

分置

# 高性能透明中性子遮蔽材の開発

1995年11月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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ください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

## 高性能透明中性子遮蔽材の開発

館 義昭\* 加納 茂機\*

## 要 旨

燃料製造施設のグローブボックスパネルにおける中性子線遮蔽性能を向上させることを目的に、高性能透明中性子遮蔽材の開発をフロンティア材料研究として平成6年度から実施してきた。従来のアクリル樹脂に替わる素材として水素含有量の多い透明樹脂を探索し、グローブボックスのパネルとしての板材を試作した。また、試作した遮蔽材に対してCf-252を線源とした中性子遮蔽実験を行い、遮蔽性能を評価するとともに、MOX燃料を線源とした場合の遮蔽性能についても計算評価した。得られた結果は以下の通りである。

- (1)アクリル樹脂では従来までの強度を維持しつつ水素量を増加させることは困難であり、新たにエチレンとテトラシクロドデセンからなる環状オレフィンコポリマー（オレフィン樹脂）を素材としたアクリル樹脂よりも水素含有量の多い透明遮蔽材（ $300 \times 300 \times 10^4$  mm）を初めて試作した。
- (2)グローブボックスパネルとして必要な透明性や機械的強度特性について、オレフィン樹脂はアクリル樹脂と同等であることが特性評価の結果から明らかになった。
- (3)Cf-252を線源とした中性子遮蔽実験から、オレフィン樹脂の遮蔽性能は中性子減速能として約13%、アクリル樹脂よりも優れることが明らかになった。
- (4)MOX燃料を対象とした遮蔽計算結果から、オレフィン樹脂がアクリル樹脂に比べて20%程度、遮蔽性能が優れることが明らかとなった。

以上の結果から、透明性、強度特性、中性子遮蔽のそれぞれの点において、オレフィン樹脂がアクリル樹脂と同等以上の性能を有することから、オレフィン樹脂は従来のアクリル樹脂に替わる透明遮蔽材として有用であることが明らかになった。

---

\* 動燃事業団 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

## Development of high performance transparent shielding materials for fast neutrons

Yoshiaki Tachi \*, Shigeki Kano \*

### Abstract

For innovative improvement of fast neutrons shielding performance on glove-box panels in fuel manufacturing facilities, high performance transparent shielding materials have been developed as frontier materials research since 1994 fiscal year. Transparent synthetic resin which contained much quantity of hydrogen than acrylic resin was searched and attempted the manufacturing of sheets as panels of glove-box.

Its shielding performance was evaluated by experiments using fast neutrons radiated from Cf-252, and then its attenuation rate for fast neutrons of mixed oxide fuel was calculated by MCNP code. Their results were described as follows;

- (1) Because it is difficult to increase amount of hydrogen in acrylic resin with present strength, the transparent shielding material ( $300 \times 300 \times 10^1$  mm) containing much hydrogen than acrylic resin was newly manufactured from ringed-olefin-copolymer (olefinic resin) synthesized by ethylene and tetracyclododecene.
- (2) It was clarified that olefinic resin was as excellent as acrylic resin on transparency and mechanical properties required as glove-box panels.
- (3) The shielding experiment using Cf-252 showed that fast neutrons shielding property of olefinic resin was more about 13% excellent than that of acrylic resin.
- (4) It was clarified by shielding calculation that olefinic resin was more about 20% excellent than acrylic resin on fast neutrons shielding of mixed oxide fuel.

Like the above, the olefinic resin is more useful than acrylic resin because it has excellent properties of transparency, mechanical strength and shielding of fast neutrons.

---

\* Frontier Technology Section, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center, PNC

## 目次

1	緒言	.....	1
2	従来の透明中性子遮蔽材	.....	2
	(1) 中性子遮蔽環境	.....	2
	(2) 透明遮蔽材の素材	.....	2
	(3) 中性子遮蔽性能	.....	2
	(4) 従来の透明中性子遮蔽材の改良と問題点	.....	2
3	高性能透明中性子遮蔽材の試作・評価		
	(1) 素材	.....	4
	(2) 透明遮蔽材の試作	.....	4
	(3) 試作材の基本的特性評価	.....	5
4	中性子遮蔽実験		
	(1) 評価方法	.....	6
	(2) 実験方法	.....	6
	(3) 実験結果	.....	6
5	中性子遮蔽計算による評価	.....	7
	(1) 遮蔽性能計算	.....	7
	(2) 計算結果	.....	7
	(3) 計算による遮蔽性能評価の有用性	.....	7
6	MOX燃料を線源とした場合の中性子遮蔽性能		
	(1) 線源計算	.....	8
	(2) 遮蔽計算	.....	8
	(3) 遮蔽計算結果	.....	9
7	中性子遮蔽性能の評価および考察	.....	10
8	結言	.....	11
	謝辞	.....	12
	参考文献	.....	13

## 図表目次

### (表リスト)

表1	MOX燃料中のPu同位体含有率	14
表2	アクリル樹脂板の基本的特性	15
表3	高水素アクリル樹脂板の基本的特性	16
表4	高水素含有高分子材料の一覧	17
表5	オレフィン樹脂板の基本的特性	18
表6	Cf-252の中性子線源特性	19
表7	遮蔽計算から求めたアクリル樹脂,オレフィン樹脂の減衰率	20
表8	海外PuO <sub>2</sub> 燃料中のPu同位体含有率	21
表9	各MOX燃料からの( $\alpha, n$ )中性子放出率	22
表10	アクリル樹脂板およびオレフィン樹脂板の核種数密度	23
表11	現行MOX燃料を中性子源とした減衰率	24
表12	高次化MOX燃料を中性子源とした減衰率	25
表13	海外PuO <sub>2</sub> 燃料を中性子源とした減衰率	26
表14	中性子吸収物質を水素数密度の1%および2%添加した場合の減衰率	27

### (図リスト)

図1	現行MOX燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル	28
図2	高次化MOX燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル	28
図3	アクリル樹脂板の遮蔽実験の測定系	29
図4	アクリル樹脂板の中性子遮蔽性能(Cf線源)	30
図5	水素含有量9.4wt%と8wt%のアクリル樹脂板の遮蔽性能(Cf線源)	30
図6	オレフィン樹脂による透明中性子遮蔽材成形板の試作工程	31
図7	遮蔽遮蔽実験系	32
図8	オレフィン樹脂板の減衰率	33
図9	3次元計算モデル	33
図10	アクリル樹脂板の減衰率の実験および計算結果の比較	34
図11	オレフィン樹脂板の減衰率の実験および計算結果の比較	34
図12	海外PuO <sub>2</sub> 燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル	35
図13	3次元計算モデル	35
図14	現行MOX燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能	36
図15	高次化MOX燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能	36
図16	海外PuO <sub>2</sub> 燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能	37
図17	水素含有量と減衰率の関係	38
図18	中性子吸収物質を添加した場合の水素数密度と減衰率の関係	39

## 1 緒言

高速炉用燃料の主流となっているUとPuの混合酸化物燃料 (Mixed Oxide; MOX燃料) からは、人体に影響を及ぼす中性子線、 $\gamma$ 線といった放射線が発生する。また、通常、高速炉で燃やされた燃料の中には、新たにPuが生成したり、まだ燃焼可能なUやPuが残っており、これらを再処理によって回収し、再び炉心燃料に製造している。このような再処理・再製造の過程を繰り返すことにより、MOX燃料中のPuは高次化し、その線源強度は次第に高くなる。このMOX燃料の製造は、燃料製造施設のグローブボックス内でそのほとんどの工程が行われており、グローブボックスに使用されている透明遮蔽材の遮蔽性能を飛躍的に向上させることは、燃料製造作業に携わる作業員の被ばく低減の観点で非常に重要な課題である。特に中性子線については、昨今のICRPの勧告により中性子線質係数が従来の2倍に、年間線量当量限度が2/5にそれぞれ見直され、その被ばく低減が非常に急務な課題となっている。

フロンティア材料研究では、燃料製造用のグローブボックスのパネル材を想定し、従来使用されているアクリル樹脂よりも中性子遮蔽性能に優れた高性能透明中性子遮蔽材の開発を最終目標とした研究を実施している。その一環として、中性子遮蔽に有効な水素含有量がアクリル樹脂より多い、環状オレフィンコポリマーにより透明中性子遮蔽材を試作し、その試作材に対して遮蔽実験、遮蔽計算を行い、遮蔽性能を評価した。本報では、試作結果、実験結果、計算結果を中心に、新規試作材の遮蔽材としての有用性について報告する。

## 2 従来の透明中性子遮蔽材

### (1)中性子遮蔽環境

燃料製造用のグローブボックスにおける放射線環境としては、MOX燃料から発生する各種放射線（ $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線等）が考えられる。なかでも、作業員の被ばくに大きな影響を与えるのは、その飛程から中性子線および $\gamma$ 線である。ここでは特に、ICRPの勧告により線質係数や年間線量当量限度が見直された中性子線の放射線環境について述べる。

MOX燃料からの中性子線発生は、おもにPu同位体の自発核分裂およびPu(Am)-O間の（ $\alpha, n$ ）反応に依るところが大きく、U同位体の自発核分裂や（ $\alpha, n$ ）反応発生率はPu同位体およびAmのそれに比べると無視できる程度であると考えられる。現行MOXならびに高次化MOX燃料40kg（PuO<sub>2</sub>富化率30%）中のPu同位体の含有率は、表1に示す通りである。また、これらのPu同位体による中性子線のエネルギースペクトルについては、線源計算コードより求めた（詳細は第5章を参照）。図1および図2にその結果を示す。

### (2)透明遮蔽材の素材

グローブボックスパネルの素材にとって必要な条件としては、ボックス内を観察するために透明であること、中性子線を遮蔽すること、さらにボックス内に核物質を包蔵するためのバウンダリーとしての強度を有することが挙げられる。これらのことを考慮し、現行のグローブボックスでは、そのパネル材としてアクリル樹脂が用いられている。アクリル樹脂は、C-O-H系で構成されており、透明性や耐油性等に優れ、中性子を遮蔽するために重要な水素を透明な材料のなかでも比較的多い8wt%含んでいる。また、高分子材料のなかでは軟化点ならびに強度が高い。現在のグローブボックスに用いられているアクリル樹脂板の基本的特性を表2に示す。

### (3)中性子遮蔽性能

現行のグローブボックスにおいては、中性子遮蔽はパネル材として使用されているアクリル樹脂板が担っている。中性子はアクリル樹脂中に含まれる水素原子により減速され、高エネルギー側の中性子線束が減じられることにより線量への寄与を小さくするという方法（減速効果）によって遮蔽されている。

現行のアクリル樹脂板の中性子遮蔽性能について、大洗工学センター 安全管理部放射線管理課所掌の機器校正室内において遮蔽実験を実施し、評価した。中性子線源には、MOX燃料から発生する中性子線と同様なエネルギースペクトルを持つCf-252線源を用いた。また、中性子線に対する遮蔽性能は、アクリル樹脂板により遮蔽された中性子の個数から求めた減衰率で評価し、中性子の計測はアクリル樹脂板の厚さごとにレムカウンタで計測した。測定系を図3に示す。実験により得られた現行のアクリル樹脂板の減衰率を図4に示す。

### (4)従来の透明中性子遮蔽材の改良と問題点



燃料製造施設では、Puの高次化、乾式回収粉末の使用等により、中性子の線源強度が年々高くなってきているとともに、ICRP Pub.60では、中性子線質計数が従来の2倍に、年間線量当量限度が2/5に見直されていることから、現行のアクリル樹脂板での中性子遮蔽よりも優れた遮蔽性能を有する透明遮蔽材の開発、適用が期待されている。

そこで、中性子の遮蔽性能を高めるため、アクリル樹脂内の水素量を現行の8.0wt%から9.4wt%まで増加させた高水素アクリル樹脂板を試作した。この試作材の諸特性を現行のアクリル樹脂板の特性とともに表3に示す。また、試作材に対して、先に述べたアクリル樹脂板と同様な方法で中性子遮蔽実験を実施した。実験結果を8.0wt%のアクリル樹脂の結果とともに図5に示す。

試作した高水素アクリル樹脂板の中性子遮蔽性能は、遮蔽実験の結果では現行のアクリル樹脂板とほとんど変らなかった。これは、高水素アクリル樹脂板の密度が現行のアクリル樹脂板よりも小さく、実質的な単位体積あたりの水素増加量が $0.009\text{g/cm}^3$ であり、現行のアクリル樹脂内の水素量のわずか9.6%増に過ぎないためであると考えられる。一方、アクリル樹脂中の水素量の増加には限度があり、9.4wt%以上ではグローブボックスパネル用としての板材の成形が不可能となってしまふ。また、高水素アクリル樹脂板のように通常のアクリル樹脂よりも水素量を増加させると、本来の無色透明から黄色気味に変色するとともに、機械的強度が低下し、脆化する傾向が見られる。

以上のように中性子遮蔽性能の飛躍的な向上については、現状のアクリル樹脂やアクリル樹脂をベースにした改良では対処できず、新規素材の開拓が必要であることが明らかとなった。

### 3 高性能透明中性子遮蔽材の試作・評価

#### (1) 素材

アクリル樹脂中の水素量の増加には限界があるため、中性子遮蔽性能を向上させるためには新規素材の開拓が必要となる。素材開拓にあたっての条件としては、遮蔽性能の向上以外に、グローブボックスのパネル用として可視光に対して透明であること、内部に核物質を包蔵するバウンダリーとして十分な強度を有すること等が求められる。具体的には、現行のアクリル樹脂板と同等の透明性および強度を持つとともに、アクリル樹脂板以上の中性子遮蔽性能を示す素材を開拓することが必要となる。

透明性の高い素材としては、セラミックスのような無機材料や高分子材料のような有機材料がその候補に挙げられる。しかし、バウンダリーとしての強度の面では脆性材料であるセラミックスよりも高分子材料が有効である。したがって、ここでは高分子材料を中心に、より中性子遮蔽性能の高い素材の探索について検討を行う。

また、中性子遮蔽の点においては、B10やCdのようにその原子核の変壊によって中性子を捕獲・吸収させる（吸収効果）元素の添加も考えられるが、十分な透明性を長時間維持するためには、核変壊により透明性が変化する可能性がある添加物を加える方法よりも減速効果を持つ水素を利用する方が優れており、水素を多く含む高分子材料が有効であるといえる。したがって、アクリル樹脂に代わる素材としては、透明かつ水素含有量が多く、さらにアクリル樹脂と同等以上の強度を有する高分子材料を探索することとした。

含有水素量が比較的多い高分子材料を表4に示す。なかでも、ポリメチルペンテン、ポリイソブチレンが含有水素量が多いが、前者は透明ではないため、後者は半固体材料で成形板が得られないため、いずれも透明遮蔽材の素材としては適さない。また、C-H系の代表的な物質であるポリエチレンは、高分子材料のなかでも最も水素含有量が多い構造をとっているが、現状の製造プロセスでは成形体が不透明であり、これを透明にすることはできない。

一方、エチレン単体では成形体が不透明であるが、このエチレンに適量の環状オレフィンであるテトラシクロドデセンをランダム共重合させることにより透明な樹脂が得られる。これは、エチレンとテトラシクロドデセンからなる環状オレフィンコポリマー（以下、オレフィン樹脂と称す）の1種であり、すでに、光学製品やシート・フィルム材としても実用化されているものである。このオレフィン樹脂は、透明な高分子のなかでも比較的多い12wt%の水素を含んでいる。さらに、アクリル樹脂と同等な強度特性を有している。アクリル樹脂に代わる透明中性子遮蔽材の素材として、このオレフィン樹脂について透明遮蔽材の試作を行った。

#### (2) 透明遮蔽材の試作

先に述べたオレフィン樹脂は環状オレフィンであるテトラシクロドデセンと $\alpha$ -オレフィンであるエチレンの2種類のオレフィンからなるランダム共重合体である。そのうち、テトラシクロドデセンは、オレフィン樹脂内にあつて透光性を上げる役割を担っており、

一方、エチレンは水素含有量を増加させる役割を担っている。エチレンのみでは、ポリエチレンのように不透明になってしまい、透明かつ水素含有量の高い遮蔽材を製作するためには、この両者を適当な割合で配合しなければならない。今回は、水素含有量をできるだけ高くするため、テトラシクロドデセンとエチレンの配合比（モル比）を15：85としたオレフィン樹脂を用いて透明遮蔽材としての板状成形体を試作した。15：85のモル比は、固体成形板を得るための最大水素含有組成であり、エチレンの比をこれ以上に高くすると成形体を得られなくなる。このオレフィン樹脂を用いた板状成形体の試作の行程を図6に示す。

### (3)試作材の基本的特性評価

オレフィン樹脂による透明遮蔽材（以下、オレフィン樹脂材と称す）の基本的特性を評価するため、以下に示す各種評価試験をJISに準拠して実施した。

①密度	JIS K-7112に準拠
②全光線透過率	JIS K-7105に準拠
③ヘイズ（雲価）	JIS K-7105に準拠
④引張強度（MPa）	JIS K-7113に準拠
⑤引張破壊伸度（%）	JIS K-7113に準拠
⑥曲げ強度（MPa）	JIS K-7203に準拠
⑦アイゾット衝撃強度	JIS K-7110に準拠
⑧ロックウェル硬度	JIS K-7202に準拠
⑨MFR（Melt Flow Rate）	JIS K-7210に準拠
⑩ガラス転移温度（℃）	JIS K-7121に準拠
⑪熱変形温度（℃）	JIS K-7207に準拠
⑫熱膨張係数	JIS K-6911に準拠
⑬成形収縮率（%）	JIS K-6911に準拠

これらの諸特性の評価結果をアクリル樹脂板の値とともにを表5に示す。

## 4 中性子遮蔽性能の実験評価

### (1)評価方法

中性子の遮蔽性能は、遮蔽材に入射した中性子数（入射成分）に対する遮蔽材を透過した中性子数（透過成分）の比で表した中性子数の減衰率により評価した。この減衰率の算出にあたっては、評価精度を高めるために、入射成分として線源から放出される全中性子数のうち遮蔽材ならびに測定器に直接的に入射する成分（直接入射成分）のみを用い、散乱による中性子線は削除した。直接入射成分は、線源から放出される全中性子数から、シャドーコーンを用いて測定した散乱成分を差し引くことにより求めた。

また、遮蔽性能の比較・検討のため、従来使用されているアクリル樹脂材についても同様の実験評価を行った。

### (2)遮蔽実験

遮蔽実験は、中性子線源の強度が高い（中性子放出率大）こと、線源の遠隔自動操作ならびに連続計測が可能なことおよび散乱成分の影響が小さいこと等の理由から、東海事業所・放射線管理課所掌の校正室に於いて実施した。

中性子線源は、MOX燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル（2MeV付近にピークを示す）を模擬するため、類似したエネルギースペクトルを持つ<sup>252</sup>Cfを用いた。その線源強度等を表6に示す。また、中性子の計測はレムカウンタを使用して行った。

中性子線の計測方法については、厚さに対する減衰率を評価するため27cm×27cm×10mmの遮蔽材を5枚使用し、図7の①から④に示す測定系に於いて行った。①及び②の測定系では遮蔽材に対する直接入射成分を計測するため、①では線源とレムカウンタのみで散乱成分を含めた直接成分の計測、②ではシャドーコーンを用いて散乱成分のみの計測を行った。③及び④の測定系では、各枚数時の遮蔽材透過成分を計測するため、③では線源とレムカウンタの間に遮蔽材を設置して散乱成分を含めた透過成分の計測、④ではシャドーコーンを用いて各枚数時の散乱成分のみの計測を行った。

中性子計測時間については、線源強度が高いという理由から、1回の計測時間を1分間とし、計測値のバラツキを考慮して各遮蔽材の枚数毎に連続3回計測した。

### (3)実験結果

Cf線源による中性子遮蔽実験から得られたアクリル樹脂材およびオレフィン樹脂材の減衰率を図8に示す。

図8に示すように、いずれの測定点においてもオレフィン樹脂材のほうがアクリル樹脂材よりも遮蔽性能に優れる結果となった。

## 5 中性子遮蔽計算による評価

### (1)遮蔽性能計算

遮蔽材の遮蔽性能を計算コードにより精度良く評価することを目的に、今回実施したオレフィン樹脂材とアクリル樹脂材に対する遮蔽実験を模擬した遮蔽計算を行い、その計算結果と実験結果を比較して計算コードを用いた遮蔽性能評価の有用性について検討した。

計算には3次元モンテカルロ計算コード（MCNPコード）を使用した。計算モデルは、図9に示すように線源から検出器までの距離を82cm、線源と検出器の間に線源から10cmの位置に順次遮蔽材を配置した体系とした。中性子線源としては、実験と同じCf線源とした。検出器の応答関数はICRP51の線量当量換算係数を用いた。

### (2)計算結果

上述した体系で実施した遮蔽計算の結果をアクリル樹脂材、オレフィン樹脂材についてそれぞれ表7に示す。また、実験結果と比較した結果をそれぞれ図10、図11に示す。

### (3)計算による遮蔽性能評価の有用性

図10,11に示した結果から、いずれの場合も実験値のほうが計算値よりも減衰率が高く（上側）、すなわち計算値のほうが減衰効果が大きい側にわずかにずれた形で表れているが、実験結果と計算結果はほぼ同様な傾向を示した。アクリル樹脂とオレフィン樹脂の材質が違うものの間で同じような傾向になったことから、このようなわずかなずれが生じたのは、実験系の模擬の不十分さが原因であると考えられる。すなわち、計算モデルの設定が実際の実験系とは異なっていたため、また、線源周辺の詳細な状況が計算モデルの中に加味されていないために、中性子線の散乱状況が実験系と計算モデルでは異なっていることが挙げられる。これらのことを考慮し、実験系を正確に模擬したモデルによる計算を再度実施する必要があるが、現在の計算技術の精度を考えると、また、遮蔽性能の計算による評価がかなり実際に即した正確な形で行えることから、計算を用いることは大雑把な評価手法としては有用であると考えられる。

## 6 MOX燃料を線源にした場合の中性子遮蔽性能の計算評価

汚染等の問題からMOX燃料を用いた遮蔽実験の実施が困難なため、オレフィン樹脂材のMOX燃料に対する遮蔽性能を計算により評価した。また、MOX燃料の線源強度は、実際の組成をもとに計算から求めたものを使用した。

### (1)線源計算

MOX燃料の中性子線源としてのエネルギースペクトルを求めるにあたって、現行MOX燃料、高次化MOX燃料、さらに海外PuO<sub>2</sub>の3種類の燃料を想定した。計算にあたっては、富化度を30wt%とし、U同位体の自発核分裂や( $\alpha, n$ )反応発生率を無視し、Pu同位体およびAmを線源評価の対象とした。各々のPu同位体組成のうち、現行および高次化MOX燃料については表1に示す通りであり、海外PuO<sub>2</sub>については表8に示す。計算は、核燃料施設の線源評価に実績の多いORIGEN-2(82)コード<sup>(1)</sup>を使用した。このコードは、中性子線源に対して強度のみを与えるため、スペクトルについてはデータブック<sup>(2)</sup>を用いた。各MOX燃料の中性子放出率を表9に、現行MOX燃料、高次化MOX燃料、海外PuO<sub>2</sub>それぞれのエネルギースペクトルを図1、図2、図12に示す。

各燃料とも( $\alpha, n$ )反応による中性子収量と自発核分裂による中性子収量とは同一オーダーであるが、前者の方が相対的に多い。( $\alpha, n$ )反応による中性子は、いずれの燃料の場合も、2.2MeV近傍にピークを持つ分布であり、それぞれのピークの大きさは燃焼度に基づく収率を反映している。一方、自発核分裂による中性子のエネルギースペクトルについても、燃料組成の違いによる収率の違いが各ピークの高さに反映しているが、各スペクトルとも概ね一致している。

以上のように、各燃料において( $\alpha, n$ )反応による中性子スペクトルも自発核分裂による中性子スペクトルも、そのエネルギー依存性についてはほとんど差がないことが明らかになった。このことから、3種類の線源で得られる線量減衰率にほとんど差を生じないことが示唆される。

### (2)遮蔽計算

試作したオレフィン樹脂材に対して、線源計算を行った3種類のMOX線源条件を与えて遮蔽性能評価を実施した。また、比較としてアクリル樹脂についても同様の評価を行った。

計算は放射線遮蔽解析で多くの実績のある3次元モンテカルロ計算コードMCNP<sup>(3)</sup>を用いた。MCNPコードは計算対象を厳密にモデル化できるほか、使用する核断面積ライブラリが群定数でなくエネルギーに関して連続的に扱えるという特徴がある。断面積ライブラリはコードに付属するBMCCSライブラリを用いた。

MCNPコードによる3次元計算モデルは図13に示す通りである。円柱体系の中に1m×1mの矩形遮蔽材を設定したモデルであり、線源は点として扱い線源から40cmの位置に各遮蔽材を設置し、線源と遮蔽材を結ぶ軸上さらに40cmの位置の軸からそれぞれ10cm、20cm、40cm横方向にずらした位置における線量当量を計算した。

遮蔽材透過後の中性子束の減衰を整理するため、線量率で評価することとした。このため、線量当量換算係数はICRP51に記載された中性子100群の換算係数を利用した。また、遮蔽計算で使用する核種数密度を表10に示す。

### (3)遮蔽計算結果

MCNPコードにより計算された各MOX燃料を線源とした場合の遮蔽性能を表11～13および図14～16に示す。

## 7 中性子遮蔽性能の評価および考察

オレフィン樹脂による透明遮蔽材のCf線源に対する遮蔽性能が従来のアクリル樹脂よりも優れていることが、4章の遮蔽実験ならびに5章の遮蔽計算のいずれの結果からも明らかとなった。オレフィン樹脂材の遮蔽性能がアクリル樹脂材よりも優れる主な要因としては、含有水素量の違いが挙げられる。このことは、図17に示す、それぞれの樹脂における含有水素量と減衰率の関係や単位体積当たりの水素量の比較からも明らかである。

また、5章において議論したとおり、遮蔽性能の評価は減衰率を計算から求めて評価することも有効であり、遮蔽実験の実施が困難なMOX燃料を線源とした場合についても、計算結果からオレフィン樹脂材に遮蔽効果があり、アクリル樹脂材と比較しても遮蔽性能に優れていることが明らかになった。

さらに、今回は中性子を遮蔽するための方法として水素原子による減速効果を用いたが、中性子吸収物質（元素）を添加することによる遮蔽効果についても検討する。一般的には中性子スペクトルが軟らかい場においては、熱中性子吸収元素の添加が有効であるが、今回のようにCfやMOX燃料を線源とした中性子場は一般にスペクトルが硬いため、吸収元素の添加の有効性は明らかではない。したがって、いくつかの中性子吸収元素を添加したオレフィン樹脂材の遮蔽性能を計算により評価した。計算方法、計算モデルは5章で行ったものと同様である。吸収元素の添加方法は次の通りとした。本来は化合物の形態とそれによる密度変化を反映すべきであるが、ここでは単純化のためにオレフィン樹脂の密度 ( $1.02\text{g/cm}^3$ ) を保存し、この水素密度の1%および2%の個数密度分だけ吸収元素を添加する。これにより、密度が一定であることから水素の個数密度は減少する。添加元素は、Li6, Be9, B10, Ag, Cd, Eu, Hfの7種を想定した。それぞれの場合について、中心軸上の線量率の減衰率を表14に示す。その結果、全般的に吸収元素を添加したことによる遮蔽性能の向上は認められず、図18に示すように水素含有率と減衰率との相関が非常に大きいことが明らかとなった。これらのことから、少々の吸収元素の添加では遮蔽性能の向上は認められず、透明遮蔽材としては水素含有量の増加による遮蔽性能向上を模索したことが妥当であったといえる。

一方、グローブボックスのパネル材として必要な透明性（全光線透過率）や引張・曲げ強度についてもオレフィン樹脂はアクリル樹脂材と同等の性能を有している。オレフィン樹脂の熱変形温度は70℃でありアクリル樹脂よりもやや低いが、燃料製造施設での最高温度の60℃よりは高く、問題はないと考えられる。

以上のように、オレフィン樹脂材は透明遮蔽材として必要な透明性、高強度といった性能を有しつつ、従来のアクリル樹脂材よりも中性子の遮蔽性能に優れており、燃料製造施設における透明遮蔽材として十分に有効なものであるといえる。



## 8 結言

従来、燃料製造施設において透明中性子遮蔽材と用いられてきたアクリル樹脂よりも遮蔽性能に優れるオレフィン樹脂を用いた遮蔽材を開発した。このオレフィン樹脂遮蔽材は、透明性や強度面においてもアクリル樹脂と同等以上の性能を有しており、MOX燃料を線源とした燃料製造施設の中性子場においても十分に有効なことが計算評価からも明らかになった。

このオレフィン樹脂遮蔽材については、2件の特許出願を行うとともに、東海事業所、Pu燃料工場において試験的に採用するため、1m×1mの遮蔽材の製造が行われている。

今後は、中性子線とともに $\gamma$ 線に対しても遮蔽性能を向上させるとともに、中性子遮蔽性能のさらなる向上が課題である。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって、Cf線源による中性子遮蔽実験においては、大洗工学センター 放射線管理課 田川 博氏および東海事業所 放射線管理第一課 大関 清氏よりご助言、ご支援を、原子力技術(株) 益子 真一氏にご協力を頂きました。

また、東海事業所 製造課 出口 守一課長、沖田 高敏氏よりMOX燃料製造施設における放射線環境条件および遮蔽材への要求性能等の情報を提供していただきました。

透明遮蔽材の試作にあたっては(株)アスクの原田 恵文氏、奥田 久志氏、市野 隆行氏に、遮蔽計算にあたっては(株)三菱総合研究所 角田 弘和氏にご協力をいただきました。

これらのご支援ならびにご助言に対し、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) A.G.Croff, "ORIGEN-2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristic of Nuclear Materials," Nucl. Technol., Vol62,335 (1983)
- 2) 松延、ほか、「 $(\alpha, n)$  反応と自発核分裂による中性子収率を計算するためのデータブック」, JAERI 1324, (1992)
- 3) "MCNP 4A, Monte Carlo N-Particle Transport Code System" , RSIC Computer Code Collection, CCC-200, (1993)

表1 MOX燃料中のPu同位体含有率

核種	質量数	崩壊当たりの $\alpha$ 崩壊割合	崩壊定数	現行MOX燃料			高次化MOX燃料		
				PuO <sub>2</sub> 12kg中の重量	( $\alpha, n$ ) 放出率	Spn放出率	PuO <sub>2</sub> 12kg中の重量	( $\alpha, n$ ) 放出率	Spn放出率
Pu-238	238.0496	0.999	2.505E-10	1.448E+02	2.359E+06	3.848E+05	2.504E+02	4.080E+06	6.654E+05
Pu-239	239.0522	0.998	9.133E-13	5.597E+03	2.535E+05	1.269E+02	5.324E+03	2.412E+05	1.207E+02
Pu-240	240.0538	0.999	3.362E-12	2.624E+03	4.532E+05	2.389E+06	2.440E+03	4.125E+05	2.222E+06
Pu-241	241.0568	2.45E-05	1.526E-09	1.389E+03	2.100E+03	6.866E+01	1.608E+03	2.429E+03	7.946E+01
Pu-242	242.0587	0.999	5.841E-14	5.145E+02	1.209E+03	8.673E+05	7.009E+02	1.646E+03	1.182E+06
Am-241	241.0567	0.999	5.086E-11	3.176E+02	1.046E+06	3.940E+02	3.174E+02	1.045E+06	3.938E+02
合計				1.059E+04	4.115E+06	3.642E+06	1.064E+04	5.792E+06	4.070E+06
O	15.9994	1.00000		1.413E+03			1.420E+03		
O-16	15.9949	0.99762		1.409E+03			1.416E+03		
O-17	16.9991	0.00038		5.705E-01			5.733E-01		
O-18	17.9992	0.00200		3.179E+00			3.195E+00		

表2 アクリル樹脂板の基本的特性

項目	アクリル樹脂板
元素組成 (wt%)	H:8.0 C:60.0 O:32.0
全光線透過率 (%)	93
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.19
引張強度 (MPa)	63.7
引張破壊伸度 (%)	2.2
曲げ強度 (MPa)	90.2
曲げ弾性率 (Pa)	2.94E+09
熱変形温度 (°C)	100

表3 高水素アクリル樹脂板の基本的特性

項目	高水素 (9.4wt%) アクリル樹脂板	水素量8.0wt%アクリル樹脂板を 1としたときの相対比
元素組成 (wt%)	H:9.4	1.175
	C:70.3	1.172
	O:20.3	0.634
全光線透過率 (%)	93	1.000
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.11	0.933
引張強度 (MPa)	16.7	0.262
引張破壊伸度 (%)	1.5	0.682
曲げ強度 (MPa)	17.9	0.199
曲げ弾性率 (Pa)	2.16E+08	0.073
熱変形温度 (℃)	74	0.740

表4 高水素含有高分子材料の一覧

材料名	元素組成 (wt%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	全光線透過率 (%)	中性子遮蔽性能 (計算値)		屈折率	引張強度 (MPa)	引張破壊伸度 (%)	曲げ強度 (MPa)	曲げ弾性率 (Pa)	熱変形温度 (℃)
				厚さ (mm)	減衰率相対比						
アクリル樹脂板	H:8.0 C:60.0 O:32.0	1.19	93	30	1.00	1.52	63.7	2.2	90.2	3.24E+09	100
				60	1.00						
				90	1.00						
ポリカーボネート	H:5.8 C:74.4 O:19.8	1.20	86	30	1.08	—	63.7	85	93.2	2.35E+09	135
				60	1.18						
				90	1.29						
ポリメチルペンテン	H:14.3 C:85.7	0.84	半透明	30	0.96	1.46	17.2	25	35.3	1.27E+09	90
				60	0.92						
				90	0.88						
ポリイソブチレン	H:14.3 C:85.7	0.92	92	30	0.91	流動性を有する半固体材料のため、データなし					
				60	0.82						
				90	0.75						
含鉛アクリル	H:5.8 Pb:30.0 C:43.8 O:20.4	1.60	82	30	1.01	1.54	48.1	18	69.6	2.06E+09	80
				60	1.02						
				90	1.02						
鉛ガラス	H:0.9 Si:16.1 C:25.6 Ba:4.5 O:1.8 Pb:51.1	4.45	85	—	—	—	117.7	12	49.0	—	400

表5 オレフィン樹脂板の基本的特性

項目		オレフィン樹脂	従来のアクリル樹脂板を	
			1としたときの相対比	アクリル樹脂板
元素組成	(wt%)	H:12.0 C:88.0	1.500 1.467	H:8.0 C:60.0 O:32.0
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	1.02	0.857	1.19
単位体積あたりの 水素量	(g/cm <sup>3</sup> )	0.1224	1.286	0.0952
全光線透過率	(%)	91	0.978	93
ヘイズ		2	—	—
引張強度	(MPa)	44.1	0.693	63.7
引張破壊伸度	(%)	30.0	13.64	2.2
曲げ強度	(MPa)	93.2	1.033	17.9
曲げ弾性率	(Pa)	2.45E+09	0.758	3.24E+09
アイゾット衝撃強度	(kgf・cm/cm <sup>2</sup> )	3.5 (ノッチあり)	—	—
		20 (ノッチなし)	—	—
ロックウェル硬度		120	—	—
MFR (Melt Flow Rate)	(g/10min)	30	—	—
ガラス転移温度	(°C)	80	—	—
熱変形温度	(°C)	70	0.700	100
熱膨張係数		7 (たて)	—	—
		6 (よこ)	—	—
成形収縮率	(%)	0.6 (たて)	—	—
		0.5 (よこ)	—	—



表6 Cf-252の中性子線源特性

Cf-252の線源強度特性	
線量当量平均エネルギー	2.40 (MeV)
半減期	2.65 (year)
中性子放出率 (1995/3)	1.051E+08 (n/s)
補正中性子放出率 (1995/3)	1.022E+08 (n/s)

表7 遮蔽計算から求めたアクリル樹脂,オレフィン樹脂の減衰率

厚さ (mm)	アクリル樹脂		オレフィン樹脂	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	14.20	1.0000	14.20	1.00000
20	9.024	0.6355	8.599	0.6056
40	5.920	0.4169	5.366	0.3779
60	3.867	0.2723	3.296	0.2321
80	2.590	0.1824	2.127	0.1498
100	1.770	0.1246	1.414	0.0996

表8 海外PuO<sub>2</sub>燃料中のPu同位体含有率

核種	質量数	崩壊当たりの $\alpha$ 崩壊割合	崩壊定数	海外PuO <sub>2</sub>		
				PuO <sub>2</sub> 12kg中の重量	( $\alpha, n$ ) 放出率	Spn放出率
Pu-238	238.0496	0.999	2.505E-10	1.721E+02	2.804E+06	4.573E+05
Pu-239	239.0522	0.998	9.133E-13	5.868E+03	2.658E+05	1.330E+02
Pu-240	240.0538	0.999	3.362E-12	2.825E+03	4.880E+05	2.572E+06
Pu-241	241.0568	2.45E-05	1.526E-09	8.149E+02	1.232E+03	4.026E+01
Pu-242	242.0587	0.999	5.841E-14	5.891E+02	1.384E+03	9.930E+05
Am-241	241.0567	0.999	5.086E-11	3.176E+02	1.046E+06	3.940E+02
合計				1.059E+04	4.606E+06	4.023E+06
O	15.9994	1.00000		1.413E+03		
O-16	15.9949	0.99762		1.410E+03		
O-17	16.9991	0.00038		5.707E-01		
O-18	17.9992	0.00200		3.180E+00		

表9 各MOX燃料からの ( $\alpha, n$ ) 中性子放出率

核種	$E\alpha$ (MeV)	O ( $\alpha, n$ ) 反応中性子取率 (n/sec)		
		現行MOX	高次化MOX	海外PuO2
Pu-238	5.5	2.359E+06	4.080E+06	2.804E+06
Pu-239	5.1	2.535E+05	2.412E+05	2.658E+05
Pu-240	5.2	4.532E+05	4.215E+05	4.880E+05
Pu-241	4.9	2.100E+03	2.429E+03	1.232E+03
Pu-242	4.9	1.209E+03	1.646E+03	1.384E+03
Am-241	5.5	1.046E+06	1.045E+06	1.046E+06
		( $\alpha, n$ ) スペクトル (n/sec)		
En (MeV)		現行MOX	高次化MOX	海外PuO2
0.1		5.093E+04	6.827E+04	5.660E+04
0.2		5.395E+04	7.342E+04	6.009E+04
0.3		5.286E+04	7.182E+04	5.886E+04
0.4		6.053E+04	8.326E+04	6.753E+04
0.5		7.805E+04	1.093E+05	8.731E+04
0.6		8.584E+04	1.211E+05	9.613E+04
0.7		9.329E+04	1.321E+05	1.045E+05
0.8		1.005E+05	1.429E+05	1.127E+05
0.9		9.502E+04	1.357E+05	1.066E+05
1.0		7.879E+04	1.123E+05	8.838E+04
1.1		8.448E+04	1.196E+05	9.466E+04
1.2		9.195E+04	1.299E+05	1.030E+05
1.3		1.031E+05	1.458E+05	1.155E+05
1.4		1.116E+05	1.567E+05	1.250E+05
1.5		1.145E+05	1.615E+05	1.282E+05
1.6		1.210E+05	1.703E+05	1.354E+05
1.7		1.317E+05	1.851E+05	1.474E+05
1.8		1.472E+05	2.066E+05	1.647E+05
1.9		1.544E+05	2.161E+05	1.727E+05
2.0		1.627E+05	2.276E+05	1.820E+05
2.1		1.639E+05	2.289E+05	1.833E+05
2.2		1.714E+05	2.394E+05	1.916E+05
2.3		1.736E+05	2.427E+05	1.942E+05
2.4		1.667E+05	2.329E+05	1.864E+05
2.5		1.589E+05	2.223E+05	1.777E+05
2.6		1.519E+05	2.128E+05	1.699E+05
2.7		1.443E+05	2.024E+05	1.615E+05
2.8		1.332E+05	1.870E+05	1.490E+05
2.9		1.228E+05	1.805E+05	1.435E+05
3.0		1.197E+05	1.689E+05	1.340E+05
3.1		1.053E+05	1.488E+05	1.180E+05
3.2		9.804E+04	1.389E+05	1.099E+05
3.3		8.371E+04	1.189E+05	9.384E+04
3.4		6.752E+04	9.617E+04	7.572E+04
3.5		5.582E+04	7.998E+04	6.266E+04
3.6		4.743E+04	6.824E+04	5.328E+04
3.7		3.784E+04	5.474E+04	4.254E+04
3.8		3.201E+04	4.657E+04	3.601E+04
3.9		2.767E+04	4.040E+04	3.115E+04
4.0		2.236E+04	3.269E+04	2.517E+04
4.1		1.982E+04	2.912E+04	2.234E+04
4.2		1.302E+04	1.913E+04	1.467E+04
4.3		1.018E+04	1.496E+04	1.148E+04
4.4		6.220E+03	9.135E+03	7.009E+03
4.5		3.965E+03	5.823E+03	4.468E+03
		4.115E+06	5.792E+06	4.606E+06

表10 アクリル樹脂板およびオレフィン樹脂板の核種数密度

物質名		アクリル樹脂板		オレフィン樹脂	
核種	元素記号	数密度 (/cm <sup>3</sup> /b)	wt比	数密度 (/cm <sup>3</sup> /b)	wt比
水素	H	5.6879E-02	8.00%	7.3130E-02	12.00%
リチウム6	Li-6				
リチウム7	Li-7				
ベリリウム	Be				
ホウ素10	B-10				
ホウ素11	B-11				
炭素	C	3.5799E-02	60.00%	4.5004E-02	88.00%
窒素	N				
酸素	O	1.4333E-02	32.00%		
ナトリウム	Na				
マグネシウム	Mg				
アルミニウム	Al				
ケイ素	Si				
リン	P				
硫素	S				
カリウム	K				
カルシウム	Ca				
クロム	Cr				
マンガン	Mn				
鉄	Fe				
ニッケル	Ni				
銅	Cu				
ジルコニウム	Zr				
ニオブ	Nb				
モリブデン	Mo				
スズ	Sn				
密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.190E+00	100%	1.020E+00	100%

表11 現行MOX燃料を中性子源とした減衰率

中心軸上

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.17E-02	1.0000	1.17E-02	1.0000
2	9.70E-03	0.8274	9.29E-03	0.7927
4	7.71E-03	0.6575	7.14E-03	0.6089
6	6.03E-03	0.5141	5.22E-03	0.4451
8	4.53E-03	0.3865	3.81E-03	0.3251
10	3.39E-03	0.2896	2.69E-03	0.2292

中心軸から径方向 10cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.16E-02	1.0000	1.16E-02	1.0000
2	9.60E-03	0.8287	9.19E-03	0.7933
4	7.57E-03	0.6534	6.99E-03	0.6035
6	5.87E-03	0.5066	5.09E-03	0.4397
8	4.44E-03	0.3838	3.75E-03	0.3237
10	3.32E-03	0.2866	2.61E-03	0.2255

中心軸から径方向 20cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.12E-02	1.0000	1.12E-02	1.0000
2	9.61E-03	0.8201	8.78E-03	0.7860
4	7.20E-03	0.6444	6.68E-03	0.5982
6	5.52E-03	0.4945	4.83E-03	0.4325
8	4.13E-03	0.3695	3.47E-03	0.3104
10	3.07E-03	0.2752	2.43E-03	0.2175

中心軸から径方向 40cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	9.79E-03	1.0000	9.79E-03	1.0000
2	7.66E-03	0.7826	7.32E-03	0.7480
4	5.82E-03	0.5943	5.35E-03	0.5463
6	4.34E-03	0.4438	3.77E-03	0.3854
8	3.19E-03	0.3257	2.62E-03	0.2679
10	2.30E-03	0.2351	1.82E-03	0.1854

表12 高次化MOX燃料を中性子源とした減衰率

## 中心軸上

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.17E-02	1.0000	1.17E-02	1.0000
2	9.69E-03	0.8266	9.29E-03	0.7928
4	7.68E-03	0.6556	7.14E-03	0.6087
6	6.04E-03	0.5150	5.22E-03	0.4453
8	4.51E-03	0.3845	3.83E-03	0.3265
10	3.41E-03	0.2913	2.68E-03	0.2288

## 中心軸から径方向10cmの位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.16E-02	1.0000	1.16E-02	1.0000
2	9.59E-03	0.8279	9.19E-03	0.7940
4	7.55E-03	0.6524	7.00E-03	0.6048
6	5.88E-03	0.5077	5.10E-03	0.4407
8	4.42E-03	0.3818	3.77E-03	0.3252
10	3.33E-03	0.2880	2.61E-03	0.2254

## 中心軸から径方向20cmの位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.12E-02	1.0000	1.12E-02	1.0000
2	9.16E-03	0.8203	8.79E-03	0.7865
4	7.17E-03	0.6422	6.67E-03	0.5974
6	5.59E-03	0.5007	4.84E-03	0.4330
8	4.11E-03	0.3678	3.48E-03	0.3114
10	3.09E-03	0.2766	2.43E-03	0.2173

## 中心軸から径方向40cmの位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	9.79E-03	1.0000	9.79E-03	1.0000
2	7.66E-03	0.7822	7.33E-03	0.7488
4	5.81E-03	0.5934	5.36E-03	0.5473
6	4.35E-03	0.4448	3.77E-03	0.3851
8	3.19E-03	0.3257	2.63E-03	0.2688
10	2.31E-03	0.2364	1.81E-03	0.1851

表13 海外PuO<sub>2</sub>燃料を中性子源とした減衰率

中心軸上

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.17E-02	1.0000	1.17E-02	1.0000
2	9.70E-03	0.8275	9.29E-03	0.7927
4	7.70E-03	0.6569	7.14E-03	0.6091
6	6.02E-03	0.5139	5.22E-03	0.4456
8	4.53E-03	0.3867	3.81E-03	0.3254
10	3.40E-03	0.2897	2.66E-03	0.2266

中心軸から径方向 10cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.16E-02	1.0000	1.16E-02	1.0000
2	9.60E-03	0.8288	9.19E-03	0.7935
4	7.56E-03	0.6532	6.99E-03	0.6039
6	5.86E-03	0.5064	5.10E-03	0.4403
8	4.45E-03	0.3840	3.75E-03	0.3239
10	3.32E-03	0.2868	2.58E-03	0.2227

中心軸から径方向 20cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	1.12E-02	1.0000	1.12E-02	1.0000
2	9.17E-03	0.8207	8.78E-03	0.7861
4	7.19E-03	0.6435	6.68E-03	0.5982
6	5.53E-03	0.4947	4.83E-03	0.4325
8	4.13E-03	0.3697	3.47E-03	0.3106
10	3.07E-03	0.2751	2.40E-03	0.2152

中心軸から径方向 40cm の位置

厚さ(cm)	アクリル樹脂板		オレフィン樹脂板	
	計算値	減衰率	計算値	減衰率
0	9.79E-03	1.0000	9.79E-03	1.0000
2	7.65E-03	0.7820	7.32E-03	0.7478
4	5.82E-03	0.5946	5.35E-03	0.5465
6	4.34E-03	0.4438	3.77E-03	0.3852
8	3.18E-03	0.3252	2.62E-03	0.2677
10	2.30E-03	0.2352	1.80E-03	0.1836



表14 中性子吸収物質を水素数密度の1%および2%添加した場合の減衰率

対象材料		厚さ 0 cm 計算値	厚さ 10 cm 計算値	減衰率	水素個数密度	備考
オレフィン樹脂		1.170E-02	2.690E-03	0.2295	7.319E-02	参考値
ポリエチレン			2.420E-03	0.2061	8.232E-02	参考値
水			3.450E-03	0.2942	6.664E-02	参考値
材料	添加量(wt%)					
オレフィン樹脂 (Li6添加)	1.00		2.700E-03	0.2303	7.267E-02	
	2.00		2.700E-03	0.2301	7.215E-02	
オレフィン樹脂 (Be9添加)	1.00		2.780E-03	0.2372	7.241E-02	
	2.00		2.790E-03	0.2384	7.165E-02	
オレフィン樹脂 (B10添加)	1.00		2.710E-03	0.2309	7.233E-02	
	2.00		2.740E-03	0.2335	7.148E-02	
オレフィン樹脂 (nat-Ag添加)	1.00		3.250E-03	0.2772	6.492E-02	
	2.00		3.670E-03	0.3132	5.833E-02	
オレフィン樹脂 (nat-Cd添加)	1.00		3.250E-03	0.2776	6.454E-02	
	2.00		3.680E-03	0.3142	5.773E-02	
オレフィン樹脂 (nat-Eu添加)	1.00		3.440E-03	0.2931	6.197E-02	
	2.00		3.980E-03	0.3392	5.373E-02	
オレフィン樹脂 (nat-Hf添加)	1.00		3.610E-03	0.3078	6.035E-02	
	2.00		4.180E-03	0.3569	5.135E-02	

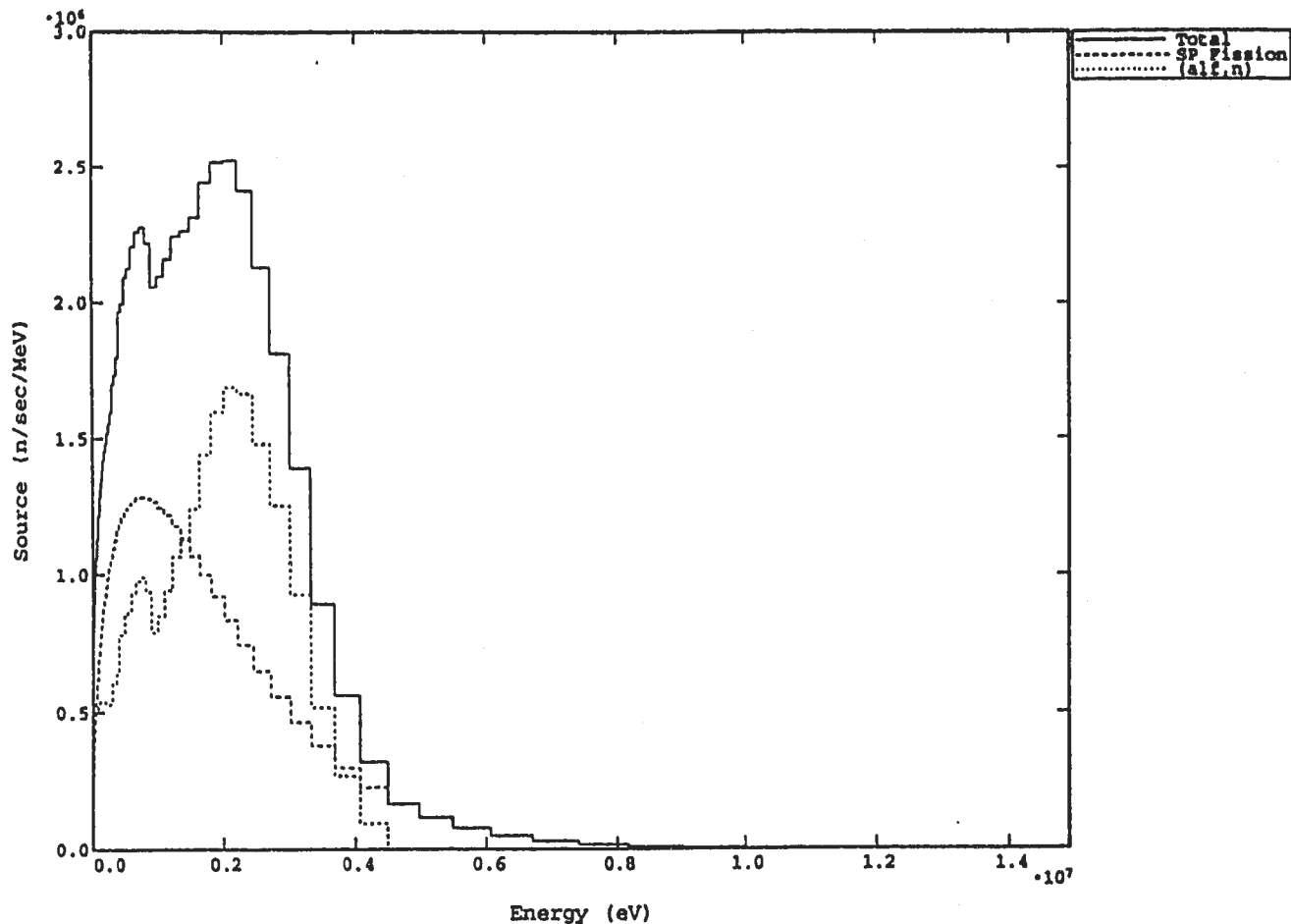


図1 現行MOX燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル

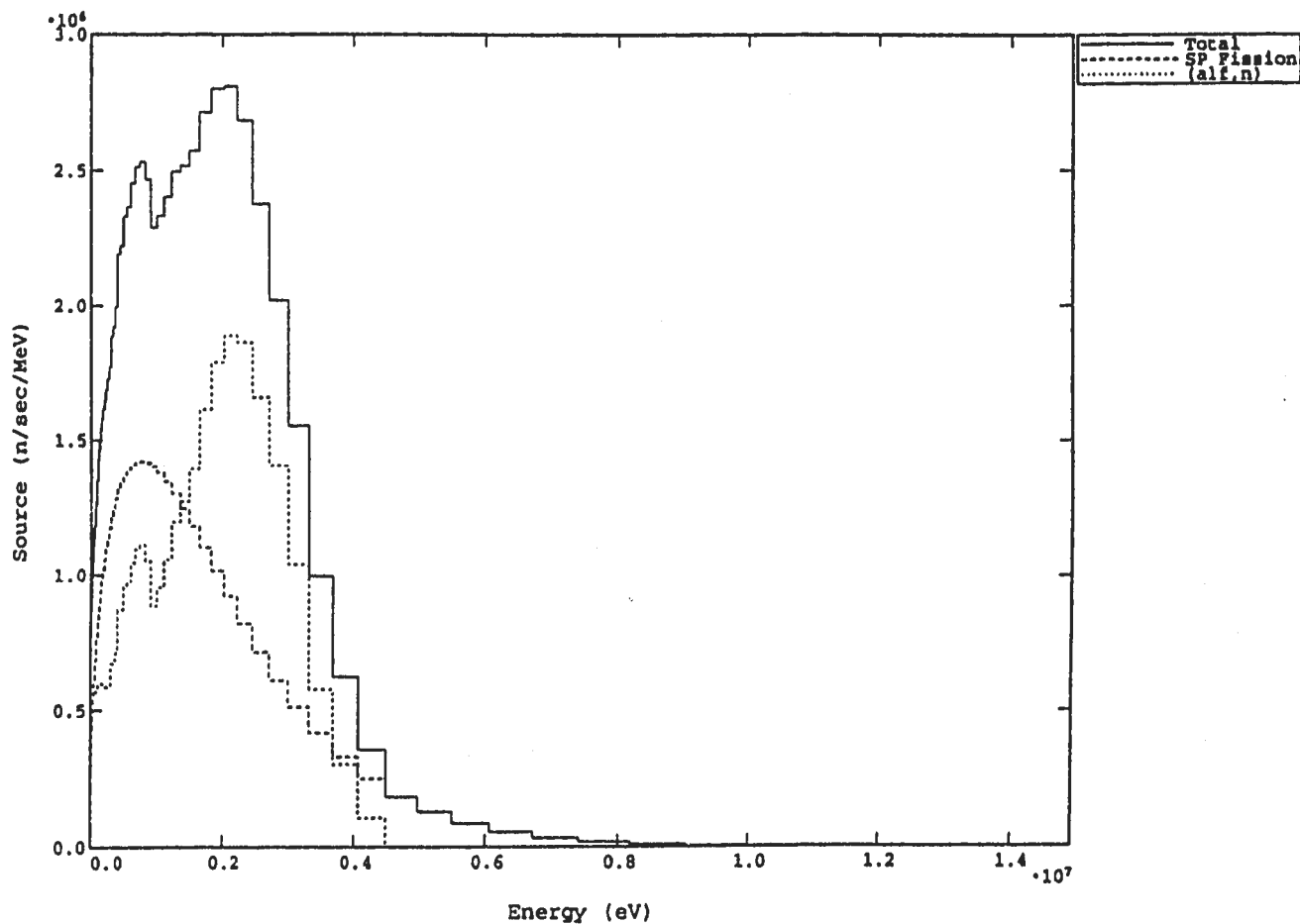


図2 高次化MOX燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル

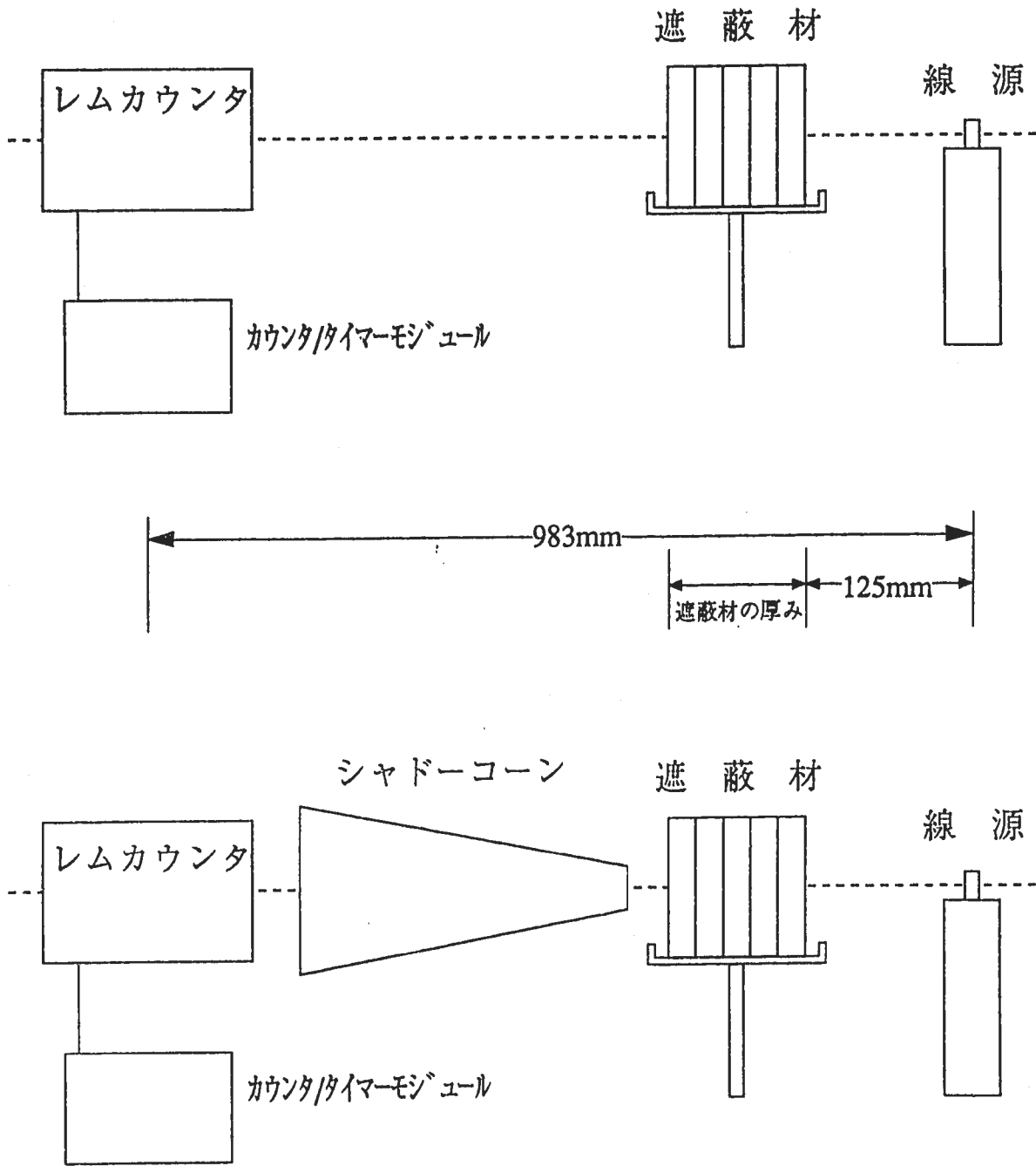


図3 アクリル樹脂板の遮蔽実験の測定系

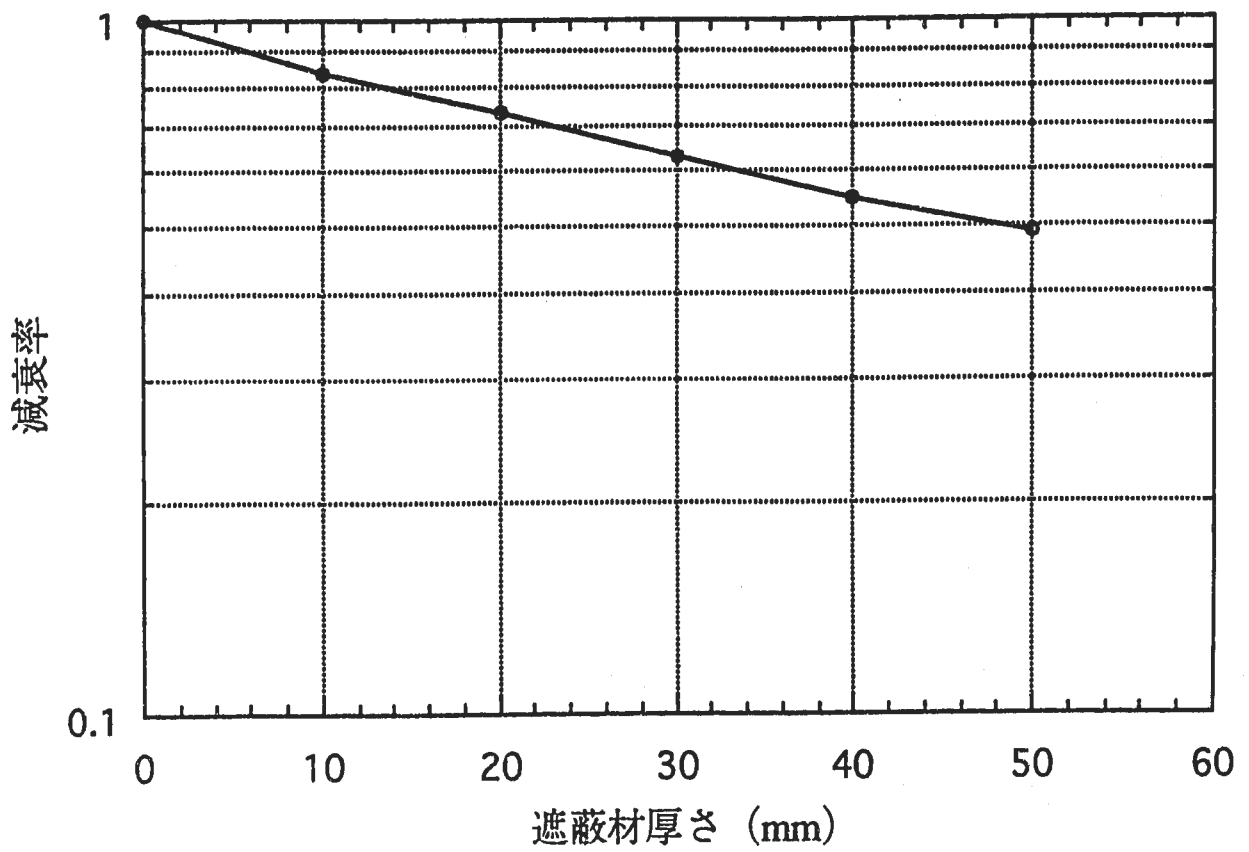


図4 アクリル樹脂板の中性子遮蔽性能 (Cf線源)

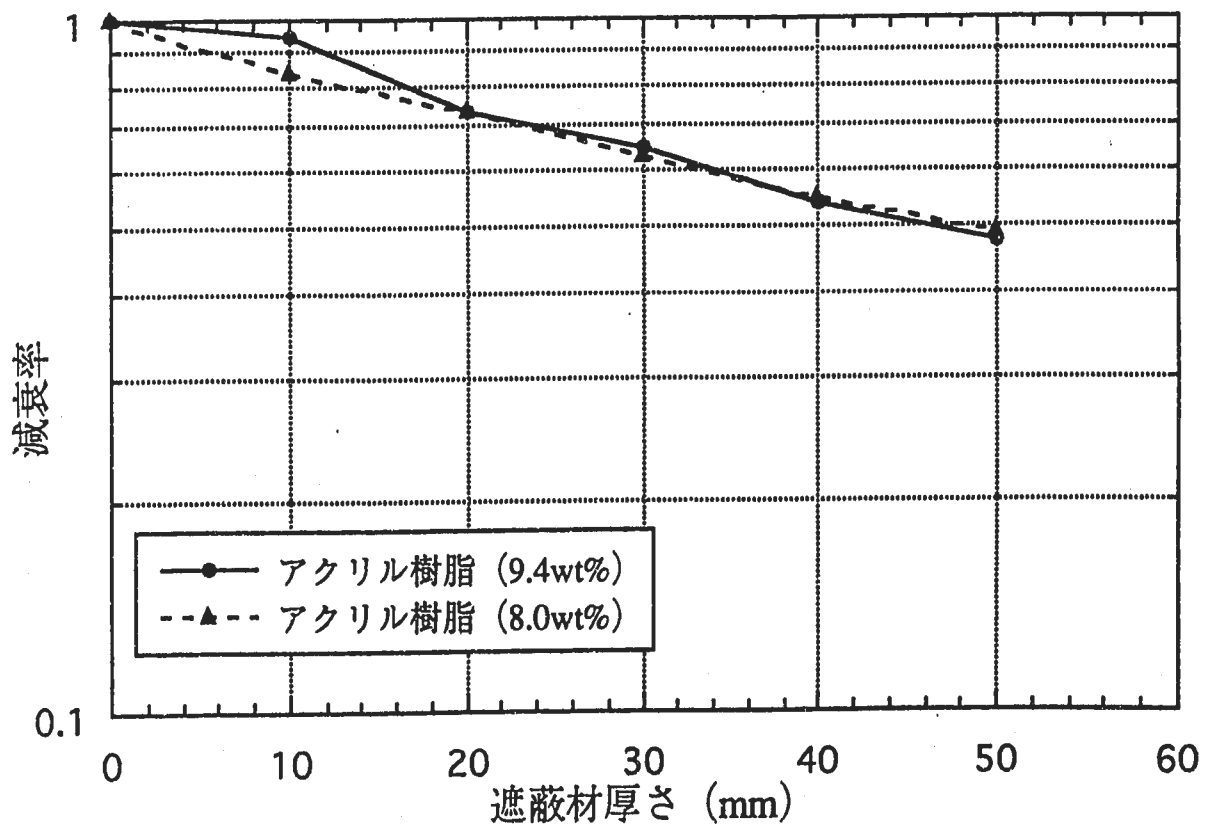
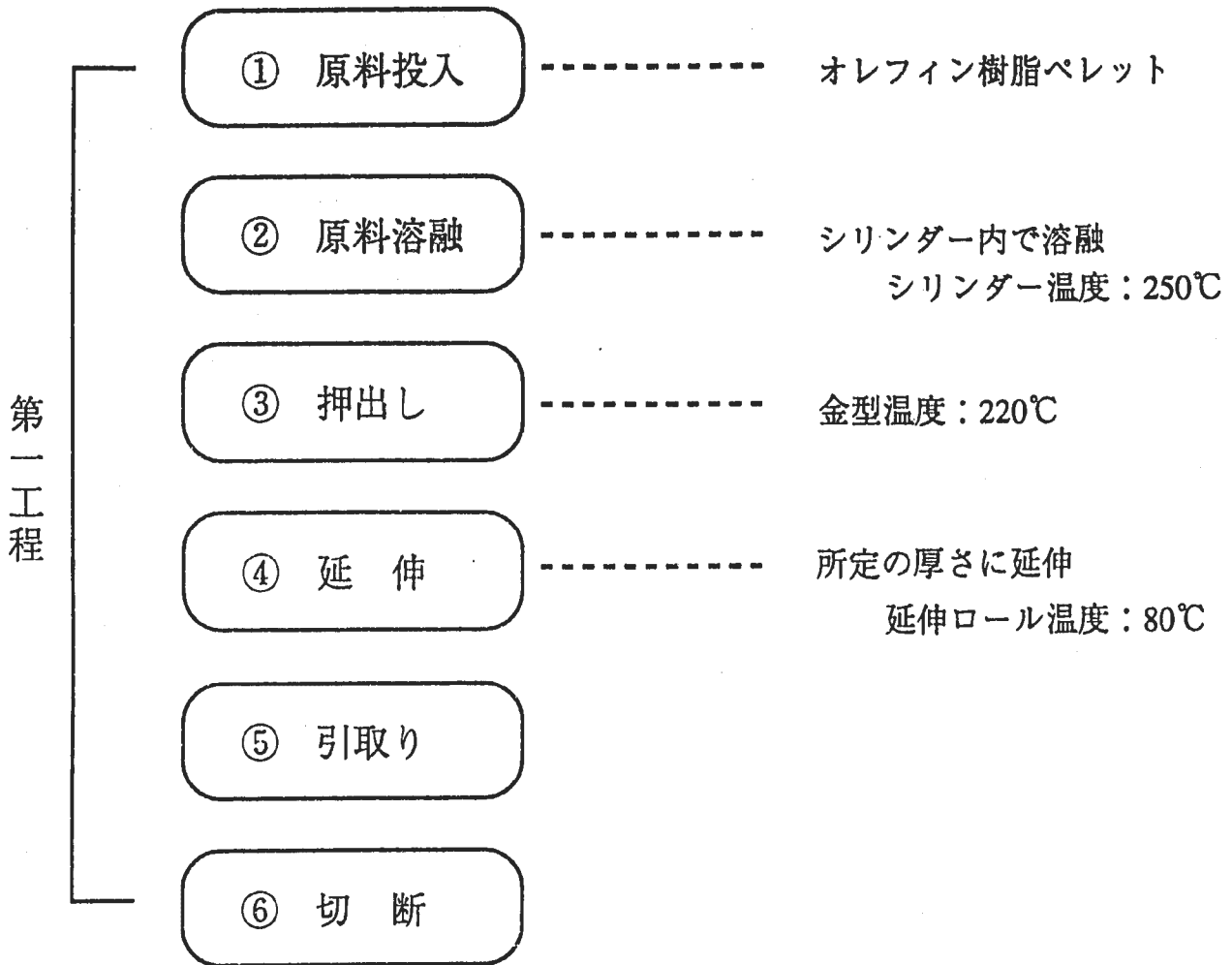


図5 水素含有量9.4wt%と8wt%のアクリル樹脂板の遮蔽性能 (Cf線源)

### 第一工程：オレフィン樹脂シートの製作



### 第二工程：オレフィン樹脂厚板の製作

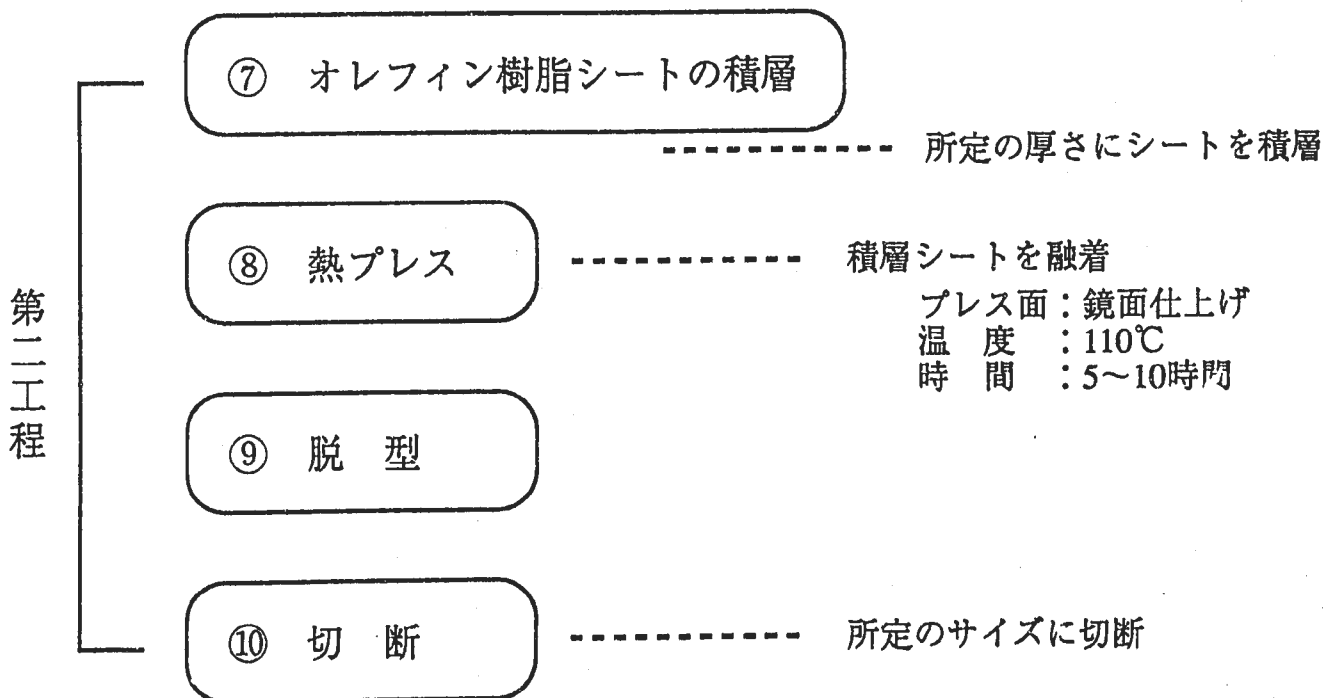


図6 オレフィン樹脂による透明中性子遮蔽材成形板の試作工程

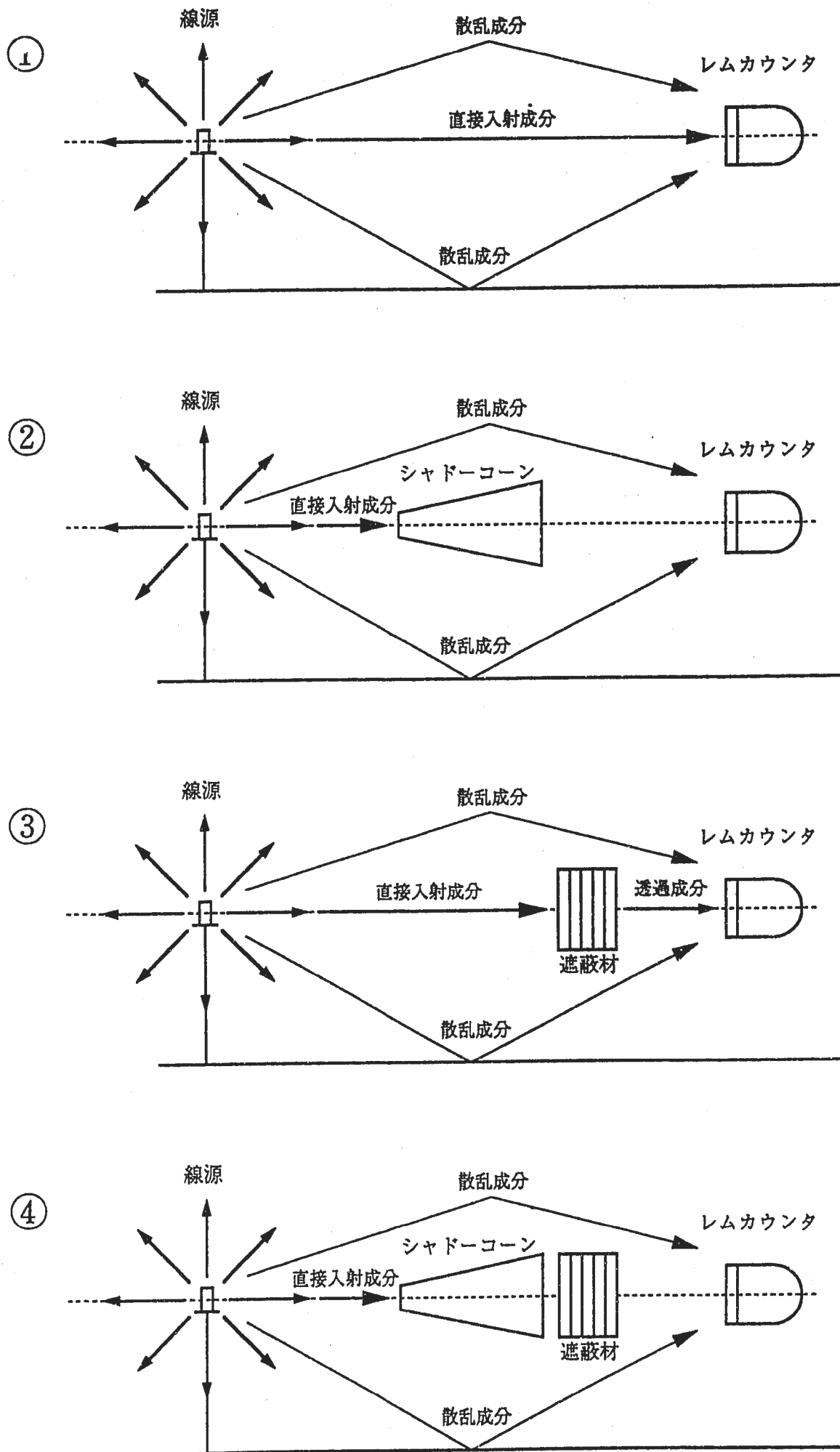


図7 遮蔽遮蔽実験系

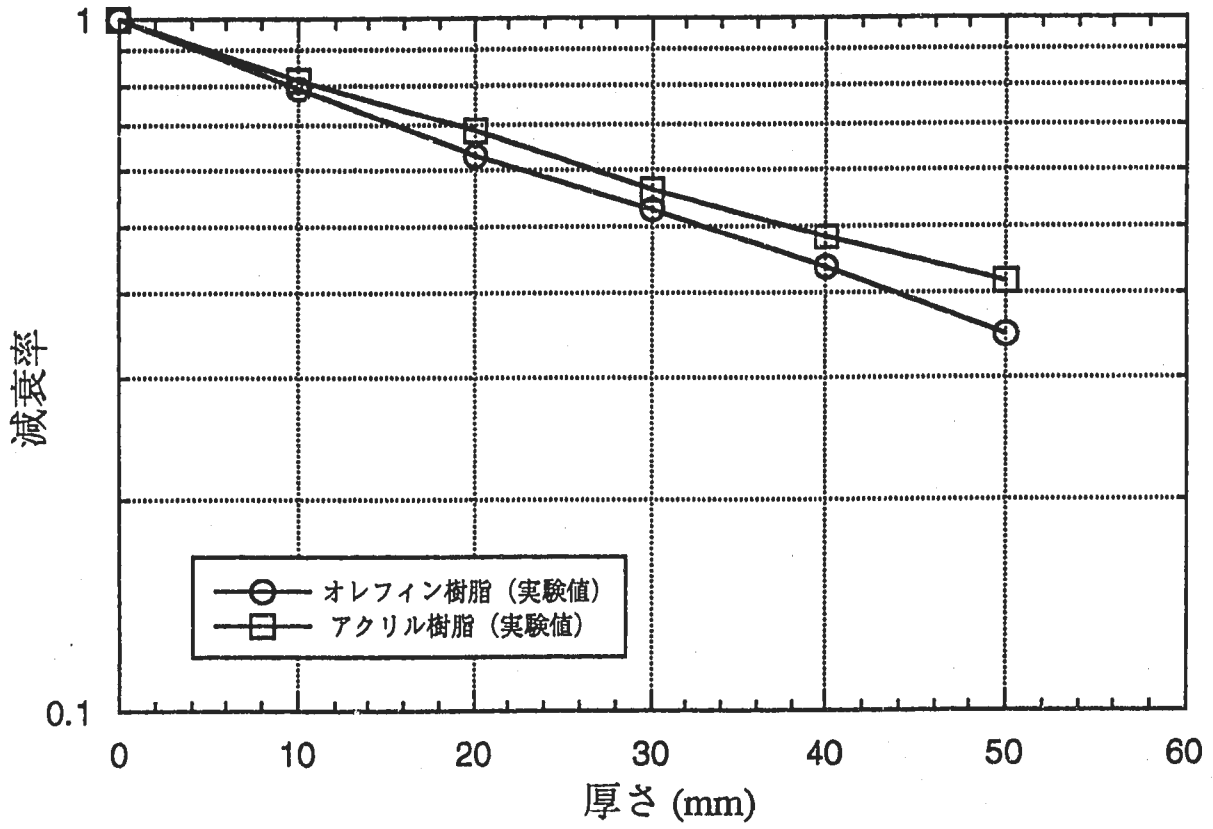


図8 オレフィン樹脂板の減衰率

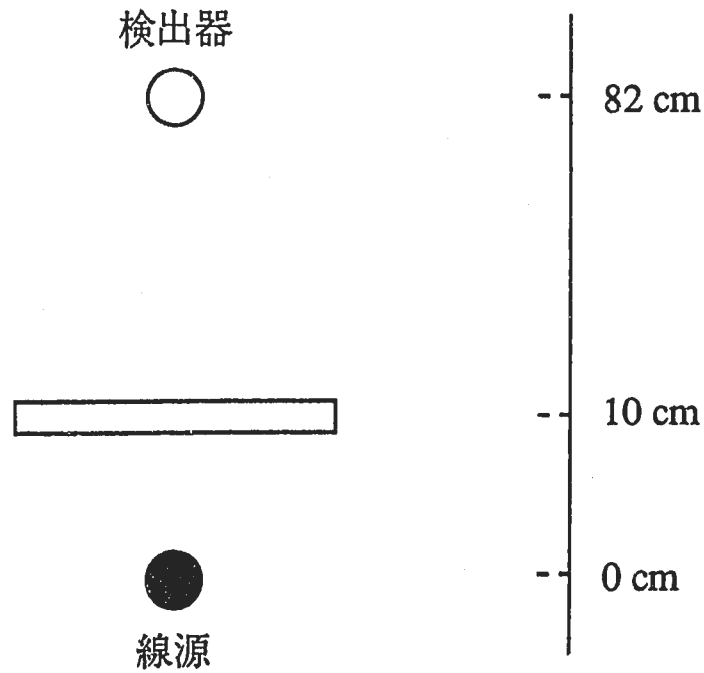


図9 3次元計算モデル

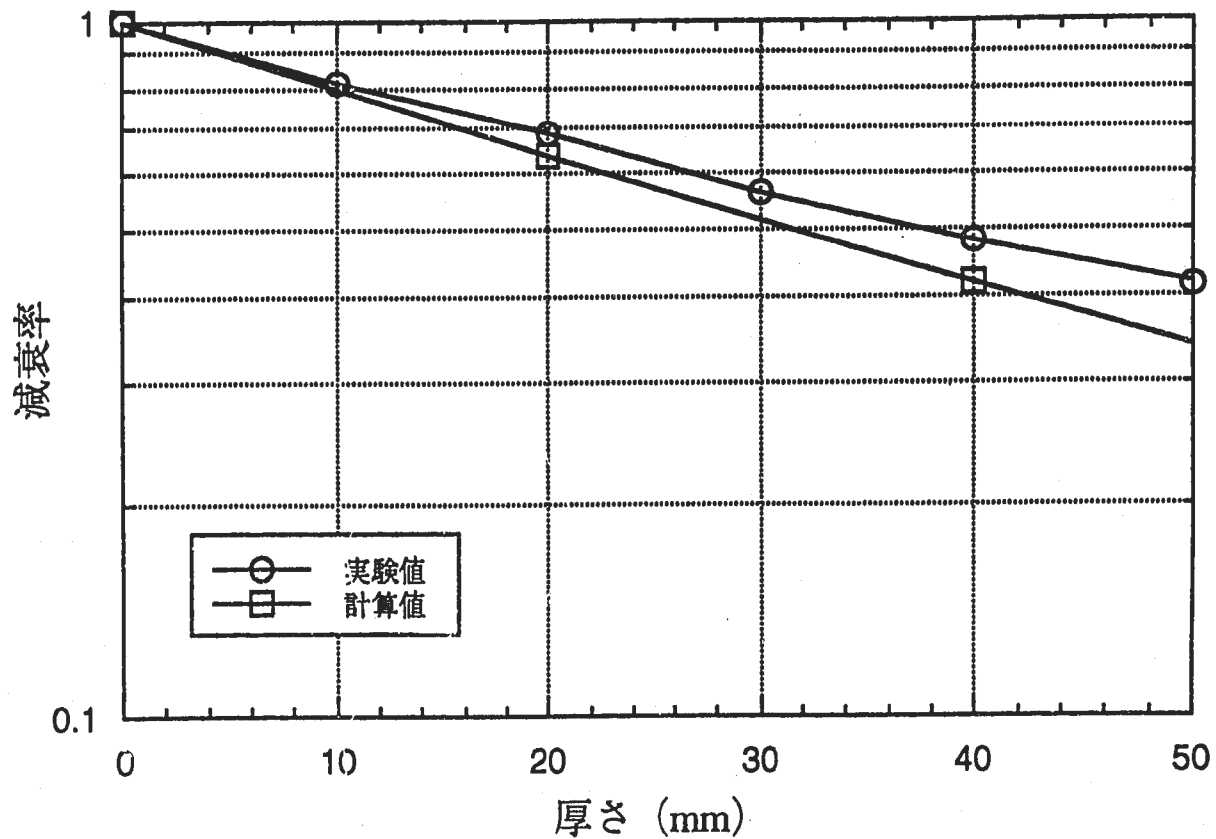


図10 アクリル樹脂板の減衰率の実験および計算結果の比較

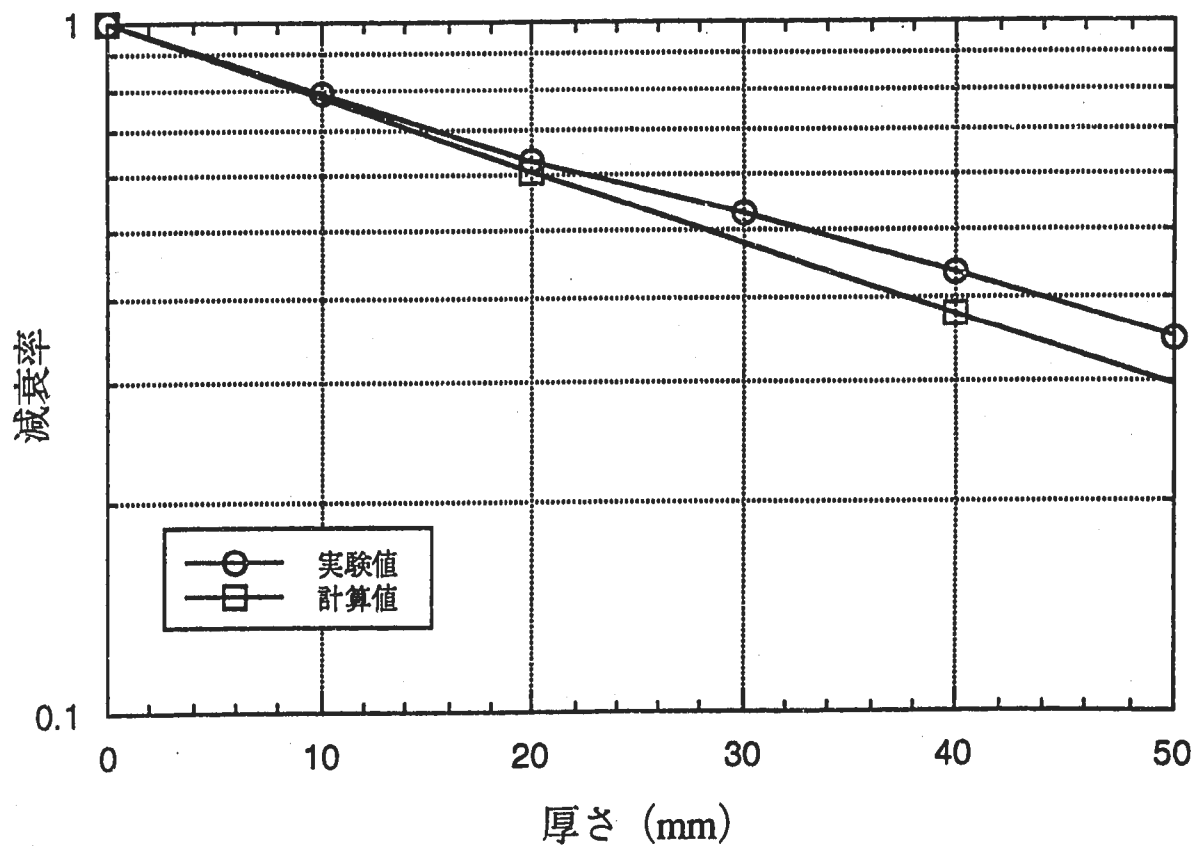


図11 オレフィン樹脂板の減衰率の実験および計算結果の比較



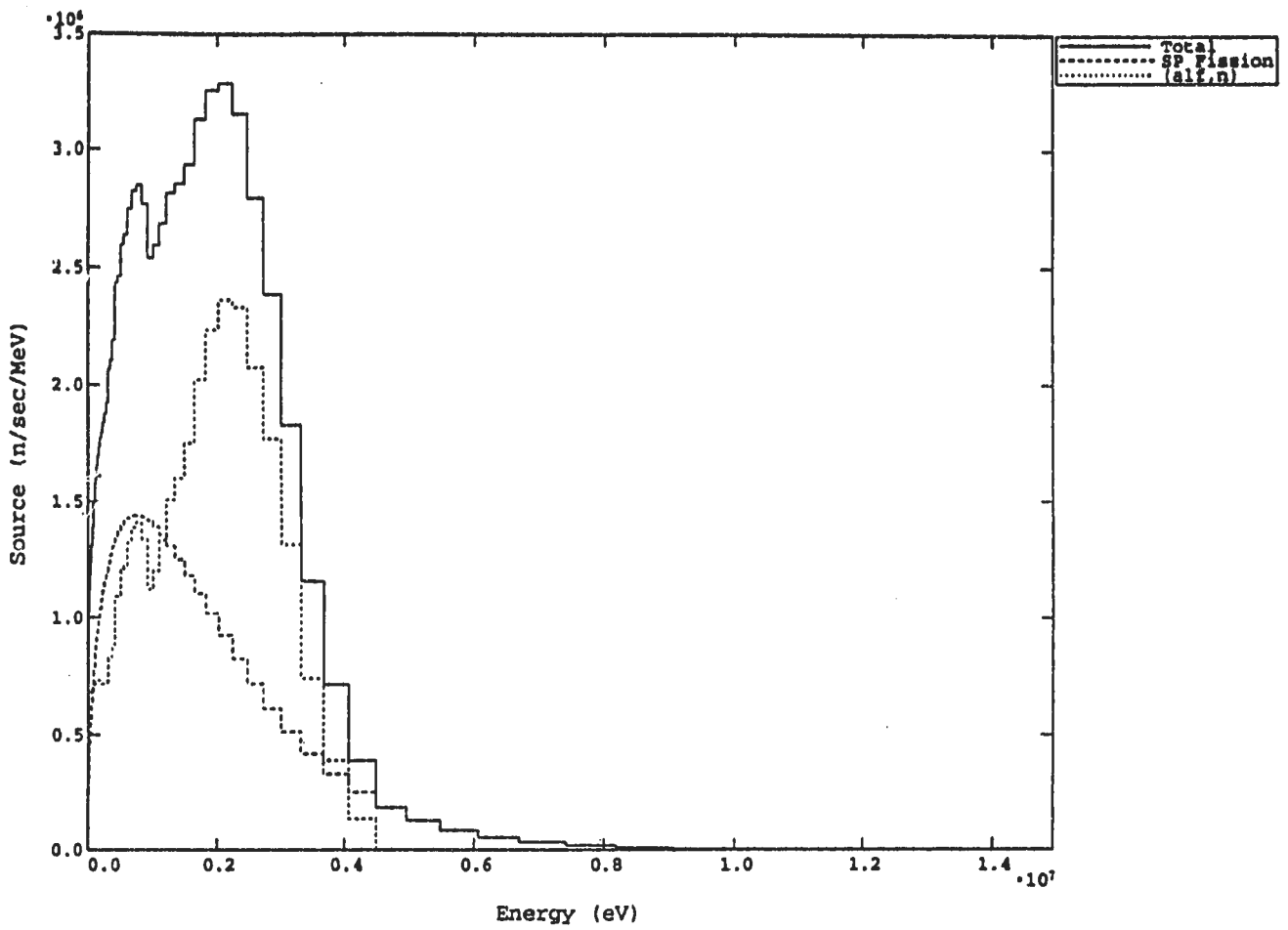


図12 海外PuO<sub>2</sub>燃料から放出される中性子のエネルギースペクトル

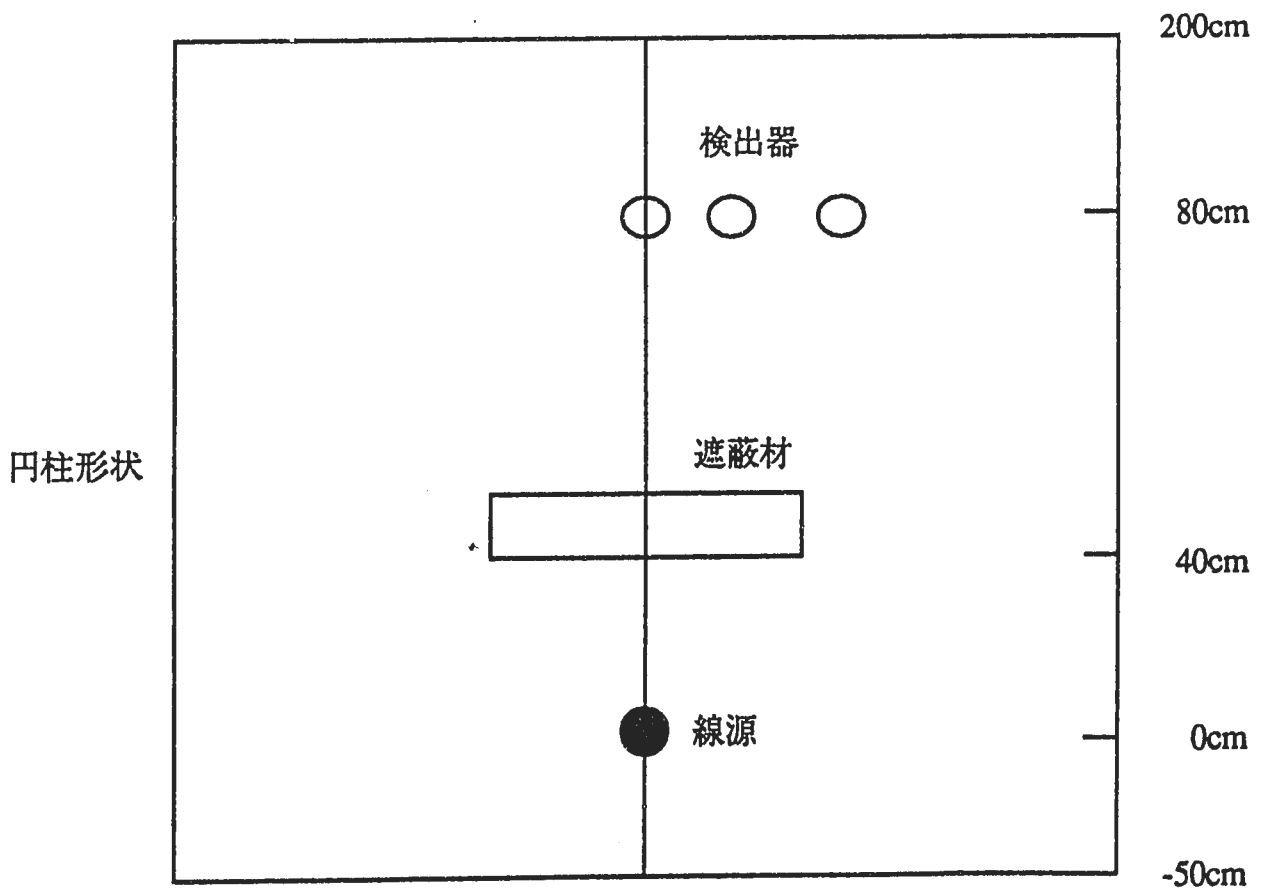


図13 3次元計算モデル

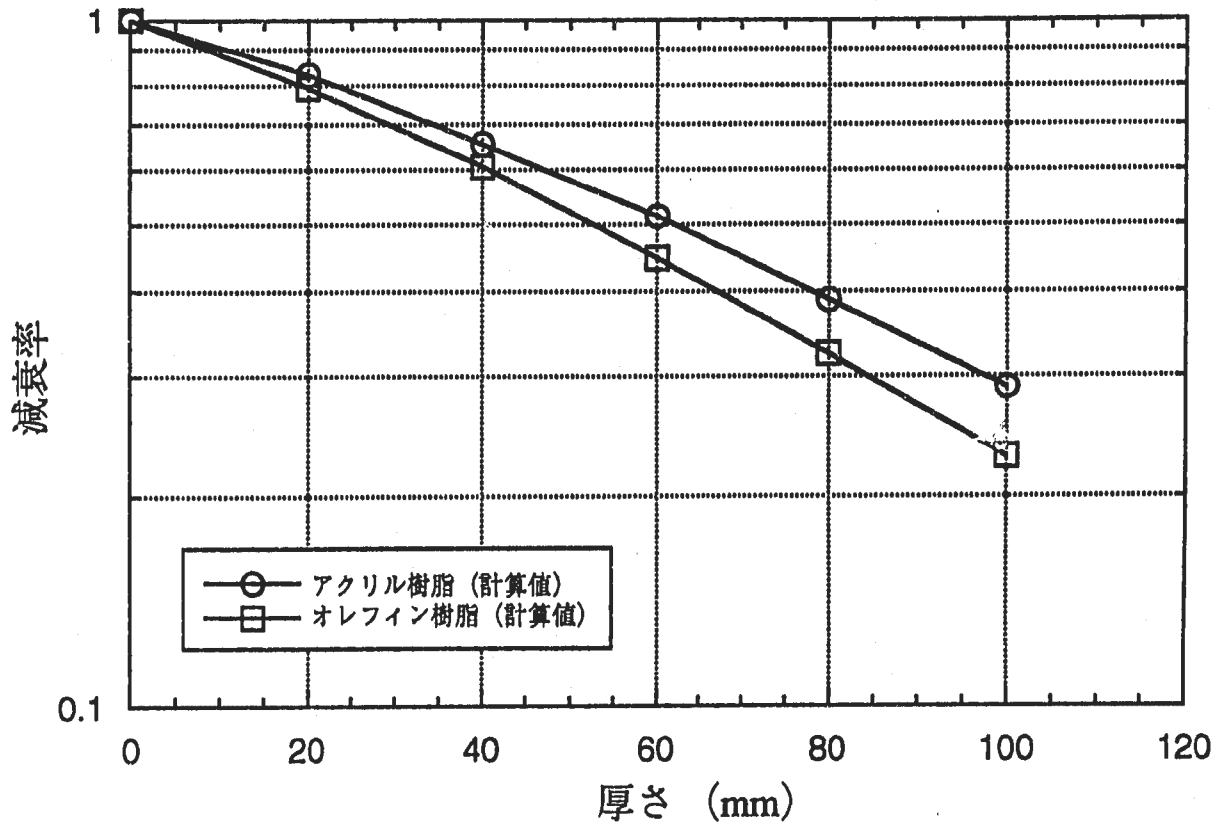


図14 現行MOX燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能

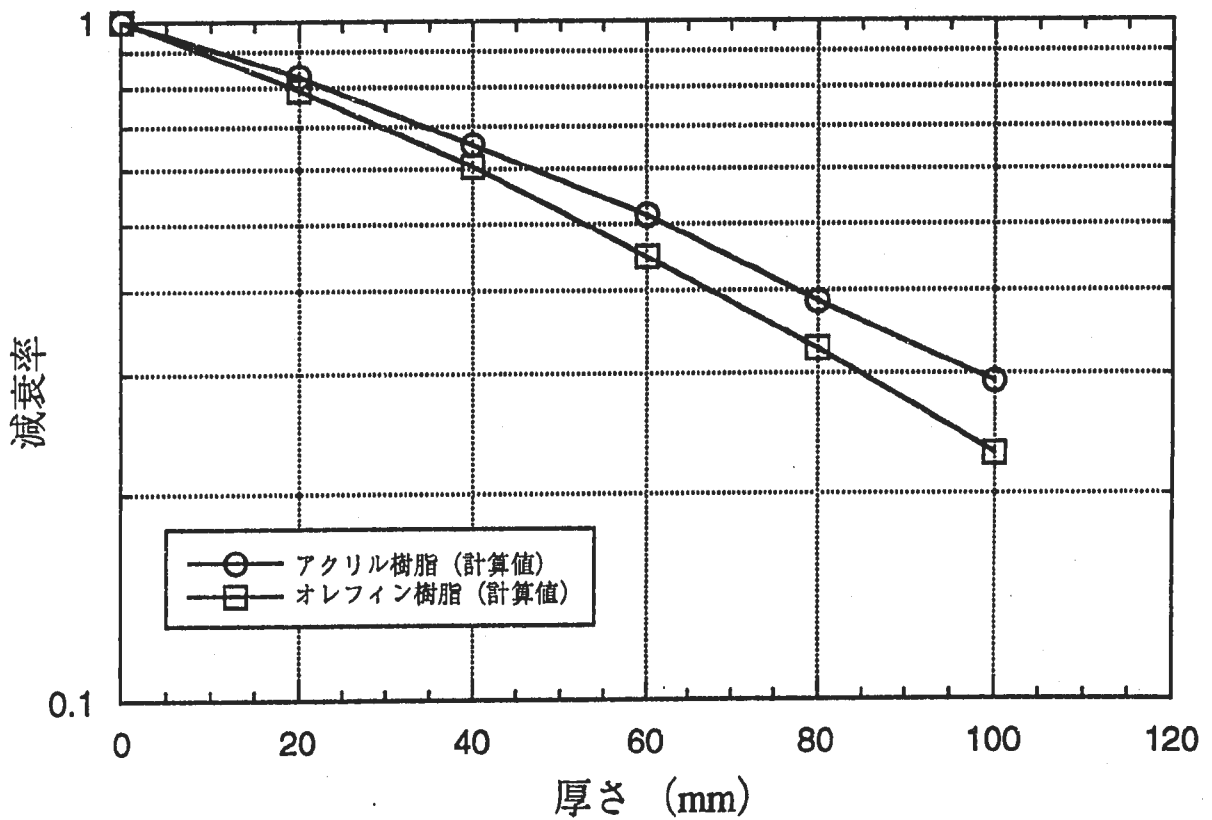


図15 高次化MOX燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能

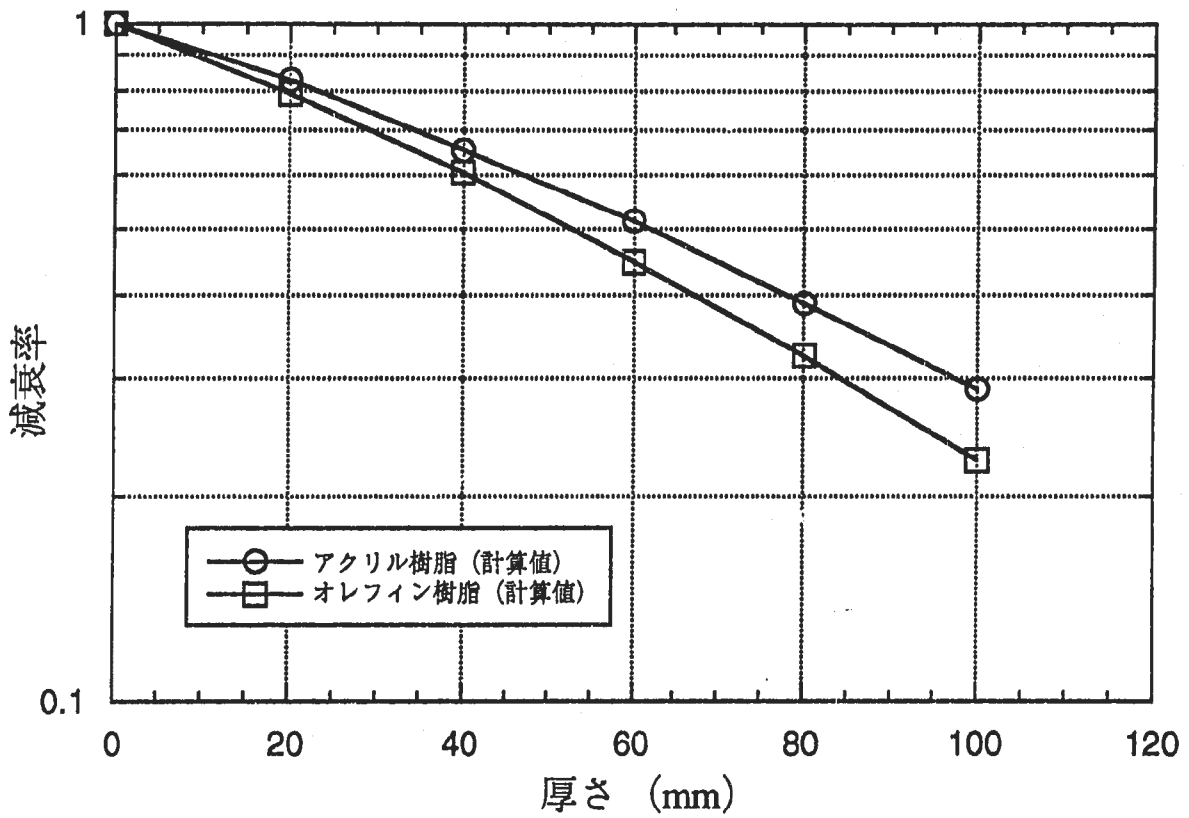


図16 海外PuO<sub>2</sub>燃料を線源にした場合のオレフィン樹脂板の遮蔽性能

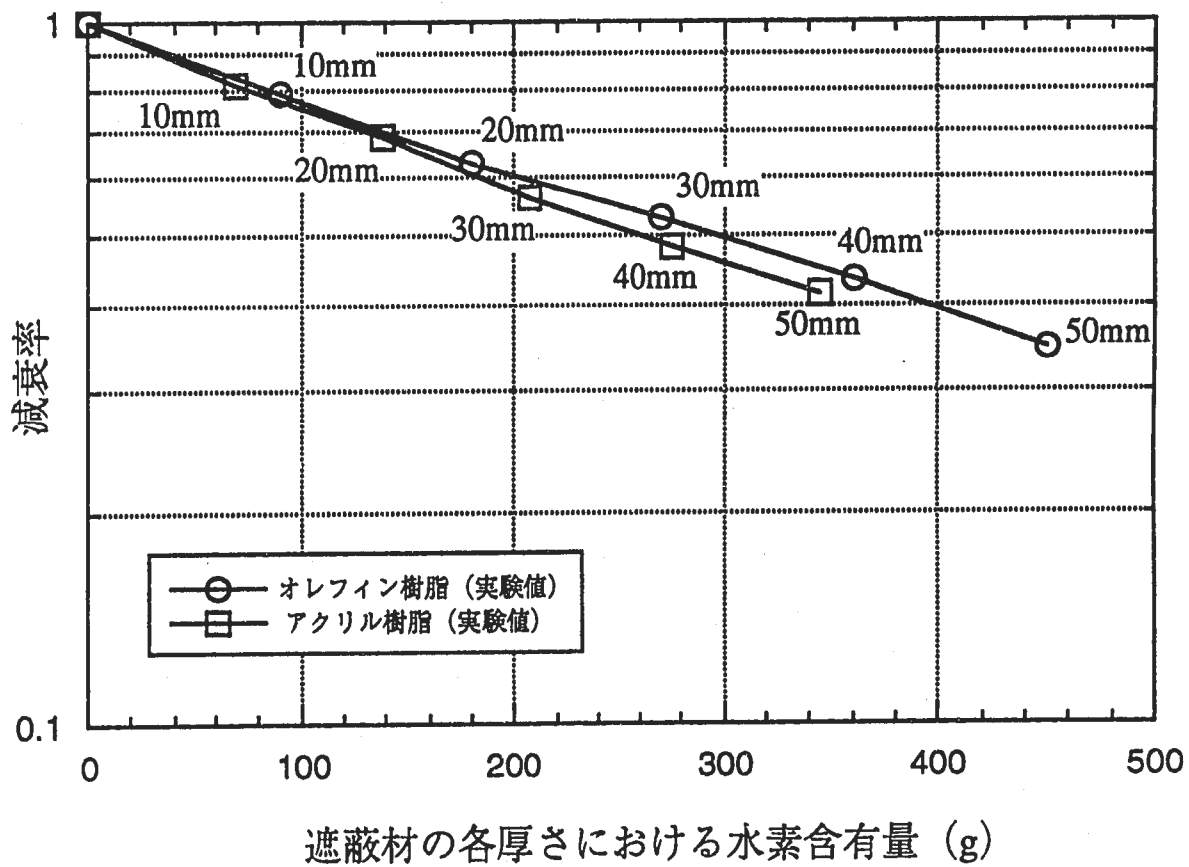


図17 水素含有量と減衰率の関係

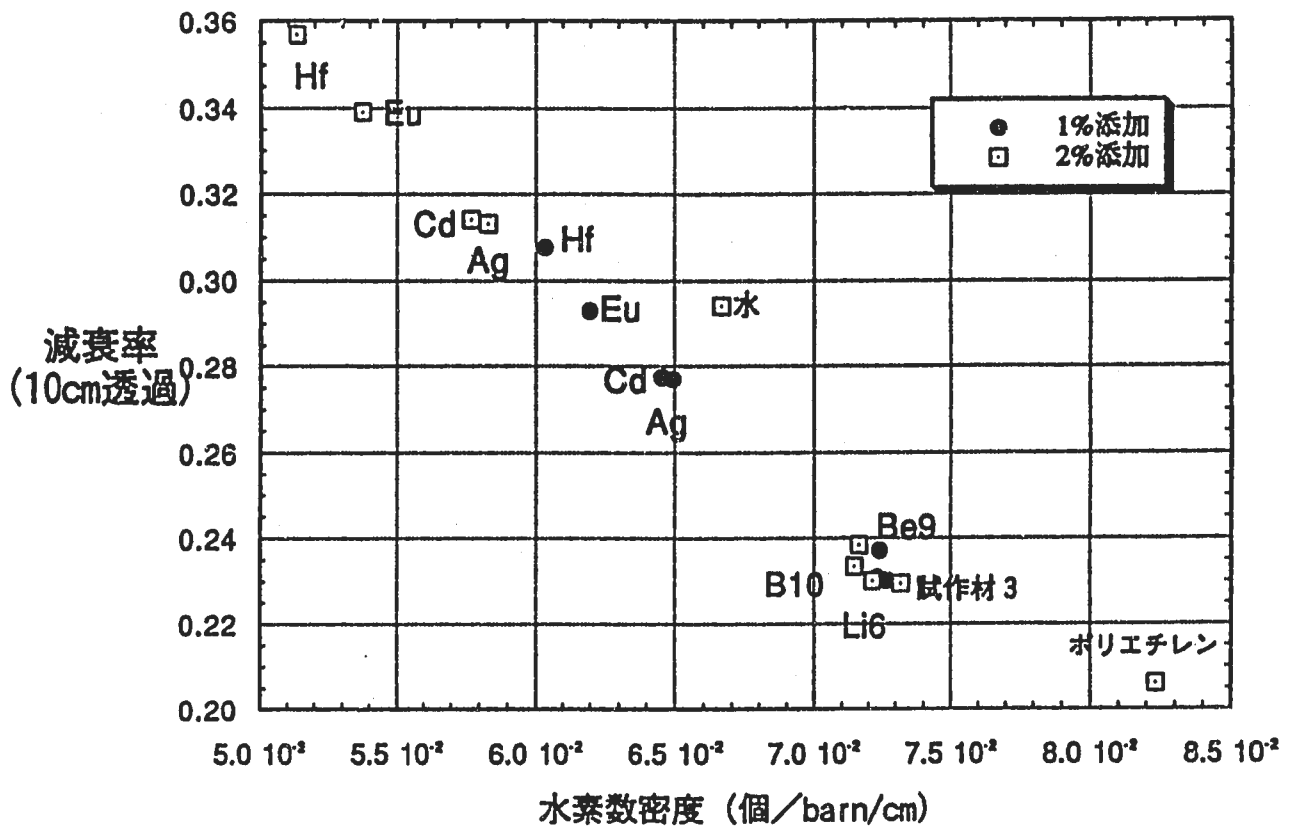


図18 中性子吸収物質を添加した場合の水素密度と減衰率の関係