

歐美 여러나라의

使用後核燃料中間貯藏動向

— 사일로 및 水풀 貯藏方式 —

1. 캐나다의 사일로貯藏方式

1.1 開發經緯

1970年代 初期에 AECL과 電力會社에 의해 설립된 燃料貯藏檢討委員會는 CANDU爐 燃料의 使用後核燃料貯藏에 대해 水풀貯藏方式 2케이스〔原子力發電所 사이트內(AR)와 사이트外(AFR)〕 및 3케이스의 乾式貯藏(사일로, 自然對流vault, 強制對流vault) 등 5方式을 검토한 결과, 水풀貯藏의 代替案으로 空冷中間貯藏方式을 개발해야 한다고 권고했다. 이것은 캐나다의 水풀貯藏에 특히 문제점이 있는 것은 아니나, 풀貯藏에서 문제가 되는 運轉監視, 2次廢棄物處理處分 등의 부담을 최소화시킬 수 있다는 전망에 의한 판단때문이다. 이 勸告에 따라 여러가지의 사일로와 自然對流vault에 대한 사이트外 貯藏施設의 概念設計가 행해졌다.

AECL은 사일로貯藏方式을 實証하는 實驗計劃을 1974년에 시작했다. WNRE에서 사일로를 製作하여 電氣히터와 實際燃料를 裝荷해서 實証試驗을 행하여 基礎데이터를 수집한 후 1977년에 실험을 終了하였다. 이 實驗結果에 따라 저장장 가능하다고 판단한 WNRE는 1977년부터 7개의 原型사일로를 製作하여 重水減速有機材冷却實驗爐 WR-1의 사용후핵연료의 定常貯藏을 시작했다. AECL은 原型사일로중 3개를 實

驗用으로 CANDU爐의 實際燃料裝荷에 의한 長期貯藏試驗을 행하고 있다. 그리고 이 사일로를 輸送에도 사용하기 위해서 IAEA輸送法規에 의한 1/8규모 모델에 의한 落下試驗을 행했는데, 同法規에는 適合되지 못했다.

또, 1982년부터 온타리오 하이드로社는 貯藏, 輸送, 最終處分에 一貫해서 사일로를 사용하는 汎用 콘크리트 캐스크(Integrated Concrete Cask)를 1994年 實用化를 목표로 개발중에 있다. 이것은 1,000년의 耐久性을 요구하는 것으로 현재는 각종 요구를 만족시키기 위한 設計條件의 검토가 행해지고 있다.

1974년부터 행해진 WNRE에서의 사일로 實証試驗에서는 4개의 사일로를 製作했는데, 4개의 實証사일로중 2개는 높이 약 5.3미터, 직경 약 2.3미터의 円筒型이며, 이중 한개에는 WR-1의 照射後 核燃料가 裝荷되었다. 나머지 2개는 높이 약 5.3미터, 한 변이 약 2.3미터인 角柱型으로 이중 한개에는 Douglas Point 原子力發電所의 照射後 CANDU核燃料가 裝荷되었다.

實際燃料는 鐵製溶接構造의 密封배스킷(He 環境)에 넣어서 裝荷되므로 그 취급, 차폐 등에 대해서 문제가 없고, 사일로는 計算 및 試驗結果에서 熱負荷, 應力, 遮蔽, 被曝, 安全解析, 安全保障性에 있어서 저장에 사용할 수 있다는

결론이 얻어졌다

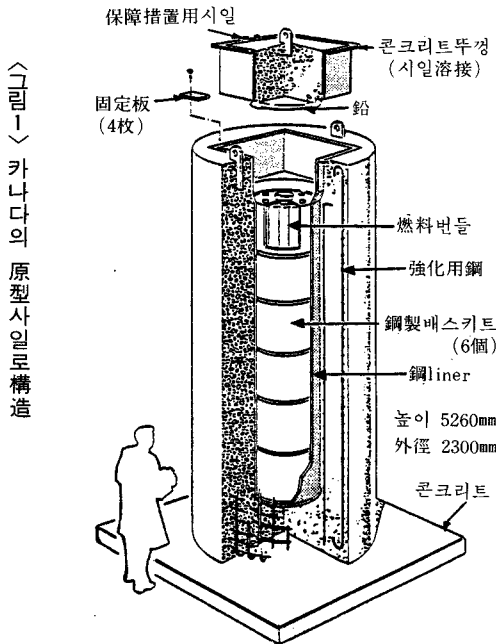
WNRE가 1977년부터 제작한 原型사일로로는 實証用的 円筒型사일로와 거의 같은데 實証用에서 사용된 두께 약 25mm의 납(鉛)liner를 없애고 두께 150mm의 콘크리트로 바꾸었기 때문에 직경이 290mm, 높이가 379mm로 커졌다.

이 原型사일로를 사용한 AECL의 실험은 制御環境實驗(Controlled Environment Experiment)이라고 불리는데 150°C貯藏溫度에서 공기 저장환경이 연료에 주는 영향의 長期觀察, 水分이 저장연료에 주는 영향, 연료 결합의 영향 등의 검토를 행하고 있다. 그리고 IAEA安全保障措置를 위해 封印에 光피버를 조합시켜 비엔나의 IAEA本部가 遠融監視할 수 있는 장치를 붙였는데 트러블로 인해 廢止되었다.

1.2 貯藏方式의 概要

原型사일로는 그림1과 같은데 이 貯藏方式은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

① 貯藏되는 燃料은 길이 약 0.5m, 직경 약 0.1m의 CANDU爐 또는 實驗爐 WR-1의 번들이다.



② 23번들(WR-1) 또는 28번들(CANDU爐)이 He環境의 炭素鋼製密封 배스킷에 封入된다 (1次 배리어).

③ 6배스킷이 사일로에 封入된다.

④ 사일로 内壁에는 炭素鋼liner가 있고, 뚜껑은 시일溶接된다(2次 배리어).

⑤ 사일로는 屋外에 두며 外氣의 自然對流에 의해 냉각된다.

⑥ 배스킷은 移動式크레인을 사용해서 屋外에서 裝荷된다.

⑦ 貯藏場所에서 사일로를 製作할 수 있어서 製作期間이 짧다.

⑧ 貯藏施設의 부대설비가 적다.

⑨ 콘크리트 壁에 의해 충분한 遮蔽가 얻어진다.

⑩ 사일로의 製作費가 싸다.

⑪ 運轉費用이 거의 필요없다.

⑫ 2次廢棄物의 發生이 적다.

⑬ 토지면적당 貯藏密度가 낮다.

⑭ 現狀況으로는 사일로를 輸送에 사용할 수 없다.

⑮ 배스킷裝荷時에 스카이사인에 의한 被曝이 생긴다.

또, 1981년에 AECL과 온타리오 하이드로社가 행한 사일로方式과 自然對流vault方式의 經濟性比較檢討結果는 表1과 같으며 vault方式이 약간 싸다는 결론을 얻고 있다. 그러나 사일로

〈表1〉 캐나다에서의 사일로方式과 自然對流vault方式의 貯藏코스트의 比較

(單位는 1980年 7月 캐나다달러)

費目	貨物레이트 \$55/t+\$0.095/t·km		貨物레이트 \$0.35/t·km		貨物레이트 \$0.50/t·km	
	사일로	vault	사일로	vault	사일로	vault
	設備費	0.49	0.89	0.49	0.89	0.49
運轉費	4.19	2.10	4.19	2.10	4.19	2.10
輸送費	5.00	5.00	10.34	10.34	14.37	14.37
計(\$/kgU)	9.68	7.99	15.02	13.33	19.05	17.36

〈表2〉 Sellafield의 핵貯藏施設概要

名稱	물數	對象燃料	容 量(t)	MEB, 캐니스터, 스킵	캐스크	燃 料 受入拂出	貯 藏
POND 2 (B-30)	1	GCR	420	濕式/乾式	濕式/乾式	乾 式	濕式
POND3 (B-27)	5 (bay1~5)	AGR LWR	2,300	濕式/乾式	濕式/乾式	濕 式	濕式
POND4 (B-310)	—	AGR	500 (캐니스터100個 分 増設豫定)	濕 式	濕 式	乾 式	濕式
POND5	3	GCR AGR	GCR : 3,000 or AGR : 1,530	濕 式	濕 式	乾 式	濕式
THORP	3	AGR LWR	3,000	濕 式	濕 式	濕 式	濕式

方式은 初期投資가 적어도 된다는 캐스크 貯藏方式과 같은 利點이 있으며 또한 어느 方式도 設備費의 웨어가 적고 輸送費가 반이상을 占하고 있는 것이 특징이다.

캐나다에서 개발되고 있는 사일로貯藏方式은 이와 같은 특징을 가지고 있으며 經濟性의 展望도 나쁘지 않다. 그러나 CANDU爐燃料은 輕水爐燃料에 비해 길이가 짧으며 燃燒度도 낮다. 냉각, 차폐, 배스킷裝荷方式設計에는 이들 조건 的 차이가 크게 영향을 줄 것으로 생각된다. 輸送, 貯藏, 處分을 1基로 處分할 수 있는 汎用사일로(Integrated Concrete Cask)의 개발은 주목되나, 이것이 實用化된다 하더라도 그대로 길이가 긴 輕水爐燃料集合體에 적용한다는 것은 불가능할 것이다.

2. 英國의 水물貯藏方式

水물에다가 使用후핵연료를 貯藏하는 것은 原子爐사이트 및 再處理施設에서의 貯藏方式으로 이미 오랜 經驗이 축적되어 있다.

2.1 開發經緯

英國의 使用후핵연료貯藏시설은 특정한 實驗爐를 제외하고 Magnox爐 및 그 개량형인 AGR, 앞으로 導入이 검토되고 있으며 또 海外에서 부터의 委託再處理對象인 輕水爐에서 발생되는 使用후핵연료를 貯藏하는 것으로서 v-

ault貯藏 이외는 BNFL이 사업주로서 Sellafield(前 Windscale)에 建設 또는 建設을 豫定하고 있는 水물貯藏施設이다. 이들 貯藏施設은 再處理施設과 밀접하게 關聯되어 있으며, 기본적으로는 再처리시설의 일부로서 設計, 安全評價, 建設, 運轉이 행해지고 있다.

현재까지는 Sellafield에 설치 또는 계획된 貯藏물(英國에서는 Pond)은 POND 1~5 및 THORP(Thermal Oxide Reprocessing Plant)內 물 등 6設備이다. POND 1은 1950년대 말기에 운전을 停止했으며, POND 2~5 및 THORP內 물의 特性은 表2와 같다. 이들 水물貯藏施設에 1982년 현재 약 800톤의 UO₂燃料, 약 1,000톤의 Magnox燃料가 再처리를 위해 貯藏되어 있다.

POND 2는 Magnox燃料를 받아들이기 위한 것으로서 再處理를 위해 필요한 디캔닝 등 前處理도 이 시설내에서 행한다. 이미 약20년간 운전을 하고 있으며 POND 5의 運開에 따라 閉鎖될 豫정이다.

POND 3은 1960년대 후반 國內 및 海外再處理契約에 따라 AGR과 輕水爐의 산화물연료 貯藏 위해 建設되었다. 1983년 현재 세번째 擴張工事(Bay 5)를 하고 있으며, 이로써 貯藏容量이 1,000톤에서 2,300톤까지 擴大된다.

POND 4는 AGR燃料用的 새로운 貯藏물로서 500톤의 貯藏용량을 가지고 있는데, 다시 AGR

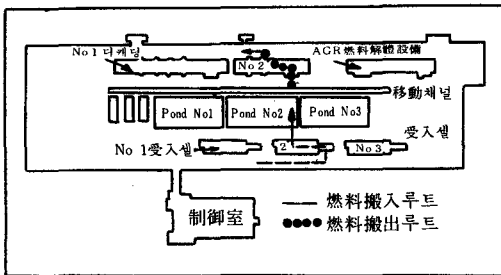
燃料用캐니스터 100개분을 增設할 예정이다.

POND 5는 Magnox燃料과 AGR燃料用の 貯藏폴로서 1983년에 완성되었다. THORP內 폴은 AGR과 輕水爐의 연료를 받아들이는 것으로 각각 1,000톤 용량의 3개 貯藏폴이 검토되고 있다.

燃料收納方式에 대해서는 輸送 및 貯藏의 경험에서 2重容器的 概念을 도입하여 輕水爐燃料에는 MEB(Multi-Element Bottle), AGR 燃料에는 캐니스터를 채택했다. 이 方式은 貯藏폴의 설계를 보다 간단하게 하여 作業者의 피폭을 저감시키고 있다.

BNFL 貯藏폴의 특징중 하나는 開方式인데,

〈그림2〉 POND 5의 概略配置圖(No.1~3의 3개의 폴을 갖는다)



POND 5에서 처음으로 密閉式(지붕구조)이 채택되었다. BNFL은 開放式貯藏폴에 關해 30년 의 經驗을 가지고 있으며, 대기오염 등의 측정을 포함한 研究開發을 하고 있다. 그 結果 開放式貯藏폴의 安全性을 입증하고 있으며 開放式은 建設費의 低減에도 기여하고 있다.

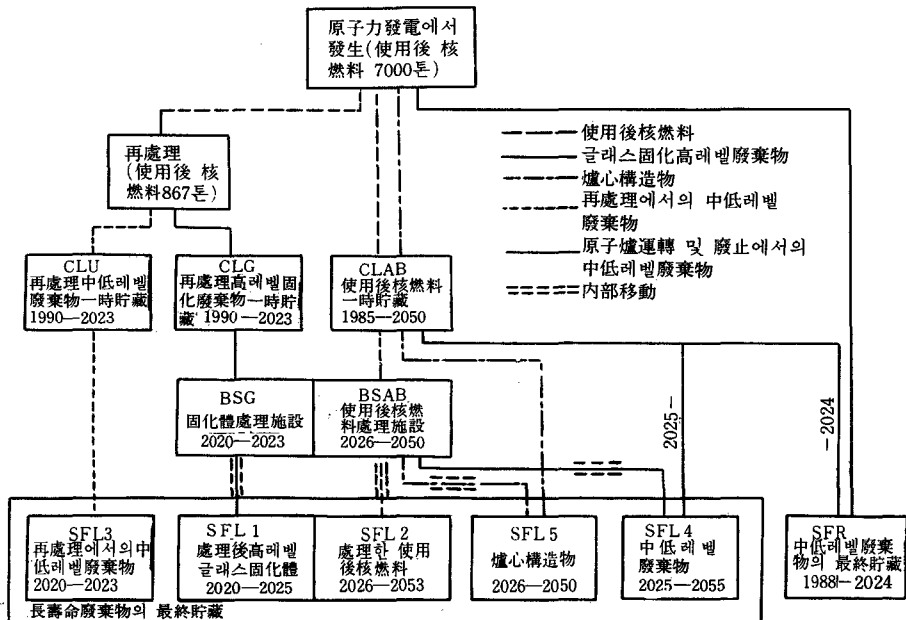
2.2 貯藏方式의 概要

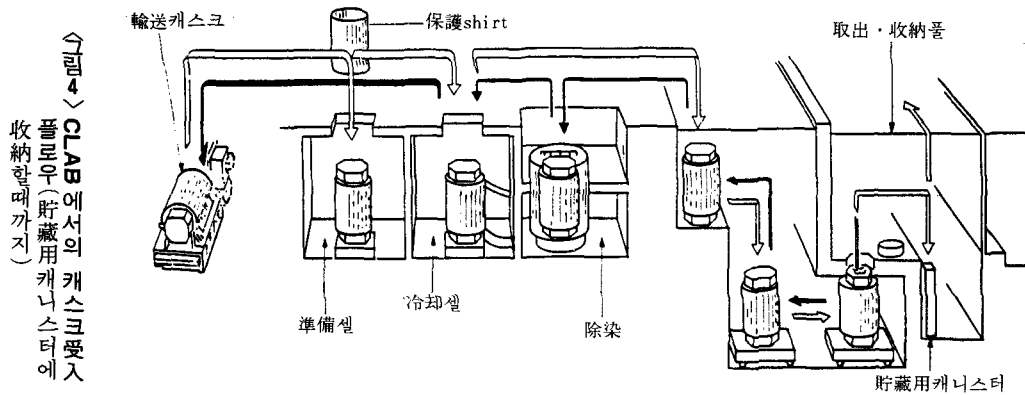
POND 5를 例로 貯藏方式의 概要를 알아본다. POND 5시설의 機能은 受入, 貯藏, 디켄닝·解體, 부속건물 4개로 구분되며 부속건물을 제외한 각 설비는 그림2와 같이 배치되어 있다.

受入設備에서는 舍內에 내려진 캐스크의 뚜껑을 遠隔操作으로 열고 캐니스터를 收納容器內에 옮긴 후 트롤리에 의해 폴중으로 내린다. AGR燃料에서는 저장밀도를 높이기 위해 燃料集合體를 해체하여 燃料棒을 스킵에 바꾸어 채울 수 있도록 되어 있다.

POND 5에서 발생하는 廢液 및 貯藏폴水의 냉각은 인접하고 있는 SIXEP에서 처리, 냉각된다. SIXEP에는 6MW의 冷却器가 備置되어 있다.

〈그림3〉 스웨덴의 使用後核燃料·廢棄物處理處分計劃





3. 스웨덴의 地下式水풀 貯藏方式

3.1 開發經緯

1980년 3월에 행해진 國民投票에 의해 스웨덴에서는 原子爐의 새로운 計劃은 인정되지 않으며 建設中인 原子爐를 포함해서 12基를 한도로 하고 또한 2010년에는 全原子爐의 운전을 止하기로 되어 있다.

또한, 1977년 4월에 의회를 통과한 법령에 의해 新規의 原子爐에 燃料를 裝荷할 경우에는 사용후핵연료 또는 再處理에 의해서 생기는 廢棄物을 高度로 안전한 方法으로 처분할 수 있다는 것을 실증하고, 그 結果가 政府에 의해서 認可되어야 한다고 되어 있다. 즉, 스웨덴의 原子力은 그 Life Cycle의 모든 계획을 확립하게 끔 요청되고 있다.

사용후핵연료 최종처분까지의 研究開發 및 시설의 건설은 스웨덴核燃料供給會社(SKBF)가 책임지도록 되어 있다. SKBF는 Oskarshamn원자력발전소와 인접해서 使用후핵연료 중앙貯藏시설(CLAB)을 설치하기 위해서 1977년 豫備設計를 시작하여, 1980년에 착공했다.

사용후핵연료 및 폐기물의 흐름은 그림3과 같이 계획되어 있으며, 프랑스의 Cogema社에 委託再處理하는 使用후핵연료 이외는 모두 CLAB에서 30~40년간 貯藏될 豫정이다. 最近, 스웨덴은 1990년 이후의 Cogema社와의 契約分 692톤을 破棄했다고 보도되고 있어서 CLAB로

의 의존은 더욱 강해지는 것으로 생각된다.

3.2 貯藏方式의 概要

CLAB는 3,000톤 우라늄 상당의 사용후핵연료를 貯藏할 수 있는데, 9,000톤까지 확장할 수 있도록 설계되어 있으며, 爐心構造物의 貯藏에도 對應可能하도록 되어 있다.

CLAB는 받아들이는 시설 및 貯藏설비, 부속 건물로 되며, 貯藏設備은 地下岩盤內를 掘削한 空洞內에 설치되고 空洞天井面에서부터 地表까지는 25m로써 엘리베이터로 접속된다. 貯藏풀은 각각 750톤의 容量을 가진 4개의 貯藏풀 및 豫備의 中央풀 등 5개로 구성된다.

施設의 받아들이는 능력은 300톤/년이며 시설의 수명은 60년을 想定하고 있다. 貯藏燃料의 냉각을 위해 貯藏풀에는 6.5MW의 除熱시스템이 있으며, 최종적으로는 海水와 熱交換으로 냉각하는데 오염방지를 위해 2次冷却系統을 거쳐 열교환을 하고 있다.

CLAB의 貯藏풀에서는 輕水爐燃料集合體가 캐니스터에 수납되어 貯藏된다. 캐니스터의 收納體數는 PWR燃料에서 5體, BWR燃料에서 16體이다. 캐니스터는 施設內에서의 연료 취급단 위이며, 使用후핵연료는 受入設備에 의해서 그림4와 같은 순서로 캐니스터내에 수납된다. CLAB의 總建設費는 1981년 평가 12억 크로네로 豫상되며, 運轉費는 3,500만 크로네/년으로 전망되고 있다.