

加壓輕水爐 安全에 관한 當面 研究課題의 分析

張 舜 興

<韓國科學技術院 核工學科 · 工博>

1. 머리말

現在 우리나라는 增加하는 電力需要를 充當하기 위하여 原子力 發電所 建設에 拍車を 가하고 있다. 이미 加壓輕水爐(Pressurized Water Reactor; PWR)를 美國으로부터 6機, 프랑스로부터 2機 導入하였고, 캐나다로부터 CANDU型 加壓重水爐(CANDU Type Pressurized Heavy Water Reactor; CANDU-PHWR)를 1機 導入하였으며, 앞으로도 계속해서 導入될 전망이다.

이러한 狀況에서 世界の 注目を 끌고 있으며, 原子力 發電所의 核心 課題라 할 수 있는 安全性 確保 問題에 대한 國內研究는 必須的이라 하겠다.

이에 韓國 原子力發電의 主宗을 이루고 있는 加壓輕水爐의 安全性을 위한 研究課題를 本文에서 紹介하고자 한다.

原子力發電所 安全의 基本 目標는 定常時는 물론 過度時(transient)나 事故時에도 放射線의 爐心外 放出을 充分히 抑制하여 從事者 및 居住 住民에게 放射線 障害를 주지 않도록 하고, 또한 放射線의 影響을 가능한 한 낮게 하는 것이다.

이러한 目標는 放射性 物質을 遮蔽할 수 있는 세계의 獨自의인 遮蔽物을 利用함으로서 이루어진다. 이 세가지는 (1) 核燃料棒 被覆材(fuel cladding), (2) 壓力容器, 配管, 蒸氣發生器 튜우브 등으로 構成되는 一次系의 境界(primary boundary), 그리고 (3) 格納容器(reactor containment)

ment)이다.

그러므로, 定常時나 事故時에 있어서 이 세 遮蔽物의 健全性(integrity) 確保는 原子爐의 安全과 直結된다. 세 遮蔽物의 健全性 確保를 위해 다음과 같은 基本原則을 둔다.

- (1) 發電所의 設計 및 建設에 있어서 最大의 安全을 考慮하며,
- (2) 過度狀態에 대한 計測, 修正을 위하여 保護系統(protective system)을 附與하고,
- (3) 事故의 結果를 緩和시키기 위하여 工學的 安全設備(engineering safety features)를 設置한다.

2. PWR 安全研究의 課題

最近에 일어난 TMI 事故를 考慮하며, 原子力 發電所의 安全目標 및 安全基本原則에 立脚한 PWR의 安全研究의 課題는 다음과 같이 열거지 정도로 大別할 수 있다.

- (1) 一次系統 境界(壓力容器, 配管, 蒸氣發生器 튜우브로 構成)의 安全設計 및 保護에 관한 研究
- (2) 假想的 事故의 熱水力學的 實驗과 工學的 安全設備(engineered safety features)의 效率性에 관한 研究
- (3) 假想的 事故時 核燃料棒과 被覆材의 舉動 및 損傷限界에 관한 研究
- (4) 迅速·正確한 事故 結果의 豫測을 위한 電算코우드(code) 開發에 관한 研究

- (5) 水素 發生 및 舉動에 관한 研究
- (6) 原子爐 運轉 安全에 관한 研究
- (7) 系統 및 部品の 信賴度에 관한 研究
- (8) 放射性 廢棄物處理 및 處分에 관한 研究
- (9) 爐心 溶解事故 및 格納容器 損傷에 관한 研究
- (10) 위험 부담(risk) 및 量的인 安全目標 設定에 관한 研究

2.1. 一次系統 境界의 安全設計 및 保護

이 研究는 壓力容器 및 一次系統 配管, 蒸氣發生器 튜우브의 健全性에 관한 것이며, 다음과 같은 內容을 包含하고 있다.

- (1) 균열에 관한 物質의 彈性 및 塑性的인 움직임에 관한 破壞力學
- (2) 파이프와 蒸氣發生器 튜우브의 응력-부식 균열(stress-corrosion cracking)
- (3) 壓力容器的 방사에 의한 脆性化(radiation embrittlement)
- (4) 蒸氣發生器의 튜우브 시이트(tube sheet)에서의 움푹파임(denting) 現象
- (5) 熔接部分에서 흠(flaw)의 探知를 위한 非破壞 檢査
- (6) 漏出(leaking)의 探知를 위한 非破壞 檢査
- (7) 比較的 뜨거운 壓力容器에 加하는 차가운 非常 爐心冷却水(emergency core cooling water)의 熱衝激
- (8) 一次 및 二次系統에서의 물의 화학적성질(water-chemistry)
- (9) 地震荷重 分析
- (10) 蒸氣發生器 튜우브 周圍에서의 流量分布

2.2. 假想的 事故의 熱水力學的 實驗과 工學的 安全設備의 效率性

이 研究는 單一 발생 사건으로서 가장 極甚한 事故인 冷却水 喪失事故(loss of coolant accident: LOCA)를 包含한 各種 過度現象에 관한 實驗을 通하여, 過度現象 아래서의 二相流動(two phase flow)의 水力學과 熱傳達現象 解析 및 LOCA 時에 非常 爐心冷却系統(emergency core cooling system; ECCS)의 實際 움직임과 效率性에 관한

結果 測定이 주된 課題이다. 實驗은 綜合 系統 實驗과 個別 效果實驗 등으로 나눌 수 있으며, 다음과 같은 研究課題를 包含하고 있다.

- (1) 큰 LOCA 時에 ECCS의 움직임에 관한 綜合 系統實驗
- (2) 작은 LOCA 時에 ECCS의 움직임에 관한 綜合 系統實驗
- (3) 流動 喪失事故(loss of flow accident) 時 자연순환에 관한 綜合 系統實驗
- (4) 再灌水(reflood) 및 ECCS의 통과, 블로우다운(blowdown) 등에 관한 個別 效果實驗
- (5) 二相流動의 熱水力學을 위한 상호 관계의 開發

2.3. 假想的 事故時에 核燃料棒과 被覆材의 舉動 및 損傷限界

核燃料棒 및 被覆材는 放射性 物質의 一次 遮蔽物이기 때문에, 運轉時나 假想的 事故時에 있어서 堅固性 解析은 原子力 安全解析의 核心課題라 하겠다.

이에 관한 研究는 다음과 같은 內容을 包含하고 있다.

- (1) 假想的 事故時에 UO_2 펠릿(pellet)의 特性
- (2) 假想的 事故時에 지르카로이(zircaloy) 被覆材의 酸化
- (3) 冷却이 可能한 爐心 形態의 維持에 관한 性能基準과 關聯된 지르카로이 被覆材의 機械的 움직임 및 變形
- (4) 潛熱(decay heat) 및 갭 컨덕탄스(gap conductance)
- (5) 核燃料棒의 損傷에 관한 原理
- (6) 核燃料棒 損傷의 探知

2.4. 迅速·正確한 事故結果의 豫測을 위한 電算코우드 開發

事故結果를 迅速·正確하게 豫測하는 電算코우드의 開發은 認許可 過程에 있어서 쓰이는 電算코우드의 評價를 위해서나, 事故가 났을 때 迅速하게 對處하기 위하여 絕對的으로 必要하다.

이에 관한 研究는 다음과 같은 內容을 包含하고 있다.

(1) 綜合 系統의 움직임을 豫測하는 系統코우드

(2) 個別 部品の 움직임을 豫測하는 部品(component)코우드

(3) 電算時間을 줄이며 正確한 結果를 주는 數值解析法의 開發

(4) 實驗結果 및 理論에 立脚하여 二相流動 및 亂流(turbulence)에 관한 模型의 改善

(5) 關係式(correlation)의 開發

2.5. 水素 發生 및 舉動

TMI 事故 後, 水素의 發生 및 燃燒 可能性은 深刻한 危險으로 대두되었으며, 이에 관한 研究도 많이 進行되고 있고, 다음과 같은 課題를 包含하고 있다.

- (1) 水素 發生 및 그 根源
- (2) 水素의 溶解度
- (3) 水素의 探知 方法
- (4) 水素의 燃燒 可能條件
- (5) 水素의 運搬
- (6) 水素의 除去裝置

2.6. 原子爐 運轉安全

美國의 輕水爐 安全報告書인 WASH-1400 에 서나 TMI 事故에서의 經驗으로 볼 때, 原子爐의 運轉에 관한 安全은 매우 重要하다고 하겠다. 原子爐 運轉安全은 運轉技師의 失手 問題와 計測, 制御에 對한 問題로 大別할 수 있으며 다음과 같은 內容을 包含하고 있다.

- (1) 危險度, 信賴度에 立脚한 人間失手의 評價
- (2) 人間工學에 立脚한 人間失手의 極小化
- (3) 二相流體의 動壓力 測定
- (4) 蒸氣發生器 및 加壓器(pressurizer)의 計測 및 制御를 위한 動力學
- (5) 事故時 計測·制御器의 作動
- (6) 電線(cable)에서의 火災 發生 防止

2.7. 系統 및 部品の 信賴度

系統이나 部品の 故障에 관한 確率 研究은 原子爐 安全研究의 重要한 部分인 同時에 原子力 發電所의 可動率 問題와도 直結된다. 信賴度를

높이기 위하여 多重性, 分離性, 獨立性에 立脚한 原子力 發電所가 設計되어지지만 數量的인 信賴度의 計算은 새로이 發展된 設計方向을 提示할 수 있으며, 다음과 같은 內容을 包含하고 있다.

- (1) 電波 供給系統의 信賴度 分析
- (2) 補助 供給水系統의 信賴度 分析
- (3) 非常 爐心冷却系統의 信賴度 分析
- (4) 各種 部品の 老衰에 따른 信賴度 下降에 관한 分析
- (5) 週期的 整備를 통한 信賴度 上昇에 관한 分析
- (6) 信賴度 解析方法의 發展

2.8. 放射性 廢棄物 處理·處分

계속 增加하고 있는 放射性 廢棄物의 累積은 環境保存에 큰 影響을 미칠 可能性이 있으므로, 이 問題는 窮極的인 原子力 安全問題로서 대두되고 있다.

아직도, 만족할 만한 放射性 廢棄物 處理·處分法이 決定되지 않은 狀態이므로 앞으로도 많은 研究이 되어질 豫想이다. 放射性 廢棄物은 取扱·輸送·貯藏, 또는 廢棄에 이르는 一聯의 工程을 가지는 데, 現在로서 가장 어려운 研究課題는 長期的인 貯藏(또는 廢棄)問題이며 다음과 같은 問題를 包含하고 있다.

- (1) 安定도가 높은 固化 處理技術의 開發
- (2) 乾式貯藏과 이에 따른 安全性
- (3) 濕式貯藏과 이에 따른 安全性
- (4) 海洋廢棄 및 外界廢棄
- (5) 再處理 및 核擴散

2.9. 核心 溶解事故 및 格納容器 損傷

爐心 溶解와 格納容器 損傷現象은 일어날 可能性이 매우 稀薄한 事故이지만, 原子力 發電所에서 最高量의 放射線이 漏出될 수 있는 경우는 이 두 事故가 同時에 일어날 때이므로, 이 極限 事故들에 관한 研究가 必要하다. 이 研究는 爐心 溶解事故의 緩和를 위한 研究, 爐心 溶解事故 및 格納容器 損傷事故의 原因 및 發展에 관한 研究로 大別할 수 있으며 다음과 같은 內容

을 포함하고 있다.

- (1) 溶解된 核燃料의 舉動
- (2) 溶解된 爐心の 冷却 및 臨界性
- (3) 溶解된 核燃料과 물과의 反應
- (4) 溶解된 爐心の 格納容器的 透過
- (5) 爐心 溶解事故의 緩和를 위한 緩和裝置 設計
- (6) 蒸氣爆發에 의한 格納容器 損傷
- (7) 水素燃焼에 의한 格納容器 損傷
- (8) 高壓으로 인한 格納容器 損傷
- (9) 格納容器的 遮斷 失効

2. 10. 위험부담 및 量的인 安全基準 設定

1975 年에 發表된 美國의 商業 輕水爐의 安全에 관한 報告書인 WASH-1400 은 現實的이고 組織的인 方法으로 原子爐의 危險度를 分析하여 安全性 研究의 새로운 方向과 指針을 提示하였다. 이를 契機로, 原子爐의 實際的인 危險度 研究는 더욱 더 많은 應用을 갖게 되었고, 다음과 같은 研究分野를 낳게 되었다.

- (1) WASH-1400 의 再評價와 危險度 分析法의 發展
- (2) 認許可制度에 危險度 分析과 費用-效果 分析(cost-benefit analysis)에 立脚한 量的인 安全基準 設定
- (3) 人間에 의한 오류(human error)의 危險度 分析
- (4) WASH-1400 의 各나라에의 應用
- (5) 危險度 分析에 있어서의 不確實性

3. 맺 는 말

앞에서도 言及한 바와 같이, PWR 의 安全性

確保는 原子力發電所의 安全 運營이라는 測面에서 꼭 遂行되어야 할 課題이다. 本論에서 살펴본 安全 課題의 分析에서 얻을 수 있는 重要한 結論은, 대부분의 安全 課題가 여러 分野가 동원된 綜合的 研究에 의해서만 解決될 수 있다는 事實이다. 이 結論에 비추어 볼 때, 全分野 研究陣의 組織的인 參與에 의해서만이 安全性 研究가 遂行될 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NRC Report WASH-1400, Oct. 1975.
2. L.S. Tong and G.L. Bennett, NRC Water-Reactor Safety-Research Program, Nuclear Safety, Vol. 18, Feb. 1977.
3. L.S. Tong, Boiling Heat Transfer and Two Phase Flow, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
4. R. Mattson et al., Concepts, Problems and Issues in Developing Safety Goals and Objectives for Commercial Nuclear Power Nuclear Safety, Vol. 21, No.6, November-December 1980.
5. G.W. Parry et al., Characterization and Evaluation of Uncertainty in Probabilistic Risk Analysis, Nuclear Safety, Vol. 22, No. 6, January-February 1981.
6. A. Bayer et al., Basic Aspects and Results of the German Risk Study, Nuclear Safety, Vol. 22, No. 6, November-December 1980.

