

原子爐의 디커미셔닝과 技術開發

— 鋼構造物의 解體技術 —

原子力施設의 廢止措置에 따른 原子爐 鋼構造物의 解體 또는 施設에서 發生하는 放射性固體廢棄物의 減容處理 등 解體技術에 관한 研究開發의 必要性이 높아지고 있다. 이들 鋼構造物의 解體技術은 原子力施設 특유의 조건을 고려하여, 放射線防護의 관점에서 水中切斷 또는 放射화된 두꺼운 材料의 원격절단을 고려한 工法을 취하여야 한다. 다음은 輕水爐型 原子力發電所의 原子爐壓力容器 및 爐內構造物을 대상으로한 鋼構造物의 解體技術이다.

1. 解體對象鋼構造物

商業用原子力發電所에는 加壓水型(PWR)과 沸騰水型(BWR)이 주류를 이루고 있다. 원자력 발전소의 시설은 원자로건물, 터빈건물, 폐기물 처리건물, 연료저장건물 등으로 나누어 진다. 이들 施設을 구성하는 설비, 기기 및 배관 등의 鋼構造物은 사용목적에 따라 재질, 두께, 설치형상 등이 매우 다양하다.

그림 1은 PWR의 대표적인 系統構成을 나타낸 것이다. 이들 원자력발전소의 鋼構造物을 解體撤去技術의 개발면에서 보면 壓力容器 및 爐內構造物이 가장 중요한 대상물이 된다.

1.1 PWR의 壓力容器

PWR의 壓力容器는 그림 2에서와 같이 圓筒型의 容器이며 底部는 半球形이고 윗뚜껑은 플랜지構造로서 떼어낼 수 있게 되어 있다. 胴部

에는 플랜지部 바로 아래 位置에 1차냉각재의 출입구 노즐이 同一面上에 붙어 있어서 壓力容器的 重量은 이 노즐部에서 支持되고 있다. 下鏡에는 爐內計裝用 하우징이 있다.

壓力容器 本體의 材質은 低合金炭素鋼製이고, 냉각재에 접하는 용기내면에는 약 4mm의 스텐레스材가 皮복되어 있다.

1,100MWe級 發電所의 壓力용기는 外徑 約 5m, 높이 13m인데 뚜껑을 제외하면 約11m의 높이가 된다. 切斷對象의 두께는 胴部에서 約220mm, 플랜지部에서 約420mm이다.

1.2 PWR의 爐內構造物

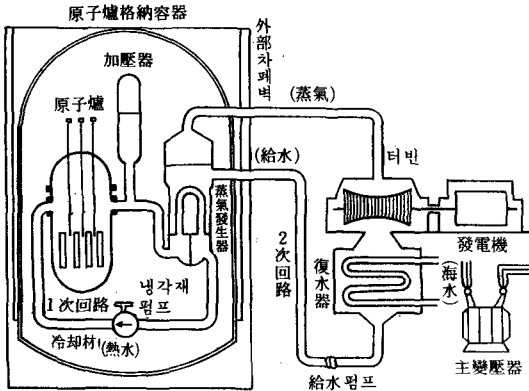
그림 3에서와 같이 上部爐心構造物과 下部爐心構造物로 大別된다. 上部爐心構造物은 主로 制御棒案内管, 上部支持板, 上部爐心板支持柱, 上部爐心板 등으로 구성된다. 下部爐心構造物은 下部爐心板, 下部爐心板支持柱, 爐心支持板, 爐心槽, 爐心버플 및 熱遮蔽體 등으로 구성된다. 爐內構造物의 재료는 스텐레스鋼이며, 절단이 필요한 곳의 板두께는 上部에서 約300mm, 下部에서 約500mm이다.

2. 解體技術의 技術的 背景

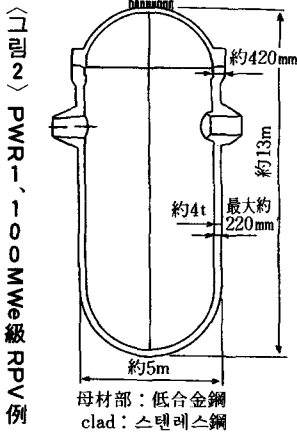
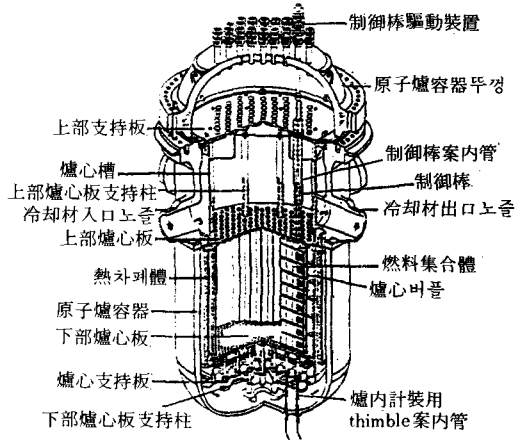
原子力發電所에서 鋼構造物 解體技術의 특징은 다음과 같다.

① 壓力容器, 爐心構造物 등 放射화된 구조물에 대해 방사선방호를 할 필요가 있다(즉, 물속

〈그림 1〉 PWR原子力發電所系統圖



〈그림 3〉 PWR의 爐內構造物



사성 2차폐기물의 처리 등 周邊技術에 대해서도 충분히 검토할 필요가 있다.

3. 解體(切斷)技術의 現況

機器的 절단기술은 일반적으로 溶斷法과 機械的切斷法 두종류로 大別되며, 그림4에서와 같이 각종 방식으로 細分할 수 있다.

溶斷法은 절단부를 열로 용융시키는 것으로서 酸化反應熱利用方式과 電氣에너지利用方式이 있으며, 대표적인 절단방법으로 前者에는 가스절단, 後者에는 플라즈마아크절단이 있다. 또 그 외에 특수한 방식으로 成形爆藥에 의한 폭파절단, 레이저절단이 있다.

기계적인 절단법은 機器, 配管 등을 녹임이 없이 절단부를 깎아낸다는가, 펀치로 구멍을 뚫는다는가 해서 절단하는 것이다.

다음은 原子力發電所 鋼構造物의 解體工法으로 현재 주목받고 있는 몇가지 절단방식의 概要이다.

3.1 水中가스切斷

沈沒船의 解體, 橋脚改造 등의 공사에 사용되고 있는 것으로서 그림5에서와 같이 火口가 사용된다. A는 火口先端에 外套를 붙임으로서 豫熱炎을 안정시키는 것이다. B, C는 火口의 最外周에서 부터 壓搾空氣나 산소를 噴出시킴으로

에서의 절단).

②原子爐 1次系統, 廢棄物處理系統, 燃料取扱·貯藏系統의 機器, 配管 등은 방사성물질이 부차되어 있으므로 절단시 汚染擴散防止對策이 필요하다.

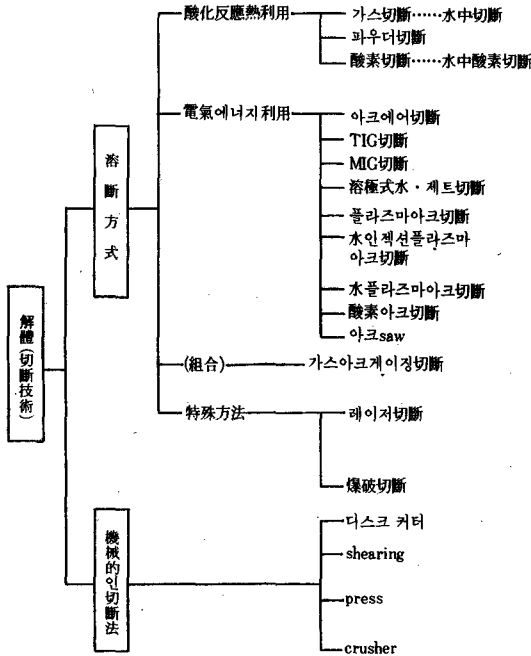
③壓力容器, 爐內構造物 및 加壓器 등에 사용되고 있는 炭素鋼, 스텐레스鋼은 모두 板두께가 두껍다.

④스텐레스鋼이 많이 사용되고 있다.

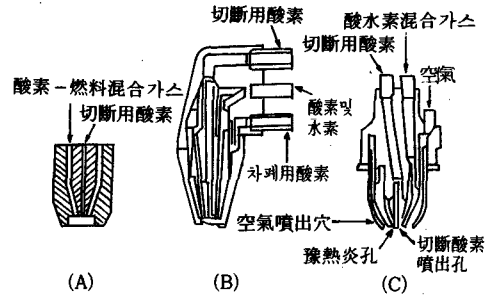
⑤切斷裝置의 設置공간, 切斷片의 移送공간 및 作業공간이 좁다.

이와 같은 특징에서 原子力發電所 鋼構造物의 해체기술은 一般産業에서 實用化되어 있는 절단기술을 그대로 적용하기에는 곤란한 점이 있다. 또한, 장치의 遠隔操作技術, 發生하는 방

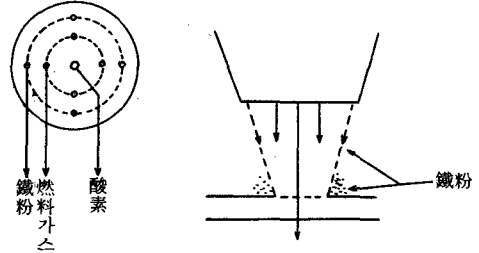
〈그림 4〉 解体切斷技術의 具體的 方法



〈그림 5〉 水中가스 切斷器의 火口形狀



〈그림 6〉 파우더가스切斷과 火口



3.3 溶極式水제트切斷

MIG 절단의 경우에 사용하는 가스 대신 水噴流을 사용하는 것이다. 그림 7에서와 같이 送給모터에 의해 와이어전극을 내보내고, 콘택트팁에 의해 加工電流를 흐르게 하여, 母材와의 사이에 아크를 발생시킴으로서 母材를 절단한다. 와이어는 소모됨에 따라 자동적으로 공급된다. 시일드가스는 전혀 사용하지 않으며, 대신 高速의 물을 분사시켜 아크열에 의해 용융된 금속을 날려버린다. 炭素鋼, 스텐레스鋼이나 비철금속의 절단에 유효하다.

3.4 플라즈마切斷

플라즈마 아크의 퍼짐을 그림 8에서와 같이 노즐로 제한하여 被切斷物의 대단히 좁은 영역에 아크에너지를 집중시키기 때문에 강한 열로 금속을 용융시킨다. 가스의 흐름은 아크에 의해 加熱되어 收縮部를 통과하는 사이에 加速되기 때문에 이 가스흐름의 제트作用에 의해 용융금속이 연속적으로 배제되어 절단부에서 잘라진다. 가스의 종류는 被切斷材에 따라 N₂, Ar 등이 선별사용되는데 炭素鋼, 스텐레스鋼, 비철금속

서 물을 배재하여 불꽃의 안정을 도모하는 것이다.

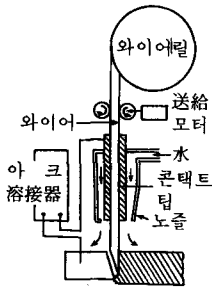
특성은 일반적인 가스절단과 거의 같으나, 얇은 板에 대해서는 열을 곧 빼앗기 때문에 자르기가 어려워진다. 두꺼운 板에 대해서는 단순한 分離切斷이라면 300mm까지의 실적이 있다.

3.2 파우더가스切斷

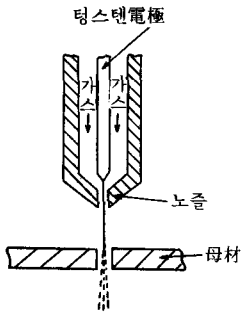
非鐵金屬, 스텐레스鋼 등 가스절단의 조건에 적합하지 않은 것에 대해 切斷酸素中에 鐵粉을 混入시킴으로서 발생하는 反應熱에 의해 가스절단의 성능을 향상시키는 것이다. 철분 또는 알루미늄분말 등을 배합한 것을 압축공기 또는 N₂가스에 의해 절단부에 연속적으로 공급하여 切斷酸素에 의해서 연소시킨다. 그 生成熱은 절단부의 온도를 높임과 동시에 절단을 저해하는 難溶性酸化물을 용해제거하여 절단을 촉진시킨다. 그림 6에 파우더가스切斷火口를 나타냈다.

이 방법을 사용하면 鑄鐵, 스텐레스鋼, 銅 등의 절단도 가능하다.

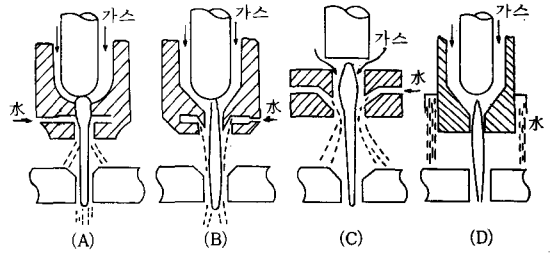
〈그림 7〉 溶極式水제트切斷



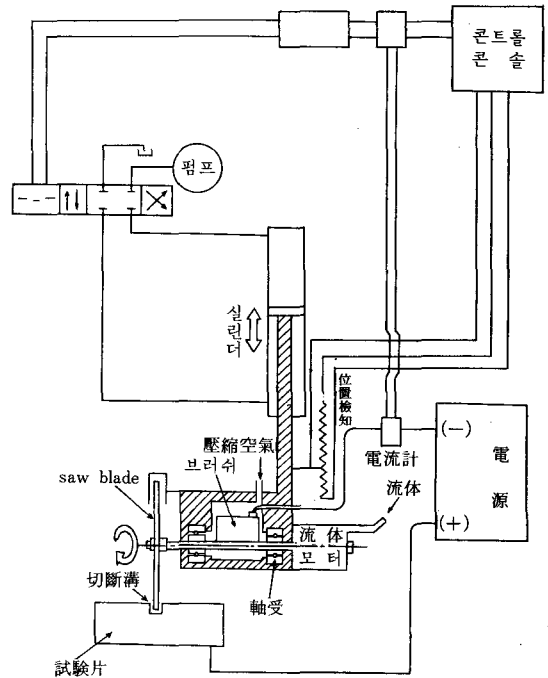
〈그림 8〉 플라즈마切斷



〈그림 9〉 水인젝션 플라즈마아크切斷



〈그림 10〉 아크saw 切斷裝置基本構成圖



에 유효하다.

3.5 水인젝션플라즈마아크切斷

이 절단법은 플라즈마절단법의 플라즈마 아크를 다시 물로 둘러싸서 아크의 퍼짐을 억제하는 것이다. 물로 아크를 둘러싸므로서 절단면의 품질 향상 뿐만 아니라 흠이나 切斷騒音의 저감에 현저하게 효과가 있기 때문에 그림 9 에서와 같이 각종 방법이 개발되고 있다. 성능은 기본적으로 통상의 플라즈마 아크절단과 다르지 않다.

3.6 아크 saw

아크 saw는 非消耗電極型 아크절단의 일종으로 回轉圓板을 전극으로 하고 있다. 高速(30~1,500rpm)回轉하는 圓板電極(blade)과 被切斷物과의 사이에 直流低電壓, 大電流를 흐르게 하여 아크 방전에 의한 열로서 피절단물을 용융절단하는 것이다.

용융드로스는 회전원판에 의해서 날려버린다. 아크 saw는 모든 導電極性金屬을 절단할 수가 있으며, 圓板直徑의 1/3정도의 板두께까지 절단할 수가 있다고 한다.

현재 日本原子力研究所에서 JPDR壓力容器的

절단용으로 개발하고 있는 시험장치에서는 水中에서 약 200mm 鋼板의 절단에 성공하고 있다 (원판직경 36인치, 切斷電流 2만암페어). 또한, 이 절단법을 사용하면 形狀이 복잡한 것, 예를 들면 保温材料, 파이프, 型鋼 등까지도 한번에 절단할 수 있다. 그림 10에 切斷裝置의 概念을 나타내었다.

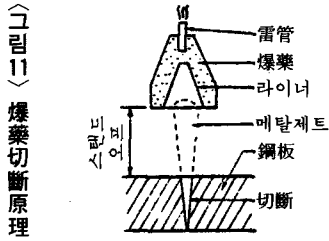
3.7 爆藥切斷

그림 11에서와 같이 폭약을 斷面V字形狀을 갖는 鋼製라이너(V코드)에 裝填하여, 절단대상물과의 사이에 스탠드 오프(간격)를 설치함으로써

폭발시의 高温, 高速, 高壓에너지를 한점에 집중시키는 효과를 이용한 것이다.

3.8 機械式切斷

현재 압력용기 노즐근방 배관의 절단용으로 디스크 커터의 개발이 추진되고 있다. 이 방법은 圓板狀의 커터 칼날을 절단물에 접촉하여 절단물을 塑性變形시켜서 절단하는 것이다. 절단



〔表 1〕 鋼構造材解體工의 各種切斷工法 適用性

部 位		壓 力 容 器		爐 內 構 造 物		配 管	
材 料		低合金炭素鋼 (內面스텐레스鋼)		스텐레스鋼		炭 素 鋼	스텐레스鋼
切 斷 環 境		水 中		水 中		氣 中	
切 斷 場 所		設 置 場 所 (粗斷)	切斷指示場 所 (細斷)	設 置 場 所 (粗斷)	切斷指示場 所 (細斷)	設 置 場 所 (粗斷 / 細斷)	
溶 斷 方 式	가 스 切 斷	×	○	×	×	○	×
	水中가스切斷	×	○	×	×	△	×
	파우더가스切斷	△	△	△	△	△	△
	酸素 切 斷	×	×	×	×	△	×
	아크에어切斷	×	×	△	△	△	△
	TIG 切 斷	×	×	△	△	△	△
	MIG 切 斷	×	×	△	△	△	△
	溶極式水제트切斷	×	×	○	○	△	○
	플라즈마아크切斷	×	×	○	○	○	○
	水인젝션플라즈마아크切斷	×	×	○	○	○	○
	酸素아크切斷	×	×	△	△	○	○
	아크 saw	○	○	△	○	△	△
	가스·아크게이징 組合 切斷	○	○	×	×	△	×
	레이저 切斷	×	×	×	×	○	○
爆 破 切 斷	×	×	×	×	○	○	
機 械 切 斷	커 터	△	△	△	△	○	○

○ 適用可能 △ 適用可能하나 困難 × 適用不可

실험에서는 12인치, Sch 160의 스텐레스鋼管의 절단에 성공하고 있다.

이상 여러가지 切斷技術을 소개했는데, 이들의 적응성에 대해서 해체대상물마다 평가하면 表 1과 같다. 또 切斷技術의 현황과 개발상황을 정리해서 表 2에 나타내었다.

4. 解體技術의 適應性

4.1 壓力容器로의 適應

절단환경으로는 작업중 분위기오염방지와 피폭저감에서 壓力容器內外를 물로 채우는 水中切斷이 바람직하다. 수중환경하에서의 절단 및 폐기물의 발생량으로 보아 절단방식으로는 아크

〈表 2〉 解體技術의 現況

機 器	對 象	能 力 等 의 現 況	特 徵
아크 saw	解體·撤去 · 原子爐壓力容器 · 爐內構造物 細 斷 · 撤去物全搬	① 切斷두께 : 炭素鋼 : 200mm (一層切斷) 스텐레스鋼 : 150mm (一層切斷) 炭素鋼 : 400mm (多層切斷) ② 切斷速度 : 20~30 cm / 秒 ③ 適用範圍 : 全金屬 ④ 切斷雰圍氣 : 氣中 및 水中	① 小型아크saw는 1971年 JPDR 改造計劃에서 實用되었다. ② 大型아크saw는 Retech社에서 開發中이며 現在 Hanford研究 所에서 實證이 끝났다. ③ JPDR解體技術研究開發計劃 에서 實驗中.
가 스 + 게이징組合	解體·撤去 · 原子爐壓力容器 細 斷 · 撤去物全搬	① 切斷두께 : 炭素鋼 : 300mm ② 切斷速度 : 15~20 cm / 分 ③ 適用範圍 : 炭素鋼(가스切斷) : 스텐레스鋼(게이징) ④ 切斷雰圍氣 : 氣中 및 水中	① 通産省工技院四國工業技術試 驗所에서 開發되었다.
플라즈마아크 切斷	解體·撤去 · 爐內構造物 · 原子爐容器以外 機器配管等 細 斷 · 매우두꺼운것을제외한撤去物全搬	① 切斷두께 : 스텐레스鋼 : 230mm (氣中) 同 上 : 130mm (水中) ② 切斷速度 : 15~20 cm / 分 (1000A) ③ 適用範圍 : 全金屬 ④ 切斷雰圍氣 : 氣中 및 水中	① Elk River SRE에서 使用實 績 있음. ② 動燃團에서 爐內管의 切斷技 術을 開發하였다(水中切斷). ③ JPDR解體技術研究開發計劃 에서 實驗中.
溶極式水제트 切斷	解體·撤去 · 爐內構造物 細 斷 · 撤去物全搬	① 切斷두께 : 스텐레스鋼 : 80mm ② 切斷速度 : 20~25 cm / 分 ③ 適用範圍 : 全金屬 ④ 切斷雰圍氣 : 水中	① 通産省工技院四國工業技術試 驗所와 메이커의 共同研究에 의해 研究되었다.

saw절단, 가스·게이징의 조합에 의한 절단이 타당하다고 생각된다.

4.2 爐內構造物로의 適應

절단환경은 피절단물의 방사화 정도가 특히 높고 작업중의 분위기오염방지, 피폭저감의 관점에서 壓力容器와 마찬가지로 수중절단이 바람직하다. 절단방식으로는 피절단물의 재질이 거의 스텐레스鋼이므로 수중절단에서 효율적인 아크 saw절단, 플라즈마 아크切斷, 溶極式水제트절단법을 절단대상물에 따라 채택하게 된다. 또한, 압력용기에서 꺼낼 수 있는 부위는 機器 풀, 爐內 캐비티에서 절단하는 것도 가능할 것이다.

4.3 遠隔操作技術

鋼構造物의 해체에 필요한 周邊技術로서 해체 시의 작업원의 피폭저감을 위해 수중조작 또는 원격조작은 매우 중요한 기술이다. 裝置化에 있어서는 절단방식과 해체대상부위가 중요한 요인이 되는데, 실적이 있는 원격조작장치는 적다.

4.4 2次廢棄物의 處理技術

鋼構造物을 절단할때 2차폐기물로서 落下드로스, 水中浮遊固形物(수중 절단시), 廢가스, 흙이 발생한다.

廢棄物의 處理는 오염확대의 방지, 피폭방호의 관점에서 중요하나 既存의 技術로서 충분히 대응이 가능하다고 생각된다.