

우라늄精鍊現況 및 核燃料供給

Present Status of Ore Processing and Nuclear Fuel Supply



張 仁 順 (韓國에너지研·變換工程研究室長)

1. 우라늄資源

우라늄은 地殼에 平均 約4ppm程度, 海水에 約3ppb程度 含有되어 있는 것으로 알려져 있다. 各種 資源에 存在하는 우라늄의 含量은 大略 表 1과 같다.

그러나 모든 우라늄 含有物質들이 資源으로써 價値를 갖고 있는 것은 아니며, 現在 開發 價値가 있는 最低含有量은 約0.1% 以上이다.

우라늄原鑛은 自然狀態에서는 恒常 酸化物(UO_x)形態로 存在하며, 그밖에 共存하고 있는 成分에 따라 그 名稱이 表2와 같이 다르다.

우라늄資源의 世界的 分布는 表3에서 볼 수 있듯이 主로 북아메리카주, 아프리카주, 호주等地에 偏在되어 있으며, 그외의 地域에는 소량 또는 低品位의 資源만이 存在하고 있다.

우리나라에서는 1969년부터 長期計劃에 따라 韓國動力資源研究所(當時 國立地質研究所)主管으로 沃川系 괴산地域 및 금산地域을 對象으로 探査를 遂行한 結果, 約5,000萬톤의 原鑛이 埋藏되어 있음을 確認하였다. 그러나 發見된 原鑛의 平均品位는 約0.04%로써 그 經濟性은 매우 미약한 實情이다. 이밖에 公州地域, 가평地域等地에서도 低品位의 原鑛이 存在하고 있는 것으로 밝혀져 있다.

2. 우라늄精鍊

精鍊이라 함은 우라늄原鑛에서 crude yellow cake을 만들어내는 工程으로서 核燃料週期(nuclear fuel cycle)中에서 初期段階이다.

우라늄을 抽出해내는 精鍊工程은 크게 나누어 原鑛粉碎-浸出-固液分離-精製-沈澱工程 등으로 分類할 수 있다. 採掘된 原鑛은 우선 粉碎(Crushing), 微粉碎(grinding)를 通하여 잘게 부순다. 粉碎된 原鑛粉末스러리(Slurry)에 黃酸 또는 알카리 등의 浸出劑 및 酸化劑를 加하면서 加溫하면 우라늄은 다른 鑛物質들과 함께 岩石으로부터 녹아 나온다. 이렇게 우라늄을 녹여내는 工程을 浸出이라 한다. 原鑛中 炭酸塩의 成分이 많이 存在하면 알카리溶液을 加해 處理하는 알카리浸出法이 利用되는데, 大部分의 精鍊工程에는 黃酸을 浸出劑로 使用하는 酸浸出法이 使用된다.

浸出後 우라늄은 이온(ion)狀態로 溶液中에 녹아있으므로 不溶性인 固形成分과 分離하여 精製段階로 들어간다. 精製段階는 一般的으로 이온交換樹脂法과 溶媒抽出法으로 大別할 수 있는데, 이 工程에서는 溶液中 共存하는 다른 不純物과 分離하는 精製뿐만 아니라 우라늄의 相對的 濃度を 높여주어 우라늄의 回收를 쉽게 만

〈表 1〉 우라늄 자원 및含量

資 源	平均品位 (PPM)	總量 (Ton-U)
U-ORES	350~5000	4 ~ 5 × 10 ⁶
Phosphates	100~200	5 ~ 10 × 10 ⁶
Bauxite	8 ~ 12	0.09~0.1 × 10 ⁶
Lignite	0.1~1	0.15 × 1.5 × 10 ⁶
Manganese Modules	4 ~ 7	10~14 × 10 ⁶
Granite	4	4 × 10 ⁹
Shelf Sediments	1 ~ 4	3 ~ 4 × 10 ¹¹
Sea Water	0.003	4.5 × 10 ⁹

〈表 2〉 우라늄 鑛物名

Type	Name	Composition
Oxides	Uraninite	(U ⁺⁴ _{1-x} , U ⁺⁶ _x)O _{2+x}
	Pitchblende	Variety of uraninite
Hydrated oxides	Becquerelite	7UO ₂ ·11 H ₂ O
	Gummite	Alteration product of uraninite ^a
Nb-Ta-Ti complex oxides	Brannerite	(U, Ca, Fe, Th, Y)(Ti, Fe) ₂ O ₆
	Davidite	Ideally FeTi ₃ O ₇
Silicates	Coffinite	U(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}
	Uranophane	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH) ₂ ·5H ₂ O
	Uranothorite	Uranoan variety of thorite, ThSiO ₄
Phosphates	Autunite	Ca(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ ·10-12H ₂ O
	Torbernite	Cu(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ ·12H ₂ O
Vanadates	Carnotite	K ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ ·1-3H ₂ O
	Tyuyamunite	Ca(UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ ·5-8H ₂ O
Hydrocarbons	Thucholite	Uraninite complex with hydro-

든다. 精製된 우라늄이온이 存在하는 溶液에 알 카리를 加해 沈澱시키면 yellow cake라고 하는 黄色粉末이 얻어진다. 이 粉末은 우라늄의 成分이 70~80%가량 含有되어 있으며, 이것을 우라늄精鑛(uranium concentrate)이라고도 한다. 國際우라늄市場에서의 去來는 yellow cake로 이루어지고 있다. 典型的인 우라늄 精鍊工程은 그림1과 같다.

全體 核燃料週期中 우라늄精鍊에 所要되는 즉, yellow cake를 얻기 爲한 費用은 많은 部分을 차지한다. 理解를 돕기 爲하여 核燃料週期

〈表 3〉 世界的 우라늄 자원

<\$80/kgU (<\$30/lb U₃O₈)

	Reasonably Assured	Estimated Additional	Total
Algeria	28	0	28
Argentina	23	3.8	26.8
Australia	290	47	337
Brazil	74.2	90.1	164.3
Canada	215	370	585
France	39.6	26.2	65.8
Gabon	37	0	37
India	29.8	0.9	30.7
Namibia	117	30	147
Niger	160	53	213
South Africa	247	54	301
Sweden	0	0	0
United States	531	773	1,304
Other	58.4	32	90.4
Total	1,850	1,480	3,330

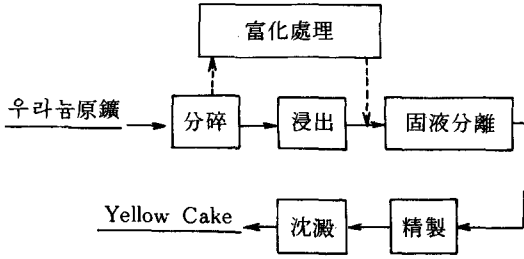
\$80-130/kgU (\$30-50/lb U₃O₈)

	Reasonably Assured	Estimated Additional	Total
Algeria	0	5.5	5.5
Argentina	5.1	5.3	10.4
Australia	9.0	6	15
Brazil	0	0	0
Canada	20	358	378
France	15.7	20	35.7
Gabon	0	0	0
India	0	22.8	22.8
Namibia	16	23	39
Niger	8	0	8
South Africa	144	85	229
Sweden	301	3	304
United States	177	385	562
Other	44.2	56.4	100.6
Total	740	970	1,710

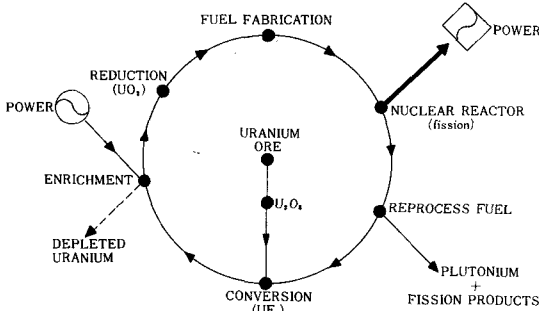
(NEA/IAEA December 1979) (1,000Tonnes U)
(As of January 1, 1978)

를 圖示하면 그림2와 같으며, 核燃料週期費用의 內譯은 表4에 나타나 있다.

〈그림 1〉 精鍊工程圖



〈그림 2〉 核燃料週期



우라늄精鍊技術은 그렇게 어려운 技術이 아니며, 先進國에서는 이미 1950年代에 技術이 確立되었다. 우리나라에서는 韓國에너지研究所에 小規模 試驗施設이 設置되어 있으며, 國內產 우라늄原鑛에 대한 最適工程試驗을 마친 狀態이다.

그러나 國內產 우라늄原鑛은 前述한 바와 같이 品位가 낮아 經濟性이 稀薄하기 때문에 商用規模施設의 設置는 考慮되고 있지 않다. 기존의 適用規模 精鍊工場이 運營되고 있는 곳에서는 버려지는 低品位의 우라늄原鑛은 간단한 Heap浸出같은 方法으로 값싸게 우라늄을 回收하고 있다.

3. 代替精鍊工程

本節에서는 變則的인 精鍊工程 및 現在 활발한 研究가 이루어지고 있는 海水로 부터의 우라늄回收에 關하여 간단히 설명하고자 한다.

○Heap浸出²⁻⁴⁾

Heap浸出이라 함은 普遍的인 浸出方法, 즉 微

〈表 4〉 核燃料週期費의 內譯

	單 價	\$/kg Fuel	mills /kWh	占有率 (%)
精 鍊	78 \$/kgU	549	2.2	32.3
變 換	6 "	43	0.2	3.0
濃 縮	140 \$/kg SWU	659	2.6	38.2
加工·初期	200 \$/kgU	211		
交替	180 "	191	0.8	11.8
使用後核燃料貯藏	200 \$/kg HM	220	1.0	14.7
計			6.8	100.0

(再變換費는 加工에 포함되어 있음)

粉碎된 原鑛의 slurry를 加熱, 攪拌시키면서 浸出劑를 加하여 우라늄을 녹여내는 대신에 粗分碎된 原鑛더미 위로 浸出劑를 撒泡시켜 우라늄鑛物을 溶解시키는 變則方法이다. 이 方法은 普通의 製鍊方法으로는 經劑性이 없는 低品位 우라늄原鑛, 高品位 原鑛의 富化(beneficiation) 殘餘物 또는 工場에서 멀리 떨어져 있는 小量의 高品位 原鑛의 處理에 利用된다. 이 工程의 有利한 點은 다음과 같다.

1) 低品位 原鑛은 高品位 原鑛의 採鑛時 同時에 採內어야 하기 때문에 採鑛費를 考慮하지 않아도 된다.

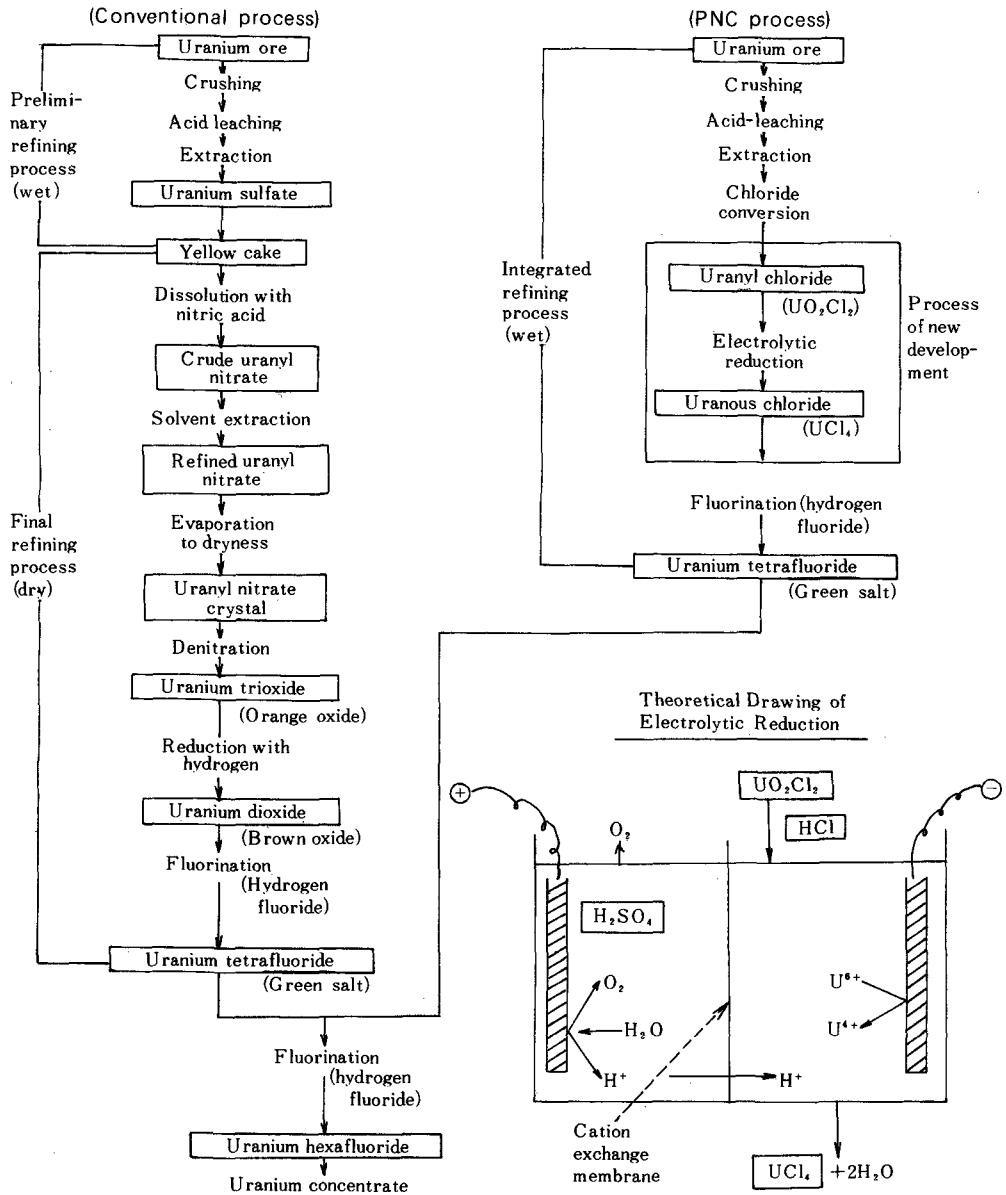
2) 低品位 原鑛 또는 廢原鑛의 貯藏地域內에서 施設運營이 可能하기 때문에 따로 工場敷地가 必要없다.

3) 初期投資費, 副原料 等 運轉經費를 상당히 줄일 수 있다. 그러나 浸出效率의 低下, 酷寒期의 運轉中止 및 廢鑛의 處理가 問題點으로 대두되지만, 在來式方法에 比하여 상당히 簡便한 方法임에 틀림없으며 만약 우리나라 우라늄鑛을 開發한다면 이 方法이 現在로서는 가장 適合할 것이다.

○集積工程⁵⁻⁸⁾

日本の 動力爐·核燃料開發事業團(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corpora-

그림 3 在來式 PNC式 工程의 比較



tion)과 Asahi Chemical社는 共同으로 研究에 着手하여 소위 PNC工程(Integrated Process)을 完成하였다. 이 工程은 電氣的 還元에 依해 精鍊工程에서 變換工程을 거치지 않고 直接 核級우라늄化合物(nuclear grade uranium compound)을 만드는 方法이다.

이온交換膜을 利用하여 우라늄이온을 處理하는 方法은 本來 英國과 美國 等에서 研究된바

있었다.⁹⁻¹⁰⁾ 이 工程의 原理는 粉碎로 부터 浸出, 濾過, 溶媒抽出工程까지는 普通의 精鍊方法과 大差가 없지만, 逆抽出後 溶液의 電氣的 還元 및 UF₄沈澱工程이 追加되어 있는 點이 特異하다. 이 方法으로 現在 日本의 Ningyo-Toge 工場에서 UF₄를 年間 100톤 規模로 生産해 내고 있다. 在來式 精鍊, 變換과의 工程 比較는 그림3과 같다.

○海水로 부터의 우라늄抽出^{11~13)}

海水中에는 約80餘種의 各種 元素가 含有되어 있으며, 이 중 우라늄은 約3ppb程度로써 극히 낮은 品位이다. 그러나 바닷물의 量이 14×10^{17} 톤이나 되므로 海水 全體에는 約45억 톤이나 되는 우라늄이 存在한다. 이는 地表面에서의 可採量의 約1,000倍에 通하는 量이다.

海水에서의 우라늄抽出 研究를 처음으로 시작한 것은 英國이며, 其他 國家에서도 이의 研究를 修行中에 있다. 特히, 日本에서는 大學에서 基礎研究를 遂行하여 金屬鑛業事業團(Metal Mining Agency)主管으로 1981년에 Seto섬의 Nio에 試驗施設을 着工하였다. 投資費는 約1,000萬 달러이며, 年間 約10kg의 우라늄을 回收할 수 있는 規模로써 1985年末에 始運轉을 始作할 예정이다.

그들은 運轉結果를 토대로 하여 1990年경에 年産 수 톤 規模의 半商用施設을 계획하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 海水로 부터 우라늄 回收는 아직 生産費가 높기 때문에 쉽사리 成功한다고 보기는 어렵지만, 앞으로 우라늄 資源의 枯渴을 豫想할때 이 技術의 開發은 매우 重要하다고 판단되며, 우라늄이온을 쉽게 吸着시킬 수 있는 材料의 開發에 期待를 걸고 있다.

4. 核燃料 需給問題와 確保方案

우리나라에는 現在 3基의 原子力發電所가 稼動中에 있으며, 6基가 建設中이다. 1989년까지 總9基가 稼動되고 그後에도 繼續하여 原子力發電所의 增加가 豫見되고 있다. 그런데 이에 所要되는 核燃料는 全量 海外資源에 依存하고 있는 實情이며, 國內資源의 活用으로 이에 充當할 可能性은 없다고 말할 수 있다. 왜냐하면, 國內賦存 우라늄原鑛을 全量 處理하여 우라늄을 回收한다고 假定하여도 U_3O_8 으로 換算하여 約2萬 톤에 不過한 形便이고, 이것은 100萬KW級

輕水爐 4基를 30年間 運轉할 수 있는 程度일 뿐이기 때문이다.

現在까지는 多幸스럽게도 國際市場動向으로 判斷하건데 當分間은 核燃料의 需給에는 큰 어려움이 없을 것 같다. 그 理由는 다음과 같다.

1970年代 中半의 石油波動에 依한 原油價의 急激한 上昇에 따라 非産油國들은 서둘러 原子力發電所의 建設을 推進하였었다. 이에 따라 一時的으로 치솟던 우라늄價格은 1970年代末을 고비로 下落을 거듭하여 現在에 이르러서는 生産原價를 밀도는 바닥時勢로 核燃料가 去來되고 있다.

이런 現象은 우라늄價格의 仰騰에 便乘한 過剩生産 및 備蓄, 새로운 高品位 資源의 發見 또는 發見의 期待感에 依한 購買留保, 주춤하는 새로운 原子力發電所의 注文斷絶, 注文된 發電所의 建設遲延 또는 取消 등 複合的인 要因에 依하여 우라늄이 過剩 備蓄되어 있기 때문이다.

1980年末 現在 우라늄 1파운드당 100달러 以上の 價格으로 生産할 수 있는 全世界 確證 埋藏量은 U_3O_8 基準으로 約300萬 톤이며, 이 중 30달러 以下の 價格으로 收支를 맞출 수 있는 所謂 高品位 原鑛은 約90萬 톤이다. 現在の 우라늄 生産能力과 資源面에서 考慮된다면 使用後核燃料를 다시 使用하지 않고 長期貯藏내지 永久處分하는 once-through 方法으로 運轉할 境遇 當分間의 需要는 充足되어진다고 보여진다. 勿論 새로운 鑛山이 開發되고 使用後核燃料를 循環方式으로 利用한다면 安定供給期間은 훨씬 더 增加할 것이지만 아직까지는 國際情勢 및 技術上 어려움이 있다.

하여튼 現在の 原子力發電所의 發電單價가 石油火力發電單價보다 훨씬 低廉한 實情에 비추어 본다면, 表5에서 豫見되는 바와 같이 原子力發電所의 購買力은 上乘할 것이고,¹⁾ 따라서 核燃料의 需要도 增加할 것으로 判斷된다. 그러면 高品位 原鑛의 不足化現象은 加速化할 것이

(單位 : GW)

Region of Country	1980	1985	1990	1995
OECD(excluding the United States)				
Australia/New Zealand	0	0	0	0
Austria/Switzerland	1.9	2.9	2.9	3.8-4.9
Benelux/Denmark	2.3	5.0- 6.0	6.0	6.0-7.0
Canada	5.5	10.3	13.4-14.2	16.6-19.0
France	10.9	25.7-29.1	38.5-44.2	50.1-56.5
Germany	9.1	15.0-16.6	22.5-27.5	28.7-33.9
Greece/Turkey	0	0	0	0
Italy	1.4	1.4	3.4-4.3	6.4-9.5
Japan	14.6	17.8-19.5	24.5-30.9	40.8-46.2
Scandinavia	7.9	9.5	12.6-13.2	13.9-15.6
Spain/Portugal	1.1	7.4	9.3-13.2	13.2-17.8
United Kingdom/Ireland	8.7	11.8	11.6-13.1	13.4-17.6
Subtotal	63.4	107-115	145-170	194-230
Non-OECD				
Argentina	0.3	0.9	1.5-2.1	3.3-3.9
Brazil	0	0.6	1.9-3.1	3.1-5.7
Cuba	0	0	0.4-0.9	0.9
India	1	1.2- 1.5	1.9-2.1	2.7-3.3
South Korea	0.6	1.8- 2.7	5.5-7.4	9.3-13.5
Libya	0	0	0.0-0.4	0.4
Mexico	0	0.6	1.3-2.6	2.6-4.1
Pakistan	0.1	0.1	0.1-0.7	0.7-1.9
Philippines	0	0	0.6	0.6
South Africa	0	0.9- 1.8	1.8-2.7	3.7-5.5
Taiwan	1.2	3.1- 4.0	4.9-6.7	6.7-8.7
Yugoslavia	0	0.6	0.6-1.2	1.2-1.8
Subtotal	3.2	10-13	21-31	35-51
Total OECD and Non-OECD (excluding the United States)	66.6	117-128	165-200	229-280

〈表 5〉 原子力發電容量의 現況과 展望

고, 去來價格의 上乘 및 核燃料의 供給制限措置 等의 否定的인 側面이 擡頭될 것이다. 即, 現在의 購買者 中心의 國際우라늄市場이 서서히 1978年과 같은 供給者 中心으로 바뀔 것이다.

이러한 豫想은 供給者側도 쉽게 豫想할 수 있기 때문에, 現在의 低廉한 價格으로 長期契約

의 締結은 어려울 것이다.

그렇다면 長期的인 眼目으로 原鑛 및 核燃料의 確保에 눈을 돌려야 할 것이다. 即, 資源이 不足한 우리나라와 같은 國家가 豊富한 우라늄 資源 및 未探査地域을 갖고 있는 아프리카, 오스트레일리아, 캐나다, 남미 等地에서 직접 現地探査 및 採鑛活動에 參與하여 우라늄原鑛形



〈Yellow cake〉

態로 核燃料을 確保하는 方案이다.

이러한 政策은 勿論 投資資本의 回收期間이 길고 成功與否를 쉽게 점칠 수 없기 때문에 危險性을 內包하고 있지만, 探查時點에서 부터 uranium 生産까지의 時日이 많이 所要되기 때문에 지금부터 積極的으로 海外 各處에 良質의 uranium 原鑛을 確保하고, 그 原鑛의 處理工場을 國內에 이미 設置되어 있는 試驗施設에서 研究하여 그 結果를 土臺로 現地에 精鍊工場을 세워 核燃料供給을 圓滑히 하는 것이 바람직하다. 實例로 프랑스, 日本같은 uranium 資源 不足國家에서는 世界 各地에서 探查活動을 벌여 原鑛確保에 血眼이 되어 있는 實情이다.

우리나라에서도 파라과이, 가봉 等地에서 共同探查活動을 遂行하여 왔지만, 그 結果는 아직 微微하다. 이러한 事業은 政府次元에서 積極的으로 支援하여 行하여야 할 것이다.

〈參考文獻〉

1. E. Gordon, "Uranium 1980," Atomic Industrial Forum, Inc(1981).
2. Vera Zivanovic, IAEA-SM-135/7, The Recovery of Uranium Proceedings of a Symposium

São Paulo, 17-21 Aug. 1970(1971).

3. R. J. Ring, INIS-MF-6204(1979).
4. R. C. Merritt, "The Extractive Metallurgy of Uranium," (1971).
5. S. Takenaka and H. Kawate, IAEA-AG/33-1, Uranium Ore Processings of an Advisory Group Meeting, Washington D. C., 24-26 Nov., 1975(1976).
6. The Research Development Corporation of Japan News No.119(1974).
7. "Ion Exchange Membrane and its Applications," Asahi Chemical Industry Co., Brochure.
8. S. Takada et al, IAEA-SM-135/14, The Recovery of Uranium(1971).
9. T. A. Davis et al, AIChE J. vol 17(4) p1006 (1971).
10. W. W. Schulz et al, Ind. and Eng. Chem. v. ol 50(12), p1768(1958).
11. M. Kanno, Sep. sci. and Tech. 16(9), p999 (1981).
12. A. D. Kelmers, Sep. Sci. and Tech., 16(9) p 1019(1981).
13. B. B., Per Vallander, STV-PROJECT80-3955(1981).