

□ 日本最初の 營業用 原子力發電所 □

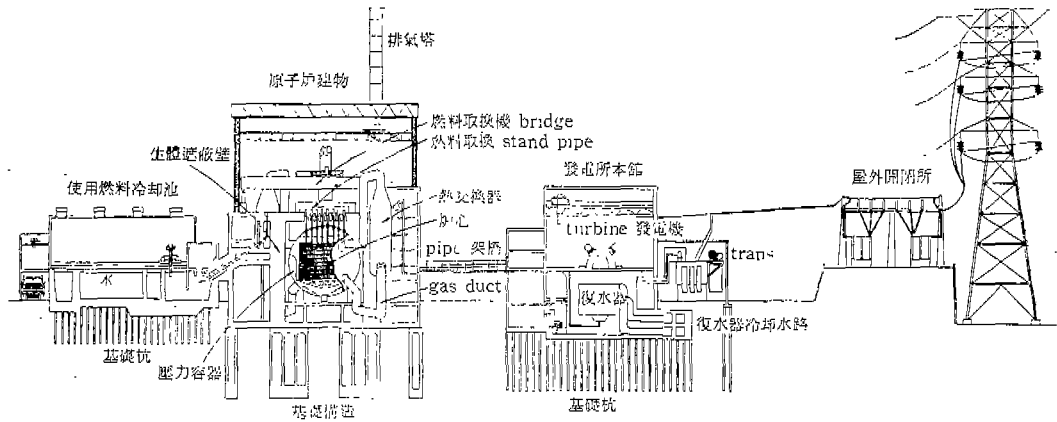
東海村(TOKAIMURA)原子力發電所 概要

<日誌에서 譯載>

1. 머리 말

日本 茨城縣(Ibaragi-Ken) 東海村(Tokaimura)라는 僻村, 茫茫한 太平洋 바다를 내다보는 松林의 хан子석에 日本 最初の 原子力發電所의 建設工事が 마

침내 竣工되어 巨大한 콘크리트 建物群이 近代的 偉容을 誇示하고 있다. 電氣出力 16萬6千Kw. 日本 最初の 實用規模의 原子力發電所로서 日本原子力發電會社가 英國의 GE社에 發注한 것이다. (第1圖)



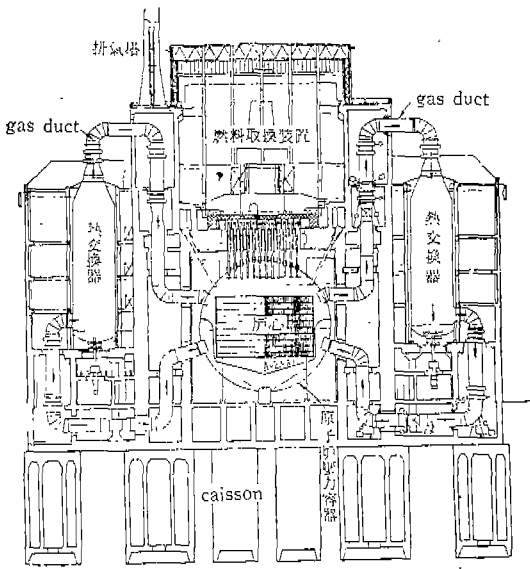
第1圖 東海發電所 斷面圖

이 發電所의 動力發生源인 原子爐는 所謂 Calder Hall 改良型이라고 하는 것인데 이것은 英國에서 1956年 10月에 完成된 以後 現在에 이르기까지 滿足한 運轉을 繼續하고 있는 Calder Hall 原子爐를 그後의 技術의 進歩에 따라 一層 經濟的이고 信賴性 있는 것으로 改良한 型인 것이다.

이 型의 原子爐는 核分裂을 이끄는 燃料로서는 天然 uran의 金屬棒을 使用하며 中性子の 速度를 減速하여 核分裂이 일어나기 쉽게 하기 爲한 減速材에는 黑鉛brick를, 또한 原子爐에서 核分裂에 依하여 發生하는 熱을 除去하기 爲한 冷却材에는 加壓된 炭酸가스를 使用하고 있다.

原子力發電所는 原子核이 分裂될 때에 發生하는 에너지를 熱의 形態로 抽出하고 그 熱을 利用하여 蒸氣를 生産하고 이것으로 터빈發電機를 움직여서 電氣를 發生시키는 發電所이다. 따라서 蒸氣를 生産하기 爲하여 原子力 에너지를 利用하는 것으로서 一旦 蒸氣가 生産된 以後의 過程은 在來式의 普通 火力發電所와 똑 같다고 생각하던 되는 것이다.

限定된 紙面으로는 東海發電所의 여러 모에 關하여 詳述할 수 없는 일이므로 그 心臟이라고도 말할 수 있는 原子爐(第2圖)를 焦點으로 하여 記述해 보기로 한다.



第2圖 原子爐 建物 斷面圖

2. 原子力에너지

化石燃料 即 石炭이나 石油를 燃燒시켜 얻어지는 에너지는 化學反應에 依한 에너지이며 1g의 燃料를 燃燒시켜 얻을 수 있는 에너지는 3~5 Kcal 정도이다. 化學反應에 있어서는 原子核 그 自體에는 何等的 變化가 일어나지 않으며 그 周圍의 電子가 相互反應할 따름이다. 이에 對하여 原子力에너지는 原子核 自體가 分裂할 때에 그 質量의 一部分이 消滅하고 그 代身에 發生하는 巨大한 에너지인 것이다.

Einstein의 有名한 公式 $E=mc^2$ 에 依하면 에너지는 質量에다 光速의 2乘을 곱한 것과 같다. 이 式에 依하여 質量을 에너지로 換算하여 보면 1g의 任意的 物質이 完全히 에너지로 變할 경우 그 値는 約 200 億 Kcal 이라는 膨大한 數字가 된다. 그러나 實際의 核分裂에 있어서는 極少部의 質量이 에너지로 變할 뿐이다. 1g의 uranium이 完全히 核分裂하여 發生하는 에너지는 約 2,000萬 Kcal 이므로 核分裂로 消滅하는 質量은 元 質量의 約 0.1% 정도임을 알 수 있다. 또한 1g의 uranium은 數噸의 石炭과 비슷한 程度의 일을 할 수 있는 潛在的인 힘을 가지고 있는 것도 알 수 있다.

3. 原子爐의 燃料

Uranium이 中性子를 吸收하여 核分裂을 일으키

면 常識的으로는 正確하게 두 쪽으로 쪼개지는 것으로 생각하기 쉽지만 實際에 있어서는 꼭 切半으로 쪼개지는 確率은 매우 적고 質量數 95 附近과 140 附近의 2개의 物質로 쪼개지는 確率이 가장 크다.

이러한 奇妙한 現象은 어째서 일어나는 것일까? 核分裂에 있어서는 2個 乃至 3個의 中性子が 새로이 放出된다. 이 中性子에는 核分裂과 同時에 放出되는 것과 核分裂 後 若干의 時間을 經過하여 放出되는 것이 있다. 中性子の 放出에 隨伴하여 普通 強力한 gamma線이 同時에 放出된다. 이들 中性子 및 gamma線은 都大體 어떠한 mechanism에 依하여 放出되는 것일까? 核分裂이라는 現象 그 自體는 매우 明確하게 認識되고 또한 그것이 實用的으로 利用되고도 있지만 그 속에 숨은 複雜한 mechanism에 關하여서는 아직도 未知의 點이 많고 깊은 수수께끼를 간직하고 있는 現狀인 것이다.

原子核은 plus의 電荷를 가지고 있는데 對하여 中性子는 電氣的으로는 中性이므로 原子核과 中性子 사이에는 電氣的인 相互作用은 일어나지 않는다. 따라서 速度가 빠른 中性子는 設使 uranium 原子核에 接近하더라도 그 옆을 빠져나가 버리기 때문에 核分裂反應을 일으킬 確率은 매우 적다. 이 反應을 일어나기 쉽게 하기 爲하여는 中性子를 減速시켜 줄 必要性이 생긴다. 中性子를 減速시켜서 그 平均 運動에너지가 媒質의 原子의 平均 運動에너지와 同一하게 된 것을 熱中性子라고 부른다.

原子爐의 原料로 使用하는 天然 uranium은 2個의 同位元素 即 99.3%의 uranium 238과 0.7%의 uranium 235를 含有하고 있다. 이 中에서 熱中性子에 依하여 核分裂을 일으키는 것은 uranium 235뿐이기 때문에 熱中性子를 利用하는 型의 原子爐에서 核燃料로서 直接 利用할 수 있는 것은 uranium 235뿐이라고 말할 수 있다.

天然 uranium을 使用하는 原子爐에서는 密度가 높은 uran金屬을 使用할 必要가 있다. 金屬 uranium에는 α 相, β 相, γ 相의 3個의 相異한 種類의 結晶體가 存在하고 있다. α 相의 金屬 uranium은 約 660°C 以下の 溫度에서 安定이 되며 그 密度는 19.0이다. 溫度가 660°C를 넘으면 α 相에서 β 相으로 相變位가 일어나고 結晶構造가 變化하여 密度가 18.1로 減少한다. 即 金屬 uranium의 溫度가 660°C 以上이 되면 그 體積이 突然 膨脹하여 困難한 問題가 發生하

기 때문에 이 種類의 原子爐에서는 燃料의 溫度를 660°C 以上으로 올릴 수가 없다.

α 相의 金屬 uran은 結晶方向에 따라 熱膨脹率이 相異하기 때문에 熱싸이클에 따라 漸次로 結晶方向으로 成長하는 現象이 일어난다. 이 効果는 結晶粒을 작게 하는 同時에 random組織으로 함으로써 이것을 避할 수 있으며 이것을 爲하여 特殊한 加工方法이 開發된 바 있다. 그리고 350°C 以上の 運轉溫度에서는 金屬 uran의 膨脹이 問題가 된다. 이것은 核分裂로 發生하는 가스가 燃料의 內部에 蓄積되고 擴散되어가는 것이 主要原因으로 생각되고 있는데 이 膨脹의 比率는 熱싸이클을 받음에 따라 커지는 것이다.

Uran 燃料에는 爐內에서 이와 같은 現象이 일어나기 때문에 東海發電所에서는 燃料가 平均 3,000MW/T 燃焼하는가 또는 爐內의 滯在期間이 5.年을 經過하는가 하면 새로운 燃料과 바꾸기로 되어 있다.

天然 uran 燃料은 日本에서는 民有가 認定되어 있으므로 日本原子力發電株式會社와 英國原子力公社 사이에 直接 購買契約이 이루어졌다. 最初에 裝入하는 燃料은 約 186噸이고 그 後에는 發電所의 負荷率을 80%로 하던 每年 約 57噸의 燃料가 必要하게 된다. 이것만을 보아도 原子力發電所의 燃料消費量이 石炭에 比하여 얼마나 微少한 것인가를 알 수 있다.

4. 燃料의 被覆

金屬 uran은 酸素와 激烈하게 反應할 뿐만 아니라 燃料의 內部에 發生한 放射性 核分裂生成物을 密封해 둘 必要가 있으므로 반드시 適當한 材料로 被覆하여 使用하고 있다. 이 被覆材는 高溫度에서 機械的 強度가 強하고 또한 中性子를 稀되게 吸收하지 않는 性質을 가질 것이 要望된다. 機械的 強度라는 點에서는 stainless steel이 좋다고 하겠으나 이것은 中性子를 稀되게 吸收하기 때문에 天然 uran의 被覆材로서 使用할 수는 없다. Aluminum은 比較的 良好한 被覆材이기는 하나 機械的 強度나 其他의 點에서 아직 不充分하다. 이리하여 magnesium 合金이 새로이 開發되었다. 이 特殊한 合金을 magnox라고 부르고 있다. Magnox의 融點은 650°C 附近인데 400°C를 넘으면 機械的 強度가 急激히 低下하기 때문에 金屬 uran과 密着시켜 이것과 行動을 같이 하도록 設計되어 있다. 따라서 使用溫度는 475°C 以下로 制限이 되어 있다.

Magnox를 高溫度에서 長時間 保持하는 경우에는 顯著한 結晶粒의 成長이 일어나며 結晶粒間에 微小한 空洞이 發生한다. 이 空洞의 發生은 200°C~400°C에서 最大이기 때문에 이 溫度로 長時間 保持되면 空洞이 連續되어 被覆을 貫通할 憂慮가 있다. 이 現象은 燃料要素의 壽命을 決定하는 重要한 要素이다.

5. 中空燃料의 採用

燃料의 內部에서 發生한 熱은 그 表面까지는 熱傳導의 形態로 傳播되고 그 表面에서부터는 熱傳達의 形態로 冷却에 依하여 運搬되어 간다.

燃料의 內部에 있어서의 中心에 가까울수록 溫度가 높아지고 있으므로 燃料의 制限溫度는 中心에서 일어나게 된다. 따라서 東海發電所의 原子爐에서는 中空燃料을 採用함으로써 燃料의 溫度制限을 緩和하고 原子爐의 比出力(燃料의 單位重量當 熱出力)을 增加시켜 經濟性을 높이기로 하였다. 中空燃料의 安全性에 關하여는 念慮할 問題가 없다는 展望이 있기는 하였으나 이것은 世界에서도 別로 例를 찾아볼 수 없는 것이었으므로 그 安全性과 信賴性을 實地로 確認하기 爲하여 照射試驗을 비롯하여 詳細한 燃料開發試驗이 實施되었다. Calder Hall 原子爐의 平均 比出力은 1.5MW/T이고 그 後에 英國에서 開發된 Calder Hall 改良型 原子爐의 平均 比出力은 2.1乃至 2.5MW/T이다. 이에 比하여 東海 原子爐의 平均 比出力은 3.15MW/T이므로 中空燃料을 使用하면 原子爐 比出力이 훨씬 커질 수 있음을 이로써 알 수 있다.

6. 爐 心

爐心은 黑鉛 block을 圓筒形으로 10層을 싸올려 만들고 있다. 使用한 黑鉛 block의 總數는 約 30,000個, 總重量은 約 1,500噸이다. 爐心の 直徑은 13.8m, 높이는 8.15m이다. 爐心에는 約 2,000個의 燃料 channel이 縱으로 貫通하고 있으며 各 channel에는 8本の 燃料要素가 들어 있다.

(1) 黑鉛의 性質

黑鉛은 中性子の 速度를 減速하는 減速材로서 使用되며 또한 爐心の 構造材料이므로 材質이 고르고 密度가 높으며 또한 不純物이 되도록 적을 것이 要求된다. 黑鉛은 高速中性子の 照射을 받으면 結晶을 構成하고 있는 炭素原子가 結晶 밖으로 튀겨져

나가고 그곳에 結晶格子의 空隙이 생긴다. 炭素原子는 結晶을 構成하고 있을 때에 가장 安定되고 結晶 밖으로 튕겨져 나간 原子는 不安定한 狀態이며 에너지 準位가 높은 狀態가 된다. 卽 黑鉛은 高速中性子の 照射을 받으면 에너지가 그 內部에 蓄積된다. 이 에너지를 Wigner energy 라고 부르고 있다. Wigner energy 가 過大하게 蓄積되면 結晶 밖으로 튀어나간 炭素原子가 다시 結晶格子의 空隙으로 되돌아가서 에너지를 放出하고 黑鉛溫度를 上昇시킬 危險性이 있다. Wigner energy 의 蓄積은 中性子束 密度가 높을수록 그리고 黑鉛溫度가 낮을수록 크다.

黑鉛爐에 있어서는 Wigner energy 가 過大하게 蓄積되기 前에 이것을 人爲적으로 放出시키는 裝置를 만들든가 또는 原子爐의 壽命期間 中 이 에너지가 自己解散하지 않도록 黑鉛의 運轉溫度를 높게 設計할 必要가 있다. 東海爐에 있어서는 冷却材의 爐心入口溫度는 約 200°C, 出口溫度는 約 390°C 이므로 이대로의 溫度狀態로는 爐心 下部에 Wigner energy 가 過大하게 蓄積될 可能性이 있다. 따라서 燃料要素에다 黑鉛의 sleeve 를 붙여 低溫가스가 直接 減速材인 黑鉛에 接觸하지 않도록 하고 黑鉛溫度를 250°C 以上으로 保持하게끔 設計되어 있다.

燃料要素에 黑鉛 sleeve 을 붙이면 이 밖에도 利點이 생기게 된다. 萬一 黑鉛 sleeve 가 없다면 channel 內의 燃料要素에는 各各 그 위에 있는 燃料要素의 重量이 걸리게 된다. 元來 燃料要素는 機械的強度가 弱하기 때문에 그 荷重을 勘耐할 수가 없다. 黑鉛 sleeve 가 붙은 燃料要素의 경우는 上部의 荷重은 黑鉛 sleeve 에 걸리고 燃料要素 自體는 自己의 重量만을 勘耐하면 足하다는 理致가 된다. 卽 燃料의 個別支持가 簡單히 可能한 것이다.

黑鉛은 炭酸가스와 反應하여 一酸化炭素를 發生한다. 이 反應은 可逆反應이므로 發生한 一酸化炭素는 再次 分解하여 炭素를 遊離시킨다. 卽 黑鉛은 一酸化炭素를 媒介로 하여 移動한다. 이 現象을 黑鉛의 質量移行이라고 부르며 溫度가 높을수록 그리고 放射線이 強할수록 質量移行의 比率이 커진다. 東海原子爐에 있어서는 溫度가 그다지 높지 않기 때문에 이 現象은 別로 問題가 되지 않는 것으로 看做되고 있다. 더욱이 channel 을 흐르는 冷却材는 黑鉛 sleeve 의 內側을 흐르며 直接 減速材와는 接

觸하지 않기 때문에 質量移行의 比率은 一層 적어 지는데 萬一을 爲하여 一酸化炭素의 濃度를 測定하는 計器가 設置되어 있다. 또한 黑鉛의 試驗片을 原子爐 內에 넣어 두고 一定한 期間마다 들어내어 試驗, 分析을 行함으로써 恒常 黑鉛의 狀態變化를 監視하고 있다.

中性子照射은 에너지 蓄積에 따라 黑鉛의 膨脹 또는 收縮을 이끈다. 比較的 낮은 溫度에서는 中性子の 照射에 依하여 粒子配列方向과 直角인 方向으로 膨脹하고 平行한 方向으로는 若干 收縮한다. 黑鉛의 內部에는 加工時의 應力이 남아 있으므로 300°C 以上の 高溫으로 照射을 받으면 應力이 解放되어 結晶格子의 再充填이 일어나서 空隙을 메꾸고 密度가 增加하여 全體의인 收縮이 일어난다. 爐心の 黑鉛構造物은 이와 같은 照射에 依한 黑鉛의 變形을 許容하는 間隙을 가지는 同時에 構造材로서 爐心の 形態를 維持하여야만 되는 까닭에 이를 爲하여 特殊한 考案이 必要하게 된다.

(2) 爐心の 耐震設計

英國에서는 地震의 念慮가 없기 때문에 Calder Hall 原子爐의 爐心은 四角柱의 黑鉛 block 과 2層으로 된 黑鉛 tile 을 交代로 싸올린 簡單한 構造로 되어 있다. 이 黑鉛 block 의 組積體를 耐震構造로 하기 爲하여서는 先 먼저 耐震設計加速度를 決定하지 않으면 안된다. 東海村에서 豫想되는 最大地震加速度는 地表面에서 150G(cm/sec²) 程度이며 또한 日本建築基準法에서 採用되고 있는 普通 建築物의 標準 耐震加速度는 200G 로 되어 있으나 爐心部는 가장 重要한 構造物로서 特히 安全性이 要求되기 때문에 600G 의 水平加速度와 300G 의 垂直加速度가 同時에 加해지는 경우라도 安全하게끔 設計하기로 되었던 것이다.

設計 當初에는 黑鉛이 中性子の 照射을 받으면 膨脹한다는 事實 밖에는 알려져 있지 않았기 때문에 爐心部는 四角形 block 로써 壓縮力場을 形成하는 構造體로 하고 그 周圍에 鋼製의 補強構造物을 附設하여 이것으로 黑鉛構造體를 外部로부터 堅固하게 조이는 方針으로 設計가 進行되었다. 그리고 黑鉛과 補強構造體의 熱膨脹을 同一하게 만들기 爲하여 이 補強構造體를 truss 型으로 하고 巧妙한 構造가 考案되었던 것이다.

그 後 中性子の 照射에 依한 黑鉛의 變形은 어떤

條件下에서는 膨脹보다도 오히려 收縮 쪽이 더 크다는 事實이 밝혀짐에 이르러 設計는 全的으로 出發點으로 되돌아가서 새로 始作하지 않을 수 없게 되었다. 이리하여 壓縮力場을 形成하려는 當初의 設計方針은 剪斷力場을 形成하는 方針으로 바뀌었던 것이다. 外形이 圓筒形에 가까운 正多角形을 이루고 있는 構造體에 剪斷力場을 形成하기 爲하여서는 相似 多角形으로 構造體를 形成하는 것이 理想的이다. 平面을 同一한 크기의 正多角形으로 分割하는 方法은 正方形 또는 正三角形이나 正六角形 밖에는 없다. 여기서 結局 邊의 數가 가장 많은 正六角形을 採用하는 過程을 自然히 밟게 되었다. 이리하여 最後에 誕生한 것이 所謂 벌집型이라고 불리는 것으로서 이는 正六角形 block을 使用하여 剪斷力場을 形成하는 設計이다.

爐心部가 이와 같은 設計가 되었으므로 補強構造物의 熱膨脹은 黑鉛의 그것과는 全히 無關係이어도 좋다는 結論이 나오고 最初의 truss 型 代身에 剛構造의 cylinder 型을 採用하기에 이르렀다. 그리고 黑鉛集合體의 最外周의 block을 이 圓筒型의 補強構造物에 固定시키기로 하였다.

7. 冷却材

原子爐內에서 核分裂이 일어나면 放出되는 에너지의 大部分은 熱로서 나타나게 되므로 이 熱을 原子爐에서 抽出하여 有效한 것으로 만들기 爲하여는 適當한 冷却系統이 必要하다. 이와 같이 原子爐에서 熱을 抽出하는 物質을 冷却材라고 부르고 있다.

冷却가스로서 使用할 수 있는 것으로는 炭酸가스, 水素, helium, 窒素의 4種을 생각할 수 있다. Helium은 核的, 化學的 및 熱的 特性은 良好하지만 高價이므로 容易하게는 入手할 수 없다. 窒素는 中性子を 잘 吸收하며 또한 誘導放射能을 띠기 때문에 取扱이 複雜하며 天然 uran을 使用한 原子爐에서는 中性子 經濟의 點에서 使用할 수가 없다. 水素는 熱的 特性이 가장 優秀하지만 空氣가 混入하여 爆發할 危險성이 있고 金屬 uran과 反應하여 鋼板의 內部에 擴散하여 이것을 脆弱하게 만든다. 炭酸가스는 거의 中性子を 吸收하지 않으며 誘導放射能도 적고 安價로 純도가 높은 것을 大量으로 入手할 수 있다. Calder Hall 原子爐에서는 이러한 理由로 炭酸가스를 冷却材로서 選擇하게 되었던 것이며

東海爐도 亦是 炭酸가스를 使用하고 있는 것이다.

氣體는 熱傳導特性이 不良하기 때문에 1 channel에서 抽出할 수 있는 出力은 冷却材의 熱의 能力에 依하여 制約을 받는다. 따라서 燃料被覆의 外周에 被覆材와 同一한 材質의 spiral 形의 지느러미를 붙여 熱傳導面積을 增加시킴으로써 有效하게 熱을 除去하는 裝置가 되어 있다. 그러나 이 지느러미가 過大해지면 中性子 損失을 增大시키게 되어 좋지가 않다. 이런 點에 設計의 困難성이 있는 것이다.

8. 가스循環方式

氣體는 熱을 除去하는 能力이 떨어지기 때문에 冷却材로 氣體를 使用하는 型의 原子爐에서는 가스循環機를 驅動하기 爲하여 大量의 動力이 消費된다. 이 消費動力을 적게하기 爲하여서는 되도록 높은 壓力으로 冷却材를 加壓하는 것이 가장 效果의이다. 勿論 이 壓力은 原子爐 壓力容器의 耐壓限度에 依하여 制限을 받는다. Calder Hall 原子爐에서는 50 mm 鋼板의 現場溶接이 技術上의 限度였기 때문에 約 8氣壓 밖에는 加壓할 수가 없었다. 그 後 溶接技術이 進歩하여 東海爐에서는 80mm乃至 90mm의 鋼板의 現場溶接이 可能하게 되었고 이에 따라 冷却機의 運轉壓力도 約 14氣壓까지 높일 수가 있었다. 그러나 亦是 가스循環機에 依하여 消費되는 動力의 比率이 크기 때문에 東海發電所에서는 世界에서도 別로 類例를 볼 수 없는 最新의 設計가 採用되었다. 從來의 英國의 原子力發電所에서는 原子爐의 熱을 利用하여 蒸氣를 發生하고 그 蒸氣의 에너지를 電氣로 變化시킨 다음에 그 電氣를 利用하여 電動機에 依하여 가스循環機를 驅動하고 있었다.

그러나 이러한 方式으로는 中間에서 에너지의 損失이 크기 때문에 東海發電所에서는 熱交換器에서 發生한 高壓蒸氣를 直接 利用하여 8,700馬力の 背壓터빈으로 驅動하고 그 排氣를 低壓의 過熱器에 넣어 再熱한 다음 主터빈으로 引導하는 方式을 採用하고 있다. 이와 같이 하여 plant의 熱效率의 向上을 圖謀하고 있는 것이 東海爐의 큰 特徵의 하나로 되어 있다.

9. 蒸氣條件

蒸氣溫度는 原子爐出口 가스溫度에 依하여 決定된다. 爐心出口 가스溫度의 上限은 두가지 要素의 制約을 받는다. 하나는 uran 金屬의 變態點을 넘을

수 없다는 제한인데 이 溫度는 665°C이다. 다른 하나는 magnox 被覆의 使用溫度인데 475°C 以下로 되어 있다. 어느 쪽이 制限要素가 되느냐 하는 것은 爐의 設計에 따라 決定되는데 가스壓力이 높고 流量이 큰 爐에 있어서는 燃料中心溫度의 制限을 받게 되고 比出力이 작은 爐의 경우는 被覆溫度의 制限 쪽이 嚴格하다. 東海爐에서는 中空燃料을 使用하고 있기 때문에 被覆溫度가 制限要素로 되어 있다.

이상과 같은 制限으로 인하여 原子爐出口 가스溫度는 392.6°C로 決定되었다. 原子爐入口 가스溫度를 低下시키면 爐의 熱出力을 增加시킬 수가 있지만 이것은 蒸氣條件을 낮추고 給水溫度를 低下시키기 때문에 蒸氣사이클의 效率를 惡化시킨다. 이것은 또한 Wigner energy 蓄積의 면에서도 不利하다. 이러한 여러가지를 考慮하여 入口가스溫度는 203.3°C로 決定되었다.

出入口 가스溫度差가 189.3°C나 되므로 이 溫度差를 效果의 利用하기 爲하여 二重 壓力사이클이 採用되고 있다. 高壓蒸氣의 條件은 壓力 60.6Kg/cm², 溫度 375°C에서 低壓蒸氣는 17.6Kg/cm², 溫度 260°C이다.

10. 原子爐 壓力容器

爐心部는 內徑 18.34m의 球形의 原子爐 壓力容器 속에 格納되어 있다. 이 容器의 두께는 通常 80mm, 最大 92mm이고 設計壓力은 16.17Kg/cm²이다. 爐心과 壓力容器의 重量 約 3,000 噸은 直徑 14.5m, 두께 62mm의 圓筒形의 skirt로 支持되고 있다. 그리고 耐震上의 考慮로서 上部의 stand pipe 群의 外側에도 skirt를 붙이고 그 上端에서 圓周方向으로 耐震支持板을 내어 生體遮蔽壁에 連結함으로써 耐震으로 壓力容器의 頭部가 흔들리는 것을 防止하고 있다.

一旦 原子爐가 運轉을 開始하게 되면 中性子の 照射를 받아 鋼材의 性質이 變化하고 또한 鋼材 內部에 放射性 cobalt가 發生하기 때문에 接近하여 修理할 수가 없으므로 原子爐 壓力容器用의 鋼板에는 嚴密한 仕様이 要求되고 있다. 日本에서는 이 種類의 鋼板에 關하여서는 거의 經驗이 없었으므로 英國製의 鋼板을 使用하는 것으로 하여 計劃이 進行되었다. 이 鋼材는 콜타르 28이라고 불리고 있고 低炭素 高당량 킨드鋼으로서 aluminum 添加에 依하

여 微粒子化된 것이며 熔接性에 優秀한 性質을 가지고 있다.

이 鋼板을 日本에 入荷하여 熔接을 爲한 開先加工을 行하였던 바 開先面에 多數의 傷處가 發見되었다. 그 傷處에 關하여 慎重히 調査한 結果 그 大部分이 鋼板의 製造過程에 殘留한 水素에 起因하는 것임이 判明되었으므로 此種의 缺陷을 가진 鋼板은 原子爐 壓力容器用으로는 不適當하다는 結論이 나왔다. 이리하여 東海發電所의 原子爐 壓力容器用 鋼板의 仕様을 充分히 充足시키는 同時에 水素傷處가 없는 鋼板의 製造와 그 保證이 可能한 會社로서 새로이 英國에서 1社, 西獨에서 2社, 日本에서 1社를 選定하여 各種의 調査를 行한 結果 日本의 日本製鋼所가 技術의 으로도 他社와 遜色 없이 優秀하다는 것이 認定되고 또한 納期도 가장 빠르다는 點에서 同社가 代替品의 製造者로 決定되었다. 中性子の 照射에 起因하는 鋼材의 性質의 變化에 關하여는 이미 入手된 콜타르 28의 메이타로 類推할 수는 있었지만 代替品인 鋼板을 英國으로 보내어 照射試驗을 行하는 등 萬全의 措置가 講究되었었다.

이 鋼材는 熔接性에 있어서는 優秀하지만 平面 creep 現象에 對하여는 弱하기 때문에 壓力容器 上部의 溫度를 材料의 creep 溫度 以下로 維持하기 爲하여 高溫가스에 接觸하는 上半部 內面을 多層 stainless 鋼箔의 特別한 熱絕緣材로 被覆하고 또한 低溫가스에 接觸하는 下半部는 外面은 鑛物質의 保溫材로 被覆하여 壓力容器 各部의 溫度가 均一하게 200°C가 되게끔 設計되어 있다.

이 球形의 容器는 1枚當 約 7噸의 鋼板 101枚를 熔接하여 만들어져 있다. 이 鋼板은 工場加工된 以後 鋼板 그대로 東海의 建設現場까지 輸送되고 여기서 6個의 部分으로 나누어 現場의 假設 組立場에서 熔接되었다. 熔接된 各部分은 높이 120m, 容積 125噸(最大 吊上重量 150噸)의 derrick로 吊上되어 原子爐 建物 안의 生體遮蔽용 콘크리트壁 안으로 옮겨져 거기서 차례로 圓周方向의 熔接이 進行되어 球殼이 形成되었다. 그 後 熔接部의 殘留應力을 除去하기 爲하여 容器 全體의 磨鈍이 行하여졌다. 이 作業은 主로 容器 內面에 放射式 電熱 strip을 吊上하여 配置하고 容器의 溫度가 全體의 540°C乃至 590°C가 될 때까지 徐徐히 加熱하여 約 10時間 동안 이 溫度로 維持한 後 徐徐히 冷却함으로써 達成되었다. 이 作業을 爲하여 使用

된 電力은 最高일 때 約 3,500Kw 에 達하였고 作業에 要한 日數는 約 半個月이었다.

11. 破損燃料의 檢出

放射성을 띤 核分裂生成物은 燃料要素의 被覆材 안에 封鎖되어 있으므로 原子爐의 一次回路 안을 循環하고 있는 炭酸가스는 通常時는 放射성을 거의 띠지 않고 있다. 그러나 燃料要素의 被覆材에 破損이 생기는 경우에는 그곳에서부터 放射성을 띤 核分裂生成物이 새어나오게 되기 때문에 迅速하고도 正確하게 이것을 發見할 必要가 있다. 이것을 爲하여 燃料가 들어 있는 各 channel에서 sample gas를 採取하여 選擇瓣에 依하여 自動적으로 約 20分마다 全體 channel을 走査할 수 있게끔 設計가 되어 있다. Sample gas는 filter를 通하여 測定室로 引導되는 故로 固體狀의 物質은 測定室로 들어갈 수 없다.

多幸히 核分裂生成物의 하나인 krypton은 氣體이기 때문에 filter를 通過한 後 測定室 안에서 저절로 崩壞하여 固體狀의 rubidium으로 變한다. 이 rubidium은 荷電粒子이므로 電氣集塵器와 同一한 原理로 集積이 可能하다. 이와 같이 하여 集積된 rubidium은 다시 저절로 崩壞하여 strontium으로 變化한다. 이 때에 放出되는 beta線이 scintillation counter로 計測된다. 計測된 count數가 通常보다 顯著하게 增加한다면 그 sample gas를 抽出한 channel의 燃料가 破損되었음을 알 수 있다.

이렇게 하여 檢出된 破損燃料은 連續적으로 監視를 받으며 破損의 程度가 甚하게 되면 燃料交換機에 依하여 直時로 爐內로부터 끄집어내어 特別히 단 들어진 容器에 密封되어 使用濟燃料 冷却池로 보내어진다. 따라서 破損燃料로 因하여 冷却池가 汚染되는 일은 없다.

12. 使用濟燃料의 取扱

核燃料은 어느 程度 燃焼하고 나면 잘 타지 않게 되어버리므로 原子爐에서 들어내어 새로운 燃料와 交換할 必要가 있다. 이 作業은 原子爐 壓力容器의 上部에 林立하는 stand pipe를 通하여 原子爐 運轉中에 行하여진다. 이 使用濟燃料에는 「죽음의 제」가 含有되어 있어 放射성을 띠고 있으므로 이 作業은 一切 遠隔操作에 依하여 punch card方式으로

慎重하게 行하여진다. 이 作業의 主役을 하는 機械는 巨大한 transporter 위에 놓여 있는 燃料交換機이다.

原子爐에서 들어낸 燃料은 冷却池로 運搬되어 約 3個月間 冷却 貯藏된다. 이 使用濟燃料 속에는 타다 남은 uranium과 세로이 生成된 plutonium이 含有되어 있으므로 이 貴重한 plutonium을 分離시키기 爲하여 再處理工場으로 運搬된다.

13. 原子爐의 制限

이 型의 原子爐에서는 反應度의 溫度係數는 原子爐의 運轉 當初에는 마이너스가 되어 있다. 反應度의 溫度係數가 마이너스라고 하는 것은 爐心의 溫度가 높아지면 反應도가 떨어지고 反對로 爐心의 溫度가 낮아지면 反應도가 올라간다는 것이며 制御棒을 움직이지 않아도 原子爐의 出力을 自動적으로 安定된 狀態로 維持할 수 있음을 意味한다.

그後 燃料가 燃焼함에 따라 plutonium이 漸次 生成되어 간다. Uranium은 中性子를 共鳴吸收하는 領域이 相當히 溫度가 높은 곳에 있으며 그 溫度領域에 到達하기까지는 核分裂을 일으키는 確率은 溫度의 上昇에 比例하여 작아진다. 그러나 plutonium의 경우는 溫度가 어느 程度 以上으로 높아지면 溫度의 上昇에 따라 核分裂을 일으키는 確率이 커지는 現象이 일어난다.

Calder Hall 原子爐에서는 燃料의 平均燃焼度는 數百 MWD/T 程度나 되고 冷却劑의 原子爐 入口溫度 및 出口溫度는 各各 145°C 및 340°C이기 때문에 反應度의 溫度係數가 플러스가 되는 일이 없었다. 그러나 東海爐에서는 燃料의 平均燃焼度는 300 MWD/T이며 冷却劑의 入口 및 出口 溫度는 各各 203°C 및 392°C이므로 燃料의 燃焼도가 어떤 值 以上에 達하면 生成된 plutonium의 影響으로 反應度의 溫度係數가 플러스가 되게 된다. 反應度의 溫度係數가 플러스가 되면 核分裂生成物의 하나인 크세논(xenon)의 生成과 더불어 中性子束이 空間적으로 振動을 일으킬 可能性이 생기게 된다. 이 可能性은 爐心의 사이즈가 커짐에 따라 增大한다.

이 中性子束이 空間적으로 振動을 일으키는 現象에 對하여는 東海爐를 例로 하여 慎重한 解析이 行하여졌다. 그 結果 半徑方向에 있어서는 振動을 일으킬 可能性이 充分이 있으나 軸方向에 있어서는 그 可能性이 거의 없음이 判明되었다. 萬一 이러한 振

動現象이 일어난다고 假定하면 爐心 밖에서 測定한 中性子束 即 原子爐의 出力 表面으로는 變化가 없으나 爐心の 內부에 있어서는 中性子束의 높은 부분과 낮은 부분이 나타나며 그 結果로 中性子束의 높은 부분의 燃料가 過熱할 念慮가 있다. 따라서 이와 같은 中性子束의 空間的인 振動을 防止하기 爲하여 爐心을 9個의 領域으로 分割하고 各 領域마다 獨立的으로 制御하는 方法이 考案되었다. 即 各 領域마다 1本 乃至 2本の 微調整棒을 配置하고 各 領域의 原子爐 channel 出口 가스溫度를 一定하게 維持하게끔 原子爐는 自動적으로 制御되고 있다.

14. 燃料裝入에서 營業運轉까지

商業規模의 原子力發電所의 建設은 日本에서는 처음 經驗이 없으므로 그 建設途上에는 豫想하지 못한 여러가지 難關이 伏在하여 있었다. 이러한 難關을 하나하나 着實하게 克服하고 建設이 終了된 設備에 對하여 하나하나 系統別의 動作試驗을 施行한 다음 1965年 4月 20日 通商省으로부터 燃料裝入前檢査 合格證을 交付받았다. 繼續하여, 4月 21日에는 試驗使用의 認可를 얻어 同日부터 燃料을 裝入하기에 이르렀던 것이다.

初裝荷燃料의 裝入에 있어서는 通常 運轉時에 使用하는 燃料交換機는 使用되지 않았다. 이들 諸 燃料要素는 1 channel分 8本이 들어가는 燃料裝荷用 trolley에 실어 stand pipe까지 運搬되고 燃料裝入 機로 1本씩 手動으로 stand pipe를 通하여 所定 channel內에 吊下되었다. 이러한 方法으로 몇個 段階로 나누어 圓筒上에 燃料은 爐內에 裝入되었으며 各 段階마다 中性子の count數가 計測되었다. 燃料을 裝入한 channel數와 이때에 計測된 中性子の count數로부터 臨界量을 推定할 수가 있다. 이러한 作業은 順調롭게 進行되어 東海發電所는 5月 4日에 마침내 臨界에 到達하였다. 이때의 全 燃料

channel數는 2,048, 臨界 channel數는 387이었다.

原子爐가 臨界에 到達하자 조금씩 燃料을 裝入하여 軸方向 및 半徑方向의 中性子束 分布와 그 때의 原子爐 反應度를 測定하였다. 이 兩者의 몇가지 値에서부터 無限增倍係數와 半徑方向의 移動面積을 求할 수 있다. 이와 같이 하여 格子常數 및 反應度の 壓力係數 等의 測定이 끝나자 全量에 이르기까지 數 段階로 나누어 安全性을 確認해 가면서 燃料을 裝入하였다.

全量까지의 燃料裝入이 끝나자 原子爐의 固有反應度가 測定되었다. 空氣中에 含有되어 있는 窒素는 中性子を 吸收하는 毒物質인 故로 加壓된 空氣는 制御棒과 꼭 같은 作用을 한다. 即 모든 制御棒을 빼내버리고 空氣만으로 臨界가 되는 點의 空氣 壓力을 測定하면 反應度の 壓力係數로부터 原子爐의 固有反應度를 求할 수 있다. 이러한 方法을 air poisoning法이라고 부르고 있다. 다음에는 같은 方法으로 制御棒의 校正을 行하고 이로써 原子爐 特性試驗은 끝났다.

여기까지는 爐內에 空氣가 들어있는 狀態로 試驗이 行하여졌다. 다음으로는 原子爐 1次回路에 처음으로 炭酸가스를 充填하고 運轉壓力이 될 때까지 加壓한다. 爐心에는 이미 燃料은 들어있지만 이 時點에서는 아직 核加熱은 하지 않는다. 所內 보일러에서 發生하는 蒸氣를 熱交換器의 2次側으로 通하게 하여 原子爐內의 炭酸가스를 約 180°C까지 加熱한다. 이와 같이 可能한 限度까지 運轉條件에 近似한 狀態下에서 原子爐 機器를 運轉하여 그 性能을 確認한다. 이 試驗이 끝나면 壓力器 內部の 最終檢査를 施行하고 出力上昇試驗을 開始한다. 이 段階에서 비로소 原子爐의 出力이 本格的으로 上昇해 온다. 이 出力上昇試驗이 끝나고 通商省의 竣工檢査에 合格이 되면 마침내 營業運轉을 開始하게 되는 것이다. (電氣公論 1965年 12月號)

原稿募集

第6號의 原稿를 募集합니다. 枚數: 制限 없음(但 橫書)
 ○ 業體 또는 國體 消息 마감: 1966年 11月 10日
 ○ 研究事項 送付處: 大韓電氣協會 事務局
 ○ 評論·提言 備考: 掲載分 稿料贈呈
 ○ 隨筆·隨想