

原子爐 計測의 動向

高 丙 俊 · 申 鉉 國

原子力研究所制御研究室

1. 序 論

1939年 核分裂이 發見된 후 人類는 原子核 内部의 에너지를 利用하는 새로운 에너지原 開發에 노력해 왔었다. 이러한 結果로 核에너지를 利用한 原子力發電所가 先進國에서는 이미 50年代 後半期부터 建設되기 시작하였으며, 現在에 이르러서는 全世界의 으로 많은 原子力發電所가 稼動되고 있는 實情이다.

우리 나라에서도 1978年 歷史上 最初로 古里 原子力 發電所를 가동시켰으며, 이어 60萬 Kwe 級 2機와 90萬Kwe級 2機등 4機가 建設되고 있어 우리나라도 선진 여러 나라와 같이 본격적인 原子力 發電時代로 접어 들게 되었다.

原子力 發電은 核分裂物質을 爐內에서 核分裂反應을 일으켜 여기서 發生되는 막대한 熱을 利用하여 증기터빈을 돌려서 發電을 한다. 기존 발전 방식과는 달리 原子力 發電은 위험한 核分裂物質을 使用하기 때문에 原子爐의 保護 및 安全裝置가 多重으로 設置되어 있으며, 또한 많은 計測裝置를 設置하여 原子爐 監視와 制御를 하고 있다. 本 解說에서는 原子爐 運轉, 보호에 매우 중요한 역할을 하고 있는 原子爐 計測에 關해 記述하고자 한다.

2. 原子力 計測裝置

原子爐 運轉을 다른 裝置의 運轉과 比較할 때 크게 差異가 나는 것은 原子爐가 完全히 停止하여 出力이 영이 되기가 어렵다는 것이다. 原子爐

가 全出力으로 運轉하고 있을 때 中性子束을 1이라 한다면, 停止中의 原子爐라도 宇宙線이나 우라늄의 自然崩壞에 依한 中性子 때문에 $10^{12} \sim 10^{13}$ 程度의 中性子束이 존재한다. 爐心속에 中性子源을 넣을 경우에는 中性子束은 10^{11} 정도가 된다. 이런 관계로 原子爐 運轉에 있어서 停止와 全出力間 中性子束을 對數 눈금으로 취한 中性子束의 變化는 時間에 對하여 직선이 되고, 기율기와 反應度가 1對1로 對應하는 關係가 있다. 이런 意味에서도 中性子束을 對數 눈금으로 취급하는 것이 편리하다.

이러한 原子爐의 特性은 計測裝置에 있어서 問題를 어렵게 만든다. 즉 原子爐의 停止時에 아주 적은 中性子束을 精密히 測定할 수 있는 計測器로 全出力時에 그것의 10^{11} 배나 큰 中性子束을 역시 精密하게 測定한다는 것은 매우 어려운 일인 것이다. 그러므로 感度範圍가 다른 몇 개의 測定系統을 만들어 中性子束의 크기에 따라 使用區分을 할 필요가 생기게 된다. 이러한 測定範圍를 動力爐에서는 그림 1과 같이 中性子源 領域(source range), 中間領域(intermediate range), 出力領域(power range)로 나누고 있다.

가장 낮은 中性子源 領域은 6 decades의 中性子束을 測定할 수 있으며, 다음 領域인 中間領域은 8 decades까지의 中性子를 測定하고 있다.

이들 計測範圍는 中性子源 領域의 上段과 中間領域의 下段이 重疊되도록 마련되었다. 제일 높은 領域인 出力領域의 計測들은 總計測範圍의 약 2

decades를 測定할 수 있게 되어 있다.

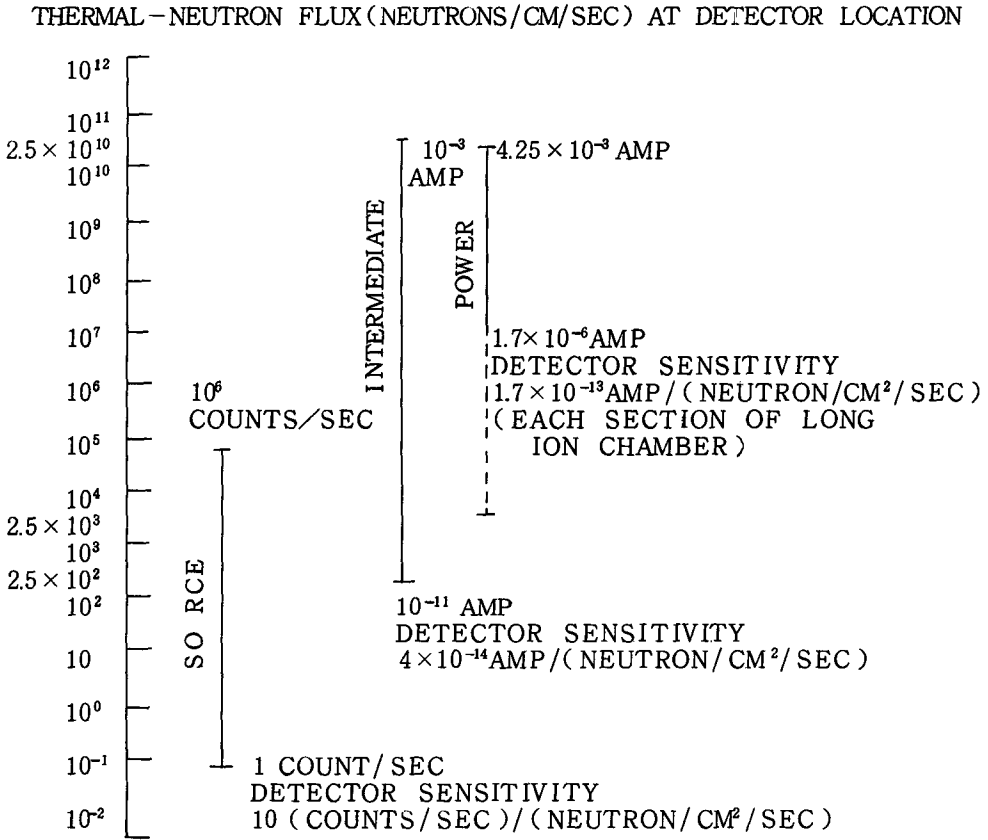


그림 1. 核計測系統의 各領域別 測定範圍

이 原子爐計裝 (out of core) 들은 各範圍가 서로 重疊되어 각 기능이 연속적으로 動作하게 되어 있어 原子爐를 安全하게 保護하고 制御할 수 있게 한다.

各系統의 機能을 原子爐稼動 順序와 관련해서 說明하면 다음과 같다.

原子爐를 始動하기 위해서는 우선 中性子源을 爐心內에 삽입한다. 다음 制御棒을 서서히 뽑아 내면, 原子爐는 서서히 臨界에 가까워지고 同時에 中性子束도 서서히 上昇하게 된다. 이 領域이

中性子源 領域에 해당한다. 臨界狀態에 도달한 후 全出力에 도달하기 위해서는 變化率을 一定하게 上昇시키는 方法을 使用하고 있다. 이 方法은 原子爐의 경우 出力을 對數 눈금으로 表示하기 때문에 變化率도 出力의 對數變化率을 使用하는 것이 便利하다.

$$\alpha = \frac{d \ln N(t)}{dt} = \frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} = \frac{1}{T}$$

여기서 α 의 역수 T는 爐週期 (reactor Per-

iod) 라 부른다. T는 原子爐의 出力 $N(t)$ 가 一定한 率 α 로 계속 上昇할 때 $N(t)$ 가 $e = 2.718$ 倍가 되는데 걸리는 時間이다. 臨界以後 週期가 一定하게 되도록 運轉하는데, 이 부분은 中間 領域에 該當한다.

原子爐의 出力이 出力 領域에 들어서면 制御棒은 다시 서서히 삽입하게 되고 運轉은 週期를 一定하게 하던 方式에서 出力自體를 어떤값으로 決定짓는 方式으로 바뀌어 진다. 이런 過程에서 出力이 어떤 設定值에 도달하면 制御棒은 原子爐가 臨界되는 位置에 돌아가 稼動이 完了되게 된다.

各 領域에서 計測에 使用되는 檢出器는 領域에 따라 그 構造나 機能이 조금씩 다르나, 一般的으로 基本的인 原理는 같다. 電離函에 印加하는 電圧變化에 따라 變하는 動作 性성을 說明한 후, 各 領域에 필요한 電離函을 소개하고자 한다.

放射線中에 α 線이나 β 線은 電荷를 갖고 있

는 荷電粒子(charged particle) 이기 때문에 이들이 氣體中을 通過하면, 그 進路를 따라서 氣體의 原子나 分子를 電離시켜 電子나 陽이온은 서로 分離되고, 分離된 電荷를 전극에 모으면 電氣의 信號를 얻을 수 있다. 그러나 中性子는 荷電粒子가 아니므로 직접 氣體를 電離시킬 수는 없다. 따라서 위의 檢出方法을 사용하지 않는다.

어떤 종류의 原子核, 예컨대 붕소의 同位原素 B^{10} 은 中性子를 흡수하면 α 線입자를 放出하는 性質을 갖고 있다. 이때 發生된 α 입자를 위해서 說明한 것과 같이 檢出하면 間接적으로 中性子の 測定이 可能하다. 또 U^{235} 나 Pu^{239} 등은 中性子를 흡수하면, 核分裂을 일으키고 分裂의 破片 또한 荷電粒子로서 매우 큰 電離能力을 갖고 있으므로 이것도 中性子 檢出에 利用될 수 있다.

따라서 어느 것이나 中性子를 흡수하여 放出的 2次 荷電粒子의 電離能力을 利用하여 間接적으로 中性子를 檢出하는 것이다. 그러나 氣體가

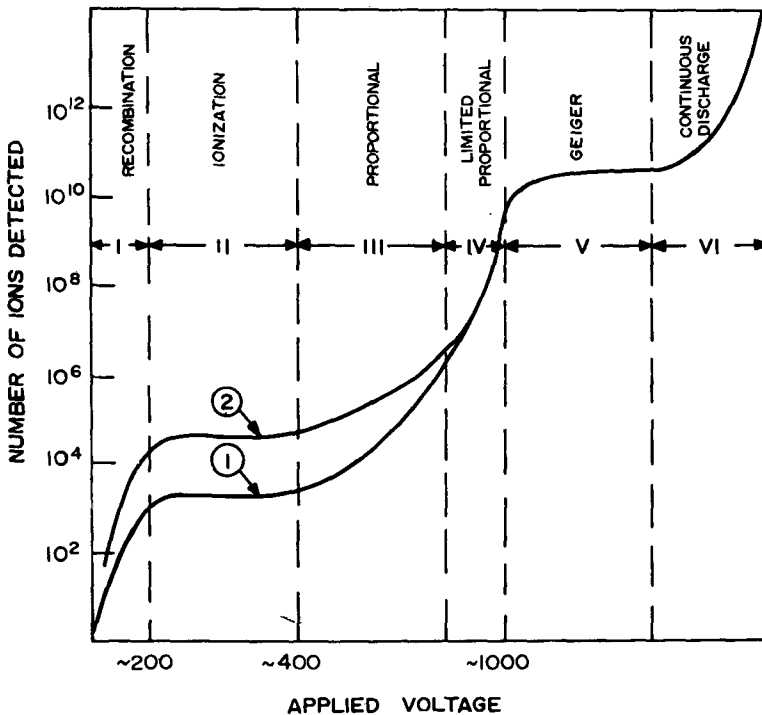


그림 2 Gas 充塡이온 電離函의 動作 特性

電離할 때 나오는 電子와 陽이온은 그대로 방치해 두면 再結合하여 消滅되어 버리기 때문에 電場을 加하여 分離 시킨다. 만일 一定한 放射線場에서 檢出器의 두 極間에 電壓을 加해 이를 變化 시킨다면 電極에 收集된 이온의 數는 그림 2와 같이 변하게 된다.

檢出器에 加해진 電壓이 領域 I에 해당될 때 放射線에 의해 形成된 모든 이온은 이온狀態를 유지하지 못하고 再結合을 하게 된다. 檢出器에 加해진 電壓이 領域 II에 해당될 때 直接電離에 의해 形成된 모든 이온쌍은 再結合이 發生하지 않고 電極에 도달하게 된다. 이 영역을 電離領域이라 한다. 이것은 實際 檢出器容積當 이온의 收集比率이 이온 形成比와 같기 때문에 一定한 電流의 흐름이 나타난다. 이러한 狀態에서 쓰이는 檢出器를 電離函(ionization chamber)라 한다.

領域 III에서는 印加電壓이 領域 I, II보다 높은 약 400 V~800 V가 되기 때문에 形成된 이온쌍은 충분한 速度로 加速되며, 부수적으로 gas의 이온화를 더욱 促進시킨다. 이러한 現狀을 가스增倍(gas multiplication)라 한다.

이때 收集된 이온數는 1次 電離에 比例한다. 그래서 III領域을 比例領域이라 한다. 이런 狀態에 쓰이는 檢出器는 比例計數管(proportional counters)라 부른다.

위의 比例領域을 지나면 2次 電離의 數가 限界點에 이르게 된다. 이 領域을 限界比例 領域이라 한다. 領域 V에서는 印加電壓이 아주 高壓이기 때문에 比例領域의 경우와 같이 一定比例로 이온쌍을 形成하는 것이 아니라 한점 또는 陽의 電極에서 發生되는 이온쌍의 눈사태(avalanche)가 檢出器 全體에 확대되어 放射線粒子에 의해 形成되는 이온쌍의 수에는 關係없이 같은 量의 電荷가 電極에 모인다. 이 領域을 가이거릴러 領域이라 말한다. 이 領域은 中性子 檢出에는 거의 利用하지 못하고 주로 γ 線 檢出에 利用된다.

가이거영역을 넘어서면 檢出器는 계속 放電하게 된다.

電離函은 pulse를 出力으로 하는 것과 입사한 中性子 數에 比例하는 電流를 出力으로 하는 것으로 區分하고 있다. 前者를 pulse型 電離函(pulse chamber)라 부르고, 後者를 電流型 電離函(current chamber)라 불러서 區別한다. 보통의 制御系에서는 電流나 電壓의 大小로서 信號를 取하고 pulse數라는 형의 信號는 거의 취하지 않는다. 그러나 原子爐 制御를 위한 檢出器로 使用하는데는 pulse형의 計數管이 더 使用할 경우가 많다. pulse형의 檢出器는 一定한 時間사이의 計數率을 그것에 比例하는 電壓, 電流로 變換하는 計數率計(count rate meter)가 필요한 단점도 있지만 中性子和 γ 선을 識別할 수 있는 큰 長點이 있다.

原子爐內에는 中性子外에 核分裂이나 核分裂生成物의 崩壞結果로 發生하는 높은 에너지의 γ 선이 存在한다. 높은 에너지의 γ 선은 電離函의 材料와 작용할 때 電子를 發生시키므로 中性子 檢出器는 中性子에는 물론 γ 선에도 민감하게 된다.

高出력으로 運轉하고 있는 原子爐에서는 γ 선에 비해 中性子が 훨씬 많으므로 γ 선으로 因한 中性子束 測定의 오차는 거의 問題가 되지 않는다. 原子爐를 停止시키면 中性子束은 비교적 쉽게 減少되지만 γ 선은 감소하지 않아 상대적으로 γ 선의 비율이 크게 되어 中性子和 γ 선에 민감한 檢出器로는 信賴할 만한 中性子束의 測定이 不可能하게 된다. 그러나 펄스型 檢出器는 中性子에 對한 펄스의 크기는 크고 γ 선에 의한 펄스는 훨씬 작으므로 적당한 크기의 펄스만을 通過시키는 波高判別器(pulse height discriminator)를 쓰면 中性子에 의한 펄스를 용이하게 測定할 수 있는 것이다.

이와 같이 中性子 檢出器에는 여러가지 종류가 있어 測定系統의 사정에 따라 적합하게 선택된다.

實際 原子爐에 設置된 檢出器는 그림 3 과 같이 原子爐 壓力容器 둘레에 배치된다.

chamber) 이라 한다.

出力制御系는 高出力時에 쓰이는 것이므로 中

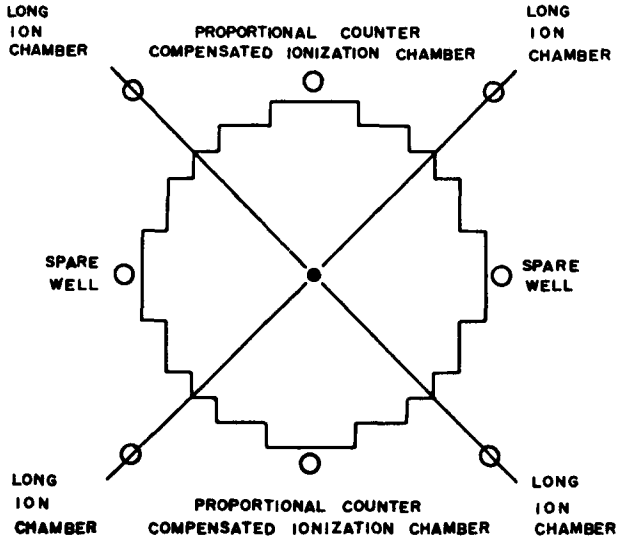


그림 3. 原子爐 주변에 배치된 計測器 位置圖

우선 起動領域에서는 測定해야 할 中性子束 準位가 낮으므로 感度가 좋고 上記와 같이 中性子 和 r 線의 識別이 便利한 펄스형의 檢出器가 쓰인다. 實例로서 核分裂電離函 (fusion chamber), BF_3 比例 計數管 (B^{10} 을 BF_3 가스형으로 봉입한 것), B^{10} 피복 비례계수관 (B^{10} 을 電極에 입힌 것) 을 들 수 있다. 中間領域 (intermediate range) 이 상에서는 中性子束이 높기 때문에 펄스형의 檢出器로는 대체로 포화되고 만다. 그렇기 때문에 보통은 B^{10} 을 피복한 電流電離函이 사용된다.

그러나 中間領域에서는 또한 r 선의 상대적 비율이 커서 단순한 電離函으로는 中性子を 正確히 測定할 수 없다. 中性子 和 r 線과를 識別하는데는 同一한 電離函을 2개 重合시킨 후 그 하나의 電極에만 보론(B^{10})을 입혀 놓으면 보론을 입힌 쪽은 中性子 和 r 쪽에 다른 한쪽은 r 선에만 민감하므로 양쪽 電離函의 出力差를 取하면 中性子만 을 檢出하는 方法이 된다. 이러한 電離函을 r 線 보상형 電離函 (r-compensated ionization

性子 和 r 線의 識別에 큰 신경을 쓸 필요가 없다. 그보다는 制御用으로 사용되는 信號가 되므로 가능한 큰 電流를 얻는 것이 바람직하다. 이를 위해 有效電極面積이 넓은 高感度 電離函이 쓰이고 있다.

이 中性子 檢出器는 보통 long ion chamber (LIS) 라고 불리우는 爐心높이의 約 半에 該當하는 檢出部分을 가진 非補償型 中性子電離函 (UIS) 이 上下로 봉입되어 있다. 특히 壓力容器 外軸의 原子爐 側面 네곳에 90°씩 떨어져 LIC 가 배치되어 있으며, 出力領域의 計測器 Sensor 로 사용될 뿐만 아니라 그 位置關係를 利用하여 半徑方向과 上下方向의 中性子 分布의 對稱性 항상 監視하고 있다.

3. 爐心 計測裝置

爐心이 큰 大型 動力爐에서는 原子爐 運轉을 위한 出力調整用 計測裝置外에 爐心內의 核分裂 出力分布를 決定짓는 計裝이 필요하다. 이 計裝은

爐心出力密度와 燃料의 平均燃燒度 및 Xe에 依한 空間振動의 抑制等 爐心內의 詳細한 情報를 正確하게 파악하는데 있다. 爐心內의 中性子分布도 爐心特性을 決定짓는 重要한 因子中의 하나며, 따라서 各各의 爐型에 適合한 各種 爐心 中性子 monitor가 開發되고 있다.

BWR型 原子爐의 爐心中性子 monitor는 多數의 小型中性子 檢出器를 配置한 소위 小型中性子 檢出法의 代表的인 例이다. 이 monitor의 方法은 네개의 燃料集全體에 대해서 한개의 비율로 도합 25개의 thimble를 배치하고 있으며, 各各의 thimble內의 軸方向에는 네개의 固定 中性子 檢出器가 配置되어 있다. 특히 thimble內의 固定檢出器에 可動型 中性子 檢出器(traversing incare probe)가 삽입될 수 있는 案內管이 設置되어 있어 軸方向의 中性子 分布를 연속적으로 測定할 수 있게 된다. BWR에서는 이와 같이 爐心內 中性子 檢出器와 計算機를 함께 使用하므로써 hardware와 software 양면에서 3次元의 中性子 分布를 監視할 수 있다. 여기에 使用된 中性子 檢出器는 micro chamber라고 부르는 小型核分裂電離函이다.

PWR에서는 爐心內의 可動小型 TIP와 爐心外 中性子 檢出器에 의해서 中性子 分布를 監視한다. 爐心內의 可動小型 檢出器는 36個의 TIP用 Thimble에 設置되어 있으며 TIP는 주기적으로 爐心內에 삽입되어 爐心內의 中性子 分布를 測定하고 계산기를 使用하여 출력의 peaking factor와 非對稱性等을 計算 감시하고 있다. 多量의 情報를 處理위해 導入된 計算機는 最近 on-line system으로 開發되었으며, 計算機의 기능은 自動運轉을 行하는 것이 아니고 다만 性能計算, 특히 中性子 密度의 감시에 의한 爐特性의 파악, 爐心管理, 異常現象의 조기파악과 표시등에 중점을 두고 있다.

4. Process 計測裝置

Process 計裝은 溫度計, 準位計, 壓力計, 流量計, 蒸氣發生器의 漏洩檢出器, 不純物計, 破損燃料檢出計 등으로 構成되어 있다. 溫度計는 일반적으로 thermo couple과 매우 순수한 금속의 저항성분이 온도에 따라 변화하는 성질을 利用한 resistance thermal detector를 많이 사용하고 있다.

PWR에서는 核燃料의 出口溫度에 관한 정보를 얻기 위해 stainless 鋼筒속에 設置된 크로멜알루멜 열전대가 爐容器를 貫通하여 爐心까지 내려와 있는 것이다. 여기서 얻은 data는 計算機에 의해 處理되며 熱電對가 故障이 생기는 경우에도 運轉을 繼續할 수 있으며 또 燃料를 交換할때에 熱電對의 交換도 可能하다. 또한 저항열 검출기(RTD)는 1次 및 2次系統 process loop內의 열검출에 使用된다. 準位計에는 現在도 既存하는 Na준위계 뿐만 아니라 定置抵抗式, 水位追從 on-off式 등이 使用되고 있다. 壓力計로는 electric metal sensor, strain gage, piezo electric sensor 등이 使用되고 있으며, 最近에는 一般的인 process 計裝보다는 爐內計裝으로 空洞共振器의 共振周波數가 溫度壓力에 依한 容積變化에 따라 變化하는 것을 利用하는 micro 波 應用壓力計가 開發되고 있다. 流量計에는 差壓流量計(differential-pressure flow meter)와 rotameter, piston-type meter, turbine meter, magnetic meter 등을 사용하고 있다. 蒸氣發生器는 細心한 注意를 가지고 設計 및 製作을 하고 있지만, 料欠陥, 溶接不完全, 應力腐食에 依한 龜裂等 여러가지 原因때문에 漏洩發生을 全無하게 하는 것은 不可能하므로 安全性 및 經濟性의 見地에서 볼때 조그만 漏洩을 早期에 檢出하여 이 系를 격리 차단시키는 것이 重要하다. 현재 漏洩檢出法으로는 Na₂O₂ 中의 氣泡檢出方法, Na₂O₂ 中에 溶存한

H檢出法等이 使用되고 있다. 不純物計는 N_a 中의 不純物 濃度에 의해 固有抵抗이 變하는 것을 利用한 RHO meter 와 溶解度の 溫度 依存性을 利用한 計測器 및 $ThO_2 - Y_2O_3$ 等の 固體電解質을 삽입한 N_a 와 酸素濃度の 對數에 比例해서 電極間에 發生하는 起電力을 利用한 酸素計 등이 있다. 破損燃料의 檢出은 燃料의 破損을 檢知하여 原子爐運轉上의 適切한 조치를 취할 뿐만 아니라 어떤 燃料 집합체가 破損되어 있는가를 찾아내어 그 位置를 決定하는 것에 目的을 두고 있다.

이 以外에도 1次 loop 系統, 2次 loop 系統 등에 많은 壓力計, 溫度計, 流量計 및 기타 計器들이 使用되고 있으나, 이들은 一般工場 工程系에 使用되는 process 計測器들이므로 여기서는 제외 하겠다.

5. 結 論

原子爐 核計測系統은 항상 原子爐出力 準位를 監視하는 것으로서 原子力發電所에서 運轉에 가

장 重要한 部分이다. 이것은 일차적으로 原子爐 保護에 使用되며, 原子爐 運轉時 및 停止時 等 여러가지 상황에 대해 適當한 경보와 지시를 해 준다. 아울러 一차적인 制御機能도 가지고 있다.

그리고 原子爐計測系는 爐心의 中性子 分布나, 壓力, 熱등 原子爐의 狀態에 관한 情報 뿐만 아니라 機器의 正常動作 確認, 故障의 原因과 糾明에 重要한 役割을 하고 있기 때문에 爐計測系의 高精密化 高信賴化는 原子爐의 安全運轉 向上을 위해 매우 必要하다. 따라서 原子爐의 더 높은 安全性, 信賴性, 經濟性을 높이기 위한 方法으로 爐内外의 環境에 잘 견디는 高性能의 計測器를 開發하여 原子爐計測 技術을 向上시키는 것과 原子爐計測器를 早期異常檢出系의 一部로서 使用하는 原子爐診斷技術을 開發하는 것이 앞으로의 과제라 할 수 있겠다.

