

JCO臨界事故における核分裂数の時間変化の推定

住友原子力工業（株）核設計部

山野 直樹[†], 市瀬 潤

[†]yamano@sae.co.jp

1. はじめに

JCOで発生した臨界事故は日本の原子力界にとって痛恨の事件であり、その調査報告は原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会（事故調）報告^[1]に述べられている通りである。愛媛大学で開催された原子力学会 2000 年春の年会でも特別セッションで多くの報告^[2]が行われている。本報告では、被曝評価に重要な核分裂数の時間変化を限られた情報のみで同定する試みを行った。総核分裂数は臨界収束後の沈殿槽からのサンプル採取による測定で確定しているが、核分裂数の時間変化についての詳細な評価は残された課題である。周辺線量のような間接的な測定値から推定された値が、どの程度再現性を持つかを考察することは今後の緊急時対策を考えるうえで重要と思われる。

2. 推定方法

事故当初より科学技術庁のホームページ等で情報が公開され、日本原子力学会炉物理部会等の活動でも様々な情報が交換されていたが、全てのデータが公表されているわけではなく、限られた情報の中から信頼性のあるデータを入手し選択することは容易ではない。ここでは、以下に示すデータを基に推定を行った。入手可能な情報が限られていたため、事故調が採用した評価手法とは異なった推定方法を用いた。

- a) 原研那珂研究所中性子モニタ(MP1)データ^[3]
- b) JCO事務棟2階窓際での中性子レムカウンタ測定値^[4]
- c) JCO第一加工棟UF₆貯蔵室γ線エリアモニタ指示値
- d) JCO・SMM東海事業所建屋図／配置図

ここで、bはJNCが23:15頃測定したものであり、沈殿槽から直線距離で約250mの位置で550 μ Sv/hである。この値を採用した理由は、測定位置が建屋配置図より同定可能で、しかも転換試験棟を直視できる位置にあり、障害物となる他の建屋の影響が無視できること、及びこの時間帯では後で示すγ線エリアモニタ指示値がほぼ一定であることによる。c及びdはJCOが事故調に提出した資料で、提出後しばらく経過してから入手したものである。事故調の評価では、第一加工棟γ線エリアモニタとして粉末貯蔵室の指示値を採用している。これは打点式記録計の第1打点が最も早く立ち上がっていることが主な理由と考えられるが、ここでは粉末貯蔵室よりバックグラウンドが約1桁低い

UF₆貯蔵室の指示値を採用した。なお、指示値の時間プロファイルは両者ともほぼ同じである。その他、敷地境界周囲において中性子レムカウンタにより測定された時系列線量当量率データが公表されているが、測定位置が図面では正確に読み取れない、地上1m程度の測定のため敷地内建屋の影響が大きい理由により採用しなかった。

推定方法は図1に示す通りであり、最初に転換試験棟を図2に示すようにモデル化した幾何形状で固有値問題をMCNP4Bで計算する(KCODE計算)。この際に、沈殿槽の形状と攪拌器及び整流器をできるだけ詳細にモデル化して臨界量を推定した。沈殿槽を除く機器・貯槽類はその詳細構造や内容物の情報が得られなかったので残念ながら無視した。次に中性子固定線源問題をMCNP4Bにより計算する。この際に、転換試験棟、第一加工棟及び敷地内建屋を図2～図4に示すように可能な限り詳細にモデル化した。転換試験棟、第一加工棟の内部は建屋構造(仕切壁・遮蔽体)までを配置図から読み取ってモデル化した。両者の計算を後で規格化するために、沈殿槽中心より半径50cmの球殻を仮想的に考え、その球殻から漏洩する中性子カレントを求めた。全体の計算を二種類に分けた理由は、固有値問題で線源から2km程度離れた位置までの中性子輸送計算をMCNP4Bで行うのは効率が悪いことによる。

次に、固定線源問題で計算した事務棟2階窓際での中性子線量当量率を測定値で規格化した定数で上記の仮想的な球殻の漏洩中性子カレントを規格化する。固有値問題で臨界となる条件で計算された同じ球殻の漏洩カレントは等しくなるとして、固有値問題の計算値を規格化することによって、23:15時点での核分裂数を得る。

次に出力の時間変化の推定であるが、後述するように γ 線エリアモニタ指示値は臨界初期(数分間)の著しい変化を除いて、相対出力を極めて良く示していると考えられる。測定された γ 線は中性子捕獲反応による γ 線と即発 γ 線が主な寄与であり、沈殿槽内で発生した核分裂生成物(FP)から放出される γ 線の寄与は小さい。従って、臨界初期を除いた核分裂数の相対変化は γ 線エリアモニタ指示値で同定可能と仮定した。 γ 線エリアモニタ指示値と臨界継続全期間において測定されているMP1の計数値を同じ時間範囲でそれぞれ積分した積算値を用いて規格化定数を求める。臨界初期の出力変化はこの規格化定数を用いてMP1の計数値から求める。

3. 固有値計算

沈殿槽の計算体系を図5に示す。沈殿槽にはSS304製の攪拌器及び整流器が中心近くに挿入されており、反応度効果が大きいため図6に示すように整流器をモデル化した。建屋内部の壁面から中性子反射を考慮するために、幾何形状は図2に示す通り、建屋内部の仕切壁、遮蔽体を含んだ建屋外壁までをモデル化した。建屋及び仕切壁は軽量発泡コンクリート(ALC、商品名:シボレックス)であるので、その密度及び組成は製造元の住友シボレックス(株)に照会して入手した。ウラン濃度370gU/l、U-235濃縮度18.8wt%、遊離硝酸濃度0.2Nの硝酸ウラニル水溶液による臨界サーチを、初期中性子発生数10000、

計算世代数 1550, スキップする初期世代数 50 の条件で MCNP4B によって計算した。核データの違いを検討するため, ウラン量 16.6kg において, U-235,238 は ENDF/B-VI 及び JENDL-3.2 の両者を用い, その他の物質は JENDL-3.2 を採用した。計算結果を表 1 に示す。これより, JENDL-3.2 は ENDF/B-VI に比べ k_{eff} を約 0.7% 過大評価する。ENDF/B-VI を用いた場合, ウラン量 16.484kg で $k_{\text{eff}}=1.00013$ ($1\sigma=0.00048$) となり, この値を臨界推定値とした。なお, この条件における沈殿槽中心から半径 50cm の仮想的な球殻からの漏洩中性子カレントは 0.322109 (fractional standard deviation: $\text{fsd}=0.0004$) (n/fission) である。

表 1 固有値計算結果

U inventory (kg)	Nuclear Data	k_{eff}	1σ
16.6	JENDL-3.2	1.00970	0.00048
16.6	ENDF/B-VI	1.00243	0.00048
16.484	ENDF/B-VI	1.00013	0.00048

4. 固定線源計算

固定線源計算では, 固有値問題とは異なり沈殿槽内での中性子発生を一様と仮定して計算を行った。そのため, 固有値計算で求められる沈殿槽内での中性子束分布とは厳密には一致しないが, 沈殿槽を取り囲む半径 50cm の仮想的な球殻からの漏洩中性子カレントを両者で規格化することにより, 固有値計算と固定線源計算を結合することができる。線量当量を計算する位置として, 上記の JCO 事務棟 2 階窓際(沈殿槽より 246m)を point estimator で計算し, MP1(沈殿槽より 1700m)位置では ring estimator を用いた。その他, 線量の空間分布を見るため, 80~2000m の範囲で数点計算した。計算精度の指標となる fsd は事務棟窓際位置で 0.0520, MP1 位置で 0.0173 であり, その他の位置では全て 5%以内である。分散低減法として Russian roulette と space-energy-splitting を組み合わせた Weight Window を数回調整して用いた。一方, 事故調の評価では, 原研が測定した多くの測定値を最小自乗法で fitting して簡便な Stevenson's formula の係数を求めている。信頼できる多数の測定値が存在する場合には, この評価方法は簡便でかつ信頼性が高い優れた手法である。本計算値と事故調の評価値との整合性を検討した結果を図 7 に示す。ここでは両者とも 246m での線量当量率を $550\mu\text{Sv/h}$ に規格化して表示しているが, 線源より 150~2000m の範囲で両者の減衰傾向は良い一致を示しており, 計算値の妥当性が確認された。一方, 100m 以内では評価位置によって敷地内の建屋配置の影響が顕著に現れている。なお, 沈殿槽中心から半径 50cm の仮想的な球殻からの漏洩中性子カレントは 0.397849 ($\text{fsd}=0.0008$) (n/source) であり, JCO 事務棟 2 階窓際の測定値で規格化することにより漏洩中性子カレントは 7.750×10^{12} (n/sec) と評価した。

5. 23:15 における核分裂数

上記の固有値計算及び固定線源計算の結果から、沈殿槽中心から半径 50cm の仮想的な球殻での両者の漏洩中性子カレントが等しいとすると、23:15 時点の核分裂数として $7.750 \times 10^{12} / 0.322109 = 2.406 \times 10^{13}$ (fissions/sec) が得られる。核分裂当たりの放出エネルギーとして 205 (MeV/fission) を用いると、この時点での臨界出力は、 $2.406 \times 10^{13} \cdot 1.60217733 \times 10^{-19} \cdot 205 \times 10^6 = 790$ (watt) となる。

6. 核分裂数の時間変化の推定

図 8 に第一加工棟 UF₆ 貯蔵室 γ 線エリアモニタ指示値を eye guide で読み取った結果を示す。バースト部(10:35~11:00, 経過時間 0~25min.)の後、線量当量率は緩やかに減少して、22:25(経過時間 710min.)頃から一定となっている。その後、沈殿槽ジャケットからの冷却水抜き取り作業の始まった 3:30(経過時間 1015min.)頃に一旦大きく減少してから変動し、アルゴンガスパージによる抜き取り作業が終了した 6:15(経過時間 1180min.)に臨界が収束したと見られる。ここで得られた線量当量率の時間変化をバースト部とプラトー部に分けて、多項式による最小自乗 fitting を行った。但し、バースト部については、臨界開始後 5min. までのエリアモニタ指示値は打点式記録計の追従性の問題より信頼性が低いと判断して採用せず、10:40~翌朝 6:15 を fitting の対象とした。バックグラウンドは $0.163 \mu\text{Sv/h}$ と評価した。

10:35 から 5 分間の出力変化については MP1 の測定値から求める。その際に、22:25~3:25 の値を 1 に規格化しているため、MP1 の値も同様に規格化する必要がある。この規格化係数は以下のように求めた。

まず、fitting によって得られた多項式を 10:40~6:15 の範囲で時間積分し、相対出力の積算値(25.058644)を求めた。また、同じ時間範囲における MP1 の計数値を用いて、線量当量の積算値を以下のように求めた。

$$\left(\frac{46 + 1810}{20 \times 60 + 19 \times 3600 + 15 \times 60} - 0.0137 \right) \times 0.253 \times \frac{1175}{60} = 6.255776 \times 10^{-2} \text{ (}\mu\text{Sv)}$$

$$\text{(counts/s)} \quad \text{(B.G.)} \quad \frac{(\mu\text{Sv/h})}{\text{(counts/s)}} \quad \text{(h)}$$

この両者の積算値を用いて、MP1 の測定値を以下のように多項式で得られた結果に規格化した。

$$10:35:00 \sim 10:35:01 \quad (25 - 0.0137) \cdot 0.253 \cdot \frac{25.058644}{6.255776 \times 10^{-2}} = 2532.2$$

$$10:35:01 \sim 10:36:00 \quad \left(\frac{37}{59} - 0.0137 \right) \cdot 0.253 \cdot \frac{25.058644}{6.255776 \times 10^{-2}} = 62.166$$

$$10:36:00 \sim 10:40:00 \quad \left(\frac{24}{240} - 0.0137 \right) \cdot 0.253 \cdot \frac{25.058644}{6.255776 \times 10^{-2}} = 8.7460$$

以上で臨界全期間中(10:35~翌朝 6:15)の相対出力の時間変化が算出された。各時間帯に

おける fitting 関数は表 2 に示す通りである。ここで、多項式中の時間 t の単位は min. であり、10:40~11:00 の範囲では 10:35 を起点とし、11:00 以降の場合は 11:00 を起点としている。この関数は、エリアモニタ指示値が一定であった 22:25~3:25 の値を 1.0 に規格化した相対出力を示している。なお、得られた多項式による標準偏差は 0.0019049 である。この結果を図 9~図 10 に示す。図 9 はバースト部を、図 10 はプラトー部をそれぞれ示している。

表 2 Fitting で得られた相対出力評価式

10 : 35 : 00 ~ 10 : 35 : 01	$f(t) = +2532.2$
10 : 35 : 01 ~ 10 : 36	$f(t) = +62.166$
10 : 36 ~ 10 : 40	$f(t) = +8.7460$
10 : 40 ~ 11 : 00	$f(t) = -8.79574110 \times 10^{-9} \cdot t^9 + 1.25232590 \times 10^{-6} \cdot t^8 - 7.80813202 \times 10^{-5} \cdot t^7$ $+ 2.79452424 \times 10^{-3} \cdot t^6 - 6.31200733 \times 10^{-2} \cdot t^5 + 9.30117532 \times 10^{-1} \cdot t^4$ $- 8.91673925 \cdot t^3 + 5.36278549 \times 10^1 \cdot t^2 - 1.84695552 \times 10^2 \cdot t$ $+ 2.83311106 \times 10^2$
11 : 00 ~ 11 : 40	$f(t) = +2.07473055 \times 10^{-8} \cdot t^6 - 2.50774609 \times 10^{-6} \cdot t^5 + 1.13517760 \times 10^{-4} \cdot t^4$ $- 2.35344325 \times 10^{-3} \cdot t^3 + 2.11918519 \times 10^{-2} \cdot t^2 - 5.41398400 \times 10^{-2} \cdot t$ $+ 2.49055723$
11 : 40 ~ 13 : 33	$f(t) = -1.37056147 \times 10^{-11} \cdot t^6 + 8.80537166 \times 10^{-9} \cdot t^5 - 2.27382175 \times 10^{-6} \cdot t^4$ $+ 3.00200319 \times 10^{-4} \cdot t^3 - 2.12076190 \times 10^{-2} \cdot t^2 + 7.48056904 \times 10^{-1} \cdot t$ $- 7.82266637$
13 : 33 ~ 17 : 40	$f(t) = -9.71604443 \times 10^{-16} \cdot t^7 + 1.95741211 \times 10^{-12} \cdot t^6 - 1.65195854 \times 10^{-9} \cdot t^5$ $+ 7.56082746 \times 10^{-7} \cdot t^4 - 2.02438421 \times 10^{-4} \cdot t^3 + 3.16733345 \times 10^{-2} \cdot t^2$ $- 2.68003036 \cdot t + 9.64336864 \times 10^1$
17 : 40 ~ 19 : 16	$f(t) = -5.73784140 \times 10^{-20} \cdot t^9 + 1.10828358 \times 10^{-16} \cdot t^8 - 7.18248344 \times 10^{-14} \cdot t^7$ $+ 1.26133442 \times 10^{-11} \cdot t^6 + 2.39132870 \times 10^{-9} \cdot t^5 + 7.82229670 \times 10^{-7} \cdot t^4$ $- 6.56825443 \times 10^{-4} \cdot t^3 - 2.18122949 \times 10^{-1} \cdot t^2 + 1.53606605 \times 10^2 \cdot t$ $- 2.05944999 \times 10^4$
19 : 16 ~ 22 : 25	$f(t) = +2.00184463 \times 10^{-19} \cdot t^8 - 5.20896271 \times 10^{-16} \cdot t^7 + 4.23860940 \times 10^{-13} \cdot t^6$ $- 1.30613140 \times 10^{-11} \cdot t^5 - 1.30695532 \times 10^{-7} \cdot t^4 + 2.05780093 \times 10^{-5} \cdot t^3$ $+ 3.85846712 \times 10^{-2} \cdot t^2 - 1.96086993 \times 10^1 \cdot t + 2.82855579 \times 10^3$
22 : 25 ~ 3 : 25	$f(t) = +1.0$

(次ページに続く)

表 2 Fitting で得られた相対出力評価式 (続き)

$$\begin{aligned}
 3:25 \sim 3:44 \quad f(t) &= +7.81467420 \times 10^{-20} \cdot t^8 - 5.75460846 \times 10^{-16} \cdot t^7 + 1.08816925 \times 10^{-12} \cdot t^6 \\
 &\quad - 4.31264757 \times 10^{-10} \cdot t^5 - 4.05287085 \times 10^{-7} \cdot t^4 + 8.05969621 \times 10^{-6} \cdot t^3 \\
 &\quad + 2.95333677 \times 10^{-1} \cdot t^2 + 3.66299737 \times 10^1 \cdot t - 9.43260938 \times 10^4 \\
 3:44 \sim 5:33 \quad f(t) &= +4.08596968 \times 10^{-18} \cdot t^7 - 3.35602253 \times 10^{-14} \cdot t^6 + 1.01245415 \times 10^{-10} \cdot t^5 \\
 &\quad - 1.33424979 \times 10^{-7} \cdot t^4 + 4.70607856 \times 10^{-5} \cdot t^3 + 6.46987018 \times 10^{-2} \cdot t^2 \\
 &\quad - 7.03547426 \times 10^1 \cdot t + 2.02495521 \times 10^4 \\
 5:33 \sim 6:09:30 \quad f(t) &= -1.36889402 \times 10^{-23} \cdot t^9 - 1.65212768 \times 10^{-19} \cdot t^8 + 3.09628672 \times 10^{-16} \cdot t^7 \\
 &\quad + 2.67670170 \times 10^{-13} \cdot t^6 - 6.20569629 \times 10^{-11} \cdot t^5 - 1.51565545 \times 10^{-6} \cdot t^4 \\
 &\quad + 1.68934836 \times 10^{-3} \cdot t^3 - 9.54624361 \times 10^{-1} \cdot t^2 + 9.05262225 \times 10^2 \cdot t \\
 &\quad - 4.61349099 \times 10^5 \\
 6:09:30 \sim 6:15 \quad f(t) &= -9.62229161 \times 10^{-3} \cdot t + 1.11137468 \times 10^1
 \end{aligned}$$

7. バースト部とプラトー部の核分裂数

前節で求めた相対出力の時間変化をバースト部(10:35~11:00)とプラトー部(11:00~翌朝 6:15)の範囲でそれぞれ時間積分すると、両者の積算値が求まる。バースト部の積算値を右上欄に、プラトー部の積算値を右下欄にそれぞれ示す。これよりバースト部とプラトー部の核分裂数比は 11.6:88.4 となる。事故調の評価値 (11.4:88.6) とほぼ同じ比率となった。

また、核分裂数は 5 節で得られた 23:15 の核分裂数(2.406×10^{13} fissions/sec)から、

time range	time (h)	cumulative power
10:35:00 ~ 10:35:01	1/3600	0.70339
10:35:01 ~ 10:36:00	59/3600	1.01883
10:36:00 ~ 10:40:00	4/60	0.58307
10:40:00 ~ 11:00:00	20/60	0.87580
total	0.4166667	3.18109

time range	time (h)	cumulative power
11:00:00 ~ 11:40:00	40/60	1.67824
11:40:00 ~ 13:33:00	113/60	3.93793
13:33:00 ~ 17:40:00	247/60	6.84688
17:40:00 ~ 19:16:00	1.6	2.11177
19:16:00 ~ 22:25:00	3.15	3.52858
22:25:00 ~ 3:25:00	5	5.00000
3:25:00 ~ 3:44:00	19/60	0.23622
3:44:00 ~ 5:33:00	109/60	0.64292
5:33:00 ~ 6:09:30	2190/3600	0.19789
6:09:30 ~ 6:15:00	330/3600	0.00242
total	19.25	24.18285

・バースト部 $2.406 \times 10^{13} \cdot 3.18109 \cdot 3600 = 2.755 \times 10^{17}$ (fissions)

・プラトー部 $2.406 \times 10^{13} \cdot 24.18285 \cdot 3600 = 2.095 \times 10^{18}$ (fissions)

であり、総核分裂数は $2.755 \times 10^{17} + 2.095 \times 10^{18} = 2.371 \times 10^{18}$ (fissions) となり、事故調の評価値 ($(2.49 \pm 0.14) \times 10^{18}$ (fissions)) と比べて 0.95 倍であるが誤差範囲内で一致している。

8. γ 線エリアモニタにおける γ 線源の寄与の割合

本報告では、第一加工棟の γ 線エリアモニタが臨界初期の数分間を除いて相対的な出力変化を忠実に示しているとの仮定に基づいて推定を行っている。この仮定が妥当であるためには、出力変動の過去の履歴に従う FP 核種の崩壊 γ 線の寄与が十分小さくなくてはならない。そのため、 γ 線エリアモニタで検出された γ 線に寄与する γ 線源の割合をバースト部とプラトー部の境である 11:00 の時点で検討した。FP 核種の崩壊 γ 線の評価には、その冷却時間が極めて短いため、短時間冷却でも信頼性のある崩壊データを用いる必要がある。ここではシグマ委員会が評価中の JENDL FP Decay Data File 2000^[5]の β 版を使用した。また、任意の照射時間と冷却時間における γ 線エネルギースペクトルの計算には、愛知淑徳大学の親松氏が開発した Aggregate FP 計算コード^[6]を使用した。10:35 より 11:00 までの核分裂数は前節で求めた関数より評価した。また、核分裂による即発 γ 線データは ENDF/B-VI の U-235 を採用した。図 11 に 11:00 における γ 線源強度に対する FP 核種からの寄与と即発 γ 線の寄与を示す。これより、11:00 における γ 線源は 56.4% が即発 γ 線であり、FP 核種からの崩壊 γ 線は 43.6% の寄与となる。なお、照射時間が短いため、アクチノイド核種からの崩壊 γ 線の寄与は無視できる。11:00 の γ 線エネルギースペクトルを図 12 に示す。図 12 は即発 γ 線と FP 核種の崩壊 γ 線による寄与を合計している。この線源条件で図 2～図 4 に示す幾何形状モデルによる γ 線固定線源問題を MCNP4B で計算し、第一加工棟エリアモニタ位置での γ 線線量当量率を計算した。また、中性子固定線源による中性子- γ 線結合計算を行い、 (n, γ) 反応によるエリアモニタ位置での γ 線線量当量率を同様に求めた。その結果、エリアモニタ位置での γ 線線量当量率の約 93% は (n, γ) 反応による寄与であり、残りの 7% のうち即発 γ 線は約 4%、FP 核種からの崩壊 γ 線は約 3% であることが分かった。 (n, γ) 反応による γ 線と即発 γ 線はその時点における核分裂数に比例するため、エリアモニタで検出された γ 線のうち約 97% はその時点での相対出力を示している。JCO には中性子モニタが無かったにもかかわらず、第一加工棟の γ 線エリアモニタは核分裂数の時間変化をほぼ忠実に示していたことがわかる。

9. 周辺環境の線量評価

臨界継続期間中の核分裂数の時間変化を基に、周辺環境の中性子及び (n, γ) 反応による線量評価を行った結果を表 3 に示す。沈殿槽からの各距離における 1cm 線量当量は

MCNP4B の計算結果を用いた。計算結果は各時刻までの積算された実効線量当量に換算して示している。事故調の評価値とは内訳が異なるので、中性子線量だけで比較すると臨界全期間の集積線量は約 2 倍の値となった。これは線量評価に用いた MCNP4B 計算結果が、実測値に基づく事故調の評価値より過大評価であることによる。MCNP4B 計算の幾何形状モデルは事業所内の限られた建屋しか考慮しておらず、その他の建造物や樹木等の遮蔽物を無視していることが原因と考えられる。しかしながら、事故調の評価値も中性子線量に対して±42%の誤差があることを考慮すると、ファクター 2 以内での一致は、限られた情報のみから得られた結果としておおむね妥当であると考えられる。

10. まとめ

臨界事故における核分裂数の時間変化を限られた情報から推定した。総核分裂数はサンプル溶液の測定による評価値より約 5%低い誤差範囲内で一致し、バースト部とプラト一部の核分裂比もほぼ一致する結果が得られた。中性子による周辺環境の集積線量は事故調の評価値より約 2 倍の過大評価であるが、これは周辺建物等の遮蔽効果を考慮していないことが原因と考えられる。

本推定において、出力の相対変化は γ 線エリアモニタ指示値及びMP1の測定値で求めているが、絶対値への規格化は1つの測定値のみに依存している。多くの測定値があれば信頼性の高い評価が可能であることは言うまでもないが、周辺の建屋の影響が少なく、かつ測定位置が正確に同定できる信頼性のある測定が1点あれば、最新の詳細計算手法によってある程度の再現性が得られることが分った。

今後、このような事故は決して起こらないと信じるものであるが、類似の事故を想定すると、線源建屋を直視できる建物の屋上等が最も適した測定位置となる。高精度GPSによる測定位置の確認も有効な手段であろう。 γ 線エリアモニタ等の放射線測定装置は打点式記録計より、MP1のような毎秒単位の計数値をパソコン等に蓄積する方式が緊急の場合には役立つ。また、事業所敷地内の建屋配置図、機器配置図等は緊急時に所定の保管場所から迅速に取り出せる一元管理が望ましい。

謝辞

本推定を行うにあたり様々な情報をご提供頂いた住友金属鉱山(株)二見達也氏、小島康秀氏、林圭一氏、住鉱シボレックス(株)加藤誠伸氏、原研外部被ばく防護研究室坂本幸夫氏、原研臨界安全研究室三好慶典氏、中島健氏に深甚なる謝意を表します。原研核データセンター片倉純一氏には JENDL FP Decay Data File 2000 の β 版を、愛知淑徳大学親松和浩氏には Aggregate FP コードをそれぞれ使用させて頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] 原子力安全委員会：ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告,平成11年12月24日.
- [2] 日本原子力学会：2000年春の年会要旨集,2000年3月28～30日,愛媛大学.
- [3] 科学技術庁事故調査対策本部：ウラン加工工場臨界事故調査委員会第9回会合,資料第9-3号,平成11年12月11日及び第11回会合資料第11-3-1号,平成11年12月24日.
- [4] 坂本幸夫：第14回「遮蔽設計法高度化」研究専門委員会資料14-5,平成11年11月19日,日本原子力学会.
- [5] Katakura, J.: Proc. 1999 Symposium on Nuclear Data, Nov. 18-19,1999, JAERI, Tokai, JAERI-Conf 2000-005, pp. 110-115 (2000).
- [6] Oyamatsu, K.: Proc. 1997 Symposium on Nuclear Data, Nov.27-28,1997, JAERI, Tokai, JAERI-Conf 98-003, pp. 328-333 (1998).

表3 周辺環境における実効線量当量積算値（中性子+(n,γ)反応の合計）（mSv）

time range	350 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m
10:35~10:40	1.73E-1 (1.02E-2)	4.56E-2 (2.82E-3)	1.10E-3 (1.19E-4)	4.40E-5 (1.16E-5)	2.90E-6 (1.54E-6)
10:35~11:00	2.39E-1 (1.40E-2)	6.29E-2 (3.89E-3)	1.52E-3 (1.64E-4)	6.08E-5 (1.60E-5)	4.00E-6 (2.13E-6)
10:35~12:00	4.25E-1 (2.49E-2)	1.12E-1 (6.92E-3)	2.70E-3 (2.92E-4)	1.08E-4 (2.84E-5)	7.12E-6 (3.78E-6)
10:35~13:00	5.84E-1 (3.42E-2)	1.54E-1 (9.49E-3)	3.70E-3 (4.01E-4)	1.48E-4 (3.89E-5)	9.77E-6 (5.19E-6)
10:35~14:00	7.22E-1 (4.23E-2)	1.90E-1 (1.17E-2)	4.58E-3 (4.96E-4)	1.84E-4 (4.82E-5)	1.21E-5 (6.43E-6)
10:35~15:00	8.56E-1 (5.02E-2)	2.25E-1 (1.39E-2)	5.43E-3 (5.88E-4)	2.17E-4 (5.71E-5)	1.43E-5 (7.61E-6)
10:35~16:00	9.82E-1 (5.76E-2)	2.58E-1 (1.60E-2)	6.23E-3 (6.74E-4)	2.50E-4 (6.55E-5)	1.64E-5 (8.74E-6)
10:35~17:00	1.10E+0 (6.46E-2)	2.90E-1 (1.79E-2)	7.00E-3 (7.57E-4)	2.80E-4 (7.36E-5)	1.85E-5 (9.81E-6)
10:35~18:00	1.21E+0 (7.10E-2)	3.19E-1 (1.97E-2)	7.68E-3 (8.31E-4)	3.08E-4 (8.08E-5)	2.03E-5 (1.08E-5)
10:35~19:00	1.31E+0 (7.67E-2)	3.44E-1 (2.13E-2)	8.31E-3 (8.99E-4)	3.33E-4 (8.73E-5)	2.19E-5 (1.16E-5)
10:35~20:00	1.40E+0 (8.22E-2)	3.69E-1 (2.28E-2)	8.90E-3 (9.62E-4)	3.56E-4 (9.35E-5)	2.35E-5 (1.25E-5)
10:35~21:00	1.49E+0 (8.71E-2)	3.91E-1 (2.42E-2)	9.43E-3 (1.02E-3)	3.78E-4 (9.92E-5)	2.49E-5 (1.32E-5)
10:35~22:00	1.57E+0 (9.19E-2)	4.13E-1 (2.55E-2)	9.95E-3 (1.08E-3)	3.98E-4 (1.05E-4)	2.62E-5 (1.40E-5)
10:35~23:00	1.64E+0 (9.64E-2)	4.33E-1 (2.67E-2)	1.04E-2 (1.13E-3)	4.18E-4 (1.10E-4)	2.75E-5 (1.46E-5)
10:35~ 0:00	1.72E+0 (1.01E-1)	4.52E-1 (2.80E-2)	1.09E-2 (1.18E-3)	4.37E-4 (1.15E-4)	2.88E-5 (1.53E-5)
10:35~ 1:00	1.79E+0 (1.05E-1)	4.72E-1 (2.92E-2)	1.14E-2 (1.23E-3)	4.56E-4 (1.20E-4)	3.00E-5 (1.60E-5)
10:35~ 2:00	1.87E+0 (1.10E-1)	4.92E-1 (3.04E-2)	1.19E-2 (1.28E-3)	4.75E-4 (1.25E-4)	3.13E-5 (1.66E-5)
10:35~ 3:00	1.94E+0 (1.14E-1)	5.12E-1 (3.16E-2)	1.23E-2 (1.34E-3)	4.94E-4 (1.30E-4)	3.26E-5 (1.73E-5)
10:35~ 4:00	2.00E+0 (1.17E-1)	5.27E-1 (3.26E-2)	1.27E-2 (1.37E-3)	5.09E-4 (1.34E-4)	3.35E-5 (1.78E-5)
10:35~ 5:00	2.03E+0 (1.19E-1)	5.34E-1 (3.30E-2)	1.29E-2 (1.39E-3)	5.15E-4 (1.35E-4)	3.40E-5 (1.81E-5)
10:35~ 6:15	2.06E+0 (1.21E-1)	5.41E-1 (3.35E-2)	1.31E-2 (1.41E-3)	5.23E-4 (1.37E-4)	3.44E-5 (1.83E-5)

* 括弧内の数値は(n,γ)反応のみの寄与を示す。

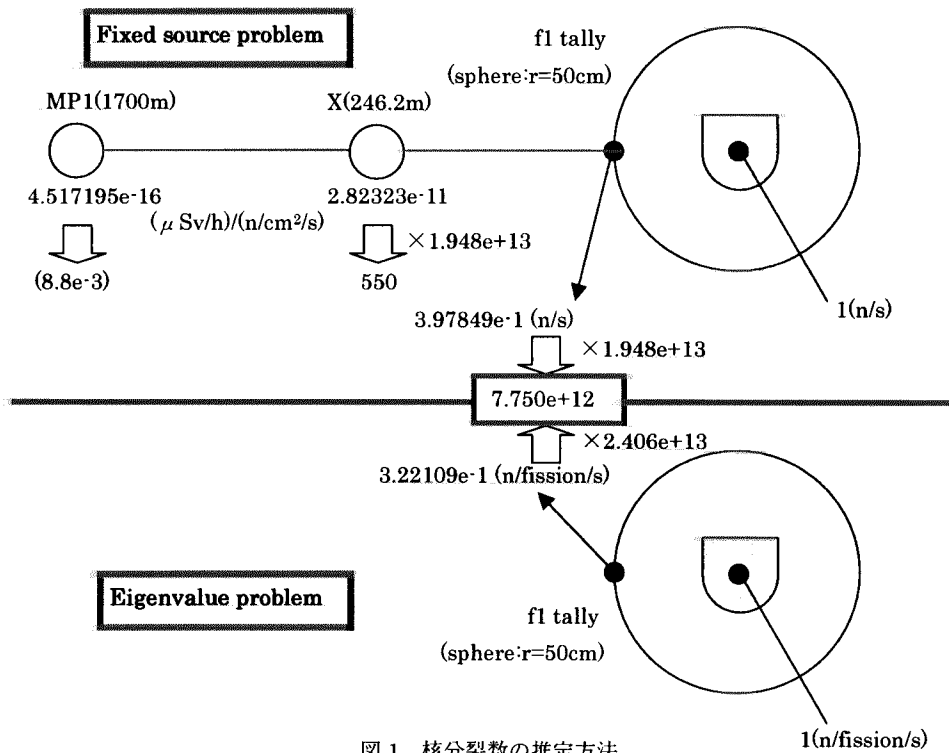


図1 核分裂数の推定方法

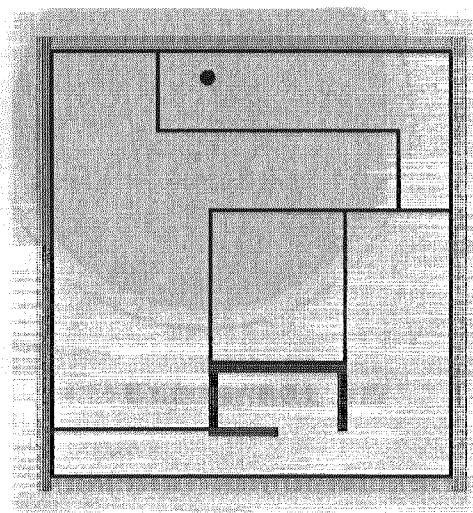


図2 転換試験棟の計算モデル

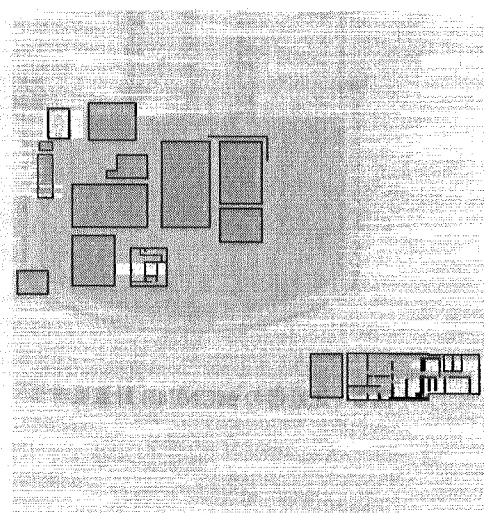


図3 固定線源問題の計算モデル(部分)

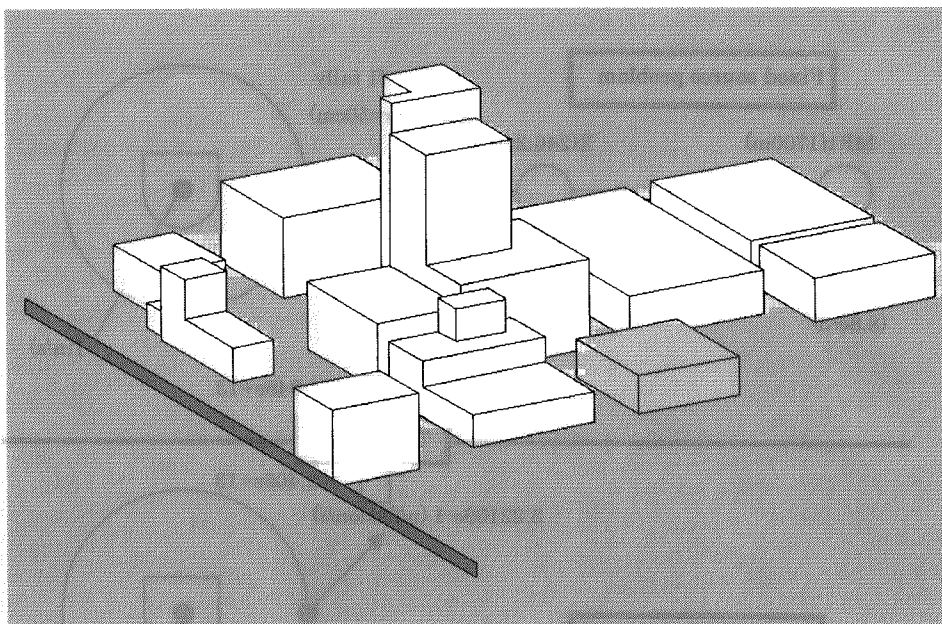


図4 固定線源問題における MCNP4B 計算モデル鳥瞰図(部分)

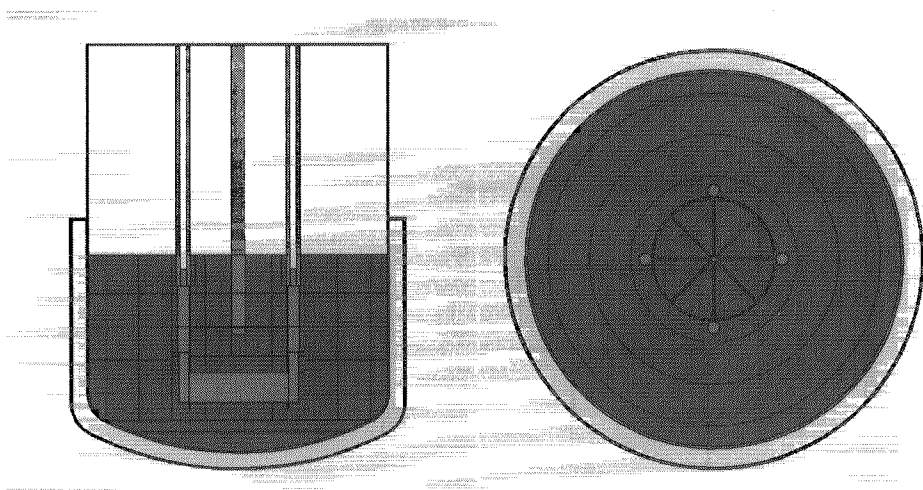


図5 沈殿槽の MCNP4B 計算モデル

図6 沈殿槽内部の整流器モデル

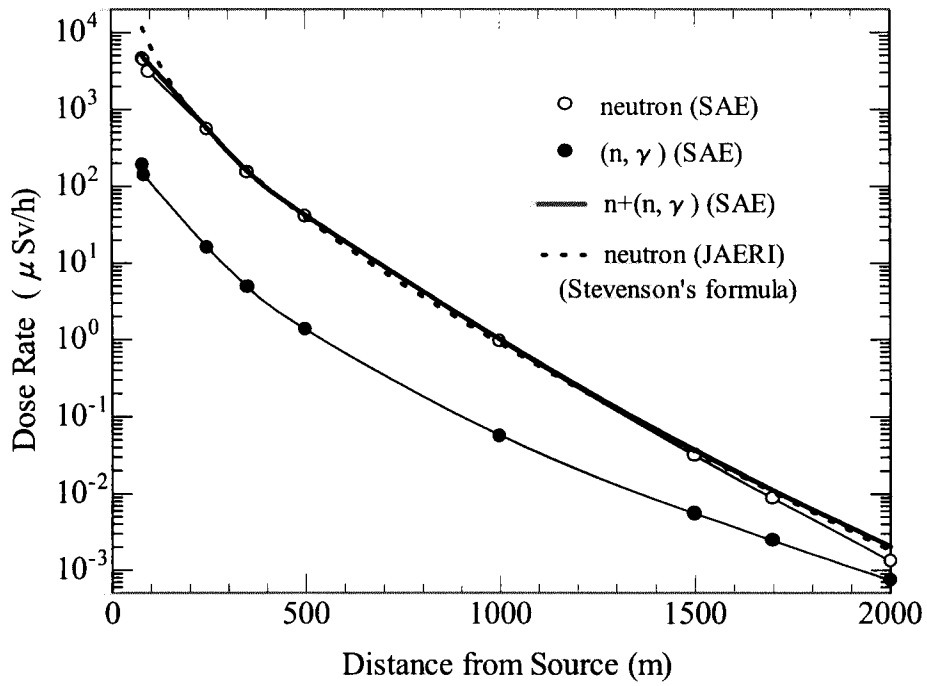


図 7 1cm 線量当量率分布の比較

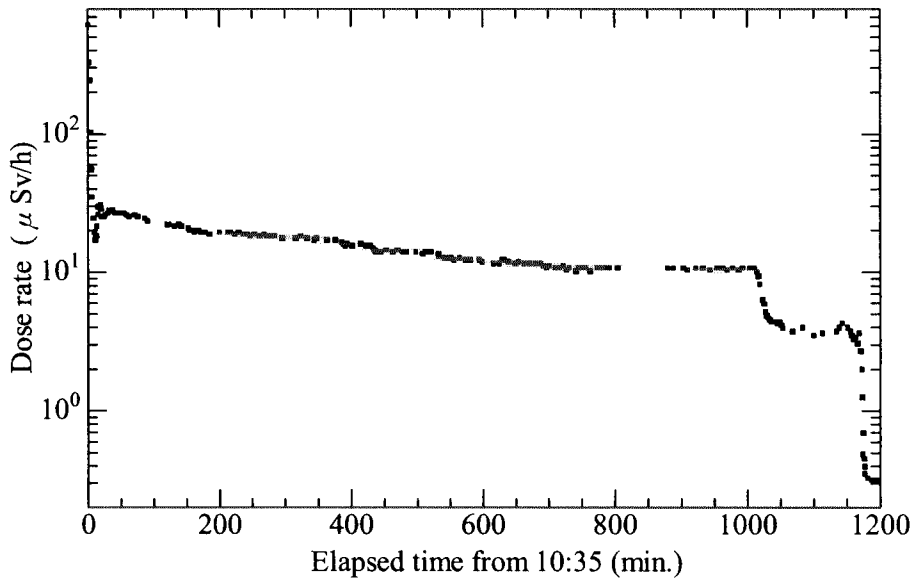


図 8 第一加工棟 UF₆ 貯蔵室 γ 線エアモニタ指示値

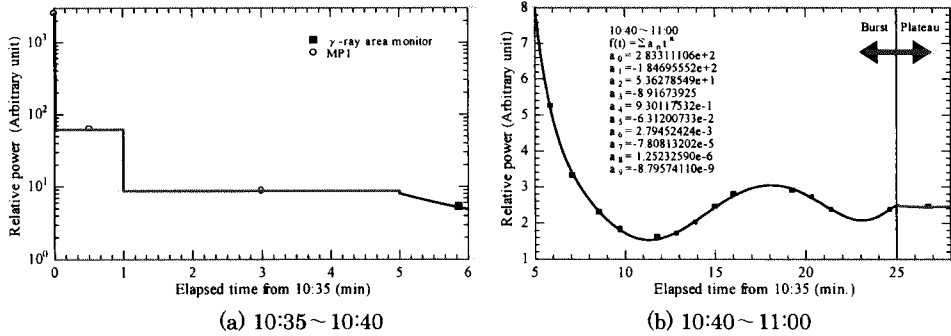


図9 バースト部の fitting 関数

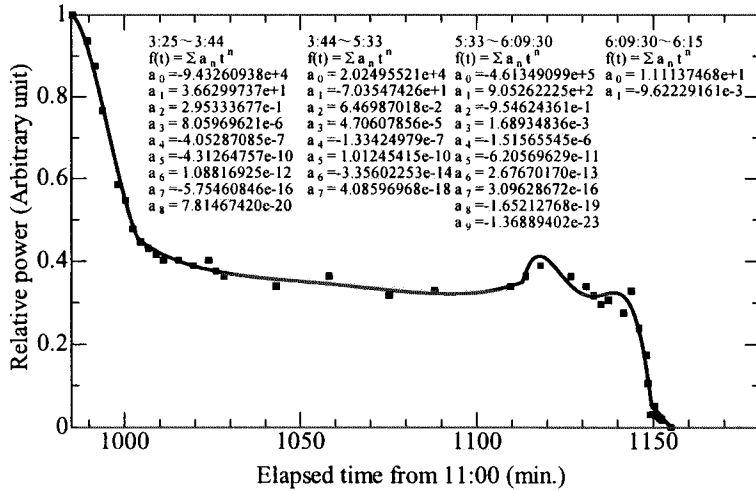
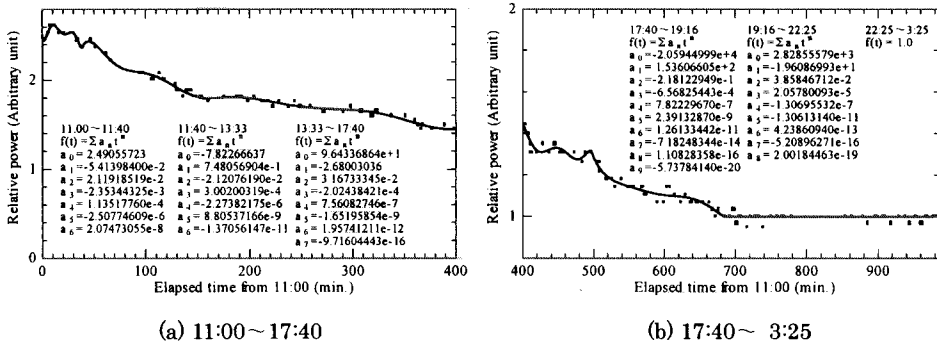


図10 プラトー部の fitting 関数

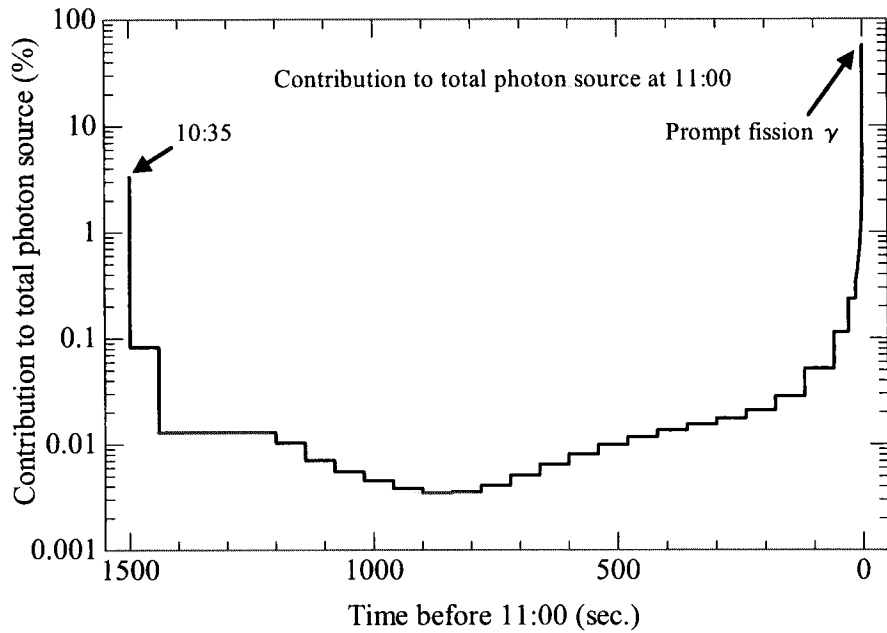


図 11 11:00 における γ 線源強度に対する即発 γ 線と FP 核種の崩壊 γ 線の寄与

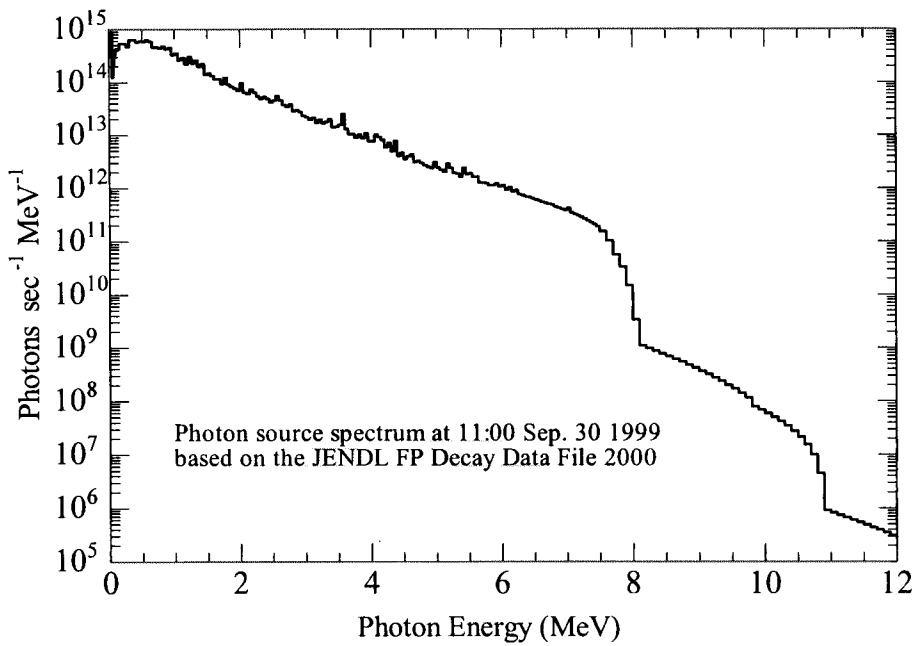


図 12 11:00 における γ 線源エネルギースペクトル