

原子力發電 소프트웨어技術(Ⅱ)

— 플랜트診斷技術을 中心으로 —

1. 序 論

최근 일본의 原子力發電플랜트의 設備利用率은 70%를 넘어서고 있으며, 85년도 1기당 年평균의 Scram 회수는 0.6건까지 감소했다. 이와같이 원자력발전플랜트가 양호한 운전을 할 수 있게 된 것은 部品·機器·시스템의 품질향상과 면밀한 豫防活動(巡視·點檢·교환 등)에 의한 것이다. 이 예방활동을 지원하고 있는 것이 플랜트診斷技術인데 이때까지 여러가지의 플랜트診斷裝置가 개발되고 있다. 이들의 診斷시스템의 개발은 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 발전에 의한 바가 크다.

原子力發電所의 진단방법으로서 가장 먼저 개발된 것이 雜音解析法인데, 현재 이 방법에 의한 플랜트監視·診斷은 여러 나라에서 실시되어 많은 보고가 행해지고 있다. 또한 최근에는 인스트럭션시스템의 일부로서 disturbance 解析(外亂解析)에 의한 진단이 개발되었고 知識工學의 方法에 의한 진단기술도 개발되어가고 있다. 이들 방법중 本稿에서는 가장 실적이 있는 雜音解析法에 의한 진단기술에 대해 기술한다.

雜音解析法에 의한 原子力플랜트 감시는 1950년대에 시작하여 熱的인 피드 백이 거의 없는 低出力爐의 傳達係數, 中性子壽命, 爐出力絶對值, 未臨界反應度 등이 측정되었다. 이들의 양을 雜音解析 以外の 방법으로 얻으려면 각각의 양을 측정하기 위한 실험이 필요해지며 또한 原

子爐에 外亂을 주지 않으면 얻을 수 없다. 이와 같이 원자로의 雜音은 원자로의 운전에 영향을 주지 않고서 운전상태에서의 原子爐内部의 정보를 많이 제공해 준다. 그후 雜音解析法을 動力爐로 적용하는 방안이 검토되었다.

2. 雜音解析法의 概要

雜音解析法이란 計測信號에 포함되는 離散(stragglng雜音)成分을 통계적으로 解析(周波數解析, 時系列解析)함으로써 周波數스펙트럼, 相關係數, 確率密度係數 등을 구하고 플랜트 각부의 動的인 특성을 파악하여 플랜트構成機器의 動的인 상태를 감시하는 방법이다.

그림 1은 雜音解析法의 개념을 나타낸 것인데 통상의 플랜트 운전·제어에는 계속된 신호의 평균치가 사용되고 있으나, 平均值信號가 변하지 않을 정도의 초기적인 異常이라 할지라도 雜音信號에는 異常의 징후가 가끔 나타난다. 미국의 플랜트에서 발생한 計劃外의 플랜트정지중 약 40%가 雜音解析法으로 豫知가 가능하다는 조사 결과도 있다.

雜音解析에 사용하는 계측장치구조를 그림 2에서 표시한다. 雜音解析法은 機器診斷과 플랜트診斷으로 대별할 수 있다. 前者는 특정의 기기나 특정의 현상을 감시하는 것으로 機器診斷이라 부르고, 또 다른 쪽은 플랜트 각부의 動的인 舉動을 종합적으로 감시하는 것으로 플랜트

診斷이라 부른다. 기기진단에서는 통상 특별히 설치된 變位計, 加速度計 또는 AE 센서를, 또 플랜트診斷에서는 플랜트의 運轉·制御에 사용되고 있는 中性子檢出器나 프로세스信號(流量計, 壓力計, 水位計 등)가 사용된다.

雜音解析法에 의한 플랜트의 특성평가의 한 예로서 中性子雜音特性에 대해 알아본다. 그림 3은 플랜트의 爐內中性子檢出器(LPRM)의 時間波形을 가리킨 것으로 縱方向의 아래에서 A, B, C, D의 순과 같은 軸上에 설치되어 있으며 각각의 장소에서 中性子雜音信號를 표시하고 있다.

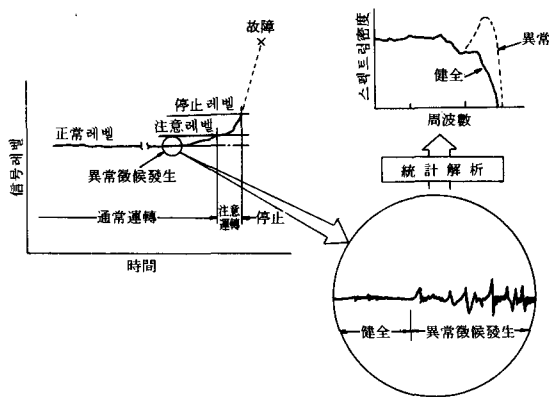
그림에서 低周波成分은 모두 같은 擧動을 하고 있어 高周波成分은 A, B, C, D로 아래서 위로 올라갈수록 雜音成分은 증가한다(그림의 상하는 검출기 위치와는 逆). 이것은 BWR 플랜트의 전형적인 波形으로 각각의 信號스펙트럼密度를 가르키면 그림 4에서와 같이 된다. 그림에서 1Hz 이하의 低周波成分은 거의 같은 패턴을 나타내고 있는데, 이것은 1Hz 이하의 低周波成分도

같은 거동을 하고 있다고 생각되며 global 成分이라고 불려지고 있다. 한편 1Hz 이상의 高周波成分은 검출기의 설치장소에 따라 다르며 局部的인 거동을 하고 있으므로 local 成分이라고 불려지고 있다. 上部의 LPRM일수록 local成分은 큰 경향이 있으며 이것은 BWR 爐心內에서 발생한 void量에 관련되어 있음을 나타내고 있다.

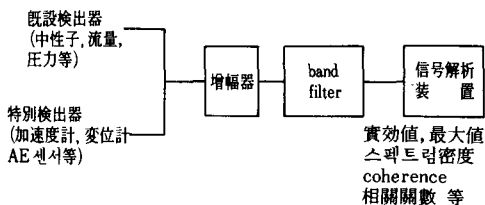
이 성질을 이용해서 보이드의 傳播方向(軸方向)에 위치한 2개의 LPRM사이 中性子雜音의 상관관계에서 검출기근방의 보이드分布 및 검출기사이의 보이드전파속도에 관한 정보를 얻을 수 있다.

그림 5는 軸方向에 위치한 2개의 中性子檢出器 사이의 상호 스펙트럼密度의 位相差이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 位相遲延과 周波數와는 직선관계에 있으며 그 勾配가 시간지연 τ 에 상당한다. 검출기간의 距離L은 既知이므로 보이드傳播速度 V는 $V=L/\tau$ 로서 구할 수가 있다. 또 氣液 2相系에서 連續方程式을 이용, 측정된

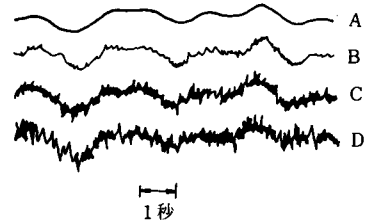
〈그림 1〉 雜音解析에 의한 異常 早期檢知



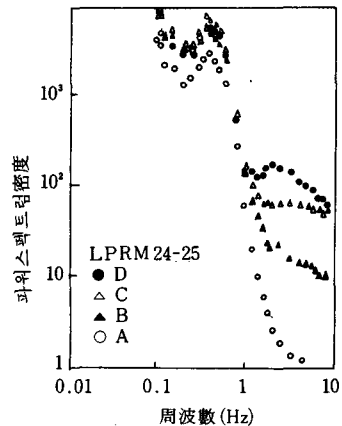
〈그림 2〉 雜音解析法의 基本的인 構造



〈그림 3〉 爐內 中性子 檢出器의 時間波形



〈그림 4〉 爐內 中性子檢出器의 파워 스펙트럼密度



보이드傳播速度를 대입함으로써 보이드率이 얻어진다(그림 6). 이때 구해진 보이드전파시간을 사용해서 燃料入口流量을 推定할 수도 있다.

3. 機器診斷

機器診斷은 특정기기 혹은 특정현상을 진단하기 위해 특별히 검출기를 설치해서 감시진단을 행하는 것으로 이미 機器診斷裝置를 설치한 플랜트도 있다. 다음은 valve의 leak 檢出裝置 및 loose parts monitor에 대한 내용이다.

3.1 밸브의 漏泄監視

原子爐의 1次系統冷却材가 漏泄하면 플랜트 운전상 지장이 생기므로 漏泄監視는 중요하다. 이때까지도 배관 등에서 생기는 漏泄을 사전에 감시하기 위한 연구개발이 행해져 왔는데, T-MI-2事故 이후 原子爐 1次系統에 설치된 relief valve, safety valve의 감시가 문제되었다.

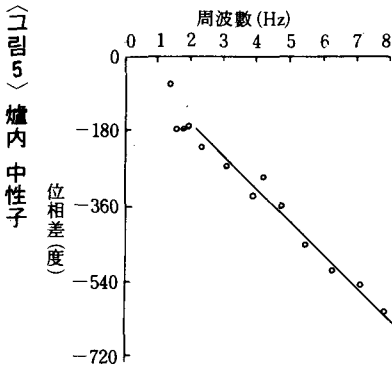
1차냉각재의 漏泄監視法으로서는 일반적으로 바닥드레인流量, 주변 온도, 放射能레벨, 湿度 등이 사용되어 왔으며, 또 配管系로부터의 누설을 音響의으로 감시하는 방법이 검토되었다. 이

들의 방법을 비교검토한 결과 relief safety 밸브의 漏泄監視에는 音響의인 방법이 가장 적합하다는 것을 알게 되었다.

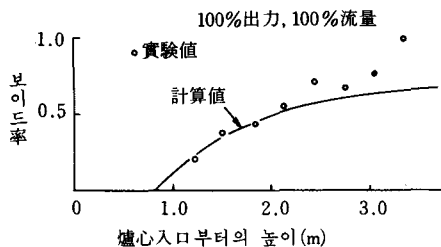
일반적으로 加壓容器 등에서 가스나 액체가 작은 틈을 통해서 漏泄할 때 용기의 漏泄部에서 발생한 음향에너지는 振動音으로서 용기 등의 固體中으로 전파되므로 용기에 설치된 音響檢出器로 漏泄에 따르는 振動音을 검출할 수가 있다.

그림 7은 音響法에 의한 漏泄監視裝置의 구조인데 대상으로 하는 밸브에 음향검출기를 설치했다. 음향검출기로서는 加速度計와 AE 센서(表 1)를 사용했다. 음향검출기에 의해 검출된 漏泄에 따르는 진동음은 增幅된 후의 實効值(r. m. s)로 變換된다. 그림 8은 실험에 사용한 relief safety valve로 實機에서 사용되고 있는 것과 같다.

그림 9는 relief safety 밸브를 고의로 개폐시켰을 때, 밸브본체에 설치된 加速度計 및 AE 센서의 出力電壓波形으로 밸브開信號에 의해 밸브 로드는 상승하고 이것과 동시에 加速度信號와 AE信號는 증가한다. 역으로 밸브 開信號가 없어도 밸브 로드는 하강하여 이것과 동시에

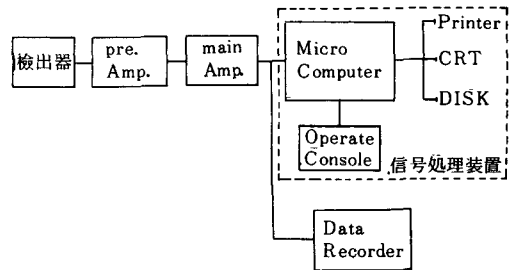


〈그림 5〉 爐内中性子 檢出器(C, D)의 位相差



〈그림 6〉 軸方向 보이드率 분포

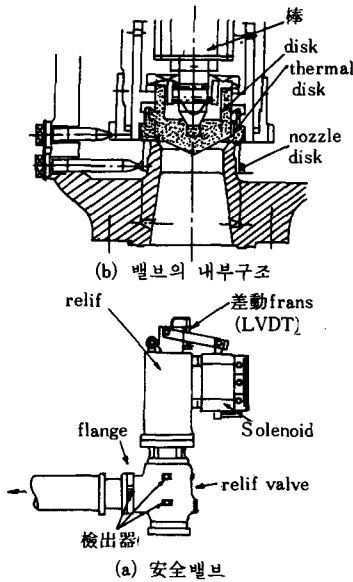
〈그림 7〉 漏泄監視裝置의 構造



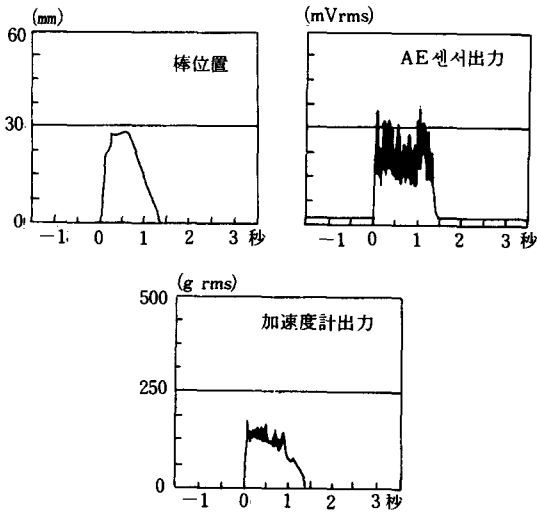
〈表 1〉 漏泄監視에 使用한 檢出器의 特性

	加速度計	AE 센서
周波數範圍	0~15kHz	250~600kHz
使用溫度	-184~400℃	-184~340℃
感 度	10PC/g	40dBrelV/m/s

〈그림 9〉 Relief Safety Valve의 構造



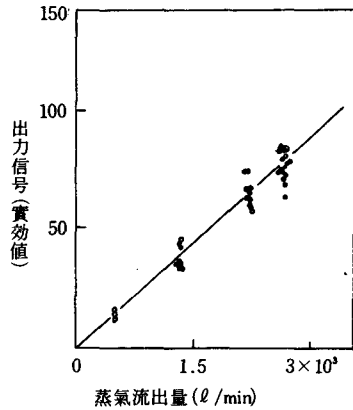
〈그림 9〉 밸브開閉時의 信號波形



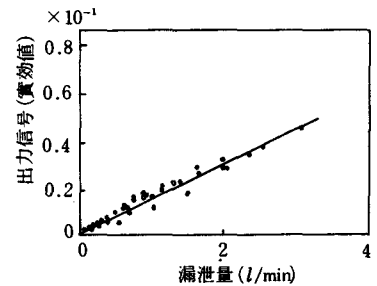
加速度信號, AE 센서의 출력신호도 다시 최초의 상태로 되돌아간다. 마찬가지로 蒸氣壓力을 변화시켜 검출기의 出力電壓과 유출한 蒸氣量과의 관계를 표시하면 그림10과 같이 된다. 이 그림에서 검출기의 출력전압은 증기의 유출량에 비례하고 있음을 알 수 있다.

또한 thermal disk에 작은 상처를 인공적으로 생기게 하고 미소한 漏泄을 발생시켜 漏泄量과

〈그림 10〉 蒸氣流出量과 出力信號



〈그림 11〉 微少漏泄量出力信號와의關係



검출기의 출력전압을 조사한 결과 그림11 같이 플랜지부에 설치된 음향검출기의 출력신호와 漏泄量과의 관계는 음향검출기의 출력신호가 漏泄量에 비례하는 것으로 밝혀졌다. 이 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (i) 0.065~3리터/分の 蒸氣漏泄量과 음향검출부의 출력신호와는 비례한다.
- (ii) 音響信號레벨은 상처의 형상이나 크기에는 거의 의존하지 않으며 漏泄量에 관련하고 있다.

(iii) 이 裝置는 微少한 漏泄뿐만 아니라 밸브개방의 감시도 가능하다.

3.2 Loose Parts Monitor

loose parts monitor는 原子爐 1次系統內 混入한 金屬性異物이나 파손한 부품이 압력용기 등과 충돌했을 때 생기는 진동을 高速度計 등에서 감시하는 것으로, loose parts가 검출되었을 때 이 정보를 조사하여 플랜트의 영향을 평가하는

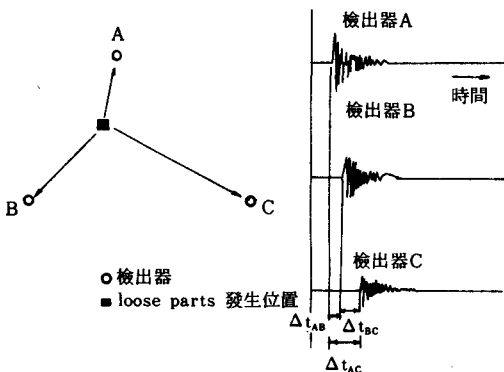
것이다.

loose parts에 관한 정보로서 종래는 loose parts의 검출과 발생위치의 추정뿐이었으나 최근에는 질량과 에너지의 추정이 행해지게 되었다. loose parts의 발생위치 추정에 대해서는 종래부터 행해져 왔던 時間差法이 자주 사용되고 있다.

그림12는 loose parts 위치의 推定法을 표시한 原理圖로서 loose parts가 壓力容器內壁과 충돌하면 용기는 局部的으로 진동하고 그 진동은 용기속을 전파하여 加速度計 A, B, C에 도달한다. 진동의 傳播速度는 정해져 있으므로 진동의 到達時間差는 loose parts의 발생장치와 검출기와의 거리의 차로써 정해지며 충돌에 의한 진동의 도달 시간차에서 loose parts의 발생위치를 추정할 수가 있다. 그러나 이 방법으로는 ① 平面上的 點은 간단히 추정할 수 있으나 曲面上 點의 추정에는 시간을 요하고, ② 推定精度가 좋지 못한 점이 존재하는 등의 결점이 있다. 이 결점을 보완하기 위해 mesh法에 의한 位值推定法이 제안되었다.

그림13은 mesh法에 의한 위치추정법의 순서를 나타낸 것으로 位值推定域을 mesh狀으로 나눈다. 마주 본 2組의 검출기(여기서는 검출기 1과 2 및 3과 4)내의 點 P에서 충돌했다고 하면 P點과 검출기 사이의 거리와 전파속도가 알려져 있

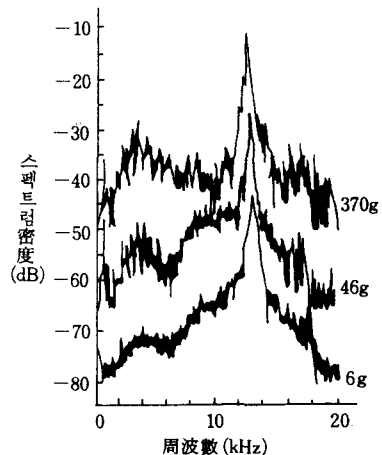
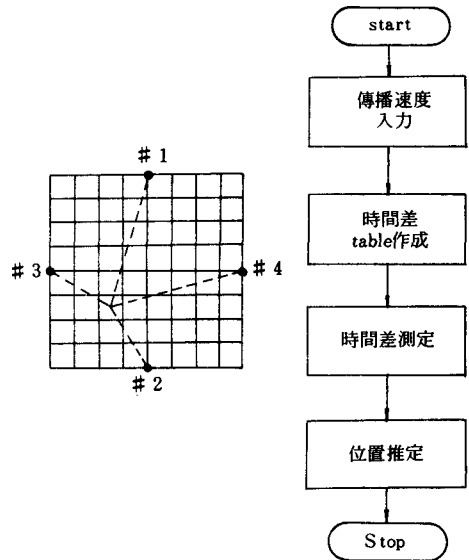
〈그림 12〉 Loose Parts發生位置의 推定



으므로 검출기 1과 2에서 검출되는 도달 시간차 또는 검출기 3과 4에서 검출되는 시간차도 계산할 수 있다. P點은 mesh의 중심에 취해지고 있으므로 이 점을 순차적으로 이동시켜 모든 mesh에 대한 시간차의 地圖를 계산할 수 있다. 이와 같은 지도를 작성해두면 실제로 측정된 시간차와 연계시킴으로써 위치를 추정할 수 있다.

그림14는 다른 질량을 가진 球狀의 loose parts가 模擬容器와 충돌했을 때, 衝擊信號의 周波數스펙트럼으로서 loose parts의 질량이 늘면 全周波數領域에서 상승하나 13kHz 附近의 숫아오

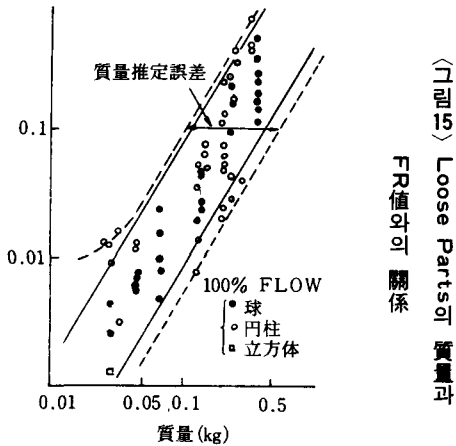
〈그림 13〉 Mesh法에 의한 位置推定



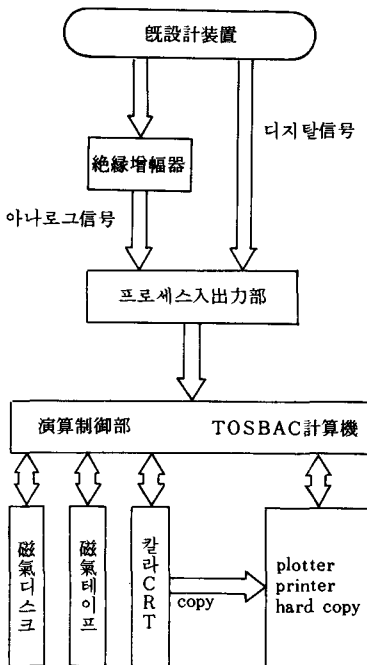
〈그림 14〉 Loose Parts의 質量과 周波數스펙트럼

름은 10kHz 以下の 주파수에 비해 상대적으로 작다. 이것은 周波數 스펙트럼 패턴이 loose parts의 질량과 관련되어 있기 때문이다.

또 周波數 스펙트럼은 loose parts의 충돌에너지, loose parts의 形狀 및 충돌점의 영향을 거의 받고 있지 않음을 보여 준다. 이것은 loose parts의 衝擊信號中 加速度信號의 스펙트럼에서 loose parts의 질량을 추정할 수 있음을 가르키



〈그림15〉 Loose Parts의 質量과 FR值와의 關係



〈그림16〉 플랜트診斷裝置의 構造

고 있다.

간단하게 loose parts의 질량을 추정하는 방법으로서 周波數 스펙트럼의 低周波成分과 高周波成分에 대한 비를 구하는 FR值法이 제안되고 있다. 그림15는 loose parts의 질량과 形狀(球, 圓柱, 立方體)을 바꾸어 loose parts의 질량과 FR值의 關係를 나타낸 것인데, FR值에 loose parts의 질량에 비례하고 있음을 알 수 있다. 여기서 低周波成分으로는 1~6kHz를, 高周波成分으로는 10~15kHz를 사용하고 있다.

4. 플랜트의 診斷

통상 플랜트의 運轉·制御에 사용되고 있는 중성자검출기나 프로세스信號(流量計, 壓力計, 水位計 등)의 雜音成分解析은 활발하게 행해지고 있으며, 최근에는 on-line의 診斷시스템도 등장하였다. 그림16은 플랜트에 설치된 진단장치의 과정으로서 소형컴퓨터를 중심으로 오퍼레이터 콘솔, 磁氣디스크, 高密度CRT, 高速프린터, 入出力타이프로 구성되어 있으며 시스템의 조작성은 모두 오퍼레이터 콘솔에서 조작성된다. 진단의 대상으로서는 爐心部와 主制御系統(再循環流量制御系統, 給水制御系統, 壓力制御系統) 및 제

〈表 2〉 診斷對象 및 項目

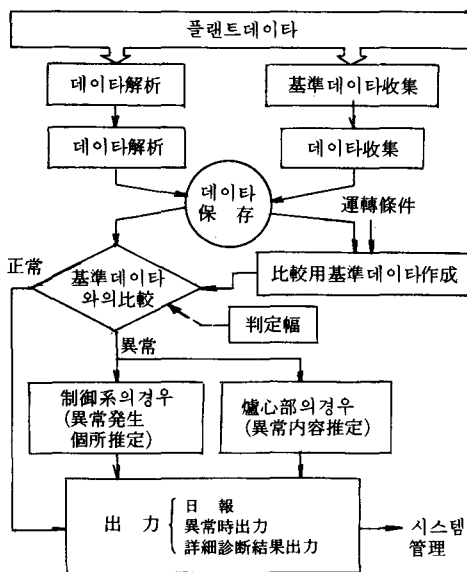
診 斷 對 象	診 斷 項 目
爐 心 部	爐心反應度安定性 채널流量安定性 爐內計裝管振動 燃料채널流量的變化
jet pump	jet pump振動
給 水 制 御 系	主制御器特性 操作器特性(A), (B)
再循環流量制御系	速度制御器特性 (A), (B) 울림管特性(A), (B) MG set動作特性(A), (B) 再循環驅動펌프/모터 (A), (B)
壓 力 制 御 系	壓力調整器特性 加減弁特性 (1), (2), (3), (4)

트럼프를 감시대상으로 하고 있다. (표2)에 진단대상과 진단항목을 표시했다.

爐心部에 대해서는 주로 LPRM信號를 사용해서 爐心安定性, 채널안定性, 爐內計裝管動, 燃料채널 流量變化 等の 異常을 감시한다. 또 制御系에 대해서는 各 制御系內 主要 Komponenten의 入出力信號를 감시해서 기기의 異常을 조사한다. 제트펌프에 대해서는 高速流體가 흐르고 있으므로 유체의 異常振動이 생기고 있지 않은가 어떤가를 감시한다. 이 장치의 플로우차트를 그림17에 표시한다. 기본적인 구성은 정상시에 얻어진 데이터를 기준데이터로서 보존해 두고 운전조건의 변화에 대응한 비교용 기준데이터를 작성한다. 기준데이터와의 비교의 결과 注意狀態로 판정된 경우에는 다시 상세한 검토를 한다.

制御系統信號에 대해서는 異常發生個所를 추정하고 爐心部信號에 대해서는 異常內容을 推定한다. 이와 같이 이 시스템에서는 단순히 상태변화의 표시뿐만 아니라 詳細診斷結果 또는 필요한 처리결과를 칼라CRT上에 표시해서 운전원이 대처하는데 있어서 많은 정보를 제공한다.

(그림17) 플랜트診斷 시스템의 플로우 차트



상태변화 檢知는 운전조건에 적합한 기준 파워 스펙트럼密度와 플랜트에서 수집된 데이터의 파워 스펙트럼密度를 비교해서 차이가 있을 경우에는 要注意로 판정한다. 여기의 차는 플랜트의 장기 운전에 의해 얻어지는 각 신호의 變動特性으로부터 정상운전중의 變動幅을 평가하여 그 범위에서 크게 벗어날 경우를 말한다. 파워스펙트럼密度에 대한 異常判定을 위한 평가함수는

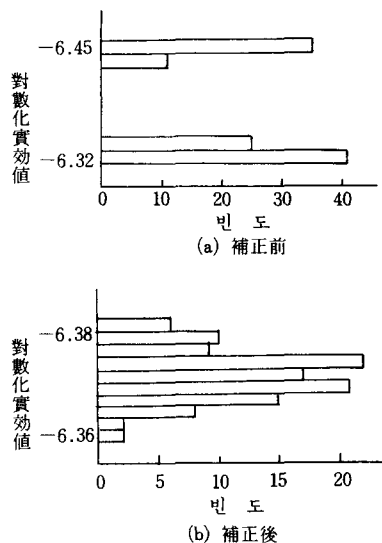
$$|\log(\sum P_i / \sum P_{Bi})| > \epsilon_1 \text{ 이면 要注意} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum (\log P_i / P_{Bi})^2 / \gamma > \epsilon_2 \text{ 이면 要注意} \dots\dots\dots (2)$$

로 한다.

여기서 P_i : 診斷用데이터의 파워 스펙트럼密度, P_{Bi} : 診準데이터의 파워 스펙트럼密度, $\gamma = 1/N + 1/N_B$, N : 진단용데이터의 샘플평균치, N_B 는 기준데이터의 샘플평균치이다. 또 制御系統의 신호가 要注意로 판정되면 制御系統의 각 구성기기의 입력과 출력신호의 상관관계가 전달함수(gein과 位相)의 패턴을 기준데이터와 비교해 그 통계적인 거리에서 異常發生個所를 추정한다.

(그림18) 運轉條件의 補正前後에서 給水流量信號의 變動分布



이 統計의距離 (D)는

$$D = \sum_{i=1}^{12} (X_i - X_i^{(B)})^2 / \sum_{i=1}^{12} i^{(B)}$$

로서 주어진다. 여기서 i : 周波數分點, X_i : 샘플 雜音패턴, $X_i^{(B)}$: 基準雜音패턴, $\sum_i \sum_i^{(B)}$: 샘플 및 基準雜音패턴의 分散이며 X_i 는 coherence, 傳達係數의 gein, 位相이다.

그림18은 운전조건이 다를 때의 給水流量信號의 頻度分布로 운전조건을 補正함으로서 운전 상태가 다르더라도 絕對正規分布로 할 수 있다.

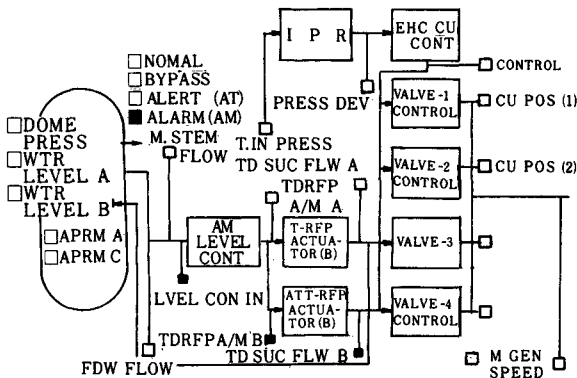
그림19는 起動試驗中에 실시된 給水制御系統의 파라미터 시험시에 主制御器의 比例帶의 設定值를 模擬的으로 약 반으로 한 異常을 발생시켰을 경우의 CRT畫面이다. 이 화면에서 레벨 콘트롤러의 부분에 要注意의 표시가 발생하고 있다. 또한 상세한 데이터를 관측하고 싶을 때는 coherence 함수 등의 解析結果를 자유로이 표시할 수 있도록 되어 있다. 이 시스템은 다음과 같은 方面에서 적용이 유효하다.

- (1) 定期檢査後 再起動時의 플랜트特性 체크
- (2) 플랜트 動特性的의 surveillance
- (3) 保守管理의 支援
- (4) 運轉特性的의 長期的 變化監視

4.2 PWR의 爐內構造物의 振動監視

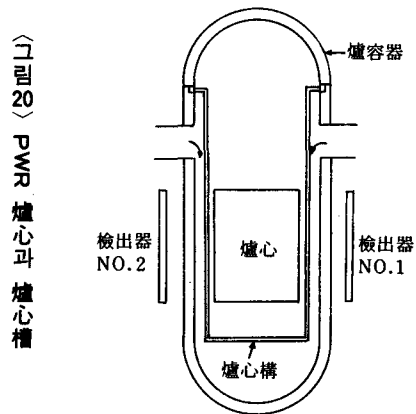
雜音解析法에 의한 진단기술의 개발은 현재 미국, 서독, 프랑스 등에서 플랜트감시를 목적

〈그림19〉 模擬的인 異常에 대한 診斷結果

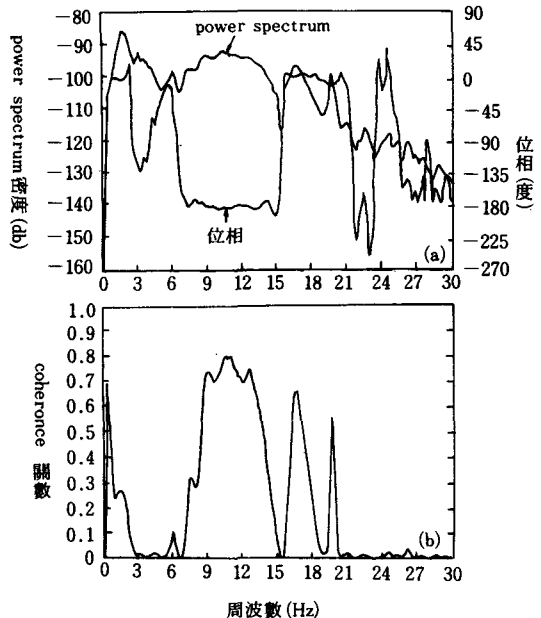


으로 進行되고 있다. 특히 최근에는 프랑스가 진단장치를 적극적으로 개발하고 있는데 10년 전부터 문제가 되어온 爐心槽의 振動에 대해 雜音解析法이 적용되어 爐心槽의 異常振動은 미국의 Palsades에서 발견되었고 이것이 동기가 되어 PWR에서의 雜音解析法의 적용이 활발하게 행해지게 되었다.

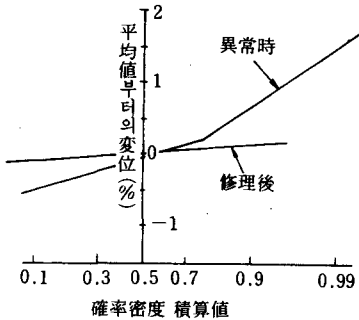
그림20은 PWR 爐容器와 爐心槽와의 關係를 나타낸 概略圖이다. 爐容器의 상부로부터 매달



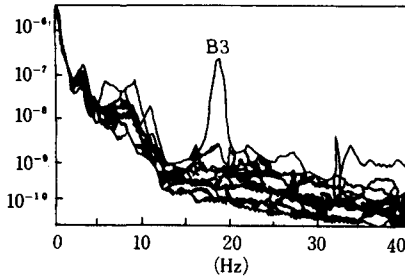
〈그림21〉 2個의 爐心 中性子檢出器의 스펙트럼密度 位相 및 coherence關係



〈그림22〉 爐心槽의 異常時 및 修理後 爐外 中性子檢出器의 出力雜音分布



〈그림23〉 PWR爐內 中性子檢出器 power spectrum 密度 (14個所)



린 爐心槽는 高速으로 유입되는 1차냉각재에 의해서 진동이 생긴다. 爐心이 진동하면 爐容器 밖에 설치된 中性子檢出器의 출력신호도 변동한다. 그림21은 180° 떨어진 위치에 설계된 2개의 爐外中性子檢出器의 파워 스펙트럼密度, 位相 및 coherence 함수를 가리키는 것으로 그림에서 7~15Hz에서 位相은 逆轉하며 또 coherence 함수도 대단히 높아지고 있다. 이것은 이 주 파수에서 爐心槽가 진동하고 있기 때문이다. 그림22의 Palsades에서의 異常時 및 爐心槽修理後의 爐外中性子檢出器의 確率密度函數를 표시했다. 이것은 정상시에 평균치로부터의 變位는 確率密度의 積算値와 비례관계에 있는데 대해, 이상시에는 비례관계에서 크게 벗어나 있음을 가리킨다. 그후 buffer板의 틈에서 냉각재가 유입하는 소위 buffer jet flow에 의해 爐心最外周의 燃料집합체가 진동하는 이상이 발생했다. 이

진동을 감시하기 위해 爐外中性子檢出器의에 爐內中性子檢出器가 사용되었다. 그림23은 1,000 MWe, 4루우프의 PWR 爐外 및 爐內중성자검출기의 파워스펙트럼密度를 가리키는 것으로 爐內 중성자검출기에 대해서는 14개의 검출기스펙트럼을 표시했다. 여기서 爐內 中性子檢出器 B3의 17~19.5Hz의 스펙트럼이 다른 것과 다른 것은 燃料집합체의 진동에 의한 것으로 평가되고 있다.

5. 結 論

雜音解析法에 의한 原子力發電플랜트의 診斷技術은 外國에서 활발하게 추진되고 있으며 그 일부는 이미 플랜트의 運轉·管理에 이용되고 있다. 앞으로도 계속 雜音解析法에 의한 診斷技術의 개발은 적극적으로 추진될 것으로 여겨지며 이와 함께 다른 방법에 의한 보다 효과적인 플랜트診斷이 검토될 것이다.

이달의 到着資料

- ◇ Nuclear Europe<ENS> 3月號
- ◇ Nuclear News<ANS> 3月號
- ◇ INFO<AIF> 3月號
- ◇ Buyers Guide '85<ANS>
- ◇ ATOM<UKAEA> 3月號
- ◇ Atoms in Japan<JAIF> 3月
- ◇ Nucleonic Week<McGraw-Hill> Vol. 27, No. 10, 11, 12, 13, 14
- ◇ American National Standard<ANS> Safety Criteria for HVAC Systems Located Outside Primary Containment
- ◇ 原子力資料<日本原産> 3月號
- ◇ 原子力文化<日本原子力文化振興財團> 3月號
- ◇ '86 Radioisotopes<日本 RI協會> 3月號
- ◇ Isotope News<日本 RI協會> 3月號
- ◇ 原子力産業新聞<日本原産> 1325號, 1326號, 1327號, 1328號, 1329號