

ZNF430 90-003

PNC ~~430-90-003~~

内部資料

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 20 [技術情報室]

高燃焼度燃料再処理の検討(8)

— シャヘイスペクトル —

1990年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



高 燃 焼 度 燃 料 再 処 理 の 検 討 (8)

— し ゃ へ い ス ペ ク ト ル —

須藤俊幸* 古川博章*

要 旨

再処理施設で取り扱う核種は多数に上るため、しゃへい設計及び評価に当たっては、従来代表としていくつかの γ 線エネルギーを考え、これらに対する光子数分布（スペクトル）を考慮することが一般的である。

高燃焼度燃料再処理のしゃへい安全を検討するに当たっては、基準燃料が現行の基準燃料よりも燃焼度、冷却期間が異なること、また使用しているインベントリ計算コードが違っていることから新たに検討することとした。

検討では、スペクトルの群数等作成方法の依存性を調べつつ、工程間の核種組成の変化の影響を簡単なモデル形状にたいし、しゃへい計算コードQADを用いて評価し、その結果より全工程に共通のモデルスペクトルを作成した。また、スカイシャインの場合についても、QAD-G33の組み合わせにより調べてみた。

以上の検討より、本報告で作成したモデルスペクトルと単位ウラン重量当たりの放射能を用いることによって、高燃焼度燃料再処理におけるしゃへい評価では、保守側の評価で、しかも過大評価とならない結果を与えることが可能であることがわかった。

* 再処理工場 処理部 化学処理第1課

目 次

1. 序	1
2. しゃへいスペクトルの作成	2
2.1 光子数のエネルギー分布	2
2.2 スペクトル作成上の考慮すべき点	7
2.3 スペクトルの作成	8
3. スペクトル作成方法の影響	10
3.1 計算条件	10
3.2 計算結果	10
3.3 考 察	11
4. 適用工程範囲の検討	20
4.1 計算条件	20
4.2 計算結果	20
4.3 考 察	21
5. スカイシャイン計算への影響	30
5.1 計算条件	30
5.2 計算結果	30
5.3 考 察	31
6. 単位ウラン重量あたりの光子数	34
7. まとめ	37
別添 QAD-PCS コードとG33-PCS コード について	38

1. 序

再処理施設のしゃへい設計（ガンマ線）及びしゃへい安全評価では取り扱う核種が多数に上るため、代表としていくつかのガンマ線エネルギーを考え、これらに対する光子数分布を考えることが一般的である。東海再処理施設においても基準燃料（燃焼度28GWD/T, 比出力35MW/T, 初期濃縮度4W/O, 冷却期間180日）に対し、インベントリ計算コードのBlomeke-Toddで計算される核種より、5群のスペクトルを作成し、しゃへい安全評価を行っている。

高燃焼度燃料再処理のしゃへい安全を検討するにあたって、我々の選定した基準燃料（燃焼度55GWD/T, 比出力25MW/T, 初期濃縮度4W/O, 冷却期間3年）は現行の基準燃料と同じ軽水炉燃料であるものの、燃焼度や冷却期間が異なるし、また使用しているインベントリ計算コードをORIGEN2としたため、新たにスペクトルを作成する必要があると考えられる。

スペクトルの作成においてその群数をいくつにするか、代表エネルギー（インデックスエネルギー）をどうとるか、あるいは何種類のスペクトルを作成するかなどといったことは、設計サイドの任意ではあるが、これらの因子の計算結果に対する影響、即ち感度解析をしておくことは、しゃへい評価上の誤差を見積もる上での重要な要素である。しゃへい評価上の誤差としては、1回散乱点減衰核法のごとき計算理論に起因するものと、ビルドアップ係数およびその補間式やスペクトルといったライブラリに起因するもののような計算コードによるものと、評価対象のモデル化に起因する計算方法によるものとに分かれよう。

我々はここでは計算コードとしてしゃへい設計及び安全評価に広く利用されているQAD（QAD-P5Aをパソコン用に変更したQAD-PCS）を用い、単純な計算モデルで、スペクトルの依存性すなわちスペクトルに対する安全係数をどの程度見込めばよいかについて検討する。

本報告の構成は次のとおりである。第2章では、まず現行の基準燃料と高燃焼度燃料（55GWD/T, 3年冷却）の光子数のエネルギー分布の比較検討を行った上で、スペクトル作成上の考慮すべき点を整理し、いくつかの代表的な参考用スペクトルを作成する。第3章では得られたいくつかのスペクトルを使って簡単な幾何形状に対し、QADコードによってこれらのスペクトル作成方法の影響を調べる。第4章では何種類のスペクトルを作成すべきか、すなわち再処理工程をいく種類かに分けてそれぞれに対して、適用するスペクトルを変えるといた立場もあるため、工程ごとのインベントリの相違に対し、再処理施設入量インベントリについて作成したスペクトルを適用した場合について比較検討する。第5章ではその特殊な場合としてスカイラインへの影響について調べる。最後に第6章では、従来のしゃへい評価において、単位ウラン重量あたりの γ 放射能に対応する数値を与える。

2. シャヘイスペクトルの作成

2.1 光子数のエネルギー分布

シャヘイスペクトルを作成する前に、光子発生数のエネルギー分布についてORIGEN 2 コードを用いて調べる。ORIGEN 2 コードでは、光子としてFP核種からの光子の他に、 β 線の制動放射による2次光子を考慮することができる。制動放射による光子発生量は β 線が制動される媒質に強く依存し、ORIGEN 2 コードでは制動放射を考慮しない場合と、 UO_2 及び H_2O に対する制動放射を考慮した光子ライブラリーがそれぞれ用意されている。

表2.1.1及び図2.1.1に高燃焼度燃料にたいしてそれぞれのライブラリーを使用した場合の光子発生数のエネルギー分布を示す。これより、制動放射を考慮すると0.5MeV以下の光子発生数が増加し、媒質を重元素を含む UO_2 とした場合が特に大きくなることが分かる。全光子数の比較では、 UO_2 媒質では制動放射を考慮しない場合に比べ約2倍となっている。

再処理工場におけるシャヘイ評価の場合、受入・貯蔵工程やウラン貯蔵では線源評価用の媒質として UO_2 を、その他の工程では H_2O を考えるのが適当であろうが、以降では安全側に

UO_2 媒質における光子発生数を用いるものとする。(後に分かるように、制動放射による低エネルギー光子は、急激に減衰してしまうため、シャヘイ評価結果に与える影響はほとんど無い。)

光子数のエネルギー分布の燃焼度、冷却期間の依存性をみるため、ORIGEN 2 コードを用いて、従来の基準燃料と高燃焼度燃料について光子発生数を計算した結果を表2.1.2に、図2.1.2には光子のエネルギー分布を示す。これより、燃焼度が約2倍に増大すると、平均光子エネルギーがやや増大する、すなわちスペクトルがややハードな側にシフトすることがわかる。

次に、表2.1.3に高燃焼度燃料の場合の冷却期間と平均光子エネルギーとの関係を求めた。これによると、炉取出し後約1年程度までは下がって行くが、その後冷却期間とともに徐々に上昇していく。図2.1.2及び図2.1.3に示すように、冷却期間が長くなるにつれて、長半減期核種であるCs-137 (Ba-137m)の全FP放射能に占める割合が急速に増大し、Cs-137 (Ba-137m)の放出する662keVの光子エネルギーのため平均エネルギーが上昇するものと考えられる。表には1ケースのみ記載したが冷却期間についての定性的な傾向は共通している。

線量計算結果に与える影響を平均エネルギーで定性的に考えることが出来るか、それともスペクトルの形も考慮しなければならないかは、シャヘイ厚にも関係し、後でみるように再処理施設のシャヘイ厚程度の領域では高エネルギー側の成分比が重要な因子である。

表2.1.1 媒質による光子スペクトルの比較 (55 GWD/T)

(photons/sec/MTU)

光子エネルギー (MeV)	媒質		
	無	UO ₂	H ₂ O
1.50E-02	1.067E+14	7.988E+15	8.063E+14
2.50E-02	2.166E+14	1.882E+15	3.676E+14
3.75E-02	8.937E+14	1.984E+15	9.957E+14
5.75E-02	5.246E+13	1.631E+15	1.998E+14
8.50E-02	1.592E+14	1.125E+15	2.513E+14
1.25E-01	5.692E+14	1.209E+15	6.317E+14
2.25E-01	6.783E+13	9.576E+14	1.585E+14
3.75E-01	1.308E+14	5.509E+14	1.765E+14
5.75E-01	1.200E+16	1.224E+16	1.203E+16
8.50E-01	3.974E+15	4.063E+15	3.985E+15
1.25E+00	6.362E+14	6.774E+14	6.421E+14
1.75E+00	1.895E+13	2.852E+13	2.069E+13
2.25E+00	2.010E+13	2.143E+13	2.038E+13
2.75E+00	4.245E+11	6.557E+11	4.851E+11
3.50E+00	6.344E+10	8.370E+10	7.059E+10
5.00E+00	9.370E-05	9.370E-05	9.370E-05
7.00E+00	6.080E-06	6.080E-06	6.080E-06
1.10E+01	3.845E-07	3.845E-07	3.845E-07
total	1.8850E+16	3.4370E+16	2.0280E+16

図2.1.1 媒質によるγ線スペクトルの比較 (55 GWD/T)

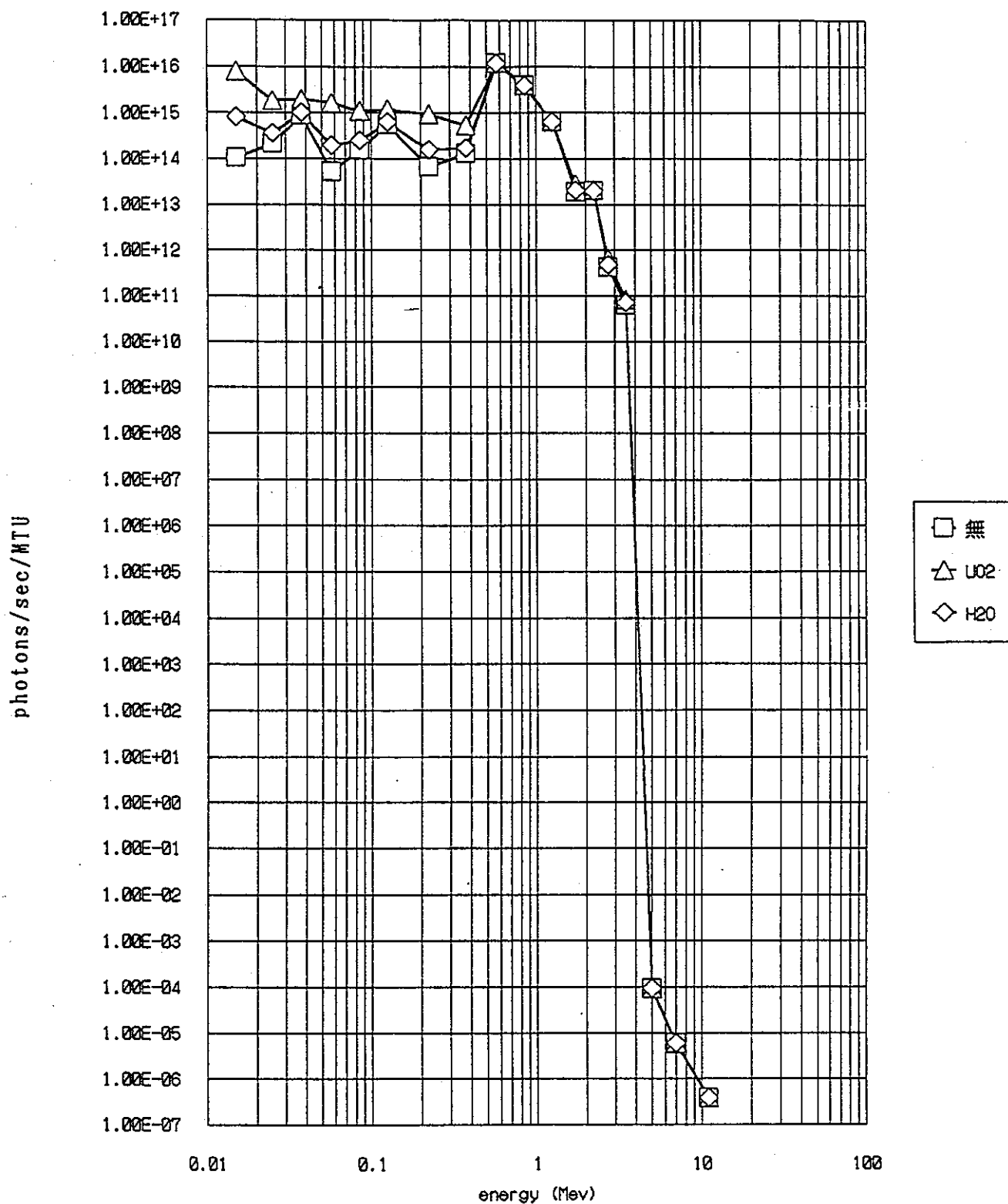


表2.1.2 光子スペクトル (光子数)

エネルギー (MeV)	(photons/sec/MTU)		
	28GWD/T 35MW/T 4.0W/O 180日冷却	55GWD/T 25MW/T 4.0W/O 0.5年冷却	55GWD/T 25MW/T 4.0W/O 3年冷却
1.50E-02	3.778E+16	3.668E+16	7.998E+15
2.50E-02	8.391E+15	8.368E+15	1.882E+15
3.75E-02	8.918E+15	8.343E+15	1.984E+15
5.75E-02	7.736E+15	7.647E+15	1.631E+15
8.50E-02	5.474E+15	5.338E+15	1.125E+15
1.25E-01	7.348E+15	6.411E+15	1.209E+15
2.25E-01	4.664E+15	4.680E+15	9.576E+14
3.75E-01	2.422E+15	2.529E+15	5.509E+14
5.75E-01	1.426E+16	2.690E+16	1.224E+16
8.50E-01	2.637E+16	2.356E+16	4.063E+15
1.25E+00	8.588E+14	1.647E+15	6.774E+14
1.75E+00	9.227E+13	1.403E+14	2.852E+13
2.25E+00	2.343E+14	1.834E+14	2.143E+13
2.75E+00	2.543E+12	3.795E+12	6.557E+11
3.50E+00	2.900E+11	4.677E+11	8.370E+10
5.00E+00	4.877E-05	9.135E-05	9.370E-05
7.00E+00	3.165E-06	5.927E-06	6.080E-06
1.10E+01	2.001E-07	3.748E-07	3.845E-07
total	1.246E+17	1.324E+17	3.437E+16
平均エネルギー (MeV/photon)	0.299	0.325	0.362

図2.1.2 光子エネルギー分布

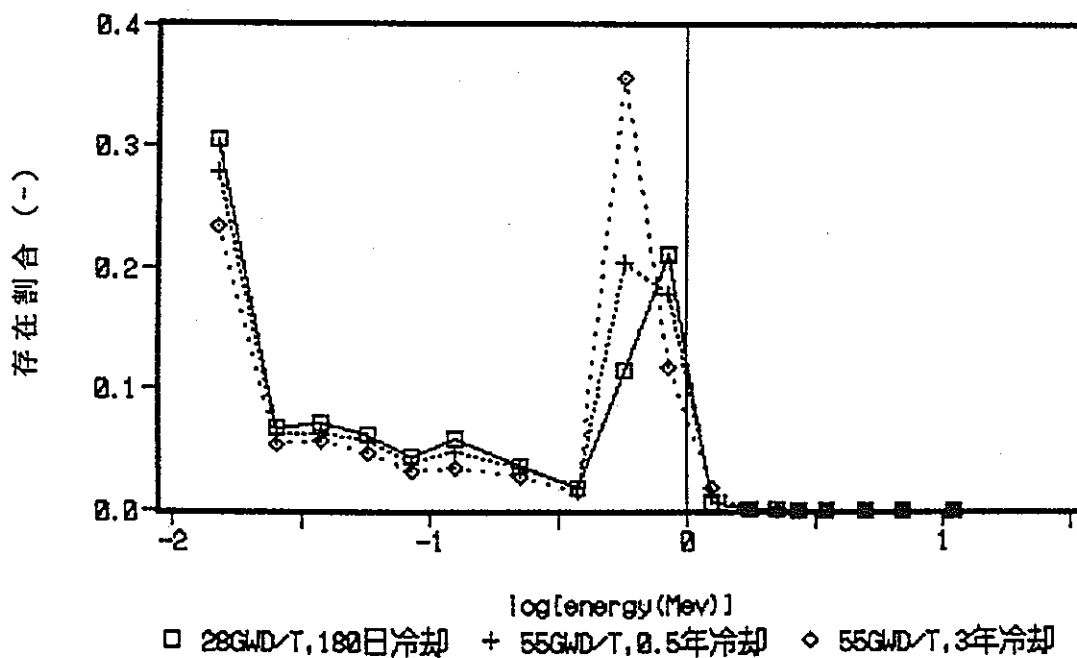


表 2.1.3 冷却期間による平均光子エネルギーの変化
(55 GWD/T, 25MW/T, 4.0 W/O)

冷却期間 [年]	平均エネルギー (MeV/photon)
0.00	0.403
0.50	0.324
1.00	0.301
1.50	0.312
2.00	0.331
2.50	0.348
3.00	0.362
3.50	0.372
4.00	0.379
4.50	0.383
5.00	0.383

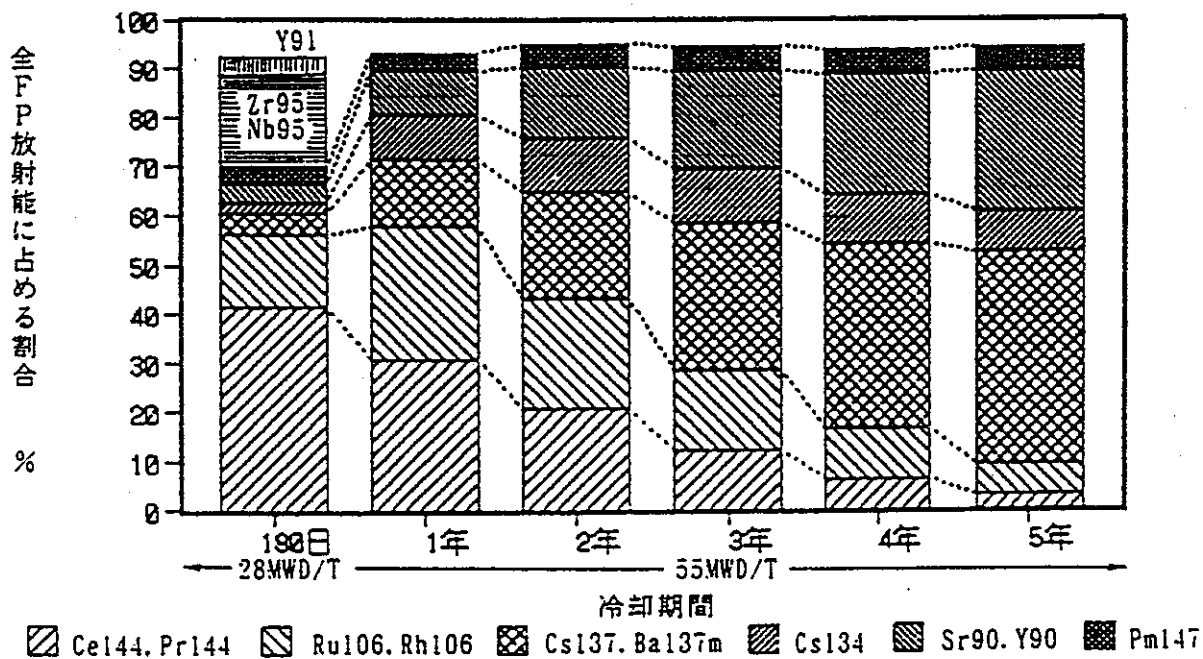


図 2.1.3 冷却期間による主要FP放射能に対する割合の変化

高燃焼度燃料再処理の検討(1) -インベントリ計算(1)-
 PNC 18430 88-009, (1988) より引用

2.2 スペクトル作成上の考慮すべき点

高燃焼度燃料再処理のしゃへい計算用スペクトルの作成にあたっては、スペクトル作成上考慮すべき点をまず摘出し、次にこれらの要因の影響を見るための参考用スペクトルを作成した後、簡単なモデル系で計算をして、その影響の程度を確認し、最終的にモデルスペクトルを決定するという手順をとる。

以下にスペクトル作成上考慮すべき点を列挙する。

(1) 群数をいくつとするか？

現在ではしゃへい計算は計算機で行うため少々群数が多くても、入力の手間がやや増える程度であるが、ORIGEN 2 のアウトプットは1000近くの核種があり、これらの光子エネルギーをすべて入力することは現実的ではない。そのためエネルギーについて縮約し、10前後のエネルギー群とすることが妥当である。このとき縮約したエネルギー群の代表性が問題となる。即ち、全ての核種をあらわに考慮したしゃへい計算結果と、スペクトルを用いたしゃへい計算結果を比較して、その差があまりないことを確認することが必要である。もっともこの作業も手間の非常にかかるものであるため、いくつかのスペクトルを用意してその群数の影響を調べた上、実際のしゃへい計算上手間のかからない程度の群数を決めることとする。

(2) 低エネルギー領域をカットしてよいか？

再処理施設においては、放射線源は通常しゃへい体に取り囲まれているため、低エネルギー光子は取り囲まれたしゃへい体を透過することができず、しゃへい評価上はこれら低エネルギー光子を無視してもなんら影響はないと言われている。

低エネルギー領域をカットした場合、エネルギースペクトルはハードな側にシフトするが、同じ放射エネルギーをもつ線源にたいし、しゃへい評価は過大評価をしている可能性がある。

どの程度の低エネルギー領域をカットしてよいかという問題は、實際上、入力の手間だけの問題である。むしろ全放射エネルギーの主要な寄与をなす核種 (^{144}Ce - ^{144}Pr , ^{106}Ru - ^{106}Rh , ^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{134}Cs , ^{147}Pm) の放出光子の平均エネルギーと、スペクトルより算出される平均エネルギーと一致するようにすること、あるいは再処理施設でよく見られるしゃへい厚に対し、評価結果の一致が良いようにすること等の方が、実体に則していると考えられる。このとき、低エネルギー領域をカットした場合とそうでない場合の計算結果を比較してその開きを見ておく必要がある。

2.3 スペクトルの作成

前節で述べたような考慮をもとに、その影響を調べるための参考用スペクトルとして次の3つのタイプを作成する。

タイプA) できるだけ群数をたくさんとったもの

タイプB) ある程度縮約したもの

タイプC) 低エネルギー領域をカットしたもの

以上3つのスペクトルを表2.3.1～2.3.3に示す。タイプAのスペクトルの光子エネルギーは、ORIGEN2のアウトプットとしてのインデックスエネルギーをそのまま採用し、存在比の少ない高エネルギー側をカットした。インデックスエネルギーの採用の仕方は、ORIGEN2のアウトプットが18群にまとめられているのをそのまま選択した。インデックスエネルギーをどのように取るかという問題は、計算結果をつねに保守側となっていることがよいとするなどの考え方に基づく。この点については後でさらに検討する。またタイプBはタイプAのスペクトルを表2.3.1の太線を境界として縮約したものである。ここでの縮約はタイプAで採用した各エネルギーを単に算術平均したものである。対数平均をとるべきであるとの論もありうるが、タイプAの各エネルギーの任意性からみて、とりたてて対数平均をする必要はないと考える。タイプCはタイプAの内、低エネルギー及び存在量の少ない高エネルギー側をカットして存在比を割り出したものである。なお、高エネルギー側のカットについては、後で言及する。

表2.3.1 タイプAのスペクトル

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
1.50E-02	23.27
2.50E-02	5.48
3.75E-02	5.77
5.75E-02	4.75
8.50E-02	3.27
1.25E-01	3.52
2.25E-01	2.79
3.75E-01	1.60
5.75E-01	35.61
8.50E-01	11.82
1.25E+00	1.97
1.75E+00	0.08
2.25E+00	0.06

表2.3.2 タイプBのスペクトル

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
2.58E-02	34.52
8.92E-02	11.54
3.00E-01	4.39
5.75E-01	35.61
8.50E-01	11.82
1.75E+00	2.12

表2.3.3 タイプCのスペクトル

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
2.25E-01	5.18
3.75E-01	2.98
5.75E-01	66.20
8.50E-01	21.98
1.25E+00	3.66

3. スペクトル作成方法の影響

3.1 計算条件

- (1) モデル形状； 図3.1.1、3.1.2に示すように、点線源及び長さ5mの線線源とし、検出点との間のしゃへい材を密度2.3g/ccの普通コンクリートとした。なお、検出点は、線源より20, 50, 70, 100, 150 cm (コンクリート厚) の地点で評価した。
- (2) 線源強度； 点線源に対しては、1Ci, 線線源に対しては、2 γ Ci/cmとした。
- (3) スペクトル； 高燃焼度燃料に対するスペクトルをタイプA, B, C用意した。また、参考のため現行基準燃料に対する同様のスペクトルとしてタイプD (表3.1.1) 及び現行のBlomeke-Toddに基づく5群スペクトル (表3.1.2) を用いる。それぞれのスペクトルの特徴を以下に述べる。
 - タイプA) できるだけ群数をたくさんとったもの。但し、高エネルギー側をカットした。
 - タイプB) タイプAを縮約したもの。
 - タイプC) タイプAの低エネルギー側をカットしたのち縮約したもの。
 - タイプD) 現行基準燃料に対応してタイプAと同様に作成したもの。
 - タイプE) Blomeke-Toddに基づく現行のスペクトル。
- (4) ビルドアップ係数； 検討対象のスペクトルに低エネルギー領域があるため、Nucl. Sci. Eng. 51(1975) のコンクリートのテーブルデータを補間して用いた。なお、従来使用している Eng. Comp. Radiation Shielding (1968) のデータをCAPO式により補間した場合についても、比較計算を行う。
- (5) 線量率変換係数； ANSI/ANS-6.1.1-1977 によった。

3.2 計算結果

タイプA～Eのスペクトルについて、点線源に対する結果を表3.2.1に、タイプA～Cのスペクトルについて、線線源に対する結果を表3.2.2に示す。

- (1) 図3.2.1にタイプA～Cの結果を示す。横軸には検出点 [cm] を、縦軸には線量率の常用対数値を示す。図より以下の事項がわかる。
 - ① しゃへい厚が大きくなるほど3つのスペクトルの計算結果の開きが大きくなる。
 - ② この開きは大きいところで、一桁程度である。
 - ③ 3つのタイプの計算結果の大小関係は一定していない。

- ④ シャへい厚が厚い部分ではスペクトルの高エネルギー側の寄与が大きく、各群ごと寄与をみると、検出点 150cmでは 1.25MeV以上の高エネルギー光子の寄与が最も大きい。(表3.2.3参照)
- (2) 図3.2.2に燃焼度の違いによるスペクトルの変化が結果にどう影響するかを示す。タイプDはタイプAと同じくORIGEN2のアウトプットから同様の手順で作成したスペクトルである。図から燃焼度によるスペクトルの変化の影響はほとんどみられず、わずかにシャへい厚の大きい部分で 28GWD/Tの燃焼度のスペクトルの計算結果のほうが大きめに出ている。
- (3) 図3.2.3に燃焼度 28GWD/Tに対する従来のBlomeke-Toddの計算結果から得られたスペクトル(タイプE)とORIGEN2の計算結果から求めたスペクトル(タイプD)の比較を示す。タイプEの計算結果は全シャへい厚にわたって大きめに結果がでている。開きはfactor 2程度である。
- (4) これまでの結果はすべて点線源であった。図3.2.4に線線源に対する計算結果を示す。傾向は点線源の場合と同様であるが、開きは検出点150cmで一桁程度になる。
- (5) ビルドアップ係数は従来CAPOによる式が用いられてきたが、CAPO式の適用範囲の最低エネルギーが、0.5MeVと高い為、今回 Nucl. Sci. Engi. Vol.51(1975)のテーブル値より log-log 内挿または外挿して求めた。図3.2.5及び図3.2.6にタイプC、Eの場合について示す。結果はビルドアップ係数の違いはほとんど見られない。シャへい厚の薄い側で、CAPO式の結果がやや大きめに出ている。

3.3 考 察

- (1) スペクトルタイプA、B、Cの各エネルギー群ごとの寄与を見ると、検出点 150cmでは、それぞれのスペクトルの最大エネルギーの光子の寄与が最も大きい(表3.2.3参照)。図3.2.1ではこの地点での線量率の大小関係は $B > A > C$ であるが、タイプBでタイプAの1.25~2.25MeVの範囲を縮約するときに、Aでは1.25MeVが主であるのに対しBではこれを1.75MeVで代表させたこと、タイプCでは1.75MeV以上の高エネルギー範囲をカットしていることによる。

従って、再処理施設で通常見られるシャへい厚では、図3.2.1の結果からもわかるように、スペクトルの作成方法によって、一桁の変動があるため、高エネルギー側のスペクトルの作成方法が、重要であると考えられる。

- (2) タイプAのスペクトルでは高エネルギー側をカットしたが、その光子数は、表2.1.2に

示すように2.75MeV以上が桁落ちとなっており、しゃへい計算に影響しないと予想され、実際にQADで計算したところ、この予想どおりであった(表3.2.4参照)。従って、上記(1)の結果とあわせると1~2.5MeV程度の高エネルギー側のスペクトルの作成が、重要と考えられる。

- (3) タイプAスペクトルはORIGEN 2のアウトプットのまま(高エネルギー側はカット)であるから、他のスペクトルよりも真値に近いとの推測も成り立つが、ORIGEN 2のアウトプットの光子エネルギーでも縮約したものであって、真値に近いといっても、非保守側の結果を与えている可能性もある。したがって、しゃへい評価においては、そのerror barを考慮にいれて評価するか、タイプEのように保守側の結果を与えるようにスペクトル、特に高エネルギー側の光子のエネルギーを少し操作するかである。この点については後述する。
- (4) 図3.2.2において、結果が燃焼度によってほとんど変わらないことは、燃焼度によってスペクトルがほとんど変わらないことと対応している。なお、しゃへい厚の大きいところで28GWD/Tの計算結果の方が大きくでていることについては、平均エネルギーを比較すると28GWD/Tの方が、55GWD/Tよりも低いものの、2.2MeVの光子エネルギーを出す ^{144}Ce - ^{144}Pr の存在比が、28GWD/Tの方が多いため(図3.3.1参照)この寄与によるものと考えられる。
- (5) 図3.2.3においてBlomeke-Toddのスペクトル(タイプE)は全体にタイプDスペクトルよりも大きめの結果を与えており、しゃへい安全評価上は保守側の評価を与える、という言い方もできるだろう。
- (6) ビルドアップ係数の違いが、計算結果に現れていないのはしゃへい評価上影響がでてくるのが、0.1ないし0.5MeV以上のエネルギーであるため、低エネルギー側で違いがあるこれらのビルドアップ係数の違いが結果にでてこなかったものである。ただ、しゃへい厚の薄い部分でわずかにCAPOの方が大きくでているのは、QADコードでCAPO式を用いる場合、0.5MeV未満では0.5MeVのビルドアップ係数と同じ値で一定として計算するため、ビルドアップ係数が大きめとなるためと考えられる。

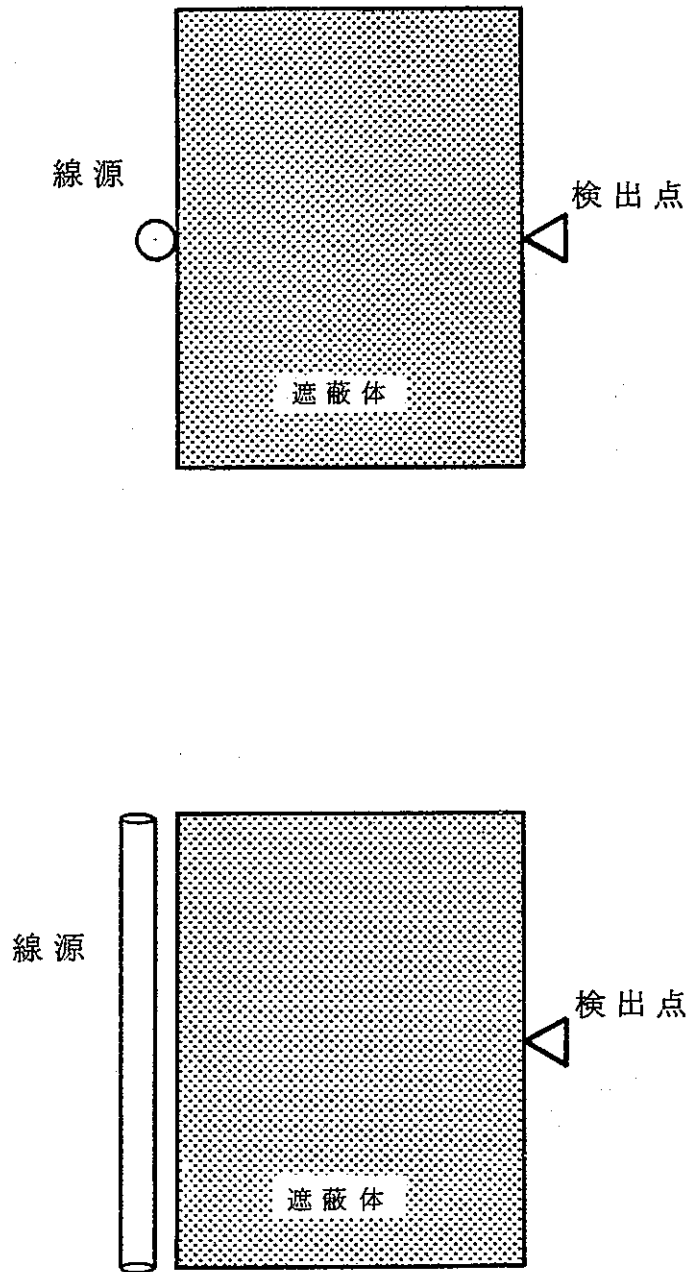


図3.1.2 モデル形状 (線線源)

表3.1.1 タイプDのスペクトル

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
1.50E-2	30.29
2.50E-2	6.75
3.75E-2	7.17
5.75E-2	6.22
8.50E-2	4.40
1.25E-1	5.91
2.25E-1	3.75
3.75E-1	1.95
5.75E-1	11.47
8.50E-1	21.21
1.25E+0	0.69
1.75E+0	0.07
2.25E+0	0.19

表3.1.2 タイプEのスペクトル

[Blomeke-Todd]

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
0.50	4.71E+01
0.75	5.19E+01
1.50	3.59E-01
2.20	5.29E-01
2.50	1.24E-02

表3.2.1 計算結果 (点線源)

検出点位置 [cm]	スペクトルタイプ°					[rem/h]
	A	B	C	D	E	
20	1.14E+00	1.12E+00	1.96E+00	8.81E-01	1.99E+00	
50	3.73E-03	4.73E-03	6.59E-03	3.75E-03	5.56E-03	
70	1.38E-04	2.38E-04	2.26E-04	1.55E-04	2.51E-04	
100	1.68E-06	4.77E-06	2.09E-06	2.35E-06	4.41E-06	
150	3.49E-09	1.27E-08	1.58E-09	7.74E-09	1.81E-08	

表3.2.2 計算結果 (線線源)

検出点位置 [cm]	スペクトルタイプ°			[rem/h]
	A	B	C	
20	6.02E+01	6.01E+01	1.14E+02	
50	3.35E-01	4.46E-01	6.37E-01	
70	1.52E-02	2.81E-02	2.61E-02	
100	2.37E-04	7.03E-04	2.97E-04	
150	6.57E-07	2.35E-06	2.81E-07	

図3.2.1 スペクトルタイプによる計算比較
(タイプA, B, C; 点線源)

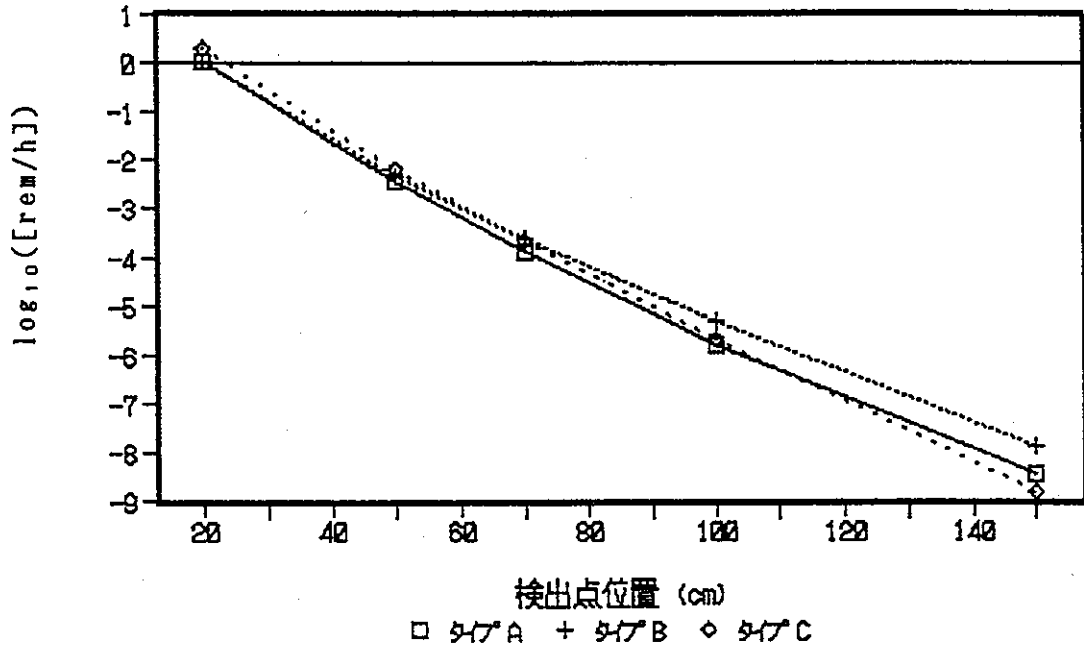


図3.2.2 スペクトルタイプによる計算比較
(タイプA, D; 点線源)

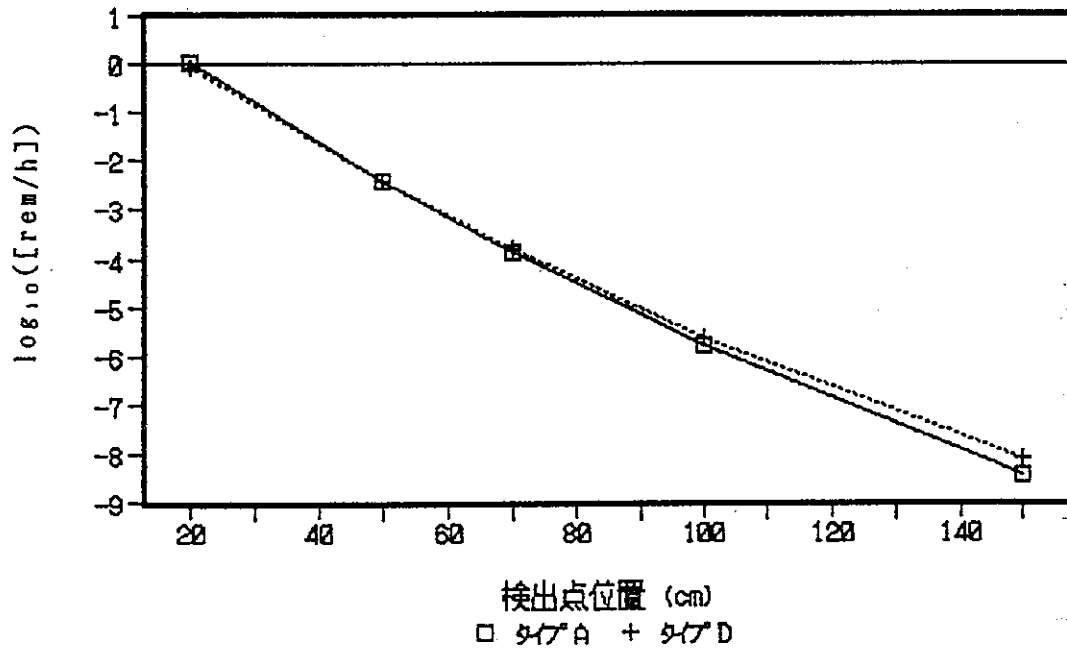


表 3.2.3 各エネルギーの光子の線量率への寄与割合 (点線源)

スペクトル タイプ	光子エネルギー [MeV]	存在比 (%)	検出点位置 での線量率への寄与割合				
			20cm	50cm	70cm	100cm	150cm
A	1.50E-02	23.27	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2.50E-02	5.48	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3.75E-02	5.77	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.75E-02	4.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	8.50E-02	3.27	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.25E-01	3.52	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2.25E-01	2.79	7.16%	0.46%	0.05%	0.00%	0.00%
	3.75E-01	1.60	1.22%	0.31%	0.09%	0.01%	0.00%
	5.75E-01	35.61	53.26%	34.20%	18.79%	4.99%	0.18%
	8.50E-01	11.82	29.29%	40.01%	38.11%	23.17%	3.38%
	1.25E+00	1.97	7.95%	20.43%	31.19%	38.71%	20.85%
	1.75E+00	0.08	0.49%	1.96%	4.38%	9.62%	13.63%
	2.25E+00	0.06	0.49%	2.64%	7.39%	23.49%	61.97%
B	2.58E-02	34.52	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	8.92E-02	11.54	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3.00E-01	4.39	2.17%	0.23%	0.03%	0.00%	0.00%
	5.75E-01	35.61	54.52%	27.02%	10.86%	1.76%	0.05%
	8.50E-01	11.82	29.99%	31.61%	22.03%	8.18%	0.93%
	1.75E+00	2.12	13.26%	41.14%	67.07%	90.05%	99.03%
C	2.25E-01	5.18	0.77%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%
	3.75E-01	2.98	1.32%	0.32%	0.10%	0.01%	0.00%
	5.75E-01	66.20	57.61%	36.01%	21.31%	7.46%	0.72%
	8.50E-01	21.98	31.70%	42.13%	43.23%	34.66%	13.85%
	1.25E+00	3.66	8.60%	21.49%	35.35%	57.86%	85.42%

図3.2.3 スペクトルタイプによる計算比較
(タイプD, E; 点線源)

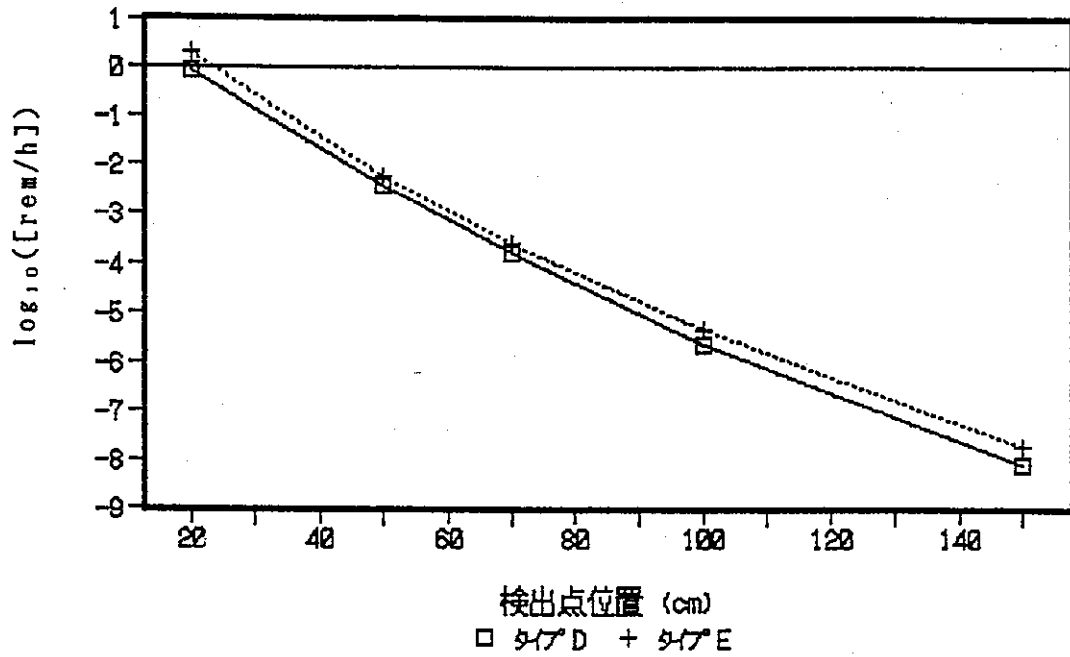


図3.2.4 スペクトルタイプによる計算比較
(タイプA, B, C; 線線源)

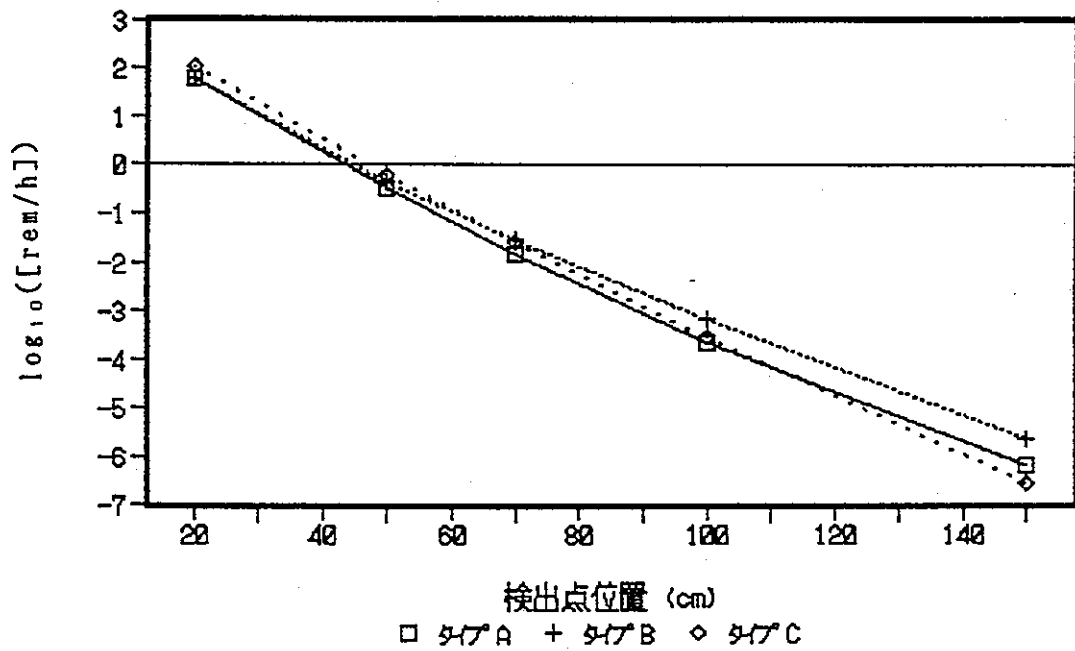


図 3.2.5 ビルドアップ係数データの影響
(高燃焼度燃料タイプ C ; 点線源)

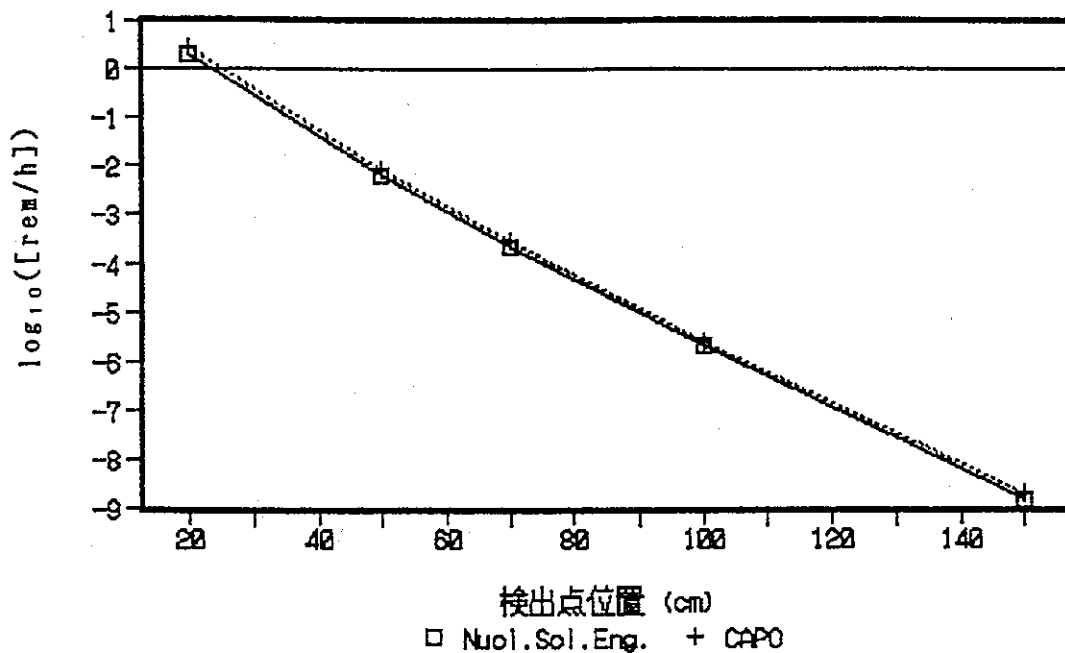


図 3.2.6 ビルドアップ係数データの影響
(現行基準燃料タイプ E ; 点線源)

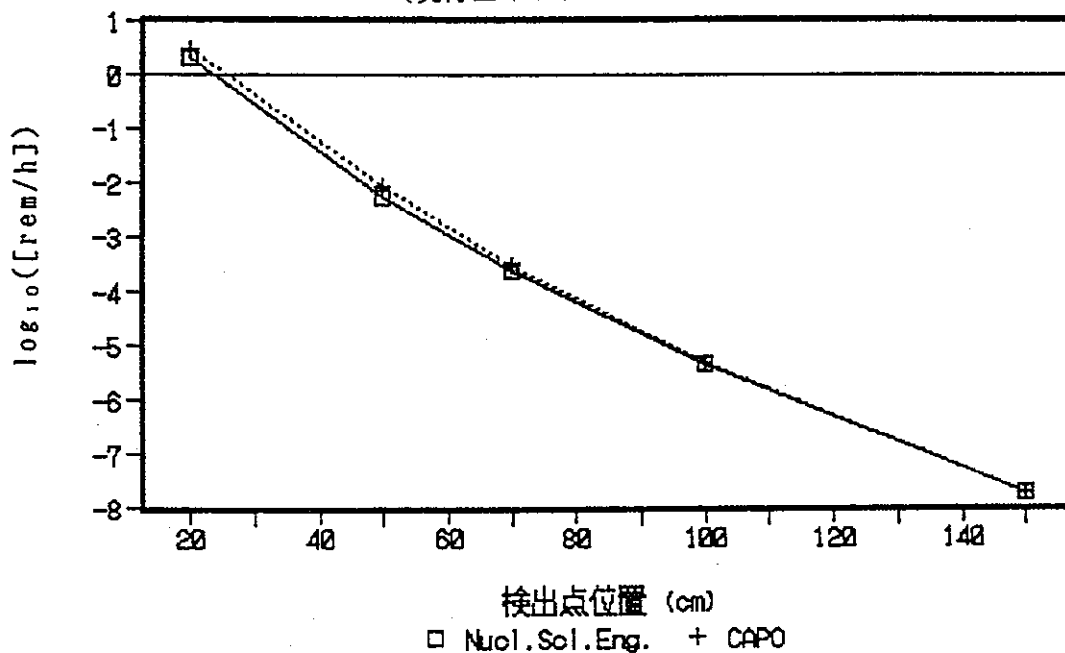
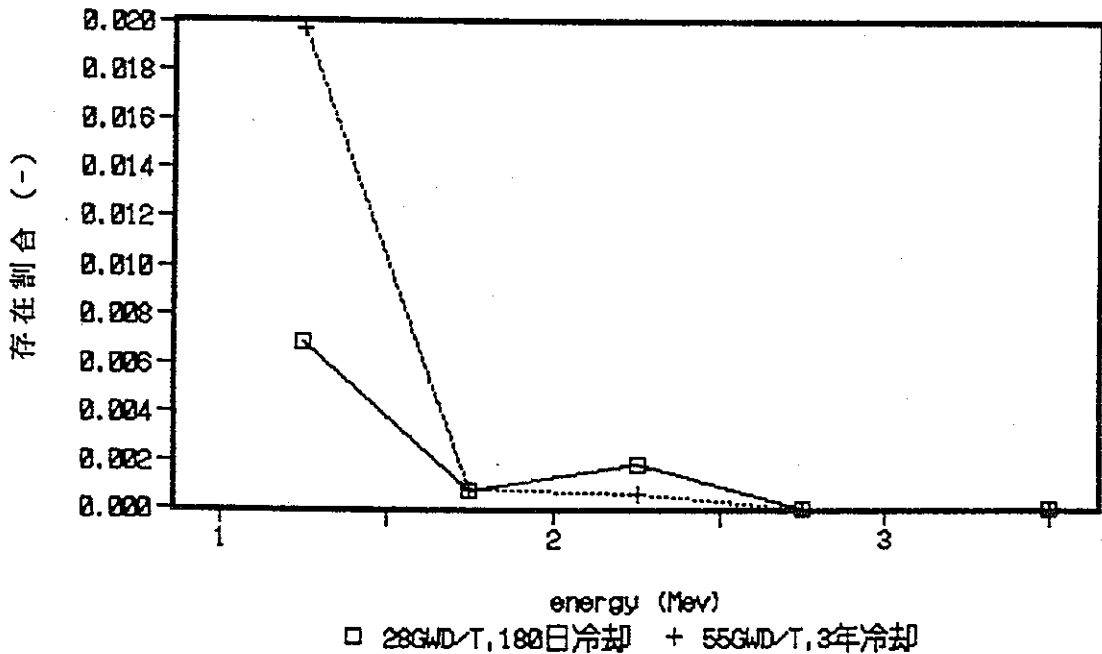


表 3.2.4 ORIGENの18群エネルギーの各光子の線量率への寄与割合

(点線源)

光子エネルギー [MeV]	存在割合 (-)	検出点位置 での線量率への寄与割合				
		20cm	50cm	70cm	100cm	150cm
8.50E-02	3.273E-02	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.25E-01	3.518E-02	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2.25E-01	2.786E-02	0.76%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%
3.75E-01	1.603E-02	1.30%	0.31%	0.09%	0.01%	0.00%
5.75E-01	3.561E-01	56.88%	34.23%	18.62%	4.82%	0.16%
8.50E-01	1.182E-01	31.29%	40.04%	37.76%	22.39%	2.99%
1.25E+00	1.971E-02	8.50%	20.45%	30.92%	37.43%	18.46%
1.75E+00	8.298E-04	0.54%	2.04%	4.50%	9.64%	12.51%
2.25E+00	6.235E-04	0.54%	2.74%	7.61%	23.59%	56.99%
2.75E+00	1.908E-05	0.02%	0.13%	0.41%	1.63%	6.09%
3.50E+00	2.435E-06	0.00%	0.03%	0.09%	0.49%	2.81%

図 3.3.1 光子エネルギー分布の比較
(1MeV以上の範囲)



4. 適用工程範囲の検討

前節までの議論では使用済燃料に対するインベントリから、スペクトルを導出した。再処理施設においては、いろいろな核種が工程を通過していくにつれて、除去されるため、工程ごとに内蔵している核種組成は異なっている。したがって、しゃへい評価において、前節までに求めたスペクトル（ここでは、タイプCを「共通」スペクトルとして比較の対象とする。）を採用してよいのか、また、よいとして実際の計算結果は共通スペクトルにたいし、各工程の核種組成での計算結果との開きがどの程度であるかを見ておく必要がある。このことは、全工程に共通したスペクトルを使うことの妥当性を示しており、設計、安全評価の効率化に資することとなる。ここでは工程の核種組成の違いによる影響をみるため、Pu系、U系について実際の核種組成での計算と共通スペクトルによる計算とを比較する。

4.1 計算条件

- (1) モデル形状； 前節と同じく、図3.1.1、3.1.2に示すとおり。
- (2) 線源強度； 前節と同じく、点線源に対しては、 $10i$ 、線線源に対しては、 $20i/cm$ とした。
- (3) スペクトル； 共通スペクトルとして、タイプCスペクトルを採用し、Pu系、U系のスペクトルとしては、表4.1.1に示すようなプルトニウム製品、ウラン製品の東海再処理工場の運転実績の核種組成を基にした存在比より、表4.1.2に示すようなタイプF（Pu系）、タイプG（U系）のスペクトルを作成した（各核種の光子エネルギー及び光子収率はORIG EN79の光子ライブラリーから引用した）。各タイプの光子エネルギー分布を図4.1に示す。
- (4) ビルドアップ係数； Nucl. Sci. Eng. 51(1975)によるコンクリートデータのみを使用した。なお、補間式は同じである。
- (5) 線量率変換係数； 前節に同じ。

4.2 計算結果

表4.2.1に点線源に対する結果を、表4.2.2に線線源に対する結果を示す。また図4.2.1、4.2.2にそれぞれの結果を図示する。

- (1) 点線源、線線源ともに3つのスペクトルの傾向、各検出点での大小関係など定性的には同じと言える。
- (2) しゃへい厚の大きな部分での計算結果の開きは、一桁程度である。これは、スペクトル

タイプA～Cの計算結果の開きと同じくらいである。

- (3) タイプF, Gはしゃへい厚の厚い方が、薄い方よりも一致している。一方、共通スペクトルとの一致は、しゃへい厚の薄いほうが良い。
- (4) タイプF (Pu系) は、共通スペクトルに対し、常に大きくでているが、タイプG (U系) は、共通スペクトルに対し、しゃへい厚の薄い部分では小さく、厚い部分では、大きくでている。

4.3 考 察

- (1) タイプF, Gと共通スペクトルの計算結果の最大開きが、スペクトルA～Cの計算結果の開きと同じくらいである。タイプFは4核種、タイプGは1核種のみで作成されており、また、高燃焼度燃料及び現行基準燃料の全放射能の95%以上が数種の核種で占められていることを考え合わせると、計算結果には、これらの共通核種である ^{106}Ru - ^{106}Rh が強く寄与しているものと考えられる。
- (2) 表4.3.4にタイプF, Gの各エネルギーの光子の線量率への寄与割合を示す。タイプFでは ^{60}Co の1.17, 1.33MeVによるものが大半であり、これが線量率を高いものにしてしている。しかし、しゃへい厚が厚くなると ^{106}Ru - ^{106}Rh の1.5MeV以上の寄与が強くなってくるため、タイプFとの差が縮まってくる。また、これとは逆にしゃへい厚が厚くなると共通スペクトルの線量率が他より低くなってくるのは、高エネルギー側がカットされているためである。
- (3) 以上より、工程による核種組成の違いが、スペクトルの作成方法の依存性と同じ程度であることが分かった。従って、工程毎にスペクトルを作成するよりも、全工程に共通するスペクトルを採用する法が、合理的であろう。
- (4) 全工程に共通するスペクトルとしては、①タイプCの様に平均的な値を与え、詳細なスペクトルでの計算結果に近い結果を与えるもの、②スペクトルの作成方法、工程による核種組成の変動を包絡するように、保守的な結果を与えるもの、等が考えられ、従来のスペクトル(タイプE)は②の考え方に従っている模様である。ここでは、従来の考え方を踏襲しつつ、共通スペクトルに近い高燃焼度燃料用のスペクトル(モデルスペクトル)を作成する。
- (5) モデルスペクトルの作成に当たっては、再処理施設でのしゃへい厚程度の領域において、高エネルギー光子の影響が大きいこと、及びタイプAからタイプCに縮約する過程で、高

- エネルギー側のインデックスエネルギーが低いほうにシフトしていくことから、共通スペクトルのインデックスエネルギーを高い側に変更することとする。すなわち、タイプCのインデックスエネルギーの最も高い 1.25MeVを1.5MeVに変更してみる。(表4.3.1参照)
- (6) モデルスペクトルを用いて、点線源及び線線源に対して、4.1節と同じ様な計算条件で計算してみた結果を表4.3.2、4.3.3及び図4.3.1、4.3.2に示す。これらには比較のために他のタイプによる結果も併せて示す。図より分かるように、結果は工程別のスペクトルタイプ(タイプF、G)以外に対しては当初の目標を満足している。
- (7) インデックスエネルギーを変更することの妥当性については、ORIGEN2のアウトプットのインデックスエネルギーの選択が任意であろうと推察されるため、平均エネルギーおよびスペクトル形状を変えない範囲での調整は問題ないと考え。むしろ、このような変更によって、系統的にしゃへい設計、安全評価が可能となる利点がある。
- (8) モデルスペクトルの計算結果とタイプF、Gの計算結果との開きは最大でfactor 3程度である。すなわち、モデルスペクトルを用いた場合、工程ごとの核種組成の違いは、error barが3程度を見込めば良いと考えられる。
- (9) しゃへい体のない体系について、モデルスペクトルを適用する場合には、図4.3.1～2より保守側の結果を与えると言えよう。

表4.1.1 Pu, U製品核種存在比

	(Ci%)	
	Pu系	U系
Zr-95	16	0
Nb-95	12	0
Ru-Rh-106	60	100
Co-60	12	0

* 高燃焼度再処理の検討(5) -フローシート(2) -
PNC 18430 89-003, (1989) より引用

表4.1.2 タイプF, Gスペクトル

光子エネルギー [MeV]	スペクトルタイプ(%)	
	F	G
0.300	9.174%	15.290%
0.630	53.612%	34.302%
1.100	3.120%	5.200%
1.173	12.000%	0.000%
1.332	12.000%	0.000%
1.550	0.450%	0.750%
1.990	0.138%	0.230%
2.380	0.102%	0.170%
2.750	0.008%	0.013%
3.250	0.000%	0.000%

図4.1 光子エネルギー分布の比較
(タイプF, G, C)

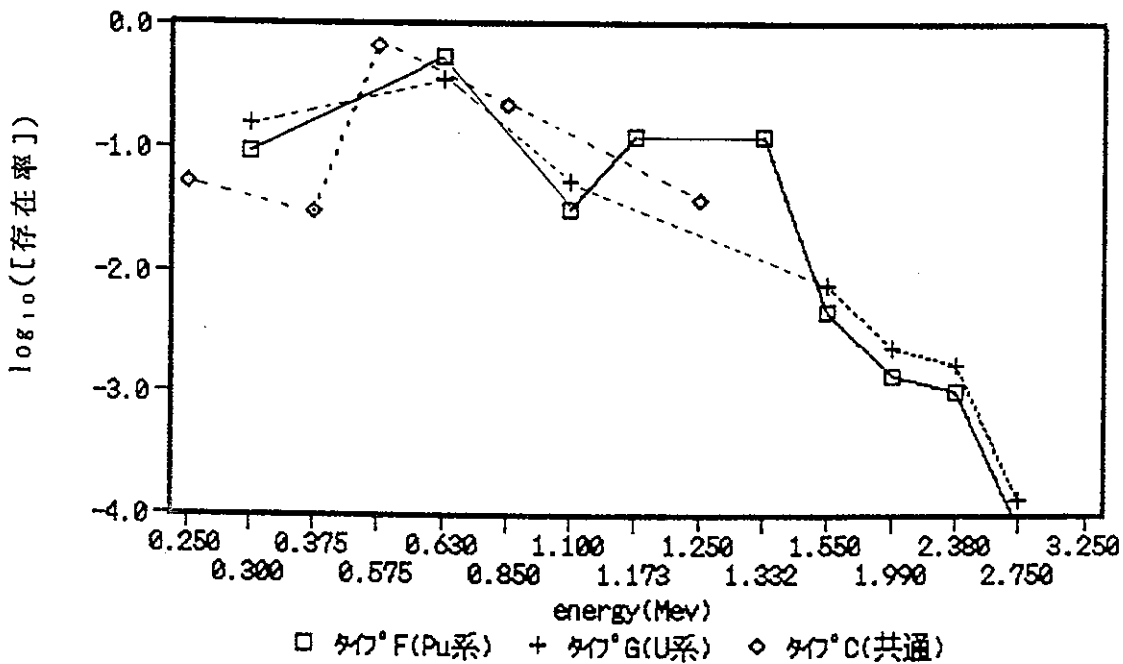


表 4.2.1 計算結果 (点線源)

検出点位置 [cm]	共通スペクトル (タイプ C)	[rem/h]	
		Pu系 (タイプ F)	U系 (タイプ G)
20	1.96E+00	2.36E+00	1.03E+00
50	6.59E-03	1.36E-02	4.28E-03
70	2.26E-04	7.03E-04	2.09E-04
100	2.09E-06	1.12E-05	4.28E-06
150	1.58E-09	2.13E-08	1.64E-08

表 4.2.2 計算結果 (線線源)

検出点位置 [cm]	共通スペクトル (タイプ C)	[rem/h]	
		Pu系 (タイプ F)	U系 (タイプ G)
20	1.14E+02	1.32E+02	5.54E+01
50	6.37E-01	1.30E+00	4.01E-01
70	2.61E-02	8.14E-02	2.47E-02
100	2.97E-04	1.59E-03	6.45E-04
150	2.81E-07	3.68E-06	3.19E-06

図4.2.1 工程別スペクトルの影響
(タイプF, G, C; 点線源)

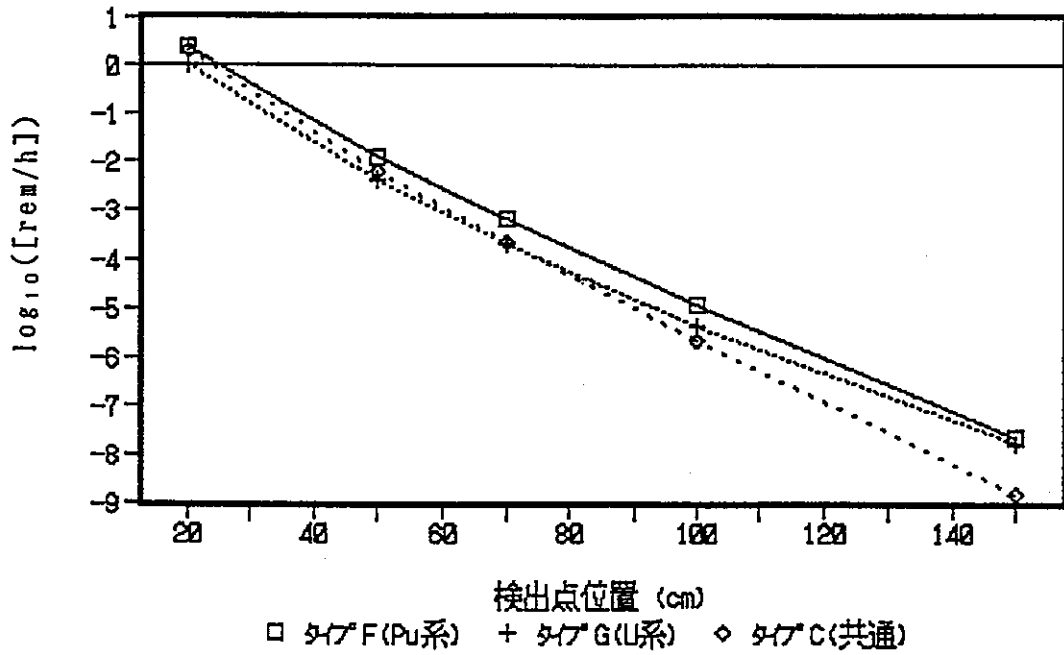


図4.2.2 工程別スペクトルの影響
(タイプF, G, C; 線線源)

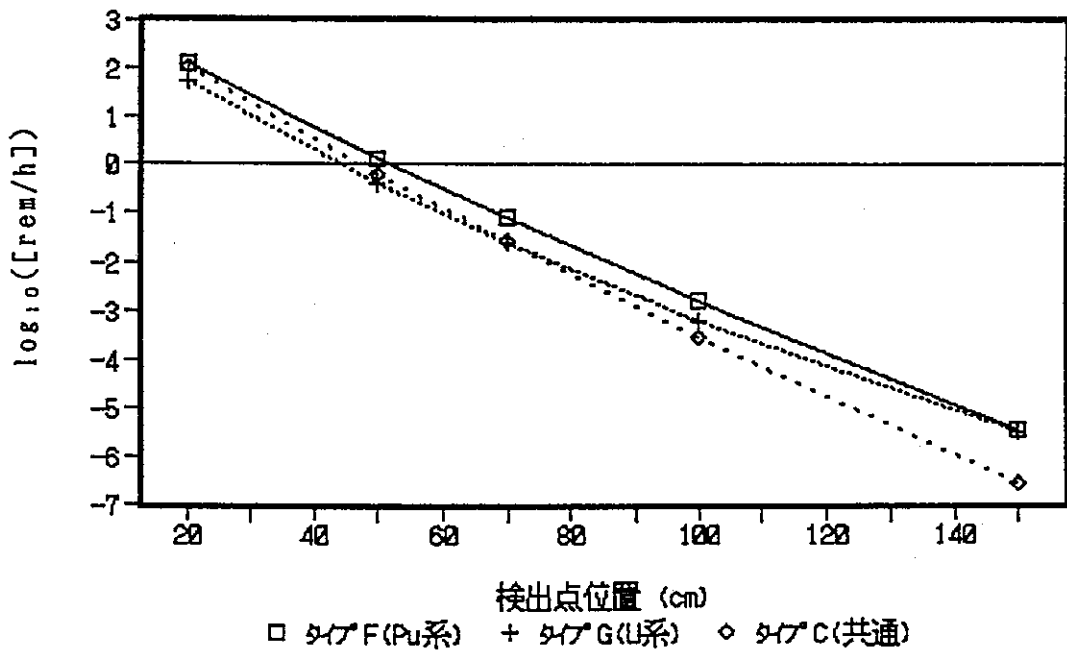


表4.3.1 各エネルギーの光子の線量率への寄与割合（点線源）

スペクトル タイプ	光子エネルギー [MeV]	存在割合 (-)	検出点位置での線量率への寄与割合				
			20cm	50cm	70cm	100cm	150cm
F (Pu系)	0.300	9.17E-02	2.14%	0.17%	0.02%	0.00%	0.00%
	0.630	5.36E-01	43.63%	19.15%	8.58%	2.13%	0.12%
	1.100	3.12E-02	5.18%	6.31%	5.90%	4.45%	1.82%
	1.173	1.20E-01	21.61%	28.85%	29.17%	24.76%	12.58%
	1.332	1.20E-01	25.36%	40.48%	47.66%	50.94%	38.43%
	1.550	4.50E-03	1.15%	2.25%	3.15%	4.37%	5.13%
	1.990	1.38E-03	0.47%	1.26%	2.28%	4.65%	10.54%
	2.380	1.02E-03	0.42%	1.39%	2.90%	7.63%	26.37%
	2.750	7.80E-05	0.04%	0.15%	0.34%	1.07%	5.01%
G (U系)	0.300	1.53E-01	8.18%	0.90%	0.13%	0.00%	0.00%
	0.630	3.43E-01	64.06%	38.94%	18.43%	3.57%	0.10%
	1.100	5.20E-02	19.82%	33.44%	33.03%	19.38%	3.73%
	1.173	0.00E+00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.332	0.00E+00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.550	7.50E-03	4.39%	11.91%	17.60%	19.02%	10.51%
	1.990	2.30E-03	1.79%	6.68%	12.74%	20.26%	21.61%
	2.380	1.70E-03	1.61%	7.37%	16.22%	33.23%	54.05%
	2.750	1.30E-04	0.14%	0.76%	1.84%	4.53%	10.01%

表 4.3.2 高燃焼度燃料用モデルスペクトル

光子エネルギー [MeV]	存在比 [%]
2.25E-01	5.18
3.75E-01	2.98
5.75E-01	66.20
8.50E-01	21.98
1.50E+00	3.66

表 4.3.3 計算結果 (点線源)

検出点位置 [cm]	モデルスペクトル	[rem/h]			
		(タイ7°A)	共通スペクトル (タイ7°C)	Pu系 (タイ7°F)	U系 (タイ7°G)
20	2.00E+00	1.14E+00	1.96E+00	2.36E+00	1.03E+00
50	7.46E-03	3.73E-03	6.59E-03	1.36E-02	4.28E-03
70	3.06E-04	1.38E-04	2.26E-04	7.03E-04	2.09E-04
100	4.22E-06	1.68E-06	2.09E-06	1.12E-05	4.28E-06
150	6.66E-09	3.49E-09	1.58E-09	2.13E-08	1.64E-08

表 4.3.4 計算結果 (線線源)

検出点位置 [cm]	モデルスペクトル	[rem/h]			
		(タイ7°A)	共通スペクトル (タイ7°C)	Pu系 (タイ7°F)	U系 (タイ7°G)
20	1.66E+02	6.02E+01	1.14E+02	1.32E+02	5.54E+01
50	7.30E-01	3.35E-01	6.37E-01	1.30E+00	4.01E-01
70	3.66E-02	1.52E-02	2.61E-02	8.14E-02	2.47E-02
100	6.29E-04	2.37E-04	2.97E-04	1.59E-03	6.45E-04
150	1.24E-06	6.57E-07	2.81E-07	3.68E-06	3.19E-06

図 4.3.1 モデルスペクトルと計算比較
(点線源)

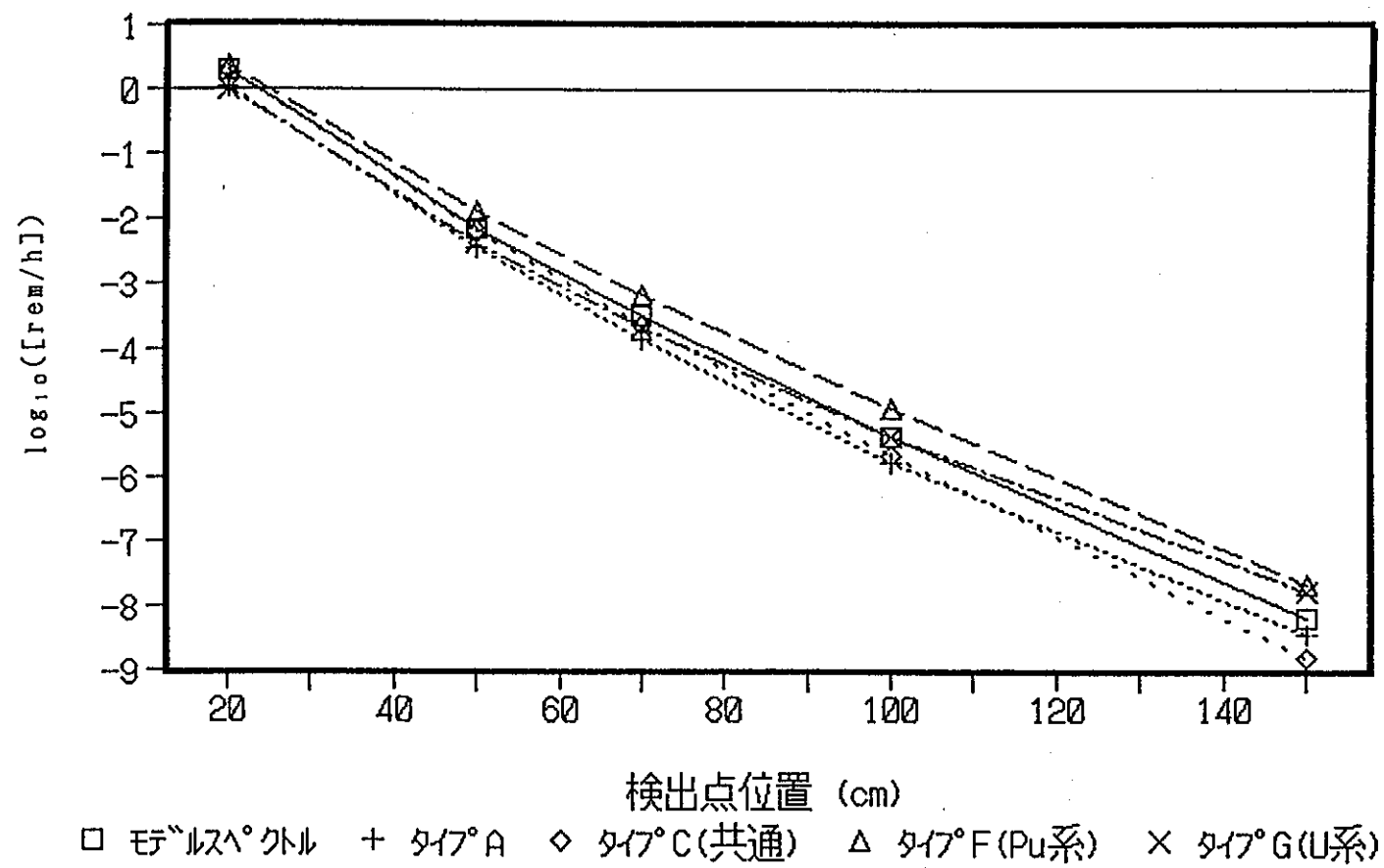
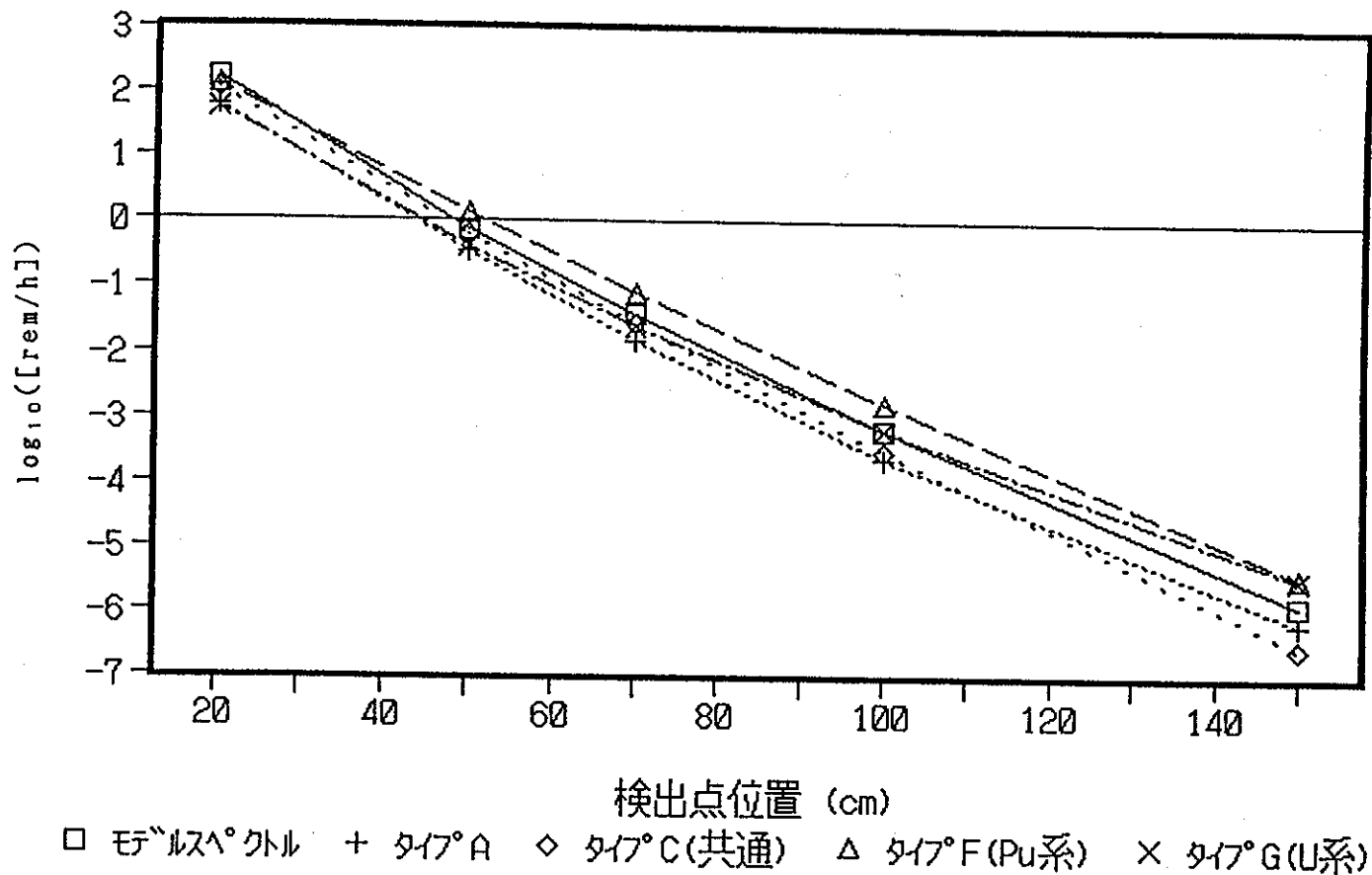


図4.3.2 モデルスペクトルと計算比較
(線線源)



5. スカイシャイン計算への影響

4章では、工程による核種組成の変動の影響を調べ、それらを包含するようなモデルスペクトルを作成した。ここでは、計算体系の異なるスカイシャインについて、ウラン貯蔵庫を例にとってモデルスペクトルを使った場合と、実際のインベントリを使った場合との比較を行う。

5.1 計算条件

- (1) 対象； ウラン貯蔵所とし、密度3.5g/ccのUO₃粉末が、φ40cm×80cmの容器に封入され、容器は2段積みされている。貯蔵量は100ton-Uとする。
- (2) モデル形状； U重量、密度、高さを保存した直方体とする。（図5.1参照）
- (3) 放射能濃度； 240γ μCi/kgUO₃
- (4) 計算コード； QAD-G33(QAD-PCSとG33-PCS)、接続点は建家天井より100m真上。
- (5) スペクトル； 4章で定めたモデルスペクトルと¹⁰⁶Ru-¹⁰⁶Rhが100%の2ケースを考える。
- (6) ビルドアップ係数； 4章に同じ。QAD計算ではコンクリート、G33計算では水をビルドアップ計算用の物質とした。
- (7)線量率変換係数； 3章に同じ。

5.2 計算結果

計算結果を表5.2、図5.2に示す。なお、スカイシャイン線量率は、以下の方法で算出している。

$$\text{QADの100m上空のダイレクト線量率} \times \frac{\text{G33の散乱線量率(MaxSc)}}{\text{G33の100m上空のダイレクト線量率(MinD)}}$$

- (1) モデルスペクトルの計算結果の方が、常に低めにでている。
- (2) モデルスペクトルと¹⁰⁶Ru-¹⁰⁶Rhが100%のスペクトルの計算結果との開きはfactor 2程度である。
- (3) 上記(1)、(2)の結果は4章において、モデルスペクトルの作成をU系、Pu系の結果をも包絡するものとはせず、共通スペクトルに近いものを作成したためである。計算結果の開きは、4.3.(7)と同程度である。

5.3 考 察

- (1) モデルスペクトルと ^{106}Ru - ^{106}Rh が100%のスペクトルの計算結果との開きがfactor 2程度であり、4章の結果と同程度であることは、モデルスペクトルをしゃへい計算ばかりではなく、スカイシャイン計算にも適用可能であることを示している。

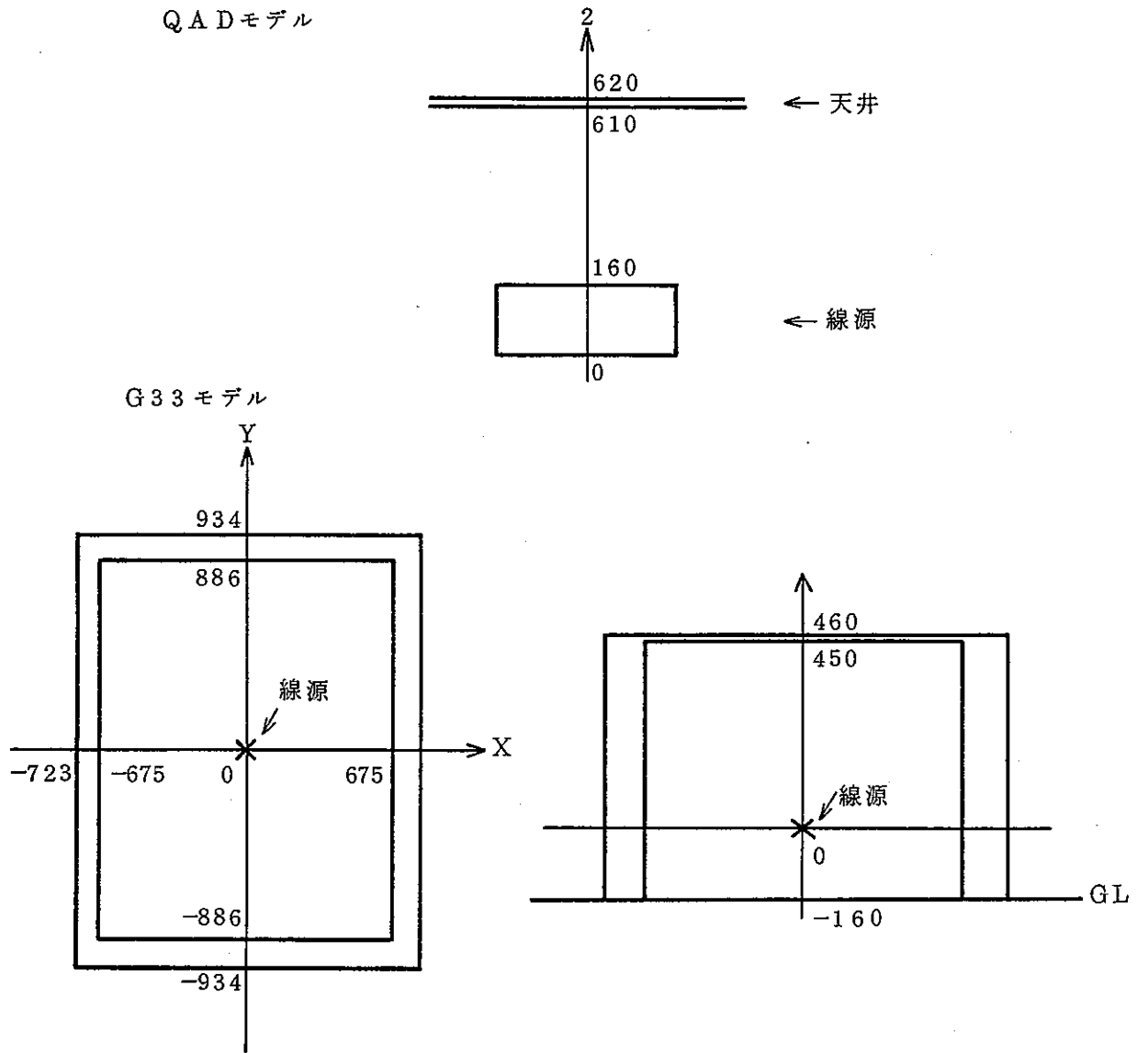
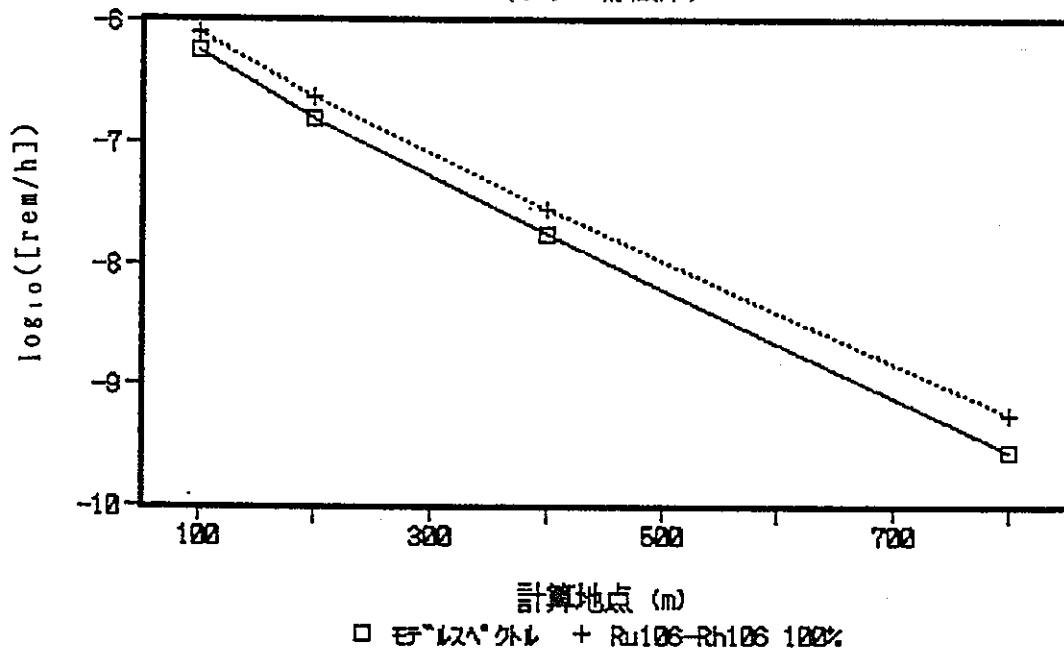


図5.1 スカイシャイン計算モデル (ウラン貯蔵庫)

表5.2 スカイシャイン計算結果 (ウラン貯蔵庫)

計算地点	モデルスペクトル [rem/h]	Ru-Rh 100% [rem/h]
北側 100m	5.525E-07	7.909E-07
北側 200m	1.550E-07	2.294E-07
北側 400m	1.708E-08	2.747E-08
北側 800m	2.775E-10	5.569E-10

図5.2 スカイシャイン計算結果
(ウラン貯蔵庫)



6. 単位ウラン重量あたりの光子数

再処理施設におけるしゃへい評価では、評価対象の内蔵放射エネルギーを知らなくてはならない。通常評価対象の工程機器の内蔵放射能は、工程の物質収支をもとに、工程変動、異常時などを考慮した上で放射能収支を作成する。

この時、単位ウラン重量あたりの光子数（放射エネルギー）が必要となってくる。表2.1.2より、高燃焼度燃料基準燃料にたいしては、次の通りとする。

$$930 \text{ } \gamma \text{Ci/kgU}$$

但し、上記の値を用いるに当たっては、以下の点に注意を要する。

(1) 上記の値は表2.1.2の全光子数より求めたものである。これには、しゃへい評価上無視し得る、低エネルギー光子も含まれており、その割合はモデルスペクトルの最小光子エネルギー未満の範囲で約半分である。従って、この値を用いたしゃへい計算では、factor 2程度の過大評価をしていることとなり、4章においてモデルスペクトルを用いた計算結果が、工程の核種組成の違いがある場合にしゃへい厚の厚い部分で最大factor 3程度下回っていること、また、スカイシャインの場合においても同様であることから、モデルスペクトルと上記の単位ウラン重量あたりの放射能を用いることによって、再処理施設の高燃焼度燃料の場合のしゃへい評価はほぼ常に保守側の評価となるものと考えて良い。

(2) 上記の値は用いる計算コード、ライブラリによって異なる。従って、物質収支が同じであっても、インベントリ計算結果が異なる場合には、しゃへい評価も異なることとなる。

従来のBlomeke-Toddの場合には、現状の基準燃料に対して1500 γ Ci/kgUを与えているが、ORIGEN 2によるとUO₂ 媒質の場合約3400 γ Ci/kgUとなる。ORIGEN 2では、低エネルギー光子の計算が精密になったといわれており、モデルスペクトルのインデックスエネルギーの範囲では1300 γ Ci/kgU程度となり、ほぼBlomeke-Toddの場合に近い値となっている。表6に現状の基準燃料に対するORIGEN 2による光子スペクトルの媒質による影響を示すが、媒質無しで制動放射を考慮しない場合には、約1300 γ Ci/kgU、H₂O媒質の場合には約1500 γ Ci/kgUという結果なる。また、媒質無しの場合の各エネルギーの光子の存在割合は、0.575 MeV 以下のものを全て0.5MeVとしてまとめるとほぼBlomeke-Toddに基づく5群スペクトルに近いものとなっている。

(3) インベントリ計算コードにより得られる光子数は、計算体系、即ち、燃料ペレットであるか、水溶液中であるか等によって異なることとなるが、これらのエネルギーはもっぱら

表6 媒質による光子スペクトルの比較 (28 GWD/T)

光子エネルギー (MeV)	媒質			無の場合の 存在割合
	無	UO ₂	H ₂ O	
1.50E-02	4.234E+14	3.778E+16	3.764E+15	0.856%
2.50E-02	4.448E+14	8.391E+15	1.173E+15	0.899%
3.75E-02	3.687E+15	8.918E+15	4.193E+15	7.450%
5.75E-02	7.732E+13	7.736E+15	7.981E+14	0.156%
8.50E-02	7.152E+14	5.474E+15	1.172E+15	1.445%
1.25E-01	4.134E+15	7.348E+15	4.448E+15	8.354%
2.25E-01	7.631E+13	4.664E+15	5.448E+14	0.154%
3.75E-01	1.867E+14	2.422E+15	4.296E+14	0.377%
5.75E-01	1.296E+16	1.426E+16	1.310E+16	26.188%
8.50E-01	2.588E+16	2.637E+16	2.594E+16	52.296%
1.25E+00	6.332E+14	8.588E+14	6.661E+14	1.280%
1.75E+00	4.016E+13	9.227E+13	4.978E+13	0.081%
2.25E+00	2.278E+14	2.343E+14	2.292E+14	0.460%
2.75E+00	1.644E+12	2.543E+12	1.889E+12	0.003%
3.50E+00	2.201E+11	2.900E+11	2.448E+11	0.000%
5.00E+00	4.877E-05	4.877E-05	4.877E-05	0.000%
7.00E+00	3.165E-06	3.165E-06	3.165E-06	0.000%
1.10E+01	2.001E-07	2.001E-07	2.010E-07	0.000%
total	4.949E+16	1.246E+17	5.651E+16	100.000%

低エネルギーであり、しゃへい評価には影響を与えないものであるにもかかわらず、上記の値はこれらの光子数も含めて計算している。

7. まとめ

本報告では、高燃焼度燃料再処理におけるしゃへい評価上のスペクトルと単位ウラン重量あたりの光子数について検討した。

検討にあたっては、スペクトルの群数等作成方法の依存性、及び工程ごとの核種組成の違いについて、点線源および線線源というモデル形状についてしゃへい計算コードQAD-PCSを用いて計算した上で、モデルスペクトルを作成した。

作成したモデルスペクトルは、5群としており、点線源、線線源に対し、ウラン系、プルトニウム系の実績インベントリとの比較を行ったところ、しゃへい厚の大きいところで、最大factor 3程度の開きとなった。また、スカイシャインについても同様の結果となった。

単位ウラン重量あたりの放射能をORIGEN 2の計算する全光子数から求めた。こうすることによって、これらの組み合わせによるしゃへい評価は、ほぼ保守側の評価を与えるようにすることができる。

高燃焼度燃料再処理のしゃへい評価にに係わる今後の検討は、つぎのようになる；

- ① 現在進めている、フローシート（物質収支）の作成後、放射能収支（ γ フローシート）を作成すること、
- ② 各区域の割当線量を見直しつつ、しゃへい計算を実行する。

これらについては、別途あらためて報告する。

別添 QAD-PCS コード と G33-PCS コード について

1. QAD-PCS

本コードは、しゃへい計算用の点減衰核積分コードQAD-P5A*に対して、入力仕様の簡略化を図るとともに、計算の融通性をもたせるよう変更を加えたものを、NEC製パーソナルコンピュータPC-98シリーズ用に移植したものである。

* NASA TM X-1397 (1967), ORNL-4181 (1967), LA-4572 (1968)

1.1 従来のQADコードとの相違点

- (1) コントロールカード及び物質組成カードの入力の一部に対して、数値選択方式よりわかり易い単語選択方式に変更した。
- (2) 線源領域の分割座標を指数関数を基に自動的に計算するオプションを追加した。指数関数の指数値を入力パラメータとして、分割幅の変化率を調整することができる。即ち、等分割、漸増、漸減分割を自由に設定できる。

(3) ビルドアップ計算について、以下の追加を行った。

- ① CAPO式による計算に対し、コンクリート、ウランを追加。

注) CAPO式の適用範囲 : 0.5~10MeV, 0~20mfp

データ出典 : Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol.1 (1968)

Shielding Fundamentals and Methods p217.

- ② 鉄、鉛、コンクリート、水について、 μX と光子エネルギーに対して与えられているビルドアップ係数の表から補間して計算するオプションを追加。

(i) Nuclear Science Engineering Vol.51 (1975) より、

コンクリート、水 (適用範囲 0.03~10MeV, 0.5~40mfp)

(ii) Turbey, D.K. ; ORNL/RSIC-49 (1988) より、

鉄、鉛、コンクリート、水 (適用範囲 0.1~15MeV, 0.5~40mfp)

- (4) 物質組成について、標準物質の組成を内蔵させ、標準物質名とその密度を指定するだけでよいように変更した。

標準物質として、水、空気、鉄、鉛、コンクリート、三酸化ウラン、SS41、SUS304、SUS316を用意。(但し、SS41、SUS304、SUS316については、Mn, Cr, Ni成分の減衰係数データがないため、現在はMnを無視し、Cr, NiはFeとしているため、実際上はIRONとほとんど変わらない組成となっている)

また、標準物質以外の物質を使用する場合には、その物質の密度並びに元素名とその重

量割合を指定することで行なえる。

標準物質組成データ出典： JAERI-M-6928

- (5) 線量率変換係数は ANSI/ANS-6.1.1-1977 及び ICRP Pub. 51の実効線量当量の AP, ROT, ISO 並びに 1 cm当量の PAR, ROT, ISOの 7種類を選択でき、自動的に計算される。これらに対しては、従来通り線源エネルギーに対する換算係数を用いて計算が行われるが、これらとは別に、Pub. 51の1cm当量 (PARに対応) に対して、検出点でのエネルギースペクトルを考慮した実効換算係数を用いるオプションを用意した。(計 8種類)
- (6) 質量減衰係数は以下の文献値と置き換えた。

データ出典： Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol.1 (1968)
Shielding Fundamentals and Methods p173-175

1.2 新線量体系 (放射線障害防止法の改正) に係わる

1 cm線量当量計算オプションの追加について

従来、QADコードによる線量率計算では、線源エネルギーに対する換算係数を用いて線量率を計算していたが、より正確に計算する場合には、検出点での γ 線のエネルギースペクトル分布に応じた換算係数を用いるべきである。

本コードに対し、文献等に基づき、検出点での γ 線のエネルギースペクトル分布を考慮した実効換算係数を用いて 1 cm線量当量を計算するオプションを追加した。さらに、最新文献による照射線量ビルドアップ係数を新たに追加した。

本コード内での計算方法を以下に示す。

点線源からのフラックス (ビルドアップ省略)

$$\phi(r, E) : \gamma \text{線フラックス (photons/sec. cm}^2\text{)} \quad (\text{従来のQADで計算される})$$

照射線量率 (R/h)

$$D_e(r, E) = E \cdot \phi(r, E) \cdot (\mu_{en}/\rho)_{\text{air}} \cdot 3600/5.43E7$$

$$(\mu_{en}/\rho)_{\text{air}} : \text{空気の質量エネルギー吸収係数 (cm}^2\text{/g)}$$

(γ 線エネルギーの関数)

空気吸収線量率 (Gy/h)

$$D_a(r, E) = D_e(r, E) \cdot 8.70E-3$$

1 cm線量当量率 (Sv/h)

$$H1(r, E) = f_x(\mu t, E) \cdot D_a(r, E)$$

$f_X(\mu t, E)$: 実効換算係数

(出典: RADIOISOTOPES, 38, 90-100 (1989))

体積線源では、

$$H_1(r) = \int_V \int_E f_X(\mu t, E) \cdot B(\mu t, E) \cdot dE \cdot \phi(r, E) \cdot dv \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \cdot 3600 \cdot 1.602E-10$$

$B(\mu t, E)$: ビルドアップ係数

参 考 文 献

- (1) RADIOISOTOPES, 38, 90-100 (1989)
- (2) 放射線遮蔽計算における新施行規則の線量当量率算出法, 放射線遮蔽実務講座資料
No. 8904431日本原子力情報センター (平成元年4月28日開催)

1.3 補 足

- (1) 質量減衰係数の算出は、Aitkin-Lagrange 法によるlog-log補間による。
- (2) Publication 51の線量率変換係数(空気の質量エネルギー吸収係数を含む)の算出は、4点データのLagrange 補間による。
- (3) ビルドアップ係数のTable値からの補間は、
 μt について $\ln(BU) = a \cdot \mu t + b$ により、
E について log-log 内挿により計算。
- (4) 実効換算係数(f_x)表(光子エネルギーとmfpに対して与えられている)からの補間は、
 μt について 表に与えられているmfpの中から f_x の大きい方を、
E について $f_x(E) = a \cdot E + b$ により計算。

2. G 3 3 - P C S

本コードは、しゃへい計算用の1回散乱計算コードG33*に対して、前記QADコードと同様に入力様の簡略化を図るとともに、計算の融通性をもたせるよう変更を加えたものを、NEC製パーソナルコンピュータPC-98シリーズ用に移植したものである。

* NUS-TM-NA-42 (1965)

2.1 従来のG33コードとの相違点

基本的には前記QAD-PCSコードと同様であるが、一部について追加、修正が未着手のものがある。以下には、QAD-PCSコードの仕様と異なる部分のみについて記す。その他についてはQAD-PCSコードと同様の追加、修正が施されている。

- (1) 散乱エネルギーの群分けをコード内部で行い、入力不用とした。
- (2) 散乱領域の分割座標を指数関数を基に自動的に計算するオプションを追加した。指数関数の指数値を入力パラメータとして、分割幅の変化率を調整することができる。即ち、等分割、漸増、漸減分割を自由に設定できる。
- (3) ビルドアップ計算については、CAPO式による計算用として、コンクリート、ウランの追加にとどまっている。
- (4) 線量率変換係数については、ANSI/ANS-6.1.1-1977 及び ICRP Pub. 51の実効線量当量の AP, ROT, ISO 並びに 1 cm当量の PAR, ROT, ISOの7種類を選択でき、自動的に計算される。これらに対しては、従来通り線源エネルギーに対する換算係数を用いて計算が行われる。QAD-PCSコードにある実効換算係数オプションはない。

2.2 補 足

- (1) 散乱エネルギーの群分けは、最大線原エネルギーから最小線原エネルギーによる散乱エネルギーの最小値までの対数の等分割を行う（等レサジー間隔）。
- (2) 質量減衰係数の算出は線源エネルギーに対しても散乱エネルギーに対しても、線形補間による。（オリジナルコードと同じ）
- (3) 線量率変換係数の算出は、散乱 γ 線エネルギー郡境界値に対してANSI又はPub. 51から補間し、線原エネルギーに対しては、これらの補間して求められた変換係数に基づきさらに線形補間している。（線原エネルギーに対する補間のしかたはオリジナルと同じ）