

JAERI-Research
99-032



JP9950395



深海放射能測定用 Ge γ 線検出器
システムの開発

1999 年 4 月

山本忠利・清水 徳・小澤皓雄・美留町厚・千崎年彦・片桐政樹

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

深海放射能測定用Ge γ 線検出器システムの開発

日本原子力研究所むつ事業所施設部

山本 忠利・清水 徳・小澤 皓雄⁺・美留町 厚⁺・千崎 年彦⁺・片桐 政樹⁺⁺

(1999年3月16日受理)

深海海底に存在する人工放射性物質から放出される放射線を計測することを目的として、深海放射能測定システムとして従来のNaI検出器と同様に使用できるように耐圧容器に収納した型の小型電気冷却式Ge検出器を製作した。そして水中における冷却試験及びエネルギー分解能測定試験を行い、Ge検出器を液体窒素温度まで約5.8時間で冷却でき、 ^{60}Co 1.33 MeVのピークに対して2.66 KeVのエネルギー分解能を有することが確認できた。さらに、海洋科学技術センター所有の無人探査機ドルフィン3Kへの接続を行った後の海水中における放射能測定試験を行い、海底における天然放射性物質からの放射線を計測できることを確認した。

むつ事業所：〒035-0064 青森県むつ市港町4-24

+ 東海研究所技術部

++ 東海研究所中性子科学研究センター

Development of Ge γ Ray Detector System for Radioactivity Measurement in Deep Sea

Tadatoshi YAMAMOTO, Toku SHIMIZU, Teruo KOZAWA*, Atsushi BIRUMACHI*,
Toshihiko SENZAKI* and Masaki KATAGIRI**

Department of Facilities
Mutsu Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Minato-cho, Mutsu-shi, Aomori-ken

(Received March 16 , 1999)

The purpose of this work is to measure the radiation emitted from the artificial radioactive substances existed in deep sea bottom. As the measurement system for radioactivity in deep sea, the small electric-cooled Ge detector introduced into the pressure vessel similarly to the conventional NaI detector was made up. The cooling test and the energy resolution test were carried out in water. It was confirmed that the Ge detector can be cooled about 5.8 hours to the temperature of liquid nitrogen and can be hold the energy resolution of 2.66 KeV to 1.33 MeV peak of ^{60}Co . After the Ge detector was connected to the dolphin 3K of remotely operated vehicle belonging to Japan Marine Science & Technology Center, the radioactivity measurement test was carried out in seawater. It was confirmed that the Ge detector can be measured the radiation from the natural radioactive substances in sea bottom.

Keywords: Ge Detector, Radioactivity Measurement, Artificial Radioactive Substance, Deep Sea Bottom,
Pressure Vessel, Cooling Test, Energy Resolution Test

+ Department of Engineering Services, Tokai Research Establishment
++ Center for Neutron Science, Tokai Research Establishment

目 次

1. まえがき	1
2. 小型電気冷却式 Ge 検出器の製作及び調整	2
2.1 小型電気冷却式 Ge 検出器の製作	2
2.2 小型電気冷却式 Ge 検出器の調整	3
3. データ転送部の開発	11
4. スターリング冷凍機の改良	18
5. 深海放射能測定用耐圧容器の製作	21
5.1 Ge 検出器用耐圧容器の製作	21
5.2 電源用耐圧容器の製作	22
6. 深海放射能測定用電源の製作及び調整	34
6.1 深海放射能測定器用電源の製作	34
6.2 深海放射能測定器用電源の調整	35
7. 水中における性能試験	37
7.1 スターリング冷凍機改良前	37
7.2 スターリング冷凍機改良後	38
8. 海水中における総合試験	48
9. あとがき	58
参考文献	59

Contents

1. Introduction	1
2. Production and Adjustment of Small Electric-cooled Ge Detector	2
2.1 Production of Small Electric-cooled Ge Detector	2
2.2 Adjustment of Small Electric-cooled Ge Detector	3
3. Development of Data Transmission Equipment	11
4. Improvement of Stirling Refrigerator	18
5. Production of Pressure Vessel for Radioactivity Measurement in Deep Sea	21
5.1 Production of Pressure Vessel for Ge Detector	21
5.2 Production of Pressure Vessel for Electric Power Supply	22
6. Production and Adjustment of Electric Power Supply	34
6.1 Production of Electric Power Supply for Radioactivity Measurement in Deep Sea	34
6.2 Adjustment of Electric Power Supply for Radioactivity Measurement in Deep Sea	35
7. Performance Test in Water	37
7.1 Before Improvement of Stirling Refrigerator	37
7.2 After Improvement of Stirling Refrigerator	38
8. Overall Test in Sea Water	48
9. Remarks	58
References	59

1. ま え が き

液体窒素を使用しないでスターリング冷凍機を用いて液体窒素温度まで冷却できる小型電気冷却式Ge検出器をこれまで開発してきた^{(1) - (4)}。当海洋調査研究室では、 γ 線のエネルギー分解能が良好なGe検出器を従来のNaI検出器の代わりに海洋放射能測定用の放射線検出器としての海洋への適合性を確認する目的で、海水中で使用できる耐圧型のGe検出器を製作するとともに、無人潜水機にこの放射線検出器を搭載して、海水、海底土における放射能測定ができるようにデータ転送部及び電源を製作して開発を進めた⁽⁵⁾。

まず、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁からの委託研究としての海洋モニタリングシステム整備調査の一環として、原子力発電所等の周辺海域における海洋に放出された放射能を迅速にモニタリングするための測定システムの整備を平成2年度から平成8年度前半まで行った^{(6), (7)}。海水及び海底土中の γ 線放出核種を測定する目的で従来のNaI検出器を海洋中で測定できるシステムの整備を行うとともに、原研で開発したスターリング冷凍機を装備したGe検出器を海洋用に改良し、それを耐圧容器に収納した測定システムの整備を行った。このシステムは、2台のスターリング冷凍機を使用して、冷凍機の先端部分のコールドフィンガーにクローズドエンド型Ge検出素子を装着し、耐圧50 kg/cm²のアルミニウム製の容器に収納したものである。このGe検出器によって測定されたデータは、船上へ光信号として転送されるが、測定可能な水深は約500 mまでと限定された。

そこで、深海海底に投棄された旧ソ連の放射性廃棄物の漏洩状況、深海海底での核実験による放射性降下物の蓄積状況等を調べることを目的として、水深が約3,000 mまで放射能測定ができるように耐圧容器の仕様を向上させるとともに、このGe検出器を装備した測定システムが水中で冷却できることを性能試験で確認した。海洋科学技術センターが所有している無人探査機（ドルフィン3 K）に従来のNaI検出器を搭載して、深海放射能測定に関する研究を海洋科学技術センターへの受託研究として平成8年度から実施している^{(8), (9)}が、このGe検出器の測定システムを同様に搭載できるようにデータ転送部及び電源を改良して調整を行った。さらに、ドルフィン3 Kへ接続して海水中において放射能測定ができることを総合試験で確認した。

本報告は、深海放射能測定システムとしての小型電気冷却式Ge検出器、データ転送部、耐圧容器、電源等の製作について述べるとともに、この測定システムを用いた水中における性能試験及びドルフィン3 Kへの接続を行った後の海水中における総合試験について述べたものである。

2. 小型電気冷却式 Ge 検出器の製作及び調整

2.1 小型電気冷却式 Ge 検出器の製作

本検出器は、環境中に存在する放射性核種としての γ 線放出核種の放射能を測定するものであり、液体窒素を検出部に供給することなく、スターリング冷凍機により検出部を冷却するものである。小型電気冷却式 Ge 検出器本体の構造とブロックダイアグラムを図 2-1 と図 2-2 に、その外観を写真 2-1 にそれぞれ示す。

2.1.1 機能

本検出器は、以下の機能を備えている。

- ① スターリング冷凍機 2 台によって、Ge 検出器を液体窒素温度まで短時間に冷却できる。
- ② 従来の液体窒素冷却方式に比べて、電気冷却方式を採用することで小型化がなされ、しかも取り扱いが簡易である。
- ③ ^{60}Co の 1.33 MeV のピークに対して、分解能が 2.5 KeV 以下であり、相対効率が 20% 以上である Ge 検出器を持っている。
- ④ Ge 結晶温度、コールドフィンガー温度及びヒートシンク温度が表示できる。
- ⑤ 電源として交流 90 ~ 250 V、直流 12 V が供給できる。
- ⑥ Ge 検出器の機能を維持するための安全装置を備えている。

2.1.2 仕様

型 式	: GEM-20250 / ST-DSR
相 対 効 率	: 20% 以上
分 解 能	: 2.5 keV 以下 (at 1.33 MeV ^{60}Co)
検出器タイプ	: クローズドエンド型高純度 Ge 検出器
冷 却 機	: スターリング冷凍機 (住友重機械工業製 SRS-2110) 2 台
高 圧 電 源	: Positive 3000 V 以下 プリアンプ、メインアンプ内蔵
表 示	: Ge 結晶温度、コールドフィンガー温度、ヒートシンク温度
温度コントロール	: 可変 (273 K ~ 50 K)
安全 装置	: Ge の温度 120 K で高圧電源シャットダウン ヒートシンク温度 60℃ で高圧電源及び冷凍機が停止 外部から DC 遮断信号入力で電源の DC 12 V 出力、AC 出力が遮断
供給 電源	: スターリング冷凍機の駆動用電源として使用 入力 AC 90 ~ 250 V、出力 DC 12 V、AC 0 ~ 25 V (図 2-3 及び写真 2-2)
消費 電力	: 最大 300 W 以下
数 量	: 1 式

2.1.3 性能

- ① Ge 検出器の性能試験として、 ^{60}Co の 1.33 MeV のピークに対して、半値幅が 2.5 KeV 以下であり、相対効率が 20% 以上であることを確認したところ、図 2-4 に示すように半値幅が 2.35 KeV であり、相対効率が 29.1% であった。
- ② スターリング冷凍機の性能試験によって、80 K における冷却能力が 1.6 W であり、クールダウン時間が 100 K で 8 分以下、80 K で 10 分以下で到達することが保証された。

2.2 小型電気冷却式 Ge 検出器の調整

本調整は、上記の小型電気冷却式の Ge 検出器について温度出力の機能を付加し、スターリング冷凍機、メインアンプのゲイン等の調整を行い、性能を確認するものである。

2.2.1 付加及び調整内容

(1) 温度出力の付加

小型電気冷却式 Ge 検出器の温度特性を測定するために下記の機能を付加した。

- ① Ge 結晶、コールドフィンガー及びヒートシンクの温度信号を RS 232 C で外部に出力する機能を付加した。
- ② 高圧電源及びスターリングコントロール信号を RS 232 C で外部に出力する機能を付加した。
- ③ 上記付加機能が動作し、後述のデータ転送部と通信できることを確認した。

(2) 総合調整

上記の温度出力を付加した後、後述の耐圧容器内の治具に装着した Ge 検出器及びスターリング冷凍機の動作確認と調整を行った。

- ① スターリング冷凍機を装備した Ge 検出器を耐圧容器の治具に装着し、耐圧容器から外した状態（写真 2-3）で動作確認と調整を行った。
- ② メインアンプのゲインを調整して、 ^{60}Co の 1.33 MeV のエネルギーに対して 2,665 ch 付近にくるようにした。

2.2.2 性能

- ① スターリング冷凍機の性能試験として、Ge 結晶、コールドフィンガー及びヒートシンクの温度特性を測定して、本 Ge 検出器の冷却試験を行ったところ、図 2-5 に示すように Ge 結晶の温度が 100 K に到達するのに 26,000 秒かかることを確認した。
- ② スターリング冷凍機を装備した Ge 検出器の性能試験として、 ^{60}Co の 1.33 MeV のピークに対してエネルギー分解能測定を行ったところ、図 2-6 に示すように半値幅が 2.6 KeV であった。

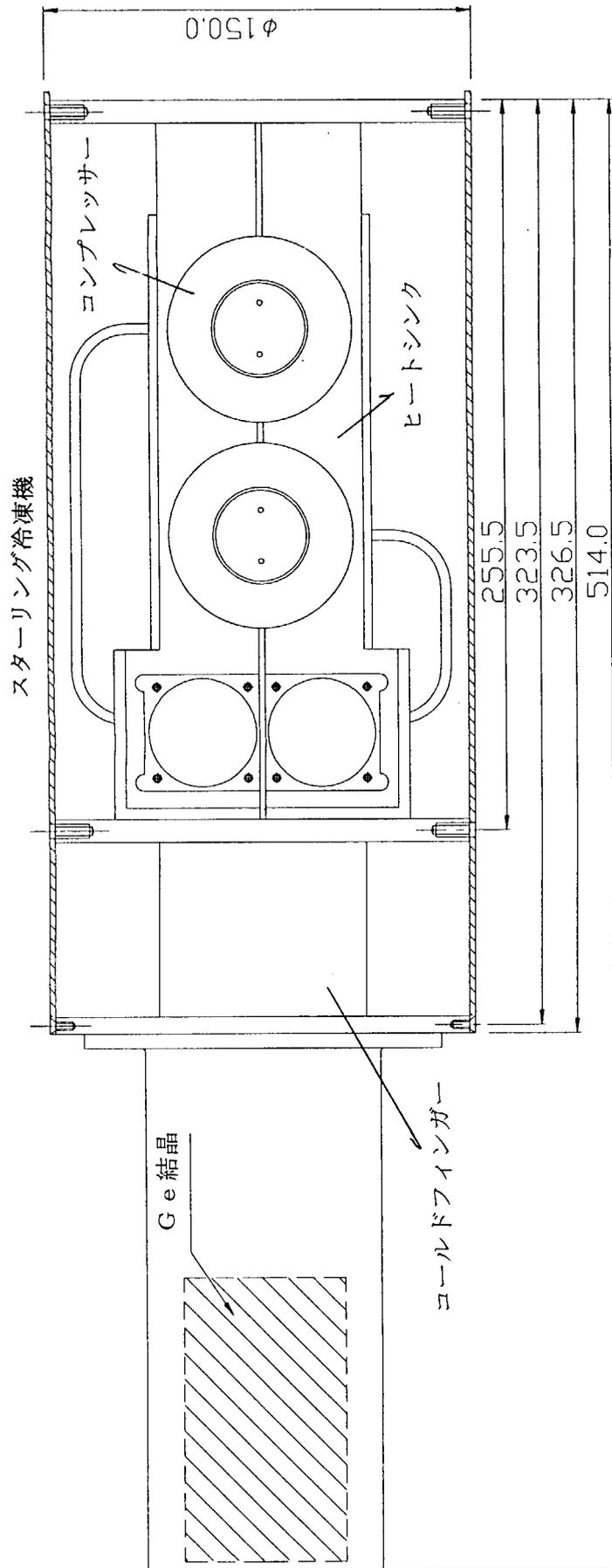


図 2-1 小型電気冷却式Ge検出器の構造

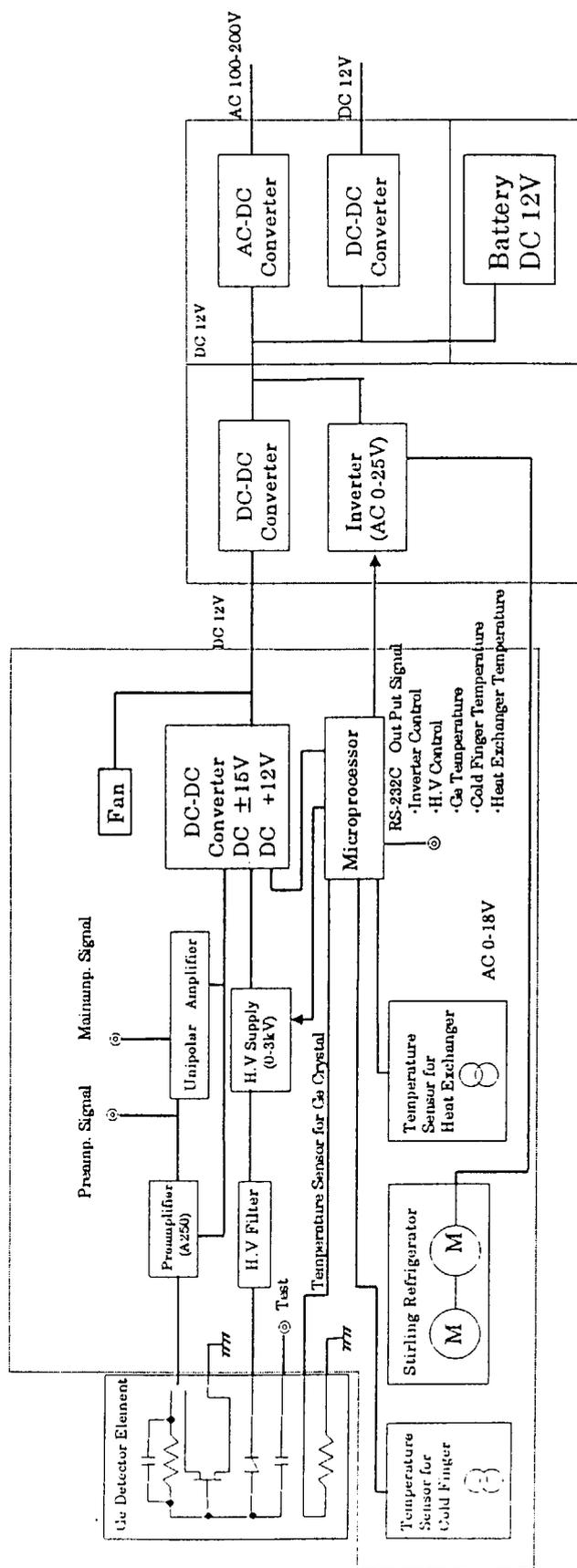


図 2-2 小型電気冷却式Ge検出器のブロックダイヤグラム

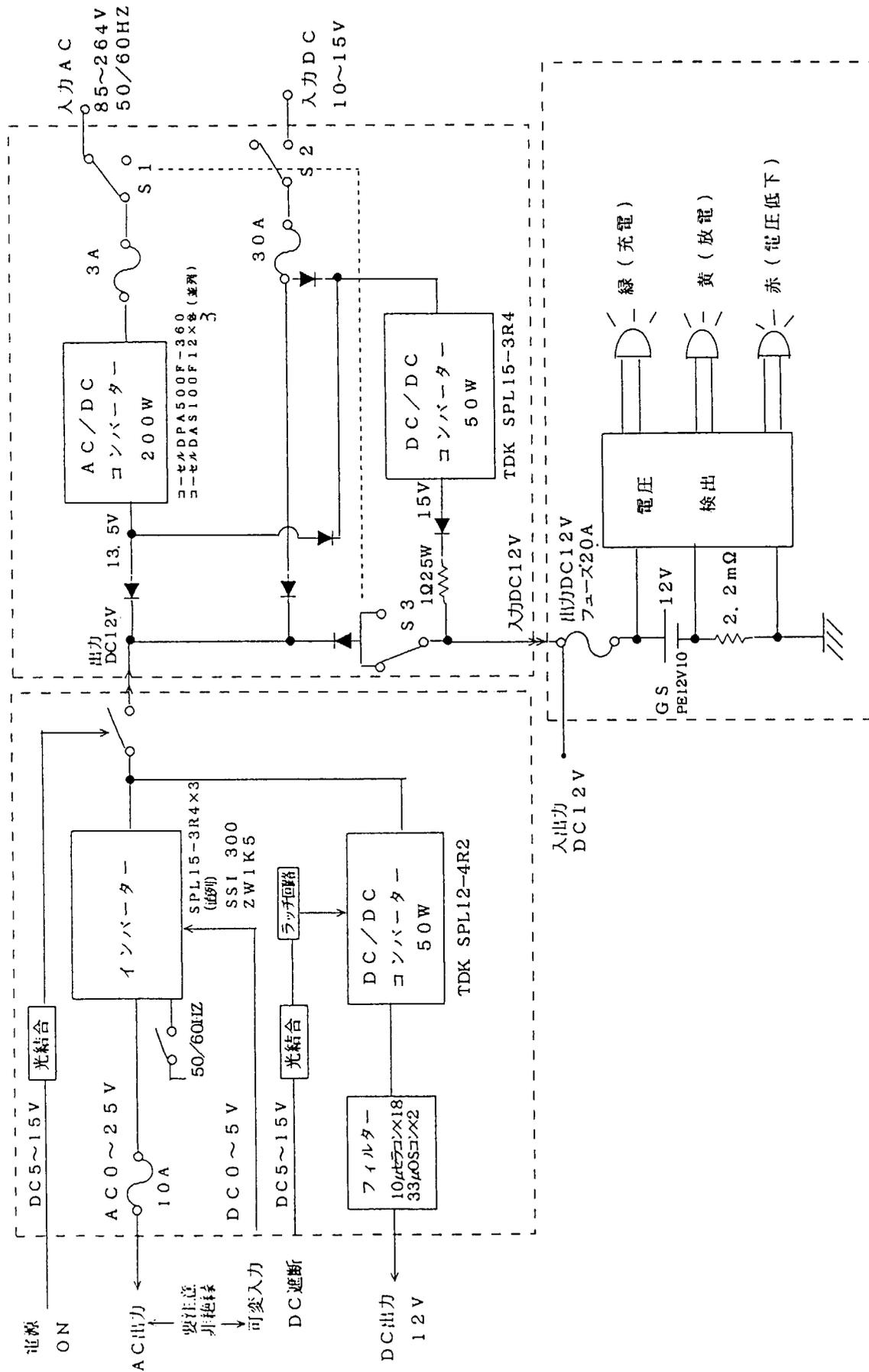


図 2-3 電源部の電気回路

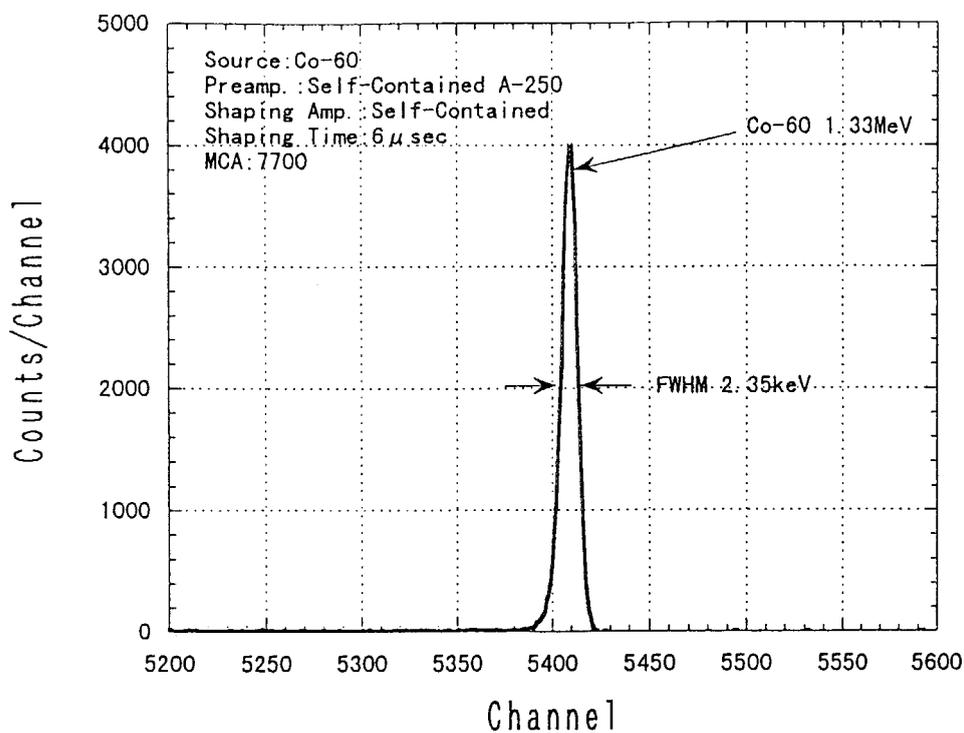


図 2-4 エネルギー分解能

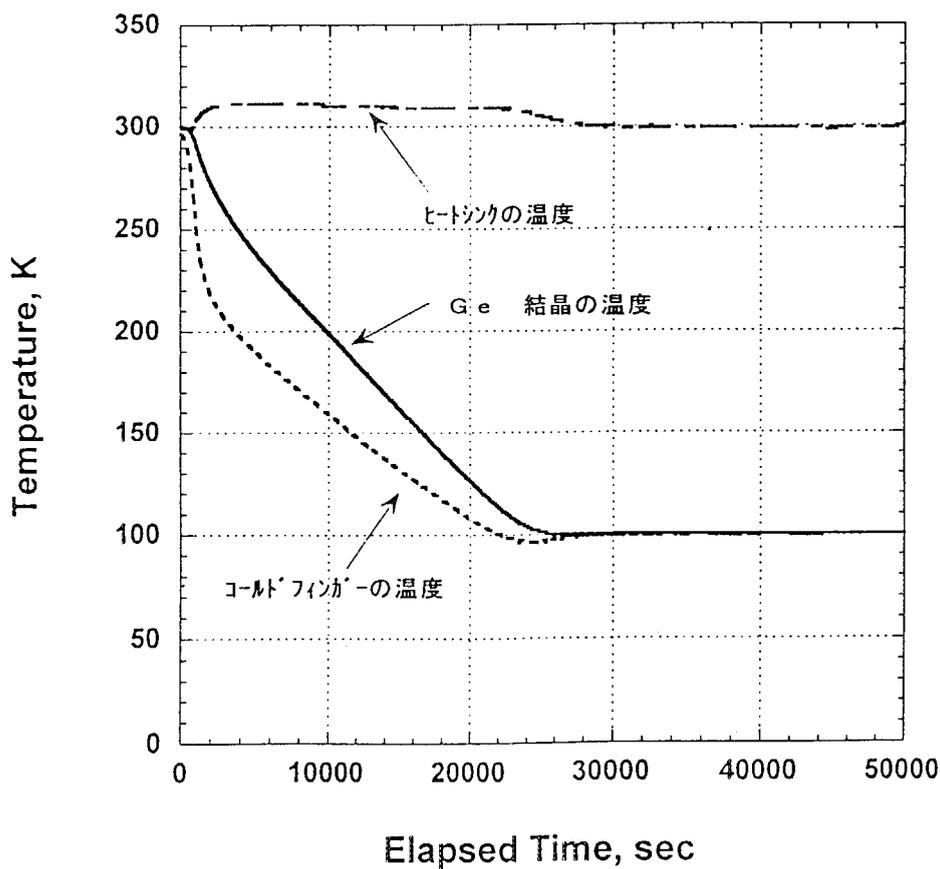


図 2-5 スターリング冷凍機による冷却試験

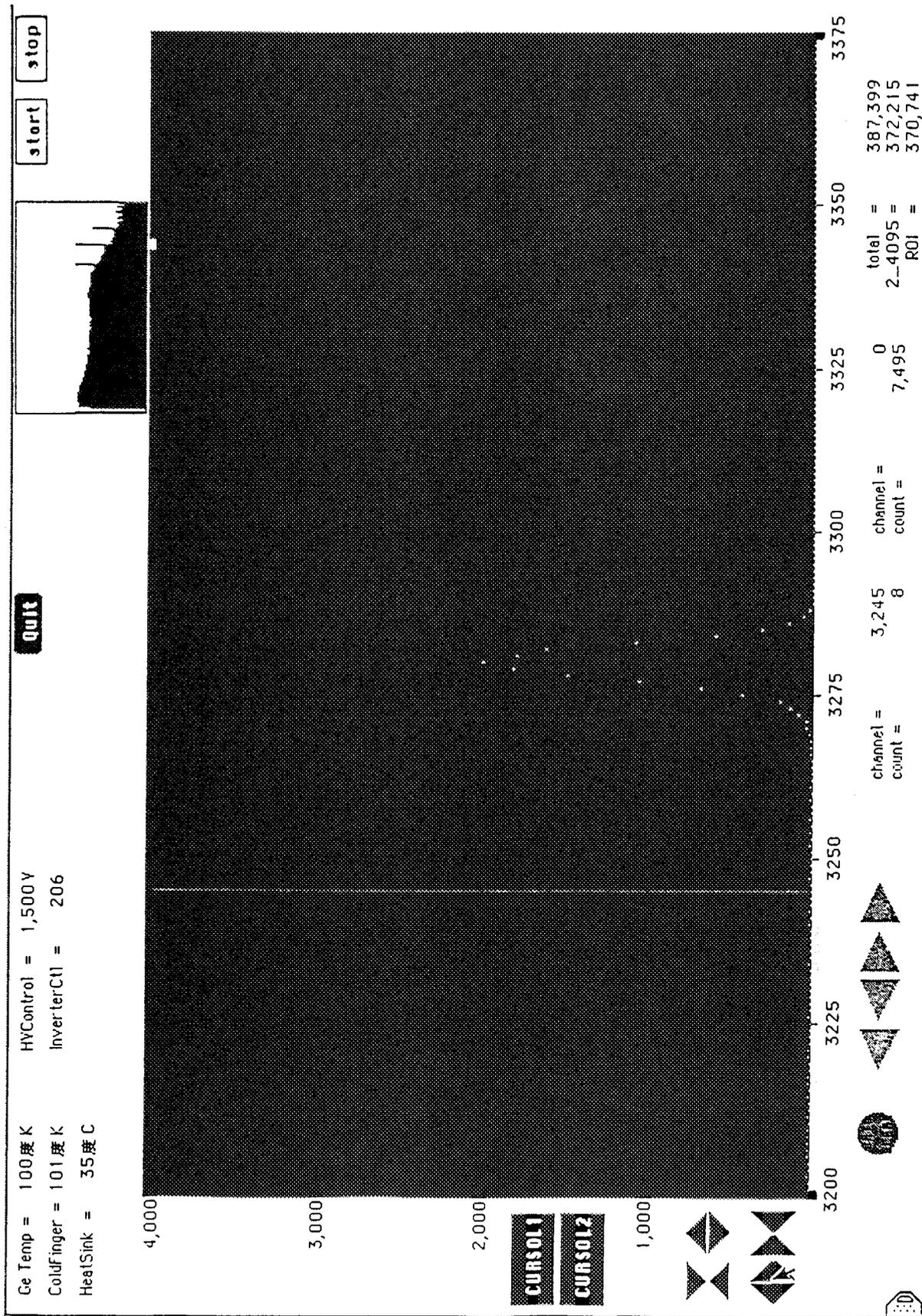


図 2-6 調整後のエネルギー分解能測定

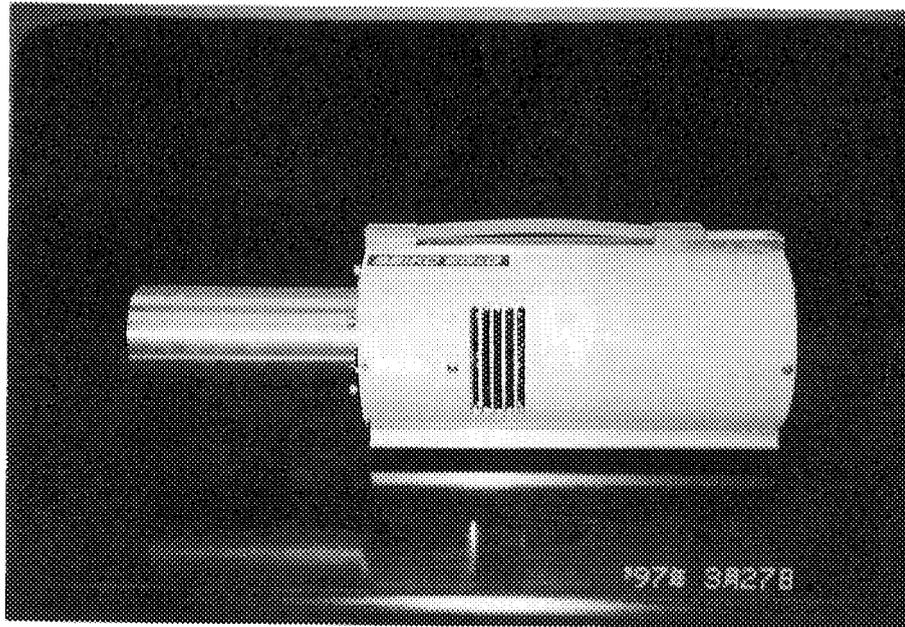


写真 2-1 小型電気冷却式Ge検出器本体

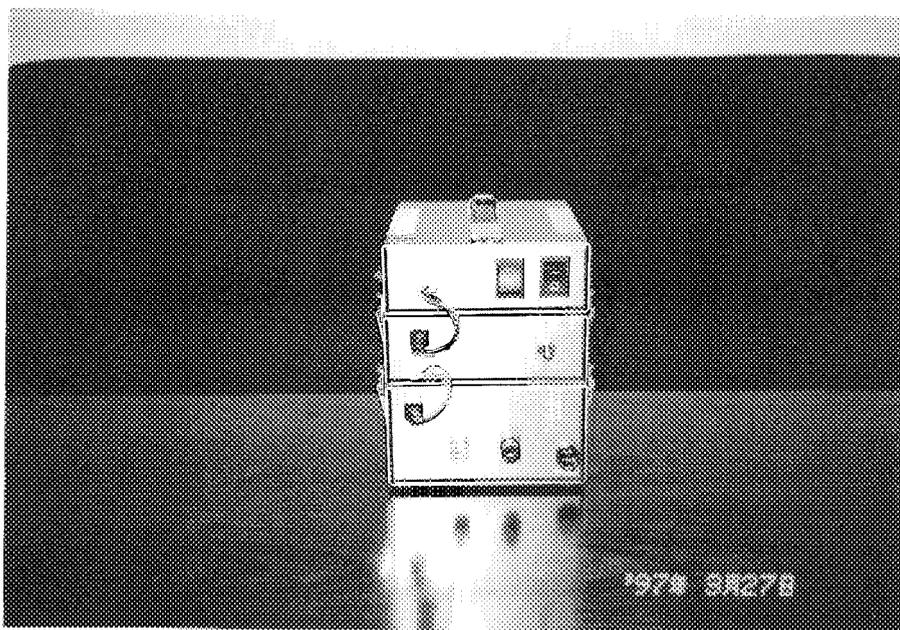


写真 2-2 電源部

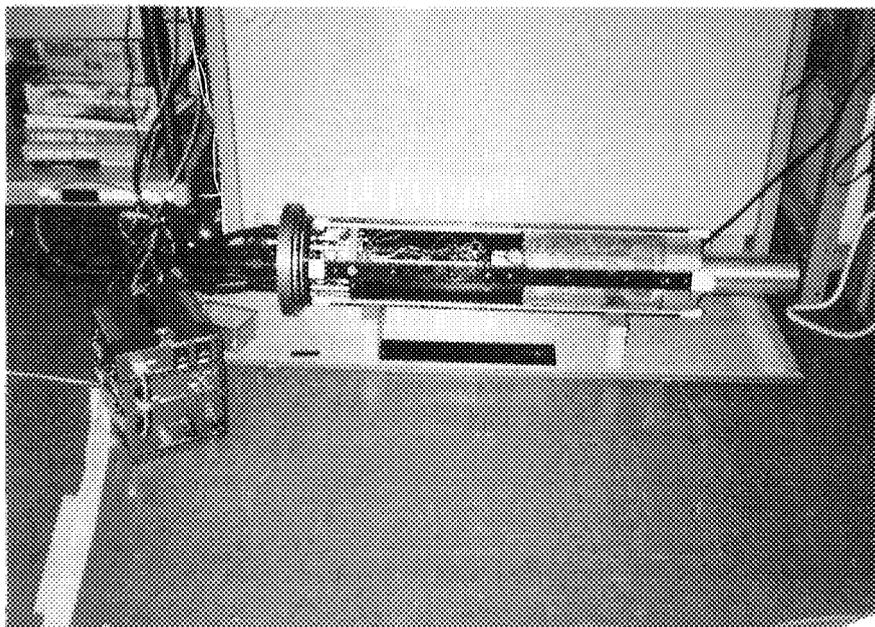


写真 2-3 耐圧容器の治具に装着した小型電気冷却式Ge検出器

3. データ転送部の開発

本データ転送部は、小型電気冷却式 Ge 検出器の運転情報と放射線パルスの波高データを海洋科学技術センターが所有する無人探査機（ドルフィン3K）のビデオ信号転送装置を通して母船（なつしま）上まで転送する機器であり、検出器の動作状態を確認しながら放射線データを収集するものである。図 3-1 にデータ転送部全体図、図 3-2 に MODEL4385ADC/TRANSMITTER ブロック図、写真 3-1 に MODEL4385ADC/TRANSMITTER の写真、図 3-3 に MODEL4386RECEIVER ブロック図、写真 3-2 に MODEL4386RECEIVER の写真をそれぞれ示す。

(1) 機能

本データ転送部は、MODEL4385ADC/TRANSMITTER、MODEL4386RECEIVER、リストモード記録プログラム、ヒストグラム作成プログラムから構成され、以下の機能を備えている。

1) MODEL4385ADC/TRANSMITTER

- ① 放射線パルスの波高情報を A/D 変換する。
- ② 電気冷却式 Ge 検出器から ASCII で送られてくる運転情報を 2 進数に変換する。
- ③ ①、②のデータを多重化して、EIA ビデオ（モノクロ NTSC）フォーマットで送出する。

2) MODEL4386RECEIVER

- ① MODEL4385 から送られてくる信号の DC レベルを再生し、同期信号を除去し、TTL レベルに変換する。
- ② ①で受信した信号を RS422 レベル変換し、Macintosh に送出する。
- ③ ①で受信した信号をパラレル変換し、放射線波高データを MCA インターフェースに送出する。

3) リストモード記録プログラム

- ① MODEL4386RECEIVER から RS422 で送られてくる信号を受信する。
- ② 電気冷却式 Ge 検出器の運転情報を表示する。
- ③ モニター用に放射線波高データのヒストグラムを表示する。
- ④ 放射線波高データと運転情報をリストモードでハードディスクに記録する。

4) ヒストグラム作成プログラム

- ① リストモード記録プログラムで記録した放射線データの時間ごとのカウントレートを表示する。
- ② リストモード記録プログラムで記録した放射線データの任意の時間の波高スペクトルを表示する。

(2) 仕様

それぞれの機器及びソフトの仕様を以下に示す。

1) MODEL4385ADC/TRANSMITTER

分解能 : 4000ch
 変換方式 : ウィルキンソン型
 変換クロック : 90MHz
 積分直線性 : 0.05 %以下
 転送データ : 放射線波高データ、Ge結晶温度、コールドフィンガー温度、
 ヒートシンク温度、冷凍機出力、HV電圧
 転送速度 : 230kbps
 搬送信号形式 : EIAビデオ (NTSCモノクロ) 信号
 動作温度 : 0 ~ 50℃
 電源 : DC12V
 形状(mm) : H;45、W;130、L;180 (突起物を除く)

2) MODEL4386RECEIVER

入力信号形式 : EIAビデオ (NTSCモノクロ) 信号
 転送速度(RS422) : 230kbps
 MCA OUT : 4000ch MCA用
 動作温度 : 0 ~ 40℃
 電源 : 85 ~ 132V、50 ~ 60Hz
 形状(mm) : H;55、W;320、L;230 (突起物を除く)

3) リストモード記録プログラム

入力データ転送速度 : 230kbps (± 10kbps)
 プラットホーム : Power Macintosh
 OS : MacOS 7.6 以降
 必要メモリ : 32MByte 以下
 計測データ容量 : 2GByte 以下

4) ヒストグラム作成プログラム

解析データ : リストモード記録プログラムで作成したファイル
 プラットホーム : PowerMacintosh
 OS : MacOS 7.6 以降
 必要メモリ : 32MByte

(3) 性能

① 電気冷却式 Ge 検出器の運転情報を MODEL4385ADC/TRANSMITTER、MODEL4386RECEIVER

を通して転送されることを確認した。ハードディスクに記録されたデータから運転情報を取り出しグラフにした例を図 3-4 に示す。

- ② モニター用に放射線波高データを時間ごとのカウント及び波高スペクトルを表示できることを確認した。その画面を図 3-5 に示す。

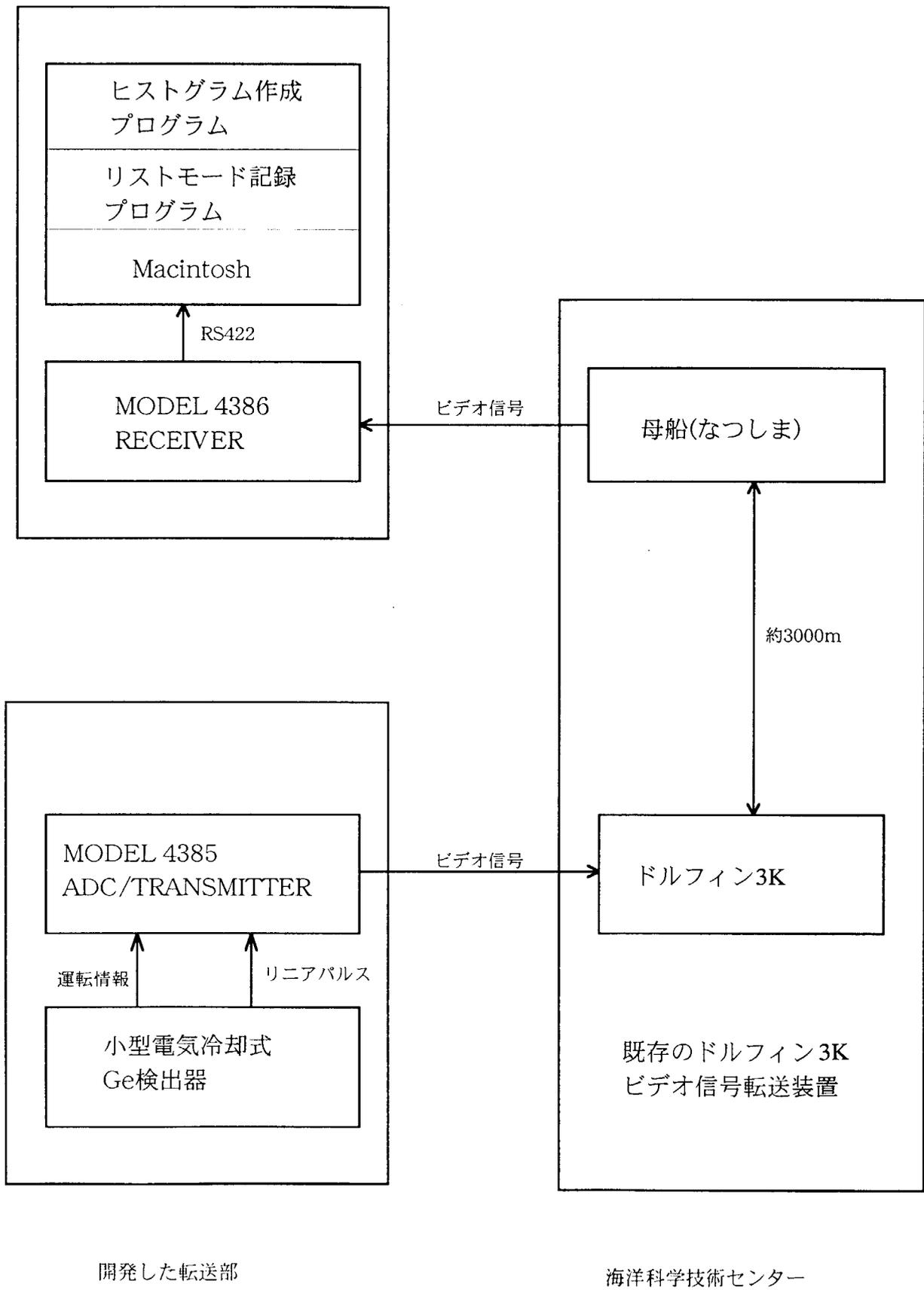


図3-1 データ転送部全体図

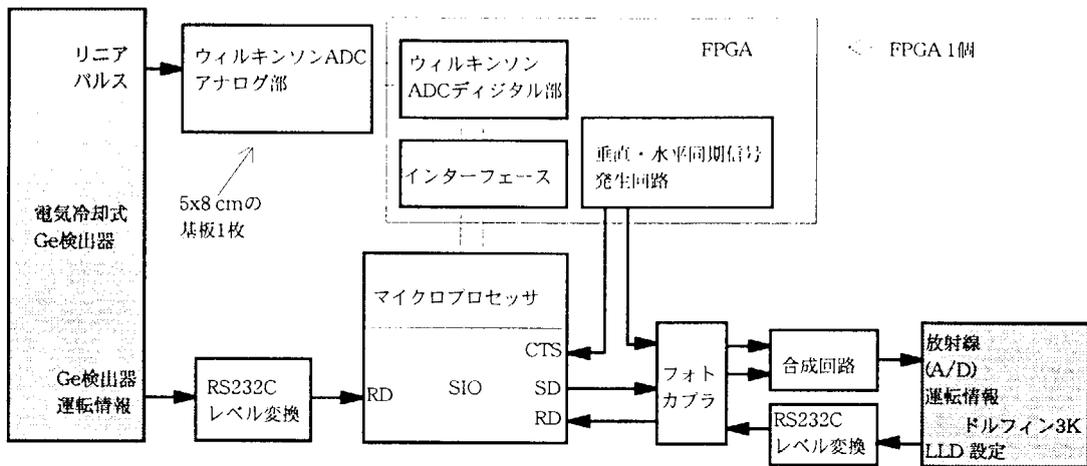


図 3-2 MODEL 4385 ADC/TRANSMITTER ブロック図

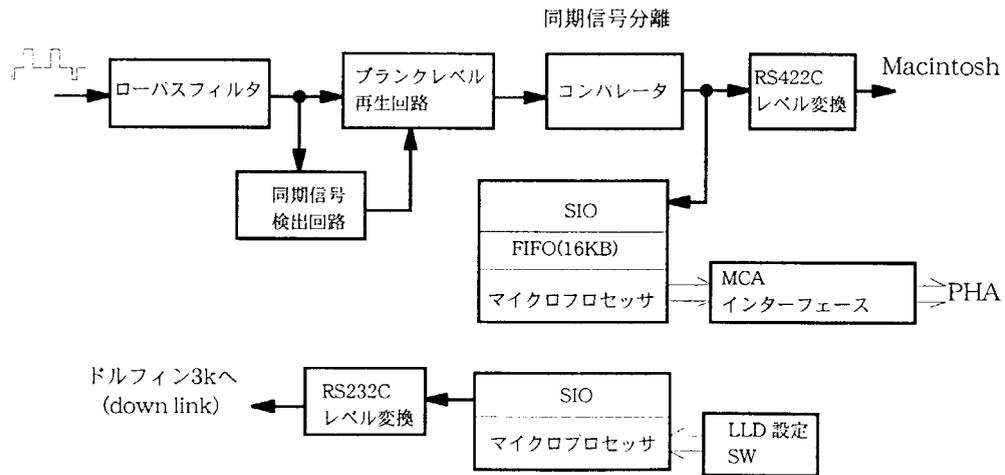


図 3-3 MODEL 4386 RECEIVER ブロック図

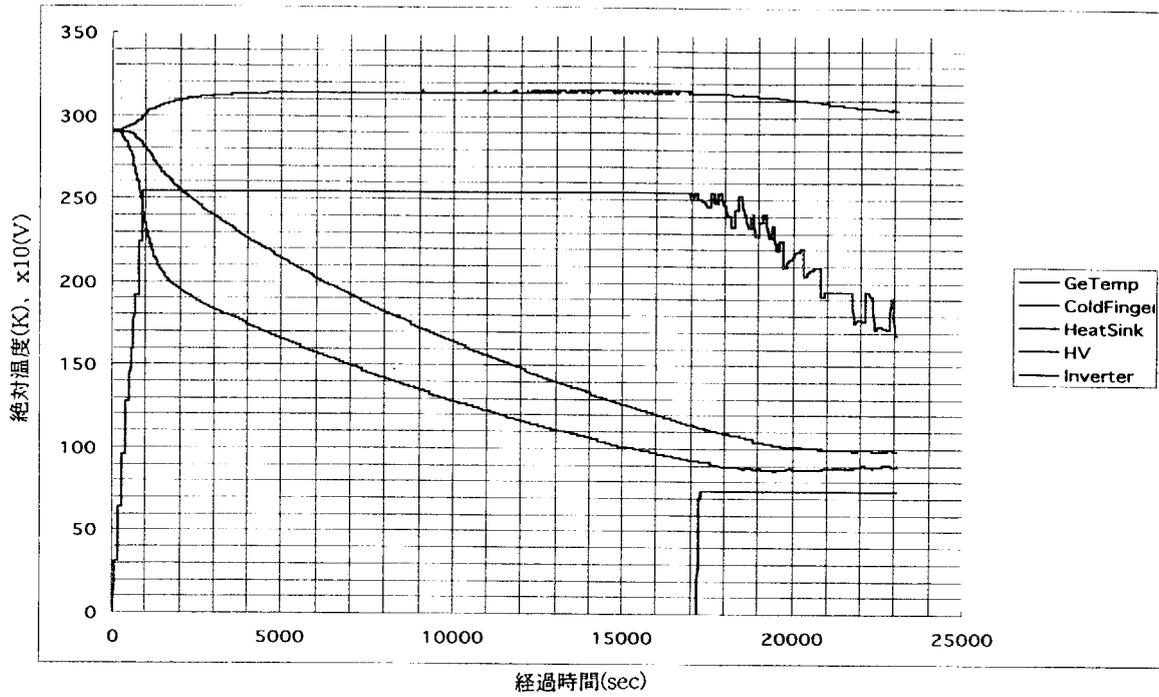


図3-4 運転情報のグラフ例

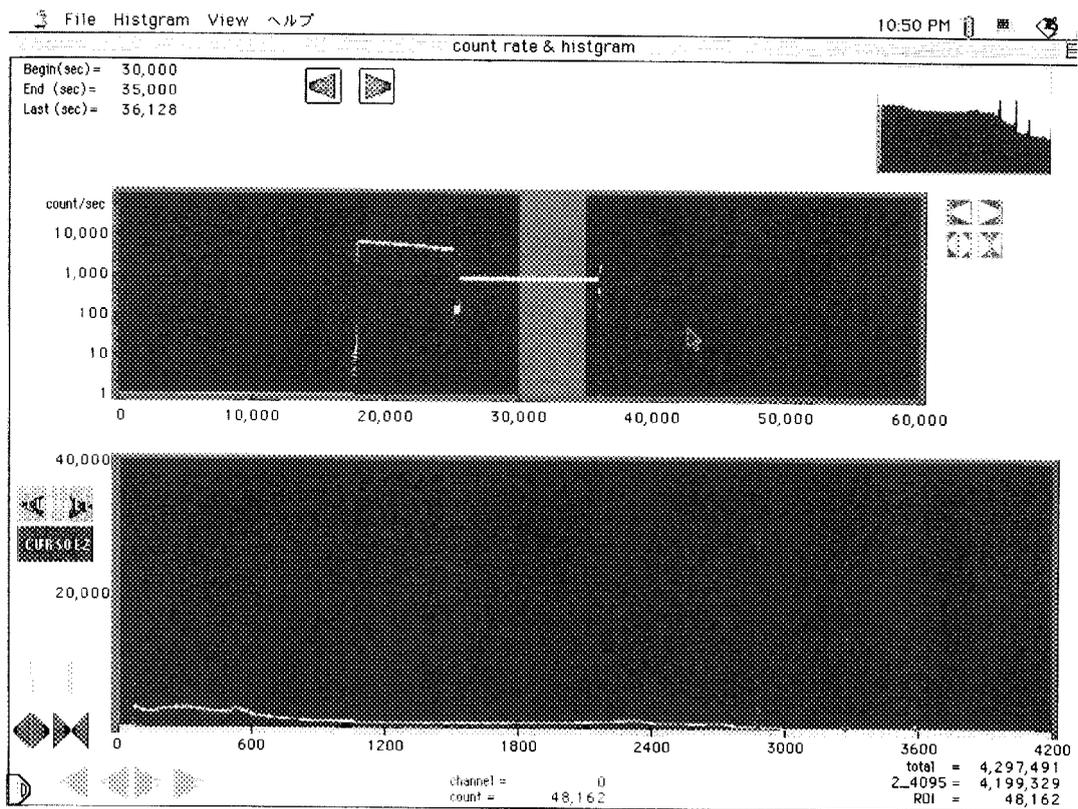


図3-5 カウントレート(上側)と波高スペクトル(下側)画面の例

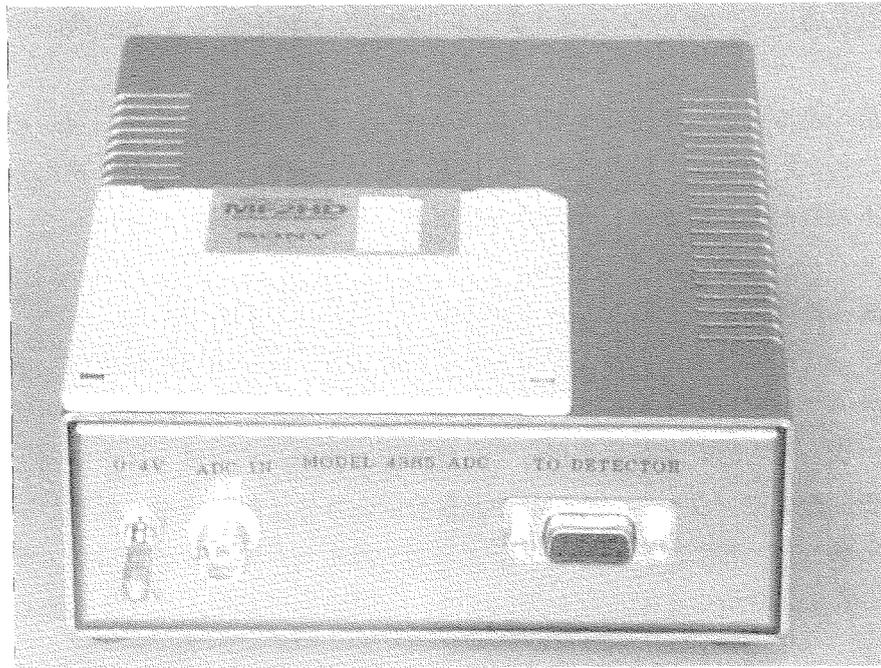


写真3-1 MODEL 4385 ADC/TRANSMITTERの 写真



写真3-2 MODEL 4386 RECEIVER(PC下側のユニット)の 写真

4. スターリング冷凍機の改良

Ge 検出器用の冷凍機として使用しているスターリング冷凍機が、寿命 4,000 時間の保証を確保されているにもかかわらず、約 500 時間の運転で騒音が大きくなり、Ge 検出器の分解能が劣化するなどの不具合が生じたので、その原因を調査して改善対策を行った。

(1) 調査と改善対策

同じタイプの Ge 検出器をランニングテストしたところ、同じような騒音が大きくなり、スターリング冷凍機のコンプレッサーが異常に摩耗していることによるものと考えられた。この異常摩耗は、コンプレッサーのガスシール部分の品質劣化と駆動時の温度上昇が原因として生じたものと推測される。そこで、ガスシール部分の品質を向上させた材料を用いた新しいタイプのコンプレッサーに交換した。また、後部ファンに従来より風量の多いものを使用し、2 個のコンプレッサーを直列に装着させることで、コンプレッサーの温度上昇を抑えた。今回施した改善対策を下記に示す。

- ① コンプレッサーを旧タイプ (SRS2110 旧) から新タイプ (SRS2110 新) のものに交換した。
- ② 後部ファンの風量を強化した。
- ③ コンプレッサーの発熱を抑えるため、最大駆動電圧を 16.5 V から 15.5 V に低下した。
- ④ メインアンプの波形整形時定数 (Shaping Time) を $6 \mu \text{sec}$ から $3 \mu \text{sec}$ に変更した。
- ⑤ 筐体カバーの取付け等のマイクロフォニックノイズ対策を施した。
- ⑥ 真空劣化対策として、化学吸着材を真空容器内に装着させた。

(2) 性能

- ① 改良後のスターリング冷凍機の性能試験として、Ge 結晶、コールドフィンガー及びヒートシンクの温度特性を測定して本 Ge 検出器の冷却試験を行った。図 4-1 に示すように、Ge 結晶の温度は 20,000 秒強で 100 K に到達することを確認した。ヒートシンクの温度はコンプレッサー最大駆動時で約 44℃であった。また、Ge 結晶の設定温度 (100 K) 維持時における Ge 結晶の温度とコールドフィンガーの温度の差は約 8 K であった。なお、このときの高圧は Ge 結晶の温度 115 K で 1500 V に印加した。
- ② 改良後のスターリング冷凍機を装備した Ge 検出器の性能試験として、 ^{60}Co の 1.33 MeV のピークに対してエネルギー分解能測定を行った。図 4-2 に示すように、半値幅が 2.3 KeV であった。この場合の測定については 8000 ch の分解能を有する MCA を使用した。

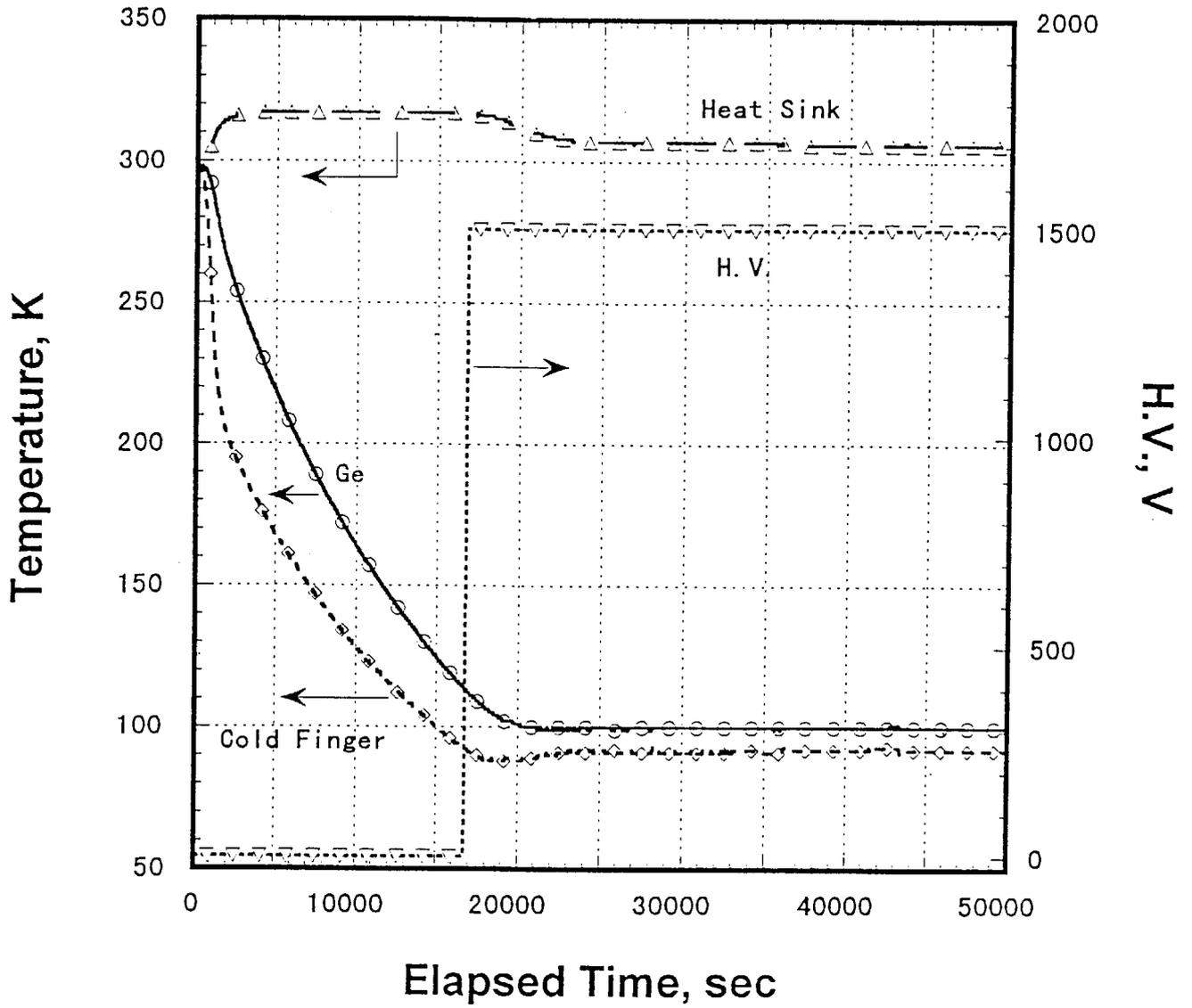


図 4-1 改良後のスターリング冷凍機による冷却試験

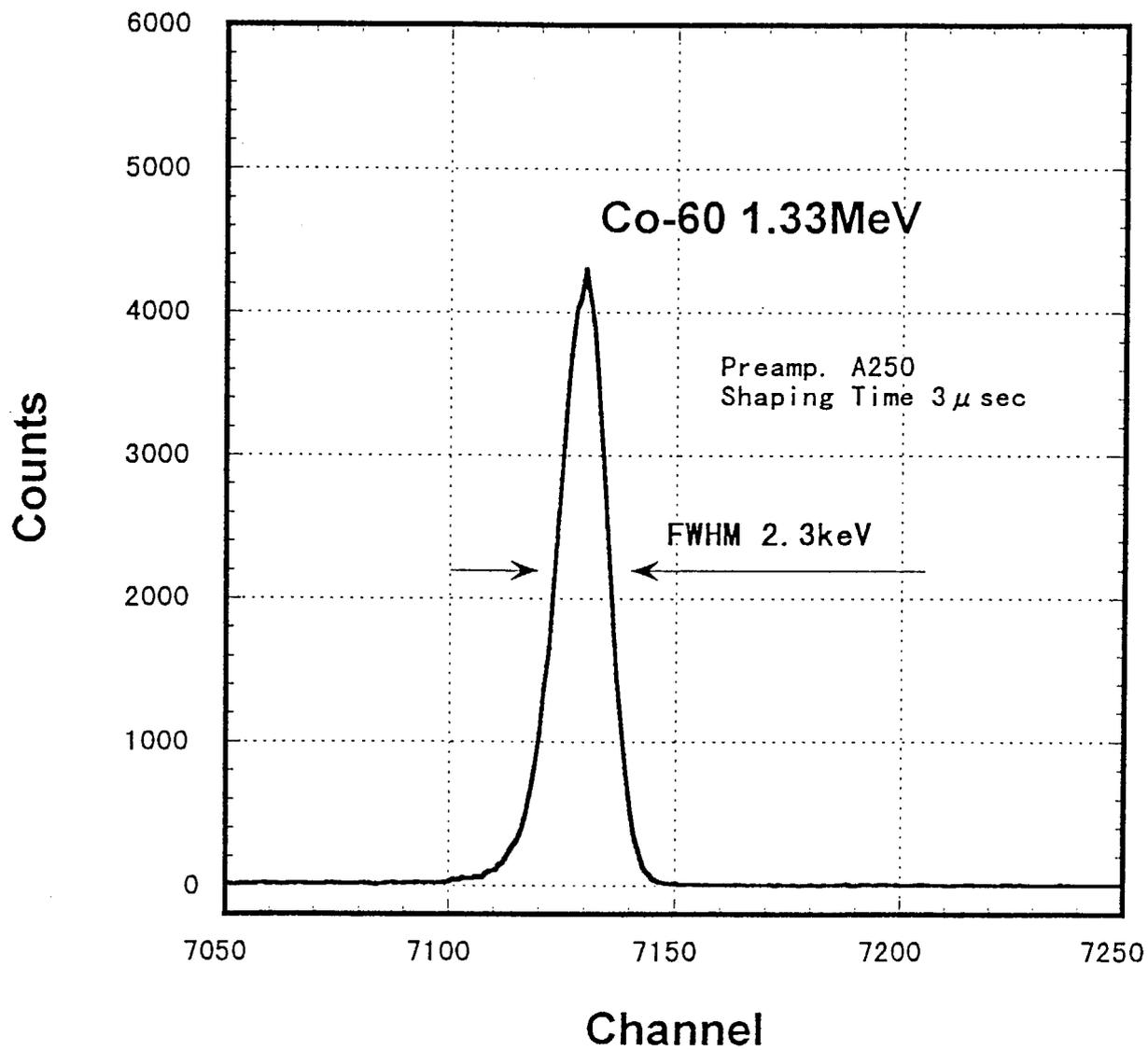


図 4-2 改良後のエネルギー分解能測定

5. 深海放射能測定用耐圧容器の製作

本耐圧容器は、深海中において放射線測定用機器を収納するためのもので、二台の耐圧容器で構成される。一台はGe検出器の部分を装填するためのもの、もう一台は電源、電子回路等の部分を収納するためのものである。本耐圧容器の使用条件が深海約3,000 mという高圧下であるために、耐圧容器の製作に当たっては容器の機密性及び耐圧性は非常に重要な要件となる。

5.1 Ge検出器用耐圧容器の製作

耐圧容器の製作に当たって、以下に示すような特徴を有するアルミニウム合金を採用した。耐圧容器本体については、①無人探査機（ドルフィン3K）に搭載するために軽量である、②中継り加工が高価なため材料がパイプ状で先端が溶接できる、③耐食性及び経済性が良い等を、耐圧容器蓋については、①軽量である、②強度がある、③耐食性及び経済性が良い等を考慮して材質を決定した。

5.1.1 機能

本耐圧容器は、以下の機能を備えている。耐圧容器の外観及び製作図について写真5-1及び5-2、図5-1にそれぞれ示す。

- ① 耐圧容器の蓋を取り外し、治具にGe検出器本体を装着でき、その出入れができる。
- ② 高圧下で海水が漏れ込まないように二重のOリングで容器蓋がシールされている。
- ③ 使用の実績のある米国のプラントナー社製のケーブルを採用している。

5.1.2 仕様

(1) 耐圧容器

最大使用水深：3,300 m

寸法：φ230 mm（外形）×φ175 mm（内径）、1041 mm（長さ）

重量：空中において約57 kg f、水中において約15 kg f

容器本体：材質、耐食性アルミニウム合金 A6061-T6
（表面硬質陽極酸化被膜処理仕上げ）

容器蓋：材質、高張力アルミニウム合金 A7075-T6
（表面硬質陽極酸化被膜処理仕上げ）

数量：1台

(2) 付属品

蓋固定ナット（MC ナイロン）	1個
治具（アルミ合金、樹脂）	1式
同軸水密コネクタ VSF-4-BCL	1個
4ピン水密コネクタ VSL-4-BCL	1個
5ピン水密コネクタ VSL-5-BCR	1個

1 2 ピン水密コネクタ XSL-12-BCP	1 個
ダミーキャップ VMF-C-FSD-HP/VSF-FLS-D	1 個
ダミーキャップ VMG-4-FSD/G-FLS-D	1 個
ダミーキャップ XSL-5-DSP	1 個
ダミーキャップ XSL-12-DSR	1 個
(3) ケーブル	
水密ケーブル VMF-C-FS/VSF-FLS-D with one ends of CN5 cable 5 m (同軸ケーブル、テスト用)	1 本
水密ケーブル VMG-4-FS/G-FLS-D with one ends of 18/4 SO cable 5 m (RS-232C シリアルケーブル、テスト用ケーブル)	1 本
水密ケーブル XSL-5-CCP with one ends of 18/5 SO cable 5 m (スターリング、AC18V 用ケーブル)	1 本
水密ケーブル XSL-12-CCR with one ends of 18/12 SO cable 5 m (DC12V、各種信号のテスト用ケーブル)	1 本

Ge 検出器用耐圧容器の材質及び性質の詳細については表 5-1 及び 5-2 にそれぞれ示す。

5.1.3 性能

高圧実験水槽内に Ge 検出器用耐圧容器を挿入し、水槽及び配管内の空気を逃がした後プランジャーポンプにより水圧をかけて圧力ゲージが 325 kg f/cm^2 に達した時に弁を閉じ約 4 時間の間、圧力を維持した。その後、ゆっくり弁を開いて圧力をゼロにし、水槽より容器を取り出して容器の形状の変形及び水漏れ等を調べた結果、特に異常は認められなかった。なお、耐圧試験状況及び耐圧試験記録については写真 5-3 及び 5-4、図 5-2 にそれぞれ示す。

5.2 電源用耐圧容器の製作

電源用耐圧容器の製作に当たっては、前述の 5.1 に示した Ge 検出器用耐圧容器の製作と同様の条件で製作した。

5.2.1 機能

本耐圧容器には以下の機能を備えている。耐圧容器の外観及び製作図について写真 5-5 及び 5-6、図 5-3 にそれぞれ示す。

- ① 耐圧容器の蓋を取り外し、治具に電源、電子回路等の機器を装着でき、その出入れができる。
- ② 高圧下で海水が漏れ込まないように二重の O リングで容器蓋がシールされている。
- ③ 使用実績のある米国のプラントナー社製のケーブルを採用している。

なお、図 5-4 に示すように電源、検出信号等のケーブルを介して、電源用耐圧容器、Ge 検出器用耐圧容器及びドルフィン 3 K に接続できる機能を備えている。

5.2.2 仕様

(1) 耐圧容器

最大使用水深：3,300 m

寸法：φ 230 mm (外形) × φ 175 mm (内径)、913 mm (長さ)

重量：空中において約 6.5 kg f、水中において約 2.8 kg f

容器本体：材質、耐食性アルミニウム合金 A 6 0 6 1 - T 6

(表面硬質陽極酸化被膜処理仕上げ)

容器蓋：材質、耐張力アルミニウム合金 A 7 0 7 5 - T 6

(表面硬質陽極酸化被膜処理仕上げ)

数量：1台

(2) 付属品

蓋固定ナット (MC ナイロン)	2個
治具 (アルミ合金)	1式
2ピン水密コネクタ XSG-2-BCL	1個
12ピン水密コネクタ XSL-12-BCP	1個
5ピン水密コネクタ XSG-5-BCR	1個
12ピン水密コネクタ XSK-12-BCL	1個
ダミーキャップ RMG-2-FSD-HP/G-FLS-D	1個
ダミーキャップ RMK-12-FSD/K-FLS-D	1個
ダミーキャップ XSL-5-DSP	1個
ダミーキャップ XSL-12-DSR	1個

(3) ケーブル

水密ケーブル RMG-2-FS/G-FLS-D with 16/12 SO cable 5m and RMG-2-MP/G-MLS-D on the other end (ドルフィン 3 K → 耐圧容器へ送るための電源用ケーブル)	1本
水密ケーブル RMG-2-FS/G-FLS-D with one of 18/4 SO cable 5 m (電源 AC125V テスト用ケーブル、実際には使用しない)	1本
水密ケーブル XSL-5-CCP with one ends of 18/5 SO cable 5 m (DC12 V 出力、各種信号のテスト用ケーブル)	1本
水密ケーブル XSL-12-CCR with one ends of 18/12 SO cable 5 m (AC18 V 出力用のテストケーブル)	1本
水密ケーブル RMG-12-FS/K-FLS-D with one ends of 18/12 SO cable 1.5 m (母船 → 電源用耐圧容器への電源用ケーブル)	1本
水密ケーブル VMG-4-FS/G-FLS-D with both of 18/4 SO cable 3 m (Ge 検出器用耐圧容器 → ドルフィン 3 K、シリアルケーブル)	1本
水密ケーブル VMG-C-FS/VSF-FLS-D with both ends of CN5 cable 3 m (Ge 検出器用耐圧容器 → ドルフィン 3 K、同軸ケーブル)	1本
水密ケーブル XSL-5-CCP with 16/5 SO cable 2m and XSL-5-CCR	

on the other end (電源用耐圧容器→ Ge 検出器用耐圧容器、AC18V スターリング用電源ケーブル)	1 本
水密ケーブル XSL-12-CCR with both ends of 16/12 SO cable 2 m (電源用耐圧容器→ Ge 検出器用耐圧容器、電源用 DC12V、各種信号 用ケーブル)	1 本

電源用耐圧容器の材質及び性質の詳細については Ge 検出器用耐圧容器のそれらと同様である(表 5-1 及び 5-2)。

5.2.3 性能

電源用耐圧容器の性能試験については Ge 検出器用耐圧容器の場合と同じ要領で実施したところ、水漏れ及び形状の変形等は認められなかった。

表 5-1 電源用及び Ge 検出器用耐圧容器本体の材質及び性質

1. 容器材質：A6061-T6

		化 学 成 分 (%)										
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	その他	
											個々	合計
規格値	以上	0.40		0.15		0.8	0.04					
	以下	0.8	0.7	0.40	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	RE	<0.05	<0.15
電源用耐圧容器		0.67	0.2	0.36	0.04	1.0	0.08	0.01	0.02	RE	<0.05	<0.15
Ge 検出器用 "		0.65	0.2	0.33	0.01	1.0	0.08	0.02	0.02	RE	<0.05	<0.15

RE：残部

2. 機械的性質

規格

引張強さ：265 N/mm² 以上、

耐力：245 N/mm² 以上、伸び：10 %以上

電源用容器

検査結果 (合格)

引張強さ：351 N/mm²、

耐力：336 N/mm²、伸び：14.4 %

Ge 検出器用容器

検査結果 (合格)

引張強さ：375 N/mm²、

耐力：365 N/mm²、伸び：14.0 %

表 5-2 電源用及び Ge 検出器用耐圧容器蓋の材質及び性質

1. 容器蓋材質：A7075-T6

		化 学 成 分 (%)										
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	その他	
											個々	合計
規格値	以上			1.2		2.1	0.18	5.1				
	以下	0.40	0.50	2.0	0.30	2.9	0.28	6.1	0.20		<0.05	<0.15
電源用容器蓋		0.67	0.2	0.36	0.04	1.0	0.08	0.01	0.02	RE	<0.05	<0.15
Ge 検出器用 "		0.65	0.2	0.33	0.01	1.0	0.08	0.02	0.02	RE	<0.05	<0.15

RE：残部

2. 機械的性質

規格 引張強さ：－ N/mm^2 以上、
 耐力：－ N/mm^2 以上、伸び：－ %以上
 (特に定めがなく検査結果の値を用いて設計を行う)

電源用蓋

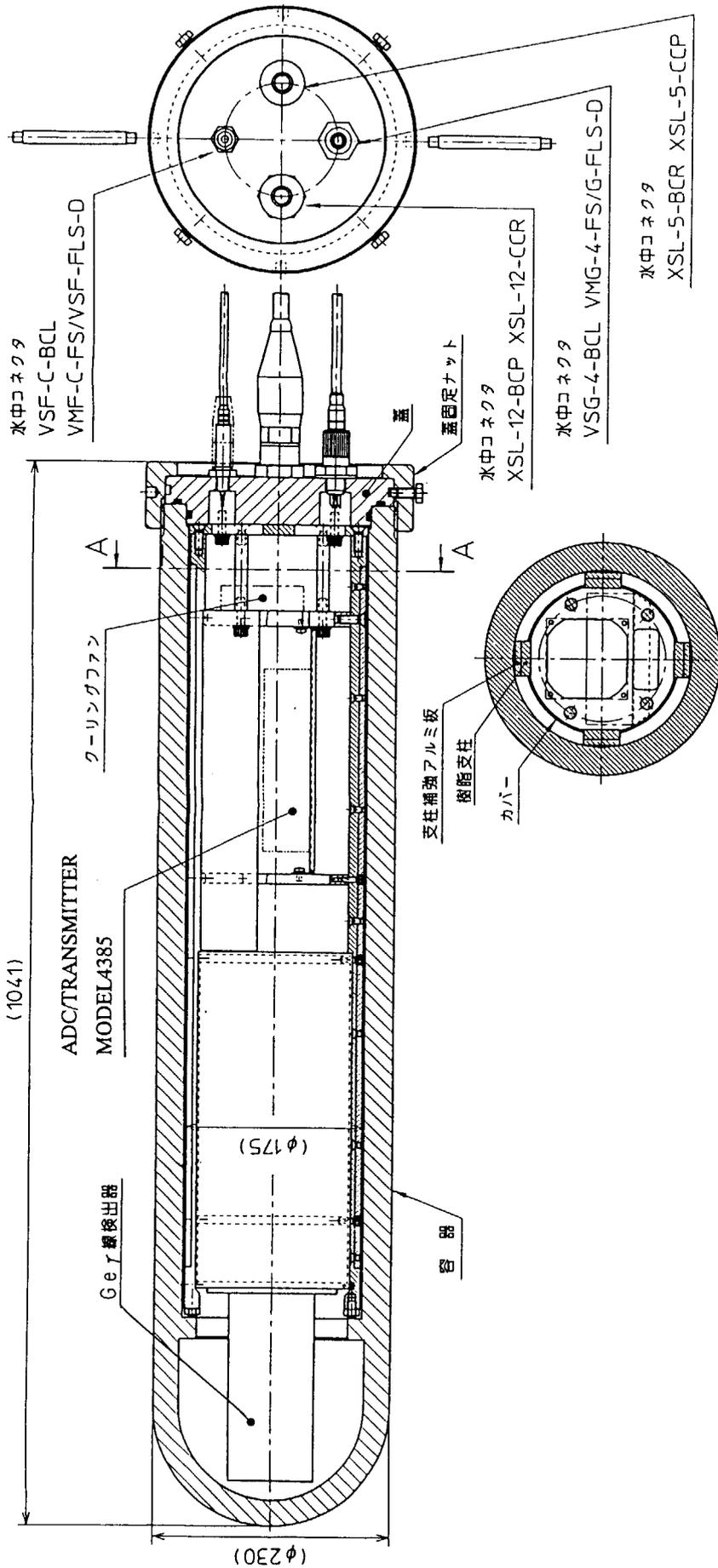
検査結果 (合格)

引張強さ：533 N/mm^2 、
 耐力：432 N/mm^2 、 伸び：8.4 %

Ge 検出器用蓋

検査結果 (合格)

引張強さ：504 N/mm^2 、
 耐力：407 N/mm^2 、 伸び：11.0 %



A - A 断面

図 5-1 Ge 検出器用耐圧容器製作図

仕様
 使用水深 : 最大3300m
 材質 : 容器 A6061-T6, 蓋 A7075-T6, 蓋固定ナット ナイロン
 表面処理 : 硬質陽極酸化皮膜処理
 重量 : 空中 約57kgf 水中 約15kgf

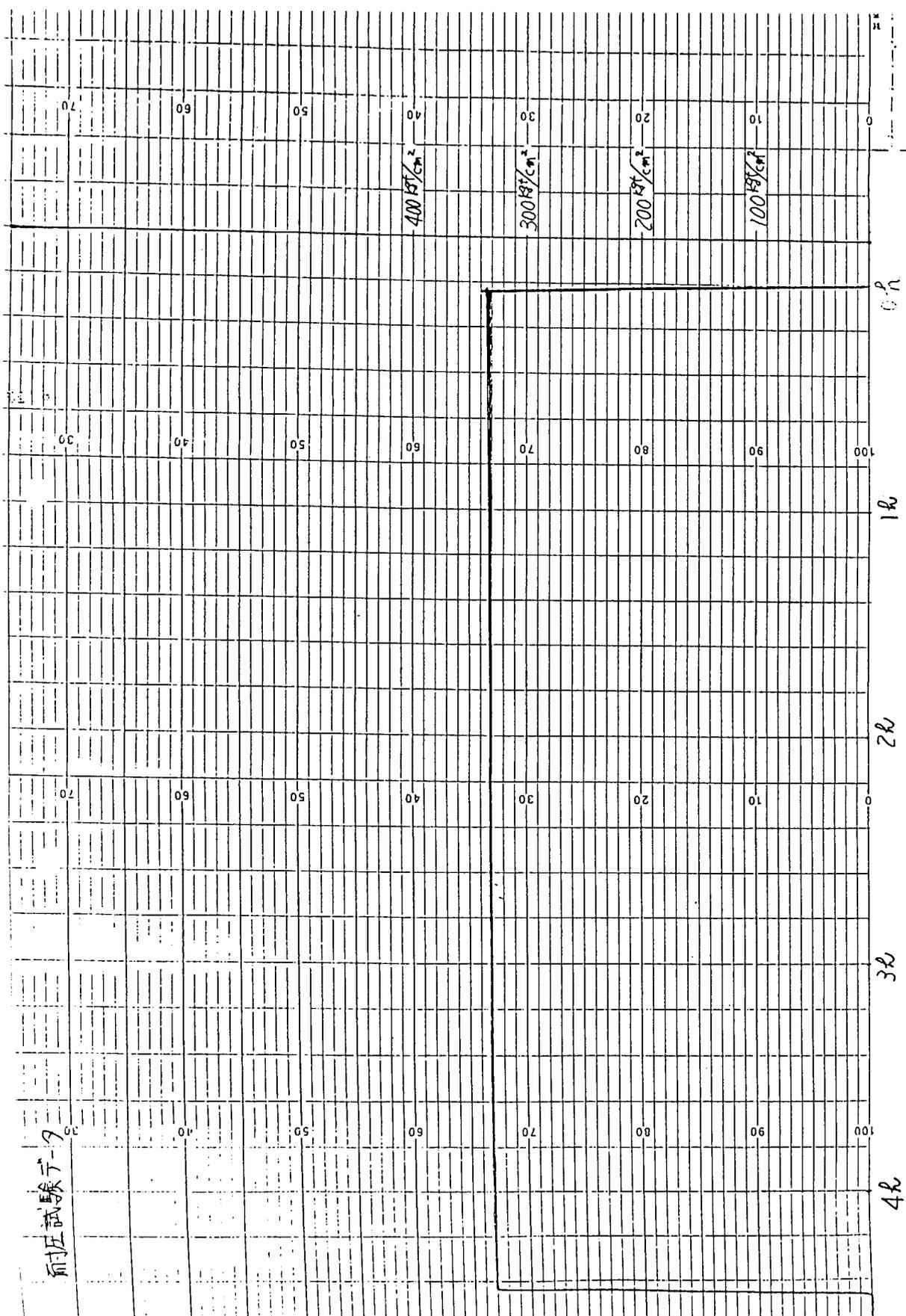
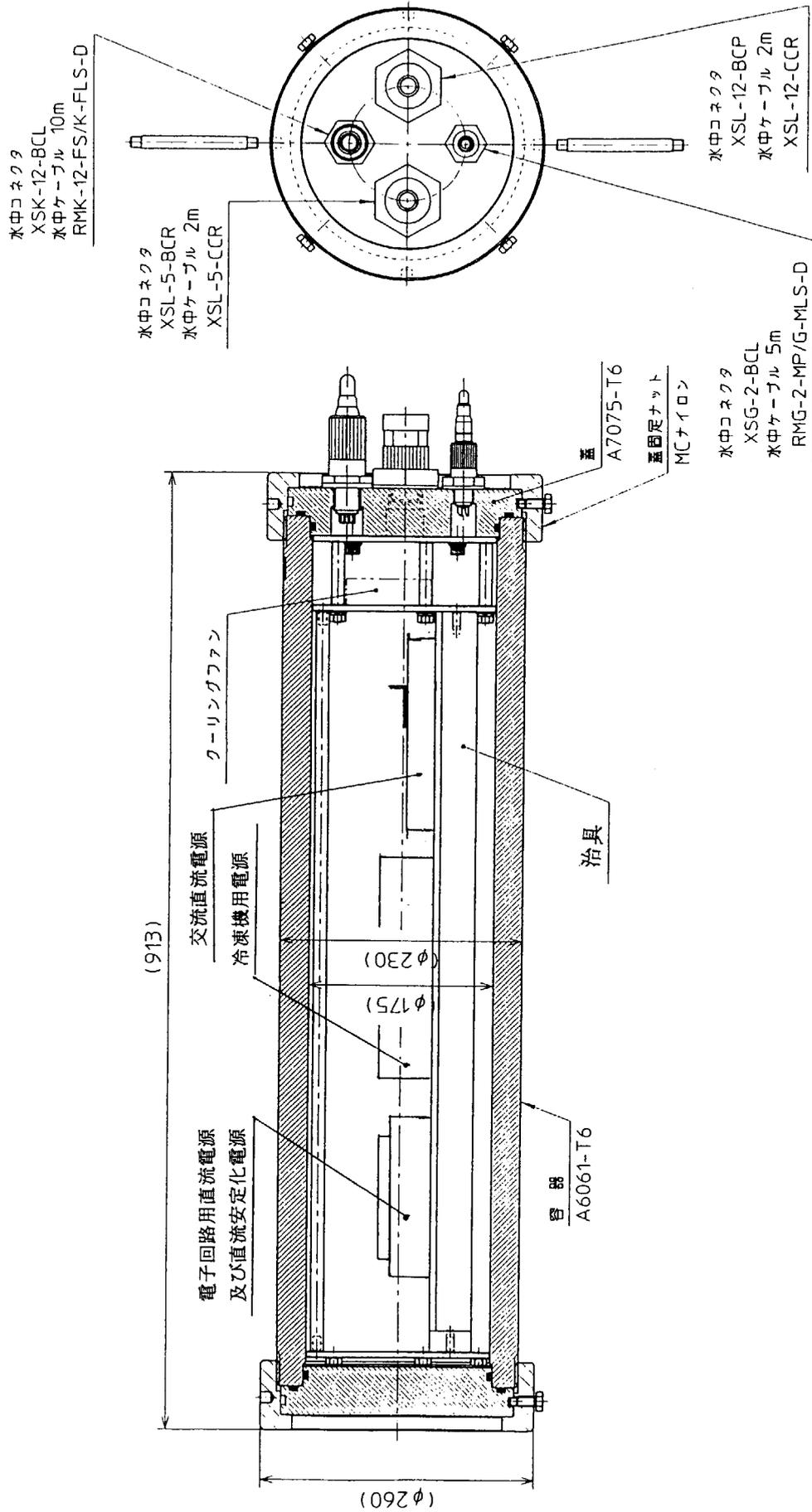


図 5-2 耐圧容器の耐圧試験記録



仕様
 使用水深 : 最大3300m
 材質 : 容器 A6061-T6, 蓋 A7075-T6, 蓋固定ナット ナイロン
 表面処理 : 硬質陽極酸化皮膜処理
 重量 : 空中 約65kgf 水中 約28kgf

図 5-3 電源用耐圧容器製作図

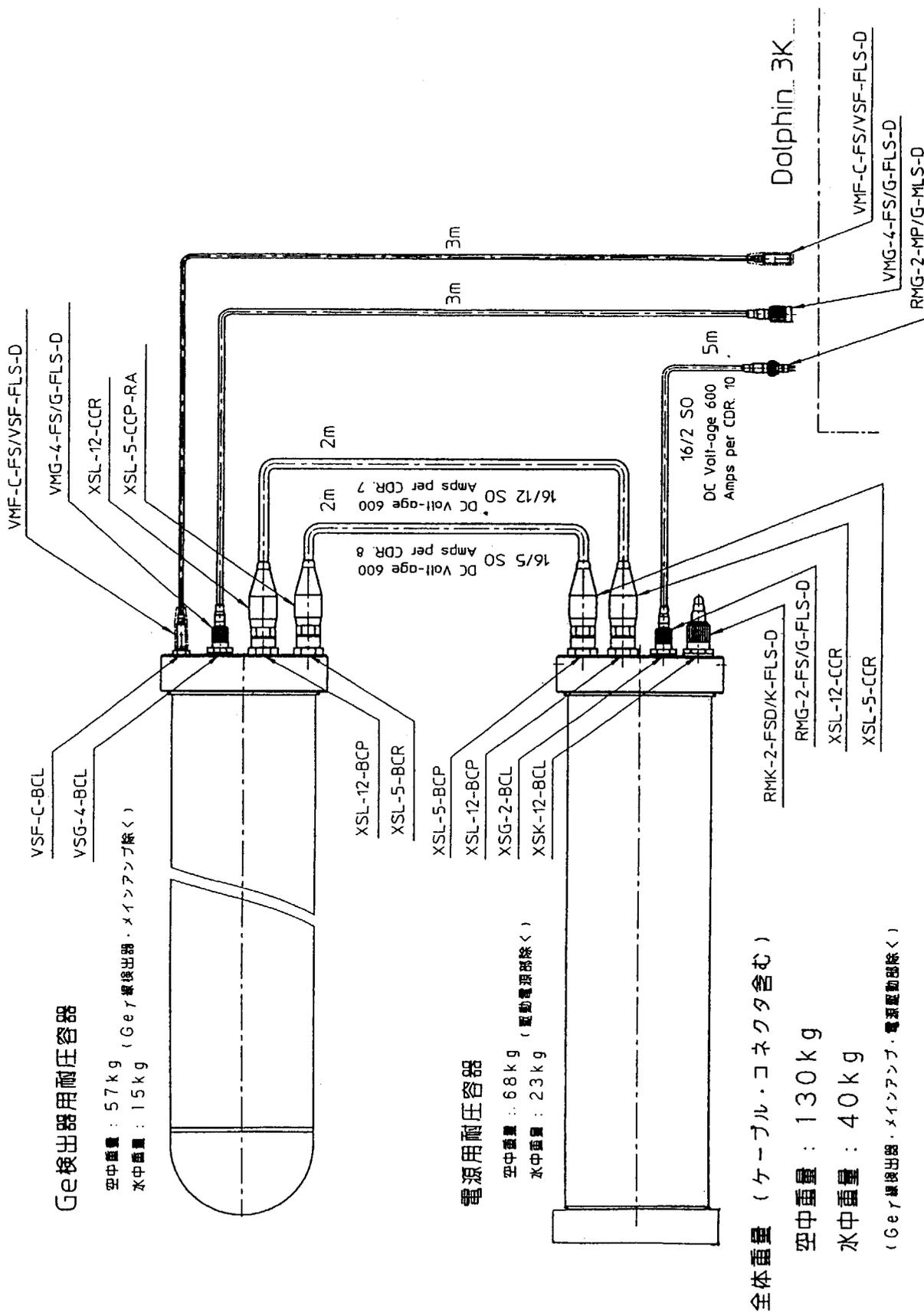


図 5-4 電源及び検出器用ケーブル取り付け図

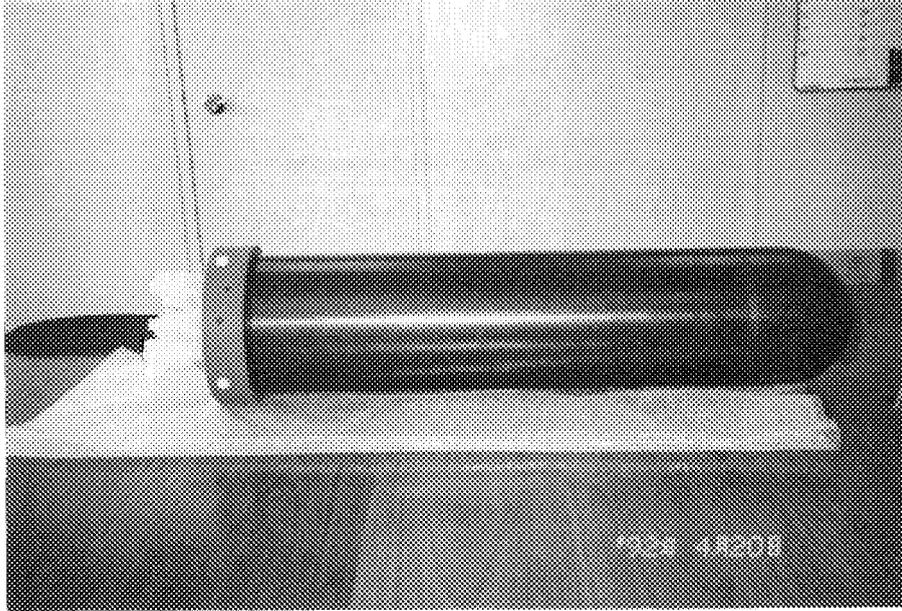


写真 5-1 小型電気冷却式 Ge 検出器用耐圧容器（側面図）

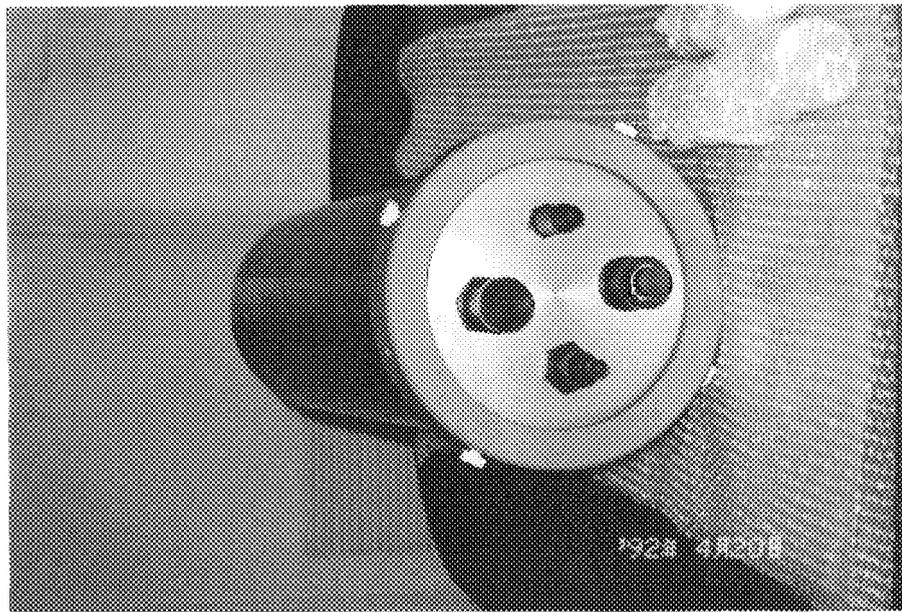


写真 5-2 小型電気冷却式 Ge 検出器用耐圧容器（正面図）

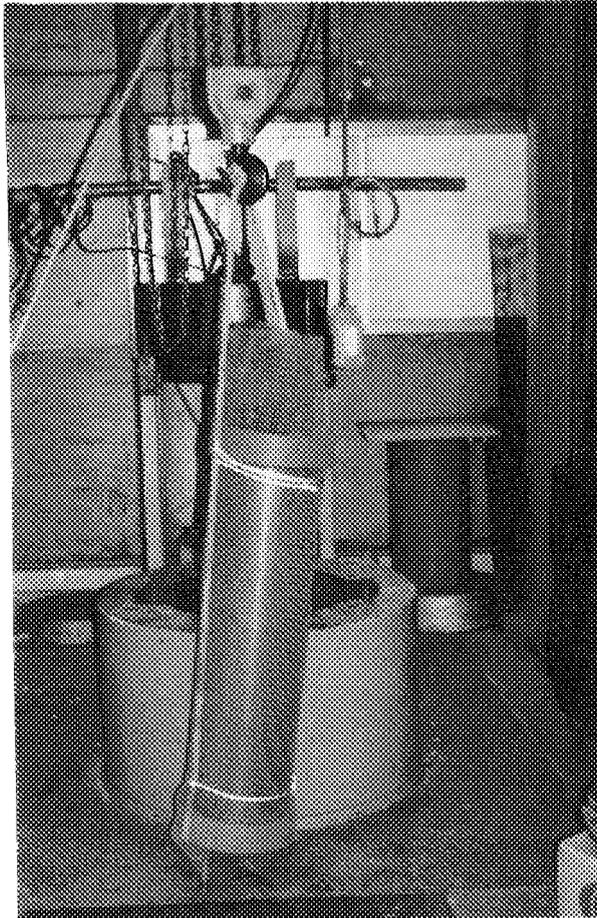


写真 5-3 耐圧容器の耐圧試験状況（高圧実験水槽へ挿入前）

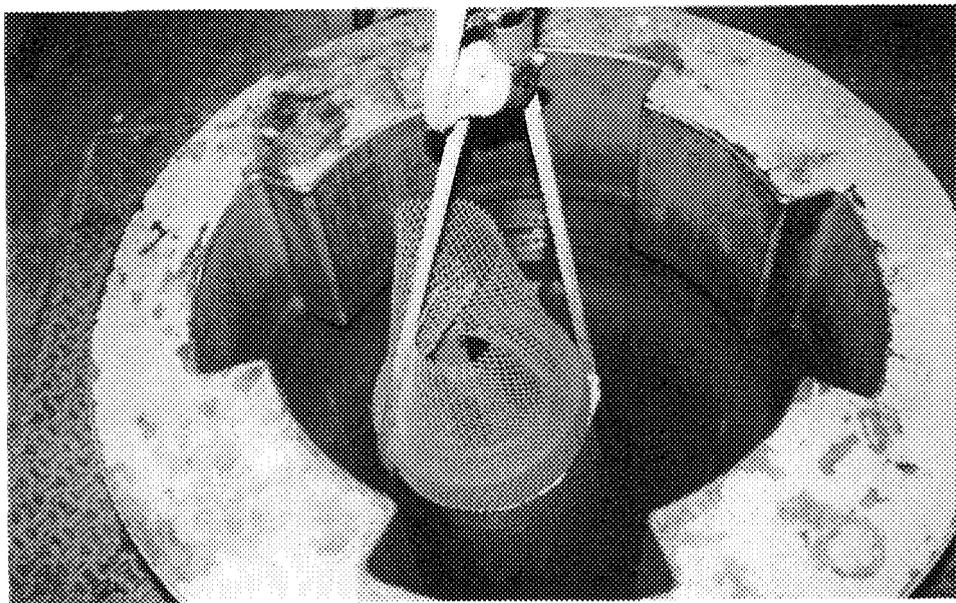


写真 5-4 耐圧容器の耐圧試験状況（高圧実験水槽へ挿入時）



写真 5-5 電源用耐圧容器（側面図）

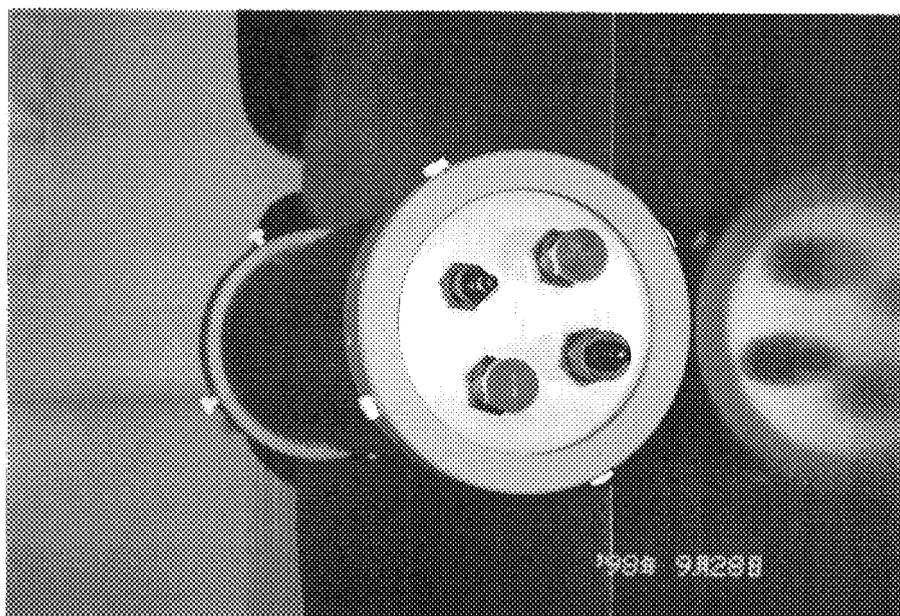


写真 5-6 電源用耐圧容器（正面図）

6. 深海放射能測定用電源の製作及び調整

6.1 深海放射能測定器用電源の製作

本電源は、深海放射能測定器としての小型電気冷却式 Ge 検出器への電力供給用に製作した電源であり、検出器内部のスターリング冷凍機に供給する低圧の交流電源及び各種制御回路用、前置増幅器等用の電子回路用直流電源から構成され、またこれらの電源を駆動するために交流から直流に変換する電源及び直流を安定化させる直流安定化電源も内蔵している。深海放射能測定器用電源のブロックダイアグラムを図 6-1 に示す。

6.1.1 機能

本電源は、以下の機能を備えている。

- ① 商業電源入力回路として動作環境に応じて使い分けできるように、2系統を備えている。これにより2系統同時又は片側のみの、両モードにて運転が可能である。
- ② 電子回路用直流電源の安定化を行い、リップルノイズ等も最小限に押さえられる。
- ③ スターリング冷凍機用交流電源は、外部コントロール信号により 0 V ~ 17 V の最大出力電圧までの電圧可変機能を備えている。
- ④ 内部温度が上昇した場合の安全機能を備えている。

6.1.2 仕様

電源 入力 : 交流 90V ~ 250V (50Hz ~ 400Hz) 2系統
 出力 : 交流 0V ~ 17V (外部コントロール信号により可変) 最大 20A 50Hz サイン波
 直流 12V 最大 4A リップルノイズ 10mV 以下
 変換 効率 : 70 % 以上
 安全 装置 : 内部ヒートシンク温度 80℃ 以上で、出力シャットダウン
 消費 電力 : 最大 900W 以下
 重 量 : 63.7 Kg (含む外部耐圧容器)

6.1.3 性能

- ① 本電源の性能試験として、両入力共に AC100V を印加し出力電圧を測定した結果、スターリング冷凍機用低圧交流電源及び電子回路用直流電源が正常に動作していることを確認した。
- ② 本電源動作中、2入力 AC 電源の電源供給片側を切っても、電圧出力には何ら変化のないことを確認した。
- ③ スターリング冷凍機用低圧交流電源は、外部コントロール信号により 0V ~ 17V 付近まで変化することを確認した。

6.2 深海放射能測定器用電源の調整

深海放射能測定器用電源を製作した後、前述に製作した耐圧容器内の治具に装着し、小型電気冷却式 Ge 検出器に接続して調整を行った。

- ① 耐圧容器内部の電源用治具に取り付けた各種電源を耐圧容器の固定治具に装着し、耐圧容器から外した状態（写真 6-1）で電源を供給した結果、本電源が正常に動作することが確認できた。
- ② 本電源の出力を小型電気冷却式 Ge 検出器に接続し電源を供給した結果、スターリング冷凍機及び各種制御回路が正常に動作することが確認できた。

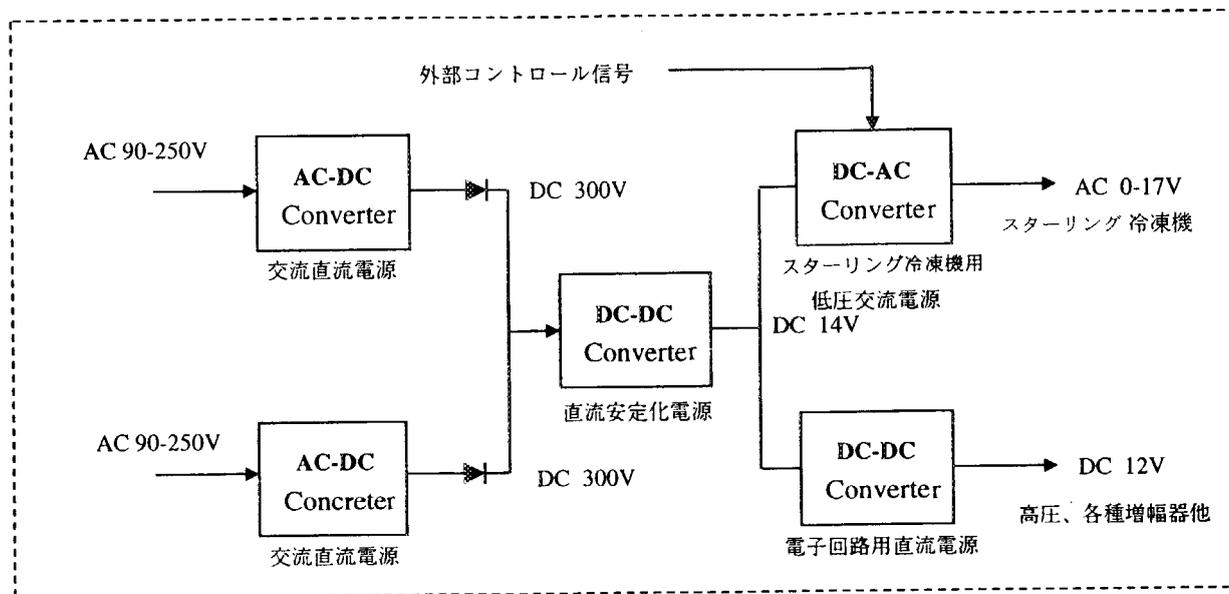


図 6-1 深海放射能測定器用電源ブロックダイヤグラム

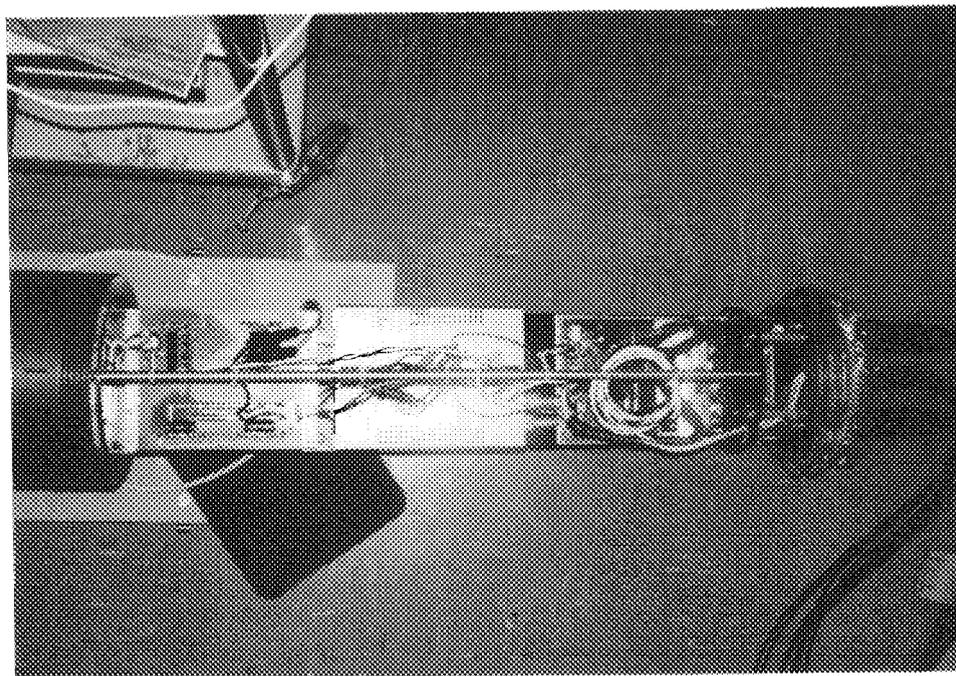


写真 6-1 本電源を耐圧容器から外した状態

7. 水中における性能試験

7.1 スターリング冷凍機改良前

7.1.1 目的

海水中における総合試験を行う前に簡易プールを利用して、小型電気冷却式 Ge 検出器用の耐圧容器内に水が浸入しないことを確認するとともに、スターリング冷凍機による Ge 検出器の冷却試験及びエネルギー分解能測定試験を行い、液体窒素温度まで冷却でき、かつ優れた分解能を有することを確認する。

7.1.2 方法

水中試験は以下の手順で行った。

- ① 直径約 3m の簡易プールを用意し、内部に水道水を約 40cm の深さになるように入れる。
- ② 小型電気冷却式 Ge 検出器を耐圧容器に収め、耐圧蓋を装着する。
- ③ 耐圧蓋に取り付けられた水中コネクタと小型電気冷却式 Ge 検出器用の 2.1 で製作した試験用電源からのケーブルを接続し耐圧容器を簡易プールに沈める。
- ④ 小型電気冷却式 Ge 検出器に電源を投入した後、スターリング冷凍機による冷却試験として、Ge 結晶、コールドフィンガー、ヒートシンクの冷却温度特性、インバータ電源の動作特性及び高圧電源の出力上昇特性を調べ、Ge 検出器温度が 100K に到達するまでの時間を測定する。
- ⑤ Ge 検出器の温度が 100K に到達した後、エネルギー分解能測定試験として、耐圧容器（表面）先端より 26cm の位置に ^{60}Co 線源（約 $3\ \mu\text{Ci}$ ）を設置し、エネルギー分解能を測定する。水中試験を行う前に室内で冷却試験及びエネルギー分解能測定試験を行い、それらの試験と水中試験との結果を比較した。写真 7-1 に室内試験、写真 7-2 に水中試験の様子をそれぞれ示す。

7.1.3 結果

- ① 室内での冷却試験の結果を図 7-1、水中での冷却試験の結果を図 7-2 にそれぞれ示す。水中試験では室内試験と同様に、インバータ電源及び高圧電源は正常に動作していることが確認できた。スターリング冷凍機の性能について、室内試験では、図 7-1 に示すように Ge 結晶の温度が 100K に達するのに約 26,000 秒かかっているのが確認できたが、水中試験では、図 7-2 に示すように Ge 結晶の温度が 100K に達するのに約 28,000 秒かかった。水中試験においては、Ge 結晶が 100K になるまでの時間が室内試験よりも約 2,000 秒多くかかった。この差は、室内での試験においては耐圧容器蓋を開けて行い、水中での試験においては耐圧容器の蓋を閉めたために、スターリング冷凍機の熱交換効率の違いによるものと考えられる。
- ② ^{60}Co 1.33MeV のピークに対して室内試験でのエネルギー分解能は 3.10KeV であった。その結果を図 7-3 に示す。同様の方法で水中では 2.71KeV であった。その結果を図 7-4 に示す。室内及び水中試験での分解能の差が 0.39KeV である。耐圧容器外部の温度環境が、室内 22℃ に対し水中 9℃ である。室内試験での分解能が大きくなったのは、スターリング冷凍機の熱交換効

- 率が水中試験に比べ良くないために、スターリング冷凍機に加わる電圧が高くなり、スターリング冷凍機の振動が増えて、マイクロフォニックノイズが増えたことによるものと考えられる。
- ③ ①と②の試験終了後、水中から耐圧容器を取り出して耐圧容器の蓋を開けたところ、水漏れがないことを目視によって確認した。

7.2 スターリング冷凍機改良後

7.2.1 目的

7.1 の改良前の水中性能試験を行った後にスターリング冷凍機本体を改良し、また、耐圧容器内に組み込む深海放射能測定器用電源を製作しているため、改良後のスターリング冷凍機による Ge 検出器の冷却試験及びエネルギー分解能測定試験を 7.1 の改良前の水中性能試験と同様に行うとともに、電源用耐圧容器も水中に沈めて各部分に水が浸入しないことを確認する。

7.2.2 方法

水中試験は、7.1.2 で記述した方法と同様に行った。電源は 2.1 で製作した試験用電源を使用せず、前述に製作した深海放射能測定器用電源を使用し、ケーブルは改良後のスターリング冷凍機と接続した。水中試験を行う前に室内で冷却試験及びエネルギー分解能測定試験を行い、それらの試験と水中試験との結果を比較した。写真 7-3 に室内試験、写真 7-4 に水中試験の様子をそれぞれ示す。

7.2.3 結果

- ① 室内での冷却試験の結果を図 7-5、水中での冷却試験の結果を図 7-6 にそれぞれ示す。水中試験では室内試験と同様に、深海放射能測定器用電源、インバータ電源及び高圧電源は正常に動作していることが確認できた。スターリング冷凍機の性能については、室内試験では、図 7-5 に示すように Ge 結晶の温度が 100K に達するまでの時間が約 21,000 秒かかった。水中試験では、図 7-6 に示すように室内試験と同様に約 21,000 秒で Ge 結晶が 100K に達したことが確認できた。7.1 の試験結果と同様に、室内試験では、耐圧容器の蓋を開いた状態で行い、水中試験では蓋を閉じた状態で行った。これらの結果から、Ge 結晶の温度が 100K に達する時間がいずれも同じであり、また Ge 結晶の温度が 100k に達する時間が 7.1 に試験結果と比べて約 6,000 秒以上早くなったことが確認できた。これは、スターリング冷凍機の改良によって冷却効率が上昇したものと考えられる。
- ② ^{60}Co の 1.33MeV のピークに対して、室内試験でのエネルギー分解能は 2.57KeV であり、水中試験では 2.66KeV であった。この場合、線源の位置を耐圧容器表面より 5cm の位置にした。それらの結果を図 7-7 及び図 7-8 にそれぞれ示す。室内及び水中試験でのエネルギー分解能の差が、僅か 0.09KeV である。耐圧容器外部の温度環境は、室内 24℃ に対し水中 10℃ である。温度環境は、7.1 の試験と同様な差がある。この分解能における僅かな差は、スターリング冷凍機の改良により冷凍機に加わる電圧に関係なく振動が押さえられたことによって、マイクロフォニックノイズが減少したために、エネルギー分解能が改善されたことによるものと考え

られる。また、水中試験が室内に比べ分解能が多少悪い結果になったのは、水中で放射線散乱が起きたためによるものと考えられる。

- ③ ①と②の試験終了後、水中から Ge 検出器用及び電源用耐圧容器をそれぞれ取り出して耐圧容器の蓋を開けたところ、いずれも水漏れのないことを目視によって確認した。

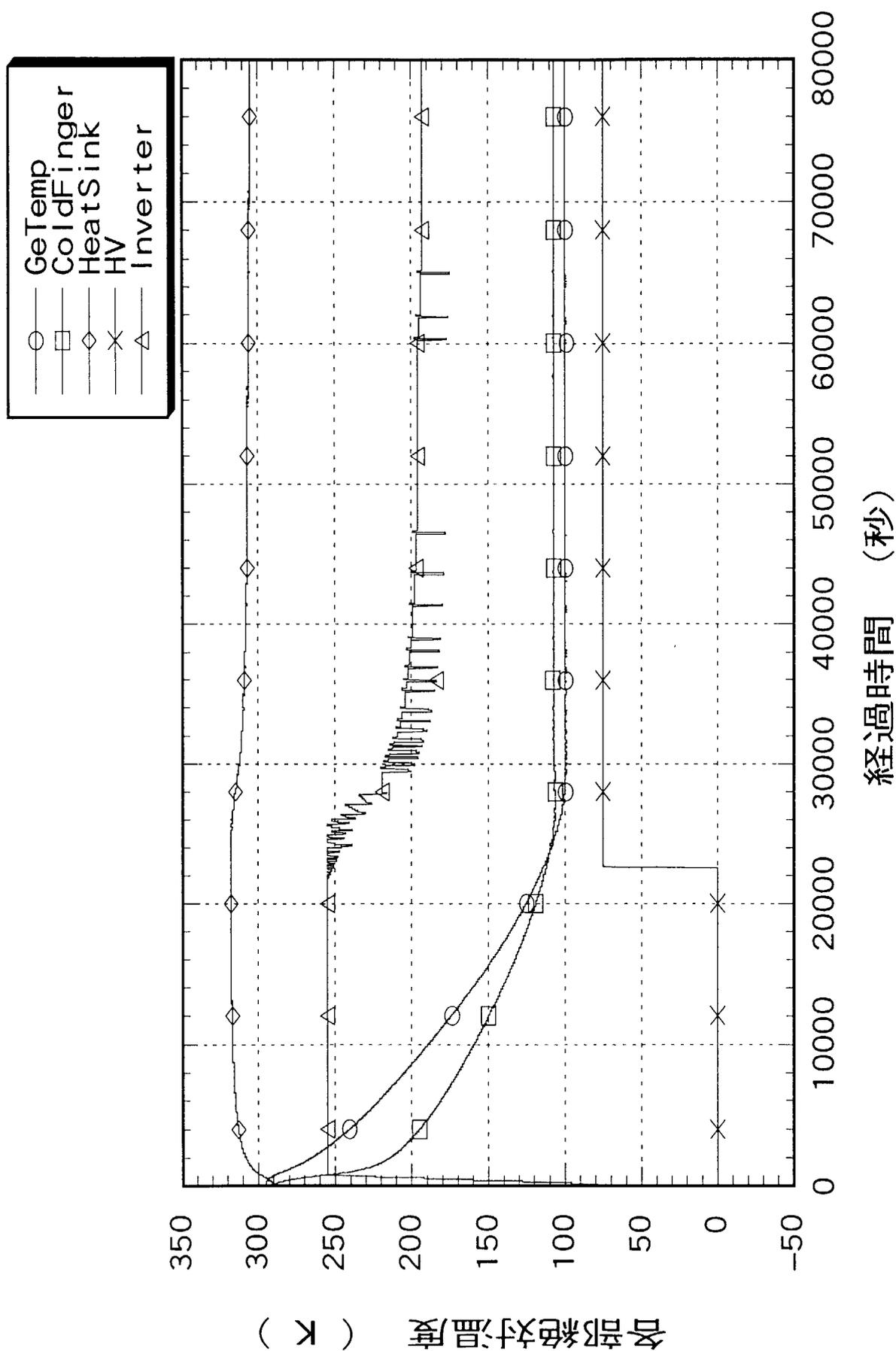


図 7-1 室内での冷却試験 (改良前)

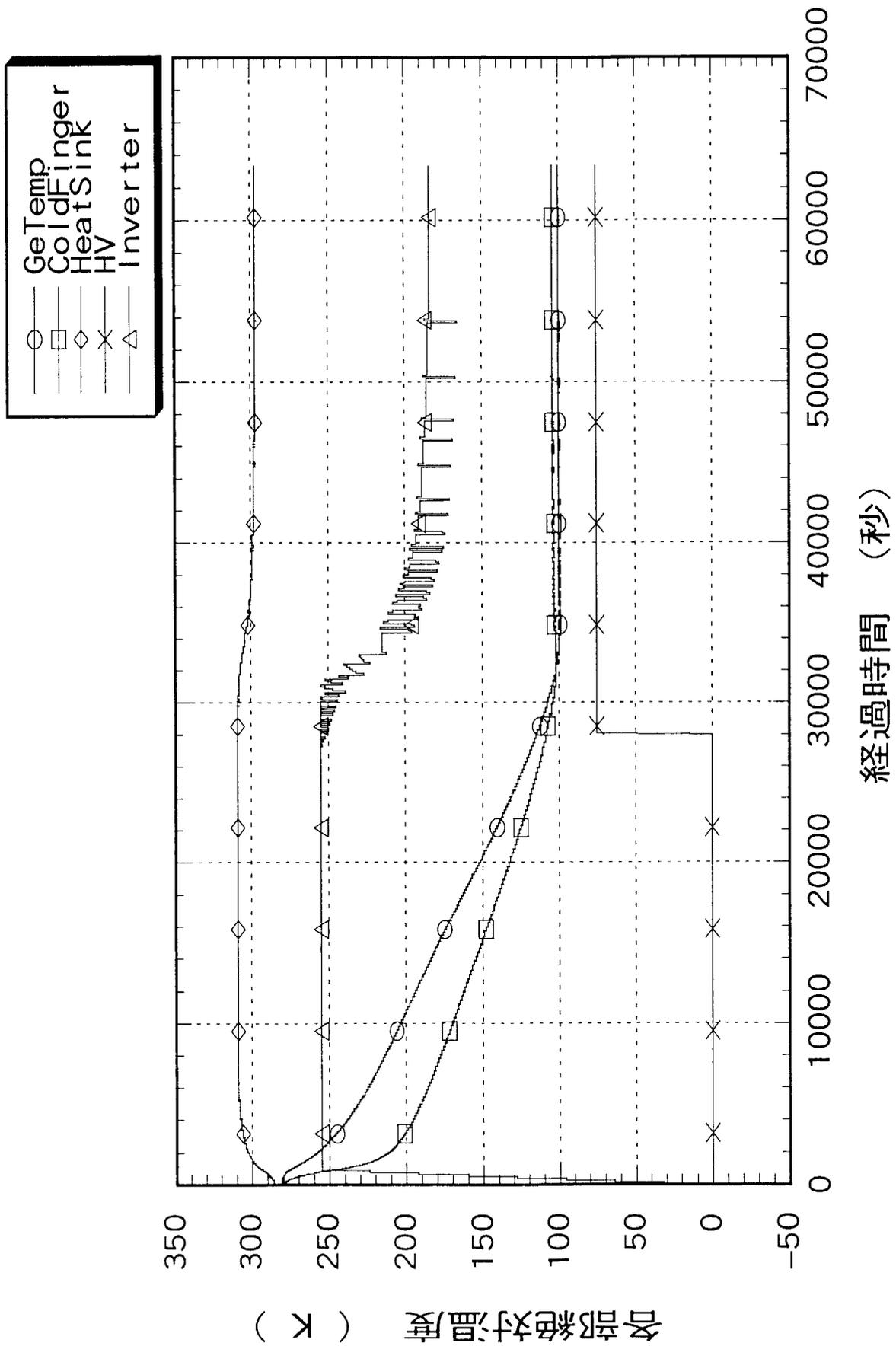


図 7-2 水中での冷却試験 (改良前)

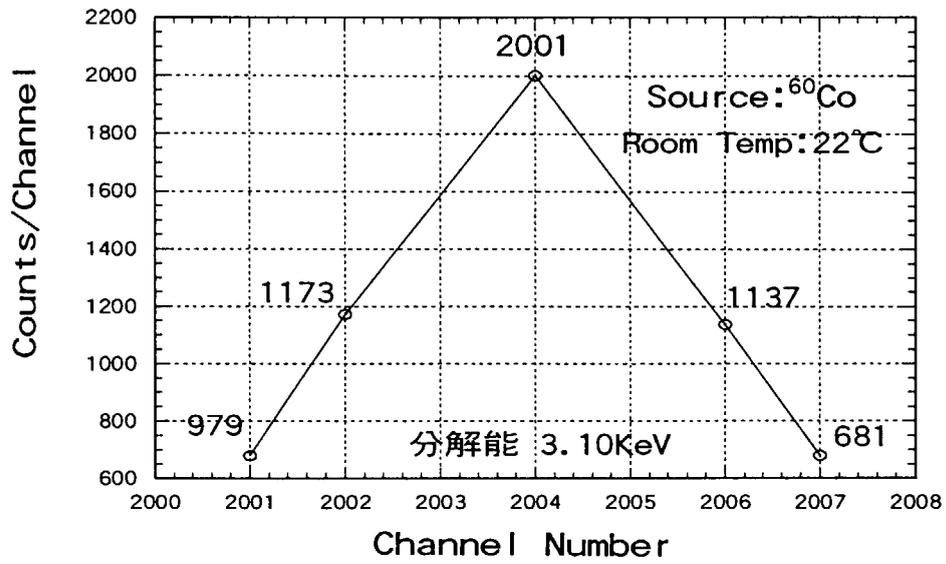


図 7-3 室内でのエネルギー分解能測定試験 (改良前)

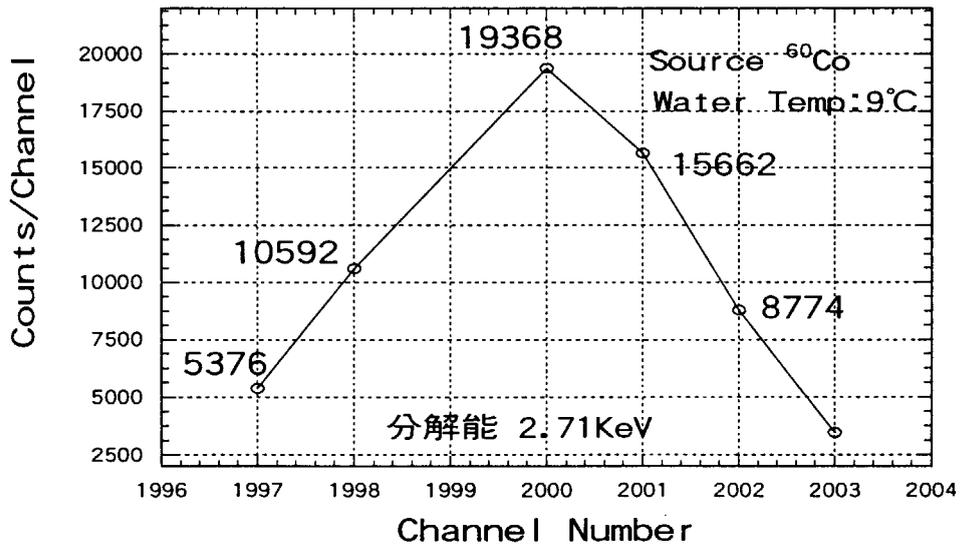


図 7-4 水中でのエネルギー分解能測定試験 (改良前)

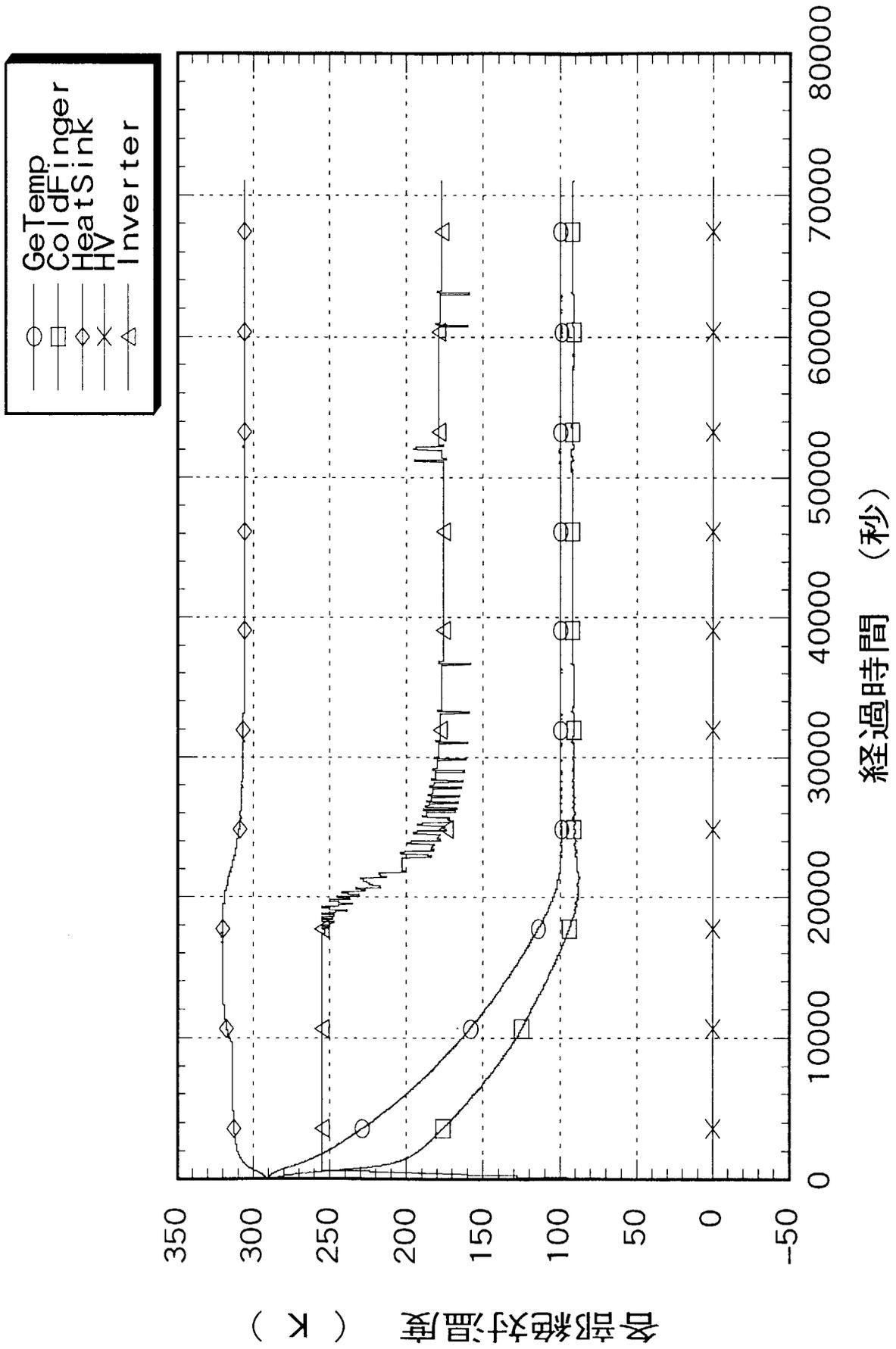


図 7-5 室内での冷却試験 (改良後)

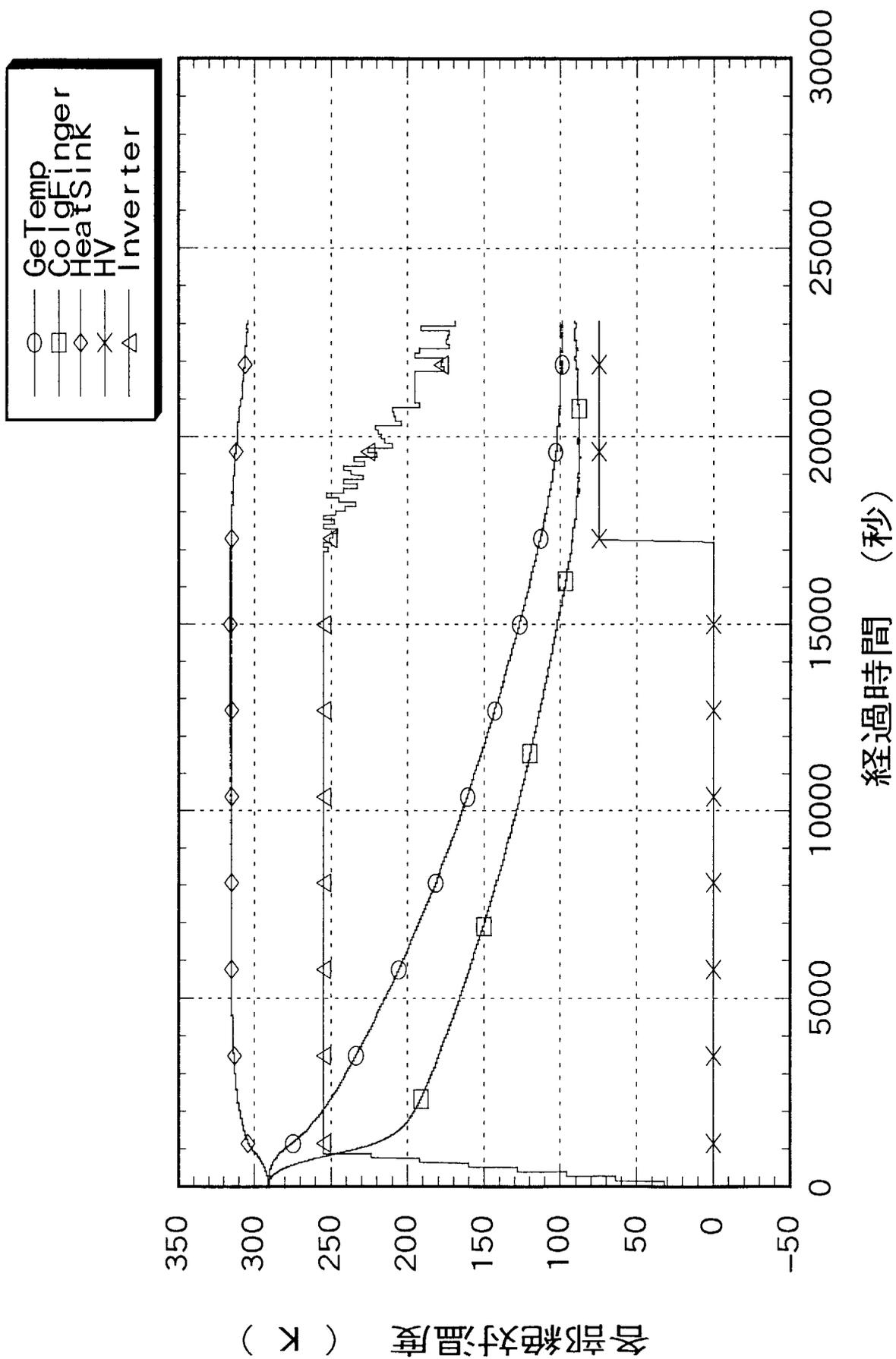


図 7-6 水中での冷却試験 (改良後)

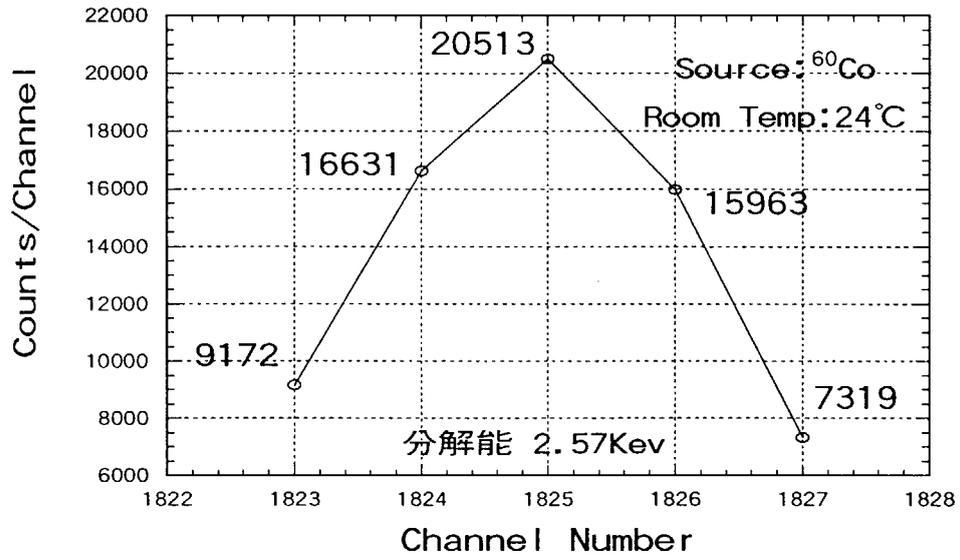


図 7-7 室内でのエネルギー分解能測定試験 (改良後)

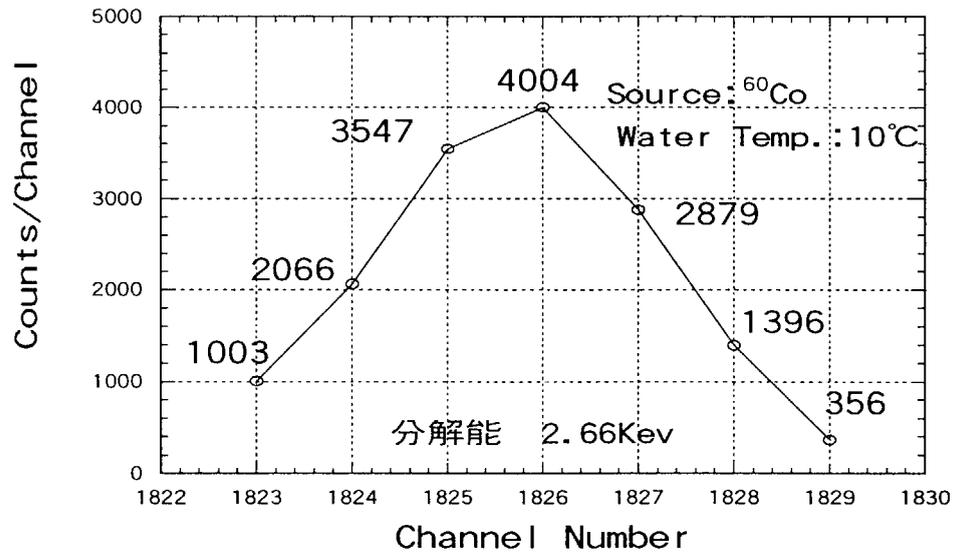


図 7-8 水中でのエネルギー分解能測定試験 (改良後)



写真 7-1 室内での性能試験 (改良前)



写真 7-2 水中での性能試験 (改良前)

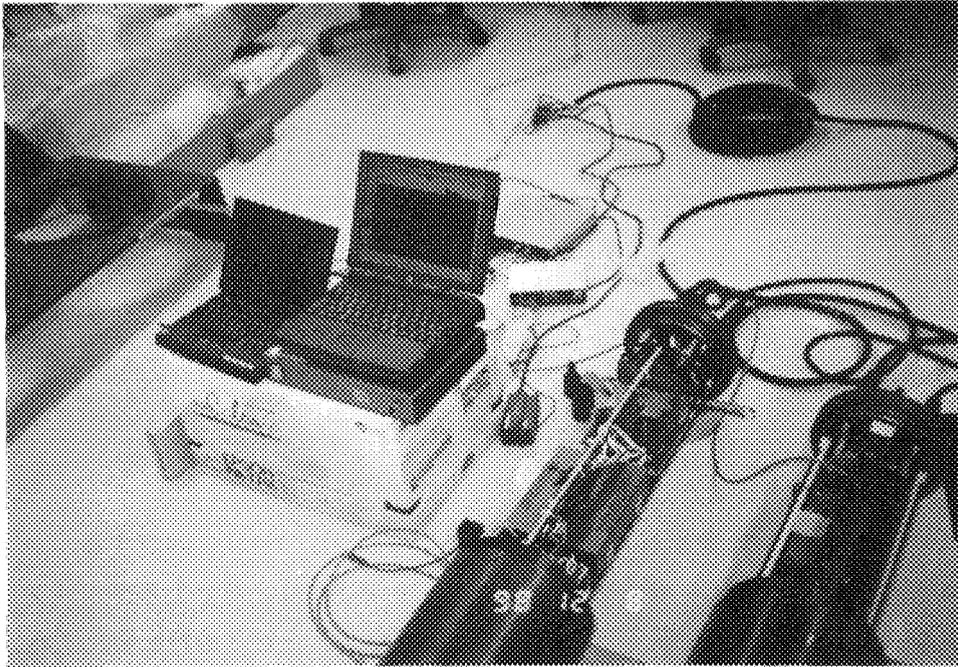


写真 7-3 室内での性能試験 (改良後)



写真 7-4 水中での性能試験 (改良後)

8. 海水中における総合試験

(1) 目的

海洋科学技術センター所有の海洋調査船（なつしま）に装備されたドルフィン 3K に小型電気冷却式 Ge 検出器システムを取り付けて、スターリング冷凍機による Ge 検出器の冷却試験を行い、液体窒素温度まで冷却できることを確認するとともに、ドルフィン 3K を海水中に投入して、海水中に存在する天然放射性物質からの放射線を計測できることを確認する。さらに、試験終了後の耐圧容器内に水が浸入しないことなどを確認する。

(2) 方法

総合試験は以下の手順で行った。

- ① なつしまの甲板上で、Ge 検出器システムをドルフィン 3K の治具に固定する。
- ② 甲板上の仮電源を用いて Ge 検出器を冷却する。冷却時には、安全上スターリング冷凍機及び電源の加熱を防止するために耐圧容器の周辺に濡れウエスを巻き過熱を防止する。
- ③ ^{60}CO のエネルギー較正用線源を用いて Ge 検出器のエネルギー較正を行う。
- ④ 試験海域に近づいたところで電源をドルフィン 3K 側に切り換える。
- ⑤ ドルフィン 3K 全体の機器を点検して、測定準備ができたところでドルフィン 3K を海水中に投入する。
- ⑥ 放射線測定は北緯 35 度 00 分、東経 139 度 14 分の近傍数百メートルの範囲で行い、そのときの深さは 1100 ~ 1200 m である。
- ⑦ 測定終了後、海水中からドルフィン 3K を引き上げ甲板上に固定して水洗等を行い、電源をドルフィン 3K 側から甲板上の仮電源に切り換える。

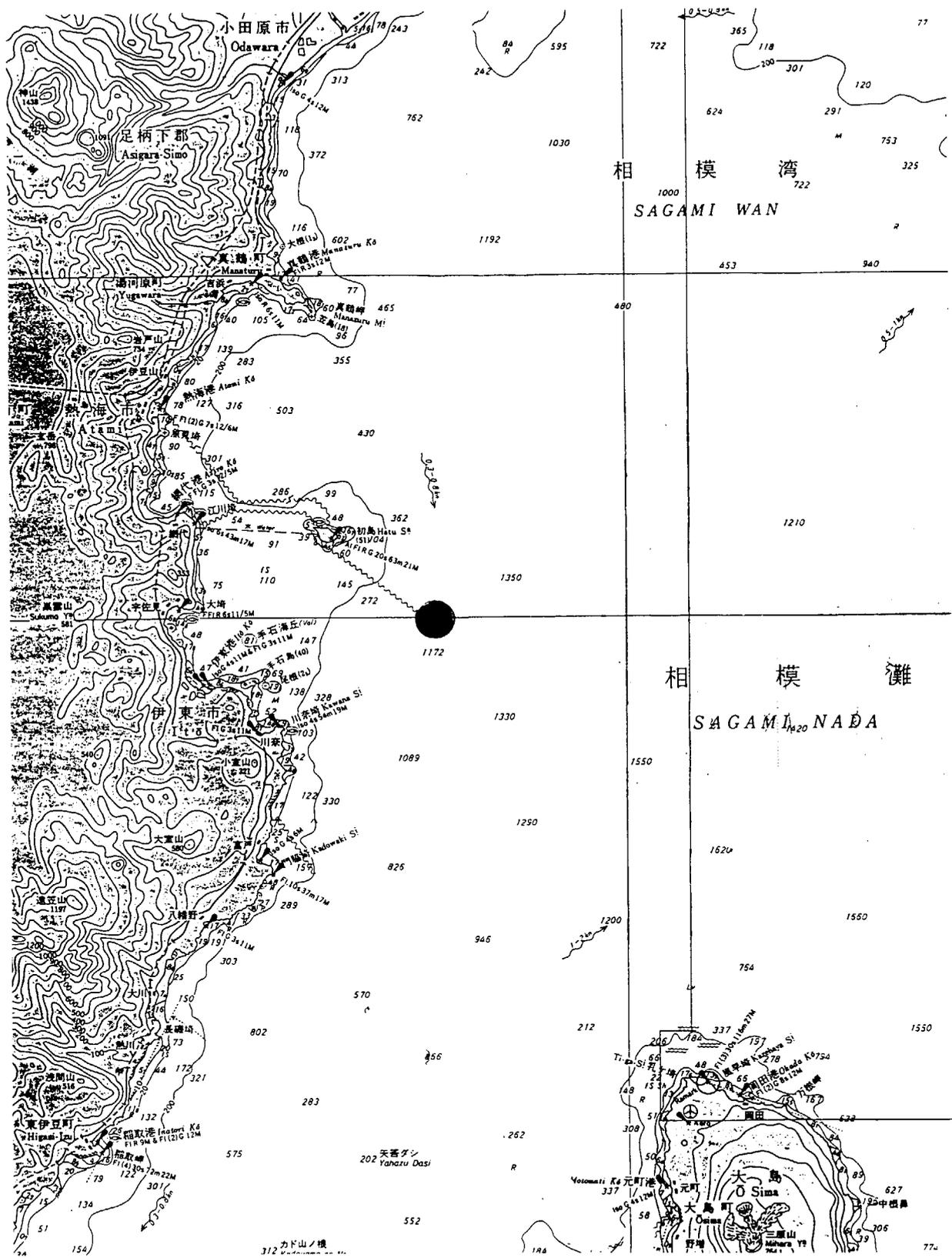
海水中における総合試験は平成 11 年 1 月 31 日から 2 月 2 日の 3 日間で相模湾の海域において実施した（図 8-1）。なお、写真 8-1 及び 8-2 にはドルフィン 3K の治具に Ge 検出器システムを取り付けている状況、写真 8-3 及び 8-4 には同システムを装備したドルフィン 3K を海水中に沈めている状況、並びに写真 8-5 及び 8-6 には総合試験が終了した後、海水中からドルフィン 3K を引き上げている状況をそれぞれ示す。

(3) 結果

- ① なつしま甲板上的スターリング冷凍機による冷却試験の結果を図 8-2 に示す。Ge 結晶の温度が 100K に到達するのに約 21,000 秒かかり、7.2 の改良後の水中性能試験とほぼ同じであることが確認できた。
- ② 図 8-1 に示した相模湾の海域で水深 1100 ~ 1200 m のところをドルフィン 3K に取り付けた Ge 検出器システムで放射線（ γ 線）を計測した結果の 1 例を図 8-3 に示す。海水中における放射線測定は全体で 3 回実施した。右上の図は、下の図の横軸の 10 チャンネルを 1 チャンネルに縮小して、チャンネル数に対するカウント数を示している。中央の図は 1 秒当たりのカウント数を示している。下の図はチャンネル数に対するカウント数を示している。図 8-3 に示した γ 線スペクトルから、あらかじめ ^{60}CO の γ 線エネルギー（1.173MeV と 1.332MeV）からチ

チャンネル数を校正した結果に基づいて、その他の γ 線ピークを示す γ 線エネルギーを計算して核種を同定したところ、 ^{208}Tl 2614 KeV (図 8-4)、 ^{40}K 1461 KeV (図 8-5)、 ^{212}Pb 238 KeV (図 8-6)、 ^{226}Ra 185 KeV (図 8-7) などの天然放射性核種が海水中に存在することが分かった。これらのことから、海水中において液体窒素温度まで冷却した Ge 検出器を用いて、海水及び海底土中の天然放射性物質をサンプリングすることなく直接測定できることが確認できた。

- ③ 測定終了後に海水中からドルフィン 3K を引き上げて、電源用耐圧容器、Ge 検出器用耐圧容器及びケーブルを目視にて観察したところ、これらの形状等に異常が見られなかったとともに、ドルフィン 3K を陸上に移して耐圧容器の蓋を開けたところ、水漏れは見られなかった。



● : 測定位置

図 8-1 試験海域 (相模湾)

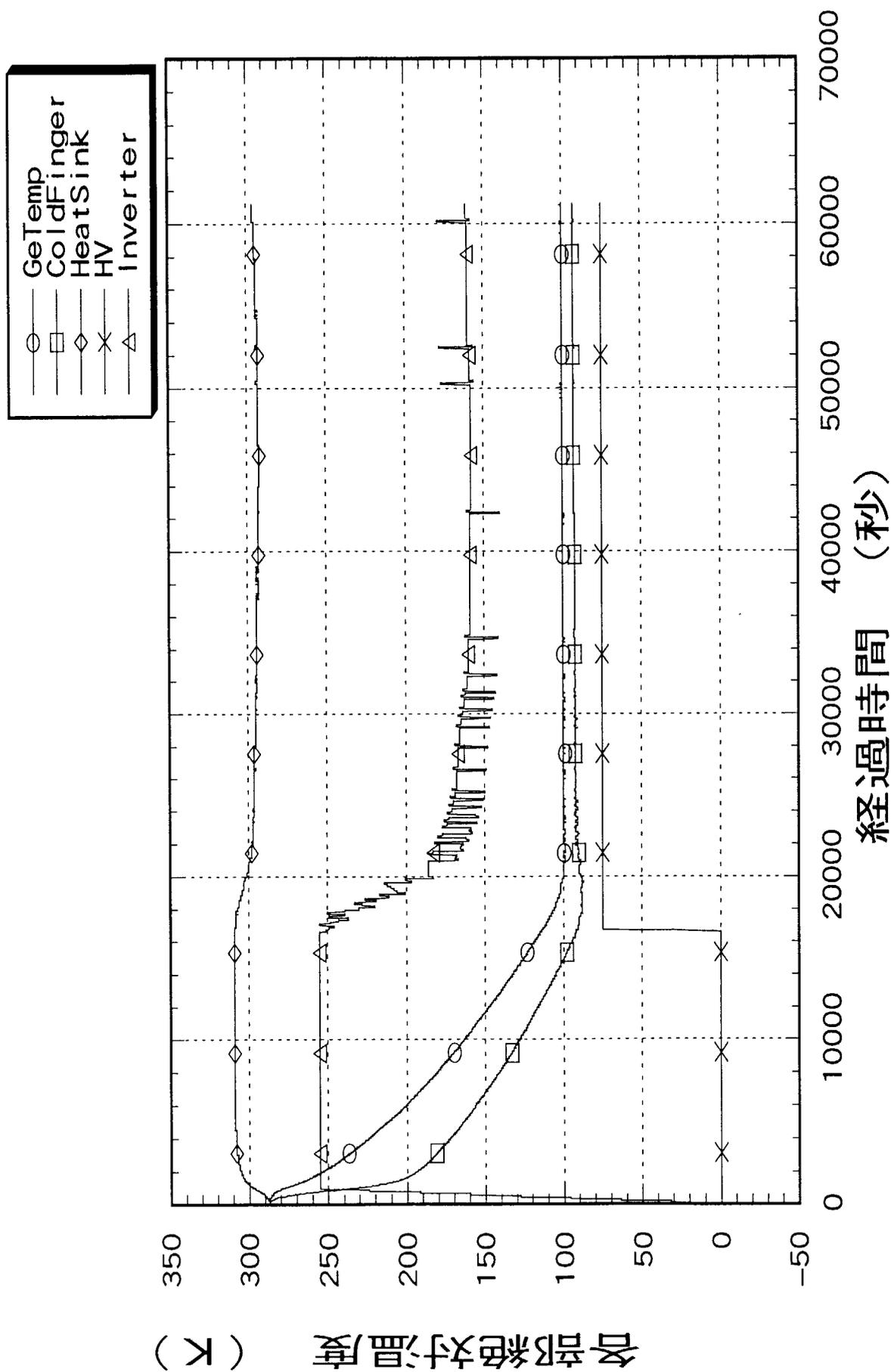


図 8-2 なつしま甲板上ででの冷却試験

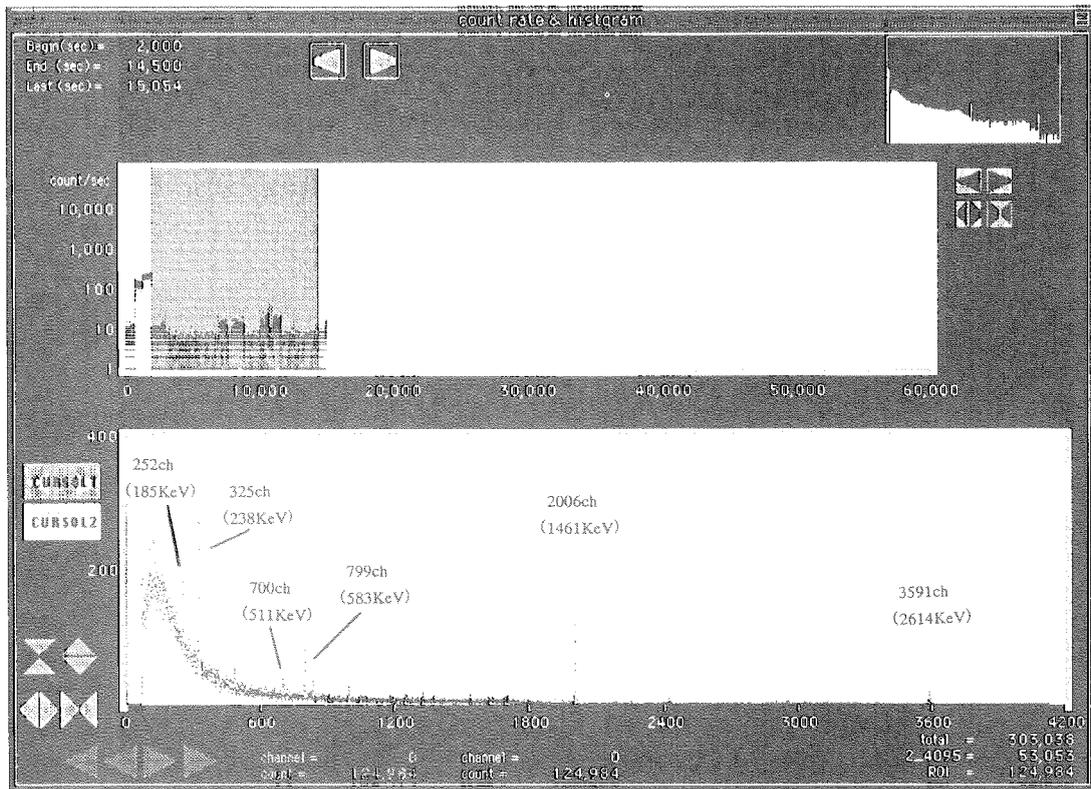


図 8-3 海水中における γ 線スペクトル

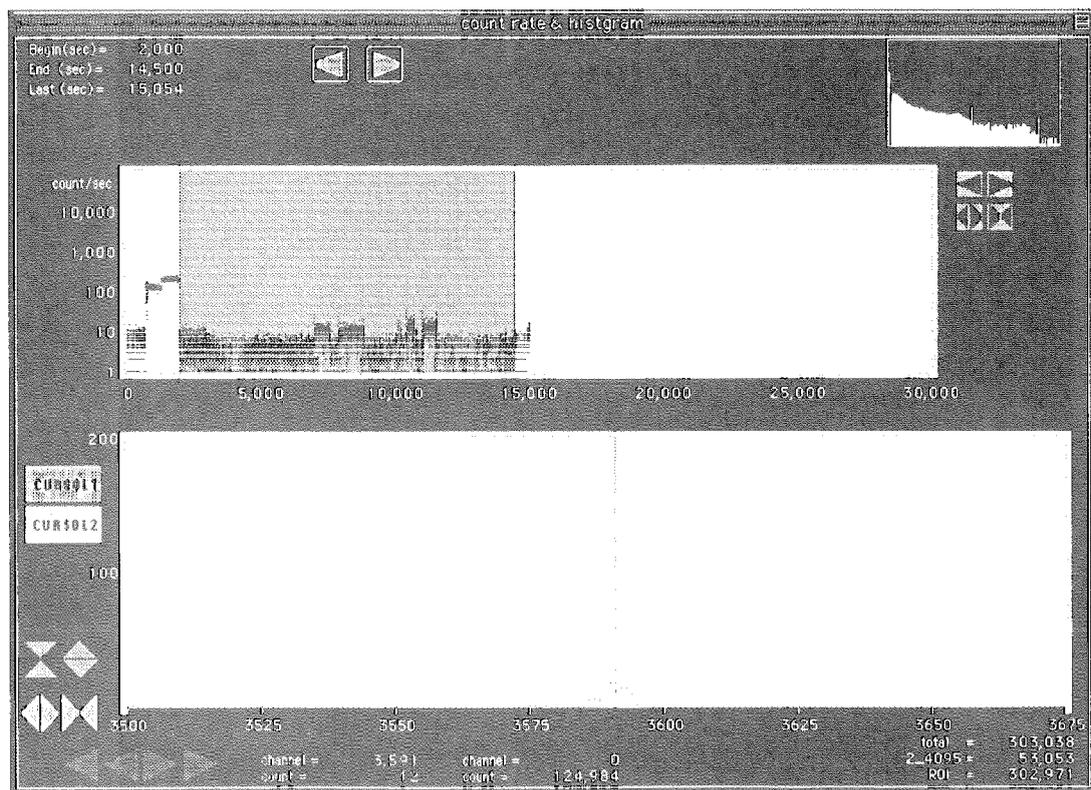


図 8-4 ^{208}Tl の γ 線ピーク

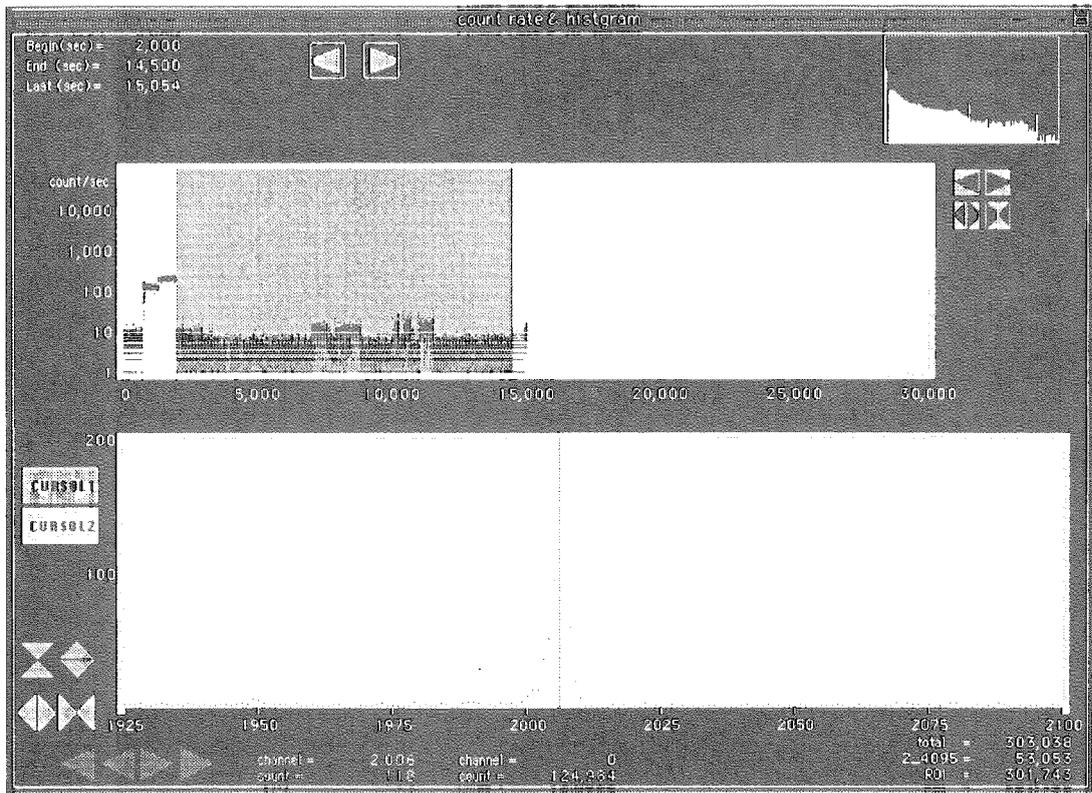


図 8-5 ^{40}K の γ 線ピーク

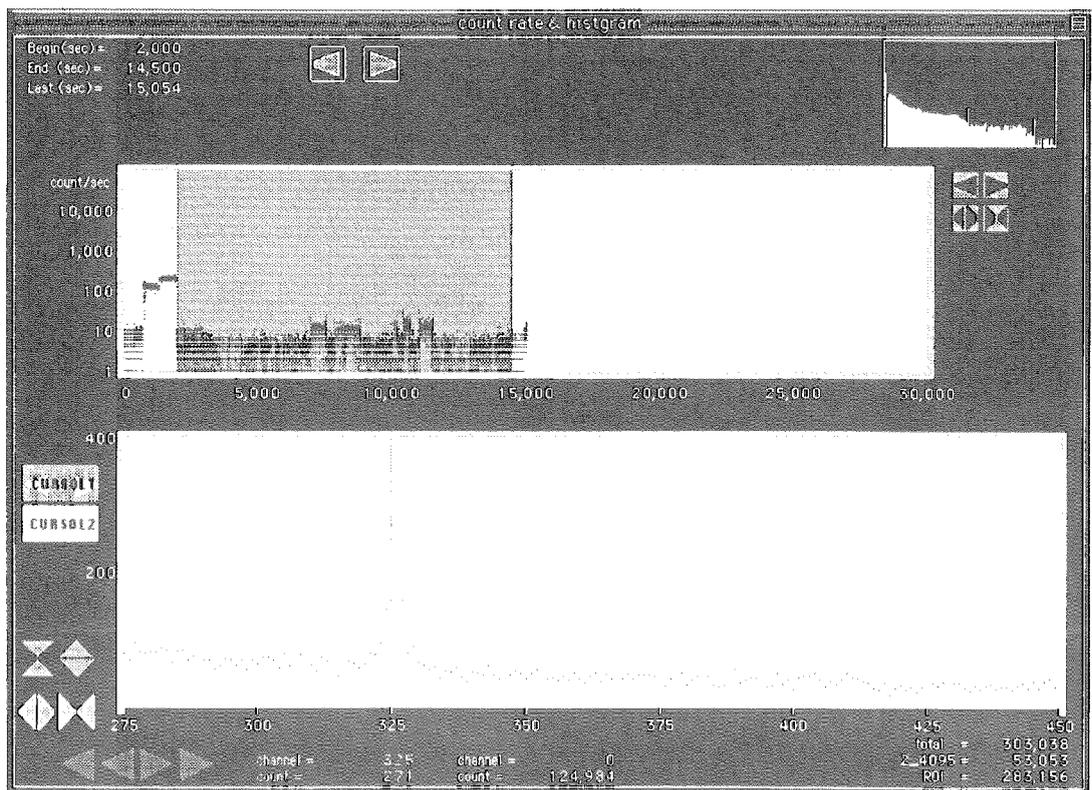


図 8-6 ^{212}Pb の γ 線ピーク

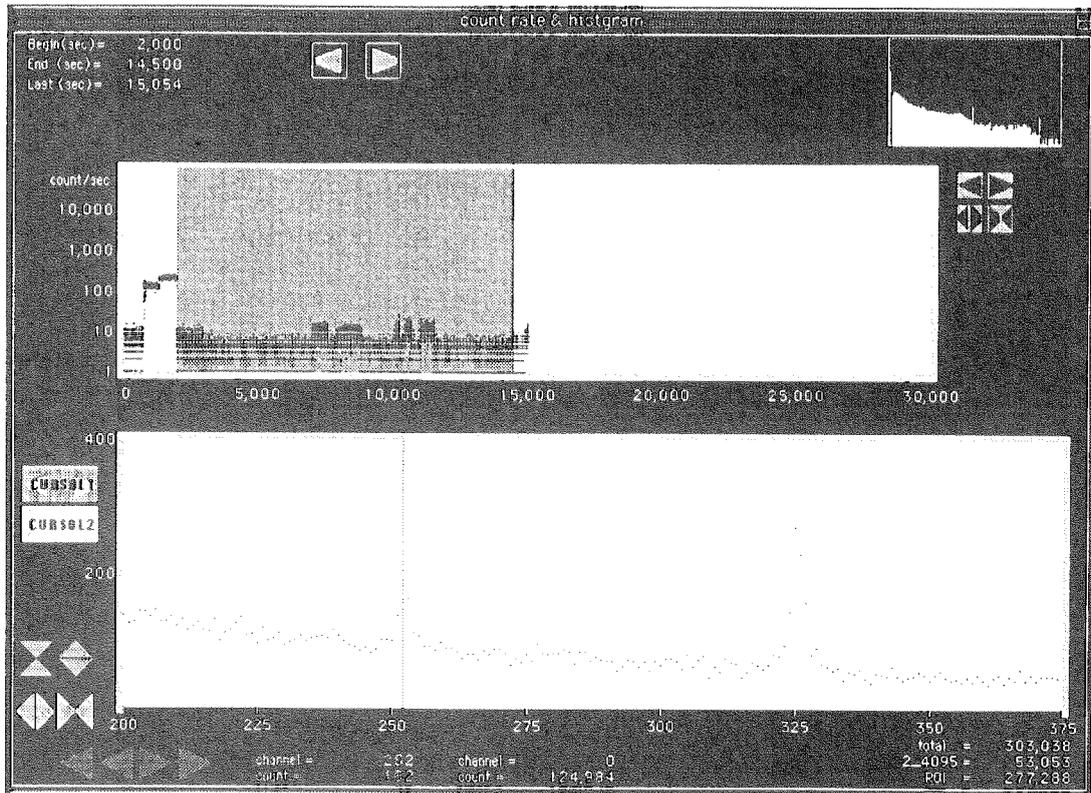


図 8-7 ^{226}Ra の γ 線ピーク

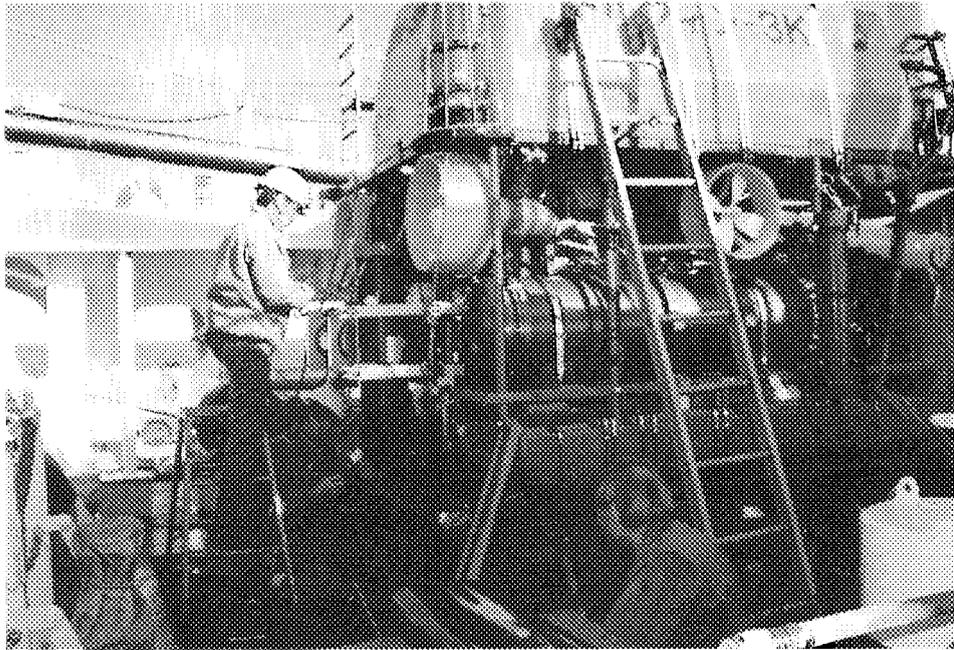


写真 8-1 ドルフィン3K に Ge 検出器システムを取り付けている状況 (その1)

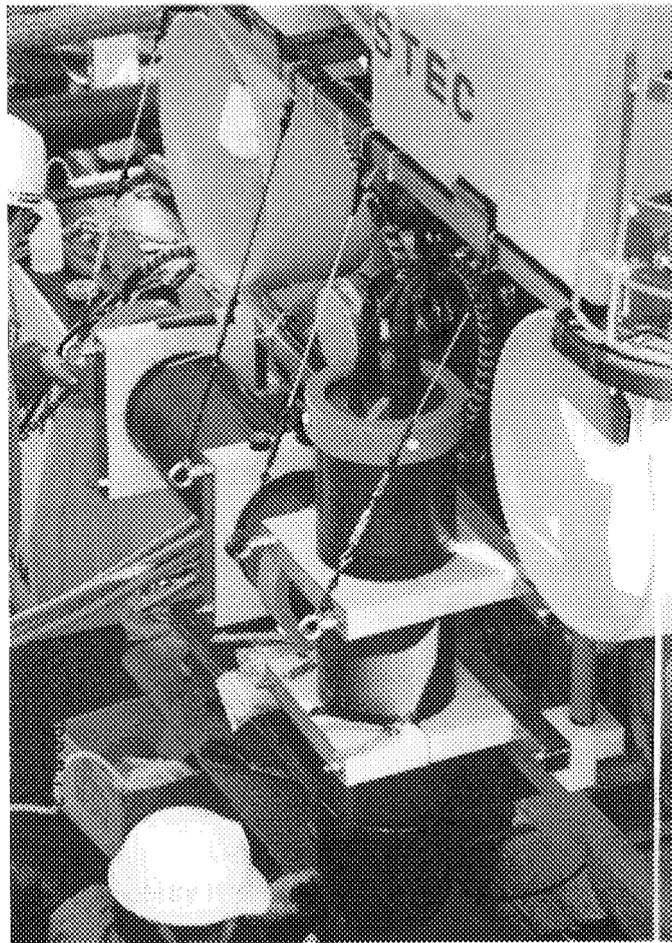


写真 8-2 ドルフィン3K に Ge 検出器システムを取り付けている状況 (その2)

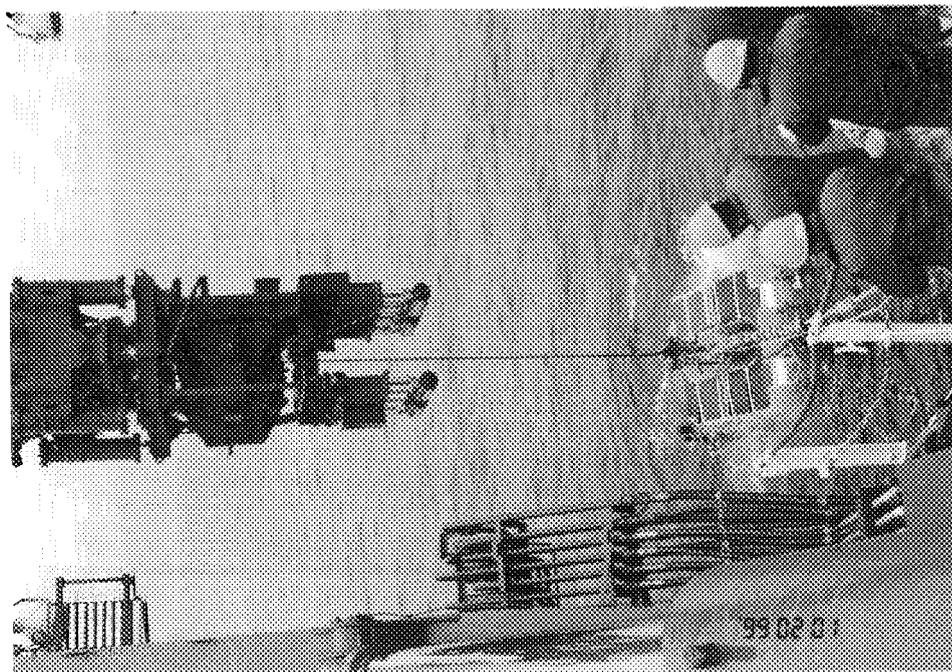


写真 8-4 ドリル3Kを海水中に沈めている状況 (その2)

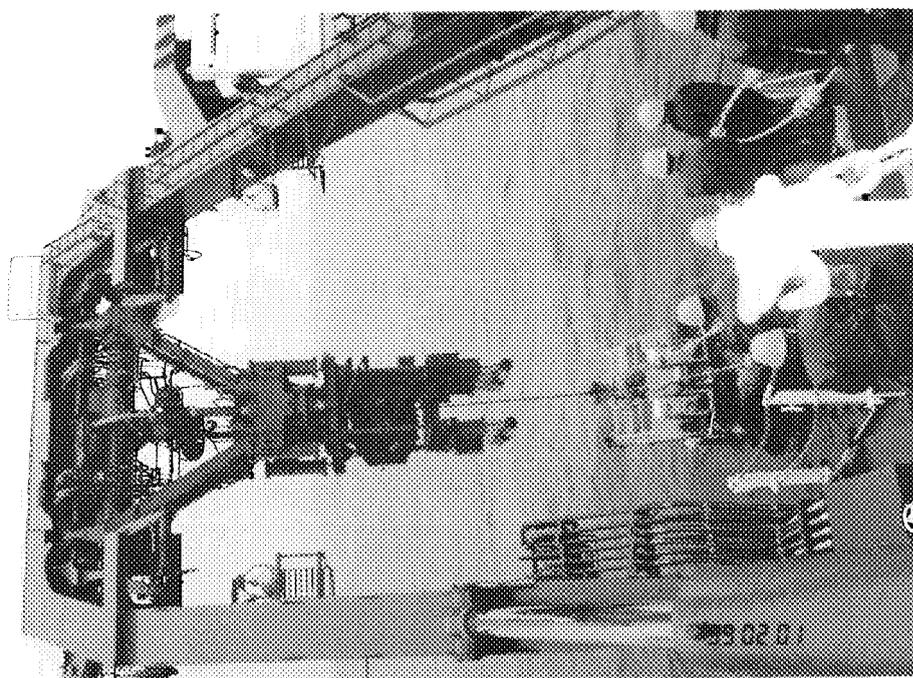


写真 8-3 ドリル3Kを海水中に沈めている状況 (その1)



写真 8-5 ドルフィン3Kを海中から引き上げている状況（その1）

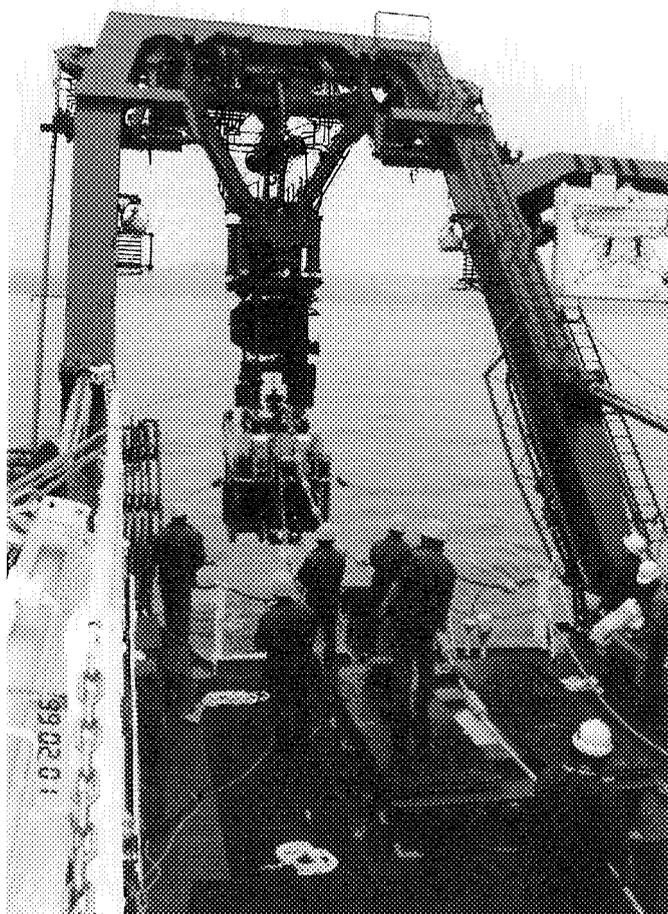


写真 8-6 ドルフィン3Kを海中から引き上げている状況（その2）

9. あとがき

以上、深海放射能測定用に開発した小型電気冷却式Ge γ 線検出器システムについて記述した。

本測定システムを海洋科学技術センター所有の無人探査機ドルフィン3Kに搭載して、平成11年度に日本沿岸海域に出航し、深海海底における天然放射性物質からの放射線を実海域で計測する計画であり、得られた放射線データを従来のNaI検出器による放射線データと比較して、本測定システムの海洋への適合性を確認する。

なお、本開発を進めるにあたっては、旧原子炉工学部センシング技術研究室から小型電気冷却式Ge検出器製作の技術的指導を受けるとともに、技術部エレクトロニクス課から水中における性能試験、海水中における総合試験等に協力を受けた。

終わりに、本報告をまとめるにあたり貴重なご助言をいただいた水島俊彦氏、ご理解とご鞭撻をいただいた施設部部長の酒井陽之氏に深く感謝の意を表します。さらに、スターリング冷凍機の改良にあたり多大なご協力をいただいたセイコー・イージーアンドジー（株）の高橋幸嗣氏、小型電気冷却式Ge γ 線検出器の製作にあたりご協力をいただいたセイコー・イージーアンドジー（株）関係者、耐圧容器の製作にあたりご協力をいただいた日油技研工業（株）関係者、データ転送部及び深海放射能測定用電源の製作にあたりご協力をいただいた技術部エレクトロニクス課関係者、海水中における総合試験の実施にあたりご協力をいただいた海洋科学技術センターの岡野真治氏、服部陸男氏、並びに海洋調査船なつしまの乗組員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 片桐政樹, 小林義威, 他: "小型電気冷却式Ge γ 線検出器(3)", 日本原子力学会「1994秋の大会」予稿集, E 42, p338 (1994).
- (2) M.Katagiri, Y.Kobayashi, et al: "General-Purpose Germanium Gamma-ray Detector Cooled by Two Stirling Refrigerators", KEK Proceeding 95-1, Radiation Detector and Their Uses, 219-224 (1994).
- (3) 片桐政樹, 小林義威, 他: "小型電気冷却式Ge γ 線検出器(4)", 日本原子力学会「1995秋の大会」予稿集, C 23, p155 (1995).
- (4) 高橋幸嗣, 片桐政樹, 他: "小型電気冷却式Ge γ 線検出器(5)", 日本原子力学会「1996春の年会」要旨集, G 43, p367 (1996).
- (5) 千崎年彦, 片桐政樹, 他: "小型電気冷却式Ge γ 線検出器(7)", 日本原子力学会「1998春の年会」要旨集, C 11, p101 (1998).
- (6) 小林義威, 他: "海洋モニタリングシステム整備調査", 第36回環境放射能調査研究成果発表論文抄録集, 110-111 (1994).
- (7) 千崎年彦, 片桐政樹, 他: "小型電気冷却式Ge γ 線検出器(6)", 日本原子力学会「1996秋の大会」予稿集, H 52, p81 (1996).
- (8) 岡野真治, 服部陸男, 他: "ドルフィン3Kによる深海放射能測定", 海洋科学技術センター「第14回しんかいシンポジウム」予稿集, 10-11 (1997).
- (9) 岡野真治, 松本剛, 他: "ドルフィン3Kによる深海放射能測定", 海洋科学技術センター「第15回しんかいシンポジウム」予稿集, 70-71 (1998).

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の 1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J(国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻⁴	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

