

Hot Cell 제염 및 개보수 사례기술현황 분석

A State-of-the Art Report on the Case Study of
Hot Cell Decontamination and Refurbishment

KAERI 2008. 8.

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

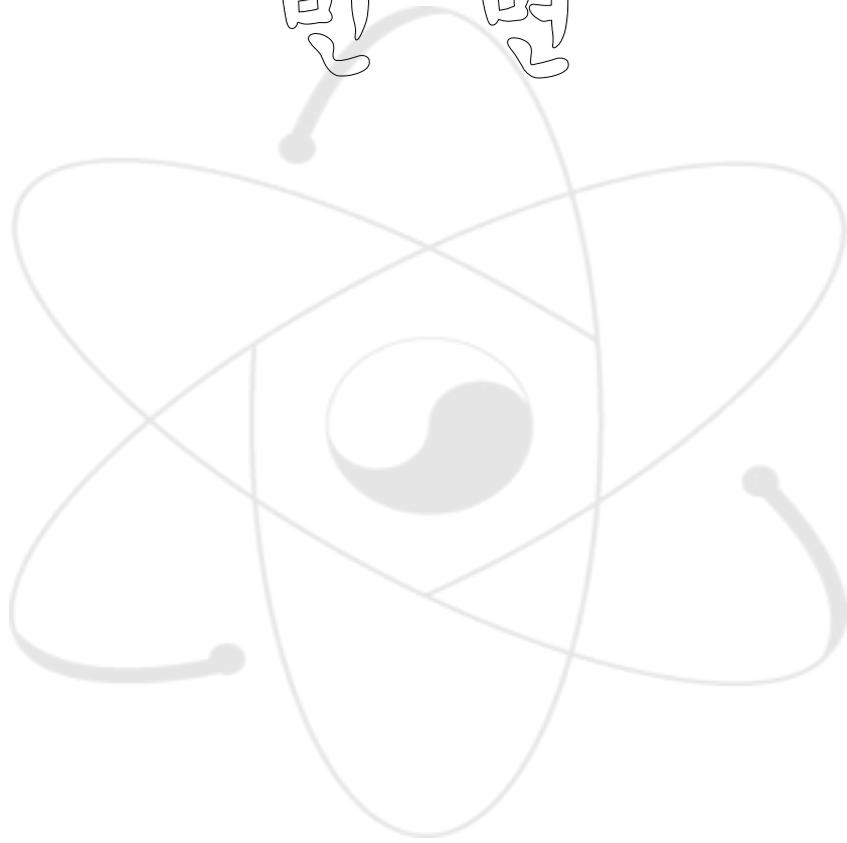
본 보고서를 2008년도 “사용후 핵연료 건식재활용시설의 개보수를 위한 제염방안 도출” 과제의 “Hot Cell 제염 및 개보수 사례” 에 관한 기술현황 분석 보고서로 제출합니다.



2008. 8.

주 저 자 : 원 휘 준
공 저 자 : 정 종 헌
문 제 권
박 근 일
송 기 찬

비명



목 차

제출문.....	i
목차.....	iii
표목차.....	v
그림목차.....	vi
제 1 장 서론.....	1
제 2 장 Hot cell 개보수 사례.....	3
제 1 절 미국.....	3
1. 개요.....	3
2. 시설 운영 내역.....	5
3. 해체 목적 및 업무 범위.....	5
4. 수행된 업무.....	6
제 2 절 일본.....	20
1. 서언.....	20
2. 안전대책의 기본 방침.....	22
3. CA-3 hot cell 개조.....	24
4. CA-5 hot cell의 in cell crane 보수.....	27
제 3 절 프랑스 LECA.....	31
1. LECA 시설 소개.....	31
2. 과제의 목적.....	32
3. 전략, 안전성 및 주요 기술적 사항들.....	33
제 4 절 프랑스 고 방사능 실험실.....	40
1. 고방사능 실험실.....	40
2. Hot cell.....	40
3. 결어.....	46
제 5 절 벨기에.....	47
1. 소개.....	47
2. 문제 정의(defining the problem).....	48
3. 해체 전략에 있어서 첫 번째 일반적 결론.....	48

4. 1 단계: 작업바닥 제염.....	49
5. 2 단계: Hot cell 철거.....	49
6. 방사학적 mapping에 의한 폐기물 처분 순서도 예측.....	50
7. 결어.....	52
제 6 절 영국.....	53
1. 소개.....	53
2. 방사능 시설.....	53
3. 개조 전 hot cell.....	54
4. 개조 전 작업실.....	54
5. 청정화 및 벗겨 내기.....	54
6. 계획 단계의 제한 사항.....	55
7. Hot cell 개조.....	55
8. 작업실 개조.....	57
9. 제염 공정.....	59
제 3 장 결 론.....	60
참 고 문 헌.....	63

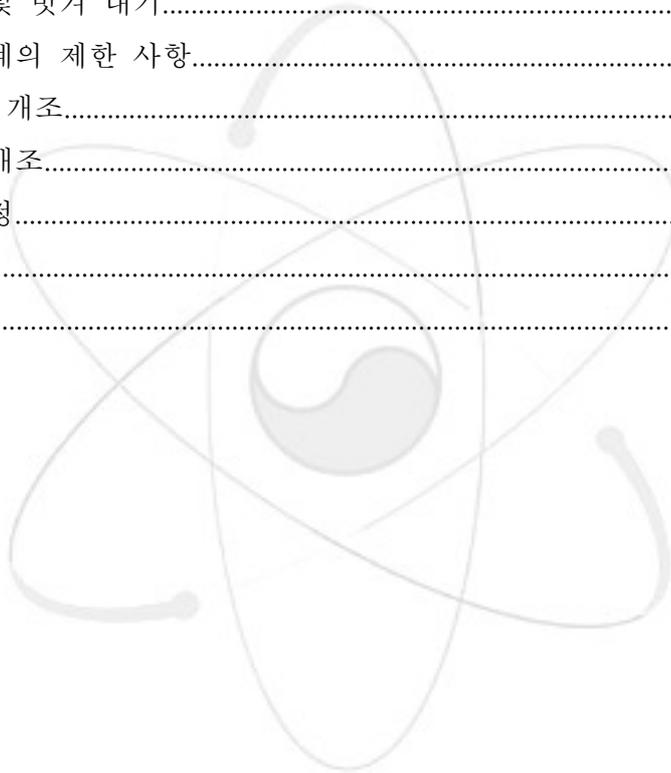
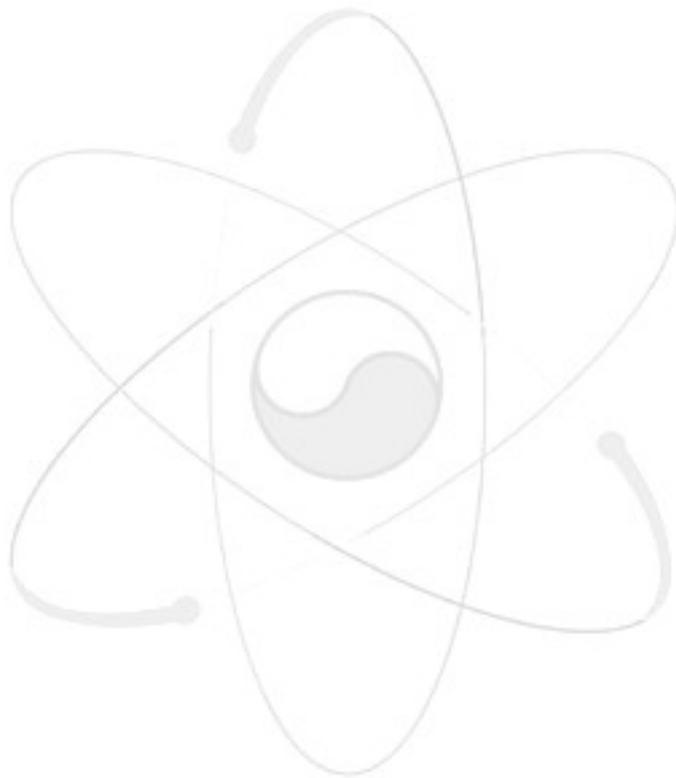


표 목 차

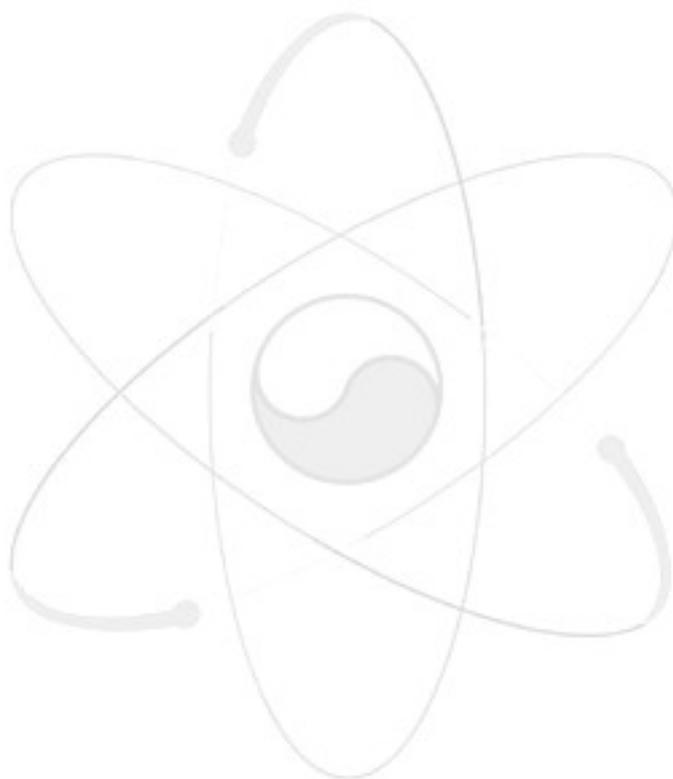
Table 1. Schedule of Work.....	21
Table 2. Challenges and Solutions of DD & R.....	23
Table 3. Main Radiological Restrictions.....	51



그 립 목 차

Figure 1. In-Cell Camera and External Video Monitor Viewing Remote Decontamination in Hot Cell M-1.....	11
Figure 2. Remote Loading of Radioactive Waste into a 16.5 L Can, Hot Cell M-1.....	12
Figure 3. Remote Use of Portable Shear Tool.....	12
Figure 4. Remote Vacuuming of Radioactively Contaminated Surfaces in Hot Cell M-1.....	13
Figure 5. Remote Removal of Strippable Decontamination Paint, Hot Cell K-3.....	13
Figure 6. Remote Abrasive Wheel Circular Saw Cutting the Shear Bed in Hot Cell M-3.....	14
Figure 7. Technicians Making a Full-Suited Hot Cell Entry through an Isolation Tent.....	14
Figure 8. Technicians Using Hand Held Vacuum Equipped Scabbler to Remove Fixed Radioactive Contamination.....	16
Figure 9. Process Flow Diagram of A-line.....	21
Figure 10. Flow Chart of Engineering.....	22
Figure 11. Repair of In-cell Crane in CA-5 Cell.....	27
Figure 12. Master Schedule.....	35
Figure 13. Side View(left) and Front View(right) of Mobile Shielded Upper Cell.....	36
Figure 14. Arrival of Travelling Crane(left) and Replaced Travelling Crane (right).....	37
Figure 15. Stainless Steel Box(left) and Setting the Box into the Cell from the Top.....	37
Figure 16. Strengthening of the Cell Bases for Seismic Withstanding Purposes(reinforced concrete).....	38
Figure 17. High Activity Laboratory in CEA Saclay.....	41
Figure 18. Actual View of Cell 11.....	42

Figure 19. View of Cell 11-29 at the Beginning..... 43
Figure 20. View of Cell 11-39 at the Beginning..... 43
Figure 21. View of Cell 15..... 44
Figure 22. View of Cell 15-22 Before(left) and After (right) Decontamination
..... 45



제 1 장 서 론

해외에서는 지난 수십 년간의 재처리 시설 가동 및 이를 위한 연구 결과 hot cell 이 노후화되었으며 내부는 방사능으로 오염되었다. 한편 이들 시설에 대한 안전규제 강화와 본래의 연구 목적을 다한 hot cell을 다른 용도로의 변경 및 완전 철거를 위해 이들 시설을 내부 제염한 후 다음 용도에 맞게 개보수하는 필요성이 증대되고 있다.

프랑스에서는 설계 가동 년수 도달과 계속되는 안전규정의 강화로 1960년대에 건설된 LECA(irradiated fuel examination facility)의 refurbishment 계획을 1997년부터 수립하였다. 이 계획을 2000년 국가 안전 규제기관에 제출하여 2001년에 승인을 받았으며 2005년에는 모든 refurbishment work을 완료하였다. 한편 일본은 고 방사능 및 알파방사능으로 오염된 hot cell refurbishment work의 경험이 거의 없었다. 그러나 고속로연료의 재처리기술개발을 위한 ‘조요’의 사용 후 핵연료 핀 절단, 용해, 추출, 정제 및 변환시험을 수행한 hot cell에 대한 새로운 재처리공정 시험을 실시하기 위해 1995년부터 2001년 사이에 hot cell을 개조하였다. 그 결과는 2007년에야 공개되었다. 고준위 알파오염 hot cell 내의 개조공사는 일본에서는 이전에는 이러한 종류의 작업이 없었던 것으로, 작업원의 내부 피폭방지 및 외부피폭 저감에 세심한 주의가 요구되었다. 한편 미국에서도 ANL, PNNL 및 ORNL의 hot cell refurbishment에 대한 연구결과가 1990년 대 중반부터 계속 보고되고 있다.

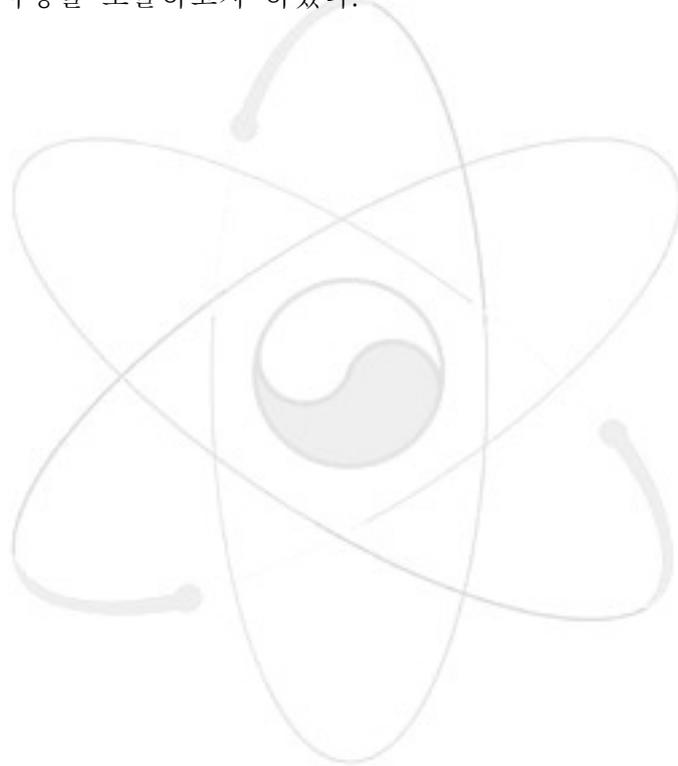
우리나라의 경우 사용후 핵연료 건식재활용연구시설인 DFDF 시설의 가동연수 증가에 따른 장비 교체 및 보수가 필요한 상태이며 핵주기 시험시설인 조사후 시험시설(PIEF)은 20년 이상 가동으로 노후화에 따른 안전성 확보를 위해 차후 10년 이내에 대단위 보수가 예상되고 있다. 그러므로 이에 대비한 관련 기술 및 고준위 방사성 시설 내부 보수기술의 개발이 필요하다. 한편, 원자력발전소는 고리 1호기가 수명연장을 1회 할 경우 2017년에 운전이 정지되므로 늦어도 2012년 전에 해체 준비단계에서 필요한 관련 기술을 확보하여야 한다.

고방사능 시설에 대한 제염보수 기술의 확보가 필요함에도 불구하고 우리나라의 후행 핵연료주기 기술개발의 이력이 길지 않아 국내 핵연료 취급시설인 DFDF, PIEF, IMEF 등과 같은 연구시설의 유지보수 및 교체수리에 적용하기 위한 연구에 대해 소규모 투자만 이루어지고 있는 실정이다. 그리고 개발된 제염 기술의 실용화를 위해 요구되는 다양한 실증 여건이 제대로 갖추어지지 않는 문

제점도 있다.

차 후, 사용후 핵연료 건식재가공, 부피감용 등 사용후 핵연료 관리이용기술 개발에 관련된 건식재활용 연구시설의 지속적인 활용을 위해서는 장비의 제염 및 교체수리를 포함한 관련 기술이 필요하므로 이에 대한 기술 개발 요구가 증가할 것으로 예측된다. 그리고 정치적인 상황과 연계되기는 하지만 북한 핵시설에 대한 해체의 필요성이 제기될 가능성이 존재하므로 이에 대비하고자 하는 노력이 필요하다.

본 연구에서는 해외 고 방사능 hot cell에 대한 개보수 경험을 사례별로 정리 고찰하였으며 이를 통해 개보수에 필요한 방법론, 문제점 및 이에 대한 해결 방안, 관련 필요 사항을 도출하고자 하였다.



제 2 장 Hot cell 개보수 사례

제 1 절 미국

Argonne National Laboratory-East에서는 Building 200 M-wing Hot cell들의 내부를 제염하는 과제를 수행하였다[1]. 본 과제의 목적은 Rn-220 이 환경으로 방출되는 것을 실제적으로 제거하고 hot cell 들을 비어있는 상태에서 제한적으로 사용하는 조건으로 복구하기 위한 것이었다. 1985년 이 과제가 개시될 당시 hot cell 내에 잔존하는 Rn-220가 매년 약 96.2 TBq(2600Ci)씩 외부으로 방출되었다.

5개의 hot cell 중 4개의 hot cell(K-1, K-3, M-1 and M-3)은 조사된 Th 붕들에 대한 연구에 사용되었었다. 이 연구는 M-3에서 붕들에 대한 정밀한 전단 (shearing), M-1 에서의 고농도 산을 사용한 시료의 용해, K-3 hot cell 에서의 시료 용해용액 제조 및 K-1 hot cell 에서의 폐용해 용액의 폐기물저장소에서의 이송 등을 포함하고 있었다. 증식 조건에 대한 정량 분석을 위해 원자력발전소로부터 가져온 조사된 핵연료 시편들을 분쇄하는데 Hot cel A-1이 사용되어졌다.

다섯 개의 모든 hot cell들에 대해 작업자가 방호장비를 장착하고 제염작업을 수행하기 전에 원격 제염 및 분해 작업이 요구되었다. 두 쌍의 고성능 manipulator가 원격 제염 및 분해 작업을 위해 구입되었다. 그 당시 운영되고 있었던 무선 조절 궤도 카트 시스템(rail cart system)이 원격 조절에 의해 방사성 폐기물(> 200 mrem/hr)을 운반하는데 사용되었다.

이 프로젝트는 1992년 6월부터 1996년 4월까지의 46개월 동안 ANL의 종사자들에 의해 수행되었으며 소요된 비용은 5.8×10^6 US \$ 이었다. 과제에 참여된 인력의 총 피폭 선량은 74.5 person-mSv(7.45 person-rem) 이었다.

5개 hot cell 내부는 비워지고 제한적으로 사용할 수 있도록 제염되었다. 25.8 톤의 방사성 폐기물이 발생하였으며 8.5톤의 오염된 차폐 납 벽돌이 제염 및 재활용되었다. 원격조작에 의해 발생된 208 L 드럼통 10개는 DOE 처분부지로 이송되었다. 폐기물 내에 존재한 총 방사능 양은 110 Ci 이었고 대부분 핵분열 생성물이었다.

1. 개요

ANL-East는 정부와 계약제로 운영되는 다양한 연구 과제를 수행하는 시설

로 시카고 중심가로부터 40 km 떨어진 곳에 위치하고 있다. 본 과제의 목적은 hot cell로부터 오염된 물질과 설비 제거, hot cell 제염 및 방사성폐기물을 처분하는 것이다. 최종 설정치는 Rn-220의 방출 감소, hot cell들을 비우고, hot cell 내부가 일반적인 방사선 background 준위인 1 mrem/hr 이하로 만드는 것이었다. 아래의 조치들이 요구되었다.

- 제염 팀 조직 및 운영
- 제염 계획 및 절차 수립
- 작업자, 공공 및 환경 보호를 보증하는 안전 분석 수행
- 원격에 의한 부피 저감 및 포장과 폐기물 처분을 위한 방사성 물질 및 설비 제거
 - Hot cell 의 방사선 준위를 background 까지 감소시켜 작업자가 공기 공급 및 완전 보호 의복을 착용하여 hot cell 에로 출입할 수 있도록 원격으로 표면 제염
 - 수작업을 동반하는 기술을 적용함에 의해 남겨진 방사성 물질과 설비 분해 및 포장
 - 느슨하게 붙어있는 방사성 오염물들을 제거하여 일반 background 준위(1mrem/hr) 이하로 감소시키기 위한 hot cell 표면 제염
 - 방사성 물질 및 혼성폐기물 기록 및 처분
 - 최종 방사능 측량(survey) 수행

본 과제의 부가적 목적을 아래에 기술하였다.

- 작업자 방사선 피폭, 방사능 내부 피폭 및 가능한 부상 최소화
- 방사성 폐기물 부피의 최소화로 특히 원격조정에 의해 발생된 폐기물 및 혼성폐기물의 최소화
- ALARA에 따른 방사선 피폭 범위 안에서 과제 예산의 최소화
- 제염 및 다른 활동들을 위한 가장 효과적 방법 결정

본 과제는 1992년부터 DOE로부터 예산을 제공받아 수행되었는데 ANL-E 기술 운전 팀, 환경안전 및 보건 팀(ESH, Environmental, safety and health)으로 구성되었다. Health physics는 hot cell 운영 및 감시에 대한 경험이 풍부한 인력이 선정되었다.

2. 시설 운영 내역

방사성동위원소에 대한 연구 및 동위원소 분리를 위해 건설된 M-wing 의 hot cell들은 Building 200에 소속되어 있으며 1961년 건설되었다. M-wings hot cell 시설은 megacurie를 취급하는 4개의 full size hot cell과 kCi 를 취급할 수 있는 8개의 hot cell(2개는 full size, 2개는 1/2 size, 4개는 1/4 size)로 구성되어 있었다. Full size hot cell의 규모는 5.5 m X 4.3 m X 3.7 m 이었다. MCi hot cell의 두께는 1.2 m, kilocurie hot cell의 두께는 0.7 m 이며 벽들은 모두 고밀도 강화 콘크리트로 건설되었다. 1984~1985년 사이에 M-wing hot cell들 중 5개는 해군(navy)의 증식 연구 과제(breeding research program)를 수행하는데 사용되었다. K-1, K-3, M-1 및 M-3 hot cell은 조사된 Th 붕들에 대한 연구에 사용되었다. 이 연구는 M-3에서 붕들에 대한 정밀한 전단(shearing), M-1에서의 고농도 산을 사용한 시료의 용해, K-3 hot cell 에서의 시료 용해용액 제조 및 K-1 hot cell 에서의 폐용해 용액의 폐기물저장소에서의 이송 등을 포함하고 있었다. Hot cell A-1(1/4 크기)은 Zion Nuclear Power Station PWR로 부터 꺼내어진 사용 후 핵연료를 검사하는데 사용되어졌다. A-1 hot cell은 분쇄된 조사 후 핵연료 시료를 포함하였다. Hot cell 내으로 보호 장비를 착용한 인력이 투입되기 전 조사된 핵연료 시편에 대한 원격 차폐 취급 및 원격제염이 필요하였다. 모든 hot cell들은 가동정지 상태에 있었지만 두 개의 hot cell은 사용 중이었다. 이러한 상황은 hot cell을 운영 및 보조하는 인력과의 협조 체제를 요구하였지만 제염 작업의 수행에 대해 방해가 되는지는 증명되지 않았다.

3. 해체 목적 및 업무 범위

1993년 DOE site로부터 환경에 방출되는 모든 Rn-220의 대부분은 ANL-E로부터 발생된 것이다. 본 과제의 목적은 hot cell들을 깨끗이 청소하고 이들을 제한적으로 사용할 수 있는 준위까지 제염하며 발생하는 방사성폐기물 및 혼설 폐기물을 처분하는 것이었다. 또한 본 작업의 목표는 방사능으로 오염된 hot cell들과 환경으로 방출되는 Rn-220 으로부터 위험성들을 감소시키는 것이었다. M-1 및 K-1 hot cell로부터 누출된 산 용액은 흡습성의 성질을 가지는 방사성 염(salt)을 형성하였다. 이들 방사성 오염물들의 표면에서 진행되는 수화 반응에 의해 Rn-220의 방출이 증가되는 것으로 보고되고 있다.

기술적 접근에 따른 업무 범위는

- 과제의 문서화 및 요구되는 질(quality), 훈련 및 경험이 풍부한 과제

원 운영

- 작업자가 보호 의복을 착용하여 hot cell 에로 출입 및 제염할 수 있도록 5개의 hot cell에 대한 원격 제염 및 방사성폐기물 원격제거
- 방사성폐기물의 처분을 위한 부피 감소 설비 및 구조물 및 이들에 대한 포장
- 일반 background 준위(1 mrem/hr) 이하로 감소시키기 위한 hot cell 제염
- 방사성폐기물에 대한 특성 분석, 서류화 및 처분
- Hot cell들을 비어있는 상태의 제한사용을 위한 복원

또한 본 업무에는 들어 올리는 힘이 45.4 kg 인 arm 및 22.7 kg의 고성능 manipulator 두 set를 구입, 설치 및 사용하는 것이 포함되어 있다. 원격 제염작업의 특성 상 이때까지 보유하고 있던 manipulator hand의 들어 올리는 힘은 6.8 kg 이었으며 계속적으로 성능이 저하되고 있었다. 이미 장착된 원격조절 궤도 이송장치는 원격조작에 의해 발생된 방사성 폐기물을 이동 및 운송하는데 사용되었다. Hot cell 내에서 사용하기 위해 마모성 원형 톱(abrasive wheel saw), 칼날형 톱(saber saw), 나사형 절단기(bolt cutter), 렌치(wrenches) 및 전단기(shear) 가 설치되었다. 진공법, 박리페인트, 계면활성제로 젖혀진 형짚 및 종이, 전기 브러시, 전기 바닥고르개(scabbler)와 같은 다양한 제염기술들이 이용되었다. Hot cell 출입을 위해 네 곳에 호흡공기 컴프레서, 전면 조각 호흡기, 공기분배 작업복, 전기 공기정화호흡기, 양방향 무전기, 압축공기 실린더, 작은 사람이 휴대 가능한 압축공기 보충 실린더 등을 구입하여 사용하였다.

4. 수행된 업무

가. 과제 관리

제염을 위해 1990년 8월 개념설계 리포트(conceptual design report, CDR)의 작성이 완료되었다. 1991년 예산이 DOE 로부터 확보되었고 1991년 환경평가 보고서의 초안이 작성되었다. 기술적 관리 계획(technical management plan)의 초안은 1991년 12월 작성되었다. 1992년 1월 환경 평가 보고서가 DOE에 제출되었다. 1992년 5월, 환경평가보고서는 DOE의 검토 내용에 의거하여 수정되었으며 국가 환경 보호 규제(National Environmental Protection Act, NEPA)의 하부에 위치하는 규제 설명 각서(Action Description Memorandum, ADM)로서 다시 제출되었다.

과제 수행 팀이 소집되어 사무실과 저장 공간이 할당되었으며 물질과 설비들이 조달되었다. 제염작업은 1992년 6월에 시작되었다. Hot cell 출입 작업이 수행되기 전에 방사선 작업자 훈련, 전신 방사능 검사, hot cell 출입을 위한 제염작업, mock-up을 이용한 공급 공기 의복과 호흡공기 압축 시설을 사용하기 위한 훈련 및 방사선 작업 허가서 작성 등이 완료되었다. 과제의 계획과 제염 계획은 필요할 때 언제든지 수정되었다. 조사된 핵연료 시료를 hot cell A-1으로 부터 이송하기 위해 절차서를 특별히 작성하였다.

매 주 주요 보고서, 월별 과제현황 보고서 및 6개월 사이의 현황 보고서를 DOE에 제출하였다. 조사된 핵연료 시료의 이송 및 원격조작 방사성폐기물들이 제거된 후, hot cell nuclear facility에 대한 등급은 'Category 3' 로부터 'Radiological facility'로 변경되었다. 이 변경은 DOE에 공식적으로 요청함에 의해 이루어졌다. 과제의 종료는 최종 방사성 조망 절차 준비, 최종 방사성 조사 보고서 작성완료, 동원된 인력 해산, 최종 과제 보고서 작성완료, 과제 종료 데이터의 작성 및 DOE 에로 종료사항 통보를 통해 이루어졌다.

나. 과제 엔지니어링

과제 엔지니어링 업무는 작업 계획, 특수한 장비 조달 및 원격 제염과 장비 크기 감소작업을 용이하게 하기위한 장비의 변경을 포함하였다. Hot cell들은 이미 무선으로 움직이는 선로 이송시스템, manipulator, 엘리베이터 및 이송창문과 함께 가동할 수 있는 조건을 가지고 있었다. 원격 제염 작업을 위한 강도와 하중 출력을 향상시키기 위해, Hot cell M-1 및 다른 hot cell에서 필요로 하는 원격 감용과 설비를 취급하기 위해 두 쌍의 조잡한 manipulator를 구입하였다. 이 manipulator들에 대한 명세에는 각 부품에 대한 주문 조립에 대한 요구사항이 없었다. 전기톱 및 드릴과 같은 휴대용 공구들은 manipulator 집게로 조작하는 것을 용이하게 하도록 개량되었다. 카메라와 방사선 검출기들은 원격으로 사용되도록 설치되어 hot cell 내 오염상황을 외부에서 파악하는 것이 가능토록 하였다.

다. Hot cell 특성 조사

Hot cell 내 오염된 모든 지점들을 확인하고 오염지도를 만들기 위해 60 cm X 60 cm 의 격자 시스템을 사용하여 hot cell 의 내부 표면을 원격 방사선 검출기 측량(survey)에 의해 초기 특성 조사가 이루어 졌다. 이 작업은 원격에

의한 방사성폐기물 포장 및 제염작업을 위한 방사선준위의 분포에 대한 정보를 제공하였다. 에너지 준위가 높은 곳의 방사선량은 1 Gy/h(100R/h) 이었다. 시료들을 스미어(smear)로 선정된 표면으로부터 원격 채취한 후 γ 및 α 방사능 분석을 위해 Argonne National Laboratory로 이송시켰다. 주요 방사성 γ 핵종은 Cs-137이었으며 이와 거의 동등한 양의 β 방사성 핵종인 Sr-90과 Y-90 이 존재하였다. α 방사성 핵종인 U-234 및 U-233은 Cs-137에 비해 1% 이하로 존재하는 것으로 나타났다. U-234의 양이 U-233에 비해 3배정도 많이 존재하였다.

제염과 방사성폐기물 포장을 위한 정보를 얻기 위해, 방사선 검출 측량 및 스미어 시료채취/분석은 원격 및 이후 보호복을 입은 출입 작업자에 의한 두 방법으로 수행되었다. 제염 작업의 효과를 결정하기 위해 방사선 측정은 반복적으로 수행되었다. Hot cell M-1, K-1 및 M-3로부터 방출되는 Rn-220의 양을 컴퓨터에 의한 온라인으로 읽었는데 이는 이들 hot cell에 대한 제염작업의 진행 상황을 파악하기 위해서였다. Hot cell M-3의 배기 굴뚝에 대한 감시는 방사성 폐기물의 재포장 및 하적을 위한 방사선 방출 측정 후 부가적으로 실시되었다.

Hot cell M-1 바깥쪽의 복도 표면에 방사선 오염구역은 직접 방사능 측정 및 건식 스미어 법으로 측정되었다. 이 후 이 구역은 잘 닦고 2.5 cm 가량의 콘크리트 두께를 갈아내어 깨끗하게 만들어졌다.

2.5 cm 두께의 딱딱한 잔여물 시료는 Hot cell M-1의 방사성폐기물 용기로부터 꺼내어진 후 원격으로 조각내어졌으며 방사성핵종의 함량이 습식으로 분석되었다. U-233 함량이 초 우라늄 문턱 함량(100 nCi/g) 보다 높은 것으로 나타났으며 진한 질산에서도 용해되지 않았다. 이러한 정보는 원격으로 조각내거나 전기 wire brush를 사용하도록 유도되었다. 방사성분진을 원격으로 제거하기 위해 HEPA filter가 달린 진공청소기를 사용하였다.

라. 준비 절차

Hot cell을 제염하기 위한 준비로서 아래의 조치가 취해졌다.

- 과제에 소속된 인원들에 대한 계획 및 업무할당
- 과제 계획 및 절차 작성
- 최근의 방사선 억제 조치 및 설비 운전 등에 관한 교육
- 최저 생물학적 검증(bioassay) 데이터 확보 및 전신 방사능 측정
- 작업을 협동으로 수행하기 위해 과제 비 참여자들과의 의사소통
- 사무실 및 방사선 피폭 측정설비, 생물학적 검증 감시, 락카, 개인별

보호 장비를 위한 공간 배열

- 필요 공구, 장비 및 폐기물 저장용기 조달

마. 제염 작업

Hot cell 제염작업은 두 단계로 진행되었다. 첫 번째 단계는 원격 제염이며 두 번째 단계는 보호 출입 제염(protected entry decontamination) 이다.

1) 원격 제염 단계

Hot cell M-1 및 K-1 내 1 Gy/hr(100R/h) 보다 높은 구역에 대해서는 작업자가 수 제염작업을 위해 공기가 공급되는 옷을 착용하고 hot cell 내로 출입할 정도의 방사선준위로 낮추기 위해 강력한 원격 제염작업이 요구되었다. 다섯 개 hot cell 각각에 대해 원격 제염작업이 수행되었는데 가장 제염이 어려운 방부터 쉬운 방으로 이며 순서는 M-1, K-1, M-3, A-1 및 K-3 이었다.

초기 작업은 원격 측량(surveying), HEPA 진공 청소, 습식 흠침(wipe) 세정 및 설비 해체, 방사성 폐기물 포장 및 분리이었다. Hot cell M-1 내 설비들은 장착되어 있는 지점에서 원격으로 제거되었다. 설비들을 풀기 위해 매니플레이터로 렌치를 취급하였다.

보호 출입이 가능하도록 방사능 준위를 배경준위(background level)까지 감소시키기 위해, 고 준위 방사능 설비와 위치를 원격으로 확인하는 것이 필요하였다. 방사능 hot spot을 확인하기 위해 원격 측량이 반복으로 수행되었다. 원격 측량기기가 원격작업의 다양한 결정을 위해 제염작업자에 의해 사용되었다. 원격 측량기기는 작업자 방사선 피폭 측정 및 Hot cell 출입을 위한 결정을 위해 사용되지는 않았다. 방사선 작업 감시자들은 건강 안전을 위해 모든 측정을 그들의 감시 시스템 하에서 보정된 장치를 사용하였다.

Hot cell 창문으로 볼 수 없는 지역의 상황을 원격으로 관찰하기 위해 외부 비디오 화면과 카메라를 연결하였다(Figure 1). 플레시 조명 형태의 카메라는 1 lux의 광 감도를 가지고 있었으며 별도의 조명이 없이 저장조 내의 조건들을 효과적으로 관찰할 수 있게 하였다.

원격 조작 단계 동안, 고 방사능 폐기물의 크기를 감소시켜 3.8 L 혹은 19L 통에 넣을 수 있게 하였다. 19 L 통에 넣는 순간의 사진을 Figure 2에 나타내었다. 원격조작에 의한 폐기물 선적을 위해 이 폐기물은 연속하여 이송부에서 제작한 250L 의 17C 철 강 드럼에 넣어졌다.

원격에 의한 폐기물 감용 기술은 렌치, 절단기(shearing), 톱 및 구부림 기계(bending) 를 사용한 분해기술을 포함한다. 원격 절단기를 사용한 절단기에 대한 사진을 Figure 3에 나타내었다. 휴대용 절단기가 유효한 반면, 대형 절단기에 의한 원격 부피 감소는 어려웠다. 화재로 부터의 안전을 위해, hot cell 내에서 플라즈마 토치나 아세틸렌 토치는 사용하지 않도록 결정되었다.

설비와 구조물을 모두 제거한 후, 접근 불가능 지역에 대한 제염과 방사능 측량이 가능하게 되었다. Hot cell 내에서 manipulator에 의해 사용 가능한 휴대용 장비에 의한 진공 세정법을 반복 적용하는 것이 요구되었다(Figure 4). 수용성 세정제를 함유한 면직물 헝겊 및 종이를 사용하여 오염된 표면을 문지르는 방법이 표면 오염으로 정의된 지역에 대한 제염에 효과적이었다. 수용액 기초의 박리 제염페인트가 원격 및 출입제염 단계 모두에 대해 광범위하게 사용되었다. 박리 제염페인트는 분사기, 롤러 및 솔에 의해 적용되었다. 적용 후 8시간이 경과한 후 원격으로 제염 페인트를 박리하였다(Figure 5).

연마 원형 톱 절단기술이 무거운 설비를 지탱하는 골격물의 크기를 감소시키기 위해 사용되었으며 세이버(saber) 톱이 액체 이송 탱크를 분리시키기 위해 사용되었다(Figure 6).

무선으로 조절되는 선로 카트 체계에 의해 원격 조작에 의해 발생된 폐기물을 이송하였다. 선로 카트는 250 L의 드럼 차폐 용기를 이송할 수 있었다.

원격 제염 단계에서의 작업을 하는데 있어서 매니플레이터에 대한 연속적인 보수 작업이 요구되었다. 매니플레이터의 고장은 설계 용량을 초과함에 의해 발생되었다. 제염 및 보수를 위해 기능이 불량한 매니플레이터를 제거하여 벨트 교체 및 조이는 것(tensioning)이 필요하였다. 그 외 다른 설비들에 대해서도 보수작업이 필요하였다.

2) 보호 출입 제염 단계

ALARA 계획의 지침 내에 포함되는 지점으로 원격 제염작업에 의한 방사성피폭 준위가 감소될 때까지 hot cell 내에서의 보호 출입이 연기되었다. 보호 출입이 원격 작업보다 제염 작업을 수행하는데 보다 더 효과적이었다. 보호 출입 제염작업이 수행되기 전, 적절한 보호 작업복과 장비의 조달 및 작업복을 입기위한 교육이 수행되었다. 이 장비에는 의복 내 모든 지역으로 공기를 분배하는 장비, 얼굴에 맞는 호흡장치, 양 방향 무선기 및 이어폰, 5분간 숨을 쉴 수 있는 공기 공급 압축 봄베가 포함되어 있다. 두 명의 작업자가 출입을 하기 위해서는 다음과 같이 최소 다섯 명의 부가적인 보조자가 필요하였다.

- Hot cell 의 창문을 통해 관찰하고 hot cell 내부에 있는 작업자로부터 요청사항을 받거나 지시할 수 있는 보조자 한명

- 출입 작업자의 옷을 입히는 것을 돕고 그들의 설비를 감시하는 시중으로서의 보조자 한명

- 호흡을 위한 공기 압축기 및 압축 호흡 공기 붐베를 감시하는 보조자 한명

- 비상사태 발생 시 hot cell 내에 있는 작업자를 지원하기 위해 완전 무장하여 출입준비를 완료한 보조자 한명

- Hot cell 밖으로 나오는 작업자를 검사하기 위해 적절한 장비를 가지고 방사능 서베이 및 비상사태 발생 시 다른 도움을 줄 수 있는 health physics 를 담당 한명의 보조자

Hot cell 내로의 출입은 전형적으로 출입구에 있는 격리 텐트를 통하여 이루어졌다(Figure 7). 공기 팽창식 발기 텐트들이 설치와 제거의 효율성을 위해 사용되었다. 공기공급 보호의복이 찢어지는 위험을 최소화하기 위해, 뽕죽하거나 절단면은 테이프로 봉하였다.

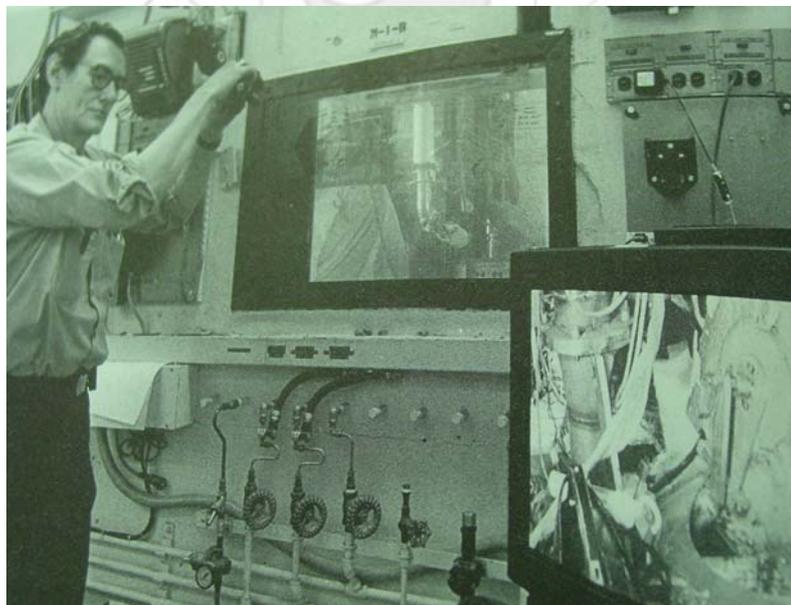


Figure 1. In-Cell Camera and External Video Monitor Viewing Remote Decontamination in Hot Cell M-1.



Figure 2. Remote Loading of Radioactive Waste into a 16.5 L Can, Hot Cell M-1.

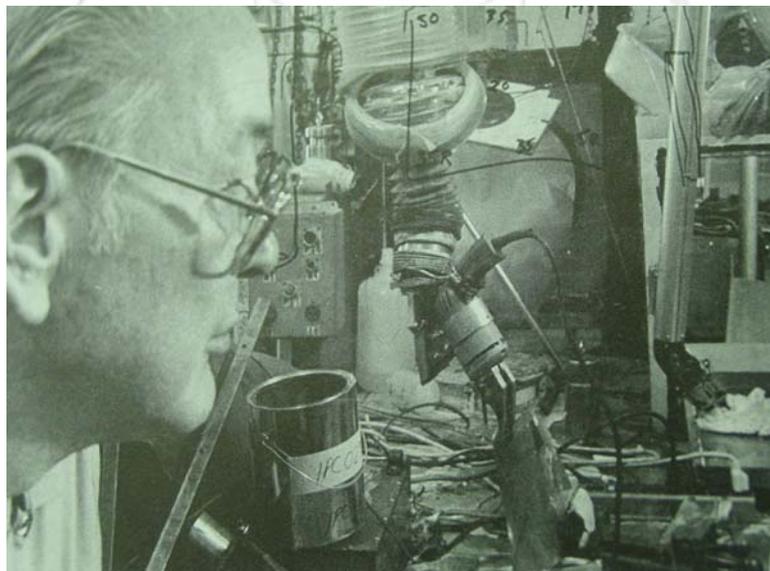


Figure 3. Remote Use of Portable Shear Tool.



Figure 4. Remote Vacuuming of Radioactively Contaminated Surfaces in Hot Cell M-1.

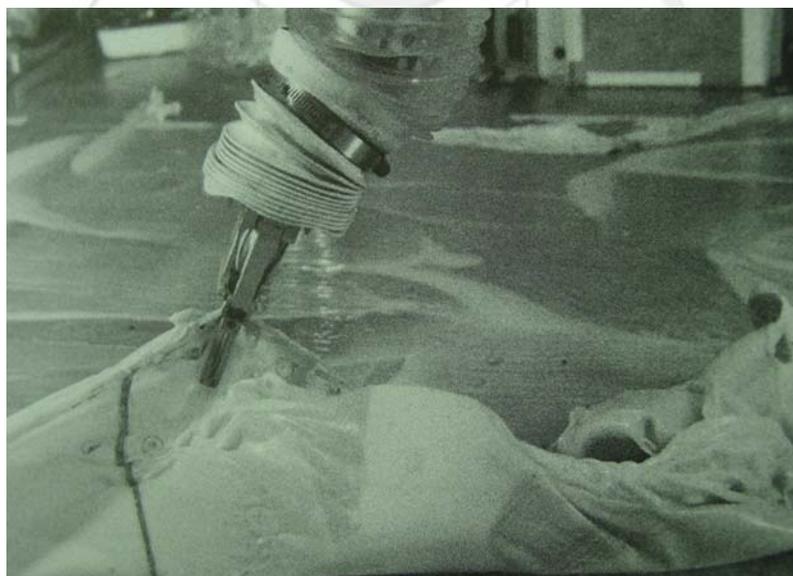


Figure 5. Remote Removal of Strippable Decontamination Paint, Hot Cell K-3.



Figure 6. Remote Abrasive Wheel Circular Saw Cutting the Shear Bed in Hot Cell M-3.



Figure 7. Technicians Making a Full-Suited Hot Cell Entry through an Isolation Tent.

출입 제염기술로서 HEPA 여과기 진공제염, 수용성 세정제를 함유한 면직물 형겔 및 종이를 사용하여 오염된 표면을 문지르는 방법이 사용되었다. 박리 제염 페인트를 반복적으로 사용하였다. 적용 후 손을 사용하여 제염 페인트를 박리하였다. 방사성 오염물이 표면에 고착되어 있거나 재질 내부로 침투해 들어간 지역은, 스케블링(scabbling) 법을 사용하였다. 강철 막대가 장착된 휴대용 칩 스케블러를 사용하였으며(Figure 8). 분진의 부유를 억제하기 위한 진공흡입기를 스케블러 측면에 장착하였다. 보다 강력한 스케블링을 위해, Hot cell M-1 북쪽 벽의 오염된 콘크리트 바닥 외부 면은 전기로 작동되는 잭 해머(jack hammer, 휴대용 착암기)를 사용하였다.

Hot cell 출입 제염의 마지막 단계에서는 공기공급 호흡장치 대신에 강력 공기정화 호흡장치(powered air purifying respirators)를 사용하였는데 이는 작업자들이 안전하게 작업을 수행하기 위해서였다. 이는 hot cell 내 단지 공기 채취 분석결과가 대기 오염이 강력 공기정화 호흡장치를 사용할 정도로 낮아졌기 때문이었다.

Hot cell M-1의 북쪽 벽의 바깥 복도 지역은 연구를 수행하던 중 오염되었었다. 이 지역은 형겔으로 닦아내어 제염하였으며 콘크리트는 jackhammer를 사용하여 2.5 cm 깊이까지 파내었다. 파내어진 지역은 새로운 콘크리트로 채우고 붉은색 페인트로 페인트칠을 한 후 노란색페인트로 덧 입혔으며 아직 남아있는 방사능을 표시하였다.

디지털 방사선량계를 사용하여 각 hot cell 출입에 있어서 대략의 피폭량을 즉각적으로 측정하였다. 이 방사선량계는 일정치를 선정하여 방사선 피폭선량 및 누적 피폭량이 그 한도를 넘으면 자동적으로 경보를 울릴 수 있도록 하였다.

바) 폐기물 처분

다섯 개의 hot cell 전체를 통해 핵분열 생성물이 혼성되어 존재하였기 때문에, 저 준위 방사성폐기물이 주요 방사성폐기물 형태이었다. 드림중 하나의 표면에서 Cs-137에 기인한 감마 방사선양이 145 R/h 이었기 때문에, 방사성폐기물 부피의 2.7 %는 원격으로 처리하였다(폐기물 포장 단위 표면은 > 200 mR/hr). 방사성폐기물은 처분을 위해 DOE Hanford site에로 보내졌다.

사) 해체 후 방사능 서베이

다섯 개의 hot cell들은 해체된 것이 아니라 비어진 것이고 제한적 사용을 위해 제염된 것이었다. Health Physics 요원들은 그들의 계획된 절차에 따라 최

종 방사능 서베이를 수행하였다. Hot cell들은 벽과 바닥에 대해, 분필로 남서쪽 모서리에서 시작하여 1 m 단위의 정사각형 격자를 표시하였다. 격자의 만나는 점은 잉크를 사용하여 바닥에 표시하였다.

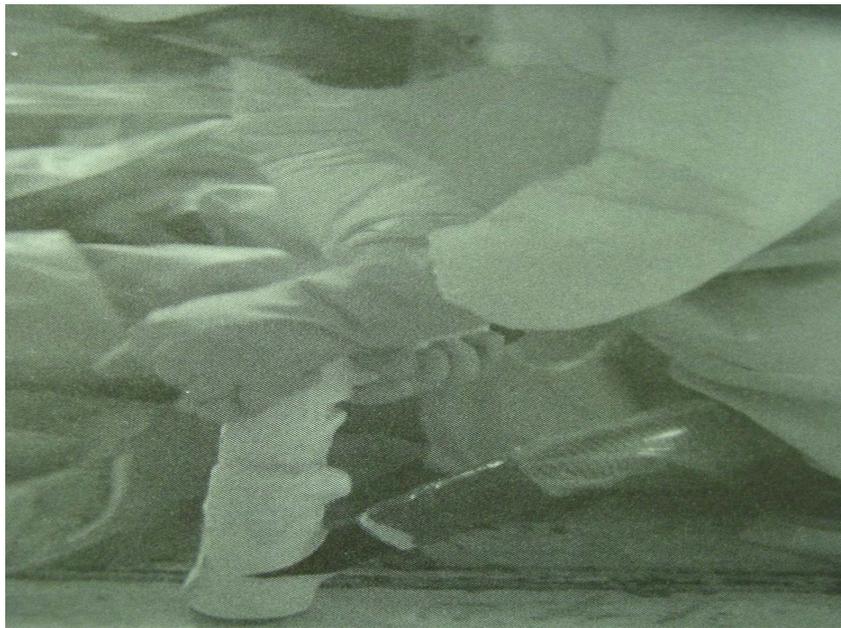


Figure 8. Technicians Using Hand Held Vacuum Equipped Scabbler to Remove Fixed Radioactive Contamination.

각 격자에 대해 기체 비례 서베이 장치를 사용하여 알파 모드에서 알파방사능을 직접 측정하였다. 특별히 방사능이 높은 지점들과 방사능이 없는 지점들에 대한 측정들은 hot cell 바깥에서 기록자에 의해 hot cell 지도 내에 그려졌다. Hot cell 내의 작업자와 hot cell 바깥의 기록자 사이에 무전기를 사용한 교신이 이루어졌다. 기록자는 hot cell 창문을 통해 격자위치를 확인하였다. 각 격자는 베타와 감마방사능을 구분하는 이온 챔버 방사능 측정 장치를 사용하여 감마 및 베타 방사능이 직접 측정되어졌다.

직접 방사능 서베이와 함께, 각 격자는 1 m² 면적 전체에 대해 한장의 종이로 smear 하여 그 종이를 분석시료로 사용하였다. 이 시료는 ZnS(Ag) 알파베타 섬

광검출기에 의해 알파 및 베타 모두에 대해 1분간의 적분 모드(integrate mode)에서 분석되었다. 100 cm²의 소규모 smear 시료들은 각 격자의 중심에서 취해졌으며 1 m² 면적시료와 동일한 방법으로 분석되었다.

아. 소요 예산

이 과제에 소요된 예산은 5.8 X 10⁶ US\$ 이었다. 과제 관리에는 725,000 US\$, Hot cell A1에 101,000 US\$, Hot cell M3에 502,000 US\$, Hot cell M1에 874,000 US\$, Hot cell K3에 285,000 US\$, Hot cell K1에 573,000 US\$, 남겨진 방사성폐기물의 채포장에 311,000 US\$, 특성분석에 310,000 US\$, 유지 및 감시에 923,000 US\$, 설비구매에 466,000 US\$ 및 제염 등 engineering에 730,000 US\$이 소요되었다.

자. 발생한 폐기물의 부피

본 과제에서 발생한 방사성폐기물 저장용기의 개수는 156통이었으며 총 부피는 79.1 m³, 총 무게는 23,496kg 이었다. 열 개의 208L 드럼은 2.1 m³에 1028 kg으로 원격으로 취급되어졌다. TRU 폐기물의 문턱 비 방사능이 100 nCi/g (3.7 TBq/g) 이기 때문에, 발생한 방사성폐기물은 최대 U-233 함량이 45 nCi/g (1.67 TBq/g) 미만으로 모두 TRU 폐기물이 아니었다.

손으로 직접 처리한 폐기물 용기들은 표면에서의 선량률이 제한선인 2 mGy/h(200 mR/h) 이하로 측정되었다. 원격으로 취급된 폐기물 드럼의 최대 표면 선량은 1.45 Gy/h(145 R/h) 이었다.

방사성폐기물 외에도, 제염 및 재활용을 위해 방사능으로 오염된 납 0.68 m³의 취하였다. 이 차폐 납벽들의 무게는 7759 kg으로 hot cell M-1 내 방사성 폐기물 탱크 주위를 방사선 차폐하는데 사용되었다.

차. 작업자 방사선 피폭 및 hot cell의 최종 상황

작업자의 방사선 피폭 선량은 법에 정한 지침서보다 훨씬 아래에 있었다. 전체 과제의 총 누적 피폭선량은 대략 74.5 person-mSv(7.47 person-rem) 이었다. Hot cell들은 바닥으로부터 상단의 방사선 준위가 1.75 m Hot cell K-3<2 μSv/h(<0.2 mrem/h), Hot cell M-3<2 μSv/h(<0.2 mrem/h), Hot cell K-1<5 μSv/h(<0.5 mrem/h), Hot cell A-1~25 μSv/h(2.5 mrem/h), Hot cell M-1~50 μSv/h(5 mrem/h)로서 제한 사용의 상황이 되었다.

카. 교훈 및 DOE에 보고해야할 사항들

- 안전을 보증하기 위해 공기선의 연결등과 같은 사항을 재 검토하기위한 절차들이 필요하다. 연결부위가 확실히 조여지지 않았기 때문에 오염된 hot cell 내에서 작업하는 동안 공급되어진 공기선 연결 부위들이 분리되었다.

- 방사선장에서 제염을 하기 위해서는 보충 작업자 보호체계가 필요하였다. 이 상황은 공급되는 공기선이 끊어지는 일이 발생하였을 때 필요한 것으로 나타났다. 압축 호흡 공기 실린더의 보충 시스템은 공기 공급선이 끊어지면 더 이상 필요하지 않는 것으로 보여진다. 안전한 철수를 위해, 보호 복 내에 사람이 운반할 수 있는 5분 동안 가동되는 소형 공기공급시스템과 같은 2차 보충 시스템이 위급상황에서 호흡을 위한 공기를 제공하였다. 이 장치는 방사능을 흡입하지 않도록 한다.

보충시스템들은 오염된 hot cell 내으로 들어가기 전 작업자가 옷을 입을 동안 호흡공기 압축기가 망가지는 경우에도 꼭 필요하다.

- 매니플레이터나 다른 원격조작 장비들이 제염 혹은 보수를 위해 제거되었을 때 방사능 오염의 확산을 피하기 위해 효과적인 절차와 단속방안을 수립하는 것이 필요하다. 본 과제에서의 초기 절차는 hot cell의 내부 중앙 복도지역에 있는 장치를 제염, 얇은 플라스틱 sheet로 잔여 오염이 있는 부분 포장 후 보수를 위해 hot cell 외부 지역으로 설비를 이동하는 것이었다. 이 절차는 hot particles들을 조절하는데 충분치 못하였다. 이송을 위한 보다 강력한 포장, health physics 담당자들이 설비가 이송되는 뒤에서의 방사능 감시, 바닥 넓은 지역에 대한 보다 빈번한 smear survey를 수행하는 절차가 첨가되었다.

- 원격 쪼개기 장치(chipping), 전기드릴에 의해 가동되는 철선 솔(wire brush) 및 HEPA 여과기가 장착된 휴대용 진공청소기를 사용하는 것이 두 개의 스테인레스강 용해 탱크 내부에 남겨진 방사성 잔유물의 딱딱한 층 2.5 cm 를 제거하는데 효과적임이 알려졌다.

- 오염된 hot cell 내부에 원격 및 수작업으로 박리성 수용액 베이스 제염페인트를 적용하는 것이 효과적임이 알려졌다. 이 페인트는 hot cell 내 바닥을 형성하는 금속판들 사이의 틈에 있는 방사성 미세 입자를 제거하는데 유용하게 사용되었다. Hot cell 표면의 재 오염을 억제하기 위해 오염된 hot cell 벽(벽종이)의 덮개로서 적용하는 것 역시 효과적이었다.

- Hot cell 내에서 사용할 수 있는 1 룩스의 광 감도를 가지는 플래시 빛 형태의 카메라를 원격으로 가용하는 것이 탱크내부나 장치의 뒷면 혹은 아래

면과 같이 숨겨진 부분을 관찰하기 위해 효과적임이 증명되었다. 카메라의 내부 움직임과 투시된 사진을 연결되어질 수 있는 hot cell의 창문 바깥에 위치한 비디오화면을 통해 영상들이 관찰되었다. 이와 같은 방법으로 만약 원한다면 비디오 정보를 기록할 수 있었다.

- 용해성 방사성 오염물이 존재하는 곳에서, 땀으로 젖은 보호복과 오염물이 접촉하는 것을 막기 위해 접촉하는 부분을 물이 스며들지 않는 테이프로 단단히 덮는 것이 좋은 방법이다. 무릎 부분에 대한 또 다른 방법은 무릎 pad를 보호복 외면에 부착하는 것인데 이는 무릎에 대한 오염을 피할 뿐만 아니라 무릎을 구부리고 작업하는 동안 작업자의 편안함을 유지하는데 도움이 된다. 옷의 접촉부분은 땀으로 젖게 되고 방사성 염들이 오염물로 존재하기 때문에 방사성 오염물들은 제염 중 보호복을 통과하여 작업자의 무릎 피부와 접촉하게 된다.

- 작업자가 방사선 통제 지역을 적절히 검사한다는 것을 보증하기 위해 손발 감시 지점에서는 자동 계수시간 방식을 택하는 것이 유리하다. 부적절한 계수시간을 피하기 위한 시도를 포함한 행정적인 통제 문제들을 피하기 위해 과제가 진행되는 동안 감시 지점들이 개선되었다.

- 방사선 준위 및 누적피폭을 인지하기 위해, 맞춘 점(set point)에서 경고음을 발생하는 방사선량계를 사용하는 것이 ALARA 조절 조치로서 유용하였다. Hot cell 출입 후 즉각적으로 방사선량계를 읽음으로써 작업자 및 감시자에게 방사선피폭을 조절하기 위한 정보를 제공하였다. 감시자는 월간 피폭 한도와 비교를 위해 개개인의 현재 피폭 기록을 유지하는 것이 가능하였다. TLD 배지를 통한 월간 피폭량 측정은 상기의 방사선량계에 의해 보충되었다.

- 다 겹으로 이루어진 전체 보호구의 끝 부분까지 완전히 공기를 분배하기 위해 공급되는 공기분배 설비를 작업자들이 잘 다루는 것이 중요하였다. 이는 효과적인 냉각과 땀에 의한 습기를 최소화하기 위해 필요하였다. 또한 기포 뚜껑에도 공기 공급장치가 있었다(역방향 공기공급).

- Hot cell 내으로 들어가는 출입구에 공기 팽창식 저장텐트를 설치함으로써, 비 공기 팽창식 형태에 비해 준비 시간이 25% 감소되었다.

- Hot cell의 가장 적게 오염된 지역으로부터 제염이 가장 어려운 지역으로 작업을 진행하는 것이 효과적이었다. 이와 같은 방법을 통해, 보다 어려운 작업을 위한 제염절차와 방사능 통제 조치들이 향상되었다. 보다 오염준위가 높았을 때, 작업자들은 시간을 효과적으로 사용하게 되었고 작업을 빨리 진행할 수 있었으며 이를 통해 방사선피폭을 최소화 하였다.

제 2 절 일본

일본 원자력연구개발 기구(JAEA) 내 Tokai 연구개발 센터의 핵연료주기 공학 연구소에 있는 고준위 방사성물질 연구시설(chemical processing facility 이하 CPF)은 고속로 연료의 재처리기술개발과 고준위 방사성폐액의 처리, 처분기술 개발을 위한 기초 시험시설이며, hot cell, glove box, hood 등의 설비가 설치되어 있다. 고속로연료의 재처리기술개발은, 1982년의 고속실험로인 ‘조요’의 사용 후 핵연료 핀들을 절단, 용해, 추출, 정제 및 변환시험을 수행하였으며 기존 공정에 의한 고속로 재처리의 기초 데이터를 취득하였다. 이 후, 새로운 재처리공정 시험을 실시하기 위해 1995년부터 2001년도에 걸쳐 hot cell등을 개조하였다[2,3,4]. 고준위 알파오염 hot cell 내의 개조공사는 일본에서는 이러한 종류의 작업을 볼 수 없는 것으로서, 작업원의 내부 피폭방지 및 외부피폭의 저감에 세심한 주의가 요구되었다. 원격조작에 의한 해체, 철거, 제염작업을 철저하게 수행한 후 hot cell 내에 직접 인력이 투입되어 수행한 해체, 철거 및 제염작업으로 이동하는 공정을 채용하였고 새롭게 설치된 기기의 unit화 등의 대책에 의해, 작업원의 피폭량을 예측보다 대폭 낮추는 성공을 거두었다.

1. 서언

CPF는 고속로핵연료의 재처리기술개발과 고준위방사성폐기물 처리 및 처분 기술개발을 수행하는 기초시험시설이며, 지금까지 실제 고속로연료를 사용한 추출, 분리 등의 시험이 여러 번 수행되었다. 선진 고속로연료 재처리 공정의 확립을 목표로 한 연구개발에 있어서 CPF를 적극적으로 활용하였기 때문에 기술의 고도화 및 다양화에 대응하는 것을 목적으로 개보수 공사를 실시하였다. CPF에는 재처리 시험용의 A-line 계열 hot cell 및 유리고화시험용의 B-line hot cell이 있으며 A-line 계열에는 CA-1부터 CA-5 까지 5개의 cell 설비가 있다. CA-3 cell은 고속로 사용 후 핵연료에 대해 용해로부터 추출까지의 시험을 실시한 연구 중심의 hot cell이다. CA-3 hot cell에서는 1995년까지 기존 공정에 의한 고속로 재처리의 기초 데이터를 얻는 연구를 수행하였고, 새로운 재처리공정의 개발을 목적으로 한 다양한 시험 연구의 필요에 대응하는 시험 시설로서 거의 모든 시험설비 및 utility 설비의 철거, 갱신, 개조를 수행하였다. 또한, 분석용의 hot cell인 Ca-5 cell의 천장 port, in-cell crane 등의 보수도 실시하였다. 이러한 hot cell의 개조 외에도 globe box의 신설 및 갱신, 각종 분석 장치의 설

2. 안전대책의 기본 방침

본 공사는 고 선량의 알파 오염 셀 내에서의 작업이 주로 이루어지기 때문에, 오염문제의 방지 및 피폭관리에 특별히 세심한 주의를 요할 필요가 있었다. 작업자의 피폭량 저감에는 작업량과 작업시간을 가능한 최소화하는 것 및 hot cell 내 공간 선량률을 가능한 낮추는 것이 유효한 대책이다.

안전대책의 기본 방침과 본 공사의 흐름을 Figure 10에 도시하였다. 또한, 주 피폭량 저감을 목적으로 하여 실시한 사항들을 Table 2에 정리하였다.

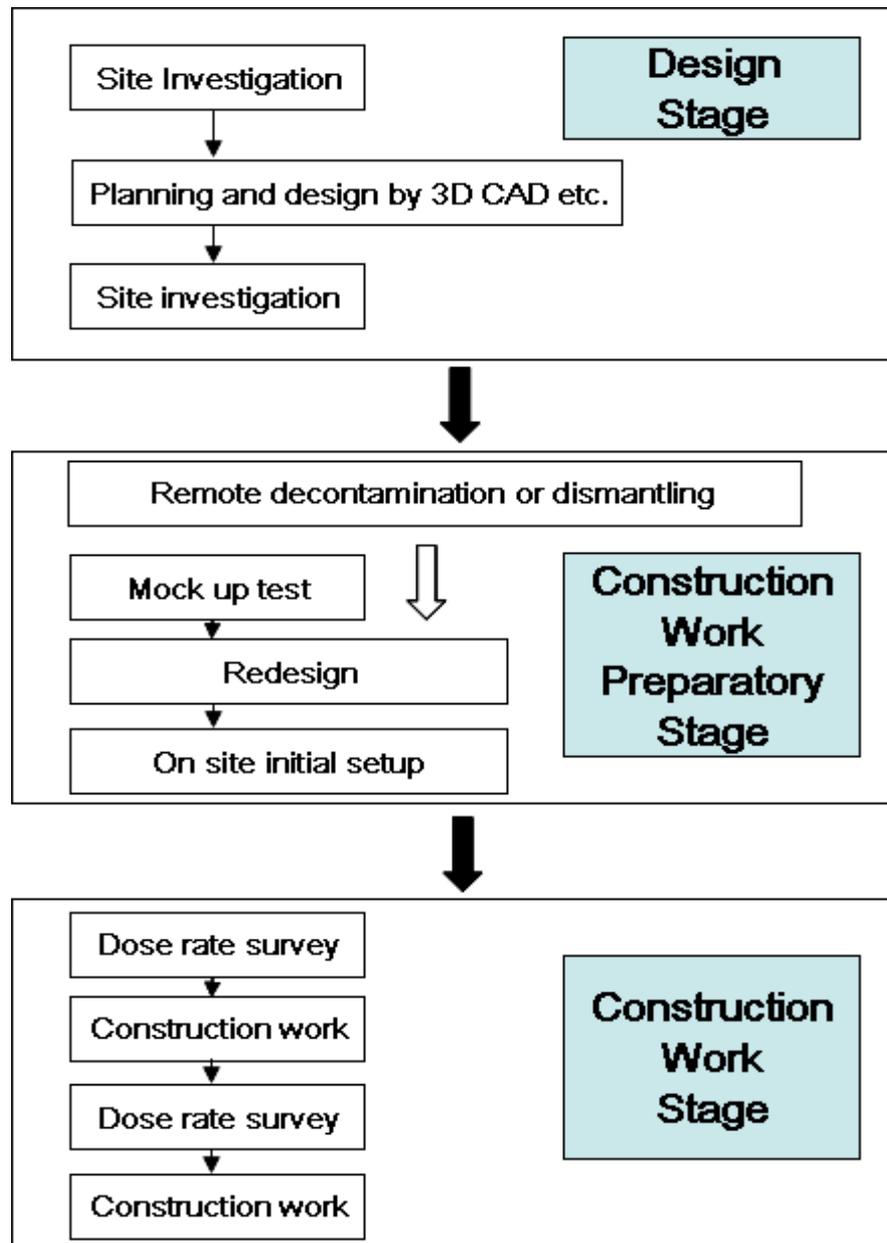


Figure 10. Flow Chart of Engineering.

Table 2. Challenges and Solutions of DD & R.

Basic Requirements	Challenges	Solutions	Hot cell
Maximize workable time for Direct Work	Should be maximized remote decontamination prior to worker intrusion inside cell (from 3 digits order to 1 digit in mSv/hr)	"Vacuum cleaner" + "Electrolytic polishing device" + "Remote wiping" Selection of steady decontamination method instead of "Dry ice blasting", "Water jet" and "Steam" in order to avoid extra waste generation, additional cleaning work and fluctuation of negative pressure in cell	CA-3 CA-5
	High radiation from floor even after decontamination	Aerial direct work without touching with floor for workers. Workers entered from ceiling hatch and worked on the tailored scaffolds	CA-5
		Putting down lead plate	CA-5
Minimize Actual (Direct) Work Time	Difficulty of direct access work using 1.3m diameter ceiling port to install 3m - 1.7 m scaffolds and saddles	Adoption of 3D simulation, 3D motion simulator IGRIP Structural analysis NASTRAN	CA-5
		Full scale mock up with real equipment to be installed to confirm accessibility and workability	CA-5
To Keep Project Schedule	Repeated MSM (Master Slave Manipulator) failure	Operator training in order to avoid MSM failure. Preparing spare MSM in order to minimize outage time of remote work	CA-3
	No fatal error during work is performed	Planning by 3D simulation	CA-3 CA-5
		Full scale mock up with real equipment to be installed to confirm accessibility and workability	CA-3 CA-5
Minimize Waste Volume	Excess waste generation than estimated	Volume reduction by "Pla-Melt" method. Volume reduction by using friction heat for thermoplastic material such as vinyl acetate suit and shoe cover.	CA-3 CA-5

가. 설계 단계

예측된 피폭요인을 사전에 발견하여 설계 단계에서 대책을 세웠다. 기기의 설계와 함께 작업성 검토에 virtual plot typing 기능을 가진 3D CAD를 사용하였다.

상기 검토를 구체적인 공법의 선택, 기기 설계 및 작업계획 입안에 반영하였다.

나. 공사 준비 단계

기기 설치, 폐기물처리 등 hot cell 내 혹은 green house(GH) 내에서의 복잡한 작업을 안전하면서도 빠르게 수행하는 것을 목적으로 하여, cold mockup 실험을 실시하였다. 이 과정에서, 작업자와 함께 설계자가 검사성과 작업성 확인 및 작업공정을 확인하였으며 설계, 작업공정 및 작업 순서를 재검토 하였다. 한편, 신설기기 설치 단계에서는 cell 안에 1/10 모형을 사용하여 cell 내 작업 수행 바로 전에 있는 작업자로 하여금 cell 내으로 들어가는 길과 cell의 현재 상황에 대한 확인 작업을 연습하였다.

다. 공사 단계

Hot cell 내의 공간 선량률을 낮추기 위한 목적으로, cell 내의 제염을 원격 조작과 직접 제염을 합리적으로 조합하여 실시하였다. 또한, 이동반출이 가능한 기기류는 cell로 부터 반출하여 이동시켰다.

발생하는 문제에 대한 방지책으로 GH의 구역을 세분화, 매일 작업 전후의 smear 채취/측정 실시, GH의 부압을 철저히 조절하였다.

피폭 관리로서 작업현장의 공간 선량률이 상승한 경우, 납 차폐체를 추가 설치하는 것과 함께 폐기물 취급 시 사전에 표면 선량률을 측정하였다. 고 선량 물체에 대해서는 시간 관리와 함께 납 치마 및 납 장갑을 착용하였다.

3. CA-3 hot cell 개조

가. 공사 개요

CA-3 cell은 CPF 연구동의 중앙에 위치하며 고속로 사용후 핵연료의 용해 및 추출 등의 연구에 사용되었다. 개조 내용은 원래 hot cell 내 일부 기기나 배관의 배치를 변경하는 것이었다. 가능한 한 원격조작으로 기기 등을 철거하였고

제염작업을 수행하였지만 남겨진 기기류의 높은 선량률과 이들 기기류의 드러나지 않는 부분에 제염이 불가능한 부위가 있었기 때문에 납판 등을 다량으로 부설하지 않은 곳은 신설기기 설치작업이 곤란하다고 판단되어, 공사 중에 방침을 변경하였다. 기기의 전면 철거와 제염에 의한 목표 선량률을 달성하기 위해 CA-3 cell 천장 hatch에 의해 신설기기와 배관류를 반입하였다. 또한 작업원의 출입은 cell 의 배면 문에서 오염 확대 방지를 목적으로 4단계의 green house를 중간에 세웠다.

나. 각 공정에서 피폭량 저감을 위한 수단

CA-3 cell 개조 공사는 크게 다음 세 가지 작업으로 구분한다.

- . 원격조작에 의한 해체, 철거 및 제염 작업
- . Cell 에 직접 출입하면서 해체, 철거 및 제염 작업
- . Cell 에 직접 출입하면서 신설기기 설치 작업

1) CA-3 cell 원격해체, 철거 및 제염

원격조작에 의한 구 설비의 해체, 철거, 제염 작업은 cell 내에 설치되어있는 manipulator등의 원격조작기기를 사용하여 cell 내 기기 및 배관등을 해체, 철거하여 다음 작업 단계인 작업원의 직접 출입에 지장이 없는 방사선 준위까지 cell 내의 공간 선량률을 저감하기 위한 작업이다. 원래 작업원의 cell 내 출입을 위한 원격 제염의 목표치를 1 mSv/hr로 하여 작업을 개시하였으나 최종적으로는 이 값을 크게 낮춘 0.4 mSv/hr의 준위까지 제염하게 되었다. 아래의 작업을 차폐 창 및 카메라를 삽입하여 monitoring 하면서 실시하였다.

- Cell 내 기기를 절단 및 철거하고 작업으로 발생한 절단 입자 및 분진을 회수하였다.

- 바닥, 벽 및 기 설치된 배관 주위에 있어서 제염 장치를 사용하였다.

- 해체 및 제염작업의 진전과 함께 표면선량 및 공간선량을 측정하여 제염효과를 수시로 확인하였다. 측정 결과는 hot spot 유무의 확인과 함께 원격제염으로부터 직접해체 단계에로의 이행하는 순간까지 사용하였다. Hot spot가 발견되는 경우, 그 지역을 매우 조심하여 측정에 있어서는 차폐된 선량계를 power manipulator에 설치하여 위치가 변화된 공간 선량률 분포를 얻었다. Map 작성의 빈도는 원래 3개월에 한번이었지만 공사의 진도와 함께 그 빈도가 서서히 높아졌다. 최종적으로는 주 1회 정도로 작성하였다.

- 철거물은 미세하게 절단하고 제염 용액 등을 사용하여 가능한 한도까지 제염하고, 폐기물 통에 넣었다,

- 원격으로 제염이 덜된 부위에는 납 차폐체를 설치하였다.

2) CA-3 cell 직접 해체, 철거 및 제염

원격조작에 의한 제염작업 후 작업원이 직접 cell 안에 들어가서 원격으로 철거할 수 없었던 남아있는 받침대 등의 철거 및 제염을 수행하였다. 작업에 있어서는 작업원의 cell에로의 출입 시 오염 및 피폭관리를 철저히 하였다. 또한 폐기물 반출 작업에 있어서도 오염 확산 방지에 대해 세심한 주의를 기울였다.

Cell 내의 선량은 직접 제염작업 개시 시에는 1인당 작업가능 시간이 30 분까지이었으나 제염작업의 진전과 함께 작업시간이 60분까지 될 정도로 선량을 낮추었다. 최종적으로는 0.06 mSv/hr 이었다. 이 값은 hot cell 내 작업에서의 선량을 로서는 충분히 적은 값이다.

3) CA-3 cell 신설기기 설치

계속하여 수행된 신설기기의 설치 작업 및 검사에서는 작업효율의 향상, 작업 안전 확보 및 품질관리의 확보로서 아래의 사항을 고려하였다.

. 신설기기 배치의 구분에 의한 unit 화와 짜 올린 unit 마다 cell 내에서의 반입 및 설치

. 용접 및 배관 시공 등의 작업에 있어서 전용 작업 보호구 사용

. 작업 감시 시스템의 충실과 cell 내 작업자와의 연락수단을 다양하게 확보

또한, 현장 작업에 들어가기 전 실제 scale의 cold mock-up 실험을 수행함으로써, 현장작업의 순서, 검사 방법, 출입하는 방법들에 대한 다양한 경험을 확보할 수 있었다.

다. 안전대책의 성과

CA-3 cell 신설기기, 배관류의 unit화를 수행하고, cold mock-up 을 실시한 결과, 좁고 긴 부위가 많은 중장비(air line mask, tyvex suit, 5겹 고무장갑) 등과 같이 cell 안에서의 작업조건을 어렵게 만드는 설비를 이용한 작업량과 작업시간을 감축함에 의해 대폭적인 피폭량 저감 및 공정단축을 실현하였다(원래 7개월 계획에서 5개월로 단축)

4. CA-5 hot cell의 in cell crane 보수

가. 공사 개요

본 개조 공사에서는 Figure 11에 나타난 바와 같이 CA-5 cell의 천장 port의 보수, in-cell crane의 주행 장치 및 횡축 이동장치의 바퀴를 교환하였다. 분석용 cell인 CA-5 cell의 바닥면에는 선량이 높은 기기류가 설치되어 있었기 때문에 cell 벽면의 hatch를 이용하여 출입하는 경우 작업원이 필요이상의 피폭을 받는 두려움이 있었다. 그래서 피폭량을 가능한 저감하기 위해 CA-5 cell 천장 벽에 설치되어 있는 hatch port(직경 1.3 m)를 이용하여 작업원 출입 및 기기류의 입.반출이 이루어졌다.

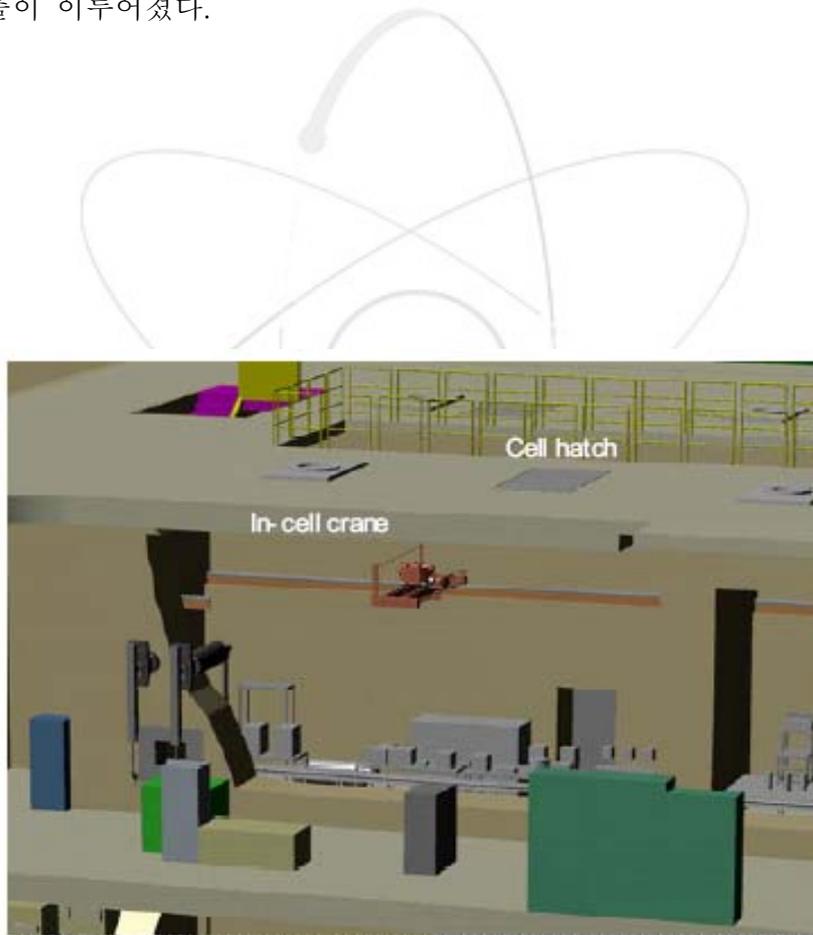


Figure 11. Repair of In-cell Crane in CA-5 Cell.

이와 함께, 작업에 필요한 발판을 cell의 바닥으로부터 순차적으로 쌓아 올리 지 않고, in-cell crane용 rail의 아래 부분에 설치하였으며 작업발판도 hatch port로 부터 반입하였다.

나. 각 공정에서 피폭량 저감을 위한 조치

1) CA-5 cell 제염

Cell 내부를 제염한 후 잔유물을 이송하고, 납 차폐체를 설치하여 in-cell crane 위치에서 공간선량을 감소시켜서 한사람의 작업자가 하루에 60분 정도 작업이 가능하도록 하였다.

2) 작업발판 설계 및 작업계획 수립

작업성을 고려하여 작업 발판은 어느 정도 큰 것이 필요하지만 통상 작업방호복을 착용한 작업원이 협소한 hatch port 로부터 안전하게 작업발판을 안전하게 출입하는 것은 결코 쉽지 아니하였다. 이를 위해 작업발판의 형태를 포함하여 계획을 검토할 필요가 있었다.

- 바닥에는 작업자가 접근하지 않는 공정을 택하였다. 또한 구리를 재료로 한 작업발판을 어느 정도 두껍게 하여 차폐능력을 유지할 수 있도록 하였다.

- 작업성과 작업원의 피폭량 저감을 함께 고려한 작업 schedule 작성, 작업 발판의 cell 안으로의 반입성(cell 벽면이나 crane rail과의 간섭성 포함), 견고함 등의 검토에 virtual plot typing을 적용하였다. 또한, 작업의 안전관리를 위해 설치하는 원격 감시용 camera의 배치 검토에도 동일한 방법을 사용하였다. 작업성 및 반입성을 모두 만족하기 위해 여러 종류의 발판 모델을 작성하여 비교 검토하였다.

3) 공사의 cold mock-up

설계 결과에 기초한 full scale cold mock-up을 수행하여 설계의 타당성을 확인함과 함께, 작업성을 조작 순서를 철저히 교육시켰다. 또한 최종 검토 결과에 기초하여 컴퓨터 그래픽 animation을 작성하고 작업자의 교육 훈련에 제공하였다.

다. 안전 대책의 성과

설계 단계에서 작업의 용이화와 단순화를 도모하여 작업원의 총 피폭량을 저감하였다. 훈련을 목적으로 한 mock-up 시험에 있어서 본 검토 결과가 작업원 교육에 도움이 되었으며 효과적인 훈련이 이루어졌다. 결과적으로 공사비가 대폭 감소되었다. 총 방사선 피폭량은 계획 시 10 mSv 이었는데 실제 1 mSv 이었으며, CA-5 hot cell 보수 공사비는 계획에 비해 반 이하로 저감되었다(원래의 예산은 명확하게 발표하지 않았음).

라. 폐기물 처리

Cell 개조 공사 및 crane 보수 공사에서 발생된 폐기물은 Pu 계, 베타 및 감마 계열, 가연, 난연 및 불연으로 구분하여 처리하였다. 또한 폐기물 저감을 위해 cell 안에서 다목적으로 사용하는 작업대를 제작하였다. 일련의 개조작업을 통하여, cell에서 다량의 고준위 고체 방사성폐기물이 발생하였으나 이러한 스테인리스강 등의 불연성폐기물에 있어서는 표면이나 틈새에 부착된 방사성물질 제거하기 위해 가열시킨 초산 용액에 침적시켰다. 이 침적 제거법에 의해, 해체된 고준위 금속폐기물 약 90 %를 저준위 폐기물로 하여 구분하게 되었다. 또한, cell 안에 출입하기위해 사용한 작업 방호복(초산비닐 제품의 suit 및 신발 커버 등) 등의 가연성 폐기물에 있어서 원래 추측한 량을 초과하는 폐기물이 발생하였지만 이를 위한 장치를 설치하여 감용하였다. 이 용융 처리장치는 마찰열을 이용하는 것으로 compact하며, 비교적 저온에서 작동, 높은 용융 효율이 얻어지는 특징이 있다. 이 처리방법의 실시에 의해 방사성폐기물을 대폭적으로 감용할 수 있게 되었다.

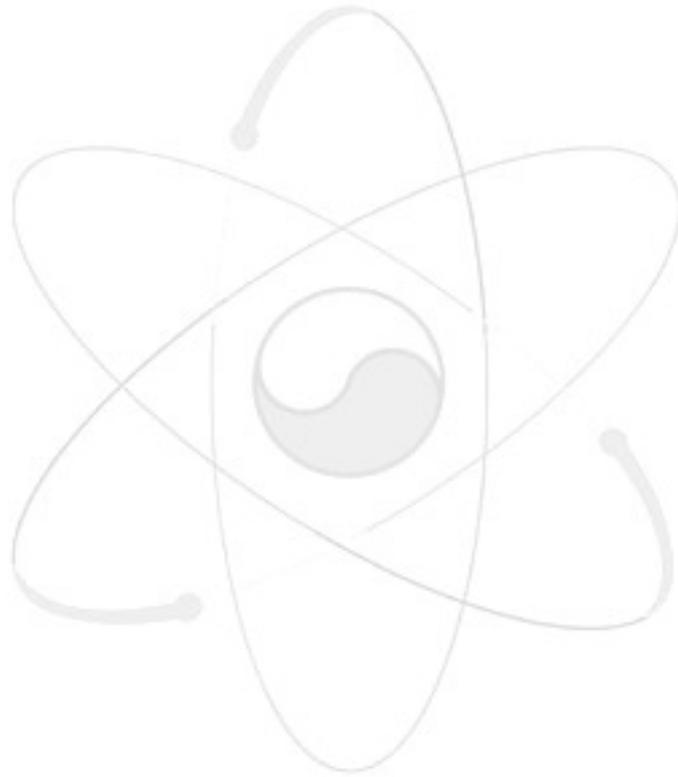
마. 결언

Cell 개조 및 crane 보수공사에 대하여, 안전성을 충분히 확보한 공정을 채용하여 무사고, 무재해로 공사를 완료하였다. 또한, 공정 개선에 의해 작업자 피폭 저감을 달성하고 공사로부터 발생된 방사성폐기물 처리에는 감용 처리장치를 고안하여 대폭적인 폐기물 감용화를 달성할 수 있었다.

동작 simulation을 중심으로 한 virtual plot typing 방법을 방사선 환경 하에서의 crane 보수 공사에 적용하여 본 방법이 안전성 향상이나 피폭 저감에 유용함을 실증하였다. 본 공사의 요점으로서, 환경조건 등이 엄격한 제약을 받은 관 계로 각 현장에서 "trouble zero" 에 이르기 위해서는 충분한 "front loading" 이

필요하며 구체적으로는 원하는 "설계 tool"과 "cold mock-up" 등의 조합이 필요하다고 생각된다. 종래의 설계, 공사 준비에 비해서는 작업량이 약간 증가하였으나, 이는 지금까지 현장에서 대처하였던 문제가 설계, 공사 준비에 의해 이행한 것에 비해서는 아무것도 아니라고 생각된다.

이번 공사에서 제염, 해체, 철거와 관련하여 많고 귀중한 데이터를 얻었다. 이후, 이와 비슷한 연구시설의 hot cell 갱신 및 개조 시 지금까지 얻어진 지식과 경험을 살려 안전하고 합리적인 공사가 실현되어야 할 것으로 예측된다. 또한, 개조를 무사히 종료한 CPF는 현재 선진 습식법 재처리에 관한 기술개발 등의 연구가 수행되고 있다.



제 3 절 프랑스 LECA

LECA는 Irradiated Fuel Examination Laboratory에 대한 프랑스 명이다. CEA 소속 이 hot 실험실은 조사된 fuel elements들에 대한 관찰을 수행하기 위해 1960년대에 설계되었다. 이 시설은 고전적인 hot cell 실험실로서 그 당시의 안전 규정에 따라 건설되었다. 1964년부터 가동하여 LECA는 안전과 관련된 문제없이 과학 및 공학 영역에서 데이터 공급원으로서 적절한 역할을 하였다. 그러나 이 시설의 낡은 디자인은 안전법률에 대한 점차적인 보강을 필요로 하였고 시설 운영자로 하여금 1995년 경 LECA를 새롭게 변경시켜야 한다는 생각을 가지게 되었다. LECA를 새롭게 변경시키는 과제 제안서가 1997년에 입안되어 2000년도에 안전 당국에 접수되었다. 1년 후, 이 과제에 대한 협정서가 발표되었는데 2015년 까지 운영되어 지는데 다음과 같은 광대한 보강계획이 포함되어 있다[5].

- . 현재까지 이 지역에서 발생한 최대 강도의 지진에 견딜 수 있도록 건물을 보강하기 위한 토목 공사
- . Hot cell 내부 제염 및 스테인리스 강 첨가, 배기 계통 변경, hot cell 윗부분에 이동 가능한 cell을 설치함에 따른 제한성의 향상
- . 전원, 차폐 유리 및 대부분의 manipulator 교체
- . Crane 성능 향상
- . 화재 대비
- . 방사능 조절 및 경보 감시(radioactivity control, alarm monitoring)
- . 방사성폐기물 특성 분석 및 배출을 위한 새로운 운영 체계
- . 시설 내에 저장된 핵분열성 물질 질량 감소

이 외에도 과제의 최종 종료 년도를 2005년으로 고정시켰다.

1. LECA 시설 소개

LECA는 알파, 베타, 감마 방사성 물질을 취급할 수 있는 hot cell 실험실로서 조사된 핵연료를 관찰하기 위한 곳이다. 이 시설은 두 개의 주 hot cell line으로 구성되며 방사능을 취급할 수 있는 전체 면적은 120 m² 이다.

- 10개의 cell로 구성된 한쪽 line은 중량 콘크리트로 구성되며 벽, 천장

및 바닥의 두께가 모두 1.2m이며 방사선에 강하게 차폐되어 있다. 각 cell의 평균 표면적은 9 m²이며 이들 cell은 비파괴(eddy current, X-ray radiography, profilometry, 감마 scanning 등), 반파괴(pin, 핵연료 봉 핵분열기체 부피 측정, 공구 작업, 조사 전 핵연료 element를 사용한 조립 실험) 및 파괴(절단, 금속 조직학, 전자빔을 이용한 시료미량분석 실험) 실험을 수행하였다.

- 5개의 cell로 이루어진 다른 line은 납 hot cell로 부르며, 주로 금속조직학 연구를 위한 준비와 구조 분석에 사용되었다.

- 이 주요 line들과 함께, 이 실험실은 EPMA, SIMS, X-ray diffraction 및 SEM 과 같은 미세관찰을 수행하기 위한 glove box를 소유하고 있다.

후방 지역, 핵물질/폐기물 출입을 위한 hot cell 상단지역, 용기 취급을 위한 차폐 지역을 위해 30 ton 용량의 크레인이 사용되었다.

2. 과제의 목적

가. 규약 개선

시간이 경과된다 하여도 모든 시설의 안전 등급(safety level)은 가동 초기의 안전등급을 그대로 유지하려는 경향이 있다. 보수 계획은 이러한 목적으로 수립되나 세월이 흐름에 따라 교체되지 않은 부품들로 인해 시설에 대한 신뢰성이 점차 감소하게 된다. 안전 등급을 보다 시대에 뒤떨어지게 만드는 실제적인 방법은 시간 경과에 따라 규약에 대한 요구사항을 증가시키는 것이다. 세월이 경과함에 따라, 한쪽 편에서는 안전 등급 유지를 요구하고 다른 편에서는 규율을 강화하는 이러한 접근 과정은 조만간 그 시설이 더 이상의 안전 요구사항에 다다르지 못하도록 한다. 이 사건이 발생하기 전에는 이 시설을 정지시키거나 새롭게 건설하거나 하는 두 가지 방안으로만 생각되었다. 이 두 가능성에 대한 재정적, 기술적 고찰이 LECA에 대해 이루어졌다. 새로운 시설을 건설하는 것이 그 자체로는 저렴하였으나 제염, 폐기물 처리, 해체에 소요되는 경비가 새롭게 시설을 건설하는 옵션을 보다 비싸게 만들었다. 특별히, 지진의 저항성을 고려한 LECA의 개조(refurbishment)에 대한 기술적 타당성이 확인되었고 이에 대한 개조 과제가 결정 및 시행되었다.

나. 개량 핵연료 관찰

새로운 연구 계획들은 주로 핵연료 효율(고연소도)과 장수명 핵폐기물 감축에 초점이 맞추어 있다. 예를 들면, actinide 계통 원소들의 로내 변환(pile transmutation), 고농도 Pu(~45%) 연료에 대한 실험, 고연소도 LWR 핵연료들의 관찰과 같은 것들이다. 이러한 특별한 조사 핵연료들은 안전 면에서 세심한 주의를 필요로 하는데 LECA의 개조 전에는 수행할 수 없었던 보관(static confinement), 알파방사능 검출, 제염 효율, 폐기물 특성 분석 및 관리와 같은 것들이다.

다. 기술 향상, 유지 및 생산성

만약 유지프로그램(maintenance program)이 LECA의 안전등급을 유지할 수 있었다면, 매년 유지보수를 수행하는데 보다 많은 시간이 소요되며 파손 발생률이 최근의 기준과 비교할 때 높았을 것이라는 점이 지적되어야 한다. 노후화된 설비를 보수하는 것은 예비 부속품을 공급하는 것뿐만 아니라 보수가 점점 어려워지고 비용이 많이 소요되었을 것이다. 이러한 불량한 조건은 보다 경쟁적인 환경에서 더 이상 존재할 수 없었다.

3. 전략, 안전성 및 주요 기술적 사항들

가. 초기 평가 및 긴급 완화 조치들

본 과제에서 수행된 첫 번째 기술적인 작업은 시설에 대한 광대한 방사능 분포 및 함량(inventory)을 그리고 지난 30년간 가동 중에 얻었던 경험을 요약하는 것이었다. 이와 같이, 몇 가지의 즉각적인 조치들은 이들이 안전, 저렴 및 쉽게 수행될 수 있기 때문에 취해진 것이었다. 이러한 첫 번째 단계는 본 과제가 안전규제 당국의 믿음을 얻는데 기여하였다. 이 조치는 주로 배기 감시 및 방사선 조절 장치와 주로 관련되어 있다.

나. 차기 가동 기간을 위한 과제 설계 및 협약

본 과제는 아래 4개의 주요 영역에서 상기한 3개의 주요 목적으로 추진되었다. 4개 주요 영역은 ① confinement(정적, 동적, 방사학적 및 무거운 물질), ② 설비 공급 신뢰도, ③ 화재 검출 및 소화와 ④ 시설의 지진에 대한 강도이다. 성취하여야 할 개조의 조치들은 아래와 같다.

- Confinement: 스테인리스강 liner, 원격 manipulator 및 차폐 유리를 설치함에 의해 개량 핵연료에 할당된 hot cell들의 밀집 성을 증가시킨다. 막음질에 의해 건물 및 나머지 hot cell들로 부터의 누출을 감소시킨다.

- 배기 장치들: 이중 분리 계통(hot cell과 건물)으로 구 계통(hot cell들 및 건물에 대해 유일한 배기계통)을 완전히 교체함으로써 건물 배기계통이 정지된 상태일지라도 hot cell 내부가 저압을 유지할 수 있다. 어려움은 시설이 이미 가동 중이라는 것이다. 이와 같이, 배기 계통이 가동 상태를 유지되어야 하며 오작동하는 경우에 이전의 안전한 상태로 빨리 되돌아오기 위해서는 각 단계가 가역적이 되어야 한다. 서로 다른 상태들을 예측하기 위해 특별한 전산코드(SIMEVENT)가 사용되었다. 배관과 다른 부분들을 교체하는 동안 배기상태를 유지하기 위해 임시 bypass들이 사용되었다. 때때로 심하게 오염된 노후화된 부분을 제거하는 데에는 제거전의 세정 단계를 배제하는 특별한 절차를 사용하였다.

- 크레인: 가장 무거운 cask를 취급하는 동안 지진에도 견디는 고 신뢰성 모델로 이동크레인을 교체한다. Hot cell 상부에 납으로 차폐된 이동성 hot cell(40 ton)을 설치함에 의해 모든 hot cell내외로의 출입을 안전하게 수행할 수 있다.

- 설비 공급의 신뢰성: 불연성과 내화성이 증명된 전선들(전력 및 감식)로 교체한다. 전력은 다른 두 지점으로 부터 공급된다. 배기 장치의 운전을 자동 관리 함에 의해 전력 소비량을 감소시킨다.

- 감시 계통: 화재 감지, 방사학적 조절, 홍수, 전력 공급, 배기압력 및 유속 조절에 대한 감시 장치의 교체는 먼 거리에 있는 본부에서도 시설의 상태를 상세히 파악할 수 있고 원격 조작으로 안전한 상태에로의 회귀가 가능하도록 한다.

- 내화성: 시설 전체 및 특히 hot cell 내부에 화재에 견디며 화재 진압 전 2시간 동안 화재의 확산을 감소시키도록 설계된 칸막이를 설치한다.

- 토목 공사: 주목적은 hot cell들과 주위의 건물에 대해 역사적으로 발생하였던 가장 강도가 큰 지진에 견디는 것이다. 이 작업은 hot cell 판들을 보강하고 건물로부터 격리하는 것이다(충격에 견디도록 하는 것 보다는 접촉 자체를 없앴). 콘크리트와 강판들을 사용하여 국부적 지지대를 많이 생기도록 함에 의해 건물 자체의 강도를 증대시킨다. 이 시설이 원래 지진에 대비하여 건설되지 않았고 지진에 견딜 수 있도록 하는 많은 방법 중에서 경제적으로 타당한

방법이 거의 없으므로 이렇게 보장하는 것은 매우 엄격한 방법이라는 것을 염두에 두어야 한다. 건물로 하여금 진동수가 적게 움직이게 하기 위해서 가능한 멀리 딱딱한 물체(계단, 지붕, 벽 및 승강기 지지대 등)를 고립시키는 것이 해결책이다. 경제적 관점에서 볼 때, 납 차폐 hot cell은 지진에 대한 요구사항을 만족할 수 없었다. 그러므로, 이들은 2005 ~ 2008년 사이에 제염 후 파괴시키는 것으로 결정되었다.

전체 과제 계획은 새로운 안전 분석 보고서를 사용하여 안전 당국에 보고되었고 2001년 7월 13일에 채택되었다.

- 작업 및 과제 수행을 위한 안전 면허: 경제적 및 전략적 목적으로, 시설의 가동을 중지시키지 않고 실험을 계속하면서 본 과제를 완수하도록 결정되었다. 이러한 사실이 안전 당국으로 하여금 본 과제 자체에 대해 안전문제에 특별한 관심을 가지게 된 원인이었다.

과제 전체는 Figure 12.에 나타난 바와 같이 6단계로 나뉘어져 있으며 각 단계별로 안전작업에 대한 보고서 및 면허가 있다. 면허를 취득하면 작업이 수행되었으며 작업이 진행됨에 따라 작업 규칙은 점차 경신하게 되었다.

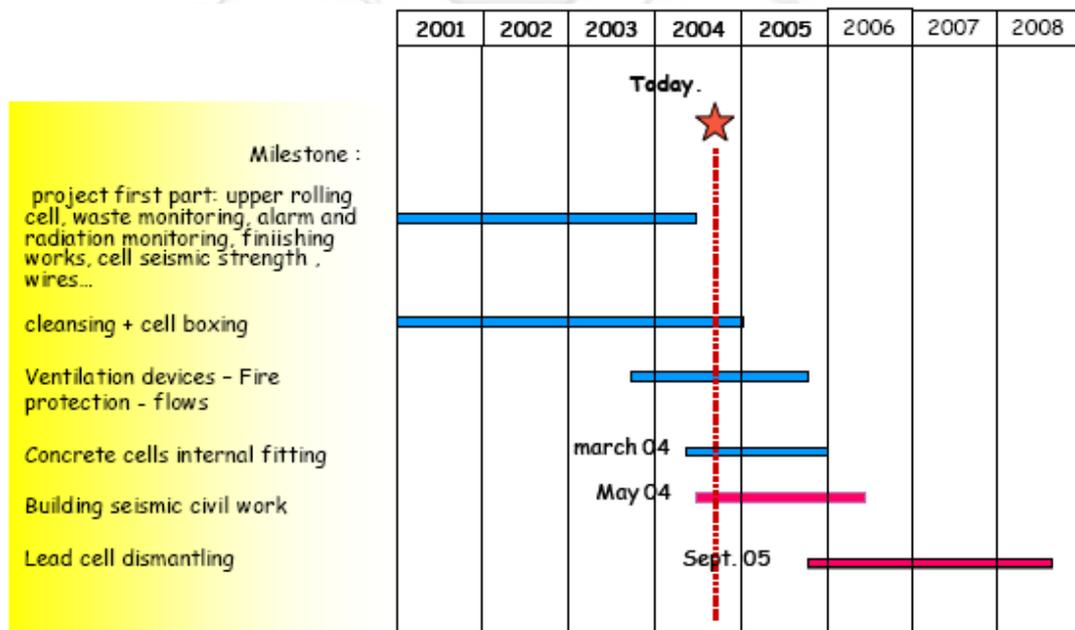


Figure 12. Master Schedule.

다. 조직 및 일정

과제는 개조 자체에 책임이 있는 소유권자 과제 팀(owner project team, 7인)에 의해 관리되거나 가동 및 실험과제들과 잘 협조체제를 유지한다. 운전자들은 실험프로그램의 수행뿐만 아니라 개조작업의 안전성을 포함하여 시설의 안전관리를 유지한다. 운전자는 작업자들에게 필요 물자(의복, 통제, 폐기물 등)를 조달한다.

과제 엔지니어링은 Framatome-ANP 사에 의해 수행되어진다.

상기 Figure 12.는 2005년 말에 모든 작업이 완료됨을 보여준다. 그러나, 2006년 중반에 완료될 지진에 대비한 보강 작업은 제외된다.

라. 2004년 현재 과제의 현황

대략적으로 과제의 1단계는 완료되었다.

- 폐기물 감시 장치가 성공적으로 설치되어 2004년 초부터 시설에서 발생하는 방사성폐기물 통에 대한 특성분석을 성공적으로 수행 중이다.
- 차폐된 이동성 상부 hot cell은 이미 작동 중에 있다(Figure 13).
- 새로운 이동성 크레인이 운전 중에 있다(Figure 14.).



Figure 13. Side View(left) and Front View(right) of Mobile Shielded Upper Cell.



Figure 14. Arrival of Travelling Crane(left) and Replaced Travelling Crane (right).

- 격리: Hot cell #9 및 #10에 대해 2개의 in cell box가 설치되었다(Figure 15).



Figure 15. Stainless Steel Box(left) and Setting the Box into the Cell

from the Top.

- 교체된 전선(전력 공급 및 감시용)의 전체 길이는 2000 km에 이른다. 화재 경보, 방사학적 통제, 홍수, 전원 공급, 배기압력 및 유속 감시에 대한 시험을 성공적으로 통과하여 가동 중이다.

- 콘크리트 hot cell 기초들에 대한 지진의 저항성을 목적으로 콘크리트 보강 작업을 수행하였다. 이와 함께, 40 톤 규모의 이동성 상부 hot cell 의 무게를 지탱할 수 있도록 지붕에도 콘크리트 보강작업을 실시하였다(Figure 16).



Figure 16. Strengthening of the Cell Bases for Seismic Withstanding Purposes(reinforced concrete).

- 내화성 유리, 비상구, 화재발생 시 자동 잠금장치, 통로 폐쇄 장치 등을 설치함에 의해 방화 작업은 2004년 현재 거의 완료 단계에 있다.

- 2004년 내에, hot cell을 통과하는 철관 문 설치가 완료되며 에어컨을 설치함에 의한 배기 계통을 새롭게 하였다. 이 후 새로운 감시 계기판을 가동하

고 가장 방사능이 높은 부분(hot cell 배기 계통으로 배관 및 HEPA filter)을 교체한다. 이 단계는 안전한 관점에서 매우 예민하게 취급해야 하는데 그 이유는 배기계통이 정지되면 방사능 오염사건이 발생할 수 있기 때문이다.

마. 성과 및 결론

LECA 개조공사는 특징을 가지고 있는데 실험실이 가동 중에 있는 동안 작업이 수행되었다는 것이다. 이 두 개의 업무가 함께 존재하는 것은 하루하루가 도전의 연속으로 판명되었지만 수년간의 경험을 가진 사람들로 이루어진 이 조직은 시간 손실이 거의 없이 작업을 잘 관리하는 것이 가능토록 하였다.

160,000 시간 이상의 작업 중, CEA와 계약한 사람들로부터 단지 2% 정도가 가격문제와 관련된 요구가 있었다. 현재까지 작업 기간 중의 사고율은 연구센터에서 관찰된 사고율의 평균범위에 있었으며 작업효율은 보다 높았다. 과제 수행 중의 변경 사항(개조작업 중에 자주 발생), 우발 사건, 지진에 대한 보강 공사 및 협조 등을 관리하는데 있어서 좋은 경험을 얻었다.

2005~2006년 사이에는 본 과제의 많은 부분을 차지하는 2차 단계를 완료하여야 한다. 그러나 이미 얻은 경험과 현재까지 성취된 사항들은 이 작업을 성공시키는데 있어서 긍정적으로 작용할 것이다.

제 4 절 프랑스 고 방사능 실험실

고 방사능 실험실이 1950년대 말에 건설되었다. 이 시설의 특징은 14개의 서로 다른 영역의 실험이 수행된다는 것이다. 연구 분야는 생물학, Cs 및 Cf와 같은 동위원소 생산, 재료학, 기계학적 실험 등이다. 원자력 연구의 최적화를 위해, CEA는 이 시설을 점진적으로 폐쇄하고 다른 장소로 이동하여 실험을 하기로 결정하였다. 이러한 조치는 1997년 시작되었으며 2010년도 완료될 예정이다. 1997년과 2001년 사이에 6개의 실험실이 폐쇄되었으며 차폐 hot cell들에 대한 해체가 2002년에 시작되었다[6]. 그러므로 몇 개의 실험실을 깨끗하게 정리하였다.

그럼에도 불구하고, 이 과제의 중요한 특징은 다른 실험실의 제염과 해체가 진행되는 중에 몇 개의 실험이 수행된다는 것이다. 예를 들면, 조사된 재료의 재료학적/기계적 특성실험을 수행하였던 실험실에 대한 해체작업을 설명한다. 이 실험실은 20개의 납 hot cell과 2개의 glove box로 채워졌다. 이들 cell들에 대한 이용은 점차적으로 정지되었다(2001년 말 12개소, 2003년 말 5개소). 나머지 3개 hot cell에 대한 정지는 2004년 9월 현재 2005년 말로 계획되고 있다. 2001년 말 이후, 9개의 납 hot cell이 깨끗하게 청소되었다. 이들에 대한 해체는 2006년 및 2007년에 수행되었다. 이와 병행하여, 다른 cell들에 대한 청소 작업을 수행할 계획이다. 그리고 실험실 내에 있는 약 5,000개의 조사된 모든 시료들을 CEA의 폐기물 처리 센터 혹은 다른 연구 시설로 이동할 것이다.

1. 고방사능 실험실

고방사능 실험실은 CEA의 Saclay 지역에 위치하고 있으며 Figure 17에 시설 전체에 대한 그림이 도시되어 있다.

2. Hot cell

고방사능 실험실은 서로 다른 영역에서의 연구를 위해 16 개의 hot cell 로 구성되어 있다. 연구 분야는 생물학, 화학, Cs 및 Cf와 같은 동위원소 생산, 재료학, 기계학적 실험 등이다. 1994년 이래로 실험실들은 점진적으로 가동이 중지되고 있다. 2010 년까지 해체 철거될 시설은 Figure 17의 0, 1, 2, 3, 5, 9, 10 및 14이다. 8, 11, 12, 13, 15, 16 hot cell들은 해체 후 미래에 비방사능 연구를 위해 보관될 것이고, 방사능 준위가 낮은 cell 6는 화학분석, cell 4는 그대로 보존 및 cell 7은 방사성 원소 보관에 이용될 계획이다.

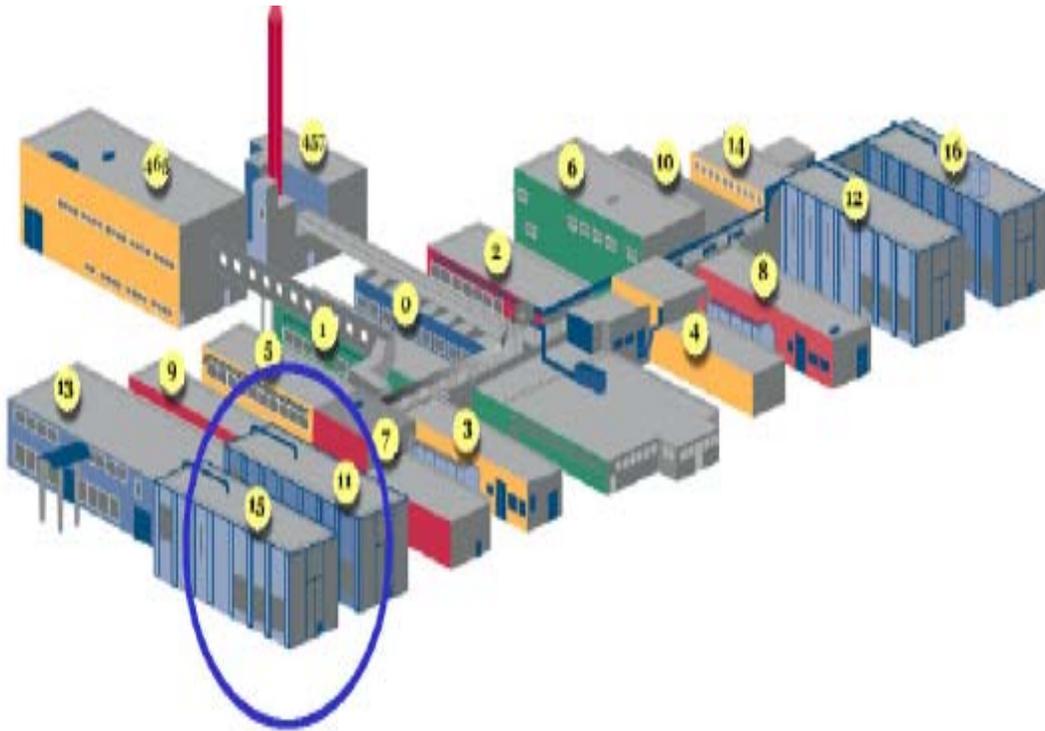


Figure 17. High Activity Laboratory in CEA Saclay.

Cell 11에 대해 해체 철거 과제가 2002년에 개시되었고 2004년 현재 2006년 완료되는 것으로 보고되었다. 이 cell은 조사된 재료들에 대해 기계적 특성을 분석하는데 사용되었으며 이 cell 내의 11-29 cell은 인장 강도(tensile strength) 실험에 11-39 cell은 조도(toughness) 측정 실험에 사용되었다. Figure 18에 cell 11의 전체 윤곽을 나타내었으며 이 cell은 2001년 이래로 운영이 점진적으로 중단되고 있다.



Figure 18. Actual View of Cell 11.

Cell 11-29의 초기 방사능 상태는 알파방사능 6900 Bq/cm^2 , dose rate $180 \mu \text{ Gy/h}$ 이었다. 비교적 쉽게 접근하는 것이 가능하였으며 cell 내에는 Figure 19에 보이는 바와 같이 작은 설비들이 많이 존재하였다. 3 주일간의 제염 작업 중에 어떠한 문제도 발생하지 않았으며 제염작업 후 최종 방사학적 상태는 알파방사능 0.21 Bq/cm^2 이하, 베타 방사능은 20 Bq/cm^2 이었고 dose rate는 보고되지 않았다.

Figure 20에 보이는 바와 같이 Cell 11-39의 초기 방사능 상태는 알파방사능 9200 Bq/cm^2 , dose rate $2300 \mu \text{ Gy/h}$ 이었다. 비교적 쉽게 접근이 가능하였으며 제염은 5주일간 수행되었으며 무겁고 큰 조각들이 많이 발생하였다. 제염작업 후 최종 방사학적 상태는 알파방사능 0.21 Bq/cm^2 이하, 베타 방사능은 20 Bq/cm^2 이었고 dose rate는 $5 \mu \text{ Gy/h}$ 이었다.



Figure 19. View of Cell 11-29 at the Beginning.



Figure 20. View of Cell 11-39 at the Beginning.

Cell 15는 2001년 이래로 운영이 점진적으로 중단되었는데 Figure 21에 Cell 15의 사진을 도시하였다. Line Semiramis에서는 조사 핵연료와 관련된 일련의 실험이 수행되었으며 전자현미경을 위한 시편을 준비하는데 사용되었다. 2002 - 2003년 까지 cell 15-31, 15-26, 15-21, 15-22, 15-23에 대한 제염작업이 수행되었다. 초기 방사능 상태는 매우 위험한 지역(15-22) 로부터 거의 청정한 지역(15-23-3) 까지 다양한 형태로 오염되었었다. 제염에 의해 다량의 작은 조각들이 hot cell 바깥으로 이송되었으나 고 준위 방사성 폐기물의 유출은 불가능 하였다.

특히, hot cell 15-22의 방사능이 매우 높아 알파방사능 10000 c/s 이상, 베타방사능 5000 c/s, 알파방사능의 양은 80000Bq, 초기 알파 선량률은 1600 μ Sv/hr 이었다. 이 hot cell 에 접근하기 이동성 벽(mobile front wall)을 사용하여 접근 하였으며 제염 중 발생된 고 준위 폐기물들은 cask 내에 보관되었다. 방사선 준위를 인간이 접근할 수 있는 범위(orange level)까지 낮추는데 2개월이 소요되었다. 완전히 오염구역을 제염하는 데에는 1개월이 더 소요되었다.

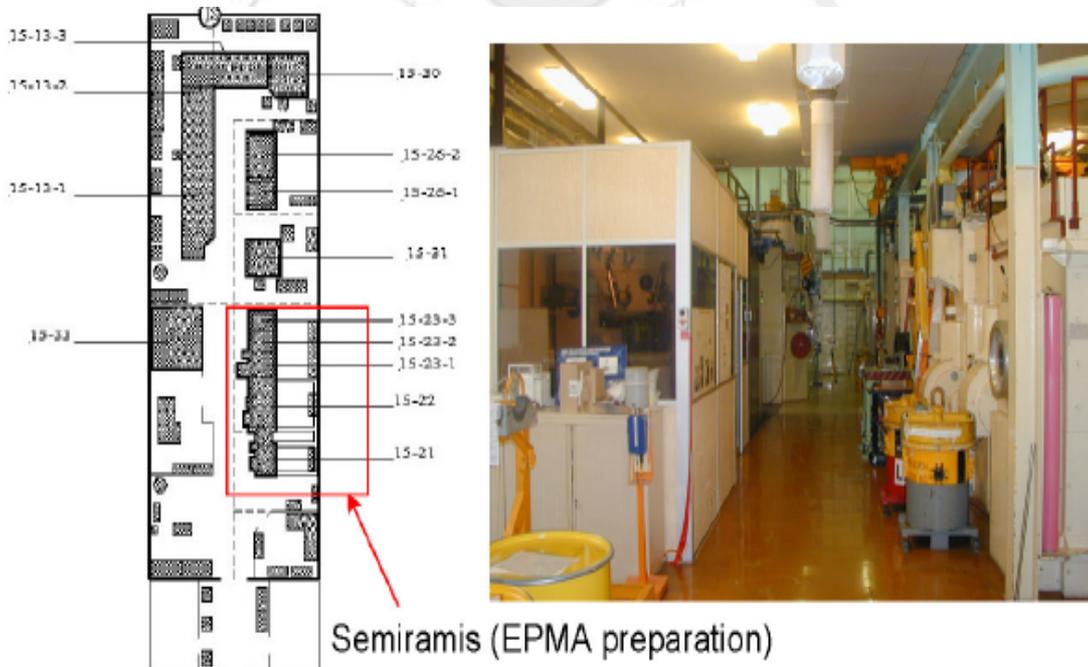


Figure 21. View of Cell 15.

제염 후 hot cell 내 방사학적 상태는 알파방사능 ~200 c/s, 베타방사능 280Bq/cm², 최종 평균 알파 선량률은 400 μSv/hr 이었다. 제염 전 후 cell 15-22 에 대한 사진을 Figure 22에 나타내었다.

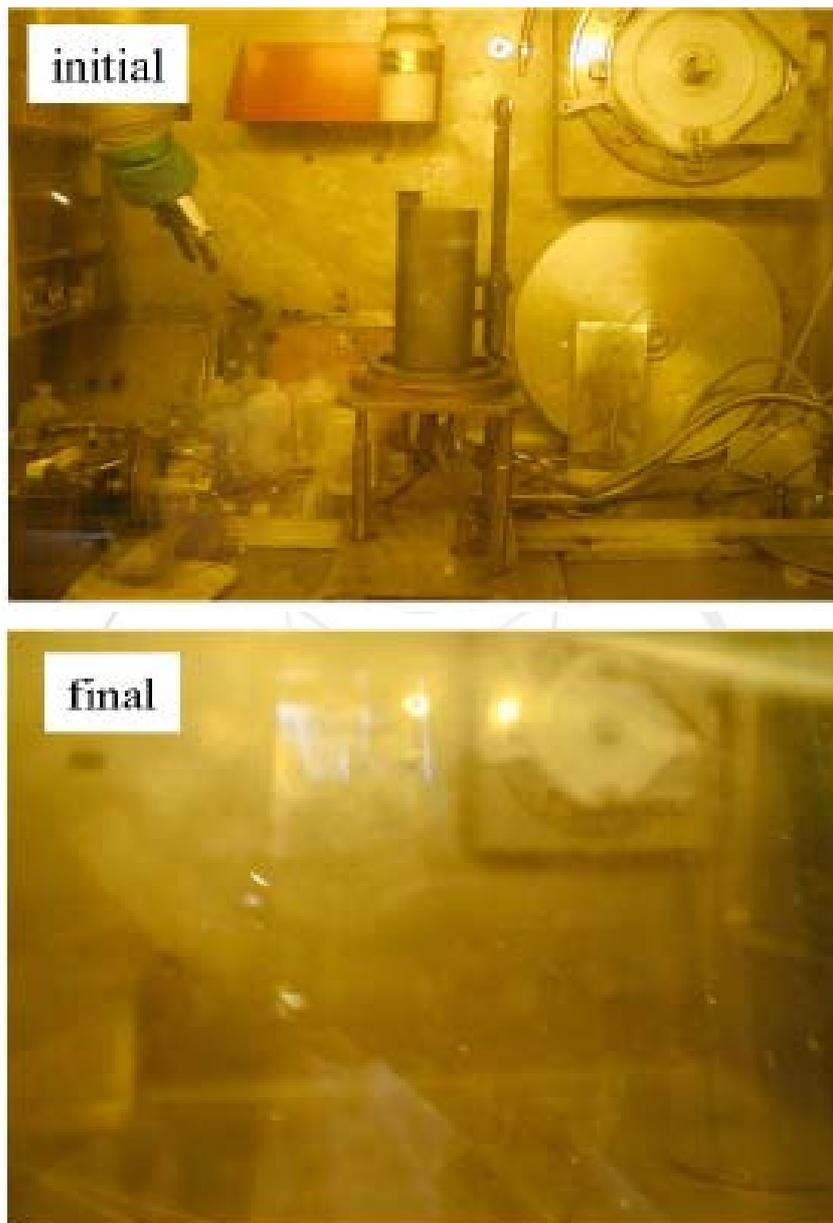


Figure 22. View of Cell 15-22 Before(left) and After (right) Decontamination.

Cell 15-23-1은 접근하기가 불가능하여 카메라와 manipulator 조작에 의해서만 제염작업을 수행하였다. 초기 방사학적 상태는 알파방사능 4500 c/s 이상, 베타 방사능 4000 c/s, 알파방사능의 양은 34600 Bq 이었다. 제염 후 알파방사능 ~ 2 Bq/cm², 베타방사능 < 35 Bq/cm², 평균 최종 알파 선량률은 40 μ Sv/hr 이었다.

3. 결어

본 과제에서 최종 방사학적 상태에로의 목표는 비 안정성 오염에 대해 < 100 Bq/cm² 이며 hot cell 중앙에서 300 mg/cm² 의 오염물에 대해 흡수 선량률을 0.01 mGy/hr 이하로 낮추는 것이었다. 이 목표치는 cell 15-22 및 cell 15-23-1을 제외한 모든 cell에서 정해진 시간 내에 성취될 수 있었다.

이 두 cell 에 대해 ① 최종 결과치가 철거기준을 만족하였기 때문이었고, ② 보조적인 다른 방법들은 프랑스 안전 당국으로부터 승인을 얻어야하는데 제염작업이 3개월 이상 연기됨에 따라 과제의 원만한 진행에 부적합하며, ③ 잉여 예산이 많이 소요되었기 때문에 제염작업은 중단되었다.

또한 작업 수행에 있어서의 어려웠던 점은 ① 공사에 대한 계획을 세우지 않았었고, ② 제염하여야 할 모든 cell 에 대해 방사선 준위가 너무 높았을 뿐만 아니라 접근하기 어려움 및 일부 hot cell에서 발생하는 다량의 조각들을 배출하여야 하는 것 및 ③ cell 11-34에 저장된 5000 개의 조사된 시료를 배출시키는데 폐기물 시설에 이 시료를 보내는 협정이 체결되기 힘들뿐만 아니라 cask를 계속 사용함에 따른 시간 소비, 제염과 철거 작업을 방해 하였다는 점 및 ④ 작업 자체가 약간씩 지연되었다는 것이다.

제 5 절 벨기에

벨기에의 연구기관인 SCK·CEN에서 가장 오래된 hot cell인 LHMA(Low, High and Medium Activity)에 대한 해체작업이 완료되었다[7]. 지난 20년간, 이 hot cell은 조사 재료 및 핵연료 pin들에 대한 조사 후 연구에 사용되었다. 그리고 이 hot cell은 생체차폐체인 납으로 둘러싸인 18 m³의 L 형태 밀폐형 알파 box로 구성되었으며 작은 선반, 절단 장비와 같은 설비들이 12개의 집게(tongs) 및 11개의 manipulator에 의해 가동되었다.

이 hot cell의 해체는 4단계로 특징 지워질 수 있다.

- 1 단계: 설비 철거

설비의 부피는 초기에 비해 65%로 감소되었으며 최종 폐기물은 주석 도금을 한 강통에 보관되고 차폐용기에 넣어진 후 폐기물 처리 관련 시설로 옮겨졌다.

- 2 단계: Hot cell 제염

강력한 진공청소기와 결합된 기계적 연마(mechanical polishing) 장치를 사용하여 접촉 방사 선량률을 1.4 mSv/hr 에로 감소시켰다.

- 3 단계: Hot cell 철거

Hot cell을 밀폐된 건축물로 둘러싼 후 70 ton의 납을 제거하였고 hot cell과 작업대를 plasma torch를 사용하여 절단하였다.

- 4 단계: 폐기물 관리

Hot cell을 해체한 결과 13ton의 방사성 폐기물, 원자력 산업에서 재생이 가능한 일정량의 재료 및 free release 가 가능한 일정량의 재료가 발생되었다.

1. 소개

LHMA는 새로운 과제들을 수행하기 위한 공간을 확보하기 위해 철거되었다. 현재까지, 최대 2 m³ 인 hot cell들의 해체를 위한 전략은 우선 내부에 있는 것들을 제거하거나 감소시킨 후 내부 면을 제염하는 것이었다. 이러한 두 가지 조치들은 아무 간섭 없이 수행되었다. 계속해서, 차폐체는 제거되어 포장되었으며 발생된 폐기물은 이를 처리하는 장소로 이송되었다.

본 과제의 경우, 선반과 절단 장비들과 같은 내부 부품들은 보통의 시나리오

에 의해 제거되었다, 그러나 방사학적 및 기계적 제한으로 인해 해체 전략의 나머지 부분은 통상의 전략과는 완전히 달랐으며 이를 “현장 철거”로 묘사할 수 있다. 최소의 경비로, 해체작업자에게는 안전규칙에 따라, 환경에 안전하게 hot cell을 현장에서 해체하기 위해서는 준비가 철저해야 하며 조직화된 폐기물 관리가 필요하다. 실제 철거가 진행되기 전, 방사성폐기물의 관리 흐름도를 분석함에 의해 해체기술을 선정하는 것이 가능하다. 가동이 중지된 다른 hot cell들의 해체에 준비 비용을 적용시키는 것이 가능하였다.

2. 문제 정의(defining the problem)

문제 정의는 해체전략의 첫 번째 단계이다. LHMA가 오래전 가동을 중지하였으므로, 기술적 및 방사학적 정보가 한정되었으며 작업장 아래 어두운 지점들은 문제점 도출을 더욱 어렵게 만들었다. 방사학적 문제를 명확히 파악하기 위해 hot cell 전체 표면의 방사능과 방사성 핵종들을 결정할 필요가 있었다. 현장에서의 측정 및 시편분석을 통해 오염 정도를 도표에 도시할 수 있었다. 방사학적 정보가 수록된 지도는 해체 전략 및 폐기물 관리의 안내서로 사용되어 졌다. Hot cell 내의 오염 준위(background)는 6 mSv/hr(바닥으로부터 50 cm 상단)에 이르렀고, hot spot들의 선량률은 120 mSv/hr 이었다. 이 방사선 준위는 차폐 없이는 hot cell 내로 작업자가 접근하는 것이 불가능하게 만들었고, 12 개의 노후화된 집계와 2대의 manipulator를 사용한 접근도가 불충분하였다.

3. 해체 전략에 있어서 첫 번째 일반적 결론

- 작업자에 의한 작업

ALARA 원리에 따라, Cs-137, Cs-134 및 Co-60과 같은 방사선 동위원소들에 의해 이루어진 고 선량률은 차폐체 제거를 허용하지 않았다. Am-241과 같은 독성 동위원소를 포함한 방사선 환경은 해체 작업자들이 접근하는 것을 너무 위험스럽도록 만들었다.

- 비 작업자에 의한 작업

집계와 manipulator의 불충분한 접근성은 hot cell 전체 내부 표면을 적절히 제염할 수 없도록 하였다.

Hot cell 철거를 위해 비 작업자에 의해 방사선 준위를 낮추어야 하고(1 단계), 가능하다면 작업자에 의한 작업(2 단계)을 수행하는 것으로 결론을 요약하

였다.

4. 1 단계: 작업바닥 제염

높은 조사 선량률은 hot cell의 작업 바닥의 고 준위 오염 탓으로 돌릴 수 있었다. 작업 바닥을 기존의 집계와 manipulator로 제염하는 것이 가능하였다.

다음의 이유로 해체 전략의 1 단계가 필요하였다.

- 2 단계에서 작업자 방사선 피폭 저감

안전규제 기관에서는 해체작업자들에 대한 누적 조사량을 1주일에 1 mSv.man으로 제한하였다. 작업 바닥의 제염은 피폭량을 감소시키기 위한 것이었으며, 이로 인해 누적조사량을 벗어나기 위해 노력해야하는 작업자가 보다 적도록 하는 것이었다.

- 고 방사성 폐기물 부피 감축

제염은 무게에 대한 방사능의 비율을 감소시키는 작업인데 이는 동일한 용기에 폐기물을 포장하는 양이 증가한다는 것을 의미하며 그 결과 고 방사성 폐기물 용기의 숫자가 감소시키는 것이다.

- 작업성

방사학적 mapping에 기초한 계산 결과, 만약 작업자를 위한 2차 차폐체를 설치하지 않는다면 기존의 차폐체를 제거하는 것이 건물의 방사선주위를 상승시켜 2단계가 진행되는 동안 건물 내에서 다른 작업을 수행하는 것이 불가능한 것으로 나타났다. 압축공기에 의해 가동되는 회전 brush로 구성된 장비를 사용하여 바닥면을 연마하였다. 이 brush는 집계와 manipulator에 의해 취급될 수 있었다. 강력한 진공청소기를 사용하여 방사성입자들을 특별히 고안된 폐기물 용기에로 수집하였다.

비록 1단계의 목표인 방사선 준위를 0.2 mSv/hr 이하로 낮추지는 못했을지라도 최종 방사선 준위는 1.4 mSv/hr 이었다. 경제성을 분석한 결과, 1 단계에서 hot cell을 철거하는 것이 제염을 계속하는 것보다 이익임을 확인하였다.

5. 2 단계: Hot cell 철거

해체 전략에 있어서 본 단계의 주요 목적은 방사능 준위가 매우 높은 구역을 빠르게 제거하는 것인데 작업 바닥면 전체를 제거하는 것도 포함된다. 2 단계는 다섯 개의 소 단계로 구분할 수 있다.

가. 밀폐 시설 건설

작업 구역 내에 오염물을 가두기 위해, 배기구를 포함한 시설물이 hot cell 주위에 설치되었다. 방사선 피폭을 가능한 한 최소화하기 위하여 이 시설은 납 차폐체가 제거되기 전에 건설할 필요가 있었다.

나. 차폐체 제거

차폐체는 납 벽돌 및 납판으로 구성되었다. 일부분은 크레인에 의해 처리되어야 했기 때문에 밀폐시설의 지붕은 제거가 가능하도록 할 필요가 있었다. 70 톤의 납이 제거, 방사능 측정 후 건물 바깥으로 이송되었다.

다. Hot spots 제거 및 작업바닥 절단

차폐체를 제거한 후, hot spots의 위치는 hot cell 상자위에 표시되어졌다. 플라즈마 토치에 의해 hot spot들은 잘려져 나가 특별히 고안된 폐기물 드럼에 처분되어졌다. Hot spot으로 여겨지는 작업바닥도 작은 부분으로 절단되었다.

라. Hot cell 내 나머지 부분 절단

이 시점에서 작업구역의 방사선 준위는 허용치 이하로 감소되었기 때문에 안전 상태는 향상되었고 hot cell에 대한 절단도 계속되었다.

마. 작업지역에 대한 일반적인 청정화

Hot cell 상자 아래의 콘크리트 바닥이 오염되었다. 수 cm 깊이로 파냄에 의해 알파, 베타, 감마 오염을 제거하였다. 제염 및 방사능 측정 후 무제한 재사용을 위해 건축물을 방출하였다.

6. 방사학적 mapping에 의한 폐기물 처분 순서도 예측

1단계를 완료한 후, 제염 후의 방사학적 데이터를 포함한 두 번째 도표가 제작되었고 물리적 정보를 첨가하였다. 제염 전략을 정의하는데 있어서 주요 원리는 가능한 한 저렴한 해체 비용을 유지하는 것이다. 해체 비용은 발생하는 폐기물의 양에 비례하기 때문에, 방사성폐기물의 발생량을 최소화하기 위해 폐기물 형태를 정의하고 그들의 양을 산정하며 가장 효과적인 기술을 선정하는 것이 필요하다. 총 예산(철거 + 폐기물 처리)의 최소화는 철거기술과 발생폐기물량을 연관시키는 것이고 해체 전략에 폐기물관리를 주요 목표로 삼는 것이다.

특수한 방사학적 및 물리적 제한을 고려할 때, 다음의 방사성 폐기물 처리절차가 타당한 것으로 생각된다.

첫 번째, 자유 방출(free release): 방사선 방어에 있어서 권한을 부여받은 기관

과 연합하여 안전 관리 팀은 자유방출을 위한 허용치를 베타감마선 방출체에 대해 0.4 Bq/cm², 알파선 방출체에 대해 0.04 Bq/cm²로 결정하였다.

각 항목 혹은 유사한 항목들의 모임에 대해, 자유 방출을 위한 완전한 자료들이 구축되었다. 자유 방출을 위한 재료들은 최종 방출이 발생되기 전 다시 방사능을 측정하기 위해 3개월 동안 보관되었다. 70톤의 납이 자유롭게 방출될 수 있었다.

두 번째, 제한 재사용(restricted reuse): 조사선량 및 비방사능과 같은 방사학적 제한 내에서, 철, 스테인리스강은 이들을 용융시킴에 의해 원자력산업에서 재사용되어질 수 있었다. 포장을 위한 승인 기준은 방사성폐기물과 다르다. 총 5.6톤의 금속재료가 제한적 재사용을 위한 제한치 범위 내에 있었다.

세 번째, 제염: 연마 분사 제염(grit blasting)법은 철 및 스테인리스강을 자유 방출할 수 있게 하였다. 이 분사기술은 단지 기하학적으로 관심 있는 부분만 제염할 수 있으며 그 효율은 표면 방사능에 대해 반비례 한다. 두 폐기물 용기에 대한 실험에 따르면, 분사 grit의 포화로 인해 이 제염기술을 적용하는 것이 기존 방사성 폐기물 처리비용보다 더 높은 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고, 3.6톤의 금속폐기물을 제한 사용할 수 있었다. 나머지 1.5 톤에 대해서는 보다 효과적인 제염방법을 찾는 실험에 사용될 것이다.

네 번째, 방사성 폐기물: 방사학적 및 물리적 기준에 의거하여, 방사성 폐기물을 25 종으로 분류하였다. 폐기물 종류 하나 하나는 NIRAS(National Institute for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials)에 의해 구체적으로 기술되어 있다. Table 3에 본 과제와 관련이 있는 사항을 기술하였다.

Table 3. Main Radiological Restrictions

Type	Maximum Background	Maximum Activity	Maximum Dose
Low active combustible solid(LAC)	40 GBq/m ³	40 MBq/m ³	2 mSv/hr
Low active super compressible solid(LASC)	40 GBq/m ³	5 MBq/m ³	2 mSv/hr
Medium active solid(MA)	100 TBq/m ³	200 GBq/m ³	200 mSv/hr

총 6톤의 방사성 폐기물(MA, LASC, LAC)이 발생되었다. MA 폐기물 처리가

가장 고가이기 때문에 가능하면 발생을 중지시키고 제염하여야 한다. LASC 에 대해서는 1톤당 단위 처리비용을 감소시켜야 한다. 철거 후 이들에 대한 부피 감소가 필요하다. LAC는 주로 단위 부피 당 질량이 적은 의복류를 포함한다.

7. 결어

폐기물 관리 개념을 해체 전략에 포함시킴에 의해 일반적인 해체 비용을 절감할 수 있었다. 바꾸어 말하면 MA 폐기물을 제염함에 의해 일부는 방출, 일부는 LAC로 변화시킬 수 있었다. 자유 방출 재료는 3,100만원(21,000ECU)에 매대 하였으며 이차폐기물에 대한 비용은 3,700만원(25,300ECU)에 이르렀다. 전체 해체 비용에 행정, 안전 규제 및 감시, 제염, 준비 및 clean-up 비용이 포함되었다. 준비 비용(밀폐 건축물 설치 및 배기장치)을 저감하기 위해 다른 hot cell들도 함께 철거되어 폐기물들은 같은 장소에서 절단되었다. 모든 hot cell들은 본 과제에서 논한 hot cell과 같은 해에 건설되었으며 수명이 다하여 철거하였다. 이 hot cell 차폐체의 제거는 동시에 이루어졌는데 그렇지 않았으면 알파 box 들에 의한 피폭이 ALARA 원리를 위반하였을 것이다. 초기에 손해로 보였던 것이 해체전략에 있어서 큰 이익으로 나타났는데 그 것은 ‘현장에서 hot cell들을 철거’ 하는 것이 저렴하다는 것이다.

- 이 전략은 차후 보다 작은 hot cell들과 glove box들을 철거하는데 사용되어 질 수 있다.

- 준비 비용은 해체 계획을 철저히 세움에 의해 감축시킬 수 있는데 hot cell들 하나하나에 대한 준비 비용보다는 전체 cell을 하나로 고려해야 한다는 것이다.

- 현장에서 철거 작업을 수행하는 것은 폐기물 관리를 해체전략에 연관시키는 것이며 이를 통해 각 hot cell 에 대한 최상의 해결책이 도출되었다.

제 6 절 영국

AEA Technology 사가 Windscale에 위치한 Building 13 내 방사능 취급시설 내 제염시설을 운영하고 있다. 현존하는 hot cell과 인접한 방사능 작업장은 개조되었으며 제염관련 장비를 넣어두는 곳으로 사용되었다. 차폐된 hot cell은 일차적으로 원격 제염구역을 제공하며 인접한 방사능 작업장은 2차적으로 수작업 공간을 제공한다. 1차 제염공정은 뜨거운 계면활성제와 물의 혼합물로 채워진 탱크 내에서 제염 대상물을 잠기게 하는 것이다. 프로펠러 형태의 교반기, 초음파 발생장치와 분사 장치가 탱크 내에 설치되어 있다. 제염 시설은 유지보수 및 처분 전에 오염된 설비와 재료를 깨끗하게 하는데 사용될 것이다. 본 논문에서는 제염시설 및 이 시설의 방사능 취급시설과의 통합성을 기술한다[8].

1. 소개

수년 동안, Windscale에 위치한 Building 13은 대단위 개조 및 정상화 작업이 수행되었다. 본 작업은 현대 기준에 맞추기 위해 요구되는 upgrade와 작업 형태에 있어서의 변화에 부흥하기 위해 시설에 설비를 장착하는 것이다. 개조 및 정상화 작업은 상당량의 오염된 설비와 재료들을 발생시켰다. 작업 형태의 변화는 또한 cell 내부를 보수하고 공구를 재배치하는데 있어서 보다 빈번한 단기 과제들을 요구하였으며 오염설비와 재료가 부가적으로 발생되었다.

통합 제염 시설은 방사능을 취급하는 시설의 중요한 부분으로 인식되었으며 유지보수 중에 작업자로 하여금 방사성피폭과 폐기물 처분 비용을 최소화하였다.

2. 방사능 시설

Building 13 내 방사능 시설은 주로 핵연료의 조사 후 관찰 및 핵폐기물 공정을 위해 사용되었다. 이 시설은 13개의 hot cell 라인으로 구성되었다. 기본 차폐체는 ZnBr가 함유된 강화 콘크리트와 납 창문이다. Cell 내에서의 작업은 manipulator와 크레인 등에 의해 이루어진다. 재료는 끝단의 두 cell에 위치한 수납 창구, cell 후면의 문 혹은 cell 지붕의 문을 통해 시설 내외로 투입된다. 이들 출입구는 재료를 내보낼 때도 사용된다. 모든 hot cell들은 차폐된 복도를 통해 연결되어 있으며 시설 내에서 재료를 이동하기 위한 운송시스템이 설치되어 있다.

3. 개조 전 hot cell

제염시설로 개조되는 hot cell 12는 원래 제염작업을 위해 설계되었으나 수년 동안 다양한 종류의 조사 후 실험 및 Co-60 동위원소를 취급하는 시설로 사용되었다. 이 hot cell은 차폐된 콘크리트 구역으로 구성되어 있다. 작업 면 벽 두께는 1.37m 이다. Hot cel 지붕은 2 층의 콘크리트 차폐체 블록들(두께 1.2 m)로 구성되어있다. 작업 면에는 창문이 두 개있으며 두 개의 manipulator는 각 창문의 위쪽에 위치하며 cell 내에서 가벼운 물건을 들어 올리거나 취급 시 사용된다. 크레인은 보다 무거운 물체를 취급하기 위해 설치되었다. Hot cell은 운반 시스템과 접속하는 운전 장치가 있어서 이 장치가 tray를 사용하여 원격 조작에 의해 hot cell 에로 재료들을 출입하는데 이용된다. 이 hot cell의 배수구는 방사성 액체 배수계통과 연결되어 있었다. 두 개의 1차 공기여과 하우징은 cell 안에 위치하며 건물 내 고준위 시설 배기 계통과 연결되어 있었다. 이 hot cell은 Co-60 방사능 계수장비 및 이와 관련되어 방사선원을 넣고 오르내리게 하는 기어가 있었다. 강철로 만든 두 개의 칸막이 차폐 문이 hot cell과 방사능 작업실을 분리하도록 설치되었으며 이와 유사한 칸막이 문들이 hot cell과 수송 복도를 분리하도록 설치되었다.

4. 개조 전 작업실

방사능 작업실은 hot cell 12의 서쪽 끝에 건설되었으며 hot cell과는 콘크리트 차폐 벽과 두 개의 칸막이 차폐 문에 의해 나누어져 있다. 칸막이 차폐 문은 크레인에 의해 오르내려질 수 있으며 hot cell 크레인이 작업실로 들어갈 수 있게 만든다. 작업실의 북쪽 및 서쪽 벽은 차폐되지 않았으며 벽돌로 건설되어 있다. 작업자는 서쪽 면에 있는 문을 통해 작업실로 들어가며 이 문을 통과하면 세면기와 옷을 갈아입는 칸막이가 있는 작은 입구가 있다. 보다 큰 항목들이 작업실에서의 출입을 위해 이송하는 것이 가능하도록 북쪽에는 보다 큰 문이 설치되어 있다. 작업실 지붕에 출입구가 있는데 이 출입구는 hot cell 지붕 지역으로 항목들이 출입하는 것을 가능토록 한다. 저 방사능 작업구역에는 스테인리스강으로 덮인 집안 마루와 방사능 배수계통과 연결되는 배수로가 있다. 6개의 일차 공기여과기가 집안 지역의 남쪽 끝에 설치되었으며 이 여과계통은 건물 내 배기 계통과 연결되어 있다.

5. 청정화 및 벗겨 내기

개조 전에, hot cell 내부의 처리하기 쉬운 모든 폐기물들은 이송시스템을 통해 제거되었고 작업 지역은 원격으로 깨끗하게 하거나 manipulator를 사용하여 제염하였다. 비록 hot cell 이 수년간 가동되어 심하게 오염되었지만, 비교적 짧은 기간 동안 통상적인 방법을 원격 적용함에 의해 아주 낮은 준위까지 제염되었다. 작업자가 수작업에 의한 청정화 및 제염을 수행할 수 있도록 hot cell로부터 지붕 판들을 제거하기 전에 이송 복도와 hot cell을 나누기 위해 차폐 문들을 설치하였다. 비록 작업을 수행하는 동안 cell 내 호흡 방어시스템이 낮은 채로 있었지만, 모든 설비들이 완전히 제거된 뒤 cell 내에서는 작업을 무제한 적으로 수행할 수 있을 정도로 방사능 준위가 낮아졌다.

방사능 작업실은 수작업에 의해 청정화 되었으며, 처리하기 쉬운 항목들은 제거되었고 오염지역은 제염되었다. Hot cell 제염 후, 작업실의 스테인리스강으로 덮인 지역에는 천막을 설치하고 이 후 사람이 작업실을 통해 hot cell에 접근하는 것이 가능하도록 차폐문이 제거되었다. 주형으로 뜬 입힘쇠(encast liner), 지지대, 크레인 레일 및 배수 수집구를 제외한 hot cell 내 모든 설비와 부품들이 콘크리트 구조물로부터 제거되었다.

6. 계획 단계의 제한 사항

이 과제의 계획 단계에서 몇 가지 제염방법이 고려되었다. 다음의 요구 사항들이 제염 방법을 최종적으로 선택하는데 있어서 주요 제한 인자들이었다.

- . 방사성 액체 배수구에서 강산이나 강염기를 흐르게 해서는 안 된다. 그러므로 치명적인 제염 방법은 사용하지 않는다.

- . 유용한 공간은 hot cell과 작업실 사이의 경계 지역이므로 설치하는 장비는 소형이며 부피가 최대한 작아야한다.

- . 현재의 이송 체계는 방사능 시설과의 중개 역할을 제공한다. 이는 제염을 위해 이송될 수 있는 항목들의 무게와 크기가 한정됨을 의미한다.

결과적으로 제한적인 설계일 수밖에 없지만 이는 상대적으로 작업의 문제점에 대한 해답을 제공한다. Hot cell 내 제염조는 장래에 원격으로 제거될 수 있도록 설계되었다.

7. Hot cell 개조

Hot cell 내부의 기본 골격을 변경하는 작업은 콘크리트 바닥 석판의 일부분을 잘라내어 제염 탱크의 안전 설치를 위한 스테인리스강 대용량 탱크에 넣는

것이다. 새롭게 일차 여과 하우징이 설치되었으며 새로운 작업대와 강철지지대가 장비의 새로운 전기선 및 배관 제품등과 연결되어 설치되었다. 새로운 운전 기계와 지지대들이 이송시스템을 연결하기 위해 설치되었다.

두 대의 제염탱크를 스테인리스강 대용량 탱크 안에 위치시켰다. 이 탱크들 중의 하나는 오염 물체를 제염하는데 사용되었고 다른 하나는 물과 계면활성제의 혼합물인 제염제를 저장하는데 사용되었다. 각 탱크는 일정온도를 유지시키는 상태에서 작동 가능한 가열기, 프로펠레 형태의 혼합기, 수위 지시계 및 수위 조절계, 작은 용기 및 린스 노즐이 장착된 뚜껑으로 구성되어 있다. 제염 공정을 적용하는 탱크에는 초음파 발진기가 설치되었다. 탱크의 모든 부속품들은 원격으로 제거 혹은 교체되었다.

순환 펌프가 hot cell 내 필요한 모든 펌핑 작업을 수행하기 위해 배수구 덮개 판 위에 설치되었다. 여과 하우징과 마이크론 이하 크기의 입자를 여과하는 카트리지 형 여과기는 제염생성물 여과 및 순환펌프와의 연결 작동을 위해 작업대 상단에 설치되었다. 이 카트리지는 입자를 담은 자루에 의해 에워싸였다. 원격으로 카트리지를 교환하기 전 자루와 여과기 사이에 있는 액체를 배출시키도록 하우징과 압축 공기 선에 연결되었다. 작은 초음파 용기가 작업대 위에 놓여 졌으며 초음파 발진기, 용기 및 덮개와 함께 연결되었다. 이 초음파 용기는 작거나 깨지기 쉬운 항목들을 제염하는데 사용되어질 것이다. 대용량 탱크, 탱크, 용기, 펌프 및 작업대 모두를 급속 해제 형(quick release type) 자발 밀폐 결합기(self sealing coupling)에 연결시켰다. 제염제 공급을 위한 펌핑 경로는 manipulator와 특수 연결 장치 사이에 호스를 연결함에 의해 이루어 졌다. 8개의 제염 호스와 4개의 압축 공기 공급 호스가 요구되었다. 납유리로 이루어진 창문이 설치되었으며 누출 위험이 있던 ZnBr 형 창문과 교체되었다. 새 지붕과 창문을 위한 새로운 광원이 설치되었다. Hot cell 면의 화면 표시 장치와 함께 오염지점 측정을 위한 이동성 감마 탐침(probe)이 hot cell 내에 설치되었다. 모니터 선이 창문들 중 하나의 근처에 있는 차폐 벽 플러그를 통과하여 지나간다. 탐침과 모니터는 오염물이 제염되는 동안의 조사 선량을 및 여과기나 폐수 저장조에 방사능이 누적되는 것을 검출하는데 사용되었다. 대기 온도 센서를 hot cell 내에 설치하고 디스플레이를 벽면에 달아 hot cell의 온도를 직접 볼 수 있게 하였다. 센서로 가는 전기선은 창문들 사이의 차폐 벽 플러그를 통과한다. 이 센서는 hot cell내 온도가 높을 때 경고음을 발한다. 도르래와 함께 새로운 크레인이 설치되었다. 크레인을 운전하는 장소는 각 창문 근처의 cell 외부 벽면 탁자 및 작업실 내에

설치하였다. 탱크 내부를 굽어보기 위해 카메라를 도르래의 이동모터에 설치하였다. 창문 사이의 hot cell 외부 벽면에 관찰 모니터를 설치하였다. 4기의 manipulator를 hot cell 내 라이너(liner)에 부착시켰다. 칸막이 차폐 출입문(bulkhead seal door)을 hot cell의 동쪽 끝 hot cell과 이송 복도를 가로막는 칸막이에 설치하였다. 이 문은 작업자가 출입하는 문으로 복도를 왕래하는 상자의 이송이 가능하도록 위로 젖히는 문을 가지고 있다. Hot cell 과 방사능 작업실 사이에 있는 기존 칸막이 차폐 출입문들은 작업장 내 감시 울타리와 차폐 이송 계통을 잘 연결하도록 개조되었다. 이 문들은 작업장 내외로 상자의 출입이 가능하도록 부분별로 나누어질 수 있다. 창문 아래의 hot cell 벽에 탁자를 새로 설치하여 cell 내에서의 작업을 조절할 수 있도록 하였다. 이 외부 작업대 근처에는 경고등이 설치된 판, 초음파발진기 상자 등이 위치한다.

8. 작업실 개조

작업실을 개조하기 전 hot cell을 개조하였다. 그러나 작업실과 cell 사이의 콘크리트 차폐 벽을 통해 두 개의 구멍을 뚫는 것이 필요하였다. 그 이유는 시료 채취를 위한 공급선, 반송선, 배수 및 배기선 들을 넣을 수 있는 차폐 플러그를 삽입하기 위해서였다. Hot cell을 개조하는 중에 작업실의 배기 필터 및 cladding된 부분을 제거하였다.

차폐시킨 이송 및 모니터링 설비를 hot cell 탁자의 상단에 설치하였고 이를 작업실까지 확장시켰다. 이 설비는 철강 조각으로부터 제작되었으며 각 끝 부분은 철강으로 만들어지고 납으로 채워진 미닫이문에 잘 맞도록 하였다. 각 문은 공기 실린더에 의해 가동되었으며 쇠바퀴 위에서 수평으로 이동한다. 울타리의 지붕에는 감마선 모니터링 탐침과 납유리 창문(lead glass viewing window)을 설치하였다. 울타리 안의 'V' 자 형 홈이 파여진 판위에는 쇠바퀴가 달린 미끄럼 작은 상자(sliding tray)가 위치하며 망원경으로 보는 상태에서 공기 실린더에 의해 가동된다. 이 작은 상자는 공기 실린더가 팽창될 때 hot cell 방향으로 미끄러져 들어간다. 이러한 작동에 의해 오염물질은 상자에 놓여 저서 모니터링을 위해 차폐된 울타리 내으로 들어가게 된다. 인터록(interlock)은 ① 언제든 지 한 개의 문만 열고자 할 때만, ② 내부의 hot cell 측면 문이 완전히 열려 있을 때 작은 상자가 그 안에 들어가고자 할 때에만, ③ 작은 상자가 완전히 빠졌을 때 내부 문을 닫고자할 때만 작동한다. 방사선 인터록은 방사선 준위가 설정치를 넘었을 때 작업실의 바깥쪽 측면 문이 열리는 것을 방지할 때 작동한다. 바

꺄쪽 문을 연 후에 상자는 공기 실린더로부터 떨어질 수 있으며, 오염물을 제거하는 것을 허락하도록 수작업으로 이 상자를 울타리 바깥으로 끄집어낼 수 있다.

두 개의 작업실 여과기 하우징을 설치하였고 hot cell 지붕의 배기 추출 duct 안에 damper를 설치하였다. Damper는 모터에 의해 가동되고 hot cell로부터 추출 시스템으로 저 흐름 공기가 도착할 때 닫혀 지도록 연동되었다. 이 장치는 hot cell로부터 발생된 동기가 건물의 추출 시스템으로 흘러들어가는 것을 막도록 한다.

작업실 내에 새로운 콘크리트 주춧돌 상단에 차폐된 시료채취 울타리를 설치하였다. 이 울타리에는 시료 용기를 이용한 수작업 시료채취 시스템, 공기에 의해 가동되는 공급선 밸브, 감마 탐침 및 이음매 차폐 문이 설치되었다. 인터록이 설치되어 공급선 밸브가 닫혀져 있지 않거나 울타리 내 방사선 준위가 설정치 내에 있지 않으면 출입문이 열리지 않도록 하였다. 인근 벽에는 시료 채취, 이송 및 감시를 위한 배전판과 황색 추출 damper가 설치되었다.

작업실 바닥은 배수 입구 지점 주변을 따라가며 굴착하였고 새로운 여과 하우징과 물에 섞인 불순물을 거르는 통을 설치하였으며 바닥면 이하준위까지 배수선을 용접하였다. 굴착된 지점은 콘크리트로 채웠으며 남은 작업실 바닥은 콘크리트로 얇게 발랐고 물에 섞인 불순물을 거르는 통에 까지 기울기를 주면서 얇게 덧칠하였다. 혼합탱크 아래 배출구, 넘쳐흐름 방지 장치, 분사 형 글러브 박스의 배수기, 작업실 샤워기 및 세면기 배출구로부터 물에 섞인 불순물을 거르는 통까지 덧칠 아래에 배관들을 설치하였다.

제염제 혼합 탱크를 작업실 내에 설치하였다. 이 탱크는 온도 조절 가열기, 프로펠러 혼합기, 수위 지시계 및 스위치가 설치되었다. 이 탱크는 건물의 물 공급 시스템과 연결되어 있으며 제염 분말은 상단으로부터 공급되었다. 깨끗한 제염제를 작업실이나 hot cell에 공급하기 위해 이 탱크의 근처에 공기에 의해 가동되는 펌프, 카트리지 필터 및 하우징이 설치되었다. 혼합 탱크 및 설비를 위한 배전판을 탱크 근처에 설치하였다.

글러브 박스를 작업실 내에 설치하였다. 이 글러브 박스는 제염을 위해 고압수 세척기와 연관되어 사용되었다. 작업실 배수 필터 하우징과 연결되도록 이 글러브 박스에 배수선을 설치하였다.

공기에 의해 가동되는 도르레가 부착되고 횡단 이동기능이 있는 크레인을 작업실 내의 현존하는 크레인 레일에 설치하였다.

출입 지역 및 출입구 서쪽은 사람이 샤워, 세수 용기, 작업자 감시 설비 및 탈의실 벽의 설치가 가능하도록 재배치하였다. 공기 중 베타선, 감마 감시 및 경보기를 장비실 내에 설치하였다.

9. 제염 공정

기본 제염공정은

- 혼합탱크 내에 1회분의 제염제를 준비하고 hot cell 내에서 펌핑하여 제염 공정 탱크으로 이송

- 오염된 물질들을 공정 탱크 내에 위치시키고 일정 온도에서 초음파 세척과 함께 물에 적시도록 함

- 여과기를 거치도록 하며 제염제를 공정 탱크로부터 저장 탱크으로 펌핑

- 혼합탱크로부터 깨끗한 제염제 공급 및 공정 탱크 내에서 오염 설비 세척

- 이들을 제거하여 감마 탐침으로 측정

- 필요 시 제염을 반복 수행

- 제염된 물질을 차폐된 울타리 및 감시 벽을 통해 작업실으로 이송

- 필요 시 보수, 저장 및 처분을 위한 2차 수작업에 의한 제염

여과된 제염제는 가능하다면 재사용된다. 제염제는 궁극적으로 방사능 배출구를 통해 배출된다.

1차 제염공정의 효과는 방사능 작업 중에 평가될 것이다. 보다 강력한 물리적 제염방법이 개발되고 있는데 바늘 총(needle gun), 고압수 젯, 연마 바퀴(abrasive wheel) 등이며 다른 보조 제염법(sponge jet, foam spray)과 연계하여 사용된다. 이러한 기술들은 물 세척법이 비효과적이라고 판명될 때 사용될 것이다.

제 3 장 결 론

우리나라는 아직 hot cell 과 같은 고 방사능 시설에 대한 제염 및 개보수 사례가 전무하다. Hot cell 내부를 제염 혹은 개보수하기 위한 적절한 계획 수립, 고 방사선장 하에서의 효과적이며 경제적인 작업, 작업자 피폭 저감, 발생된 방사성 폐기물의 안전 관리를 위해서는 해외의 선행 연구를 고찰함에 따른 이들의 경험과 시행오차를 가능한 많이 파악하는 것이 중요하다.

1) 미국의 선행 연구를 통해,

- 원격제염에 의해 방사선 준위를 설정치 까지 낮춘 후 작업자가 hot cell 내부에서 작업하는 것이 바람직 함

- 안전을 보증하기 위해 공기선의 연결등과 같은 사항을 재 검토하기 위한 절차 필요

- 방사선 장에서 제염을 하기 위해서는 보충 작업자 보호체계 필요

- 매니플레이터나 다른 원격조작 장비들이 제염 혹은 보수를 위해 제거되었을 때 방사능 오염의 확산을 피하기 위해 효과적인 절차와 hot particles의 control 과 같은 단속방안을 수립하는 것이 필요

- 오염된 hot cell 내부에 원격 및 수작업으로 박리성 수용액 베이스 제염페인트를 적용하는 것이 효과가 있음. 이 페인트는 hot cell 내 바닥을 형성하는 금속판들 사이의 틈에 있는 방사성 미세 입자를 제거하는데 유용하게 사용되었음

- Hot cell 내에서 사용할 수 있는 1 룩스의 광 감도를 가지는 플래시 빛 형태의 카메라를 원격으로 사용하는 것이 탱크내부나 장치의 뒷면 혹은 아래 면과 같이 숨겨진 부분을 관찰하기 위해 효과적임

- 용해성 방사성 오염물이 존재하는 곳에서, 땀으로 젖은 보호복과 오염물이 접촉하는 것을 막기 위해 접촉하는 부분을 물이 스며들지 않는 테이프로 단단히 덮는 것이 좋은 방법임

- 방사선 준위 및 누적피폭을 인지하기 위해, 맞춘 점(set point)에서 경고음을 발생하는 방사선량계를 사용하는 것이 ALARA 조절 조치로서 유용함

- Hot cell의 가장 적게 오염된 지역으로부터 제염이 가장 어려운 지역으로 작업을 진행하는 것이 효과적임을 파악할 수 있었다.

2) 일본의 선행 연구를 통해,

- Cell 개조 및 crane 보수공사에 대하여, 안전성을 충분히 확보한 공정을 채용 것이 바람직 함
- 개보수 중 연속적인 공정 개선에 의해 작업자 피폭 저감을 달성하고 발생된 방사성폐기물 처리를 위한 상황에 적절한 감용 처리장치 고안이 필요
- 동작 simulation을 중심으로 한 virtual plot typing 방법이 방사선 환경 하에서 안전성 향상이나 피폭 저감에 유용함
- 환경조건 등이 엄격한 제약을 받은 관계로 각 현장에서 "trouble zero"에 이르기 위해서는 충분한 "front loading"이 필요하며 구체적으로는 원하는 "설계 tool"과 "cold mock-up" 등의 조합이 필요함을 파악할 수 있었다.

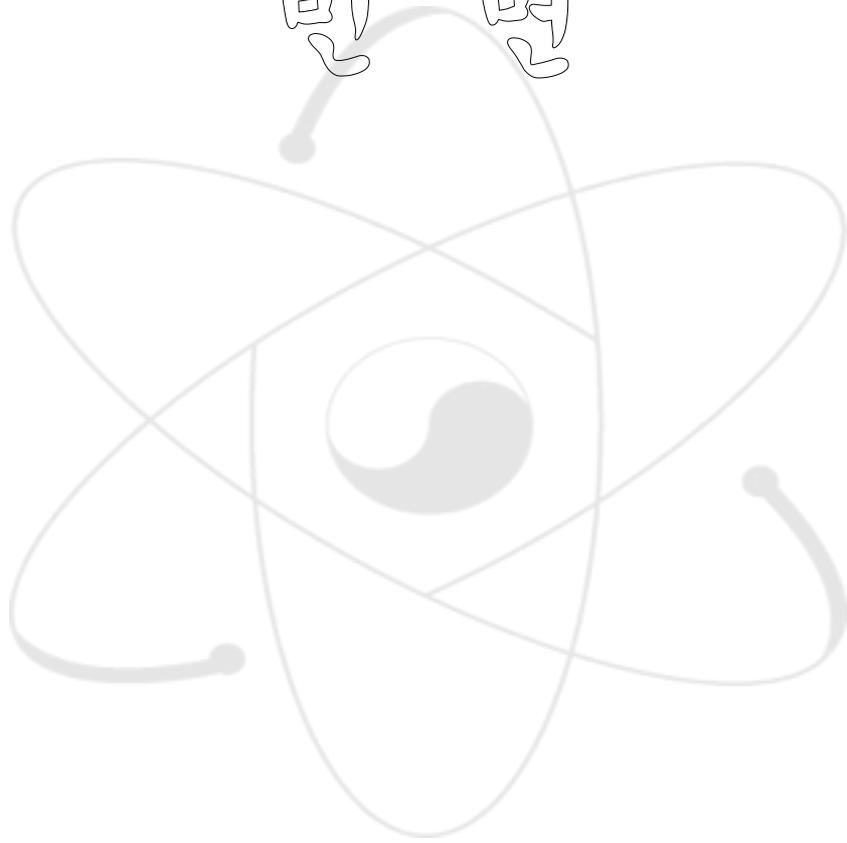
3) 프랑스의 선행 연구를 통해,

- Hot cell 개조공사를 실험실이 가동 중에 있는 동안 수행하는 것이 가능한데 하루하루가 도전의 연속이었던 것으로 판명됨
- 160,000 시간 이상의 작업 중 사고율은 기존 연구센터에서 관찰된 사고율의 평균범위에 있었으며 작업효율은 보다 높았음. 과제 수행 중의 변경 사항(개조작업 중에 자주 발생), 우발 사건, 지진에 대한 보강 공사 및 협조 등을 잘 관리하는 것이 필요함
- Hot cell에서 발생하는 다량의 조각들을 배출하여 폐기물 시설에 시료를 신속하게 보내는 것이 어려웠음
- Cask를 계속 사용함에 따라 시간 소비 및 제염과 철거 작업이 방해되었음을 파악할 수 있었다.

4) 벨기에 및 영국의 선행 연구를 통해

- 폐기물 관리 개념을 해체 전략에 포함시킴에 의해 일반적인 해체 비용의 절감이 가능함: 현장에서 hot cell들을 함께 철거하는 것이 저렴한데 현장에서 철거 작업을 수행하는 것은 폐기물 관리를 해체전략에 연관시키는 것이며 이를 통해 각 hot cell에 대한 최상의 해결책이 도출되었음
- Hot cell 내 제염조는 장래에 원격으로 제거될 수 있도록 설계되어야 함
- 작업의 안전성을 위해 인터록(interlock) system이 필요함
- Mild 한 화학제를 첨가한 제염방법이 비효과적일 때 강력한 물리적 제염방법이 해결책이 될 수 있음을 파악할 수 있었다.

비명



참 고 문 헌

1. Argonne National Laboratory, "Decontamination of hot cells K-1, K-3, M-1, M-3 and A-1, M-wing, building 200: Project Final Report", ANL/D&D/TM-96/2, USA(1996).
2. S. Ohuchi, S. Miyachi, Y. Ichige, T. Shinozaki, K. Nomura, K. Ogasawara, T. Kitazima, S. Aose, T. Nabemoto, F. Katahira and T. Sakaya, "Experience of hot cell renovation work in CPF(Chemical Processing Facility)", J. of the RANDEC, ISSN 1343-3881, No. 37(2008)pp.25-37.
3. T. Nabemoto, F. Katahira, T. Sakaya et al., "Experience of hot cell renovation work in CPF(Chemical Processing Facility)", Proceedings of ANS DD&R, Chattanooga, Tennessee, USA(2007),pp. 51-53.
4. S. Aose, T. Kitazima, K. Ogasawara, S. Miyachi, Y. Ichige, T. Shinozaki and S. Ohuchi, "Renovation of CPF(Chemical Processing Facility) for development of advanced fast reactor fuel cycle system", Proceedings of ANS DD&R, Chattanooga, Tennessee, USA (2007.9),pp. 54-56.
5. F. Boussard, D. Bois and J. Y. Blanc, "LECA refurbishment project or how to get ready for the next ten years", Proceedings of HOTLAB Plenary Meeting, Halden, Norway(2004), pp.163-168.
6. B. Thierry and B. Alain, "Cleaning and dismantling of a high activity laboratory", Proceedings of HOTLAB Plenary Meeting, Halden, Norway(2004), pp.169-176.
7. S. Harnie and L. Noynaert, "Decommissioning a hot cell used for post irradiation research", Proceedings of HOTLAB Plenary Meeting, Studsvick, Sweden(1997), pp.71-77.
8. T. R. Black and M. S. Stucke, "Refurbishment of a hot cell for decontamination of in-cell equipment", Proceedings of HOTLAB Plenary Meeting, Studsvick, Sweden(1997), pp.78-97.

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/AR-806/2008					
제목 / 부제		Hot Cell 제염 및 개보수 사례 기술현황 분석			
연구책임자 및 부서명		원 휘 준, 제염해체기술 개발부			
연구자 및 부서명		연구자 : 정종현, 문제권/박근일, 송기찬 부서명 : 제염해체기술 개발부/ 재순환핵연료기술개발부			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2008
페이지	62 p.	도표	있음(0), 없음()	크기	210×297 cm
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), _ 급비밀		보고서종류	기술현황분석보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록	<p>국내 고방사능 시설인 IMEF, PIEF, DFDF의 hot cell 가동 년수가 증가함에 따른 노후화로 이들에 대한 제염과 개보수의 필요성이 증대되고 있다. 또한, 차후 이들 시설에 대한 안전 규제 강화로 인한 개보수 및 이들 시설을 다른 용도로 변경하거나 해체하여야 할 가능성도 존재하고 있다. 이를 대비하여 미국, 일본, 프랑스, 벨기에 및 영국의 hot cell 개보수, 제염 및 해체 사례를 조사하였다. 미국의 ANL에서는 hot cell 내부를 제염하는 과제를 수행하였다. 이 과제는 Rn-220 이 환경으로 방출되는 것을 실제적으로 제거하고 hot cell 들을 비어있는 상태에서 제한적으로 사용하는 조건으로 복구하기 위한 것이었다. 5개 hot cell 내부는 비워지고 제한적으로 사용할 수 있도록 제염되었다. 일본 JAEA의 고준위 방사성물질 연구시설(CPF) 은 고속로 연료의 재처리기술개발과 관련된 기초 시험시설인데 새로운 재처리공정 시험을 위해 1995년부터 hot cell을 개조하였다 원격조작에 의한 해체, 철거, 제염작업을 철저하게 수행한 후 hot cell 내에 직접 인력이 투입되어 수행한 해체, 철거 및 제염작업으로 이동하는 공정을 채용하였고 새롭게 설치된 기기의 unit화 등의 대책에 의해, 작업원의 피폭량을 예측보다 대폭 낮추는 성공을 거두었다. 기타 외국에서는 hot cell 개보수 및 제염을 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 이를 통해 기술과 경험을 계속 축적하는 것으로 판단되었다.</p>				
주제명키워드	핫셀, 개보수, 해체, 원격 제염, 제한, 안전 규제, 노후화, 피폭				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-806/2008					
Title / Subtitle					
A State of the Art Report on the Case Study of Hot Cell Decontamination and Refurbishment					
Project Manager and Department		H. J. Won, Decontamination and Decommissioning Technology Development Division			
Researcher and Department		C. H. Jung, J. K. Moon, G. I. Park and K. C. Song			
Recycled Fuel Technology Development Division					
Publication Place	Taejon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute	Publication Date	August. 2008
Page	62 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No()	Size	210×297 cm
Note					
Classified	Open(○), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	State of the Art Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>As the increase of the operation age of the domestic high radiation facilities such as IMEF, PIEF and DFDF, the necessity of decontamination and refurbishment of hot cells in these facilities is also increased. In the near future, the possibilities of refurbishment of hot cells in compliance with the new regulations, the reuse of hot cells for the other purposes and the decommissioning of the facilities also exist. To prepare against the decontamination and refurbishment of hot cells, the reports on the refurbishment, decommissioning and decontamination experiences of hot cells in USA, Japan, France, Belgium and Great Britain were investigated. ANL of USA performed the project on the decontamination of hot cells. The purpose of the project was to practically eliminate the radioactive emissions of Rn-220 to the environment and to restore the hot cells to an empty restricted use condition. The five hot cells were emptied and decontaminated for restricted use. Chemical processing facility in JAEA of Japan was used for the reprocessing study of spent fuels, hot cells in CPF were refurbished from 1995 for the tests of the newly developed reprocessing process. In a first stage, decommissioning and decontamination were fully performed by the remote operation. Then, decommissioning and decontamination were performed manually. By the newly developed process, they reported that the radiation exposure of workers were satisfactorily reduced. In the other countries, they also make an effort for the refurbishment and decontamination of hot cells and it is inferred that they accumulate experiences in these fields.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Hot cell, refurbishment, decommissioning, remote decontamination, confinement, safety guard, operation age radiation exposure			