

A Study on the Applicability for Primary System Decontamination through Analysis on NPP Decommission Technology and International Experience

원전 제염기술 및 해외경험 분석을 통한 1차 계통 제염 적용 연구

Jong Soon Song, Min Young Jung, and Sang-Heon Lee*

Chosun University, 309 Pilmun-Daero, Dong-Gu, Gwangju, Republic of Korea

송중순, 정민영, 이상현*

조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309

(Received October 1, 2015 / Revised December 23, 2015 / Approved December 23, 2015)

Decontamination is one of the most important technologies for the decommissioning of NPP. The purpose of decontamination is to reduce the Risk of exposure of the decommissioning workers, and to recycle parts of the plant components. Currently, there is a lack of data on the efficiency of the decontamination technologies for decommissioning. In most cases, the local radiation level can be lowered below a regulatory limitation by decontamination. Therefore, more efficient decontamination technology must be continuously developed. This work describes the practical experiences in the United States and the European countries for NPP decommissioning using these decontamination technologies. When the decommissioning of domestic nuclear power plant is planned and implemented, this work will be helpful as a reference of previous cases.

Keywords: Decommissioning, Decontamination, Chemical decontamination, Mechanical decontamination

* Corresponding Author.

Sang-Heon Lee, Chosun University, E-mail: leesanghoen@naver.com, Tel: +82-62-230-7165

ORCID

Jong Soon Song <http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>

Min Young Jung <http://orcid.org/0000-0003-1229-8708>

Sang-Heon Lee <http://orcid.org/0000-0002-5203-3029>

제염은 원전 해체를 위한 가장 중요한 기술 중의 하나이다. 제염은 해체작업자의 피폭을 감소시키고 발전소 일부 부품을 재 활용 할 수 있게 한다. 현재는 해체 제염기술의 효율성에 대한 자료가 많지는 않다. 대부분의 경우, 제염 후, 부분적인 방사능준위가 규제 적용을 받지 않는 수준까지 낮아 질 수 있으므로 좋은 제염효율을 갖는 제염기술은 꾸준히 개발되어야 한다. 본 논문에는 이러한 제염기술을 활용하여 원전을 해체한 미국 및 유럽국가들의 경험사례를 설명하였다. 국내 원전을 해체 할 경우 이 연구가 선행사례로 활용될 수 있을 것이다.

중심단어: 해체, 제염, 화학적 제염, 기계적 제염

1. 서론

일반적으로 원전 해체에서 제염기술을 사용해야 하는 3 가지 이유가 있다. 첫째는 시스템과 설비의 오염물질 제거를 통해 계통의 방사능 준위를 초기 방사능 준위로 낮추는데 있다. 방사능 준위가 초기 준위로 낮아지면 높은 비용이 드는 로봇이나 인공조종 장치를 사용하지 않고 작업자가 직접 설비 분해 작업을 수행하게 된다. 둘째는 해체 작업 시 오염물질의 잠재적인 확산을 최소화 한다. 특히, 고방사능 물질이 묻어 있는 시스템의 경우 방사능물질의 확산을 최소화 한다. 셋째는 제염을 통해 일부 시스템과 설비의 방사능 준위를 낮추어 폐기물관리를 용이하게 하거나 그에 소요되는 비용을 경제적으로 절감하게 된다. 또한, 이러한 시스템과 설비를 재활용함으로써 폐기물관리 규제에 대한 부담을 줄일 수도 있다.

최근 원자력산업에서 사용되는 제염기술 동향이 유지보수의 제염에서 해체 제염으로 옮겨가고 있는 추세이다. 아직까지는 해체 제염기술의 효율성에 대한 자료가 많지는 않다. 대부분의 경우, 제염 후 부분적인 방사능준위가 규제 적용을 받지 않는 수준까지 낮아지기는 하여도 요구되는 완벽한 제염 수준을 만족시키는 제염방법은 기술개발이 필요한 실정이다.

2. 원전 제염기술 및 고려사항

2.1 화학적 제염

2.1.1 일반적인 고려사항

화학적 제염은 주로 표면에 고착화된 오염물질을 제거하기

위해 사용하는 제염방법으로 원자력 관련시설에서 널리 사용되고 있다. 원전에서 사용되는 화학적 제염은 일반산업에서 사용되고 있는 대용량 화학 제염방법에서 유래되었다. 두 분야 모두 오염물질을 제거하기 위해 유사한 기술, 방법, 장비, 절차를 사용하고 있으며 기본적인 화학적 지식을 필요로 한다. 그러나 원전의 경우 방사성물질의 위험도를 고려하여 일반산업에서 요구되는 제염수준 보다 더욱 높은 강도의 제염이 요구된다.

화학적 제염에서 가장 많이 활용되는 3가지 화학처리 기술로는 알카리성 용해, 산화환원(Redox) 반응, 킬레이트화(Chelation) 반응이 있다[1]. 이 3가지 제염기술들은 각각 독립적으로 사용되는 것이 아니라 상황에 따라 같이 혼합하여 사용되거나 또는 순차적으로 사용된다. 일반적으로 화학제염의 효율성을 높이기 위해 여러 형태로 기술들을 조합하여 사용한다. 그러나 이러한 제염기술의 조합은 실제 제염과정에서 복잡성을 야기할 수 있기 때문에 기술의 조합으로 인한 장단점을 명확히 파악한 후 적용하는 것이 필요하다.

화학적 제염의 장점은 다음과 같다.

- ① 비교적 제염공정이 빠르고 간단하다.
- ② 일반산업의 제염공정과 유사하기 때문에 기존의 일반산업에서 수행한 제염 경험을 원전 해체 제염에 적용이 용이하다.
- ③ 추가적인 장비를 필요로 하지 않기 때문에 비교적 제염비용이 저렴하다.
- ④ 적절한 화학제를 선택하면, 제염하고자 하는 오염지역 표면의 거의 모든 방사성물질을 제거할 수 있어 제염된 설비의 재활용이 가능하다.
- ⑤ 제염계수 10,000을 달성 가능하다.

- ⑥ 사람의 접근이 어려운 내부 배관, 파이프 등 복잡한 구조에 대해서도 제염이 가능하다.
- ⑦ 일반적으로 제염과정에서 방사성물질의 분진은 발생하지 않는다.

화학적 제염에서 고려해야 할 단점은 다음과 같다.

- ① 화학적 제염으로 인해 2차 액체 폐기물이 발생된다. 이러한 액체 폐기물은 이온교환, 침전, 여과, 증발 등의 처리과정을 필요로 하며 이러한 과정에서 추가적인 폐기물이 한다. 또한, 2차 폐기물을 처리하기 위해 상당한 비용이 발생하게 된다.
- ② 제염공정에서 사용되는 강산이나 산화제의 유독성으로 인해 작업자의 안전에 위협이 될 수 있으며 수소와 같은 폭발성의 가스가 발생되기도 한다.
- ③ 일반적으로 다공성 표면의 경우 화학적 제염의 효율성이 낮다.
- ④ 제염된 물질이 흘러 다닐 수 있기 때문에, 오염지역 이외의 기타 지역을 다시 오염시킬 수 있으며 사고로 인해 유출될 경우 환경의 위험도를 증가시킨다.
- ⑤ 제염공정에서 높은 온도가 요구될 경우도 있다.
- ⑥ 제염공정에서 사용되는 시스템의 복잡성으로 인해 제염 시 해당분야의 전문가를 필요로 한다.

특히, 원전의 경우 방사성오염물질이 부식생성물과 함께 시스템 곳곳에 깊숙이 고착되어 있어 이로 인해 화학 제염이 더 복잡해진다. 가장 대표적인 예로 미국 Browns Ferry 원전 1호기와 Indian Point 원전의 원자로 냉각수 정화시스템 제염이 있다. Browns Ferry 원전의 경우, LOMI (Low Oxidation Station Transition Metal Ion based on the alkaline permanganate) 기술과 AP (Alkaline Permanganate: 알칼리 과망간산염) 기술을 4단계로 조합하여 LOMI → LOMI → AP → LOMI 순서로 제염을 실시하였다[2]. Indian Point 원전의 경우, 원자로 냉각재계통과 잔열제거계통 및 화학체적제어 시스템(CVCS)을 CANDEREM (Canadian Decontamination and Remediation Process: 캐나다 제염복원 프로세스) 기술과 AP 기술을 5단계로 조합하여 CANDEREM → AP → CANDEREM → AP → CANDEREM 순서로 제염을 실시하였다[3]. 따라서 비록 화학적 제염이 효과적이기는 하나 이를 수행하기 위해서는 제염하고자 하는 설비에 대한 전문적인 분석과

오염물질의 특성을 명확히 이해하는 것이 매우 중요하다.

한편, 화학적 제염이 제대로 이루어지지 않을 경우 오히려 해당 제염설비로 인한 위험도가 증가한다. 예를 들어, 킬레이트화 반응을 통해 표면의 방사성오염을 제거할 경우, 킬레이트와 오염물질의 혼합물은 일반적으로 오염물질이 혼자 존재할 때 보다 매우 높은 독성을 지니게 된다. 또한, 이러한 방사성오염물질은 액체인 화학제와 혼합됨으로 인해 유동성을 갖게 되고 이로 인해 외부로 유출 시 환경에 큰 위험도를 가져다 줄 수 있으며, 기타 인접한 다른 설비에도 오염을 확산시킬 수 있는 위험이 있다. 화학적 제염이 계획된 목적을 달성하기 위해서는 반드시 적절한 위험 관리가 필요하다.

2.1.2 화학적 제염기술 비교

2.1.2.1 킬레이트 유기산

킬레이트화 반응은 유기화합물을 금속 이온에 결합시키는 것으로 화학제와 결합된 금속 이온은 불용 상태의 금속으로부터 분리되어 용액으로 이동되고 제거된다. 킬레이트는 일반적으로 깊게 닦아낼(Smear) 수 없는 지역의 부착된 오염물질을 제거하는데 사용되며 주로 금속, 콘크리트, 나무 등의 표면 제염을 실시할 경우 킬레이트가 사용되며 분무식, 담금질, 수세식으로 복잡한 구조의 표면 제염에 효과적이며 사람이 접근할 수 없는 지역 표면이나 설비의 제염에도 사용 가능하다.

장점으로는 다양한 제염목적을 위해 화학작용제의 조합이 가능하며, 다른 화학제용 기술에 비해 안전하다. 단점으로는 효과적인 제염을 위해서는 많은 전문적인 기술과 지식이 요구된다. 폐기물처리를 위한 오염물질 안정화 작업이 필요하며 오염물질의 유동성으로 인한 위험이 존재한다.

2.1.2.2 무기산 및 관련 화학작용제

화학적 제염에 사용되는 강 무기산의 종류로는 염산, 질산, 황산, 인산 등이 있다. 산으로 인해 수소이온이 생성되고 이온들은 오염물질의 산화물을 공격하고 산화물 격자를 와해시킨다.

장점으로는 높은 온도와 높은 농도로 접촉시간을 늘려 주면 금속 기저에 깊숙이 존재하는 오염물질 막도 제거할 수 있으며 제염경험이 풍부하고 금속의 부식생성물을 제거하는데 효과적이다. 단점으로는 취급시 안전과 관련하여 높은 주의가 요구된다.

2.1.2.3 화학포말 및 화학 겔

포말과 젤 제염방법은 부식침적물이나 입자 등을 제거하는데 사용되며 기본적으로 다른 화학제염제를 혼합하여 사용하기 때문에 제거하고자 하는 방사성동위원소의 특성을 고려하여 화학제염제를 선택해야 한다.

장점으로는 화학 반응시간을 늘릴 수 있으며 원거리 및 보이지 않는 지역에 적용이 가능하다. 단점으로는 효과적인 제염을 위해서는 반복적인 제염공정이 필요하며 세척시 거품이 유출될 수 있기 때문에 주의가 요구된다.

2.1.2.4 산화제 및 환원제

산화 및 환원제 제염방법은 주로 금속에 묻어 있는 부식 생성물 또는 철이나 크롬 산화물을 제거하는데 사용된다. 용해나 산화물 격자 파괴를 통해 산화물을 오염지역 표면에서 제거한다. 제염과정에서 산을 많이 사용하기 때문에 발생된 폐기물의 중화가 필요하며, 제거된 부식입자는 안정화 처리와 함께 고체 및 액체 형태로 분류된다. 또한, 용해된 방사성물질과 기타 독성물질들은 거의 대부분 이온교환수지에서 제거되기 때문에 폐수지를 안정화시키고 처분하는 절차가 요구된다.

장점으로는 적은양의 화학작용제로 효과적인 제염을 달성할 수 있으며 다른 제염 방법들과 복합적으로 사용이 가능하다. 단점으로는 산화 및 환원 조건이 성립되는 환경이 갖추어져야 된다.

2.1.2.5 TechXtract(화학정화기술)

TechXtract 기술은 상품으로 등록된 화학작용제를 사용하여 콘크리트, 벽돌, 나무, 금속 등에 고착화 되어 있는 방사성물질, PCB, 기타 유해한 유기물 및 무기물을 제거하는 기술이며 비 다공성(Non-porous) 표면을 가진 오염물질뿐만 아니라 표면에 구멍이 많거나 미세기공이 있는 오염물질의 제염에 주로 사용된다. 화학작용제가 오염지역 표면과 화학 반응을 하도록 일정시간을 기다린 후에 연마패드(Abrasive pad)를 사용하여 표면을 문지르면 물리화학적 힘에 의해 화학작용제는 오염물질의 기저까지 침투하게 되고 화학적 또는 정전기적으로 결합하여 제염을 하는 방법이다.

장점으로는 제염특성에 맞게 화학작용제 조합이 가능하다. 단점으로는 회분식(Batch)으로 작은 오염 설비로 제염을 실시해야 하며 오염물질에 대한 최적화 과정이 필요하다.

2.2 물리적 제염

2.2.1 일반적인 고려사항

물리적 제염은 기계적 제염이라고 불리기도 하며 수세척, 닦음질, 진공처리, 그라인딩, 블라스팅(blasting), 스캐블링(scabbling), 코팅 제거등의 과정을 통해 오염된 표면에서 방사성오염물질을 제거하는 방법이다. 물리적 제염은 크게 표면을 세척하는 기술과 제거하는 기술로 나뉜다. 표면 세척 기술은 솔질, 닦음질, 수세척, 진공처리, 코팅제거 등의 과정을 이용하며 제염 후 제염대상 표면의 오염은 기계적으로 제거되지만 표면은 온전한 상태를 유지하게 된다. 반면에 표면 제거 기술은 그라인딩, 블라스팅, 스캐블링, 웨이빙, 스폴링, 피닝, 스케일링 등의 과정을 이용하여 표면 전체의 막을 벗겨내어 오염물질을 제거하게 된다.

물리적 제염은 화학적 제염의 대안으로 사용될 수 있으며 또한 화학적 제염을 보완하기 위해 사용되기도 한다. 화학적 제염방법과 비교해 볼 때, 물리적 제염방법은 장점과 단점을 가지고 있다. 우선, 물리적 제염방법의 장점은 다음과 같다.

- ① 거의 모든 표면에 대해 적용할 수 있으나 제염대상 물질의 특성에 따라 용이함의 차이는 있다. 예를 들어, 회반죽 같은 물질의 표면은 쉽게 제거할 수 있으나 금속의 표면은 제거하기가 매우 어렵다.
- ② 일부 표면의 경우에는 물리적 제염만을 사용해야한다. 콘크리트와 같은 다공성의 물질은 오염물질이 콘크리트 특성으로 인해 콘크리트 내부에 깊숙하게 위치하고 있다. 이 경우 화학적 제염을 실시하게 되면, 오히려 오염물질을 더욱 깊게 위치하게 되는 역효과를 발생시킨다.
- ③ 일반적으로 오염물질 전체를 제거할 수 있기 때문에 화학적 제염에 비해 높은 제염계수를 달성한다.
- ④ 오염된 표면 전체가 제거되기 때문에 표면 전처리와 같은 과정이 불필요하다.
- ⑤ 제거된 표면 물질을 바로 수집하여 폐기처분 할 수 있기 때문에 이온교환수지와 같은 2차 폐기물이 발생되지 않고 폐기물관리가 화학적 제염에 비해 단순하다.

물리적 제염에서 고려해야 할 단점은 다음과 같다.

- ① 고유 특성상 방사성핵종에 특화된 제염기술은 없다.

- ② 일반적으로 표면이 세척되면서 파괴되기 때문에 오염된 설비를 재사용하기 위한 제염목적에는 적용하기가 어렵다.
- ③ 주로 표면을 마모하여 제염을 실시하기 때문에 작업 도중 마모된 입자가 부유할 수 있어 이에 대한 방안을 마련해야 한다.
- ④ 복잡한 구조의 표면에 대한 접근성이 떨어진다. 예를 들어 가늘고 긴 파이프와 같이 제염해야 할 오염표면이 멀리 떨어져 있거나 설비의 틈이나 조인트와 같이 복잡한 구조일 경우에는 물리적 제염을 적용하기에는 한계가 있다.
- ⑤ 손이 많이 가는 기술로 오염된 표면 근처에서 제염장비를 가지고 작업자가 제염을 실시해야 한다. 이로 인해 제염과정에서 작업자가 방사선 피폭을 받을 수 있기 때문에 안전에 많은 주의가 필요하다.
- ⑥ 화학적 제염에 비해 오염 표면을 깊숙이 제거하게 되면 발생하는 폐기물의 부피가 매우 커지게 된다.

물리적 제염의 성능은 오염물질의 형태, 물리화학적 특성, 발생장소, 오염깊이, 표면의 특성 등에 따라 달라진다. 따라서 제염이전에 예비조사를 실시하여 해당 오염물질 제거에 적합한 물리적 제염방법을 선택해야 한다. 일반적으로 물리적 제염방법은 오염지역이 크고, 접근에 장애가 없는 오염물질에 대해 적용되고 있다. 물리적 제염도 화학적 제염과 마찬가지로 일반 산업체에서 이를 통해 많은 제염을 실시하여 관련된 기술의 경험이 상당히 축적되어 있는 상태이다.

2.2.2 물리적 제염기술 비교

2.2.2.1 코팅제거(Strippable coatings)

코팅 제거방법에 사용되는 코팅물질은 페인트 또는 폴리머로 오염물질 표면에 느슨하게 붙어 있는 방사성오염물질에 부착되고 함께 떨어지며 제거하는 방법이다.

장점으로는 단일 고체폐기물 발생 및 분진오염이 없으며 2차 폐기물이 발생하지 않는다. 단점으로는 비용측면에서 규모가 작은곳에 사용하며 쉽게 제거되는 오염물질의 제염에만 적용 가능하다.

2.2.2.2 원심쇼트 블라스팅(Centrifugal shot blasting)

원심 쇼트 블라스팅은 콘크리트 벽면을 직접 마모시켜

표면으로부터 페인트와 가벼운 코팅물질을 제거하는 제염방법으로 단단한 쇠구슬이 프로펠러에 의해 오염된 표면으로 강하게 부딪히게 되고 이로 인해 표면에서 떨어져 나온 미세 오염입자들이 진공장치를 통해 흡입되어 제거되는 방법이다.

장점으로는 콘크리트 표면의 페인트와 가벼운 코팅물질을 제거하는데 매우 효과적이다. 단점으로는 작업중 쇠구슬로 인한 작업자가 위해를 받을 수 있으며 장비의 크기에 좁은지역의 제염에는 적용이 불가능하다.

2.2.2.3 드라이아이스 블라스팅(Dry ice blasting)

블라스팅은 시멘트, 콘크리트, 플라스틱, 나무, 금속 등의 다양한 오염표면에 적용할 수 있으며 이산화탄소 알갱이(Pellet)를 블라스팅 매개체로 사용하여 표면을 세척하는 방법으로 제염과정에서 이산화탄소 가스를 대기 중으로 보내고 표면에서 떨어져 나온 오염물질만 남게 되므로 오염물질을 수거하는 장비와 이산화탄소를 걸러주는 장비로 구성되어 있다.

장점으로는 표면제염에 매우 효과적이며 이산화탄소 발생량이 적다. 단점으로는 깊은 공간을 제염하기에는 어려움이 있으며 공기압축기, 건조기 및 필터가 필요로 된다.

2.2.2.4 콘크리트 그라인더(Concrete grinder)

다이아몬드 그라인딩 휠(wheel)을 사용하여 콘크리트의 표면을 벗겨내기 때문에 평평하거나 약간 굴곡진 표면의 제염에도 적용 할 수 있으며 진공장비와 같이 사용하면 제염과정에서 발생된 분진을 제거하는 제염방법이다.

장점으로는 휴대성이 좋고 제염속도가 빠르며 다른 제염방법과 복합적으로 적용이 가능하다. 단점으로는 작은 크기로 인하여 넓은 지역의 제염에는 적용하기 어려움이 있다.

2.2.2.5 EN-VAC 로봇 벽 스캐블러(EN-VAC robotic wall scabber)

EN-VAC 로봇 벽 스캐블러는 그릿 블라스팅(Grit blasting)방법을 사용하여 평평한 표면을 제염하기 위한 원격조정 장비이며 다른 스캐블링 방법에 비해 매우 깊이 벽면의 오염을 제염할 수 있으며 그릿은 평균적으로 10회 정도 재활용되기 때문에 매우 적은 양의 폐기물 발생하는 제염방법이다.

장점으로는 넓은 면적을 제염할 수 있으며 원격조정으로 인한 작업자의 피폭을 방지 및 위험한 지역을 제염하는데 효율적이다. 단점으로는 벽면을 제염하기 위해서는 추가적인

보조설비가 요구된다.

2.2.2.6 피스톤 스캐블러(Piston scabber)

피스톤 스캐블러는 분진으로 인한 오염발생을 줄이며 큰 크리트 면이나 바닥을 제염하기에 유용하며 스캐블링 헤드에 붙어있는 피스톤에 의해 제염되며 원격조정으로 인해 작업효율이 좋으며 작업자의 안전성 측면이 매우 우수하다. 물을 사용하지 않기 때문에 2차 폐기물 발생이 적으며 제염과정에서 발생된 먼지와 파편은 HEPA 진공장치에 의해 흡입되며 폐기물드럼으로 이동되는 제염방법이다.

장점으로는 원격조정이 가능하며 평평한 바닥과 표면에 적용이 가능하다. 단점으로는 소음발생이 심하며 벽면의 경우 제염의 어려움이 따른다.

2.2.2.7 스팀 진공세척(Steam vacuum cleaning)

스팀 진공 세척방법은 오염지역에 유체를 분사하여 표면에 묻어 있는 오염물질을 기계적으로 제거한다는 점에서 고압수 세척방법과 유사하지만 과열된 물을 증기형태로 표면에 분사하는 과정이 다르다. 제염과정에서 분진의 발생이 거의 없으며, 작업자에 대한 위험도가 낮고 2차 폐기물의 발생이 적은 제염방법이다.

장점으로는 사용이 편리하고 표면이 빠르게 건조되어 넓고 평평한 지역의 표면제염에 적합하다. 단점으로는 복잡한 구조의 표면에는 적용하기 어렵고 기름성분의 오염물질 제거에는 효과적이지 않다. 또한, 고온의 증기로 인해 오염지역 표면이 손상 될 수 있으므로 사전에 검토가 필요하다.

3. 원전 해체 제염기술 적용 경험

3.1 화학 제염 기술

3.1.1 DfD 기술(Electric Power Research Institute)

DfD (Decontamination for Decommissioning) 기술의 목적은 기저금속과 오염물질이 있는 산화막을 천천히 균등하게 용해시켜 이온교환수지에서 제거될 수 있도록 화학조건을 만들어 주는 데 있다. 플루오르화 붕소산이 재질을 용해시키는 주 화학제로 사용된다.

DfD 기술개발 초기단계에서 300 시리즈의 스테인리스강은 플루오르화 붕소산에 의해 용해되지 않는다는 것을

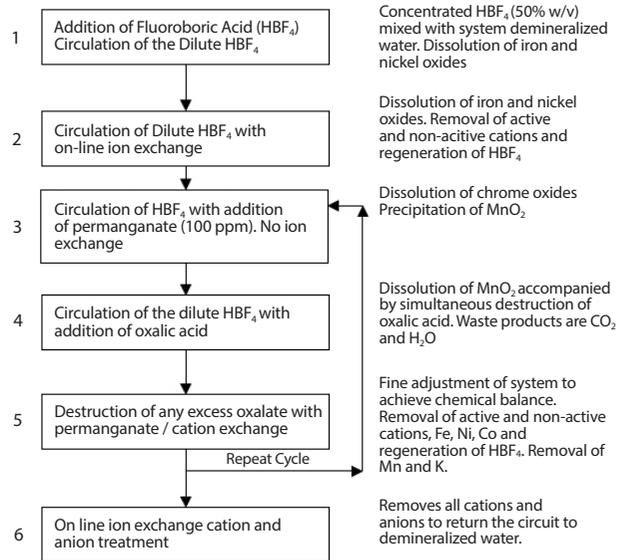


Fig. 1. Schematics of the EPRI DfD Process.

발견하였다. 스테인리스강이 용해가 잘 일어나지 않는 이유는 크롬막이 금속 주위를 덮어 용해가 일어나는 것을 방해하고 있었기 때문이다. 또한, 용액의 산화 전위(Oxidation potential)를 증가시켜주면 용해가 더욱 활발하게 일어난다. 따라서 금속의 활발한 용해를 위해 용액에 산화 전위를 증가시켜주는 것이 제안되었으며 이를 위해 DfD 기술은 산화제(Oxidizing reagent)를 사용한다. 제염과정에서 주로 사용되는 산화제는 과망간산칼륨(Potassium permanganate)이며 산화제로서 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 약 100 ppm의 과망간산칼륨 농도까지 스테인리스강의 부식율이 선형적으로 증가하는 것으로 밝혀졌으며 100 ppm을 넘어서는 부식율이 둔화되는 것으로 나타났다. Fig. 1은 DfD공정의 도식도를 나타낸다.

DfD 기술에 적용되는 온도는 제염하고자 하는 금속에 따라 달라진다. 300 시리즈의 스테인리스강이나 인코넬 합금인 경우 대기압에서 실제적 적용할 수 있는 최고 온도를 사용한다. 만약 온도가 적정수준 이하이면 금속의 부식율이 낮아질 수 있으며 제염과정도 더디게 진행되게 된다. 그러나 온도가 낮다고 해서 부작용이 발생하는 것은 아니며 단지 제염 과정이 느리게 진행되는 것 뿐이기 때문에 낮은 온도를 적용 시에는 그에 맞게 제염과정을 융통성 있게 변경하면 된다. 만약 탄소강과 400 시리즈의 스테인리스강을 제염하고자 한다면 이들 금속의 고유한 높은 부식율로 인해 상온에서도 DfD

기술을 적용이 가능하다. 또한 이들 금속에 대해서는 산화주기를 엄격하게 적용하지 않아도 된다. 그러나 제염과정에서 산화를 아예 적용하지 않으면 금속 일부분에서 비용해성의 표면막이 생성될 수도 있다. 또한 이러한 표면막은 방사성물질과 결합하여 제염계수를 떨어뜨릴 수 있기 때문에 산화조건을 만들어 주는 것은 제염과정에 필요하다.

방사성오염물질이 음이온인 경우에는 위에서 기술한 제염주기에서 제거되지 않는다(비록 이러한 오염물질도 마지막 제염과정에서 제거된다). 예를 들어 우라늄 농축공장을 제염할 때 자주 접하게 되는 Tc-99가 이에 해당된다. 따라서 제염과정에서 음이온 오염물질에 대한 조치를 취하지 않으면 이러한 음이온 오염물질의 농도가 증가되어 제염하고자 하는 표면에 다시 침적되는 문제가 발생하기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 음이온 교환 칼럼(Anion exchange column)을 제염과정에서 사용하는 것이 필요하다. 이러한 음이온 교환 칼럼은 플루오르보산염 형태(Fluoroborate form)로 존재하여 제염과정에서 오염물질이 플루오르보산염으로 변환되는 것을 방지한다. 이러한 방법은 음이온 오염물질을 제거하는데 매우 효과적인 것으로 밝혀졌다. 그러나 제염과정에서 음이온 칼럼을 지속적으로 사용해야 하는 것은 아니며 필요한 때에 간헐적으로 사용해주면 된다.

전기화학적 이온교환 셀(Electrochemical ion exchange cell)을 Fig. 2에 나타내었다 셀은 양극 격실, 음극 격실, 중앙수지 격실 3부분으로 구성되어 있으며 각각은 양이온 교환막(Cation exchange membranes)에 의해 분리되어 있다. 양극과 음극 격실은 각각 DC 전압과 연결된 전극을 포함하고 있다. 따라서 양극 및 음극 격실 속에 있는 용액들은 저장조를 순환하면서 음극 용액들은 셀의 아래쪽으로 내려가게 된다. 셀 아래쪽은 중력에 의해 용액에 포함된 금속입자들이 쌓이게 되며 이러한 물질들은 다른 폐기물 보관용기로 담겨지게 된다.

한편, 금속 폐기물처리와 관련하여 대안으로 어떤 경우에는 DfDX (Decontamination for Decommissioning, electrochemical ion eXchange) Cell을 관련된 지역의 폐기물 보관함 내부에 설치하는 경우도 있다. 이 경우, 다공성의 탄소로부터 음극이 만들어 질 수 있으며 금속은 이러한 다공성의 탄소 구조물과 적극적으로 결합하게 된다. DfDX Cell은 특수하게 제작된 보관함 마개를 가지고 있으며 제염이 완료된 후 마개를 제거하여 보관함에 시멘트와 같은 물질을 채워 최종폐기물 저장고로 보낸다. DfD와 DfDX에 관한 상세한

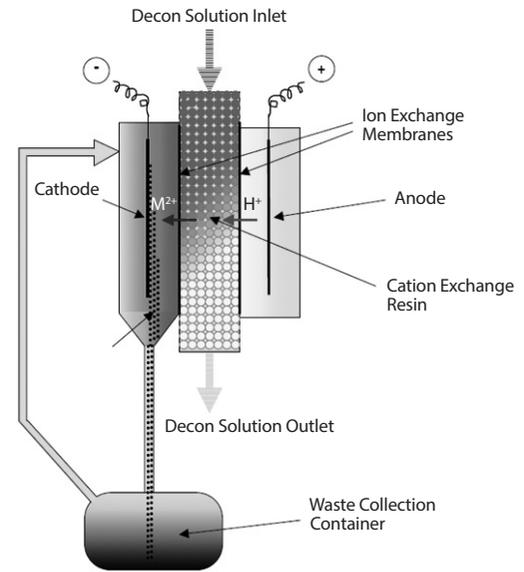


Fig. 2. Electrochemical ion exchange diagram.

기술적 사항은 EPRI 보고서에 각각 기술되어 있다[7].

3.1.2 CORD 기술(AREVA)

미국 원전과 달리 유럽 원전에서는 전체 시스템에 대한 화학적 제염을 HP/CORD UV (Permanganic acid/Chemical Oxidation Reduction Decontamination based on the acid permanganate Ultra-Violet light) 기술을 사용하여 실시하고 있다[4]. HP/CORD UV 기술은 원래 독일 Siemens KWU가 개발하였으나 현재 AREVA NP GmbH로 합병되어 기술개발 및 적용이 진행되고 있다[5,6]. 특히 AREVA NP GmbH는 제염하고자 하는 원전의 노형과 목적에 따라 기술을 조금씩 달리 적용하고 있으며 이를 Table 1에 나타내었다. 또한, HP/CORD UV 기술의 일반적인 제염과정은 Fig. 3과 같다. HP/CORD UV 기술의 장점은 다음과 같다.

- ① 재질간의 높은 호환성
- ② 과망간산을 산화제로 사용
- ③ 환원과 제염에 단일 화학제를 사용
- ④ 전체 제염과정은 물만 채워주면 진행됨
- ⑤ 모든 노형의 원전에 대해 높은 제염계수를 나타냄
- ⑥ 현장에서 화학제를 물과 이산화탄소로 분해함
- ⑦ 폐기물에 킬레이트가 포함되지 않음
- ⑧ 폐기물 발생의 최소화

Table 1. Processes of the CORD family developed by AREVA NP GmbH

Target	Applicable CORD process
Worldwide PWR/BWR, stainless steel	HP/CORD UV
Worldwide PWR RCP internals	HP/CORD
Worldwide Decommissioning	HP/CORD D UV
Westinghouse NPPs Inconel 600-SG, FSD	HP/CORD N UV
Japan RHR heat exchangers (Cu-alloys)	CORD C UV
GE NPPs Auxiliary systems, carbon steel	CORD CS UV
BWR Systems, stainless steel with > 0.06% C	HP CORD 2000 UV
Worldwide Removal ALPHA contamination	CORD ALPHA

한편, HP/CORD UV 기술의 큰 단점은 제염 후에 일부 재질에서 입자경계 부식손상(Intergranular attack: IGA)이 발견된다는 점이며 제염단계에서 옥살산이 형성된다. 이렇게 생성된 옥살산은 정화처리를 더욱 어렵게 만든다.

HP/CORD UV 기술의 큰 특징은 해당 표면의 모든 방사성물질을 제거하기 위해 여러 번의 제염주기 적용이 가능하다. 특히, 해체 원전의 경우 특화된 HP/CORD D UV 기술의 적용이 가능하다. 이 기술을 적용할 경우 우선 HP/CORD UV 기술을 이용하여 표면의 산화막을 제거한 후 기저 재질에 잔존하는 방사능을 HP/CORD D UV 기술을 사용하여 완전히 제거될 때까지 제염주기를 실시하게 된다. HP/CORD UV 제염기술은 가동 중인 원전뿐만 아니라 해체원전의 제염에도 널리 적용되고 있다. 특히, 해체원전에 적용하는 CORD 기술의 장점은 기본적인 HP/CORD UV 기술을 사용할 때보다 약 수십 배에서 수천 배 높은 제염계수를 나타낸다. Table 2는 CORD 기술을 사용한 발전소를 나타내고 있다.

3.2 원자력 시설 제염 경험

Table 3은 PWR 원전의 제염결과들을 요약하여 나타내었으며, ALARA(As Low As Reasonably Achievable)와 작업자 안전측면을 고려한 작업을 수행하였다[7, 8].

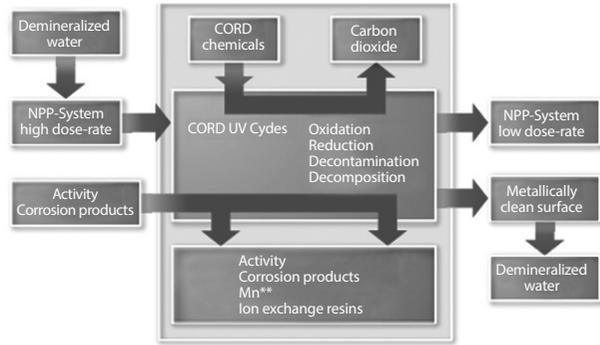


Fig. 3. Logistics of the HP/CORD UV process.

3.2.1 Maine Yankee 원자로

Maine Yankee 원전은 해체 초기에 원자로 냉각재계에 대한 화학적 제염을 실시하기로 결정하였다. 방사선안전 관리자가 평가한 결과 원자로 냉각재계에 대한 화학적 제염을 통해 약 150 person-Sv의 방사선피폭을 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

주요 제염결과는 다음과 같다[7].

- ① 10^2 Ci(3.7×10^{12} Bq)의 감마 방사능이 제거되었다. (98% Co-60 제거)
- ② 전반적으로 제염계수 31을 달성하였으며 선량율이 100 mR/h 이상인 지역에 대해서는 제염계수 89를 달성하였다.
- ③ 제염을 통해 이온교환수지에서 15.1 m^3 의 폐기물이 발생되었으며 시스템의 붕소제거과정을 통해 추가적인 2.5 m^3 의 수지 폐기물이 발생되었다.

3.2.2 Connecticut Yankee 원자로

Connecticut Yankee 원전의 전체 시스템에 대한 화학적 제염은 AREVA의 CORD 기술을 적용하여 실시되었다. 그러나 기본적 제염 접근방법은 앞 절에 기술된 Maine Yankee 원전의 제염과 동일하다. Connecticut Yankee 원전 제염에서 영구적으로 설치된 잔열제거펌프는 높은 유속을 제공해주었고 두 번째 주기에서 만족할 만한 제염계수를 확보하는데 도움을 주었다.

3.2.3 Big Rock Point 냉각재 시스템

Big Rock Point 원전의 전체 시스템에 대해 DfD 기술을

Table 2. Usage of CORD family processes for decontamination prior to decommissioning

NPP	Country	Year	Reactor type	OEM	System
FR2	Germany	1986	PWR	AREVA	Primary loop
Grundremmingen A	Germany	1989	BWR	GE	Recirc
BR3 Mol	Belgium	1991	PWR	WH	FSD including SG, RPV
VAK Kahl	Germany	1992/93	BWR	GE/AEG	FSD including SG, RPV & AUX
Rheinsberg	Germany	1994	PWR	VVER	SG
MZFR	Germany	1995	PWR	AREVA	FSD including SG
Würgassen	Germany	1997/98	BWR	GE	FSD without RPV, 11 systems
Connecticut Yankee	USA	1998	PWR	WH	FSD without RPV
Lingen	Germany	2001	BWR	GE	FSD without RPV, 7 systems
Caorso	Italy	2004	BWR	FSD	FSD, 2 systems
Trino	Italy	2004	PWR	WH	SGs and primary loop section
Stade	Germany	2004/05	PWR	AREVA	FSD including SG, RPV and AUX
Obrigheim	Germany	2006/07	PWR	AREVA	FSD including SG, RPV and AUX
Barseback 2	Sweden	2007	BWR	ABB	FSD including RPV
Barseback 1	Sweden	2008	BWR	ABB	FSD including RPV
Chooz A	France	2011	PWR	WH	SGs, pressurizer, loop sections

Table 3. Comparison of results to PWR full system decontamination[7]

Plant		Connecticut Yankee	Maine Yankee	Stade	José Cabrera
Surface area(m ²)	SS	1,997	1,997	5,000	894
	Inconel	929	139	12,000	2,313
Metals removed	(kg)	182	307	230	234
Radioactivity removed	Co-60 (Ci)	129	99	630 (total)	713.70
Resin generated	(m ³)	13.2	15.1	15.3	13.14
Decontamination factors	RCS	17.6	8.7	21.6~112	7.8~50.23
	AUX	9.8	44.8	17.9	33.07

적용하여 화학적 제염이 실시되었다. Fig. 4는 화학적 제염 과정의 유로(Flow path)를 보여주고 있다[7]. 화학적 제염은 2단계로 진행되었다.

3.2.4 Jose Cabrera 원자로

Jose Cabrera 원전은 스페인 Almonacid de Zorita 지역에 있는 PWR로 1968년부터 2006년까지 운전을 한 후 2006년에 원자로 정지를 하였다. Jose Cabrera 원전은 독특한 혼합방법(NITROX 기술 + DfD 기술)을 이용하여 전체 시스템에 대한 화학적 제염을 실시하였다.

Table 4. Major decontamination method

Decontamination before Decommissioning	System, Pipe	Chemical decontamination
		Mechanical decontamination
Decontamination after Decommissioning	Tank, Pool	High pressure water jet
		Jet
		Removing the coating
		Electrolytic polishing
		Chemical flooding
Decontamination after Decommissioning	Equipment, Pipe	Abrasive jet
		Ultrasonic waves
		Foam, Gel

4. 기기 및 계통별 제염방법 분류

계통 및 기기제염기술은 크게 해체전 제염과 해체후 제염으로 나뉜다. 해체전 제염의 경우는 계통, 배관, 탱크등이 있으며 해체 후 제염은 기기, 배관등으로 나뉘어 진다. 부피가 큰 기기 및 계통의 경우에는 화학적제염과 기계적제염을 동시에 사용하여 제염을 수행하는 방법을 활용할 수 있지만, 부피가 작은 경우에는 화학적 제염방법을 주로 사용하는 방법이 이상적이다. 주요 계통 기기별로 사용가능한 주요제염방법을 Table 4에 나타내었다.

5. 결론

향후 1차 계통의 주요 제염기기의 제염 및 해체를 수행하기 위해서는 안전성이 입증된 제염기술과 효율성 높은 제염방법 등의 복합적인 기술이 요구된다. 계통, 기기, 배관 등의 재질에 대한 다양한 제염방법을 개발하고 이러한 기술 및 장비를 사전에 가상의 환경에서 모사하여 평가하고 문제점을 파악한다면 실제 제염 시 시행착오를 줄여 비용을 절감할 수 있으며, 해체 시 작업자 피폭선량을 상당히 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 기 확보 제염기술과 향후 제염 기술개발을 기반으로 제염해체 기술에 대한 국가경쟁력을 확보 할 수 있을 것이다.

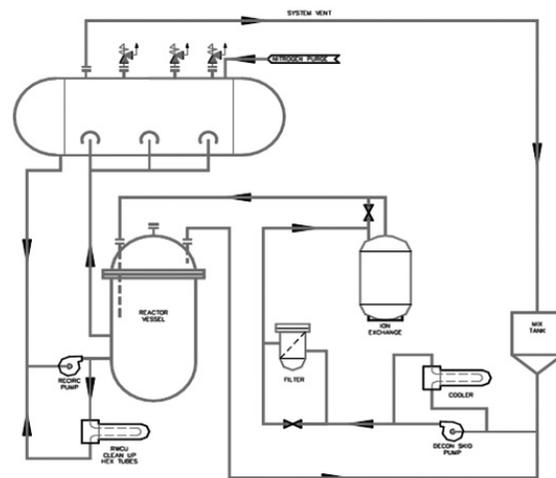


Fig. 4. Big Rock Point high-temperature flow diagram.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141510300310)

REFERENCE

[1] Ed. Feltcorn, "Technology Reference Guide for Radio-

- logically Contaminated Surfaces”, U.S. Environmental Protection Agency Report, EPA-402-R-06-003 (2006).
- [2] Hartwig, Ed, Reid, Richard, “Chemical Decontamination at Browns Ferry Unit 1”, Nuclear Plant Journal, vol. 21(5), 38-39, ISSN 0892-2055 (2003).
- [3] Information System on Occupational Exposure European Technical Centre, “Overview of the First Three Full System Decontaminations”, CEPN-No. 6 (1996)
- [4] P. Kinnunen, “ANTIOXI - Decontamination techniques for activity removal in nuclear environments”, vol. 3(58), 5-33, VTT-R-00299-08 (2008).
- [5] Siemens, “The state-of-the-art decon process for every job”, Siemens presentations in EPRI Chemical Decontamination Conference, May 18-19, 1998, South Carolina.
- [6] Siemens, “The world’s leading decontamination process for BWR and PWR”, Siemens presentations in 12th Pacific basin Nuclear Conference, October 15-19, 2000, Seoul.
- [7] International Atomic Energy Agency, “Lessons learned from the decommissioning of nuclear facilities and the safe termination of nuclear activities”, ISSN 0074-1884 (2006).
- [8] Electric Power Research Institute, “Proceedings: Decommissioning - Decontamination, ALARA, and Worker Safety Workshop”, EPRI - 01000648 (2000).