

JAERI-M

8478

SDG-79016

HgI<sub>2</sub>放射線検出器の試作

1979年10月

中谷 秀夫\*・阪井 英次・片桐 政樹

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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.

HgI<sub>2</sub>放射線検出器の試作

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

中谷 秀夫\*・阪井 英次・片桐 政樹

(1979年9月12日受理)

わが国で初めてHgI<sub>2</sub>検出器の $\alpha$ ,  $\gamma$ , X線パルスを観測した。市販のHgI<sub>2</sub>特級試薬(純度99.2~99.8%)を真空封じしたパイロックス管を, 2温度領域の電気炉中で蒸気輸送させる簡単な方法で, 数mm角1mm厚程度の多数の結晶を作り, アカダックを塗布して電極を作りHgI<sub>2</sub>検出器の<sup>241</sup>Amからの $\alpha$ 線,  $\gamma$ , X線に対するパルス波高分布を測定した。最も良い検出器は59.5 keV  $\gamma$ 線に対してエネルギー分解能4.9 keVを示したが, 良いエネルギー分解能を示す検出器の製作は困難であった。正孔の電荷収集特性は電子のそれに比べて極めて悪いこと, 透明度が良く劈開性の良い結晶が良い検出器特性を示すこと, 市販のHgI<sub>2</sub>特級試薬は蒸気輸送を行うと固化した灰色の残留物を残すこと, 検出器へのHumiseal塗布は耐高電圧特性, 長期安定性, エネルギー分解能を改善すること, HgI<sub>2</sub>検出器の電子・正孔対当りの平均エネルギーはほぼ4.2 eVであること, 50℃, 25℃, 0℃と検出器の温度を下げるとエネルギー分解能が改善されること, 溶媒蒸発法で作った結晶は蒸気輸送法で作った結晶よりも悪い検出器特性を示すことが確認された。

---

\* 1977年4月~1978年3月, 日本原子力研究所原子炉研修所高級課程に在籍。

現在, 富山大学工学部電気工学科(富山県高岡市中川園町1の1(〒933), Tel 0766(21)2510)

Fabrication of HgI<sub>2</sub> Nuclear Radiation Detectors

Hideo NAKATANI\*, Eiji SAKAI and Masaki KATAGIRI  
Division of Nuclear Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received September 12, 1979 )

HgI<sub>2</sub> nuclear radiation detectors were fabricated and their performance was tested. Crystals of a few mm squares and about one mm thickness were grown by vapor transport method using a two-temperature-region electric furnace in which commercially-available HgI<sub>2</sub> powder of 99.2 to 99.8% purity was sealed in a Pylex ampoule. Detectors were fabricated using Aquadag-paint electrodes and tested using 5.5MeV alpha-particles, 59.5keV gamma-rays and LX-rays from <sup>241</sup>Am. The best detector showed a FWHM energy resolution of 4.9keV for 59.5 keV gamma-rays while it is difficult to obtain detectors having good energy resolution. The following were confirmed; charge collection of holes was worse than that of electrons. Crystals having better transparency and better cleavability resulted in better detector performance. Dark solidified residue was found after one vapor transport of the commercially-available powder. Humiseal paint on the detector surface improved the applicable high voltage, the long-term stability and also the energy resolution. The average energy per electron-hole pair was about 4.2eV. The energy resolution improved as the temperature decreased from 50°C to 0°C. The performance of the detectors made of solvent-evaporation method was worse than that made of vacuum transport method.

Keywords: HgI<sub>2</sub> Nuclear Radiation Detectors, Fabrication, Crystal Growth, Vapor Transport Method, Solvent-Evaporation Method, Detector Performance, Alpha-Particles, Gamma-Rays, LX-Rays, Energy Resolution, Charge Collection, Humiseal, Average Energy Per Electron-Hole Pair, Temperature Dependence.

---

\* Advanced course attendant, Radioisotope and Nuclear Engineering School, Japan Atomic Energy Research Institute, from April 1977 to March 1978. Now at Faculty of Engineering, Toyama University, 1-1, Nakagawasonomachi, Takaoka, Japan 933. Tel.0766(21)2510.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 沃化第2水銀結晶製作 .....	4
2.1 材 料 .....	4
2.2 真空封入装置及び加熱用電気炉 .....	4
2.3 蒸気輸送法による単結晶の製造 .....	5
3. 検出器製作 .....	8
4. 測定系 .....	10
4.1 パルス波高分布の測定方法 .....	10
4.2 立ち上がり時間の測定方法 .....	11
5. 各検出器の特性 .....	12
5.1 #1-2 検出器 .....	12
5.2 #1-3 検出器 .....	13
5.3 #2-1 検出器 .....	15
5.4 #2-2 検出器 .....	17
5.5 #2-3 検出器 .....	17
5.6 #2-5 検出器 .....	18
5.7 #3-1 検出器 .....	18
5.8 #3-2 検出器 .....	19
5.9 #4-2 検出器 .....	20
5.10 #4-3 検出器 .....	21
5.11 #4-4 検出器 .....	21
5.12 #5-2 検出器 .....	22
5.13 #5-4 検出器 .....	23
5.14 ###1-1 検出器 .....	23
5.15 ###1-2 検出器 .....	24
5.16 ##2-2 検出器 .....	24
5.17 ##2-3 検出器 .....	25
5.18 ##2-4 検出器 .....	26
5.19 ##2-5 検出器 .....	26
6. 検出器の総合的評価 .....	28
6.1 小宗化学薬品(株) 試薬と和光純薬工業(株) 試薬による検出器特性の比較 .....	28
6.2 検出特性と繰り返し蒸気輸送との関係 .....	29
7. Hg I <sub>2</sub> 検出器と Ge 検出器とのパルス波高の比較 .....	30
8. エネルギー分解能の温度依存性 .....	31

9. 結 び .....	32
謝 辞 .....	35
参考文献 .....	36

## 付 録

A. 東北大・金研の溶媒蒸発法試料による検出器検出特性 .....	41
A.1 結晶製作の概要 .....	41
A.2 TH-1S検出器 .....	41
A.3 TH-2S検出器 .....	42
B. 東大・理学部の試料による検出器検出特性 .....	44
B.1 溶媒蒸発法試料による検出器検出特性 .....	44
B.1.1 結晶製作の概要 .....	44
B.1.2 TK-1S検出器 .....	44
B.1.3 TK-2S検出器 .....	44
B.1.4 TK-3S検出器 .....	45
B.2 蒸気輸送法試料による検出器検出特性 .....	45
B.2.1 結晶製作の概要 .....	45
B.2.2 TK-2V検出器 .....	45
B.2.3 TK-3V検出器 .....	46
C. 富山大・工学部の溶媒蒸発法試料による検出器検出特性 .....	47
C.1 結晶製作の概要 .....	47
C.2 TY-1S検出器 .....	47
C.3 TY-2S検出器 .....	47
D. ま と め .....	49

## Contents

1. Introduction
2. Fabrication of  $\text{HgI}_2$  crystals
  - 2.1 Starting material
  - 2.2 Ampoule evacuation system and crystal growing furnace
  - 2.3 Crystal growth by vacuum transport method
3. Detector fabrication
4. Measuring system
  - 4.1 Pulse height distribution measuring system
  - 4.2 Pulse risetime measurement
5. Detector performance
  - 5.1 Detector #1-2
  - 5.2 Detector #1-3
  - 5.3 Detector #2-1
  - 5.4 Detector #2-2
  - 5.5 Detector #2-3
  - 5.6 Detector #2-5
  - 5.7 Detector #3-1
  - 5.8 Detector #3-2
  - 5.9 Detector #4-2
  - 5.10 Detector #4-3
  - 5.11 Detector #4-4
  - 5.12 Detector #5-2
  - 5.13 Detector #5-4
  - 5.14 Detector ###1-1
  - 5.15 Detector ###1-2
  - 5.16 Detector ##2-2
  - 5.17 Detector ##2-3
  - 5.18 Detector ##2-4
  - 5.19 Detector ##2-5
6. Overall detector comparison
  - 6.1 Performance comparison of detectors made of crystals grown from starting materials supplied by Koso Chemical Co.,Ltd. and Wako Pure Chemical Industry, Ltd.
  - 6.2 Detector performance and repeated vacuum transport cycles

7. Comparison of pulse heights obtained from HgI<sub>2</sub> and Ge detectors
8. Temperature dependence of detector performance
9. Concluding remarks

Acknowledgment

References

Appendix

- A. Performance of detectors made of crystals grown by solvent evaporation method at Tohoku University
  - A.1 Crystal growth
  - A.2 Detector TH-1S
  - A.3 Detector TH-2S
- B. Performance of detectors made of crystals grown at Tokyo University
  - B.1 Performance of detectors made of crystals grown by solvent evaporation method
    - B.1.1 Crystal growth
    - B.1.2 Detector TK-1S
    - B.1.3 Detector TK-2S
    - B.1.4 Detector TK-3S
  - B.2 Performance of detectors made of crystals grown by solvent evaporation method
    - B.2.1 Crystal growth
    - B.2.2 Detector TK-2V
    - B.2.3 Detector TK-3V
- C. Performance of detectors made of crystals grown by solvent evaporation method at Toyama University
  - C.1 Crystal growth
  - C.2 Detector TY-1S
  - C.3 Detector TY-2S
- D. Conclusion

Tables

Figures

Photos

## List of Tables

- Table 1-1 Various characteristics of semiconductor detectors.
- Table 2-1 Assay reports of commercially available  $\text{HgI}_2$  powder.
- Table 6-1 List of  $\text{HgI}_2$  detectors made of crystals grown by us and their performance.
- Table D-1 List of  $\text{HgI}_2$  detectors made of crystals grown by other laboratories and their performance.

## List of Figures

- Fig. 1-1 Linear attenuation coefficients for photoelectric absorption, Compton scattering and pair production in silicon, germanium, cadmium telluride and mercury iodide.
- Fig. 1-2 Calculated detection efficiencies of  $\text{HgI}_2$  detectors of thicknesses of 0.5mm and 1mm.
- Fig. 1-3 Calculated detection efficiencies of 3mm Si, 3mm Ge and 2mm CdTe detectors.
- Fig. 1-4 Crystal structure of  $\text{HgI}_2$ .
- Fig. 2-1 Schematic diagram of ampoule evacuation system.
- Fig. 2-2 Sketch of horizontal furnace with controller.
- Fig. 2-3 Connection diagram of thermo-controller.
- Fig. 2-4 Positions of crystals grown and corresponding temperature distributions.
- Fig. 2-5 Crystal growth of #2 and #3.
- Fig. 2-6 Crystal growth ##1, ##2 and ###1.
- Fig. 2-7 Ampoule used in ###1 crystal growth.
- Fig. 3-1 Detector mount using Al plate and teflon film.
- Fig. 3-2 Detector mount using Al plate and cover-glass.
- Fig. 3-3 BNC(P) type detector mount.
- Fig. 3-4 BNC(J) type detector mount.
- Fig. 3-5 SHV(J) type detector mount.
- Fig. 4-1 Schematic diagram of electronics.
- Fig. 4-2 Electronics used in  $\text{HgI}_2$  detector gamma-rays performance measurement.
- Fig. 4-3 Preamplifier output pulse shape from  $\text{HgI}_2$  detector #2-1(-300V) and pulser.

- Fig. 5-1 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #1-2.
- Fig. 5-2 Pulse height and FWHM vs. applied bias characteristics of  $\text{HgI}_2$  detector #1-3. (Electron traversal).
- Fig. 5-3 FWHM vs. shaping time characteristics of  $\text{HgI}_2$  detector #1-3 at -1400V.
- Fig. 5-4 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-1.
- Fig. 5-5 Maximum pulse height of  $\alpha$  vs. bias voltage characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-1.
- Fig. 5-6 Maximum pulse height of  $\alpha$  vs. amplifier time constant characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-1.
- Fig. 5-7 FWHM energy resolution vs. gamma ray energy characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated).
- Fig. 5-8 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #4-2.
- Fig. 5-9 Detector mount for ##1-1  $\text{HgI}_2$  detector.
- Fig. 7-1 Circuit diagram of electronics to compare outputs from  $\text{HgI}_2$  detector with those from hyperpure Ge detector.
- Fig. 7-2 Comparison of pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $\text{HgI}_2$  detector and hyperpure Ge detector.  
 (a)  $\text{HgI}_2$  detector ##2-2 at room temperature.  
 (b) Hyperpure Ge detector at liquid nitrogen temperature.
- Fig. 7-3 Gamma-ray energy vs. pulse height relations for  $\text{HgI}_2$  and hyperpure Ge detectors.
- Fig. 8-1 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-5(-300V) at 50°C, 25°C and 0°C. Improvement of FWHM was observed as temperature decreased.
- Fig. 8-2 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-5(+300V) at 50°C, 25°C and 0°C.
- Fig. A-1 Mount for  $\text{HgI}_2$  detector TH-IS.
- Fig. A-2 Total counts in 4000s vs. elapsed time characteristics of  $\text{HgI}_2$  detector TH-IS.
- Fig. B-1 Total  $\alpha$  counts in 4000s(●) and pulse height (○) vs. elapsed time obtained from  $\text{HgI}_2$  detector TK-2S.

## List of Photos

- Photo. 2-1 Photo of ampoule evacuation system.  
 (a) Ampoule, evacuation speed control cocks, and liquid nitrogen trap.  
 (b) Evacuation speed control cocks, two liquid nitrogen traps and pirani gauge and diffusion pump.
- Photo. 2-2 Photo of electric furnace and its controller.
- Photo. 2-3 Photo of ampoule in which #0 crystals were grown. 12.5g Wako powder was loaded in the left end. Crystals were grown in the middle of the ampoule.
- Photo. 2-4 Photo of #2 crystal growth.  
 (a) Overall view of ampoule.  
 (b) Solidified source residue.  
 (c) Grown crystals.
- Photo. 2-5 Crystal growth of ##2.  
 (a) Overall view of ampoule.  
 (b) Grown crystals.  
 (c) Source residue.
- Photo. 3-1 Photo of #1 crystals.
- Photo. 3-2 Photo of #1-2 detector.  
 (a) Over view. Triangle shaped  $\text{HgI}_2$  crystal is seen in the center on square cover-glass. Teflon stand on the right.  
 (b) Side view.
- Photo. 5-1 Preamplifier output pulse shapes from  $\text{HgI}_2$  detector #1-2(-350V) and pulser.
- Photo. 5-2 Preamplifier output pulse shapes from  $\text{HgI}_2$  detector #1-2(+500V) and pulser.
- Photo. 5-3 Main amplifier output shapes and pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #1-2 (-350V) and pulser.  
 (a) Main amplifier output shapes.  
 (b) Pulse height distribution.
- Photo. 5-4 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #1-2(+500V) and pulser.

- Photo. 5-5 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-3 (no Humiseal coat).  
(a) Bias voltage -1400V  
(b) Bias voltage +1400V.
- Photo. 5-6 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-3 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1300V  
(b) Bias voltage +1200V.
- Photo. 5-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-3 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1300V  
(b) Bias voltage +1300V.
- Photo. 5-8 Preamplifier output pulse shapes obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1 with positive bias voltage under Am-241  $\alpha$  irradiation.  
(a) Bias voltage +100V  
(b) Bias voltage +350V.
- Photo. 5-9 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1.  
(a) Bias voltage -350V  
(b) Bias voltage +300V.
- Photo. 5-10 Pulse Height distribution of 5.9KeV X-rays from Fe-55 obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1 (-150V).
- Photo. 5-11 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-2 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1400V  
(b) Bias voltage +1000V.
- Photo. 5-12 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 with -600V. Improvement of FWHM was observed by coating the detector with Humiseal.  
(a) No Humiseal coat  
(b) With Humiseal coat.

- Photo. 5-13 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated).  
 (a) Bias voltage -1000V  
 (b) Bias voltage +1000V
- Photo. 5-14 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 at -1000V bias.
- Photo. 5-15 Pulse height distributions of various energies of X-rays from Ammersham variable energy X-rays source obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated) at -1000V bias.  
 (a) Mn X-rays (b) Cu X-rays  
 (c) Rb X-rays (d) Mo X-rays  
 (e) Ag X-rays (f) Ba X-rays.
- Photo. 5-16 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-5 (Humiseal 1A27 coated).  
 (a) Bias voltage -500V  
 (b) Bias voltage +500V.
- Photo. 5-17 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #3-1 (Humiseal 1A27 coated).  
 (a) Bias voltage -450V  
 (b) Bias voltage +450V.
- Photo. 5-18 Pulse Height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #3-2 (no Humiseal coat).  
 (a) Bias voltage -1400V  
 (b) Bias voltage +1350V.
- Photo. 5-19 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #3-2 (Humiseal 1B12 coated).  
 (a) Bias voltage -1600V  
 (b) Bias voltage +1350V.
- Photo. 5-20 Preamplifier output pulse shapes obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-2 (-300V).
- Photo. 5-21 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-2 (no Humiseal).  
 (a) Bias voltage -400V  
 (b) Bias voltage +400V.

- Photo. 5-22 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-3 (no Humiseal coat).  
(a) Bias voltage -450V  
(b) Bias voltage +450V.
- Photo. 5-23 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-4 (no Humiseal coat)  
(a) Bias voltage -800V  
(b) Bias voltage +800V.
- Photo. 5-24 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-4 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1100V  
(b) Bias voltage +1000V.
- Photo. 5-25 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #5-2 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -800V  
(b) Bias voltage +800V.
- Photo. 5-26 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #5-4 without and Humiseal coat.  
(a) No Humiseal coat  
(b) With Humiseal coat.
- Photo. 5-27 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #5-4 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -750 V  
(b) Bias voltage +500V.
- Photo. 5-28 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ###1-1 (Humiseal 1A27 coated).  
(a) Bias voltage +500V on rear electrode  
(b) Bias voltage -500V on rear electrode.
- Photo. 5-29 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ###1-2.  
(a) Bias voltage -300V  
(b) Bias voltage +200V.
- Photo. 5-30 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ###1-2 (Humiseal 1B12 coated)  
(a) Bias voltage -700V  
(b) Bias voltage +700V.

- Photo. 5-31 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-2 (Humiseal 1A27 coated).  
(a) Bias voltage -1000V  
(b) Bias voltage +1000V.
- Photo. 5-32 Pulse height distributions of Cs-137 gamma rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-2 (Humiseal 1A27 coated) at -1000V bias.  
(a)  
(b)
- Photo. 5-33 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-4 at -600V bias (no Humiseal coat).
- Photo. 5-34 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-4 at -600V bias (Humiseal 1B12 coated).
- Photo. 5-35 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-5 (no Humiseal coat).  
(a) Bias voltage -800V  
(b) Bias voltage +800V.
- Photo. 5-36 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ -and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-5 (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1800V  
(b) Bias voltage +1200V.
- Photo. 8-1 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-5 with maximum applicable negative bias voltages at 50°C, 25°C and 0°C.
- Photo. 8-2 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-5 with maximum applicable positive bias voltages at 50°C, 25°C and 0°C.
- Photo. A-1 Photo of HgI<sub>2</sub> detector TH-IS.

- Photo. A-2 Preamplifier output pulse shapes and pulse height distribution for Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS with negative bias voltage (-250V).  
(a) Preamplifier output pulse shapes for Am-241  $\alpha$ 's and pulser  
(b) Pulse height distribution of Am-241  $\alpha$ 's.
- Photo. A-3 Preamplifier output pulse shapes for Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS with positive bias voltages and pulser.  
(a) Bias voltage +400V  
(b) Bias voltage +450V.
- Photo. A-4 Main amplifier output pulse shapes obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS for Am-241  $\gamma$ - and X-rays and pulser pulses.  
(a) Bias voltage -250V  
(b) Bias voltage +500V.
- Photo. A-5 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS.  
(a) Bias voltage -250V  
(b) Bias voltage +500V.
- Photo. A-6 Pulse height distributions of 5.9 KeV X-rays from Fe-55 source obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS. Noises were subtracted.  
(a) Bias voltage -200V  
(b) Bias voltage +300V.
- Photo. A-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-2S (no Humiseal coat).  
(a) Bias voltage -700V  
(b) Bias voltage +600V.
- Photo. A-8 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-2S (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -1200V  
(b) Bias voltage +1200V.

- Photo. B-1 HgI<sub>2</sub> detector TK-2S.
- Photo. B-2 Preamplifier output pulse shapes obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2S with positive bias voltages for Am-241  $\alpha$ 's and pulser.  
For negative bias voltages, no pulses were observed.  
(a) Bias voltage +350V  
(b) Bias voltage +50V.
- Photo. B-3 Pulse height distribution of Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2S with +300V bias.
- Photo. B-4 HgI<sub>2</sub> detector TK-2V.
- Photo. B-5 Preamplifier output pulses obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2V for Am-241  $\alpha$ 's.  
(a) Bias voltage -350V  
(b) Bias voltage +400V.
- Photo. B-6 Pulse height distributions of Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2V.  
(a) Bias voltage -350V  
(b) Bias voltage +400V.
- Photo. B-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2V.  
(a) Bias voltage -150V  
(b) Bias voltage +150V.
- Photo. B-8 Pulse height distribution of 5.9 KeV X-rays from Fe-55 obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2V (-250V).
- Photo. B-9 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-3V (Humiseal 1B12 coated).  
(a) Bias voltage -300V  
(b) Bias voltage +300V.
- Photo. C-1 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TY-2S.  
(a) Bias voltage -300V (no Humiseal coat)  
(b) Bias voltage -300V (Humiseal 1B12 coated).

## 1. ま え が き

エネルギー分解能の優れたGe検出器およびSi検出器は、放射線特に $\gamma$ 線のスペクトル測定を利用する分野で広範囲に使用されている。しかしながら、液体窒素冷却を必要とするという不便さがある。エネルギー分解能のやや劣ったNaI(Tl)シンチレーション検出器は余り良いエネルギー分解能を必要としない $\gamma$ 線スペクトル測定あるいは $\gamma$ 線検出によく用いられるが光電子増倍管を必要とし、その分だけ寸法が大きくなる。したがって、液体窒素冷却を必要とせず常温で動作し、しかもNaI(Tl)検出器よりは良いエネルギー分解能を持つ $\gamma$ 線検出器の出現が待ち望まれている。そのような検出器として、GaAs, CdTe, HgI<sub>2</sub>などの半導体材料を用いた半導体検出器が各国で開発中である。<sup>1)-5)</sup> Table 1-1 は放射線検出器として研究されている半導体材料の原子番号 $z$ , 禁止帯幅, 正孔・電子対当りの平均エネルギー, 電子あるいは正孔のドリフト易動度 $\mu$ , 平均自由時間 $\tau$ ,  $\mu\tau$ 積, 報告されている最良のエネルギー分解能, これらの値を得た温度をまとめたものである。<sup>5)</sup>

常温で良いエネルギー分解能を示すためには、洩れ電流が小さくなければならないが、洩れ電流は禁止帯幅 $E_g$ が大きいほど小さいから、禁止帯幅が大きな半導体材料が望まれる。しかし、禁止帯幅が大きすぎると、それに比例して電子・正孔対当りのエネルギー $\epsilon$ が大きくなり、その結果、放射線で生成される電子・正孔対の数が減り信号電荷が小さくなり信号雑音比が悪くなりエネルギー分解能が悪くなる。また、電子・正孔のドリフト易動度も禁止帯幅と関係し、禁止帯幅が大きすぎるとドリフト易動度が小さくなり、立ち上がり時間が長くなるとともに $\mu\tau$ 積が小さくなり電荷収集特性が悪くなり、良いエネルギー分解能が得られなくなる。

洩れ電流とともにエネルギー分解能を決めるものとして、上述の $\mu\tau$ 積がある。電界 $E$ のかかっている半導体材料の中で、電子あるいは正孔が易動度 $\mu$ , 平均自由時間 $\tau$ で動くとする、その平均自由行程 $\lambda$ は

$$\lambda = \mu\tau E$$

となる。この入が、電界 $E$ のかかっている領域(例えば空乏層, あるいは, 真性領域)の長さ $W$ に比べて、ずっと大きくないと、電子または正孔が電極に到達せず、したがって、100%の電荷を外部回路に誘起できず、良いエネルギー分解能を実現できない。すなわち、

$$\mu\tau E > W$$

という条件が必要である。

その他に、 $\gamma$ 線検出器としては高い $\gamma$ 線検出効率を持つことが望ましく、光電効果による $\gamma$ 線線吸収係数は原子番号 $z$ の5乗に比例することから、 $z$ の大きい半導体材料が望まれる。

HgI<sub>2</sub>は、Hgの $z=80$ , Iの $z=53$ であり、Ge( $z=32$ ), Si( $z=14$ )に比べて大きな $\gamma$ 線検出効率を持っている。Fig. 1-1 は $\gamma$ 線エネルギーに対するHgI<sub>2</sub>の線吸収係数をSi, Ge, CdTeの線吸収係数と比較して図示したもので、HgI<sub>2</sub>の光電効果の線吸収係数は100 keVにおいてGeの約10倍, Siの約300倍, CdTeの約2倍であることが判る。また、HgI<sub>2</sub>のコンプトン散乱の吸収係数はGe, CdTeとほぼ同じ, Siの約2倍となっている。

らなみに、厚さ  $t = 0.5 \text{ mm}$  および  $1 \text{ mm}$  の  $\text{HgI}_2$  検出器の全検出効率  $\eta$  を

$$\eta_t = 1 - e^{-\mu_t t}$$

で計算すると、Fig. 1-2 の曲線①および③が得られる。ここで  $\mu_t$  は  $r$  線の全吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) である。また、光電効果の検出効率は、光電効果の吸収係数  $\mu_p$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) を用いて

$$\eta_p = (\mu_p / \mu_t) \{1 - e^{-\mu_t t}\}$$

で計算した値も示した。実際の検出器の中では光電効果のみでなく、コンプトン散乱した2次  $r$  線がさらに光電効果で吸収されて全吸収ピークになるから、実際の検出器の全吸収ピーク検出効率は図示した②、④よりは大きくなるはずである。Fig. 1-3 に3 mm厚 Si, 3 mm厚 Ge, 2 mm厚 CdTe 検出器の全検出効率、光電効果検出効率の計算値を示す。Fig. 1-2 の  $\text{HgI}_2$  検出器と比べると、0.5 mmの  $\text{HgI}_2$  検出器は3 mmの Si 検出器、Ge 検出器よりも高い光電効果検出効率を示し、2 mmの CdTe 検出器よりも若干小さな光電効果検出効率を示すこと、1 mmの  $\text{HgI}_2$  検出器は2 mmの CdTe 検出器よりも大きな光電効果検出効率を示すこと、40 keV以下の  $r$  線に対しては100%、100 keV  $r$  線に対して85%の検出効率を示すことが判る。

我が国ではGaAs 検出器については東京芝浦電気株式会社総合研究所小林哲二氏らが、また、CdTe 検出器については大阪大学工学部電気工学科田口常正氏、東北工業大学庄司忠良氏らが開発研究を行っているが、 $\text{HgI}_2$  検出器については未だ誰も着手していないこと\*、 $\text{HgI}_2$  結晶の成長は100数10°Cであり高価な結晶成長装置が不必要であること、上述のように  $r$  線検出効率が高く実用される可能性が大きいと判断されることなどから、1977年夏に  $\text{HgI}_2$  検出器の開発研究に着手する決心をした。

$\text{HgI}_2$  検出器は1971年6月末に、SiemensのW. R. Willig<sup>6)~8)</sup> が始めて報告したもので、その後、Chalk Rives Nuclear Lab.のH. L. Malm<sup>9)10)</sup>、Lawrence Livermore Lab.のG. A. Armantrout<sup>12)15)21)</sup>、E. G. & G.のM. Schieber<sup>13)</sup>、University of California Los AngelesのJ. Llacer<sup>16)</sup>、Z. H. Cho<sup>22)26)</sup>、G. C. Huth<sup>23-8)24)</sup>、StrasbourgのP. Siffert<sup>18)19)23-5), 23-10)</sup>、LimeilleのG. M. Martin<sup>17)</sup>、PhillipsのH. Scholtz<sup>14)23-1)23-9)</sup>、ModenaのG. Ottaviani<sup>20)23-4)</sup>、GrenobleのJ. Daval、BaselのI. Zchokke-Granacher、韓国原研のM. K. Chung<sup>25)</sup>、などが  $\text{HgI}_2$  検出器の開発に参加しているが、 $\text{HgI}_2$  検出器開発の中心は何と言っても、M. Schieberを中心とするThe Hebrew University of Jerusalem<sup>34)35)38)40)42)44)46)52)53)</sup>とE. G. & G.<sup>29)30)31)37)39)51)</sup>で、E. G. & G.はM. Schieberが最初 consultantとして結晶成長法を指導していた。The Hebrew University of JerusalemはYISSUM RESEARCH DEVELOPMENT COMPANYを作り、 $\text{HgI}_2$  検出器を1978年春頃から市販し始めた\*\*。

$\text{HgI}_2$  結晶は光電導や exciton スペクトルの測定が始めて行われた半導体であり、後述するような層状構造から異方性の点で固体物理関係者に注目されており、我が国においても、東

\* 最近(1979年4月)、東北大学金属材料研究所仁科研究室、見方裕一氏らが  $\text{HgI}_2$  検出器の試作研究に着手された。

\*\* 代理店：関西電子株式会社(東京営業所 〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷4丁目24番地17号(ロースビル) 電話03(404)2586)

北大学金属材料研究所仁科研究室や東京大学理学部桑原研究室などで $\text{HgI}_2$ 結晶の製作および物性研究が行われている。また、仁科研究室では最近、 $\text{HgI}_2$ 検出器の開発に着手されたのは前述の通りである。

$\text{HgI}_2$ 検出器の開発研究に際しては、材料の純化法、結晶成長法、検出器製作法などの技術的な問題のみでなく、検出器特性の測定その他に、光学的測定、熱励起電導、レーザーパルス励起電導、タイムオブフライト、走査型電子顕微鏡蛍光X線分析、質量分析、光電磁気電子効果などの測定が行われている点、従来のGeのSi検出器の開発研究とは若干異なった手段が使用されている。

次に $\text{HgI}_2$ の一般的な特性について述べると、次の通りである。 $\text{HgI}_2$ は室温で赤い透明な正方晶系、成層格子で、Fig. 1-3に示すようにHgには頂点を共有するひずんだ四面体型の4つのIが配位する結晶である。その格子定数は $a = 4.37 \text{ \AA}$ 、 $c = 12.44 \text{ \AA}$ で、その比重は6.28である。蒸気圧が高く、 $20^\circ\text{C}$ で $5 \times 10^{-5} \text{ torr}$ 、 $127^\circ\text{C}$ で $0.2 \text{ torr}$ 、蒸発率は $20^\circ\text{C}$ の真空中で $3 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、空気中で $10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ と言われている。禁止帯幅は $300^\circ\text{K}$ で $2.13 \text{ eV}$ 、その温度変化は $100 \sim 300^\circ\text{K}$ に対して $-7 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ である。 $127^\circ\text{C}$ で相転移して、黄色の斜方晶系結晶に変る。この格子定数は $a = 4.67 \text{ \AA}$ 、 $b = 13.76 \text{ \AA}$ 、 $c = 7.32 \text{ \AA}$ である。

放射線検出器としては室温で動作させることを目的としており、現在の所、 $300^\circ\text{K}$ における電子、正孔あたりのエネルギー $\epsilon = 4.15 \text{ eV}$ 、C軸に平行な方向に電界を加えたときの電子および正孔のドリフト速度は $100 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$ および $4 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$ 、電子および正孔の平均寿命は $\sim 100 \text{ ns}$ 、 $\sim 10 \text{ ns}$ （電界強度 $E = 5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ のとき）程度の値が得られている。

さらに詳細な $\text{HgI}_2$ 検出器の現状については、文献3), 4), 5), 44), 50), 51), 52)を参照して欲しい。

本報告書は、簡単な蒸気輸送法による結晶製作装置、すなわち、市販の $\text{HgI}_2$ 特級試薬を一端に真空封じしたパイロックス管を2温度領域の電気炉中で加熱する方法を使用して製作した数mm角の多数の結晶の中から適当な結晶を選択してアカダック電極を付け検出器を製作し、その $\alpha$ 線、 $\gamma$ 線、X線検出特性を測定した結果を報告する。実際に結晶を製作した期間は、筆者の一人（中谷）が日本原子力研究所原子炉研修所高級課程に在籍した1977年末から1978年3月であり、短期間であったため、最適結晶成長条件を求めるとか、さらに良い結晶成長法を試みるに至らなかった。しかし、我が国で最初に $\text{HgI}_2$ 検出器を試作した経験は今後この検出器の開発にたずさわる人々に大いに益するものと考えている。

第2章に結晶製作法、第3章に検出器製作法、第4章に測定装置、第5章に測定した検出器特性、第6章に試作した検出器の総合評価、第7章にGe検出器と $\text{HgI}_2$ 検出器の出力パルス波高の比較、第8章に $\text{HgI}_2$ 検出器の温度特性を述べ、第9章でそれらの結果をまとめた。また、付録として、東北大学金属材料研究所仁科研究室および東京大学部桑原研究室から頂いた溶媒蒸発法あるいは蒸気輸送法で製作した結晶を使用した検出器の特性および筆者の一人中谷が富山大学電気工学科で製作した溶媒蒸発法による結晶を使用した検出器の特性を述べた。なお、巻末に附した参考文献は $\text{HgI}_2$ 検出器に関する文献をほぼ全部記した横りである。

## 2. 沃化第2水銀結晶製作

### 2.1 材 料

沃化第2水銀の単結晶製作に使用した原材料は小宗化学薬品<sup>\*</sup>(以下ではK社と称する)及び和光純薬工業<sup>\*\*</sup>(以下ではW社と称する)から市販されている粉末状の赤色沃化第2水銀である。Table. 2-1はそれぞれの製品についてメーカーが行った分析結果を示し、JIS規格に適合し硫酸上乾燥後の含有量はそれぞれ99.2%及び99.5~99.8%となっている。検出器としての性能とくに電荷収集特性に影響を及ぼす不純物の挙動を明らかにする見地からは元素分析の資料が必要である。K社はTable. 2-1に示した程度の情報を教えてくれたが、W社では含有量のみしか判らなかつた。質量分析器にかけて分析することも試みる必要がある。原材料は医薬外毒物であつて、吸入したり、身体表面に付着すると急性中毒の症状として吐き気、下痢、歯齦炎、腎障害を起し、慢性中毒の症状として歯齦(はぐき)の浮腫、手の震えが認められるといわれている。<sup>59)</sup>このためフードを設備した室で、必要に応じて防毒マスク、保護手袋などを着用して取扱い、取扱い後は手洗い、うがいの励行といった注意事項を遵守しなければならない。なお、原材料は専用の冷暗所に保管した。

### 2.2 真空封入装置と加熱用電気炉

Fig. 2-1は $\text{HgI}_2$ 粉末を入れたバイレックス管の内部を真空に引き、バイレックス管を封じ切るときに使用した真空排気装置のブロック図を示す。左側に示すバイレックス管の下端部にガラス製の漏斗を通して前記の $\text{HgI}_2$ 試薬を落下して充填した後、すり合わせ部で真空排気装置に接続し、2段構えの液体窒素トラップから油拡散ポンプ、油回転ポンプ、排気フードへと通ずるラインで真空排気を行う。排気速度制御用コックは油回転ポンプで荒引き開始時に小口径のものから徐々に開放して粉末状試薬の急激な浮遊上昇を緩和するためのものである。荒引き開始後、数時間程度経過してピラニー真空計の指示が $(2.5 \sim 5.0) \times 10^{-6}$  Torrに到達した時点でバイレックス管頂部の肉厚部をバーナーで熱して封じ切る。

Photo. 2-1(a)はバイレックス管、排気速度制御用コック、前段の液体窒素トラップを示し、(b)はその後の液体窒素トラップ、ピラニー真空計、および油拡散ポンプを示している。封じ切った長さ約55 cm、外径25 mm(当初のものは35 mm)、肉厚1.5 mmのバイレックス管をFig. 2-2に示すように長さ60 cm、内径40 mmの炉心管のなかに水平にそり入する。電気炉の温度制御は結晶成長領域および材料領域に巻いてある2群のカンタル線に流れる電流の通電時間をそれぞれ単独に制御してバイレックス管の表面に張りつけたクロメル・アルメル

\* 東京都中央区日本橋本町2の9

\*\* 大阪市東区道修町3丁目10番地

熱電対の温度が設定値になるようにした。Fig. 2-3 は温度調節計を示し、目標設定温度値とパイレックス管表面上の測定位置に密着させたクロメル・アルメル熱電対による測定温度値との偏差に応じてトリガパルスが発生し、トライアックスイッチの作動により通電時間を制御するものである。Photo. 2-2 に電気炉および温度制御装置を示す。

### 2.3 蒸気輸送法による単結晶の製作

蒸気輸送法による単結晶の製作に際して、原材料に粉末状の  $\text{HgI}_2$  試薬を用いた場合と、一度成長させた結晶を回収して原材料として再び結晶成長を行った場合とがある。

#### (1) 原材料に粉末状の $\text{HgI}_2$ 試薬を用いた場合

Fig. 2-4 は電気炉内のパイレックス管表面（上面）の温度分布と、各温度分布に対応する結晶成長場所を明示したものである。図中の #0～#5 は、#0～#5 の順で6回結晶成長を行ったことを示している。通電開始後10日間前後で原材料は消耗するとともに固化してそれ以上原材料が昇華しなくなり、結晶成長を停止した。パイレックス管の左端から20 cm および40 cm の位置の2個所に設けたネック部は原材料中の不純物が低温帯の結晶成長部分に運ばれてくるのを物理的に阻止することを意図したものである。結晶の製作経過を #0 と #1, #2 と #3, #4 と #5 の3つに区切って次に説明する。

#0 と #1 はパイレックス管の外径が35 mm, W社製  $\text{HgI}_2$  試薬の封入量が1.25 グラムの同じ条件で、温度分布を Fig. 2-4 に示したように変えた場合である。2～3 mm 角程度の結晶が成長したのは温度が80～100℃に変化しているところで、#0 では左端から30～35 cm, #1 では20～25 cm のところである。原材料位置から遠ざかる左端に近いほど不純物がよく除去されることからみて#0 よりも#1 の温度分布が好ましい。Photo. 2-3 は#0 の結晶成長終了後の状態を示し、左端に原材料の固化したものと多量の紐状不純物が残存していた。左端から20～25 cm にわたる巾5 cm の管壁内面には2～3 mm 角の結晶が付着し、それ以下の微細な結晶は相当広範囲にわたって拡散して付着している。これらのことから大きな結晶に成長させるためには管の外径を細くして原材料の封入量を増加すること、純度の高い結晶をうるためには温度分布として#0 より#1の方がよいことが判った。

次に、#2 と #3 は Fig. 2-5 の上に示すようにパイレックス管の外径を25 mm と細くし結晶の成長する位置をさらに左端に近づけるような温度分布で結晶成長を行った。原材料の封入量を#2はK社製2.5グラム、#3はW社製5.0グラムとした。温度が90～110℃のところ、したがって左端から15 cm 前後の位置に単結晶が成長した。その大きさは#2では3～4 mm 角程度のものがえられたが#3では原材料の封入量を倍加したにもかかわらず2～2.5 mm 角程度にとどまり結晶の収集率も良くなかった。これは原材料の封入量が過剰になると表面が不純物などにより変質して固化するため内部にある  $\text{HgI}_2$  が昇華出来なくなるためと思われる。Photo. 2-4 の(a)は電気炉からとりだした#2結晶成長の全体の状況を示し、(b)は蒸発しないで残った原材料の固化した状況を、(c)は結晶の成長状況を示す。(a)と(c)に見られる結晶成長部分から、電気炉内では上側の方が下側より温度が低くパイレックス管の上側に結晶が成長することを示している。これらのことから原材料の封入量は2.5グラム程度が適当であるこ

とが判ったが、幅広く付着しているため微細な結晶しか成長しない。できるだけ1個所に集中させて成長させる方法を考える必要がある。

最後に#4と#5については、共に原材料の封入量を25グラムとし、低温帯に炉内温度より低い15~25℃の室内空気を小型のエアポンプにより小口径のガラスノズルから吹き付ける方法をとったが、Fig. 2-4に示したように空気を吹き付ける管面上の位置とノズルからの噴射方向および原材料のおかれる管端部の形状が異なっている。また、#4はW社製、#5はK社製の粉末を使用している。結晶の成長位置は空気を吹き付けた管内面に近接する部分と左端から20cmのネック部に阻止された部分に大別される。前者の位置からえられた結晶は透明な単結晶であるが、後者の位置からのものは透明度が低く多結晶成分が多くを占めていた。したがって低温帯に設けた管のネック部は不純物の伝搬を物理的にさまたげる役目をしていることが確認できた。

以上を総合して次の事柄を知ることができた。

- ①. パイレックス管の外径は35mmよりも25mmと細くした方が厚みのある面積の広い結晶がえられる。
- ②.  $\text{Hg I}_2$  試薬の封入量を12.5グラム、25グラム、50グラムと変えて結晶製作を行ったが、収集率、結晶寸法の点から25グラム程度が適当と思われる。
- ③. 不純物を除くためには90℃~110℃の部分で原材料位置から出来るだけ遠くに位置するように電気炉内の温度分布を制御し、また、結晶成長領域の幅を狭くするためには急峻な温度勾配を持つことが望ましい。
- ④. パイレックス管表面上に冷却空気を局部的に吹き付けると結晶の成長領域を局限する効果がみられる。

(2) 原材料に前節(1)でえられた結晶を回収して用いた場合

ここで回収した結晶とは放射線検出器の製作に不相当とみなされる微細な結晶群および多結晶気味の粗悪な結晶である。 $\text{Hg I}_2$  試薬を原材料とした前節(1)の場合と異なり、注意を要することは不純物が既にかなり除去されているため昇華速度が早いことで、それに相当して短時日のうちに炉内からとりだすことが必要である。前節(1)で述べた所要日数約10日の期間、炉内に置くと成長した単結晶は過熱のため亀裂を生じる。また、前節(1)で述べた温度分布と比較して管面上の温度を低く設定し、結晶の成長状況をつとめて監視することが必要である。結晶製作に供した温度分布と結晶の成長位置をFig. 2-6に示す。##1については原材料として前節(1)で製作した結晶#1、#3、#4を使用し、前節(1)の#4、#5とほぼ同じ温度分布で約1週間炉内で加熱した。この結果左端に近い管のネック部付近に蓄積した結晶は焼けすぎをきたし、劈開性を消失していた。なお、原材料部の残留物は、すすのような灰状のものだけで、 $\text{Hg I}_2$  結晶はすべて無くなっていた。##2は焼けすぎを防ぐために温度設定値を80%に低下して温度分布の低温化をはかり、管にネック部を設ける加工を行わず、結晶の成長状況を観察しながら結晶成長を行い5日間で原結晶がなくなったので、電気炉から取り出した。Photo. 2-5は##2の結晶成長終了時に50mm<sup>2</sup>、5mm厚さ程度の単結晶が管壁に付着している状態を示したもので前節(1)のPhoto. 2-4と比較して結晶は大きく、不純物を含む残滓の量が顕著に減少している。

###1は原材料として結晶製作に失敗した##1の結晶のほとんどを回収して用いたもので、再再蒸気輸送ともいべきものである。##2と同様な温度分布であるがパイレックス管に対しては大幅な改良を試みた。すなわちFig. 2-7に示すように左端から15 cmほどの範囲は外径32 mm, 内径14 mmの中空円筒とし、その空洞部にガラスノズルを挿入し冷却空気を吹き付けたこと、さらにその先端の根元部に長さ数cmの髭状のガラス突起を数本植え付けたことである。また、原材料挿入はFig. 2-7の下に示したように右側の原材料側から行ったため、右端から10 cmの所に薄いガラスの隔壁を作り、試料を挿入し、右側を封じ切った後、**breaking ball**でこの隔壁を破る構造にした。この結果は所要日数6日間で冷却された内部円筒管壁部及びガラスの髭に5 mm角程度の単結晶を成長させることができた。(1)節および(2)節で記述した結晶を使用して作った検出器の特性は後節で説明するように##1, ##2, ##4および##2の結晶を用いて製作した検出器が59.5 keV  $\gamma$ 線に対してピークを示し、##2結晶から作った検出器が一番良いエネルギー分解能を示した。###1結晶から作った検出器は幅広いピークしか示さなかったが、これは結晶成長法が悪いというよりは、##1結晶成長の段階で焼きすぎたため、例えば $I_2$ が飛び去ってHg過剰の $HgI_2$ 結晶になっていたために検出器のエネルギー分解能が悪かったのではないかと思われる。今後の確認を必要とする。

### 3. 検出器製作

Photo. 3-1 はバイレックス管内の壁面に付着した結晶番号#1系の結晶をガラス棒とテフロン製ピンセットを使ってとりだし寄せ集めたものである。このなかから適当な大きさを選び薄いかみそりの刃をさし込んで劈開し易い面（C軸に直角な面に相当する）を探して切り出す。これを20~25%沃化加里水溶液中に浸してエッチングを行いイオン交換水で洗浄する。エッチングの際に亀裂、きずなどの欠陥が肉眼でよく識別されるので、これらを除去し透明なものを選択して用いる。

Fig. 3-1 ~ Fig. 3-5 はエッチング処理をした結晶をアルミ製の板、ハンダを肉盛りした塊り、黄銅製の台座などの金属基盤上に介在物をおいてマウントしたものである。マウントの手順は、テフロンフィルムまたはカバーガラス（0.15mm厚）の介在物を瞬間接着剤で金属基盤面にわたって含有水分20%程度の膠質状黒鉛（以下アカダックと称する）を毛筆で塗布し、乾燥しないうちに結晶をのせて結晶下面とよくなじませて接地側電極とする。ついで、結晶の上面にもアカダックを塗布して電圧印加側電極を作り、金のリード線（0.1mm径）とよくなじませて接触させ、リード線の他端はテフロン絶縁した導体に導電性セメントを使用して接続した。テフロンフィルム、カバーガラスなどの介在物を用いた理由は  $\text{HgI}_2$  結晶中の水銀と基盤金属とが活潑なアマルガム反応を起こすのを避けるためである。例えば  $\text{Al}$  板にアカダックを塗り、その上に  $\text{HgI}_2$  結晶を乗せると、 $\text{HgI}_2$  と  $\text{Al}$  が反応して白い粉末状となりながら、 $\text{HgI}_2$  が溶けてゆく。 $\text{HgI}_2$  結晶と金線間についてもアカダックの塗布量が不足すると接触部近くで金線の切断と結晶面に数ヶ所の孔食を惹起するが、乾燥後の塗布厚さが0.05mm程度あれば支障がないようである。介在物として当初は Fig. 3-1 に示すようにテフロンフィルムを用いていたが、アカダック塗布後の乾燥過程で著しい剝離を生じ結晶下面とよくなじまなかつた。以後はカバーガラスの使用で対処した。Fig. 3-2 はアルミ製の板にマウントした検出器で、これを真空容器の内部に取り付けて、 $\alpha$ 線、 $\gamma$ 線の検出特性を測定した。Photo. 3-2 は結晶番号#1系の結晶をマウントした検出器（#1-2）の例で、(a)は上から見た所、(b)は横から見た所を示している。結晶寸法は各辺が3, 4, 6mmの3角形で厚さは0.5mmである。アルミ製の板にマウントした検出器は $\gamma$ 線及びX線の検出特性の測定時に金属製容器（真空容器を代用）の内部に取り付けるため面倒である。簡便で小型化を図るため Fig. 3-3 のようにトランジスタケースと同軸用コネクタBPC(P)を組み合わせた検出器ケースを試作した。恒温槽にに入れてエネルギー分解能の温度依存性の測定に使用した。しかし、ハーメチックシール部の耐電圧が低いのが難点であった。

Fig. 3-4 は快削黄銅棒を工作してBNC(J)コネクタを嵌合するようにして前記の難点を改善した検出器ケースである。Ge検出器と $\gamma$ 線パルス波高の比較実験を行う際などに使用した。 $\text{HgI}_2$  検出器自体は耐電圧が高いと言われているので、さらに高耐圧のSHVコネクタを使用して Fig. 3-5 のようにSHV(J)コネクタ付きの検出器ケースを試作し、ケース内に結晶をマウントした。 $\alpha$ 線、 $\gamma$ 線の検出特性測定の補足実験として使用した。

なお、長期にわたって検出器の特性を安定に維持させるために耐湿性を付与するHumiseal<sup>\*</sup>を結晶面に向かってスプレーまたは塗布した。使用したのはポリウレタン系の黄味を帯びた1A27とアクリル系の透明な1B12とである。1A27は結晶面へスプレーするのに適しているが、微細な気泡を含んで付着した。1B12は毛筆で結晶面に塗布し、付着性は確実であった。

Humisealは後述するように耐電圧を向上させる効果と多くの場合にエネルギー分解能を改善する効果を示した。

---

\* Humiseal Division, Columbia Chase Corporation,  
Woodside, New York 11377, U.S.A., Tel. (212)932-0800

## 4. 検出器特性測定装置

### 4.1 パルス波高分布の測定方法

Hg I<sub>2</sub> 検出器からの出力パルスは電荷型前置増幅器及びパルス整形を行う主増幅器により増幅されてマルチチャンネル波高分析器によりそのパルス波高が記録される。Fig. 4-1 は検出器から前置増幅器、主増幅器、マルチチャンネル波高分析器へと続く主回路及び検出器へのバイアス電圧電源とチェック校正用のパルサー、オシロスコープとからなる測定装置の構成を示したものである。終端抵抗 93 Ω は主増幅器とマルチチャンネル波高分析器間に使用したケーブルの特性インピーダンスと整合をとるためのターミネーションである。マルチチャンネル波高分析器はキャンベラ社の 8100 型で、記憶されたデータは CRT ディスプレイ、データプロッタ、磁気テープなどを使用して観測、撮影、読み取り、記録、保管される。主増幅器の時定数設定にあたっては、バイアス電圧一定のもとで、時定数を変化してパルス波高分布を測定し、そのなかで最良のエネルギー分解能を与える時定数として 5 μs あるいは 3 μs とした。また、実験の都合で時定数を 8 μs に設定した場合もある。

Hg I<sub>2</sub> 検出器で α 粒子を計数する場合は、Hg I<sub>2</sub> 検出器と α 線源とを両者の間隔が調整可能な大阪電波機製の VC-8 型真空槽内に収容した。α 線としては Am-241 0.111 μCi を使用した。また、Am-241 からの γ 線、X 線を測定する場合は厚さ 0.5 mm のアルミで密封された 10 μCi 及びポリエチレンフィルムで密封された 10 μCi 線源を使用した。以下前者を 10 μCi-a、後者を 10 μCi-b として区別する。α 線源を使用するときは当初は検出器に Humiseal を塗布しないで使用し、真空槽内部は 10<sup>-2</sup> Torr 程度の真空とした。その後、Humiseal を塗布した場合も α パルスを計数できることが判った。γ 線源使用のときは必要に応じ α 線源を使用するときと同様に真空状態としたが、通常は Humiseal を塗布し、真空槽内部には空気を導入した。Fig. 3-3 ~ Fig. 3-5 に示したマウントを使用した検出器は試作容器前面に線源を密着して大気中で測定した。

α 線のパルス波高分布を測定するにはあたっては、パルサーのパルス波高が Si 検出器による Am-241 α 線源の 5.488 MeV のパルス波高に相当するようにパルサーを調整した。なお、使用した Si 検出器は面積 143.1 mm<sup>2</sup> で、ORTEC 社製の表面障壁型であり、プラス 150 V のバイアス電圧を印加した。γ 線のパルス波高分布の測定にあたっては Fig. 4-2 に示すように、前置増幅器として JAERI-125、パルサーとして JAERI-134 を使用してパルサーパルスを含めて 59.5 keV γ 線ピークから 13.9 keV X 線ピークにわたるパルス波高分布が 1024 ch におさまるようにした。Fig. 4-2 に γ 線測定系における各モジュールについて設定した定数値を示した。

## 4.2 立ち上がり時間の測定方法

検出器出力パルスの立ち上がり時間の測定は Fig. 4-1 あるいは Fig. 4-2 に示した前置増幅器の出力パルスをオシロスコープで観測することにより行った。Fig. 4-3 は厚みが 0.7 mm の  $\text{HgI}_2$  結晶を Fig. 3-2 に示したようなアルミ製の板にマウントした検出器 #2-1 にマイナス 300 V のバイアス電圧を印加したとき Am-241  $\alpha$ 線源 0.111  $\mu\text{Ci}$  による前置増幅器の出力波形をオシロスコープ TEKTRO 485 で観測した例を示す。横軸は 0.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、縦軸は 5  $\text{mv}/\text{cm}$ 、ポラロイドフィルム タイプ 107 の露出時間 3 s で撮影した例である。図から  $\alpha$ 線による検出器出力パルス及びパルサーパルスの立ち上がり時間は、それぞれ 0.5  $\mu\text{s}$ 、50 ns であることが読みとられる。

立ち上がり時間を測定することによってキャリアの易動度  $\mu$  を求めることができる。その手順を示すとバイアス電圧を  $V$  (V)、結晶の厚みを  $L$  (cm)、立ち上がり時間を  $t_r$  (s) とすると、電界の強さ  $E$  及びキャリアの速度  $v$  は

$$E = \frac{V}{L} \text{ (V/cm)}, \quad v = \frac{L}{t_r} \text{ (cm/s)}$$

で与えられる。各バイアス電圧に対する前記の前置増幅器出力パルスの観測波形から電界の強さとキャリア速度との関係が表示される。キャリアの易動度  $\mu$  は

$$\mu = \frac{v}{E} \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$$

として求められる (後述の Fig. 5-1 参照)。

$\alpha$ 線の入射する側の電極に印加する電圧が正の場合、結晶中を移動して他の電極に到着するキャリアは正孔であるので、このとき観測されたパルスの立ち上がり時間は正孔の移動によるものであり、したがって、この立ち上がり時間から求めた  $v$  および  $\mu$  は正孔の速度および易動度となる。また逆に、 $\alpha$ 線の入射する側の電極に負の電圧を印加した場合は、結晶中を移動して他の電極に到着するキャリアは電子であるので、このとき観測されたパルスの立ち上がり時間から求めた  $v$  および  $\mu$  は電子の速度および易動度となる。このように、印加電圧の極性を変えることにより、キャリアを正孔あるいは電子に選ぶことができる。

## 5. 各検出器の特性

今回、製作した  $\text{HgI}_2$  検出器のなかで、検出機能を有するものについて、代表的な検出特性の測定結果を報告する。検出機能を有しない検出器とはアカダックの塗布が過剰にすぎたため結晶側面が短絡して洩れ電流が流れたり、単結晶の微細な亀裂にアカダックが浸透したため短絡状態になっていたり、アカダックが十分に乾燥しないうちに Humiseal を塗布したため洩れあるいは短絡を生じていたものなどである。なお、2-3節蒸気輸送法による単結晶の製作(1)項で述べた結晶番号#0 ( Fig. 2-4, Photo. 2-3 参照 ) 系の結晶#0-2 ( $1\text{mm}^2 \times 0.75\text{mm}$ ) を用いて製作した検出器については、検出器製作の要領を会得するためと真空槽内で加えるバイアス電圧値の目安を知るための準備段階として使用したため報告から除外した。以下に述べる各検出器の検出器番号について付言すると、結晶番号#1~#5は市販の  $\text{HgI}_2$  試薬特級を原材料として用い、蒸気輸送法で製作した結晶である。得られた結晶を回収して再び蒸気輸送を行ったものが##1, ##2であり、##1をさらに蒸気輸送したのが###1である(2.3節参照)。検出器番号の最初の数字はマウントした単結晶が上記の結晶番号に属することを示し、末尾の数字は各々の製作順を示している。例えば#1-2は#1で製作した結晶の中から2番目に選んだ結晶を使用した検出器を意味している。

### 5.1 #1-2検出器

#### 5.1.1 結晶成長条件

原材料としてW社  $\text{HgI}_2$  試薬特級 1.25グラムを使用した。炉内の温度分布は Fig. 2-4 に示した通りである。

#### 5.1.2 検出器の製作

$\text{HgI}_2$  結晶の仕上り形状は  $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 6\text{mm}$  の3角形で面積は  $5.3\text{mm}^2$ 、厚さは  $0.5\text{mm}$  である。Fig. 3-2 に示したアルミ製の板にマウントした。検出器の外観は Photo. 3-2 に示した通りである。

#### 5.1.3 $\alpha$ 線検出特性

Photo. 5-1 は検出器にバイアス電圧マイナス  $350\text{V}$  を印加したとき、Am-241  $\alpha$ 線源による前置増幅器の出力波形を TEKTRO 485 で時間を  $0.1\mu\text{s}/\text{cm}$ 、波高を  $5\text{mV}/\text{cm}$  に設定して観測し露出時間2秒で撮影したものである。 $\alpha$ 線によるパルス波形から立ち上がり時間が  $0.2\mu\text{s}$  と読みとられる。マイナス電圧が  $\alpha$ 線入射電極に印加されているので、検出器中を横断するのは電子であるので、観測したパルスは電子の横断によりもたらされたものである。4-2節立ち上がり時間の測定法で述べた手順で計算すると、電界強度  $E$ 、電子速度  $v_e$  はそれぞれ  $E = 7 \times 10^3 \text{V}/\text{cm}$ 、 $v_e = 2.5 \times 10^5 \text{cm}/\text{s}$  となり電子の易動度  $\mu_e$  は  $35.7 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  と算出

される。各バイアス電圧に対する観測波形を観測して Fig. 5-1 に示すような電子速度のバイアス電界依存性が得られた。これから検出器 #1-2 の  $\mu_e$  はほぼ  $40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  とみなされる。次にバイアス電圧プラス 500 V を印加したときの  $\alpha$  パルス波形を Photo. 5-2 に示す。マイナスのバイアス電圧印加の場合に比してパルス波高が低く、立ち上がり時間は  $0.2 \mu\text{s}$  未満で、パルサーパルスの立ち上がり時間  $50 \text{ ns}$  程度に近く、立ち上がりはきわめて速い。 $\alpha$  線入射電極にプラス電圧が印加されているので、検出器結晶中を横断するキャリアは正孔である。正孔の易動度  $\mu_h$  は文献によると  $4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  と言われており、この数字を用いて立ち上がり時間を算出してみると  $1.25 \mu\text{s}$  となるが該当するパルス波形は出現していない。なお、プラス 200 V を印加したときもプラス 500 V を印加したときとほぼ同様なパルス波形を呈し、両者について顕著な差異は認められなかった。このことは正孔が結晶中の格子欠陥や不純物などの捕獲中心に捕獲され、結晶全体を横断することができないために、予想されるようなパルス波形が観測されなかったと考えられる。また、立ち上がり時間がパルサーの立ち上がり時間  $50 \text{ ns}$  とほぼ同じであることから、正孔の平均自由時間は  $50 \text{ ns}$  以下であると思われる。

#### 5.1.4 $\gamma$ 線検出特性

検出器に Humiseal を塗布せず、Am-241  $\gamma$  線源  $10 \mu\text{Ci-a}$  によるパルス波高分布を真空中で測定した。Photo. 5-3 の (a) はバイアス電圧マイナス 350 V を印加したときの主増幅器 ORTEC 450 の出力波形であり、 $\sim 9 \text{ V}$  の波高を持つパルスはパルサーによるもの、2 V 以下が Am-241 からの  $\gamma$  線 X 線パルスである。(b) は縦軸の counts/channel を対数目盛で示した Am-241 の  $\gamma$  線 X 線のパルス波高分布である。右側の #824 チャンネルのピークはパルサーによるピークを示している。17.8 keV Np  $L\beta$  の X 線は broad peak を示し、59.5 keV の  $\gamma$  線に対しては peak を示していない。バイアス電圧プラス 500 V を印加したときのパルス波高分布を Photo. 5-4 に示したが、前者の Photo. 5-3 に比して計数率が高いのは、線源と検出器間の距離が移動したためと思われる。パルス波高が大きくなっていることに関してはその原因は不明である。ピークは全然見られなかった。正孔の電荷収集特性が電子の電荷収集特性に比べて悪いことを意味している。

## 5.2 #1-3 検出器

### 5.2.1 結晶成長条件

#1-2 検出器と同様である。

### 5.2.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は  $1 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  で、これを Fig. 3-5 に示した SHV (J) コネクタを用いた試作容器内にマウントした。Humiseal 1B12 を塗布した。

### 5.2.3 $\alpha$ 線検出特性

Humiseal 塗布前と塗布後のものについて  $\alpha$  パルスの前置増幅器出力波形から立ち上がり時

間を求め  $\mu_e, \mu_h$  を算出した。確認される立ち上がり時間  $t_r$  から算出した結果は Humiseal 塗布前の検出器については、バイアス電圧マイナス 100 V に対して  $t_r = 350 \text{ ns}$  から  $\mu_e = 71.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、プラス 600 V に対して  $t_r = 1.2 \mu\text{s}$  から  $\mu_h = 3.48 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となり。Humiseal 塗布後の検出器については、バイアス電圧マイナス 200 V に対して  $t_r = 350 \text{ ns}$  から  $\mu_e = 73.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、プラス 400 V に対して  $t_r = 4 \mu\text{s}$  から  $\mu_h = 3.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となった。Humiseal 塗布の前後で、 $\mu$  はほとんど変わっていない。

#### 5.2.4 $r$ 線及び X 線の検出特性

Am-241  $r$  線源  $10 \mu\text{Ci}$  を試作検出器前面に貼り付けてパルス波高分布を測定した。

##### (1) 検出器に Humiseal を塗布しない場合

5.95 keV  $r$  線及び 17.8, 13.9 keV X 線に対するエネルギー分解能が、マイナスのバイアス電圧値及び shaping time によって、どのように変化するかを調べた。Fig. 5-2 は shaping time を  $3 \mu\text{s}$  一定にして上記  $r$  線, X 線に対する波高値と半値巾の電圧依存性を示したものである。5.95 keV  $r$  線に対するエネルギー分解能の電圧依存性は顕著である。Fig. 5-3 はバイアス電圧をマイナス 1400V 一定にして半値巾の shaping time 依存性を示したものである。shaping time  $5 \mu\text{s}$  が最適であることが判った。Photo. 5-5 (a), (b) は shaping time を  $3 \mu\text{s}$  にして、バイアス電圧がマイナス 1400V 及びプラス 1400V 印加時のパルス波高分布を示す。Photo. 5-5 (a) によると 5.95 keV  $r$  線及び 17.8, 13.9 keV X 線に対する半値巾はそれぞれ 6.35 keV 及び 2.83, 2.61 keV のエネルギー分解能を示している。Photo. 5-5 (b) のプラスバイアス電圧印加のパルス波高分布は未だピークを示していないけれども、正孔の電荷収集特性としては、かなり良いことを示している。

##### (2) 検出器に Humiseal を塗布した場合

Photo. 5-6 (a), (b) は shaping time  $3 \mu\text{s}$  においてバイアス電圧マイナス 1300V 及びプラス 1200V を印加して 1978 年 10 月 15 日に測定したパルス波高分布である。Photo. 5-6 (a) によると 5.95 keV  $r$  線及び 17.8, 13.9 keV X 線に対する半値巾はそれぞれ 5.83 keV 及び 2.57, 2.57 keV のエネルギー分解能を示している。Photo. 5-6 (a) を Photo. 5-5 (a) と比べると、5.95 keV  $r$  線ピークの低エネルギー側のテイリングが改善されていることが判る。

Photo. 5-7 (a), (b) は shaping time  $3 \mu\text{s}$  においてバイアス電圧マイナス 1300V 及びプラス 1300V を印加して 1979 年 3 月 17 日に測定したパルス波高分布である。検出器を試作して約 5 ヶ月経過しても特性が安定していることを示したものである。なお、Photo. 5-6 (b), Photo. 5-7 (b) によると正孔の電荷収集特性が割合良いことを示している。

以上のことから Humiseal を塗布することによってバイアス電圧がマイナス, プラス印加いずれの場合もパルス波高分布に顕著な差違が認められない。ただ、5.95 keV  $r$  線ピークのエネルギー分解能に若干の改善がみられたと言える。

### 5.3 #2-1 検出器

#### 5.3.1 結晶成長条件

原材料としてK社  $\text{HgI}_2$  試薬特級 25 グラムを使用した。炉内の温度分布は Fig. 2-4, Fig. 2-5 に、炉からとりだしたときの結晶成長の状況は Photo. 2-4 に示した通りである。

#### 5.3.2 検出器の製作

$\text{HgI}_2$  結晶の仕上り寸法は  $2\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$  で、Fig. 3-2 に示したようなアルミ製の板にマウントした。Humisealは塗布していない。

#### 5.3.3 $\alpha$ 線検出特性

##### (1) 立ち上がり時間の測定

バイアス電圧マイナス 300 V を印加したときの  $\alpha$  パルス出力波形は、さきに 4-2 節立ち上がり時間の測定法で例として挙げた Fig. 4-2 である。図によると立ち上がり時間は  $0.5\ \mu\text{s}$  で  $E = 4.29 \times 10^3\ \text{V/cm}$ ,  $v_e = 1.4 \times 10^5\ \text{cm/s}$  となり、 $\mu_e$  は  $32.6\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  として算出された。各バイアス電圧に対する  $v_e$  と  $E$  との関係は Fig. 5-4 のように表示され、この  $\text{HgI}_2$  検出器結晶の  $\mu_e$  はほぼ  $30\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  とみなされる。プラスのバイアス電圧を印加したときの前置増幅器出力のパルス波高が  $2 \sim 4\ \text{mV}$  ときわめて低く、またパルサーと同じ程度の立ち上がりを持つパルスが観測された。 $\mu_h = 4\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  として予想される立ち上がり時間はバイアス電圧が 100 V 及び 350 V に対して、それぞれ  $12.2\ \mu\text{s}$  及び  $3.5\ \mu\text{s}$  となるが Photo. 5-8 (a), (b) に示すように該当するパルス波形は出現していない。正孔の平均自由時間が短かく正孔が検出器結晶中を横断する以前に捕獲中心に捕獲されることを示していると思われる。

##### (2) パルス波高分布の測定

主増幅器のパルス整形の時定数を一定として、印加するバイアス電圧を変化したときと、一定のバイアス電圧を印加して主増幅器の時定数を変化したときとのパルス波高分布を測定して、最大パルス波高の電圧依存性と時定数依存性を調べた。

##### (2-a) 最大パルス波高の電圧依存性

$\text{Am-241}$  の  $5.49\ \text{MeV}$   $\alpha$  線源によるパルス波高分布の代表的なものを Fig. 5-5 の右上部に示した。波高分布に peak がみられないのは、アカダック電極の吸収によるものである\*。Fig. 5-5 は、この最大パルス波高の Si 検出器による  $5.49\ \text{MeV}$   $\alpha$  相当のパルサーパルスに対する相対値を縦軸とし、バイアス電圧を横軸にとって、バイアス電圧による依存性を示したものである。印加し得るバイアス電圧の最大が  $\pm 350\ \text{V}$  であるのは、これを超過するバイアス電圧を印加すると雑音パルスが出現するためである。主増幅器 ORTEC 450 の時定数は  $0.5\ \mu\text{s}$  と一定にした。測定の結果は  $\alpha$  線の入射するアカダック電極にマイナスのバイアス電圧を印加したとき結晶表面で生成された正孔と電子のうち電子が結晶中を横断する場合の方が、 $\alpha$

\* 薄く一様な電極が製作できれば、 $\alpha$  線のパルス波高分布にピークが観測されるはずで望ましい。金や Al の蒸着は  $\text{HgI}_2$  とアマルガムを作るので適当ではない。Pd は安定と言われているので、試みようと考えている。

線の入射電極にプラスのバイアスを印加した正孔横断の場合よりも、最大パルス波高が各バイアス電圧に対して2倍程度大きく、正孔よりも電子の電荷収集効率の良いことが示された。電子横断及び正孔横断いずれの場合もバイアス電圧値が200Vあたりから最大パルス波高は飽和の傾向を示し、その相対値はそれぞれ0.50及び0.25にとどまっている。これは、アカダック電極による $\alpha$ 線の吸収と捕獲中心による正孔捕獲のためであり、本来ならば電子、正孔の対を生成するに要する平均エネルギー $\epsilon$ の値がSiでは $\epsilon_{\text{Si}} = 3.6 \text{ eV}$ 、 $\text{HgI}_2$ では $\epsilon_{\text{HgI}_2} = 4.2 \text{ eV}$ であるので、最大パルス波高の相対値はバイアス電圧を高くしてゆくとき電子横断、正孔横断いずれの場合も $\frac{\epsilon_{\text{Si}}}{\epsilon_{\text{HgI}_2}} = 0.857$ に到達すべきものである。ここで電子横断の場合について、電子易動度 $\mu_e$ と平均寿命 $\tau_e$ との積 $(\mu\tau)_e$ を求めると、 $(\mu\tau)_e = 4.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$ となり、 $\mu_e = 30 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ より $\tau_e = 1.4 \mu\text{s}$ がえられる。 $(\mu\tau)_e$ の算出方法は次の通りである。結晶の厚みをL、バイアス電圧をVとして電荷収集効率 $\eta$ を与えるHechtの式

$$\eta = \frac{\mu\tau}{L^2} V \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{L^2}{\mu\tau V}\right) \right\}$$

から

$$\mu\tau = L^2 \left( \frac{d\eta}{dV} \right)_{V=0}$$

となる。したがって、電荷収集効率の印加電圧依存性の $V=0$ における傾斜 $\left(\frac{d\eta}{dV}\right)_{V=0}$ を測定して $\mu\tau$ を求めることができる。Fig. 5-5の50Vと0Vの値を直線で結び $0.857/0.500$ を乗じて $\left(\frac{d\eta}{dV}\right)_{V=0}$ を求めた。0.857/0.500は $\text{HgI}_2$ 検出器のアカダック電極による $\alpha$ 線の吸収補正である。文献によると $(\mu\tau)_e = 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$ のデータが報告されている。

#### (2-b) 最大パルス波高の時定数依存性

Fig. 5-6はバイアス電圧 $\pm 350\text{V}$ を印加して主増幅器の時定数を $0.25 \mu\text{s}$ から $5 \mu\text{s}$ にわたって変化したときの最大パルス波高相対値の変化を示したものである。マイナスのバイアス電圧を印加した電子横断の場合に時定数を長くしてゆくに連れて最大パルス波高が増加しているのは、パルス波形観測において同一のバイアス電圧値で $0.48 \mu\text{s}$ の立ち上がり時間を示したことからみて妥当であり、正孔横断の場合に時定数の影響をほとんど受けないのは、正孔パルスがパルサーパルスの立ち上がり時間 $50 \text{ ns}$ と同程度の立ち上がり時間を示していることを考えると当を得た結果を示している。

#### 5.3.4 $\gamma$ 線及びX線の検出特性

検出器にHumisealを塗布せず、Am-241 $\gamma$ 線源 $10 \mu\text{Ci}$ -aによるパルス波高分布を真空中で測定した。Photo. 5-9の(a)はバイアス電圧マイナス $350 \text{ V}$ を印加したときのパルス波高分布で、縦軸のcounts/channelは直線目盛である。 $59.5 \text{ keV}$  $\gamma$ 線及び $17.8 \text{ keV}$ X線のpeakが得られ、エネルギー分解能はそれぞれの半値幅が $1.36 \text{ keV}$ 、 $3.8 \text{ keV}$ である。パルサー半値幅は $1.6 \text{ keV}$ であった。(b)はバイアス電圧プラス $300 \text{ V}$ を印加したときのパルス波高分布でpeakはみられない。次にPhoto. 5-10はバイアス電圧マイナス $150 \text{ V}$ を印加したときのFe-55 $100 \mu\text{Ci}$ のX線源に対するパルス波高分布で $5.9 \text{ keV}$ のpeakが雑音から肩を出しており、その半値幅は $3.3 \text{ keV}$ 、このときのパルサーの半値幅は $2 \text{ keV}$ であった。プラスのバイアス電圧印加時にはpeakを示さなかった。電子の電荷収集特性の方が正孔の電荷収集特性よりも良いことを意味している。

## 5.4 #2-2 検出器

結晶成長条件及び検出器の製作については#2-1 検出器の場合と同様であり、マウントも Fig. 3-2 に示したような Al 板である。この段階から  $\gamma$  線の検出特性を測定するのに検出器に Humiseal 1 B 1 2 を塗布し空気中で測定することとした。検出器にマウントした  $\text{HgI}_2$  結晶の仕上り寸法は  $2\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  でバイアス電圧マイナス  $1400\text{ V}$ 、プラス  $1000\text{ V}$  まで印加することができた。電界の強さにして  $(2.0 \sim 2.8) \times 10^4\text{ V/cm}$  であってマイナスのバイアス電圧に対しては#1-2 検出器の約 4 倍、#2-1 検出器の約 7 倍に及ぶ強電界に相当する。Humiseal の塗布が耐電圧性を改善することを示している。Photo. 5-11 の(a)はバイアス電圧マイナス  $1400\text{ V}$  印加時の  $\gamma$  用 Am-241 線源  $10\ \mu\text{Ci}$  - a の  $\gamma$  線 X 線のパルス波高分布を示したもので  $59.5\text{ keV}$   $\gamma$  線の peak はみられない、 $17.8\text{ keV}$  X 線の peak 半値幅は  $6.5\text{ keV}$  でエネルギー分解能は良くなかった。Humiseal を塗布しない状態では恐らくエネルギー分解能はさらに良くないものと思われる。(b)はバイアス電圧プラス  $1000\text{ V}$  を印加したパルス波高分布で peak はみられず、正孔の電荷収集特性の良くないことを示している。

## 5.5 #2-3 検出器

### 5.5.1 結晶成長条件

#2-1 検出器と同様である。

### 5.5.2 検出器の製作

$\text{HgI}_2$  結晶の仕上り寸法は  $1.5\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$  で#2-1 検出器と同様にアルミ製の板にマウントした。検出器に Humiseal 1 B 1 2 を塗布した。

### 5.5.3 $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

#### (1) $\gamma$ 線検出特性

検出器に Humiseal を塗布する前後の Am-241  $\gamma$  線源  $10\ \mu\text{Ci}$  - a によるパルス波高分布を Photo. 5-12 (a), (b) に比較して示す。バイアス電圧はいずれもマイナス  $600\text{ V}$  を印加した場合である。この場合、Humiseal を塗布することによってエネルギー分解能が向上している。Humiseal を塗布しないときはバイアス電圧は  $600\text{ V}$  までしか印加できなかったが Humiseal を塗布すると  $1000\text{ V}$  まで印加できるようになった。すなわち耐電圧の向上が見られた。Photo. 5-13 (a), (b) は検出器に Humiseal を塗布しバイアス電圧値マイナス  $1000\text{ V}$ 、プラス  $1000\text{ V}$  を印加したときのパルス波高分布である。マイナス  $1000\text{ V}$  印加のとき  $59.5\text{ keV}$   $\gamma$  線及び  $17.8\text{ keV}$  X 線に対して半値幅はそれぞれ  $9.2\text{ keV}$ 、 $2.5\text{ keV}$  を示しエネルギー分解能は良い。プラス  $1000\text{ V}$  印加時のパルス波高分布には peak がみられない。正孔の電荷収集特性がこの場合も良くないことがわかる。Photo. 5-14 は Photo. 5-13 (a) を拡大して示したもので、上記のほか  $26.4\text{ keV}$   $\gamma$  線、 $13.9\text{ keV}$   $\text{NpL}_\alpha$ 、 $2.08\text{ keV}$   $\text{NpL}_\gamma$  X 線の peak 及び検出器寸法が小さいためにもたらされる  $\text{HgI}_2$  結晶中の汚素の  $\text{K}_\alpha$  X 線 escape  $31.0\text{ keV}$  が示されている。

## (2) X線検出特性

線源として Ammersham 社の Variable energy X-ray source を用いた。Am-241  $\gamma$  線源を内蔵していて Mn, Cu, Rb, Mo, Ag, Ba などの各種金属に逐次  $\gamma$  線を照射し、それぞれの金属からの特性 X 線が得られるようになっているものである。これら X 線は容器内でコリメートされてでてくる。検出器にバイアス電圧マイナス 1000V を加え、主増幅器 ORTEC 450 は C.G. 1000, F.G. 1000, shaping time 3  $\mu$ s としてパルス波高分布を測定した結果を Photo. 5-15(a)~(f) に示す。Fig. 5-7 はこれらパルス波高分布について各光子エネルギーに対する半値幅を示したもので、エネルギーの低い X 線になるにしたがってエネルギー分解能が良くなる。17.48 keV から 8.05 keV にいたる間は半値幅 2.39 keV 一定とみなされる。

## 5.6 #2-5 検出器

### 5.6.1 結晶成長条件

#2-1 検出器の場合と同様である。

### 5.6.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  0.55 mm で検出器に Humiseal 1A27 を塗布して Fig. 3-3 に示すトランジスタケース内にマウントした。

### 5.6.3 $\gamma$ 線検出特性

検出器を恒温槽に入れ温度 25  $^{\circ}$ C のときの Am-241  $\gamma$  線源 10  $\mu$ Ci-b によるパルス波高分布を Photo. 5-16(a), (b) に示す。トランジスタケースのハーメチックシール部の絶縁が低いため印加しうるバイアス電圧値は 500V にとどまった。(a) はバイアス電圧マイナス 500V 印加時のパルス波高分布で 59.5 keV  $\gamma$  線, 17.8 keV X 線に対する半値幅はそれぞれ 17.1 keV 及び 3.7 keV である。ポリエチレンフィルムで密封された線源であるため 13.9 keV NpL $\alpha$ X 線の peak が明瞭に出現している。(b) はプラス 500V を印加したときに得られたパルス波高分布であるが、peak は見られなかった。この検出器はエネルギー分解能の温度依存性の測定に使用した。結果については第 8 章で報告する。

## 5.7 #3-1 検出器

### 5.7.1 結晶成長条件

原材料として W 社 HgI<sub>2</sub> 試薬特級 50 グラムを使用した。炉内の温度分布は Fig. 2-4, Fig. 2-5 に示した通りである。

### 5.7.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は 1 mm  $\times$  3 mm  $\times$  0.3 mm で Fig. 3-2 に示すアルミ製の板にマウントした。検出器に Humiseal 1A27 を塗布した。

### 5.7.3 $\gamma$ 線検出特性

結晶の厚みが0.3 mmと薄いため印加しうるバイアス電圧は450 Vが限度であった。しかし、電界の強さにして $1.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ でHumiseal塗布による耐電圧向上の効果がみられた。Am-241  $\gamma$ 線源10  $\mu\text{Ci}$ -aによるパルス波高分布はPhoto. 5-17(a), (b)に示す通りで、バイアス電圧マイナス450 V印加の(a)に示されるように59.5 keV  $\gamma$ 線 peakはみられず、17.8 keV X線はbroad peak状を呈していて結晶番号#2系により製作した検出器に比較してエネルギー分解能はかなり劣っている。なお、バイアス電圧を長時間連続して印加したがスペクトル特性の改善される傾向は示さなかった。(b)はプラス450 V印加時のパルス波高分布でpeakを示さなかった。

## 5.8 #3-2検出器

### 5.8.1 結晶成長条件

#3-1検出器と同様である。

### 5.8.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub>結晶の仕上り寸法は1 mm  $\times$  1.8 mm  $\times$  0.5 mmで、Fig. 3-5に示したSHV(J)コネクタ付きの試作容器内にマウントした。検出器にHumiseal 1B12を塗布した。

### 5.8.3 $\alpha$ 線検出特性

Humiseal塗布前後について前置増幅器の $\alpha$ パルス出力波形を観測して立ち上がり時間を求め $\mu_e$ ,  $\mu_h$ を算出した。観測波形のなかで立ち上がり時間の確認されたものから算出した結果は次の通りである。Humiseal塗布前にはバイアス電圧マイナス100 Vに対して $t_r = 270 \text{ ns}$ から $\mu_e = 3.35 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , プラス800 Vに対して $t_r = 0.6 \mu\text{s}$ から $\mu_h = 1.88 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ となり。Humiseal塗布後には、マイナス450 Vに対して $t_r = 80 \text{ ns}$ から $\mu_e = 25 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , プラス900 Vに対して $t_r = 400 \text{ ns}$ から $\mu_h = 2.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ となった。

### 5.8.4 $\gamma$ 線及びX線の検出特性

Am-241  $\gamma$ 線源10  $\mu\text{Ci}$ -bを試作検出器前面に貼り付けてHumiseal塗布前後についてパルス波高分布を測定した。

#### (1) 検出器にHumisealを塗布しない場合

Photo. 5-18(a), (b)はshaping timeを3  $\mu\text{s}$ にして、バイアス電圧がマイナス1400 V及びプラス1350 V印加時のパルス波高分布である。Photo. 5-18(a)によると59.5 keV  $\gamma$ 線に対する半値幅は1.065 keVであり、17.8 keV X線に対してはbroad状の波高分布を呈している。

#### (2) 検出器にHumisealを塗布した場合

Photo. 5-19(a), (b)はshaping timeを3  $\mu\text{s}$ にして、バイアス電圧がマイナス1600 V及びプラス1350 V印加時のパルス波高分布である。Photo. 5-19(a)によると59.5 keV  $\gamma$ 線及び17.8 keV X線に対する半値幅はそれぞれ8.9 keV及び6.4 keVのエネルギー分解能を示してい

る。以上のことからHumisealを塗布することによって、マイナスのバイアス電圧を印加したPhoto. 5-18(a)とPhoto. 5-19(a)を比較してみると後者の方がX線のピークが顕著になったことと、プラスのバイアス電圧を印加したPhoto. 5-18(b)とPhoto. 5-19(b)を比較してみるとスペクトルに変化を生じていることが注目されるが理由は判らない。同じ印加電圧でも、Humisealを塗布するとパルス波高分布が変化する。Humisealは表面の状態を変えることは予想されるが、結晶内部における電荷収集特性を変えるとは考えられないので、Humiseal塗布によるパルス波高分布の変化の説明は理解できない。Humiseal塗布が結晶表面の電荷状態を変え、それにともない結晶内部の電界分布を変えるのかも知れない。

## 5.9 #4-2 検出器

### 5.9.1 結晶成長条件

原材料としてW社HgI<sub>2</sub> 試薬特級25グラムを使用した。炉内の温度分布はFig. 2-4に示した通りである。

### 5.9.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り形状は2.5 mm × 3 mm × 5 mm の3角形で面積は2.85 mm<sup>2</sup>、厚さは0.5 mmである。Fig. 3-2に示すアルミ製の板にマウントした。Humisealは塗布しなかった。

### 5.9.3 α線検出特性(立ち上がり時間の測定)

Photo. 5-20は検出器にバイアス電圧マイナス300 Vを印加して、Am-241 α線源による前置増幅器の出力波形をオシロスコープで時間0.2 μs/cm、波高10 mV/cmに設定して露出時間5秒で撮影したものである。出力波形がFig. 4-3、Photo. 5-1に示したものと異なり、α線の出力パルスがパルサーパルス波高に接近して大きく観測されたのは、オシロスコープの入力端子はno terminationとしたことと、パルサーとしてBNC PB-4を使用し発振周波数25 Hz、立ち上がり時間50 nsとしてパルス波高を低く調整したことによる。

Photo. 5-15によると立ち上がり時間は0.12 μsと読みとられE = 6 × 10<sup>3</sup> V/cm、v<sub>e</sub> = 4.1 × 10<sup>5</sup> cm/secでμ<sub>e</sub>は68.3 cm<sup>2</sup>/V·sと算出された。各バイアス電圧に対する観測波形からFig. 5-8の関係が得られた。したがって、結晶番号#4系のHgI<sub>2</sub> 結晶のμ<sub>e</sub>はほぼ70 cm<sup>2</sup>/V·sとみなされる。#1系、#2系のHgI<sub>2</sub> 結晶のμ<sub>e</sub>が30~40 cm<sup>2</sup>/V·sに比較して一段と向上した易動度を示した。

### 5.9.4 r線検出特性

検出器にHumisealを塗布せずバイアス電圧400 Vを印加したときのAm-241 r線源10 μCi-bによるパルス波高分布をPhoto. 5-21(a), (b)に示す。(a)によると59.5 keV r線及び17.8 keV X線に対する半値幅はそれぞれ14.9 keV、5.0 keVである。原材料としてW社HgI<sub>2</sub> 試薬を用い、Humisealを塗布しない検出器のなかでは最も良いエネルギー分解能を示した。

### 5.9.5 Humisealの塗布

Humisealをかけると5.5.3節で説明したように一般に耐電圧の向上およびエネルギー分解能の改善が見られるので、この検出器についてもHumisealを塗布して測定する必要がある。1978年3月頃にHumiseal 1A27をスプレーしたが測定は行っていなかった。8月まで約5ヶ月間乾燥箱に保管してあった。8月27日に測定を行った所、300V以下のバイアス電圧では雑音が出なかったが、400Vを印加すると雑音が出た。金のリード線の接続が外れたので、シンナでHumisealを溶かし、エッチングをしたが、結晶の透明さが失われた。真空槽に入れて真空引きを行ったが、雑音はなくなり、シンナでHumisealを溶かし、エッチングをしたことにより、アカダックが結晶表面に広がり、雑音を増したのではないと思われる。したがって、Humisealを塗布した効果を測定することはできなかった。

## 5.10 #4-3 検出器

### 5.10.1 結晶成長条件

5.9.1節と同じである。

### 5.10.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り形状は1.5mm×2mm×0.4mmtの方形で面積は3mm<sup>2</sup>である。Fig. 3-4に示したケースにマウントした。

### 5.10.3 $\gamma$ 線検出特性

検出器にHumisealを塗布せず、バイアス電圧マイナス450V、プラス450V印加時のAm-241  $\gamma$ 線源10 $\mu$ Ci-bによるパルス波高分布をPhoto. 5-22(a), (b)に示す。(a)によると59.5keV  $\gamma$ 線に対してno peak, 17.8keV X線に対してbroad peakを示した。(b)のプラスバイアス電圧印加時については電荷収集特性がさらに悪かった。

検出器にHumiseal 1A27をスプレーしたところ大きな気泡を生じた、このためシンナでHumisealを溶かしてHumiseal 1B12を筆で塗布した。 $\gamma$ 線源によるパルス波高分布は100V未満でノイズが激増していて測定できなかった。シンナによるアカダックが結晶中に浸みこんだものと思われる。

## 5.11 #4-4 検出器

### 5.11.1 結晶成長条件

#4-2検出器と同様である。

### 5.11.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は2mm×3mm×0.6mmtで、これをFig. 3-5に示した試作容器内にマウントした。検出器にHumiseal 1B12を塗布した。

### 5.11.3 $\alpha$ 線検出特性

Humiseal塗布後のものについて、 $\alpha$ パルスの出力波形を観測し、立ち上がり時間 $t_r$ を求め $\mu_e$ 、 $\mu_h$ を算出した。算出結果はバイアス電圧マイナス600Vに対しては $t_r = 80 \text{ ns}$ から $\mu_e = 7.5.0 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ で、プラス900Vに対しては $t_r = 0.5 \mu\text{s}$ から $\mu_h = 8.0 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ となった。

### 5.11.4 $\gamma$ 線及びX線の検出特性

Am-241  $\gamma$ 線源10  $\mu\text{Ci}$  - bを試作検出器前面に貼り付けてパルス波高分布を測定した。shaping timeは3  $\mu\text{s}$ とした。

#### (1) 検出器にHumisealを塗布しない場合

Photo. 5-23(a), (b)はバイアス電圧がマイナス800V及びプラス800V印加時のパルス波高分布である。Photo. 5-23(a)によると5.9.5 keV  $\gamma$ 線に対してはピークがみられない、17.8 keV X線に対してはbroad状の波高分布を呈している。Photo. 5-23(b)によると正孔の電荷収集特性は良くない。

#### (2) 検出器にHumisealを塗布した場合

Photo. 5-24(a), (b)はバイアス電圧がマイナス1100V及びプラス1000V印加時のパルス波高分布である。

Photo. 5-24(a)によると5.9.5 keV  $\gamma$ 線に対する半値幅は22.1 keVで、17.8 keV X線に対してはbroad状の波高分布を呈している。Photo. 5-24(b)によると正孔の電荷収集特性はきわめて良くない。以上のことからHumisealを塗布することによって、マイナスのバイアス電圧を印加した場合に、 $\gamma$ 線及びX線に対するエネルギー分解能の改善がみられる。

## 5.12 #5-2 検出器

### 5.12.1 結晶成長条件

原材料としてK社HgI<sub>2</sub>試薬特級25グラムを使用した。炉内の温度分布はFig. 2-4に示した通りである。

### 5.12.2 検出器の製作

仕上り寸法1.5 mm  $\times$  1.5 mm  $\times$  0.5 mmのHgI<sub>2</sub>結晶にHumiseal 1B12を塗布して、Fig. 3-4に示したケースにマウントした。

### 5.12.3 $\gamma$ 線の検出特性

バイアス電圧マイナス800V、プラス800V印加時のAm-241  $\gamma$ 線源10  $\mu\text{Ci}$  - bによるパルス波高分布をPhoto. 5-25(a), (b)に示す。(a)によると5.9.5 keV  $\gamma$ 線、17.8 keV X線に対してそれぞれdouble peakがみられる。これは単結晶の一部が悪いのか、結晶が2つに割れているのではないかと思われる。(b)のプラスバイアス電圧印加時については電荷収集特性の良くないことを示している。

## 5.13 #5-4 検出器

### 5.13.1 結晶成長条件

#5-2 検出器と同じである。

### 5.13.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は、1.5 mm × 5 mm × 0.5 mm で #5-2 検出器と同様に Fig. 3-4 に示したような試作容器内にマウントした。

### 5.13.3 r線の検出特性

Humiseal 1 B 1 2 塗布前、塗布後に同一のバイアス電圧マイナス 500 V を印加して、r 線源によるパルス波高分布を比較したのが Photo. 5-26(a), (b) である。Humiseal の塗布によってエネルギー分解能が改善されることを示している。Humiseal 塗布後マイナス 750 V, プラス 500 V のバイアス電圧を印加したときのパルス波高分布が Photo. 5-27(a), (b) である。Photo. 5-27(a) によると 5.95 keV r 線は broad peak 状を呈しその半値幅は 18.2 keV, 1.78 keV X 線に対して半値幅 3.5 keV のエネルギー分解能を示した。Photo. 5-27(b) のプラスバイアス電圧印加のパルス波高分布によると正孔の電荷収集特性としては良い方である。

## 5.14 ###1-1 検出器

### 5.14.1 結晶成長条件

W社 HgI<sub>2</sub> 試薬を用いて製作した結晶番号 #1, #3, #4 の結晶のなかで多結晶性のもの、微細なものを寄せ集めて原材料として製作した結晶番号 ###1 である。###1 は電気炉内に長時間置きすぎたためか、結晶の劈開性が悪く使用できなかった。そこでこの ###1 結晶を再び原材料として製作した。炉内温度分布は Fig. 2-6 に示した通りである。

### 5.14.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は 1.5 mm × 1.5 mm × 0.5 mm で Humiseal 1 A 2 7 を塗布し、Fig. 5-9 のようにアルミ製の板にマウントした。今回は接地側電極となるアルミ製の板の一部をくりぬき、ここを通して放射線が結晶表面にあたるようにした。

### 5.14.3 r線検出特性

Am-241 r 線源 10 μCi-b によるパルス波高分布を測定した。Fig. 5-9 に示したように結晶中の電子横断はバイアス電圧の極性がプラスのときに行われるため、この極性のときが電荷収集特性がよい。Photo. 5-28(a), (b) はバイアス電圧値 500 V 印加の正負に対するパルス波高分布である。後節で述べるように、##2 結晶から作った検出器は良いエネルギー分解能を示し、再結晶成長を行ったことにより、不純物が少なくなったためか、エネルギー分解能の改善が見られたのに対して、再結晶成長を行った ###1 結晶から作った検出器が余り良い特

性を示さなかったことは、##1結晶成長時に高温で長時間焼きすぎたために $I_2$ が不足したHg過剰の結晶になってしまったのではないかという疑いがあり、再再結晶成長が特性を劣化させると単純に結論することはできないと思われ、結論は今後に残された。

## 5.15 ###1-2検出器

### 5.15.1 結晶成長条件

###1-1検出器と同様である。

### 5.15.2 検出器の製作

Hg $I_2$ 結晶の仕上り寸法は $1.2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ で、Fig. 3-5に示したSHV(J)コネクタ付きの試作容器内にマウントした。検出器にHumiseal 1B12を塗布した。

### 5.15.3 $\gamma$ 線及びX線の検出特性

Am-241 $\gamma$ 線源 $10\mu\text{Ci}$ -bを試作検出器前面に密着してパルス波高分布を測定した。shaping timeは $3\mu\text{s}$ とした。

#### (1) 検出器にHumisealを塗布しない場合

Photo. 5-29(a), (b)はバイアス電圧がマイナス $300\text{V}$ 及びプラス $200\text{V}$ 印加時のパルス波高分布である。

Photo. 5-29(a)によると $59.5\text{keV}$  $\gamma$ 線に対してはbroad状の波高分布を呈し、 $17.8\text{keV}$ X線に対してはピークを示さなかった。Photo. 5-29(b)によると正孔の電荷収集特性は良くない。

#### (2) 検出器にHumisealを塗布した場合

Photo. 5-30(a), (b)はバイアス電圧がマイナス $700\text{V}$ 及びプラス $700\text{V}$ 印加時のパルス波高分布である。Photo. 5-30(a)によると $59.5\text{keV}$  $\gamma$ 線に対してはDouble peakを呈し、 $17.8\text{keV}$ X線に対しては半値幅が $6.0\text{keV}$ のエネルギー分解を示した。Photo. 5-30(b)によると正孔の電荷収集特性はHumiseal塗布前よりは改善されている。以上のことからHumiseal塗布前に比較して塗布後は、耐電圧がマイナス $300\text{V}$ からマイナス $800\text{V}$ に改善された。また、バイアス電圧がマイナス $300\text{V}$ のパルス波高分布を比較してみてもスペクトルは改善されていた。しかし、未だスペクトルは良くはなかった。

## 5.16 ##2-2検出器

### 5.16.1 結晶成長条件

K社Hg $I_2$ 試薬を用いて製作した結晶番号#2, #5の結晶のなかで検出器製作に適しない結晶を寄せ集めて原材料として製作した。炉内の温度分布はFig. 2-6に示した通りである。

### 5.16.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り形状が2mm×2mm×2.5mm の3角形で、面積は1.95mm<sup>2</sup>、厚さは0.7mmでFig. 3-4の試作容器にマウントした。Humiseal 1A27を塗布した。

### 5.16.3 $\gamma$ 線検出特性

バイアス電圧1000Vを印加してAm-241  $\gamma$ 線源10 $\mu$ Ci-bによるパルス波高分布をPhoto. 5-31(a), (b)に示す。バイアス電圧マイナス1000V印加の(a)によると59.5keV  $\gamma$ 線及び17.8keV X線に対する半値幅はそれぞれ4.9keV, 2.6keVであって、ここまで列挙してきた検出器のなかでエネルギー分解能の最も良いものである。また、バイアス電圧プラス1000V印加の(b)の場合についても正孔の電荷収集特性が向上していることを示した。59.5keVピークとパルスピークの間にある計数については測定当時気が付かず、原稿をまとめる段階で問題となった。よりエネルギーの高い $\gamma$ 線源が近くにあったのを知らないで測定したためのバックグラウンドなのか、あるいは、検出器のどこかで絶縁破壊をしていてそのための疑似パルスなのかは確かめることが出来なかった。

次に、バイアス電圧マイナス1000Vを印加してCs-137線源100 $\mu$ Ciによるパルス波高分布をPhoto. 5-32(a), (b)に示す。(a), (b)は縦軸を変えただけで同じパルス波高分布である。662keV  $\gamma$ 線のpeak及びHgI<sub>2</sub>結晶中の水銀のK $\alpha$  X線 escape peak 591.2keVが付随しているのがみられる。このように $\gamma$ 線のエネルギーが高くなると $\gamma$ 線が検出器の結晶内部まで到達して電子・正孔対の生成が結晶の全領域にわたって行われるようになるため、電荷収集特性に及ぼす正孔の短い平均自由行程 $\lambda_h$  ( $\lambda_h = \mu_h \tau_h E < L$ )の影響が大きくなるようになって単一キャリア輸送特有のパルス波高分布を呈し、良いエネルギー分解能が期待できなくなる。

## 5.17 ##2-3 検出器

### 5.17.1 結晶成長条件

##2-2検出器と同様である。

### 5.17.2 検出器の製作

HgI<sub>2</sub> 結晶の仕上り寸法は1.5mm×1.5mm×0.2mmで、Fig. 3-5に示したSHV(J)コネクタ付きの試作容器内にマウントした。検出器にHumisealは塗布していない。

### 5.17.3 $\gamma$ 線及びX線の検出特性

Am-241  $\gamma$ 線源10 $\mu$ Ci-bを試作検出器前面に密着し、shaping time 3 $\mu$ sにおいてパルス波高分布を測定した。結晶に小さな亀裂が入っていたため印加し得るバイアス電圧値は200Vが限度であった。マイナス200Vにおいて59.5keV  $\gamma$ 線に対してはbroadのピーク、17.8keV X線に対してはピークを示さなかった。

## 5.18 ##2-4 検出器

### 5.18.1 結晶成長条件

##2-2 検出器と同様である。

### 5.18.2 検出器の製作

前節(5.17.2)の試作容器内にある##2-3 検出器を除去して、仕上り寸法が  $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$  の  $\text{HgI}_2$  結晶をマウントした。厚さは  $0.5\text{ mm}$  程度にすることを予定していたが、KI 溶液が濃くなったため溶けすぎて  $0.3\text{ mm}$  の厚さとなった。検出器に Humiseal 1B12 を塗布した。

### 5.18.3 $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

$\text{Am-241}$   $\gamma$  線源  $10\ \mu\text{Ci}$  - b を試作検出器前面に密着し、shaping time  $3\ \mu\text{s}$  においてパルス波高分布を測定した。バイアス電圧マイナス  $600\text{ V}$  印加時において Photo. 5-33 は Humiseal を塗布しない場合、Photo. 5-34 は Humiseal 塗布後のパルス波高分布である。いずれも  $59.5\text{ keV}$   $\gamma$  線に対してピークを示さず、 $17.8\text{ keV}$  X 線に対して broad 状の波高分布を呈し、エネルギー分解能は良くなかった。以上のことから、Humiseal を塗布することによって broad 状の波高分布ではあるが、X 線のスペクトルがいくらか改善された。しかしながら耐電圧の向上は認められなかった。

## 5.19 ##2-5 検出器

### 5.19.1 結晶成長条件

##2-2 検出器と同様である。

### 5.19.2 検出器の製作

前節(5.18.2)の##2-4 検出器はエネルギー分解能が良くないので、これを除去して同一の試作容器内に仕上り寸法が  $1.5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$  の  $\text{HgI}_2$  結晶をマウントした。検出器に Humiseal 1B12 を塗布した。

### 5.19.3 $\alpha$ 線検出特性

Humiseal 塗布後のものについて  $\alpha$  パルスの出力波形を観測し、立ち上がり時間  $t_r$  を求め  $\mu_e$ ,  $\mu_h$  を算出した。算出結果はバイアス電圧マイナス  $900\text{ V}$  に対しては  $t_r = 70\text{ ns}$  から  $\mu_e = 77.77\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となり、プラス  $900\text{ V}$  に対しては  $t_r = 1\ \mu\text{s}$  から  $\mu_h = 5.44\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となった。

### 5.19.4 $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

$\text{Am-241}$   $\gamma$  線源  $10\ \mu\text{Ci}$  - b を試作検出器前面に密着させてパルス波高分布を測定した。

shaping time は  $3 \mu\text{s}$ とした。

(1) 検出器に Humiseal を塗布しない場合

Photo. 5-35(a), (b)はバイアス電圧がマイナス  $800 \text{ V}$ 及びプラス  $800 \text{ V}$ 印加時のパルス波高分布である。

Photo. 5-35(a)によると  $59.5 \text{ keV}$   $\gamma$ 線に対してはピークがみられない,  $17.8 \text{ keV}$  X線に対しては broad 状のピークを呈している。Photo. 5-35(b)によると正孔の電荷収集特性はきわめて良くない。

(2) 検出器に Humiseal を塗布した場合

Photo. 5-36(a), (b)はバイアス電圧がマイナス  $1800 \text{ V}$ 及びプラス  $1200 \text{ V}$ 印加時のパルス波高分布である。

Photo. 5-36(a)によると  $59.5 \text{ keV}$   $\gamma$ 線に対してはピークが認められるまでにはいたっていないが,  $17.8, 13.9 \text{ keV}$  X線に対しては半値幅がそれぞれ  $3.0, 2.8 \text{ keV}$  のエネルギー分解能を呈している。

Photo. 5-36(b)によると正孔の電荷収集特性は良くない。以上のことから Humiseal を塗布することによって, マイナスのバイアス電圧を印加した場合の X線に対するエネルギー分解能は改善され, 耐電圧値は  $800 \text{ V}$  から  $1800 \text{ V}$  へと飛躍的に向上した。

## 6. 検出器の総合的評価

Table 6-1 は前章に述べた検出器特性をまとめて、大要を示したものである。全体を通じて検出器にマウントした $\text{HgI}_2$ 単結晶の仕上り寸法は面積にして $1.6 \sim 8 \text{ mm}^2$ ， $0.2 \sim 0.7 \text{ mm}$ にわたっている，平均と面積は $3 \text{ mm}^2$ ，厚さは $0.5 \text{ mm}$ 前後である。印加したバイアス電圧による電界はHumisealを塗布しない場合に $0.5 \sim 4.5 \text{ kV/mm}$ ，Humisealを塗布した場合は $0.6 \sim 5.3 \text{ kV/mm}$ にわたっている。本章では検出特性と材料との関係について原材料としてK社，W社試薬を用いて製作した検出器について検出性能を比較し，ついで検出特性と繰り返し蒸気輸送との関係については蒸気輸送を1回行なったときと，2～3回繰り返して行なったときのエネルギー分解能に与える影響を検討してみたい。

### 6.1 K社試薬とW社試薬による検出器特性の比較

ここでは蒸気輸送を1回行なった場合について述べる。

#### (1) 立ち上がり時間の観測から算出したキャリアの易動度について

電子の易動度 $\mu_e$ は $25 \sim 40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 級と $70 \sim 75 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 級とが得られた。K社試薬を用いて製作した検出器では#2-1検出器について $30 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を求めるにとどまった。

正孔の易動度 $\mu_h$ はW社試薬を用いて製作した検出器について $1.9 \sim 3.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 級と $8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ とが得られた。

したがって，これだけでは原材料としてK社，W社試薬を用いることによる相異点を論じることができない。

$\mu_e$ ， $\mu_h$ 値にバラツキの生じた原因としては，原材料中の不純物，結晶成長条件が異なること，また，同一パイロックス管内でも温度分布があるために結晶の成長条件が異なり，異なった特性の結晶となっていることが主な原因と考えられる。

文献によると $300 \text{ K}$ において $\mu_e \approx 100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ， $\mu_h \approx 4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 値が多く報告にみられる。我々の製作した検出器は $\mu_e$ ， $\mu_h$ とも，報告されている値よりは低かった。

#### (2) 検出器にHumisealを塗布しない場合について

エネルギー分解能の最良のものは $17.8 \text{ KeV}$  X線， $59.5 \text{ KeV}$   $\gamma$ 線に対する半値幅がK社試薬によるものは#2-1検出器でそれぞれ $3.8 \text{ KeV}$ ， $13.6 \text{ KeV}$ で，W社試薬によるものは#1-3検出器でそれぞれ $2.8 \text{ KeV}$ ， $6.35 \text{ KeV}$ を示した。この結果からW社試薬がK社試薬より良質であると判定できない。結晶成長条件としての試薬封入量，炉内の温度分布などを異にするからである。

#### (3) 検出器にHumisealを塗布した場合について

エネルギー分解能の最良のものは $17.8 \text{ KeV}$  X線， $59.5 \text{ KeV}$   $\gamma$ 線に対する半値幅がK社試薬によるものは#2-3検出器でそれぞれ $2.9 \text{ KeV}$ ， $9.2 \text{ KeV}$ で，W社試薬によるものは#1-3検出器でそれぞれ $2.6 \text{ KeV}$ ， $5.8 \text{ KeV}$ を示した。

以上の例は Humiseal を塗布した結果エネルギー分解能が改善されたものであるがW社試薬による#3-1及び#4-4検出器ではエネルギー分解能が良いとはいえ改善の効果はみられない。しかし、一般的に言えることとしては、同一の結晶番号について検出器に Humiseal を塗布することによって塗布前と比較して、印加し得るバイアス電圧値は約1.2~2.3倍に向上し、多くの場合エネルギー分解能を改善する傾向を示したと言うことができる。この Humiseal 塗布による分解能の改善について言及した論文は未だない。

## 6.2 検出特性と繰り返し蒸気輸送との関係

原材料として  $HgI_2$  試薬を用い蒸気輸送を1回行なって製作した結晶による検出器と比較して、得られた結晶を回収して原材料とし蒸気輸送を繰り返し行なって製作した結晶による検出器の方が良いエネルギー分解能を示すか否かは結晶成長条件の適否によって大きく左右される。

結晶成長の際に炉内の温度分布、加熱時間が適切でなかったために成長した結晶が過熱されて壁開性を喪失した失販例はW社試薬系の結晶番号##1にみられる。蒸気輸送を適切な条件下で繰り返すと結晶の純度が高まってエネルギー分解能の向上する結果を示したものが認められる。たとえば、K社試薬による検出器でTable 6-1の59.5 KeV  $\gamma$ 線に対する半値幅の欄に注目すると9.2 KeV以上であったものが繰り返し蒸気輸送を行なった##2-2検出器で4.9 KeVに改善されている。また、壁開性を喪失したW社試験系で結晶番号##1の結晶を適切な条件下で再び繰り返し輸送を行なると検出機能を回復した###1系の検出器が挙げられる。

##2-2検出器は我々の製作した検出器のなかで、最良のエネルギー分解能を示したにもかかわらず、同じ結晶ロッドのなかの##2-3~##2-5検出器はエネルギー分解能はきわめて良くなかった。したがって我々の試みた結晶成長方法では、結晶を多数作って、そのなかから壁開性の良い結晶を選択することが良い検出器を得る方法であると思われる。

7. HgI<sub>2</sub> 検出器とGe 検出器とのパルス波高の比較

HgI<sub>2</sub> 検出器の電子，正孔の対を生成するに要する平均エネルギー  $\epsilon$  の値を求めるため，HgI<sub>2</sub> 検出器とGe 検出器の並列に接続してパルス波高分布を測定して比較した。HgI<sub>2</sub> 検出器として # 2-2 検出器  $1.95\text{mm}^2 \times 0.7\text{mm}$  を用い，Ge 検出器として NRD 社の  $50\text{mm}^2 \times 5\text{mm}$  の planar 型高純度 Ge 検出器を用いた。2つの検出器は Fig. 7-1 に示すように並列に接続した。高純度 Ge 検出器は p 層側にマイナス 500V の電圧を印加して信号を n 層側からとりだす接続になっており，HgI<sub>2</sub> 検出器については  $\gamma$  線の入射方向の反対側を接地し，入射方向側にマイナス 800V の電圧を印加した。この結果，前置増幅器の出力信号の極性は Ge 検出器ではマイナス，HgI<sub>2</sub> 検出器ではプラスとなったため主増幅器の入力極性を切換えて測定を行なった。切換時の増幅度およびベースラインのシフトは前置増幅器の test 入力にパルサー信号を挿入して基準とし主増幅器の増幅度を調整するとともにベースラインの調整を行ない正確に合致せしめた。線源には Am-241  $\gamma$  線源  $10\mu\text{Ci}$  を使用し，Ge 検出器については検出器表面から 10 cm の位置において測定し，HgI<sub>2</sub> 検出器については検出器ケースに密着して測定を行なった。HgI<sub>2</sub> 検出器 Ge 検出器で測定したパルス波高分布を Fig. 7-2 (a) (b) に示す。(a) に示す HgI<sub>2</sub> 検出器のエネルギー分解能が先に示したバイアス電圧 マイナス 1000V 印加のパルス波高分布 Photo. 5-31 (a) と比較して悪くなっているのは Ge 検出器と並列に接続したこと，HgI<sub>2</sub> 検出器の検出特性が時間の経過に伴なって悪くなってきたことによると考えられる。Fig. 7-3 に HgI<sub>2</sub> 検出器と Ge 検出器とのチャンネル数に対する  $\gamma$  線エネルギーとの関係を示す。両者の直線を延長すると，エネルギー零で若干ずれている。上記の結果と 77 K における Ge 検出器の電子，正孔の対を生成するに要する平均エネルギー  $\epsilon_{\text{Ge}} = 2.98\text{eV}$  の値を使って HgI<sub>2</sub> 検出器の電子，正孔の対を生成するに要する平均エネルギーの値を算出した。すなわち，

$CH_{\text{HgI}_2}$  : HgI<sub>2</sub> 検出器の波高値 (チャンネル数)

$CH_{\text{Ge}}$  : Ge 検出器の波高値 (チャンネル数) として

$$\frac{\epsilon_{\text{HgI}}}{\epsilon_{\text{Ge}}} = \frac{CH_{\text{Ge}}}{CH_{\text{HgI}_2}} \quad \text{の関係式を適用して算出すると } 59.5\text{KeV } \gamma \text{ 線および } 17.8\text{KeV } X \text{ 線に}$$

対してそれぞれ  $\epsilon_{\text{HgI}_2}$  は 4.48, 4.20 eV となった。この値は現在までに報告されている電子・正孔対あたりの平均エネルギーの値 4.2 eV とほぼ合致している。

## 8. エネルギー分解能の温度依存性

HgI<sub>2</sub>検出器およびAm-241  $\gamma$ 線源を可変温度(-30°C~+70°C)の新日本電工(株)製 Thermostatic Oven TO-3WB型恒温槽に入れて、エネルギー分解能の温度依存性を測定した。HgI<sub>2</sub>検出器は4mm<sup>2</sup>×0.55mmtの単結晶をトランジスタケースにマウントした#2-5検出器で、Am-241  $\gamma$ 線源10 $\mu$ Ci-bは検出器の前面に密着した。トランジスタケースのハーメチックシール部が高温になると耐電圧性が低下するため印加しうるバイアス電圧値は低い。Fig. 8-1はバイアス電圧マイナス300Vを印加したときのパルス波高分布の温度依存性を示したもので、温度を下げるとエネルギー分解能が良くなってゆくことが判る。Photo. 8-1は各温度に対して印加しうる最高のマイナスバイアス電圧値に対するパルス波高分布の温度依存性を示したもので、50°C, 25°C, 0°Cの各温度に対して59.5 KeV  $\gamma$ 線ピークの半値幅はそれぞれ21.4 KeV, 17.1 KeV, 15.4 KeVであり、13.9 KeV NpL <sub>$\alpha$</sub>  X線ピークの半値幅はそれぞれ3.2 KeV, 2.7 KeV, 2.5 KeV となって温度がさがるに従ってエネルギー分解能が向上する。

Fig. 8-2はバイアス電圧プラス300Vを印加したとき、Photo. 8-2は各温度に対して印加しうる最高のプラスバイアス電圧値に対するパルス波高分布の温度依存性を示したもので、エネルギー分解能は低温になると若干、改善されてくることが判る。

温度を下げるとエネルギー分解能の向上する理由として、易動度×平均自由時間積( $\mu\tau$ 積)が大きくなるためと考えられるが、 $\mu$ ,  $\tau$ のいずれが大きくなるのかは不明である。なお、エネルギー分解能のバイアス印加電圧に対する依存性は温度によって異なる様相を呈したことを付記する。今後は-10°C~-70°Cにわたる温度特性を各検出器について測定してゆきたい。

## 9. 結 び

1977年11月23日に、一端に $\text{HgI}_2$ 粉末(試薬特級)を真空封じしたパイレックス管を2温度領域の電気炉に入れて蒸気輸送により $\text{HgI}_2$ 結晶の製作を開始して以来、約一年半、アカダックを両電極とした検出器を約30個試作して、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、X線による検出器特性の測定などを行なって来た。以下に、本研究で得られた成果の概要を示す。

(1) 東北大学金属材料研究所仁科研究室から頂いた溶媒蒸発法で製作された $\text{HgI}_2$ 結晶を使用して $\text{HgI}_2$ 検出器を製作し、我が国で始めて\*、 $\alpha$ 線パルスおよび $\gamma$ 線パルスを観測した(附録A.2節参照)

(2) 我々が2温度領域電気炉を用いて蒸気輸送法で製作した結晶からは、数mm角 $\times$ 1mm程度の単結晶が得られた。これらの結晶を使用した検出器(Table 6-1参照)の中で、室温で最良のエネルギー分解能を示した検出器##2-2(面積 $1.95\text{mm}^2$ 、厚さ $0.7\text{mm}$ )は、 $5.95\text{KeV}$   $\gamma$ 線に対して半値幅 $4.9\text{KeV}$ を示した。他の検出器のエネルギー分解能はそれより劣り、Table 6-1に示したようにピークを示さないもの、ダブルピークを示すものなどを含めて種々の特性を示した(5, 6章参照)。すべての検出器は放射線入射側電極に負電圧をかけた場合(電子横断時)よりも正電圧を印加した場合(正孔横断時)の方がパルス波高が低く、また、エネルギー分解能も悪く、正孔の電荷収集特性が電子のそれよりも低いことを示した。

(3)  $5.5\text{MeV}$   $\alpha$ 線パルスの立ち上がり時間およびパルス波高の観測値から、 $\text{HgI}_2$ 検出器結晶中の電子、正孔の移動度 $\mu_e$ 、 $\mu_h$ および $\mu\tau$ 積( $\tau$ は平均自由時間)を求めた。(Table 6-1参照)。 $\mu_e = 25 \sim 40\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $\mu_e = 70 \sim 75\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $\mu_h = 1.9 \sim 3.5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $\mu_h = 8\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を示した。これらの値は文献<sup>2)3)</sup>で示されている $\mu_e \approx 100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $\mu_h \approx 4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ よりは低かった。 $\mu\tau$ 積については、#2-1検出器(5.3節参照)は $(\mu\tau)_e = 4.2 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{V}$ を示し、文献の $(\mu\tau)_e = 10^{-4} \sim 10^{-5}\text{cm}^2/\text{V}$ と同じレンジに入っている。また、 $\mu_e = 30\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ から $\tau_e = 1.4\mu\text{s}$ となった。正孔横断に対するパルス波高は電子横断時のパルス波高よりも低く、また、 $\mu_h$ を求められるような直線的に上昇する立ち上がりを示すようなパルスを観測できないで、パルスパルスの立ち上がりとほぼ同様な立ち上がりのパルスを示すことが多い。したがって、 $\tau_h$ が極めて短い( $< 5 \times 10^{-8}\text{s}$ )ものと思われる。この場合 $\mu_h = 4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ としても $(\mu\tau)_h < 2 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{V}$ となる。正孔の収集特性が電子の収集特性に比べて2桁以上悪いことを示している。

(4) 良い検出器特性を得ることのできる結晶成長条件を求めるために、電気炉の温度分布やパイレックス管の寸法、構造などを変えて見たが、同一ロット内の異なる単結晶から作った検出器は異なる特性を示したため、明確な結晶成長条件を求めることができなかった。しかし、経験的に、透明度が高く劈開性の良い結晶は良い検出器特性を示すことが判った。劈開性が良

\* 最近(1979年4月)、東北大学金属材料研究所仁科研究室見方裕一氏が $\text{HgI}_2$ 検出器の試作に着手された。

いというのは、例えば、カミソリの刃を軽く当てると結晶が劈開することを意味している。

電気炉の温度が高すぎると劈開性の良い結晶を得ることができないこと、パイレックス管径が35mmの場合は管径25mmに比べては結晶は小さいけれども良い検出器特性が得られること、逆に外径35mmより25mmの方が面積の大きい厚い結晶が得られること、有効に原材料を使用するには25g程度をパイレックス管に封入するのが良いこと、低温帯側の温度分布を急峻にしたり、あるいは冷却空気を局部的に吹き付けると結晶成長領域が局限できてより大きな結晶が得られること、結晶を原材料として蒸気輸送させるときは特級試薬を原材料とする場合よりも低い温度で成長させ、過熱による結晶の亀裂をさけるように留意する必要があることなどが判った。

(5) 原材料として、小宗化学薬品株式会社(純度99.2%以上)および和光純薬工業株式会社(純度99.5~99.8%)の試薬特級を使用した。両試薬による検出器特性の差を示すデータは得ることができなかった。いずれの試薬を用いた場合も、結晶成長を行なうとパイレックス管の原材料側に固化した灰色の残留物が残った。一度成長させた結晶を回収して原材料として蒸気輸送させると、残留物はほとんどなかった。また、最も良いエネルギー分解能を示した##2-2検出器は一度成長させた結晶を原材料として再結晶させたものから作ったものである。純度という点では明らかに再結晶させた方が良いが、一方、再結晶をくり返すと蒸気圧の差から $I_2$ が抜けてHg過剰の $HgI_2$ 結晶になるという問題があるので、再結晶をくり返すことが良い検出器特性を得ることにつながるか否かは疑問である。Hg過剰の $HgI_2$ 結晶は正孔捕獲中心を持つと<sup>37)</sup>言われているためである。したがって、一度蒸気輸送を行なって純度を高め<sup>44)</sup>た後、 $I_2$ 雰囲気中で $I_2$ を添加しながら再結晶を行なうことが必要となろう。

(6) 検出器の製作に際しては次の諸点に留意すべきである。エッチングの際に使用するKI溶液、イオン交換水は使用の都度、新しい液と交換して清浄な水溶液で処理することが必要である。また放射線の入射する側の電極へのリード線として用いる金線と結晶表面とはアカダックによくなじませて接触させる。 $HgI_2$ 結晶中の水銀と金との活発なアマルガム反応を避けるためにはアカダック乾燥後の塗布厚さを5/100mm程度にすると長期の使用に支障がないと思われる。今後、Pd、Pt線をリード線として試用することを考えている。 $HgI_2$ 検出器の耐電圧性は良いので、例えば0.5mm厚さに2000V程度( $4 \times 10^4$  V/cm)の電圧も不可能ではない。したがって、耐電圧性の良い検出器マウントを作る必要がある。したがってコネクタを使用する場合BNCは不適當で、MHVあるいはSHVを使用する必要がある。また、静電容量をできるだけ小さくできるようなコネクタを使用することが望ましく、例えばMHV(P)、SHV(P)を持つ検出器マウントが望ましい。

(7) 検出器特性の長期安定性をはかるためにHumisealで検出器表面を包んだ。ポリウレタン系Humiseal 1A27はスプレーできるので便利であると考えたが、スプレーすると気泡が残るため問題が生じ余り適當でないことが判った。アクリル系Humiseal 1B12はスプレー瓶にはつめられないものであるが、筆で塗ることにより良い結果が得られ適していることが判った。Humiseal塗布により、雑音を生じ始める電圧を上げられ、したがって良い電荷収集特性が得られること、長期的安定性が得られることが確認できた。さらに、同じ印加電圧においてもHumisealを塗布するとパルス波高分布が変化しエネルギー分解能が改善された。エネルギー分解能は結晶内部の電荷収集特性に関係し、Humisealは表面の状態を変えるだ

けと考えられるので、Humiseal 塗布によるエネルギー分解能の改善の原因は明白ではないが、表面電荷状態が変り結晶内部の電界分布が変るような現象があるのかも知れない。

(8) 高純度Ge 検出器HgI<sub>2</sub> 検出器を同時に並列に接続して両者のパルス波高を比較した結果、HgI<sub>2</sub> 検出器の電子・正孔当りの平均エネルギーεは59.5KeV γ線に対して4.48KeV、17.8KeV X線に対して4.20eVとなり、文献による4.2eVとほぼ合致した。

(9) HgI<sub>2</sub> 検出器を50°C、25°C、0°C で温度特性を調べた結果、冷却すればエネルギー分解能が改善されることが判った。

(10) 付録に述べたように、東北大学金属材料研究所仁科研究室、東京大学理学部桑原研究室および富山大学電気工学科で溶媒蒸発法で作った結晶を使用した検出器のエネルギー分解能は、我々の製作した蒸気輸送法による結晶からの検出器のそれよりも悪かった。文献で溶媒蒸発法で作った結晶は蒸気輸送法で作った結晶よりも検出器特性が劣ると報告されていることと合致している。

以上に述べたように、簡単な方法で蒸気輸送法を行ない結晶を作り、アカダック電極を付け、Humiseal を塗布した検出器のα、γ、X線検出特性を測定した。いずれも放射線パルスを出したが、良いエネルギー分解能を持つ検出器を得ることは困難であった。より大きい面積を持ち、より良いエネルギー分解能を示す検出器を安定に確実に製作する技術を開発する必要がある。

今後、I<sub>2</sub> 雰囲気中で蒸気輸送を行ない、<sup>37)</sup> Temperature Oscillation Method で大きな単一結晶を作るなど、より高級な結晶成長法を試みる予定である。それとともに、μτ積やμ、τを正確に評価するために、HgI<sub>2</sub> とアマルガムを作らない金属を蒸着して薄い電極の作成を試みたい。また、HgI<sub>2</sub> 常温型半導体検出器の特長を生かした応用分野を開発したいと考えている。

## 謝 辞

本研究を遂行する上で次の諸兄のご指導，ご協力を受けましたので深く感謝する次第です。

Hg I<sub>2</sub> 検出器の試作にさきだって溶媒蒸発法，蒸気輸送法による単結晶の製作過程についての，ご教示をいただくとともに，貴重な試料を提供して下さった東北大 金研 仁科雄一郎教授，後藤武生 助教授，東大理学部 佐久間史洋氏（当時，博士課程2年）。

結晶の製作，測定にあたって便宜を与えていただいた富山大 工学部 市村昭二 教授，原研 原子炉計測研究室 若山直昭氏，吉田広氏，原子炉研修所 吾勝永子氏。

検出器マウントの製作に協力していただいた日立 那珂工場 計器設計部 辻省吾氏，東芝 総研 久保克己氏。

結晶製作に不可欠の原材料封入用バイレックス管の加工，ガラス製真空封入系の製作をしていただいた原研 原子炉化学部 分析センター 木村喜久雄氏。

なお，本研究の大部分は筆者の一人中谷が昭和52年8月から昭和53年3月に日本原子力研究所・原子炉研修所の高級課程で行なったものである。お世話になった原子炉研修所の方々に深く御礼申し上げます。また，その後，中谷が富山大学工学部電気工学科において溶媒蒸発法で Hg I<sub>2</sub> 結晶を成長させたが，このとき手伝って頂いた杉本強氏（現在東京芝浦電気株式会社），舟田光志氏（現在星和電機株式会社）に感謝します。

## 参考文献

- 1) 阪井英次: "半導体ガンマ線検出器", 応用物理, 42(2), (1973)97-114.
- 2) 阪井英次: "新しい半導体検出器 - HgI<sub>2</sub> -", 放射線, 3(1) (1976)15-26.
- 3) 阪井英次: "HgI<sub>2</sub> 放射線検出器の現状", 応用物理, 46(10) (1977)1034-1039.
- 4) 阪井英次: "常温半導体検出器", RADIOISOTOPES, 27(3) (1978)1804.
- 5) E. Sakai: "Recent topics in semiconductor detector development", Proceedings of KEK Symposium on "Radiation Dosimetry", July 17-18, 1978, Tsukuba, KEK-78-18 (1978) 165-190.
- 6) W.R. Willig: "Mercury iodide as a gamma spectrometer", Nuclear Instrum. and Methods, 96 (1971) 615-616.
- 7) W.R. Willig and S. Roth: "InSb, PbO, HgI<sub>2</sub> and PbI<sub>2</sub> as nuclear particle spectrometers", Proceedings of the International Symposium on Cadmium Telluride, P. Siffert and A. Cornet, eds. Centre des Recherches Nucleaires, BPN 20, 67, Strasbourg, France (June 29-30, 1971).
- 8) W.R. Willig: "Large bandgap mercury and lead compounds for nuclear particle detection", Nuclear Instrum. and Methods, 101, (1972) 23-24.
- 9) H.L. Malm: "Mercuric iodide gamma-ray spectrometer", IEEE Trans., NS-19 (3) (1972) 263-265.
- 10) H.L. Malm, T.W. Raudorf, M. Martini, and K. R. Zanio: "Gamma-ray efficiency comparisons for Si(Li), Ge, CdTe and HgI<sub>2</sub> detectors," IEEE Trans., NS-20(1) (1973) 500-509.
- 11) W.R. Willig: "New gamma detectors of mercury iodide and other heavy metal compounds", Siemens Forsch. Enturcklungsber, 2(3) (1973) 157-160.
- 12) S.P. Swierkowski, G.A. Armantrout, and R. Wichner: "High-resolution HgI<sub>2</sub> X-ray spectrometers", Appl. Phys. Letters, 23(5) (1973) 281-282.
- 13) M. Schieber, R. Carlston, H. Lamonds, P. Randke, W. Schnepfle and J. Llacer: "Purification, growth, and characterization of alpha mercuriodide crystals for gamma-ray detection," J. Crystal Growth, 24/25 (1974) 205.
- 14) H. Scholtz: Acta Electronica, 17 (1974) 69.
- 15) S.P. Swierkowski, G.A. Armantrout and R. Wichner: "Recent advances with HgI<sub>2</sub> X-ray detectors," UCRL-74828 (1973), also IEEE Trans., NS-21 (1) (1974) 302-304.

- 16) Jorge Llacer, Michael M.K.Watt, M. Schieber, R. Carlston, and W. Schnepfle: "Preliminary studies of charge carrier transport in mercuric iodide radiation detectors", IEEE Trans., NS-21 (1) (1974) 305-314.
- 17) G.M. Martin, P. Bach, and P. Guétin: "Transport properties in  $HgI_2$ ", Appl. Phys. Letters, 25(5) (1974) 286-288.
- 18) J.P. Ponpon, R. Stuck, P.Siffert and C.Schwab: "Preliminary results on mercuric iodide nuclear radiation detectors", Nucl. Instrum and Methods, 119(1974) 197-198.
- 19) J.P. Ponpon, R. Stuck, P.Siffert, B.Meyer, and C. Schwab: "Properties of vapour phase grown mercuric iodide single crystal detectors", IEEE Trans., NS-22(1) (1975) 182-191.
- 20) G. Ottaviani, C. Canali, and A. Alberigi Quaranta: "Charge carrier transport properties of semiconductor materials suitable for nuclear radiation detectors," IEEE Trans., NS-22(1) (1975) 192-204.
- 21) S.P. Swierkowski and G.A.Armantrout: "Prognosis for high-Z semiconductor detectors", IEEE Trans., NS-22(1) (1975) 205-210.
- 22) Z.H.Cho, M.K.Watt, M.Slapa, P.A.Tove, M.Schieber, T.Davies, W.Schnepfle, P.Randtke, R.Carlston, and D.Sarid: "Characterization effort of  $HgI_2$  radiation detectors by pulsed laser transient charge injection technique," IEEE Trans., NS-22(1) (1975) 229-240.
- 23) P.Siffert, J.P.Ponpon, I.Zschokke-Granacher, and B.Schwab, ed.: "Workshop on mercuric iodide nuclear radiation detectors", held at Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg, on June 11, 1975.
- Crystal growth
- 23-1) H.Scholtz: "The behavior of mercuric iodide in crystal growth experiments".
- 23-2) I.F.Nicolau: "Growing of  $\alpha$ - $HgI_2$  single crystals from solutions of complex Hg(II) iodides".
- 23-3) C.Schwab: "Purification and growth problems of red  $HgI_2$  for nuclear detectors".
- Characterization
- 23-4) G.Ottaviani, C.Canali, G.Majni: "Electron or hole drift velocity in mercuric iodide".
- 23-5) R.Stuck, J.C.Muller, J.P.Ponpon, C.Scharager, C.Schwab, P.Siffert: "Study of trapping in mercuric iodide by thermally stimulated current measurements".

- 23-6) G.M.Martin, Ngo-Tich-Phuoc, E.Fabre: "Characterization of HgI<sub>2</sub> material and nuclear detectors".

Detectors

- 23-7) M.M.Schieber: "Fabrication of HgI<sub>2</sub> nuclear detectors".
- 23-8) M.Slapa, G.C. Huth, W.Seibt: "Room temperature mercuric iodide low energy X-ray spectrometers".
- 23-9) W.Puschert, H.Scholz: "γ-ray spectra with HgI<sub>2</sub> at room temperature".
- 23-10) J.P.Ponpon, R.Stuck, P.Siffert: "Work on mercuric iodide at Strasbourg".
- 24) M.Slapa, G.C.Huth, and W.Seibt: "Capabilities of mercuric iodide as a room temperature X-ray detector", IEEE Trans., NS-23(1) (1976) 102.
- 25) M.K.Chung and S.W.Cho: "Preliminary studies on mercuric iodide soft-gamma-ray detector," IEEE Trans., NS-23(1) (1976) 112.
- 26) M.K. Watt and Z.H.Cho: "Study of mercuric iodide detectors by pulsed laser induced photon-injection techniques," IEEE Trans., NS-23(1) (1976) 124.
- 27) S.P. Swierkowski: "A comprehensive model for predicting semiconductor detector performance," IEEE Trans., NS-23(1) (1976) 131.
- 28) J.H. Yee, J.W. Sherohman, and G.A. Armantrout: "Theoretical band structure analysis on possible high-z detector materials," IEEE Trans., NS-23(1) (1976) 117.
- 29) M. Schieber, W.F. Schnepfle, and L. van den Berg: "Vapor growth of HgI<sub>2</sub> by periodic source or crystal temperature oscillation", J. Crystal Growth, 53 (1976) 125.
- 30) P.T. Randtke, C. Ortale, R.C. Whited, and L. van den Berg: "Advances in mercuric iodide single crystal nuclear detectors", Proceedings, ERDA X-and Gamma-Ray Symp, Ann Arbor, MI, May 19-21, 1976 (Conf 760539) 71.
- 31) M. Schieber: "Fabrication of HgI<sub>2</sub> nuclear detectors," Nuclear Instrum. and Methods, 144 (1977) 469.
- 32) G.A. Armantrout, S.P. Swierkowski, J.W. Sherohman, and J.H. Yee, "What can be expected from high-x semiconductor detectors", IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 121.
- 33) P.T. Randke and C. Ortale: "The effects of dislocations and crystal defects on the energy resolution and response uniformity of mercuric iodide detectors," IEEE Trans. NS-24(1) (1977) 129.
- 34) U. Gelbart, Y. Yacoby, I. Beinglass, and A. Holzer: "Study of imperfections in mercury iodide by the thermally stimulated currents

- method", IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 135.
- 35) M. Schieber, I. Beinglass, A. Holzer, and G. Dishon: "The behavior of  $\text{HgI}_2$  nuclear detectors irradiated with high X-ray fluences", IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 148.
- 36) C. Manfredotti, R. Murri, A. Quirini, and L. Vasanelli: "The photomagnetolectric effect in mercury iodide", IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 158.
- 37) R.C. Whited and L. van den Berg: "Native defect compensation in  $\text{HgI}_2$  crystals," IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 165.
- 38) E. Pinsky, A. Halperin, I. Beinglass, and M. Schieber: "X-ray luminescence of mercuric iodide nuclear detectors", IEEE Trans., NS-24(1) (1977) 260.
- 39) L. van den Berg, W.F. Schnepfle, C. Ortale and M. Schieber: "Vapor growth of doped mercuric iodide crystals by the temperature oscillation method", J. Crystal Growth, 42(1977) 160.
- 40) I. Beinglass, G. Dishon, A. Holzer, and M. Schieber: "Improved crystals of mercuric iodide grown in a horizontal furnace from the vapor phase using the temperature oscillation method", J. Crystal Growth, 42 (1977) 166.
- 41) C. Manfredotti, R. Murri, and L. Vasanelli: "Anisotropy of the photomagnetolectric effect in mercuric iodide; Solid State Communication, 21 (1977) 53.
- 42) I. Beinglass, G. Dishon, A. Holzer, S. Offer, and M. Schieber: "High-energy gamma spectra detected with improved  $\text{HgI}_2$  spectrometers at room temperature", Appl. Physics Letters, 30 (1977) 611.
- 43) M. Slapa, P.A. Tove, and G. Boberg: "The characterization of CdTe and  $\text{HgI}_2$  crystals and detectors by light spot scanning (LSS)", Nuclear Instrum and Methods, 150 (1978) 55.
- 44) M. Schieber, I. Beinglass, G. Dishon, A. Holzer, and G. Yaron: "State-of-the-art of crystal growth and nuclear spectroscopic evaluation of mercuric iodide radiation detectors", Nuclear Instrum, and Methods, 150 (1978) 71.
- 45) S. Shalev: "Gamma-ray spectrometry with mercuric iodide detectors with application to medical imaging", Nuclear Instrum and Methods, 150 (1978) 79.
- 46) S. Caine, A. Holzer, I. Beinglass, G. Dishon, E. Lowenthal, and M. Schieber: "Direct current and pulse counting measurements on in-vivo mercuric iodide medical probes", Nuclear Instrum and Methods, 150 (1978), 83.

- 47) R. Kurz: "A novel pulse processing system for  $\text{HgI}_2$  detectors," Nuclear Instrum and Methods, 150 (1978) 91.
- 48) J.C. Muller, A. Friant, and P. Siffert: "TSC in  $\text{HgI}_2$  crystals grown by solution and vapor phase techniques", Nuclear Instrum. and Methods, 150 (1978) 97.
- 49) C. De Blasi, S. Galassini, C. Manfredotti, G. Micocci, and A. Tepore: "Photoelectronic properties of  $\text{HgI}_2$ ", Nuclear Instrum. and Methods, 150 (1978) 103.
- 50) Andrzej J. Dabrowski and G.C. Huth: "Toward the energy limit of mercuric iodide in room temperature low energy X-ray spectrometry", IEEE Trans., NS-25(1) (1978) 205.
- 51) L. van den Berg and R.C. Whited: "Recent improvements in  $\text{HgI}_2$  detectors," IEEE Trans., NS-25(1) (1978) 395.
- 52) M. Schieber, I. Beinglass, G. Dishon, and A. Holzer: "Bulk performance of improved mercuric iodide nuclear detectors", IEEE Trans., NS-25(1) (1978) 644.
- 53) S. Caine, A. Holzer, I. Beinglass and M. Schieber: "Fabrication and evaluation of  $\text{HgI}_2$  miniature probes for in-vivo medical applications", IEEE Trans., NS-25(1) (1978) 649.
- 54) 中谷秀夫, 阪井英次, 片桐政樹: "沃化第2水銀ガンマ線検出器の試作" 1978年春第25回応用物理学関係連合講演会, 27PR3 (1978年3月27日, 武蔵工科大学, 東京)。
- 55) 中谷秀夫, 阪井英次, 片桐政樹: "沃化第2水銀放射線検出器の試作", 日本原子力学会昭和53年年会, B27 (1978年3月29日, 工学院大学, 東京)。
- 56) 中谷秀夫, 阪井英次, 片桐政樹: " $\text{HgI}_2$  検出器の試作", 日本物理学会第33回年会, 1aAB5 (1978年4月1日, 東北大学, 仙台)。
- 57) 阪井英次, 久保克巳, 中谷秀夫: " $\text{HgI}_2$  検出器の諸特性の温度依存性", 日本原子力学会昭和53年秋の分科会(炉物理炉工学), B72 (1978年10月10日, 神戸商船大学, 神戸)。
- 58) 阪井英次, 久保克巳, 中谷秀夫: " $\text{HgI}_2$  検出器の温度特性", 1978年秋季第39回応用物理学学会学術講演会, 3pA2 (1978年11月3日, 近畿大学, 大阪)。
- 59) 齊藤 宏: "現代内科学大系, 中毒編 工業毒, 169-172頁(1962年4月10日発行, 中山書店)。

## 付 録

東北大金研の仁科研究室<sup>\*</sup>ならびに東大理学部<sup>\*\*</sup>の桑原研究室から Hg I<sub>2</sub> 結晶の試料をいただいた。これらの試料は我々が研究に着手するにあたって検出器製作、検出特性測定の上で参考となることが多かった。以下に富山大工学部電気工学科電力工学実験室<sup>\*\*\*</sup>で溶媒蒸発法により製作した Hg I<sub>2</sub> 結晶による検出器を含めて、これらの検出特性の測定結果を報告する。

## A. 東北大金研の溶媒蒸発法試料による検出器検出特性

## A.1 結晶製作の概要

粉末状の市販 Hg I<sub>2</sub> 試薬を真空引きにして精製し、これを原材料としてエチルアルコールに溶解して飽和溶液を作る。結晶は溶液を恒温槽内で 60°C に保つと 10 ~ 20 日間で仕上るとのことである。

## A.2 TH-1S 検出器

## ①. 検出器製作

エッチング処理後の仕上り寸法が 1mm × 1mm × 1mm の単結晶の両面にアカダックを塗布して電極とし、テフロンシートを介して Fig. A-1 のようにアルミ製の板にマウントした。アカダックはテフロンとよくなじまないため亀裂剝離を生じ易い。マウントした状況を Photo. A-1 に示す。

## ②. α線の検出特性

放射線の入射する側の電極にバイアス電圧マイナス 250 V を印加して用 Am-241 α線源 0.111 μCi による前置増幅器の出力波形およびパルス波高分布を Photo. A-2 (a), (b) に示す。αパルスの出力波形から立ち上がり時間を 1 μs と読みとると本文 4.2 節で述べた手順で電子の易動度は 40 cm<sup>2</sup> / V · s と算出される。パルス波高分布の最大パルス波高の Si 検出器による 5.49 MeV α 相当のパルサーパルスに対する相対値は 0.14 で低いのは、アカダックによる吸収が大きいことを示している。

プラスバイアス電圧を印加したときの出力波形の例を Photo. A-3 (a), (b) に示す。500 V 以上では spurious パルスの出現と、パルス波高が時間の経過とともに小さくなる傾向が顕著なため 500 V 未満で測定した。450 V 印加時の出力波形をみてマイナスバイアス電圧

\* 仁科雄一郎教授、後藤武生助教授に深く感謝します。

\*\* 大学院生 佐久間史洋氏に深く感謝します。

\*\*\* 在 学 生 杉本 強氏(現在東京芝浦電気株式会社)、舟田光志氏(現在星和電機株式会社)に深く感謝します。

印加時よりもパルス波高の低いのは  $(\mu\tau)_h \ll (\mu\tau)_e$  による。文献による正孔の易動度  $4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  に対応する立ち上がり時間を試算すると  $5.5 \mu\text{s}$  であるが該当する  $\alpha$  パルスは観測されない。観測されたのは立ち上がり時間が  $1 \mu\text{s}$  以下の高速パルス群で、正孔が直ちに捕獲されて検出器結晶中を横断して電極に到達しないことを示している。プラス  $400 \text{ V}$  印加時の出力波形によると  $\alpha$  パルスはほとんど観測されていない。Fig. A-2 はバイアス電圧印加後、Am-241  $\alpha$  パルスの全計数値 ( $4000 \text{ S}$  計数) の時間的变化を示したもので、マイナス  $200 \text{ V}$  を印加した場合 (電子横断時) は●点に示され、ほとんど変化はないが、プラス  $400 \text{ V}$  を印加した場合 (正孔横断時) は○点で示したように電圧印加後急激に計数率は減少し約  $16000 \text{ s}$  ( $4.4 \text{ h}$ ) 後に初期値の  $90\%$  となって安定している。これは正孔が捕獲されプラスの空間電荷を build up することによる polarization ではないかと思われる。

### ③. $\gamma$ 線の検出特性

バイアス電圧マイナス  $250 \text{ V}$  およびプラス  $500 \text{ V}$  印加時の Am-241  $\gamma$  線源  $10 \mu\text{Ci}$  - a による主増幅器の出力波形を photo. A-4 (a), (b) に示す。バイアス電圧が同一値であれば  $(\mu\tau)_e \gg (\mu\tau)_h$  であることからマイナスバイアス電圧印加時の方がパルス波高は高くなるはずである。 $\gamma$  線による polarization と思われる現象がパルス波形の観測中に著しくはないが観測された。

Photo. A-5 (a), (b) は前記のバイアス電圧値に対するパルス波高分布を示したもので、 $59.5 \text{ KeV}$   $\gamma$  線に対するピークはみられない。この検出器は日本において初めて  $\gamma$  線パルスをだした  $\text{Hg I}_2$  検出器である。

### ④. X線の検出特性

バイアス電圧マイナス  $200 \text{ V}$  およびプラス  $300 \text{ V}$  印加時の Fe-55 線源  $100 \mu\text{Ci}$  によるパルス波高分布を Photo. A-6 (a), (b) に示す。マイナスバイアス電圧印加時の場合に  $5.9 \text{ KeV}$  X線の肩が出現している。

## A.3 TH-2S 検出器

### ①. 検出器製作

エッチング処理後の  $\text{Hg I}_2$  結晶の仕上り寸法は  $1.3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$  t で、これを Fig. 3-5 に示した SHV (J) コネクタ付きの試作容器内にマウントした。検出器に Hamiseal 1B12 を塗布した。

### ②. $\alpha$ 線の検出特性

Hamiseal 塗布後のものについて、Am-241  $\alpha$  線源  $0.111 \mu\text{Ci}$  による前置増幅器の出力波形を観測して立ち上がり時間  $t_r$  を求め電子の易動度  $\mu_e$  を算出した。算出結果はバイアス電圧マイナス  $300 \text{ V}$  に対して  $t_r = 240 \text{ ns}$  が求められ  $\mu_e = 50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となった。プラスバイアス電圧印加時の出力波形からは正孔による  $\alpha$  パルスは観測されなかった。

### ③. $\gamma$ 線及び X線の検出特性

Am-241  $\gamma$  線源  $10 \mu\text{Ci}$  - b を試作検出器前面に密着させてパルス波高分布を測定した。

shaping time は  $3\mu\text{s}$  とした。

<1> 検出器に Humiseal を塗布しない場合

Photo. A-7 (a), (b) はバイアス電圧がマイナス 700 V 及び 600 V 印加時のパルス波高分布である。Photo. A-7 (a) によると 59.5 KeV  $\gamma$  線に対してパルスがでていないが、17.8 KeV X線に対しては broad 状のピークをもった波高分布を呈している。

Photo. A-7 (b) によると正孔による電荷収集がきわめて良くないことを示している。

<2> 検出器に Humiseal を塗布した場合

Photo. A-8 (a), (b) はバイアス電圧がマイナス 1200 V 及びプラス 1200 V 印加時のパルス波高分布である。

Photo. A-8 (a) によると 59.5 KeV  $\gamma$  線に対してパルスがでていないが、17.8 KeV X線に対してはパルスはでていないがピークを呈していない。Photo. A-8 (b) によると正孔による電荷収集特性はきわめて良くないことを示している。Humiseal を塗布することによってエネルギー分解能が悪化した。原因は Humiseal を塗布したためにアカダックが結晶面から剝離する傾向をとったのではないかと思われる。

## B. 東大理学部の試料による検出器検出特性

### B.1 溶媒蒸発法試料による検出器検出特性

#### B.1.1. 結晶製作の概要

粉末状の市販  $\text{Hg I}_2$  試薬 1 グラムをフラスコに入れアセトン 100 グラムに溶解して薬紙でふたをして放置すると、アセトンの蒸発に伴ないフラスコ底面に微結晶が出現し 1 mm 角以上の大きさとなる。これを種子として別途  $\text{Hg I}_2$  試薬 5 ~ 1.0 グラムをアセトン 500 グラムに溶解して 3 個のフラスコに分配したなか投入して薬包紙でふたをすると 1 ~ 4 ヶ月でアセトンはほとんど蒸発して 3 mm 角程度の結晶が仕上る。ということである。

#### B.1.2. TK-1 S 検出器

##### ①. 検出器製作

エッチング処理後の仕上り寸法が  $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.1\text{mm t}$  の単結晶の両面にアカダックを塗布して電極とし、カバーガラスを介してアルミ製の板にマウントした。

##### ②. $\alpha$ 線検出特性

バイアス電圧マイナス 350V を印加して  $\alpha$  線源による前置増幅器の出力波形を観測するとパルス波高は 1.5mV と低く、散発的に  $\alpha$  パルスが出現した。プラスバイアス電圧を印加したが  $\alpha$  パルスは観測されなかった。

#### B.1.3. TK-2 S 検出器

##### ①. 検出器製作

仕上り寸法が  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm t}$  の単結晶を用いて、TK-1 S 検出器と同様 Photo. B-1 に示すようにマウントした。

##### ②. $\alpha$ 線の検出特性

$\alpha$  線源による前置増幅器の出力波形を観測したところマイナスバイアス電圧の印加に対しては  $\alpha$  パルスは出現せず、350V を超過するとノイズが激増した。プラスバイアス電圧印加のときは 350V および 50V に対する  $\alpha$  パルスの出力波形が Photo. B-2 のように出現する。Photo. B-3 はバイアス電圧プラス 300V 印加時のパルス波高分布を示したものである。この検出器は Fig. B-1 に示すように時間の経過とともに計数值および最大パルス波高の減少する polarization 効果を呈した。最大パルス波高の相対値は約 7 時間後に初期値の 88% となった。マイナスのバイアス電圧印加のときパルスの出現しない原因は明らかでないが、次節③に示すように正負両バイアス電圧でパルスが出たことからアカダック電極下の  $\text{Hg I}_2$  に不感層があり、この不感層の厚さが正負のバイアス電圧に対して異なるとすれば説明可能である。

##### ③. $\gamma$ 線の検出特性

$\gamma$  線源による  $\gamma$  パルスはバイアス電圧がプラス、マイナスいずれの場合も出現した。オシロスコープで  $\gamma$  線パルスを観測しただけで、パルス波高分布は測定しなかった。

## B.1.4. TK-3S 検出器

## ①. 検出器製作

エッチング処理後の  $\text{Hg I}_2$  結晶仕上り寸法は  $1\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.6\text{mm}$  で、これを Fig. 3-5 に示した試作容器内にマウントした。検出器に Humiseal 1B12 を塗布した。

②.  $\gamma$  線及び X 線の検出特性

$\text{Am-241}$   $\gamma$  線源  $10\mu\text{Ci}$  を試作検出器前面に密着させて shaping time  $3\mu\text{s}$  でパルス波高分布を測定した。

印加しうるバイアス電圧値は検出器に Humiseal を塗布しない場合は  $100\text{V}$ 、塗布した場合は  $300\text{V}$  が限度であった。測定結果によると Humiseal の塗布前、塗布後ともに全くスペクトル分布を示さなかった。原因は結晶内に空洞が存在していたことによるものと思われる。

## B.2 蒸気輸送法試料による検出器検出特性

## B.2.1. 結晶製作の概要

粉末状の市販  $\text{Hg I}_2$  試薬  $10 \sim 20$  グラムを原材料として、長さ  $60\text{cm}$ 、外径  $35\text{mm}$  のパイプ管に  $10^{-5}$  torr の真空封入をして炉心管内に水平に挿入して、原材料を  $120^\circ\text{C}$  の高温部におき、低温部を室温にした温度で加熱すると約 1 週間で低温部に結晶が仕上る。とのことである。

## B.2.2. TK-2V 検出器

## ①. 検出器製作

エッチング処理後の単結晶の形状は複雑で  $3\text{mm} \times 4\text{mm}$  の長方形に内接することから、仕上り寸法を一応  $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  と称することにする。アルミ製の板にカバーガラスを介してマウントした状態を Photo. B-4 に示す。

②.  $\alpha$  線の検出特性

バイアス電圧マイナス  $350\text{V}$  およびプラス  $400\text{V}$  印加時の  $\alpha$  線源による前置増幅器の出力波形を Photo. B-5 (a), (b) に示す。マイナスバイアス電圧印加時の電子による  $\alpha$  パルスの立ち上がりは早くて各バイアス電圧に対する立ち上がり時間の差異を読みとることと、プラスバイアス電圧印加時の正孔による  $\alpha$  パルスは立ち上がりが不連続で立ち上がり時間を読みとることとは、いずれも不可能であった。電子の立ち上がり時間を正確に測定するためには、もう少し厚い検出器 (例えば  $0.5\text{mm}$  厚) を用いる必要がある。Photo. B-6 (a), (b) は前記のバイアス電圧値に対するパルス波高分布を示したもので、マイナスバイアス電圧印加のときは、プラスバイアス電圧印加の場合に比して最大パルス波高相対値が大きく電子による電荷収集特性が正孔のそれに比べて良いことを示している。

③.  $\gamma$  線および X 線の検出特性

バイアス電圧マイナス  $150\text{V}$  およびプラス  $150\text{V}$  を印加したとき、 $\gamma$  線源によるパルス波高分布を Photo. B-7 (a), (b) に比較して示す。マイナスバイアス電圧印加の場合には  $59.5\text{KeV}$   $\gamma$  線ピークは出現しないが  $17.8\text{KeV}$  X 線に対してはこぶができていて、

broad peak 状になっている。プラスバイアス電圧印加の場合にはパルス波高分布にピークがみられない。

バイアス電圧マイナス 250V を印加して Fe - 55 100  $\mu$ Ci 線源によるパルス波高分布を Photo. B-8 に示す。5.9 KeV X線が broad な肩を作っており、電荷収集特性が悪いことを示している。

### B.2.3. 検出器製作

エッチング処理後の Hg I<sub>2</sub> 結晶の仕上り形状は 3.5mm × 4mm × 4.5mm の三角形で、面積は 6.7mm<sup>2</sup>、厚さは 0.2mm である。Fig. 3-5 に示した試作容器内にマウントした。検出器に Humiseal 1B 12 を塗布した。

#### ②. $\alpha$ 線の検出特性

Humiseal 塗布前と塗布後のものについて  $\alpha$  用 Am - 241  $\alpha$  線源 0.111  $\mu$ Ci による前置増幅器の出力波形を観測して立ち上がり時間  $t_r$  を求め  $\mu_e$  を算出した。立ち上がり時間の確認される出力波形から算出した結果はバイアス電圧マイナス 100V に対して Humiseal 塗布前にあっては  $t_r = 100$  ns から  $\mu_e = 4.0$  cm<sup>2</sup>/V·s となり、Humiseal 塗布後においては  $t_r = 180$  ns から  $\mu_e = 2.22$  cm<sup>2</sup>/V·s となった。プラスバイアス電圧印加時の出力波形からは正孔による  $\alpha$  パルスは観測されなかった。

#### ③. $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

Am - 241  $\gamma$  線源 10  $\mu$ Ci - b を試作容器前面に密着させて shaping time 3  $\mu$ s でパルス波高分布を測定した。印加しうるバイアス電圧値は検出器に Humiseal を塗布しない場合、塗布した場合とも 300V が限度であった。

測定結果によるとバイアス電圧マイナス 300V 印加時のパルス波高分布は、Humiseal 塗布前には 59.5 KeV  $\gamma$  線及び 17.8 KeV X線に対してパルスはでているがピークはみられなかった。Humiseal 塗布後には Photo. B-9(a) に示すように 17.8 KeV X線に対しては broad 状のピークを呈する波高分布となった。Photo. B-9(b) はバイアス電圧プラス 300V 印加時のパルス波高分布で、正孔による電荷収集は良くないことを示している。

## C. 富山大工学部の溶媒蒸発法試料による検出器検出特性

### C.1 結晶製作の概要

原材料としてK社市販の粉末状  $\text{Hg I}_2$  試薬を用い、これをアセトンまたはエチルアルコールに溶かして飽和溶液を作り、溶媒蒸発法により  $\text{Hg I}_2$  結晶を製作した。種子には大きさが  $10\text{mm}^3$  前後の原研#2系の結晶を用いた。室温に保って  $1500\text{cc}$  の飽和溶液が蒸発して結晶ができるまで約40日間を要した。アセトン飽和溶液から成長させたものは結晶内部に空洞を生じていて劈開性を消失していた。

エチルアルコール飽和溶液から成長させた結晶では、よい劈開性を示した。したがって検出特性の測定に供したのはエチルアルコール飽和溶液から成長させた結晶群である。

### C.2 TY-1S 検出器

#### ①. 検出器製作

エッチング処理後の  $\text{Hg I}_2$  結晶仕上り寸法は  $1.5\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  で、これを Fig. 3-5 に示した試作容器内にマウントした。検出器に Humiseal 1B12 を塗布した。

#### ②. $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

$\text{Am-241}$   $\gamma$  線源  $10\mu\text{Ci-b}$  を試作検出器前面に密着させて shaping time  $8\mu\text{s}$  でパルス波高分布を測定した。

印加しうるバイアス電圧は Humiseal 塗布前のものはマイナス  $450\text{V}$  で塗布後のものはマイナス  $500\text{V}$  であった。測定結果は Humiseal 塗布前、塗布後ともに  $59.5\text{KeV}$   $\gamma$  線、 $17.8\text{KeV}$  X線に対してピークはみられなかった。

### C.3 TY-2S 検出器

#### ①. 検出器製作

前節 (C.1.の①) の試作容器内にある TY-1S 検出器を除去して、仕上り寸法が  $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.4\text{mm}$  厚さの  $\text{Hg I}_2$  結晶をマウントした。検出器に Humiseal 1B12 を塗布した。

#### ②. $\gamma$ 線及び X 線の検出特性

前節 (C.2.の②) と同様な測定条件でパルス波高分布を測定した。Photo. C-1 (a) は Humiseal 塗布前にバイアス電圧マイナス  $300\text{V}$  印加時のパルス波高分布であり、Photo. C-1 (b) は Humiseal 塗布後にバイアス電圧マイナス  $300\text{V}$  印加時のパルス波高分布である。

塗布前、塗布後ともに  $59.5\text{KeV}$   $\gamma$  線に対してスペクトルがでていないが、 $17.8\text{KeV}$  X

線に対しては、塗布前に broad 状のピークがみられたが、塗布後にはピークがみられなくなった。Humiseal の塗布によって耐電圧値はマイナス 300 V からマイナス 550 V に向上したが、エネルギー分解能は悪化した。

## D. ま と め

Table. D-1は以上A, B, Cの各章にわたって述べてきた検出器について代表的な検出特性を抽出してまとめたものである。溶媒蒸発法で製作したTH, TK, TYのS系結晶による検出器は次のような問題点と特異性を示した。

①.  $\alpha$ 線源,  $\gamma$ 及びX線源によるパルス波高分布の測定結果はいずれの検出器もパルス波高分布にピークを示さず電荷収集特性が良くないことを示した。文献によると溶媒蒸発法で作った結晶の( $\mu\tau$ )。は $10^{-8}\text{cm}^2/\text{V}$ で蒸気輸送法で作った結晶の $10^{-3} \sim 10^{-4}\text{cm}^2/\text{V}$ と比べて著しく近いといわれていることを裏付けている。

②. プラスバイアス電圧印加時にパルス波高および全計数率が時間とともに減少する現象がみられた。いわゆる polarizationと思われる。TH-1S, TK-1S検出器で測定したFig. A-2とFig. B-1がこの時間的経過を示している。結晶中で捕獲された正孔のプラス電荷がマイナス電極の近くに蓄積するため時間とともに結晶内の電界を減少させ、その結果パルス波高および計数率が減少することによると思われる。

③. 検出器にHumisealを塗布することによって気相法によるものでは多くの場合にエネルギー分解能が改善されたが、溶媒蒸発法によるものではいずれもエネルギー分解能が悪化した。これらの理由はわからない。

こゝで同じ溶媒蒸発法でもエチルアルコール飽和溶液から成長させたTH, TYのS系結晶はアセトン飽和溶液から成長させたTKのS系結晶に比較して、X線に対して幾分電荷収集特性が良い。アセトン飽和溶液から成長させた結晶は劈開性に乏しいか、あるいは劈開性が全然なかった。

溶媒蒸発法で作った結晶は以上のような問題点をもっているが、これらのなかでTH-1S検出器は日本において初めてHgI<sub>2</sub>検出器として放射線パルスを出した点に大きな意義がある。

なお、同じ蒸気輸送法でもTable. 6-1に示した我々の製作による結晶の方がTKのV系結晶に比較して電荷収集特性の良いことが示された。

最後に、東北大金研、東大理学部が行なっている物性研究たとえば光学的吸収測定に、ここで述べた結晶が使用されているけれども彼等の物理的測定値とその結晶を使用して製作した検出器の特性との間に関連があるのかどうか、あるいは我々が蒸気輸送法で製作した電荷収集特性の良い結晶の物性測定値例えば光学的吸収が彼等の使用している結晶と異なるのかなど興味深く思われ、今後結晶の交換を行なって調べることも考える必要があろう。

Table 1-1 Various characteristics of semiconductor detectors

Material	Atomic number Z	Operating Temp. (K)	Band gap $E_g$ (eV)	Average energy per e-h pair $\epsilon$ (eV)	Drift mobility $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )		Mean free time $\tau$ (s)		$\mu\tau$ product ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )		Y-ray energy resolution FWHM (keV)			
					electron	hole	electron	hole	electron	hole	5.9 keV	60 keV	122 keV	662 keV
Si	14	77 300	1.16 1.12	3.76 3.61	$2.1 \times 10^4$ 1350	$1.1 \times 10^4$ 480	$2 \times 10^{-5}$ $2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$ $2 \times 10^{-5}$	0.42 0.027	0.22 0.01	0.16	0.4	0.55	0.9
Ge	32	77	0.74	2.98	$3.6 \times 10^4$	$4.2 \times 10^6$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	0.36	0.84		0.3	0.4	0.9
GaAs	31-33	130 300	1.4	4.51 4.2	7000, 8600	400, 420	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	$10^{-8} \sim 10^{-9}$				0.64 2.6		
GaSe	31-34	300	2.03	6.3*	60*	215	$1.6 \times 10^{-9}$ $\sim 2.5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-10}$ $\sim 7 \times 10^{-9}$	$10^{-7} \sim 10^{-6}$ $1.5 \times 10^{-6}$	$10^{-7} \sim 1.5 \times 10^{-6}$				
CdTe	48-52	300	1.47	4.43	600-1100	100	$10^{-6}$		$10^{-3}$	$5 \times 10^{-5}$	1.1	1.6	4.5	8
HgI <sub>2</sub>	80-53	300	2.13	4.2	100	4	$10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	0.5	1.2	2.0	4.5
SiC	14-6	300	2.2-2.3											
C	6	300	5.4	13, 17	1800 $\sim 2000$	1600	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	$2 \times 10^{-5}$ $\sim 2 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$ $\sim 1.5 \times 10^{-6}$	**			
ZnTe	30-52	300	2.26		340	100	$3.8 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-7}$				
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	83-16	300	1.3		200	1100	$10^{-10}$	$9 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-8}$	$10^{-7}$				
PbI <sub>2</sub>	82-53	300	2.6	7.68*	8	2	$2.5 \times 10^{-9}$	$10^{-8}$	$9 \times 10^{-7}$	$9 \times 10^{-7}$				
AsSb	13-51	300	1.62	5.055*	1200*	700*	$2.6 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$						

\* Theoretical values

\*\* FWHM 120 keV for 5.5 MeV  $\alpha$ , 8.5 keV for 482 keV electrons

[From E.Sakai; "Recent topics in semiconductor detector development", Proceedings of KEK Symposium on "Radiation Dosimetry", July 17-19, 1978, Tsukuba, KEK-78-18 (1978) 165-190]

Table 2-1 Assay reports of commercially available HgI<sub>2</sub> powder

Contents	JIS	Koso chemical Co., Ltd.	Wako pure chemical Ind., Ltd.
Solubility in KI solution	to pass test	to pass test	
Residue after ignition (as sulfate)	max. 0.1%	0.02%	
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	max. 0.01%	0.003%	
Heavy metals (as Pb)	max. 0.001%	0.0005%	
Mercurous mercury (as Hg <sup>+</sup> )	max. 0.1%	0.01%	
Soluble mercury salt (as Hg)	max. 0.05%	0.03%	
Assay	> 99.0%	99.2%	99.5~99.8%

Table 6-1 List of HgI<sub>2</sub> detectors made of crystals grown by us and their performance

Crystal number	Starting material	Detector number	Size	Humiseal	Rise time		Typical FWHM resolution (KeV)		Detector mount	Photo. number
					$\Delta E$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\Delta h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	17.8 Kev X-rays	59.5 KeV $\gamma$ -rays		
#1	Wako powder	#1-2	5.3mm <sup>2</sup> x0.5mm	No.	40.0(-350V)		Broad peak	No peak (-350V)	Fig.3-2 Fig.3-5 Fig.3-5	5-3(a) 5-5(a) 5-6(a)
		#1-3	1x1.6x0.5mm <sup>3</sup>	No	71.5(-100V)	3.5(+600V)	2.8	6.35 (-1400V)		
		"	"	1B12	73.5(-200V)	3.1(+400V)	2.6	5.8 (-1300V)		
#2	Koso Powder	#2-1	2x4x0.7mm <sup>3</sup>	No	30.0(-350V)		3.8	13.6 (-350V)	Fig.3-2 Fig.3-2 Fig.3-2 Fig.3-4 Fig.3-4 Fig.3-4	5-9(a) 5-11(a) 5-13(a), 5-14
		#2-2	2x3x0.5mm <sup>3</sup>	1B12			6.5	No peak (-1400V)		
		#2-3	1.5x3x0.4mm <sup>3</sup>	1B12			2.5	9.2 (-1000V)		
		#2-5	2x2x0.55mm <sup>3</sup>	1A27			3.4	21.4 (-350V, 50°C)		
		"	"	"			3.7	17.1 (-500V, 25°C)		
		"	"	"			3.1	15.4 (-500V, 0°C)		
#3	Wako Powder	#3-1	1x3x0.3mm <sup>3</sup>	1A27	33.5(-100V)	1.9(+800V)	Broad peak	No peak (-450V)	Fig.3-2 Fig.3-5 Fig.3-5	5-17(a) 5-18(a) 5-19(a)
		#3-2	1x1.8x0.3mm <sup>3</sup>	No			Broad peak	10.65 (-1400V)		
		"	"	1B12			6.4	8.9 (-1600V)		
#4	Wako powder	#4-2	2.85mm <sup>2</sup> x0.5mm	No	70.0(-350V)		5.0	14.9 (-400V)	Fig.3-2 Fig.3-4 Fig.3-5 Fig.3-5	5-21(a) 5-22(a) 5-23(a) 5-24(a)
		#4-3	1.5x2x0.4mm <sup>3</sup>	No			No peak	Broad peak (-450V)		
		#4-4	2x3x0.6mm <sup>3</sup>	No			No peak	Broad peak (-800V)		
		"	"	1B12			Broad peak	22.1 (-1100V)		
		"	"	"			Broad peak			
#5	Koso powder	#5-2	1.5x1.5x0.5mm <sup>3</sup>	1B12			Double peak	Double peak (+800V)	Fig.3-4 Fig.3-4	5-25(a) 5-27(a)
		#5-4	1.5x5x0.5mm <sup>3</sup>	1B12			3.5	18.2 (-750V)		
#1	#1, #3, #4 Crystals	No detector was made since crystals have no cleavability								
#11	#11 crystal	#11-1	1.5x1.5x0.5mm <sup>3</sup>	1A27			4.8	Broad peak (-500V)	Fig.5-9 Fig.3-5 Fig.3-5	5-28(a) 5-29(a) 5-30(a)
		#11-2	1.2x2x0.2mm <sup>3</sup>	No			No peak	Broad peak (-300V)		
#12	#2, #5 crystals	#12-2	1.95mm <sup>2</sup> x0.7mm	1A27			2.6	4.9 (-1000V)	Fig.3-4 Fig.3-5 Fig.3-5 Fig.3-5 Fig.3-5 Fig.3-5	5-31(a) 5-33 5-34 5-35(a) 5-36(a)
		#12-3	1.5x1.5x0.2mm <sup>3</sup>	No			No peak	Broad peak (-200V)		
		#12-4	1.5x2x0.3mm <sup>3</sup>	No			Broad peak	No peak (-600V)		
		"	"	1B12			Broad peak	No peak (-600V)		
		"	"	No			Broad peak	No peak (-800V)		
		"	"	1B12			Broad peak	No peak (-1800V)		

Note: FWHM without notifying temperature was measured at room temperature.

Table D-1 List of HgI<sub>2</sub> detectors made of crystals grown by other laboratories and their performance

Detector number	Size	Humiseal	$\alpha$ rise time $\Delta E$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	Typical FWHM resolution (KeV)		Bias Voltage	Detector mount	Photo. number
				17.8 keV X-rays	59.5 KeV $\gamma$ -rays			
TH-1S	1x1x1mm <sup>3</sup>	No	40(-250V)	No peak	No peak	-250V	Fig.3-1, A-1 Fig.3-5	A-5(a) A-7(a)
TH-2S	1.3x3x0.6mm <sup>3</sup>	No	50(-300V)	Broad peak	No pulse	-700V		
"	"	1B12			No peak	No pulse	-1200V	Fig.3-5
TK-1S	1x1x0.1mm <sup>3</sup>	No		No peak	No peak	-100V	Fig.3-2	
TK-2S	2x2x0.5mm <sup>3</sup>	No		No pulse	No pulse		Fig.3-2	
TK-3S	1x2x0.6mm <sup>3</sup>	No		No pulse	No pulse		Fig.3-5	
"	"	1B12		No pulse	No pulse	-300V	Fig.3-5	
TK-2V	3x4x0.5mm <sup>3</sup>	No	40(-100V)	Broad peak	No peak	-150V	Fig.3-2	B-7(a)
TK-3V	6.7mm <sup>2</sup> x0.2mm	No	22(-100V)	No peak	No peak	-300V	Fig.3-5	B-9(a)
"	"	1B12		Broad peak	No peak	-300V		
TY-1S	1.5x2x0.5mm <sup>3</sup>	No		No peak	No peak	-450V	Fig.3-5	C-1(a) C-1(b)
"	"	1B12		No peak	No peak	-500V	Fig.3-5	
TY-2S	1x1x0.4mm <sup>3</sup>	No		Broad peak	No pulse	-300V	Fig.3-5	
"	"	1B12		No peak	No pulse	-300V	Fig.3-5	

Note: TH---The Research Institute for Metals, Tohoku University.  
TK---Faculty of Science, Tokyo University.  
TY---Faculty of Engineering, Toyama University.

S--- Crystal was grown by solvent evaporation method  
V---Crystal was grown by vacuum transport method

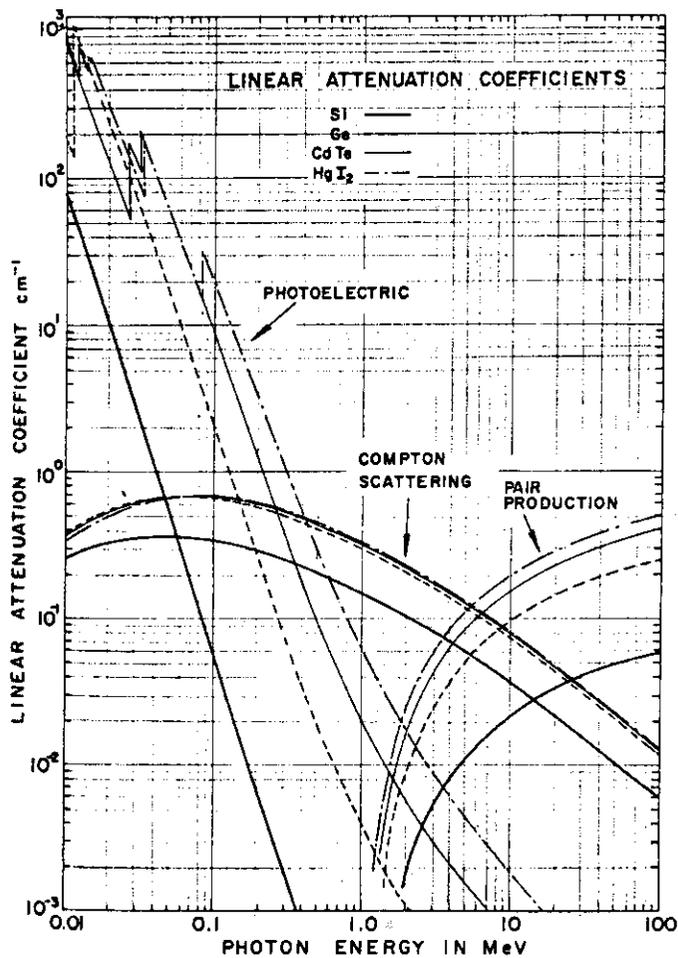


Fig.1-1 Linear attenuation coefficients for photoelectric absorption, Compton scattering and pair production in silicon, germanium, cadmium telluride and mercury iodide [ From H.L.Malm, et al; IEEE Trans, NS-20(1),500(1973) ]

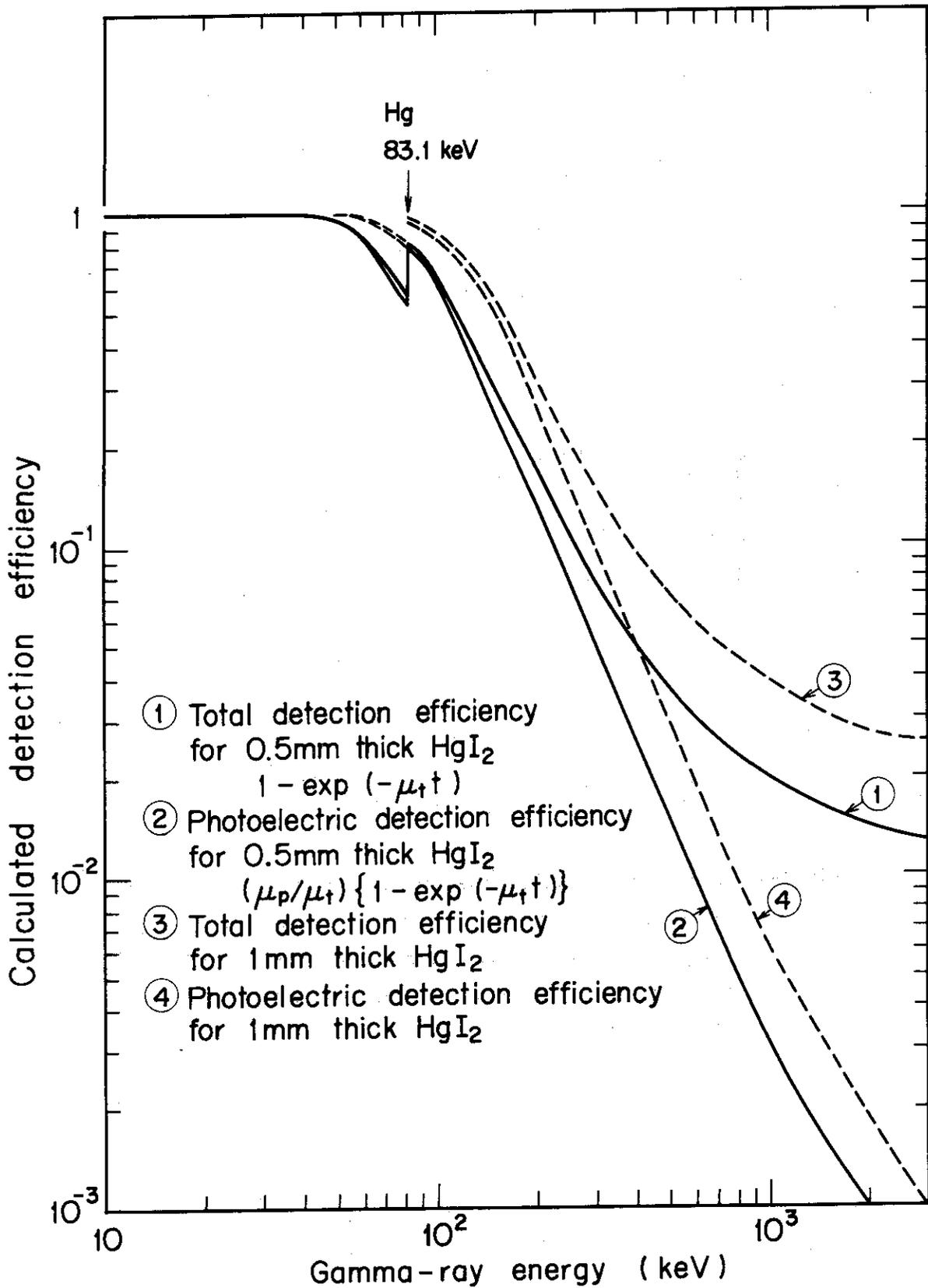


Fig. 1-2 Calculated detection efficiency of  $\text{HgI}_2$  detectors (thickness 0.5mm and 1mm)

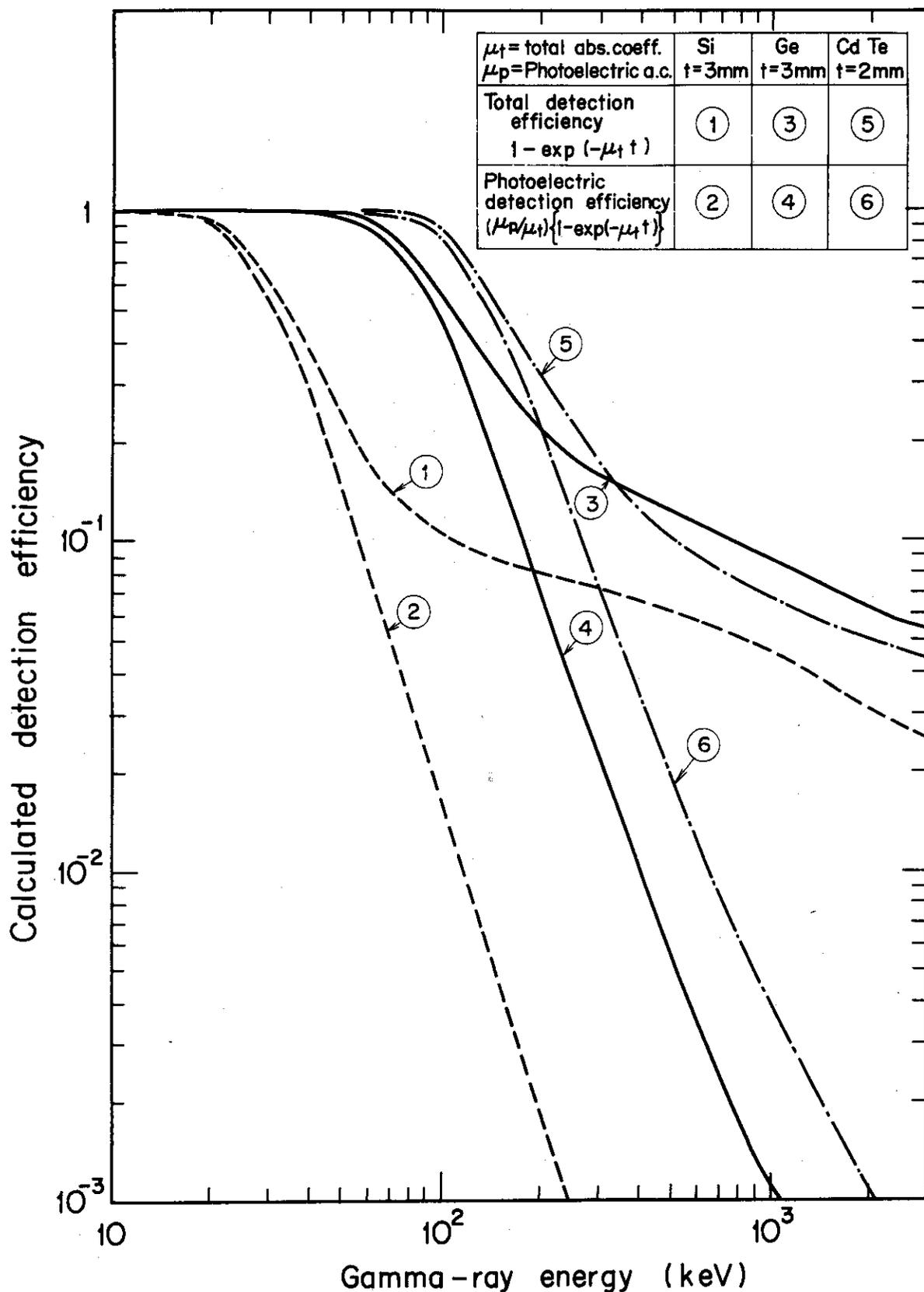


Fig.1-3 Calculated detection efficiencies of 3mm Si, 3mm Ge and 2mm CdTe detectors

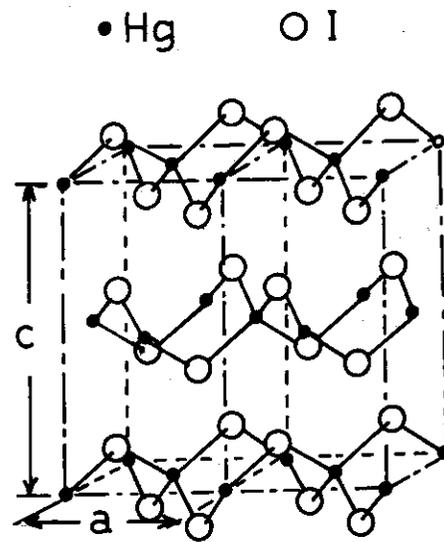


Fig.1-4 Crystal structure of HgI<sub>2</sub>

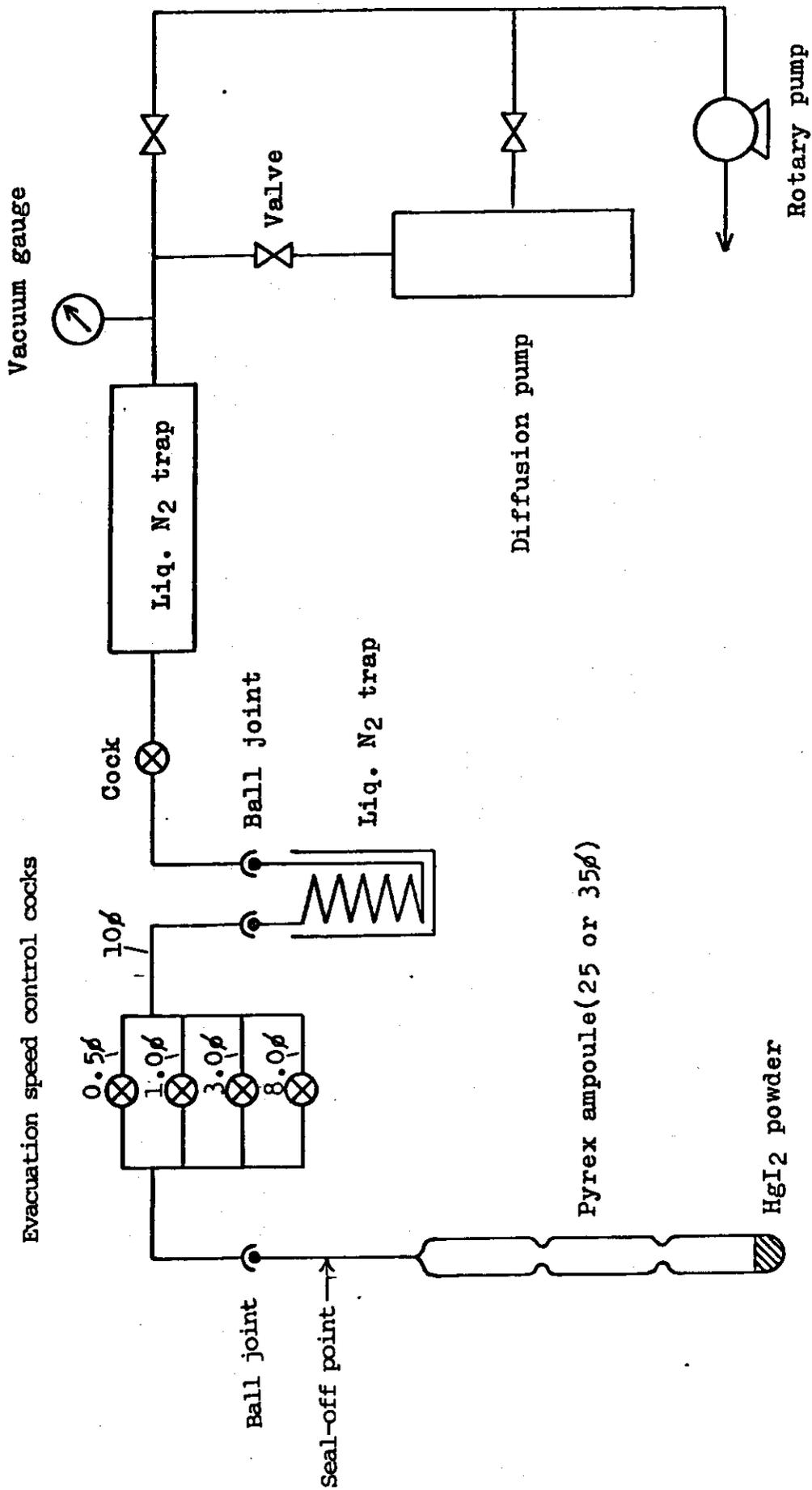


Fig.2-1 Schematic diagram of ampoule evacuation system

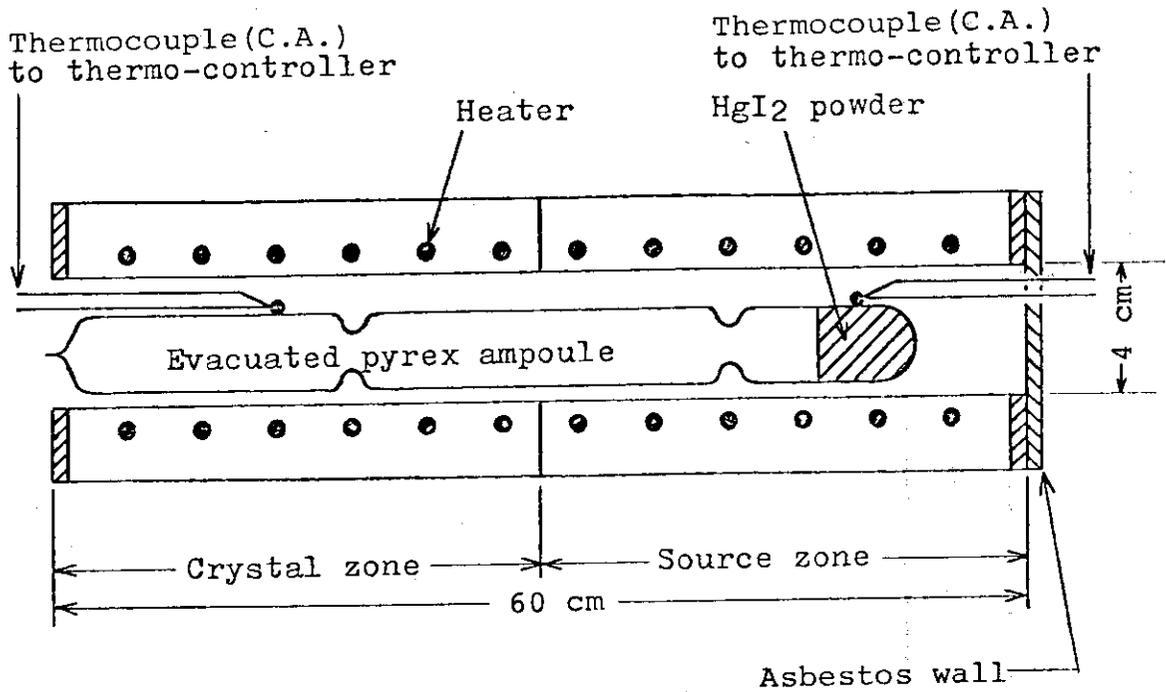


Fig.2-2 Sketch of horizontal furnace with controller

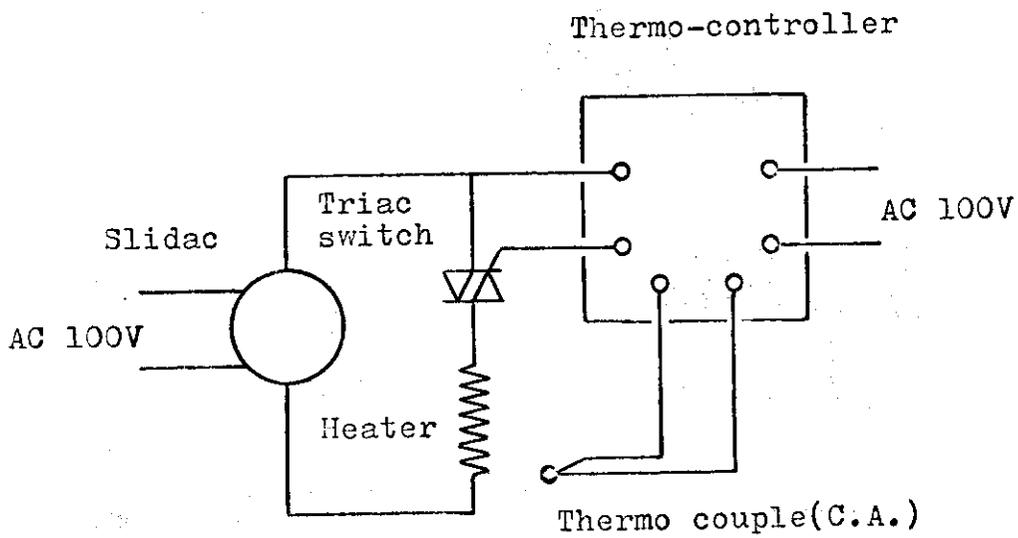


Fig.2-3 Connection diagram of thermo-controller

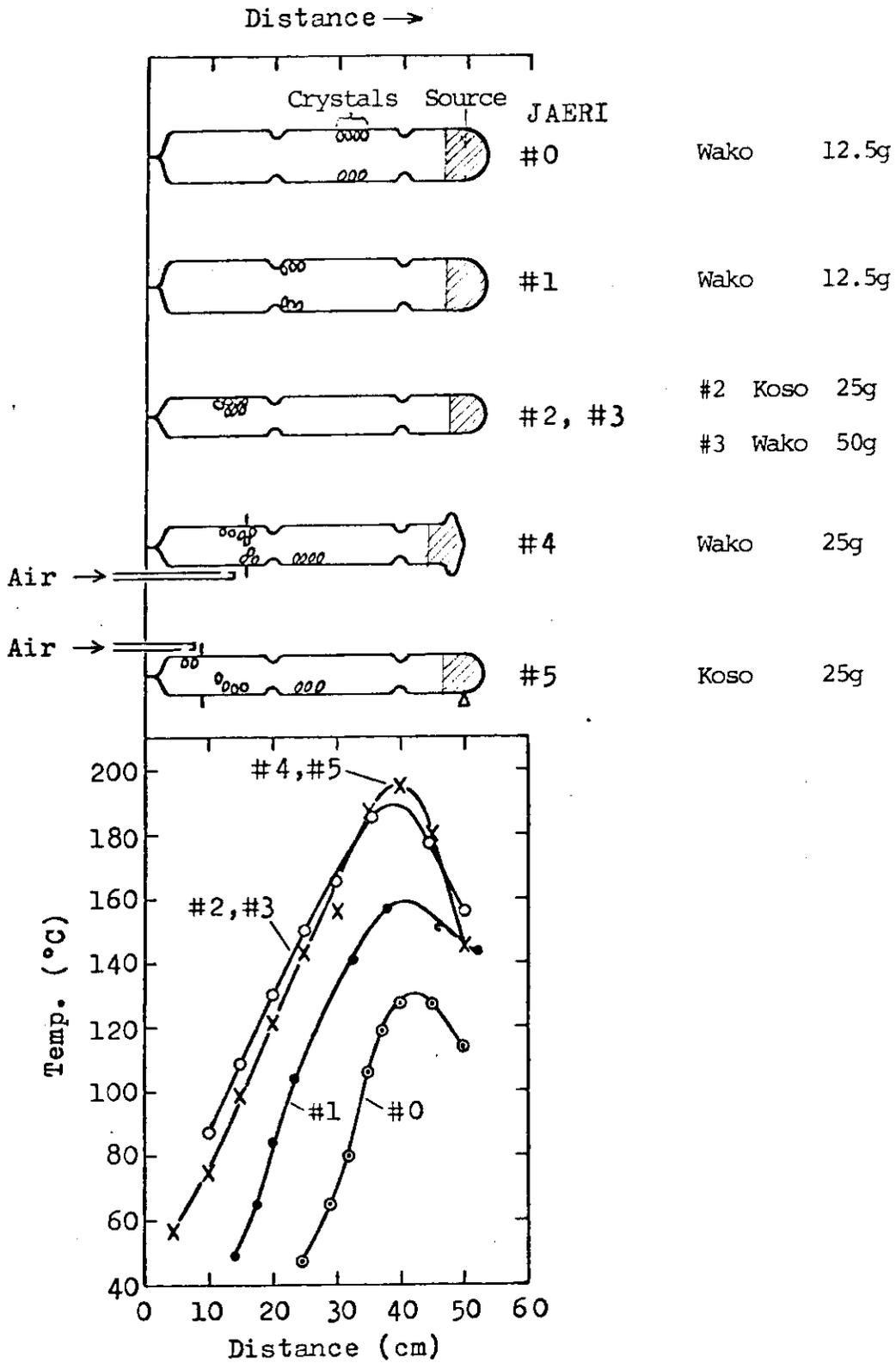


Fig.2-4 Positions of crystals grown and  
corresponding temperature distributions

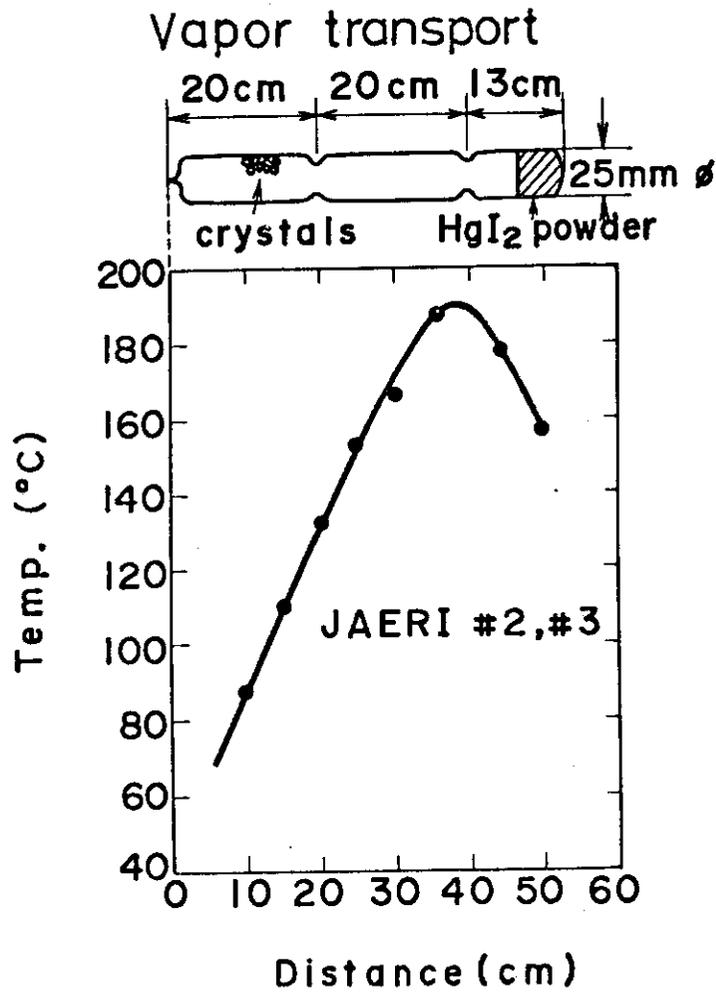


Fig.2-5

Crystal growth of #2 and #3.

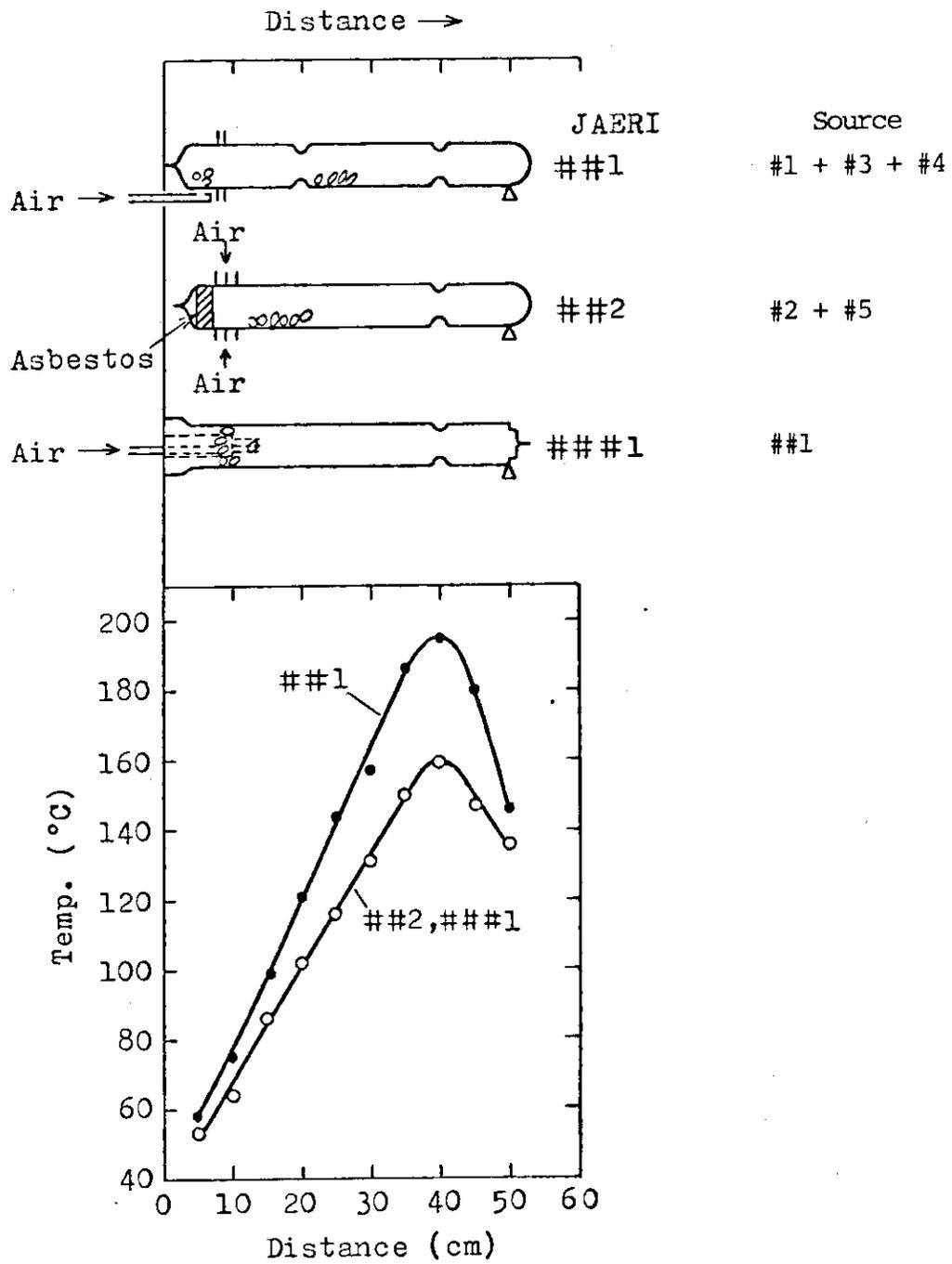


Fig.2-6 Crystal growth ##1, ##2 and ###1

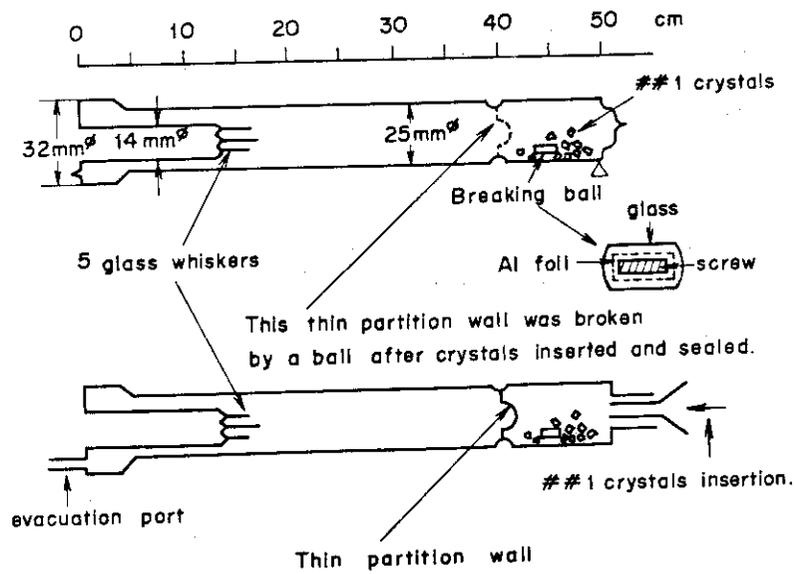


Fig.2-7 Ampoule used in ###1 crystal growth.

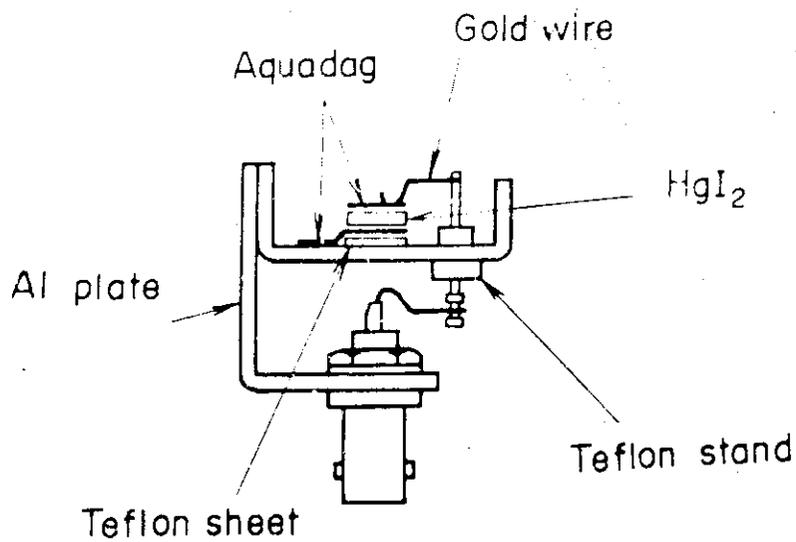


Fig.3-1 Detector mount using Al plate and teflon film.

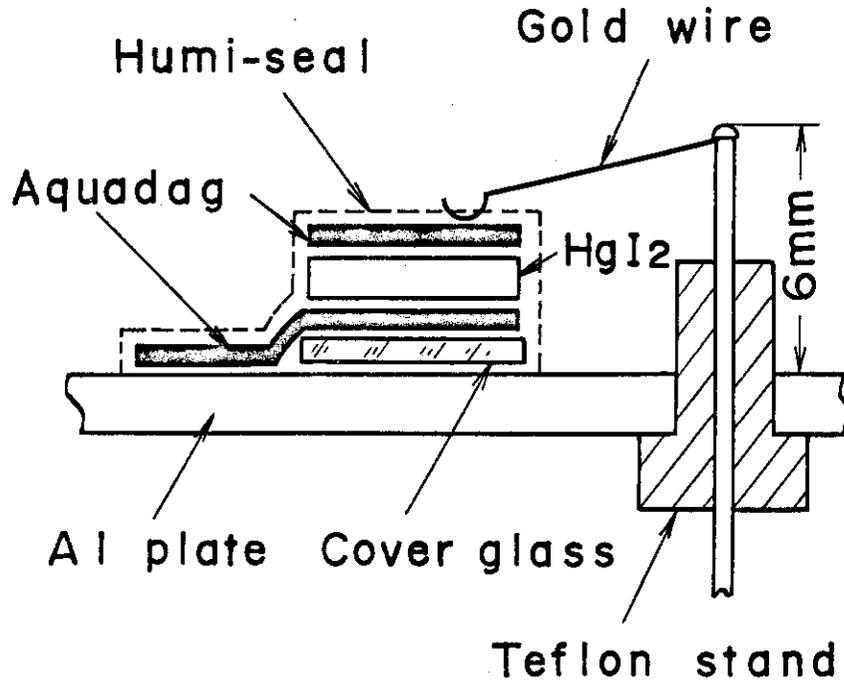


Fig.3-2 Detector mount using Al plate and cover-glass

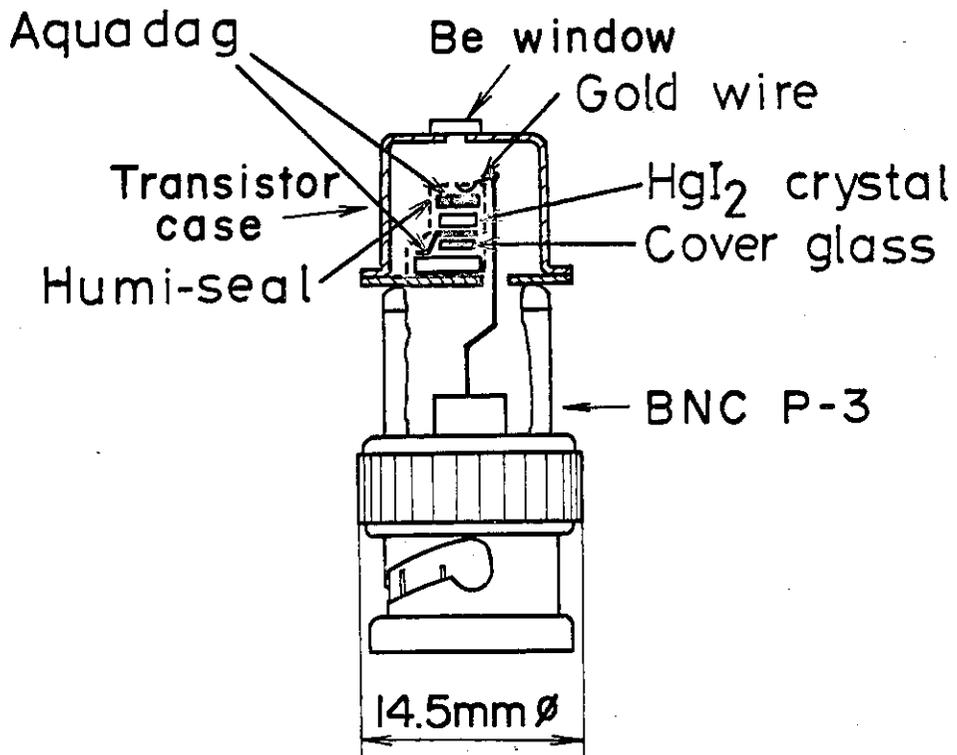


Fig.3-3 BNC(P)-type detector mount

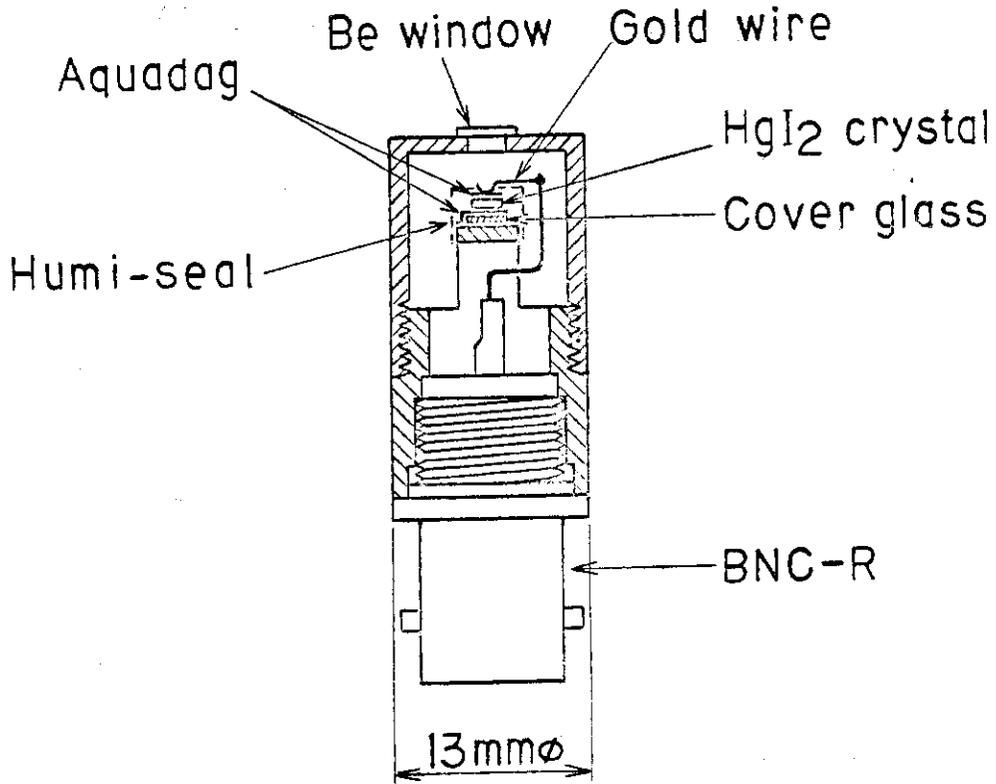


Fig.3-4 BNC(J)-type detector mount

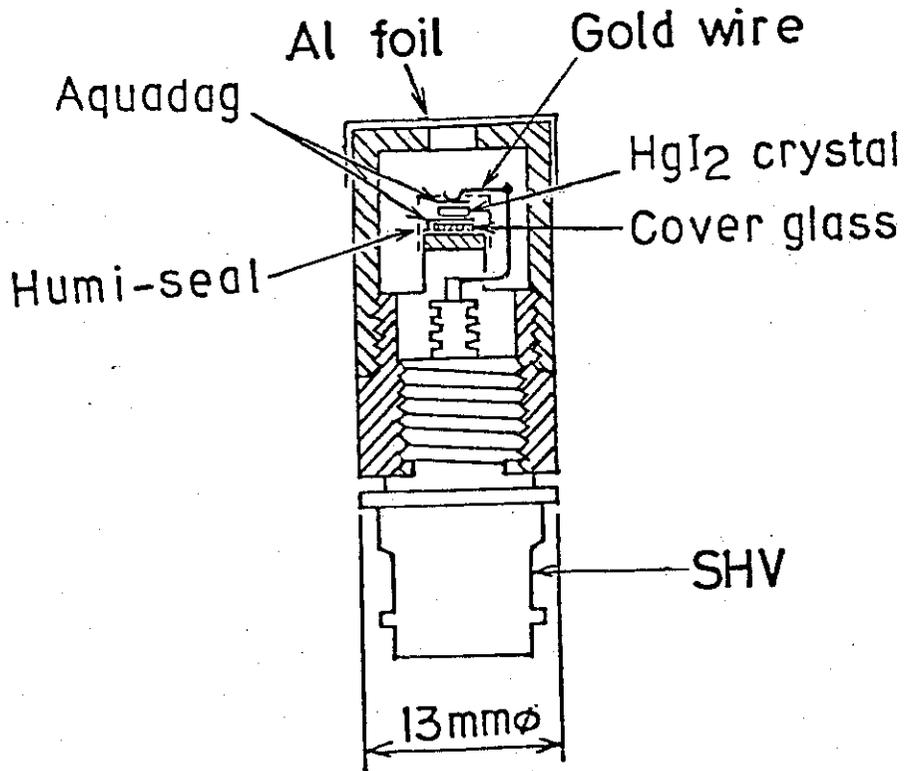


Fig.3-5 SHV(J)-type detector mount

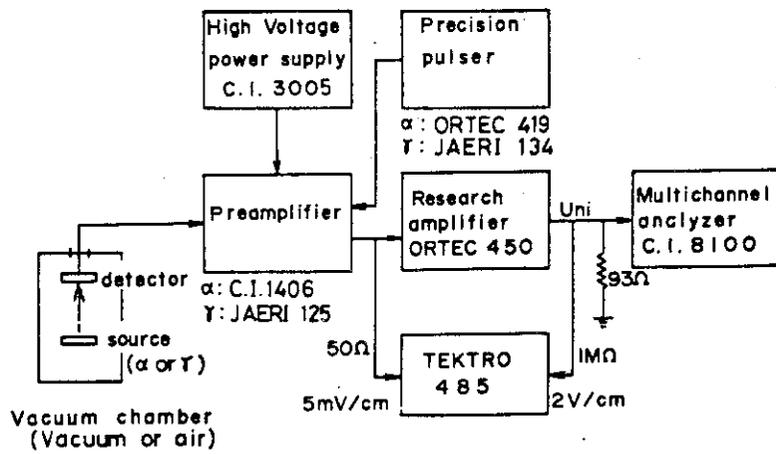


Fig.4-1 Schematic diagram of electronics

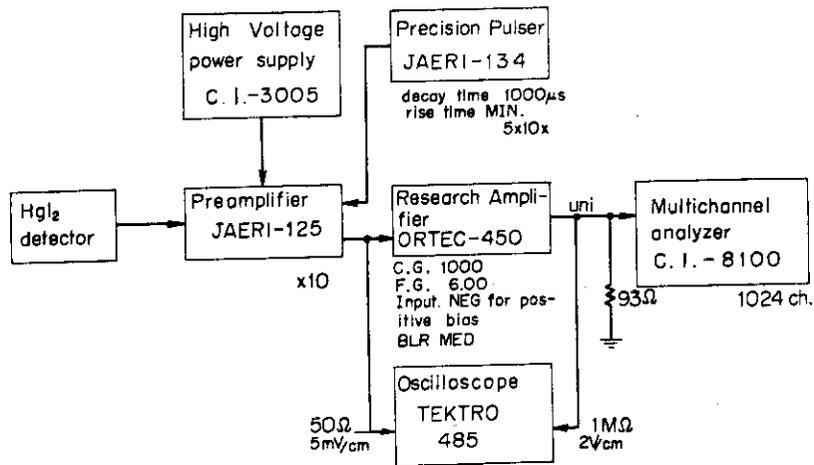


Fig.4-2 Electronics used in HgI<sub>2</sub> detector gamma-rays performance measurement.

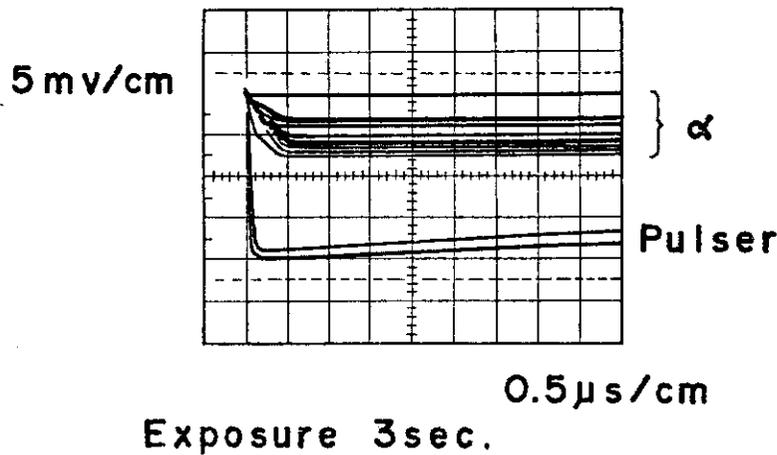


Fig.4-3 Preamplifier output pulse shape from HgI<sub>2</sub> detector #2-1 (-300V) and pulser.

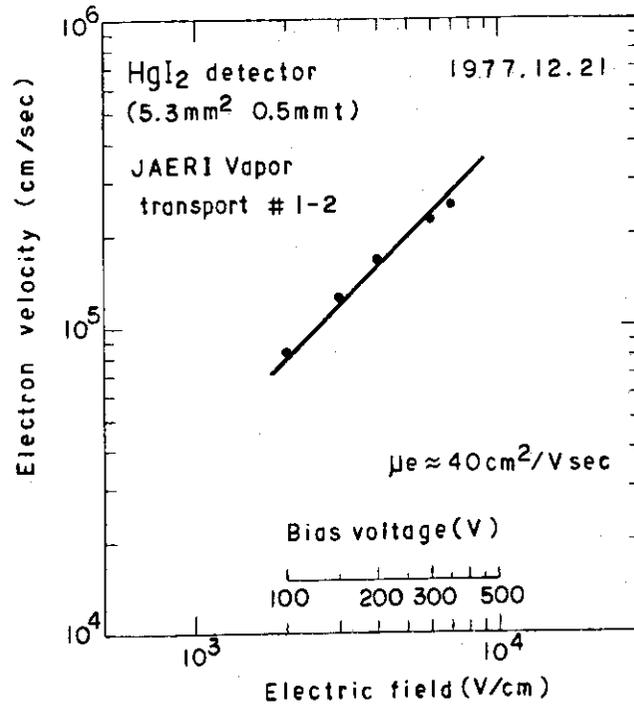


Fig.5-1 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-2.

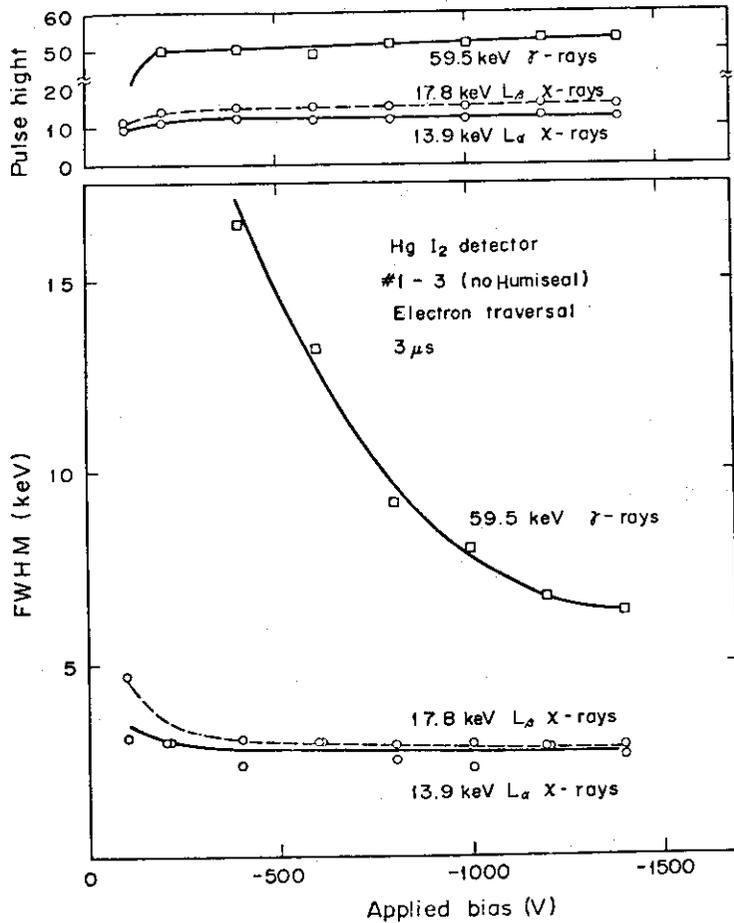


Fig. 5-2 Pulse height and FWHM vs. applied bias characteristics of HgI<sub>2</sub> detector #1-3 (no Humiseal) (Electron traversal)

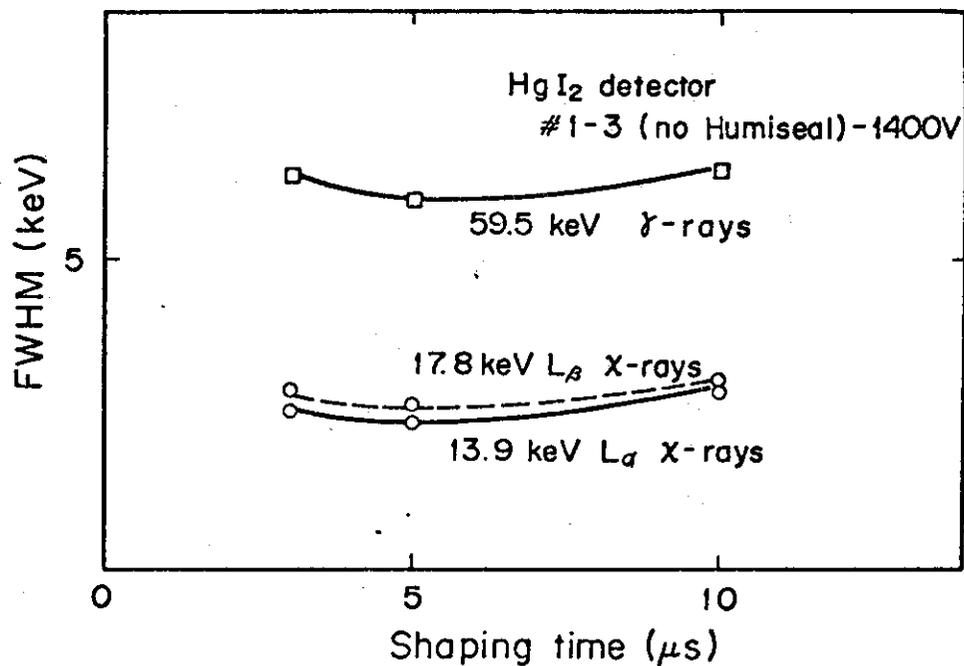


Fig.5-3 FWHM vs. shapingtime characteristics of HgI<sub>2</sub> detector #1-3(no Humiseal)at -1400V.

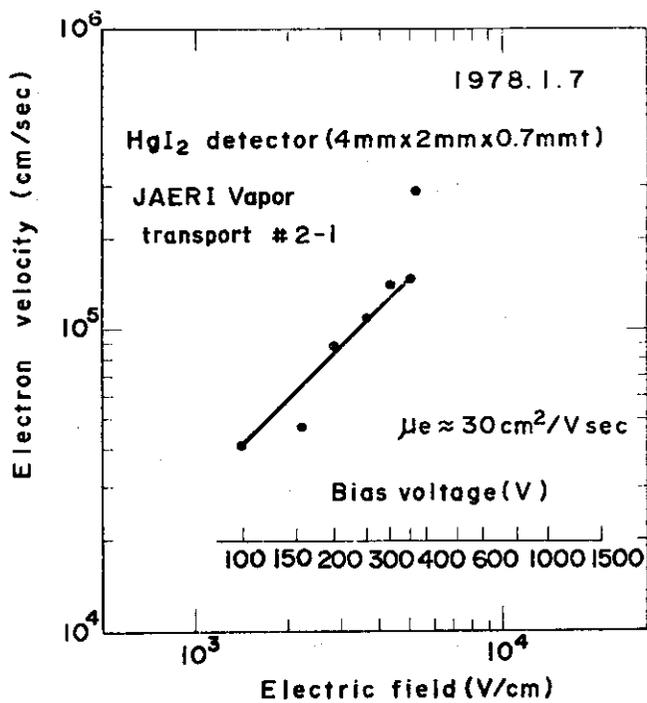


Fig.5-4 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1.

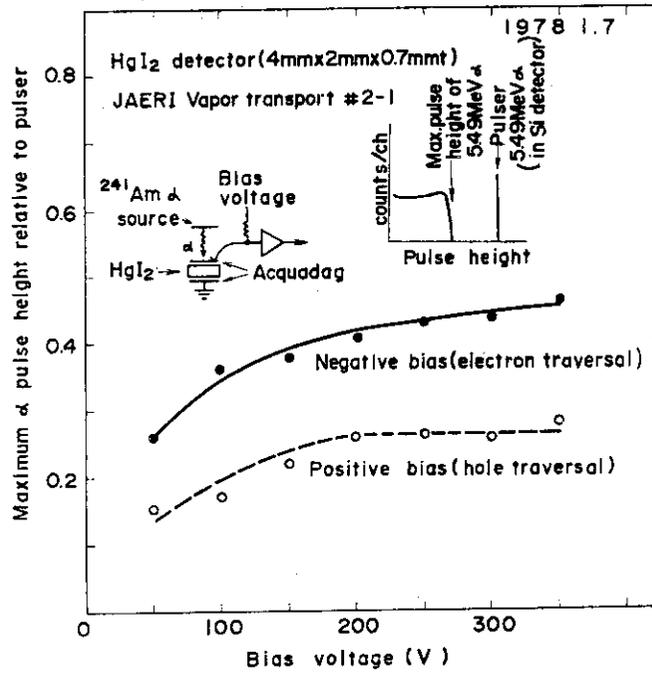


Fig.5-5 Maximum pulse height of α vs. bias voltage characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1.

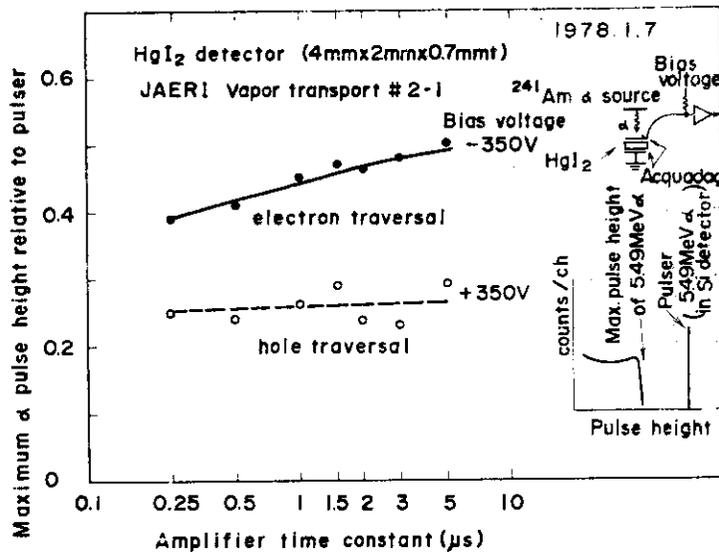


Fig.5-6 Maximum pulse height of α vs. amplifier time constant characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1.

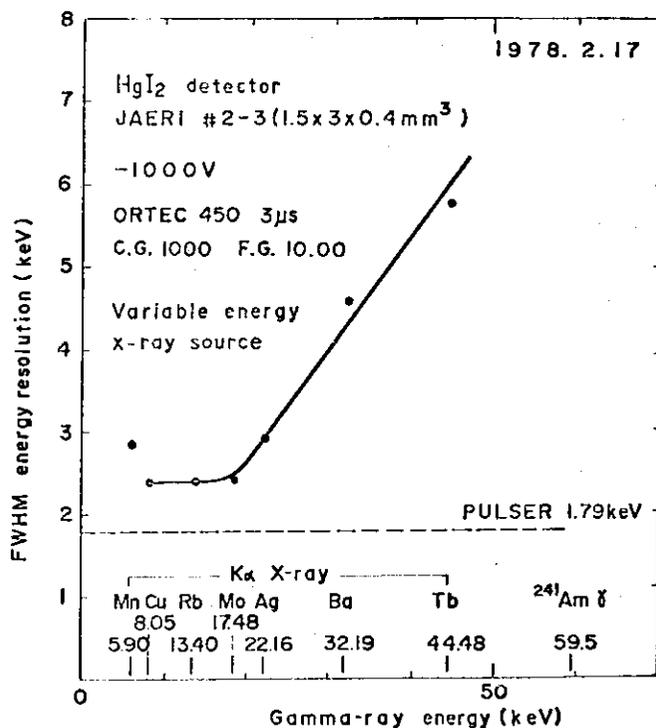


Fig.5-7 FWHM energy resolution vs. gamma ray energy characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated)

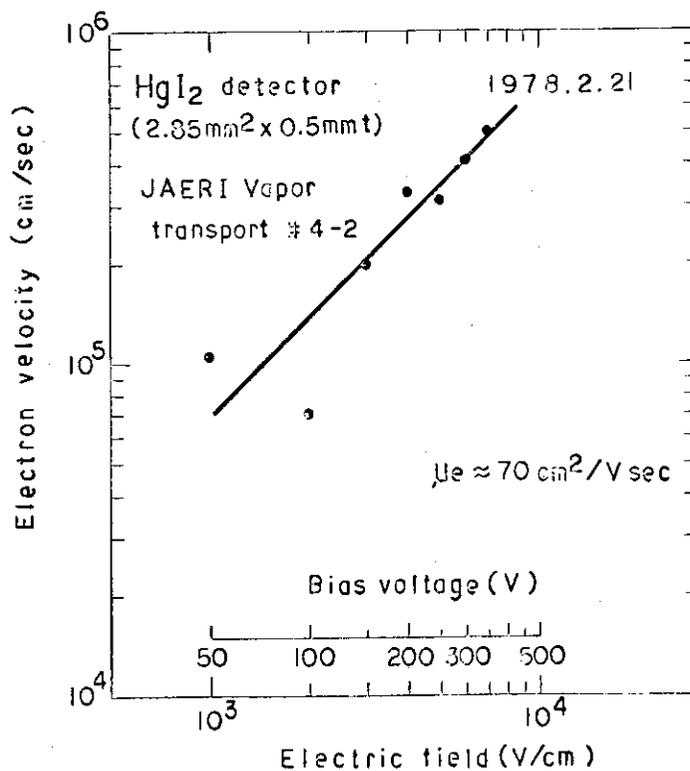


Fig.5-8 Electron velocity vs. applied electric field characteristics obtained from HgI<sub>2</sub> detector # 4-2

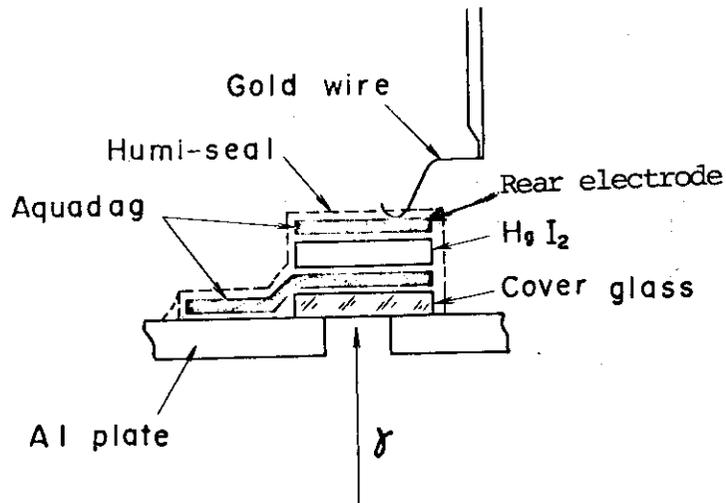


Fig.5-9 Detector mount for ##1-1 HgI<sub>2</sub> detector.

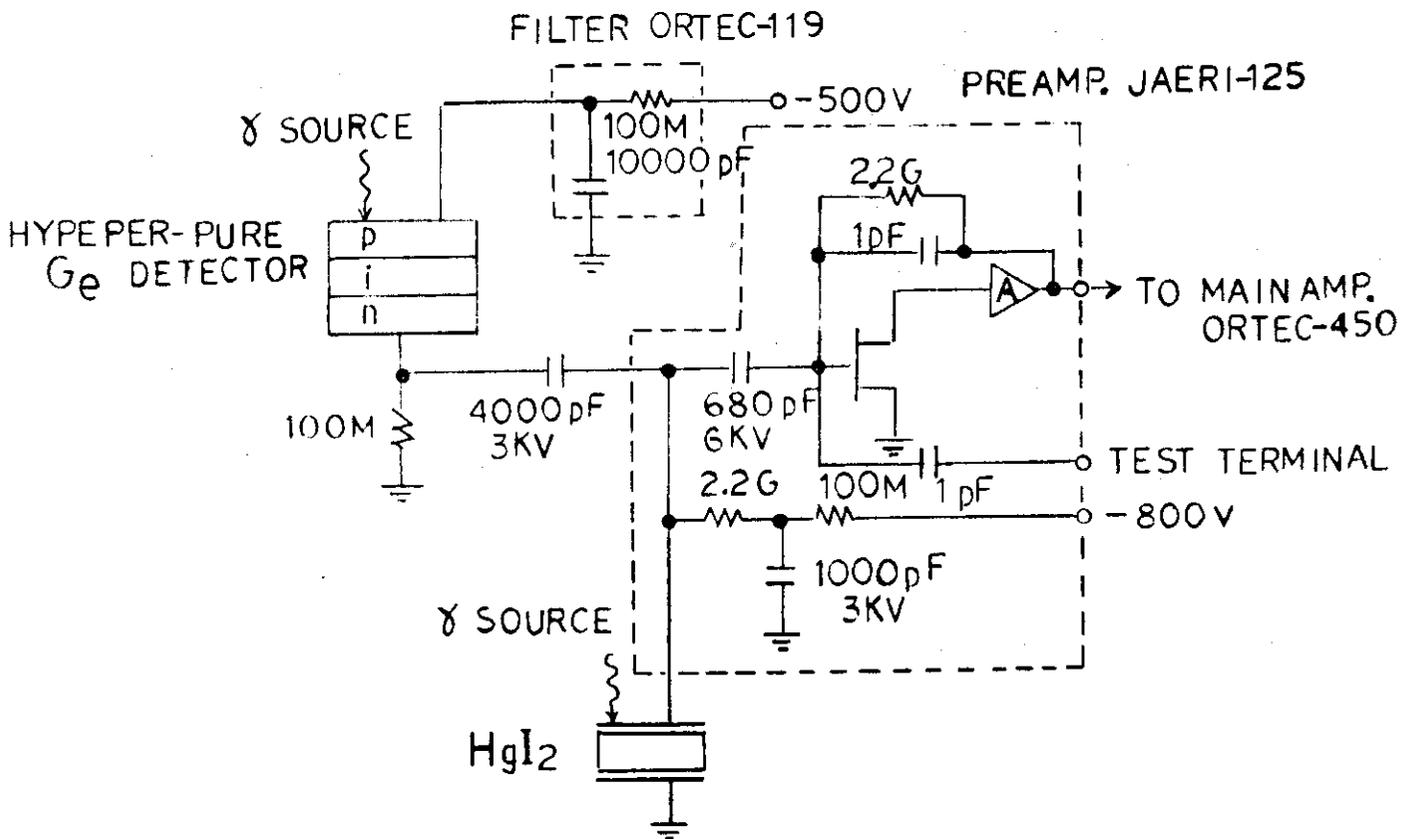
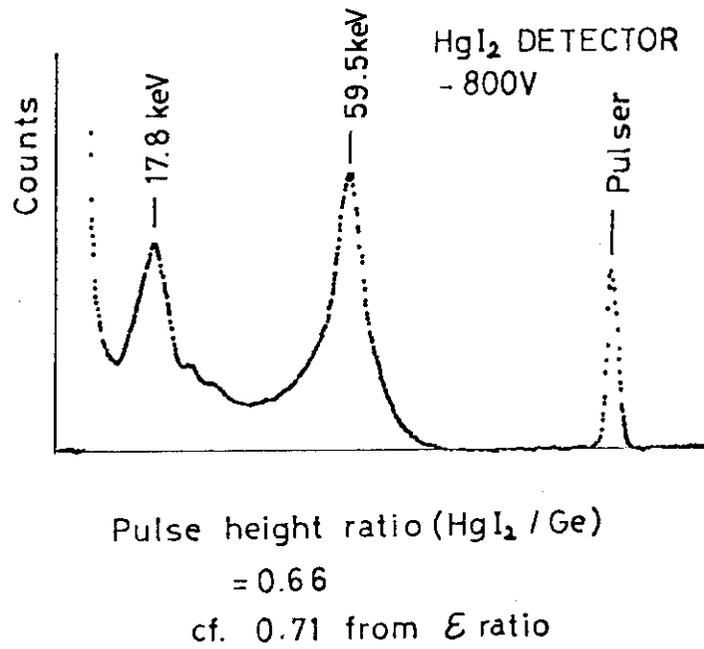
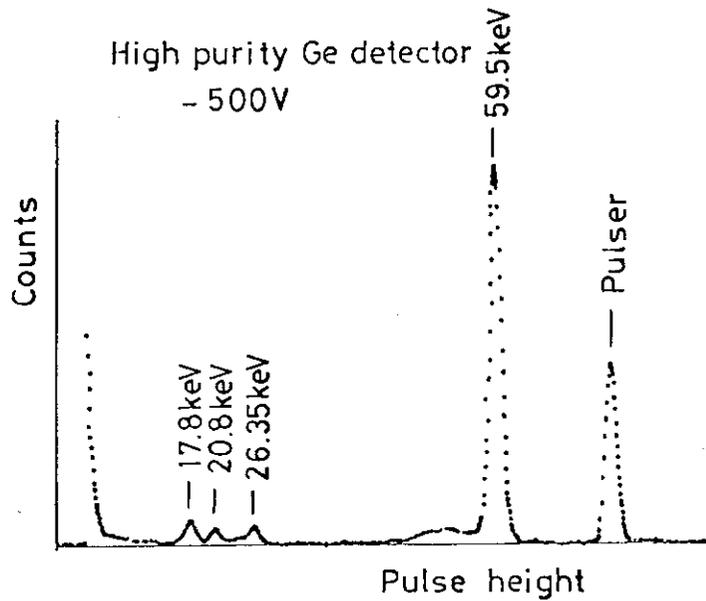


Fig.7-1 Circuit diagram of electronics to compare outputs from HgI<sub>2</sub> detector with those from hyperpure Ge detector.



(a) HgI<sub>2</sub> detector ##2-2 at room temperature.



(b) Hyperpure Ge detector at liquid nitrogen temperature.

Fig.7-2 Comparison of pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector and hyperpure Ge detector.

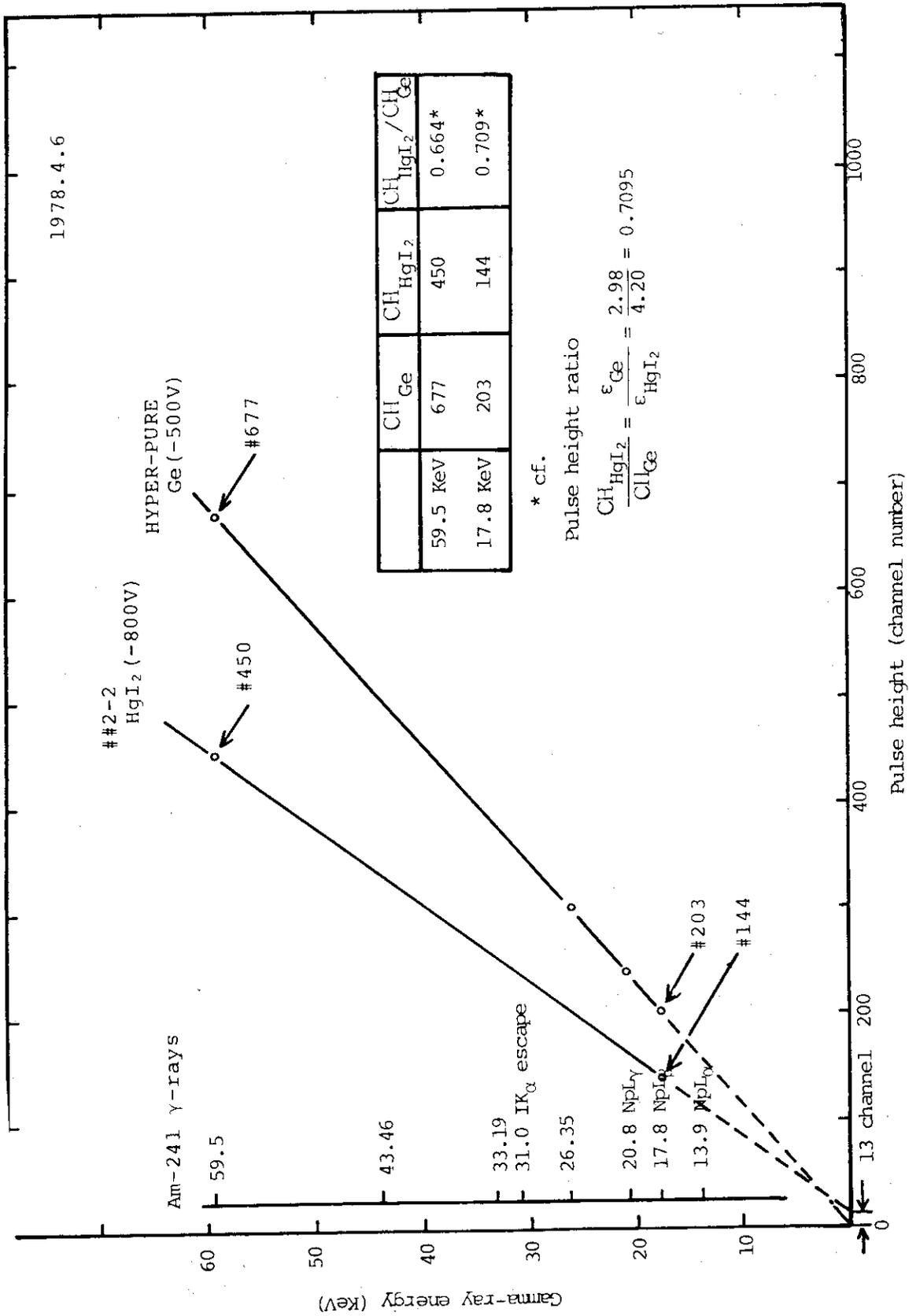


Fig.7-3 Gamma-ray energy vs. pulse height relations for HgI<sub>2</sub> and hyperpure Ge detectors.

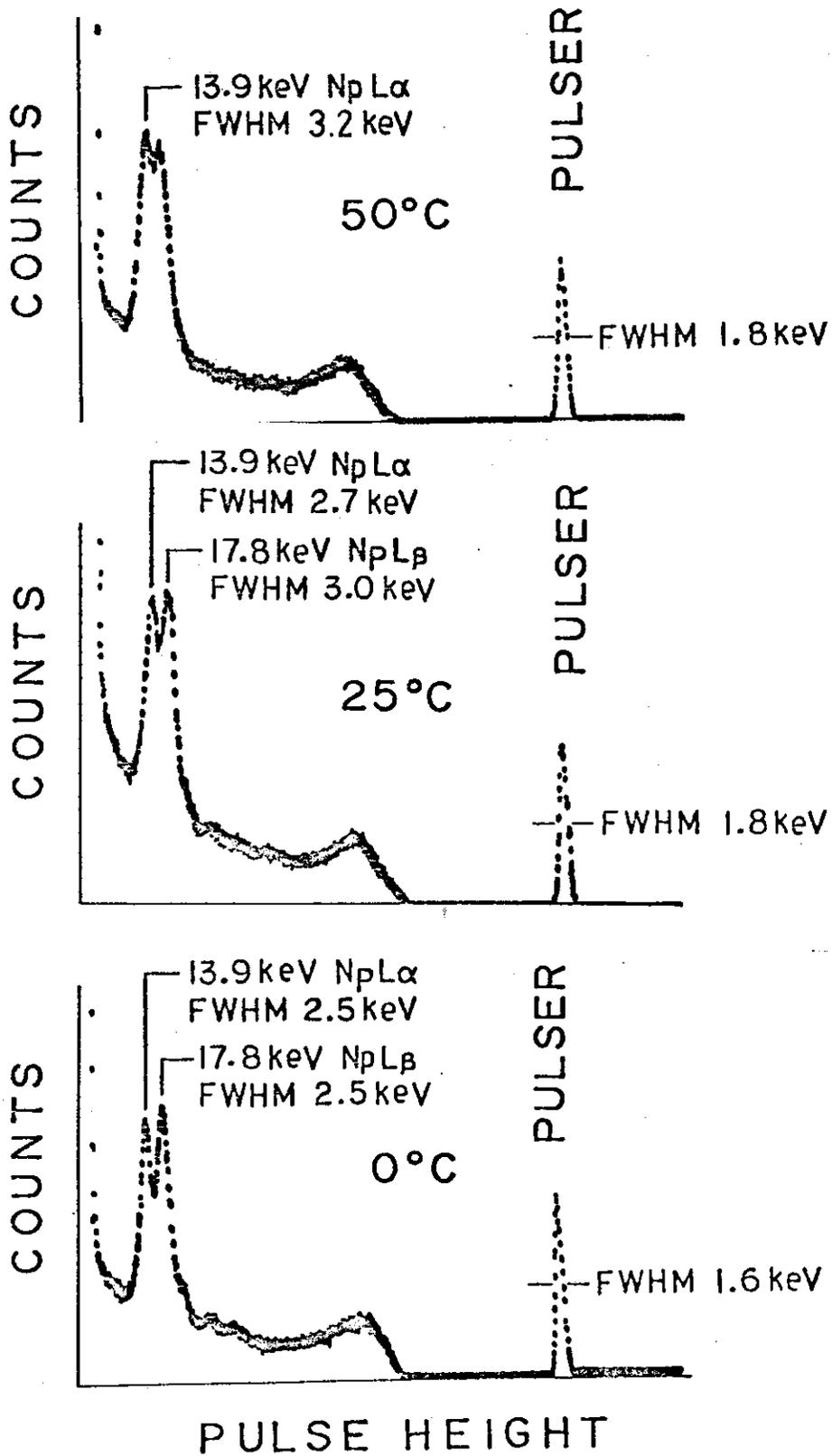


Fig.8-1 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-5(-300V) at 50°C, 25°C and 0°C. Improvement of FWHM was observed as temperature decreased.

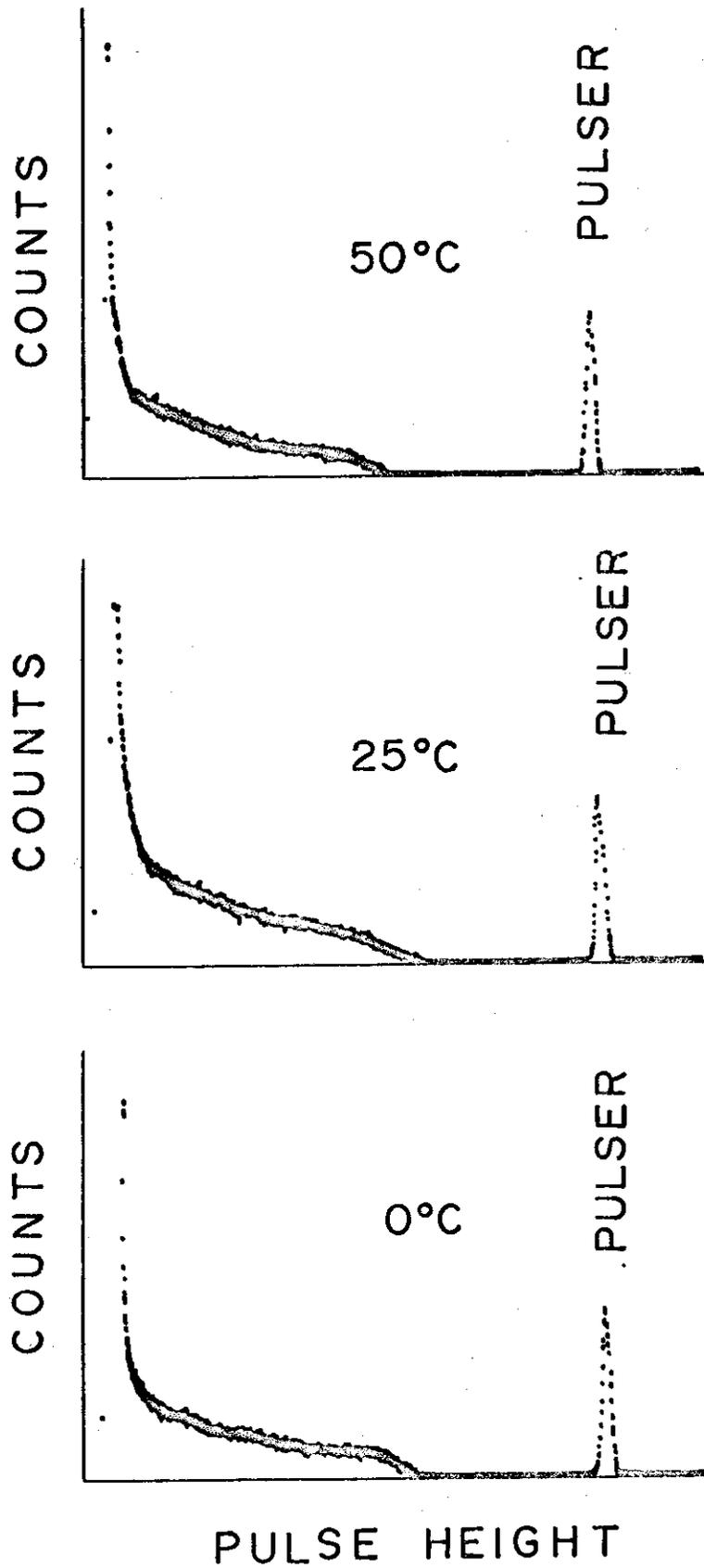


Fig.8-2 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-5(+300 V) at 50°C, 25°C and 0°C.

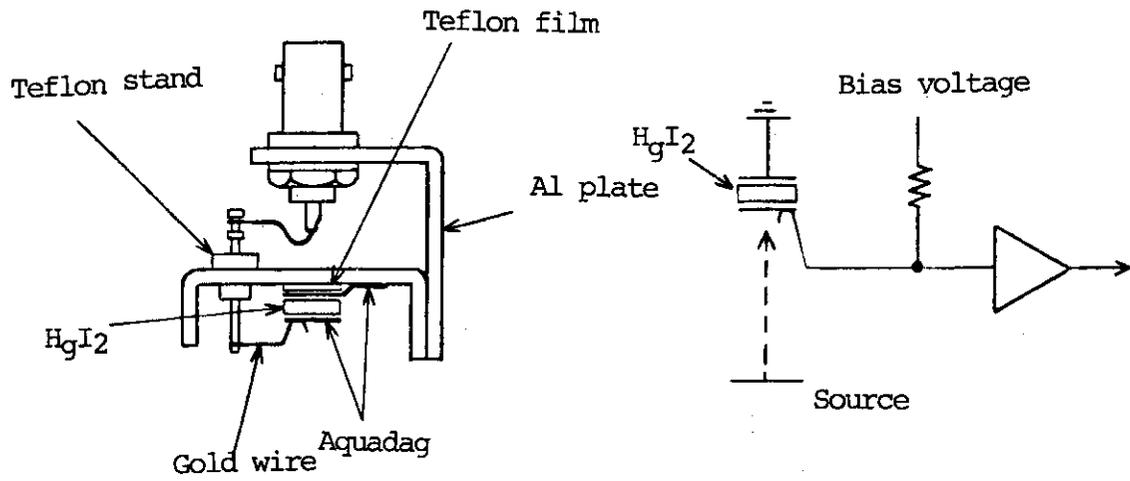


Fig.A-1 Mount for  $HgI_2$  detector TH-IS

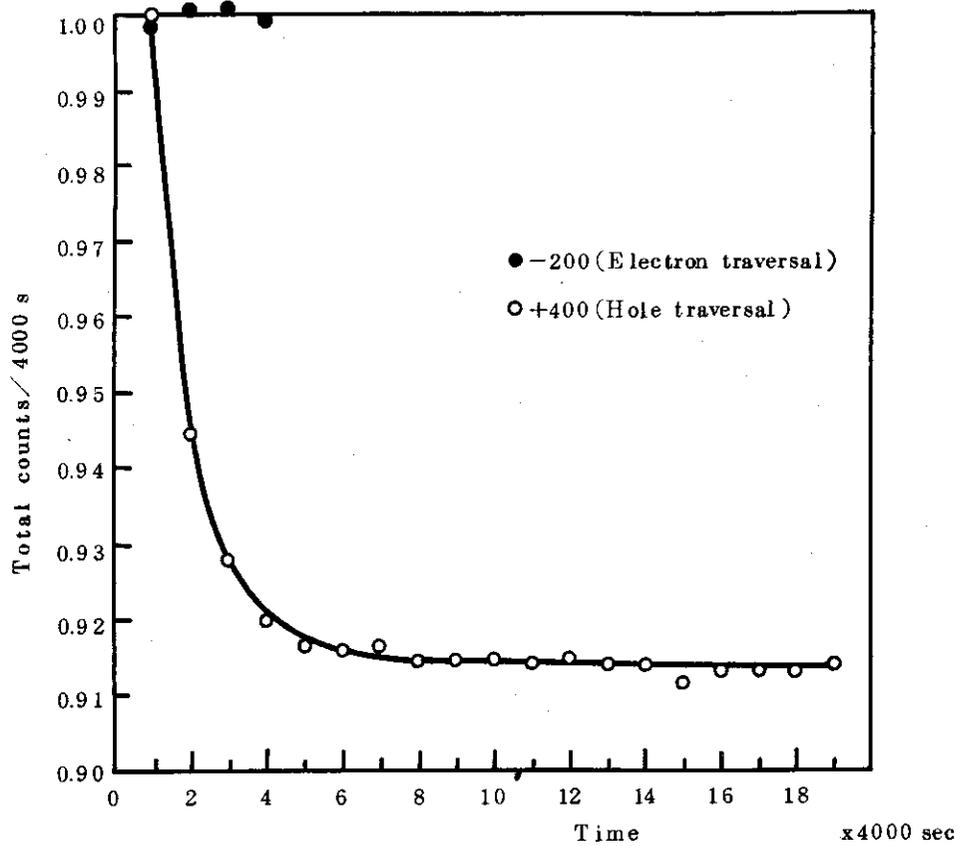


Fig. A-2 Total counts in 4000s vs. elapsed time characteristics of  $HgI_2$  detector TH-IS

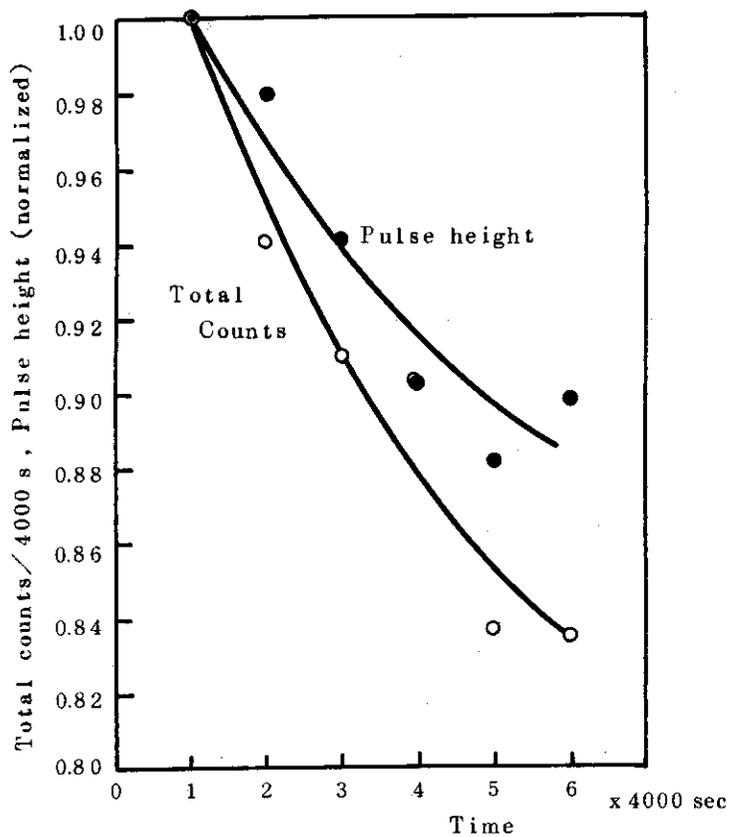
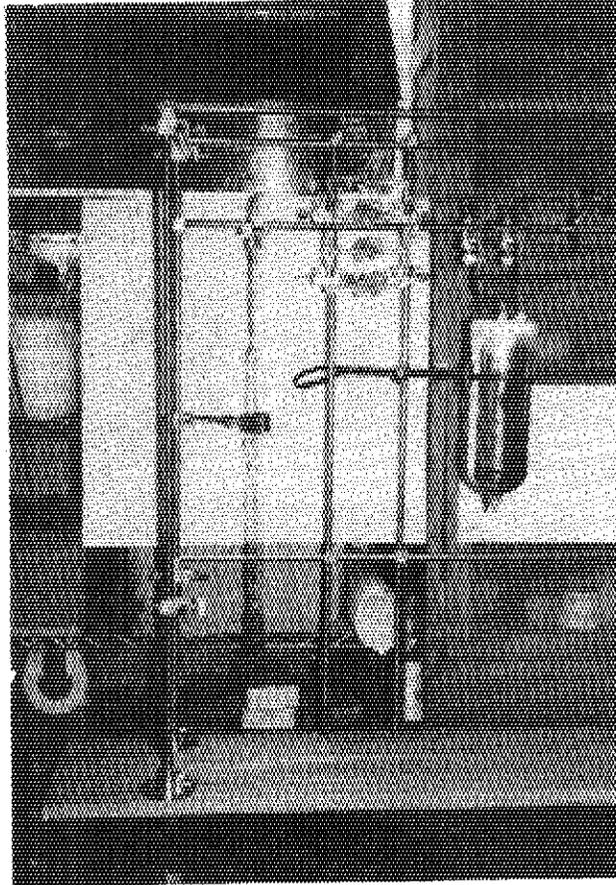
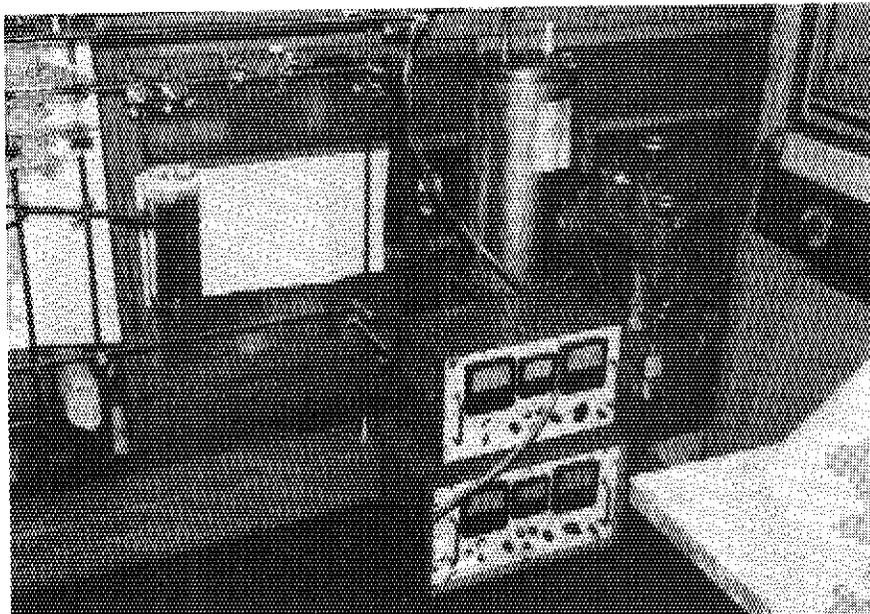


Fig. B-1 Total  $\alpha$  counts in 4000 s (o) and pulse height (●) vs. elapsed time obtained from  $H_gI_2$  detector TK-2S.



(a) Ampoule, evacuation speed control cocks,  
and liquid nitrogen trap



(b) Evacuation speed control cocks, two  
liquid nitrogen traps, pirani gauge  
and diffusion pump

Photo.2-1 Photo of ampoule evacuation system

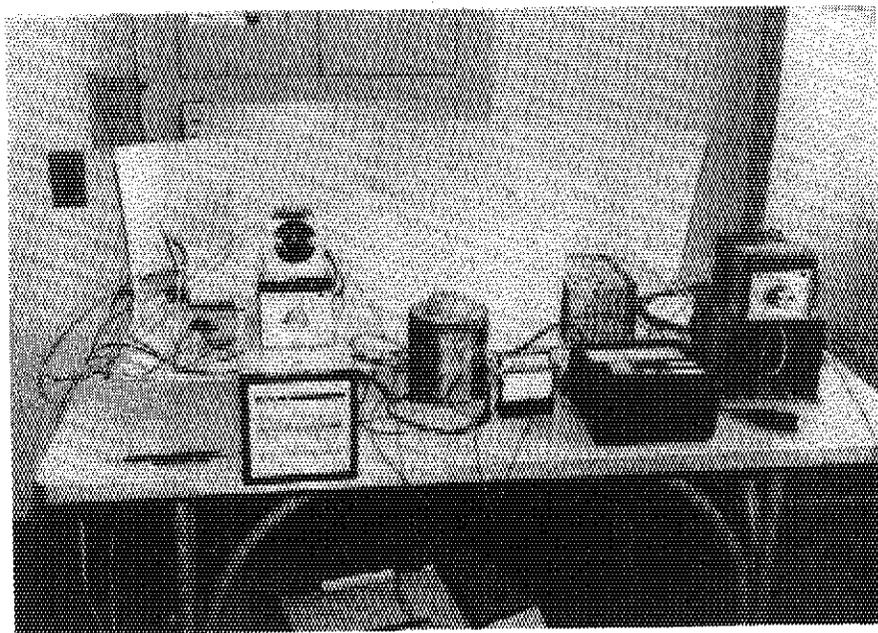


Photo.2-2 Photo of electric furnace and its controller

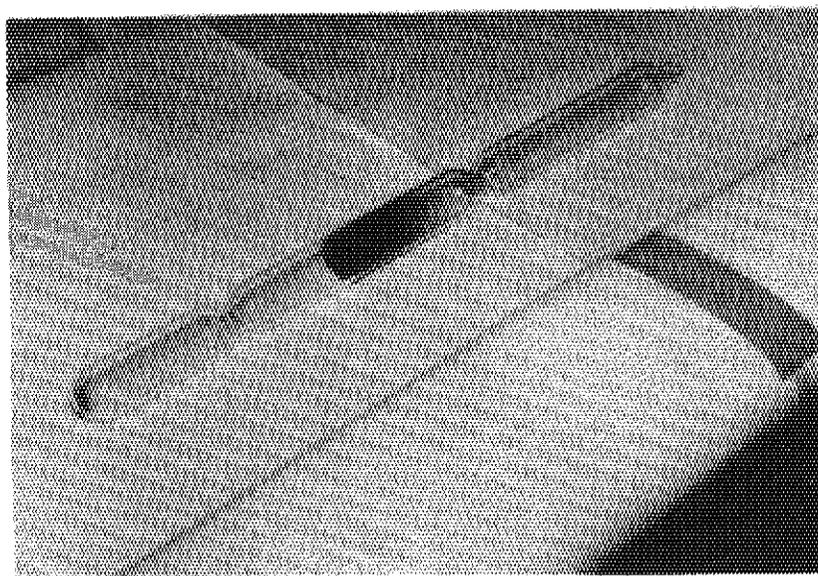
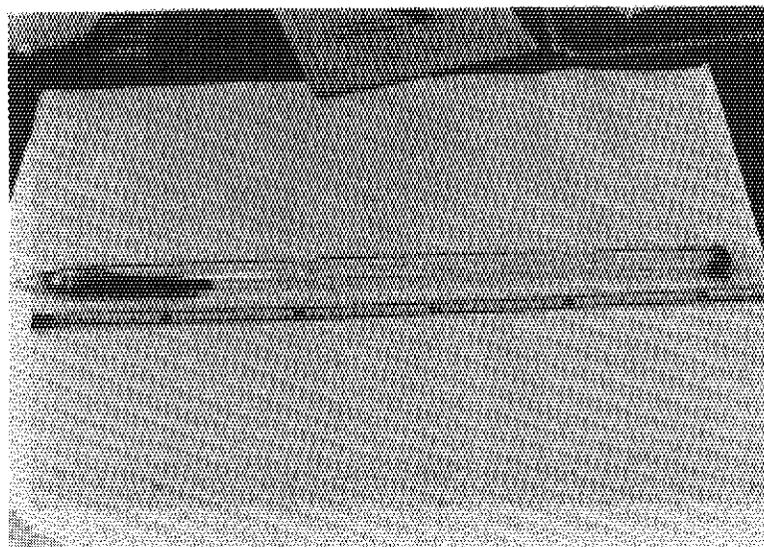
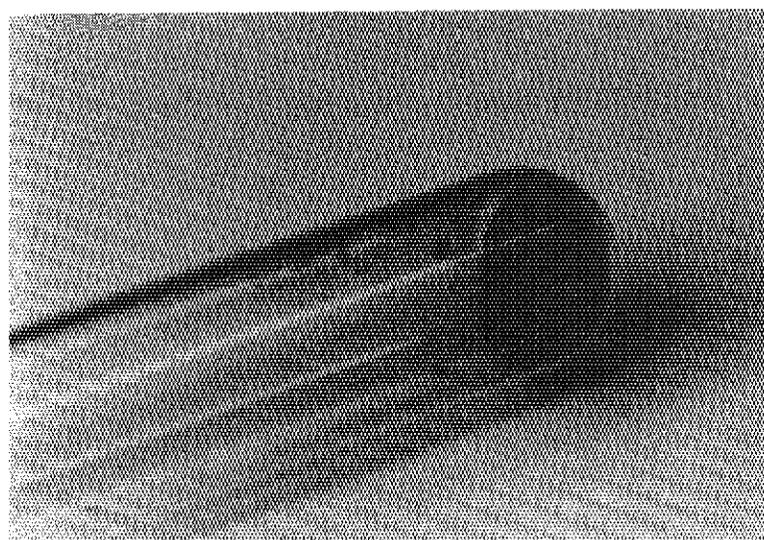


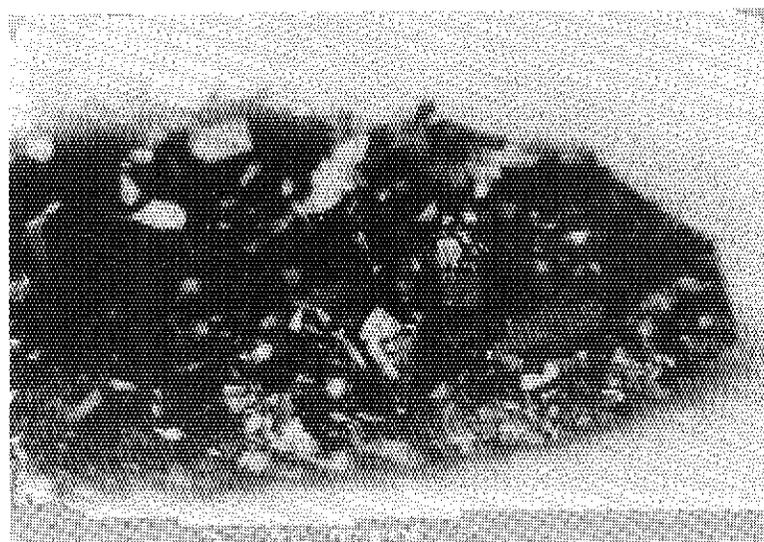
Photo.2-3 Photo of ampoule in which #0 crystals were grown. 12.5g Wako powder was loaded in the left end. Crystals were grown in the middle of the ampoule.



(a) Overall view of ampoule

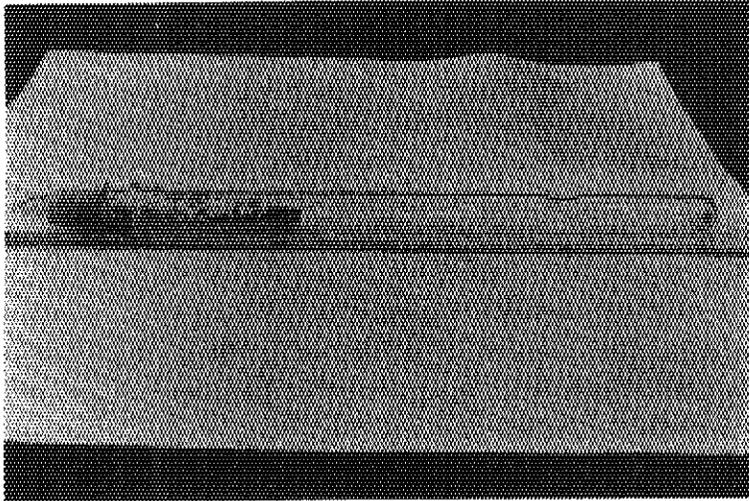


(b) Solidified source residue

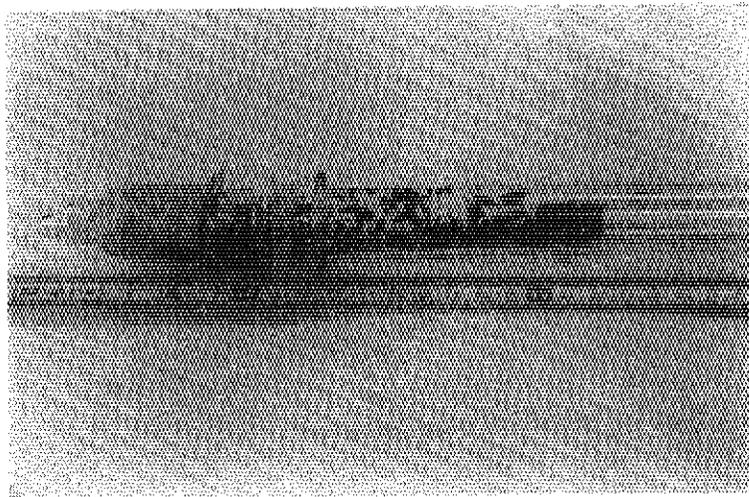


(c) Grown crystals

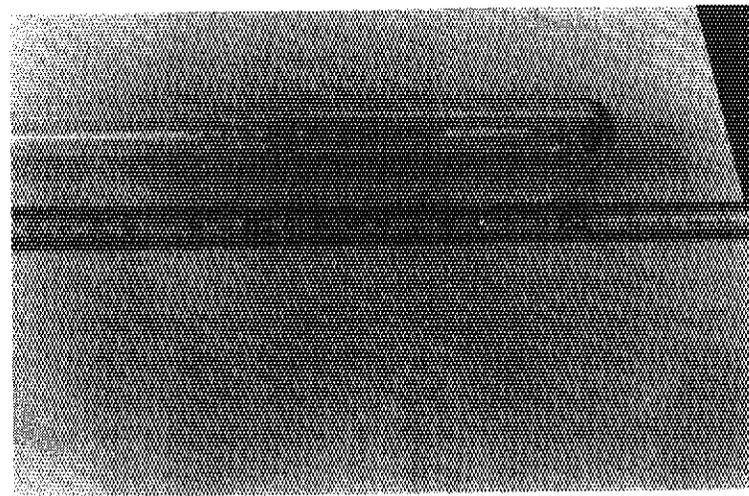
Photo.2-4 Photo of #2 crystal growth



(a) Overall view of ampoule



(b) Grown crystals



(c) Source residue

Photo.2-5 Crystal growth of ##2.

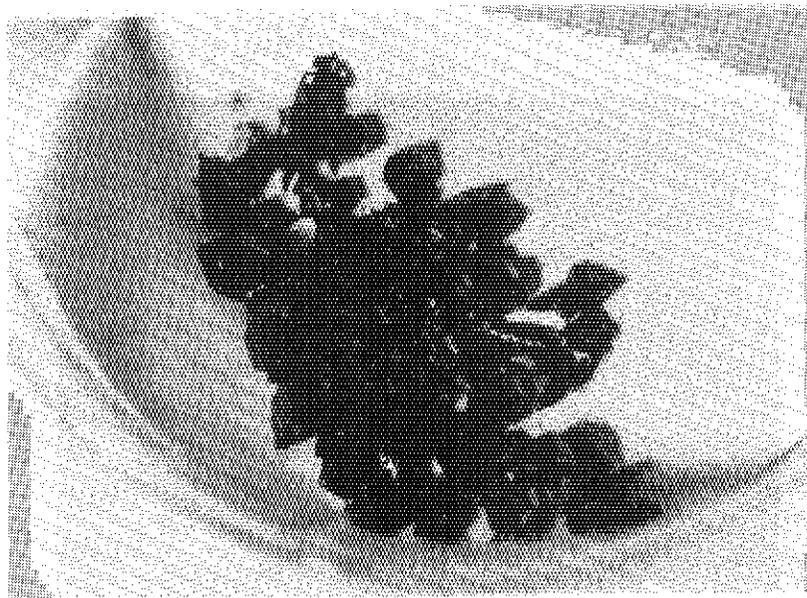
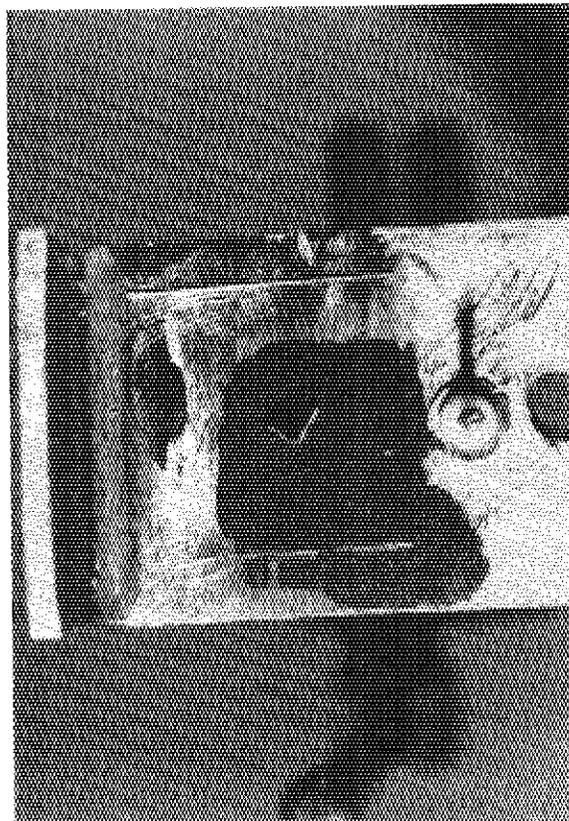
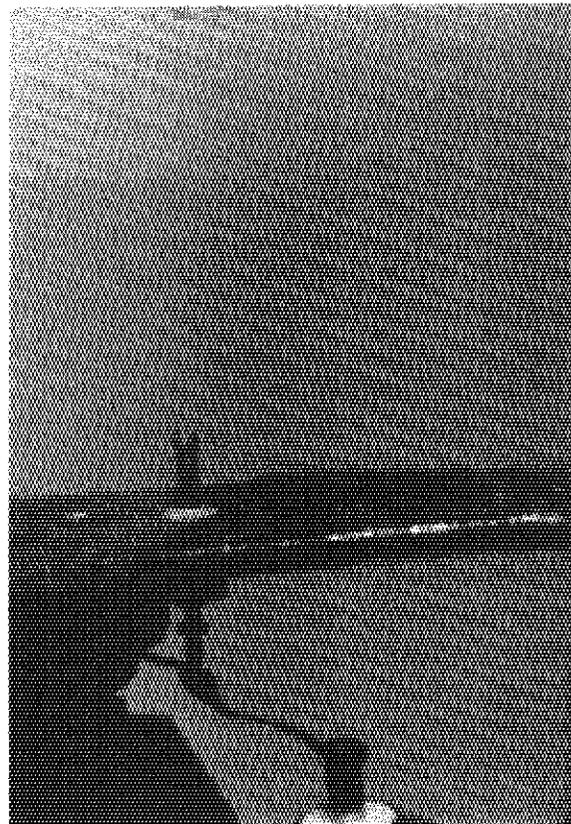


Photo.3-1 Photo of #1 crystals.



(a) Over view. Triangle shaped  $HgI_2$  crystal is seen in the center on square cover-glass. Teflon stand on the right.



(b) Side view.

Photo.3-2 Photo of #1-2 detector

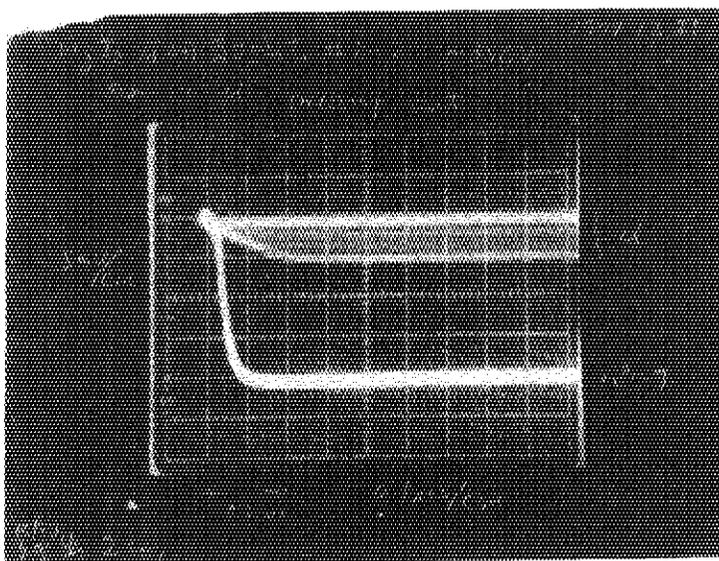


Photo.5-1 Preamplifier output pulse shapes from  $HgI_2$  detector #1-2(-350V) and pulser.

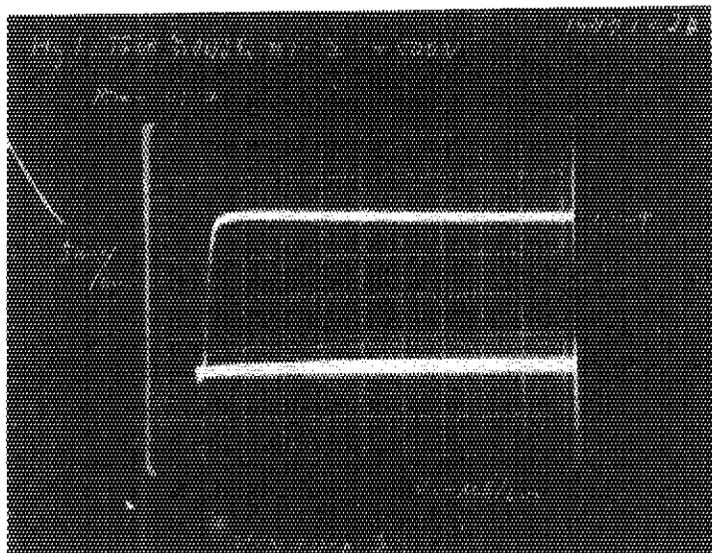
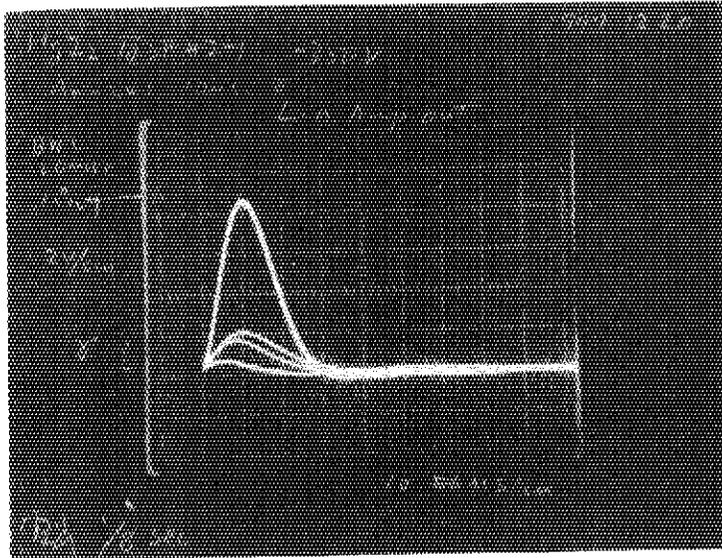
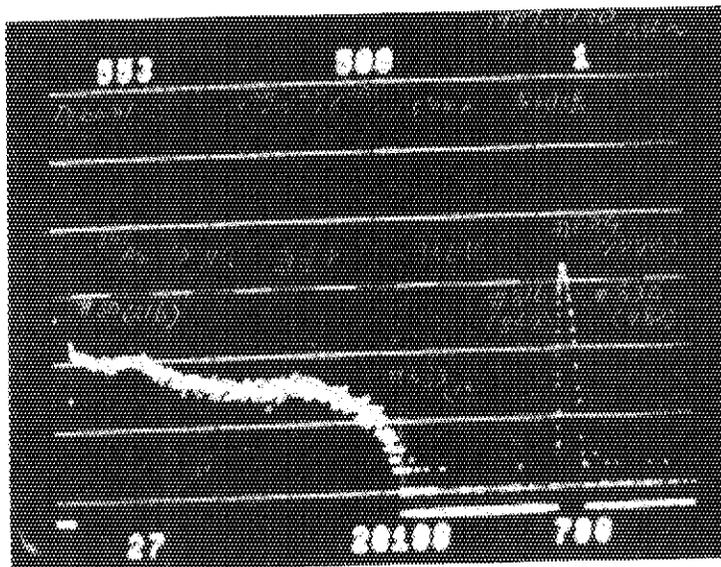


Photo.5-2 Preamplifier output pulse shapes from  $HgI_2$  detector #1-2(+500V) and pulser.



(a) Main amplifier output shapes.



(b) Pulse height distribution.

Photo.5-3 Main amplifier output shapes and pulse height distribution of Am-241  $\gamma$ -and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #1-2(-350V) and pulser.

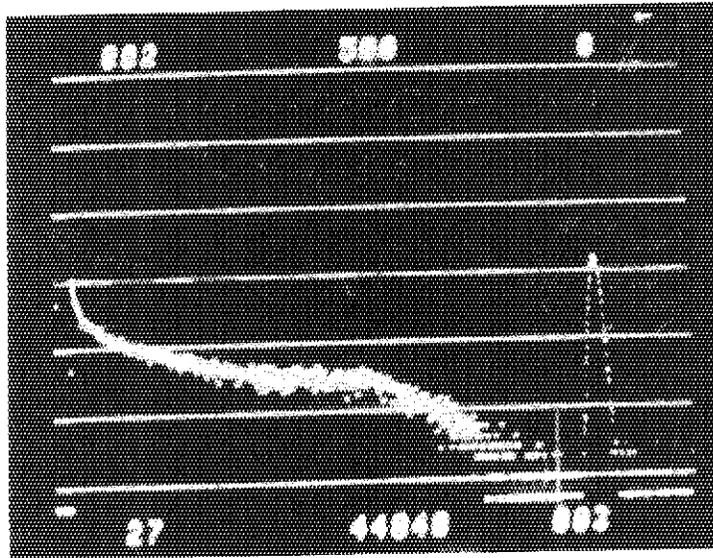
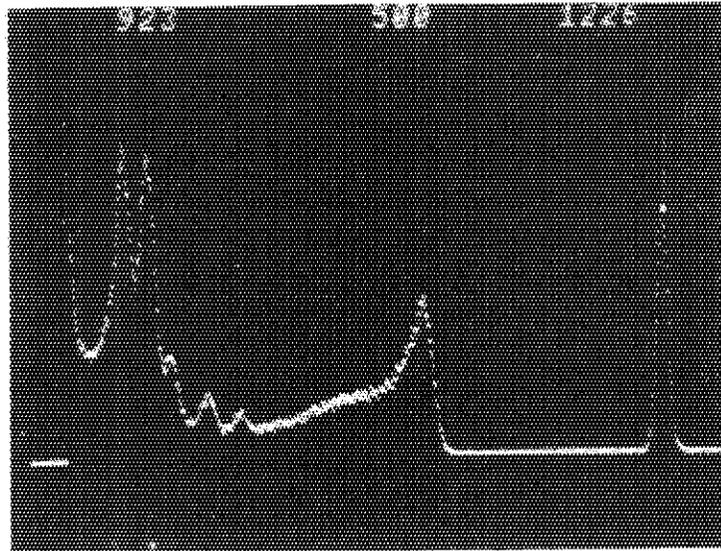
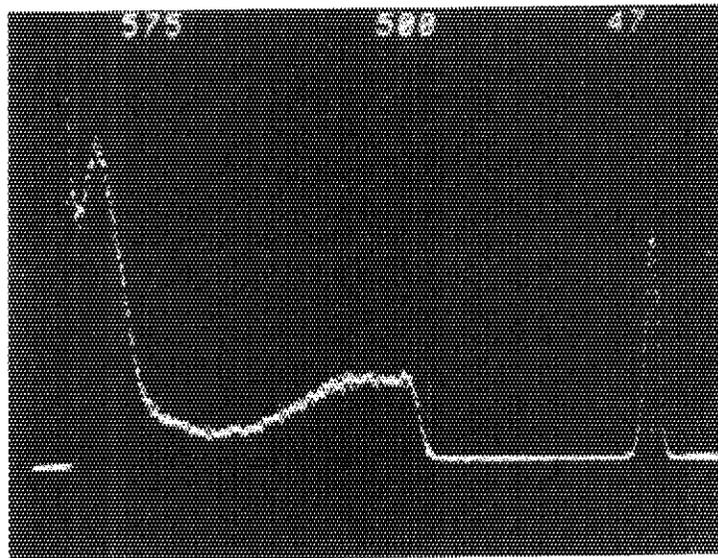


Photo.5-4 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-2(+500V) and pulser.

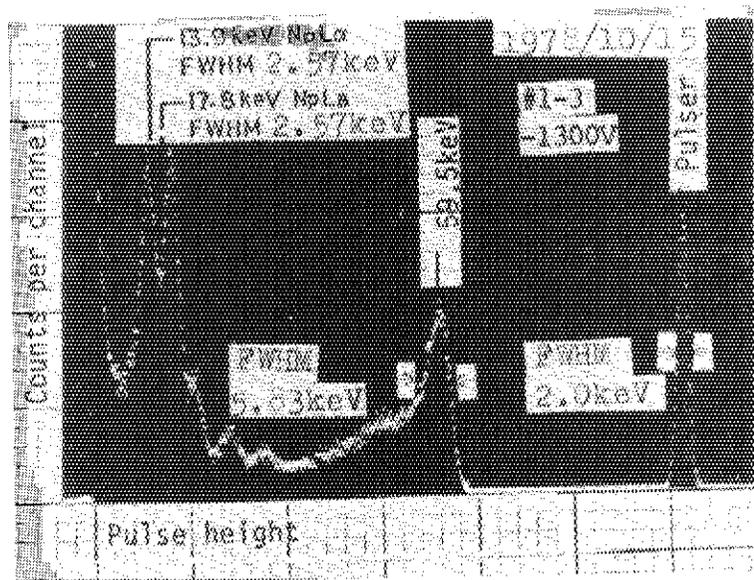


(a) Bias voltage -1400V

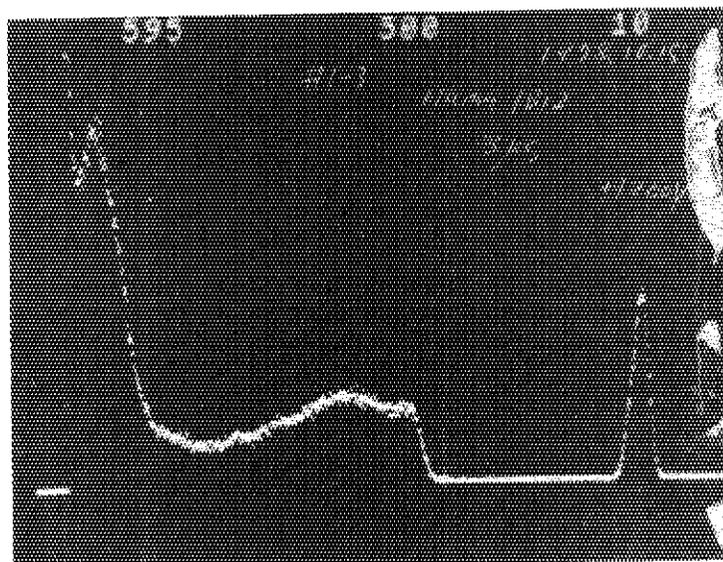


(b) Bias voltage +1400V

Photo.5-5 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #1-3 (No Humiseal coated)

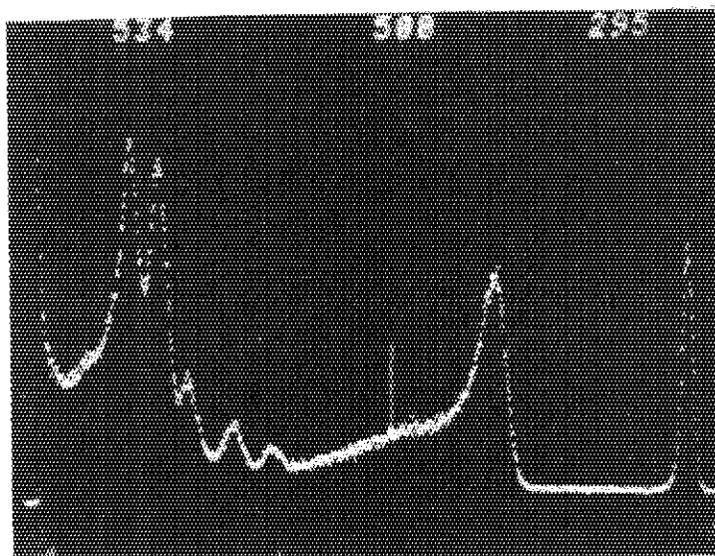


(a) Bias voltage -1300V

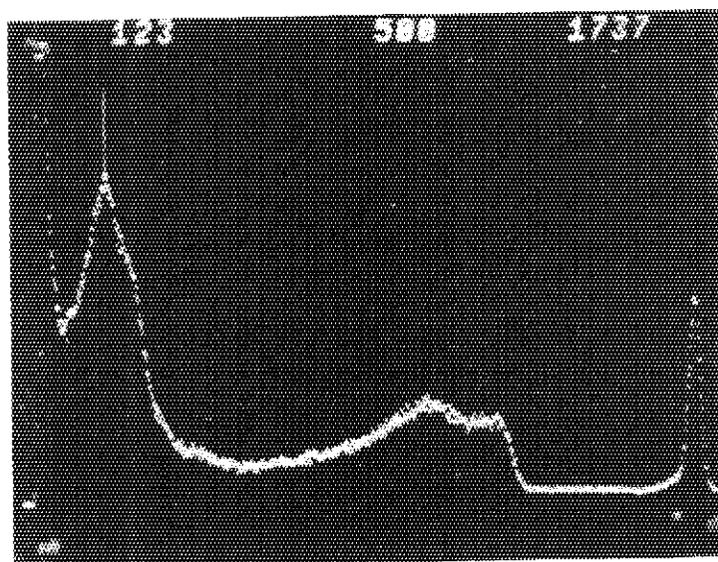


(b) Bias voltage +1200V

Photo.5-6 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #1-3 (Humiseal 1B12 coated)

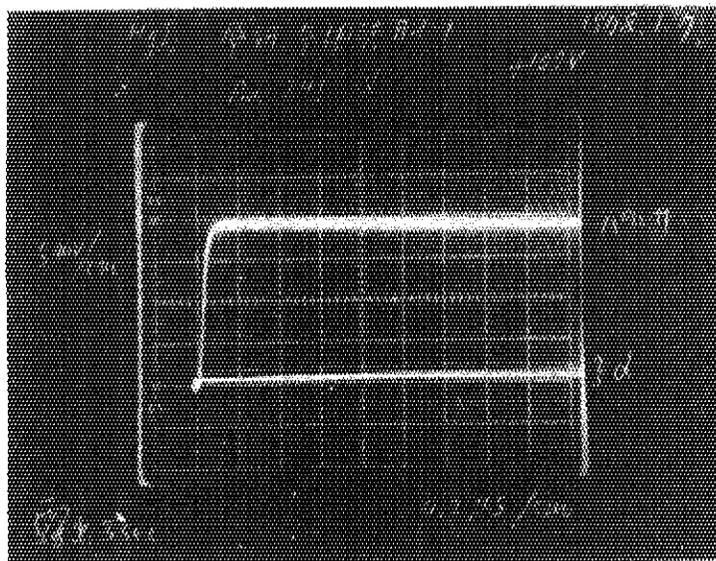


(a) Bias voltage -1300V

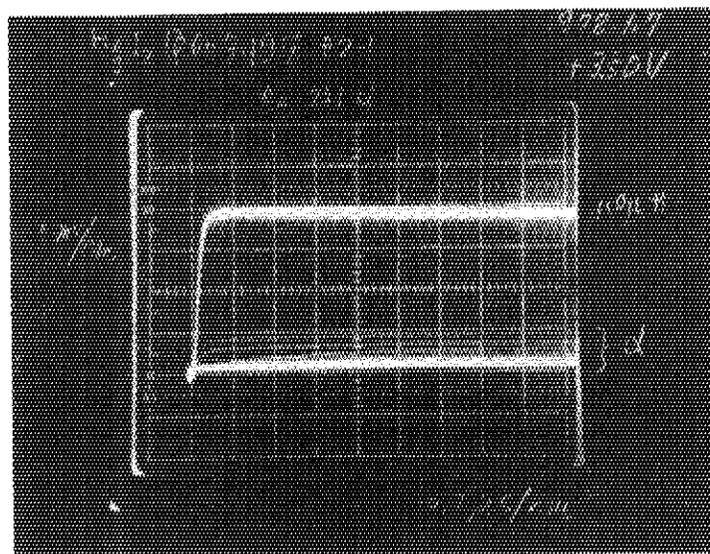


(b) Bias voltage +1300V

Photo.5-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #1-3 (Humiseal 1B12 coated)

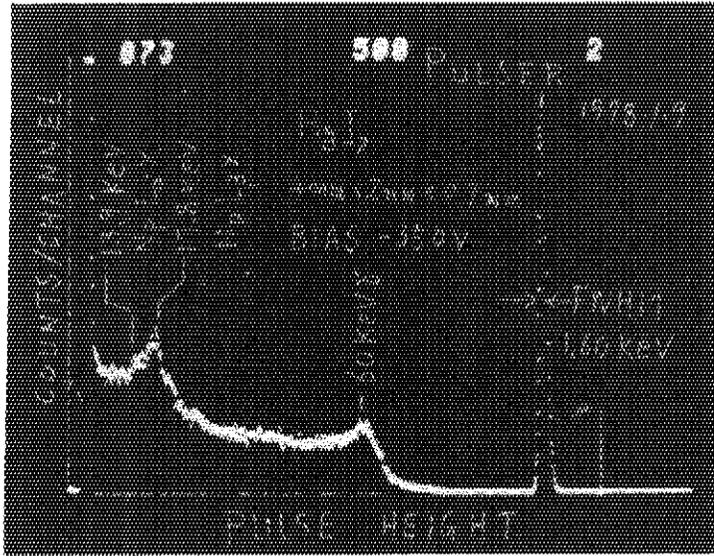


(a) Bias voltage +100V

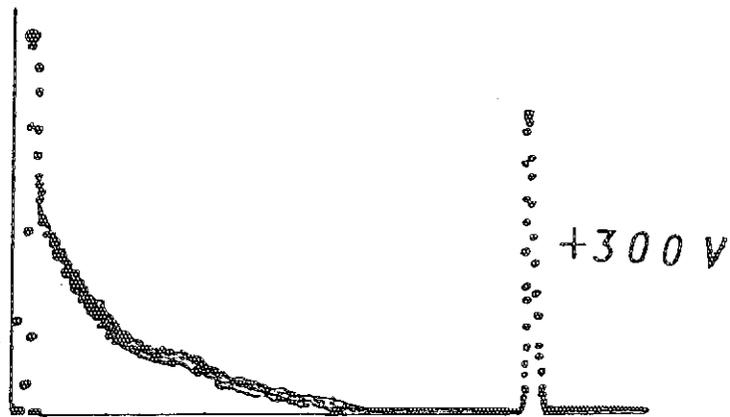


(b) Bias voltage +350V

Photo.5-8 Preamplifier output pulse shapes obtained from  $HgI_2$  detector #2-1 with positive bias voltage under Am-241  $\alpha$  irradiation.



(a) Bias voltage -350V



(b) Bias voltage +300V

Photo.5-9 Pulse height distributions of Am-241  
Y - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector  
#2-1.

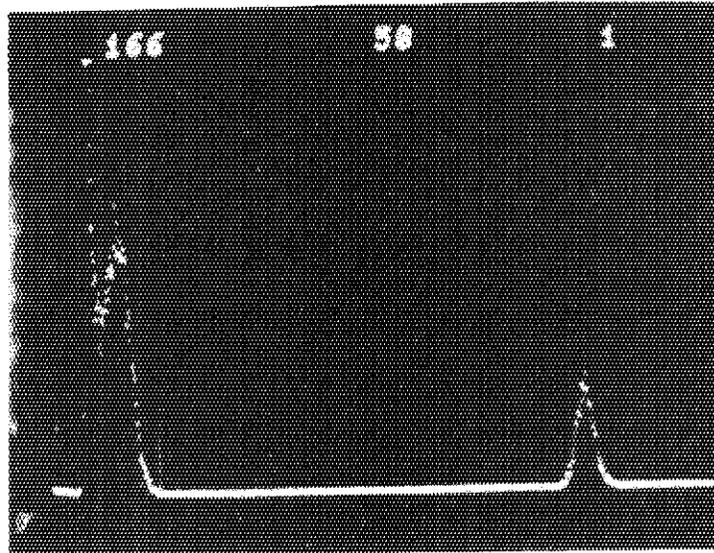
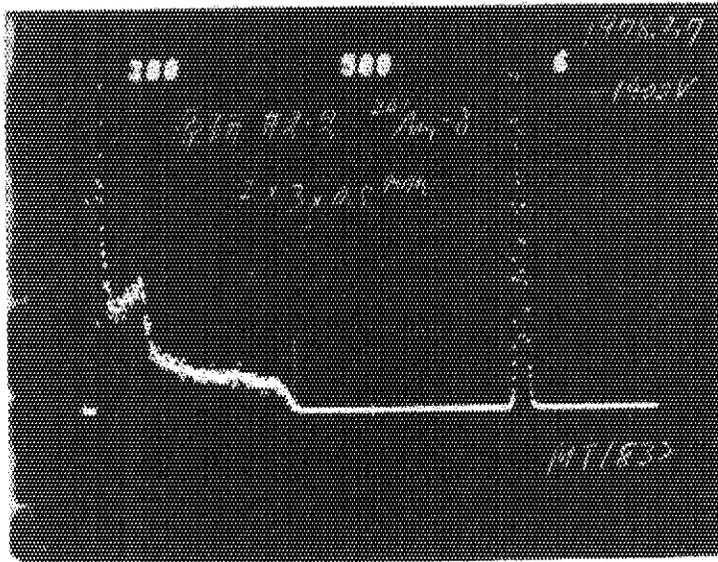
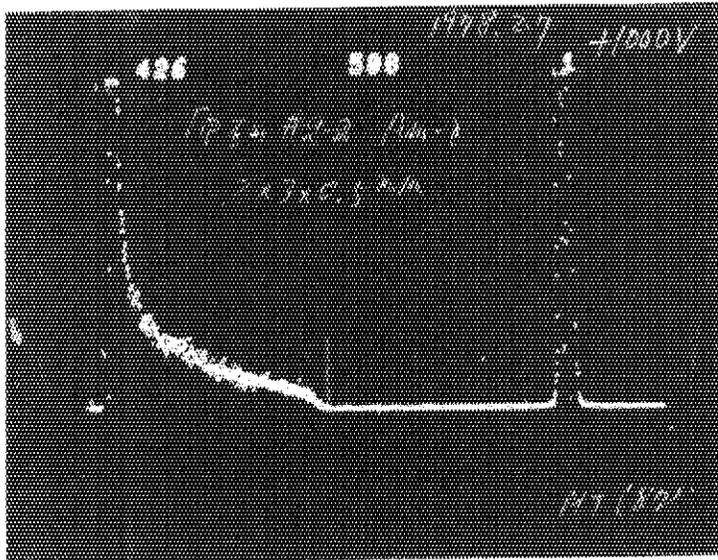


Photo.5-10 Pulse Height distribution of 5.9KeV X-rays from Fe-55 obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-1. (-150V)

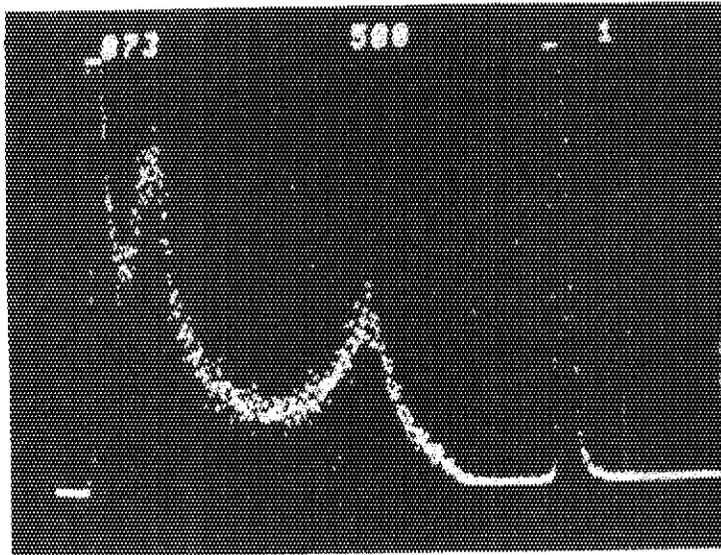


(a) Bias voltage -1400V

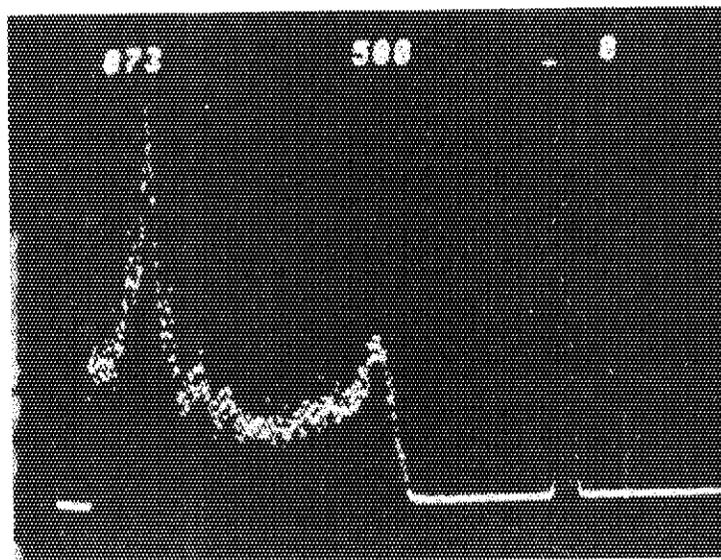


(b) Bias voltage +1000V

Photo.5-11 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-2 (Humiseal 1B12 coated)

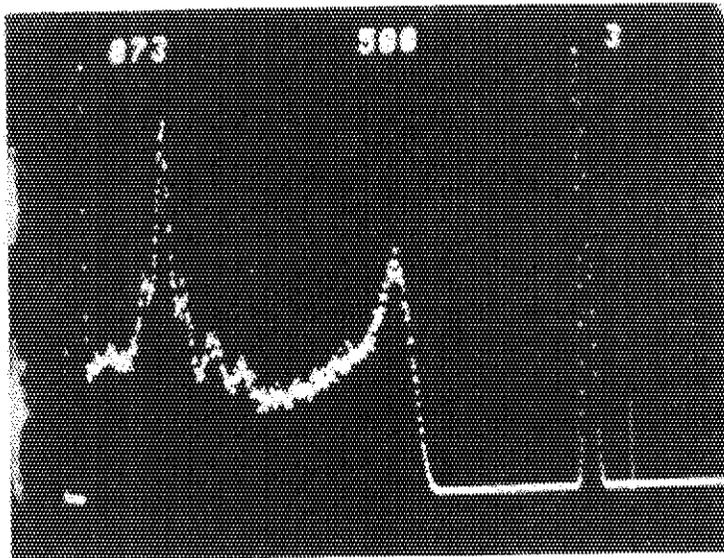


(a) No Humiseal coat

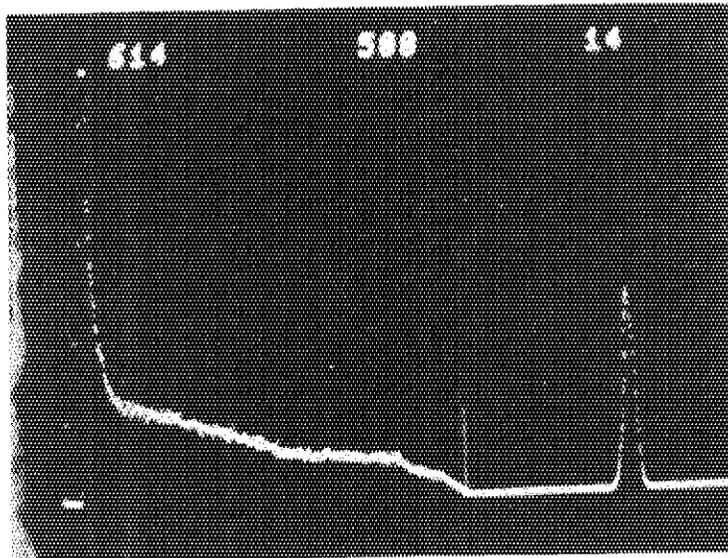


(b) With Humiseal coat

Photo.5-12 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-3 with -600V. Improvement of FWHM was observed by coating the detector with Humiseal.



(a) Bias voltage -1000V



(b) Bias Voltage +1000V

Photo.5-13 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated)

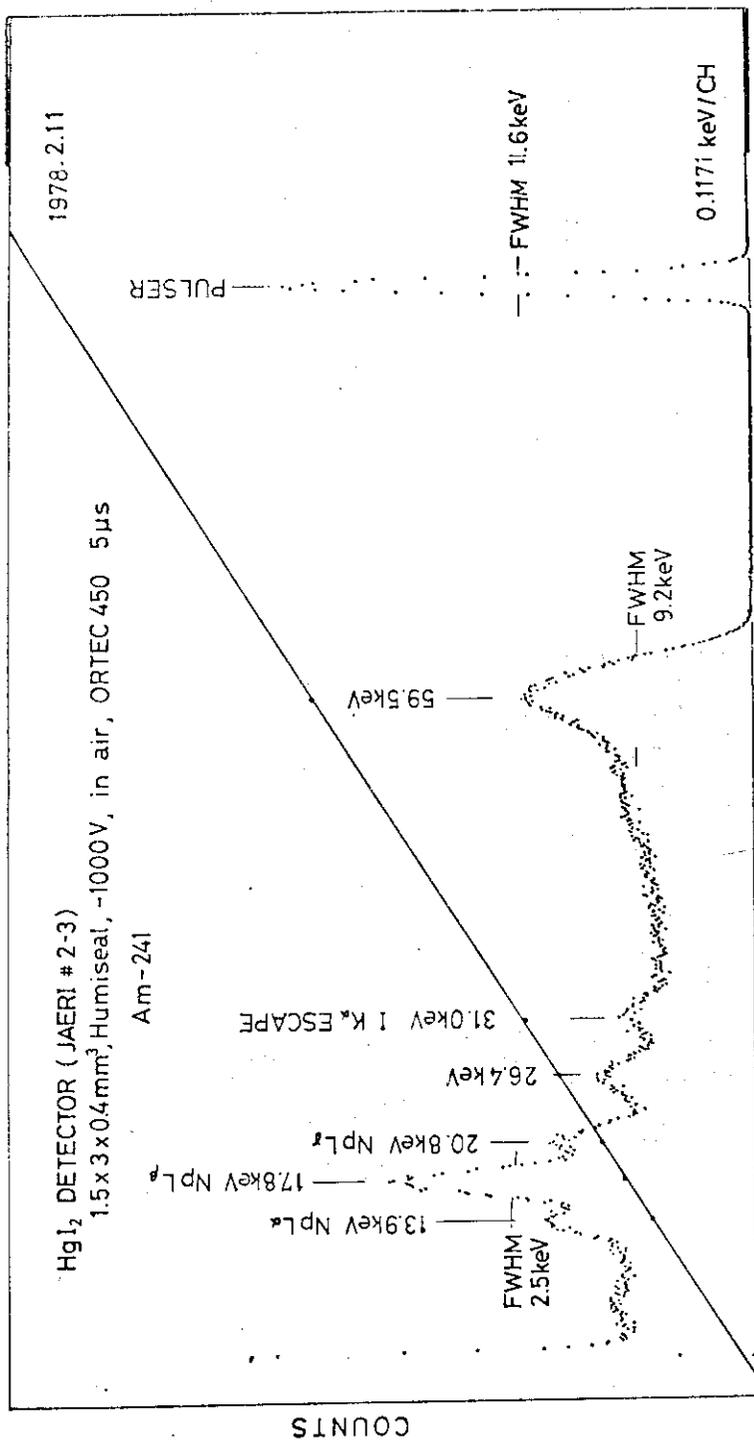
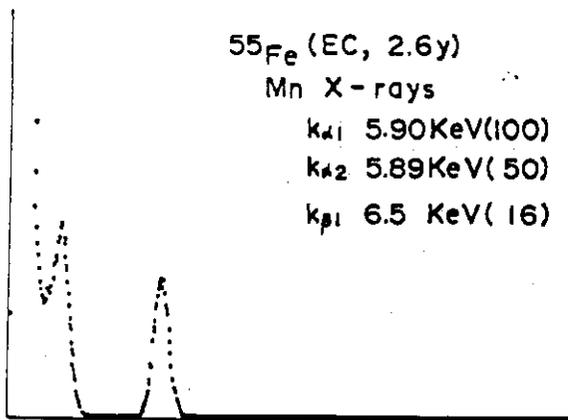
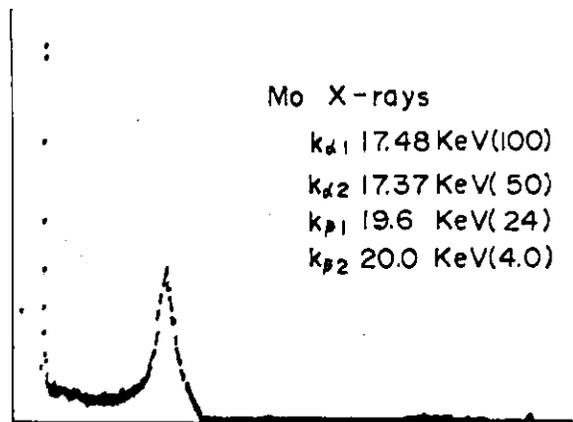


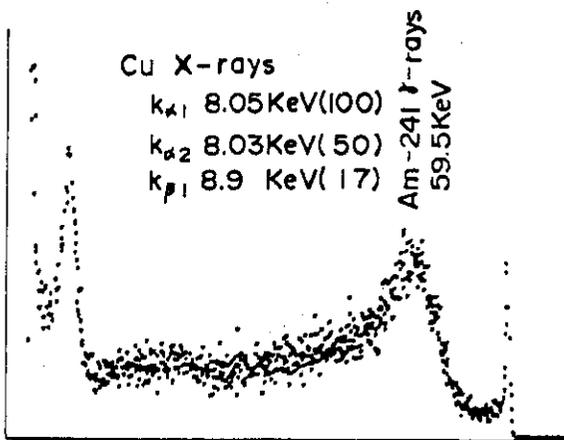
Photo.5-14 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$  and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-3 at -1000V bias.



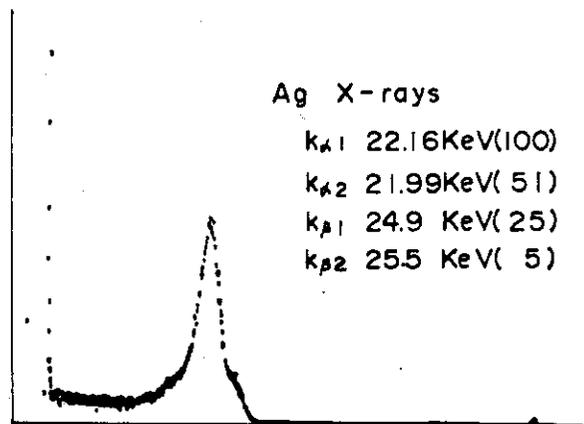
(a) Mn X-rays



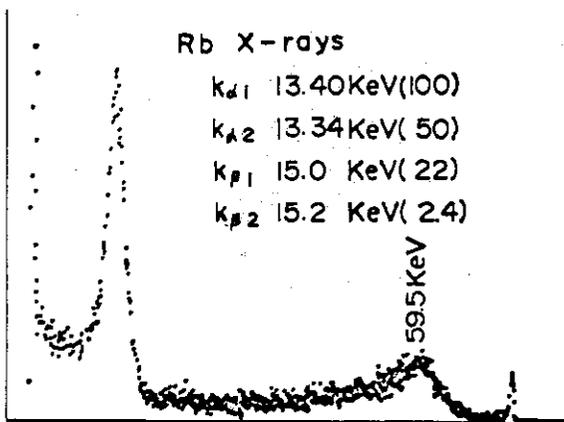
(d) Mo X-rays



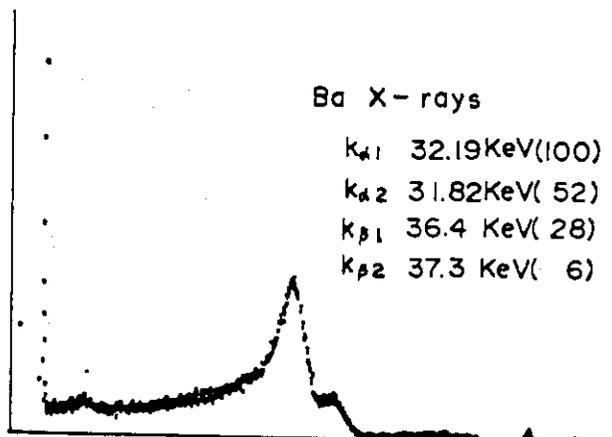
(b) Cu X-rays



(e) Ag X-rays

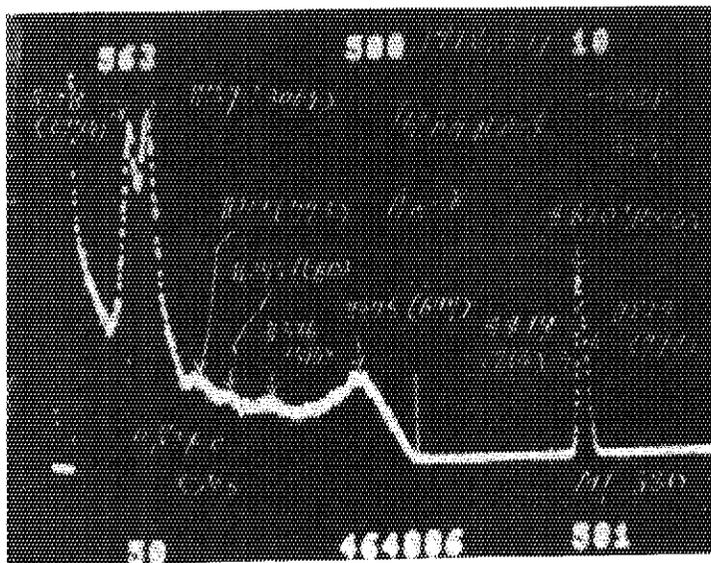


(c) Rb X-rays

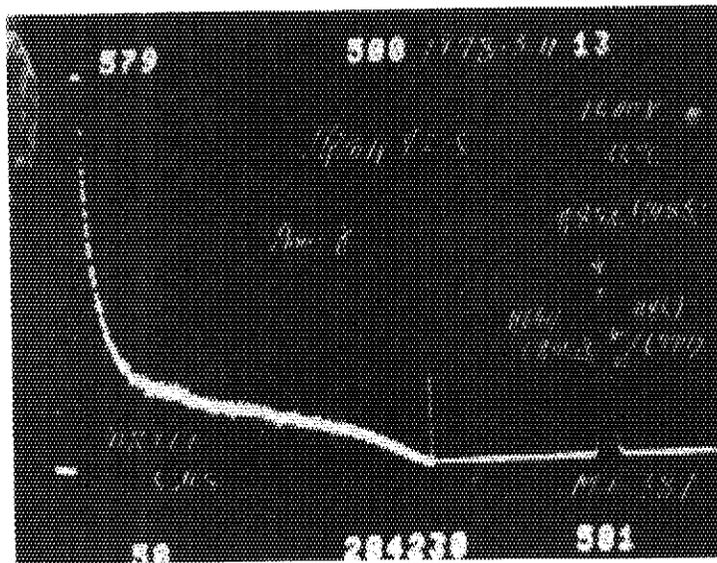


(f) Ba X-rays

Photo.5-15 Pulse height distributions of various energies of X-rays from Amersham variable energy X-rays source obtained from  $\text{HgI}_2$  detector #2-3 (Humiseal 1B12 coated) at -1000V bias.

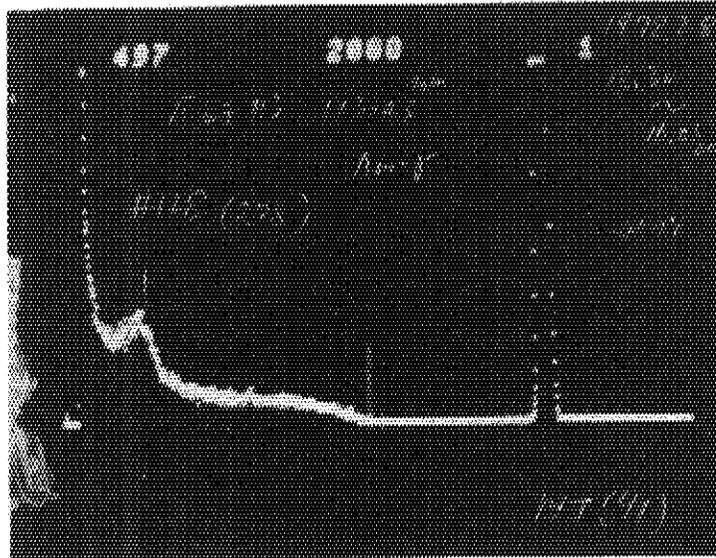


(a) Bias voltage -500V

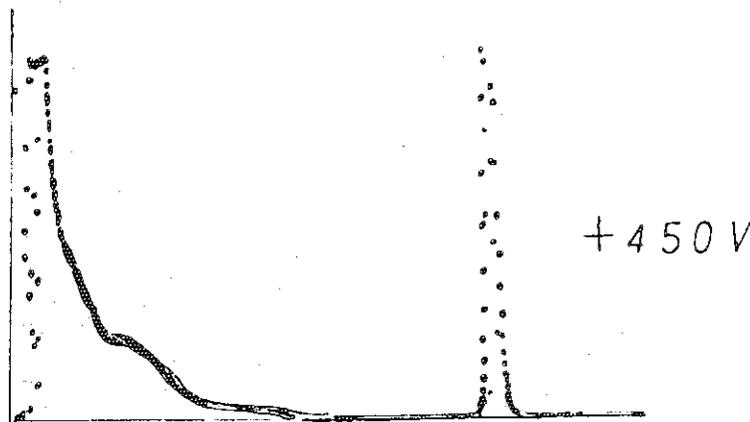


(b) Bias voltage +500V

Photo.5-16 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-5 (Humiseal 1A27 coated)

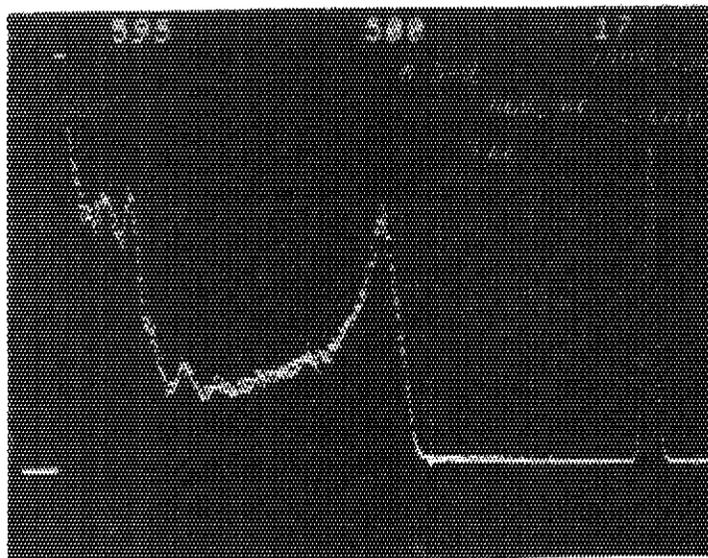


(a) Bias voltage -450V

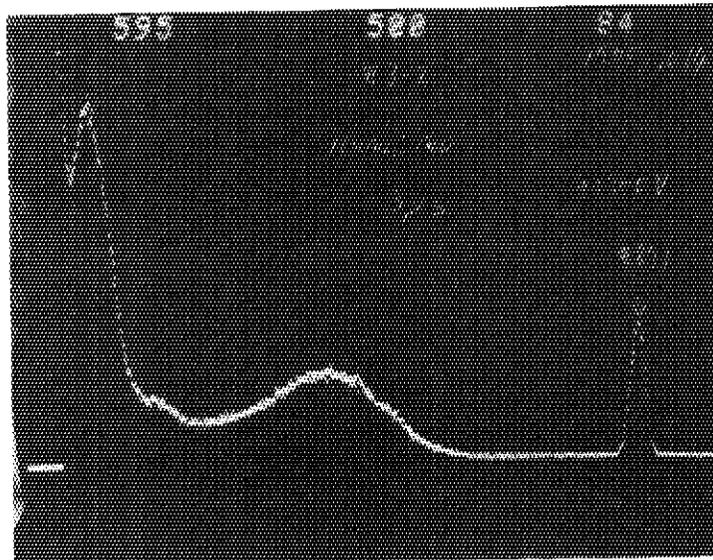


(b) Bias voltage +450V

Photo.5-17 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #3-1 (Humiseal 1A27 coated)

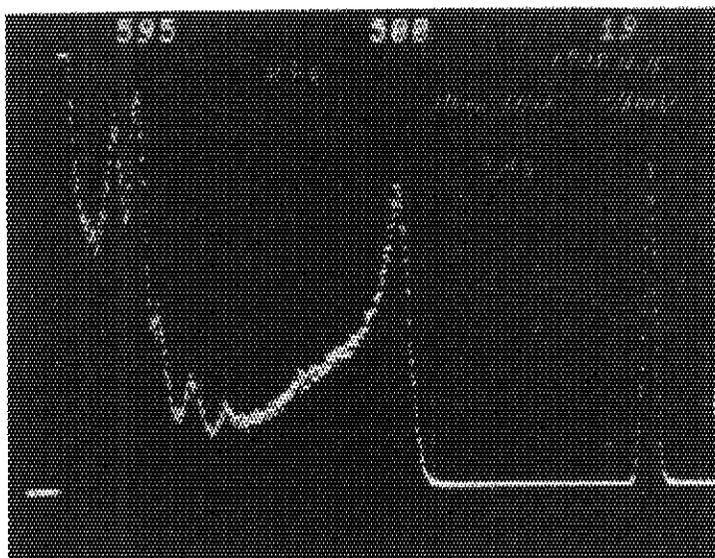


(a) Bias voltage -1400V

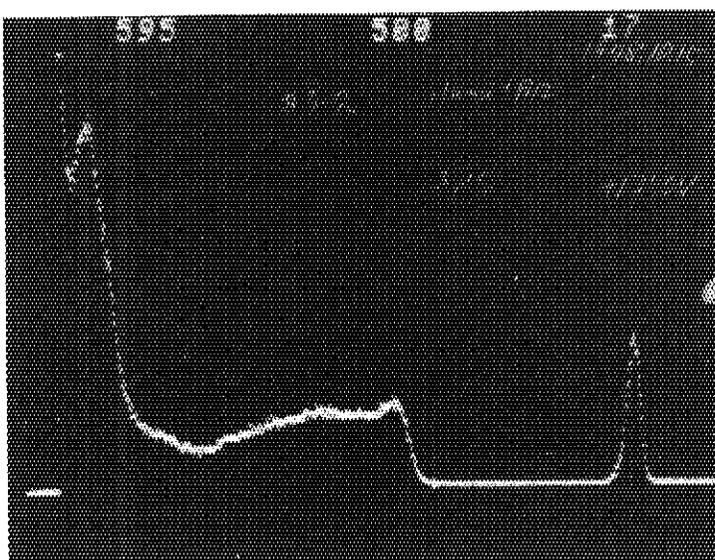


(b) Bias voltage +1350V

Photo.5-18 Pulse Height distributions of Am-241  $\gamma$  -  
and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector  
#3-2 (No Humiseal coated)



(a) Bias voltage -1600V



(b) Bias voltage +1350V

Photo.5-19 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #3-2 (Humiseal 1B12 coated)

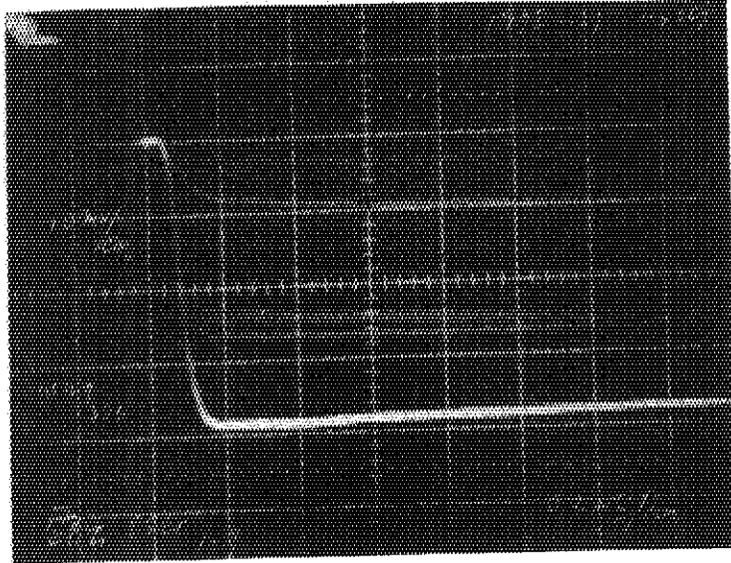
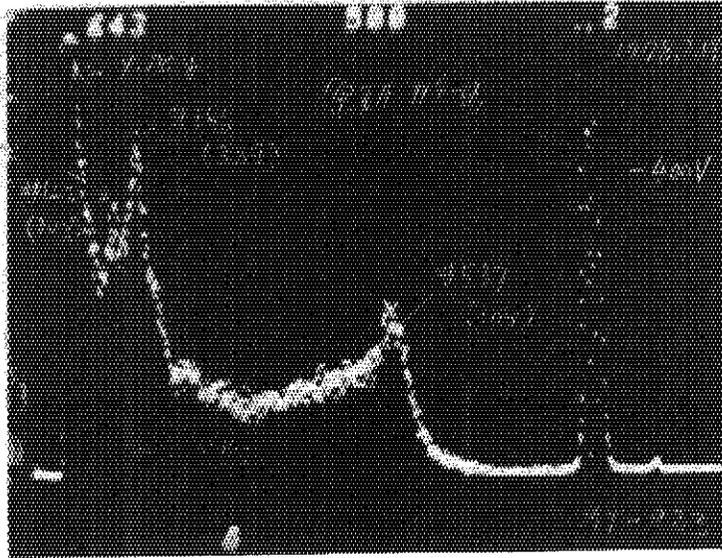
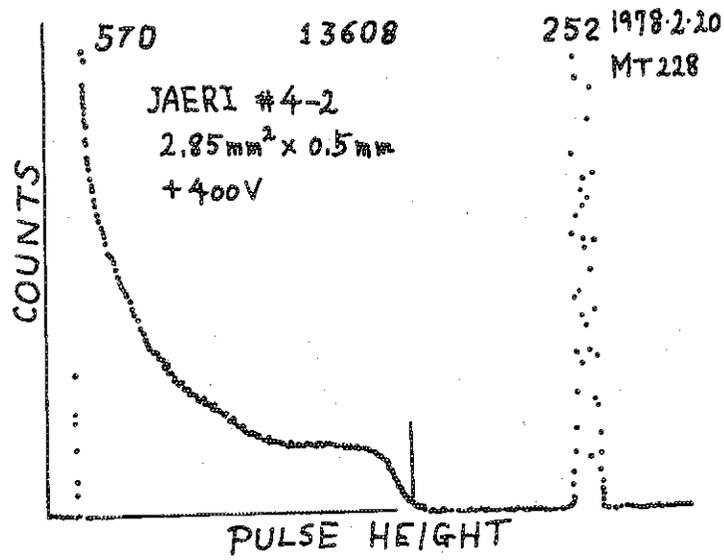


Photo.5-20 Preamplifier output pulse shapes obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-2. (-300V)

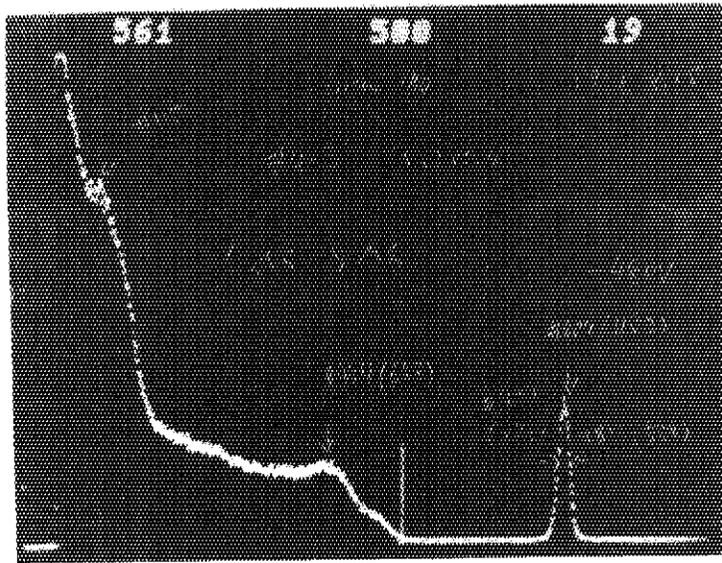


(a) Bias voltage -400V

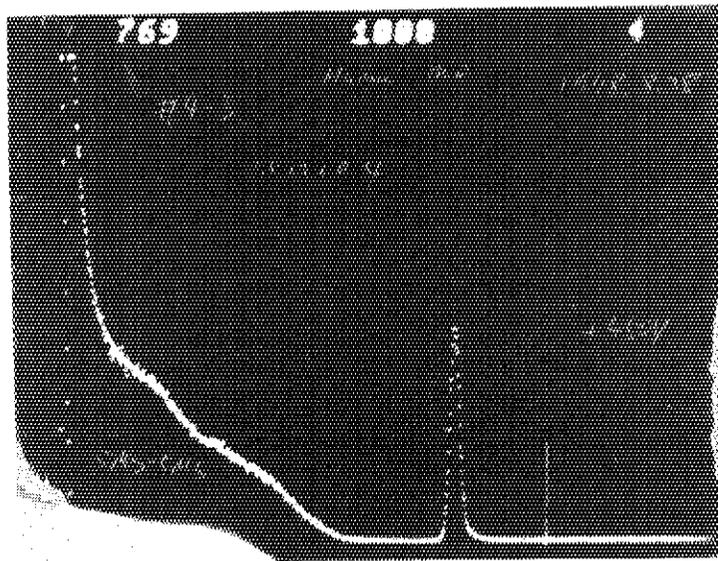


(b) Bias voltage +400V

Photo.5-21 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-2 (No Humiseal)

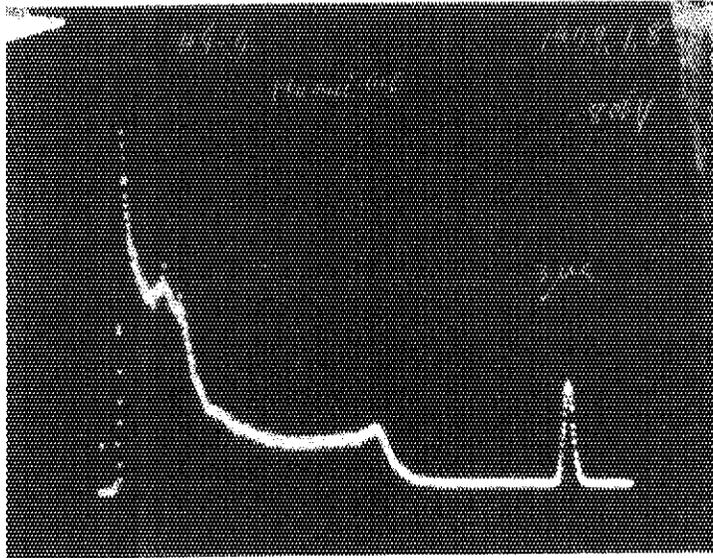


(a) Bias voltage -450V

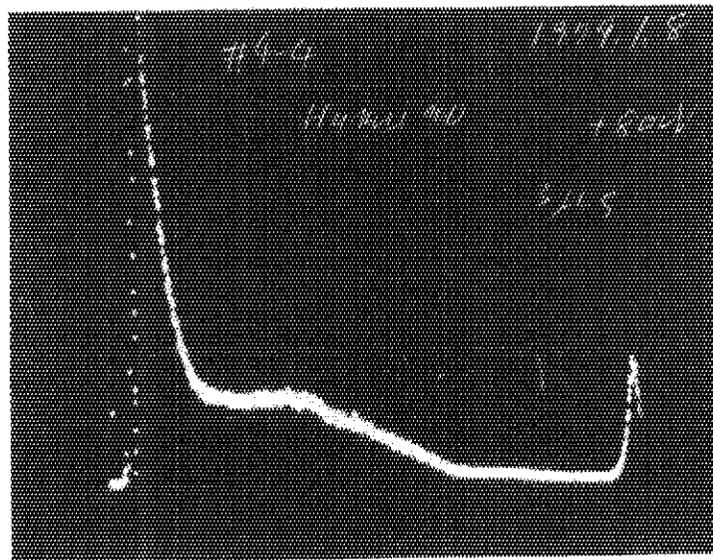


(b) Bias voltage +450V

Photo.5-22 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #4-3 (No Humiseal coated).

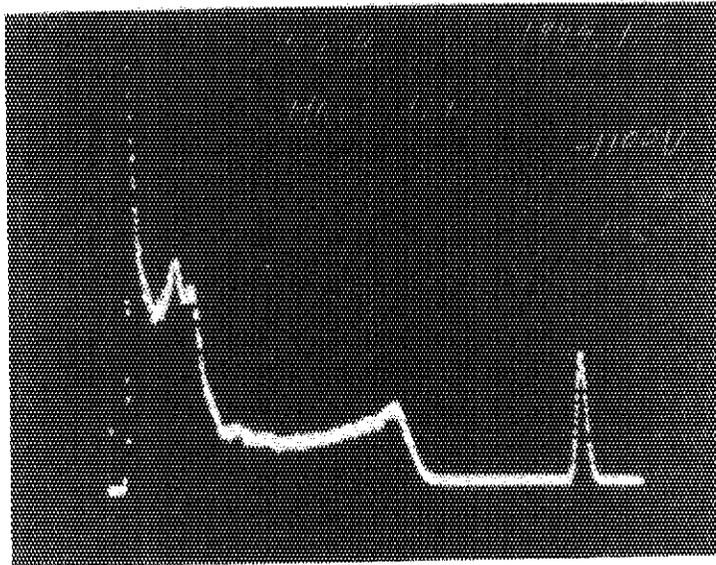


(a) Bias voltage -800V

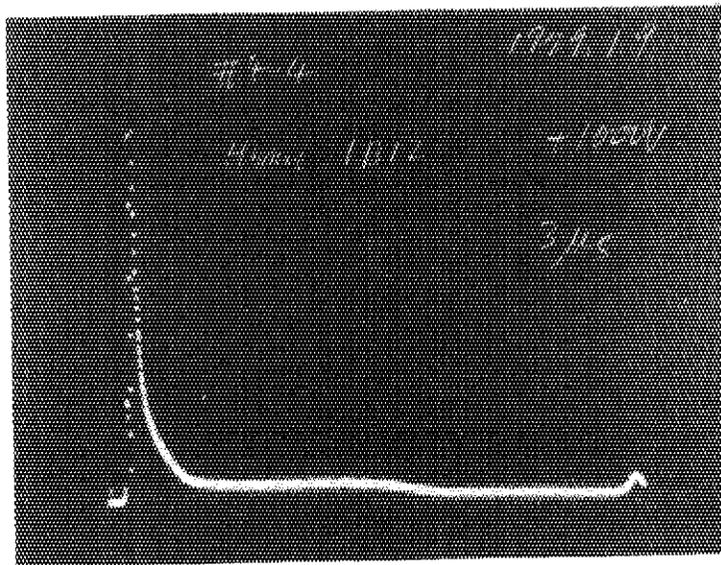


(b) Bias voltage +800V

Photo.5-23 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #4-4 (No Humiseal coated)

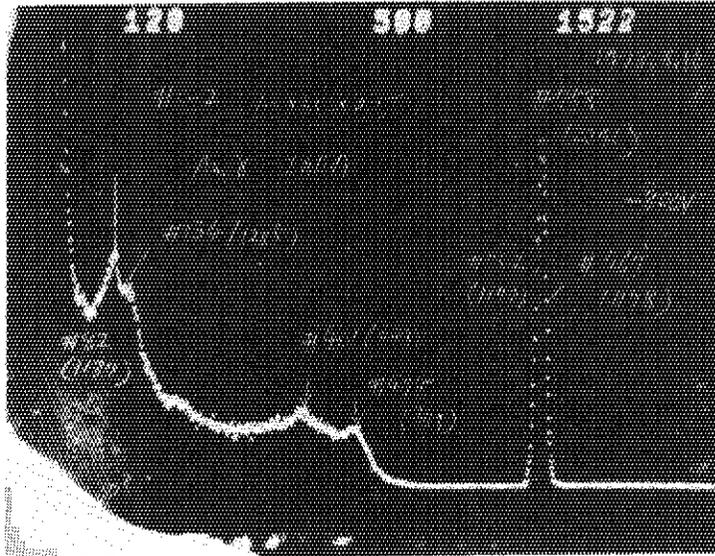


(a) Bias voltage -1100V

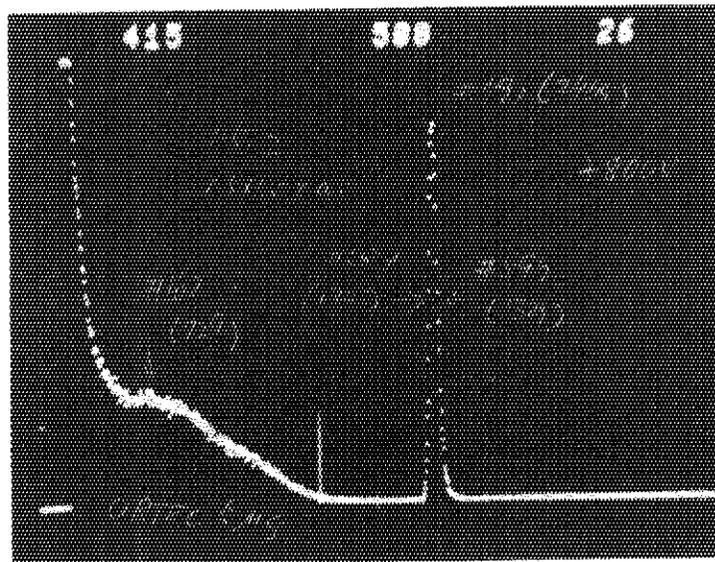


(b) Bias voltage +1000V

Photo.5-24 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #4-4 (Humiseal 1B12 coated)

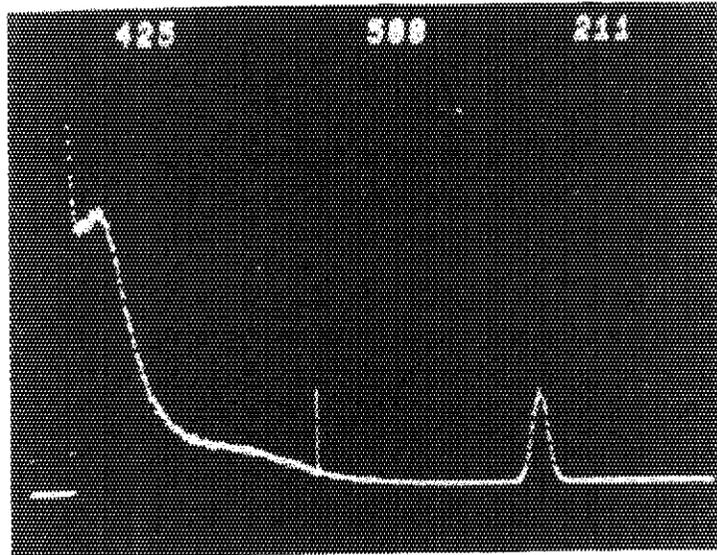


(a) Bias voltage -800V

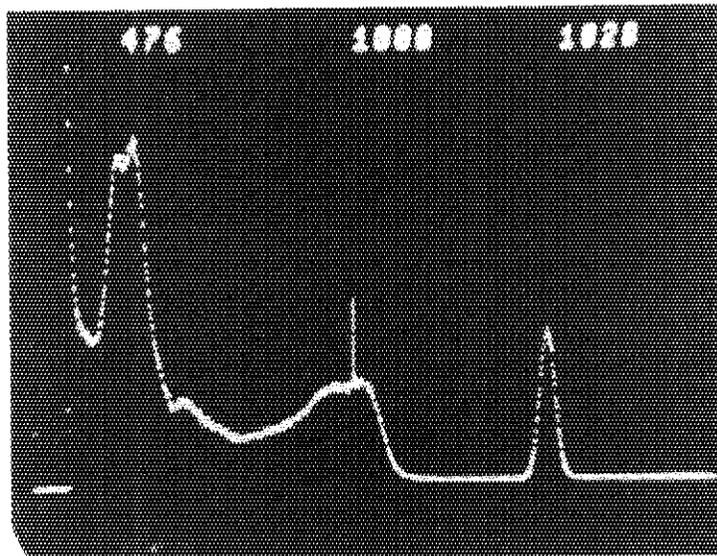


(b) Bias voltage +800V

Photo.5-25 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #5-2 (Humiseal 1B12 coated)

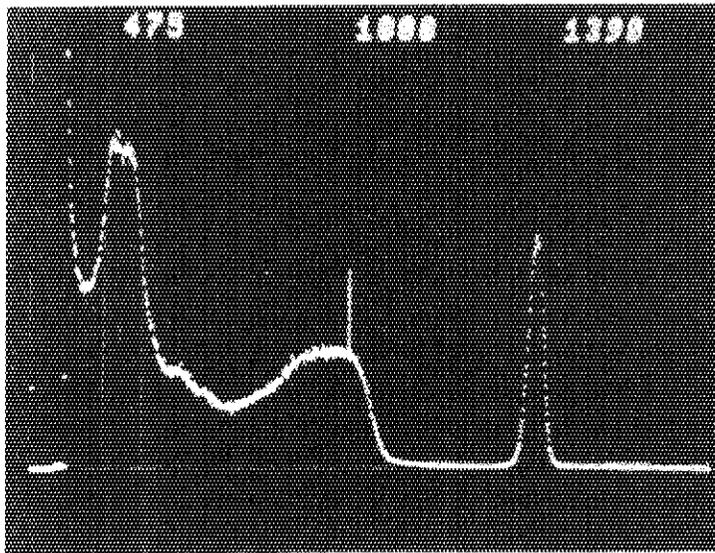


(a) No Humiseal coat

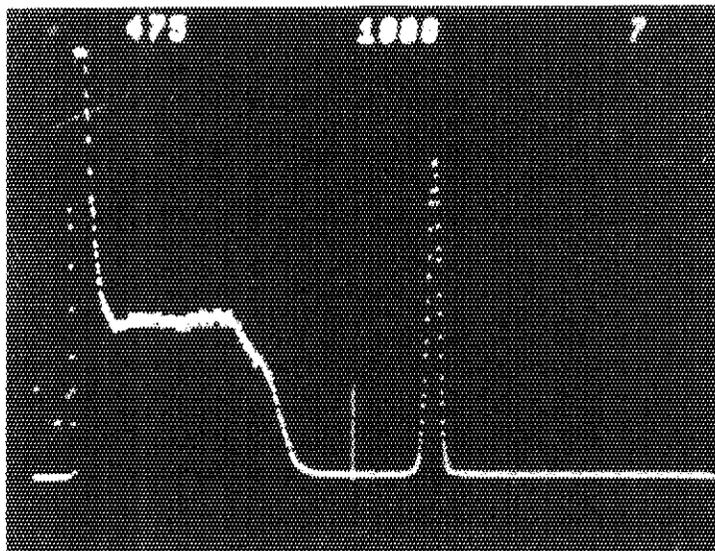


(b) With Humiseal coat

Photo.5-26 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #5-4 without and with Humiseal coat

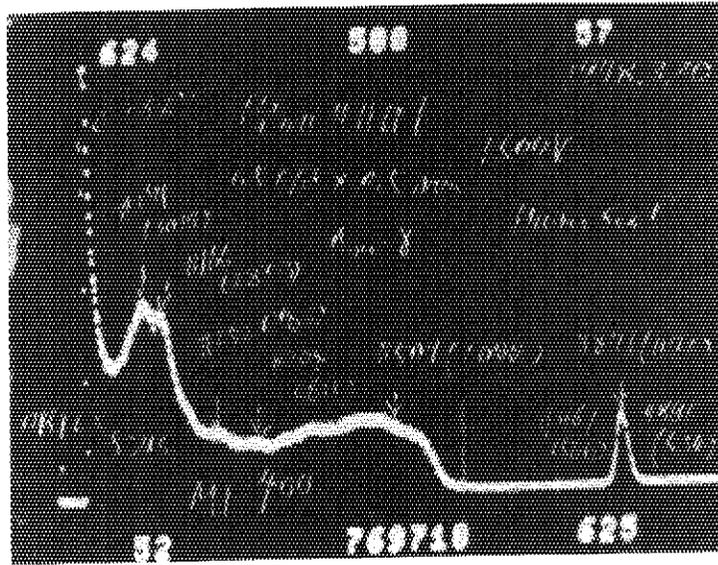


(a) Bias voltage -750V

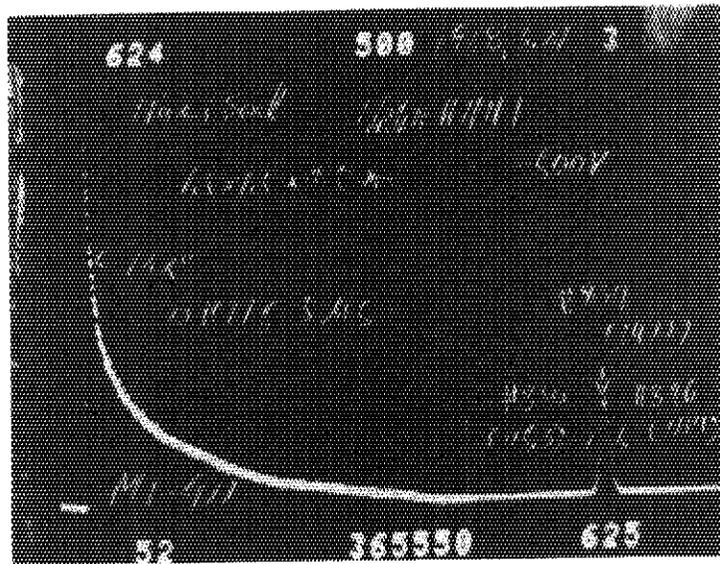


(b) Bias voltage +500V

Photo.5-27 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #5-4 (Humiseal 1B12 coated)

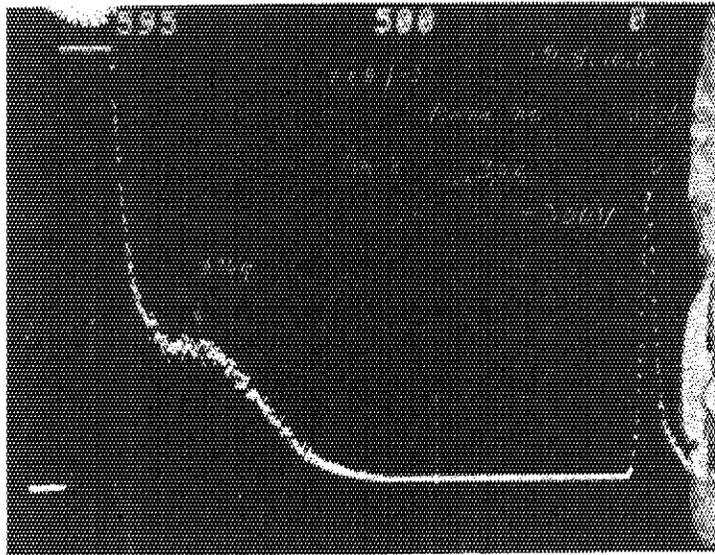


(a) Bias voltage +500V on rear electrode

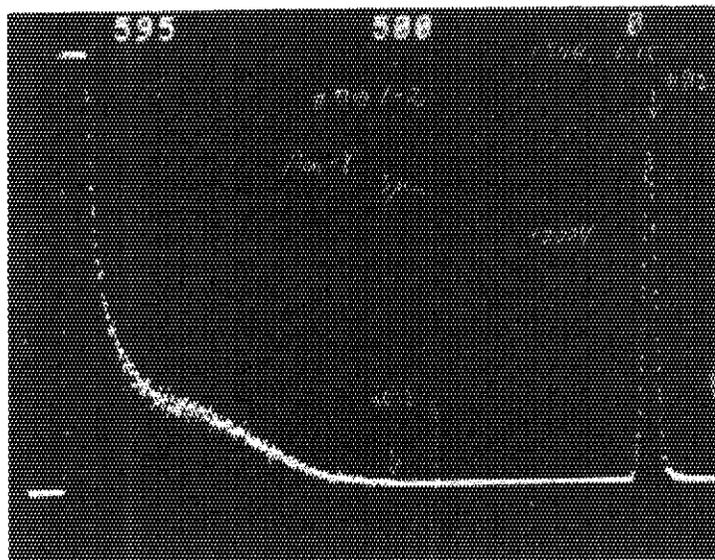


(b) Bias voltage -500V on rear electrode

Photo.5-28 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector ###1-1 (Humiseal 1A27 coated)

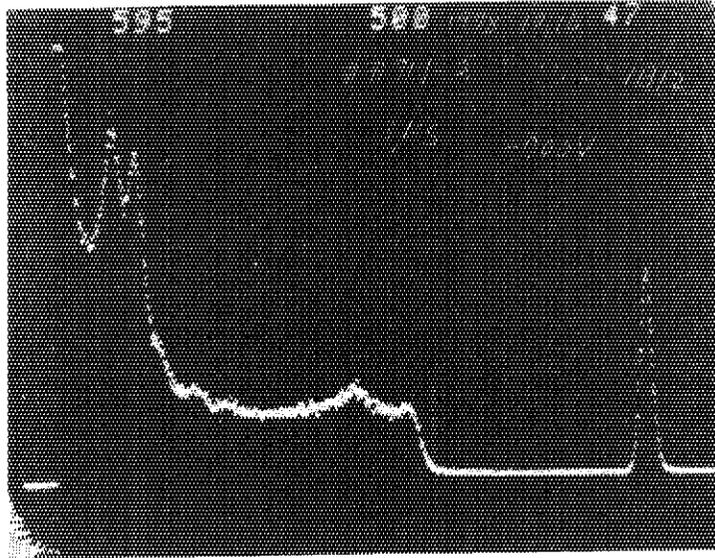


(a) Bias voltage -300V

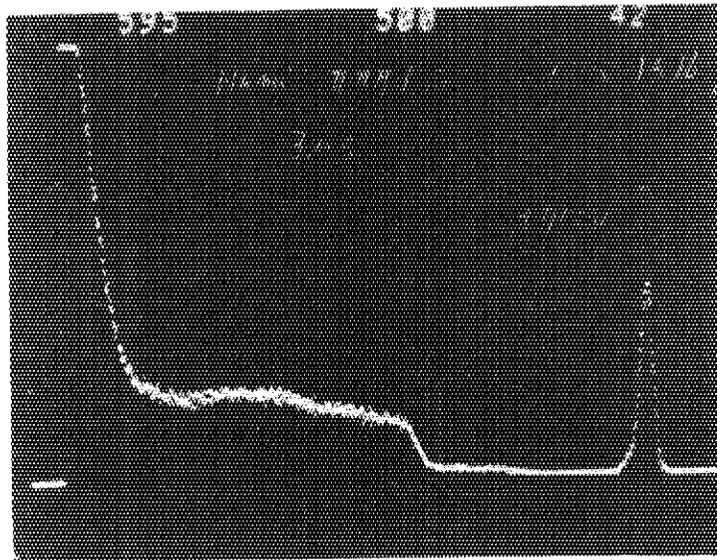


(b) Bias voltage +200V

Photo.5-29 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##1-2



(a) Bias voltage -700V



(b) Bias voltage +700V

Photo.5-30 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector ###1-2 (Humiseal 1B12 coated)

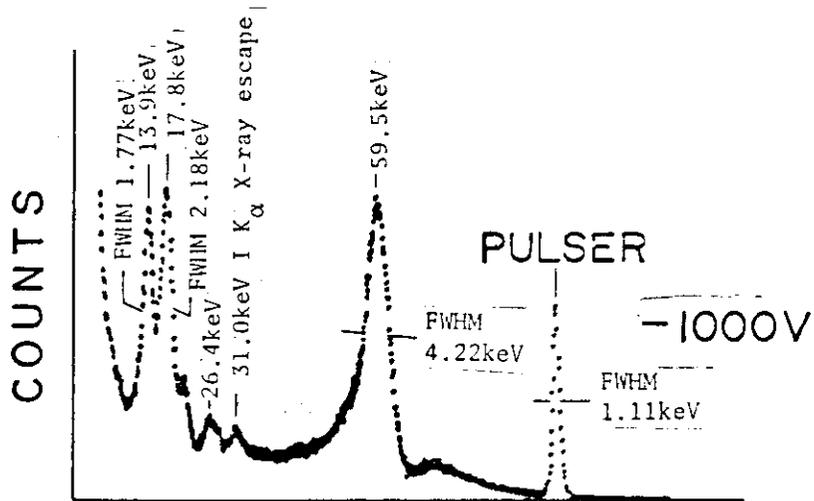
1978.4.4

HgI<sub>2</sub> DETECTOR (JAERI ##2-2)

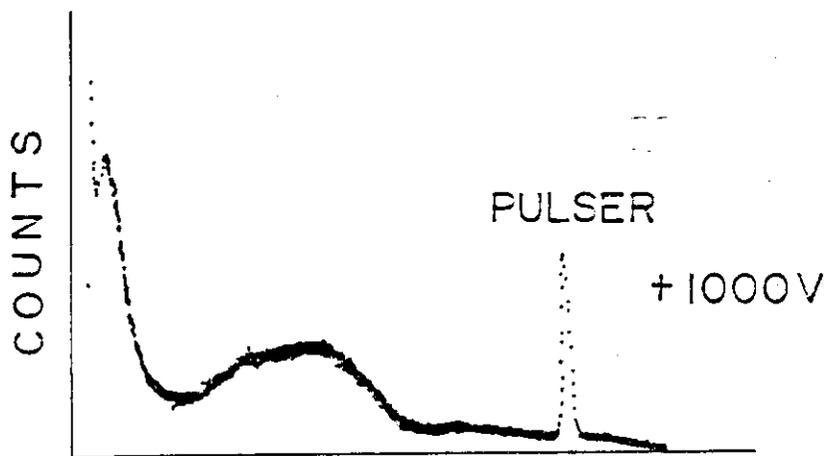
1.95 mm<sup>2</sup> x 0.7 mm t, Humiseal,

in air, ORTEC450 5μs

Am-241 δ



(a) Bias voltage -1000V

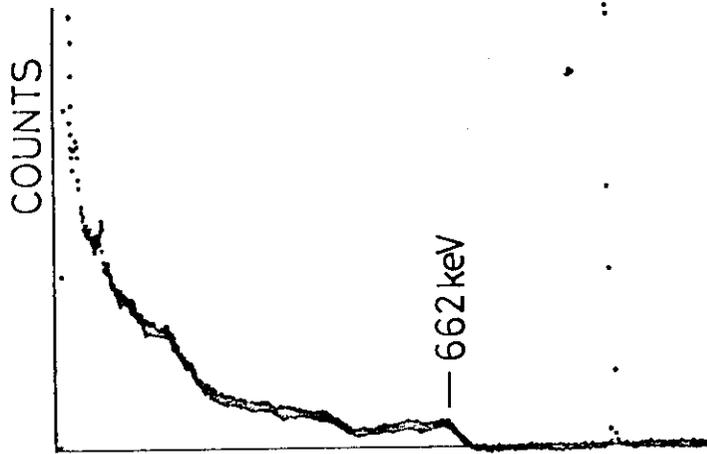


PULSE HEIGHT

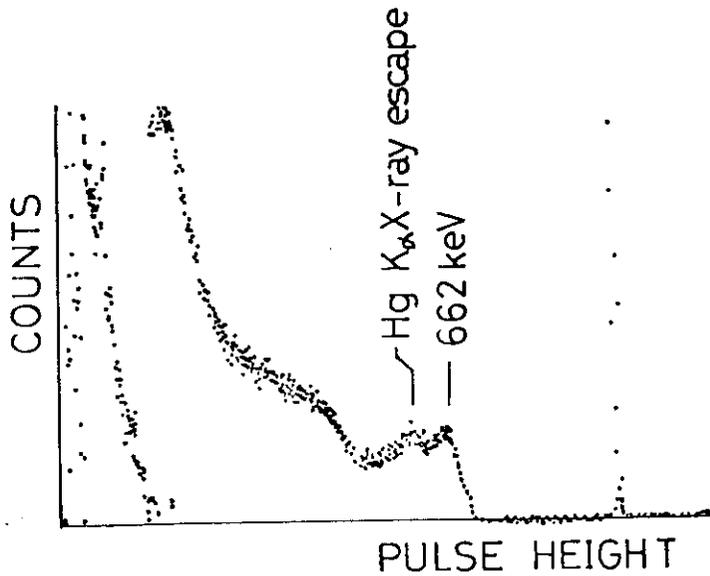
(b) Bias voltage +1000V

Photo.5-31 Pulse height distributions of Am-241 γ- and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector ##2-2 (Humiseal 1A27 coated)

HgI<sub>2</sub> DETECTOR(JAERI ##2-2) 1978.4.5  
 1.95mm<sup>2</sup> x 0.7mm, Humiseal, in air, -1000V  
 Cs-137, 662keV  $\gamma$ -rays



(a)



(b)

Photo.5-32 Pulse height distributions of Cs-137 gamma rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector #2-2 (Humiseal 1A27 coated) at -1000V bias

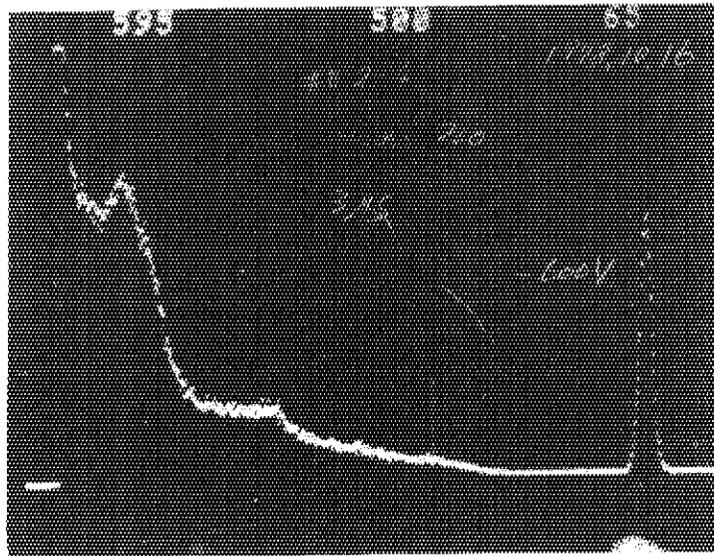


Photo.5-33 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-4 at -600V bias (No Humiseal coat)

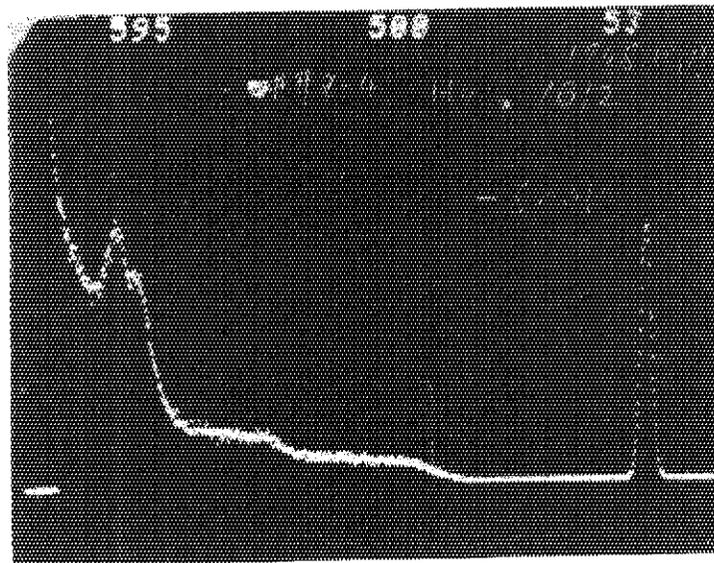
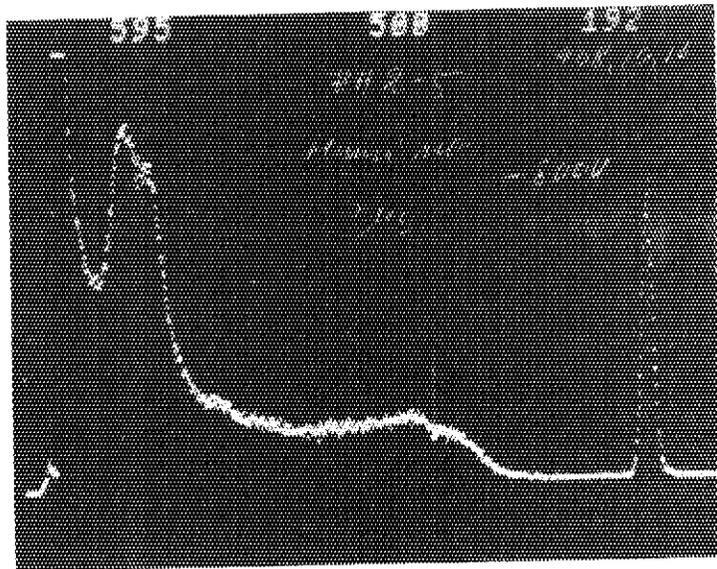
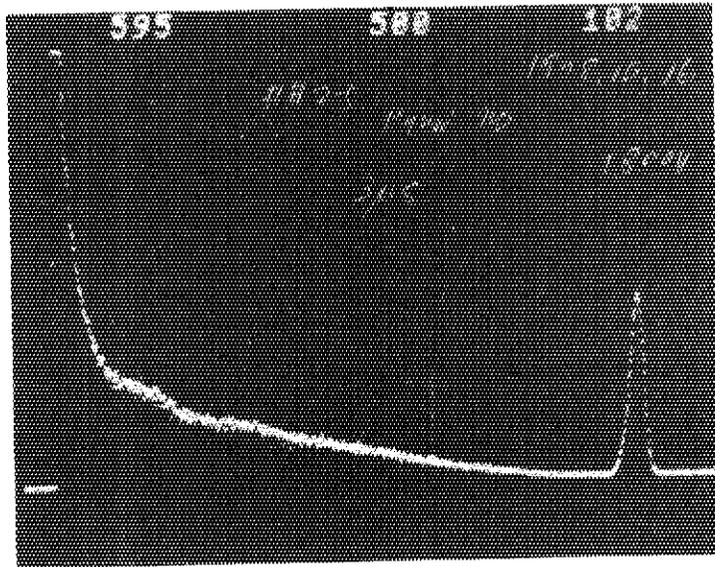


Photo.5-34 Pulse height distribution of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-4 at -600V bias (Humiseal 1B12 coated)

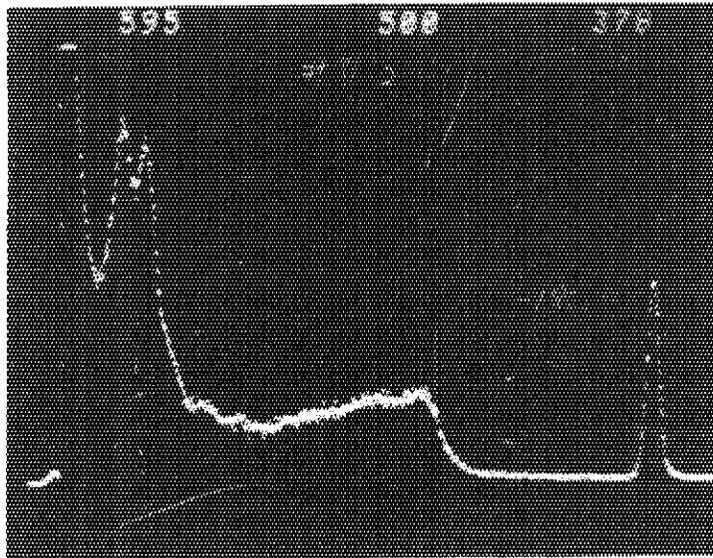


(a) Bias voltage -800V

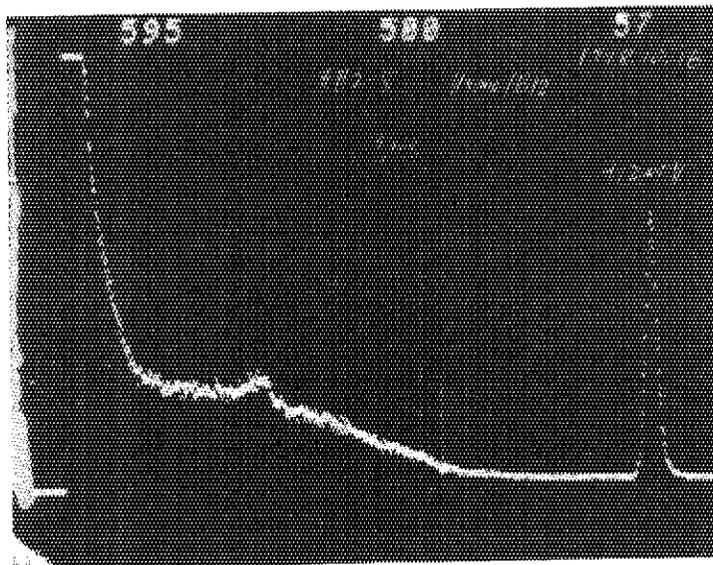


(b) Bias voltage +800V

Photo.5-35 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-5 (No Humiseal coated)



(a) Bias voltage -1800V



(b) Bias voltage +1200V

Photo.5-36 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector #2-5 (Humiseal 1B12 coated)





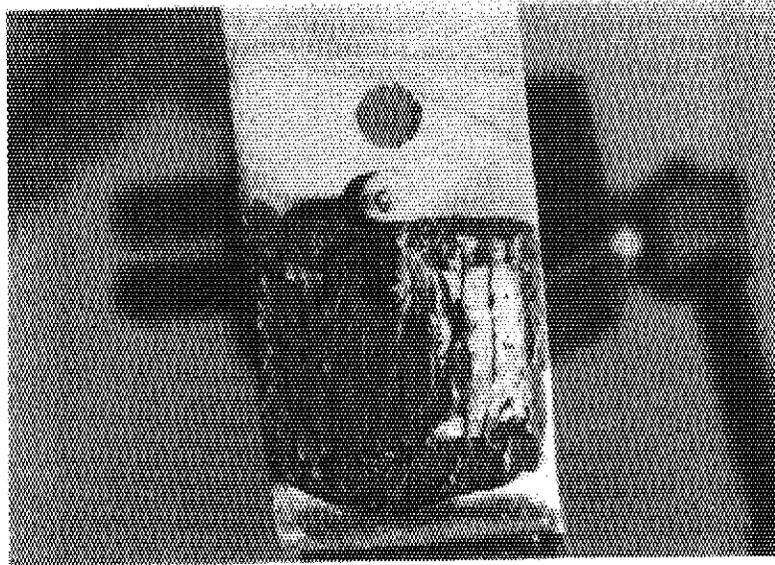
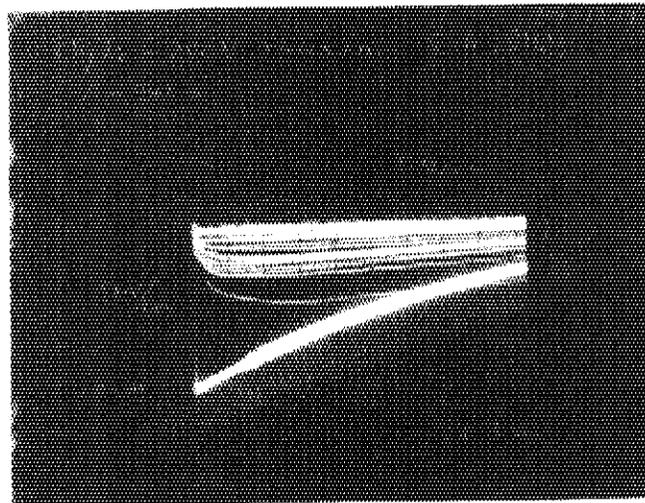
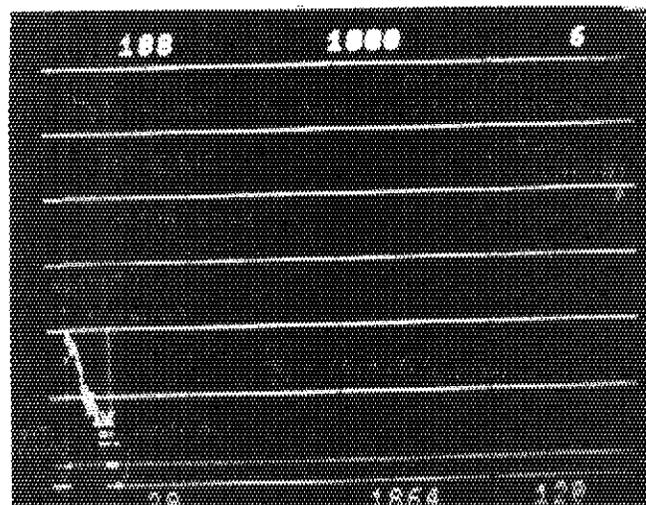


Photo.A-1 Photo of  $HgI_2$  detector TH-IS

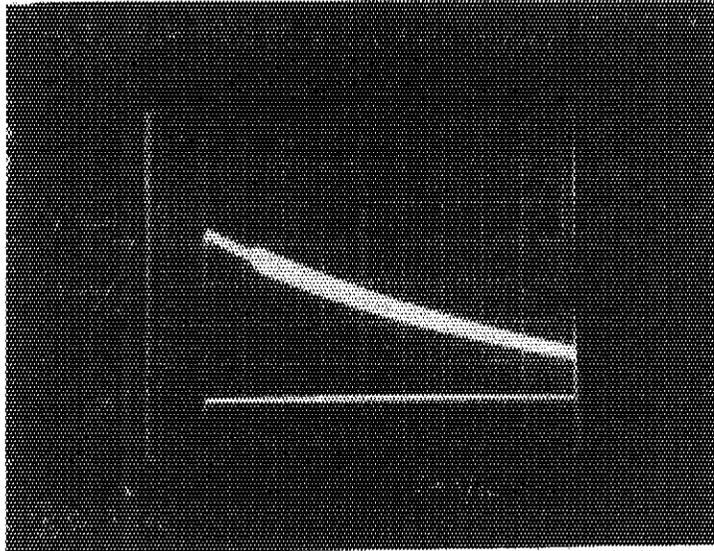


(a) Preamplifier output pulse shapes for  $Am-241\alpha$ 's and pulser

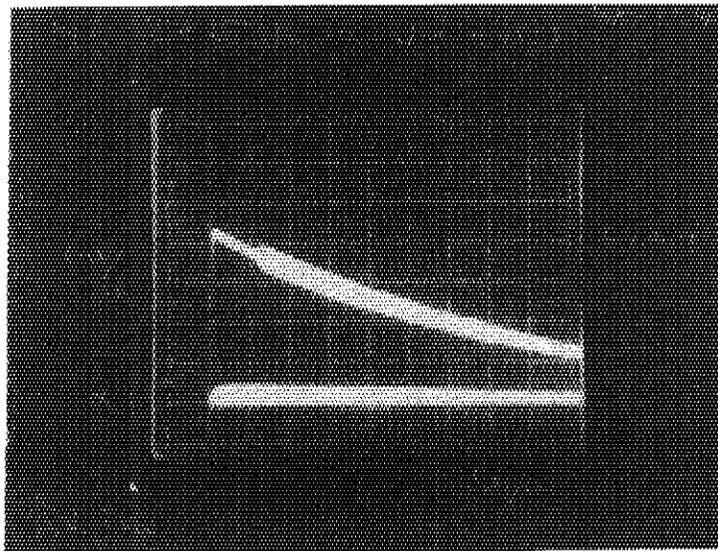


(b) Pulse height distribution of  $Am-241\alpha$ 's

Photo.A-2 Preamplifier output pulse shapes and pulse height distribution for  $Am-241\alpha$ 's obtained from  $HgI_2$  detector TH-IS with negative bias voltage (-250V)

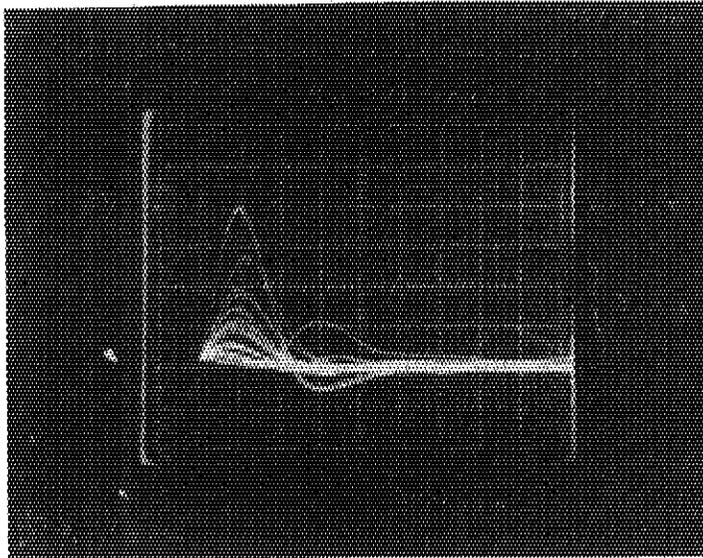


(a) Bias voltage +400V

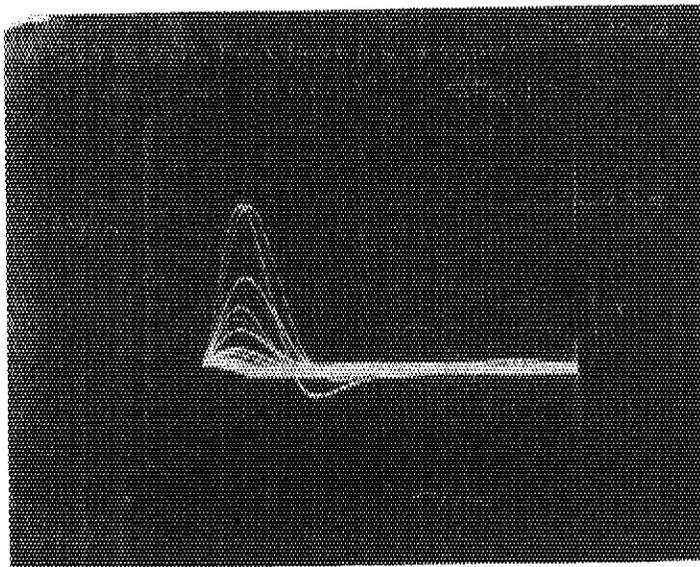


(b) Bias voltage +450V

Photo.A-3 Preamplifier output pulse shapes for Am-241  $\alpha$ 's obtained from  $HgI_2$  detector TH-IS with positive bias voltages and pulser

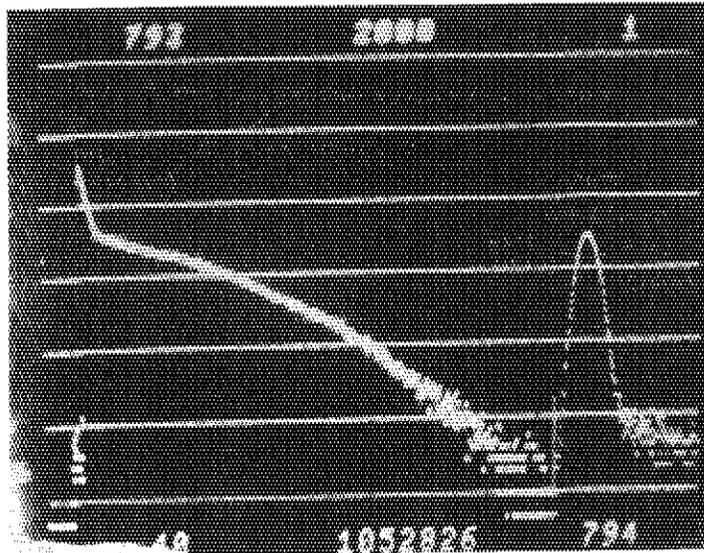


(a) Bias voltage -250V

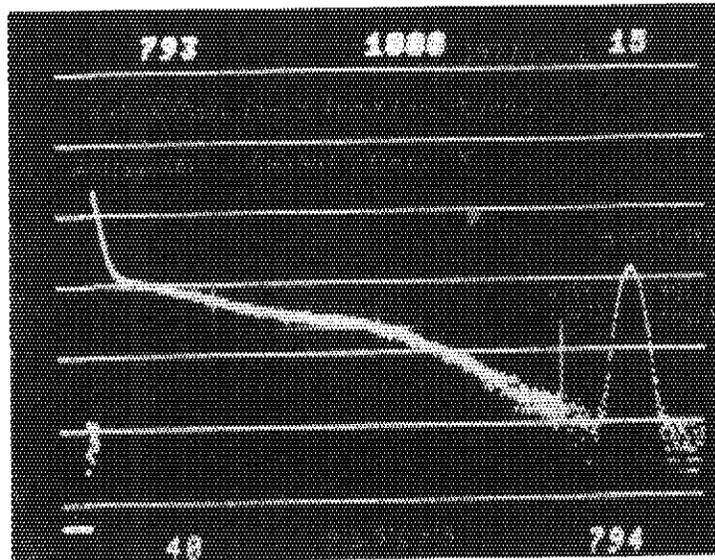


(b) Bias voltage +500V

Photo.A-4 Main amplifier output pulse shapes obtained from  $HgI_2$  detector TH-IS for Am-241  $\gamma$ - and X-rays and pulser pulses

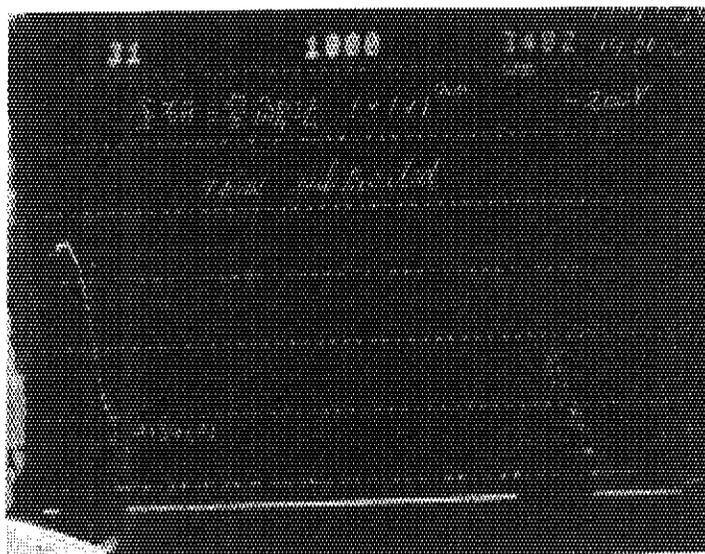


(a) Bias voltage -250V

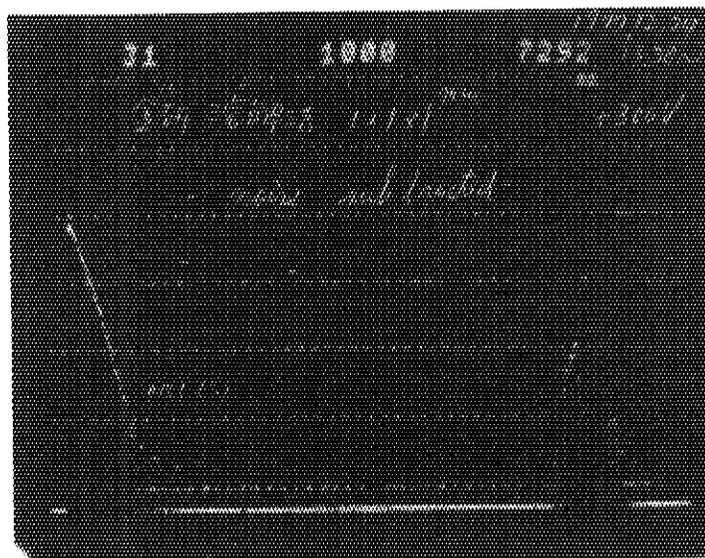


(b) Bias voltage +500V

Photo.A-5 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS

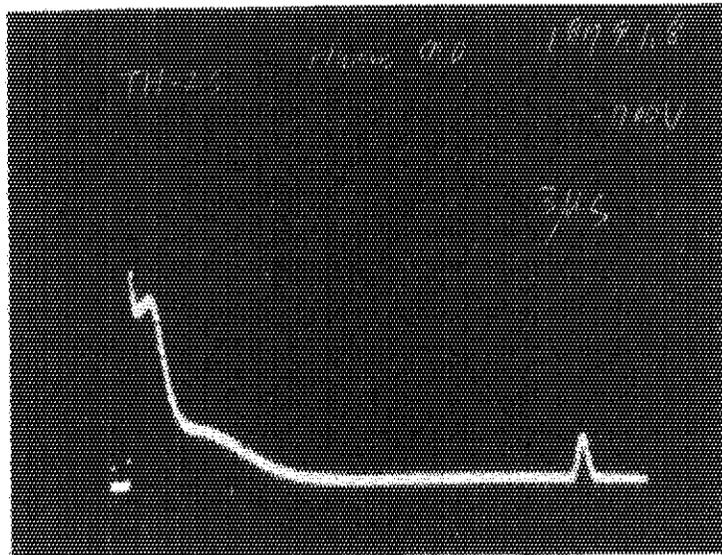


(a) Bias voltage -200V

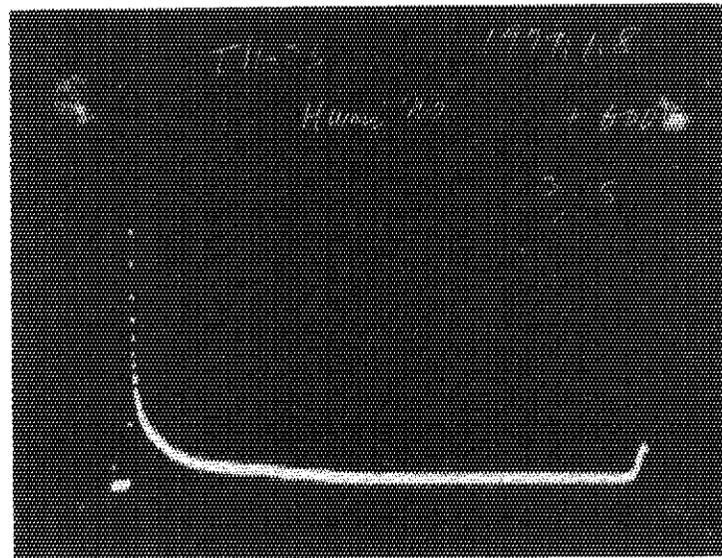


(b) Bias voltage +300V

Photo.A-6 Pulse height distributions of 5.9KeV X-rays from Fe-55 source obtained from HgI<sub>2</sub> detector TH-IS. Noises were subtracted.

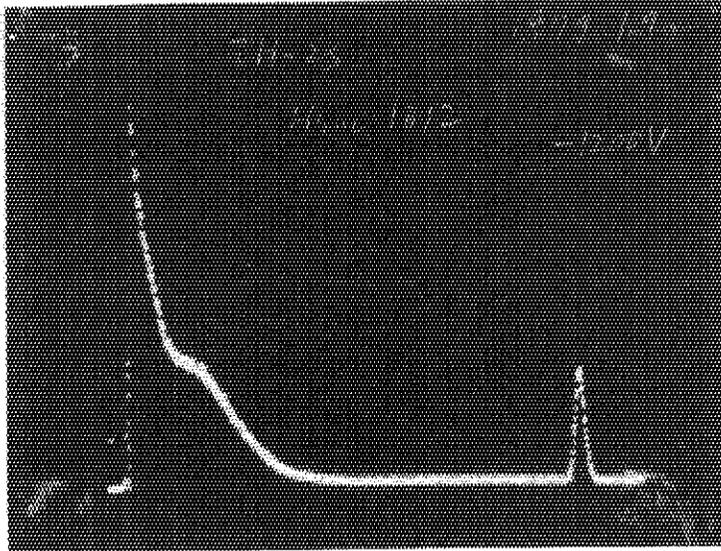


(a) Bias voltage -700V

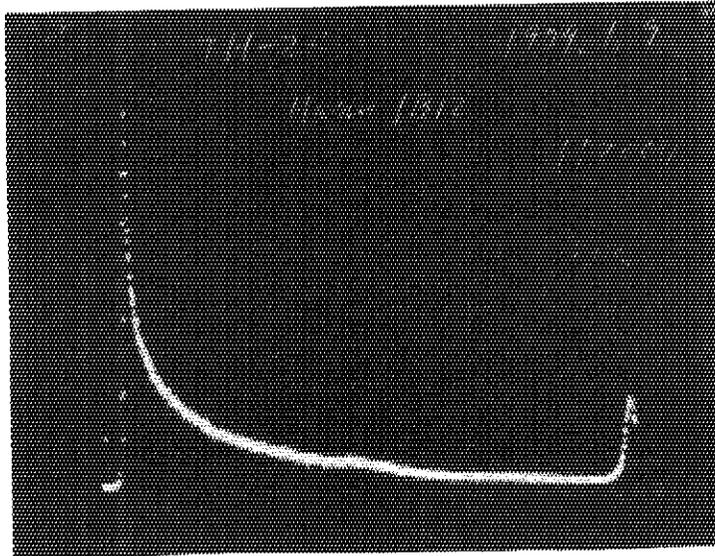


(b) Bias voltage +600V

Photo.A-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector TH-2S (No Humiseal coat)



(a) Bias voltage -1200V



(b) Bias voltage +1200V

Photo.A-8 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$ - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector TH-2S (Humiseal 1B12 coated)

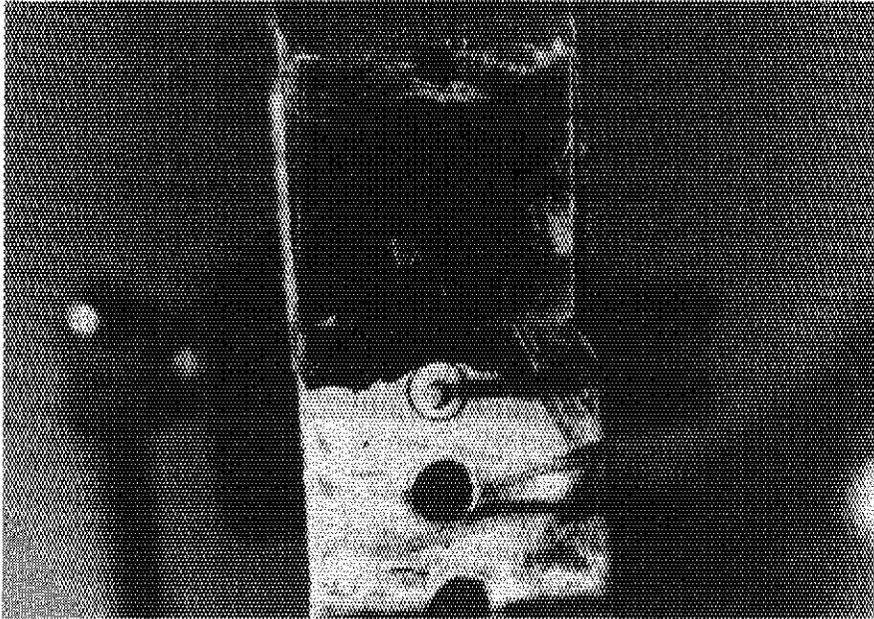
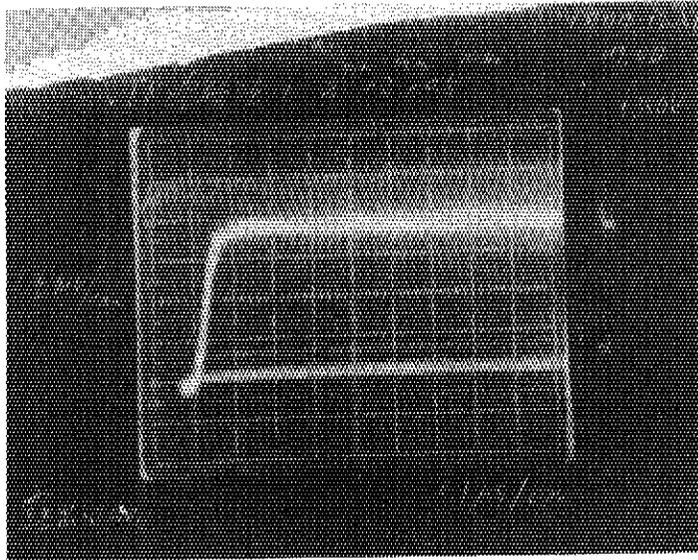
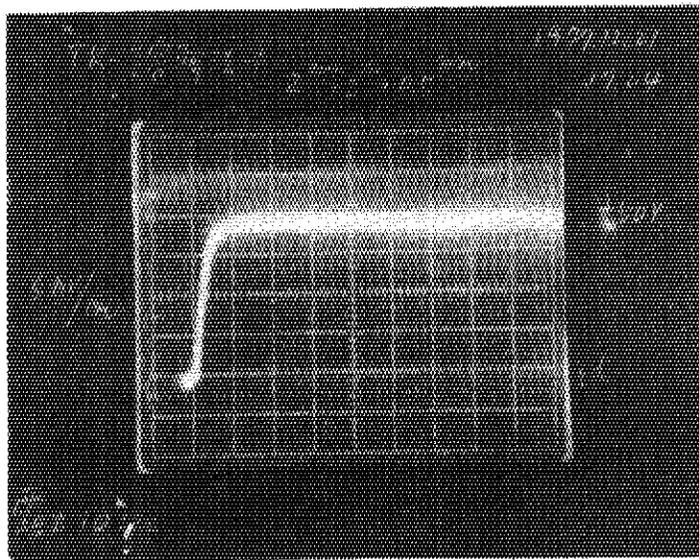


Photo.B-1  $\text{HgI}_2$  detector TK-2S



(a) Bias voltage +350V



(b) Bias voltage +50V

Photo.B-2 Preamplifier output pulse shapes obtained from  $\text{HgI}_2$  detector TK-2S with positive bias voltages for Am-241  $\alpha$ 's and pulser. For negative bias voltages, no pulses were observed.

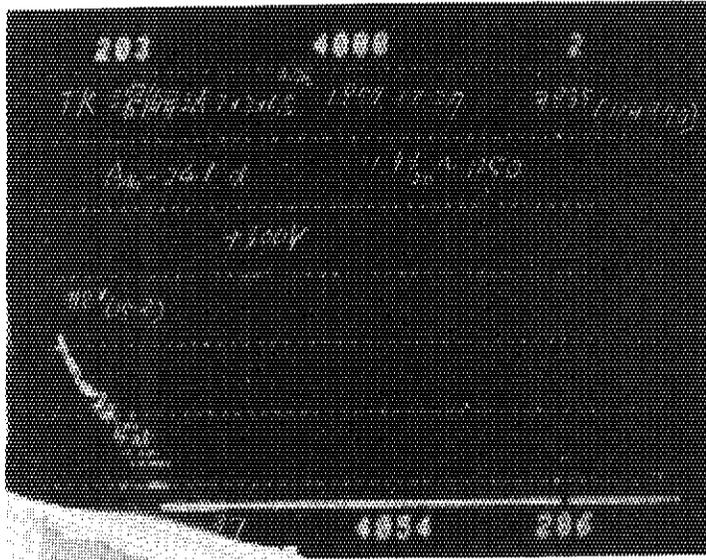


Photo.B-3 Pulse height distribution of Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2S with +300V bias.

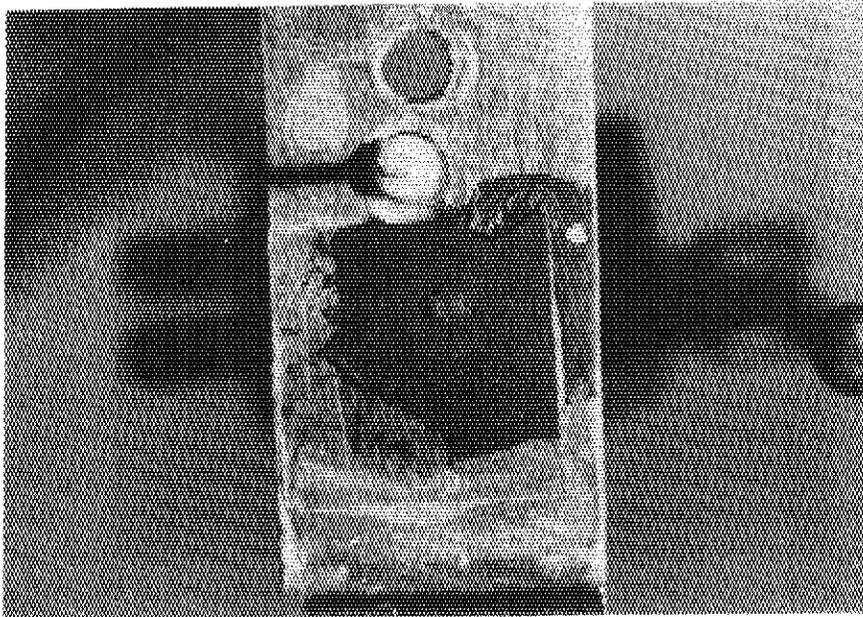
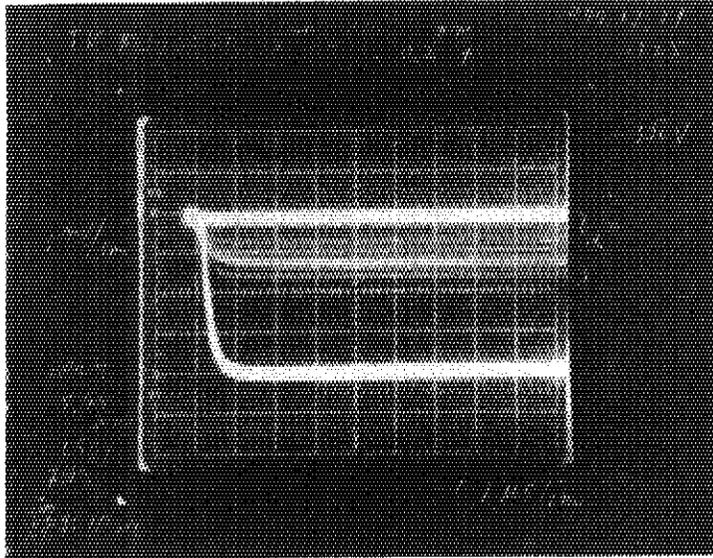
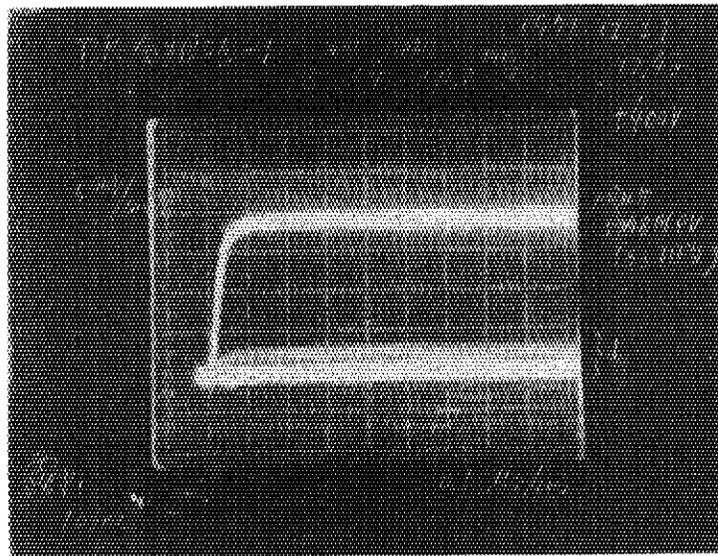


Photo.B-4 HgI<sub>2</sub> detector TK-2V



(a) Bias voltage -350V

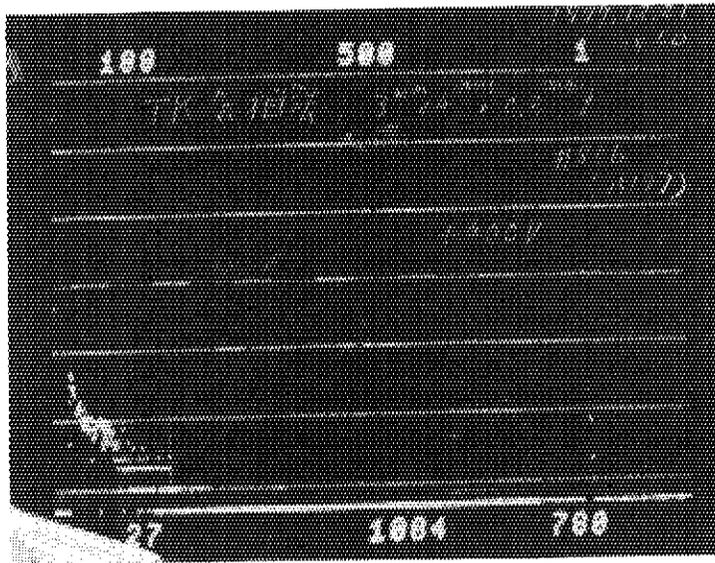


(b) Bias voltage +400V

Photo.B-5 Preamplifier output pulses obtained from  $\text{HgI}_2$  detector TK-2V for Am-241  $\alpha$ 's.

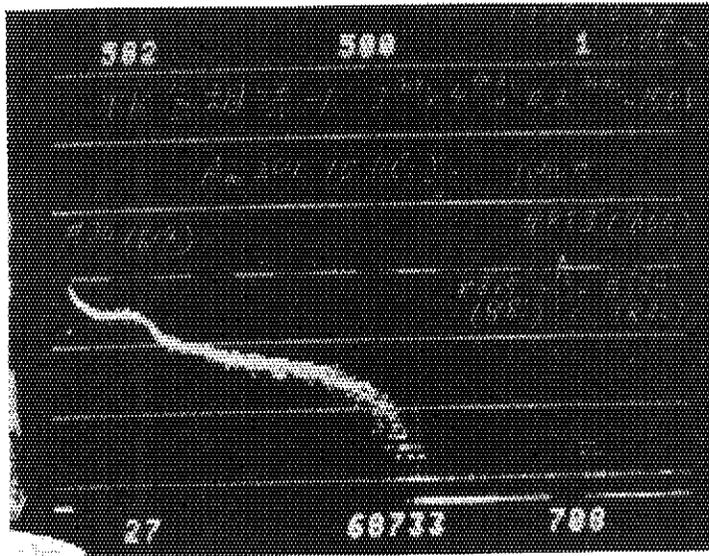


(a) Bias voltage -350V

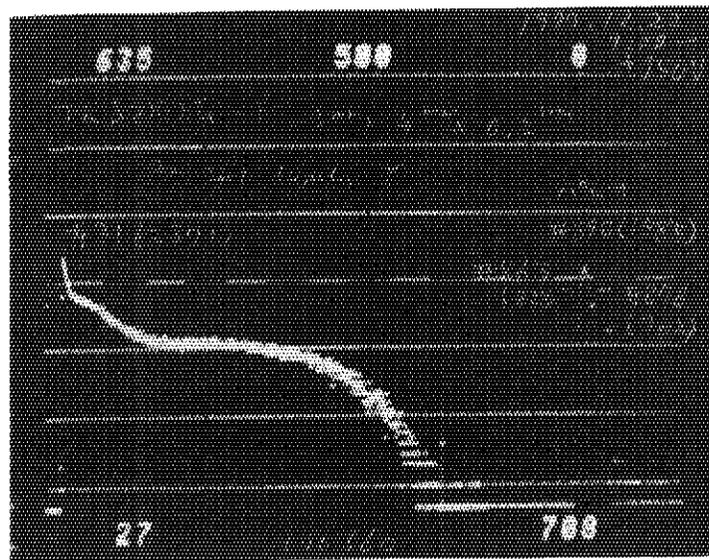


(b) Bias voltage +400V

Photo.B-6 Pulse height distributions of Am-241  $\alpha$ 's obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-2V



(a) Bias voltage -150V



(b) Bias voltage +150V

Photo.B-7 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector TK-2V

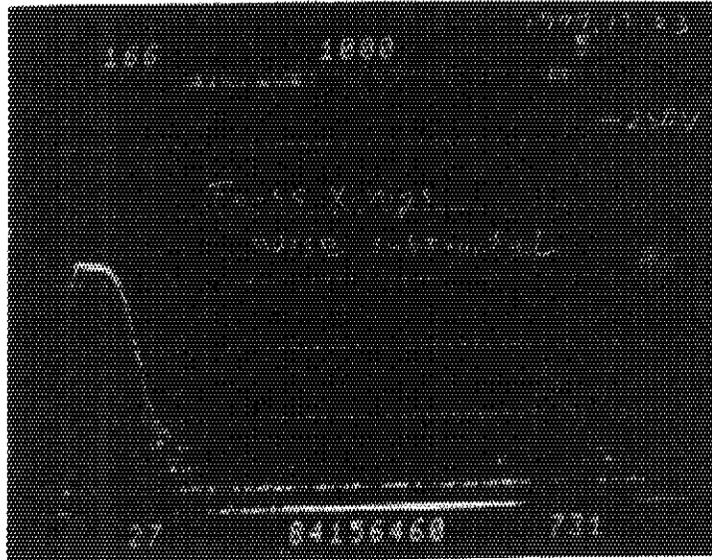
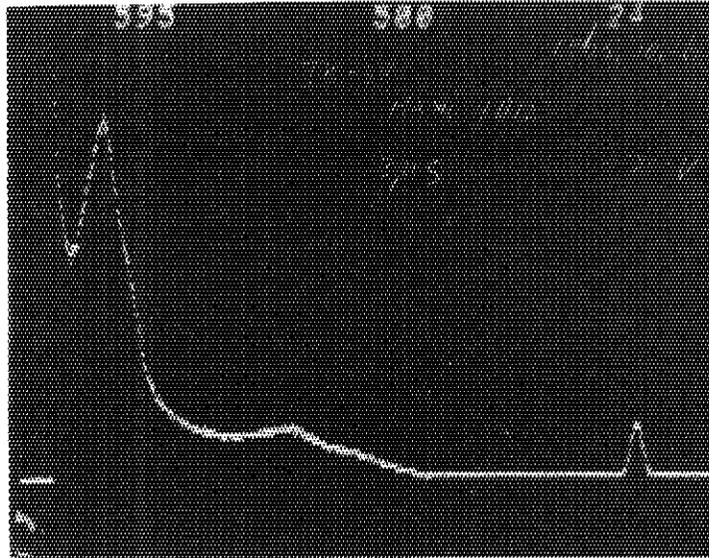
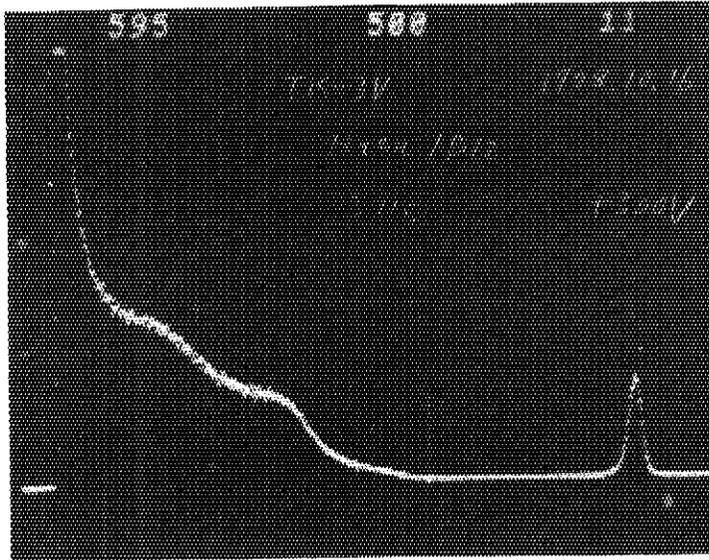


Photo.B-8 Pulse height distribution of 5.9KeV X-rays  
from Fe-55 obtained from HgI<sub>2</sub> detector  
TK-2V (-250V)

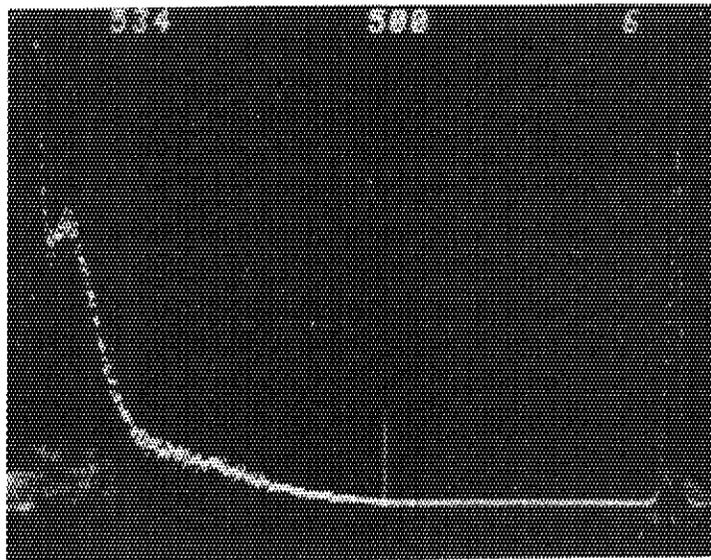


(a) Bias voltage -300V

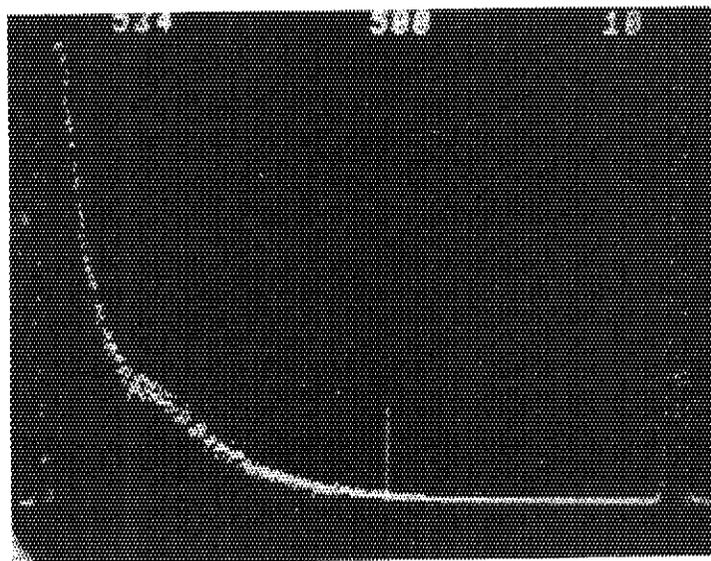


(b) Bias voltage +300V

Photo.B-9 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from HgI<sub>2</sub> detector TK-3V (Humiseal 1B12 coated)



(a) Bias voltage -300V (No Humiseal coat)



(b) Bias voltage -300V (Humiseal 1B12 coated)

Photo.C-1 Pulse height distributions of Am-241  $\gamma$  - and X-rays obtained from  $HgI_2$  detector TY-2S