# 原電의 經濟性과 向上對策

*Economics and Cost Reduction of Nuclear Power Generation*

石橋 周一 〈九州電力(株) 副社長〉

## 1. 序 論

日本의 에너지資源은 매우 貧弱하며 대부분 외국에서의 輸入에 依存하고 있다. 特히 石油의 경우 이것은 事實이며 아직도 全體에너지의 60%를 供給하고 있다. 에너지의 安定收給을 위하여는 石油依存度를 줄이거나 에너지源의 多變化가 必要한 것이다. 그러므로 原子力은 安定供給과 經濟性의 利點을 갖는 半國産에너지라는 특성을 考慮해 볼 때, 계속 成長을 하여 온 것이다.

첫 原子力發電所의 商業運轉은 1966年 英國에서 導入한 Tokai No. 1 가스형 원자로였다. Tsuruga No. 1과 Mihama No. 1은 美國에서 導入한 商業化된 輕水爐로서 1970年에 運轉을 始作하였다. 그 以後 日本은 햇수로 20여年 혹은 200爐年(reactor-year)의 運轉經驗을 갖게 되었다. 現在로 原子力發電은 27基가 運轉中이며 總容量은 20,000MW에 達하고 있다. 이것은 日本 全發電容量의 14%인 것이다. 1983年에 原子力에 의한 發電量은 約110,000GWh였으며 이것은 日本 總發電量의 20%에 이르는 것이다. 建設中이거나 計劃中인 發電所를 包含한다면 原子力發電容量은 44基에 36,000MW가 되며, 原子力發電이 가장 重要한 에너지源中에 하나가 되는 것이다.

지난해 11月에 한 長期에너지消費豫測에 依하면, 1995年에 原子力發電容量은 48,000MW (全體容量의 23%)가 될 것이며, 總發電量의 35%를 차지할 것이다. 未來에는 原子力이 차지하는 率은 더욱 커질 것이다.

石油波動以後 原子力의 安定된 成長은 主로 經濟的 利點 때문에 加速되어 오고 있다. 그러나 世界의 에너지現況의 變化 때문에, 특히 근래의 石油의 低需要 및 低原油價 때문에 原子力發電單價는 다른 종류의 발전소, 특히 石炭發電에 比하여 크게 利點이 줄어들고 있다. 經濟的 에너지는 국가적인 견지에서 꼭 必要한 것이므로 原子力發電單價의 安定은 매우 重要한 課題인 것이다. 그러므로 우리는 原子力發電單價를 安定시키기 위한 諸般 問題 및 처치방안을 確實하게 理解하여야 하는 것이다.

## 2. 原子力에너지의 經濟性

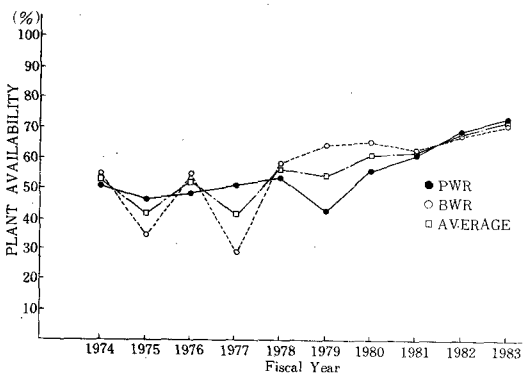
지난 두번에 걸친 石油波動은 石油發電所의 經濟性을 크게 떨어뜨렸다. 核燃料價는 石油나 石炭과 같이 많이 오르지 않았기 때문에, 그리고 原子力이 차지하는 比率이 全體에너지의 작은 部分에 지나지 않기 때문에 原子力發電은 다른 發電에 비하여 아직도 經濟性을 維持하고 있는 것이다.

原子力發電의 經濟性이라는 것은 安全性 및 信賴性이라는 點을 前提로 하여 다루어져야 된

다고 본다. 原子力의 높은 稼動率은 經濟性을 높이는데 크게 이바지하고 있다. 높은 稼動率은 원자력의 발전단가를 낮추고, 그러므로 다른 종류의 발전보다 有利하게 한다는 것은 잘 알려진 事實이다. 그림 1은 日本의 平均 稼動率의 경향을 보여주고 있다. 1979年 까지는 新技術의 導入中에 發生하는 諸般 問題들이 많아서 이것들이 稼動率을 40~50% 程度까지 낮추었다. 그러나 石油波動으로 因한 價格上昇과 國家的인 見地에서 에너지確保라는 觀點에서 完璧한 補修維持 및 改善點에 눈을 돌리게 된 것이다. 요즈음은 技術이 發達하여 大部分의 機材가 國內에서 製作되고 있으며, 과거의 經驗을 바탕으로 特異하고 有益한 改善을 많이 하게 되었으며 運轉 및 補修管理도 改善되었다. 그 結果로 1980年以後 稼動率이 繼續해서 좋아지고 있고 1982-1983年에는 더 높은 稼動率을 갖게 되었다. 1983년에는 稼動率이 70%를 넘어 지금까지 가장 좋은 실적이었다. 計劃된 補修 및 檢査期間을 제외하면 實際的인 稼動率은 거의 100%인 것이다.

表 1에서 보는 바와 같이 1983년 通商産業省(MITI)의 計算에 依하면, 1983年에 運轉에 들어가는 발전소의 첫해의 發電單價는 石油나 LNG의 경우 17엔/kWh, 石炭의 경우 14엔/kWh 그리고 原子力의 경우 12.5엔/kWh이다. 그러나 그림 2에서 보는 바와 같이 石炭값의 下落으로 原子力과 石炭의 差異가 많이 줄어들었다. 1982年의 3엔 차이가 1983年에는 그 半인 1.5엔으로 줄어들은 것이다.

〈그림 1〉 發電所 平均 稼動率 傾向




燃料市場의 事情과는 別途로, 그 差異가 줄어든 理由中의 하나는 建設單價의 上昇이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 KW當 建設單價는 每年增加하여 왔다. 1975年 運轉에 들어간 Genkai No. 1은 100,000엔/KW였고, 1981年 運轉에 들어간 Genkai No. 2는 200,000엔/KW였다. 여기서 두배로 오른 것은 石油波動 때문이었다. 올해에 始作되는 Sendai No. 1은 300,000엔/KW였고, 1993年에 始作될 Genkai No. 3은 年間上昇率 3%로 보아서 400,000엔/KW가 될 것이다.

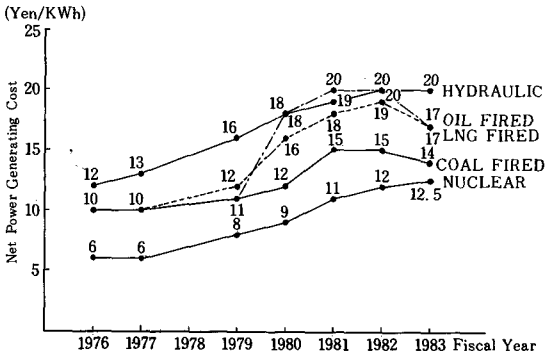
여기서 2000年代에 原子力과 石炭의 發電單價를 比較하여 紹介하고자 한다. 이것은 今年 3月 에너지經濟研究所에서 發表한 "將來에 있어서의 發電用 燃料의 需給構造와 電源構成"이라는 論文에서 발췌한 것이다. 2000年에 運轉에 들어갈 發電所의 發電單價는 세가지의 燃料變數(高, 中, 低)와 두가지의 外換率(現, 高円傾向)을 使用하여 여섯가지 경우에 計算이 되었다. 結果値가 表 2에 주어졌다. 모든 여섯가지 경우에서 原子力이 石炭보다 優秀한 것으로 나타나고 있다. 10%의 建設單價節減을 생각치 않고, Back-end費用을 모두 考慮하여 가장 비싼 경우에도 아직 優秀한 것이다. 原子力의 다음과

〈表 1〉 發電單價 比較

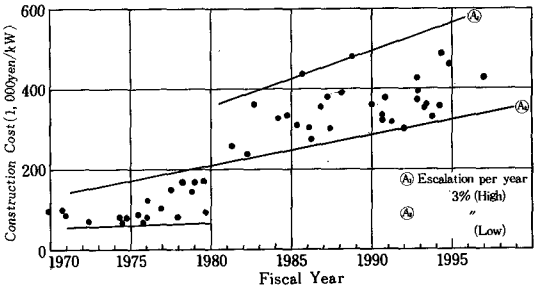
(1983年 運轉, MITI 계산모델)

| | Power Generating cost | | Construction cost |
|---|---|---|---|
| | [yen/kWh] | Share of Fuel Cost | [1000 yen/kW] |
| Hydraulic | ≃20 | - | 610 |
| Oil Fired | ≃17 | ≃75% | 130 |
| Coal Fired | ≃14 | ≃40% | 230 |
| LNG Fired | ≃17 | ≃65% | 180 |
| Nuclear Power | ≃12.5 | ≃25% | 300 |

〈그림 2〉 發電單價 傾向 比較(MITI 計算모델)




〈그림 3〉 原子力發電所 建設費




같은 特性은 더욱 더 經濟的 優秀性을 보여 주리라 믿는다.

(2-1)原子力發電所는 放射線問題로 安全性과 信賴性을 가장 重要하게 생각하여 다른 發電所에서의 경우보다 훨씬 注意 깊게 設計되어 있다. 그런 理由로 過多한 安全度를 갖고 있으며, 때로는 不必要한 過多設計로 均衡이 잡혀 있지 않은 部門도 있는 것이다. 信賴性은 繼續하여 維持하면서도 全體의 設計를 最適化함으로서 經濟性을 增大시킬 수 있을 것이다.

(2-2)지난해의 稼動率은 70%를 넘어서 현재까지 가장 높은 것이었다. 運轉싸이클을 길게 하고 補修檢査期間을 줄임으로서 稼動率을 85%까지 올릴 수 있으리라고 믿는다. 石炭發電所는 80%의 稼動率을 이미 갖고 있다. 日本에서 原子力의 稼動率이 石炭과 같은 水準까지 向上된다면 原子力의 優秀性은 훨씬 커지게 되는 것이다.

(2-3)現在의 價格 計算은 16年의 減價償却을 基準으로 한 것이다. 그러나 技術的으로 볼 때 原子力發電所는 30年 동안 繼續 運轉되리라고 생각된다. 그러므로 減價償却이 끝난 뒤에는 運轉費用만 고려하면 된다. 따라서 電氣값은 結果的으로 安定化 될 것이다.

## 3. 原子力의 經濟性 向上을 위한 方案

原子力發電單價는 資本要素가 60%를 차지하기 때문에, 그리고 資本의 支出은 建設費와 比例하기 때문에 原子力의 發電單價는 建設費의 增加에 크게 影響을 받는다.

建設費의 上昇要因은 石油波動에 따른 物價의 上昇 結果와 TMI事故 以後 좀 더 엄격한 安全規制 그리고 建設期間中에 發生하는 利子支出의 增加라고 알고 있다.

原子力과 다른 發電의 發電單價의 差異가 줄어듬에 따라서, 原子力을 계속 밀고 나가기 위하여는 發電單價를 줄이는 것이 매우 重要한 것이다. 왜냐하면 原子力은 石油의 主代替에너지로 생각되고 있고, 結局 電力會社들의 가장 重要한 目的이 되는 것이기 때문이다. 우리의 原子力프로그램이 成熟段階에 이를 때, 原子力의 經濟性은 높은 信賴性을 저하시키지 않는 範圍에서 維持되고 改善되어야 할 것이다. 이렇게 되기 위해서 建設費節減과 高稼動率(높은 信賴性에 기반을 둔)은 매우 重要한 것이다.

### (3-1) 建設費를 줄이는 方案

"The Round Table Council for Up-Graded Nuclear Power"에서 다음과 같은 것이 提案되었다.

A. 設計 餘裕値 檢討

過去의 設計方針은 安全性과 信賴性을 가장 重要하게 여겼다. 그러므로 設計가 큰 餘裕値를 갖었고, 따라서 設計指針이 比較的 保守的으로 定하여 졌다. 研究와 開發로 뒷받침된 現在의 技術(Technology)에 依하면 安全性을 害치지 않는 범위내에서 더 높은 信賴性을 追求하

여야 할 時期라고 본다. 이같은 일은 設計方針을 檢討하여 플랜트 全體의 여러 系統 및 機器, 施設들에 均衡잡힌 設計値를 갖게 할 수 있는 것이다. 特히 日本은 高地震帶에 있기 때문에, 더욱 設計 餘裕値가 크다. 여러 實驗研究室이나 研究機關에서 수행한 近來의 研究에 依하면, 그리고 새로 개발된 地震解析法에 依하면 設計 餘裕値를 줄일 수 있다고 본다.

B. 建設期間 短縮

現 工期에서 Critical Path에 걸리는 것은 1次側 設置이다. 原子爐建物內에는 構造物과 機器들이 서로 얽혀서 聯關性을 갖고 設置되기 때문에, 1次側 設置가 Critical Path가 되는 것이다. 그러므로 새로운 工法을 使用함으로서 工期를 줄일 수 있는 것이다.

〈表 2〉 發電單價 比較 (原子力 對 石炭)

(2000年 運轉, 稼動率 70%)

1. 現換率 (238엔/$)경우 〔엔/kWh〕

| Case / Fuel Cost | Nuclear Power A | Nuclear Power B | Coal Fired C | C/A | C/B |
|---|---|---|---|---|---|
| High | 23.23 | 26.62 | 35.56 | 1.53 | 1.34 |
| Middle | 23.23 | 26.60 | 33.07 | 1.42 | 1.24 |
| Low | 20.21 | 23.32 | 29.20 | 1.44 | 1.25 |

2. 低換率 (180엔/$)경우 〔엔/kWh〕

| Case / Fuel Cost | Nuclear Power A | Nuclear Power B | Coal Fired C | C/A | C/B |
|---|---|---|---|---|---|
| High | 22.42 | 25.79 | 30.72 | 1.37 | 1.19 |
| Middle | 22.42 | 25.79 | 28.84 | 1.29 | 1.12 |
| Low | 19.51 | 22.60 | 25.48 | 1.31 | 1.13 |

A. 10% 建設費 節減의 경우
B. 現 建設費+廢爐費 (建設費의 20%)
+廢棄物處理處分費 (發電單價의 2%)
(가장 높게 發電單價를 豫想한 경우)

〈자료〉 "Future Supply/Demand Situation of Power Plant Fuels and Power Sources" by Institute of Energy Economics (March 1984)

C. 品質保証 및 管理 合理的 單純化

現在 우리 原子力發電所의 높은 稼動率은 政府와 産業體가 이룬 品質保証에 대한 共同努力德分이다. 그렇지만 여러가지 檢査 및 試驗이 機器設置過程과 試運轉過程에서 때로는 重復되고 있다. 그동안의 充分한 經驗에 비추어 볼때 合理的 單純化를 위하여 檢査 및 試驗의 種類 및 頻度가 檢討되어야 한다.

D. 標準化 範圍 擴大

1975年에서 1980年까지의 1, 2次 "輕水爐 改良 및 標準化 計劃"은 成功이었다. 初期에 있었던 問題點과 運轉經驗에서 부터 많은 進步를 본 것이다. 3次로 1981년부터 始作하여 우리의 經驗과 國際協力을 通하여, 좀 더 信賴性있고 經濟的인 日本型 輕水爐를 만들기로 指向하고 있다.

아직까지의 標準化는 主로 原子爐와 그 附屬機器에 힘을 기울였으나, 이제는 發電所 全體에 擴張되어야 한다. 具體的인 方案이 "The Survey Committee for Improving and Standardizing Nuclear Power Plant" (原子力發電所 改良 및 標準化 檢討委員會)에서 現在 研究되고 있다.

(3-2) 稼動率을 改善하는 方案

稼動率을 높이기 위하여는 信賴性있고 安定된 運轉을 繼續하는 것은 必須的이다. 지난해 平均稼動率이 70%에 達하였다. 좀 더 改善을 위하여 (結局은 費用節減을 위하여) "The Round Table Council for Up-Graded Nuclear Power"와 "The Sub-Committee for Up-Grading Light Water Reactor Technology"에서는 研究 結果로 다음과 같은 세가지를 提案하였다.

A. 運轉週期 延長

日本에서는 運轉週期를 늘이기 위하여 濃縮度를 올리거나 再裝塡燃料다발数를 늘려 왔다. Genkai No. 2는 415日의 繼續運轉 記錄을 수립하였다. 延長運轉의 目標는 最高 18個月이고 平均으로 15個月이다. 이 目的을 위하여 高燃燒燃

料의 開發, 延長運轉에서 가장 문제가 되는 機器의 保証 그리고 期間과 核燃料費 사이의 最適化 關係를 찾기 위한 解析方法의 研究 等이 行하여 져야 한다.

B. 檢査 / 補修期間 短縮

우리는 벌써 檢査 / 補修期間을 줄이기 위하여 原子爐容器의 integrated head package, 蒸氣發生器 補修를 위한 新形 ECT로보트 그리고 蒸氣發生器 노즐 덮게 등을 採擇하였다. 現在의 80~120日 檢査 / 補修期間을 훨씬 効率的인 技術을 利用하여 平均 60日로 줄일 豫定이다. 그러기 위해서는 運轉中檢査技術이 研究되어야 하며, 運轉經驗에 따른 計劃된 檢査 / 補修의 項目 및 方法 그리고 期間이 檢討되어서 最適化를 위하여 改善되어야 한다. 또한 補修가 必要없는 機器의 開發과 改善된 運轉中檢査方法도 적극적으로 推進되어야 한다.

C. 故障 豫防

機器의 故障없는 安定되고 繼續的인 運轉을 위하여서는 機器의 週期的 檢査, 豫防補修 그리고 運轉中의 故障豫想은 매우 중요하다. 오랜 運轉으로 因하여 質이 떨어지는 程度를 分析하고 豫測하는 診斷體系의 開發이 必要하며, 國內外의 資料가 補修作業에 되利用되는 體系의 設立이 必要하다.

만약 運轉期間의 延長과 檢査 / 補修期間의 短縮이 짧은 時間동안 稼動率을 높일 뿐, 길게 보아서 信賴性 및 經濟的 利益을 沮害한다면 이것은 우리가 원하는 바가 아니다.

**(3-3) 發電所 壽命 延長**

原子力의 運轉 經驗이 길어지고 信賴性 推持가 要求됨에 따라서, "The Round Table Council for Up-Graded Nuclear Power"와 "The Sub-Committee for Up-Grading Light Water Reactor Technology"는 發電所 機資材의 壽命을 評價하는 體系와 長壽命 機器技術을 發展시키는 研究를 수행할 것을 提案하였다. 特히, 原子爐容器와 같이 發電所 壽命期間동안 交替하기 힘들거나 不可能한 重要 機器 및 系統의 壽命을 豫測하고, 이들의 壽命을 늘리는 機資材를 開發하는 技術이 必要한 것이다.

## 4. 앞으로의 展望

放射性廢棄物處分과 壽命이 다 된 原子爐의 廢爐는 앞으로 原子力 經濟性의 重要한 關鍵이 될 것이다.

放射性廢棄物의 體積을 줄이는 方法은 繼續應用되고 있고, 따라서 年間 處理되는 廢棄物의 體積은 每年 줄어들고 있다. 그럼에도 불구하고 廢棄物은 繼續 蓄積되어 所內의 貯藏能力을 充分히 갖는 것이 힘들어 지고 있다. 그러므로 最終處分前의 임시 所外貯藏이 深刻하게 고려되고 있다. 極低準位의 廢棄物로서 放射性廢棄物로 分類하기도 不可能한 것도 所內에 貯藏하고 있다. 그 이유는 法이나 規定으로 放射能의 強度를 分類하고 있지 않기 때문이다. 앞으로의 所外貯藏이나 最終處分을 爲하여서는 安全性이 考慮된 強度의 分類가 必要하다. 이것을 考慮하여 원자력청 산하에 있는 "The Sub-Committee of Radioactive Waste Disposal"(放射性廢棄物 處分小委員會)은 금년 8월에 다음과 같은 分類를 하였다. 現在 불리고 있는 低準位放射性廢棄物(LLW)을 다음과 같이 細分하기로 하였다.

- 低準位放射性廢棄物 (LLW)
- 極低準位放射性廢棄物(Extremely Low Level)
- 非放射性廢棄物 (Non-Radioactive)

이러한 分類는 運轉中에 發生하는 廢棄物 뿐만아니라, 廢爐段階에서 發生하는 많은 量의 金屬, 콘크리트 등에도 重要하여 効果的인 再使用과 處分을 達成할 수 있을 것이다.

땅은 限定되어 있기 때문에 廢爐는 運轉이 終熄되자 마자, 發電爐를 모두 解體하여 敷地를 再使用할 수 있도록 整備되어야 한다고 본다. 廢

爐段階에서 解體 및 整備하는 費用은 建設費의 10% 내지 20%로 豫想된다. 이것은 發電單價에 1엔/KW를 上昇시키고 原子力發電의 經濟性을 따지는데 無視할 일이 아닌 것이다. 廢爐는 짧은 時間內 엄청난 資本을 必要로 하기 때문에 敷地의 再使用, 解體費用, 解體中 받을 放射線 被曝, 廢棄物處分 등을 考慮한 經濟的 廢爐作業의 全般的인 計劃이 硏究되고 세워져야 한다. 이를 위하여 "The Sub-Committee for Decommissioning Plan"(廢爐計劃小委員會)이 通商産業省내에 올해 組織되었고, 廢爐를 위한 費用計算을 着手하였다.

電力을 利用하는 사람들에게 正當한 電力費를 附加하여 된다는 點을 考慮할 때, 電力費産出의 體系를 세워서 必要한 資金을 造成할 수 있는 方案이 硏究되어야 한다.

原子力發電의 經濟性을 좀 더 높이기 위하여는 우라늄資源의 效率的 利用이 重要하다. 現在 全 世界의 우라늄需要는 낮다. 그러나 우라늄鑛의 生産은 現在 計劃段階의 것을 包含하더라도 1990年代末까지의 需要밖에 맞추지 못하는 것으로 豫想되고 있다. 그리고 歐美의 需要는 1980年代 後半에 急激히 上昇될 것이다. 그러므로 1980年代末에는 우라늄 供給이 不足하리라 豫想된다. 우라늄 供給源을 多變化하는 동안, 새로운 鑛山프로젝트와 輸入을 서두르고, 輸入에만 依存하는 것 보다는 獨自的인 鑛山投資를 늘리는 것이 必要하다.

플루토늄利用은 外國資源 依存度를 줄이므로, 플루토늄利用은 우라늄資源의 效率的 利用이나 에너지 確保라는 側面에서 볼때 重要하다. 長期原子力 開發計劃에 따르면, 再處理하여 얻은 플루토늄은 高速增殖爐(FBR)에 使用할 計劃이다. 商業用 FBR發電所는 2010年에 完成되리라 期待되며, 그때까지 가장 좋은 利用은 現存하는 輕水爐에 쓰는 것이다. 輕水爐에 플루토늄을 實際的으로 利用하는 時期는 核燃料費를 높이지 않는다는 全體的 經濟性에 根據를 두어야 한다. 그러므로 日本에서의 우라늄의 效率的 利用은 매우 重要하며, 意味를 갖는 것이다. 그래서 今年 7月에 濃縮, 再處理, 廢棄貯藏을 위한 綜合的인 敷地造成計劃을 地方政府에 提出하였다.

## 5. 要　約

日本에서의 原子力發電의 位値는 다음과 같다.

A. 原子力發電은 現在의 높은 稼動率로 實証되는 바와 같이 安定되고 成熟한 段階에 이르렀다.

B. 發電單價가 다른 發電에 比하여 低廉한 差異가 점점 줄어들고 있기 때문에 發電單價를 安定시키기 위하여 努力하여야 할 것이다.

다시 말해서 훨씬 높은 信賴性과 經濟性을 原子力에서 찾을 수 있다고 보고, 또한 찾아야 한다. 1975年에 始作한 政府와 産業體가 共同으로 한 硏究인 "原子力發電所의 改良과 標準化"는 信賴性을 높이는데 많은 이바지를 하였다. 그러나 지금부터는 높은 信賴度를 저해하지 않는 限 經濟性을 올리는데 主로 努力하여야 할 것이다. 石油에너지의 主 代替源으로 기대되는 原子力의 좀 더 安定된 成長을 위하여, 經濟的인 側面에서 改善될 點을 언급하였다. 에너지保障은 資源이 貧困한 나라, 日本에서는 原子力이 갖는 가장 重要한 役割의 하나이다.

原子力은 資本 集約的이며 높은 産業技術의 綜合을 要求한다. 그래서 原子力은 그 높은 附加價値的, 知識集約的 特性 때문에 産業技術 進步에 貢獻을 하고 있다. 原子力의 發展은 다른 産業에 至大한 影響을 갖고 있다. 鉄鋼, 金屬 그리고 電氣機器 뿐만아니라 建設, 化學 그리고 컴퓨터 소프트웨어 産業까지 影響을 주는 것이다. 그러므로 原子力은 日本의 産業 成長에 重要한 役割을 하였으며, 다른나라의 경우도 그렇다고 기대된다. 우리는 國際的인 技術交流를 通하여 우리의 蓄積된 原子力工學技術 Know-how를 利用하는 것이 매우 重要하다고 믿는다.