

# 原子爐의 디커미셔닝과 技術開發

## — 콘크리트構造물의 解體技術 —

廢止措置가 취해지는 原子力發電所의 大規模 철근콘크리트구조물을 해체철거하기위해 필요한 기술은 일반 철근콘크리트구조물 해체기술의 延長線上에 있다고 할 수 있으나, 原子力施設特有的의 기술적 문제가 있다. 다음은 輕水爐를 對象으로 原子爐本體周邊의 放射化콘크리트구조물의 해체기술, 周邊技術 및 放射性汚染콘크리트구조물의 除去技術이다.

### 1. 解體對象物

原子力發電所에는 원자로건물, 터빈건물, 방사성폐기물건물 등 여러가지의 구조물이 대규모 철근콘크리트구조물로 設置되어 있다. 특히, 原子爐建物は 일반건물에 비해 ① 철근의 직경이 굵고 치밀하게 配筋되어 있다, ② 건물의 形狀은 원형부분이 많고 柱梁의 배치가 불규칙하며 壁式構造와의 組合 등 특수하다, ③ 콘크리트의 強度가 크며 構造體의 斷面이 두껍다, ④ 機器, 配管 등의 지지를 위해 埋込金屬物, anchor bolt가 많다 등의 구조적 특징이 있다. 또한 原子爐施設特有的의 문제로 ① 原子爐 運轉中中性子照射에 의해서 爐心近傍의 철근콘크리트가 放射化되어 있다, ② 방사성물질에 의해서 오염된 콘크리트구조물이 있다 등의 문제점을 들 수 있다.

현재 우리나라에서稼動中인發電用 原子爐는 대부분이 加壓水型(PWR) 輕水爐인데, 爐의 출력, 구조, 규모 등이 다르나 그 대표적인 예로서 그림1에 PWR 原子爐格納施設과 放射化領域의 概略圖를 나타내었으며, 이들 원자로시설의 콘크리트구조물을 해체하는데 있어서 특히 검토가 요구되는 對象部位의 概要를 기술한다.

#### (a) PWR 生體遮蔽壁

下部는 內徑 약 5m의 円筒形, 上部는 內徑 약 8m의 8角形으로 철근이 상당히 치밀하게 들어 있는 철근구조물인데 內面은 스테인레스鋼板 또는 일반 鋼板으로 라이닝되어 있다. 벽의 두께는 下部에서 약 3m, 上部는 약 1.5m이다. 內面부터 약 60cm까지가 放射化領域으로 고려되며, 70cm정도부터 外側은  $10^{-4}\mu\text{Ci/g}$ 以下라고 생각하고 있다.

#### (b) BWR 生體遮蔽壁

직경 약 35m, 높이 약 40m, 두께 약 190cm의 円錐形 철근콘크리트 구조물로 原子爐建物の 주요구조부위를 형성하며, 철근은 高密度로 配筋되어 있다. 鋼板製의 1次格納容器(PCV)와의 사이에 약 50mm의 공간이 있다. 放射化의 정도는 內面の 淺層部가  $10^{-4}\mu\text{Ci/g}$ 程度이다.

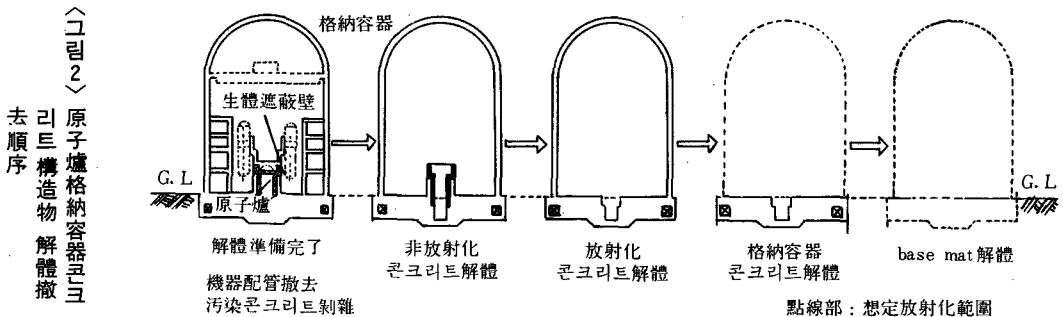
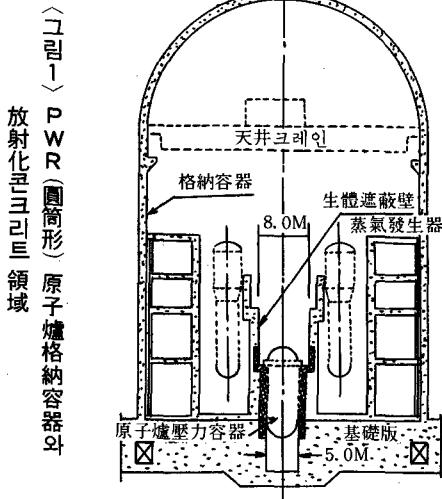
#### (c) BWR 原子爐遮蔽壁

직경 약 10m, 높이 약 15m, 두께 약 60cm의 円筒形構造物로서 두께 30~45mm의 鋼板外殼中

에 콘크리트 또는 重모르타르가 充填되어 있다. 방사화의 정도는 原子爐의 출력, 운전시간, 정지후의 냉각시간 등에 의해서 다르나, 콘크리트 구조물 가운데서는 방사화의 정도가 가장 높으며( $10 \sim 10^{-2} \mu\text{Ci/g}$  程度), 방사화콘크리트에 포함되어 있는 방사성핵종의 주된 것은  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Co}$  등이다.

(d) BWR 原子爐壓力容器페디스틀

직경 약10m, 높이 약24m, 두께 약170~200cm의 円筒形으로 원자로압력용기(RPV) 및 원자로 차폐벽을 지지하는 高密度配筋의 철근콘크리트구조물이다. 内外面 모두 鋼板라이닝이 되어 있는 例가 많다. RPV에 面하는 側의 일부는  $10^{-4} \mu\text{Ci/g}$ 程度 放射化되어 있을 가능성이 있다.



## 2. 解體工法

### 2.1 解體順序

建物別 解體順序는 시설해체중에 이용하는 機器系統이 있는 건물은 최종해체 그룹으로 하며, 非放射性建物(PWR의 터빈건물 포함)의 해체를 먼저 하고 이어서 방사성오염이 적은 건물(BWR의 터빈건물 포함), 그다음 原子爐建物, 마지막에 廢棄物處理建物の 순서로 해체를 진행한다.

解體에 있어서 특히 문제가 되는 原子爐建物の 해체에 대해서 概要를 기술하겠다. 콘크리트 구조물의 해체는 機器, 配管類의 철거가 끝난 후 높은 곳에서 차례로 낮은 곳으로 진행 하는 것이 일반적이나, 放射性物質의 환경으로의 방출을 관리하기 위한 방호울타리로 建物外壁을 남겨두고 内部構造物의 해체를 先行시킨 다음 外壁을 해체하는 방법이 일반적이다. 그림 2에 PWR 原子爐建物の 解體順序例를 나타냈다.

### 2.2 放射化콘크리트의 解體

원자로시설 특유의 문제인 爐本體周邊의 방사화콘크리트구조물의 해체에 대해서 기술하겠다.

#### (1) 블록狀切斷解體方式

원자로 주변의 차폐콘크리트는 그 전부가 방사화되어 있는 것이 아니고, 爐心에서부터 멀수록 방사화의 정도는 낮다. 콘크리트구조물을 해체할 경우 放射性廢棄物量을 저감시키기 위해 방사능 레벨에 따라 中, 低, 極低레벨 방사성폐기물과 일반폐기물로 구분하여 처리·처분을 하든가, 해체폐기물의 수송, 보관면에서 -

定形狀의 블록으로 해서 해체하는 것이 容積的으로 유리하다. 이를 위해 콘크리트구조물을 블록狀으로 剝離, 切斷하는 방식을 취한다.

블록狀으로 절단하는데는 다음과 같은 세 종류의 방법이 고려되는데 라이닝鋼板, 콘크리트, 철근을 하나의 블록으로 해체할 수 있는 工法을 선정할 필요가 있다.

(a) 機械的研削法, 레미트法, 火炎제트法, 研磨제트法 등을 사용해서 遮蔽體 內面側에서 부터 소정의 간격, 깊이의 格子狀 슬리트를 표면에 대해서 수직으로 자르고, 슬리트에 機械的 췌기, 靜的破碎劑 등을 넣어서 接續部의 콘크리트에 굴곡과괴를 일으켜 블록을 잘라낸다.

(b) 앞의 방법으로 콘크리트의 접속부를 굴곡과괴로 분리시키는 대신 차폐체의 上面側에서부터 다이아몬드드릴 垂直孔을 랩시키거나, 연마제트법 등으로 接續部를 절단하여 블록을 잘라낸다.

(c) 앞의 (a)에서와 같이 格子狀 슬리트를 表面에 대해 수직방향으로 잘라내는 것이 아니고 背面의 접속부가 남지않게 비스듬하게 溝切하여 3角筒에 가까운 형상의 블록을 溝切만으로 잘라낸다.

## (2) 破碎解體方式

解體廢棄物을 방사능레벨에 따라 분류하는 것은 상당히 어려우나, 工期短縮이나 경제성의 면에서 유리한 방식으로 原子力施設의 해체실적도 많다. 遮蔽콘크리트의 內側에서부터 破碎하는 경우와 外側에서 부터 破碎하는 경우가 있다.

(a) 적당한 간격, 깊이의 구멍을 뚫고 爆藥類, 콘크리트破碎器, 靜的破碎劑 등을 裝填하여 콘크리트를 破碎한다. 노출되는 철근, 鋼板은 산소아세틸렌법, 플라즈마마크법, 기계적절단법 등에 의해 遠隔切斷한다.

(b) Giant breaker, 壓碎機 등 機械的破碎機를 사용해서 콘크리트를 破碎하고, 노출된 鐵筋, 鋼板은 前記의 방법으로 원격절단한다.

放射化콘크리트의 해체에는 일반 콘크리트구조물의 解體工法, 機具中에서 두종류 이상을 병용할때가 많으며, 解體對象部位에 따라 적절한 것을 선택하게 된다. 원자로 주변의 차폐체에 존재하는 強固한 철근콘크리트는 中性子照射에 의해서 방사화되어 있다. 이 部位의 解體에는 ① 強固하고 거대한 구조물을 보다 능률적으로 해체할 수가 있는 것, ② 遠隔操作性이 우수한 것, ③ 오염의 확산, 즉 먼지의 발생이나 廢水 등에 의한 2次汚染의 발생을 방지할 수 있는 것, ④ 放射性廢棄物의 減容化를 도모할 수 있는 것 등의 조건을 중시해서 공법을 선택한다.

## 2.3 汚染콘크리트의 除去

原子力施設에는 표면이 방사성물질로 오염되어 있는 부위가 있다. 오염이 表面에만 국한되어 있을때도 있으나, 콘크리트는 多孔質이고 균열이 발생하기도 쉽기 때문에 방사성물질이 내부로 침투되어 있을 경우가 있다.

이들 汚染콘크리트의 제거공법은 ① 오염이 표면뿐이던가 또는 침투가 얇을 때는 액체, 고체의 噴射, 研磨研削機具에 의해 콘크리트의 표면을 긁어내든가, 벗겨내는 방법, ② 침투가 깊을때는 機械的, 熱的, 電氣的으로 表層剝離할 수 있는 解體工法에 가까운 방법 등이 사용된다. 汚染콘크리트의 除去工法 선정에 있어서는 오염레벨, 오염의 침투깊이, 오염부위, 작업장소, 공기, 코스트 등 여러 요인에 적합하도록 하는 공법으로 먼지나 廢水에 의한 2차오염의 방지, 작업자의 피폭방어를 할 수 있는 공법임이 요구된다.

## 3. 周邊技術

### 3.1 遠隔操作技術

放射化 콘크리트構造物의 해체작업에는 작업자의 피폭저감을 위해 가능한한 원격조작에 의해서 작업을 할 수 있는 것이 희망되고 있다. 放射化콘크리트構造物의 解體用으로 실적이 있

는 원격장치는 적은데, 현재 그 開發이 추진되고 있다. 콘크리트構造物機械의切斷試驗裝置는 原子爐 캐비티내 크레인에 부착시켜서 캐비티의 벽을 이용해서 支持棒으로 장치를 고정한다. 다이아몬드커터 콘크리트벽을 가로, 세로 방향으로 원격조작으로 전달하는 장치이다

### 3.2 集塵技術

放射化 또는 汚染콘크리트의 해체나 제거작업에는 破碎片과 浮遊粉塵의 回收(集塵)技術이 방사능오염의 확산방지와 작업자의 피폭방어의 관점에서 중요하다.

粉塵의 捕集方式을 原理的으로 대별하면 機械式과 電氣式으로 나누어지는데, 각각의 방식에는 粉塵을 건조한 상태에서 捕集하는 乾式과 물을 사용하는 濕式이 있다. 장치의 형식도 cyclon, filter, scraper 等 多種多樣的 것이 實用化되어 있다.

해체작업에 사용할 경우 發生粉塵의 量, 粒徑, 性狀이나 風量, 耐久性, 保守管理性, 經濟性 등을 평가해서 放射性粉塵에 대해서 최고의 捕集效率를 얻을 수 있도록 몇종류 형식의 장치를 조합시켜서 각각의 解體工法에 적절한 시스템을 설계할 필요가 있다. 그림3에 放射性콘크리트의 해체에 이용할 수 있는 集塵시스템의 概念圖를 나타냈다. 이 시스템은 小破片, 粗粒子를 제거하는 사이클론式分離器, 粗필터 및 放射性微細粉塵을 제거하는 HEPA필터와 吸引用블로워어로 구성된다.

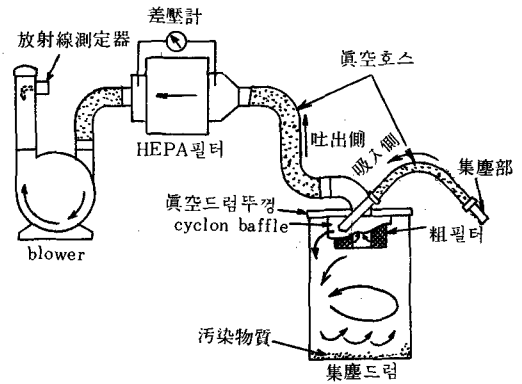
### 3.3 搬出技術

放射化 또는 汚染콘크리트構造物의 해체에 의해서 발생하는 폐기물의 반출방법에 대해서 기술한다.

#### (1) 콘크리트研碎片, 슬러그 등의 搬出方法

큰 破碎片이나 슬러그덩어리에 대해서는 集積, 積込에 의한 반출이 일반적이다. 많은 종류의 掘削機械와 실는 기계가 각종 작업을 할 수 있으며 또 遠隔化되어 있는 것도 있다. 解體

〈그림3〉 眞空式集塵시스템 概略圖



破碎片은 廢棄物輸送容器에 넣어서 搬出한다. 작은 破碎片에 대해서는 集塵시스템을 사용해서 폐기물용 드럼에 회수하여 搬出한다.

#### (2) 鋼材切斷片的 搬出方法

철근 및 라이닝鋼板 等の 鋼材切斷片의 반출 방법은 콘크리트 破碎片의 반출방법에 따르는데 集積, 積込을 행한다.

#### (3) 鋼板, 콘크리트複合構造物 블록의 搬出方法

원자로 차폐벽 등의 해체에는 블록狀으로 절단하는 경우가 있다. 이 블록을 반출하기 위해 블록에 미리 들어올리는 구멍이나 또는 들어올리는 기구를 이용해서 天井크레인 등의 揚重機를 사용하여 수송용기에 收納한다. 원격조작으로 블록을 着脫할 수가 있으며 重量, 크기에 따라서는 專用的 들어올리는 기구를 설계할 필요가 있다.

## 4. 解體實施例, 檢討例

### 4.1 Elk River爐(EER)의 實施例

EER은 沸騰水型動力試驗爐로서 發電爐로서는 세계 최초로 解體撤去되었다. 原子爐格納容器內 콘크리트構造物의 철거순서를 그림4에 나타내었는데, Phase 1에서 Phase 4의 네단계로 나누어서 生體遮蔽壁의 上部에서 下部로 진행되었다.

먼저, 上部生體 遮蔽體, 主床版, 原子爐캐비

티주위의 약60cm두께의 放射化, 콘크리트, 殘存生體遮蔽壁, 地下室汚染床의 순서로 爆藥으로 破碎解體한 후 積납용기의 胴部, 크레인가더, 円筒壁의 순서로 鋼球로 해체하고 地下室殘部, 基礎版은 폭약으로 해체하였다.

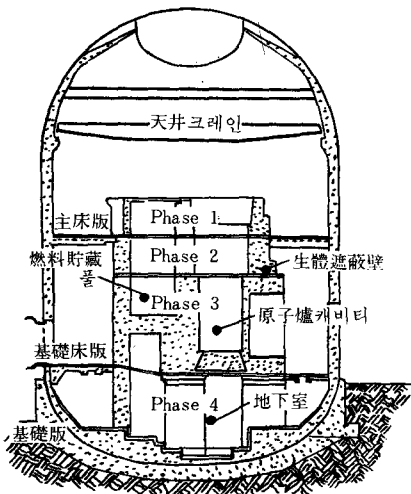
破碎에는 다섯종류의 高速爆藥이 特性에 따라 나누어서 사용되었다. 發破에 의한 破碎片의 飛散防止를 위해 고무製防爆매트가, 또 粉塵의 발생을 저감시키기 위해 噴霧裝置가 사용되었다.

원자로캐비티주변 放射化콘크리트의 해체는 爆破가 약간의 時間差로 進行되도록 제어할 수 있는 릴레이爆破法에 의해서, 캐비티의 내측에서부터 외측으로 향해서 同心円狀으로 콘크리트를 剝離하였다. 主床版의 해체는 切斷豫定位置의 콘크리트에 구멍을 뚫고 폭약을 장전해서 支持梁部를 爆破切斷하여 블록化한 床版을 크레인으로 철거했다.

#### 4.2 나트륨 實驗爐(SRE)의 實施例

1982년에 原子爐廢止措置가 완료된 SRE는 나트륨冷却, 黑鉛減速型實驗用發電爐이다. 콘크리트구조물을 포함한 原子爐本體는 완전히 해체철거하고, 原子爐建物은 방사성오염을 除染하여 非放射性實驗施設로 轉用했다.

〈그림 4〉  
ERR 原子爐格納容器內 콘크리트  
構造物의 撤去順序



SRE의 爐本體, 冷却시스템, 燃料 저장 셀 등은 地表下에 매설되어 있으며, 지하실의 벽, 바닥이나 주변의 岩盤等 상당한 범위의 오염이 있었다. 爐本體의 해체는 爐周圍의 흙을 굴착하여 支柱를 설치한 후 hydraulic hoeram이라고 불리는 油壓式backhoe와 ram의 조합된 기계로 생체차폐콘크리트를 바깥부터 벗겨냈다.

放射化領域은 內面에서부터 약25cm정도로 콘크리트를 방사성과 非放射性으로 구별하여 대량으로 解體撤去하는 데는 이 工法이 爆破工法보다 우수했다. 노출된 放射化鐵筋은 油壓式커터로 절단했고, 라이닝鋼板은 마지막에 細斷해서 반출했다.

#### 4.3 海外에서의 檢討例

美國原子爐規制委員會(NRC)는 原子力施設의 廢止措置에 관한 조사에서 PWR 및 BWR의 해체에 대해서 보고하였다. 이 보고서에서 放射化콘크리트의 해체는 爆破工法이 다른 공법에 비해 유리하다고 하고 있다. 放射化된 라이닝鋼板은 매니플레이터에 부착된 산소아세틸렌로치로 절단한다.

西獨에서는 KKN을 모델케이스로 해서 해체를 계획하고 있다. 生體遮蔽壁은 內面에서부터 약40cm까지가 방사화영역으로 생각되는데, 安全하게 60cm 두께를 방사성콘크리트로 고려해서 제거한다.

解體工法으로는 계획당초에는 遠隔操作에 의한 回轉매니플레이터에 다이아몬드 커터를 부착시킨 장치를 사용해서 생체차폐벽 내면에 가로, 세로 방향으로 금을 긋고 背面部에 수직의 連續코어보링을 하여 블록狀의 콘크리트를 단계적으로 절단하는 방법을 생각하였으나, 實施計劃에서는 경제적 이유로 爆破工法으로 변경했다. 폭파는 높이방향 2m 간격, 수평방향 30~40cm 간격으로 하여 오염을 확대시키지 않도록 하기 위해 밑에서 부터 폭파하는 방법으로 행하기로 하고 있다.