

原子力發電所의 安全性

車 宗 熙
(韓國原子力研究所副所長)

1. 序言

왜 原子力發電所에 대하여 安全性이 重要視되고 強調되는가? 그것은 原子力發電所의 熱源인 原子爐가 莫大한 潛在에너지와 核分裂에 의해 생기는 多量의 放射能을 가지고 있어 무슨 事故라도 생겨 放射能이 漏出되면 周邊의 人命에 害를 미칠 수 있기 때문이다.

發電用 原子爐에 使用되는 核燃料은 低濃縮 富라늄을 使用하기 때문에 原子爆彈과 같이 一時에 爆發하는 일은 없으며 또 冷却의 不充分으로 核燃料가 高溫이 되더라도 陰의 反應度溫度係數 때문에 出力이 減少되는 固有의 安全性 때문에 큰 災害를 招來하는 일은 없다.

그러나 重要한 것은 運轉中 原子爐가 停止되어도 얼마간의 熱이 계속 發生하는 事實이다. 核分裂現象은 停止되어도 核分裂生成物로 부터의 崩壞熱이 계속 放出되기 때문이다. 이 熱은 停止 直後일 때 運轉出力의 8%, 數時間이 經過한 後에도 약 1% 정도가 계속 나온다. 古里1號機의 경우 이 殘留熱의 量은 正常運轉일

때 停止直後는 138MW이고 數時間이 경과한 후 이면 17MW 정도이다. 그래서 原子爐의 停止 後에도 상당한 期間동안 爐心의 冷却이 유지되도록 되어 있다. 만약 이것이 圓滑치 못하다면 核燃料가 損傷되거나, 심하면 溶融현상까지 擴大되어 放射能이 原子爐 밖으로 漏出되는 일이 일어날 수 있다. 이런 事實은 TMI事故에서 經驗한바 있다.

原子力發電所의 安全은 平常時의 運轉中은 勿論 어떠한 事故時에도 確保되어 放射能으로부터 人命이 害를 입는 일이 없도록 하여야 한다. 그렇게 하기 위하여 여러 種의 安全裝置가 설치되고, 設計, 建設, 運轉과정에서 安全性이 點檢되고 있다.

2. 原子力發電所의 安全設備

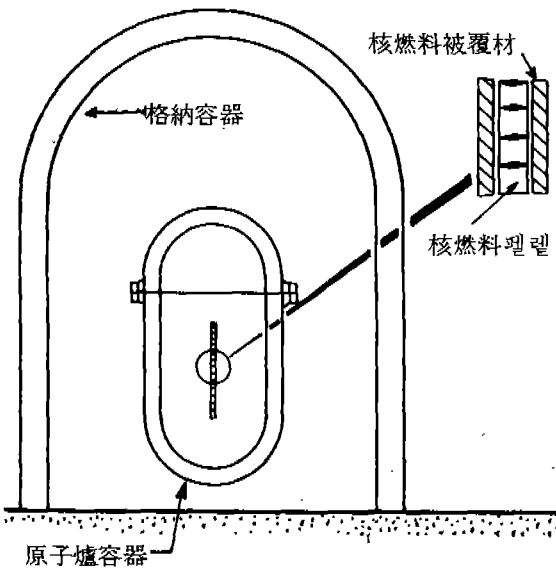
原子力發電所는 安全性의 確保를 위하여 安全設計가 고려되고 여러 種의 安全設備가 설치된다. 이런 安全設備들은 機能과 信賴性이 設計段階에서부터 建設, 運轉에 이르기까지 點檢된다. 다음에 主要한 安全設備의 概要를 적어 보기로 한다.

먼저 말할 수 있는 것은 放射能의 漏出을 막기 위하여 (그림 1)과 같이 여러 겹의 物理的防壁을 둔 것이다. 放射線源인 核燃料은 金屬製의 被覆管內에 들어 있으며 이들 核燃料棒의 集合體는 두꺼운 鋼製의 壁을 가진 容器 안에 들어 있다. 이 原子爐容器는 두꺼운 鋼板으로 조립된 格納容器內에 설치된다. 따라서 放射線源은 3重의 防壁을 가지고 있어 어떤 경우라도 이를 뚫고 새어나가기 어려우며 실제 이들 防壁을 뚫고 漏出된 例는 아직 없다.

原子力發電所의 主要系統은 法的으로 効力이 있는 “安全設計基準”과 ASME Code Section III와 같은 技術基準에 따라 嚴格한 品質保證이 요구되는 設計, 製作, 組立, 檢査가 이루어지도록 되어 있다. 特히 放射能을 保有하고 있는 1次冷却材系統은 健全性이 確保되어야 하며 이를 위하여 安全한 構造強度를 갖도록 設計, 製作됨은 물론 使用中에도 定期的으로 龜裂如否를 檢査하는 “稼動中檢査”가 法的으로 요구되어 施行된다.

“安全設計基準”에서는 原子爐의 保護上 必要한 計測이나 安全回路는 그 機能의 信賴度를 높

(그림 1) 여러 겹의 放射能防壁



이기 위하여 多重性和 獨立性을 갖도록 요구하고 있다. 原子爐保護系統은 原子爐의 安全性을 상실할 우려가 있는 過渡狀態나 誤動作이 생겼을 때 原子爐의 스크램, 警報 등 保護動作을 作動시키는 機能을 갖는다.

또 原子爐에는 設計原理가 다른 서로 獨立的인 反應度制御系統이 마련되도록 되어 있다. 그래서 加壓輕水爐에서는 制御棒클러스터系와 1次冷却材 中の 硼素濃度調節의 2가지 方法이 채택되고 있다. 反應度制御系統은 制御棒脫出, 冷水注入, 冷却材의 溫度, 壓力變化 등의 事故時에도 爐心에 過度의 反應度量이 加해지거나 爐心冷却能力이 低下하는 일이 없도록 設計하게 되어 있다.

重要한 것은 原子爐 冷却材 系統 등이 破斷되어 冷却材가 喪失되는 最惡의 事故가 일어나더라도 爐心을 有效하게 冷却하여 放射能이 外部로 放出되는 일이 없도록 하기 위한 安全施設이 마련되어 있는 것이다. 即 이 施設은 冷却材喪失事故時 爐心을 有效하게 冷却하는 非常爐心冷却系統, 核分裂生成物의 外部放出을 막는 原子爐格納容器, 格納容器의 壓力低減을 위한 格納容器스프레이系統, 格納容器內의 揮發性核分裂生成物의 低減을 하는 空氣淨化系統등이다.

非常爐心冷却系統은 加壓輕水爐의 경우 (그림 2)와 같이 蓄壓注入系, 高壓注入系 및 低壓注入系로 構成되며 關聯機器는 多重性을 갖는 同時 非常用電源으로부터도 給電되도록 設計되어 어떠한 事故狀態에서도 그 機能을 充分히 發揮할 수 있다.

蓄壓注入系는 冷却材喪失事故가 發生하여 1次冷却材回路의 壓力이 所定值 以下로 減少하였을 때 原子爐格納容器內에 설치된 蓄壓탱크로부터 硼酸水를 爐內에 自動的으로 注入하여 爐心の 早期冷却을 確保한다. 이 蓄壓탱크는 各冷却回路마다 1基씩 설치되며 硼酸水탱크 內에는 窒素가스에 의해 加壓貯溜되어 있으며 冷

却回路와는 체크밸브에 의해連結되어 있다.

高壓注入系는 原子爐補助建物內에 설치된 充填펌프에 의해 冷却材喪失事故時에 燃料交換用水탱크의 硼酸水を 1次冷却回路의 低溫 및 高溫側配管을 거쳐 原子爐容器內로 注入하여 爐心の 冷却을 確保한다.

低壓注入系는 原子爐補助建物內에 설치된 殘熱除去펌프에 의하여 燃料交換用水탱크의 硼酸水を 爐心上部에 노즐로부터 原子爐容器에 注入하여 爐心の 冷却을 確保하는 것이다. 燃料交換用水탱크의 貯溜水を 써버린 후는 格納容器底部의 섬프에 고인 硼酸水を 殘熱除去펌프를 使用하여 殘熱除去熱交換器로 冷却하여 注入하게 된다. 이렇게 하면 必要한 注入水源은 連續적으로 確保되어 冷却材喪失事故時에 燃料의 損傷, 溶融, 또는 지르코늄과 물의 反應이

防止된다.

輕水爐의 경우 非常爐心冷却系統은 冷却材喪失事故時 다음 條件을 滿足하도록 그 機能이 있어야 한다. 즉,

① 核燃料被覆管의 最高溫度는 2200°F (1204°C)를 超過해서는 안된다.

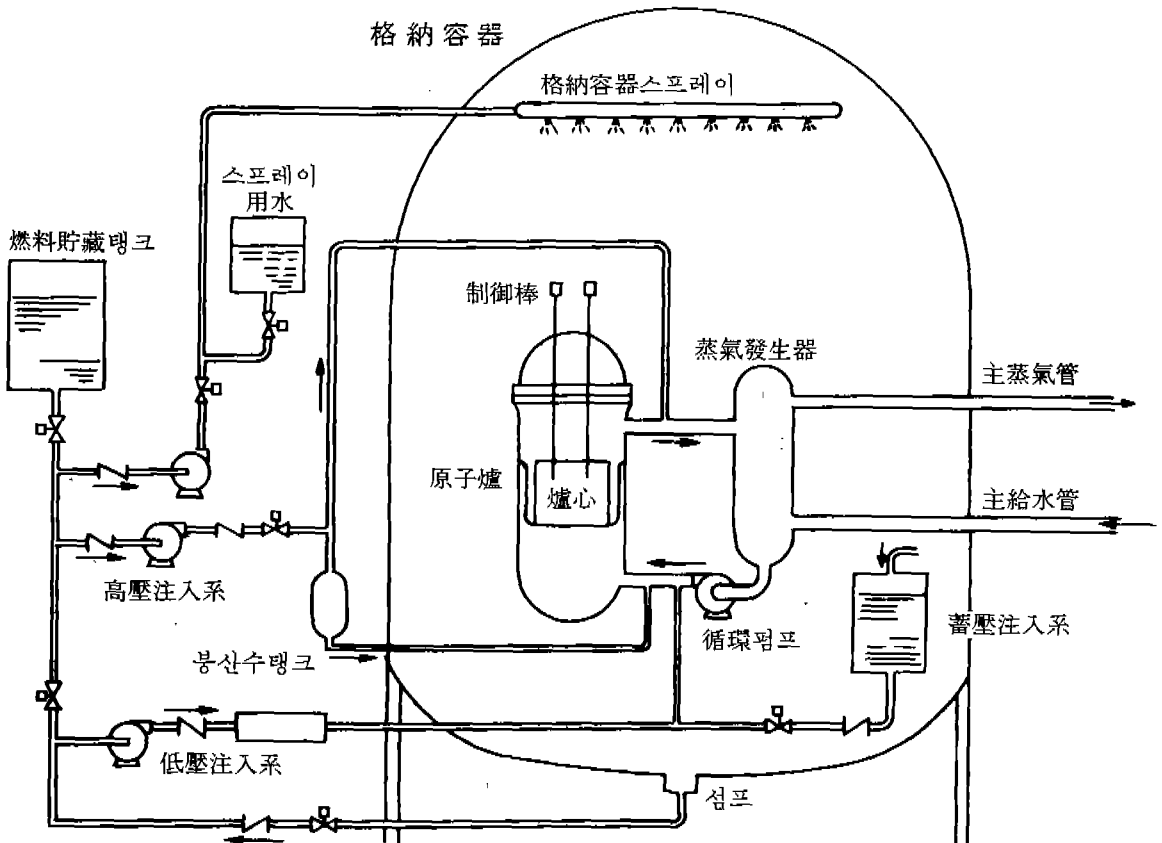
② 核燃料被覆管의 酸化는 被覆管의 두께의 15%를 超過해서는 안된다.

③ 核燃料被覆管의 지르코늄과 물, 또는 蒸氣의 反應은 全爐心の 1%를 超過해서는 안된다.

④ 爐心은 冷却 可能한 形狀으로 유지되어야 한다.

⑤ 爐心の 長壽命核種에 의한 崩壞熱의 除去는 長期間 이루어져야 하며 初期의 非常爐心冷却系統의 作動에 의한 冷却 後에도 爐心溫度는

[그림 2] 非常爐心冷却系統



恒常 充分히 낮은 溫度로 유지되어야 한다.

原子爐系統을 收容하고 周邊公衆의 安全確保를 위한 最終的인 安全設備로서 格納容器가 있다. 古里1號機의 경우 格納容器는 3.8cm 두께의 耐壓鋼板으로 만들어져 있으며 그 周圍를 厚壁의 콘크리트構造物이 둘러싸고 있다. 格納容器에 要求되는 條件은 最惡의 事故時의 壓力에도 견디는 強度를 가지고 또한 漏洩率이 1日當 内部空間의 0.1%를 초과하지 않는 安全設計가 되도록 되어 있다.

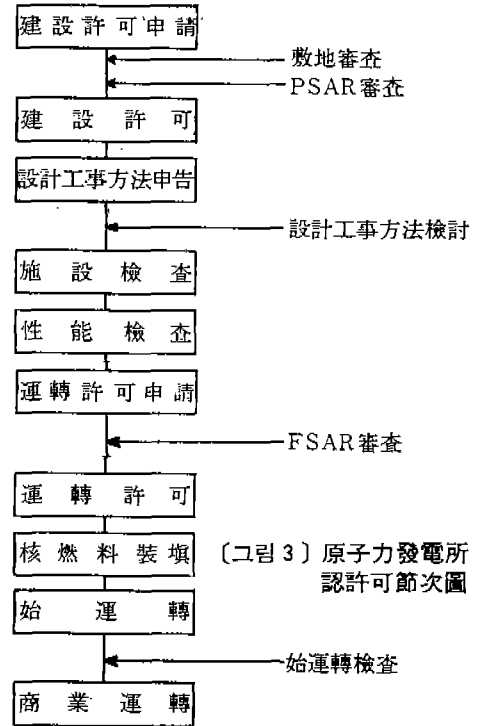
또한 格納容器에는 스프레이設備가 있어 事故時 格納容器內 蒸氣를 冷却凝縮시켜 內壓를 減少시키고 沃素를 스프레이水滴에 吸着시키는 役割을 한다. 만일 氣體中의 放射性物質이 格納容器 밖으로 放出되는 경우를 假想하여 高性能의 필터장치 등을 두어 철저히 淨化시키도록 한다.

그밖에 原子力發電所에는 建物內는 勿論 周圍의 放射能을 監視하는 施設이 具備되어 있으며 運轉中 發生하는 放射性廢棄物을 法的 基準에 滿足하도록 處理處分하는 施設이 갖추어져 있다.

3. 安全規制活動

原子力發電所의 建設과 運轉은 徹底한 安全性이 確保되어야 하기 때문에 電力事業者에게만 委任할 수 없으며 政府가 國民을 保護하는 立場에서 安全을 規制하고 있다.

原子力發電所의 安全規制는 “原子力法”, “原子爐의 建設 및 運營管理規定”, “原子爐施設의 技術基準 및 保安措置規定” 등의 法的 뒷받침에 의하여 科學技術處가 遂行하고 있다. 實務는 科學技術處 內의 原子力安全局이 主管하며 科技處次官이 委員長인 “原子爐施設安全審査委員會”가 技術的 諮問役割을 하고 있다. 그리고 實際 技術問題의 解決은 原子力研究所가 크게 功獻하고 있다.



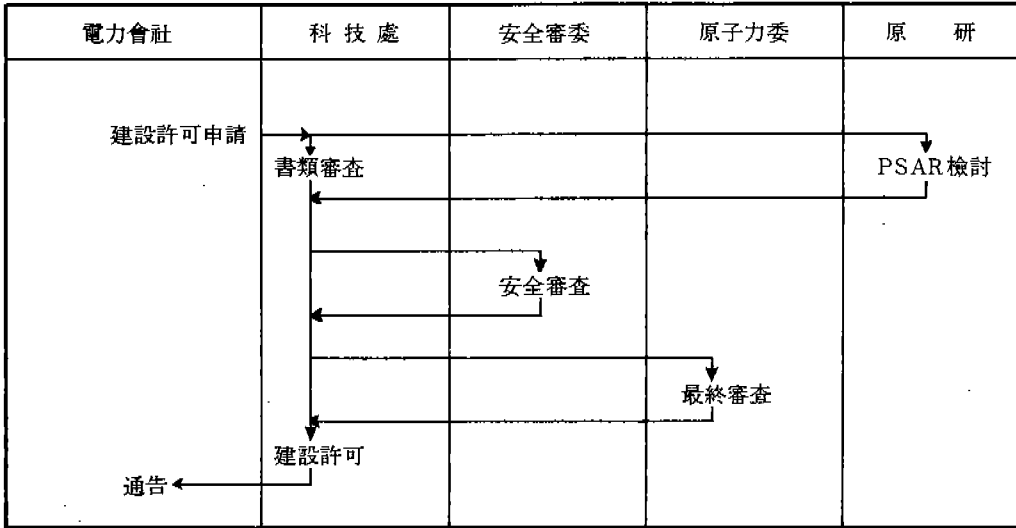
(그림 3) 原子力發電所 認許可節次圖

原子力發電所의 建設, 運轉에는 安全規制上 要求되는 認許可節次가 있으며 (그림 3)과 같다. 電力事業者(우리 나라의 경우 韓國電力株式會社)가 原子力發電所를 設置, 運營하려면 먼저 建設許可를 받아야 한다. 建設許可를 위하여 敷地에 대한 環境報告書와 豫備安全分析報告書(PSAR라 略稱)를 添付한 建設許可申請을 規制機關에 提出하면 專門家에 의해 安全性을 審査받는다. 審査에는 敷地條件을 비롯하여 原子爐系統, 安全設備, 放射線管理, 核燃料取扱, 運轉管理, 要員確保 등이 安全性의 見地에서 檢討되는데 約 20個 分野의 專門家가 動員되어 數個月이 걸린다.

專門家들의 檢討가 끝나면 (그림 4)와 같이 原子爐施設安全審査委員會의 審議와 原子力委員會의 議決을 거쳐 科學技術處長官이 建設許可를 發給한다.

建設工事中에는 主要施設(보통 10餘個 施設로 分割)마다 事業者는 規制機關에 設計 및 工事方法에 대한 申告를 하여 工事が 設計대로 進

[그림 4] 原子力發電所 安全審査節次例



行되고 있는가를 點檢받는다. 또 主要施設の 工事が 끝날 때마다 施設檢査가 進行되며 完成된 系統에 대해서는 性能檢査가 規制機關 主導下에 이루어진다.

建設工事が 完了될 무렵 事業者는 最終安全分析報告書(FSAR라고 略稱)를 添付하여 運轉許可를 申請하며 이에 따라 다시 한번 専門家에 의해 安全性이 檢討된다. 이 段階에서는 建設工事が 安全設計대로 이루어졌는가, 安全運轉對策이 充分히 樹立되었는가를 點檢받는다. 이것이 認定되면 建設許可時와 同一한 節次에 의해 運轉許可가 發給된다. 運轉許可를 得하면 核燃料가 裝填되고 被期運轉試驗을 거쳐 商業發電에 들어간다.

原子力發電所의 安全性을 記述한 安全分析報告書에는 發電所一般, 敷地特性, 構造設計, 原子爐設計, 冷却材系統, 安全設備, 計測制御系統, 電氣系統, 補助施設, 動力變換系統, 放射性廢棄物管理, 放射線管理, 運轉管理, 初期運轉試驗, 事故解析 및 品質保證계획 등이 包含된다.

敷地特性에 대해서는 地理, 人口分布, 隣接産業施設, 氣象條件, 水文學的條件, 地質, 地震學的分析 등이 記述되는데 특히 地質이 原子爐

構造物의 安全性을 유지하는데 適合하며 地震의 영향如否에 대하여 깊이 檢討하게 된다.

原子爐系統의 構造設計, 原子爐設計 및 冷却材系統에 대해서는 設計에 適用되는 基準 및 規格, 耐震設計基準, 飛來物防護에 대한 고려, 原子爐心の 熱水力學的設計, 蒸氣發生器의 改良設計(加壓輕水爐의 경우) 殘留熱除去系統의 安全設計 등이 強調되어 檢討된다.

安全設備에 대하여는 前述한 非常爐心冷却系統 및 格納容器에 대한 設計內容이 注意깊게 分析된다. 計測制御系統에 대해서는 安全保護系統의 設計基準에 重點을 두며 電氣系統은 非常電源設備가 強調되어 檢討된다.

補助施設에 대하여는 核燃料取扱裝置, 火災防護裝置가 重點적으로 檢討되며 動力變換系統에 대해서는 주로 主蒸氣 및 給水系統에 대한 安全性이 다루어진다.

放射性廢棄物管理에서는 氣體, 液體 및 氣體廢棄物의 處理施設이 適切한가를 檢討하며 放射線管理에서는 各種 放射線監視裝置의 適切如否가 檢討된다.

安全分析報告書에서 核心部分이라고 할 수 있는 것은 事故解析으로서 이것은 考慮되는 各種 事故에 대하여 充分히 核燃料가 安全하게 保存

되어 放射能이 漏出됨이 없음을 證明한 解析報告書이다. 여기서 考慮되는 各種 事故中 主要한 것을 들면 主蒸氣管破裂, 動力喪失, 冷却材 流動喪失, 冷却材喪失 등이다.

原子爐安全規制活動은 建設許可를 위한 安全 分析報告書의 檢討, 建設中의 設計工事點檢, 試驗檢査를 包含한 品質保證, 運轉許可를 위한 安全 性 分析 등이 主要 內容이며 勿論 運轉中에 도 定期檢査 등 安全性 點檢이 계속 遂行되고 있다.

4. TMI事故

原子力發電所의 安全性을 論함에 있어 TMI 事故에 대한 話題를 빼놓을 수는 없다. 지난 79 年 3月28日 美國의 TMI(Three Mile Island) 原子力發電所 第2號機에서 일어난 事故는 豫 想치 못했던 일로서 이것이 준 衝擊은 原子力 安全의 再檢討의 契機를 만들고 있다. TMI 發 電所도 소정의 安全基準에 따라 設計되고 安全 設備가 갖추어져 있으며 建設과 運轉段階에서 美國原子力規制委員會의 安全規制를 받았던 것

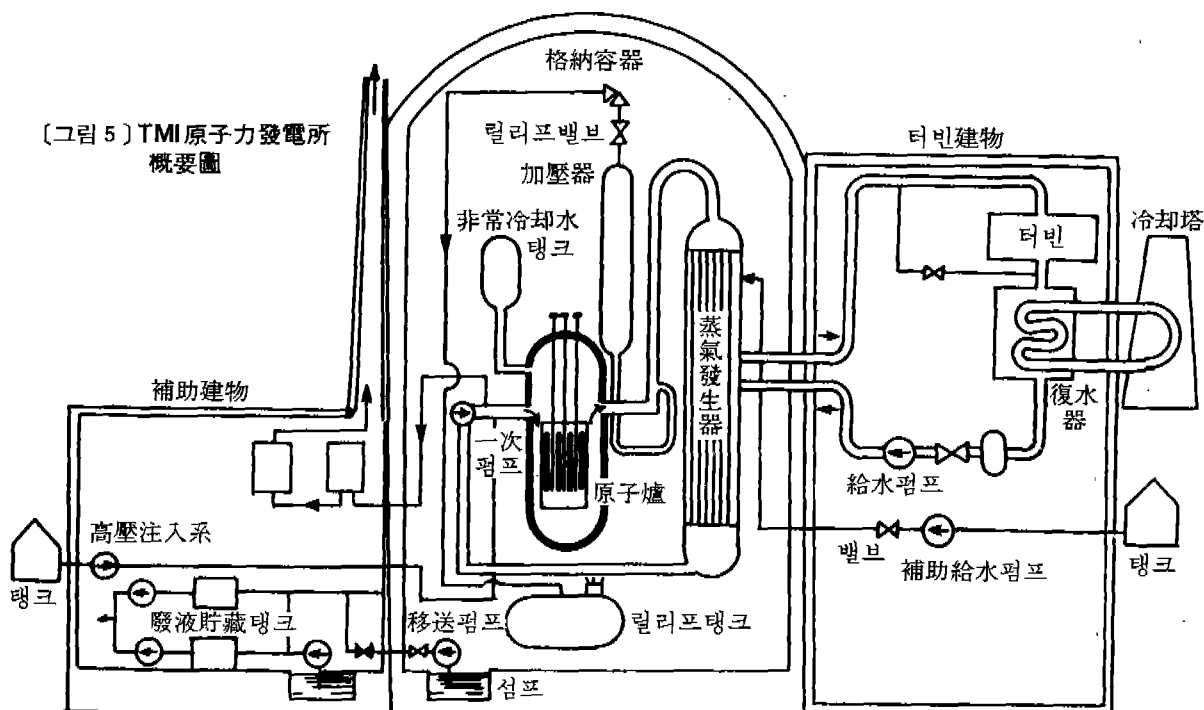
이다. 그렇기 때문에 이 事故가 收拾되었으며 放射能의 害를 防止할 수 있었다고 본다. 그러 나 安全分析에서 다루지 못했던 種類의 事故가 發生하였으며 事故收拾期間中 全世界의 原子力 界가 떠들썩 했던 것이다.

TMI事故의 原因과 經緯 등에 대해서는 이미 상세히 紹介되고 있어 여기서는 問題되는 6가 지의 事故誘導 原因에 대해서만 言及하기로 한 다.

① 2次系統의 補助給水系統의 作動이 遲延 되었다. TMI事故의 發端은 2次給水펌프가 故 障났을 때 補助給水펌프의 作動信號가 있었으 나 그 下流의 밸브의 閉鎖로 實際作動이 遲延 되었다. 여기서 問題되는 것은 2次給水펌프의 故障과 관련한 品質管理의 未備, 補修 後의 點 檢의 不完全, 中央制御室에서의 밸브開閉表示 設計의 缺陷 등이다.

② 自動作動하는 加壓器릴리프밸브가 닫혀지 지 않았다. 設計대로 열린 加壓器릴리프밸브가 設計대로 自動的으로 닫혀지지 않았으며 手動 으로 닫히기까지는 상당한 시간이 걸렸다. 問 題되는 것으로 릴리프밸브의 信賴性의 缺乏과

(그림 5) TMI 原子力發電所 概要圖



點檢의 不充分을 들 수 있다.

③ 非常爐心冷却系統의 高壓注入系를 早期에 閉鎖시켰다. 設計대로 自動作動된 高壓注入系를 加壓器의 水位가 上昇하였다고 判斷하여 注入을 끊었다. 冷却材喪失事故時의 應急操作指針의 不完全, 運轉員의 訓練 未熟이 問題된다.

④ 格納容器的 隔離가 早期에 이루어지지 않았다. 格納容器로부터 나가는 配管은 格納容器內壓이 4psi에 到達하면 自動적으로 閉鎖된다. TMI의 경우 約 4時間 後까지 이 隔離가 이루어지지 않았다. 加壓器릴리프밸브의 開放으로 인하여 冷却材가 格納容器的 바닥에 고여 이 때문에 섭프펌프가 自動作動되어 放射能을 가진 冷却材가 補助建物로 운반되었다. 設計대로 作動되었다면 設計에 ミス가 있다고 볼 수 있다.

⑤ 1次冷却材循環펌프를 停止시켰다. 터빈 停止 後 1時間과 2時間 사이에 4臺 있는 1次펌프에 캐비테이션이 일어나 4臺를 모두 停止시켰다. 冷却材의 確保라는 安全運轉의 基本原理에 어긋나는 運轉員의 誤操作이라고 指摘되고 있다. 펌프의 明確한 運轉操作要領이 마련되었어야 했다.

⑥ 加壓器의 水位에 重點을 두고 運轉이 이루어졌다. 加壓器는 爐內壓力을 一定하게 유지하는 役割 外에 그 水位에 의하여 爐內의 冷却狀態를 判斷한다. 平常運轉時는 液相임으로 信賴性이 充分하나 TMI事故와 같이 二相混合時는 水位計의 指示를 믿을 수 없게 된다. 이와 같은 경우의 加壓器水位를 中心으로 한 運轉方法의 定立과 水位計 以外의 計測으로 爐心冷却狀態를 判斷하는 方法도 있어야 할 것이다.

TMI事故를 分析할 때 原子力發電所의 安全設計에 缺陷이 있다기 보다는 機器의 試驗, 補修管理의 疎忽, 運轉의 誤判, 誤操行 등이 事故擴大의 要因이 되고 있다.

TMI事故를 契機로 輕水爐를 保有하고 있는 여러 나라에서 安全點檢이 實施되었으며 우리나라에서도 古里1號機에 대한 綜合的 安全點檢이 施行되었다. 多幸히 設計者가 다른 古里1號機에서는 TMI事故와 類似的한 事故는 일어날 수 없다는 結論을 내린 바 있다.

TMI事故 後 美國의 原子力規制委員會는 릴리프밸브性能試驗能力의 強化, 事故診斷을 위한 情報裝置의 補充, 格納容器隔離作動의 檢討, 事故時 水素制御系統의 設置, 事故時 放射線管理의 檢討, 補助給水系統의 自動化, 事故分析範圍의 擴大, 運轉員訓練의 強化, 事故時 非常節次的 改善 등을 포함한 24個 項目의 安全強化를 위한 短期的 勸告事項을 發表하고 있으며 또 大統領이 任命한 TMI事故調査特別委員會(委員長 케메니氏)의 報告書에서는 原子力安全規制體制의 改編, 運轉員訓練의 強化, 事故對策을 위한 技術評價의 確立, 防災계획과 對策의 樹立, 安全을 위한 放射線研究의 擴充 등이 勸告되고 있다.

TMI事故를 契機로 原子力安全은 더욱 다져나갈 것으로 믿는다.

5. 結言

우리 나라는 宿命的으로 賦存에너지源이 不足하여 原子力發電에 力點을 두고 있다. 지금까지 알려진 原子力發電계획에 의하면 2000년까지 48,000MW 電氣出力容量으로서 40餘基의 建設이 必要하다고 한다. 이 계획을 成就하려면 技術의 土着化, 機器의 國産化, 人力의 養成, 財源의 調達 등 많은 問題가 가로놓여 있는데 무엇보다 先行되어야 할 일은 技術面이나 管理面에서 完璧한 安全性의 確保라고 생각된다.