

高速中性子檢出器 NE-213 有機液体 Scintillator에 依한 n- γ 波形判別

李 大 遠

The n- γ Pulse-shape Discrimination in Liquid Organic Scintillator NE-213 as a Fast Neutron Spectrometer

Dae-Won Lee

目 次	
1. 序 論	3.1 NE-213 檢出器
2. 原 理	3.2 測定回路
2.1 有機液体 Scintillator에 依한 中性子の 檢出	3.3 檢出器의 調整
2.2 中性子-Gamma 線 波形判別	4. 結果와 考察
3. 測 定	

Abstract

A fast neutron spectrometer which utilizes a cylindrical liquid organic scintillator of dimension 53- by 57-mm dia., filled with NE-213 scintillator* mounted on a RCA-4522 photomultiplier tube gives good linearity and good pulse-shape discrimination against gamma-rays. The zero cross-over timing method is used for pulse-shape discrimination. Measurements of Am-Be pulse-shape spectra and pulse-height distributions are presented. Also pulse-shape discrimination ability is discussed.

(* NE-213 scintillator: manufactured by Nuclear Enterprises, Ltd., Winnipeg, Canada)

1. 序 論

최근 核融合爐의 研究, 開發이 進行되어, 特히 D-T爐의 實現을 서두르고 있다. 그 중에서 Blanket의 Neutronics가 큰 研究課題의 하나로 되어있다.

核融合爐 blanket의 設計를 위해서는 Tritium 增殖比, 放射線發熱分布, 遮蔽效果 등을 正確히 알 必要가 있다. 이를 위해 blanket를 核的으로 模擬한 体系에서의 中性子 및 Gamma線의 舉動을 조사하여 設計에 利用할 核計算 system을 開發하고 이것을 實驗的으로 檢證하지 않으면 안된다. 筆者도 Neutronics 研究의 立場에서 D-T反應에 의해 생기는 中性子の 体系로부터

의 透過 spectrum 測定을 위해 有機液体 scintillator와 pulse 波形判別回路를 利用한 高速中性子 檢出器를 제작하였다.

高速中性子 檢出器로서의 有機 scintillator는 反跳陽子型에 속하며 다음과 같은 長點을 갖고 있다(1~3).

- 1) 比例計數管型 反跳陽子檢出器 等 氣體檢出器나 計數管望遠鏡 等에 比較하여 檢出效率이 높다.
- 2) Rise Time의 빠른 出力 pulse를 얻을 수 있다(rise time ≈ 10 nsec). 그러므로 飛行時間法 등 高時間分解能을 要求하는 測定에 有利하다.
- 3) 單色中性子에 對한 反跳陽子 spectrum의 應答이 직사각형에 가까운 比較的 간단한 形으로 된다.

有機 scintillator는 위와 같은 長點이 있는 反面에 다음과 같은 缺點도 있다(4~5).

- 4) 發光量이 작기 때문에 pulse 波高分解能이 좋지 않다.
- 5) Gamma線에도 感應하여 波高로부터 入射粒子를 判別 할 수가 없다.

筆者가 使用한 有機液体 scintillator NE-213은 위에서 말한 長點以外에도 다음과 같은 特徵을 갖고 있다(6~7).

6) 液体이기 때문에 形態, 크기에 關한 自由度가 크며 熱이나 충격에 強하고 또 應答에 非等方性이 없다.

7) 光 pulse의 形은 scintillation을 일으킨 荷電粒子의 種類에 따라 다르며, 荷電粒子의 種類 즉 入射粒子의 種類를 pulse 波形에 의하여 判別할 수가 있다. 그러므로 5)의 缺點을 除去할 수가 있다.

NE-213은 特히 7)의 性質이 뚜렷하며 波形에 의한 粒子判別能力이 크다.¹⁾²⁾

以上과 같이 NE-213 有機液体 scintillator는 高速中性子檢出器로서 가장 適合한 것 中의 하나라고 생각된다.

2. 原 理

2.1 有機液体 scintillator에 의한 中性子の 檢出

有機液体 scintillator에 의한 中性子 檢出은 反跳陽子法의 一種이라고 말할수 있다. 陽子에 의한 中性子 彈性散亂에서 생기는 反跳陽子の Energy는 非相對論的 領域에서 다음과 같은 式으로 表現할 수 있다.

$$E_p = E_n \cos^2 \theta \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 E_n : 入射中性子 Energy
 E_p : 反跳陽子 Energy
 θ : 反跳角

또 入射中性子 Energy가 約 15MeV 以下일 경우에는 陽子の 彈性散亂은 重心系에서 等方的이기 때문에 이때의 反跳陽子 Energy spectrum은 다음式으로 表現되는 직사각형이 된다.

$$\phi(E_p) = \begin{cases} K & (0 \leq E_p \leq E_n) \\ 0 & (E_p > E_n) \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 K : 定數

그러나 다음 節에서 記述하는 바와 같이 有機 scintillator는 陽子等 阻止能이 큰 荷電粒子에 對하여 scintillation光量의 比例性이 좋지않다. 이 때문에 波高 spectrum은 직사각형이 되지 않는다. 더욱이 MeV 領域의 中性子에 對하여서는 炭素의 斷面積을 無視할 수가 없다. 20MeV까지의 Energy 範圍에서 일어날수 있는 反應에는 다음과 같은 것 들이 있다.

- 1) $^{12}\text{C}(n, n)^{12}\text{C}$
- 2) $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$
- 3) $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$
- 4) $^{12}\text{C}(n, n')^3\text{He}$
- 5) $^{12}\text{C}(n, p)^{11}\text{B}$
- 6) $^{12}\text{C}(n, pn)^{11}\text{B}$
- 7) $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$

이러한 反應에서 생긴 荷電粒子에 의한 scintillation 波高分布가 反跳陽子에 의한 波高分布에 중첩되며 또 多重散亂效果도 겹쳐서 觀測된 波高 spectrum은 꽤 복잡한 spectrum이 된다. 이 波高 spectrum은 實驗적으로 測定하는 以外에 Monte-Carlo法에 의하여 計算할 수가 있다.³⁾ 또 實驗과 Monte-Carlo 計算을 結合시켜 보다 正確한 應答를 求한 例⁴⁾도 있다.

2·2 中性子—Gamma 線 波形判別

有機 scintillator 發光機構에 對하여 簡單히 說明한다.⁵⁾ 有機分子와 荷電粒子와의 相互作用은 다음의 4過程으로 크게 나눌 수가 있다.

- 1) π-電子의 1重項勵起狀態로의 勵起
- 2) π-電子의 電離
scintillation에 寄與하는 것은 이상의 2 過程이다.
- 3) π-電子 以外의 電子 (σ-電子와 炭素 1s 電子)의 勵起
- 4) π-電子 以外의 電子의 電離

여기에서 π-電子의 第1重項勵起狀態를 第1勵起狀態 S_1 , 第2勵起狀態를 S_2 ……로 表現하자. 같은 모양으로 π-電子의 3重項勵起狀態를 T_1, T_2 ……로 表現하자. 基底狀態는 1重項狀態에서 S_0 로 表現한다. 波長 spectrum의 研究에 의하면 1)의 過程은 S_0 로부터 S_1, S_2 ……에로, 1重項狀態間의 勵起인 것이 確認되었다. S_0 로부터 T_1, T_2 ……에서의 勵起는 選擇의 法則에 의하여 禁止되어 있다. S_2 以上の 1重項勵起狀態는 壽命이 測定 不可能할 정도로 짧고 狀態間의 遷移에 의한 放射波長은 scintillator의 自己吸收가 強한 範圍에 있기때문에 檢出할 수가 없다. 따라서…… $S_2 \rightarrow S_1$ 과 같은 順序에 의해 S_1 狀態로 되며 1)은 結局 S_1 狀態를 만드는 狀態라고 할 수 있다. 한편 2)의 過程에서 생긴 ion은 再結合 할 때에 約 75%가 3重項勵起狀態 分子가 되고…… $T_2 \rightarrow T_1$ 의 順序로 T_1 狀態의 分子가 만들어진다. 波長 spectrum의 研究에 의하면 scintillation은 S_1 狀態로 부터 S_0 狀態로의 遷移에 의하여 放射되는 것이 알려져 있다. S_1 狀態의 壽命은 約 10nsec로 1)의 過程에서 만들어진 S_1 狀態의 大部分은 S_0 狀態로 遷移하여 scintillation의 主要部인 ‘빠른成分’을 形成한다. 그러나 一部の S_1 狀態는 ‘Inner System Crossing’이라고 불리우는 過程에서 光의 放射를 수반하지 않고 T_1 狀態로 遷移한다.

T_1 狀態 自体의 壽命은 대단히 길며 그 放射光을 燐光 이라고 부른다. 그러나 T_1 狀態는 $T_1 - T_1$ 對를 만들며 그 相互作用에 의하여 S_0 狀態와 S_1 狀態로 變化한다. 이 過程의 速度는 T_1 끼리의 相互作用確率에 依存하며 一般적으로 數 100nsec 程度이다. 따라서 $T_1 - T_1$ 相互作用을 源으로하는 S_0 狀態에 依하여 생긴 scintillation의 減衰는 S_1 狀態 自体의 壽命에 比較하여 길며 scintillation의 ‘늦은成分’을 形成한다. 이 외에 電離消滅이라고 불리우는 重要な 效果가 있다. 이것은 電離의 效果가 높은 경우에 S_1 狀態가 消滅하는 效果를 말한다. scintillation을 일으키는 荷電粒子 阻止能의 差異는 S_1 狀態와 T_1 狀態의 生成量, 그리고 위에서 말한 여러가지 效果에 의하여 影響을 받는다. 阻止能이 크면 클수록 電離密度는 增加하고 電離消滅에 의하여 S_1 狀態는

減少한다. 이것이 陽子나 alpha粒子的 Energy가 scintillation量과 比例하지 않는 原因이 된다. S_1 狀態가 減少하면 'Inner System Crossing'에 의하여 生成된 T_1 狀態는 減少한다. 그러나 電離密度的 增加는 結合確率의 增加에 관련되며 2)의 過程에서 生成된 T_1 狀態는 增加한다. 따라서 T_2 狀態에 관하여서는 阻止能의 영향이 相殺되어 버린다. 때문에 荷電粒子阻止能에 의하여 S_1 狀態와 T_1 狀態의 比率이 달라지며 그 結果 scintillation波形이 變化한다. 以上에 의하여 有機液体 scintillator에서는 pulse의 波形으로부터 荷電粒子의 阻止能의 相異를 識別할 수 있고 反跳陽子와 反跳電子의 判別 즉 中性子와 Gamma線의 判別이 可能하다.

中性子-Gamma線 波形判別回路에 對하여서는 現在까지 많은 研究가 報告되어 있다.²⁾⁶⁻¹¹⁾ 代表的인 方法으로서는 '零交差時間法'과 '電荷比較法'이 있다.

1) 零交差時間法

scintillator pulse를 積分함에 따라 波形의 相異는 pulse의 rise time의 相異로 變換된다. 이 積分 pulse를 2重遲延線整形 혹은 RC微積分整形을 하여 bipolar를 만들면 그 零交差時間은 pulse의 波高에 關係하지 않고 pulse의 rise time 즉 scintillation의 波形에만 依存한다. 이 零交差時間의 相異를 檢出하여 波形判別을 行한다. 이 方法의 特徵은 dynamic range가 넓으며 (約1:400), 高計數率에 對한 許容性(約 10^4 cps)을 들수 있다.

2) 電荷比較法

다음의 式으로 R 을 定義한다.

$$R = \frac{\int_0^T S(t) dt}{\int_0^\infty S(t) dt} \dots \dots \dots (3)$$

여기에서 t : 時間, pulse의 起點에서 $t=0$

$S(t)$: scintillation pulse

T : 適當한 時間

이와같이 R 은 pulse의 波高에 關係하지 않고 pulse의 波形에만 依存한다. 電荷比較法은 R 을 回路의으로 求하는 것에 의하여 波形判別을 行한다. 이 方法의 特徵은 低波高領域에서 判別能力이 크다. 筆者는 零交差時間法을 使用하였다. 상세한 回路에 對하여서는 後述한다.

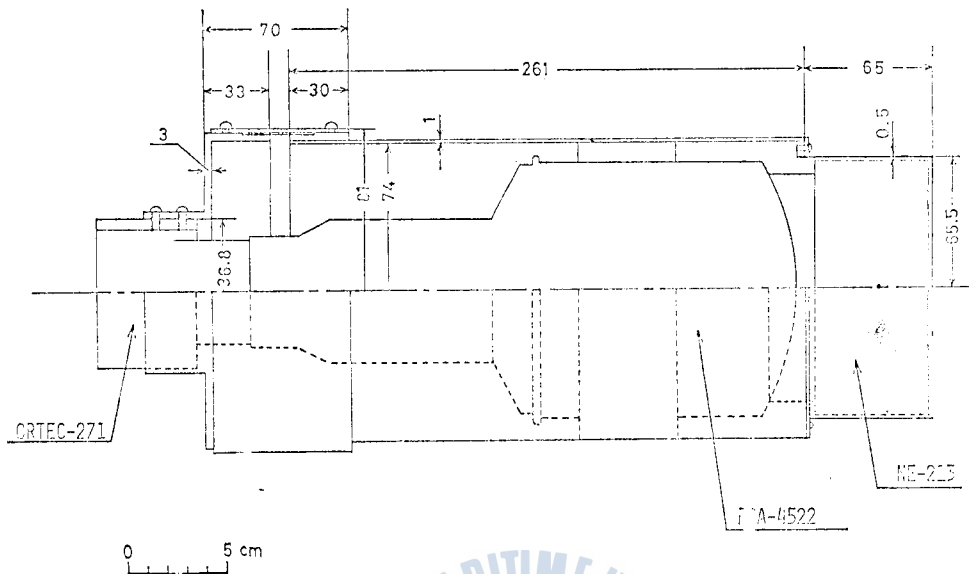
3. 測 定

3.1 NE-213 檢出器

製作한 檢出機를 第1圖에 나타내었다.

scintillator는 Nuclear Enterprises社製로 內徑 114mm, 높이 53mm의 유리製 圓筒容器로 密封되어 있다. 測面과 밑면은 反射體로 싸여져 있으며 이것은 또 Aluminium容器로 保護되어 있다. 光電子增倍管은 RCA社 製品인 RCA-4522를 使用하였다. RCA-4522는 14段의 dynode로 되어 있으며 直徑은 5inch로 凸面狀의 光電陰極을 갖고 있는 光電子增倍管이다. scintillator와 光電子增倍管은 acrylic製 light guide와 silicon grease를 使用하여 接合시켰다. 檢出器의 case는 鐵로 製作하였으며 scintillator의 머리 部分은 中性子에 對한 影響을 考慮하여 0.5mm 두께의 鐵로 製作하였다. case의 全長은 ± 2 cm의 範圍에서 可變할수 있도록 하여 다른 光電子增倍管, 예를 들면 Philip社의 XP-1040等도 使用 可能하다.

高電壓의 極性은 負(-)이며 光電陰極은 負의 高電位이다. 그러므로 光電陰極과 case를 Te-



第 1 圖 NE-213 有機液体 Scintillation 檢出器

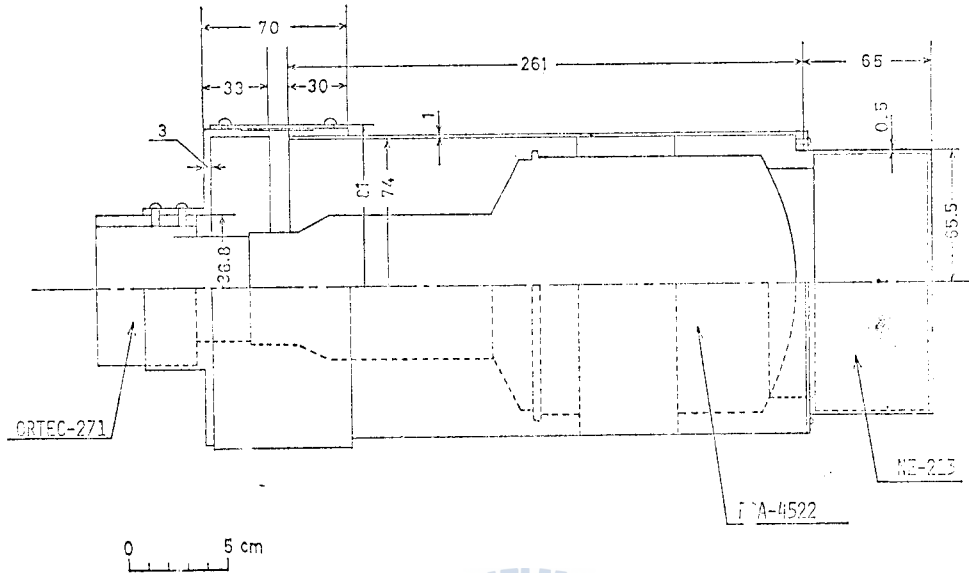
flon sheet와 Styrofoam으로 絶緣시켰다. 高電壓의 分壓回路는 ORTEC社製인 ORTEC-271을 使用하였다. ORTEC-271은 高電壓分壓回路 以外에 前置增幅器와 高時間分解能(約500psec)의 時間 pulse를 얻기 위한 Constant Fraction Timing Discriminator를 內藏하고 있다.

3.2 測定回路

測定回路의 Block Diagram은 第2圖와 같다.

筆者가 使用한 波形判別回路는 零交差時間法을 利用하였다. 光電子倍增管의 印加 電壓은 gain의 調整을 위하여 $-2,000$ volt와 $-2,300$ volt를 使用하였다. 波高信號는 光電子倍增管 RCA-4522의 第 10 dynode로부터 빼어내었다. 이 信號는 ORTEC-271의 前置增幅器로 積分하여 2重遲延線波形整形增幅器(D. D. L. 增幅器, ORTEC-410)로 보내어 bipolar로 만든다. 整形의 時定數는 1段, 2段 共히 0.8μ sec이다.

D. D. L. 增幅器의 出力은 2개로 分岐되어 하나는 μ sec遲延器와 Linear Gate and Stretcher를 거쳐 Multichannel Analyzer로 간다. 다른 하나는 Timing 單一波高分析器(T. S. C. A. #1)에 入力된다. T. S. C. A. #1은 入力된 pulse의 波高가 設定된 判別幅 內에 있을 때, 入力 bipolar pulse의 零交差時에 同期한 Logic pulse를 出力한다. D. D. L. 整形 bipolar pulse의 零交差時刻는 다음과 같은 式으로 나타낼 수 있다.



第 1 圖 NE-213 有機液体 Scintillation 檢出器

flon sheet와 Styrofoam으로 絶緣시켰다. 高電壓의 分壓回路는 ORTEC社製인 ORTEC-271을 使用하였다. ORTEC-271은 高電壓分壓回路 以外에 前置增幅器와 高時間分解能(約500psec)의 時間 pulse를 얻기 위한 Constant Fraction Timing Discriminator를 內藏하고 있다.

3·2 測定回路

測定回路의 Block Diagram은 第2圖와 같다.

筆者가 使用한 波形判別回路는 零交差時間法을 利用하였다. 光電子倍增管의 印加 電壓은 gain의 調整을 위하여 -2,000 volt와 -2,300volt를 使用하였다. 波高信號는 光電子倍增管 RCA-4522의 第 10 dynode로부터 빼어내었다. 이 信號는 ORTEC-271의 前置增幅器로 積分하여 2重遲延線波形整形增幅器(D. D. L. 增幅器, ORTEC-410)로 보내어 bipolar로 만든다. 整形의 時定數는 1段, 2段 共히 0.8μ sec이다.

D. D. L. 增幅器의 出力은 2개로 分岐되어 하나는 μsec遲延器와 Linear Gate and Stretcher를 거쳐 Multichannel Analyzer로 간다. 다른 하나는 Timing 單一波高分析器(T. S. C. A. #1)에 入力된다. T. S. C. A. #1은 入力된 pulse의 波高가 設定된 判別幅 이내에 있을 때, 入力 bipolar pulse의 零交差時刻에 同期한 Logic pulse를 出力한다. D. D. L. 整形 bipolar pulse의 零交差時刻은 다음과 같은 式으로 나타낼 수 있다.

$$T_C = T_D + T_R \cdot \ln R \dots\dots\dots(4)$$

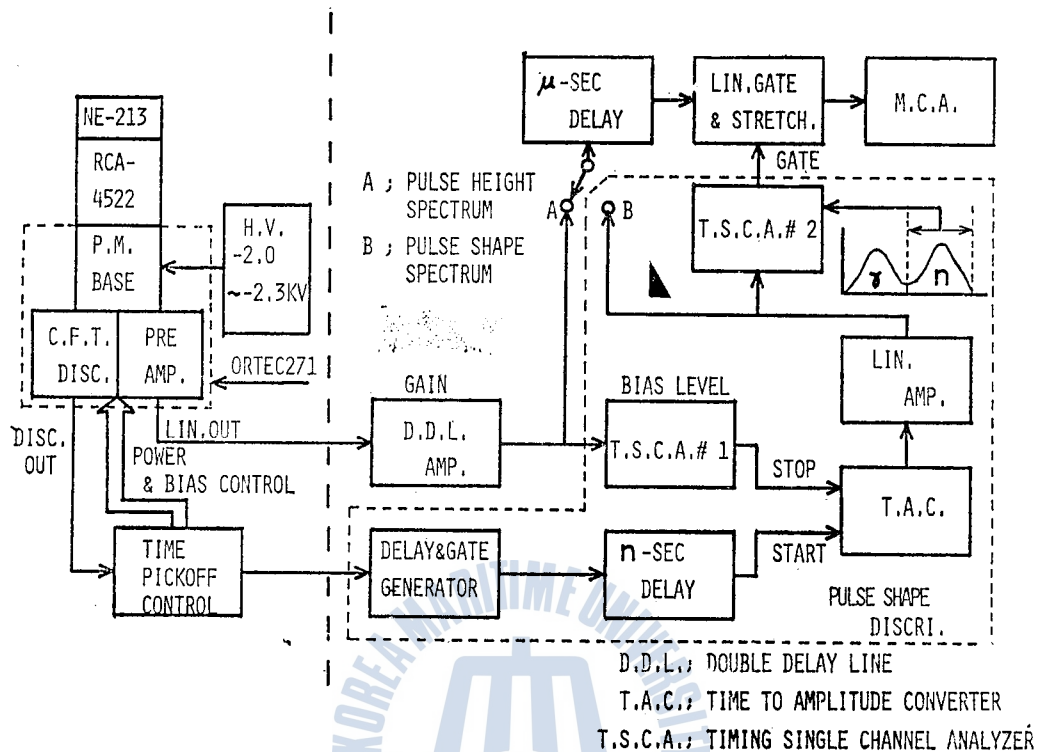
단 $T_R \ll T_D$

여기에서 T_R : pulse의 rise time

T_D : 遲延線整形의 時定數

T_C : 零交差時刻(pulse의 起點을 0으로 한다)

(4)式으로부터 알 수 있는 바와 같이 T_C 는 T_R 만의 函數로서 pulse의 振幅에는 關係하지 않는다. 따라서 適當한 時間基準 pulse를 使用 한다면 pulse의 rise time의 變化를 時間基準 pulse와 T. S. C. A #1의 出力 pulse와의 變化로 變換시킬 수 있다. 단 時間基準 pulse는 scintillation

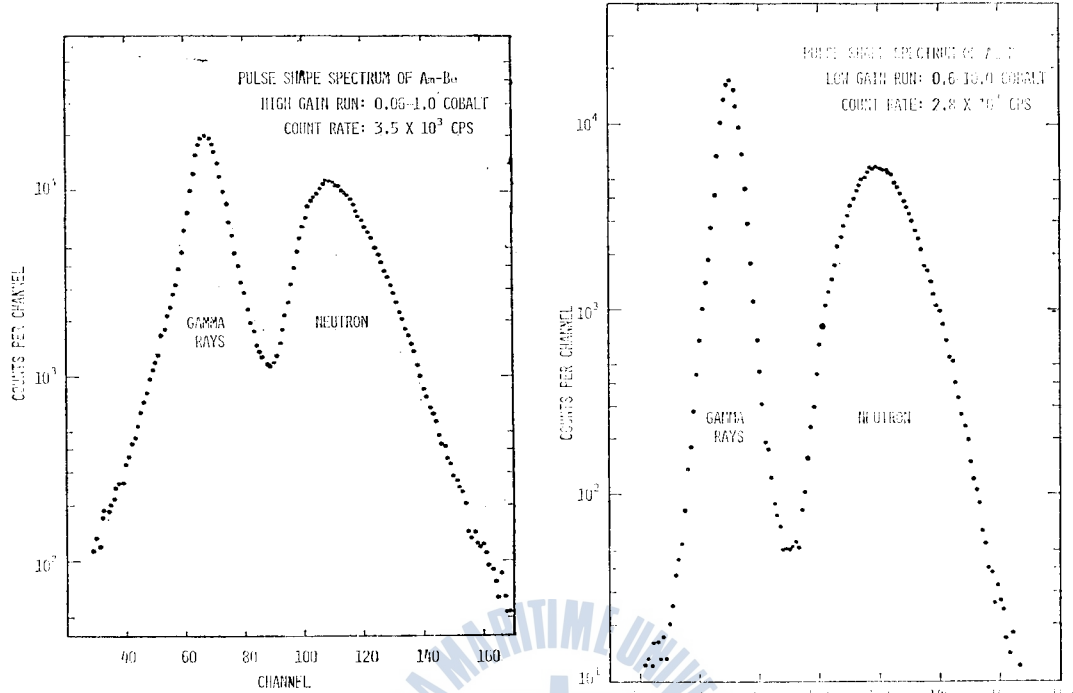


第 2 圖 測定回路 Block Diagram

의 波形과 波高에 關係해서는 안된다. 우리들은 時間基準 pulse로서 ORTEC-271의 Constant Fraction Timing Discriminator의 出力을 利用하였다. Constant Fraction Timing Discriminator의 出力은 Time Pick-off Control이라고 불리우는 Tunnel Diode Trigger를 사용한 fast fan-out회로를 거쳐 時間基準 pulse로 된다. 이 時間基準 pulse는 T.S.C.A.#1의 出力pulse와의 時間差를 時間波高變換器(T.A.C.)를 利用하여 pulse 波高로 變換시키면 pulse의 rise time 分布를 pulse의 波高分布 形態로 觀測할 수가 있다. rise time의 變化에 의하여 생긴 時間基準 pulse와 T.S.C.A.#1의 出力 pulse와의 時間差 變化를 相對적으로 크게 하기 위하여 約 $1\mu\text{sec}$ 遲延시켜 T.A.C.의 start pulse로, T.S.C.A.#1의 出力을 stop pulse로 쓴다. T.A.C.는 最大變換時間 $0.1\mu\text{sec}$ 에서 $1.0\text{mV } \mu\text{sec}^{-1}$ 의 出力을 얻을 수 있다. 이것을 增幅시켜 multichannel 波高分析器로 測定하면 pulse波形 spectrum을 觀測할 수가 있다. 時間軸의 矯正은 nsec 遲延器로 행한다. Am-Be中性子源에 의해 觀測된 pulse波形 spectrum은 第3圖와 같다. 또 Timing 單一波高分析器(T.S.C.A.#2)의 出力으로 Linear Gate를 Gate 시킨다. 이 Linear Gate에 D.D.L. 增幅器의 出力을 入力시키면 特定한 波形을 갖은 信號의 pulse 波高 分布를 얻을 수 있다.

以上の 回路의 信號處理('零交差時間法'에 의한 pulse의 波形判別)에 의하여 Gamma線 Background의 影響이 除去된 中性子 波高 spectrum을 觀測할 수가 있다. 이상과 같은 回路의 動作 原理는 第4圖와 같다.

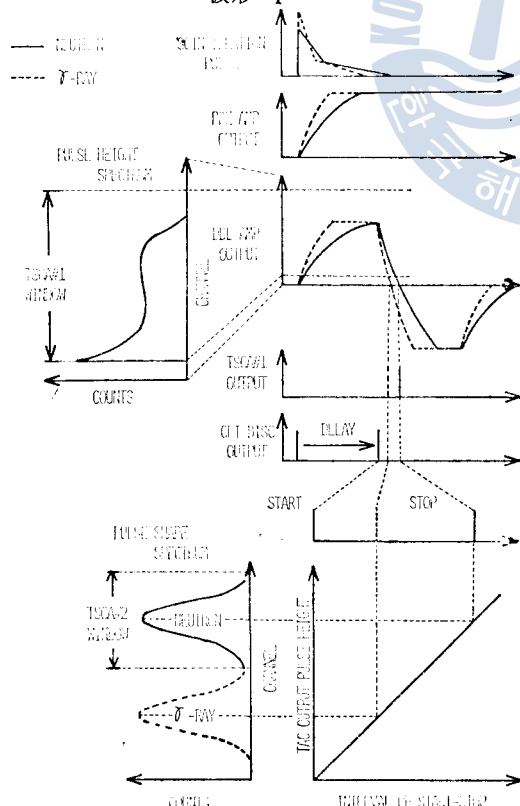
pulse 波高 spectrum, pulse 波形 spectrum은 Hitachi RH-403型 400 Channel Analyzer에 의해 分析하였으며 變換 Gain은 $0\sim 10\text{Volt}$ 를 200 channel로 하였다.



(a) High Gain測定 때의 Am-Be의 Pulse 波形 Spectrum

(b) Low Gain測定 때의 Am-Be의 Pulse 波形 Spectrum

第 3 圖



第 4 圖 回路의 動作

3.3 檢出器의 調整

測定에 앞서 다음과 같은 調整을 한다.

- 1) Gain의 調整
- 2) pulse 波形判別器의 判別幅 設定

(1) Gain의 調整

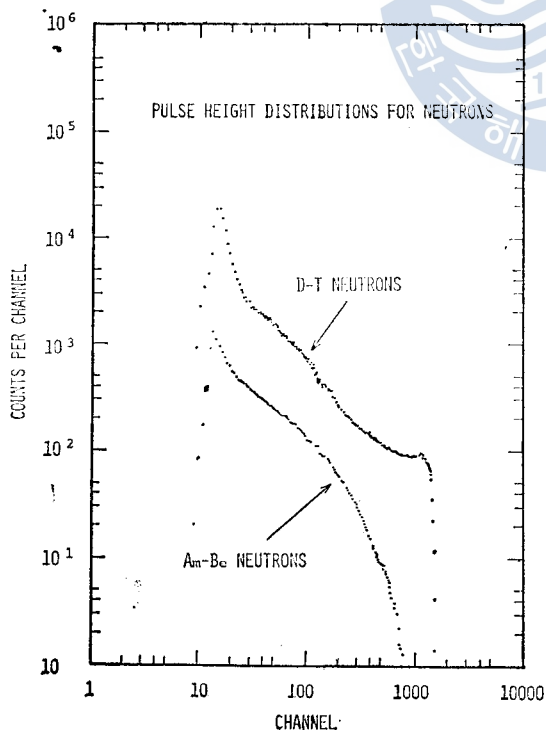
測定될 pulse의 波高分布는 spectrum의 解析에 使用하기 위한 應答函數의 波高軸의 尺度를 一致시키기 위해서는 Gain의 調整이 必要하다. 더욱이 넓은 pulse 波高 Dynamic Range(約 800:1)를 아주 精密하게, 그리고 效率이 좋도록 測定하기 위하여 하나의 測定對象에 對하여 High Gain과 Low Gain의 2회에 걸쳐 測定을 한다. 그러므로 測定할 때마다 Gain의 再現性이 問題가 된다. Gain의 調整은 光電子倍增管의 印加電壓과 線形增幅器의 增幅率을 調整하여 行한다. 筆者는 高電壓을 High Gain의 測定에서 -2,300volt, Low Gain의 測定에서 -2,000volt로 하였으며 그 이상의 微調整은 D.D.L. 增幅器(ORTEC-410)의 增幅率을 調整하였다.

波高의 基準으로서는 Cobalt-60과 高波高精度水銀 pulser(ORTEC-448)을 使用하여, 200 channel 波高分析器에 對하여 High Gain 測定은 0.005[Cobalt/Channel], Low Gain 測定은 0.05[Cobalt/Channel]로 하였다. 여기에서 말하는 [Cobalt]單位는 다음과 같이 實驗的으로 定義한다.

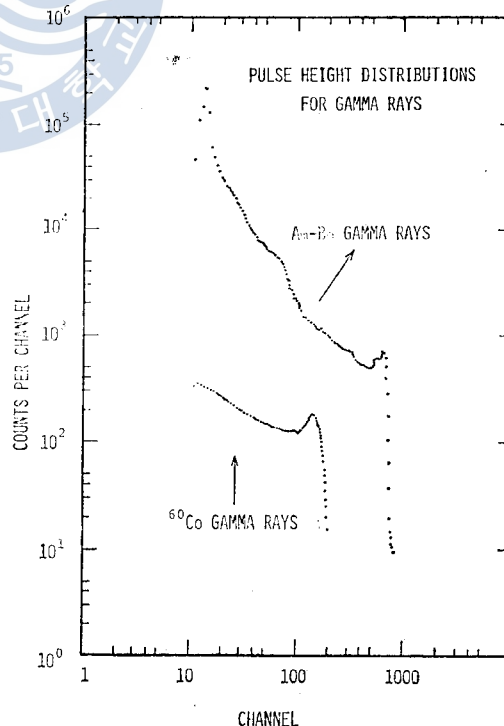
- ① ^{60}Co 의 Gamma線을 測定한다.
- ② 波高分布를 線形 Graph에 plot 한다.
- ③ Compton edge에 直線을 그어 이 直線의 零交差點을 1[Cobalt]라 한다.

(2) pulse 波形判別回路의 判別幅 設定

pulse 波形判別器의 調整은 Am-Be 中性子源을 利用하여 行한다. Am-Be은 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反應에 의해 中性子를 發生한다. 이때 殘留核 ^{12}C 가 第一勵起狀態로부터 基底狀態로 遷移할 때 4.43MeV의 Gamma線을 放出하기 때문에 Gamma 線源으로서의 性質도 갖고 있으며, 따라서 pulse 波形判別器의 調整에 適當하다. (1)의 Gain 調整後 Am-Be 中性子源의 pulse 波形 spectrum을 測定한다. Delay and Gate Generator의 遲延時間과 T. A. C.의 出力 增幅用인 線型增幅器의 增幅率을 調整하여 第3圖와 같은 適當한 波形 spectrum을 얻는다. T. S. C. A. #2의 出力으로 pulse 波形 spectrum 信號를 gate 시키면 T. S. C. A. #2의 判別幅 以內의 pulse 波形 spectrum만을 觀測할 수가 있다. 여기에서 T. S. C. A. #2의 判別幅으로 波形 spectrum의 中性子에 의한 peak를 좁혀 pulse 波高 spectrum으로 바꾸어 中性子만의 波高 spectrum을 觀測할 수가 있다. 같은 모양으로 Gamma線만의 波高 spectrum도 觀測 可能하다. 中性子の pulse 波高 spectrum은 第5圖, Gamma線의 波高 spectrum은 第6圖와 같다.



第 5 圖 中性子에 의한 Pulse의 波高分布



第 6 圖 Gamma線에 의한 Pulse의 波高分布

4. 結果와 考察

筆者가 製作한 有機液体 scintillator와 零交差時間法을 利用한 波形判別回路로 만든 高速中性子檢出器에 의해 3.2)에서 얻은 Am-Be 中性子源에 對한 pulse波形 spectrum(第3圖)로부터 中性子-Gamma 線粒子判別能力을 評價하였다.

各 pulse波形 spectrum에 있어서 Gamma 線 peak가 Gauss形分布를 하고 있다고 가정하여 中性子 peak에의 混入量을 外插에 의하여 推定하였다. 그 結果 다음과 같은 값을 얻었다.

High Gain 測定

波高範圍 0.06~1.0[Cobalt]

全計數率 3.5×10^3 cps

$$\frac{\text{混入量}}{\text{中性子 peak}} \times 100 = 0.8(\%)$$

Low Gain 測定

波高範圍 0.6~10.0[Cobalt]

全計數率 2.8×10^3 cps

$$\frac{\text{混入量}}{\text{中性子 peak}} \times 100 \leq 10^{-3}(\%)$$

Gamma線의 混入率은 測定對象의 Gamma 線 Energy, 中性子 Energy 또 Gamma線 計數率, 中性子 計數率에 의하여 變化하며 언제나 위의 값이 適用되는 것은 아니다. 그러나 電子 Energy 範圍 0.06~10MeV, 陽子 Energy 範圍 0.6~20MeV, 計數率 約 10^4 cps 以內의 實驗條件에서는 充分히 實用的인 波形判別에 의한 粒子判別을 達成할 수 있다고 생각한다.

參 考 文 獻

- 1) P. G. Sjölin : Nucl. Inst. and Meth. 37(1965)45
- 2) G. W. McBeth et al. : Nucl. Inst. and Meth. 93(1971)99
- 3) R. E. Textor and V. V. Verbinski : 05S ORNL-4160(1968)
- 4) V. V. Verbinski et al. : Nucl. Inst. Meth. 65(1968)8
- 5) J. B. Birks : The theory and practice of scintillation counting(pergamon, London, 1964)
- 6) M. L. Roush et al. : Nucl. Inst. and Meth. 31(1964)112
- 7) B. Sabban and A. Suhani : Nucl. Inst. and Meth. 58(1968)102
- 8) J. Kalyna and I. J. Taylor : Nucl. Inst. and Meth. 88(1970)277
- 9) P. Sperr et al. : Nucl. Inst. and Meth. 119(1974)55
- 10) P. Betz et al. : Nucl. Inst. and Meth. 119(1974)199
- 11) Christopher L. Morris : Nucl. Inst. and Meth. 137(1976)397

