

TRIGA MARK III 研究用 原子爐의 制禦 計測 系統

朴 寅 用* · 李 炳 璿**

1. 概 說

TRIGA MARK-II 原子爐가 最大 熱出力 100 KW 로 臨界에 到達한 後 10年을 지나오는 동안 國內의 原子力開發과 그 利用은 크게 增加하여 第一號機인 TRIGA MARK-II 는 最大 熱出力을 250 KW 로 增強 運轉되어 왔다. 그러나 高速 中性子線束(neutron flux)을 利用하는 研究分野의 擴大, 放射性 同位元素의 質的 量的 增加의 요청에 따라 새로운 高出力 原子爐를 必要로 하게 되었다. 政府는 이에 맞추어 建設費 9억 5400만 원을 投資하여 原子力研究所에 第二號機인 2MW 級 TRIGA MARK-III 原子爐를 1969年4월에 着工하여 1972年 5월에 竣工하였다.

一號機와 二號機의 型種인 TRIGA 는 訓練(Training), 研究(Research), 同位元素(Isotope) 生産을 爲한 原子爐로서 現在 시공회사인 걸프제너럴 아토믹社(Gulf General Atomics Inc., GGA)의 前身인 제너럴 아토믹社(GA)의 이름을 붙여 TRIGA 라 命名한 것이다.

TRIGA MARK-III 原子爐는 高中性子線束(high neutron flux), 高出力으로 運轉되며 그부속시설로 많은 實驗室과 放射性 同位元素의 生産 시설을 갖추고 있어서 이를 活用하면 研究分野가 擴大되어 研究遂行을 보다 効率的으로 할 수 있으며 放射性 同位元素의 增産을 꾀할 수 있다. 放射性 同位元素는 現在 TRIGA MARK-II 原子爐로 34種을 生産하고 있으나 39種으로 增加되며 특히 工業用 放射線源으로 널리 使用되고 있는 Ir-192, Co-60을 제조할 수 있다. 따라서 短壽命

의 同位元素는 國內에서 自給自足할 수 있게 된 것이다.

TRIGA MARK-III 는 定常最大出力 2000 KW (2MW)와 펄스方式일 때 最大出力 2000 MW 로 運轉된다. 核燃料 物質은 u-235를 20% 濃縮하여 使用하고 있으며 u-235의 量은 3.8 kg 이다.

TRIGA MARK-III 의 中性子實驗孔은 TRIGA MARK-II 의 4個에 比하여 무려 10個나 되며 熱中性子柱 2곳, 大型 中性子照射室 1 廻轉式 R.I. 生産 貯留통 1개를 保有하고 있다.

最大 中性子線束은 中心孔에서 定常運轉時 6.5×10^{13} 이고 펄스運轉時 6.0×10^{16} 이며 회전식 R.I. 생산 貯留통에서는 2.0×10^{13} 그리고 中性子照射室에서는 1.2×10^{12} 이다. 표 1은 TRIGA MARK-II 와 TRIGA MARK-III 의 諸 特性을 比較한 것이다.

사진 1은 TRIGA MARK-III 原子爐의 爐心과 附屬 實驗施設의 全景이며 그림 1은 垂直 및 水平 斷面圖이다.

2. 制禦 系統

TRIGA MARK-III 原子爐는 그 制禦用 各 回路를 半道體化하여 트랜지스터와 集積回路를 使用하여 小型化 하였다.

制禦系統은

1. 制禦臺(control console)를 中心으로 한 各 制禦端子和 標識裝置
 2. 原子爐制禦와 安全을 爲한 裝置
 3. 警報用 裝置
- 로 크게 大別할 수 있다.

* **原子力研究所

表 1. TRIGA MARK-III 主要 特性(TRIGA MARK-III 와의 對比表)

區 分	主 要 特 性 對 比	
	TRIGA MARK-III(KORR-III)	TRIGA MARK-I (KORR-I)
1. 出 力	정상 2000 KW 펄스 2000 MW	250 KW
2. 爐 心		
가. 핵연료 물질	20% 농축 u-235	20% 농축 u-235
나. u-235의 량	3.8 kg(임계량 2.3 kg)	2.3 kg(임계량 2.1 kg)
3. 實驗施設		
가. 中性子實驗孔	10	4
나. 熱中性子柱	2	1
다. 大型中性子照射室	1	—
라. 廻轉式 RI 生産 시료통	1	1
4. 中性子線束		
가. 中心孔 最大	정상 6.5×10^{13} 펄스 6.0×10^{16}	1.0×10^{13}
나. 廻轉式 RI 生産 시료통	2.0×10^{13}	1.7×10^{13}
다. 中性子照射室	1.2×10^{12}	—

TRIGA MARK-III 수직단면도

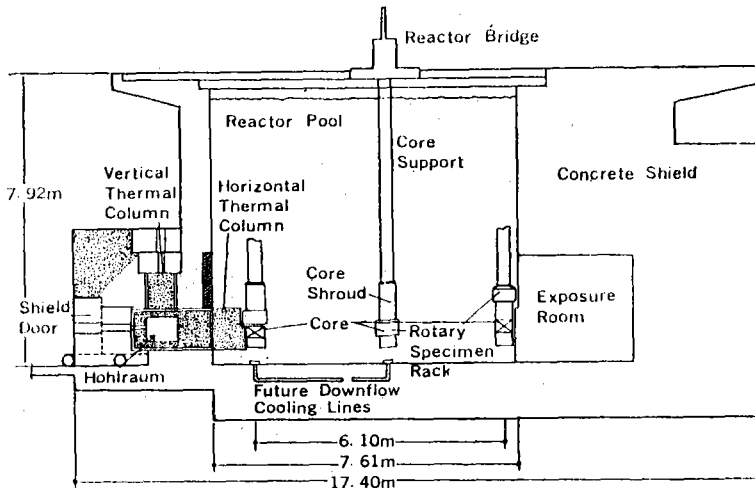


그림 1 a. TRIGA MARK-III 原子爐의 垂直斷面圖

2-1. 制禦臺(control console)를 中心으로 한 制禦 端子와 標識裝置

TRIGA MARK-III 原子爐의 制禦系統의 브리더는 그림 2와 같다.

制禦에 必要한 電源 스위치에서 出力미터, 制禦 棒位置標識, 出力記錄計等 모든 制禦用 스위치

와 단자(terminal), 標識은 卓上型의 制禦臺 (desk type control console)에 부차되어 原子爐 運轉에 便利하도록 되어있다.

TRIGA MARK-III 原子爐의 運轉形式은 4가지로 구별되는데 ① 手動方式(manual mode) ② 自動方式(automatic mode) ③ 구형과方式(square

TRIGA-MARK-III 수평단면도

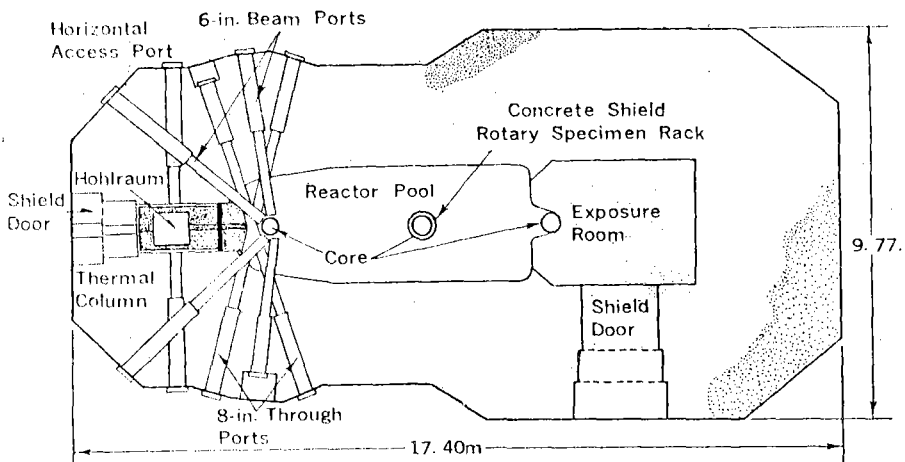


그림 1 b. TRIGA MARK-III 水平 斷面圖

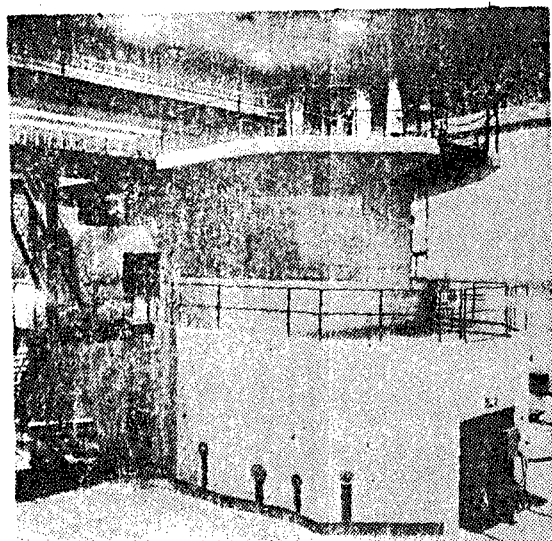


사진 1. TRIGA MARK-III 全景

wave mode) ④ 펄스方式(pulse mode)이다.

手動方式과 自動方式은 定常的인 運轉方式이며 手動方式은 選擇스위치를 定常狀態(steady state)에 接續시키 動作한다. 手動과 自動方式은 線源準位(source level)에서 最大出力인 2MW 까지 모두 使用할 수 있다. 手動과 自動 모두 始動(start up)은 手動操作으로 이루어지며 펄스方式은 순간出力을 最大 2000 MW 까지 올릴 수 있다. 自動方式은 10W 以下の 出力에서는 거의 使用되지 않고 있다.

2-1-1. 手動方式(Manual Mode)

넓은 領域의 對數增幅器(log amplifier)를 使用하여 線源準位(source level)에서 100%出力까지의 出力을 測定 記錄計에 記錄하며 手動으로 操作한다.

原子爐에는 始動時 차단(interlock) 作用이 있어서 아주 낮은 電力準位에서는 動作을 하지 못하도록 되어있어서 手動으로 始動시킬 때에는 最小線源準位(minimum source level)를 維持시키고 있는 제어봉(RWP)을 빼어낸 두 檢出器에 10 nV의 出力이 나타나 總出力의 10⁻⁵% 程度의 始初出力을 얻은뒤 主 制禦棒을 驅動시킨다.

運轉中の 各 檢出器와 出力범위 간의 動作關係는 그림 3과 같다.

2-1-2. 自動方式(Automatic Mode)

自動方式은 手動方式과 거의 비슷하나 단지 미세조정봉(regulating rod)의 作用이 原子爐 出力을 一定하게 調整하기 爲해서 饋還(feedback) 回路에 의해서 自動으로 出力調節을 할수 있도록되어 있다.

原子爐의 出力은 中性子を 吸收하는 各 制禦棒의 爐心部內 位置에 따라 決定된다. 中性子の 吸收棒이 깊게들어와 中性子の 吸收가 많아지면 出力은 감소되고 反對로 制禦棒이 爐心部를 많이 빠져나와 있을 때에는 出力은 급격한 增加를 보이게 된다.

自動方式은 아주 낮은 出力(10 W 以下)에서는 使用되지 않으며 出力調節의 上下幅은 要求(de-

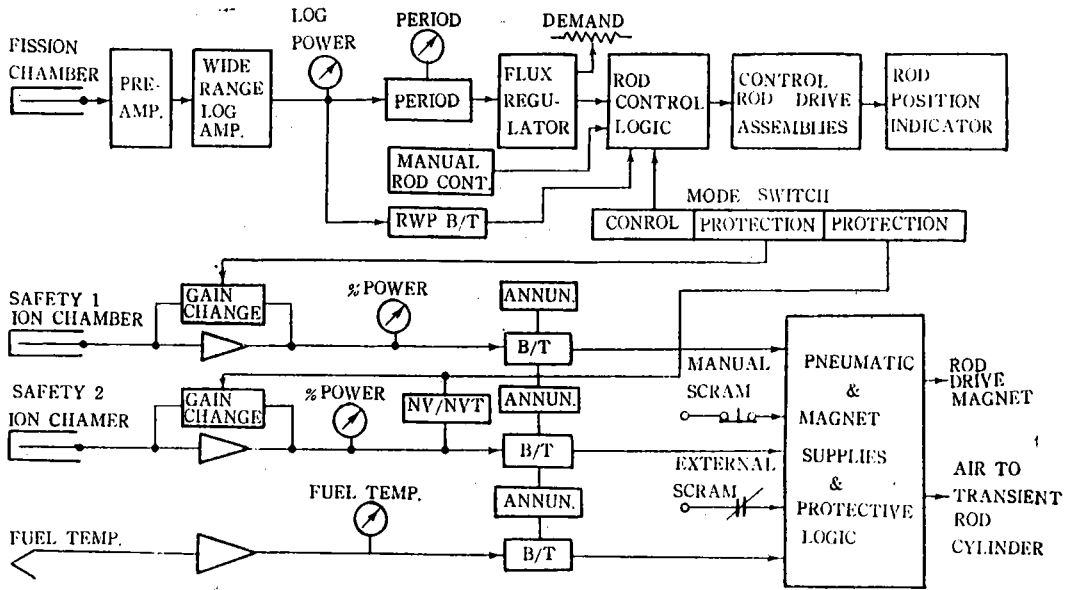
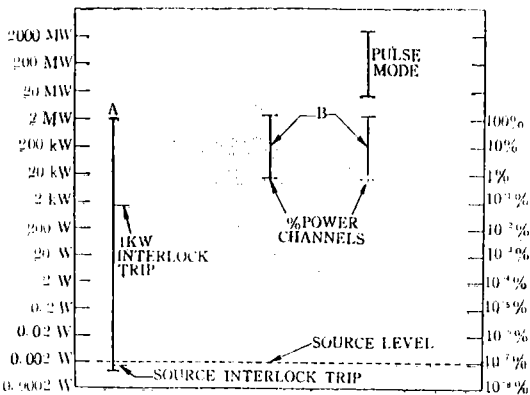


그림 2. 原子爐 制禦 系統圖



A=Wide range log channel(fission detector)
 B=Manual, automatic, and square wave modes
 그림 3. 檢出部의 動作範圍

mand)스위치로 定한다. 반도체화된 線束(flux) 제어기로서 出力과 周期信號와 設定된 基準値와 比較하여 制禦모터를 돌려 出力을 均一하게 固定시킨다.

이러한 作用은 보통 自動으로 전환한후 5秒 以內에 要求된 設定値에 正確하게 맞추어 動作하게 되어 있다.

2-1-3. 구형파方式(Square Wave Mode)

구형파方式은 自動方式과 같이 運轉되나 要求

된 出力値까지 급격히 增加할 수 있도록 線束調節器(flux regulator)의 動作이 중지되었다가 要求된 出力에 到達한 뒤에야 自動方式과 같이 動作하게 되어 있다.

2-1-4. 펄스方式(Pulse Mode)

펄스方式은 아주 높은 線束이나 出力을 순간적으로 얻기 爲한 運轉方式이다. 最大 펄스出力은 2000 MW 나 되나 펄스幅의 制限으로 펄스당 1秒에 30 MW 以下의 에너지를 放出하도록 設計되어 있다.

펄스方式으로 動作하기 爲해서는 壓縮空氣의 計時器(Pneumatic timer)를 利用하여 過渡制禦棒(transient rod)을 2秒 內至 5秒 사이에서 올렸 다 내린다. 이때 순간적인 最大 出力이 記錄計에 기록되며 그 後 다른 특별한 運轉操作은 必要하지 않다. 이러한 펄스方式으로 原子爐는 순간적으로 2000 MW 의 높은 出力을 내며 中性子線束은 6.0×10^{16} 으로 급격한 上昇을 하게된다.

2-2. 原子爐制禦 및 安全裝置

制禦및 安全을 爲한 系統圖는 그림 2와 같으며 主要 部分을 고찰하면 다음과 같다.

2-2-1. 制禦棒 驅動스위치와 回路

原子爐出力은 前述한 바와 같이 제어봉의 下降과 上昇으로 調節된다. 제어대의 下降(down), 上

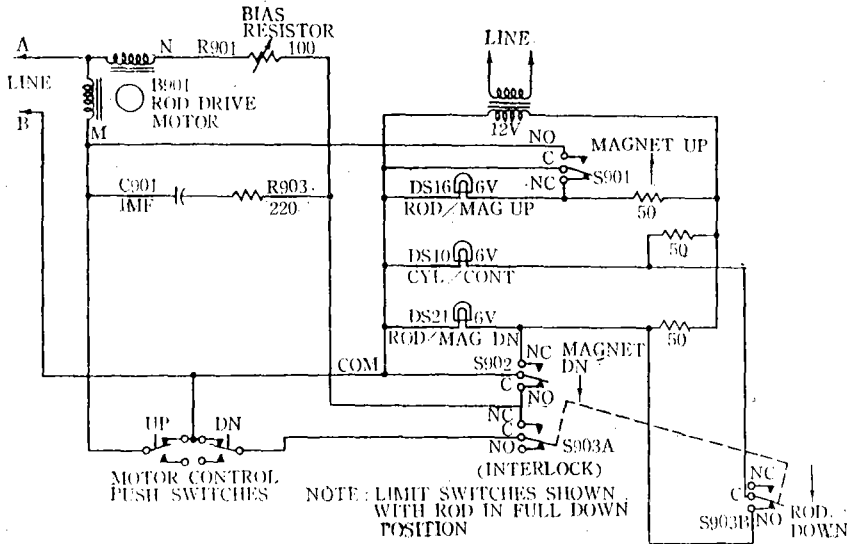


그림 4. 簡略化된 모터 驅動 回路圖

昇(up) 스위치에 의해서 制禦棒을 움직이는 모터를 動作시키 制禦棒을 움직이고 最上, 下端에 位置하지 않는限 CONT/ON 스위치에 불이 켜지게 되어있다. 制禦棒의 위치는 수치 表識板에 나타나며 이 標識板을 참고로 하여 手動調節을 하게 된다.

非常停止막대(scram bar)를 누르면 一時에 4 制禦棒이 낙하되며 出力은 급격히 떨어진다.

制禦棒은 과도제어봉(transient rod), 거친 제어봉(shim rod) 안전제어봉(safety rod), 미세 조절제어봉(regulating rod)이 있으며 110 V, 60 Hz의 單相 모터에 依해서 움직여진다. 이것은 10회전의 가변저항기와 連結되어서 그 位置를 表示할수 있도록 하고있다.

그림 4는 모터 驅動回路를 簡略化한 系統圖이다.

定常狀態에서는 M과 N 사이에는 制禦棒의 上昇(up), 下降(down) 스위치에 의해서 線間 電壓이 걸려 있어서 모터는 停止狀態로 있다. 上昇스위치를 누르면 M點의 線間 電壓을 차단시키고 電流는 下降스위치와 1μF의 용량체를 거쳐서 N點으로 흘러서 位相이 90° 변화하게 된다. 따라서 모터는 時計方向으로 돌아서 움직인다. 反時計方向은 下降스위치를 누르면 反對作用으로 因해서 움직이게 된다. 그림 4에서의 모든 스위치

는 制禦棒이 最下端에 있을 때를 表示한다. 이때에는 그림 4에 나타난 바와 같이 制禦棒이 最下端에 位置함을 나타내기 위하여 下降램프 DS-21과 점속램프 DS-40이 모두 불이 켜지고 上昇램프 DS-16은 불이 켜지지 않는다. 이때 다시 下降스위치를 누르면 制禦棒 驅動모터에는 아무런 作用을 시키지 못하나 上昇스위치를 누르면 B측에서 모터의 M點 電源 連結點을 開放하여 모터를 作動시킨다. 電流는 바이어스 抵抗과 모터磁場코일 N과 220Ω의 저항 그리고 1μF의 용량體를 통해서 흐르게 된다. 따라서 모터는 時計方向으로 돌게된다.

이제 上昇스위치를 놓으면 모터의 位相變化回路(1μF의 용량體, 220Ω의 抵抗)가 短絡되어 모터의 두 磁場 코일에는 거의 같은 電流가 흘러서 모터는 停止하게 된다. 停止될 때에도 300Ω의 可變抵抗 特性으로 모터에는 若干의 驅動力이 存在하는데 이것은 制禦棒의 무게 때문에 계속 停止狀態로 있게 하기 위해서 必要한 힘이다.

最上端 點에서 下降시킬 때의 動作特性도 위와 비슷하다.

最小 線源計數 차단 리레이(minimum source-count interlock relay)는 아주 낮은 線源以下의 強度에서는 모든 制禦棒의 움직임을 막아주는 역할을 하고 있다. 線間 電壓의 B측에서 리레이

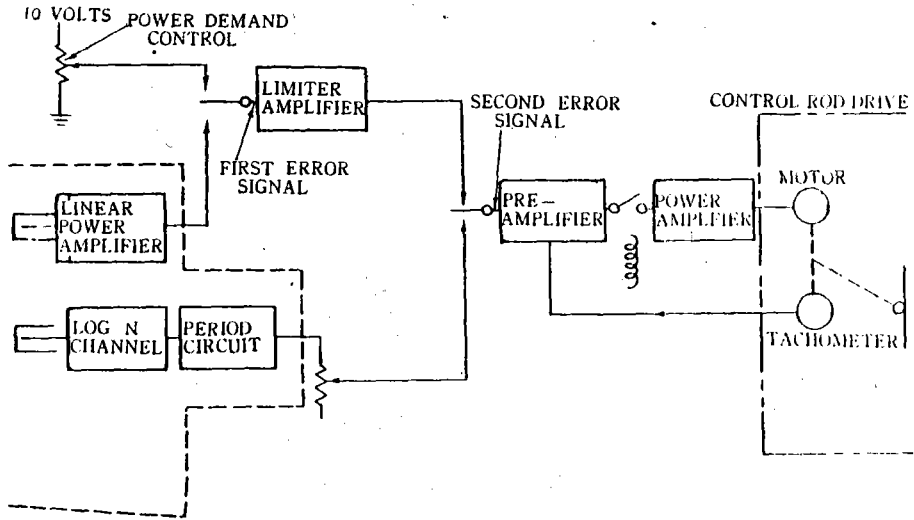


그림 5. 出力 調節 系統圖

K-13을 통하여上昇스위치와連結되어 있어서 最小線源計數에 到達하면 이 리레이는 磁力을 잃고 모든 스위치가 動作되지 않도록 하고 있다.

制禦棒의 位置標識은 3單位의 숫자로 되어있다 이것은 制禦用모터의 기어(gear)에 맞물려 돌아가고 있는 10회전의 可變抵抗에서 유기되는 電壓을 디지털 電壓計(digital voltmeter)로 읽은 것이다. 可變抵抗의 兩端에는 $\pm 15\text{ V}$ 의 電壓이 걸려 있어서 이 電壓의 變化가 中央 端子에 나타나 숫자로 標識한다.

2-2-2. 線束 制禦器(Flux Controller)

自動運轉方式을 擇했을 때 이 線束制禦器는 自動的으로 原子爐를 제어하는데 使用된다. 調節器의 比較回路(comparator circuit)는 原子爐의 出力과 設定値와 比較하여 그 오차信號를 만들고線束제어기는 이 信號를 근거로 하여 調節棒을 要求된 出力이 되도록 適切하게 제어한다.

그림 5는 出力 調節 系統圖이다.

比例 出力增幅器(linear power amplifier)에서 나오는 출력전압과 要求된 출력의 比較値가 入力으로 들어간다.

制限器(limiter)는 이 差信號를 4.7V 最大値로 制限시키는데 이 信號와 周期回路(period circuit)에서 나오는 信號와 結合 第二次 誤差 信號電壓을 形成한다.

制限器는 要求出力(demand power)과 實際出力 사이의 誤差가 너무 커서 過激한 出力變動이 要求될 때 적절한 上限値로 變化量을 制限하기 爲한 것이다.

周期回路의 出力은 反轉(inverse)시켜 可變抵抗으로 利得을 조절하여 第二 誤差 信號에 보내는데 만일 制禦棒이 적절히 조절되어 要求된 出力과 같아졌을 때 周期回路의 出力은 0에 接近하여 無限大에 가까운 周期를 지님으로서 一定한 出力을 계속 지속하게된다.

2-2-3. 雙安定 트립 회로(Bistable Trip Circuit)

이 回路는 슈미트 트리거 回路(Schmitt trigger circuit)로 트리거 레벨을 調整할 수 있게한 DC 增幅器이다.

이 回路는 原子爐와 爐計測器의 變化를 감시하고 제어작용을 圓滑하게 해주기 爲한 回路이다.

이 回路는 正饋還(positive feedback)이 된 演算增幅器(operational amplifier)를 사용하여 高感度 準位の 檢知器 役割을 하고 있다. 入力信號가 트리거(trigger) 레벨에 到達하면 演算增幅器의 出力은 0V에서 +13V로 뛰어 올라서 리레이의 磁化를 풀어주고 定常인 制禦狀態가 되도록 原子爐作動을 막아주게 된다.

2-2-4. 對數 出力채널(Log Power Channel)

이 回路는 10개의 decade를 가진 廣帶域 對數

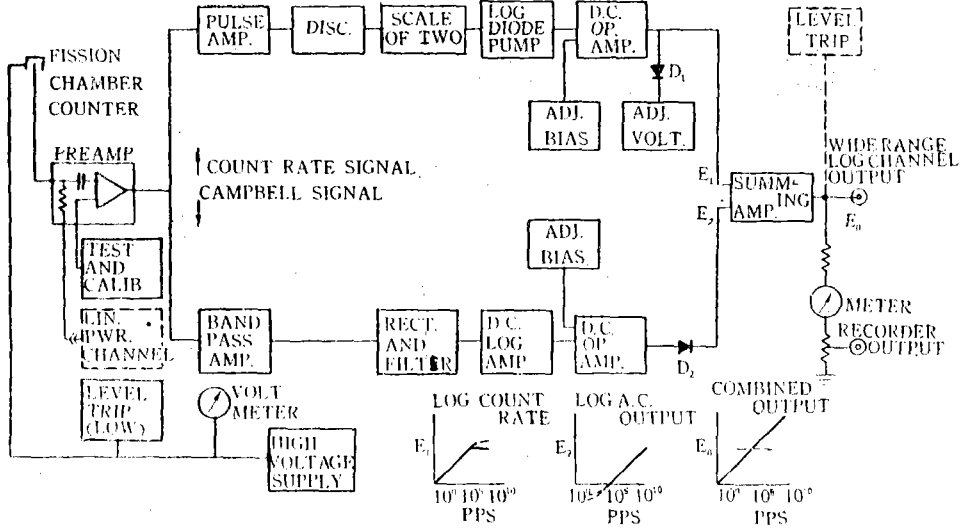


그림 6. 廣帶域 對數채널 系統圖

出力 채널이다.

이 채널은 計數部分과 캠펠링(Campbell) 技術을 使用하여 10 decade의 범위를 10r/hr의 감마선 백그라운드(background)에도 불구하고 정확하게 測定할 수 있다.

檢出器로는 分裂函(fission chamber)을 使用하였으며 原子爐 出力을 測定하고 그 信號를 제어대의 미터에 表示하고 記錄計에 記錄한다. 또한 이 出力信號는 周期信號로 利用되어 雙安定 트립 회로를 動作시켜 線源차단(source interlock) 回路의 入力信號 역할도 한다.

이 回路의 特性는 다음과 같다.

- 범위(range) : 10 decade 對數 눈금
- 直線率(linearity) : $\pm 1.5\%$ ($20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$)
 $\pm 10\%$ 線電壓變動率下
 $\pm 3\%$ ($10^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$)
 $\pm 0\%$ 線電壓變動率下
- 平均應答時間 : $10^7\text{nV} \sim 10^{10}\text{nV}$ 15 msec
 $10^6\text{nV} \sim 10^8\text{nV}$ 20 msec
 $10^4\text{nV} \sim 10^6\text{nV}$ 40 msec
 $10^2\text{nV} \sim 10^4\text{nV}$ 500 msec
 $10\text{nV} \sim 10^2\text{nV}$ 2 sec
 $< 10\text{nV}$ 20 sec
- 出力 : 0~10 V dc full scale
 0~1mA 원격미터(remote

meter)

0~100 mV 기록계

- 電源 : 1.5 V $\pm 10\%$ (1Amp), 60 Hz
 +15 V dc (1.3A)
 -15 V dc (0.28A)

캠펠링 技術이란 中性子線束을 測定하는데 分裂函(fission chamber)으로 부터 나오는 信號中 dc 성분보다 ac 성분을 利用하는 方法이다. 이 方法은 理論과 實驗的으로 1967年度에 完成을 본 것으로 ac 雜音成分을 보편적인 方法으로 整流하여 dc 電壓을 測定하면 그 값은 넓은 範圍에 걸쳐서 中性子線束의 平方根에 比例한다는 事實이다.

그림 6은 廣帶域 對數채널의 브럭도이다.

이 채널은 對數計數部分과 對數-캠펠(log-Campbell)部分으로 되어있으며 같은 檢出器의 前置增幅器에서 入力信號를 얻는다. 이 두 部分의 出力은 最終端에서 서로 合해져서 나온다.

그림 6 下端의 出力에 對한 圖解는 이 두 部分을 合함으로써 그 結果는 直線的인 直線의 形을 取할 수 있다.

2-2-5. 安全채널(Safety Channel)

두개의 安全채널은 모두 半導體化되어 높은 信賴度를 지닌 電流 增幅器이다. 이 두 回路는 各 各 다른 電離源으로부터 入力信號를 얻어서 그 出力은 保護回路인 雙安定 트립回路에 주며 또한그

값을 百分率 出力으로 較正된 미터에 나타내게 된다.

回路 特性은 다음과 같다.

入力: 電離函 電流
 感度: 入力電流 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-3}$ A 에 動作

出力: 0~10 mA(線型미터)
 0~10 V(原子爐保護回路)

※ 10 V는 150% 原子爐出力時 얻는 電壓과 同一

正確度: 入力에 對한 比例 比率 $\pm \frac{1}{2}\%$

浮動(drift): $\pm \frac{1}{2}\%$ (線間電壓變化 $\pm 10\%$ 溫度變化 $10^\circ\text{C} \sim 43^\circ\text{C}$)

應答時間: 계단入力에 對해 0.5 msec 에 最終值의 63%에 도달

그림 7은 比例增幅器로서 電離函에서 나온 信號勢力이 比例增幅되어 나가는 回路의 系統圖이다.

2-2-6. 周期채널(Period Channel)

Log-n 增幅器는 中性子線束의 對數值에 比例하는 電壓을 發生시키고 微分回路는 原子爐周期的 逆數에 比例하는 電壓을 發生하며 이 電壓은 演算增幅器로 增幅되어 秒로 較正된 미터상에 표시 된다.

이 채널은 出力 變化比率을 나타내기 위한 것으로 A1 反轉增幅器(inverter)와 變化率을 測定하는 微分回路인 A2 增幅器로 구성되어있고 스

윅치 Q는 必要한 다른 回路의 作用이 계속되는 동안에는 微分回路의 作用을 막아주는 役割을 하고 있다.

2-2-7. 安全과 遮斷로직(Safety and Interlock Logic)

前述한 周期채널은 半導體化된 雙安定트립回路를 出力側에 두어서 信號를 스크램 論理계통(seram logic system)에 보내고 있다. 논리系統(logic system)은 OR 게이트(gate)로서 雙安定트립回路의 信號로 原子爐를 비상정지(scram)시킬 수 있다. 제어대에는 이 回路를 檢査해보기爲한 可變抵抗器가 있다.

線源準位 차단(source level interlock) 작용은 抵出力채널의 雙安定트립回路에서 일어나며 이 信號는 線源의 準位가 주어진 값에 미달할 때에는 制禦棒의 움직임을 막는 作用을 하고있다.

手動 비상정지(scram)는 간단히 制禦棒을 落下시킬 수 있고 各個의 制禦棒을 單獨으로 낙하시키는 스위치는 制禦棒의 落下로 인한 反應度(reactivity)變化를 보기 위한 것이다.

各 電離函들에 공급되는 電源이 차단되면 自動적으로 原子爐는 비상정지 상태로 된다.

2-3. 警報채널(Monitoring Channel)

2-3-1. 原子爐 流入 冷却水 溫度 警報裝置

原子爐에 流入되는 冷却水의 溫度는 제어대의 前面板에 있는 미터에 表示된다. 높은 溫度係數를 가진 nickel線을 사용하여 溫度를 測定하고 이것이 設定值를 넘었을 때에는 부저(buzzer)音과 빛을 發하며 警報하도록 되어 있다.

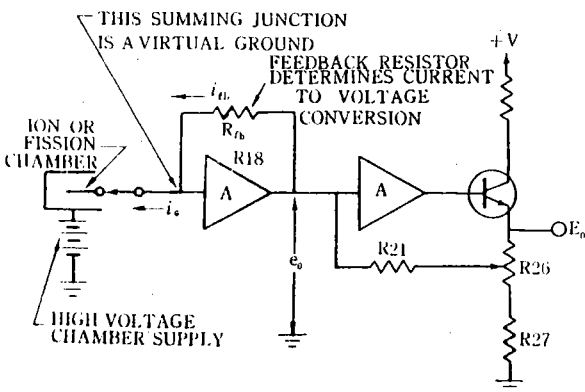


그림 7. 比例 出力 增幅器

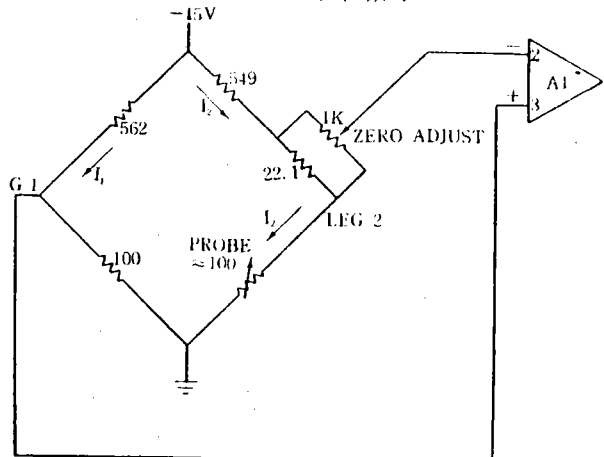


그림 8. 冷却水 溫度 測定回路

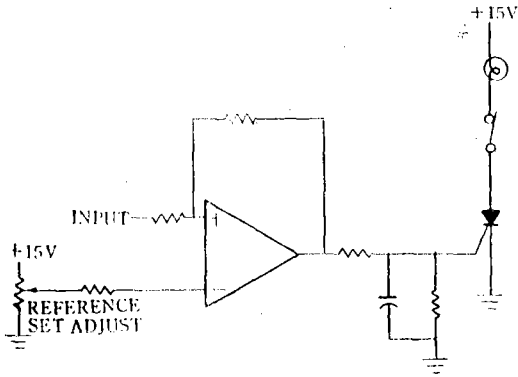


그림 9. 冷却水 温度測定增幅器 트립 回路

그림 8은 물의 温度를 測定하는 브릿지 回路와 增幅回路를 보여주고 있다.

温度感知用素子は 0°C에서 약 100Ω의 抵抗을 가지고 있어서 브릿지의 I_1 과 I_2 가 같아져서 평형을 이루게 되어있다. 增幅器 A1의 出力은 比較트립回路(comparing trip circuit)의 增幅器 A2에 들어가 設定值 以上으로 入力이 크게 되면 SCR의 게이트 電流를 크게 흘려서 램프에 불이 켜지게 하고 警報를 울리도록 하고 있다. 再動作

시킬 때에는 警報用 램프를 連結하고 있는 스위치를 열어 주었다 다음으로써 SCR의 再動作을 시킬수 있다.

그림 9는 冷却水 測定 增幅器트립回路를 보여 준다.

3. 結 語

TRIGA MARK-III 原子爐는 一號機인 TRIGA MARK-II 原子爐에 比하여 훨씬 改善된 高出力 原子爐이다.

첫째로 모든 制御用 回路를 트랜지스터와 I.C.를 使用하여 制御系를 小型化하였고 制御, 計測, 警報回路에 새로운 技術을 도입하였다. 특색있는 回路中의 하나로 캄벨링 技術을 使用한 廣帶域對數 增幅器를 들수 있는데 이러한 原子爐 雜音을 利用한 原子爐計測法은 1967년에 決算을 본 原子爐 雜音(pile noise) 利用에 關한 學術面의 成果를 實際에 適切하게 適用하여 使用하고 있는 것이다.

그림 2의 系統圖에서 나타난 바와 같이 其他 다른 여러要素, 例를들면 燃料 温度測定裝置나 各電離函, 電源供給 關係 등이 있으나 主要 部分만 選擇하여 制御技能을 說明하였다.