

연구용 원자로 2호기의 납셀 제염·해체에서 방사성 폐기물 최소화  
The Radioactive Waste Minimization from D&D Activities of The  
Lead cell of KRR-2 Research Reactor

정경환, 이동규, 이근우, 정기정, 박진호  
한국원자력연구소

요 약

TRIGA Mark - III(KRR-2) 연구로의 운영과 더불어 방사성 동위원소 생산을 위한 화학 처리 공정용 납셀이 건설 운영되어 왔다. 대전 하나로의 가동으로 1999년 방사성 동위원소 생산을 중단한 후 모든 시설은 안전 저장 형태로 유지되어 왔으나, 해체 프로그램에 따라 2002년 납셀을 제염·해체하게 되었다. 이 논문은 납셀의 제염·해체를 통하여 발생된 폐기물 양을 최소화하고, 방사성물질의 생성을 피할수 있는 기술적 인자를 도출하였다.

Abstract

The lead cells for process units of radioisotope production in TRIGA Mark - III(KRR-2) 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. This report describes the radioactive waste minimization from D&D activities. Technical factors to avoid the production of radioactive materials are introduced.

1. 서 론

서울에 구 한국원자력연구소의 TRIGA Mark-II&III 연구용 원자로(KRR-1&2)는 방사성동위원소의 생산을 통해 의료용 진단시약과 치료시약을 개발함으로써 국민 건강 증진에 크게 기여를 하여왔으며, 원자력 전문인력 양성, 교육훈련 등 원자력 기

술발전에도 크게 기여를 하였다. 이제 지난 30여년간의 운영으로 연구용 원자로는 수명을 다하게 되었고, 또한 30MW급 다목적 연구로인 하나로가 대전에서 준공과 가동에 들어감으로서, Triga Mark II와 III 연구로는 폐로의 길을 걷게 되었다.

1972년 KRR-2 가동을 전 후로 하여 10기의 방사성 동위원소 생산용 process unit을 넣기 위한 납셀을 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, 납셀에서 수행되는 공정은 주로 화학처리 공정이다.

대전 하나로의 가동으로 1999년 생산을 중단함과 더불어 안전 저장 형태로 유지되어 왔다. 납셀은 중성자 선원을 취급하지 않았으므로 납셀내 구조물 및 시설이 방사화 되지는 않았을 것으로 예상된다. 납셀의 방사선/능 현황을 살펴보면 방사선/능 조사 당시는 단수명 동위원소 생산을 위해 납셀을 사용 중에 있었으므로 높은 방사선 및 오염도를 나타냈었으나, 납셀의 해체 공사시에는 납셀 사용이 중지 된지 오래되어 단수명 핵종 등의 붕괴로 인해 오염도는 현저히 떨어져 자연 방사선/능 수준이다.

제염·해체 활동으로 다양한 폐기물이 생성된다. 방사성 물질에 오염된 폐기물 중에도 제염 가능 여부에 따라 다양한 처리·처분 방법이 선택될 것이다. 이중 경제적 가치가 있는 것으로서는 재가공 되거나 재사용 할 수 있을 것이다. 그러나 경제적 가치가 거의 없어서 방사성 폐기물로서 혹은 일반 폐기물로서 처분되거나, 처분 방법이 없으면 저장되어 어떠한 경우든 간에 원자력 산업에 중요한 경제적 비용이 된다.

제염·해체 작업으로 생성되는 최종 생산물을 경제적으로 이용 가치가 있는 주 생산물, 약간의 제염으로 다른 원자력 설비에 재사용 할 수 있는 중간 생산물 그리고 방사성 폐기물로 처리되어 처분되는 부 생산물로 나눌 수 있다.

따라서 제염·해체 폐기물에 따라 혹은 정책과 경제성에 의하여 제염·해체 활동으로 인한 최종 생산물의 종류 및 그 양이 결정된다. 제염·해체 작업에 적용되는 기술의 선정은 항상 효율성을 중시하면서 최종적으로 처분될 부 생산물의 발생을 최소화하는 방법으로 고려되어야 한다.

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

Preparation Tools을 이용하여 수행하였다.

본 연구에서는 연구로 2호기 납셀의 제염·해체를 통해서 발생된 최종 생산물을 분류·평가하고 이를 통하여 제염·해체 폐기물 선정에 문제점을 파악하며, 납셀의 설계 시 적용되어야 할 사항을 도출하여 보고자 한다.

## 2. 시설 설명

납셀 (lead cell)은 KRR-2 동위원소 생산 시설의 RI 제조실 #1 및 #2 (Room No. 133, 135 & 137, Fig.1)에 10개가 설치되어 있다. 각 셀의 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)

납셀 전면 중앙 (높이 1,400mm)에는 납유리(500×500mm<sup>2</sup>) 1개가 설치되어 있고, 2개의 원격집게(Tongs)가 양손으로 다룰 수 있게 높이 1,000mm 위치에 설치되어 있다.

양 옆 벽면에는 전면으로부터 납셀 내부로 호스 등을 넣을 수 있는 pipe 3개와 물 및 가스관등이 매설되어 있으며 전선 및 전선코드가 설비되어 있다. 한쪽 벽면 상부에는 필터 하우징(100×250mm<sup>2</sup>)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 납셀의 바닥에는 1mm 두께의 스테인레스 스틸 트레이가 설치되어 있고, 전면의 납벽돌 내부는 테이프로 붙인 후 에폭시 페인트로 마감되어 있다. 납셀내의 바닥 배수 및 액체 폐기물 수집은 납셀의 하부 콘크리트 구조물 속에 배수라인이 설치되어 있어 수집통에 수집된다.

## 3. 시설의 내역 및 현재의 조건

1972년 KRR-2 가동을 전 후로 하여 10기의 방사성 동위원소 생산을 위한 process unit으로 납셀을 설치하였다. 생산된 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 표적

준비, 표적의 중성자 조사, 화학처리, 품질관리, 포장 및 반출 공정으로 나누어지는데, 납셀에서 수행되는 공정은 주로 화학처리 공정이다.

방사성 동위원소 생산을 위한 화학처리 공정은 각각의 원소마다 틀리지만, 대체적으로 조사된 표적 화합물을 산이나 알칼리로 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 동위원소 생산을 위한 화학처리 공정은 각각의 원소마다 틀리지만, 대체적으로 조사된 표적 화합물을 산이나 알칼리로 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.

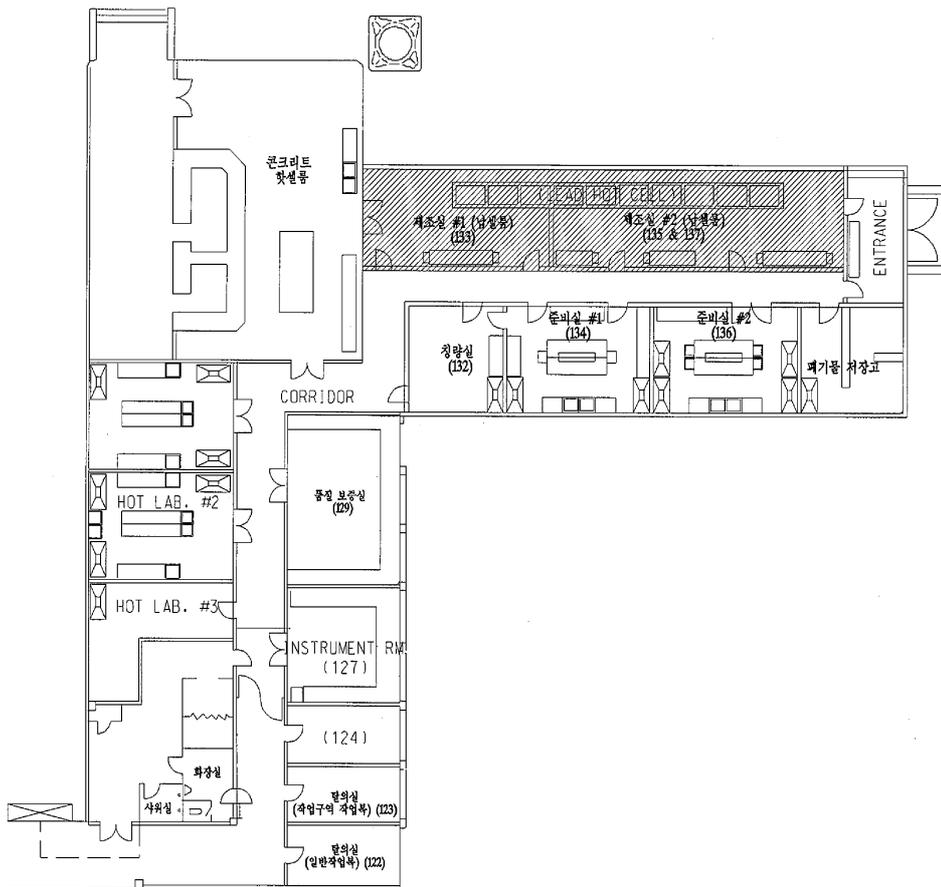


Fig. 1. First Floor Plan of Lead

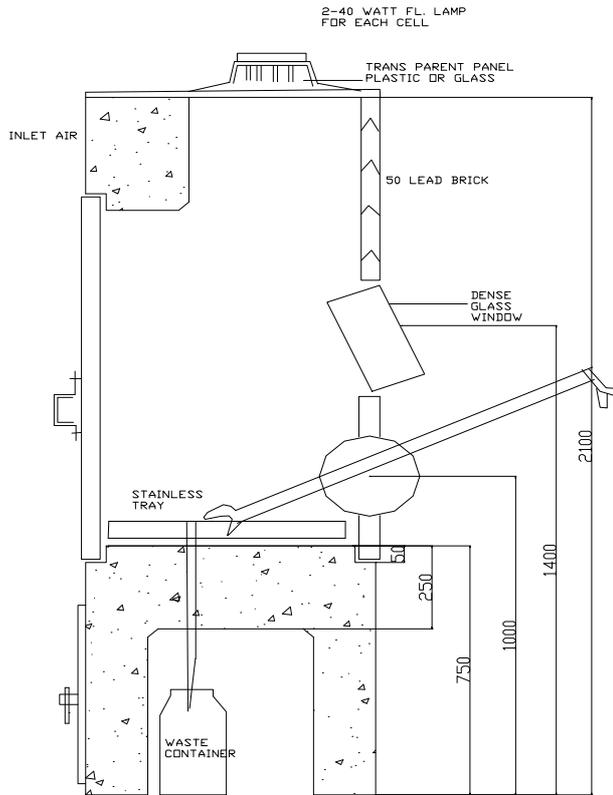


Fig. 2. Vertical Cross Section of Lead Cell.

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

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

#### 4. 해체 작업

##### 가) 준비작업

납셀 제염·해체를 위한 준비 작업으로서 납셀이 설치되어있는 방 전체의 방사선량을 측정하고, 납셀 주변에 폐기자재의 제염·해체작업을 수행하였다. 또한 제염·

해체에 필요한 장비를 확보하였다.

#### 1) 방사선 준위 측정

납셀이 설치되어 있는 방에 방사선 준위 측정에서 고착성 오염도는 smear 시험법을 이용하였다. 오염이 비교적 높게 나타난 곳으로는 납셀 안쪽에서 유리성 오염도  $\beta = 26,600\text{Bg}/\text{m}^2$ , 고착성 오염도 500cpm 정도였다. 납셀 외부에는 최대 오염도가 유리성 오염도  $\beta = 4,160\text{Bg}/\text{m}^2$  정도였고 외부 배관이  $\beta = 661\text{Bg}/\text{m}^2$  정도 오염된 상태였다. 방에 설치되어 있는 핫싱크에서 유리성 오염도  $\beta = 230\text{Bg}/\text{m}^2$ , 고착성 오염도가 500cpm, 표면선량  $56\mu\text{k}/\text{h}$ 로 측정되었고 폐기물 수집통에서 고착성 오염도 1,000cpm, 표면선량  $139\mu\text{k}/\text{h}$ 로 납용기에서 유리성 오염도  $23,400\text{Bg}/\text{m}^2$ , 고착성 오염도 250cpm 정도 측정되었다.

#### 2) 납셀 주변 폐기자재 해체

납셀이 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) 납셀 내부 잡 기자재 해체

납셀 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. 납셀 내부에 SUS트레이를 쉽게 분리가 가능하여 제거하였다.

#### 2) 납셀 외부 가스 및 수도 배관 해체

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

#### 3) 납셀 뒷문 해체

납셀 뒷문 1개의 무게가 30kg이나되고 뒷문과 벽과의 간격이 좁아 철거가 쉽지 않았다. 가위 기중기 위에 문을 고정시킬 수 있는 고정대를 설치하여 문을 고정시킨

후 문과 납셀을 연결하는 장식의 나사를 풀어 분리하였다.

#### 4) 납 벽돌 해체

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

#### 5) 필터 Housing 해체

필터 Housing 내부를 진공청소기로 미세 먼지를 제거한 후 납셀 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) 납셀 콘크리트 해체

납셀 콘크리트 해체는 최대한 크고, 다루기 적당한 조각으로 절단하여 해체하였다. Fig. 3에 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 기증기에 고정시킨다. 콘크리트 파쇄 부위를 코아 천공기로 뚫은 후 나머지 부위를 파쇄기로 부순다. 이동형 기증기에 매달린 절단된 콘크리트는 천천히 바닥에 놓여진다. 한 개의 납셀은 4 ~ 6 개의 조각으로 분리된다. 분리된 콘크리트는 Peening Preparation tools로 표면을 깎아 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.

### 5. 제염·해체시 방사성 폐기물의 최소화

폐기물 최소화 전략의 주요인자는 소스의 감소, 오염 확산 방지, 재사용 그리고 폐기물 관리 최적화이다. 이를 위하여 가능한 방사성 폐기물의 생성을 최소화 해야한다. 더욱이 방사성 폐기물의 생성을 확대시키는 오염의 확산을 막아야한다.

발생되었거나 발생된 가능성이 있는 물품에서 재 사용할 품목을 가능한 최적화한다. 그리고 적절한 처리 기술로 생성된 방사성 폐기물의 양을 최소화하는 것이다.

납셀의 제염·해체로 발생된 폐기물은 표1에 나타내었다. 콘크리트 표면의 제염 작업으로 대부분의 콘크리트를 일반 폐기물화가 가능한 폐기물로 변환시켰고 발생된

전체 폐기물 중 73%를 차지하였다.

재활용 및 재사용이 가능한 품목으로 납, 납유리, 그리고 핫셀 차폐문 등이다. 납과 납유리는 다른 원자력 시설에서 차폐 시설물로 재사용이 가능하다. 핫셀 차폐문은 차폐체인 납을 철재로 둘러싼 형태의 문이다. 따라서 동일한 형태의 핫셀에 재활용이 가능할 수 있으나 이의 수요가 의심이 된다. 재활용을 위해서 납과 철을 분리해야 한다. 재활용 및 재사용 가능 폐기물은 전체 폐기물 중 27%를 차지하였다.

표 1. 납셀 해체 폐기물

		/ (Bq/cm <sup>2</sup> )	(kg)
가		-	32276
		-	6760
가		-	2747
			702
			1650
		1.21	15
		0.92	74
	( )	0.52	258

## 6. 방사성 물질의 생성을 피하기 위한 기술적 인자와 적용

방사성 물질의 생성을 피하거나 최소화하는데 고려해야 할 중요한 기술 인자는 다음과 같다.

- 설비의 설계
- 재질 선정
- 설비나 시스템의 보수 유지
- 세척과 제염

납핫셀의 설계에서 내부의 작업이 높은 방사선을 띄고 수행하기 때문에 차폐가 우선이다. 따라서 이전의 핫셀 설계는 콘크리트의 밀도가 크고 두께가 두껍게 이루어진다. 이에 따라 단단한 구조를 갖는 핫셀의 해체 또한 어렵다. 따라서 구조적인 문제가 없다면 조립식 설계가 최우선으로 고려해 볼 만 하다.

각각의 셀마다 밑에 폐기물을 저장할 수 있는 방을 두어 셀과 폐기물 저장 룸 사이에 콘크리트 두께가 두껍게 된다. 폐기물 저장 룸사이에 콘크리트 두께가 두껍게 된다. 폐기물 저장룸을 따로 두거나 3개중 가운데 셀에 하나로 묶는등, 많은 폐기물 저

장름을 줄일 수 있다. 따라서 중간 바닥의 콘크리트가 두꺼울 필요가 없다.

재사용 및 재활용 품목을 전체 발생 폐기물에서 비중을 높이려면 콘크리트 벽체나 바닥을 납제품으로 대체 해야한다. 이는 건설비의 증가를 가져오나 재활용할 수 있다는 측면에서 차폐용 납제품을 활용해야겠다.

핫셀 밑에 폐기물 저장고가 쉽게 볼 수 없는 구조로 되어있어 폐액의 수위확인이 어렵다. 따라서 over flow에 의한 오염 사고가 일어나기 쉽다. 이의 개선이 요구된다.

#### 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)