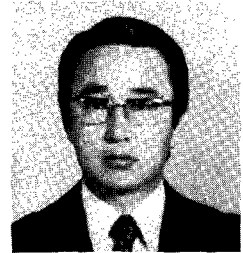


# 重水爐에 관한 考察



吳龍植

〈韓國電力公社 月城原子力發電所 所長〉

## I. 序 文

原子力産業은 종합적인 첨단기술을 요구하는 자본집약적 사업으로서 균형있는 산업체의 기술개발과 효과적인 투자는 국가적인 에너지 정책 성패에 연결되는 만큼 長期原子力建設計劃은 중요하다 하겠다.

그와 같은 점으로 관련 기업체와 주무관서에서는 계속적인 검토와 수정을 거듭하고 있으나 심한 불확실성의 변동으로 뚜렷한 장기계획을 확정하지 못하고 있으며, 다행한 것은 지금까지 중요시하였던 단순한 경제성 보다는 관련된 기타 요인들(입지, 환경문제 등)도 고려하여 우리나라 현실과 장래에 부합할 수 있는 계획 수립에 주력하고 있음은 다행한 일이라 하겠다.

특히, 금년들어 예상을 웃도는 전력수요의 증가는 전원개발계획의 조기 확정을 요구하고 있으며 2010년까지 약 10기의 원자력과 약 30기의 석탄화력 건설이 필수적인 바, 경제성 이외의 환경, 입지, 국민이해 등을 고려할때 순탄한 계획 진척을 낙관할 수 없는 현실이다.

이러한 현 시점에서 많은 유리한 조건을 구비하고 있는 重水爐를 고찰하여 보고자 한다.

## II. 重水爐(CANDU: CANada Deuterium Uranium) 概要

### 1. 開發 및 供給

CANDU형 重水爐는 天然우라늄을 燃料로 使用하고 重水(D<sub>2</sub>O)를 減速材 및 冷却材로 使用한다는 점에서 現在 商業爐의 主류를 이루는 輕水爐(LWR)와 크게 區分되며, 그 運轉實績이 양호하고 稼動率이 뛰어난 데다 그밖의 여러가지 固有한 長點으로 높은 評價를 받고 있는 爐型으로 캐나다의 國策會社인 AECL社에 의해 獨自적으로 開發되었다. 供給爐型으로는 容量에 따라 CANDU 3(CANDU 300) 및 國內 유일의 中水爐인 月城 1號機의 노형인 CANDU 6(CANDU 600)과 대용량인 CANDU 9(CANDU 950) 등이 있다.

1987年末 現在 캐나다내 19기를 포함한 총 28기의 重水爐가 상업운전 중에 있고 루마니아 CERNAVODA 4기를 비롯 총 13기가 建設中에 있으며 그밖에 멕시코, 터키, 네덜란드, 일본 등이 中水爐 導入을 추진했었거나 추진중에 있다.

最近 原子力發電所의 安全性 및 經濟性 高揚

을 추구하는 世界的 趨勢에 맞추어 AECL은 設計 概念이 대폭 改良된 ADVANCED CANDU를 世界市場에 새로운 商品으로 선보이기 위한 노력을 기울이고 있다.

## 2. 重水爐 特性

重水爐는 設備 및 技術의 特性상 많은 長點을 가진 原子爐로서, 특히 開途國에 適合한 爐型이라 할 수 있다.

우선 燃料로 天然우라늄(U235, 0.7%)을 使用하므로 濃縮이 必要가 없어 燃料費가 低廉하고 아울러 燃料 確保를 위한 海外 依存度를 줄일 수 있으며 輕水爐 使用後核燃料를 處理 再加工하여 重水爐에 使用하는 탄뎀(Tandem) 核燃料週期가 實用化될 경우 많은 輕水爐를 運轉하고 있는 우리로서는 核燃料의 효율적 使用과 더불어 高放射性廢棄物 감축이라는 一石二鳥의 효과도 기대할 수 있을 것이다.

現在 月城 1號機는 所要量 全量을 한국에너지연구소에서 생산하는 國產核燃料로 確保하고 있으며, 또한 다른 爐型과는 달리 燃料交替를 위한 發電停止가 不必要하여 利用率을 높일 수 있고 燃料에 缺陷이 發生하면 언제든지 燃料交替가 가능하므로 冷却材 및 關聯機器의 오염도를 아주 낮은 狀態로 運轉할 수가 있다.

冷却材와 減速材 系統은 設備가 서로 分離되어 있어 冷却材喪失事故(LOCA)時에도 減速材가 HEAT SINK 役割을 할 수 있어 爐心熔融事故 發生빈도가 相對的으로 낮은 安全性 側面에서의 利點을 갖고 있다. 다만 냉각재 및 감속재로 高價의 重水를 使用하기 때문에 원자로 系統으로 부터 중수 漏洩量이 最少化되도록 設計되고 重水の 繼續 使用을 위해 중수 淨化設備(PURIFICATION) 및 昇級(UPGRADING) 設備를 갖추고 있다.

또한 현재 상업운전 중인 爐型中 唯一하게 컴퓨터를 發電所 制御에 利用하므로 精巧한 제어 LOGIC 구축 및 구성 變更이 쉽고 制御常數 調整(TUNE-UP)을 簡單히 할 수 있는 등 系

統 制御能力이 뛰어난 점을 特性으로 들 수 있다.

重水爐는 계통 給電需給 및 運營計劃에도 많은 융통성을 賦與하고 있는데 一例로 加壓輕水爐의 불시정지 및 燃料 재장전 기간 등으로 給電需給計劃에 蹉跌이 發生할 경우 경제 급전차원에서 燃料비가 가장 저렴하고 燃料燃盡 걱정이 없는 重水爐가 대응할 수 있으며 사정에 따라 發電所 停止時期를 調整할 수 있는 등 계통 운용에 柔軟하게 대처할 수 있다.

또한 原子爐의 반응도 制御가 迅速하여 負荷 追從(LOAD FOLLOW) 能力이 뛰어나므로 系統 定格주파수(60Hz) 維持를 위한 순시제어 發電機群에 상시 가담할 수 있고, 제어系統에 컴퓨터를 채용하여 발전소 START-UP이 거의 自動化되어 있으며, 계통 외란 및 난조시에도 발전기가 送電線에서 分離되는 계통탈락빈도가 낮으며, 터빈-발전기 등 2차계통의 障蔽로 發電所가 정지되더라도 原子爐계통은 稼動 狀態를 維持하도록 되어 있어 신속하게 再系統 併人시킬 수 있는 등 자율안정 能力이 탁월한 점도 電力事業者 立場에서 볼때는 아주 매력적인 爐型이라 아니할 수 없다.

기타 Gently-2에서나 알렌틴의 Cordoba 발전소에서 처럼 制御棒을 利用하여 Co-60을 生産한다든지 감속재에서 삼중수소를 추출, 생산하는 등의 부수적인 장점도 보유하고 있기도 하다.

CANDU爐에는 이러한 여러가지 장점이 있는 반면, 한편으로는 原子爐壓力管의 CREEP 現狀 및 이와 관련된 원자로 壽命期間 동안의 압력관 信賴度 및 건전성 維持에 대해 現在로서는 확신을 가질 수 없다는 단점도 있다.

이러한 기술적인 문제점을 克服하기 위해 後續機 事業을 통해 체계적인 노력을 傾注한다면 CANDU爐의 眞價를 더욱 고양시킬 수 있을 뿐만 아니라, 이로 인한 국내 技術水準 거양의 效果도 期待할 수 있으리라고 본다.

### 3. CANDU爐 運轉實績

重水爐는 世界的으로 높은 利用率을 보이고 있는데 실제로 최근 원전 이용률 10위내 發電所中 7기가 중수로형(表1)인 것만 보아도 알 수가 있다.

국내 唯一의 重水爐인 月城 1號機도 '85. 4 - '86. 3기간중 이용률 98.4%라는 경이적인 記錄으로 世界 1位를 차지하는 등 國內 稼動中인 타 爐型에 비해 높은 이용률을 보이고 있다. 表 2는 月城 1號機와 같은 施設容量인 CANDU-600의 運轉實績을 조사한 것이다.

(表1) 설비 이용률 상위 발전소

순위	발전소명	노형	이용률	비고
1	PICKERING 7	CANDU	90.3	○설비용량 500MW
2	BRUCE 7	CANDU	89.0	이상의 세계 260개
3	PICKERING 8	CANDU	88.2	원자력발전소를 대
4	POINT LEPPEAU	CANDU	87.9	상으로 1988년 3
5	PHILIPPSBURG 2	PWR	87.8	월 31일까지의 전
6	BRUCE 3	CANDU	86.8	운전기간을 통계
7	GROHNDE A-1	PWR	85.7	기준으로 함
8	BRUCE 5	CANDU	85.1	○이용률=실제 발
9	BRUCE 6	CANDU	84.9	전량/100% 설비용
10	TIHANGE 3	PWR	84.8	량으로 운전 전기 간발전가정시 발 전량

자료 : NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL

(表2) CANDU-600 운전실적

발전소명	국가	상업운전	이용률(%)		비고
			운전기간	'87년도	
POINT LEPREAU	캐나다	1983. 3. 1	92	91.9	*G-2, Embalse Cordoba)는 해당국 및 주정부의 정치, 경제 계약으로 실적지조함.
*GENTILLY 2	캐나다	1983. 10. 1	69	82.8	
WOLSUNG 1	한국	1983. 4. 22	78	92.9	
EMBALSE	알제틴	1984. 1. 20	68	87.6	

### III. 月城 1號機 概要

#### 1. 建設 概要

경북 월성군 나아리 62만평(4호기분) 敷地에 내자 3,055억원을 포함하여 總 建設費 9억9천 5백만불을 들여 建設하였는데 初期 핵연료비를

(表3) 주요설계 특성

주증기 압력	45.48 Bar
주증기 온도	258°C
발전소 열효율	29.2% (Net)
원자로내 장입 우라늄량	86톤
계통내 중수 장입량	490톤
중수 순도	99.722%

엔 建設單價는 1,591불/kW가 所要되었다.

건설은 主契約者인 AECL이 設計, 供給, 設置 및 始運轉 등 발전소 건설에 대한 全般的인 責任과 건설후 發電所 性能을 保障토록 하는 一括發注方式으로 推進하였다.

\*表3은 월성 원자로의 주요 設計 特性을 보여 준다.

#### 2. 建設 沿革

1975년 1월 캐나다와 技術導入 契約協定을 締結하여 다음해 1월 기자재 공급계약 및 借款이 發効되었으며 1978년 3월 最初 콘크리트 타설 이후 56개월 만에 初臨界에 到達하였다.

원자로건물 건조시에는 Slip Form 공법을 채택하여 건조착수 12일만에 높이 42.2m, 두께 1.07m의 원통형 철근콘크리트 벽체를 건조하였으며, DICON(Device Installation Connection) 등의 전산시스템을 사용하기도 하였다.

月城 1號機의 주요 Milestone은 다음과 같다.

- '76. 1 계약 발효
- '77. 5 굴착 개시
- '78. 2 건설허가 인가
- '78. 3 최초 콘크리트 타설
- '79. 11 원자로 설치 완료
- '82. 8 초기핵연료 장전(운전면허인가)
- '82. 12 계통 병입
- '83. 4 상업운전 개시

#### 3. 運轉實績

運轉現況, 放射性廢棄物 및 被曝現況을 연도 별로 통계를 냈다. 表에서 볼 수 있듯이 '87年 末 基準으로 본 發電所의 누계 이용률은 80%

以上으로 運轉實績이 양호함을 알 수 있다.

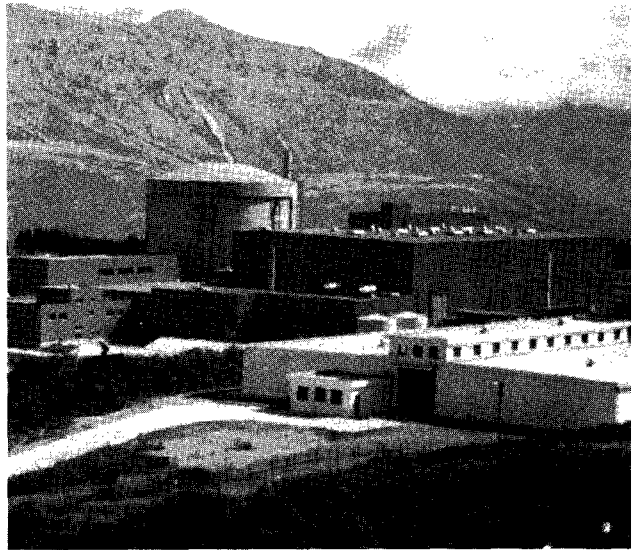
이는 앞에서도 言及한 바 있는 CANDU 爐 固有의 長點 및 特徵을 잘 살릴 수 있었기 때문이다. 물론 이러한 CANDU 爐의 長點 및 特徵을 살리기 위해서는 海外訓練 및 시운전 전과정 참여 등을 통해 技術과 經驗을 충분히 쌓은 發電所 運營要員들의 노력이 뒤 따랐음도 간과해서는 안될 것이다.

다만 壽命期間 運轉實績을 캐나다의 Pt. Lepreau 發電所와 比較에 붙때 아쉬운 감이 들지 않을 수 없는데, 그 原因을 發電所 定期檢査에 관한 兩國의 規制制度上의 差異 등 여러가지 側面에서 생각해 볼 수 있겠으나, 특기할 것은 月城의 경우 주증기의 습분 함유량 과다문제를 해결하기 위한 증기발생기 개조작업을 위해 '87년과 '84년에 각 1회씩 發電所를 長期間 정지해야 했었고 아울러 과다 습분으로 인한 터빈의 손상 우려로 인해 상업운전 초기인 '83年度の 상당기간 동안을 全出力 운전을 하지 못했다는 사실이다. 또한 '86년과 '88년도에는 해수 냉각계통 設計上의 脆弱點을 改善하기 위한 補修, 개조 공사를 위해 연차 補修工事 期間이 長期化될 수 밖에 없었는데, 이는 상기 系統의 보수 작업은 원자로심의 잔열이 충분히 감쇠되어 야만 시행 가능하기 때문이었다.

물론 Pt. Lepreau 發電所에는 이러한 問題點들이 없었으며, 그들은 發電所 定期補修工事を 통상 2~3주에 마무리 짓고 있기 때문에 發電所의 年間 利用率이 月城보다 앞서 가고 있다. 만약 商業運轉 初期에 주증기 습분과다 문제가 없었다면 '88年末 現在 누계 利用率 實績은 83.65%로 豫想된다.

〈表 4〉 운 전 현 황

구분 \ 년 도	'83	'84	'85	'86	'87	비 고
발전량(GWH)	2562.9	3985.0	5609.8	4736.3	5521.3	
이용률(%)	61.9	66.85	94.36	79.67	92.87	
연료단가(원/KWH)	3.37	3.39	2.63	3.10	2.9	
발전단가(원/KWH)	25.43	31.47	23.76	31.43	26.55	



▲ 月城原子力發電所 全景.

廢棄物發生量 및 방사선 피폭선량도 타 爐型에 비해 매우 양호한 상태를 보이고 있다.

〈表 5〉 방사성폐기물 및 피폭현황

년 도	'83	'84	'85	'86	'87	비 고
방사성 고체폐기물 (55GAL드럼)	53	217	135	220	92	*고리 2호기 연간 평균 약 460드럼
방사선 피폭선량						
○총피폭량(MAN-REM)	26.3	101.4	86.6	183.9	55.9	
○개인선량(REM/년)	0.05	0.16	0.15	0.18	0.10	최대피폭 허용 선량: 5REM/년

#### IV. 重水爐 後續機의 經濟性

##### 1. 發電原價 및 經濟性 比較

月城 1號機 複製建設을 전제로 500MW급 석탄발전소와 경제성을 比較해 보면, 表4에서 보이는 바와 같이 중수로가 유리한 것을 알 수 있다.

이는 月城 2號機의 複製建設에 따르는 설계비 절감과 부지, 공용설비 등 기존 投資施設의 活用 등 建設費 절감 잇점이 큰 것과 발전기 용량의 상향조정에 따른 건설단가 하락에 기인한 것으로 풀이된다.

〈表6〉발전원가 및 석탄 후속기와의 경제성 비교

구분		월성 2호기 (720MW×1기)			석탄 후속기 (500MW×2기)		
공사비 (연료비 제외)	천 US	956,533			900,000		
	백 만 원	717,400			680,000		
건설단가	\$ / KW	1,329			900		
발전 원가	이용률(%)	75	80	85	75	80	85
	원 / KWh	28.15	26.79	25.59	29.56	28.51	27.58

- \* 주1. 종합이차율: 10%/년  
경계수명기간: 25년, 소내소비율: 6%  
에비비: 건설이차 제외한 전체공사비의 10%  
환율 1 \$: 750원, 석탄가격: \$44.3/Ton
- \* 주2. 전기출력: 720MW Gross  
- 원전 11, 12호기 입찰시 월성후속기의 GE사 터빈방전기 용출출력(727MW) 기준  
- 월성 1호기 설계 및 증기조건 변동없이 터빈효율 개선에 따른 출력증가임(월성 1호기 터빈방전기는 P-ARSONS사 공급)
- \* 주3. 연료비는 월성 1호기 핵연료비를 기준하였으며 초기발전 중수비는 운전기간중 분할상환하는 조건으로 동비용을 연료비에 산입, 포함시켰음

2. 月城 후속기 建設의 必要性 및 利點

重水爐 後續機 建設은 國産化가 容易한 점 등 고유한 장점 및 發電所 敷地의 既確保, 基底 負荷 에너지의 多元化라는 측면에서 全般的인 檢討가 必要한 따라고 본다.

특히 月城 2號機는 月城 1號機의 동일 爐型 後續機라는 점에서 다음과 같은 많은 잇점을 가지고 있다.

- 既存資料 및 기투자된 設備의 최대 活用
  - 월성 1, 2호기 共用 機電設備: 약 170억 (현가 환산)
  - 부지 및 공용 土建設備: 약 810억(현가 환산)
- 계 : 약 980억
- 초기 투자비 최소화
  - 월성 1호기 및 認許可 基準變更 억제
  - 초기장전용 重水 購買代金は 運轉開始 後 30년간 60회 均等分割 상환
- 동일 노형 운전에 따른 이용률 向上 可能
  - 豫備部品 호환성 增大
  - 운전 및 補修要員 확보 容易
  - 技術蓄積에 따른 설비개선 및 國産化 圖 謀 可能
- 중수로 핵연료 제조 국산화에 따른 燃料費 의 해외유출 防止

- 국산 핵연료사용량: '87년도 50%  
'88년도 이후 100%

- 복제 건설로 건설공기 短縮 可能
  - 건설 및 始運轉 經驗 보유
  - 복제 설계로 설계변경에 따른 건설 遲延 要因 排除
  - 건설관리 및 현장설치, 시운전 절차서 및 기자재 구매자료 등 관련자료 보유
- 그밖에도 경수로의 使用後核燃料를 중수로에 이용한다든가 하는 경수로 보완노형으로의 開發 必要性도 無視할 수 없으며 특히 기술자립후 開途國을 相對로 海外市場 開拓에 重水爐가 매우 有利한 점 등도 경제성의 잇점과 月城 後續機의 推進 檢討時 진지하게 고려되어야 할 事項이 아닌가 여겨진다.

아울러 앞에서 언급한 바 대로 원자로 壓力 管과 相關한 技術的 問題點을 克服하기 위한 體系的인 노력을 後續機 事業 推進을 通해 圖 謀하게 되면, CANDU의 진가를 더욱 고양시킬 수 있음은 물론 金屬工學 等 比較的 水準이 취약한 國內 聯關 技術의 開發 및 蓄積이라는 부 수적 效果도 期待할 수 있을 것이다.

V. 結 言

周知하는 바와 같이 月城發電所 부지는 2기를 增設可能한 대지를 확보하고 있으나 地質特性으로 重水爐 以外는 不適合한 條件으로 現在까지 遊休地化되어 있으며 1號機 建設時 後續機를 고려한 附帶설비(取水口 設備, 非常冷却水池, 其他 共用設備)가 施工되어 있다.

또한 重水爐技術과 經驗을 쌓은 人力資源도 充分하고 前述한 바와 같이 技術的인 長點은 勿論 經濟性도 有利하고 核燃料製作도 自立되어 있으므로 앞으로 原子力建設計劃에 重水爐 建設 計劃을 適宜 配定하여 輕水爐의 補完 設備로 重水爐建設을 推進하는 것이 有益하다고 思料되므로 月城發電所를 重水爐團地로 造成되는 것이 고려되기를 바라는 바이다.