

加壓水型原子爐의 技術的 動向에 關하여

盧 潤 來*

(Eun-rae Roh)

緒 論

現在 技術的 및 經濟的으로 立證된 動力爐로는 美國에서 研究開發된 沸騰水型 原子爐(BWR)와 加壓水型 原子爐(PWR), 英國의 Calder Hall 을 發展시킨 改良型 개스冷却爐(AGR), 그리고 캐나다에서 開發된 重水減速 沸騰輕 水冷却爐(CANDU-BLW)等 四種을 들 수 있다.

1970 年代 中期에는 韓國에서도 最初의 原子力發電所가 稼動될 展望이므로 上記 諸種의 技術性, 經濟性, 安定性等을 調査研究해야 될 것이다. 우선 紙面關係로 가장 우리의 興味를 끄는 PWR 에 對하여 그 技術의 開發現況과 앞으로의 展望에 關하여 分析 檢討코저 한다.

1. 加壓水型 原子力 發電所의 歷史

原子力 發電所 建設을 計劃할 때 반드시 생각해야될 問題는 ① 安全性, ② 信賴性, ③ 經濟性 其他, ④ 運轉의 容易인바 이는 普通의 火加發展所를 建設計劃하는 경우에도 적용된다. 現在 世界各國에서 名種爐型의 實用化가 試圖되고 있거나 그 가운데 通稱, PWR 라고 하는 閉回路 輕水冷却——減速型 原子爐는 上記의 基準을 滿足시킴으로 電力 또는 船舶用으로 多數 建設되고 있다.

原子力 發電所의 原價構成을 建設費 및 燃料費의 比重에 있어서 火力發電所에 比하여 建設費가 點하는 比率이 크지만 發電所 容量의 增大와 더불어 經濟性은 急速히 改善되어 最近에 發注되는 發電所는 거의 全部가 信賴性和 經濟性에 있어서 火力과 同等하거나 보다 有利하다고 判斷된 結查 原子力의 發注速度는 數年前 美國政府가 Pittman Report 에서 原子力産業의 成長을 豫見한 것과는 比較가 되지 않을 程度이다. 또 最近에 大型發電所의 注文을 받고 原子爐 供給者로서의 位置를 굳게 하고 있는 Combustion Engineers 또는 B & W 社 등이 PWR 을 推獎하고 있는 것은 이 型式이 前記 四條件을 가장 滿足시킬 수 있음을 表示하는 것이기 때문이다.

世界 最初의 PWR 原子力發電所로서는 1957 年에 稼動된 美國의 Shippingport 를 들 수 있고 그 以後 오는 갈지 約 10 年間에 걸친 期間中 加壓水型 原子力發電의

商用化는 實로 눈부신바 크다. 世界의 加壓水型 原子力 發電所는 第 1 表와 같이 20 數基가 完成 運轉中이거나 建設 또는 建設準備中에 있어서 이들의 合計 出力은 約 1,100 萬 KW 에 達하고 實驗開發과 訓練用을 除外하면 平均 單其出力은 60 萬 KW 가 된다. 이와같이 大型化하면 經濟性이 현저하게 改善되는 原子力發電所도 이따가 지는 建設數地가 主로 僻地에 限定되어 왔으나, 美國 Los Angeles 市에 建設될 50 萬 KW 의 Malibu 發電所, 瑞西 Basel 近郊에 建設中인 35 萬 KW 의 Benzau 發電所와 現在는 計劃을 中斷하였지만 New York 市內에 建設하려던 Consolidated Edison 會社의 100 萬 KW Ravenswood 發電所 等은 需要中心地에 計劃된 것으로 安全施設에 對한 信賴性的의 向上과 더불어 歐美의 特히 大都市 近傍에서는 煙害防止를 爲하여 原子力發電所를 採用하는 傾向이다.

今後 WH(Westinghouse)는 이제까지 確立된 PWR 技術을 土臺로 하여 보다 理想的인 原子爐의 製作에 힘 쓸 것으로 展望되는데 그 分野는 다음과 같다. 即 冷却材인 輕水の 溫度와 壓力을 높여 超臨界壓力, 溫度의 條件下에서 使用하므로써 터빈發電機의 蒸汽條件을 改善하는 것, 燃料利用率을 向上시켜 燃料費를 低下시키는 것, 出力密度等을 높여서 壓力容器를 縮小化하고 따라서 이와 關聯된 機器를 縮小시켜 建設費를 低下시키는 것 等이다. 또한 增殖比가 높도록 設計를 할 수 있어 燃料政策上 우리나라에서도 利用도가 높은 原子爐가 될 것으로 豫想된다.

2. 爐心 設計

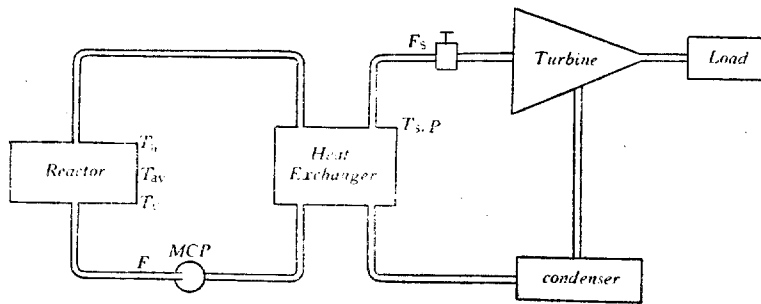
이제까지 發電原價의 設備費分을 低下시키기 爲해서는 爐心の 出力密度 即 比出力을 上昇시키고 또한 燃料費分을 低下시키기 爲해서는 爐心の 燃燒壽命이 오래가도록 設計上的 改良에 힘써 왔으나 具體的으로는 熱水路係數의 低下, 熱水力設計의 改良 및 反應度制禦能力의 增大等이다. 爐心設計의 進歩가 明白히 認定된 것은 同一한 設備에서 爐心만을 改良함으로써 出力을 上昇시킨 경우인데 그 좋은 例가 Yankee 爐이다. 1960 年末에 出力運轉을 開始한 當時의 第一 爐心은 熱出力 392 MW 였으나 順次的으로 改良하여 約 四年後의 裝荷된 第 4 爐心은 熱出力 600 MW 發生이 可能하여 實로 50%의

*韓國電力株式會社 電子力課 正會員

<第1表>

世界の加壓水型原子力發電所

發電所名	國名	原子爐製作者	臨界年度	Loop數	熱出力 (MWt)	電氣出力 (MWe)
Shippingport	U.S. A.	WH	1957	4	525	150
Yankee	〃	〃	1960	4	600	185
Indian Point	〃	B & W	1962	4	795	255
Saxton	〃	WH	1962	1	20	5
BR-3	Belgium	WH	1962	1.5	40.9	11.5
VVER-1	USSR	KAEI	1963	—	760	210
SELNI	Italy	WH	1964	4	900	272
VVER-2	USSR	KAEI	1965	—	—	360
SENA	Belgium, France	WH	1966	4	905	283
San Onofre	USA	WH	1966	3	1,345	450
Conn. Yankee	〃	〃	1967	4	1,970	646
Zorita	Spain	WH	1967	1	510	160
Obrigheim	W. Germany	WH-Siemens	1968	2	907.5	300
Malibu	USA	WH	1969	4	1,700	550
Rooppur	Pakistan	WH	1969	1	—	70
NOK	Swiss	WH	1969	2	1,130	350
Bookwood	USA	WH	1969	2	1,300	450
Indian Point-2	〃	〃	1969	4	3,220	1,058
Turkey Point #3	〃	〃	1970	3	2,300	760
Hartsville	〃	〃	1970	3	2,300	760
Wisconsin	〃	〃	1970	2	—	480
Palisades	〃	〃	1970	2	—	310
Mihama	Japan	WH	1970	2	1,031	340
Turkey Point #4	USA	WH	1971	3	2,300	760
Delaware #1	〃	〃	1971	4	—	1,035
Total						10,710.5



<第1圖> PWR의 制禦概念圖

出力增加를 達成시킨바 있다.

性能의 改善이 行하여 질 수 있는 要素로서는 實際의 製作運轉 經驗을 쌓은 爐心內의 狀態를 實測함으로써 設計時에 充分히 둔 餘裕를 減少시킬 수 있는 경우와 새로운 考案을 爐心設計에 應用하는 경우이다. 前者에 屬하는 例로서는 Yankee 原子爐의 第一 및 第二 爐心에서의 出力上昇을 들 수 있다. 即 第一爐心の 初期 熱出力 392 MW 를 第二爐心에서는 540 MW 까지 增加시킬 수 있었던 것인데, 이는 전혀 같은 爐心에서 이루어진 것으로 運轉中の 實測에 依하여 當初의 設計時에 使

用된 熱水路係數 값에 포함된 餘分의 餘裕를 줄이므로써 可能했음을 確證하는 좋은 例이다. 後者の 例로서는 Yankee 原子爐 第三爐心 以後의 多域爐心, SELNI 原子爐 以後의 化學制禦方式, SCE 原子爐 以後의 RCC 制禦棒方式 等の 새로운 技術의 採用 및 爐心 流量分布의 改良 및 冷却材 混合의 改善 等등의 各種設計를 들 수 있는데, 이들은 모두 熱水路係數를 低下시키는 效果가 있으므로 이

에 依하여 爐心の 出力密度를 上昇시킬수 있었던 것이다.

以上과 같은 種種의 改善에 依하여 熱水路係數가 Yankee 第一爐心으로부터 現在의 爐心に 이르기까지 變化되어 온 라를 第2表에 表示한다.

今後에는 熱水路係數의 低下가 계속되어 1000 MWe 級에 爐에서는 $F_{\Delta H}=1.80$, $F_v=2.94$ 程度의 것이 設計될 것으로 豫想된다. 燃燒壽命을 延長시키려면 材料의 種類에 따라 制限을 받겠지만 制禦方法을 改善시킴으로써 이를 성취시킬 수 있을 것이다.

熱水力設計의 觀點으로부터 燒損에 關한 DNB 相關式

<第2表> 熱水路係數의 變遷

熱水路係數	Yankee 第一爐心	Yankee 第四爐心	SELNI	SCE (450MW)
F_H (Erthalpy)	3.36	2.51	2.11	1.88
F_s (出力)	5.17	2.93	3.25	3.23

의 改善, 運轉壓力 溫度의 上昇 및 體積沸騰 等を 許容 시킬 수 있을 것으로 期待된다.

5 MWe 의 Saxton 實驗用 發電所의 實驗으로 最大比 出力 23 KW/ft 가 可能할 것으로 보여지나, 現在에는 DNB 條件에 制限을 받으므로 그렇게 比出力이 오를 수 없을 것이다. 이를 改善시키기 爲하여는 正確한 DNB 相關式을 開發할 必要가 있으므로 이 때문에 많은 實驗이 行하여지고 있어 今後 23 KW/ft 에 가깝게 될 것으로 期待된다.

一次冷却系의 壓力制禦가 非常히 良好한 實績으로부터 設計壓力 2500 psi 까지 運轉壓力을 높일 수 있게 되었다. 即 Yankee 爐에 있어서는 2000 psi 였던것이 最近에는 2100 psi 로부터 2250 psi 로 上昇하고 있다. 이에 따라 爐內 平均溫度 및 蒸汽溫度가 上昇되어 plant 效率가 向上되고 있다. 爐心內에서 體沸騰을 일으킬 수 있도록 設計를 하면 效率는 多少 向上되겠지만, 이에 體沸騰發生과 더불어 흐름의 不安定性에 問題된다. 이 點에 對해서는 Saxton 原子爐의 實驗이 行하여지고 있으므로 그 結果 PWR 의 改良에 有效한 data 가 提供될 것으로 期待된다.

3. 制 禦

(1) 制禦方式

PWR plant 의 制禦는 火力의 경우와 같거나 또는 그 以上の 높은 自由度를 갖지고 있어서, 原子爐는 本質의 으로 系續上의 如何한 制禦要求에도 應할 수 있는 能力을 갖이고 있다. PWR 發電所의 制禦는 基本的으로는 原子爐의 높은 自己制禦性을 利用하는 方式으로서, 第 1圖의 概念圖에 보이는 바와 같이, 原子爐는 溫度를 檢出할 수 있는 一定範圍內에 놓여 있어 電氣負荷의 增減에 따라 터빈 가바너(Turbine Governor)가 動作하여 蒸汽流量이 變化할 때 그 變化分만큼 原子爐 入口溫度가 低下 또는 增加하는 바 原子爐의 反應度는 그 溫度係數가 負임으로 原子爐의 反應度는 增加 또는 減少되어 電氣負荷에 맞는 出力을 유지하게 된다.(原子爐의 反應度와 溫度係數에 關해서는 筆者의 論文이 電氣學會誌 Vol. 15 No. 5, 1967年度에 發表되어 있음)

前項에서 말한바와 같이 現在의 PWR 에서는 一次冷却材인 輕水中에 中性子의 吸收材인 硼素를 溶解시켜 그 濃度를 調整함과 아울러 다른 原子爐에서 採用하고

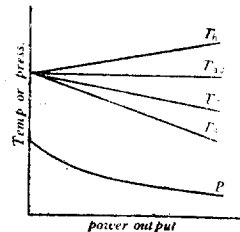
있는 制禦棒의 삽입 또는 引出動作으로 反應度를 制禦하고 있다.

制禦系의 主信號는 一次冷却材 爐心出入口의 平均溫度이지만, 現在에는 PWR 開發始初의 冷却材平均溫度 一定方式은 아니고 負荷의 減少와 더불어 平均溫度를 低下시키는 平均溫度 program 方式을 採用하고 있는 開發初期에 應用된 이 Const-Tav(平均溫度一定) program 은 出力의 變化와 相關없이 外部로부터의 制禦를 必要로 하지 않으며, 平均溫度가 一定한 以上 一次側 loop 의 冷却水量이 一定하여 加壓器의 크기를 極小化시킬 수 있는 長點이 있기는 하나, 實際로 aging 과 poisoning 의 效果를 無視할 수 없으므로 Tav를 一定로 유지하려면 심지어 아주 작은 plant 에서도 feedback 制禦를 하지 않으면 안되는 缺點이 있어, Const-p(壓力一定) program 을 導入하기에 이르렀다.

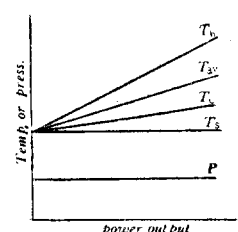
이 方法은 出力의 變化에 相關없이 蒸汽壓力을 一定하게 유지하고 一次側 溫度를 上昇토록 許容한 것으로 Const-Tav 가 一次側에 有利해던 것에 比하여 이 Const-p는 二次側에 有利한 program 이다. 即 Const-p는 自動爐裝置, 特殊한 터빈 또는 보일러 給水 펌프 등의 設計上 革新의 考察이 不必要하게 되는 長點은 있으나, 反面에 Tav의 變化로 因하 反應度의 變化가 커서 加壓器의 容量이 크게 됨에 따라 一次側의 加壓器에 重大한 問題를 일으킨 危險이 크다. 따라서 이 兩者를 절충하는 이른바 Compromise program 을 現在의 PWR 에 採用하고 있는 것인데 이들의 關係를 第 2, 3, 4圖에 表示한다.

(2) 制禦機器

制禦棒 및 制禦棒驅動裝置, 各種 計裝用 金屬 等々の



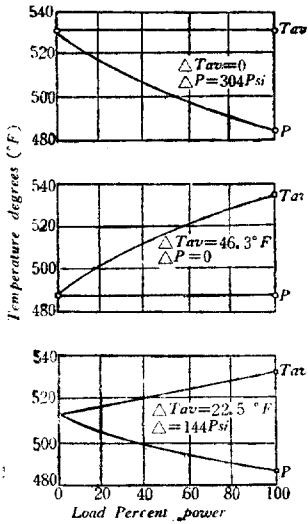
<第2圖> Const-Tav Program



<第3圖> Const-p program

分野에서 많은 改良이 있었다. 그중 하나는 Rod Cluster Control (RCC)의 實用化인데, 그 結果, 十字型 制禦棒의 경우와는 달리 引出後에 생기는 減速材 slot 中の 中性子 peak 가 생겨 十字型의 경우에 必要로 했던 follower 가 不必要하게 되었고 또한 별도의 scram用 緩衝器도 不必要하게 되어 이에 따라 原子爐器의 높이가 낮아지고 그 裝作費가 低下되었다.

制禦用 및 保護用 電子回路에 있어서의 半導體化, 核



〈第4圖〉 500°F 근처에서稼動되는 Plant Const-Tav, const-p. Compromise program의 計數的實例

材를 使用한던 出力密度의 上昇과 이로 因한 機器代의 減少로 資本費가 低下하며, 또한 原子爐容器的 設計가 容易하게 될뿐 아니라 反應度의 制禦能力에는 實質的으로 限界가 없으므로 燃燒率 增大에 依한 燃料費 低下가 期待되는 等 利點이 있다. 한편 制禦材로서의 硼酸을 使用하게 되던 이는 市販의 質도 良好하며 그 價格도 廉 善편이다.

(1) 出力密度의 增大

定常的인 全出力 運轉時에는 制禦棒을 거의 다 引出시키고 一次冷却材中에 分布된 中性子 吸收材(爐素)로 制禦하면 均一한 出力分布를 容易하게 얻을 수 있고 同時에 出力密度도 增加한다. 大型 PWR에서는 多領域 燃料裝荷法을 使用하고 있는데 여기에 出力分布를 爐心內에서 均一化시킨 出力密度가 增加하게 되어 燃料要素의 熱設計限度에 가까운 條件下에서 使用이 可能하게 된다.

(2) 制禦棒數의 減少

冷却材中에 있는 中性子吸收材의 濃度變化는 매우 늦는데, 化學制禦는 Xe變化보다 늦은 反應度變化를 補償하는 것이다. 化學制禦를 使用하면 制禦棒을 半數 以下로 減少시킬 수 있어 이는 經濟的으로도 有利할뿐 아니라, 爐心 및 原子爐 壓力容器的 設計가 容易하여 安全性도 좋다. 한편 制禦棒에 對한 要求도 減少되어 RCC

計裝檢出器의 改良이 進前되어 計裝의 信賴度, 精度의 向上에 크게 기여하고 있어, 運轉經驗上 期初에 있었던 悲觀的인 見積의 餘裕를 이제는 現實的으로 바꿀 수 있게되었다. 그 代表的 例는 最大過出力值에서 從來에는 118%로 設計되었던 것이 現在에는 112%로 되었다. 이는 같은 爐心設計에 對해서 定格出力을 크게 할 수 있음을 뜻하는 바에 따라 發電價格을 低減시킬 수 있다.

4. 化學制禦의 利點

制禦棒으로 比較的 서서히 反應度變化를 制禦하는 PWR에 化學制禦

材를 使用한던 出力密度의 上昇과 이로 因한 機器代의 減少로 資本費가 低下하며, 또한 原子爐容器的 設計가 容易하게 될뿐 아니라 反應度의 制禦能力에는 實質的으로 限界가 없으므로 燃燒率 增大에 依한 燃料費 低下가 期待되는 等 利點이 있다. 한편 制禦材로서의 硼酸을 使用하게 되던 이는 市販의 質도 良好하며 그 價格도 廉 善편이다.

(ii) Yankee 爐, SELNI 爐

Yankee는 第三爐心 以來, 化學制禦의 連續運轉에 들어 滿足한 狀態에 있고, SELNI는 1964년에 臨界에 達한 後 出力運轉의 最初부터 化學制禦를 採用하였는바 順調롭게 運轉되고 있다. 그後 WH社는 設計中의 原子爐는 모두 化學制禦를 採用하기를 決定하였다.

(5) 減速材 溫度係數

一次冷却材 密度와 더불어 減少되어 여기에 溶解된 中性子吸收材의 密度도 減少하는 것이므로, 減速材 溫度係數는 中性子吸收材인 爐素濃度가 上昇함에 따라 負의 値는 減少되고 어떤 濃度 以上에서도 正으로 된다. 그러나 UO_2 燃料의 溫度係數가 負의 큰 값을 갖이고 있으므로 減速材 溫度係數가 非常히 큰 正의 値를 갖지 않는 限 安全上 問題되는 것은 아니다. 또 原子爐制禦의 觀點에서 보면 減速材 溫度係數가 負일 것이 要望되는데, 이 값이 正에 아주 가깝게 되는 것은 다만 燃料 cycle의 初期인 零出力부분이므로 燃燒가 進行됨에 따라 다시 負의 큰 값으로 되어 이點도 問題되지 않는다. 따라서 原子爐 制禦系 및 出力空間分布를 詳細히 解析

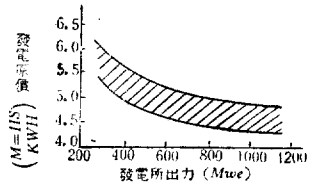
의 採用이 可能하게 되어 이에 따라 또한 爐心內의 均一한 出力分布를 얻을 수 있어서 資本費가 低下된다.

(3) 反應制禦의 制限으로부터 解放

原子爐를 制禦棒만으로 制禦하는 경우, 燃料의 燃燒度를 높이려면 剩餘反應度를 充分히 높이지 않으면 안되는데, 制禦할 수 있는 剩餘反應度에는 限界가 있다. 그러나 化學制禦를 採用하면 이같은 制限으로부터 解放됨을 뜻하는데 그 結果로 現在 27,000 MWD/T 程度가 保證되며 未지않아 30,000~35,000 MWD/T 까지 期待할 수 있다.

(4) 發電爐에서의 經驗

1965年 7月까지의 化學制禦用 PWR의 發電量은 1.8×10^6 MWh以上이었다.



〈第5圖〉 PWR의 出力과 發電價格 比較圖

(i) Saxton 爐

化學制禦의 實用性を 證明함을 目的의 하나로 建設된 原子爐인데, 制禦棒만의 運轉出力은 20 MWt 였으나 1963年 5月的 化學制禦運轉後에는 23.5 MWt로 出力增加를 보였다. 그 後 連續運轉의 結果, 爐素가 爐心에 蓄積되었다가 急히 放出하는 일은 核沸騰條件下에서도 일어나지 않음이 밝혀졌고 또 爐素의 濃度增減은 充分히 制禦할 수 있고 脫鹽塔의 動作도 良好한 것이 確認되었다.

한 결과, 減速材 溫度係數는 반드시 正일지라도 그 值는 적기 때문에 原子爐 運轉上 어떤 制限을 要求하지 않음이 判明되었으므로 現在와 같이 燃燒度를 높일 수 있게 되었다.

5. 機 器

原子力發電所는 火力發電所에 比하여 大容量化에 따른 建設費의 遞減이 더욱 현저하므로(第5圖 參照), 機器도 이에 맞도록 大型으로 開發되어 實用化되고 있다.

PWR plant의 主機器로서는 爐心を 지탱하는 原子爐 容器, 5爐心에서 얻은 熱을 取해내는 一次冷却材 pump, 熱에너지를 터빈發電機系에 傳達하는 蒸汽發生器, 系壓力을 設定値에 保持하는 加壓器 및 및 이들 機器의 連結配管 등이 있고 이들을 總稱하여 一次冷却系라 부른다. 一次冷却系를 正常的으로 運轉하는 系로서는 原子爐 補助系가 있는데, 이에는 一次冷却材의 水質, 水量 및 中性子 吸收材인 硼酸의 濃度를 制禦하는 化學 및 體積禦禦系, plant에 蓄積된 放射性物質을 制棒處理하여 plant 밖으로 有害한 物質이 放出되지 않도록 하는 廢棄物處理系, plant 停止系機器를 冷却하는 補助冷却系 燃料交換時 및 緊急時에 硼酸水를 供給하는 安全注入系 등이 있는데 이에 屬하는 機器配管은 一次冷却系의 機器와 配管에 比하여 材料나 製作仕樣의 要求가 單純하므로, 以下 一次冷却系의 主要한 機器의 現狀을 記述한다.

(1) 原子爐容量 및 蒸汽發生器

機器의 大型化는 工場設備, 輸送上의 諸問題, 或은 設計 code 등의 點에서 스스로 制約을 받고 있다.

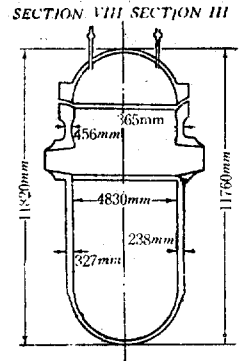
設計 code에 關하여 말한다면, 美國에서는 1965年以來 ASME Sec. III에 基準하여 設計하고 있는데, 從來의 Sec. I 或은 Sec. VIII에서 採用되었던 最大應力說에 대신하여 最大剪斷應力說을 採用하고 詳細한 應力計算을 課하고 있는 것이다. Sec. III과 Sec. VIII에 準하여 1000 MW 級의 原子爐容器를 設計한 경우의 差를 第6圖에 表示한다. 即 Sec. I 또는 Sec. VIII에서는 nozzle 開口部에 對한 補強은 nozzle에서 行하여도 좋았으나, Sec. III에서는 容量胴部에서 하도록 規定되어 있으므로 nozzle은 非常히 짧아지고 두텁게되어 製作費는 그런 點에서 增大되지만 한편 容器의 두께는 얇아져서 容器 全體로서는 637 吨에서 540 吨으로 約 16%의 重量이 減少된다.

發電所容量은 今後 점차로 增大하는 傾向에 있는데 이 경우의 原子爐容器의 內徑變化를 第7圖에 表示한다.

原子爐容器의 材料는 高速中性子の 照射에 依하여 그 性質이 變化되어 脆性遷移溫度(NDT)가 運轉時間과 더

불어 變化된다. 即 原子爐容器의 主材料인 A 212 B, A302 B 또는 HY-80은 450°F 以下에서는 相當히 NDT 溫度가 上昇하고 그 以上の 溫度에서는 多少의 燒房效果때문에 그 增加는 遞減한다. 이때문에 原子爐容器 材料의 一部를 爐中에 두고 그의 變化를 監視(monitoring)하고 있다.

PWR plant 一次冷却系는 爐心出口에서 蒸汽發生器, 一次冷却材 pump를 지나 爐心入口에 이르는 한 개의 loop를 構成하고 있는데, 蒸汽發生器와 pump를 組合하여 loop 容量을 各種으로 規格化하고 loop 數와 loop 容量을 選擇함으로써 하나의 爐心으로부터 所要의 出力을 얻을 수 있도록 設計하고 있다. 例컨데 第1表에 表示된 plant에서 loop 當出力이 約 7.5 萬 KWe 인 것—Rooppur (1 loop), SELNI, SENA(各 4 loop), 約 16 萬 KWe 인 것—Zorita (1 loop), Obrigheim, 美濱(各 2 loop), SCE(3 loop), Conn. Yankee, Maliba(各 4 loop) 등이 있는데, 最近의 大型 plant에서는 約 23 萬~25 萬 KWe loop가 採用되고 있다. loop 當 容量增加의 모양을 第3表에 表示한다.



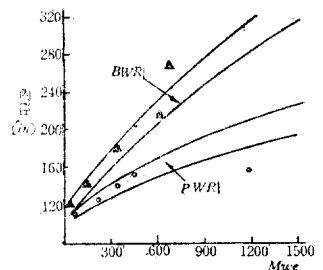
第6圖

<第3表> loop 容量의 變遷

Plant	Yankee	SCE	NOK	Brook-wood	Indian Point #2
熱出力 (MWt)	600	1,347	1,130	1,300	2,758
loop 當熱出力 (MWt)	150	449	565	650	689
loop 溶 量 (10 ⁶ Lb/hr)	9.45	26.0	27.45	38.55	34.05

(2) 一次冷却材 펌프

앞에서 記述한 바와 같이 loop 容量 增大에는 信賴性이 높은 大型 펌프의 實現이 크게 寄與하고 있다. 從來에는 高溫高壓의 一次冷却材를 循環시킴에는 caned moter pump가 使用



第7圖 發電所出力과 原子爐容器內徑

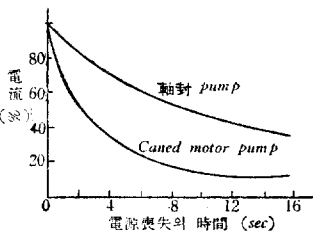
되었으나 WH에서 2250 psi의 一次冷却材를 安定되게

封入할 수 있는 軸封機構를 開發한 結果, 效率이 높은 大容量 펌프製作이 可能하여 現在에는 90,000 GPM 이 實用化되고 있다. caned motor 型을 軸封型으로 變更시킨 後 펌프의 大型化가 經濟적으로 可能한 것은 아니지만 第8圖에 보인 바와 같이 펌프의 慣性을 容易하게 增加시킬 수가 있어서 安全解析上 非常히 有利하고 또한 現地에서의 補修가 容易한 利點이 있다. 펌프 封轉에 있어서도 封水는 漏洩이 없도록 調整된다. 또한 萬一의 경우, 一次冷却材에 發生된 放射性氣體가 軸封部를 세어 나와도 paper seal 이 있어야 原子爐 格納容器內에 放出되지는 않는다.

(3) 爐內構造

原子爐의 爐藏部に 해당하는 爐心 및 그 支持構造物을 爐心構造物이라 부르는데 原子爐容器內에 配置한다. 第9圖에 最近의 PWR 爐心構造를 表示한다. Yankee 와 같은 初期의 爐와 比較하여 크게 다른 相異點은 制禦棒의 構造와 scram 荷重을 받는데 있고, 冷却材의 흐름에는 큰 差가 없다.

初期에는 制禦棒에 板狀制禦棒을 使用하여 scram 荷重을 上部爐心板이 받도록 되어 있었다. 爐心板은 爐心에서 가까이 있으므로 γ 線에 依한 發熱이 比較的 큰데 反하여 板의 두께에는 限度가 있기 때문에 여기에 힘을 버티게하면 複雜한 샌드위치 構造밖에 될 수 없으므로 順次的으로 改良하여 最近에는 前述한 바와 같이 RCC 方式의 制禦棒을 採用한 結果, scram 荷重은 下部構造에 加하게 되어 上部構造는 完全히 強度材로부터 解放되어 重量이 輕減되며 構造는 單純化가 可能하여 燃料交換이 容易하게 될 뿐 아니라 이에 要하는 時間도 단축되었다. 또한 RCC 方式에 따라 制禦棒 및 爐心に 特別한 制禦棒 緩衝裝置를 세운 必要가 없어져 爐內構造는 一層 單純化되었다. RCC 는 또한 follower 를 必要치 않으므로 下部構造物이 길이가 短縮되어 壓力容器內의 容積을 減少시키고 安全注入系 作動時의 時間이 短縮되어 安全上의 利點이 있다.



第8圖 pump 動力을 喪失했을 때의 漫性物性

以上과 같이 爐心の 構造는 一貫하여 構造의 單純化, 一體化의 方向으로 前進되고 있는바 RCC 의 採用으로 더욱 뚜렷한 成果를 보이고 있다. 또한 爐內 計裝으로는 外部에서 移轉 및 取出이 可能한 檢出器를 採用하고 壓力容器

의 下部에서 取出할 수 있도록 設計되어 있어 燃料交換 作業은 容易하도록 되어 있다.

6. 燃 料

燃料의 cycle cost 를 低減하기 爲하여 燃料技術의 分野에 있어서는 燃料集合體의 設計, 燃料選擇 등 많은 點에서 改良이 되었다. 燃料은 金屬被覆管에 低濃縮 二酸化우라늄을 pellet 型으로 하여 封入한 燃料棒을 여러 개 配列한 燃料集合體로 만든 것으로 本質的으로는 Yankee 發電所 以來 變換한 것은 없으나, 集合體의 形狀, 被覆管의 材質 등에 있어서 많은 進歩를 보게 되었다. 現在의 PWR 에서는 RCC 案內管에 約 500 mm 의 pitch 를 두고 燃料棒 支持格子를 溶接固定시켜 이로서 燃料集合體의 支持 또는 強度材로서 使用하고 있다. 이 燃料棒 支持格子를 組合하는 方法은 徒前과 別差가 없으나 平行流의 振動이나 또는 橫荷重이 棒에 moment 가 加해져도 燃料棒의 位置에 決코 影響이 미치지 않도록 設計되어 있다.

이 燃料集合體에서 燃料棒은 固定되어 있지 않으므로 半徑 또는 軸方向으로 自由로 膨脹될 수 있어서 燃料棒은 爐心內에서 Bending 또는 Bowing 現象이 없어지고 따라서 棒의 龜裂과 이로 因한 核分裂 生成物의 放出염려도 적어진다. 뿐만아니라 RCC 案內管은 側板에 代해서 強度材의 역할을 하지 않으므로 爐內에서 餘分의 構造가 不必要하게 되어 以前의 設計에 比하여 中性子經濟上 크게 向上될 可能이 있다. 또 RCC 가 들어있지 않은 燃料集合體에도 流量調整用 plug 또는 中性子源 plug 를 넣어, 全爐心을 同一燈料集合體의 相互 交換性을 良好하게 하고 있다.

이 改良型 燃料集合體는 Saxton 原子爐에서 照射實驗하고, 爐外에서는 爐心開發試驗 loop 에 plant 運轉條件으로 RCC 作動試驗을 겸하여 長時間 實驗한 結果, 良好한 成績을 얻은 것이다.

燃料棒은 Yankee 以來 많은 照射實績을 쌓고 信賴性이 높음을 實證하고 있는데, 第4表에 Stainless steel (S.S), Zircaloy (Zry)被覆의 燃料實績을 表示한다. S.S 이나 Zry 는 모두 被覆管으로 有効한 材料인데, S.S 는 耐蝕性, 高溫溫度가 좋고 加工이 容易하여 처음부터 使用되어 왔었는데, WH 社에 依한 材料開發과 Saxton, CVTR(重水減速爐)의 實績으로부터 耐蝕性, 水素脆化가 적은 Zry-4 (Ni 含有量이 500 ppm 以下 되는 Zry-2) 를 採用하게 되어 앞서 말한 바와 같이 燃料集合體에서 側板의 省略과 더불어 中性子 經濟上 크게 進歩하게 되었다. 計劃中の 爐心은 모두 Zry-4 被覆으로 豫定되어 있다.

燃料製造技術에 있어서도, Saxton 의 푸르토늄計劃以

<第4表>

PWR 燃料의 照射實績(1965年 7月15日 現在)

原 子 爐	被 覆 材	被 覆 管 厚 度 (in)	最大出力密度 (km/ft)	最 大 照 射 量	
				n/cc>1MeV	MWD/T
Yankee	燒 鈍 348 s.s.	0.021	11.7	8×10^{21}	38,000
BR-3	〃 〃	0.0205	11.6	2×10^{21}	9,000
SA×TON	冷間加工 304 s.s.	0.015	13.5	3×10^{21}	22,000
SA×TON	〃 〃	0.010	13.5	1×10^{21}	10,000
SELNI	〃 〃	0.015	10.5	1×10^{21}	6,000
CVTR	Zry-4	0.023	14.0	8×10^{21}	14,000
SAXTON	〃	0.023	16.0	2×10^{21}	14,000

來 燃料成分(UO₂와 UO₂-PuO₂), 燃料加工法(pellet 과 振動充填) 및 被覆材(Zry 와 S.S.)를 種種 組合하여 性能上의 比較를 行한 結果, 이들의 成果는 다음의 PWR 에 適用될 것으로 思慮된다.

7. 大容量化의 限界

現在의 PWR技術上 機器의 製作限界는 美國에 있어서 單機 150萬~200萬 KW 이다. 製作限界에 걸리는 것은 터빈, 發電機 및 原子爐容器이고, 蒸汽發生器와 펌프는 强하고 大型化할 必要가 없다. 原子爐容器製作의 限界로는 製作設備 以外에도 檢査設備와 輸送能力인데, 美國의 CE社에서는 이미 150萬 KW 以上の 原子爐容器를 製作할 때는 8 MeV 線型加速器를 非破壞檢査用으로서 設備에 加하고 있다. 輸送에 關해서도 PWR用 原子爐容器는 重量과 寸法上 比較的 小型이므로, 이 程度까지는 現在의 輸送設備能力으로 充分하다고 생각된다.

한편 爐心設計는 PWR 爐心을 出力密度가 높아 元來 小型이지만, 容量增加에 對하여 대단히 커지므로 從來의 設計가 踏襲되고 있다. 102萬 KWe의 Indian Point B는 爐心이 領域 3 cycle의 設計이므로 燃料集團體의 方法은 特別히 變하지 않았으나 150萬 KWe 以上の 爐心에 對해서는 出力의 平坦化를 期할 수 있도록 設計上의 새로운 提案이 可能하다.

8. 安 全

(1) 正常運轉時의 安全性

PWR 原子力發電所에서는 放射性 氣體를 포함한 一次冷却系는 蒸汽發生器에서 터빈 蒸汽系와 分離된 閉回路型이므로 一次冷却中の 放射性 氣體가 터빈의 air ejector에서 放出될 虞는 없다. 一次冷却系中の 放射性 氣體는 廢棄物處理系에서 放射能을 充分히 減無한 後에 氣象條件을 考慮하여 完全히 放射線管理가 된 排氣筒에 依하여 大氣中에 放出되도록 設計되어 있다. 그런데 排氣筒出口에서의 放射能은 充分히 낮아서, 大氣擴

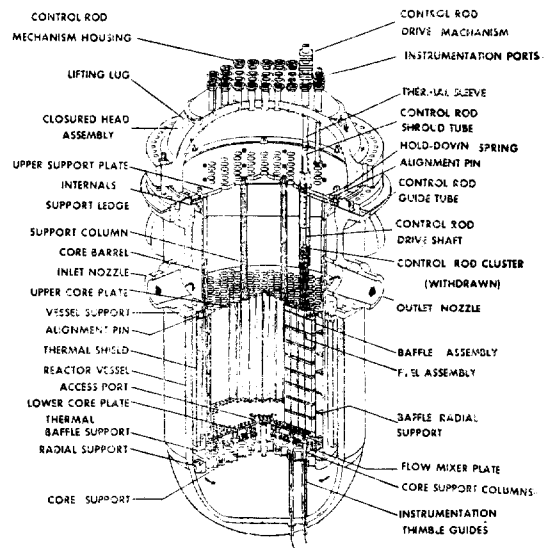
散效果를 높이기 爲하여 排氣筒을 높게 할 必要는 없다. Indian Point #2(美), Turkey Point #3, #4(美)發電所 같은 最近의 PWR 發電所의 排氣筒 높이는 格納容器보다 얼마 높지 않도록 設計되어 있다. 從來의 發電所에서는 排氣筒을 相當히 높게 設計하고 있었으나 最近의 發電所에서는 排氣筒을 낮게 設計하는 傾向에 있다.

(2) 事故時의 安全性

PWR 原子力發電所에서는 安全注入系, 原子爐 格納施設(格納容器, 內外部 spray系, 空氣再循環系, 排氣筒 filter系) 등의 事故後의 安全處理施設을 設置하고 確率的으로도 거의 일어나지 않을 原子爐系 配管破斷事故에 對備하여 發電所 周邊에 公害가 미치지 않도록 考慮되고 있다.

(i) 安全注入系

安全注入系는 原子爐系의 配管破斷事故時에 硼酸水를 原子爐系 loop의 低溫側에 뿌려서 爐心の 溶融을 防止



第9圖 PWR 爐內構造 說明圖

하도록 設計되어 있다. 또한 Benzau(스위스), Malibu(美), Turkey Point(美), 美兵(日) 등의 發電所에는 直接 原子爐壓力容器內에 注水하여 爐心을 冷却하는 deluge 系를 併設하고 있다.

San Onofre 發電所(美)에서는, 安全注入 펌프를 二次 系의 給水펌프로 兼用하도록 設計되어 있으나 系統의 複雜을 避하기 爲하여 그 後로부터는 尋用的 安全注入 펌프를 設置하고 있다.

(ii) 原子爐 格納施設

最近의 發電所에서는 內側을 얇은 強板으로 補裝하여 氣密性을 높이고, 外側을 鐵筋 콘크리트로 補強하여 遮斷의 目的을 갖는 格納容器가 많이 使用되고 있다. Connecticut Yankee(美), Indian Point #2(美)의 格納容器는 이같은 型이다. 또 鐵筋 콘크 대신 P.S. 콘크리트를 使用한 것으로는 Brookwood(美), Turkey Point(美)의 兩發電所가 있다. Yankee 發電所에서 볼 수 있는 全鋼鐵製 格納容器 대신에 콘크리트 外卷의 設計가 많이 쓰이는 것은, 格納容器의 容積과 設計壓力이 增大되면 全鋼鐵製 格納容器가 콘크리트製보다 價格이 높아지기 때문이다. 人口密集地에 建設되는 Malibu(美), Benzau(스위스) 發電所에는 二重格納容器가 採用되고 있어서, 事故時에 格納容者中에 放出되는 核分裂生成物을 完全히 內封하여 大氣中에 放散되지 않도록 設計되어 있다. 單一格納容器와 二重格納容器의 中間의인 것으로 半二重格納容器가 있는데, SELNI(伊) 및 美兵 發電所에 採用되고 있고, 그 機能은 二重格納容器와 같이 核分裂生成物을 內封할 수 있도록 設計되어 있다. 原子爐格納施設에는 格納容器 以外에도 다음과 같은

補助系가 設計되어 있어서, 格納容器의 事故時에도 核分裂生成物의 內封機能을 높이도록 配慮되어 있다. 內外部 Spray 系는 事故時의 格納容器 內壓을 減少시키는 機能을 갖고 있어, 內部 Spray 系에 內壓減少 以外에도 核分裂生成物의 水洗效果를 期待할 수 있다. 空氣再循環系는 Halogen filter 와 冷却器를 具備하고 있어서 格納容器內의 空氣의 除染과 冷却을 할 수 있도록 되어 있다.

×

×

以上에서 PWR 型 發電所의 技術의 開發現況과 그 展望에 關하여 略述 하였거니와, 昨今の 韓國 에너지 事情은 매우 艱박한 바 있어 우리도 不遠한 將來에 原子力發電을 하지 않을 수 없는 處地에 놓여 있게 되었다. 現在 計劃으로는 1970 年 初에 原子力發電所의 建設을 始作하여 1974 또는 75 年에 稼動할 目標을 세우고 있거니와 同計劃대로 原子力事業을 推進하기 爲하여는 政府는 보다 強力한 支援을 아끼지 말아야 하며, 發電事業體인 韓電은 보다 效果的인 計劃을 作成 遂行해야 될 줄 믿는다. 早速한 時日內에 原子力發電所가 韓國에서 稼動되기를 筆者는 期待하여, 將次는 原子力發電이 모든 電力供給의 中心이 될 것으로 確信한다.

參 考 文 獻

- (1) M.A. Shultz; Control of Nuclear Reactors and Power plants (p. 251~264)
- (2) IAEA刊; Directory of Nuclear Reactors, Vol. 4. (Power Reactors)
- (3) 原子力工業: Vol. 12, No. 11, 1966.