2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 연구용 원자로 2호기의 납 핫셀 제염 · 해체 경험

# Experience for the Decontamination and Decommissioning of the Lead Hot Cell in KRR-2 Facilities

정경환, 이동규, 이근우, 정기정
한국원자력연구소

요 약

연구로 2호기(TRIGA Mark - III)의 운영과 더불어 방사성 동위원소 생산을 위한 화학처리 공정용 납 핫셀이 건설 운영되어 왔다. 다목적 연구로인 하나로의 가동으로 1999년 방사성 동위원소 생산을 중단한 후 모든 시설은 안전 저장 형태로 유지되어 왔으나, 해체 프로그램에 따라 2002년 납 핫셀을 제염 · 해체하게 되었다. 여기에서는 납 핫셀의 제염 · 해체, 방사선 안전관리, 그리고 폐기물 관리 등의 과정을 서술하였다.

Abstract

The lead cells for process units of radioisotope production in KRR-2 (TRIGA Mark - III) were constructed and had been operated. In 1999 the radioisotope process units had stopped its operation due to normal operation of HANARO. In 2002, those lead cells were decommissioned by D&D program. It is described the decontamination procedures, the health physics programs, and the waste management.

## 1. 서 론

서울에 구 한국원자력연구소의 연구용 원자로 1, 2호기(TRIGA Mark-II&III)는 방사성동위원소의 생산을 통해 의료용 진단시약과 치료시약을 개발함으로서 국민건강 증진에 크게 기여를 하여왔으며, 원자력 전문인력 양성, 교육훈련 등 원자력 기술 발전에도 크게 기여를 하였다. 이제 지난 30여년간의 운영으로 연구용 원자로는 수

명을 다하게 되었고, 또한 30MW급 다목적 연구로인 하나로가 대전에서 준공과 가동에 들어감으로서, 연구로 1, 2호기는 폐로의 길을 걷게 되었다.

1972년 연구로 2호기 가동을 전 후로 하여 방사성 동위원소 생산용 process unit을 넣기 위한 납 핫셀 10기를 설치하여, 개봉 선원인 Tc-99m, Mo-99, I-131, Au-198, P-32, K-42 그리고 Rb-86등을 생산하였다. 방사성 동위원소 생산 공정은 표적준비, 표적의 중성자 조사, 화학처리, 품질관리, 포장 및 반출 공정으로 나누어지는데, 납 핫셀에서 수행되는 공정은 주로 화학처리 공정이다.

하나로의 가동으로 1999년 생산을 중단함과 더불어 안전 저장 형태로 유지되어 왔다. 납 핫셀은 중성자 선원을 취급하지 않았으므로 납 핫셀내 구조물 및 시설이 방사화 되지는 않았을 것으로 예상된다. 납 핫셀의 방사선/능 현황을 살펴보면 방사선/능 조사 당시는 단수명 동위원소 생산을 위해 납 핫셀을 사용 중에 있었으므로 높은 방사능 및 오염도를 나타냈었으나, 납 핫셀의 해체 공사시에는 납 핫셀 사용이 중지된지 오래되어 단수명 핵종 등의 붕괴로 인해 오염도는 현저히 떨어져 자연 방사선/능 수준이다.

납 핫셀의 해체는 외부 수도 및 가스 공급 배관, 뒷문 철거, 납유리 및 집게(Tungs)와 납벽돌 철거, 필터 housing 철거, 천장 및 형광등 철거 그리고 콘크리트 구조물 철거 순서로 수행하였다. 외부 수도 및 가스 공급 배관은 1차로 제염한 후 철거하였다. 철거된 배관의 방사능은 대부분이 검출 하한치 이하였으며, 일부 유리성 오염이 측정되었으나 2차 제염 후 완전 제거되었다. 납 핫셀 콘크리트 해체는 코아 진공기와 콘크리트 파쇄기를 이용하여 절단하고, 콘크리트 표면 제염은 Peening Preparation Tools을 이용하여 수행하였다.

## 2. 시설 개요

납 핫셀 (lead hot cell)은 연구로 2호기 동위원소 생산시설의 RI 제조실 #1 및 #2 (Room No. 133, 135 & 137, Fig.1)에 10개가 설치되어 있다. 각 핫셀의 전체 크기는 900mm × 1,150mm × 2,100mm이고, 2단으로 설치되어 있어 하단에는 폐액을 수집할 수 있는 콘크리트 구조물 (높이 750mm, 두께 250mm)로 되어있고 그 위의 양옆에는 두께 250mm의 콘크리트 구조물 (높이 1,350mm), 전면은 납벽돌(두께 50mm), 그리고 후면에는 차폐문이 설비되어 있다. (Fig. 2)

납 핫셀 전면 중앙 (높이 1,400mm)에는 납유리(500×500㎟) 1개가 설치되어 있고, 2개의 원격집게(Tongs)가 양손으로 다룰 수 있게 높이 1,000mm 위치에 설치되어 있다.

양 옆 벽면에는 전면으로부터 납 핫셀 내부로 호스 등을 넣을 수 있는 pipe 3개와 물 및 가스관등이 매설되어 있으며 전선 및 전선코드가 설비되어 있다. 한쪽 벽면 상부에는 필터 하우징(100×250㎟)이 설치되어 있어 air filter를 장착하게 되어 있고 배기가스는 duct를 통하여 pre-filter 및 HEPA 필터를, 혹은 필요에 따라 charcoal filter를 거쳐 대기로 방출하게 되어 있다. 천장에는 형광등(40W×2)이 설치되어 내부 조명에 사용되었다.

모든 납 핫셀의 바닥에는 1mm 두께의 스테인레스 스틸 트레이가 설치되어 있고, 전면의 납벽돌 내부는 테이프로 붙인 후 에폭시 페인트로 마감되어 있다. 납 핫셀내의 바닥 배수 및 액체폐기물 수집은 납 핫셀의 하부 콘크리트 구조물 속에 배수라인이 설치되어 있어 수집통에 수집된다.

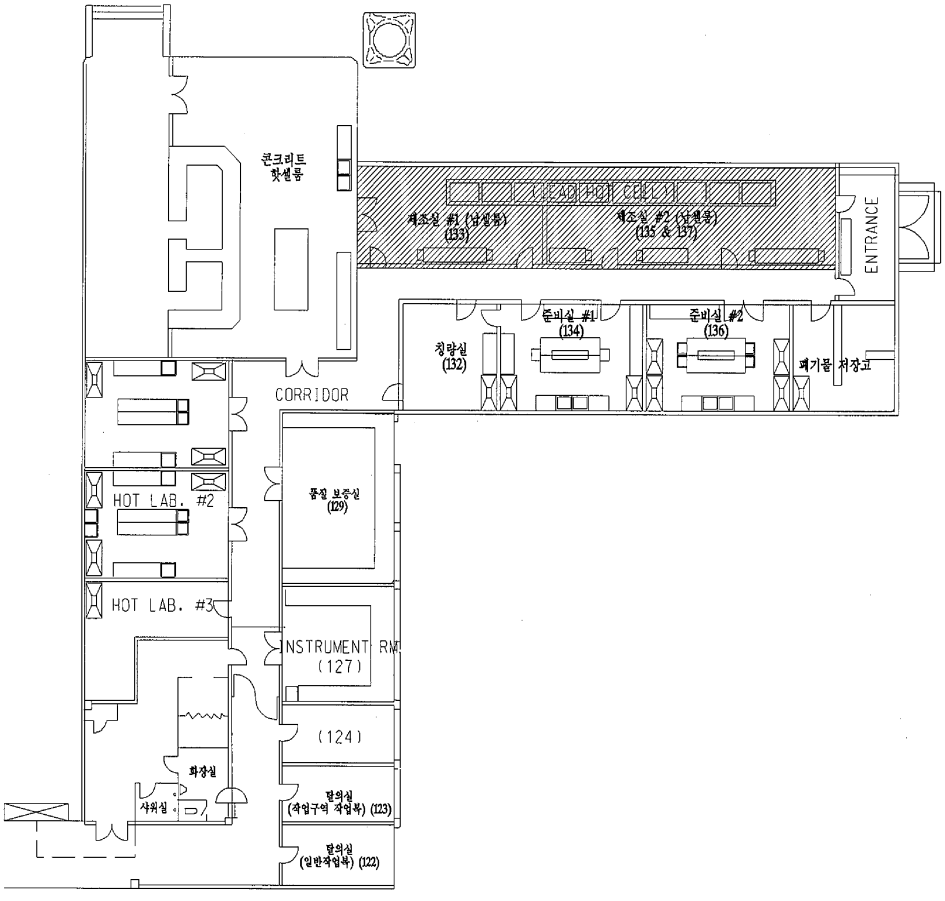


Fig. 1. First Floor Plan of Lead

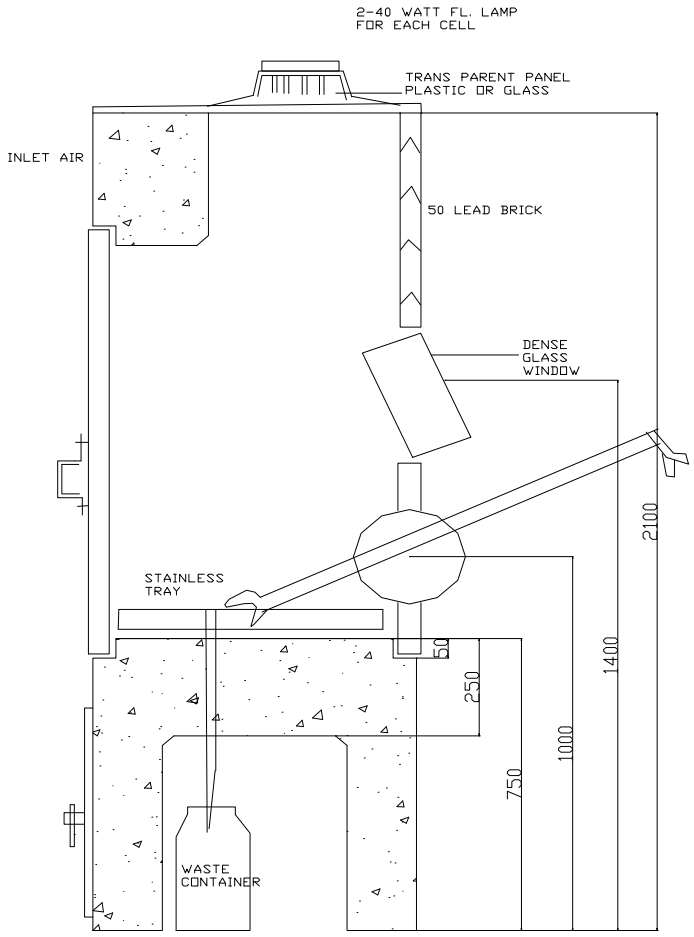


Fig. 2. Vertical Cross Section of Lead Cell.

## 3. 시설 현황

1972년 연구로 2호기 가동을 전 후로 하여 방사성 동위원소 생산을 위한 process unit으로 납 핫셀 10기를 설치하였다. 납 핫셀에서 생산되었던 방사성 동위원소는 개봉 선원으로 Tc-99m, Mo-99, I-131, Au-198, P-32, K-42 그리고 Rb-86등이다. 대전 하나로의 가동과 더불어 1999년 생산을 중단하였다. 방사성 동위원소 생산 공정은 표적준비, 표적의 중성자 조사, 화학처리, 품질관리, 포장 및 반

출 공정으로 나누어지는데, 납 핫셀에서 수행되는 공정은 주로 화학처리 공정이다.

방사성 동위원소 생산을 위한 화학처리 공정은 각각의 핵종마다 틀리지만, 대체적으로 조사된 표적 화합물을 산이나 알카리로 용해시킨 다음 증발시켜 여러 단계의 분리과정을 거쳐 방사성 동위원소의 수도를 향상시키는 방법으로 사용하였다. 이에 사용된 장치는 대부분 유리로 가공된 제품이고 일부 Hot plate, Heating, Mantle, 진공펌프 등이 있다.

방사성 동위원소의 생산을 위한 화학처리를 중단하면서 대부분의 화학처리 장치는 대전의 신규 방사성 동위원소 생산 시설로 옮겼으나 3개의 납 핫셀 내에 화학처리 장치의 일부인 초자류 진공펌프 및 시약품 등이 남아 있었다.

납 핫셀 하부에는 액체 폐기물 수집 용기(20ℓ PE통)에 폐액이 수집되어 있었고, 폐기 비이커류, 콘크리트 블록, 고무 호스류 등이 있었다.

## 4. 안 전

모든 제염 및 해체 활동은 현지 작업 요원과 일반 대중을 안전하게 보호하도록 계획되고 수행된다. 여기에 고려된 사항은 방사능 안전, 산업 안전 그리고 현장보안등이다. 이러한 인자에 적용된 사항은 다음과 같다.

### 가. 방사능 안전

훈련된 방사선 안전 관리 요원이 모든 제염·해체 활동에 대해 방사능 방어 측면에서 관리·감독을 한다.

※ 방사능 방어 기준에 따라 작업 수행 감독

※ 개인 피폭과 오염확산이 최소가 되도록 방사선 측정과 작업과정의 평가

※ 방사선 측정, smear 측정, 공기 시료 채취 자료, 제염·해체 작업 중 인체 피폭 등의 기록.

※ 작업 수행 시 계획단계의 예측기준과 비교 검토.

필요한 방사선 안전관리 업무를 수행하기 위하여 연구소 안전관리실 요원과 용역회사 안전관리요원이 상주하게 된다. 작업 인원의 방사선 방어는 방사선 관리구역의 설치, 방사선 작업 허가서 승인, 납 핫셀 내외의 오염도 측정, 그리고 방사선 방어의류의 적절한 사용을 통하여 확인된다.

방사선 측정 결과는 제염·해체 작업 진행에 판단자료로서 포괄적으로 이용될 것이다.

### 나. 산업안전

위에서 언급된 것처럼 관계되는 산업 안전은 일차적으로 방사선 차폐에 중점을 두고, 일반적인 산업안전의 계획과 수행의 포괄적인 지침은 다음과 같다.

1) 작업자에게 상해를 주는 위험을 최소화하기 위한 활동 혹은 사고에 따른 재정상의 손실을 막을 수 있는 예방활동.

2) 작업 지침과 절차에 따른 제염·해체 작업 수행과 작업 환경의 유지.

3) 모든 주요 사건 사례의 연구와 유사한 사건의 재발을 막는 활동.

### 다. 현장 보안

현장 보안에 고려되는 사항은 관리(통제)구역 설치, 안내 및 표지판 설치, 위험구역에 대한 접근 경보, 그리고 안전 장비의 구비이다. 이들 외에 가장 중요한 것은 모든 요원이 시설 접근을 최소화하는 것이다.

## 5. 계획 및 관리

연구로 2호기의 제염·해체를 수행하기 위하여 계획단계에서 각종 작업지침과 절차서를 수립하였으며, 여기에 작업 수행에 따른 필요사항들이 서류화되었다.

납 핫셀의 제염·해체 작업은 과제 책임자가 관리한다. 과제 책임자는 일일 작업과 단계별 작업을 총괄하며 진행 여부등 작업 관리를 조정하며 다음과 같은 업무를 수행한다.

※ 모든 작업자를 위한 상세한 작업 절차와 명령 등을 제공한다.

※ 필요시 작업자에 대한 적당한 훈련을 실시한다.

※ 과제 단계마다 목적과 기준을 정하고 문서화한다.

※ 제염·해체 작업이 방사선 보호, 산업안전, 폐기물 관리 기준에 따라 수행되는지 확인한다.

※ 방사선/능 측정 및 공기 채취자료, 폐기물 발생자료, 그리고 인체 피폭량의 기록 유지.

※ 각 단계마다 설정된 기준과 수행된 값과의 비교 검토와 문서화.

## 6. 작업 내용

### 가 준비작업

납 핫셀 제염・해체를 위한 준비 작업으로서 납 핫셀이 설치되어있는 방 전체의 방사선량을 측정하고, 납 핫셀 주변에 폐 기자재의 제염・해체작업을 수행하였다. 또한 제염・해체에 필요한 장비를 확보하였다.

1) 방사선 준위 측정

납 핫셀이 설치되어 있는 방에 방사선 준위 측정에서 고착성 오염도는 smear 시험법을 이용하였다. 오염이 비교적 높게 나타난 곳으로는 납 핫셀 안쪽에서 유리성 오염도 β= 26,600Bg/㎡, 고착성 오염도 500cpm정도였다. 납 핫셀 외부에는 최대 오염도가 유리성 오염도 β= 4,160Bg/㎡정도였고 외부 배관이 β= 661Bg/㎡ 정도 오염된 상태였다. 방에 설치되어 있는 핫싱크에서 유리성 오염도 β= 230Bg/㎡, 고착성 오염도가 500cpm, 표면선량 56μk/h로 측정되었고 폐기물 수집통에서 고착성 오염도 1,000cpm, 표면선량 139μk/h로 납용기에서 유리성 오염도 23,400Bg/㎡, 고착성 오염도 250cpm정도 측정되었다.

2) 납 핫셀 주변 폐기자재 해체

납 핫셀이 설치되어 있는 방의 벽에는 핫싱크 3대가 있었고, 동위원소를 병에 넣은 후 뚜껑을 봉합하는 장치가 설치되어 있었다. 또 주변에 폐기된 초자류와 동위원소 운반용 납용기류가 있었다. 주변 물품은 각 개체마다 오염여부를 측정하여 동일한 재료끼리 분류 수집하였다. 병 뚜껑 봉합장치 및 핫 싱크는 목재와 일부 철재로 제작된 것이므로 간단히 해체되어 역시 오염 준위와 재료에 따라 분류하여 수집하였다.

3) 제염・해체 장비 확보

제염・해체장비로는 콘크리트 파쇄기, 코아 진공기, 집진기, 샘플채취기, Peening Preparation Tools, 진공청소기, 그리고 가위기중기 등을 구매하여 준비하였다. 기타 일반공구, 소모성 자재비와 개인 방사선 방호 장비 등이 준비되었다.

**나 제염・해체**

1) 내부 잡 기자재 해체

납 핫셀 내부에 보관된 주요 기자재는 동위원소 생산용 화학처리 장치로서 대부분 초자류이고 일부 진공 펌프나 폐기통 등이 있었다. 이들은 쉽게 제거가 가능하였다. 제거된 물품은 폐기물 수집 기준에 따라 분류 수집되었다. 납 핫셀 내부에 SUS 트레이를 쉽게 분리가 가능하여 제거하였다.

2) 외부 가스 및 수도 배관 해체

납 핫셀 외부에 돌출 식으로 연결된 배관은 적절한 공구(pipe wrench)를 이용하여 철거하였다.

3) 뒷문 해체

납 핫셀 뒷문 1개의 무게가 30kg이나 되고, 뒷문과 벽과의 간격이 좁아 철거가 쉽지 않았다. 가위 기중기 위에 문을 고정시킬 수 있는 고정대를 설치하여 문을 고정시킨 후 문과 납 핫셀을 연결하는 장석의 나사를 풀어 분리하였다.

4) 납벽돌 해체

납벽돌은 V자 홈의 암수가 있어 밑에서부터 쌓아 올린 형태이다. 그리고 중앙에 납유리와 하단에 원격집게가 조인트로 접합되어 있었다. 따라서 원격집게의 조인트를 풀어 해체한 후 납벽돌을 한 개씩 분해하였다.

5) 필터 Housing 해체

진공청소기를 이용하여 필터 Housing 내부의 미세 먼지를 제거한 후 납 핫셀 상부에 있는 Duct를 분리하였다. 그리고 벽과 천정에 고정되어 있는 필터 Housing을 해체하였다.

6) 천장 및 형광등  해체

형광등에 연결된 전기를 차단하였다. 고정된 나사를 풀어 형광등을 해체하고, 산소 절단기로 천장 철판을 분리 해체하였다.

7) 콘크리트 해체

납 핫셀 콘크리트 해체는 최대한 크고, 다루기 적당한 조각으로 절단하여 해체하였다. Fig. 3.에 나타낸 바와 같이 우선 코아 천공기를 이용하여 Lifting hole을 뚫는다. 콘크리트 절단시 바닥으로 떨어지는 것을 방지하고 작업자의 사고를 방지하기 위하여, 이 구멍에 줄을 달아 이동형 기중기에 고정시킨다. 콘크리트 파쇄 부위를 코아 천공기로 뚫은 후 나머지 부위를 파쇄기로 부순다. 이동형 기중기에 매달린 절단된 콘크리트는 천천히 바닥에 놓여진다. 한 개의 납 핫셀은 4 ~ 6 개의 조각으로 분리된다. 분리된 콘크리트는 Peening Preparation tools로 표면을 갉아 내어 제염한다. 이때 나오는 분진은 집진기로 모두 수거한다. 대부분의 콘크리트 표면에서

방사성 농도가 Co-60이나 Cs-137이 약 $10^{-2}$ Bq/g 정도 검출되었으나 Peening Preparation tools로 제염한 결과 MCA 분석기로 검출하지 못하였다.

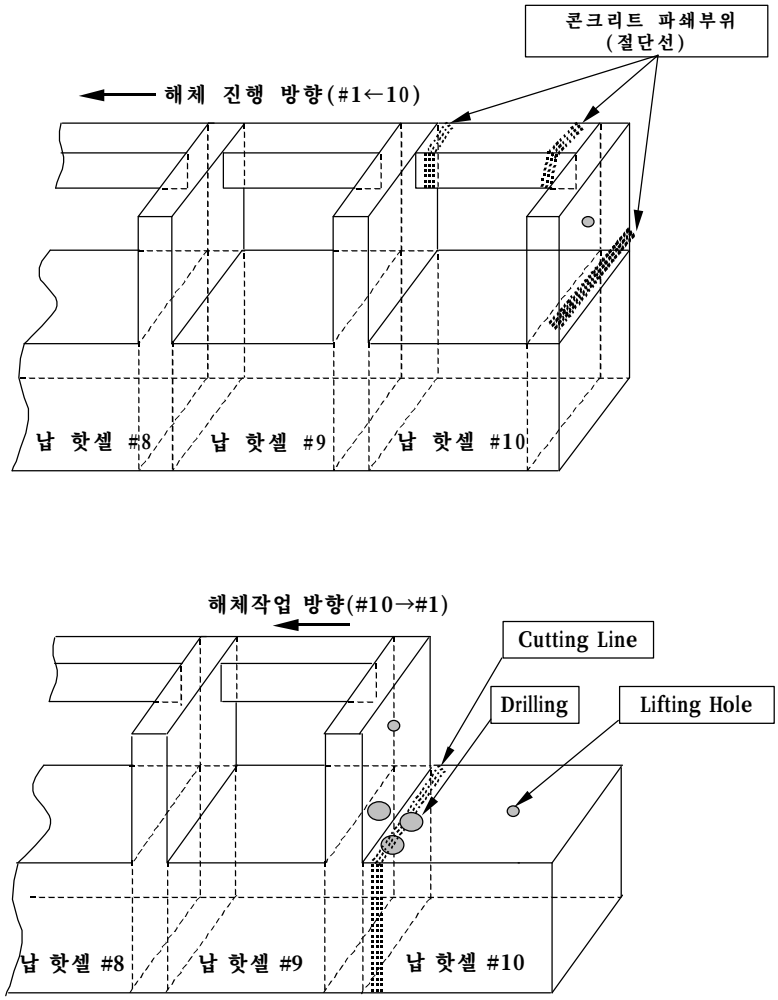


Fig. 3. Decommission of lead cell concrete

## 7. 폐기물 관리

해체 폐기물 관리는 폐기물 관리 지침과 관리 절차에 따라 방사선 준위(농도)별 그리고 재질별로 분류하여 수집 및 저장된다.

## 8. 결과 및 토의

제염·해체 대상물인 방사성 동위원소 생산용 납 핫셀의 오염 준위가 낮아 작업자 개인에 대한 방사선 안전관리보다 산업안전이 더 중요시되는 작업이었다.

그러나 연구로 해체시 보다 안전하게 작업하고, 해체 전 문제점 파악 및 방사선 작업 절차와 작업순서 숙지 그리고 방사선 물질의 제염·해체 경험 축적을 위하여 납 핫셀의 제염·해체 작업시 방사선 안전 관리에 만전을 기하고 작업 절차를 충실히 이행하면서 수행하였다. 또한 모든 해체 폐기물에 방사선 이력의 작성 등 일반 작업에 비하여 많은 해체 시간이 소요되었다.

콘크리트 해체 시 분진의 발생을 최소화하는 공법을 선택하였다. 이에 따라 습식 코아 천공기를 사용하게 되었고 해머식 콘크리트 파쇄기의 사용을 최소한으로 하였으며, 집진기의 가동으로 분진의 확산을 줄였다.

콘크리트 표면에 오염 준위가 낮고 표면에만 오염된 상태였다. 제염에 Peening Preparation Tools을 사용한 결과 모든 오염물을 제거할 수 있었다. 이 때 같이 사용된 집진기가  카트리지 형태의 필터에 펄스식 집진기로 모든 분진을 모을 수 있었으며 집진기 배기체는 다시 HEPA filter를 거쳐 대기로 나가게 하였다.

## 참 고 문 헌


1. IAEA, CLEANUP AND DECOMMISSIONING OF A NUCLEAR REACTOR AFTER A SEVERE ACCIDENT, Technical Reports Series No. 346, IAEA, Vienna (1992)
2. IAEA, DECOMMISSIONING OF FACILITIES FOR MINING AND MILLING OF RADIOACTIVE ORES AND CLOSEOUT OF RESIDUES, Technical Reports Series No. 362, IAEA, Vienna (1994)
3. IAEA, DECOMMISSIONING TECHNIQUES FOR RESEARCH REACTORS, Technical Reports Series No. 373IAEA, Vienna (1994)
4. IAEA, PLANNING AND MANAGEMENT FOR THE DECOMMISSIONING OF RESEARCH REACTORS AND OTHER SMALL NUCLEAR FACILITIES, Technical Reports Series No. 351, IAEA, Vienna (1993)

5. M.W. McMoy, R.P. Allen, H.W.Arrowsmith, SURFACE DECONTAMINATION OF SOLID WASTE, U.S. Department of Energy under Contract de-ac06-76RLO, (1830)
6. Jonny R. Harper Raymond Garde, Decommissioning the Los Alamos Molten Plutonium Reactor Experiment(LAMPRE I ), Los Alamos, New Mexico 87545, (1981)
7. Adolf F. Vigt, Head Reactor Decommissioning, Principal author, Decommissioning of Ames Laboratory Research Reactor, United States Department of energy under Contract W-7405-ENG-82 (1981)
8. UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT BERKELEY RESEARCH REACTOR DECOMMISSIONING PROJECT, IAEA, Biscrafi Northeast, Inc. (1990)