

PWRのN-16からの高エネルギー 線測定用 Cd-Zn-Te半導体検出器の開発

Development of Cd-Zn-Te Semiconductor Detector for the Detection of
High-Energy Gamma Rays from N-16 in PWR

中村 裕明 (Hiroaki Nakamura)* 西沢 博志 (Hiroshi Nishizawa)†

要約 加圧水型原子力発電所 (PWR) の蒸気発生器の伝熱管漏えいを高感度で検出するための N-16 モニタ用の高エネルギー 線測定用半導体検出器として、常温から100 近くまで使用可能な Cd-Zn-Te (CZT) 半導体素子に着目し、これを216個積層した CZT 検出器を製作し、その線検出感度と出力パルスの波高分布を校正用線源と実際の PWR における N-16 によって測定した。また一方、モンテカルロ計算法 (EGS4) を用いてそれらの値を計算し、実験値と比較することにより、計算手法と各種パラメータ設定の妥当性を検証した。続いて、実機規模の N-16 モニタ (全素子数約2,600個) を想定し、その N-16 の 線に対する検出感度を計算した結果、現在 PWR の N-16 モニタとして使用されている寸法3" × 3" t の NaI (TI) シンチレーション検出器とほぼ同じ値であることを確認し、感度の点からこの CZT 検出器の実機への適用性を確認した。

キーワード N-16 モニタ, 高エネルギー 線測定, カドミウム・亜鉛・テルル (CZT) 素子, 室温作動半導体検出器, モンテカルロ計算

Abstract A Cd-Zn-Te (CZT) semiconductor detector that works from room temperature to 100 was adopted as an N-16 monitor for the high-sensitivity detection of leakage from a tube in a steam generator of PWR. We constructed a CZT detector composed of 216 elements and measured its output pulse height spectra and detection sensitivity to gamma rays from Cs-137 and Co-60 sources and from N-16 in the primary cooling water of operating PWR's. These values were also calculated using a Monte Carlo code (EGS4). The calculated results showed reasonably good agreement with the measured ones. The detection sensitivity of an actual CZT detector composed of about 2,600 elements, which is used as an N-16 monitors, was calculated using the same method, and the obtained detection sensitivity was about the same as that of a NaI(Tl) scintillation detector three inches in diameter and three inches thick, which is presently used as an N-16 monitor in PWR. From this, the applicability of this CZT detector as a new N-16 monitor is confirmed from the standpoint of detection sensitivity.

Keywords N-16 monitor, high-energy gamma rays, cadmium zinc telluride, room temperature semiconductor detector, Monte Carlo calculation

1. はじめに

原子力発電所の冷却系統設備などにおいて、放射線監視設備を巧みに利用すると、設備の健全性が監視でき、故障を早期に発見できることがある。例えば、PWR において 2 次冷却系配管の近傍に N-16 モニタを設置すると蒸気発生器の伝熱管漏えいを高

感度で検出できるためプラントの運転上極めて重要なものとなっている。N-16 は約 6MeV もの高エネルギー 線を放射するので、通常かなり大きな NaI (TI) シンチレーションカウンターが用いられているが、その設置場所は設計温度 80 近くの高温になることがあり、カウンターの保守管理がやりにくく、寿命も限られる。そこで本研究では、常温ないしは

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 三菱電機(株) 産業システム研究所

上記雰囲気で使用可能で、しかも高エネルギー線まで分析できる高原子番号の半導体検出器を用いたN-16モニタの開発を目的とした。これが可能になると、検出器がコンパクトになるので、多重化も可能となり、プラントの保守性および運用性が向上する。常温ないし100℃近傍まで作動の高原子番号の半導体検出器材料として、Cd-Zn-Te(CZT)を採用し、その素子216個を積層化したCZT検出器を製作した。校正用線源(Cs-137とCo-60)および実際のPWRの1次冷却系配管近傍でのN-16の線をこのCZT検出器で測定し、検出感度と出力パルス波高分布を求めた。一方、電子光子輸送モンテカルロ計算により、そのCZT検出器の線検出効率とパルス波高分布を求めて、上記測定結果と比較してほぼよい一致を得た。続いて素子数を12倍にしたCZT検出器を蒸気発生器の伝熱管漏えいを検出するN-16モニタとして実機に適用する可能性について評価した。

2. 検出器の試作

2.1 素子の選定と積層化

現在、実用化あるいは今後有望な半導体放射線検出素子の中で、Cd-TeおよびCd-Zn-Te(CZT)は、結晶製造方法の改善により、最近良質の製品が得られるようになってきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これらはいずれも原子番号が大きく、バンドギャップエネルギーが広いので常温動作が可能で、高エネルギー線に対する感度が高く、かつ電荷キャリアの $\mu \cdot \tau$ 積(移動度と寿命の積)が比較的大きいなどの点で他の素子より優れている。本研究では、良質な素子材料の安定的な供給も考慮してCZTを選択した。CZT素子の $\mu \cdot \tau$ 積が小さいことはキャリアが結晶中の格子欠陥等に捕獲され、全てが収集電極まで到達できないため、出力波高の低下が起こる。これにより、素子に付与されたエネルギーが同じであっても、相互作用の位置により出力波高が異なり⁽⁴⁾、正確なパルス波高分布を得ることができなくなる。しかも、エネルギーが高くなるにつれて、エネルギー吸収ピーク

の計数値が減り、ピークの形状も低エネルギー側にずすを引くようになる。そこでより正確なパルス波高分布を得るためには、キャリアが捕獲される前に収集電極に到達できるように、素子を薄くして電荷収集効率を向上する必要がある。すなわちCZT半導体素子を用いて、しかも高エネルギー領域の感度を向上するためには、

- 1) 検出部分の体積(厚み)を大きくすること
- 2) 電荷収集効率を向上するため薄い素子を用いること

という相反する要求を同時に満たさなければならない⁽⁵⁾⁻⁽¹¹⁾。そこで本研究では、薄いCZT素子を多数積層して大きな検出部を構成することにした。この概念を図1に示す。

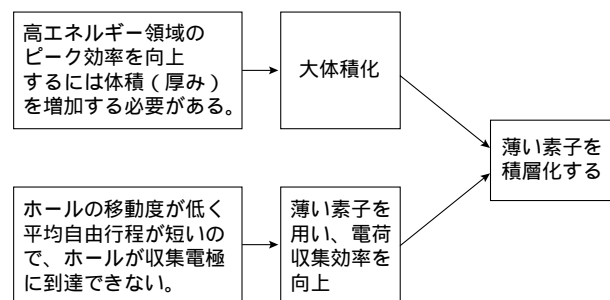


図1 積層化の概念

2.2 設計の考え方

(1) 基本的構成

実機で用いるものの約1/10サイズの検出器を試作し、試験することにした。その基本的構成要素は、素子、ホルダーおよびプリアンプである。まず、素子はCZT素子(単品サイズ:10x10x1mm)、ホルダーはアルミナ製のものを用い、ホルダー1枚あたりに9素子を装着した。プリアンプは回路分割方式を採用し、ノイズ低減のため検出素子部分と一体化した。その構成を図2に示す。

(2) プリアンプの設計

(入力段基板とプリアンプ本体基板)

プリアンプの回路として、現場での使用実績があ

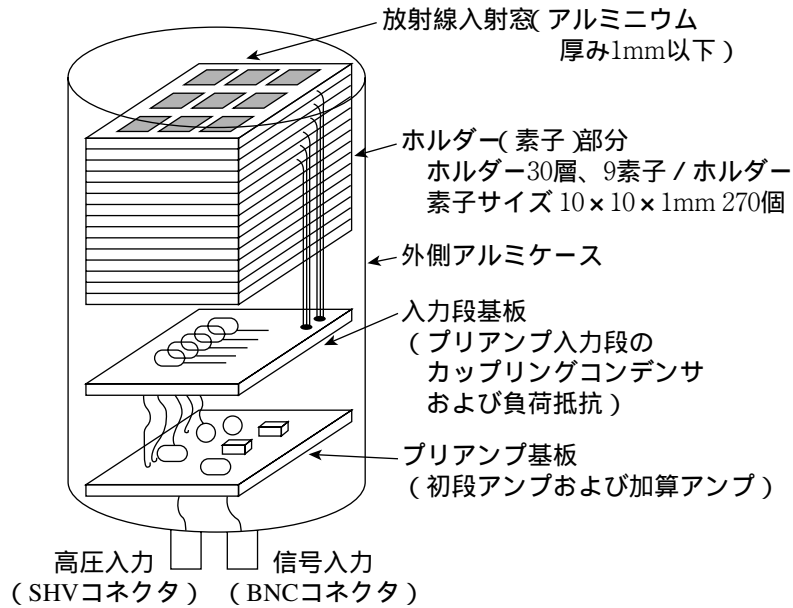


図2 モデル検出器の構成

るチャージアンプをベースとし、試作する検出器用に回路定数を見直した。

並列接続素子数は9個とし、回路分割数は5個とした。回路構成の概要を図3に示す。

(3) ホルダー部分の構造設計

a. 素子占積率の向上

単位体積あたりの感度を向上し有感部分のエネルギー吸収を大きくするため、水平方向には素子間の寸法をできるだけ少なくし、積層方向にはさらに素子間の介在物をなくし、空気層のみとなるように配慮した。

b. 素子に歪みをかけないように注意

素子にマイクロクラックを生じないようにするため、ホルダーの角穴に素子を緩衝材（シリコンゴム系）にて粘弾性的に保持し、変形応力を吸収できるようにした。

c. 温度、湿度耐性

温度100℃、湿度100%に耐えうる材料としてアルミナを選定した。

d. 電気的絶縁および低静電容量化

ホルダー間の絶縁を容易にし、かつホルダー間の浮遊容量を減少するため、積層方向の極性をホルダー毎に交互にして、ホルダー間をほぼ無電界とした。

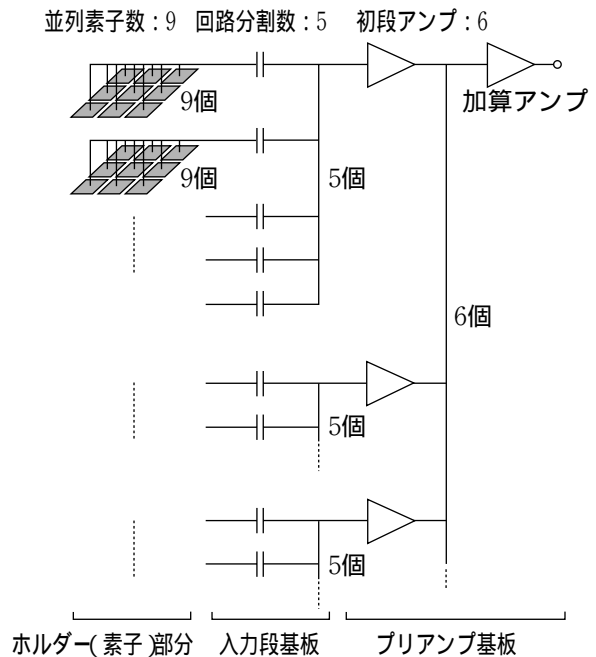


図3 回路構成の概要

2.3 試作した検出器

試作した検出器の全体構造を図4に示す。図5は試作器の写真である。

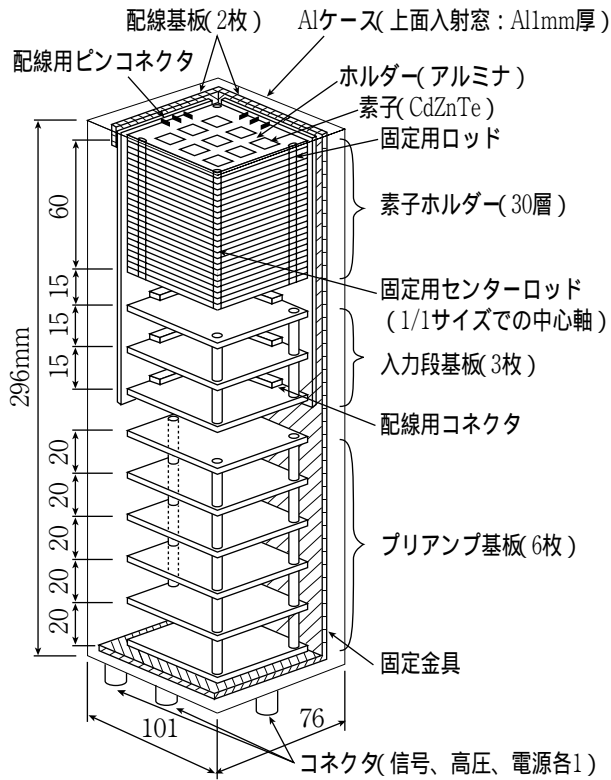


図4 検出器の全体構造

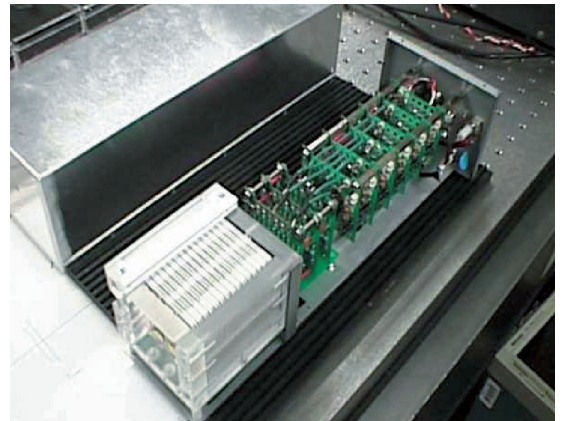


図5 試作器の写真

3. 感度計算

試作した検出器について、電子光子輸送モンテカルロ計算コードEGS - 4⁽¹²⁾を用いて、線に対する検出感度の計算を実施した。

3.1 計算モデル

当初270素子のCZT検出器を想定し、試作の中間段階を含め、45素子および90素子のものについても計算を行った。また、最終的には、216素子のCZT検出器としたので、これについても計算を行った。具体的には、素子部分(素子間隔、ホルダー材質など)を模擬し、次のパラメータを用いて計算を行った。素子部分のモデルを図6に示す。

入射粒子：線

エネルギー：661.6 keV (Cs-137),

1173.2, 1332.5 keV (Co-60),

6.13 MeV (N-16)

素子数：45, 90, 216および270

入射方向：検出器の最上面に垂直に一様入射

入射粒子数： 10^5 個/cm²

下限エネルギー：電子10keV, 光子1keV

1回体系外に出た粒子の追跡は行わない

電荷キャリアの平均自由行程 (cm): 例えば、印加電圧75Vの時、ホールに対する値は0.0375cm, 電子に対する値は1.125cm

実験結果との比較を容易にするため、以下の仮定や補正を行った。

(1) 電荷キャリアの流動距離に指数分布を仮定

CZTでよく起こる電荷キャリアの捕獲を考慮して、一様な捕獲中心を仮定し、電荷キャリアの流動距離に指数分布を持たせた。⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

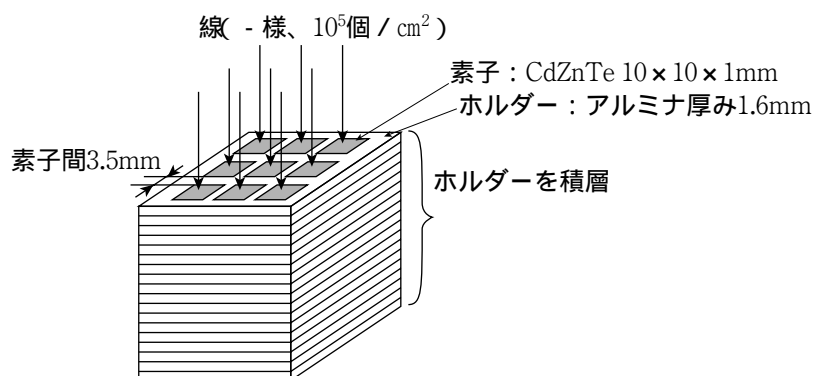


図6 検出感度計算モデル

(2) エネルギー軸の補正

使用したCZT検出器中のキャリアの流動距離が素子の厚さよりも短く、外部回路に伝達されるエネルギーが付与エネルギーよりも小さくなることもある。

外部回路に伝達されるエネルギーを E_{out} 、素子に付与されたエネルギーを E_{dep} とすると、

$$E_{out} = E_{dep} \cdot (\rho_e + \rho_h) / d$$

ここで、

ρ_e ：電子の流動距離

ρ_h ：ホールの流動距離

d ：素子厚

である。印加電圧が低く、電界 F が小さくなり、大多数の電子とホールの流動距離の和が d より小さくなると、計算結果は付与エネルギーよりも低いエネルギーとして出力される。これは、印加電圧が小さい時に顕著になる。このため、感度の計算の結果が

ら、各入射エネルギーに対するエネルギーピークまたはエネルギーエッジの値と入射エネルギーとを比較することによりエネルギー軸を補正した。このエネルギー軸補正係数は入射エネルギーに依存し素子にかかる実効電圧が低いほどその依存性は大きい。

(3) 検出器分解能関数でのコンボリューション

実験で得られたパルス波高分布には、電子回路雑音により、エネルギー分解能の広がりが存在する。この広がりには、検出器分解能関数でコンボリュートしてやる必要がある。この分解能関数は、通常Gauss分布と考えられるので、感度の計算で得られた結果を、半値幅を考慮したGauss分布でコンボリュートするとよい。ここではコンボリューションの半値幅として、実験で得られた半値幅を採用した。

3.2 検出感度の計算結果

以上に述べた仮定や補正を織り込み、出力パルス波高分布を計算した。このようにして各線源に対して求めた検出感度を表1に示す。また検出器を形成する素子の体積の総和を有感体積として、これに対する検出感度の計算結果を図7に示す。

表1 改善した計算により得られた各検出器感度

| CZT検出器 素子数 | 印加電圧 [V] | 実効電圧 [V] | Cs-137ピーク感度 (661.6 ± 50keV) [cps / (μSv·h)] | Co-60ピーク感度 (1332.5 ± 50keV) [cps / (μSv·h)] | N-16感度 4.5 ~ 7MeV [cps / (μSv·h)] |
|---------------|-------------|-------------|---|---|---|
| 45素子 | 100 | 80 | 3.98 | 0.26 | - |
| 90素子 | 50 | 40 | 6.83 | 0.36 | - |
| | 75 | 60 | 8.62 | 0.54 | - |
| 216素子 | 100 | 80 | 10.3 | 0.71 | - |
| | 50 | 39 | 13.7 | 0.73 | - |
| | 75 | 59 | 17.5 | 1.30 | 1.13 |
| | 100 | 78 | 20.9 | 1.79 | - |

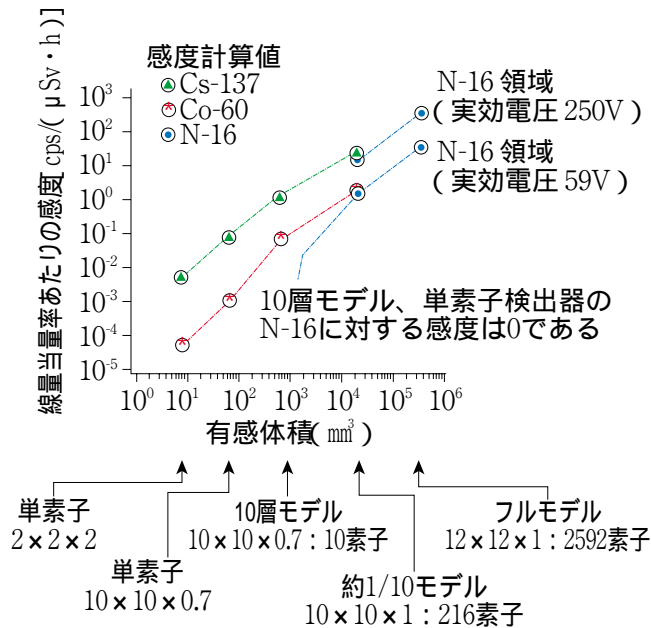


図7 有感受積と検出感度の予測

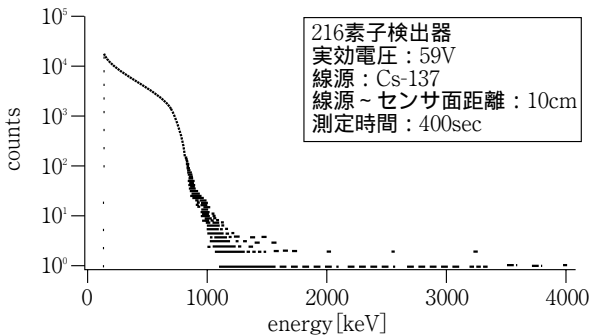


図8 パルス波高分布 (Cs-137)

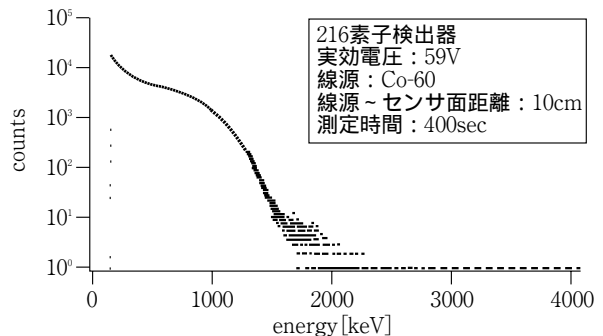


図9 パルス波高分布 (Co-60)

表2 Cs-137とCo-60の線測定における各CZT検出器の検出感度(ピークの感度)

| 検出器 | 印加電圧 [V] | 実効電圧 [V] | Cs-137ピーク感度 (661.6 ± 50keV) [cps / (μSv·h)] | Co-60ピーク感度 (1332.5 ± 50keV) [cps / (μSv·h)] |
|-------|----------|----------|---|---|
| 45素子 | 100 | 80 | 3.95 | 0.27 |
| | 50 | 40 | 5.81 | 0.37 |
| 90素子 | 75 | 60 | 6.70 | 0.48 |
| | 100 | 80 | 7.99 | 0.70 |
| 216素子 | 50 | 39 | 12.9 | 1.02 |
| | 75 | 59 | 15.6 | 1.34 |
| | 100 | 78 | 17.8 | 1.68 |

4. パルス波高分布の測定

4.1 校正線源の線の測定 (Cs-137 およびCo-60)

45素子, 90素子, 216素子の各種層段階の CZT検出器により, Cs-137とCo-60の線に対するパルス波高分布およびピークの感度の測定を行った。ピークの感度の算出にあたり, 計数率の線量当量率依存性から, パイルアップの影響が無視できるデータを用いた。検出感度の計算には, 線源強度, 線放出率および線束・線量当量換算係数を用いた。Cs-137およびCo-60の線に対する測定結果をそれぞれ図8と図9に示す。また, Cs-137とCo-60測定により得られた45素子, 90素子および216素子のCZT検出器の感度をまとめると表2のようになる。

4.2 実機におけるN-16の線測定

(1) 測定場所

関西電力(株)高浜発電所1号機の第18回定期検査時に測定を実施した(測定実施日は平成11年3月16日～3月25日)。216素子のCZT検出器を同発電所の非再生クーラ入口配管近傍に設置し、計測器は非再生クーラ室の外部に設置して計測を行った。現場での測定の状況の写真を図10に示す。

(2) 測定方法

測定結果を、NaI(Tl)検出器(3 x 3 t)と比較し、評価するため、対象とするCZT検出器(216素子)とともに、NaI(Tl)検出器も設置した。測定場所のN-16の線量当量率はこのNaI(Tl)検出器によって求めた。参考のために、CZT検出器(10層モデル)ならびに216素子CZT検出器の有感体積に相当する検出部体積を有するNaI(Tl)検出器(2 x 1)も併せて設置した。以下にそれらを表示する。

| | |
|-------------------|----------------------------|
| CZT検出器(216素子) | 本研究対象品 |
| CZT検出器(10層モデル) | 参考用 |
| NaI(Tl)検出器(3 x 3) | 比較・評価用(実機相当品) |
| NaI(Tl)検出器(2 x 1) | 参考用 216素子CZT検出器とほぼ同等の有感部体積 |

各検出器は測定用の架台に取り付けることにより、その有感中心が配管から同一距離になるように設置するとともに、被ばく線量の低減を考慮して、仮設作業と試験終了後の撤去を容易にできるようにした。また、線量当量率の時間的変化を避けるため、上記4種類の検出器からの信号を同時に測定し、そ

れぞれの波高分布を求めた。発電所起動ステップにおいて、定格出力の50%と75%および定格出力におけるパルス波高分布をそれぞれ測定した。定格出力における測定時間は48時間とした。

(3) 測定結果

測定した波高分布のうち、定格出力時のものを図11に示す。得られた波高分布から、4.5～7MeVのエネルギー範囲の計数率の積分値を求め、N-16感度を算出した。

5. 検出感度計算の妥当性

5.1 計算値と実験値の比較

3章で求めた感度計算の結果および4章で求めた感度測定試験の結果を表3にまとめた。ここには、10層モデルの結果も併せて示している。

計算に用いたパラメータとして、素子の $\mu \cdot$ 積とコンポリューション時の半値幅がある。本研究では、 $\mu \cdot$ 積の値は電子： 1.5×10^{-3} 、ホール： $5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{V}$ を用いた。また、コンポリューションの半値幅は実験で得られた値(Cs-137では115keV、Co-60では137keV、Am-241では255keV)を採用した。両者を比較した結果、Cs-137では計算結果の方がやや大きく、Co-60ではほぼ一致し、N-16でもほぼ一致した。このため、検出感度についての計算結果は概ね妥当と考える。

フィールド測定実施状況



フィールド測定中の画面

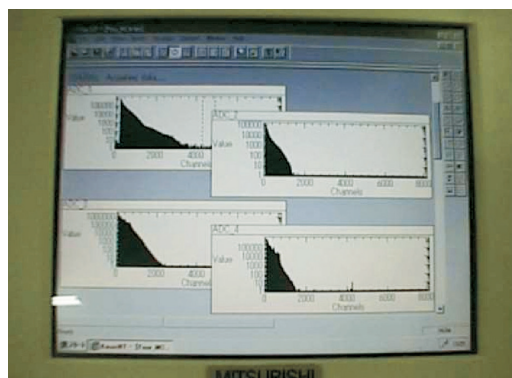


図10 現場でのN-16測定状況の写真

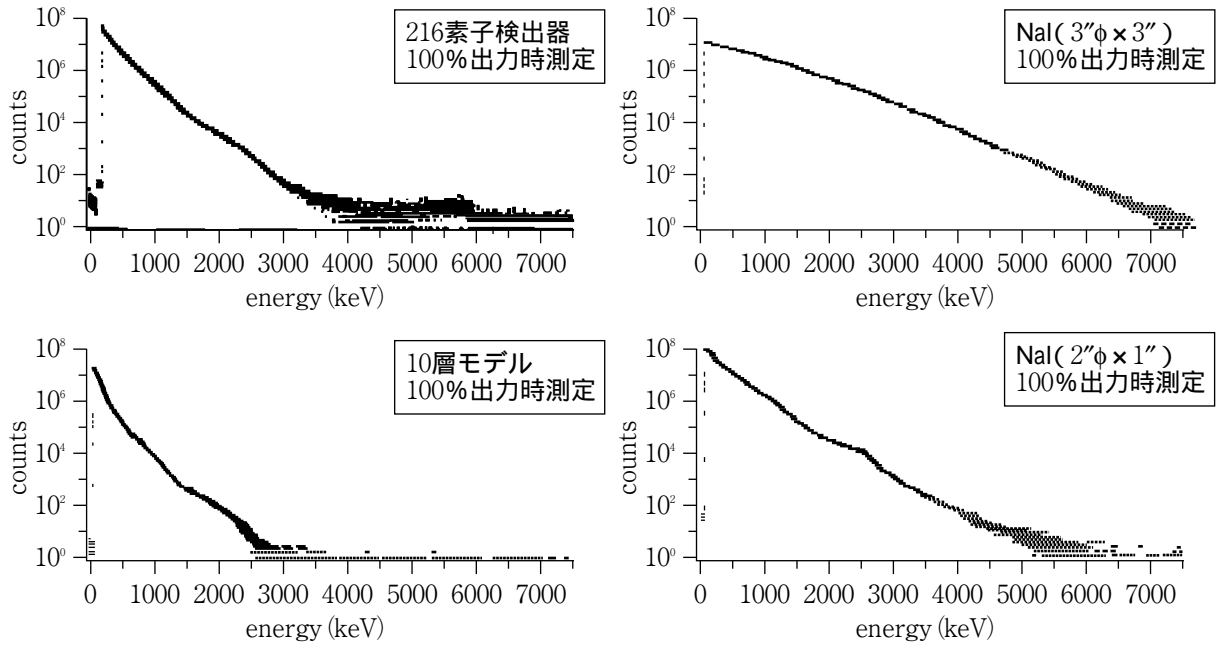


図11 N-16によるパルス波高分布測定結果

表3 線検出感度の計算値と実験値との比較

| 検出器 | 印加電圧 [V] | 実効電圧 [V] | Cs-137ピーク感度 (661.6 ± 50keV) [cps / (μ Sv · h)] | | Co-60ピーク感度 (1332.5 ± 50keV) [cps / (μ Sv · h)] | | N-16感度 (4.5 ~ 7MeV) [cps / (μ Sv · h)] | |
|-------------------------|---------------|---------------|--|------|--|-------|--|------|
| | | | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 実験値 |
| 10層モデル | 100 | 100 | 1.02 | 0.96 | 0.071 | 0.065 | 0.12 | - |
| 45素子 | 100 | 80 | 3.98 | 3.95 | 0.26 | 0.27 | - | - |
| 90素子 | 50 | 40 | 6.83 | 5.81 | 0.36 | 0.37 | - | - |
| | 75 | 60 | 8.62 | 6.70 | 0.54 | 0.48 | - | - |
| 216素子 | 100 | 80 | 10.3 | 7.99 | 0.71 | 0.70 | - | - |
| | 50 | 39 | 13.7 | 12.9 | 0.73 | 1.02 | - | - |
| 216素子 | 75 | 59 | 17.5 | 15.6 | 1.30 | 1.34 | 1.13 | 1.24 |
| | 100 | 78 | 20.9 | 17.8 | 1.79 | 1.68 | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Na(TI) 参考 (3 x3) | - | - | 1330 | - | 336 | 500 | 296 | 360 |

5.2 パルス波高分布の検討考察

(1) Co-60のパルス波高分布

Co-60の場合について、計算と実験で得られたパルス波高分布の比較を図12に示す。波高分布の形状は概ね良く一致している。ただし、実験値の高エネルギー領域（1.3MeVを超える領域）にパイルアップ

プと見られる計数値の多い部分が認められる。なお、200～400keVの領域で実験値が大きくなっているのはノイズの影響であろう。

(2) N-16のパルス波高分布

N-16の場合について、計算と実験で得られたパルス波高分布の比較を図13に示す。

3 MeV以下のエネルギー領域では計数値が多くな

っているが、これはバックグラウンド測定結果から N - 16以外の核種によるものが原因であろう。一方、3 MeV以上では波高分布の形状は概ね一致しており、両者ともにほぼ平坦で推移し、ピークは見られず、6 MeV付近で「肩」状の構造がある。

(3) 考察

以上のように、計数値すなわち検出感度およびパルス波高分布の形状の比較を行った結果、両者間に少し差異が存在する。その原因として次のようなことが考えられる。

a. 散乱線の影響

線のエネルギーが高くなると、コンプトン散乱や電子対生成の相互作用により入射線の方向とエネルギーが変わる。これはエネルギーが高くなるほど寄与が多くなる。計算では、検出器のハウジング、周辺構造物、架台等を考慮していない。従ってこれらの周辺材により散乱線が増加し、結果としてビルドアップが起こり、検出器部分に入射する線が増え、感度が向上する。この影響については、これらの周辺材を模擬した、より詳細な計算により評価が可能である。そこで、まず検出部保護用のアクリルケースのみを考慮した計算で評価したところ、N - 16領域の感度増加効果は20%程度となり、上記の推察が裏付けられた。

b. パイルアップの影響

計数のパイルアップにより、高エネルギー領域の見かけの計数率が増加したことが考えられる。今回の実験はパイルアップの影響の少ない距離15cmの結果を採用しており、影響は少ないと考えられるが、概算では数%程度と考える。高線量当量率時に正確な計測を行うためには、パイルアップ除去回路を付加することが有効であり、計測場所（検出器設置場所）に応じた設計を行うことを留意しておく必要がある。

c. $\mu \cdot$ 積の評価値の影響

実験で用いたCZT素子の $\mu \cdot$ 積を推定するため、出力波形から電子の移動度 μ_e を求めた結果は $3 \times 10^3 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ となった。寿命 τ を 10^{-6} s と仮定すると電子の $\mu \cdot$ 積は $3 \times 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V}$ と推定でき、想定していた値の2倍であった。

このため、ここで用いたCZT素子の $\mu \cdot$ 積は想定していた値よりも大きい可能性がある。このこと

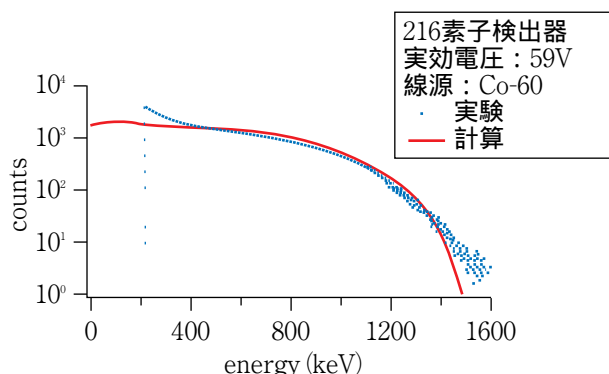


図12 Co-60における実験と計算のパルス波高分布の形状比較

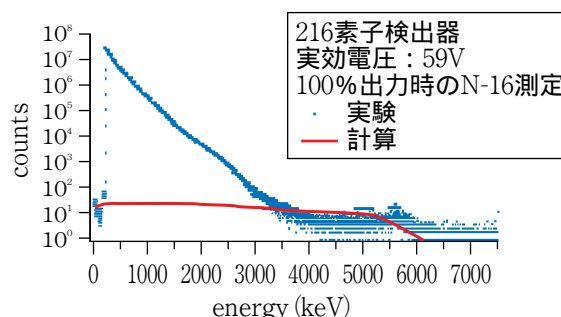


図13 N-16における実験と計算のパルス波高分布の形状比較

は、想定していた $\mu \cdot$ 積を4倍にした場合の計算と実際の測定結果が、よい一致を示していることから確かめられた。

以上により、計算手法およびそれに用いたパラメータの値はほぼ妥当であるといえる。

6. CZT検出器N-16モニタの実機適用の評価

6.1 現行のNaI (TI) 検出器とほぼ同じ検出感度のCZT検出器

実機サイズのCZT検出器として、現在用いられている直径、厚さともに3インチのNaI(Tl)シンチレーション検出器とほぼ同じ検出感度を持つCZT検出器を想定した結果、その基本仕様は次のようになった。

使用素子(单品) : CZT, 12x12x1mm
 ホルダー : 1枚に9素子を装着
 積層方法 : ホルダー4枚を平面に配置し72段の積層とする
 (全素子数,2592個,全体ホルダー数,288枚)
 印加実効電圧 : 250V

この検出器について行った計算の体系を図14に示す。次にN-16の線をこれに入射させたときのパルス波高分布の計算値を図15に示す。この結果から、素子の実効電圧を250Vとした場合、N-16の検出感度は、289cps/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}$)となる。実際上は、さらに散乱線の影響で10~20%程度の感度増加が見込まれる。この値は現行のNaI(Tl)検出器の要求感度300cps/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}$)とほぼ同じ値である。

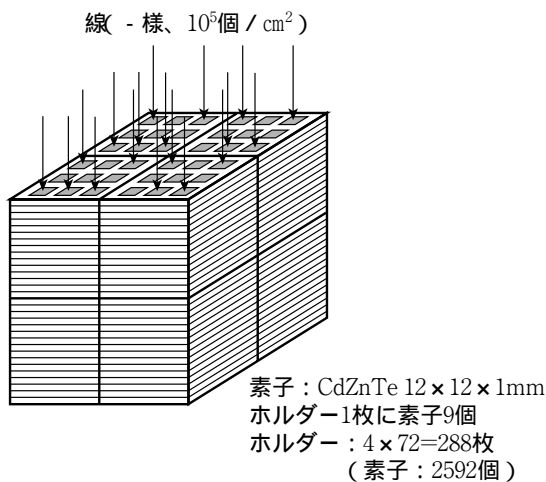


図14 実機用CZT検出器と感度計算の仮定

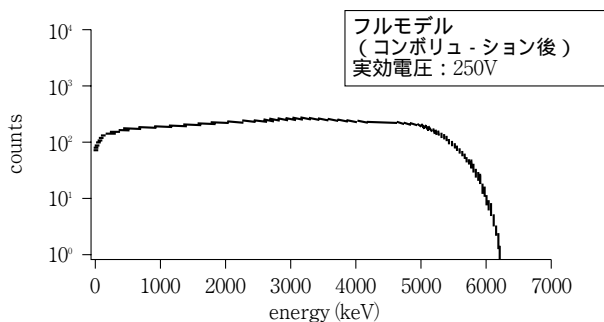


図15 実機用CZT検出器のN-16に対するパルス波高分布の予測

6.2 実機への適用性の評価

CZT素子単体, 10層モデル, 216素子およびフルモデル2592素子のCZT検出器の計算と実験の結果から、検出部の有感体積とN-16感度の関係をまとめると、図16のようになる。これにより、フルモデルの体系において素子に印加する電圧が250Vの場合、要求感度が達成できることが分かる。また、図17に実機用モニタの構造の概念を示す。これは2592素子を搭載した288個のホルダーを検出部とし、回路分割したプリアンプ基板を装着する。プリアンプはICを用いることにより、小スペース化を図る。

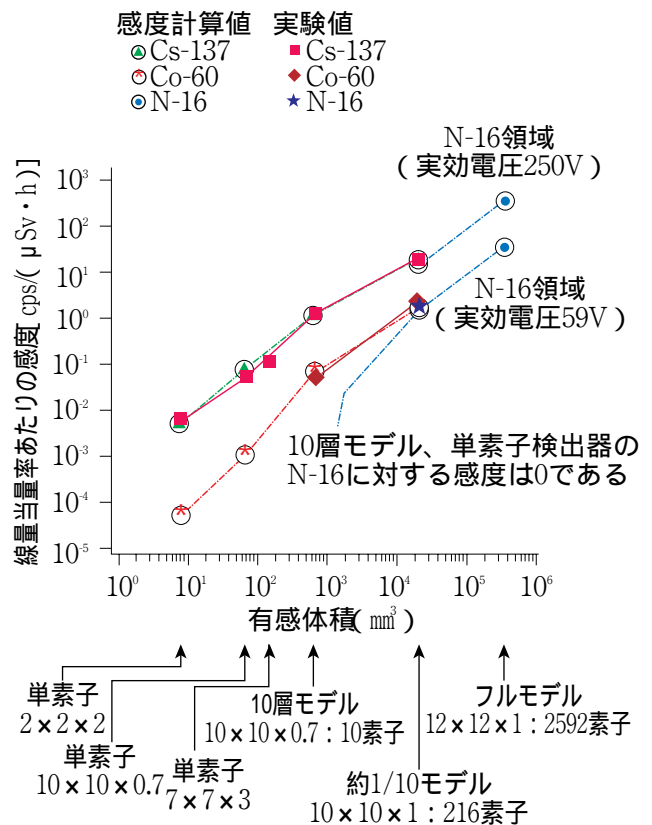


図16 実機適用性の評価 (有感体積に対するN-16の感度)

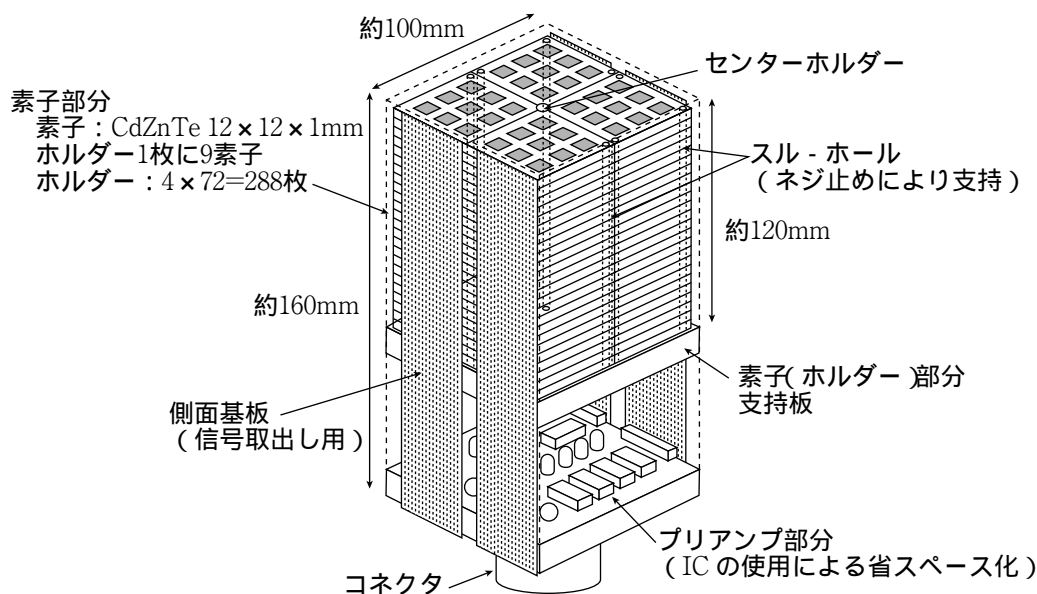


図17 実機用CZT検出器N-16モニタの概念図

7. まとめ

(1) CZT検出器の試作

PWRのN-16モニタ用として、常温から100近傍まで安定な動作が期待できるCZT半導体素子を用いて、CZT線検出器を試作した。検出器の構成は、ホルダー1枚あたり9個のCZT素子（単品寸法：10x10x1mm）を搭載し、このホルダーを24段積層した（素子総数216個）。プリアンプとしては回路分割方式を採用した。

(2) 線検出感度の計算

試作した216素子検出器の形状、寸法と材料を配置し、電荷キャリアの挙動を考慮した計算モデルを作成して、線検出感度の計算を行った。得られた計算結果にエネルギー軸の補正および検出器分解能関数によるコンボリューションを施した。

(3) 試作CZT検出器によるCs-137、Co-60およびN-16の線測定

試作した216素子CZT検出器により、校正線源（Cs-137とCo-60）および実際のPWRプラントでのN-16の線に対するパルス波高分布の測定を実施し、これらに対する検出感度の実験値を得た。

(4) 検出感度計算の妥当性検証

216素子CZT検出器についての線検出感度計算の結果と実験の結果を比較し、ほぼよい一致を得た。例えばCo-60では計算結果が1.30cps/(μ Sv \cdot h)に対して実験の結果は1.34cps/(μ Sv \cdot h)であり、N-16では計算結果が1.13cps/(μ Sv \cdot h)に対して実験の結果は1.24cps/(μ Sv \cdot h)であり、両者を比較検討した結果、計算手法とこれに用いたパラメータの値は概ね妥当であって、この手法の妥当性が確認された。なお実験値と計算値の差異については、周辺構造材による散乱線の影響が10~20%あることが分かった。

(5) CZT検出器N-16モニタへ実機適用性の評価

上記計算手法を用いて、現在実機で使用されているNaI(Tl)検出器とほぼ同じ検出感度を持つCZT検出器を設計し、その検出感度を計算し、実機への適用性について検討評価を行った。想定したCZT検出器は、1枚あたりに9個の素子（寸法：12x12x1mm）を装着したホルダー4枚を平面に配置し、これを72段積層（素子総数2592個）して構成する。このCZT検出器は現行のNaI(Tl)検出器の要求感度（300cps/(μ Sv \cdot h)）を充たす。

8. 謝辞

本研究の実施にあたり，実際に現場でのN - 16測定について，関西電力（株）高浜発電所計装保修課および大飯発電所計装保修課をはじめとし，両発電所の関係者の方々には大変お世話になりました。また，大阪大学RIセンターの山本幸佳教授には，この研究の遂行に際して貴重な助言と御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- (1) Y.Iwase, R.Ohno, et.al., Current-voltage characteristics of high resistivity CdTe, Mat. Res. Soc. Symp.Proc. Vol. 302, pp. 225-230 (1993)
- (2) C.J.Johnson, E.E.Eissler, et.al., CRYSTALLOGRAPHIC AND METALLURGICAL CHARACTERIZATION OF RADIATION DETECTOR GRADE CADMIUM TELLURIDE MATERIALS, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.302, pp. 463-478 (1993)
- (3) T.O.Tumer, D.C.Joyce. et.al., Preliminary Results Obtained from Novel CdZnTe Pad Detectors, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol.43, No.3, pp. 1417-1421 (1996)
- (4) G. F. Knoll (木村逸郎, 阪井英次訳), 「放射線計測ハンドブック第2版」, 日刊工業新聞社 (1991年)
- (5) K.Ikegami, H.Nishizawa, T.Usami, and T.Yamamoto, Radiation Protection Dosimetry, IMPROVEMENT OF THE SENSITIVITY OF CdTe RADIATION DETECTORS IN THE HIGH ENERGY REGION, Vol.66, Nos.1-4, pp.455-458 (1996)
- (6) H.Nishizawa, K.Ikegami, K.Takashima, T.Usami, and T.Yamamoto, IMPROVEMENT OF THE SENSITIVITY OF CdTe DETECTORS IN THE HIGH ENERGY REGIONS, KEK Proc.96-4, Proc. of the 10th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, pp. 230-239 (1996)
- (7) H.Nishizawa, K.Ikegami, K.Takashima, T.Usami, and T.Yamamoto, IMPROVEMENT OF THE SENSITIVITY OF CdTe SEMICONDUCTOR DETECTOR IN THE HIGH ENERGY REGION, IRPA9 Proc. Vol.4, pp. 287-289 (1996)
- (8) 西沢博志, 池上和律, 高嶋和夫, 宇佐美照夫, 積層型CdTe半導体検出器の開発, 「放射線」 Vol.22, No.3, pp. 27-36 (1996)
- (9) 西沢博志, 積層型CdTe半導体検出器の開発, 「放射線」 Vol.23, No.4, pp. 123-131 (1997)
- (10) H.Nishizawa, K.Ikegami, K.Takashima, T.Usami, T.Hayakawa, T.Yamamoto, H.Nakamura and Y.Matsuoka, A Cd_{1-x}Zn_xTe γ -ray Detector Sensitive in High Energy Regions, Technical Digest of the 15th Senser Symposium 1997, pp. 123-128 (1997)
- (11) K.Ikegami, H.Nishizawa, K.Takashima, T.Usami, T.Hayakawa, T.Yamamoto, H.Nakamura and Y.Matsuoka, CZT SEMICONDUCTOR RADIATION SENSER FOR HIGH ENERGY GAMMA RAYS, Radiation Effects & Defects in Solids, Vol. 146, pp. 161-173 (1998)
- (12) W.R.Nelson, H. Hirayama and D.W.O.Rogers, The EGS4 Code System, SLAC-265 (1985)
- (13) H.Nishizawa, K.Ikegami, K.Takashima, T.Usami, and T.Yamamoto, CALCULATION OF CdTe SEMICONDUCTOR DETECTOR RESPONSE, KEK Proc.96-10, Proc. of the Sixth EGS4 Users' Meeting in Japan, pp. 61-69 (1996)
- (14) 西沢博志, 池上和律, 高嶋和夫, 宇佐美照夫, 早川利文, 藤原博次, 山本幸佳, 中村裕明, 松岡由了, CdTe半導体検出器の応答計算, 日本原子力学会「1997年春の年会」予稿集 B-15