

《해설》 原子力發電과 揚水發電 複合開發의 經濟性

金 鍾 珠

대한전기협회

(1974년 7월 24 일접수)

1. 原子力 發電의 必要性

1) 우리나라 에서도 世界 다른나라와 마찬가지로 電力에너지의 消費는 해를 거듭할수록 增加하여 全體 에너지 消費量에서 차지하는 比重도 漸漸 커지고 있다. 이것은 電力이 다른 어떤 에너지 보다도 使用이 便利하고 輸送이 便利하기 때문이다.

2) 政府나 電力會社는 앞으로 原子力에 主力하게 될 것이 明白하다. 우리나라에서는 水力이나 無煙炭 等 國內資源을 最大限 活用해야 할것은 當然하나, 그 供給量에는 限界가 있어 1973年만 하더라도 全體 에너지 需要量의 54.9%가 輸入에 依存하고 있다. 輸入 에너지源의 多元化라는 政策的인 理由와 原油값의 暴騰으로 因한 原子力發電의 相對的 發電原價 低廉이라는 經濟的 理由 때문이다.

3) 電力에너지는 所謂 二次에너지 로서 大端히 使用에 便利하나 한가지 큰 缺點이 있다. 그것은 經濟的인 貯藏이 大量으로는 不可能 하다는 點이다. 거기다 電力 需要는, 時時刻刻, 曜日에 따라 또 季節에 따라 달라지기 때문에 發電量(供給量)을 여기에 맞추어 變動시켜야 할 不便이 있다. 1例로서 1973年 11月 22日 韓國電力系統의 1日 24時間 동안 電力負荷(需要) 變動曲線은(그림 1)과 같다. 이것을 보면 午前, 午後 두차례 尖頭(最大) 負荷가 걸리고 밤 11時 以後 아침 5時까지 所謂 深夜와 正午 點心時間 두차례 最低負荷가 있음을 알수있다.

2. 原子力發電의 原價構造

1) 原子力發電原價는 發表者(發表國)에 따라 前提條件에 따라 다르게 나타나고 있으나 여기에 分明히 할 수 있는것은 在來火力(石炭이나 油類를 燃料로 하는 火力發電)에 比하여 建設費(固定費)는 비싸고 運轉費(可變費)는 싸다. 그 原價特性에 있어 在來火力和 水力發電의 中間에 있다고 할 수 있다.

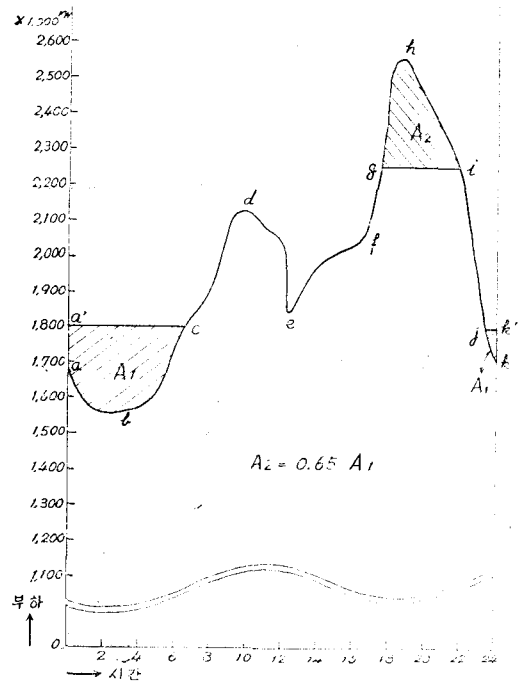


그림 1. 11月 22日 韓國電力系統의 日負荷曲線

2) 一例로 現在 古里에서 建設中인 輕水爐(若干 濃縮된 우라늄을 燃料로 使用)에 있어서 油專燒火力和 發電原價를 比較한 (表 1)을 보면 建設費는 原子力이 火力의 約 2倍이며 燃料費는 6分之 1밖에 되지 않는다. 이러한 特性은 天然우라늄을 燃料로 使用하는 가스冷却爐나 重水爐에 있어서는 더욱 현저 하다. 즉 이들은 輕水爐 보다 建設費는 10~20% 비싸고 燃料費는 輕水爐의 約半 밖에 되지 않는다.

3) 原子力發電은 아직도 그 歷史가 짧기 때문에 技術의 發展, 設計의 標準化, 部品の 標準化 等으로 建設費나 運轉費가 더욱 低廉해질(物價上昇을 고려하지 않으면) 展望이 보인다. 그러나 將來에도 原子力發電所의

表 1 原子力(輕水爐)과 在來火力的 發電原價比較
1976年 竣工 基準)

| 區 分 | 原子力(古里1號) | 火力(油專機) | |
|----------------------|-----------------|-------------|----------------|
| 出 力 | 595 MWG | 600 MWN | |
| 建 設 單 價 | 385\$/KWG | 181\$/KWN | |
| 發 電 所 利 用 率 | 80% | 80% | |
| 年 固 定 費 率 | 12.87% | 12.87% | |
| 推 定 發 電 單 價 | 固 定 費 | 7.454 70.6% | 3.324 17.9% |
| | 燃 料 費 | 2.5 24.7% | 14.78 79.8% |
| | 運 轉 維 持 費 | 0.464 4.2% | 0.426 2.3% |
| | 核 保 險 費 | 0.052 0.5% | |
| mills/ KWH net | 10.470 4원19전 | 100% | 18.53 7원42전 |

註 火力燃料費：1974. 4. 8. 現在 油價 基準

建設費가 在來火力的 그것보다 적어지기를 期待할수는 없을 것이다. 또 原子力에 있어서는 發電原價의 大部分이 固定費(建設費에 對한 減價償却, 支拂利子 등)가 될 것이다. (表 1)에서 보는바와 같이 輕水爐에 있어서도 固定費는 全體 發電原價의 70.6%에 該當한다. 따라서 原子力發電所는 特別히 利用率{(平均電力)/(施設容量)}이 높게 運轉할수록 經濟성이 더욱 좋아진다는 것을 알수 있으며 必須의으로 基底負荷(Base Load)를 擔當하여야 한다. (그림 2)에서 보는 바와같이 原子力發電所는 在來火力에 比해서 利用率이 높아짐에 따라 發電單價가 低廉해 지는 경향이 더욱 현저하다. 古里 一號機인 경우 利用率 60%에서 發電單價 KWH當 5.24원 이든것이 90% 일때는 3.84원으로 내려간다. 그런데 原子力發電所를 基底負荷發電所로 運轉하는데는 問題가 있다. 즉 그 原子力發電所 以外의 餘地 發電所들의 利用率이 低下 되는것이 不可避하다. 換言하면 餘地發電所의 經濟運轉을 어느程度 희생 하여야한다.

4) 一定한 負荷率에서 基底負荷 發電所로서 在來火力과 原子力發電의 發電原價를 比較한다는것은 實質的으로 現實에 맞는 結論을 期待할수 없는 境遇가 많다. 왜냐하면 新設 原價低廉 發電所(原子力이건 在來火力이건)의 經濟運轉(基底負荷運轉)에 依한 利得이 餘地 既存發電所의 利用率減小로 因한 損失에 依하여 相殺되는 경우가 있기 때문이다. 따라서 現實에 맞는 經濟성을 따지려면 新設發電所와 既存發電所를 合한 總合的 年間發電費用이 最低로 되는 電源開發計劃이 찾아져야 할것이다. 어떤 경우에는 基底負荷를 擔當할 原子力發電과

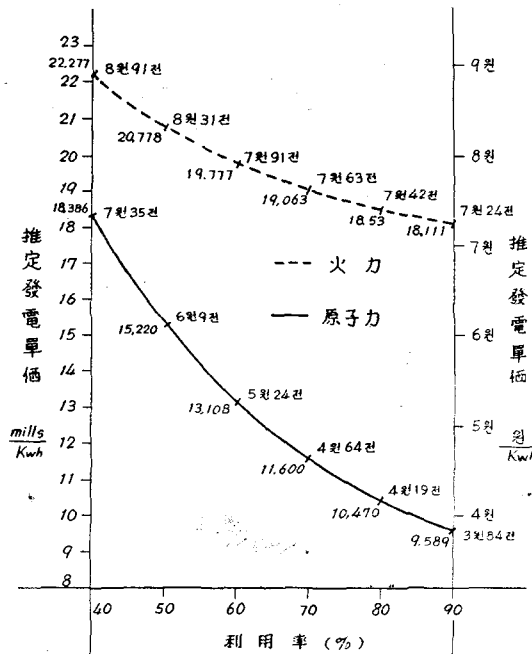


그림 2 原子力發電所와 在來火力發電所에 있어서 利用率에 따라 發電單價가 떨어지는 모양

在來火力 어느것 보다도 尖頭負荷用發電所(Peak Load Plant)를 新設하는것이 더욱 經濟的이라는 結論을 얻을 수도 있다. 勿論 이때 尖頭負荷用發電所 그 自體만을 보면 發電原價가 현저히 비쌀 것이다.

5) 經濟規模의 原子力發電所(600 MWe 以上)가 經濟的 運轉을 爲하여 高利用率로 運轉 되기 위해서는 그 電力系統의 需要側 負荷率(System Load Factor)이 높아야 하겠으나 어느나라 電力系統에서나 年間負荷率이 60~65% 範圍內에 있다. 그 電力系統의 規模(Size)가 또 問題가 된다. 例컨데 美國이나 西歐 처럼 서로 連結된(Interconnected) 電力系統 負荷가 數億 KW에 達하는 경우에는 100萬 KW 原子力發電所가 몇개 追加로 系統에 連結 投入 되더라도 餘地 發展所의 經濟運轉에 影響을 거의 주지 않고 高利用率로 運轉이 可能하다. 그러나 一般的으로 開發途上國에 있어서는 電力系統의 規模가 크지 못하기 때문에 事情이 다르다.

6) 既存 發電所들에 利用率 減少 運轉의 影響을 주지 않기 爲하여 또는 적게 주기 爲하여 原子力發電所의 規模를 적게하기는 困難하다. 왜냐하면 (그림 3)에서 보는 바와같이 原子力發電所는 規模가 커짐에 따라 KW當 建設單價가 低廉해지는 경향이 在來火力 보다 더욱 현저하며 一定規模(以上)이 되어야 在來火力보다 有利해진다.

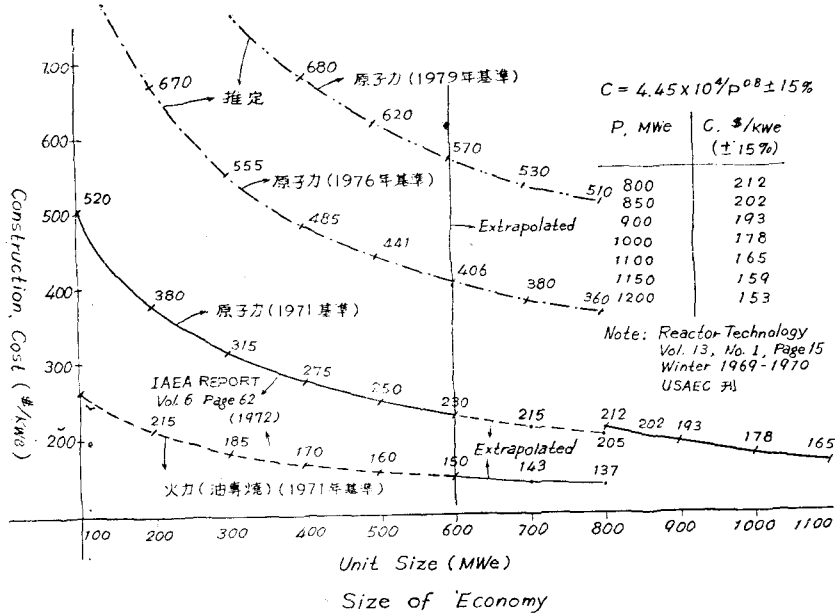


그림 3 原子力發電所와 在來火力發電所의 施設規模와 建設原價의 關係.

3. 揚水發電所의 必要性

1) 新設된 原子力發電所가 餘他 既存發電所의 經濟運轉과 系統運轉의 融通性 (Flexibility)을 희생하지 않고 高利用率로 運轉되기 爲한 方法이 揚水發電所를 原子力發電所와 “콤비”로 建設하는 것이다.

2) 이 解決策을 簡單히 說明하면 (그림 1)에서 23時 30分부터 6時 30分까지 最底負荷時 原子力發電所 까지 도 低負荷로 運轉 하지 않을수 없을때 面積 A₁에 該當하는 電力量 만큼 더 發電함으로써 原子力發電所의 利用率을 높이고 이 A₁의 電力量을 揚水發電所로 送電 이것으로 揚水하여 揚水發電所의 上池에 물을 貯藏 한다음 17時 20分부터 21時 45分까지 最大負荷時 上池에 貯藏된 물을 落下시켜 A₂에 該當하는 電力量만큼 發電하여 不足分을 補充한다. 이것을 다시 (그림 1)에서 說明하면 揚水發電所가 없는 狀態에서는 日負荷曲線이 a-b-c-d-e-f-g-h-i-j-k 이든 것이 揚水發電所가 稼動함으로써 揚水發電所를 除外한 系統 日負荷曲線이 a'-c-d-e-f-g-i-j-k'로 改善된다. 이때 揚水發電所의 機械的 電氣的 損失을 감안한 綜合效率은 約 65%에 不過하여 35%의 損失을 보게되나 (A₂=0.64A₁) 電力量 A₁의 燃料費는 原子力發電所의 그것이므로 KWH 당 1원 인데 비해 A₂에 該當하는 尖頭負荷用發電所의 燃料費는 KWH 당 10원 以上이나 되므로 全體의인 經濟性은 크게 改善된다.

3) 電力需要가 增加함에 따라 發電施設이 增設되어야

할때 系統負荷率 關係로 增設分 全體를 原子力으로 할 수는 없다. 原子力 外에 供給調節能力을 가진 發電所를 並行 增設하여야 하며 이때 在來火力보다 揚水發電所를 原子力과 同時에 建設하는것이 經濟的으로 有利한 境遇가 많다. 그理由는 KW 당 建設單價가 揚水發電所 쪽이 在來火力發電所 보다 低廉하며 運轉의 融通性도 훨씬 좋기 때문이다. 運轉費에 있어서는 揚水에 所要되는 電力量의 約 65% 밖에 發電되지 않기는 하지만 原子力發電所에서 싼 燃料費로 發電되는 電力量을 揚水用으로 供給 받기 때문에 揚水發電所의 運轉費는 供給받는 電力의 燃料費보다 約 54% 밖에 비싸지지 않는다. (原子力發電의 燃料費가 1원/KWH 이면 揚水發電의 原料費는 約 1원 54전/KWH). 이것은 系統에 아직도 남아있는 舊式小容量發電所나 尖頭負荷用發電所의 燃料費 보다는 越等히 싼 뿐만 아니라 前般 油類波動으로 一般 在來火力의 燃料費보다도 싸기 때문이다.

4) 어떠한 경우에 있어서는 電力系統의 負荷率問題를 떠나서도 새로 追加되어야 할 發電施設을 原子力과 揚水로 나누어서 建設하는것이 有利하다. 이는 原子力의 建設費가 너무 비싼데 비해 揚水發電所의 그것이 大端히 적기 때문에 그電力系統의 綜合的인 經濟性 때문에 이러한 結論을 얻을수도 있다. 原子力發電所 建設에 所要되는 莫大한 資金을 調達하기 어려운 境遇 于先 系統尖頭需要를 充足하기 爲하여 揚水發電所를 建設하여 尖頭負荷를 供給하고 既存 原子力 및 新設火力發電所를 더욱 高負荷率로 運轉하여 不足되는 電力量을 供給하는 것이

賢明한 解決策인 境遇도 많다. 이때는 電力量(KWH)의 供給可能量이 電力量(KWH)의 需要를 充足할수 있겠는지 檢算해 보아야한다. 檢算結果 電力量이 不足하게될 時機에가서 原子力을 竣工하도록 計劃하면 된다. 揚水發電所의 建設費는 在來火力發電所의 60~80%로 보는 것이 普通이다. 그러나 償却期間이 火力發電所의 2배에 가깝기 때문에 年間 償却費는 火力의 半以下로 된다.

5) 揚水發電所는 勿論 地形條件을 갖춘 適當한 場所가 있어야 할것이다. 그 場所는 되도록 負荷(需要)中心地에서 또 既存送電施設에서 가까운 곳이라야 送電損失이 적고 連結用 送電線 建設에 큰 初期投資가 不必要하다. 地理的인 條件을 갖춘 適當한 場所는 韓國과 같이 산이 많고 地形의 高低差가 많은 곳에서는 얻기에 別로 어렵지 않다. 그 理由로는

a 地形에 高低差만 있으면 上, 下池모두 人工的으로 建造할수 있다. 少量의 流量이 있는 溪川이 近處에 있으면 된다.

b 既存 貯水池, 큰江, 또 바다를 下池로 利用할수 있다.

c 上, 下池를 包含한 揚水發電施設을 建設하는데는 크게 넓은 地域이 必要치 않기 때문에 比較의 人口稠密한 都市近處에도 適當한 場所를 얻을 수 있다.

4. 揚水發電所의 重要한 設計因子 決定方法

1) 年間 最大負荷가 發生하는 날의 日負荷曲線(그림 1)에서 基底負荷用 發電所들(原子力, 新銳火力)에서 發電되는 出力(KW)이 日負荷曲線의 最低點을 上廻하는 部分(그림 1)에서 斜線部分의 面積 A_1 , 即 남아도는 電力量은 쉽게 計算할수 있다. 이 電力量으로 揚水할수 있는 물의량도 落差와 關聯, 쉽게 計算할수 있다. 다시 日負荷曲線에서 尖頭負荷時 不足電力量中 揚水發電所에서 供給되어야할 電力量도 計算할수 있으며 이것에서 上池의 貯水容量이 算出될수 있다.

2) 揚水發電所 建設에 決定되어야할 세가지 要素 即 a. 最大폼프容量 b. 是大發電容量 c. 最大 上, 下池 貯水容量을 決定하는데, 日負荷曲線 뿐만 아니라 地形上의 條件, 既存發電所들의 特性等에 依하여 經濟性を 감안 決定하여야 할것이다.

3) 原子力-揚水 스킴(Scheme)의 經濟性檢討나 重要因子 決定에 年間負荷持續曲線(Annual Load Duration Curve)에만 依存해서는 안된다. 왜냐하면 揚水發電所의 上池容量이 日間調整, 커야 週間調整을 考慮하여 決定되어 있고, 年間負荷持續曲線으로서는 基底負荷用發電所의 不時停止(Forced Outage), 計劃停止(Scheduled Outage) 등을 가려낼수 없게 되어있다.

4) 基底負荷發電所(原子力, 新銳火力發電所等)의 剩餘發電量을 잘 利用하자는 것이 揚水發電所 建設의 目的이다. 따라서, 剩餘發電量이 가장 많이 생기는 週末에 이發電量으로 充分히 揚水하여 두었다가 週中(Week days)의 尖頭負荷時에 發電할수 있도록 可及의이던 貯水池容量을 週間調整이 可能할만큼 充分한 크기로 하는 것이 바람직하다. 揚水發電所의 重要한 要素를 決定함에 있어서는 最大負荷가 걸리는 冬期週間負荷曲線과 夏期週間負荷曲線을 利用하면 된다고 생각한다. 이 두境遇에 맞도록 設計하면 春·秋期에는 自然히 맞도록 될것이다.

5) 負荷曲線의 下部와 上部를 各各 基底負荷發電所와 尖頭負荷發電所가 擔當하고 그 中間部分을 一般火力發電所가 燃料費가 싼 順位로 아래서 부터 메꾸어 나가게 된다. 揚水發電所에서 供給받는 揚水用電力이 原子力發電所에서 供給될境遇에는 揚水發電原料費는(原子力發電燃料費)/0.65로 原子力發電燃料費가 1KWH에 1원 이라고 하면 揚水發電原料費는 1원 54전 으로 된다. 이와 같이 揚水發電原料費가 餘他 火力發電의 燃料費보다 싸게될 可能性이 있어 負荷曲線의 比較의下部를 擔當해야 될것같이 생각되나 普通 이部分까지 擔當할만큼 上池容量이 充分히 크지 못하다.

6) 全發電施設容量이 그電力系統의 全需要電力보다 얼마간 더 커야한다. 그 理由는 發電所의 定期補修, 水力發電所의 冬期渴水로 인한 發電力減少等 豫期할수 있는 減發과 不意의 事故와 같은 豫期할수 없는 減發에 있어서도 恒常 中斷없는 電力供給을 해야할 義務가 公益企業인 電力事業者에게는 있기 때문이다. 이 豫裕電力을 豫備電力이라고 하며, 그 電力系統事情(系統의 規模, 新銳火力과 舊式火力의 構成比, 그나라 工業水準等)에따라 다르나 10~25% 程度 있어야 한다. 平常時에는 原子力, 新銳火力, 舊式火力等 順位로 發電하고 되질 가스터빈發電機等 燃料費가 비싼 發電所들은 待機狀態(Stand-by)로 있다가 運轉中인 發電所가 事故, 補修 其他理由로 停止하여 系統出力이 不足할때 發電하여 不足分을 補充하게 된다. 揚水發電所는 上池容量에 餘裕가 있으면 이와같은 待機用發電所(Stand-By Plant)로서의 役割도 할수있다. 또 그 系統에 있는 新銳火力(燃料費가 싼)과 舊式火力(燃料費가 비싼)과의 사이에 燃料費差가 클 境遇 新銳火力에서 發電되는 電力으로 揚水하며 發電하는 것이 舊式火力으로 尖頭負荷를 擔當하는 것 보다. 低廉한 때도 많다.

5. 揚水發電所의 餘他利得

1) 前述한 바와같이 揚水發電所 建設의 主目的은 이

것을 系統에 갖임으로서 原子力發電所와 新銳火力發電所의 利用率을 높여 주어 經濟的인 利得을 얻자는데 있다. 그러나 揚水發電所의 建設은 以外에도 몇가지 計算하기 어려운 餘他利得을 갖어온다. 原子力發電所의 安定된 運轉(Steady Operation)은 燃料費의 節約뿐 아니라 發電所를 構成하는 諸般機器에도 無理가 안가게 하고 그 壽命을 延長시켜준다. 勿論 原子力發電所에서도 負荷變動에 따라 運轉할 수 있는 特性을 갖게 할 수 있으며 또 하고 있지만 그렇더라도 普通火力보다는 어려우며 可及的이던 出力變動이 적은것만 같지 못하다. 또 처음부터 揚水發電所와 같이 計劃 하므로써 原子力發電所의 出力變動機能을 多少 희생하면 初期投資도 若干 減少할 수 있을것이다.

2) 揚水發電所가 좀더 餘裕있는 上池貯水容量을 가짐으로서 그 系統의 待機發電所(Stand-by Plant) 役割을 할境遇 餘他 待機發電所의 必要容量을 그만큼, 줄일수 있을뿐만 아니라 그것들의 運轉을 훨씬 單純하게, 容易하게 할것이며, 그것들이 언제나 直刻 起動할수 있도록 잘 補修되어야할 必要性을 減少함으로서 相當한 經濟的 利得을 期待할 수 있다.

6. 原子力—揚水 發電所 複合開發의 例示

1) 一例로서 90萬 KW의 原子力發電所 하나와 30萬 KW 揚水發電所 하나를 合해서 90萬 KW 1個發電所 처럼 생각하여 보면 이 두가지 發電所를 콤비로 同時에 開發하는 意義를 더욱 定量的으로 알수 있다.

例.

前提 1. 原子力發電所 900 MW, 揚水發電所 300 MW 同時竣工. 兩者間 送電損失 無視

前提 2. 原子力發電所 建設費 \$ 270,000,000, \$ 450/KW. 揚水發電所 建設費 \$45,000,000. \$150/KW,

前提 3. 原子力發電所 燃料費 2.5 mills/KWH. 揚水發電所運轉: 深夜 6時間 300MW 揚水運轉. Peak時 4時間 300MW 發電運轉. 原子力發電所運轉. 24時間 600MW 全出力 運轉.

따라서 Peak時 4時間 出力

$$\text{Nuclear } 600\text{MW} + \text{P. S. H. P } 300\text{MW} = 900\text{MW}$$

深夜 6時間 出力

$$\text{Nuclear } 600\text{MW} - \text{P. S. H. P } 300\text{MW} = 300\text{MW}$$

其外 14時間 出力

$$\text{Nuclear } 600\text{MW} (\text{P. S. H. P 停止})$$

深夜 6時間揚水한 물이 peak時 4時間發電하는데 所要되는 물과 同一하다.

900MW 한個 發電所로서의 結果

a. 建設費

$$\$315,000,000 (\$270,000,000 + \$45,000,000)$$

建設單價

$$\$315,000,000/900,000 = \$350/\text{KW}$$

b. 燃料費

所要되는 燃料費

$$600\text{MW (Nuclear)} \times 24\text{H} \times \$2.5/\text{MWH} = \$36,000$$

900MW (Nuclear+P. S. H. P) Plant에서 發電量

$$(900\text{MW} \times 4\text{H}) + (300\text{MW} \times 6\text{H}) + (600\text{MW} \times 14\text{H})$$

$$= 13,800 \text{ MWH}$$

KWH 當 燃料費 (mills/KWH)

$$\$36,000 \div 13,800,000\text{KWH} = 2.61\text{mills}/\text{KWH}$$

이 KWH 當 燃料費는 原子力發電所보다는 若干 비싸나, 在來火力보다는 顯著히 싸다.

c. 日間負荷率 (900MW plant로서)

$$13,800\text{MWH} \div 24 \div 900\text{MW} = 0.639.64\%$$

系統負荷의 日間負荷率은 70~80%이므로 이 Nuclear-P. S. H. P 900MW system은 前提와 같이 運轉되는 境遇 系統 餘他發電所들의 稼動率을 改善하는 役割을 하게된다.

7. 結 論

前述한 內容을 綜合하던 다음과 같다.

1) 電力供給事業이 原子力의 平和的利用의 大宗이 될 것이며 그主된 理由는 化石燃料 또는 水力資源의 枯渴을 念慮해서 뿐만 아니라 電力生産原價를 低廉하게하여 電力使用者의 負擔을 줄이기 위해서이다.

2) 原子力發電所에는 在來火力에 비해 多額의 投資가 所要되므로 그發電原價가 他發電에 비해 低廉하게 되려면 그利用率이 높아야 한다.

3) 將次 技術의 發達에 依하여 原子力發電所建設費가 低廉해진다 하더라도 原子力과 火力의 現在와 같은 相對的關係는 變하지 않을것이다.

4) 開發途上國의 比較的 적은 電力系統에서 原子力發電所를 建設하려고 할때 특히 그것의 規模가 系統最低負荷보다 클때 原子力發電所의 經濟性을 提高하기 爲하여 揚水發電所의 同時開發이 바람직하다. 現在로서는 經濟的인 大量에너지 貯藏의 唯一한 方法이 揚水發電이다.

5) 큰 電力系統에 있어서도 原子力發電所의 全體容量이 그系統最低負荷보다 클때 揚水發電所의 도움 없이는 原子力發電所가 經濟的인 利用率 以上으로 稼動이 어려울 것이다.

6) 普通 揚水發電所의 適地選定이 어려울것으로 생각되나 事實은 그렇지 않다. 특히 우리나라와 같이 山이

답고 三面이 바다로 둘러싸인 곳에서는 그 適地選定이 어렵지 않다

7) 揚水發電所의 諸般要素 (Parameters)를 決定하는데는 冬, 夏期의 代表的인 日負荷曲線, 週間負荷曲線에 依據하여야 하며 年間負荷持續曲線(Annual Load Du-

ration Curve)에만 依存해서는 안된다,

8) 電力系統에 揚水發電所를 導入하므로서 前述한 外에도 몇가지 利得을 期待할수있다. 原子力發電所와 其他火力 發電所의 運轉을 쉽게 하고 補修費가 節減되는 效果를 갖어올 것이다.