

原子爐의 디커미셔닝現況

— 技術開發과 計劃 —

1. 原子爐 디커미셔닝 役割

原子力發電플랜트의 중심 장치인 原子爐는 어느 것이나 장래의 어느 時點에서는 運轉壽命을 다 하고 廢止된다. 따라서 放射能을 대량으로 內藏하고 있는 原子爐의 廢止措置를 원활하게 실시하게 하는 것이 필요하다.

原子爐의 壽命은 一般的으로 40年 이 중에서 75% 稼動으로 보아 實質적으로 商業用플랜트에서는 30年으로 생각하고 있다. 研究爐, 實驗爐 등은 사용목적이 끝나거나, 보다 高性能의 原子爐가 出現하면 廢止되는 것이 보통이다.

社會에서 문제가 되는 것은 原子力發電所의 廢止措置인데 廢止에 따르는 解體, 一部解體後의 保管, 解體中 및 後의 安全, 解體廢棄物의 處理處分, 解體에 따르는 汚染除去, 解體코스트 및 解體跡地 등이다.

2. 디커미셔닝 方式

原子爐를 解體하는 경우 全部를 해체하는 경우 외에도 部分的으로 해체하는 경우도 있다. 이들은 다음과 같은 세가지 方式으로 분류되고 있다.

(1) Stage-1(IAEA), Option 1(NEA), Mothballing(美國) - (SAFSTOR로 變更豫定), 密閉管理(日本)

原子爐 1次系統의 流體가 爐室로 새어나오지 않게 密閉하는 등의 方法외에 汚染이 없는 機器를 플랜트에서 제거하는 등 최소한의 해체에 의해서 플랜트를 그대로 보관하는 것 보다 放射線管理를 쉽도록 하여 보관하려는 것이다.

오랜기간(30年程度)을 이와 같은 상태로 두면 管理를 하기 위한 機器가 老朽化하여 그 기기의 更新을 要하는 사태가 일어나며 放射能의 減衰도 그 후에는 적어진다. 따라서 長期保管으로 는 적당하지 못하다.

(2) Stage-2(IAEA), Option-2(NEA), In-place Entombment(美國) - (ENTOMB로 變更豫定), 遮蔽隔離(日本)

原子爐生體遮蔽內에 플랜트의 放射性汚染物質을 해체한 機器를 封込하여 방사능을 완전히 密閉하는 方式이다. 長期間 保管할 수 있으나, 일종의 방사성폐기물 처분상태와 같아져서 原子爐跡地利用에 큰 制約을 받는다. 保管은 매우 쉬우므로 방사능을 減衰시키는데 좋아서 그대로 通常의 廢棄物이 될때까지 보관하려는 생각도 있으나, 長半減期의 방사능은 현재의 추정으로 그렇게 되는것이 어려울 것이라는 보고도 있다.

(3) Stage-3(IAEA), Option-3(NEA), Removal of Radioactive Components and Lisma-

〈表 1〉 디커미셔닝 방식의 分類에 대한 提案

Regulatory Guide 1.86 (June 1976)	NUREG/CR- 0130 (PWR, 1978)	NUREG/CR- 0672 (BWR, 1980)	NUREG-0586 (Draft EIS) (1981)	ANSI/ANS- 15.10 (Res. Reactors) (Sept. 1981)	IAEA-179 (1975)	OECD-NEA (1980)	NUREG-0278 NFRP (1977)
Mothballing	Safe Storage Custodial Safe Storage (Layaway) Passive Safe Storage (Mothballing) Hardened Safe Storage (Temporary Entombment)	Safe Storage Custodial Safe Storage Passive Safe Storage Hardened Safe Storage	NO ACTION SAFSTOR	SAFSTOR	Stage-1	Option-1	Layaway Protective Storage
In-Place Entombment	Permanent Entombment	Entombment	ENTOMB	ENTOMB	Stage-2	Option-2	Entombment
Removal of Radioactive Components and Dismantlement Conversion to a New Nuclear System or a Fossil Fuel System	Dismantlement	Dismantlement	DECON	DECON	Stage-3	Option-3	Dismantlement

ntlement(美國) - (DECON으로 變更豫定),
解體撤去(日本)

原子爐를 解體撤去하고 放射性物質을 제거한 후 사용에 제한이 없는 상태로 한다. 디커미셔닝에서 跡地利用의 觀點으로 바람직한 것이 되리라 생각된다.

(4) Conversion to a New Nuclear System or a Fossil Fuel System(美國)

原子力플랜트를 일부 해체하고, 나머지 부분은 새로운 原子力플랜트 또는 火力플랜트로 다시 이용하는 방법으로서 美國에서만 분류되고 있다. South Dakota州 Sioux Falls에 있는 Pathfinder 核過熱輕水爐(19萬 KWth)의 原子爐를 Mothballing하여 터빈系統을 남겨서 火力發電所로 한 例(1972年)가 있는데, 費用은 370만달러가 소요되었다.

디커미셔닝 방식에 대한 분류는 지금도 여러 가지로 論議되고 있는데, 그 例를 表1에 나타내었다.

3. 原子爐의 디커미셔닝狀況

40年 以上 原子力開發과 實施設을 건설해 온 미국은 20여년전부터 디커미셔닝을 실시해오고 있는데, 이에 비해 다른 나라의 디커미셔닝例는 그다지 많지 않다.

그러나 美國의 原子爐 디커미셔닝에서도 大規模 商業用 原子力發電플랜트에 대해서는 아직 실시되고 있지 않으며, 實驗用發電爐 등 소규모의 것들이다.

(1) 美國에서의 디커미셔닝例

表2에 美國의 試驗爐 및 小型發電爐級 디커미셔닝의 主된 實施例를 나타내었다. 廢止된 原子爐는 全美國에서 研究爐 등을 포함하면 70基 정도 된다.

현재 미국이 原型爐級에서 실제로 디커미셔닝하려는 것은 Pennsylvania州 Pittsburgh 교외에 있는 Shippingport發電所(PWR, 60→72 MWe)이다. 그 외에 解體가 고려되고 있는 것은 Big Rock Point, Dresden-1, Indianpoint, Yan-

〈表 2〉美國의 發電爐 等 디커미셔닝의 例

原子爐名	爐型	出力 MWth	廢止期	方式
HRE-2	均質爐	1	'54	3
PM-2A	PWR	10	'64	3
CVTR	PHWR	65	'68	1
Hallam	SGR	256	'69(3年要)	2
Pigua	OMR	45	'69(3年要)	2
BONOS	BWR	50	'70	2
EBR-1	FBR	1.2	'73(記念館으로 改 造, 3의 部類)	
Saxton	PWR	23.5	'73(2.5M\$要)	1
SEFOR	FBR	20	'73	1
Elk River	BWR	58	'74(3年要)	3
Fermi 1	FBR	200	'75(約 7M\$要)	1
Peach Bottom-1	HTGR	115	'77(2年余要)	1
VBWR	BWR	50	'63에 停止)	1
SRE	SGR	20	'74~'82	3

kee-Row 및 Hombolt Bay 등의 發電플랜트인데, 구체적으로 계획이 수립된 것은 아니다.

(2) 各國(美國以外)의 디커미셔닝例

英國에서는 Magnox型 原子爐가 26基 있으며 대부분이 수명의 반이상을 넘었다고 보여지는데, 具體的인 解體計劃이 있는 것은 아니다. 다만, 디커미셔닝의 케이스스터디가 추진되고 있다.

WAGR이나 Dragon Project의 HTGR, DFR 및 SGHWR은 停止된채로 있으며 겨우 WAGR의 解體計劃이 立案되었을 정도로서 英國의 小型 實驗用 發電爐에서는 解體의 實作業에 대해서 그다지 진척되고 있지 않다.

西獨은 原子力船 OTTOHAHN號(38MWth, PWR)를 1979년까지 10年半 運航한 후 1982년에 Hamburg港에서 原子爐의 解體撤去를 실시하여 디젤엔진으로 바꾸어 船體를 다시 사용하고 있다. 發電爐는 소규모의 것, KAHL(BWR, 약10MWe), HDR(核過熱BWR, 100MWth), KKN(HWGCR, 316MWth), Gundremmingen KRB-1(250MWe) 등이 停止狀態로 있어서 解體計劃이 추진되고 있으나 實際作業에는 들어가고 있지 않다.

프랑스는 約 10基의 原子爐를 디커미셔닝했는

데, 거의 대부분이 CEA所屬이고 EDF所屬 發電爐인 Chinon-1(Magnox型, 300MWth)은 密閉管理로 記念館이 될 것이다. 또한 FBR인 Rapsodie의 解體가 주목을 받고 있다.

캐나다는 研究爐의 一部(原子爐容器 等)를 解體, 交換하고 있는데(Chalk River의 NRX, NRU 및 Pickering의 原子爐內壓力管 등) 디커미셔닝이라고 할 수는 없을 것이다.

日本에서는 臨界實驗裝置 3基의 解體와 JRR-1의 密閉管理(記念館), HTR의 해체 등 研究爐關係는 있으나, 動力爐로서는 JPDR(BWR, 12.5 MWe)이 디커미셔닝(解體撤去)의 대상이 되어 이를 위한 技術開發과 준비가 추진되고 있다.

4. 放射能 인벤토리의 評價

放射能이 있으므로 原子爐의 디커미셔닝은 일반 플랜트와 매우 다르기 때문에 방사능의 인벤토리가 어느 정도, 어느 곳에, 어떤 核種이 있는가를 제일 먼저 알아야 할 필요가 있다. 실제의 원자로에서는 사전에 實測을 하는데 모든 부분을 측정할 수 없으므로 계산에 의한 추측과 함께 방사능의 인벤토리를 評價하게 된다.

이와 같은 관점으로 각국에서 技術開發이 추진되고 있다. 이 評價에 필요한 정보는 爐心에 관해서 出力分布, 燃燒度分布, 核分裂生成物の 蓄積量 等の 데이터를 상세하게 알 필요가 있는데, 일반적으로 이와 같은 데이터는 풍부하다.

그러나 爐心外의 反射體나 遮蔽體外에 실제로 차폐가 되어 있는 shroud, 壓力容器, 爐內 構造物 및 제트펌프 등에 관한 核的 데이터는 많지 못하다. 誘導放射能은 中性子束의 계산에서 부터 시작된다.

(1) 誘導放射能의 計算

일반적으로 爐心의 中性子束 變化는 완만하며 擴散理論에 의해서 구해지는데, 遮蔽體 等の 中性子束은 非等方性散亂의 효과를 고려한 輸送理論에 의해서 구할 필요가 있다.

原子爐의 中性子分布 등은 일반적으로 행해지는 三次元核熱水力計算에 의해서 구하는데, 이 계산에서는 燃料集合體를 하나의 셀로 취급하므로 이 셀內의 中性子束은 상세하게 구해지지

못하며 2次元擴散이거나, Sn計算에 의한 필요가 있다.

遮蔽體의 中性子束分布은 Sn法이나 Monte Carlo法에 의한다. 이 數值計算에 있어서 큰 체적, 急勾配의 中性子束分布 및 중성자 에너지 변화의 다양화에 의해 계산시간이 길어진다. 일반적으로 反射體近傍의 中性子束은 燃燒가 진행됨에 따라 40%정도 변화를 하므로, 이 효과를 고려해야만 한다.

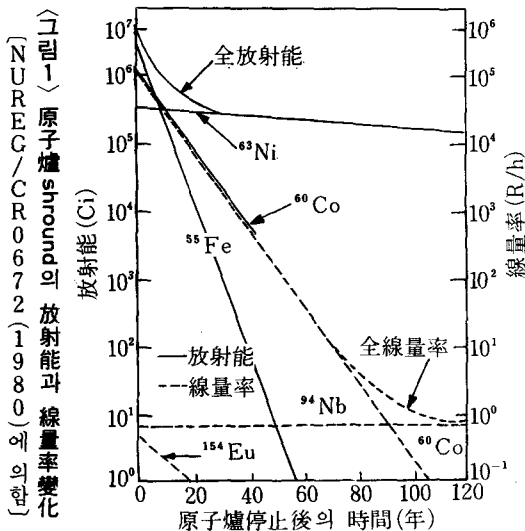
大型發電플랜트에서는 5回 정도 燃料交換을 하면 平衡爐心이 되어 半徑方向의 중성자속은 爐心을 均質化하여 一次元體系로 나누어서 계산하는 것도 概算일때는 할 수 있다.

앞에서의 計算方法을 改良하여 빨리, 精度가 높게 放射能 인벤토리를 구하는 研究가 추진되고 있다. 이와 같이 해서 계산을 110萬KW級 BWR에 대해서 試算한 결과를 보면, 방사능 인벤토리의 95% 정도가 爐心の shroud에 있으며, 3% 정도가 制御棒에 있는데 全體로는 약 7×10^6 Ci 정도가 된다는 試算例가 있다.

40年 運轉, 75% 稼動 原子爐 shroud의 誘導 放射能과 爐停止 後의 核種에 의한 減衰狀態를 그림 1에 나타내었다. 實例로는 美國 Elk River 爐 解體後의 測定이 있는데 表3에 나타내었다.

(2) 1次冷却系統의 汚染量

爐型이나 運轉狀況에 의하여 一次系統內의



〈表 3〉 美國 Elk River 爐의 放射能

공 포 넨 트	放射能 (Ci)	最大接觸線量 (R/h)
内部構造物	770	2,800
上部shroud	770	2,800
下部shroud	35	175
爐心과 shroud板	2,370	8,000
爐心支持台	100	150
内部熱遮蔽	3,090	1,000
shadow遮蔽	2,330	3,000
給水分配링	75	60
壓力容器	1,110	115
外部熱遮蔽	75	1
計	9,955	

(DOCKET 112에 의함)

汚染量은 여러가지로 달라지는데, 예를 들면 BWR에서는 再循環水系配管의 表面線量은 1년에 100 mr/h 정도가 된다. 이것은 1차계통내의 부식생성물이 爐心內에 부착되었다가 剝離 등을 일으켜서 다시 배관내에 부착함으로써 이루어진다. 輕水爐에서는 爐心에서의 부식생성은 적고 配管系統이 주인데 溶存酸素濃度 등에 크게 영향을 준다. 그리고 BWR에서는 燃料被覆管에 1~30 mg/cm² 정도, PWR에서는 0.5~1mg/cm² 정도가 부착된 實例가 있다.

이들 부착물의 放射性核種은 ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁵⁹Fe 및 ⁵⁴Mn 등인데, 방사능으로 모든 系統을 합하면 수천 Ci 정도로 추산된다.

(3) 放射化와 汚染의 測定

原子爐의 디커미셔닝作業에서 문제가 되는 방사선은 α線, β線 및 γ線이다. 放射能을 갖고 있는 부분을 샘플링하여 이들 방사선을 내는 核種을 化學分析하는 방법과 原子爐의 狀態 그대로 실시하는 非破壞計測에 의한 방법 두가지가 있다.

5. 디커미셔닝의 計劃과 實施

(1) 計劃

계획에서 기본적으로 고려를 필요로 하는 것은 1) 作業者의 안전, 2) 周邊公衆의 안전과 환

경보전, 3) 放射性廢棄物의 적절한 처분 등 이다. 그리고 소정의 기간내에 되도록 코스트를 낮게 해서 실시할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 放射能 인벤토리를 고려해서 디커미셔닝 방식을 정하며, 작업순서를立案하고, 體制를 검토하고, 오염이나 해체에 소요되는 機器를 준비하며, 安全管理方法을 결정하고, 解體廢棄物의 대책을 수립하는 것이다.

이와 같은 것들은 爐型, 容量, 使用狀態, 廢棄物의 處理處分方法에 따라 다르므로 케이스 스터디가 필요하다. 이 스터디는 各國에서 모델을 정하여 그 상세한 검토가 행해지고 있다. 특히, 미국에서는 NRC가 民間에 委託해서 행정면의 필요에서 각종의 검토가 행해져 왔다. 이들은 NUREG의 기호를 붙인 문헌으로 발표되고 있다.

大型爐에서는 준비에 약2년, 解體作業에 4년 정도를 대체로 잡고 있는데 建設作業과 期間的으로는 그다지 변하지 않는 것 같다.

(2) 汚染除去

作業者의 방사선방어 입장에서 機器의 오염에 의한 피해를 적게하기 위해 解體作業前에 오염의 제거가 행해진다. 그러나 遠隔操作에 의한 해체나 解體物의 처리가 용이한 곳은 오염 제거가 필요없으며, 解體物을 오염제거하면 다시 이용 가능한 것은 除染이 행해진다.

다만, 오염제거를 위해서 새로 除染用設備, 예를 들면 藥劑탱크라든가 除染廢液탱크 등 외에도 廢液을 처리하고 거기서 생기는 放射性物質의 處理處分을 고려해야만 한다. 따라서 되도록이면 除染을 적게 하는 것이 상책이다.

汚染除去方法에는 化學除染, 機械的物理的除染 및 物理化學的除染(電解研磨) 등이 있는데, 除染係數가 큰 것만이 좋은 것은 아니다. 除染廢液의 처리처분이 그로 인해서 큰 부담이 되면 의미가 없어진다. 즉, 汚染除去란 原子爐系에서 다른系로 방사성물질이 옮겨가는 것이지, 방사성물질이 소멸된다는 것이 아니다. 이와 같은 것들을 기반으로 해서 汚染除去法의 기술개발이 추진되고 있다.

(3) 콘크리트構造物의 解体

콘크리트 구조물은 原子爐플랜트에 대단히 많이 있고 또한 일반적인 건축물 보다 철근이 훨씬 많이 사용되고 있는데, 이것을 포함한 콘크리트구조물을 해체해야 한다. 한편, 바닥 등은 광범위하게 조금씩 浸透하고 있어서 방사능으로는 큰 것이 아니며, 生體遮蔽도 原子爐容器 가까이 것은 방사능이 비교적 크다고 할 수 있으나, 外側에서는 문제가 되지 않을 정도의 放射能이다.

以上에서 放射能量은 적음에도 불구하고 解體에 의해 나오는 廢棄物量은 다량이 되고 또한 해체작업 그 자체도 통상 콘크리트구조물의 해체보다 훨씬 일이 더 많을 것이다. 따라서 방사능이 있다고 보여지는 곳과 방사능이 문제가 되지않는 곳을 구분하여 각각에 적합한 解體作業과 폐기물의 처리처분방법을 고려하는 것이 좋을 것이다. 이와 같은 方向에서 현재 技術開發이 추진되고 있다.

(4) 鋼構造物의 解体

原子爐의 主體를 이루고 있는 것은 鋼構造物이다. 따라서 誘導放射能이 높고 系内部는 오염되어 있다. 그래서 解體機器는 高放射線下에서는 원격조작에 의해야만 한다. 그러기 위해서 切斷機의 支持機構位置決定, 移動速度의 조정 등 切斷機以外의 사항도 크게 고려해야 하며 또 절단 등에 따르는 粉塵 또는 슬러지 등의 處理處分을 고려해야 한다.

특히, 粉塵은 필터를 사용하는데, 이 필터가 자주 막히므로 2대의 필터를 교대로 바꾸어가면서 사용해서 停止中에 1基의 필터를 교환한다는 것이 고려되고 있다.

만약, 解體廢棄物의 이동이 가능하면 切斷을 대강해서 切斷線의 길이를 짧게 하는 것이 解體作業의 코스트 低下에 크게 영향을 준다. 그래서 美國의 Shippingport PWR의 해체에 있어서는 原子爐容器를 절단하지 않고 그대로 배에 실어 파나마運河를 통과해서 西北海岸에서 부터 Hanford의 廢棄物處分場으로 운반할 계획으로 되어 있다. 이와 같은 것들에 의해서 放射性物質의 輸送容器를 위시해서 수송방법의 기술개발이 필요하게 되어 검토가 추진되고 있다.