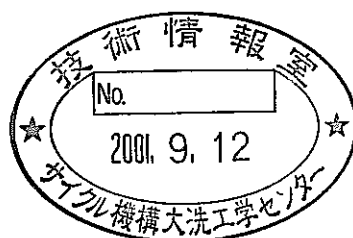


弥生炉を用いた TRU 核種の崩壊熱の測定・評価

(研究報告)



2001年5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)
2001

弥生炉を用いた TRU 核種の崩壊熱の測定・評価

(研究報告)

大川内 靖¹⁾

庄野 彰²⁾

越塚 誠一³⁾

要旨

崩壊熱は、原子炉除熱系の設計や使用済燃料の取扱において重要である。本研究は、マイナーアクチニドの崩壊熱を高速中性子源「弥生」を用いて測定したものである。U-235 は冷却時間 19 秒～20,000 秒、Np-237 は冷却時間 64 秒～20,200 秒の範囲で測定を行った。

弥生炉のグレージングホール中心で、U-235 は 10 秒及び 100 秒、Np-237 は 100 秒及び 500 秒照射した。 γ 線エネルギースペクトルは、NaI (Tl) シンチレーション検出器を用いて測定した。 β 線エネルギースペクトルは、プラスチックシンチレーション検出器と β - γ 弁別用比例計数管を組み合わせ、同時計数を取ることで測定した。規格化に用いる核分裂数は、Ge 検出器で測定した γ 線エネルギースペクトルから評価した。

測定したパルス波高分布はバックグラウンドを除去した後に、検出器の応答関数を用いて、FERDO コードによりアンフォールディング処理を行った。アンフォールディングされたエネルギースペクトルは、単位時間当たりの核分裂数で規格化した。そして、規格化されたエネルギースペクトルから、有限時間照射崩壊熱を求めた。有限時間照射崩壊熱は、照射条件の異なる実験値や各種計算値と比較ができないので、瞬時照射崩壊熱に変換した。

U-235 と Np-237 に対する β 線崩壊熱結果を JNDC-V2 を用いた総和計算値と比較した。U-235 の測定結果は、冷却時間が 150 秒～250 秒の範囲で比較的良好一致した。Np-237 の測定結果は、冷却時間が 250 秒～350 秒の範囲で比較的良好一致した。

U-235 と Np-237 に対する γ 線崩壊熱結果を JNDC-V2 を用いた総和計算値と比較した。U-235 の測定結果は、測定した全ての冷却時間領域において良好一致した。Np-237 の測定結果は、冷却時間が 200 秒～2,500 秒の範囲で良好一致した。冷却時間が 2,500 秒～20,000 秒の範囲では、Np-237 の中性子捕獲反応によって生成する Np-238 からの γ 線が影響することがわかった。

-
- 1) 大洗工学センター 実験炉部 技術課
 - 2) 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学 Gr
 - 3) 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

Decay Heat Measurement of Minor Actinides at YAYOI

Yasushi OHKAWACHI¹⁾ Akira SHONO²⁾
Seiichi KOSHIZUKA³⁾

Abstract

The decay heat is important in designing the heat removal system of nuclear reactors and spent fuel handling systems. In this study, minor actinide decay heat was measured using the fast neutron source reactor "YAYOI". The decay heat of U-235 was measured for cooling times between 19 and 20,000 seconds, and Np-237 was measured for cooling times between 64 and 20,200 seconds.

The samples were irradiated at the center of the grazing hole at YAYOI for time periods of 10 and 100 seconds for U-235, 100 and 500 seconds for Np-237. Gamma-ray energy spectra were measured using a NaI(Tl) scintillation detector. Beta-ray energy spectra were measured using a plastic scintillation detector combined with a proportional counter to eliminate gamma-ray effects. The number of fission for normalization was evaluated from measured gamma spectra by Ge detector.

Measured pulse height data were corrected for background data, and unfolded using the FERDO code with the use of the response function of the detector. Each unfolded spectrum was divided by the number of fission per second to obtain the normalized spectra. And, the finite irradiation decay heat data were obtained from the normalized spectra. The finite irradiation decay heat can not be compared with experimental results and calculation results obtained under different irradiation conditions. So, the finite irradiation decay heat were converted to the fission burst decay heat.

The present results on beta-ray decay heat for U-235 and Np-237 are compared with the summation calculations results using JNDC-V2. The present results on U-235 agree with the summation calculations results using JNDC-V2 between 150 to 250 seconds. The present results on Np-237 agree with the summation calculations results using JNDC-V2 between 250 to 350 seconds.

The present results on gamma-ray decay heat for U-235 and Np-237 are compared with the summation calculations results using JNDC-V2. The present results on U-235 agreed with the summation calculations results using JNDC-V2. The present results on Np-237 agree with the summation calculations results using JNDC-V2 between 200 to 2,500 seconds. The accuracy of the present results between 2,500 to 20,000 seconds is bad. The reason is gamma-rays released from Np-238, that were generated by neutron capture reaction of Np-237.

1) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC, JNC

2) Reactor Physics Engineering Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

3) University of Tokyo, Nuclear engineering research Laboratory

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	2
2.3 β 線検出器	4
2.4 γ 線検出器	4
2.5 照射時間と測定時間	4
2.6 核分裂数の測定方法	5
第3章 β 線及び γ 線エネルギースペクトルの導出	20
3.1 FERDO コード	20
3.2 応答関数	21
3.3 FERDO コード入力データ作成	22
第4章 測定結果とデータ解析	32
4.1 核分裂数評価結果	32
4.2 β 線有限時間照射崩壊熱	35
4.3 γ 線有限時間照射崩壊熱	37
4.4 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	38
4.5 β 線瞬時照射崩壊熱	40
4.6 γ 線瞬時照射崩壊熱	41
第5章 考察	84
5.1 β 線崩壊熱に関する考察	84
5.2 Np-237 γ 線崩壊熱のアクチニド崩壊熱寄与の検討	85
5.2.1 各測定データの確認	85
5.2.2 1MeV ピークとその他のピークの減衰比較	85
5.2.3 1MeV ピークの原因検討	85
第6章 結言	106
謝辞	107
参考文献	108

表リスト

表 2-5-1	U-235 の測定開始時間と測定時間	7
表 2-5-2	Np-237 の測定開始時間と測定時間	8
表 3-2-1	β 線スペクトロメータの応答関数エネルギー群構造	24
表 3-2-2	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	25
表 4-1-1	ピーク面積出力リスト例	42
表 4-1-2	核分裂数評価に用いた核データとその誤差	43
表 4-1-3	γ 線標準線源測定データと光電ピーク効率	44
表 4-1-4	U-235 核分裂数評価結果 (10 秒照射, 原子炉出力 500W)	45
表 4-1-5	U-235 核分裂数評価結果 (100 秒照射, 原子炉出力 500W)	46
表 4-1-6	Np-237 核分裂数評価結果 (100 秒照射, 原子炉出力 1900W)	47
表 4-1-7	Np-237 核分裂数評価結果 (500 秒照射, 原子炉出力 1900W)	48
表 4-2-1	U-235 β 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	49
表 4-2-2	U-235 β 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	50
表 4-2-3	Np-237 β 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	51
表 4-2-4	Np-237 β 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	52
表 4-3-1	U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	53
表 4-3-2	U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	54
表 4-3-3	Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	55
表 4-3-4	Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	56
表 4-4-1	U-235, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 10 秒)	57
表 4-4-2	U-235, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 100 秒)	58
表 4-4-3	Np-237, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 100 秒)	59
表 4-4-4	Np-237, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 500 秒)	60
表 4-4-5	U-235, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 10 秒)	61
表 4-4-6	U-235, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 100 秒)	62
表 4-4-7	Np-237, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 100 秒)	63
表 4-4-8	Np-237, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間 500 秒)	64
表 4-5-1	U-235 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	65
表 4-5-2	U-235 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	66
表 4-5-3	Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	67
表 4-5-4	Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	68
表 4-6-1	U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	69
表 4-6-2	U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	70
表 4-6-3	Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	71
表 4-6-4	Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	72

表 5-1-1 エネルギー範囲による β 線崩壊熱寄与割合 88

図リスト

図 2-1-1	Np-237 試料の形状	9
図 2-1-2	照射用カプセル全体図	10
図 2-1-3	照射用カプセル部品図	11
図 2-2-1	気送管システム全体の概要図	12
図 2-2-2	崩壊熱測定装置の概要	13
図 2-2-3	気送管システムの全体詳細図	14
図 2-2-4	鉛遮蔽箱の全体図	15
図 2-2-5	カプセル通過検出部	16
図 2-2-6	照射管部組立図	17
図 2-3-1	β 線スペクトロメータのブロック・ダイヤグラム	18
図 2-4-1	γ 線検出器のブロック・ダイヤグラム	19
図 3-2-1	β 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)	26
図 3-2-2	β 線応答関数 (論文掲載図)	26
図 3-2-3	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)	27
図 3-2-4	γ 線応答関数 (論文掲載図)	27
図 3-2-5	β 線エネルギースペクトルの実験値と計算値の比較	28
図 3-2-6	β 線エネルギースペクトルの実験値と計算値の比較 (論文掲載図)	28
図 3-2-7	FERDO 入力 (Co-60 測定値)	29
図 3-2-8	FERDO 出力結果 (Co-60)	29
図 3-2-9	FERDO 入力 (Cs-137 測定値)	30
図 3-2-10	FERDO 出力結果 (Cs-137)	30
図 3-2-11	FERDO 入力 (Na-22 測定値)	31
図 3-2-12	FERDO 出力結果 (Na-22)	31
図 4-1-1	光電ピーク効率曲線	73
図 4-5-1	U-235 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	74
図 4-5-2	U-235 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	75
図 4-5-3	Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	76
図 4-5-4	Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	77
図 4-6-1	U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 10 秒)	78
図 4-6-2	U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 500W, 照射時間 100 秒)	79
図 4-6-3	U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱 (10 秒照射結果+100 秒照射結果)	80
図 4-6-4	Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 100 秒)	81
図 4-6-5	Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力 1900W, 照射時間 500 秒)	82
図 4-6-6	Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱 (100 秒照射結果+500 秒照射結果)	83

図 5-1-1	U-235 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 140 秒)	89
図 5-1-2	U-235 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 1600 秒)	90
図 5-1-3	U-235 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 20000 秒)	91
図 5-1-4	Np-237 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 264 秒)	92
図 5-1-5	Np-237 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 1845 秒)	93
図 5-1-6	Np-237 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間 20200 秒)	94
図 5-2-1	照射 14950 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 16700 秒)	95
図 5-2-2	照射 9950 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 11200 秒)	96
図 5-2-3	照射 6950 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 7700 秒)	97
図 5-2-4	照射 5150 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 5800 秒)	98
図 5-2-5	照射 3795 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 4322.5 秒)	99
図 5-2-6	照射 2695 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 3195 秒)	100
図 5-2-7	照射 1795 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 2245 秒)	101
図 5-2-8	照射 995 秒後の γ 線測定データ (冷却時間 1445 秒)	102
図 5-2-9	880keV 付近のピークと 1MeV 付近のピークの減衰比較	103
図 5-2-10	照射後 Np-237 の Ge 検出器測定結果 (照射後約 26,000 秒)	104
図 5-2-11	照射後 Np-237 の Ge 検出器測定結果 (照射後約 56,000 秒)	105

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。

高速度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、ある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。

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、過去3年間の先行基礎工学研究の成果を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 β 線及び 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度中性子源「弥生」のグレーディングホール^{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内に設置された β 線スペクトルメータあるいは NaI (Tl) シンチレーション検出器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、遮蔽箱内に設置した β 線スペクトロメータあるいは NaI (Tl) シンチレーション検出器による測定が終了後、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 均一に電着してあり、電着面上には厚さ $10 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ 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、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 β 線あるいは γ 線の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ディ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てい

たカプセルの輸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ディ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 上に窓があげてある。窓には、厚さ 5mm \times ϕ 17.8mm の耐放射線用の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カ所設置してある。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 0.6kg/cm²G で実施した。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 β 線検出器

β 線エネルギースペクトルの測定は、 β - γ 弁別用透過型比例計数管とプラスチックシンチレーション検出器とから構成される β 線スペクトロメータを用いて測定された。

プラスチックシンチレーション検出器は、直径50.8mm、長さ50mmの円柱で、片面中心に入口径16mm、底面径30mmで深さ20mmの井戸を持った形状をしている。井戸の反対面には光電子増倍管(EMI-9813KB)が取り付けられている。光電子増倍管の接着面を除く全面には光反射膜としてVHエナメル白色塗料が0.1mm厚で塗布されている。シンチレータ前面は直径15mmの入射孔をもつPbで内装されたAl製遮蔽、側面はPb製遮蔽で覆われている。

β - γ 弁別用透過型比例計数管は、一辺が150mmの正方形で厚さが20mmの箱型で両面の中心に直径60mmの透過窓をもつ形状をしている。この箱は2mm圧のAl製で、透過窓には金蒸着が施されたポリパラキシレンの薄膜(厚さ約1.5g/m²)が張られている。陽極線は0.05mmφのタングステン線で、平行等間隔に5本張られている。この比例計数管はPRガス(Ar90%+CH₄10%)を用いたガスフロー型で、50keV以上の β 線を計測でき、100keV以上の γ 線に対する感度は無視できるほど小さい特性をもっている。

プラスチックシンチレーション検出器は、過去に秋山らが実際に使用していたものである。 β - γ 弁別用透過型比例計数管は、秋山らが使用していたものが残っていなかったため、残されていた図面をもとに忠実に再現した。

β - γ 弁別用透過型比例計数管をプラスチックシンチレーション検出器の前面に中心を合わせて密着させて使用する。シンチレーション検出器と反対側の透過窓には、直径15mmの入射孔を持つ厚さ9mmの鉛で内張されたアルミニウム製コリメータが取り付けられている。照射された試料はコリメータ前面から3mmの位置に止まるように試料受けが設定されている。両検出器の同時計数を取ることで、 γ 線の効果を除外して β 線のみエネルギースペクトルが測定できる。図2-3-1に β 線スペクトロメータのブロック・ダイヤグラムを示す。

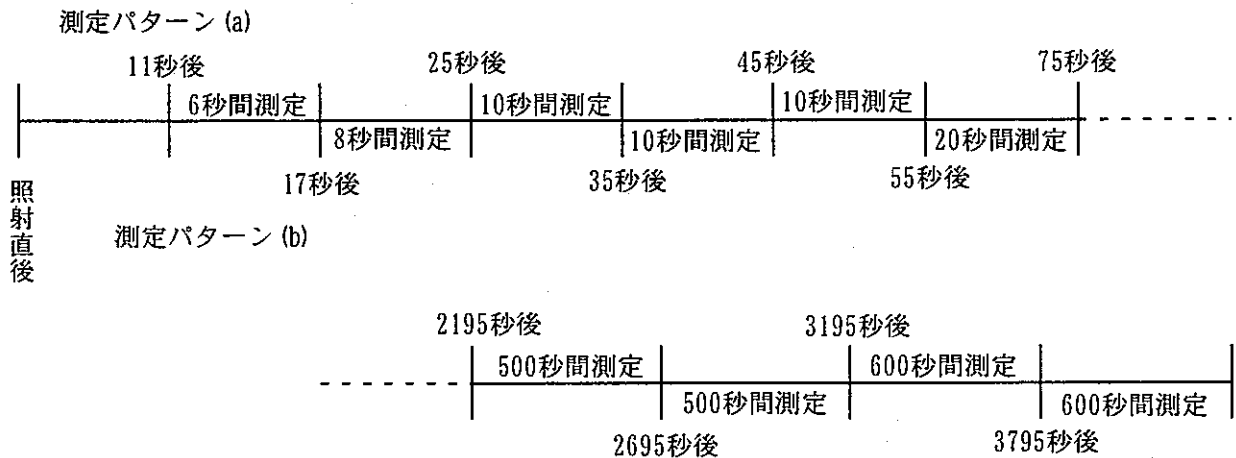
2.4 γ 線検出器

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2-4-1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、アンプで増幅して波形処理された後、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あたりおよそ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。

2.5 照射時間と測定時間

表2-5-1にU-235の測定開始時間と測定時間を、表2-5-2にNp-237の測定開始時間と測定時間を示す。

測定パターンは、常に2組で1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秒+6秒+8秒=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る。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。



原子炉出力は、U-235 の場合 500W、Np-237 の場合 1900W である。原子炉出力が異なる理由は、U-235 の核分裂断面積（高速炉における1群断面積の値）が 1.942 (b) であるのに対して、Np-237 の核分裂断面積は 0.328 (b) と約 1/6 程度しかないこと、さらに U-235 試料の重量は約 1.6mg あるのに対して、Np-237 試料の重量は約 0.5mg と約 1/3 程度しかないことから、U-235 と同条件では十分な照射が出来ないためである。そこで、原子炉出力と照射時間を大きくすることで、Np-237 に対して U-235 と同程度の照射が出来るようにした。Np-237 は U-235 に対して、核分裂断面積が約 1/6 で試料の重量が約 1/3 なので、 $1/6 \times 1/3 = 1/18$ ということになる。そこで例えば、U-235 の場合、原子炉出力 500W、照射時間 100 秒という照射条件に対して、Np-237 の場合、原子炉出力 1900W、照射時間 500 秒とした。ちなみに弥生炉の最大出力は 2000W なので、1900W という出力は事実上最大値と考えてよい。

2.6 核分裂数の測定方法

照射中に発生した核分裂数は、鉛遮蔽箱内でのβ線あるいはγ線エネルギースペクトル測定が終了した後、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線の強度を測定することで求めた。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、親核が発生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-135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2-5-1 U-235の測定開始時間と測定時間

(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

(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

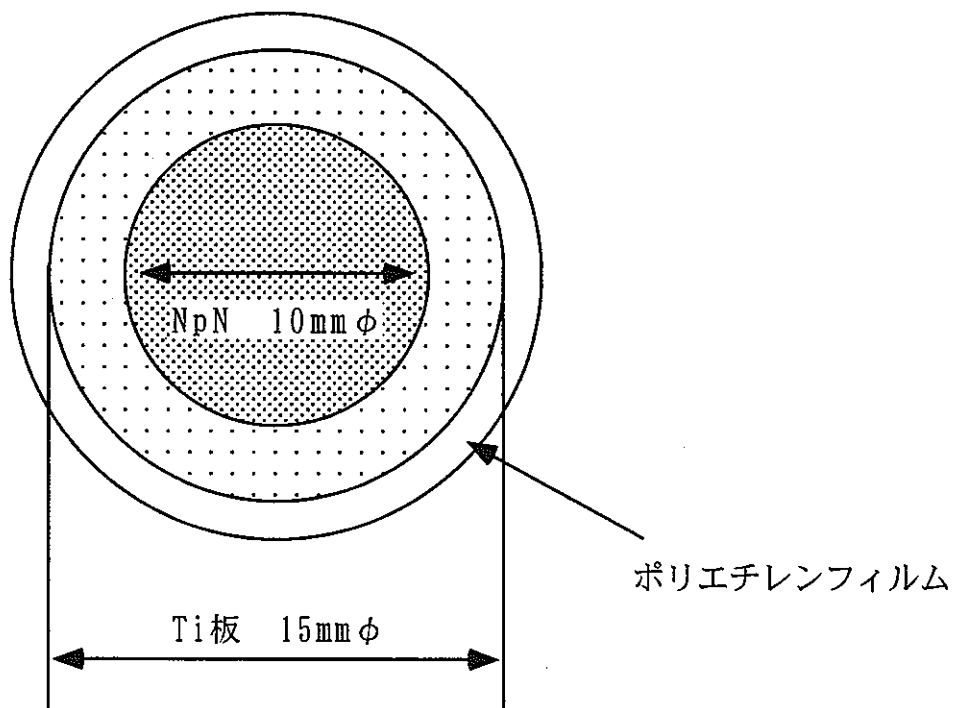
表2-5-2 Np-237の測定開始時間と測定時間

(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

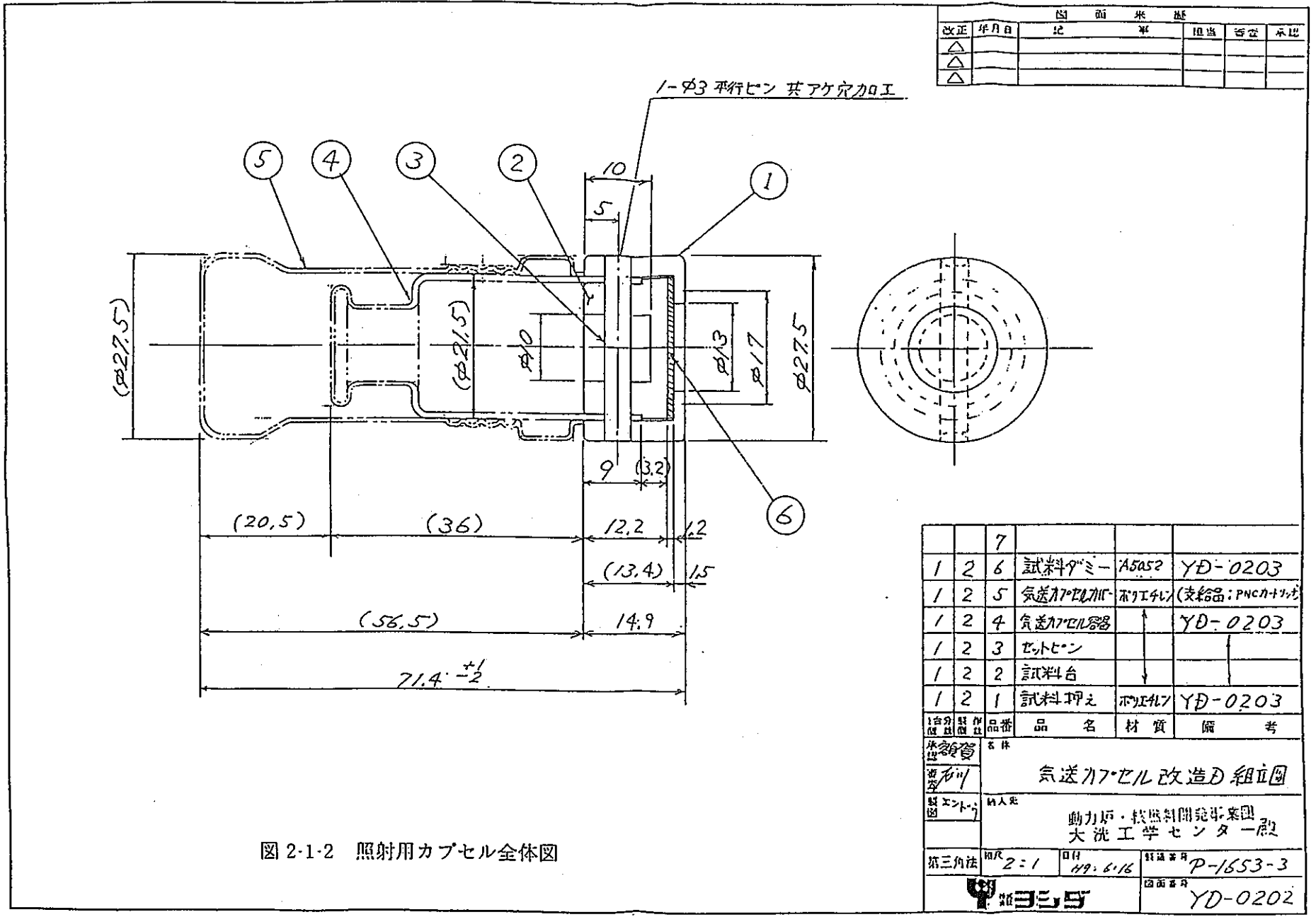
(f) Np-237の測定パターン

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



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

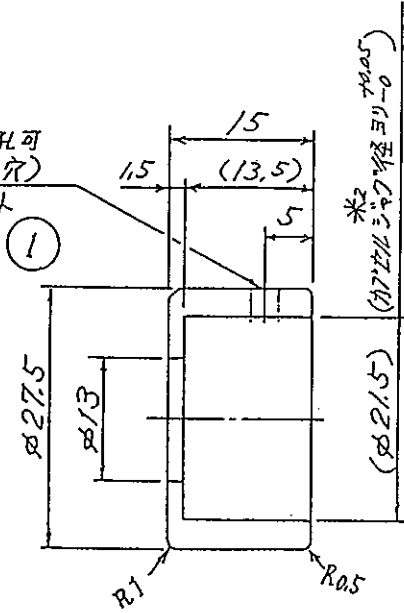


図面米基					
改正	年月日	記	筆	担当	承認
△					
△					
△					

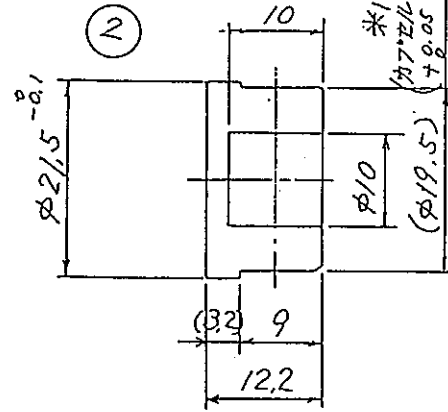
		7			
1	2	6	試料グミ-ASAS2	YD-0203	
1	2	5	気送カプセル加工	加工材料 (支給品: PNCN-加工)	
1	2	4	気送カプセル容器	↑	YD-0203
1	2	3	セトピン	↓	
1	2	2	試料台	↓	
1	2	1	試料押え	加工材料	YD-0203
1	台分	品番	品名	材質	備考
1	台分	品番	気送カプセル改造D組立図		
1	台分	品番	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 設		
1	台分	品番	図尺	日付	製造番号
1	台分	品番	2=1	19.6.16	P-1653-3
1	台分	品番	図面番号		YD-0202

図 2-1-2 照射用カプセル全体図

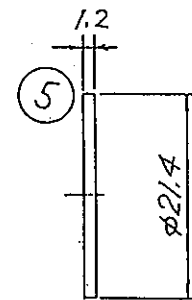
*3
1-φ1~2.5下孔可
(1-φ3セットピン穴)
組立参照、コト



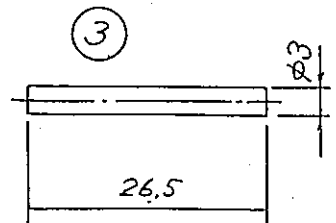
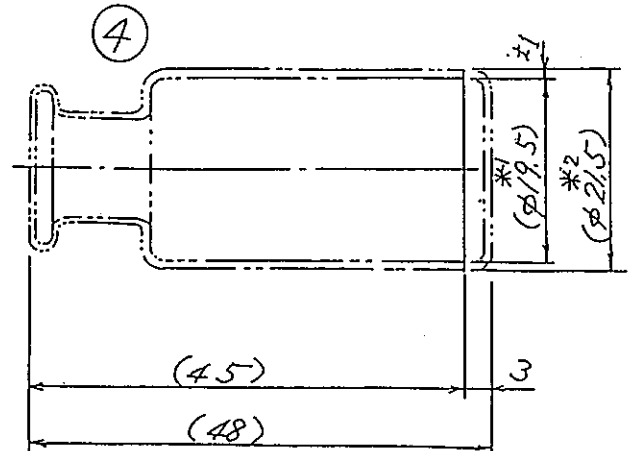
*2
(カプセルシヤク内径5.0)



*1
(カプセルシヤク内径5.0)



注記: *1は、
現合線り嵌めの
こと。
*2は、抜き差し
可能のこと
*3は品番⑤を
挟んで、セット
ピン穴加工のこと

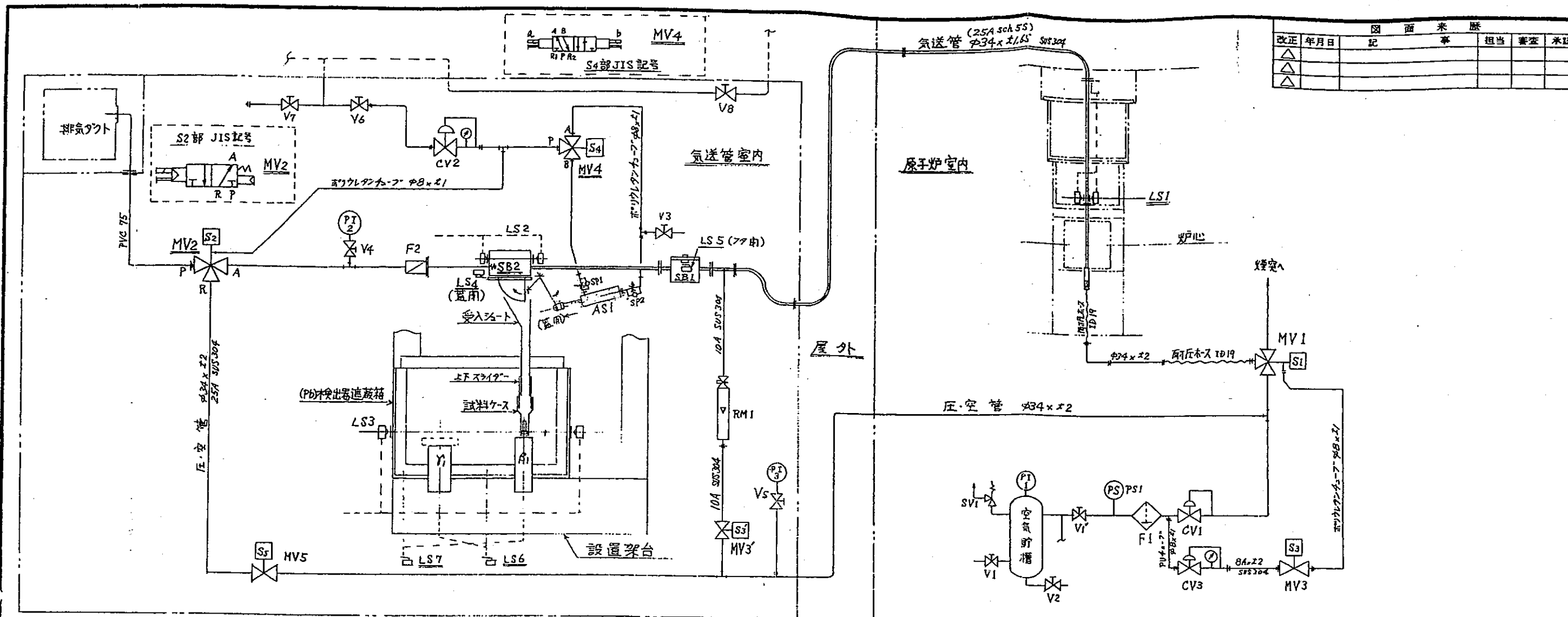


改正	年月日	記	出	番	承認
△					
△					
△					

1	2	5	試料タミー	C.S	±1.2×φ21.4
1	2	4	気送カプセル	ポリエチレン	線器(1+1)追加
1	2	3	セットピン		φ3×40
1	2	2	試料台		φ25×30
1	2	1	試料押え	ポリエチレン	φ30×30

1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
気送カプセル改造D部品図					
納入先					
第三角法 相尺 2:1 日付 199.6.16 製図番号 P-1653-3					
YD-0203					

図 2-1-3 照射用カプセル部品図



図面履歴				
改正	年月日	記	担当	審査
△				
△				
△				

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:メ-7角		AS1	エア-シリンガ-	ハット'倒リ'トニオン式'
	MV1~MV2~MV4	電磁弁(3方口)	MV1~MV2:木筒取付式 MV2~MV4:新設記号付		V1 ~ V8	手動バルブ	
	MV3~MV3~MV5	電磁弁(2方口)	MV3':未使用		β ₁	β線用検出器	
	SV1	安全弁			γ ₁	γ線用検出器	
	F1	フィルター	濾過式		RM1	ロータ-メ-タ-	未使用
	F2	フィルター	全アミ 80メッシュ		SB1	試料入レ	
	PI1~PI3	圧力計	PI1: 7kg/cm ² G PI2: 5.5 2kg/cm ² G PI3: 1.5 5kg/cm ² G		SB2	試料出シ	
	PS1	圧力スイッチ			-	(管継手類)	
	LS1~LS3	光電スイッチ	ファン'分離'型 投光'検光'式'		-	(端部スワリング)	
	LS4~LS7	リミットスイッチ	汎用7mm'ア-ラ-ン'式'		-	圧力計(減圧弁付)	
	SP1~SP2	スピットコントロール	シリンガ-口付商品				

1台分	製作	品番	品名	材質	備考
個数	個数	名称	気送管及び設備の製作 全系統図		
承認	署名	川			
審査	署名	川			
製図	エントウ	納入先	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター殿		
第三角法	縮尺	日付	製造番号	P-1653	
		H9.6.25	図面番号	YC-9706	

図 2-2-1 気送管システム全体の概要図

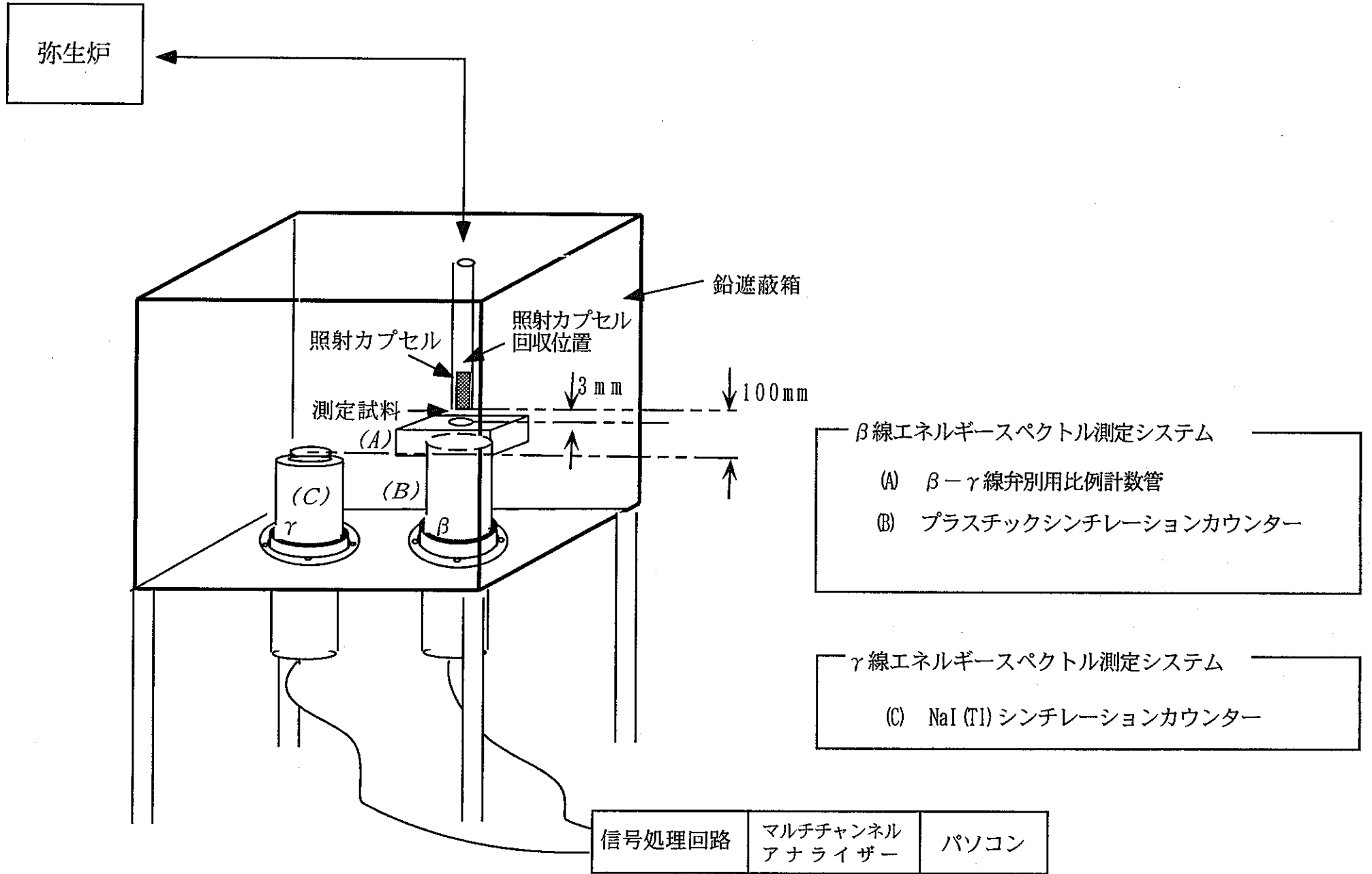


図2-2-2 崩壊熱測定装置の概要

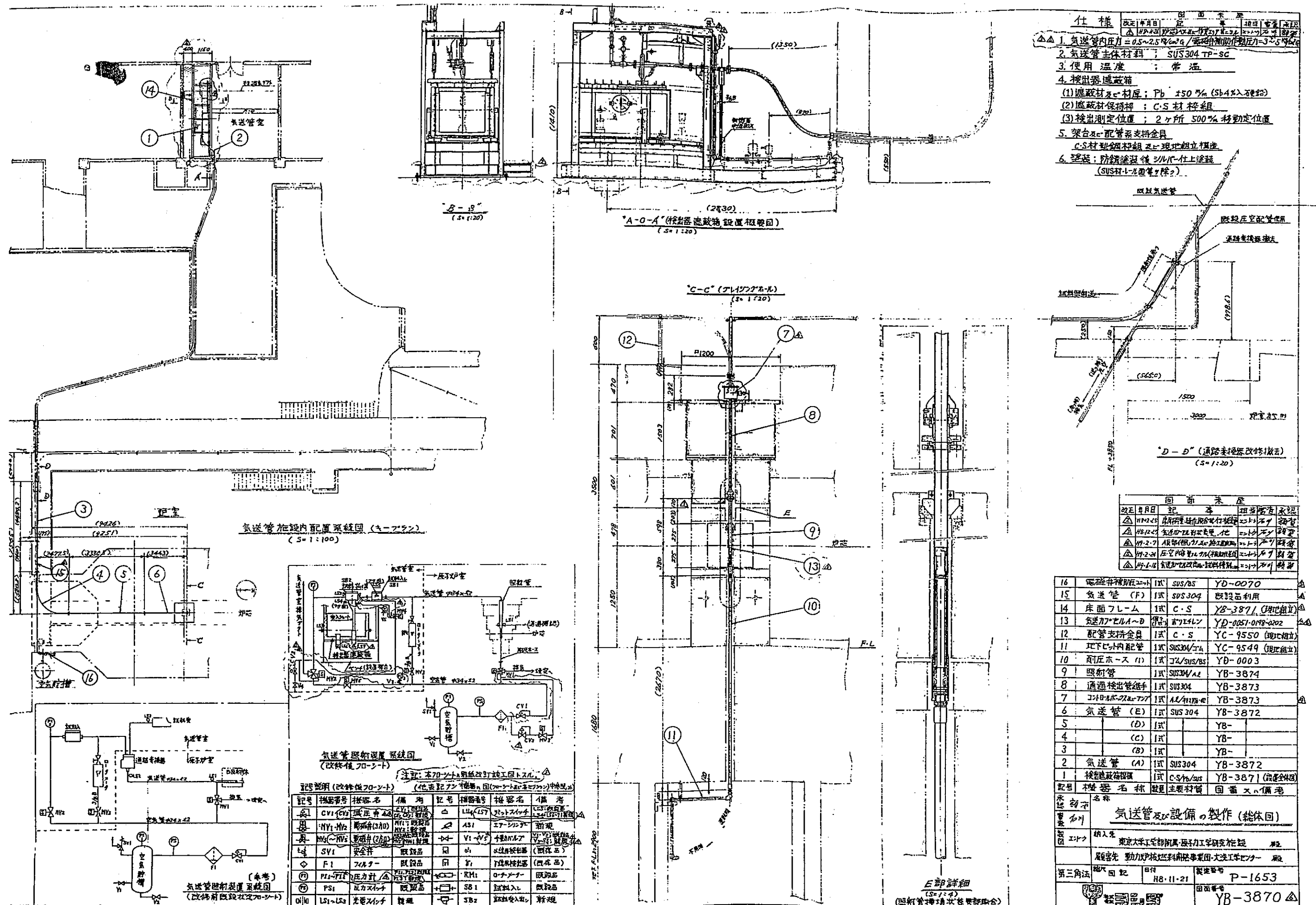
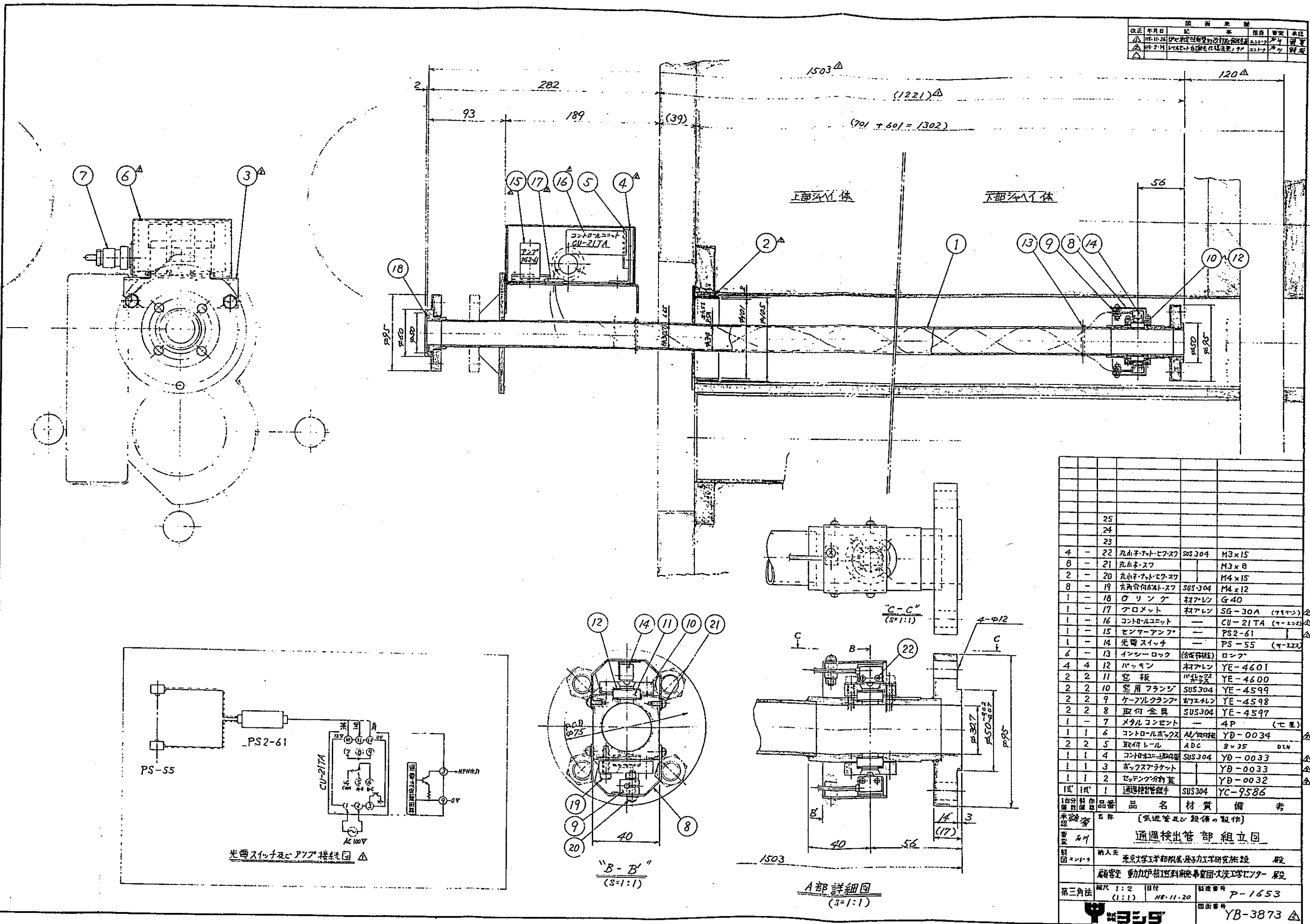


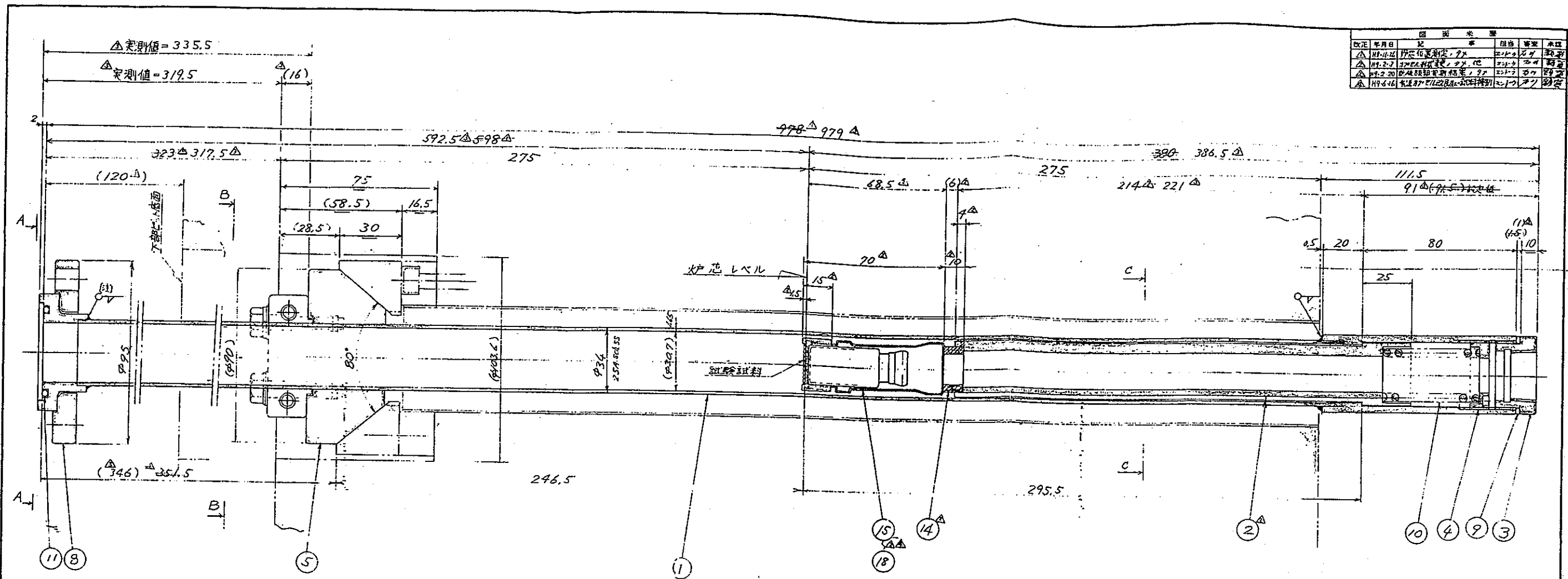
図 2-2-3 気送管システムの全体詳細図



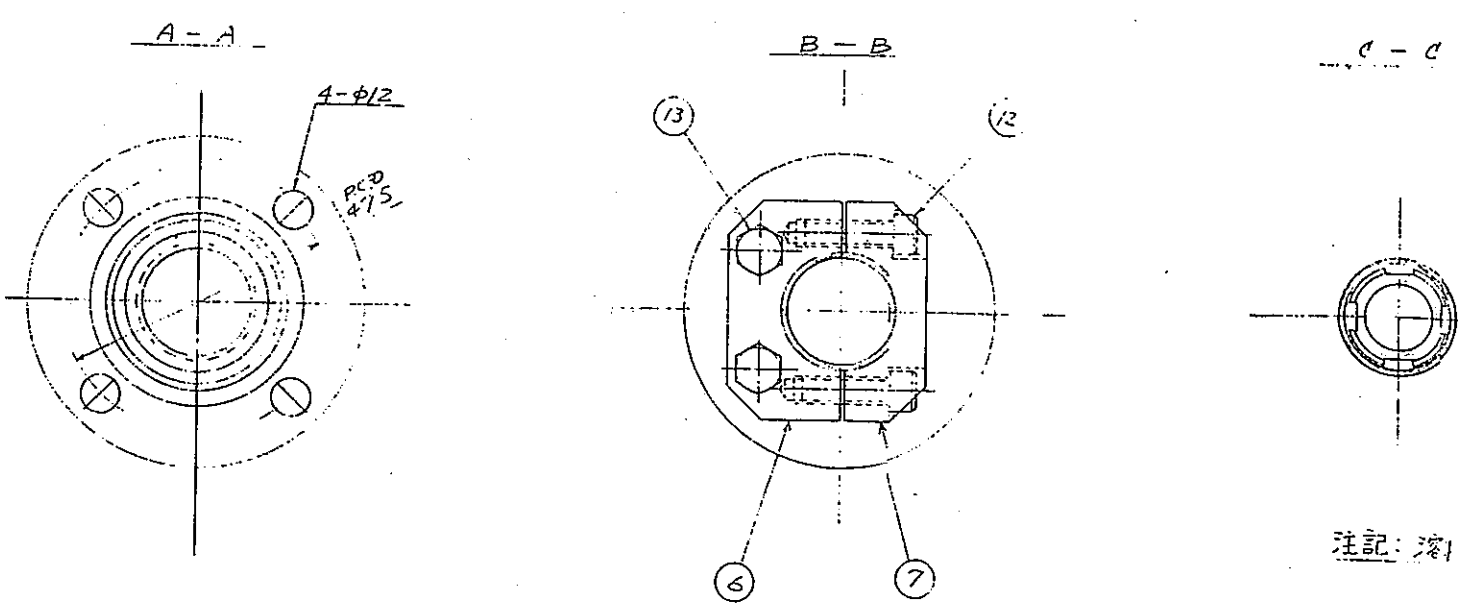
改正	年月日	記	担当	変更	理由
△	10-26	伊藤	伊藤	修正	
△	10-27	伊藤	伊藤	修正	
△	10-28	伊藤	伊藤	修正	

数量	部品番号	品名	材質	備考
1	25			
1	24			
1	23			
4	22	丸山ネジ・ビス	SUS304	M3×15
8	21	丸山ネジ		M3×8
2	20	丸山ネジ・ビス		M4×15
8	19	六角穴付ねじ	SUS304	M4×12
1	18	リング	材質	G40
1	17	プロメット	材質	SG-30A (7177)
1	16	コントローラユニット		CU-21TA (7-221)
1	15	センサーアンプ		PS2-61 (7-222)
1	14	光電スイッチ		PS-55 (7-223)
6	13	インソーロック	(含材料)	ロンク
4	12	バッキング	材質	YE-4601
2	11	窓板	材質	YE-4600
2	10	窓用フランジ	SUS304	YE-4599
2	9	ケーブルクランプ	材質	YE-4598
2	8	取付金具	SUS304	YE-4597
1	7	メタルコンポント		4P (7-22)
1	6	コントローラボックス	AL	YD-0034
2	5	取付レール	AAC	8×35 DIN
1	4	コントローラユニット	SUS304	YD-0033
1	3	ボックス		YD-0033
1	2	センサーアンプ		YD-0032
1	1	通過検出管	SUS304	YC-9586
1. 部品名 (気流管及び設備の製作)				
2. 部品名				
3. 部品名				
4. 部品名				
5. 部品名				
6. 部品名				
7. 部品名				
8. 部品名				
9. 部品名				
10. 部品名				
11. 部品名				
12. 部品名				
13. 部品名				
14. 部品名				
15. 部品名				
16. 部品名				
17. 部品名				
18. 部品名				
19. 部品名				
20. 部品名				
21. 部品名				
22. 部品名				
23. 部品名				
24. 部品名				
25. 部品名				
通過検出管部組立図				
納入先 東京大学工学部附属原子力工学研究施設 様				
顧客先 重加炉核燃料開発事業団大洗工場 様				
第三角法	縮尺 1:2 (1:1)	日付 10-11-20	製造番号 P-1653	図面番号 YB-3873

図 2-2-5 カプセル通過検出部



改訂	年月日	記	担当者	審査	承認
△	H11.11.14	炉芯位置調整、寸法	江崎 隆夫	石川 隆夫	石川 隆夫
△	H11.2.7	炉芯位置調整、寸法、他	石川 隆夫	石川 隆夫	石川 隆夫
△	H11.2.20	炉芯位置調整結果、寸法	石川 隆夫	石川 隆夫	石川 隆夫
△	H11.4.16	炉芯位置調整結果、寸法	石川 隆夫	石川 隆夫	石川 隆夫



注記: 溶接部(5)(6)挿入後施工スルコト.

品番	数量	品名	材質	備考
18	2	気送管(40D)	ステンレス	YD-0202
17	3	C		-0051
16	4	B		-0200
15	6	気送管(A)	ステンレス	YD-0198
14	12	クッションゴム	ネオレン	YE-4615
13	2	六角ボルト(7.27)	SUS304	M8x35
12	2	六角ボルト(7.27)	SUS304	M8x25
11	1	G1/2"	ステンレス	G40
10	1	圧縮バネ	SUS304	YE-4614
9	1	ロックワッシャー	ステンレス	YE-4605
8	1	ワッシャー	SUS304	YE-4606
7	1	2.5x7.0(B)	SUS304	YD-0036
6	1	2.5x7.0(A)	SUS304	YD-0036
5	1	コンスタノール	A5052	YD-0036
4	1	ワッシャー	SUS304	YE-4604
3	1	ワッシャー	SUS304	YE-4603
2	1	ステンレス	A5052	YD-0035
1	1	照射管	SUS304	YD-0034

品番	品名	材質	備考
	照射管部組立図		
	納入先		
	東京工業大学工学部附属原子力工学研究施設		
	〒113-8656 東京都文京区根岸 1-16-15		
	図面番号		
	P-1653		
	図面番号		
	YB-3874		

図 2-2-6 照射管部組立図

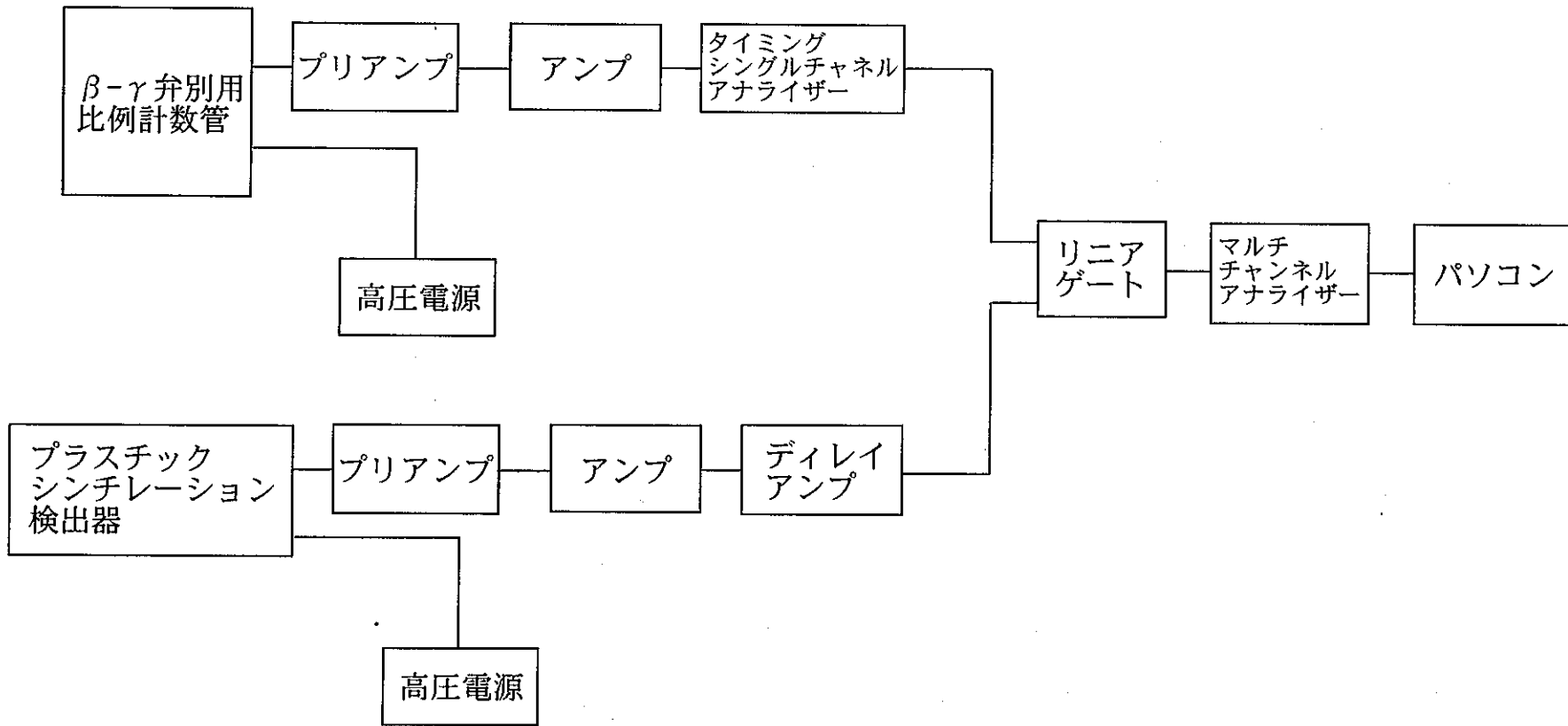


図2-3-1 β線スペクトロメータのブロック・ダイアグラム

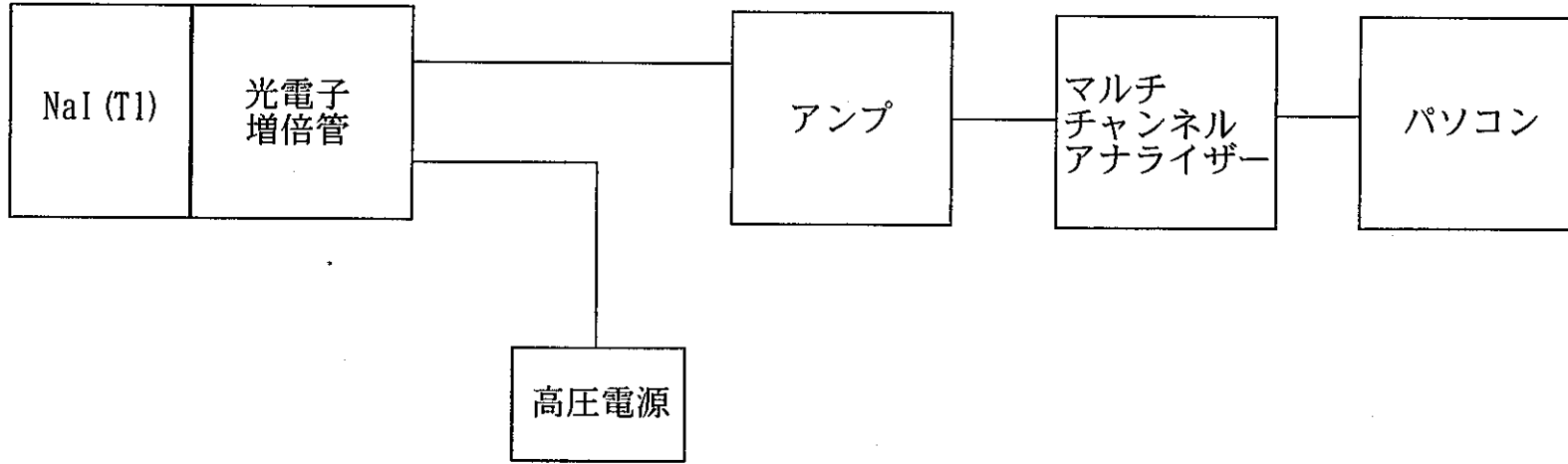


図2-4-1 γ 線検出器のブロック・ダイヤグラム

第3章 β 線及び 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 β - γ 弁別用透過型比例計数管とプラスチックシンチレーション検出器とから構成される β 線スペクトロメータで測定された β 線パルス波高分布及び鉛遮蔽箱内に設置されたNaI (TI) 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、それぞれの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 $\phi(E)$ を持つ放射線の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 $C(I)$ とは次式で関係づけられる。

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

$\phi(E)$: 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、

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

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

$\bar{\phi} = \{\phi_j\}$: 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 FERDO コード⁸⁾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で、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、

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

$$i=1, 2, 3 \cdots \cdots NR$$

$$j=1, 2, 3 \cdots \cdots NC$$

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

ここで w_i は重み計数で通常 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

β 線の測定に使用した β 線スペクトロメータは、 β - γ 弁別用透過型比例計数管とプラスチックシンチレーション検出器から構成されており、そのうちプラスチック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。また、 β - γ 弁別用比例計数管は、残っていた図面から忠実に再現したものである。 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、これら検出器の応答関数が必要となる。

秋山らは、 β 線スペクトロメータについては旧東京大学原子核研究所の空芯 β 線スペクトロメータから引き出した単色電子線、標準内部転換電子線源及び標準 β 線源を用いて β 線エネルギー 0.2~8MeV の間で 100 群、パルス波高 340 群の応答関数を実験的に求めている。 γ 線検出器については、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 0.06~5.0MeV 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。

このような応答関数を求める作業は非常に労力と時間を要し、困難である。特に β 線スペクトロメータの応答関数を求めるためには、単色電子線を発生する装置が必要であるが、当時秋山らが使用した東京大学原子核研究所の空芯 β 線スペクトロメータは現在存在せず、これに変わる装置を準備することは難しい。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にした。

秋山らが実験的に求めた応答関数の値は、論文に載っていない。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。β線スペクトロメータの応答関数については図3-2-1と図3-2-2に、γ線検出器の応答関数については図3-2-3と図3-2-4に示す。また、この応答関数のエネルギー群構造をβ線については表3-2-1に、γ線については表3-2-2に示す。これら2つの図がそれぞれ一致することから、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、β線及び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。

まず、β線についてであるが、Sr-90+Y-90標準β線源からのβ線を測定し、測定されたパルス波高分布をアンフォールディングして得られるβ線エネルギースペクトルと理論計算値とを比較することで、現在のシステムでも秋山らが実験的に求めた応答関数が使えるかどうか判断した。図3-2-5に測定されたパルス波高分布をアンフォールディングすることで得られるβ線エネルギースペクトルと理論計算値との比較を示す。実験値と計算値は1MeV以上の面積で規格化してある。低エネルギー側で実験値と計算値の間に差が見られるが、全体としてはほぼ一致しているため、秋山らが実験的に求めたβ線スペクトロメータの応答関数が、現在のシステムで使用しても大きな影響は無いと判断した。ちなみに、秋山らも同様の方法で彼ら自身が実験的に求めた応答関数の妥当性を確認しており、我々の結果と同じように低エネルギー側で差が見られている。図3-2-6に秋山らの比較図を示す。ただし、秋山らの結果と我々の結果を比較すると低エネルギー側で若干の差が見られるため、5章でこの影響を評価する。

続いてγ線について入力に用いたパルス波高分布測定結果を図3-2-7、図3-2-9、図3-2-11に、出力結果を図3-2-8、図3-2-10、図3-2-12に示す。テスト計算の結果、入力に用いたCo-60 (1137keV, 1333keV)、Cs-137 (662keV)、Na-22 (511keV) 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 (TI) 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。

以上の比較からβ線及びγ線の応答関数は、現在のシステムでも使えると判断し、以後、これらの応答関数を用いてアンフォールデ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、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。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(照射された試料から放出されるβ線あるいはγ線)は、次式より求められる。

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

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 β 線あるいは 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 β 線あるいは 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 β 線あるいは 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 β 線あるいは 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分布は340群なので、バンチングする必要がある。秋山らは、 β 線測定については8MeV以下、 γ 線測定については5MeV以下のエネルギー範囲で測定したとあるので、 β 線は1群当たり24keV、 γ 線は1群当たり15keVとなるようにバンチングした。

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、 β 線は24keVごとに、 γ 線は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 β 線あるいは 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 β 線スペクトロメータ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	0.210	0.02	36	1.385	0.05	71	4.110	0.10
2	0.230	0.02	37	1.435	0.05	72	4.210	0.10
3	0.250	0.02	38	1.490	0.06	73	4.310	0.10
4	0.270	0.02	39	1.550	0.06	74	4.410	0.10
5	0.290	0.02	40	1.610	0.06	75	4.510	0.10
6	0.310	0.02	41	1.670	0.06	76	4.620	0.12
7	0.330	0.02	42	1.730	0.06	77	4.740	0.12
8	0.350	0.02	43	1.790	0.06	78	4.860	0.12
9	0.370	0.02	44	1.850	0.06	79	4.980	0.12
10	0.390	0.02	45	1.910	0.06	80	5.100	0.12
11	0.415	0.03	46	1.975	0.07	81	5.220	0.12
12	0.445	0.03	47	2.045	0.07	82	5.340	0.12
13	0.475	0.03	48	2.115	0.07	83	5.460	0.12
14	0.505	0.03	49	2.185	0.07	84	5.580	0.12
15	0.535	0.03	50	2.255	0.07	85	5.700	0.12
16	0.565	0.03	51	2.325	0.07	86	5.830	0.14
17	0.595	0.03	52	2.400	0.08	87	5.970	0.14
18	0.625	0.03	53	2.480	0.08	88	6.110	0.14
19	0.655	0.03	54	2.560	0.08	89	6.250	0.14
20	0.685	0.03	55	2.640	0.08	90	6.390	0.14
21	0.720	0.04	56	2.720	0.08	91	6.530	0.14
22	0.760	0.04	57	2.800	0.08	92	6.670	0.14
23	0.800	0.04	58	2.880	0.08	93	6.810	0.14
24	0.840	0.04	59	2.965	0.09	94	6.960	0.16
25	0.880	0.04	60	3.055	0.09	95	7.120	0.16
26	0.920	0.04	61	3.145	0.09	96	7.280	0.16
27	0.960	0.04	62	3.235	0.09	97	7.440	0.16
28	1.000	0.04	63	3.325	0.09	98	7.600	0.16
29	1.040	0.04	64	3.415	0.09	99	7.760	0.16
30	1.085	0.05	65	3.510	0.10	100	7.920	0.16
31	1.135	0.05	66	3.610	0.10			
32	1.185	0.05	67	3.710	0.10			
33	1.235	0.05	68	3.810	0.10			
34	1.285	0.05	69	3.910	0.10			
35	1.335	0.05	70	4.010	0.10			

表3-2-2 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

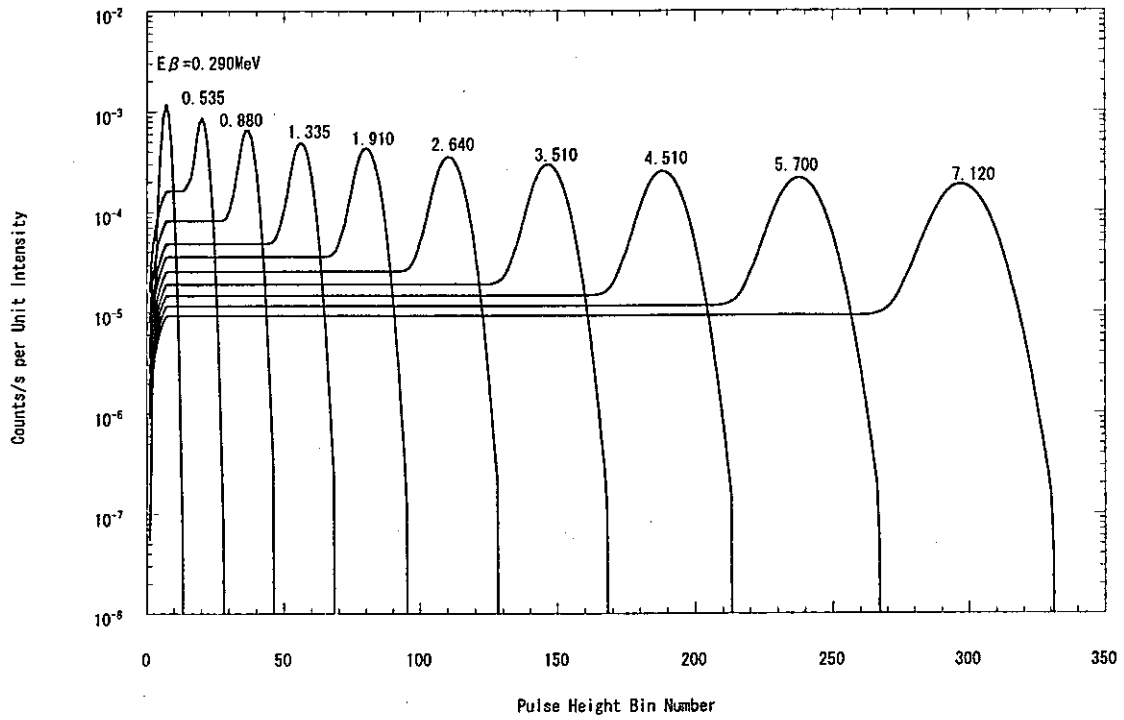


図3-2-1 β 線応答関数データ (秋山が使用した入力データをもとに再現した値)

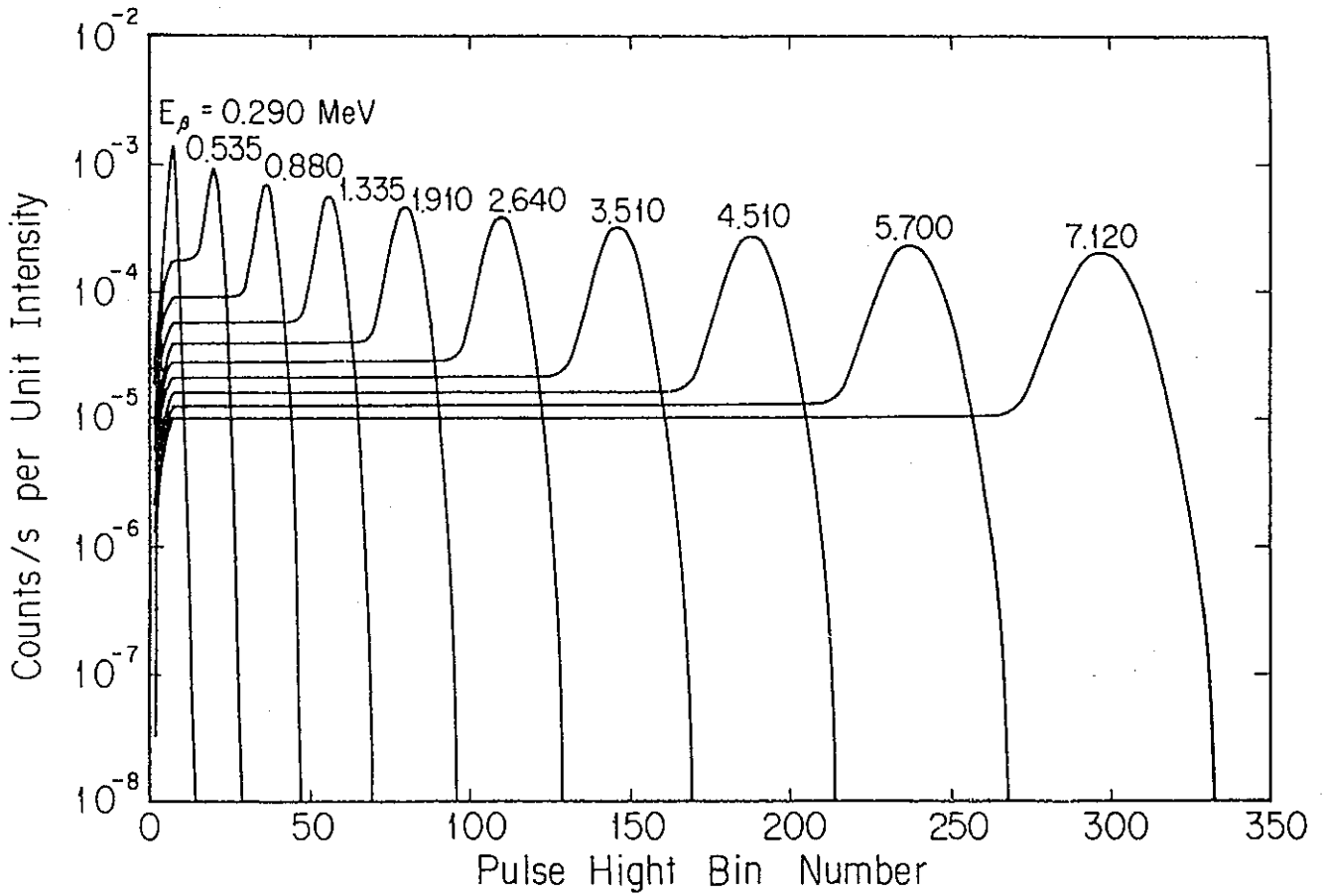


図3-2-2 β 線応答関数 (論文掲載図)

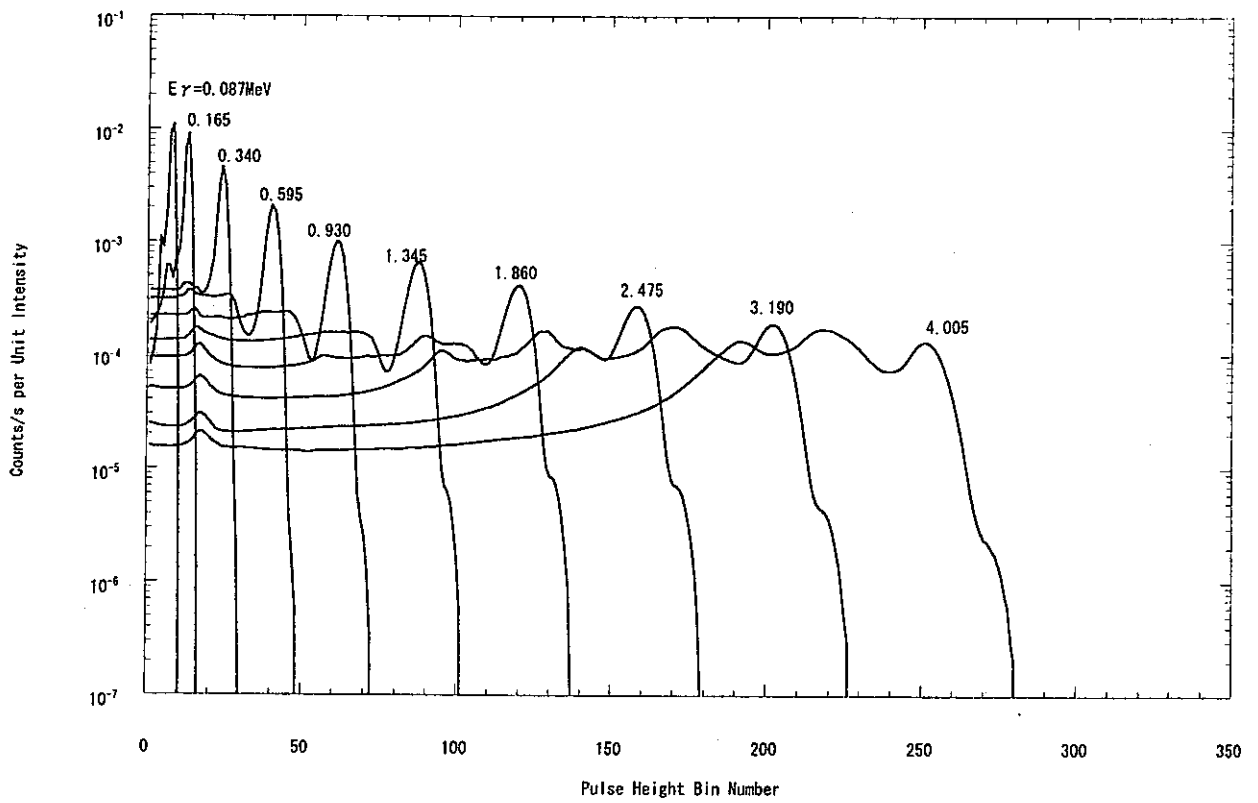


図3-2-3 γ 線応答関数データ (秋山が使用した入力データをもとに再現した値)

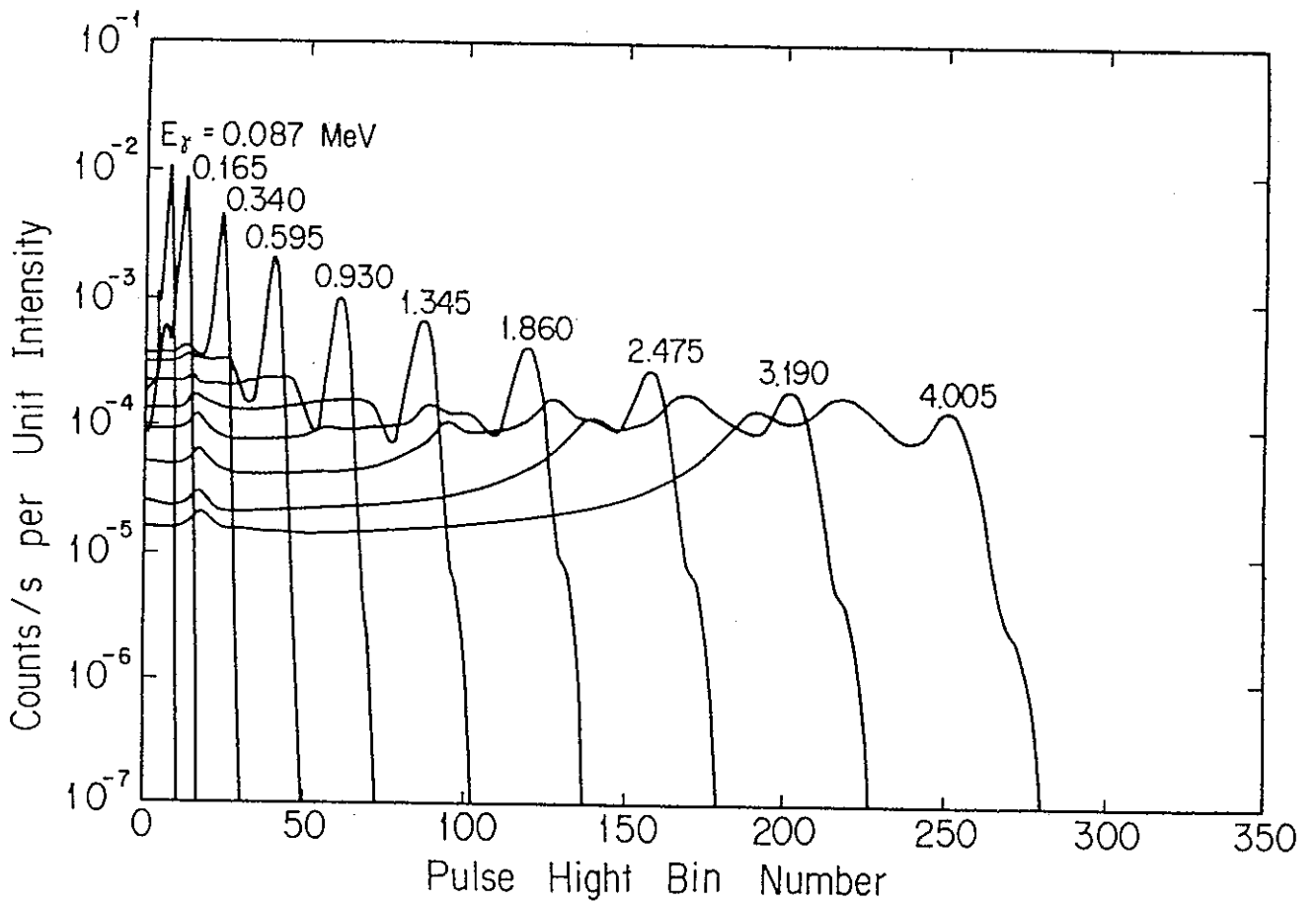


図 3-2-4 γ 線応答関数 (論文掲載図)

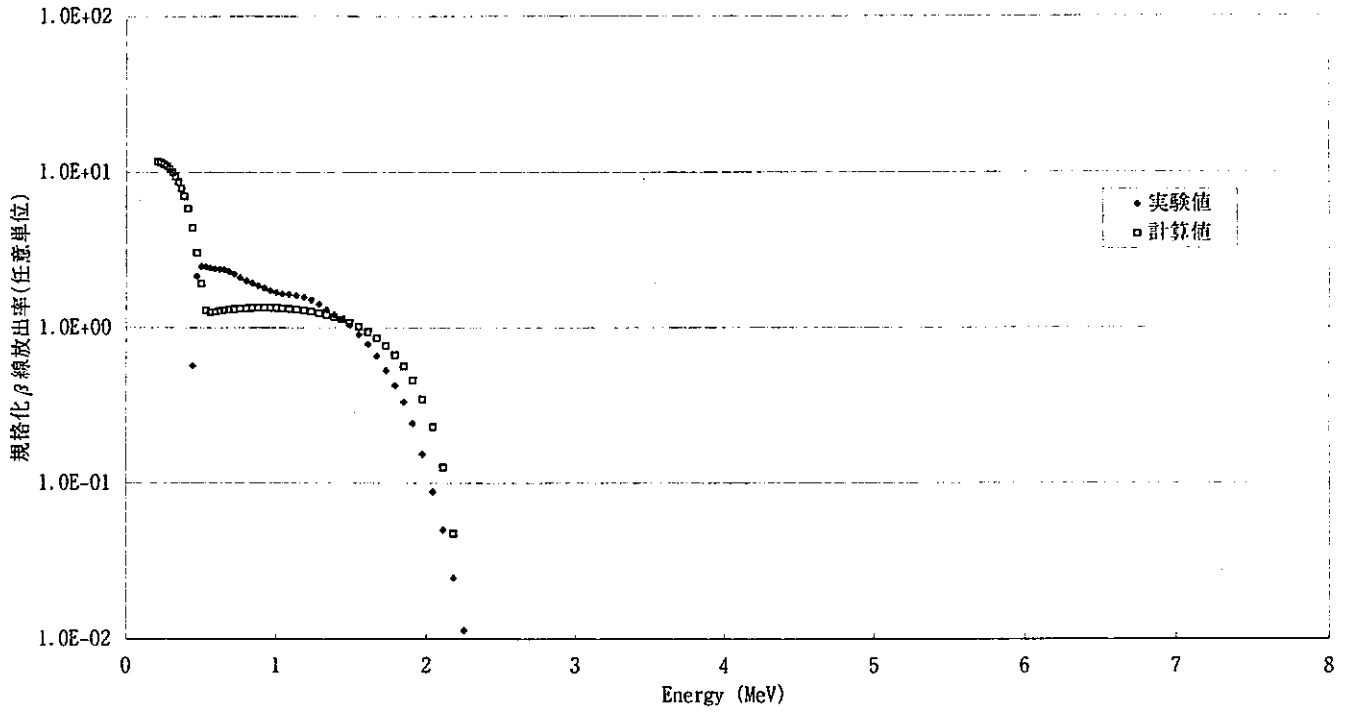


図3-2-5 β 線エネルギースペクトルの実験値と計算値の比較

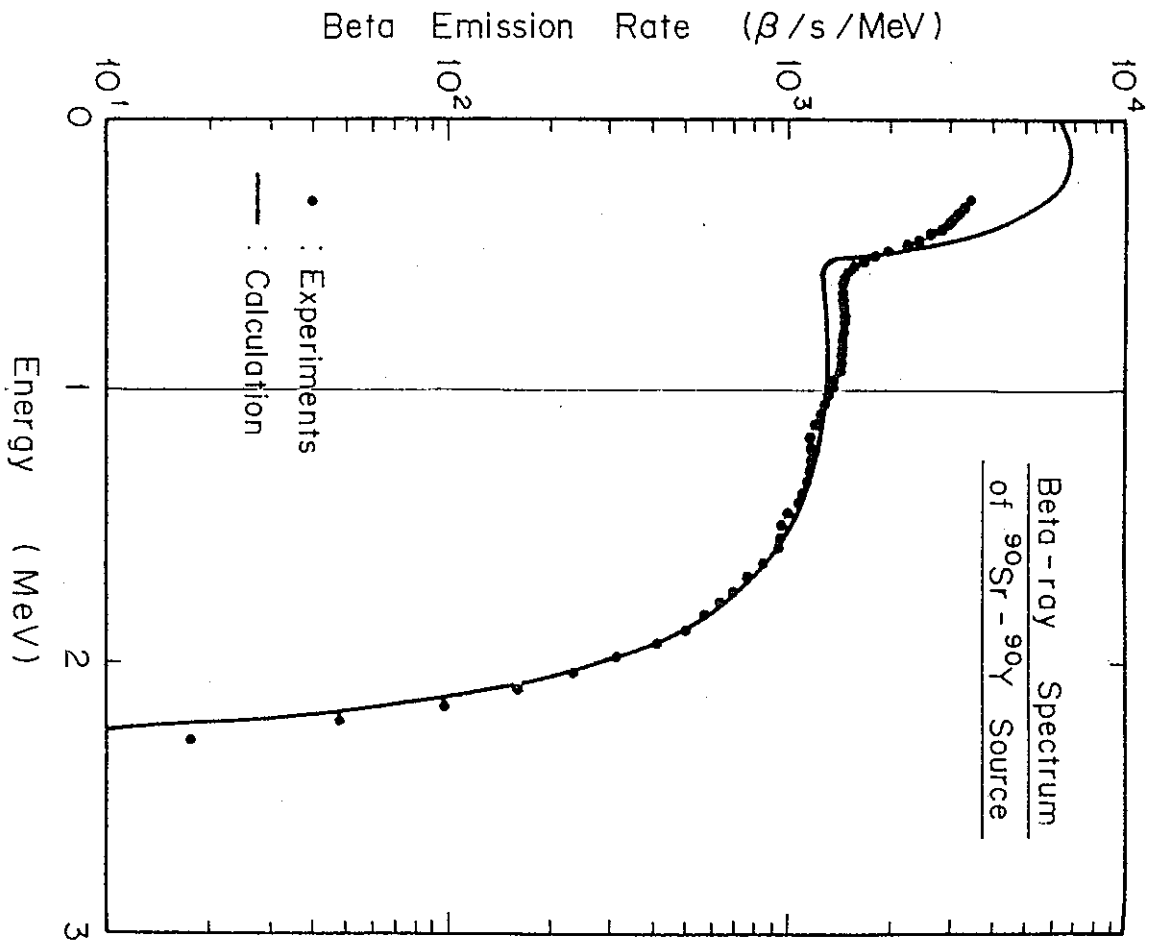


図3-2-6 β 線エネルギースペクトルの実験値と計算値の比較 (論文掲載図)

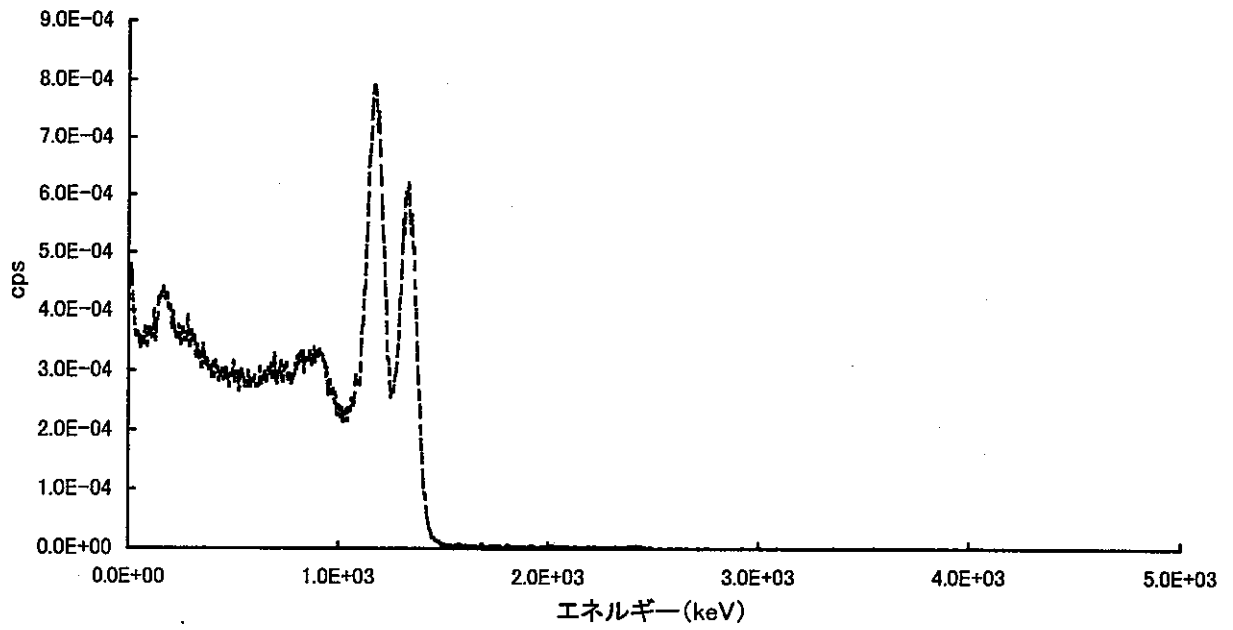


図3-2-7 FERDO入力 (Co-60測定値)

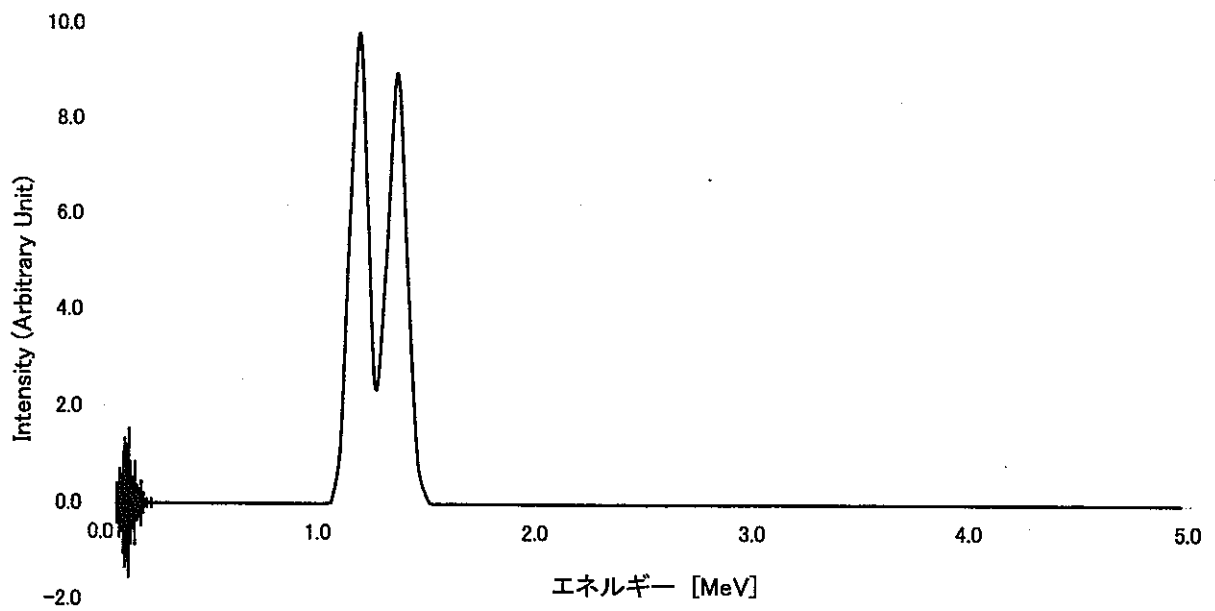


図3-2-8 FERDO出力結果 (Co-60)

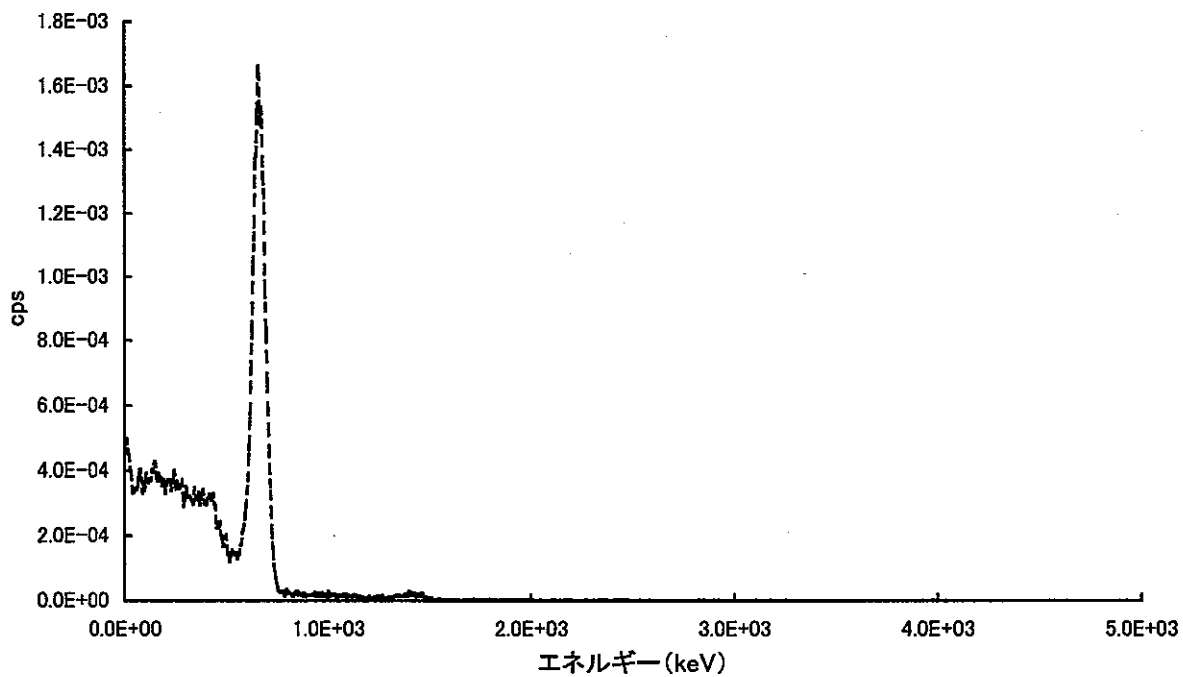


図3-2-9 FERDO入力(Cs-137測定値)

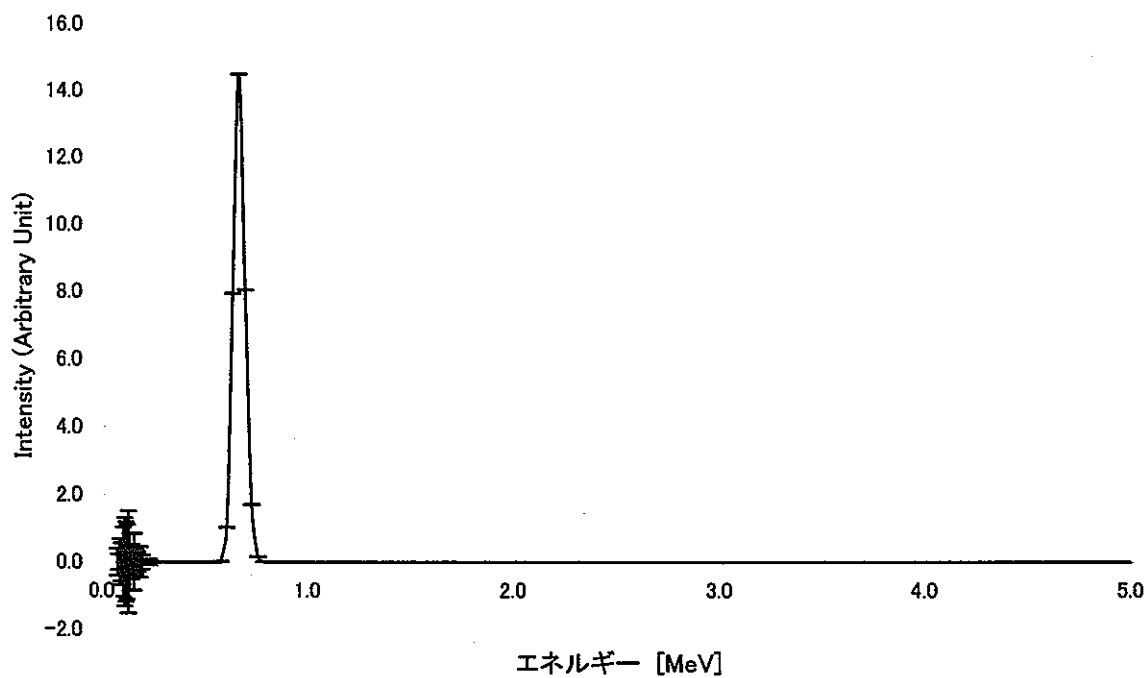


図3-2-10 FERDO出力結果(Cs-137)

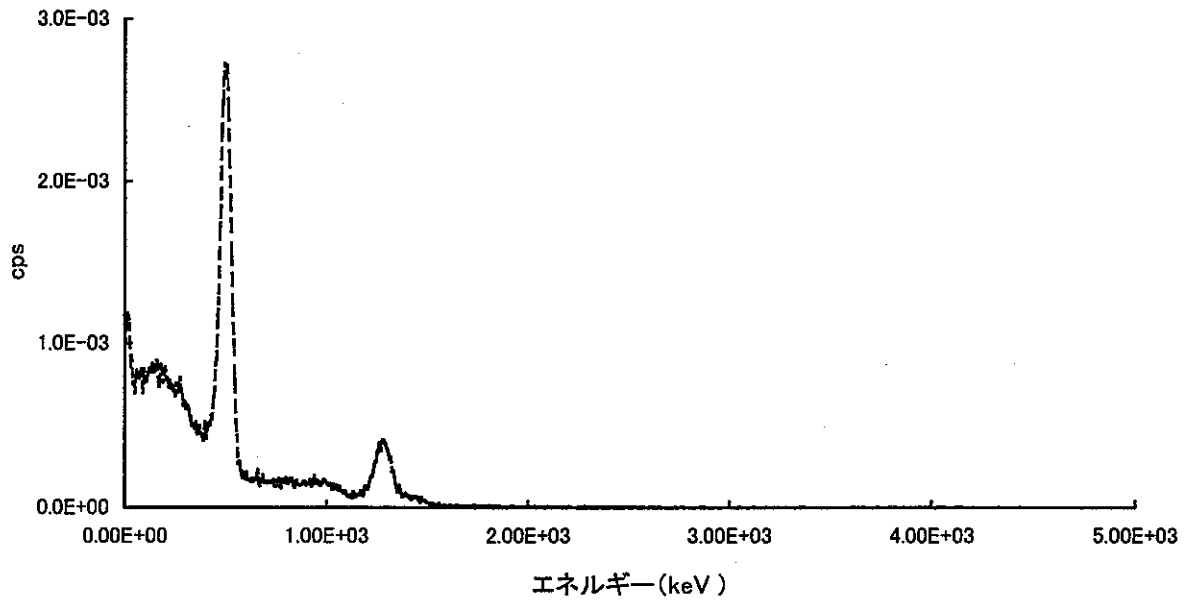


図3-2-11 FERDO入力 (Na-22測定値)

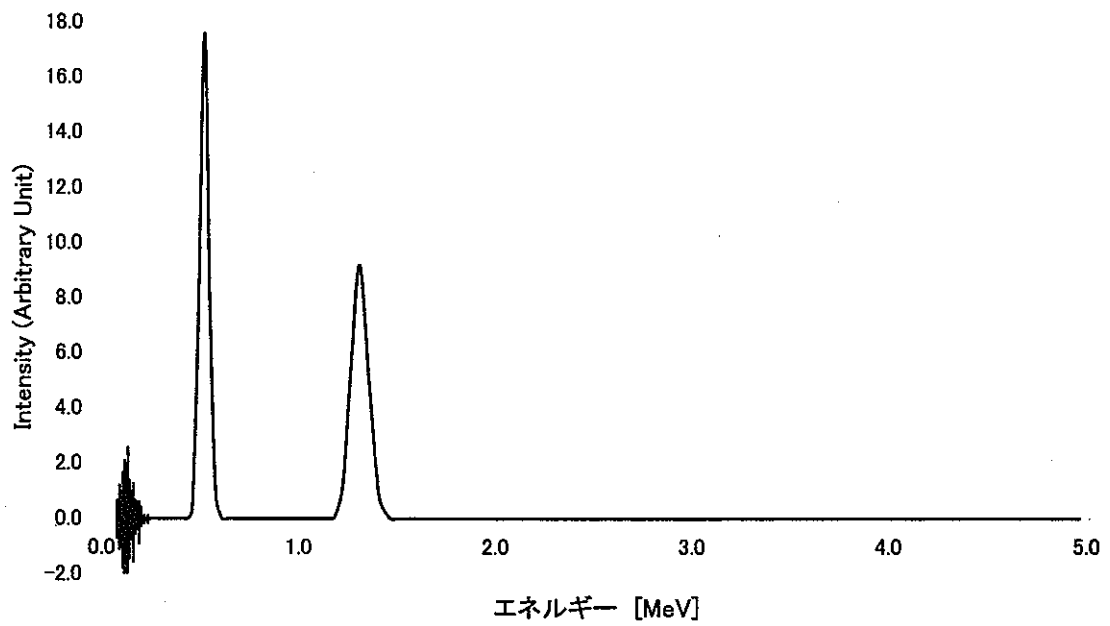


図3-2-12 FERDO出力結果 (Na-22)

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β線あるいは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、β線あるいはγ線のパルス波高分布測定が終了後、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。

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 コマンドを使用して抽出された複数のピークから、Xe-135=250keV, Y-91m=556keV, Nb-97=658keV, Nb-97m=743keV の4つの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。

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

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

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

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

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

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

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、

$$C_B = \epsilon_p b_B P_B \dots \dots \dots (4-1-5)$$

と表される。式 (4-1-4) と式 (4-1-5) から核分裂反応率は、

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

と求められる。したがって、全核分裂数は、

$$N_f = n_f T_R = \frac{C_B (\lambda_B - \lambda_A) T_R}{\epsilon_p b_B \alpha_A A} \dots \dots \dots (4-1-7)$$

ここでAは、

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

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。

使用したGe検出器の光電ピーク効率 ϵ_p 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。

$$\ln \epsilon_p = a(\ln E_\gamma)^2 + b \cdot \ln E_\gamma + c \dots \dots (4-1-9)$$

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、相対誤差で一律4.8%とした。

- 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。関数の分散は、変数の相関が無い場合、次のようにして求められる。

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{x_i}{f}\right)^2 \left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)^2 \dots \dots (4-1-10)$$

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。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta N_f}{N_f}\right)^2 &= \left(\frac{\Delta C_B}{C_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b_B}{b_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha_A}{\alpha_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial \lambda_A} \frac{\lambda_A}{N_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta \lambda_A}{\lambda_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial \lambda_B} \frac{\lambda_B}{N_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_R} \frac{T_R}{N_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta T_R}{T_R}\right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_C} \frac{T_C}{N_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta T_C}{T_C}\right)^2 + \left(\frac{\partial N_f}{\partial T_W} \frac{T_W}{N_f}\right)^2 \left(\frac{\Delta T_W}{T_W}\right)^2 \end{aligned} \quad (4-1-11)$$

ここで、

ΔC_B : ピーク面積の誤差

$\Delta \epsilon_P$: 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

(4-1-11) 式を評価するためには、 λ_A , λ_B , T_R , T_C , T_W についての微分係数が必要である。これ微分係数は、MATHEMATICA¹³⁾ を用いて数値的に求めた。(4-1-7) 式と(4-1-11) 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。

4.2 β 線有限時間照射崩壊熱

照射後の試料から放出される β 線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十分に短いので、測定時間内での β 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。従って、測定で得られた各 β 線エネルギースペクトルは、測定時間内での平均の単位時間当たりのスペクトルとみなすことができる。測定されたパルス波高分布は、(3-3-1) 式に従って真のパルス波高分布を求め、「FERDO」コードを用いてアンフォールディングを行った。アンフォールディングされた β 線エネルギースペクトルは、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 β 線有限時間照射崩壊熱を次式の通り求めた。

$$F\left(T_R, T_W + \frac{1}{2}T_C\right) = \frac{1}{n_f} \int_{E_0}^{E_{\max}} E \cdot \phi(E) dE$$

$$= \frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{j_{\max}} E_j \cdot \phi(E_j) \cdot \Delta E_j + \frac{1}{n_f} \int_{E_0}^{E_{\min}} E \cdot \phi(E) dE \cdots (4-2-1)$$

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 β 線束

T_R : 照射時間

T_w : 測定待ち時間

T_C : 測定時間

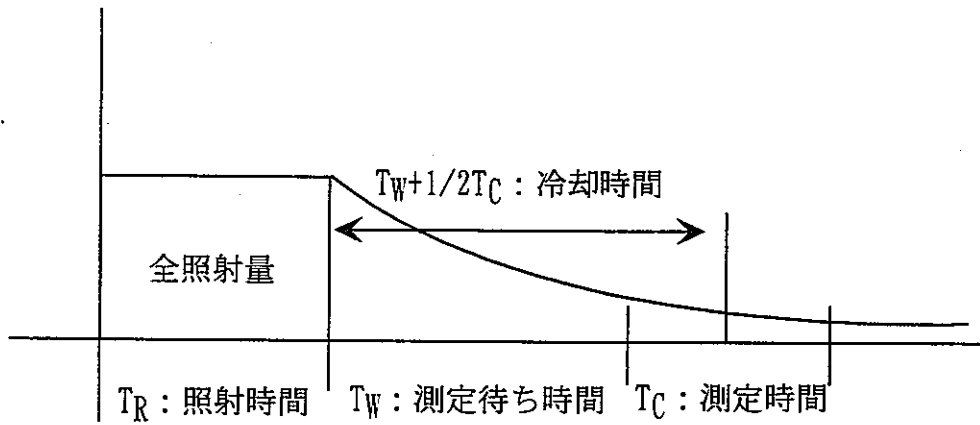
$T_w + \frac{1}{2}T_C$: 有限時間照射崩壊熱の冷却時間

(4-2-1) 式の右辺第1項は測定されたエネルギースペクトルから計算される部分であり、第2項は測定されたエネルギースペクトルのエネルギー下限値以下のエネルギーをもつ β 線からの寄与分である。このエネルギー下限値は用いた測定系の低エネルギー側ディスクリレベルによって決まり、その値は約300keVである。0~300keVの β 線による有限時間照射崩壊熱の全体に与える寄与は、総和計算によると最も大きくて4%程度である。

(4-2-1) 式で得られた有限時間照射崩壊熱を次式で与えられるエネルギー放出量、つまり $(1/T_R)$ fission/sの割合で T_R 時間照射した後の T_w から (T_w+T_C) 時間内に放出されるエネルギーに変換した。ただし、上述した0~300keVの β 線による有限時間照射崩壊熱の寄与分は補正していない。

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

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。(4-2-2)式から得たU-235の結果を表4-2-1~表4-2-2に、Np-237の結果を表4-2-3~表4-2-4に示す。



4.3 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十分に短いので、測定時間内の 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。

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

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) 式で得られた有限時間照射崩壊熱を次式で与えられるエネルギー放出量、つまり $(1/T_R)$ fission/s の割合で T_R 時間照射した後の T_w から $(T_w + T_c)$ 時間内に放出されるエネルギーに変換した。

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

(4-3-2) 式から得た U-235 の結果を表 4-3-1 ~ 表 4-3-2 に、Np-237 の結果を表 4-3-3 ~ 表 4-3-4 に示す。

4.4 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

実験的に求められた崩壊熱の値は、パルス炉によるパルス的な照射のような特別な場合を除くと一般的にある時間照射した後のエネルギー放出量を測定し、それらから崩壊熱を求めている。この場合、照射中の核分裂反応率が一定という単純な照射条件の時には、照射時間 T_R の間 1 fission/s の割合で照射した後の冷却間 t におけるエネルギー放出量を一般に有限時間照射崩壊熱と呼んでいる。しかし、個々の実験においては、照射時間 T_R はそれぞれの実験条件に適するように選ばれるため、実験値間の比較が難しい。したがって、実験条件の異なる実験値を比較する上で崩壊熱に関する基本的概念が必要となる。この基本概念には、それより任意の照射時間に対する有限時間照射崩壊熱が算出できることが条件として付加される。このような基本概念の一つに瞬時照射崩壊熱がある。瞬時照射崩壊熱の定義は 1 核分裂が発生した後の核分裂発生時点からの冷却時間 t の関数としてのエネルギー放出量である。以下に有限時間照射崩壊熱から瞬時照射崩壊熱を算出する方法を述べる。

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

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

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

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

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

T_R

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測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ない。

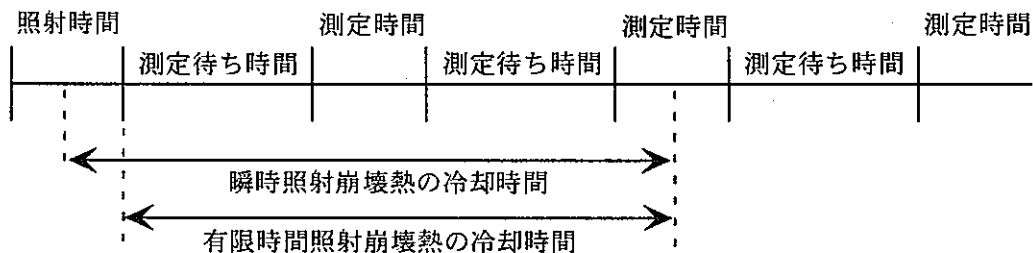
$$T_f = T_w + \frac{1}{2}(T_R + T_C) \dots (4-4-4)$$

$$T_f = T_w + \frac{1}{2}T_C \dots (4-4-5)$$

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なになる。



補正係数を求めるための総和計算値は、愛知淑徳大学の親松助教授が作成した計算ツール¹⁴⁾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β線崩壊熱の補正係数を表4-4-1～表4-4-4に、γ線崩壊熱の補正係数を表4-4-5～表4-4-8に示す。なお、総和計算に用いた核データライブラリは、decay data library, fission yield library共にJNDC-V2を使用した。

4.5 β線瞬時照射崩壊熱

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、任意の照射条件における崩壊熱をそれから計算できること、照射条件の異なる他の実験値

あるいは各種計算値との比較を容易にするなど有意義である。

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、待ち時間 T_w が照射時間 T_R と測定時間 T_C の和より十分長い場合、つまり $T_w \gg (T_R + T_C)$ が成り立つ時は、(4-4-1)式より瞬時照射崩壊熱に変換した。一方、 $T_w < (T_R + T_C)$ の範囲においては、(4-4-1)式が成り立たないので、この範囲では(4-4-3)式で求めた補正係数を導入して(4-4-2)式より瞬時照射崩壊熱に変換した。このようにして得たU-235の結果を表4-5-1～表4-5-2及び図4-5-1～図4-5-2に、Np-237の結果を表4-5-3～表4-5-4及び図4-5-3～図4-5-4に示す。瞬時照射崩壊熱は冷却時間の逆数にほぼ比例するので、横軸に冷却時間を、縦軸に瞬時照射崩壊熱と冷却時間の積をとって図示してある。

4.6 γ 線瞬時照射崩壊熱

β 線の時と同様、待ち時間 T_w が照射時間 T_R と測定時間 T_C の和より十分長い場合、つまり $T_w \gg (T_R + T_C)$ が成り立つ時は、(4-4-1)式より瞬時照射崩壊熱に変換した。一方、 $T_w < (T_R + T_C)$ の範囲においては、(4-4-1)式が成り立たないので、(4-4-2)式より瞬時照射崩壊熱に変換した。このようにして得たU-235の結果を表4-6-1～表4-6-2及び図4-6-1～図4-6-2に、Np-237の結果を表4-6-3～表4-6-4及び図4-6-3～図4-6-4に示す。 β 線の時と同じく、横軸に冷却時間を、縦軸に瞬時照射崩壊熱と冷却時間の積をとって図示してある。

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:\vtreasu-1\大川内\vdhdata\yge\yno20\yno20-1.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

Energy[keV] = [2.319907e-007]*Ch² + [4.993442e-001]*Ch + [-2.937442e+001]

FWHM [keV] = [-1.549853e-002]*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 Xe-135
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 Y-91m
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 Nb-97
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	Nb-97m
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
3	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})	$2.91E-5 \pm 4.40E-8$	$2.03E-5 \pm 2.14E-8$	$1.14E-5 \pm 3.36E-8$	$1.14E-5 \pm 3.36E-8$
着目核の崩壊定数 (S^{-1})	$2.11E-5 \pm 4.63E-8$	$2.32E-4 \pm 1.87E-7$	$1.60E-4 \pm 1.54E-6$	$1.16E-2 \pm 1.36E-3$
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。
 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 (秒)	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(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%
No15total	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(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(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(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4-2-1 U-235 β 線有限時間照射崩壊熱(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)						C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	19	0.195	0.187	0.156	0.271	0.246	0.244	1.249	1.303	1.566	0.899
25	10	35	0.147	0.141	0.117	0.204	0.198	0.196	1.332	1.390	1.670	0.959
45	10	55	0.078	0.075	0.062	0.109	0.115	0.118	1.504	1.569	1.886	1.083
75	20	90	0.077	0.074	0.061	0.107	0.130	0.133	1.727	1.802	2.166	1.244
115	40	140	0.079	0.076	0.063	0.110	0.154	0.152	1.931	2.015	2.422	1.391
195	60	230	0.057	0.054	0.045	0.079	0.125	0.122	2.148	2.241	2.694	1.547
315	80	360	0.044	0.042	0.035	0.061	0.103	0.096	2.191	2.286	2.748	1.578
495	100	550	0.0318	0.0305	0.0254	0.0442	0.0852	0.077	2.414	2.519	3.027	1.739
795	200	900	0.038	0.037	0.0307	0.053	0.0974	0.094	2.442	2.548	3.063	1.759
1395	400	1600	0.044	0.042	0.035	0.061	0.109	0.104	2.354	2.456	2.952	1.695
2195	500	2450	0.0372	0.0356	0.0296	0.052	0.0831	0.079	2.112	2.203	2.648	1.521
3195	600	3500	0.0271	0.0260	0.0216	0.038	0.0638	0.058	2.150	2.243	2.696	1.548

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-2-2 U-235 β 線有限時間照射崩壊熱(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)					C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
70	40	140	0.135	0.139	0.134	0.187	0.162	1.202	1.170	1.208	0.870
150	60	230	0.110	0.113	0.110	0.153	0.125	1.128	1.098	1.134	0.816
270	80	360	0.077	0.079	0.076	0.106	0.097	1.263	1.230	1.270	0.914
450	100	550	0.055	0.056	0.054	0.076	0.077	1.407	1.370	1.414	1.018
750	200	900	0.058	0.060	0.058	0.080	0.094	1.619	1.576	1.627	1.171
1350	400	1600	0.055	0.056	0.055	0.076	0.104	1.891	1.841	1.900	1.368
2150	500	2450	0.038	0.039	0.038	0.052	0.079	2.081	2.026	2.092	1.506
3150	600	3500	0.0263	0.0271	0.0262	0.0364	0.058	2.215	2.156	2.226	1.603
4350	800	4800	0.022	0.023	0.0223	0.031	0.050	2.216	2.157	2.227	1.603
5950	1000	6500	0.018	0.019	0.018	0.025	0.041	2.244	2.184	2.255	1.623
7950	2000	9000	0.0223	0.0229	0.0222	0.031	0.054	2.402	2.338	2.414	1.738
11950	3000	13500	0.0227	0.0233	0.0226	0.031	0.050	2.211	2.152	2.222	1.600
17950	4000	20000	0.0197	0.020196	0.019562	0.027172	0.043	2.206	2.148	2.217	1.596

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-2-3 Np-237 β 線有限時間照射崩壊熱(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)					C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	64	0.0393	0.0390	0.0438	0.0190	0.0770	1.9588	1.9775	1.7591	4.0447
25	10	80	0.0393	0.0389	0.0437	0.0190	0.0847	2.1568	2.1774	1.9370	4.4537
45	10	100	0.0285	0.0282	0.0317	0.0138	0.0608	2.1362	2.1566	1.9185	4.4111
75	20	135	0.0321	0.0318	0.0357	0.0155	0.0802	2.5009	2.5247	2.2460	5.1641
115	40	185	0.038	0.038	0.042	0.0185	0.1048	2.7492	2.7755	2.4690	5.6771
195	60	275	0.0335	0.0332	0.0373	0.0162	0.0953	2.8407	2.8678	2.5512	5.8661
315	80	405	0.0260	0.0258	0.0290	0.0126	0.0822	3.1588	3.1890	2.8369	6.5230
495	100	595	0.0199	0.0197	0.0222	0.0097	0.0695	3.4882	3.5216	3.1328	7.2031
795	200	945	0.026	0.025	0.028	0.0124	0.0883	3.4607	3.4937	3.1080	7.1465
1395	400	1645	0.031	0.030	0.034	0.0148	0.0981	3.2012	3.2318	2.8750	6.6105
2195	500	2495	0.022	0.022	0.024	0.0106	0.0733	3.3350	3.3669	2.9951	6.8864
3195	600	3545	0.0165	0.0164	0.0184	0.0080	0.0537	3.2446	3.2754	2.9139	6.6998
4350	800	4800	0.0161	0.0160	0.0179	0.0078	0.0456	2.8311	2.8583	2.5427	5.8463
5950	1000	6500	0.013351	0.013225	0.014866	0.0064657	0.0365	2.7327	2.7587	2.4542	5.6427
7950	2000	9000	0.023554	0.023331	0.026227	0.011406	0.0469	1.9909	2.0099	1.7880	4.1113
11950	3000	13500	0.026437	0.026186	0.029436	0.012802	0.0433	1.6390	1.6547	1.4720	3.3846
17950	4000	20000	0.031456	0.031159	0.035026	0.015233	0.0378	1.2004	1.2118	1.0780	2.4787

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-2-4 Np-237 β 線有限時間照射崩壊熱(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)					C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	264	0.0226	0.0219	0.0275	0.0158	0.0236	1.0442	1.0751	0.8572	1.4900
25	10	280	0.0292	0.0283	0.0356	0.0205	0.0294	1.0073	1.0372	0.8270	1.4374
45	10	300	0.0229	0.0223	0.0279	0.0161	0.0235	1.0245	1.0549	0.8411	1.4620
75	20	335	0.0345	0.0335	0.0420	0.0242	0.0357	1.0348	1.0655	0.8496	1.4767
115	40	385	0.0503	0.0488	0.0612	0.0352	0.0543	1.0801	1.1121	0.8867	1.5413
195	60	475	0.0508	0.0493	0.0619	0.0356	0.0589	1.1597	1.1940	0.9520	1.6548
315	80	605	0.0455	0.0442	0.0554	0.0319	0.0582	1.2778	1.3157	1.0491	1.8235
495	100	795	0.0381	0.0370	0.0465	0.0267	0.0540	1.4164	1.4584	1.1628	2.0211
795	200	1145	0.0469	0.0456	0.057	0.0329	0.0737	1.5705	1.6171	1.2894	2.2411
1395	400	1845	0.047	0.046	0.058	0.0331	0.0863	1.8284	1.8826	1.5010	2.6090
2195	500	2695	0.0327	0.0318	0.040	0.0229	0.0663	2.0249	2.0850	1.6624	2.8896
3195	600	3745	0.0236	0.0229	0.0287	0.0165	0.0496	2.1058	2.1682	1.7288	3.0050
4350	800	5000	0.0213	0.0207	0.0259	0.0149	0.0430	2.0186	2.0785	1.6572	2.8805
5950	1000	6700	0.0174	0.0169	0.021	0.0122	0.0350	2.0062	2.0657	1.6470	2.8627
7950	2000	9200	0.025	0.0242	0.030	0.0175	0.0456	1.8296	1.8838	1.5021	2.6108
11950	3000	13700	0.026	0.0251	0.031	0.0181	0.0426	1.6502	1.6992	1.3548	2.3548
17950	4000	20200	0.025	0.0244	0.031	0.0176	0.0374	1.4866	1.5306	1.2204	2.1214

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-3-1 U-235 γ 線有限時間照射崩壊熱(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)						C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	19	0.204	0.205	0.198	0.273	0.213	0.209	1.03	1.02	1.06	0.77
25	10	35	0.182	0.183	0.177	0.244	0.195	0.189	1.04	1.03	1.07	0.77
45	10	55	0.115	0.115	0.112	0.154	0.126	0.122	1.06	1.06	1.09	0.79
75	20	90	0.137	0.138	0.133	0.184	0.150	0.147	1.07	1.07	1.10	0.80
115	40	140	0.169	0.169	0.164	0.226	0.180	0.176	1.05	1.04	1.07	0.78
195	60	230	0.131	0.132	0.128	0.176	0.146	0.142	1.08	1.08	1.11	0.81
315	80	360	0.103	0.103	0.100	0.138	0.116	0.110	1.07	1.07	1.10	0.80
495	100	550	0.0805	0.0808	0.0784	0.1078	0.0916	0.0876	1.09	1.08	1.12	0.81
795	200	900	0.101	0.101	0.0984	0.135	0.115	0.110	1.09	1.08	1.12	0.81
1395	400	1600	0.118	0.119	0.115	0.159	0.132	0.129	1.09	1.08	1.12	0.81
2195	500	2450	0.0969	0.0973	0.0943	0.130	0.103	0.104	1.08	1.07	1.11	0.80
3195	600	3500	0.0750	0.0753	0.0730	0.100	0.0807	0.0837	1.12	1.11	1.15	0.83

* 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(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)						C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	秋山	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
70	40	140	0.221	0.230	0.208	0.281	0.195	0.186	0.84	0.81	0.89	0.66
150	60	230	0.156	0.162	0.147	0.198	0.151	0.146	0.93	0.90	0.99	0.74
270	80	360	0.118	0.122	0.111	0.150	0.116	0.111	0.94	0.91	1.01	0.74
450	100	550	0.0938	0.0975	0.0881	0.119	0.0924	0.0879	0.94	0.90	1.00	0.74
750	200	900	0.116	0.121	0.109	0.147	0.114	0.110	0.95	0.91	1.01	0.75
1350	400	1600	0.132	0.137	0.124	0.167	0.129	0.129	0.98	0.94	1.04	0.77
2150	500	2450	0.102	0.106	0.0962	0.130	0.103	0.104	1.02	0.98	1.08	0.80
3150	600	3500	0.0803	0.0834	0.0754	0.102	0.0822	0.0837	1.04	1.00	1.11	0.82
4350	800	4800	0.0724	0.0752	0.0680	0.0919	0.0746	0.0762	1.05	1.01	1.12	0.83
5950	1000	6500	0.0605	0.0628	0.0568	0.0767	0.0627	0.0646	1.07	1.03	1.14	0.84
7950	2000	9000	0.0782	0.0812	0.0734	0.0992	0.0808	0.0830	1.06	1.02	1.13	0.84
11950	3000	13500	0.0643	0.0668	0.0604	0.0816	0.0659	0.0678	1.05	1.02	1.12	0.83
17950	4000	20000	0.0464	0.0482	0.0436	0.0589	0.0461	0.0481	1.04	1.00	1.10	0.82

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-3-3 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱(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)					C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	64	0.0683	0.0677	0.0761	0.0331	0.0739	1.08	1.09	0.97	2.23
25	10	80	0.0864	0.0856	0.0962	0.0419	0.0865	1.00	1.01	0.90	2.07
45	10	100	0.0629	0.0623	0.0700	0.0305	0.0644	1.02	1.03	0.92	2.11
75	20	135	0.0841	0.0833	0.0936	0.0407	0.0879	1.05	1.06	0.94	2.16
115	40	185	0.120	0.119	0.133	0.0580	0.117	0.98	0.99	0.88	2.02
195	60	275	0.110	0.109	0.122	0.0531	0.106	0.97	0.98	0.87	2.00
315	80	405	0.0957	0.0947	0.1065	0.0463	0.0912	0.95	0.96	0.86	1.97
495	100	595	0.0835	0.0827	0.0930	0.0405	0.0779	0.93	0.94	0.84	1.93
795	200	945	0.109	0.108	0.122	0.0529	0.102	0.94	0.95	0.84	1.94
1395	400	1645	0.136	0.135	0.152	0.0661	0.122	0.89	0.90	0.80	1.85
2195	500	2495	0.109	0.108	0.121	0.0528	0.0984	0.90	0.91	0.81	1.86
3195	600	3545	0.0881	0.0872	0.0981	0.0427	0.0781	0.89	0.90	0.80	1.83
4350	800	4800	0.0849	0.0841	0.0945	0.0411	0.0709	0.84	0.84	0.75	1.72

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-3-4 Np-237 γ 線有限時間照射崩壊熱(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)					C/E値			
			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	総和計算値	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
11	6	264	0.0245	0.0237	0.0290	0.0179	0.0238	0.97	1.01	0.82	1.33
25	10	280	0.0302	0.0292	0.0358	0.0220	0.0312	1.03	1.07	0.87	1.42
45	10	300	0.0238	0.0230	0.0282	0.0174	0.0255	1.07	1.11	0.91	1.47
75	20	335	0.0378	0.0366	0.0448	0.0276	0.0395	1.04	1.08	0.88	1.43
115	40	385	0.0598	0.0578	0.0709	0.0436	0.0606	1.01	1.05	0.85	1.39
195	60	475	0.0667	0.0646	0.0791	0.0487	0.0657	0.99	1.02	0.83	1.35
315	80	605	0.0672	0.0650	0.0797	0.0491	0.0652	0.97	1.00	0.82	1.33
495	100	795	0.0628	0.0608	0.0745	0.0459	0.0616	0.98	1.01	0.83	1.34
795	200	1145	0.0896	0.0867	0.106	0.0654	0.0872	0.97	1.01	0.82	1.33
1395	400	1845	0.111	0.107	0.131	0.0808	0.109	0.99	1.02	0.83	1.35
2195	500	2695	0.0935	0.0904	0.111	0.0682	0.0904	0.97	1.00	0.82	1.33
3195	600	3745	0.0798	0.0772	0.0946	0.0582	0.0731	0.92	0.95	0.77	1.26
4350	800	5000	0.0772	0.0747	0.0915	0.0563	0.0673	0.87	0.90	0.74	1.19
5950	1000	6700	0.0710	0.0687	0.084	0.0518	0.0566	0.80	0.82	0.67	1.09
7950	2000	9200	0.101	0.0973	0.119	0.0734	0.0722	0.72	0.74	0.61	0.98
11950	3000	13700	0.102	0.0990	0.121	0.0747	0.0592	0.58	0.60	0.49	0.79
17950	4000	20200	0.103	0.0997	0.122	0.0752	0.0432	0.42	0.43	0.35	0.57

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-4-1 U-235, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間10秒)

T _R (s)										
10		T _W (s)	T _C (s)	T _f (S)	T _F (S)	f _{cal} × T _f (MeV/fission)	F _{cal} × T _F (MeV/fission)	f _{cal} (MeV/s/fission)	F _{cal} /T _R (MeV/s/fission)	η
11	6	19	14	7.50E-01	5.69E+00	3.95E-02	4.07E-02	0.971		
25	10	35	30	6.79E-01	5.88E+00	1.94E-02	1.96E-02	0.991		
45	10	55	50	6.45E-01	5.88E+00	1.17E-02	1.18E-02	0.997		
75	20	90	85	5.97E-01	5.65E+00	6.63E-03	6.64E-03	0.999		
115	40	140	135	5.33E-01	5.14E+00	3.81E-03	3.81E-03	0.999		
195	60	230	225	4.66E-01	4.56E+00	2.03E-03	2.03E-03	1.000		
315	80	360	355	4.32E-01	4.26E+00	1.20E-03	1.20E-03	1.000		
495	100	550	545	4.22E-01	4.18E+00	7.68E-04	7.68E-04	1.000		
795	200	900	895	4.23E-01	4.21E+00	4.70E-04	4.70E-04	1.000		
1395	400	1600	1595	4.16E-01	4.15E+00	2.60E-04	2.60E-04	1.000		
2195	500	2450	2445	3.85E-01	3.84E+00	1.57E-04	1.57E-04	1.000		
3195	600	3500	3495	3.40E-01	3.40E+00	9.73E-05	9.73E-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4-4-2 U-235, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数 (照射時間100秒)

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	5.33E-01	3.65E+01	3.81E-03	4.06E-03	0.938
150	60	230	180	4.66E-01	3.74E+01	2.03E-03	2.08E-03	0.976
270	80	360	310	4.32E-01	3.75E+01	1.20E-03	1.21E-03	0.992
450	100	550	500	4.22E-01	3.85E+01	7.68E-04	7.70E-04	0.997
750	200	900	850	4.23E-01	4.00E+01	4.70E-04	4.70E-04	0.999
1350	400	1600	1550	4.16E-01	4.03E+01	2.60E-04	2.60E-04	1.000
2150	500	2450	2400	3.85E-01	3.77E+01	1.57E-04	1.57E-04	1.000
3150	600	3500	3450	3.40E-01	3.36E+01	9.73E-05	9.73E-05	1.000
4350	800	4800	4750	2.98E-01	2.95E+01	6.22E-05	6.22E-05	1.000
5950	1000	6500	6450	2.65E-01	2.63E+01	4.08E-05	4.08E-05	1.000
7950	2000	9000	8950	2.41E-01	2.40E+01	2.68E-05	2.68E-05	1.000
11950	3000	13500	13450	2.26E-01	2.25E+01	1.67E-05	1.67E-05	1.000
17950	4000	20000	19950	2.17E-01	2.16E+01	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 $T_F = T_W + 1/2 T_C$ 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4-4-3 Np-237, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間100秒)

T _R (s)										
100		T _w (s)	T _c (s)	T _f (S)	T _F (S)	f _{cal} × T _f (MeV/fission)	F _{cal} × T _F (MeV/fission)	f _{cal} (MeV/s/fission)	F _{cal} /T _R (MeV/s/fission)	η
11	6	64	14	5.82E-01	1.80E+01	9.09E-03	1.28E-02	0.708		
25	10	80	30	5.66E-01	2.54E+01	7.08E-03	8.47E-03	0.836		
45	10	100	50	5.44E-01	3.04E+01	5.44E-03	6.08E-03	0.895		
75	20	135	85	5.07E-01	3.41E+01	3.75E-03	4.01E-03	0.936		
115	40	185	135	4.67E-01	3.54E+01	2.53E-03	2.62E-03	0.964		
195	60	275	225	4.30E-01	3.57E+01	1.56E-03	1.59E-03	0.984		
315	80	405	355	4.13E-01	3.65E+01	1.02E-03	1.03E-03	0.994		
495	100	595	545	4.13E-01	3.79E+01	6.94E-04	6.95E-04	0.998		
795	200	945	895	4.17E-01	3.95E+01	4.41E-04	4.41E-04	0.999		
1395	400	1645	1595	4.03E-01	3.91E+01	2.45E-04	2.45E-04	1.000		
2195	500	2495	2445	3.66E-01	3.58E+01	1.46E-04	1.47E-04	1.000		
3195	600	3545	3495	3.17E-01	3.13E+01	8.95E-05	8.95E-05	1.000		
4350	800	4800	4750	2.74E-01	2.71E+01	5.70E-05	5.70E-05	1.000		
5950	1000	6500	6450	2.37E-01	2.35E+01	3.65E-05	3.65E-05	1.000		
7950	2000	9000	8950	2.11E-01	2.10E+01	2.34E-05	2.34E-05	1.000		
11950	3000	13500	13450	1.95E-01	1.94E+01	1.44E-05	1.44E-05	1.000		
17950	4000	20000	19950	1.89E-01	1.88E+01	9.44E-06	9.44E-06	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4-4-4 Np-237, β 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間500秒)

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	4.33E-01	2.75E+01	1.64E-03	3.93E-03	0.418
25	10	280	30	4.29E-01	4.41E+01	1.53E-03	2.94E-03	0.521
45	10	300	50	4.25E-01	5.87E+01	1.42E-03	2.35E-03	0.602
75	20	335	85	4.19E-01	7.58E+01	1.25E-03	1.78E-03	0.701
115	40	385	135	4.15E-01	9.16E+01	1.08E-03	1.36E-03	0.793
195	60	475	225	4.12E-01	1.10E+02	8.67E-04	9.82E-04	0.883
315	80	605	355	4.13E-01	1.29E+02	6.82E-04	7.27E-04	0.939
495	100	795	545	4.16E-01	1.47E+02	5.23E-04	5.40E-04	0.968
795	200	1145	895	4.16E-01	1.65E+02	3.63E-04	3.69E-04	0.985
1395	400	1845	1595	3.95E-01	1.72E+02	2.14E-04	2.16E-04	0.993
2195	500	2695	2445	3.56E-01	1.62E+02	1.32E-04	1.33E-04	0.996
3195	600	3745	3495	3.09E-01	1.45E+02	8.25E-05	8.27E-05	0.997
4350	800	5000	4750	2.68E-01	1.28E+02	5.36E-05	5.37E-05	0.998
5950	1000	6700	6450	2.34E-01	1.13E+02	3.49E-05	3.50E-05	0.999
7950	2000	9200	8950	2.10E-01	1.02E+02	2.28E-05	2.28E-05	1.000
11950	3000	13700	13450	1.95E-01	9.56E+01	1.42E-05	1.42E-05	1.000
17950	4000	20200	19950	1.89E-01	9.32E+01	9.34E-06	9.34E-06	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4-4-5 U-235, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間10秒)

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4-4-6 U-235, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間100秒)

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 ; 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 $T_F = T_W + 1/2 T_C$ 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4-4-7 Np-237, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間100秒)

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4-4-8 Np-237, γ 線崩壊熱の総和計算値と補正係数(照射時間500秒)

T _R (s)										
500		T _W (s)	T _C (s)	T _F (S)	T _F (S)	f _{cal} × T _F (MeV/fission)	F _{cal} × 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4-5-1 U-235 β 線瞬時照射崩壊熱(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						補正係数	総和計算値 JNDC-V2	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	0.601	0.576	0.479	0.834	0.760	0.0361	0.971	0.750	1.25	1.30	1.57	0.90
35	0.510	0.489	0.407	0.708	0.690	0.0301	0.991	0.679	1.33	1.39	1.67	0.96
55	0.429	0.411	0.342	0.595	0.627	0.02805	0.997	0.645	1.50	1.57	1.89	1.08
90	0.346	0.331	0.276	0.480	0.582	0.0252	0.999	0.597	1.73	1.80	2.17	1.24
140	0.276	0.265	0.220	0.383	0.540	0.0224	0.999	0.533	1.93	2.02	2.42	1.39
230	0.217	0.208	0.173	0.301	0.481	0.02047	1.000	0.466	2.15	2.24	2.69	1.55
360	0.197	0.189	0.157	0.274	0.439	0.01764	1.000	0.432	2.19	2.29	2.75	1.58
550	0.175	0.168	0.139	0.243	0.435	0.01815	1.000	0.422	2.41	2.52	3.03	1.74
900	0.173	0.166	0.138	0.240	0.422	0.0162	1.000	0.423	2.44	2.55	3.06	1.76
1600	0.177	0.169	0.141	0.245	0.416	0.01568	1.000	0.416	2.35	2.46	2.95	1.70
2450	0.182	0.175	0.145	0.253	0.375	0.01274	1.000	0.385	2.11	2.20	2.65	1.52
3500	0.158	0.152	0.126	0.220	0.329	0.01085	1.000	0.340	2.15	2.24	2.70	1.55

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-5-2 U-235 β 線瞬時照射崩壊熱(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				補正係数	総和計算値 JNDC-V2	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*			Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
140	0.444	0.456	0.441	0.613	0.938	0.533	1.20	1.17	1.21	0.87
230	0.413	0.425	0.411	0.571	0.976	0.466	1.13	1.10	1.13	0.82
360	0.342	0.351	0.340	0.473	0.992	0.432	1.26	1.23	1.27	0.91
550	0.300	0.308	0.299	0.415	0.997	0.422	1.41	1.37	1.41	1.02
900	0.261	0.268	0.260	0.361	0.999	0.423	1.62	1.58	1.63	1.17
1600	0.220	0.226	0.219	0.304	1.000	0.416	1.89	1.84	1.90	1.37
2450	0.185	0.190	0.184	0.255	1.000	0.385	2.08	2.03	2.09	1.51
3500	0.154	0.158	0.153	0.212	1.000	0.340	2.21	2.16	2.23	1.60
4800	0.135	0.138	0.134	0.186	1.000	0.298	2.22	2.16	2.23	1.60
6500	0.118	0.121	0.118	0.163	1.000	0.265	2.24	2.18	2.25	1.62
9000	0.100	0.103	0.100	0.139	1.000	0.241	2.40	2.34	2.41	1.74
13500	0.102	0.105	0.101	0.141	1.000	0.226	2.21	2.15	2.22	1.60
20000	0.098	0.101	0.098	0.136	1.000	0.217	2.21	2.15	2.22	1.60

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-5-3 Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱(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	補正係数	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	JNDC-V2		Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*
64	0.297	0.294	0.331	0.144	0.582	0.708	1.96	1.98	1.76	4.04
80	0.262	0.260	0.292	0.127	0.566	0.836	2.16	2.18	1.94	4.45
100	0.255	0.252	0.284	0.123	0.544	0.895	2.14	2.16	1.92	4.41
135	0.203	0.201	0.226	0.098	0.507	0.936	2.50	2.52	2.25	5.16
185	0.170	0.168	0.189	0.082	0.467	0.964	2.75	2.78	2.47	5.68
275	0.151	0.150	0.169	0.073	0.430	0.984	2.84	2.87	2.55	5.87
405	0.131	0.130	0.146	0.063	0.413	0.994	3.16	3.19	2.84	6.52
595	0.118	0.117	0.132	0.057	0.413	0.998	3.49	3.52	3.13	7.20
945	0.120	0.119	0.134	0.058	0.417	0.999	3.46	3.49	3.11	7.15
1645	0.126	0.125	0.140	0.061	0.403	1.000	3.20	3.23	2.88	6.61
2495	0.110	0.109	0.122	0.053	0.366	1.000	3.34	3.37	3.00	6.89
3545	0.098	0.097	0.109	0.047	0.317	1.000	3.24	3.28	2.91	6.70
4800	0.097	0.096	0.108	0.047	0.274	1.000	2.83	2.86	2.54	5.85

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-5-4 Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱(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	0.415	0.403	0.505	0.290	0.433	0.418	1.04	1.08	0.86	1.49
280	0.426	0.413	0.518	0.298	0.429	0.521	1.01	1.04	0.83	1.44
300	0.414	0.402	0.505	0.290	0.425	0.602	1.02	1.05	0.84	1.46
335	0.405	0.393	0.493	0.284	0.419	0.701	1.03	1.07	0.85	1.48
385	0.384	0.373	0.467	0.269	0.415	0.793	1.08	1.11	0.89	1.54
475	0.355	0.345	0.432	0.249	0.412	0.883	1.16	1.19	0.95	1.65
605	0.323	0.314	0.394	0.226	0.413	0.939	1.28	1.32	1.05	1.82
795	0.294	0.285	0.358	0.206	0.416	0.968	1.42	1.46	1.16	2.02
1145	0.265	0.257	0.322	0.185	0.416	0.985	1.57	1.62	1.29	2.24
1845	0.216	0.210	0.263	0.152	0.395	0.993	1.83	1.88	1.50	2.61
2695	0.176	0.171	0.214	0.123	0.356	0.996	2.02	2.09	1.66	2.89
3745	0.147	0.143	0.179	0.103	0.309	0.997	2.11	2.17	1.73	3.00
5000	0.133	0.129	0.162	0.093	0.268	0.998	2.02	2.08	1.66	2.88
6700	0.117	0.113	0.142	0.082	0.234	0.999	2.01	2.07	1.65	2.86
9200	0.115	0.111	0.140	0.080	0.210	1.000	1.83	1.88	1.50	2.61
13700	0.118	0.115	0.144	0.083	0.195	1.000	1.65	1.70	1.35	2.35
20200	0.127	0.123	0.155	0.089	0.189	1.000	1.49	1.53	1.22	2.12

* 核分裂数評価に使用したFP核種

表4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(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	0.630	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4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(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			
	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4-6-3 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱(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	補正係数	C/E値			
	Nb-97*	Nb-97m*	Y-91m*	Xe-135*	JNDC-V2		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4-6-4 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱(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

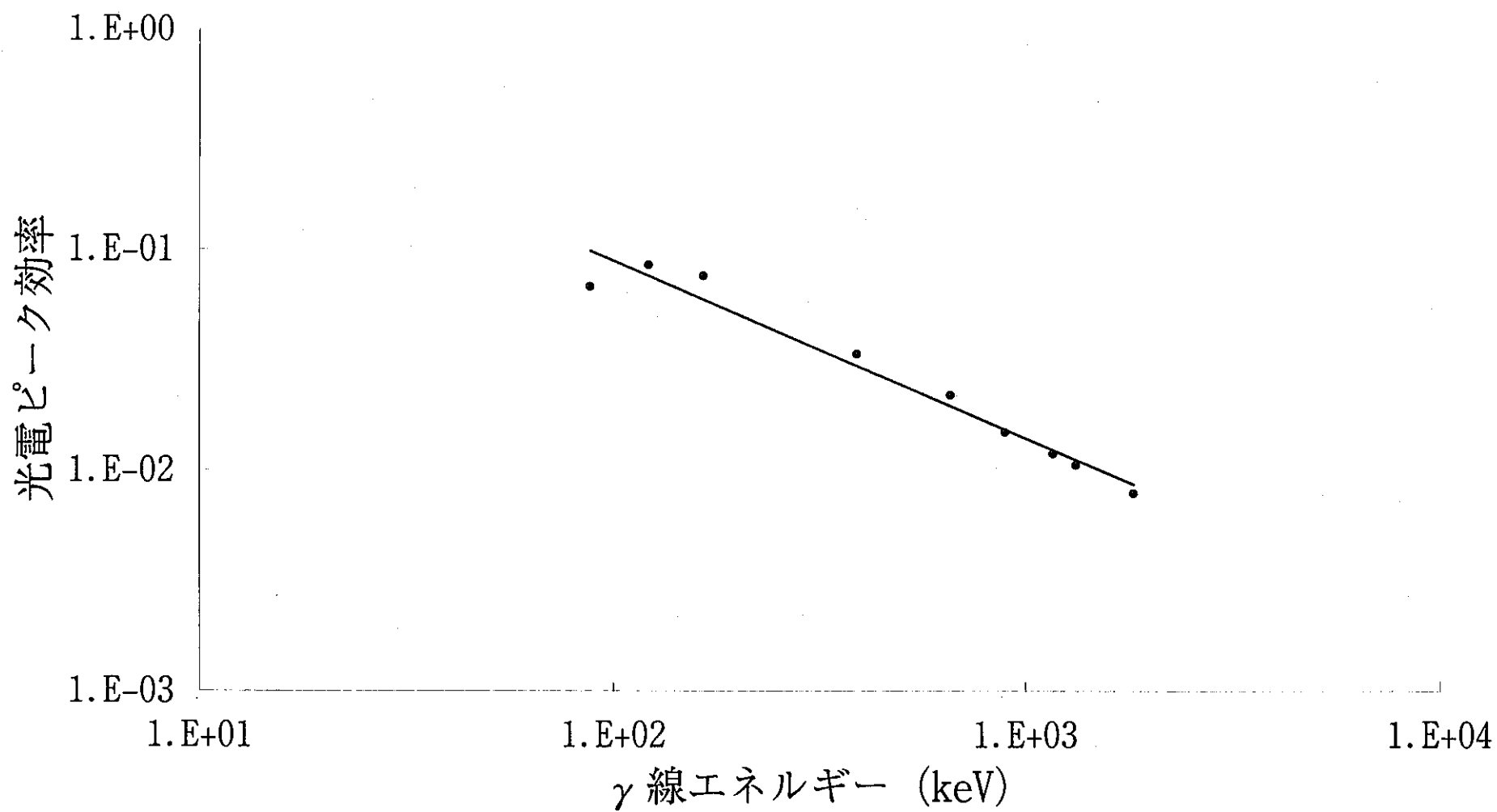


図4-1-1 光電ピーク効率曲線

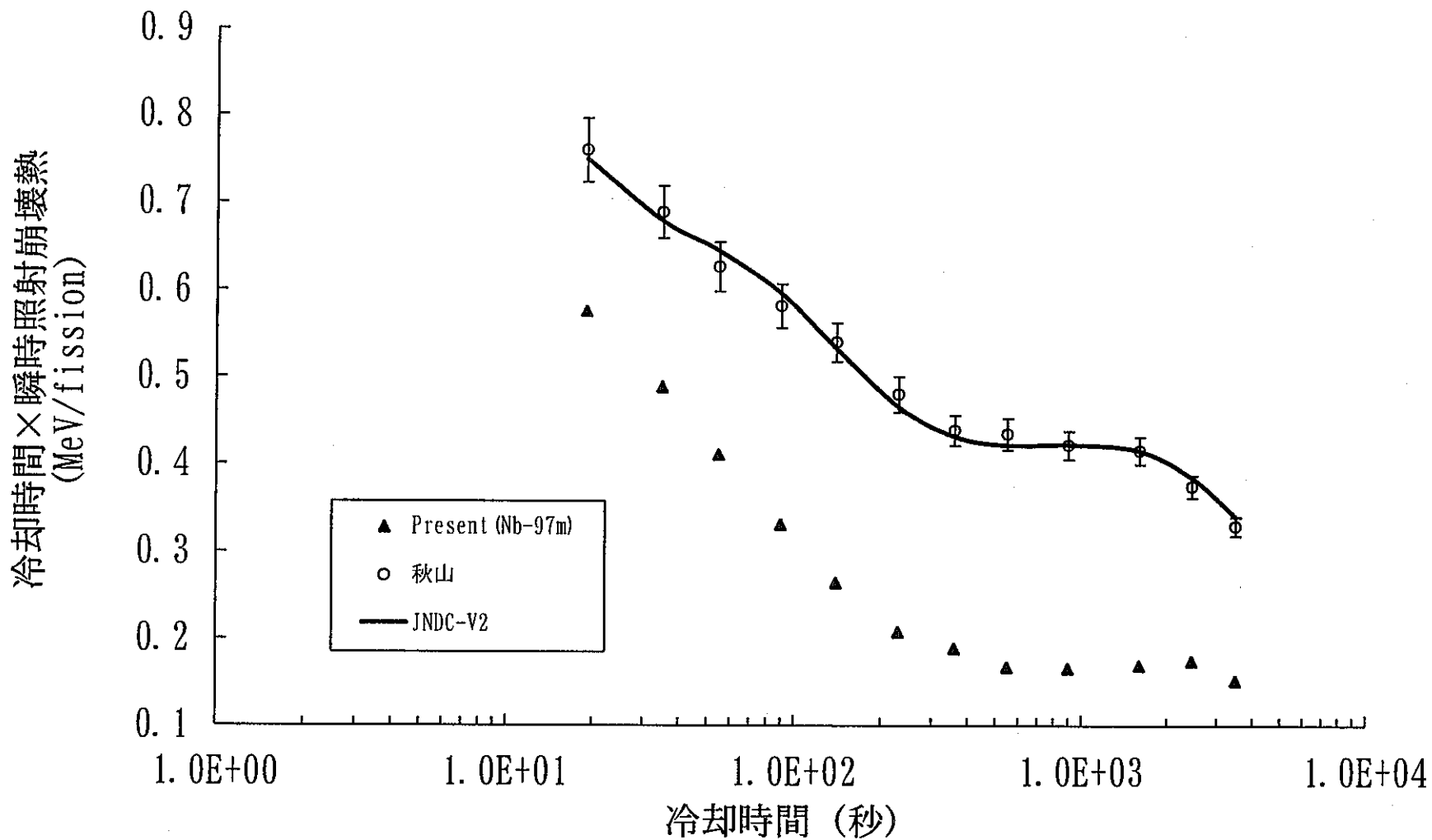


図4-5-1 U-235 β線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力500W, 照射時間10秒)

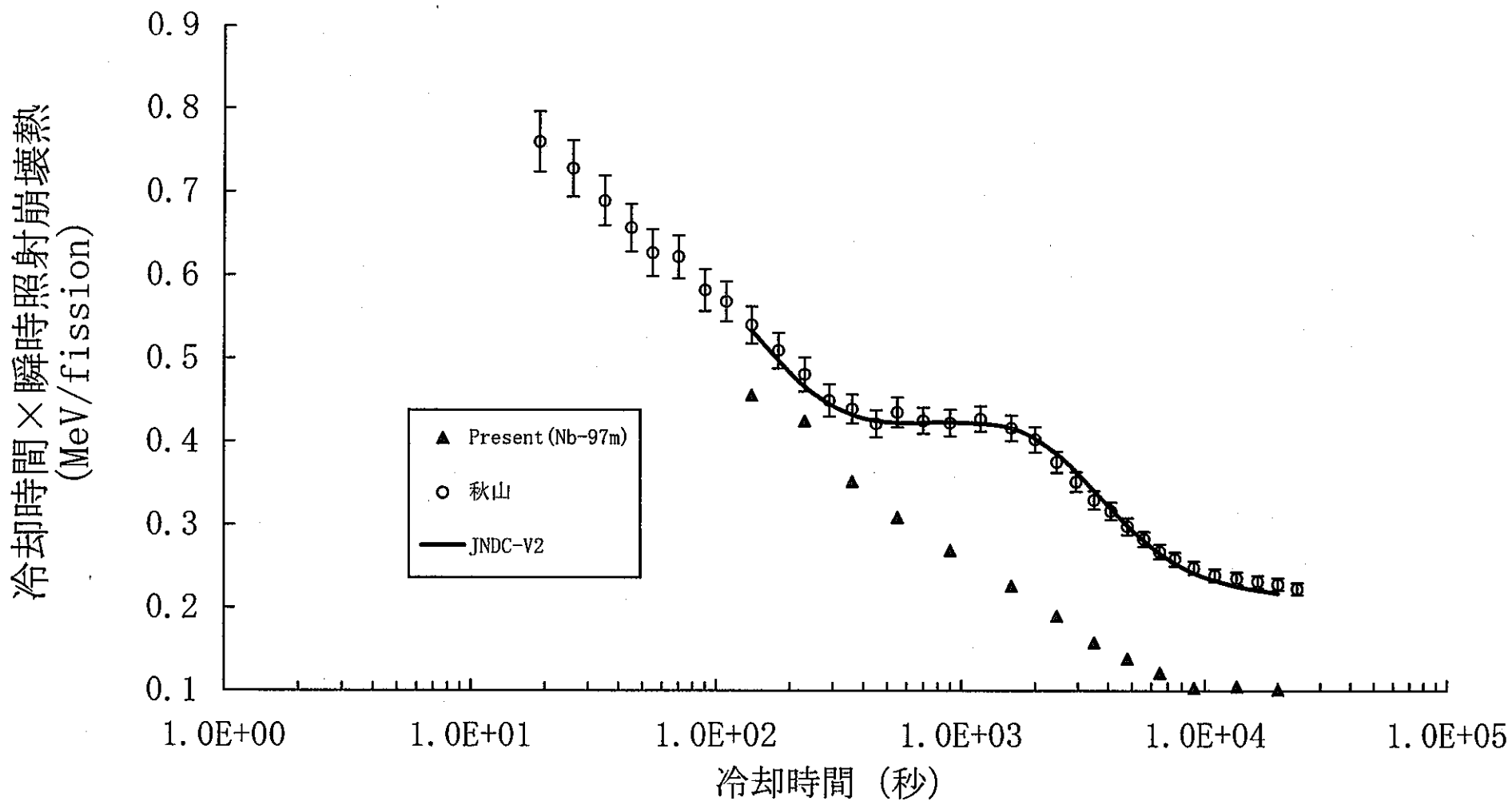


図4-5-2 U-235 β 線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力500W, 照射時間100秒)

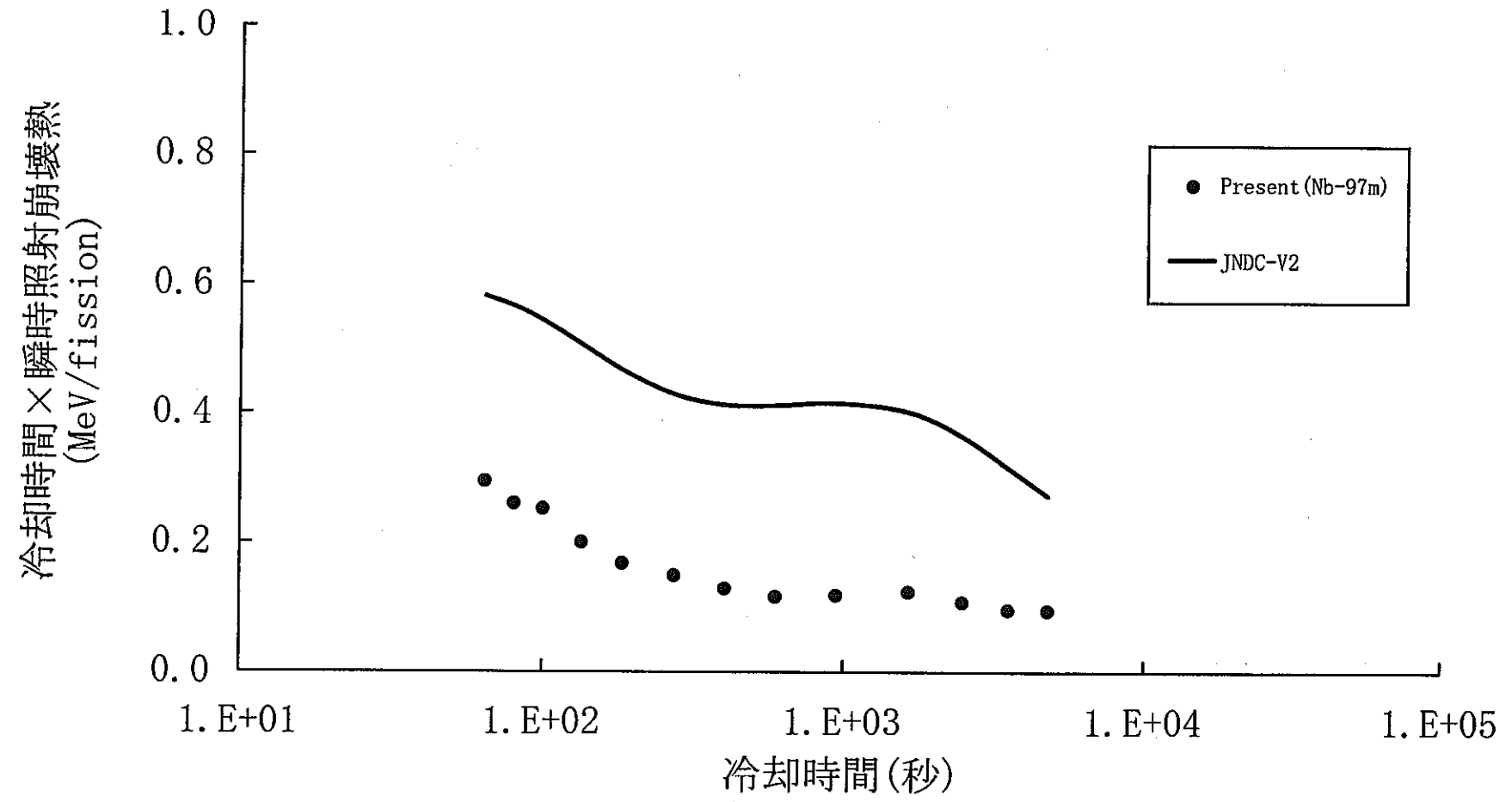


図4-5-3 Np-237 β線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力1900W, 照射時間100秒)

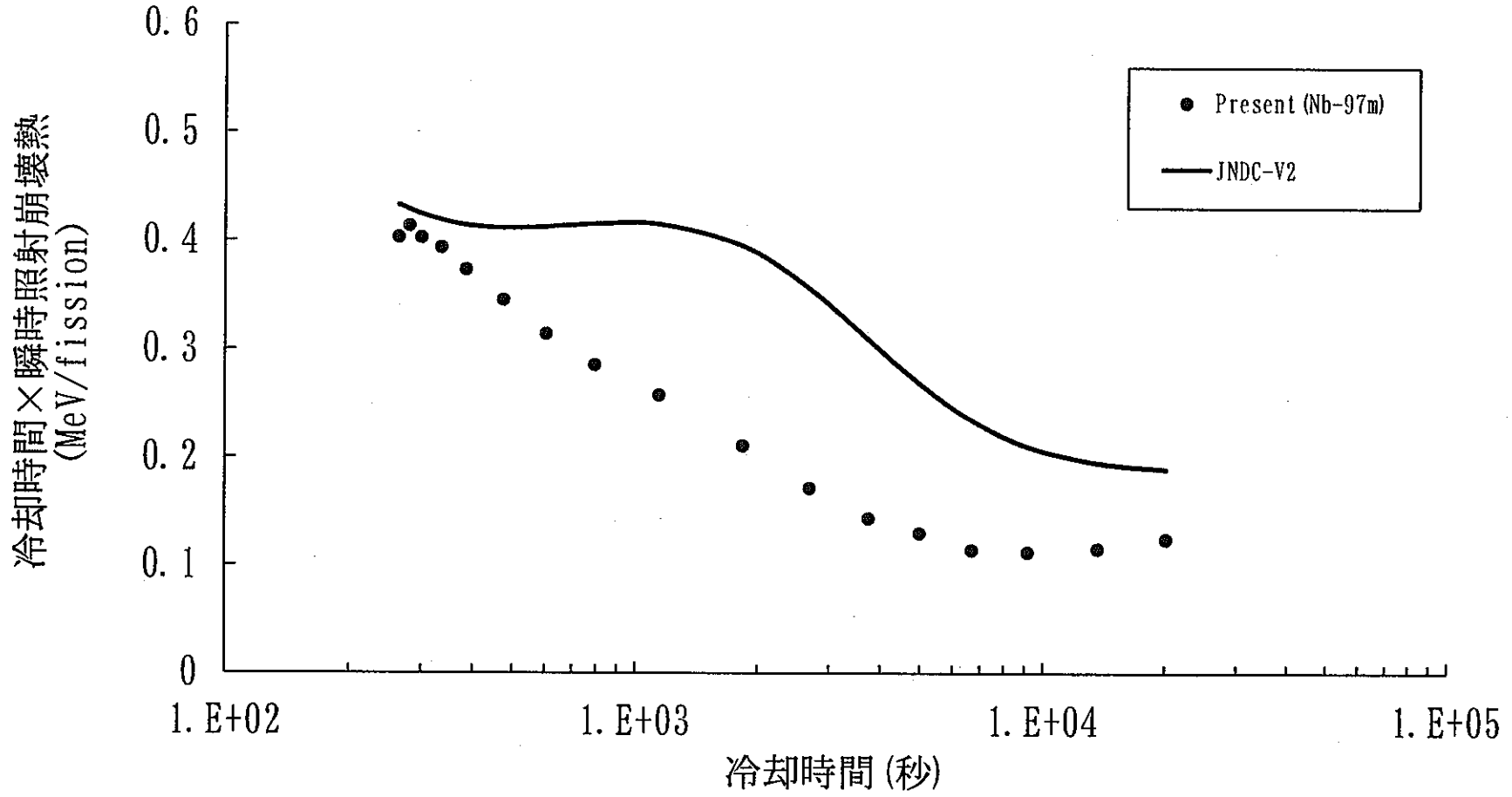


図4-5-4 Np-237 β 線瞬時照射崩壊熱 (原子炉出力1900W, 照射時間500秒)

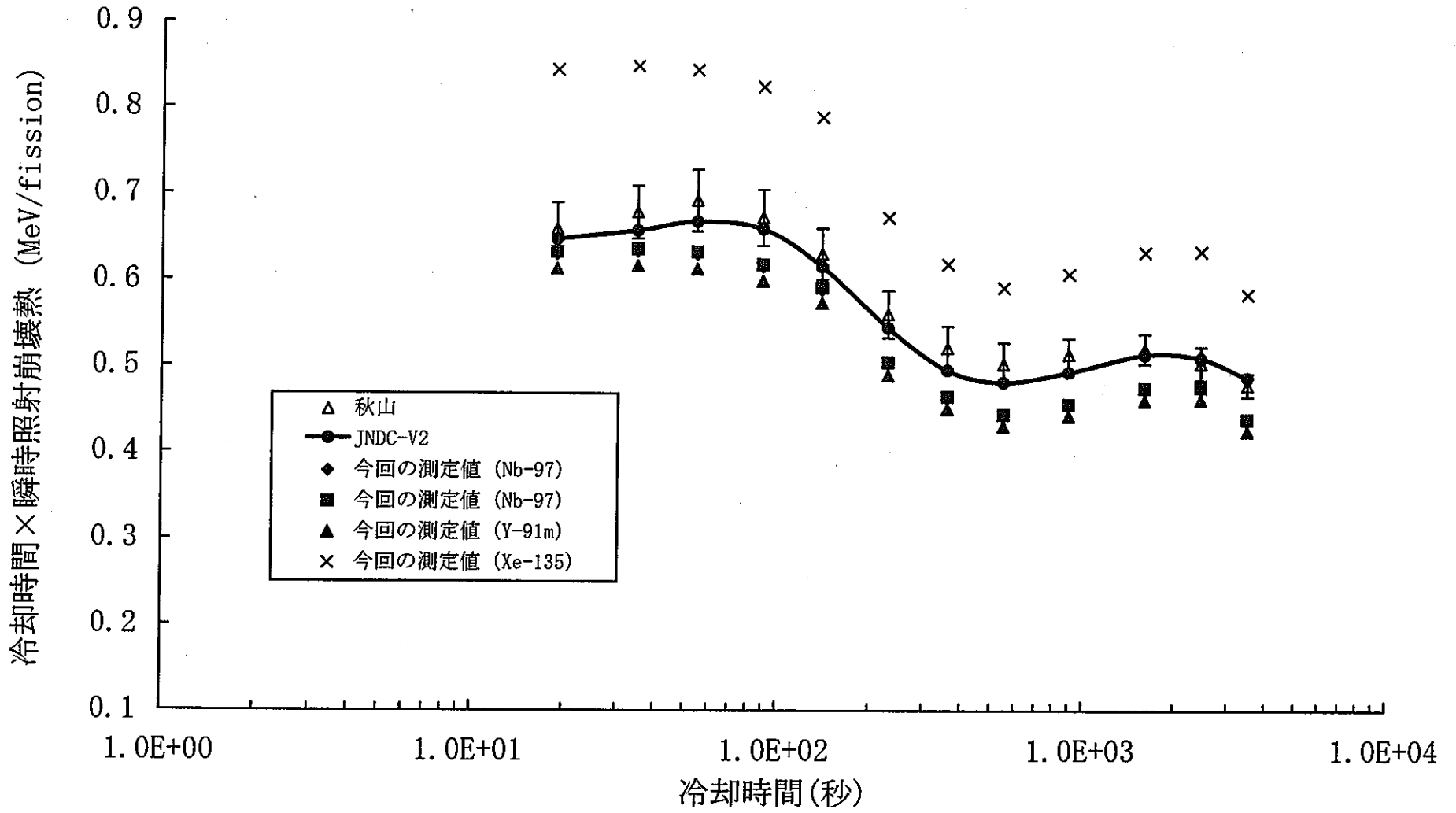


図4-6-1 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力500W, 照射時間10秒)

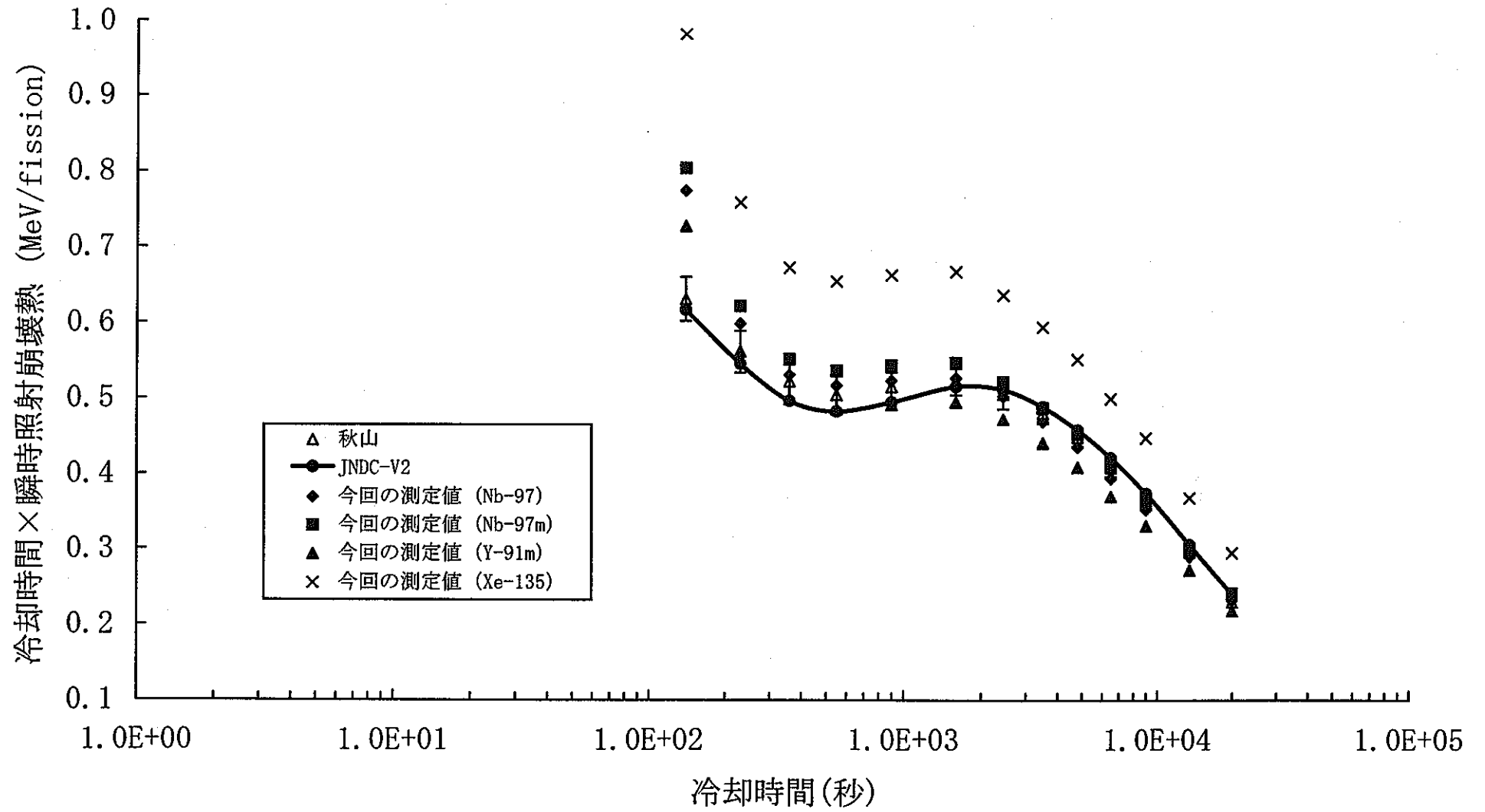


図4-6-2 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力500W, 照射時間100秒)

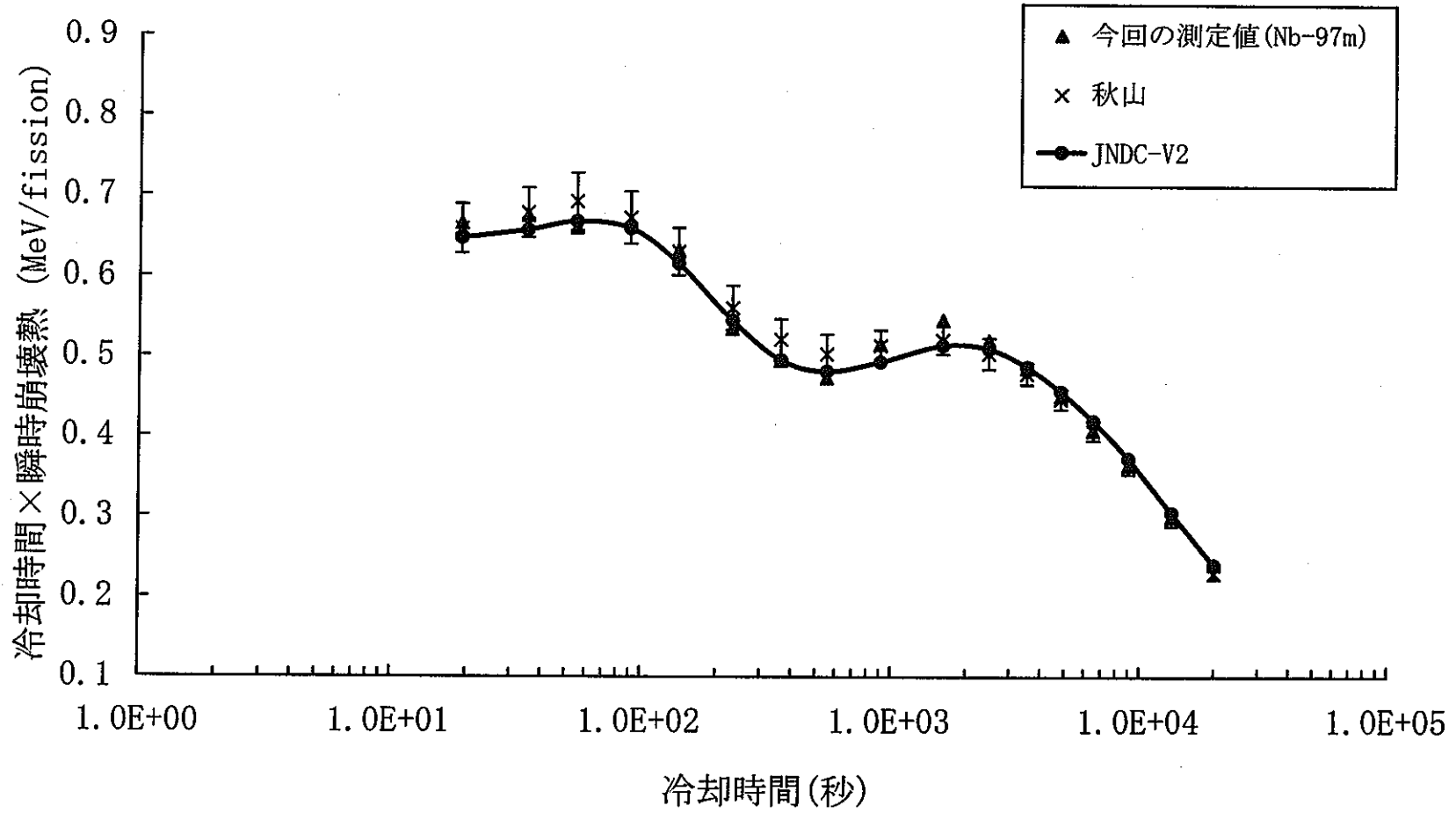


図4-6-3 U-235 γ 線瞬時照射崩壊熱(10秒照射結果+100秒照射結果)

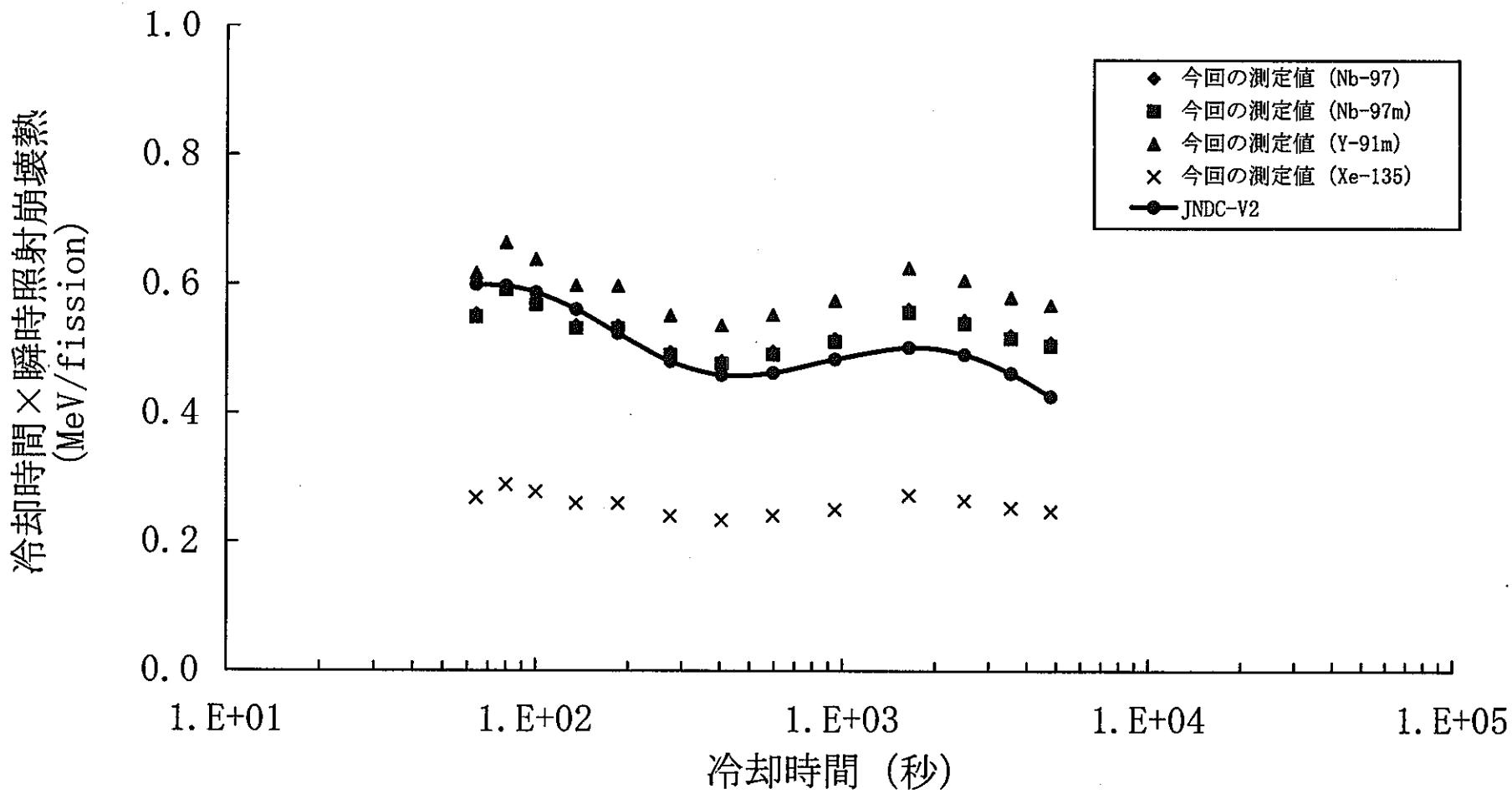


図4-6-4 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力1900W, 照射時間100秒)

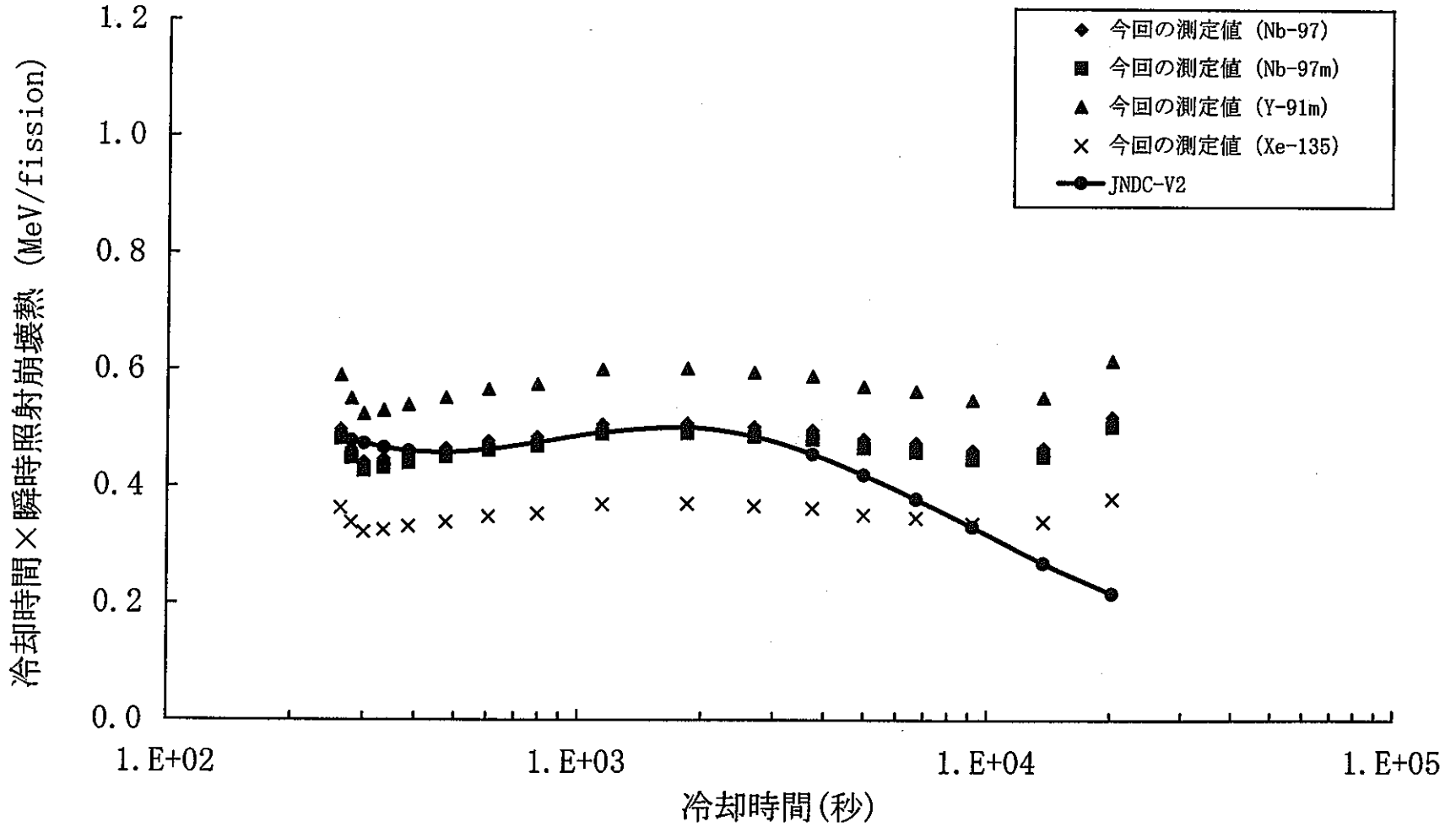


図4-6-5 Np-237 γ 線瞬時照射崩壊熱(原子炉出力1900W, 照射時間500秒)

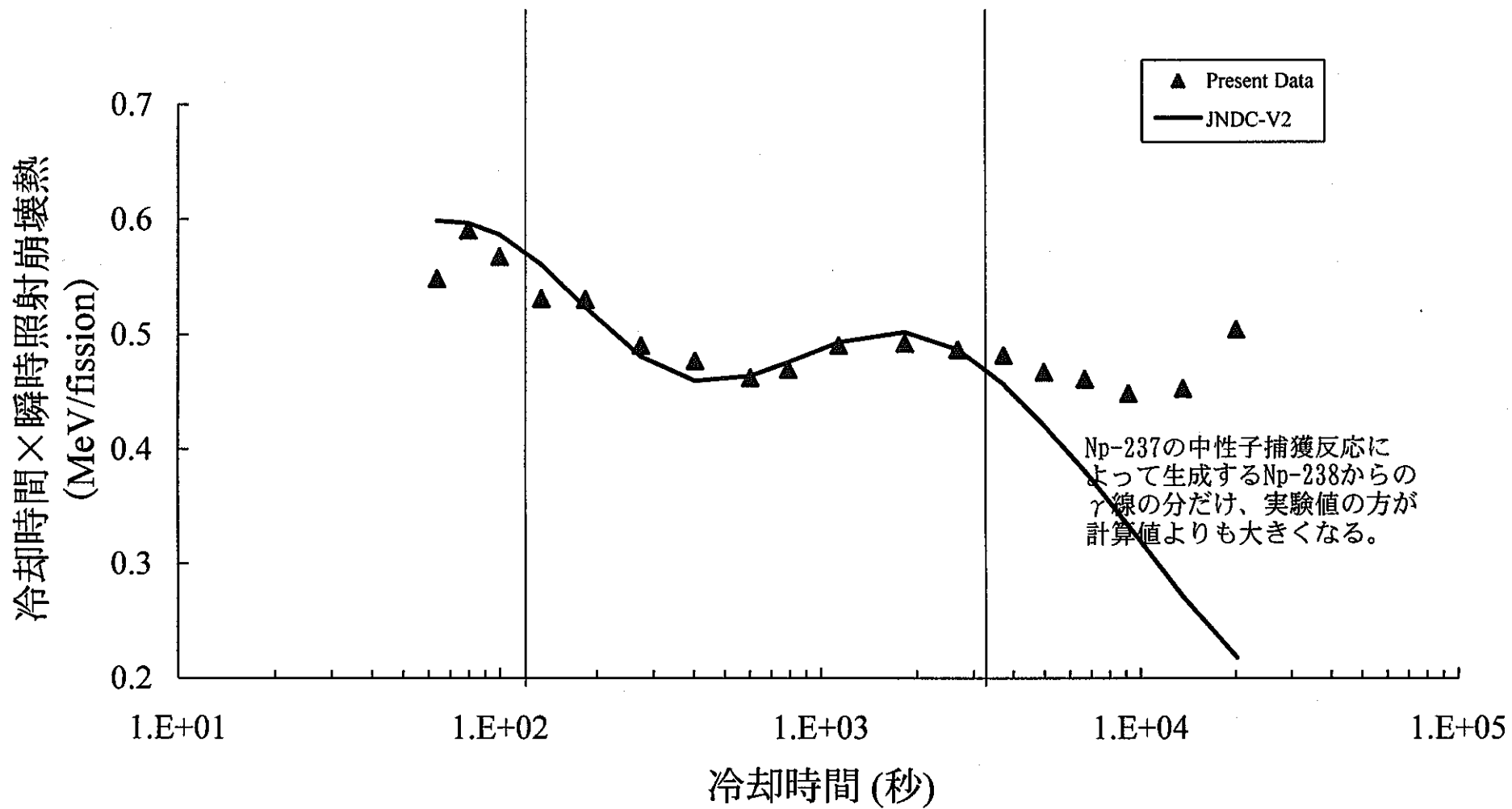


図4-6-6 Np-237 γ線瞬時照射崩壊熱 (100秒照射結果+500秒照射結果)

第5章 考察

4章で示したように、 β 線崩壊熱に関しては、U-235, Np-237共に照射時間が長いデータにおいては、冷却時間が約500秒程度までのデータについて比較的総和計算値と実験値は一致しているが、冷却時間が約500秒～20,000秒の範囲では実験値の方が計算値よりも小さい。そこで実験値と計算値の差を調査した。5.1に詳細を述べる。

また、 γ 線崩壊熱に関してはNp-237の場合のみ、冷却時間が約2,500～20,000秒の範囲で実験値の方が総和計算値よりも大きくなる。この点に関する検討結果を5.2で詳細に述べる。

5.1 β 線崩壊熱に関する考察

照射時間の長いU-235及びNp-237の β 線瞬時照射崩壊熱は、どちらの実験値も冷却時間の短いデータは比較的総和計算値と一致しているが、冷却時間の長い領域では実験値の方が計算値よりも小さく、Np-237の500秒照射データの場合、冷却時間が約500～20,000秒の範囲で実験値の方が小さく、C/E値が最大で1.7となった。実験値と計算値で差が見られる原因を考察するために、各冷却時間領域における崩壊熱のエネルギー分布を図5-1-1～図5-1-3 (U-235)及び図5-1-4～図5-1-6 (Np-237)に示した。横軸はエネルギー (MeV) で、縦軸はエネルギー× β 線束の値をプロットしてある。ここで縦軸の意味を説明しておく。瞬時照射崩壊熱は以下の式で求められる。

$$\frac{1}{T_R} \cdot \frac{1}{n_f} \int_0^{E_{\max}} E \cdot \phi(E) dE \dots \dots (5-1-1)$$

ここで、 T_R :照射時間、 n_f :核分裂数、 E :エネルギー、 $\phi(E)$: β 線束である。

図4-5-3～図4-5-4は、エネルギーと β 線束の積をエネルギーで積分した値に冷却時間をかけたものをプロットしている。図5-1-1～図5-1-6は、積分される前の値を縦軸に取ることで各エネルギー範囲における計算値と実験値の違いを示したものである。

図5-1-1と図5-1-4は実験値と計算値が比較的一致しているケースであるが、これを見ると0～1.5MeV程度までは実験値の方が大きくなるものの、約1.5MeV以上ではよく一致していることがわかる。それに対して実験値と計算値に差が見られる冷却時間領域の結果を比較した図5-1-2, 図5-1-3, 図5-1-5, 図5-1-6を見ると、約1MeV以下の範囲では実験値が大きく、約1～4MeVの範囲では実験値の方が小さいという傾向が見られる。ここで1～4MeVの崩壊熱が全崩壊熱に対してどの程度寄与があるかを見るために、各エネルギー範囲における崩壊熱寄与割合を総和計算より求めた。表5-1-1に結果を示す。1～4MeVの崩壊熱寄与割合は約70%であり、この範囲において実験値の方が計算値よりも小さいことが、崩壊熱全体で見たときの差であることがわかる。ただし、なぜ冷却時間が長くなると実験値の方が計算値よりも小さくなるのかについては、さらに検討が必要である。

続いて「3.2 応答関数」に記載した β 線応答関数の妥当性について述べる。図3-2-5に示したSr-90+Y-90 β 線標準線源を用いた実験値と計算値の比較を見ると約1MeV以下の範囲は実験値の方が大きく、1MeV以上の範囲では実験値の方が小さいという傾向がある。しかし、この点については「3.2 応答関数」で述べたように秋山らの実

験でも同様の傾向があったことから、この影響は無視してアンフォールディング処理を行った。そこで非常に簡易的な方法ではあるが、この影響を評価するために実験値と計算値の比を補正係数として、U-235 や Np-237 のアンフォールディング後スペクトルを補正することを試みた。その結果、全ての実験値に対して 10~15% 程度増加するだけで、崩壊熱カーブの形状が変化するわけではなく、効果は小さいことがわかった。

5.2 Np-237 γ 線崩壊熱のアクチニド崩壊熱寄与の検討

Np-237 γ 線崩壊熱の長冷却時間データ (冷却時間が約 2,500~20,000 秒) が、総和計算値と一致しない理由について検討を行った。照射後の Np-237 γ 線エネルギースペクトルの測定結果を良く観察すると、約 1MeV 付近に γ 線のピークが見られるのに対して、総和計算による γ 線エネルギースペクトルにはこのピークが見られないことがわかった。さらに、この約 1MeV のピークを取り除いて崩壊熱を求めると、冷却時間が最も長い 20,200 秒のデータでは、おおよそ総和計算値と一致することが確認できた。以下に、この約 1MeV の γ 線ピークについて調査・検討を行ったので報告する。

5.2.1 各測定データの確認

約 1MeV 付近に見られる γ 線ピークは、照射後の Np-237 のみに見られるのかどうか調査した。図 5-2-1~図 5-2-8 に照射後 Np-237、照射後 U-235、照射後 Ti 板、照射前 Np-237 (background) の測定結果を示す。横軸はエネルギー (keV)、縦軸は cps (count/sec) で、冷却時間が最も長いデータから順にさかのぼって図示してある。

図 5-1-1 を見ればわかるように、照射後 Np-237 にだけ約 1MeV 付近にピークが見られ、他の 3 つのデータにはピークは見られない。また、図を順に追っていく (冷却時間が最も長いデータから時間をさかのぼって見ていく) と、この約 1MeV のピークが徐々に目立たなくなり、冷却時間が 1,445 秒のデータではほとんど見えなくなっている。総和計算値と測定値に差が見られる冷却時間領域は、約 2,500 秒以降であるので冷却時間が 1,445 秒というデータは、総和計算値と測定値が良く一致しているデータである。

なお、測定日が異なるデータにおいてもこの約 1MeV ピークが確認できることから、今回図示したデータだけに、たまたま見られる現象ではない。

5.2.2 1MeV ピークとその他のピークの減衰比較

図 5-2-1~図 5-2-8 を見る限り、着目している約 1MeV のピークは、他の γ 線ピークと比較すると減衰の様子が異なるように見える。そこで、この約 1MeV のピークのカウント数と他のピークのカウント数の減衰の様子を比較してみた。877keV と 1028keV のカウント数の減衰を比較した結果を図 5-2-9 に示す。横軸は冷却時間 (秒)、縦軸は cps (count/sec) である。図 5-2-9 を見ると 1028keV の減衰の方が遅いことがわかる。つまり、半減期の長い核種から放出されている γ 線であることがわかる。

5.2.3 1MeV ピークの原因検討

今までの調査より、以下の 3 点がわかった。

1. 約 1MeV に顕著なピークが見られ、冷却時間が長くなるに従って目立ち始める。
2. 約 1MeV のピークを無視して崩壊熱 (冷却時間 20,200 秒データの場合) を求めると、総和計算値と良く一致する。

3. 約 1MeV のピークは、照射後 Np-237 データのみに見られ、照射後 U-235、照射後 Ti 板、background には見られない。
上記より、この原因は Np 試料に起因すると考えられる。以下、その原因を検討する。

検討 1：不純物の可能性

Np-237 の純度は 99.9% であるが、残りの 0.1% にどのような不純物が含まれているかについては不明である。この点についてさらに追求するためには、試料製造元に不純物として入る可能性の核種について調査するしか方法はないが、現時点においてそこまで確認はできていない。

検討 2：窒素の影響

今回測定に使用している Np は、窒素化合物である。ちなみに U-235 は金属ウランを使用している。そこで、窒素の影響を検討する。天然窒素において N-14 は 99.634%、N-15 は 0.366% の存在比である。N-15 は存在比が小さく、断面積は N-14 と比べて 4 桁ほど小さいので影響は小さい。N-14 は ORIGEN2 ライブラリによると (60 万 KWe 級高速炉のスペクトルで 1 群に縮約) $1.124\text{E}-2$ (b) という (n, p) 反応断面積を持っている。これにより C-14 が生成されるが、C-14 の半減期は 5730 年でかつ β 崩壊核種であり γ 線は放出されない。さらに、Np-237 の核分裂断面積より 1 桁小さい。以上より、窒素が約 1MeV に見られるピークの原因とは考えられない。

検討 3：Np-237 の中性子捕獲反応

Np-237 は中性子捕獲反応により、Np-238 を生成する。Np-238 は β 崩壊により Pu-238 と変化し、さらに α 崩壊により U-234 となる。Np-237 の (n, γ) 反応断面積と (n, fission) 反応断面積は、ORIGEN2 ライブラリによると (60 万 KWe 級高速炉のスペクトルで 1 群に縮約)、(n, γ) 反応断面積は $1.728\text{E}+00$ (b)、(n, fission) 断面積は $3.295\text{E}-01$ (b) である。また、Np-238 の半減期は 2.12 日であるのに対して、Pu-238 の半減期は 87.74 年である。以上より、Np-237 の中性子捕獲反応により生成される Np-238 の影響が大きいと考えられる。以下、Np-238 についてさらに検討を進める。

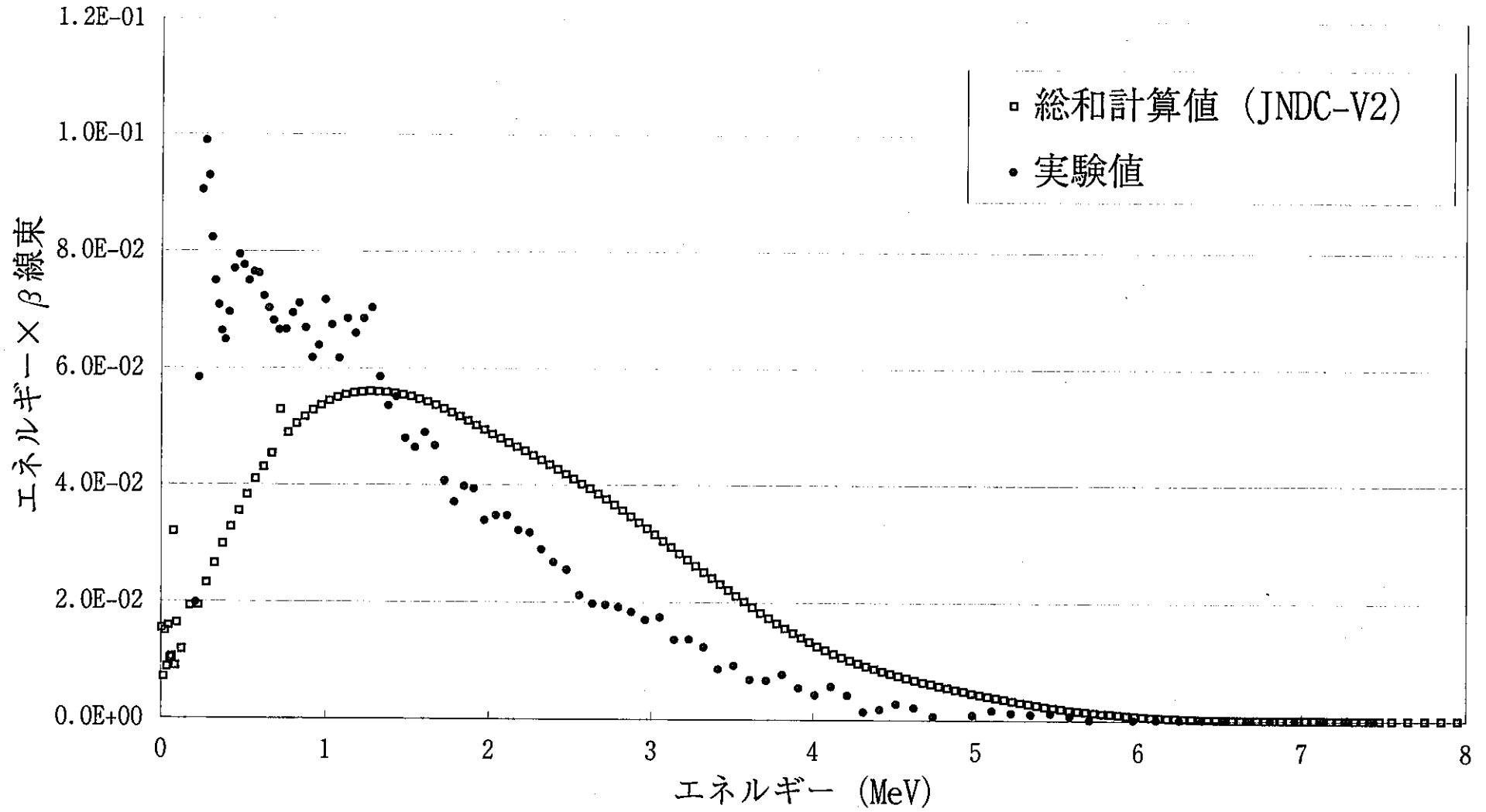
Np-238 は β 崩壊で、この時放出される主な γ 線は以下の 4 つである。923.98keV (2.86%)、984.45keV (27.8%)、1025.87keV (9.65%)、1028.54keV (20.38%)。これ以外の γ 線は放出率が 0.1% 以下と小さいのでほとんど無視してよいと考えられる。これら 4 つの γ 線は、いずれも 1MeV 付近に集中しており、NaI (TI) シンチレーション検出器による測定結果に見られる傾向に合致する。ただし、NaI (TI) シンチレーション検出器はエネルギー分解能が良くないので、これら 4 つのピークを分解して見ることはできない。そこで、核分裂数評価のために測定している Ge 検出器による測定結果では、これら 4 つのピークが確認できるか調査した。図 5-2-10～図 5-2-11 に Ge 検出器による測定結果を示す。図 5-2-10 は照射約 26,000 秒後、図 5-2-11 は照射約 56,000 秒後で図 5-2-10 から 10 時間経過している。この 2 つの図より、上記の 4 つの γ 線ピークが確認できる。また、図 5-2-10 の 924keV と 985keV の頂点の単位時間当たりのカウント数の比を求めると、 0.282 (cps) / 2.22 (cps) = 0.128 であり、これはそれぞれの放出率の比 $2.86\% / 27.8\% = 0.103$ に近い値である。(本来はピーク面積を求める必要がある。) ちなみに図 5-2-11 の 924keV と 985keV の頂点の単位時間当たりのカウント数の比は、 0.263 (cps) / 1.95 (cps) = 0.135 である。(1025.87keV と 1028.54keV のピークは接近しているのでこのような簡易的な検討は難しい。) さ

らに、Np-238 の半減期は 2.12 日なので 10 時間後には約 $1/8$ 減少することになる。985keV の頂点の単位時間当たりのカウント数の減少を見てみると $2.20 \text{ (cps)} - 1.95 \text{ (cps)} = 0.25 \text{ (cps)}$ で、これは $2.20 \text{ (cps)} \times 1/8 = 0.275 \text{ (cps)}$ に近い値であり、およそ Np-238 の半減期に合致する。

以上の検討より約 1MeV 付近の γ 線ピークは、Np-237 の照射によって生成する Np-238 が β 崩壊する際に放出する γ 線成分であると考えられる。

表5-1-1 エネルギー範囲による β 線崩壊熱寄与割合

エネルギー範囲 (MeV)	寄与割合
0~1	27%
1~2	35%
2~3	25%
3~4	10%
4~5	2%
5~6	0.4%
6~7	0.03%
7~8	0.0004%
8~9	0.0000%
9~10	0.0000%
10~11	0.0000%
11~12	0.0000%
12~13	0.0000%
合計	100.00%

図5-1-1 U-235 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間140秒)

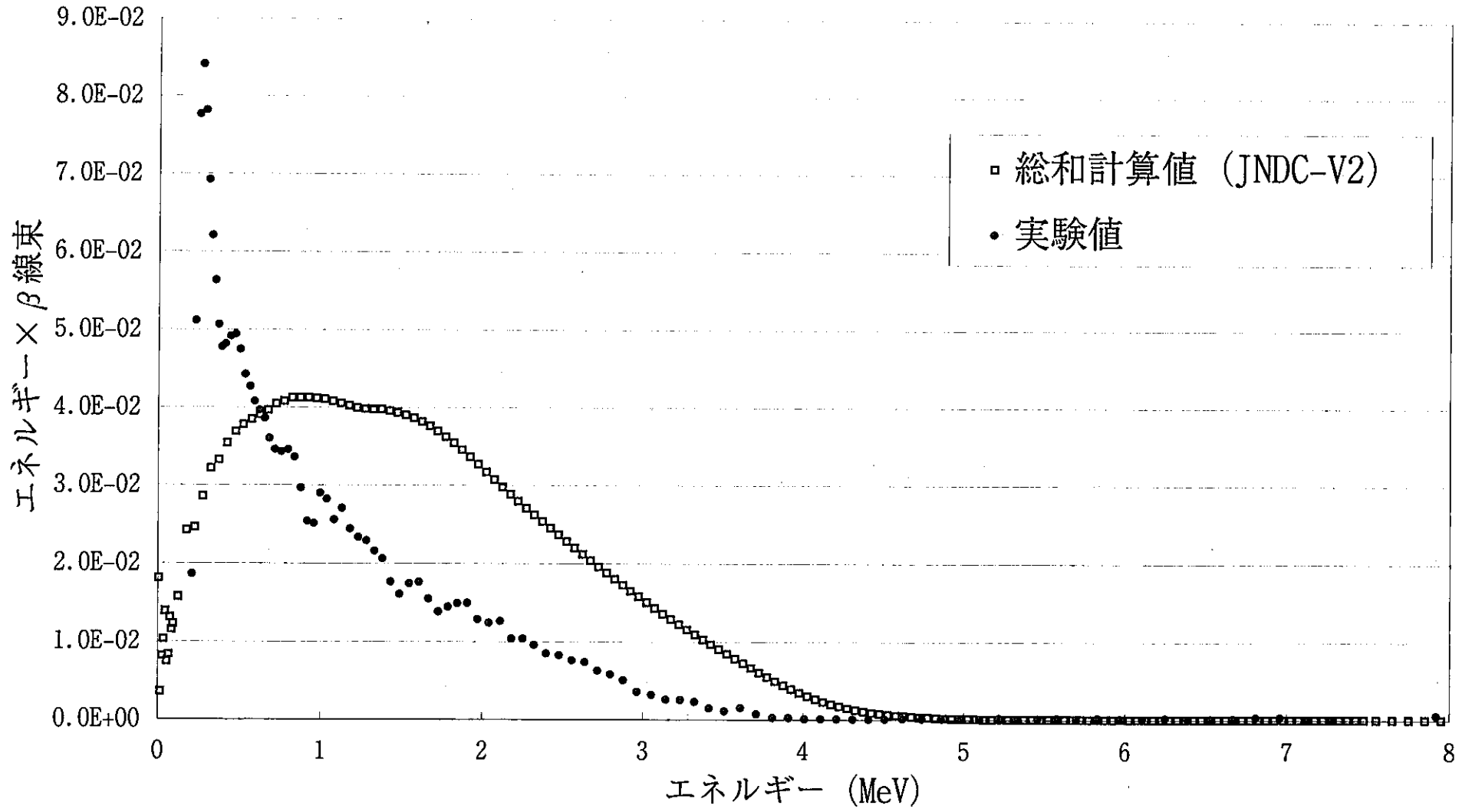


図5-1-2 U-235 β線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間1600秒)

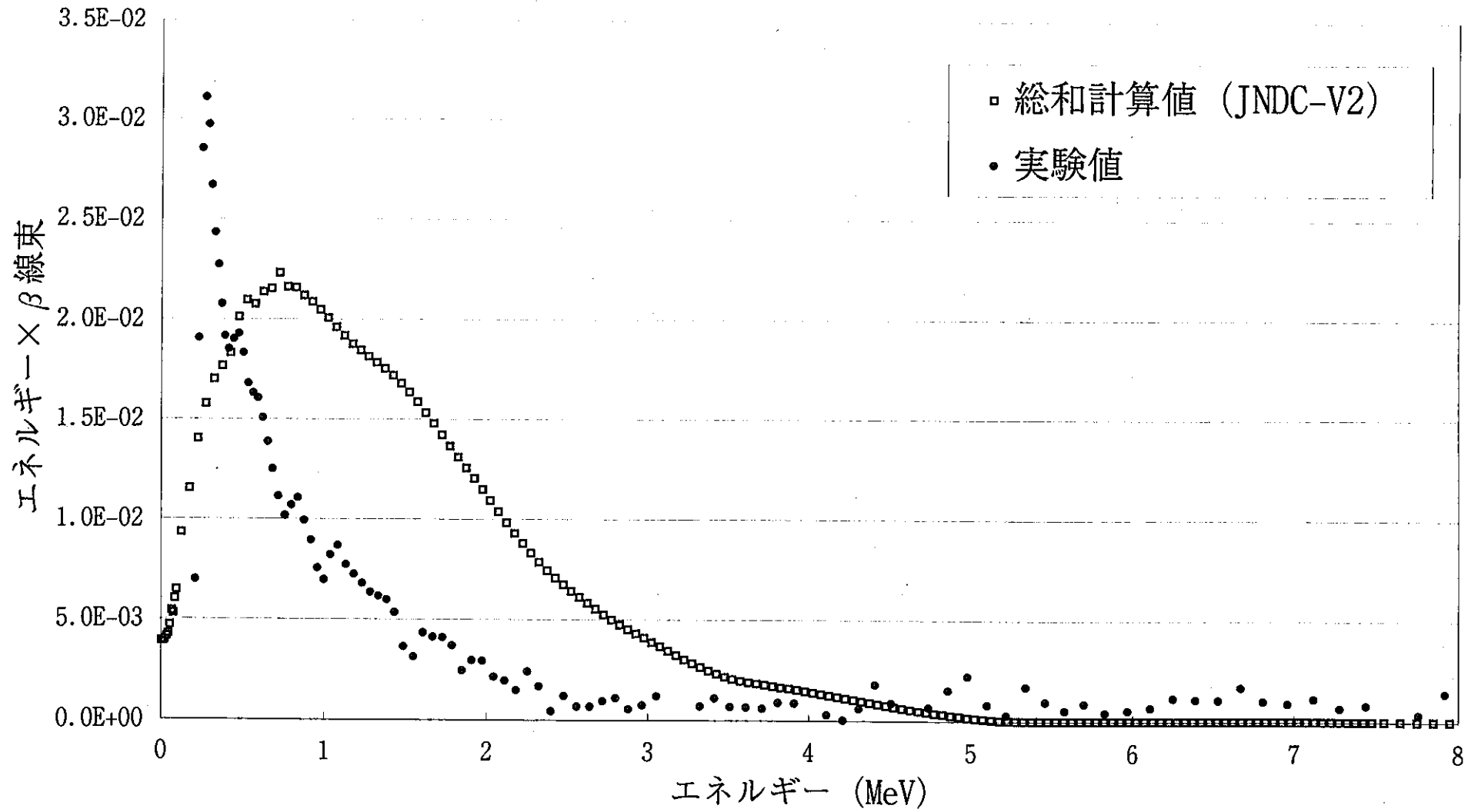


図5-1-3 U-235 β線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間20000秒)

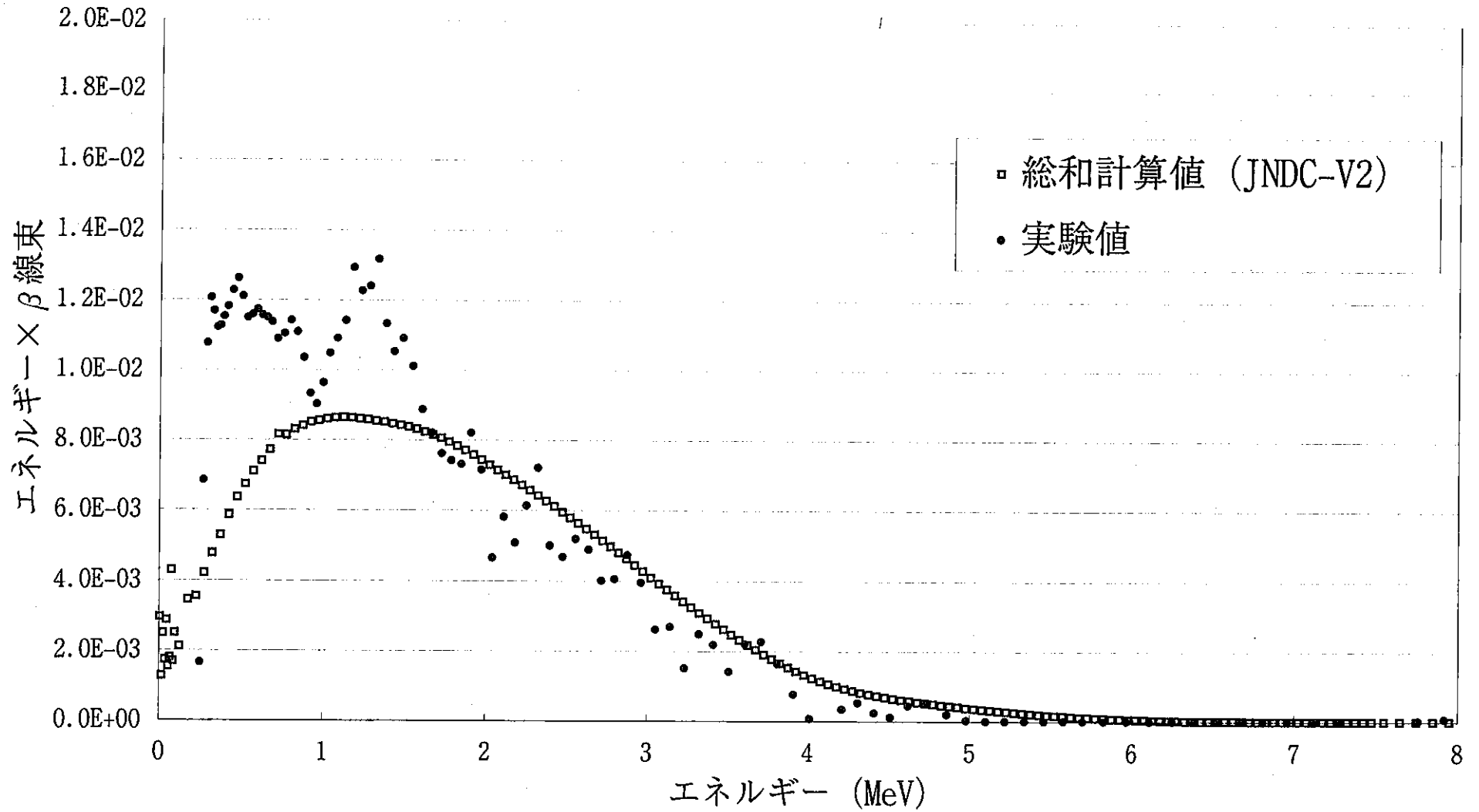
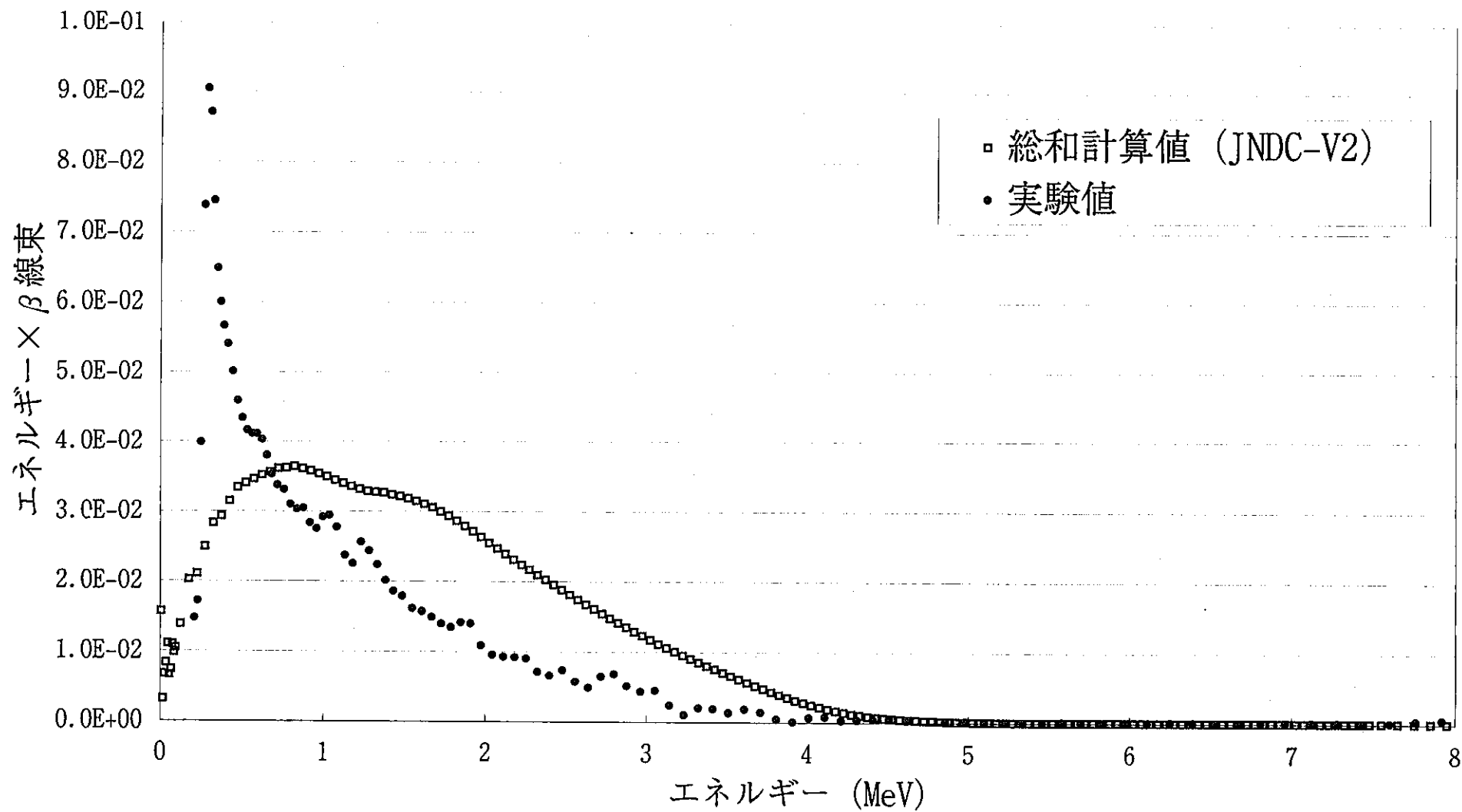
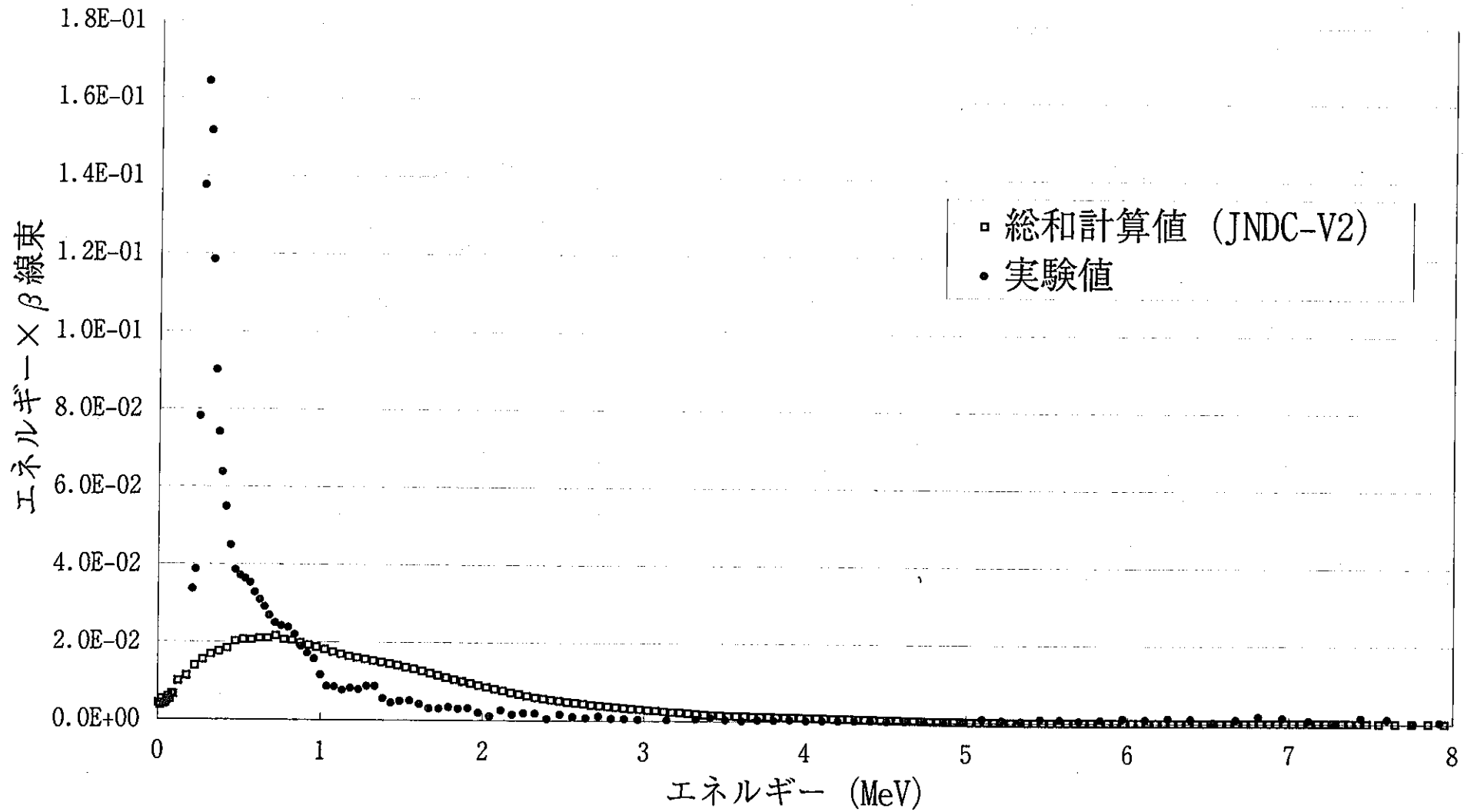
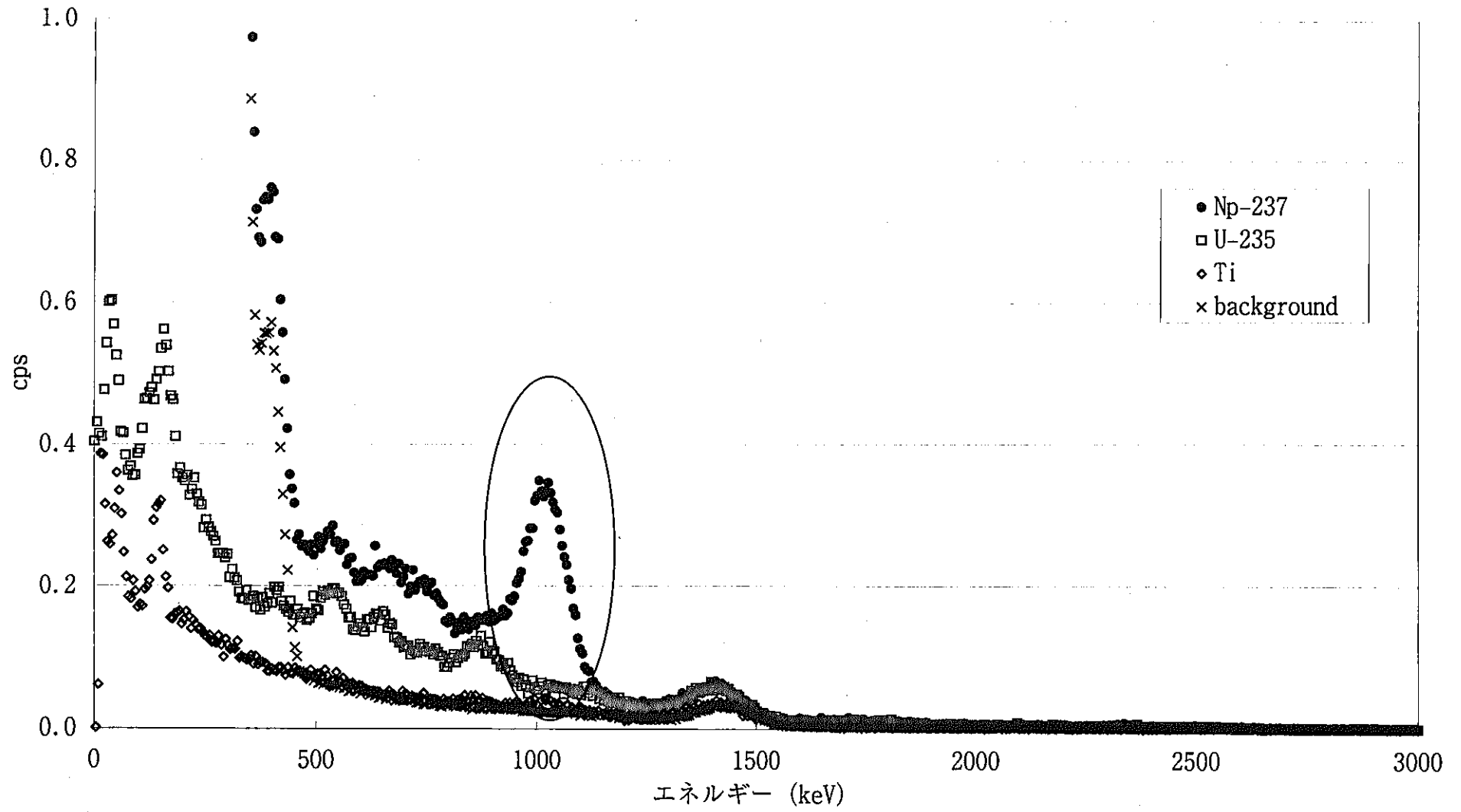


図5-1-4 Np-237 β線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間264秒)

図5-1-5 Np-237 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間1845秒)

図5-1-6 Np-237 β 線崩壊熱のエネルギー分布比較 (冷却時間20200秒)

図5-2-1 照射14950秒後の γ 線測定データ (冷却時間16700秒)

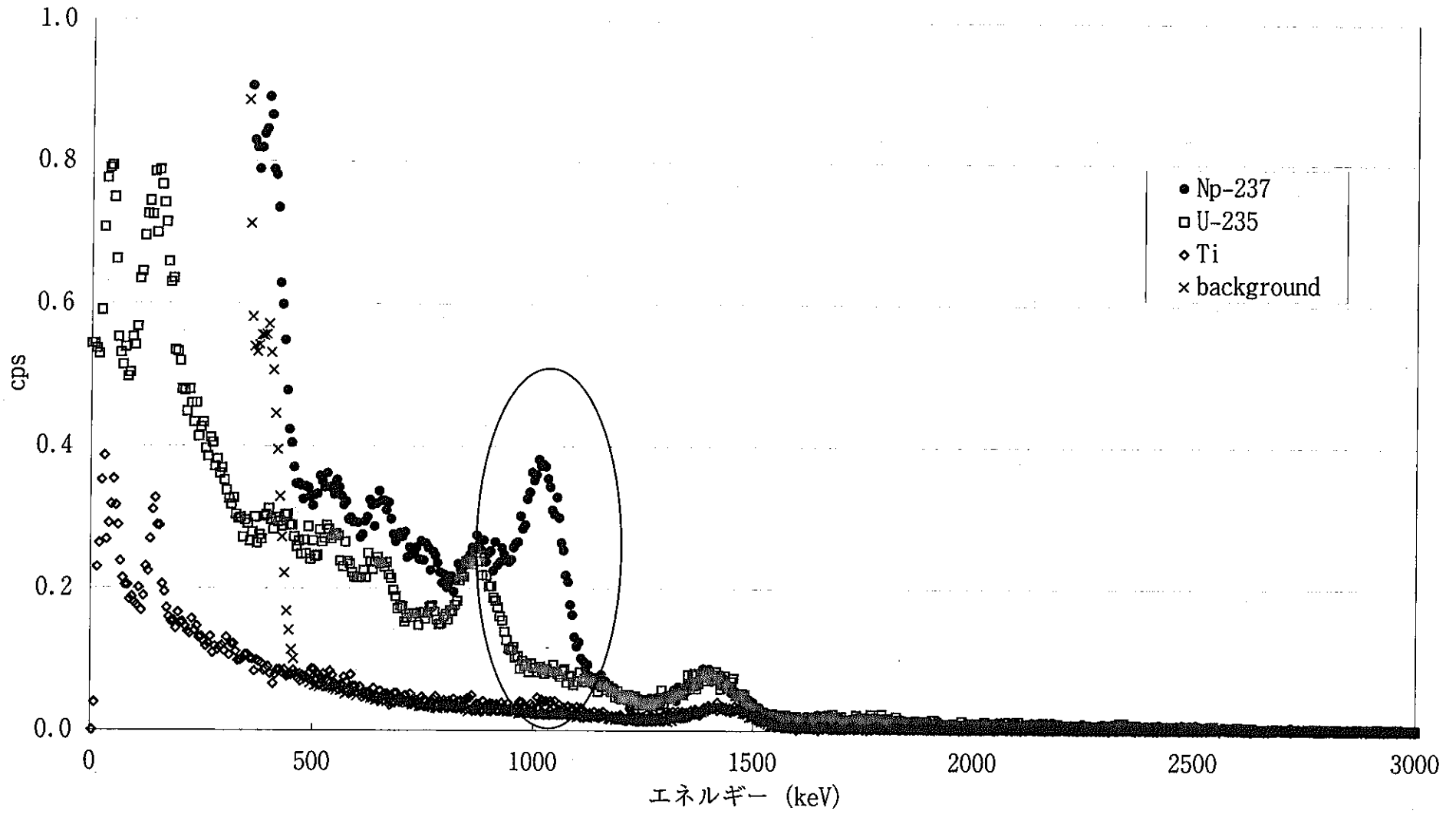


図5-2-2 照射9950秒後の γ 線測定データ (冷却時間11200秒)

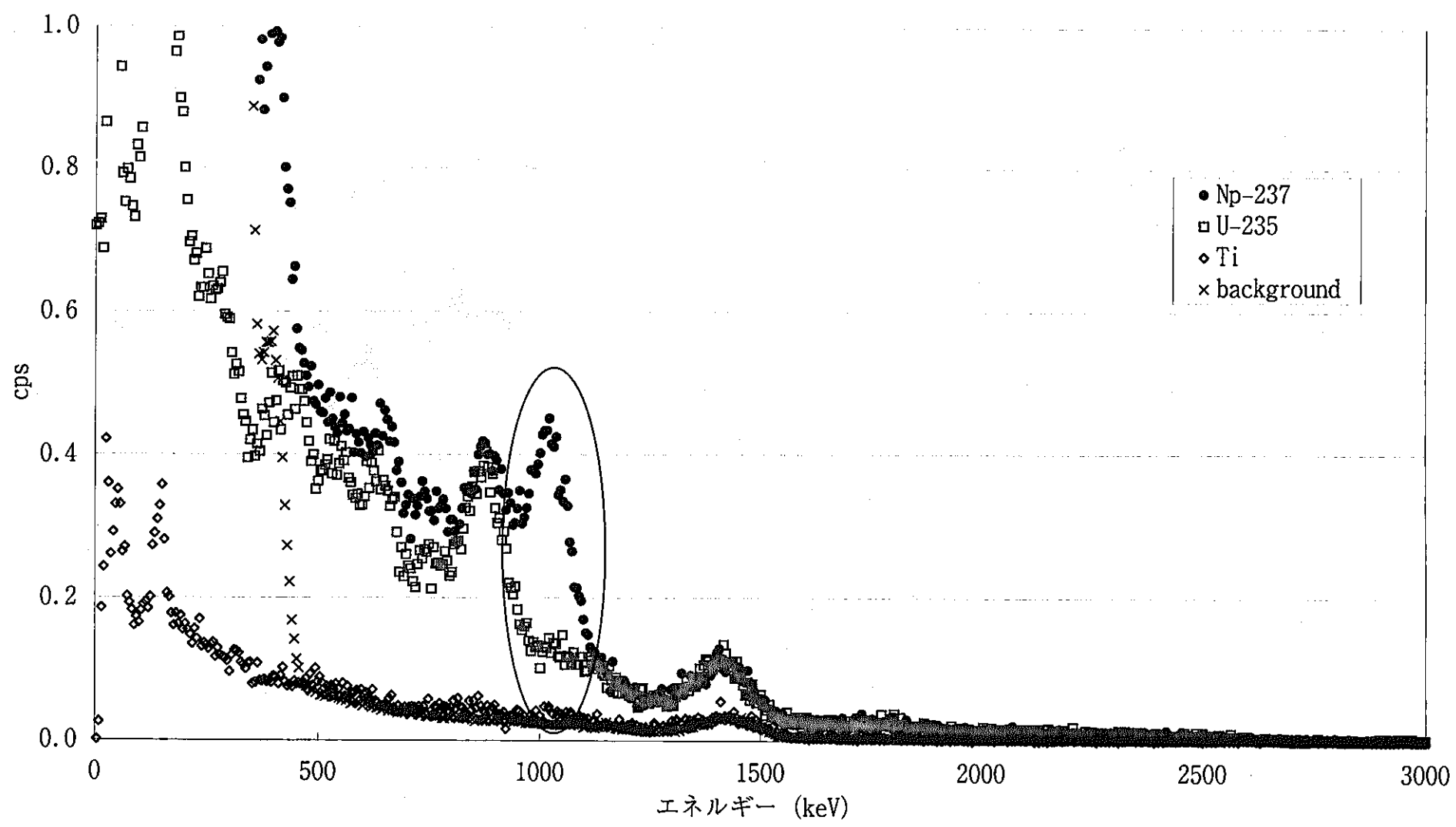
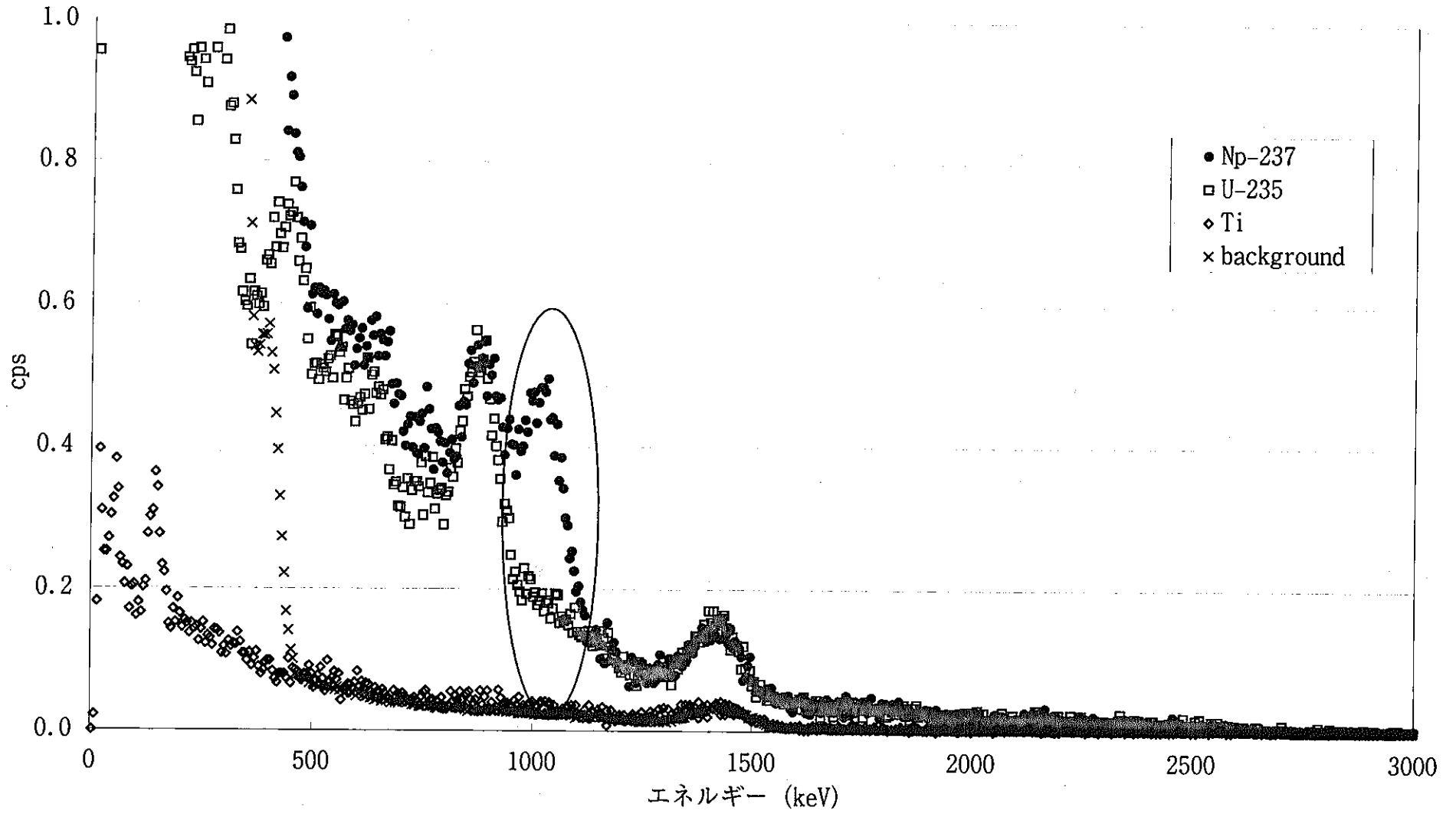


図5-2-3 照射6950秒後の γ 線測定データ (冷却時間7700秒)

図5-2-4 照射5150秒後の γ 線測定データ (冷却時間5800秒)

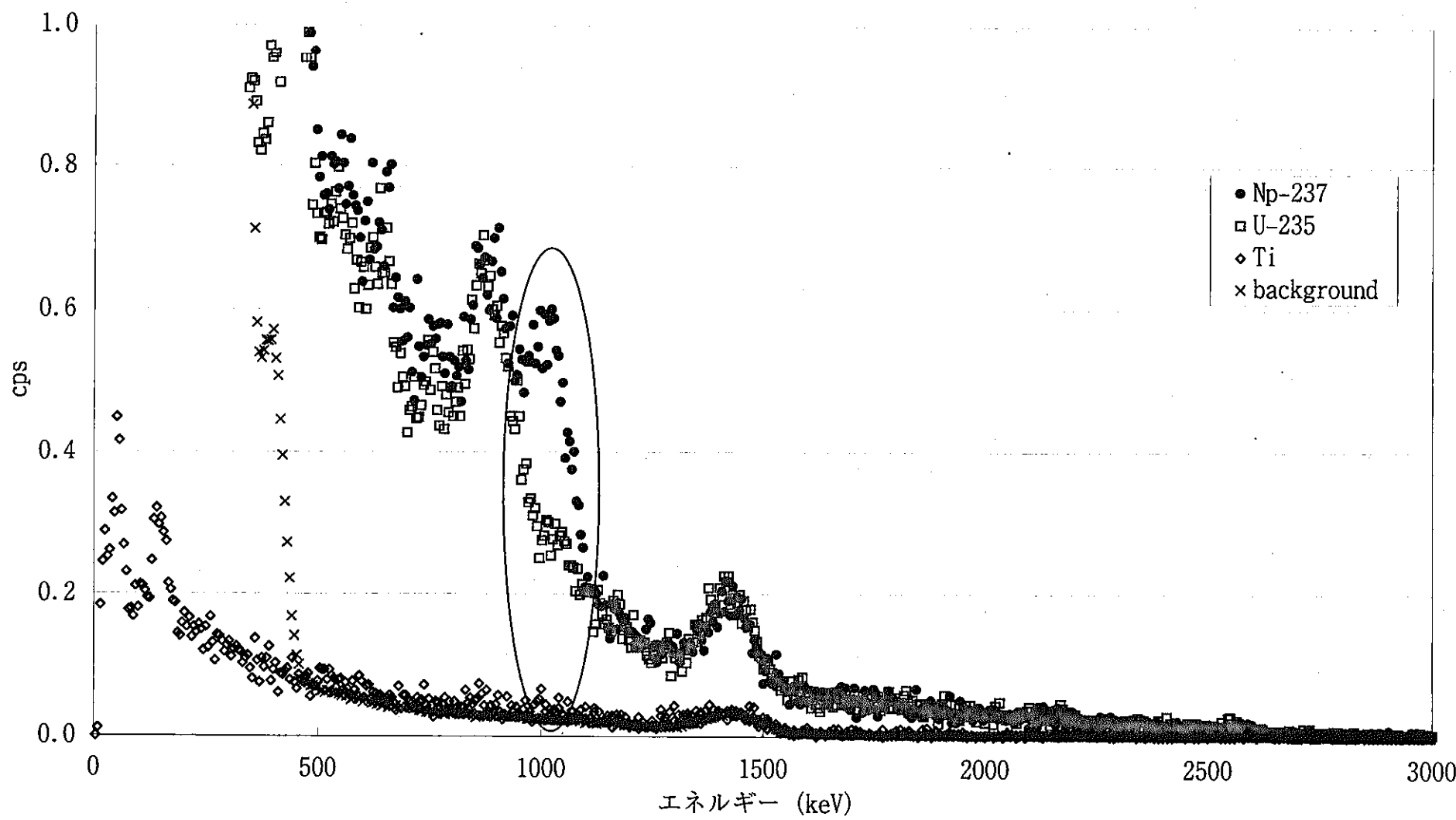


図5-2-5 照射3795秒後の γ 線測定データ (冷却時間4322.5秒)

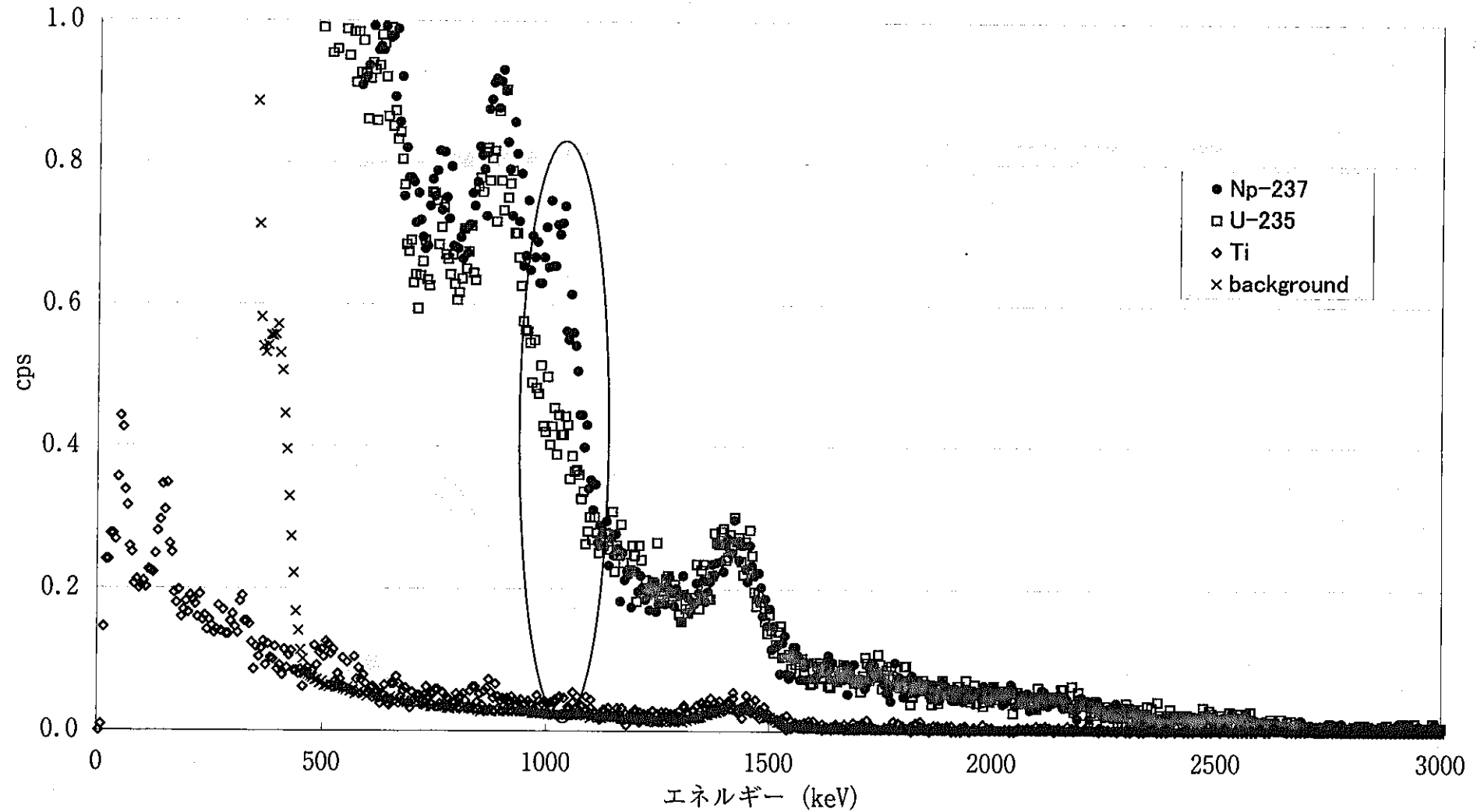
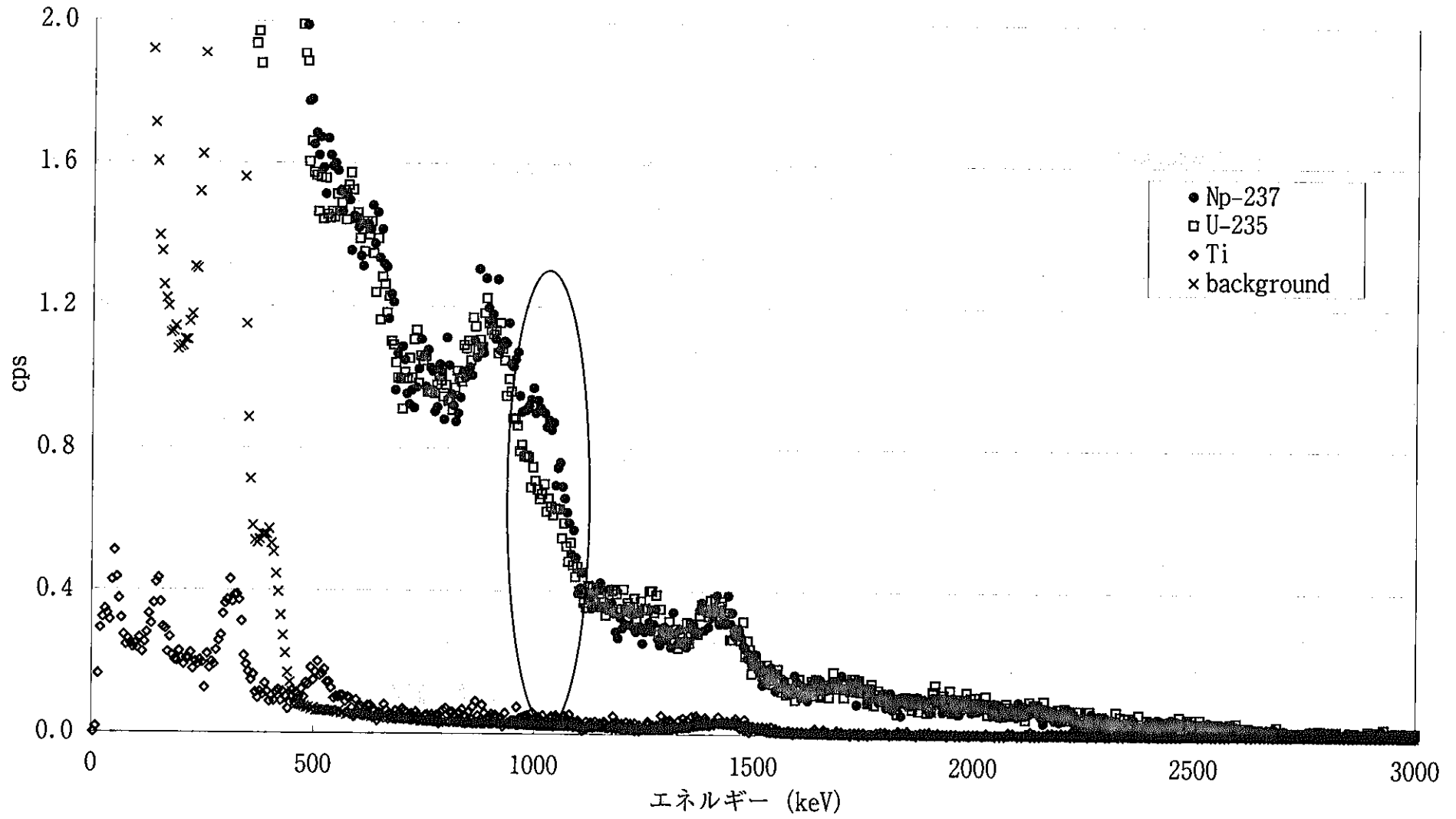
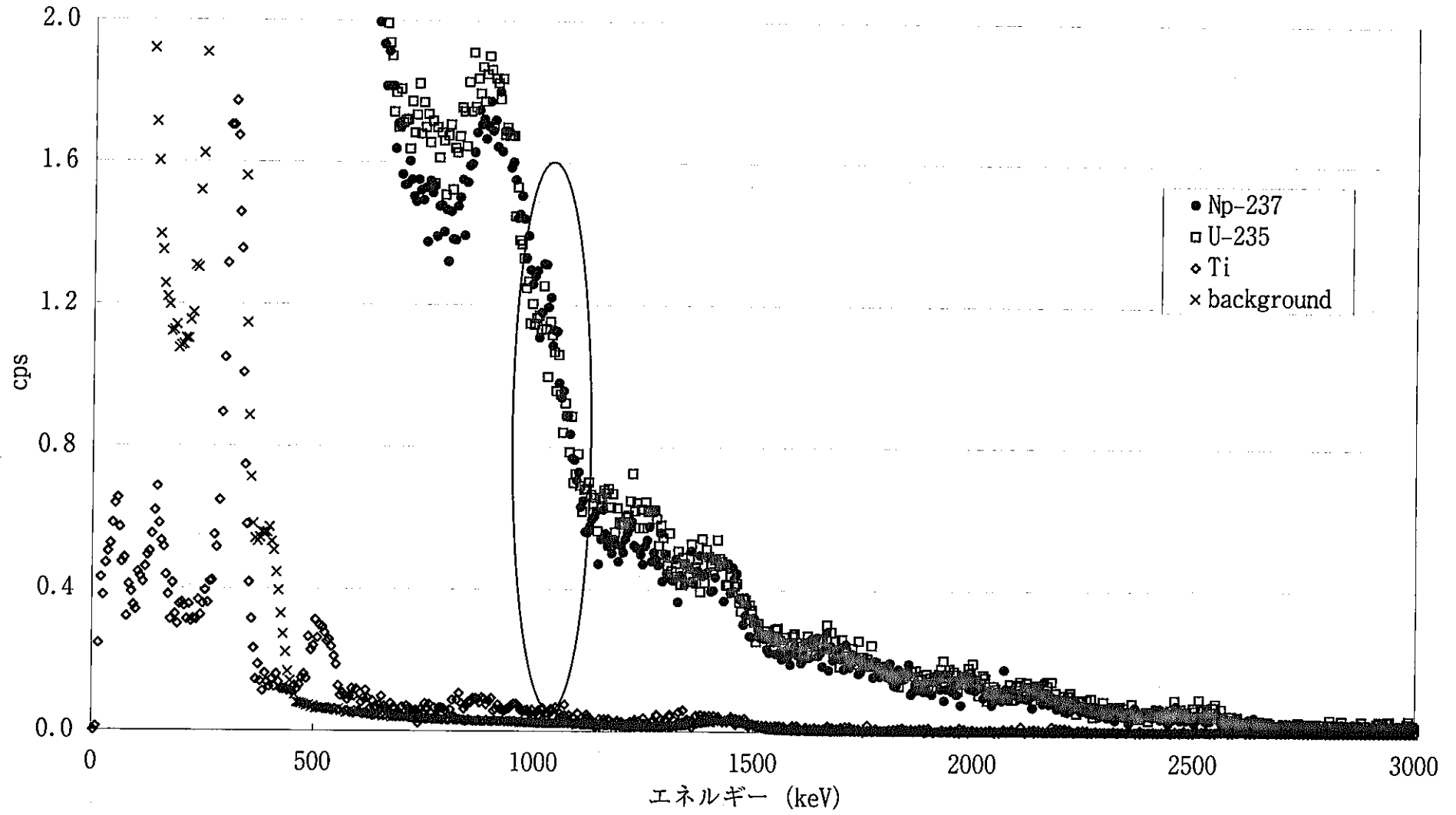


図5-2-6 照射2695秒後の γ 線測定データ (冷却時間3195秒)

図5-2-7 照射1795秒後の γ 線測定データ (冷却時間2245秒)

図5-2-8 照射995秒後の γ 線測定データ (冷却時間1445秒)

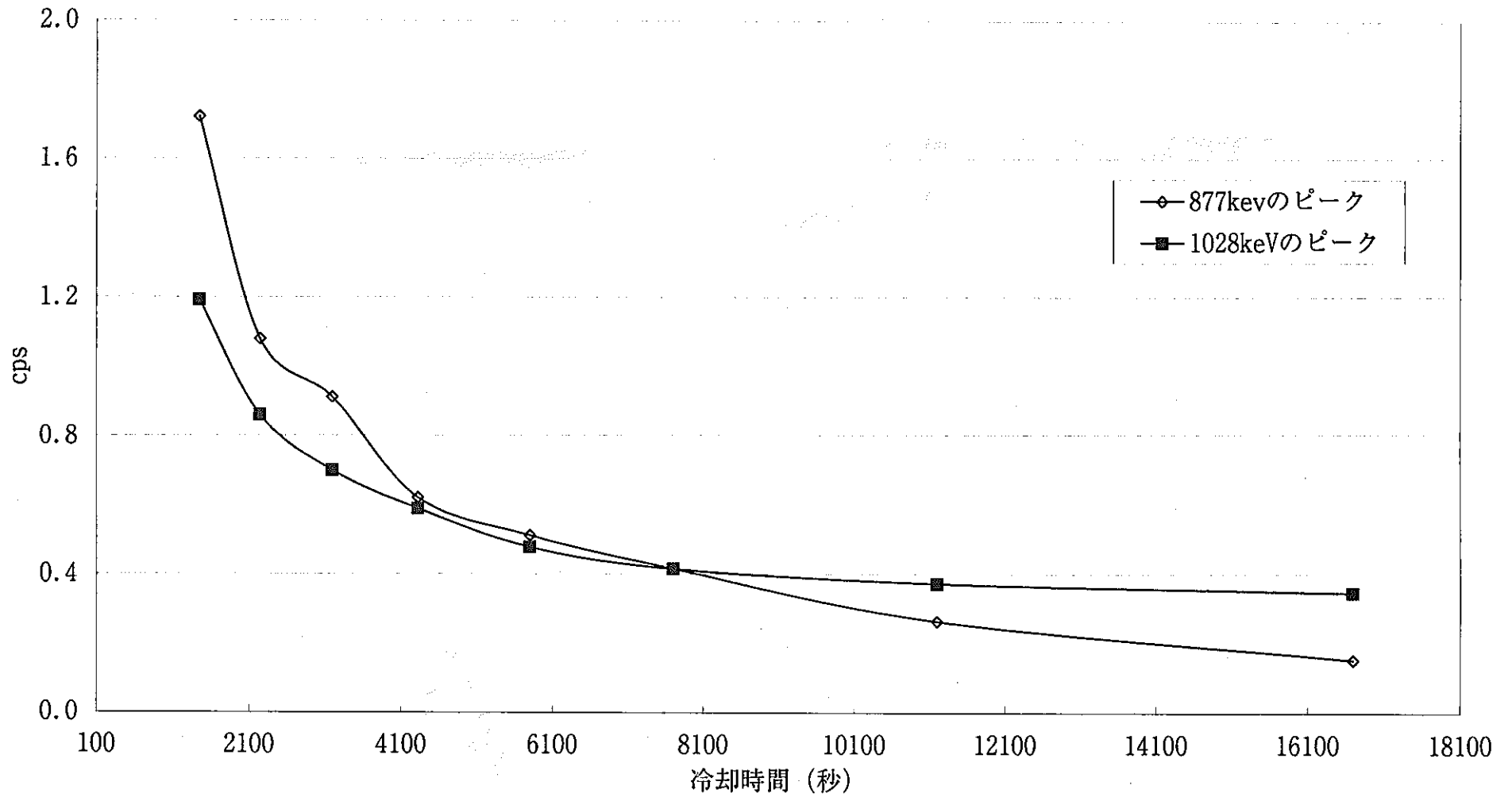


図5-2-9 880keV付近のピークと1MeV付近のピークの減衰比較

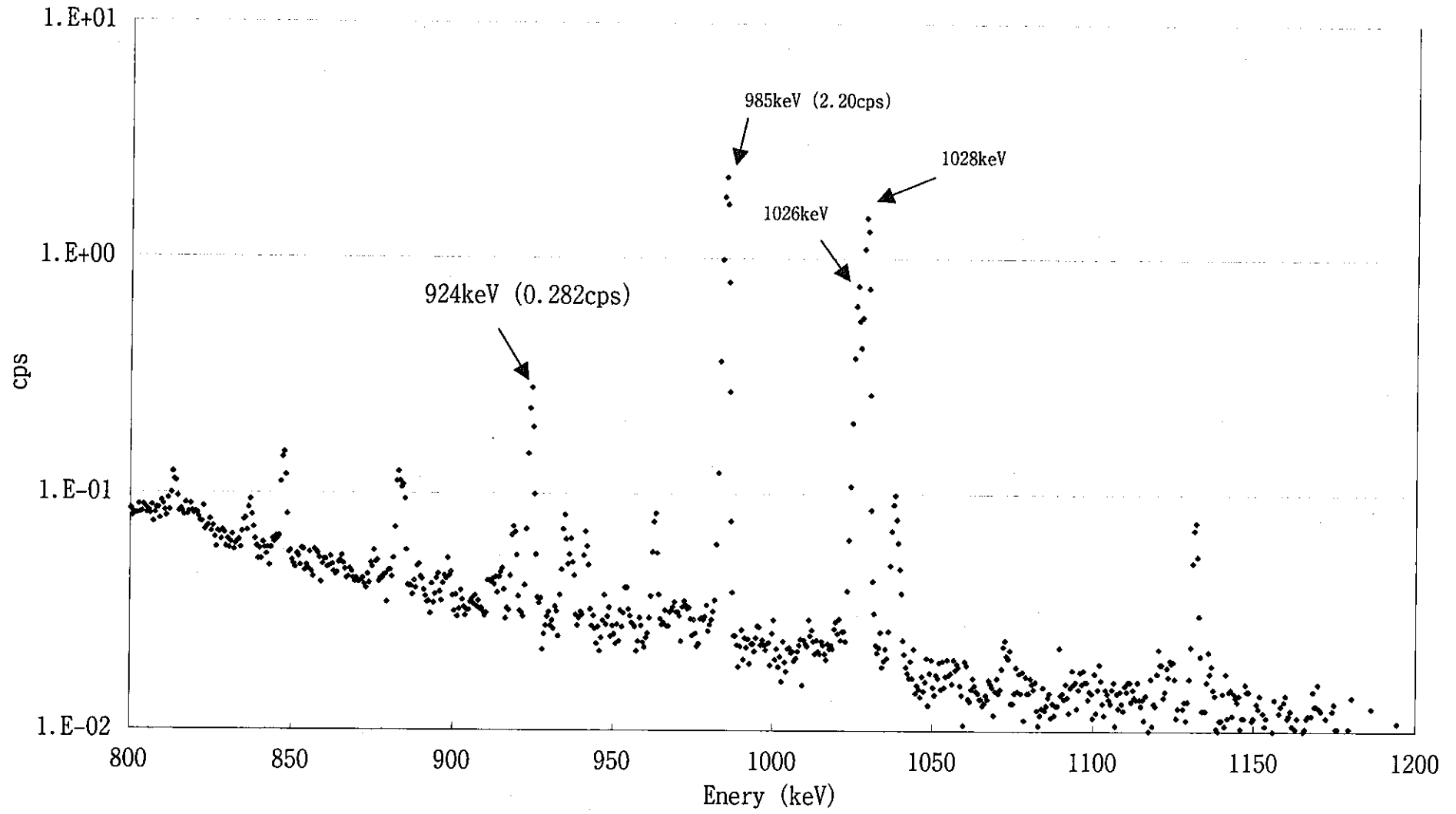


図5-2-10 照射後Np-237のGe検出器測定結果 (照射後約26,000秒)

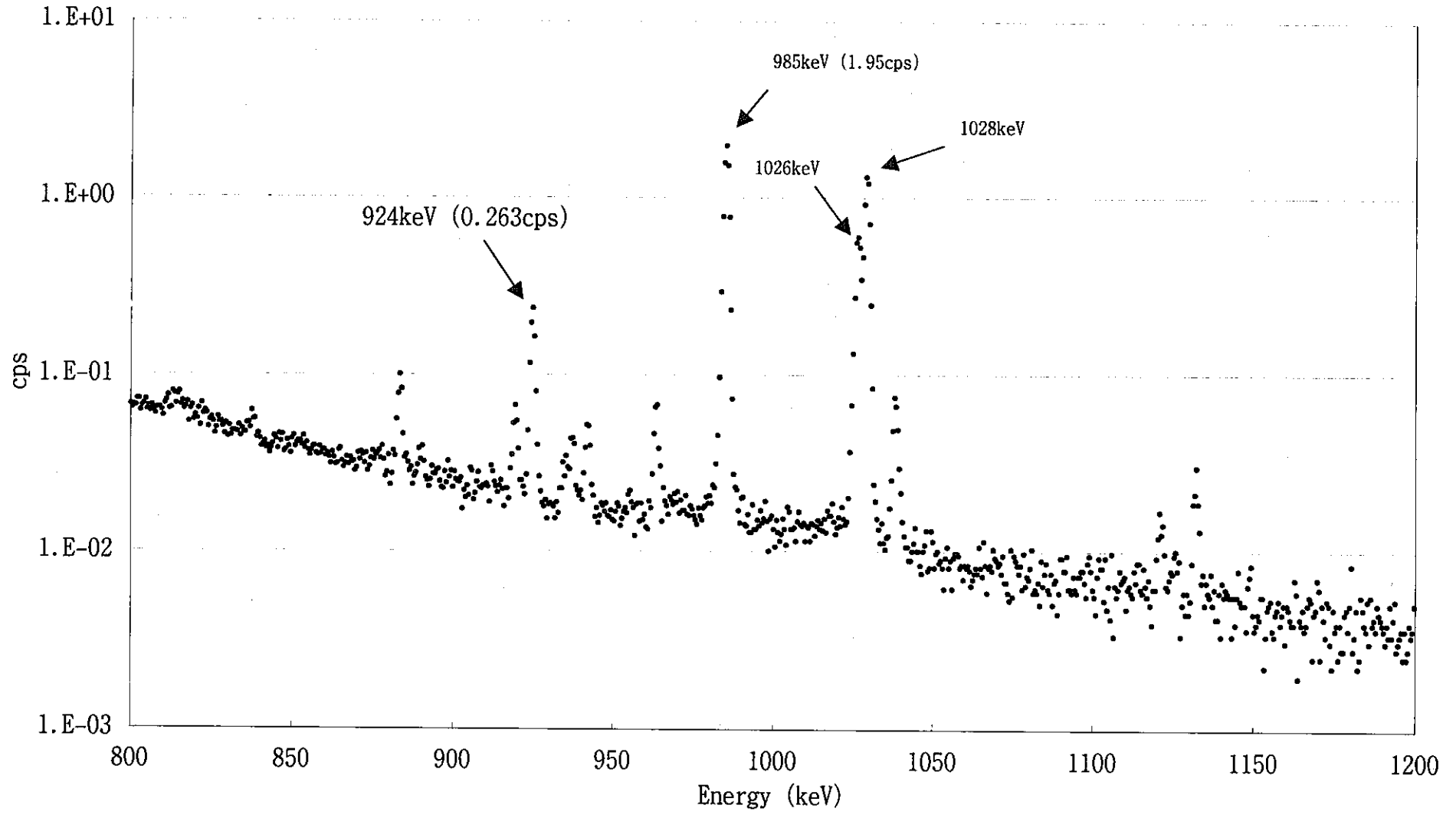


図5-2-11 照射後Np-237のGe検出器測定結果 (照射後約56,000秒)

第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、 β 線及び γ 線崩壊熱を求めた。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。

β 線崩壊熱については、照射時間が長いU-235、Np-237データは共に冷却時間が約500秒程度まで比較的総和計算値と実験値は一致しているが、冷却時間が約500秒～20,000秒の範囲では実験値の方が計算値よりも小さい。実験値と計算値で崩壊熱のエネルギー分布を比較すると、実験値と計算値がよく一致している冷却時間領域ではエネルギー分布もよく一致しているのに対して、実験値と計算値で差が見られる冷却時間領域においては、約1MeV～4MeVの範囲では実験値の方が小さく、約1MeV以下の範囲では実験値の方が大きいという傾向が見られる。全崩壊熱に対する1MeV～4MeVの範囲の崩壊熱寄与割合は約70%であり、このエネルギー範囲において実験値の方が計算値よりも小さいことが、崩壊熱全体で見たときの差であるといえる。

一方、 γ 線崩壊熱については、U-235の測定結果が過去の秋山らの測定値の誤差範囲内ではほぼ一致することから、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秒と冷却時間が約2,500秒以上のデータを除くと、JNDC-V2を用いた総和計算値とよく一致した。冷却時間が長い領域については、Np-237の中性子捕獲反応によって生成するNp-238の γ 線の影響が大きいいため、実験値は計算値よりも大きくなることがわかった。

謝辞

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斉藤勲助手、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、間渕幸雄技術官、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。

武蔵工大の吉田正教授、愛知淑徳大の親松助教授に、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; "235U, 239Pu 及び 233U 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.