

中性子しゃへい材性能確認試験

1991年10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。注)

〒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 (Tokai Works)

技術協力部 技術管理室

(Technology Management Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatu Ooaza, Tokai, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1991

中性子しゃへい材性能確認試験

小林博英* 上野哲朗**
大峰 守* 都所昭雄*

要 旨

プルトニウム燃料製造施設の本格稼動に伴うプルトニウム取扱量の増大による作業員の被ばく増加に対する懸念、及び1990年にICRPが公表した新勧告に基づく中性子線被ばく評価値の増大といった問題に対処するため、作業環境の中性子線量当量を低減する方策が検討されている。中性子被ばく低減化方策については、東海事業所にワーキンググループが設置され、検討が加えられてきた。著者らは、このワーキンググループに参加して中性子しゃへい材の性能確認試験を実施してきた。

本書は、この試験方法及び結果をより詳細に示すとともに、それらの妥当性等について考察を加えたものである。また、しゃへい材による中性子エネルギースペクトルの変化等についての試験結果も追加し、その変化が中性子線量にどのように寄与しているのかを評価した。

試験の結果、プルトニウム取扱作業場における中性子エネルギーに対し、アクリル系しゃへい材の場合、厚さ5 cmで線量が約半分になること、その他のしゃへい材についてもアクリルとほぼ同等な性能を有することなどを確認した。さらに、中性子線照射場における散乱線に対する考慮が、しゃへい材の性能評価において重要であることも確認できた。

また、中性子線量当量の減衰に大きく寄与するのは0.1 MeV以上のエネルギー帯の中性子フルエンスの変化であることも確認した。

本書にまとめた試験方法及び結果は、今後、しゃへい材性能確認を実施する際の参考となるものとする。

* 放射線管理第一課
** 検査開発係

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. シャヘイ性能試験体について | 2 |
| 3. シャヘイ性能確認試験 | 3 |
| 3.1 試験方法 | 3 |
| 3.2 試験結果 | 8 |
| 3.3 考 察 | 16 |
| 4. 中性子スペクトロメータによるシャヘイ性能確認試験 | 19 |
| 4.1 試験方法 | 19 |
| 4.2 試験結果 | 21 |
| 4.3 考 察 | 30 |
| 5. フィールドにおけるシャヘイ性能確認試験 | 32 |
| 5.1 衝立型シャヘイ体に関する試験 | 32 |
| 5.2 アクリル系試験体に関する試験 | 34 |
| 5.3 考 察 | 37 |
| 6. まとめ | 39 |
| 7. 謝 辞 | 40 |
| 付 録 | 41 |

目 次

| | | |
|--------|---------------------------------|----|
| 図 3-1 | レムカウンタの構造 | 3 |
| 図 3-2 | レムカウンタのエネルギー特性 | 4 |
| 図 3-3 | レムカウンタの方向依存性 | 4 |
| 図 3-4 | シャドウコーンの寸法及び材質 | 5 |
| 図 3-5 | しゃへい性能確認試験概念図 | 7 |
| 図 3-6 | 散乱成分測定概念図 | 7 |
| 図 3-7 | アクリル系試験体のしゃへい効果 (Cf線源) | 11 |
| 図 3-8 | アクリル系試験体のしゃへい効果 (Am-Be、Pu-Be線源) | 12 |
| 図 3-9 | アクリル系以外の試験体のしゃへい効果 (Cf線源) | 13 |
| 図 3-10 | ニュートロンストップ試験体のしゃへい効果 (Cf線源) | 14 |
| 図 3-11 | 各線源に対するアクリル試験体のしゃへい効果の比較 | 15 |
| 図 3-12 | シャドウコーンを用いたことによる効果 | 17 |
| 図 3-13 | しゃへい性能確認試験結果と計算結果との比較 (アクリル) | 17 |
| 図 3-14 | 測定と計算によるしゃへい効果の関係 (アクリル) | 18 |
| 図 4-1 | 中性子スペクトロメータによる試験概念図 | 21 |
| 図 4-2 | 純アクリルでしゃへいしたときのスペクトル | 22 |
| 図 4-3 | Gd添加アクリルでしゃへいしたときのスペクトル | 22 |
| 図 4-4 | Gd添加含鉛アクリルでしゃへいしたときのスペクトル | 23 |
| 図 4-5 | 含鉛アクリルでしゃへいしたときのスペクトル | 23 |
| 図 4-6 | アクリル系試験体のしゃへい効果 | 24 |
| 図 4-7 | 各試験体のフラックス変化の比較(1) | 27 |
| 図 4-8 | 各試験体のフラックス変化の比較(2) | 27 |
| 図 4-9 | 各試験体の線量当量率変化の比較(1) | 28 |
| 図 4-10 | 各試験体の線量当量率変化の比較(2) | 28 |
| 図 4-11 | 各試験体の線量当量率変化の比較(3) | 29 |
| 図 4-12 | 各試験体の線量当量率変化の比較(4) | 29 |
| 図 5-1 | 試験状況概略図 | 33 |
| 図 5-2 | 周囲から入射する成分の測定概念図 | 35 |

| | | |
|------|------------------------------|----|
| 図5-3 | アクリル系試験体のしゃへい効果（フィールド） | 36 |
| 図5-4 | フィールド試験場所における中性子スペクトル | 37 |

表 目 次

| | | |
|-------------|-----------------------------|----|
| 表 2 - 1 | しゃへい材の化学組成、密度一覧 | 2 |
| 表 3 - 1 | 試験体一覧 | 8 |
| 表 3 - 2(1) | 純アクリルのしゃへい効果 | 9 |
| 表 3 - 2(2) | Gd (30%) 添加アクリルのしゃへい効果 | 9 |
| 表 3 - 2(3) | Gd (3 %) 添加含鉛アクリルのしゃへい効果 | 9 |
| 表 3 - 2(4) | 含鉛アクリルのしゃへい効果 | 9 |
| 表 3 - 2(5) | ポリイソブチレンのしゃへい効果 | 9 |
| 表 3 - 2(6) | ポリメチルペンテンのしゃへい効果 | 10 |
| 表 3 - 2(7) | ポリカーボネート(Gd コーティング) のしゃへい効果 | 10 |
| 表 3 - 2(8) | ポリカーボネートのしゃへい効果 | 10 |
| 表 3 - 2(9) | ニュートロンストップのしゃへい効果 | 10 |
| 表 3 - 2(10) | しゃへい用ゴムのしゃへい効果 | 10 |
| 表 4 - 1 | エネルギー群構造及び換算係数 | 19 |
| 表 4 - 2 | 試験体一覧 | 21 |
| 表 4 - 3 | 各試験体の減衰比 | 24 |
| 表 4 - 4 | エネルギースペクトルの変化(増減比) | 26 |
| 表 4 - 5 | 線量当量率の変化(減衰率) | 26 |
| 表 5 - 1 | 衝立のしゃへい効果 | 33 |
| 表 5 - 2(1) | 純アクリルのしゃへい効果 | 35 |
| 表 5 - 2(2) | Gd (3 %) 添加含鉛アクリルのしゃへい効果 | 35 |
| 表 5 - 2(3) | Gd (30%) 添加アクリルのしゃへい効果 | 35 |

(付録表)

| | | |
|--------|-------------------|----|
| 表(1)-1 | 散乱成分の測定結果 | 41 |
| 表(1)-2 | しゃへい材なしのときの測定結果 | 41 |
| 表(1)-3 | 中性子しゃへい性能確認試験データ | 42 |
| 表(2)-1 | 散乱成分の測定結果 | 43 |
| 表(2)-2 | しゃへい材なしのときの測定結果 | 43 |
| 表(2)-3 | 中性子しゃへい性能確認試験データ | 43 |
| 表(3)-1 | 散乱成分の測定結果 | 44 |
| 表(3)-2 | しゃへい材なしのときの測定結果 | 44 |
| 表(3)-3 | 中性子しゃへい性能確認試験データ | 44 |
| 表(3)-4 | 中性子しゃへい性能確認試験データ | 45 |
| 表(3)-5 | 中性子しゃへい性能確認試験データ | 46 |
| 表(4)-1 | 散乱成分の測定データ | 47 |
| 表(4)-2 | しゃへい材なしのときの測定結果 | 47 |
| 表(4)-3 | 中性子しゃへい体性能評価試験データ | 47 |

1. はじめに

動力炉・核燃料開発事業団東海事業所のプルトニウム燃料製造施設等における燃料製造は、グローブボックス等の気密設備内において行われている。ここでは、製造時あるいは装置のメンテナンス時に手作業（グローブ作業）を行うため、線源に近接した作業となっている。さらに、燃料製造の本格化に伴う取扱量の増大により、今後、放射線被ばくの増加に留意する必要がある。

一方、ICRPの1990年勧告では放射線防護で用いられる基本的な量の見直しが行われており、線量当量評価に影響が生じた。特に、プルトニウム燃料製造施設における中性子の平均エネルギー約2 MeV に対しては、従来の線質係数の2倍となる20という放射線荷重係数が付与された。このことから、作業員の受ける線量当量は従来の2倍となることが考えられ、中性子線による被ばくの管理において大きな問題が生じることとなる。

以上のことから、今後の燃料製造作業においては、被ばくの観点から作業制限等が加えられるおそれがあり、これによって計画的な燃料製造に支障を来すかも知れず、解決を図るべき大きな問題となってくる。この問題の解決を図るため、東海事業所内にワーキンググループ等が設置されて対応方法の検討が進められた。ここでの検討過程において、種々のしゃへい材のしゃへい性能評価試験が行われ、その結果はワーキンググループが取りまとめた検討報告書に反映されている。

本書は、ワーキンググループ* での試験のうち、種々のしゃへい材のしゃへい性能確認試験の方法及び結果をより詳細に示したものである。これは、今後開発されるしゃへい材に対する同様の試験やしゃへい性能評価における参考となるようにという観点から、試験の方法及びここで得られたデータを整理した。さらに、ワーキンググループ検討後に得られた他のしゃへい材の性能評価、並びにしゃへい材による中性子エネルギー又はフルエンスの変化及びこれが線量当量に及ぼす効果等の試験結果についても追加してまとめている。

* 中性子被ばく低減化検討ワーキンググループ

(主査 都所 放射線管理第一課長 平成元年12月～平成2年10月)

2. シャへい性能試験体について

シャへい性能確認試験に供した試験材は、ワーキンググループにおいて調査・収集した材料及び核燃料技術開発部転換技術開発室、プルトニウム燃料工場設備課で開発を進めている材料等をあてた。各試験体の化学組成、密度等を表2-1に示す。

表2-1 シャへい材の化学組成、密度一覧

| 項目 | 化学組成 (wt%) | | | | | | | | 密度 (g/cm ³) |
|---|------------|------|------|------|------|------|------|------------|----------------------------|
| | H | C | O | B | Si | Pb | Gd | その他 | |
| シャへい材 | | | | | | | | | |
| 純アクリル | 8.0 | 60.0 | 32.0 | — | — | — | — | — | 1.19 |
| Gd(3%)添加含鉛アクリル | 6.2 | 45.8 | 21.0 | — | — | 24.0 | 3.0 | — | 1.53 |
| ポリイソブレン(テラックス) | 14.4 | 85.6 | — | — | — | — | — | — | 0.92 |
| 含鉛アクリル | 5.8 | 43.8 | 20.4 | — | — | 30.0 | — | — | 1.60 |
| Gd(30%)添加アクリル | 5.3 | 39.3 | 25.4 | — | — | — | 30.0 | — | 1.9 |
| ポリメチルペンテン | 14.3 | 85.7 | — | — | — | — | — | — | 0.84 |
| ポリカーボネート | 5.8 | 74.4 | 19.8 | — | — | — | — | — | 1.2 |
| ポリカーボネートのGdコーティング材 | 8.1 | 54.0 | 24.6 | — | 1.4 | — | 2.1 | 9.8 (N) | 0.98 |
| ニュートロンストップ 純ポリエチレン | 14.3 | 85.7 | — | — | — | — | — | — | 0.96 |
| ニュートロンストップ B ₂ O ₃ 44% | 7.2 | 44.1 | 34.9 | 13.8 | — | — | — | — | 1.19 |
| ニュートロンストップ B ₄ C 50% | 4.1 | 27.0 | 10.8 | 39.2 | 18.9 | — | — | — | 1.4 |
| ニュートロンストップ Gd ₂ O ₃ 10% | 7.3 | 29.2 | 20.8 | — | 34.0 | — | 8.7 | — | 1.1 |
| 含鉛ゴム (サンプルA) | 8.0 | 50.0 | 15.0 | 1.5 | — | 15.0 | — | 8.5 | 不明 |
| 含鉛ゴム (サンプルB) | 8.1 | 53.4 | 13.4 | 0.8 | — | 15.7 | — | 8.6 | 不明 |

本試験は、グローブボックス作業における被ばく低減化を念頭におき、グローブボックスに対するシャへい体設置を目的に実施されたものであるため、主に透明な材料が対象となった。ニュートロンストップ等は、中性子シャへい材として市販されているものであり、ポリイソブチレンは、粘性のある無色透明な液状材質である。また、Gdの中性子吸収に着目しこれらをアクリルに添加した材料や中性子の減速効果を上げるために水素含有率の高い材料について重点的に試験を実施することとした。

3. シャへい性能確認試験

各種シャへい材の持つシャへい性能を確認するため、東海事業所計測機器校正施設に設置している中性子線源を用いて測定を実施した。測定には散乱線が大きく影響することが予想されたため、シャドウコーンを用いて散乱線成分を評価するとともに測定値の補正を行うこととした。

3.1 試験方法

シャへい材性能確認試験における使用機器類並びに測定及び評価方法を以下に示す。

(1) 使用機器類

シャへい材性能確認は線量当量率の減衰率を測定・評価することにより実施することとし、線量当量率の測定にはレムカウンタを用いた。また、指示値の読み取りには、レムカウンタの出力パルスを計数するカウンタモジュール (NAIG社製 D-110) 及びタイマーモジュール (NAIG社製 D-111) を用いた。さらに測定の精度を上げるためにシャドウコーンを用いた。以下に使用した機器類の概要を示す。

① レムカウンタ (Studsvik社製 2202D)

線量当量率の測定に使用したレムカウンタは、ICRP Pub. 21 に提示されているレムレスポンスに近いエネルギー特性を有した測定器である。(現行法令ではICRP Pub. 51 により示された中性子フルエンス-線量当量換算係数が採用されているが内容的な変更はない。) 本測定器の構造並びにエネルギー特性及び方向依存性についてそれぞれ図 3-1、3-2 及び 3-3 に示す。

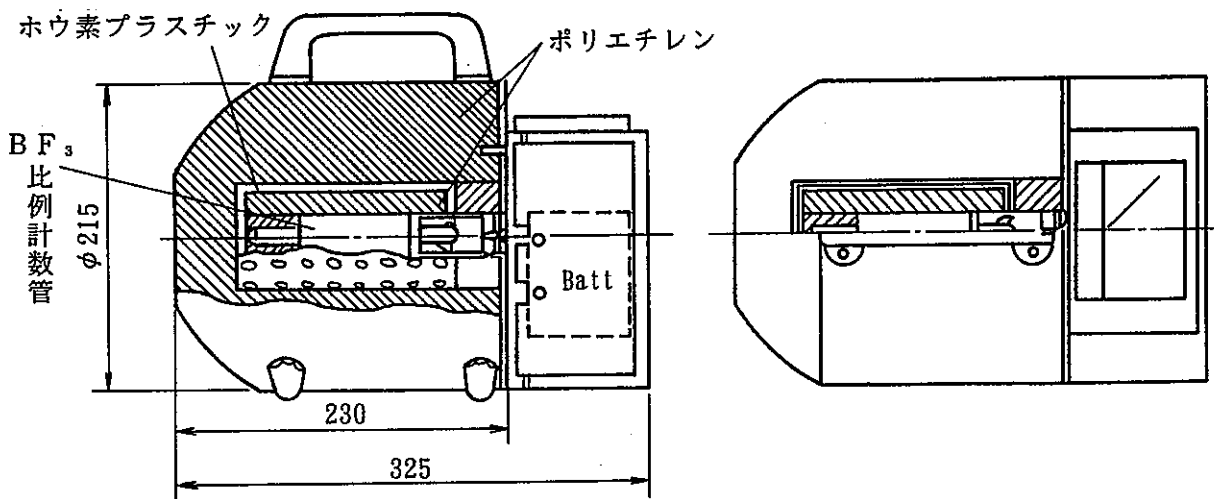


図 3-1 レムカウンタの構造

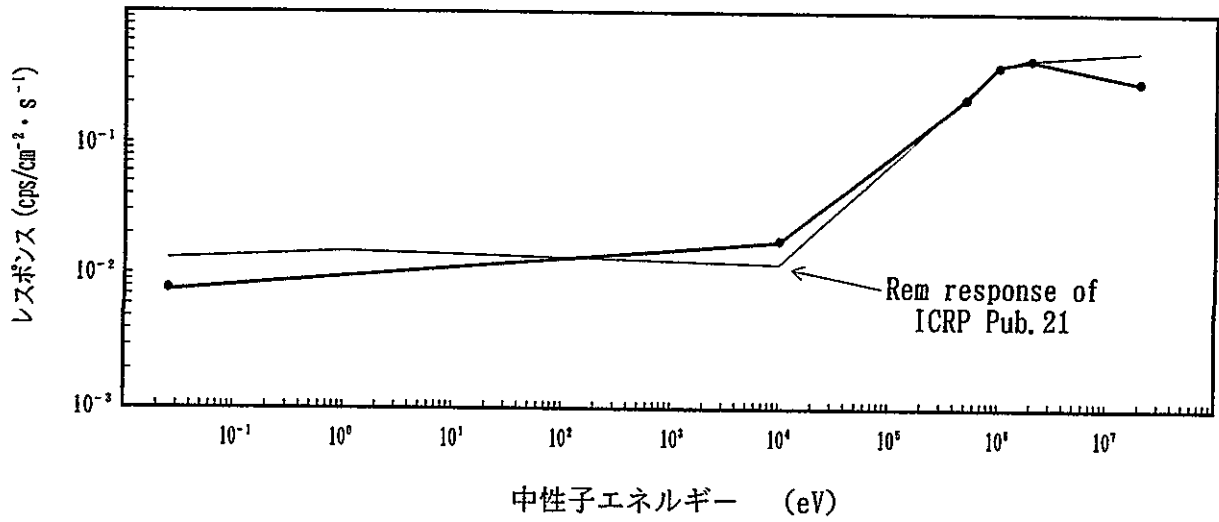


図 3-2 レムカウンタのエネルギー特性

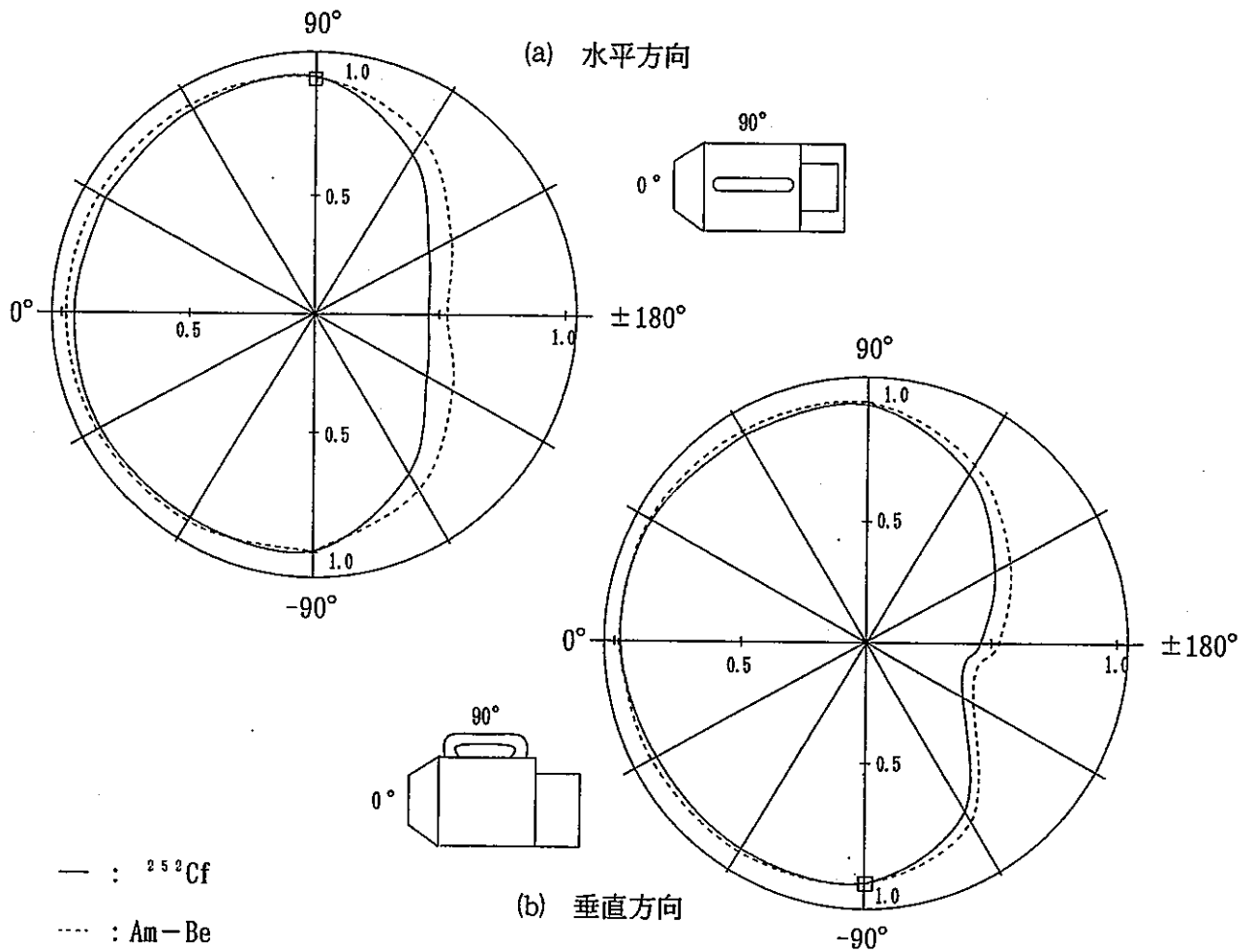


図 3-3 レムカウンタの方向依存性

② 中性子線源

照射試験は、計測機器校正施設の照射室（B）に設置してある中性子照射装置を用いた。本装置には、 ^{252}Cf 、 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 及び $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$ の各中性子源が装備されている。使用した線源の中性子放出率、平均エネルギー等を以下に示す。

- ^{252}Cf : 中性子放出率 4.54×10^7 n/s (平成2年4月現在)
 平均エネルギー 2.37MeV
 半減期 2.65年
- $^{241}\text{Am}-\text{Be}$: 中性子放出率 2.42×10^6 n/s (平成2年4月現在)
 平均エネルギー 4.46MeV
 半減期 458年
- $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$: 中性子放出率 2.41×10^7 n/s (平成2年4月現在)
 平均エネルギー 約4.4MeV
 半減期 86.4年

③ シャドウコーン

線源からの直接入射成分をカットし、照射場の散乱線を測定・評価するためにシャドウコーンを使用した。シャドウコーンの寸法及び構造を図3-4に示す。

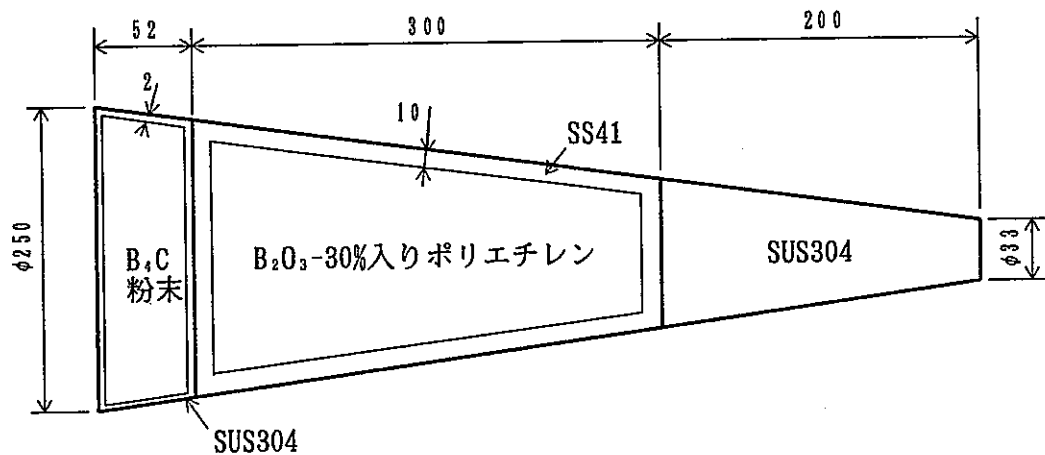


図3-4 シャドウコーンの寸法及び材質

(2) 測定及び評価方法

① 測定

線源から約1mの位置にレムカウンタを固定し、レムカウンタ側にしゃへい試験体を配置して測定を行った。ただし、ドーナツ状の試験体については線源を覆う形とした。測定状態を図3-5に示す。測定には、レムカウンタのパルス出力をカウンタで計数する方法を採り、測定精度の向上を図った。各試験体に対する測定は1分間3回とし、その平均値を測定結果とした。

② 散乱線の評価

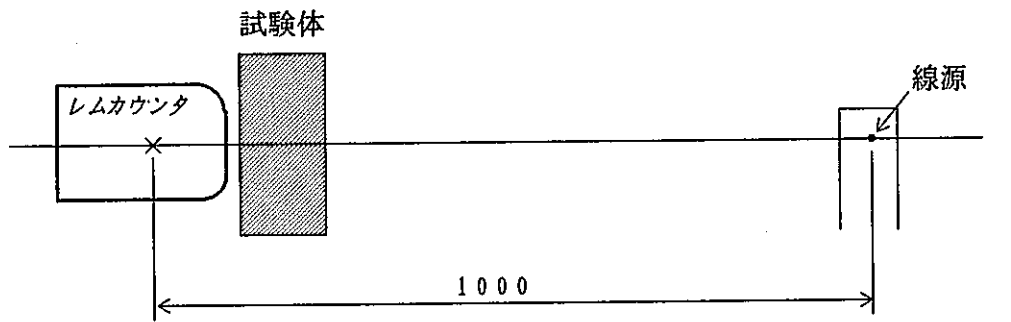
照射場における散乱線成分の存在は、しゃへい性能評価上、特にしゃへい材が厚くなって直接成分による計数が少なくなったときに大きな影響を与えるため、散乱線の評価して測定値の補正を行うこととした。散乱線の評価には円錐形のシャドウコーンを用いたが、その配置にはシャドウコーンの寸法・形状並びに線源及びレムカウンタの位置を十分考慮した。散乱線の測定状態を図3-6に示す。

③ 評価

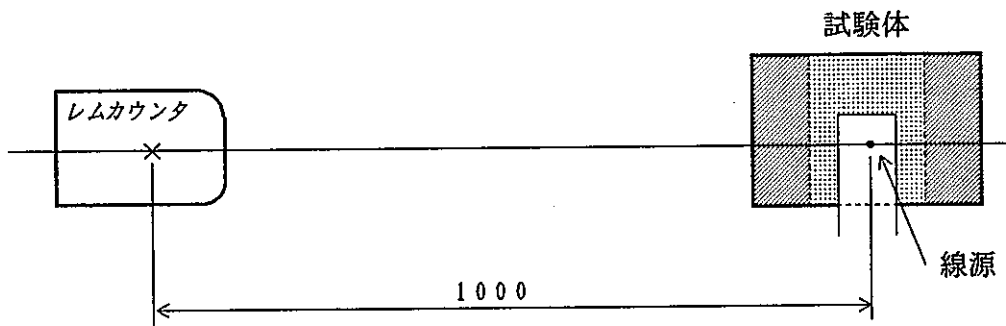
しゃへい性能は、しゃへい試験体の測定値から散乱線成分の評価値を差し引いた値を用いて計算により求めた。

(計算式)

$$\text{減衰比} = \frac{\text{しゃへい試験体設置時の計数率} - \text{散乱線成分の計数率}}{\text{しゃへい試験体なしの時の計数率} - \text{散乱線成分の計数率}}$$



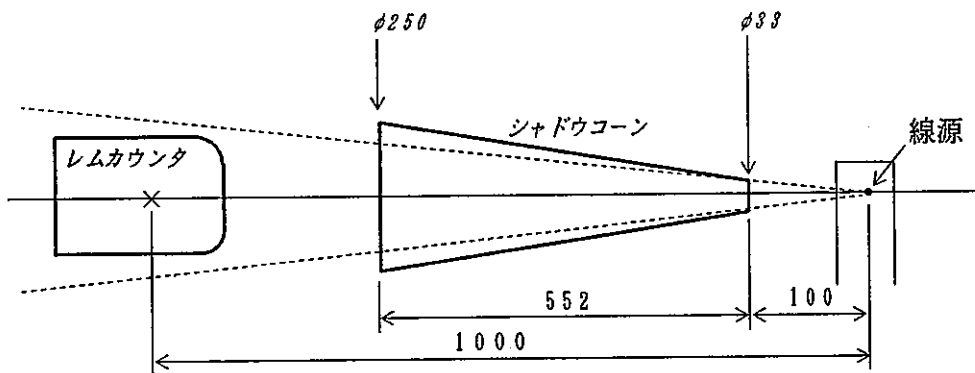
(a) 板状しゃへい材の場合



(b) ドーナツ状しゃへい材の場合

(単位：mm)

図3-5 しゃへい性能確認試験概念図



(単位：mm)

図3-6 散乱成分測定概念図

3.2 試験結果

前節で述べた試験方法に従い、各種しゃへい試験体のしゃへい性能確認試験を実施した。表3-1にしゃへい試験体を、表3-2(1)~(10)にしゃへい効果を示す。

表3-1 試験体一覧

| 試験体 | 使用数量等 | 備考 |
|--------------------|--|--|
| 純アクリル | 6mm厚9枚、10mm厚1枚、30mm厚1枚、31mm厚1枚 | 平成2年7月16日及び 10月23日 ^{252}Cf による試験 |
| Gd(30%)添加 アクリル | 10mm厚10枚 | |
| Gd(3%)添加 含鉛アクリル | 10mm厚6枚 | |
| 含鉛アクリル* | 7mm厚8枚 | 平成3年2月25日及び 5月9日 ^{252}Cf 、Am-Be、Pu-Beに よる試験 * Pu-Beは実施せず |
| 刹イソフレン (ドーナツ状) | 30mm厚、60mm厚、90mm厚、 各1体(粹材: Al 2mm+2mm) | 平成2年7月16日 ^{252}Cf による試験 |
| 刹メチルペンテン | 31mm厚3枚 | 平成2年10月23日 ^{252}Cf による試験 |
| 刹カーボネート | 31mm厚4枚(Gd コーティング有り)、30mm厚2枚 | |
| ニュートロンストップ SP | 31mm厚1枚(純刹イソフレン)、 30mm厚1枚(B_2O_3 44%入り) | |
| ニュートロンストップ SM | 30mm厚1枚(B_4C 50%入り) | |
| ニュートロンストップ SY | 1.5mm厚各1枚(Gd_2O_3 10%入り)、 (Gd_2O_3 20%入り)、 (Gd_2O_3 40%入り)、 (Gd_2O_3 60%入り) | |
| ゴム(サンプルA) | 10mm厚3枚、15mm厚1枚 | 平成3年5月9日 ^{252}Cf 、Am-Beによる 試験 |
| ゴム(サンプルB) | 15mm厚1枚 | |

表 3 - 2 (1) 純アクリルのしゃへい効果

| 厚さ (mm) | | 6 | 10 | 22 | 30 | 40 | 52 | 60 |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.91 | 0.86 | 0.73 | 0.64 | 0.55 | 0.45 | 0.39 |
| | Am-Be | — | — | — | 0.78 | — | — | 0.54 |
| | Pu-Be | — | — | — | 0.76 | — | — | 0.56 |

| 厚さ (mm) | | 70 | 82 | 91 | 103 | 109 | 119 | 125 |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.33 | 0.26 | 0.23 | 0.19 | 0.17 | 0.14 | 0.12 |
| | Am-Be | — | — | — | — | 0.26 | — | — |
| | Pu-Be | — | — | — | — | 0.29 | — | — |

表 3 - 2 (2) Gd(30%)添加アクリルのしゃへい効果

| 厚さ (mm) | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.87 | 0.74 | 0.65 | 0.53 | 0.45 | 0.38 | 0.32 | 0.26 | 0.22 | 0.19 |
| | Am-Be | — | — | 0.87 | — | — | 0.54 | — | — | — | 0.34 |
| | Pu-Be | — | — | 0.83 | — | — | 0.56 | — | — | — | 0.35 |

表 3 - 2 (3) Gd(3%)添加含鉛アクリルのしゃへい効果

| 厚さ (mm) | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.86 | 0.73 | 0.62 | 0.53 | 0.44 | 0.37 |
| | Am-Be | — | 0.87 | — | 0.72 | — | 0.51 |
| | Pu-Be | — | 0.83 | — | 0.68 | — | 0.55 |

表 3 - 2 (4) 含鉛アクリルのしゃへい効果

| 厚さ (mm) | | 7 | 14 | 21 | 28 | 35 | 42 | 49 | 56 |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.92 | 0.81 | 0.73 | 0.66 | 0.59 | 0.52 | 0.46 | 0.41 |
| | Am-Be | — | — | 0.88 | — | 0.72 | — | 0.64 | 0.53 |

表 3 - 2 (5) ポリイソブチレンのしゃへい効果

| 厚さ (mm) | | 34 | 64 | 94 |
|---------|-------------------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.62 | 0.37 | 0.21 |

表3-2(6) ポリメチルペンテンのしゃへい効果

| 厚さ(mm) | | 31 | 62 | 93 |
|--------|-------------------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.61 | 0.35 | 0.21 |

表3-2(7) ポリカーボネート(Gd コーティング) のしゃへい効果

| 厚さ(mm) | | 31 | 62 | 93 | 124 |
|--------|-------------------|------|------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.67 | 0.43 | 0.27 | 0.16 |

表3-2(8) ポリカーボネートのしゃへい効果

| 厚さ(mm) | | 30 | 60 |
|--------|-------------------|------|------|
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.69 | 0.45 |

表3-2(9) ニュートロンストップのしゃへい効果

| 種 類 | 厚さ(mm) | 減衰比(^{252}Cf) |
|-------------------------------------|--------|--------------------------|
| SP (純ポリエチレン) | 31 | 0.56 |
| SP (B_2O_3 44%入り) | 30 | 0.62 |
| SM (B_4C 50%入り) | 30 | 0.68 |
| SY (Gd_2O_3 10%入り) | 1.5 | 0.98 |
| SY (Gd_2O_3 20%入り) | 1.5 | 0.99 |
| SY (Gd_2O_3 40%入り) | 1.5 | 0.98 |
| SY (Gd_2O_3 60%入り) | 1.5 | 0.98 |

表3-2(10) しゃへい用ゴムのしゃへい効果

| 種 類 | サンプルA | | | | | B | |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 15 | |
| 厚さ(mm) | | | | | | | |
| 減衰比 | ^{252}Cf | 0.90 | 0.82 | 0.76 | 0.62 | 0.44 | 0.81 |
| | Am-Be | 0.98 | 0.91 | 0.76 | - | 0.58 | 0.85 |

各種試験体のうち、アクリルを基本としたしゃへい材の ^{252}Cf 線源に対する厚さとしゃへい効果との関係を図3-7に、Am-Be及びPu-Be線源に対する厚さとしゃへい効果との関係を図3-8に示す。いずれの線源においても、アクリルに鉛やガドリニウムを添加しても中性子線に対するしゃへい効果はほとんど変わらない結果となっている。

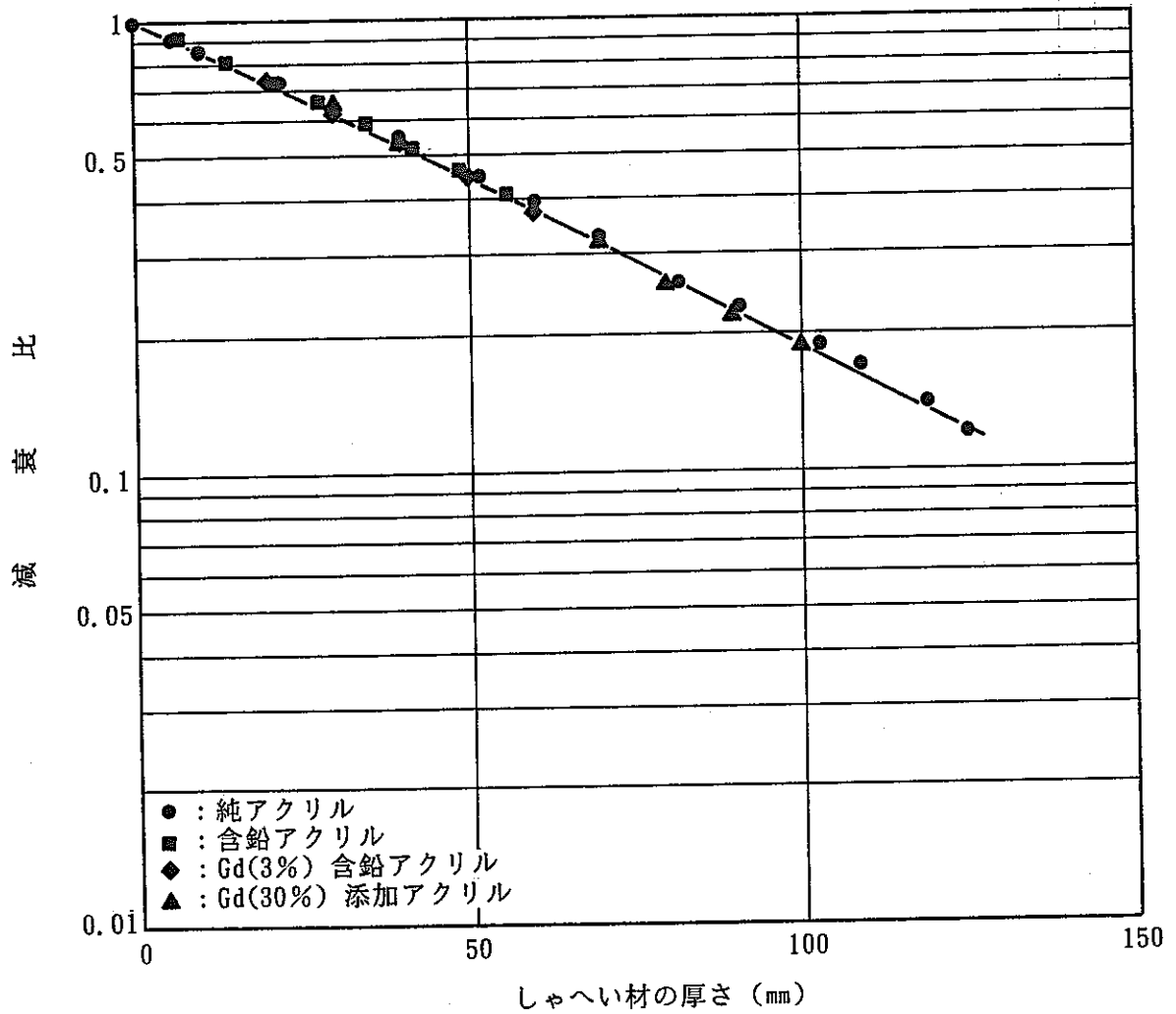


図3-7 アクリル系試験体のしゃへい効果 (Cf線源)

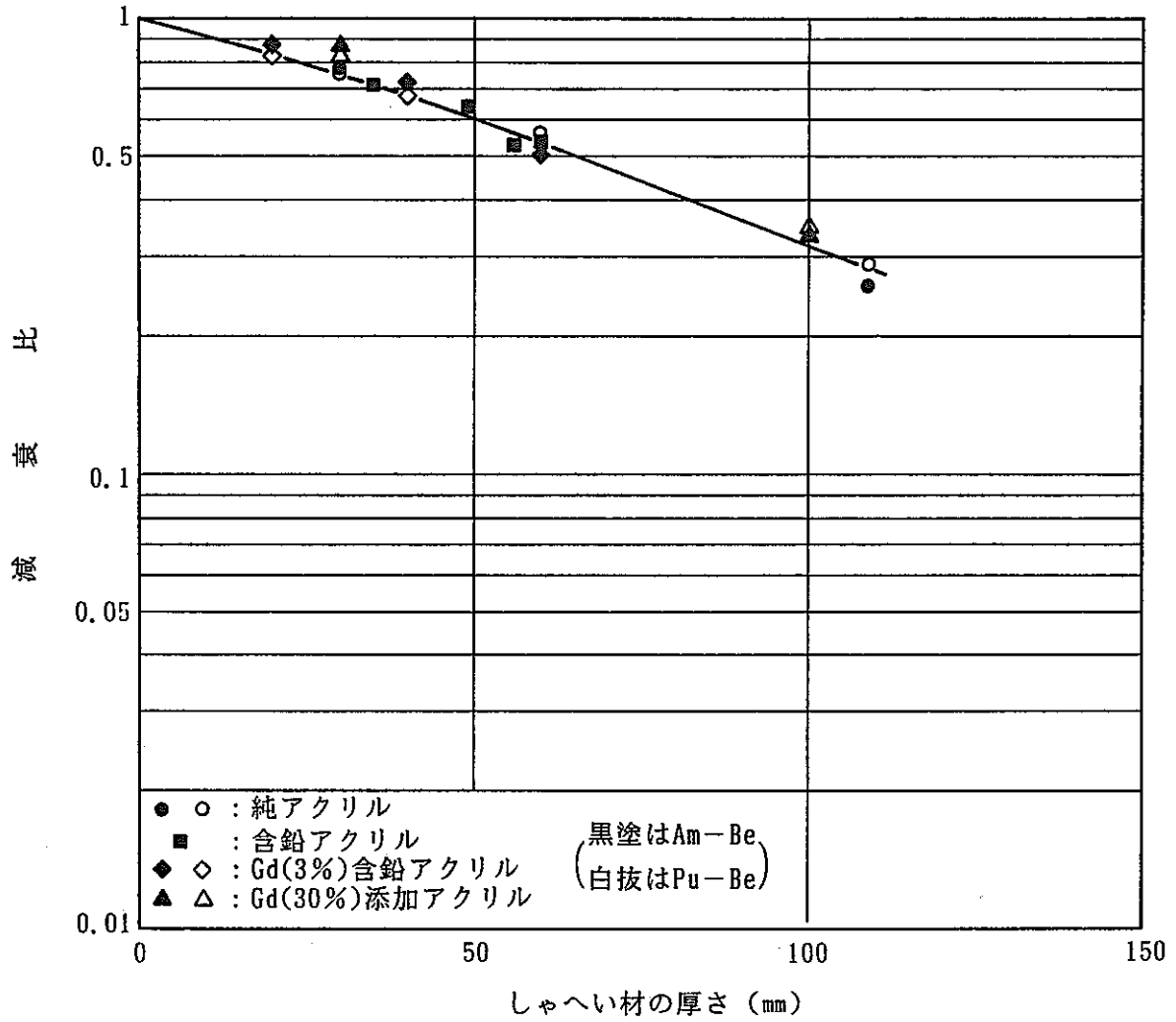


図3-8 アクリル系試験体のしゃへい効果 (Am-Be、Pu-Be線源)

各種試験体のうち、アクリル系以外のしゃへい材の ^{252}Cf に対する厚さとしゃへい効果との関係を図3-9に示す。また、7種類のニュートロンストップについては、それぞれ1枚ずつしかないため厚さとしゃへい効果の関係は確認することができないが、参考のためアクリルのしゃへい効果と比較したグラフを図3-10に示す。これらの図から、各種の試験体のしゃへい効果にはそれほど大きな差がないことが確認された。この中でポリカーボネート材のしゃへい効果が若干劣っている。

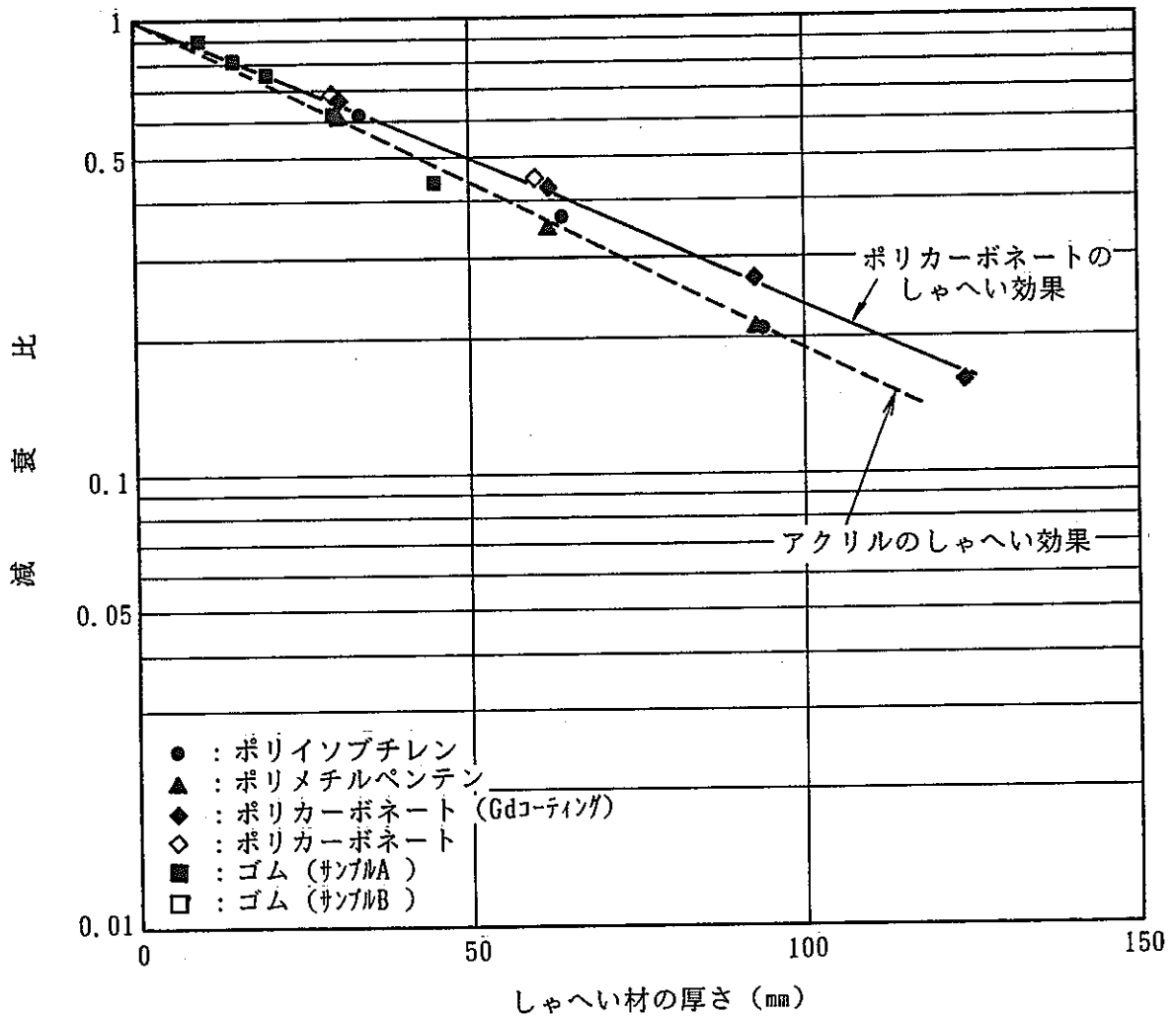


図3-9 アクリル系以外の試験体のしゃへい効果 (Cf線源)

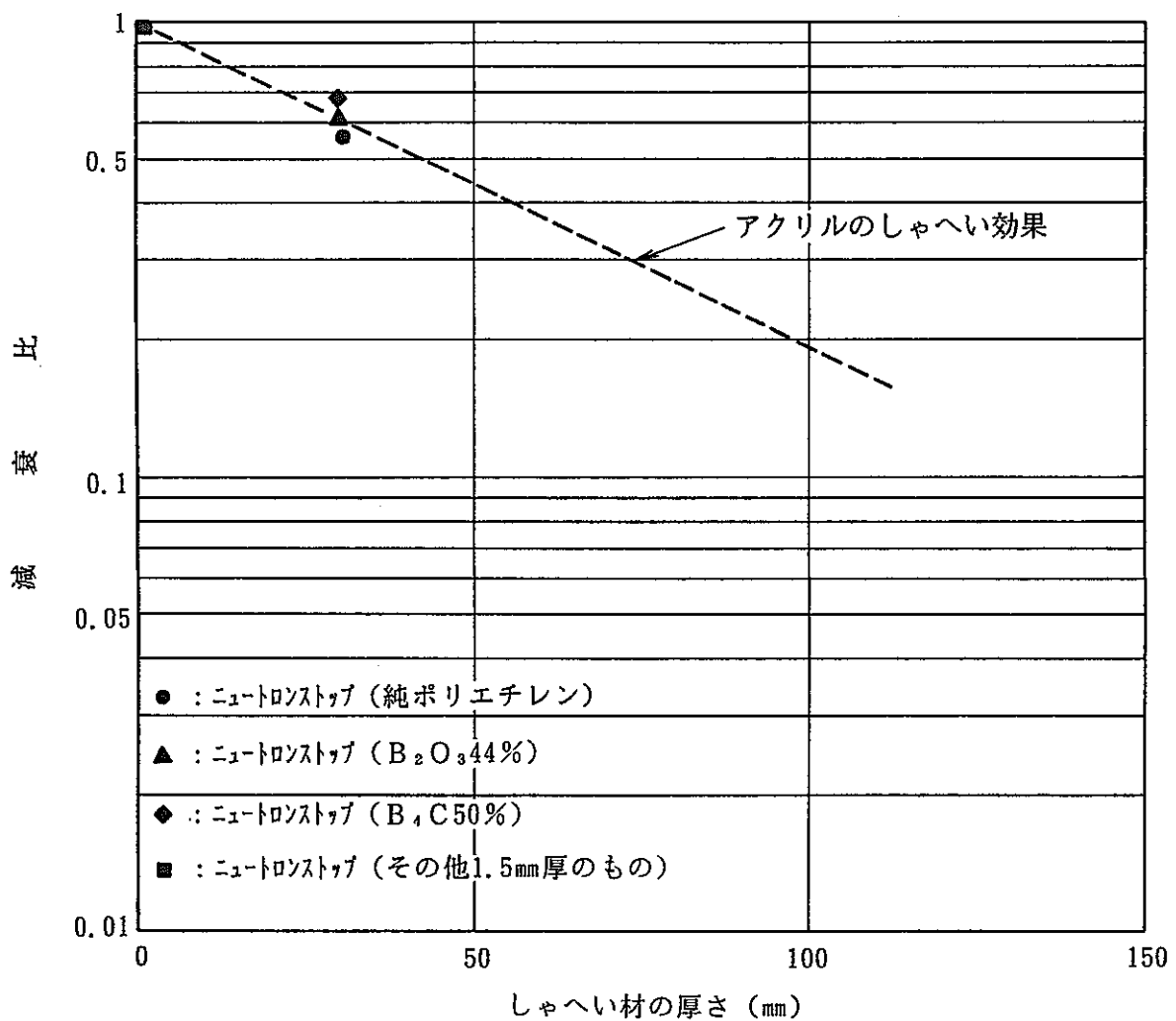


図3-10 ニュートロンストップ試験体のしゃへい効果 (Cf線源)

アクリル試験体における、線源の違い（中性子の平均エネルギーが異なる）に対するしゃへい効果の比較を図3-11に示す。この図から、中性子エネルギーがほとんど同じであるAm-BeとPu-Be線源に対するしゃへい効果は同程度であり、これらよりエネルギーの低いCf線源に対してはしゃへい効果が高くなることが確認された。

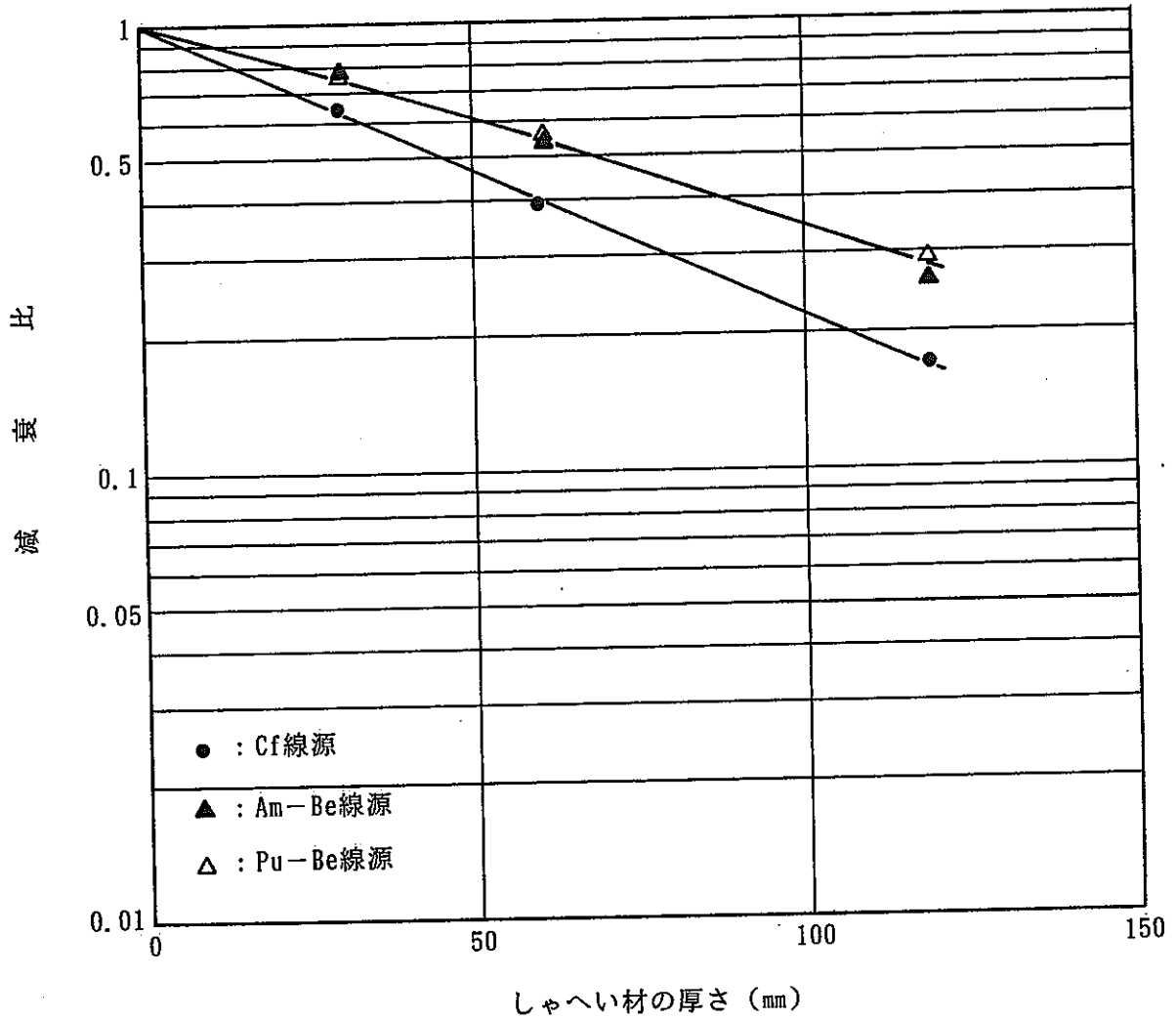


図3-11 各線源に対するアクリル試験体のしゃへい効果の比較

3.3 考察

試験結果からは、期待されたほどGdの効果はみられなかった。これは、しゃへい材によって中性子エネルギーが減速されGdによる中性子吸収が起こることを期待したのであるが、線量当量を占める高速中性子エネルギー成分が減速されないために中性子吸収が起こらなかったものと考えられる。しかし、さらにしゃへい厚さを増やした場合には、Gdの効果が顕著に現れるものと考えられ、どの程度の厚さで効果が現れるかは今後測定を行う場合の検討項目となろう。

また、中性子エネルギーの違いによるしゃへい効果の違いに対しては、エネルギーの低い方に対してしゃへい効果が高くなることが測定により確認された。プルトニウム燃料製造施設における中性子の平均エネルギーは約2 MeV という報告があり、これは ^{252}Cf の中性子平均エネルギーにほぼ等しいことなどから、フィールドにおいてしゃへい対策を施す場合には、そのまま参考として採用できるものとする。ただし、より詳細に効果を確認するならば、エネルギースペクトル等の情報を得たり実際のMOX燃料を用いたしゃへい効果確認試験を行う必要がある。

本試験により、ICRPの1990年勧告において採用された放射線荷重係数の変更に対し、従来の施設にしゃへい対策を施すことによって対処するためには、約5 cmのアクリル系しゃへい体を追加する必要があることが確認された。

一方、しゃへい材の性能確認試験結果には、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たが、これによりかなりの精度向上が図られた。今回試験を行った照射場における散乱線の影響については、レムカウンタの全計数に対する散乱成分計数の割合が10%近くになるため、しゃへい材の厚さが10 cmの場合には、直接線と散乱線の比がほぼ2 : 1になるほどである。また、アクリルについては、試験の再現性を確保するために数回のしゃへい性能確認を行ったが、再現性の誤差は数%であることも確認している。参考として、シャドウコーンを用いて散乱線に対する考慮を行ったことによる効果を図3-12に示す。

また、本試験方法の妥当性を評価するため、計算コードによる計算結果との比較を図3-13に示す。ここでは、計算モデルに球体系を用い、線源条件には、プルトニウム燃料第三開発室のしゃへい計算条件に使用しているPuの同位体組成と富化度を用いている。

さらに、以上の結果から、散乱線を考慮した場合としない場合について試験結果と計算結果とを比較すると図3-14になる。散乱線を考慮した場合には、試験で得られた減衰比と計算で得られた減衰比は比例関係にあることが判る。これらの結果から、平板状のしゃへい材の性能

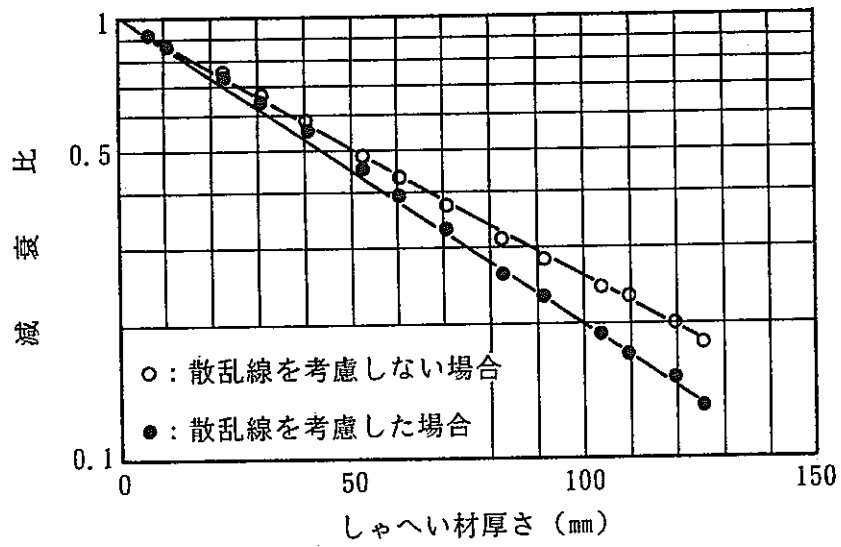


図3-12 シャドウコーンを用いたことによる効果

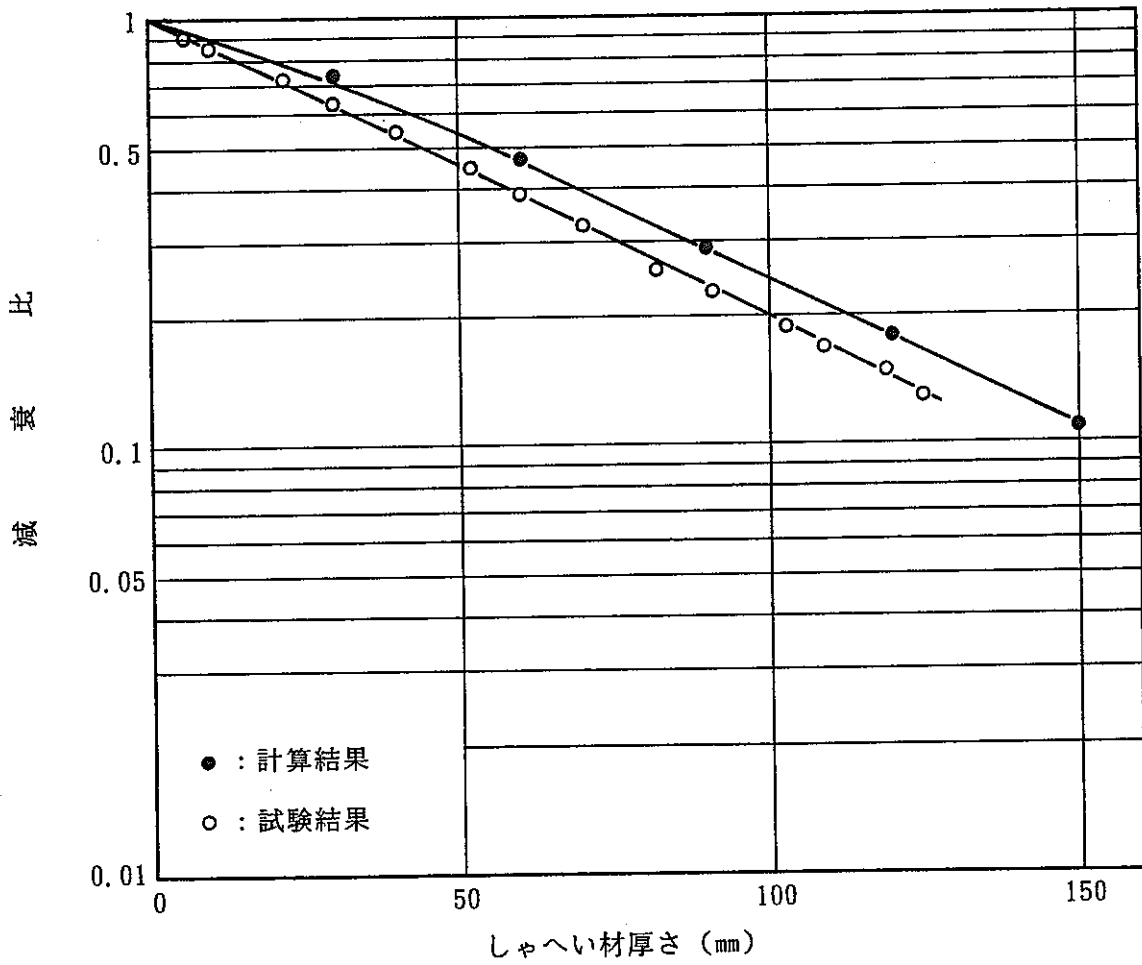


図3-13 シャへい性能確認試験結果と計算結果との比較 (アクリル)

確認試験において計算値との比較を行う場合には、照射場の散乱線を評価し、これを考慮した試験方法を用いる必要があることが理解できる。

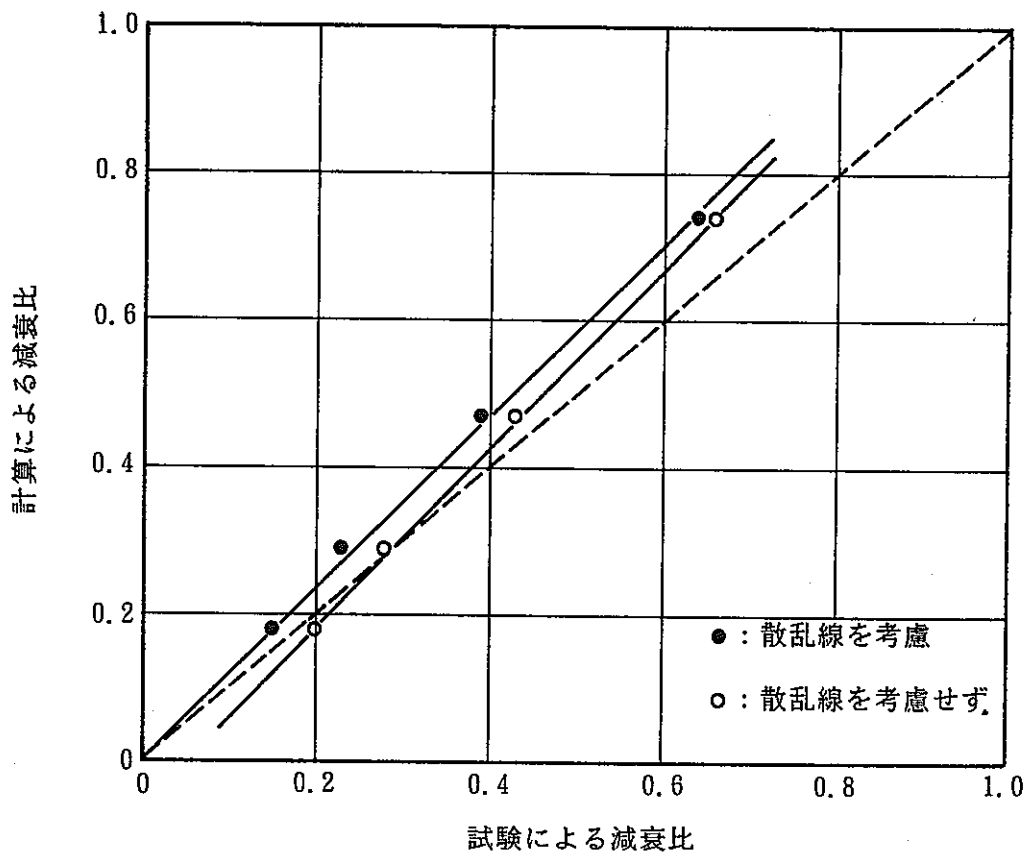


図3-14 測定と計算によるしゃへい効果の関係 (アクリル)

4. 中性子スペクトロメータによるしゃへい性能確認試験

アクリル系しゃへい材の持つしゃへい性能を中性子のエネルギースペクトルの変化の面から確認するため、中性子スペクトロメータによる ^{252}Cf 線源を用いた試験を実施した。これは第3章に述べた試験結果を追認することを主眼とし、原則としてその試験と同一条件で行った。

4.1 試験方法

(1) 使用機器類

試験に用いた中性子スペクトロメータは、放射線管理第一課で平成2年度に製作したシステムであり、多組減速体付 ^3He 比例計数管（減速体4種類+減速体なしの計5組）により測定した各組の計数率から、SAND IIコードを用いて 10^{-2}eV ~15 MeVのエネルギー帯を21群に分割したスペクトル解析（アンフォルディング）を行い、各エネルギー群の中性子フルエンス密度（フラックス）を求めるものである。また、このフラックスと科学技術庁告示第15号別表第5に示された換算係数から1 cm線量当量率を求めることができるが、本システムでは、スペクトル解析用のエネルギー群構造に合わせて変換の上、内蔵した換算係数を用いている。エネルギー群構造及び換算係数を表4-1に示す。

照射試験には、計測機器校正施設の中性子照射装置の ^{252}Cf 線源を用い、評価の条件をそろえるため、散乱線の測定にはシャドウコーンを用いた。

表4-1 エネルギー群構造及び換算係数

| 中性子エネルギー帯 | 換算係数 | 中性子エネルギー帯 | 換算係数 |
|-----------------|-------|-----------------|--------|
| 15.0 ~ 9.05 MeV | 1.47 | 86.5 ~ 24.8 keV | 0.120 |
| 9.05 ~ 5.49 " | 1.47 | 24.8 ~ 7.10 " | 0.0471 |
| 5.49 ~ 3.33 " | 1.46 | 7.10 ~ 2.03 " | 0.0363 |
| 3.33 ~ 2.02 " | 1.44 | 2.03 ~ 0.58 " | 0.0371 |
| 2.02 ~ 1.22 " | 1.33 | 583 ~ 167 eV | 0.0393 |
| 1.22 ~ 0.74 " | 1.12 | 167 ~ 47.9 " | 0.0416 |
| 743 ~ 450 keV | 0.806 | 47.9 ~ 13.7 " | 0.0427 |
| 450 ~ 273 " | 0.557 | 13.7 ~ 3.93 " | 0.0437 |
| 273 ~ 165 " | 0.380 | 3.93 ~ 1.13 " | 0.0448 |
| 165 ~ 86.5 " | 0.241 | 1.13 ~ 0.414 " | 0.0448 |
| | | 0.414 ~ 0.010 " | 0.0385 |

換算係数の単位は $[\mu\text{Sv/h}/\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$

(2) 測定及び評価方法

① 測定

中性子線源から1 mの位置に検出器を設置し、検出器側にしゃへい試験体を配置して測定を行った。測定状態を図4-1に示す。なお、測定時間は計数の統計的誤差を考慮したうえで、100秒間1回とした。また、散乱線に対する考慮として、各組の検出器についてシャドウコーンを用いた測定を行い、しゃへい試験体の測定値を補正してからアンフォールディングした。

② 評価

レムカウンタによる試験結果と比較するため、しゃへい性能の評価として1 cm線量当量率に換算した結果から減衰比を次式により求めた。

(計算式)

$$\text{減衰比} = \frac{\text{しゃへい試験体設置時の線量当量率}}{\text{しゃへい試験体なしの時の線量当量率}}$$

また、中性子エネルギースペクトルの変化を確認するために、エネルギー群ごと及び全エネルギー帯のフラックスの増減比を次式により求めた。

(計算式)

$$\text{増減比} = \frac{\text{しゃへい試験体設置時のフラックス}}{\text{しゃへい試験体なしの時のフラックス}}$$

さらに、各エネルギー群のフラックスの変化が線量当量率の減少にどのように寄与したかを確認するために、エネルギー群ごとの線量当量率の低減率を次式により求めた。

(計算式)

$$\text{低減率} = \frac{\text{しゃへい試験体設置時のエネルギー群ごとの線量当量率減少分}}{\text{しゃへい試験体なしの時の線量当量率}} \times 100 [\%]$$

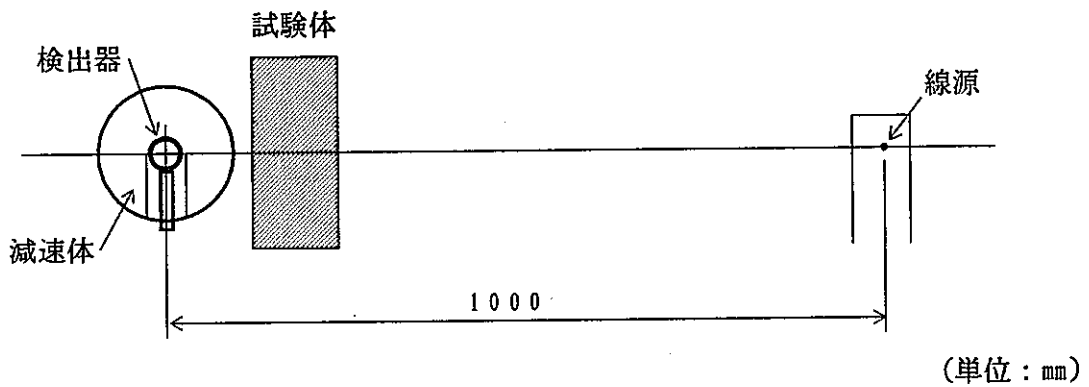


図4-1 中性子スペクトロメータによる試験概念図

4.2 試験結果

前節で述べた試験方法によりアクリル系しゃへい試験体のしゃへい性能確認試験を実施した。

表4-2にしゃへい試験体を示す。

表4-2 試験体一覧

| 試験体 | 使用数量等 | 備考 |
|--------------------|--------------------------------|---|
| 純アクリル | 6mm厚5枚、10mm厚1枚、30mm厚1枚、31mm厚1枚 | 平成3年10月7日、 10月11日及び 10月16日 ^{252}Cf による試験 |
| Gd(30%)添加 アクリル | 10mm厚10枚 | |
| Gd(3%)添加 含鉛アクリル | 10mm厚6枚 | |
| 含鉛アクリル | 7mm厚8枚 | |

(1) アンフォールディング結果

中性子スペクトロメータにより求めた ^{252}Cf 線源（しゃへい材なし）のエネルギースペクトル及びしゃへい試験体でしゃへいしたときのエネルギースペクトルを図4-2～図4-5に示す。

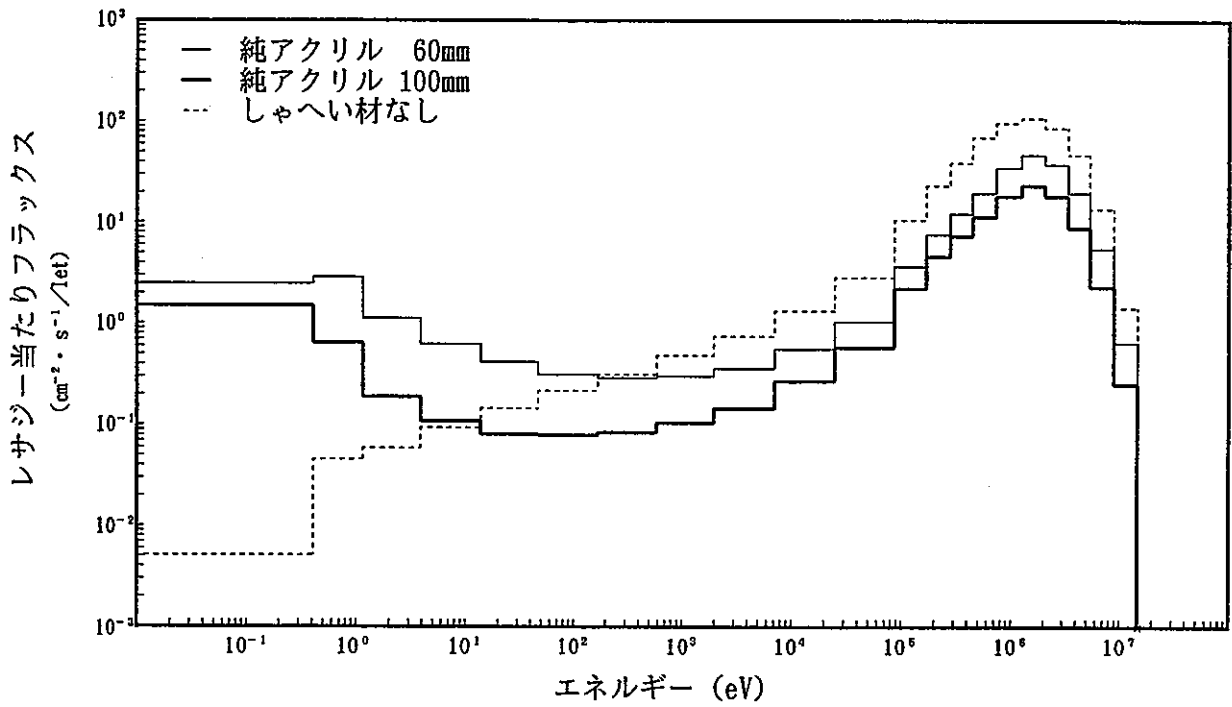


図4-2 純アクリルでしゃへいしたときのスペクトル

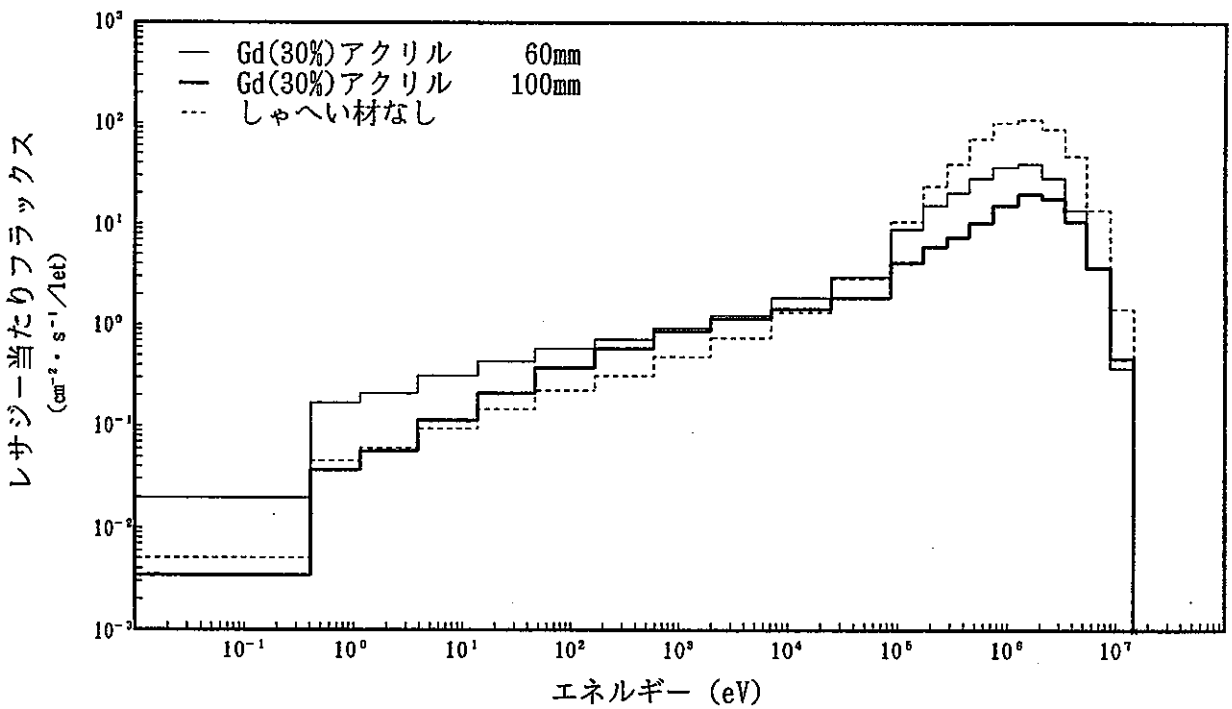


図4-3 Gd添加アクリルでしゃへいしたときのスペクトル

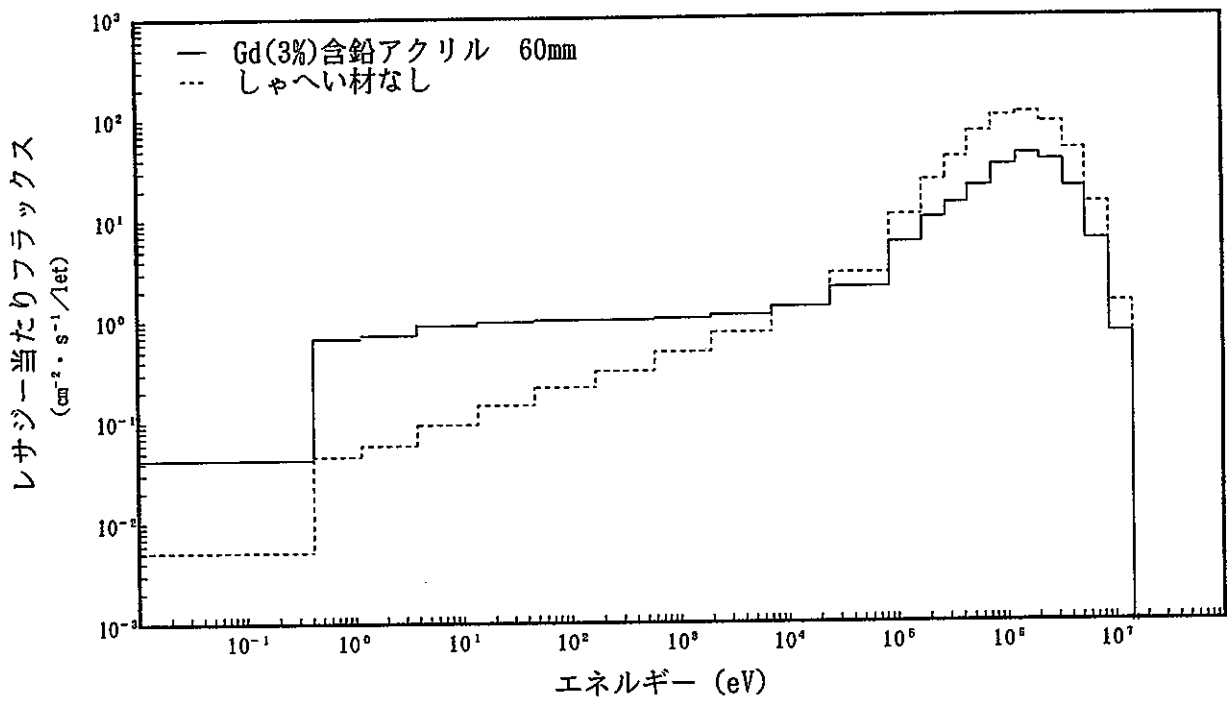


図 4 - 4 Gd添加含鉛アクリルでしゃへいしたときのスペクトル

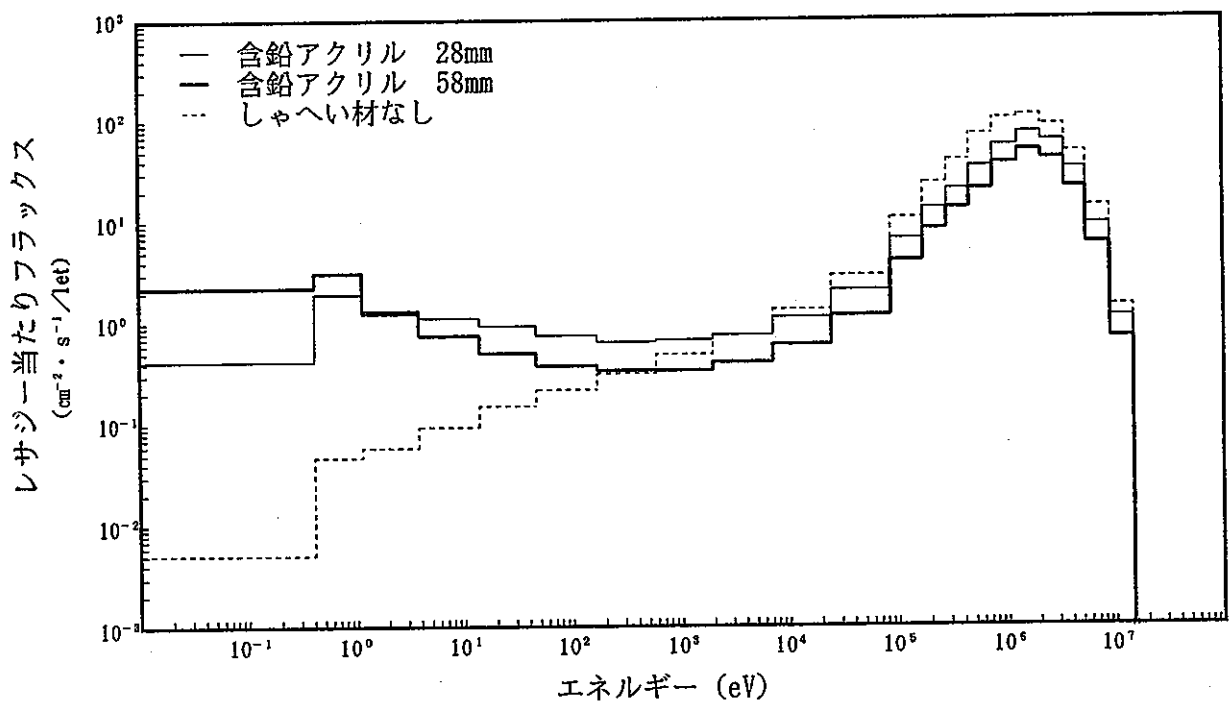


図 4 - 5 含鉛アクリルでしゃへいしたときのスペクトル

(2) シャへい性能確認結果

本システムで求めた結果により評価した全体的なシャへい性能（減衰比）を表4-3に、シャへい試験体の厚さと減衰比との関係を図4-6に示す。この結果は第3章に述べた結果とよく一致している。

表4-3 各試験体の減衰比

| 厚さ(mm) | | 28 | 56 | 60 | 100 | 101 |
|--------|------------|------|------|------|------|------|
| 減衰比 | 純アクリル | - | - | 0.40 | - | 0.20 |
| | Gd30% アクリル | - | - | 0.36 | 0.19 | - |
| | Gd含鉛アクリル | - | - | 0.38 | - | - |
| | 含鉛アクリル | 0.63 | 0.42 | - | - | - |

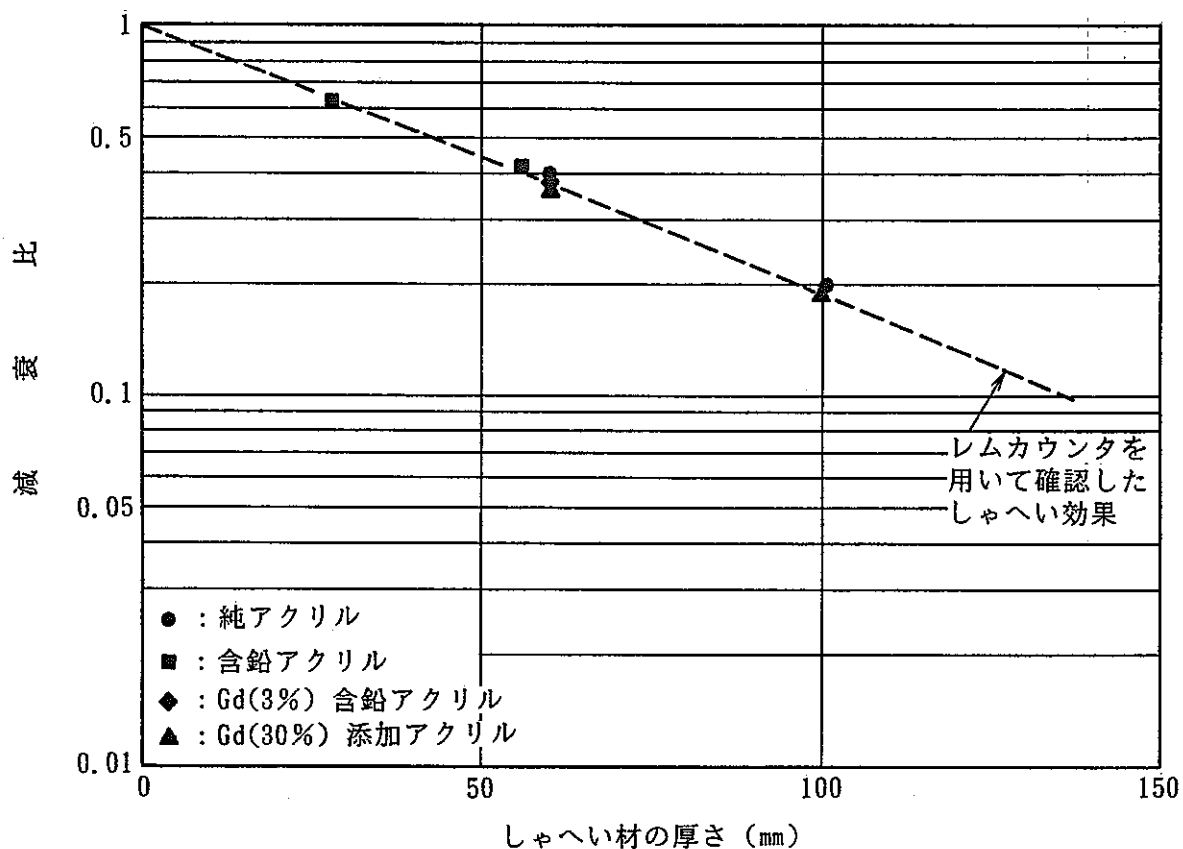


図4-6 アクリル系試験体のシャへい効果

(3) エネルギースペクトルの変化

エネルギー群ごとのフラックスの変化（増減比）及び全エネルギー帯におけるフラックスの減衰比を表 4-4 に示す。また、この増減比をしゃへい試験体について比較した結果を図 4-7、図 4-8 に示す。

厚さ約 60mm の各種試験体について比較した図 4-7 から、純アクリルと含鉛アクリル試験体のしゃへい状況はスペクトルの変化から見てほとんど同じであることが判る。Gd を添加したものについても、3% 添加（鉛も添加）のものは 0.2MeV 以上の領域では純アクリルと同じである。一方、Gd30% 添加アクリルについては、他の試験体とは異なるスペクトル変化を見せている。

厚さ 100mm の試験体について比較した図 4-8 を見ると、0.3 ~ 3 MeV の領域で近似している他はまったく違う変化を見せている。

(4) 線量当量率の変化

エネルギー群ごとのフラックスの変化が全体としての 1 cm 線量当量に与える影響を低減率として表 4-5 に示す。また、この低減率をしゃへい試験体について比較した結果を図 4-9、図 4-10 に、同じしゃへい試験体ごとに厚さについて比較した結果を図 4-11、図 4-12 に示す。

これらの図から、線量当量率の減衰に寄与しているのは 0.1~10MeV のエネルギー群に限られていることが判る。また、Gd を添加したしゃへい材はそれ以外と異なるスペクトル変化の傾向を見せていたが、線量当量率変化についてはほとんど同じ曲線を描いている。

表4-4 エネルギースペクトルの変化(増減比)

| しゃへい試験体 | エ ネ ル ギ 一 群 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 全体 |
|----------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ | ⑭ | ⑮ | ⑯ | ⑰ | ⑱ | ⑳ | ㉑ | | |
| 純アクリル 60mm | 0.44 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.35 | 0.29 | 0.30 | 0.33 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.48 | 0.63 | 0.90 | 1.47 | 2.81 | 6.56 | 18.8 | 62.8 | 494 | 0.44 |
| 純アクリル 101mm | 0.17 | 0.17 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.19 | 0.17 | 0.18 | 0.20 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.27 | 0.36 | 0.56 | 1.14 | 3.29 | 14.2 | 660 | 0.25 |
| Gd30%アクリル 60mm | 0.26 | 0.26 | 0.29 | 0.32 | 0.36 | 0.37 | 0.40 | 0.51 | 0.66 | 0.82 | 1.04 | 1.32 | 1.63 | 1.94 | 2.27 | 2.62 | 2.96 | 3.27 | 3.51 | 3.67 | 3.79 | 0.42 |
| Gd30%アクリル100mm | 0.31 | 0.26 | 0.23 | 0.20 | 0.18 | 0.15 | 0.15 | 0.18 | 0.26 | 0.39 | 0.63 | 1.05 | 1.52 | 1.81 | 1.87 | 1.72 | 1.45 | 1.18 | 0.96 | 0.78 | 0.67 | 0.22 |
| Gd含鉛アクリル60mm | 0.50 | 0.44 | 0.42 | 0.41 | 0.39 | 0.33 | 0.30 | 0.34 | 0.42 | 0.54 | 0.72 | 1.01 | 1.47 | 2.11 | 3.07 | 4.51 | 6.59 | 9.26 | 12.3 | 15.2 | 18.1 | 0.42 |
| 含鉛アクリル 28mm | 0.74 | 0.67 | 0.69 | 0.68 | 0.66 | 0.55 | 0.48 | 0.51 | 0.57 | 0.63 | 0.70 | 0.82 | 1.03 | 1.40 | 2.07 | 3.40 | 6.19 | 11.9 | 22.8 | 41.3 | 79.8 | 0.65 |
| 含鉛アクリル 56mm | 0.49 | 0.45 | 0.47 | 0.47 | 0.46 | 0.37 | 0.30 | 0.32 | 0.35 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.54 | 0.72 | 1.05 | 1.73 | 3.36 | 7.80 | 21.7 | 67.7 | 420 | 0.46 |

表4-5 線量当量率の変化(低減率 [%])

| しゃへい試験体 | エ ネ ル ギ 一 群 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ | ⑭ | ⑮ | ⑯ | ⑰ | ⑱ | ⑳ | ㉑ | | |
| 純アクリル 60mm | 0.2 | 1.5 | 5.2 | 12.7 | 14.8 | 12.7 | 5.2 | 2.8 | 1.1 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 |
| 純アクリル 101mm | 0.3 | 3.0 | 9.6 | 17.9 | 19.9 | 16.1 | 8.2 | 5.3 | 1.3 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.2 |
| Gd30%アクリル 60mm | 0.3 | 2.6 | 8.6 | 15.1 | 16.5 | 12.4 | 5.8 | 2.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gd30%アクリル100mm | 0.3 | 2.6 | 9.3 | 17.9 | 20.9 | 16.8 | 8.2 | 1.2 | 0.3 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gd含鉛アクリル60mm | 0.2 | 2.0 | 6.9 | 13.4 | 15.8 | 13.4 | 6.9 | 2.6 | 0.9 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 含鉛アクリル 28mm | 0.1 | 1.2 | 3.8 | 7.2 | 8.6 | 8.9 | 5.2 | 2.0 | 0.7 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 含鉛アクリル 56mm | 0.2 | 2.0 | 6.5 | 12.0 | 13.7 | 12.4 | 6.9 | 2.7 | 1.0 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 |

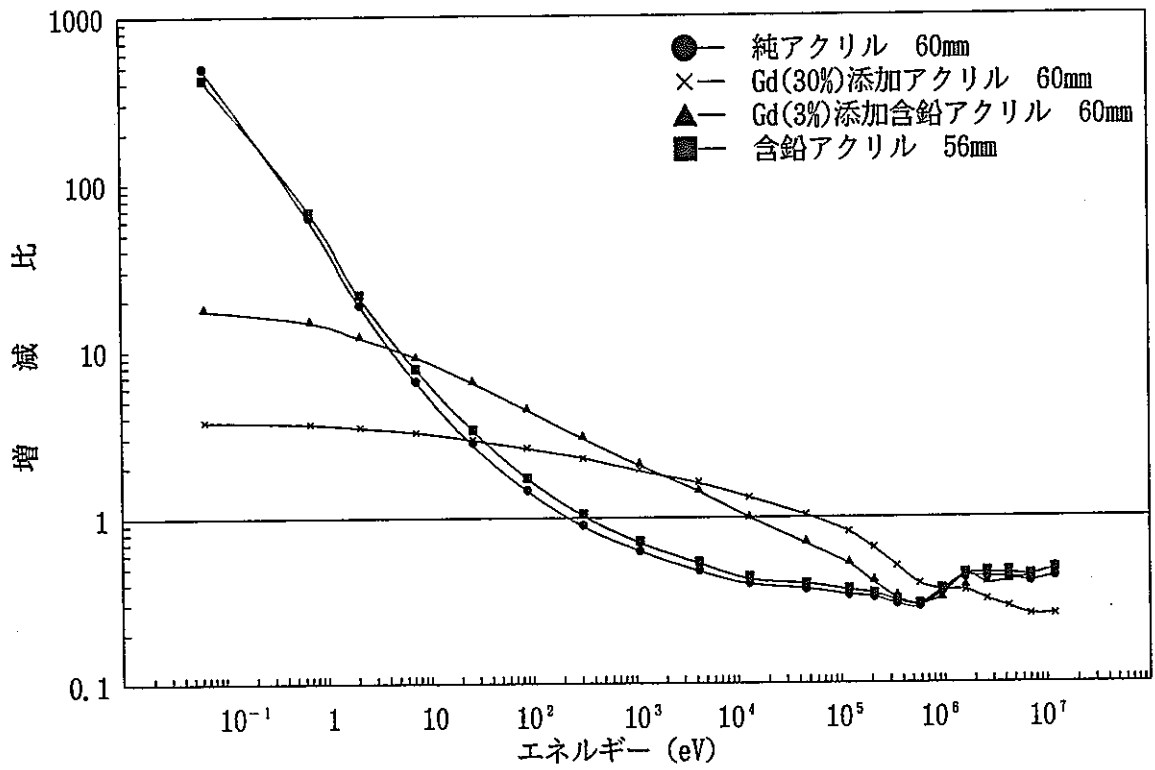


図4-7 各試験体のフラックス変化の比較(1)

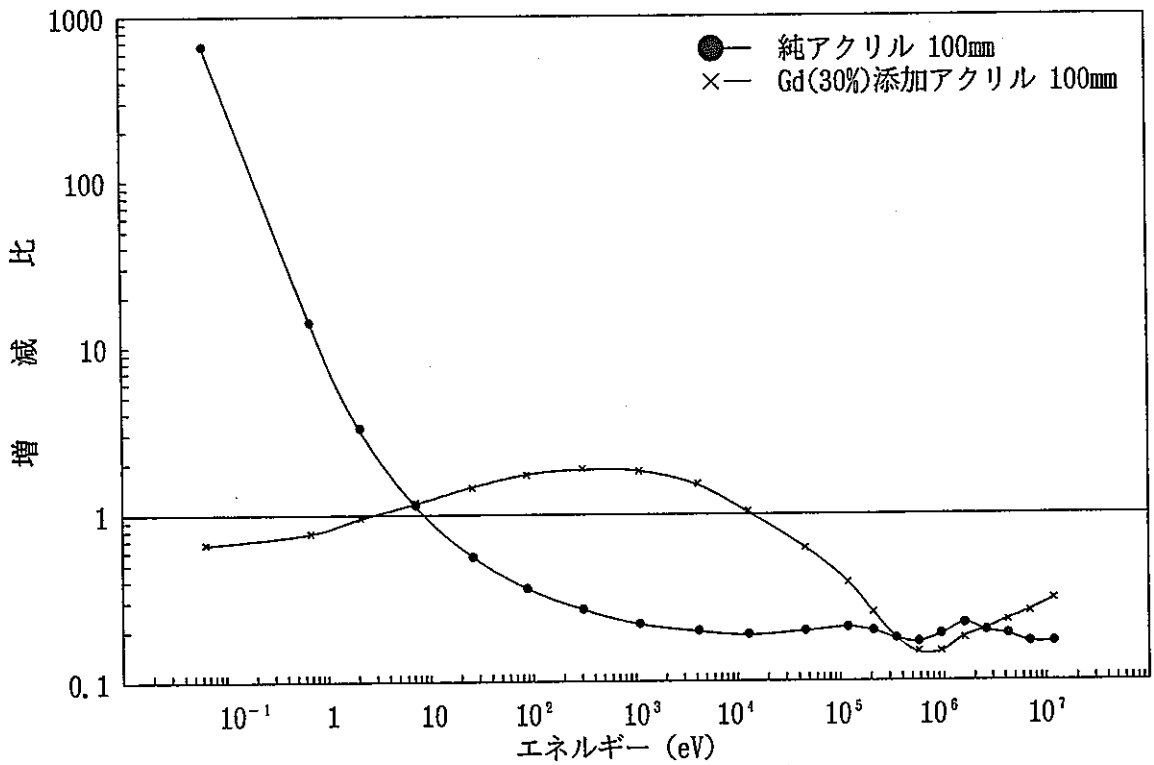


図4-8 各試験体のフラックス変化の比較(2)

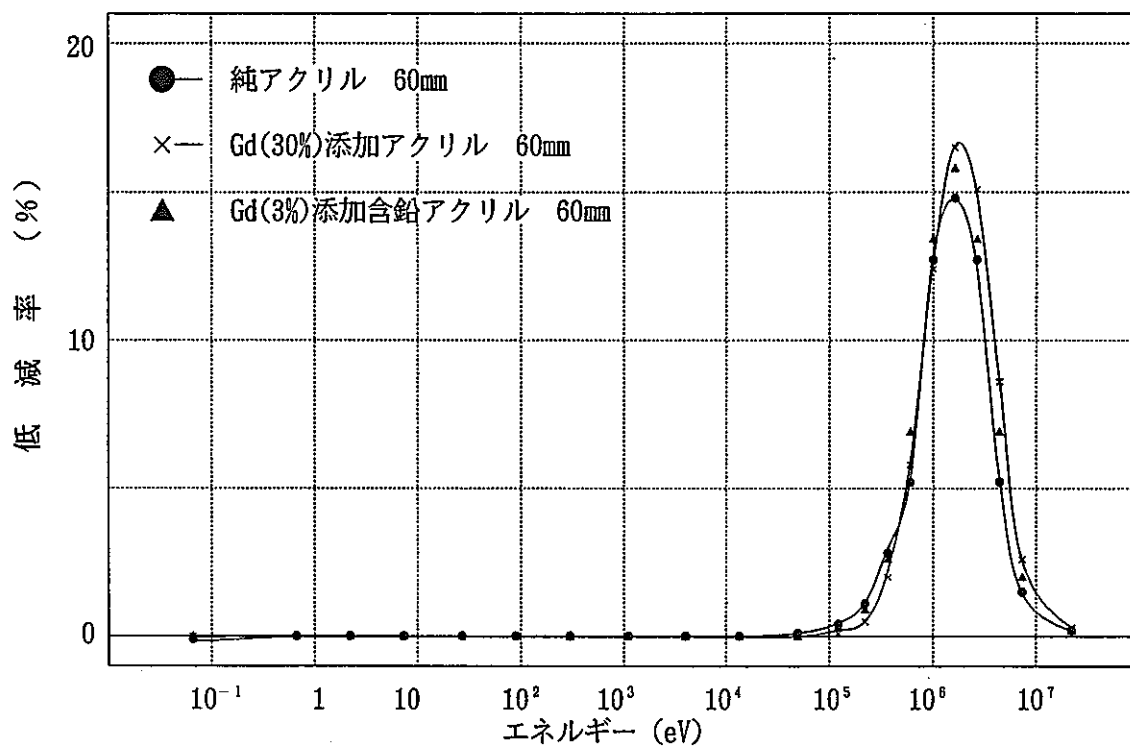


図4-9 各試験体の線量当量率変化の比較(1)

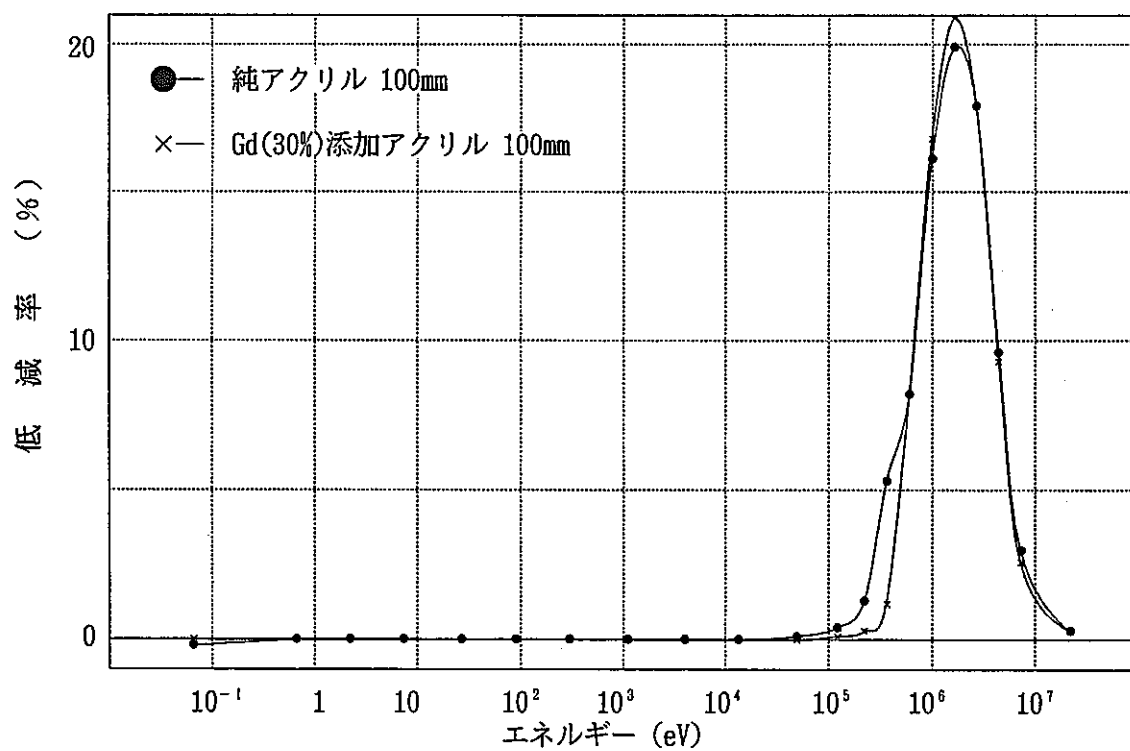


図4-10 各試験体の線量当量率変化の比較(2)

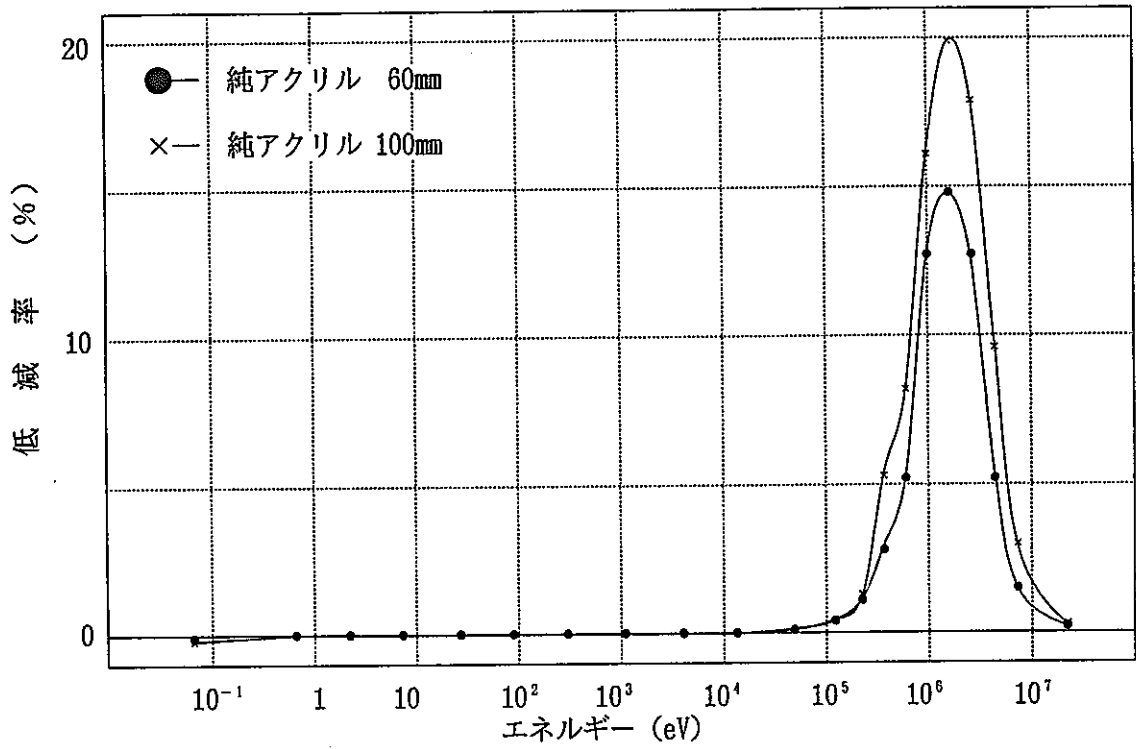


図4-11 各試験体の線量当量率変化の比較(3)

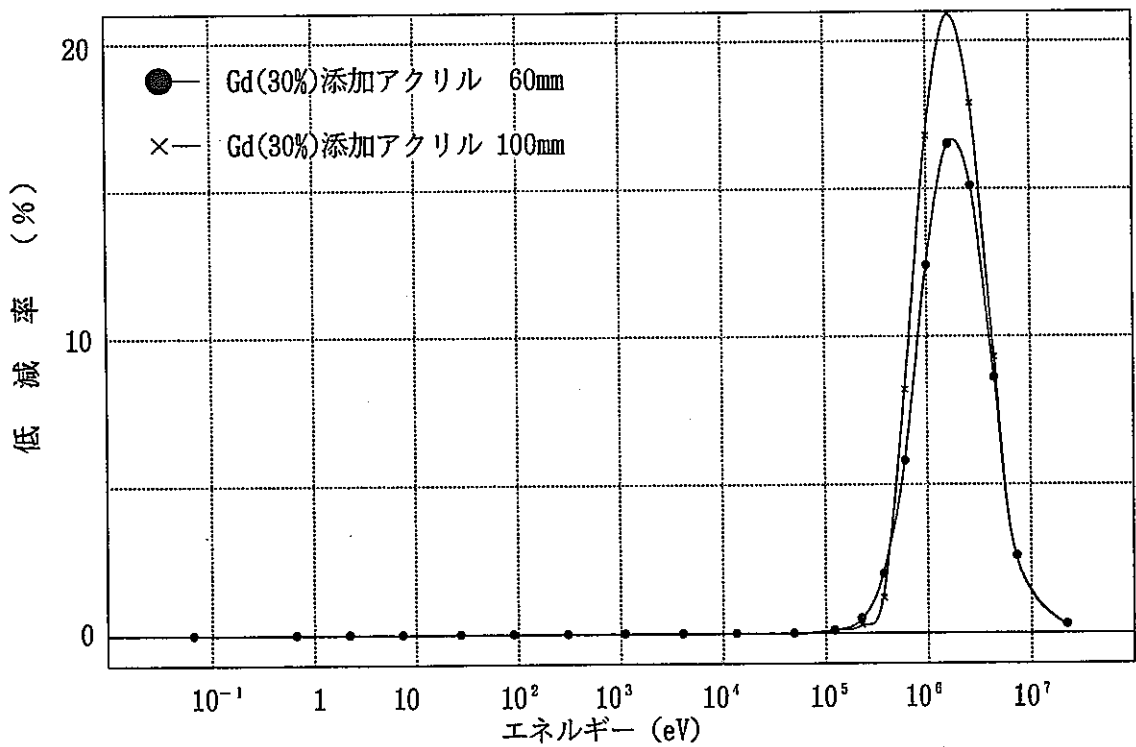


図4-12 各試験体の線量当量率変化の比較(4)

4.3 考察

中性子スペクトロメータを用い、エネルギースペクトルの変化の面からしゃへい効果を確認するという試験によって得られた知見を以下に示す。

純アクリル試験体でしゃへいした場合のスペクトルでは、60mm厚のときは0.1MeV以上で、100mm厚のときは20keV以上で各エネルギー群のフラックスが減少しており、それぞれこのエネルギー以下では逆に大きく増加していることが判る。これは、照射中性子がアクリル材を構成している軽元素と弾性衝突してエネルギーを失った（減速された）結果と考えられる。

Gd(30%)添加アクリル試験体でしゃへいした場合のスペクトルでは、0.1MeV以上で減衰が見られるが、これ以下のエネルギー群では照射線源のスペクトルとほぼ一致している。これは、しゃへい材のベースであるアクリルによって減速された中性子をGdが捕獲した結果と考えられる。この結果にはGdの効果が大きく現れている。

含鉛アクリル試験体でしゃへいした場合のスペクトルでは、56mm厚の場合は純アクリル(60mm)と同じ結果となっており、鉛の添加は中性子線のしゃへいに関して何ら寄与していないと考えられる。

Gd(3%)添加含鉛アクリル試験体でしゃへいした場合のスペクトルでは、0.1MeV以上で減衰が見られることはGd(30%)添加試験体と同様であるが、これ以下のエネルギー群ではフラックスが増加していることが判る。しかし、純アクリル試験体と比較すると増加の割合は少なく、ここでもGdの捕獲効果が現れていると言える。

一方、全エネルギー帯におけるフラックスの変化における減少は、しゃへい材との衝突により散乱され検出器に入射しなくなった分、及びGd添加しゃへい材の場合はこれにGdに捕獲されたものを加えた分と捉えることができるが、フラックスの減衰比と1cm線量当量率の減衰比を比較してみると、線量当量の減衰の方が大きいことが判る。これは中性子のしゃへいを考えるとき、線量当量減衰効果は単にフラックスの減衰だけによるものではないということができる。

ここで、各エネルギー群のフラックスの変化が全体としての1cm線量当量率にどのように寄与したかをみると、アクリル系しゃへい材によるしゃへい効果はGdの添加の有無に係わらず、そのほとんどが0.1MeV~10MeVという高いエネルギー群に支配されていることが判る。また、純アクリル材の場合に低いエネルギーのフラックス、特に熱中性子が大きく増加しているが、これが線量当量の変化に与えた影響について見てみると、厚さ100mmにおいて、元の線量当量の0.2%相当を増加させているだけである。以上のことから、今回性能確認試験

を行ったしゃへい材では、その構成原子との衝突による中性子の減速、特に0.1MeV以上のエネルギー群の中性子の減速が、線量当量の低減に対し支配的であると言えよう。

Gdの添加に関しては、フラックスの変化の面からは効果が大であったが、その効果を発揮するのが低いエネルギー群に対してであり、1cm線量当量率の変化の面から見るとその効果が効いてこないと言える。また、今回の試験では中性子線源を用いているが、実作業環境におけるエネルギースペクトルに関する従来の測定・評価によると、平均エネルギーについてはほぼ等しいという結果が得られており、これを以て評価しても差し支えないものとする。

さらに、本試験では、中性子のエネルギースペクトルから求めたしゃへい効果が、レムカウンタを用いて求めたしゃへい効果と一致することが確認された。このことから、レムカウンタを用いた試験の妥当性が確認されたことになる。

5. フィールドにおけるしゃへい性能確認試験

本章では、プルトニウム取扱施設作業現場において実施したしゃへい材の性能確認試験について述べる。ここでを行った試験は、第3章に述べた試験体の一つである「ポリイソブチレン」を用いた衝立型しゃへい体に関する試験と、アクリル系試験体のフィールドにおける性能確認試験の二つである。

ポリイソブチレンは透明性に富み、又線源を用いたしゃへい効果確認試験においてもアクリル系しゃへい材に近似する性能が得られており、今後開発の進む可能性のある素材の一つとして、ワーキンググループにおいて試作・評価を行うこととしたしゃへい材である。今回は、しゃへい体の形状及び試験場所の作業との関係から、作業員常駐場所の線量当量低減効果の確認を行うこととし、グローブボックスと常駐場所の間にしゃへい体を配置して試験を行った。

また、アクリル系試験体の試験については、低エネルギーの中性子線に対するGdの効果が期待されており、これを確認するため、工程室の作業環境よりさらに低エネルギー成分の多いと思われるプルトニウム貯蔵庫側壁において試験を実施した。

5.1 衝立型しゃへい体に関する試験

(1) 使用機器類

しゃへい性能の確認を線量当量率の減衰率の測定・評価により実施する方法は第3章と同様であるが、施設側の作業の支障とならないこと及び作業に伴う線量当量率の変化に対応できることを考慮して、中性子線エリアモニタ型の測定器を使用した。検出器にはBF₃計数管式中性子線検出器を用い、高圧電源モジュール、レートメータモジュール及びレコーダを組み合わせて、測定及び記録を連続して行えるようにした。

試験を行った衝立型しゃへい体は、アクリル製の外枠内にポリイソブチレンを充填（厚さ80mm）したものである。本しゃへい体は、プルトニウム燃料工場設備課が実際の製作を担当し、放射線管理第一課がその評価を行った。

(2) 測定及び評価方法

① プルトニウム取扱作業が行われている工程室の一角にエリアモニタを仮設して作業現場の線量当量率を連続測定した。試験用の衝立型しゃへい体は作業の支障にならないよう毎日の作業終了後にグローブボックスと仮設モニタの間に設置し、これを3日間繰り返した。試験の状況を図5-1に示す。

- ② シャヘイ性能（効果）は、衝立設置前後の線量当量率の比（減衰比）で表した。基準とした衝立設置前の線量当量率は、核燃料物質の搬送に伴う短時間の大きな変動時を除く2～3時間の線量当量率の平均値とし、衝立設置後の線量当量率はレベルが一定になってから翌日の衝立撤去（作業開始）までの平均値とした。

(3) 実施場所

プルトニウム燃料第二開発室 粉末調整室 (A103)

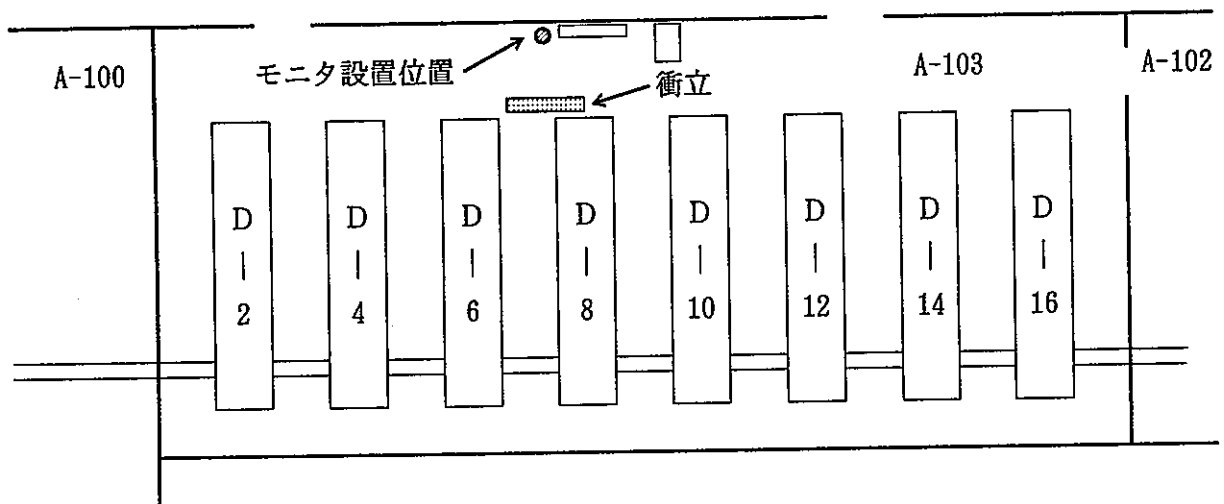


図5-1 試験状況概略図

(4) 試験結果

平成2年10月24日から10月26日までの3日間の測定結果を表5-1に示す。

表5-1 衝立のシャヘイ効果

| 衝立 | 線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$) | | | 平均 |
|-----|----------------------------|--------|--------|------|
| | 10月24日 | 10月25日 | 10月26日 | |
| 設置前 | 3.5 | 2.9 | 2.7 | 3.0 |
| 設置後 | 2.4 | 2.1 | 1.8 | 2.1 |
| 減衰比 | 0.69 | 0.72 | 0.67 | 0.70 |

Cf線源による試験では厚さ90mmで減衰比0.2という結果が得られており、フィールドにおけるしゃへい効果はかなり低い結果となった。これは、衝立の大きさが縦横約1.5mしかなく、衝立に隠れないグローブボックスからの中性子線の寄与及び室内で散乱して検出器に入射する中性子線の寄与が大きいことが原因となっていると考えられる。

5.2 アクリル系試験体に関する試験

(1) 使用機器類

第3章の試験と同様、線量当量率の測定にはレムカウンタを用いた。また、指示値の読取りについてもカウンタ、タイマーモジュールによる方法とした。さらに、測定精度を上げるための散乱線測定・評価にはパラフィンブロック（100×200×50 mm 6個）を使用した。

(2) 測定及び評価方法

- ① 作業環境レベルの適当な中性子線量当量率の場としてプルトニウム燃料第二開発室のプルトニウム貯蔵庫側壁を選んで3種類の試験体の比較測定を行った。この測定は、貯蔵庫側壁に試験体を配置して行ったが、試験体方向以外から入射する中性子線の影響を補正するため試験中はレムカウンタを固定して位置関係が変わらないようにした。
- ② 試験体は30cm×30cmの大きさである一方、貯蔵庫内には線源となるプルトニウム貯蔵容器が広く分布していることから、試験体の性能評価には係わらない、しゃへい材の周囲からレムカウンタに入射する中性子線の計数が性能評価に大きく寄与してくるため、予めこの成分のみを測定した。測定方法を図5-2に示す。
- ③ 各試験体に対する測定は、1分間、3回とし、その平均を測定結果とした。
- ④ しゃへい性能（効果）は、しゃへい試験体の測定値から補正用の測定値を差し引いた値を用いて計算により求めた。

（計算式）

$$\text{減衰比} = \frac{\text{しゃへい試験体設置時の計数率} - \text{②の測定による計数率}}{\text{しゃへい試験体なしの時の計数率} - \text{②の測定による計数率}}$$

(3) 実施場所

プルトニウム燃料第二開発室 中廊下

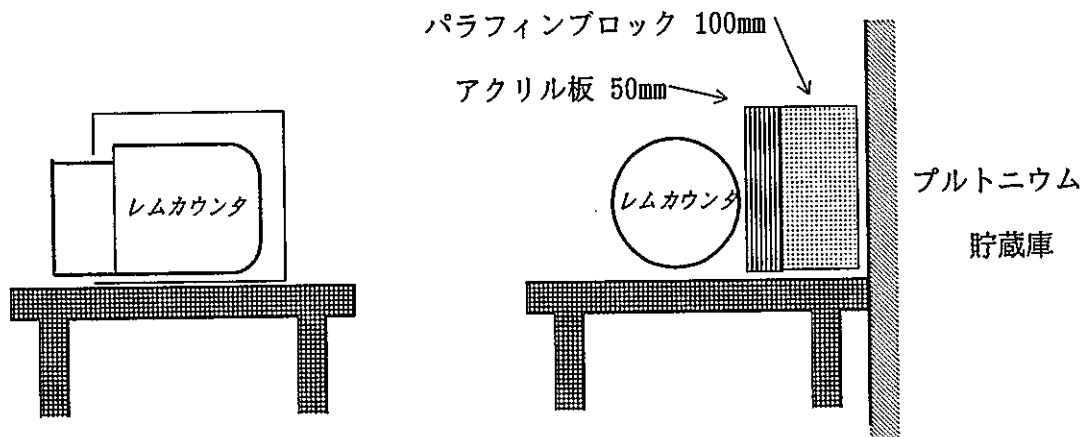


図 5 - 2 周囲から入射する成分の測定概念図

(4) 試験結果

平成 3 年 3 月 11 日に純アクリル、ガドリニウム(3%)添加含鉛アクリル及びガドリニウム(30%) 添加アクリルの 3 種類の試験体について測定を行った。ここで確認されたしゃへい効果を表 5 - 2(1)~(3)に示す。

表 5 - 2(1) 純アクリルのしゃへい効果

| | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 厚さ(mm) | 12 | 24 | 36 | 48 | 66 | 88 |
| 減衰比 | 0.77 | 0.56 | 0.42 | 0.38 | 0.27 | 0.15 |

表 5 - 2(2) Gd(3%)添加含鉛アクリルのしゃへい効果

| | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 厚さ(mm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 減衰比 | 0.73 | 0.51 | 0.44 | 0.40 | 0.30 | 0.23 |

表 5 - 2(3) Gd(30%)添加アクリルのしゃへい効果

| | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 厚さ(mm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| 減衰比 | 0.72 | 0.63 | 0.51 | 0.45 | 0.22 | 0.13 | 0.10 |

フィールドにおけるアクリル系試験体の厚さとしゃへい効果の関係を図5-3に示す。測定結果にバラツキは見られるが、ほぼ試験体の厚さのみに依存した結果となっており、中性子線源を用いた試験の結果と同じである。本試験においてもGdの添加によるしゃへい効果の向上は確認されなかった。

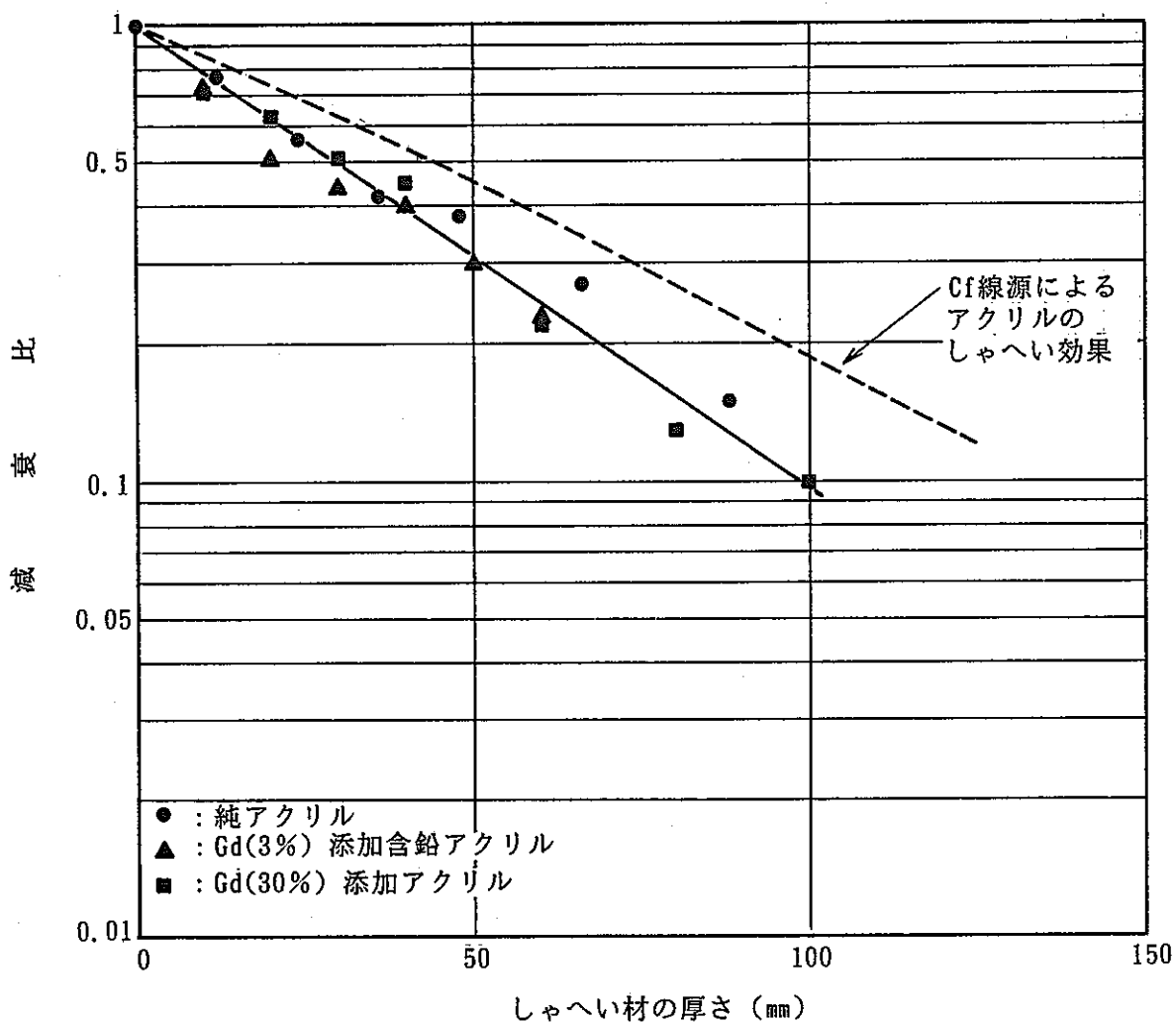


図5-3 アクリル系試験体のしゃへい効果 (フィールド)

5.3 考察

二つのフィールド試験結果から、

- ① 実作業環境では線源物質が広く分布しており、また、室内には様々な設備・機器があることから、衝立のような部分的しゃへい物を置いた場合には、これに隠れない線源からの寄与及びこれを回り込んでくる散乱線の寄与が大きく、しゃへい効果はかなり低くなってしまふ。
- ② 実作業環境では包蔵設備構造物などにより中性子のエネルギーがある程度減衰していることが考えられるが、このようなエネルギーの低い場においてもアクリルに添加したGdなどの効果は認められない。

という知見が得られた。

また、②でふれた中性子エネルギーの状況については、中性子スペクトロメータを用いて測定を行った結果、平均エネルギーは約370keVであり、第4章の²⁵²Cf線源による試験時の線源から1m離れた中性子場の平均エネルギー約1.7MeVに比べ、スペクトルがかなり低エネルギー側へ移行していることを確認している。これは、プルトニウム貯蔵庫の壁がしゃへいを考慮して厚く造られていることによると考えられる。参考として、スペクトルのアンフォールディング結果を図5-4に示す。

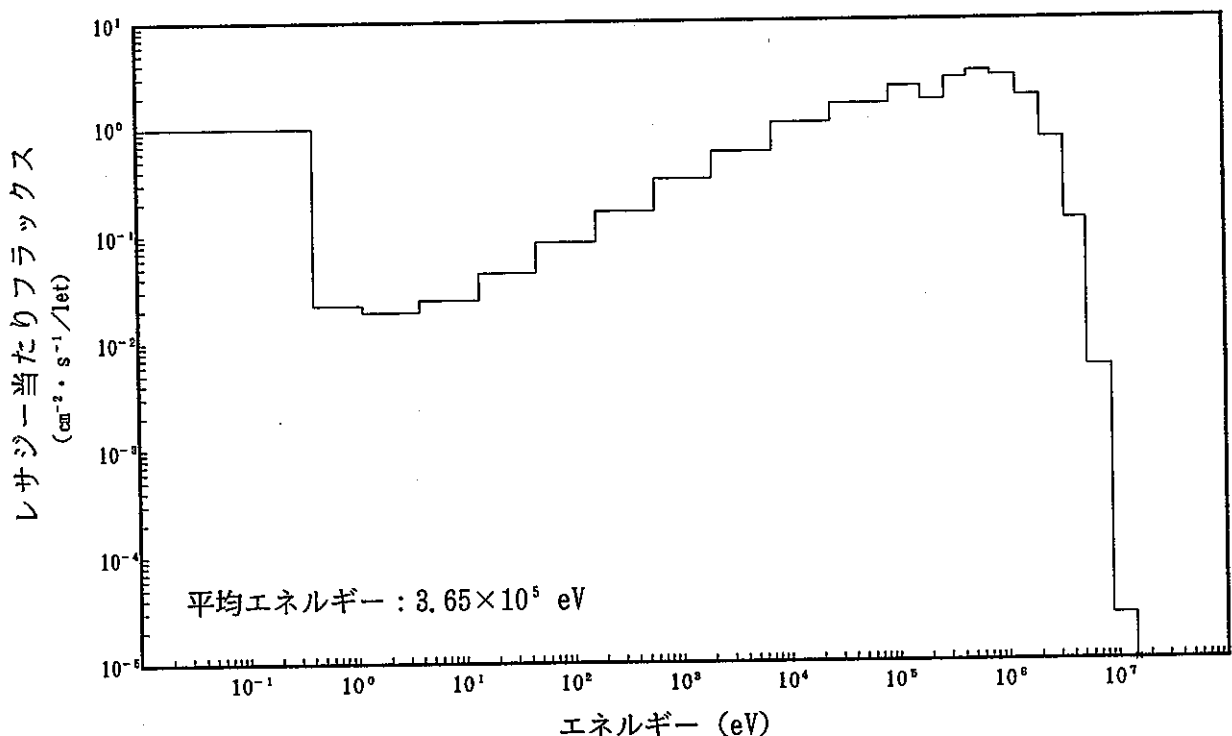


図5-4 フィールド試験場所における中性子スペクトル

さらに、第3章に述べたように、試験体のしゃへい性能は対象となる中性子エネルギーが低い場合の効果の方が高くなるが、5.2節の試験結果はCf線源を用いた試験で確認した効果よりも高く、中性子エネルギーとしゃへい効果の定性的関係は一致している。

これらのことから、実作業環境における中性子しゃへいを考えるとき、線源の分布状況を良く把握してしゃへい体を設置しなければならないと言える。特に、作業員常駐場所の線量当量低減を図る場合には、そこを囲むようなしゃへい体の配置が必要であろう。また、今回フィールド試験を行ったようなプルトニウム取扱施設用のしゃへい材については、期待されたGdの添加による効果はほとんどないことが確認された。

6. ま と め

しゃへいによる中性子線量当量の低減化を図る場合には、採用する場所、使用する量などを考慮しながら各種しゃへい材の性能を確認し、さらに、その結果に基づいた適切な選択を行った上でしゃへい体の取付けを実施することになる。中性子線しゃへい材の開発は各所で行われているが、その性能評価に関しては、熱中性子に対するものが大半であって、プルトニウム取扱施設のようなエネルギーの高い中性子線場における効果はあまり明らかとなっていない。今回実施した一連の試験では、このようなエネルギー範囲の中性子線に対する市販しゃへい材及び開発途上の素材のしゃへい性能を同一条件で比較、確認することができた。

線量当量の観点からは、アクリル系しゃへい材の性能が優れているが、期待されたGdの効果は確認されなかった。一方、開発途上にあるポリイソブチレン等のしゃへい材については、アクリル系のものと同等のしゃへい効果が得られることを確認した。

しゃへい材による中性子エネルギースペクトルの変化の測定においては、Gdを含むことによる低エネルギー中性子の減少が確認された。しかし、低エネルギー中性子は、線量当量にはほとんど影響しないため上述のような結果となっている。今回の試験により、しゃへい材の開発で着目すべき点は、エネルギーの高い中性子をいかに減速するかということであることが明らかとなった。一方、中性子エネルギースペクトルの測定結果から求めた線量当量の減衰比は、レムカウンタによる測定値から求めた減衰比とほぼ等しい結果が得られており、レムカウンタ及びシャドウコーンを用いた測定体系が妥当なものであり、今回のようなしゃへい性能確認試験にレムカウンタが適していたことの裏付けとなった。

本試験を踏まえ、中性子しゃへい材の性能確認試験方法はほぼ整理されたものと考えられるが、厚さが増えた場合（線量当量が低い場合）には、もっと測定の精度を上げる必要がある。今後、より詳細なデータの収集が必要な場合には、今回使用したシャドウコーンによる散乱線の評価に加え、測定時間を長くにとって計数の統計誤差を下げることを考慮する必要がある。これらについては今後さらに検討を加えていきたい。最後に、中性子線のしゃへいについては、施設又は設備の構造材である壁や容器などでも必要であり、この分野では不透明材料の開発が進んでいる。核燃料物質取扱施設においてもこれらの材料の採用を検討することが必要となろうが、それらの材料の性能確認時には、今回の試験方法等が参考となるであろう。また、各種のしゃへい材の情報を広く集め、今回の試験を踏まえたより精度の高い試験を実施してデータの蓄積をはかっていきたい。

7. 謝 辞

中性子しゃへい材の性能確認試験は、平成元年度から開始したものである。当初、しゃへい試験はシャドウコーンによる散乱線評価を行わない状態で実施していた。このため、計算による結果と合わず、特に、しゃへい厚さが増すにつれてしゃへい効果が落ちる（飽和状態になる）結果となっていたが、中性子場の散乱線評価を行うことにより、適切な結果にまとめ上げることができた。これらの点に関して、シャドウコーンを用いた測定方法等についての助言をいただいた現、放射線管理第二課の永井博行氏に感謝の意を表します。また、しゃへい性能確認試験における測定作業に協力していただいた放射線管理第一課の柴浩三氏、遠藤邦明氏、故渡辺賢司氏に本紙面をかりて感謝の意を表します。さらに、フィールド試験、特に衝立を用いた試験において多大な御協力をいただいた、プルトニウム燃料工場製造課製造第二係の皆様感謝致します。

付 録

中性子線源を用いて実施した各しゃへい材の性能確認試験データを以下にまとめて示す。

(1) 純アクリル材しゃへい性能確認試験データ

平成2年7月16日に実施した ^{252}Cf 線源による試験結果を表(1)-1～表(1)-3に示す。

表(1)-1 散乱成分の測定結果
単位：c/分

| ① | ② | ③ | 平均値 |
|-----|-----|-----|-------|
| 689 | 748 | 704 | 713.7 |

表(1)-2 しゃへい材なしのときの測定結果
単位：c/分

| | | | |
|---|-------|-----|---------|
| ① | 10917 | ⑥ | 10983 |
| ② | 11022 | ⑦ | 11094 |
| ③ | 10962 | ⑧ | 11061 |
| ④ | 11072 | ⑨ | 10982 |
| ⑤ | 11037 | 平均値 | 11014.4 |

散乱成分補正後の比較基準値：10300.7 cpm

表(1)-3 中性子しゃへい性能確認試験データ

| しゃへい材条件 | | 平均値 (c/分) | 補正值 (c /分) | 減衰比 |
|-----------------------|--------|--------------|---------------|------|
| 純 ア ク リ ル | 6 mm | 10110.0 | 9396.3 | 0.91 |
| | 10 mm | 9575.0 | 8861.3 | 0.86 |
| | 22 mm | 8242.7 | 7529.0 | 0.73 |
| | 30 mm | 7291.0 | 6577.3 | 0.64 |
| | 40 mm | 6391.3 | 5677.6 | 0.55 |
| | 52 mm | 5318.0 | 4604.3 | 0.45 |
| | 60 mm | 4705.7 | 3992.0 | 0.39 |
| | 70 mm | 4096.3 | 3382.6 | 0.33 |
| | 82 mm | 3429.3 | 2715.6 | 0.26 |
| | 91 mm | 3107.7 | 2394.0 | 0.23 |
| | 103 mm | 2650.3 | 1936.6 | 0.19 |
| | 109 mm | 2495.0 | 1781.3 | 0.17 |
| | 119 mm | 2208.3 | 1494.6 | 0.14 |
| | 125 mm | 2034.7 | 1321.0 | 0.12 |

(2) ポリイソブチレン材（テトラックス）しゃへい性能確認試験データ

平成2年9月19日に実施した ^{252}Cf 線源による試験結果を表(2)-1～表(2)-3に示す。

表(2)-1 散乱成分の測定結果

単位：c/分

| 測定条件 | ① | ② | ③ | 平均値 |
|---------------------|-----|-----|-----|-------|
| テトラックス(30mm)+Al 4mm | 548 | 576 | 509 | 544.3 |
| テトラックス(60mm)+Al 4mm | 333 | 340 | 342 | 338.3 |
| テトラックス(90mm)+Al 4mm | 241 | 249 | 246 | 245.3 |

表(2)-2 しゃへい材なしのときの測定結果
単位：c/分

| | |
|-----|---------|
| ① | 10448 |
| ② | 10508 |
| ③ | 10620 |
| 平均値 | 10525.3 |

散乱成分補正後の比較基準値： 9981.0 cpm (30mm)
10187.0 cpm (60mm)
10280.0 cpm (90mm)

表(2)-3 中性子しゃへい性能確認試験データ

| しゃへい材条件 | 平均値 (c/分) | 補正值 (c/分) | 減衰比 |
|--------------|--------------|--------------|------|
| テトラックス 30 mm | 6747.3 | 6203.0 | 0.62 |
| テトラックス 60 mm | 4067.7 | 3729.4 | 0.37 |
| テトラックス 90 mm | 2356.7 | 2111.4 | 0.21 |

(3) その他各種のしゃへい材の性能確認試験データ

平成2年10月23日に実施した ^{252}Cf 線源による試験結果を表(3)-1～表(3)-5に示す。

表(3)-1 散乱成分の測定結果
単位：c/分

| ① | ② | ③ | 平均値 |
|-----|-----|-----|-------|
| 608 | 609 | 622 | 613.0 |

表(3)-2 しゃへい材なしのときの測定結果
単位：c/分

| | |
|-----|---------|
| ① | 10755 |
| ② | 10756 |
| ③ | 10735 |
| 平均値 | 10748.7 |

散乱成分補正後の比較基準値：10135.7 cpm

表(3)-3 中性子しゃへい性能確認試験データ

| しゃへい材条件 | | 平均値 (c/分) | 補正值 (c/分) | 減衰比 |
|---|-------|--------------|--------------|------|
| ニュートロンストップ SP 純ポリエチレン | 31mm | 6271.0 | 5638.2 | 0.56 |
| ニュートロンストップ SP (B_2O_3 44%入り) | 30mm | 6889.7 | 6256.9 | 0.62 |
| ニュートロンストップ SM (B_4C 50%入り) | 30mm | 7506.0 | 6873.2 | 0.68 |
| ニュートロンストップ SY (Gd_2O_3 10%入り) | 1.5mm | 10499.0 | 9866.2 | 0.98 |
| ニュートロンストップ SY (Gd_2O_3 20%入り) | 1.5mm | 10655.3 | 10022.5 | 0.99 |
| ニュートロンストップ SY (Gd_2O_3 40%入り) | 1.5mm | 10549.7 | 9916.9 | 0.98 |
| ニュートロンストップ SY (Gd_2O_3 60%入り) | 1.5mm | 10558.3 | 9925.5 | 0.98 |

表(3)-4 中性子しゃへい性能確認試験データ

| しゃへい材条件 | | 平均値 (c/分) | 補正值 (c/分) | 減衰比 |
|---------------------------|--------|--------------|--------------|------|
| 含鉛 アクリル | 7 mm | 9922.0 | 9289.2 | 0.92 |
| | 14 mm | 8825.7 | 8192.9 | 0.81 |
| | 21 mm | 8064.7 | 7431.9 | 0.73 |
| | 28 mm | 7343.3 | 6710.5 | 0.66 |
| | 35 mm | 6660.0 | 6027.2 | 0.59 |
| | 42 mm | 5947.0 | 5314.2 | 0.52 |
| | 49 mm | 5332.0 | 4699.2 | 0.46 |
| | 56 mm | 4773.7 | 4140.9 | 0.41 |
| Gd 添加含鉛 アクリル | 10 mm | 9323.3 | 8690.5 | 0.86 |
| | 20 mm | 8249.0 | 7616.2 | 0.75 |
| | 30 mm | 7019.3 | 6386.5 | 0.63 |
| | 40 mm | 6075.7 | 5442.9 | 0.54 |
| | 50 mm | 5185.3 | 4552.5 | 0.45 |
| | 60 mm | 4463.3 | 3830.5 | 0.38 |
| Gd (30%) 添加 アクリル | 10 mm | 9414.3 | 8781.5 | 0.87 |
| | 20 mm | 8084.7 | 7451.9 | 0.74 |
| | 30 mm | 7170.7 | 6537.9 | 0.65 |
| | 40 mm | 6025.7 | 5392.9 | 0.53 |
| | 50 mm | 5214.0 | 4581.2 | 0.45 |
| | 60 mm | 4467.0 | 3834.2 | 0.38 |
| | 70 mm | 3879.3 | 3246.5 | 0.32 |
| | 80 mm | 3304.3 | 2671.5 | 0.26 |
| | 90 mm | 2803.7 | 2170.9 | 0.22 |
| 100 mm | 2526.0 | 1893.2 | 0.19 | |

表(3)-5 中性子しゃへい性能確認試験データ

| しゃへい材条件 | | 平均値 (c/分) | 補正值 (c/分) | 減衰比 |
|------------------------|--------|--------------|--------------|------|
| ポリカーボネート | 30 mm | 7580.0 | 6947.2 | 0.69 |
| | 60 mm | 5177.0 | 4544.2 | 0.45 |
| ポリカーボネート (Gdコーティング) | 31 mm | 7421.3 | 6788.5 | 0.67 |
| | 62 mm | 4979.0 | 4346.2 | 0.43 |
| | 93 mm | 3368.3 | 2735.5 | 0.27 |
| | 124 mm | 2293.7 | 1660.9 | 0.16 |
| ポリメチルペンテン | 31 mm | 6785.3 | 6152.5 | 0.61 |
| | 62 mm | 4185.3 | 3552.5 | 0.35 |
| | 93 mm | 2702.3 | 2069.5 | 0.21 |

(4) アクリル系しゃへい材の各種線源比較試験データ

平成3年2月25日に実施した²⁴¹Am-Be及び²³⁸Pu-Be線源による試験結果を表(4)-1～表(4)-3に示す。

表(4)-1 散乱成分の測定データ

| 線源 | 測定値 (c/3分) | | | | 平均計数率 (cpm) |
|-------|------------|------|------|--------|-------------|
| | ① | ② | ③ | 平均 | |
| Am-Be | 98 | 124 | 102 | 108.0 | 36.0 |
| Pu-Be | 1198 | 1121 | 1145 | 1154.7 | 384.9 |

表(4)-2 しゃへい材なしのときの測定結果

| 線源 | 測定値 (c/3分) | | | | 平均計数率 (cpm) |
|-------|------------|-------|-------|---------|-------------|
| | ① | ② | ③ | 平均 | |
| Am-Be | 1839 | 1870 | 1812 | 1840.3 | 613.4 |
| Pu-Be | 18497 | 18403 | 18172 | 18357.3 | 6119.1 |

散乱成分補正後の比較基準値 ; Am-Be線源 : 577.4 cpm
Pu-Be線源 : 5734.2 cpm

表(4)-3 中性子しゃへい体性能評価試験データ

| 線源 しゃへい材 | | Am-Be線源 | | | Pu-Be線源 | | |
|----------------------------|--------|---------|-------|-------|---------|--------|-------|
| | | 平均値 | 補正値 | 減衰比 | 平均値 | 補正値 | 減衰比 |
| 純 アクリル | 30 mm | 485.7 | 449.7 | 0.779 | 4768.3 | 4383.4 | 0.764 |
| | 61 mm | 348.0 | 312.0 | 0.540 | 3580.0 | 3195.1 | 0.557 |
| | 119 mm | 184.3 | 148.3 | 0.257 | 2054.7 | 1669.8 | 0.291 |
| Gd ア添 ク加 リ含 ル鉛 | 20 mm | 536.3 | 500.3 | 0.866 | 5113.0 | 4728.1 | 0.825 |
| | 40 mm | 449.7 | 413.7 | 0.716 | 4305.7 | 3920.8 | 0.684 |
| | 60 mm | 332.3 | 296.3 | 0.513 | 3529.3 | 3144.4 | 0.548 |
| Gd ア添 ク加 リ ル | 30 mm | 473.7 | 437.7 | 0.758 | 4723.0 | 4338.1 | 0.757 |
| | 60 mm | 348.3 | 312.3 | 0.541 | 3580.3 | 3195.4 | 0.557 |
| | 100 mm | 232.0 | 196.0 | 0.339 | 2413.3 | 2028.4 | 0.354 |