

使用後核燃料의 乾式貯藏技術

— 캐스크貯藏方式의 技術的·經濟的 檢討 —

1. 使用後核燃料 各種貯藏方式의 豫備的 評價

使用後核燃料의 저장기술에는 물에 의한 濕式貯藏技術外에 cask, vault, silo, drywell 등을 사용하는 乾式貯藏技術이 있다. 물저장은 스웨덴, cask저장은 서독 및 미국, vault저장은 영국, silo저장은 캐나다에서 각각 연구개발, 실증이 행해지고 있는데 그중에는 인허가를 받아서 건설, 운전되고 있는 것도 있다.

다음에 이들 각종 저장방식에 대해 경제성, 안전성, 認許可性, 사회적 받아들임 가능성 등 여덟가지의 측면에서 문헌조사 등에 의한 데이터를 기초로 事前에 예비적으로 평가해보았다. 그 결과는 表 1에서와 같이 캐스크 및 물풀 두 가지 저장방식이 비교적 우위에 있다고 되어 있다. 이 경우의 데이터 베이스는 모두 문헌 등에 보고된 것으로서 여러가지 조건에서 설계·비용견적되고 있으며, 이 평가결과는 우리나라 입지환경하에서의 동일조건으로 비교된 것이 아님을 알아두어야 한다.

2. 캐스크貯藏方式의 技術的 檢討

事前의 예비적인 평가에 의해서 물저장방식과 함께 비교적 우위에 있는 캐스크저장방식에 대해 기술적 검토를 하였다. 즉, 수송과 저장에 사용할 수 있는 캐스크와 이것을 收納하는 건물의 개념설계를 하고 安全解析을 하였다.

(1) 輸送/貯藏兼用캐스크의 概念設計

사용후핵연료의 저장캐스크에 대해서 서독에서는 비교적 값이 싸고 제조기간이 짧은 鑄鐵製貯藏캐스크가 이미 개발되어 있으며, 프랑스와 美國에서는 鍛造鋼의 저장캐스크가 개발되어 있다. 이들 저장캐스크는 日本에서 이미 사용한 실적이 있는 輸送캐스크와 큰 차이는 없으며 단지 저장캐스크에는 저장시의 密封性모니터링 機能이 있다는 점이 다르다. 따라서 이와 같은 저장캐스크의 설계에는 개념적으로는 그대로 수송캐스크의 설계를 적용할 수 있다. 그래서 현재 歐美에서 認許可·開發되고 있는 저장캐스크는 저장 뿐만아니라 수송에서도 사용할 수 있는 겸용캐스크로 적용 가능하다고 생각되어 개념설계를 그림 1에 나타내었다. 輸送貯藏兼用캐스크는 각 발전소의 크레인容量이 허용되는 한 되도록 대형인 것이 수송이나 저장의 效率上 有利하다.

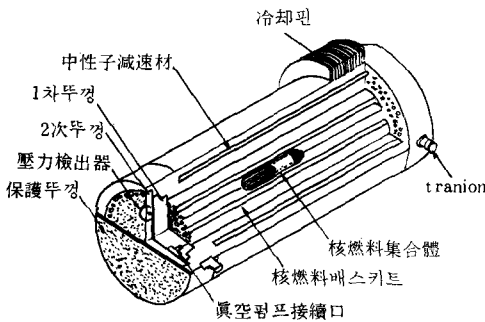
(2) cask收納建物の 概念設計

輸送時에 캐스크는 단독으로도 충분히 방사선 차폐능력을 가지고 있으나, 저장시에는 캐스크를多數集中保管하므로 사이트의 敷地面積 등 입지 조건 사정으로는 캐스크의 收納建物에 相應한 차폐성을 갖도록 할 필요가 있다. 그런데 차폐성을 갖고 있는 건물내에 캐스크를多數收納, 保管하면 캐스크의 분위기가 外氣와 차단되어 버리므로 캐스크를 除熱하도록 냉각성을 갖

〈表 1〉各種貯藏方式의 豫備의 評價結果

評價 카테고리	重點	式				
		濕式 水溝	vault	silos	dry well	cask
經濟性	16	13.9	14.9	13.9	14.9	16.0
安全性	16	13.6	13.2	14.8	15.6	15.4
認許可性	15	15.0	9.0	12.0	12.0	12.0
社會的 반아들 임 可能性	13	12.2	11.1	11.5	11.5	13.0
運轉特性	12	9.7	8.9	9.7	9.7	12.0
技術的特性	11	11.0	9.0	7.5	8.5	10.7
環境影響特性	9	9.0	9.0	9.0	7.5	9.0
保障措置特性	8	7.1	8.0	4.7	4.7	7.5
合計	100	91.5	83.1	83.1	84.4	95.6
評價順位	—	①	③	③	③	①

〈그림 1〉 輸送貯藏兼用캐스크의 概念圖

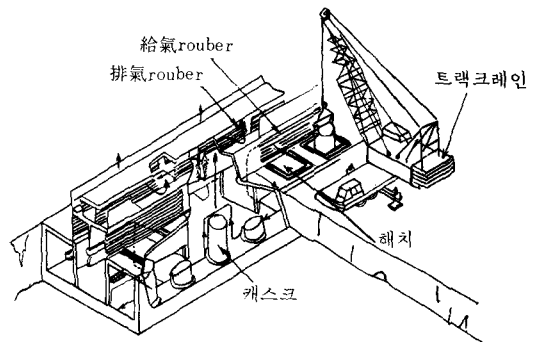


도록 하는 것이 건물에 요구된다. 그리고 이 경우 냉각은 사용후핵연료의 저장기간이 30년 정도가 될 수 있으므로 運轉·保守作業이 최소한이 되도록 自然空冷에 의한 방식이 바람직하다.

캐스크 收納建物에 대해 생각할 수 있는 방식으로는 서독에서 건설된 콘크리트 건물식에 철골스래이트식, 터널식, 지하피트식, 트랜치식, 개별차폐식, bellows house式, 膜構造建物式, 바야지식 등이 있다.

이들 건물방식중 원자력발전소부지내에 예들 들어 250~500MTU 정도의 사용후핵연료를 최대 30년간 캐스크저장할 경우에는 안전성, 특히 차폐성능이나 경제성의 관점에서 트랙크레인을 사용하는 트랜치식이나 개별차폐방식이 유리하다.

〈그림 2〉 트랜치식 概念圖



〈그림 3〉 個別遮蔽式 概念圖

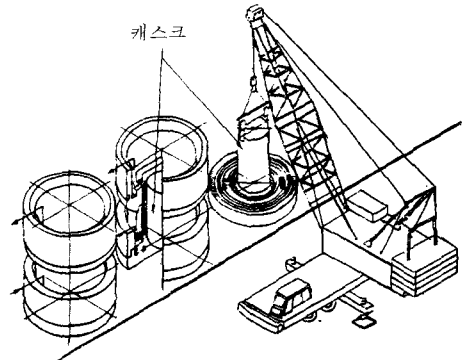
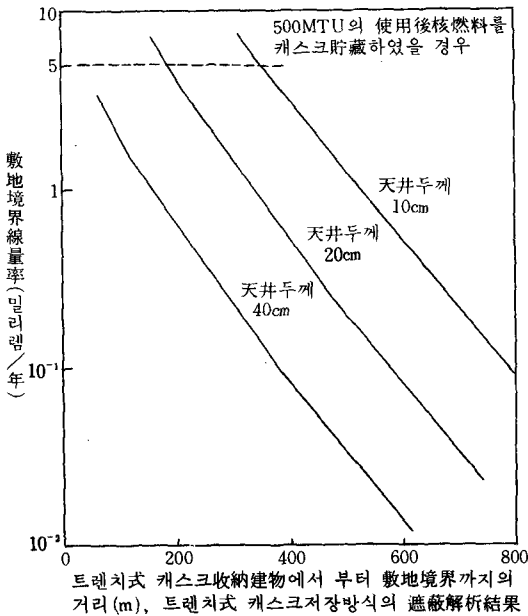


그림 2는 트랜치식의 개념도이다. 트랙크레인의 분 길이나 작업반경의 제약상 캐스크의 保管配列은 두줄의 세로길이가 된다. 이 방식에서 캐스크는 지하부분에 놓여지므로 벽방향의 차폐는 고려할 필요가 없고 天井方向의 스카이라인線量에 대한 차폐만 고려하면 된다. 또 건물의 地表 가까이 있는 給氣rouber로 들어가 캐스크의 주변을 아래에서 위로 상승하여 天井의 排氣rouber로 빠져나가는 공기의 대류에 의해 캐스크는 自然空冷된다.

그림 3은 개별차폐식의 개념도이다. 이 경우 캐스크는 지표면상의 콘크리트板上에 설치되어 1基마다 콘크리트 차폐체로 덮혀진다. 이들 작업은 트랙크레인에 의해 수시로 행해진다. 이 방식에 의하면 임의의 지점에서 캐스크저장이 가능하다. 또 캐스크의 열은 캐스크의 표면을 아래에서 위로 對流하는 공기에 의해 自然空冷된다. 다음에 이들 캐스크저장방식의 안전성을

〈그림 4〉 트랜치식의 경우



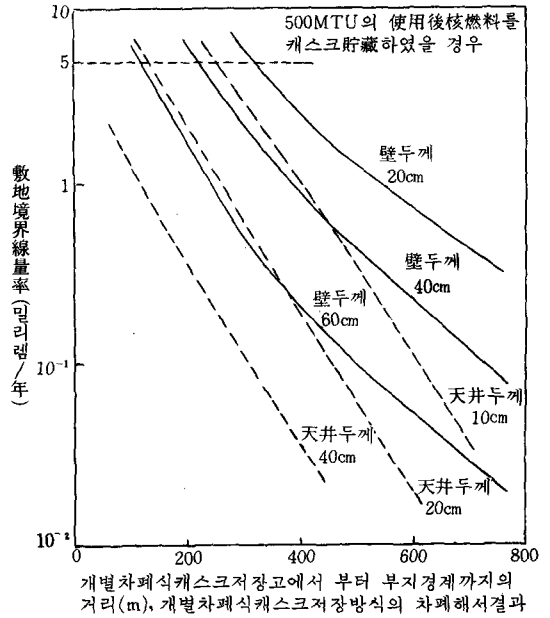
解析에 의해서 평가했는데, 특히 차폐해석과 地震時安全解析의 결과에 대해서 기술한다.

(3) 遮蔽解析

캐스크를 收納하는 건물의 차폐성능을 解析에 의해서 확인하였다. 그림 4는 트랜치식의 경우에 대해서 건물에서 부터 부지경계까지의 거리와 敷地境界線量率과의 관계를 나타낸 것으로서 콘크리트로 만든 天井두께를 파라미터로 하고 있다. 이 경우 使用後核燃料貯藏容量은 500MTU로 하고 있으며 캐스크數는 56기이다. 이 방식의 차폐는 스카이사인에 대해서, 즉 天井두께만을 고려하면 된다. 敷地境界線量率이 5밀리렘/년으로 割當되었을 경우, 건물에서 부터 부지경계까지의 거리가 300미터이면 콘크리트로 된 天井두께는 15cm이다.

다음에 그림 5는 개별차폐방식인 경우의 遮蔽解析結果이다. 이때는 天井두께와 벽두께가 차폐설계상에서 정해진다. 예를 들면, 敷地境界線量率이 5밀리렘/년으로 割當되었을 경우 건물에서 부터 부지경계까지의 거리가 300m이면 콘크리트로 된 벽두께는 30cm, 天井두께는 10

〈그림 5〉 個別遮蔽식의 경우



cm이다.

그리고 어느 건물방식의 경우에도 실제로는 부지경계까지의 거리를 더욱 길게 취한다고 생각되므로 차폐설계상 콘크리트의 두께는 더욱 얇아도 충분하다.

(4) 地震時安全解析

캐스크는 輸送基準(9m 높이 상당의 耐落下衝擊力等)을 만족하고 있으므로 충분한 力學的強度를 가지고 있어서 캐스크收納建物の 耐震基準은 C급으로 설계할 수 있다. 만약을 위해 이 경우의 地震時安全解析을 행한 결과 C급에서 정하는 地震力을 넘는 지진에 의해 건물이 倒壞되어도 캐스크는 건전함이 확인되었다. 즉, 트랜치방식 및 개별차폐방식 각각의 건물에 대해 여러가지의 倒壞모드를 想定했다. 그리고 건물의 지붕이나 벽이 캐스크에 낙하, 충돌하는 경우 캐스크에 주는 충격을 비교검토했다. 그 결과 충격의 정도는 트랜치방식의 경우가 크나, 表 2에 나와있는 것처럼 倒壞에 의해서 캐스크가 받는 衝擊加速度(또는 衝擊力)은 캐스크 자신의 許容衝擊加速度(또는 強度)

에 비해서 충분히 작아 캐스크는 건전함이 입증되었다.

그런데 캐스크수납건물이 倒壞하여 캐스크가 콘크리트 파편에 파묻혔을 경우에는 캐스크 표면으로 부터의 除熱性能이 억제된다. 그래서 이와 같은 때의 熱解析을 행하였던 바, 倒壞後 장시간에 걸쳐서 복구하더라도 캐스크내 사용후 핵연료봉의 온도는 상승하지 않으며 피복관의 파손도 전혀 없음이 확인되었다. 즉, 캐스크 표

(表 2) 트랜치式 캐스크收納建物の 倒壞에 의한 衝擊力評價

建物の倒壞モード		a. 캐스크로의 衝擊加速度 G	b. 캐스크의許容 衝擊加速度 G	安全率 (b/a)
長邊方向	지붕	16	120	7.5
	벽	40	120	3.0
短邊方向	지붕	23	120	5.2

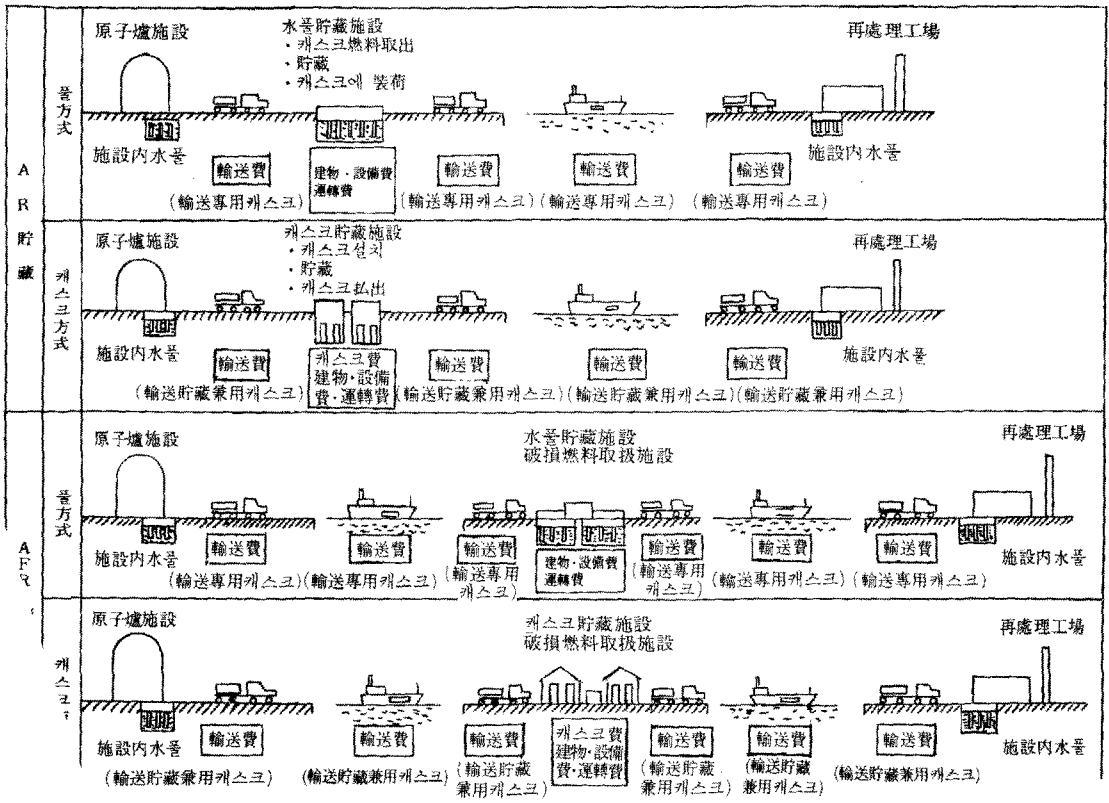
면에서 부터 완전히 재열이 행해 40일이내에 콘크리트 파편을 제거의 除熱性能은 회복되어 사용후핵전성이 유지되는 것이다.

3. 캐스크貯藏方式의 經濟的 檢討

캐스크貯藏방식의 경제성에 대해서 늘 식과 비교, 검토하였다. 경제성비교의 대 폴저장방식을 택한 것은 이 방식이 종래부 자리시설에서 오랫동안 제공사용되어 오고 있으며 충분히 확립된 기술이기 때문이다. 리고 폴저장기술에는 rod consolidation 이 rerocking 등 새로운 폴增容量技術이 채택되지 않은 것으로 하였다.

또 이것들은 사용후핵연료를 재처리할때까지의 중간貯藏에 대한 경제성비교이므로 비용산

(그림 6) 使用後核燃料管理코스트의 費用算出範圍



출의 범위는 그림 6에서와 같이 원자로시설내의 수풀에서 부터의 반출에서 재처리공장내의 수풀로의 반입까지 사이에 발생하는 모든 비용을 포함하는 것으로 하였다. 저장시설의 자본비, 운전비 뿐만아니라 원자로시설에서 저장시설까지의 수송비 및 저장시설에서 재처리공장까지의 수송비도 포함하는 것으로 하고, 이것을 사용후핵연료관리코스트로 하였다.

兩方式의 경제성비교에 있어서 저장시설이 원자력발전소의 시설내에 설치될 경우(AR貯藏)와 저장시설이 원자력발전소부지와는 별개의 부지에 독립적으로 설치될 경우(AFR貯藏)로 나누어서 검토하였다. 前者 AR貯藏의 경우는 같은 부지내의 원자로에서 부터 나온 사용후핵연료만을 저장하면 되므로 비교적 적은 저장용량으로 충분하나, 後者 AFR貯藏의 경우는 각지에 點在하는 원자로에서 부터의 사용후핵연료가 모이므로 비교적 큰 저장용량을 갖게 된다.

케이스스터디로 저장용량을 AR貯藏의 경우 500MTU, AFR貯藏의 경우 3,000MTU를 설정했다. 그리고 저장시설의 건설기간은 3년, 운전기간은 30년으로 하고 또 사용후핵연료의 반입기간은 500MTU의 AR貯藏施設이 5년, 3,000MTU의 AFR貯藏施設이 10년(最大貯藏期間은 모두 30년)으로 했다.

비용견적에 대해서는 캐스크저장시설과 풀저장시설의 개념설계에 따라서 비용을 견적함과 함께 별도로 조사한 歐美各國 저장시설의 경제성평가데이터에 의해 이들의 비용견적을 검토하였다. 이 경우에 문제가 되는 것은 캐스크費를 어디에 포함시키는가이다. 이 케이스스터디에서는 캐스크저장방식의 경우 캐스크費는 수송저장겸용캐스크의 구입비도 되므로 저장시설의 자본비에 포함시켰고, 또 풀저장방식의 경우 캐스크費를 수송비에 포함시켰다.

이와 같은 견적비용에서 사용후핵연료관리코

스트(원자로시설에서 부터 재처리공장까지의 총비용)를 구하게 되는데, 이 경우 우선 저장시설의 건설기간 3년과 운전기간 30년 합계 33년간의 cash flow를 검토하고 각각의 해마다 割當해서 變 사용후핵연료의 저장량으로 나누는 방법(正味現在價值法)에 의해서 사용후핵연료관리코스트를 구했다. 그리고 이때의 割引率은 과거의 金利推移 등을 고려해서 8%로 하고 있다.

AR貯藏, AFR貯藏 모두 캐스크저장방식이 풀저장방식보다 값이 싸지는 정도가 다르다. 즉, AR저장의 경우는 40%나 싸지는 것에 비해 AFR저장의 경우는 10%밖에 싸지지 않는다.

그래서 이와 같은 이유를 명백히 하기 위해 사용후핵연료관리코스트를 구성하는 비용항목마다의 내용을 검토하였다.

(1) 저장시설의 자본비는 캐스크저장방식의 경우 캐스크비가 거의 대부분인데 대해 풀저장방식의 경우는 건물이나 설비의 비용뿐이다. 그러나 AR저장의 경우 두 저장방식의 자본비는 거의 같음에도 불구하고, AFR저장의 경우 캐스크저장방식이 풀저장방식보다 자본비가 비싸게 되어 있다. 이것은 AFR저장의 경우 각지의 원자로에서 부터 크고 작은 여러가지 크기의 캐스크가 운반되어와 단일크기의 캐스크만인 AR저장의 경우보다 단위 kg-U당의 캐스크基數가 증가하여 그만큼 캐스크비도 높아지기 때문이다.

(2) 저장시설의 운전비는 캐스크저장방식의 경우 거의 비용이 소요되지 않음에 대해 풀저장방식의 경우는 풀의 유지관리에 상당한 비용이 발생한다.

(3) 수송비에 대해서는 캐스크저장방식에서는 수송저장겸용캐스크를 사용하므로 수송전용캐스크를 사용하는 풀저장방식의 거의 반의 비용이다.