

原子力發電技術의 現況과 安全性

田 文 憲

<韓國科學院 核工學科·工博>

1. 序 論

現代人類社會가 直面하고 있는 가장 基本的인 挑戰은 에너지를 解決하는 問題이다. 人間이 어떤 目的을 達成하기위해 사용한 에너지와 人間의 生活水準과는 密接한 關係를 가지고 있다. 물레방아를 사용하던 原始的 生活로부터 原子力을 사용하는 高度의 文化生活에 이르기까지 1人當 에너지 消費量은 계속 증가되어 왔다.

歷史적으로 볼때 過去 2~3百年間을 除外하고는 우리의 主에너지源은 나무였다. 18世紀中葉부터 化石燃料가 나무를 代替 하였고, 또 最近까지는 油類가 石炭을 代替 하는듯 하였으나, 앞으로는 계속 原子力이 化石燃料를 代替하게 될 것이 틀림없게 되었다.

가까운 未來에 우리가 必要한 에너지 所要量을 推定하기 위해서 一般的으로 人口增加趨勢와 1人當 에너지 消費量을 基礎로 삼고 있다. 西紀 2千年頃에는 世界의 人口가 現在의 約2倍 即 60億에 達할 것으로 본다. 萬一 人口增加에 따라 계속 에너지의 需要가 增加한다면 西紀 2千年度에 가서는 現在보다 約2倍의 에너지가 必要하다는 結論을 얻게 된다.

化石燃料(即石炭, 石油 및 天然가스等)는 動物이나 植物이 1千萬年 내지 1億年前에 地下에 埋葬되어 형성된 것이므로 지금 埋葬된 化石燃料를 한번 써버리고나면 다시는 數百年內에 再生시킬 수 없는 것이다. 여러가지 推定에 의하면 化石燃料는 앞으로 빠르면 25年 늦으면 1~2百年

內에 모두 枯渴될 것으로 보고 있다. 여기서 重要한 點은 經濟적으로 採取할 수 있는 化石燃料의 量보다 이 化石燃料에 對한 世界의 總需要量이 훨씬 크다는 것이다.

지난 數年間 모든 先進諸國은 現在까지 사용하여 온 에너지源은 勿論 새로운 代替에너지를 開發하기 爲해 온갖 研究에 拍車를 加하고있다. 現在 또는 가까운 未來에 使用可能하게 될 것으로 期待되는 에너지源에는 (1)化石燃料, (2)水力, (3)風力, (4)潮力, (5)太陽熱에너지, (6)地熱, (7)核分裂에너지, (8)核融合에너지 등이 있다. 그러나 化石燃料는 덜지않아 枯渴될 것이고 其他 水力, 風力, 潮力, 太陽熱, 地熱等은 一部 地域에 限하여 利用可能하고, 大量으로 必要한 電力에너지源으로 使用하기에는 不適當한 것들이다. 한편 核融合反應에너지의 利用은 理論的으로는 可能한 것이나 實用段階에 이르려면 아직도 너무 어려운 問題들이 가르놓여 있으므로 現時點에서 볼때 大量으로 利用可能한 에너지源은 核分裂에너지를 利用한 原子力發電뿐이라고 할 수 있다.

人類가 가진 最初의 原子爐는 美시카고大學의 스퀘시(squash) 球場에 세워졌다. 이것은 黑鉛 덩어리로 만든 格子위에 우라늄산화物과 우라늄金屬을 쌓아놓은 것이었다. 이 原子爐가 人類史上 最初로 核分裂連鎖反應을 시작하게 된것은 1942年 12月 2日이었다. 其後 約 15年後인 1957年度에 最初의 商用原子力發電所가 펜실베니아 주 슈핑포트에서 稼動하기 시작하였다. 우리 나라에는 지난 1978年 4월에 古里 1號機가 竣工되

□ 解 說

어 現在 稼動中에 있다.

最初의 商用原子力發電所가 稼動하기 시작하여 20餘年을 지나는 동안 原子力發電技術上 많은 發展을 이룩하였으나 아직도 몇가지의 宿題를 남겨두고 있다.

특히 美國트리마일·아일랜드(Three Mile Island) 原子力發電所에서 일어난 事故는 原子力發電所의 系統設計上의 큰 잘못이 있었다기 보다는 그것의 管理와 運轉에서 失手, 誤判, 誤操作等이 겹쳐 일어난 事故임이 밝혀졌으나, 이 事故가 준 衝擊은 原子爐安全性에 關해 세밀한 再檢討의 契機를 만들었다.

그러면 다음에 이 原子力發電上의 基礎的인 概念을 먼저 簡單히 소개한다음, 原子力發電技術全般에 對한 現況과 그 安全性等에 關하여 考察하기로 하겠다.

2. 原子力發電에 關한 基礎概念

2.1 核燃料과 核分裂

世界의 에너지需要에 對處하는데 原子力이 어느 程度의 潜在力을 가지고 있는가를 가장 쉽게 理解하려면 다음과 같은 事實을 想起하면 될 것이다. U-235와 같은 核分裂物質 1kg는 石炭 2,700톤 또는 1萬2千배럴의 石油가 가진 에너지를 發生할 수 있다. 몇가지 推定에 의하면 核燃料 埋藏量은 約 1千6百萬噸(共產國家除外)로 알려져 있다. 또한 地球上에는 約 40×10^7 百萬噸의 우라늄과 토륨 混合物이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 經濟性이 있고 저렴하게 採取할 수 있는 우라늄은 30年내지 70年밖에 사용할 수 없는 量에 不遇한 것으로 보고 있다.

現在水準의 原子爐技術로는 1,000Mwe의 容量을 가진 熱中性子爐(Thermal Reactor)는 그 原子爐의 壽命이 다 할때까지 約 3千6百噸의 天然우라늄을 사용한다. 化學的 燃料反應을 하던 燃料과 酸素의 原子가 再配合하여 燃燒後 다른 分子를 형성하며, 이 燃燒過程에서 極히 少量의 質量이 에너지로 轉換된다. 그러나 核分裂反應時에는 더많은 比率의 質量이 에너지로 轉換되

고 또 核分裂을 일으킨 原子核은 分裂되어 다른 元素로 된다.

現在 核分裂에 適合한 元素에는 U-233, U-235, Pu-239, 및 Pu-241等 4個의 放射性物質이 있다. 이 4元素는 熱中性子에 依해서 核分裂을 일으키게 할 수 있는데 반하여, 同位元素인 U-238과 Th-232는 高速中性子에 依해서만 核分裂을 일으키게 할 수 있다.

核分裂性原子核이 中性子を 吸收하게되면 核分裂을 일으킨다. 即, 中性子が 하나더 들어오면 原子核속에 있는 中性子和 陽子사이의 內部힘의 均衡을 잃게된다. 이렇게되면 原子核이 2個의 가벼운 原子核으로 分裂되고 이때에 平均 2~3個의 中性子を 내어놓는다. 核分裂結果로 생긴 原子核과 中性子等 모든 質量의 合計는 核分裂前의 原子核과 中性子を 合한 質量보다 적는데, 核分裂前後의 質量差는 에너지의 型態로 나타나게 된다. 그 에너지의 量은 有名한 아인슈타인의 公式 $E=mc^2$ 으로 구할 수 있다.

萬一 核分裂結果로 생긴 2~3個의 中性子中에서 한個가 다른 核分裂性原子核에 吸收되면 앞에서 일어난 것과 같은 核分裂이 두번째로 일어나게 되며, 또 다른 中性子が 태어나 세번째의 核分裂을 일으키게 되어, 이 核分裂이 적어도 또 다른 하나의 核分裂을 일으켜 스스로 核分裂이 持續되는 現狀을 “連鎖反應”이라고 한다. 이와 같이 核分裂을 爲한 連鎖反應을 처음 일어나게 하고, 또 이 連鎖反應이 繼續하게 하기도 하고, 한편 이것을 願하는대로 調節할 수 있는 裝置를 “原子爐”라고 부른다.

核分裂連鎖反應에 依해 생기는 3가지의 重要한 結果는 다음과 같다. 첫째로 에너지를 얻을 수 있다. 이 에너지의 約 80%는 새로생긴 核分裂片과 中性子等の 運動에너지로 나타나게 된다. 한편 核分裂結果로 생긴 核分裂片과 中性子등은 核燃料, 構造物質等과 數많은 衝突을 일으켜 運動에너지를 잃고 熱의 形態로 내어놓게 된다. 둘째로 核分裂이 일어날때 放射線이 나타난다. 放射線은 電子나 히리움原子核 또는 純粹한 電磁氣의放射線의 形態로 나타난다. 原子爐에서 나

오는 放射線은 核分裂이나 核分裂片의 自然崩壞로부터 직접 나오는 것들이다. 安定原子核을 原子爐속에 놓아둠으로써 放射性同位元素(即, 不安定하고 放射성을 放出하는 同位元素)로 만들 수 있다. 原子爐속에서 中性子들이 安定原子核에 마구衝突하게 되어 原子核의 構造를 變化시킨다. 放射線은 生物器官과 모든 材料에 害를 주는 潛在力을 保有하고 있다. 그러나 適切히 利用하면 生物器官과 材料에도 極히 有用한 것이기도 하다. 放射線과 그 使用을 取扱하는 原子力工學의 한 分野를 同位元素技術(Radioisotope Technology)이라고 한다. 셋째로 核分裂을 일으킬 때에 내어놓은 中性子の 數는 全體의 核分裂過程에 重要한 것이다. 核分裂反應이 스스로 持續되려면(即, 連鎖反應을 일으키려면) 核分裂이 일어날 때마다 적어도 하나의 中性子が 나와서 다른 原子核에 衝突하여 核分裂을 일으켜야 한다. 核分裂結果 태어난 中性子들의 運命에 따라 核分裂反應이 未臨界(Subcritical), 臨界(Critical), 또는 超臨界(Supercritical)가 된다. 臨界狀態(Critical)란 單位時間當 核分裂反應이 一定한 率로 持續되는 連鎖反應을 말하며, 核分裂反應率이 점차로 減少되어가는 原子爐의 狀態를 未臨界라고 한다. 한편 核分裂反應이 점차로 增加되어가는 狀態를 超臨界라고 한다. 原子爆彈은 分明히 超-超臨界狀態(Super-Supercritical)이라고 할 수 있다.

2.2 原子力發電所의 主要部品

原子爐는 在來式 動力사이클의 보일러와 같은 것이다. 原子爐의 主要部品과 材料는 表 1에 간단히 要約한 바와 같다. 原子力發電所의 正常的稼動을 爲해 必要한 主要部品에는 다음과 같은 것이 있다.

(1) 原子爐와 核燃料棒 및 制御棒: 어떤 原子爐든지 中性子群을 調節하는 手段이 있어야 한다. 臨界反應을 爲해 必要치 않은 모든 中性子를 除去하는데에는 制御棒(Control Rod)을 사용한다. 制御棒은 中性子를 보다 많이 또는 보다 적게 吸收할 수 있도록 爐心內外로 移動시킬 수 있다.

(2) 冷却水: 核燃料棒內에서의 核分裂結果로 생긴 熱에 의해 加熱되어 궁극적으로 터빈을 作動시킬 水蒸氣를 發生케 한다. 이 冷却水는 核燃料棒의 熱을 繼續 除去하여줌으로써 核燃料棒이 過熱로 因해 破壞되는 것을 防止하여 주기도 한다.

(3) 蒸氣發生器: 高溫으로 加熱된 爐心冷却水는 이 蒸氣發生器속으로 흐르면서 二次系統으로부터는 低溫의 물에 熱을 傳達함으로써 蒸氣를 發生케 한다(특히 加壓輕水爐의 경우).

(4) 蒸氣터빈: 電氣를 發生하는 發電機를 回轉시킨다.

(5) 給水펌프: 물이 모든 系統을 순환하도록 하여 준다.

(6) 加壓器: 큰 貯藏槽로써 原子爐內의 冷却水를 高壓下에 維持함으로써 沸騰을 防止한다

表 1. 原子爐 主要部品과 材料

主要部品	材	料	機	能
核燃料	U-233, U-235, Pu-239, Pu-241		核分裂反應	
減速材	輕水, 重水, 탄소, 베리리움		高速中性子の 에너지를 減少시켜 熱中性子が 되게함	
冷却材	輕水, 重水, 空氣, CO ₂ , 헬륨(He), 나트륨(Na), 비스머스(Bi), 유기물		爐心を 冷却하고, 이때에 얻은 熱을 蒸氣發生에 사용함	
反材 減	減速材와 同一		中性子の 漏出을 最少限으로 하기 위함	
遮蔽材	콘크리트, 물, 鋼鐵, 납, 폴리에틸렌		放射線으로 부터의 保護	
制御棒	카드미움(Cd), 보론(B), 하프늄(Hf)		中性子の 發生率을 調節하기 위함	
構造物	알루미늄(Al), 鋼鐵, 지르코늄(Zr), 스텐레스鋼		原子爐構造物과 部品 및 燃料棒等을 持支하기 위함	

□ 解 說

(加壓輕水爐에만 있음). 加壓器의 한 例를 들면, 加壓器탱크안에 約 800ft³(22.7m³)의 물과 그위에 約 700ft³(19.8m³)의 水蒸氣를 保有한다. 加壓器의 水蒸氣壓力은 그 안에 있는 電氣加熱器에 依해 加熱 또는 冷却함으로써 調節하는 한편 爐心冷却水의 壓力은 加壓器의 水蒸氣壓力으로 調節한다.

3. 原子爐技術의 現況

3.1 原子爐型의 區分

原子爐의 用途는 (1)發電用, (2)研究訓練用, (3)醫學用 등이 있다. 또한 原子爐는 (1)核分裂로 얻은 中性子의 用途에 따라, (2)中性子群의 에너지分布에 따라, (3)核分裂母體物質(fertile material)의 轉換程度에 따라, (4)爐心物質의 離散에 따라, (5)燃料, 減速材, 被覆材 및 調節 등을 위해 選擇한 材料에 따라 여러가지 方法으로 區分할 수 있다. 다음에 特別히 核分裂을 일으키게하는 中性子의 에너지에 依해 原子爐를 區分하여 보겠다.

熱中性子爐(Thermal Reactor)는 原子爐의 爐心物質과 熱平衡을 이루고 있는 熱中性子(Thermal Neutron)에 依해 核分裂을 일으키도록 한 것이다. 오늘날 使用하고 있는 대부분의 商用原子爐는 이 熱中性子爐이다. 하나의 中性子が 부딪친 原子核과 서로 反應하는 確率을 中性子斷面積(Neutron Cross Section)"이라고 부른다. 우라늄(U-235)의 核分裂에 依해 생긴 中性子는 高速中性子이므로, 이것이 다른 U-235原子와 서로 反應할 確率은 아주 작다. 따라서 熱中性子爐에는 減速材를 使用하는데, 이 減速材는 中性子和 衝突하여 中性子의 에너지를 減少시켜 熱中性子로 만들어주기 위해(熱中性子는 U-235와 核分裂反應을 일으킬 確率이 크므로) 爐心속에 넣는 것이다. 優秀한 減速材는 中性子和 몇번 衝突하지 않아도 中性子의 에너지(即, 速度)를 減少케한다.

한편 "高速原子爐(Fast Reactor)"는 中性子의 速度를 減少시킬 必要가 없기 때문에 減速材

를 使用하지 않는다. 中性子의 平均에너지는 0.5Mev 내지 1.0Mev 程度인바, 이 程度의 높은 에너지를 가진 高速中性子는 많은 部分의 U-238과 Th-232를 核分裂性 Pu-239와 U-233으로 쉽게 轉換시킬 수 있다.

現在 우리가 使用하고 있는 熱中性子爐는 消費하는 量보다 極히 더 적은 量의 核分裂母體物質(即 U-238 및 Th-232)을 核分裂性物質(即, Pu-239 및 U-233)로 轉換시킨다. 따라서 이런 原子爐는 燃燒爐(Burner Reactor)라고 부른다. 現在 사용하고 있는 動力爐(Power Reactor)의 核分裂性物質로 轉換시키는 比率은 約 50%이다. 轉換比率이 100%以上 超過하는 原子爐는 "增殖爐(Breeder)"라고 할 수 있다. 高速中性子는 增殖을 可能케 하므로 우리가 保有하고 있는 莫大한 토리움-232와 우라늄-238을 核燃料로 轉換시켜줄 可能性을 가지고 있는 것이다.

3.2 商用動力爐의 種類와 그 技術現況

商用動力爐中 特別히 (1)加壓輕水爐(Pressurized Water Reactor), (2)沸騰輕水爐(Boiling Water Reactor), (3)加壓重水爐(CANDU-Pressurized Heavy Water Reactor)와 現在 開發完了段階에 있는 두 爐型, 即 (4)高溫氣體爐(High Temperature Gas-Cooled Reactor), (5)高速增殖爐(Fast Breeder Reactor)等 5개의 重要爐型만을 選擇하여 그 作動原理와 特性 등을 簡單히 考察하겠다.

(1) 加壓輕水爐(PWR) : 加壓輕水型原子爐는 美國에서 가장 많이 使用되고 있는 動力爐이다. 이 爐型의 有名메이커에는 웨스팅하우스社와 콰버스온·엔지니어링社 및 B&W(Babcock and Wilcox)社 등이 있다. 우리나라에서도 현재 稼動中인 古里 1號機를 비롯하여, 앞으로 建設計劃中인 原子爐는 月城 1號機를 除外하고는 모두 加壓輕水型이다. 여기에 使用하는 核燃料은 우라늄-235의 含有量을 2~4%程度로 濃縮한 酸化우라늄위에 지르칼로이로 被覆한 것이다. 燃料被覆은 核燃料속에서 생긴 核分裂生成物이 漏出하지 못하게 하고, 核燃料과 冷却材等과 反應

하여 腐蝕을 防止하기 위해서이다. 爐心內의 壓力은 冷却材의 沸騰을 最少限으로 줄이고, 高溫의 冷却材를 얻기 위해 2,150 psia의 壓力下에 維持하고 있다.

爐心全體가 格納容器안에 있고, 爐心을 통해 위로 흐르는 高溫冷却水는 2個 또는 4個의 蒸氣發生器로 흘러들어 간다. 한편 2次系統冷却水는 蒸氣發生器內에서, 爐心으로부터 나온 高溫의 1次系統冷却水로부터 熱을 받아 蒸氣로 되어 蒸氣터어빈으로 들어간다. 蒸氣터어빈은 發電機를 回轉시켜 發電을 하게 된다. 蒸氣發生器로부터 나온 冷却된 1次系統의 冷却水는 1次冷却材펌프에 의해 冷却水管을 통해 다시 爐心속으로 들어가고, 한편 터어빈 復水器에서 回收된 蒸氣는 機關의 效率를 向上시키기 위해서 再熱器를 거쳐 復水器펌프에 의해 蒸氣發生器로 들어간다.

加壓輕水型爐의 熱效率는 典型的 火力發電施設의 效率 42%보다 훨씬 낮은 34%程度이다. 이 加壓輕水爐의 效率는 過熱蒸氣를 얻을 수 있는 貫流蒸氣發生器(Once-through Steam Generator)의 開發을 통해 높일 수 있다.

이 爐型의 問題點은 主要原子爐製作會社가 擇하고 있는 U-字型管 蒸氣發生器에 있는 것 같다. 數年間 使用하고나면, 蒸氣發生器內의 많은 U-管이 腐蝕하여 破壞되고 막히게 된다. 이것을 解決하는 한 方法은 U-管대신 垂直管을 사용한 蒸氣發生器를 사용하는 것이다.

加壓輕水爐에 사용하는 核燃料는 上述한 바와 같이 若干濃縮한 우라늄을 사용하므로, 濃縮施設과 核燃料再處理施設을 갖추지 못한 우리나라로써는 燃料供給을 全的으로 外國에 依存하지 않을 수 없는 것이 하나의 큰 短點이라고 하겠다.

(2) 沸騰輕水爐(BWR) : 이 爐型의 唯一한 製作會社는 제너럴 엘렉트릭社이다. 輕水를 減速材와 冷却材로 사용한다는 點에서는 加壓輕水爐와 같으나, 爐心系統의 壓力이 加壓輕水爐의 절반程度인 1,000 Psia이고, 冷却水가 爐心안에서 沸騰할 수 있게 한點이 다르다.

爐心속에서 發生시킨 蒸氣로 直接 터어빈을 作動시킬 수 있고, 壓力이 比較的 낮으므로 加壓

器도 필요없고, 格納容器도 加壓輕水爐에 比해서 얇은것을 사용할수 있다. 그러나 爐心의 冷却材를 순환시키는 제트펌프와 蒸氣乾燥器系統 때문에 格納容器가 PWR보다 더크다.

原子核物理學의 側面에서 보면 負의 溫度係數 때문에 極히 安全하다. 即, 出力增加(이로 인한 溫度의 增加)는 原子爐의 核分裂反應度를 減少케 한다. 그러나 이 爐型도 加壓輕水爐와 마찬가지로 터 復水器管의 破壞등과 같은 部品故障이 일어나기 쉽다. 復水器에 사용한 材料는 애드미럴티(Admiralty), 스테인레스鋼-304(또는 306), 알루미늄-부론즈(Al-Bronze), 銅-니켈(90-10 Cu-Ni) 및 티타늄(Titanium)등인바, 이들 材料의 輕水와의 化學作用은 自然복잡하고 만족할만한 해결방법도 아직 없는 실정이다.

이 輕水爐의 持續的인 成功을 위해서는 현재 사용되고 있는 材料와 輕水와의 化學作用에 關한 지식의 축적은 물론 熱交換器의 極甚한 振動等을 除去하는데에 있다고 하겠다.

(3) 칸두型加壓重水爐(CANDU-PHWR) : 이 爐型은 캐나다에서 開發하여 商用化하는데에 成功시킨 것으로 重水를 減速材로 사용한 唯一한 原子爐이다. 重水의 中性子 減速能力은 輕水の 1.425인데 比하여 不過 0.177이다. 그러나 中性子 減速能力의 참된指數는(即, 熱中性子核分裂有效度를 測定할 수 있는指數는) 減速比率(Moderating Ratio)인 바 重水는 4,830인데 比하여 輕水는 불과 62이다. 따라서 칸두型 加壓重水爐에서는 우라늄을 濃縮하지 않고 天然우라늄을 그대로 核燃料로 사용한다. 核燃料集合體는 比較的 작은 28個의 燃料棒으로 되어있다. 이 燃料는 減速材인 重水가 들어있는 칼란드리아(Calandria)라고 부르는 큰탱크를 통과하는 水平으로 된 壓力管속에 裝填한다.

加壓輕水爐에서는 單一大型의 鋼鐵壓力容器(Steel Pressure Vessel)를 사용하는데 反하여, 칸두型加壓重水爐에서는 많은 數의(例하면 月城 1號機는 380個)의 壓力管(Pressure Tube)을 사용하고 있다. 한편 蒸氣發生器는 加壓輕水爐에서와 같이 U-字型管으로 된것을 사용한다. 또

□ 解 說

한 水平으로된 燃料棒과 冷却管을 사용하므로써 美國의 輕水爐에서는 不可能한 稼動中核燃料交替가 可能하다.

原子爐의 制御는 一般的인 制御棒과 減速材인 重水의 水深調節等에 依한다. 原子爐의 신속한 停止를 하기 위해서는 減速材貯藏槽가 있다. 콩크리트로된 格納容器는 眞空狀態의 建物에 連結되어 있어 格納容器的 壓力이 增加되면 蒸氣를 吸入하여 壓力을 減少시킬 수 있게 되어 있다.

특히 칸두型加壓重水爐는 天然우라늄을 燃料로 사용할 수 있기 때문에 우라늄濃縮施設과 核燃料再處理施設을 保有한 先進諸國에 依存하기를 願하지 않는 發展途上國家에게는 無척 매력을 주는 爐型이다. 이 爐型의 또하나의 特徵은 原子武器用 푸르토늄-239를 効率的으로 生産할 수 있다는 點이나, 實은 動力爐로써도 가장 優秀한 原子爐型中의 하나이다.

(4) 高溫氣體冷却爐(HTGR) : 初期의 氣體冷却爐는 天然우라늄을 核燃料로, 黑鉛을 減速材로, 2酸化炭素를 冷却材로 사용하고, 마그녹스(Magnox) 합금을 核燃料의 被覆材로 사용하여 왔으나(소위 마그녹스 原子爐), 最近의 高溫氣體冷却爐는 헬륨을 冷却材로 하고 金屬材대신 도자기類를 燃料被覆材로 사용한다. HTGR는 高濃縮우라늄(93%)을 사용하고 있어 濃縮施設이 필요하나 토리움(Thorium) 싸이클에 依存하기 때문에(即, 토리움-232로부터 核分裂性物質인 우라늄-233으로 轉換하여 준다) 그 需要量의 半에 불과하므로 우라늄資源을 節減할 수 있다. 그러나 美國(即, Gulf General Atomic社)에서는 그 商用爐開發過程에서 技術的인 問題에 昉착한 經驗을 가지고 있다.

高溫氣體冷却爐의 長點은 2,400 psi의 壓力下에서 約 1,000 °F(538°C)의 過熱蒸氣를 얻을 수 있어, 全體熱効率は 42%로 다른 熱中性子爐型에 比해서 높고, 오늘날 사용하는 가장 効률이 좋은 新銳火力發電所의 그것과 거의 같다. 또 冷却材 溫度가 높기 때문에 發電目的以外에도 製鐵工業 및 各種化學工業等の 産業用 熱源으로 사용할 수 있는 點이다.

(5) 高速增殖爐(FBR) : 只今까지 開發하여온 增殖爐型에는 4個의 爐型 即, “液體金屬冷却高速增殖爐(Liquid Metal Fast Breeder Reactor)”, “氣體冷却高速增殖爐(Gas Cooled Fast Breeder Reactor)”, “液體鹽冷却增殖爐(Molten Salt Breeder Reactor)”, “輕水增殖爐” 등이 있다.

한個의 核分裂物質(U-235)이 中性子를 吸收(即燃燒)하므로써 生成되는 새로운 核分裂物質(Pu-239, Pu-241)의 量이 1보다 크도록 設計된 原子爐가 增殖爐이다. 增殖効率(Breeding Ratio)과 增殖率(Breeding Gain)은 核分裂을 일으키게 하는 中性子の 平均에너지가 커질수록(約 0.1 Mev 이상일 때) 增加한다. 따라서 高速中性子群을 連鎖反應에 사용하는 高速增殖爐에서는 熱中性子爐(Thermal Reactor)와는 달리 減速材를 사용하지 않으므로(中性子の 平均에너지는 0.1내지 0.5 Mev에 이른다) 爐心과 爐心주위(爐心주위에는 濃縮 U-235와 Pu-239를 두고, 그 주위에 토리움, 天然우라늄 또는 既사용 燃料를 둔다)에는 燃料棒과 冷却材만이 있다.

現在와 같이 단순히 U-235의 核分裂에만 依存하는 熱中性子爐(PWR, BWR等)는 天然우라늄의 99%를 燃料폐기물(Waste depleted uranium)로 버리게 하나, 增殖爐는 우라늄 에너지의 60%를 회수할 수 있으므로 우라늄 1톤으로부터 石炭 2百萬톤에 相當한 에너지를 얻을 수 있다. 이와같이 增殖爐의 매력은 限定된 核燃料資源을 그 이상으로 活用할 수 있다는 點이다. 即, 現在와 같이 熱中性子爐만을 사용한다면 30年 내지 70年程度밖에 사용할 수 없는 天然우라늄을 數 10世紀 연장할 수 있다.

지난 25年間 世界各國의 LMFBR開發努力結果가 商用化할 수 있는 단계에 이르렀다. 그중 佛蘭서의 LMFBR計劃이 가장 成功的이었다고 볼 수 있다. 即, 1973年 稼動을 시작한 250 Mwe의 페닉스(phenix) 시범發電所는 우수한 加동실적을 보여주고 있다. 이 液體金屬冷却高速增殖爐에서는 熱傳達係數가 높은 液體金屬(나토륨)을 冷却材로 사용하여 熱効률도 增大시키고 있다. 現在까지는 Na(나토륨)가 最適의 冷却材로 알려져

으나, Na는 酸化作用과 휘발성 및 물과 化合物 때 爆發性이 極烈하므로 1次冷却系統에 특수한 遮蔽를 要하고, 熱交換器와 蒸氣發生器 등의 製作에도 큰 問題가 된다.

4. 原子力發電所의 安定性

4.1 原子力發電所의 問題點

原子力發電所의 經濟的인 利點은 原子力發電에 수반하는 여러가지의 問題로 因해 直接間接으로 影響을 받고 있다. 가장 重要한 問題의 例를 들면 (1)安全性的의 問題, (2)核燃料 燃燒率의 向上問題, (3)使用한 核燃料의 輸送, 貯藏, 再處理의 問題, (4)放射性 廢棄物의 處分問題, (5)우라늄 原鑛確保의 問題, (6)核武器擴散과의 關聯問題等이다. 그외에도 蒸氣發生器와 復水器管의 破損에 依한 漏泄의 問題等도 앞으로 根本的인 解決을 要하는 것들이다. 다음에 위와같은 여러가지 問題中 特히 安全性에 關하여서만 考察하기로 하겠다.

4.2 原子力發電所의 安全性

原子力發電所의 固有한 特徵은 水力 및 火力發電所와는 달리 많은 量의 放射性物質 即, 核分裂生成物을 갖고있다는 점이다. 따라서 原子力發電所에서 特히 유의해야 할점은 正常稼動時는 물론 事故가 發生하였을 경우에도 原子爐系統에서 放射線이 流出되지 않도록 모든 措置를 취하고, 이에 對한 對備策을 강구하는 일이다.

(1) 多重防護의 概念: 原子力發電所로부터 放射能의 漏出을 防步하기 위해서 原子力發電所는 多量防護의 理念을 導入하여 設計되었다. 이 防護壁은 核燃料나 그타 모든곳으로부터 나오는 放射性原子의 通路를 막기위한 여러가지 遮斷線을 뜻하며, 一般的인 原子爐의 放射線遮斷線에는 다음과 같은 것이 있다.

第一遮斷線은 核燃料이다. PWR와 BWR의 燃料棒에 있어서는 原子爐 運轉中에 生成되는 大部分의 放射性物質은 UO_2 로 되어있는 核燃料안에 그대로 남고, 그밖의 가스도 核燃料펠레트

(Pellet)안에 갇히게 된다.

第二遮斷線은 燃料被覆材이다. 核分裂가스의 누출을 防止하고 燃料 表面가까이에서 나오는 核分裂生成物을 가두기위해 核燃料를 被覆材로 감싼다.

第三遮斷線은 原子爐容器와 閉鎖冷却材回路이다. 모든 最新動力爐의 一次冷却系統은 한個以上の 폐쇄循環經路로 되어있어, 萬一 被覆材가 파괴되어 氣體放射性物質이 새어 나오드라도 冷却材에 依해 回收되어 一次冷却系統안에 갇히게 된다. 또한 原子爐容器(Reactor Vessel)는 放射能 流出을 防護하기 위한 것이므로 가장 嚴格한 品質과 신뢰도 標準에 맞도록 設計되고 製作된 후 檢査를 거친다.

第四遮斷線은 格納容器(Containment Vessel)이다. 原子爐의 모든 一次系統은 格納容器안에 收容되는데 密閉된 이 格納容器는 비단 放射性物質이 大氣로 流出되는 것을 防止할 뿐 아니라, 外部로 부터의 추락물이나 그타 衝擊으로부터 原子爐系統을 安全히 保護하는 역할도 한다. 放射線을 위한 物理的防壁에 關한 限, 格納容器가 最後의 防禦線이다. 따라서 어떠한 重大事故時에라도 이 格納容器만은 崩리지 않도록 設計·製作되고 또 유지 되어야 한다.

第五遮斷線은 原子力發電所敷地의 位置(Site Location)이다. 放射線에 對한 物理的 防禦는 第四遮斷線인 格納容器가 最後이나, 이것까지도 무너지는 最惡의 경우에 對備키위해 原子力發電所는 半徑 7百~1千m를 撤去區域으로 하여 住民의 居住를 禁하고, 또한 原子力發電所의 敷地는 人口稠密地域으로부터 멀리 떨어지게 하는 것이 原則이다.

(2) 三段階安全對策: 放射能 누출防止를 위한 多重防護概念은 原子力發電所 設計의 基本이다. 機器의 故障, 運轉員의 誤操作 또는 自然現狀에 依해 非常事態가 發生하여도 各防護壁이 무너지지 않도록 美原子力規制委員會에서는 三段階 安全對策을 安全理念으로 삼고 있다. 各段階의 戒律은 다음과 같다.

第一段階의 戒律은 正常運轉을 가장 安全하게

□ 解 說

하고, 系統故障에 對한 安全餘裕度도 最大가 되도록 設計하고, 安全運轉에 가장有利한 設計方法을 사용한다. 即 品質, 重複性, 檢査의 용이도 및 稼動前과 稼動期間中의 試驗의 容易度等을 強調한다.

第二段階의 戒律은 設計, 製作 및 運轉에 세심한 注意를 하였더라도 各種 事故가 發生할 것이라고 假定하고, 이러한 事故가 일어났을 경우 運轉員과 住民을 保護하고, 被害를 防步하거나 또는 最少限으로 하기위해 安全施設을 갖춘다.

第三段階의 戒律은 事故時에 사용할 安全防護施設에 故障이 났을때와 같은 極甚한 假想의 事故의 影響을 評價한後 이를위해 安全施設을 追加設置한다.

(3) 設計基準: 美國의 경우 原子力規制委員會에서는 위에서 말한 安全理念을 바탕으로하여, 原子力發電所의 安全한 運轉에 關聯되는 重要한 모든 構造物과 系統 및 部品들에 對한 設計, 組立, 建設, 試驗 및 性能條件等을 確立하는 一般의 設計基準을 制定하여 聯邦規制法規(Code of Federal Regulation의 10CFR50의 부록A)속에 포함시켜 있다.

(4) 工學的 安全設備: 實際로 建設된 모든 動力原子爐는 工學的 安全設備系統을 갖고 있다. 다만 그 特徵과 機能은 施設의 設計에 따라 多少 相異할 뿐이다. 例하면 “非常爐心冷系統”의 명칭하에 여러가지의 工學的 安全設備系統이 갖추어져 있다. 이것은 冷却材 상실事故時에도 爐心을 충분히 冷却시킬수 있도록 冷却材를 供給하여주는 機能을 갖고 있다. 其他 다른 工學的 設備에는 原子爐의 急速한 정지를 可能케 해주고, 爐心冷却材 누출로 因한 格納容器內의 放射能과 壓力等을 減少케 해주는 것 등이 있다.

(5) 重大事故 確率: 美原子力規制委員會의 “美商用原子力發電所事故危險의 評價(1975年 WAS H-1400)”란 研究報告書에 依하면, 原子力發電所의 潛在的 事故가 一般住民에게 줄수있는 危險은 다른 原因에 依한것보다 훨씬 적은 것임을 보여주고 있다. 이러한 結論은 다음과같은 事實에 根據를 두고 있다.

첫째로 原子力發電所의 潛在的 事故가 줄수있는 被害는 다른 事故에 依한 것보다 훨씬 적은 것임을 보여주고 있다.

둘째로 同一量의 被害를 초래할 事故를 比較할때, 原子力發電所의 事故發生確率은 다른 事故 即, 火災, 폭발, 毒性化學物質의 流出, 堤防의 破壞, 비행기 추락, 지진, 폭풍, 선풍 등의 發生確率보다 적다.

또한 1980年代에 100基의 原子爐가 同時에 稼動할때, 이것이 주는 事故의 危險과 人工的 또는 自然的災害가 주는 危險과를 比較한 것을 보면 다음과 같다.

첫째로 많은 人命被害를 초래할 可能性은 다른 種類의 事故에 依한 것이 原子發電所 事故에 依한 것보다 約 1萬倍 더크다.

둘째로 同一額의 損失을 가져올 事故를 比較하여보면, 原子力發電所의 事故發生確率은 다른 要因으로 因한 事故發生確率의 1000分之 1에 不過하다.

5. 結 語

지금까지 序論에서는 化石燃料과 其他 여러 代 替에너지의 限界性에 비추어 原子力(특히 核分裂에너지)에너지 利用의 不可避性을 지적하였다. 이어서 本論에서는 原子力發電에 關한 가장 基礎的인 概念을 紹介하고, 또 原子爐技術의 現況과 原子力發電所의 安全性에 對하여서도 簡單히 考警하였다.

原子力發電所는 放射能을 漏出하고 廢熱을 放出하기 때문에 潛在的 危險性을 갖고 있음은 否認할 수 없다. 그러나 모든 에너지轉換裝置는 체계물을 내어놓게 마련이다. 특히 石炭火力發電所는 CO₂, SO₂, 粉塵等을 放出한다. 各種研究 結果와 實例를 綜合하여 보면 公害要素 放出面에서 뿐만아니라, 資源活用 및 國家經濟的 側面에서도 原子力發電은 在來式 石炭 및 石油火力發電보다 훨씬 優秀함을 알 수 있다.

原子力發電施設과 모든 關聯技術도 앞으로 時間이 經過함에 따라 계속 進歩되어 熱效率의 增大는 勿論, 安全施設과 그타 放射能廢棄物의 處(378페이지에 次속)