

# 플랜트의 長壽命化 및 劣化對策

## 輕水爐의 技術高度化

原子力發電所는 多重防護의 概念에서 複數의 安全設備를 갖는 등 系統이 膨大하고 복잡하며 또한 엄격한 品質管理를 실시하므로 다른 發電形式에 비해 建設費가 높은 편이다. 따라서 設備의 有效利用을 도모하는 것이 중요하다.

이와 같은 관점에서 앞으로 既設發電所의 長壽命化를 도모하고, 全壽命期間의 發電電力量을 증대시킴으로서 原子力發電 코스트를 다른 發電 코스트보다 有利하게 하는 것도 가능하다.

長壽命化를 실현시키기 위해서는 壽命評價上 중요한 構造機器의 劣化診斷技術, 壽命豫測方法 및 壽命을 좌우하고 교환이 곤란한 機器·시스템의 補修技術·工法 등에 관한 技術開發이 중요한 課題이다.

### 1. 劣化에 對해서

일반적으로 機器故障의 시간에 따른 변화는 잠재적인 설계의 잘못이나 製作·設置工程에서의 결함 등 플랜트의 약점이 使用初期에 나타나는 初期故障期間, 거기에 이어지는 상당히 장기간에 걸친 고장이 적은 안정된 偶發故障期間, 이 기간이 지나고 故障率이 점점 높아지는 摩耗故障期間 등 세개의 기간으로 분류된다(그림 1). 偶發故障期間中은 故障率이 매우 낮아 플랜트가 안정되게 운전되므로 통상 이 기간을 有效壽命(Useful Life)이라고 한다. 摩耗故障期

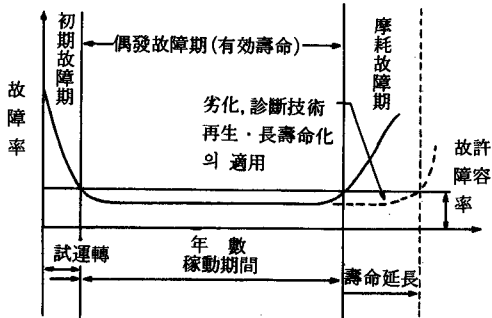
間은 機器에 經年劣化症狀이 현저하게 생겨서 수명이 끝나는 기간이다. 摩耗故障期間에 있는 機器에 대해 劣化對策을 행함으로써 故障率을 낮추어 有效수명의 연장을 도모하는 것이 가능하다.

日本의 경우 導入初期의 원자력발전소에서 蒸氣發生器傳熱管의 減肉이라는 初期故障의 腐蝕損傷을 運轉開始 直後에 경험했는데, 재료의 변경 및 水質環境을 개선함으로써 早期에 이에 대한 對策을 강구하였으며, 최근 운전을 개시한 原子力發電所에서는 상업운전을 시작하면 이미 偶發故障期에 들어갔다고 생각된다.

原子力發電所에서 현재 행해지고 있는 定期檢査는 주로 運轉中의 健全성을 유지하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 長期的인 관점에서 플랜트의 건전성을 확인하는 것과 長壽命化를 고려하면 ① 그 發電所가 摩耗故障期까지 얼마만한 기간이 있는가 또는 偶發故障期의 어느 시점에 있는가를 명백히 할 필요가 있으며, ② 摩耗故障期에 들어간 기기에 대해 필요하면 再生·長壽命化 및 交換技術을 개발하는 것이 앞으로 기대된다.

현재, 原子力發電所에서 당초보다 구체적으로 고려되고 있는 機器는 照射脆化를 받는 原子爐 壓力容器나 再循環系統配管 등과 같은 發電用 原子力施設에 관한 구조 등의 기술기준에 관한 第1種 容器나 第1種 管이다. 이들에 대해

〈그림 1〉 機器의 故障曲線概念圖



서는 플랜트 壽命中에 받는 變動荷重에 의해서도 충분히 疲勞하지 않도록 평가하는 것이 무화되어 있다.

長壽命化라는 관점에서 원자력발전소에서 고려해야 할 劣化現象에 대한 例를 表1에 나타내었다. 靜的構造機器에 대한 劣化는 주로 腐蝕, 균열, 疲勞와 照射脆化이며, 回轉機器에 대한 劣化는 異常振動이고, 電氣計裝機器에 대한 劣化는 絶緣不良임이 고려된다.

回轉機器 및 電氣計裝機器의 劣化는 교환에 의해 충분히 대처할 수 있다고 생각되므로 靜的構造機器의 劣化가 플랜트 壽命에 크게 영향을 준다고 고려되어 이에 대해 중점적으로 알아보고자 한다.

2. 劣化檢出技術과 壽命予測方法

構造機器의 劣化는 서서히 진행되기 때문에 통상 이것을 파악하기는 어렵다. 이로 인해 長壽命化를 도모할 때에는 劣化에 대해서 定量的인 評價와 殘存壽命을 정확히 예측하는 것이 중요하다.

劣化의 定量化를 도모하기 위해서는 劣化檢出技術의 開發, 劣化判定基準의 明確化, 劣化診斷場所의 選定 및 劣化診斷頻度の 選定이 중요하다.

壽命豫測에 대해서는 원자력발전소로 30년 또는 40년 稼動한 실적이 없다는 것, 劣化機構가 해명되었을 경우에도 適確한 加速試驗의 실시

〈表 1〉 劣化現象의 例

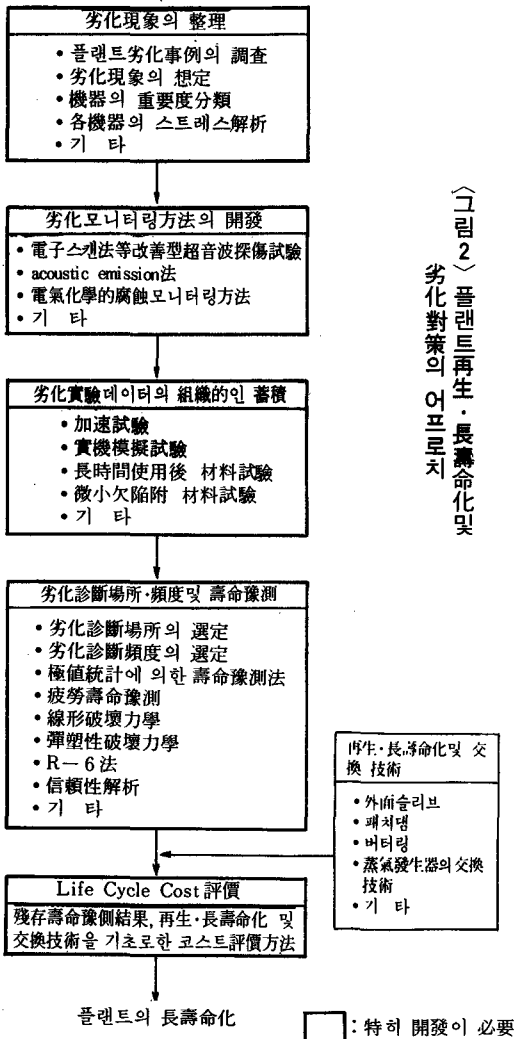
設 備	劣化 狀況	檢出 方法例	備 考	
原子爐壓力容器 配管類 熱交換器類 탱크類	照射脆化	서베일런스試驗	原子爐壓力容器	
	腐蝕	外表面狀況	육안檢査	I T V
		内表面狀況	육안檢査	피버스코프
	減 肉	두께測定 減肉監視 電氣化學的腐蝕 모니터링法	超音波두께計, 電氣 抵抗放射線透過試驗 크로스하드法 分種抵抗法等	
			外表面균열	浸透探傷, 磁粉探傷 渦流探傷, 電氣抵抗 육안檢査
	內表面균열	放射線透過探傷 磁粉探傷, 渦流探傷 超音波探傷		
핀 홀	육안檢査 浸透試驗	主로 溶接部		
材質劣化	E P R 法 섬프法	Ageing		
回轉機器類	振動 軸受摩耗 流體振動 인벤런스 미스어레이먼트	振動計 振動解析		
電氣·計裝類 케이블, 電 動機, 變壓器	絶緣劣化	絶抵抗試驗 直流高壓絶緣抵抗試驗 絶緣油의 劣化度分析		

가 곤란하다는 것 및 평가방법이 확립되어 있지 않다는 등 여러가지 해결해야 할 문제가 있다.

이들의 문제를 해결하기 위해 필요하다고 생각되는 구체적인 開發테마 및 그 어프로치方法을 그림 2에 나타내었다. 各各의 開發테마 內容은 다음과 같다.

(1) 劣化現象의 整理

原子力發電所에서 일어날 수 있는 劣化現象은 原子爐 壓力容器에 생기는 照射脆化를 제외하면 腐蝕, 균열 등 주로 確率的인 發生事例라고 생각되기 때문에 國內外的의 原子力發電所 損傷事例를 계통적으로 조사하여 어떠한 劣化가 어디에 발생하며, 어떠한 改善策이 취해졌는가를 데이터 뱅크化하는 것이 바람직하다.



장기적인 관점에서 특히 중점을 두고 조사해야 할 劣化는 全面腐蝕, 孔蝕, 腐蝕疲勞, 疲勞 및 균열이라고 생각된다. 또 이 기회에 長時間 使用後材料의 經年劣化(Aging)狀況을 조사하는 것도 필요할 것이다.

이들의 조사에 의해 發生可能的한 劣化現象을 정리하는 것은 改善對策의 研究開發, 모니터링方法의 開發 및 모니터링頻度の 지식에 관해 유익한 정보를 얻을 수가 있다고 생각된다.

(2) 劣化모니터링

원칙적으로 모니터링방법은 非破壞로 하는

것이 바람직하다. 즉, 균열形狀의 파악 등 비파괴검사방법은 결합의 有無를 판정할 수 있으나, 그 定量化는 아직 개발중이다. 앞으로 損傷의 정도를 現場에서 定量的이고도 간편한 조작으로 모니터링할 수 있는 小型劣化診斷技術을 개발하는 것이 필요하다.

특히, 현재 개발되고 있는 것 중 주목되는 技術은 복잡한 形狀을 하고 있는 균열이나 腐蝕面을 映像化하기 위한 홀로그래피法, 電子스캔法 등 改善型超音波探傷法과 材料自身の 부식 경향을 모니터링하기 위한 크로스터드法, 交流임피던스法 등 電氣化學的腐蝕모니터링방법이다. 이들의 개발에 있어서는 實機의 손상에 대해서 충분히 사용이 가능할 것, 現場에서 간편하고 또한 단시간에 측정할 수 있는 것이 매우 중요하다.

(3) 劣化實驗데이터의 組織의 蓄積

原子爐 1次系統 및 2次系統 環境下에서의 재료의 부식 및 피로 등에 관한 實驗데이터는 적기도 하지만 또한 원자력발전개발 당시의 오래된 데이터들이며 試驗研究方法이 현재와 다른 것도 있어서 그 有効性에 의문이 되는 것도 있다. 또 長時間 使用된(20年 運轉) 材料試驗結果는 현재 거의 없다.

따라서, 앞으로 構造機器材料別로 다음과 같은 데이터蓄積을 하여 데이터뱅크화하는 것은 實機劣化 모니터링結果와 비교도 가능하므로 適確한 劣化診斷, 殘存壽命豫測을 행하는 것이 가능하게 되리라고 고려된다.

① 實機模擬루프에 의한 재료특성데이터의 수집(加速試驗 포함).

② 實機에 루프를 설치해서 재료특성데이터의 수집.

③ 長時間使用後材料(例를 들면, 20년이상 경과한 것)의 재료특성데이터의 수집.

④ 微小欠陥(균열)이 있을 경우의 재료의 劣化特性데이터의 수집.

(4) 劣化診斷場所 및 劣化診斷頻度

원자력 발전소는 膨大한 부품의 집합이기 때문에 구조기기의 모든 곳에 대해 劣化診斷을 하는 것은 불가능하다. 診斷場所에 대해서는 앞에서 언급한 實機劣化데이터를 참고로 함과 동시에 샘플링 장소에서 부터 全系統의 劣化狀況을 파악할 수 있는 방법을 개발하는 것이 중요하다고 생각된다.

또 劣化診斷의 빈도에 대해서는 원자력의 경험과 다른 산업, 특히 항공기산업에서의 劣化點檢에 대한 개념이나 구조재료의 劣化를 想定한 신뢰도의 연구 등이 참고가 될 것이다.

(5) 壽命予測方法

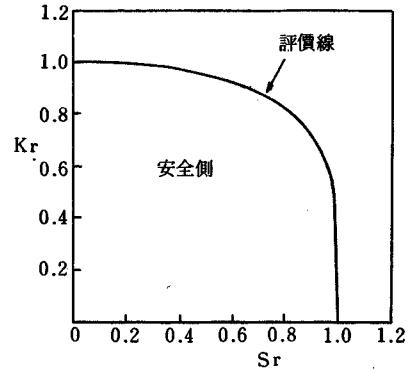
殘存壽命의 예측은 가장 곤란한 기술방법이나, 長壽命化를 도모하는 데에는 가장 중요한 開發테마이다. 이 壽命豫測의 방법으로는 다음과 같은 사항을 기초로 연구개발을 행하는 것이 바람직하다고 생각된다.

① 健全性이나 殘存壽命을 평가하는 방법으로는 주로 脆化材料에 대해 적용가능하며 또한 A SME B & P Code Sec. XI에 정해져 있는 線形破壞力學에 의한 방법과 發電所의 모든 재료에 적용가능하나, 그 解析方法이 어려운 彈塑性破壞力學이 있다.

殘存壽命豫測方法으로는 J積分 등 모든 材質에 적용가능하며 또한 評價精度도 높다고 생각되는 彈塑性破壞力學을 사용한 詳細解析方法의 확립과 어느 정도 간단한 彈塑性破壞力學을 사용한 解析方法을 개발할 필요가 있다. 後者의 例로는 英國 CEGB (Central Electricity Generating Board)가 개발한 R-6法이라고 불리는 線形破壞力學에 사용되고 있는 應力擴大係數(Kr)와 塑性崩壞荷重(Sr)을 조합시킨 결합의 평가법이 있으며, 이것들은 英國이나 西獨에서 適用例가 많다는 점에서 유망할 것으로 기대된다 (그림 3).

② wiper分布 등의 極值統計解析 등에 의한

그림 3 R-6法 : 破壞評價線圖



$$K_r = S_r \left\{ \frac{8}{\pi} \ln \sec \left( \frac{\pi}{2} S_r \right) \right\}^{-1/2}$$

$$K_i = \frac{K_i}{K_{ic}} = \frac{\text{應力擴大係數}}{\text{破壞韌性值}}$$

$$S_r = \frac{\text{負荷荷重}}{\text{欠陥을 포함한 構造物의 塑性崩壞荷重}}$$

信賴性解析에 따른 壽命評價方法

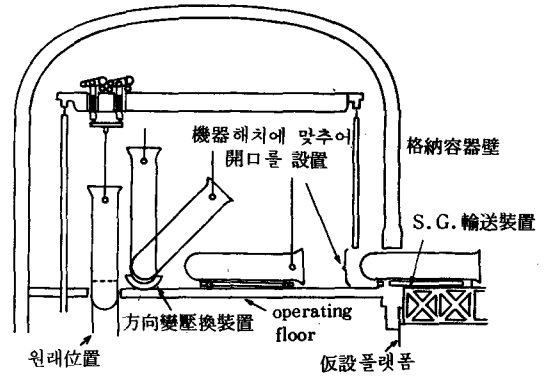
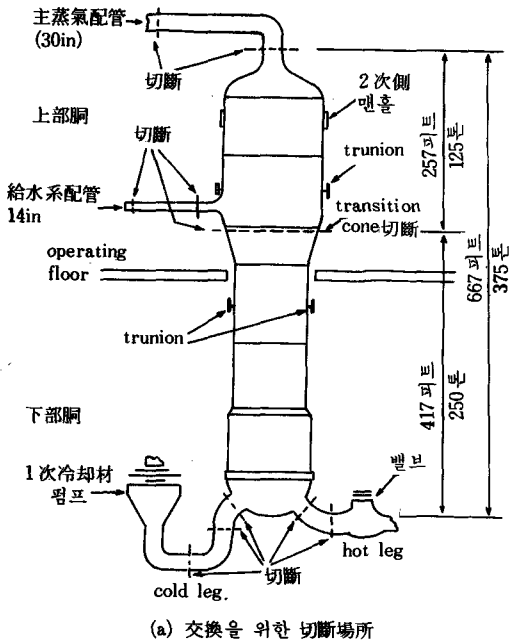
殘存壽命豫測方法은 개발중인 기술이며 당초부터 유용한 성과를 얻는 것은 어려울 것으로 고려되나, 다른 산업에서 행해지고 있는 방법을 참고로 하면서 개발을 추진해나갈 필요가 있을 것이다.

3. 劣化對策으로의 再生·長壽命化 및 交換技術

교환이 곤란한 機器의 劣化는 원자력발전소의 수명을 좌우하는 것이다. 原子爐 壓力容器나 증기발생기 등 대형기기는 당초 플랜트壽命期間中 교환할 수 없는 것을 前提로 하고 있었으나, 최근 美國, 西獨 및 이탈리아에서 損傷이 심한 증기발생기의 교환이 행해지고 있다(그림 4). 이와 같은 최근의 경험을 반영해서 현재 建設中인 日本의 PWR 플랜트에서는 증기발생기 등 大型機器의 교환도 어느 정도 가능하도록 큰 機器해체가 설치되고 있다.

原子爐 壓力容器에 대해서 美國에서는 切斷해서 꺼내서 새로운 압력용기와 교환하는 工法 및 교환비용에 대한 연구가 실시되고 있다. 가장 곤란하다고 推定되는 原子爐 壓力容器에 대해서도 현재의 補修技術 외에 原子爐 廢止措置

〈그림 4〉 蒸氣發生器의 交換



(b) S/G下部胴部の 交換方法.  
新S/G는 逆으로 넣는다.

를 위해 개발하고 있는 기술을 효과적으로 組合시킴으로서 교환이 가능하게 될 것으로 기대되고 있다.

配管 및 容器의 劣化에 대해서는 外面슬리브, 버티어링 및 패치뎀 등의 工法이 이미 民間研究로 일본에서 개발되어 있다. 이 공법은 劣化對策으로 가장 간단하며, 현재 응급처리대책으로 인정되고 있으며 또한 높은 健全성도 확보할 수 있는 것으로서 앞으로 實績을 쌓음으로서 恒久對策으로 인정받는 것이 중요하다.

플랜트의 長壽命化를 고려할 경우 有害롭지 않은 腐蝕이나 減肉, 疲勞 등에 의한 미세한 균열 등이 構造機器에 발생할 가능성이 매우 높다고 생각된다.

플랜트의 壽命末期에 이르러서는 劣化場所의 교환 등 設備投資와 經濟的 影響이 크다는 것도 고려된다. 따라서, 壽命延長은 현실적인 健全性評價技術의 開發 및 劣化對策工法의 恒久對策化를 확립하는 것이 유용하다고 생각된다.

원자력발전소의 劣化防止·再生長壽命化 및

교환기술을 확립하는 것은 중요하나, 이들 기술을 실제로 적용함에 있어서는 플랜트의 Life Cycle Cost를 고려하는 것이 필요하다. Life Cycle Cost의 最適化를 목표로 하는 프로그램을 개발하는 것은 앞으로 중요한 開發테마의 하나라고 생각된다.

#### 4. 結 論

長期的인 관점에서 劣化評價, 壽命豫測, 再生·長壽命化 및 교환기술에 대해서 검토를 하였다. 그 결과 ① 現技術의 轉用으로 어느 정도 성과가 얻어지는 것은 再生·長壽命化 및 교환기술이다, ② 劣化評價 및 壽命豫測에 대해서는 確定的인 기술이 없기 때문에 당초부터 유효하게 될 것 같은 다른 산업에서 실시하고 있는 방법이나 연구를 참고로 해서 추진해나가는 것이 바람직하리라 생각된다.

플랜트 長壽命化 및 劣化對策은 앞으로 크게 발전할 것이며, 다른 산업으로의 波及效果도 매우 클 것이다.