

350 Mwe 原子力 發電所의

發電原價 推定

技術解説

16-4-1

Power Cost Evaluation of 350 MWe Nuclear Power Plant.

盧 潤 來*

Eunrae Roh

Abstract

This paper covers an estimation and analysis of generating cost of 350 MWe nuclear power plant [using a pressurized water reactor on the assumption that such a nuclear power plant would be constructed in Korea in or around 1970.

For the evaluation of this generating cost, an extensive study has been conducted based on the current information on operating and costing parameters of light water reactors, particularly those of pressurized water reactors.

Based on this study, a total generating cost of 7.29 Mills/Kwh was evaluated by operating the plant at 80% plant factor.

For this calculation, a steady state method was introduced. It is considered, therefore, that a total generating cost in the beginning of plant operation would be a little higher than 7.29 Mills/Kwh, which has been calculated in the state of equilibrium.

1. 序 論

一般的으로 原子力 發電을 計劃하고 있는 後進國家에 있어서, 先進國이 發表한바 있는 發電原價를 解析하고 後進이라는 特殊條件下에 그를 適用함에는 다음과 같은 困難性이 따르게 마련이다.

하나는 原價에 關한 資料가 不完全하거나 或은 막연하여 評價하기가 힘든 경우이며, 다른 하나는 이들 資料에 依하여 決定된 發電原價가 後進國에서는 一般的으로 使用할 수 없는 方法으로 計算되어 있기 때문이다.

理論的으로 原子力 發電의 原價計算은 在來式 火力發電의 그것과 같은 方法에 따른다. 어느 경우에 있어서도 發電所의 建設, 燃料, 運轉 및 維持에 所要된 費用에 對하여 發電原價를 決定하는것이 그 目的이다. 그러나 이들 費用이 비록 類似한 區分에 따라서 分類되지만 原子爐의 型과 核燃料의 特性이 運轉經驗의 不足과 함께 複雜性을 띄우게 되어 原子力에 있어서는 在來式 火力보다 發電原價 計算이 더 困難하게 된다.

原子力 發電所의 建設에 있어서는 所要되는 建設單價가 火力보다 큰것이 그 特徵의 하나이며, 原子力 技術의 發展에 따라 그 差는 漸次로 좁혀지고 있는 實情이다. 이 建設單價는 爐의 型, 位置 및 크기에 따라 變하

는데 특히 크기가 작아지면 建設單價가 현저하게 增加하여 200 MWe 級에서는 火力의 두배, 20 MWe 級에서는 3배 또는 그 以上으로 된다. 經驗不足, 開發費用의 增大, 安全을 爲한 過度의 設計와 함께 爐材料의 限定된 貿易으로 因하여 初期의 建設單價는 매우 높았으나, 現在에는 立證된 爐型과 함께 單一容量의 增大로 美國에서는 1,000MWe 級의 輕水爐인 경우에 火力과 別差없는 建設單價를 보이고 있다.

다음에 原子力이 火力보다 높은 設費에도 不拘하고 充分한 競合性을 갖는것은 燃料費가 低廉하기 때문인데 原子力의 燃料費는 將來에도 계속 下落할 것으로 展望된다. 그 理由는 푸루토늄, 우라늄-233과 같이 原子爐에서 生産된 核分裂性 物質의 使用이 可能할것이고 標準化에 따라 燃料棒의 成型費가 低下되며 技術開發에 따라 燃料의 効率的인 使用이 可能하기 때문이다. 그러나 燃料로 因한 初期投資는 火力에 比할 수 없이 크다. 例컨데 三個月分의 石炭貯藏을 갖인 火力인 경우를 보면 이는 kw 容量當 1噸에 該當되므로 石炭價格에 따라 \$5~20/kw 밖에 되지 않으나, 原子力인 경우에는 爐에 裝填된 燃料과 貯藏分을 합치면 火力의 10배에 達하는 巨額이 된다. 한편 使用이 끝난 燃料에도 核分裂性 物質이 들어 있어서 이를 輸送하고 化學處理를 하여야 되므로 原子力의 燃料費를 正確히 評價하기란 매우 困難

* 正會員 韓國電力 技術部

한 일이다.

한편, 原子力은 人體의 保健과 安全上 火力보다는 運轉維持가 높게 되는것이 事實이며, 保險料에 있어서도 같은 傾向이다.

原子力の 發電原價에 對해서는 先進諸國에서 이미 數 많은 評價가 各 爐型 및 크기에 따라 報告되고 있으나, 韓國에는 아직도 原子力 發電所의 運轉實績은 물론 뚜렷한 計劃 및 原價計算도 되어 있지 않은 情形이다. 그러나 머지 않아 우리도 原子力 發電을 하게 될것임으로 筆者는 350MWe 加壓水型 原子爐를 擇하여 이를 韓國에 建設한다고 假定하고 그 發電原價를 評價하여 보았다. 本 論文에서 行한 計算은 平衡狀態에 達한 原子爐에서 Steady state method에 依한 것임을 밝혀둔다.

2. 建設費 推定

“發電所 建設費”란 發電所 建設에 要하는 全費用을 뜻하며 敷地, 材料, 機器, 設置 등 直接費뿐만 아니라 設計, 建設中 利子, 運轉資金 등 이른바 間接費까지 포함된다. 그러나 燃料費는 除外된다. 原子力 發電所의 建設費를 推定하는 方法은 在來式 火力의 경우와 같지만, 原子力인 경우 機器의 壽命이 一定치 않아 不確實性이 介在하게 되므로 注意를 要하게 된다. 原子力의 原價計算에 있어서 무엇보다 이 資本費의 正確한 策定이 重要하므로 다음에 그 概要를 說明코져 한다.

敷地의 選定은 經濟的 및 技術的 要件에 따라 決定되는 것이며 總建設費에 對한 比率는 매우 적어 最大인 경우에도 kw 당 2~3弗밖에 되지 않는다. 따라서 經濟的 要件下에서 觀察한다면 問題될것은 없으나 原子力은 人口의 密集地域으로부터 避해야만 되는 保健上의 問題가 다르므로 이른바 擴散區域 (Kxclusion Area)을 加味하여 在來式 火力의 경우보다는 같은 容量에 있어서도 넓은 敷地를 要하게 된다. 따라서 敷地 自體의 價格보다는 擴散地域內의 民家에 對한 補償問題가 더 심각한 것이다. 결하여 廣範한 敷地로 因한 道路의 新設, 送電과 給水의 施設 등에 많은 投資가 要하게 된다. 다음에 原子爐의 格納設備은 原子爐 建物의 一部가 되므로 爐型과 爐의 危險度에 따라서 폭 넓은 建設費의 差가 있게 된다. 뿐만 아니라 格納設備의 設計에는 最惡의 假想事故時에 對해서도 絶對 安全性을 確保할 수 있어야 되므로 巨大한 容器가 必要되며 또한 生體 保護를 爲한 콘크리트 遮蔽도 設置되어야 하므로 正確한 評價는 困難한 일이다. 그러나 現在 美國에서 開發되고 있는 壓力抑制式 格納設備은 將次 모든 輕水爐에 有用될 것이므로 爐의 크기에 따라 極準化가 可能한 것이다.

原子爐 設備에 있어서는 첫째 壓力容器는 設計溫度와

壓力 또는 材料에 따라 다르나 重量이나 容積이 巨大하므로 輸送上의 問題도 된다. 또한 非破壞 檢査와 應力解析에 따라 容器의 製作費에 큰 影響을 미친다. 原子力 發電所의 計裝費는 火力보다 一般의으로 高價인데 특히 事故燃料과 燃燒度를 檢査하는 計裝의 制禦方式에 따라 그 差異는 甚하다. 어느 경우를 막론하고 經濟的 理由보다는 安全面에서 選擇되어질 것이다. 高溫氣體冷卻爐나 重水減速爐가 아닌 輕水爐의 경우에는 減速材나 冷卻材에 關하는 限別問題는 없을 것이다.

끝으로 間接費로서의 設計 및 技術監督費와 建設中 利子は 火力의 경우와 같은 方法에 依하면 大差가 없을 것이지만, 原子力은 그 經驗이 적고 豫期치 못한 事故의 頻發로 豫備費의 策定이 困難할뿐 아니라 火力에 비하여 큰 比重을 차지하는것이 普通이므로 原子力 發電所의 建設이 漸次 增加되고 實際 投資費가 正確히 評加됨에 따라서 豫備費가 占하는 比率는 減少될 것이다.

以上과 같은 諸要件을 참작하고 國內의 特殊性을 考慮하여 送所端出力 350MW의 加壓水型 原子爐를 建設하는 경우의 總 建設單價를 \$230/kw로 控定하였는데 그 理由는 다음과 같다.

우선 美國內에서 運轉중이거나 建設中인 PWR의 容量과 建設單價와의 相關圖表를 作成하고 內插法에 依하여 얻어진 350MWe의 建設單價(\$208/kw)에 原子力 技術의 開發過程을 勘案하여 1970年初의 建設費를 \$190/kw로 推定하였다. 이는 今年初 WH社가 發表한바있는 350MWe의 建設單價(\$189/kw)와 같다고 하겠다. 問題는 이를 韓國內에 建設하는 경우인데, 대략 20%加算한 \$230/kw로 筆者는 推定하였다. 한편 보다 正確을 期하기 爲하여 年初에 發表된 “350MW Net Electric Output Summary Capital Cost Estimate”(WH社發表)를 参照하고 韓國의 特殊性을 考慮하여 輸送, 保險, 技術監督, 設計 등 諸費用을 加算한 後에 豫備費를 15%, 內資 및 外資比를 25%對 75%로 보아 据置期間이 建設期間보다 外資의 利子分을 생각치 않고 內資分의 利率을 7.5%로 하여본 建設單價의 推定도 上記 \$230/kw와 大差가 없었다.

以上과 같은 方法으로 推定된 建設單價에 現在 韓電當局에서 適用하고 있는 固定費率을 使用하고 原子力 發電所의 平均 負荷率을 80%(年間 7010時間 稼動)로 보면 發電原價學 資本費가 占하는 比重은 매우 커서 4.46 Mill/KWH로 된다. Appendix Table 2 參照)

이와 같은 方法으로 資本費를 計算한다면 簡單明瞭하여 좋기는 하지만, 다음과 같은 事實에 注意를 해야 될 것이다. 即 資產의 減價償却과 借款의 年賦償還이 그것인바, 借款의 償還額은 發電所機器의 壽期과는 關係없

이 決定되지만 減價償却은 樣器의 壽命과 絶對的인 關聯性을 갖게 되는 것이므로 發電所의 壽命을 어느 程度 보느냐가 困難한 問題로 남게 되는 것이다. 가령 在來式火力인 경우에는 全體를 一括하여 30年으로 보고 있지만, 原子力인 경우에는 中性子束에 依하여 照射된 機器와 照射되지 않은 機器의 壽命이 크게 다르므로 어떤 部分은 例컨데 15~20年의 壽命을, 다른 部分은 20~25年의 壽命을 適用하지 않으면 안되는 不便이 따르게 된다. 그러나 이는 매우 複雜하여 全體로서의 平均 壽命을 在來式보다 약간 적게 보아 25年 程度로 보는 것이 通例이다.

例컨데 英國式 氣體冷却爐에서는 20年, 캐나다의 重水爐에서는 重水の 壽命을 40年爐와, 燃料換給機의 壽命을 15年, 發電設備分을 30年으로 보고 原價計算을 하고 있는데, 輕水爐인 경우에는 在來式과 同一하게 30年의 耐用年數로 보아도 無放하다.

3. 核燃料費

原子力 發電所의 建設單價가 火力보다 높음에도 不拘하고 充分한 競合性을 갖는 理由는 燃料費가 低廉하기 때문이다. 原子力의 燃料費는 核燃料의 性能이 漸次 改善될 뿐 아니라 成型費와 化學處理費도 技術의 開發과 量産化에 따른 標準化로 因하여 앞으로도 계속 下落될 展望이다. 그럼에도 不拘하고 核燃料은 濃縮, 成型, 變換, 化學處理, 照射 冷却, 輸送 等등의 複雜한 循環을 갖이므로 核燃料費의 正確한 評價는 原子力의 原價計算中 가장 困難한 것이다. 이와같이 複雜한 原子力의 燃料循環이지만 根本적으로는 U-235, U-238과 Pu의 세 가지 核分裂性 燃料中에서 그 하나를 使用하는 것인데 輕水爐인 加壓水型에 있어서는 U-235를 使用한다. 即 濃縮된 U-235를 燃料로 使用하고 生産된 Pu은 再循環되지 않고 販賣되는 것이 普通이다. U-235 濃縮燃料의 循環圖를 Appendix Fig. 1에 表示한다.

現在 核燃料의 完製品을 販賣하고 있는 國家는 英國과 美國뿐인데 輕水爐의 燃料로서는 自然히 美國의 原子力委員會 (U.S. AEC)가 策定한 U_3O_8 의 값에 變換費와 被覆材를 包含한 成型費를 加算하는 方法이 第一無難할 것이다. 따라서 本論文에서 計算된 核燃料費의 方法으로서는 다음과 같이 美國內의 實情을 참작하여 우리 國內事情에 맞도록 하였다.

(1) 우라늄의 값으로는 U.S. AEC가 現在 施行하고 있는 \$8/kg U_3O_8 를 그대로 使用하였는데, 이는 同委員會가 發表한바와 같이 上記 값은 앞으로 계속 維持된 展望이기 때문이다.

(2) UF_6 의 形態로 供給되는 濃縮우라늄의 값도 그 濃縮度에 따라서 U.S. AEC에서 定한 價格을 使用하였다. 이에 따라 3.04% 濃縮된 初期 우라늄의 값을 \$22.1.29/kg로 했으며 1%의 最終우라늄의 값을 \$36.28/kg로 보고 計算하였다.

(3) 美國內의 原子力 發電所에 對해서는 現在 U.S. AEC로 부터 燃料을 賃貸받아 原子爐의 稼動으로 缺損된 우라늄量의 該當分과 賃貸에 따른 使用料로서 一定期間(一年)마다 4 $\frac{3}{4}$ % 支拂하고 있다. 그러나 外國인 경우에는 相互계약에 따르게 되는데 例컨데 美國과 Euratom과의 協約에 依하면 美國은 燃料를 販賣할 수도 있고 或은 賃貸할 수도 있게 되어 있다. 筆者는 將次 어떠한 協定이 韓美間에 이루어 질지 알 수 없으므로 (美國의 輕水爐를 導入한다고 假定하고) 여기서는 美國內의 燃料製作者側으로 부터 年 6%의 使用料를 支拂하는 賃貸借契約을 맺는 것으로 假定하고 爐稼動으로 因한 우라늄의 缺損分과 使用料를 부담하는 것으로 計算하였다.

(4) 照射된 燃料棒의 化學的處理費와 우라늄의 UF_6 로의 變換費는 모두 U.S. AEC에서 定한 金額에 따르기로 하였는데 이는 將次 Toll Enrichment에 따르는 경우에도 계속 適用될 것으로 展望된다. 이에 따라 處理工場의 能力을 3% 濃縮인 경우에 一日 1,000kg로 보았으며 日當 處理費를 \$23,500로 하였다. 또한 UNH를 UF_6 로 變換하는 費用을 \$5.6/kgU로 하였다.

(5) Pu credit를 考慮하여 U.S. AEC에서 \$10/gr으로 買入하고, PuN를 金屬으로 變換하는 費用을 \$1.5/gr로 하였다.

(6) 上記와 같은 諸過程에 있어서 우라늄과 Pu의 損失이 不可避하므로 다음과 같이 그 損失率을 推定하였는데 이는 現在 美國의 化學處理工場, 濃縮工場에서 適用하고 있는 것이다.

抽出作業中の U 損失	1%
變換作業中の U 損失	0.3%
抽出作業中の Pu 損失	1%
變換作業中の "	1%

上記와 같은 條件 以外에도 核燃料費의 計算에 큰 影響을 미치는 것으로 核燃料의 技術的 性能과 그 保障이 問題된다. 即 燃料의 燃燒率이 核燃料費에 큰 比重을 차지하게 되는데 現在の 技術로 UO_2 燃料棒에서 15~20 MWD/kgU이 無難하다. 한편 같은 輕水爐이면서도 加

壓水型은 沸騰水型보다 燃料의 濃縮度가 높고 被覆材도 中性子の 吸收가 적은 Zry-4를 將次的 모든 加壓水型爐에 使用할 展望이므로 그 燃燒度는 25~30 MWD/kgU 이 可能할것이다. 따라서 本 論文에서는 27MWD/kgU 으로 보았다. 이와 같이 高燃燒度를 基準한 理由로서는 첫째 現今의 原子力技術이 改善되어 있어 燃料棒에 機械的 또는 腐蝕으로 因한 化學的 事故가 全無하므로 冷却材의 흐름에 障穽가 없고 核分裂로 生成된 物質이 冷却材로 放出될 念慮가 거의 없기 때문이고 둘째 爐의 反應度가 豫想外로 低下하는 경우에는 一般的인 契約또는 協定內容에 따라 燃料棒의 製作者가 爐心內에서 燃料棒集合體의 配列을 다시 調整하여 保障된 燃燒度를 維持토록 하거나 危弱한 燃料棒을 交替할 義務가 있기 때문이다. 이같은 燃料保障에 따른 製作者側의 財政的 責任은 普通 大部의 경우 成型費의 부담과 輸送費의 부담이고, 燃料事故로 因하여 發生된 運轉中止때문에 加해진 需用損失은 包含되지 않는다.

끝으로 使用이 끝난 燃料의 價格評價 인데 이는 原則的으로 U-235, Pu 같은 Fissile material 과 U-238(Fertile material)의 價格에서 輸送과 保險料를 處理費와 함께 減한것이므로, 本 論文에서도 이를 考慮하여 核燃料費를 計算하였다. 또한 輸送費에 있어서 使用치 않은 새 燃料의 輸送은 一般 機器와 類似하게 취급할 수 있으나 照射된 燃料은 비록 3~4個月間의 冷却期間을 두고 半減期가 짧은 分裂生成物의 崩壞를 充分히 託用한다. 하더라도 放射性이 대단히 強하며 더구나 爐內 또는 燃料의 放出中에 被覆材에 破損이 나면 汚染될 危險이 있어서 使用이 끝난 燃料의 輸送에는 重量의 容器가 必要되어 그 費用도 커지게 된다. 따라서 이點을 充分히 考慮하여 使用이 끝난 核燃料의 輸送費를 \$3/kgU 로 하였다.

以上과 같은 諸條件을 考慮하면 核燃料費는 燃料의 缺損分과 賃貸料, 成型費, 化學處理費, 變換費, Pu credit, 輸送費 등 一聯의 複雜한 計算을 包含할 뿐만 아니라 支拂될때 까지의 期間에 따라서도 큰 影響을 미치게 된다. 또한 燃料의 管理方法에 따라서도 燃料費에 큰 影響을 미치는데 例컨데 多領域에 依한 裝填方法은 燃料循環費에 큰 利益을 준다.

本 論文에서는 以上 言及된 諸條件下에서 平衡狀態에 達한 核燃料費를 計算하였는바 그 값은 1.79 mills/kwh 였다. (Appendix 參照)

IV. 運轉 維持費 및 其他

便宜上 運轉 維持費속에서 第三者側의 原子力保險料와 機器의 中間交替費 및 運轉資本費 등을 包含시킨다.

이들의 總計를 普通 施設容量의 kw當 年間費用으로 表示하는데, 이는 發電所의 稼動率變化에도 不拘하고 運轉 維持費가 占하는 比重은 全費用의 一部에 지나지 않을뿐 아니라 負荷率의 變化에 對해서도 比較的 鈍感하기 때문이다.

따라서 運轉維持費의 發電原價에 對한 部分을 Z로 表示한다면, 上記 諸費用의 合計를 年間의 平均稼動時間(h)으로 나누어 KWH 當 運轉維持費가 計算된다.

$$\text{即 } Z = \frac{\sum A_i}{h}$$

但 $\sum A_i$ 는 kw 當 年間費用의 合計.

一般的으로 原子力 發電所에 있어서의 運轉維持費는 火力 發電所에 있어서의 運轉維持費는 火力 發電所보다 높는데 그것은 機器의 附屬品이 比較的 高價일뿐 아니라 原子力의 技術은 一般的으로 高度의 知識과 熟練을 要하므로 發電所 要員에 對한 報酬가 또한 높기 때문이다. 例컨데 Film badge의 處理, 放射能이 汚染된 衣類의 取扱, 計器의 調整, 放射生理分析 等등의 作業은 最少限 原子力 發電所內에서 行하여져야만 되므로 能熟한 技術者가 要求된다. 한편 韓國에서 原子力 發電을 始作하는 경우에는 비록 附屬品이 美國보다는 비싸겠지만 人件費가 아주 低廉하므로 一般的으로 運轉維持費는 美國보다. 약간 싸거나 또는 같을것으로 推定된다. 本論에서는 350MWE에서 美國과 거의 同一하게 推定하였다.

다음에 原子力 發電所에 있어서는 在來式 火力에서 볼수 없는 原子力 保險이 따르는데 이는 萬若의 경우 發生될 事故를 豫想하여 그 補償을 前提로 한것이다. 原子力의 事故는 在來式 火力의 事故와는 달라서 그 被害가 激甚할 뿐 아니라 放射能의 汽染은 被害區域이 擴大될 念慮도 있고, 一段 事故가 發生되는 경우 國民들이 받는 心忡 衝擊은 莫大하여 原子力 發展에 크나큰 阻障을 超來할것이 明確하다. 이같은 不詳事를 防止할 目的下에 第三者에 依한 原子力保險制度가 創設되었는데 韓國은 아직 이에 關한 規制도 없고 또한 實績도 없으므로 同一한 容量의 輕水爐에 있어서 美國에서 實施되고 있는 原子力保險費보다 10% 增加한 것으로 보았다.

機器의 老朽로 因하여 代置될 部分은 普通 이를 함께 考慮하여 建設費用에 包含시키고 있는데 本論에 있어서는 이를 kw 當 建設單價의 年平均 0.3%로 推定하여 運轉維持費內에 包含시켰다.

끝으로 發電所의 運轉과 燃料에 投入된 資金은 電氣 販賣로 因한 受金까지 이른바 運轉資金의 形態로서 必要한것인데 이는 各國마다 特殊한 條件에 따라서 다르므로 一律的으로 策定할 수는 없다. 다만 美國에서는

經驗上 原子力發電所의 運轉資金을 우라늄燃料의 價格을 除한 全 爐心 成型費의 60%와 税金과 保險料를 除外한 年間費用의 2.7%를 合한것으로 推算하고 있는 實情이다. 筆者는 다만 이를 \$2/kw p.a. 로 推定했다.

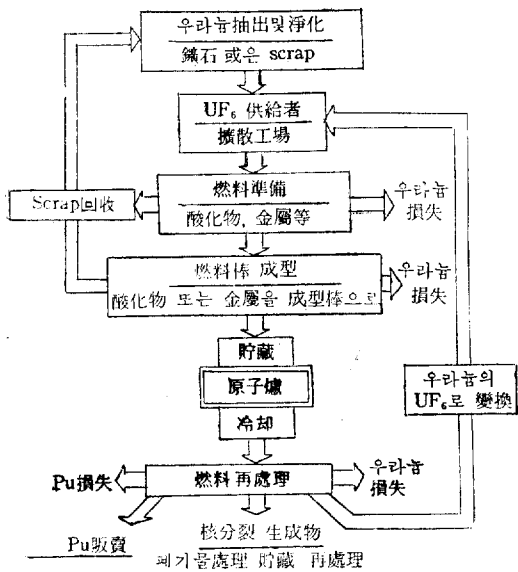
以上과 같은 方法으로 O & M 費(原子力保險費等 包含)를 計算한 結果 1.04 mills/kwh 였다. (Appendix Table 2 參照).

V. 結 論

以上에서 Steady state method 에 依한 350 Mwe 加壓水型爐의 發電原價를 評價하여 보았으나 核燃料費의 推算에는 많은 要件이 作用하게 된 關係로 不確實性의 介在가 全無하다고 할 수 없을것이고 또한 原子力 發電의 經驗을 가지고 있지 못한 우리의 實情이기 때문에 多少의 無理가 있을법한 일이다. 그러나 筆者는 現在까지 發表되었거니와 或은 入手된 여러 資料를 근거로 하여 發電原價計算에 臨하였음을 附言하여 둔다.

同 評價의 結論은 7.29 Mills/KWH 의 發電原價가 平衡狀態에서 可能함을 表示하고 있는데 稼動初期에는 이 보다 높은 發電原價가 豫想된다.

끝으로 原子力, 發電의 發電原價에 關하여 많은 研究 論文이 나오기를 筆者는 期待한다.



<REFERENCES>

1. Glasstone & Sesonske; "Nuclear Reactor Engineering" Chapt, 14, D. Van Nostrand Co.1963.
2. IAEA Technical Reports No. 5, "Introduction to the Methods of Estimating Nuclear Power Gene-

rating Costs", 1961.

3. Westinghouse Electric Int. Co.; "Financial Aspects of the Nuclear Fuel Cycle", 1967.
4. Westinghouse Electric Int. Co.; "Nuclear Fuel Cost Estimate for 350 MW Net Electric Output Plant", 1966.

Appendix Table 1
Operating and Costing Parameters

項 目	記 號	單 位 ¹⁾	計 算 例
A. Operating Parameters			
1. 熱 出 力	P_t	KWt	1160×10^3
2. 電氣出力(發電端)	P_o	KWe	370×10^3
3. 電氣出力(送電端)	P	KWe	350×10^3
4. 正味効率	e	—	0.3
5. 初期核燃料裝填	L_o	kgU	40,275
6. Annual throughput	L_a	"	$12,550^{3)}$
7. 初期濃縮度	E_o	%U ²³⁵	3.04
8. 最終濃縮度	E_f	"	1.00
9. Plutonium 生産	Pu	g/kgU	6.0
10. 年間平均稼動時間	h	hr	7,010
11. 平衡狀態에서의 燃 燒 率	b	MWD /kgU	27
12. 裝填되기 前의 燃料 貯藏時間	t_s	months	4
13. 使用이 끝난 燃料의 冷却貯藏時間	t_c	"	3
14. 壽 命	n	years	30
B. Costing Parameters			
1. 總建設單價	C_n	\$/KWe	230
2. U라늄(3.04%濃縮)의 價格	U_f	\$/kgU	$221^{4)}$
3. 燃料成型費	U_f'	"	$119^{4)}$
4. 成型된 燃料의 價格	$C_f = U_f + U_f'$	"	$340^{4)}$
5. 平衡狀態에서 放出된 U라늄價格(照射, 處理 및 變換過程에서 損失된것을 加味)	U_i	"	$34^{5)}$
6. 平衡狀態에서 放出된 U라늄과 生性된 Plutonium價格에서 輸送費를 包含한 모든 諸費用을 加味한것)	C_i	"	$17^{5)}$
7. U라늄燃料에 對한 利率	i_f	p.a.	0.06
8. 燃料를 除外한 利率 (資本費率)	i	"	0.0754
9. 減價償却率	s	"	0.0333
10. 年 利	$a = i + s$	"	0.1087
11. 法人稅 및 保險率 ²⁾	X	"	0.0273

12. 總資本費率 (固定費率)	$a+X$	"	0.136 ⁶⁾	=1170 days/core =3.21 yr/core
13. 原子力保險費率	A_1	\$/kw p.a.	0.6 ⁷⁾	따라서 Annual throughput=40,275 $\times \left(\frac{365}{1170}\right) = 12,550 \text{ kgU/yr}$
14. 運轉資本費率	A_{wc}	"	2	
15. O & M (燃料除外)	A_0	"	4	4) Table 4 참조. 5) Table 6 참조.
16. 中間交替費率	$A_r = 0.3\%$	"	0.7 ⁸⁾	6) 年間資本費率は 融資되는 資金과 稅率에 따라 크게 變하는데 本計算에는 現在 韓國電力에서 使用하고 있는 資料에 따라 했음. 7) 原子力保險에 關한 國內實績이 없었으므로 美國의 例를 引用하여 이보다 約 20% 增加하여 計算하였음. 8) 普通 資本費率에 包含시키기도 하는데, 여기서는 分難시켜서 總建設費의 0.3% p.a. 로 보았음.

1) 單位에 kgU 로 表示된것은 原子爐에 裝填된 kgU 임을 뜻함.
2) 保險에는 第三者側의 原子力保險費가 除外되어있음.
3) 年間使用되는 核燃料 Annual throughput의 計算은 다음과 같다.
爐心의 壽命 (Core life)
$$= \frac{(40,275 \text{kgU}) (27,000 \text{KW-days/kgU}) (10^{-3} \text{MW/KW})}{(1160 \text{ MW}) (0.8 \text{ plant factor})}$$

Table 2

發電原價計算表

Table 1의 各種 Parameters를 使用하여 發電原價를 計算하면 다음과 같다

	公 式 및 計 算	發 電 原 價
1. Capital Costs	$\frac{C_n (a+X) 10^3}{h}$ $\frac{(230) (0.136) 10^3}{7010}$	4.46
2. Fuel Costs		
(a) Consumption	$\frac{C_f - C_i}{24eb}$ $\frac{(340-17)}{(24) (0.30) (27)}$	1.64
(b) Inventory	$\frac{\left[\frac{1}{2} \left((U_f + U_i) L_0 + \left(U_f \frac{t_i}{12} + U_i \frac{t_c}{12} \right) L_a \right) i_f 10^3}{ph} \right.}{\left[\frac{1}{2} (221+34) (40,275) + \left(221 \times \frac{4}{12} + 34 \times \frac{3}{12} \right) \right] (12,550)} (0.06) 10^3$	0.15
Sub-total	(a)+(b)	1.79
3. O & M and other costs		
(a) O & M	$\frac{A_0 10^3}{h}$ $\frac{4 \times 10^3}{7010}$	0.57
(b) Nuclear Insurance, interim replacement, Working Capital	$\frac{(A_1 + A_r + A_{wc}) 10^3}{h}$ $\frac{(0.6+0.7+2) 10^3}{7010}$	0.47
Sub-total	(a)+(b)	1.04
4. Total generating cost		7.29

Table 3

核燃料準備 및 成型에 要하는 Parameters

A. Operating and Cost Parameters	記 號	單 位	值	費 用	\$/kgU
1. UF ₆ 供給에서 燃料變換까지의 時間	t_0	days	30	R_0	1.50
2. 燃料 準備	t_p	"	30	R_{pf}	100 ²⁾
3. 燃料成型工場까지의 時間 ¹⁾	t^1	"	0		
4. 燃料 成型	t_f	"	30		

350 Mwe 原子力 發電所의 發電原價 推定

5. 燃料變換에서 Scrap 回收까지의 時間 ¹⁾	t_s'	"	0	—	—
6. 成型工場에서 Scrap 回收까지의 時間	t_s''	"	30	R_s''	1.50
7. Scrap 回收	t_s	"	60	R_s	10
8. Scrap 回收에서 UF ₆ 供給者까지의 時間	t_s'''	"	30	R_s'''	1.50
9. 成型工場에서 爐까지의 時間	t^g	"	60	R_r	3.0
10. UF ₆ 우라늄의 價格	—	—	—	U_f	221
11. 우라늄에 對한 利率	i_f	% p.a.	6.0	—	—
12. 우라늄을 除外한 利率	i	% p.a.	7.54	—	—
13. 구입될 우라늄 量	$F = \frac{1}{(1-l_{pf}-s)}$	kgU/kg charged	1.11		
14. 準備 및 成型過程에서의 損失	l_{pf}	% of F	2		
15. 準備 및 成型中 生成된 Scrap	s	% of F	8		
16. Scrap 回收中の 損失	l_s	% of S	5		

- 1) 燃料의 準備, 成型 및 變換으로부터의 回數는 同一한 領域內에서 이루어 진다고 假定한 것임.
 2) 燃料의 準備 및 成型費를 包含함.

Table 4

核燃料準備 및 成型費의 計算表

Table 3에 주어진 Parameters 를 使用하여 核燃料의 成型費를 計算하면 다음과 같다.

B. Cost Calculations	公 式 및 計 算	\$/kgU charged
1. Uranium inventory UF ₆ 供給, 燃料準備, 成型, Scrap 回收期間中 우라늄 價 格에 加해진 利子	$[t_o + t_{pf} + (t_s'' + t_s + t_s''')s]FU_{fif}/365$ $[30+60+(30+60+30)(0.08)] \frac{(1.11)(221)(0.06)}{365}$	4.02
. Shipping charges UF ₆ 供給者로부터의 輸送費 와 回收工場 (Scrap)間的연 료 輸送에 對한 費用	$[R_0 + R_s''s + R_s'''s(1-l_s)]F$ $[1.50+(1.50)(0.08)+1.50(0.08)(0.95)](1.11)$	1.92
3. Uranium losses 燃料準備, 成型 및 Scrap回 收中에 損失된것,	$[l_{pf} + l_s]FU_f$ $[0.02+(0.05)(0.08)](1.11)(221)$	5.90
4. Scrap recovery	R_rSF (10)(0.08)(1.11)	0.89
5. Preparation & Fabrication (燃料準備, 集合體, 材料等 等 別로 區分하지 않았음)	R_{pf}	100
6. Total cost at Fabrication site	f (項目 1~5의 合計)	112.73
7. Total cost at Reactor Site (a) Fabrication Cost at fabrication site	f (項目 6)	112.73
(b) Uranium inventory in transit to reactor site	$U_{f2}i_f/365$ (221)(60)(0.06)/365	2.18
(c) Fabrication inventory in transit to reactor site	$ft_2i/365$ (111.89)(60)(0.0754)/365	1.26
(d) Shipment of fabricated fuel to site	R_r	3.0
(e) Total fabrication cost at reactor site	$U_f' = a + b + c + d$	119

(f) Uranium fuel (3.04% U-235)	U_f	221
(g) Total fabricated fuel cost	$C_f = U_f + U_f'$	340 ^{b)}

1) 借給者로부터 買入한價格이며, 成型中의 使用料는 項目 7 (a)에 包含되어 있음.

Table 5

燃料再處理費用과 Plutonium credits

A. Operating and Cost Parameters	記 號	單 位	值	費 用	\$ /kgU
1. 爐에서 處理工場까지 期間	t_3	days	60	R_r	18
2. Batch 處理	L_r	kgU	$0.25L_r = 10,069$	R_r	23.5 ^{b)}
3. Hold-up cost factor	g	—	1.82 ^{b)}		
4. Nitrates 으로 處理	t_r	days	40	$R_r = R_r g$	$(23.5)(1.82) = 42.7$
5. Plutonium 生成	P_u	g/kgU	6		
6. 金屬 Plutonium 價格	v_m	\$/g	10	$V_m = v_m P_u$	$6 \times 10 = 60$
7. Nitrates 에서 UF_6 로 變換	t_r'	days	20	R_r'	5.6
8. P_u Nitrates에서 金屬으로 變換	t_r''	"	— ³⁾	R_r''	$6 \times 1.5 = 9$
9. 處理工場에서 UF_6 供給者로 輸送	t_i	"	— ⁴⁾		
10. 抽出中의 우라늄損失	l_u	%	1		
11. 變換中의 우라늄損失	l_u'	"	0.3		
12. 抽出中의 Plutonium 損失	l_{pu}	"	1		
13. 變換中의 Plutonium 損失	l_{pu}'	"	1		
14. 平衡狀態에서 放出된 우라늄濃縮度	E_f	%U ²³⁵	1	V_u	36
15. 우라늄에 對한 利率	i_f	%p.a.	6.0		
16. 우라늄 除外한 利率	i	"	7.54		

1) 1日에 1,000kgU 處理可臨한 工場에서 1日 使用料를 \$23,500 基準하였음. 但, 機器運轉員의 人件費와 工場 정리費는 除外.

2) Processing Batch가 8×10^3 kgU 以上인 경우에 Hold-up cost factor는 $1 + \frac{8 \times 10^3}{(1-i)L_r}$ 로 주어짐. 但 i 는 照射로 因한 우라늄 質量的 縮少率로서 다음과 같이 評價된다.

$$i = 1.06b + P_u = (1.06)(27) + 6 = 34.6 \text{ g/kgU, 或은 } 0.0346$$

3) 處理時間은 項目 7의 t_r' 속에 包含되어 있음.

4) 우라늄處理工場과 UF_6 供給者는 同一地域內에 있는 것으로 假定함.

Table 6

燃料再處理費의 計算表

Table 5의 各種 Parameters를 使用하여 燃料再處理費를 計算하면 다음과 같다.

B. Cost Calculations	公 式 및 計 算	\$ /kgU charged
1. Fissile fuel 의 正味價格		
(a) 우라늄의 正味價格 照射, 處理, 交換過程에서의 損失을 加味한 放出된 우라늄의 正味價格	$U_i = (1 - l_u - l_u')(1 - l_i) V_u$ $(0.987)(0.965)(36)$	34.2
(b) Plutonium의 正味價格 處理 및 變換過程에서의 損失을 加味한 放出된 Plutonium의 正味價格	$(1 - l_p - l_p')(1 - l_i) V_m$ $0.98(0.965)(60)$	56.7
小 計	(a) + (b)	90.9
2. 處理費用		
(a) 우라늄 Inventory 抽出, 變換 및 credit를 爲한 UF_6 供給者에 對의 輸送中에 加해진 우라늄價格에 對	$i_f(t_r + t_r')(1 - l') V_u / 365$ $(0.06)(40 + 20)(0.965)(36) / 365$	0.33

한 利子		
(b) 處理 및 變換 分裂生成物로 부터의 抽出費 및 UNH 를 UF ₆ 로, PuN를 Pu 金屬으로 變換하는 費 用의 合 小 計	$[R_r + R_r'(1-l_u) + R_r''(1-l_{pu})](1-l_i)$ $[42.7 + (5.6)(0.99) + (9)(0.99)](0.965)$	55.2
3. 化學處理끝난 Fissile fuel의 正味價格	(a)+(b)	55.53
4. 原子爐敷地에서 使用이 끝난 燃料의 價格	$V_p(1項-2項)$	35.37
(a) 使用이 끝난 燃料가 輸送으로 因하여 割 引된 後의 價格	$\frac{V_p}{1+(t_3+t_r+t_r'+t_4)i/365}$ 35.37	34.8
(b) 原子爐敷地에서 處理工場으로 輸送中の 우라늄 Inventory	$\frac{i f t_3(1-l_i)V_u}{365}$ $\frac{(0.06)(60)(0.965)(36)}{365}$	0.34
(c) 原子爐敷地에서 處理工場까지의 輸送費	$\frac{R_i(1-l_i)}{(18)(0.965)}$	17.4
(d) 處理工場에서의 正味價格	$(i=a-(b+c))$	17.06



<29페이지에서 계속>

$$(J+3)**5**2/12 = \frac{(J+3)5^2}{12}$$

$$(J+3)**2**5/12 = \frac{5(J+3)^2}{12}$$

演算 Statement 의 Mode

式은 整數던가 浮動小數點이라던 하지만 演算 Statement 의 左邊의 變數는 만드시 右邊의 式의 Mode 와 같은 Mode 가 될 必要가 없다.

萬一 左邊의 變數가 整數量이고 右邊의 式이 浮動小數點이라던 그 式은 먼저 浮動小數點 形式으로 計算되고 이것이 左邊의 變數에 Store 될 때 小數點以下의 部分이 切捨되어 整數量으로 變換된다. 따라서 이때 結果가 例를 들어 +3.8983이었다면 Store 가 되는 整數는

+3이지 +4가 아니다. 反對로 左邊의 變數가 浮動小數點이고 右邊式이 整數式이라던 먼저 右邊式에서 整數計算이 實行된 다음 結果가 浮動小數點으로 變換되는 것이다.

例

演算 Statement	計算結果
A=3/2	A=1.
A=3./2.	A=1.5
I=3/2	I=1
I=3./2.	I=1
I=3./2	

(不可能 ∵ “3”과 “2”는 Mode 가 틀림)