

# 原子力發電 Software 技術 (Ⅲ)

## — 事故時의 運轉支援 —

### 1. 緒 言

TMI-2 事故는 原子力界에 수많은 교훈을 남겼는데 사고시 運轉支援의 觀點에서는 복잡한 事故時 플랜트 舉動의 해명 필요성과 中央制御室에서의 man-machine性의 개선이 특히 重要했다.

安全解析研究는 종래는 設計基準事故指向에서 單一故障, 安全系統 自動作動의 假定에서 短時間의 過渡解析中心이었으나, TMI 이후에는 안전계통의 複合故障를 생각한다든가 또는 運轉員의 조작이 개재될 수 있는 長時間의 過渡解析으로 대상이 移行해 오고 있다. 즉 大破斷 LOCA 指向에서 中小破斷 LOCA, 外部電源喪失, 給水喪失, 혹은 ATWS와 광범위한 過渡形式 등을 들 수 있다. 이와같은 다양한 사고 형식에 대한 플랜트의 응답해명은 RELAP, TRAC, RETRAN 등의 最良推定安全解析코드의 정비와 아울러 이들 코드에 의한 計算機 simulation에 의해 다각적으로 검토되어, 오늘날 이와같은 계산기 시뮬레이션은 사고의 확대 과급을 초래할 가능성이 있는 경로의 摘出이나 이에 대한 設備對策 내지 操作方法의 改進黨을 위해 극히 有效한 수단으로 되어 있다.

한편, 맨-machine性의 개선에 대해서는 TMI-2 事故에 대한 反성으로 일부 학자들은 ‘安全機能(Safety function)’ 이란 개념에 의해 operator의 역할, 중앙제어실에서 的 運轉支援方法, 사고시 的 運轉順序 등을 통일적으로 재편성할 것을 제

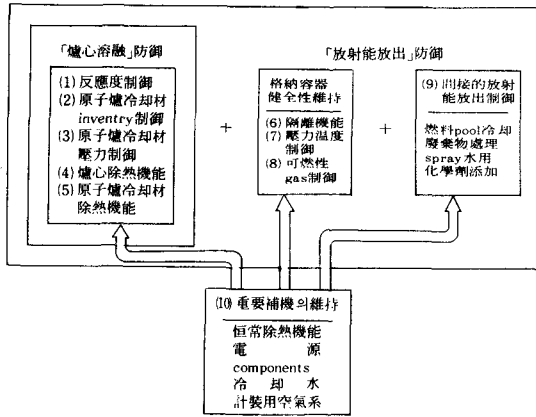
안했는데, 이것은 post-TMI의 연구 개발 방향을 결정지우는 것이었다. 여기서는 먼저 이 ‘安全機能’ 概念을 소개하고 그 후 内外의 연구 개발 동향을 중앙제어실내에서의 문제와 중앙제어실 밖으로부터의 技術的支援에 속하는 문제로 나누어서 概況을 소개한다.

### 2. 安全機能概念

Corcoran 등은 종래의 運轉節次書, 緊急時節次書, 安全解析書나 技術指針은 플랜트 설계자의 의도를 운전자에게 전달하는 데 있어 결점이 있었다고 하고, ‘安全機能’ 概念을 발표했다. 안전기능이란 爐心溶融을 방지하고 환경으로의 방사능 방출을 최소한으로 하기 위한 총 10개 항목의 action이며 이것을 다시 4개의 class로 분류했다. ‘安全機能’에서의 액손, 클래스 및 그 상호 關係를 圖 1에 표시했다. 그림중 번호를 붙인 것이 액손이며 네모로 둘러싼 것이 클래스이다. 각각의 액손을 성공시키는 徑路를 success path라고 불렀다.

안전 기능을 달성하는 데는 운전원이 어떠한 사고가 발생했는가를 곧바로 알 필요는 없고 ① 어느 안전 기능을 달성시키지 않으면 안되는가, ② 어느 석세스 파트가 가능한가, ③ 플랜트상 태는 어떤가를 아는 것이 중요하다. 또 이 안전 기능 개념을 사용해서 운전원의 사명을 분석하면, ① 중앙제어실에서의 運轉員支援을 위해 安

圖 1 安全機能의 action, class와 그 相互關係



全과라미터 表示시스템, 重要函數 監視시스템 개발의 필요성, ② 종래의 事象指向 운전절차에서 微候指向 운전절차으로의 재편성, ③ 운전원 훈련법의 재검토와 緊急時對應을 위한 on-shift crew라고 하는 高級安全技術者의 플랜트常駐 등이 제안되고 있다.

이상의 3가지 제안은 post-TMI의 연구 과제를 방향지우는 것이었다. 즉, ①은 각종의 計算機化 運轉員 支援시스템으로 内外에서 개발이 추진되고 있고, ②에 대해서는 ①의 계산화 시스템에서의 가이드를 내는 방법으로서의 問題나 '緊急時運轉節次指針'으로 발전하고 있다. 이들 ①, ②에 대해서는 그 후의 연구상황을 정리해서 ③에 기술한다. 또 ③가운데서 특히 on-shift crew에 대해서 각 플랜트에 常駐할 것인가 아닌가의 의견이 나누어지고 있다.

### 3. 中央制御室에서의 問題

#### 3.1 operator 補助로의 計算機 적용

중앙제어실에서 운전원의 사고시 조작을 지원하기 위해 플랜트 計裝信號의 계산화 처리에 의한 安全과라미터表示'와 '重要函數監視' 개념을 확장해서 ① 플랜트 상태진단, ② 안전과라미터나 중요 함수의 추정, ③ 플랜트 상태의 장래 예측 등이 포함된 종합시스템으로서의 개발이 각

국에서 행해지고 있다.

이와같이 운전원 지원 시스템으로의 運用을 위해 연구된 시스템을 소개하면, 狀態診斷에 決定論的方法의 範疇에서 因果樹木圖 (Cause Consequence Tree, CCT), 知識工學의 응용, 統計的方法에 多變量解析法, innovation 등이 있고 狀態推定에 칼만 필터나 非干涉化 필터, 將來豫測에 GMDH에 의한 black box model 同定이나 對象시스템의 간단한 動特性모델중 未確定과라미터를 觀測值의 短時間 sample值를 사용해서 非線型 最急勾配法으로 추정하고, 그 다음 同定한 과라미터차를 사용해서 그 간단한 動特性 모델로 앞으로의 長時間 傾向을 예측하는 일종이 '逆解析'法이 제안되고 있다.

#### 3.2 事故時運轉節次的 재검토

종래의 運轉節次書에는 設計基準事象을 대상으로 먼저 원인을 진단하고 그후 同定된 事象에 대응한 절차를 취하는 방법을 취하고 있었다. 그러나, 이와같은 manual에 의한 운전에서는 ① 원인이 진단되지 않을 때나 진단 착오의 경우에 잘못된 대응을 할 가능성이 있고, 또 ②보다 다수의 事故事象에 대응할 수 있도록 하면 절차가 너무 複雜化된다는 결점이 있었다.

한편, 醫療나 航空機 등 다른 분야에서는 급함을 요할 때 위와 같은 事象指向은 對應이 될 수 없다. 예컨데 병이 났을 때 의사는 원인을 진단하지 못하더라도 환자의 微候에 의해 出血을 정지시킨다든가 解熱劑를 준다든가 해서 容態의 회복 조치를 첫번째로 행한다.

이와 같은 관점에서 '微候 (symptom)'에 의해 플랜트의 안전 기능 악화 방지의 중요성과 微候指向의 긴급시 運轉節次에 대한 재편성의 필요성을 Corcoran과 Colquhoun 같은 학자들이 제안하고 있다. 이에 의하면 플랜트應答에서 '微候'를 同定하면 그 징후가 特定事象에 합치하는 경우 그 特定事象用의 運轉節次를 起動한다. 그러나, 어느 특정 事象에도 합치하지 않을 때는, ①危

機에 있는 안전 기능을 同定하고, 이어서 ② 플랜트 상태를 결정하여 몇 가지의 success path 중 적절한 것을 순차로, 同定, 起動시켜 플랜트 응답이 기대한 방향으로 향하는가를 본다. 이와같은 절차를 (N+1)次 節次라고 부른다. 그리고 徵候에서 異常事象을 特定할 수 있는 경우에는 운전원의 대응 조작은 rule base 또는 skill base의 행동을 취하며, 한편 (N+1)次 節次에서는 知識베이스의 행동이 요구된다고 하여 운전원 훈련의 바람직한 방향, 고도의 기술적 판단력의 함양을 요구하고 있다.

이상과 같은 긴급시 운전 절차에 대한 사고 방식은 일본에서는 instruction system 개발에 있어서 운전원에 대한 guide 선택에 반영되고 있다고 한다. 예컨대, 圖2에 원자력발전소의 trip時 冷温停止로의 안전 이행을 위한 가이드 選定 algorithm을 표시한다. 이때, 플랜트 計裝信號의 外亂解析에 의해 異常事象이 特定되고, 事象指向의 절차를 취할 때, 절차의 번잡화를 피하기 위해 다음과 같이 하고 있다. 먼저, 冷却系의 使用可否에 영향을 주는 事象의 관점에서 給水系機能喪失, 主蒸氣隔離弁閉鎖 및 外部電源喪失의 3가지, 그리고 필요로 하는 냉각계의 용량에 영향을 주는 事象의 관점에서 relief safety valve 開와 配管破斷의 2개를 선택하여 결국 12가지의 異常그룹으로 集約하고, 각각의 事象그룹에 따

라 水位確保, 減壓, 殘留燃除去 및 格納容器冷却 등 각각의 冷温停止對策에 대해 사용할 수 있는 冷却系에 대해 미리 순위를 붙여둔다. 한편 플랜트 상태에 따라 각각의 冷温停止對策의 개시, 종료 판단이나 플랜트 應答性에 따라서 事象指向 가이드와 徵候指向 가이드의 교체 판단을 행하는 기능을 가진 시스템 구성으로 되어 있다.

美國에서는 緊急時 運轉節次書의 전면적 재검토가 ‘安全機能’개념을 중심으로 행하여져 NRC에 의해 긴급시 運轉節次指針이 발표되고 있다. 이에 의하면 ‘緊急時運轉節次(Emergency Operation Procedure : EOP)’이란 플랜트 파라미터가 原子爐安全保護系나 工學的安全設備의 設定點을 넘었을 경우 異常的인 過渡나 事故의 영향을 경감하기 위해 운전원에 요구되는 運轉節次라고 정의하고, ‘事象指向 EOP’에서는 異常事象의 진단이 필요하며 한편 ‘機能指向 EOP’에서는 重要安全函數가 충분한 여유가 있는가를 확인하여 이것이 손상되었을 때 회복 조치를 취하도록 guidance를 주는 것이 목적으로 운전원이 事象을 진단할 필요는 없다고 하고 있다. 또 ‘技術指針(Technical guideline)’이란 사고의 영향을 경감하고 안전 기능을 회복하기 위해서 운전해야 할 裝置, 系統을 규정, 그 운전 순서를 기술한 것으로 安全解析에서 얻어진 工學的 데이터를 EOP를 記述하기 위해 變換한 것이라 하겠다. 이 계열은 플랜트 설계를 대상으로 하는 ‘一般技術指針’과 개개 플랜트에 대한 ‘特定技術指針’으로 나누어진다.

EOP 작성에 있어서는 運轉員이 완전하고 정리하고 읽기 쉬우며 이해하기 쉬운 것으로 하기 위해서 텍스트나 visual aids를 작성하기 위한 ‘記述基準(Writer’s guide)’을 human factor를 고려해서 규정하며, 대략 圖3의 단계에서 EOP를 策定, 檢證하여 운전원 훈련에 도입해야 한다고 기술하고 있다. 그후 미국에서는 작성된 EOP

圖2 運轉支援 system에서의 guidance選定

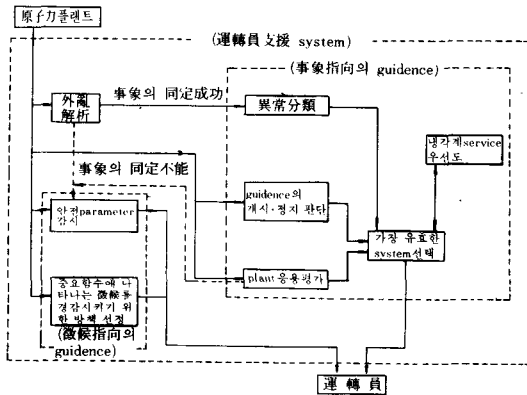
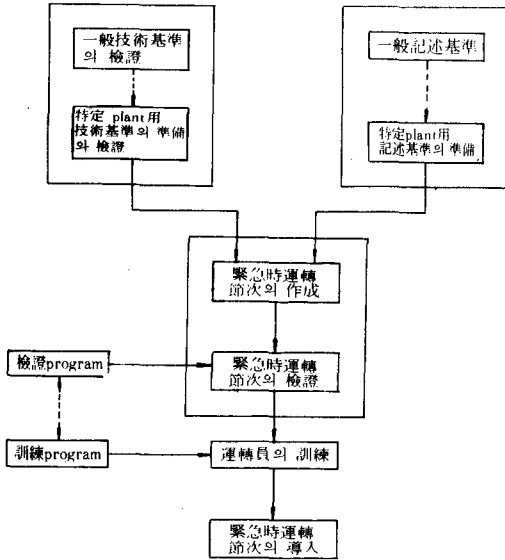


圖 3 緊急時運轉節次的開發 program



의 유효성을 뒤에서 언급할 plant analyser에 의해 조사하고 있다. 일본의 경우에는 언어 사용이나 환경의 차이 등으로 미국의 매뉴얼을 그대로 적용할 수는 없으나 휴먼 팩터의 고려 등 그 근본 사상에는 검토의 가치가 있다고 하고 있다.

#### 4. 中央制御室外로부터의 技術的支援

##### 4.1 On-shift crew의 유효성

Cerceran 등이 제안한 on-shift crew의 플랜트常駐에 대한 사고 방식은 '微候'베이스의 운전 조작에 이르렀을 경우 知識베이스의 행동이 필요하게 되므로 이에 대비하여 原子爐安全性에 대해 고도의 지식을 갖춘 安全技術者를 각 플랜트에 배치하려는 것이다. Tanguy에 의하면 프랑스에서는 단적으로 이 방향을 검토하고 있다고 한다. 즉, 통상시의 運轉操作義務는 없으나 플랜트의 안전 운전에 대해 항상 분석하고 그 개선에 대해 운전원을 지도하는 立場의 on-shift safety engineer를 각 플랜트에 배치하는 한편 플랜트運轉節次를 圖 4에서와 같이 분류하고 있다. 設計基準을 넘는 사고가 발생하고 爐心溶融의

圖 4 France에서의 運轉節次의 分類

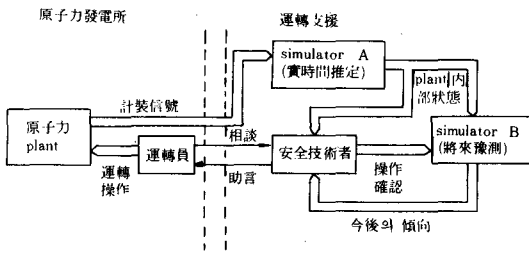
A-節次	工學的安全設備를 사용한 對應操作에 의한 回復	設計基準內 事故	
H-節次	安全系 redundancy 손상되었을 때	設計基準을	
U1-節次	爐心溶融의 最終的인 防止策	넘는 事故	on-shift safety engineer에 의한 指揮
U2-節次	格納容器隔離의 破損(β-mode)檢出의 局所化, 修理		
U3-節次	ESF를 修繕하기 위한 移動車出動		
U4-節次	basemat meltthrough (ε-mode)		class9 事故
U5-節次	格納容器的 排氣·filter制御 (δ-mode)		

위험성이 생기는 사태에 도달하면 U-節次(Ultimate Procedure)으로 옮겨가는데 그 이후의 플랜트 운전은 전혀 on-shift safety engineer에 의해서 지휘된다.

이와같은 on-shift crew는 플랜트 운전엔 책임을 지고 있지 않으며 운전원쪽이 개개의 플랜트 상태를 보다 잘 파악하고 있기 때문에, 일상의 조언은 그렇게 운전원 쪽으로부터 받아들여지지 않을 것이며, 운전원에 있어서의 助言이 필요한 긴급시에는 時間的制約이나 스트레스로 인해 on-shift crew와 상담하는 여유도 없을 것이라는 반론도 있다.

그러나 確率的으로는 극히 적다 하더라도 緊急事態가 일단 발생하면 중앙제어실의 운전원에는 대단한 技術的負擔과 心理的스트레스가 걸린다. 이와같은 상황속에서는 오히려 운전원의 미스를 유발하기 쉽다. 그래서 플랜트와 떨어진 곳에 運轉 支援센터를 두고, 光通信케이블로 플랜트 計裝信號를 보내어 플랜트 내부상태의 분석을 實時間으로 행하여 그 예측 분석 결과에서 操作方法이나 사고의 收束方法에 대해 조언하는 방식(圖 5 參照)을 제안하고 있는 사람도 있다. 말하자면, on-shift crew가 그룹으로서 '微候'베이스의 운전시에 事故事象의 진단이나 su-

圖 5 緊急時運轉에서의 中央制御室의 運轉員과 運轉支援 center의 安全技術者와의 關係



ccess path의 확인을 시간적 제약이 있는 상태에서 분담하는 방식이다.

#### 4.2 原子力 plant analyser

on-shift crew가 플랜트에 常駐를 하든 운전 지원센터에 配備하고 있든 어느 쪽이라 하더라도 이와같은 고급 안전 기술자가 사고시 플랜트 運轉操作上的 문제를 검토, 분석해서 해석하기 위해서는 實時間에서 손쉽게 플랜트의 여러 가지 事故時 舉動을 模擬하는 simulator가 필요하게 된다.

미국에서는 TMI 이후, ① 종래의 훈련용 시뮬레이터로는 플랜트의 異常事象이나 사고를 올바르게 모의할 수가 없고 운전원의 사고시 대응 훈련에 불충분했으므로 ② NRC staff가 사고시의 플랜트 거동, 운전 절차 등을 시뮬레이션에 의해 연구하고 또 실제의 사고 발생시에는 豫測計算에 의해 대응책을 검토할 수 있는 原子力 플랜트 애널리저 (NPA)라고 불리는 시뮬레이터를 가져야 한다는 인식하에 BNL에서 BWR用의 NPA를, 그리고 Idaho國立研究所 (INEL), Los Alamos國立研究所 (LANL) 및 민간의 캘리포니아技術開發社 (Technical Development of California, TDC) 3者에서 PWR用의 NPA를 개발하였다.

##### (1) BNL의 플랜트 analyser (미니컴과 alley processor)

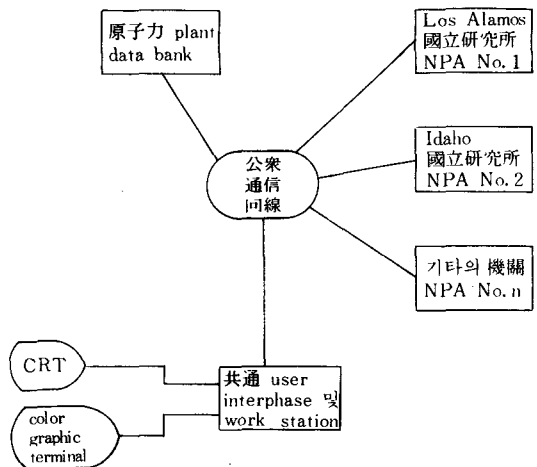
최신의 熱流力 모델링 방법과 特殊周邊 미니컴 기술을 사용해서 플랜트의 最適推定事故 시뮬레이션을 실제의 약 10분의 1의 빠르기로 달성하고 있다. 非平衡·非均質二相流 model, 蒸氣line

의 壓力波傳波效果, 플랜트 전체의 冷却材溫度에 의한 核的 feedback과 1點近似 動特性 모델, 燃料·被覆內溫度分布計算, 制御系·플랜트 安全系の 模擬를 PDP 11을 host로 해서 AD-10이라는 高速計算專用的 特殊周邊 processor 2대로서 NPA를 구성하고 있다. AD-10은 multibus에 積分專用 processor, 數值計算 processor, vector化 data memory, memory address processor, AD/DA 變換器나 10channel 등을 接續한, 독자적인 OS를 가지지 않은 backend processor로서 응용 program은 host 상에서 MPS 10이라는 software에 의해 獨特한 simulation言語로 작성되어 있다.

##### (2) INEL-LANL-TDC plant analyser (大型 code와 user interphase)

INEL의 RELAP 5, LANL의 TRAC의 사용 방법을 확장하여 圖 6에서와 같이 user가 TSS에 의한 會話型으로 access할 수 있게 한 것으로 INEL, LANL의 main frame 計算機上에서 대형 코드를 사용한다. user는 원자력 플랜트 데이터뱅크속에 미리 준비된 각 플랜트마다, 코드마다의 標準入力 데이터를 사용해서 쉽게 계산할 수가 있고 計算實行과 병행해서 CRT display에 결과를 표시하거나 解析條件의 변경을 회화형으로 처리한다.

圖 6 INEL-LANL-TDC에 의한 NPA 構成



解析코오드 자체도 NPA用에 고속 계산을 할 수 있게 개량하고 있는데, 예를 들면 TRAC에서는 1次元 내지 3次元의 二相流解析을 최신의 2流體 모델로서 오일러型 有限差分近似로 푸는데 있어서 數値解의 安定性을 강화한 방법(SE-TS)의 채용, 코드의 module化, vector processer에 알맞는 코딩 등에서 實時間計算보다 약간 빨라졌다. 장차 並列處理 프로세서의 응용도 생각하고 있는 것 같다.

#### 4.3 高速診斷型 plant analyser

실제의 플랜트 사고 발생시에 플랜트의 내부 상태를 추측하려면 플랜트計裝에 따르는 計測情報밖에 없다. 이에 따라서 고속으로 플랜트내부 상태를 상세하게 추정하기 위해서는 對象 플랜트를 전체로 상세하게 모델화할 것이 아니라, components나 sub-system으로 분리할 수 있는 곳에서 절단하여 이에 대해 비교적 간단한 物理모델을 정립하는 것이 計測信號에 불가피한 흠여짐이나 오차 등을 고려하면서 중요한 플랜트變數를 추정할 수 있는 방법 또는 algorithm을 導出하는데 전망이 좋고 실제적이다.

이상의 관점에서 이것을 美國의 NPA와 구별하여 日本에서는 '高速診斷型 플랜트 애널리저'라고 부르기도 한다. 즉, 圖5에서와 같이 플랜트 計裝信號를 시시각각으로 사용해서 플랜트 내부상황을 實時間 추정하는 simulator A, 將來豫測을 위한 simulator B로 구성된다. 먼저 시뮬레이터 A에 대응하는 實時間事故追跡 시뮬레이터의 試行列로서 PWR 1次系内の 事故時熱流力舉動 實時間追跡을 대상으로 TOKRAC코드를 개발했다. TOKRAC에서는 熱平衡 均質二相流모델에 따라서 RELAP 4와 기본적으로 같은 數値解法을 사용하고 있으나, ① node절단의 簡素化, ② 燃料棒 傳熱모델, 펌프나 SG, ECCS 등의 component모델, 液位모델, 破斷流모델의 簡略化, ③ 플랜트 操作變數(原子爐스크램, 펌프, ECCS), 崩壞熱曲線, SG 傳熱量, 液位(加壓器,

爐心), 漏洩流量 등 시간 변화의 외부로부터의 入力可能, ④ 1次 loop 주변 흐름의 방정식의 摩擦係數를 初期定常壓力分布를 사용 fitting함으로써 初期定常設定을 고속화하는 것 등에서 main frame 계산기의 의해 TMI-2事故나 cold leg 小破斷 LOCA를 數値實驗하여 實時間의 약 10분의 1의 계산 시간으로 충분한 精度의 계산이 가능하다는 것을 가르켰다. 圖7에서는 TMI-2 事故 초기의 加壓器壓力의 시간변화를 TOKRAC와 RELAP 4 計算 및 플랜트記錄에 대해서 제시했다.

또 TOKRAC에 의한 高速計算達成上의 큰 假定인 SG 傳熱量的 實時間推定의 실현성에 대해서는 SG 2次側의 enthalpy와 質量 balance에 관한 1點近似 모델에서 흠여짐 성과가 重疊한 計裝信號壓力, 給水流量, 蒸氣流量을 사용해서 SG 傳熱量을 칼만필터에 의해 實時間推定하는 數學모델을 導出, LOFT ATWS實驗 데이터 등에 의한 數値實驗에 의해 그 유효성을 확인하고 있다.

緊急時對應을 위한 計算機化診斷設備의 將來象을 hard/soft 쌍방의 전체 구성에 대해 PWR 플랜트를 대상으로 좀더 구체적으로 표시하면, 결국 圖8과 같은 시스템이 생각된다.

이와같은 긴급시 對應診斷設備는 高度情報 net-

圖 7 TMI-2 事故 simulation에서의 加壓器壓力의 時間變化 比較

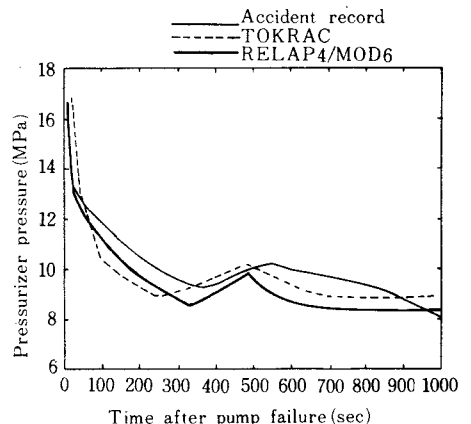
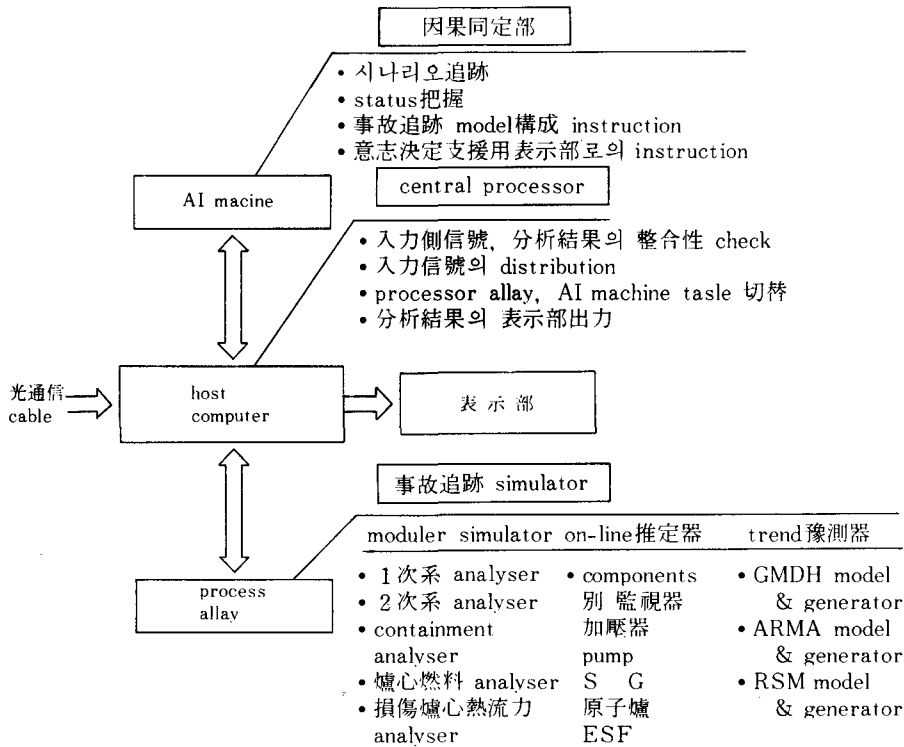


圖 8  
緊急時對應用診斷設備의 hardware  
software 構成



work system과 digital 計算機 技術을 결합하고 또한 知識情報處理나 並列計算方式 등 소프트웨어 면에서도 새로운 과제가 많은 테마이다. 이 중에서 事故追跡 시뮬레이터에 대해 기술하면, modular simulator에서는 安全解析研究 분야에서 확립되고 檢證된 數學모델과 함께 高速數值解法과 外部入力變數를 명확히 한 intellectual한 module化가 과제이며, 한편 on-line推定器에서는 각 콤포넌트별로 유효한 추정기의 설계가 과제가 된다. 즉, 이용 가능한 計裝의 종류와 특성의 파악, 감시해야 할 重要變數나 파라미터의 同定·推定 algorism의 개발이 과제일 것이다.

#### 4. 結 語

사고시의 운전지원에 대해 post-TMI의 動向을 ‘安全機能’ 개념에 따라서 최근의 安全解析研究의 경향, 計算機化 運轉員支援시스템, 緊急時運轉節次의 재검토, on-shift crew의 是非나 운

전 지원센터, 高速事故 시뮬레이션이나 플랜트 진단을 목적으로 하는 각종 플랜트 analyser의 연구 개발 상황을 개설했다. 운전 지원센터의 구상과 관련하여 Neuschaefer에 의하면 미국에서는 「技術支援센터」(Technical Support Center; TSC)나 「緊急時運轉施設」(Emergency Operations Facility; EOF), 「NRC 運轉 센터」(NRC Operations Center; NOC)가 만들어져 있으며 긴급대응을 위한 計算機化 診斷設備로서 綜合의 事故監視 시스템(Integrated Accident Monitoring System, AMS)을 플랜트 中央制御室, TSC, EOF, NOC와 접속시킨 형으로 시스템화 하는 것을 검토하고 있다. 또 최근 내외에서 연구가 진행되고 있는 損傷爐心 熱料舉動이나 爐心 溶融舉動에 관한 연구 성과도 사고시 운전지원면에서 프랑스의 H-節次形에서의 緊急對應法의 기초가 될 것이다. 그리고 긴급시의 인간의 행동이나 심리적 측면 즉, human factor의 연구도 매우 중요한 과제이다.