

「日本에서의 原子力発電所の 建設, 運転経験」

藤井 祐三(東京電力株)

日本에서의 BWR는 1970년 GE社부터 導入한 375 MW Unit가 처음이었는데 오늘까지는 輸入, 国産 合하여 10基, 6393MW가 商業 運転中이고 또 4基, 4,400MW가 현재 建設中이다.

그동안 건설, 운전에서 많은 문제가 있었는데 특히 1975~7년 사이에는 운전中 unit에 stainless 配管의 応力腐蝕갈라짐(Stress corrosion Cracking)를 위시한 trouble가 多發하여 운전 가동율이 대폭 低下를 가져왔다. 그러나 maker의 협력을 얻어 銳意 原因의 究明과 対策의 促進에 努力한 결과 78년에는 가동율도 회 복하였다. 앞으로 建設하는 Plant에서는 GE社의 설계를 개선한 새 선한 새로운 표준형 설계를 개발 적용하도록 하였다.

1. 建設, 運転의 실적

운전中 Plant (PWR)

| 전 력 회 사 | Plant名 | 出 力 | 主 契 約 者 | 운 전 개 시 | 建 設 千 单 価圓/kw |
|-----------|--------|-------|------------|-------------|------------------|
| 日本原子力発電株 | 敦 賀 1 | 357 | GE | 70, 3, 14 | 90 |
| " | 東 海 2 | 1,100 | GE/日立 | 78, 11, 28 | 188 |
| 東 京 電 力 株 | 福 島 1 | 460 | GE | 71, 3, 26 | 85 |
| " | " 2 | 784 | GE/東芝 | 74, 7, 18 | 72 |
| " | " 3 | 784 | 東芝 | 76, 3, 27 | 80 |

| 전 력 회 사 | Plant 名 | 出 力 (MW) | 主 契 約 者 | 운 전 개 시 | 建 設 千 単 価 圓/kw |
|---------|---------|-------------|------------|-------------|-------------------|
| 東京電力(株) | 福島4 | .784 | 日 立 | 78.10.12 | 102 |
| " | " 5 | 784 | 東 芝 | 78. 4.18 | 115 |
| 中国電力(株) | 島根 | 460 | 日 立 | 74. 3.29 | 86 |
| 中部電力(株) | 浜岡1 | 540 | 東 芝 | 76. 3.17 | 115 |
| " | " 2 | 840 | 東芝/日立 | 78.11.29 | 138 |

年間稼働率は 最高 100% (浜岡2号, 1978年度)도 있으나 7.9% (福島第2号, 1977年度, scc对策, 스퍼저 교환)의 低成積도 있었다. 主稼働率 低下원인은 scc对策, 給水 nozzle의 수리, 스퍼저의 교환, 中性子束計装管, 振動对策 등이었다.

2. 原子力 Plant의 導入과 国産代

日本の 商業用輕水炉는 1号機는 美国에서 도입, 同形式同容量의 2号機는 美国 maker와의 技術 제휴에 의해 国産化 한다는 형태로서 개발이 추진되었다.

BWR 1号機의 輸入은 Turnky base로 GE社에서 담당하였고 그 다음부터는 GE社에서 輸入한것을 東芝 group, 日立 group가 GE社의 下請으로 機器의 설치공사를 담당함과 동시에 圧力容器, 格納容器를 위시한 機器의 約 50%를 공급하여 国産化에의 준비를 진행하였다. 67년 4월에 東芝·日立가 GE社와 原子炉系의 設計에 관하는 技術 제휴 관계서 日立가 島根 1号機 460 MW를, 東芝가 福島第一 3号機 784 MW를 각각 一対契約으로 収注하여 건설하였다. 그 後이 2社는

따같이 1,100 MW級 Plant의 一括受注하였다. 이와같은 國產化과정에서 이들 회사의 技術習得의 苦心과 努力은 대단한 것이었으며 한편 User로서는 GE설계의 國內安全基準으로의 適合性검토와 병행해서 특히 發注方式에 대해서 慎重한 配慮를 하였다. 즉 國산화의 初期에는 日本側의 User, maker는 다같이 原子力에 대한 經驗이 없었기 때문에 계약에 있어서는 技術的仕樣은 GE社의 것에 準拠해서 細目까지 지정하고 원칙으로 變更을 인정하지 않은 方針으로 하였다. 이 방식은 초기단계에서는 Plant의 신뢰성 確保上 바람직하나 反面에 maker의 創意研究의 의욕을 억제하는 側面이 있다. 그 후는 ① maker측에서의 技術축적이 풍부해졌고, ② maker側의 自主적인 技術開發이 活發化해 왔으며, ③機器기타의 相當한 부분에 걸쳐 제작 시공면에서의 日本側 maker의 신뢰성이 높아진 점 등을 감안하여 福島第一 1号機 이후부터는 個個의 技術的 仕樣을 정하지 않고 機能만을 지정하는 소위 機能購亮方式으로 바꾸기로 하였다. 이에 따라 maker의 獨創性을 살린 새로운 合理的 설계의 도입이 촉진되기는 하나 새로운 설계의 採用에 있어서는 이에 대한 信賴性의 確証試驗등 多角的 Check를 특히 엄중히 행하도록 하고 있다.

3. 建設費의 動向

3.1: 建設費의 推移

最近着工한 unit의 建設單価는 初期의 것 보다 3倍 이상이다. 그 주되는 이유로서는

- (1) 物價・勞賃의 上昇, 특히 73年の 石油危機를 계기로 物價上

昇이 현저하여 10년간에 약 2.5배 건설비가 상승하였다.

(2) 設備強化対策, 初期의 설계에 비해 그후의 정세 변화에 의해 安全性이 더욱 강조되어 중요한 설비強化대책을 추가함에 따르는 건설비 증가

(7) 환경·안전대책, 발전소주변의 환경방사선 level를 法令基準(500 mR/年)보다 대폭으로 저감하도록 지도한 原子力委員會의 기준(76年)에 대응한 換氣系의 개선, Valve의 누설방지 外에 格納容器內機器, 配管의 지지구조물 강화등

(8) 作業員의 被曝低減対策, 点檢保修space의 拡大, 複水여과장치의 追加 및 給水加熱器 tube의 低cobalt化에 따르는 放射線源의 除去와 發生防止등.

(9) 信賴度方向対策, scc対策, 폐기물처리계의 集重化, 三系列化, 연료교환기의 자동화에 의한 点檢기간의 단축등 운전경영에 적합한 가동율향상대책

그리고 既設 unit에 대해서도 정기점검기간을 이용해서 여러 설비 강화책을 추가실시하기로 하고 있다.

3.2 建設費의 低減

(1) 改良標準化의 추진, 輕水炉의 改良標準化의 成果를 福島第二·2号機이후에 채용하여 설계제조방법의 표준化에 의해서 建設Cost를 低減하고 아울러서 운전보수위의 절감과 가동율의 향상을 도모한다.

(2) 設備의 合理化, 運轉경험의 축적에 따라 방사선차폐설비, 환기설비, 방사선폐기물 처리시설등 系全体를 재검토 合理化한다.

(3) 機器配置計劃의 合理化

原子炉格納容器 外側部分과 turbine Plant에 대해 美国의 Bechlet社, 国内 maker 協同으로 從來設計를 抜本的으로 재검토하여 合理化한다. 이中 turbine Plant에 대해서는 이미 完了하고 実機에 채용하기로 하였다.

(4) 工期의 短縮

총래 1,100MW의 표준工期는 60개월을 표준으로 하였으나 機器의 工場組立범위의 擴大, 건축工法の 개선, 설계개량에 의한 기계, 건축공사의 一部同時시공등의 대책에 의해 当面에는 3개월 단축하고 계속 단축을 위해 연구를 한다.

4. 建設・운전경험에 따르는 課題와 対策

4.1 品質保證体制, 初期에는 Q.A体制가 충분치 못해서 요접부의 결함이나 재료에 起因하는 部品の 결함이 발견되었으나 그後 美国 South West Research Institute의 協力を 얻어 国内 maker의 品質保證감사와 개선권고를 행하였다.

이 결과 品質이 월등히 개선되었고 또 體制도 강화되어 독립적인 品質保證조직을 新設하였다.

4.2 運轉稼働率, 日本의 BWR는 특히 75년부터 77년에 많은 Trouble이 多発하여 대폭적인 가동율의 저하를 가져왔다. 이 중에서 主되는 것은, Scc, 中性子束計裝管의 진동에 의한 연료 Channel Box의 손상, 給水 nozzle의 熱波勞갈라짐등이며 모두 설계

단계에서의 確証시험의 불철저에 起因하는 것이다. 이와 같은 것들은 電力공급면, 경영수지면에서의 악영향은 물론 原發에 대한 사회적 신뢰의 저하도 크고해서 이 trouble 극복에 최대에 노력을 傾注했다. 가장 영향이 컸든 SCC와 그 대책에 대해 記述하기로 한다.

BWR에서는 74년경부터 미국에서 再循環系 bypass管, 炉心 Spray 등등의 Stainless 配管에 대해 SCC (應力腐蝕갈라짐)가 발견되어 JE社로부터의 연락에 따라 당社에서도 UT를 행한결과 같은 SCC의 징후가 발견되었다. 이 단계에서는 극히 미소한 Crack였고 炉水の 漏洩은 전혀없었으나 安全確保를 위해 全面的대책을 강구하기로 하였다. 이 결과로서 採用한 대책으로서는

- (1) 溶接入熱의 低減, SCC의 主因인 Stainless 鋼의 銹敏化의 방지
- (2) 配管内面에의 Clad 溶着, 銹敏화된 田材가 腐蝕환경에 接하는 것은 防止한다.
- (3) 炉水の 脱氣運轉

SCC의 또다른 主因인 起動時의 炉水中的의 過度의 酸素濃度를 억제한다.

- (4) 配管의 高周波加熱

日本에서 独自の으로 개발한 方法으로서 용접시의 殘留應力을 저감하기 위해 外部부터 高周波에 의한 熱處理를 가한다. 이는 既設Plant에서 交換 곤란한 IOB 이상의 지름이 큰 配管에 적용할 수가 있어서 대단히 有效하였다.

- (5) 새로운 Stainless 材의 채용

SCC는 모두 SUS 304材에 발생하고 있기때문에 이들을 SCC가 발생하기 어려운 SUS 316L, 316LC 혹은 304LC로 변경한다.

이상의 대책은 현재 건설中の unit에는 全面的으로 채용하고 있으며 운전中の unit도 당면의 필요한 곳에 대해 거의 완료하여 78년以後 SCC의 발생을 방지할수가 있었다.

4.3 作業員의 被曝의 低減

원자력발전소의 保守点檢作業에 따르는 방사선피폭에 대해서는 각 발전소마다 엄중한 個体管理를 하고 있다. 그러나 作業員의 年間總被曝선량은 증가경향이 현저하다. 그 원인은,

(1)운전年度가 증가함에 따라 一次系機器의 内面에 부착하는 방사성부식생성물이 증가한 것.

(2)同一발전소의 unit수가 증가한것.

(3)前記의 trouble發生에 따르는 点檢, 保修작업이 증가한것.

등을 들 수 있는데, 具体側로서 福島第一에서는 1号機運開의 71년에는 年間總피폭선량 220人rem였든것이 77년에는 3,230人rem가 되었다. 이에 대한 対策은 user와 maber가 협동으로 연구하고 있다. 그 대책으로

(ㄱ) 点檢·保修Space의 확대, 원자로건물, 格納容器등의 형상, 칫수를 재검토함과 함께 機器배치를 作業하기 쉽도록 合理化한다.

(ㄴ) 自動保守機器의 開發, 線量率이 높은 機器의 보수할 때 적극적으로 人力을 줄이기 위해, 〇制御棒駆動機構 교환장치, 〇연료교환 Platform, OISI장치 등의 자동화, 遠隔操作化를 개발 채용하고 있다.

(3) 復水炉過 filter의 채용

파우텍스를 炉材로 한 復水 filter를 復水脱塩장치의 前置 filter

로서 설치하고 방사성 Clad의 主因인 Co-60, Mn-54를 제거한다.

(4)給水加熱器 細管의 低Cobalt仕

Co-60의 生成에 가장 奇与하는 給水가열기의 細管에 Cobalt함
유량이 낮은 재료를 채용한다.

(5)保修訓練 Conter의 설치

実物과 같은 寸수의 설비를 가지는 訓練 Conter를 福島第一의
부지内에 설치하여 훈련에 숙련도와 실제작업시의 被曝시간을 단축
시킨다.

4.4 燃料의 信賴性和 運轉特性

福島第一·1号機에서는 商業運轉개시후 4개월만에 炉水内の 방사
능 level가 上昇하고 炉水中 汚素濃度 $6 \times 10^{-3} \text{uCi/ml}$, off-gas 中
방사능 level 약 600mCi/sec 가 기록되었다. 이것은 일부의 燃料
봉피복관이 파손된것을 나타낸것인데 그후 71년, 72년의 燃料교환
시에 행한 검사에서 18体の 燃料集合체에 Pin hole가 발견되었
다. 여기서 GE社에 原因조사를 시킨 결과 燃料봉피복관内에 湿分이
높은것이 있었어 水素胞化를 생기게 하는것이 主因으로 判明하였다.
이와같은 것은 73년도에도 欧州에서 Pellet와 피복관사이의 相互
作用(PGI, Pellet Clad interaction)이 피복관피손의 큰 원인이
된일이 있었으며 이의 대책으로서 ①피복관의 湿分除去, ②燃料 Pell
ct의 形状개선과 가열처리에 의한 피복관의 延性的 向上, ③燃料
봉의 出力速度를 제한하는 PCIOMR (Preconditioning interium
operating manapement recommendafion)에 의한 PCI의 방지

및 ④연료봉의 線出力案度の 低減등의 방법을 채용하여 실용상 지장이 없는 정도로 개선되었다. 그러나 上記의 PCIOM은 원자로出力 약 50% 以下の level부터 出力上昇시키는 경우의 시간적 증가율에 대한 제한이 엄하기 때문에 원자로정지후 다시 100%出力으로 올리기까지 약 20일이라는 긴 기간을 요하는 결과가 되기때문에 이로인한 年間利用率(availability factor)으로의 영향이 무시할 수 없다. 따라서 앞으로의 연료개선의 주목표는 PCIOMR 조건의 완화 또는 全廢에 있으며 이를 위해 여러가지의 새로운 개념에 따르는 연료설계의 개선의 연구의 추진과 다시 微調整制御棒 구동장치의 導入, 새로운 概念에 의한 炉心設計의 개발등에 대해 協同으로 연구를 추진하고 있다.

5. 앞으로의 전망

현재로서는 既設 unit의 운전실적도 점차로 安定化되어가고 있으며 또 건설中 unit의 채용되어 있는 改良標準型설계도 운전개시후에는 거의 만족할 수 있는 실적을 나타낼것을 기대하고 있다. 그러나, 더욱 高度의 安全性, 信賴性, 또는 경제성의 向上등을 향한 새로운 기술의 개발에 노력함은 당연한 責務일것이다. 현재 第一次개량표준화는 GE社의 기본설계를 base로하여 개량을 가한것이나 이와같은 일은 世界的으로 可型의 family로서 힘을 結集해서 새설계의 개발에 노력을 해야 할것이다.

昨年 5月, 신설계개발을 위한 AET (Advanced engineering team) 을 발족시킨것도 여기에 原因하는 것이다.

(1) AET는, GE, 日立, 東芝, ASEA-ATOM (Sweden) AMN (Italy)의 5社에 의해서 구성된다.

(2) 参加 各 maker는 2-3名의 전문가를 GE에 파견해서 1년간 원자로의 계념설계 (feasibility study)를 한다.

(3) 계념설계 완료후 그 결과를 평가하고 좋다면은 계속 새로운 구성요소에 대한 충분한 확증시험을 실시한다.

(4) 현재 주로 검토하고 있는 과제로서는 운전성능 향상을 위한 炉心設計의 설계, 再循環 100P 方式의 변경 (internal Pump方式), 最適格納容器의 개발등이다. AET는 현재 순조로운 작업이 진행되고 있다.