

弥生炉を用いたMA崩壊熱測定
— γ 線崩壊熱測定結果 —
(研究報告書)

2000年8月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松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)

2000

弥生炉を用いた MA 崩壊熱測定

— γ 線崩壊熱測定結果—

(研究報告)

大川内 靖^{*1)} 庄野 彰^{*1)}

要旨

U-235 及び Np-237 における高速中性子核分裂による核分裂生成物からの γ 線崩壊熱を、放射線計測法 (γ 線エネルギースペクトルを測定する方法) を用いて測定した。試料は、東京大学の高速中性子源「弥生炉」を用いて照射した。 γ 線エネルギースペクトルの測定は、NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて行い、照射中の核分裂数の評価は、Ge 検出器を用いて測定した γ 線エネルギースペクトルから求めた。測定された γ 線 (1024ch のパルス波高分布) はバックグラウンドを差し引き、検出器の応答関数のエネルギー群構造に一致するように 340 群へバンチングした。バンチングしたパルス波高分布は、アンフォールディングコード FERDO と検出器の応答関数を用いてエネルギースペクトルに変換した。エネルギースペクトルに変換後、核分裂数で規格化し、エネルギーで積分することで測定したタイムステップ毎の崩壊熱を得た。実験から直接得られる有限時間照射崩壊熱は、照射条件が異なる実験値や各種計算値との比較ができないので、瞬時照射崩壊熱に変換した後、JNDC-V2 を用いた総和計算値と比較した。

今回測定した U-235 の結果は、同様の手法を用いて測定された他の結果と約 10% で一致しており、実験手法の再現性が確認できた。今回測定した Np-237 の結果は、冷却時間が約 200 秒～2500 秒の範囲で JNDC-V2 を用いた総和計算値と約 8% で一致した。今後の課題として、実験誤差の検討、核分裂数の最終評価などが挙げられる。また、冷却時間の短いデータの精度を上げるために短時間照射の追加測定を行う必要がある。冷却時間の長いデータの精度向上のためには、データ処理の改善が必要である。

また、 β 線崩壊熱については γ 線と同様の測定データを得ており、エネルギー校正や検出器の応答関数に留意して γ 線崩壊熱と同様のデータ処理、総和計算との比較を進める予定である。

*1) 大洗工学センター システム技術開発部 炉心技術開発 Gr

August, 2000

Decay Heat Measurement of Minor Actinides at YAYOI (Measurement Results of Gamma-Ray Decay Heat)

Yasushi OHKAWACHI^{*1} · Akira SHONO^{*1}

Abstract

Gamma-ray decay heat released from fission products has been measured for fast neutron fissions of U-235 and Np-237 using the radiation spectrometry method. The samples were irradiated at fast neutron source reactor "YAYOI" of the University of Tokyo. Gamma-ray energy spectra were measured using a NaI(Tl) scintillation detector. And, the number of fission was evaluated from measured gamma spectra by Ge detector. For the measured gamma-ray, the background count was subtracted from the pulse height distribution of 1024 channels measured. The results were grouped by 340 channels to match the response matrix of the detector. This distribution was converted to energy spectra using the FERDO code and the response matrix of the detector. Normalized decay heat by the number of fission was obtained by integration of the energy spectra for each time step.

The finite irradiation decay heat that is directly obtained by experiments can not be compared with experimental results and calculational results obtained under various irradiation conditions. So, the finite irradiation decay heat was converted to the fission burst decay heat. These results were compared with summation calculations using JNDC-V2 decay data file. The present results on U-235 were compared with other experimental data using the same method. The present results agreed with other experimental data using the same method within 10%, suggesting the repeatability of experimental method. The present results on Np-237 were compared with the results of summation calculations using JNDC-V2 decay data file. As the result, the present results agreed with summation calculations within 8%. Problems to be solved for the future are estimation of the experimental error, re-evaluation of the number of fission using updated nuclear data. To improve accuracy of decay heat data in shorter cooling time range, less irradiation experiment will be useful. Furthermore, to improve accuracy of decay heat data in longer cooling time range, improvement of the data processing must be considered.

Beta-ray decay heat was also measured using the same method. In the future, these data will be converted to the fission burst decay heat considering the energy calibration and the response matrix of the plastic scintillation detector. These results will be compared with the summation calculations using JNDC-V2 decay data file.

*1) Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

目次

第1章 緒言	1
第2章 実験	2
2.1 照射試料と照射カプセル	2
2.2 照射位置と気送管システム	3
2.3 γ 線検出器	4
2.4 照射時間と測定時間	4
2.5 核分裂数の測定方法	5
第3章 γ 線エネルギースペクトルの導出	21
3.1 FERDO コード	21
3.2 応答関数	22
3.3 FERDO 入力データの作成	23
第4章 測定結果とデータ解析	29
4.1 核分裂数評価結果	29
4.2 γ 線スペクトル測定とアンフォールディングの結果	32
4.3 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱	32
4.4 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱	34
4.5 有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求めるための補正係数	35
4.6 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱	37
4.7 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱	37
第5章 今後の課題	82
5.1 核分裂数評価結果について	82
5.2 核分裂数評価に用いている核データの見直し	82
5.3 有限時間照射崩壊熱結果と瞬時照射崩壊熱結果について	82
5.4 実験誤差の検討	82
5.5 Np-237 測定の照射時間について	82
第6章 結言	84
謝辞	85
参考文献	86
付録A	87

表リスト

表 2-4-1 U-235 の測定時間と測定待ち時間	7
表 2-4-2 Np-237 の測定時間と測定待ち時間	9
表 2-4-3 これまでの測定実績	10
表 3-2-1 NaI(Tl) シンチレーション検出器の応答関数エネルギー群構造	24
表 4-1-1 ピーク面積出力リスト例	39
表 4-1-2 核分裂数評価に用いた核データとその誤差	40
表 4-1-3 γ 線標準線源測定データと光電ピーク効率	41
表 4-1-4 U-235 核分裂数評価結果とその誤差 (10 秒照射, 原子炉出力 500W)	42
表 4-1-5 U-235 核分裂数評価結果とその誤差 (100 秒照射, 原子炉出力 500W)	43
表 4-1-6 Np-237 核分裂数評価結果とその誤差 (100 秒照射, 原子炉出力 1900W)	44
表 4-1-7 Np-237 核分裂数評価結果とその誤差 (500 秒照射, 原子炉出力 1900W)	45
表 4-3-1 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱 (10 秒照射, 試料 No.3)	46
表 4-3-2 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱 (10 秒照射, 試料 No.12)	47
表 4-3-3 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱 (100 秒照射, 試料 No.2)	48
表 4-4-1 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱 (100 秒照射, 試料 No.672)	49
表 4-4-2 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱 (500 秒照射, 試料 No.672)	50
表 4-5-1 U-235, 照射時間 10 秒の総和計算値と補正係数	51
表 4-5-2 U-235, 照射時間 100 秒の総和計算値と補正係数	52
表 4-5-3 Np-237, 照射時間 100 秒の総和計算値と補正係数	53
表 4-5-4 Np-237, 照射時間 500 秒の総和計算値と補正係数	54
表 4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (試料 No.3)	55
表 4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (試料 No.12)	56
表 4-6-3 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (試料 No.2)	57
表 4-6-4 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (total)	58
表 4-7-1 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (100 秒照射)	59
表 4-7-2 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (500 秒照射)	60
表 4-7-3 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (total)	61

図リスト

図 2-1-1 Np-237 照射試料	11
図 2-1-2 照射用カプセル全体図	12
図 2-1-3 照射用カプセル部品図	13
図 2-2-1 気送管システム全体の概要図	14
図 2-2-2 崩壊熱測定装置の概要	15
図 2-2-3 気送管システムの全体詳細図	16
図 2-2-4 鉛遮蔽箱の全体図	17
図 2-2-5 カプセル通過検出部	18
図 2-2-6 照射管部組立図	19
図 2-3-1 γ 線検出器のブロック・ダイヤグラム	20
図 3-2-1 γ 線応答関数（入力データ読み取り値）	25
図 3-2-2 γ 線応答関数（論文掲載図）	25
図 3-2-3 FERDO 入力（Co-60 測定値）	26
図 3-2-4 FERDO 出力結果（Co-60）	26
図 3-2-5 FERDO 入力（Cs-137 測定値）	27
図 3-2-6 FERDO 出力結果（Cs-137）	27
図 3-2-7 FERDO 入力（Na-22 測定値）	28
図 3-2-8 FERDO 出力結果（Na-22）	28
図 4-1-1 光電ピーク効率曲線	62
図 4-2-1 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-1）	63
図 4-2-2 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-2）	64
図 4-2-3 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-3）	65
図 4-2-4 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-4）	66
図 4-2-5 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-5）	67
図 4-2-6 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-6）	68
図 4-2-7 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-7）	69
図 4-2-8 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-8）	70
図 4-2-9 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-9）	71
図 4-2-10 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-10）	72
図 4-2-11 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-11）	73
図 4-2-12 U-235,10 秒照射のアンフォールディング結果（試料 No.3-12）	74
図 4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料 No.3）	75
図 4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料 No.12）	76
図 4-6-3 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料 No.2）	77
図 4-6-4 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（total）	78
図 4-7-1 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱（100 秒照射）	79
図 4-7-2 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱（500 秒照射）	80

第1章 緒言

核分裂生成物（FP）の崩壊に伴って放出されるエネルギー（崩壊熱）は、原子炉停止直後において定格出力の6～7%にも及び徐々に減衰しながらも長期間にわたって発生し続けるため、崩壊熱の予測精度向上は原子炉及び核燃料サイクル関連施設の安全性、信頼性及び経済性向上に密接な関係がある。

現在、経済性向上のための高燃焼度炉心や環境負荷低減を目指したマイナーアクチニド（MA）入り燃料炉心の設計及びそれに関連する核燃料サイクル施設が検討されているが、ここで新たに重視すべきMA核種の精度良い崩壊熱測定データは現状ではほとんど存在しない。そこでMA核種の崩壊熱予測精度向上を目的として、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速中性子源「弥生」を用いたMA崩壊熱測定を実施した。

高速中性子核分裂によるFPからの崩壊熱測定は、過去に秋山らによってU-233,U-235,Pu-239等が弥生炉を用いて実施されている^{1) 2) 3)}。本実験は、秋山らの手法を踏襲し、照射時間や測定時間の制御はパソコンによる自動化を図ることにより精度向上を目指した。対象核種はU-235とNp-237で、照射後試料から放出されるβ線及びγ線のエネルギースペクトルを測定した。測定されたβ線及びγ線のエネルギースペクトルはエネルギーで積分し、照射時の核分裂数で規格化して有限時間照射崩壊熱を求めた。有限時間照射崩壊熱は、特定の照射条件における崩壊熱であるため異なる照射条件の実験値や各種計算値と比較することができない。そこで、有限な照射時間の効果を補正した瞬時照射崩壊熱をU-235については照射後19秒～20,000秒、Np-237は照射後64秒～20,200秒について整理した。U-235については秋山らの測定結果及びJNDC-V2を用いた総和計算値との比較を行った。Np-237については、JNDC-V2を用いた総和計算値との比較を行った。実験はβ線及びγ線それぞれに対して同様の測定を行っているが、本報告書はγ線崩壊熱測定結果に関する速報版である。

なお、本研究は東京大学との共同研究であり、機構は崩壊熱測定及び測定結果の解析を分担した。本報告書は、機構が分担した部分を単独報告書として取りまとめたものである。

第2章 実験

U-235 及び Np-237 の高速中性子核分裂による FP からの γ 線崩壊熱を、放射線計測法を用いて測定した。試料の照射は、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速中性子源「弥生」のグレージングホール^{4), 5), 6), 7)} に設置された気送管システムを用いて実施した。試料は自動的に所定時間照射した後、計測部に回収され鉛遮蔽箱中の NaI(Tl) シンチレーションカウンターを用いて測定される。測定されたパルス波高分布は、アンフォールディングコードで処理してエネルギースペクトルに変換し、単位時間、1 核分裂当たりに規格化した後、エネルギーについて積分して崩壊熱を求めた。核分裂数の測定は、遮蔽箱中の測定が終了後、Ge 検出器を用いて行った。以下、実験内容を詳細に示す。

2.1 照射試料と照射カプセル

U-235 照射試料は、過去に秋山らが実際に使用していたもので全部で 20 枚残っている。直径 18mm, 厚さ 0.1mm の Ti 板に直径 10mm の大きさで U-235 金属が約 1.6mg 均一に電着しており、電着面上には厚さ $10 \mu\text{g/mm}^2$ のマイラーフィルムをかぶせ、周囲を塩化ビニール製リング（外径 20mm, 内径 14mm, 厚さ 2mm）で固定したものである。純度は 97.652 % で、不純物として U-234 が 1.168 %、U-236 が 0.170 %、U-238 が 1.005 % 含まれている。1 枚 1 枚の詳細なデータについては情報が残っていないのでわからない。

Np-237 照射試料は、アマシャム株式会社（現、株式会社千代田テクノル）より合計 4 枚購入した。Np-237 試料の形状を図 2-1-1 に示す。直径 15mm, 厚さ 0.1mm の Ti 板に直径 10mm の大きさで NpN を 0.5mg (13kBq) 均一に電着し、公称値 $40 \mu\text{m}$ のポリエチレンフィルムで密封した。試料の純度は 99.9% である。試料の重量は、核分裂断面積及び照射条件（原子炉出力や照射時間）の制約を考えると U-235 試料と同等かそれ以上が望ましいが、Ti 板に NpN を電着する製作方法では 0.5mg が限度であることがわかった。そのため、U-235 試料の約 1/3 の重量となっている。よって、Np-237 の照射は U-235 より原子炉出力を増加し、かつ照射時間を長くすることで照射後の γ 線計数率を増加させるよう配慮した。

照射用カプセル及び部品について図 2-1-2 と図 2-1-3 に示す。当初、カプセルは秋山らのものを踏襲し、先端に接着材で試料を固定する方法を採用していた。しかし、試料を電着していない Ti 板のみのダミーカプセルで気送管システムのテストを繰り返していたところ、接着材の一部が剥がれてしまった。原因は中性子による接着材の劣化や、カプセルが計測部へ回収された時にクッション部分と衝突する際のダメージが考えられる。そこで、接着材を使用せずカプセル本体とキャップの間に挟んで固定する方法を考えた。キャップ部分は試料が直接見えるように、直径 13mm の穴が空けてある。この方法だとキャップがあるため、回収時に試料と回収位置にあるクッションが直接衝突することがない。また、キャップはカプセル輸送中に外れることがないように、同材質で製作したピンで固定している。

2.2 照射位置と気送管システム

試料の照射は、弥生炉のブランケット部を貫くグレージングホール中心で行った。図2-2-1に気送管システムの全体概要と照射位置を示す。過去に秋山らが使用したカプセルの搬送のための気送管システムは撤去されていたため、サイクル機構が新たに設置した。試料の挿入や取り出し、システム制御、測定などは原子炉室とは別棟の研究棟内にある気送管室で行えるようになっている。気送管は気送管室から一度屋外に出た後、原子炉室へ入り炉頂部からグレージングホールへと繋がっている。気送管室には鉛遮蔽箱が設置されている。鉛遮蔽箱の中には、 β 線検出器と γ 線検出器が固定されており、鉛遮蔽箱を移動させることで、 β 線あるいは γ 線が測定できるようになっている。鉛遮蔽箱内に検出器を設置した理由は、環境中の γ 線を遮蔽するためである。また、鉛遮蔽箱の上部には試料の挿入口及び照射後カプセル払い出し口が設置してある。図2-2-2に崩壊熱測定装置の概要を示す。

気送管はステンレス製(SUS304)で、照射位置から約648.5mm上に窓が空けてある。窓には、厚さ5mm×φ17.8mmの耐放射線用パイレックスガラスがはめ込まれており、その外側にはレーザーセンサーによる光電スイッチが設置してある。カプセルが通過するとレーザーが遮断され、通過を確認できるようになっている。この通過確認によって、カプセルの炉心への挿入・取り出しの信号を得る。また、このカプセル到達信号により照射時間を管理している。このようなレーザーセンサーによる光電スイッチは、この他2ヶ所設置してある。1つは、鉛遮蔽箱の側面で高さは検出器位置の数cm上である。これにより照射カプセルが、検出器位置にセットされたことを確認する。残りの1つは、検出器上部の照射カプセル回収位置に設置してある。これにより、照射カプセルが検出器上部に回収されたことを確認し、カプセル払出のための扉の開閉をエアシリンダーによって行う。扉が開いたあと、カプセルは自由落下で検出器上部にセットされたプラスチックのカプセルホルダーで受け止め、所定の位置に試料がセットされる。この他、リミットスイッチが計4ヶ所設置してある。1つは照射カプセル挿入口で、蓋を閉めたことを確認する。同じように照射カプセル回収場所の払出扉位置に設置してあるリミットスイッチで、払出扉が閉まったことを確認する。残りの2つは、検出器が設置してある鉛遮蔽箱の下に設置してある。これは、検出器位置が β 線測定側にあるのか γ 線測定側にあるのかを確認するためのものである。この検出器位置の確認は、気送管室にある制御盤上に検出器位置ランプが点灯することで確認できるようになっている。

照射カプセルの炉心への搬送及び検出器上部への引き戻しは、気送管システムからの信号による電磁弁の開閉動作によって制御されている。気送管の空気圧は当初2kg/cm²Gであったが、「2.1 照射試料と照射カプセル」で述べたように搬送の繰り返しテストを行っていた際にカプセルが破損したため、カプセル形状と試料の取り付け方を改良した。また、空気圧を2kg/cm²Gから0.6kg/cm²Gに下げた。空気圧を下げてカプセルの搬送テストを繰り返し100回行ったところ、改良カプセルの破損は見られなかった。空気圧を下げることによるデメリットとして引き戻し速度の低下が懸念されたが、空気圧2kg/cm²Gの時にカプセルを検出器上部に回収し測定を開始するまでに約7秒かかっていたものが、0.6kg/cm²Gに下げても1秒遅れるだけで約8秒後から測定可能であること

がわかった。よって、実際の照射では空気圧 $0.6\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ で実施している。ちなみにカプセルが挿入口から炉心照射位置に到達するまでの搬送時間は約 4 秒である。図 2-2-3 に気送管システム全体の詳細図を、図 2-2-4 に鉛遮蔽箱の全体図を示す。また、図 2-2-5 にはカプセル通過検出部を、図 2-2-6 には実験孔内の照射管部を図示する。光電スイッチやリミットスイッチの位置については、これらの図を参照されたい。

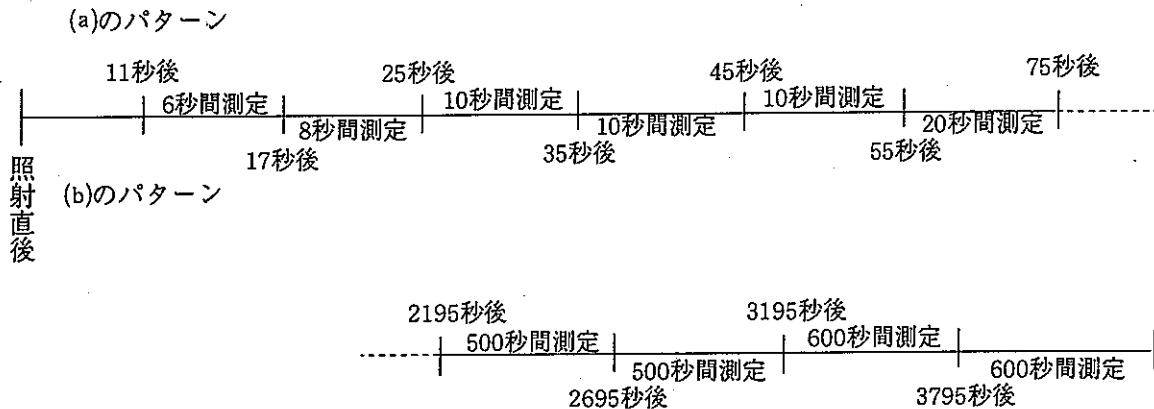
2.3 γ 線検出器

γ 線エネルギースペクトルの測定は、過去に秋山らが実際に使用していた NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて行った。大きさは直径 76.2mm、厚さ 76.2mm で、光電子増倍管は RCA-8054 が用いられている。検出器の前面には、照射試料から放出される β 線の入射を防ぐために厚さ 30mm のポリエチレンの板が付けられており、検出器は環境のバックグラウンド計数を低減するために鉛遮蔽箱の中に設置されている。図 2-3-1 に γ 線検出器のブロック・ダイヤグラムを示す。検出器前面から測定試料までの距離は、秋山らの実験と同じく 10cm とした。これは、「3.2 応答関数」で述べるように秋山らが実験的に求めた応答関数を使用できるようにするためである。光電子増倍管からの信号は、プリアンプを通してアンプで増幅され波形処理された後、1024ch パルス波高分析器により解析される。検出器の利得は、秋山らと同様に 1ch 当たりおよそ 5keV になるように調整し、5MeV までの γ 線が測定できるようにした。

2.4 照射時間と測定時間

U-235 の測定は、秋山らの実験の再現性を確認する意味も含んでいるため、原子炉出力や照射時間、測定時間及び測定待ち時間は全く同じとした。表 2-4-1 の (a)～(d) に U-235 の測定開始時間と測定時間を示す。原子炉出力は全て 500W である。照射時間は 10 秒と 100 秒の 2 通りがあり、10 秒照射は冷却時間の短いデータを（照射後 11～4395 秒の範囲）、100 秒照射は冷却時間の長いデータを（照射後 70～25950 秒の範囲）取得するために行った。照射時間が 10 秒の場合、照射後約 1 時間程経過すると計測される γ 線は環境バックグラウンドレベルまで減衰するので、それより冷却時間の長いデータの測定はできない。照射時間が 100 秒の場合は逆に、冷却時間の短いデータ（照射後 70 秒より以前のデータ）は、検出器の不感時間が大きすぎるため測定できない。

測定パターンは、表 2-4-1 に示したように 10 秒照射、100 秒照射共に 2 組みセットとなっている。測定パターンの一例を以下に示す。測定パターン (a) は、照射 11 秒後から 6 秒間測定し、8 秒間の待ち時間がある。そして、 $11+6+8=25$ 秒後から 10 秒間測定し、10 秒間の待ち時間となる。このように、測定時間と待ち時間が繰り返されていく。測定パターン (b) は、測定パターン (a) で待ち時間だった部分を測定時間とし、測定時間だった部分を待ち時間としている。こうして、測定パターン (a) と (b) がセットになることで連続した測定となる。



Np-237 の核分裂断面積（高速炉における 1 群断面積の値）は、U-235 の値に比べ約 1/6 と小さく、さらに Np-237 試料は「2.1 照射試料と照射カプセル」で述べたように U-235 試料に比べて約 1/3 の重量しかないため、U-235 と同条件では十分な γ 線計数率が得られない。そこで、原子炉出力は 1900W、照射時間は 100 秒及び 500 秒で実験を行った。表 2-4-2 に Np-237 の測定開始時間と測定時間を示す。ちなみに Np-237 の測定時間と測定待ち時間のパターンは、照射時間 100 秒及び 500 秒とも同じパターンで測定している。表 2-4-3 にこれまでの測定実績を示す。弥生炉の最大出力は 2,000W であるため、1,900W という出力は事実上最大値と考えて良い。照射時間についてはこれが最適値というわけではなく、今後追加測定を行うにあたっては検討が必要である。これについては第 5 章で詳しく述べる。

2.5 核分裂数の測定方法

照射中に発生した核分裂数を評価するために、鉛遮蔽箱内での γ 線エネルギー測定が終了した後、隣室にある Ge 検出器を用いて Nb-97, Nb-97m, Y-91m, Xe-135 の崩壊に伴い放出される γ 線の強度を測定した。 γ 線の測定は、4096ch のパルス波高分析器を用いて約 2MeV まで行った。測定されたパルス波高分布から、上述した 4 核種の崩壊に伴い放出される γ 線エネルギーに相当するピークを同定した。

選定した 4 核種は γ 線強度が大きく、半減期については照射後 2~3 時間から 1 日程度の期間で測定するのに適している。また、これら 4 核種の崩壊系列を見てみると、選定した 4 核種の親核は比較的長い半減期を持っており、さらに原子番号の小さな核種は半減期が非常に短い。よって、核分裂発生後すぐに崩壊し、親核が生成すると見なすことができる。また、選定した 4 核種の独立核分裂収率は、その親核の累積核分裂収率に比べて無視できるほど小さい。ただし、Xe-135 はその原則に該当しないので、Xe-135 と Xe-135m の独立核分裂収率を 0 として、親核である I-135 の累積核分裂収率に加えるという近似をしている。（U-235 の高速中性子核分裂の場合、Xe-135 と Xe-135m の独立核分裂収率はそれぞれ 0.116% と 0.207% なのに対して、親核である I-135 の累積核分裂収率は 6.027% である。また、Np-237 の高速中性子核分裂の場合、Xe-135 と Xe-135m の独立核分裂収率はそれぞれ 0.232% と 0.650% なのに対して、I-135 の累積

核分裂収率は 6.655%である。) 以上のことから、選定した 4 核種の親核を A、目的の γ 線を放出する選定 4 核種を B、その娘核を C とすると崩壊系列は、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ と単純化できる。このような考え方を基にして、測定した 4 核種のピーク面積より核分裂数を算出した。算出方法の詳細については、「4.1 核分裂数評価結果」に示す。

表2-4-1 U-235の測定開始時間と測定時間 (1/2)

(a)10秒照射時のパターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
11	6
25	10
45	10
75	20
115	40
195	60
315	80
495	100
795	200
1395	400
2195	500
3195	600

(b)10秒照射時のパターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
17	8
35	10
55	20
95	20
155	40
255	60
395	100
595	200
995	400
1795	400
2695	500
3795	600

表2-4-1 U-235の測定開始時間と測定時間 (2/2)

(c)100秒照射時のパターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
70	40
150	60
270	80
450	100
750	200
1350	400
2150	500
3150	600
4350	800
5950	1000
7950	2000
11950	3000
17950	4000

(d)100秒照射時のパターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
110	40
210	60
350	100
550	200
950	400
1750	400
2650	500
3750	600
5150	800
6950	1000
9950	2000
14950	3000
21950	4000

表2-4-2 Np-237の測定開始時間と測定時間

(e)Np-237の測定パターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
11	6
25	10
45	10
75	20
115	40
195	60
315	80
495	100
795	200
1395	400
2195	500
3195	600
4350	800
5950	1000
7950	2000
11950	3000
17950	4000

(f)Np-237の測定パターン

照射後測定 開始時間 (秒)	測定時間 (秒)
17	8
35	10
55	20
95	20
155	40
255	60
395	100
595	200
995	400
1795	400
2695	500
3795	555
5150	800
6950	1000
9950	2000
14950	3000
21950	4000

表2-4-3 これまでの測定実績

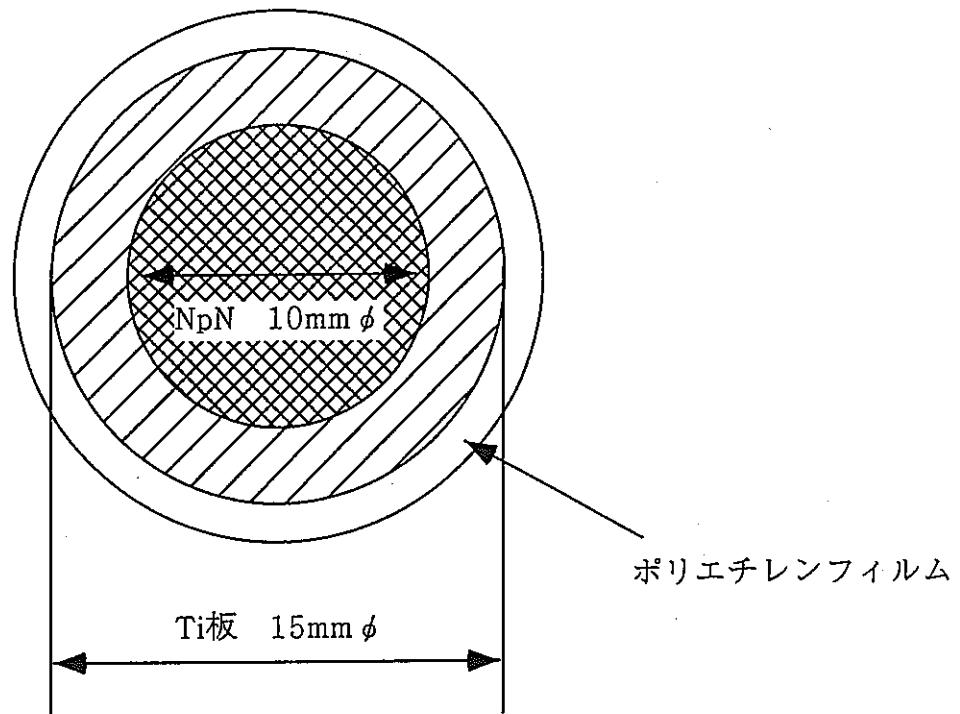
測定核種	原子炉出力 (W)	測定放射線	照射時間 (秒)	測定パターン	試料番号	照射後 データ	照射前 データ	Ti板照射 データ	環境バック グランド
U-235	500	β 線	10	a	14	○	◎	○	○
					15	○	◎	○	○
				b	-	×	?	×	○
			100	c	20	○	◎	○	○
				d	-	×	?	×	○
		γ 線	10	a	3	○	◎	○	○
					12	○	◎	○	○
				b	3	○	◎	×	○
			100	c	2	○	○	○	○
				d	2	○	○	×	○
Np-237	1500	β 線	10	e	753	○	◎	○	○
			100	e	671	○	◎	○	○
				f	754	○	◎	×	○
			500	e	671	○	◎	×	○
				f	-	×	?	×	○
		γ 線	100	e	754	○	◎	○	○
					672	○	◎	○	○
			f	753	○	◎	○	○	○
			500	e	672	○	◎	○	○
				f	-	×	?	×	○

◎ ; 平成11年度の測定

○ ; 平成11年度以前の測定

× ; 未測定

? ; 過去に測定した試料番号であれば必要なし



Ti板（厚さ0.1mm）にNpNを0.5mg電着してポリエチレンフィルムで密封化

図2・1・1 Np・237試料の形状

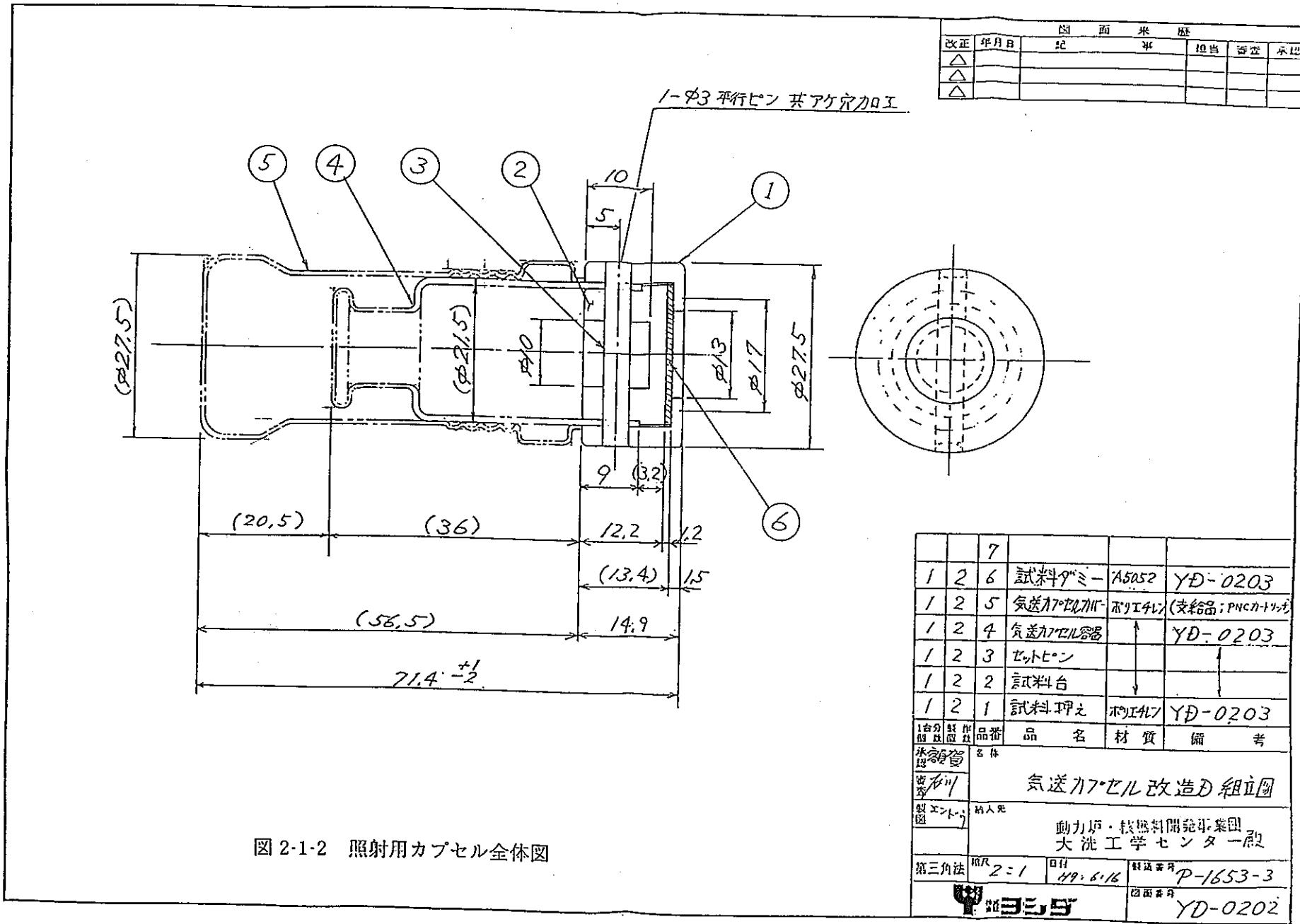
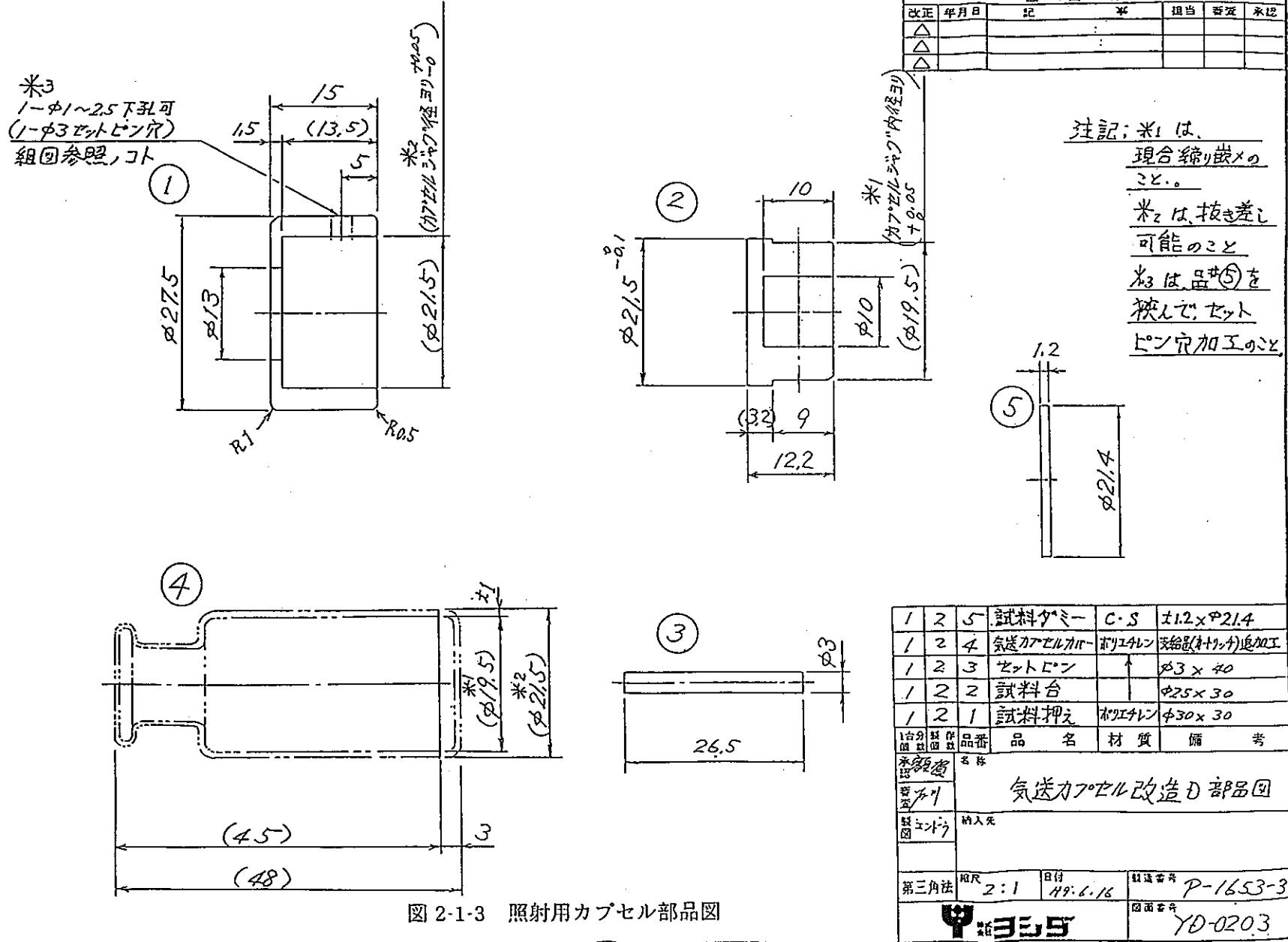
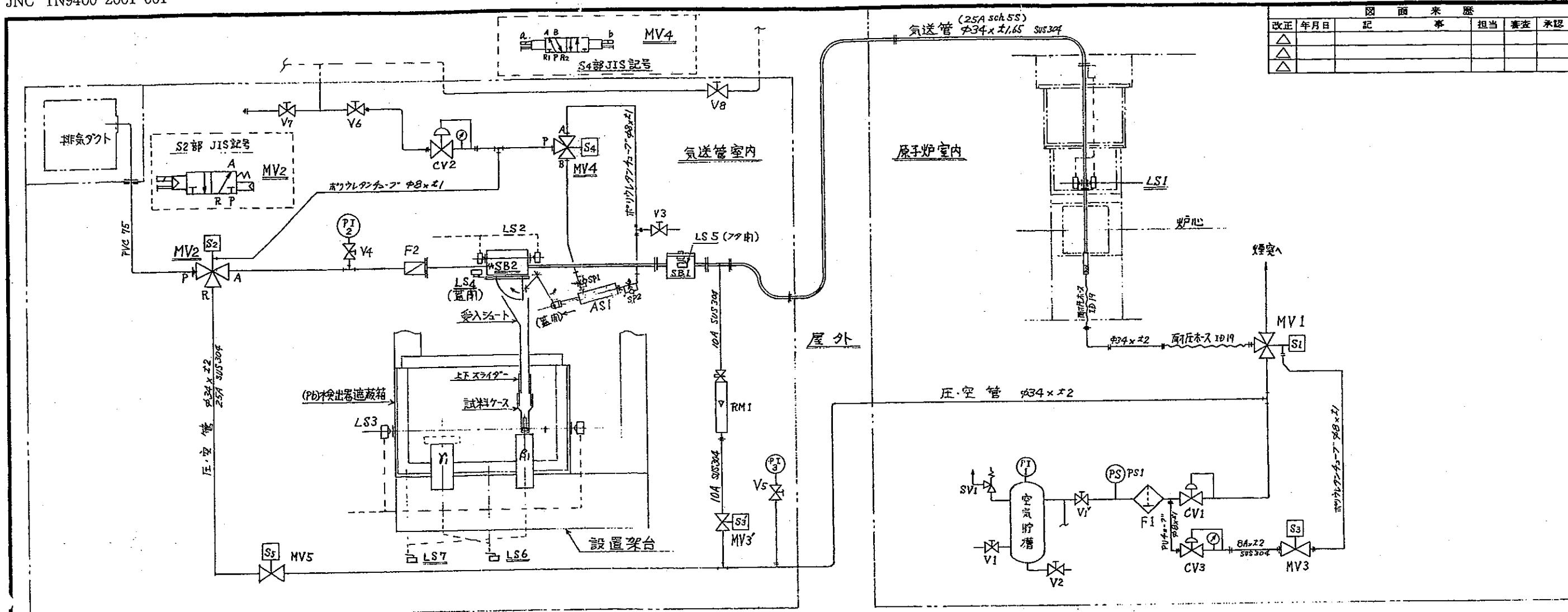


図 2-1-2 照射用カプセル全体図





気送管照射装置 系統図 記号説明

記号	機器番号	機器名	備考	記号	機器番号	機器名	備考
△	CV1~CV3	減圧弁	CV2,CV3: X-射線 MV1,MV2: 極助圧式 MV2,MV4: 新設記号	□	AS1	エアーシリンダー	ヘッド側トランシオン式
○	MV1~MV4	電磁弁(3方口)	MV1,MV2: 極助圧式 MV2,MV4: 新設記号	△	V1~V8	手動バルブ	
□	MV5~MV7,MV8	電磁弁(2方口)	MV3': 未使用	△	β1	β線用検出器	
△	SV1	安全弁		△	γ1	γ線用検出器	
◇	F1	フィルター	沪過式	△	RM1	ローターメーター	未使用
□	F2	フィルター	金アミ 80メッシュ	□	SB1	試料入れ	
(PT)	PI1~PI3	圧力計	PI1: 7kg/cm ² G PI2: 2kg/cm ² G PI3: 5kg/cm ² G	□	SB2	試料取出シ	
(PS)	PS1	圧力スイッチ		+	—	(管継手類)	
□	LS1~LS3	光電スイッチ	アンプ分離型 投光・受光式	—	—	(端部スプリング)	
□	LS4~LS7	リミットスイッチ	汎用アームフランジ式	(②)	—	圧力計(減圧弁付)	
□	SP1~SP2	スピードコントロール	シンクロロ 何基品				

1台分個数	製作個数	品番	品名	材質	備考
承認	鶴賀		名称		
審査	石川				
製図	エントラ		納入先		
			動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター一段		
第三角法	縮尺	日付	製造番号		
	—	H9.6.25	P-1653		
			図面番号	YC-9706	

図 2-2-1 気送管システム全体の概要図

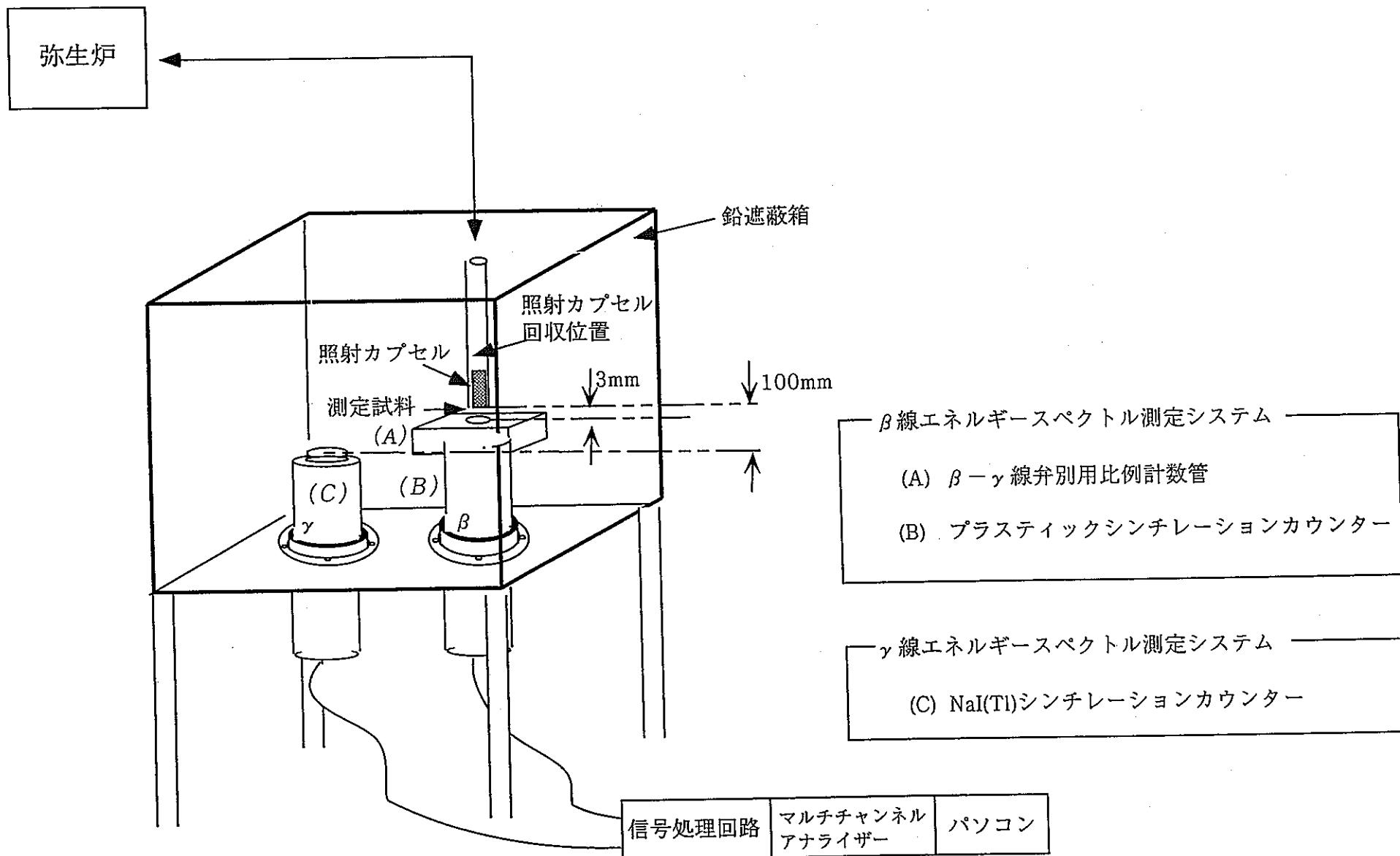


図2-2-2 崩壊熱測定装置の概要

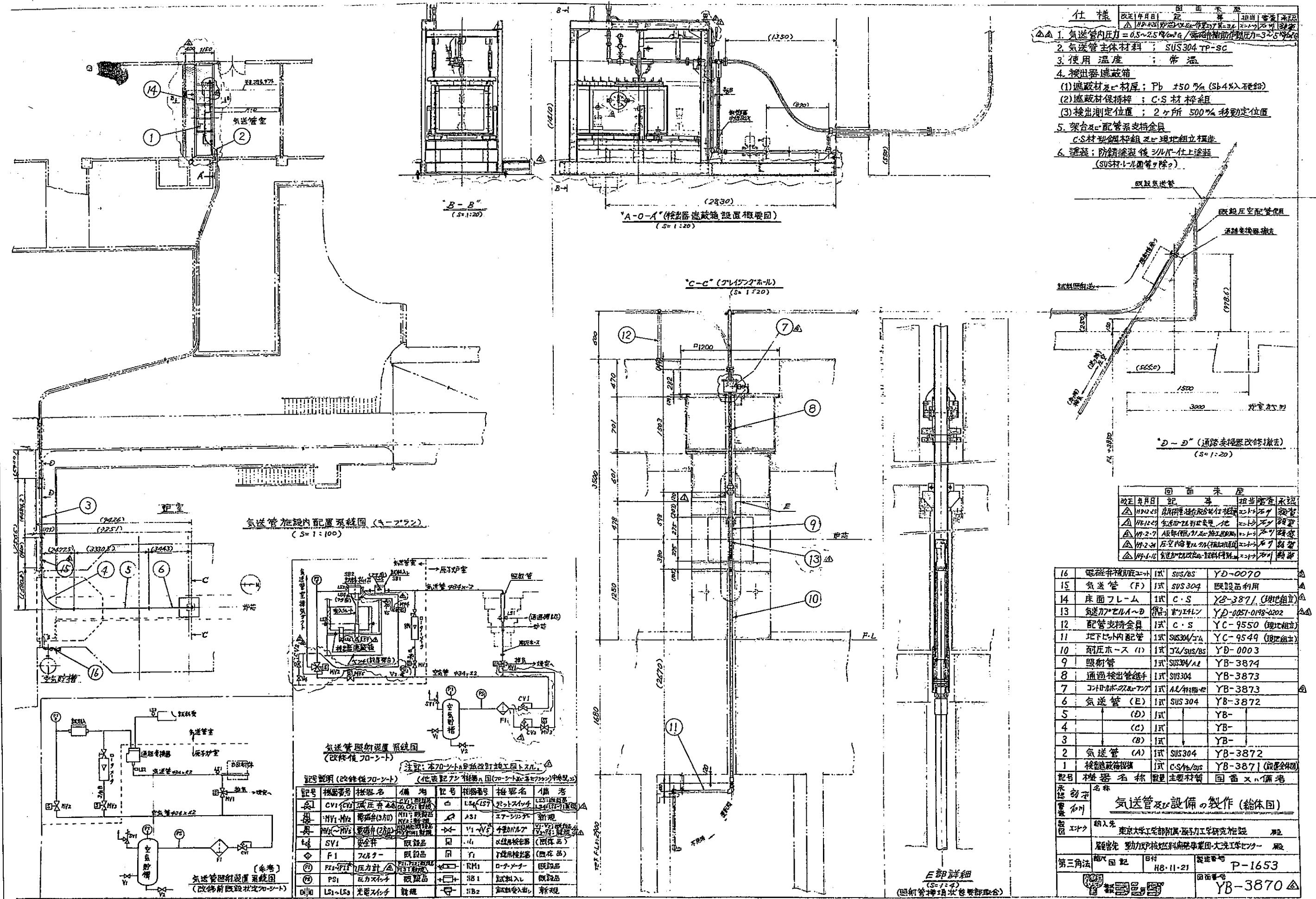
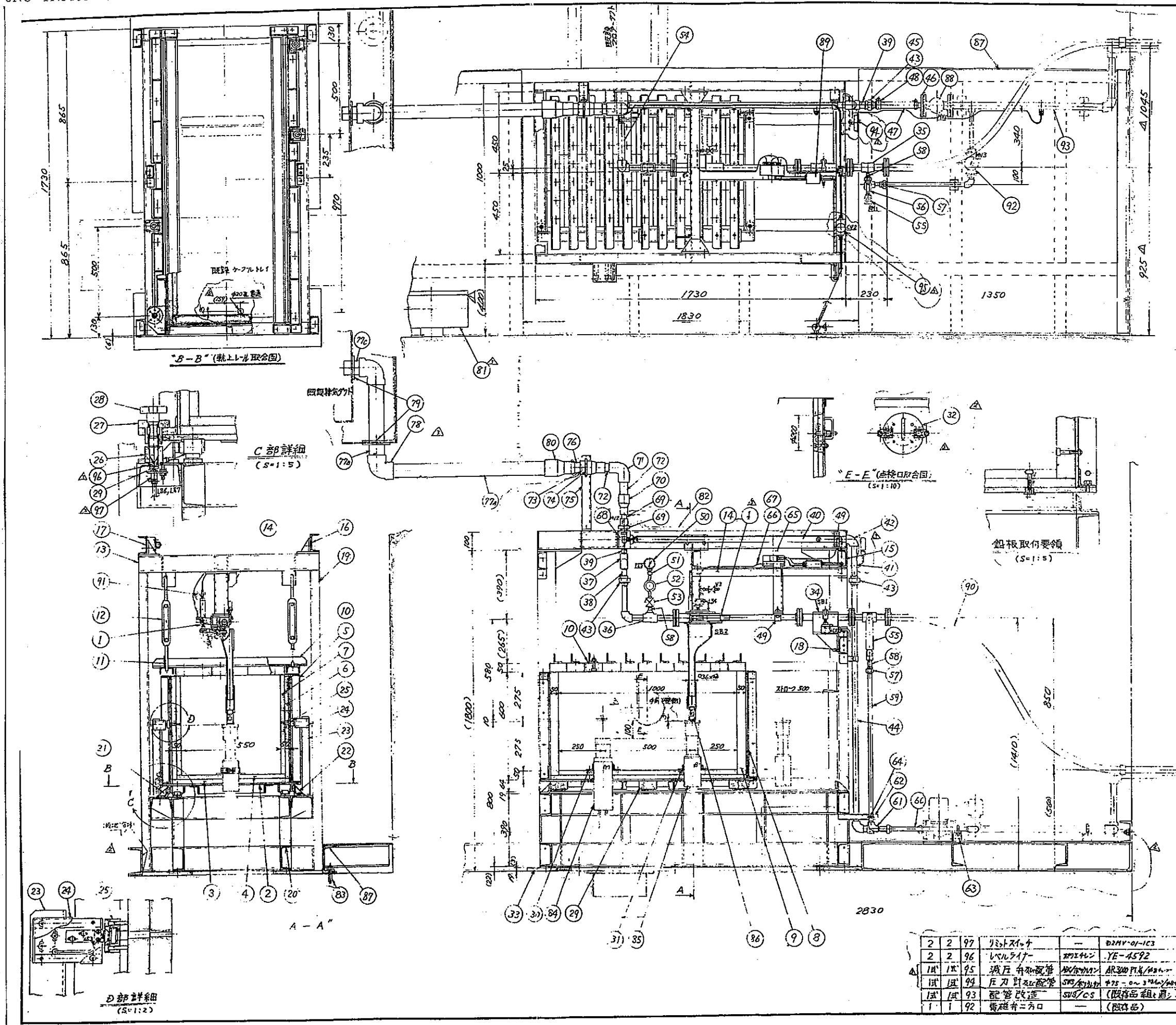


図 2-2-3 気送管システムの全体詳細図



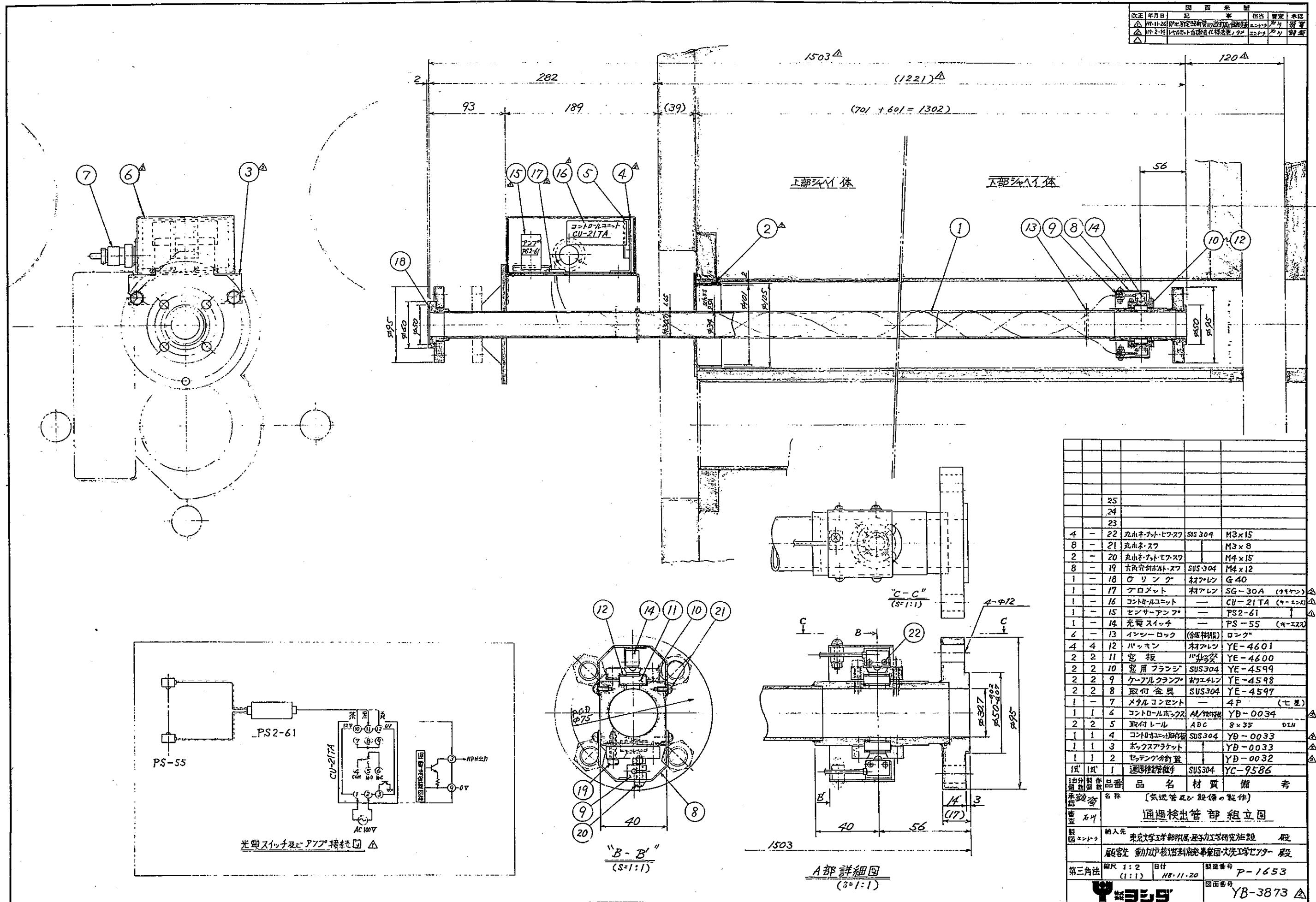


図 2-2-5 カプセル通過検出部

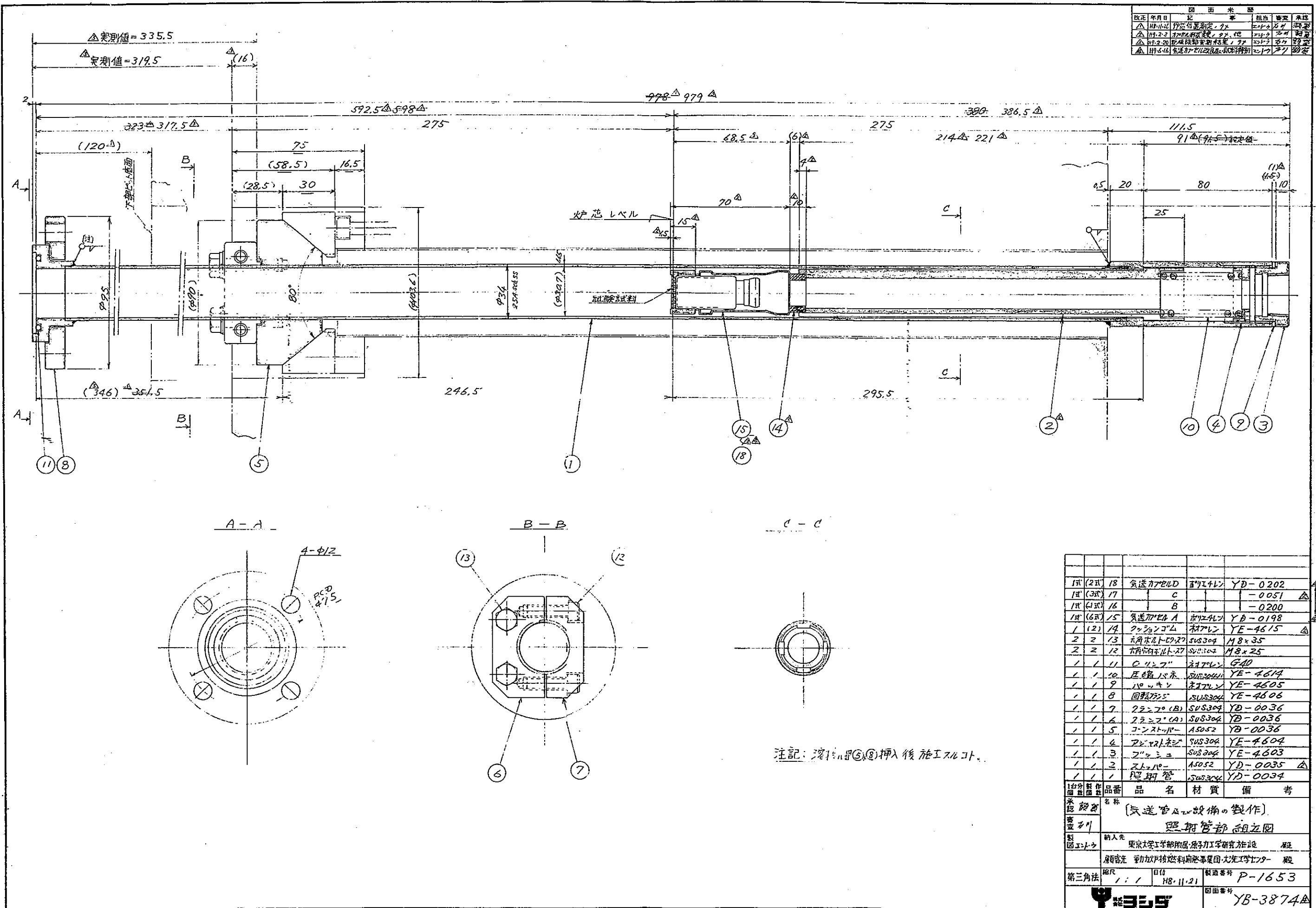


図 2-2-6 照射管部組立図

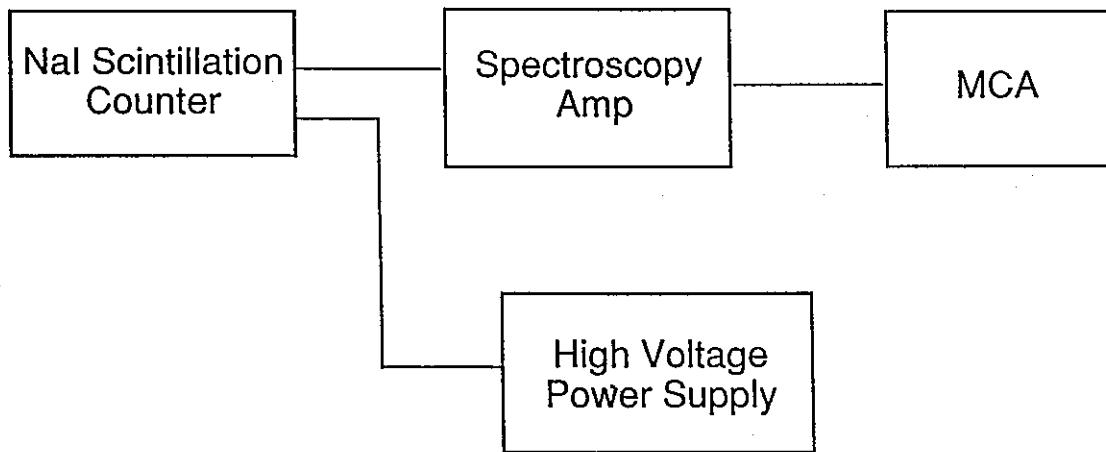


図2-3-1 γ 線検出器のブロック・ダイヤグラム

第3章 γ 線エネルギースペクトルの導出

鉛遮蔽箱内に設置された NaI(Tl) シンチレーション検出器で測定された γ 線パルス波高分布は、同検出器の応答関数を用いてエネルギースペクトルに変換し、核分裂数で規格化する。規格化されたエネルギースペクトルを、エネルギーで積分することにより崩壊熱が求められる。

パルス波高分布からエネルギースペクトルを推定する操作は、アンフォールディングと呼ばれる。ここでは、アンフォールディング計算に用いたコードやそれに必要な応答関数等について述べる。

3.1 FERDO コード

一般に連続なエネルギースペクトル $\phi(E)$ を持つ放射線をある検出器で測定した場合、入射した放射線のエネルギースペクトル $\phi(E)$ と測定されたパルス波高分布 $C(I)$ とは次式で関係づけられる。

$$C(I) = \int_0^{\infty} R(I, E) \phi(E) dE \quad \dots \quad (3-1-1)$$

$\phi(E)$: 放射線のエネルギースペクトル

$C(I)$: 測定されたパルス波高分布

$R(I, E)$: 検出器の応答関数

(3-1-1) 式を数学的に取り扱い易いようにエネルギースペクトルを群構造化すると、

$$\bar{C} = [R] \cdot \vec{\phi} \quad \dots \quad (3-1-2)$$

$\bar{C} = \{C_i\}$: パルス波高分布ベクトル (NR 次元)

$\vec{\phi} = \{\phi_j\}$: スペクトルベクトル (NC 次元)

$R = \{R_{ij}\}$: レスポンスマトリックス (NR × NC 次元)

と表される。(3-1-1) 式あるいは(3-1-2) 式を解いて、測定されたパルス波高分布からエネルギースペクトルを推定する操作はアンフォールディングと呼ばれる。本研究では、アンフォールディング計算に FERDO⁸⁾ コードを用いた。本コードは ORNL で開発されたコードで、財団法人高度情報科学技術研究機構 (RIST) を通じて入手した。

FERDO の入力には、測定したパルス波高分布とその誤差、検出器の応答関数、window function の 3 つが必要となる。応答関数については、「3.2 応答関数」で詳しく述べる。window function とは、アンフォールディングによって得られたエネルギースペクトルを平滑化するための検出器の分解能関数のこと、エネルギー E における検

出器のエネルギー分解能を入力することで得られる。

(3-1-2) 式を解くためには、レスポンスマトリックスの逆行列を求める必要があるがこれは困難なので、FERDO コードでは最小二乗法で解くことを基本概念としている。つまり、(3-1-2) 式より

$$C_i = \sum_{j=1}^{NC} R_{ij} \phi_j \quad \dots \quad (3-1-3)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, NR \\ j &= 1, 2, \dots, NC \end{aligned}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{NR} w_i \left(C_i - \sum_{j=1}^{NC} R_{ij} \phi_j \right)^2 \quad \dots \quad (3-1-4)$$

ここで w_i は重み係数で通常 C_i の分散の逆数で、 Q を最小にするような ϕ_j を求める。詳細については、FERDO コードマニュアル⁸⁾ に示されている。

3.2 応答関数

γ 線の測定に使用した NaI(Tl) シンチレーション検出器は、過去に秋山らが実際に使っていたものである。アンフォールディングには、この検出器の応答関数が必要となる。秋山らは、12 種類の単色 γ 線標準線源と 4 種の核反応より作られる γ 線源を用いて γ 線エネルギー 0.06～5.0 MeV の間でエネルギー 105 群、パルス波高 340 群の応答関数を実験的に求めている。この作業は非常に労力と時間を要し、困難である。そこで我々はまず、秋山らが求めた応答関数をそのまま用いたテスト計算を行い、結果が良好であれば、そのまま応答関数を使用し、そうでない場合は、実験的に求めなおすこととした。

秋山らが実験的に求めた応答関数の値は、論文には載っていない。そこで、過去に秋山らがアンフォールディング計算に使用した入力データから、応答関数に該当すると思われる部分を検索した。検索結果が確かに秋山らが実験的に求めた応答関数であることを確認するために、論文に唯一応答関数の情報として載せてある図と同じものを作成し、比較した。それらを図 3-2-1 と図 3-2-2 に示す。また、この応答関数のエネルギー群構造を表 3-2-1 に示す。これら 2 つの図が一致することから、検索結果が確かに秋山らの使用した応答関数であることを確認した。

ただし、これは検索結果が秋山らの使用した応答関数であることを確認したに過ぎず、現在の計測システムでも使用できることを確認したわけではない。そこで、 γ 線標準線源のパルス波高分布測定結果を用いてテスト計算を行った。入力に用いたパルス波高分布測定結果を図 3-2-3, 図 3-2-5, 図 3-2-7 に、出力結果を図 3-2-4, 図 3-2-6, 図 3-2-8 に示す。テスト計算の結果、入力に用いた Co-60 (1137 keV, 1333 keV), Cs-137 (662 keV), Na-22 (511 keV) のピークが見られ、アンフォールディング計算が良好であることを確認した。これにより、秋山らが実験的に求めた NaI(Tl) シンチレーション検出器の応答関数が、現在のシステムでも使えると判断した。以後、この応答関数を用いてアンフォー

ルティングを行うこととした。

3.3 FERDO コードの入力データ作成

実験では、以下の 4 種類のデータを測定する必要がある。①試料照射データ、② Ti 板照射データ、③照射前試料データ、④環境バックグラウンド。②は試料が電着してある Ti 板の放射化に伴う放射線の測定で、③は試料自身から放出される放射線の測定である。真のパルス波高分布（照射された試料中の FP から放出される γ 線）は、次式より求められる。

$$C_{T_R, T_W, T_C}(I) = \left(\frac{Y_{T_R, T_W, T_C}(I)}{T_{SC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) - \left(\frac{D_{T_R, T_W, T_C}(I)}{T_{DC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) - \left(\frac{P(I)}{T_{PC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) \dots \quad (3 \cdot 3 \cdot 1)$$

T_R : 照射時間

T_W : 測定待ち時間

T_C : 測定時間

T_{SC} : 照射後試料の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{DC} : 照射後 Ti 板の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{PC} : 照射前試料の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{BC} : 環境バックグラウンドの真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

$C_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 真のパルス波高分布

$Y_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 照射後試料からの γ 線に対するパルス波高分布

$D_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 照射後 Ti 板からの γ 線に対するパルス波高分布

$P(I)$: 照射前の試料自身からの γ 線に対するパルス波高分布

$B(I)$: 環境バックグラウンド γ 線に対するパルス波高分布

測定によって得られる①～④のパルス波高分布は 1024ch のデータである。それに対して応答関数のパルス波高は 340 群なので、バンチングする必要がある。秋山らは、 γ 線測定における検出器の利得を 1ch 当たり 5keV として約 5MeV まで測定できるように調節したとあり、我々の測定もこれを踏襲している。1024ch データを 340 群へバンチングするためには $1024\text{ch}/340\text{群} \approx 3\text{ch}$ で、1 群当たり ; $5(\text{keV}/\text{ch}) \times (3\text{ch}) = 15(\text{keV})$ となる。測定されたデータはエネルギー校正してエネルギー対カウント数に変換する。変換した測定データは、15keV ごとにバンチングして 340 群にする。その後、(3・3・1) 式より照射した試料の FP から放出される γ 線の真のパルス波高分布が求められる。

このような作業は、データ数が膨大で煩雑なため時間がかかり、またミスを犯しやすい。そこで、正確かつ短時間で処理するために、エネルギー校正された測定データから FERDO コードの入力データを作成するプログラムを作った。FERDO コードの入力データには、上述した真のパルス波高分布の他に、その誤差が必要となる。本プログラム（付録 A 参照）は、真のパルス波高分布とその誤差を求め、FERDO コードの入力データのフォーマットにしたがって出力する。

表3-2-1 NaI(Tl)シンチレーション検出器の応答関数エネルギー群構造

Bin No.	Mid-Bin Energy (MeV)	Width (MeV)	Bin No.	Mid-Bin Energy (MeV)	Width (MeV)	Bin No.	Mid-Bin Energy (MeV)	Width (MeV)
1	0.063	0.006	36	0.625	0.03	71	2.220	0.06
2	0.069	0.006	37	0.655	0.03	72	2.280	0.06
3	0.075	0.006	38	0.685	0.03	73	2.340	0.06
4	0.081	0.006	39	0.715	0.03	74	2.405	0.07
5	0.087	0.006	40	0.745	0.03	75	2.475	0.07
6	0.093	0.006	41	0.775	0.03	76	2.545	0.07
7	0.099	0.006	42	0.810	0.04	77	2.615	0.07
8	0.105	0.006	43	0.850	0.04	78	2.685	0.07
9	0.111	0.006	44	0.890	0.04	79	2.755	0.07
10	0.117	0.006	45	0.930	0.04	80	2.825	0.07
11	0.125	0.010	46	0.970	0.04	81	2.895	0.07
12	0.135	0.010	47	1.010	0.04	82	2.965	0.07
13	0.145	0.010	48	1.050	0.04	83	3.035	0.07
14	0.155	0.010	49	1.090	0.04	84	3.110	0.08
15	0.165	0.010	50	1.130	0.04	85	3.190	0.08
16	0.175	0.010	51	1.170	0.04	86	3.270	0.08
17	0.185	0.010	52	1.210	0.04	87	3.350	0.08
18	0.200	0.020	53	1.250	0.04	88	3.430	0.08
19	0.220	0.020	54	1.295	0.05	89	3.510	0.08
20	0.240	0.020	55	1.345	0.05	90	3.590	0.08
21	0.260	0.020	56	1.395	0.05	91	3.670	0.08
22	0.280	0.020	57	1.445	0.05	92	3.750	0.08
23	0.300	0.020	58	1.495	0.05	93	3.830	0.08
24	0.320	0.020	59	1.545	0.05	94	3.915	0.09
25	0.340	0.020	60	1.595	0.05	95	4.005	0.09
26	0.360	0.020	61	1.645	0.05	96	4.095	0.09
27	0.380	0.020	62	1.695	0.05	97	4.185	0.09
28	0.400	0.020	63	1.745	0.05	98	4.275	0.09
29	0.420	0.020	64	1.800	0.06	99	4.365	0.09
30	0.445	0.030	65	1.860	0.06	100	4.455	0.09
31	0.475	0.030	66	1.920	0.06	101	4.550	0.10
32	0.505	0.030	67	1.980	0.06	102	4.650	0.10
33	0.535	0.030	68	2.040	0.06	103	4.750	0.10
34	0.565	0.030	69	2.100	0.06	104	4.850	0.10
35	0.595	0.030	70	2.160	0.06	105	4.950	0.10

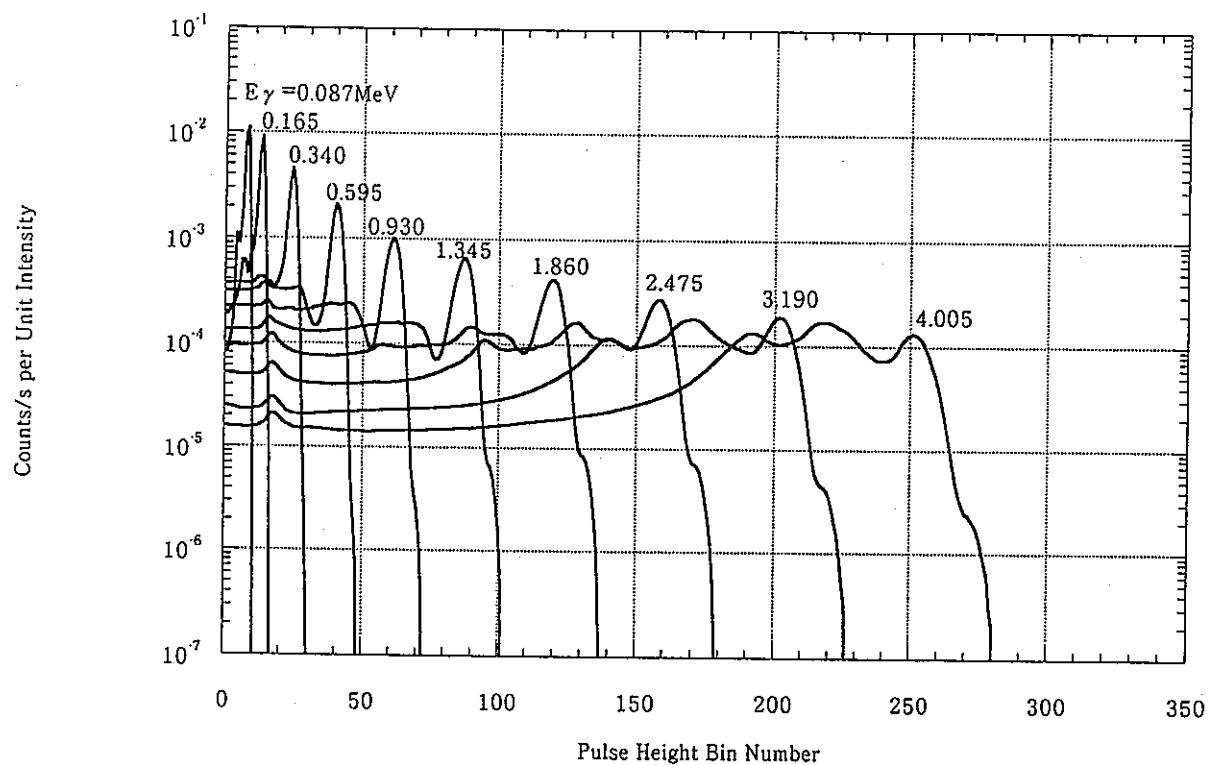


図3-2-1 γ 線応答関数データ（秋山が使用した入力データをもとに再現した値）

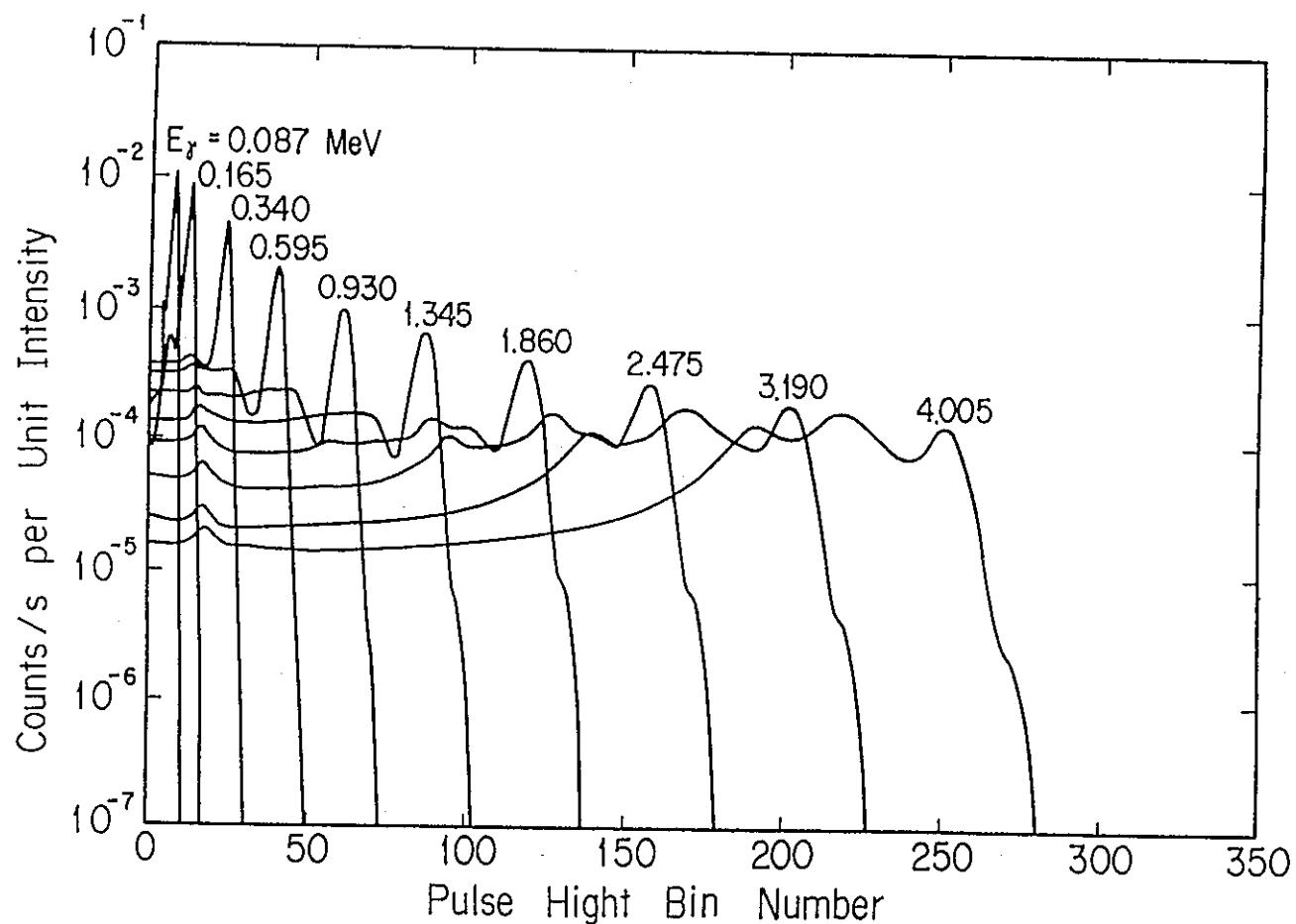


図3-2-2 γ 線応答関数（論文掲載図）

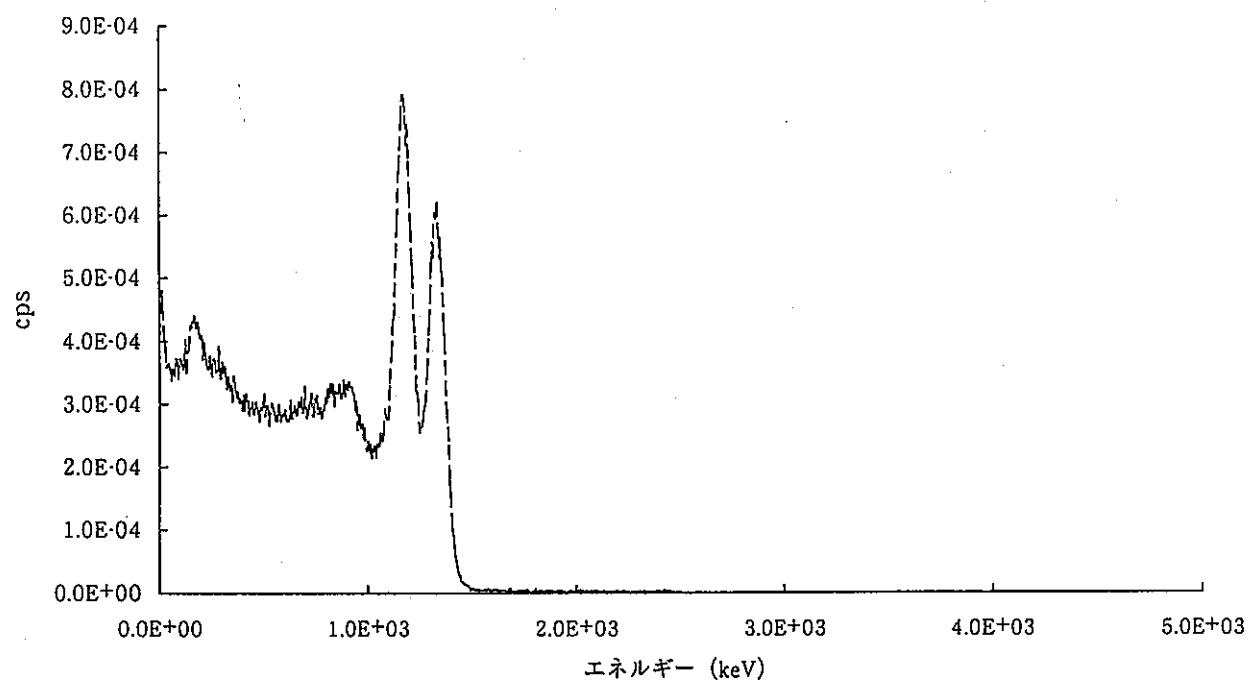


図3-2-3 FERDO入力 (Co-60測定値)

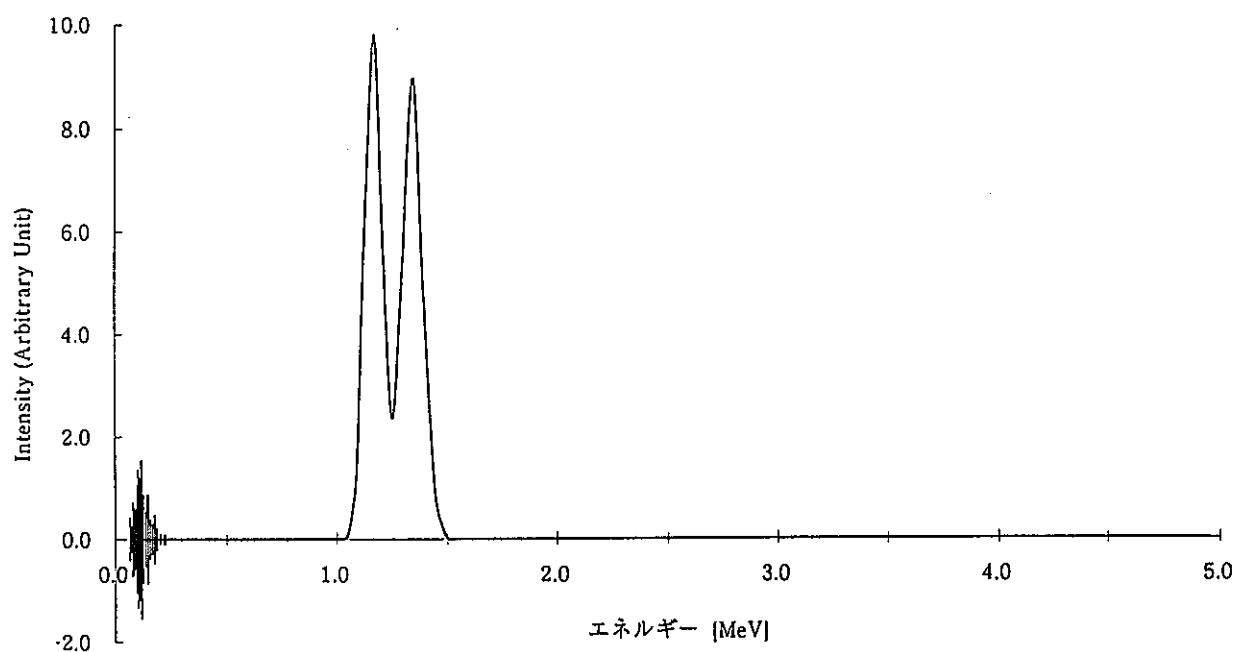


図3-2-4 FERDO出力結果 (Co-60)

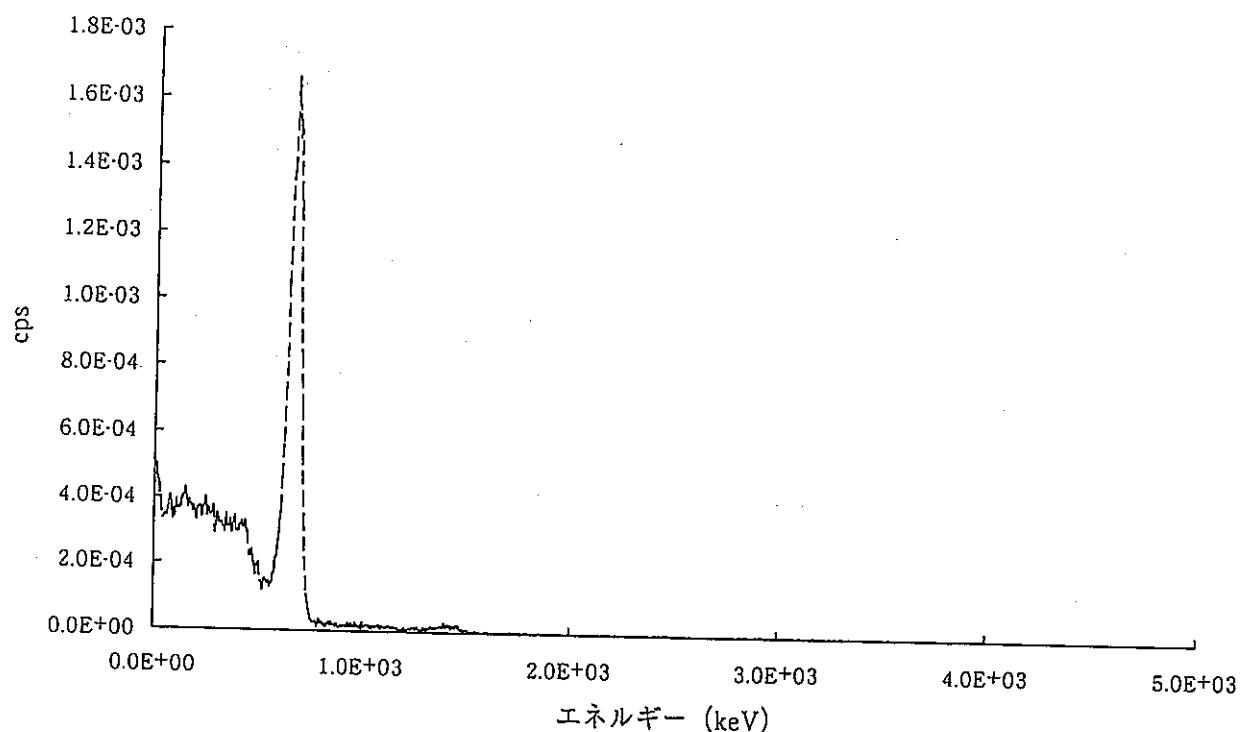


図3-2-5 FERDO入力 (Cs-137測定値)

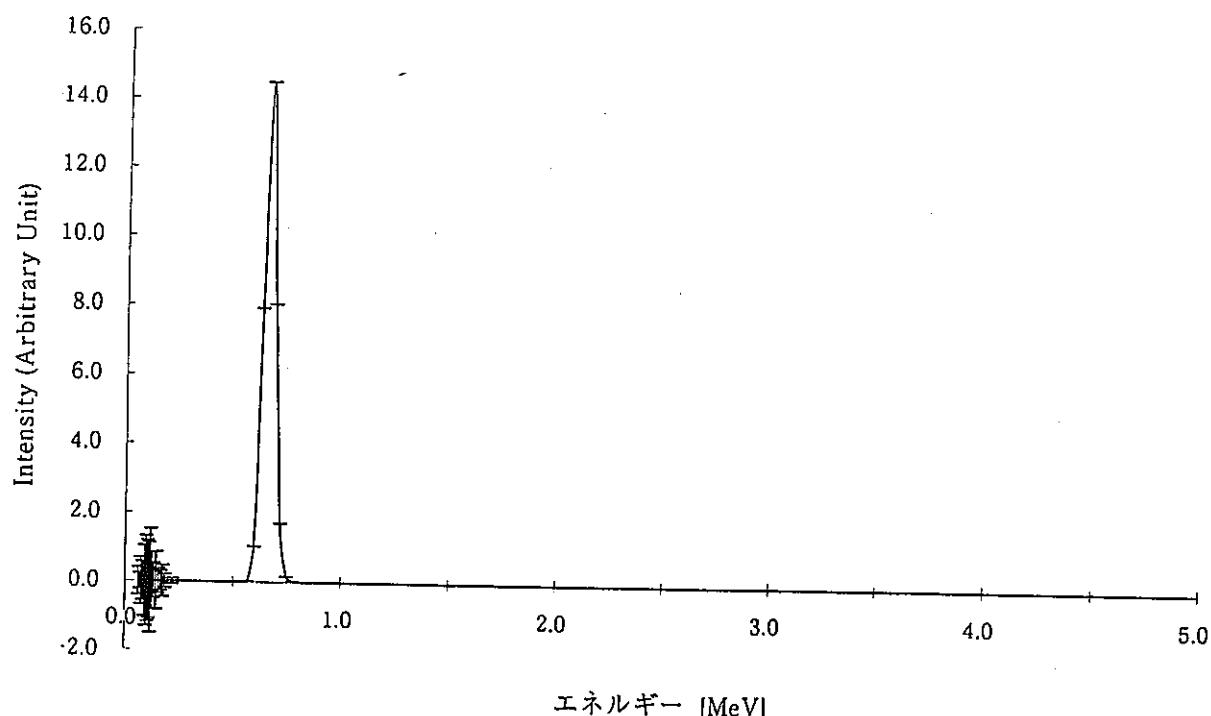


図3-2-6 FERDO出力結果 (Cs-137)

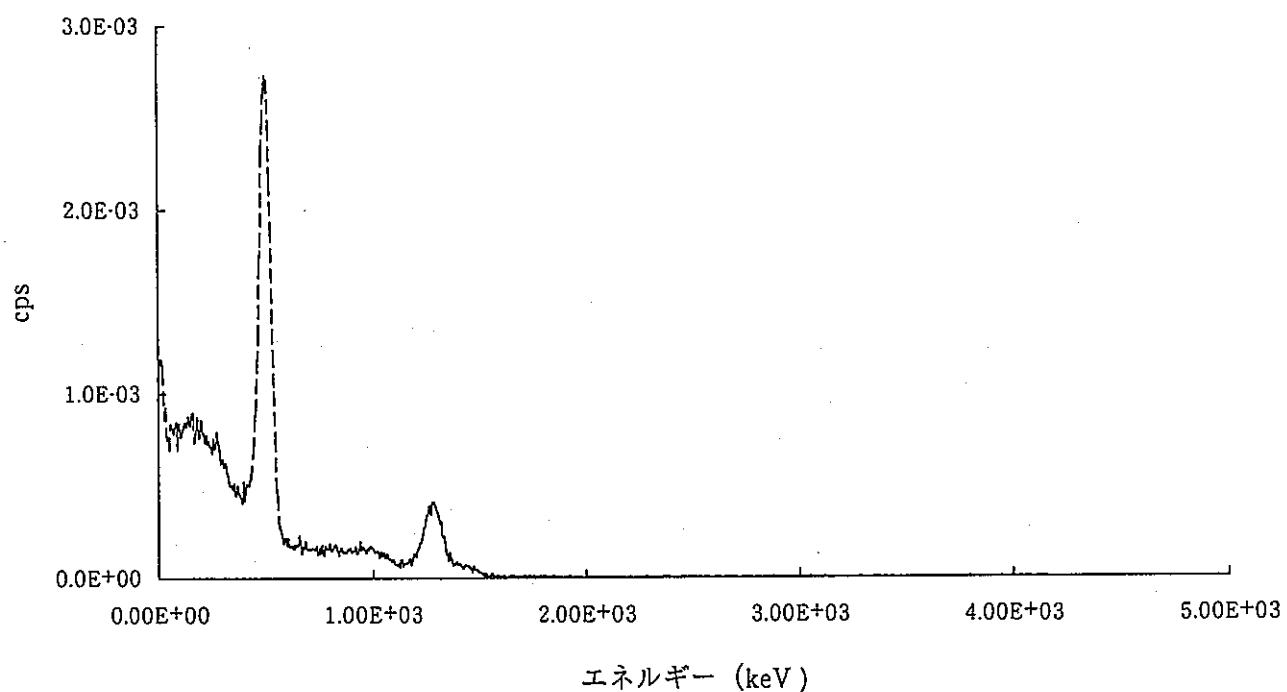


図3-2-7 FERDO入力 (Na-22測定値)

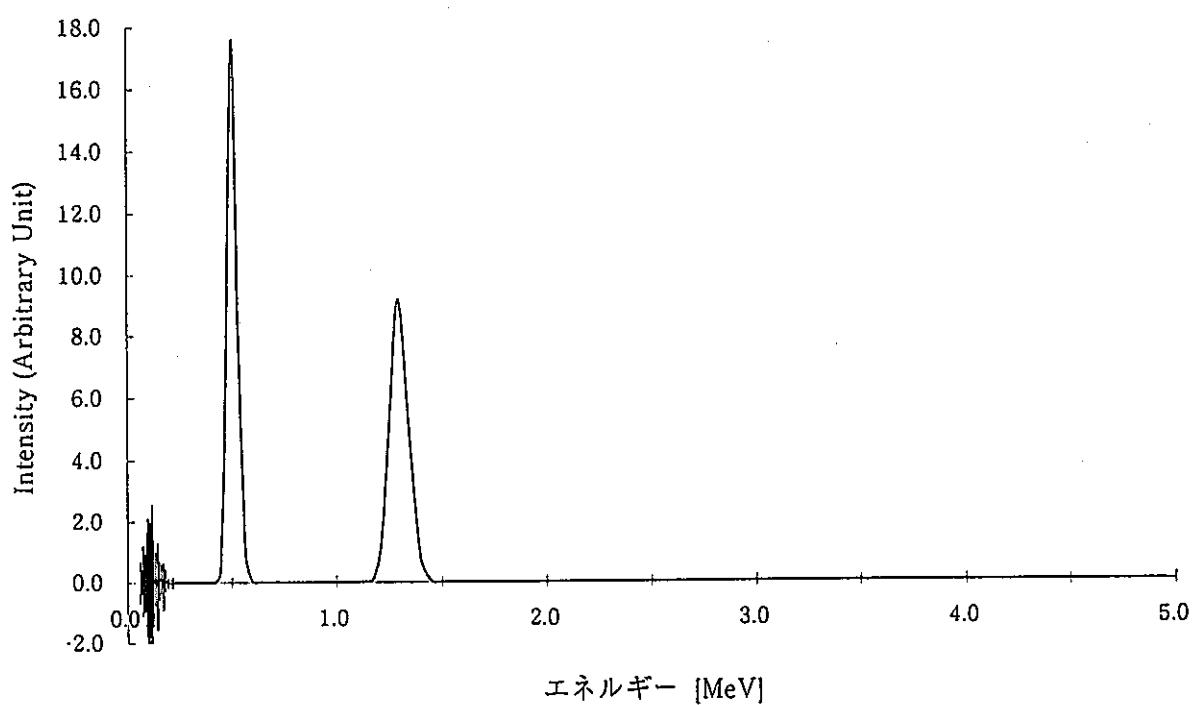


図3-2-8 FERDO出力結果 (Na-22)

第4章 測定結果とデータ解析

測定された4種類のパルス波高分布から(3-3-1)式を用いて照射後試料のFPから放出される γ 線の真のパルス波高分布を求めた後、アンフォールディングコードFERDOを用いて処理し、エネルギースペクトルを求めた。また、求めたエネルギースペクトルを核分裂数で規格化するために、Ge検出器で測定された γ 線エネルギースペクトルから核分裂数を求めた。アンフォールディングされたエネルギースペクトルは、核分裂数で規格化し、エネルギーで積分して崩壊熱を求めた。このようにして実験から直接得られる崩壊熱は有限時間照射崩壊熱なので、照射時間で除することで瞬時照射崩壊熱に変換した。変換する際に、総和計算から求めた補正係数によって補正を行った。以下に詳細を述べる。ここで有限時間照射崩壊熱とは、1fission/sの割合でT時間照射した後の冷却時間tにおけるエネルギー放出量のことである。また瞬時照射崩壊熱とは、1核分裂が発生した後の冷却時間tの関数としてのエネルギー放出量のことである。なお、本報告書は、 γ 線崩壊熱測定に対する第一報であり、照射中の核分裂数や崩壊熱についてはノミナル値である。また誤差評価も現時点では行っていないため推定的に書かれている部分があることを予め断つておく。

4.1 核分裂数評価結果

Ge検出器で測定されたNb-97,Nb-97m,Y-91m,Xe-135の崩壊に伴い放出される γ 線エネルギーのピーク面積から試料照射中の核分裂数を求めた。ピーク面積の算出には、測定に使用しているソフト「mcawin」のpeak findコマンドを使用した。peak findコマンドを使用した時に得られるデータファイル(リスト)を表4-1-1に示す。各カラムの意味は左から順に、ピークのナンバー、ピークチャネル(ch)、ピークエネルギー(keV)、正味のカウント数、バックグラウンドのカウント数、誤差(%)、半値幅(ch)である。peak findコマンドを利用して得られるデータファイル(リスト)から、Xe-135=250keV,Y-91m=556keV,Nb-97=658keV,Nb-97m=743keVの γ 線ピークエネルギーに対応する正味のカウント数をピーク面積とした。

上述した4つの核種を選定した理由は「2.5 核分裂数の測定方法」に示した通りである。選定した4核種の親核をA、目的の γ 線を放出する選定4核種をB、その娘核をCとすると崩壊系列は、A→B→Cと単純化できる。核分裂反応率は照射時間中一定と仮定すると、核種Aと核種Bの生成・崩壊の式は次のように与えられる。

$$\frac{dN_A}{dt} = \alpha_A n_f - \lambda_A N_A \quad \dots \quad (4-1-1)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad \dots \quad (4-1-2)$$

ここで、

N_A ：核種Aの原子数

N_B ：核種Bの原子数

- λ_A : 核種 A の崩壊定数
 λ_B : 核種 B の崩壊定数
 α_A : 核種 A の累積核分裂収率
 n_f : 核分裂反応率

T_R 時間照射し T_W 時間冷却した後、測定時間 T_C 内に崩壊する核種 A 及び B の原子数 P_A , P_B は、

$$P_A = \frac{\alpha_A n_f}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A T_R}) (1 - e^{-\lambda_A T_C}) e^{-\lambda_A T_W} \dots \dots \dots \quad (4-1-3)$$

$$P_B = \frac{\alpha_A n_f \lambda_B}{\lambda_A (\lambda_B - \lambda_A)} (1 - e^{-\lambda_A T_R}) (1 - e^{-\lambda_A T_C}) e^{-\lambda_A T_W} - \frac{\alpha_A n_f \lambda_A}{\lambda_B (\lambda_B - \lambda_A)} (1 - e^{-\lambda_B T_R}) (1 - e^{-\lambda_B T_C}) e^{-\lambda_B T_W} \quad (4-1-4)$$

となる。一方、核種 B の崩壊に伴い放出される γ 線が Ge 検出器で測定されたときのピーク面積 C_B は、 γ 線放出率 b_B 及び検出器の光電ピーク効率 ε_p を用いて、

$$C_B = \varepsilon_p \cdot b_B \cdot P_B \dots \dots \quad (4-1-5)$$

と表される。式 (4-1-4) と式 (4-1-5) から核分裂反応率 n_f は、

$$n_f = \frac{C_B (\lambda_B - \lambda_A)}{\varepsilon_p \cdot b_B \cdot \alpha_A \left\{ \frac{\lambda_B}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A T_R}) (1 - e^{-\lambda_A T_C}) e^{-\lambda_A T_W} - \frac{\lambda_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B T_R}) (1 - e^{-\lambda_B T_C}) e^{-\lambda_B T_W} \right\}} \dots \dots \quad (4-1-6)$$

と求められる。したがって、全核分裂数は、

$$\begin{aligned} N_f &= n_f \cdot T_R \\ &= \frac{C_B (\lambda_B - \lambda_A) T_R}{\varepsilon_p \cdot b_B \cdot \alpha_A \cdot A} \dots \dots \quad (4-1-7) \end{aligned}$$

ここで A は、

$$A = \left\{ \frac{\lambda_B}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A T_R}) (1 - e^{-\lambda_A T_C}) e^{-\lambda_A T_W} - \frac{\lambda_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B T_R}) (1 - e^{-\lambda_B T_C}) e^{-\lambda_B T_W} \right\} \dots \dots \quad (4-1-8)$$

として求められる。

本報告書に示す評価では、U-235 に関する核データは秋山らの実験結果と比較するために同じものを採用した。すなわち累積核分裂収率は Rider&Meek の評価値⁹⁾を、崩壊定数と γ 線放出率は Table of Isotopes (第 7 版)¹⁰⁾ の値を使用した。また、Np-237 については、秋山らは実験を行っていないので、累積核分裂収率は JNDC-V2¹¹⁾ の値を、その誤差については JNDC-V2 には記載されていないので ENDF/B-VI¹²⁾ の値を採用した。核分裂数評価に用いた値を表 4-1-2 に示す。これら核データについては、今後最新のも

のを調査し、最終結果に反映する必要がある。

使用した Ge 検出器の光電ピーク効率は、 γ 線標準線源を用いて実験的に求めた。 γ 線標準線源からの γ 線を Ge 検出器で測定し、それらの光電ピークの面積を測定に用いている mcawin ソフトの peak find コマンドより得た。求めた光電ピーク面積と標準線源の測定時放射能から光電ピーク効率を計算した。これらの値を表 4-1-3 に示す。 γ 線のエネルギーを横軸に光電ピーク効率を縦軸に取ってプロットし、次式に示す最小二乗法フィッティングを行い、光電ピーク効率曲線を得た。この結果を図 4-1-1 に示す。

$$\ln \varepsilon_p = a \cdot (\ln E_\gamma)^2 + b \cdot \ln E_\gamma + c \dots \dots$$

ε_p : 光電ピーク効率

E_γ : γ 線エネルギー (keV)

図 4-1-1 で求めた光電ピーク効率曲線より、それぞれのフィッティングパラメータは以下の通りとなった。なお、光電ピーク効率の誤差は、一律 4.8% (相対誤差) としており、今後見直す予定である。

γ 線エネルギー範囲 : 250keV ~ 2000keV

a : 1.178116E-3

b : -9.223899E-1

c : 6.692121E+0

一方、全核分裂数の誤差は測定上の誤差と使用した核データの誤差から次のように求められる。関数 $f = (x_1, x_2, x_3, \dots)$ の分散 $(\Delta f)^2$ は、変数の相関が無い場合、次のようにして求められる。

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{x_i}{f} \right)^2 \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2 \dots \dots \quad (4-1-9)$$

上式に基づき計算した式 (4-1-7) の分散は次の通りである。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta N_f}{N_f} \right)^2 &= \left(\frac{\Delta C_B}{C_B} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta b_B}{b_B} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha_A}{\alpha_A} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial \lambda_A} \frac{\lambda_A}{N_f} \right)^2 \left(\frac{\Delta \lambda_A}{\lambda_A} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial \lambda_B} \frac{\lambda_B}{N_f} \right)^2 \left(\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_R} \frac{T_R}{N_f} \right)^2 \left(\frac{\Delta T_R}{T_R} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_C} \frac{T_C}{N_f} \right)^2 \left(\frac{\Delta T_C}{T_C} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_W} \frac{T_W}{N_f} \right)^2 \left(\frac{\Delta T_W}{T_W} \right)^2 \dots \dots \quad (4-1-10) \end{aligned}$$

ここで、

ΔC_B : ピーク面積の誤差

$\Delta \varepsilon_p$: 検出器の光電ピーク効率の誤差

- Δb_B : γ 線放出率の誤差
- $\Delta \alpha_A$: 核種 A の累積核分裂収率の誤差
- $\Delta \lambda_A$: 核種 A の崩壊定数の誤差
- $\Delta \lambda_B$: 核種 B の崩壊定数の誤差
- ΔT_R : 照射時間の誤差
- ΔT_C : 測定時間の誤差
- ΔT_W : 冷却時間の誤差

(4-1-10) 式を評価するためには、 $\lambda_A, \lambda_B, T_R, T_C, T_W$ についての微分係数が必要である。これら微分係数は、MATHEMATICA¹³⁾ を用いて数値的に求めた。(4-1-7) 式と(4-1-10) 式を用いた核分裂数とその誤差の評価結果の一例を表 4-1-4～表 4-1-7 に示す。U-235 の評価結果は、過去に秋山らが同条件で照射した時の核分裂数よりも 40～50% 程少ないが、後述するように核分裂数で規格化した崩壊熱が秋山らの結果及び総和計算値と良く一致するので、整合は取れていると思われる。同条件の照射にもかかわらず、核分裂数に有意な差が見られる理由については、東大・弥生炉側からも情報を収集しているところである。今後の課題としたい。

4.2 γ 線エネルギースペクトル測定とアンフォールディングの結果

γ 線のエネルギースペクトル測定は、NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて行った。本検出器は、秋山らが過去に使用していたものである。照射時間や測定時間は、パソコンで制御されており、データの保存等も自動的に行われる。測定されたデータは、「3.3 FERDO コードの入力データ作成」で述べた方法で入力データを作成し、FERDO コードを用いてアンフォールディング処理を行った。照射後の U-235 試料について、アンフォールディング後の γ 線エネルギースペクトルの例を図 4-2-1～図 4-2-12 に示す。秋山らの結果と比較すると 40～50 % 程度相対的に小さくなっているがスペクトルの形状は一致しており、また核分裂数も同程度に少なく、次節以降で述べるように核分裂数で規格化した崩壊熱が秋山らの結果と良く一致することから、実験手法あるいは解析方法に根本的なミスはないと考える。

4.3 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱

照射後試料から放出される γ 線のエネルギースペクトルは、冷却時間と共に変化している。しかし、本測定において測定時間は測定待ち時間に比べて充分に短いので、測定時間内での γ 線エネルギースペクトルの形は変化せず、強度のみが時間とともに直線的に減少すると仮定できる。「4.2 γ 線スペクトル測定とアンフォールディングの結果」で得られたアンフォールディング処理後の γ 線エネルギースペクトルを、エネルギーについて積分して単位時間当たりの核分裂数で規格化することで U-235 γ 線の有限時間照射崩壊熱を次式の通り求めた。

$$\begin{aligned}
 F\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right) &= \frac{1}{n_f} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \phi(E) dE \\
 &= \frac{1}{n_f} \sum_{j=L_{\min}}^{L_{\max}} E_j \phi(E_j) \Delta E_j \dots \dots \quad (4-3-1)
 \end{aligned}$$

n_f : 照射中に発生した単位時間当たりの核分裂数

E_j : j 群の中心エネルギー

ΔE_j : j 群のエネルギー幅

$\phi(E_j)$: j 群の γ 線束

T_R : 照射時間

T_w : 測定待ち時間

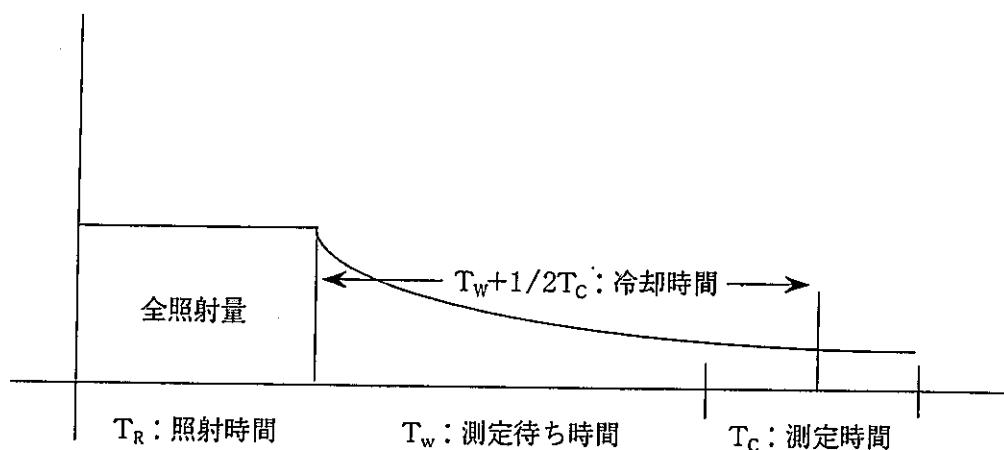
T_c : 測定時間

$T_w + \frac{1}{2}T_c$: 有限時間照射崩壊熱の冷却時間

(4-3-1) 式より得た U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱は、使用しやすいように以下のようない変換を行った。

$$E\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right) = \frac{T_c F\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)}{T_R} \dots \dots \quad (4-3-2)$$

これは、 $(1/T_R)$ fission/s の割合で T_R 時間照射した後の T_w から $(T_w + T_c)$ 時間に放出されるエネルギーである。照射時間、測定待ち時間、測定時間、冷却時間の関係を以下に図示する。(4-3-2) 式から得た結果を表 4-3-1～表 4-3-3 に示す。核分裂数については、「4.1 核分裂数評価結果」で得られた 4 核種それぞれの結果を用いている。最終的に 1 核種の値を選定するか複数核種の平均値を採用するかは今後検討する。



試料 No.3 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、秋山らの測定結果の誤差範囲内で一致している。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値と Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) は ±5% の範囲で一致した。

試料 No.12 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、秋山らの測定結果の誤差範囲内で一致している。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値と Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) は ±11% の範囲で一致した。

試料 No.2 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、冷却時間の最も短い 140 秒のデータを除いて秋山らの測定結果の誤差範囲内で一致している。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値と Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) を比較すると、冷却時間の最も短い 140 秒のデータを除いて ±10% の範囲で一致した。

このように今回の測定結果は、秋山らの測定結果の誤差範囲で一致しており、十分に実験は再現されていると考える。なお、本測定結果には誤差が含まれていないので、今後検討する。また、複数ある実験結果から明らかに不整合なデータや実験誤差が大きなデータを削除し、最終的な測定結果を求める必要がある。

4.4 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱

U-235 と同様にアンフォールディングされた γ 線エネルギースペクトルをエネルギーについて積分して単位時間あたりの核分裂数で規格化することで、Np-237 の γ 線有限時間照射崩壊熱を求めた。(4-3-1) 式及び(4-3-2) 式から得た結果を表 4-4-1 と表 4-4-2 に示す。核分裂数については、U-235 と同様に「4.1 核分裂数評価結果結果」で得られた 4 核種それぞれの結果を用いている。

原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒の測定結果 (ノミナル値) は、規格化の核分裂数に Nb-97m から求めた結果を用いると冷却時間が最も短い 64 秒と冷却時間が 1645 秒以上のデータを除いて ±6% の範囲で JNDC-V2 を用いた総和計算値と一致している。冷却時間の短いデータは、有限照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱への変換のための補正係数が 0.760 と大きいため精度が悪いと考えられる。今後、照射条件を見直し再測定を実施することで、より精度良いデータを取ることが可能である。冷却時間が長いデータは、バックグラウンド等を完全に差し引くことができないため精度の悪い結果になっていると考える。今後、この点について検討が必要である。

原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒の測定結果 (ノミナル値) は、冷却時間が 300 秒以下と冷却時間が 5000 秒以上のデータを除いて ±8% の範囲で JNDC-V2 を用いた総和計算値と一致している。冷却時間が短いデータは、照射時間が 100 秒のデータと同様に補正量が大きい (有限照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱への変換のための補正係数が 0.461~0.618) ため精度が悪くなっていると考えられる。冷却時間が長いデータも同様に、バックグラウンド等を完全に差し引くことができないため精度の悪い結果になっていると考えられる。

なお、実験誤差については、U-235 測定と同じく今後の課題とする。

4.5 有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求めるための補正係数

実験で得られた有限時間照射崩壊熱を瞬時照射崩壊熱に変換しておくことは、照射時間の異なる他の実験値あるいは各種計算値と比較するために有意義である。

照射時間内で核分裂反応率が一定で、生成された FP の中性子反応の効果が無視できる場合、測定待ち時間が照射時間と測定時間の和より十分長ければ、瞬時照射崩壊熱は、有限時間照射崩壊熱を照射時間で除することで求められる。すなわち、

$T_w > T_R + T_C$ の時

$$f\left\{T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_C)\right\} \approx \frac{F\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)}{T_R} \dots \dots \quad (4-5-1)$$

T_w : 測定待ち時間

T_R : 照射時間

T_c : 測定時間

$f\left\{T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_c)\right\}$: 実験的に得られる瞬時照射崩壊熱

$F\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)$: 実験的に得られる有限時間照射崩壊熱

一方、測定待ち時間が照射時間と測定時間の和より短い場合は、次の補正係数を導入する。

$T_w < T_R + T_c$ の時

$$f\left\{T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_c)\right\} = \eta \frac{F\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)}{T_R} \dots \dots \quad (4-5-2)$$

$$\eta = \frac{\frac{f_{cal}\left\{T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_c)\right\}}{F_{cal}\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)}}{T_R} \dots \dots \quad (4-5-3)$$

η : 補正係数

T_w : 測定待ち時間

T_R : 照射時間

T_c : 測定時間

$f_{cal}\left\{T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_c)\right\}$: 総和計算による瞬時照射崩壊熱

$F_{cal}\left(T_R, T_w + \frac{1}{2}T_c\right)$: 総和計算による有限時間照射崩壊熱

有限時間照射条件での総和計算値と実験的に得られた有限時間照射崩壊熱、及び瞬時照射条件での総和計算値と実験的に得られる瞬時照射崩壊熱は、いずれも完全に一致するとは限らないが、総和計算値における有限時間照射崩壊熱と瞬時照射崩壊熱の比と、実験的に得られた有限時間照射崩壊熱と瞬時照射崩壊熱の比は等しいと仮定して補正係数を導入する。補正係数は、照射時間、測定待ち時間および測定時間の関数となっているので、それぞれの組みについて補正係数が計算される。

ここで注意すべき点は、瞬時照射崩壊熱の冷却時間は、測定待ち時間+1/2（照射時間+測定時間）であるのに対して、有限時間照射崩壊熱の方は、測定待ち時間+1/2 测定時間と定義されており、1/2 照射時間だけのずれがあるということである。総和計算を行う際には、冷却時間の定義が異なることを認識しておかなければならぬ。

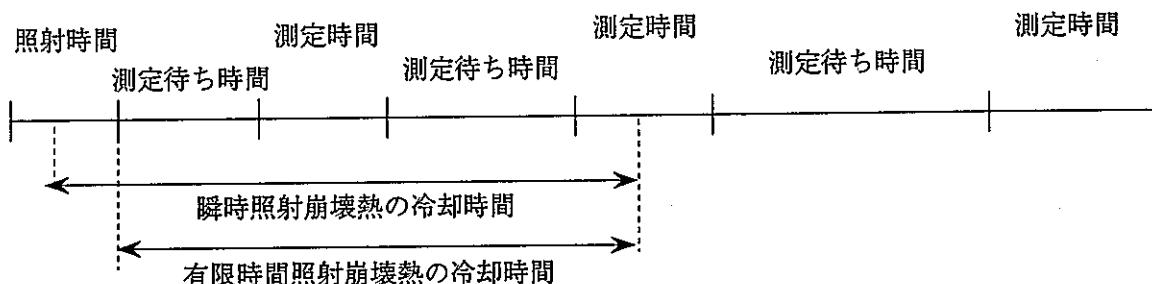
$$T_f = T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_c) \dots \dots \quad (4\cdot5\cdot4)$$

$$T_F = T_w + \frac{1}{2}T_c \dots \dots \dots \quad (4\cdot5\cdot5)$$

T_f : 瞬時照射条件における冷却時間

T_F : 有限時間照射条件における冷却時間

図示すると以下のようになる。



補正係数を求めるための総和計算は、愛知淑徳大学の親松助教授が作成した計算ツール¹¹⁾を用いた。本ツールは、核データライブラリとして JNDC-V2,ENDF/B-VI,JEF-2.2 の3つが用意されており、計算したい冷却時間を入力したテキストファイルを準備するだけで容易に総和計算が実行できる。計算に使用する decay data library や fission yield library は異なる核データライブラリを用いてもよい。また、有限時間照射崩壊熱の場合は、核データライブラリの選択や冷却時間入力ファイルの他に照射時間を入力する必要がある。本ツールを用いた計算結果は、有限時間照射崩壊熱及び瞬時照射崩壊熱共に冷却時間と崩壊熱の積として得られる。よって、補正係数を求めるためには、それぞれの冷却時間で除する必要がある。本ツールを用いて計算した有限時間照射崩壊熱と瞬時照射崩壊熱及びこれらの結果から求めた補正係数を表 4-5-1～4-5-4 に示す。

4.6 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱

表 4-4-1～4-4-2 に示した補正係数と表 4-3-1～4-3-3 に示した U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求めた。結果を表 4-6-1～表 4-6-4 及び図 4-6-1～図 4-6-4 に示す。

試料 No.3 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、秋山らの結果と $\pm 5\%$ の差が見られ、秋山らの実験誤差範囲内にほぼおさまる結果が得られている。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値と Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) と比較すると $\pm 5\%$ の範囲で一致している。

試料 No.12 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、秋山らの結果と $\pm 13\%$ の差が見られた。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値との比較では、同じく Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) では $\pm 11\%$ の範囲で一致している。

試料 No.2 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒) の測定結果 (ノミナル値) は、Nb-97m から求めた核分裂数を用いた場合、冷却時間の最も短い 140 秒のデータを除いて秋山らの結果と $\pm 8\%$ の差が見られた。また、JNDC-V2 を用いた総和計算値との比較では、同じく Nb-97m から求めた核分裂数を用いた結果 (ノミナル値) では冷却時間の最も短い 140 秒のデータを除いて $\pm 10\%$ の範囲で一致している。

なお、実験誤差については有限時間照射崩壊熱同様、今後の課題とする。

4.7 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱

Np-237 の γ 線有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求めた。「4.4 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱」と同様に総和計算ツールを用いて (4-4-1) 式の補正係数を求め、有限照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求める際の補正を行っている。補正係数の結果は、表 4-5-3 と表 4-5-4 に示した通りである。500 秒照射の場合、冷却時間 264 秒の時の補正係数は 0.461 と影響の大きな値になっている。このように補正量の大きなデータは、補正量が少ない照射時間の短いデータと比較し整合が取れていることを確認するか、あるいは補正量の少ないデータのみを採用することにする。これは今後の課題である。

(4-5-2) 式と表 4-5-3 及び表 4-5-4 に示した補正係数を用いて、有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求めた。結果を表 4-7-1～表 4-7-3 及び図 4-7-1～図 4-7-3 に示す。

原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒の測定結果 (ノミナル値) は、冷却時間が最も短い 64 秒と冷却時間が 1,645 秒以上のデータを除くと、JNDC-V2 を用いた総和計算値と比較して $\pm 6\%$ の範囲で一致している。冷却時間が短いデータは、有限時間照射崩壊熱のところで述べたように有限照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求める際の補正量が大きいため、精度の悪いデータとなっていると考えている。冷却時間の長いデータは有限時間照射崩壊熱の時と同様に、バックグラウンド等を完全に差し引くことができていないことが原因で精度の悪いデータとなっていると考えている。

原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒の測定結果 (ノミナル値) は、冷却時間が 300 秒と冷却時間が 5,000 秒以上のデータを除くと、JNDC-V2 を用いた総和計算値と比較

して±8%の範囲で一致している。冷却時間が短いデータは、100秒照射データと同様に有限照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を求める際の補正量が大きいため、精度の悪いデータとなっていると考えている。冷却時間が長いデータは、100秒照射データと同様にバックグラウンドを完全に差し引くことができないため精度の悪いデータとなっていると考えている。

なお、実験誤差については、U-235測定と同じく今後の課題とする。

表 4-1-1 ピーク面積出力リスト例

[AUTOMATIC PEAK SEARCH (Find)] Report 00/08/21 14:01:20

Data File: c:\treasu\大川内\dhdata\ge\no20\no20-1.dat

Comment :

Measure : Date 97/11/14 12:12:09 Live 3597 Real 3603

Parameter: Ch Size = 4096 Start Ch = 400
 Stop Ch = 3000 Sensitive = 3.0
 Est. FWHM = 3 Filter Width = 2
 Recognize Ch = 2 Max Peak = 100
 Isotope Table File Name = mca.iso
 Diff Eng from Iso Table (Pkf) = 0.5

$$\text{Energy[keV]} = [2.319907e-007]*\text{Ch}^2 + [4.993442e-001]*\text{Ch} + [-2.937442e+001]$$

$$\text{FWHM [keV]} = [-1.549853e-002]*\text{sqrt(Eng)} + [1.753915e+000]$$

No.	Pk[ch]	Pk[KeV]	Net[cts]	Bg.[cts]	Err[s/net]	FWHM[ch]	
1	430.24	185.51	15733.7	1277.3	0.83	3.08	U -235
2	439.00	189.88	-569.0	1555.0	-5.52	0.65	Weak
3	448.52	194.64	175.0	651.0	16.42	1.79	
4	461.30	201.02	174.0	683.0	16.82	2.10	
5	469.44	205.09	1182.5	759.5	3.73	3.11	U -235
6	515.45	228.07	1240.7	753.3	3.60	2.96	Np-239
7	558.36	249.51	4278.7	585.3	1.63	2.87	
8	567.30	253.98	-204.0	768.0	-11.64	2.26	Weak
9	584.44	262.54	45.7	243.3	37.23	6.00	
10	592.56	266.60	282.2	411.8	9.34	2.99	
11	645.51	293.06	1185.7	461.3	3.42	2.80	
12	697.56	319.06	70.7	207.3	23.59	1.53	Nd-147
13	760.52	350.52	84.7	199.3	19.90	1.67	
14	769.28	354.90	78.3	382.7	27.41	3.09	
15	786.97	363.74	226.7	357.3	10.66	2.38	
16	874.39	407.42	33.7	147.3	39.96	3.05	
17	894.00	417.22	51.0	109.0	24.80	0.77	
18	927.55	433.99	48.7	139.3	28.17	1.24	
19	1053.43	496.91	96.0	132.0	15.73	3.75	Pd-103
20	1074.53	507.46	66.0	181.0	0.00	3.75	*DB*
21	1080.50	510.44	94.0	181.0	0.00	3.75	*DB*
22	1104.41	522.39	75.0	190.0	21.71	3.43	
23	1111.56	525.96	-348.5	745.5	-5.72	2.75	Weak
24	1118.81	529.59	1808.0	540.0	2.68	3.65	
25	1132.08	536.22	60.0	338.0	33.25	0.00	
26	1151.45	545.90	79.0	175.0	20.17	1.16	
27	1170.29	555.32	1078.3	251.7	3.38	3.39	
28	1300.00	620.17	48.5	57.5	21.23	3.67	Ag-110M
29	1319.58	629.95	57.0	100.0	21.98	2.02	
30	1363.66	651.99	162.5	148.5	10.85	4.61	
31	1375.35	657.84	1813.7	183.3	2.46	3.60	
32	1385.81	663.07	-432.0	671.0	-3.58	0.79	Weak
33	1394.53	667.43	359.0	216.0	6.68	3.83	
34	1545.74	743.04	1448.2	188.8	2.79	4.01	
35	1558.62	749.48	293.8	108.2	6.82	4.59	
36	1604.53	772.43	284.3	101.7	6.91	3.95	
37	1809.73	875.06	80.5	49.5	14.16	1.99	Os-185
38	1909.82	925.13	32.0	57.0	29.48	1.22	
39	1927.79	934.12	93.5	34.5	12.10	3.45	
40	1951.29	945.87	31.5	31.5	25.20	1.11	
41	1967.91	954.19	58.0	49.0	17.83	2.99	
42	2024.99	982.75	70.0	50.0	15.65	3.79	
43	2106.27	1023.41	392.0	38.0	5.29	4.54	
44	2134.13	1037.35	107.2	62.8	12.17	4.23	Co- 56
45	2221.00	1080.81	1.5	24.5	339.93	0.00	Weak
46	2321.74	1131.22	149.0	33.0	9.05	3.17	
47	2681.83	1311.45	64.0	8.0	13.26	0.00	
48	2824.91	1383.08	46.0	22.0	17.93	0.00	
49	2971.53	1456.49	39.7	29.3	20.94	0.62	

表4-1-2 核分裂数評価に用いた核データとその誤差

着目核	Xe-135	Y-91m	Nb-97	Nb-97m
着目核の親核	I-135	Sr-91	Zr-97	Zr-97
着目核の放出する γ 線エネルギー (keV)	250	556	658	743
検出効率 (%)	5.13±0.25	2.48±0.12	2.13±0.10	1.91±0.09
親核の崩壊定数 (S^{-1})	2.91E-5±4.40E-8	2.03E-5±2.14E-8	1.14E-5±3.36E-8	1.14E-5±3.36E-8
着目核の崩壊定数 (S^{-1})	2.11E-5±4.63E-8	2.32E-4±1.87E-7	1.60E-4±1.54E-6	1.16E-2±1.36E-3
γ 線放出率 (%)	90±3	54.2±3.0	98.2±0.1	92.8±0.3
U-235高速核分裂の場合の親核の累積核分裂収率 (%)	6.350±0.089	5.662±0.057	5.947±0.042	5.940±0.083
Np-237高速核分裂の場合の親核の累積核分裂収率 (%)	6.708±0.188	3.925±0.157	6.111±0.171	6.111±0.171
照射時間誤差 (s)	0.1	0.1	0.1	0.1
測定時間誤差 (相対値)	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
冷却時間誤差 (s)	10	10	10	10

検出効率の相対誤差は、検出効率に対して一律4.8%とした。(今後、見直す予定)

照射時間誤差は、一律0.1秒と見積もった。

測定時間誤差は、測定時間に対して一律0.1%と見積もった。

冷却時間誤差は、一律10秒と見積もった。

表4-1-3 γ 線標準線源測定データと光電ピーク効率

標準線源測定日	1996.11.1	光電ピーク効率 曲線測定日	1998.4.2	経過日数	517
---------	-----------	------------------	----------	------	-----

標準線源核種	γ 線エネルギー (keV)	強さ (γ 線/秒)	半減期 (日)	効率曲線測定日の 線源の強さ	測定時間	測定結果	光電ピーク効率
Cd-109	88.03	640	463.55	295.4	3600	71812.5	0.0675
Co-57	122.1	561	271.79	150.1	3600	45782.0	0.0847
Ce-139	165.9	701	137.64	51.9	3600	14117.0	0.0756
Sn-113	391.7	2073	115.09	92.1	3600	11101.7	0.0335
Cs-137	661.7	2435	10975.55	2356.8	3600	184080.0	0.0217
Y-88	898.0	6194	106.65	215.1	3600	11417.8	0.0147
Co-60	1173	3292	1923.92	2732.5	3600	115714.0	0.0118
Co-60	1333	3295	1923.92	2735.0	3600	102697.3	0.0104
Y-88	1836	6565	106.65	228.0	3600	6372.0	0.0078

表4-1-4 U-235核分裂数評価結果とその誤差 (10秒照射,原子炉出力500W)

試料番号	Xe-135*	誤差	Y-91m*	誤差	Nb-97*	誤差	Nb-97m*	誤差
No.3-1	6.726E+06	6.29%	7.412E+06	7.88%	6.176E+06	5.80%	7.826E+06	5.67%
No.3-2	5.157E+06	6.34%	7.029E+06	8.27%	6.197E+06	5.93%	6.621E+06	6.01%
No.15-1	7.822E+06	7.47%	8.965E+06	9.77%	9.477E+06	7.52%	8.401E+06	8.59%
No.15-2	7.516E+06	7.46%	9.398E+06	9.68%	9.338E+06	7.60%	9.236E+06	8.25%
No.15-3	7.595E+06	7.35%	9.702E+06	9.81%	8.910E+06	7.86%	7.912E+06	8.85%
No.15-4	7.516E+06	7.33%	9.489E+06	10.05%	9.285E+06	7.80%	7.796E+06	9.26%
No.15-5	8.267E+06	7.13%	9.390E+06	10.34%	9.635E+06	7.63%	1.154E+07	7.82%
No.15-6	7.373E+06	7.37%	9.943E+06	10.20%	8.921E+06	8.08%	8.444E+06	8.99%
No.15-7	7.550E+06	7.27%	9.582E+06	10.31%	8.806E+06	8.08%	7.189E+06	9.91%
No.15-8	7.121E+06	7.38%	9.274E+06	10.81%	9.933E+06	7.78%	8.725E+06	8.96%
No.15-9	6.585E+06	7.62%	1.072E+07	10.58%	9.661E+06	8.01%	8.546E+06	9.26%
No.15-10	7.492E+06	7.37%	8.780E+06	11.59%	9.881E+06	7.96%	9.069E+06	9.17%
No.15-11	6.926E+06	7.53%	8.603E+06	12.25%	7.961E+06	9.00%	8.285E+06	9.63%
No.15-12	6.965E+06	7.61%	1.068E+07	11.14%	9.186E+06	8.55%	9.538E+06	9.30%
No.15-13	6.938E+06	7.62%	8.197E+06	12.73%	8.946E+06	8.91%	8.705E+06	9.60%
No.15-14	7.065E+06	7.69%	9.875E+06	12.49%	9.487E+06	8.68%	7.580E+06	10.51%
No.15-15	6.894E+06	7.72%	8.319E+06	13.88%	9.711E+06	8.63%	8.188E+06	10.41%
No.15-16	6.629E+06	7.93%	7.858E+06	14.37%	1.066E+07	8.36%	1.010E+07	9.35%
No.15total	7.291E+06	6.11%	9.234E+06	7.67%	9.028E+06	5.27%	8.730E+06	5.36%
No.14-1	6.874E+06	6.96%	1.197E+07	9.62%	9.545E+06	7.09%	9.959E+06	7.51%
No.3-2	7.399E+06	6.90%	1.210E+07	9.73%	1.111E+07	6.90%	8.776E+06	5.66%
No.12-1	6.970E+06	7.03%	9.591E+06	10.88%	9.334E+06	7.32%	9.297E+06	5.66%
秋山a	1.542E+07	5.06%	1.721E+07	8.83%	1.719E+07	3.37%	1.715E+07	2.92%
秋山b	—	—	—	—	1.884E+07	4.30%	1.956E+07	3.68%

* 評価に用いた特性 γ 線を発生するFP核種

表4-1-5 U-235核分裂数評価結果とその誤差 (100秒照射,原子炉出力500W)

試料番号	Xe-135*	誤差	Y-91m*	誤差	Nb-97*	誤差	Nb-97m*	誤差
No.2-1	7.635E+07	6.16%	9.081E+07	7.66%	8.735E+07	5.34%	8.343E+07	5.45%
No.2-2	7.550E+07	6.16%	9.130E+07	7.69%	8.889E+07	5.35%	8.710E+07	5.44%
No.2-3	7.316E+07	6.16%	9.348E+07	7.67%	8.161E+07	5.39%	8.688E+07	5.44%
No.2-4	7.014E+07	6.16%	9.456E+07	7.71%	8.509E+07	5.38%	8.509E+07	5.48%
No.2-5	7.042E+07	6.16%	9.523E+07	7.72%	8.443E+07	5.40%	8.531E+07	5.49%
No.2-6	7.118E+07	6.15%	9.306E+07	7.74%	8.301E+07	5.42%	8.595E+07	5.50%
No.2-7	7.236E+07	6.15%	9.279E+07	7.77%	8.388E+07	5.43%	8.236E+07	5.55%
No.2-8	7.066E+07	6.16%	9.517E+07	7.79%	8.839E+07	5.41%	8.423E+07	5.55%
No.2-9	6.685E+07	6.17%	9.206E+07	7.82%	8.675E+07	5.44%	8.169E+07	5.60%
No.2-10	6.599E+07	6.17%	9.180E+07	7.86%	8.876E+07	5.43%	9.013E+07	5.55%
No.2-11	6.693E+07	6.18%	9.147E+07	7.90%	8.543E+07	5.48%	8.191E+07	5.65%
No.2-12	6.496E+07	6.19%	9.372E+07	7.93%	8.370E+07	5.51%	8.262E+07	5.65%
No.2-13	6.707E+07	6.19%	8.674E+07	8.03%	8.093E+07	5.55%	8.518E+07	5.65%
No.2-14	6.715E+07	6.19%	8.763E+07	8.09%	8.848E+07	5.50%	8.418E+07	5.69%
No.2-15	6.611E+07	6.20%	9.086E+07	8.09%	8.492E+07	5.55%	8.358E+07	5.72%
No.2-16	6.635E+07	6.21%	9.587E+07	8.10%	9.024E+07	5.53%	8.288E+07	5.75%
No.2-17	6.641E+07	6.22%	9.412E+07	8.17%	8.943E+07	5.55%	8.292E+07	5.78%
No.2-18	6.455E+07	6.24%	1.003E+08	8.15%	8.715E+07	5.59%	8.574E+07	5.78%
No.2-19	6.370E+07	6.25%	8.792E+07	8.35%	8.918E+07	5.60%	8.074E+07	5.88%
No.2-20	6.434E+07	6.27%	8.350E+07	8.51%	8.332E+07	5.69%	8.796E+07	5.81%
No.2-21	6.718E+07	6.26%	9.775E+07	8.40%	9.221E+07	5.63%	8.549E+07	5.87%
No.2-22	6.222E+07	6.30%	8.846E+07	8.61%	8.510E+07	5.71%	8.693E+07	5.91%
No.2-23	6.418E+07	6.31%	8.509E+07	8.79%	8.459E+07	5.75%	8.101E+07	6.02%
No.2-24	6.408E+07	6.33%	9.514E+07	8.68%	8.604E+07	5.78%	8.260E+07	6.02%
No.2-25	6.351E+07	6.35%	9.059E+07	8.88%	9.041E+07	5.76%	8.156E+07	6.08%
No.2-26	6.189E+07	6.39%	9.610E+00	8.82%	8.619E+07	5.83%	7.991E+07	6.15%
No.2-27	6.496E+07	6.37%	8.626E+07	9.21%	8.887E+07	5.82%	7.805E+07	6.33%
No.2-28	6.447E+07	6.40%	8.571E+07	9.40%	8.901E+07	5.86%	7.991E+07	6.24%
No.2-29	5.940E+07	6.47%	8.847E+07	9.41%	8.569E+07	5.94%	7.899E+07	6.33%
No.2-30	6.289E+07	6.47%	9.660E+07	9.38%	8.502E+07	5.97%	7.840E+07	6.38%
No.2-31	6.264E+07	6.51%	1.019E+08	9.42%	8.656E+07	5.98%	8.621E+07	6.25%
No.2-32	6.293E+07	6.54%	9.494E+07	9.68%	8.612E+07	6.03%	8.233E+07	6.41%
No.2-33	6.115E+07	6.58%	8.877E+07	9.95%	8.479E+07	6.11%	8.612E+07	6.42%
No.2-34	5.688E+07	6.71%	8.257E+07	10.62%	9.055E+07	6.06%	7.818E+07	6.70%
No.2-35	5.975E+07	6.69%	8.956E+07	10.45%	8.797E+07	6.14%	7.737E+07	6.78%
No.2-36	6.154E+07	6.73%	1.059E+08	10.18%	8.946E+07	6.34%	7.611E+07	6.87%
No.2-37	6.339E+07	6.74%	8.661E+07	11.18%	9.036E+00	6.19%	7.822E+07	6.86%
No.2-38	6.262E+07	6.79%	7.259E+07	12.30%	8.467E+07	6.33%	8.405E+07	6.73%
No.2-39	6.083E+07	6.89%	1.000E+08	10.97%	9.108E+07	6.26%	7.419E+07	7.10%
No.2-40	6.239E+07	6.92%	1.063E+08	10.93%	7.909E+07	6.57%	7.425E+07	7.24%
No.2total	6.786E+07	6.02%	9.168E+07	7.42%	8.609E+07	5.02%	8.289E+07	5.04%
秋山c	—	—	—	—	1.389E+08	2.52%	1.395E+08	2.37%
秋山d	—	—	—	—	1.381E+08	2.53%	1.392E+08	2.37%

* 評価に用いた特性 γ 線を発生するFP核種

表4-1-6 Np-237核分裂数評価結果とその誤差 (100秒照射,原子炉出力1900W)

試料番号	Xe-135*	誤差	Y-91m*	誤差	Nb-97*	誤差	Nb-97m*	誤差
672-1	3.585E+07	8.27%	1.435E+07	23.03%	1.563E+07	9.86%	1.676E+07	10.72%
672-2	4.353E+07	8.17%	1.018E+07	32.17%	1.288E+07	11.16%	1.493E+07	11.54%
672-3	3.137E+07	8.80%	-	-	1.597E+07	9.84%	1.340E+07	13.33%
672-4	2.821E+07	9.49%	-	-	4.118E+06	5.56%	1.713E+07	11.60%
672-5	3.139E+07	9.18%	8.160E+06	43.78%	1.731E+07	9.58%	1.829E+07	10.98%
672-6	3.798E+07	8.87%	1.635E+07	23.18%	1.731E+07	10.01%	1.674E+07	11.66%
672-total	3.242E+07	6.48%	1.410E+07	13.12%	1.570E+07	6.56%	1.585E+07	7.08%

* 評価に用いた特性 γ 線を発生するFP核種

表4-1-7 Np-237核分裂数評価結果とその誤差 (500秒照射,原子炉出力1900W)

試料番号	Xe-135*	誤差	Y-91m*	誤差	Nb-97*	誤差	Nb-97m*	誤差
672-1	1.108E+08	6.93%	6.977E+07	9.64%	8.379E+07	6.14%	8.418E+07	6.41%
672-2	1.233E+08	6.76%	6.479E+07	9.97%	7.906E+07	6.22%	8.297E+07	6.48%
672-3	1.157E+08	6.74%	7.866E+07	9.65%	8.743E+07	6.13%	8.824E+07	6.38%
672-4	1.156E+08	6.75%	7.024E+07	10.06%	7.773E+07	6.29%	8.431E+07	6.49%
672-5	1.108E+08	6.77%	6.262E+07	10.52%	7.686E+07	6.28%	8.783E+07	6.52%
672-6	1.180E+08	6.74%	7.170E+07	10.27%	7.792E+07	6.36%	8.409E+07	6.60%
672-7	1.100E+08	6.76%	7.595E+07	10.51%	7.412E+07	6.43%	8.246E+07	6.63%
672-8	1.166E+08	6.82%	4.947E+07	12.77%	8.664E+07	6.30%	7.413E+07	7.01%
672-9	1.336E+08	6.77%	1.305E+08	8.35%	8.324E+07	6.37%	-8.493E+07	6.78%
672-10	1.142E+08	6.90%	1.222E+08	8.35%	8.845E+07	6.32%	8.042E+07	6.94%
672-total	1.155E+08	6.56%	6.645E+07	8.74%	8.094E+07	5.69%	8.334E+07	5.77%

* 評価に用いた特性 γ 線を発生するFP核種

表4-3-1 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱（試料No.3,原子炉出力500W,照射時間10秒）

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)							総和計算値
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	秋山(誤差)		
11	6	19	0.179	0.226	0.164	0.268	0.213	0.010	0.209	
25	10	35	0.162	0.205	0.149	0.244	0.195	0.009	0.189	
45	10	55	0.0992	0.126	0.0911	0.149	0.126	0.007	0.122	
75	20	90	0.126	0.159	0.115	0.189	0.150	0.007	0.147	
115	40	140	0.152	0.193	0.140	0.229	0.180	0.008	0.176	
195	60	230	0.116	0.147	0.107	0.175	0.146	0.007	0.142	
315	80	360	0.0923	0.117	0.0847	0.139	0.116	0.006	0.110	
495	100	550	0.0723	0.0915	0.0663	0.108	0.0916	0.0045	0.0876	
795	200	900	0.0918	0.116	0.0843	0.138	0.115	0.005	0.110	
1395	400	1600	0.109	0.137	0.0997	0.163	0.132	- 0.005	0.129	
2195	500	2450	0.0831	0.105	0.0763	0.125	0.103	- 0.005	0.104	
3195	600	3500	0.0642	0.0813	0.0590	0.0964	0.0807	- 0.0038	0.0837	

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-3-2 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱（試料No.12,原子炉出力500W,照射時間10秒）

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)							総和計算値
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	秋山 (誤差)		
11	6	19	0.204	0.205	0.198	0.273	0.213	0.010	0.209	
25	10	35	0.182	0.183	0.177	0.244	0.195	0.009	0.189	
45	10	55	0.115	0.115	0.112	0.154	0.126	0.007	0.122	
75	20	90	0.137	0.138	0.133	0.184	0.150	0.007	0.147	
115	40	140	0.169	0.169	0.164	0.226	0.180	0.008	0.176	
195	60	230	0.131	0.132	0.128	0.176	0.146	0.007	0.142	
315	80	360	0.103	0.103	0.100	0.138	0.116	0.006	0.110	
495	100	550	0.0805	0.0808	0.0784	0.1078	0.0916	0.0045	0.0876	
795	200	900	0.101	0.101	0.0984	0.135	0.115	0.005	0.110	
1395	400	1600	0.118	0.119	0.115	0.159	0.132	0.005	0.129	
2195	500	2450	0.0969	0.0973	0.0943	0.130	0.103	0.005	0.104	
3195	600	3500	0.0750	0.0753	0.0730	0.100	0.0807	0.0038	0.0837	

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-3-3 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱（試料No.2,原子炉出力500W,照射時間100秒）

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)							総和計算値
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	秋山 (誤差)		
70	40	140	0.221	0.230	0.208	0.281	0.195	0.006	0.186	
150	60	230	0.156	0.162	0.147	0.198	0.151	0.004	0.146	
270	80	360	0.118	0.122	0.111	0.150	0.116	0.003	0.111	
450	100	550	0.0938	0.0975	0.0881	0.119	0.0924	0.0027	0.0879	
750	200	900	0.116	0.121	0.109	0.147	0.114	0.003	0.110	
1350	400	1600	0.132	0.137	0.124	0.167	0.129	0.004	0.129	
2150	500	2450	0.102	0.106	0.0962	0.130	0.103	0.003	0.104	
3150	600	3500	0.0803	0.0834	0.0754	0.102	0.0822	0.0023	0.0837	
4350	800	4800	0.0724	0.0752	0.0680	0.0919	0.0746	0.0021	0.0762	
5950	1000	6500	0.0605	0.0628	0.0568	0.0767	0.0627	0.0018	0.0646	
7950	2000	9000	0.0782	0.0812	0.0734	0.0992	0.0808	0.0023	0.0830	
11950	3000	13500	0.0643	0.0668	0.0604	0.0816	0.0659	0.0019	0.0678	
17950	4000	20000	0.0464	0.0482	0.0436	0.0589	0.0461	0.0014	0.0481	

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-4-1 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱（試料No.672,原子炉出力1900W,照射時間100秒）

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)				
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算
11	6	64	0.0683	0.0677	0.0761	0.0331	0.0739
25	10	80	0.0864	0.0856	0.0962	0.0419	0.0865
45	10	100	0.0629	0.0623	0.0700	0.0305	0.0644
75	20	135	0.0841	0.0833	0.0936	0.0407	0.0879
115	40	185	0.120	0.119	0.133	0.0580	0.117
195	60	275	0.110	0.109	0.122	0.0531	0.106
315	80	405	0.0957	0.0947	0.1065	0.0463	0.0912
495	100	595	0.0835	0.0827	0.0930	0.0405	0.0779
795	200	945	0.109	0.108	0.122	0.0529	0.102
1395	400	1645	0.136	0.135	0.152	0.0661	0.122
2195	500	2495	0.109	0.108	0.121	0.0528	0.0984
3195	600	3545	0.0881	0.0872	0.0981	0.0427	0.0781
4350	800	4800	0.0849	0.0841	0.0945	0.0411	0.0709

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-4-2 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱（試料No.672,原子炉出力1900W,照射時間500秒）

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)				
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算値
11	6	264	0.0245	0.0237	0.0290	0.0179	0.0238
25	10	280	0.0302	0.0292	0.0358	0.0220	0.0312
45	10	300	0.0238	0.0230	0.0282	0.0174	0.0255
75	20	335	0.0378	0.0366	0.0448	0.0276	0.0395
115	40	385	0.0598	0.0578	0.0709	0.0436	0.0606
195	60	475	0.0667	0.0646	0.0791	0.0487	0.0657
315	80	605	0.0672	0.0650	0.0797	0.0491	0.0652
495	100	795	0.0628	0.0608	0.0745	0.0459	0.0616
795	200	1145	0.0896	0.0867	0.106	0.0654	0.0872
1395	400	1845	0.111	0.107	0.131	0.0808	0.109
2195	500	2695	0.0935	0.0904	0.111	0.0682	0.0904
3195	600	3745	0.0798	0.0772	0.0946	0.0582	0.0731
4350	800	5000	0.0772	0.0747	0.0915	0.0563	0.0673
5950	1000	6700	0.0710	0.0687	0.084	0.0518	0.0566
7950	2000	9200	0.101	0.0973	0.119	0.0734	0.0722
11950	3000	13700	0.102	0.0990	0.121	0.0747	0.0592
17950	4000	20200	0.103	0.0997	0.122	0.0752	0.0432

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-5-1 U-235,照射時間10秒の総和計算値と補正係数

T_R (s)	10
-----------	----

T_w (s)	T_c (s)	T_f (S)	T_F (S)	$f_{cal} \times T_f$ (MeV/fission)	$F_{cal} \times T_F$ (MeV/fission)	f_{cal} (MeV/s/fission)	F_{cal}/T_R (MeV/s/fission)	η
11	6	19	14	6.48E-01	4.88E+00	3.41E-02	3.49E-02	0.977
25	10	35	30	6.58E-01	5.67E+00	1.88E-02	1.89E-02	0.993
45	10	55	50	6.68E-01	6.09E+00	1.22E-02	1.22E-02	0.997
75	20	90	85	6.60E-01	6.24E+00	7.33E-03	7.34E-03	0.999
115	40	140	135	6.17E-01	5.95E+00	4.41E-03	4.41E-03	0.999
195	60	230	225	5.45E-01	5.34E+00	2.37E-03	2.37E-03	1.000
315	80	360	355	4.96E-01	4.89E+00	1.38E-03	-1.38E-03	1.000
495	100	550	545	4.82E-01	4.78E+00	8.76E-04	8.76E-04	1.000
795	200	900	895	4.94E-01	4.91E+00	5.49E-04	5.49E-04	1.000
1395	400	1600	1595	5.15E-01	5.13E+00	3.22E-04	3.22E-04	1.000
2195	500	2450	2445	5.11E-01	5.10E+00	2.08E-04	2.08E-04	1.000
3195	600	3500	3495	4.88E-01	4.87E+00	1.39E-04	1.39E-04	1.000

 T_w ; 測定待ち時間 T_c ; 測定時間 T_R ; 照射時間 T_f ; 瞬時照射崩壊熱の冷却時間 $T_f = T_w + 1/2(T_R + T_c)$ T_F ; 有限時間照射崩壊熱の冷却時間 $T_F = T_w + 1/2T_c$ f_{cal} ; 総和計算における瞬時照射崩壊熱 F_{cal} ; 総和計算における有限時間照射崩壊熱 η ; 補正係数

表4-5-2 U-235照射時間100秒の総和計算値と補正係数

T_R (s)	100
-----------	-----

T_w (s)	T_c (s)	T_f (S)	T_F (S)	$f_{cal} \times T_f$ (MeV/fission)	$F_{cal} \times T_F$ (MeV/fission)	f_{cal} (MeV/s/fission)	F_{cal}/T_R (MeV/s/fission)	η
70	40	140	90	6.17E-01	4.19E+01	4.41E-03	4.65E-03	0.947
150	60	230	180	5.45E-01	4.37E+01	2.37E-03	2.43E-03	0.977
270	80	360	310	4.96E-01	4.31E+01	1.38E-03	1.39E-03	0.991
450	100	550	500	4.82E-01	4.40E+01	8.76E-04	8.79E-04	0.997
750	200	900	850	4.94E-01	4.67E+01	5.49E-04	5.50E-04	0.999
1350	400	1600	1550	5.15E-01	4.99E+01	3.22E-04	3.22E-04	1.000
2150	500	2450	2400	5.11E-01	5.00E+01	2.08E-04	2.08E-04	1.000
3150	600	3500	3450	4.88E-01	4.81E+01	1.39E-04	1.39E-04	1.000
4350	800	4800	4750	4.57E-01	4.52E+01	9.52E-05	9.52E-05	1.000
5950	1000	6500	6450	4.20E-01	4.17E+01	6.46E-05	6.46E-05	1.000
7950	2000	9000	8950	3.74E-01	3.71E+01	4.15E-05	4.15E-05	1.000
11950	3000	13500	13450	3.05E-01	3.04E+01	2.26E-05	2.26E-05	1.000
17950	4000	20000	19950	2.40E-01	2.40E+01	1.20E-05	1.20E-05	1.000

 T_w ; 測定待ち時間 T_c ; 測定時間 T_R ; 照射時間 $T_f = T_w + 1/2(T_R + T_c)$ $T_F = T_w + 1/2T_c$ f_{cal} ; 総和計算における瞬時照射崩壊熱 F_{cal} ; 総和計算における有限時間照射崩壊熱 η ; 補正係数

表4-5-3 Np-237, 照射時間100秒の総和計算値と補正係数

T_R (s)	100
-----------	-----

T_w (s)	T_c (s)	T_f (S)	T_F (S)	$f_{cal} \times T_f$ (MeV/fission)	$F_{cal} \times T_F$ (MeV/fission)	f_{cal} (MeV/s/fission)	F_{cal}/T_R (MeV/s/fission)	η
11	6	64	14	5.99E-01	1.72E+01	9.35E-03	1.23E-02	0.760
25	10	80	30	5.97E-01	2.59E+01	7.46E-03	8.65E-03	0.862
45	10	100	50	5.87E-01	3.22E+01	5.87E-03	6.44E-03	0.911
75	20	135	85	5.60E-01	3.73E+01	4.15E-03	4.39E-03	0.945
115	40	185	135	5.23E-01	3.95E+01	2.83E-03	2.93E-03	0.967
195	60	275	225	4.80E-01	3.99E+01	1.75E-03	1.77E-03	0.984
315	80	405	355	4.59E-01	4.05E+01	1.13E-03	1.14E-03	0.994
495	100	595	545	4.62E-01	4.25E+01	7.77E-04	7.79E-04	0.998
795	200	945	895	4.84E-01	4.58E+01	5.12E-04	5.12E-04	0.999
1395	400	1645	1595	5.02E-01	4.87E+01	3.05E-04	3.05E-04	1.000
2195	500	2495	2445	4.91E-01	4.81E+01	1.97E-04	1.97E-04	1.000
3195	600	3545	3495	4.62E-01	4.55E+01	1.30E-04	1.30E-04	1.000
4350	800	4800	4750	4.25E-01	4.21E+01	8.86E-05	8.86E-05	1.000
5950	1000	6500	6450	3.84E-01	3.81E+01	5.90E-05	5.90E-05	1.000
7950	2000	9000	8950	3.35E-01	3.33E+01	3.72E-05	3.72E-05	1.000
11950	3000	13500	13450	2.73E-01	2.72E+01	2.02E-05	2.02E-05	1.000
17950	4000	20000	19950	2.19E-01	2.19E+01	1.10E-05	1.10E-05	1.000

 T_w ; 測定待ち時間 T_c ; 測定時間 T_R ; 照射時間 T_f ; 瞬時照射崩壊熱の冷却時間

$$T_f = T_w + 1/2(T_R + T_c)$$

 T_F ; 有限時間照射崩壊熱の冷却時間

$$T_F = T_w + 1/2T_c$$

 f_{cal} ; 総和計算における瞬時照射崩壊熱 F_{cal} ; 総和計算における有限時間照射崩壊熱 η ; 補正係数

表4-5-4 Np-237, 照射時間500秒の総和計算値と補正係数

T_R (s)	500
-----------	-----

T_w (s)	T_c (s)	T_f (S)	T_F (S)	$f_{cal} \times T_f$ (MeV/fission)	$F_{cal} \times T_F$ (MeV/fission)	f_{cal} (MeV/s/fission)	F_{cal}/T_R (MeV/s/fission)	η
11	6	264	14	4.84E-01	2.78E+01	1.83E-03	3.97E-03	0.461
25	10	280	30	4.79E-01	4.68E+01	1.71E-03	3.12E-03	0.548
45	10	300	50	4.73E-01	6.38E+01	1.58E-03	2.55E-03	0.618
75	20	335	85	4.66E-01	8.39E+01	1.39E-03	1.98E-03	0.704
115	40	385	135	4.60E-01	1.02E+02	1.20E-03	1.51E-03	0.790
195	60	475	225	4.58E-01	1.23E+02	9.64E-04	1.10E-03	0.879
315	80	605	355	4.63E-01	1.45E+02	7.65E-04	8.15E-04	0.939
495	100	795	545	4.75E-01	1.68E+02	5.97E-04	6.16E-04	0.970
795	200	1145	895	4.92E-01	1.95E+02	4.30E-04	4.36E-04	0.987
1395	400	1845	1595	5.01E-01	2.18E+02	2.72E-04	2.73E-04	0.995
2195	500	2695	2445	4.86E-01	2.21E+02	1.80E-04	1.81E-04	0.997
3195	600	3745	3495	4.56E-01	2.13E+02	1.22E-04	1.22E-04	0.998
4350	800	5000	4750	4.20E-01	2.00E+02	8.40E-05	8.41E-05	0.999
5950	1000	6700	6450	3.79E-01	1.83E+02	5.66E-05	5.66E-05	0.999
7950	2000	9200	8950	3.32E-01	1.62E+02	3.61E-05	3.61E-05	1.000
11950	3000	13700	13450	2.70E-01	1.33E+02	1.97E-05	1.97E-05	1.000
17950	4000	20200	19950	2.18E-01	1.08E+02	1.08E-05	1.08E-05	1.000

 T_w ; 測定待ち時間 T_c ; 測定時間 T_R ; 照射時間 T_f ; 瞬時照射崩壊熱の冷却時間 $T_f = T_w + 1/2(T_R + T_c)$ T_F ; 有限時間照射崩壊熱の冷却時間 $T_F = T_w + 1/2T_c$ f_{cal} ; 総和計算における瞬時照射崩壊熱 F_{cal} ; 総和計算における有限時間照射崩壊熱 η ; 補正係数

表4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料No.3、原子炉出力500W、照射時間10秒）

冷却時間（秒）	冷却時間×瞬時照射崩壊熱						総和計算 JNDC-V2	補正係数	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	秋山（誤差）			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
19	0.553	0.700	0.507	0.830	0.659	0.0304	0.648	0.977	1.17	0.93	1.28	0.78
35	0.564	0.714	0.518	0.847	0.679	0.0308	0.658	0.993	1.17	0.92	1.27	0.78
55	0.544	0.689	0.500	0.817	0.693	0.0358	0.668	0.997	1.23	0.97	1.34	0.82
90	0.564	0.714	0.518	0.847	0.673	0.0324	0.660	0.999	1.17	0.92	1.27	0.78
140	0.533	0.674	0.489	0.800	0.631	0.0294	0.617	0.999	1.16	0.91	1.26	0.77
230	0.446	0.565	0.409	0.670	0.561	0.0276	0.545	1.000	1.22	0.97	1.33	0.81
360	0.415	0.526	0.381	0.624	0.522	0.0256	0.496	1.000	1.19	0.94	1.30	0.80
550	0.397	0.503	0.365	0.597	0.504	0.0248	0.482	1.000	1.21	0.96	1.32	0.81
900	0.413	0.523	0.379	0.620	0.515	0.0189	0.494	1.000	1.20	0.95	1.30	0.80
1600	0.434	0.550	0.399	0.652	0.522	0.0176	0.515	1.000	1.19	0.94	1.29	0.79
2450	0.407	0.516	0.374	0.612	0.505	0.0196	0.511	1.000	1.25	0.99	1.37	0.84
3500	0.375	0.474	0.344	0.563	0.480	0.0137	0.488	1.000	1.30	1.03	1.42	0.87

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料No.12、原子炉出力500W、照射時間10秒）

冷却時間（秒）	冷却時間×瞬時照射崩壊熱				秋山	秋山（誤差）	総和計算 JNDC-V2	補正係数	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*					Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
19	0.630	0.633	0.613	0.844	0.659	0.0304	0.648	0.977	1.03	1.02	1.06	0.77
35	0.634	0.636	0.617	0.849	0.679	0.0308	0.658	0.993	1.04	1.03	1.07	0.77
55	0.631	0.633	0.614	0.844	0.693	0.0358	0.668	0.997	1.06	1.06	1.09	0.79
90	0.616	0.619	0.600	0.825	0.673	0.0324	0.660	0.999	1.07	1.07	1.10	0.80
140	0.590	0.592	0.574	0.790	0.631	0.0294	0.617	0.999	1.05	1.04	1.07	0.78
230	0.503	0.505	0.490	0.674	0.561	0.0276	0.545	1.000	1.08	1.08	1.11	0.81
360	0.463	0.465	0.451	0.620	0.522	0.0256	0.496	1.000	1.07	1.07	1.10	0.80
550	0.443	0.445	0.431	0.593	0.504	0.0248	0.482	1.000	1.09	1.08	1.12	0.81
900	0.455	0.457	0.443	0.609	0.515	0.0189	0.494	1.000	1.09	1.08	1.12	0.81
1600	0.474	0.476	0.461	0.635	0.522	0.0176	0.515	1.000	1.09	1.08	1.12	0.81
2450	0.475	0.477	0.462	0.636	0.505	0.0196	0.511	1.000	1.08	1.07	1.11	0.80
3500	0.437	0.439	0.426	0.586	0.480	0.0137	0.488	1.000	1.12	1.11	1.15	0.83

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-6-3 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料No.2、原子炉出力500W、照射時間100秒）

冷却時間（秒）	冷却時間×瞬時照射崩壊熱						総和計算 JNDC-V2	補正係数	C/E値（補正後）			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	秋山（誤差）			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
140	0.775	0.805	0.728	0.983	0.631	0.029	0.617	0.947	0.84	0.81	0.89	0.66
230	0.599	0.622	0.562	0.759	0.561	0.028	0.545	0.977	0.93	0.90	0.99	0.74
360	0.531	0.551	0.498	0.673	0.522	0.026	0.496	0.991	0.94	0.91	1.01	0.74
550	0.516	0.536	0.485	0.655	0.504	0.025	0.482	0.997	0.94	0.90	1.00	0.74
900	0.523	0.543	0.491	0.663	0.515	0.019	0.494	0.999	0.95	0.91	1.01	0.75
1600	0.526	0.547	0.494	0.668	0.522	0.018	0.515	1.000	0.98	0.94	1.04	0.77
2450	0.502	0.521	0.471	0.637	0.505	0.020	0.511	1.000	1.02	0.98	1.08	0.80
3500	0.468	0.486	0.440	0.594	0.480	0.014	0.488	1.000	1.04	1.00	1.11	0.82
4800	0.434	0.451	0.408	0.551	0.447	0.012	0.457	1.000	1.05	1.01	1.12	0.83
6500	0.393	0.408	0.369	0.499	0.408	0.012	0.420	1.000	1.07	1.03	1.14	0.84
9000	0.352	0.365	0.330	0.446	0.364	0.010	0.374	1.000	1.06	1.02	1.13	0.84
13500	0.290	0.301	0.272	0.367	0.297	0.009	0.305	1.000	1.05	1.02	1.12	0.83
20000	0.232	0.241	0.218	0.294	0.230	0.007	0.240	1.000	1.04	1.00	1.10	0.82

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-6-4 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱（10秒照射結果+100秒照射結果）

冷却時間(秒)	冷却時間×瞬時崩壊熱					総和計算 JNDC-V2
	No.3+No.2	No.12+No.2	平均	秋山	秋山(誤差)	
19	0.700	0.633	0.666	0.659	0.0304	0.648
35	0.714	0.636	0.675	0.679	0.0308	0.658
55	0.689	0.633	0.661	0.693	0.0358	0.668
90	0.714	0.619	0.667	0.673	0.0324	0.660
140	0.674	0.592	0.633	0.631	0.0294	0.617
230	0.565	0.505	0.535	0.561	0.0276	0.545
360	0.526	0.465	0.495	0.522	0.0256	0.496
550	0.503	0.445	0.474	0.504	0.0248	0.482
900	0.533	0.500	0.516	0.515	0.0189	0.494
1600	0.547	0.547	0.547	0.522	0.0176	0.515
2450	0.521	0.521	0.521	0.505	0.0196	0.511
3500	0.486	0.486	0.486	0.480	0.0137	0.488
4800	0.451	0.451	0.451	0.447	0.0125	0.457
6500	0.408	0.408	0.408	0.408	0.0117	0.420
9000	0.365	0.365	0.365	0.364	0.0099	0.374
13500	0.301	0.301	0.301	0.297	0.0085	0.305
20000	0.241	0.241	0.241	0.230	0.0070	0.240

* No.2, No.3, No.12とも核分裂数はNb-97mから求めた結果を用いた

* 550秒までは10秒照射の結果、1600秒以降は100秒照射の結果、900秒は両者の平均

* 平均は、550秒までのNo.3とNo.12の結果を平均したもの

表4-7-1 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料No.672、原子炉出力1900W、照射時間100秒）

冷却時間(秒)	冷却時間×瞬時照射崩壊熱				総和計算 JNDC-V2	補正係数	C/E値(補正後)			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
64	0.554	0.549	0.617	0.268	0.599	0.760	1.08	1.09	0.97	2.23
80	0.596	0.591	0.664	0.289	0.597	0.862	1.00	1.01	0.90	2.07
100	0.573	0.567	0.638	0.277	0.587	0.911	1.02	1.03	0.92	2.11
135	0.536	0.531	0.597	0.260	0.560	0.945	1.05	1.06	0.94	2.16
185	0.536	0.531	0.596	0.259	0.523	0.967	0.98	0.99	0.88	2.02
275	0.495	0.490	0.551	0.240	0.480	0.984	0.97	0.98	0.87	2.00
405	0.481	0.477	0.536	0.233	0.459	0.994	0.95	0.96	0.86	1.97
595	0.496	0.491	0.552	0.240	0.462	0.998	0.93	0.94	0.84	1.93
945	0.515	0.511	0.574	0.250	0.484	0.999	0.94	0.95	0.84	1.94
1645	0.561	0.556	0.625	0.272	0.502	1.000	0.89	0.90	0.80	1.85
2495	0.544	0.539	0.606	0.263	0.491	1.000	0.90	0.91	0.81	1.86
3545	0.520	0.515	0.580	0.252	0.462	1.000	0.89	0.90	0.80	1.83
4800	0.509	0.504	0.567	0.247	0.425	1.000	0.84	0.84	0.75	1.72

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-7-2 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱（試料No.672、原子炉出力1900W、照射時間500秒）

冷却時間(秒)	冷却時間×瞬時照射崩壊熱				総和計算 JNDC-V2	補正係数	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
264	0.497	0.481	0.590	0.363	0.484	0.461	0.97	1.01	0.82	1.33
280	0.463	0.448	0.549	0.338	0.479	0.548	1.03	1.07	0.87	1.42
300	0.441	0.427	0.523	0.322	0.473	0.618	1.07	1.11	0.91	1.47
335	0.446	0.432	0.529	0.326	0.466	0.704	1.04	1.08	0.88	1.43
385	0.454	0.440	0.539	0.332	0.460	0.790	1.01	1.05	0.85	1.39
475	0.464	0.449	0.551	0.339	0.458	0.879	0.99	1.02	0.83	1.35
605	0.477	0.462	0.566	0.348	0.463	0.939	0.97	1.00	0.82	1.33
795	0.484	0.469	0.575	0.354	0.475	0.970	0.98	1.01	0.83	1.34
1145	0.506	0.490	0.600	0.369	0.492	0.987	0.97	1.01	0.82	1.33
1845	0.508	0.492	0.602	0.371	0.501	0.995	0.99	1.02	0.83	1.35
2695	0.502	0.486	0.596	0.367	0.486	0.997	0.97	1.00	0.82	1.33
3745	0.497	0.481	0.589	0.363	0.456	0.998	0.92	0.95	0.77	1.26
5000	0.482	0.466	0.571	0.352	0.420	0.999	0.87	0.90	0.74	1.19
6700	0.475	0.460	0.564	0.347	0.379	0.999	0.80	0.82	0.67	1.09
9200	0.462	0.447	0.548	0.338	0.332	1.000	0.72	0.74	0.61	0.98
13700	0.467	0.452	0.554	0.341	0.270	1.000	0.58	0.60	0.49	0.79
20200	0.520	0.504	0.617	0.380	0.218	1.000	0.42	0.43	0.35	0.57

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-7-3 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱（100秒照射結果+500秒照射結果）

冷却時間（秒）	冷却時間×瞬時照射崩壊熱（補正後）				総和計算 JNDC-V2
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	
64	0.554	0.549	0.617	0.268	0.599
80	0.596	0.591	0.664	0.289	0.597
100	0.573	0.567	0.638	0.277	0.587
135	0.536	0.531	0.597	0.260	0.560
185	0.536	0.531	0.596	0.259	0.523
275	0.495	0.490	0.551	0.240	0.480
385	0.454	0.440	0.539	0.332	0.460
475	0.464	0.449	0.551	0.339	0.458
605	0.477	0.462	0.566	0.348	0.463
795	0.484	0.469	0.575	0.354	0.475
1145	0.506	0.490	0.600	0.369	0.492
1845	0.508	0.492	0.602	0.371	0.501
2695	0.502	0.486	0.596	0.367	0.486
3745	0.497	0.481	0.589	0.363	0.456
5000	0.482	0.466	0.571	0.352	0.420
6700	0.475	0.460	0.564	0.347	0.379
9200	0.462	0.447	0.548	0.338	0.332
13700	0.467	0.452	0.554	0.341	0.270
20200	0.520	0.504	0.617	0.380	0.218

冷却時間が64～275秒までは、100秒照射データ

冷却時間が385秒以降は、500秒照射データ

*評価に用いた特性 γ 線を発生するFP核種

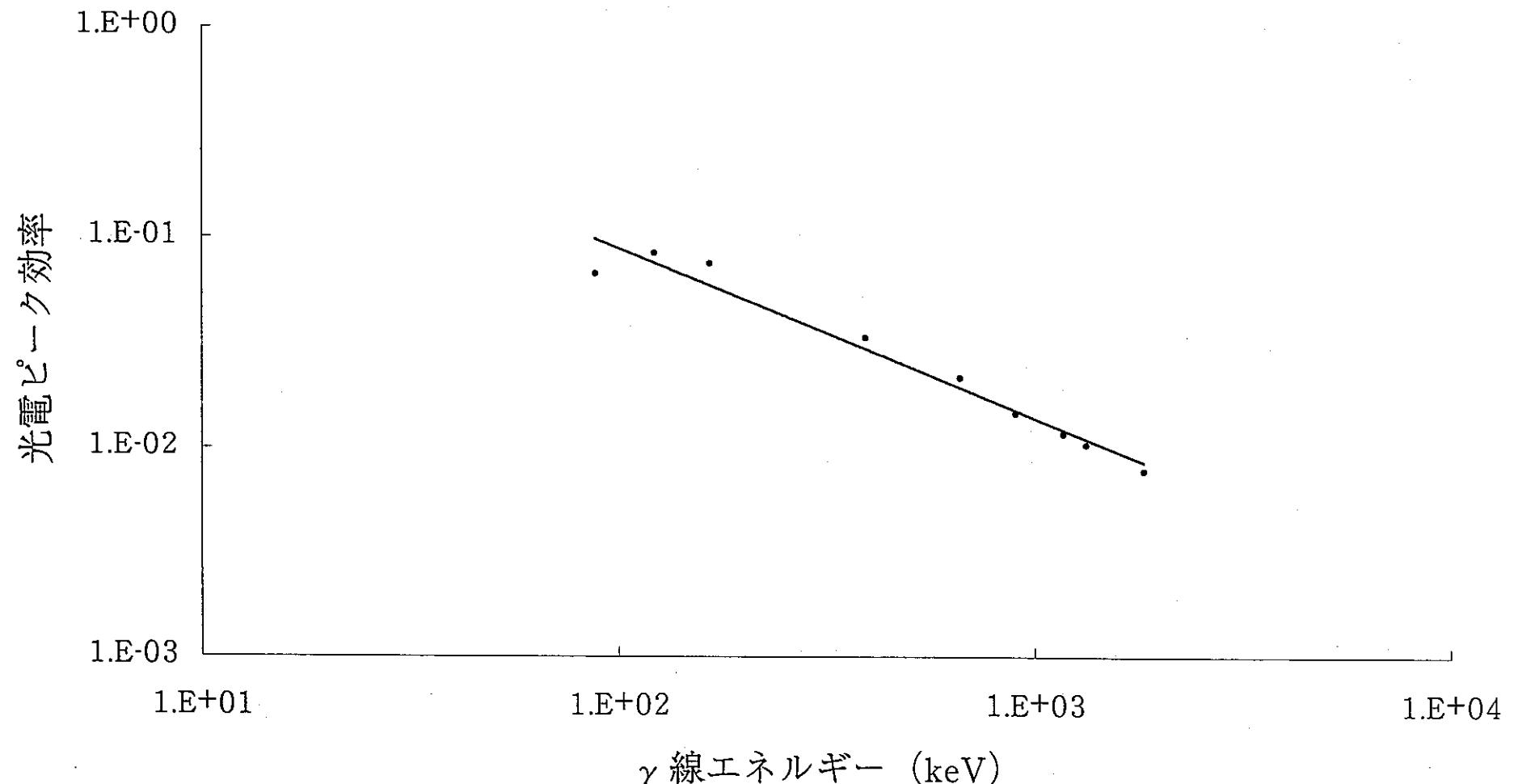


図4-1-1 光電ピーケ効率曲線

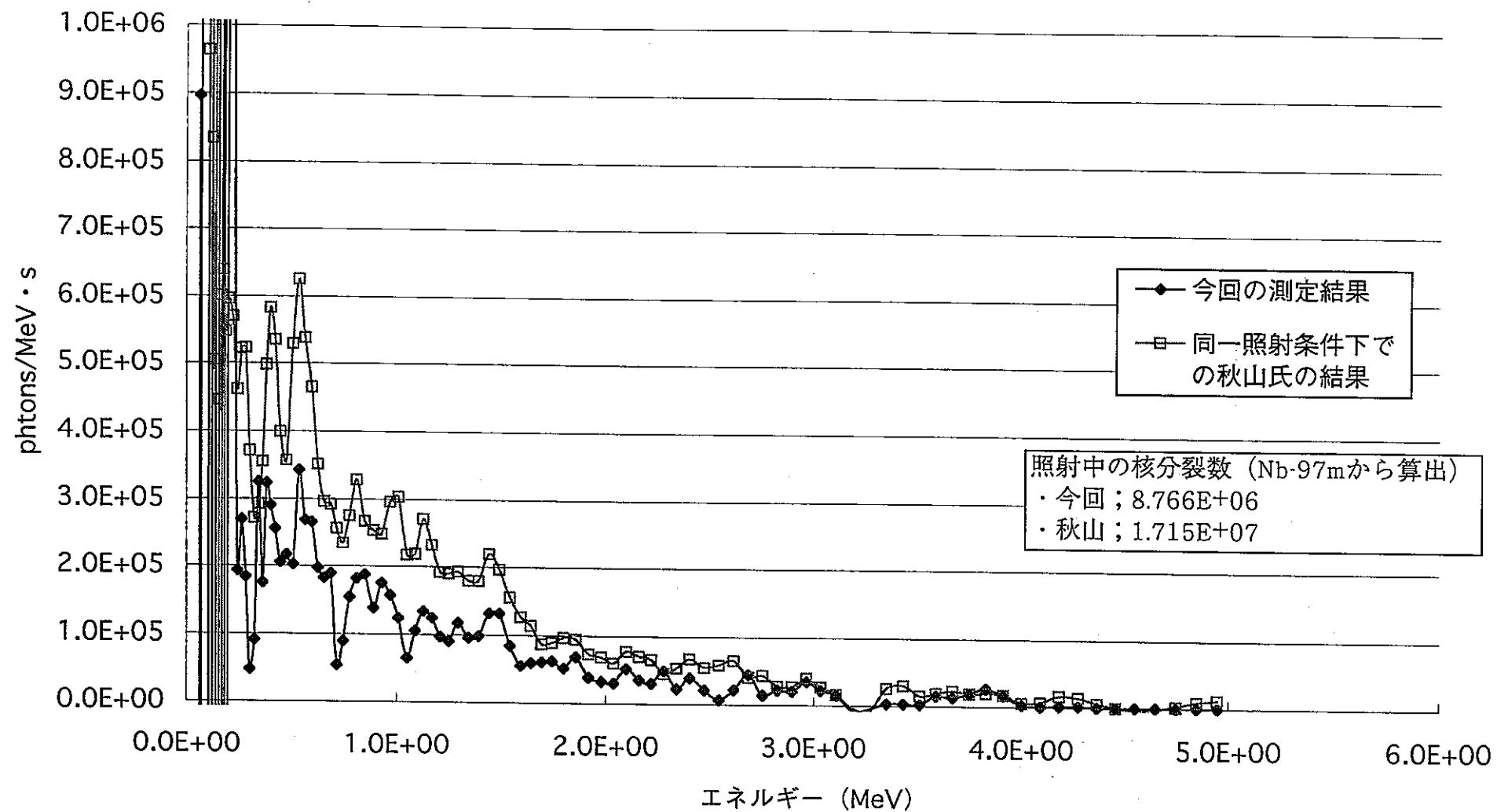


図4-2-1 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-1)

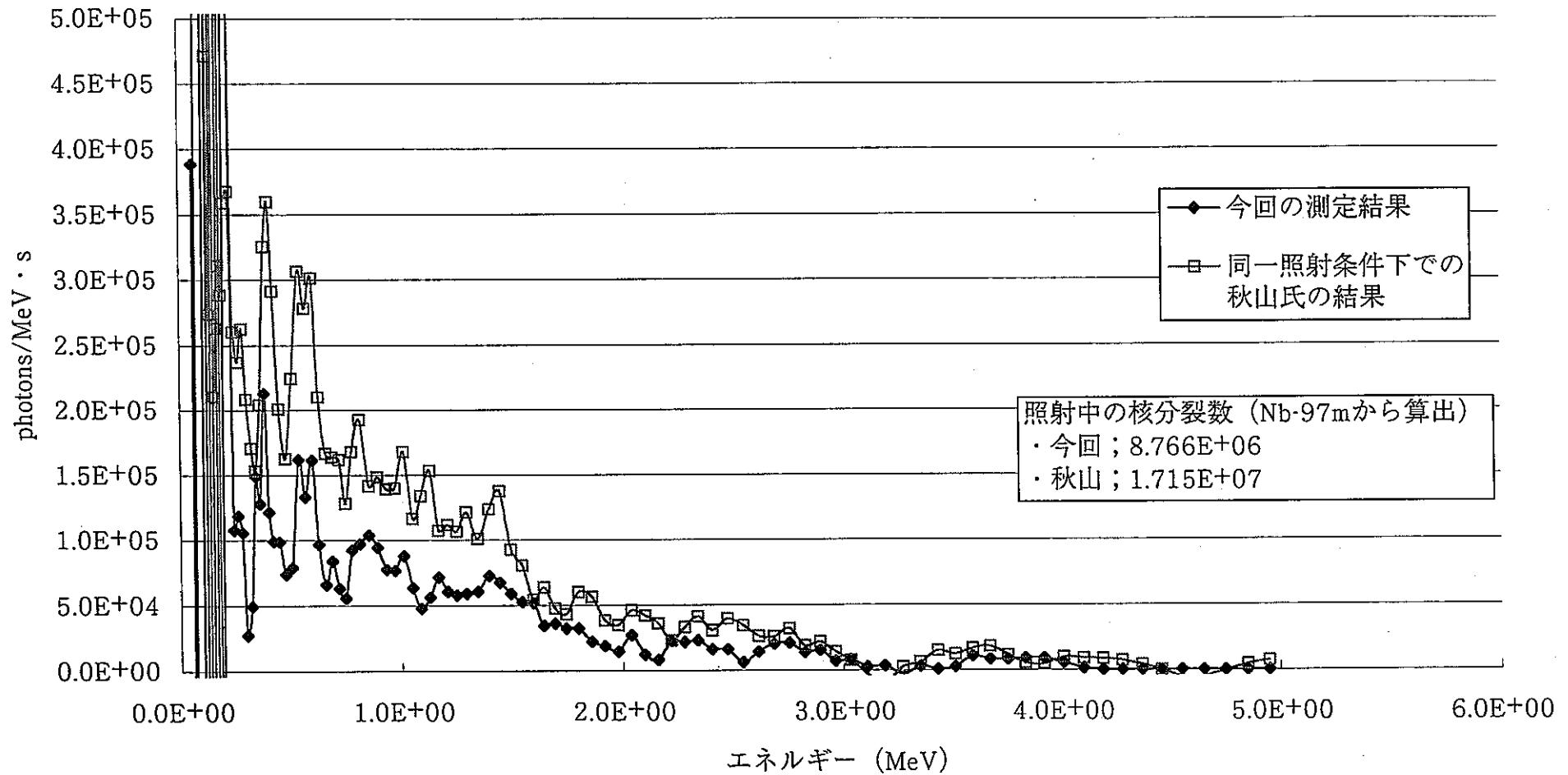


図4-2-2 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果（試料No.3-2）

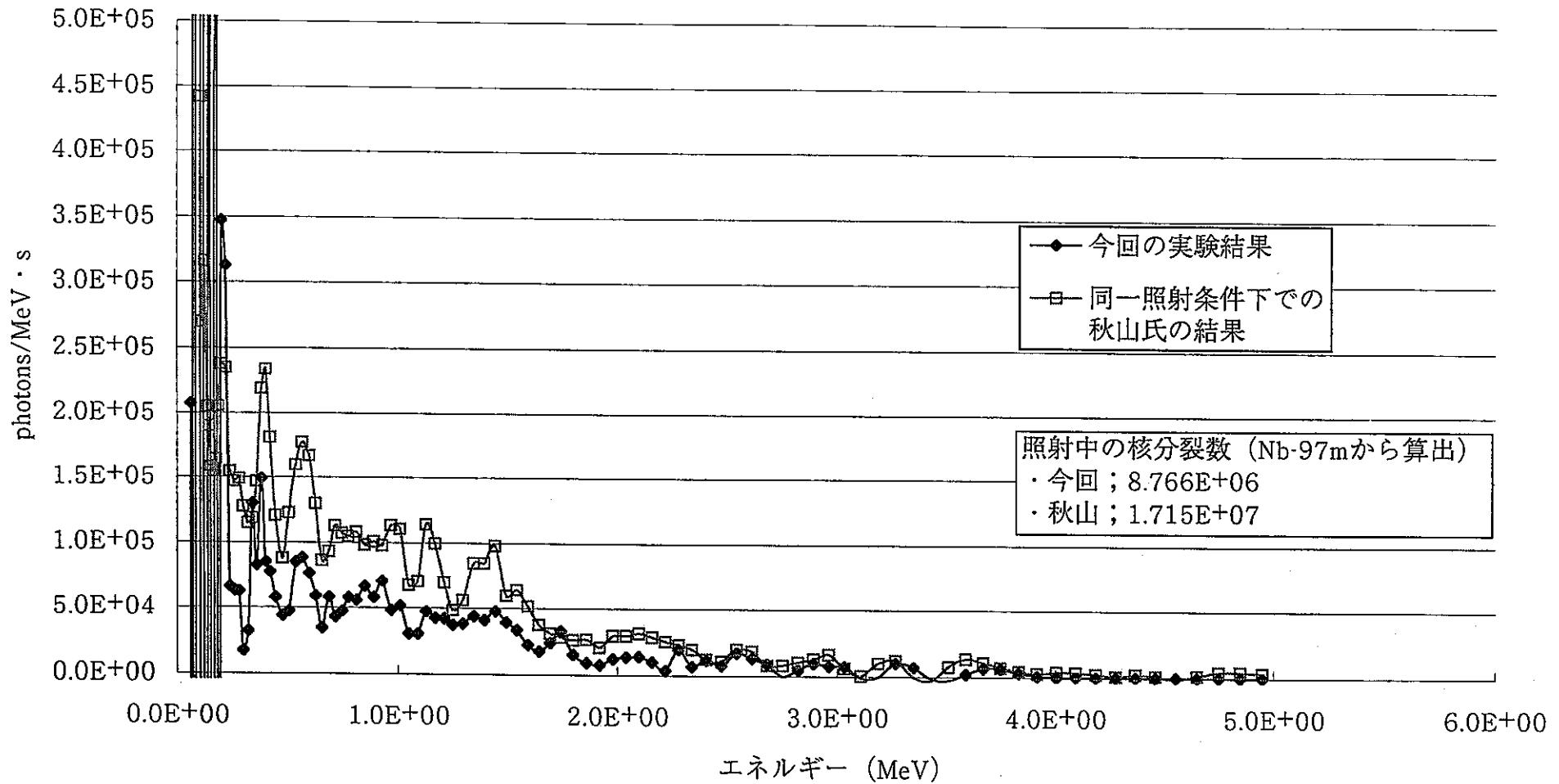


図4-2-3 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-3)

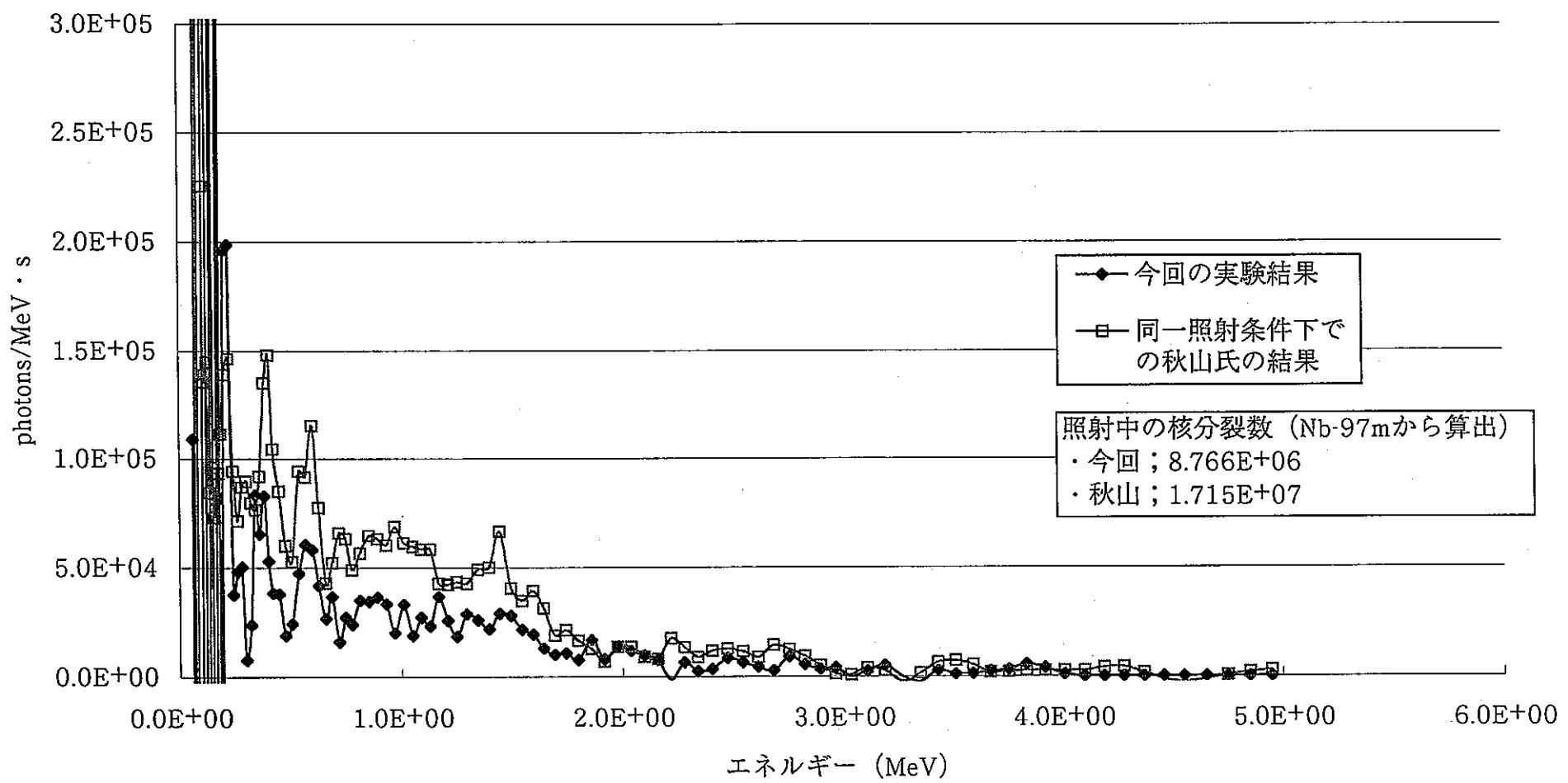


図4-2-4 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-4)

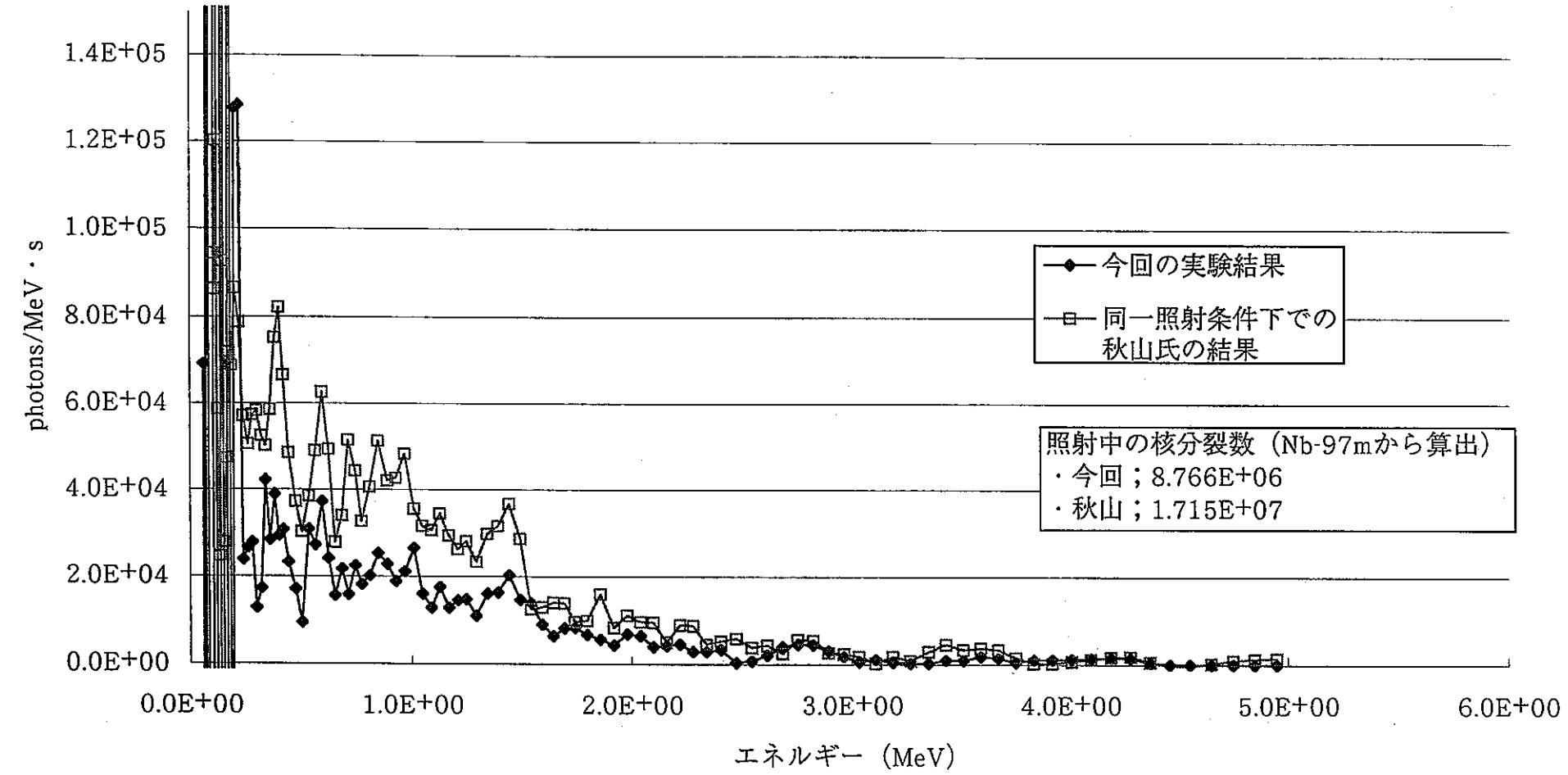


図4-2-5 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-5)

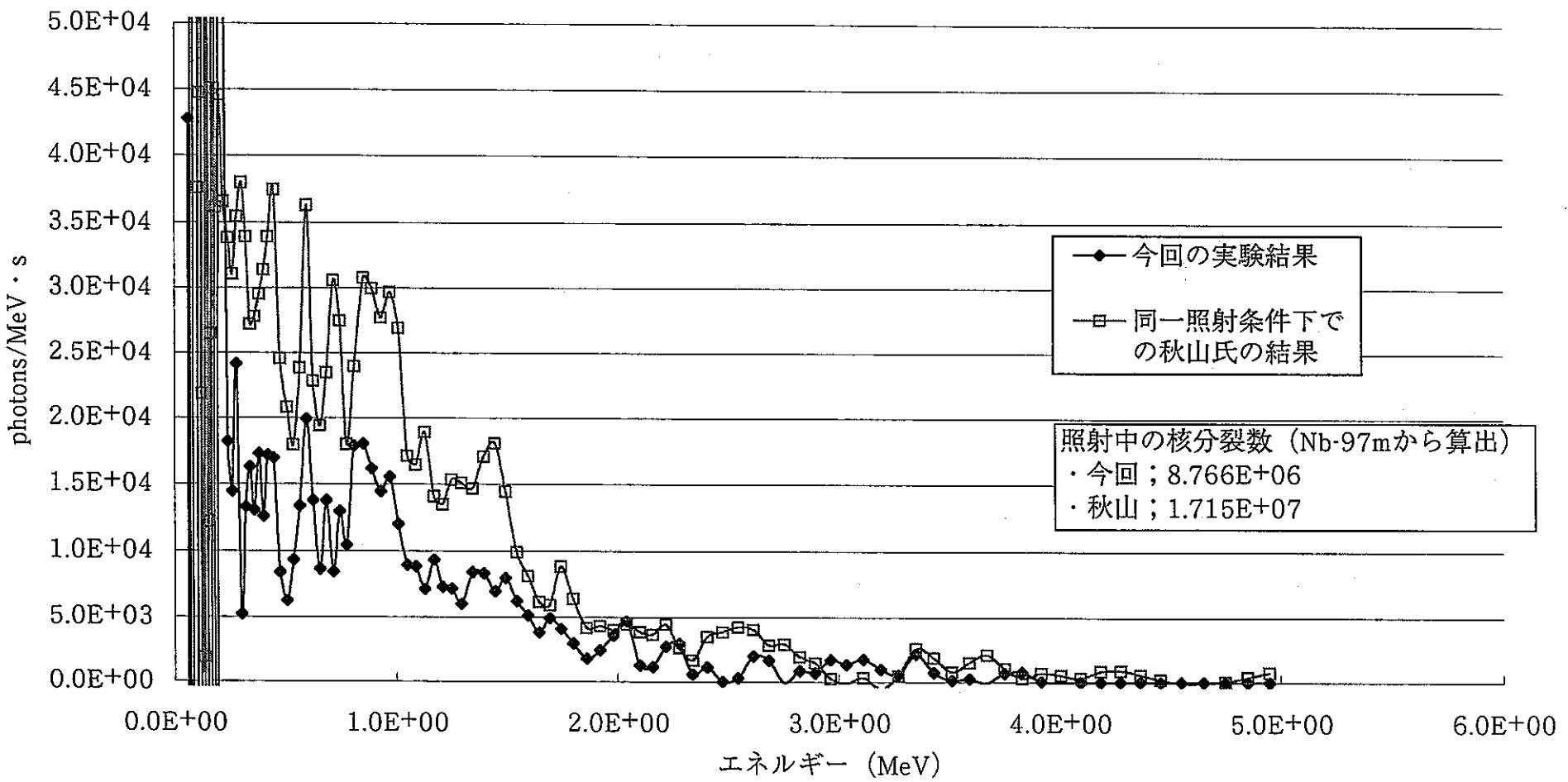


図4-2-6 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-6)

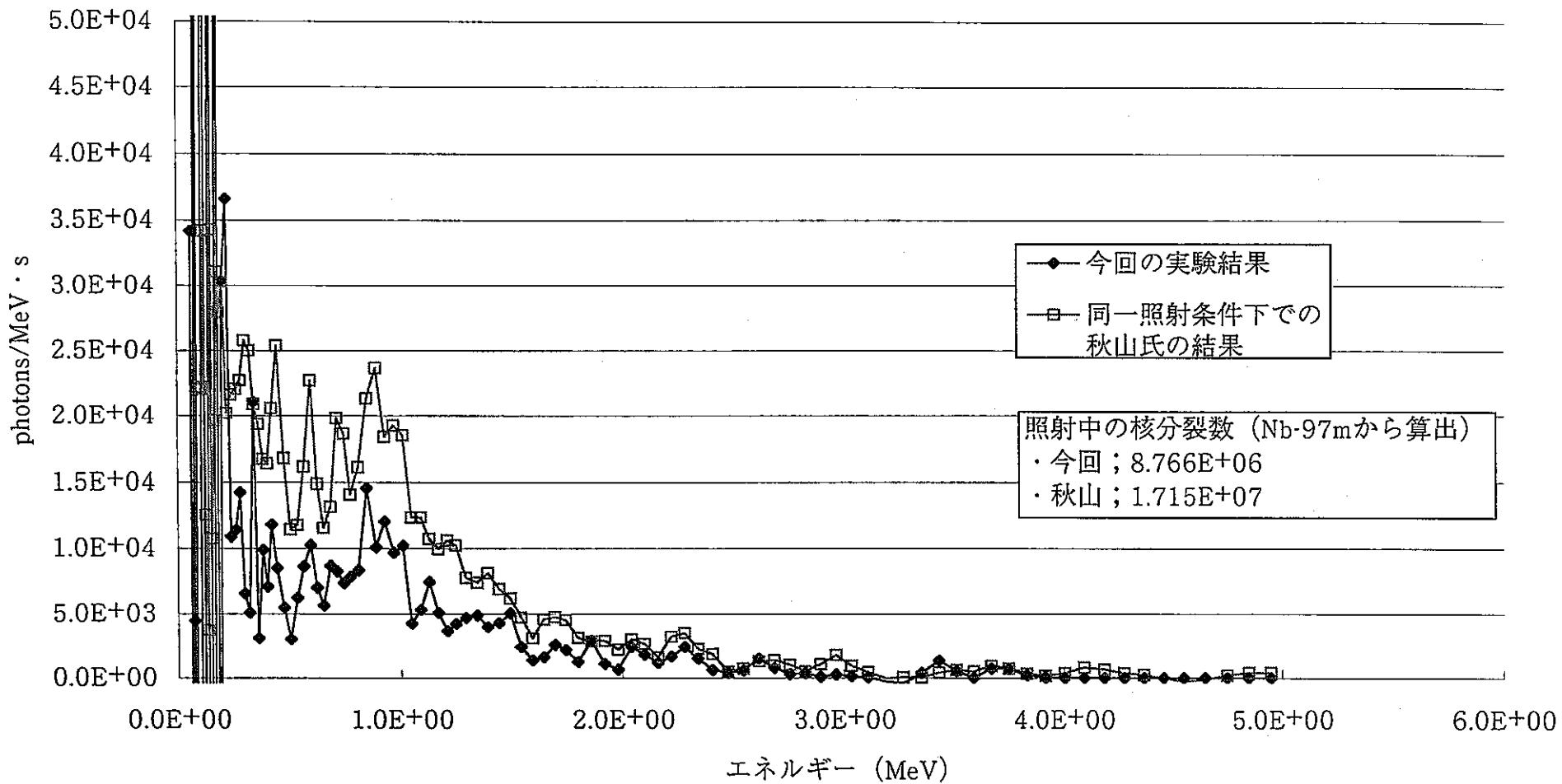


図4-2-7 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-7)

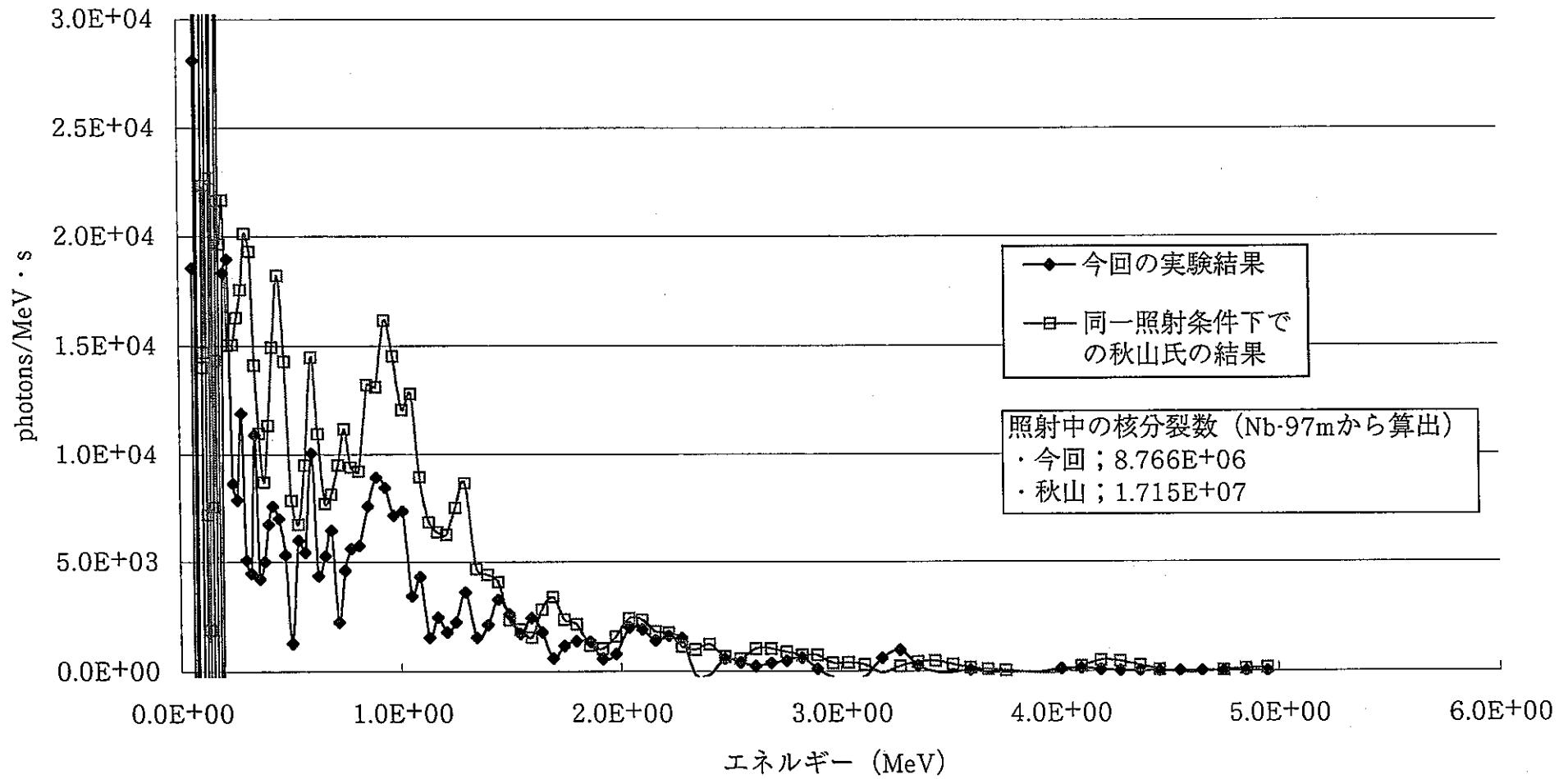


図4-2-8 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (No.3-8)

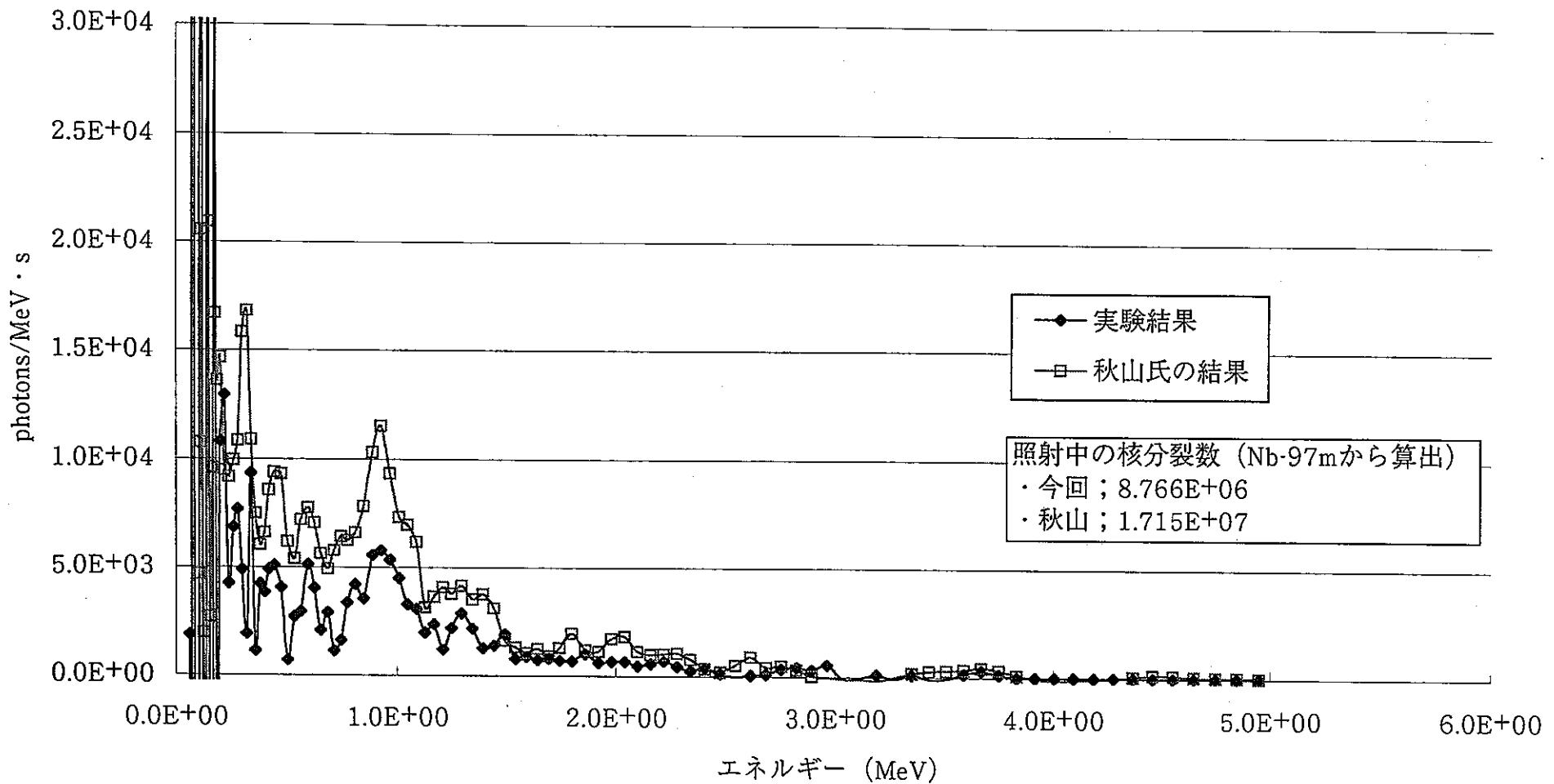


図4-2-9 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-9)

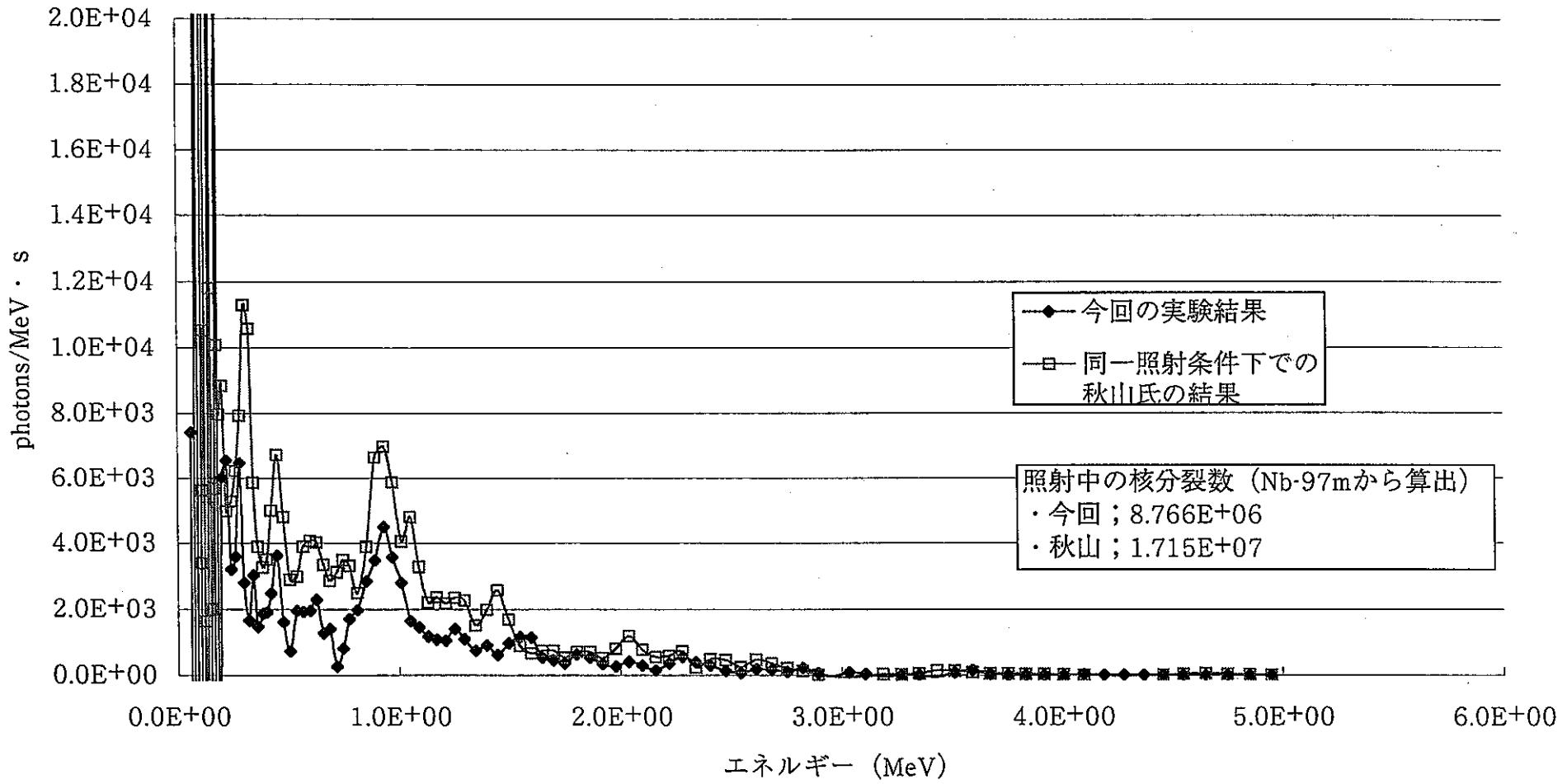


図4-2-10 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-10)

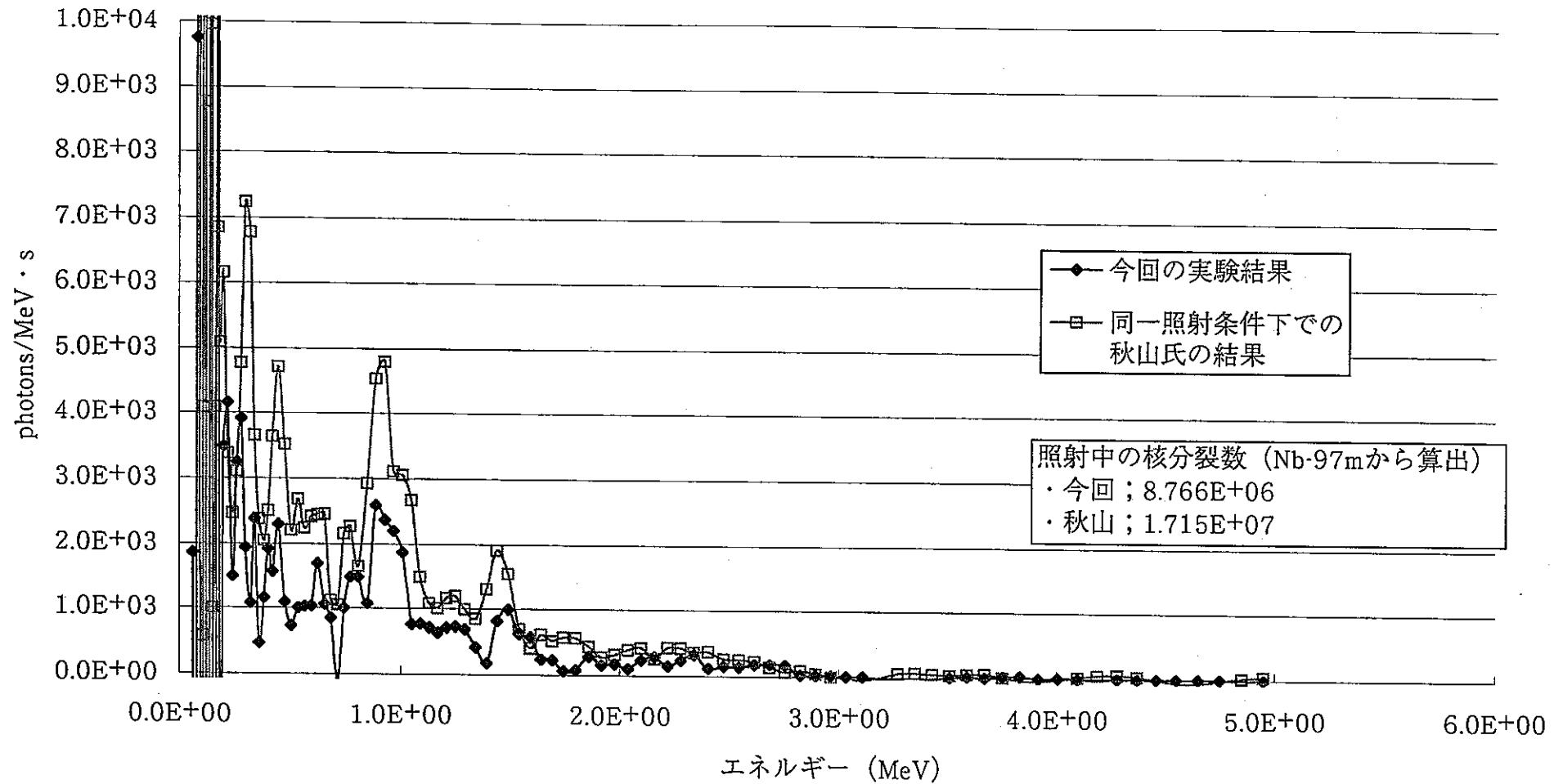


図4-2-11 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-11)

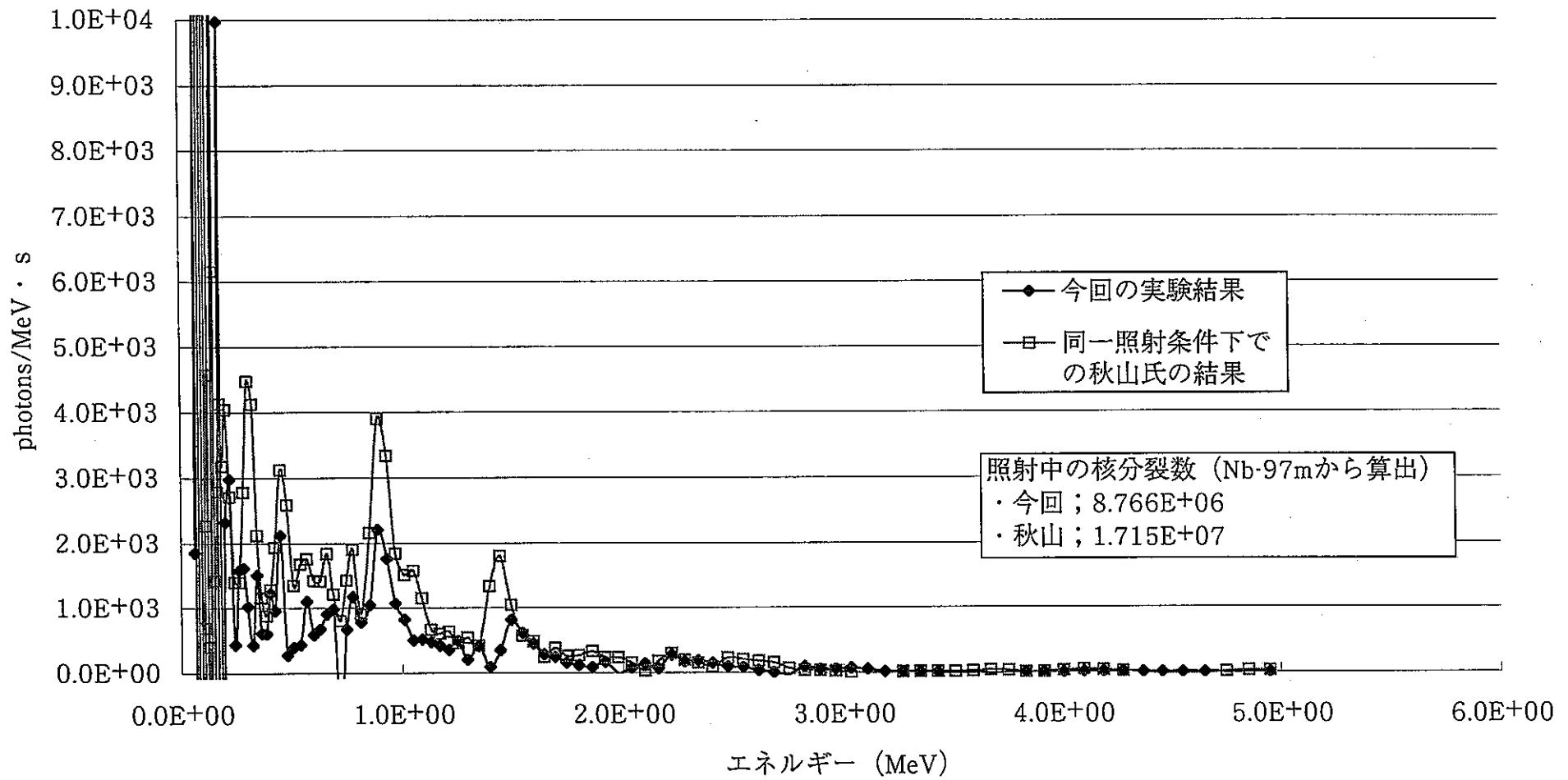


図4-2-12 U-235,原子炉出力500W,照射時間10秒のアンフォールディング結果 (試料No.3-12)

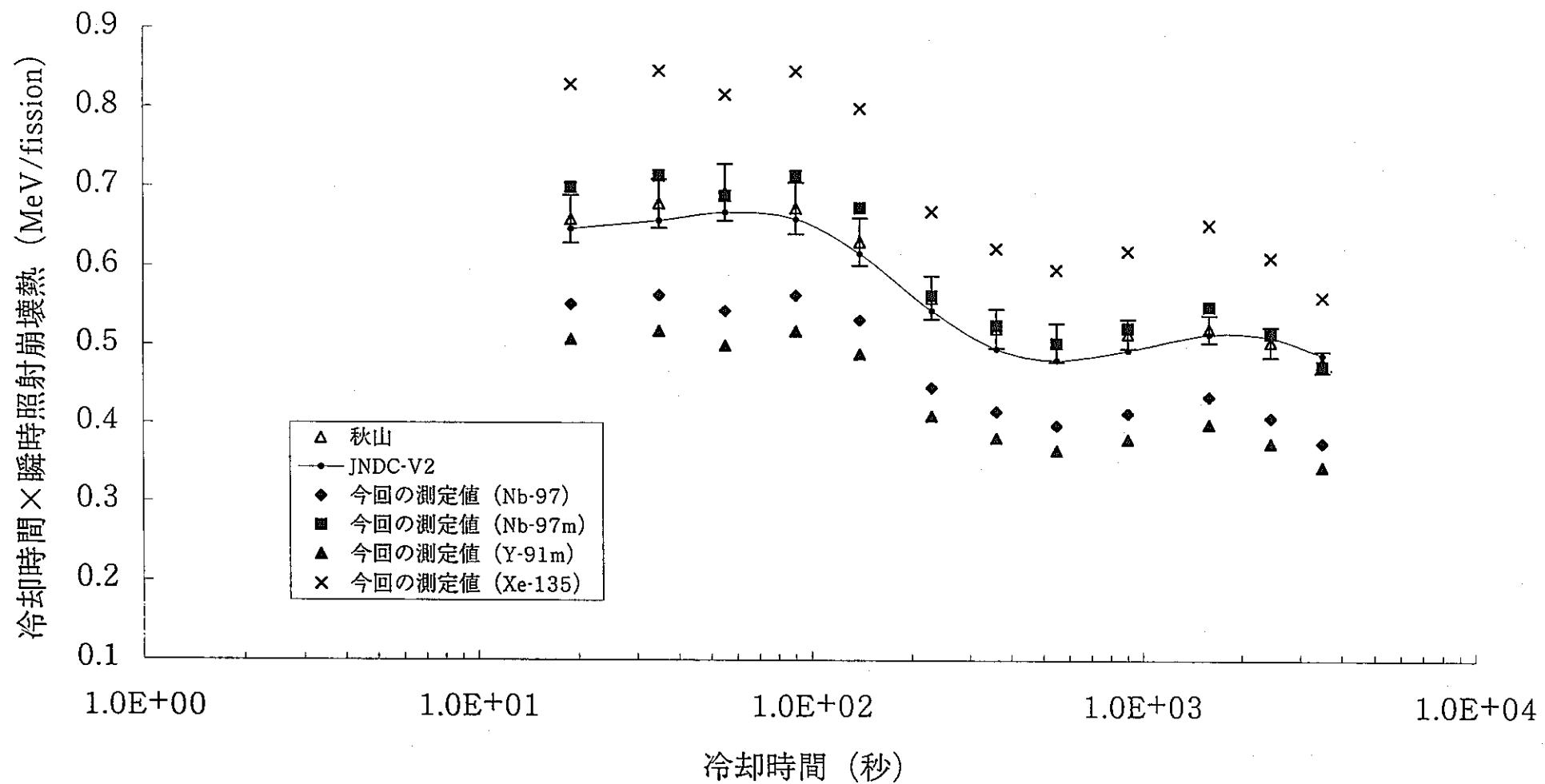
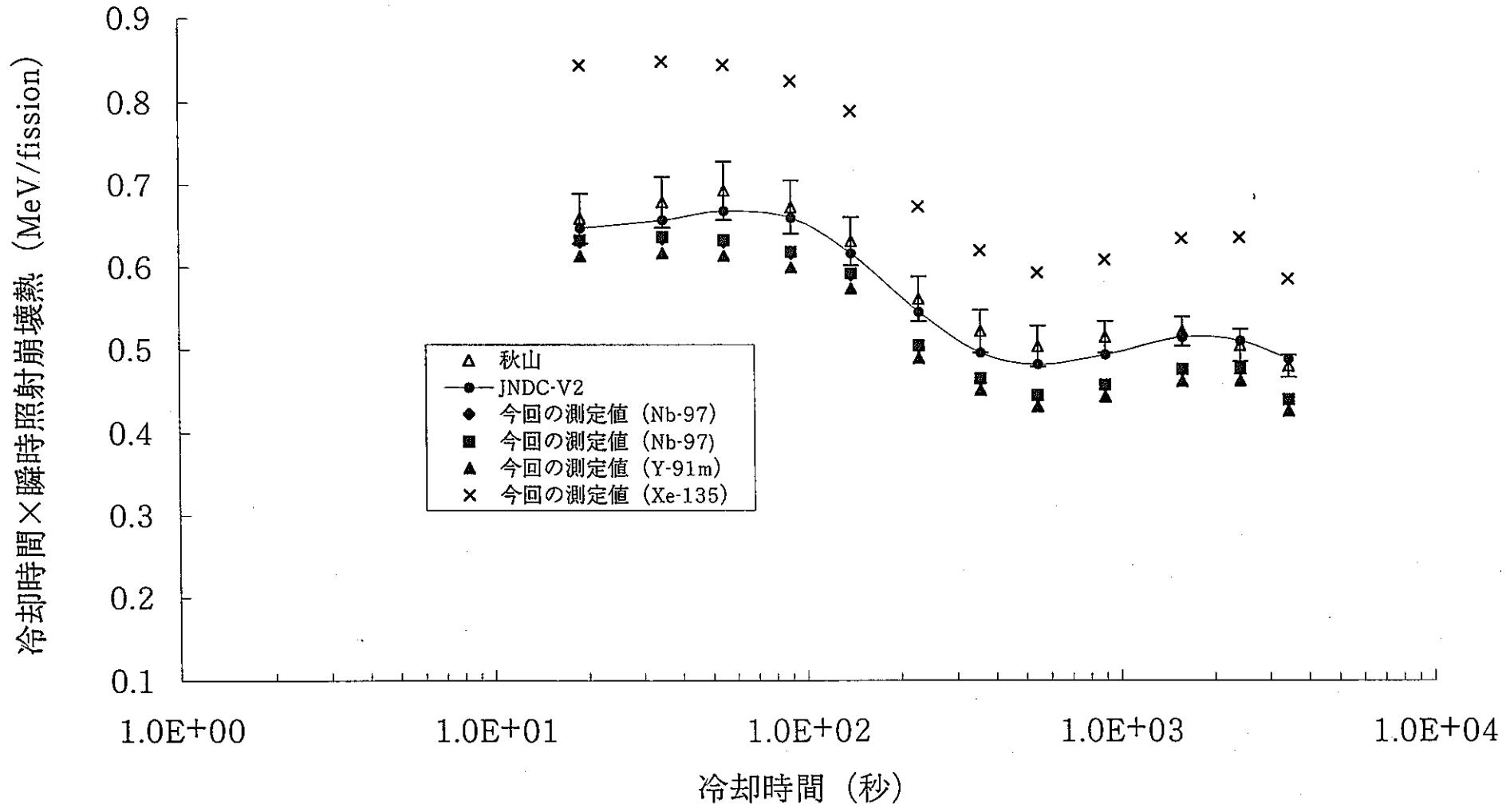


図4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(試料No.3,原子炉出力500W,照射時間10秒)

図4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(試料No12,原子炉出力500W,照射時間10秒)

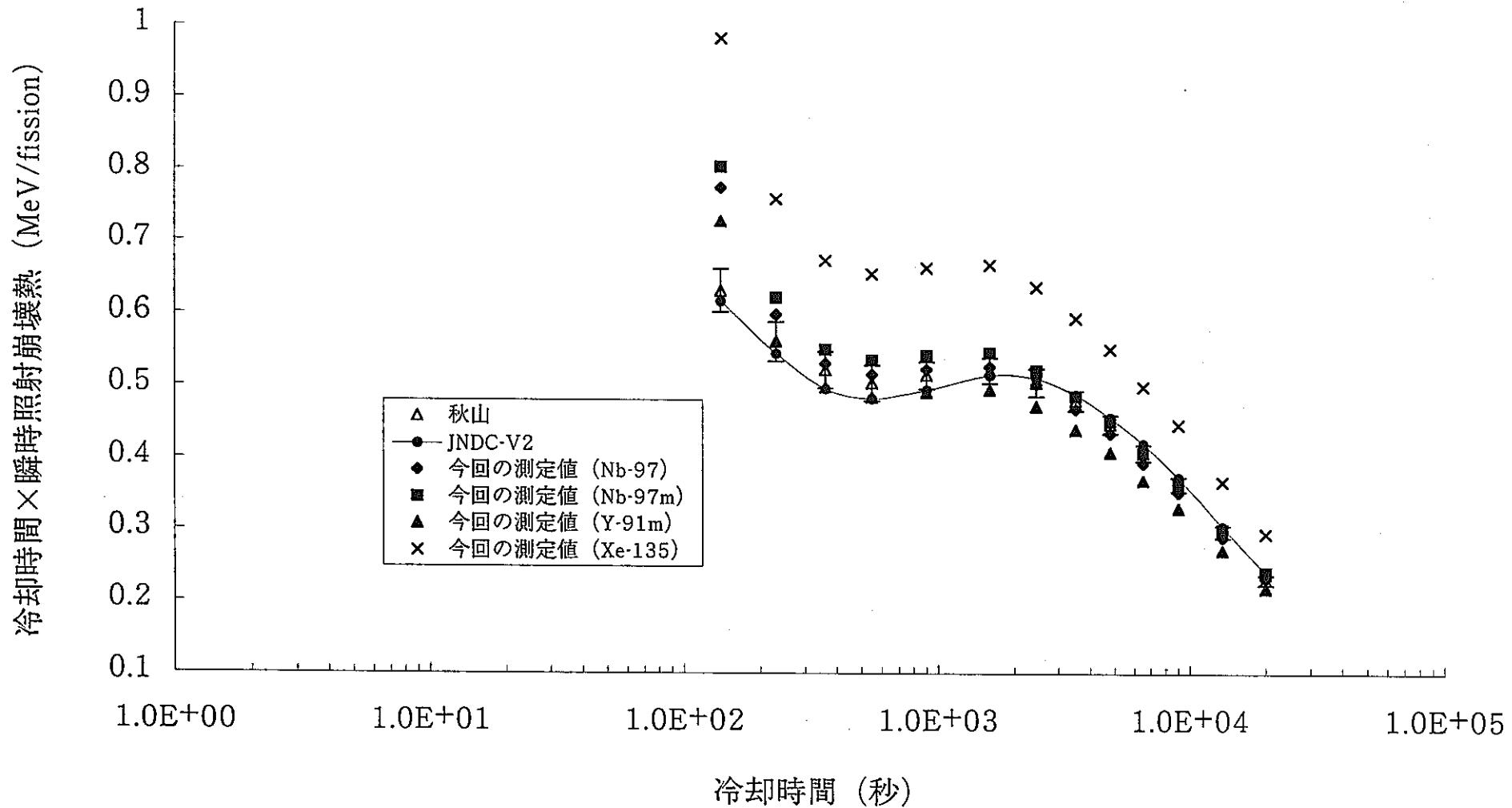
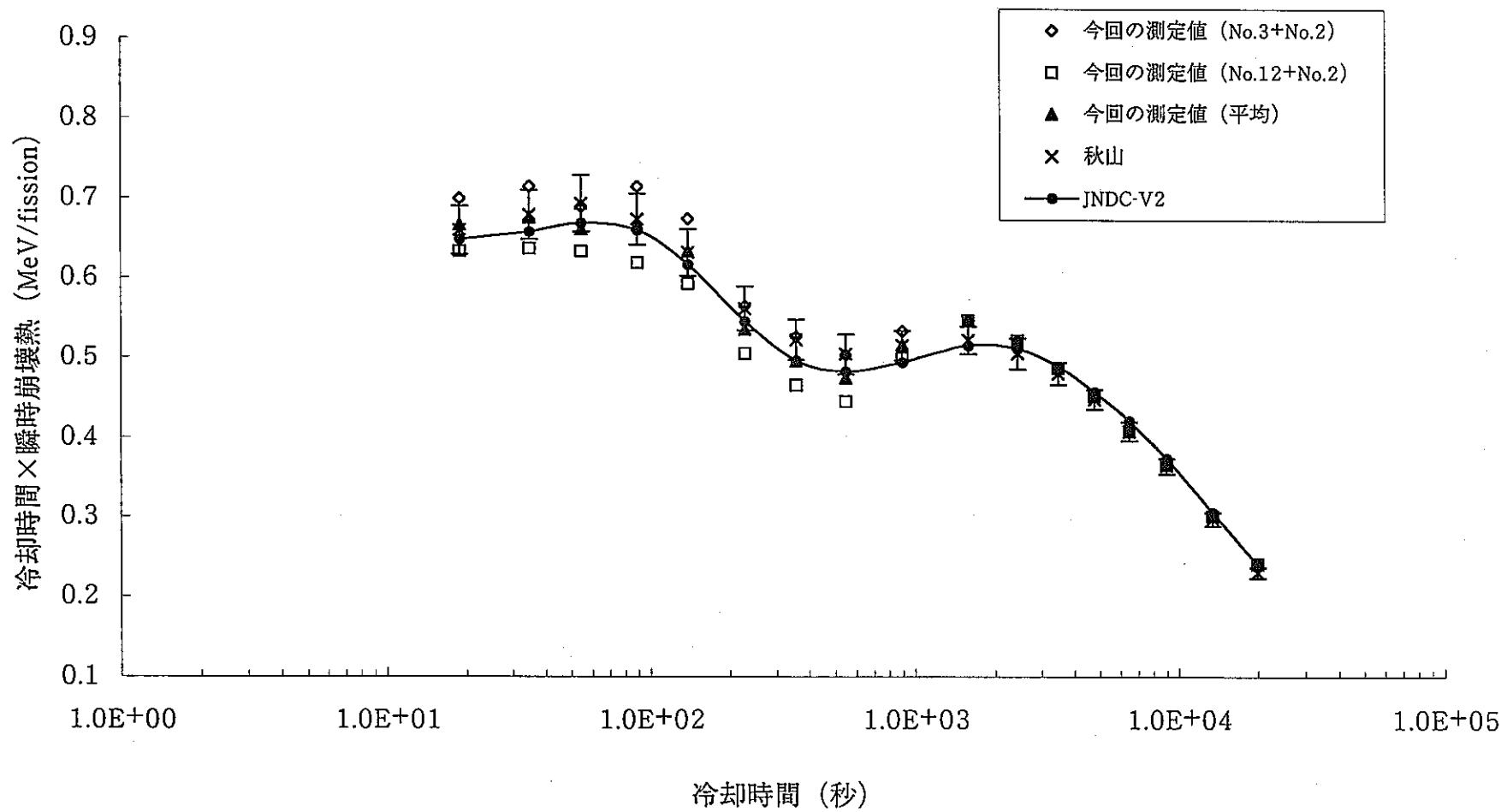


図4-6-3 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(試料No.2,原子炉出力500W,照射時間100秒)

図4-6-4 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (10秒照射結果+100秒照射結果)

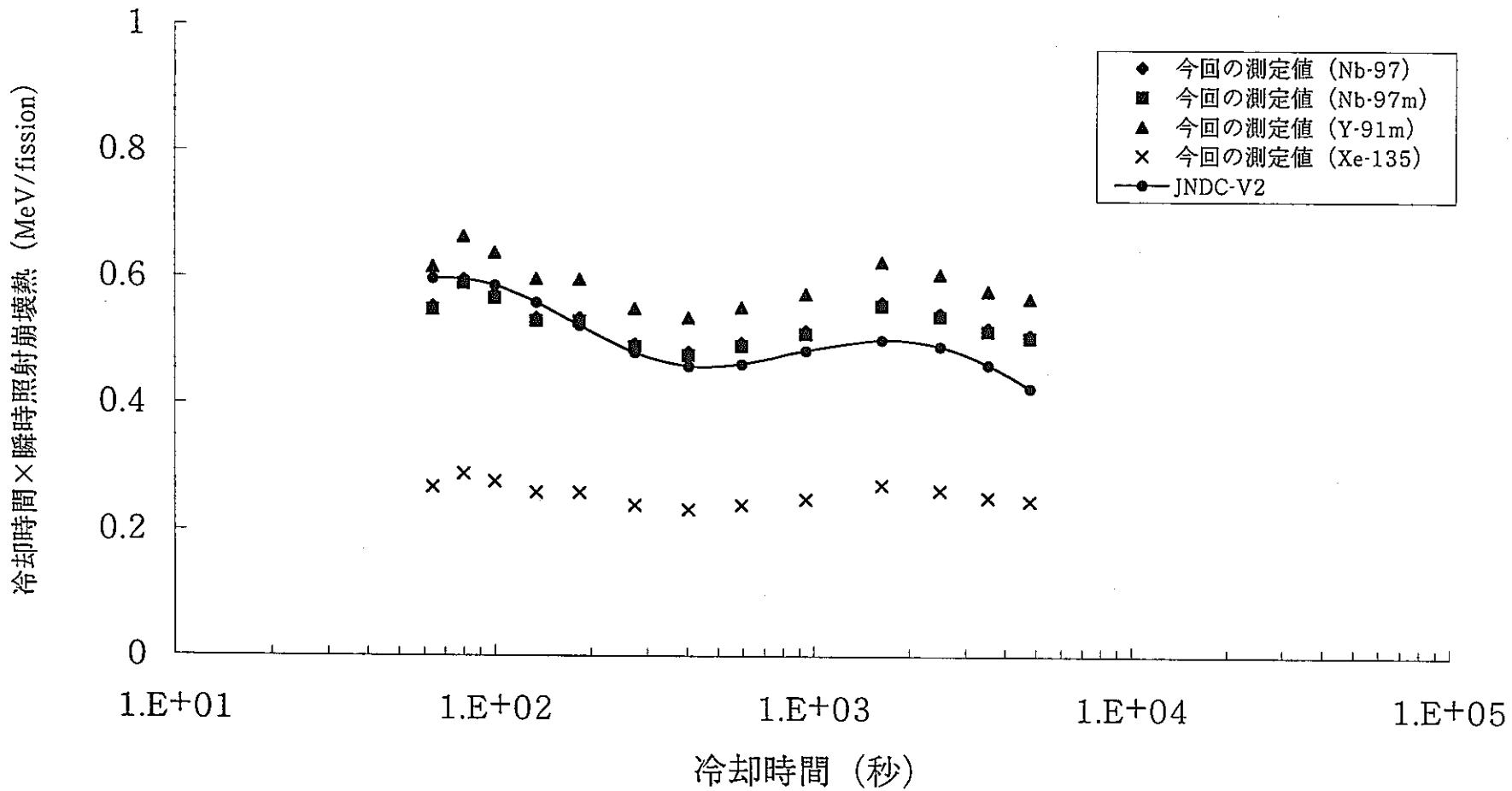


図4-7-1 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱
(試料No.672,原子炉出力1900W,照射時間100秒)

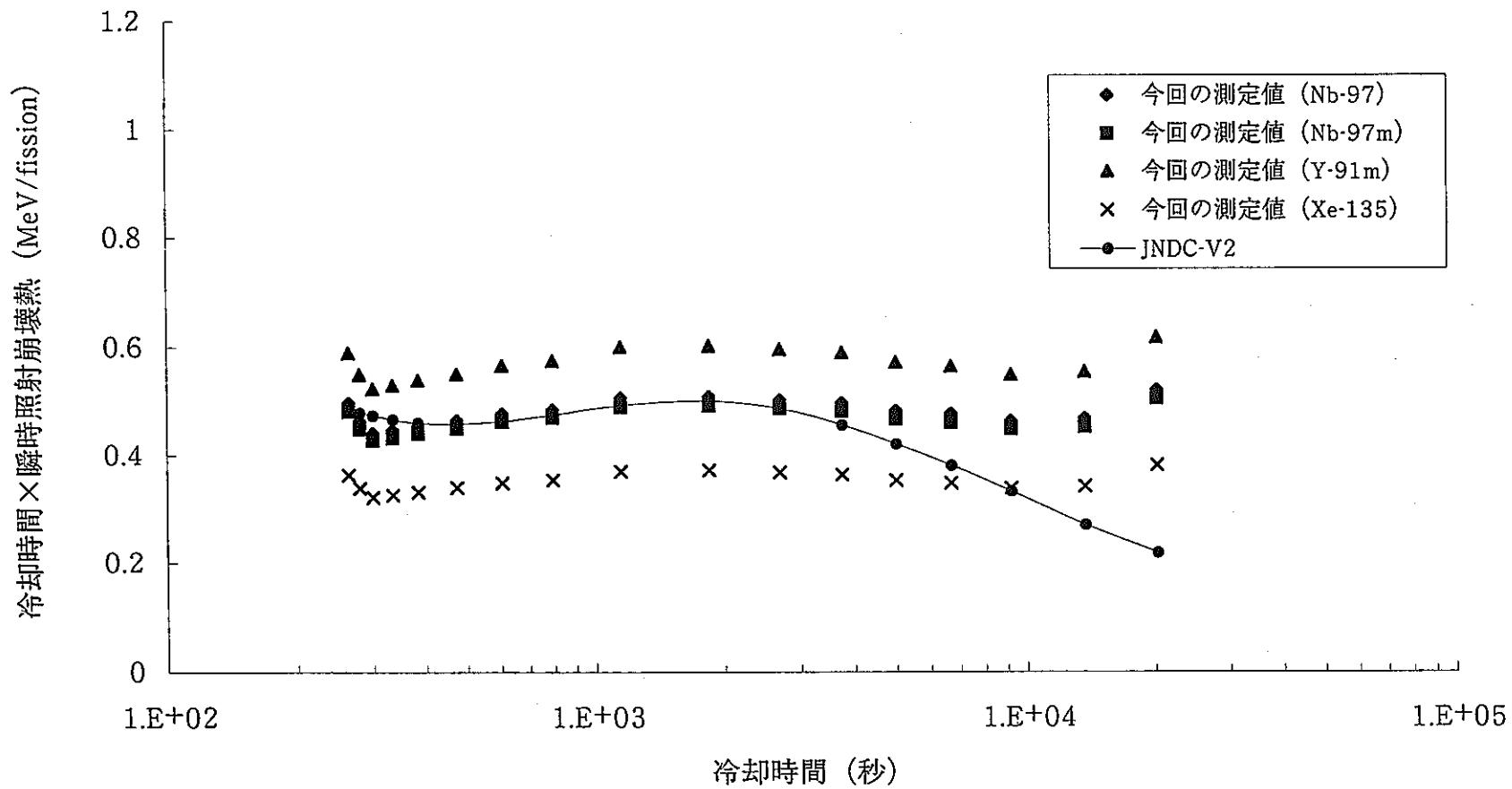
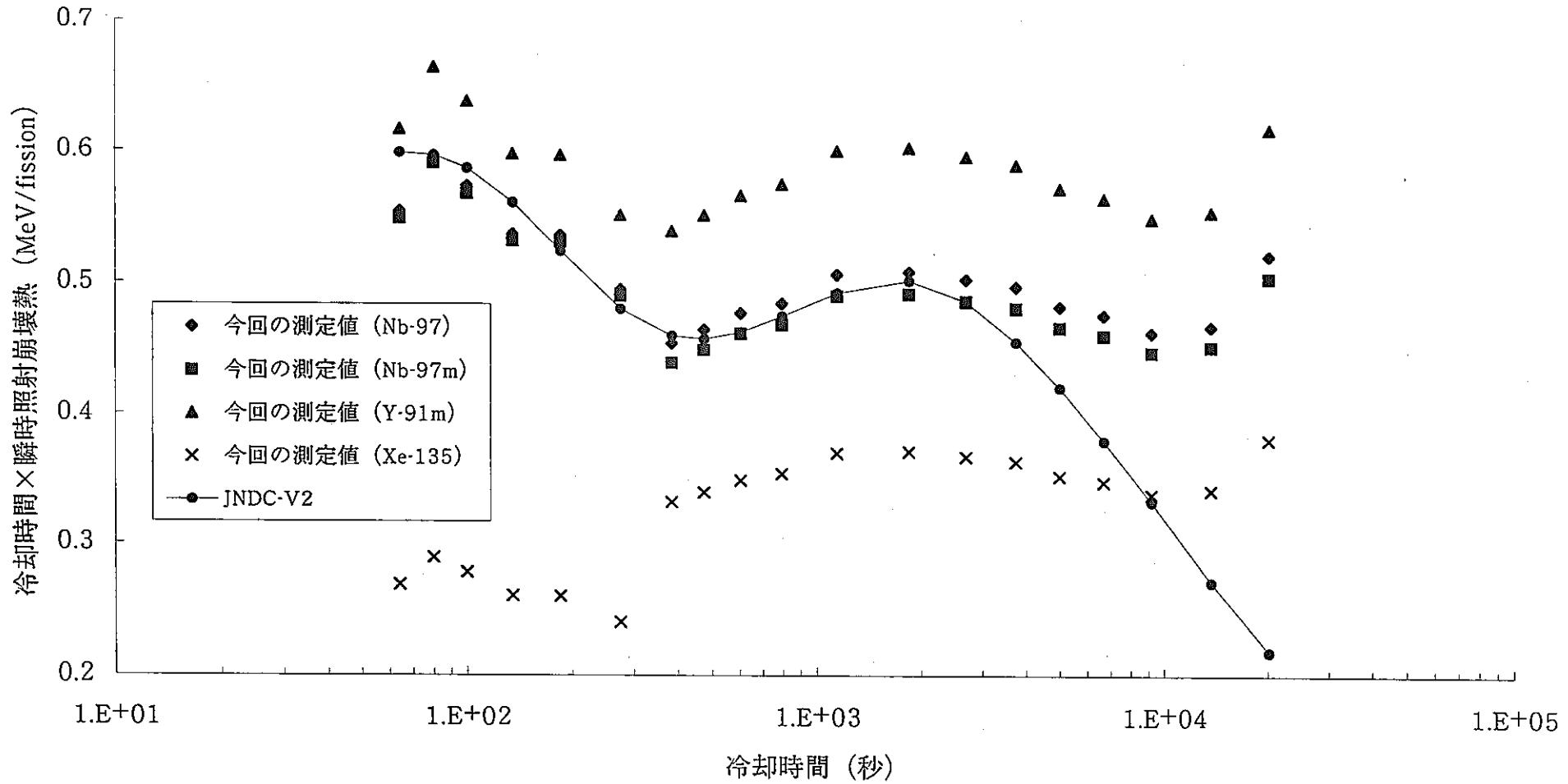


図4-7-2 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱
(試料No.672,原子炉出力1900W,照射時間500秒)

図4-7-3 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (100秒照射結果+500秒照射結果)

5章 今後の課題

本報告書は、 γ 線崩壊熱に対する最終報告書ではないので、いくつかの課題が残っている。ここでは、それら課題について整理しておく。

5.1 核分裂数評価結果について

核分裂数の評価には、Xe-135,Y-91m,Nb-97,Nb-97mの4核種から放出される γ 線のピーク面積から算出している。また、実験によって同一照射後試料を1時間×複数回連続して測定を行っているものもある。今後、4核種中どの核種から求めた値（あるいは平均）を採用するのか決定する。また、複数回連続して測定を行っているデータについては、明らかにエラーだと考えられるデータについては削除し、平均値とするのかあるいはトータルのピーク面積から求めるのかを決定する。

5.2 核分裂数評価に用いている核データの見直し

現在、U-235の核分裂数評価に用いている核データは、秋山らの実験結果と比較するために秋山らが採用した核データを使用している。そこで、最新の核データを調査し、核分裂数を再評価する。その際に、どのような核データがどれだけ核分裂数に影響を与えるか検討する。測定結果から得られる崩壊熱は、核分裂数で規格化するため核分裂数評価結果は、直接崩壊熱に影響を与える。よって、核分裂数評価に用いている核データの精度は、崩壊熱の精度に密接に関係している。

5.3 有限時間照射崩壊熱結果と瞬時照射崩壊熱結果について

実験によっては、同条件の照射を複数回測定しているデータがある。このようなデータについては、明らかにエラーだと考えられるものや実験誤差が大きいものについては削除し、最終的な実験結果を求める。また、過去に測定された秋山らの結果や総和計算値と比較し、考察を加える。

5.4 実験誤差の検討

今回示した結果は、実験誤差が含まれていない。測定誤差の要因として以下のものを検討する。

- ①パルス波高分布の統計誤差
- ②パルス波高分布をエネルギースペクトルに変換する際に生じる誤差
- ③核分裂数の誤差
- ④照射時間の誤差
- ⑤測定時間の誤差

5.5 Np-237 測定の照射時間について

Np-237試料はU-235試料と比較すると重量が約1/3程度しかなく、またNp-237の核分裂断面積（高速炉における1群断面積の値）は、U-235の値に比べ約1/6と小さ

いので、同じ照射条件での実験では照射量が足りない。よって、原子炉出力を 500W から 1900W に上げた。弥生炉の最大出力は 2000W なので、1900W は実質上の最大値と考えてよい。照射時間については、U-235 は 10 秒と 100 秒であったのに対して Np-237 は 100 秒と 500 秒に延長している。Np-237 は照射時間を短くても 100 秒としているため、冷却時間の短いデータが取れていない。秋山らは冷却時間 19 秒からデータを取っているので、同等のデータを取るためにには、100 秒よりも照射時間の短い実験を行う必要がある。また、短冷却時間データは、有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱に変換する際の補正量が大きいため精度が良くない。これを改善するためにも、照射時間の短い測定は有効である。今後、上記の制約を考慮しつつ、できるだけ幅広い冷却時間領域で精度良い測定結果を得られるよう努める。長冷却時間データについては、現時点では、バックグラウンドを完全に差し引くことができないため精度の悪い結果となっている。この点については、追加測定に關係なく検討できるので今後改善を行う。

6章 結言

東大・弥生炉を用いて U-235 と Np-237 を照射し、照射後の FP から放出される β 線及び γ 線のエネルギースペクトルを測定する方法で MA の崩壊熱を測定し、 γ 線崩壊熱の暫定値を求めた。弥生炉を用いた崩壊熱の測定は、過去に秋山らによって行われており、本実験は秋山らの手法を踏襲している。その結果、U-235 については、過去の測定値の誤差範囲内ではほぼ一致する結果が得られ、実験の再現性を確認した。Np-237 の測定結果は、冷却時間が最も短い 64 秒と冷却時間が 5,000 秒以上のデータを除くと、土 6~8% の範囲で JNDC-V2 を用いた総和計算値と一致した。冷却時間の短いデータは有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱へ変換するための補正量が大きいため精度が悪くなる可能性があるので、今後照射条件を検討することで精度を改善できる可能性がある。また冷却時間の長いデータについては、バックグラウンド等を完全に差し引くことができないので、この点についても改善の余地がある。本測定結果は今後実験誤差を評価することにより、最終的な測定結果とする。また、 β 線についても同様の手法で測定しており、今後解析・評価を実施することで γ 線と同程度の精度のデータを得る。

謝辞

本実験は、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設との共同研究で行われたもので、越塚誠一助教授をはじめ、斎藤勲助手、岡村和夫助手、助川敏夫技術官、貴家憲彦技術官、寺門勉技術官、間瀬幸雄技術官、仲川勉技術官には、気送管システムの使用、パソコンのデータ取得プログラム、放射性物質の取扱、Ge 検出器の扱いについてご指導、ご協力をいただき深く感謝致します。また、武藏工大の吉田正教授、愛知淑徳大の親松助教授には、総和計算及び総和計算ツール、核分裂数を求めるための核データ、その他実験解析結果等に対するコメント・アドバイスをいただきました。ここに深く感謝致します。

サイクル機構・大洗工学センター放射線管理課の高田千恵氏、田川博氏には、標準線源の借用及び放射線計測に関するアドバイスをいただき深く感謝致します。炉心 Gr の大木繁夫氏には、核分裂数の誤差評価手法をはじめ、その他実験解析結果について多くのコメント・アドバイスをいただきました。ここに深く感謝致します。最後に、原子力システム（株）の神智之氏には、アンフォールディングコード FERDO の処理に必要な計算作業をはじめ多くのデータ処理に関するご協力をいただきました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 秋山雅胤 ; ”高速中性子核分裂による核分裂生成物からの崩壊熱に関する研究”、東京大学博士論文 (1982.12)
- 2) 秋山雅胤,他 ; ” $^{235}\text{U},^{239}\text{Pu}$ 及び ^{233}U の高速中性子核分裂による核分裂生成物からの γ 線崩壊熱の測定”、日本原子力学会誌、Vol.24,No.9 (1982)
- 3) Masatsugu AKIYAMA, Yoshiaki OKA and Shigehiro AN. ; "Measurement of Decay Heat of Fast Neutron Fission Products". Progress in Nuclear Energy. Vol.32,No1/2,pp.53-60,1998.
- 4) 安成弘 ; ”大学における原子力施設共同利用の現状, (III) 東京大学原子力工学研究施設”、日本原子力学会誌、Vol.14,No.12 (1972)
- 5) Shigehiro AN, et al. ; "Physics Experiments with YAYOI". Proceedings of the International Symposium on Physics of Fast Reactors, Tokyo,1973.
- 6) Shigehiro An, Yoshiaki OKA, Isao SAITO. ; "Present Status and Future Program of YAYOI as a Fast Pulse Reactor". UTNL-R-0061 (1978).
- 7) 中沢正治、関口晃 ; ”「弥生」線量測定データ集 (I) ”、UTNL-R-0061 (1976).
- 8) Bert W. Rust, Daniel T. Ingersoll and Walter R. Burrus. ; "A User's Manual for The FERDO and FERD Unfolding Codes". ORNL/TM-8720,1983.
- 9) Rider B.F, Meek M.E. ; "Compilation of Fission Product Yields". NEDO-12154-2(D), 1977.
- 10) Lederer C.M, et al. ; "Table of Isotopes (7th Edition)". 1978.
- 11) Kenji TASAKA, et al. ; "JNDC Nuclear Data Library of Fission Products -Second Version-". JAERI 1320,1990.
- 12) P. Rose and C. Dunford. ; "Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6". ENDF-102,1991.
- 13) Stephen Wolfram. ; "The Mathematica Book, 4th ed". Wolfram Media/Cambridge University Press,1999.
- 14) K.Oyamatsu. ; "Easy-to-use Application Programs to Calculate Aggregate Fission-Product Properties on Personal Computers". JAERI-Conf 99-002,1999.

付録 A

FERDO コード入力データ作成ツール

FERDO コード入力データ作成ツールは、測定データより真のパルス波高分布とその誤差を求め FERDO コードのインプットデータを作成するものである。

まず測定データを入力データとして与え、測定時間、エネルギー校正データ、チャンネル、パルス波高（カウント数）を読み取る。このときの入力データは、①照射後試料データ、②Ti 板照射データ、③照射前試料データ、④環境バックグラウンドの 4 つの測定データである。次に各測定データに対し以下の処理を行う。

1. チャンネルデータからエネルギーデータへの変換

測定データはチャンネル対パルス波高で得られるので、次式を用いてエネルギー対パルス波高に変換する。

$$\text{エネルギー} = A \times \text{チャンネル}^2 + B \times \text{チャンネル} + C \dots \quad (1)$$

ここで A、B、C は、標準線源を用いて測定されたピーク ch とエネルギー値をもとに最小二乗法でフィッティングしたときの二次近似式の係数である。これらの値は、標準線源を用いた測定データをもとに各測定結果をエネルギー校正することで求められる。各測定データの出力ファイル（FERDO コード入力データ作成ツールの入力ファイル）では下記に示す通り A、B、C の値が示される。本ツールでは A、B、C の値とチャンネル値を読み取り (1) 式を用いてエネルギー変換する。

○入力データ

```
[MEASURE]
FILE=c:\treasu~1\代\鞠済 dhdata\981113\decay001.dat
DATE=98/11/13
TIME=10:32:44
MODE=1
STOP_MODE=0
FULL_CH=1024
ENG_UNIT=
PTIME=6
PCOUNT=0
LTIME=6
RTIME=7
TUNIT=6
DOWEL=0
COMMENT=PC98BX MCA started at 1998-11-13 10:32:44
```

```
[ENG_CALIB]
A=-3.424492E-04 ← A:A(I)
B=5.370290E+00 ← B:B(I)
```

C=-8.703474E+01 ← C:C(I)

[ROIINO, ROISTART, ROIEND]

[DATA]

<u>0000</u>	6	← チャンネル:CHAN(I,J)、パルス波高
0001	7	
0002	9	
0003	10	
↓		
1021	0	
1022	0	
1023	0	

○プログラム

```

DO 20 I=1,4
    DO 10 J=1,1024
        ENGY(I,J)=A(I)*CHAN(I,J)**2.0+B(I)*CHAN(I,J)+C(I) . . .
10    CONTINUE
20    CONTINUE

```

2. バンチング

測定データのパルス波高分布は 1024ch であるのに対し、検出器の応答関数はエネルギー 105 群 (γ 線) あるいは 100 群 (β 線)、パルス波高 340 群なので、測定データのパルス波高分布は応答関数にあわせるため、バンチングする必要がある。1024ch のデータを 340ch にバンチングするには、およそ 3ch ずつ加えればよいことになるが、単純に端から足しあわせるわけにはいかない。つまり、「1. チャンネルデータからエネルギーデータへの変換」を行った際に用いたエネルギー校正データ A、B、C は、各測定毎に異なるからである。よって、1 群当たりのエネルギー幅を求め、各パルス波高に対するエネルギーがどの群に対応するか判定することでバンチングを行った。

例えば γ 線測定の場合、検出器の利得は 1 チャンネル当たり 5keV で約 5MeV までの γ 線を測定できるように調整したので 1 群当たり 15keV ということになる。そこで各パルス波高に対するエネルギーをプログラムの（下線部）のように $0 \leq \text{ENGY}(I,J) < 15, 15 \sim 30, \dots, 325 \sim 340$ と判定し、判定条件を満たしたエネルギー（群）に分類した。分類後、各群毎にパルス波高を足しあわせた。

○プログラム

```

DO 30 I=1,4
  DO 20 J=1,340
    UP(J)=J*15.0
    LOW(J)=J*15.0-15.0
    BCPS(I,J)=0.0
    DO 10 K=1,1024
      IF( ENGY(I,K) .LE. LOW(J) ) GO TO 10
      IF( ENGY(I,K) .GT. UP(J) ) GO TO 10
      BCPS(I,J)=BCPS(I,J)+CPS(I,K)
    10      CONTINUE
  20      CONTINUE
  30      CONTINUE
}
} 各群への分類
      .. 群毎にパルス波高を足しあわせる

```

3. 真のパルス波高分布とその測定誤差

340群にバンチングした各測定データは、(2)式より真のパルス波高分布を求める。また、(3)式よりその測定誤差を求める。

$$C_{T_R, T_W, T_C}(I) = \left(\frac{Y_{T_R, T_W, T_C}(I)}{T_{SC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) - \left(\frac{D_{T_R, T_W, T_C}(I)}{T_{DC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) - \left(\frac{P(I)}{T_{PC}} - \frac{B(I)}{T_{BC}} \right) \quad \dots \quad (2)$$

$$\Delta C_{T_R, T_W, T_C}(I) = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{Y_{T_R, T_W, T_C}(I)}}{T_{SC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{D_{T_R, T_W, T_C}(I)}}{T_{DC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{P(I)}}{T_{PC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2} \quad \dots \quad (3)$$

T_R : 照射時間

T_W : 測定待ち時間

T_C : 測定時間

T_{SC} : 照射後試料の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{DC} : 照射後 Ti 板の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{PC} : 照射前試料の真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

T_{BC} : 環境バックグラウンドの真の測定時間（測定系の不感時間を差し引いたもの）

$C_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 真のパルス波高分布

$Y_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 照射後試料からの γ 線に対するパルス波高分布

$D_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 照射後 Ti 板からの γ 線に対するパルス波高分布

$P(I)$: 照射前の試料自身からの γ 線に対するパルス波高分布

$B(I)$: 環境バックグラウンド γ 線に対するパルス波高分布

$\sqrt{\left(\frac{\sqrt{Y_{T_R, T_W, T_C}(I)}}{T_{SC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2}$: 照射後試料から環境バックグラウンドを差し引いた計数率誤差

$\sqrt{\left(\frac{\sqrt{D_{T_R, T_W, T_C}(I)}}{T_{DC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2}$: Ti 板照射から環境バックグラウンドを差し引いた計数率誤差

$\sqrt{\left(\frac{\sqrt{P(I)}}{T_{PC}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{B(I)}}{T_{BC}} \right)^2}$: 照射前試料から環境バックグラウンドを差し引いた計数率誤差

$\Delta C_{T_R, T_W, T_C}(I)$: 真のパルス波高分布の統計誤差

○プログラム

※ 真のパルス波高分布

```

DO 20 I=1,4
  DO 10 J=1,340
    CPS(I,J)=COUNT(I,J)/COUNT(I,1)
 10      CONTINUE
 20 CONTINUE

DO 10 I=1,340
  TCNT(I)=(BCPS(1,I)-BCPS(4,I))-(BCPS(2,I)-BCPS(4,I)) . . . (2) 式
  >      -(BCPS(3,I)-BCPS(4,I))
 10 CONTINUE

```

※ 真のパルス波高分布の統計誤差

```

DO 20 I=1,4
  DO 10 J=1,340
    ERRO(I,J)=SQRT(BCNT(I,J))/COUNT(I,1)
 10      CONTINUE
 20 CONTINUE

DO 10 I=1,340
  TERRO(I)=SORT(ERRO(1,I)**2.0+ERRO(4,I)**2.0+ERRO(2,I)**2.0 . . . (3) 式
  >      +ERRO(3,I)**2.0+ERRO(4,I)**2.0+ERRO(4,I)**2.0)
    IF( TERRO(I) .EQ. 0 ) TERRO(I)=1.0E-20
 10 CONTINUE

```

添付 1. 本ツールの入力（測定データ）

```
[MEASURE]
FILE=c:\treasu~1\代\鞠済 dhdata\981113\decay001.dat
DATE=98/11/13
TIME=10:32:44
MODE=1
STOP_MODE=0
FULL_CH=1024
ENG_UNIT=
PTIME=6
PCOUNT=0
LTIME=6 ← 測定時間
RTIME=7
TUNIT=6
DOWEL=0
COMMENT=PC98BX MCA started at 1998-11-13 10:32:44
```

[ENG_CALIB]

```
A=-3.424492E-04 ← A
B=5.370290E+00 ← B
C=-8.703474E+01 ← C
```

[ROI0, ROISTART, ROIEND]

[DATA]

<u>0000</u>	6	← チャンネル、パルス波高
0001	7	
0002	9	
0003	10	
}		
1021	0	
1022	0	
1023	0	

添付 2. 本ツールの出力（FERDO インプットデータ）

```
FERDO-INPUT TITLE
FORMAT ROW 03 (6X,I4,I2,3E10.3)
      1 1.000E+00 6.182E+01 1.274E+00 ← 群数、パルス波高、誤差
      2 2.000E+00 2.088E+02 2.300E+00
      3 3.000E+00 2.491E+02 2.510E+00
      }
      338 3.380E+02 0.000E+00 1.000E-20
      339 3.390E+02 0.000E+00 1.000E-20
      340 3.400E+02 0.000E+00 1.000E-20
```