

# 月城原子力

## 試運轉 經驗



盧 潤 來

(韓國電力公社 月城原子力發電所長)

우리나라 初有의 600MW級 重水爐인 月城原子力發電所의 試運轉에 관한 報告書가 現在 作成中이며 이는 곧 Nuclear Engineering International誌에 發表될 豫定이므로 여기에서는 그 經驗談을 隨筆形式으로 記述하였다. [筆者 註]

### 1. 初臨界에 관한 興味있는 이야기

月城原子力發電所의 原子爐는 AECL이 設計한 600MW 標準型 重水爐(CANDU)로서 輕水爐와는 달리 冷却材 및 減速材로서는 各各 分離된 重水を, 核燃料로서는 天然우라늄을 使用하는 것이 특징이다.

原子爐의 構造는 直徑과 長이가 各各 6m되는 正圓柱形으로서 水平으로 놓여 있는데 380個의 核燃料裝填管이 爐心을 構成하고 있으며, 한개의 管에는 12個의 燃料다발(Fuel Bundle)이 들어 있어 總 4,560個의 Bundle이 있게 되는데 무게로는 약 84톤에 해당된다. 月城과 꼭 같은 原子爐가 現在 캐나다에는 2基(Point Lepreau 및 Gentilly 2號機)가 運轉中에 있고 아르헨티나에 1基(Cordoba)가 試運轉中에 있으며 東歐의 루마니아에 1基가 建設中에 있다.

月城 試運轉의 業務는 主契約者인 AECL의 下請으로 캐나다 最大의 電力會社인 Ontario Hydro의 技術指導下에 四段階로 나누어 遂行되었는데 그 過程을 살펴보면 다음과 같다.

Phase A. 各種 機器의 運轉 및 系統의 全般的인 運轉 可能性을 確認하는 試運轉 過程

Phase B. 初臨界 및 爐物理試驗

Phase C. 出力上昇試驗

Phase D. 全出力 稼動試驗

歷史的인 月城의 初臨界는 1982年 11月 21日(일요일) 午前 9時18分48秒로 記錄된다. 이보다 약 3日 앞선 18日 午後 3時에 初臨界를 向한 作業이 시작되었는데 이때 뜻하지 않았던 가돌리늄(Gd)의 除去問題가 close up 하게 되었다.

元來 CANDU에서의 臨界는 確認停止狀態 [Guaranteed Shutdown State라고 하는데 이것은 核燃料과 重水가 裝填되어 있는 爐心內에 21個의 S.S. 製 調整棒(Adjuster Rod라고 하며 그 目的은 出力과 燃料에 따른 Flux 分布를 最適化하는 機能을 갖음)이 插入되고 中性子 吸收體인 4個의 Absorber와 28個의 停止棒(Shut Off Rod라 하며 Absorber와 같이 中性子 吸收斷面積이 큰 Cd으로 만들어져 있다)이 爐心 밖으로 除去된 狀態로서 保守的인 安全解析上 A-

bsorber와 停止棒에 依한 初期 炉心 反應度の 抑制 機能을 考慮치 않고 따라서 重水減速材에 硼素를 32ppm 以上 희석시켜 놓은 狀態를 말함)에서 硼素의 濃度를 점차 희석시켜 가면서 核分裂에 따른 中性子 計測器의 計測值를 읽음으로서 알 수 있는데 月城에서는 뜻하지 않은 Gd의 減速材 流入事件으로 臨界時間을 약 이틀간 지연시켰을 뿐 아니라 이 때문에 모든 관계자들을 당혹시키기도 했다.

그러나 이로 因하여 Gd에 관한 많은 知識을 배우고 또 經驗하게 된것은 참으로 多幸이라고나 할까? 600MW CANDU에서는 第一停止系統(SDS-1)인 停止棒을 back up 해주기 위한 수단으로서 第二停止系統(SDS-2)을 두고 있는데 이는 強力한 中性子 吸收材인 Gd를 窒酸形態( $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ )로 하여 非常時 減速材에 噴射함으로써 原子炉를 신속하고 安全하게 停止토록 한것인데, 며칠전 이 系統의 確認作業 過程에서 약간의 窒酸가돌리눔이 重水減速材에 흘러 들어간 일이 있었다.

問題는 斷面積이 4,000未滿인 B-10에 比하여 12배나 되는 Gd(46,000bn)의 強力한 中性子の 吸收性 때문에 事前에 이의 除去가 急先務였던 것으로 18日 午後 3時의 分析結果 약 1.3ppm이었던 Gd濃度는 子正까지에는 豫想대로 purification의 resin에 依해 잘 filtering되어 갔는데 (0.3ppm까지), 19日 새벽에는 反對로 0.56ppm까지 上昇하는 기이한 現象이 일어나 모두들 그 原因分析에 골몰하게 되었다.

Sample을 재삼 確認하고 分析도 再次 했으나 結果는 틀림 없었고 캐나다側의 專門家도 確實히 알 수 없는듯 머리를 갸우뚱 하기만 했다. 時間이 흐름에 따라 自然히 알려진 事實은 Gd은 溫度와는 별로 관계 없으며 酸性 용액에서 잘 溶解된다는 事實을 알게 되었다.

最初의 重水減速材는 pH가 9 以上の 알카리性인데 이는 重水の 生産過程에서 탄산소다가 함유되기 때문이며, 減速材가 炉内에서 循環되면 purification系統에서 소다가이 분리되어 점차 酸性으로 됨에 따라 原子炉 밑바닥에 석출되

어 있었던 Gd이 점차 溶解되어 나온 것으로 “아닌 밤의 홍두깨비” 소동을 일으킨 結果가 되었는데 이 經驗은 나중에 있었던 SDS-2의 作動과 관련 運轉員에게 有益한 事前 知識을 넣어준 좋은 敎訓이 되었다.

一段 Gd의 濃度가 0.1ppm 以下로 떨어진 것이 確認된 20日 午前부터는 硼素의 濃度(처음 34ppm였음)를 떨어뜨리기 始作하여 수명이 다된 resin을 爲해 中間에 이온 交換 Column을 바꾸는 등 계속 硼素의 濃度희석과 1/CR를 p-plot해 나갔는데, 이렇게 해서 꼬박 三日을 지켜보느라 모든 관계 직원들은 지쳐 있었다.

21일 아침 먼동이 트이면서 計數值가 急上昇하자 모두 希望찬 가운데 끝내 9時가 조금 지나 初臨界가 發表되는 순간 눈시울이 붉어지기도 했던 감격을 느껴보지 않은 사람은 잘 모를 것이다.

다음날 科技處 長官을 모시고 간단한 祝賀行事와 臨界過程을 CRT를 통해 시범을 보였지만 그것은 어디까지나 初臨界가 아닌 再臨界였던 것이다.

또 한가지 興味있는 것은 初臨界에 관한 正確한 時間이다. 82年 11月 21日 午前 9時18分48秒로 記錄은 되었으나 實은 筆者가 보기에 약 2時間程度 성급하게 發表된 것 같다. 技術指導를 담당한 AECL의 Trojan 博士가 初臨界를 筆者에게 通報한 시간을 初臨界 達成時間으로 正式化하기는 했으나 1/CR 曲線이나 후에 出力을 上昇시켜 再臨界를 만드는 過程中에서 이같은 事實을 確認할 수 있었는데, 보다 正確한 初臨界 時間이 記錄되지 못했음은 實로 애석한 事인 것이다.

## 2. CANDU 原子炉의 特長

모든 原子炉는 그 種類에 따라 個個의 特有한 長點을 지니고 있게 마련인데 Phase C에 접어들면서부터 CANDU 原子炉의 優秀한 負荷追從性에 모두 매료되고 말았다.

輕水炉와는 달리 CANDU는  $10^{-6}FP$ 로부터

全出力에 이르기까지 電算機에 의한 完全自動運轉이 可能토록 設計되어 있어 運轉員의 主業務란 첫째로 CRT를 통해 모든 系統이 正常稼動되고 있는지를 監視하고, 둘째로는 安全系統에 대한 定期點檢(Call-up)을 運轉節次(OPP)에 따라 遂行하는 것으로 이같은 方法에 따라 安全運轉을 確實히 할 수 있다는 長點이 있다.

또한 出力上昇率은 正常(Normal)인 경우 0.25%/sec로서 doubling time이 不過 5分이어서 系統需要에 急速히 應할 수 있는 特長이 있는 것인데, 이 때문에 輕水爐의 運轉에만 익숙해 있었던 많은 사람들이 CANDU의 性能에 모두 매료되고 말았다. 그도 그럴것이 CANDU는 核燃料棒이 輕水爐의 그것보다 굵은 데다가 길이가 1/6로 매우 짧아 Bowing현상이 있을 수 없고 따라서 燃料의 ورا눔 pellet과 被覆材의 접촉可能性이 없어 出力上昇率이 매우 높을 수 있다는 얘기이다.

뿐만 아니라 運轉員이 出力增減을 電算機에 入力해 주면 時間의 흐름에 따라 原子爐의 出力變化가 Zone Control의 變化와 더불어 CRT에 各各 다른 天然色으로 鮮明하게 表示되므로 運轉狀況을 確實하게 알 수 있어 앞으로 모든 發電所의 配電盤 設計에는 CANDU의 型을 따르는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

運轉特性上 또 한가지의 特長은 CANDU는 天然우라늄을 使用하는 관계로 剩餘反應도가 輕水爐에 비해 1/3程度이므로 原子爐가 trip될 경우에는 30~40分 以內에 再起動되지 않으면 Xe生成에 따른 poison out 때문에 30時間을 기다리지 않으면 안되는 여건때문에 輕水爐와는 달리 二次系統의 故障로 인한 터빈trip이 原子爐trip으로 되지 않도록 論理回路가 構成되어 있어서 터빈系統의 修理가 끝나면 언제라도 즉각 系統並入이 可能토록 되어 있다.

### 3. 運轉實績 없는 機器의 채택은 禁物

어느 경우를 막론하고 다 그렇겠지만 특히 初期投資費가 엄청나고 建設工期가 긴 原子力事業

에 있어서는 設計 및 엔지니어링 그리고 機器의 選定에 있어서는 상당히 保守的인 立場을 견지하는 것이 絶對的이란 事實을 다시 한번 經驗하였다. 月城의 경우 그 代表的인 實例가 復水器와 蒸氣發生器(S/G)이다. 모두 Foster Wheeler社가 製作한 것인데, 復水器의 경우에는 蒸氣放出밸브(CSDV)運轉中 蒸氣中에 包含된 물에 의한 water hammering現象으로 復水器의 shell plate가 破損된 事故로서 이는 전적으로 設計不良에 基因된 것으로 判明되었고, 이 問題를 解決하기 爲해 많은 國內外 技術陣의 設計檢討를 거쳐 蒸氣속에 內包된 水分을 完全히 除去할 수 있도록 CSDV配管의 放出孔을 더 크게 뚫고 drain pot를 新設했으며 高水位에 의한 t-trip回路의 追加, 施工不良이었던 復水器 配管의 기울기 調整 等 現場作業을 약 2週間 주야로 強行軍하고 나서야 겨우 復水器 問題를 解決할 수 있었는데 이에 따른 心慮는 이만 저만이 아니었다. 이 때문에 82年末 竣工目標은 霧散되고 말았다.

지난 3月26日 처음으로 原子爐 出力이 100%에 到達했을 때 모두 기뻐한 것은 순간이었고 현저하게 不足되는 電氣出力에 不安한 感を 감출 수 없었다.

定格出力의 2.5% 不足까지는 契約上 義務條件이 없으므로 主契約者인 AECL은 처음에 별로 관심을 갖지 않았으나 電氣不足분이 意外로 많게되자 이들은 Task Team을 構成하고 精密機器를 搬入하여 蒸氣의 水分測定을 한 結果 出力 80%까지는 設計值(0.25%)를 滿足하나 그 이상의 出力에서는 水分이 急激히 增加하여 이로 인한 Enthalpy減少로 터빈出力의 低下는 물론이고 터빈날개의 부식문제까지 우려되는 狀態가 發生케 되었다.

調査結果 S/G의 dryer 및 separator의 設計不良으로 判明되어 이에 對한 改造作業이 不可避하게 되었는데 發電所는 이 때문에 약 1個月間 原子爐出力 80%에서만 稼動케 되었고 앞으로 現場에서의 S/G改造作業으로 3~4週程度의 發電停止를 하지 않을 수 없게 되었다.

이 S/G는 月城 以外에는 供給한 實績이 없는 것으로 앞서의 復水器和 함께 發電所의 主要 機器로는 絶대로 運轉實績이 없는 것을 擇해서는 안된다는 뼈아픈 教訓을 다시 한번 배우게 되었다.

#### 4. 施工上の 品質活動

82年 10月 中旬은 試運轉員에게는 무척 바쁘고 고달픈 때였다. 그것은 11月初로 豫定된 初臨界와 관련 모든 系統에 對한 Phase A 工程을 거의 끝막음하는 때였는데 이때 마침 原子炉 冷却系統(PHT)의 Feeder pipe 流量 測定을 再次 하지 않으면 안되게 되어 있어 모두 지치고 있었다.

Feeder pipe의 流量은 原子炉에서 生産되는 熱에너지를 炉外로 輸送하는 機能을 갖는 것으로 380個 channel中 어느 pipe가 異物質로 막히게 되면 그 channel의 流量이 현저하게 줄게 되어 결국은 channel밖으로의 熱傳達이 되지 않는 관계로 炉心이 溶融되는 위험성을 內包하게 된다.

一週日 以上 주야간 380個 channel의 流量測定 結果는 E-11 channel의 流量이 다른것에 比하여 30% 以上 적다는 것이 判明되어 E-11 channel의 Feeder pipe를 X線 촬영한 結果 channel과 最上端 Header 連結部分이 wire brush로 막혀 있음이 兇見되어 同 channel의 重水を 배수하고 核燃料를 다시 꺼낸 다음 Feeder pipe를 切斷하고 異物質을 除去한 다음 다시 熔接하고 X線에 依한 비파괴檢査를 200%로 完璧하게 施行하는 등 법석을 부리게 되었는데 이 모든 것은 결국은 하찮은 異物質 하나 때문에 많은 時間과 精力을 소비하게 된것으로 이는 現場 施工中の 品質活動(QC)이 未洽했다는 증거이다. 原子力發電所에서의 品質活動은 嚴格하고 철저한 것이 事實이나 이같은 失敗作이 가끔 發生하는 것은 避치 못할 確率論的인 해프닝인지?

#### 5. 試運轉 支援業務에 관한 助言

月城原子力の 試運轉을 遂行하는 過程에서 經驗했던 여러가지 어려운 일 가운데에서도 우리가 꼭 改善해야 될 몇가지 事項을 적어 보려고 한다.

첫째는 工期에 관한 事業管理의 고질적인 병폐를 들 수 있다. 結論的으로 말한다면 理由야 여하튼 1年半이란 工期遲延을 enjoy해온 工事管理 Team이 早期竣工을 이룬다는 구실로 Phase D는 물론 Phase C도 끝나지 않은 狀態에서 竣工이란 行政處理를 하고 만 어리석음을 저질렀으니 實로 어처구니 없다 하겠다. 이 때문에 現場支援은 自然히 소홀히 될 수 밖에 없겠는데, 이와는 달리 臺灣電力은 全出力 稼動后에도 상당한 期間(예컨대 9個月 以上)을 發電하여 電氣生産을 enjoy한 다음에야야 商業稼動을 한다고 世上에 公布하는 賢明함을 보이고 있지 않은가? enjoy하는 哲學이 다르고 實利를 取하는 賢明함이 다른 것이다.

둘째는 試運轉이란 蓄積된 技術과 合理的인 資料의 活用만이 効果的으로 運營될 때 無難하게 이루어지는 것이므로 이를 위한 專擔機構의 新設이 바람직한 것이다.

끝으로 試運轉의 어려움과 重要性을 아직도 인식치 못하고 있는 것 같다. 事實이지 우리公社의 建設業務란 主로 監督, 監理의 性格을 띠고 있을 뿐 直接的인 工事は 國內 建設業체가 맡아 하고 있음에 反하여 試運轉業務란 우리職員이 直接 皮땀을 흘리면서 機器와 싸우는 業務인데도 行政的 支援面에서는 훨씬 未洽된 狀態이니 여기에 從事하는 職員들의 士氣를 떨어뜨리는 結果 밖에는 없을 듯 하다.

□