

放射能汚染 除去技術과 經驗(I)

Decontamination Techniques and Experiences (I)



梁 慶 麟 (韓國에너지研·原子爐化學研究室長)

1. 序 論

放射能 除染技術은 原子力産業에서 급속하게 성장하고 있는 工學的 技術分野이다. 原子力産業의 개발초기에는 放射能에 汚染된 裝備의 除染은 독자적인 단순한 처리로 생각되었으며, 除染技術에 대한 관심을 촉진하는데 도움이 될 수 있었던 人體被曝과 放射性廢棄物의 처분을 감안한 규약은 현재보다 엄중하지 않았다.

近年에 와서 人體에 대한 放射線 被曝量의 低減對策에 관한 民間 및 規制當局의 계속된 壓力과 發電所 가동을 向上에 대한 經營陣의 고조된 관심, 증가된 회수의 非定期的 補修, 非計劃의 主要設備의 交替 및 檢査의 필요성으로 인하여 商業運轉中인 原子力發電所에서의 除染技術들은 그 중요성을 더해가고 있다.

原子力發電所의 運轉經驗은 汚染된 裝備는 發電所 職員들에 대한 ALARA 정책에 부응하기 위하여 除染되어야 한다는 것을 지적하고 있다. 除染技術은 또한 裝備들을 檢査나 補修를 위하여 非放射線區域으로 이동하기 위해서 또는 放射線取扱 非認可者인 業者에게 보내지기 위하여 필요하게 된다.

過去에는 除染은 ALARA의 이행을 위한 技術로서만 사용되어 왔다. 그러나, 近年에는 다수

의 회사들이 除染技術을 업체가 살아 남을 수 있는 수단으로서, 그리고 경제적으로 매력이 있는 廢棄物의 容量減縮의 대안으로서 채택하고 있다.

人體被曝低減에 대한 관심과 마찬가지로 放射性廢棄物處理에 소요되는 비용절감이 강력하게 요구되고 있어, 새로운 除染技術의 발전에 박차를 가하고 있다. 除染工學者는 각 과제에서 요구되는 목적을 달성하기 위하여 이용할 수 있는 최적의 除染技術에 관한 지식을 갖고 일련의 상이한 技術의 展開를 포함한 工業化된 工程을 적용함으로써 除染係數를 極大化하는 한편 放射性廢棄物의 生産量, 소요되는 除染經費, 人體被曝量 및 施設의 非稼動時間을 極小化시킬 수 있어야 한다는 필요성이 除染工程을 하나의 精密工業技術分野로 밀어내었다.

除染에 적용된 각종 技術들은 처리해야할 放射性廢棄物의 容量을 대단히 效果的으로 감축시켰으며 어떤 경우에는 소요된 除染經費는 除染으로 인하여 구조된 裝備의 價格으로서 몇배가 되어 되돌아 오기도 했다.

2. 除染技術의 工程檢討

한 原子力施設에서 放射能汚染을 除去하기 위

한 특정의 除染技術을 선정하기 위해서는 除染에 관련된 여러가지 고려의 대상에 대한 예비 계획과 工程의 工學的 檢討가 반드시 선행되어야 한다.

초기의 工程檢討에서 반드시 포함시켜야 할 科學的-工學的 技術情報로서는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

1. 除染計劃의 理由와 目的
2. 工程을 확인하는데 소요되는 시간적 제약
3. 除染될 設備의 크기와 모양
4. 腐蝕被膜에서의 放射能의 존재위치, 放射能의 종류 및 除染對象 表面의 형태
5. 汚染發生 機構의 확인
6. 施設에서의 除染經驗
7. 施設에서 보유하고 있는 除染裝備
8. 이용이 가능한 作業장의 넓이
9. 生産되는 放射性廢棄物의 양과 형태 및 施設의 處理施設과의 적합성
10. 除染될 裝備나 系統의 구성재료와의 적합성

除染을 하는 이유는 除染技術을 선택하는데 중요한 관련이 있다. 만일에 한개의 設備가 검사를 하는 동안의 人體被曝을 감축하기 위하여 除染되는 것이라면 非破壞的인 除染技術이 사용되어야 한다.

만일에 修理 또는 檢査를 할때 받는 人體被曝을 감축하는 것이 設備를 除染하는 이유라면 선택되는 除染技術은 마땅히 낮은 人體被曝을 받는 방법이라야 한다. 즉, 다시 말해서 除染技術은 人體被曝이 덜어지는것 보다 더 많은 人體被曝을 받는 技術이 사용되어서는 안된다는 것이다.

裝備가 放射線取扱認可가 없는 업자에게 수리나 재생을 위하여 보내지기 위하여 除染을 수행하는 것이라면 放射線區域外로의 제한없는 방출에 대한 필요조건을 만족시키기 위한 적절한 技術의 선택이 필요하게 된다.

原子力施設에서의 放射能汚染 除去技術分野는 現 시점에서 國內 原子力産業界가 깊은 관심을 갖고 대처해야 할 분야라고 생각된다. 超音波, 高壓후레온, 電氣研磨 및 化學劑 等に 의한 除染技術은 施設 從事者에 대한 放射線被曝 低減 對策과 함께 放射性廢棄物의 容量減縮과 處理費用의 節減이 강력하게 요구되고 있어 現재 美國을 위시한 先進各國에서 급속하게 성장하고 있는 精密工業技術이다.

이 分野는 政策的인 뒷받침하에 노력만 한다면 先進 外國技術에 의존함이 없이 國內技術에 의한 독자적인 개발이 가능한 技術分野로 믿어 지며 장치 國內外에서의 市場性도 높아 國策的인 면에서의 육성이 요망되는 분야이기도 하다. 이와 같은 견지에서 "放射能汚染 除去技術과 經驗"에 관한 최근 技術情報를 개관해 보았다.

概說內容은 다음과 같으며 5회로 나누어 연재하고자 한다.

1. 序 論
2. 除染技術의 工程檢討
3. 放射能汚染 除去技術과 經驗
 - 3.1 손으로 분질러 닦아내는 방법
 - 3.2 研磨破碎
 - 3.3 高壓水 洗滌
 - 3.4 高壓 후레온 洗滌
 - 3.5 超音波 洗滌
 - 3.6 電氣研磨
 - 3.7 化學劑 除染技術
 - 3.7.1 高濃度 化學劑 除染
 - 3.7.2 低濃度 化學劑·除染
 - 3.7.2.1 CAN-DECON
 - 3.7.2.2 LOMI 化學除染技術
 - 3.7.3 低濃度化學劑에 의한 PWR除染技術
 - 3.7.3.1 SWEDEN의 STUDSVIK
ENERGITEKNIK AB
 - 3.7.3.2 Berkeley Nuclear Laboratories
 - 3.7.3.3 Battelle Pacific Northwest
Laboratories

參考文獻

裝備가 處分을 위하여 제거되거나, 裝備의 손상이 문제가 되지 않을 경우에는 보다 가혹한 방법을 사용할 수 있다. 적용할 除染技術의 선택과정에서는 現場의 除染裝備와 經驗이 반드시 검토되어야 한다. 現場에 사용할 수 있는 裝備가 있고, 사용한 經驗이 있는 技術이 마땅히 첫째로 고려의 대상이 되어야 한다. 除染될 表面의 형태, 放射能의 종류, 腐蝕層에서의 放射能의 위치 또한 적절한 除染技術의 선택에 있어서 고려의 대상이 될 필요가 있다.

만일에 放射能이 腐蝕被膜의 外廓層에 느슨하게 부착된 것이라면 단순히 축축한 걸레로 닦아 넘으로서 대부분의 放射能이 제거될 것이다. 그러나, 만일에 放射能이 腐蝕被膜層에 견고하게 부착되어 있거나, 또는 거친 表面處理와 함께 있으면 더 가혹하고 파괴적인 技術의 적용이 필요할 것이다.

모든 경우에 있어서 除染工程에서 생산되는 放射性廢棄物의 양은 적용가능한 現場의 放射性廢棄物 處理施設의 용량과 부합되어야 한다. 이 處理能力은 除染工程에서 적용하는 化學藥品의 종류와 사용량을 제한하게 된다.

特定の 除染技術을 사용하고자 하는 결정을 내릴 때에는 除染의 經濟的 국면 또한 신중히 검토해야 할 필요가 있다. 만일에 除染만이 유일한 문제해결의 방법이라면 非稼動時間이 치르는 經費는 日當 40~50만달러에 이를 것이다. 放射線 被曝으로 인하여 증가되는 경비는 수리나 검사기간중에 감축된 被曝에 해당될 것이다. 被曝으로 인한 경비는 汚染된 裝備의 交替費用과도 견주어 평가되어야 한다. 때로는 汚染된 裝備의 交替가 가장 경제적인 대안일 수도 있다.

現場에서 化學的 除染技術이 적용될 때에는 化學試藥과 構成材料와의 적합성이 반드시 받아들일 수 있는 것이라야만 한다. 만일에 구성재료가 만족스럽지 못한 腐蝕行動을 나타낼 때에는 다른 化學劑 또는 다른 除染技術이 선택

되거나, 除染劑에 적절한 腐蝕抑制劑를 첨가하여야 한다.

除染工學者는 除染의 化學的, 電氣的 그리고 機械的 技術의 지식과 原子力施設로 부터의 技術情報를 토대로 하여 적용시킬 수 있는 최적의 除染工程을 설계하여야 한다. 이 설계는 除染率을 최대로 해야하는 한편 放射線 被曝量, 廢棄物의 生産量 및 設備의 非稼動時間을 최소로 하는 것이라야 한다.

除染工學者는 채택할 최적의 除染技術工程을 확인하는데 그칠 것이 아니라, 安全對策으로서 계통에 알맞게 설계된 除染後의 뒷받침 技術 또는 2次的인 補完技術도 확인하여야 한다.

除染工程 수행과정에서 발생하는 대부분의 문제는 汚染發生機構에 대한 불충분한 고려 또는 이해부족이 원인이 되어 발생하고 있다. 성공적인 除染計劃을 수립하려면 工程檢討의 初期段階에서 表面에 부착되어 있는 汚染物의 附着機構에 대한 이해가 절대로 필요하다. 만일에 除染工學者가 이 附着機構를 올바르게 이해하지 못하였을 경우에는 汚染物은 제거될 수 없을 것이고 기도된 除染은 결과적으로 어떤 특정 장소에 높은 放射線準位를 그대로 남겨두게 될 것이다. 즉, 除染工學者는 汚染이 느슨하게 들어붙은 腐蝕生成物로서 형성된 것인지, 아니면 단단하게 들어붙은 腐蝕被膜으로 형성되어 있는지를 반드시 확인하여야 한다.

이들 서로 다른 두 가지 층을 제거하기 위하여서는 각각 다른 방법의 除染技術이 필요하게 된다. 느슨하게 형성된 腐蝕生成物의 推積層을 제거하기 위하여서는 結合력을 이겨내기 위한 충분한 에너지가 表面에 집중되어 있어야 한다. 이러한 技術로서는 高壓水 洗滌과 高壓 후레온 淨化 또는 超音波 洗滌이 있으며 이들 技術은 다만 느슨하게 부착된 汚染物의 대부분을 제거할 수 있다.

硬固하게 부착된 酸化物이 腐蝕被膜内部에서

共有結合에 의하여 형성되고 있을 경우에는 더
한층 공격적인 除染技術이 필요하게 된다. 공격
적인 藥品, 化學試藥 또는 研磨器를 사용하여
손으로 세게 닦아내는 방법, 또는 電氣化學의 除
染技術이 이러한 腐蝕被膜層을 제거하기 위하여
서는 가장 적합하다. 이들 공격적인 技術은 아
마도 적은 量의 構成材料金屬을 제거할 것이다.

特定の 表面을 위하여 선택되는 除染技術은
汚染의 發生機構와 長期間에 걸쳐 지속된 系統
의 物理的, 化學的 環境에 의해서 결정된다. 表
面의 상태가 인지되고 기도하는 바 목적이 이해
되면 除染工學者는 문제 해결에 적용시켜야 할
적절한 技術을 확인할 수가 있다. 除染工學者는
汚染의 發生 및 附着機構를 관찰한 후에 最適
技術을 지정하여야 한다.

除染技術로서의 超音波의 사용은 그동안 다
년간에 걸쳐 잘못 이해되어 왔다. 그리고 이것
은 除染工學者의 필요성을 설명할 수 있는 전형
적인 예가 될 수 있다.

대부분의 商業用 原子力施設에서는 적고, 많
고간에 超音波를 除染技術로서 사용한 경험을
갖고 있다. 그러나 그 결과에 있어서는 성공도
있고, 실패도 있다. 이와 같은 效能에 대한 相
反된 결과는 오직 적용방법상의 차이에서 온다.

이상적인 超音波 除染技術은 洗滌劑 또는 保溫
劑를 첨가한 물을 溶劑로 사용한다. 最大의 眞
空度를 얻기 위하여서는 除染化學劑의 농도는
2~5 重量%의 범위이어야 하고, 溶液의 溫度는
65~75°C의 범위내에서 유지되어야 한다.

超音波 洗滌槽는 除染溶劑가 淨化 및 濾過
系統을 거쳐서 계속적으로 循環될 수 있도록 설
계되어야 하고 濾過系統은 作業者에 대한 放射
線被曝을 감축하기 위하여 차폐되어야 한다. 超
音波 洗滌劑에 현탁되어 있는 粒子들의 제거는
洗滌하려는 表面에서 最大의 眞空度를 마련해
줄 수 있게 한다. 그리고 除染溶液의 循環率은
分當 전체용액의 2%보다 적어야 한다. 이보다

많은 循環率은 溶液의 授亂을 초래하여 超音波
波長과 干涉하여 除染效果를 저하시킨다.

만일에 한 사람의 除染工學者가 工程을 설계
하고, 試運轉하도록 고용되었다면 높은 除染係
數를 얻을 수 있는 앞에서 언급한 기본적인 제
반 요인을 확인할 수 있을 것이며, 최적성능을
낼 수 있도록 工程을 工學的으로 관리할 수 있다.

原子爐 冷却材系統 裝備의 除染은 除染工學
者들이 적용상의 문제를 잘 검토해야 하는 또
다른 하나의 좋은 예가 될 수 있다.

原子爐 冷却材系統 裝備 表面에 형성되는 腐
蝕被膜의 조성은 沸騰水型 原子爐와 加壓水型
原子爐에서 각각 다르다. 이 被膜組成의 차이는
서로 다른 化學處理와 構成材料에 원인이 있다.

BWRs의 冷却材는 PWRs에 비하여 酸化性環
境을 갖고 있으며, 주된 구성재료는 Zircaloy
48%, Stainless Steel 44%, 그리고 Carbon
Steel이 8%로 되어있다. BWR의 爐心外-表
面에 부착되어 있는 주된 腐蝕生成物은 Hae-
matite(Fe_2O_3)와 크러드 내부층에 있는 니켈이
치환된 magnetite, $Ni_x Fe_{3-x}O_4 (0 \leq x \leq 1)$ 로
되어있다.

PWRs에서는 原子爐冷却材에 反應度 및 酸
素와 pH를 조절하기 위한 化學藥品들이 첨가
되며, 주된 構成材料는 Zircaloy-4 20%, In-
conel-600 75% 그리고 Stainless Steel이 5%이다.
1次冷却系統의 腐蝕被膜은 주로 니켈이 치환된
Ferrite, $Ni_x Fe_{3-x}O_4$ 로 되어 있다. magnet-
ite의 被膜은 그의 格子構造에서 대량의 크롬치
환을 갖고 있다. PWR 腐蝕被膜에 크롬이 존재
하는 것이 BWRs과 PWRs 腐蝕被膜에 대한
각종 除染溶液의 除染效果를 다르게 하는 주된
원인인 것 같다.

PWR 腐蝕被膜의 높은 크롬 함량은 보통 錯
化性 除染試藥의 공격에 대한 방법으로 작용하
는 것으로 생각되고 있다. 물에 녹지 않는 酸
化狀態인 3價의 크롬은 錯化劑가 공격하여 니켈

이 치환된 Ferrite構造를 제거하기 위하여서는 반드시 제거되어야 한다. 역사적으로 크롬은 3價의 크롬을 보다 가용성인 6價의 크롬으로 酸化시키는 $KMnO_4$ 의 첨가에 의하여 제거되고 있다. 除染劑로서 錯化劑를 계통에 첨가하기 전에 $KMnO_4$ 는 반드시 충분한 淨化 또는 상살적인 環元劑에 의하여 제거되어야 한다. 淨化後에 表面에 남아있는 $KMnO_4$ 는 濃度減縮에 따른 除染錯化劑의 効力を 감소시킨다.

크롬의 保護層이 일단 제거되면 나머지 腐蝕層은 두 原子爐에서 비슷하게 행동한다. 한 예로 높은 크롬被膜이 BWR表面에서 관찰되었다면 이 또한 적절한 除染率을 성취하기 위하여서는 사전에 처리되어야 한다.

除染工學者는 原子爐 冷却材系統 構造物 除染에 영향을 주는 제반 요인을 잘 파악하고 있기 마련이다. 除染工學者는 최적의 除染試藥 및 기타 보조 藥品을 결정하기 위하여 가능한 한 腐蝕被膜들을 試驗할 것이며, 生産되는 放射性廢棄物의 적합성을 現場 處理施設의 용량과 견주어 工程의 계획단계에서 고찰할 것이다.

예기치 않았던 상태가 발생하거나 또는 선택한 방법으로 汚染이 제거되지 못하였을 경우, 除染工學者는 汚染을 성공적으로 제거할 수 있는 적용가능한 부차적인 技術을 갖고 있기 마련이다. 이 뒷받침 技術은 1次로 사용한 기술보다 아마도 더 많은 廢棄物을 생산하거나 또는 구성재료에 대하여 약간 더 공격적일 수도 있다. 뒷받침 技術들은 1次技術보다 또한 좀더 긴 적용 시간을 요하게 될 것이나, 汚染을 감축할 수 있다.

原子力施設들은 그들이 성공한 경험이 있는 분야에 대해서는 독자적인 除染技術을 적용시켜도 무방하다. 그러나 그들의 除染技術로서 충분히 큰 除染係數를 얻지 못하였던 분야에 대하여는 除染工學者와의 협의가 필요할 것이다. 만일에 除染工學者와의 상의에 응한다면 성공적인 계획, 즉 除染係數의 향상, 除染에 소요되

는 시간의 단축 또는 감소된 放射性廢棄物의 생산량에 도달할 수 있도록 방법은 발견될 것이다. 그리고 除染工學者는 除染工程을 燃料再裝填期間, 긴급 또는 계획된 補修나 修理期間, 위급한 누설로 인한 非稼動期間 등에 적절한 시기에 적용하도록 계획할 것이다.

3. 放射能汚染 除去技術과 經驗

3.1. 손으로 문질러 닦아내는 방법

손으로 문질러 닦아내는 방법은 모든 原子力施設에서 除染作業에 사용되고 있다. 이 방법은 다른 또는 축축한 천으로 단순하게 닦아내는 방법, 또는 化學劑의 보조를 받으면서 연마기로 문질러 닦아내는 방법 등 다양하다. 사용되는 化學藥品의 종류는 요구되는 除染의 양과 表面에 推積된 汚染 또는 腐蝕被膜의 형태에 따라 결정된다.

被膜이 느슨하게 형성되어 있으면 습한 천으로 단순하게 表面을 닦아냄으로서 汚染을 제거할 수 있을 것이다. 그러나, 汚染이 견고하게 형성된 腐蝕被膜에 섞여 있으면 研磨機의 도움을 받으면서 여러가지 化學洗劑들이 사용되어야 한다. 가장 흔하게 거론되는 洗劑로서는 Radiac Wash(Atomic Products Corporation, Center Mariches, NY.), Formula 409(Clorox Company, Oakland, CA.), Amway Product, 비누, 有機酸 그리고 磷酸소다 등이 있다. 닦아내기 위한 研磨板의 재료로서는 emory-천 또는 양털모양의 강철섬유가 사용된다.

만일에 기름층이 汚染과 섞여있으면, 表面을 먼저 Acetone이나 Isopropyl Alcohol로 적신 천으로 닦아낸다. 有機溶劑는 汚染과 섞여있는 모든 기름층을 제거하게 되고, 앞으로의 除染을 위하여 腐蝕被膜을 노출시킨다.

손으로 문질러 닦아내는 방법은 空氣에 떠있는 汚染問題를 야기시킬 수 있다. 이에 대처하기 위하여 제안된 방법으로는 방독면에 의한 보

호 또는 물속에서 수행하는 방법 등을 들고 있다. 물은 또한 作業者로부터 放射線의 일부를 차폐하게 되어 보다 더 人體被曝을 감축할 수 있다. 이 技術은 시간이 오래 걸리고 때로는 잘못 사용되고 하여 높은 人體被曝을 가져왔다.

3.2. 研磨破碎(Abrasive Blasting)

研磨-破碎技術은 그다지 많지 않은 수의 原子力施設에서 사용되고 있으나, 이 技術을 성공적인 방법이라고 확인한 곳은 없었다. 硼酸結晶, 酸化알루미늄을 포함한 여러가지 종류의 研磨劑가 사용되고 있다. 除染工程에서는 眞空技術을 이용하여 95%이상의 研磨劑를 회수하고 있으나, 空氣中에 떠있는 汚染이 문제가 되었다. 또한 이 技術은 1.5보다 큰 충분한 除染係數도 생산하지 못하고 있다.

研磨劑에 의한 技術을 除染方法으로 채택하려면 사전에 조심스럽게 검토해야만 한다는 것이 저자의 의견이다. 만일에 어떤 除染을 하는데 적절한 방법이 없다고 생각될 경우에는 研磨劑 또한 그 일을 해낼 수 없을 것이다. Westinghouse는 Slurry Abrasive Grit 除染技術을 蒸氣發生器 Tubesheet를 포함한 原子爐裝備에서 사용하고자 개발한 바 있다.

3.3. 高壓水洗滌(Hydrolasers)

高壓水洗滌裝備는 고정장치된 또는 휴대용 高壓 噴射裝置, 水槽, 給水配管, 연결호스 그리고 노즐로 구성되어 있으며 20,000psi까지의 액체의 흐름을 생산할 수 있다.

高壓의 流體는 高壓호스를 거쳐서 作業자가 조절하는 噴射器로 흘러간다. 噴射器의 끝은 넓은 평판, 구부러진 表面, 配管, 탱크 그리고 기타 構成物이나 裝備를 除染하기 위하여 고안된 다양한 노즐이 장치된다. 高壓噴射는 액체를 좁은 통로, 작은 갈라짐 그리고 틈새로 강하게 보낼 수 있는 이점이 있어서 액체의 除染效果를 증가시킨다.

高壓水 噴射는 많은 原子力施設에서 除染技

術로 채택하고 있다. 高壓水 除染工程은 느슨하게 형성된 表面汚染에 대단히 효과적이다. 모든 형태의 스케일은 물론 塗裝도 제거할 수 있다. 대부분의 실무자들은 처음에는 500psi의 낮은 壓力에서 高壓水 裝備를 사용할 것을 권고하고 있다. 모든 경우에서 낮은 壓力에서 技術을 적용시킨 후에 보다 높은 壓力인 3,000에서 5,000 psi를 적용하고 있다. 그리고 만일에 보다 높은 壓力이 필요할 경우에는 기도해 보는 것이 좋다고 권고하고 있다. 高壓水 除染工程에서의 有効性은 Radiac Wash와 같은 化學的 添加物을 사용함으로써 향상시킬 수 있다. 化學洗劑가 첨가될 경우에 보다 일관성 있는 除染係數를 보여주고 있다. 腐蝕被膜이 있는 原子爐 裝備에 물만을 적용했을 경우에는 2~50의 除染係數를 얻는데 비하여 Radiac Wash가 물에 첨가되며는 除染係數는 일관성 있게 40~50을 보여주는 데 성공적으로 除染된 裝備들은 다음과 같다.

- 原子爐 冷却材펌프 임페라
- 적고 큰 밸브
- 구멍내벽
- 使用後 燃料 貯藏槽 선반
- 原子爐 容器的 벽과 상부
- 燃料 취급장비
- 供給水 스파자
- 바닥 배수구
- 汚染水 웅덩이
- 管의 내벽
- 각종 저장탱크
- 스나바
- 적은 장비와 손으로 사용하는 工具

얻어진 除染係數는 原子爐 容器壁에서 얻어진 1로부터 燃料 再裝填時의 燃料의 운반통로 벽에서 얻어진 수백에 까지 이르고 있다. 原子爐 容器壁은 除染係數 1을 보여주고 있으나, 空氣에 떠있는 汚染은 현저하게 감축되었기 때문에 除染은 성공이라고 생각되고 있다.