

月城原子爐의 初臨界 및 爐物理試驗

金 聖 年

(韓國에너지研究所)

I. 序 言

1982年 11月 21日 午前 9時頃에 우리나라의 月城郡 나아리에 建設된 重水型原子爐인 CANDU爐*가 처음으로 臨界(critical)가 되었다. 이 原子爐는 캐나다에서 開發한 것으로 美國의 加壓輕水爐(PWR)와는 여러 가지점에서 다른 特性을 가지고 있다. 예를 들어 發電에 쓰이는 核燃料가 天然우라늄이고 核分裂에서 放出되는 中性子를 減速시키는데 쓰이는 減速材와 核分裂의 熱에너지를 傳達하는 冷却材는 輕水(H₂O)가 아닌 重水(D₂O)라는 점이다. 이는 爐物理的인 側面에서의 特性이고 構造上으로는 冷却材와 減速材가 分離되어 있고 月城原子爐의 경우에는 380個의 核燃料裝填管(fuel channel)이 爐心을 構成하고 있다. 이 核燃料裝填管에는 重水冷却材가 흐르며, 한개의 管에 12個의 核燃料다발(fuel bundle)이 裝填되어 있음으로 380個의 管에 4,560個의 核燃料 bundle이 들어 있는 셈이다.

이러한 構造와 爐物理特性을 가지는 CANDU爐가 우리나라에 建設되어 初臨界와 爐物理試驗이 遂行되었는데 이에 대한 意義를 간추려 보면 대략 다음과 같다.

첫째, 電氣出力이 60萬KW인 CANDU爐는 세계에 5機가 있다. CANDU爐의 開發國인 캐나다에 2機(Pt. Lepreau와 Gentilly-2), 우리나라의 月城原子爐 1機, 알제틴의 CORDOBA原子爐 1機 그리고 루마니아에 1機가 建設되고 있다. 이들중에 캐나다의 2機의 初臨界에 이어서 세번째로 우리나라의 月城原子爐가 初臨界를 達成하였다. 특히 60萬KW級의 CANDU爐가 캐나다國 以外的 國家에서 처음으로 初臨界가 되었다는 점이다.

둘째로서는 加壓輕水爐가 1977年 7월에 初臨界가 된

後 約 5年 4個月 뒤에 爐特性과 構造가 다른 原子爐의 臨界와 爐物理試驗이 캐나다 原子力公社(Atomic Energy of Canada Limited: AECL) 主導下에 韓國電力公社와 韓國에너지研究所의 關聯者의 支援으로 遂行되었다. 그러므로 月城原子爐의 初臨界와 爐物理試驗의 遂行에 있어서 일어났던 일들과 CANDU爐에서의 初臨界達成, 爐物理試驗의 目的, 試驗遂行方法, 測定結果 및 分析에 대하여 자세히 考察하여 보는데 있다.

II. 初臨界 및 爐物理試驗

1. 初臨界試驗

原子爐의 ²³⁵U에 中性子が 吸收되면 核分裂을 일으키고 이때 數個의 中性子が 放出된다. 이 中性子は 輕水爐나 重水爐의 경우에는 減速되어 다시 核分裂을 위하여 ²³⁵U에 흡수되는데 原子爐工學에서는 이를 中性子の 一世代 또는 一週期(one generation, one cycle)라 한다. 그리고 各世代에서 生成되는 中性子數의 比가 1이 되었을 때 原子爐는 臨界가 되었다고 한다. 그러므로 原子爐속에 中性子線源의 도움이 없는 狀態에서 순수하게 核分裂에 필요한 中性子が 生成·供給되는 狀態가 維持될 때 原子爐에 臨界가 유지되는 것이다. 따라서 原子爐를 運轉하는 동안에 數 많은 臨界가 이루어지며 原子爐의 出力은 核分裂을 일으키는 中性子の 絕對數에 比例한다. 다시 말해서 1,000KW로 運轉할 때와 60萬KW로 운전할 때 核分裂을 일으키는 中性子數만 다르고 각각의 狀態에서는 原子爐가 臨界狀態로 維持되고 있다는 意味가 된다. 그런데 이러한 數 많은 臨界중에 제일 처음으로 達成해 보는 것이 初臨界이고 月城原子爐에서는 全出力의 約 1,000億분의 1

* CANDU ? (CANada Deuterium Uranium reactor)

(10^{-11} FP)에 해당되는 出力에서 初臨界가 가능하였다. 이때의 出力은 거의 零에 가깝고 단순하게 連鎖反應이 核分裂에 의해서 유지되고 있다는 意味만 있는 셈이다.

앞에서도 대략적으로 말及되었듯이 月城原子爐에서는 核燃料가 天然우라늄이고 減速材와 冷却材가 重水(D_2O)이다. 그러므로 原子爐에서 核分裂에 의해서 燃燒될 수 있는 우라늄-235는 天然우라늄에 섞여 있는 固定量인 0.711%뿐이다. 다시말해서 加壓輕水爐에 쓰이는 核燃料는 우라늄-235의 量이 天然우라늄의 約 4배 이상인 平均 3.2%로 濃縮된 것이다. 그러므로 爐心에 保有되는 剩餘反應度(excess reactivity)가 相對적으로 많기 때문에 加壓輕水爐에서는 1년에 한번씩 爐心の 1/3에 해당되는 核燃料를 交替하고 月城原子爐에서는 일정한 기간동안 운전한 후 爐心の 核燃料 一部 中 約 1/250을 매일 交替해야 한다. 그리고 濃縮우라늄을 쓰는 加壓輕水爐에서는 앞으로 燃燒되어야 하는 核燃料인 剩餘反應도가 CZP¹⁾狀態에서 約 240mk(milli-k)인데 비하여 月城原子爐에서는 約 80mk에 지나지 않는다. 이때 月城原子爐의 初期爐心은 天然우라늄과 重水冷却材, 減速材로 構成되고 특히 重水減速材의 純度는 99.78%로 매우 높다. 그리고 初期爐心の 剩餘反應度 100mk는 爐心の 中心部附近에 位置하는 80個의 核燃料裝填管(fuel channel)에 160個의 減損核燃料(depleted fuel: 0.52% U-235)와 21個의 調整棒을 插入시킴으로서 約 75mk로 줄어든다. 그러나 爐心밖에 있는 吸收棒 4個와 停止棒 28個가 完全히 爐心에 插入되더라도 初期爐心에서의 剩餘反應度價인 75mk는 制御될 수 없다. 따라서 初期爐心の 이러한 理由 때문에 核燃料裝填前에 減速材의 硼素濃度를 確認해야 하고 中性子吸收物이 大量으로 회석되어 있는 第二의 停止系統도 항상준비되어 있어야 한다. 그리고 調整棒을 包含하여 吸收棒, 地域調節裝置, 停止棒의 機能에 대하여는 爐物理試驗에서 상세하게 記述하겠다.

初期爐心に 대하여 特記할 사항은 約 0.52%로 減損된 核燃料의 사용이다. 이들은 初期爐心이 天然우라늄으로만 構成될 경우에 原子爐의 中心部分에서 出力이 높게 나타나기 때문에 이 部分의 出力을 原子爐의 외곽의 出力分布와 비슷하게 平坦化(flattening)하기 위한 것이다. 따라서 初期爐心を 天然우라늄 核燃料 bundle 4,400個 減損核燃料 bundle 160個, 重水冷却材와 減速材, 그리고 調整棒 21個가 들어 있는 狀態로

서 構成된다. 이러한 狀態에서 剩餘反應度 75mk를 吸收棒과 停止棒의 역할을 고려하지 않고 原子爐를 정확히 停止시킨 狀態를 GSS(Guaranteed Shutdown State)라고 定義한다. 즉 初期爐心の GSS는 減速材에 中性子吸收物인 硼素를 어느정도 회석시킴으로서 얻어진다. 이때 필요한 硼素量은 硼素 1ppm이 約 8.6mk를 制御하기 때문에 75mk를 억제하기 위하여 約 10ppm의 보론을 회석하여야 한다. 그러나 GSS 條件은 어떠한 경우에 있어서도 原子爐가 停止되어야 하는 狀態를 意味함으로 減損核燃料의 裝填, 調整棒의 插入, 그리고 重水冷却材까지 考慮하지 않은 경우의 剩餘反應度價에 50%의 安全如餘를 考慮한 21ppm($123mk \times 1.5 \div 8.6mk/ppm$)의 硼素를 重水減速材에 회석하면 충분한 것으로 計算된다. 이 값은 캐나다의 規制機關인 AECB(Atomic Energy Control Board)의 規制事項으로서 Pt. Lepreau 發電爐에서 適用하도록 하였다. 그러나 Pt. Lepreau에서는 硼素 約 31ppm에 해당되는 가도리움을 사용하였으며, 月城原子爐에서도 32ppm의 硼素로서 GSS를 維持하였다. 約 30ppm의 硼素(또는 이에 準하는 量의 다른 中性子吸收體)量은 Bruce 發電爐의 GSS에 適用되었던 값이다. 이는 Bruce爐의 發電量이 CANDU-600爐의 發電量에 約 1.5배가 되어 結果적으로 爐心이 크다. 그러므로 再稼動時 xenon override를 CANDU-600에서와 같이 調整棒에만 의존할 수 없어 90% 정도로 U-235가 濃縮된 booster棒을 쓰기 때문에 이들이 事故로 爐心에 進入될 경우도 GSS가 유지되어야 하는 條件을 勘案하여 31ppm이 計算된 것이다. 원인이 어디에 있었던지 21ppm의 硼素를 重水減速材에 회석시키면 GSS가 確保되는 月城原子爐의 初臨界前에 GSS條件을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 4,400個의 天然우라늄 核燃料裝填,
- (2) 160個의 減損核燃料가 爐心の 中心部에 있는 80個의 核燃料裝填管에 裝填,
- (3) 重水減速材(純度 99.78%)와 冷却材(純度 99.63%)가 채워짐,
- (4) 調整棒 21個 完全插入,
- (5) 吸收棒 4個와 安全棒 28個는 爐心밖으로 完全除去,
- (6) 地域調節裝置의 輕水平平均水位 約 17%,
- (7) 重水減速材의 中性子吸收體인 硼素量=32ppm.

이러한 狀態의 爐心에서 減速材를 순환시키고 減速材에 회석되어 있는 硼素를 조금씩 除去하면서 初臨

1) CZP (cold zero power) 狀態는 原子爐의 出力이 零에 가깝고 核燃料, 冷却材, 減速材의 溫度가 常溫(25°C)인 爐心條件을 뜻한다. 이 狀態는 HZP(Hot Zero Power)와 HFP(Hot Full Power) 條件으로 運轉되는 初期段階가 된다.

계에 접근하는 것이다. 이때에 핵반응에 필요한 중성자는 경수爐에서와 같이 중성자線源이 별도로 필요없고 우라늄의 spontaneous fission에 의하여放出되는 중성자가 線源(source)이 된다. 그리고 GSS條件에서는 spontaneous fission에서放出되는 一定한 數의 중성자는 硼素等の 중성子吸收物에 吸收되어 核分裂反應이 거의 일어나지 않는다. 그러나 減速材의 硼素量을 逐漸히 減少시키면 一定한 數로 放出되는 spontaneous fission 中性子가 減速材에 相對的으로 적게 吸收된다. 이렇게 增加되는 spontaneous fission 中性子는 減速되어 U-235에 吸收됨으로서 核分裂에서 放出되는 中性子가 다시 減速過程을 거쳐 核分裂에 寄與하게 된다. 이러한 過程을 減速材에 회석되어 있는 硼素量과 中性子計數率의 逆을 取한 값($1/\text{count rate}$)을 圖示하면 그림 1과 같다. 그리고 $1/\text{CR}$ 이 零으로 되는 地點, 즉 中性子計數率이 無限으로 되는 狀態에서 原子爐는 처음으로 臨界가 된다. 그러나 實際로 原子爐에서 中性子計數率이 無限으로 될 수 없고 다만 核分裂에서 放出되는 中性子가 減速되어 U-235에 吸收됨으로 核反應을 유지하는 狀態를 意味한다. 즉 核分裂에서 放出되는 中性子가 減速過程에서 吸收되거나 爐心밖으로 漏出되는 것을 除外하고도 연속적으로 一定한 比($k_{eff}=1.0$)를 유지하는 狀態이다. 이때 中性子の 絕對數는 出力에 따라 다르고 初臨界의 경우에 原子爐出力은 매

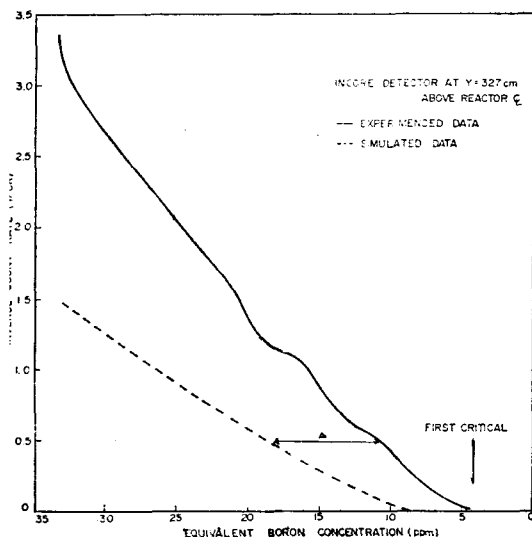


그림 1. $1/\text{CR}$ 對 硼素量(EBC)

우 낮다. 그리고 有效中性子増倍係數(effective neutron multiplication factor: k_{eff})의 값이 1.0로 유지되는데 있어서 spontaneous fission 中性子の 寄與는 核分裂에 의하여 供給되는 中性子數에 比하여 거의²⁾ 無視될 수 있어야 한다. 이것은 原子爐에 裝填되어 있는 우라늄 量이 一定하고 spontaneous fission에 의한 中性子數도 一定하기 때문에 核分裂에서 放出되는 中性子만으로도 中性子増倍가 가능해야 한다는 意味이다. 따라서 中性子の 有效増倍係數가 처음으로 1.0이 되는 狀態를 原子爐에서 調査·測定하고 이때의 殘餘硼素量과 出力을 알아 보는 것이 初臨界試驗을 遂行하는 目的이 되겠다.

그러면 月城原子爐에서 初臨界의 點火過程을 하나씩 살펴보기로 하겠다. 우선 原子爐의 GSS는 앞에서 記述한 7個의 條件에 의해서 確保되었다. 이 狀態에서 減速材에 회석되어 있는 硼素를 조금씩 서서히 除去하면서 初臨界에 到達하면 되는 것이다. 그러나 이러한 作業이 遂行되기 前에 예상하지 못했던 強力한 中性子吸收體인 가도리움이 減速材에 添加되었다. 따라서 예정에 없었던 가도리움除去에 時間이 所要되게 되었는데 여기서 문제가 되었던 것은 添加된 가도리움의 精確한 量이다. 왜냐하면 正確한 量을 알아야 GSS유지를 위하여 회석한 硼素量과 合한 毒物質의 全體量을 基礎로하여 臨界時間을 예측 할 수 있기 때문이다. 그러나 不幸이도 添加된 가도리움의 量은 밝혀지지 않았고 減速材를 sample하여 測定한 結果 11월 18日 現在로 約 1.3ppm의 가도리움이 회석되어 있는 것으로 밝혀졌다. 그리고 初臨界制御는 硼素만으로 하는 것이 원자로 제어가 용이하기 때문에 우선 가도리움을 11월 18日 14시 30분부터 除去하기 시작하였는데 添加된 가도리움을 除去하는 도중에 $1/\text{CR}$ 에서 變化가 나타났다. 즉 가도리움을 除去하는 量에 比例하여 一定한 比率로 減少하던 가도리움 量이 19日 새벽 4시에 돌연히 增加하기 시작하였고 6時 30分頃에는 最大值인 0.56ppm으로 測定되었다. 이러한 現象으로부터 추리할 수 있는 것은 가도리움이 完全히 減速材에 회석된 것이 아니라 작은 粒子狀態로 原子爐内部에 녹아 있어 減速材의 溫度和 流動條件이 變함에 따라 다시 회석되면서 나타나는 것으로 간주되었다. 따라서 減速材의 流速을 最大로 하여 減速材의 溫度를 높임으로서 粒子狀態의 가도리움을 회석시키는 作業이 遂行되었다. 그리고 初臨界

- 2) 天然우라늄으로 構成된 爐心に 硼素를 회석하지 않은 重水가 채워질 경우에 spontaneous fission으로 放出되는 中性子만으로 臨界가 가능하다. 그러나 減速材에 硼素가 회석되어 있기 때문에 spontaneous fission에서 放出되는 中性子가 減速過程을 거쳐 U-235에 吸收되어 核分裂을 일으키기 前에 거의 硼素에 吸收됨으로 低臨界狀態를 유지한다.

時間에 대한 예측은 硼素만이 회석되었을 경우(이것도 硼素量, 減速材의 流速, 이온교환기의 resin效果에 따라 다르다)나 가도리움이 約 1.3ppm이 添加되었다고 假定하였을 때는 가능하였으나 새로 가도리움의 회석되면서는 거의 不可能하게 되었다. 이러한 狀態에서 계속하여 가도리움만을 除去하는데 約 20時間이 所要되었으며, 20日 새벽 2時부터는 가도리움이 0.1ppm에서 유지되고 있었다. 이 量은 硼素 0.35ppm과 같으며 가도리움의 회석량이 0.1ppm 以下로 하는데는 더 많은 時間이 所要됨으로 20日 새벽 3時 30分부터 硼素만을 除去하기로 決定하였다. 이때 硼素量은 約 32ppm이었고 가도리움의 量은 約 0.1ppm이었다. 그러나 가도리움粒子의 完全한 회석에는 아직도 의문점이 있어서 初臨界에 대한 시간예측은 역시 가능하지 못하였다. 이러한 條件에서 硼素를 계속하여 除去하였으며, 完全히 硼素만이 회석되어 있을 경우에 初臨界에서의 硼素量인 8.6ppm에 접근되고 있었다. 즉 0.1ppm의 가도리움의 영향을 감안할 경우 純粹한 硼素는 8.3ppm 정도이던 臨界가 될 것이다. 그러나 20日 18時에 硼素量이 8ppm이 되어도 臨界의 現象이 나타나지 않았다. 즉 爐心에 設置되어 있는 中性子計測器의 計測值(CR)가 硼素除去를 정지하였을 때도 增加되지 않았다. 다시 말해서 減速材로부터 硼素를 除去하는 作業을 중지하였을 때 1~2分의 짧은 시간이 지난후 中性子計測值가 다시 增加하다가 새로운 定常狀態에 到達된다. 이때 中性子が 다시 增加하는 時點에서 原子爐는 最初로 核分裂에 의한 點火, 즉 初臨界가 되는 것이다. 만약 이러한 現象이 나타나지 않고 硼素除去를 중지한 狀態에서 一定한 計測值를 유지한다면 原子爐는 아직 低臨界狀態인 것이다.

月城原子爐에서는 初臨界일 경우에 減速材의 회석되어 있어야 할 硼素量인 8.6ppm보다 적은 量에서도 原子爐는 臨界가 되지 않았다(그림 1 參照). 이것은 가도리움粒子가 完全히 회석되지 않았고 아직도 조금씩 分散되어 회석되고 있기 때문이다. 그리하여 硼素를 臨界에 육박을 벗어난 約 4ppm까지 除去하였으며, 硼素除去에 比例하여 나타나는 中性子計測值를 勘案하여 21日 아침 9時 15分頃에 初臨界를 發表하였다. 그러나 이것은 그림 1에서 명백하게 보여 주듯이 月城原子爐는 確實히 低臨界이었다. 왜냐하면 그림 1에서 두 曲線의 橫軸에서의 表(△)가 곧 添加되어 完全히 회석되지 않은 가도리움의 影響에 의한 것이기 때문이다. 따라서 原子爐는 臨界가 될 수 없었고 臨界인가를 알아보기 위하여 硼素除去를 중단한 후 10여분이 경과하여도 1/CR의 변화는 전혀 나타나지 않았다. 또한 月城原子

爐의 初臨界發表後에 이것이 잘못이었음은 原子爐의 出力을 10^{-6} FP로 上昇시키는 過程에서도 여러차례 나타났다.

앞에서 記述한 바와 같이 原子爐의 臨界는 數없이 되풀이 되나 初臨界만은 原子爐에 最初의 點火라는 觀點에서 歷史的인 意味가 있다. 그러나 많은 時間과 人力을 동원하여서 初臨界時間을 精確하게 찾아내지 못한 것은 여기에 참여했던 한사람의 입장에서 생각하여 볼 때 못내 서운하게 생각된다.

2. 爐物理試驗

月城原子爐에서는 爐物理試驗을 遂行하기 前에 原子爐의 下端에 있는 가도리움粒子를 회석시켜 거의 完全하게 除去하고 난뒤에 爐物理試驗이 遂行되었다.

原子爐에서 爐物理試驗은 原子爐에 設置되어 있는 各種의 反應度裝置들이 設計된대로 機能을 가지고 있는가에 대하여 試驗하는 것이다. 즉 原子爐設計와 더불어 爐心에 裝置되는 制御棒, 調整棒 등이 設計仕養書에 따라 材料가 쓰여졌으며, 製作되어서 制御에 필요한 反應度を 實際 얻을 수 있는가를 出力稼動前에 確認하는 것이다. 그리고 爐心の 中性子分布도 設計에서 예측된 것과 같이 分布되는가도 爐物理試驗期間 중에 測定한다. 따라서 爐物理試驗結果는 設計에 대한 確認뿐만 아니라 앞으로 原子爐를 稼動하는데 중요한 參考가 된다.

月城原子爐는 反應度制禦裝置로서 地域調節裝置(ZC U: zone control unit), 調整棒(adjuster rod), 吸收棒(MCA: mechanical control absorber), 停止棒(SOR: shut-off rod)이 있으며, 원자로에서 이들의 위치는 그림 2와 같다. 특히 停止棒은 反應度制御보다는 原子爐의 稼動을 停止시키는데 쓰이는 것으로 SDS-1(shut down system-1)이라고도 부른다. 그리고 第二段階의 原子爐停止裝置는 8,000ppm 정도의 질산가도리움이 섞여 있는 重水가 減速材에 살포되어 600mk 정도의 反應度を 制御할 수 있는 SDS-2(shut down system-2)가 있는데 이들에 대한 動的 試驗도 爐物理試驗期間에 遂行된다.

그러면 이들의 대략적인 構造와 機能을 記述하면서 爐物理特性의 設計値와 實測值를 비교·검토하겠다.

가. 地域調節裝置(ZCU)

이 裝置는 zircaloy 管으로 製作되어 管속에 輕水가 채워지는 정도에 따라 原子爐의 反應度を 制御한다. 이 裝置는 그림 2에서와 같이 6個의 管으로 構成되며, 수평으로 놓여 있는 원통형의 原子爐를 左·右로 二等分하고 中央管은 다시 수직으로 3個의 區間, 左右管은

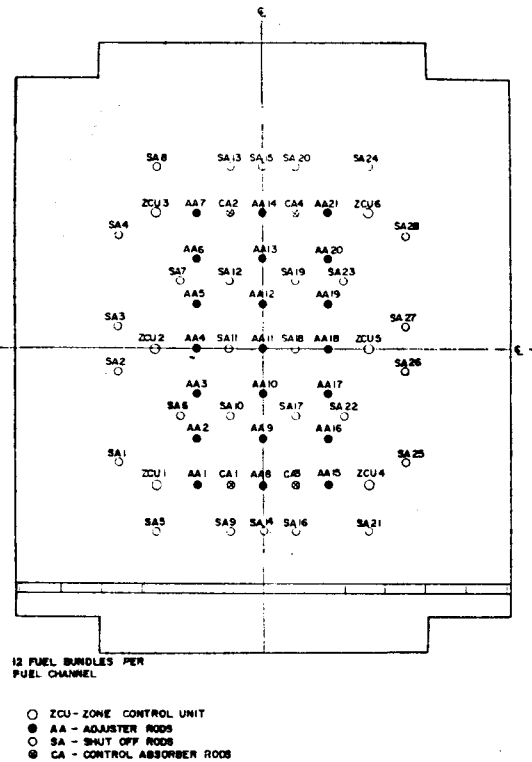


그림 2. 反應度裝置 排列圖

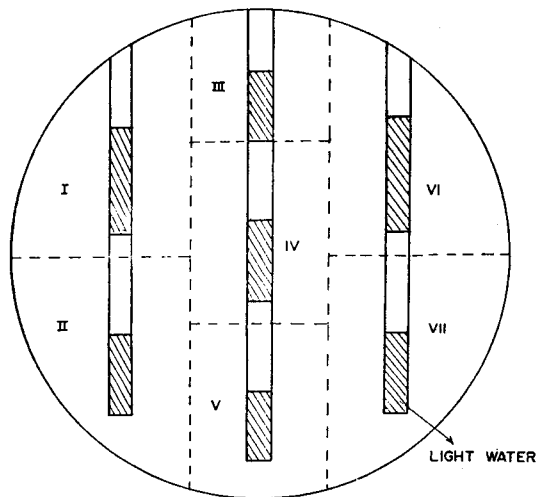


그림 3. ZCU 區間位置

各各 2個의 區間으로 나뉘어져 있다(그림 3 참조). 그러므로 6個의 수직管으로서 原子爐를 14個의 區間으로 나누어서 地域別 出力變化를 調整한다. 出力을 調整하는 方法은 14區間으로 나뉘어진 管속에 輕水(demi-water)가 채워지는데 이 量을 調節하여 地域出力을 制

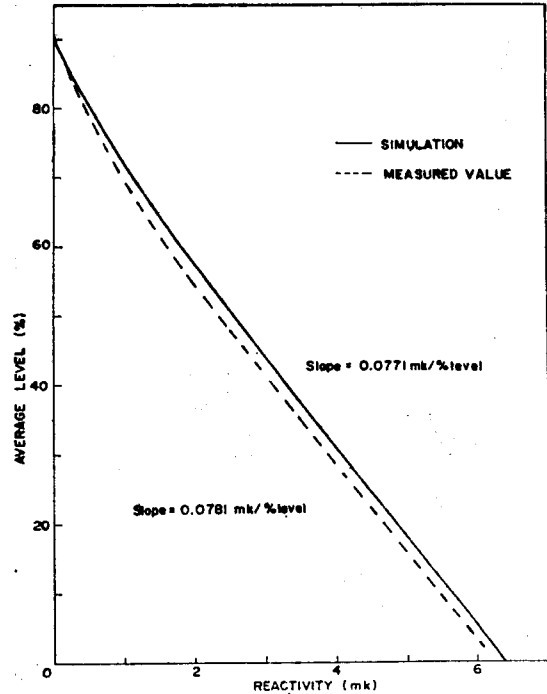


그림 4. 反應度 對 ZCU 平均水位(%)

表 1. 減速材와 冷却材條件

區 分	模 擬 條 件	測 定 條 件
減 速 材		
純 度 (a/0)	99.722	99.789
溫 度 (c)	25	39.9
冷 却 材		
純 度 (a/0)	99.722	99.633
溫 度 (c)	25	16.5

御한다.

그림 4에는 月城原子爐의 ZCU에서 測定된 反應度價(reactivity worth)를 豫想値와 함께 圖示하였다. ZCU 14個 區間에 있는 管에 채워지는 水位의 平均値가 10~90%로 變化할 때의 값으로 實測値가 豫想値보다 約 1.3% 적게 나타나고 있다. 이것은 爐心條件이 다르기 때문에 나타나는 現象으로서 減速材와 冷却材의 純度 그리고 이들의 溫度的 差異에 의한 것으로 이들의 條件은 表 1과 같다. 이러한 條件을 勘案할 때 豫測値와 實驗値는 매우 잘 一致하고 있으며, ZCU의 反應度價를 基礎로 다른 裝置들의 反應度價를 測定하게 된다.

나. 調整棒(adjuster rod)

月城原子爐에는 21個의 調整棒이 있으며 이들의 位

置는 그림 2에서와 같다. 調整棒의 機能은 原子爐가 停止되었다가 다시 稼動될 때 再稼動時間이 停止後부터 30分이 超過하지 않았을 경우 爐心에 生成되어 있는 氙의 反應度를 減衰시킴으로 再稼動을 가능하게 한다. 이 調整棒들은 中性子吸收體로 만들어져 있으며, 硼素나 가도리움과 같이 강한 吸收物質이 아니고 stainless steel이나 cobalt와 같은 것을 사용한다. 月城 原子爐에서는 調整棒이 stainless steel로 製造되어 있는데 비하여 CORDOBA 原子爐에서는 ^{58}Co 로 만들어져 ^{60}Co 生産에 活用되기도 한다.

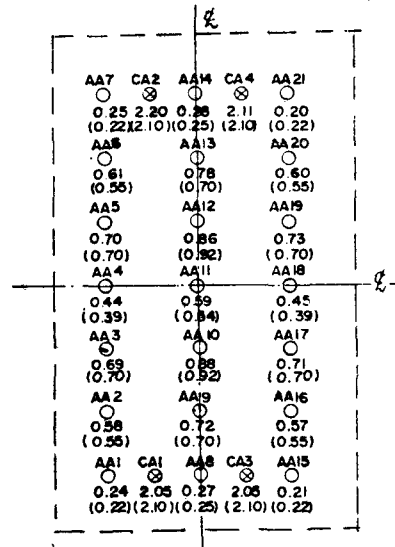
調整棒은 原子爐가 正常으로 稼動될 때는 爐心에 항상 裝填되어 있다가 原子爐停止後 30分以內에 再稼動할 때 爐心밖으로 引出한다. 이때 調整棒들은 몇개씩을 동시에 作動시키는데 이들은 群으로 나누어 測定된 反應度價와 計算値는 表 2에 정리하였다. 여기에서 調整棒의 위치를 나타내는 번호는 그림 2에 있는 排列순서(예: 7은 AA7)와 같고 群들의 反應度는 硼素 batch를 이용하여 測定하였다. 計算値와 測定値를 비교하여 보면 測定値가 전반적으로 10~20% 정도 크게 나타나고 있으며, 個個의 棒에 대한 反應度差는 제일 큰것이 약 4%정도이다(그림 5 參照). 이들의 差異는 역시 表 1에 記述되어 있는 冷却材와 減速材의 條件이 다른것에 基因된 것이며, 實測値가 原子爐設計値인 14.5mk와는 매우 잘 一致하고 있다.

다. 吸收棒(MCA: Mechanical Control Absorber)

吸收棒은 뒤에 說明되는 停止棒과 材質이나 構造가 同一하다. 月城原子爐에는 吸收棒이 4個(그림 2의 CA 1, 2, 3, 4) 있고 이들은 2개씩 2群으로 나누어 作動한다. 吸收棒의 材質은 熱中性子吸收體인 Cd로 만들어져 있고 原子爐의 出力을 크게 變化시킬 때 사용한다. 따라서 原子爐가 正常으로 稼動될 때는 出力에 따라 完全히 爐心밖에서 나와 있거나 部分的으로 爐心에 插入되어 있다. 그리고 吸收棒으로 出力을 調節(step-back)

表 2. 調整棒 反應度價

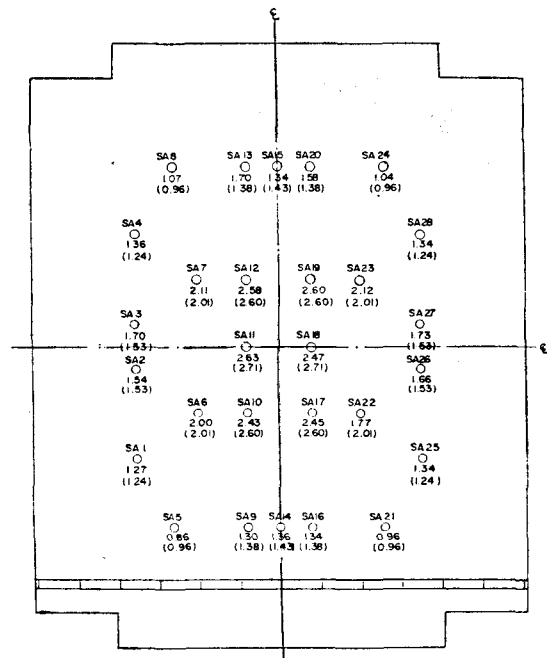
調整棒群	調 整 棒	反應度價(mk)	
		計 算 值	測 定 值
1	1, 7, 11, 15, 21	1.406	1.572
2	2, 6, 8	1.508	1.704
3	4, 16, 20	1.516	1.667
4	8, 9, 13, 14	2.196	2.612
5	3, 19	1.610	1.948
6	5, 17	1.627	1.832
7	10, 12	2.835	3.246



測定値
(計算値)

그림 5. 調整棒 및 吸收棒 反應度價

할 경우에는 吸收棒들을 機械的인 方法으로 作動시키나 非常時에도 사용할 수 있도록 荷重에 의한 자유낙하도 가능하다. 이것은 吸收棒이 가지는 反應度價만



測定値
(計算値)

그림 6. 停止棒(SDS-1)反應度價

으로도 正常稼動되는 原子爐를 停止시키기에 충분하기 때문이다. 즉 月城原子爐에서는 原子爐停止裝置가 SDS-1과 SDS-2외에 吸收棒群이 하나 더 있는 셈이다.

吸收棒의 反應度價는 吸收棒을 完全히 除去했을 때와 挿入하였을 때의 ZCU 平均水位差를 求하여 測定하였는데 計算値인 8.4mk와 매우 잘 一致하고 있으며 各各의 反應度價는 그림 5와 같다.

라. 停止棒(SOR: Shut-Off Rod)

停止棒은 吸收棒과 같은 構造物로 되어 있으며, 各各의 反應度價는 測定値와 計算値를 比較하여 그림 6에 圖示하였다. 測定結果는 個個의 棒에서 0~9%의 差異를 보이고 28個의 棒으로서 計算値 47.16mk에 比하여 1.15%가 큰 47.71mk로 나타났다. 여기서 중요한 것은 停止棒들은 個別的으로 사용되지 않고 完全 挿入 또는 除去인데 平衡爐心(equilibrium core)에서는 이들의 有效反應度價가 約 74mk의 效果가 있다는 점이다. 이것은 平衡爐心에서는 初期爐心에서와 比較하여 爐心狀態가 다르고 中性子分布도 더욱 平坦化하여 지기때문에 相對的으로 反應度價의 影響은 크게 나타나기 때문이다.

마. 中性子分布測定

CANDU 原子爐는 爐心に in-core 計測器가 固定되어 設置되어 있다. 이들은 原子爐稼動時에 中性子分布를 分析하는데 필요한 자료를 얻을 수 있는 Vanadium 計測器가 102個, ZCU의 輕水水位를 調節하는데 쓰이는 platinum計測器 28個, 그리고 SDS-1와 SDS-2에 연결되는 platinum計測器가 각각 68個(이중에 34個는 예비용임.), 46개가 있다. 이들은 中性子分布를 測定할 때 사용할 수도 있겠으나 出力($\sim 10^4$ FP)이 너무 낮기 때문에 캐나다에서 제공한 fission chamber를 사용하여 測定하였다.

初期爐心の 低出力狀態에서의 中性子 分布測定은 원통형의 原子爐가 수평으로 놓인 위치에서 수직과 수평 방향으로 遂行되었다. 그러므로 原子爐의 直徑方向으로만 中性子分布를 測定한 셈인데 이것은 反應度制御裝置들이 수직으로 挿入되기 때문에 이들의 影響을 調査하기 위한 까닭이다.

그림 7에는 수직方向으로 中性子分布를 測定한 결과와 豫想分布를 比較하였다. 이 그림은 가도리움粒子가 爐心に 남아 있는 狀態에서 測定된 것으로서 이들이 爐心下端에 모여 있음을 보여 준다. 따라서 이들을 完全히 除去한 뒤에 다시 測定한 결과는 그림 8과 같다. 여기서도 처음 算想했던 分布(simulation 1)와 다르게 測定되었는데 이것은 重水減速材의 水位가 다르기 때문에 나타난 現象이다. 따라서 처음 計算에 사용하였

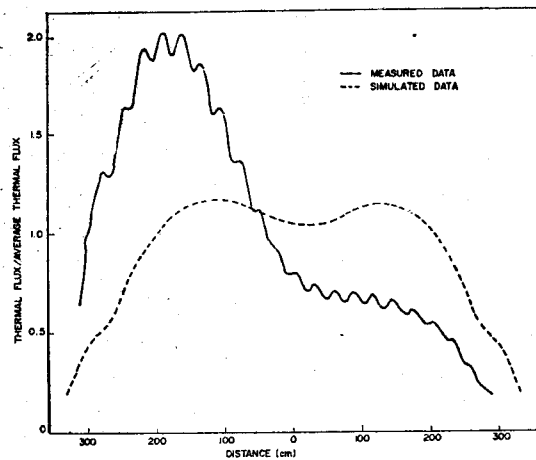


그림 7. 中性子分布(수직方向)-I

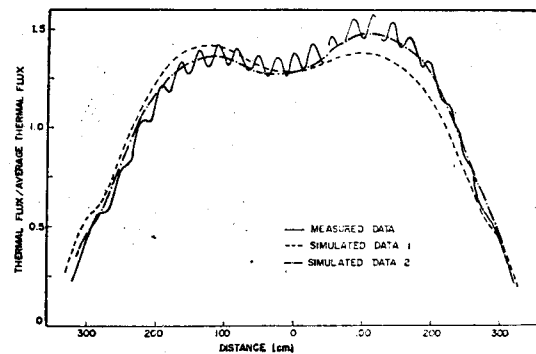


그림 8. 中性子 分布(수직方向)-II

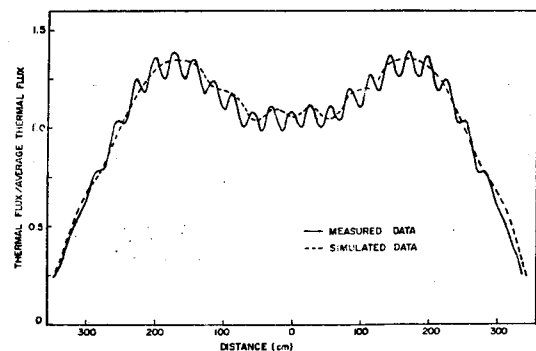


그림 9. 中性子分布(수평方向)

던 水位보다 實際水位를 사용한 결과는 測定値와 잘 一致하고 있다.

그림 9에서는 수평方向의 中性子分布를 測定結果와 比較하여 圖示하였으며, 吸收棒과 停止棒들이 爐心に 들어 있는 狀態에서 수직方向의 中性子分布는 그림 10와 같다. 여기서도 測定値들이 豫想分布와 잘 一致하고 있다.

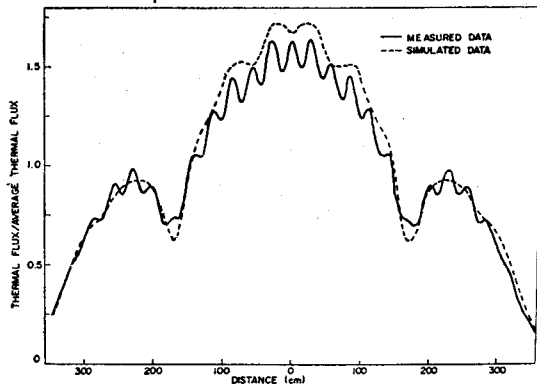


그림 10. 中性子分布(수직方向)

바. 一次系統의 溫度係數

溫度係數는 原子爐의 核燃料, 冷却材, 減速材溫度가 1°C 變하는데 따르는 反應度의 變化를 나타내는 係數이다. 특히 CANDU爐에서는 減速材와 冷却材가 分離되어 있어 만약에 冷却材損失事故가 發生하였을 때 減速材는 爐心에 남아 있기 때문에 冷却材의 溫度係數에 대한 變化는 測定해 볼 必要가 있다.

그림 11에는 月城原子爐의 冷却材 溫度係數의 測定値가 圖示되어 있다. 여기서 보여 주듯이 冷却材의 溫度係數는 負의 값을 가지는 $-0.04\text{mk}/^{\circ}\text{C}$ 이고 溫度가 增加함에 따라 係數가 완만해지는 現象을 볼 수 있다. 그리고 이 結果는 測定할 때의 原子爐條件 즉 減速材의 溫度 및 ZCU의 輕水 平均水位를 正確히 알 수 없어서 冷却材의 溫度係數를 計算하지 못하였기 때문에 月城發電所에서 제공한 자료를 圖示한 것임을 밝혀둔다.

사. 停止系統의 動的特性實驗

月城原子爐에는 原子爐停止系統이 두 種類가 있는데 이들의 動的特性에 대한 實驗이란 各各의 系統이 爐心

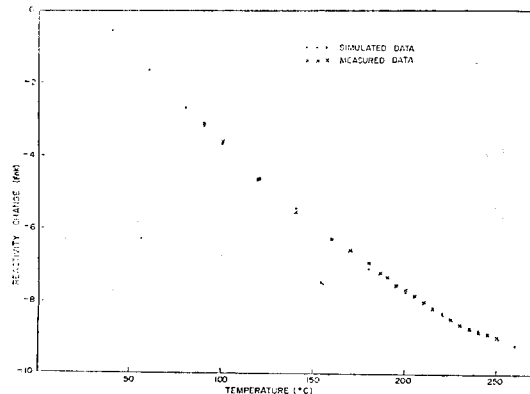


그림 11. 冷却材 溫度 係數

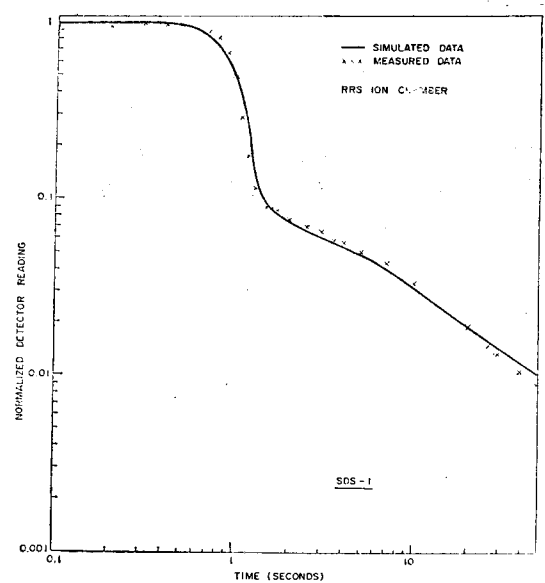


그림 12. SDS-1 動的特性 試驗

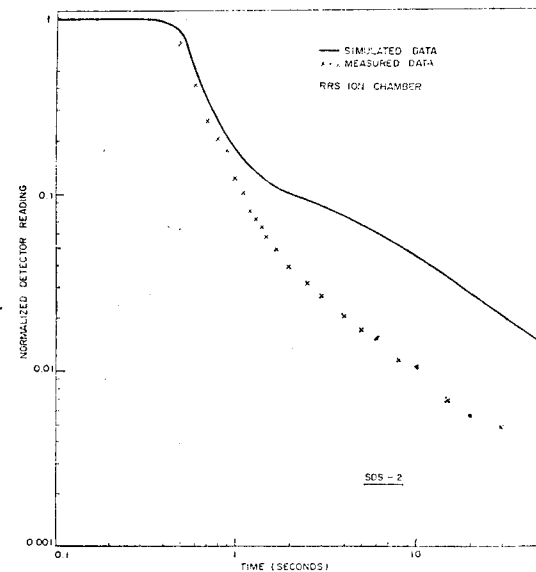


그림 13. SDS-1 動的特性 試驗

에 進入될 때 時間에 따라 出力이 減衰하는 現象이 設計된 바와 같은가를 實測하는 것이다. 이 現象은 分析할 수 있는 電算코드가 없어 캐나다에서 提供한 豫想曲線과 더불어 測定된 結果를 圖示하였다. 그림 12는 28個의 停止棒(SDS-1)이 一時에 爐心으로 자유낙하하면서 減衰되는 出力비이고 그림 13은 毒物注入 탱크(SDS-2)로 부터 毒物인 가도리움이 注入되면서 出力이 變하는 것을 보여 준다. 이 두 結果는 豫想値보다 實驗値들이 더 有效하게 爐心에 影響을 미치고 있음을

알 수 있겠다.

Ⅱ. 結 論

月城原子爐의 爐物理試驗은 처음 經驗하는 것으로서 CANDU爐의 特性을 理解하는데 많은 도움이 되었다. 特히 測定된 結果들을 分析하고 相異한 點을 檢討·理

解함으로써 앞으로 爐心管理에 많은 도움이 있을 것으로 思慮된다. 그리고 初期爐心解析에 있어서는 計算結果가 實測値와 매우 잘 一致하고 있어 原子爐特性에 대한 解析技術을 確認하는 좋은 機會가 되었다.

끝으로 月城原子爐에서 遂行된 爐物理試驗結果를 提供하여 주신 月城發電所의 爐心管理課 여러분에게 感謝드린다.