

1980年度 研究報告書

線型計画法에 의한 核燃料週期最適化研究

Linear Programming Model for Nuclear Fuel Optimization

KAERI

韓國 에너지 研究所

# 提 出 文

韓國에너지研究所 所長 貴下

이 報告書를 1980年度 研究報告書로 提出합니다.

課 題 名 : 線型計劃法에 依한 核燃料週期 最適化 研究

1980 年 12 月 31 日

研究責任者 金 寅 鎬 ( 原子力政策研究室 )

研 究 員 朴 東 淳 ( 技 術 支 援 室 )

李 永 建 ( )

安 鍾 煥 ( 核 燃 料 加 工 室 )

## 要 約

本 研究는 核燃料週期費, 炉運轉維持費, 炉建設費의 總費用을 最適化하는 典型的인 線型計劃法 (Linear Programing) 問題이나, 炉 建設에 對해서는 特別한 建設計劃(案)을 前提로 이를 整數 (Integer) 로 接近한 Mixed-Integer Linear Programing 로서의 可能性을 點檢하여 보는데 力點을 두었다.

本 研究의 基本着想이 核燃料週期側面을 強調하여, 炉型組合 (Combination of Reactor types), 高速增殖炉의 導入時期, 使用後 核燃料에 對한 對策(案) 등을 試圖했다는 點에서 原則적인 限界를 갖고 있으며, 特히 本 研究의 基本的 方法論인 MILP (Mixed-Integer Linear Programing) 에 對한 computer code 가 아직 國內에 整備되어 있지 않아, 本 研究模型에 對한 試算過程을 제대로 거치지 못하여, 本 模型의 實用性を 檢證치 못한 것이 큰 아쉬움이지만, post-optimality 를 利用하여 耐用年數 經過後의 炉型 構造變化를 勘案하는 動態化를 試圖한 것은 興味로운 接近으로 생각된다.

그러나 本 研究는 어디까지나 核燃料週期 最適化模型 定立 自體에 1次的인 目標을 두었기 때문에, 特別한 解 (Solution) 를 導出코자 하지 않았으며, 實際問題에 活用키 위해서는 本 研究模型은 좀더 擴充開發되어야 할 것이다.

### ○ 內容 및 方法

가. 基本前提 및 假定

- 1) Th-cycle 은 除外하고 U-cycle 만 考慮함.
- 2) 再處理 施設投資에 對한 經濟的 妥當性에 現今再處理에 對한 國際的 規制가 影響을 미치지 않는다.
- 3) Pu 에 對한 世界市場은 有在치 않는다.
- 4) 高速增殖炉의 商業的 導入時期는 1996年 以後 可能하다.

#### 나. 模型概要

##### 1) 目的函數 (Objective Function)

極小化 總費用 = ( 炉運轉維持費 + 先行核燃料週期費 ) + ( 後  
 行核燃料週期費 : 貯藏費 and/or 再處理費 )  
 + ( 炉建設費 )

##### 2) 制約條件 ( Constraints )

- 가) 電力需要量 ( 原子力發電依存量 )
- 나) 核燃料 flow 諸式
- 다) 炉 最大, 最小 稼動率
- 라) 炉 稼動機數, 運轉開始機數 諸式

##### 3) Input 項目

- 가) 電力需要
- 나) 炉 稼動率
- 다) 炉型別 建設費
- 라) 炉運轉維持費, 先行核燃料週期費
- 마) 使用後 核燃料 發生量
- 바) 使用後 核燃料 貯藏費, 再處理費

사) 炉型別 技術的 商業化 稼動時期

4) Output 項目

가) 炉型別, 年度別 發電量

나) 炉型別, 年度別 運轉開始量

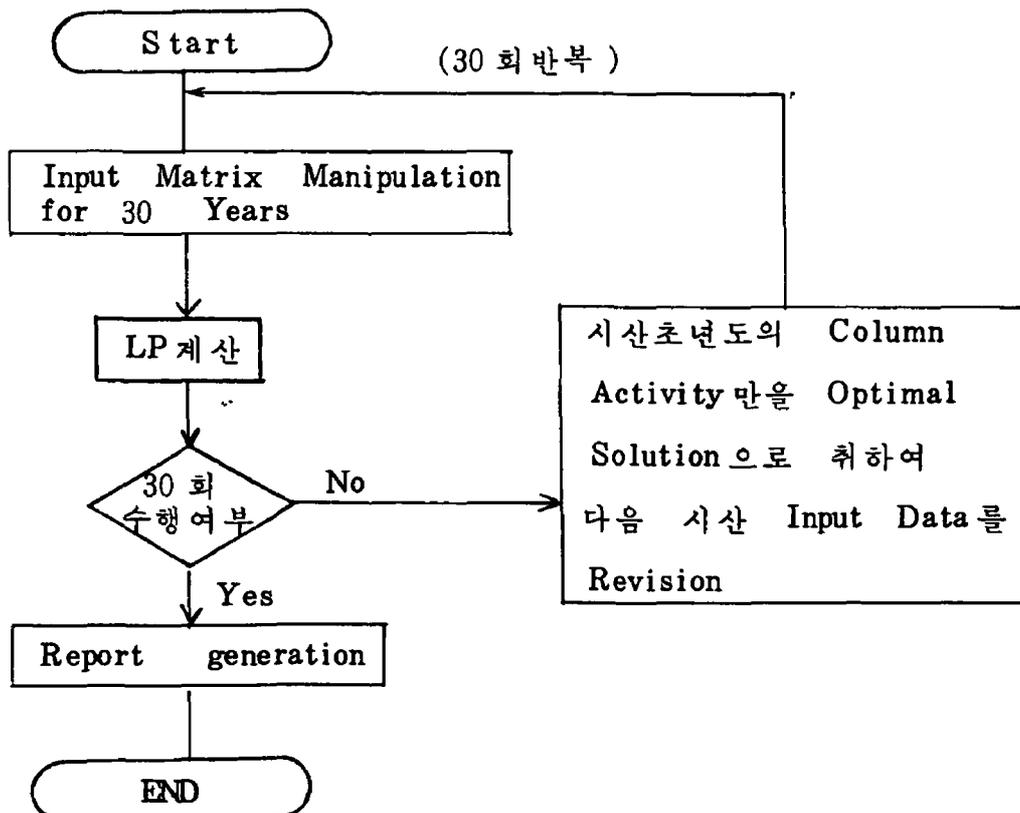
다) 炉型別, 年度別 稼動機數

라) 使用後 核燃料 最適貯藏量 또는 再處理量

다. 試算 및 評價

1) 炉型 區別없이 耐用年數 30年 假定, 耐用年數 効力時間을 考慮, 試算對象期間을 60年으로 取하였음.

2) 試算方法



3) 試算對象炉型

PWR, BWR, CANDU, PULWR, LMFBR

4) Program 概要

가) LP package : APEX - III (MILP 가 아님)

나) 데이터 枚數 : 7,900 枚

다) 使用 컴퓨터 : CYBER 174 (KIST)

라) 컴퓨터使用時間 : 3,450 初

5) 試算結果

Mixed-Integer LP package 가 國內에 없어 (Software 購入費 : 約 3 萬弗 推定), 試算을 통한 意味있는 結果를 期待할 수 없었음.

○ 結 論

核燃料週期の 最適化를 通하여, 炉型組合 및 新炉型 導入時期, 使用後 核燃料 對策을 導出코자했다는 點에서, 本 模型의 實用性에 原則적인 限界性을 갖고 있다고 하겠으나, 여타 原子力政策의 最適化 研究와 相互 補完적으로 活用 可能하다고 判斷된다. 그러나 本 研究는 MILP 模型 定立의 可能性을 檢證하는데 力點을 두어 實際 應用을 위해서는 模型이 더욱 擴充되어야 할 것이다.

## SUMMARY

In dealing with drastic and enthusiastic nuclear power generation plan in Korea, some attention should be paid to optimization study on nuclear power strategies with regard to nuclear fuel cycle

As one of system approaches, this study attempts to cover the problems of optimal combinations of reactor type, the requirements of nuclear fuel cycle, the treatment of spent fuel and the available timing of FBR, through minimizing the nuclear systems Costs-reactor operation and maintenance cost, nuclear fuel cost and construction cost - , by using Mixed Integer Linear Programing (MILP) technique.

However, this study put the emphasis on the building of MILP model in itself due to incompleteness of MILP computer code, without presenting any kinds of concrete solutions. To make this MILP model actually be used for utilization, further study has to be done.

# 目 次

I. 模型開發의 目的 및 背景 .....	3
II. 模型의 基本概要와 定立過程 .....	6
III. 定立模型의 試算과 評價 .....	15
IV. 模型의 限界性과 有用性 .....	24
參 考 文 獻 .....	33

## 表 目 次

1. 試算의 Flowchart .....	16
2. 年度別 原子力發電需要量 .....	17
3. 建設費 .....	18
4. 發電單價 및 使用後 核燃料 發生量 .....	19
5. 使用後核燃料의 貯藏 및 再處理費 .....	19
6. Input Matrix Table .....	25
7. 原子力發電炉 保有計劃 .....	27
8. Output 要約 table .....	29

## I. 模型開發의 目的 및 背景

高油價・有限供給時代의 工業化와 國民生活은 에너지 供給方式과 그 安定性 如何에 左右된다 하여도 過言이 아니다. 世界的인 脫石油政策의 不可避性과 資源貧國의 特殊性을 勘案한 우리나라의 原子力 發電計劃은 에너지政策 側面에서 볼때 地극히 當然한 것으로 理解되어지고 있다.

그러나 原子力發電도 100% 輸入우라늄에 依存해야하는 우리의 경우에는 資源確保의 限界性(世界的인 우라늄資源의 供給制約)이라는 絶對的 命題를 무시할 수 없는것이 우리의 率直한 立場인 것이다.

그렇기 때문에 原子力 發電方式에 따른 資源의 安定的 確保可能性에 신경을 곤두세우지 않을 수 없는 것이며, 여기에 炉型選擇의 問題가 생기는 것이다. 그러나 核兵器 物質로의 轉用을 우려하는 核擴散性을 核先發國들이 지나치게 強調하고 있기 때문에, 短期的으로 是後發核發電國에 있어서의 炉型選擇 問題는 地극히 限定되어 있는 것이다. 勿論 技術的으로도 資源節約型인 高速增殖炉가 商用化되기 위해서는 빨라야 90年代로 展望하고 있으므로, 開途國의 炉型選擇問題는 長期的인 것일 수 밖에 없는 것이다.

石油資源의 高갈 展望과 代替에너지 開發 展望에 비추어 볼때, 核分裂에너지 利用方式은 核融合炉의 出現時까지, 即 向後 40~50 年間的 主에너지源 開發方式이 될 것으로 展望되고 있다.

TMI 事故 以後 安全性 問題가 심각하게 再論되어 世界各國의 原子力發電計劃들이 一時的으로 中斷되거나, 延期되고 있기는 하지만

全世界 原子力發電量은 '80 年末 現在 22 個國에서 總 233 株에 140,000 MW가 機動中에 있으며, 建設計劃中인 것도 39 個國에서 411 機 (406,000 MW) 에 이르고 있다. 한편 우리나라는 原子力發電計劃을 가장 意慾적으로 推進하고 있는 나라 가운데 하나로서 現在 稼動되고 있는 古里 1 號機를 비롯하여, '91 까지 PWR 12 機, CANDU 1 機等 總 13 機에 11,000 MW 를 稼動할 豫定으로 있으며, 2,000 年까지 追加로 20 餘機가 더 建設, 稼動될 것으로 보고 있다. 이러한 意慾적인 原子力發電計劃을 成功的으로 推進, 達成키 위해서는 綜合科學技術産業인 原子力産業과 그 關聯産業이 國策적으로 推進되어야 하겠지만, 特히 核燃料의 安定供給과 使用後 核燃料에 對한 對策이 前提되지 않으면 안되는 것이다.

核燃料의 安定供給이란 見地에서 본다면, 우라늄 絶對物量 確保를 前提로 炉型別 核燃料週期서비스 (精練, 轉換, 濃縮, 再轉換, 成型加工等) 確保가 되겠으나, 資源浪費型으로 불리워지고 있는 熱中性子炉 (Thermal Reactor) 가 根本적으로 資源節約型인 高速增殖炉로 轉換되지 않는限, 核燃料의 安定供給은 資源供給國과 核燃料週期 서비스提供國의 손에 左右되게 된다.

한편 使用後 核燃料 對策이란 觀點에서 본다면, 使用後 燃料의 再使用問題는 차치하더라도, 使用後 核燃料에 對한 長期貯藏方式이 아직도 技術적으로 未確立된 狀態이므로, 협소한 國土에 高密度社會를 形成하고 있는 우리의 경우에는, 매우 심각한 문제가 아닐 수 없는 것이다.

더구나 核擴散성과 關聯한 銳敏技術로서, 使用後 核燃料에 對한 再

處理技術은 國際核情勢上 그 移轉이나 傳受가 엄격히 禁止되고 있어 使用後 核燃料 對策은 向後 우리나라 原子力利用開發政策의 基本命題中 하나로서 클로즈·업 되어야 할 것이다. Post- INFCE 의 한形態로 IPS ( International Plutonium Storage ) 問題가 舉論되고 있으며, 美國의 代替에너지 開發戰略도 原子力 重點開發로 轉換하는 움직임이 豫想되므로, 이런 變化에 對處키 위한 우리의 代案이 마련되어야 하겠으나, 本 研究에서는 核燃料經濟의 觀點에서, 向後 60年間을 對象期間으로하여, 既確定期間 以後의 炉型選擇 問題에 對하여 接近하여 보았다. 特히 高速增殖炉의 導入時期와 再處理施設의 經濟的 投資時期를 原子力發電 依存量 ( 原子力 需要量 ) 과 炉型別 核燃料週期費, 使用後燃料의 貯藏費 및 再處理費와의 關係에서 導出하는, 即 原子力發電에 대한 韓國的 Phase Diagram을 導出키 위한 模型定立에 本 研究의 目的을 두었다.

## II. 模型의 基本概要와 定立過程

### 1. 模型의 基本概念

本 模型은 長期的(30年以上)期間에 걸친 原子力發電시스템의 總費用에 對한 最適化 過程을 통하여, 炉型選擇 問題에 接近하는 것이다.

一國의 炉型選擇 問題는 原子力發電시스템이 갖는 諸制約條件, 特히 資源, 技術, 經濟, 環境, 立地 等の 諸般 條件등이 充分히 充足되는 범위內에서 決定되어야 하겠지만, 本 模型은 資源經濟의 觀點에서 原子力發電시스템內의 燃料 flow만을 고려하고 있다. 炉型으로는 加壓輕水炉(PWR), 加壓重水炉(CANDU), 沸騰輕水炉(BWR), 플루토늄利用輕水炉(PULWR) 및 高速增殖炉(FBR)의 5種을 擇하였으며, 各 炉型은 施設容量에 따라, 600 MWe ~ 1,500 MWe 範圍의 2 ~ 3種을 想定하였다.

炉型選擇은 炉建設費, 炉運轉維持費와 天然우라늄購入費, 濃縮費, 成型加工費로 構成되는 先行核燃料週期費 및 使用後燃料에 대한 貯藏費 또는 再處理費로 表示되는 後行核燃料週期費를 包含한 總費用을 考慮對象期間 全體에 걸쳐 把握한 後, 주어진 時點基準(at a given time point)의 現在價値로의 換算值를 最小化하므로서 決定된다. 內容을 보다 現實化하기 위하여, 每年度別 諸費用에 物價上昇(escalation)을 고려하는 것으로 보았고, 新炉型인 PULWR과 FBR의 商用化 導入時期에는 技術的 可能時期라는 制約條件을 追加하였다.

그리고 一般的으로는 核燃料週期費中에 plutonium 및 uranium recycled에 대한 credit 과 購入費가 包含되게 되나, 本 模型에서는 閉鎖된 核燃料週期를 前提로 plutonium이나 recycled uranium 에 대한 物量 balance 를 system內에 고려하였다.

最適化 方法論은 線型計劃法 (linear programing)을 擇하였으나, 年度別 炉 稼動機數와 運轉開始機數가 決定變數 (decision variable)로서 整數 (integer)를 取하게 되므로, 一般 線型計劃法에 Integer LP를 合한 Mixed Integer LP (MILP)로 接近코자 하였다.

## 2. 基本前提 및 假定

- 가. U-cycle 만을 對象으로 하고 Th-cycle 은 고려치 않았다.
- 나. 再處理에 대한 國際的 規制가 再處理 施設投資에 대한 經濟性에는 아무 影響을 주지 않는다.
- 다. PULWR 및 LMFBR에 쓰일 Pu 과 Recycled Uranium은 國內使用後 燃料에 對한 再處理量으로 充當하는 것으로 하였다. 即 閉鎖된 核燃料週期시스템을 假定하였다.
- 라. PULWR 및 LMFBR의 導入可能時期에는 技術的 制約이 있는 것으로 하여, PULWR은 1991年以後 LMFBR은 1996年以後부터 技術的으로 導入이 可能하다.

## 3. 目的函數 (Objective Function)

原子力發電에 所要되는 總費用 ( 炉運轉維持費 및 先行核燃料週期費  
+ 後行核燃料週期費  
+ 發電所建設費 )

에 決定變數인  $t$  期에서의 炉型別 稼動開始機數와 稼動機數를 包含시켜 다음과 같이 目的函數를 取하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{TCminimize} = & \sum_{t=1}^t \left\{ \sum_{j=1}^5 \overbrace{(\alpha_j^t * WW_j^t)}^a + \sum_{k=1}^5 \overbrace{(\beta_k^t * XX_k^t)}^b + \sum_{l=1}^5 (\gamma_l^t \right. \\
 & \left. * YY_l^t) + \sum_{m=1}^{12} \overbrace{(\delta_m^t * AZ_m^t)}^c + \sum_{n=1}^{12} \overbrace{(10^{-3} * ZZ_n^t)}^d \right\}
 \end{aligned}$$

但, TC : 模型의 計算期間에 原子力發電에 所要되는 總費用의 現在價值

變數 (Variables) :

$WW_j^t$  :  $t$  期에  $j$  炉型의 發電量

$XX_k^t$  :  $t$  期에  $k$  炉型의 使用後核燃料 貯藏量

$YY_l^t$  :  $t$  期에  $l$  炉型의 使用後核燃料 再處理量

$AZ_m^t$  :  $t$  期에  $m$  炉型의 稼動이 開始되는 基數

(Integer Value)

$ZZ_n^t$  :  $t$  期에  $n$  炉型의 稼動基數 (Integer Value)

媒介變數 (Parameters)

$\alpha_j^t$  :  $t$  期에  $j$  炉型의 單位發電量當 所要되는 發電所運轉 維持費 및 先行核週期費 (O & M 및 frontend fuel cycle cost)

$\beta_k^t$  :  $t$  期에  $k$  炉型의 使用後核燃料 單位當 貯藏費

$\gamma_l^t$  :  $t$  期에  $l$  炉型의 使用後核燃料 單位當 再處理費

$\delta_m^t$  :  $t$  期에  $m$  炉型 1 基當 建設費 (construction cost)

炉型	PWR			BWR		CANDU		PULWR			FBR	
容量 (MWe)	600	900	1,200	900	1,200	600	900	600	900	1,200	1,200	1,500
j,k,l	1			2		3		4			5	
m,n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

目的函數의 構成을 費用要素別로 보면 다음과 같다.

a. 發電所의 運轉維持費 및 先行核燃料週期費  $\left[ \sum_{t=1}^t \sum_{j=1}^f (\alpha_j^t * WW_j^t) \right]$

여기서  $\alpha_j^t$  는 炉型制 單位發電當 所要되는 發電所의 運轉維持費 및 天然우라늄 購入費, 轉換費, 濃縮費, 成形加工費와 같은 先行核燃料週期費를 나타내는 媒介變數로서 이는 炉型別 核燃料 仕様 및 炉特性을 基礎로 하여 計算하여야 한다. 또한 核燃料週期の 各 工程間의 lead time 를 考慮하여 一切의 費用을 把握하여 計算하여야 한다.

b. 後行核燃料週期費  $\left[ \sum_{t=1}^t \left\{ \sum_{k=1}^5 (\beta_k^t * XX_k^t) + \sum_{l=1}^5 (\gamma_l^t * YY_l^t) \right\} \right]$

後行核燃料週期費는 使用後燃料의 貯藏費 ( $\beta_k^t * XX_k^t$ ) 와 再處理費 ( $\gamma_l^t * YY_l^t$ ) 로 表示될 수 있으며 媒介變數  $\beta_k^t$  및  $\gamma_l^t$  는 貯藏 및 再處理 單價를 表示한다. 本 模型에서는 再處理의 規模經濟에 따른 要因은 考慮하지 않는 것으로 하였다. 即 貯藏 및 再處理費는 物量에 대하여 1次函數 關係에 있으며, 限界費用 (marginal cost) 은 一定 (constant) 하다.

$$c. \text{ 發電所의 建設費 } \left[ \sum_{t=1}^t \sum_{m=1}^{12} (\delta_m^t * AZ_m^t) \right]$$

發電所의 建設單位 ( $\delta_m^t$ ) 는 建設期間中の 總投資費를 現價化하여 求하였고 이를 稼動開始機數 ( $AZ_m^t$ ) 에 乘하여 建設費를 表示하였다.

$$d. \text{ 決定變數 } \left[ \sum_{t=1}^t \sum_{n=1}^{12} (10^{-3} * ZZ_n^t) \right]$$

每年度の 炉型別 稼動機數를 決定하기 위하여 이를 決定變數로 취하였고 目的函數에는 影響을 주지 않도록 便宜上  $10^{-3}$  을 乘하여서 最適化 計算을 하도록 하였다.

炉型別 稼動開始機數 ( $AZ_m^t$ ) 와 稼動機數 ( $ZZ_n^t$ ) 는 整數 (integer) 를 取하게 된다.

#### 4. 制約條件(Constraints)

本 模型은 目的函數인 總費用을 最小化하기 위한 變數의 값을 求하는 것으로 다음의 制約條件을 滿足하여야 한다.

$$가. \text{ 電力需要 (DMDUP}^t : \sum_{j=1}^5 WW_j^t = D^t)$$

$t$  期에서 原子力發電이 차지하는 總電力需要量 ( $D^t$ ) 은 各 炉型別 發電量 ( $WW_j^t$ ) 의 合과 같아야 한다.

$$나. \text{ 使用後 核燃料發生 (CONS}_j^t : a_j * WW_j^t = XX_k^t + YY_l^t)$$

$t$  期에서 各 炉型別 使用後 核燃料 發生量 ( $a_j * WW_j^t$ ) 은 炉型別

使用後 核燃料 發生量 ( $a_j$ ) 을 乘하여 表示될 수 있으며 이는 使用後 核燃料의 貯藏量 ( $XX_k^t$ ) 및 再處理量 ( $YY_l^t$ ) 의 合과 같아야 한다.

다. 原子炉의 稼動率 (CAPUP :  $\sum_{n=1}^{12} (b_n * c_n * zz_n^t) \geq WW_j^t$  CAPLO  
 $:\sum_{n=1}^{12} (b'_n * c_n * zz_n^t) \leq WW_j^t$ )

$t$  期에서 炉型別 發電量은 炉型別 最大發電 可能量 [ $\sum_{n=1}^{12} (b_n * c_n * zz_n^t)$ ] 보다 작거나 같고 最小發電 可能量 [ $\sum_{n=1}^{12} (b'_n * c_n * zz_n^t)$ ] 보다는 크거나 같아야 한다. 炉型別 最大 및 最小 發電可能量은 炉型別 公稱 發電容量 ( $c_n$ ) 과 最大 및 最小 稼動率 ( $b_n, b'_n$ ) 및  $t$  期の 炉型別 稼動基數의 乘으로 얻어진다.

라. 炉型別 稼動基數 (MUNIT :  $ZZ_n^t = \sum_{t=1}^t AZ_n^t + I - IT$ )

$t$  期에서 炉型別 稼動基數 ( $ZZ_n^t$ ) 는  $t = 1$  부터  $t$  까지 建設된 炉型別 稼動基數(I)의 合과 같아야 한다. 단, 原子炉의 耐用年數가 지나면 稼動基數에서 除外되도록  $t$  期에 耐用年數가 滿了되는 基數(IT) 를 減한다.

마. Pu 發生量 (PUREC, FBRRE :  $S_j * WW_j^t \leq P_l * YY_l^t$ )

푸로토늄利用 輕水炉 (PULWR) 이나 高速增殖炉 (FBR) 의 경우 Pu 使用量은 炉型別 發電量 ( $WW_j^t$ ) 에 單位 發電量當 Pu 使用量을 乘하여 表示할 수 있으며 이는 再處理에서 얻어지는 Pu 量보다 작거나 같아야 한다. 再處理에서 얻어지는 Pu 量은 再處理量 ( $YY_l^t$ )

에 使用後核燃料 單位當 Pu 發生量 ( $P_l$ ) 의 乘으로 表示될 수 있다.

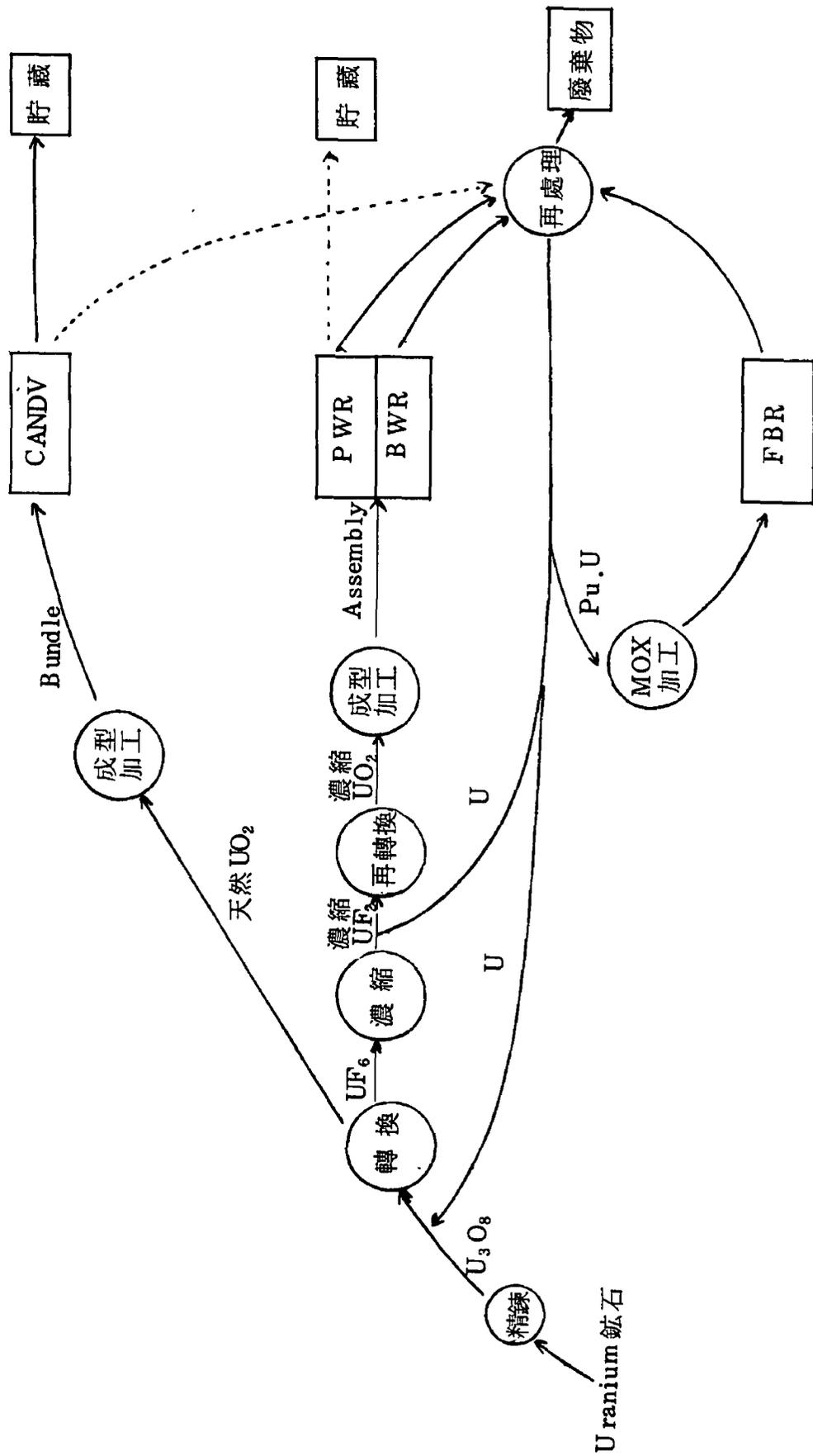
以上의 制約條件을 綜合하면 아래와 같다.

區 分	制 約 條 件
DMDUP <sup>t</sup>	$\sum_{j=1}^5 WW_j^t = D^t$
CONS <sub>j</sub> <sup>t</sup>	$-a_j * WW_j^t + XX_k^t + YY_l^t = 0$
CAPUP <sub>j</sub> <sup>t</sup>	$-WW_j^t + \sum (b_n * c_n * ZZ_n^t) \geq 0$
CAPLO <sub>j</sub> <sup>t</sup>	$-WW_j^t + \sum (b_n' * c_n * ZZ_n^t) \geq 0$
MUNIT <sub>n</sub> <sup>t</sup>	$-ZZ_n^t + \sum_{t=1}^t AZ_m^t = -(I - IT)$
PUREC <sup>t</sup> , FBRRE <sup>t</sup>	$-S_j * WW_j^t + P_l * YY_l^t \geq 0$

ㄷ. Non-Negativity Constraint

$$WW_j^t, XX_k^t, YY_l^t, AZ_m^t, ZZ_n^t \geq 0$$

5. 核燃料週期 flow



## 6. Input 데이터 項目

- 가. 原子力發電 依存量 ( 原子力需要量 )
- 나. 炉稼動率
- 다. 炉型別 容量別 建設費
- 라. 炉型別 發電單位量當 炉運轉維持費, 先行核燃週期費
- 마. 炉型別 發電單位當 使用後 燃料發生量
- 바. 使用後 核燃料 單位當 貯藏費 및 再處理費
- 사. 炉型別 技術的 商業化 可能時期

## 7. Output 데이터 項目

- 가. 炉型別, 年度別 發電量
- 나. 炉型別, 年度別 稼動開始量 ( 運轉開始量 )
- 다. 炉型別, 年度別 稼動機數
- 라. 炉型別, 年度別 使用後燃料 貯藏量 또는 再處理量

### Ⅲ. 定立模型의 試算과 評價

#### 1. 試算의 背景

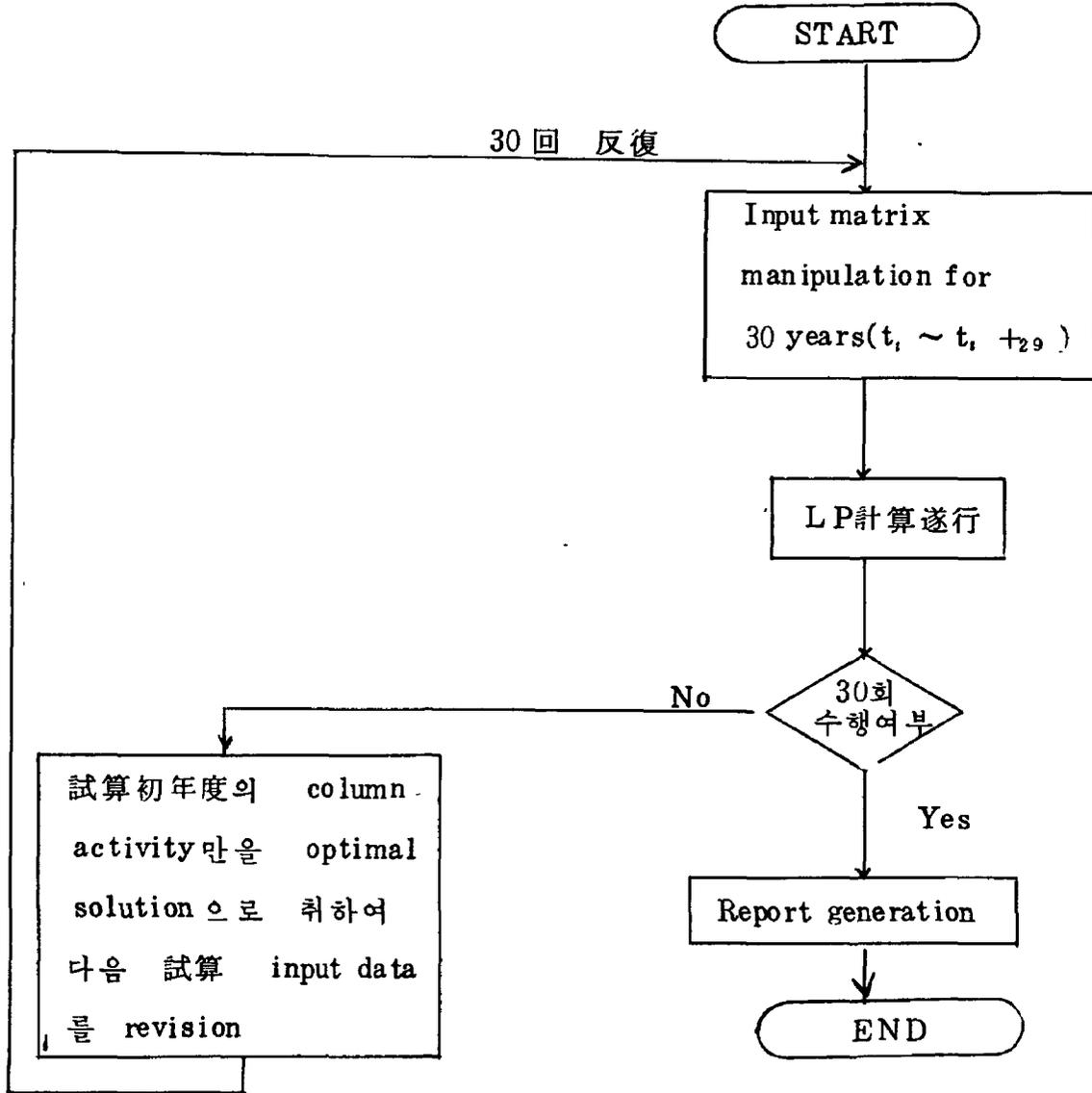
t 期에 가동개시한 發電炉는 内容年數가 經過한 t+30 期에 廢棄되므로 本 Model 은 t stage에서의 status가 t+30 stage에 影響을 直接 끼치는 dynamic system이다 따라서 定立模型의 試算過程에서는 動的 解決手法을 動員하여야 할 것이다.

發展炉의 가동기수는 정수로 解를 求하여야하나 아직까지 國內에는 MILP(Mixed Integer Linear Program)가 導入·設置되어 있지 않은 實情이며, real value로 가동개시기수  $AZ_m^t$  (m炉型의 t期 가동개시기수)를 求하고  $AZ_m^t - 1 \leq \text{bound} \leq AZ_m^t + 1$  範圍의 정수로 解를 찾을 境遇에는 LP 計算回數가  $2^{30}$ 이 되므로 現實的으로 不可能하므로 本 試算에서는 real value로 解를 찾아 Model의 有用性을 立證하는데 主眼點을 두었다.

#### 2. 試算의 方法

매회 試算의 對象 period를 30年으로 하여 LP計算을 遂行 하였으며 매회 도출한 solution으로 부터 試算 初年度의 column activity만을 당해년도의 optimal solution으로 취하고 이것을 初年度를 1年 進行시킨 다음 試算을 위한 input matrix에 feed back시켜 LP計算을 遂行하는 方法을 30回 反復함으로서 Model의 動的 適用을 기하였다 試算의 Flow는 表1과 같다

表 1. 試算의 Flow chart



### 3. Input Factors

#### a. 原子力發電 需要量

91年度까지의 原子力發電 需要量은 에너지 政策上 確定된 計劃量이며 그후의 原子力發電 需要量을 表 2 와 같이 假定하였다

表 2. 年度別 原子力發電 需要量

單位：GWe

t(期)	年度	需要量	t(期)	年度	需要量	t(期)	年度	需要量
1	1981	0.42	21	2001	30.7	41	2021	80.7
2	1982	0.42	22	2002	33.2	42	2022	83.2
3	1983	1.3	23	2003	35.7	43	2023	85.7
4	1984	1.93	24	2004	38.2	44	2024	88.2
5	1985	2.56	25	2005	40.7	45	2025	90.7
6	1986	3.19	26	2006	43.2	46	2026	93.2
7	1987	4.45	27	2007	45.7	47	2027	95.7
8	1988	5.08	28	2008	48.2	48	2028	98.2
9	1989	6.34	29	2009	50.7	49	2029	100.7
10	1990	6.97	30	2010	53.2	50	2030	103.2
11	1991	7.62	31	2011	55.7	51	2031	105.7
12	1992	10.6	32	2012	58.2	52	2032	108.2
13	1993	11.8	33	2013	60.7	53	2033	110.7
14	1994	13.1	34	2014	63.2	54	2034	113.2
15	1995	15.6	35	2015	65.7	55	2035	115.7
16	1996	18.1	36	2016	68.2	56	2036	118.2
17	1997	20.6	37	2017	70.7	57	2037	120.7
18	1998	23.2	38	2018	73.2	58	2038	123.2
19	1999	25.7	39	2019	75.8	59	2039	125.7
20	2000	28.2	40	2020	78.2	60	2040	128.2

b. 稼働率

炉型에 關係없이 最高稼働率은 70%, 最低稼働率은 50%로 각각 假定하였다

c. 建設費

建設費는 建設期間 동안의 利子和 初期 核燃料場全費를 包含하여 表 3 과 같이 假定하였다

表 3. 建設費

炉 型	Capacity(MWe )	建設費 (백만불 )
PWR	600	1, 100
	900	1, 300
	1, 200	1, 500
BWR	900	1, 400
	1, 200	1, 600
CANDU	600	1, 300
	900	1, 500
PuLWR	600	1, 100
	900	1, 300
	1, 200	1, 500
FBR	1, 200	1, 800
	1, 500	2, 000

d. 發電單価 및 使用後 核燃料 發生量

發電單価는 發電單価當 發電所 運轉維持費와 精煉·轉換·濃縮 및 加工單価로 이루어진 선행 핵주기비를 意味하며, 發電單価와

炉型別 使用後 核燃料發生量은 表4 와 같다.

表 4. 發電單価 및 使用後 核燃料 發生量

炉 型	發電單価 (백 만불/GW·y)	使用後燃料發生量 (MT/GWe)
PWR	48.8	25.8
BWR	48.8	32.4
CANDU	43.2	65.6
PuLWR	38.6	25.8
FBR	22.8	23.1

e. 使用後 核燃料의 貯藏 및 再處理費

再處理費는 處理規模에 따라 費用에 차이가 있으나 Model 의 全期間을 통하여 일정한 것으로 假定하였고, 貯藏費도 貯藏方法 (At reactor, Away from reactor 등)에 따라 費用이 相異하나 具體的 方法을 고려치 않고 表5 와 같이 假定하였다.

表 5. 使用後 核燃料의 貯藏 및 再處理費

單位 : 백만불/GW·y

炉 型	貯 藏 費	再 處 理 費
PWR	0.25	0.3
BWR	0.25	0.3
CANDU	0.25	0.3
PuLWR	0.25	0.3
FBR	0.25	0.4

#### 4. Input Matrix

##### a. Columns (variables)

1) 年度別 稼働開始 基數 (AZ<sub>ij</sub>) 및 總稼働 基本 (ZZ<sub>ij</sub>)

① i 는 炉型 / capacity 로서 i = 1, 2, ..... , 12

② j 는 毎 試算의 대상 period 로서 j = 1, 2, ..... , 30

따라서 AZ<sub>ij</sub> 및 ZZ<sub>ij</sub> vector 의 size 는 각각 12 × 36 = 360 이다

2) 發電量 (WW<sub>kj</sub>), 貯藏量 (XX<sub>kj</sub>) 및 再處理量 (YY<sub>kj</sub>)

① k 는 炉型으로서 k = 1, 2, ..... , 5

② j 는 毎 試算의 대상 period 로서 j = 1, 2, ..... , 30

따라서 각각의 Vector size 는 5 × 30 = 150 이며 總 column Vector 의 size 는 (360 × 2) + (150 × 3) = 1,170 elements 이다

##### b. Rows (constraints)

1) 需要 constraints

$$\sum_{k=1}^5 WW_{kj} = DMND_j$$
 와 같이 表現되는 需要와 發電量과 의 關係에 대해 毎 試算의 대상 기간인 30 年에 對해 30 個 ( j = t, t + 1, ..... , t + 29 ) 의 constraint equation 이 있다

2) 使用後 核燃料 發生量

$$\alpha_{kj} \times WW_{kj} = XX_{kj} + YY_{kj}$$
 와 같이 表現되는 發電量과 使用後 核燃料 發電量과의 關係에 對해 ( k = 1, 2, ..... , 5, j = t, t + 1, ..... , t + 29 ) 150 개의 constraint equation 이 있게 된다

### 3) 稼働率 constraints

最高稼働率을  $h_j$ , 最低稼働率  $l_j$ , capacity 를  $C_j$ 라 할때  $h_j \times C_{kj} \leq W_{kj}$  ( $k = 1, 2, \dots, 5$ )로 表現되는 稼働率과 發電量과의 關係에 對해  $j = t, t + 1, \dots, t + 29$ 이므로 각각 150개의 constraints equation 이 있다

### 4) t 期の 稼働開始 基數 및 總稼働 基數 constraints

t 期에 稼働開始한 炉는 t + 30 期에는 廢棄되므로 t 期の 總稼働 基數와 t - 29 期부터 t 間까지 追加建設된 基數와의 關係에 對하여 試算의 對象 期間  $j (j = t, t + 1, \dots, t + 29)$  가

①  $t \leq 29$  일때는

$$ZZ_{kj} = \sum_{j=1}^{29} AZ_{kj} \quad (k = 1, 2, \dots, 12)$$

②  $j \geq 30$  일때는

$$ZZ_{kj} = \sum_{j=1}^j AZ_{kj} - ZZ_{kj} \quad (j = j - 29, k = 1, 2, \dots, 12)$$

로 表現되는 constraint equation 이 360 개 存在한다

### 5) Pu 發生量 constraints

PuLWR 과 FBR 의 Pu 使用量과 再處理로 채취되는 Pu 量과의 關係는 發電單位當 Pu 使用量을 S, 再處理 單位當 Pu 채취량을 P 라 할때  $S \times W_{Wj} \leq P \times Y_{Yj}$ 로 表現되며 각 炉型에 對해  $j = t, t + 1, \dots, t + 29$ 이므로 각각 30개의 constraints 가 存在한다

이상 1) ~ 5) 의 constraints 로 이루어진 Row vector 는 objective function 을 包含하여 901개 가 되며 Input matrix 의 size 는

901 × 1,170 이며 그 개요를 나타내는 Table 은 表 5 와 같다

### c . Bounds

表 6 에 있는 이미 樹立되어 있는 原子力發電炉 建設計劃 上的 수치는 bounds sector에서 fixed bound로 하였고 특히 FBR은 技術開發 추세로 볼때 1996年 이후부터 保有가 可能할 것으로 推定하여 1 ~ 15期까지는 fixed bound (value = 0)로 하였다

## 5. 解 ( Solution )와 評價

以上の 基本前提와 假定 그리고 入力資料로서 行한 試算의 解는 어디까지나 計算上的 解일 뿐이지, 現實적으로 우리가 求하고자한 解는 勿論 아니다 이는 後述하겠지만 本 模型이 갖는 限界性과 資料 制約性 模型自體의 未備點 等 아직 補完해야 할 점이 많기 때문이다

단지 試算의 一例를 表示하기 위하여 試算結果를 要約하면 다음과 같다

## 6. Program 개요

a . Input matrix manipulation , data revision 및 report generator 는

FORTRAN( Source input data card 7,000枚, main program 900枚)

b . LP 計算은 Inverse revised simplex method로 된 CDC의 APEX

- III LP Package 이용, 사용 computer는 CYBER 174 .

c. CPU time

- ① Input data manipulation ; 매 회 평균 50 초
- ② LP 計算 ; 매 회 평균 65 초 ( 매 회 마다 column name 및 row name 을 計算 對象 期間의 進行에 일치되도록 變更시켰기 때문에 最初의 starting basis 를 反復使用이 不可能했음 )
- ③ 總使用時間 ;  $(50 \times 65) \times 30$  회 = 3,450 초

## Ⅳ. 模型的 限界性和 有用性

一般的으로 屬性이 多樣한 시스템을 數學的인 表現方式으로 定量化할 때의 一般的인 限界性和 制約性外에 本 模型은 다음과 같은 問題點을 갖고 있다

1. 原子力發電시스템의 總費用中 核燃料週期費의 比重이 現實的으로 50%未滿임에도 불구하고, 核燃料週期費(특히 우라늄購入費와 後行核燃料週期費)의 最適化로, 시스템 全體의 最適化를 피하는 基本構想自本에 우선 좀 無理가 있다고 하겠다 따라서 本 模型은 우라늄價格이 高價化하고 使用後燃料 對策費가 炉建設費에 對한 相對的 比重이 커진 경우에만 意味를 갖게 된다

2. 우라늄價格과 高速增殖炉 導入時期, 再處理의 經濟的 投資時期와의 相互關係를 導出하는데, 本 MILP 模型이 有効하게 利用될 수 있는가의 可能性을 지나치게 강조한 나머지 模型 自體가 너무 單純化되어 있다

3. 未完成, 不完全 商用化 技術인 原子力發電技術을 長期的으로 볼 때에는 엄청난 技術革新이 豫想되나 이를 計量的으로 豫測한다는 것이 극히 어려운 일이므로, 模型에 쓰이는 技術系數(Technical Coefficient)에 대한 信賴性を 유지하기가 곤란하다

4. 高油價 核燃料時代가 深化됨에 따라, UPEC(Uranium Producing Export Countries)의 出現 可能性과 供給獨點力에 의한 市場 支配가 長期的으로는 不可避할 것으로 豫想되므로 各種 費用에 對한 Parameter의 信賴度 유지가 곤란하다



빈 면

表7. 原子力發電炉 保有計劃

炉型	CAPA (MWe)	年度	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95
		期	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PWR	600		1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2					
	900				1	2	3	5	6	8	9	10						
	1,200																	
BWR	900																	
	1,200																	
CANDU	600				1	1	1	1	1	1	1	1	1					
	900																	
PuLWR	600																	
	900																	
	1,200																	
FBR	1,200		0															
	1,500		0															

빈 면

表 8. <OUTPUT 要約 TABLE>

區分		期		年度																													
		0	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
		'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'2000	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	
PWR	CAPA.600	推加基數	1		1																												
		總基數	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	CAPA.900	推加基數				1	1	1	2	1	2	1	1																				
		總基數				1	2	3	5	6	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
		貯藏量		10.84	10.84	21.67	37.93	54.18	70.43	102.94	119.2	151.7	168.0	184.2	131.6	131.6	131.6	184.2	131.6	131.6													
	再處理量		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CANDU	CAPA.600	推加基數			1																												
		總基數			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	貯藏量				76.18								79.5	49.7	49.7	49.7	79.5	0	49.7														
	再處理量				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PuDWR	CAPA.1200	推加基數												6.19	1.43	1.55	0.33																
		總基數													6.19	7.52	9.07	9.40	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	
	貯藏量													134.0	165.0	198.5	205.7	147.0	147.0														
	再處理量													0	.16	.20	.21	.15	.15														
FBR	CAPA.1200	推加基數																6.67	2.38	2.48	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.48	2.29	2.38	2.38	2.67	
		總基數																	6.67	9.05	11.53	13.91	16.29	18.67	21.05	23.43	25.81	28.19	30.67	32.96	35.34	37.72	40.39
	貯藏量																	161.5	219.2	279.2	336.9	394.6	452.3	510.0	567.7	625.4	683.1	743.1	798.5	856.2	913.8	978.5	
	再處理量																	.17	.22	.28	.34	.40	.45	.51	.57	.63	.68	.74	.80	.86	.92	.98	

(\* BWR 은 Active solution 이 全無함으로 表에서 除外하였음)

빈 면

5. 模型 諸關係式을 1次函數로 假定했다는 點이다 資本과 技術 集約的인 原子力發電施設과 核燃料週期施設에 대한 費用函數를 1 次式으로 파악하는데는 現實的으로 無理가 있다고 본다

6. Mixed - Integer Linear Programing 模型 自體가 靜態的 (Static)이 긴하나 이 靜態性을 補完하기 위해 耐用年數 消滅 以後의 動態 性 (Dynamic)을 감안하여, Post-Optimality 方法으로 動態化를 試圖 했다는 點이다

또한 原子力發電事業은 資源, 技術, 經濟, 環境, 立地 등의 諸條件 을 充分히 감안해야 하는 巨大한 시스템事業으로서, 綜合科學技術 인 原子力發電技術에 대한 國內 受用力 및 消化力, 研究開發力, 技術 人力供給力, 財源調達力 등에 對한 綜合檢討가 필수적으로 要求되 나, 여기서는 이들에 대해서 論外로 하였으며, 이후 補完을 要한다

위에서 지적한 여러가지 限界性和 制約性으로 인하여 本 模型을 實 際에 응용하기에는 미흡하다고 判斷되지만, 線型計劃法이 갖고 있 는 Primality와 Duality를 통한 各 變數의 Sensitivity를 比較 檢討하므로써 炉型別 核燃料週期費, 특히 우라늄 價格과 再處理費 및 使用後核燃料 貯藏費와의 相互關係를 規明하므로써, 韓國的 Phase - Diagram을 導出할 수 있을 것이며, 이에따라 高速增殖炉의 導 入時期와 再處理施設 投資에 대한 豫備妥當性 檢討가 可能할 것 이다

빈 면

## 參 考 文 獻

東京電力㈱ : Optimization System of Fuel flow , Construction and Operation of Reactors, 1975

東京電力㈱ : Analysis on Fast Reactor Strategy, 1977

IAEA : Economics of Nuclear Fuels, Vienna, 1968

INFCE REPORTS, 1977 ~ 1979

Carleton, Willard T : Linear Program and Capital Budgeting Model, the journal of Finance 16 (1974)

金 寅 鎬 : 通信事業經營, 1978

Searl/Housman : Matrix Algebra for Business and Economics, 1976

核燃料開發公團 : INFCE 結果分析研究, 1979

線型計劃法에 의한 核燃料週期最適化研究

---

1981年 4月 17日 印刷

1981年 4月 20日 發行

發行人 車 宗 熙

發行處 韓國 에너지研究所

서울市道峰區孔陵洞170-2

☎ (433) 2081 ~ 9

---

印刷所 (株) 新進商事

☎ 73-1344 74-1344

분수넘는 사치낭비 우리살림 과탄온다