

JAERI - M  
84-241

航空機ガンマ線サーベイシステムの開発Ⅲ  
—人工放射線場における測定実験の解析—

1985年1月

長岡 鋭・坂本 隆一・斎藤 公明  
堤 正博・宮坂 聡・森内 茂

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

航空機ガンマ線サーベイシステムの開発Ⅲ  
—人工放射線場における測定実験の解析—

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

長岡 鋭・坂本隆一・斎藤公明

堤 正博・宮坂 聡\*・森内 茂

(1984年12月20日受理)

広域を迅速に $\gamma$ 線サーベイするための手法を確立するため、我々は昭和55年以降、ヘリコプタ搭載型 $\gamma$ 線サーベイシステムの開発を進めている。その一環として、昭和57年10月に栃木県渡良瀬遊水池内に、 $^{60}\text{Co}$  (100 mCi, 400 mCi) 及び $^{137}\text{Cs}$  (100 mCi, 300 mCi)の点状 $\gamma$ 線源を地上に設置して人工放射線場を作り、その中での $\gamma$ 線波高分布スペクトルを測定した。測定には、3"φ球形、3"φ×3"円筒形、4"φ×4"円筒形、5"φ球形、5"φ×4"円筒形、4"×4"×16"×4本組直方体(DET-1024)の6種類のNaI(Tl)検出器を2種類ずつ組にして使用した。原則として飛行高度は20mから500mまでの8高度とし、線源から水平距離0m～500mの範囲を測定した。

今回の実験結果により、平坦地における $\gamma$ 線の空間分布を明らかにし、モンテカルロ計算による値とよく一致することを確認した。また、検出器を含むシステム全体の特性データを入手するとともに、人工放射線成分を含む場において、その場のバックグラウンド線量率を評価する手法を検討し、係数を決定した。これらの結果は、測定データ解析用基礎資料として利用されるだけでなく、環境 $\gamma$ 線の解析上汎用的に利用されることが期待される。

---

\* 中日本航空線

Development of Aerial Gamma Radiation Survey System III, Analysis  
of Flight Experiment in Artificial Gamma Radiation Field

Toshi NAGAOKA, Ryuichi SAKAMOTO, Kimiaki SAITO,  
Masahiro TSUTSUMI, Satoshi MIYASAKA\* and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 20, 1984)

An aerial gamma-ray survey system using a helicopter has been developed since 1980 in order to perform quick gamma-ray survey covering a wide area. To form a line in the chain of the development, a series of flight measurements were conducted in Watarase reservoir, Tochigi prefecture, in which artificial gamma-ray fields were realized using  $^{60}\text{Co}$  (100 and 400 mCi) and  $^{137}\text{Cs}$  (100 and 300 mCi) point sources located on the ground.

For the purpose of obtaining gamma-ray pulse height spectra in the field, 6 sets of NaI(Tl) scintillation detectors were prepared. These sets of detectors consist of ones for evaluation with high accuracy as the standard, for intercomparison with other authors' results, and for practical use. Two sets of them were boarded for each flight considering the exposure rate level and detector's sensitivity. The flight measurements were performed in a space of 20 m to 500 m in altitude, and 0 m to 500 m in horizontal distance from the source.

The experimental results of the spatial gamma-ray distribution for each gamma-ray field satisfactorily agreed with calculational results by Monte Carlo method. Throughout this experiment, characteristics of this survey system and detectors were clarified, and versatile data processing and analysis code was completed. Also, a method for subtraction of background exposure rate in a field including artificial radiation component was discussed using energy band information, and

---

\* NAKANIHON Air Service Co., Ltd.

the coefficients for this method were determined. These data obtained are expected to be used as widely applicable data not only for the interpretation of measured value, but also for analysis of environmental gamma-ray field.

Keywords: Aerial Gamma-ray Survey System, Gamma Radiation Field, NaI(Tl), Flight Experiment, Spatial Distribution of Gamma-ray, Environmental

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 実験の目的及び概要 .....	2
2.1 目的及び概要 .....	2
2.2 実験場の概観 .....	3
2.3 使用線源の取扱い及び放射線管理 .....	3
3. 測定実験の方法 .....	10
3.1 地上測定 .....	10
3.1.1 測定項目及び測定方法 .....	10
3.2 飛行測定 .....	12
3.2.1 測定項目及び測定方法 .....	12
3.2.2 測定データの前処理 .....	17
3.2.2.1 欠測データの内挿 .....	17
3.2.2.2 異常データの検出及び修正 .....	17
3.2.2.3 $\gamma$ 線波高分布上のノイズの差し引き .....	17
3.2.2.4 放射線データと位置データとの整合 .....	18
3.2.2.5 MRS 従局の設置点 .....	19
3.2.3 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの算出及び補正 .....	22
3.2.3.1 バックグラウンド測定データの補正 .....	23
3.2.3.2 人工放射線場における測定データの補正 .....	24
4. 測定結果及び考察 .....	28
4.1 地上測定 .....	28
4.1.1 バックグラウンド測定 .....	28
4.1.1.1 線量率分布 .....	28
4.1.1.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析 .....	29
4.1.2 人工放射線場における測定 .....	29
4.1.2.1 線量率分布 .....	29
4.1.2.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析 .....	29
4.2 飛行測定 .....	40
4.2.1 バックグラウンド測定(1000 mライン上測定) .....	40
4.2.1.1 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布 .....	40
4.2.1.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析 .....	40
4.2.2 人工放射線場における測定(1000 mライン上測定) .....	40
4.2.2.1 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布 .....	40
4.2.2.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析 .....	41

4.2.3	スキャン測定	42
4.3	考察	80
4.3.1	線量率と計数率及び吸収エネルギーとの相関	80
4.3.2	各検出器の測定可能範囲	82
4.3.2.1	測定可能範囲の上限(測定上限)	82
4.3.2.2	測定可能範囲の下限(測定下限)	82
5.	ディスクリミネーション法によるバックグラウンドの評価	91
5.1	ディスクリミネーション法の適用	91
5.2	測定結果	94
5.3	考察	107
6.	結言	112
	謝辞	113
Appendix I	線源強度の校正	115
Appendix II	MRSの概要	119

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Objectives and outline of this experiment .....	2
2.1 Purpose and outline of this experiment .....	2
2.2 Outline of the field used for this experiment .....	3
2.3 Handling of gamma-ray sources and radiation control .....	3
3. Experiment .....	10
3.1 Measurements on the ground .....	10
3.1.1 Items and method of measurements .....	10
3.2 Measurements on board a helicopter .....	12
3.2.1 Items and method of measurements .....	12
3.2.2 Pre-processing of measured data .....	17
3.2.2.1 Interpolation of partial loss of data .....	17
3.2.2.2 Detection and correction of abnormal data .....	17
3.2.2.3 Subtraction of noises on gamma-ray pulse height spectrum .....	17
3.2.2.4 Matching of radiological data and positional data .....	18
3.2.2.5 Location of MRS beacons .....	19
3.2.3 Calculation and correction of exposure rate, counting rate and deposited energy .....	22
3.2.3.1 Correction of data obtained in natural radiation field .....	23
3.2.3.2 Correction of data obtained in artificial radiation field .....	24
4. Results and discussion .....	28
4.1 Measurement on the ground .....	28
4.1.1 Measurement in natural radiation field .....	28
4.1.1.1 Distribution of exposure rate .....	28
4.1.1.2 Gamma-ray energy spectrum analysis .....	29
4.1.2 Measurement in artificial radiation field .....	29
4.1.2.1 Distribution of exposure rate .....	29
4.1.2.2 Gamma-ray energy spectrum analysis .....	29
4.2 Measurement on board a helicopter .....	40
4.2.1 Measurement in natural radiation field (along the 1000 m line) .....	40
4.2.1.1 Spatial distribution of exposure rate,	



counting rate and deposited energy .....	40
4.2.1.2 Gamma-ray energy spectrum analysis .....	40
4.2.2 Measurement in artificial radiation field	
(above the 1000 m line) .....	40
4.2.2.1 Spatial distribution of exposure rate,	
counting rate and deposited energy .....	40
4.2.2.2 Gamma-ray energy spectrum analysis .....	41
4.2.3 Scanning flight measurement .....	42
4.3 Discussion .....	80
4.3.1 Correlation between exposure rate and counting	
rate or deposited energy .....	80
4.3.2 Limit of detection for each detector .....	82
4.3.2.1 Upper limit of detection .....	82
4.3.2.2 Lower limit of detection .....	82
5. Estimation of background exposure rate by discrimination	
method .....	91
5.1 Application of discrimination method .....	91
5.2 Experimental results .....	94
5.3 Discussion .....	107
6. Conclusion .....	112
Acknowledgement .....	113
Appendix I Calibration of source intensities .....	115
Appendix II Outline of MRS (Microwave Ranging System) .....	119

## List of Tables

Table 3.1 Nuclide concentration-exposure rate conversion factors for  $^{40}\text{K}$ , U-series ( $^{214}\text{Bi}$ ) and Th-series ( $^{208}\text{Tl}$ ) (5).

Table 3.2 List of data recorded on magnetic tape.

Table 3.3 Combination of gamma-ray source, flight altitude and detector.

Table 4.1 Ratio of (exposure rate/total counting rate), and that of (exposure rate)/(deposited energy) for each detector.

Table 4.2 Upper limits of detection due to the dead time rate  $r$  within an acquisition interval.

Table 4.3 Lower detection limits LDL due to background level.

$\alpha$  stands for probability of making a Type I error (of concluding there is artificial radiation when there is none). Probability of making a Type II error (of concluding there is no artificial radiation when there is some)  $\beta$  is set to be equal to  $\alpha$ .

- (1) 3"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3"dia.x3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 4"dia.x4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 5"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 5"dia.x4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (6) 16"x16"x4" NaI(Tl) (DET-1024) scintillation detector

Table 5.1 Coefficients of equations for discrimination method which leads inherent background exposure rate of the field involving artificial gamma-ray component.

$y = \text{cof1} + \text{cof2} \cdot x + \text{cof3} \cdot x^2$ , where  $x$  stands for a DV (Discriminated Value, divided by cross section of detector),  $y$  stands for the corresponding background exposure rate ( $\mu\text{R/h}$ ). In every table, DV's are  $\Sigma N(I) \cdot G(I)$  ( $\mu\text{R/h/cm}^2$ ; listed on the left),  $\Sigma N(I)$  (cps/cm<sup>2</sup>; listed on the center),  $\Sigma N(I) \cdot E(I)$  (keV/sec/cm<sup>2</sup>; listed on the right) above the discrimination level  $E_{\text{dsc}}$  (keV), where  $N(I)$  stands for the gamma-ray pulse height spectrum,  $I$  stands for channel number and  $E(I)$  stands for gamma-ray energy corresponding to channel No.  $I$ .

- (1) 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3" dia. x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 4" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 5" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 5" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (6) 16" x 16" x 4" NaI(Tl) (DET-1024) scintillation detector

In case of Det-1024, there is no table for

$DV = \Sigma N(I) \cdot G(I)$ , because the response of DET-1024 depends on the directional distribution of incident gamma-rays so intensely that general  $G(E)$  function is not provided for DET-1024.

Table 5.2 Boarding condition and cross section of each detector.

Table 5.3 Coefficients of equations for discrimination method, when cosmic ray component is subtracted (for 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector).

Table AP.I.1 Results of source intensity calibration.

List of Figures

Fig.2.1 Appearance-1 of the field used for this experiment.

Fig.2.2 Appearance-2 of the field used for this experiment.

Fig.2.3 Vertical profile of ground level along the 1000m line.

Altitude is indicated in terms of meters above the sea level.

Fig.2.4 Structure of the gamma-ray source capsules.

(1)  $^{60}\text{Co}$       (2)  $^{137}\text{Cs}$

Fig.2.5 Structure of the gamma-ray source container.

Fig.3.1 Experimental arrangement for measurement on the ground.

Fig.3.2 Block diagram of the gamma-ray survey system on board a helicopter.

Fig.3.3 Distribution of exposure rate around a point gamma-ray source calculated using Monte Carlo method (3).

(1)  $^{60}\text{Co}$  1 Ci      (2)  $^{137}\text{Cs}$  1 Ci

Fig.3.4 Example of irregular helicopter's track calculated using a set of MRS\* data including an abnormal one.

(\*MRS: Microwave Ranging System)

Fig.3.5 Timing of measurement and acquisition of each data.

Fig.3.6 Positional relation among the cardinal point (the center of the field for this experiment), MRS beacon\* No.1 and No.2.

(\*beacon: receiver and transmitter of microwave)

$J_0$  : Cardinal point (relative altitude= 0 m)

$J_1$  : MRS beacon No.1 (relative altitude= 10.6 m)

$J_2$  : MRS beacon No.2 (relative altitude= 19.7 m)

Fig.3.7 Vertical distribution of background exposure rate (cosmic ray and  $^{40}\text{K}$  components are eliminated).

- (1) 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3" dia. x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 5" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 4" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 16" x 16" x 4" NaI(Tl) (DET-1024) scintillation detector
- (6) 5" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector

Fig.3.8 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m due to a point gamma-ray source calculated using Monte Carlo method (3).

Source height is 2.5 m above the ground level.

- (1)  $^{60}\text{Co}$  402.9 mCi
- (2)  $^{137}\text{Cs}$  309.5 mCi

Fig.4.1 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m along the 1000m line.

Fig.4.2 Background gamma-ray energy spectra at a height of 1 m.

- (1) at the center of the field used for this experiment.
- (2) at North 500m point on the 1000m line, covered with 10 cm thick of water.

Fig.4.3 Horizontal distribution of nuclide concentrations of  $^{40}\text{K}$ , U-series(  $^{214}\text{Bi}$  ) and Th-series(  $^{208}\text{Tl}$  ).

Soil samples were collected at every 50 m point along the 1000m line.

Fig.4.4 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m along the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

Fig.4.5 Gamma-ray energy spectra at a height of 1 m on the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

Fig.4.6 Horizontal distribution of total exposure rate, direct component and scattered component at a height of 1 m along the

1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

(1)  $^{60}\text{Co}$  (2)  $^{137}\text{Cs}$

Fig.4.7 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate of direct component)/(total exposure rate) at a height of 1 m along the 1000m line during irradiation.

(1)  $^{60}\text{Co}$  (2)  $^{137}\text{Cs}$

Fig.4.8 Horizontal distribution of background exposure rate, total counting rate and deposited energy in a detector at altitudes of 20 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m and 500 m above the 1000m line.

- (1) 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3" dia. x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 4" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 5" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 5" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (6) 16" x 16" x 4" NaI(Tl) scintillation detector (DET-1024)

Fig.4.9 Background gamma-ray energy spectra at 20 m to 500 m above the 1000m line (involving cosmic ray component), measured with 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.

- (1) at 20 m, from North 500m to North 400m
- (2) at 20 m, from North 400m to South 450m
- (3) at 50 m, from North 500m to North 400m
- (4) at 50 m, from North 400m to South 450m
- (5) at 100 m, from North 500m to South 450m
- (6) at 150 m, from North 500m to South 450m
- (7) at 200 m, from North 500m to South 450m
- (8) at 300 m, from North 500m to South 450m
- (9) at 400 m, from North 500m to South 450m

(10) at 500 m, from North 500m to South 450m

Fig.4.10 Horizontal distribution of exposure rate, total counting rate and deposited energy for each detector at altitudes of 20 m to 500 m during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

Fig.4.11 Comparison of horizontal distributions of exposure rate during irradiation, between experiment and calculation by Monte Carlo method (3).

Source intensities are normalized to 1 Ci.

Fig.4.12 Contours of exposure rate around a point gamma-ray source.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

(1)  $^{137}\text{Cs}$  (measured with DET-1024)

(2)  $^{60}\text{Co}$  (measured with 5"dia.x4" NaI(Tl) scintillation detector)

Fig.4.13 Gamma-ray energy spectra on the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

Fig.4.14 Horizontal distribution of total exposure rate, direct component and scattered component above the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

(1)  $^{60}\text{Co}$  at 50 m

(2)  $^{137}\text{Cs}$  at 20 m

(3)  $^{137}\text{Cs}$  at 50 m

Fig.4.15 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate of direct component)/(total exposure rate) during irradiation.

(1)  $^{60}\text{Co}$       (2)  $^{137}\text{Cs}$

Fig.4.16 Helicopter track in case of "Scanning Flight" using a MRS guided flying technique.

(1 km x 1 km, 100 m width)

Fig.4.17 Exposure rate contour calculated using a data set obtained by scanning flight measurement.

Fig.4.18 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate)/(total counting rate), and that of (exposure rate)/(deposited energy) above the 1000m line.

Fig.5.1 Explanatory figure for principle of discrimination method.

Background exposure rate is estimated by the component above the energy of discrimination level, and then the artificial component is separately evaluated.

Fig.5.2 Flow chart of the proceeding of discrimination method.

$N_{bg}(E)$  : Gamma-ray pulse height spectrum in natural environment.

$E$  : Gamma-ray energy (keV).

$X_{bg}$  : Background exposure rate in natural environment ( $\mu R/h$ ).

$E_{min}$  : Minimum energy of the pulse height spectrum (keV).

$E_{max}$  : Maximum energy of the pulse height spectrum (keV).

$E_{dsc}$  : Discrimination level (keV).

$G(E)$  :  $G(E)$  function ( $\mu R/h/cps$ ).

$X'_{bg}$  :  $\Sigma N(E)+G(E)$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in natural environment ( $\mu R/h$ ).

$C'_{bg}$  :  $\Sigma N(E)$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in natural environment (cps).

$A'_{bg}$  :  $\Sigma N(E)+E$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in natural environment (keV/sec).

a,b,c,d,e : Coefficients for conversion of discriminated value into exposure rate.

$N_s(E)$  : Gamma-ray pulse height spectrum involving artificial



component in a field.

- $E_s$  : Maximum energy of the artificial gamma-ray source (keV).
- $X_s$  : Exposure rate in the field ( $\mu R/h$ ).
- $X'_s$  :  $\Sigma N(E)+G(E)$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in the field ( $\mu R/h$ ).
- $C'_s$  :  $\Sigma N(E)$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in the field (cps).
- $A'_s$  :  $\Sigma N(E)+E$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  in the field (keV/sec).
- $XX_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $X'$ .
- $XC_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $C'$ .
- $XA_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $A'$ .
- $B$  : Exposure rate due to natural component ( $\mu R/h$ ).
- $S$  : Exposure rate due to artificial component ( $\mu R/h$ ).

Fig.5.3 Relations between total exposure rate and each

DV(Discriminated value), such as  $\Sigma N(E)+G(E)$ ,  $\Sigma N(E)$  and  $\Sigma N(E)+E$  between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$ , for each detector

- (1) 3"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3"dia.x3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 4"dia.x4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 5"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 5"dia.x4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (6) 16"x16"x4" NaI(Tl) (DET-1024) scintillation detector

Fig.5.4 Example of application of discrimination method to an

artificial gamma-ray field involving  $^{60}Co$  component.

In case of (2), difference of y-axis value between the line, which stands for the relation between total exposure rate and  $\Sigma N(E)+E$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$  when 2000 keV is set as the discrimination level, and a dot shows the contribution from

$^{60}\text{Co}$  component.

Fig.5.5 Example of background subtraction using discrimination method.

This figure corresponds to Fig.4.10 7.

Fig.5.6 Spectrum of cosmic ray component in 3"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.

Fig.5.7 Relations between total exposure rate and each DV of 3"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector, where cosmic ray spectrum is subtracted.

Fig.AP.I.1 Experimental arrangement for source intensity calibration applying shadow shield method.

Fig.AP.I.2 Gamma-ray energy spectra in case of source intensity calibration.

(1)  $^{60}\text{Co}$  100 mCi (2)  $^{60}\text{Co}$  400 mCi

(3)  $^{137}\text{Cs}$  100 mCi (4)  $^{137}\text{Cs}$  300 mCi

Fig.AP.II.1 Principle of MRS (Microwave Ranging System).

### List of Photographs

Photo 2.1 Outline of the field used for this experiment.

(1) Center of the field (air photo).

(2) Ground condition of the 1000m line.

Photo 2.2 Constructed road mats.

Photo 2.3 Source container.

Source capsule is lifted up by air pressure to the top of perpendicular irradiation pipe on the container.

## 1. 序

1979年3月に発生した米国スリーマイルアイランド原子力発電所の事故を契機に、日本においても広域を迅速に $\gamma$ 線サーベイできるシステムの必要性が認識され、昭和55年度から原研を中心にこれを開発することとなった。

航空機 $\gamma$ 線サーベイ用システムを開発し、このシステムを実際の航空機サーベイに適用できるようにするためには、測定機器の整備だけでなく、このシステムによって入手したデータを処理・解析するための手順の確立、結果を解釈するための基礎資料の整備、システムの運用体制の確立、システムオペレータの訓練などが必要であることは言うまでもない。とくに、測定機器の整備、データ処理、解析手順の確立、結果の解釈用基礎資料の整備は、システムの性能を左右する要件であり、最優先して整備・確立する必要がある。

このような観点から、まず55年度に基本システムを設計・整備し<sup>(1)</sup>、56年度に、自然放射線場における野外測定実験を実施し、飛行測定におけるバックグラウンドの特性調査を行った<sup>(2)</sup>。

続いて57年度には、栃木県内において、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ の密封点線源を用いた人工放射線場における飛行測定実験を行った。この実験においては、大きさ形状の異なる6種類のNaI(Tl)検出器による $\gamma$ 線波高分布を、電波高度計及びMRS (Microwave Ranging System)による位置情報とともに1秒間隔で測定、記録し、人工放射線場における詳細なデータを取得した。本報告においては、この実験の詳細と、得られた測定結果の解析について述べるとともに、緊急時における原子力施設からの放出分を効率よく検出し追跡する観点から、人工放射線源が存在し、かつバックグラウンドレベルが未知であるような場において、両者の寄与分を弁別して評価する方法について述べた。

## 2. 実験の目的及び概要

### 2.1 目的及び概要

本システムの開発の目的の1つは、航空機 $\gamma$ 線サーベイシステムによって得られたデータを解釈するための資料を整備することである。そのためには、検出器を含めたシステム全体の特性を把握することに加え、種々の条件下での $\gamma$ 線の挙動を明らかにする必要がある。 $\gamma$ 線の挙動の解明の手段として、我々はモンテカルロ法によって計算された $\gamma$ 線の空間分布<sup>(3)</sup>と、計算と同じ条件下で実測された $\gamma$ 線の空間分布とを比較する方法を採った。即ち、 $\gamma$ 線の空間分布を $\gamma$ 線源からの水平距離、垂直距離及び $\gamma$ 線エネルギーの関数として表わし、実測値と計算値とを比較・検討することによって挙動を解明する。

両者の比較に際しては、最も単純かつ現実的な条件、即ち、地面上に設置した点線源という条件が、基本的な情報を与えるという点で最も望ましい。そこで、十分広く平坦な地形の上に点状 $\gamma$ 線源を設置し、地上1 mでの測定（地上測定）及び高度20 m～500 mでの測定（飛行測定）を線源からの水平距離0～500 mについて実施し、 $\gamma$ 線空間分布の実測データを得た。ここで高度は、実際の航空機サーベイとして現実的な高度であること、空間分布を明らかにすること、直接線、散乱線の割合の異なる種々の $\gamma$ 線スペクトルや線量率が得られること、 $\gamma$ 線の到達距離などを考慮して、対地20, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 mの8種類とした。また使用する $\gamma$ 線源は、半減期、入手し易さ、エネルギーなどから $^{60}\text{Co}$ （100 mCi, 400 mCi）及び $^{137}\text{Cs}$ （100 mCi, 300 mCi）の4種類を用いた。

本実験では、約1000 m四方の平坦な区域の中心に、4種類の線源を交互に設置して作った4種類の $\gamma$ 線場及びバックグラウンド $\gamma$ 線場の中で、飛行測定、地上測定、Rn測定、 $\gamma$ 線連続モニタリング、土壌採取、線源強度の校正を行い、 $\gamma$ 線波高分布、線量率及び線束密度の空間分布に関するデータの入手に主眼をおいた。測定に関する詳細は第3、4章で述べる。また、これらのデータの処理・解析の作業を通して、迅速な処理・解析手順を確立することも、目的の1つであることを付記する。

本実験の実施に際しては、数100 mCiの $\gamma$ 線源を野外に設置して使用し、かつヘリコプターにより測定を行うという問題を含んでいるため、実験場の選択、借用手続に多くの労力を費したが、最終的には建設省関東地方建設局の管理する渡良瀬遊水池を利用して、昭和57年9月下旬に敷地整備に着手し、10月4日から10月19日まで測定実験を行い、10月23日に資機材撤去等、全ての現場作業を完了した。この間、28回約40時間に亘る飛行測定を行った。

---

\* 「高度」はとくに断わらない限り対地高度を表す。以下同じ。

## 2.2 実験場の概観

本実験においては、①野外で $\gamma$ 線源を使用するための放射線管理、②ヘリコプタの騒音対策、③半径 500 m 以内に一般人の居住ないし立入の無い平坦な土地が必要である、などの点から、実験場の選択、借用手続等に多くの労力、時間を費したが、最終的には栃木県藤岡町の渡良瀬遊水池（建設省関東地方建設局管理）の一部を借用することができた。借用した区域は、線源設置点、設置点を囲む一辺 200 m の正方形、線源設置点を通る南北約 1000 m の飛行目標用ライン等を含み、北 200 m 地点に数 m の起伏があるが、ほぼ平坦であった。実験場の概観を Fig. 2.1、2.2 及び Photo 2.1 に示す。また 1000 m ラインの起伏を Fig. 2.3 に示す。

この遊水池は通常葦の栽培場になっており、実験を実施した10月には、高さ 2～3 m の葦が生えていた。そのため、Fig. 2.2 に示すように、線源設置点を中心とした半径 25 m の区域、線源設置点を囲む一辺 200 m 幅約 3 m の正方形及び線源設置点を通る南北約 1000 m 幅 3 m の飛行目標用ライン（北側 500 m、南側 450 m；以下 1000 m ラインという）上に生えている葦を刈り取り、立ち入り制限区域、飛行目標等を設定した。飛行目標ライン上には、50 m 毎に 90 cm × 180 cm の白色ベニヤ板を置き、ヘリコプタ上から位置が確認できるようにした。

一方この遊水池は本来湿地状態である上、9月上旬に関東地方を通過した台風のため渡良瀬川が増水した際に、河川水が遊水池内に流入しており、9月中旬まで冠水していた。このような軟弱な地盤の上で 1250 kg の線源コンテナなどのような重量物を移動させるため、線源設置点と資材小屋との間に路盤確保のための鉄製ロードマット（ $30\text{cm}^{\text{W}} \times 150\text{cm}^{\text{L}} \times 5\text{cm}^{\text{t}}$ ）440 枚を敷設した（Photo 2.2）。

## 2.3 使用線源の取扱い及び放射線管理

本実験で使用した線源は、 $^{60}\text{Co}$ （100 mCi、400 mCi）及び  $^{137}\text{Cs}$ （100 mCi、300 mCi）である。ここで線源の強度値は暫定値であり、一連の飛行測定終了後に校正実験を行い、正確な強度を評価した。これについては Appendix I で述べる。

線源の大きさ、構造を Fig. 2.4 に示す。この線源をさらにステンレス製のカプセル（直径 20 mm、高さ 45 mm）に封入して、これを鉛製線源コンテナに収納した。コンテナの構造を Fig. 2.5 に、概観を photo 2.3 に示す。コンテナ内には、6つの線源収納用セルを有する回転式ディスク（ロータ）があり、線源は1つずつセルに収納され、必要な線源を選択できるようになっている。線源の選択は、コンテナ用制御装置の押しボタンによって行われ、選択された線源の入っているセルは回転によって照射筒直下にセットされる。線源照射時には、圧さく空気によって線源の入ったカプセルを照射筒の先端に押し上げた。この方式では、何らかの原因により停電した場合、ポンプが停止し、圧さく空気が供給されなくなり、線源の入ったカプセルが自然にコンテナ内へ落下するという利点がある。本実験ではディーゼル発電機により電源を得ており、このような電源供給方式を用いざるを得ないような野外実験においては有効な方式である。

一方、合計で約 900 mCi の線源を野外において使用するため、放射線管理に細心の注意を払う必要があった。線源コンテナの取扱いについてはもちろんであるが、実験場付近には釣場が多く

散在しており釣客が入るため、一時管理区域を示すローピング、土曜・日曜の実験は行わない、線源露出時に部外者が近付いた場合には、即刻実験を中止するなどの対策・方針で臨んだ。一時管理区域は線源設置点を中心とする1辺200 mの正方形区域とし、各辺に生えている葦を刈り取り（前述）、そこに放射線管理用ロープを張った。

線源コンテナは、毎日の実験終了後線源収納小屋へ収納し、旋錠して保管した。また夜間の不測の事態に備えて、資材小屋に毎夜3名を宿泊させた。

さらに連続モニタ用としてDBM式線量率計（3"φ球形NaI(Tl)検出器を使用）を資材小屋内に設置し、空間線量率を連続測定・記録した。

これらの対策により、実験期間中放射線管理に関する問題、事故は1件も発生しなかった。

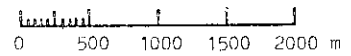
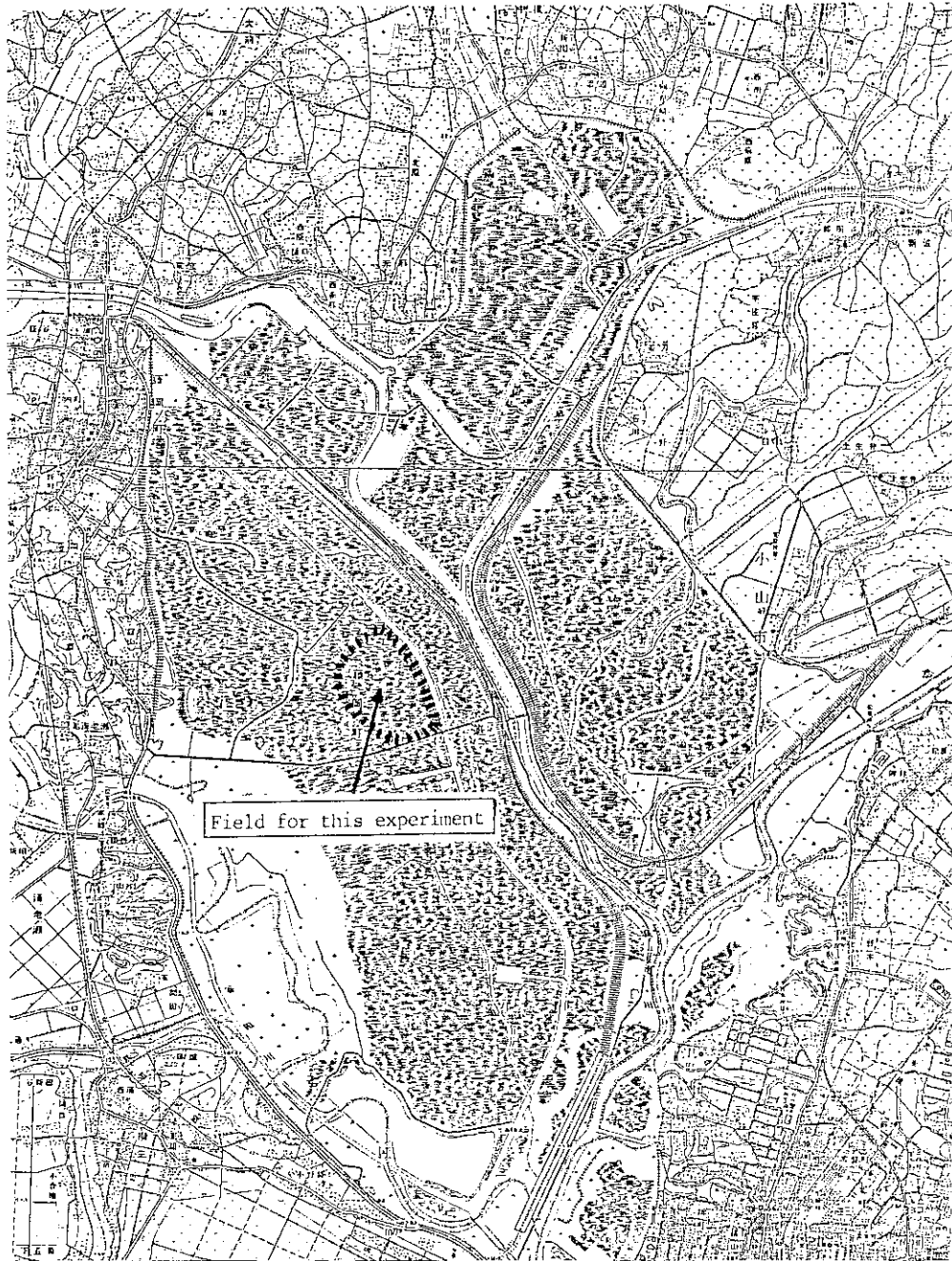


Fig.2.1 Appearance-1 of the field used for this experiment.

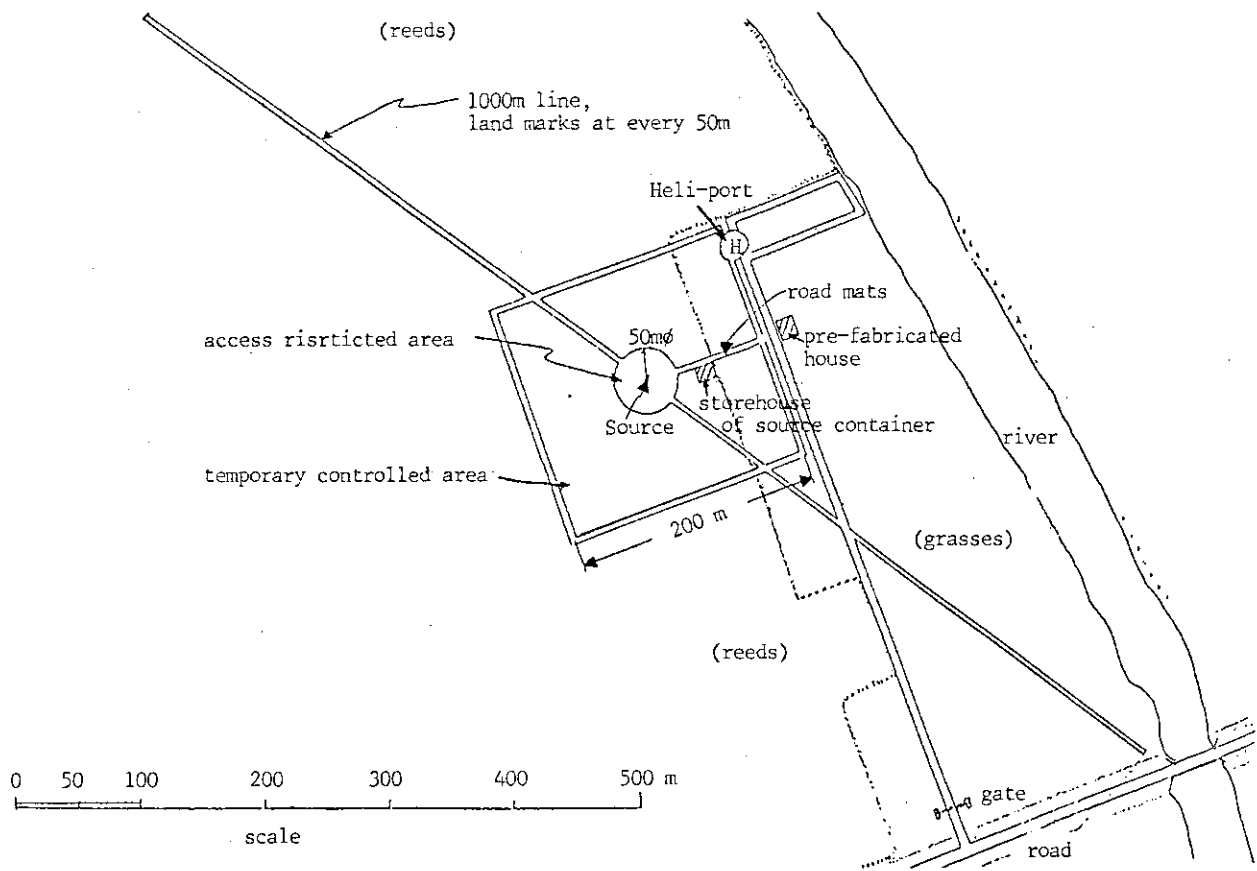


Fig.2.2 Appearance-2 of the field used for this experiment.

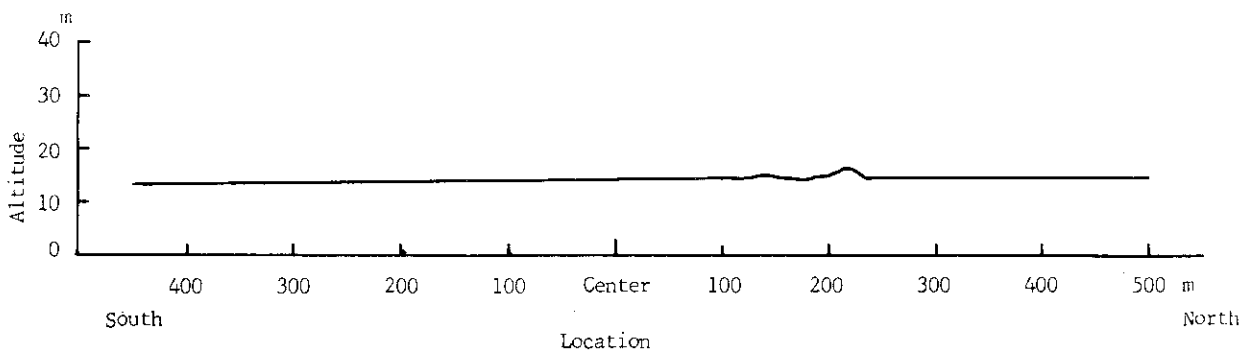


Fig.2.3 Vertical profile of ground level along the 1000m line.

Altitude is indicated in terms of meters above the sea level.



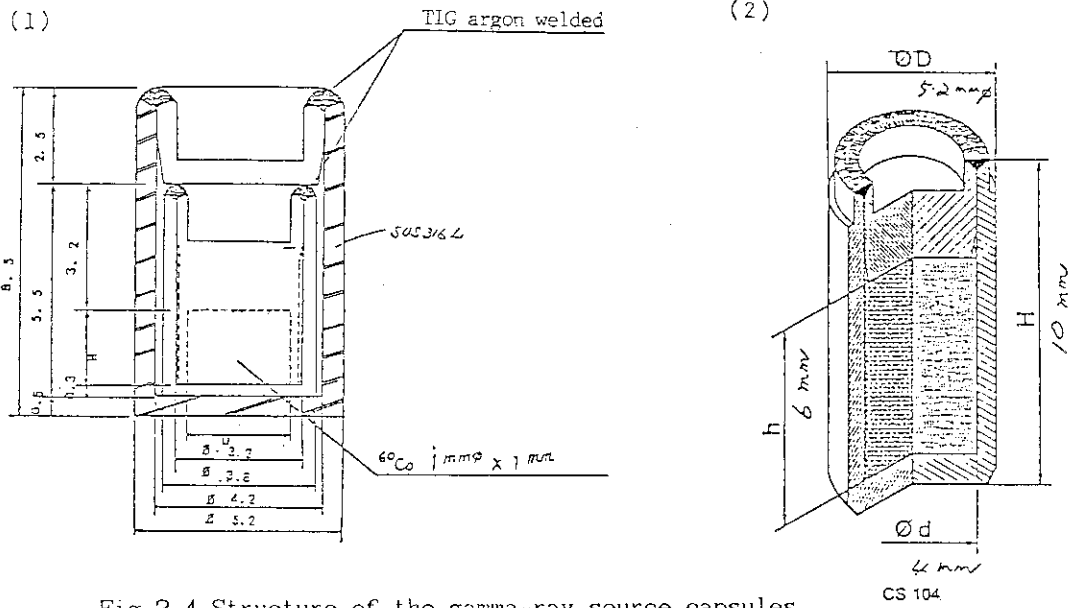


Fig. 2.4 Structure of the gamma-ray source capsules.

(1)  $^{60}\text{Co}$  (2)  $^{137}\text{Cs}$

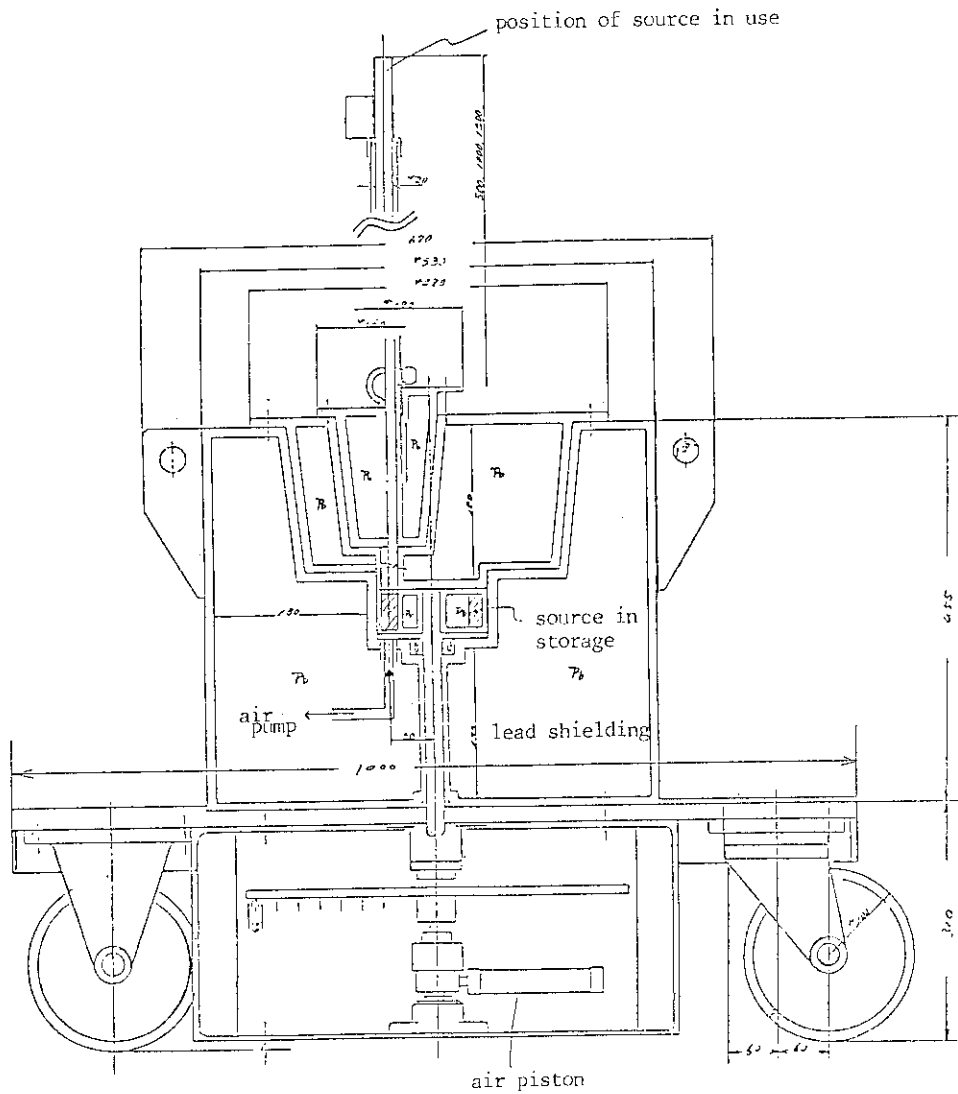


Fig. 2.5 Structure of the gamma-ray source container.

(1)



(2)



Photo 2.1 Outline of the field used for this experiment.

(1) Center of the field (air photo).

(2) Ground condition of the 1000m line.

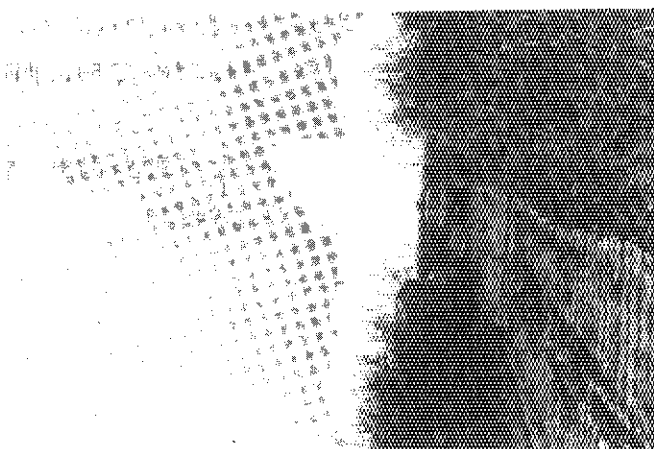
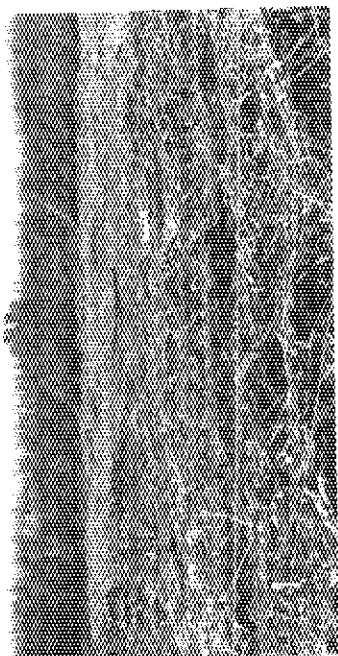


Photo 2.2 Constructed road mats.

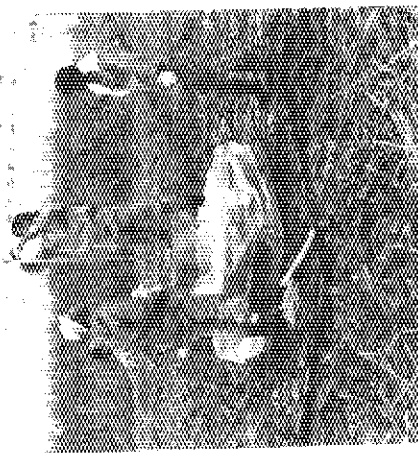


Photo 2.3 Source container.

Source capsule is lifted up by air pressure to the top of perpendicular irradiation pipe on the container.

### 3. 測定実験の方法

バックグラウンド放射線場及び人工放射線場の空間分布を明らかにするため、地上1 mにおける測定（地上測定）及び、20 m から 500 m までの 8 高度における測定（飛行測定）を実施した。本章では、地上測定及び飛行測定の方法について述べる。また、飛行測定においては、移動しながら連続測定した各種の情報を、一定時間間隔（今回は 1 秒）で記録するが、測定原理やデータ収録タイミングに起因するデータの時間的不一致がある。これを補正するための、データの前処理及び位置データの補正についても述べる。

#### 3.1 地上測定

##### 3.1.1 測定項目及び測定方法

地上における放射線分布を得るため、線源設置点から水平方向に 0 ~ 500 m 離れた地点（1000 m ライン上、線源設置点から 50 m 間隔で南北両方向）において地上 1 m で 3 MeV 以下の  $\gamma$  線波高分布（512 チャンネル）を測定した。測定は、線源照射時及び非照射時（バックグラウンド）兩者について実施した。測定器としては、 $3''\phi$  球形 NaI(Tl) 検出器、多重波高分析器を用い、電源は 400 W ポータブル発電機により供給した。測定系のブロック図を Fig. 3.1 に示す。

測定して得た  $\gamma$  線波高分布は、ストリッピング法によりスペクトル解析してフラックス密度及び線量率のエネルギースペクトル（50 keV 幅で 60 チャンネル）に変換するとともに、別途、波高分布に直接  $G(E)$  関数<sup>(4)</sup>を作用させて線量率に換算し、これらの水平方向分布を得た。

また、バックグラウンド線量率及び地表付近における  $\gamma$  線の散乱・吸収を計算によって評価するため、土壌試料を 1000 m ライン上において 50 m 間隔で採取し、核種分析、化学組成分析を行った。

核種分析は、土壌試料を東海研において純 Ge 検出器を用いて行い、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{208}\text{Tl}$  の濃度を測定した後、 $^{40}\text{K}$ 、U 系列、Th 系列毎に線量率換算した。ここで用いた換算係数を Table 3.1 に示す。

Table 3.1 Nuclide concentration-exposure rate conversion factors for  $^{40}\text{K}$ , U-series( $^{214}\text{Bi}$ ) and Th-series( $^{208}\text{Tl}$ )(5).

Nuclide	Conversion Factor
$^{40}\text{K}$	1.49 $\mu\text{R/h/w/o}$ of K in wet soil
U-series( $^{214}\text{Bi}$ )	0.62 $\mu\text{R/h/ppm}$
Th-series( $^{208}\text{Tl}$ )	0.31 $\mu\text{R/h/ppm}$

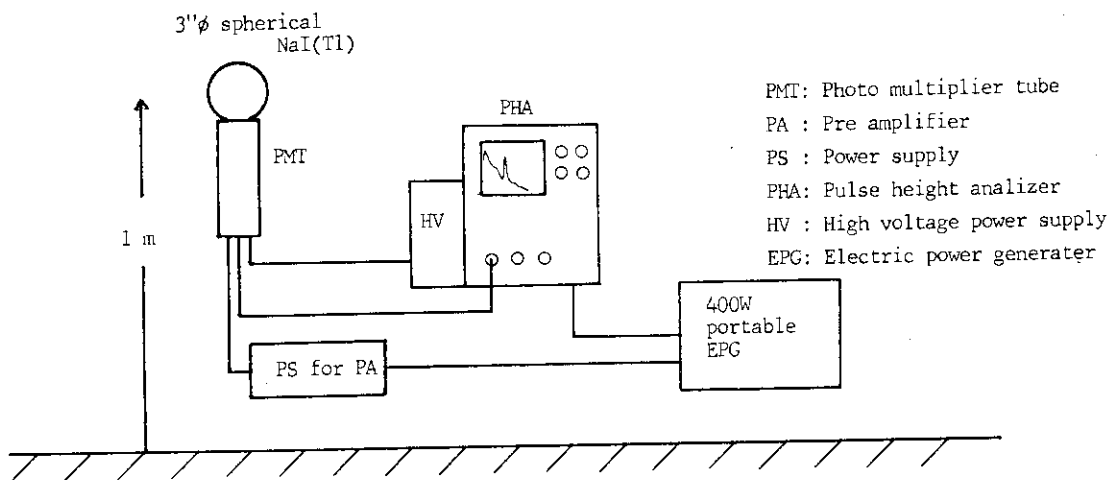


Fig.3.1 Experimental arrangement for measurement on the ground.

## 3.2 飛行測定

### 3.2.1 測定項目及び測定方法

飛行測定は、56年度の実験<sup>(2)</sup>と同様に、ベルロングレンジャー 206 L-1 型 ヘリコプタに  $\gamma$  線サーベイシステム（米国 Geo Metrics 社製）<sup>\*1</sup>及び位置計測用機器を搭載して、 $\gamma$  線及び位置の連続同時測定を行った（測定時間は 1 秒）。本測定システムのブロック図を Fig. 3.2 に示す。放射線については、2 種類の NaI (Tl) シンチレーション検出器からの  $\gamma$  線波高分布（253 チャンネル及び 60 チャンネルの 2 系統）を、位置についてはヘリコプタの高度（電波高度計、気圧高度計）及び線源設置点から約 2.5 km 離して設置した 2 局の MRS<sup>\*2</sup> 従局までの距離を測定した。測定データは、波高分布から計算された数種のバンド情報、日付、時刻などの情報とともに、予め FORMAT 化された様式で、1 秒測定終了の度にバッファメモリへ移され、4 秒分ずつまとめてバッファメモリから磁気テープに記録される。記録されるデータの一覧を Table 3.2 に示す。この他、ビデオカメラにより機体直下の状況を鉛直下マーク、高度、従局間距離及び時刻入りで録画した。システムの詳細については文献(1)に述べられている。

飛行測定は、2つのモードによって実施した。即ち、線源設置点上空を通過する 1000 m ライン（北側 500 m ~ 0 m, 南側 0 m ~ 450 m）上空を高度 20 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m の内の 1 つを選んで一定高度で飛行する「1000 m ライン上測定」と、線源設置点を中心とする 1 辺 1000 m の正方形内に、その正方形のある 1 辺に平行になるように 100 m 間隔で設定した長さ 1000 m の 11 本のコース（正方形の辺を含む）上を高度 150 m で逐次飛行測定する「スキャン測定」の 2 モードである。

1000 m ライン上測定の場合には、バックグラウンド測定は全検出器、全高度について実施し、線源測定は飛行高度における  $\gamma$  線場の強さと検出器の感度とを比較して適当な高度範囲を選択して飛行した。これについてはこの項の最後で検出器との関係とともに述べる。なお 1000 m ライン上測定では、統計精度を上げるためできるだけ遅い速度で飛行するとともに同一高度を 6 ~ 8 ランクくり返し測定した。

スキャン測定は、DET-1024<sup>\*3</sup>及び 5"  $\phi$   $\times$  4" NaI (Tl) を用いてバックグラウンドと <sup>137</sup>Cs 300 mCi について、5"  $\phi$  球形及び 4"  $\phi$   $\times$  4" NaI (Tl) を用いてバックグラウンドと <sup>60</sup>Co 400 mCi について実施した。

両モードの場合とも、搭乗員はパイロット、ナビゲータ、測定システムオペレータの計 3 名の構成とした。ナビゲータはコース、高度の指示、目標物の確認を担当し、測定システムオペレータは測定システム全体の操作、ビデオモニタによるコース、高度の確認、 $\gamma$  線波高分布スペクトル、チャートレコーダ等の監視を担当した。1 フライト当りの所要時間は 1 時間から 3 時間弱であり、適宜搭乗員を交代させながら測定を実施した。

今回の実験では、 $\gamma$  線の挙動を高精度で評価する（球形のもの）、外国の文献値<sup>(6)(7)</sup>と比較できるデータを入手する（4"  $\phi$   $\times$  4" のもの）、将来整備する実用型  $\gamma$  線サーベイシステムにおいて

- 
- \* 1 地質探査用のものを、スペクトル測定範囲、データメモリ条件等について、目的に合うよう改良した。
  - \* 2 Appendix II 参照のこと。
  - \* 3 DET-1024; 4"  $\times$  4"  $\times$  16" の直方体 NaI (Tl) を水平に 4 本並べた検出器

は放射線レベルの高低に応じて使用する検出器を取り替える方針であるため検出器の適性を評価し得るデータを入手する(3"φ×3", 5"φ, 5"φ×4"のもの), などの観点から, 6種類のNaI(Tℓ)検出器を用いて測定を行った。使用した検出器の種類及び特徴は以下のとおりである。

(1) 3"φ球形NaI(Tℓ)

6種類の中で最も検出感度が低い一方, 感度の方向特性が平坦であり, 測定評価精度が高い。また, 従来から環境γ線用検出器としての使用経験の蓄積がある。主に中, 高線量率場における標準測定用として用いる。

(2) 3"φ×3"円筒形NaI(Tℓ)

3"φ球形NaI(Tℓ)より若干検出感度が高い一方, 感度の方向依存性は3"φ球形より大きい。6種類の中で最も普及しているタイプである。主に中線量率場における線量測定用として用いる。

(3) 4"φ×4"円筒形NaI(Tℓ)

感度は6種類の中では中程度であるが, 方向依存性が比較的大きい。米国AMS<sup>(6)</sup>(Aerial Measurement System)で使用されており, データの比較用として用いられる。

(4) 5"φ球形NaI(Tℓ)

球形であるため感度の方向特性は平坦であり, 測定評価精度が高い。また3"φ球形NaI(Tℓ)より大型であるので検出効率も高い。主に低, 中線量率場における標準測定用として用いられる。

(5) 5"φ×4"円筒形NaI(Tℓ)

(6)に述べるDET-1024の次に効率が低い。また径と高さの比が5:4で, 円筒形ではあるが感度の方向特性は平坦に近い。主に低, 中線量率場における線量測定用, DET-1024の校正用として, また実用型検出器としても用いられる。

(6) DET-1024

4"×4"×16"の直方体NaI(Tℓ)を水平に4本並べて1つのケースに入れた検出器で, 6種類の中では最も検出効率が高い。一方, 感度の方向依存性は, 6種類の中で最も強い。主に低線量率場(バックグラウンドレベル程度)における線量測定用として用いられる。

測定系は2系統であるため, 検出器を2種ずつ組み合わせて測定することとしたが, 検出器の組み合わせの選択に際しては, 測定するγ線場の強さ(即ち, 線源の種類, 強度及び線源からの距離)及び検出器の感度を考慮する必要がある。そこでモンテカルロ計算により, <sup>60</sup>Co(100mCi, 400mCi)及び<sup>137</sup>Cs(100mCi, 300mCi)を地上に置いた場合の線量率の空間分布を推定<sup>(3)</sup>し, 別途推定した各検出器の測定可能線量率範囲との比較により, 使用線源, 飛行高度, 使用検出器の組み合わせを決定した。モンテカルロ計算による空間線量率分布の結果例<sup>(3)</sup>をFig. 3.3に, 使用線源, 飛行高度, 検出器の組み合わせをTable 3.3に示す。

以下3.2.2で測定データの前処理について, 3.2.3で測定データの補正について述べる。

Table 3.2 List of data recorded on magnetic tape.

## 1. Initialization data

Data	Note
year	lower 2 figures of AD year; 2 bytes (1byte= 8 bits)
date	Julian date; 3 bytes
time	hour, minute, second; 2 bytes for each
header	4 characters; 4 bytes
fiducial no.	4 digits, increase one by one with an external switch

## 2. Locational data

Data	Note
ID no. of MRS beacon	for beacon-1 and or beacon-2; 1 byte for each
MRS distance R1 & R2	unit= m; 5 bytes for each
altitude 1	digital value of radio altimeter(m); 4 bytes
altitude 2	analog value of radio altimeter(Volts); 6 bytes
altitude 3	analog value of barometric altimeter(Volts); 6 bytes

## 3. Radiological data

Data	Detector	Note
pulse height spectrum 1	1	253 ch; 2 bytes/ch
pulse height spectrum 2	2	60 ch; 2 bytes/ch
band 1	1,2	counting time(unit=0.1 msec); 3 bytes
band 2	1	total couns (40-3012 keV eq.); 3 bytes
band 3	1	counts from 32 to 252 ch (402-3012 keV eq.); 3 bytes
band 4	1	counts from 114 to 130 ch (1373-1574 keV eq./ <sup>40</sup> K peak); 3 bytes
band 5	1	counts from 139 to 155 ch(1668-1870 keV eq./ 1.76 MeV peak) ; 3 bytes
band 6	1	counts from 86 to 93 ch(1041-1207 keV eq./ 1.12 MeV peak) + 138 to 202 ch(1657-2426 keV eq./ 1.76 & 2.19 MeV peak) ; 3 bytes
band 7	1	counts from 202 to 235 ch(2414-2816 keV eq./ 2.62 MeV peak) ; 3 bytes
band 8	1	counts of 253 ch(3.012-6 MeV eq./ cosmic ray component); 3 bytes
band 9	2	total counts (47-2887 keV eq.); 3 bytes
band 10	2	counts from 35 to 39 ch(1668-1870 keV eq./ 1.76 MeV peak) ; 3 bytes
band 11	2	counts from 22 to 25 ch(1041-1207 keV eq./ 1.76 MeV peak) + 35 to 51 ch(1657-2426 keV eq./1.76 & 2.19 MeV peak) ; 3 bytes

(unit=cps except band 1)



Table 3.3 Combination of gamma-ray source, flight altitude and detector.

Detector	Applicable range of exposure rate	Source	Altitude (m)							
			<sup>m</sup> 20	<sup>m</sup> 50	<sup>m</sup> 100	<sup>m</sup> 150	<sup>m</sup> 200	<sup>m</sup> 300	<sup>m</sup> 400	<sup>m</sup> 500
DET-1024 5"φ × 4"	0.45 ~310μR/hr	<sup>60</sup> Co 400 mCi				○	○	○	○	○
		<sup>60</sup> Co 100 mCi	○	○	○	○				
		<sup>137</sup> Cs 300 mCi			○	○	○	○		
		<sup>137</sup> Cs 100 mCi	○	○	○					
		BG	○	○	○	○	○	○	○	○
5" 球 4"φ × 4"	3.1 ~520μR/hr	<sup>60</sup> Co 400 mCi			○	○	○	○		
		<sup>60</sup> Co 100 mCi	○	○	○	○				
		<sup>137</sup> Cs 300 mCi	○	○	○	○	○			
		BG	○	○	○	○	○	○	○	○
3" 球 3"φ × 3"	10 ~ 1000 μR/hr	<sup>60</sup> Co 400 mCi		○	○	○	○			
		<sup>60</sup> Co 100 mCi	○	○						
		<sup>137</sup> Cs 300 mCi	○	○	○					
		BG	○	○	○	○	○	○	○	○

○; Flight measurement was executed.

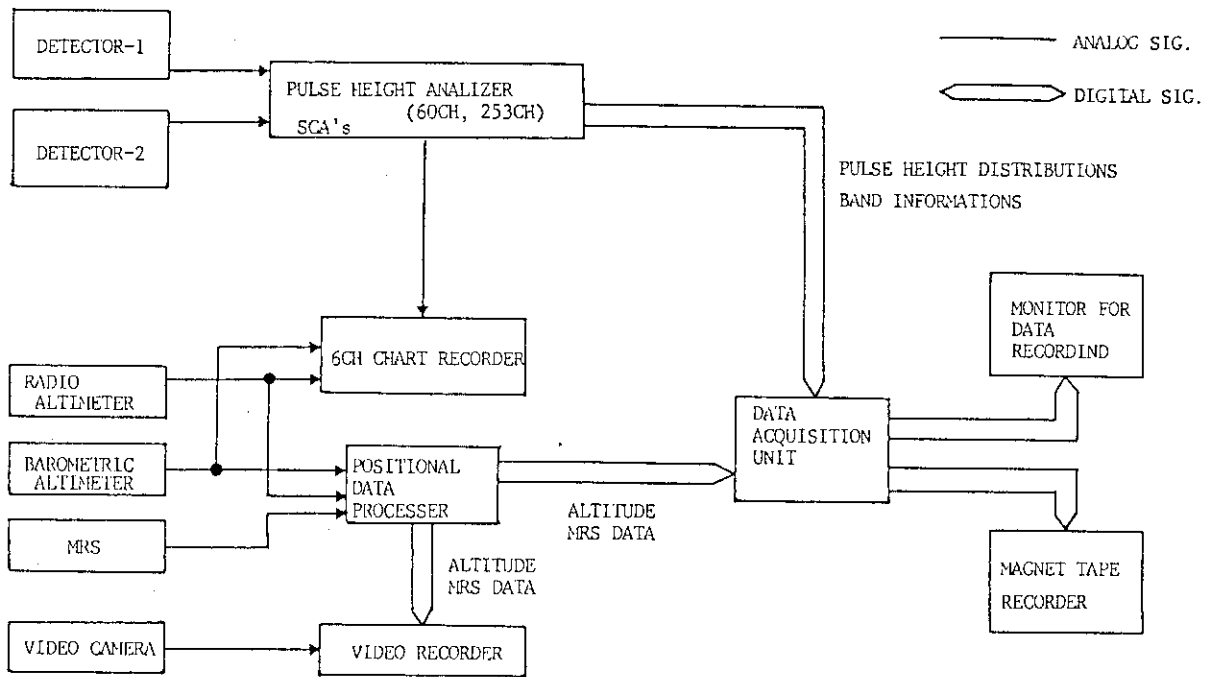


Fig.3.2 Block diagram of the gamma-ray survey system on board a helicopter.

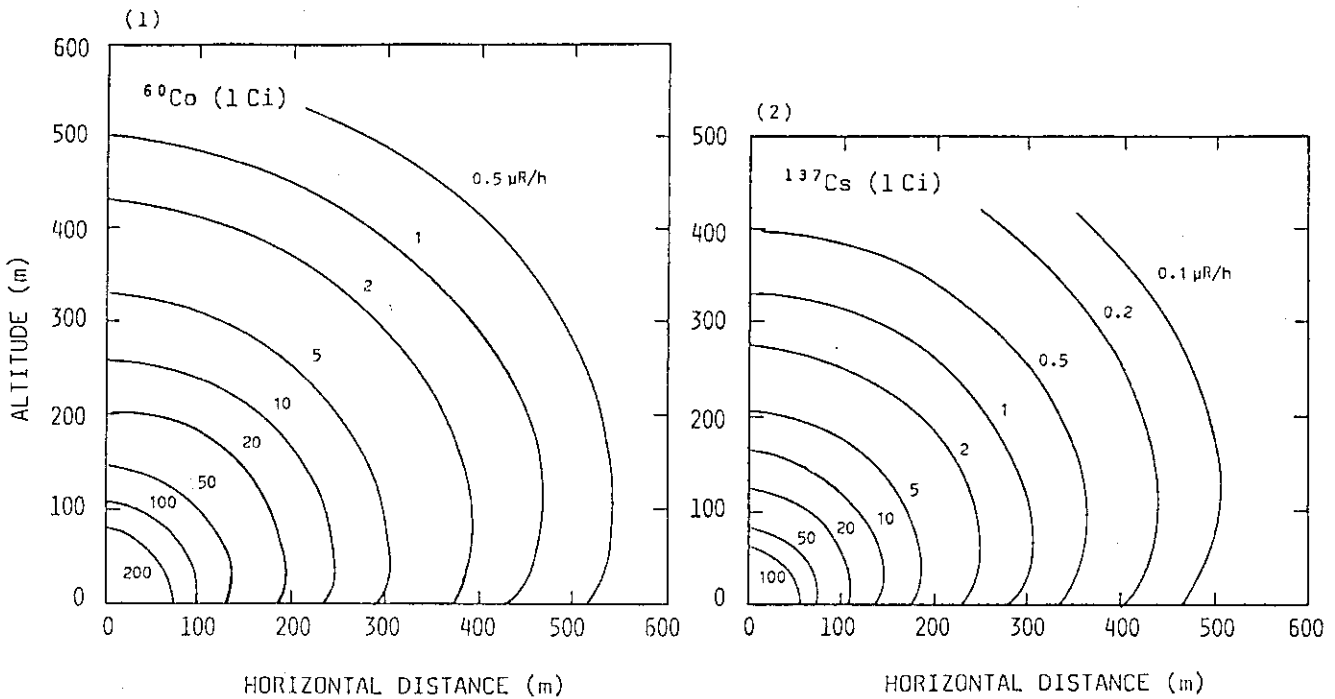


Fig.3.3 Distribution of exposure rate around a point gamma-ray source calculated using Monte Carlo method (3).

(1)  $^{60}\text{Co}$  1 Ci      (2)  $^{137}\text{Cs}$  1 Ci

### 3.2.2 測定データの前処理

上述のようにして得られた測定データを解析する前にいくつかの前処理をする必要があった。即ち、欠測データ、異常データ、 $\gamma$ 線波高分布上のノイズ、放射線データと位置データとの整合等である。以下にこれらの取扱い、処理方法について述べる。

#### 3.2.2.1 欠測データの内挿

今回の実験で取得した一連の1秒測定データのうち、MRSのデータ（ヘリコプタと2つの従局との距離）に欠測が比較的多く発生したが、高度及び放射線データの欠測は発生しなかった。MRSデータに欠測が発生した理由は、ヘリコプタ機体の向き、傾き或は、アンテナの指向性等により一時的に十分な回数の送受信が妨げられたことによるものと考えられる。

これらの欠測は、ヘリコプタがほぼ一定速度で飛行することから、欠測データ前後の欠測でないデータを用いて内挿することにより処理した。

#### 3.2.2.2 異常データの検出及び修正

MRSデータ及び高度データの一部に異常が含まれることがあることが分った。異常の症状の多くは、ほぼ一定高度、一定速度で飛行していれば、ヘリコプタと従局間の距離が1秒毎にはほぼ一様に増加（または減少）してゆくはずであるところが、突然その前後とかけ離れた値を示すというもので、原因は、MRSの電波が障害物により妨害されて到達しなかったこと、MRS装置の一時的不良動作などによるものと考えられる。これらの異常の発生はランダムで、共通する発生条件は見出せなかった。また、データリストの膨大な数字列の中から探し出すことも容易でないため、とりあえず異常データを含んだままのデータを用いて飛跡を計算し、図示した。一例をFig. 3.4に示す。データの中に異常が含まれている場合には、Fig. 3.4にあるようにその部分だけが全体の傾向と外れるため異常を発見できる。この方法は全て目視で異常を検出するため、異常の度合いが小さい場合には発見しにくく、また多大の時間、労力を要するという難点はあるが、今回はこの方法で異常値を検出し、欠測の場合と同様に、前後の正常なデータを用いて内挿した。なお、欠測及び異常データを自動的に検出、処理するため、隣り合うデータ値の差が、ある一定値以上であるか否かによって異常を検出、処理するプログラムを作成し、その適用性を検討したところ、殆ど問題ないことが分ったので、現在は自動処理を行っている。

#### 3.2.2.3 $\gamma$ 線波高分布上のノイズの差し引き

今回の実験で使用した放射線測定システムは、前述のように米国Geo Metrics社製のものである。一方検出器は、DET-1024及び3"φ×3" NaI(Tl)(DET-21)がHarshow社製で、その他の4種の検出器は国産である。今回の実験では、国産検出器を用いた測定において $\gamma$ 線波高分布上にノイズが発生する場合があった。症状としては、一定のチャンネルに一定の計数率（1～2 cps）でノイズが発生する場合と、一定のチャンネルにランダムな計数率でノイズが発生する場合の2通りあり、とくに高高度での測定で放射線の入射数が少ない時、相対的にノイズによる $\gamma$ 線波高分布の乱れが観測された。このノイズの原因は、ADCのディスクリレベルをある程度以下に下げた場合にADCが不安定動作の領域に入るため異常動作し、本来ディスクリレベル以下の信号の一部が、あるチャンネルに計数されてしまうことによるものである。このノイズは、応急対策として検出器の出力インピーダンスを規程の $\frac{1}{2}$ に落とし、入力インピーダンスを下げることによって生ずるゲインの降下を印加電圧を上げることによって補償するという方式をとった。現

在は ADC を改良して、異常動作の問題は解決している。

ノイズを含んだ波高分布は、一定チャンネルに一定計数率のノイズの場合は、その分差し引き、一定チャンネルにランダムな計数率のノイズの場合は、ノイズ発生チャンネルの前後のチャンネルの計数率を内挿することにより処理した。

#### 3.2.2.4 放射線データと位置データの整合

本実験によって得られるデータは、時刻、位置、放射線に関する情報である。このうち、放射線の空間分布に直接関わる量は位置と放射線データである。本実験では1秒毎のデータを磁気テープに記録する方式をとっているが、ヘリコプタは1秒間に約10mから20m移動すること、放射線データは1秒間の測定であるが、電波高度計は約1msec、MRSは数100msecで測定が終了すること、電波高度計測定値（電圧）のAD変換に数100msecを要すること、MRSデータの計算処理（電波の到達時間を距離に換算する）に約1secかかることを考慮して、放射線データが実際に代表している地点（又は区間）を同定する必要がある。さらに、AD変換や計算処理に時間を要することにより、ある1秒の間に測定された放射線情報と位置情報が、時間的にずれてバッファメモリへ移されるため、磁気テープに記録される時点で、別々のデータブロックに収納されることも考慮せねばならない。ここでは、これらの処理方法について述べる。Fig. 3.5に測定及びデータとり込みのタイミングを模式的に示す。

##### (1) 放射線データ

放射線データはある1秒間の最初から最後まで測定が行われ、その積算として表わされる。従ってこれを1秒以下の単位に分割することはできない。そこで、得られた放射線データは、その1秒のちょうど中間の時点（即ち測定開始の0.5秒後）における地点での値とし、位置情報との整合に際しては、位置情報だけを補正する。なお、放射線データは1秒測定終了と同時にバッファメモリへ移される。

##### (2) 高度データ

高度計のアナログ値は、毎秒の測定が終り、放射線データがバッファメモリへ移される時その時点でA/D変換された値がバッファメモリに記憶される。測定に要する時間は1msec以下でこれは1秒測定終了と同時にみなして差支えない。従って、放射線データと整合させるためには、注目しているデータブロックの高度（アナログ）値と、1つ前のデータブロックの高度値の平均値を、注目しているデータブロックの放射線データに対応させることとなる。

一方高度のデジタル値については、AD変換に数100msecを要するため、このデータが収納されるデータブロックは1つ遅れることになる点に留意して内挿する。

##### (3) MRSデータ

MRSデータは、ある1秒区間が開始してから11.5msec後に従局1との送受信を開始し、最低48回最高72回のサンプリングを行い、従局1のサンプリング終了後50msec休んで従局2について同様のサンプリングを行う。パルスのくり返し周期は924, 944, 964, 984 $\mu$ secの4通りであり、とくに問題のない限り48回のサンプリングで終了するとして、従局1つ当たり約45msecを要する。即ち、サンプリングの開始までの11.5msec、休みの50msecを考慮に入れると、従局1の値はその1秒区間開始後34msec経過後の値を、従局2の値は同じく129msec経過後の値を示すものと考えられる。従ってこのタイミングを考慮した上で、次の1秒

区間のデータと内挿して、注目している1秒区間の中央における値を求めればよい。但し、Fig. 3.5にも示すように、2つの従局に対するサンプリング終了後400 msec 休んでから、測定値を距離に換算するための計算に900 msec を要し、結局この値が収納されるデータブロックは、同じ1秒区間の放射線データの入ったデータブロックより1つ遅れる。従って、あるデータブロックの放射線データに対応するMRS データは、そのデータブロックの1つ後及び2つ後のデータブロックに収納されているMRS データを用いて内挿をすることとなる。

### 3.2.2.5 MRS 従局の設置点

MRS データ（ヘリコプタに搭載した主局と2つの従局との間の距離）と高度データとからヘリコプタの位置を求めるためには、ある基準点に対する従局設置点の位置（距離、高度差）を知る必要がある。本実験では、基準点として線源設置点をとった。

従局設置点と基準点の位置関係は、地図上から求めることはできるが、本実験の場合、従局設置点と基準点との間が約2.5 km と短いため読み取り誤差を含みやすい。そこで、光波距離計を用いて実測した。光波距離計の測定誤差は1 km 当り約25 cm であった。用いた光波距離計は2 km 以下用であったため、測定は中継点を設けて行い、三角法により算出した。結果は以下のとおりである。

		水平距離	高度差（後者－前者）
基準点	従局 1	2383.5 m	10.63 m
基準点	従局 2	2489.4 m	19.65 m
従局 1	従局 2	3569.2 m	-9.02 m

基準点と従局 1, 2 の位置関係を Fig. 3.6 に示す。

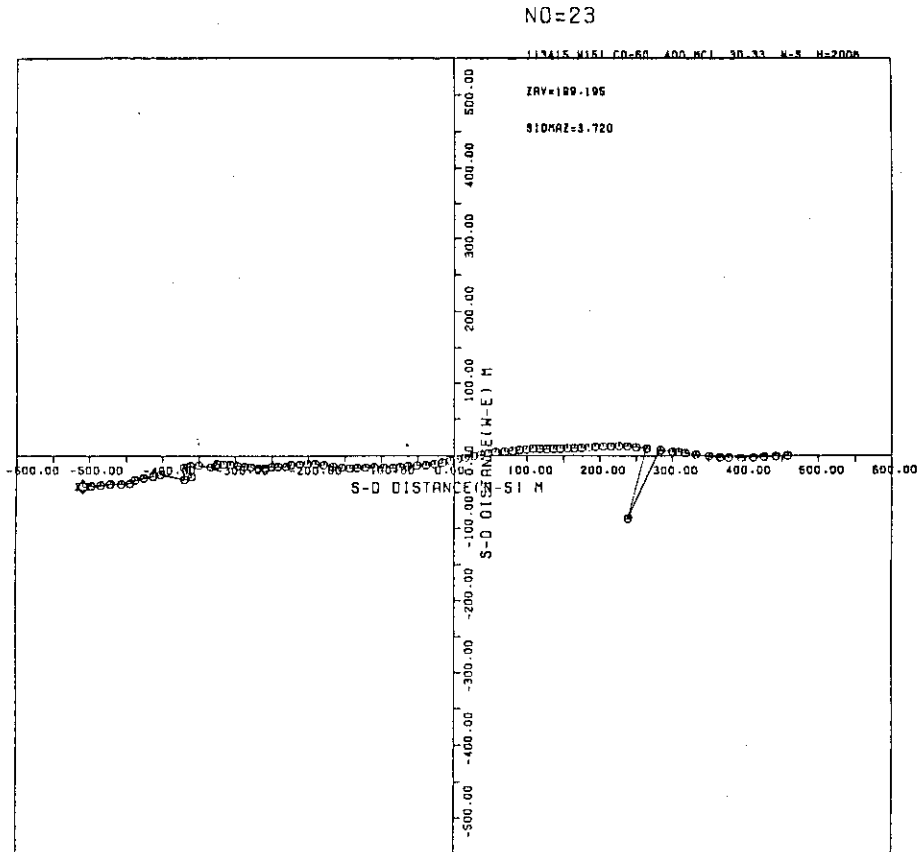


Fig.3.4 Example of irregular helicopter's track calculated using a set of MRS\* data including an abnormal one.

(\*MRS: Microwave Ranging System)

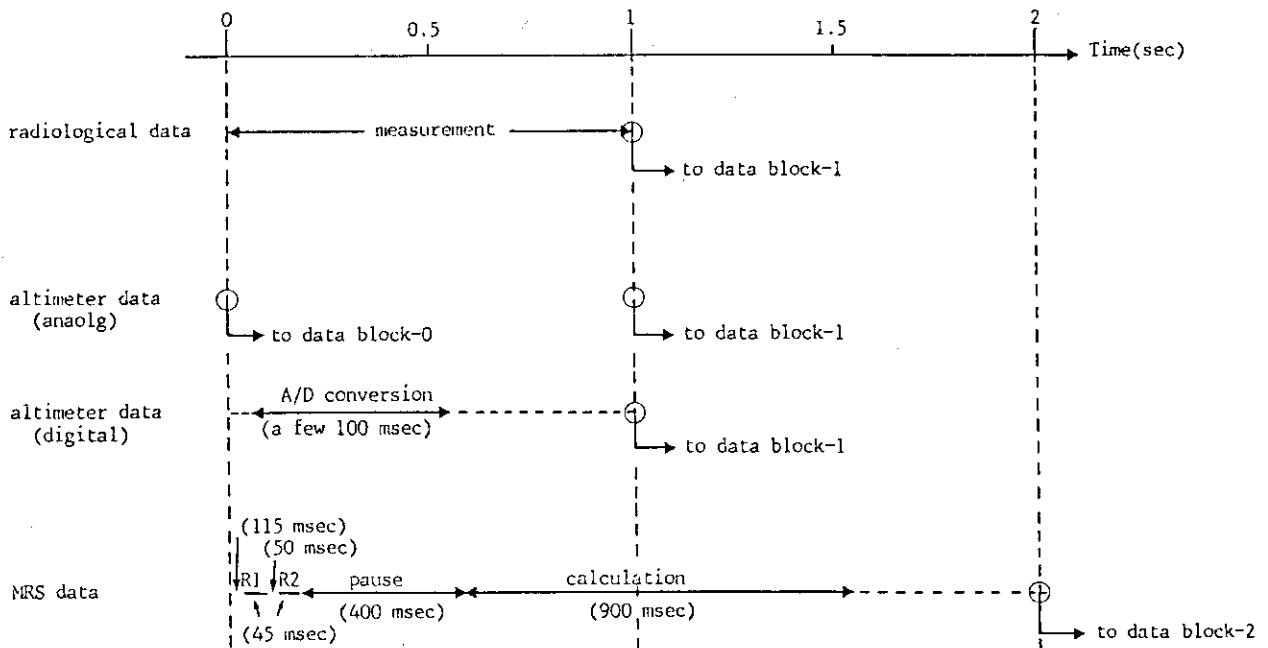


Fig.3.5 Timing of measurement and acquisition of each data.

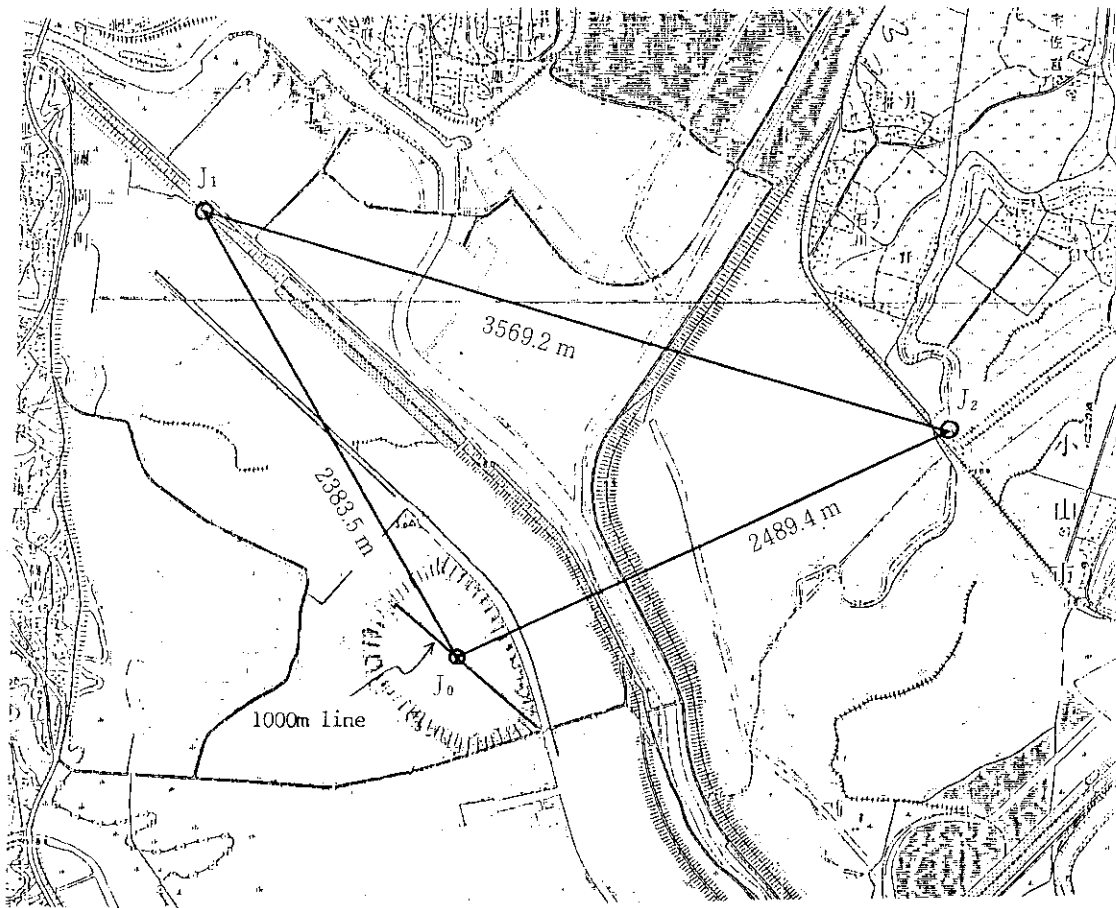


Fig.3.6 Positional relation among the cardinal point (the center of the field for this experiment), MRS beacon\* No.1 and No.2.

(\*beacon: receiver and transmitter of microwave)

$J_0$  : Cardinal point (relative altitude= 0 m)

$J_1$  : MRS beacon No.1 (relative altitude= 10.6 m)

$J_2$  : MRS beacon No.2 (relative altitude= 19.7 m)

## 3.2.3 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの算出及び補正

1000 m ライン測定により得た放射線データ ( $\gamma$  線波高分布) と位置データを用いて, 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布を求めた。

線量率は, 次式のように,  $\gamma$  線波高分布にその検出器用のスペクトル線量変換演算子  $G(E)$  関数を作用させて算出した。即ち

$$X(x, y, z) = \sum_{I=I_{\min}}^{I_{\max}} N(I, x, y, z) \cdot G(E_I) \quad (3.1)$$

$x, y, z$  : 測定地点の座標

$I$  : 波高分布のチャンネル番号

$I_{\min}$  : 波高分布の最小チャンネル番号 = 1

$I_{\max}$  : 波高分布の最大チャンネル番号 (系統 1 : 252, 系統 2 : 60)

$X(x, y, z)$  : 位置  $(x, y, z)$  における線量率 ( $\mu R/h$ )

$N(I, x, y, z)$  : 位置  $(x, y, z)$  における波高分布測定値 (cps)

$G(E_I)$  :  $E_I$  に対応する  $G(E)$  値 ( $\mu R/h/cps$ )

$E_I$  : 第  $I$  チャンネルの中央に相当する  $\gamma$  線エネルギー (keV) で次のように表わされる。

系統 1 ……  $E_I = 11.833 \cdot I + 29.1$  (keV)

系統 2 ……  $E_I = 47.333 \cdot I + 23.4$  (keV)

計数率は次式により求めた。

$$N_T(x, y, z) = \sum_{I=I_{\min}}^{I_{\max}} N(I, x, y, z) \quad (3.2)$$

$N_T$  : 計数率 (cps)

吸収エネルギーは次式により求めた

$$A(x, y, z) = \sum_{I=I_{\min}}^{I_{\max}} N(I, x, y, z) \cdot E(I) \quad (3.3)$$

$A$  : 吸収エネルギー (keV)

なお, DET-1024 については  $G(E)$  関数が決定されていない。一方, 吸収エネルギーと線量率との関係は別途<sup>(2)</sup> 明らかになっているので, その関係を用いて線量率を評価した。その関係は次式で表わされる。

$$X(x, y, z) = f \times A(x, y, z) \quad (3.4)$$

$$f = 0.0021 \mu R/h / (MeV/sec)$$

得られた放射線データは  $(x, y, z)$  座標で表わされるある地点における値である。ここで  $x$  は 1000 m ライン (北側を負, 南側を正とする),  $y$  は 1000 m ラインに直角な方向 (西側を負, 東側を正とする),  $z$  は高度とし, 原点は線源設置点とする。飛行測定においては, 空中をある速度で移動するため, この  $(x, y, z)$  を任意に選択することが極めて困難である。そのため,  $\gamma$  線場



の空間分布を求める場合には、20～500 mの各基準高度について、水平方向に北500 m、南450 mまで5 m間隔での値を内挿により求めることとし、必要な補正を行った。補正の方法はバックグラウンド測定の場合と線源測定の場合とで若干異なる。これについて3.2.3.1、3.2.3.2に述べる。

### 3.2.3.1 バックグラウンド測定データの補正

線源設置点から水平方向0 mから500 mの5 m間隔での1000 mライン上空各基準高度におけるバックグラウンド値（線量率、計数率、吸収エネルギー）を求める際、実際の飛跡が設定した直線飛行コースに対して水平（y軸）方向にずれる点、および基準高度に対して上下変動する点を考慮して補正しなければならない。

飛跡が、1000 mライン上空に設定した直線飛行コースから外れて水平方向にシフトした場合には、算出したx座標値をそのまま水平距離（即ち線源-検出器間距離）とすることはできないがシフト幅がせいぜい10 m程度であり、バックグラウンドの場合には位置が水平方向に10 m程度変動しても殆ど変化しないと考えられることから、水平（y軸）方向へのシフトによるバックグラウンド値への影響は無視した。

一方、飛行高度の上下変動については、放射線場が高度分布をもつため、設定した基準高度 $Z_0$ と実際の飛行測定高度 $Z$ での値の差を補正しなければならない。そこで、Fig. 3.7に示す線量率の高度分布を用いて、次式のように高度の上下変動分を補正した。

$$V_0 = V_e \cdot (X_0 / X_1) \quad (3.5)$$

$V_0$  : 基準高度 $Z_0$ の値に補正した値

$V_e$  : 高度 $Z$ での実測値

$X_0$  : 基準高度 $Z_0$ での平均線量率

$X_1$  : 高度 $Z$ での平均線量率

（ $X_0$ 及び $X_1$ はFig. 3.7に示す線量率高度分布から読み取る）

ここでFig. 3.7に示す線量率高度分布の考え方について述べておく。一般にバックグラウンド測定値を左右する要因としては、

- (A) 地殻中および大気中に存在する放射性物質に起因する成分で、本来のバックグラウンド成分
- (B) 宇宙線成分（ $\gamma$ 線成分は殆ど含まれていないが、高速荷電粒子がNaI(Tl)結晶中を通過することによりシンチレーション光が誘起される）および検出器系に含まれる $^{40}\text{K}$ 起因の成分
- (C)  $\gamma$ 線の入射方向分布、検出器感度の方向依存性、及びヘリコプタ機体における検出器の設置場所、吊下方向などによるしゃへい状態等に起因するもの

がある。ここで、要因(A)はその $\gamma$ 線場固有のものである。また要因(B)は検出器に固有の一定値となる（但し、宇宙線成分については緯度、高度が大きく異なる場における値とする）。要因(C)は検出器自体の感度特性に関わるもので、 $\gamma$ 線の入射量に対してfactorを乗ずるように作用する。

従って、同じ放射線場における異った検出器による測定値の相関をとると $y = a + bx$ （ $x, y$ は検出器のレスポンス、 $a, b$ は係数）の形を呈し、定数項 $a$ が要因(B)に起因する成分、傾き $b$ が要因(C)によるfactorに相当する。そこで、宇宙線成分及び $^{40}\text{K}$ 成分の値が分っている3"φ球形NaI(Tl)検出器を基準として、x軸に3"φ球形NaI(Tl)検出器による測定値から宇宙線成

分及び  $^{40}\text{K}$  成分 (3"φ 球形の場合, 計約  $0.20 \mu\text{R}/\text{h}$  相当) を差し引いた値をとり, y 軸にその他の検出器 D の測定値 (宇宙線成分及び  $^{40}\text{K}$  成分を含む) をとり, 両者の相関をとれば, 定数項 a が検出器 D の宇宙線成分 +  $^{40}\text{K}$  成分 (即ち要因(B)に起因する成分) に相当する。各検出器に対するこの相関式を次に示す。

$$y_{33} = \frac{a}{b} + 1.09 x \quad (\mu\text{R}/\text{h})$$

$$y_{44} = 0.412 + 1.06 x$$

$$y_{50} = 0.254 + 0.951 x$$

$$y_{54} = 0.295 + 1.04 x$$

$$y_{1024} = 0.286 + 1.01 x$$

x は 3"φ 球形の測定値から宇宙線成分及び  $^{40}\text{K}$  成分 (計  $0.20 \mu\text{R}/\text{h}$  相当) を差し引いた値,

$y_{33}, y_{44}, y_{50}, y_{54}, y_{1024}$  はそれぞれ

3"φ × 3", 4"φ × 4", 5"φ 球形, 5"φ × 4", DET-1024 NaI (TL) 検出器による測定値

Fig. 3. 7 に示す高度分布は, 要因(B)に起因する一定値増加分を除くため, 各検出器による測定値から定数項 a を差し引いたものとしてある。従って, Fig. 3. 7 に示す高度分布が検出器によって多少異なるのは, 要因(C)に依るものである。なお, 今後「バックグラウンド」という場合は, とくに断らない限り, 人工放射線場における測定値から差し引くべき「バックグラウンド」, 即ち, 要因(A), (B), (C) を全て含む値とする。

以上のように補正した上で各測定ラン毎の値をスムージングした。スムージングは次式<sup>(8)</sup>を用いた。

$$v_{jw} = \frac{1}{\sum_{i=-2}^2 w_i} \cdot \sum_{i=-2}^2 v_i w_i \quad (3.6)$$

ここで

$v_{jw}$  : 第 j 番目の点での値

$w_i$  : 荷重係数  $i = -2 \sim 2$

$$w_0 = 17, \quad w_1 = w_{-1} = 12, \quad w_2 = w_{-2} = -3$$

### 3. 2. 3. 2 人工放射線場における測定データの補正

線源測定データの場合には, 設定コースからの水平方向, 上下方向の変動を共に考慮する必要がある。この補正は, 3. 2. 3. 1 で求めた水平方向 5 m 間隔の各基準高度毎のバックグラウンド値と, 予めモンテカルロ計算により求めた単位強度の線源 ( $^{60}\text{Co}$  または  $^{137}\text{Cs}$ ) による線量率の空間分布<sup>(3)</sup> を用いて行った。この空間分布を Fig. 3. 8 に示す。補正手順は次の通りである。

- ①測定データに対応する位置を (x, y, z), 基準高度を  $z_0$  とする。
- ②(x, y, z) におけるバックグラウンド値 BKG (x, y, z) を求める。
- ③測定値から BKG (x, y, z) を差引き  $V_{\text{net}}$  とする。
- ④モンテカルロ計算により水平距離  $\sqrt{x^2 + y^2}$ , 高度 Z での線量率  $X_1$  と水平距離  $\sqrt{x^2 + y^2}$ , 高

度  $Z_0$  での線量率  $X_0$  とを求める。

⑤  $V_{\text{net}}$  に  $X_0/X_1$  を乗じて補正值とする。

なお、線源設置点付近での水平変動が 5 m (または 10m) 以上あり、それ以下の水平距離に対して内挿できない場合には、その付近の 4 ~ 8 点のデータを用いて二次式近似して評価した。

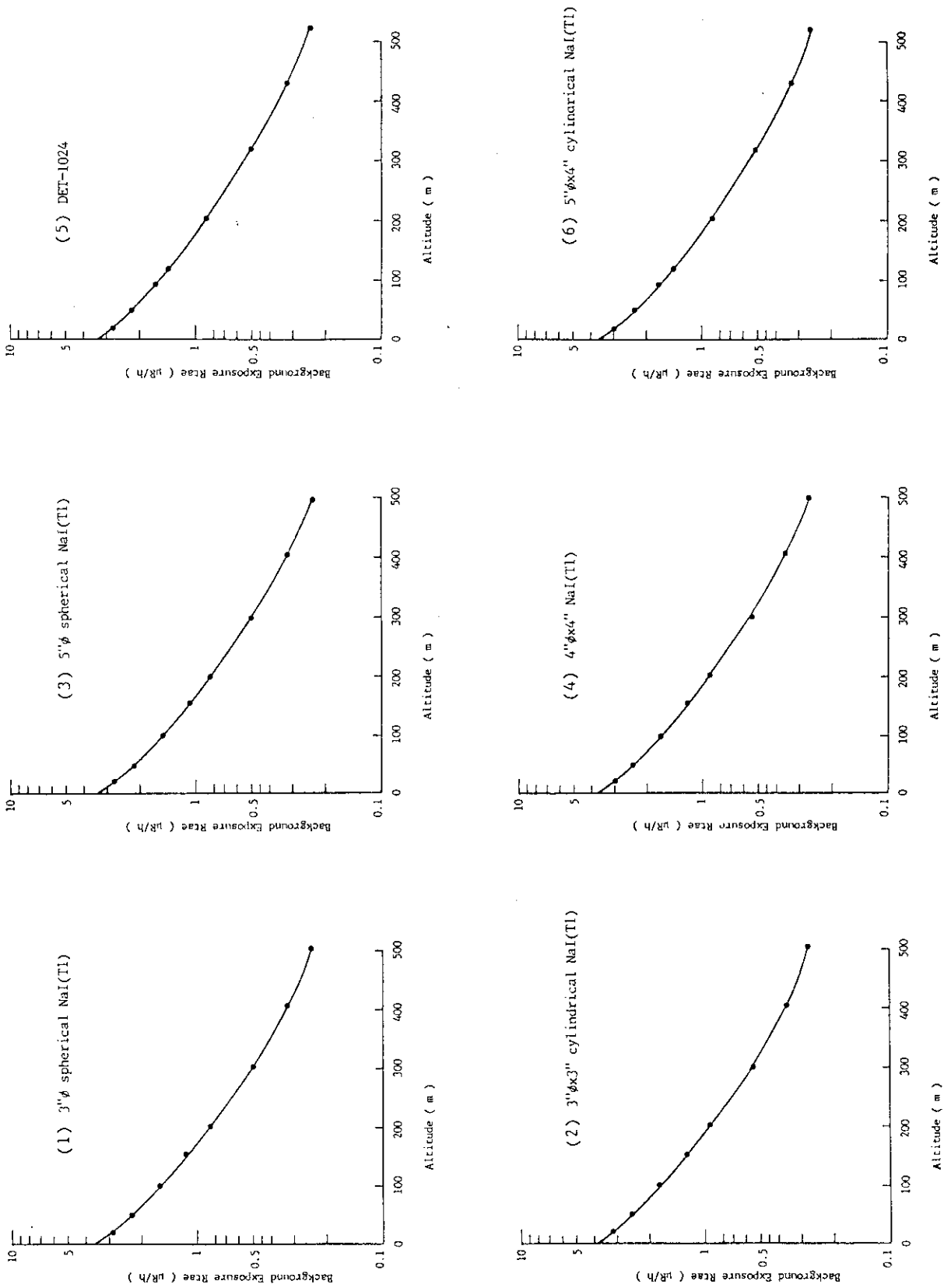


Fig.3.7 Vertical distribution of background exposure rate (cosmic ray and <sup>40</sup>K components are eliminated).

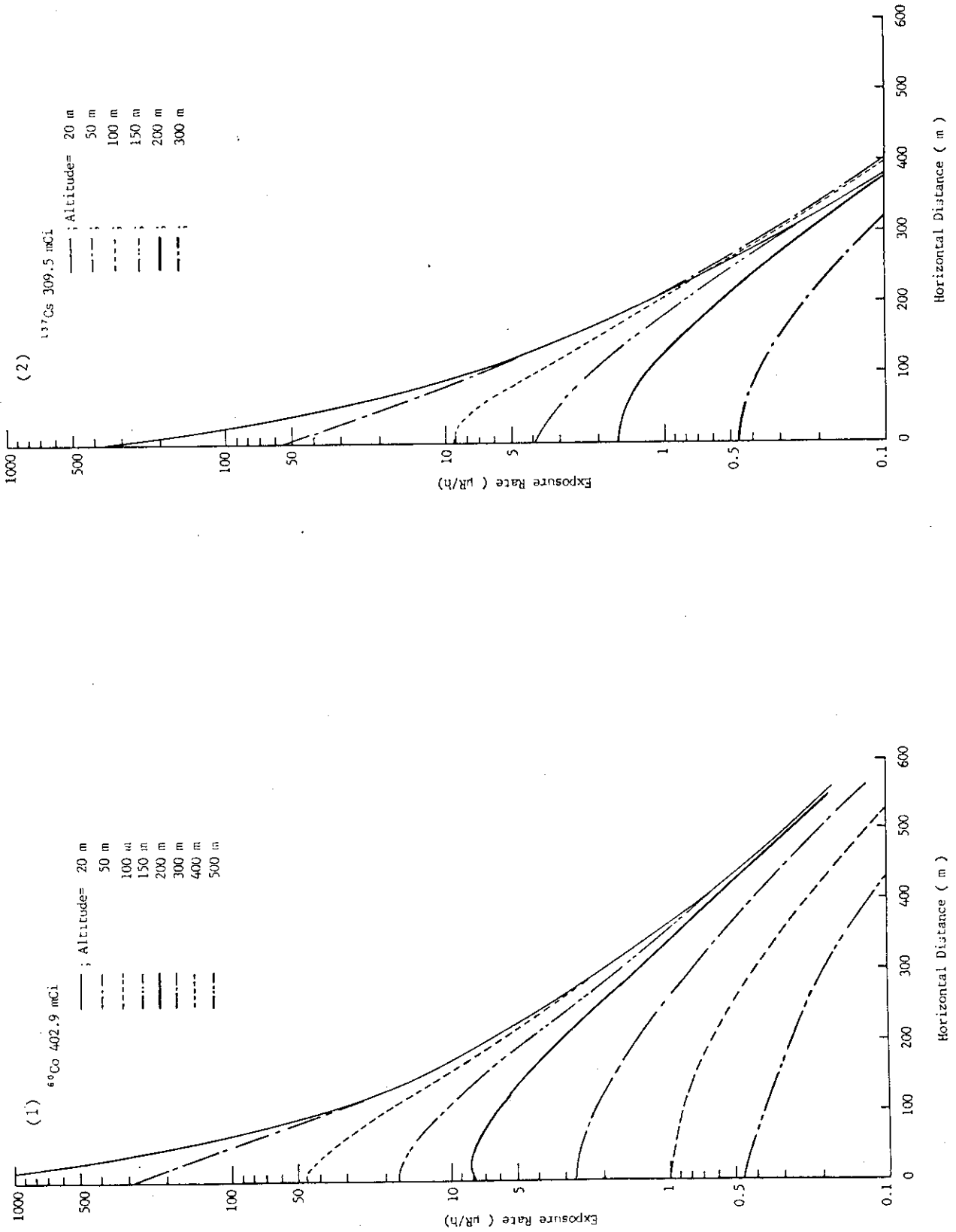


Fig.3.8 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m due to a point gamma-ray source calculated using Monte Carlo method (3). Source height is 2.5 m above the ground level.

## 4. 測定結果及び考察

第3章に述べた方法により得られた測定結果について述べる。また、結果に関する考察について述べる。

### 4.1 地上測定

#### 4.1.1 バックグラウンド測定

##### 4.1.1.1 線量率分布

地上（地表面上1m）において測定したバックグラウンド線量率の分布をFig. 4.1に示す。前述のように、地上におけるバックグラウンド測定は、3"φ球形NaI(Tℓ)検出器によって得たγ線波高分布にG(E)関数を作用させて評価したものと、土壌試料から核種分析によって求めた核種濃度に換算係数を乗じて評価したものと2通りある。Fig. 4.1にも示されているように両者は良く一致しててゐるが、飛行測定はNaI(Tℓ)検出器を使用したこと、NaI(Tℓ)検出器による測定はその場のγ線を直接測定しており地形や地表面の状態等バックグラウンドの変動要因を包含しているという点から、バックグラウンド線量率の地上値は3"φ球形NaI(Tℓ)検出器による測定値を基準とした。

バックグラウンド線量率は1000mライン上全体にわたりほぼ一定（±1μR/h）の値であった。場所により、値が多少異なる原因としては地質の分布、地形、地表面の状態などが考えられる。これについては次節4.1.1.2においてスペクトル解析の結果と併せて考察する。

##### 4.1.1.2 γ線エネルギースペクトル解析

測定して得たγ線波高分布をスペクトル解析して、そのエネルギースペクトルを線束密度及び線量率について求めた。一例として実験場中心部のエネルギースペクトルをFig. 4.2-1に示す。

バックグラウンド線量率の分布と同様に、エネルギースペクトルの形は1000mライン上各地点とも大きな差異はなかったが、以下に本実験場のバックグラウンドについて、地質、地形、地表面の状態の面から考察する。

#### (1) 地質

天然のγ線源としては<sup>40</sup>K、U系列、Th系列があるが、本実験場の場合はFig. 4.2に示されるように1.46 MeVと2.61 MeVのピークが最も顕著であり、<sup>40</sup>K(1.46 MeV)とTh系列(2.61 MeV等)の寄与がU系列(1.76 MeV等)よりも大きかった。U系列の内0.609 MeV、1.76 MeV、2.20 MeVのピークも確認はできるが、1.46 MeV及び2.61 MeVに比べるとピーク面積は小さい。これは通常のバックグラウンドスペクトルと同様の傾向である。Fig. 4.3に1000mライン上の<sup>40</sup>K、<sup>214</sup>Bi(U系列)、<sup>208</sup>Tℓ(Th系列)の濃度分布を示す。これによると<sup>40</sup>K、<sup>214</sup>Bi、<sup>208</sup>Tℓの濃度分布は同じような傾向を示している。また、濃度変化も大きくない。このことは、地質自体は基本的に同一であり、場所によって他の要因(例えば核種濃度構成の異なる土を用いた盛り土や含水量の差異)によって小さな部分的変化を呈すると考えられる。

## (2) 地 形

1000 m ライン上はほぼ平坦であったが、北側 200 m 地点は高さ数 m の丘上であった。このため、線源としての地面の形が他の地点と異なり、NaI(Tl) による測定線量値が他の平坦な地点より低くなることが予想された。実際にこの地点での線量値は他の地点より低かったが、Fig. 4.3 に示すように核種濃度も他の地点より低かったため、地形の影響は明確には評価できなかった。

## (3) 地表面の状態

北 500 m 地点の線量率値も他に比べ低かった。この地点は地面上に約 10 cm 冠水しており、その水による線量率の低下が考えられる。エネルギースペクトル (Fig. 4.2-2) の低エネルギー部分 (散乱線成分) の割合も他の地点より相対的にやや高目であり、水の影響を示唆している。

## 4.1.2 人工放射線場における測定

## 4.1.2.1 線量率分布

線源照射時における線量率分布を Fig. 4.4 に示す。線量率値は測定した  $\gamma$  線波高分布に  $G(E)$  関数を用いて得たもので、測定値から 4.1.1 で求めたバックグラウンド値を差し引き、1 Ci 当りの値に換算した。図にはモンテカルロ法による計算値<sup>(3)</sup>を併せて示した。測定値と計算値とは良く一致し、バックグラウンド値の評価、線源強度の評価の適切さも同時に裏付けられた。

<sup>137</sup>Cs の南側 300 m 以上の地点では、測定値と計算値が良く一致していないが、この辺りでは正味の線源寄与分そのものが 0.数  $\mu\text{R}/\text{h}$  以下となり、バックグラウンド値 (約 4  $\mu\text{R}/\text{h}$ ) の変動の中に入ってしまうため、差し引き誤差による不一致と考えられる。一方北側 250 m 以上で測定値と計算値との不一致が大きいが、これは前述のように北側 200 m 地点に丘が在り、線源からの直接線が殆んど到達しなかったことによるものである (Fig. 2.3 参照)。

また、線量率分布は、線源設置点を中心に南北ではほぼ対称の形をなし、線源強度による分布の形の違いも殆んどなく、これによっても線源強度の値付けを含めてデータの信頼性を裏付けた。

4.1.2.2  $\gamma$  線エネルギースペクトル解析

線源測定データのスペクトル解析結果 (エネルギースペクトル) の例を Fig. 4.5 に示す。ここで線源強度は 1 Ci として正規化してある。また、バックグラウンドスペクトルは 4.1.1.2 で求めたものを差し引いてある。 $\gamma$  線は、線源から測定地点までの距離が長い程直接線成分 (主ピーク部分に相当) が減少し、散乱線成分 (主ピーク以下のエネルギー部分に相当) の全体に対する割合が相対的に増加する。Fig. 4.5 の傾向はこれを裏付けている。また北側 250 m 以上の地点では、直接線が北 200 m 地点の丘により吸収されるため、直接線成分  $\approx 0$  となるはずである。従って、Fig. 4.5-1 で直接線成分と同エネルギーの位置に現れている成分は、空気中で小角散乱して (即ちエネルギーをあまり失わずに) 測定地点に到達した成分またはバックグラウンドの差し引き残りによる誤差と考えられる。

距離による  $\gamma$  線の減衰特性を定量的に考察するため、Fig. 4.6 に 1000 m ラインに沿った地上 1 m における線量率の直接線寄与分、散乱線寄与分及びその合計 (全線量率) の分布を示す。またモンテカルロ計算による結果<sup>(3)</sup>も併せて示す。ここで直接線寄与分としては、エネルギースペクトルの主ピーク相当分とし、<sup>60</sup>Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) については 1100 keV から 1450

keV まで、 $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) については600 keV から750 keVまでとした。測定値と計算値とは良い一致を示し、線源強度の値付けによる差異も殆んど認められない。線源の近くでは $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ とも直接線寄与分が支配的であり、直接線寄与分と散乱線寄与分とが同程度になるのは、 $^{60}\text{Co}$  の場合が約300m、 $^{137}\text{Cs}$  の場合が約150mであった。線源から離れる程測定値と計算値とが一致しなくなる原因の1つはバックグラウンドスペクトルの差引き誤差であるが、それ以外に前方散乱成分の評価誤差に依るものが考えられる。即ち、計算では1回以上散乱を起した $\gamma$ 線は、その散乱によって失われたエネルギーに依らず散乱線成分として計数されるが、実測データからスペクトル解析によって得たエネルギースペクトルの主ピーク付近には、いわゆる前方散乱を起してわずかにエネルギーを失った $\gamma$ 線による成分が存在する。そのためエネルギースペクトルの主ピークから純粋な直接線成分のみを取り出すことが困難であり、とくに散乱線成分の割合が高い、線源から離れた地点ほど計算値との差が広がる傾向にあると考えられる。

$^{60}\text{Co}$  の北250m地点の測定値が計算値より低いのは、北200m地点の丘により遮蔽されているためである。一方北400m地点で、計算値とのずれが北250m地点ほどではないのは、北400m地点では丘によって遮蔽される立体角が小さい上、この距離では散乱線成分の比率が高く、直接線の吸収が全体にはそれ程影響を与えないためと考えられる。

さらに、直接線寄与分の分布を見るため、直接線寄与分の全線量率に対する割合をFig. 4.7に示す。測定値と計算値はよく一致している。 $^{60}\text{Co}$  と $^{137}\text{Cs}$  を比べると、 $^{60}\text{Co}$  の方が距離による直接線の減衰が緩やかであるが、これは $\gamma$ 線のエネルギーの違いによるものである。北側250m以上の測定値( $^{60}\text{Co}$ のみ、 $^{137}\text{Cs}$ には測定値がない)で直接線寄与分( $^{60}\text{Co}$ の場合1100 keVから1450 keVまでの成分; 前述)が極端に下っているのは北側200m地点にある丘による吸収のためであることは明らかである。一方直接線は丘によってほぼ100%吸収されられるので、これも実際の直接線成分ではなく前述のように空気中で散乱して測定地点に到達したが、 $\gamma$ 線エネルギーは殆んど失われなかった成分(見かけ上は直接線成分としてカウントされる)による寄与分であると考えられる。



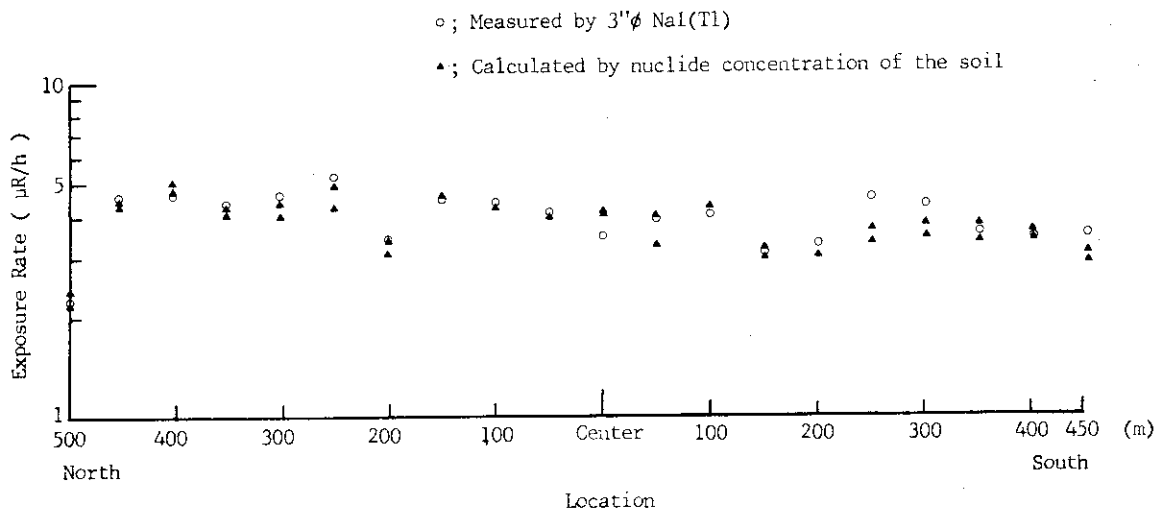


Fig.4.1 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m along the 1000m line.

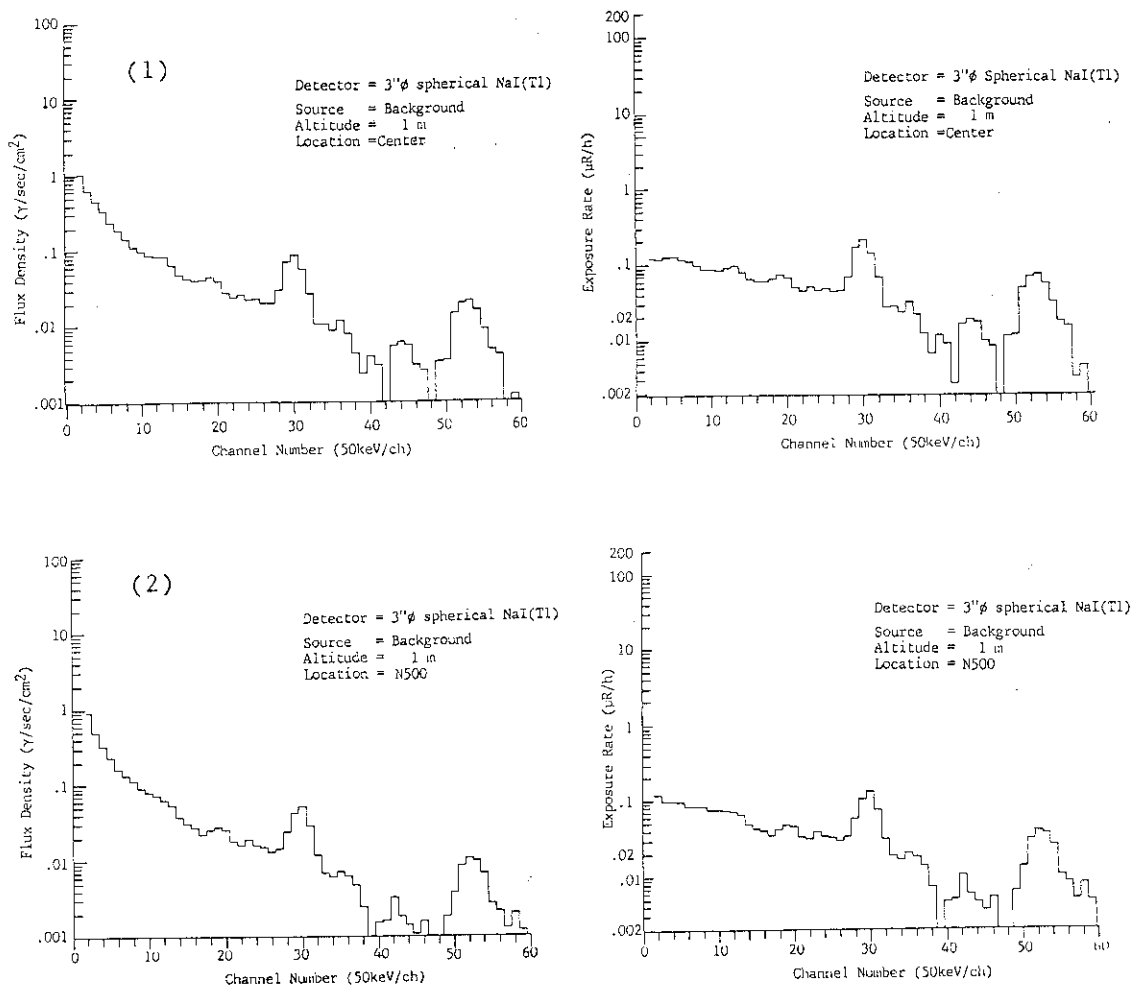


Fig.4.2 Background gamma-ray energy spectra at a height of 1 m.

(1) at the center of the field used for this experiment.

(2) at North 500m point on the 1000m line, covered with 10 cm thick of water.

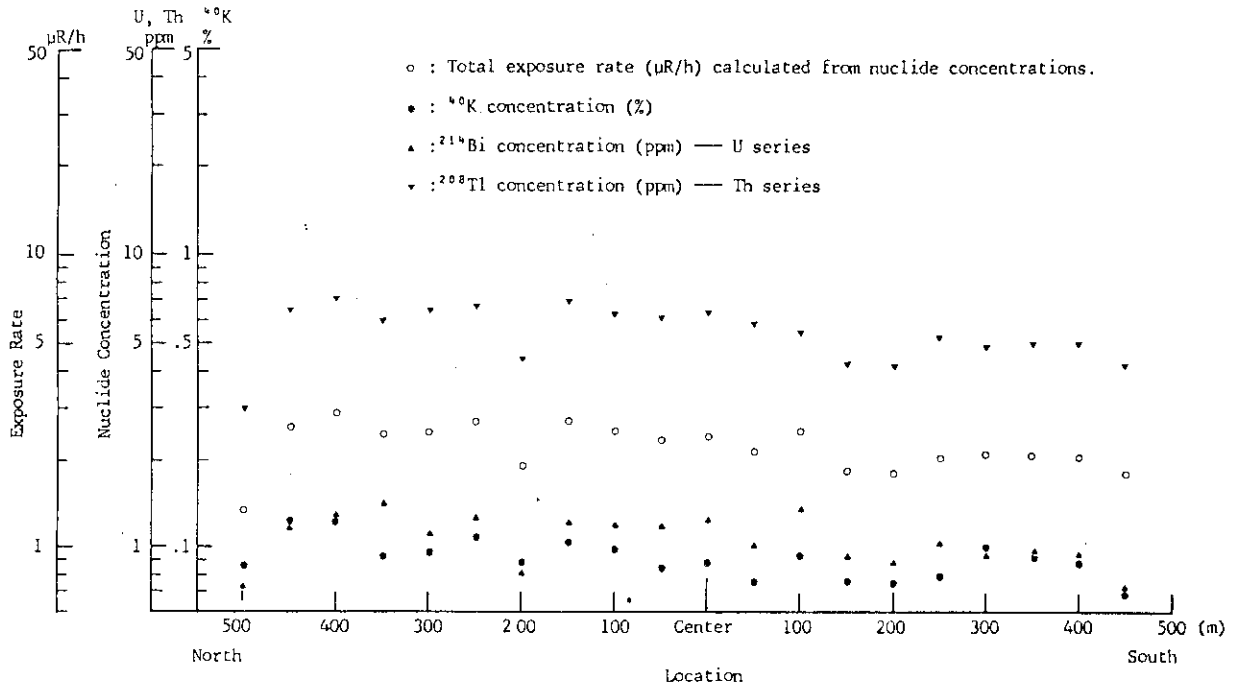


Fig.4.3 Horizontal distribution of nuclide concentrations of <sup>40</sup>K, U-series( <sup>214</sup>Bi ) and Th-series( <sup>208</sup>Tl ).

Soil samples were collected at every 50 m point along the 1000m line.

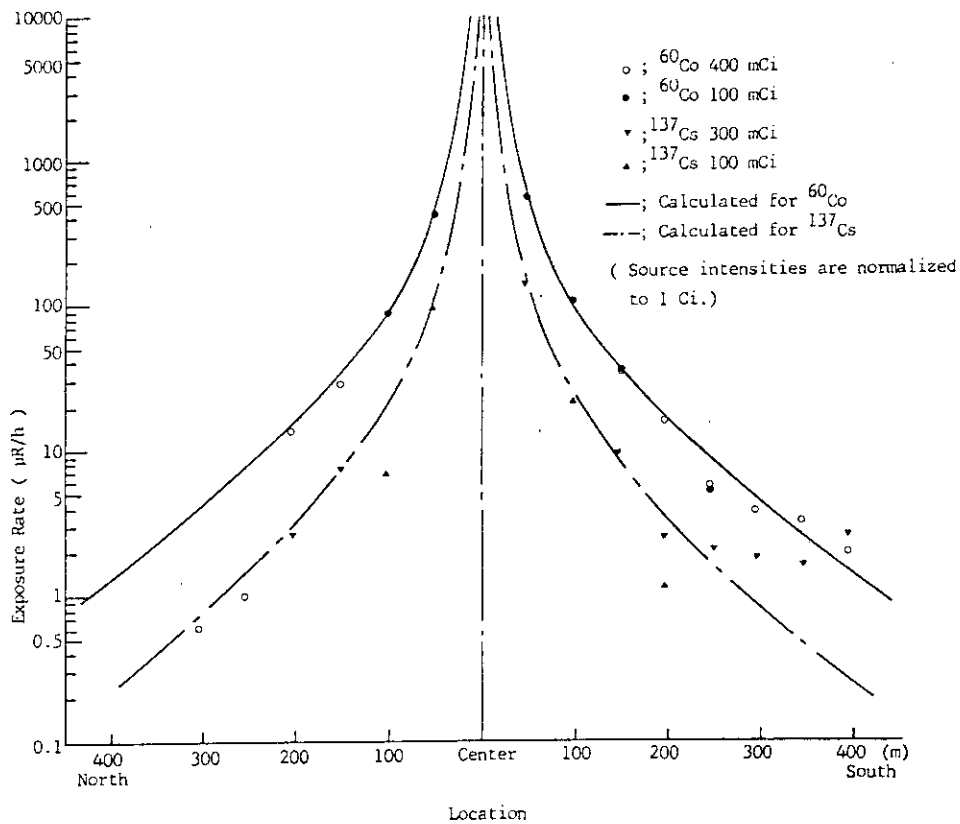


Fig.4.4 Horizontal distribution of exposure rate at a height of 1 m along the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

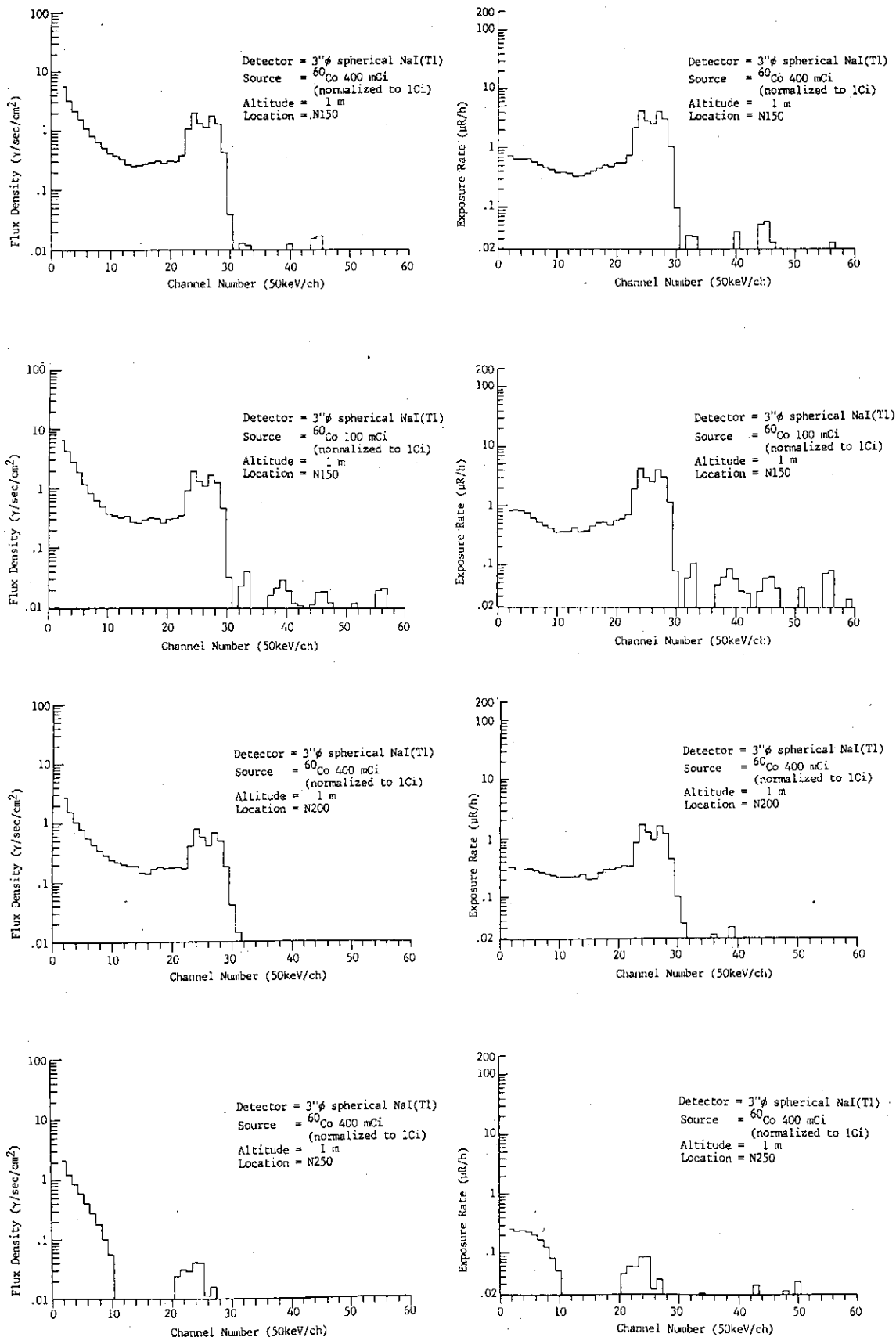


Fig.4.5 Gamma-ray energy spectra at a height of 1 m on the 1000m line during irradiation.

Source intensities are normalized to 1 Ci. (1/5)

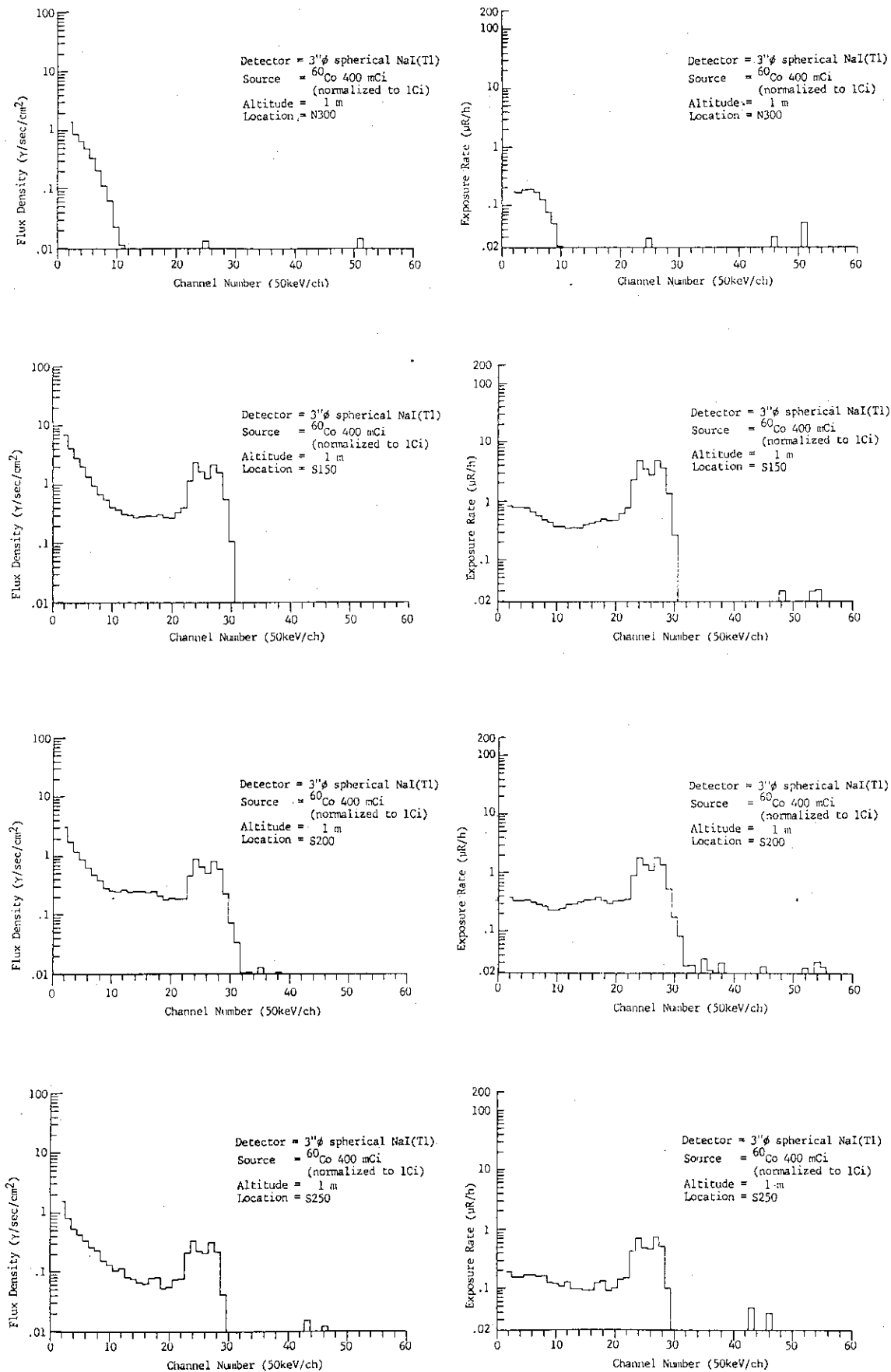


Fig.4.5 Cont'd (2/5)

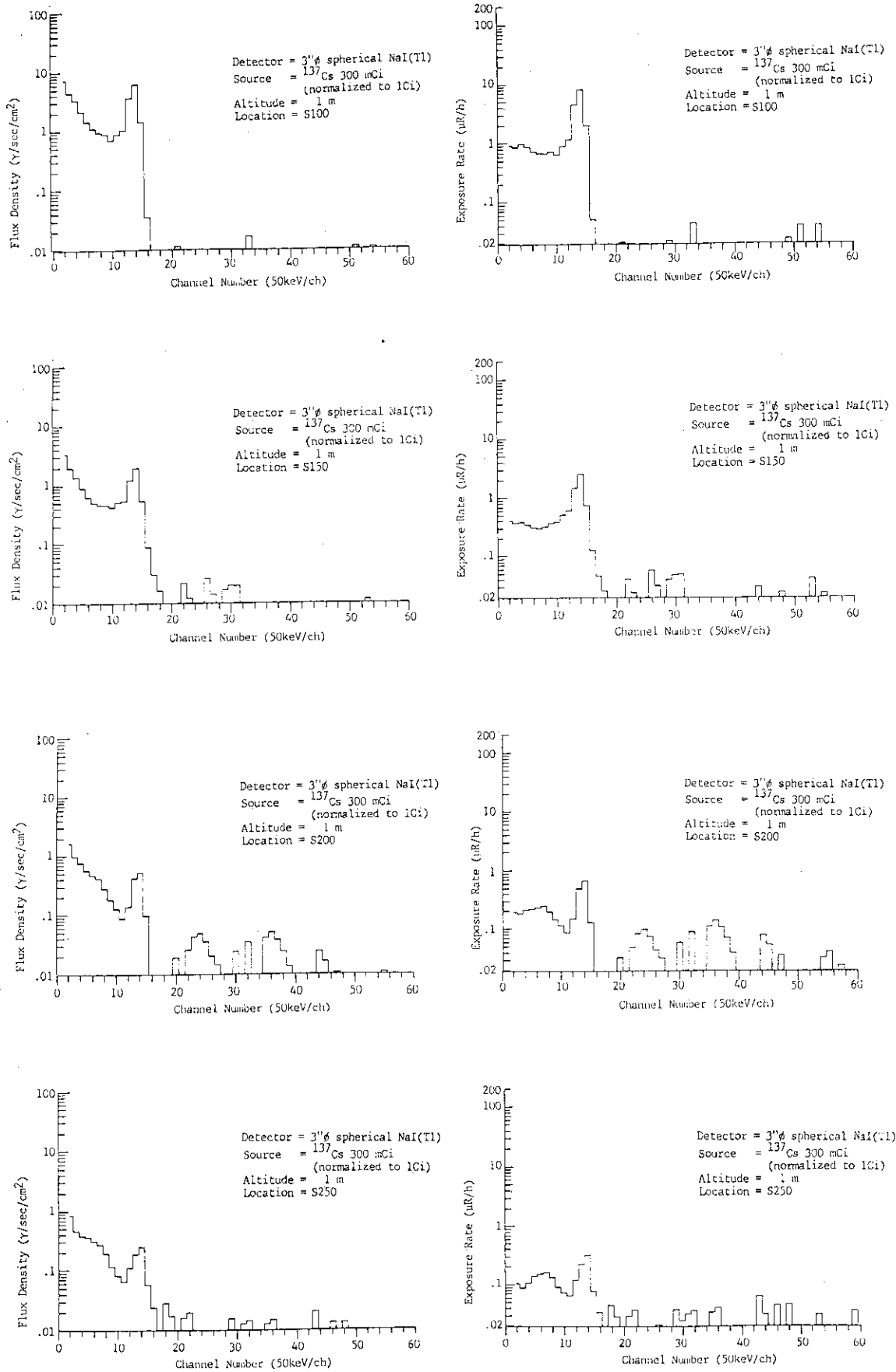


Fig.4.5 Cont'd (3/5)

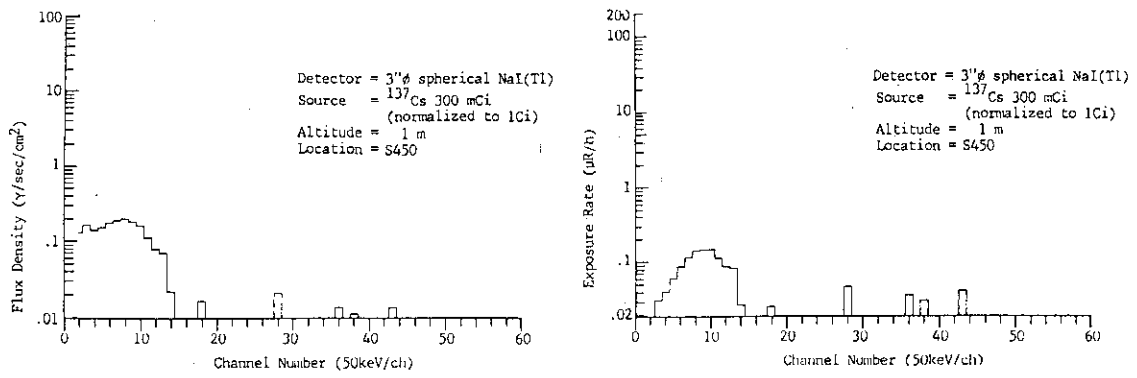


Fig.4.5 Cont'd (4/5)

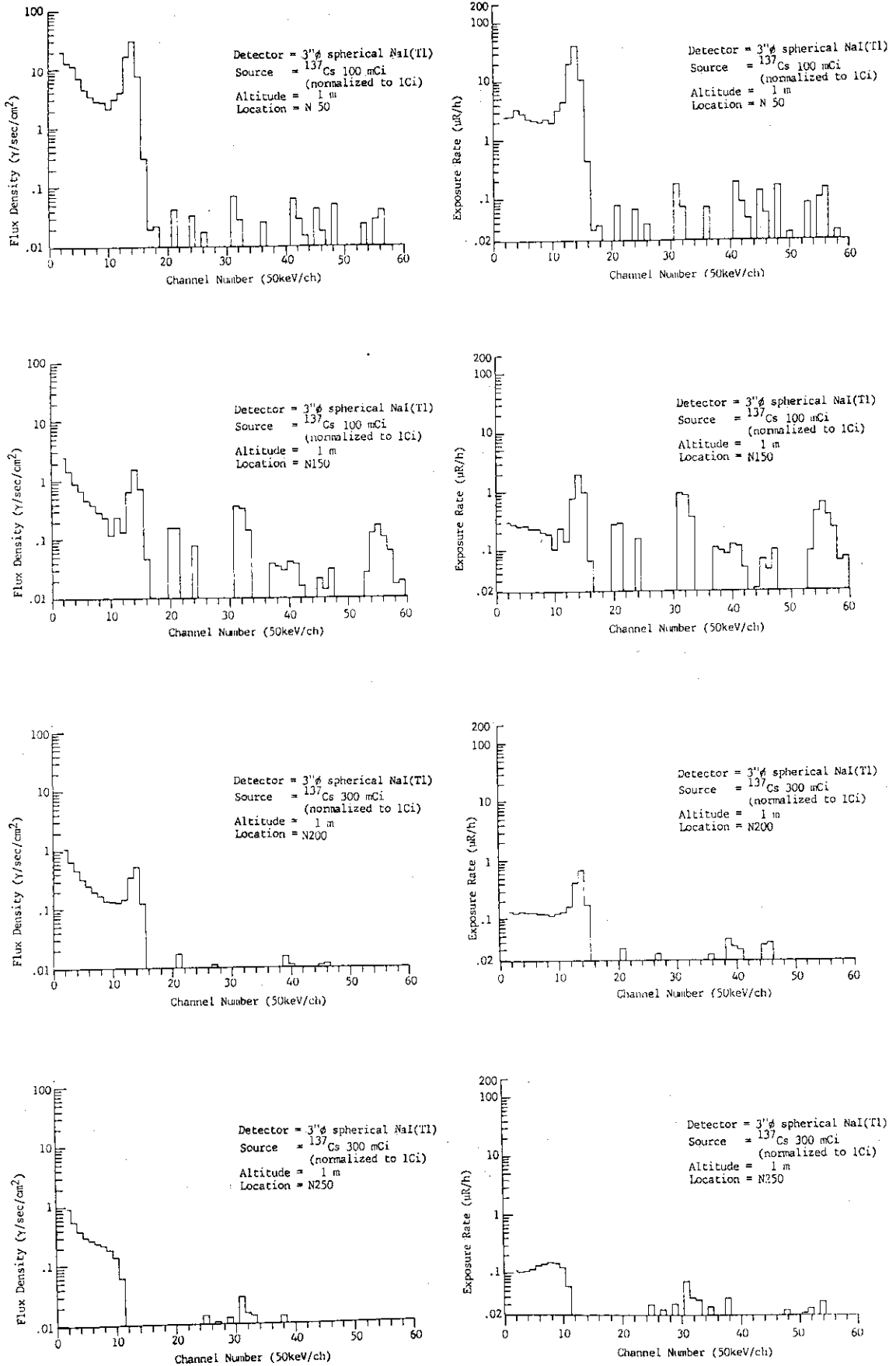


Fig.4.5 Cont'd (5/5)

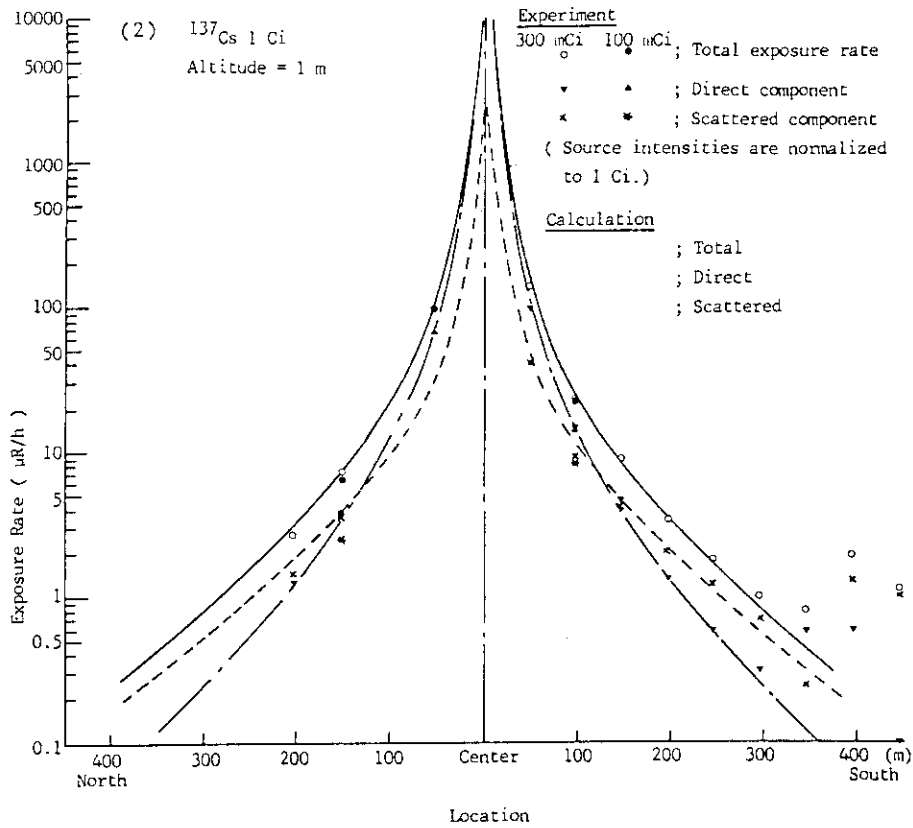
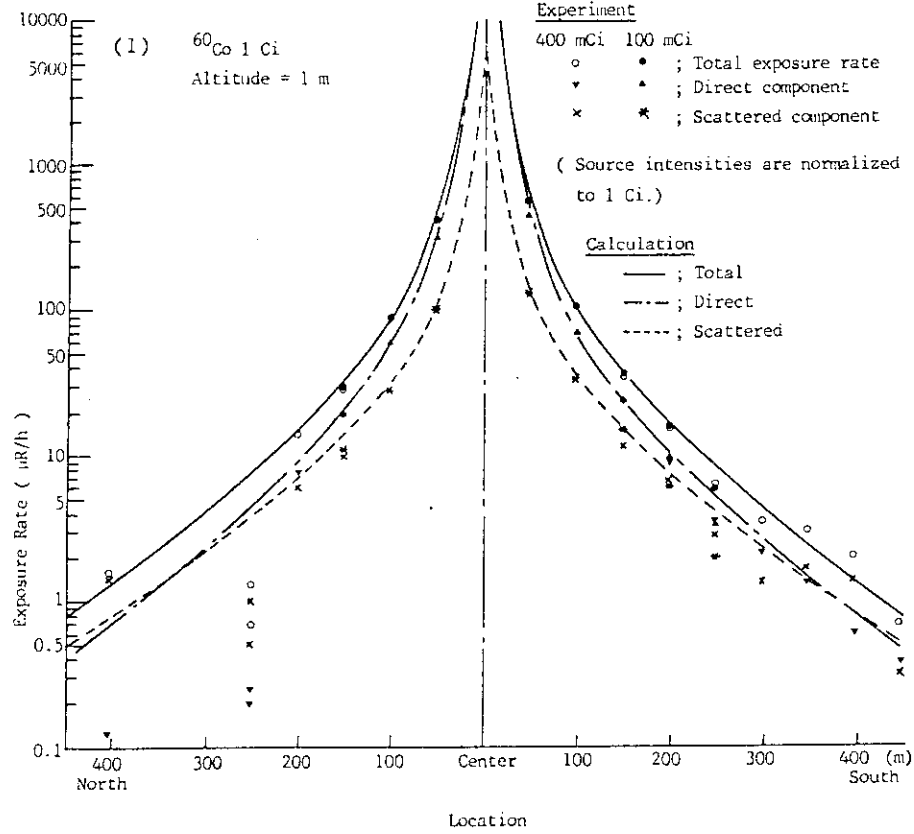


Fig.4.6 Horizontal distribution of total exposure rate, direct component and scattered component at a height of 1 m along the 1000m line during irradiation.  
Source intensities are normalized to 1 Ci.



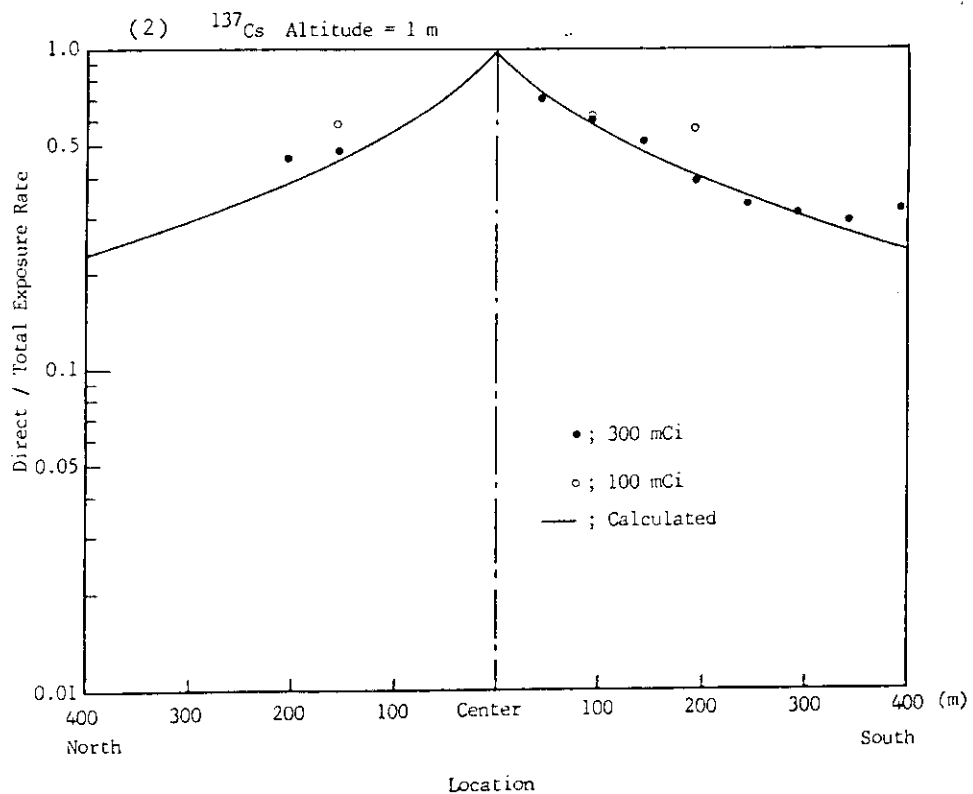
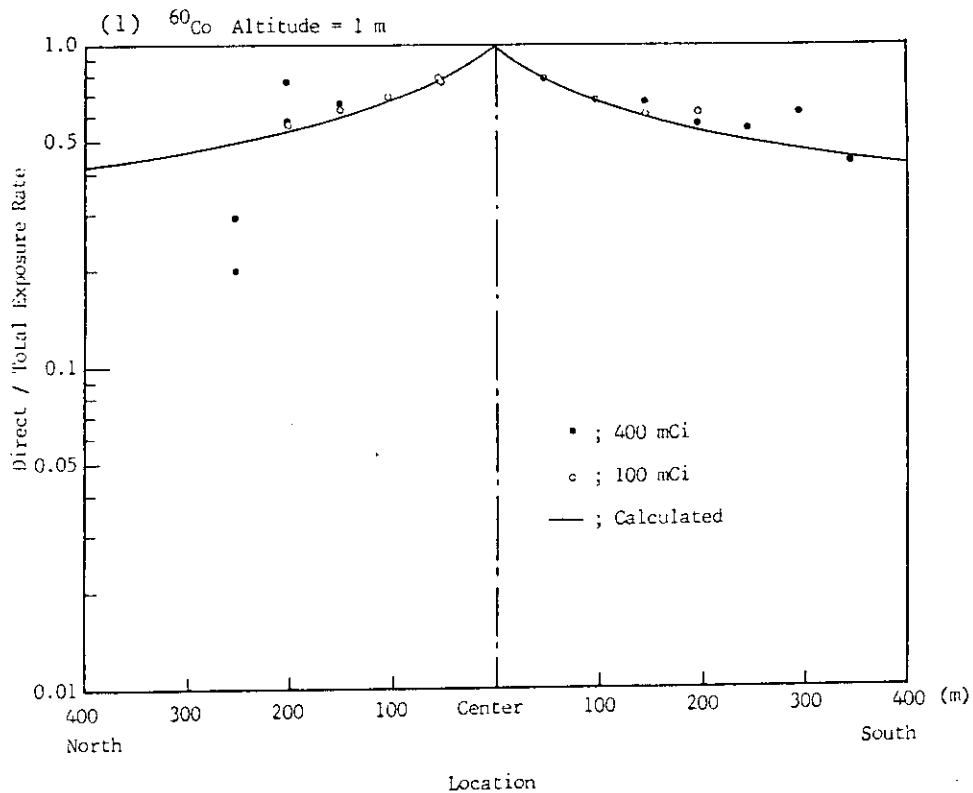


Fig.4.7 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate of direct component)/(total exposure rate) at a height of 1 m along the 1000m line during irradiation.

## 4.2 飛行測定

### 4.2.1 バックグラウンド測定 (1000 m ライン上測定)

#### 4.2.1.1 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布

線量率, 全計数率, 吸収エネルギーの空間分布 (1000 m ライン上空, 各基準高度) を各検出器についてまとめたものを Fig. 4.8 に示す。この結果は統計精度を高めるために 1 基準高度当たり 6~8 回の測定ランを平均したものである。高度が高くなる程これらの値は低くなり, また各高度における分布はほぼ平行している。高度 20 m 及び 100 m の北側 500 m から 400 m の範囲では, 若干低目の値を示しているが, これは地上測定の節でも述べたように, この辺りの地表面に水がたまっていたためであると考えられる。これらのことから, 飛行測定は, 地上測定に比べて周辺の放射線情報を平均的に把握できること, 地上付近が不均一な放射線場であっても高度 150 m 以上になるとかなり平滑化されることが分った。

一方検出器毎に見ると検出器が大型である程分布が滑らかである。これは検出感度が大型ほど高いため統計的バラツキが小さいことによるものである。また, 同一の放射線場であっても検出器により線量率の絶対値が若干異なる場合がある。これは, 3.2.3.1 で述べたバックグラウンド測定値の変動要因(B)及び(C)に依るものである。

#### 4.2.1.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析

$3'' \phi$  球形 NaI (T $\ell$ ) 検出器により測定した  $\gamma$  線波高分布をスペクトル解析し, 各基準高度におけるバックグラウンドエネルギースペクトルを線束密度及び線量率について求めた。4.2.1.1 に述べたように, 基準高度 20 m, 50 m を除いて, バックグラウンドはほぼ平坦 (一定) であるので, 基準高度 100 m 以上については 1000 m ライン上空の北側 500 m から南側 450 m までを平均し, 基準高度 20 m 及び 50 m については北側 500 m から北側 400 m までと北側 400 m から南側 450 m とを区別し, それぞれの区間での測定値を平均してエネルギースペクトルを求めた。

得られたエネルギースペクトルを Fig. 4.9 に示す。高度が低い場合には  $^{40}\text{K}$  (1.46 MeV),  $^{208}\text{Tl}$  (2.61 MeV) などのピークが明確に現われるが, 高度が高くなるにつれて減少する。これは, 直接線の減衰と散乱線の相対的な増加によるものである。

これらのバックグラウンドエネルギースペクトルは, 4.2.2.2 において, 人工放射線場における測定データの  $\gamma$  線エネルギースペクトル解析の際に, 差し引くべきバックグラウンドスペクトルとして用いられる。

### 4.2.2 人工放射線場における測定

#### 4.2.2.1 線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布

線源測定における線量率, 計数率, 吸収エネルギーの空間分布を Fig. 4.10 に示す。ここでバックグラウンド分は, 4.2.1.1 で求めたものを差し引き, 線源強度 = 1 Ci として正規化してある。また, 高計数率の場合の数え落としの補正は, 次式を用いて行った。

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau} \quad (4.1)$$

- $n_0$  ; 補正值 (cps)  
 $n$  ; みかけの計数率 (cps)  
 $\tau$  ; ADCの分解能を含むシステムのパルス処理時間で不感時間に相当する  
 (5  $\mu$ sec)。

この場合、数え落としが2%以上となるのは4000 cps以上で、今回の測定においては、とくにDET-1024、5'' $\phi$ ×4''などの大型検出器に数え落としが生じている。しかし、バックグラウンドレベルでは数え落としの補正は殆んど必要ない。なお、後述の計数率—線量率の関係 (Table 4.1) を用いると、4000 cpsに相当する線量率は、3'' $\phi$ 球形で75  $\mu$ R/h、3'' $\phi$ ×3''で60  $\mu$ R/h、4'' $\phi$ ×4''で35  $\mu$ R/h、5'' $\phi$ 球形で25  $\mu$ R/h、5'' $\phi$ ×4''で22  $\mu$ R/h、DET-1024で3  $\mu$ R/h程度に相当する。

線量率、計数率、吸収エネルギーの3つの物理量の分布は、それぞれ良く似た形を呈している。このことは、緊急時モニタリングのように迅速性を最も重視するような場合、或はエネルギー特性の秀れた線量率測定装置や評価手法を有しなくても、計数率や吸収エネルギーから線量率を推定できることを示唆してゐる。これについては4.2.4.2において考察する。

Fig. 4.11に測定結果とモンテカルロ計算値<sup>(8)</sup>との比較例を示す。両者は良く一致しており、地表面に線源がある場合、飛行測定値から計算によっても地上付近の放射線場を評価し得る。なお、線量率の低い所で測定値と計算値の間に系統的なずれが生ずるが、これは、線源測定とバックグラウンド測定とを飛行計画上の理由から別の日に行ったため、バックグラウンド値が若干変化したためと考えられる。

また、水平距離、高度ともに同じであっても線量率値が異なる場合があるが、これは放射線の入射方向分布が高さ、場所に依り均一でないことと検出器の感度の方向特性が個々に異なることに起因する。とくにDET-1024と5'' $\phi$ ×4''の線量率を比較すると、DET-1024の方が高い。これは、DET-1024の吸収エネルギー—線量率換算係数は、平坦な自然環境中という $\gamma$ 線入射方向分布が一定であるような場において得られた5'' $\phi$ ×4''NaI(Tl)検出器との同時測定データから算出されたものであるが、5'' $\phi$ ×4''検出器の方向特性が平坦であるのに対してDET-1024は最大断面積方向が最も高感度になるという強い方向依存性を有している。そのため今回のように最大断面積面を水平に設置した場合には、鉛直下方からの $\gamma$ 線入射に対してDET-1024の感度が上り、地上に点線源を置いたgeometryの中では相対的にDET-1024の指示値が上るという理由に依るものと考えられる。

さらに、得られた線量率の空間分布を用いて線量率の等値線を作成した。その例をモンテカルロ計算の結果と併せてFig. 4.12に示す。入力データ数が十分でないこと、上述のようなバックグラウンドの変動による誤差などの問題は有るが、測定値と計算値とは良く一致した。なお、この図においても線源強度は1 Ciに正規化してある。この等値線図の作成に当っては、核融合研究部理論解析研究室で作成された図形入出力サブシステムARGUS-V 4を使用した。

#### 4.2.2.2 $\gamma$ 線エネルギースペクトル解析

線源測定におけるスペクトル解析結果の例をFig. 4.13に示す。飛行測定の場合には、移動しながら測定するため放射線情報のある1点での代表値に対応させることは困難である。また、計数率が低いため統計精度も十分でない。そのため、線量率のレベルに応じて1-20秒分の測定

値の平均値を用いてスペクトル解析を行い、位置はその測定範囲を示した。

Fig. 4.14に、線量率の直接線成分、散乱線成分及び両者の合計（全線量率）の分布を示す。同時にモンテカルロ計算による値も示す。測定値と計算値は、線源に近い位置で良く一致している。また全体の傾向も良く一致している。線源から離れるに従ってずれが生ずるが、これは、地上での測定値と計算値が良く一致していたことを考えると、バックグラウンドと別の時間に測定することによるスペクトルの変動や、計数が不十分なための統計誤差が原因と考えられる。なお上述のように、何秒分かのデータを平均したスペクトルを用いたため、図にプロットした点はその位置（データをまとめた区間の中間点）での代表値ではなく、「その付近の平均値」であることも、みかけ上の誤差の要因となる。

Fig. 4.15に直接線成分の全線量率に対する割合の分布をモンテカルロ計算値とともに示す。高度が低い程、また線源からの距離が短いほど両者はよく一致している。両者のずれの原因は、地上測定の場合と同じく、エネルギーを殆んど失わない散乱線成分の評価及び計数不足による統計精度の低下にあると考えられる。

#### 4.2.3 スキャン測定

今まで述べた測定結果は、とくに断わりのない限り、1000 mライン上の飛行及び地上測定に関するものである。本実験では1000 mライン上測定以外に、MRS誘導航法によるスキャン飛行測定も実施した。即ち、1000 mライン上測定が、1本の予め定められたコース上をくり返し飛行するのに対して、スキャン飛行は、線源設置点を中心とする1000 m四方の正方形内を100 m間隔で平行に設定した計画コース上を飛行するものである。Fig. 4.16にその計画コース及び実際の航路を示す。計画コース（WAY POINT）はMRS本体のメモリーに記憶させ、飛行しながら計画コースからのずれをナビゲータが読み取りパイロットに指示してコースを修正する航法（MRS誘導航法）により飛行したので、計画コース直下に1000 mラインのような目標ラインを設置しなかったにもかかわらず、最大でも50 m程度の誤差で飛行することができた。

このスキャン飛行では1000 mライン上飛行のような直線的なデータでなく、平面的なデータを入手できた。そのデータを用いて作成した線量率の平面等値線図をFig. 4.17に示す。この等値線図の作成についても前出のARGUSを用いた。

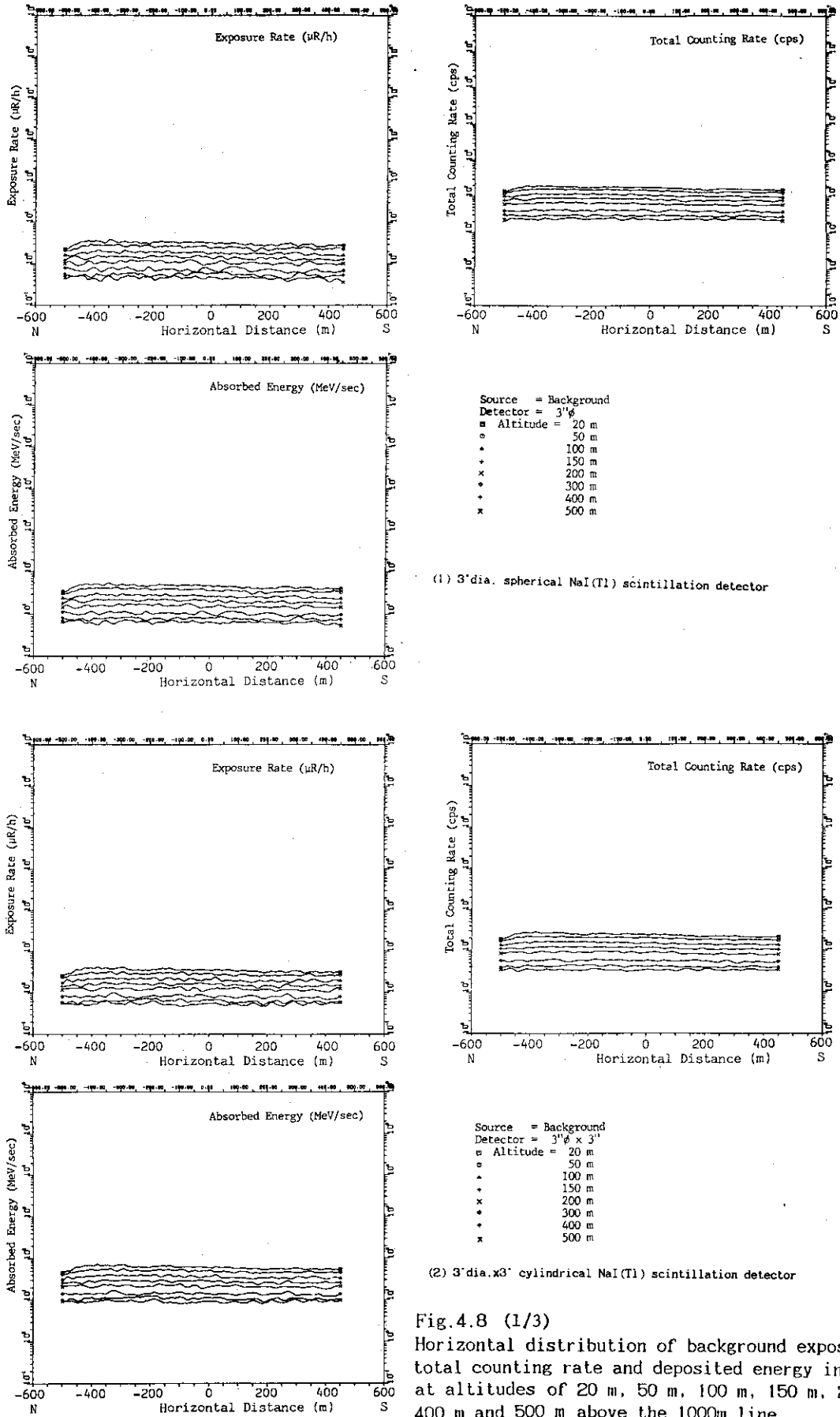
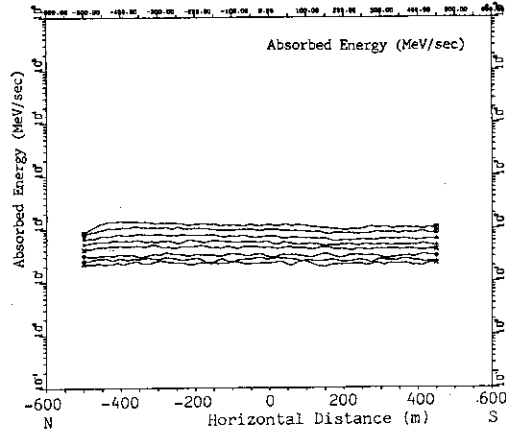
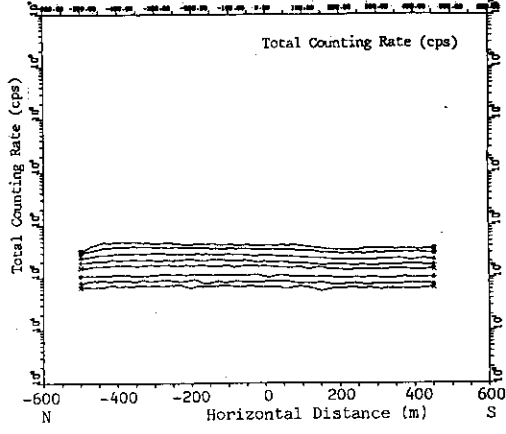
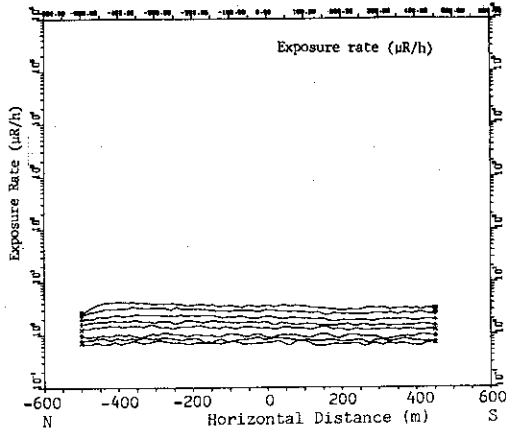
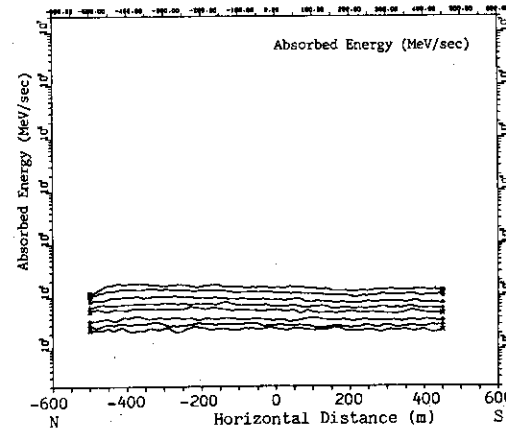
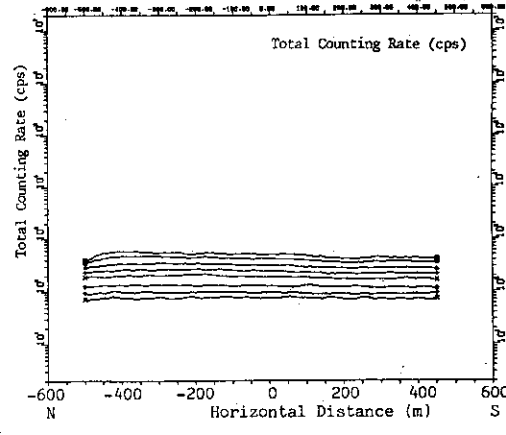
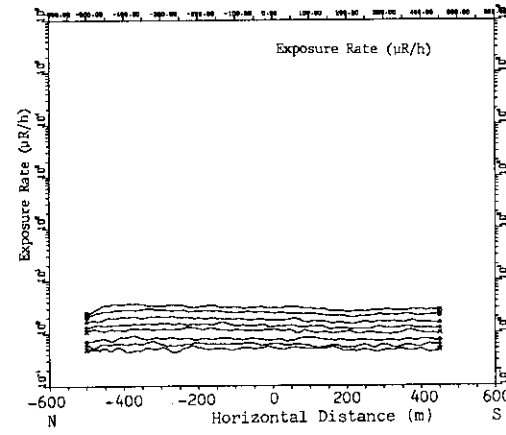


Fig.4.8 (1/3)  
 Horizontal distribution of background exposure rate, total counting rate and deposited energy in a detector at altitudes of 20 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m and 500 m above the 1000m line.



Source = Background  
 Detector = 4" dia. x 4" NaI(Tl)  
 Altitude = 20 m  
 □ 50 m  
 ○ 100 m  
 \* 150 m  
 + 200 m  
 • 300 m  
 + 400 m  
 x 500 m

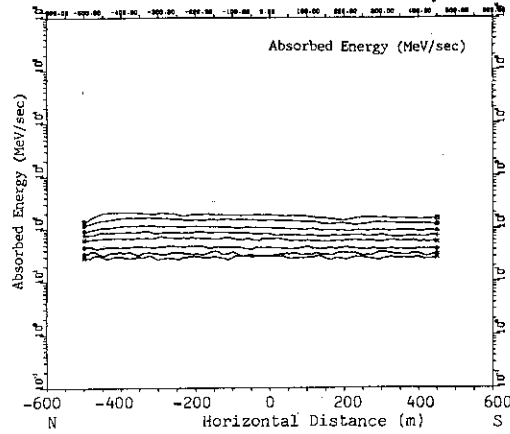
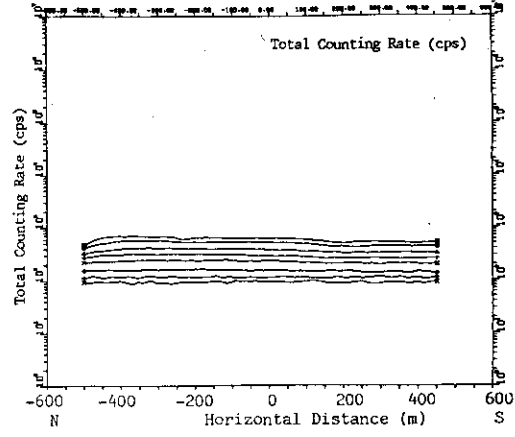
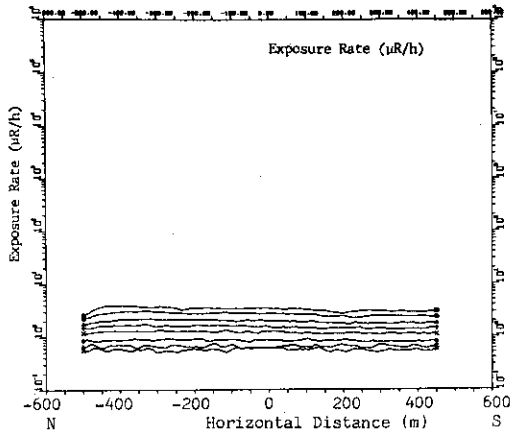
(3) 4" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector



Source = Background  
 Detector = 5" dia. spherical NaI(Tl)  
 Altitude = 20 m  
 □ 50 m  
 ○ 100 m  
 \* 150 m  
 + 200 m  
 • 300 m  
 + 400 m  
 x 500 m

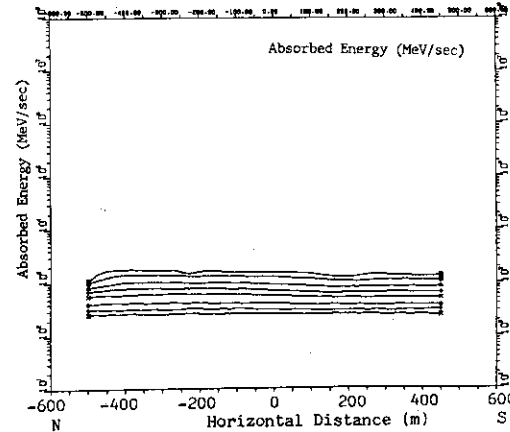
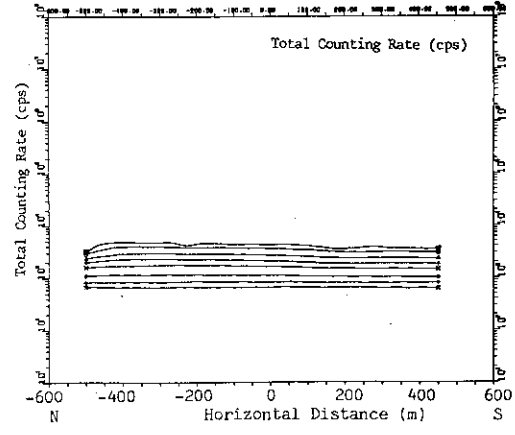
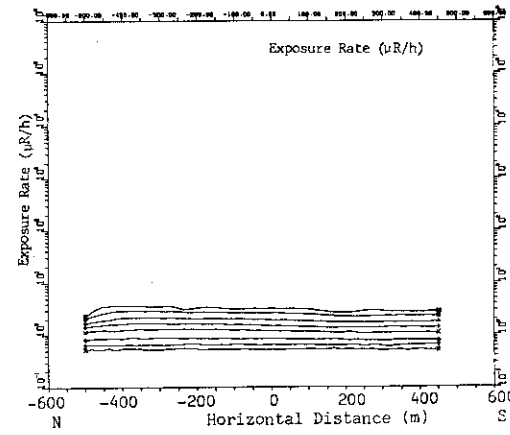
(4) 5" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector

Fig. 4.8 Cont'd (2/3)



Source = Background  
 Detector = 5' dia. x 4'  
 Altitude = 20 m  
 ○ 50 m  
 + 100 m  
 + 150 m  
 + 200 m  
 + 300 m  
 + 400 m  
 x 500 m

(5) 5' dia. x 4' cylindrical NaI(Tl) scintillation detector



Source = Background  
 Detector = DET-1024  
 Altitude = 20 m  
 ○ 50 m  
 + 100 m  
 + 150 m  
 + 200 m  
 + 300 m  
 + 400 m  
 x 500 m

(6) 16' x 16' x 4' NaI(Tl) scintillation detector (DET-1024)

Fig.4.8 Cont'd (3/3)

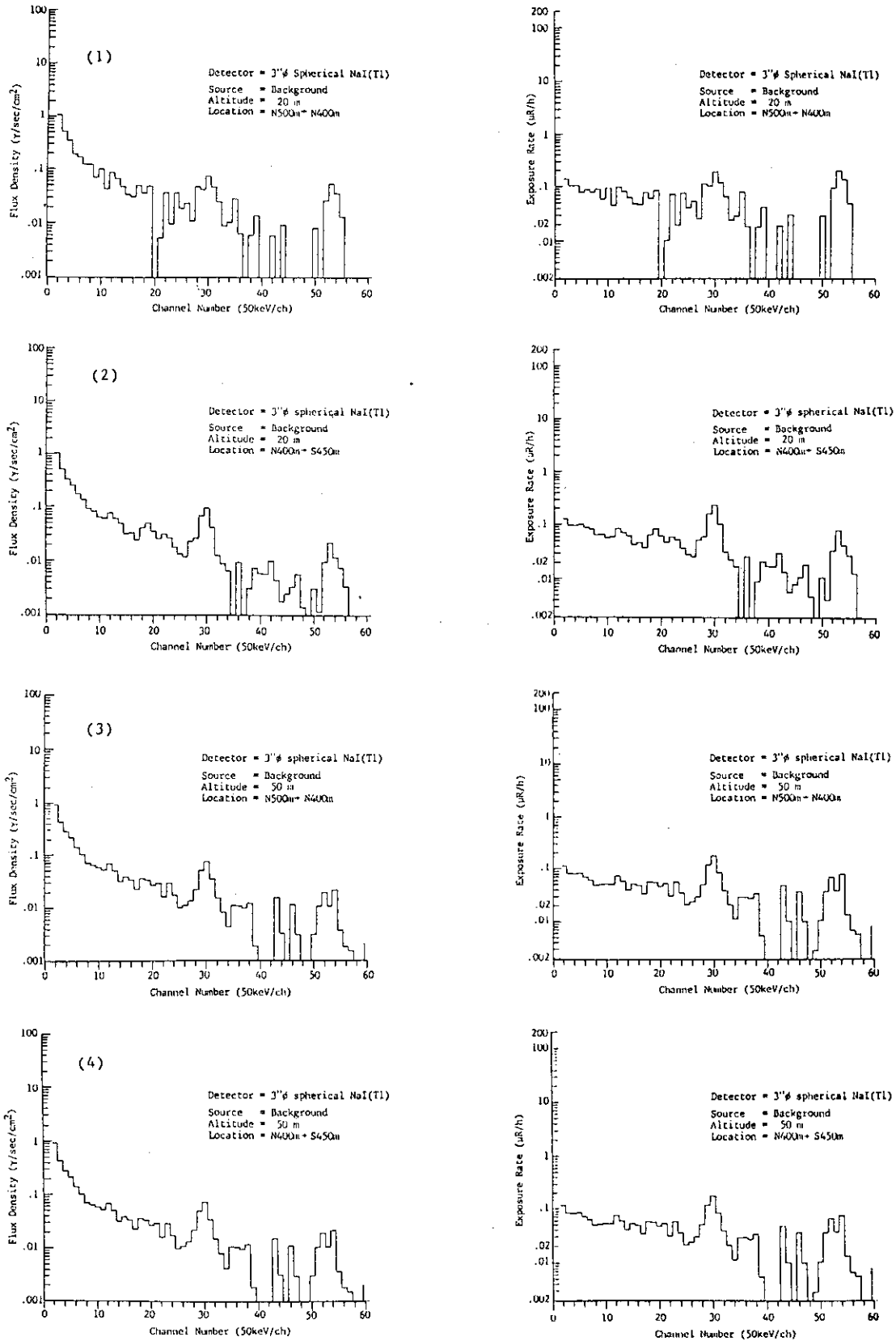


Fig.4.9 Background gamma-ray energy spectra at 20 m to 500 m above the 1000m line (involving cosmic ray component), measured with 3"dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector. (1/3)



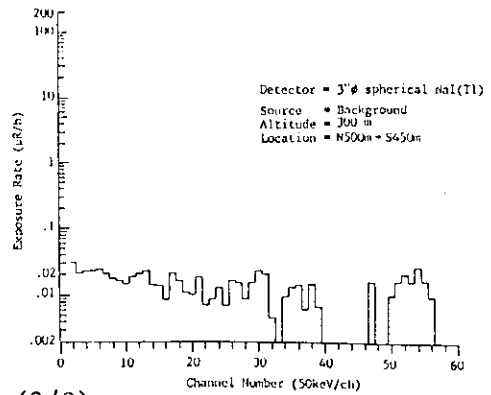
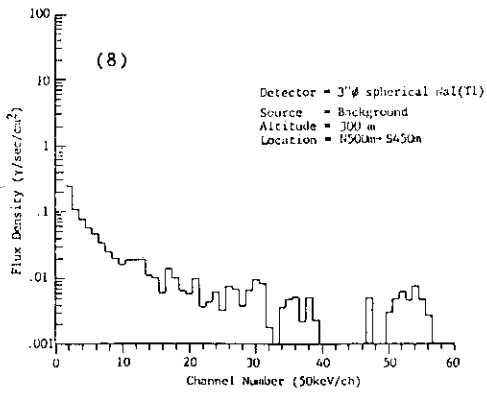
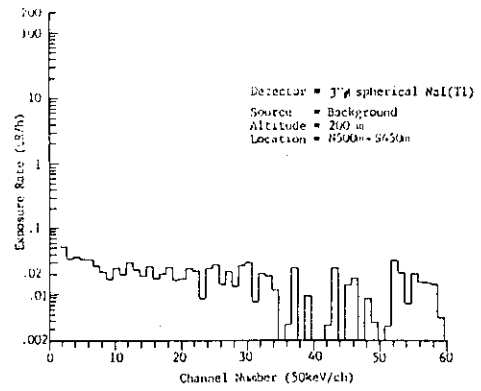
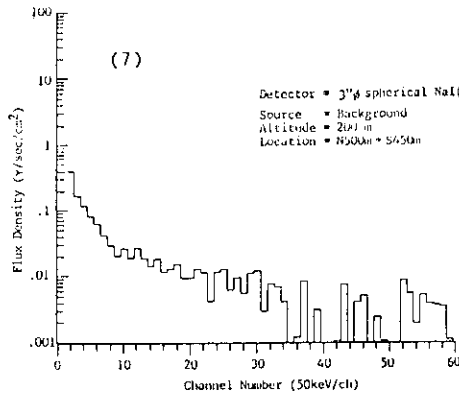
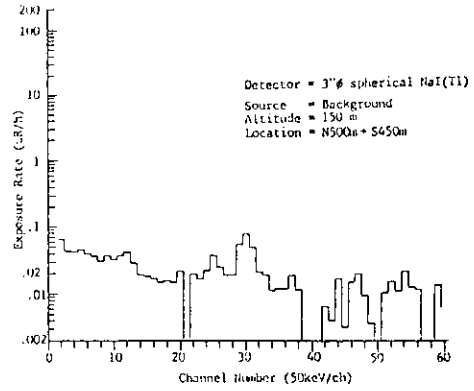
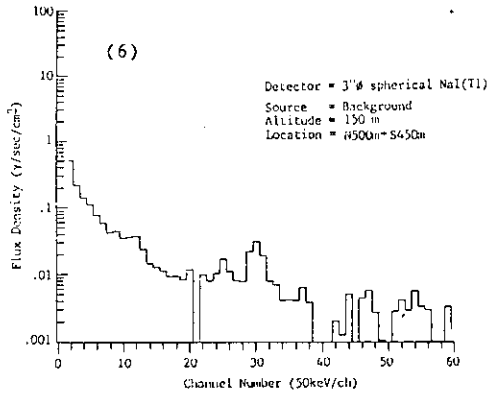
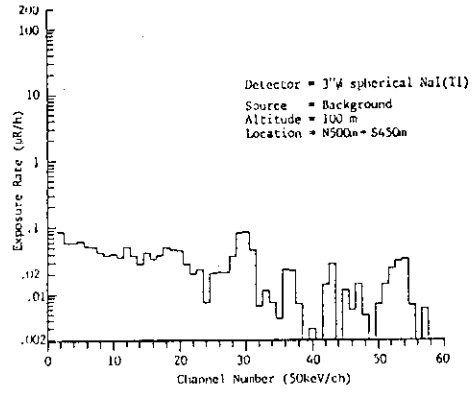
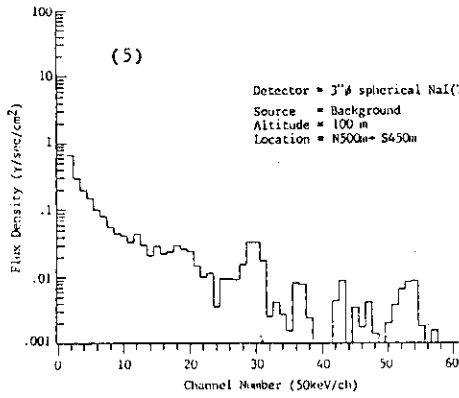


Fig.4.9 Cont'd (2/3)

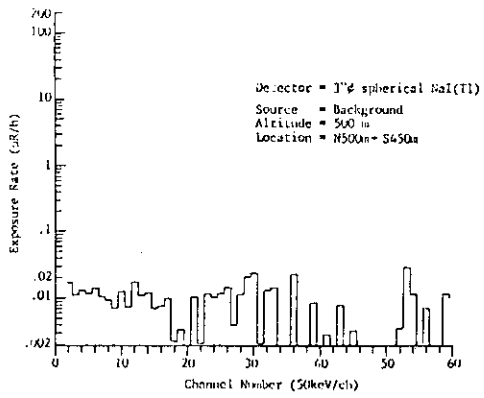
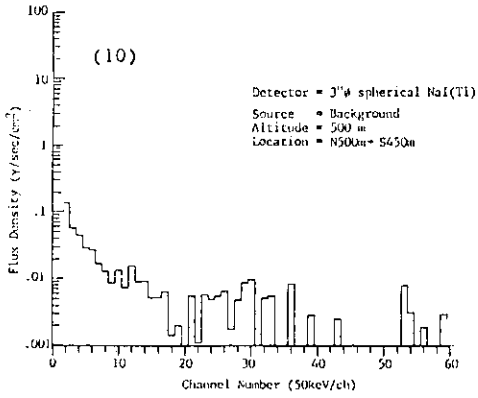
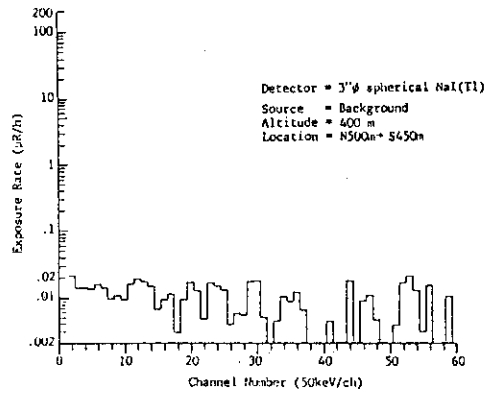
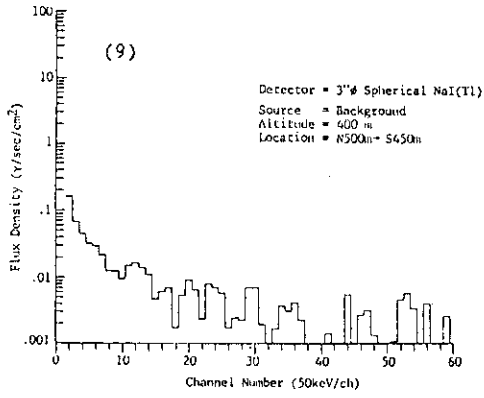


Fig.4.9 Cont'd (3/3)

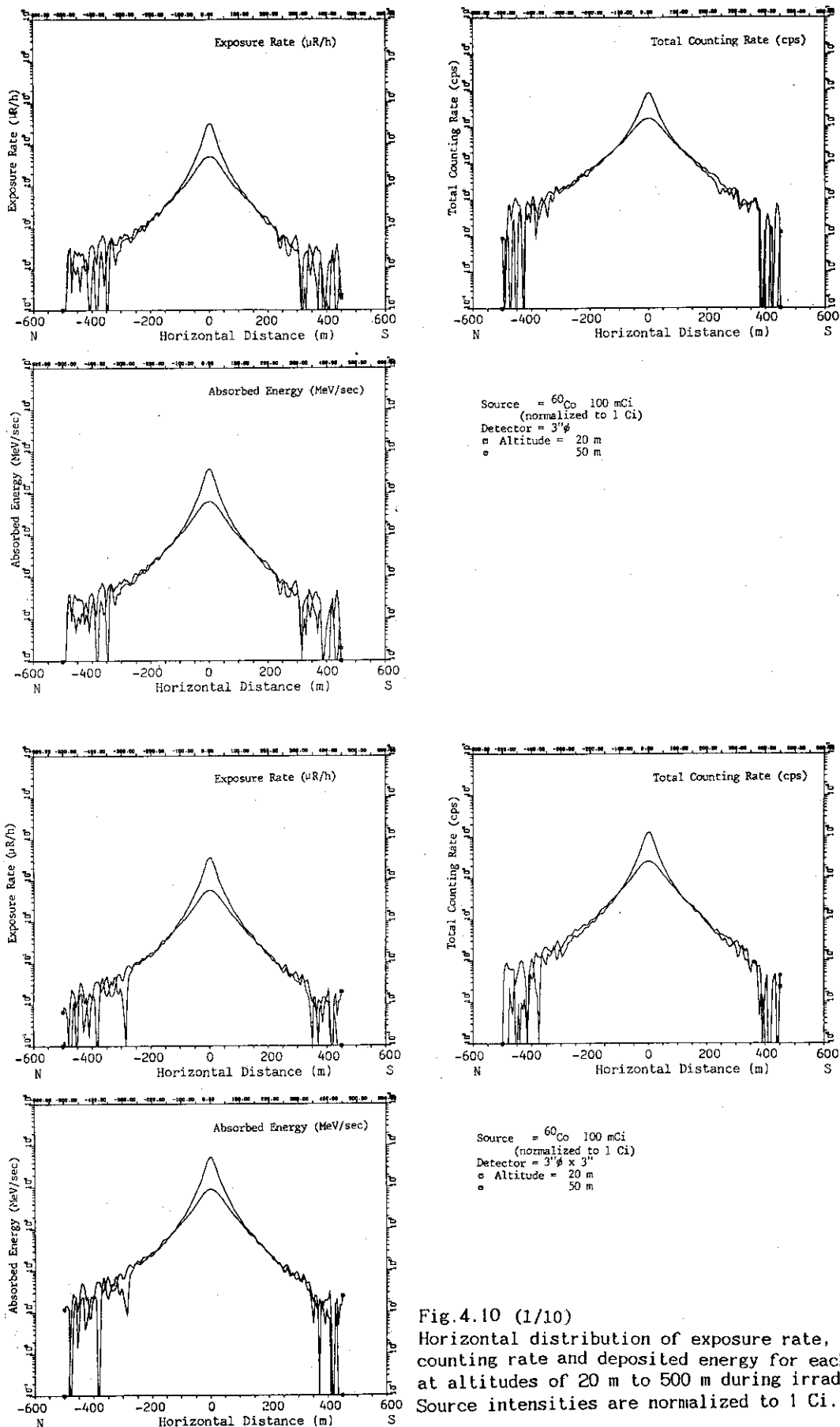


Fig.4.10 (1/10)  
 Horizontal distribution of exposure rate, total counting rate and deposited energy for each detector at altitudes of 20 m to 500 m during irradiation. Source intensities are normalized to 1 Ci.

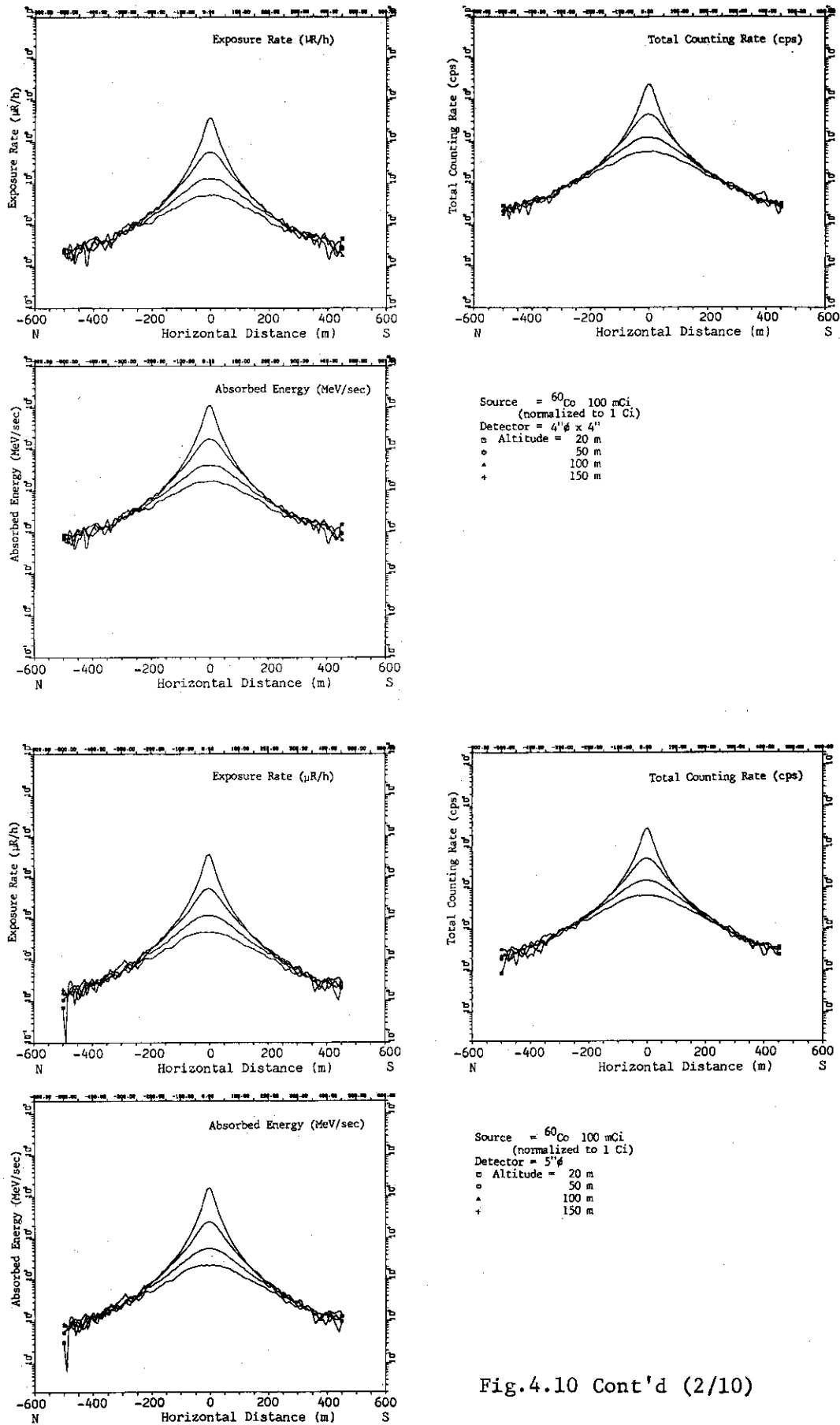


Fig.4.10 Cont'd (2/10)

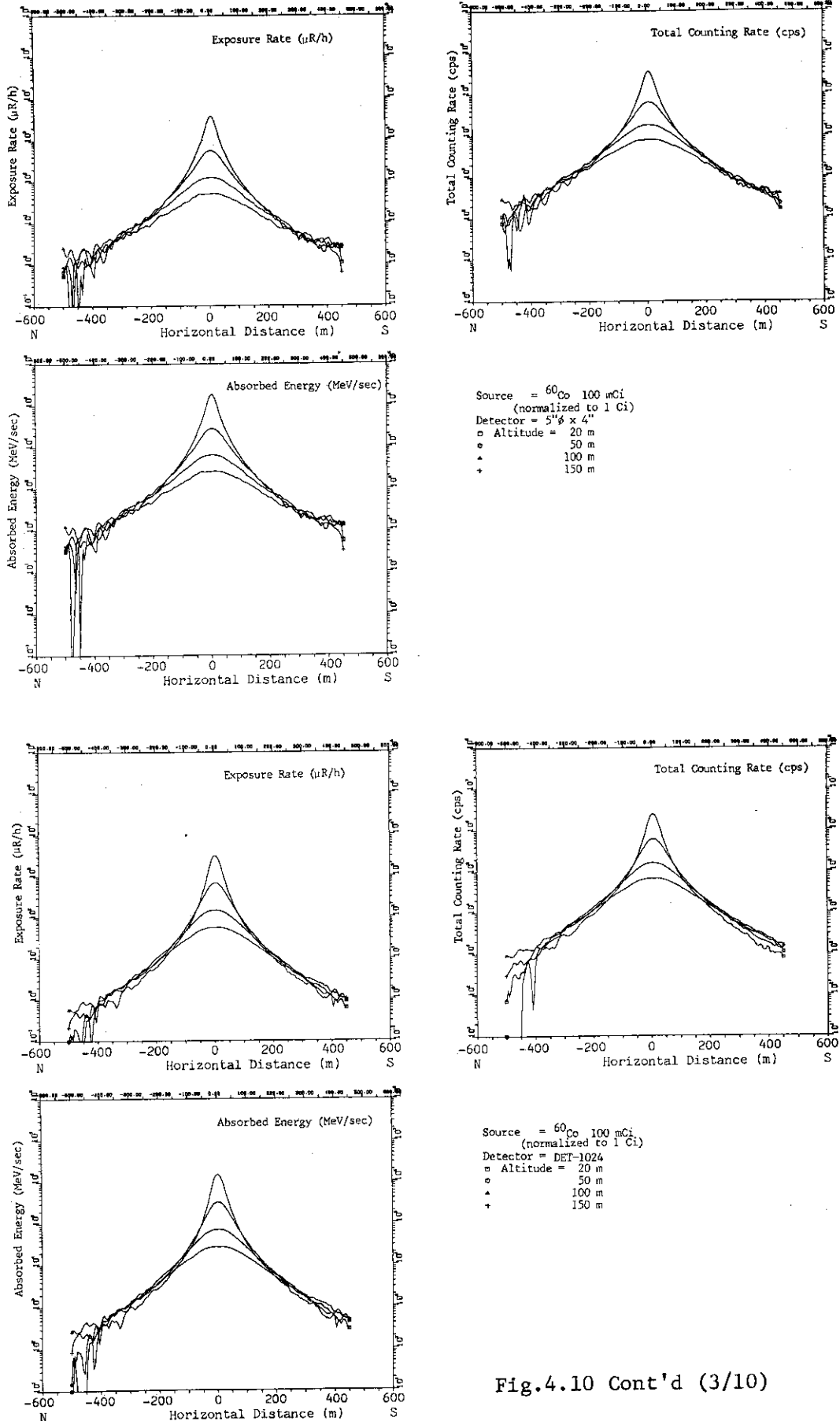


Fig.4.10 Cont'd (3/10)

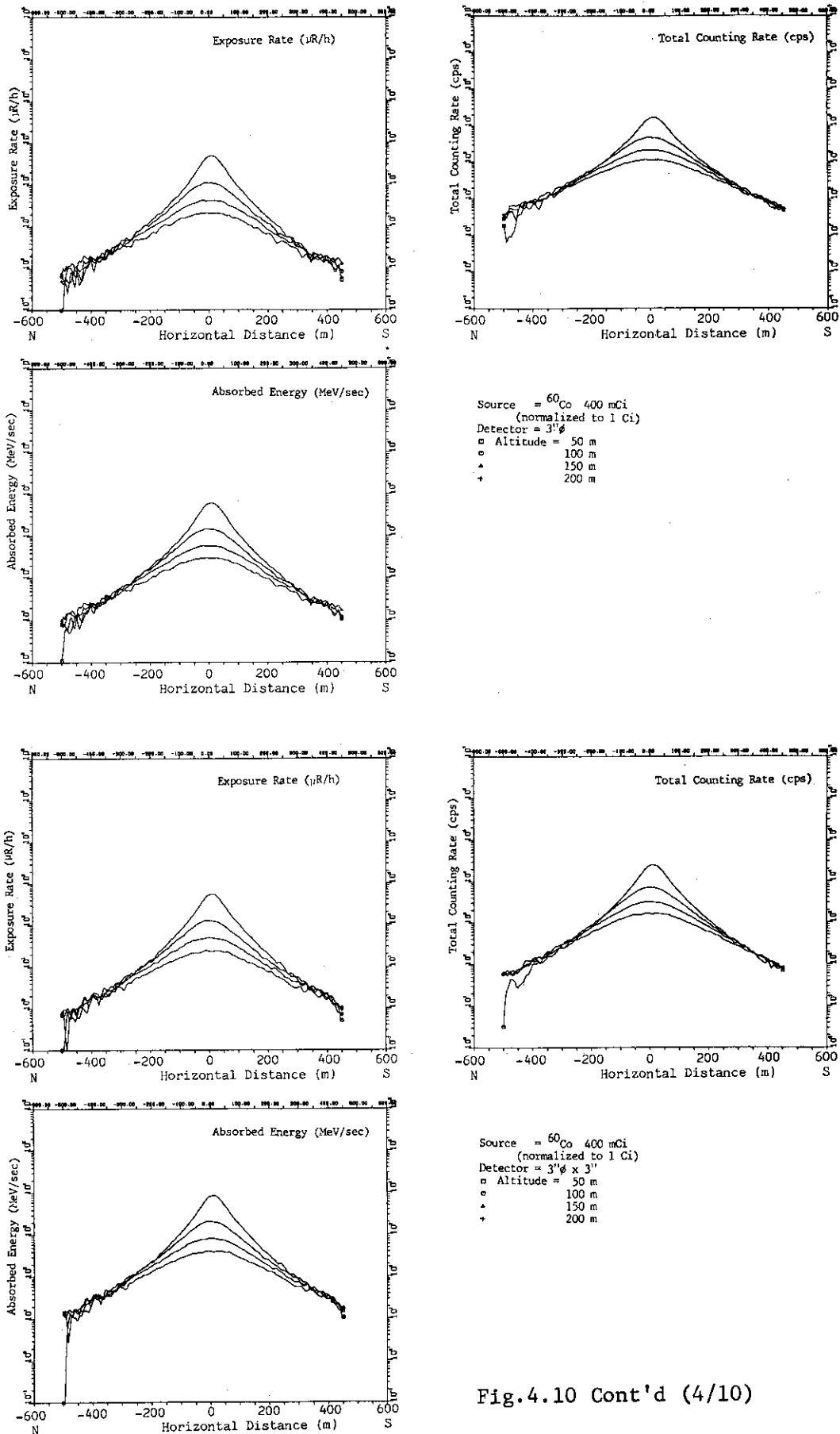


Fig.4.10 Cont'd (4/10)

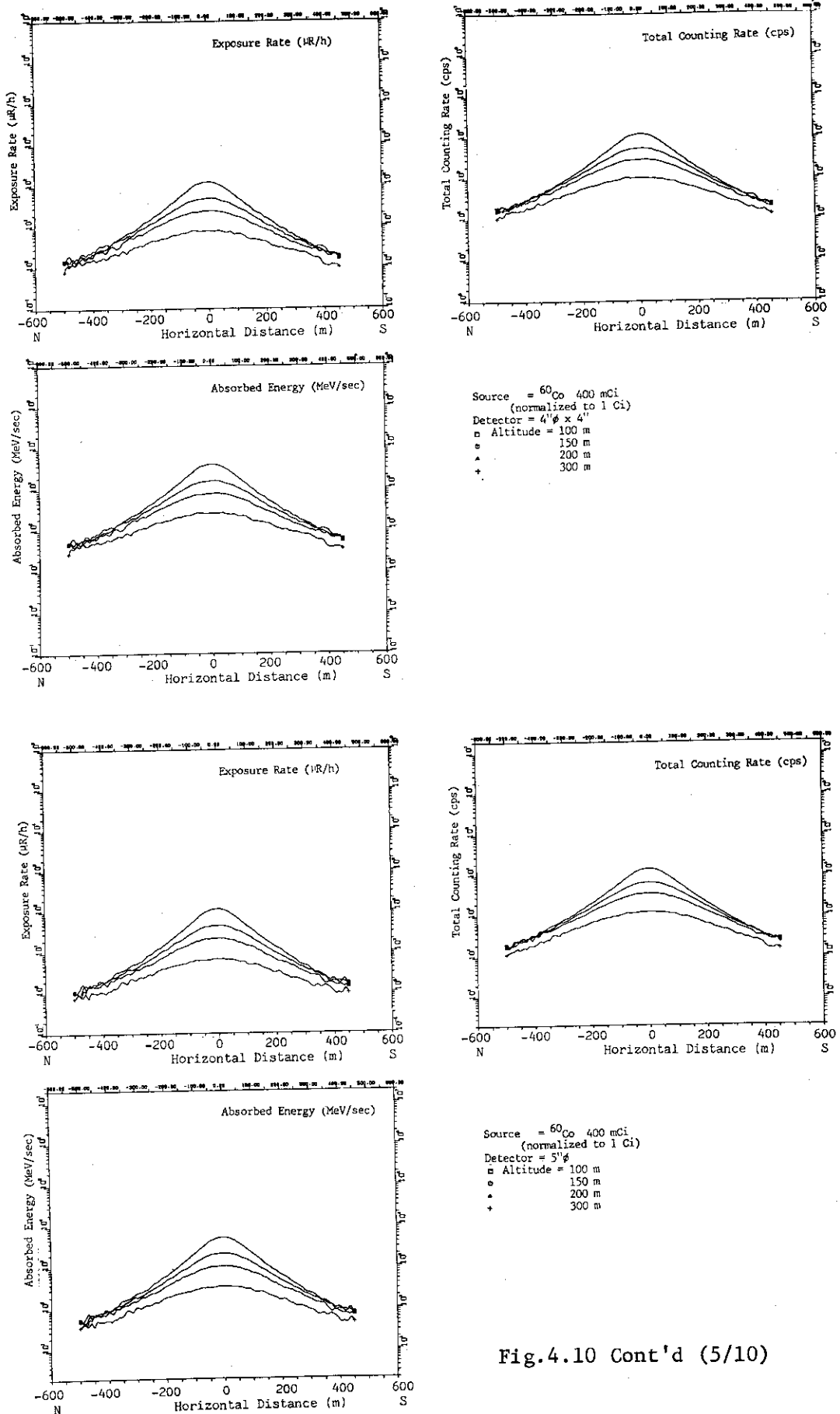


Fig.4.10 Cont'd (5/10)

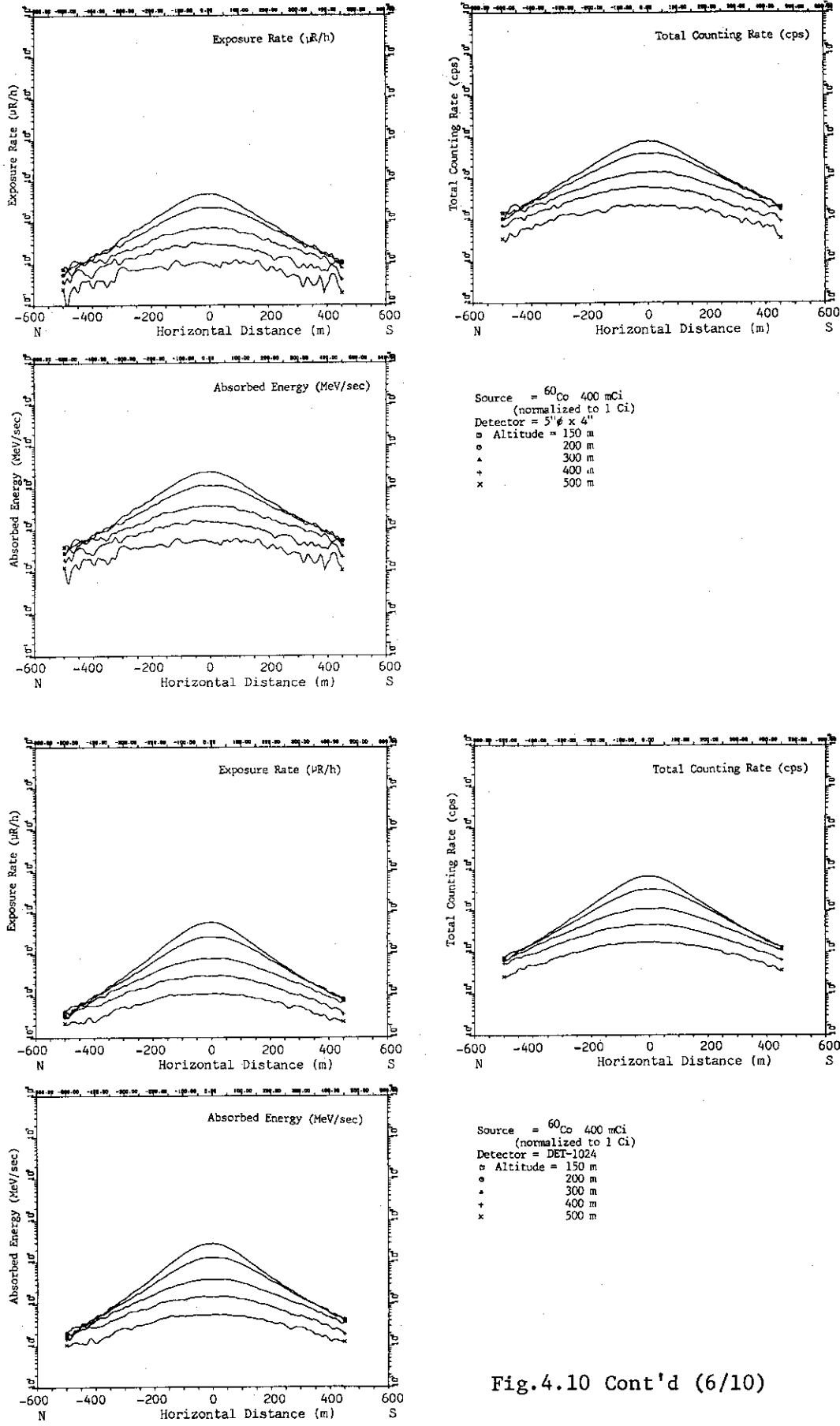


Fig.4.10 Cont'd (6/10)



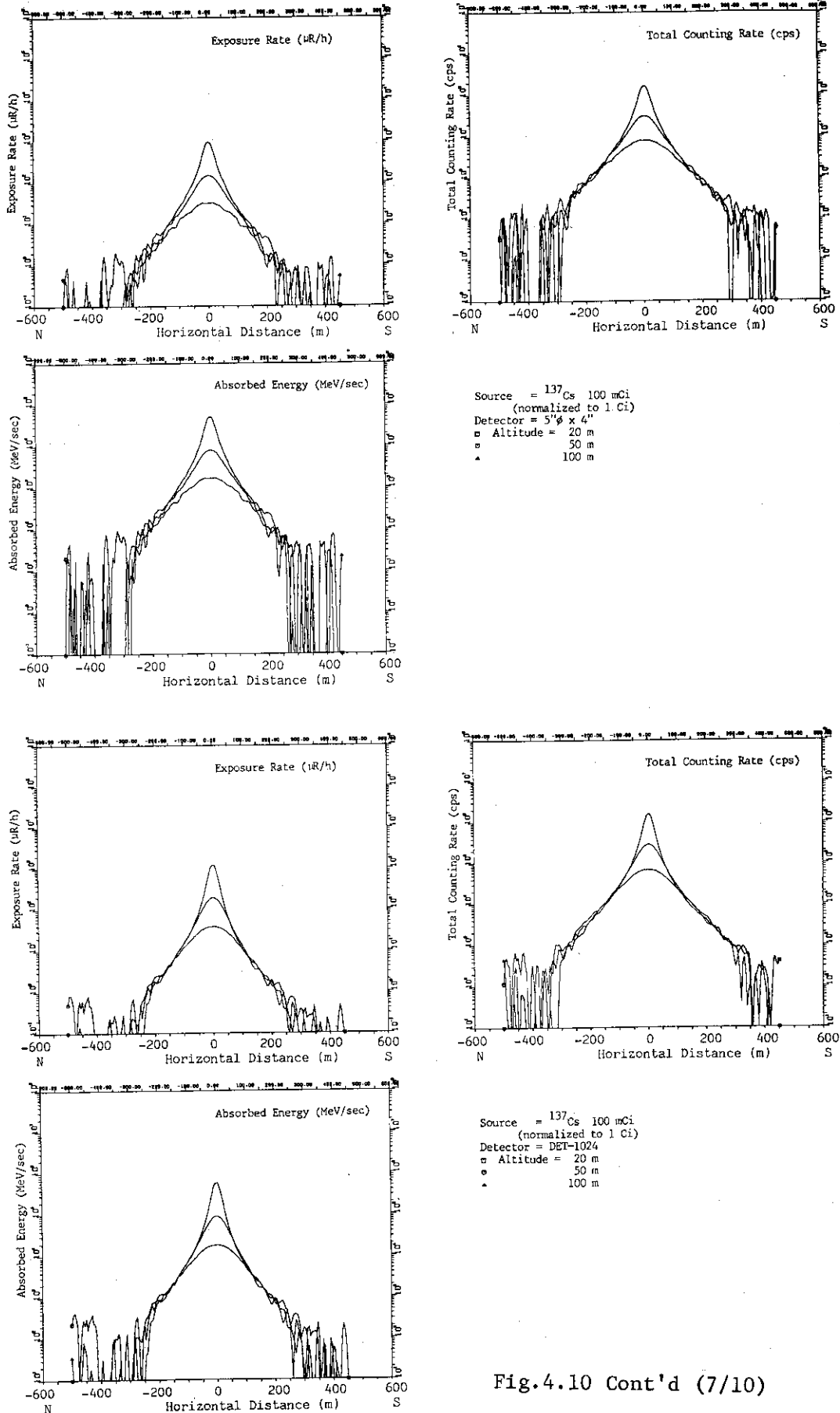


Fig.4.10 Cont'd (7/10)

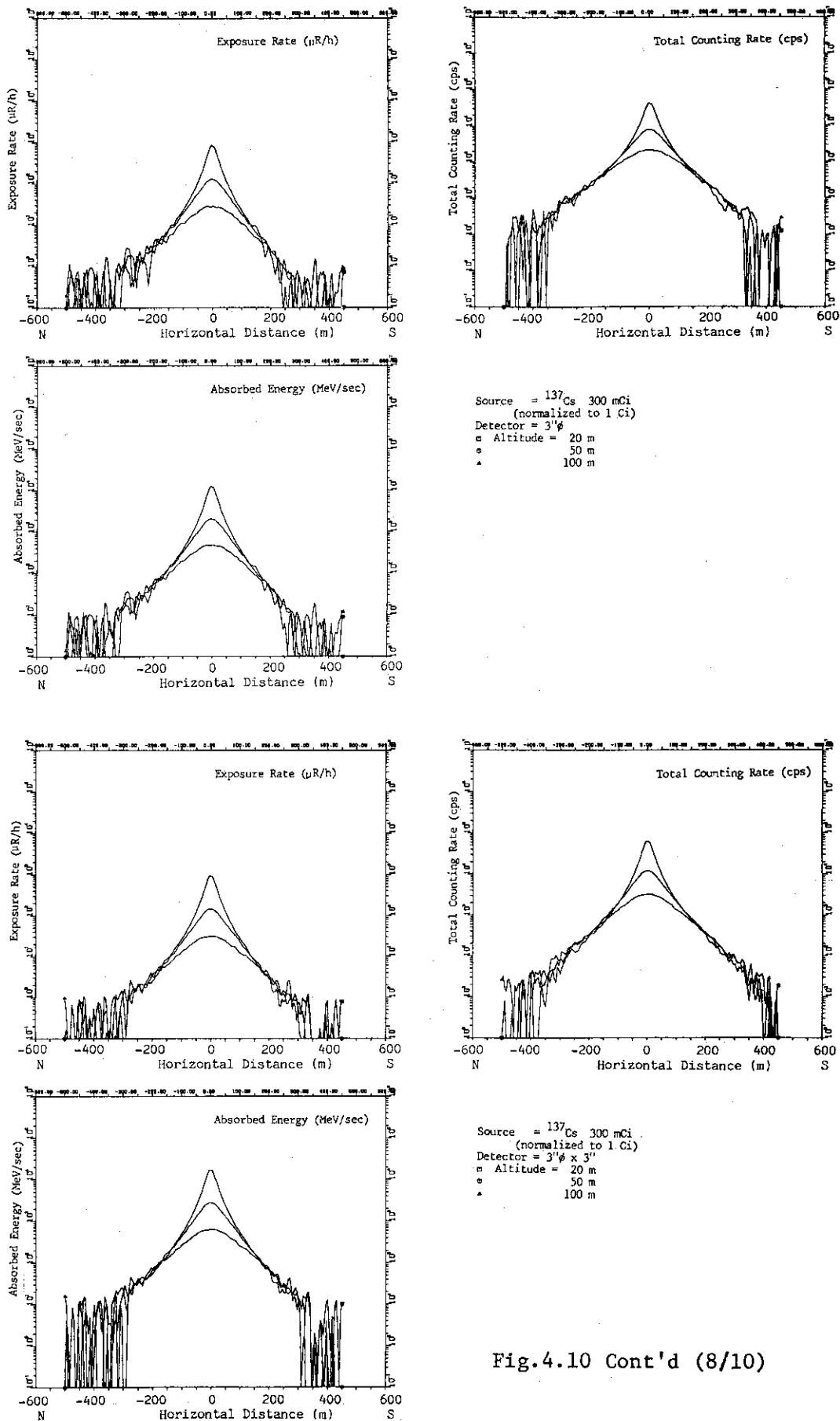


Fig.4.10 Cont'd (8/10)

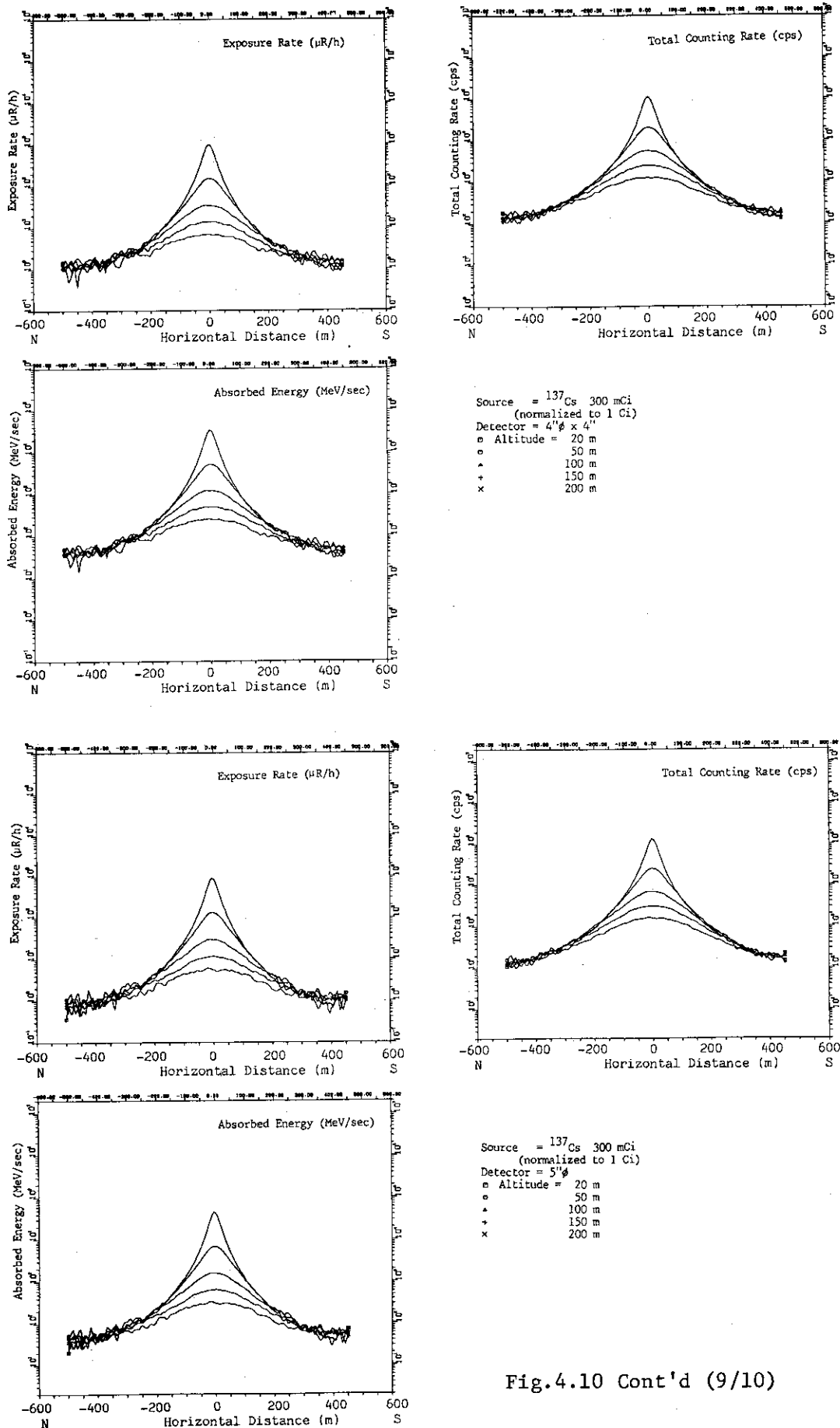


Fig.4.10 Cont'd (9/10)

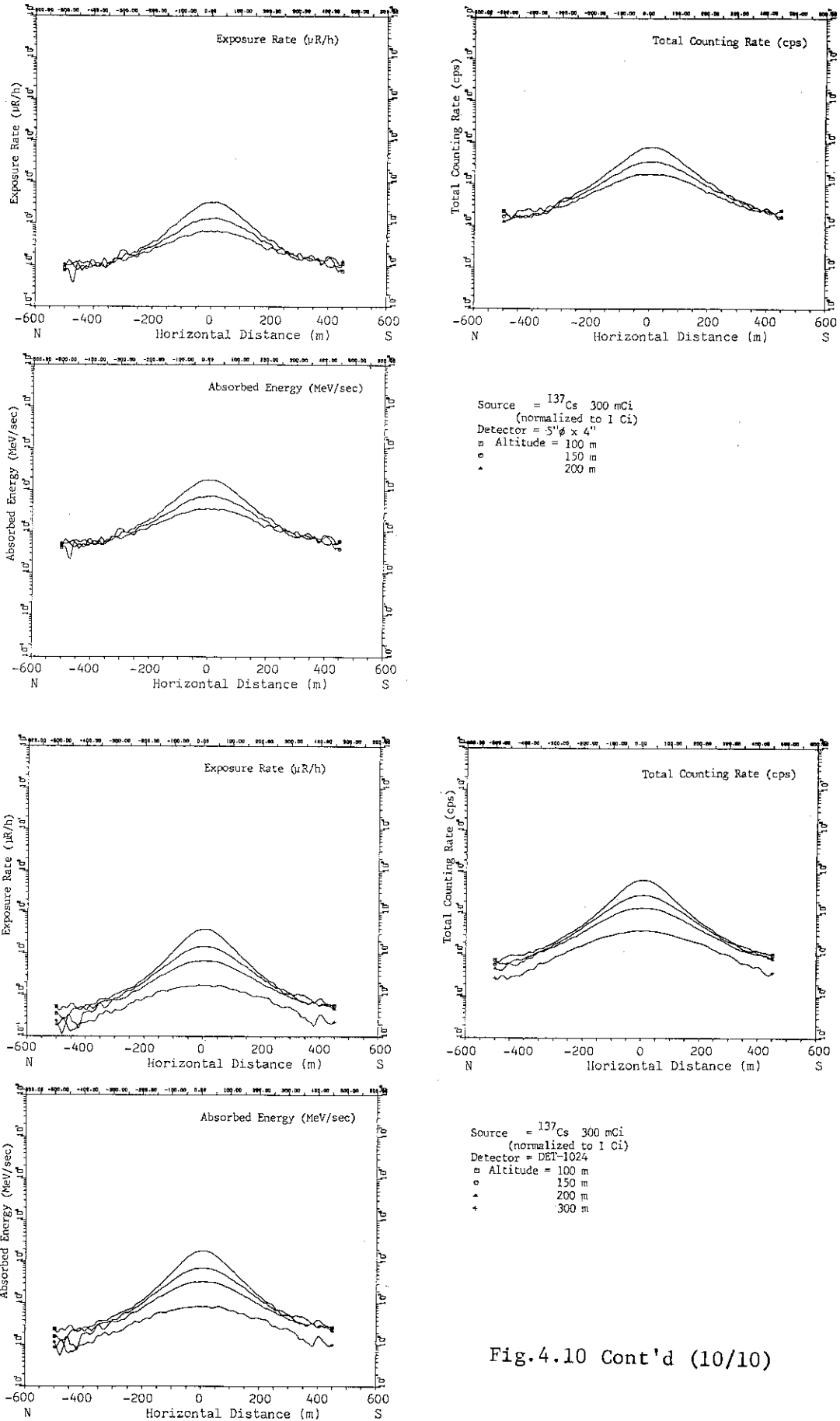


Fig.4.10 Cont'd (10/10)

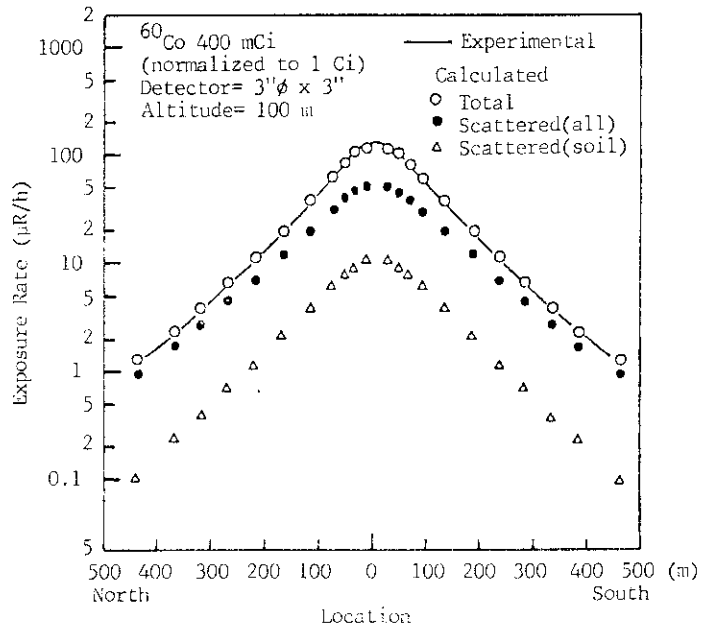


Fig.4.11 Comparison of horizontal distributions of exposure rate during irradiation, between experiment and calculation by Monte Carlo method (3).

Source intensities are normalized to 1 Ci.

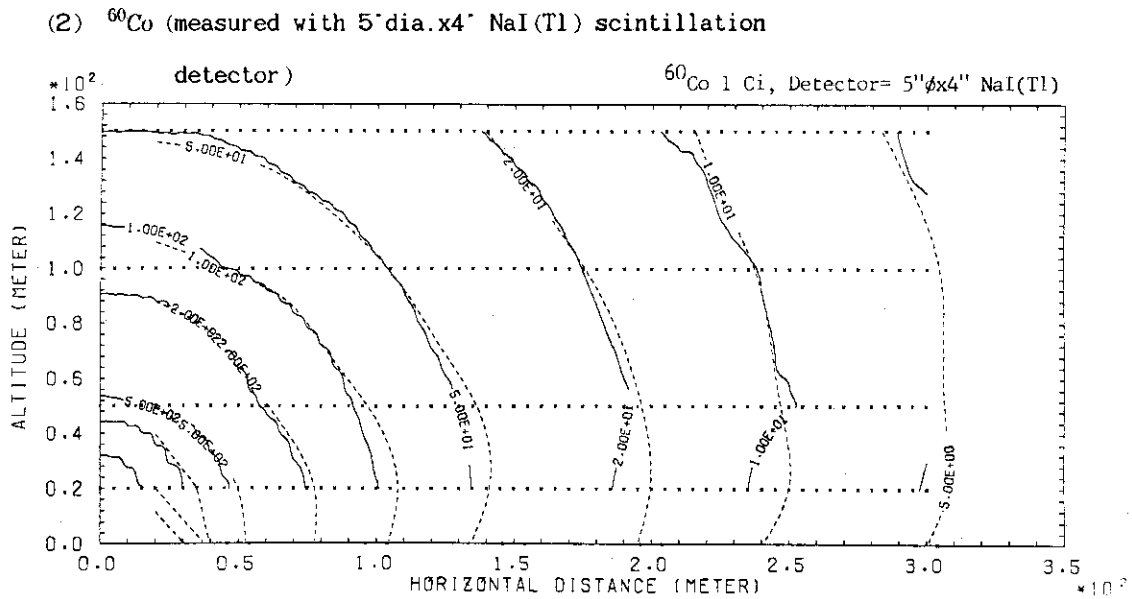
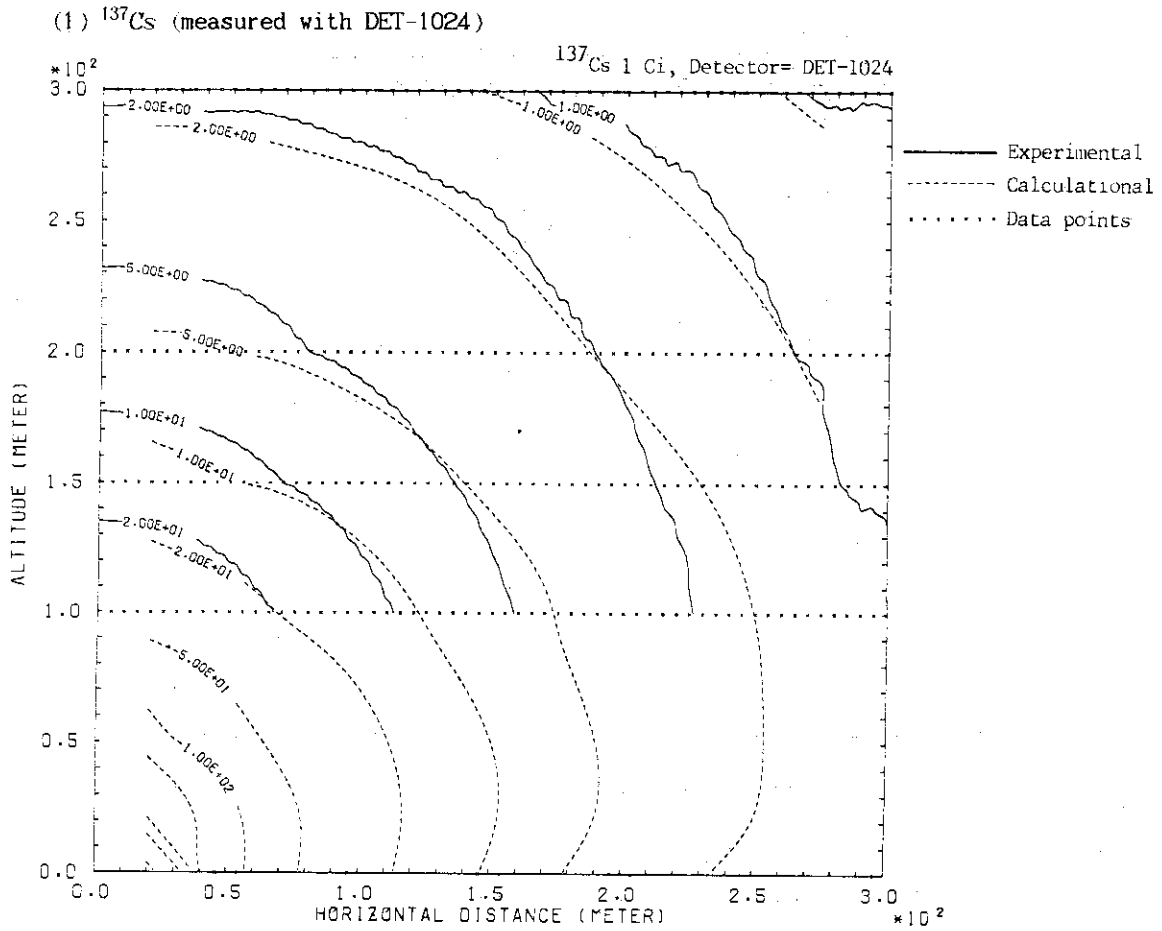


Fig.4.12 Contours of exposure rate around a point gamma-ray source.

Source intensities are normalized to 1 Ci.

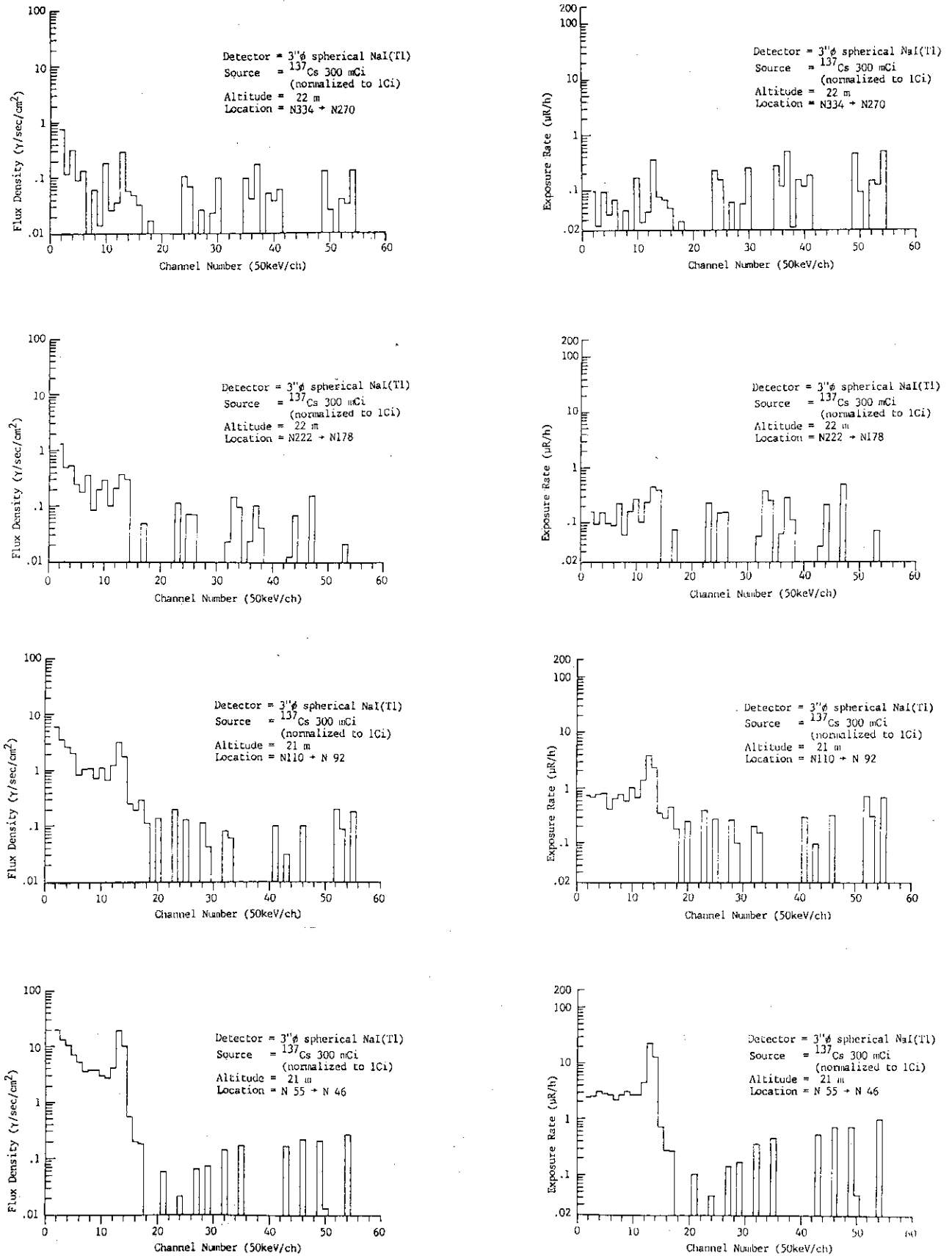


Fig.4.13 Gamma-ray energy spectra on the 1000m line during irradiation.  
Source intensities are normalized to 1 Ci. (1/14)

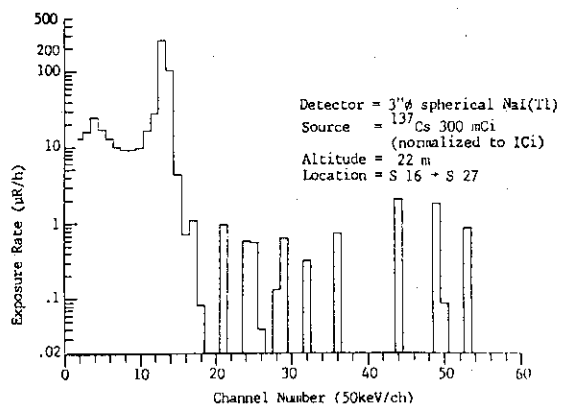
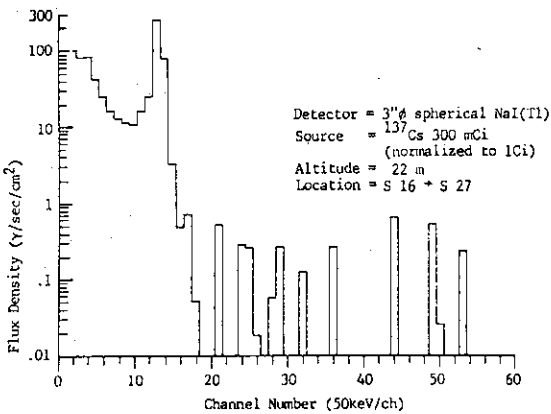
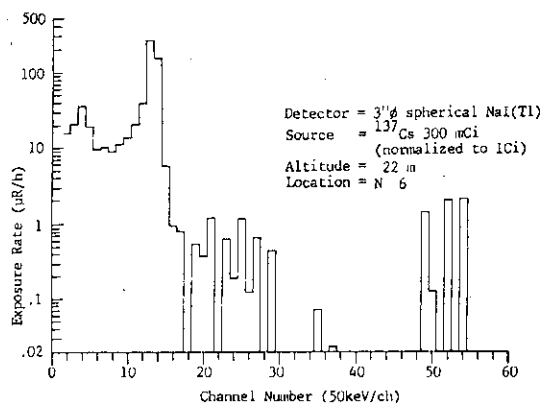
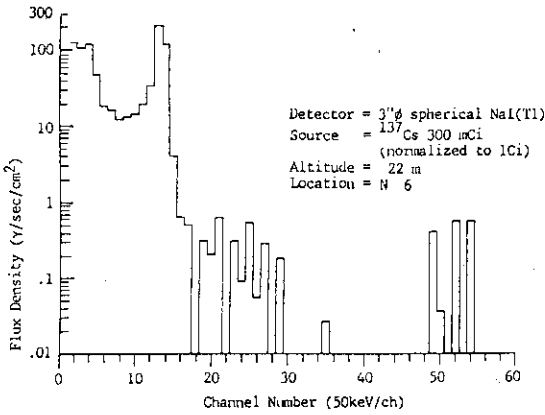
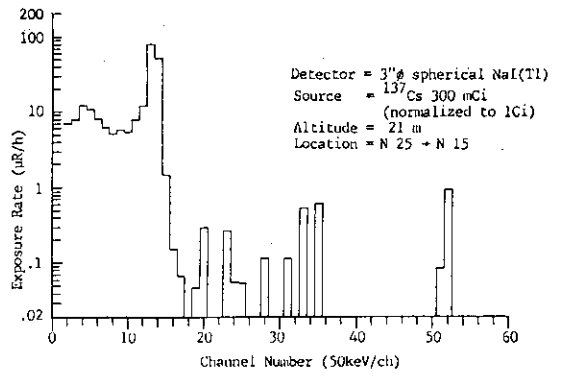
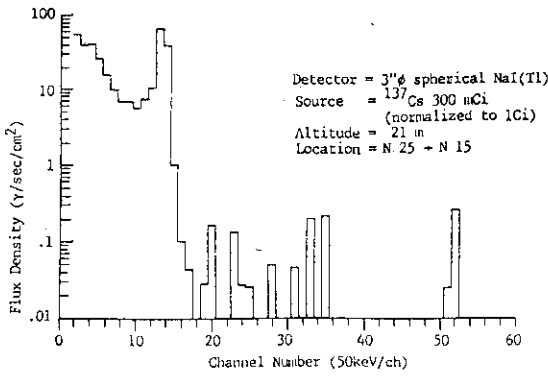


Fig.4.13 Cont'd (2/14)



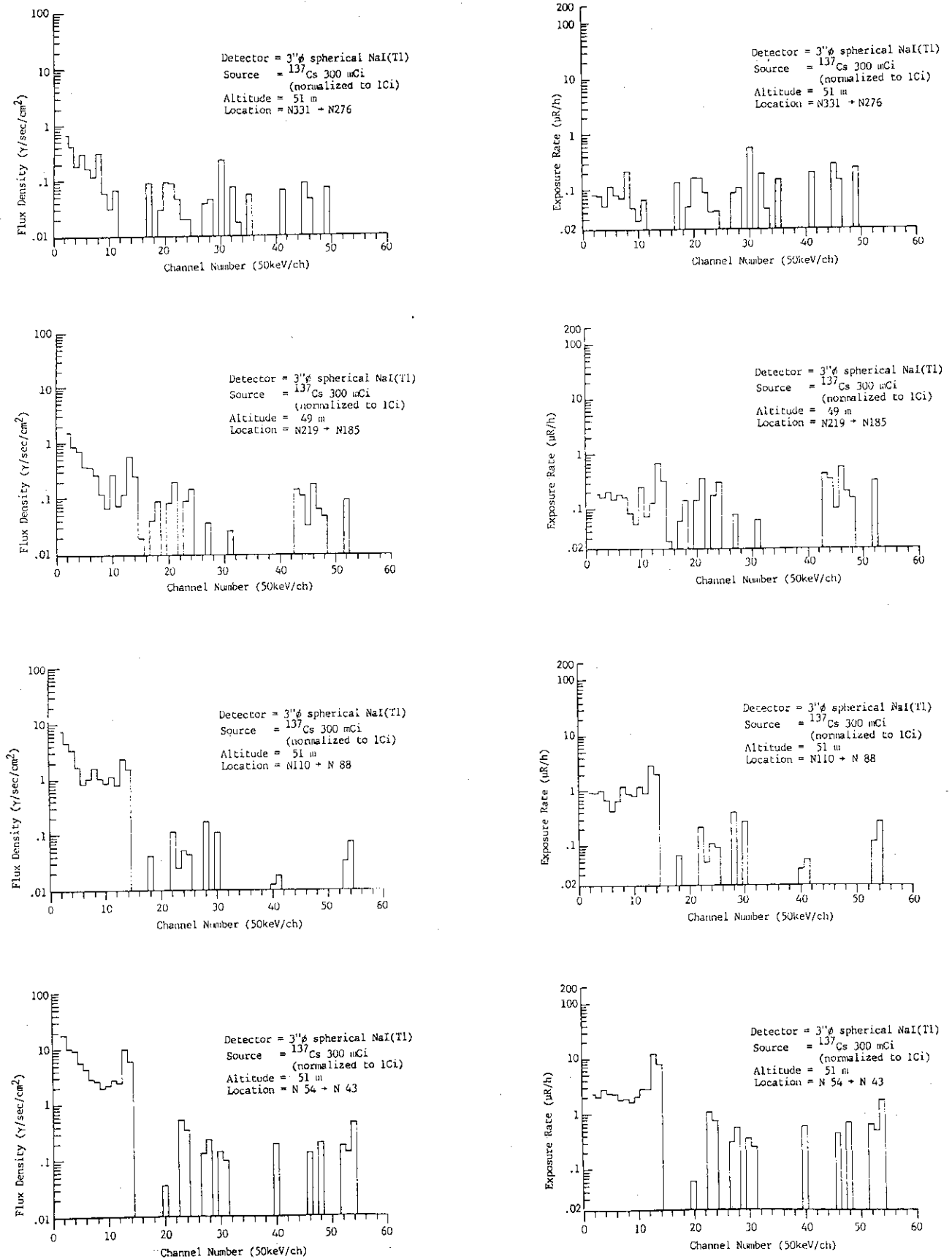


Fig.4.13 Cont'd (3/14)

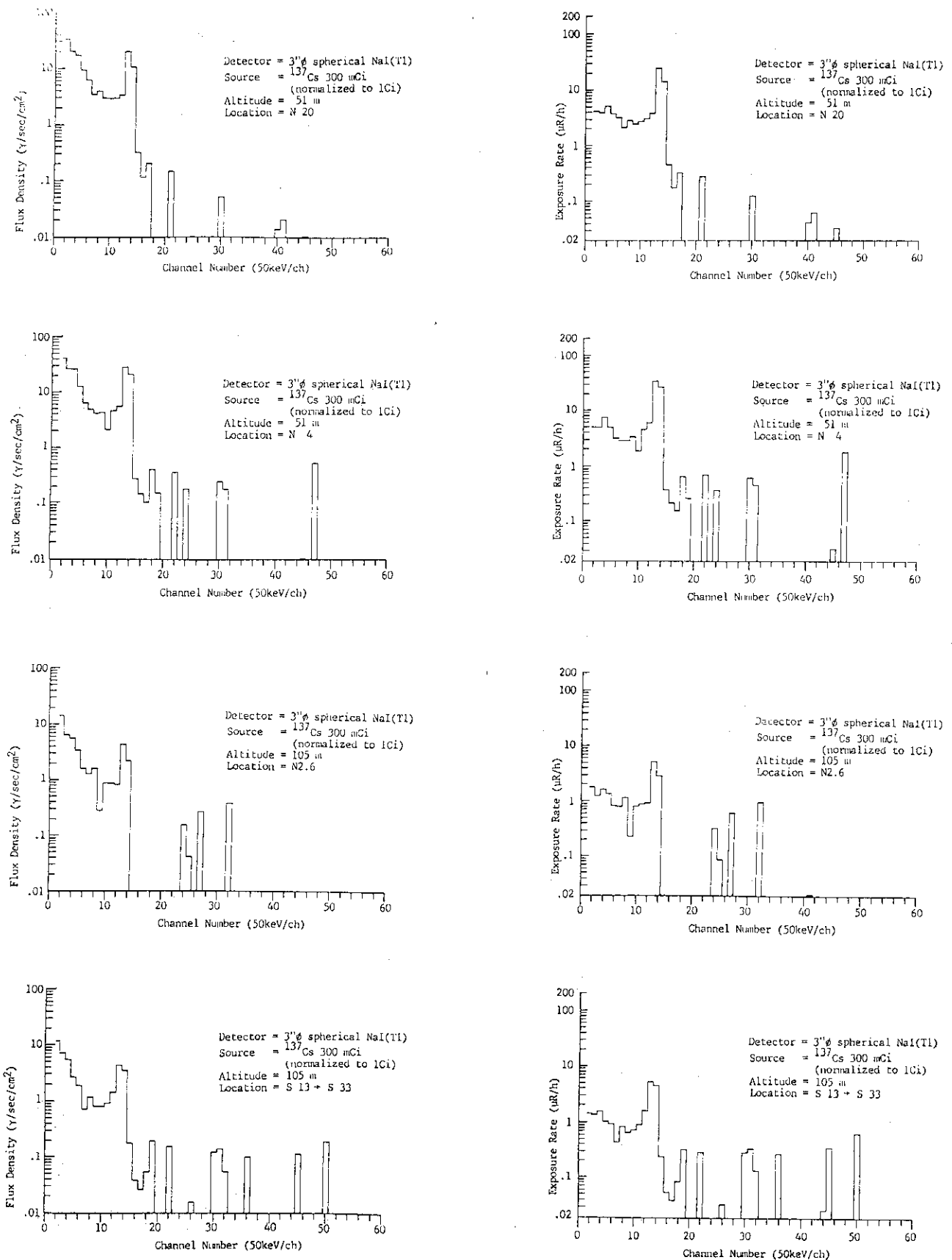


Fig.4.13 Cont'd (4/14)

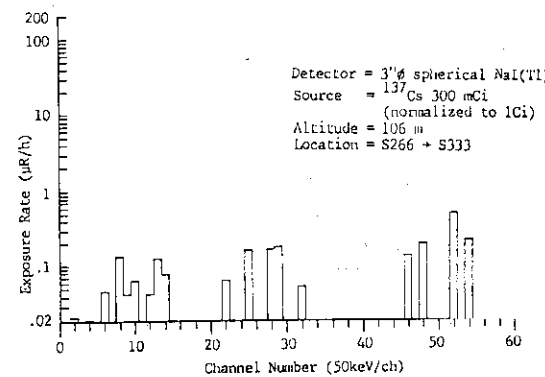
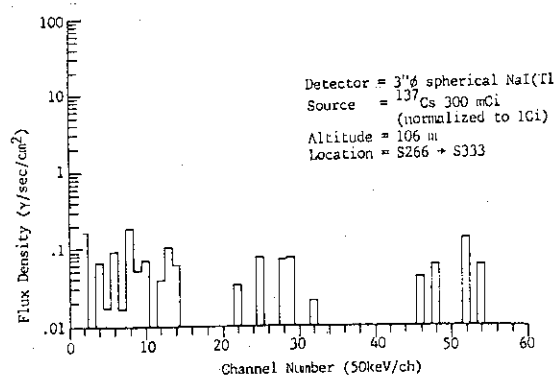
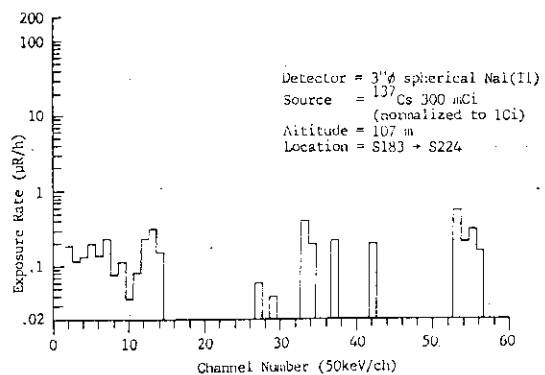
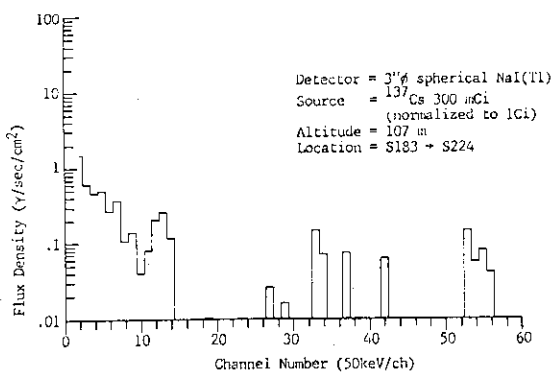
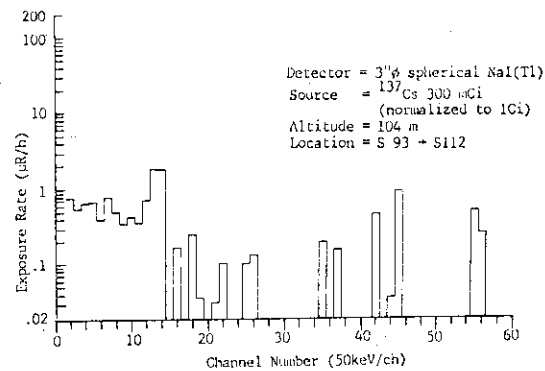
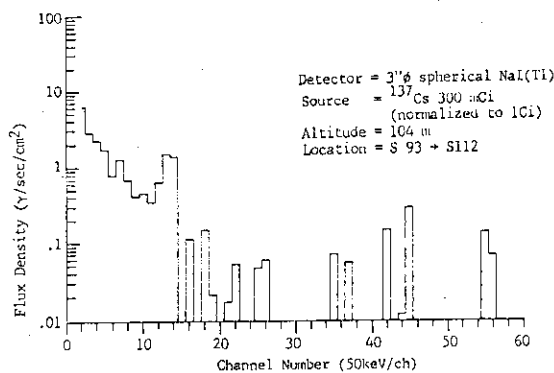
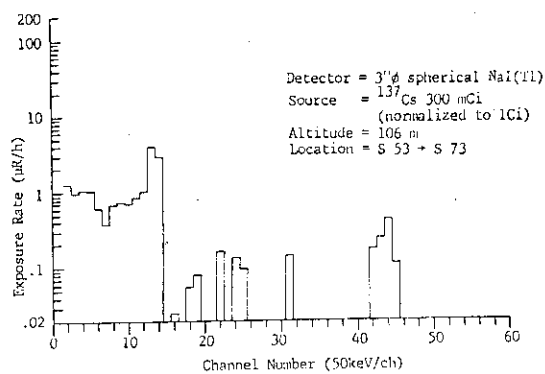
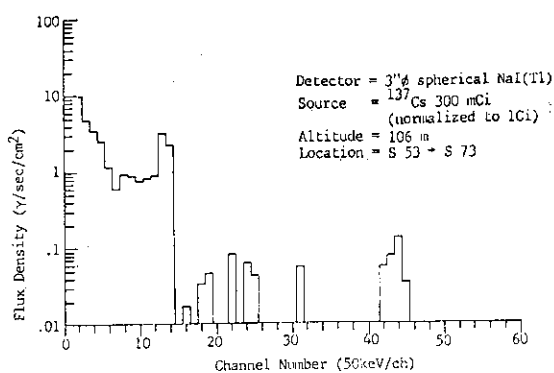


Fig.4.13 Cont'd (5/14)

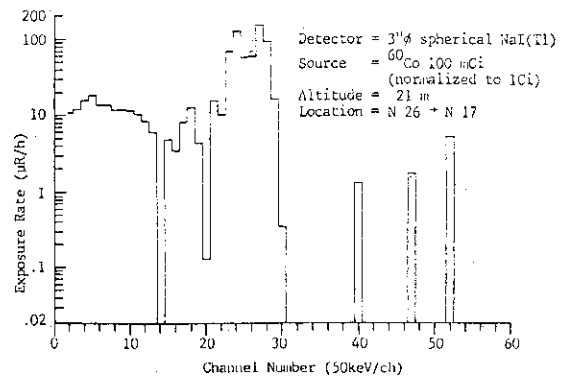
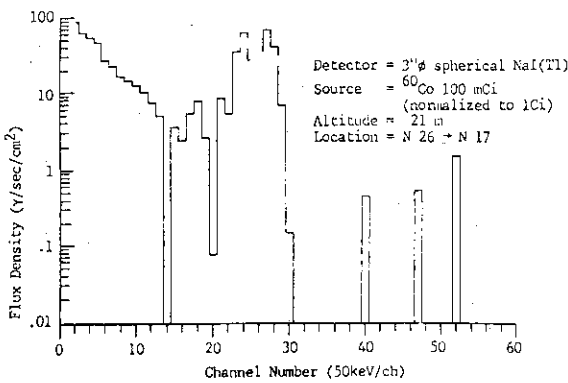
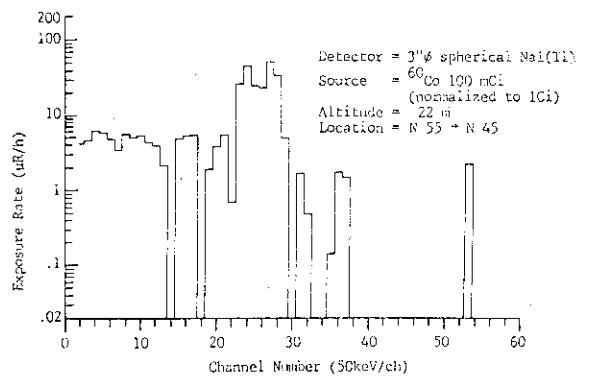
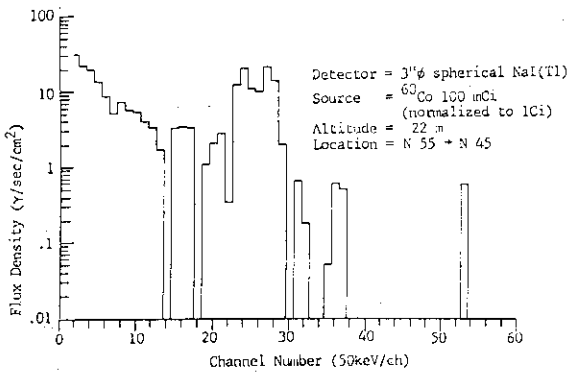
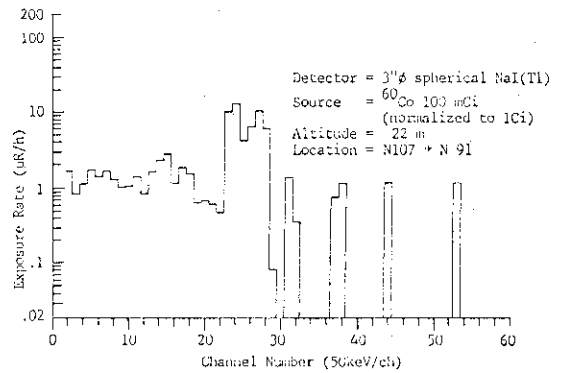
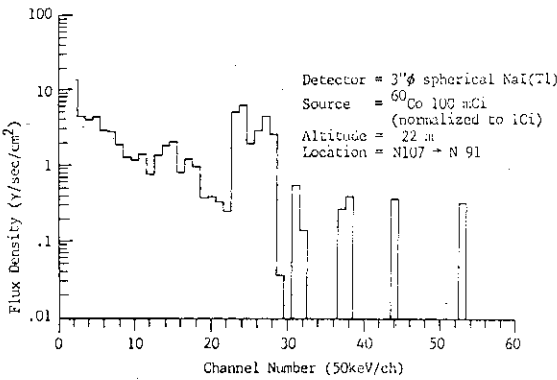
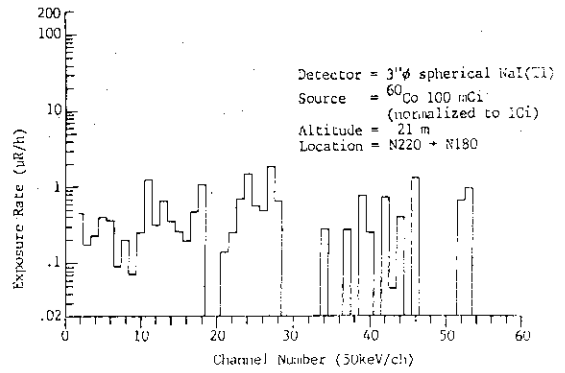
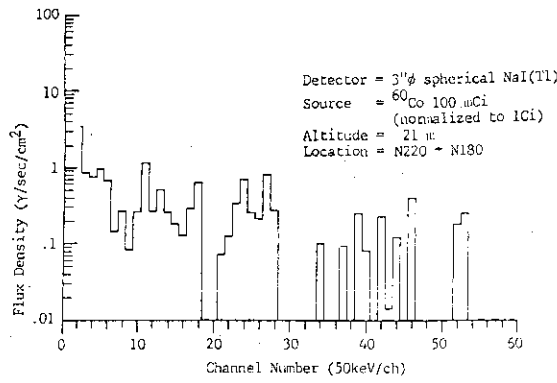


Fig.4.13 Cont'd (6/14)

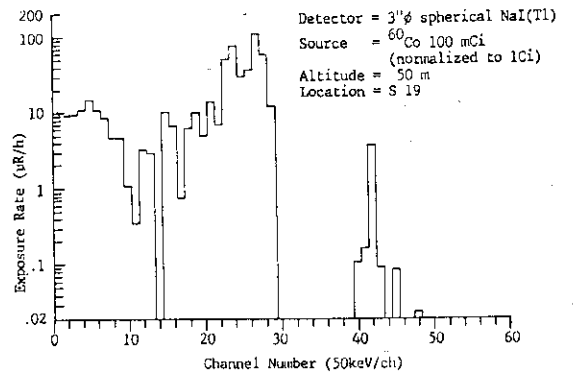
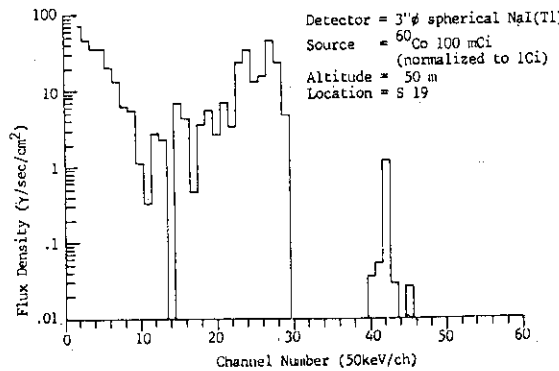
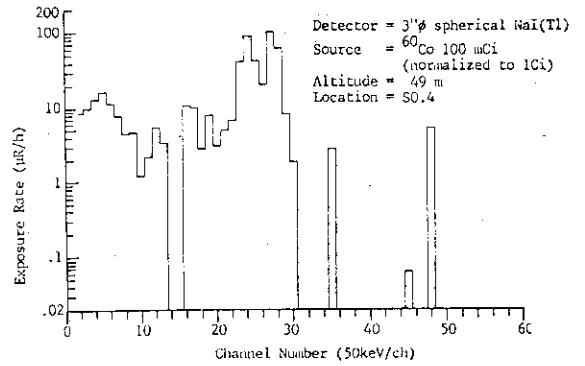
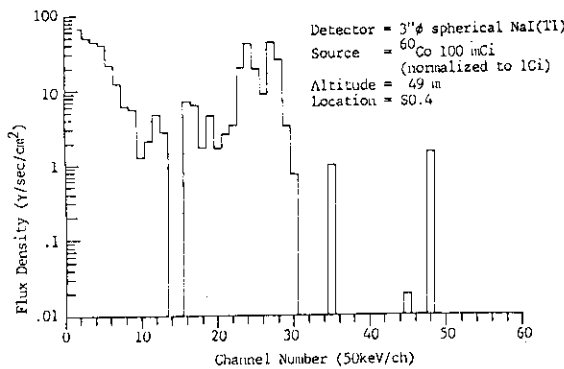
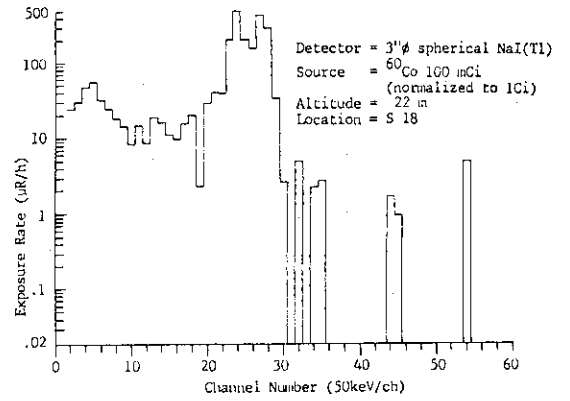
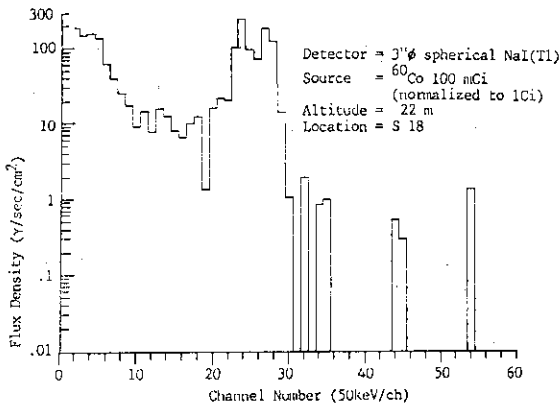
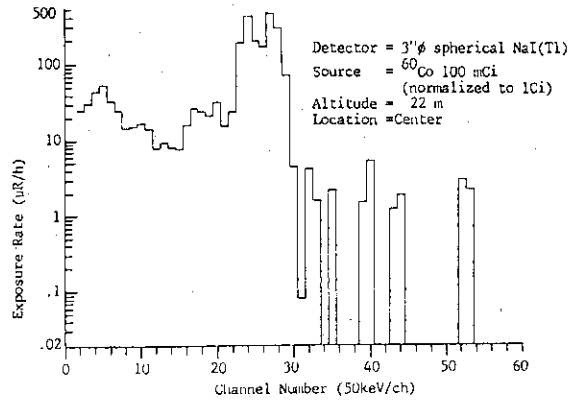
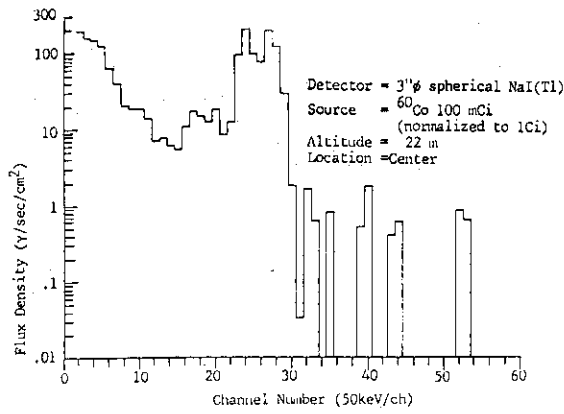


Fig.4.13 Cont'd (7/14)

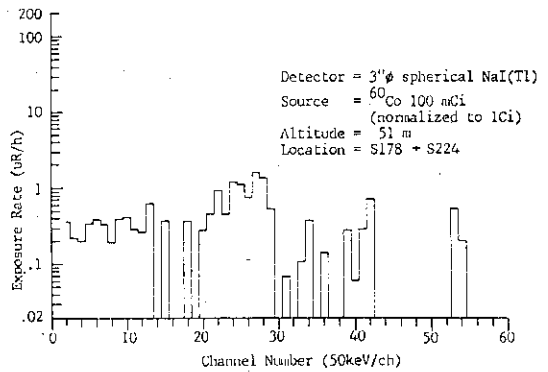
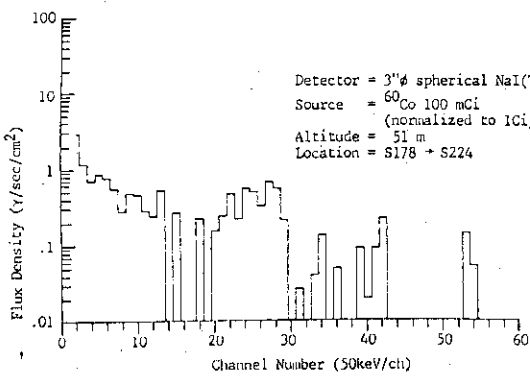
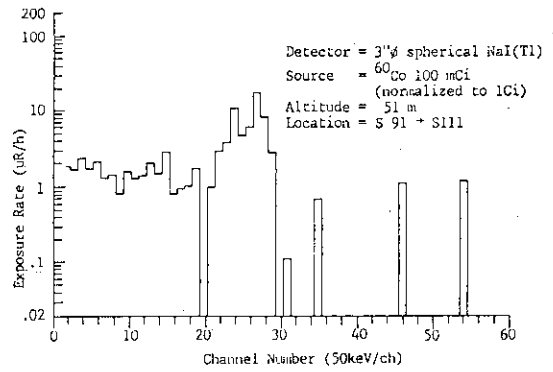
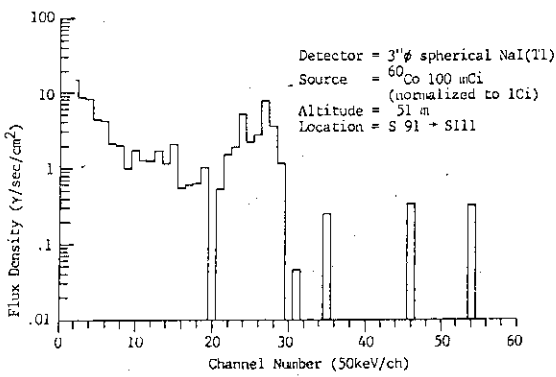
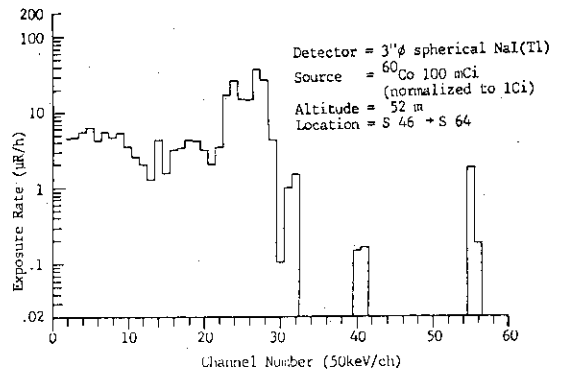
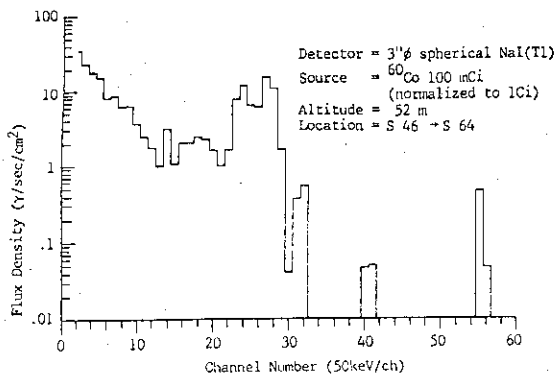


Fig.4.13 Cont'd (8/14)

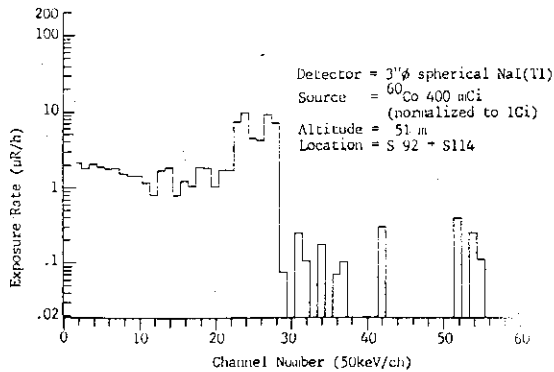
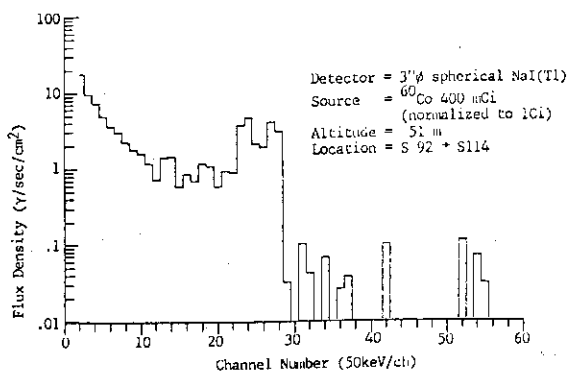
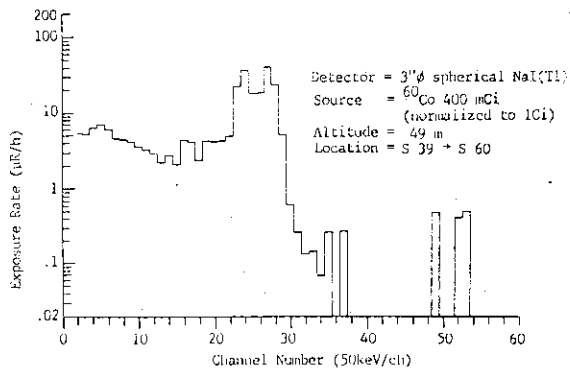
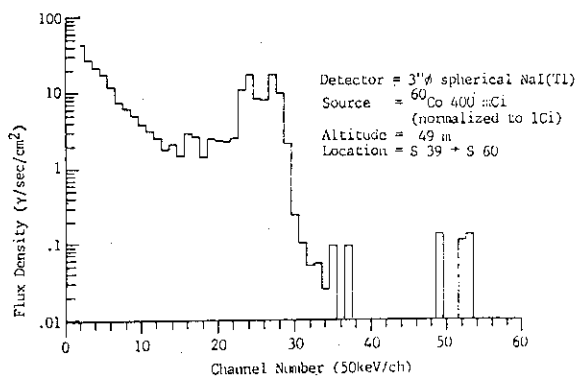
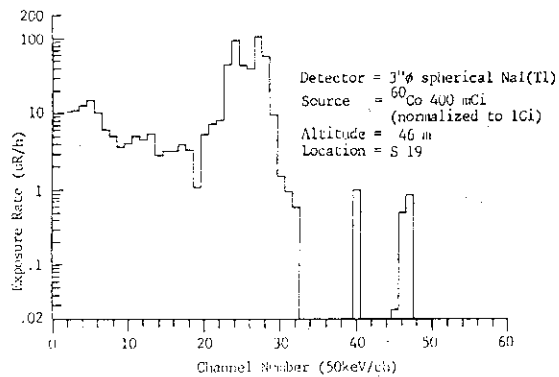
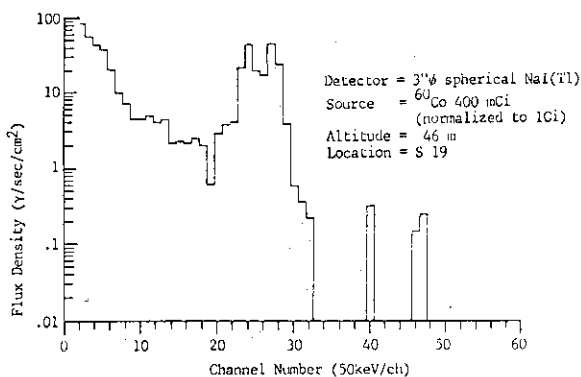
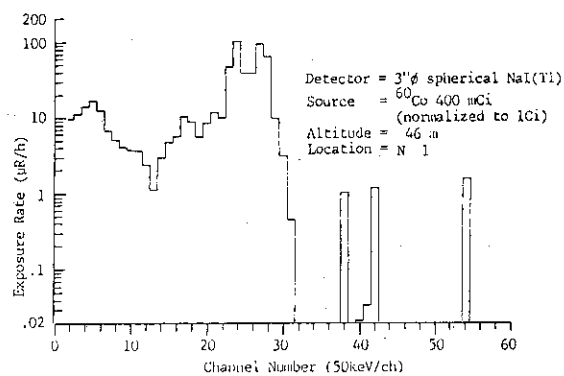
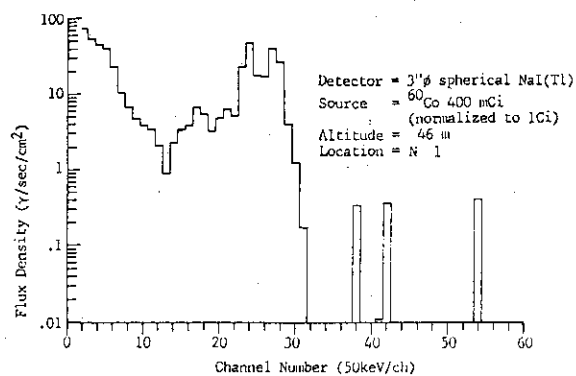


Fig.4.13 Cont'd (9/14)

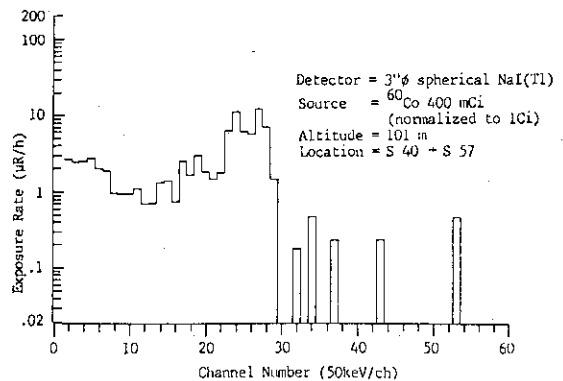
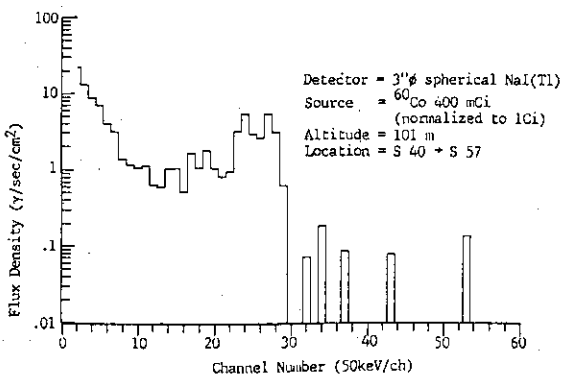
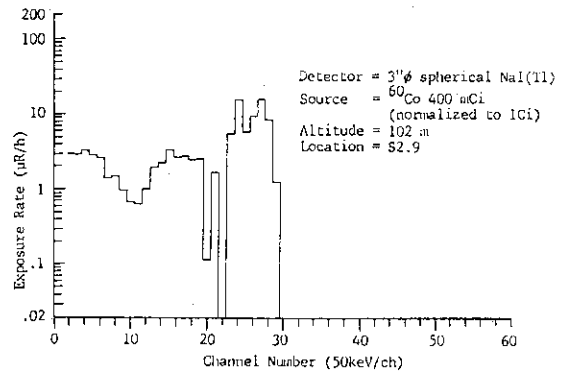
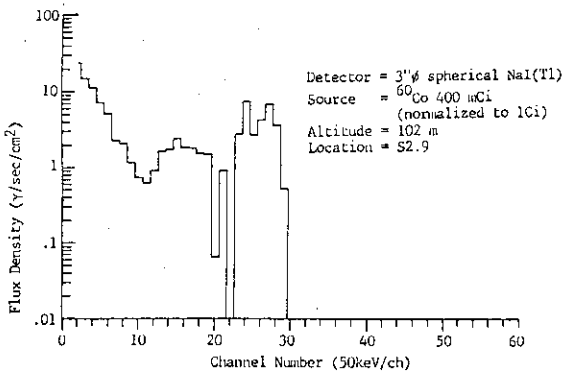
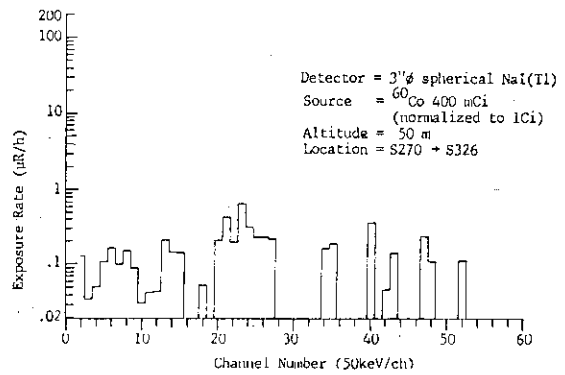
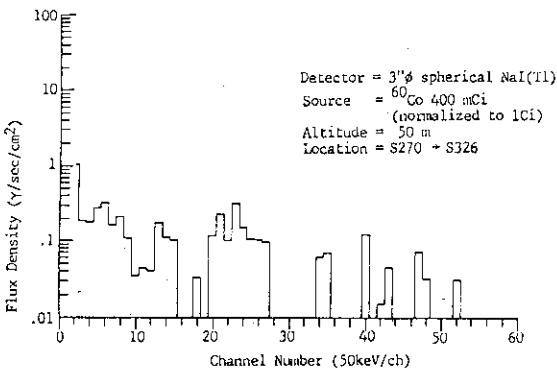
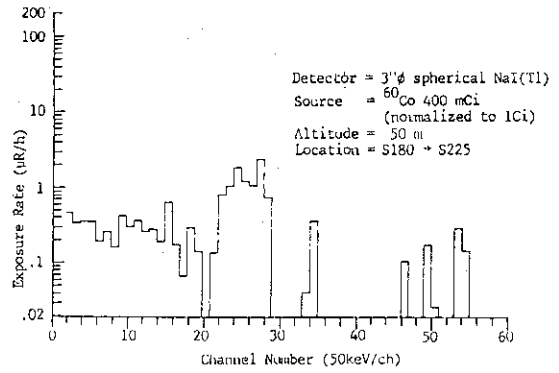
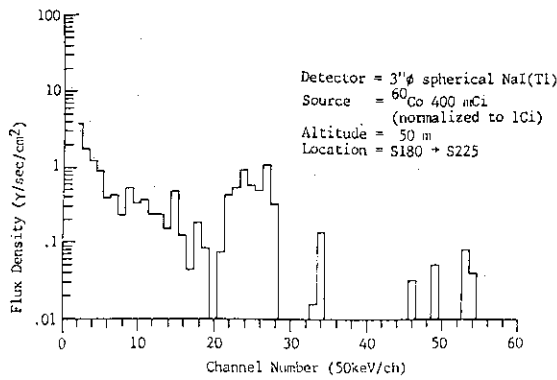


Fig.4.13 Cont'd (10/14)



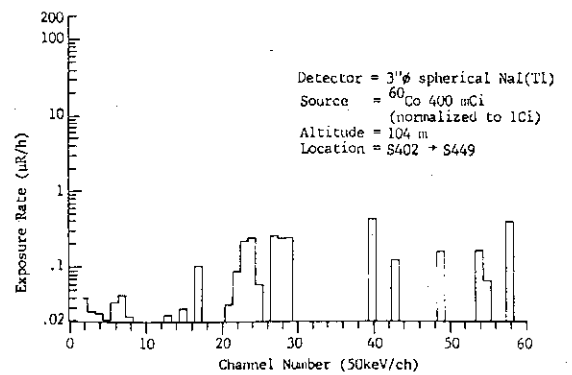
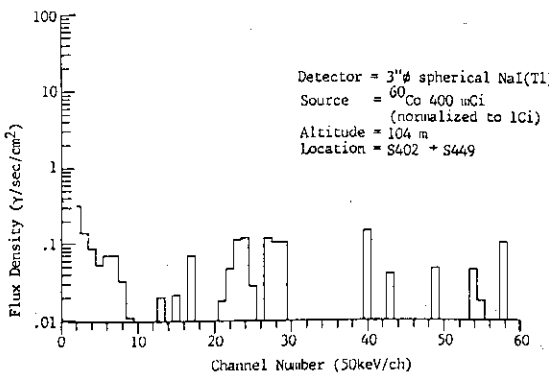
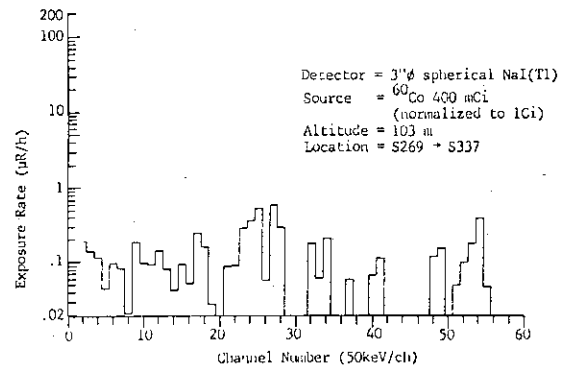
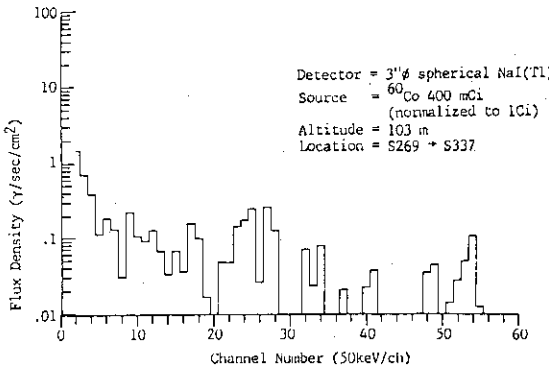
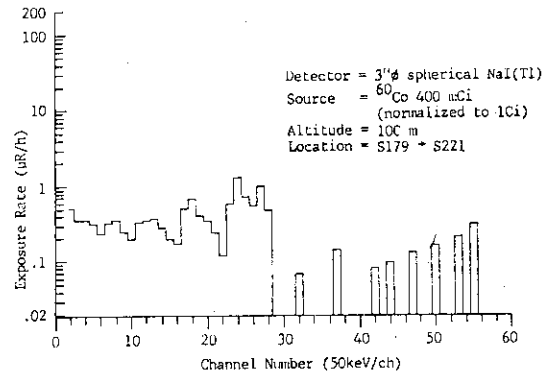
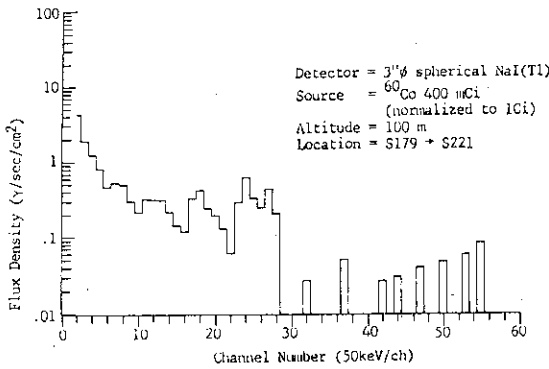
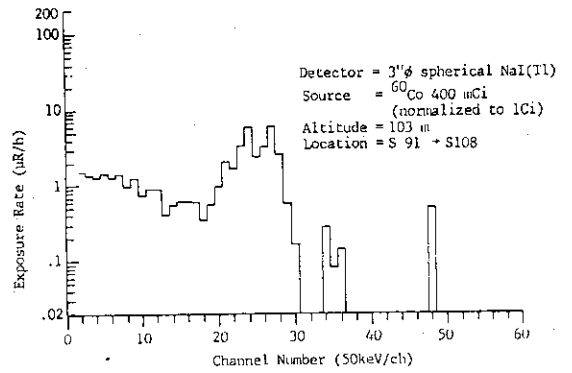
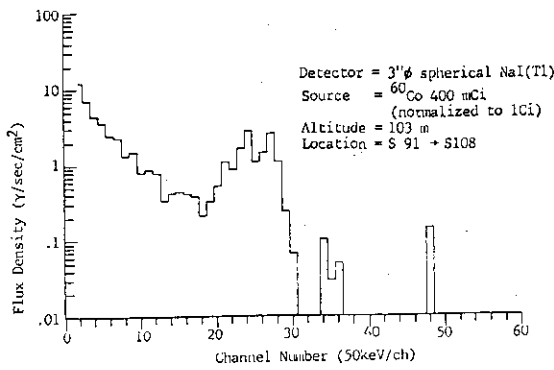


Fig.4.13 Cont'd (11/14)

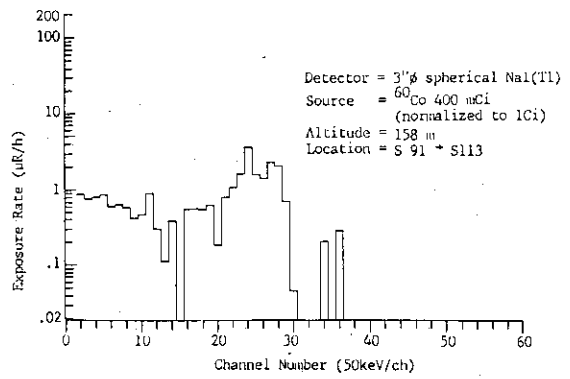
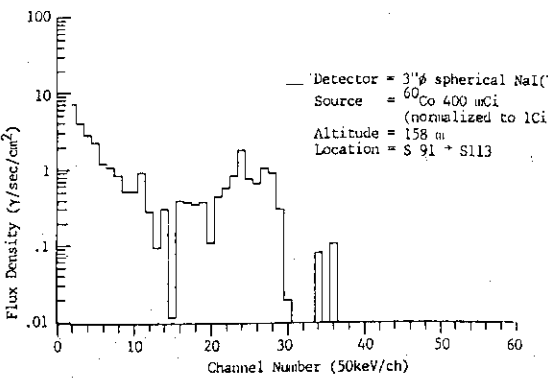
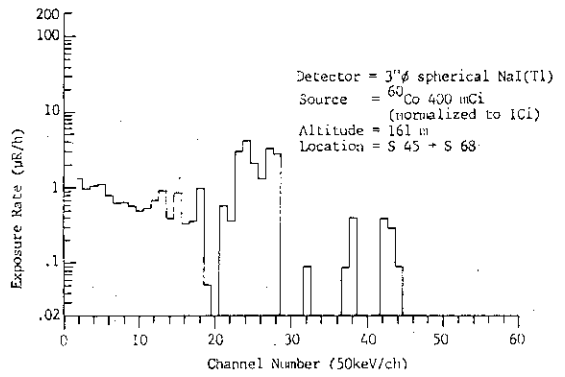
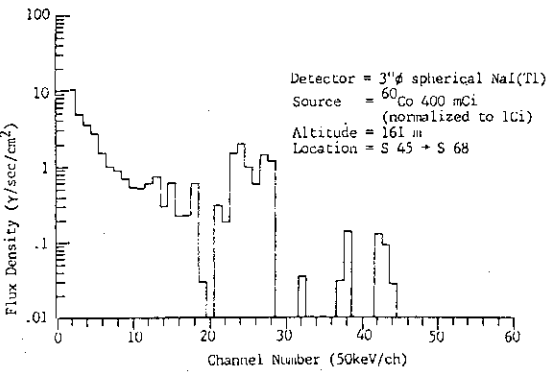
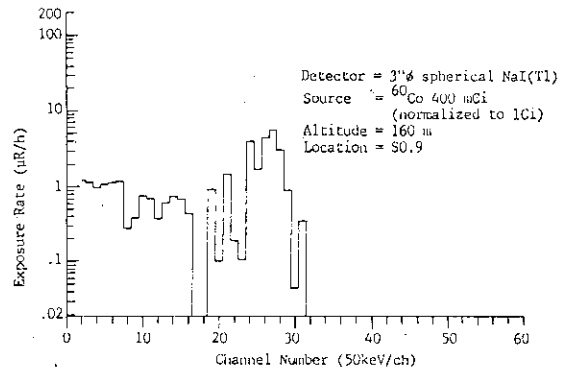
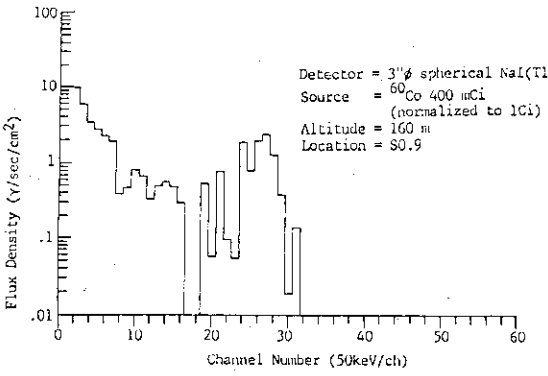
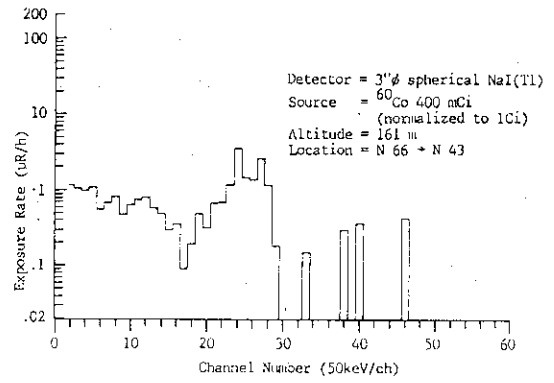
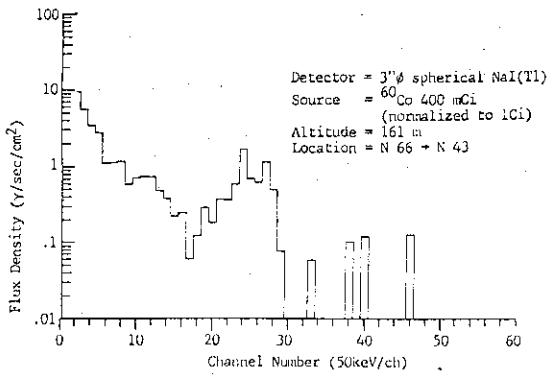


Fig.4.13 Cont'd (12/14)

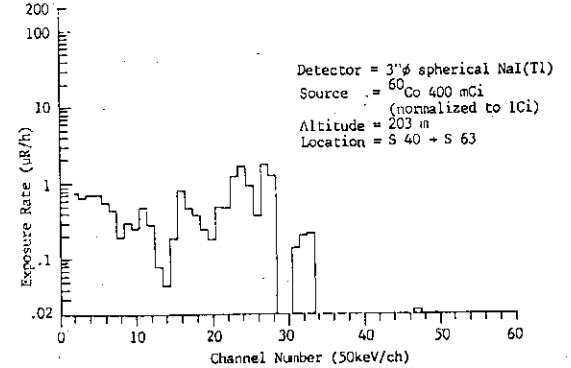
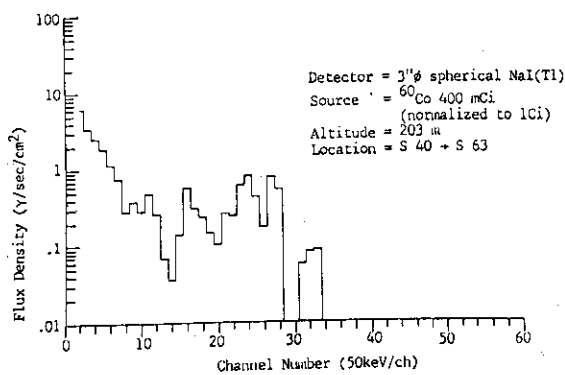
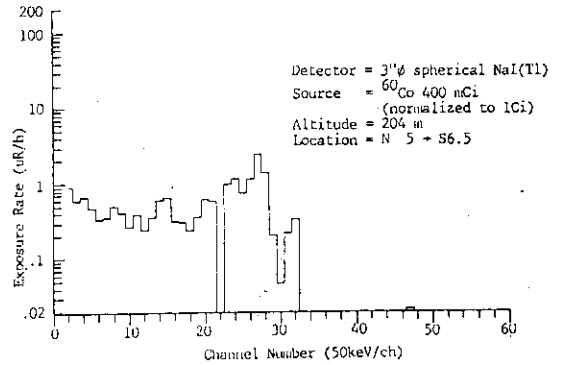
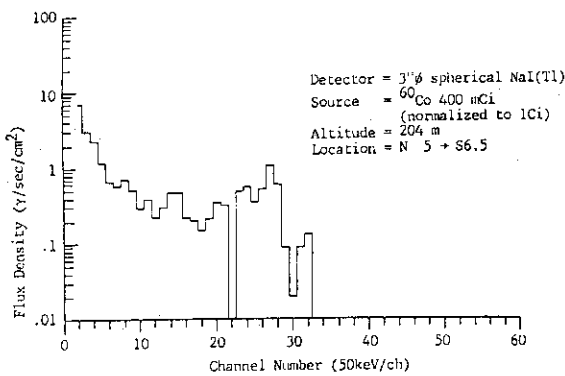
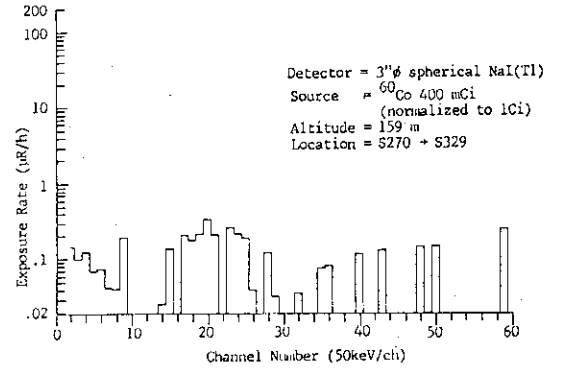
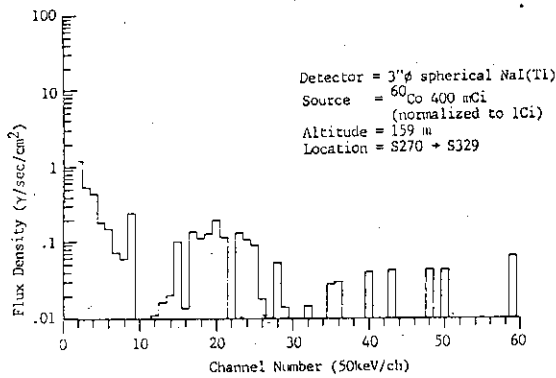
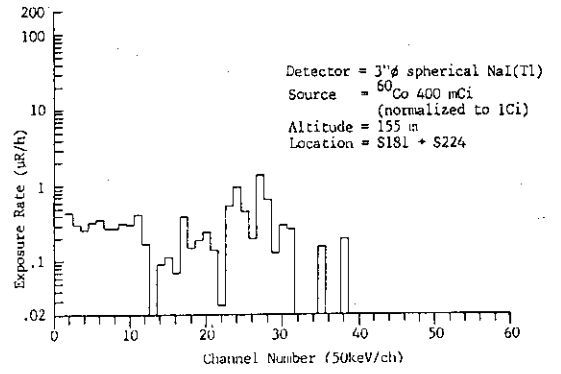
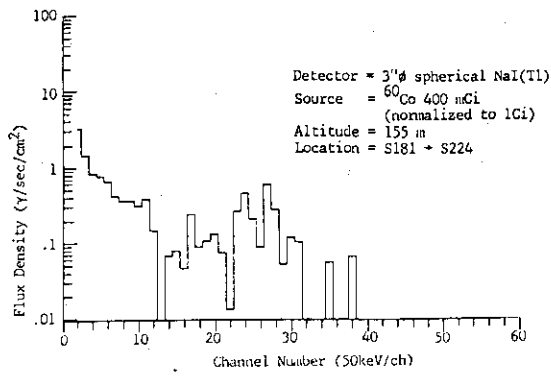


Fig.4.13 Cont'd (13/14)

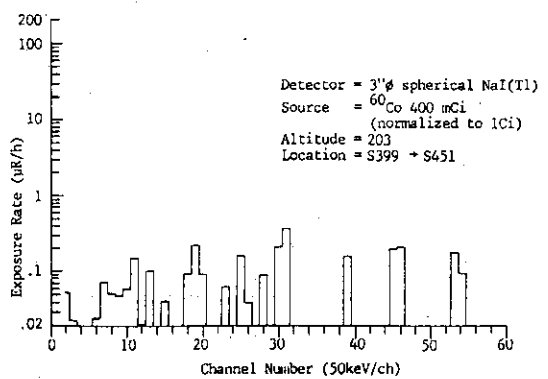
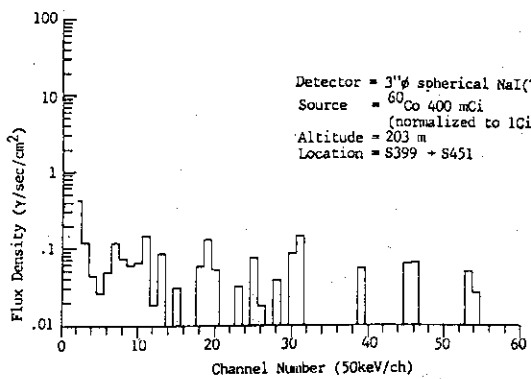
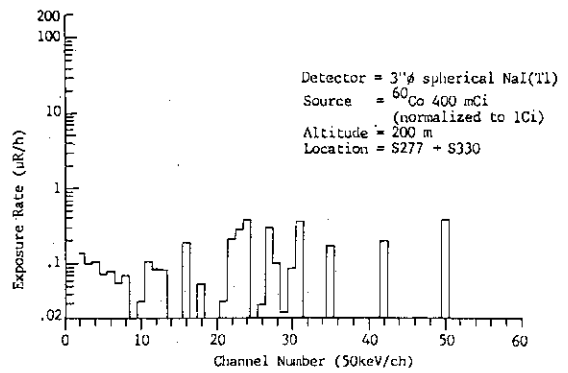
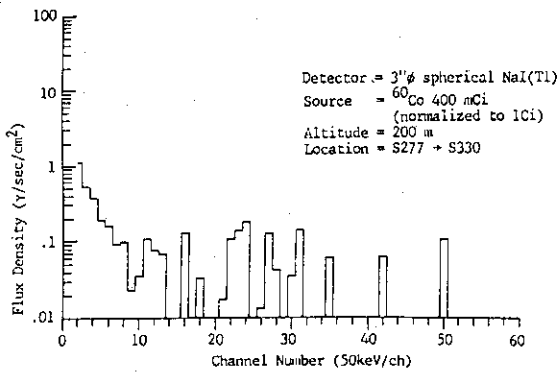
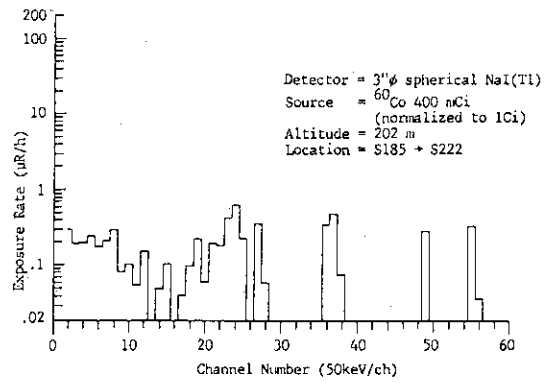
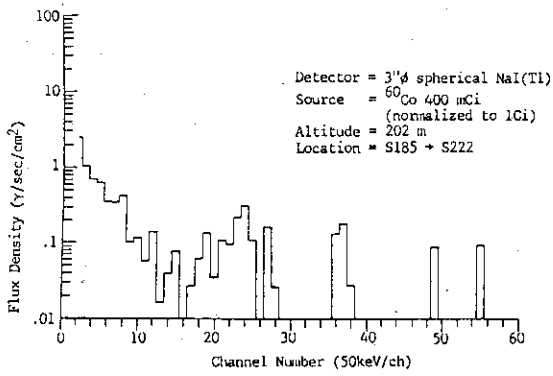
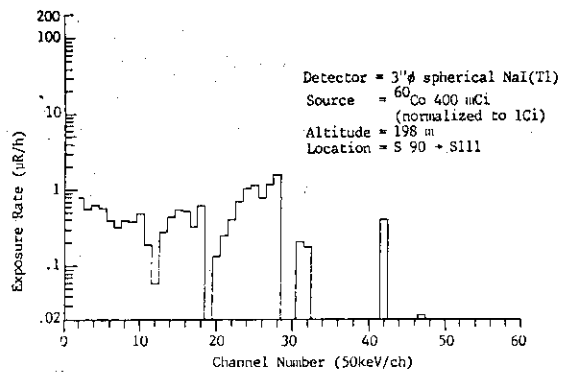
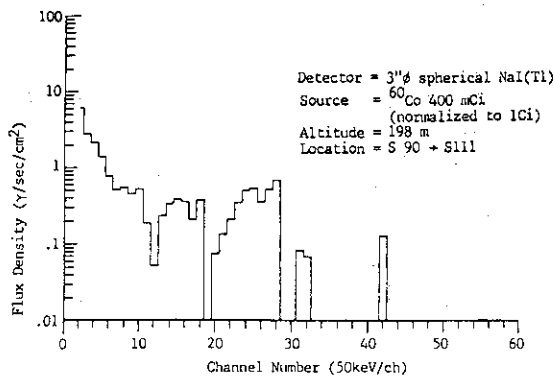


Fig.4.13 Cont'd (14/14)

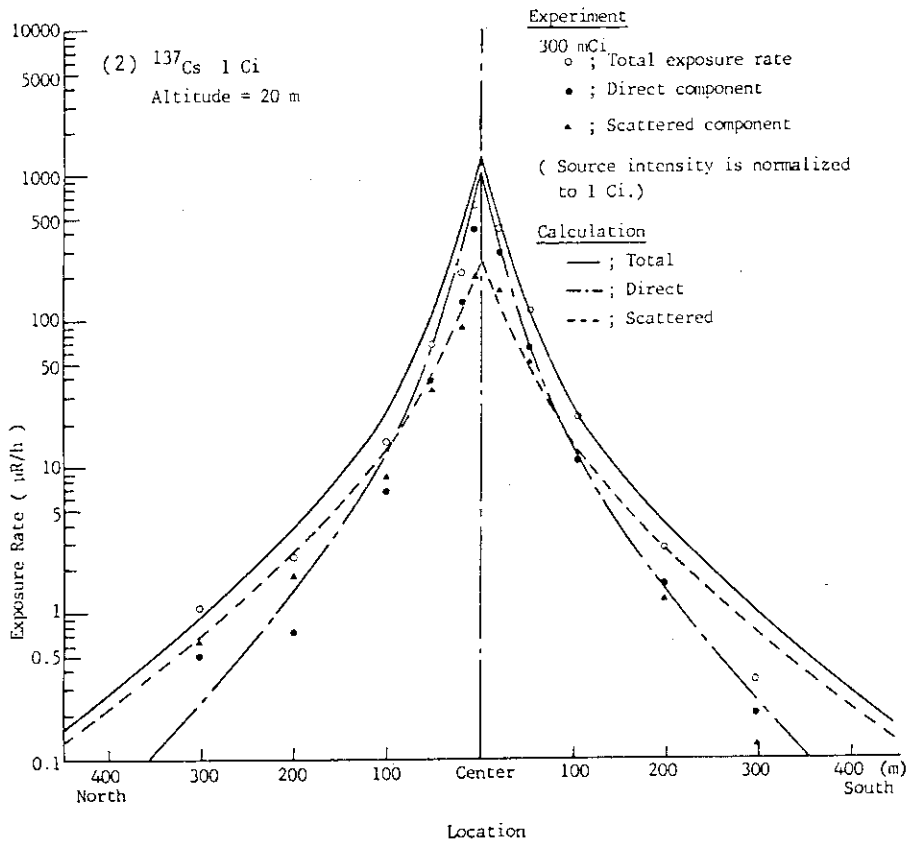
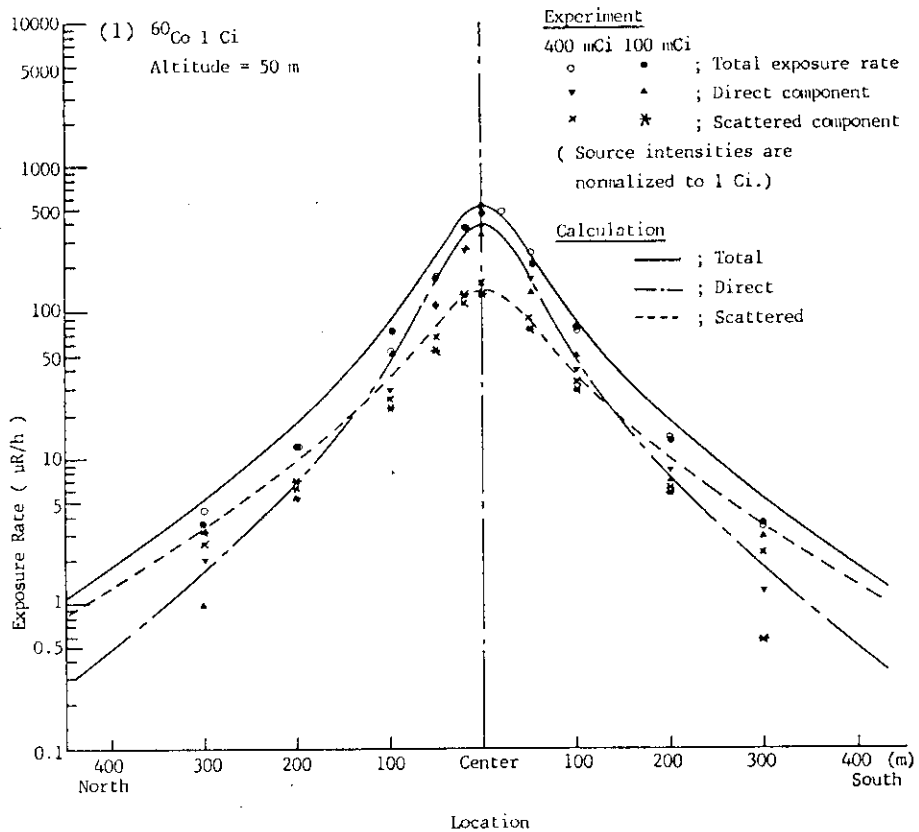


Fig.4.14 Horizontal distribution of total exposure rate, direct component and scattered component above the 1000m line during irradiation.  
Source intensities are normalized to 1 Ci. (1/2)

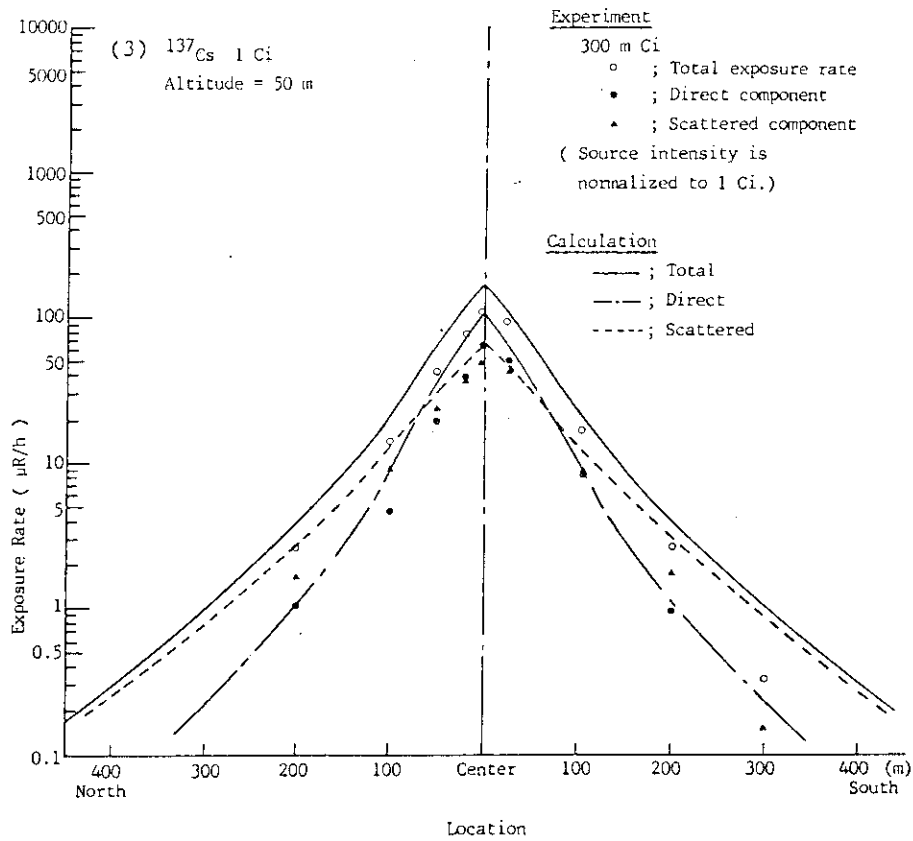
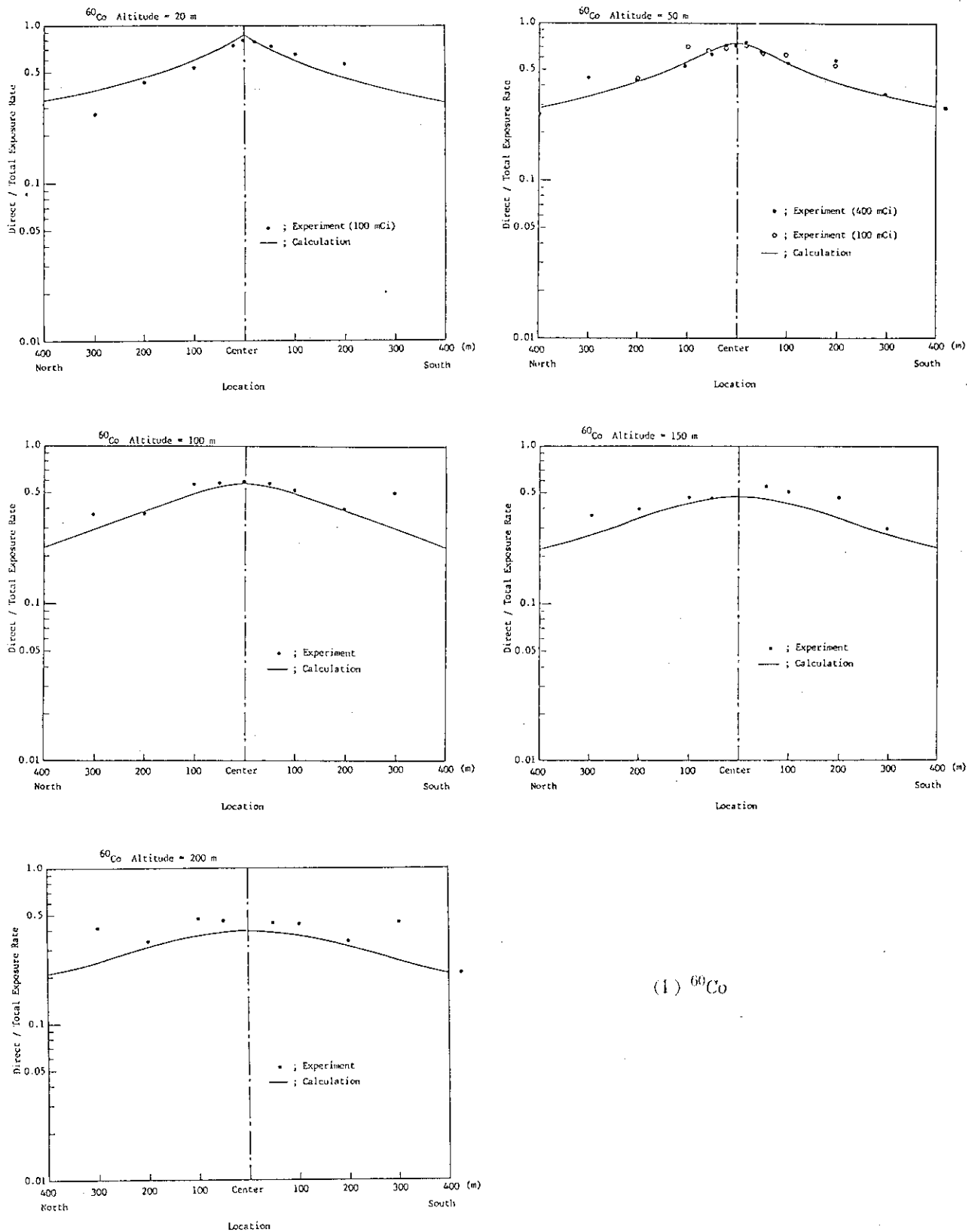
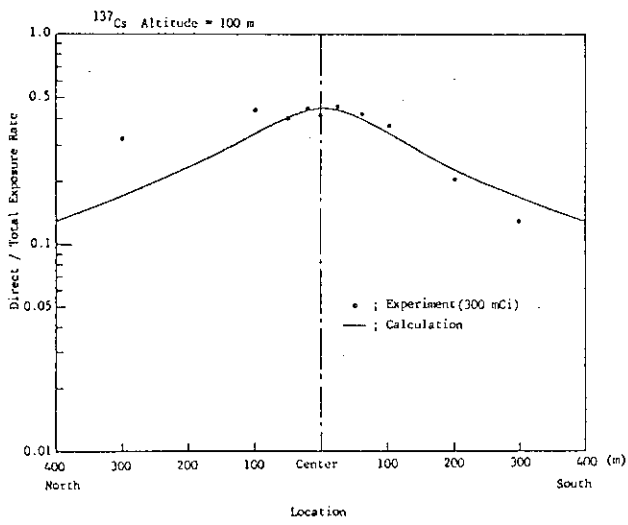
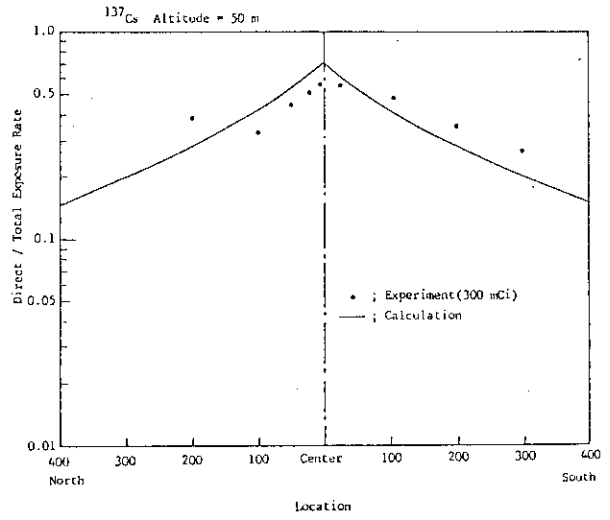
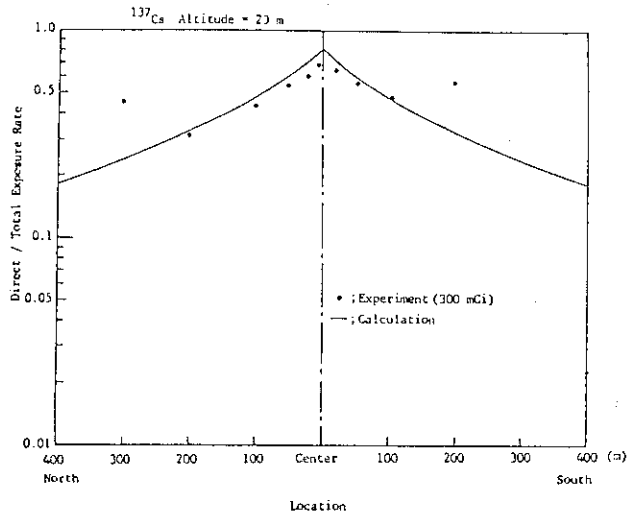


Fig.4.14 Cont'd (2/2)



(1)  $^{60}\text{Co}$

Fig.4.15 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate of direct component)/(total exposure rate) during irradiation. (1/2)



(2) <sup>137</sup>Cs

Fig.4.15 Cont'd (2/2)



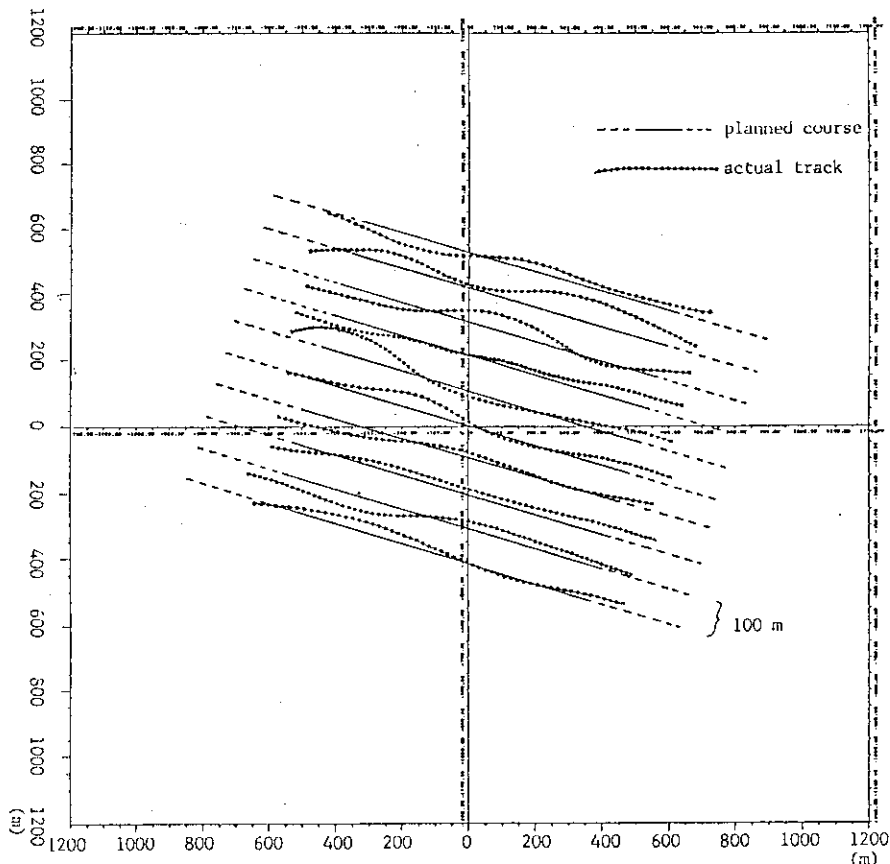


Fig.4.16 Helicopter track in case of "Scanning Flight" using a MRS guided flying technique. (1 km x 1 km, 100 m width)

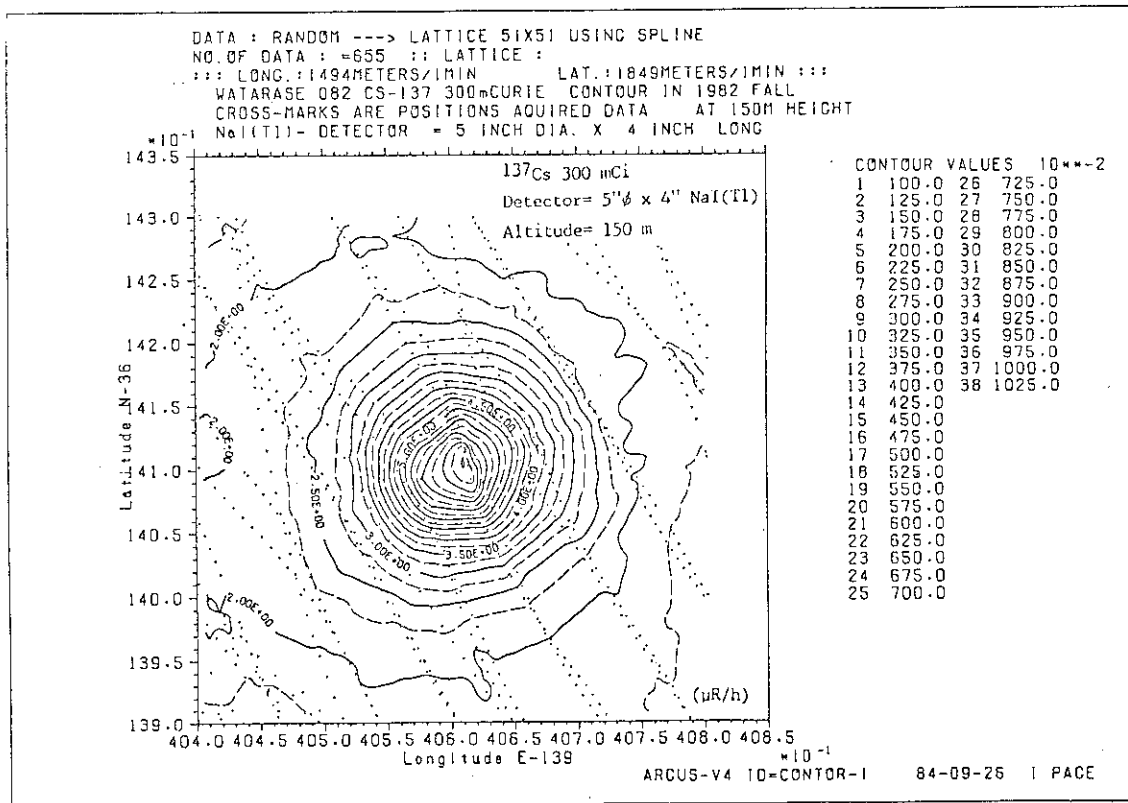


Fig.4.17 Exposure rate contour calculated using a data set obtained by scanning flight measurement.

### 4.3 考察

#### 4.3.1 線量率と計数率及び吸収エネルギーとの相関

測定された計数率または吸収エネルギーと線量率との相関関係を検討した。空気と NaI (Tℓ) とではそれらを構成する物質の原子番号組成がお互いに異なるため、厳密には、計数率または吸収エネルギーと線量率との間に直線関係は無い。しかし、自然環境中や、放射性物質が一様に分布している場のように核種組成の変化が小さく、そのために場所による  $\gamma$  線スペクトルの変化が小さい場合には計数率と線量率との間にある程度の直線関係が期待できる。また、 $\gamma$  線エネルギーが 100 keV から 3 MeV の範囲では、空気に対するエネルギー吸収係数も、NaI (Tℓ) に対するエネルギー吸収係数も、 $\gamma$  線エネルギーに依る変化が小さいため NaI (Tℓ) 検出器の検出効率が十分に高ければ、空気中に吸収されるエネルギーと NaI (Tℓ) 中に吸収されるエネルギーの比、即ち線量率と吸収エネルギーとの比が一定であることが期待できる。

即ち、ある放射線場における  $\gamma$  線線束密度スペクトルを  $\phi(E)$ 、空気に対するエネルギー吸収係数を  $\mu_{air}(E)$  とすると、この場における照射線量率  $X$  は次式で表わされる。

$$X = f_1 \cdot \int_{E_{min}}^{E_{max}} \mu_{air}(E) \cdot E \cdot \phi(E) dE \quad (4.2)$$

ここで  $f_1$  は、空気中への吸収エネルギーを照射線量に換算する係数、 $E_{min}$ 、 $E_{max}$  はそれぞれ対象とする  $\gamma$  線エネルギーの下限及び上限で、ここでは  $E_{min} = 40 \sim 50$  keV、 $E_{max} = 3$  MeV としている。ここで  $\mu_{air}(E)$  の特性を考察してみる。この場の平均的  $\mu_{air}(E)$  を  $\overline{\mu_{air}}$  とすると、

$$\overline{\mu_{air}} = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \mu_{air}(E) \cdot E \cdot \phi(E) dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} E \cdot \phi(E) dE} \quad (4.3)$$

と表わせる。即ち  $\phi(E)$  の形によって  $\overline{\mu_{air}}$  の値が決まり、 $\phi(E)$  の形が類似している場所間では、 $\overline{\mu_{air}}$  の値はほぼ等しい。一方、 $\mu_{air}(E)$  のエネルギー依存性は、 $E$  が 60 keV から 3 MeV の間では  $0.0305 \sim 0.0211$  cm<sup>2</sup>/g、即ち  $0.0258$  cm<sup>2</sup>/g  $\pm 20\%$  であり変化は小さい。従って、もし  $\phi(E)$  の形が大きく変化したとしても、 $\overline{\mu_{air}}$  の値としては、 $\pm 20\%$  の幅を超えることはない。しかも  $\phi(E)$  の形が似ている程、この幅は狭くなるから、一般の自然環境放射線場での  $\overline{\mu_{air}}$  の値はほぼ一であると考えることができる。そこで、 $\overline{\mu_{air}} = \text{一定}$  とおけば (4.2) 式は

$$X = f_1 \cdot \overline{\mu_{air}} \int_{E_{min}}^{E_{max}} E \cdot \phi(E) dE \quad (4.4)$$

と表わされる。

次に、 $\phi(E)$  の場におかれた NaI (Tℓ) 中に吸収されるエネルギー  $A$  は、次式で表わされる。

$$A = \int_{E_{min}}^{E_{max}} f_2(E) \cdot E \cdot \phi(E) dE \quad (4.5)$$

ここで、 $f_2(E)$  は検出器中に入射した  $\gamma$  線エネルギーが、検出器中に吸収される割合で、

$$f_2(E) = 1 - e^{-\mu_{\text{NaI}}(E) \cdot \ell} \quad (4.6)$$

と表わされる。ここで  $\mu_{\text{NaI}}$  は、NaI(T $\ell$ ) に対するエネルギー吸収係数、 $\ell$  は  $\gamma$  線が検出器中を通過する距離であり、 $\gamma$  線入射方向分布、検出器の大きさ及び形状の関数であるが、ここでは簡単のため、入射方向分布と検出器の大きさ及び形状を考慮した平均通過距離であるとする。ここで  $f_2(E)$  について考察を行う。今、平均的  $f_2(E)$  を  $\bar{f}_2$  とすると、これは、次式のように表わされる。

$$\bar{f}_2 = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f_2(E) \cdot E \cdot \phi(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \mu_{\text{air}}(E) \cdot E \cdot \phi(E) dE} \quad (4.7)$$

(4.7) 式より、 $\bar{\mu}_{\text{air}}$  の場合と同様に、 $\phi(E)$  の形が相似ならば  $\bar{f}_2$  の値も等しいものとなることが分る。

一方、 $\phi(E)$  の形が相似でない場に対しては考察しておく必要がある。 $\ell$  が  $\infty$  ならば、 $f_2(E)$  は  $E$  に依らず 1 であり、 $\bar{f}_2$  は  $\bar{\mu}_{\text{air}}$  の逆数に等しくなり、いわゆる全吸収型検出器の場合に相当する。この場合は  $\bar{f}_2 = 1/\bar{\mu}_{\text{air}}$  であるから、前述のようにほぼ一定の値をとると考えられる。次に、 $\ell$  が有限の値、例えば  $\ell = 10$  cm の場合には、 $f_2(E)$  の値は 3 MeV 以下の  $\gamma$  線エネルギーに対して 1 ~ 0.53 程度の値である。即ち、 $\bar{f}_2$  は最大この程度の変動幅を有するが、実際には、 $\bar{\mu}_{\text{air}}$  の場合と同じく、 $\phi(E)$  の相似性により変動幅が縮まるし、500 keV から 3 MeV では、 $\mu_{\text{air}}(E)$  も  $\mu_{\text{NaI}}(E)$  も  $E$  の増加に対して減少する傾向であるためこれも  $\bar{f}_2$  の変動幅を縮める方向に働く。従って、 $\bar{f}_2$  についても一般の自然環境  $\gamma$  線場ではほぼ一定と考えることができ、

$$A = \bar{f}_2 \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \cdot \phi(E) dE \quad (4.8)$$

と表わせ、これは (4.4) 式と比例する。

即ち、吸収エネルギーと線量率の間には良好な直線関係が存在し、検出器の検出効率が高く、放射線場のエネルギー分布が似ているほどその直線性は向上すると言えることができる。このことは、これらの関係を各検出器毎に明らかにしておけば、とくに複雑な装置を用いなくとも、迅速かつ簡便に線量率の推定が可能であることを示している。

Fig. 4.18 に、1000 m ライン上における線源設置点からの距離による線量率と計数率との比の変化の例及び、線量率と吸収エネルギーとの比の変化の例を、それぞれバックグラウンド、 $^{60}\text{Co}$  線源測定、 $^{137}\text{Cs}$  線源測定の場合について示す。ここで検出器は 5"  $\phi$  球形及び 4"  $\phi \times 4$ " 円筒型 NaI(T $\ell$ ) である。

線量率と計数率との比は、バックグラウンドの場合、場所による変化は殆んど無かった。これは、1000 m ライン上空で、高度が一定であれば、放射線場の変化は殆んど無いことから当然である。

また、線源測定の場合には、高度が高い程場所による変化は小さく、高度が低い程、とくに線源真上付近において変化が現われる。これは、線源に近い程直接線成分が多くなるためである。線源からの距離が約150 m以上になると、線量率と計数率との比は、線量率によらずほぼ一定の値となった。

線量率と吸収エネルギーとの比は、線源からの距離、線源の種類に依らずほぼ一定の値を示した。これは前述のような理由で空気と検出器の単位体積当りにそれぞれ吸収されるエネルギーの比、即ち線量率と検出器への吸収エネルギーとの比が一定であることを示している。従ってこの比と検出器への吸収エネルギーとを用いてその場の線量率を評価することができる。Table 4.1に、線源から十分離れた場所での各検出器に対する（線量率/計数率）比、及び（線量率/吸収エネルギー）比を示す。これらの値は場の $\gamma$ 線エネルギースペクトルにより多少変化するが、高度150 m以上の飛行測定においては実用上問題は無いと考えられる。

#### 4.3.2 各検出器の測定可能範囲

緊急時モニタリングにおいては、場所に依って線量率レベルが大きく変化すると予想される。一方、放射線測定系は、使用する検出器との組み合わせに依る固有の測定可能範囲を有するため、測定可能上限以上の放射線場では数え落しによる過小評価、下限以下の放射線場では計数不足による精度低下の原因となる。ここでは、使用する検出器毎に測定可能な上下限を検討する。

##### 4.3.2.1 測定可能範囲の上限（測定上限）

測定上限を「数え落しの割合 $r$ がある値以上となる場合の計数率」と定義する。数え落しの主な原因は、ADCの変換時間によるもので、変換時間が速い程数え落しは少ない。本システムの場合、変換時間は約 $5 \mu\text{sec/pulse}$ 、最大計数率は50 kcpsとされている。ここで測定上限を評価する。変換時間を $\tau$ (sec)、計数率を $n$ (cps)とすると、数え落しの割合 $r$ は $n\tau$ に等しい。 $r$ を5%、10%、15%、20%及び25%とする場合の測定上限計数率をTable 4.2に示す。計数率と線量率との関係は、 $\gamma$ 線エネルギーや線源からの距離に依るため一概に計数率を線量率に換算することはできないが、Table 4.1に示す換算係数を用いて計算した値をTable 4.2に併せて示す。この場合、とくに線源に近い所で換算係数が大きくなる傾向があるため、約2倍程度になり得ると考えられる。

##### 4.3.2.2 測定可能範囲の下限（測定下限）

測定下限を文献9)に従って「ある予め定められたレベルの信頼性をもって、バックグラウンド以外の成分による寄与分（計数率、線量率など）があると判定し得る最小の寄与分」と定義すると、測定下限LDLは次のように表わされる。

$$\text{LDL} \cong (K_{\alpha} + K_{\beta}) \sigma_0 \quad (4.9)$$

ここで  $K_{\alpha}$  : バックグラウンド以外の寄与分が無いのに有ると判定するリスク（確率） $\alpha$ の関数で、

$$\alpha = \int_{K_{\alpha}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

の関係がある\*。

$K_\beta$  : バックグラウンド以外の寄与分が有るのに無いと判定するリスク (確率)  $\beta$  の関数で,

$$\beta = \int_{-\infty}^{-K_\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

の関係がある\*。

$\sigma_0$  : バックグラウンド以外の寄与分正味の標準偏差で, 全計数の標準偏差及びバックグラウンド計数の標準偏差を  $\sigma_{\text{gross}}$  及び  $\sigma_{\text{bkg}}$  とすると

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{\text{gross}}^2 + \sigma_{\text{bkg}}^2}$$

である。

今, 全計数率とバックグラウンドのみの計数率とは近い値の場合を問題にしているから,  $\sigma_{\text{gross}} \approx \sigma_{\text{bkg}}$  とし, また簡単のため  $\alpha = \beta$  とすると,

$$\text{LDL} = 2\sqrt{2} K_\alpha \cdot \sigma_{\text{bkg}}$$

となる。本実験で用いた6検出器について, 高度別バックグラウンドに対するLDLをTable 4.3 (1)~(6)に示す。ここで  $\sigma_{\text{bkg}}$  としてはバックグラウンド計数率に対するものを用い, Table 4.1を用いて線量率換算した。この場合はバックグラウンドを対象としているので, 計数率と線量率とは比例関係にあるとみなして良いと考えられる。

---

\*  $\alpha, \beta$  と  $K_\alpha, K_\beta$  との関係は次のようになる。

$\alpha, \beta$	$K_\alpha, K_\beta$
0.01	2.327
0.02	2.054
0.05	1.645
0.10	1.282
0.20	0.842
0.50	0

Table 4.1 Ratio of (exposure rate/total counting rate) ,and that of (exposure rate)/(deposited energy) for each detector.

Detector	(Exposure rate)/(Total counting rate) ( $\mu\text{R/h}$ / cps)	(Exposure rate)/(Deposited energy) ( $\mu\text{R/h}$ / MeV/sec)
3" $\phi$ spherical NaI(Tl)	0.017 - 0.020	0.068 - 0.070
3" $\phi$ x 3" cylindrical NaI(Tl)	0.014 - 0.016	0.056 - 0.058
4" $\phi$ x 4" cylindrical NaI(Tl)	0.0080 - 0.010	0.030 - 0.031
5" $\phi$ spherical NaI(Tl)	0.0060 - 0.0070	0.020 - 0.021
5" $\phi$ x 4" cylindrical NaI(Tl)	0.0050 - 0.0060	0.019
DET-1024	0.0007 - 0.0008	0.0021

Table 4.2 Upper limits of detection due to the dead time rate  $r$  within an acquisition interval.

	Detector	Upper detection limit					Conversion factor ( $\mu\text{R/h/cps}$ ) <sup>*3</sup>
		$r=5\%$	$r=10\%$	$r=15\%$	$r=20\%$	$r=25\%$	
Upper limit of counting rate $n(\text{cps})$ <sup>*1</sup>	all	10000	20000	30000	40000	50000	
Upper limit of exposure rate $X(\mu\text{R/h})$ <sup>*2</sup>	3" $\phi$ sph.	195	411	653	925	1233	0.0185
	3" $\phi$ x 3" cyl.	158	333	529	750	1000	0.015
	4" $\phi$ x 4" cyl.	94.7	200	318	450	600	0.009
	5" $\phi$ sph.	68.4	144	229	325	433	0.0065
	5" $\phi$ x 4" cyl.	57.9	122	194	275	367	0.0055
	DET-1024	7.9	16.7	26.5	37.5	50	0.00075

$r$ ; Counting loss rate due to dead time  $\tau(5\mu\text{sec})$

\*1;  $n = r/\tau$  (cps)

\*2; Counting loss is corrected.

\*3; See Table 4.1.

Table 4.3 Lower detection limits LDL due to background level.

$\alpha$  stands for probability of making a Type I error (of concluding there is artificial radiation when there is none). Probability of making a Type II error (of concluding there is no artificial radiation when there is some)  $\beta$  is set to be equal to  $\alpha$ . (1/3)

(1) Detector= 3"∅ sph.

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu R/h$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	171.5	13.1	86.2 1.59	76.1 1.41	61.0 1.13	47.5 .88	31.2 .58
50	143.1	12.0	79.0 1.46	69.7 1.29	55.8 1.03	43.5 .80	28.6 .53
100	108.7	10.4	68.5 1.27	60.4 1.11	48.4 .90	37.7 .70	24.8 .46
150	81.65	9.04	59.5 1.10	52.5 .97	42.1 .78	32.8 .61	21.5 .40
200	62.91	7.93	52.2 .97	46.1 .85	36.9 .68	28.8 .53	18.9 .35
300	40.41	6.36	41.9 .78	36.9 .68	29.6 .55	23.1 .43	15.1 .28
400	29.40	5.42	35.7 .66	31.5 .58	25.2 .47	19.7 .36	12.9 .24
500	23.53	4.85	31.9 .59	28.2 .52	22.6 .42	17.6 .33	11.6 .21

(2) Detector= 3"∅x3" cyl.

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu R/h$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	237.8	15.4	101 1.52	89.5 1.34	71.7 1.08	55.8 .84	36.7 .55
50	196.2	14.0	92.1 1.38	81.3 1.22	65.1 .98	50.8 .76	33.3 .50
100	149.0	12.2	80.3 1.20	70.9 1.06	56.8 .85	44.2 .66	29.1 .44
150	110.7	10.5	69.1 1.04	61.0 .92	48.9 .73	38.1 .57	25.0 .38
200	85.88	9.27	61.0 .92	53.9 .81	43.1 .65	33.6 .50	22.1 .33
300	55.76	7.47	49.2 .74	43.4 .65	34.8 .52	27.1 .41	17.8 .27
400	40.61	6.37	41.9 .63	37.0 .56	29.6 .44	23.1 .35	15.2 .23
500	33.49	5.79	38.1 .57	33.6 .50	26.9 .40	21.0 .32	13.8 .21

Table 4.3 Cont'd (2/3)

(3)

Detector= 4"Øx4" cyl.

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu R/h$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	403.8	20.1	132 .19	117 1.05	93.5 .84	72.9 .66	47.9 .43
50	339.4	18.4	121 1.09	107 .96	85.6 .77	66.7 .60	43.8 .39
100	255.3	16.0	105 .95	93.0 .84	74.4 .67	58.0 .52	38.1 .34
150	194.6	13.9	91.5 .82	80.8 .73	64.7 .58	50.4 .45	33.1 .30
200	156.7	12.5	82.3 .74	72.6 .65	58.2 .52	45.3 .41	29.8 .27
300	105.9	10.3	67.8 .61	59.8 .54	47.9 .43	37.3 .34	24.5 .22
400	79.5	8.92	58.7 .53	51.8 .47	41.5 .37	32.3 .29	21.2 .19
500	66.0	8.12	53.4 .48	47.2 .42	37.8 .34	29.4 .26	19.3 .17

(4)

Detector= 5"Ø sph.

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu R/h$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	484.6	22.0	145 .94	128 .83	102 .66	79.8 .52	52.4 .34
50	406.7	20.2	133 .86	117 .76	94.0 .61	73.2 .48	48.1 .31
100	306.6	17.5	115 .75	102 .66	81.4 .53	63.5 .41	41.7 .27
150	234.9	15.3	101 .66	88.9 .58	71.2 .46	55.5 .36	36.4 .24
200	187.0	13.7	90.2 .59	79.6 .52	63.7 .41	49.7 .32	32.6 .21
300	125.6	11.2	73.7 .48	65.1 .42	52.1 .34	40.6 .26	26.7 .17
400	91.25	9.55	62.9 .41	55.5 .36	44.4 .29	34.6 .22	22.7 .15
500	74.0	8.60	56.6 .37	50.0 .33	40.0 .26	31.2 .20	20.5 .13



Table 4.3 Cont'd (3/3)

(5) Detector = 5"Øx4" cyl.

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu\text{R/h}$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	579.0	24.1	159 .87	140 .77	112 .62	87.4 .48	57.4 .32
50	476.7	21.8	143 .79	127 .70	101 .56	79.0 .43	51.9 .29
100	371.4	19.3	127 .70	112 .62	89.8 .49	70.0 .39	46.0 .25
150	325.0	18.0	118 .65	105 .58	83.7 .46	65.3 .36	42.9 .24
200	218.5	14.8	97.4 .54	86.0 .47	68.9 .38	53.7 .30	35.2 .19
300	143.8	12.0	79.0 .43	69.7 .38	55.8 .31	43.5 .24	28.6 .16
400	108.8	10.4	68.5 .38	60.4 .33	48.4 .27	37.7 .21	24.8 .14
500	92.3	9.61	63.3 .35	55.8 .31	44.7 .25	34.8 .19	22.9 .13

(6) Detector = DET-1024

Altitude (m)	Mean background (cps)	Standard deviation $\sigma_{bg}$	Lower Detection Limit LDL (upper; cps, lower; $\mu\text{R/h}$ )				
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.20$
20	4002	63.3	417 .31	368 .28	295 .22	230 .17	151 .11
50	3336	57.8	380 .29	336 .25	269 .20	210 .16	138 .10
100	2629	51.3	338 .25	298 .22	239 .18	186 .14	122 .092
150	2308	48.0	316 .24	279 .21	223 .17	174 .13	114 .086
200	1554	39.4	259 .19	229 .17	183 .14	143 .11	93.8 .070
300	1019	31.9	210 .16	185 .14	148 .11	116 .087	76.0 .057
400	767.2	27.7	182 .14	161 .12	129 .096	100 .075	66.0 .050
500	642.4	25.3	167 .13	147 .11	118 .089	91.7 .069	60.3 .045

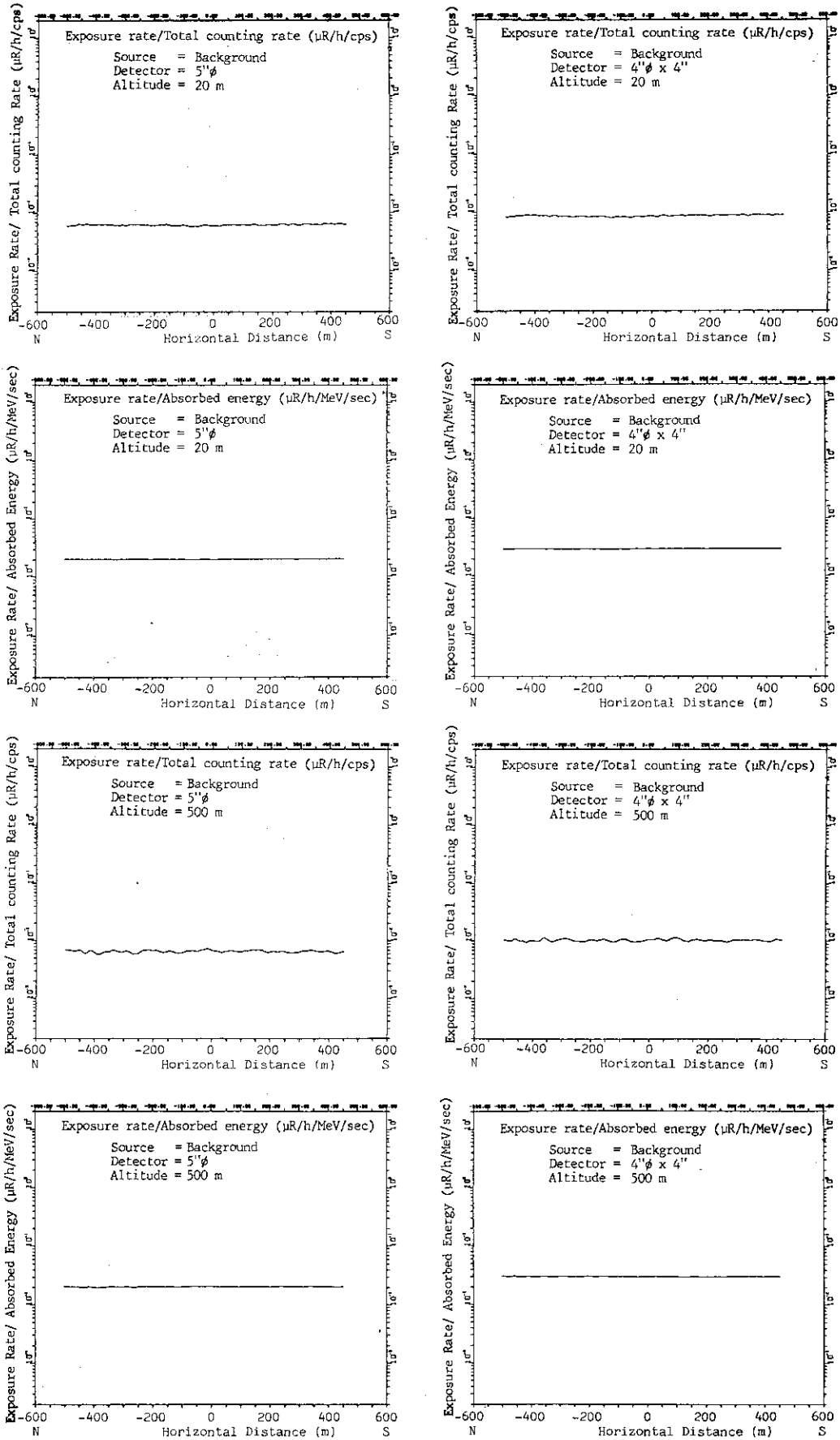


Fig.4.18 Horizontal distribution of ratio of (exposure rate)/(total counting rate), and that of (exposure rate)/(deposited energy) above the 1000m line. (1/3)

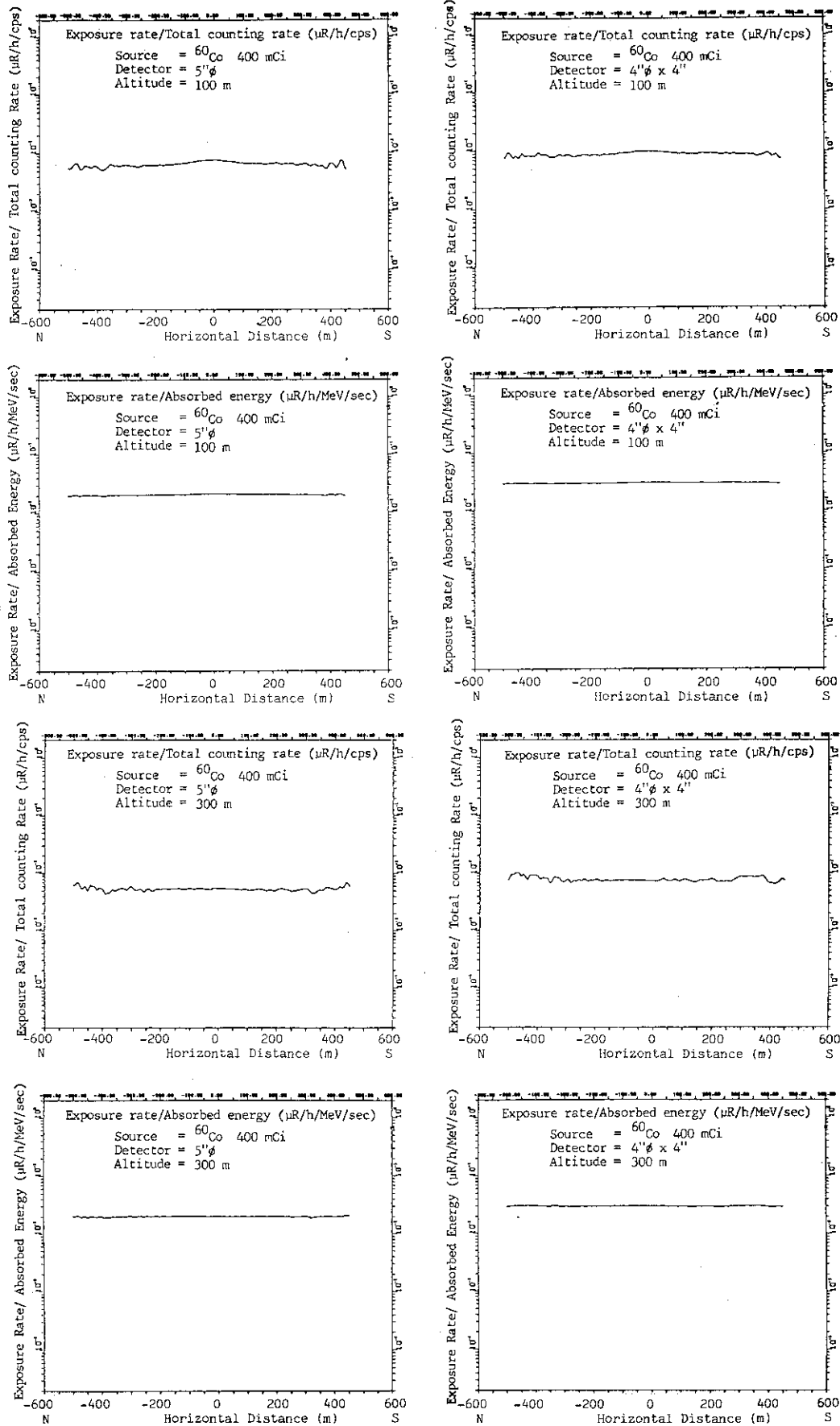


Fig.4.18 Cont'd (2/3)

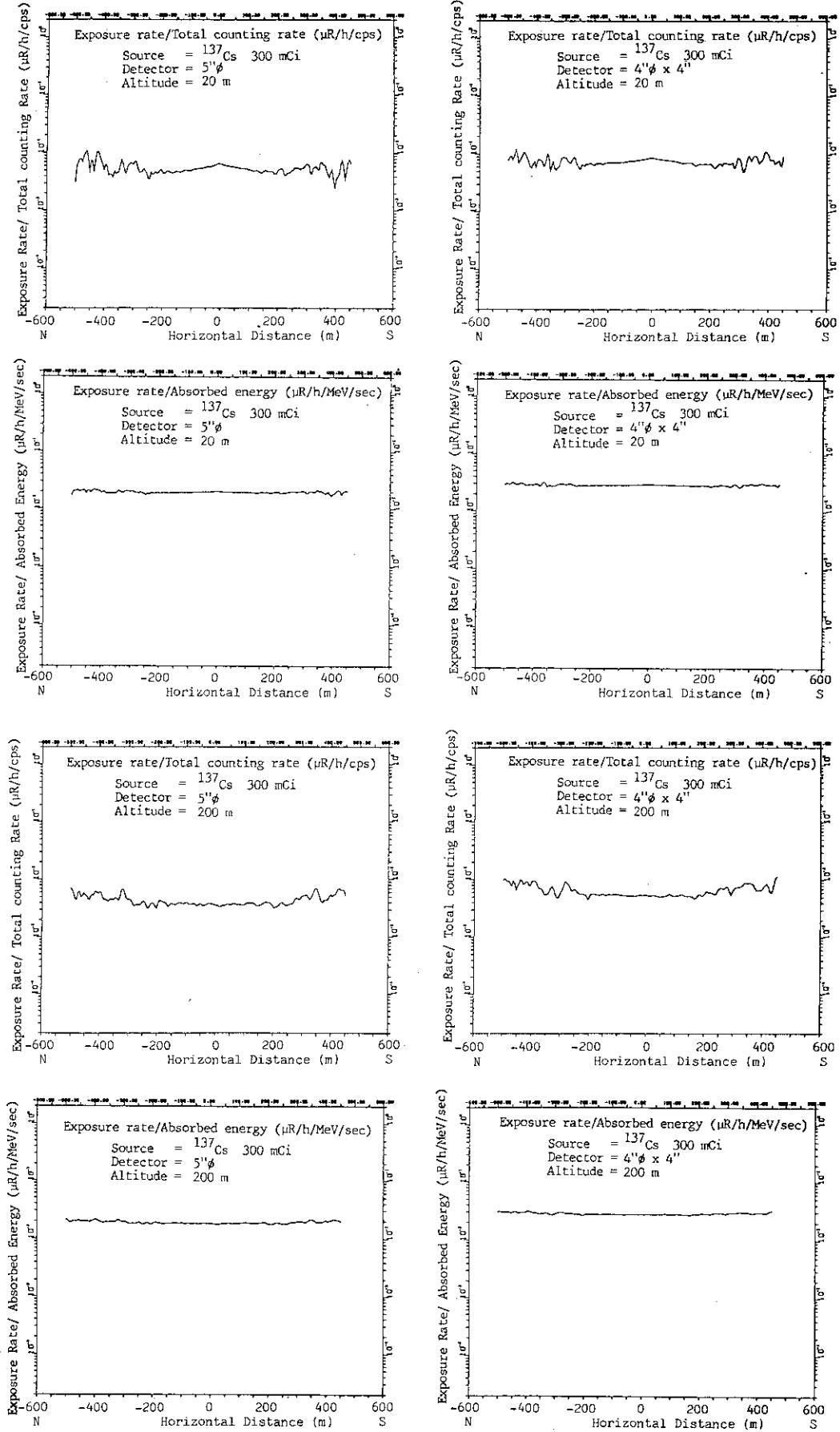


Fig.4.18 Cont'd (3/3)

## 5. ディスクリミネーション法によるバックグラウンドの評価

今回の実験のように、線源の出し入れによってバックグラウンド測定と線源測定とを選択できる場合には、人工放射線源による寄与のみを差引きによって評価することは容易であるが、実際の緊急時モニタリングを必要とする地域では、必ずしもバックグラウンドデータは存在しない。そのため、測定して得た情報（ $\gamma$ 線波高分布）を用いて、バックグラウンド（自然放射線成分）と人工放射線成分とを迅速に弁別評価する手法が必要である。本章では、そのための手法の1つとして、あるエネルギー以上の波高分布スペクトルを用いて自然放射線成分と人工放射線成分を弁別評価するディスクリミネーション法について述べる。なお、文献(6), (10)~(12)にこれと同様の手法について述べられている。

### 5.1 ディスクリミネーション法の考え方

ディスクリミネーション法の考え方の模式図をFig. 5.1に示す。

よく知られているように、自然界に存在するいわゆる自然放射線（ $\gamma$ 線）源には、 $^{40}\text{K}$ 、U系列、Th系列があり、これらの $\gamma$ 線エネルギースペクトルは、 $^{208}\text{Tl}$ の2.615 MeVを最高に約3 MeV以下の範囲に分布している。NaI(Tl)検出器を用いて波高分布を測定すると、これらに加えて宇宙線に含まれる荷電粒子による波高分布が観測される。

一方、人工放射線源が野外に存在する状態で測定すると、自然放射線源による波高分布スペクトルの上に人工放射線源による波高分布スペクトルが重なって観測される。Fig. 5.1では、例として $^{60}\text{Co}$ を野外において測定した場合の $\gamma$ 線波高分布スペクトルを示す。ここで、ディスクリミネーションレベルを1.5 MeV程度に設定してそれ以上のスペクトルに注目する。 $^{60}\text{Co}$ から放出される $\gamma$ 線のエネルギーは1.17 MeV及び1.33 MeVであり、NaI(Tl)検出器の分解能を考えても、1.5 MeV以上に $^{60}\text{Co}$ からの寄与は含まれない。即ち、1.5 MeV以上の波高分布スペクトルは、自然放射線源からの寄与のみに依るものであり、これを用いてその場のバックグラウンドレベルを評価することができる。即ち、ある自然放射線場における $\gamma$ 線波高分布スペクトルのディスクリミネーションレベル以上の線量率相当値（ディスクリミネーションレベル以上の波高分布にG(E)関数を作用させた値）、計数率、吸収エネルギー等（以下「DV (Discriminated Value)」という）について、ディスクリミネーションレベルをパラメータにとり、DVとその場の線量率（この場合には0~3 MeVの範囲でG(E)関数を作用させる）との相関関係を予め求めておく。バックグラウンドが未知である場で測定した波高分布スペクトルからその場でのバックグラウンド線量率を評価する時には、その場に存在すると考えられる人工放射性物質から放出される $\gamma$ 線のエネルギーを十分超える値にディスクリミネーションレベルを設定し、そのディスクリミネーションレベルに対応するDVとバックグラウンド線量率との関係から、自然成分と人工成分からの寄与分を分離評価できる。

以上の考え方を式で表わすと以下のようなになる。ある適当なディスクリミネーションレベルを

設定した場合のDVとバックグラウンド線量率とを結びつける係数をKとすると、自然放射線源の線量率寄与分 $D_{BKG}$ は

$$D_{BKG} = K \cdot DV \tag{4.10}$$

で表わされる。Kは、自然放射線場における測定データを用いて予め求めておくことができる。

一方、人工放射線場における全線量率 $D_{tot}$ は、

$$D_{tot} = D_{man} + D_{BKG} \tag{4.11}$$

である。ここで $D_{man}$ は人工放射線源の線量率寄与分で、

$$\begin{aligned} D_{man} &= D_{tot} - D_{BKG} \\ &= D_{tot} - K \cdot DV \end{aligned} \tag{4.12}$$

となる。 $D_{tot}$ は直接測定値から得られ、Kは予め求まっているから、測定した $\gamma$ 線波高分布からDVを求めれば人工成分 $D_{man}$ が計算できる。即ち、汚染などのためにその場のバックグラウンドを直接測定できなくとも、或いは、別途その場のバックグラウンドを測定しなくとも、線量率の自然成分と人工成分とを分離評価することができる。

以上の手順をブロックダイアグラムにしてFig. 5.2に示す。なお、DVの代りにある波高値区間内の計数率 (Table 3.2に示すバンド情報) を利用することも可能である。考え方は、上述のものと同じで、適当なバンド情報を用いてバックグラウンドを推定すればよいが、そのバンド幅の中にバックグラウンド成分でない成分が計数されないようなバンドを採用せねばならないことに注意する必要がある。

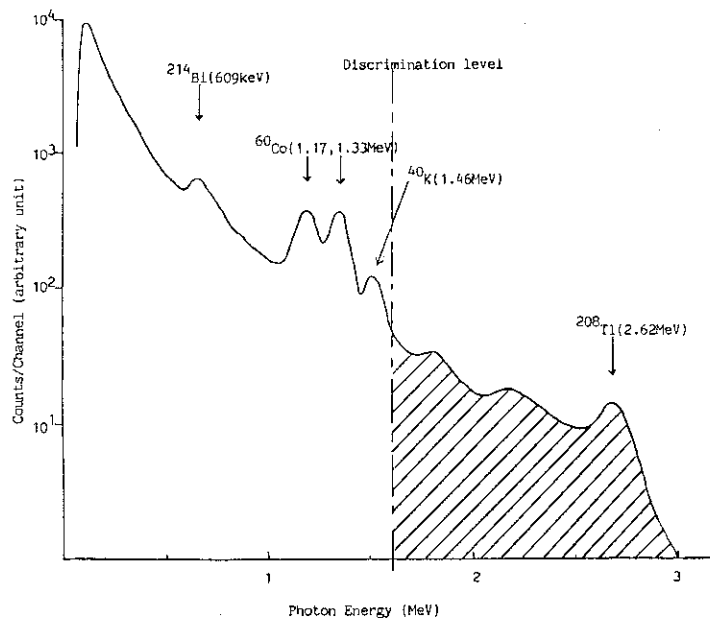
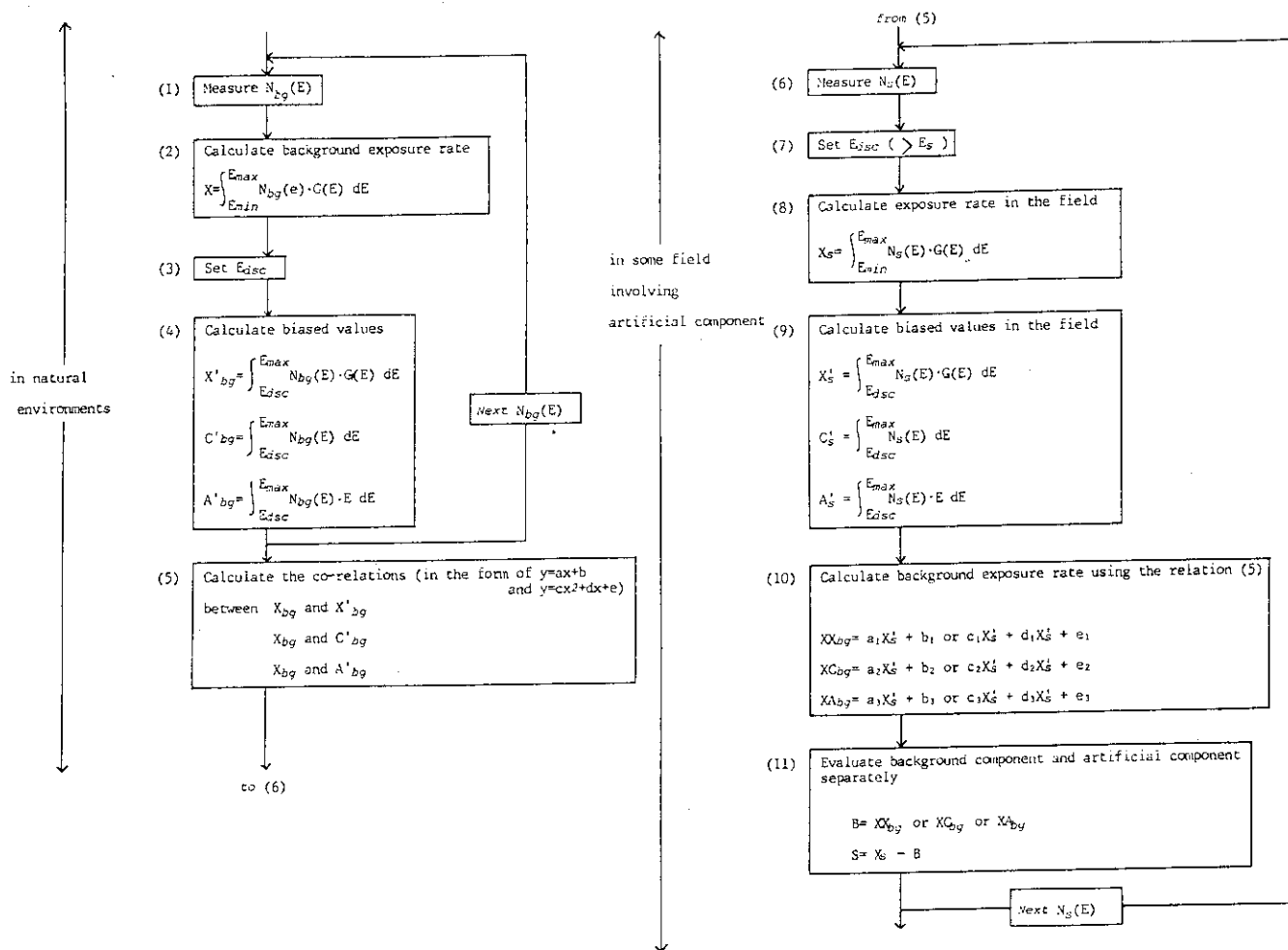


Fig.5.1 Explanatory figure for principle of discrimination method.  
Background exposure rate is estimated by the component above the energy of discrimination level, and then the artificial component is separately evaluated.



$N_{bg}(E)$  : Gamma-ray pulse height spectrum in natural environment.

$E$  : Gamma-ray energy (keV).

$N_{bg}$  : Background exposure rate in natural environment ( $\mu R/h$ ).

$E_{min}$  : Minimum energy of the pulse height spectrum (keV).

$E_{max}$  : Maximum energy of the pulse height spectrum (keV).

$E_{disc}$  : Discrimination level (keV).

$G(E)$  :  $G(E)$  function ( $\mu R/h/cps$ ).

$X_{bg}$  :  $\int N(E) \cdot G(E)$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in natural environment ( $\mu R/h$ ).

$C'_{bg}$  :  $\int N(E)$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in natural environment (cps).

$A'_{bg}$  :  $\int N(E) \cdot E$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in natural environment (keV/sec).

a.b.c.d.e : Coefficients for conversion of discriminated value into exposure rate.

$N_s(E)$  : Gamma-ray pulse height spectrum involving artificial component in a field.

$E_s$  : Maximum energy of the artificial gamma-ray source (keV).

$X_s$  : Exposure rate in the field ( $\mu R/h$ ).

$X'_s$  :  $\int N_s(E) \cdot G(E)$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in the field ( $\mu R/h$ ).

$C'_s$  :  $\int N_s(E)$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in the field (cps).

$A'_s$  :  $\int N_s(E) \cdot E$  value between  $E_{disc}$  and  $E_{max}$  in the field (keV/sec).

$XX_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $X'$ .

$XC_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $C'$ .

$XA_{bg}$  : Background exposure rate in the field calculated by using the relation (5) between  $X$  and  $A'$ .

$B$  : Exposure rate due to natural component ( $\mu R/h$ ).

$S$  : Exposure rate due to artificial component ( $\mu R/h$ ).

Fig.5.2 Flow chart of the proceeding of discrimination method.

## 5.2 測定結果

各DVとバックグラウンド線量率との関係（統計精度を上げるため、100秒間の平均値を用いてある）を、検出器毎にFig. 5.3に示す。図中の曲線は、DVの値の逆数又は1を荷重関数として最小二乗法により一次式及び二次式近似したもので、実線は1次式、破線は2次式を表わし、太い方が重み付きを表わす。近似式の係数をTable 5.1に示す。なお、データの存在する範囲内では、4つの近似式による近似値は、何れも殆んど等しかった。ここでDVの値は、いずれも検出器の断面積で除した値を用いた。各検出器の断面積は、ヘリコプタに搭載した状態での水平方向断面積とし、Table 5.2に搭載状態と断面積を示す。

Fig. 5.4にディスクリミネーション法を人工放射線場（ $^{60}\text{Co}$ ）に適用した例を示す。X軸方向はDVの値（この場合、ディスクリミネーションレベル以上の吸収エネルギー）、Y軸方向は天然及び人工放射線源によるその場の全線量率である。図内の曲線は、自然放射線場におけるDVの値と線量率との関係で、プロットされた点が人工放射線成分を含む値である。

ディスクリミネーションレベルが50 keVの場合(1)では、X軸成分に天然及び人工放射線寄与分が共に含まれるため、4章で述べた、吸収エネルギーと線量率との関係に従って、線分の延長線上にプロット点が現われる。

一方、ディスクリミネーションレベルを $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ 線エネルギーより十分高い2000 keVに設定した場合(2)では、X軸成分に人工成分が含まれていないため、人工放射線源寄与分を含むデータは曲線から離れた位置に現われる。即ち、全線量率がプロット点のY座標で、人工成分が、プロット点と線分とのY軸方向の差分として分離評価できる。ここで曲線付近にもプロット点が存在するが、これは人工成分を全く或は殆んど含まないものである。



Table 5.1 Coefficients of equations for discrimination method which leads inherent background exposure rate of the field involving artificial gamma-ray component.

$y = \text{cof1} + \text{cof2} \cdot x + \text{cof3} \cdot x^2$ , where  $x$  stands for a DV (Discriminated Value, divided by cross section of detector),  $y$  stands for the corresponding background exposure rate ( $\mu\text{R}/\text{h}$ ). In every table, DV's are  $\Sigma N(I) + G(I)$  ( $\mu\text{R}/\text{h}/\text{cm}^2$ ; listed on the left),  $\Sigma N(I)$  (cps/ $\text{cm}^2$ ; listed on the center),  $\Sigma N(I) + E(I)$  (keV/sec/ $\text{cm}^2$ ; listed on the right) above the discrimination level  $E_{dsc}$  (keV), where  $N(I)$  stands for the gamma-ray pulse height spectrum,  $I$  stands for channel number and  $E(I)$  stands for gamma-ray energy corresponding to channel No.  $I$ .

- (1) 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (2) 3" dia. x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (3) 4" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (4) 5" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector
- (5) 5" dia. x 4" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector
- (6) 16" x 16" x 4" NaI(Tl) (DET-1024) scintillation detector

In case of Det-1024, there is no table for

$DV = \Sigma N(I) + G(I)$ , because the response of DET-1024 depends on the directional distribution of incident gamma-rays so intensely that general  $G(E)$  function is not provided for DET-1024.

Table 5.1(1)

HW= 3 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30 ) ICR= 0  
X= ABSORBED ENERGY/CM\*\*2 (>EDSC) KEV /CM\*\*2 DOWN

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=3 QUADRATIC.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=4 QUADRATIC.

HW= 2 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30 ) ICR= 0  
X= COUNTS/CM\*\*2 (>EDSC) CPS/ CM\*\*2 DOWN

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=3 QUADRATIC.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=4 QUADRATIC.

HW= 1 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30 ) ICR= 0  
X= N(E)\*G(E) (>EDSC) UR/H DOWN

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, WEIGHTED. Rows 1-10 for LD=1 LINEAR and LD=2 LINEAR.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=3 QUADRATIC.

Table with 5 columns: I, EDSC(KEV), Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2, NO WEIGHT, QUADRATIC. Rows 1-10 for LD=4 QUADRATIC.

Table 5.1(2)

NW= 4 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 33) ICR= 0  
X= N(E)GGE (>EDSC) UR/H UP

LD= 1 LINEAR NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=1.

LD= 2 LINEAR WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=2.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=3.

LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=4.

NW= 5 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 33) ICR= 0  
X= COUNTS/CM\*\*2 (>EDSC) CPS /CM\*\*2 UP

LD= 1 LINEAR NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=1.

LD= 2 LINEAR WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=2.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=3.

LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=4.

NW= 6 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 33) ICR= 0  
X= ABSORBED ENERGY/CM\*\*2 (>EDSC) KEV /CM\*\*2 UP

LD= 1 LINEAR NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=1.

LD= 2 LINEAR WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=2.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=3.

LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED  
Y= COF1 + COF2\*X + COF3\*X\*\*2  
I EDSC(KEV) COF1 COF2 COF3

Table with 4 columns: I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3. Contains 10 rows of data for LD=4.

Table 5.1(3)

NW= 4 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 44 ) ICR= 0 X= N(E)*G(E) (>EDSC) UR/H (>EDSC) CPS /CM**2 UP		NW= 5 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 44 ) ICR= 0 X= COUNTS/CM**2 (>EDSC) CPS /CM**2 UP		NW= 6 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 44 ) ICR= 0 X= ABSORBED ENERGY/CM**2 (>EDSC) KEV /CM**2 UP					
LD= 1 LINEAR NO WEIGHT		LD= 1 LINEAR NO WEIGHT		LD= 1 LINEAR NO WEIGHT					
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2					
I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3	I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3
1	50.	-5.7798E-03	1.0611E+00	0.0	1	50.	1.0058E-02	2.5748E-03	0.0
2	750.	-5.6364E-02	2.2902E+00	0.0	2	750.	-5.9528E-02	6.4323E-03	0.0
3	1396.	-6.7276E-02	6.7374E+00	0.0	3	1396.	-7.4325E-02	1.8203E-02	0.0
4	2000.	-7.6459E-02	1.8141E+01	0.0	4	2000.	-8.8356E-02	4.6301E-02	0.0
5	500.	-6.9909E-02	1.7250E+00	0.0	5	500.	-7.2329E-02	4.7867E-03	0.0
6	1000.	-1.7179E-03	3.1105E+00	0.0	6	1000.	-6.8705E-03	8.6912E-03	0.0
7	1350.	9.3304E-03	5.2268E+00	0.0	7	1350.	2.8919E-04	1.4304E-02	0.0
8	1610.	-1.1185E-01	1.0467E+01	0.0	8	1610.	-1.1781E-01	2.7512E-02	0.0
9	1690.	-8.7816E-02	1.1830E+01	0.0	9	1690.	-9.5706E-02	3.0837E-02	0.0
10	2500.	2.0151E+00	-2.7010E+01	0.0	10	2500.	2.0416E+00	-6.9986E-02	0.0
LD= 2 LINEAR WEIGHTED		LD= 2 LINEAR WEIGHTED		LD= 2 LINEAR WEIGHTED					
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2					
I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3	I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3
1	50.	-1.1088E-02	1.0645E+00	0.0	1	50.	7.8166E-03	2.5752E-03	0.0
2	750.	-7.7334E-02	2.3181E+00	0.0	2	750.	-8.0564E-02	6.5111E-03	0.0
3	1396.	-9.7842E-02	6.8564E+00	0.0	3	1396.	-1.0454E-01	1.8521E-02	0.0
4	2000.	-1.0532E-01	1.8443E+01	0.0	4	2000.	-1.1690E-01	4.7059E-02	0.0
5	500.	-8.8693E-02	1.7437E+00	0.0	5	500.	-9.1144E-02	4.8385E-03	0.0
6	1000.	-2.7993E-02	3.1590E+00	0.0	6	1000.	-3.3249E-02	8.8270E-03	0.0
7	1350.	-2.6419E-02	5.3285E+00	0.0	7	1350.	-3.5093E-02	1.4605E-02	0.0
8	1610.	-1.3236E-01	1.0589E+01	0.0	8	1610.	-1.3860E-01	2.7835E-02	0.0
9	1690.	-1.0865E-01	1.1971E+01	0.0	9	1690.	-1.1681E-01	3.1229E-02	0.0
10	2500.	1.7698E+00	-8.2644E+00	0.0	10	2500.	1.7846E+00	-2.2980E-02	0.0
LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT					
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2					
I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3	I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3
1	50.	-3.5515E-02	1.1024E+00	-1.0995E-02	1	50.	-2.8790E-03	2.6160E-03	-2.8888E-08
2	750.	-1.8107E-01	2.6436E+00	-1.9599E-01	2	750.	-1.8337E-01	7.4312E-03	-1.5536E-06
3	1396.	-2.6627E-01	8.3593E+00	-2.6046E+00	3	1396.	-2.7133E-01	2.2233E-02	-1.8689E-05
4	2000.	-2.7601E-01	2.2486E+01	-1.8766E+01	4	2000.	-2.8037E-01	5.7216E-02	-1.1968E-04
5	500.	-1.8050E-01	1.9592E+00	-9.7383E-02	5	500.	-1.8313E-01	5.4366E-03	-7.4904E-07
6	1000.	-1.4289E-01	3.6746E+00	-4.3512E-01	6	1000.	-1.4904E-01	1.0272E-02	-3.3985E-06
7	1350.	-1.9637E-01	6.6026E+00	-1.7734E+00	7	1350.	-2.0418E-01	1.8018E-02	-1.3031E-05
8	1610.	-2.6142E-01	1.2315E+01	-4.5492E+00	8	1610.	-2.6746E-01	3.2351E-02	-3.1229E-05
9	1690.	-2.3834E-01	1.3968E+01	-6.0169E+00	9	1690.	-2.4662E-01	3.6416E-02	-4.0659E-05
10	2500.	1.1082E+00	1.2149E+02	-5.7364E+03	10	2500.	1.1731E+00	2.7182E-01	-3.1541E-02
LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED					
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2					
I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3	I	EDSC(KEV)	COF1	COF2	COF3
1	50.	-3.5515E-02	1.1024E+00	-1.0995E-02	1	50.	-2.8970E-03	2.6160E-03	-2.8888E-08
2	750.	-1.8079E-01	2.6422E+00	-1.9554E-01	2	750.	-1.8507E-01	7.4273E-03	-1.5499E-06
3	1396.	-2.3791E-01	8.1000E+00	-2.2028E+00	3	1396.	-2.1446E-01	2.1789E-02	-1.5624E-05
4	2000.	-1.9760E-01	2.0561E+01	-1.0232E+01	4	2000.	-2.0464E-01	5.2138E-02	-6.6325E-05
5	500.	-1.8041E-01	1.9588E+00	-9.7300E-02	5	500.	-1.8304E-01	5.4355E-03	-7.4837E-07
6	1000.	-1.4238E-01	3.6711E+00	-4.3336E-01	6	1000.	-1.4853E-01	1.0262E-02	-3.3859E-06
7	1350.	-1.7832E-01	6.4656E+00	-1.6035E+00	7	1350.	-1.8535E-01	1.7627E-02	-1.1729E-05
8	1610.	-2.0499E-01	1.1536E+01	-4.6947E+00	8	1610.	-2.0872E-01	3.0227E-02	-1.7983E-05
9	1690.	-1.7622E-01	1.2981E+01	-3.3369E+00	9	1690.	-1.8908E-01	3.4046E-02	-2.3927E-05
10	2500.	3.6755E+00	-3.0579E+02	8.6321E+03	10	2500.	3.7888E+00	-7.5190E-01	5.0819E-02

Table 5.1(4)

NW= 1 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 50 ) ICR= 0		NW= 2 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 50 ) ICR= 0		NW= 3 WMT 121 IDET= 2 (DETECTOR= 50 ) ICR= 0	
X= N(E)G(L)		X= COUNTS/CM**2		X= ABSORBED ENERGY/CM**2	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
LD= 1	LINEAR	LD= 1	LINEAR	LD= 1	LINEAR
EDSC(K)EV	NO WEIGHT	EDSC(K)EV	NO WEIGHT	EDSC(K)EV	NO WEIGHT
I	COF1	I	COF1	I	COF1
1	3.6494E-04	1	9.1902E-03	1	3.9730E-03
2	2.0015E+00	2	7.7562E-01	2	2.5631E-03
3	1.0011E+00	3	-1.1106E-02	3	-1.8317E-02
4	3.8466E+00	4	2.0711E-01	4	-4.0546E-03
5	1.531E+01	5	-5.6566E-02	5	-5.3180E-02
6	1.5660E+00	6	7.9150E+01	6	3.2315E-02
7	2.5894E+00	7	-3.8948E-03	7	-1.1984E-02
8	1.5660E+00	8	-1.9821E-02	8	4.7228E-03
9	7.7233E+00	9	1.2126E+01	9	-2.6150E-02
10	7.7233E+00	10	1.8333E-02	10	7.9194E-03
11	3.6966E+00	11	1.9770E+01	11	-7.4331E-03
12	-4.0203E-03	12	-1.4323E-01	12	2.2280E-02
13	-1.3288E-01	13	4.8768E+01	13	-1.2855E-01
14	-1.3865E-01	14	-5.4542E+01	14	1.3348E-01
15	-1.3865E-01	15	5.4942E-02	15	-1.3348E-01
16	2.2158E+01	16	1.6149E+02	16	4.8905E-02
17	2.2158E+01	17	1.6149E+02	17	6.0264E-02
18	2.2158E+01	18	1.6149E+02	18	6.0264E-02
19	2.2158E+01	19	1.6149E+02	19	6.0264E-02
20	2.2158E+01	20	1.6149E+02	20	6.0264E-02
21	2.2158E+01	21	1.6149E+02	21	6.0264E-02
22	2.2158E+01	22	1.6149E+02	22	6.0264E-02
23	2.2158E+01	23	1.6149E+02	23	6.0264E-02
24	2.2158E+01	24	1.6149E+02	24	6.0264E-02
25	2.2158E+01	25	1.6149E+02	25	6.0264E-02
26	2.2158E+01	26	1.6149E+02	26	6.0264E-02
27	2.2158E+01	27	1.6149E+02	27	6.0264E-02
28	2.2158E+01	28	1.6149E+02	28	6.0264E-02
29	2.2158E+01	29	1.6149E+02	29	6.0264E-02
30	2.2158E+01	30	1.6149E+02	30	6.0264E-02
31	2.2158E+01	31	1.6149E+02	31	6.0264E-02
32	2.2158E+01	32	1.6149E+02	32	6.0264E-02
33	2.2158E+01	33	1.6149E+02	33	6.0264E-02
34	2.2158E+01	34	1.6149E+02	34	6.0264E-02
35	2.2158E+01	35	1.6149E+02	35	6.0264E-02
36	2.2158E+01	36	1.6149E+02	36	6.0264E-02
37	2.2158E+01	37	1.6149E+02	37	6.0264E-02
38	2.2158E+01	38	1.6149E+02	38	6.0264E-02
39	2.2158E+01	39	1.6149E+02	39	6.0264E-02
40	2.2158E+01	40	1.6149E+02	40	6.0264E-02
41	2.2158E+01	41	1.6149E+02	41	6.0264E-02
42	2.2158E+01	42	1.6149E+02	42	6.0264E-02
43	2.2158E+01	43	1.6149E+02	43	6.0264E-02
44	2.2158E+01	44	1.6149E+02	44	6.0264E-02
45	2.2158E+01	45	1.6149E+02	45	6.0264E-02
46	2.2158E+01	46	1.6149E+02	46	6.0264E-02
47	2.2158E+01	47	1.6149E+02	47	6.0264E-02
48	2.2158E+01	48	1.6149E+02	48	6.0264E-02
49	2.2158E+01	49	1.6149E+02	49	6.0264E-02
50	2.2158E+01	50	1.6149E+02	50	6.0264E-02
51	2.2158E+01	51	1.6149E+02	51	6.0264E-02
52	2.2158E+01	52	1.6149E+02	52	6.0264E-02
53	2.2158E+01	53	1.6149E+02	53	6.0264E-02
54	2.2158E+01	54	1.6149E+02	54	6.0264E-02
55	2.2158E+01	55	1.6149E+02	55	6.0264E-02
56	2.2158E+01	56	1.6149E+02	56	6.0264E-02
57	2.2158E+01	57	1.6149E+02	57	6.0264E-02
58	2.2158E+01	58	1.6149E+02	58	6.0264E-02
59	2.2158E+01	59	1.6149E+02	59	6.0264E-02
60	2.2158E+01	60	1.6149E+02	60	6.0264E-02
61	2.2158E+01	61	1.6149E+02	61	6.0264E-02
62	2.2158E+01	62	1.6149E+02	62	6.0264E-02
63	2.2158E+01	63	1.6149E+02	63	6.0264E-02
64	2.2158E+01	64	1.6149E+02	64	6.0264E-02
65	2.2158E+01	65	1.6149E+02	65	6.0264E-02
66	2.2158E+01	66	1.6149E+02	66	6.0264E-02
67	2.2158E+01	67	1.6149E+02	67	6.0264E-02
68	2.2158E+01	68	1.6149E+02	68	6.0264E-02
69	2.2158E+01	69	1.6149E+02	69	6.0264E-02
70	2.2158E+01	70	1.6149E+02	70	6.0264E-02
71	2.2158E+01	71	1.6149E+02	71	6.0264E-02
72	2.2158E+01	72	1.6149E+02	72	6.0264E-02
73	2.2158E+01	73	1.6149E+02	73	6.0264E-02
74	2.2158E+01	74	1.6149E+02	74	6.0264E-02
75	2.2158E+01	75	1.6149E+02	75	6.0264E-02
76	2.2158E+01	76	1.6149E+02	76	6.0264E-02
77	2.2158E+01	77	1.6149E+02	77	6.0264E-02
78	2.2158E+01	78	1.6149E+02	78	6.0264E-02
79	2.2158E+01	79	1.6149E+02	79	6.0264E-02
80	2.2158E+01	80	1.6149E+02	80	6.0264E-02
81	2.2158E+01	81	1.6149E+02	81	6.0264E-02
82	2.2158E+01	82	1.6149E+02	82	6.0264E-02
83	2.2158E+01	83	1.6149E+02	83	6.0264E-02
84	2.2158E+01	84	1.6149E+02	84	6.0264E-02
85	2.2158E+01	85	1.6149E+02	85	6.0264E-02
86	2.2158E+01	86	1.6149E+02	86	6.0264E-02
87	2.2158E+01	87	1.6149E+02	87	6.0264E-02
88	2.2158E+01	88	1.6149E+02	88	6.0264E-02
89	2.2158E+01	89	1.6149E+02	89	6.0264E-02
90	2.2158E+01	90	1.6149E+02	90	6.0264E-02
91	2.2158E+01	91	1.6149E+02	91	6.0264E-02
92	2.2158E+01	92	1.6149E+02	92	6.0264E-02
93	2.2158E+01	93	1.6149E+02	93	6.0264E-02
94	2.2158E+01	94	1.6149E+02	94	6.0264E-02
95	2.2158E+01	95	1.6149E+02	95	6.0264E-02
96	2.2158E+01	96	1.6149E+02	96	6.0264E-02
97	2.2158E+01	97	1.6149E+02	97	6.0264E-02
98	2.2158E+01	98	1.6149E+02	98	6.0264E-02
99	2.2158E+01	99	1.6149E+02	99	6.0264E-02
100	2.2158E+01	100	1.6149E+02	100	6.0264E-02

Table 5.1(5)

NU= 4 WMT 51 IOET= 3 (DETECTOR= 54) ICR= 0  
X= N(E)\*G(E) (>EDSC) UR/H UP  
NU= 5 WMT 51 IOET= 3 (DETECTOR= 54) ICR= 0  
X= COUNTS/CM\*\*2 (>EDSC) CPS /CM\*\*2 UP  
NU= 6 WMT 51 IOET= 3 (DETECTOR= 54) ICR= 0  
X= ABSORBED ENERGY/CM\*\*2 (>EDSC) KEV /CM\*\*2 UP

Table with 4 main sections: LD=1 LINEAR NO WEIGHT, LD=2 LINEAR WEIGHTED, LD=3 QUADRATIC NO WEIGHT, LD=4 QUADRATIC WEIGHTED. Each section contains columns for I, EDSC(KEV), COF1, COF2, COF3, and Y=COF1+COF2\*X+COF3\*X\*\*2.

Table 5.1(6)

HW= 3 WMT 51 IDET= 3 (DETECTOR=1024 ) ICR= 0  
 X= ABSORBED ENERGY/CM\*\*2 (>EDSC) KEV /CM\*\*2 DOWN

HW= 2 WMT 51 IDET= 3 (DETECTOR=1024 ) ICR= 0  
 X= COUNTS/CM\*\*2 (>EDSC) CPS/ CM\*\*2 DOWN

LD= 1 LINEAR NO WEIGHT		LD= 2 LINEAR WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 1 LINEAR NO WEIGHT		LD= 2 LINEAR WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

LD= 3 QUADRATIC NO WEIGHT		LD= 4 QUADRATIC WEIGHTED	
Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.
2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.
9	1650.	9	1650.
10	2500.	10	2500.

Table 5.2 Boarding condition and cross section of each detector.

Detector	Boarding* condition	Cross section (cm <sup>2</sup> )
3"φ sph.	(1)	$\pi(1.5 \times 2.54)^2 = 45.6$
3"φx3" cyl.	(2)	$(3 \times 2.54) \times (3 \times 2.54) = 58.1$
4"φx4" cyl.	(1)	$\pi(2 \times 2.54)^2 = 81.1$
5"φ sph.	(1)	$\pi(2.5 \times 2.54)^2 = 126.7$
5"φx4" cyl.	(1)	$\pi(2.5 \times 2.54) \times (2.5 \times 2.54) = 126.7$
DET-1024 (parallelepiped)	(3)	$4 \times (4 \times 2.54) \times (16 \times 2.54) = 1651.6$

\*; Detector is installed below the helicopter.

- (1) The axis of the detector is perpendicular to the ground.
- (2) The axis of the detector is horizontal.
- (3) The side with the biggest cross section is horizontal.



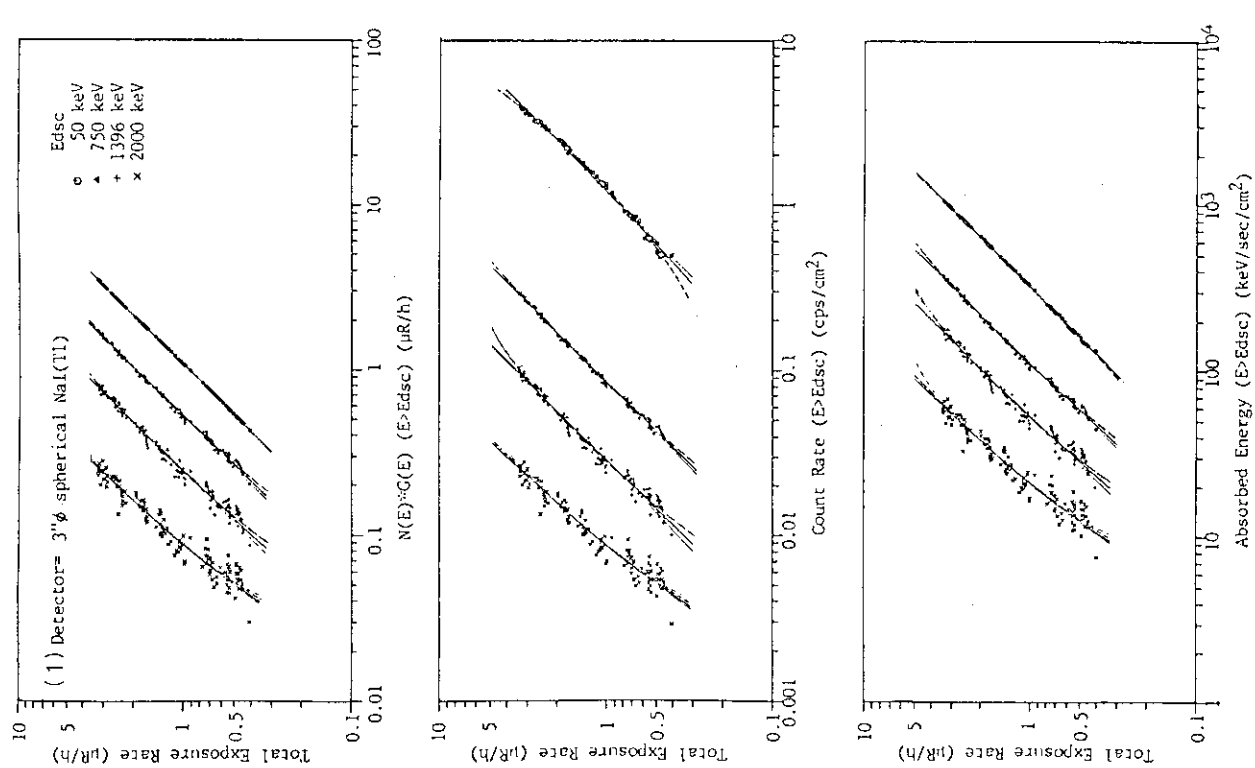
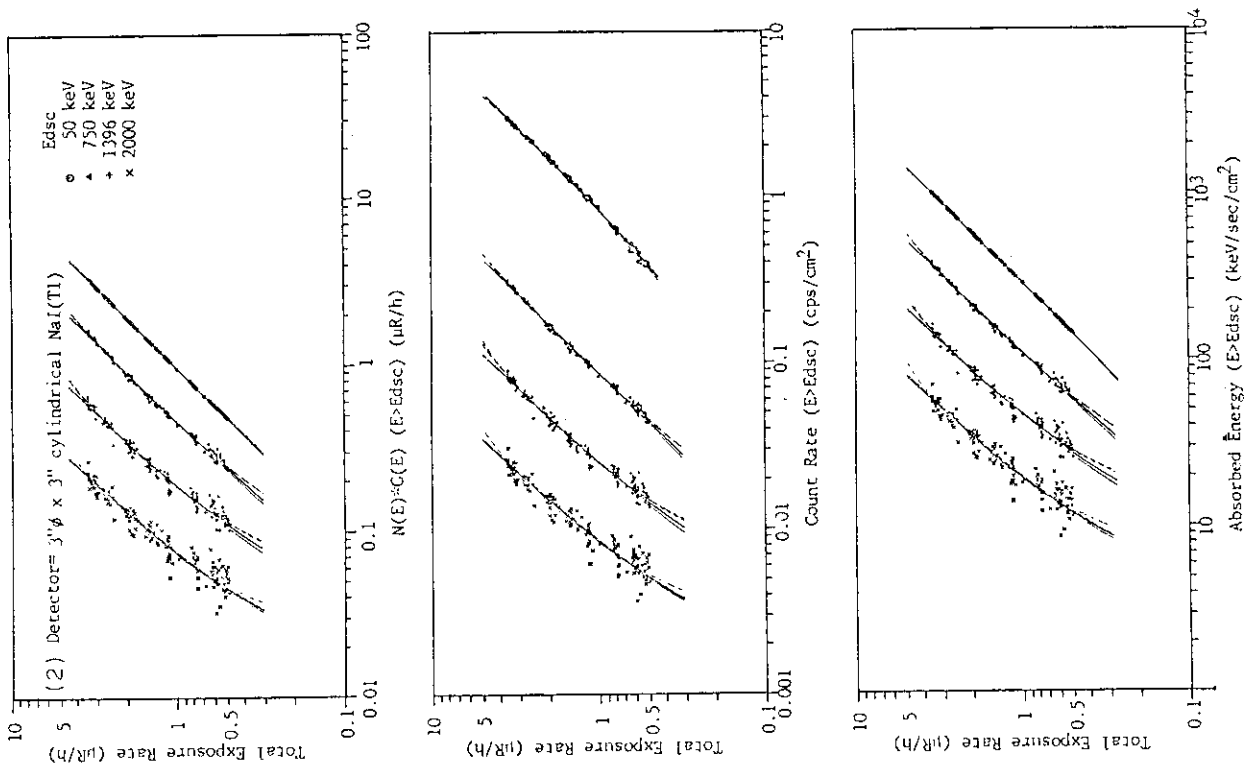


Fig.5.3 Relations between total exposure rate and each DV(Discriminated value), such as  $\Sigma N(E) \cdot G(E)$ ,  $\Sigma N(E)$  and  $\Sigma N(E) \cdot E$  between  $E_{dsc}$  and  $E_{max}$ , for each detector (1/3)

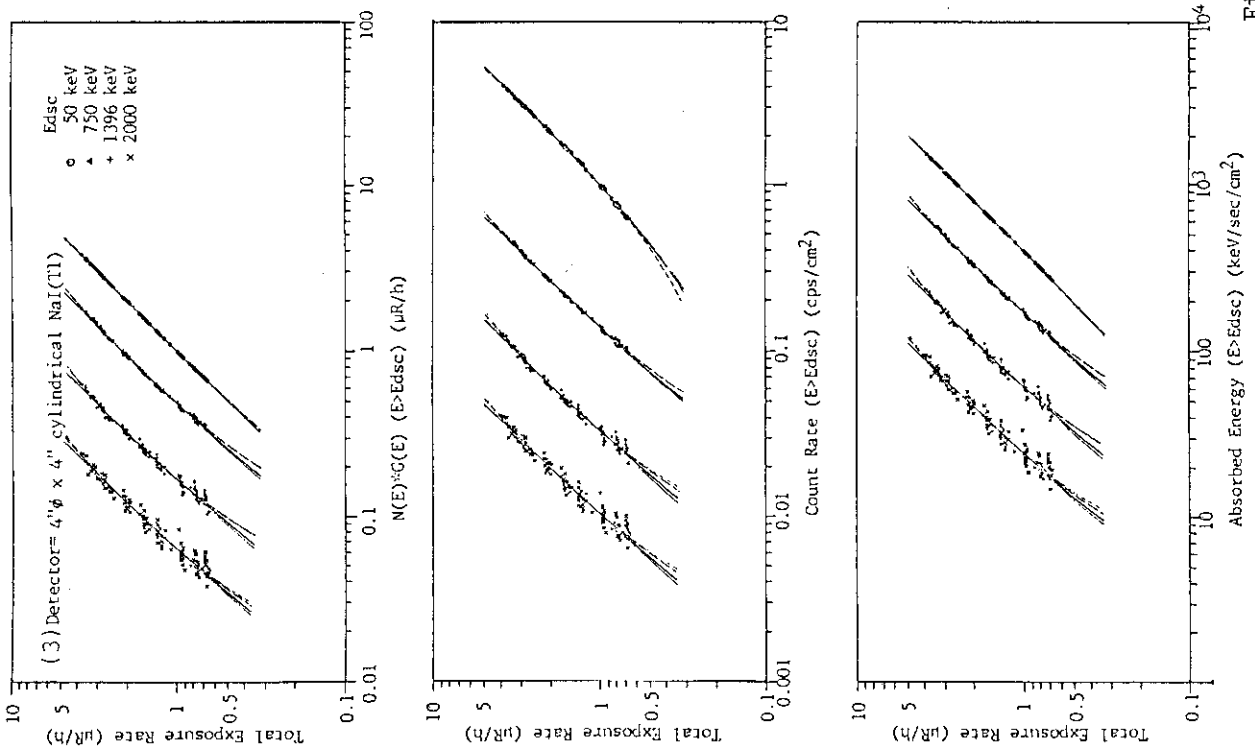
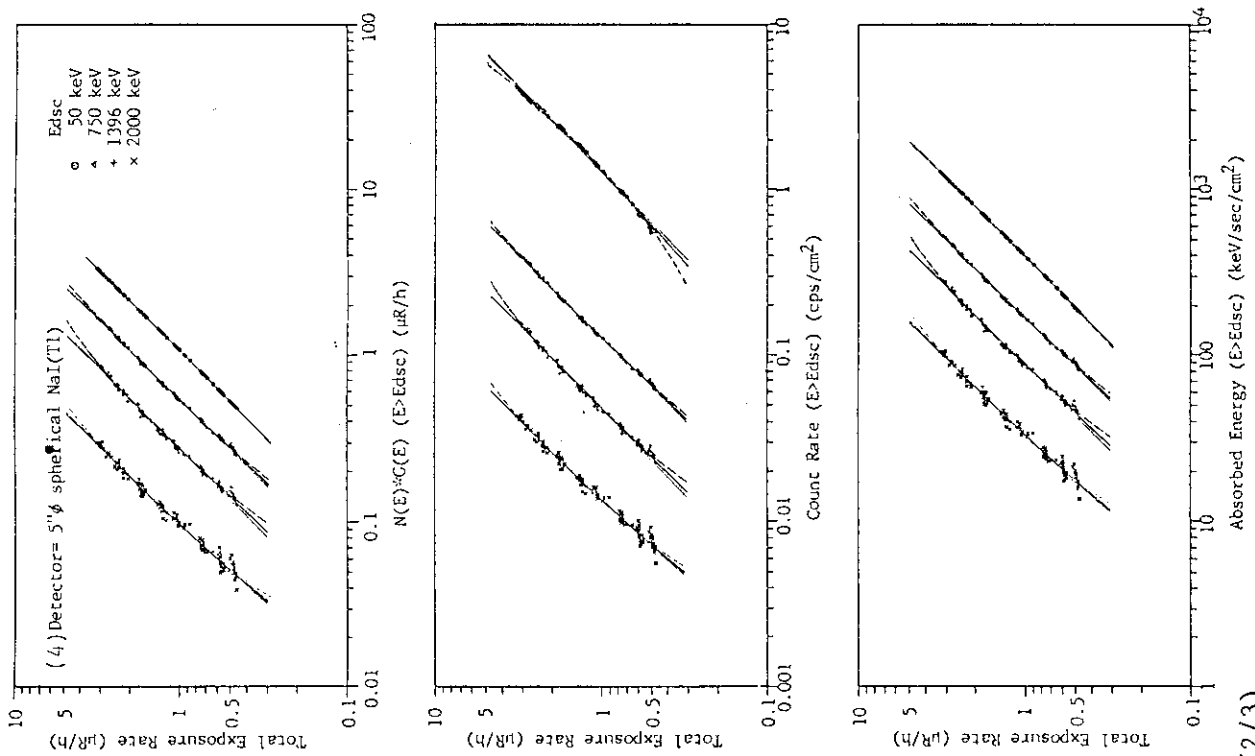
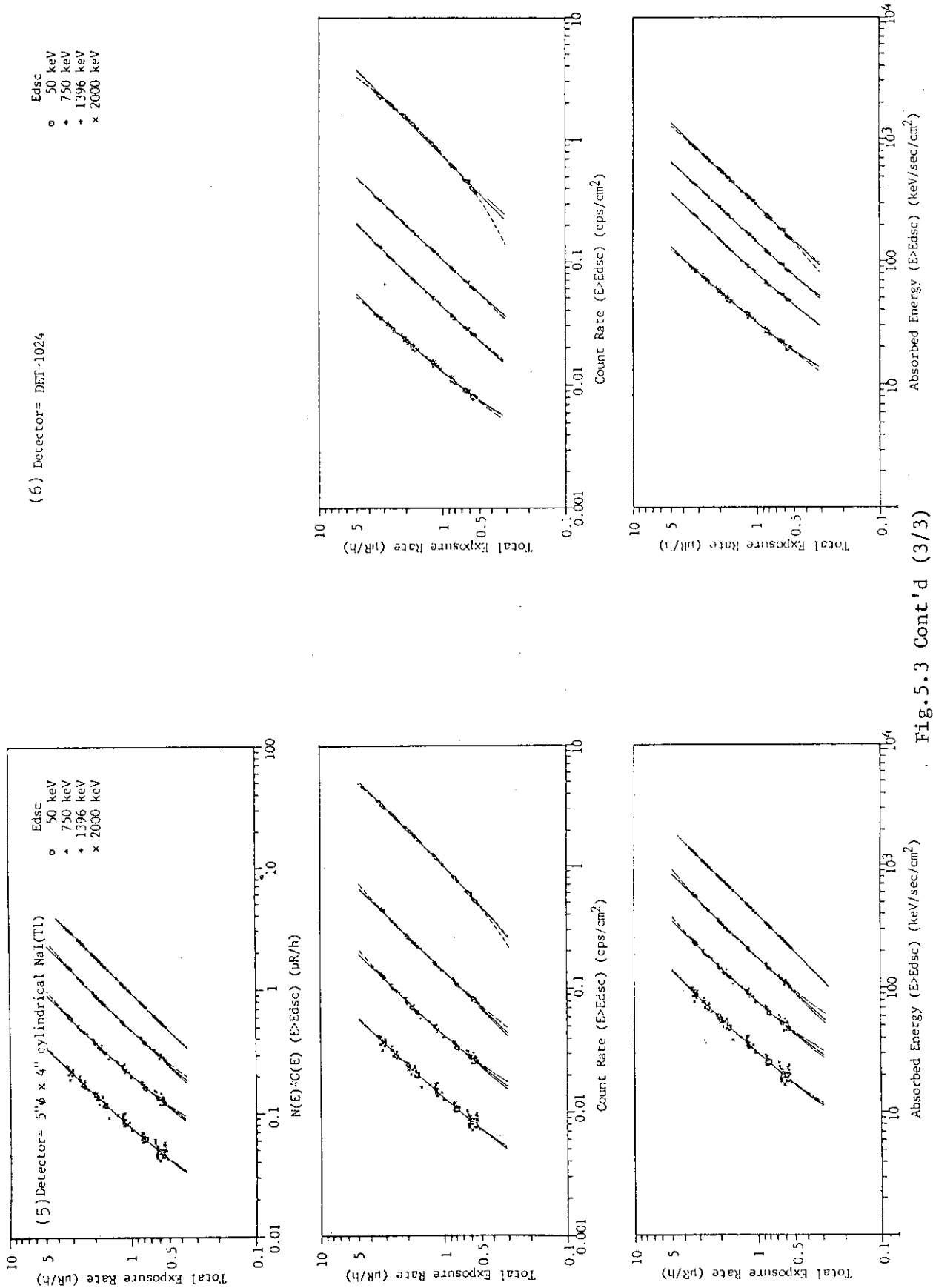


Fig. 5.3 Cont'd (2/3)



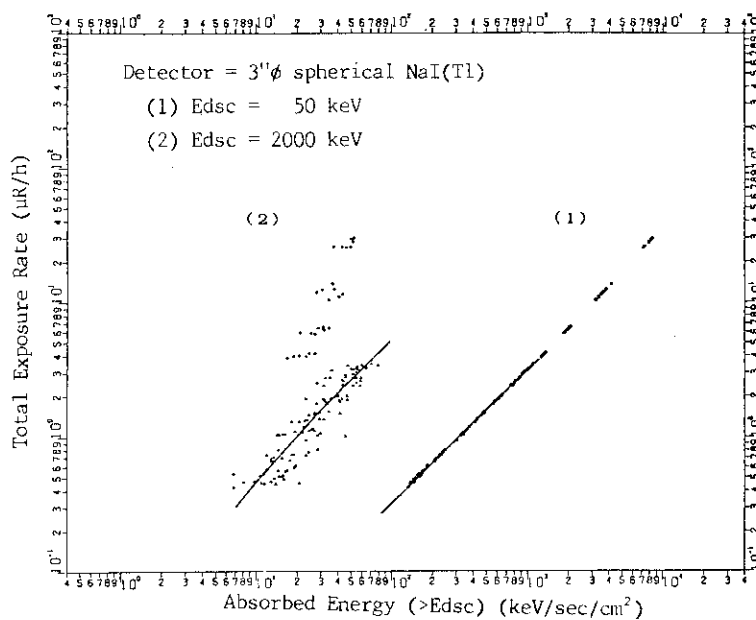


Fig.5.4 Example of application of discrimination method to an artificial gamma-ray field involving  $^{60}\text{Co}$  component.

In case of (2), difference of y-axis value between the line, which stands for the relation between total exposure rate and  $\Sigma N(E) \cdot E$  value between  $E_{dsc}$  and  $E_{mct}$  when 2000 keV is set as the discrimination level, and a dot shows the contribution from  $^{60}\text{Co}$  component.

### 5.3 考察

まず、ディスクリミネーション法の適用範囲をバックグラウンドスペクトルの面から考察する。ここでは、 $^{40}\text{K}$ 、U系列、Th系列の存在比や高度等によるスペクトルの変化を考慮せずに各パラメータとの関係を求めたが、厳密には、ある自然放射線場で求めた各パラメータ値とバックグラウンド線量の関係は全体のスペクトルの形が大きく異なる場には適用できない。従って今後種々の地質、地形条件の下での測定データの蓄積により関係式の変化の要因の検討を必要とするが、自然3成分の存在比が極端に異なりスペクトルの形の変化が無視できないような場合を除いて一定地域内では実用上問題無いと考えられる。

実際にディスクリミネーション法を用いてバックグラウンド線量率を推定する場合、Table 5.1のどの係数（即ち1次式か2次式か、或は重み付きの近似式か重み無しの近似式か）を採用するかについては、線量率レベルが今回の実験データと同レベル範囲であれば、どれを採用しても殆んど差は無い（Fig. 5.3参照）。しかし、このレベル範囲からある程度離れた場でのデータに適用する場合には一考を要する。2次式近似の場合には、係数の算出に用いたデータに対して最もフィットするように与えられるため、このレベル範囲から外れた場合に適用することには若干問題があるかも知れない。一方、Fig. 5.3の傾向を見ると、少なくとも今回のデータの範囲内では、直線性が非常に良く、場の $\gamma$ 線エネルギースペクトルの形が大きく異ならない限り、今回のデータの範囲を多少外れたレベルにおいてもこの直線を延長できると考えられる。従って一般的には一次式近似の係数を採用する方が好ましいであろう。重み付きか否かについては、係数が互いに殆んど等しいので、どちらを採用しても殆んど差は生じないと考えられる。

Fig. 5.5に人工放射線成分を含むデータから、ディスクリミネーション法によってバックグラウンドを差し引いた場合の結果例を示す。この図はFig. 4.10-7に示すものに対応している。全体の傾向はFig. 4.10-7と殆んど変わらない。線源から数100 m離れて線量率が殆んどバックグラウンドレベルに近づくようになると、計数不足に起因する統計誤差により、バックグラウンドの差し引きすぎ、或はその逆の現象も現われるが、このような場合には、1秒測定データを何点かまとめて、その地点付近の平均的なバックグラウンドを評価し、差し引けば解決できると考えられる。

次に、 $^{40}\text{K}$ による検出器の自己汚染の問題について考察する。一般に環境 $\gamma$ 線のような低レベル放射線を測定するためには、検出器及びその周辺の構造材そのものに放射性物質を含まないものを選ばねばならないが、検出器によってはとくに光学ガラスに少量の $^{40}\text{K}$ を含み、測定スペクトルに現われることがある。このような場合には、 $^{40}\text{K}$ を含まない検出器との比較などにより、 $^{40}\text{K}$ による波高分布を評価する必要がある。ディスクリミネーション法を適用する場合にも、ある程度以上 $^{40}\text{K}$ を含むような検出器を用いると、含まない場合よりも見かけの線量率は高く評価され、 $^{40}\text{K}$ の光電ピーク（1.46 MeV）を含まないディスクリミネーションレベル（約1.7 MeV以上）の各パラメータの値は $^{40}\text{K}$ の影響を受けないため、同じ関係式を用いることができず、 $^{40}\text{K}$ の自己汚染分に相当する補正をする必要がある。

$^{40}\text{K}$ による自己汚染の問題以外にも、高度による宇宙線寄与分、ヘリコプタの機体に含まれる自然放射線源からの寄与分等についても測定状況に応じて評価する必要がある。

宇宙線寄与分については、緊急時サーベイのように高度が数 100 m 以下の場合には影響ないが、それ以上の高度の場合には地上からの  $\gamma$  線が減少するのに対して宇宙線寄与分は増加するため考慮を要する。この場合、予め地上における宇宙線スペクトルを評価しておき、3 MeV 相当以上の全カウント数の比較により宇宙線分スペクトルを差し引く方法が適当である。Fig. 5.6 に 3'' $\phi$  球形 NaI (T $\ell$ ) 検出器の宇宙線スペクトル (地上値)、Fig. 5.7 に宇宙線分を差し引いた場合の各パラメータとバックグラウンド線量率の関係 (検出器は 3'' $\phi$  球形)、Table 5.3 に関係式の係数を示す。3 MeV 相当以下の宇宙線寄与は 3'' $\phi$  球形 NaI (T $\ell$ ) 検出器の場合約 0.2  $\mu$ R/h 相当で、宇宙線分を差し引いた場合と差し引かない場合とで、関係式の傾きは殆ど変わらず、定数項に若干の差が生じた。

ヘリコプタ機体からの寄与分については、検出器を一定の位置に固定する限り常に同一の寄与を受けているから、ディスクリミネーション法の適用については問題ない。しかし、今後別のヘリコプタを用いるような場合には、適用性を検討し、場合によっては関係式の定数項を補正する必要があるかも知れない。

Table 5.3 Coefficients of equations for discrimination method, when cosmic ray component is subtracted (for 3'dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector).

NW= 1 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30) ICR= 1 X= N(E)*G(E) (>EDSC) UR/R DOWN		NW= 2 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30) ICR= 1 X= COUNTS/CM**2 (>EDSC) CPS/ CM**2 DOWN		NW= 3 WMT 181 IDET= 1 (DETECTOR= 30) ICR= 1 X= ABSORBED ENERGY/CM**2 (>EDSC) KEV /CM**2 DOWN	
LO= 1 LINEAR NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 1 LINEAR NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 1 LINEAR NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.	1	50.
2	750.	2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.	8	1610.
9	1690.	9	1690.	9	1690.
10	2500.	10	2500.	10	2500.
LO= 2 LINEAR WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 2 LINEAR WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 2 LINEAR WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.	1	50.
2	750.	2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.	8	1610.
9	1690.	9	1690.	9	1690.
10	2500.	10	2500.	10	2500.
LO= 3 QUADRATIC NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 3 QUADRATIC NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 3 QUADRATIC NO WEIGHT Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.	1	50.
2	750.	2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.	8	1610.
9	1690.	9	1690.	9	1690.
10	2500.	10	2500.	10	2500.
LO= 4 QUADRATIC WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 4 QUADRATIC WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2		LO= 4 QUADRATIC WEIGHTED Y= COF1 + COF2*X + COF3*X**2	
I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)	I	EDSC(KEV)
1	50.	1	50.	1	50.
2	750.	2	750.	2	750.
3	1396.	3	1396.	3	1396.
4	2000.	4	2000.	4	2000.
5	500.	5	500.	5	500.
6	1000.	6	1000.	6	1000.
7	1350.	7	1350.	7	1350.
8	1610.	8	1610.	8	1610.
9	1690.	9	1690.	9	1690.
10	2500.	10	2500.	10	2500.

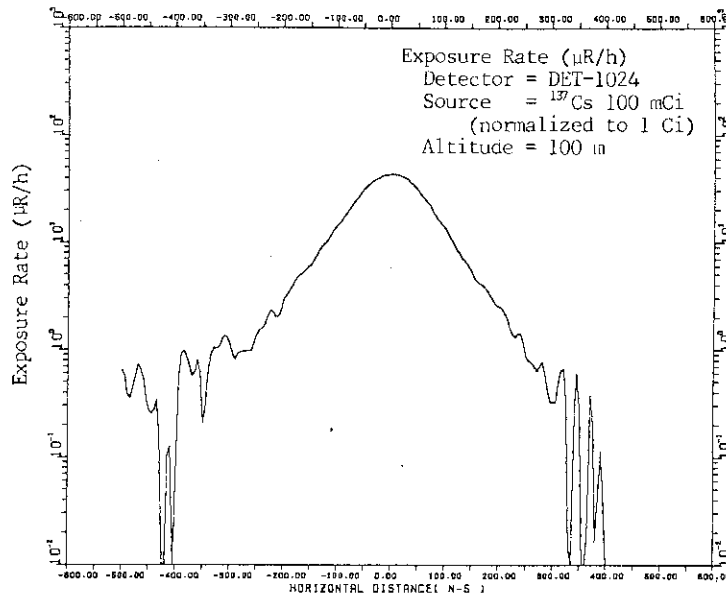


Fig.5.5 Example of background subtraction using discrimination method.  
This figure corresponds to Fig.4.10-7.

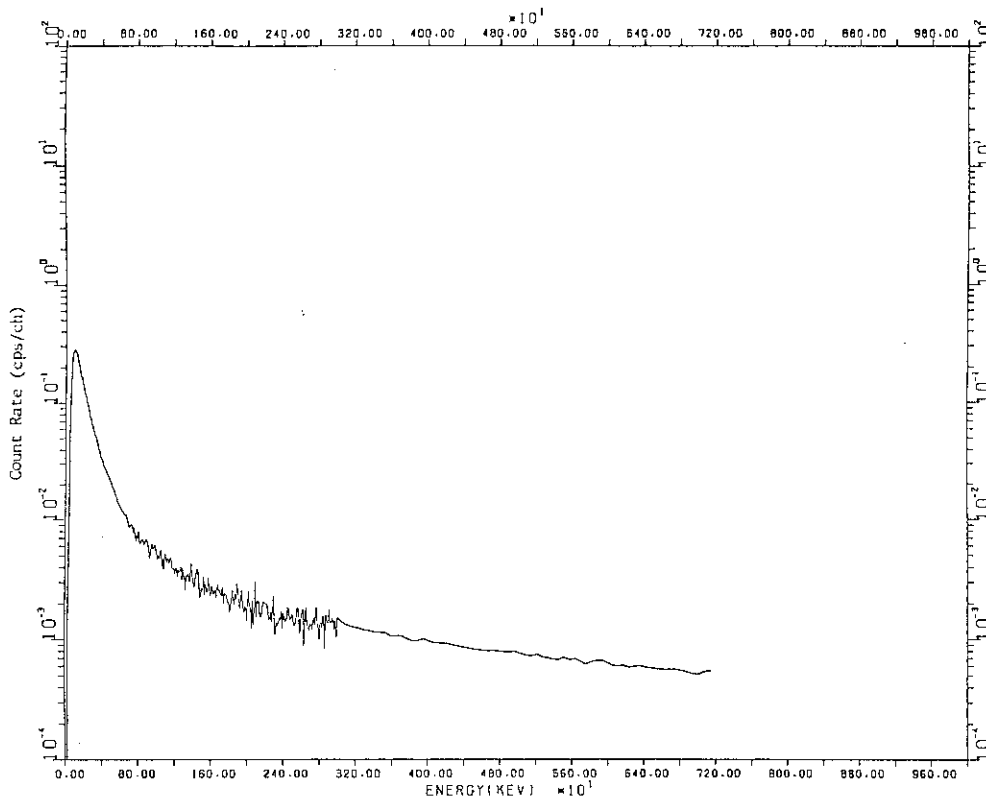


Fig.5.6 Spectrum of cosmic ray component in 3'dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.



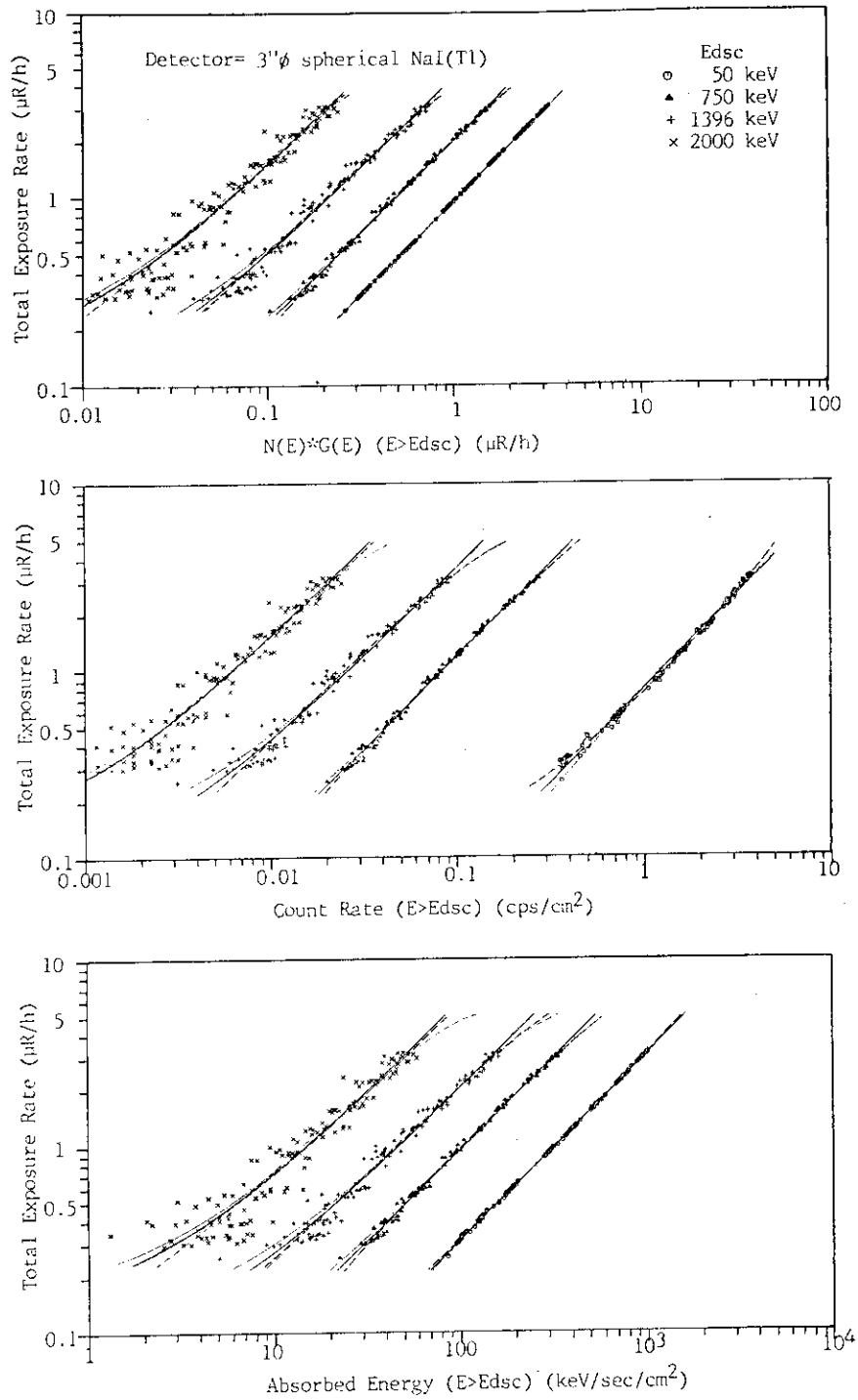


Fig.5.7 Relations between total exposure rate and each DV of 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector, where cosmic ray spectrum is subtracted.

## 6. 結 言

航空機  $\gamma$  線サーベイシステムの開発の一環として、昭和 57 年 10 月に栃木県渡良瀬遊水池において  $^{60}\text{Co}$  (100 mCi, 400 mCi) および  $^{137}\text{Cs}$  (100 mCi, 300 mCi) を用いた野外線源実験を実施した。

今回の実験は、 $\gamma$  線検出器、位置標定機器、測定・記録装置を含めたシステム全体の特性試験、及び、人工  $\gamma$  線場の空間分布を測定することにより、別途開発したモンテカルロ法による  $\gamma$  線挙動計算コードの性能を評価し、 $\gamma$  線場解析用資料を整備<sup>(3)</sup>するための基礎データを入手することを目的として実施した。

この実験では、地上 2.5 m に点状  $\gamma$  線源を置いて、地上 1 m および高度 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500 m での  $\gamma$  線波高分布を測定した。地上では 3"  $\phi$  球形 NaI (T $\ell$ ) 検出器を用い、航空機には 3"  $\phi$  球形、3"  $\phi$   $\times$  3" 円筒形、4"  $\phi$   $\times$  4" 円筒形、5"  $\phi$  球形、5"  $\phi$   $\times$  4" 円筒形、及び 16"  $\times$  16"  $\times$  4" 直方体の NaI (T $\ell$ ) 検出器の 6 種類の中から 2 種類ずつ搭載して測定を行った。位置標定は、電波高度計及び MRS (Microwave Ranging System) を用いた。

得られた  $\gamma$  線波高分布は、G(E) 関数法により線量率換算するとともに、全計数率、吸収エネルギーにも換算され、これらの空間分布 (高度分布、水平分布) を得た。また、ストリッピング法により、 $\gamma$  線エネルギースペクトルに変換した。

種々の条件 (検出器、高度、水平距離、 $\gamma$  線エネルギー) 下におけるこれらの測定結果は、モンテカルロ計算による値とよく一致し、計算手法、測定手法両者の信頼性を確認でき、計算による  $\gamma$  線挙動解析用資料の整備の見通しを得た。

また、これらの測定結果をもとに、線量率、全計数率、吸収エネルギー間の相関を検討し、線源の近傍 (約 150 m 以内) を除き直線関係が成り立つことを確認し、全計数率及び吸収エネルギーから線量率への換算係数を決定した。この係数を用いれば、複雑な演算手段を有しない測定器によっても、簡便な線量率推定が可能である。

さらに、自然  $\gamma$  線及び人工  $\gamma$  線の混在場での  $\gamma$  線波高分布から両成分を分離評価するため、ディスクリミネーション法の適用を検討し、各検出器、各ディスクリミネーション値、各ディスクリミネーションエネルギー毎に自然成分線量率評価式を決定した。これにより、バックグラウンド値が不明であるような場においても、自然成分と人工成分とを分離評価することができる。

これらの作業により、本システムによる航空機サーベイ法の開発に供する基礎資料、磁気テープデータの迅速処理解析コードを整備した。

今回の実験は過去に前例の無い規模で行われ、多くのデータを入手することができた。これらのデータは、 $\gamma$  線場解析用資料の整備、線量率レベルに応じた検出器の採用に関する検討、一般環境における  $\gamma$  線挙動の解析等に利用される。

なお、今後の本システムの開発については、実用システムの整備、実際の緊急時モニタリングを念頭においた飛行方式、位置標定方式の検討を重点として実施してゆく予定である。

## 謝 辞

今回の実験は、計約 1 Ci という強い $\gamma$ 線源を野外に設置し、それをヘリコプタで測定するという大変困難の多いものであったにもかかわらず、無事故でこれを終了することができた。これは、渡良瀬遊水池という適当な実験用敷地を確保できたためであり、敷地の使用に当って快く協力していただいた建設省関東地方建設局利根川上流工事事務所、同藤岡出張所、同渡良瀬遊水池出張所、同古河出張所の方々、地元栃木県庁、藤岡町役場、渡良瀬遊水池利用組合連合会元谷中占用組合、藤岡警察署、藤岡消防署の方々、及び周辺市町の栃木県小山市役所、同野木町役場、茨城県古河市役所、埼玉県北河辺町役場、群馬県板倉町役場の方々に謝意を表す。また放射線管理第 2 課の方々には実験中の放射線管理を担当していただいた。保安管理室の方々には線源輸送等を指導していただいた。管理部庶務課及び調達課並びに環境安全研究部事務室の方々には、このような前例の無い実験の対外説明、資材調達等を引き受けていただいた。さらに、環境第 1 研究室気象グループの諸氏には、実験期間中、敷地整備、測定などに協力していただいた。これらの方々に謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 堤正博, 斎藤公明, 坂本隆一, 長岡鋭, 森内茂: "航空機ガンマ線サーベイシステムの開発 I - ガンマ線および位置計測機器とデータ処理法", JAERI-M (投稿中)
- (2) 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 長岡鋭, 森内茂: "航空機ガンマ線サーベイシステムの開発 II - バックグラウンド放射線の基礎特性調査", JAERI-M (投稿中)
- (3) 斎藤公明, 長岡鋭, 坂本隆一, 堤正博, 森内茂: "航空機ガンマ線サーベイシステムの開発 IV - 野外実験のシミュレーション計算とガンマ線特性基礎データの蓄積", JAERI-M (投稿中)
- (4) 森内茂: "スペクトル線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定" JAERI-1209 (1971)
- (5) H.L. Beck, J. DeCampo and C.V. Gogolak: "In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry", HASL-258 (1972)
- (6) C. Jupiter, P. Boyns, "Airborne Systems for Emergency Radiological Monitoring", IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-23, 1 (1976)
- (7) 例えば, S.E. Binney, P.K. Boyns et al.: "Radiological Survey of the Lake Ontario Ordnance Works and Vicinity in June 1972", EGG-1183-1554 (1972), John F. Doyle et al.: "Radiological Survey of the Area Surrounding the National Reactor Testing Site, IDAHO FALLS, IDAHO, Date of Survey 1 and 2 Feb. 1972", EGG-1183-1586 (1973) など
- (8) A. Savitzky and M.J.E. Golay: "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures", Anal. Chem., 36, 1627 (1964)

- (9) B.S. Pasternack and N.H. Harley : "Detection Limits for Radio-nuclides in the Analysis of Multi-Component Gamma-Ray Spectrometer Data", Nucl. Instr. and Meth., 91, 533-540 (1971)
- (10) S. Moriuchi, K. Imai and I. Miyanaga : "New Low Level Environmental Radiation Monitoring around Nuclear Facilities Discriminating from Natural Radiation", CONF-730907-P1, 382-387 (1973)
- (11) 森内茂 : "年間 5 mrem の環境放射線量の測定およびその評価", Radioisotopes, 28, 8 (1979)
- (12) 森内茂 : "スペクトル荷重関数方式による環境  $\gamma$  線線量測定器に関する研究", JAERI-M 7066 (1977)

## Appendix I 線源強度の校正

今回の実験では<sup>60</sup>Co 2種(約100 mCi及び約400 mCi)及び<sup>137</sup>Cs 2種(約100 mCi及び約300 mCi),計4種類の線源を用いた。線源強度は購入時に正確な値付けをされておらず目安程度であったため、実測により正確な値を知る必要があった。線源強度校正のための測定実験は、一連の実験の最後(10月19日)に地上において実施した。測定状況をFig. Ap. I. 1に示す。

線源を線源コンテナ上部の照射筒先端にセットし、3"φNaI(Tl)検出器を線源から約45 m離れた点に設置した。また、シャドーシールド用の鉛ブロックをそのほぼ中間の位置に置けるように台を設置した。測定は、シャドーシールド用の鉛を置いた場合と置かない場合の2通りを4種類の線源それぞれについて逐次実施し、各々のγ線波高分布スペクトルを得た。得られたスペクトル(シャドーシールド有と無)の差を取ることによって線源からの直接γ線によるγ線波高分布スペクトルを求めた後、次の4通りの評価法によって線源強度を評価した。

### ① 波高分布にG(E)関数を作用させて得た線量率から評価

得られた波高分布N(I)にG(E<sub>I</sub>)を作用させ線量率を求めた。単位強度当りの測定場所における線量率は、線源-検出器距離、RHM値(<sup>60</sup>Co; 1.2827R/h/Ci, <sup>137</sup>Cs; 0.319 R/h/Ci)から算出されるから、線源強度を計算できる。

### ② 波高分布の全吸収ピーク面積から評価

測定地点での単位強度当りの計数率と測定γ線波高分布の全吸収ピーク面積とを比較して線源強度を評価した。ここでγ線放出率は<sup>60</sup>Coが2.0, <sup>137</sup>Csが0.852, ピーク効率は<sup>60</sup>Coが0.215, <sup>137</sup>Csが0.385とした。

### ③ 線量率のエネルギースペクトルから評価

測定γ線波高分布をストリッピング法によりスペクトル解析し、全吸収ピークに相当する線量率を求め、①と同様に単位強度当りの線量率値と比較して線源強度を評価した。この場合、後方散乱成分を含めた場合と含まない場合の2通りで評価した。

### ④ 線束密度のエネルギースペクトルから評価

スペクトル解析により全吸収ピーク部の計数率を求め、②と同様に単位強度当りの線束値と比較して線源強度を評価した。①から④のいずれにおいても、線源-検出器間の空気による減衰を考慮した。

スペクトル解析して得たエネルギースペクトルをFig. Ap. I. 2に、測定結果及び線源強度評価値をTable Ap. I. 1に示す。測定結果は①から④のいずれも非常に近い値を示し各評価法の妥当性を示すものであった。最終的に③による評価値を用いることとした。この際、後方散乱成分の扱いについては、1/2が検出器による後方散乱、1/2が線源容器による後方散乱であるとみなして、後方散乱成分を含む評価値と含まない評価値との平均値を線源強度値として採用した。

なお、今回の一連の飛行測定実験の結果と、モンテカルロ計算によるシミュレーション結果とは良く一致しており、線源強度評価値の妥当性が裏付けられた。

Table AP.I.1 Results of source intensity calibration.

Source	$^{60}\text{Co}$	$^{60}\text{Co}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$
Calibration method	100 mCi	400 mCi	100 mCi	300 mCi
(1) $\Sigma N(E) \cdot G(E)$	121.0	404.0	89.26	316.1
(2) Photo-peak counts	123.0	410.9	86.05	301.6
(3) Spectrum analysis (exposure rate of peak)	119.8 (122.0)*1	398.9 (406.8)	87.46 (90.56)	304.6 (314.4)
(4) Spectrum analysis (flux density of peak)	118.8	394.6	86.65	301.4
Mean	120.7	402.1	87.36	305.9
Conclusion*2	120.9	402.9	89.01	309.5

\*1; including back-scattering component

\*2; mean of two values in (3)

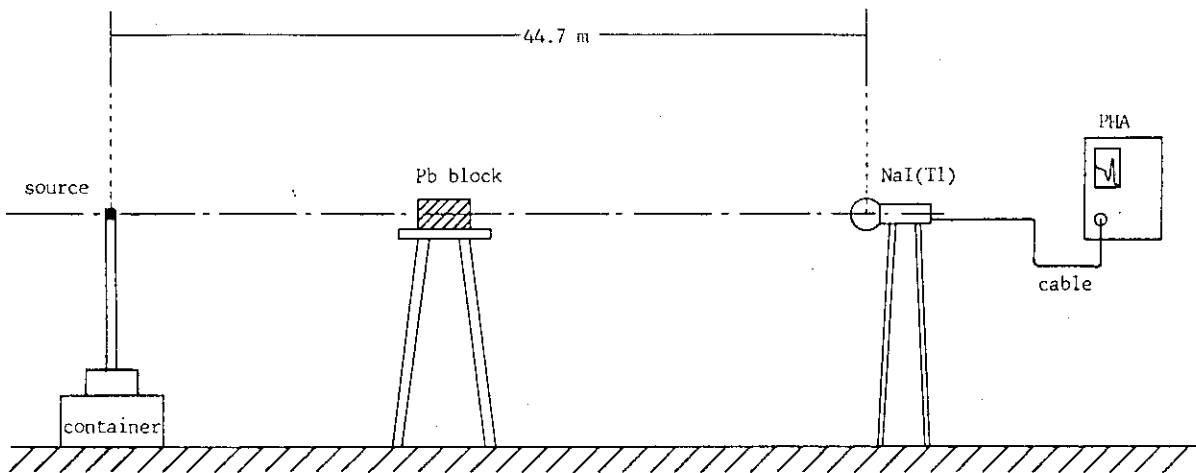


Fig.AP.I.1 Experimental arrangement for source intensity calibration applying shadow shield method.

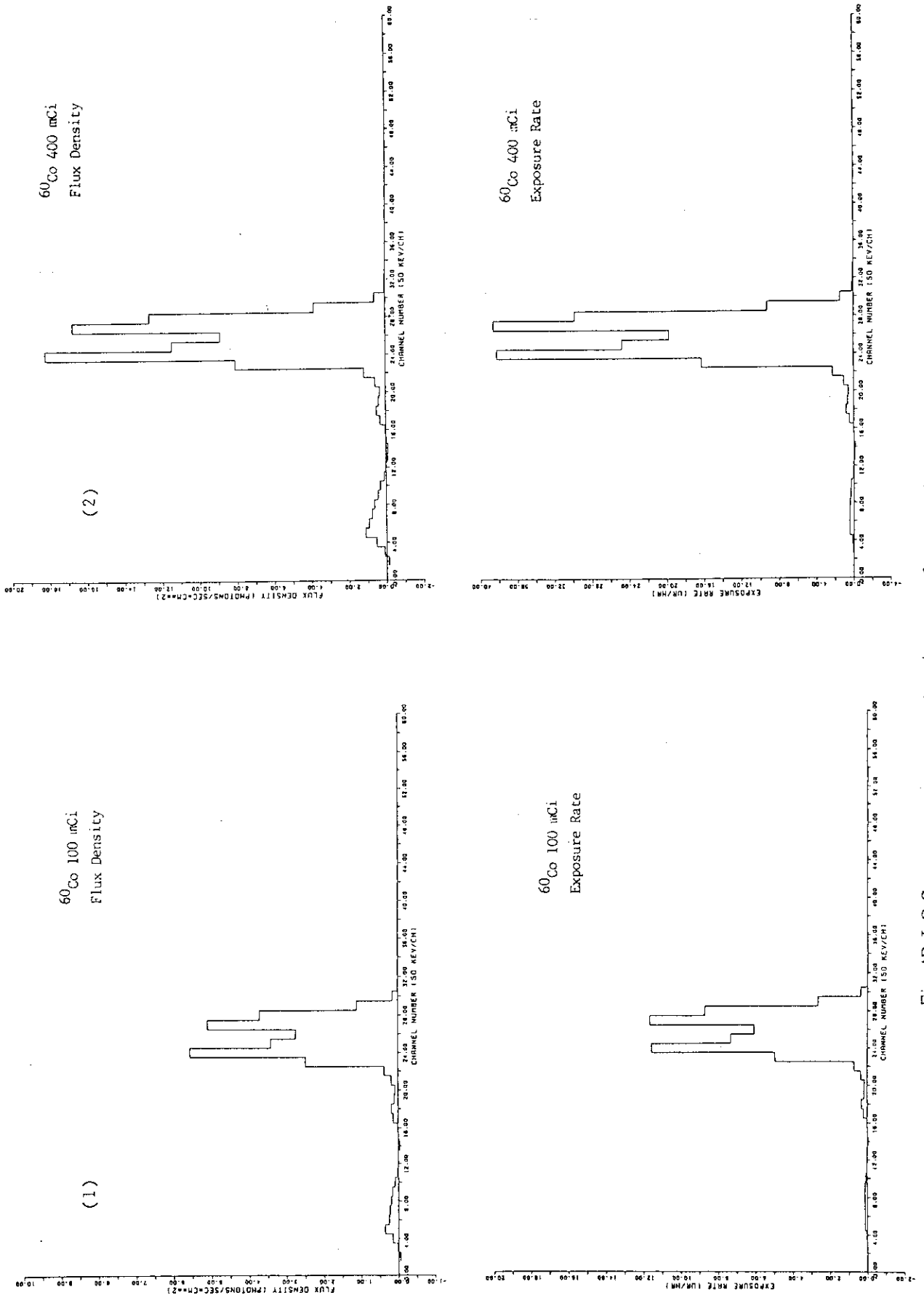


Fig. AP. I. 2 Gamma-ray energy spectra in case of source intensity calibration. (1/2)

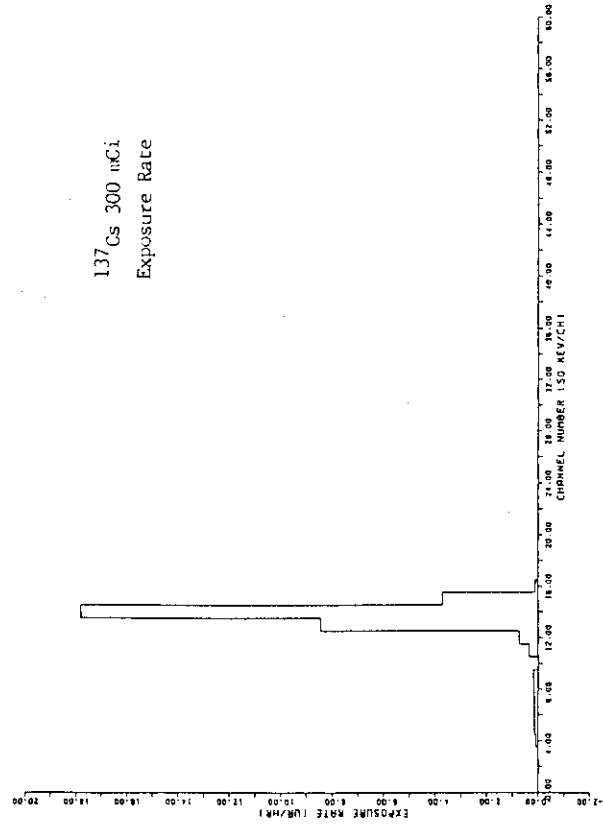
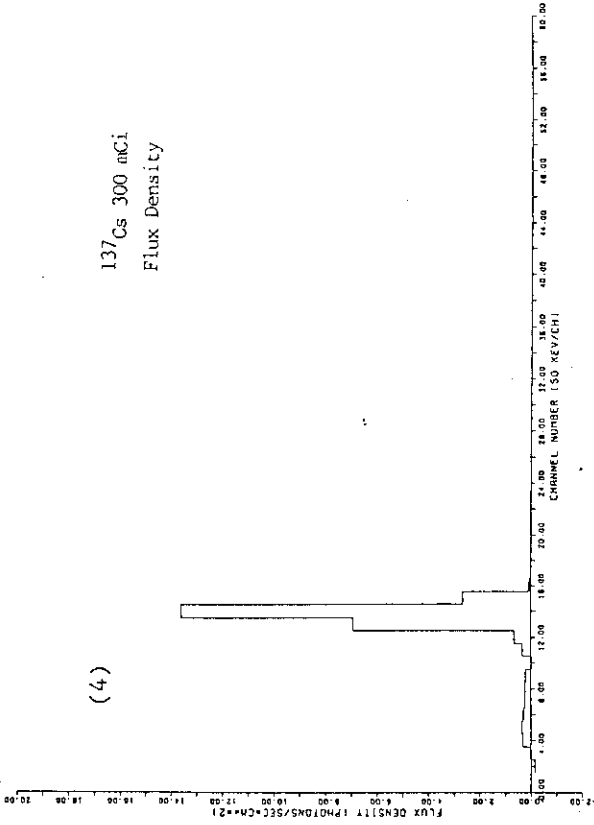
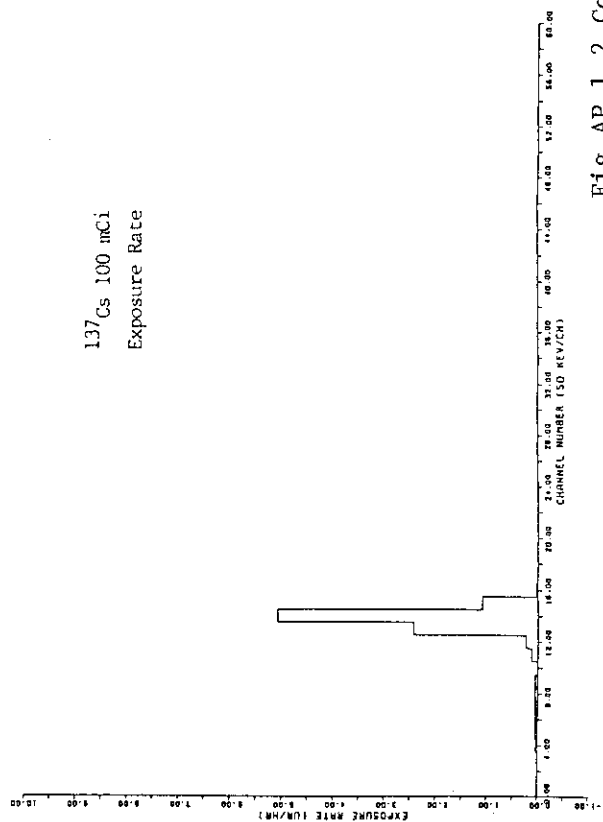
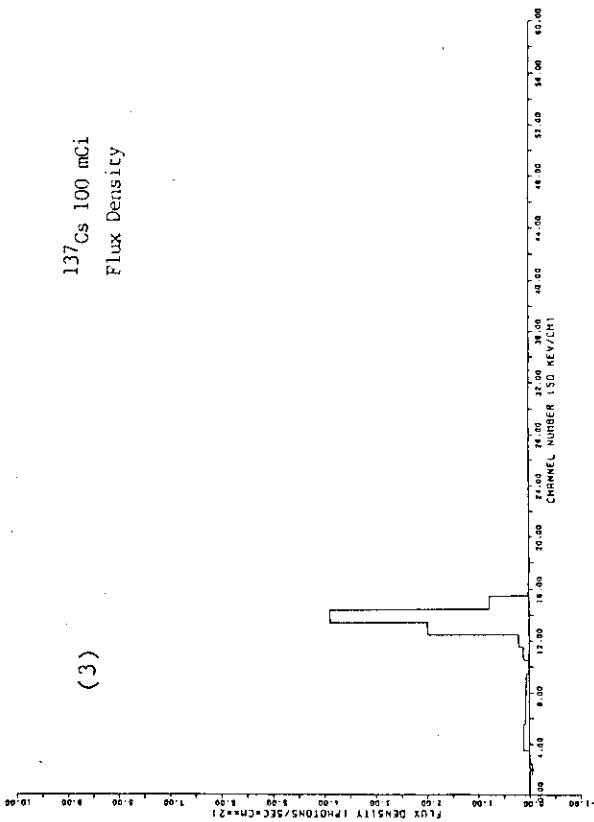


Fig.AP.1.2 Cont'd (2/2)



## Appendix II MRS の概要

MRS とは Microwave Ranging System の略であり、ある地点に設置した主局から送信したマイクロ波が別の地点に設置された従局で受信され、受信と同時に従局から送信されたマイクロ波を主局で受信するまでに要した時間を測定することによって主局—従局間の距離を測定するものである。

ここで使用した送信マイクロ波の周波数は、主局が 8960 MHz、従局が全て 8860 MHz である。従局から送信されるマイクロ波は全て 8860 MHz なので、周波数による従局の識別はできない。そこでパルスくり返し周期を 924, 944, 964, 984  $\mu$ sec の 4 種類を設定し、その内の 1 つずつを各従局に割り当てることにより従局の識別を行う。また距離測定は、前述のように主局がマイクロ波を送信してから従局からのマイクロ波を受信するまでの時間を計測して距離に換算する方法を用いているが、精度を上げるために、この測定をくり返し行う。ここでは、主局が送信をくり返して、それに対する受信が 48 回以上あればその平均値から距離換算を行った。但し、主局からの送信を 72 回行っても受信が 48 回未満の場合には、欠測とみなされる。なお、これらの測定に要する時間は、くり返し測定が 1 局当たり約 50 ~ 70 msec である (Fig. 3.5 参照)。

MRS を用いて飛行中のヘリコプタの位置を測定する場合には、主局をヘリコプタに搭載し、地上に従局を設置する。この場合、主局—従局間の距離とヘリコプタの高度 (電波高度計などを用いて測定する) を用いて三角法によりヘリコプタの位置を計算するため、従局は緯度、経度、海拔高度 (または、ある基準点に対する 3 次元座標) が正確に分っている地点に固定された 2 局以上を必要とする。概念図を Fig. Ap. II 1 に示す。

今回使用した MRS 従局は、27 cm  $\times$  15 cm  $\times$  36 cm の箱内に送受信機が収納されており、重量は約 7 kg で、電源として 24 VDC の鉛バッテリーを使用している。この箱には約 30 cm の長さのアンテナが取り付けられており、これを約 1 m の高さの三脚上に固定してある。従局の設置に当っては、前述のように設置点の位置情報が正確に分っていること、固定されていることに加え、ヘリコプタと従局間に電波送信の障害となるような物が無いこと、ヘリコプター—従局間距離が約 2 km ~ 40 km であることなどに留意する必要がある。

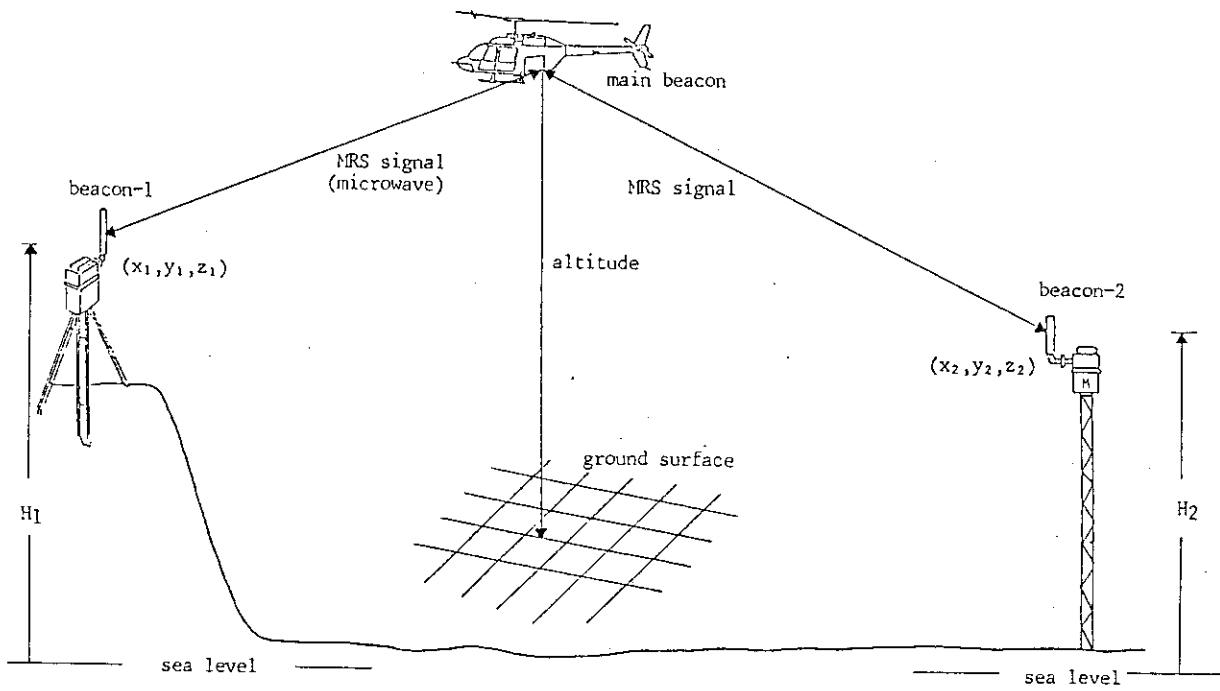


Fig.AP.II.1 Principle of MRS (Microwave Ranging System).