

月城原電의 試運轉 經驗

Commissioning Experiences of Wolsung (CANDU) NPP

盧 潤 來 (韓國電力公社 原子力研究室長)

1. 序 論

極東地域에서 처음으로 竣工된 月城의 重水型 原子力發電所는 爐型의 特異性和 함께 設計概念上의 特殊性으로 因해 우리에게는 처음부터 생소한 것이었고, 더구나 어떤 系統의 設計는 그 以前에 볼 수 없었던 새로운 것이어서 電力會社의 立場에서 볼때 實際로 받아들이기 어려운 點도 있었다. 따라서 試運轉 期間에 많은 技術上의 問題點이 導出되었으며, 그 結果로 工期上의 遲延을 多少 超來케 되었다.

그러나 이같은 技術上의 어려움은 大部分 事業者인 韓電과 主契約者인 AECL 그리고 數 많은 機器供給者와의 긴밀한 協助아래 解決되었으며, 이에 따라 1983年 4月22日에 商業運轉을 開始하게 되었다. 商業稼動 以後 오늘까지 月城 重水爐의 運轉實績을 통해 본 性能은 比較的 우수해서 國內에서 運轉되고 있는 同級의 輕水爐보다 좋은 成績을 보이고 있다.

CANDU設計에는 負荷追從上의 柔軟性和 컴퓨터에 依한 發電所의 制御에 힘입어 比較的 運轉이 容易하다는 등의 長點이 있는 反面, 試運轉 期間中 나타난 많은 問題點이 있었으며, 이 가운데 몇가지는 아직도 解決되지 못한 難問題로 尚存하고 있다.

2. 試運轉 : 一般事項

月城 試運轉에 관한 韓電 및 AECL間의 契約

에 따르면 AECL은 技術監理를, 韓電은 監理와 함께 실제로 作業을 담당할 技術者와 技能工을 供給토록 되어 있는데, AECL은 試運轉을 直接 遂行해 본 經驗이 없는 設計會社이므로 캐나다의 電力會社인 Ontario Hydro社에 下請하였으며, 한편 韓電은 不足되는 人員을 補充하기 爲해 캐나다에서 訓練된 職員은 비록 本社要員이더라도 모두 現場에 投入하였을 뿐아니라 補修工團(現在의 韓國電力補修株式會社)의 技能工을 대거 投入하였다. 이같은 人力資源을 근간으로 하여 合同試運轉班을 構成하고 本格的인 試運轉業務를 進行해 나갔다.

月城 試運轉業務는 4段階 즉, Phase A, B, C, D로 나뉘어 進行되었는데 Phase D는 發電所 性能에 관한 保証試驗이므로 실제로는 3段階에 걸쳐 이루어졌다.

3. Phase A 試運轉

A段階의 試運轉이란 通常 Pre-Operational Tests를 말함인데, 처음 始作된 系統은 建設에서 부터 引受받은 發電所 制御用 컴퓨터에 대한 각종 試驗으로서 1981年 2月부터였다. 永久的인 電氣設備과 HVAC系統이 아직도 引受되지 못한 狀態였으므로 臨時動力과 에어컨設備를 급히 設置하고서야 겨우 始作할 수 있었다. Phase A 試運轉 가운데 가장 어렵고 重要했던 業務를 몇가지 소개한다.

가. 壓力管 點檢

캐나다의 National Standard에 依하면 原子爐의 壓力管에 對한 Inaugural Inspection 및 Periodic Inspection 計劃에는 極히 制限된 數만 點檢 托록 되어 있는 바, 이에 따라 380個의 壓力管 가운데 14個를 選定하여 Full Volumetric Inspection을 한 다음 商業運轉 5年 以內에 5個만 點檢하고 다음에는 ISI의 一環으로 每10年 간격으로 壓力管을 點檢托록 했다.

따라서 아르헨티나의 CANDU600인 Cordoba 發電所에서는 Inaugural Inspection으로서 1981年 11월에 14個의 壓力管에 對한 點檢을 施行한 結果, 한개의 Channel에서 현저한 결함이 發見된 바 있어서 380個 全 Channel에 對한 點檢을 ECT로 行하는 한편 결함이 發見된 Channel은 새 것으로 交替作業을 한 바 있다.

한편 1982年 2月에는 運轉中인 Ontario Hydro의 Bruce 2 號機에서 壓力管을 통해 冷却材의 少量이 流出되는 事故가 發生되어 發電을 中止함과 同時에 결함이 있는 管을 交替한 바 있다. 자연히 이같은 일련의 事故는 壓力管 製作者가 使用하고 있는 NDE技術의 健全性에 對하여 의구심을 갖게 되었으며, 이로 인해 Pt. Lepreau에서는 全 壓力管에 對하여 ECT를 實施한 바 있다.

月城에서는 이미 Inaugural Inspection時에 14個의 壓力管에 對한 ECT를 한 바 있으나, 上記와 같은 여러 發電所의 경우를 考慮하여 380個 全 壓力管에 對한 ECT를 實施기로 決定하고 A-ECL의 專門家를 急히 派韓托록 要請하였다.

1982年 7월에 滿 8日間을 소비하여 全 壓力管에 對한 ECT點檢을 한 結果, 多幸히 결함은 發見되지 않았다. 비록 主工程上에는 多少의 遲延이 發生되었으나 이 過程을 通하여 月城 原子爐의 健全性을 재삼 確認하는 계기가 되었다는 點에 큰 意義를 둘 수 있겠다.

ECT結果가 滿足되었으므로 同年 8月15日 부

터는 核燃料裝填을 始作하여 24時間 交代로 계속 作業을 한 結果, 4,560個의 全體 燃料다발을 4日半만에 無事히 끝낼 수 있었는데 이는 CANDU史上 가장 빠른 Loading으로 記錄된다.

나. Feeder 流量測定

月城을 包含한 모든 CANDU600試運轉 計劃에는 380個의 燃料Channel에 對한 Feeder流量測定이 원래는 없었으며, 다만 관례에 따라 系統의 철저한 Flushing만이 準備되어 있었다. 그러나 1981년에 캐나다에서 數年間 運轉되어 오던 發電所에서 部分的인 Channel의 Flow Blockage가 發見되면서 各各의 Channel Flow가 막혀 있지 않다는 確信을 보여주어야만 絕對的으로 安全을 期할 수 있다는 認識을 갖게 되었다.

이에 따라 캐나다政府는 自國內에서 試運轉中인 모든 原子力發電所에 對해서 必要한 措置를 取하도록 命命한 바 있다. 이 命命에 따라 캐나다 國內의 電力會社들은 이른바 1次冷却系統의 洗淨計劃을 세우고 실제로 作業을 추진하였는데, 예를 들어 Pt. Lepreau發電所에서는 建設期間中 不注意로 놓아 둔 줄자가 異物質로 發見되어 이를 Channel 밖으로 除去한 經驗이 있었다.

이같은 事例를 注視한 原子力局은 月城에서도 캐나다의 認許條件을 充足托록 指示한 바 있다. 即, 超音波에 依한 Feeder流量測定과 X線에 依한 비파괴검사를 통해 原子爐1次系統인 熱輸送系統의 健全性을 立証托록 한 것이다.

이에 따라 1982年 6月 熱輸送系統의 冷態試驗期間을 利用하여 Feeder流量測定을 하기로 決定하고 그 結果를 分析해보니 380個 Channel 가운데 6개에 部分的인 장애가 있음을 의심케 되었다. 따라서 Boroscope, X線檢査, 超音波檢査, 肉眼檢査 등 具體的인 方法을 모두 동원하여 Outlet Header에 對한 철저한 檢査를 實施하였으나 이렇다 할 異物質을 發見할 수 없었다. 다만 솔틸에서 떨어진 것으로 생각되는 작은 철실만

이 發見되어 眞空청소기를 使用해서 이들을 除去했을 뿐이었다.

이렇다 할 異常이 없는 것으로 判斷되어 同年 8 월에 核燃料을 裝填한 다음 重水を 系統에 채우고 同年 11月5일부터 1週日동안 超音波를 利用하여 모든 Feeder流量을 다시 測定해 보았다. 한개의 Channel (E-11)만을 除外하고는 모든 流量이 許容範圍에 屬함을 알 수 있었다. 測定值를 檢討한 結果, E-11 Channel이 部分的으로 막혔을 것으로 判斷하고 X線檢査를 E-11 Feeder 管에 따라 재삼 實施하였다.

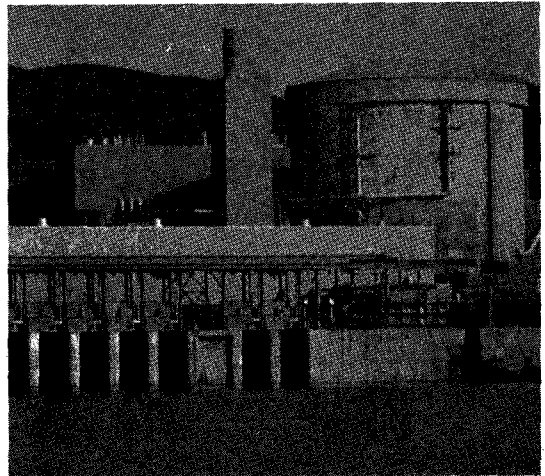
Header 밑바닥과 E-11 Feeder管의 연결 部位에 매우 큰 鐵製 異物質이 끼어 있음이 發見되어 重水を 다시 빼내고 Feeder의 끝을 切斷한 다음 異物質(鐵로 만든 술)을 除去하고 사진 判讀에는 나타나지 않은 얇은 쇠톱조각을 빼낸 다음 Feeder Nozzle을 다시 Header에 접속시켜 용접을 施行하고는 X線檢査를 두번 反復하였고 혹시 하는 마음에서 磁粉末檢査까지 끝냈다. E-11에 對한 再熔接이 철저하고 완벽했으므로 水壓試驗을 다시 해야 되는 수고를 免할 수 있었다.

異物質 除去가 끝났으므로 同年 10月末에는 Feeder流量測定을 세번째로 다시 하기로 決定하였다. 이번에는 測定值가 比較的 나빠던 40個의 Channel에 對해서 再測定한 것인데 多幸히도 모든 結果는 許容範圍內에 들게 되었다.

다. 格納容器漏洩試驗

앞서 記述한 試運轉상의 어려움으로 工期가 지연된 것 以外에도 또 하나의 까다롭고 지루했던 作業은 格納容器인 原子爐建物の 漏洩率試驗이었다. 數次에 걸친 試驗을 되풀이 하는 가운데 許容漏洩率(0.5%/day)을 겨우 充足시킬 수 있었으며 漏洩率을 줄이기 爲해서는 專門業體인 Mulco를 캐나다로 부터 要請하여 콘크리트構造物에 Epoxy注入을 해야만 되었다.

캐나다의 G-II, Pt. Lepreau와 아르헨티나의 Cordoba 等 모든 600MW級 CANDU는 우리와 類



(月城原電全景)

似한 經驗을 갖고 있으며, 結局에는 原子爐建物の 漏洩率을 許容值 以內로 줄이기 爲해 上記 專門業體를 活用치 않을 수 없었는데 이같은 經驗을 통해 볼 때 韓國과 같이 人口密度가 持히 높은 地域에서는 CANDU-600의 原子爐建物設計를 變更치 않을 수 없을 것으로 判斷된다.

콘크리트構造物이란 본래 氣密性이 없으므로 設計者는 原子爐建物の 內壁에 Epoxy를 塗裝토록 하고 있으나, 실제로 Epoxy塗裝은 漏洩率을 줄이는데 큰 效果를 끼치지 못했을 뿐아니라, 建物 內壁에 塗裝된 Epoxy가 상당히 긴 時間동안 유지할 수 있다는 保証도 없는 것이다. 실제로 漏洩試驗이 끝나고 建物內의 減壓過程中 콘크리트壁體에서 부터 Epoxy가 分離되어 떨어져 나가는 現象을 많이 겪게 되었다. 實上 캐나다國內에는 CANDU-600이 前에는 없었으며 모든 原子爐는 眞空建物과 共用으로 格納容器의 役割을 하도록 設計되어 있는 것이다.

原子爐建物の 漏洩에 惡影響을 끼친 또 다른 두가지 要素는 原子爐建物の 隔離밸브의 Seal이 豫想보다 빨리 망가져서 隔離밸브의 性能이 惡化되는 事實과 특히 Spent Fuel Discharge Bay 近處의 幾何學的 構造物이 너무 복잡하여 建設上 많은 接合部가 불가피하게 되어서 이 部位를

通한 空氣漏洩이 심하게 된 것이다. 可能的 設計變更으로는 Epoxy 塗裝 대신에 Steel Liner 로 바꾸는 것이 가장 無難하다고 생각된다.

1次側인 熱輸送系統과 이에 관련된 모든 系統의 溫態試驗은 輕水로 實施했으며 별다른 技術上的 問題點은 없었다. 溫態試驗이 끝난 다음 重水를 채우기 前에 모든 機器와 配管을 건조한 空氣로 完全히 말리기 爲해 오랜 時間을 끌었는데 이는 重水の 低質化로 爐心の 燃燒性能이 떨어지지 않기 爲함이었다.

最終的으로 重水の 裝填이 끝난 다음 부터는 重水の 漏出을 防止하고 일단 流出된 重水는 즉시 회수도록 모든 發電所 要員들은 철저한 教育과 訓練을 받았다. 모든 手動밸브는 열쇠로 잠그고, 現場 곳곳에 流出된 重水를 즉시 회수할 수 있도록 물통, 絨絨, 스폰지 등을 準備하였다. 重水管理란 經濟的인 要因 以外에도 Tritium에 의한 從業員의 被曝線量을 輕減시키기 爲해서도 絶대로 必要한 心得事項이다.

4. Phase B 試運轉

B 段階의 試運轉은 初期臨界 및 零出力試驗이 主目的인데 CANDU-600에서는 減速材의 淨化系統을 살리고 重水減速材에서 부터 Gd을 除去하는 過程에서 初臨界에 到達하게 된다. 月城에서 初臨界 到達을 爲해 特殊 核計裝設備를 臨時로 使用했는데, 이는 初期의 計數率이 매우 낮아 有效中性子增倍率을 監視하고 또한 必要時 原子爐 Trip信號를 적절히 제공할 수 있게 함이었다.

이 初臨界 到達過程을 흥분속에서 지켜 보았던 모든 發電要員들에게 特히 韓電과 AECL의 爐物理專門家에게 뜻하지 않은 異常한 現象이 목격되었다. 豫想된 時間이 훨씬 넘도록 原子爐는 臨界點에 到達치 못했는데, 이같은 現象은 原子爐 밑바닥에 Gd이 침전된 狀態로 깔려 있어서 이들 과잉 Gd의 存在를 減速材 Sample에

依한 化學分析으로도 檢出할 수 없었기 때문임이 나중에야 알게 되었다.

Calandria 밑부분에 Gd이 침전되어 있어서 零出力에서 各種 爐物理試驗을 했었을때 수직방향의 中性子束分布가 상당히 찌그러지는 現象도 發見되었다. 결국 減速系統에 窒酸을 注入하여 침전된 Gd이 重水에 녹아들게 한 다음 이온交換을 통해 Gd을 全部 除去하는데 成功할 수 있었다.

예기치 못한 Gd의 해프닝을 除外하고는 Phase B 試運轉은 순조롭게 進行되어 主要한 爐心狀態는 爐物理設計値와 잘 一致되는 結果를 갖어 왔다.

5. Phase C 試運轉

C 段階의 試運轉이란 原子爐의 出力을 增加시켜 가면서 行하는 일련의 出力試驗인데 이 過程中 어떤 系統이나 機器는 너무나 優秀한 性能을 보여 주었는가 하면 또 어떤 系統이나 主要機器는 常識밖의 缺點 투성이어서 우리 試運轉要員들은 참참한 心情을 억누를 수 없었던 經驗을 갖게 되었다.

Phase C 初期에 古里 1號機(PWR)의 試運轉에 참여했었던 大部分의 職員들은 月城에 設置된 復水器用 NASH真空펌프의 性能에 對해 찬사를 아끼지 않았다. 그도 그럴것이 古里1號機에서는 復水器의 眞空을 形成하고 유지하는데 Steam Ejector를 使用하고 있는데 反하여 月城의 그것은 機械式 Air Ejector를 使用하여 復水器의 眞空을 形成하는데 겨우 한두時間이면 充分함에 比하여 古里에서는 보통 5時間 程度 所 要하고 있기 때문이었다.

또 다른 月城의 長點은 蒸氣發生器의 水位調整이 極히 優秀한 것으로 거의 완벽에 가까웠다. PWR 試運轉時 特히 低出力에서 蒸氣發生器의 水位調整에 極히 어려움을 겪었던 職員들은 月城에서도 類似한 結果가 일어나지 않을까 하고

무척苦心했었는데 豫想밖으로 4個의 蒸氣發生器가 모두 發電所制御用 컴퓨터에 連結되어 있어 10%出力에서 부터 完全히 自動化되어 水位와 出力의 相關關係가 極히 優秀한 狀態로 制御됨을 確認케 되었다.

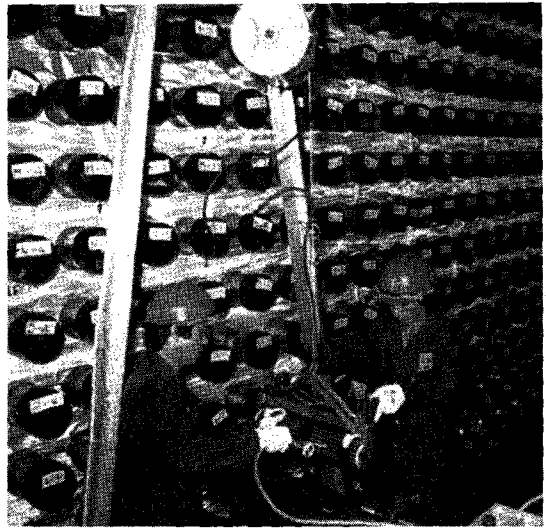
모든 職員들이 이같이 優秀한 系統이나 機器의 性能에 대료되어 있을때 豫想치 못했던 事件들, 例컨데 復水器 Hotwell 밑部分의 破裂, SDS-2의 不必要한 起動에 따른 發電所의 急停止, 蒸氣發生器에서 生産된 스팀의 過重한 濕分等 問題點이 하나 하나씩 露出되기 始作했다. 이제 重要한 問題點만 代表로 몇가지 소개한다.

가. 復水器 Hotwell 밑部分破裂

1982年12月 中旬, 主蒸氣를 復水器를 통해 放流하면서 原子爐를 定格出力의 5%로 運轉中이었는데 갑자기 復水器의 Steam Dump 系統에 Water Hammering이 發生하여 復水器의 眞空狀態가 急激히 惡化되는 現象이 觀察되었다. 즉시 原子爐를 停止하고 冷却시킨 다음 그 原因分析을 爲하여 復水器 内部를 點檢키로 하였다. 現場에서 肉眼으로 觀察한 결과 復水器의 밑바닥 部分에 작은 破裂이 생겼으며, 또 다른 復水器의 바닥부분에는 약간의 變形을 일으키고 있는 現象이 發見되었다.

後에 調査된 報告로서는 復水器 系統의 配管에 고여 있었던 물 때문에 強力한 Water Hammering 現象이 일어나 復水器 Steam Dump 벨브(CSDV)를 垂直方向으로 떠받치는 바람에 육중한 鐵板을 變形 또는 破裂시켰던 것으로 이는 設置作業中 CSDV의 不充分한 傾斜와 關聯된 配管의 配列이 물이 쉽게 빠지도록 一定한 傾斜가 이루어져 있지 않았고 또한 CSDV주위에 設置된 Steam Trap의 性能이 不良했기 때문이었다.

製作者側으로 부터 專門家를 急히 불러서 原因分析과 對策을 수립하고 Steam Dump Header의 傾斜를 調整하고 모든 Steam Trap에 By-Pass Line을 追加하는 한편 CSDV의 Drain 容量을



〈核燃料裝填光景〉

倍加하는 등 일련의 設計變更을 하였다. Steam Dump 系統의 變更 以後에는 오늘까지 아무런 技術的 問題없이 運轉되고 있다.

나. 不必要한 SDS-2 注入

CANDU-600에는 原子爐의 停止系統으로서 두개의 獨立된 相異한 設計概念을 導入하고 있는데 이들을 각각 第1停止系統(SDS-1), 第2停止系統(SDS-2)이라고 부른다.

SDS-1은 28個의 棒으로 構成되어 있어 原子爐의 急停止 信號가 發生되면 機械的으로 爐心內로 落下插入되어 原子爐를 트립시킨다. 한편 SDS-2는 強力한 中性子吸收體로서 化學物質(窒酸가돌리늄)을 減速材에 注入시킴으로서 充分한 負의 反應度를 爐心內에 誘發시킴으로서 原子爐를 트립시키는 性能을 갖게 된다. 때문에 일단 SDS-2가 原子爐를 停止시키게 되면, 減速系統에서 부터 가돌리늄을 除去해야만 原子爐는 다시 臨界狀態로 복귀할 수 있으므로 이온交換을 거쳐 가돌리늄을 除去함에는 長時間(普通 1.5~2日)의 時間을 要하게 된다. 따라서 SDS-1으로 原子爐가 充分히 急停止되는 경우에 SDS-2가 不必要하게 起動되어 窒酸가돌리늄이 注入된다면 매우 힘들게 된다.

SDS-2가 起動되지 않은 狀態에서 原子爐의 트립 原因이 밝혀진다면 간단하게 數分안에 SDS-1의 棒을 正常位置로 引出함으로써 原子爐는 곧 臨界點에 到達시킬 수 있는 것이다. 실제로 Phase C 期間中 不必要하게 SDS-2가 動作된 것은 4回였으며 이때마다 長時間의 化學工程을 거쳐 原子爐가 다시 살아날때까지 모두 기다려야만 되었다.

이같은 問題點을 깊이 認識한 設計者 AECL은 Power Rutdown Discriminator (PRD)를 考案해 냈는데 이것은 一種의 컴퓨터 소프트웨어로 原子爐의 急停止 信號發生時點부터 一定期間을 計數測定하여 그 값이 미리 프로그램된 出力보다 큰 경우에는 SDS-2가 自動으로 注入되게 한 것이지만 유감스럽게도 캐나다 規制當局 (A-ECB)의 認可를 받지 못해 使用치 못하고 있는 實情이다. 同 PRD PROM 칩은 現在 月城 制御盤에 設置되어 있으나 政府로 부터 언제 認可가 나올 수 있을지는 아무도 모르는 일이다.

다. 蒸氣發生器의 過度한 濕分問題

月城原子力의 試運轉 가운데 가장 힘들고 重大한 問題로 등장한 것은 主蒸氣의 過度한 濕分問題였는데 이는 發電機의 出力未達을 分析하는 과정에서 發見되었다. 高壓側 터빈 停止밸브 上端에 位置한 主蒸氣 Header에서 測定된 水分은 무려 12.6%나 되었는데 Heat Balance Diagram에 依하면 그 地點에서의 豫想된 水分은 0.32%였다. 普通 蒸氣發生器의 出口에서 水分이 0.25% 未滿인 것이 原子力의 慣例임을 볼때 이는 매우 높은 水分이 包含된 것이다.

이 問題는 결국 蒸氣發生器 製作者가 600MW 級의 商業用 규모의 大型發生器를 設計 및 製作해 보지 못한 經驗에서 온 큰 失手로 判明되었고 결국 이 問題로 因하여 製作者와 主契約者인 AECL은 그들의 責任(瑕疵事項)下에 1983年 8月과 1984年 5月 2次에 걸친 長時間의 修理를 거쳐 겨우 解決되었다. 비록 契約에 따라 瑕疵

處理는 되었지만 이 期間동안 電力生産을 減發 또는 中斷치 않을 수 없게 된 韓電의 損失도 무척 컸다.

6. 結 論

1983年 4月 23日 商業運轉을 始作하여 今年 9月 末까지 月城 (CANDU型) 發電所는 總 發電量 5,640,759MWH를 生産하여 同期間中 (日歷으로 計算하면 527日間)에 設備利用率 65.7%, 稼動率은 75.5%를 示顯하였다. 이 期間中 蒸氣發生器의 過度한 濕分問題를 解決하기 爲해 第 1次 修理期間을 19日이나 所要했고, 第 2次 修理는 月城의 年次補修期間中에 43日間을 所要했던 點을 考慮한다면, 또한 發電을 계속한 경우에도 出力을 85% 未滿으로 유지할 수 밖에 없었던 數個月間을 考慮한다면 上記 利用率 및 稼動率은 極히 優秀한 成績임에 틀림없다.

또한 모든 發電所가 그렇듯이 商業稼動 第 1 및 第 2年次는 性能이 아주 좋을 수 없다는 事實을 볼때 CANDU-600을 擇한 月城의 경우는 일단 成功의인 事例로 꼽을 수 있을 것이다.

오늘 現在, 月城原子力發電所의 運轉實績을 보면 특히 지난 5月の 蒸氣發生器의 修理 以後부터는 거의 全出力으로 稼動되고 있어 第 2年次의 後半期를 지나는 이 時點에서 매우 고무적이며 또한 發電所의 非正常的인 過渡現象이 점차 줄고 있고 이에 더하여 運轉要員의 숙련도가 점차 向上되고 있어 앞으로 月城의 信賴度는 더욱 增加될 것으로 判斷된다.

다만 重水爐의 特殊한 條件을 考慮하여 即, 稼動中 燃料交換을 할 수 있는 長點을 最大限 살릴 수 있도록 核燃料交換機系統의 信賴度를 향상 높이고 經濟성과 從業員의 保健物理를 爲하여 重水管理를 철저히 하고, 輕水爐에 比하여 設備가 매우 복잡한 만큼 특히 豫防點檢을 잘 해 나간다면 앞으로 月城原子力發電所의 信賴度는 더욱 增大될 것으로 確信한다.