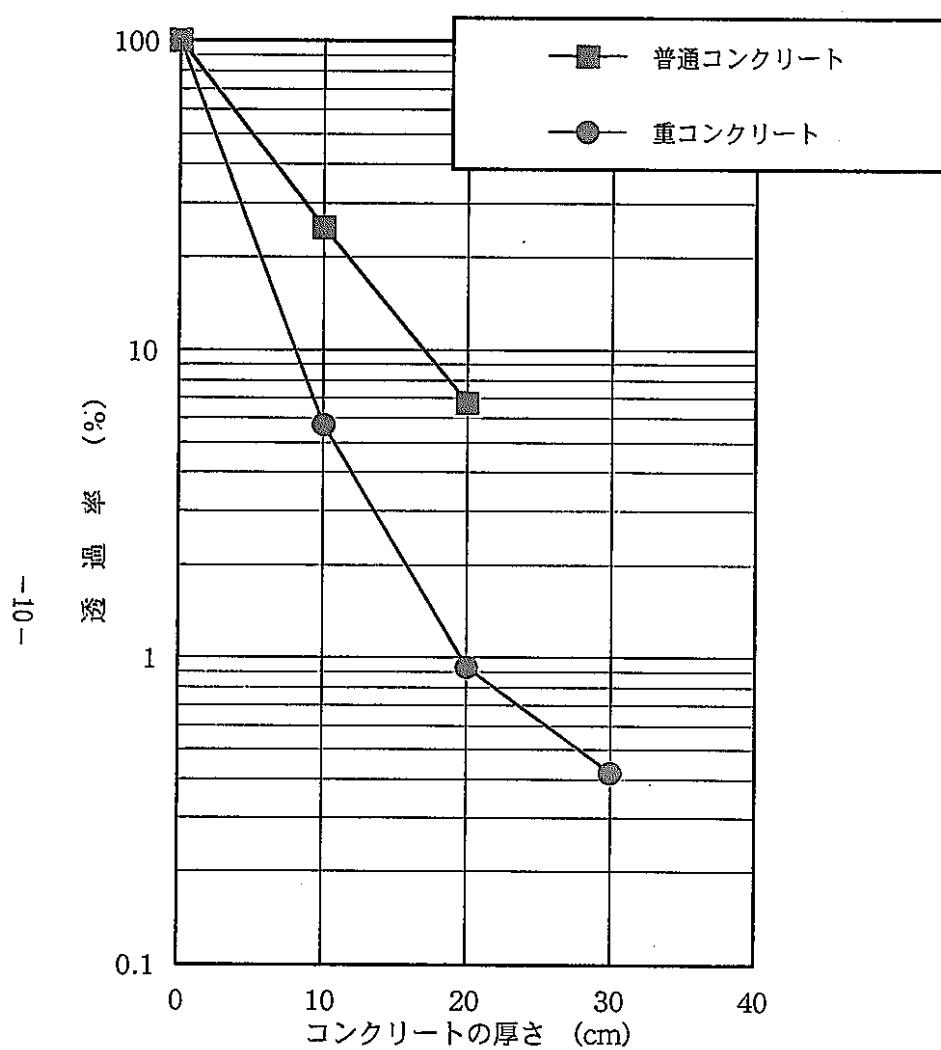
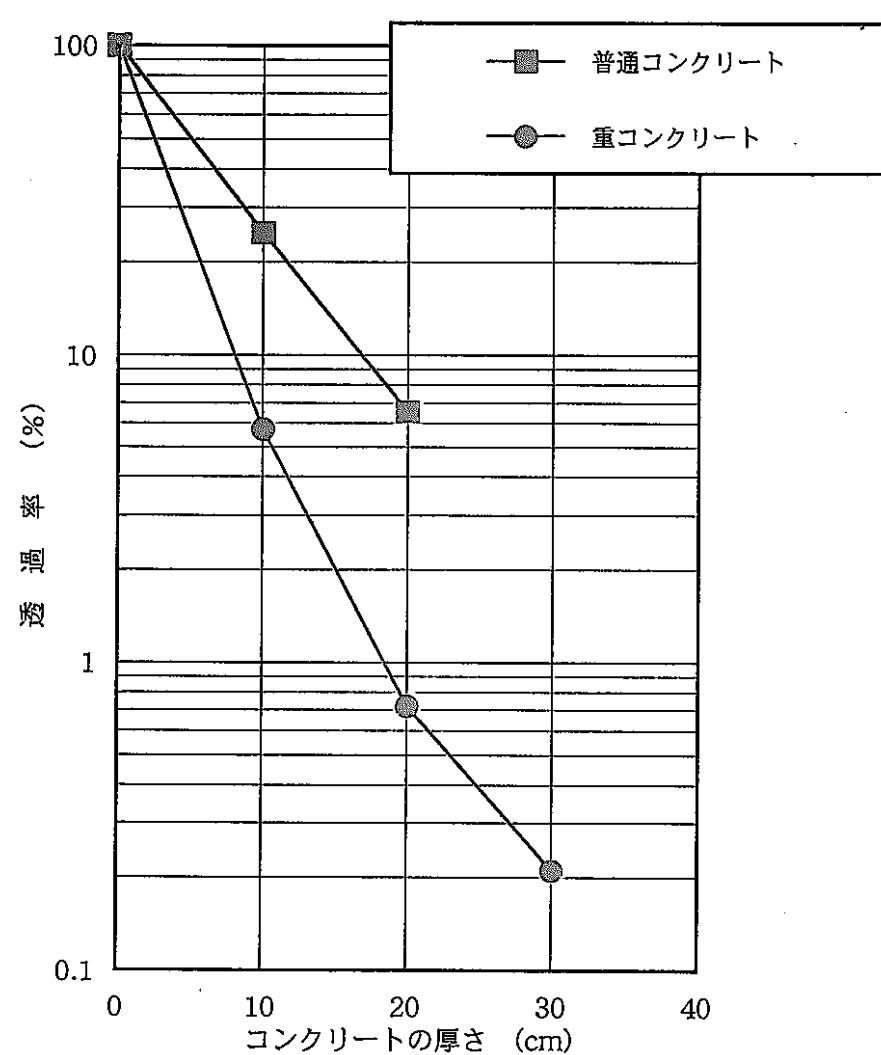
- ・試験条件

γ線源： $^{60}\text{Co}$

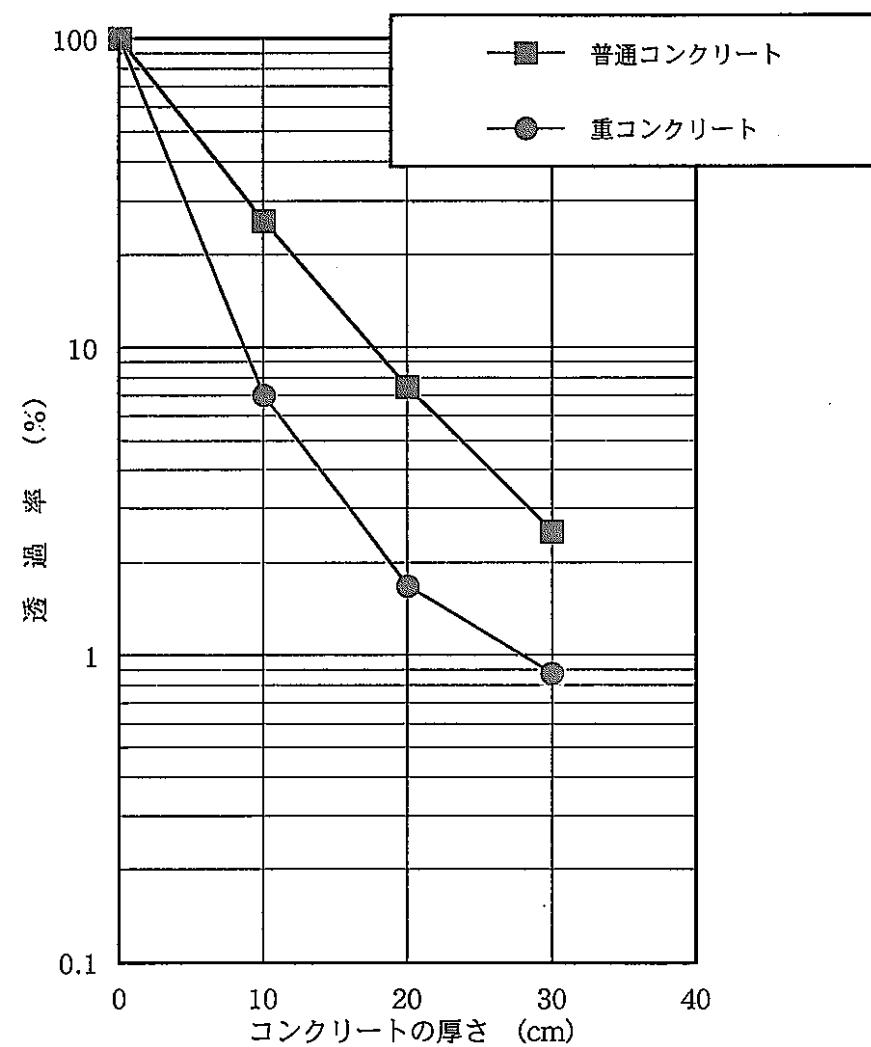
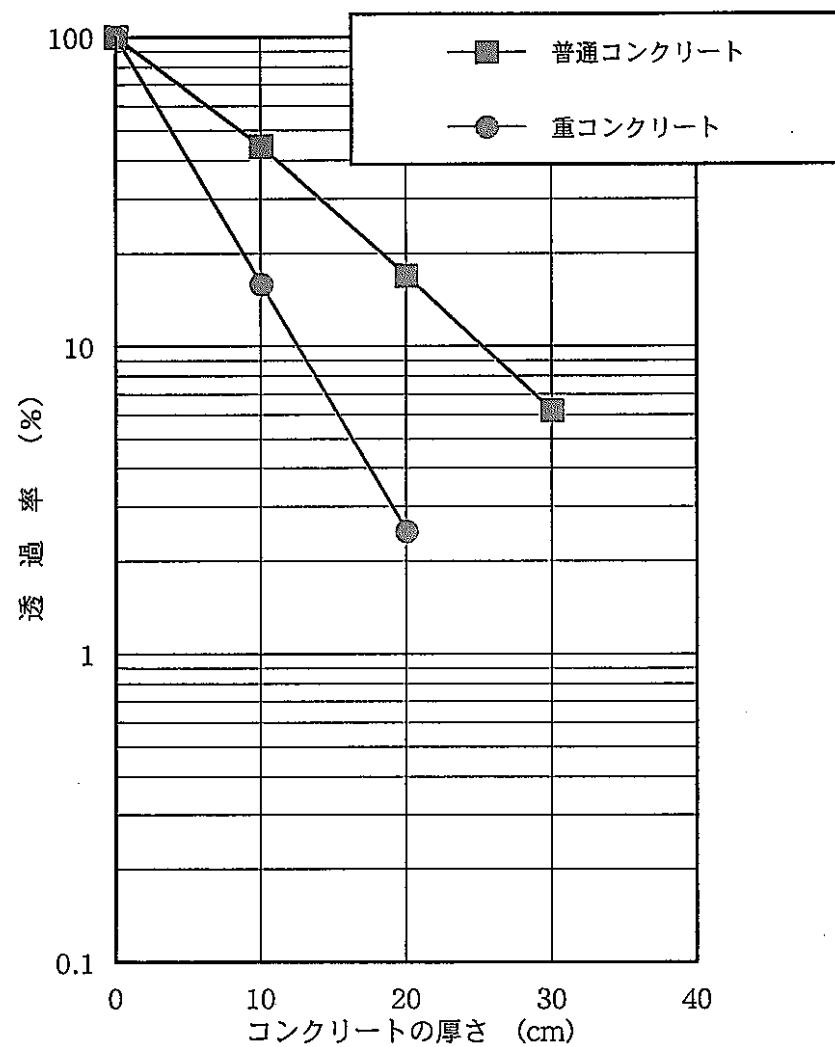
照射距離：1 m

照射位置：1.45 m

図 4.3  $^{60}\text{Co}$  照射試験の様子

図 4.4  $^{137}\text{Cs}$  照射 2 mによる遮へい体透過率図 4.5  $^{137}\text{Cs}$  照射 2 mによる  
遮へい体透過率（散乱線補正）

- 11 -

図 4.6  $^{137}\text{Cs}$  照射 3.5 m による遮へい体透過率図 4.7  $^{60}\text{Co}$  照射による遮へい体透過率

#### 4.1.2 遮へい計算による解析

遮へい計算コードを用い、重コンクリートと普通コンクリートの $\gamma$ 線に対する遮へい性能をシミュレートし、 $\gamma$ 線照射試験結果との整合性を確認した。

使用した遮へい計算コードは、モンテカルロ法 (MCNP 4A)<sup>2)</sup> である。

##### (1) 試験方法

シミュレーションを行うにあたり、照射室Aおよび照射室Bを3次元的にモデリングし、4.1.1の $\gamma$ 線照射試験と同様な条件を設計した。また、計算による統計誤差を少なくするために放射線源から放出される $\gamma$ 線の数を10,000個として計算した。なお、 $\gamma$ 線に対する遮へい性能の評価方法は、4.1.1での評価方法と同じである。

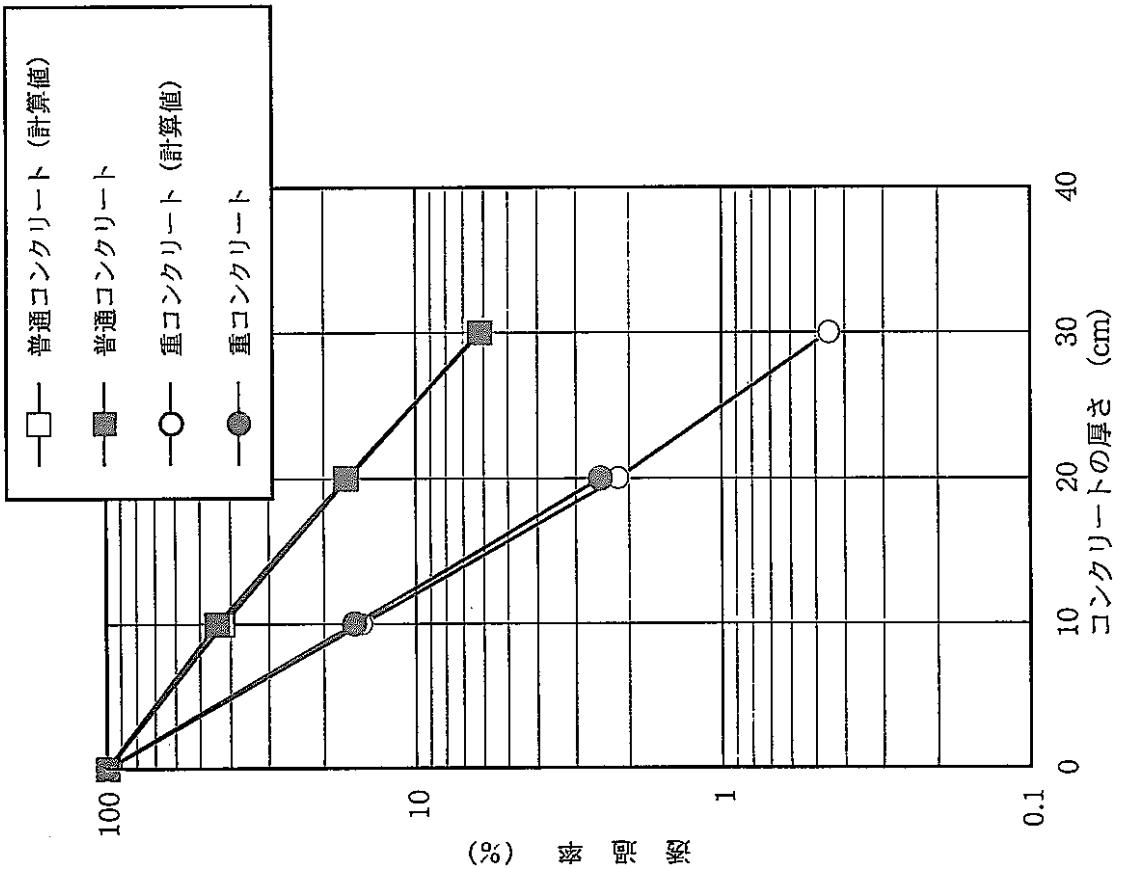
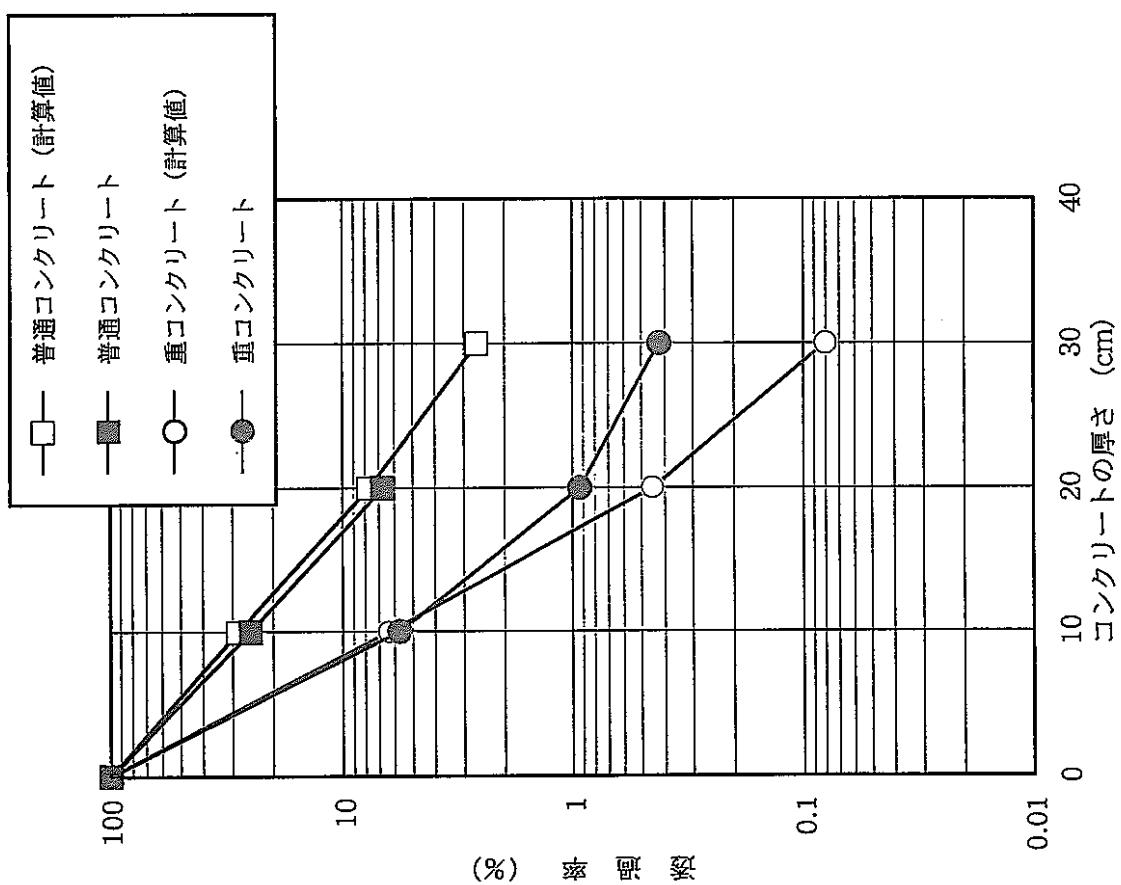
##### (2) 試験結果

表4-2に $\gamma$ 線遮へい計算結果を示す。また、図4.8に<sup>137</sup>Cs、図4.9に<sup>60</sup>Coによる実測値と計算値との透過率解析を示す。なお、 $\gamma$ 線照射試験において<sup>137</sup>Csの性能評価は2mおよび3.5mの2点において実施したが、本評価では2mのみとした。また、計算値は散乱線を含めて評価しているため、実測値も散乱線を補正しない値で比較した。

表4-2  $\gamma$ 線遮へい計算結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート				普通コンクリート				線減弱係数比 $R_\gamma$	
		計算値*		透過率		$\mu_{\gamma A}$ (cm <sup>-1</sup> )	計算値*		透過率		
		計算値 (R)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)		計算値 (R)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)	
<sup>137</sup> Cs (2 m)	0	$6.49 \times 10^{-2}$	100	100	—	$6.49 \times 10^{-2}$	100	100	—	—	
	10	$4.12 \times 10^{-3}$	6.35	5.72	0.28	$1.83 \times 10^{-2}$	28.24	25.04	0.13	2.15	
	20	$2.91 \times 10^{-4}$	0.45	0.93	0.27	$5.04 \times 10^{-3}$	7.76	6.73	0.13	2.08	
	30	$5.13 \times 10^{-5}$	0.08	0.42	0.24	$1.70 \times 10^{-3}$	2.62	—	0.12	2.00	
<sup>60</sup> Co (1 m)	0	$5.56 \times 10^{-3}$	100	100	—	$5.56 \times 10^{-3}$	100	100	—	—	
	10	$8.37 \times 10^{-3}$	15.04	5.52	0.19	$2.36 \times 10^{-3}$	42.45	44.33	0.09	2.11	
	20	$1.21 \times 10^{-4}$	2.18	0.72	0.19	$9.27 \times 10^{-4}$	16.68	16.96	0.09	2.11	
	30	$2.49 \times 10^{-5}$	0.45	0.21	0.18	$3.47 \times 10^{-4}$	—	6.18	0.09	2.00	

\* 計算によって得られる透過 $\gamma$ 線の単位は「個数」であるため、中性子遮蔽設計ハンドブック(第13.3.2、13.3.3表)に記載されている係数を用い、照射線量に換算した。

図 4.8  $^{137}\text{Cs}$ による実測値と計算値との透過率解析図 4.9  $^{60}\text{Co}$ による実測値と計算値との透過率解析

#### 4.1.3 考察

通常遮へい体の遮へい性能を評価する際は、散乱線による影響を考慮し測定値を補正することが必要である。本試験では、付録に示すような試験方法および条件で散乱線評価試験を行った。

しかし、この方法では付録の 2 に示す試験結果より、遮へい性能の評価上妥当でないことが分かった。このため今回は、散乱線を考慮しないこととした。

また、遮へい性能の評価にあたっては、遮へい厚 10 cm の値を使用する。これは、重コンクリートの遮へい厚 20 cm および 30 cm では、 $\gamma$  線が十分に減弱されてしまい測定値に対しての測定誤差の割合が大きくなるためである。

通常、同一核種の場合、 $\gamma$  線での遮へい性能は遮へい体の密度に比例することから、重コンクリートと普通コンクリートとでは、遮へい性能は 2 倍程度であると推定された。試験結果でも  $^{137}\text{Cs}$  については重コンクリートは普通コンクリートの約 2 倍の遮へい性能があることが確認された。また、参考で散乱線を補正した場合でも同様の結果であった。さらに、 $^{60}\text{Co}$  についても同じ結果が得られた。

また、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{60}\text{Co}$  を比較した場合  $^{137}\text{Cs}$  の方が減弱される割合が多く線減弱係数 ( $\mu_\gamma$ ) の値は  $^{60}\text{Co}$  より大きくなっている。これは、エネルギーの高い  $\gamma$  線ほど透過力が大きく遮へいされにくうことから説明できる。そのため線減弱係数 ( $\mu_\gamma$ ) の大きくなる割合は重コンクリートも普通コンクリートもほぼ同じであり、試験結果は妥当であるといえる。

以上の考察から、 $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  ともに今回試験した重コンクリートは普通コンクリートの約 2 倍の遮へい性能があり、 $\gamma$  線の遮へいに対して有効であるといえる。

なお、参考としてビルドアップの影響を考慮し評価した場合を以下に述べる。

ビルドアップ現象<sup>1)</sup>とは、広い線束の  $\gamma$  線が遮へい体の中でコンプトン散乱によりエネルギーを失いつつも散乱して直接線に加わる現象である。図 2.1 の遮へい体と放射線の相互作用に示す④遮へい体で散乱線し放射線測定器に入射した成分がこれにあたる。

遮へい性能を評価する上では、放射線源から出た  $\gamma$  線のうち吸収物質中（遮へい体）で相互作用を免れたもののみを測定することが重要である。

しかしながら実際は、図 2.1 に示すような状況下で行われる場合が多い。この計算はビルドアップ係数と呼ばれる補正係数  $B$  を考慮した式 (2.2) で表すことができる。ビルドアップ係数は遮へい体材料、遮へい体の厚さ、 $\gamma$  線エネルギー、有効線束の広がり等に依存する関数であるため、

$$I = I_0 B(x, E_\gamma) e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

$x$  : 遮へい体の厚さ

$E_\gamma$  :  $\gamma$  線のエネルギー

と表すことができるが  $B$  の値を限定することは難しい。

およその目安として、 $\mu x < 1$  の時は  $B \approx 1$ 、 $\mu x > 1$  の時は  $B \approx \mu x$  と近似できる。今回の試験ではビルドアップ係数が大きく寄与すると考えられ、この影響を無視できないため後記する  $B \approx \mu x$  で評価してみた。

(2.1) 式から減衰率 ( $I/I_0$ ) は、(4.4) 式のように変形できる。

$$\frac{I}{I_0} = \mu x e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

上記 (4.4) 式を用い、 $^{137}\text{Cs}$  照射 2 m (散乱線補正) での測定結果についてビルドアップを考慮し評価した結果、重コンクリートと普通コンクリートの線減弱係数比 ( $R_\gamma$ ) は表 4-3 に示すように約 2 倍 (程度) と求められた。表 4-3 にビルドアップと散乱線を考慮した試験結果を示す。

表 4-3 ビルドアップと散乱線を考慮した試験結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート			普通コンクリート			線減弱係数比 $R_\gamma$
		透過照射* 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma A}$ (cm <sup>-1</sup> )	透過照射* 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma B}$ (cm <sup>-1</sup> )	
$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	0	1874.87	100	—	1874.87	100	—	—
	10	103.46	5.52	0.44	466.55	24.88	0.22	2.02
	20	13.55	0.72	0.34	122.53	6.54	0.21	1.65
	30	3.98	0.21	0.18	—	—	—	—

\* 各遮へい体の厚さを通過した照射線量率。

この評価に使用した  $B \doteq \mu x$  はあくまで目安であるため、線減弱係数 ( $\mu_r$ ) を厳密に決定することはできないが、散乱線を含めずに算出した場合と比較しても線減弱係数 ( $\mu_r$ ) の値は同等となった。よって、ビルドアップを考慮しても 2 倍程度の遮へい効果は得られるといえる。

この評価では普通コンクリートの線減弱係数 ( $\mu_{rB}$ ) が  $0.22 \text{ cm}^{-1}$  と評価された。この値は、アイソトープ便覧 改訂 3 版<sup>注)</sup> に示されている普通コンクリートに対する  $^{137}\text{Cs}$  の  $\mu$  ( $0.18 \text{ cm}^{-1}$ ) と異なっているが、この理由は今回の試験で見積もったビルドアップ係数の差によるものと考えられる。

次に遮へい計算結果において、 $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  での透過率の計算値と実測値を比較すると、ほぼ一致した結果が得られた。また、遮へい性能を評価する線減弱係数 ( $\mu_r$ ) および線減弱係数比 ( $R_r$ ) も  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  とともに実測値と一致した。

よって、遮へい計算においても重コンクリートは普通コンクリートに比べ約 2 倍の遮へい性能があることが認められた。

---

注) 日本アイソトープ協会編 アイソトープ便覧 (改定 3 版) に示される値を使用した。

## 4.2 中性子遮へい性能試験<sup>3) 4)</sup>

### 4.2.1 中性子照射試験

中性子においても 4.1.1 に示す  $\gamma$  線照射試験と同様に中性子線源と放射線測定器の間に遮へい体のコンクリートを設置し、遮へい体の厚さを 10 cm～30 cm に変化させた時の放射線測定器による線量当量率（カウント数）を測定した。

なお、中性子線源は表 3-3 に示す、 $^{241}\text{Am-Be}$  (37 GBq) および  $^{252}\text{Cf}$  (999 MBq) を使用した。

#### (1) 試験方法

中性子線源と放射線測定器間の距離は、 $^{241}\text{Am-Be}$  および  $^{252}\text{Cf}$  とともに 1 m とし、床からの照射位置（高さ）は、線源中心位置である 1.27 m とした。測定時間は線量当量率（カウント数）に応じ決め指示値の読み取りにはカウンタスケーラーを用いた。図 4.10 に中性子照射試験の様子を示す。

#### (2) 評価方法

中性子に対する各遮へい体の透過率は次式 (4.5) により求めた。

$$\text{透過率} (\%) = \frac{\text{遮へい体設置時のカウント数} - \text{BG}}{\text{遮へい体無しの時のカウント数} - \text{BG}} \times 100 \quad \dots \quad (4.5)$$

中性子は  $\gamma$  線のように (2.1) 式を用いることは評価上適さないが、便宜上 (2.1) 式の線減弱係数  $\mu$  を中性子に対する減弱係数とみなしそれを評価することとした。また、 $\gamma$  線同様に重コンクリートと普通コンクリートの遮へい性能の比較には、同じ厚さの遮へい体に対する中性子減弱係数 ( $\mu_n$ ) の比で求めることとした。減弱係数比 ( $R_n$ ) は式 (4.6) を用い求めた。

$$\text{減弱係数比 } (R_n) = \frac{\text{減弱係数 } (\mu_{nA})}{\text{減弱係数 } (\mu_{nB})} \quad \dots \dots \dots \quad (4.6)$$

ここで、 $\mu_{nA}$ ：中性子照射における重コンクリートの減弱係数

$\mu_{nB}$ ：中性子照射における普通コンクリートの減弱係数

とする。

### (3) 試験結果

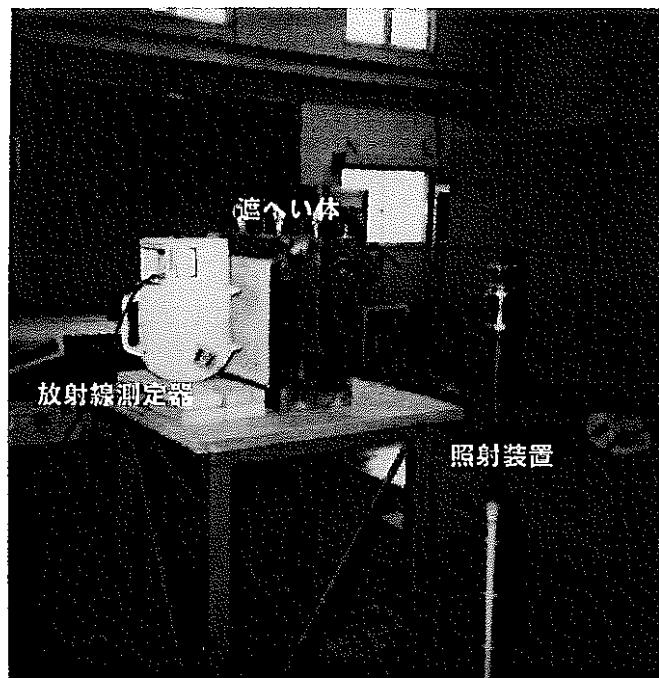
表 4-4 に中性子照射による試験結果を示す。表中の各値は 4.2 での評価方法に沿って算出したものである。なお、表中の各値は付録に示す方法により散乱線成分を評価し補正した値である。図 4.11 に  $^{241}\text{Am-Be}$  照射、図 4.12 に  $^{252}\text{Cf}$  照射による遮へい体透過率を示す。

表 4-4 中性子照射による試験結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート			普通コンクリート			減弱係数比 $R_n$
		透過中性子 線量率*	透過率 (%)	減弱係数 $\mu_{nA}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	透過中性子 線量率*	透過率 (%)	減弱係数 $\mu_{nB}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	
$^{241}\text{Am-Be}$ (1 m)	0	8.94	100	—	8.94	100	—	—
	10	3.64	40.72	0.09	4.31	48.21	0.07	1.23
	20	1.08	12.08	0.11	1.93	21.59	0.08	1.39
	30	0.09	1.01	0.15	0.70	7.83	0.09	1.79
$^{252}\text{Cf}$ (1 m)	0	205.29	100	—	205.29	100	—	—
	10	66.15	32.22	0.11	78.32	38.15	0.10	1.18
	20	14.74	7.18	0.13	25.86	12.60	0.10	1.27
	30	—	—	—	5.32	2.59	0.12	—

\* 各遮へい体の厚さを通過した線量当量率（カウント数）。

また、遮へい体が無い時の線量率は、 $^{241}\text{Am-Be}$  で 9.58 cps、 $^{252}\text{Cf}$  で 219.62 cps であり、散乱線の値は、 $^{241}\text{Am-Be}$  で 0.65 cps、 $^{252}\text{Cf}$  で 14.33 cps である。



・試験条件

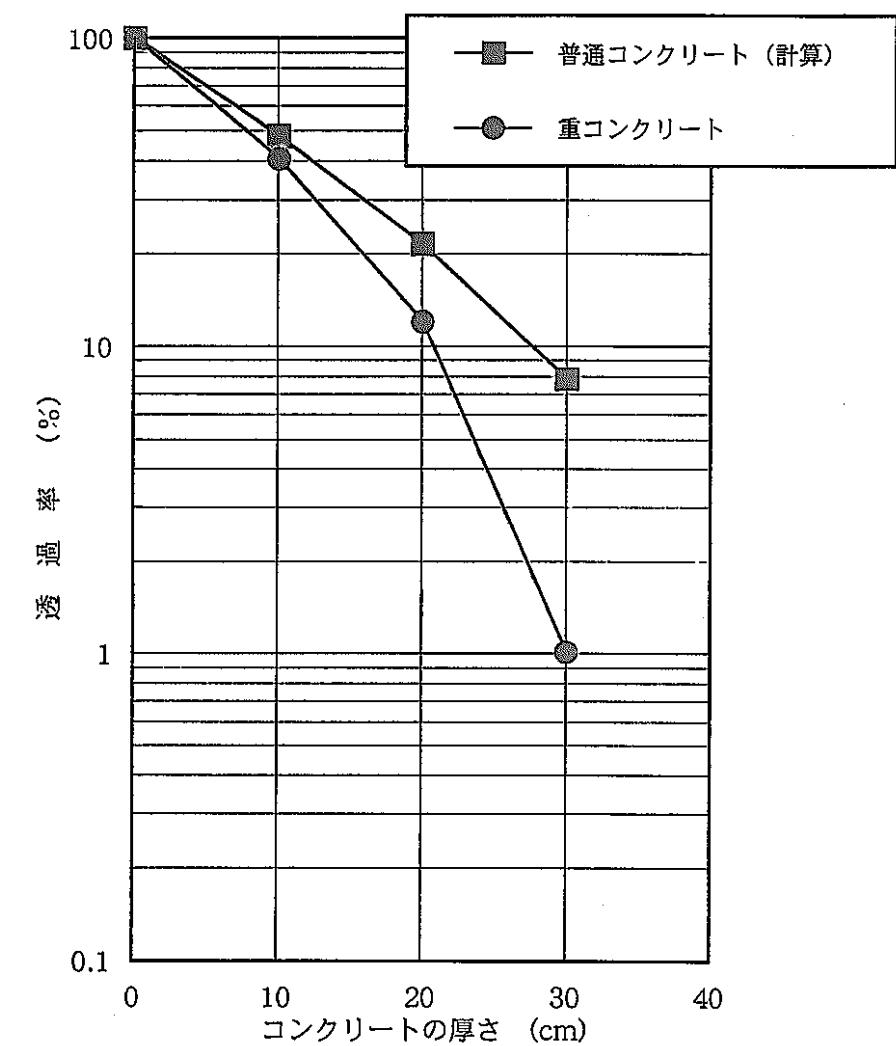
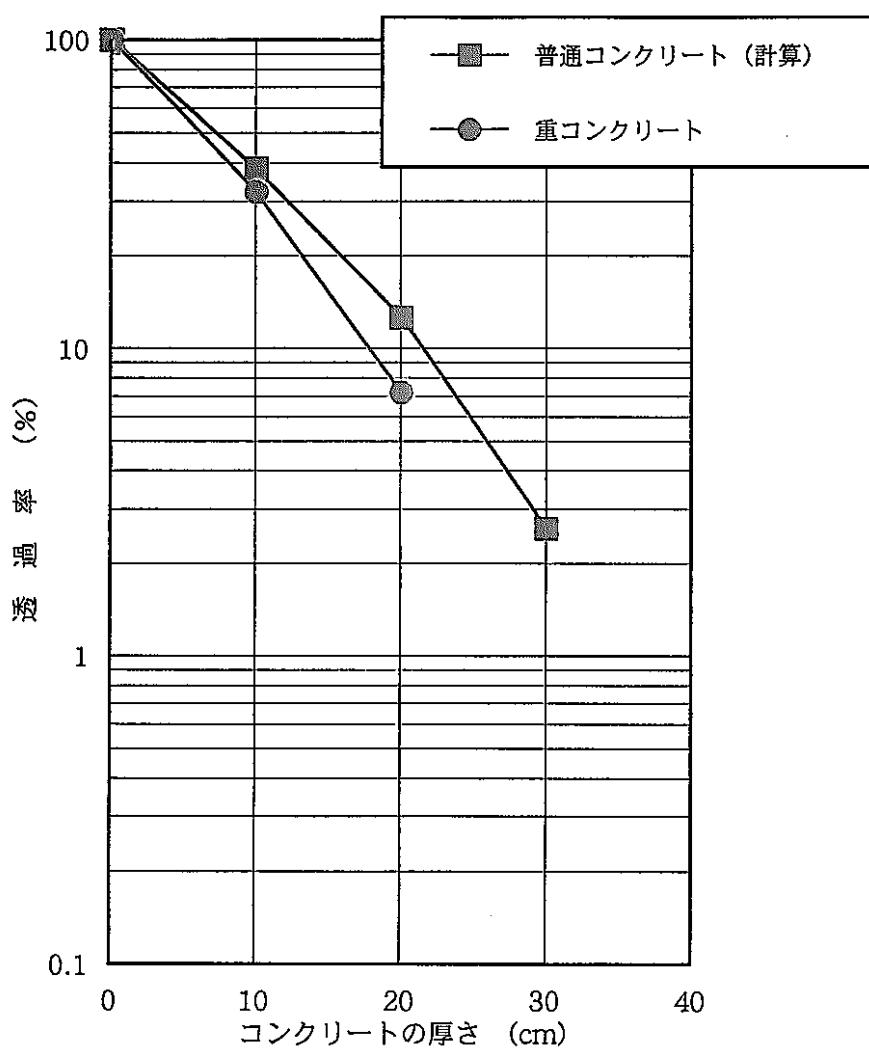
中性子線源： $^{241}\text{Am-Be}$   
 $^{252}\text{Cf}$

照射距離：1 m

照射位置：1.27 m

図 4.10 中性子照射試験の様子

-20-

図 4.11  $^{241}\text{Am-Be}$  照射による遮へい体透過率図 4.12  $^{252}\text{Cf}$  照射による遮へい体透過率

#### 4.2.2 遮へい計算による解析

中性子においても $\gamma$ 線同様に遮へい計算コード(MCNP 4A)を使用し、中性子照射試験結果の整合性を確かめた。

##### (1) 試験方法

中性子照射試験と条件を同じにするため、照射室Bをモデリングし、統計誤差を少なくするために放出される中性子の数を10,000個とした。中性子に対する遮へい性能の評価方法は4.2.1での評価方法と同じである。

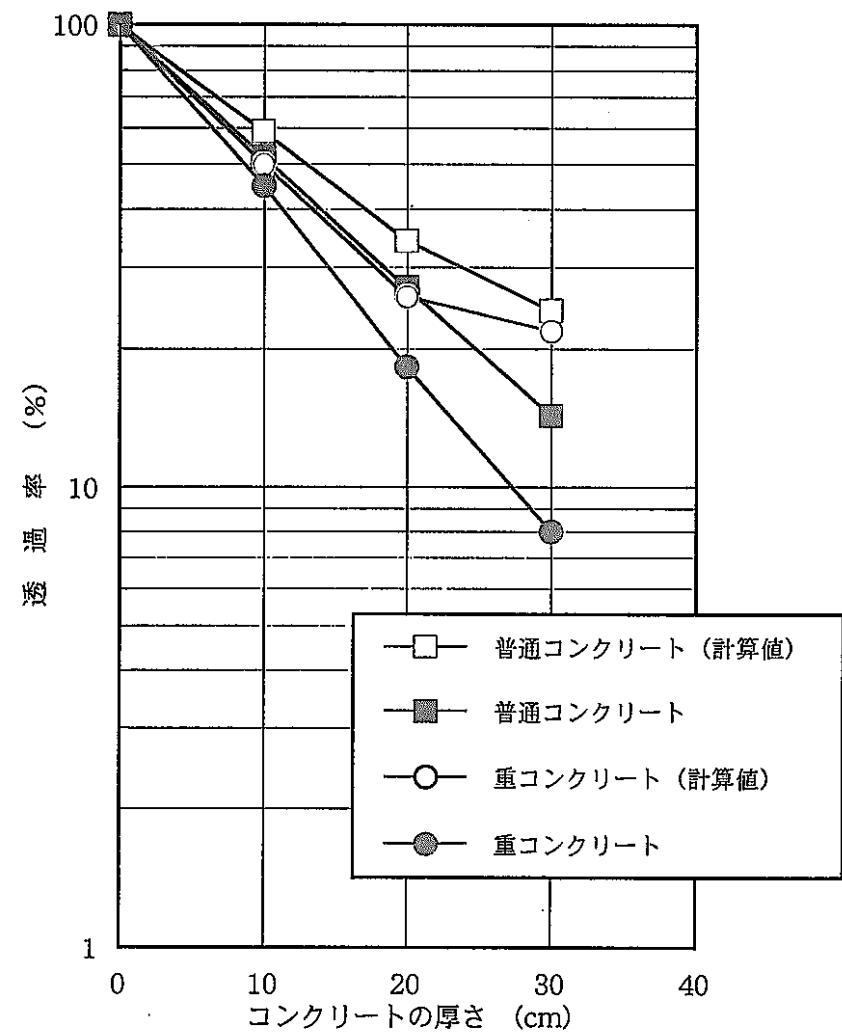
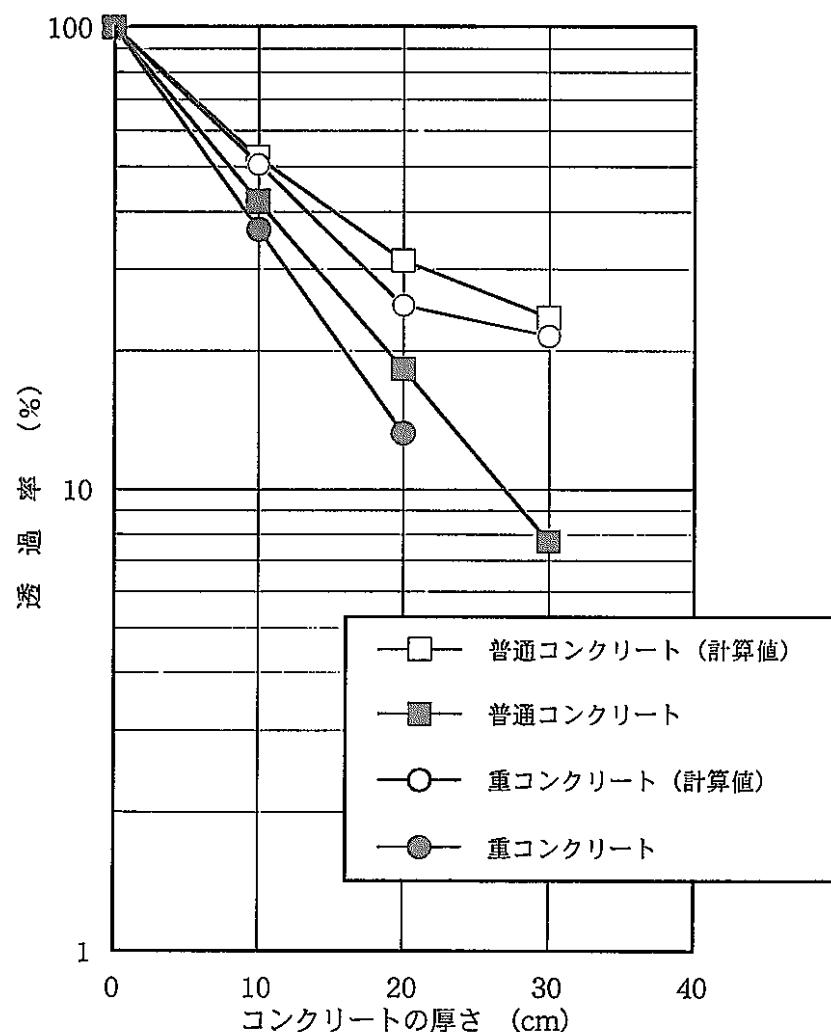
##### (2) 試験結果

表4-5に中性子遮へい計算結果を示す。また、図4.13に $^{241}\text{Am-Be}$ 、図4.14に $^{252}\text{Cf}$ による実測値と計算値との透過率解析を示す。なお、計算値には $\gamma$ 線同様に散乱線が含まれているため実測値は散乱線を補正しない値を用いた。

表4-5 中性子遮へい計算結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート				普通コンクリート				減弱係数比 $R_n$	
		計算値*	透過率		減弱係数 $\mu_{nA}$ (cm <sup>-1</sup> )	計算値*	透過率		減弱係数 $\mu_{nB}$ (cm <sup>-1</sup> )		
			計算値 (Sv)	実測値 (%)			計算値 (%)	実測値 (%)			
$^{241}\text{Am-Be}$ (1 m)	0	$3.46 \times 10^{-3}$	100	100	—	$3.46 \times 10^{-3}$	100	100	—	—	
	10	$1.73 \times 10^{-3}$	50.07	44.95	0.07	$2.03 \times 10^{-3}$	58.86	51.93	0.05	1.40	
	20	$8.95 \times 10^{-3}$	25.90	18.31	0.07	$1.19 \times 10^{-3}$	34.30	27.15	0.05	1.40	
	30	$7.54 \times 10^{-4}$	21.82	8.01	0.05	$8.35 \times 10^{-4}$	24.15	14.36	0.05	1.00	
$^{252}\text{Cf}$ (1 m)	0	$3.23 \times 10^{-3}$	100	100	—	$3.23 \times 10^{-3}$	100	100	—	—	
	10	$1.63 \times 10^{-3}$	50.59	36.65	0.10	$1.69 \times 10^{-3}$	52.37	42.19	0.06	1.67	
	20	$8.10 \times 10^{-4}$	25.09	13.25	0.07	$1.01 \times 10^{-3}$	31.37	18.31	0.06	1.17	
	30	$6.95 \times 10^{-4}$	21.55	—	0.05	$7.62 \times 10^{-4}$	23.62	7.72	0.05	1.00	

\* 計算によって得られる透過中性子の単位は「個数」であるため、中性子遮蔽設計ハンドブック(第12.3.1表)に記載されている係数を用い、線量当量に換算した。

図 4.13  $^{241}\text{Am-Be}$  による実測値と計算値との透過率解析図 4.14  $^{252}\text{Cf}$  による実測値と計算値との透過率解析

#### 4.2.3 考察

$\gamma$ 線同様に試験結果には、散乱線の存在が大きく影響している。この影響を除去するためにシャドウコーンを用い散乱線成分の評価を行った。試験方法等については付録に記す。この測定結果は付録3に示す試験結果に述べる理由により妥当であると判断されたため、測定結果には散乱線を補正し評価した。

散乱線補正後の重コンクリートの遮へい厚30cmでのデータは、減衰する割合が大きくなつたことから、遮へい厚20cmまでで評価することとした。そのため、遮へい厚30cmでの減弱係数( $\mu_n$ )の計算はしなかつた。

中性子を遮へいする場合は、一般的に原子番号の小さい物質、主に水素を使用する。水素原子は、中性子に対する減速材として大きな役割をしているためである。本試験に用いた重コンクリートと普通コンクリートは、元素組成に含まれる(中性子遮へいに寄与する)水素の量がさほど変わらないため、同程度の遮へい性能であることが推定された。しかしながら、試験結果は、 $^{241}\text{Am-Be}$ と $^{252}\text{Cf}$ のいずれも重コンクリートの方が約1.2倍良い遮へい性能を示した。

理由の一つとして、重コンクリートは普通コンクリートに比べ原子番号の大きい物質(鉄等)を多く含んでいるため、非弾性散乱線成分が多くなつたことが考えられる。

中性子も $\gamma$ 線と同様にエネルギーが高い程、透過力が大きい。

$^{252}\text{Cf}$ の平均エネルギーは約2.4MeVであり $^{241}\text{Am-Be}$ の平均エネルギー約4.5MeVと比べエネルギーが低いため、遮へいされる程度は大きくその傾向はグラフからも読み取れた。

遮へい計算においても中性子は、 $\gamma$ 線の場合ほどには計算値と実測値の透過率は一致しなかつたものの、重コンクリートと普通コンクリートの減弱係数比( $R_n$ )を求めると実測値での減弱係数比( $R_n$ )と一致した結果が得られた。

よつて、中性子においても今回試験した重コンクリートは普通コンクリートより遮へい性能が優れていることが認められた。

## 5. まとめ

### 5.1 ギ線に対しての遮へい性能

今回使用した重コンクリートは普通コンクリートに比べ、密度が約2倍である。ギ線の遮へい性能は密度および組成に比例する。その効果が試験結果よりも認められた。

$^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  照射による試験の結果、重コンクリートはギ線に対しての遮へい効果が普通コンクリートの約2倍の性能を持っており、遮へい体として十分に有効かつ効果的なものであるといえる。

また、遮へい計算コードを用いた評価においても同様な結果が得られた。

### 5.2 中性子に対しての遮へい性能

$^{241}\text{Am-Be}$  および  $^{252}\text{Cf}$  による試験結果より、重コンクリートは普通コンクリートに比べ1.2倍程度の遮へい性能があることが認められた。また、遮へい計算においても重コンクリートは普通コンクリートに比べて優れた遮へい性能を示した。

本試験では、放射線源による照射試験と遮へい計算による解析方法を適用し、重コンクリートと普通コンクリートの遮へい性能の違いを試験した。

その結果、重コンクリートはギ線の遮へいに対してだけではなく中性子の遮へいに対しても普通コンクリートより優れていることが確認できた。

また、付録に示す散乱線評価試験を行ったことにより、散乱線成分が遮へい試験にどれだけの影響を及ぼすかということが判断でき、十分満足できる結果が得られた。

## 6. 謝辞

最後になりますが、本試験を行うにあたりいろいろと御指導して頂きました石黒安全管理部長、安全技術課の清水様他、多くの方々に本紙面をお借りして深く感謝の意を表します。また、多大な御協力と試験体であるコンクリートを提供してくださいました前田建設工業株式会社の辻田課長代理様およびテク・ラジ・ガヤワリ様に本紙面を借りて深く感謝致します。

## 7. 参考文献

- 1) 石川 友清 編：「放射線概論」
- 2) RADIATION SHIELDING INFORMATION CENTER : 「RSIC COMPUTER CODE COLLECTION (MCNP 4A)」
- 3) 社団法人 日本原子力学会：「中性子遮蔽設計ハンドブック」
- 4) 小林博英、大峰守、都所昭雄、他：「中性子しゃへい材性能確認試験」

PNC TN8410 91-280

## 付録 散乱線評価試験

## 1. 散乱線試験の概要

遮へい体の遮へい性能をより精度よく評価するためには、散乱線の影響について評価することが必要である。一般に照射試験を行う場合、本編図 2.1 遮へい体と放射線の相互作用に示す場合のように放射線測定器に入射する成分には、直接線以外に床、壁、天井、遮へい体からの影響を受け入射してくる成分がある。これを散乱線と呼んでいる。この散乱線は、遮へい性能の評価に大きく影響を及ぼす。そのため、本編で行った照射試験と同じ条件のもと、放射線源から放射される直接線を完全に遮へいし、入射してくる成分を散乱線として求めることとした。

なお、直接線を完全に遮へいするために $\gamma$ 線ではコンクリートより遮へい性能が優れた鉛ブロック、中性子ではシャドウコーンを使用した。

## 2. $\gamma$ 線照射場における散乱線評価

$\gamma$ 線源と放射線測定器の間に直接線を遮へいするための鉛ブロックを設置した時にブロックや空気、壁等で散乱して検出器に入射する $\gamma$ 線（散乱線）とブロックを設置しない時の全 $\gamma$ 線を測定し、その比から散乱線の割合を求めた。

本試験では直接線を十分に遮へいできる厚さの鉛ブロックを用いて放射線測定器の検出器面を適当な大きさで覆い測定した値を散乱線とした。

### <試験方法>

$\gamma$ 線源は、本編表3-3に示す $^{137}\text{Cs}$  (1.11 TBq) と $^{60}\text{Co}$  (3.7 GBq) を使用した。照射距離は、本編4.1.1の照射試験と同様に $^{137}\text{Cs}$ では2mと3.5mの2点、 $^{60}\text{Co}$ では1mとした。図(付2.1)に $\gamma$ 線照射による散乱線試験の概要を示す。

$^{137}\text{Cs}$ 照射による散乱線試験では、照射距離、形状、鉛ブロックの厚さを変え、以下に示す試験を行った。図(付2.2)に $^{137}\text{Cs}$ 散乱線試験の様子を示す。

試験1：照射距離3.5mの地点において、 $\gamma$ 線源と放射線測定器の間に鉛ブロック（縦10×横20×厚さ20cm）を線源から3.2mの位置に設置して測定した。

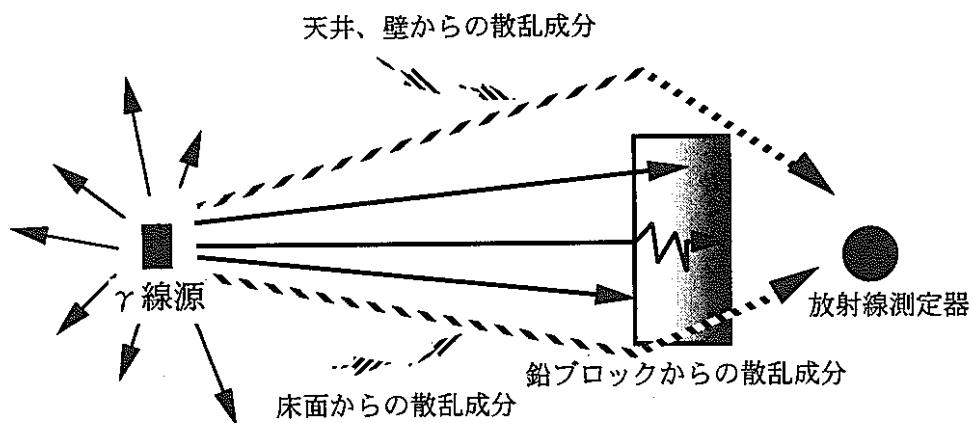
試験2：照射距離2mの地点において、空気、床、壁（天井）等からの散乱線をより正確に測定するため、鉛ブロックを重コンクリート（縦40×横40cm）と同様な面の形状（縦30×横40×厚さ20cm）に積み重ね、線源から1.7mの位置に設置して測定した。

試験3：試験2と同じ条件のもと、面の形状を縦40×横40×厚さ20cmに積み重ねて測定した。

試験4：ストリーミングの影響を調査するため、試験3の場合で、鉛ブロックの厚さを25cmにして測定した。

$^{60}\text{Co}$ 照射による散乱線試験では、直接線を遮へいするために、鉛ブロック（厚さ10cm）を線源と検出器間（線源から80cmの位置）に設置した。

図(付2.3)に $^{60}\text{Co}$ 散乱線試験の様子を示す。



図(付2.1) ガンマ線散乱線試験の概要

## &lt;評価方法&gt;

散乱線の値および割合は、下記式を用い求めた。なお、直接線を完全に遮へいするため、鉛ブロックを通過するガンマ線の理論値を無視できる程度とすべく、本編に示す式(2.1)から適当な鉛ブロックの厚さ<sup>注)</sup>を決定した。

$$\text{散乱線} = \text{測定値} - BG - \text{鉛ブロックを通過するガンマ線の理論値} \quad \cdots \quad (\text{付2.1})$$

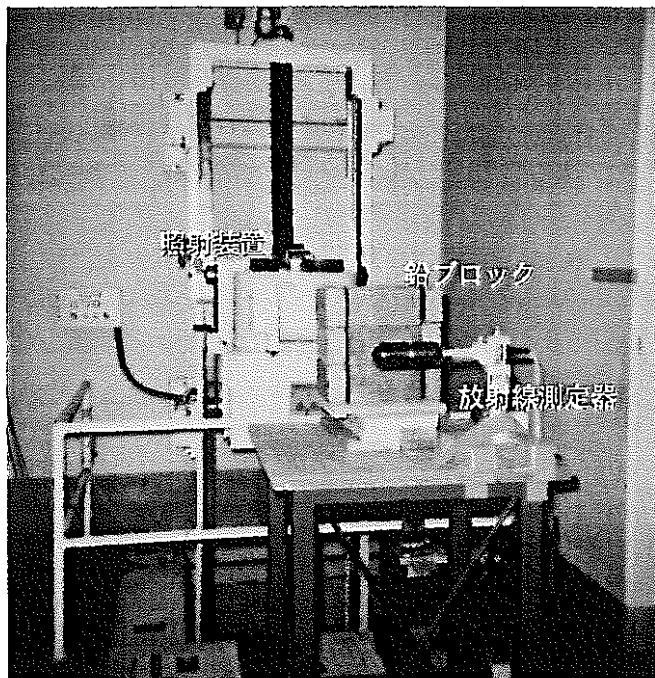
$$\text{散乱線の割合} (\%) = \frac{\text{散乱線}}{\text{基準線量率}} \times 100 \quad \cdots \cdots \cdots \quad (\text{付2.2})$$

ただし、測定値とは鉛ブロックを設置した時の照射線量率、基準線量率とは鉛ブロックを設置しない時の照射線量率である。

注) 本編式(2.1)  $I = I_0 e^{-\mu x}$  より求めた。

ただし、鉛の密度  $\rho$  :  $11.35 \text{ (g/cm}^3)$ 、鉛に対する  $^{137}\text{Cs}$  の質量減弱係数  $\mu_m$  :  $1.1 \times 10^{-1} \text{ (cm}^2/\text{g)}$ 、鉛に対する  $^{60}\text{Co}$  の質量減弱係数  $\mu_m$  :  $6.2 \times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{g)}$ 。なお、 $\mu = \rho \mu_m$  である。また、各物質の質量減弱係数は、日本アイソトープ協会編 アイソトープ便覧(改訂3版)中の値から内挿して求めた。

なお、 $^{60}\text{Co}$  のガンマエネルギーは  $1.17 \text{ MeV}$  および  $1.33 \text{ MeV}$  であるため、 $1.25 \text{ MeV}$  の値を適用した。



- ・試験条件
- γ線源： $^{137}\text{Cs}$
- 照射距離：2 mおよび3.5 m
- 照射位置：1.27 m

図(付2.2)  $^{137}\text{Cs}$  散乱線試験の様子



- ・試験条件
- γ線源： $^{60}\text{Co}$
- 照射距離：1 m
- 照射位置：1.45 m

図(付2.3)  $^{60}\text{Co}$  散乱線試験の様子

## &lt;試験結果&gt;

表(付2-1)に $\gamma$ 線照射による散乱線試験結果を示す。なお、BGは $^{137}\text{Cs}$ では測定値に対し無視できる程度であった。また、 $^{60}\text{Co}$ は0.03 mR/hであった。

表(付2-1)  $\gamma$ 線照射による散乱線試験結果

	線源	形状 (cm)	基準線量率 (mR/h)	BG (mR/h)	理論値 (mR/h)	測定値 (mR/h)	散乱線 (mR/h)	散乱線 の割合 (%)	備考
①	$^{137}\text{Cs}$ (3.5 m)	10×20×20	611.98	0	0.00	20.28	20.28	3.31	試験として適当でなかったため評価には使用しない
②	$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	30×40×20	1878.82	0	0.00	16.27	16.27	0.87	試験として適当でなかったため評価には使用しない
③	$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	40×40×20	1878.82	0	0.00	3.95	3.95	0.21	
④	$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	40×40×25	1878.82	0	0.00	2.57	2.57	0.14	ストリーミングを考慮した
	$^{60}\text{Co}$ (1 m)	10×20×10	10.85	0.03	0.00	0.27	0.27	2.49	試験として適当でなかったため評価には使用しない

鉛とコンクリートを比較した場合、 $^{137}\text{Cs}$ に対しての遮へい性能は、質量減弱係数（鉛： $1.1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g}$ 、コンクリート： $7.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ <sup>注)</sup>からみても鉛の方が大きいはずであるが、測定してみた結果、コンクリートを通過した $\gamma$ 線の測定値がきわめて小さく、一見鉛よりも遮へい性能が高いようなデータを得た。

また、 $^{60}\text{Co}$ についても同様な結果だった。

次に、 $^{137}\text{Cs}$ で鉛ブロックの線源に向かう面積を30×40、40×40 cmとし、遮へい体と同じ形状になるように積み重ねて照射線量率を測定した。その結果、それぞれ16.27 mR/h、3.95 mR/hとなった。これは散乱線として測定される量が遮へい体の形状に依存することを示している。次に、ブロックの隙間を放射線が通り抜けてしまうストリーミング現象を防ぐため、40×40 cmにつんだ鉛ブロックに、さらに1層（厚さ5 cm）隙間を塞ぐようにブロックを加えた結果、測定値は約半分の2.57 mR/hとなり、このことからもストリーミングが多少存在していたと推定できた。

注) 各物質の質量減弱係数は、日本アイソトープ協会編 アイソトープ便覧（改訂3版）中の値から内挿して求めた。

散乱線の値は遮へい体の形状や位置といった条件により変わるために、本試験について散乱線の評価を行うには、全く遮へい体と同じ形で一枚板の鉛が必要であることが分かった。このため、今回は測定結果に散乱線を含めず、遮へい性能の評価を行うこととした。なお、本編表 4-1 で使用している散乱線の値は、試験 3 の  $40 \times 40 \times 20$  cm での値  $3.95$  mR/h である。表(付 2-2)に本編表 4-1 で使用した  $\gamma$  線照射による試験結果の一部を再度示す。

表(付 2-2) 本編表 4-1  $\gamma$  線照射による試験結果

線 源	厚さ (cm)	重コンクリート			普通コンクリート			線減弱係数比 $R_\gamma$	備 考
		透過照射 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma A}$ (cm <sup>-1</sup> )	透過照射 線量率 (mR/h)	透過率 (%)	線減弱係数 $\mu_{\gamma B}$ (cm <sup>-1</sup> )		
$^{137}\text{Cs}$ (2 m)	0	1874.87	100	—	1874.87	100	—	—	
	10	103.46	5.52	0.29	466.55	24.88	0.14	2.08	
	20	13.55	0.72	0.23	122.53	6.54	0.13	1.81	
	30	3.98	0.21	0.21	—	—	0.12	—	

### 3. 中性子照射場における散乱線評価

$\gamma$ 線同様に中性子においても測定値には散乱線が含まれているため、以下の方法に従い散乱線成分の評価を行った。なお、直接線の遮へいにはシャドウコーンを用いた。

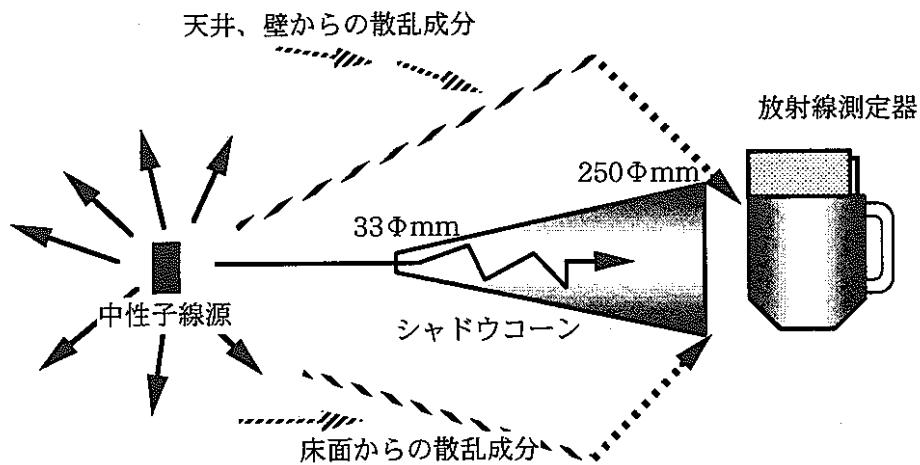
#### <試験方法>

中性子線源と放射線測定器の間にシャドウコーンを設置した時、シャドウコーンや空気、壁等で散乱して検出器に入射する中性子とシャドウコーンを設置しない時の全中性子のカウント数を測定し、その比から散乱線の割合を求めた。

放射線源は、本編表 3-3 に示す  $^{241}\text{Am-Be}$  (37 GBq) と  $^{252}\text{Cf}$  (999 MBq) を使用した。照射距離は本編 4.2.1 に示す照射試験と同様にするため  $^{241}\text{Am-Be}$  および  $^{252}\text{Cf}$  ともに 1 mとした。

放射線測定器はレムカウンタを用い、パルス出力をカウンタスケーラーで計数した。

図(付 3.1)に中性子散乱線試験の概要、図(付 3.2)に中性子散乱線試験の様子を示す。



図(付 3.1) 中性子散乱線試験の概要



・試験条件

中性子線源： $^{241}\text{Am-Be}$   
 $^{252}\text{Cf}$

照射距離：1 m

照射位置：1.27 m

図(付3.2) 中性子散乱線試験の様子

## &lt;評価方法&gt;

中性子照射による散乱線は下記式より求めた（シャドウコーンにより直接線成分はすべて遮へいされるものとする）。

$$\text{散乱線} = \text{測定値} - BG \text{ 値} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 3.1})$$

$$\text{散乱線の割合} (\%) = \frac{\text{散乱線}}{\text{基準線量率}} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{付 3.2})$$

ただし、測定値とはシャドウコーンを設置した時の線量当量率（カウント数）、基準線量率とはシャドウコーンを設置しない時の線量当量率である。

## &lt;試験結果&gt;

表(付3-1)に中性子照射による散乱線試験結果を示す。なお、BGは0.03 cpsであった。

表(付3-1) 中性子照射による散乱線試験結果

線 源	基準線量率 (cps)	BG (cps)	測定値 (cps)	散乱線 (cps)	散乱線の割合 (%)
$^{241}\text{Am-Be}$ (1m)	9.61	0.03	0.68	0.65	6.76
$^{252}\text{Cf}$ (1m)	219.65	0.03	14.36	14.33	6.53

本試験で求められた散乱線は、 $^{241}\text{Am-Be}$ で0.65 cps、 $^{252}\text{Cf}$ で14.33 cpsとなり、シャドウコーンを設置しない時の全カウント数に対する割合がそれぞれ6.76%、6.53%だった。

よって、本試験結果を用いて中性子の遮へい性能を評価した。