

《해 설》

核 燃 料 에 관 한 考 察

李 昌 健 · 李 宜 謙

原子力研究所 · 韓國電力原子力部

(1970. 10. 26 접수)

머릿 말

石炭이나 天然가스과 달라서 核燃料을 燃焼시키려면 高度의 技術과 施設을 요하는 여러가지 工程을 거쳐 爐心部에 裝填하기에 알맞는 形態로 加工해야 한다.

輕水爐일 경우 燃焼가 끝난 核燃料도 購入當時 價格의 몇分之一의 값어치는 지니고 있으므로 그것을 그냥 廢棄할 것이 아니라 再處理해서 거기에서 抽出한 우라늄과 새로히 生成된 플루토늄을 抽出해내는 것이 賢明한 일이다. 뿐만 아니라 우라늄은 시초의 濃縮도와 爐內에서의 照射度 및 燃料自體를 被覆하는 物質과 冷却材 등의 外的 要因에 따라 새로히 生成되는 核分裂性物質의 生成率이 달라지게 된다.

따라서 여기서는 우라늄이 原狀狀態로 부터 加工處理되어 動力爐에 들어가 燃焼된 후 다시 各種 工程을 거치는 諸般 過程을 段階別로 더듬어 거기에 隨伴되는 技術 및 經濟性을 檢討함으로써 全般的인 核燃料週期에 미치는 影響을 論하였고, 나아가 장차 우리 나라에서 確立해야 될 核燃料開發政策에 관해서도 言及하였다.

I. 우라늄 資源編

世界的인 추세에 따라 장차 國內에도 原子力에 의한 發電需要가 增加 될 것이고 이에 따라 核燃料 資源 確保가 重要한 問題로 대두될 것임은 必然的인 사실이다.

지금까지 國內에는 低品位 Thorium 資源의 一部를 제외하고는 核資源이 確認되지 않고 있어 原子力發電에 所要되는 燃料 全部를 海外에 의존치 않을 수 없는 實情이다.

國內에 核資源을 充分히 保有하고 있지 않는 國家나, 장차의 우라늄市場 獨占을 피하는 強大國內의 大企業體들이 캐나다, 아프리카, 호주 및 인도네시아 等地에서 探鑛에 積極的인 投資를 하고 있다.

I-1. 우라늄 埋藏量 및 長期需要

低廉한 化石燃料을 充分히 保有하지 않는 國家들은, 이미 經濟性이 立證되었기 때문에 앞으로 대부분의 發電手段으로 대두될 것이 틀림없는 原子力發電에 기대를 걸고 이 事業에 착수하고 있다. 非共產世界에서 지금까지 確認된 우라늄 埋藏量을 세가지 Cost Category 별로 보면 다음과 같다. 즉 1 lb. U₃O₈ 당 10弗以下の 可採埋藏量은 美國 310,000噸, 캐나다 200,000噸, 아프리카 205,000噸 및 其他 120,000噸으로서 非共產世界 合計 約 835,000噸으로 알려져 있다.

10~15弗 사이의 可採埋藏量은 美國 150,000噸, 캐나다 130,000噸, 스웨덴 350,000噸 및 其他 140,000噸으로 合計 770,000噸이고, 15~30弗 사이의 可採埋藏量은 미국 200,000噸, 캐나다 100,000噸, 스웨덴 150,000噸 및 기타 140,000噸으로 總 590,000噸으로 報告되어 있다.

이렇게 해서 非共產世界 總 可採埋藏量은 約 2,195,000噸이 된다.

한편 長期 電力成長 推定에는 두가지 重要한 因子를 考慮해야 하는바, 즉 그것은 인구 성장률과 1人當 energy 消費率이다. 두가지 因子들은 國家에 따라 다르지만 美國의 경우 人口는 每 40年 마다, 電力 使用量은 每 8年 乃至 10년에 각각 2배로 增加되고 있고 한국의 경우, 人口는 每 25~30年 마다, 電力 使用量은 1960年을 base 로 하면 約 5年만에 2배로 增加 되고 있다.

自由世界の 우라늄 生産量은 1969年度 現在 年間 23,000噸으로, 需要量 16,000噸에 비해 年 7,000噸을 초과 하지만 1971년에 이르면 需要와 生産이 均衡을 이루게 된다. 그후 해마다 增加하는 需要에 對해서 供給量을 確保하려면 現在 操業中인 鑛山規模의 擴大, 採掘中斷된 鑛山の 再開 및 短期間內에 未開發 鑛床의 開發 等を 推進하여야 한다. 이런 需要量 充足을 위한 여러가지 方便을 總 網羅하면 生産能力은 年間 38,000噸이 될 것으로 推定 되는바 이것은 既知의 埋藏量을 基礎로 하여 考慮해 보면 最大 生産能力이 된다. 1973年 頃의 需要가 그때의 最大 生産能力인 38,000噸에 到達되고 그後부터 需要 增加에 對應해서 未知의 鑛床의 發見 및 開發이 不可缺의 要件으로 보여진다.

이런 點에서 볼때 1973年 頃에 이르면 世界的인 原鑛 需給 balance의 轉換期가 되며 장차 高品位 大規模鑛床의 發見 및 開發이 해마다 계속되지 않는 限核燃料 需給은 艱박한 事情에 處해 질 것이 豫想된다.

남아프리카의 우라늄 鑛은 아직까지 金鑛의 副産

物로 10弗이하의 cost로 生産되고 있는데 現在の 生産率은 年間 約 4,000噸에 不過하지만 우라늄 需要 增加와 이에 부응키 위한 採鑛 技術 改善으로 1980年 까지 70,000噸 내지 80,000噸이 生産될 것으로 보인다.

캐나다에도 남아프리카와 비슷한 實情에 있고 大部分의 埋藏量은 몇개의 大單位 鑛에 制限되어 있어서 採鑛에 經濟的인 制限을 받는다. 現在 캐나다의 生産量은 1980年까지 120,000 내지 140,000噸에 達할 것으로 觀測된다.

美國의 경우 1980年까지 約 210,000噸이 採掘 利用되고 나머지 所要量은 磷鑛이나 銅鑛의 副産物로서 약간 生産될 展望이며 미국 자체로 본다면 採鑛能力의 向上으로 美國內 所要量 245,000噸만은 充足되리라고 보인다.

그外 프랑스에서 約 45,000噸 및 其他 몇個國에서 採鑛될 量을 포함하면 1980年 까지의 自由世界の 發電規模 約 235,000 Mw에 대한 우라늄 所要量 500,000噸은 無難히 充足되리라고 判斷 된다.

표 1. 世界의 우라늄 埋藏量(U₃O₈ 含有量)

단위 : 10³ 噸 U₃O₈

國家	生産 cost		同 左		同 左		計	
	U ₃ O ₈ lb 당	10弗이하	A	B	A	B	A	B
미 국	189+(120)	325+(25)	100+(50)	200	100+(100)	440	389+(270)	965+(25)
카 나 다	200	290	130	170	100	300	430	760
남아프리카	205	—(15)	—(65)	—(35)	—(55)	—(70)	205+(120)	—(120)
France	45	20	5	10	—	—	50	30
호 주	11	3	3	1	1	—	15	4
Niger	12	13	13	—	—	—	25	13
Spain	11	—	4	30	15	250	30	280
기 타	36(6)	51	389+(21)	110	265(28)	344	680+(55)	505
計	700+(126)	702+(40)	644+(136)	520+(35)	481+(183)	1,334+(70)	1,824+(445)	2,557+(145)

- 註 1. 1967 10月 ENEA資料임.
- 2. A는 既知鑛床으로부터 產出되는 것.
B는 推定鑛量
- 3. ()內는 副産物로 產出되는 것.

I-2. 우라늄 埋藏量의 地理的 分布

地球上的의 우라늄 鑛은 廣範하게 分布되어 있다고 하나 現在까지 確認된 可採埋藏量을 主要産地別로 보면 미국(30%), 캐나다(20%), 남아프리카(15%), 유유럽(25%) 및 기타(10%)의 比率로 알려지고 있다.

(USAEC 발표 資料에 의함).

I-3. 鑛床의 地質的인 形態 및 埋藏鑛量

캐나다는 全 埋藏量의 94%가 Elliot Lake 地區에 分布하는 礫岩中の 「堆積型」鑛床에 있고, 美國은 90%가 Colorado Plateau 및 Wyoming Basin 에 있는 砂

岩中の「堆積型」鑛床에 있고 남아프리카도 캐나다와 같이 礫岩中の「堆積型」이어서, 自由世界の 우라늄 埋藏量의 90%가 「堆積型」이고 나머지 10%가 「鑛脈型」인 實情이다. 一般적으로 봐서 堆積型 鑛床은 規模가 크고 연속성이 있다. 例를 들어 캐나다의 Elliot Lake 地區의 Denison 鑛山은 平均層두께 14 ft, 鑛床의 幅 7,000 ft, 鑛體의 길이 15,500 ft의 크기로서 回收可能한 우라늄 埋藏量은 U_3O_8 로서 150,000噸에 達하는데 反하여, 鑛脈型 鑛床은 最大級이라야 지금까지 確認된 埋藏量이 2,000~3,000噸에 達할 뿐이다.

I-4. 우라늄 資源의 將來 및 展望

低 cost 우라늄 鑛床 發見 및 可能性 :

10弗以下の cost로 確認된 可採埋藏量 835,000噸 外에 推定量 740,000噸이 있으며 現在 大鑛床의 分布를 보면 캐나다 남아프리카의 楕狀地, 南美的 Cordillera 地域, 아프리카의 北 로오멘아 부터 Congo까지, 印度의 Singhbhum 銅鑛床 地帶 等이며 今後 探鑛活動에 따라 低 cost 新規鑛床이 發見될 可能性이 많다.

低品位 潛在資源 :

장차 10弗以下の 우라늄은 既存 鑛床의 周邊部 低品位 外에 미국, 폴투갈, 모로코 等地의 磷酸鹽에 包含된 우라늄과 스웨덴의 明礬頁岩 等の 低品位 資源도 經濟的인 價値가 있다고 알려져 있다.

海水中の 우라늄 :

海水中の 우라늄 含有量은 平均 3 ppb로 全體 우라늄量은 約 40億噸으로 推定된다. 海水中の 우라늄은 適當한 吸着劑에 의한 回收方法이 있는데 英國의 Harwell 原子力研究所의 研究結果에 의하면 U_3O_8 lb 당 11~22弗로 抽出이 可能하다고 發表되었으나 他 研究結果의 解析에 의하면 抽出費는 lb當 100弗以上이 될 것이라는 報告가 있으므로, 장차 이 分野에 대한 많은 工學的 問題點을 解決할 必要가 있다는 것을 고려하면 이것이 實用化되기엔 아직도 머나먼 將來의 얘기일 것 같다. U_3O_8 lb 당 30弗 이하로 抽出해 내기는 극히 힘들 것이라는 것이 支配的인 意見인 것 같다.

I-5. 우라늄 資源開發의 技術 및 經濟性

가. 探鑛

探鑛方法 :

概查 ; 地質學的 知識을 基礎로 하여 有望地域을 選定.

放射能 調査(비행기, 자동차, 도보 등), 地球化學探鑛(水, 土壤 等), 放射能에 의한 우라늄 分布 調査로 異常地點發見

精查 ; 簡易試錐 等を 包含하는 地質調査, 異常地點, 鑛床의 延長 追跡.

探鑛 cost :

地域, 鑛床의 形態, 鑛量算定의 確定度에 따라 다르므로 外國의 例를 參考로 하면,

캐나다

과거실적치 0.50~1.00弗/lb U_3O_8

Elliot 地區에 의한 將來豫想值

0.10~0.15弗/lb. U_3O_8

미국

露天掘 鑛床 0.25~0.50弗/lb U_3O_8

坑道掘 鑛床 0.60~1.00弗/lb U_3O_8

프랑스

全 鑛量 1.20弗~/lb U_3O_8

確定鑛量 2.0弗~/lb U_3O_8

스페인

0.45弗/lb U_3O_8

(註. Elliot Lake 地區에 있어서 既知鑛床의 延長部는 새로운 鑛床의 存在可能性이 커서 探鑛 cost가 低下될 것으로 보이며 新規開發 探鑛 cost는 0.5~1.0弗로 보는 것이 타당함).

探鑛期間

第2次 世界大戰後 探鑛이 大規模로 開始되어 1948年 부터 활발히 움직여 1952~53年을 전후로 해서 鑛床이 속속 發見되었다. 과거의 經驗에 의하면 概查부터 鑛量確認 까지 는 수년의 期間이 所要 된다는 것을 알 수 있다.

나. 採鑛 cost

캐나다

露天掘 2.50弗/噸 粗鑛

坑道掘 4.0~6.0 " " "

高品位 좁은鑛脈 等の 小規模生産일 경우

10.0~1.50 " " "

註. 露天掘의 경우 Beaverlodge 地區의 Gunnar 鑛山은 鑛脈型 鑛床으로서 採掘 規模는 粗鑛으로 1,700噸/日, 採掘場의 크기는 地表로 부터 1,000ft×800ft 이고, 坑道掘의 경우 Elliot Lake 地區의 堆積型 鑛床의 大部分은 深度가 地下 2,000ft~3,000ft, 採掘規模는 粗鑛 3,000~6,000噸/日 程度임.

표 2. 美國에서의 우라늄 採鑛費

	200噸/日	400噸/日	1,000噸/日
露 天 掘	12.0	11.7	11.50
坑 道 掘	14.45	13.65	13.10

- 註. 1) 單位는 粗鑛 噸當 弗
 2) 開坑費 포함
 3) 深道는 露天掘의 경우 250 ft
 坑道掘의 경우 600 ft

다. 製鍊

우라늄 原鑛石부터 우라늄 金屬까지의 主要處理工程을 보면,

原鑛石의 粉碎

選鑛까지의 機械的 處理

硫酸 혹은 炭酸鹽에 의한 浸出.

이온交換, 溶媒抽出, 沈澱에 의한 分離 및 濃集
 Yellowcake 를 만드는 粗製鍊工程

등의 5가지 過程을 踏아 Yellowcake라는 우라늄原料 商品을 製造하게 된다.

製鍊 cost

표 3. 캐나다에서의 鑛石 噸當 製鍊 cost(年度別)

	粉碎, 摩耗	製鍊	搬出	計
1958	0.823	4.487	0.005	5.315
1959	0.830	3.313	0.011	4.154
1960	0.682	3.645	0.011	3.538
1961	0.662	2.601	0.010	3.276

註: 1) 單位는 鑛石 噸當弗

2) Elliot Lake 地區의 堆積型

鑛床의 하나인 Stenrock 鑛山의 例임.

表 3에 提示된 바와 같이 製鍊技術 改良으로 점차 製鍊 cost는 減少되고 있으므로 점차 더 減少될 可能性이 있을 것으로 豫測된다. 當時의 同 鑛山의 作業규모는 日當 3,000噸이고 粗製鍊所建設 등의 起業費는 Elliot Lake 地區에서 8,000~10,000弗/噸 정도임.

미국

미국 원자력위원회 발표에 의하면 우라늄 製鍊을 위한 鑛石 噸當 操業費는 다음과 같다.

표 4. 우라늄 鑛石 噸當 製鍊操業費

	200噸/日	400噸/日	1,000噸/日
勞務費	4.18	2.34	1.73
資材費	4.14	4.02	3.39
電力費	0.38	0.22	0.27
税金	0.65	0.18	0.11
其他	0.45	0.18	0.22
計	9.75	6.94	5.72

計: 1) 單位는 弗/ton treatment

2) 粗製鍊所 建設費

200噸/日 - 2,000,000弗

400噸/日 - 3,100,000弗

1,000噸/日 - 5,900,000弗

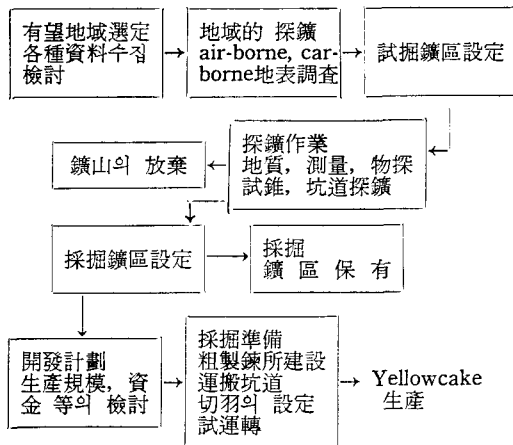
남아프리카

金의 副産物로 生産되며 Vaal Exploration & Min. Co 資料에 의하면 同鑛山의 粗鑛 噸當 製鍊費는 1.89 弗임.

라. 建設期間

探鑛의 第1段階부터 生産에 이르기까지의 過程을 보면 그림 1과 같다.

그림 1. 探鑛에서 Yellowcake 까지의 諸段階



實際의 경우에 있어서 處女地帶에서 始初부터 探鑛을 行하는 경우, 그 權利를 얻어서 既存試掘鑛區의 探鑛부터 始作하는 경우, 鑛量 確認을 위한 採掘鑛區 開發에 直接 加担하는 경우, 單獨推進이나 合同事業으로 行하는 경우 등을 볼 수 있다. Yellowcake 生産 所要 時間은 鑛量確認 까지 數年, 그 다음 生産 開始까지(探鑛) 2~3年이 所要되며 이어 經濟性이 立證된다면 鑛産開發이 着手될 것이다.

다. Yellowcake 生産 cost

坑道掘의 경우 平均生産 cost는 1b U₃O₈當 7弗 전 후로 알려졌다. 미국, 캐나다 및 아프리카의 例를 참작하면 Yellowcake 生産 Cost에 크게 影響을 주는 主要因子는 鑛石의 品位, 鑛床의 規模, 有用共生 鑛物의 有無 等이고 固定費에 대한 償却費도 큰 portion을 차지 한다고 볼 수 있다.

I-6. 우라늄 資源 確保

原子力發電이 急速히 增加되고 있는 世界的인 추세에 따라 그 所要量 充足을 위한 適期 우라늄資源 確保 供給은 原子力事業의 重要한 問題中의 하나라고 할 수 있다. 大體的으로 우라늄資源 確保 方法엔 다음과 같은 4가지를 들 수 있다.

가. 國內 核資源 開發

나. 長期 購入 契約

표 5. 世界主要 우라늄 生産國에 있어서 Yellowcake 生産 cost

單位 : lb. U₃O₈당 弗

生産國	種別	副生産	露天掘	坑道掘	備考
카나나	探鑛費 操業費 償却費 計			0.50~1.00 3.20~6.10 1.50~2.80 5.20~9.90	1,000~4,000噸/日 品位 0.1% U ₃ O ₈
미국	探鑛費 操業費 償却費 計		0.25~0.50 3.40~5.30 0.75~1.25 4.40~7.05	0.60~1.00 3.90~5.80 0.75~1.50 5.25~8.30	<1,000噸/日 品位 0.2% U ₃ O ₈
남아프리카	探鑛費 操業費 償却費 計	— 1.50~3.50 2.50~4.00 4.00~7.50		— 4.00~6.00 1.50~2.50 5.50~8.50	金과 共生 品位 0.02~0.03% U ₃ O ₈

다. 海外資源 共同 開發輸入

라. Spot 購入

(1) 國內 核資源 開發

우리나라의 原子力發電 規模 增加에 對備하여 우라늄 資源 開發을 爲해 遠視眼의 國家의 基本對策이 樹立되고 將次 安定하고 低廉한 核資源 確保를 爲해 先分한 時間餘裕를 두고 國內 資源開發의 作業이 着手되지 않으면 안된다.

本欄에서는 國內 資源 開發의 靑寫眞을 簡略하게 記述 하고자 한다.

數年前 부터 地質調査所에 의해 豫備的 우라늄 探鑛이 局部的으로 實施된 것으로 보고 또 嶺南 및 忠淸地方에서 低品位 우라늄 資源이 發見되었다는 非公式 報告도 있었으므로 지금부터 全國적으로 有望地域을 對象으로 5개년 計劃으로 組織的인 調査 研究에 着手한다면 1975年 경에 Carbone 概査가 完了 될 것이다. 1969年 8月부터 3個月間 日本 PNC와 韓國地質調査所 共同으로 大田근방에서 探鑛作業을 實施하여 品位 0.1% 정도의 鑛脈을 確認하였는데 그 정도면 經濟性이 있는 것 이라고 報道(日本 原子力新聞)된 일이 있으나 鑛區登錄과 鑛權問題 때문인지 아직은 兩側 모두 그 이상의 발표를 안하고 있는 實情이다.

이와 並行해서 「核原料 物質 開發促進 臨時措置法」을 10年 時限法으로 制定하고, 財團法人으로 核燃料 公社를 設置하는 것이 바람직한 일이며, 萬一 同 公社를 設立하는 경우 다음과 같은 세가지 課業을 遂行케 하는 것이 좋을 것이다.

1) 새로운 動力源으로서의 原子力發電用 核燃料

確保를 爲한 核資源開發.

2) 發電費 節減을 爲한 核燃料週期的 獨自的인 諸般技術 研究開發

3) 우리나라의 自體防衛態勢에 立脚한 核武器 研究開發

同 公社가 設立되면 우선적으로 有望地域을 對象으로 하여 약 100個處의 地點에 대한 우라늄 鑛床의 地質學的, 鑛床學的 調査를 實施해야 할 것이다. 同時에 試鑛調査에 의해 有望地點에서의 鑛量, 鑛脈等의 確認을 爲한 精密탐사도 해야 한다. 1973년 부터는 指定된 鑛山에서 採鑛試驗을 하면서 選鑛法의 開發을 試圖하고 우라늄 鑛石의 製鍊技術의 研究에 着手하며 1975년 경에는 水力採鑛法을 開發하여 各段階別 實驗을 거치는 것이 要請된다.

이렇게 되면 표 6에 提示된 主要準備作業이 順調롭게 進行될 것이며 國內 核資源이 確認된다면 概査 開始로 부터 10年後에는 Yellowcake 生産이 可能하여 우리나라 原子力事業中 큰 Portion을 차지하는 核燃料物資確保에 있어서 外國의 政治的 및 經濟的 干섭과 核資源 獨占家들로부터 完全히 自主性을 얻게 될 것이다.

(2) 海外資源 確保

海外資源 入手方法 : 國內 核資源 開發이 經濟的으로 妥當性이 없거나 發見되더라도 增加하는 原子力發電 需要를 充足시키지 못하는 경우 海外資源에 依存치 않을 수 없게 된다.

前述한 바와 같이 海外로 부터 우라늄資源을 確保하는 方法에는 長期 購入契約, 共同投資 開發 및 Spot 購入 등이 있다. 이하 이 3가지 方法을 검토

표 6. 國內 核資源開發 計劃(案)

項 目	年 度										
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
① Car-borne 概査											
② 核資源開發促進臨時措置法制定		→									
③ 核燃料公社創設 및 研究 및 調查活動			→								→
④ 製鍊技術研究								→			
⑤ 採鑛試驗 및 選鑛法開發								→			
⑥ 水力採鑛法開發							→				
⑦ 精査活動									→		
⑧ 採鑛開始 Yellowcake 生産										→	

하기로 한다.

開發輸入

20年 或은 30年間의 長期的인 展望에 立脚한 安定 供給 確保를 위해서는 우리나라가 海外에서 開發하는 우라늄鑛을 自主的으로 保有하는 方法이 가장 有效하고 價格의 急激한 變動 및 國際的 우라늄資源의 獨占에 對備하는 하나의 方法이 된다고 본다.

對象地域으로는 地質的으로 有望하고 政治, 經濟, 社會的으로 安定을 이룬 나라로서 友好關係에 있고 우라늄輸出을 認可하고 鑛業活動을 認定하는 地域을 選定하는 것이 必須條件이다. 즉 이런 나라로서는 캐나다, 南亞, 호주 등을 들 수 있다.

參考로 몇몇 外國의 우라늄 確保策을 검토해 보기로 한다.

西獨

西獨도 國內 우라늄 資源은 5,000屯 정도이고 그 外 所要量은 全的으로 海外에 依存하고 있다. 海外 우라늄業者와 自然우라늄의 長期購入契約을 締結하여 40%를, 開發輸入 方式에 의해 40%, 나머지 20%는 Spot 購入 方策을 樹立하였다. 그러나 長期 契約 方式은 契約 初頭 부터 資金利子, 勞賃, 物價 等の Escalation 으로 만드서 有利하지는 않다.

1969년부터 中래 目標였던 開發輸入 40%를 大幅 修正하여 開發輸入을 50~80%로 높여서 長期契約 依存方針을 지양 하였다. 그 具體策으로서 政府勸獎에 의해 海外探鑛開發을 위한 民間 Consortium 가 2 個社 設立되고 이에 대해 정부는 75% 補助, 成功拂의 探鑛補助金을 交付하여 助成하고 있다. 1967년부터 1969년까지의 期間에 걸쳐 支給된 補助額은 500 萬弗에 達하고 이 Consortium 에 의해 現在 캐나다, 아프리카에서 積極的인 探鑛開發이 實施되고 있다.

프랑스

國內에 8弗 以下の 우라늄 45,000屯의 매장량을 把握하고 있으나 海外 探鑛 開發이 活潑하게 움직이고 아프리카의 Niger, Gabon, 中央아프리카 등의 舊植 民地領에서 大規模探鑛活動이 實施中에 있다.

現在의 生産量은 本國, 海外을 合해서 年 2,000屯 이나 1974년에는 6,000屯으로 擴大하여 2,000~3,000 屯을 輸出할 計劃을 樹立하고 있다. 그외에 캐나다, 이란, 인도네시아 등지에서 探鑛을 開始하고 있다.

프랑스는 우라늄 開發에 있어서 그 產物의 輸出先을 確保하는 同時에 risk의 分散意圖로 外國과의 共同開發을 考慮中이고 이에 의해 世界 우라늄 資源의 約 10%를 支配하고 世界의 原子力發電所에 低廉의 核燃料을 供給할 수 있는 國가가 되기를 希望하고 있는 것으로 알려지고 있다.

伊太利

伊太利는 國營會社 ENI 및 海外傍系會社가 아프리카의 케냐, 소말리아에서 探鑛中에 있고 캐나다, 미국에서는 共同探鑛을 하고 있다.

日本

日本에서는 1985년에 이르러 原子力發電規模가 40,000 Mwe 가 되어 全發電施設의 25%를 차지하게 되고 이에 대한 우라늄需要는 장차 高速增殖爐가 實用化된 후에도 계속하여 增加할 것이 豫想되므로 低廉하고 安定된 우라늄資源確保는 energy 政策上 重要한 問題로 되어 있다. 우라늄資源의 確保問題에 있어서 原子力委員會 核燃料 간담회 報告 및 總 energy 調査會 報告에 의하면 國家에서의 適切한 施策에 따라 民間企業이 그 主體를 이루는 것이 適當하다고 보아 最終需要者인 電力業界가 中心이 되어 推進하고 있다.

確保方策에 있어서는 短契, 長契 및 探鑛開發의 各方式을 彈力的으로 併用하는 것으로 되어 있다. 現在까지 自然우라늄 確保량은 長·短契 合計 17,000 吨이므로 65年에서 70年까지의 5年間の 需要는 全量 確保된 셈이고 그後 75年까지의 需要量도 지금 형편으로 大략 解決된 것으로 보인다.

日本에서는 1974年 以後의 所要우라늄의 1/2을 開發輸入에 따라 供給하게 되며 各年度에 保有해야 할 可採埋藏量은 무게로 따지면 다음과 같다.

1970年	1975年	1980年
1,000 ton	37,000 ton	50,000 ton

上記 必要埋藏鑛量을 維持하기 위하여 探鑛에 의하여 1980年 까지 確保해야 할 累計量 약 66,000吨으로 보고 있으며, 이를 위한 探鑛所要資金은 探鑛 cost U_3O_8 lb 당 0.5弗에 대하여 약 7,000萬弗이 所要된다. 生産施設에 있어서는 1980~1985年間に U_3O_8 의 年間 5,000吨의 生産能力을 保有하고 (鑛石處理能力 3,000 ton/day의 粗製鍊所 5個處分에 該當, 鑛石品位 U_3O_8 0.1%), 開發起業費로서 캐나다의 實績을 適用하면 약 1억4,000만弗의 資金이 所要된다.

前述한 바와 같이 日本은 우라늄 總需要량의 1/2 혹은 적어도 1/3은 海外에서 開發하는 우라늄鑛을 自主적으로 保有할 計劃으로 되어 있다.

우라늄鑛의 特殊性에 비추어 大規模 探鑛의 risk, 巨額의 先投資 등을 勘案하면 民間鑛業各社의 參與問題는 限度가 있을 것으로 보인다. 이런 問題를 解決하는 方途로서 우라늄燃料을 결실히 必要로 하는 電力業界, 造船, 原子爐 및 核燃料 Maker가 중견이 되어 鑛業會社를 포함해서 政府 및 公企業의 協助下에 強力히 推進해야 할 것으로 본다.

II. 變換加工編

우라늄을 濃縮하기 위해서는 우선 Yellowcake(U_3O_8)를 氣體狀態로 變換하여야 하며, 氣體形態인 이 UF_6 (6불화우라늄)는 濃縮工程을 거친 다음 濃縮우라늄(UF_6 狀態)이 된다. 이 濃縮 UF_6 를 核燃料集合體로 製作하자면 2酸化우라늄에로의 變換過程이 先行되어야 하므로 本欄에서는 이 두가지 工程을 별도로 고찰하기로 한다.

II-1. UF_6 變換

Yellowcake 를 UF_6 로 變換하는 過程은 Yellowcake 에 包含되어 있는 不純物을 除去하고 U_3O_8 分子

에 結合되어 있는 酸素原子를 불소원자로 代치하는 化學的인 工程이라 할 수 있다. 現在 이 目的을 위해 두가지 工程이 商業化 되어 있다. 즉 Yellowcake 에 包含된 不純物을 除去하고 난 후에 UF_6 로 變換하는 工程과 U_3O_8 을 UF_6 로 變換한 다음 不純物을 除去하는 工程이라 할 수 있는데 前者는 溶媒抽法, 後者는 이온 交換法으로 불리어 진다. 上述한 두가지 工程中 어느 것이 더 經濟的이나 하는 問題는 原鑛의 純度라든가 化學處理費 등을 包含하는 여러가지 要素에 따라 決定될 性質이다.

變換工場에 引渡되는 Yellowcake 의 品位는 적어도 65% 以上の U_3O_8 를 含有하여야 하고 同 工程自體의 우라늄 유실을 約 0.5% 考慮하여야 한다. 이 工程의 最終製品인 UF_6 도 역시 不純物 含有量을 嚴格히 檢査(sampling and analysis)하여 濃縮工場에서 要求하는 品質規格에 一致하도록 하여야 한다. 그리고 濃縮工場까지의 輸送費, Container 임대료 및 保險料 등도 同 工程 契約金額에 包含시키는 것이 一般的인 傾向이다.

現在 稼動中인 變換工場으로서의 美國의 Allied Chemical Corp.(10,000吨/年)과 Kerr-McGee Corp.(5,000吨/年, 10,000吨 擴張 豫定), 캐나다의 Eldorado Nuclear(2,500吨/年, 5,000吨 확장 豫정), 프랑스의 CEA 및 英國의 AEA 를 들 수 있으며 稼動中인 工場의 總 施設規模만 갖고도 1970年 中期까지 自由世界의 需要量에 대해 充分하다고 알려 졌다.

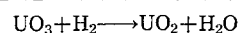
한편 Eldorado, Kerr-McGee 및 CEA 工場에서는 原鑛과 變換 서비스를 一括 취급하는 方式도 採擇하고 있으므로 電力會社는 分割取扱과 一括取扱方式에 대한 諸般條件을 면밀히 檢討하고 有利한 方式을 擇해야 할 것이다.

II-1-1 變換工程($U_3O_8 \rightarrow UF_6$)

Yellowcake 를 UF_6 로 變換하는 Block Diagram 을 보면 다음과 같다.

그림 2에 提示된 同 工程을 簡略하게 檢討하기로 한다.

固體狀態의 U_3O_8 에 包含된 不純物을 坪量한 다음 이 U_3O_8 을 溶媒抽過程을 통해 초산우라늄[Uranyl Nitrate, $U(NO_3)_6$]으로 만든다. 이 Uranyl Nitrate 는 焙燒工程에서 UO_3 가 되면서 不純物이 除去되고 이것을 還元시키면 2酸化우라늄이 된다. 즉



2酸化우라늄은 다시 無水弗酸過程(Anhydrous Hydrofluoric Process)을 거쳐 "Green Salt"라고 불리우

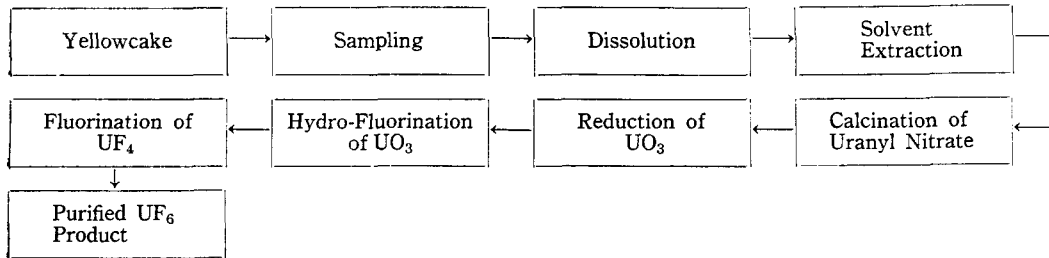
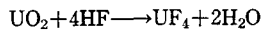


그림 2 Conversion to Uranium Hexafluoride

는 UF₄가 된다.



이렇게 만들어진 UF₄는 最終的으로 弗化(Fluorination)過程을 거쳐 精製된 UF₆가 製造 貯藏된다. 以上 記述한 工程은 溶媒抽方式에 의한 것이고 또 하나의 다른 工程은 Yellowcake를 Series of Fluid Beds에서 UO₂로 直接 變換한 다음 無水弗酸過程과 弗化過程을 利用하여 UF₆로 變換하고 蒸溜工程을 거쳐 精製된 UF₆를 얻는 方式이다.

II-2. UO₂ 變換

核燃料을 製作하기 위해서는 氣體形態인 UF₆를 出發物質로 하여 加水分解를 위시한 여러가지 化學工程을 거쳐 나중엔 UO₂(二酸化우라늄)粉末로 만든다. 加工法의 特徵으로는 製品 UO₂ 粉末에 要求되는 仕様, 取扱物質이 濃縮 우라늄이라는 것과 原料가 弗化物이라는 데서 起因되는 몇가지 點에 留意해야 한다는 일이다.

核燃料集合體가 爐內에서 裝填・燃焼中에는 中性子吸收物質(즉 σ_a가 큰것)이 加급적이던 적어야 하는 것이 바람직한 일인데, 그렇게 되려면 化學的 純도가 높은 UO₂ 粉末이 要求된다. UF₆는 실린더에 充填할 때의 純도가 높드라도 UO₂로 變換할 때까지

의 濕式, 乾式工程을 거치는 사이에 純도가 低下될 것이므로 處理過程에서 弗素를 充分히 除去할 必要가 있다. 다음에 粉末의 物性으로는 燃料製造業者가 高密度의 燒結 Pellet를 만들 때 一般粉末冶金에서 要求하는 粉末特性을 具備할 必要가 있다.

게다가 濃縮우라늄은 高價이므로, 實收率 및 加工期間이 經濟性에 크게 影響을 준다. 例를 들면 3% 濃縮우라늄 1kg의 價格은 약 250弗이므로 이것은 銀價格의 4배에 該當한다. 實收率을 높이기 위해서는 變換加工中의 損失 및 Scrap發生을 적게 해야 하고 加工期間中의 金利를 考慮하여 加工期日를 될 수록 短縮시켜야 한다. 한편 施設을 너무 크게 하면 稼動率이 낮아 질 우려가 있고 또 臨界管理面에서는 다음과 같은 制約을 받는다.

變換 Process는 濕式工程을 包含하고 濃縮우라늄을 取扱하는 경우 臨界管理를 엄격히 해야 한다. 原料로서의 UF₆는 表 7에 表示된 US AEC 規格의 圓筒型容器에 充填하게 되는데 臨界安全을 위해 boron을 耐火性 保護容器에 裝着하여 輸送하는 것을 原則으로 하고 있다.

大量의 低濃縮우라늄은 水素와 우라늄의 原子比를 制限하여 大型 cylinder(30A 정도)에다 取扱하는 수가 많고 그 臨界管理에는 특별한 配慮를 要한다.

표 7. US AEC 規定의 UF₆ Cylinder

名 稱	치 수 (inch)	林 質	Cylinder重量 (lb)	UF ₆ 充填重量 (lb)	最高濃縮度 w/o U-235
5A (5 inch)	5φ×30L	Ni	55	55	無制限
5A (8 inch)	8×51	Ni	120	250	12.5
12A (12 inch MD)	12×40	Ni	185	450	5.0
30A (2.5T)	30×81	炭 素 綱	1,600	4,800	1.5*
48A (10T)	48×120	Ni	4,500	21,000	1.5**
48F (14T)	48×150	Ni	5,200	28,000	1.0**

* : H/U 原子比 < 0.088의 경우임.

** : AEC 및 DOT의 承認이 있는 경우에만 이보다 높은 濃縮우라늄을 充填할 수 있음.

Gas화된 UF₆를 UO₂로 變換하기 까지는 基本的으로 表 8에 提示된 最大 許容值에 準하여 管理하게

된다. 臨界管理를 大別하면 濃縮우라늄의 重量制限과 裝置의 形狀인데, 前者는 batch 操業에 後者는 連

續操業에 適用된다.

표 8. U-235 水溶液系에 의한 最大 許容值
(反射體: 물, (H/U-235 減速度: 最適)

濃縮度 U-235%	重 量		容 積 (l)	無限圓筒 徑(cm)	無限平 板厚(μ)
	U-235	U			
100	0.350	0.350	4.8	12.7	3.8
20	0.480	2.40	9.5	17.5	6.9
10	0.600	6.00	14.0	20.8	9.1
5.0	0.800	16.00	27.0	26.0	12.7
4.0	0.940	23.5	33.8	28.4	14.0
3.5	1.05	30.0	40.0	30.5	15.2
3.0	1.20	40.0	49.2	32.5	16.5
2.0	2.00	100	95.1	40.6	22.1
1.00	22.7	2,270	1,300	100.6	61.0

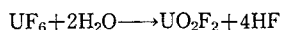
水溶液의 安全濃度: 10.8g U-235/l 以下
水溶液의 安全濃縮液: 0.95% U-235 以下

이밖에 우라늄 放射線 및 重金屬으로서의 毒性, UF₆ 毒性 등을 고려하여 엄중한 防護措置가 必要하므로 設備材質로서는 UO₂, UO₂F₂ 등에 의한 腐蝕에 견디어야 하는 것이 變換 Process 의 必須條件이다. 이 變換 process 는 現在까지 核燃料形態, U₂₃₅ 濃縮度 및 變換量에 따라 開發되었으므로 本欄에서는 A D U 法(ammonium diuranate, 重우라늄酸암모늄)과 溶媒抽出法을 紹介키로 한다.

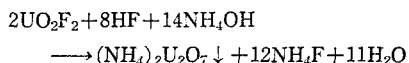
II-3. 變換方法

日本の 三菱金屬鑛業株式會社는 1959年 부터 먼저 一般的인 ADU 研究를 시작하여 高純度, 物性이 安定된 UO₂ 粉末의 獨自의이고 經濟的인 連續 製造法을 確立, UO₂ 粉末仕樣으로서는 상당히 幅넓은 要求에 應할 수 있게 되었다.

Gas 狀態의 UF₆을 高速水流에 吸入시키면 UO₂F₂ 水溶液이 된다.

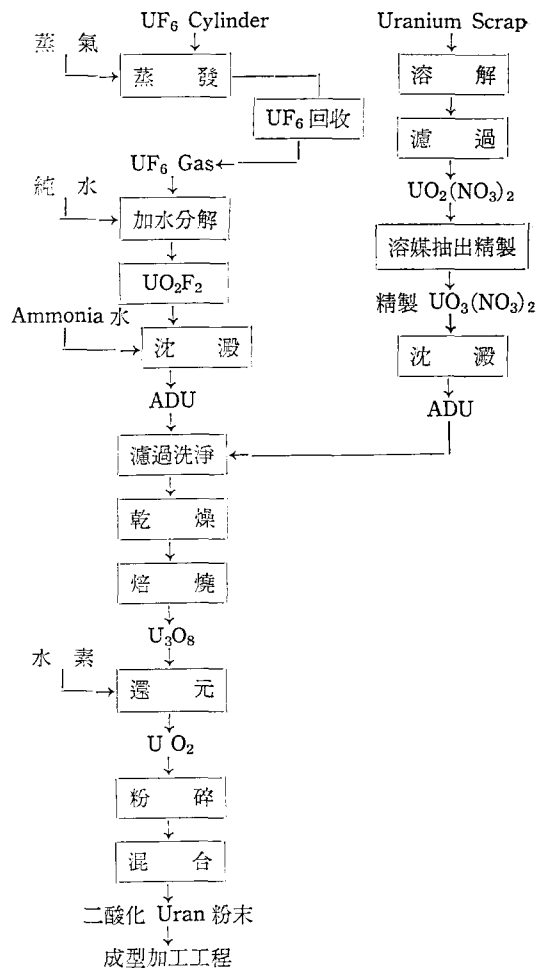


이 UO₂F₂ 水溶液에 Ammonia 水를 加하면 ADU의 黃色沈澱이 된다.



ADU 를 濾過·洗淨後 不純物을 除去키 위하여 같은 過程인 焙燒工程을 거치면 U₃O₈가 되고 이를 다시 還元시켜 UO₂를 얻는다. ADU 의 沈澱中에 殘留하는 弗素는 洗淨, 焙燒 및 還元工程을 거치는 사이에 10 ppm 以下가 된다. 粉末의 物性은 주로 沈澱, 焙燒, 還元의 各 工程操業條件에 따라 管理하고 粉

그림 3. ADU 法의 Flow Sheet



碎·混合에서 調整된다. 同 連續工程에 의해 UF₆로부터 UO₂로 變換하는 동안의 臨界管理는 形狀制限을 받게 된다.

II-4. 溶媒抽出法

그림 4에 提示된 process 는 弗素含有率이 적은 高純度, 高燒結性의 UO₂ 粉末을 高收率, 低廉한 價格로 製作할 目的으로 開發된 工程이며 加工 scrap 에 Cold scrap 의 UO₂ 再生을 同時에 行하므로 經濟的인 利點이 있다.

UF₆ Cylinder 를 水蒸氣로 加熱하여 얻은 Gas 狀 UF₆을 硝酸 alum. [Al (NO₃)₃]의 溶液中에 吸收시키면 다음과 같이 된다.

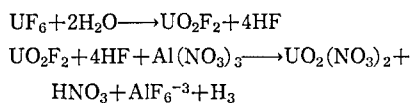
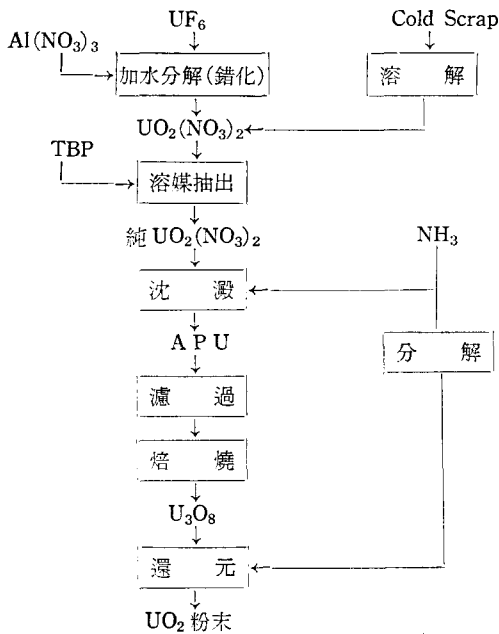


그림 4. 溶媒抽出法 Flow Sheet



위의 두 반응에서 UF_6 은 硝酸 Uranyl [$UO_2(NO_3)_2$]로 變換되고 F와 Al은 Complexion을 生成한다. 게다가 溶媒(TBP)抽出에 의해 AlF_6^{-3} 과 UF_6 에 隨伴되는 不純物은 分離되어 純 $UO_2(NO_3)_2$ 溶液이 된다. 抽出廢液中的 AlF_6^{-3} 과 HNO_3 는 水酸 $Al[Al(OH)_3]$ 으로 처리하여 AlF_6^{-3} 은 AlF_3 , HNO_3 는 $Al(NO_3)_3$ 에 의해 回收되게 된다. 純 $UO_2(NO_3)_2$ 溶液中에 ammonia gas를 吸入시키면 純 $UO_2(NO_3)_2$ 는 沈澱되고 APU [Ammonium Poly Uranate, NH_3OH 의 경우와 달리 $(NH_4)_2O \cdot 6UO_3$ 가 生成되는데 이것을 APU라고 부른다]로 變換된다.

APU는 易濾性 沈澱이므로 遠心分離機로 脫水後 약간 嵩고 還元工程을 거쳐 粉碎하면 高純度, 高燒結性 製品인 UO_2 粉末이 된다. 이 方法에 의한 APU는, 약간 구어서 還元工程을 거쳐도 球形의 形態를 유지하고 있어 粒徑의 偏差가 적은 UO_2 粉末을 容易하게 얻을 수 있다. 이때 UO_2 粉末의 F含有量은 100 ppm以下다. 日本에서도 既使用 核燃料의 再處理에서 回收되는 減損우라늄을 高濃縮우라늄과 混合하여 低濃縮 UO_2 를 再生시키는 경우에 適用되는 技術은 充分히 開發한 것으로 보인다.

II-5. 結 論

過去 十數年間 核武器의 非保有 國家인 歐州諸國과 日本 및 印度에서는 原子力發電用 核燃料인 UO_2 粉末의 研究開發을 위해 多額의 研究費를 投入, 核

燃料 國產化의 하나인 變換加工技術을 確立하였다. 이러한 國際情勢와 國內의 需要趨勢를 勘案하여 우리나라에서도 將次 우라늄原鑛이 採掘되는 경우와 開發輸入에 對備하고 原子力産業의 育成을 위해 核燃料 國產化의 하나인 變換加工技術을 서둘러야 할 것이므로 政府에서 長期的인 眼目으로 基礎作業 및 이 方面의 研究開發振興에 拍車를 加할 것을 促求하는 바이다.

III. 우라늄 濃縮編

原子力發電에 사용되는 核燃料은 爐型에 따라 自然우라늄, 低濃縮우라늄, 高濃縮우라늄을 비롯해서 플루토늄 및 토륨을 들 수 있다. 高速增殖爐가 商業的으로 稼動될 것이 豫期되는 1980年代 以前에는 美國을 中心으로 하는 輕水爐(PWR와 BWR)와 高温黑鉛爐(HTR), 英國과 프랑스의 가스冷却爐(AGR) 및 主로 캐나다에서 開發中인 重水爐(HWR)가 原子力發電의 主軸을 이루게 될 것이다. 그런데 이같은 爐型들은 정도의 差異는 있으나 모두 核燃料의 燃燒爲主로 運轉되기 때문에 本欄에서는 우라늄濃縮, 需給狀態 및 그 展望에 關하여 記述키로 한다.

自然우라늄에 含有되어 있는 U-235 同位元素의 含量은 불과 0.712%이어서 熱中性子에 의한 核分裂을 試圖하는 熱中性子 原子爐는 그 冷却體 및 構造物質의 材質에 따라 濃縮우라늄을 燃料로 써야 하므로 이를 위한 縮濃手段이 要請된다.

現在까지 紹介된 우라늄 濃縮方法은 氣體擴散法, 遠心分離法, Nozzle法, 電磁氣法 및 最近 日本에서 開發했다고 發表된 이온交換法이 있으나 商業的 規模로 稼動되고 있는 方法은 氣體擴散法 뿐이고 其他는 아직도 開發段階에 있다.

III-1. 氣體擴散法

氣體擴散法은 同一壓力·溫度 狀態下에 있는 粒子나 分子가 각각의 質量差로 인하여 運動에너지 差異에 의해서 分離되는 效果를利用한 것으로서 1846年 Graham이 實驗的으로 發見한 후 Maxwell이 氣體運動論으로 解析한 同位元素分離方法이다.

第二次 世界大戰中, 즉 1939年頃 Hahn이 규명한 核分裂의 可能性은 1942年 12月 Fermi教授가 美國 Chicago大學 측구장에 容量 200 watt의 CP-i을 最初로 設立하므로써 實證하기에 이르렀다. 이어 著名한 美國에의 亡命科學者 Einstein 등이 Manhattan計劃에 參加하여 政府의 研究補助金を 얻어 原爆開發

에着手하였고 原爆에 必要한 核燃料物質 生産을 위해 政府는 原子力委員會 傘下에 濃縮工場을 設置하였다. 그 當時 武器用 高濃縮 우라늄生産을 위해 建設된 US AEC 傘下의 3 個 濃縮工場은 그 동안 高濃縮 우라늄을 充分히 確保하여 지금은 低濃縮 우라늄만을 生産하고 있는 實情이다. 1985年度의 需要를 充足시키기 위해서는 年間 6,400 ton Sw(分離作業量)을 마련해야 하는데 이것은 現存 US AEC 傘下施設의 最高濃縮供給能力의 약 1/3에 該當하는 量이다.

理論的인 最大分離係數는 UF_6 를 使用하는 濃縮工程의 한 Stage에 있어서 1.00429이며 이것은 1에 대단히 가깝기 때문에 U-235 同位元素의 濃縮을 위해서는 많은 Stage를 直列로 連結해야 한다. 例컨데 0.712%의 自然우라늄을 90%까지 농축하는 데는 약 3,000 Stage가 直列로 連結되어야 한다.

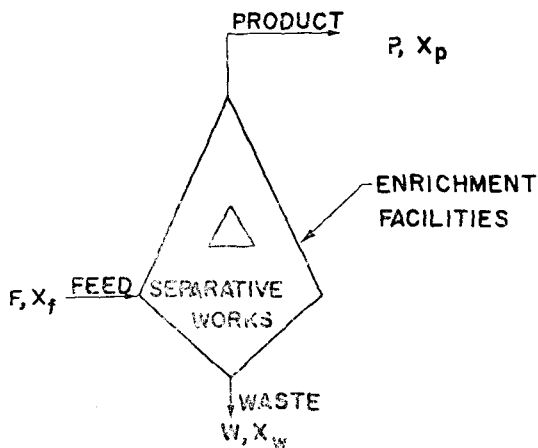
한편 1969년 부터 民間人도 核燃料를 所有케 됨에 따라 US AEC는 實需要者의 自然우라늄을 濃縮 Service 만 해주는 “委託濃縮”(Toll Enrichment)을 施行하게 되었고 우라늄同位元素를 分離하는데 要하는 作業量의 尺度로서 分離作業量 單位를 導入하고, 遂行해야 할 作業量은 工場의 施設規模, 人力 및 需要家側의 需要에 직접적으로 關聯된다. 自由世界의 原子力事業者들이 必要로 하는 우라늄濃縮에 관한 料金は 委託濃縮 施行以來 單位 分離作業量 당 \$26(71년 7월 부터 \$32)로 通用돼 오고 있다.

分離作業量 單位(SWU, Separation Work Unit; 즉 KgU. SW)

分離作業量은 主로 製品의 濃縮度 및 tails 中の U-235 含量 및 Cascade 의 分離效率 등에 關제되며 이것은 아래와 같은 數式으로 表現된다.

$$F = P + W \dots \text{Uranium balance} \dots (1)$$

그림 5. 氣體擴散法의 Cascade



$$F \cdot X_f = P \cdot X_p + W \cdot X_w \dots \text{U-235 balance} \dots (2)$$

$$F \cdot V_f + \Delta = P \cdot V_p + W \cdot V_w \dots \text{Separative work balance} \dots (3)$$

여기서 F.P.W: feed, product 및 tail
 X_f, X_p, X_w : 前者의 各 濃縮度
 Δ : 分離作業量
 V_f, V_p, V_w : 各端의 Separative Potential

上記 (3)式에서 F.W 및 Δ/P 를 變數로 놓고 Δ/P 에 대한 解를 求하면 (3)으로 부터

$$\Delta/P = V_p + \frac{W}{P} V_w - \frac{F}{P} V_f \dots (4)$$

(1), (2)로 부터 P.F 및 W의 濃縮度로 表現된

$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{P} &= \frac{X_p - X_f}{X_f - X_w} \\ \frac{F}{P} &= \frac{X_p - X_w}{X_f - X_w} \end{aligned} \right\} \text{를}$$

(4)에 代入하여 整理하면

$$\Delta/P = V_p + \frac{V_p - X_f}{X_f - X_w} \cdot V_w - \frac{X_p - X_w}{X_f - X_w} \cdot V_f \dots (5)$$

이 된다.

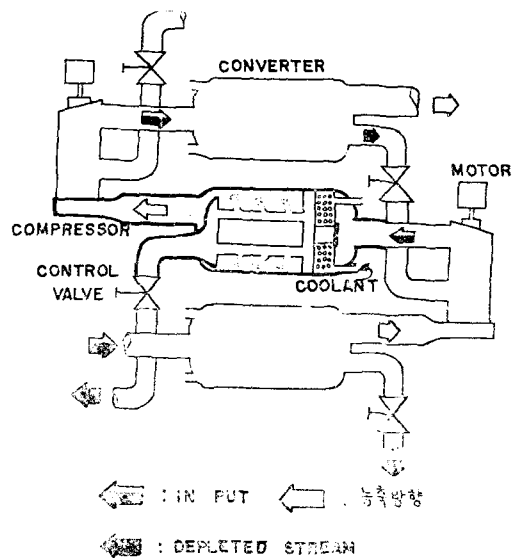
上記 右邊의 Separative Potential은

$$V_{(x)} = (2X_{(x)} - 1) L_n \frac{X_{(x)}}{1 - X_{(x)}}$$

但 (x)는 F.P 혹은 W이다.

(5)式은 單位 重量의 濃縮 우라늄을 生産키 위해 濃縮工場에서 所要되는 分離作業量이다. 分離作業量 單位는 separative work balance 式에서 明示한 바와 같이 KgU SW이고, Separation potential은 dimensionless다.

그림 6. 單位 Cascade.



III-2. 技術的 問題

하나의 分離段階는 탱크모양으로 생긴 converter (separation barrier 및 gas cooler), gas compressor (혹은 pump), control valve 및 計測裝置로 構成되어 있다.

III-2-1. UF₆:

氣體擴散方法에 의한 우라늄濃縮을 위해 U₃O₈形態(固體)로 되어 있는 原鑛을 濃縮工場에서 使用하기 適合한 六弗化우라늄(UF₆氣體)으로 變換하게 되는데 이中 弗素는 大氣壓에선 56.3°C에서 active gas state로 되나 運轉壓力에서는 40~50°C 以上이면 氣體狀態를 維持한다. 따라서 UF₆를 氣體狀態로 維持키 위해서는 全體의 pipe line을 保溫해야 하며, isolated cold spot는 避해야 한다. UF₆이 水蒸氣 같은 水素化合物과 結合하면 hydrofluoric acid를 生成하여 腐蝕성이 강한 流體가 되므로 UF₆와 接觸하는 aluminum이나 stainless steel表面은 철저한 cleaning과 表面處理를 要한다. 그리고 모든 gas circuit는 眞空으로 維持해야 하며 oil을 lubricant로 使用할 경우에는 oil과 UF₆의 接觸을 避해야 한다. 특히 UF₆는 대단히 有毒하기 때문에 工場外部로 새어 나가지 않도록 各별히 주의해야 한다.

III-2-2. Barrier:

Diffusion Barrier 製作은 精密한 技術的인 問題를 內包하고 있으며 그 加工技術은 各國마다 極秘로 하고 있다. Barrier에는 Pore size가 있는데 구멍의 直徑은 1 micron의 數百分之一 정도로 적어야 한다. 이런 구멍을 통한 大量의 gas擴散을 위해 넓은 表面과 稠密한 구멍을 要하며 약 1氣壓差에 견딜 수 있는 充分한 機械的인 強度를 가져야 한다. 代表的인 pore density는 10⁹ pores/cm² 정도다. Barrier 製作에 쓰이는 物質은 대체로 Ag-Pt, Silver-Zinc, Ni-Zinc 및 Aluminum 合金이고 이 材質은 UF₆ 蝕투를 막아야 하고 金屬支持板과의 結合(bonding)을 防止해야 한다.

III-2-3. Dynamic behaviour

Stage가 하나만일 경우의 濃縮 및 depleted gas stream은 compressor speed 및 flow control valve로 操縱되나 multi-stage(例 몇千)일 경우에는 複雜한 操縱特性을 要하는데 모든 stage의 좋은 matching이 바로 效率 및 工場經濟性에 큰 影響을 준다. 參

考로 3% U-235 1kg를 生産키 위한 消耗電力을 보면, 한 stage 內에서 1,510 kgU을 壓縮해야 하므로 結果적으로 모든 stage를 通해서 940,000 kgU을 壓縮하고 있어야 하는바 이때에 電力費가 차지하는 比重은 대단히 큰 것이다.

III-3. 經濟的 考察

動力爐에서 使用할 任意의 濃縮도를 갖는 核燃料單位 무게 當 分離作業量은 product 우라늄의 濃縮度 뿐만 아니라 tail 우라늄의 U-235 含量에도 關係되고, 이는 separation stage에 feed되는 우라늄량에도 간접적인 關聯성이 있다. 예를 들어 주어진 濃縮도의 우라늄을 生産키 위해서는 tail assay를 決定해야 하는데 tail assay가 높아 짐에 따라 分離作業量은 적어 지지만 feed量은 오히려 增加해야 하는 것이다. 따라서 tail assay의 最適值를 우선 決定해야 한다.

現在 施行中인 US AEC의 委託濃縮料金 \$26.00 (71년7월부터\$32.00)은 tail assay가 0.2%인바, feed量, tail assay 및 分離作業量 三因子와의 相互關係에서 이루어지는 濃縮우라늄의 cost trend(US AEC發表의)를 살펴보면 tail assay가 增加함에 따라 feed量은 增加되고 반대로 分離作業量은 減少한다. 이 三因子의 相互關係에서 얻어지는 濃縮우라늄 cost는 tail assay를 0.1%로 부터 0.2%까지 增加시키에 따라 약간씩 減少되며 tail assay를 더 增加시키면 濃縮우라늄 cost는 tail assay 0.2~0.25%를 最適點으로 약간씩 增加하는 傾向을 보인다.

그림 7. 농축우라늄 생산을 위한 원광 소요량, 분리작업량 및 총비용과의 상관관계도

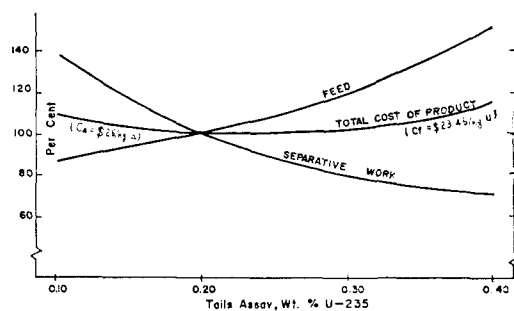


그림 7에서 보는바와 같이 濃縮우라늄의 總 cost는 tail assay의 相當한 範圍內에서 僅少한 變動을 보이므로 몇 %의 tail assay를 最適值로 決定하느냐의 問題는 우라늄 濃縮 service 提供者와 自然우라늄 生産業者에게 더 큰 經濟的 意義가 있으며 우

라늄 농축需要家에게는 別로 影響이 없다는 것을 알 수 있다.

그림 7에서 最適 tail assay를 더 仔細히 分析해 보면 最小濃縮費는 tail 우라늄의 U-235含量이 0.2% 보다 높은 點이므로 現行 US AEC의 濃縮 service費는 우라늄 濃縮 需要家에게 약간 不利하다는 것을 알 수 있다(現行 US AEC tail assay는 0.2%를 適用하고 있음).

現行 US AEC의 委託濃縮單價 \$26.00은 1970年 中葉까지 存續하리라고 發表되었으나 美國大統領의 民間運營方式 聲明을 發表한 以來 US AEC에서는 同料金 單價를 採算 Base로 再檢討하기에 이르러 1971.7부터 \$32로 올리기로 확정되었다.

표 9. 既存(혹은 現行) 料金基準(\$26.00)

電力費 및 運轉維持費	\$13.90
減價償却	3.65
追加因子	
施設 및 運營資本利子	2.93

其 他	0.87
單價(Base Unit cost)	\$21.35
建設利子	1.15
豫備費	3.50
總平均 cost	\$26.00

표 10. 企業採算 Base(\$28.00案)

電力費	\$11.90
모든運營費	3.10
CIP-CUP	2.00
減價償却	3.60
追加因子	3.80
Base unit cost	\$24.40
豫備費	3.60
總平均 cost	\$28.00

표 10에서의 cost estimate는 既 投資된 建設費를 1971-1980의 10年間に 政府에 還收시키는 假定下에

표 11. 5個 氣體擴散工場의 資料

Nation	Plant	Process Buiding	Separative Stages	Ground Coverage (Acres)	Cost (10 ⁶ \$)	Power (Mw)	Limit Enrich.	Compl date.	Operator
U S A	Oak Ridge (Tenn)	K-25	2304 ^a	40.0	347	1700.0	97% (舊) 4% (現)	Ang, 1945	
		K-27	540	8.6	61			Jan, 1946	
		K-29	300	6.7	43			Jan, 1951	
		K-31	600	17.1	97			Dec, 1951	
		K-33	640	32.3	267			Jun, 1954	
			4384 ^b	104.7	815				
	Paducah (Kentucky)	C-310	60 ^a	1.3	15	2550	4% 이하	Jan, 1953	"
		C-331	400	11.8	99			Feb. 1953	
		C-335	400	11.8	101			Apr. 1954	
		C-333	480	24.4	314			Nov. 1953	
		C-337	472	24.4	226			Dec. 1954	
			1812	73.7	755				
	Porthmouth (Ohio)	X-326	2340 ^a	28.3	248	1800	97.65% 까지	Feb. 1956	Good Year Atomic Corp.
		X-330	1100	32.0	237			Jul. 1955	
		X-333	640	32.4	271			Noo. 1955	
		4080	92.7	756					
U K	capenhurst (Cheshire)		>1000	~20	—			Start 1947 End 1950	Govt
Fraucl	Pierrelatte	Low	—	12.3	—			May 1964	Govt
		Medium	—	7.4	—		Apr. 1965		
		High	—	4.9	—		Jan. 1966		
		Very high	—		—		Sept. 1966		

"a" includes purge stages.

"b" does not include small stages and adjacent obsolete purge stages which are not operable because the use of 130 cycle power has been discontinued.

서 算出한 것이다. 이에 反하여 國防目的으로 建設된 同施設의 建設費를 企業採算 Base로 移管檢討한 다는 것은 複雜한 問題를 隨伴하므로 새로운 工場設立을 假定하는 다른 引上案(\$28.70)이 JCAE(Joint Committee on Atomic Energy)에 提出檢討되어 1971년 2월부터 發効할 豫定으로 있고, AEC傘下 3個 濃縮工場에서 使用하는 電力料金は Kwh 當 5 mill인바, 이번 引上案은 電力料金 Kwh 當 4.5mill 基準下에서 算出된 것이므로 그 以上の 引上(例를 들어 \$30.00 以上)이 不可避하리라는 展望도 보인다.

이 引上案은 輕水爐를 使用하는 自由世界 各國에 커다란 Shock를 주었으며 結果적으로 西歐三國(西獨, 和蘭, 英國)과 日本이 遠心分離方法의 開發에 拍車를 加하는 反應을 불러 일으키는 結果를 招來한 것이다.

III-4. 美國濃縮工場 供給能力

二次大戰 末期에 建設된 Oak Ridge 工場을 위시하여 Paducah, Portsmouth 등 三個工場이 稼動中인데 三個工場 總合計의 Cascade 數는 10,196 Stages, 年間分離能力은 17,100 ton U sw, 그리고 여기에 供給하는 發電施設規模는 總 6,000 Mwe 정도다.

US AEC 內에서는 同 工場의 民營化問題, Cascade 改良計劃, Cascade 增強計劃 및 企業採算 base 料金 등의 諸般問題를 檢討하고 있어 將次的 濃縮우라늄 供給能力은 豫測하기 어려우나 現在의 需要는 既存施設의 약 1/3에 該當하므로 當분간은 工場規模로 봐서 餘裕가 있다고 생각하는 것이다. 1967.12. US AEC 發表數字를 보면 표 12과 같다.

표 12. 表濃縮 우라늄 需要豫測

SW U ton/yr	1970	1975	1980
Without Pu recycle			
US 內	3,600	12,300	25,600
其他(非共產世界)	1,000	6,400	18,700
With Pu recycle			
US 內	3,600	11,300	21,800
其他(非共產世界)	1,000	6,100	16,800

美國의 濃縮우라늄 供給能力은 既存施設만으로 1975년 까지 全自由世界의 濃縮우라늄需要量을 充足시킬 수 있고 Cascade 改良計劃과 增強計劃을 參酌하면 1980년 까지는 全自由世界의 需要量의 無限線에 약간 未達할 정도다.

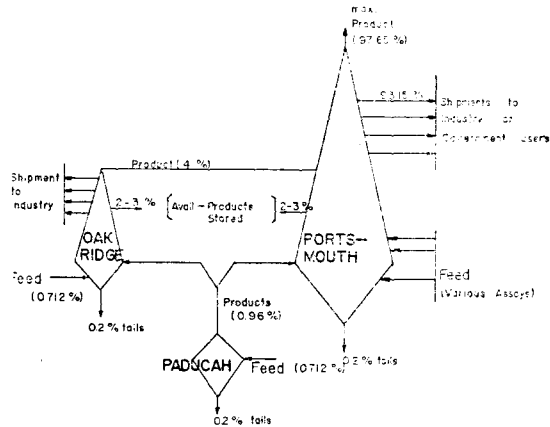
한편 1968년 以來 濃縮施設의 民間移管問題가 具

體的으로 論議되어 왔으나 現實情으로는 民間企業體에 賣却하는데는 여러가지 困難點이 隨伴하므로 當分間은 政府 直營의 公社形式으로 運營할 可能性이 많을 것으로 보인다. US AEC에서는 工場施設의 減價償却을 다룰 때 現在 稼動치 않고 있는 部分은 包含하지 않고 있는데 이것은 企業採算方式에 어긋나므로 工場의 負荷率을 cost에 反映해야할 것으로 본다. 또 하나의 다른 問題는 cost의 약 50%를 占하는 電力代를 종전과 같은 特惠價인 4mills/Kwh로 언제까지나 適用할 수 있느냐 하는 保障問題다.

III-5. 3個濃縮工場의 並合問題

US AEC傘下の 3個 濃縮工場을 効率的으로 運營키 위하여 그림 12와 같은 並合運營方法을 모색하고 있는데, 同 運營方式에 의하면 製品의 濃度 分布로 보아 輕水를 使用하는 原子力 發電事業家에겐 Tennessee 所在의 Oak Ridge 工場이 利用對象이 된다

그림 8. 3개의 농축공장 병합운영도



III-6. 遠心分離法

우라늄濃縮에 관한 研究開發은 歐州諸國에서도 數年來 相當한 進展을 보이고 있다. 이미 英國과 프랑스는 軍事用 氣體擴散工場을 所有하고 있고 西獨은 Nozzle 法을 研究中이며, 西獨, 英國 및 和蘭은 大規模 遠心分離 試作工場을 建設하여 이미 生産段階에 이르고 있다. 英國은 炭素纖維의 回軸胴을 主體로 하여 遠心分離器 100臺 以上の 規模로 2年間 連續 運轉實績을 記錄하였다고 알려져 있다.

上記 3個國은 共同會社(Royal Dutch Shell Co. 中心)로서 和蘭이나 英國에 遠心分離方式의 濃縮施設을 建設運營할 計劃을 1968년 부터 樹立하여 근자에는 6,000萬弗이 이미 投入되었다고 報道된바 있다. 歐州 3個國의 計劃에 관한 URATOM 報告에 의하면

同 3個國은 濃縮工場規模를 1980년 需要의 1/3~1/4로 생각하고 年間 4,000~6,000 Swu ton의 工場建設을 目標로 하고 있다. 이러한 움직임은 미국의 商業優位性에 대한 明白한 挑戰이며 또한 核擴散 禁止條約 第三條에 의한 國際査察의 補強을 要하는 것으로서 濃縮技術을 國家安全保障과 分離해야 할 것을 暗示하는 것이라 할 것이다.

參考로 歐州의 濃縮方法別에 의한 cost estimate를 보면 표 14와과 같다.

표 13. 유우륨의 濃縮方法 別 Cost Estimate

	遠心分離		氣體擴散		Nozzle法	
工場規模 ton SWU/yr	25	250	2500	5000	350	1800
建設費 \$/kgSWU/yr	387	215	131	140	273	79
濃縮 cost \$/kg SWU		45.9	27.6	42	82.9	48.3

표 14에 나타나 있는 3개 方法의 濃縮料金は 美國의 것과 競争이 안되지만 그중에서는 開發中에 있는 遠心分離法이 가장 有利하여 工場規模를 氣體擴散法과 比等하게 하기만 하면 價格面에서 얼마든지 妥當性이 있는 것으로 보인다. 萬一年間 採業量을 氣體擴散法の 半 정도로만 해도 濃縮費는 65% 밖에 안되는 것이다.

西歐事情과 類似한 日本에서는 歐州의 濃縮工場案에 參加하도록 努力하는 한편 獨自의 濃縮施設에 의한 部分的인 自給策을 考慮하면서 當分間 美國의 濃縮施設에 依存하려고 한다. 日本內 濃縮技術의 研究開發 現況을 보면 1969년에 住友電工과 理化學研究所가 燒結알루미나 隔膜의 豫備實驗에서 理論值의 67%分離係數를 達成했고 動力燃料事業團도 1969년에 東工大의 小型 分離裝置를 使用하여 周速 157m/sec로 1.017의 分離係數가 達成된 것은 括目할만한 事實이다. 1968年度 까지의 研究開發費 支出은 合計 55萬弗 程度다. 1968年 여름에 原子力委員會에서 濃縮研究開發의 基本計劃을 發表하였는데 그 內容은 擴散法과 遠心分離法을 兩立시켜 1972年 까지 技術問題를 檢討하고 다음해 부터 開發成果를 評價할 方針을 決定하는 것이다. 研究開發費는 1972年 까지 약 1570萬弗이며 氣體擴散法の 工學的研究(cascade

組立)는 原子力研究所가 擔當하고 隔膜의 開發(알루미나, teflon 등)은 民間企業에 委囑하고 그 特性實驗은 理化學研究所가 맡기로 했다. 遠心分離法은 動力燃料團이 開發中이고 지금까지 1, 2號機에서 周速 350m/sec 정도의 實驗을 하는 同時에 高速化 및 耐久問題에 適合한 回轉胴體材料, 軸棒 등의 研究도 兼하고 있다(계속).

참 고 문 헌

- 1) US AEC, "Proceedings of the Enrichment Services Seminar," ORO-665(1968)
- 2) US AEC, "AEC Gaseous Diffusion Plant Operation," ORO-658
- 3) The Chase Manhattan Bank, N.A., "The Outlook for Uranium," Gerald D. Gunning and David Spring Speen.
- 4) US AEC, "Fuel for Nuclear Age." Print, 1967.
- 5) J. Cameron, "Uranium Resources and Exploration" Sept. 1969.
- 6) J. Tom Roberts, "The Calculation of Nuclear Fuel Cycle Costs," Sept. 1969.
- 7) J. Cameron, "Uranium Resources and Exploration," IAEA-114 (Vol. 2), Lectures at Int'l Survey Course on Technical and Economic Aspects of Nuclear Power, Vienna, 1-12 Sept. 1969.
- 8) T. Roberts, "The Calculation of Indirect Nuclear Fuel Cycle Costs," IAEA-114 (Vol. 2), Vienna, 1-12 Sept, 1969.
- 9) G. Bradley, "U.S. Fuel Supply Policies," IAEA-114 (Vol. 2), Vienna, 1-12 Sept. 1969.
- 10) Nuclear Exchange Corp., "Monthly Report to the Nuclear Industry," No. 24, July 1970.
- 11) US AEC, Uranium Hexafluoride Specification Studies," ORO-656
- 12) US AEC, "Uranium Hexafluoride," ORO-651, Rev. 2.
- 13) Office of Atomic Energy, Korea, "美國의 核燃料 政策" NPP-13, October 1968
- 14) 日本原子力工業, p.4~12, Jan. 1970.
- 15) 日本 PNC "高速增殖爐の開發."