

JAERI-M
5988

高純度ゲルマニウム検出器の
温度サイクル試験

1975年2月

阪井 英次・寺田 博海・片桐 政樹・伊藤 浩

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高純度ゲルマニウム検出器の温度サイクル試験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

阪井英次・寺田博海・片桐政樹・伊藤 浩

(1975年1月27日受理)

Nuclear Radiation Developments 社の高純度ゲルマニウム検出器 (PHYGE charged particle detector, Model 05005B, Serial no.100P5P3, 50mm² × 5mm t) の温度サイクル試験をクライオスタットの真空中で行なった。温度サイクルは 77 K ⇄ 室温を 7 回繰り返し、その間、検出器が室温にあった時間の総計は 340 時間であった。漏洩電流、静電容量、ガンマ線ピーク検出効率、エネルギー分解能に有意な変化は見られず、温度サイクルに対して安定な検出器であることがわかった。

Temperature Cycling Test
of
A Hyper-Pure Germanium Detector

Eiji SAKAI, Hiromi TERADA, Masaki KATAGIRI, and Hiroshi ITOH

Division of Reactor engineering, Tokai, JAERI

(Received January 27, 1975)

Temperature cycling test of a hyper-pure germanium detector (Nuclear Radiation Developments, PHYGE charged-particle detector, Model No. 05005B, Serial No. 100P5P3, $50\text{mm}^2 \times 5\text{mm}$) was performed under cryostat vacuum. The total duration of the detector at room temperature was 340hr (seven temperature cycles between 77K and room temperature). The leakage current, capacitance, gamma-ray peak detection efficiency, and energy resolution showed very little change. The detector was found to be very stable against temperature cycling.

目 次

1	まえがき	1
2	NRD社のPHYGE検出器	3
3	実験装置	6
3.1	検出器	6
3.2	クライオスタット	6
3.3	検出器の取り付け	7
3.4	測定回路	7
3.5	ガンマ線スペクトル解析方法	7
4	実験結果	9
4.1	最初の特徴	9
4.2	温度サイクル試験	10
5	まとめ	11
	謝 辞	11
	References	11
	Table captions	12
	Photo captions	12
	Figure captions	13
	Tables	15
	Photos	26
	Figures	29

Contents

1. Introduction.....	1
2. NRD PHYGE detector.....	3
3. Experimental apparatus.....	6
3.1 Detector.....	6
3.2 Cryostat.....	6
3.3 Mounting of the detector.....	7
3.4 Measuring equipment.....	7
3.5 Gamma-ray spectrum analysis.....	7
4. Experimental results.....	9
4.1 Initial performance.....	9
4.2 Temperature cycling test.....	10
5. Concluding remarks.....	11
Acknowledgement.....	11
References.....	11
Table captions.....	12
Photo captions.....	12
Figure captions.....	13
Tables.....	15
Photos.....	26
Figures.....	29

1 ま え が き

Ge (Li) 検出器が高分解能であり、さらにかんりのガンマ線検出効率を示すものが得られるようになった現在、ガンマ線スペクトロメータとして、その応用範囲を拡大しつつある。Ge (Li) 検出器の1つの欠点として、スペクトロメータとして使用する時のみでなく、保存時にも液体窒素冷却を必要とすることが指摘できる。Ge (Li) 検出器を常温で放置すると、Liドリフトにより compensate された領域中の Li^+ が折出してドリフト前の p 型に戻り、ガンマ線の有感部の体積を減少させる。その結果、再び液体窒素で冷却しても最初のガンマ線検出効率およびエネルギー分解能を得ることができなくなる。^{1)*} この欠点を持たないものとしては、Ge の p-n 接合型検出器がある。しかしながら、実用上十分な検出効率を持たせるためには、厚い空乏層を作らねばならず、そのための高純度 Ge 単結晶 ($|N_D - N_A| \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) が必要となった。General Electric 社の R. N. Hall が 1970 年頃に高純度 Ge 単結晶の引き上げに成功し、これを用いた Ge の p-n 接合型検出器 (高純度 Ge 検出器と呼ぶ) が作られた。それ以来、プレーナ型は勿論、75 cm² 同軸型検出器まで試作されている。

これらについての現状は総合報告²⁾³⁾に詳しく述べられている。また、1973 年頃から、直径 16 mm、厚さ 5 mm 程度の高純度 Ge 検出器が Princeton Gamma-Tech や Ortec から市販され、最近では Princeton Gamma-Tech は 75 cm² の高純度 Ge 検出器を広告し初めた。いずれのメーカーも、室温⇄液体窒素温度間の温度サイクルを何回、何時間くりかえしても特性に変化はおこらないと述べている。しかしながらいずれのメーカーの製品についても、液体窒素 1 ℓ とか 5 ℓ の小型のクライオスタットを使用しておらず、容量 30 ℓ のクライオスタットを使用している。このことは、現在の製品が例えば液体窒素が無くなったとしても特性の変化は起さないという程度の使い方をされていることを意味しており、頻繁な温度サイクルを行なった場合は、いつ特性が変化するか判らないので、できれば液体窒素を切らさない方がよいと考えられるものと思われる。高純度 Ge 検出器の表面処理については、現在の所、各研究者がいろいろ試みている段階と思われる。^{**}

今回、カナダの Nuclear Radiation Developments 社が Charged particle detector として開発した高純度 Ge 検出器 (PHYGE detector と商標登録をしている) を試験する機会があったので、その温度サイクル試験の結果を報告する。試験した検出器は model 05 005 B (Serial no. 100P5P3) で荷電粒子入射窓面積 50 mm²、厚さ 5 mm、625 keV

* クリーン・アップ処置あるいは Li ドリフトをやり直せば、元のガンマ線検出特性は回復できる。

** 1974 年 12 月 11, 12, 13 日に Washington, D. C. で開かれた 1974 Nuclear Science Symposium and 14th Scintillation and Semiconductor Counter Symposium においても、この温度サイクルによる高純度ゲルマニウム検出器の特性変化について Panel discussion があつたらしいが、内容は不明である。20 回温度サイクルを行なっても特性に変化はなかつたと云う話があつても 21 回目になるとなるのか判らないとか、各社の検出器を試験しても余り差違は見られないとか Ortec の engineer が話していた。
*** 検出器を貸与して頂きました仁木工芸 KK。仁木三夫氏に深く感謝します。

電子に対するエネルギー分解能 3.5 keVを示す検出器である。

第2章でNRD社のPHYGE検出器の構造，仕様，取り扱い方法，保証，各種放射線のパルス波高分布などの紹介を行ない，第3章で，検出器，クライオスタット，検出器の取り付け，測定回路，実験装置，測定方法などについて述べ，第4章で最初および各温度サイクル後の検出器の漏洩電流，静電容量，ガンマ線ピーク検出効率，エネルギー分解能の測定結果を述べた。温度サイクル試験は，クライオスタットの真空中で検出器の温度を室温⇄液体窒素温度に変化させて行なった。

2 NRD社のPHYGE検出器

Nuclear Radiation Developments 社^{*}は Electronic Associates of Canada Limited の 1 部門であり, Dr. Mario Martini^{**}が Technical Director をしていることから想像すると, かつて半導体検出器の關係の製品を売っていた Simtec Industries Limited が EA CL に吸収されたものと思われる。この NRD 社が, 荷電粒子検出器として高純度 Ge 検出器を PHYGE と名付けて売り出した。通常荷電粒子検出器としては Si 検出器が使用されるが, 飛程の長い高エネルギー粒子の検出には, 高い阻止能を持つ Ge 検出器が適している。10mm 厚の Ge は, 10MeV 電子, 60MeV 陽子, 300MeV アルファ粒子を完全に吸収するわけである。この荷電粒子検出器は核物理実験用をねらって開発したものらしい。General Electric 社の引き上げた高純度 Ge 単結晶に unique な passivation process (patent pending) をほどこして検出器を製作している。^{***} p 型の高純度 Ge 単結晶の一平面に Li を熱拡散して n^+ 層を作り, 他の一平面に unique な passivation process をほどこしさらに Ni 薄膜を蒸着しケースに納めたものと思われるが, 詳細は判らない。入手した製品を眼で見た限りでは, 荷電粒子入射窓の周辺が金色に見えるのでさらに p^+ 電極を強固にするために, 荷電粒子の入射窓を除いて金を蒸着しているように思われる。この検出器は Fig. 2.1 (Instruction manual⁴) の説明からの想像図) に示すように荷電粒子入射窓の明いたアルミニウムのケースに高純度 Ge 検出器の p^+ 側を In のリングを介して押しつける構造となっている。検出器の n^+ 側はスプリングが接触しており, スプリングはマイクロドットあるいは BNC, SHV の芯線と半田付けされている。ケースは検出器の保護, 熱遮蔽を行ない, また, 取り扱いを便利にしている。ケースの中側の空間は, ケースに孔が明いているので, 大気中においては空気が, 真空中においては真空状態が満たすことになる。すなわち, 高純度 Ge 検出器の側面は雰囲気直接さらされることになる。

NRD PHYGE 荷電粒子検出器としては Table 2.1 に示すように, 入射窓の面積として 50 mm^2 , 150 mm^2 , 300 mm^2 , 厚さとしては 5 mm , 10 mm , 窓の不感層の厚さとしては $0.1\text{ }\mu\text{m}(\text{Ge})(\text{A type})$, $0.5\text{ }\mu\text{m}(\text{Ge})$ ^{****} (B type) があり, 特注品としては, 面積 1000 mm^2 , 厚さ 20 mm までの検出器が得られるようである。参考のために価格も示した。検出器のケースの寸法を Fig. 2.2 に示した。 50 mm^2 , 150 mm^2 , 300 mm^2 の検出器に対しては BNC コネクタを, 500 mm^2 , 1000 mm^2 の検出器に対しては SHV コネクタが標準のようである。Table 2.1 中のエネルギー分解能は Tennelec TC161A 前置増幅器を使用して測定しているが,

* 4401 Steeles Ave. W., Downsview, Ontario, Canada

** Italy の University of Bologna の Associate Professor をしていて, 1968 年~1969 年に NRC の postdoctoral Fellow として Atomic Energy of Canada Limited の Chalk River Nuclear Laboratory で半導体検出器中の捕獲中心を解明した人。

*** Dr. T. W. Raudorf が主に開発しているとのことである。

**** transmissinn 型の検出器ケースも特注できるようである。

***** 10 MeV 陽子は, $0.5\text{ }\mu\text{m}$ の Ge 中で約 5 keV のエネルギーを失なり。

これはNRDがTC161A前置増幅器をOEM arrangementに用いているからだということである。主増幅器としてはTennelec TC203BLRを用いている。

そのInstruction manual⁴⁾を次に紹介する。検出器の取り付け方法は次の通りである。先づ検出器を取り付けるクライオスタットの真空中に漏れがないかどうかをリーク・デテクタで確かめ、また、モレキュラ・シーブやイオン・ポンプを使用するときはそれが確実に動作することを確認し、室温で系の真空度が 5×10^{-5} torr以下になるかどうかを調べる。また、クライオスタットの信号端子の漏洩電流が使用電圧で10 pA以下であることを確認する。NRD社からPhoto 2.1に示すようなガラス瓶に封じ込まれて送られてくる。ガラス瓶の中は減圧されている。このガラス瓶の蓋についている細い銅管を切れ目の入れてある部分で折り、大気をガラス瓶内に入れ、蓋をはづして、中から検出器を取り出す。Photo 2.2はガラス瓶、蓋、検出器の前面を保護するプラスチック皿、検出器を包む銀紙を示す。このとき、手は清潔で油などが付いていないことが望ましい(手袋をすることが良い)。検出器をクライオスタットの冷却棒に取り付ける。このとき検出器と冷却棒の間にはインジウム箔を狭んで熱伝導を確実にする必要がある。クライオスタットを油回転ポンプで0.1 torrまで排気し、直ちにコールド・トラップを付けた拡散ポンプあるいは油による汚染の少ない真空排気系に切りかえる。0.1 torr以下においては油回転ポンプは油のback streamingをおこす。約1時間排気して 5×10^{-5} torrに達すると、液体窒素をクライオスタットに入れて、検出器を冷却する。モレキュラ・シーブやイオン・ポンプを使用するときは、クライオスタットの真空系を切り離して冷却を開始する。検出器が液体窒素温度に達するまで待ち、電圧10Vをかけて、検出器の漏洩電流が5 pA以下であることを確かめる。電流が5 pA以上のときは検出器は未だ使用できず、検出器の温度の下がるのを待つ。電流が下がらない場合は、検出器の温度が高いと思われるので、クライオスタットの冷却棒と検出器の間の熱伝導が悪いことになる。検出器のdata sheetに記述されている使用電圧における漏洩電流値以下に電流が下がるはずであるが、実際は検出器周辺、エンド・キャップと検出器間の距離、熱接触の良し悪し、冷却棒の長さなどにより変化する。実用上は、使用電圧において1 nA以下に漏洩電流が下がれば使用できる。以上の手順で作業を進めて問題がなければ前置増幅器を接続して、放射線の検出特性を調べる。問題があれば、クライオスタットを常温に戻して検出器を取り出し、クライオスタットの設計を考え直すなどの問題点の解決を試みなければならない。

検出器を液体窒素温度で使用した後の保存については、次の3方法が考えられる。クライオスタット中で真空のまま冷却する方法については問題はない。次の方法はクライオスタットの真空中で保存するが液体窒素は自然に蒸発して無くなり検出器は常温に戻る方法である。検出器を使用する場合は、再び液体窒素を注ぐことになる。この場合はデュワーの内部に水が溜っていないかどうかを調べ、圧縮空気をふきつけて水を取り除く必要がある。水が残っていると、液体窒素を充填しても検出器が十分に冷却しないことがある。第3の方法は、クライオスタットを常温に戻して検出器を取り出す方法である。この場合、検出器が室温から5℃以内の温度になるまでクライオスタットの真空を破らないことが必要である。もしも、真空を破ると、検出器の p^+ 層表面に霜が付き、検出器の特性を変化させる(この場合、NRD社は保証をしない)。検出器が室温になったかどうかは、漏洩電流の大きさに判断できる。検出器を取り出し

た後、窓側をプラスチック皿で保護し、銀紙で検出器を包み、ガラス瓶に戻して室温で保存する。

高純度 Ge 検出器は放射線損傷を受け易く、 10^9 個の陽子あるいは中性子が検出器に損傷を与えることが判っている。ただし損傷の程度は検出器の結晶に依存する。先づ、漏洩電流および雑音の変化がない間にエネルギー分解能のみが変化する。さらに、損傷が進むと漏洩電流、雑音ともに増大する。大抵の場合、この損傷は簡単なアニーリングを行なうことより回復する。NRD社としても、放射線損傷をおこした検出器のアニーリングを行なう用意がある。

高純度 Ge 検出器の保証期間は1年で、次の場合は保証しないと記述している。すなわち

- 1) 検出器と雰囲気ガス温度差が5℃以上、ガス圧が0.1 torr以上で、雰囲気ガスまたは空気に検出器をさらした場合
- 2) 清潔な空気あるいは不活性ガス以外の雰囲気に検出器をさらした場合
- 3) 検出器の窓を何かで触れた場合。指紋や拡散ポンプの油膜が窓の表面に残っている場合検出器は動くが、不感層厚は増大する。指紋や油膜はNRD社で洗う用意がある。
- 4) 40℃以上に熱した場合。検出器を(30~40)℃で熱することにより、表面に付着していたものを蒸発させることができる場合があるが、40℃以上熱すると検出器が損傷をうけることがある。
- 5) 検出器のケースを開いた場合
- 6) 放射線損傷を受けた場合。NRD社が簡単なアニーリングを行なうことにより回復できた場合は、検出器の価格の10%を請求する。複雑な手続きを要した場合(例えば検出器結晶を新しいものに代える)、要した価格を請求する。

以上がNRD社のInstruction Manualの内容である。なお、検出器の特性については、使用電圧、漏洩電流、静電容量、5.5MeVアルファ粒子と625keV電子に対するエネルギー分解能、増幅器の整形時定数、バイアス電圧の極性を記述したmeasuring certificate(Table 3.1参照)が各検出器に付して送られる。

PHYGE 荷電粒子検出器を使用して測定した荷電粒子のパルス波高分布の例をFig.2.3~Fig.2.5に示す。Fig.2.3は ^{241}Am からのアルファ粒子のスペクトルで、5.477MeVのピークが半値幅15.8keVで測定されている。Fig.2.4は ^{137}Cs の662keVガンマ線の内部転換電子のスペクトルで、625keV電子が半値幅1.5keVで測定されている。Fig.2.5は、10MeV陽子を $30\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の金膜にあてたときのスペクトルで、10MeV陽子が半値幅20keVで測定されている。荷電粒子検出器として設計されているのでPHYGE検出器の体積は小さくガンマ線検出器としては余り適当ではないが、勿論ガンマ線検出器としても使用できる。model 30010A($300\text{mm}^2 \times 10\text{mm}$)を用いて、 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{57}Co , ^{241}Am のガンマ線を測定したとき得られたパルス波高分布をFig.2.6~Fig.2.9に示す。1333keV, 662keV, 122keV, 59.6keVの半値幅が、それぞれ、1.83keV, 1.30keV, 880eV, 810eVで測定されている。このエネルギー分解能については冷却FET前置増幅器を用いれば、もっと良い値が得られるはずである。Fig.2.2(C)に示したように、面積 1000mm^2 、厚さ20mmのPHYGE検出器(検出体積 20cm^3 以上)も特注すれば供給できるようであるから、ガンマ検出器としても今後は使用される機会が多くなるものと思われる。

3 実験装置

3.1 検出器

今回、試験に供した高純度 Ge 検出器は、Nuclear Radiation Developments 社の PH YGETM charged particle detector Model 05005B Serial No.100P5P3で、その active area は 50mm^2 、active depth は 5mm であった。そのケースの寸法は Fig. 3.1 に示すように、外径 28.6mm 、厚さ 13.4mm のアルミニウム製ケースにマイクロ・ドット型のコネクタ^{*}が付いている。active area 50mm^2 というのは、このケースの窓の面積（直径 9mm ）を意味しており、ケースの中に納められている Ge 検出器の直径は 9mm よりも若干大きい。NRD 社における特性の測定値（1974年10月21日）は Table 3.1 に示すように、印加電圧 600V で、漏洩電流 1.0nA 以下、静電容量 6.0pF 、 ^{241}Am の 5.5MeV アルファ線および ^{137}Cs の内部転換電子に対するエネルギー分解能（FWHM）はそれぞれ、 22keV および 3.5keV であった。このとき使用した前置増幅器は Tennelec TC161A、主増幅器は Tennelec TC203BLR（時定数 $2\mu\text{sec}$ ）であった。本検出器は荷電粒子用であるので、ガンマ線に対する特性には触られていない。また、仕様によれば、検出器の窓の不感層の厚さは、Ge 換算で $0.5\mu\text{m}$ 以下である。

3.2 クライオスタット

液体窒素デュワーとして Cryogenic Associates 社の SD-170J（液体窒素 7.5ℓ ）を使用した。これに合わせて、Fig. 3.2 に示したように、前置増幅器、高電圧フィルタ、真空バルブを取り付けるリング、アルミニウム・キャップ、検出器マウントを製作した。真空のシールにはバイトン[®] O[®] リングを用いた。真空保持としては、イオン・ポンプやモレキュラ・シープを使用せず、単に SD-170J 中の super insulation を冷却する方法を用いた。検出器は 2本のボルトにより厚さ 4mm のアルミニウム板^{**}に取り付け、厚さ 3mm のボロン・ナイトライド板を介してアルミニウムの金具および冷却棒に締めつけ、この冷却棒がデュワーの腹部にねじ込まれる。各締めつけ部分にはインシュウム箔をはさみ、熱伝導を確実にした。ボロン・ナイトライド板は、検出器を電気的に大地から浮かすために用いた。検出器のケース（ p^+ 電極）と高圧端子、検出器のマイクロ・ドットの芯線（ n^+ 電極）と前置増幅器接続用 7P ハーメチック・シールの間は、熱伝導を減らすために細いステンレス鋼線を使用した。検出器マウントに検出器を取り付けた状態を Photo 3.1 に示す。デュワーおよびアルミニウム・キ

* 最近、NRD社は、マイクロドットの代わりにBNCコネクタを標準とすると云っている。

** このアルミニウム板の直径は 50mm^2 、 150mm^2 (Fig. 2.2(a))、 300mm^2 (Fig. 2.2(b)) の検出器が取り付けられる大きさとした。

*** SD-170Jの腹部に溶接されている外径 $1/2"$ のアルミニウム短棒の中心に明いている $1/4"-20$ のタップは内径が $1/4"$ であるので、これにねじ込む冷却棒の外径も $1/4"$ となる。この冷却棒をアルミニウムで作った場合、ねじ込むときにねじ切れる場合があるので、銅で作る方が安全である。また、銅の方がアルミニウムより熱伝導は良い。

キャップを Photo 3.2 に、また、前置増幅器、高圧フィルタ、アルミニウム・キャップを取り付けたデューワーを Photo 3.3 に示す。

このデューワーの液体窒素消費率については、有感体積 33.4 cm^3 の同軸型 Ge(Li) 検出器をマウントした場合のデータ⁵⁾があり、Fig. 3.3 に示すように、空調を行なった研究室内で 1.05ℓ /日であり、 7.5ℓ の液体窒素で7日間は保持できることが確かめられている。今回の実験においても、同程度あるいはそれ以上の液体窒素保持能力を示すものと思われる。

3.3 検出器の取り付け

検出器は1974年10月21日にNRD社において試験されている (Table 3.1 参照)。その後、NRD社がどの様にして検出器を保管したかは不明であるが、とにかく、1974年11月21日には、減圧されたガラス瓶中に封入されて到着した検出器を大気中に取り出し、寸法測定などを行なった後、シリカゲルを入れたデシケータ中で保管した。11月30日に検出器をデシケータから取り出し、Fig. 3.4 に示す真空排気装置を用いて排気を開始した。^{*} 廻転ポンプだけを用いて22:00まで排気を続けて $1.3 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ となった。12月3日9:00に廻転ポンプを始動、9:30には、 $1.3 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ になったので、油拡散ポンプを始動し、9:40にはコールド・トラップに液体窒素を入れ、11:30にイオン・ポンプ電源を on し、15:00にはクライオスタットをイオン・ポンプだけで排気するようにし、12月4日の10:10にクライオスタットの真空バルブを閉じて封じ切った。11:00にクライオスタットに液体窒素を充満した。12月5日に検出器の漏洩電流、静電容量、ガンマ線検出特性の測定を開始した。

3.4 測定回路

検出器の漏洩電流は Keithley 社の model 602 electrometer を7Pハーメチック・シールの信号ピン(検出器の n^+ 電極に接続されている)と大地の間に入れて測定した。検出器の静電容量は、目黒電波製のQメータを7Pハーメチック・シールの信号ピンと大地の間に入れて測定した。

ガンマ線検出特性測定用の電子回路は次のようなものを使用した。Ortec Model 119 高圧フィルタ、Ortec Model 120-4F 前置増幅器をクライオスタットに取り付け、それぞれを、Ortec Model 459 高圧電源、Ortec Model 452 スペクトロスコピ増幅器と接続した。スペクトロスコピ増幅器の整形時間は $2.0 \mu \text{ sec}$ 、BLRは High に入れ、unipolar 出力を4096チャンネル波高分析装置 (Nuclear Data 社 ND-50/50) に接続した。

3.5 ガンマ線スペクトル解析方法

ガンマ線のパルス波高分布中のピーク面積およびエネルギー分解能 (FWHM) は、ND-

* NRD社の instruction manual には、廻転ポンプで 0.1 torr 以下に排気すると、油の backstreaming があって、検出器表面に油膜をつける可能性があるので、 0.1 torr になれば直ちに油のない真空排気系 (例えばコールド・トラップ) に切り換える必要があるという記述がある。

50/50のPDP8/L計算機を用いて計算した。先づ、ピークにガウス曲線をフィッティングし、FWHMチャンネル数およびピークのチャンネル番号を求める。次に、そのFWHMチャンネル数を用いてピークのチャンネル番号から両側にFWHMチャンネル数の2倍離れた場所の計数値をとり、それをバックグラウンド計数値と見なし、これらの値に一次式の最小自乗法フィッティングを行ないバックグラウンドを決定する。ピークの面積は、ピークのチャンネル番号から両側にFWHMのチャンネル数の1.5倍離れたチャンネル番号の間を積分し、この積分値からバックグラウンド一次式の同じ範囲における積分値を差し引くことにより求めた。

4 実験結果

4.1 最初の特性

第3.3節において記述したように12月2日から12月4日にかけて検出器を取り付けたクライオスタットの真空排気を行ない12月4日に液体窒素をクライオスタットに充填した。

11月5日に検出器の漏洩電流，静電容量を測定した。その結果は，Table 4.1およびTable 4.2のInitialの欄に示した通りである。これを図示するとFig. 4.1が得られる。バイアス電圧600Vにおける漏洩電流は9.2 pAで，NRDのdata sheet (Table 3.1) に示す1.0 nAよりは充分小さい。検出器の静電容量は約150V以上で一定の値9.0 pF (配線の浮遊静電容量を含む)を示した。バイアス電圧150V附近で検出器の空乏層は p^+ 層側に到達することを意味している。配線の浮遊容量を実測すると6 pFであったので，検出器自体の静電容量は3 pFとなる。この値はNRDのdata sheet (Table 3.1) の6 pFに比べて小さい。5 mm厚のプレーナ型Ge検出器の静電容量は計算によれば 2.8 pF/cm^2 であるので

$$3.0 \text{ pF} / 2.8 \text{ pF/cm}^2 = 10.7 \text{ cm}^2$$

となり，静電容量3.0 pFの厚さ5 mmのプレーナ型検出器は断面積 107 mm^2 (直径11.7 mmに相当)を持つはづである。窓の面積 50 mm^2 に比べて2倍以上大きい。ガンマ線ビームでスキャンして実際に 117 mm^2 のGe検出器が収納されているかどうかを調べることができるが，未だ測定していない。

また，バイアス電圧150V附近で5 mm厚の空乏層を作ることから，Ge単結晶の不純物濃度が計算できる。すなわち， $|N_A - N_D| / \text{cm}^3 = 9 \times 10^9 / \text{cm}^3$ となる。不純物濃度 $9 \times 10^9 / \text{cm}^3$ のp型単結晶を使用したものと思われる。

この検出器に電子回路を接続してガンマ線スペクトルを測定した。そのパルス波高分布の例として， ^{133}Ba 標準線源 ($11.29 \mu\text{Ci}$ (1974年10月1日))のガンマ線の測定結果をFig. 4.2に示す。356 keVガンマ線が半値幅エネルギー分解能1.30 keVで測定されている。パルサの半値幅は1.00 keVであった。ピークの面積を計算してガンマ線ピークの絶対検出効率を計算すると 1.60×10^{-6} となる。

同様に，検出器，線源間距離25 cmにおいて， ^{133}Ba ， ^{137}Cs ， ^{60}Co の標準線源に対するガンマ線検出特性をFig. 4.3に示す。バイアス電圧は600V，200V，100Vの測定値を示した。バイアス電圧600Vにおける ^{60}Co の1333 keVガンマ線ピークの半値幅エネルギー分解能および絶対検出効率は，それぞれ，1.93 keVおよび 1.71×10^{-7} となった。この絶対検出効率は， $3'' \times 3'' \text{ NaI (Tl)}$ 検出器の絶対検出効率 1.2×10^{-8} に比べて，0.014%となった。バイアス電圧100Vのとき，特に100 keV以下のガンマ線の検出効率が急激に減少しているが，これは，空乏層が p^+ 層まで伸びておらず (depletion voltage $\approx 150 \text{ V}$)，したがって，検出器の前面にガンマ線の不感層があることによると考えられる。60 keV附近のガンマ線のピーク検出効率を比べると，バイアス電圧200V，600Vのときの 9.4×10^{-5} に対して，バイアス電圧100Vのときの 4×10^{-5} は $\frac{1}{2.35}$ となっている。60 keVガンマ線のGe中における減衰から，Geの不感層の厚さを計算すると0.81 mmとなる。また，不純物濃度 $9 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ およ

びバイアス電圧 100V から空乏層厚を計算すると 4mm となり、不感層厚は (5-4)mm から 1mm となり減衰から出した 0.8mm と大体合う。エネルギー分解能が 31keV のガンマ線に対して、バイアス 100V の測定値が急激に劣化しているが、これは、31keV ガンマ線が検出器の空乏層の前の不感層にほとんど吸収され、電界の弱い場所で電離が行なわれているために、電荷収集特性が悪くなり、分解能の劣化をもたらすものと考えられる。

検出器が小型で、検出効率が小さいので、検出器・線源間距離を短かくして 10cm として、ガンマ線検出特性を測定すると、Fig. 4.4 および Table 4.4, Table 4.5 に示した結果が得られた。Fig. 4.4 においてもバイアス電圧を 150V 以下に下げると、特に低エネルギーガンマ線のエネルギー分解能およびピーク検出効率が低下している。バイアス電圧 150V の 60keV ガンマ線に対する検出効率を 600V の値と比べることにより不感層の厚さ 0.25mm が計算できるので、バイアス電圧 150V においても検出器は完全に deplete しておらず、depletion voltage は 150V より若干大きいものと思われる。

4.2 温度サイクル試験

Table 4.1 に示したように、最初の特性の測定は 1974 年 12 月 4 日 11:00 から 12 月 12 日 17:00 の間の液体窒素冷却期間において行なわれた。この間 77K にあった時間は 208 時間である。12 月 12 日 17:00 に液体窒素を取り出してクライオスタットを空にした。検出器の温度は 1 時間後には室温に戻った。12 月 13 日 9:30 まで室温で放置し、9:30 に液体窒素を充満した。この間、室温にあった時間は 16.5 時間である。1 時間後には検出器の温度が液体窒素温度に冷却される。12 月 13 日から 12 月 14 日 16:30 の間に検出器の諸特性を測定した。その結果を、Table 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 の温度サイクル 1 の欄に示した。同様に、7 回までの温度サイクル試験を行なった。バイアス 600V における漏洩電流、静電容量、356keV ガンマ線ピークの検出効率、エネルギー分解能を、検出器が室温にあった時間に対してプロットすると Fig. 4.5 が得られた。静電容量、検出効率、分解能のいずれも変化していない。漏洩電流は 8pA から 14pA の間に変化しているが、きわめて小さい電流値なので、ガンマ線検出特性に変化を与えるほどのものではない。

5 ま と め

NRD社のPHYGE検出器model 05005B Serial no.100P5P3 1個の漏洩電流，静電容量，ガンマ線の検出効率，エネルギー分解能を測定し，その室温⇄液体窒素温度間の温度サイクルの影響を調べた。検出器の窓面積および厚さは，仕様によれば， 50mm^2 および 5mm であり，バイアス電圧 600V における漏洩電流は 1nA 以下，静電容量は 6pF である。

測定結果は，バイアス電圧 600V において漏洩電流は 9.2pA ，静電容量は 9.0pF （配線の浮遊容量 6pF を引き去ると， 3pF となり，仕様値の半分となった）， 1333keV ガンマ線に対するピーク検出効率は線源，検出器間距離 25cm において 1.7×10^{-7} （ $3'' \times 3''$ NaI(Tl)と比べて 0.014% ），半値幅エネルギー分解能は 1.93keV であった。検出器のdepletion voltageは 150V 附近であることから，Ge単結晶の不純物濃度は $9 \times 10^9\text{cm}^{-3}$ であることが判った。

検出器の最初の特性を測定した後，検出器はクライオスタットに入れたままで，クライオスタットの液体窒素を放出して検出器の温度を室温に上げ放置した。次に液体窒素をクライオスタットに入れて検出器を冷却し，検出器の諸特性を調べた。このような温度サイクルを7回行なった。（検出器が室温にあった時間の合計は 340 時間）が，有意な特性の変化は認められなかった。NRD社のPHYGE検出器はクライオスタットの真空中で行なう液体窒素温度⇄室温の温度サイクルに対しては安定な特性を示すと結論できる。

謝 辞

NRD社のPHYGE検出器の試験を行なう機会を与えて頂いた仁木工芸株式会社，仁木三夫氏に感謝します。

References

- 1) E.Sakai and I.L.Fowler: IEEE Trans. NS-15(3) (1968)327
- 2) E.Sakai: OYO BUTSURI (A monthly publication of the Japan Society of Applied Physics) 42(1973)97 (in Japanese)
- 3) Y.Ishizuka: ibid. 44(1975) (in Japanese)
- 4) Nuclear Radiation Developments: "Instruction Manual for PHYGE charged-particle detectors"
- 5) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, and H.Itoh: 1974 Fall Meeting of Atomic Energy Society of Japan, C-17 (17 October 1974)

5 ま と め

NRD社のPHYGE検出器model 05005B Serial no.100P5P3 1個の漏洩電流, 静電容量, ガンマ線の検出効率, エネルギー分解能を測定し, その室温⇄液体窒素温度間の温度サイクルの影響を調べた。検出器の窓面積および厚さは, 仕様によれば, 50mm^2 および 5mm であり, バイアス電圧 600V における漏洩電流は 1nA 以下, 静電容量は 6pF である。

測定結果は, バイアス電圧 600V において漏洩電流は 9.2pA , 静電容量は 9.0pF (配線の浮遊容量 6pF を引き去ると, 3pF となり, 仕様値の半分となった), 1333keV ガンマ線に対するピーク検出効率は線源, 検出器間距離 25cm において 1.7×10^{-7} ($3'' \times 3''$ NaI(Tl) と比べて 0.014%), 半値幅エネルギー分解能は 1.93keV であった。検出器の depletion voltage は 150V 付近であることから, Ge単結晶の不純物濃度は $9 \times 10^9\text{cm}^{-3}$ であることが判った。

検出器の最初の特性を測定した後, 検出器はクライオスタットに入れたままで, クライオスタットの液体窒素を放出して検出器の温度を室温に上げ放置した。次に液体窒素をクライオスタットに入れて検出器を冷却し, 検出器の諸特性を調べた。このような温度サイクルを7回行なった。(検出器が室温にあった時間の合計は 340 時間) が, 有意な特性の変化は認められなかった。NRD社のPHYGE検出器はクライオスタットの真空中で行なう液体窒素温度⇄室温の温度サイクルに対しては安定な特性を示すと結論できる。

謝 辞

NRD社のPHYGE検出器の試験を行なう機会を与えて頂いた仁木工芸株式会社, 仁木三夫氏に感謝します。

References

- 1) E.Sakai and I.L.Fowler: IEEE Trans. NS-15(3) (1968) 327
- 2) E.Sakai: OYO BUTSURI (A monthly publication of the Japan Society of Applied Physics) 42(1973) 97 (in Japanese)
- 3) Y.Ishizuka: ibid. 44(1975) (in Japanese)
- 4) Nuclear Radiation Developments: "Instruction Manual for PHYGE charged-particle detectors"
- 5) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, and H.Itoh: 1974 Fall Meeting of Atomic Energy Society of Japan, C-17 (17 October 1974)

5 ま と め

NRD社のPHYGE検出器model 05005B Serial no.100P5P3 1個の漏洩電流, 静電容量, ガンマ線の検出効率, エネルギー分解能を測定し, その室温⇄液体窒素温度間の温度サイクルの影響を調べた。検出器の窓面積および厚さは, 仕様によれば, 50mm^2 および 5mm であり, バイアス電圧 600V における漏洩電流は 1nA 以下, 静電容量は 6pF である。

測定結果は, バイアス電圧 600V において漏洩電流は 9.2pA , 静電容量は 9.0pF (配線の浮遊容量 6pF を引き去ると, 3pF となり, 仕様値の半分となった), 1333keV ガンマ線に対するピーク検出効率は線源, 検出器間距離 25cm において 1.7×10^{-7} ($3'' \times 3''$ NaI(Tl) と比べて 0.014%), 半値幅エネルギー分解能は 1.93keV であった。検出器の depletion voltage は 150V 付近であることから, Ge単結晶の不純物濃度は $9 \times 10^9\text{cm}^{-3}$ であることが判った。

検出器の最初の特性を測定した後, 検出器はクライオスタットに入れたままで, クライオスタットの液体窒素を放出して検出器の温度を室温に上げ放置した。次に液体窒素をクライオスタットに入れて検出器を冷却し, 検出器の諸特性を調べた。このような温度サイクルを7回行なった。(検出器が室温にあった時間の合計は 340 時間) が, 有意な特性の変化は認められなかった。NRD社のPHYGE検出器はクライオスタットの真空中で行なう液体窒素温度⇄室温の温度サイクルに対しては安定な特性を示すと結論できる。

謝 辞

NRD社のPHYGE検出器の試験を行なう機会を与えて頂いた仁木工芸株式会社, 仁木三夫氏に感謝します。

References

- 1) E.Sakai and I.L.Fowler: IEEE Trans. NS-15(3) (1968) 327
- 2) E.Sakai: OYO BUTSURI (A monthly publication of the Japan Society of Applied Physics) 42(1973) 97 (in Japanese)
- 3) Y.Ishizuka: ibid. 44(1975) (in Japanese)
- 4) Nuclear Radiation Developments: "Instruction Manual for PHYGE charged-particle detectors"
- 5) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, and H.Itoh: 1974 Fall Meeting of Atomic Energy Society of Japan, C-17 (17 October 1974)

Table captions

- Table 2.1 Technical specifications of NRD PHYGE charged-particle detectors
- Table 3.1 Detector data sheet supplied by NRD
- Table 4.1 Time schedule of temperature cycling
- Table 4.2 Leakage current vs. bias voltage characteristics after successive temperature cycling
- Table 4.3 Detector capacitance vs. bias voltage characteristics after successive temperature cycling
- Table 4.4 Absolute peak detection efficiency vs. gamma-ray energy characteristics after successive temperature cycling
- Table 4.5 Energy resolution vs. gamma-ray energy characteristics after successive temperature cycling

Photo captions

- Photo 2.1 Sealed container of NRD PHYGE detector: the detector was protected by a hard plastic plate, wrapped in an aluminum foil, and sealed in a glass container under decompression.
- Photo 2.2 Opened sealed-container of NRD PHYGE detector; glass bottle, lid, detector protection plate, and aluminum foil for wrapping the detector are shown.
- Photo 3.1 Detector mounted on the cold finger
- Photo 3.2 Cryostat and the detector mounted on the cold finger: aluminum end-cap was disassembled.
- Photo 3.3 Cryostat with preamplifier and high voltage filter: electronics in a mini-bin are also shown.

Figure captions

- Fig.2.1 NRD PHYGE detector construction
- Fig.2.2 Case dimension of NRD PHYGE charged-particle detector
- Fig.2.3 Pulse height distribution of ^{241}Am alpha-particles measured by PHYGE detector
- Fig.2.4 Pulse height distribution of ^{137}Cs conversion electrons measured by PHYGE detector
- Fig.2.5 Pulse height distribution of protons elastically scattered from Au at 10MeV; This was measured by PHYGE detector.
- Fig.2.6 Pulse height distribution of ^{60}Co gamma-rays measured by PHYGE detector
- Fig.2.7 Pulse height distribution of ^{137}Cs gamma-rays measured by PHYGE detector
- Fig.2.8 Pulse height distribution of ^{57}Co gamma-rays measured by PHYGE detector
- Fig.2.9 Pulse height distribution of ^{241}Am gamma-rays measured by PHYGE detector
- Fig.3.1 Dimension of NRD PHYGE detector Model 05005B
- Fig.3.2 Mounting assembly for NRD PHYGE detector
- Fig.3.3 Liquid nitrogen consumption of cryostat with 33cm^3 Ge(Li)detector and preamplifier
- Fig.3.4 Vacuum system
- Fig.4.1 Initial characteristics of capacitance and leakage current vs. bias voltage of PHYGE detector Model 05005B
- Fig.4.2 Pulse height distribution of ^{133}Ba gamma-rays measured by NRD PHYGE detector Model 05005B

Fig.4.3 Initial detector performance measured at source-to-detector distance 25cm

Fig.4.4 Initial detector performance measured at source-to-detector distance 10cm

Fig.4.5 Detector performance at 600V bias voltage vs. duration of detector at room temperature

Table 2.1 Technical specifications of NRD PHYGE
charged-particle detectors

Model No.	Active area (mm ²)	Active depth (mm)	Resolution at 77K (KeV FWHM)		Case Dimension	Price FOB Tronto \$
			5.5MeV alpha	625keV electrons		
05005A	50	5	20	3	Fig.2.2(a)	1740
05005B	50	5	/	3.5	Fig.2.2(a)	1160
05010A	50	19	20	3	Fig.2.2(a)	2900
05010B	50	10	/	3.5	Fig.2.2(a)	1970
15005A	150	5	20	3	Fig.2.2(a)	2950
15005B	150	5	/	3.5	Fig.2.2(a)	1970
15010A	150	10	20	3	Fig.2.2(a)	4060
15010B	150	10	/	3.5	Fig.2.2(a)	2750
30005A	300	5	20	3	Fig.2.2(b)	3480
30005B	300	5	/	3.5	Fig.2.2(b)	2320
30010A	300	10	20	3	Fig.2.2(b)	4950
30010B	300	10	/	3.5	Fig.2.2(b)	3480

Table 3.1 Detector data sheet supplied by NRD

Nuclear Radiation Developments

Division of Electronic Associates of Canada, Ltd.

MEASURING CERTIFICATE PHYGE™ CHARGED PARTICLE DETECTORS

Model No. 05005B (50 mm² x 5 mm)

Serial No. 100 P5 p[#]3

Type PHYGE - PARTICLE

Recommended bias voltage at 77°K

.....V
600

Reverse Current

.....nA
< 1.0

Capacitance

6.0 pF.

Energy resolution with ²⁴¹Am alpha particles
(FWHM)

.....keV
2.2

Energy resolution with ¹³⁷Cs beta particles
(FWHM)

.....keV
3.5

Energy resolution with

Amplifier time constants

2 M Sec.

Polarity of bias

- positive on the pin

NOTE: All energy resolutions measured at recommended bias voltage at 77°K with Tennelec TC161A preamplifier or equivalent and Tennelec TC203BLR amplifier or equivalent. The noise of the electronic equipment is included in the figure given for the energy resolution.

Date of test:

Oct. 21/74

Tested by:

JAB.

Table 4.1 Time schedule of temperature cycling

No. of tempera- ture cycling	Cooling cycle		Duration (hr)	
	Start	Terminate	at 77K	at room temperature
Initial	11:00 Dec.4	17:00 Dec.12	208	
1	9:30 Dec.13	16:30 Dec.14	31	16.5
2	9.30 Dec.16	18:30 Dec.16	9	41.0
3	17:00 Dec.17	18:10 Dec.19	49	22.5
4	16:00 Dec.20	14:00 Dec.21	20	22.0
5	15:00 Dec.22	14:30 Dec.23	23.5	25.0
6	11:00 Dec.24	10:00 Dec.27	71.0	20.5
7	10:30 Jan. 4			192.5

Table 4.2 Leakage current vs. bias voltage characteristics after successive temperature cycles

Hyper-pure Ge detector : NRD PHYGE model 05005B (No.100P5P3) (50mm² × 5mm t)

Number of Temperature cycle	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Date of measurement	December 5, 1974	December 13, 1974	December 16, 1974	December 18, 1974	December 20, 1974	December 22, 1974	December 26, 1974	December 4, 1975
Bias voltage (V)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)	Leakage current ($\times 10^{-12}$ A)
1	0.4	0.35	0.35	0.35	0.40	0.35	0.15	0.15
2	0.45	0.40	0.40	0.40				
5	0.65	0.55	0.55	0.55	0.50	0.45	0.30	0.25
10	0.95	0.75	0.70	0.75	0.75	0.55	0.45	0.40
15	1.1	0.90	0.80					
20	1.3	1.0	0.90	0.95	1.00	0.80	0.70	0.55
30	1.8	1.25	1.1	1.15				
50	2.5	1.65	1.5	1.60	1.50	1.25	1.25	1.00
70	3.0	2.0	1.85	1.90	1.90			
100	3.9	2.55	2.5	2.60	2.45	1.85	2.05	1.60
150	4.9	2.45	2.95	3.15				
200	5.7	2.75	3.4	3.30	3.45	3.15	3.25	2.60
250	6.3	3.25	3.75	4.00				
300	7.3	3.8	4.3	4.50	4.45	4.55	3.65	3.60
350	7.5	4.6	4.9	4.95				
400	8.0	5.55	5.25	5.65	5.45	5.75	5.15	4.55
450	8.3	6.25	6.2	6.75				
500	8.7	7.3	7.15	8.55	9.20	9.55	9.55	6.50
550	8.7	8.35	8.15	9.95				
600	9.2	9.3	9.3	11.95	13.00	14.2	14.4	8.60

Table 4.3 Detector capacitance vs. bias voltage characteristics after successive temperature cycles

Hyperpure Ge detector : NRD PHYGE model 05005B (No.100P5P3) (50mm²×5mm t)

Number of Temperature cycle	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Date of measurement	December 5, 1974	December 13, 1974	December 16, 1974	December 18, 1974	December 20, 1974	December 22, 1974	December 26, 1974	December 4, 1974
Bias voltage (V)	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *	Capacitance (pF) *
1	1.2	1.3	1.2	1.2.3	1.1.5	1.0.8	1.1.8	1.1.1
2			1.1.8	1.2.1				
5			1.1.6	1.2.0	1.1.2	1.0.6	1.0.9	1.0.6
10	1.1.7	1.2.4	1.1.5	1.1.5	1.1.2	1.0.6	1.0.7	1.0.4
15								
20	1.1.6	1.1.7	1.1.2	1.1.1	1.0.8	1.0.4	1.0.3	1.0.1
30	1.1.1	1.1.5	1.1.0	1.0.9				
50	1.0.2	1.0.7	1.0.6	1.0.4	1.0.1	9.5	9.8	9.4
70	9.9	10.2	10.1.5	9.7	9.8			
100	9.3	9.7	9.6	9.2	9.4.5	8.7	9.1	8.6
150	9.0	9.2		8.8				
200	9.0	9.0	9.5	8.7	9.4.0	8.5	8.6	8.5
250	9.0	9.0		8.7				
300	9.0	9.0	9.4	8.7	9.3.0	8.5	8.5	8.5
350	9.0	9.0						
400	9.0	9.0	9.4	8.7	9.4.0	8.5	8.6	8.5
450	9.0							
500		9.0	9.5	8.7	9.4.0	8.5	8.6	8.4
550								
600	9.0	9.0	9.5	8.7	9.4.0	8.5	8.6	8.4

* This capacitance includes a stray capacitance

Table 4.4 Absolute peak detection efficiency vs. Gamma-ray energy characteristics after successive temperature cycles

Hyperpure Ge detector : NRD PHYGE model 05005B(No.100P5P3) (50mm²×5mm t)
 Source-to-detector distance 10 cm ¹³³Ba source 11.29 μCi

Number of temperature cycle	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Date of measurement	December 10, 1974	December 14, 1974	December 16, 1974	December 18, 1974	December 20, 1974	December 22, 1974	December 26, 1974	January 8, 1974
Gamma-ray energy (keV)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)	Absolute peak detection efficiency (×10 ⁻⁵)
	4.21	4.12	4.07	4.03	4.04	4.03	3.99	4.02
	4.72	---	4.96	4.70	4.56	4.80	4.17	---
	6.13	5.93	5.97	5.91	6.10	6.04	5.92	5.92
	4.41	4.41	4.41	4.26	4.48	4.44	4.41	4.41
	3.02	3.08	3.06	3.16	3.15	3.17	3.05	3.10
	2.38	2.42	2.45	2.40	2.46	2.37	2.39	2.40
	1.58	1.60	1.62	1.60	1.62	1.64	1.62	1.61
	1.36	1.36	1.37	1.36	1.40	1.33	1.35	1.35
Pulsar								
	4.13	4.14	4.01	4.03	4.07	4.02	4.02	4.03
	4.61	4.88	4.79	4.44	---	4.75	5.07	---
	6.11	6.04	6.16	5.81	6.03	6.02	5.80	6.00
	4.40	4.42	4.37	4.33	4.45	4.43	4.37	4.42
	3.09	3.04	3.09	2.95	3.13	3.00	3.12	2.95
	2.38	2.34	2.37	2.40	2.40	2.34	2.41	2.38
	1.57	1.61	1.60	1.59	1.59	1.61	1.58	1.57
	1.33	1.35	1.35	1.35	1.37	1.44	1.33	1.34
Pulsar								

200V	310	357	371	362	359	368	360	365	359
	352	412	432	437	—	—	385	432	—
	532	593	613	581	564	593	561	580	564
	809	447	455	442	437	450	448	444	446
	2763	321	322	330	306	339	334	308	311
	3022	252	255	252	253	260	255	249	253
	3559	166	171	168	167	167	172	166	167
	3838	140	147	147	147	140	143	141	145
	Pulser								
150V	310	987	118	156	135	135	985	—	139
	352	185	201	243	211	242	164	—	—
	532	409	405	453	441	464	411	333	440
	809	382	397	402	394	406	391	360	402
	2763	279	314	313	299	320	290	278	303
	3022	225	242	244	235	240	239	227	233
	3559	152	155	160	155	155	162	157	157
	3838	129	133	138	134	134	141	131	132
	Pulser								
100V	310	0635	0459	0461	0436	0626	0904	0581	094
	352	230	150	198	248	218	100	102	211
	532	206	196	190	191	206	206	220	199
	809	291	291	286	290	294	294	303	293
	2763	237	244	238	239	246	250	253	247
	3022	193	194	191	190	195	194	197	194
	3559	126	127	125	126	129	129	131	128
	3838	109	117	105	113	109	110	111	111
	Pulser								

75 V									
3 1.0	0.083								
3 5.2									
5 3.2	1.12	1.28	1.38	1.33	1.29	1.25	1.26	1.32	
8 0.9	2.30	2.44	2.45	2.44	2.46	2.42	2.42	2.36	
27 6.3	2.09	2.22	2.26	2.29	2.18	2.13	2.10	2.09	
3 0 2.2	1.58	1.68	1.69	1.63	1.67	1.69	1.71	1.64	
3 5 5.9	1.06	1.10	1.14	1.10	1.10	1.11	1.11	1.11	
3 8 3.8	0.911	0.924	0.897	0.969	0.981	0.897	0.725	0.903	
pulser									

Table 4.5 Energy resolution vs. Gamma-ray energy characteristics after successive temperature cycles

Hyper-pure Ge detector : NRD PHYGE model 05005B (No. 100P5P3) (50 mm² × 5 mm t)
 Source-to-detector distance 10 cm ¹³³Ba source 11.29 μCi

Number of temperature cycle	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Date of measurement	December 10, 1974	December 14, 1974	December 16, 1974	December 18, 1974	December 20, 1974	December 22, 1974	December 26, 1974	January 6, 1974
Gamma-ray energy (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)	Energy resolution (keV)
	31.0	1.062	1.058	1.056	1.037	1.035		1.063
	35.2	1.298	1.306	1.349	1.392	1.361		
	53.2	1.090	1.014	1.095	1.007	1.119	1.056	1.092
	80.9	1.293	1.284	1.204	1.405	1.364	1.347	1.424
	276.3	1.100	1.266	1.132	1.255	1.247	1.165	1.284
	302.2	1.249	1.207	1.279	1.265	1.236	1.302	1.257
	355.9	1.289	1.281	1.290	1.269	1.292	1.293	1.334
	383.8	1.318	1.275	1.295	1.320	1.331	1.331	1.332
Pulser		0.999		1.022	0.998	1.002	1.029	1.016
	31.0	1.038	1.014	1.060	1.042	1.024	1.073	1.075
	35.2	1.294	1.337	1.293	0.947	1.329	1.457	
	53.2	1.083	1.147	1.034	1.085	1.069	1.063	1.066
	80.9	1.337	1.278	1.355	1.378	1.369	1.355	1.479
	276.3	1.272	1.241	1.203	1.276	1.223	1.227	1.215
	302.2	1.274	1.210	1.258	1.230	1.264	1.285	1.290
	355.9	1.289	1.282	1.291	1.287	1.305	1.319	1.281
	383.8	1.344	1.249	1.266	1.281	1.371	1.284	1.391
Pulser		0.997		1.011	0.994	0.994	1.005	1.021

200V	310	1.091	1.073	1.066	1.098	1.046	1.077	1.079	1.074
	35.2	1.177	1.260	1.353	1.201	0.866	1.238	1.331	---
	53.2	1.054	1.118	1.043	1.030	1.019	1.037	1.078	1.056
	80.9	1.323	1.324	1.323	1.279	1.501	1.382	1.357	1.473
	276.3	1.283	1.309	1.283	1.235	1.274	1.183	1.255	1.289
	302.2	1.349	1.323	1.261	1.302	1.232	1.242	1.315	1.300
	355.9	1.347	1.356	1.351	1.339	1.321	1.342	1.318	1.334
	383.8	1.328	1.400	1.372	1.412	1.311	1.415	1.412	1.344
	Pulser	---	1.007	---	1.019	0.990	1.005	1.004	1.026
	310	1.274	1.263	1.226	1.216	1.186	1.177	1.147	1.235
150V	35.2	1.311	1.345	1.296	1.361	1.348	1.258	1.363	---
	53.2	1.111	1.189	1.130	1.122	1.114	1.078	1.207	1.110
	80.9	1.345	1.407	1.343	1.379	1.482	1.406	1.404	1.483
	276.3	1.297	1.397	1.200	1.288	1.332	1.221	1.296	1.375
	302.2	1.356	1.330	1.253	1.277	1.355	1.382	1.364	1.339
	355.9	1.387	1.375	1.369	1.390	1.362	1.363	1.354	1.385
	383.8	1.388	1.454	1.313	1.374	1.438	1.437	1.524	1.400
	Pulser	---	1.027	---	1.038	1.008	1.029	1.030	1.048
	310	1.317	1.587	1.312	1.261	1.558	---	1.377	1.562
	35.2	1.451	1.170	1.336	1.473	1.374	1.421	0.946	1.334
100V	53.2	1.143	1.194	1.354	1.021	1.105	1.158	1.147	1.163
	80.9	1.336	1.489	1.388	1.435	1.457	1.450	1.455	1.451
	276.3	1.371	1.364	1.271	1.322	1.322	1.351	1.360	1.402
	302.2	1.368	1.314	1.366	1.307	1.357	1.364	1.354	1.342
	355.9	1.422	1.430	1.392	1.417	1.376	1.414	1.418	1.432
	383.8	1.441	1.560	1.349	1.454	1.416	1.417	1.448	1.402
	Pulser	---	1.078	---	1.089	1.036	1.067	1.072	1.113

31.0	1.793									
35.2										
53.2	1.421	1.149	0.977	1.223	0.975	1.282	1.170	1.512		
80.9	1.435	1.471	1.459	1.492	1.482	1.491	1.509	1.547		
276.3	1.455	1.309	1.264	1.484	1.382	1.498	1.331	1.414		
302.2	1.420	1.378	1.423	1.449	1.317	1.373	1.445	1.472		
355.9	1.435	1.418	1.449	1.435	1.436	1.451	1.402	1.559		
383.8	1.424	1.498	1.533	1.484	1.368	1.421	1.385	1.562		
Pulser		1.109		1.118	1.094	1.138	1.137	1.169		

75V



Photo 2.1 Sealed container of NRD PHYGE detector: the detector was protected by a hard plastic plate, wrapped in an aluminum foil, and sealed in a glass bottle under decompression.



Photo 2.2 Opened sealed-container of NRD PHYGE detector: glass bottle, lid, detector protection plate, and aluminum foil for wrapping the detector are shown.

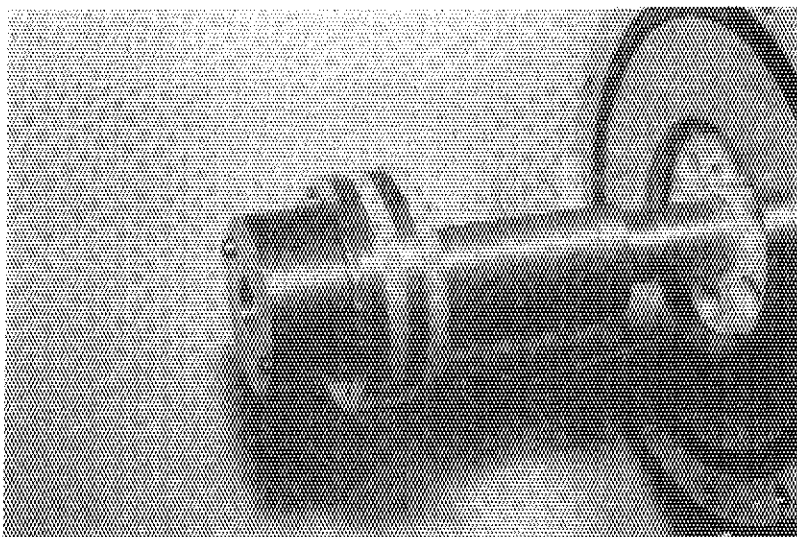


Photo 3.1 Detector mounted on the cold finger

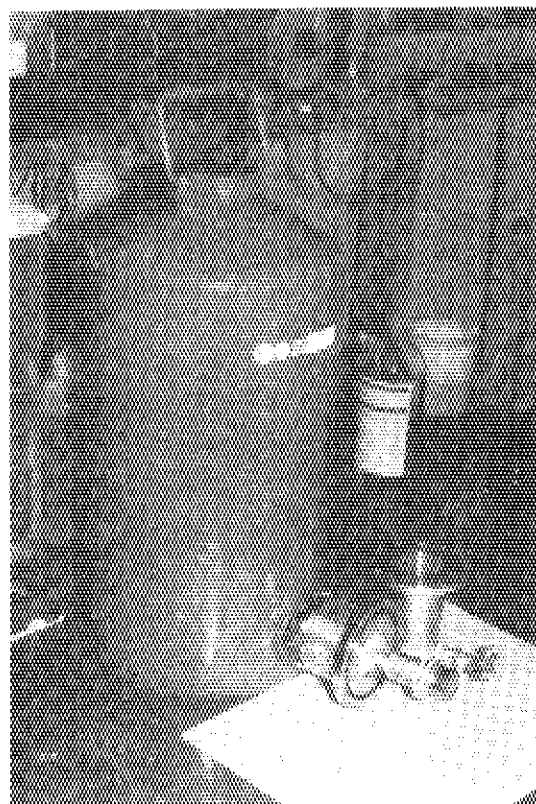


Photo 3.2 Cryostat and the detector mounted on the cold finger: aluminum end-cap was disassembled.

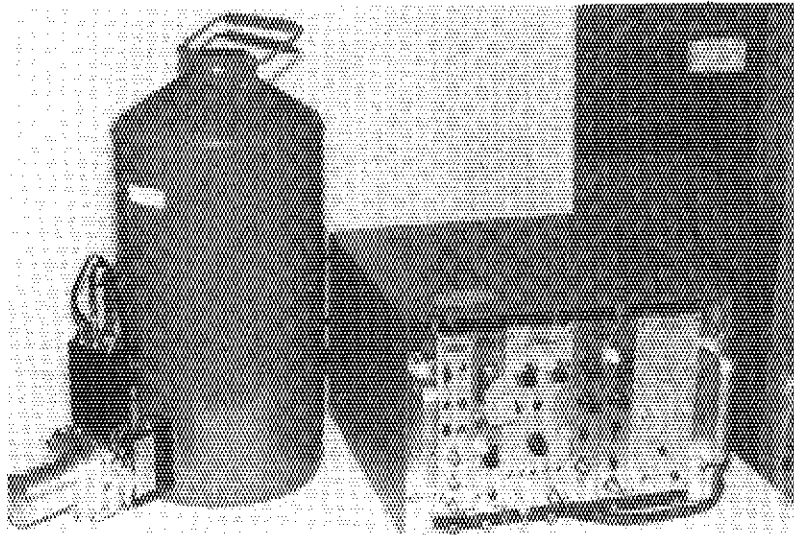


Photo 3.3 Cryostat with preamplifier and high voltage filter: electronics in a mini-bin are also shown.

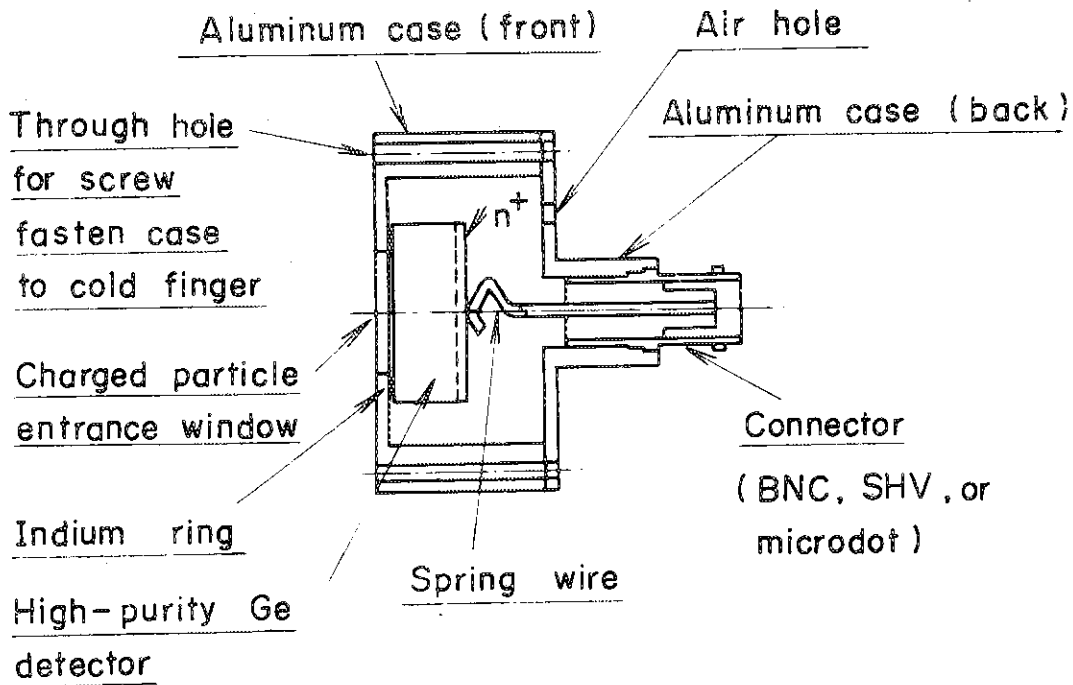


Fig. 2.1 NRD PHYGE detector construction

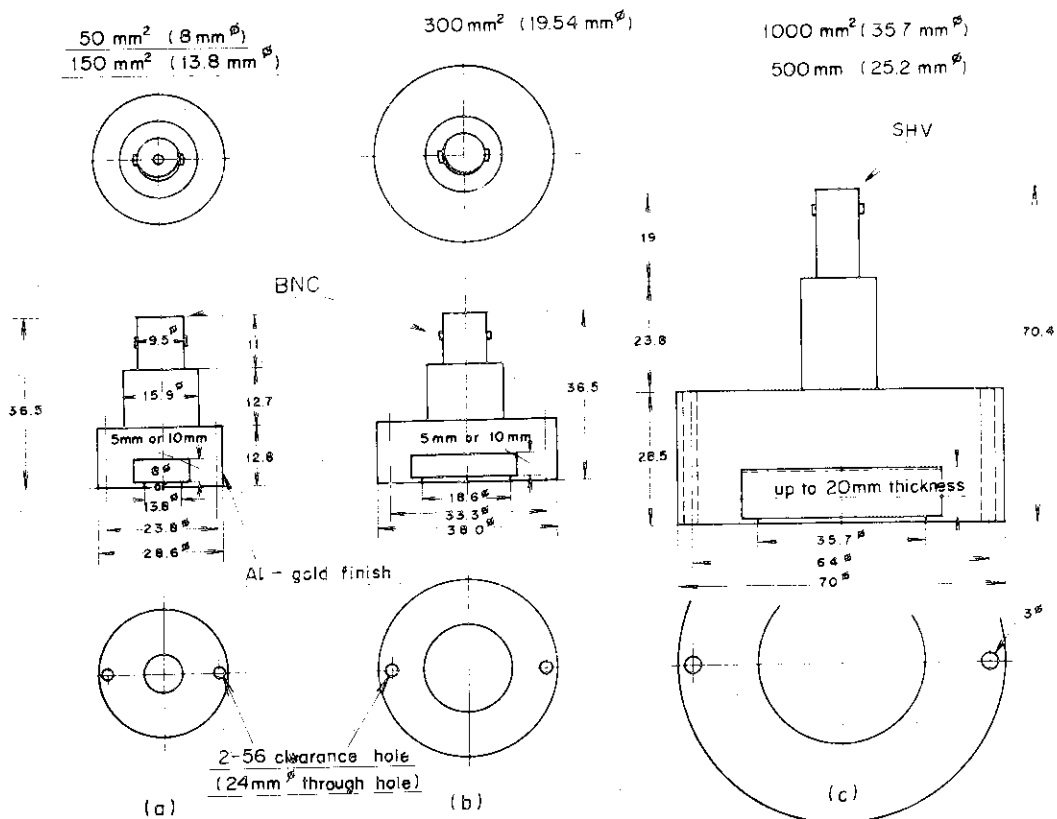


Fig. 2.2 Case dimensions of NRD PHYGE charged particle detectors

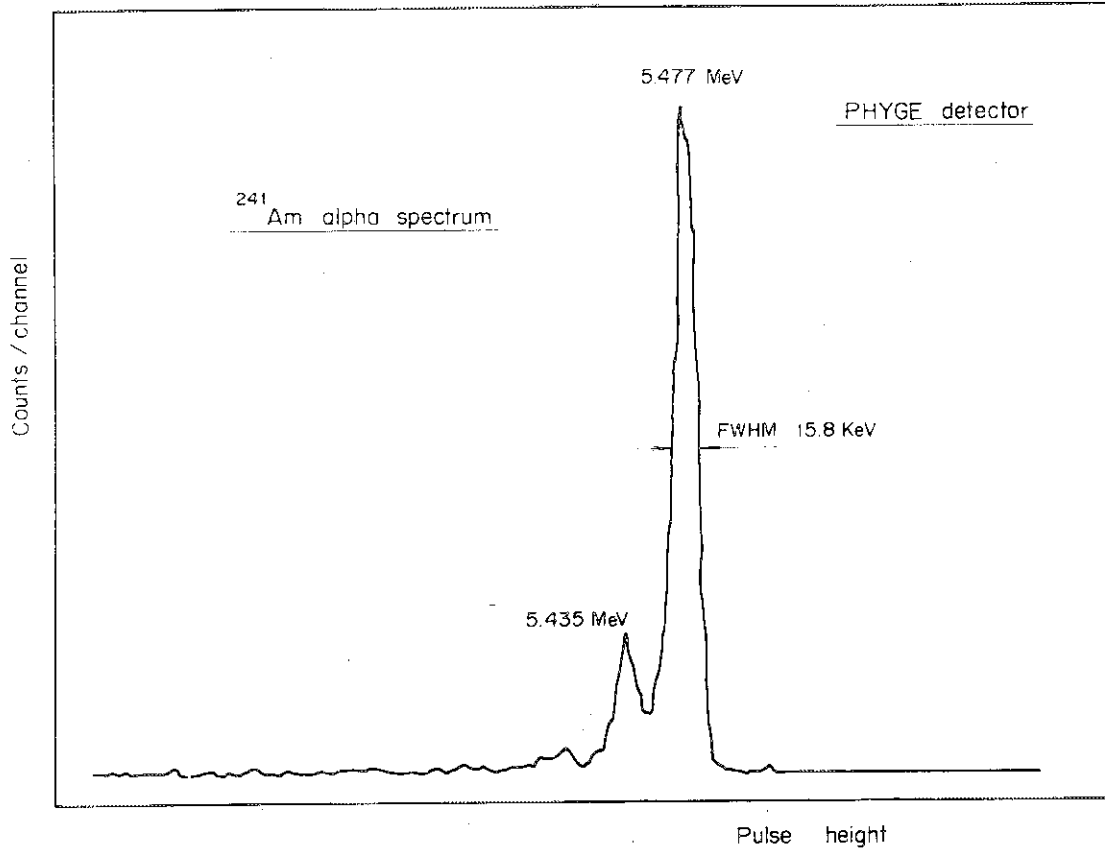


Fig. 2.3 Pulse height distribution of ²⁴¹Am alpha-particles measured by PHYGE detector

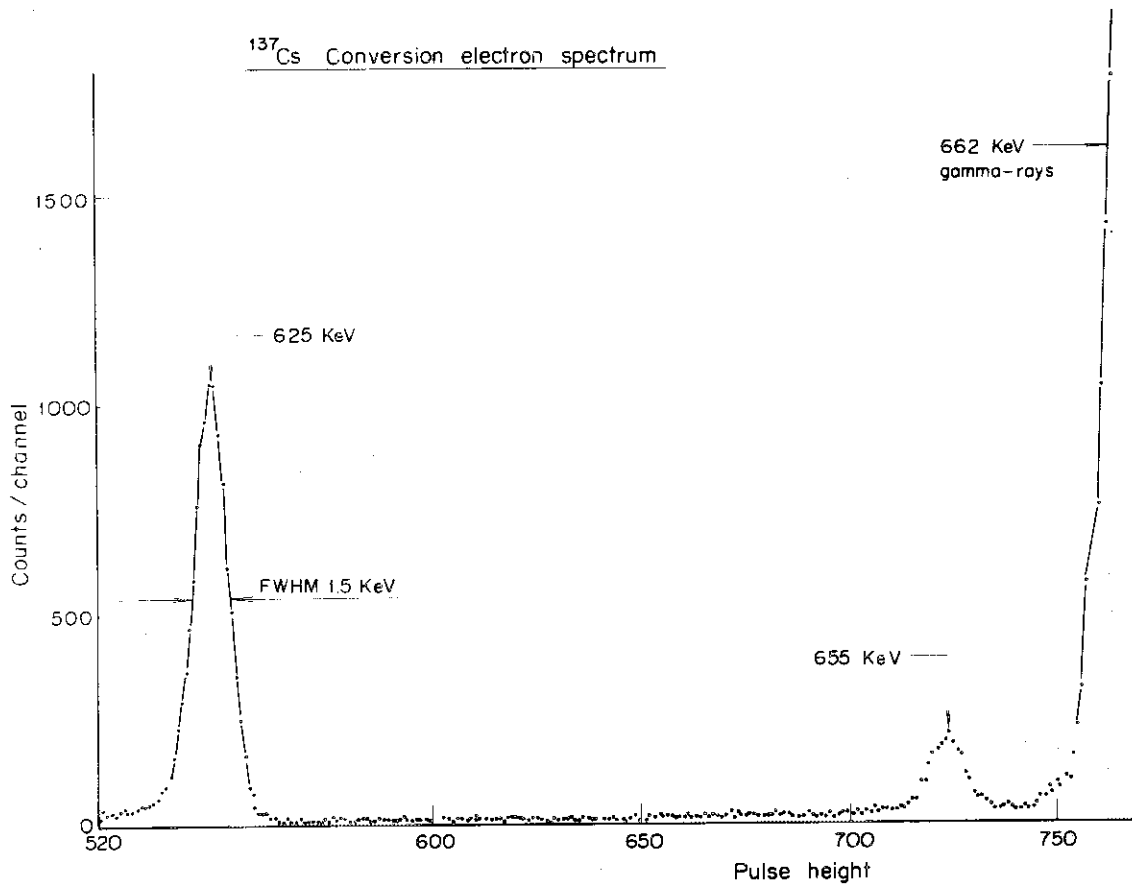


Fig. 2.4 Pulse height distribution of ¹³⁷Cs conversion electrons measured by PHYGE detector

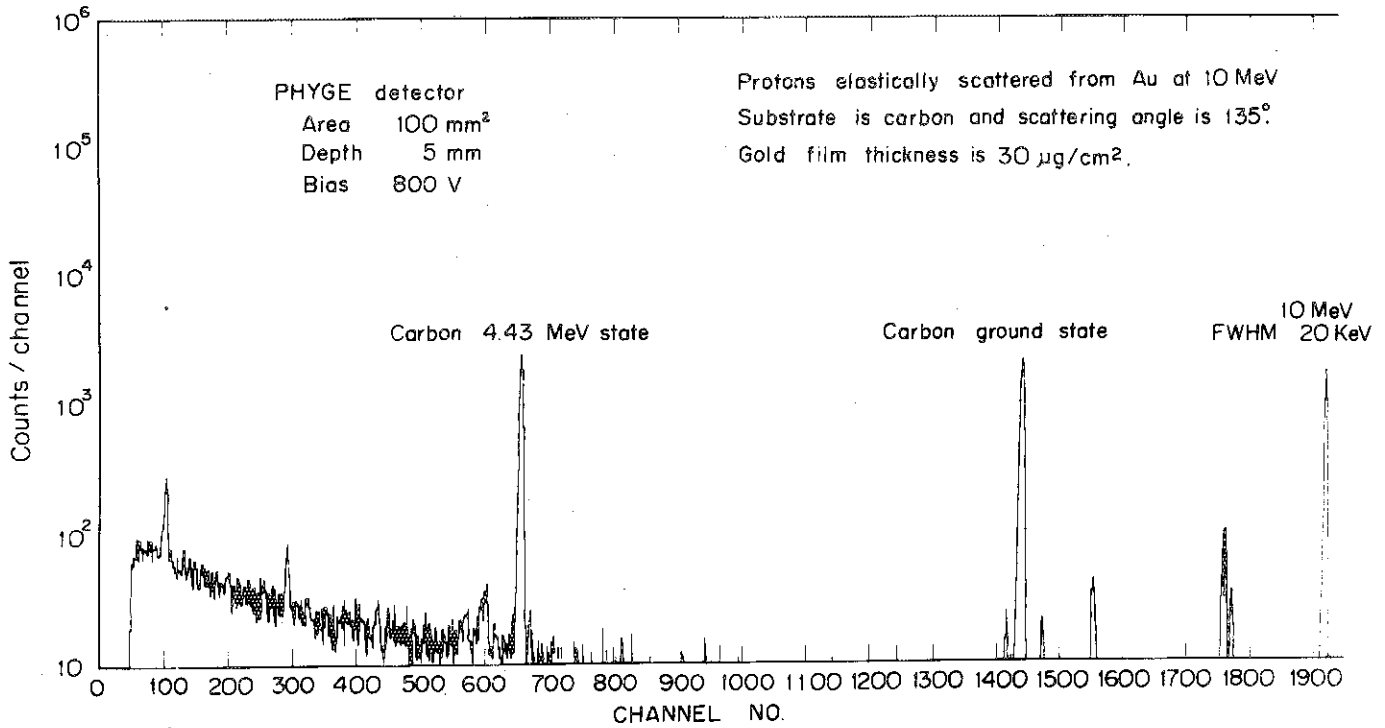


Fig. 2.5 Pulse height distribution of protons elastically scattered from Au at 10 MeV.

This was measured by PHYGE detector

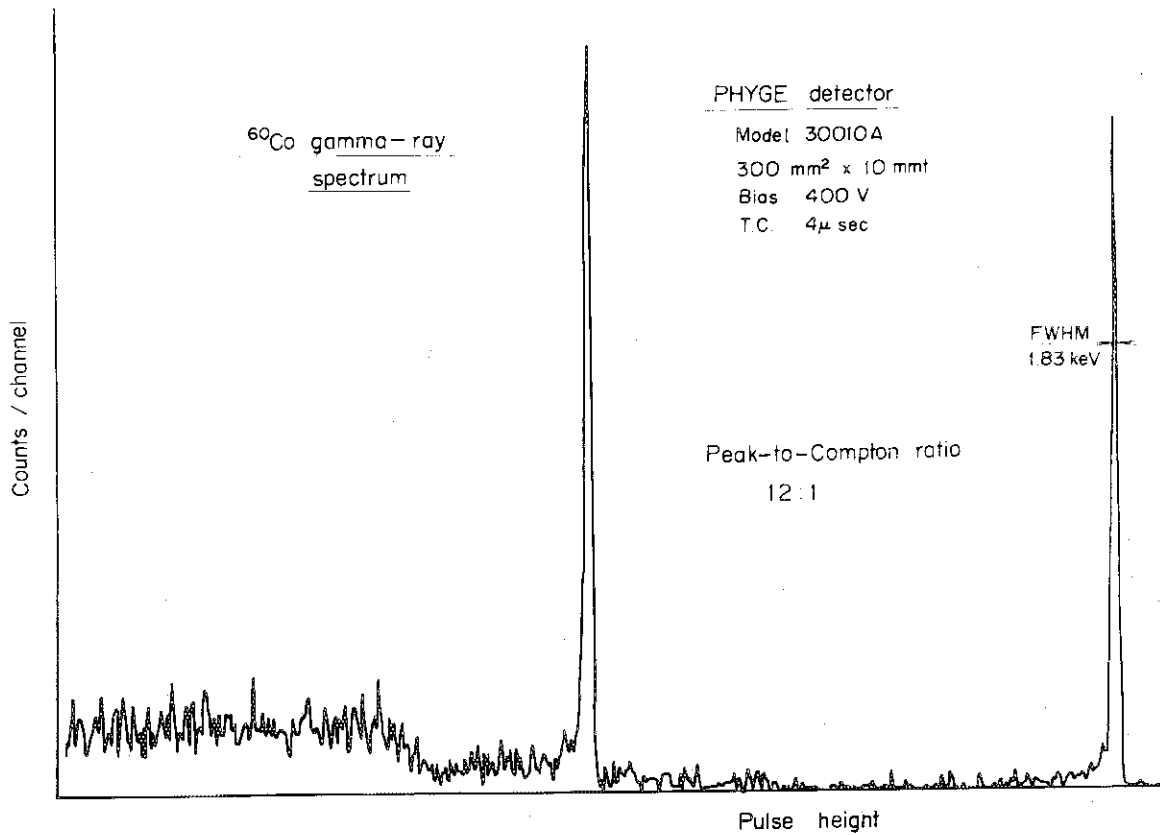


Fig. 2.6 Pulse height distribution of ⁶⁰Co gamma-rays measured by PHYGE detector

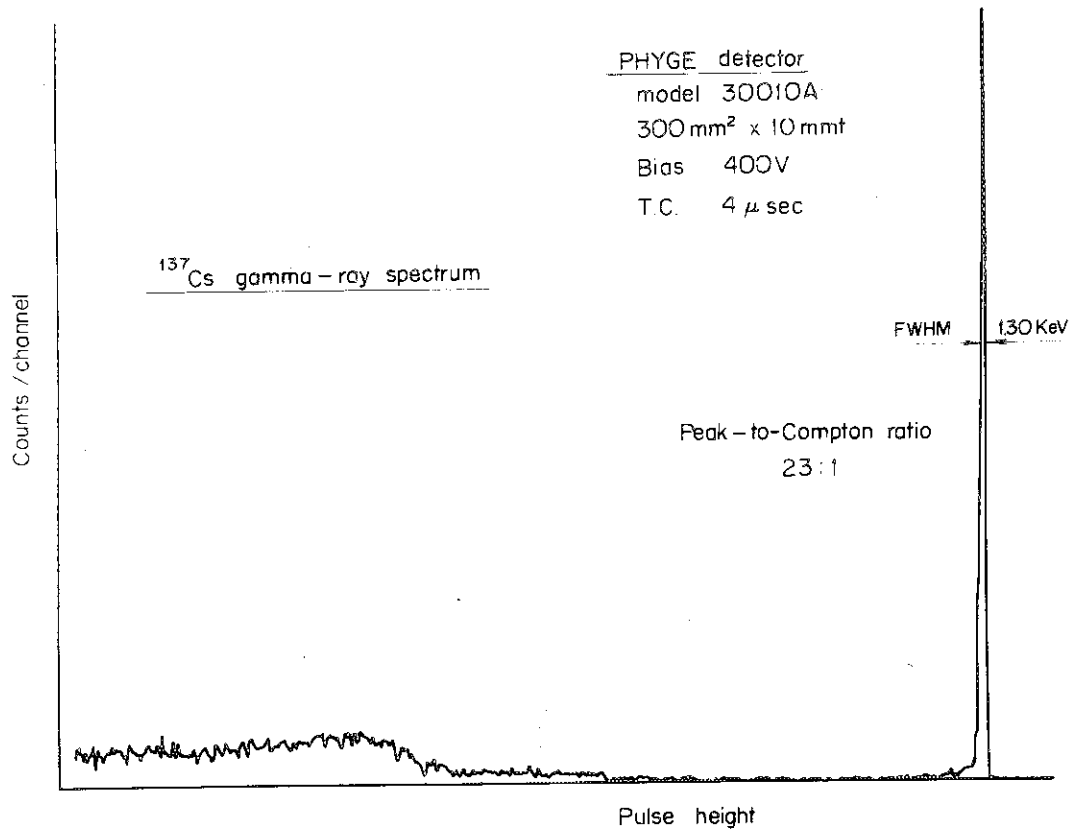


Fig. 2.7 Pulse height distribution of ¹³⁷Cs gamma-rays measured by PHYGE detector

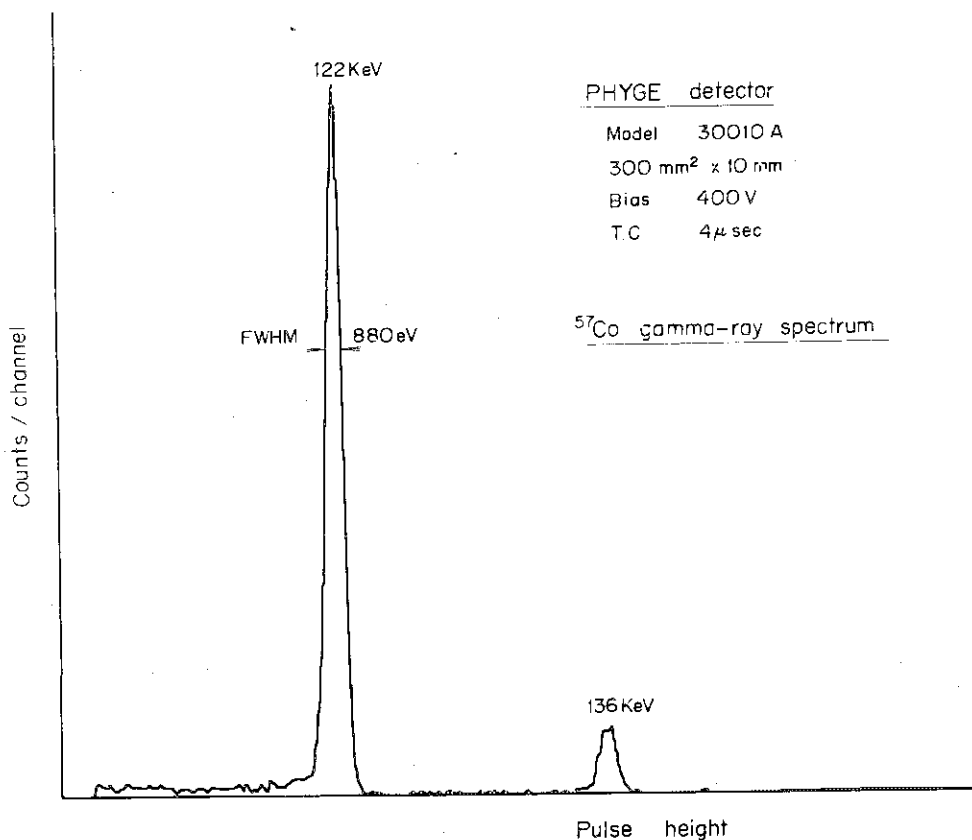


Fig. 2.8 Pulse height distribution of ⁵⁷Co gamma-rays measured by PHYGE detector

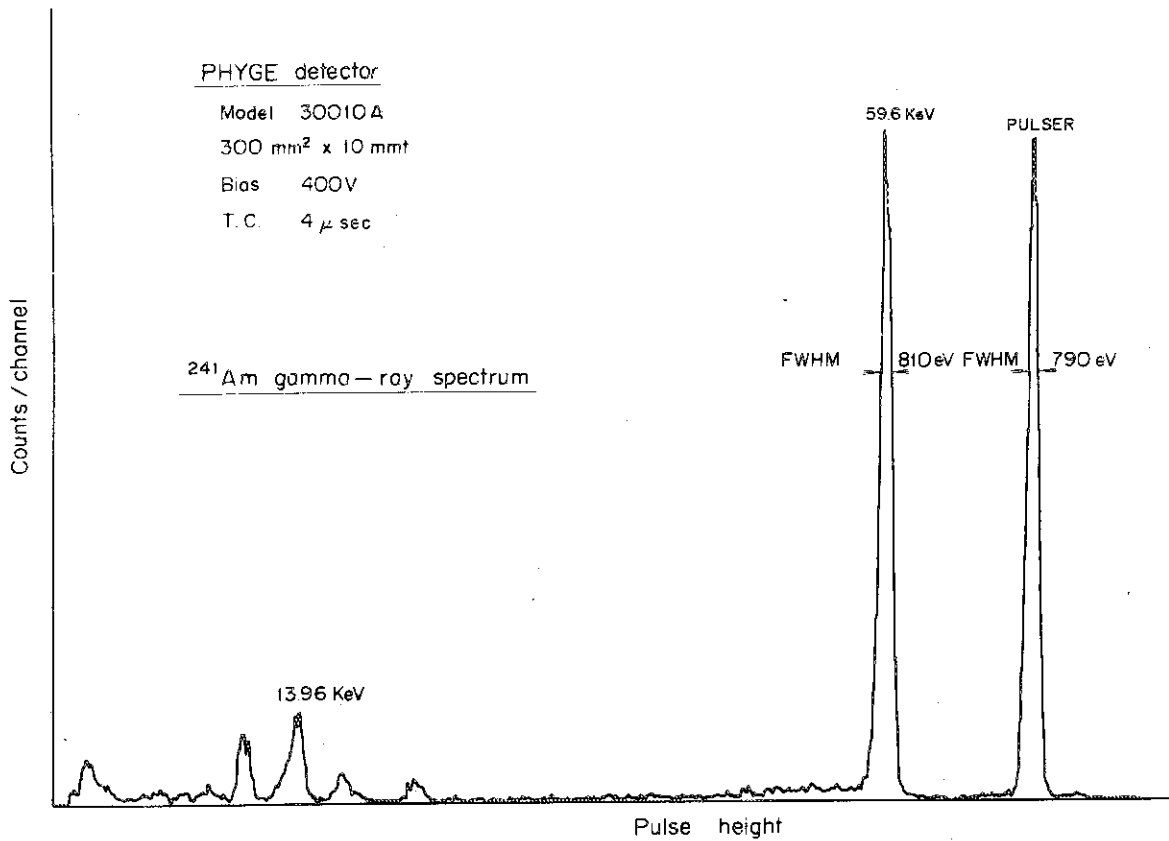


Fig. 2.9 Pulse height distribution of ²⁴¹Am gamma-rays measured by PHYGE detector

NRD PHYGE DETECTOR

Model no. 05005B (50 mm² x 5 mmt)
 Serial no. 100P5P3

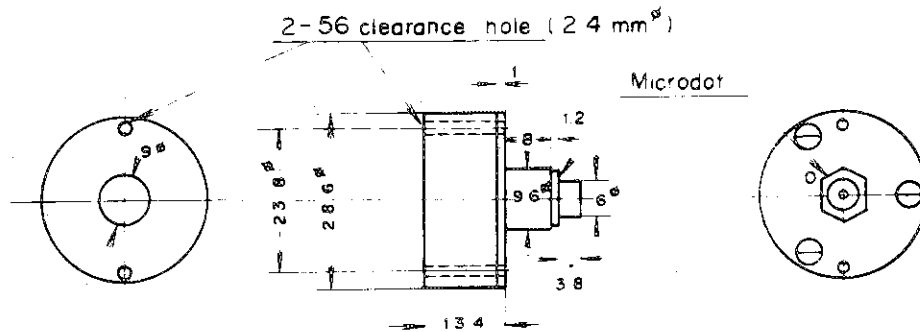


Fig. 3.1 Dimension of NRD PHYGE detector model 05005B

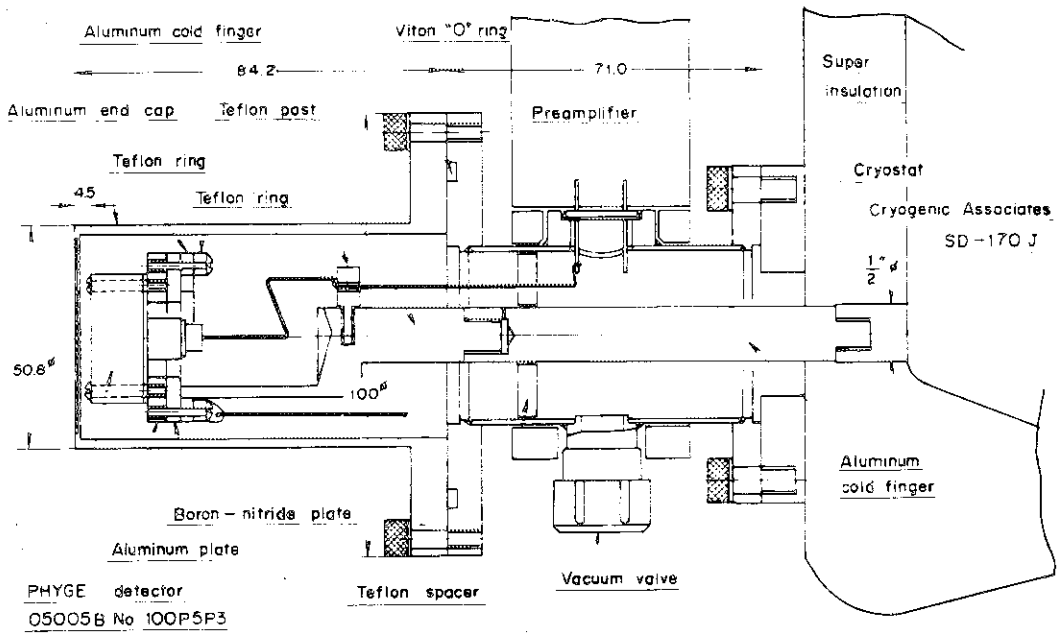


Fig. 3.2 Mounting assembly for NRD PHYGE detector

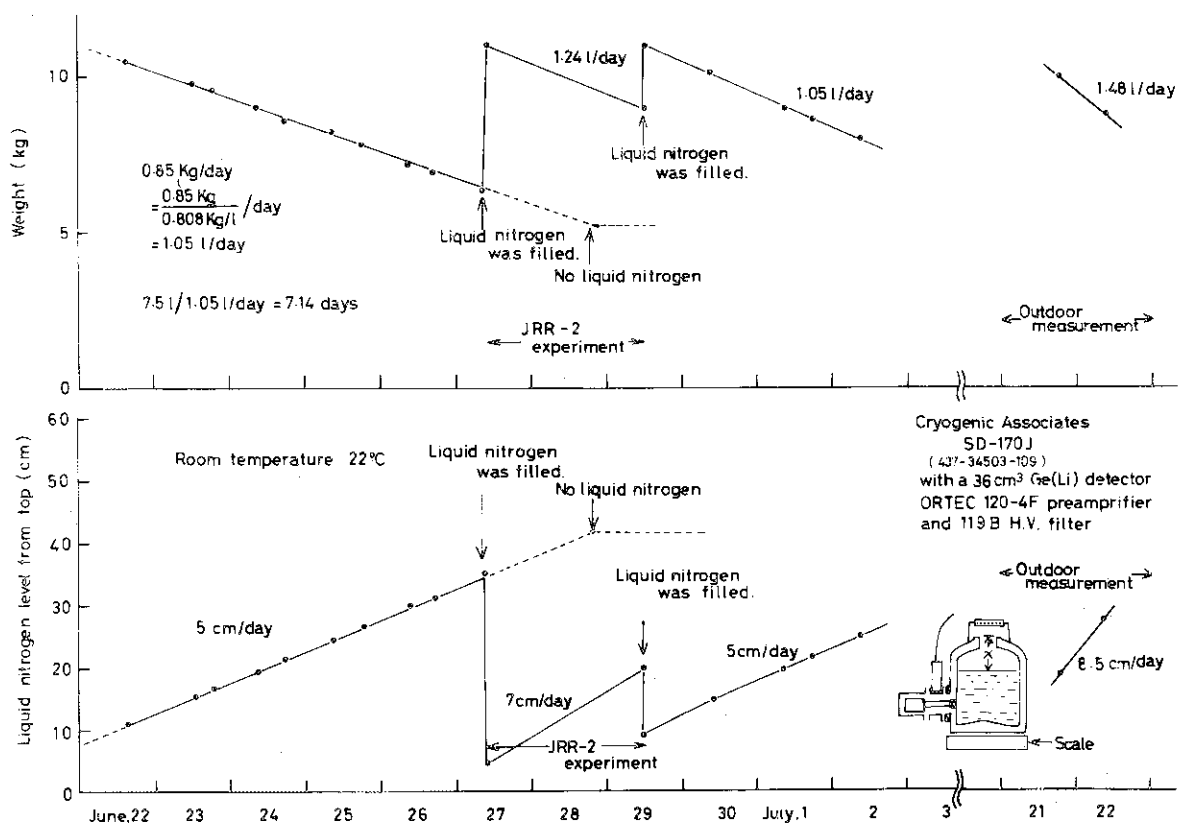


Fig. 3.3 Liquid nitrogen consumption of cryostat with 36 cm³ Ge(Li) detector and preamplifier

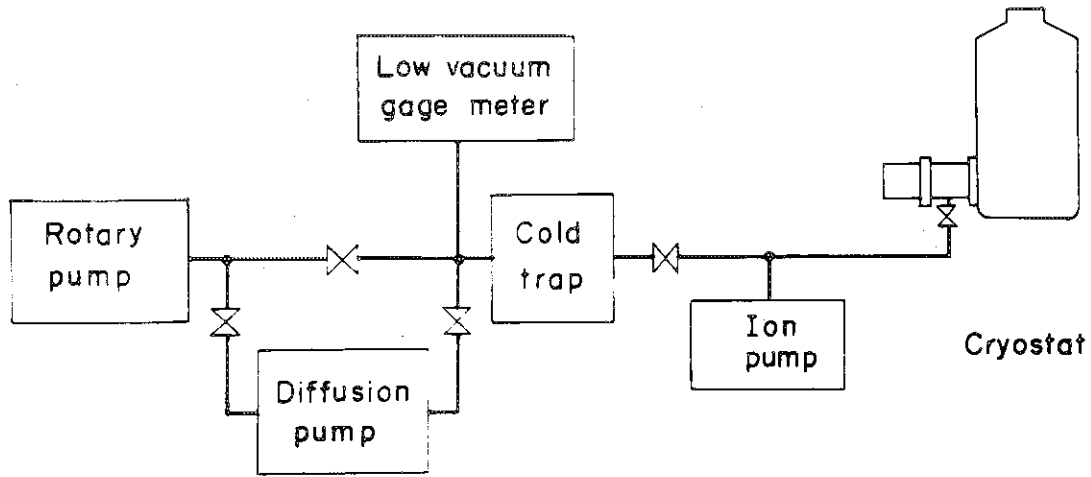


Fig 3.4 Vacuum system

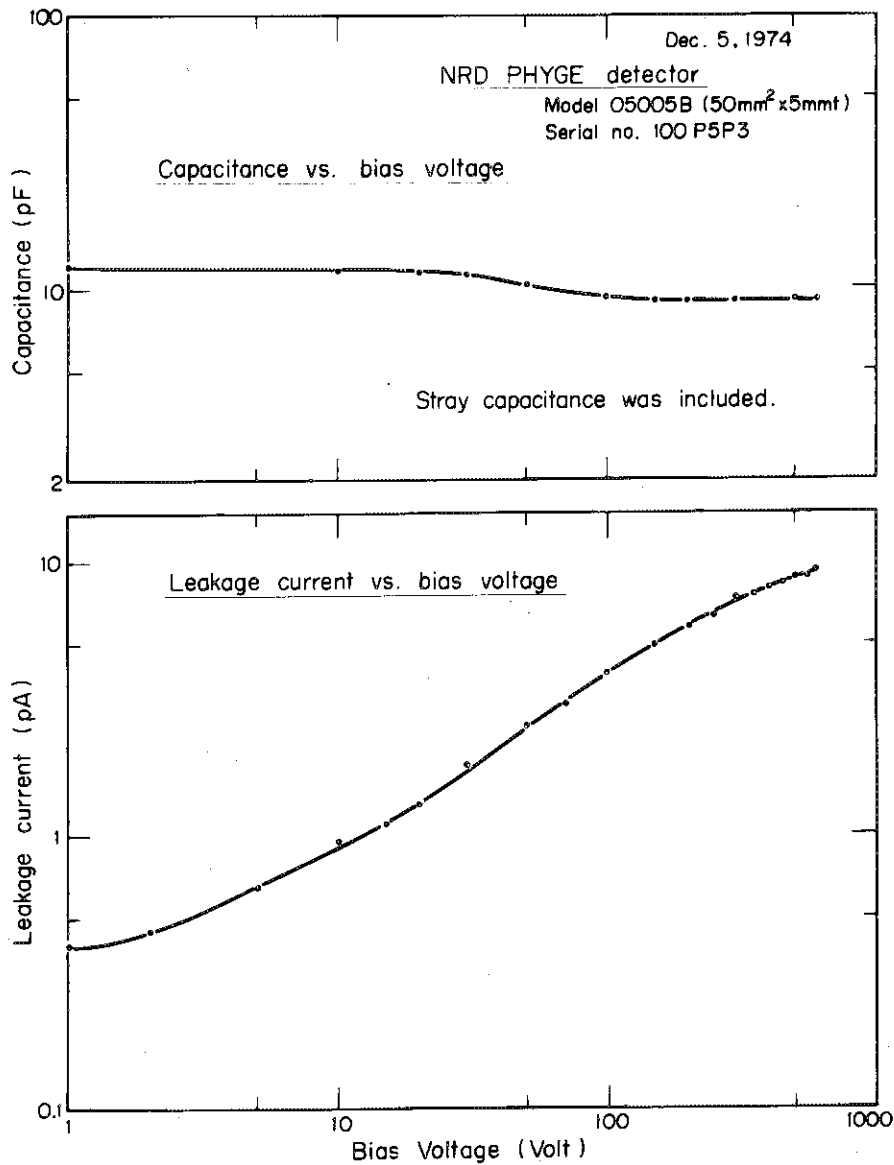


Fig. 4.1 Initial characteristics of capacitance and leakage current vs. bias voltage of PHYGE model O5005B detector

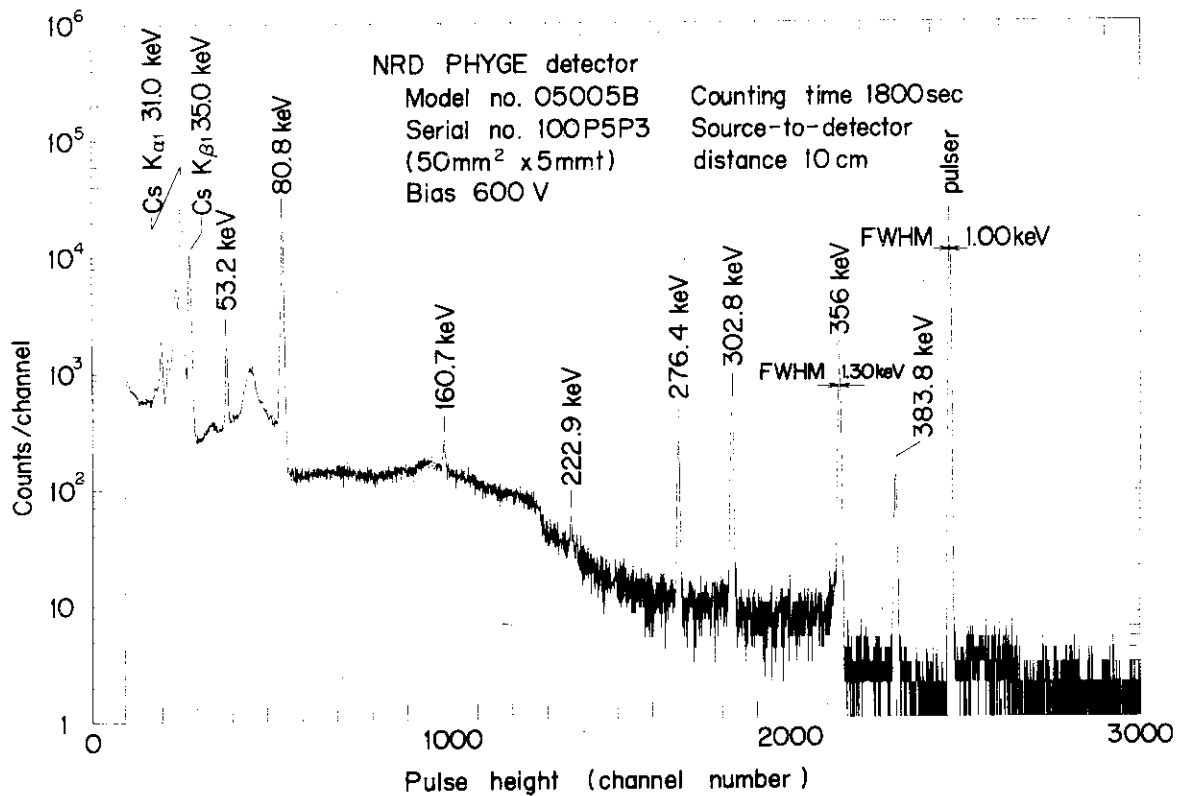


Fig. 4.2 Gamma-ray pulse height distribution of ^{133}Ba gamma-rays measured by NRD PHYGE detector

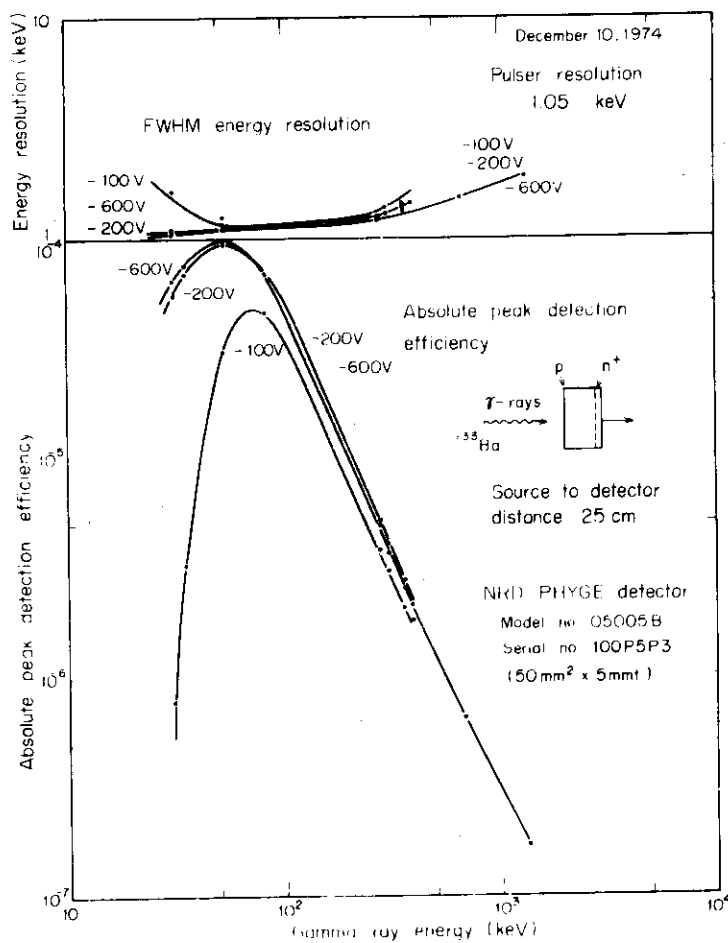


Fig. 4.3 Initial detector performance measured at source to detector distance 25 cm

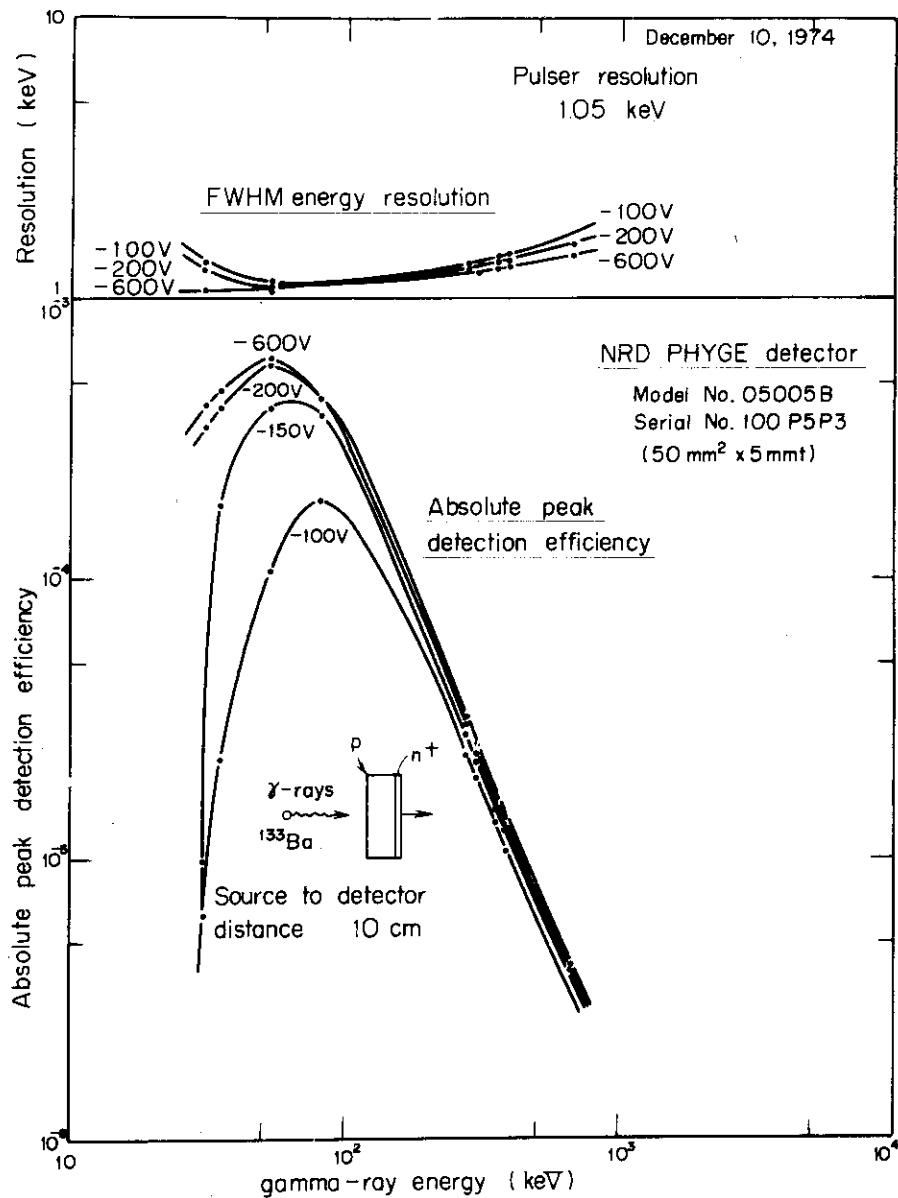


Fig. 4.4 Initial detector performance measured at source-to-detector distance 10 cm

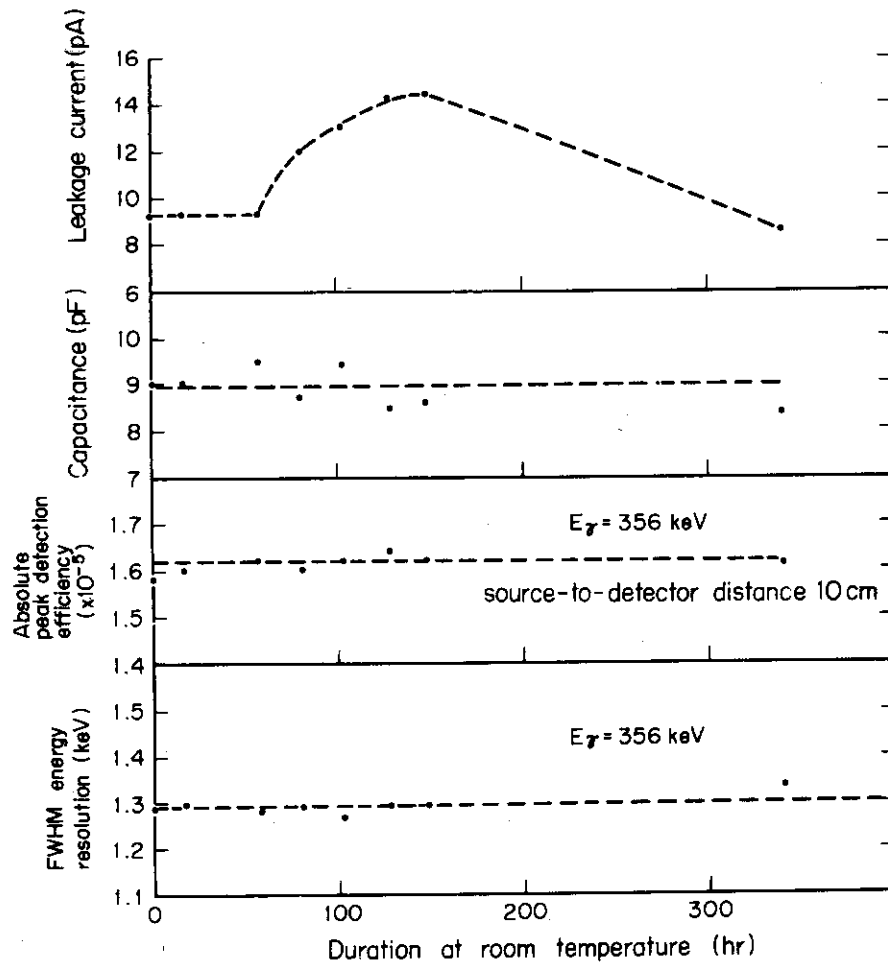


Fig. 4.5 Detector performance at 600V bias vs. duration at room temperature