

DUPIC 분말 및 소결체 시험장비의 제염/해체, 핵연료물질 및 해체폐기물 관리
Decontamination and decommissioning of Experimental DUPIC Equipment
at PIEF 9405 Hot Cell

이호희, 박장진, 신진명, 이은표, 조광훈, 양명승
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

경·중수로 연계(DUPIC : Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) 핵연료는 경수로 사용후핵연료를 직접적인 재가공 방법에 의해 중수로 핵연료로 재 사용하는 개념으로, DUPIC 핵연료 기술개발과제에서는 다량의 사용후핵연료를 사용한 본격적인 시험에 앞서 1999년 초부터 약 1 kg-U의 사용후핵연료를 사용하는 DUPIC 분말 및 소결체 특성시험을 PIEF 9405 핫셀에서 수행하였다. PIEF 9405 핫셀에서는 핵연료봉 절단, DUPIC 분말 및 펠렛제조와 이들의 제조에 따른 특성시험을 수행하였으며, 취급한 핵물질의 형태는 절단 연료봉, 분말, 압분체, 소결체, 가공 부스러기, 시료 등이 있다. 이 핫셀에는 핵연료봉 절단장치, OREOX furnace, mixer, press, sintering furnace, 계량 및 측정장치 등이 설치되어 있다. DUPIC 분말 및 소결체 특성시험이 완료됨에 따라 해체계획을 수립하고, 핵물질안전조치측면에서의 핵연료물질 계량, 포장 및 운반, 시험 및 유틸리티 장비의 제염/해체, 해체폐기물의 포장 및 운반, 핫셀 제염 등의 작업을 수행하였다. 시험장비는 고방사선 구역인 핫셀내에 설치되어 있어 작업자의 직접 접근이 불가능하므로 M/S manipulator에 의해 원격으로 제염 및 해체하여야 한다. 또한 해체폐기물의 운반 및 핫셀 제염시에는 작업자의 접근이 필요한 반원격 또는 접촉작업이 불가피하므로 작업자의 방사선피폭 저감방안도 고려하여야 한다.

Abstract

The concept of DUPIC(Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) is a dry processing technology to manufacture CANDU compatible DUPIC fuel from spent PWR fuel material. Before the main DUPIC experiment using the large amount of spent PWR fuel, it was necessary to carry out preliminary experiment using the small amount of spent PWR fuel. Therefore, characterization experiment for powder and sintered fuel had been performed using about 1 kg-U spent PWR fuel at No. 9405 hot-cell in PIEF(Post Irradiated Experiment Facility) since early in 1999. In the hot-cell, cutting of spent PWR rods, manufacturing of DUPIC powder, green pellets, sintered pellets, and characterization tests were carried out. The forms of nuclear material in the hot-cell are rod-cut, powder, green pellet, sintered pellet, scraps, samples, etc. The installed equipment in hot-cell are the cutting device of spent fuel rod, OREOX furnace, mixer, press, sintering furnace, measurement device, etc. Currently, the experiments in PIEF have been completed. It was necessary to dismantle and decontaminate the installed equipment. In order to dismantle this experimental equipment, dismantlement plan, weighing, packing, transportation of the nuclear material are required. Also, the decontamination/dismantlement of the utility equipment, the packing and transportation of the dismantlement wastes should be performed. Since all of DUPIC equipment in hot-cell are contaminated by highly radioactive material, the decontamination and dismantlement must be performed remotely by M/S manipulator. During the packing and transportation of radioactive waste, the reduction method of radiation exposure to operator has to be considered.

1. 서론

PIEF 9405 핫셀에서는 약 1 kg-U의 경수로 사용후핵연료를 사용하여 시험조건을 변화시키면서 DUPIC 핵연료 분말 및 소결체의 특성시험을 1999년 초에 착수하여 2000년 9월까지 수행하였다. 이 시험에서는 사용후핵연료를 약 15 cm로 절단하여 절단 핵연료 봉을 탈피복하고, 이를 OREOX furnace에 넣어 산화·환원하며, 이 분말을 green 펠렛으로 만든 후 sintering furnace에서 소결체로 만드는 시험을 수행하였다. 시험이 종료됨에 따라 핫셀의 재사용을 위해 시험장비를 제염/해체하여 폐기물로서 처리하고 핫셀을 제염하여 작업자가 접근할 수 있도록 하여야 한다. PIEF 9405 핫셀에서 취급한 핵물질의 형태는 절단 연료봉, 분말, 압분체, 소결체, 가공 부스러기, 시료 등이 있으며, 이 핫셀에는 그림 1에 나타난 바와 같이 핵연료봉 절단장치, OREOX furnace, mixer, press, sintering furnace, 계량 및 측정장치 등이 설치되어 있다. 고방사성 핫셀 내의 시험장비를 제염/해체하기 위해서는 제염/해체 기본계획 수립, 핵물질안전초치추진에서의 핵물질 계량, 포장 및 운반, 시험 및 공정장비의 제염 및 해체, 해체폐기물의 분류, 포장 및 운반, 작업자 피폭 저감, 핫셀 제염 등이 필요하다.

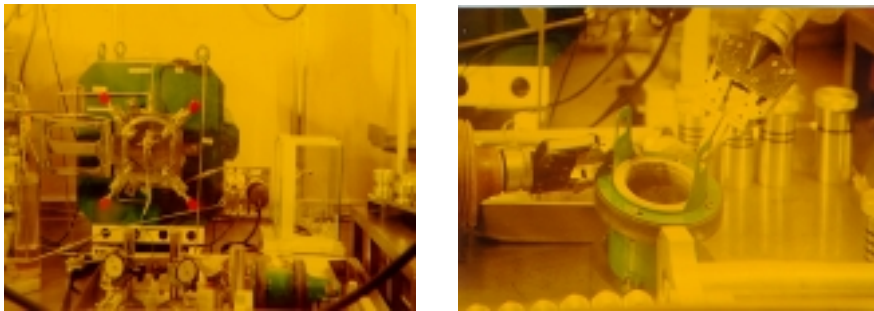


그림 1. PIEF 9405 핫셀에 설치된 DUPIC 시험장비.

2. DUPIC 시험장비 제염/해체 기본방안

핫셀 내에 시험장치를 제염/해체하기 위해서는 핫셀 내의 핵물질 계량, 포장 및 운반, 시험장비의 제염/해체, 해체폐기물의 분류, 포장 및 운반, 핫셀제염 등의 작업을 수행하여야 한다. 이러한 작업의 흐름도는 그림 2에 나타난 바와 같다.

3. DUPIC 방사성폐기물 발생원/발생량

PIEF 9405 핫셀에서 발생하는 폐기물은 제조 시험공정중 발생한 공정폐기물, 잔여 핵연료 물질 및 시험 생산품, 시험장비 해체시 발생하는 해체 폐기물로 크게 구분할 수 있다. 제조공정중 핫셀 내에서 발생한 공정폐기물은 cladding hulls, dirty scrap, 폐필터 및 폐공구, papers 및 patches 등이 있으며, 시험종료 후 발생하는 잔여 핵연료물질로는 DUPIC 핵연료분말, 가공부스러기 및 소결 펠렛 등이 있다. 시험종료 후 시험장비 해체시 발생하는 폐기물로는 재사용을 위한 장비 및 설비를 제외한 모든 폐장비, 폐설비, 폐공구 등과 이들의 제염시 발생하는 papers, patches 등이 있다. 해체폐기물의 분류 및 발생량은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 고체 폐기물 분류 및 발생량

폐기물 종류	폐기물 세부 내용	발생량
Cladding hulls	Cladding hulls(15 cm 절단 피복관)	약 0.3 kg
장비 폐기물	폐장비, 폐설비, 폐공구 등	약 3 m ³
Filters	HEPA filter(φ 245 x 380)	4 개

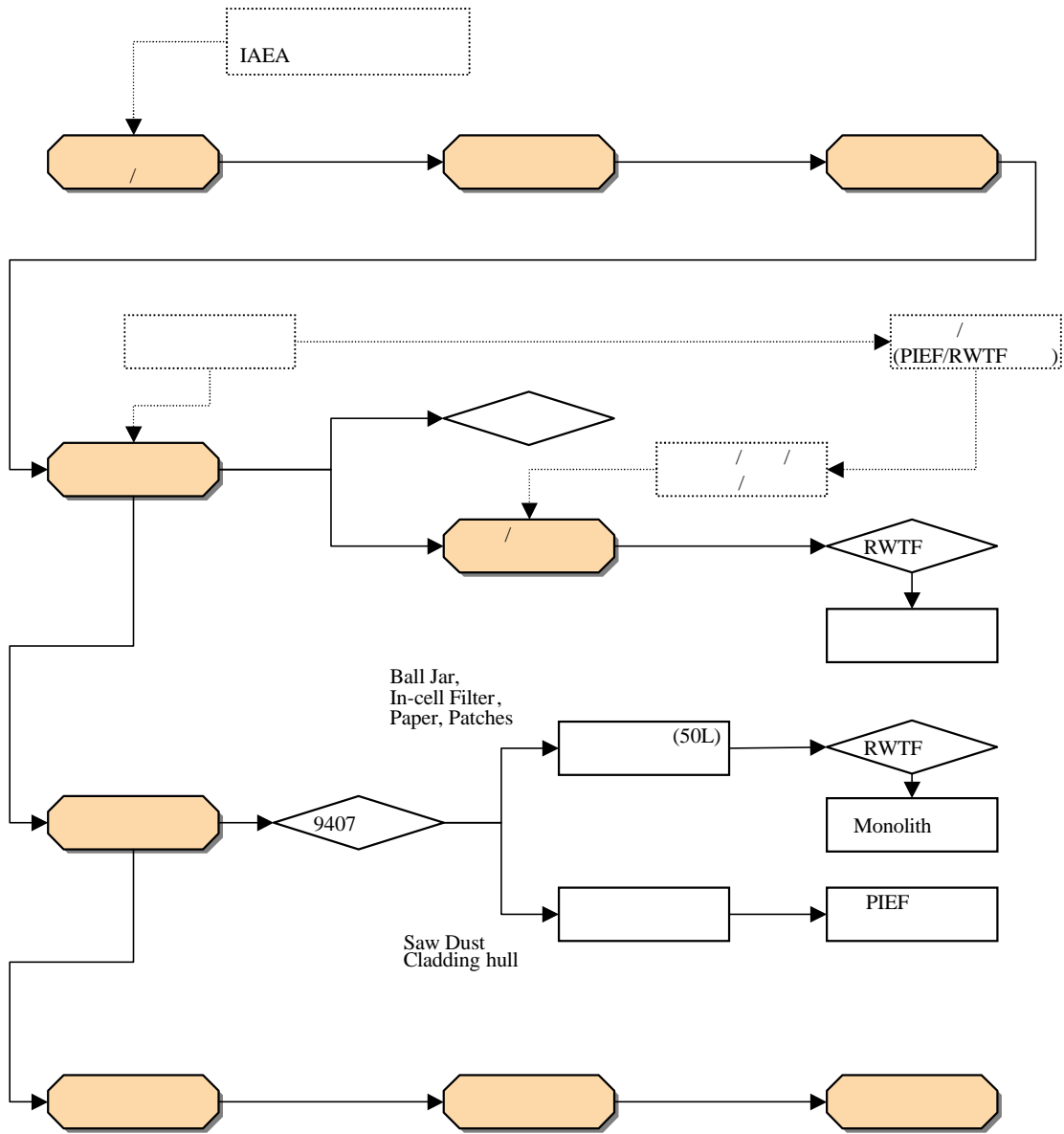


그림 2. PIEF 9405 핫셀에 설치된 DUPIC 시험장비 제염/해체 흐름도.

4. 폐기물 관리 기본개념

DUPIC 핵연료 제조시험 중에는 기체, 액체 및 고체 폐기물이 발생하며, 이러한 폐기물은 크게 핫셀 내에서 발생하는 폐기물과 핫셀 외부에서 발생하는 폐기물로 구분할 수 있다. 핫셀 외부에서 발생하는 폐기물은 기존 PIEF 시설에서 발생하는 폐기물과 구분이 곤란하고 상대적으로 발생량이 적으므로 핫셀 외부에서 발생하는 폐기물은 PIEF 폐기물 관리절차에 따라 관리한다. DUPIC 핵연료 제조시험과 관련하여 핫셀 내에서 발생하는 DUPIC 폐기물의 관리 기본개념은 그림 3에 나타낸 바와 같다. 즉, 폐기물이 발생하면 종류별로 분류하여 식별번호가 부여된 별도의 용기(컨테이너 혹은 vinyl bag)에 넣어 핫셀 내의 지정장소에 보관하다가 적합한 폐기물드럼 혹은 컨테이너에 넣은 후 수송용기에 적재하여 지정된 소내 저장시설로 운반하여 저장한다.

핵연료물질은 안전관리를 위해 잔여 핵연료분말 및 가공부스러기 등을 모두 펠렛으로 가공하여 소결한 후 무게를 측정하고 밀봉용기에 넣어 PIEF의 지정장소에 보관한다. 해체장비폐기물은 원격으로 제염하여 방사능을 낮춘 후 특수하게 설계된 저장/수송용기에 넣어 RWTF의 중·저준위 폐기물 저장고로 운반하여 저장한다. 해체작업중 발생한 고방사성 부품 및 제염지 등은 PIEF

9407 핫셀로 이송한 후 50 리터 드럼에 넣어 solid waste cask를 이용하여 RWTF의 monolith로 운반하여 저장한다. 핵연료봉 절단작업시 발생한 saw dust는 발생량이 적으므로 임시포장하여 별도 관리하다가 일정량이 수집되면 밀봉포장하여 PIEF 지정시설에 저장한다.

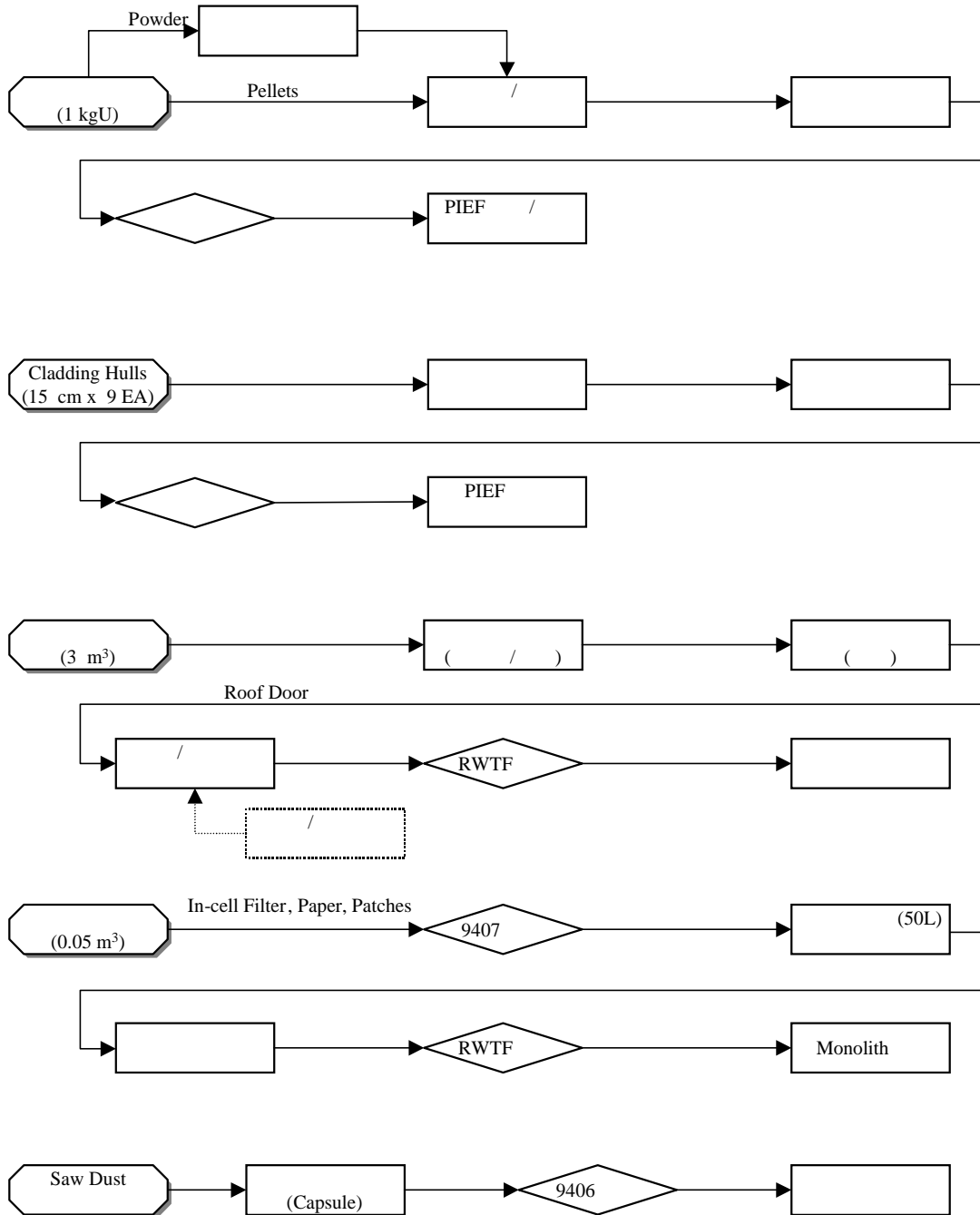


그림 3. DUPIC 해체폐기물 관리 기본개념.

5. DUPIC 시험장비의 제염/해체

PIEF 9405 핫셀에 설치된 해체대상 시험장비는 OREOX furnace, sintering furnace, ball mill, press 등의 DUPIC 핵연료 분말 및 소결체 특성시험장비, off-gas 포집장치 및 유틸리티장치 등이 있다. 해체대상 시험장비의 해체정도는 OREOX furnace와 sintering furnace는 해체 후에도 원형을 유지시키고, 나머지 장비는 가능한 한 최대한 분해하여 바스켓에 넣어 핫셀 외부로의 반출이

가능하도록 하였다. 해체는 매니플레이터의 조작이 가능하도록 특수하게 개조된 스페너, 파이프 커터 및 드라이버 등을 핫셀 내로 반입하여 해체작업을 수행하였다.

시험장비의 해체방법은 장비와 연결된 전기, 냉각수, H₂/Ar 및 O₂/Ar 가스, 압축공기 등의 유틸리티 공급라인을 차단하고 장비와의 연결부분을 해체한다. 제거된 유틸리티 라인은 절단하여 폐기물의 반출이 용이하도록 바스켓에 넣어 핫셀 밖으로 반출시까지 핫셀의 지정장소에 보관한다. 시험장비는 용기 적재계획에 따라 원격조작기로 조작이 가능하도록 제작된 전용공구를 사용하여 해체한다. 해체된 폐기물은 해체폐기물의 부피에 따라 바스켓 혹은 장비단위로 취급한다. 배기체 처리장치의 해체는 배기체 성능을 시험하기 위해 시료도 채취한다. 시험장비의 해체사진은 그림 4에 나타낸 바와 같으며, 시험장비의 해체에는 4 명이 작업을 수행하여 약 1.5 개월이 소요되었다.



그림 4. DUPIC 시험장비 해체.

6. DUPIC 해체폐기물의 핫셀반출, 소내 운반 및 저장

DUPIC 폐기물은 발생장소에서 분류하여 식별번호가 부여된 컨테이너 혹은 vinyl bag에 넣은 후 전용 수송용기에 적재하여 연구소내의 저장시설로 운반하여 저장한다. 이러한 DUPIC 폐기물의 소내 수송은 원자력법 및 과기부 고시, 방사선안전관리규정, 핵물질계량관리 및 방호규정, 방사성폐기물관리규정 등에 따라 안전하게 관리한다. DUPIC 폐기물을 적재한 수송용기를 시설 밖으로 운반할 때에는 육안검사 및 H/P survey를 수행한다. DUPIC 폐기물을 운반할 때 수송용기 표면의 방사선 선량율은 표면이 2 mSv/h, 표면으로부터 1 m 거리에서 0.1 mSv/h 이하가 되어야 한다. 본 작업에서는 접촉시의 용기별 최대 표면선량율은 각각 0.65 mSv/h이고, 1 m 거리에서 0.38 mSv/h로서 기준을 만족하였다.

DUPIC 핵연료 제조공정 중 핫셀 내에서 발생한 중·고준위 고체폐기물(cladding hull, 폐필터 및 흡수체, papers, patches 등)을 PIEF 핫셀로부터 RWTF의 monolith로 운반할 때에는 50 리터의 전용용기에 넣어 핫셀내에서 압축한 후 그림 5에 나타낸 바와 같은 solid waste cask를 사용하여 monolith로 운반하여 저장한다. 부피가 큰 해체폐기물은 50리터의 전용용기에 적재가 불가능하므로 그림 6에 나타낸 바와 같은 특수 수송/저장용기(직경 1 m, 높이 1 m, 차폐두께 납 50 mm 상당)에 넣어 RWTF 중·저준위폐기물 저장고로 운반하여 저장한다. 부피가 큰 해체폐기물은 그림 7에 나타낸 바와 같이 핫셀의 천장도어를 열고 서비스구역의 O/H 크레인을 사용하여 용기에 적재하였다.



그림 5. Solid Waste Cask.



그림 6. 해체폐기물 수송/저장 전용용기.



그림 7. 핫셀 천장도어 개방 및 해체폐기물 반출.

7. 핫셀 제염

PIEF 9405 핫셀은 사용후핵연료의 파괴시험을 수행한 핫셀이므로 핫셀표면 및 공간은 방사성 물질로 오염되어 고방사선구역으로 분류한다. 특히 DUPIC 분말 및 소결체 특성시험은 약 400~600 °C에서 산화환원공정을 통해 분말을 제조하고 이 분말을 사용하여 약 1700 °C에서의 소결체를 제조하는 소결공정도 포함하고 있으므로 핵연료 분말로 핫셀 및 시험장치가 오염될 가능성이 크다. 핫셀의 내부제염은 핫셀내의 핵물질 및 해체장비 폐기물을 인접 핫셀 또는 핫셀 밖으로 반출한 후 M/S manipulator를 이용하여 핫셀 외부의 작업구역에서 수회에 걸쳐 충분히 제염작업을 수행한 후 H/P survey를 통해 작업자의 방사선 안전이 보장될 때 핫셀 내부로 작업자가 들어가 제염작업을 수행한다. 이러한 작업은 밀폐구조이고 작업공간이 협소한 고방사선량을 갖는 고오염 지역에서 수행되므로 원자력법 및 원자력연구소의 규정을 준수하여 작업자의 방사선안전을 보장하여야 한다.

핫셀내의 핵물질 및 해체폐기물을 인접핫셀 또는 핫셀밖으로 반출한 후 핫셀 내부의 선량율은 20~100 mSv/h로 측정되었으나 M/S 매니퓰레이터로 3~4 회 제염작업을 수행한 결과 선량율은 cutting machine 부분(20~50 mSv/h)을 제외하고 2~3 mSv/h까지 떨어졌다. 더 이상 원격제염을 수행하여도 제염효과가 없는 것으로 판단되어 작업자가 핫셀에 직접 들어가 제염작업을 수행하였다. 2인 1조로 10 회의 제염작업을 수행한 결과 핫셀의 선량율은 0.5~1 mSv/h까지 떨어져 핫셀 제염작업을 종료하였다.



그림 8. 핫셀 제염광경.

8. 작업자 안전관리

방사선작업종사자에 대한 피폭선량은 외부피폭과 내부피폭선량을 합하여 평가하며 원자력법 시행령 제 2조 제 5호에서 정하는 선량한도를 초과하지 않도록 하여야 한다. 외부피폭선량 평가는 과학기술부 고시 96-6호 "개인선량계 관독에 관한 기술기준" 및 96-7호 "외부피폭선량 관독에 관한 품질보증계획서 작성기준"에 근거한 연구소 절차에 따르며, 내부피폭선량은 연구소 내부피폭선량 평가절차에 따른다. 본 작업에서는 선량한도에도 불구하고 작업자의 안전을 위해 작업자의 연간피폭누적량을 12 mSv를 초과하지 않도록 관리하였다.

핫셀에 작업자가 최초로 들어가기 전에 M/S manipulator를 사용한 원격제염을 수행한 후 핫셀 내부로 probe를 투입하여 작업에 따른 작업자의 예상피폭선량을 추정하고 작업자의 안전을 보장할 수 있을 때 작업자가 핫셀 내부로 들어가도록 하였다. 본 작업에서는 핫셀의 background를 2 mSv/h 이하로 낮춘 후 핫셀의 작업자 출입을 시작하였다.

핫셀 작업자는 방호복 및 방호덧신을 2 중으로 착용하고, 장갑은 비닐장갑을 2 중으로 착용한 후 그 위에 목장갑을 착용하여 비닐장갑의 파손을 방지토록 하였다. 방독면은 방사선환경에 적용되는 필터를 갖춘 것을 착용하였다. 방호복, 장갑 및 덧신 등을 착용한 후 핫셀 내부의 분진 등이 몸에 직접접촉하지 않도록 청데이프를 사용하여 마감처리를 하였다. 선량계는 TLD와 포켓용 디지털 도시미터를 동시에 착용토록 하였다. 선량계는 9 mSv와 1 mSv/h에서 경보가 울리도록 설정한 후 핫셀에 들어가도록 조치하였다. 또한 작업자의 안전관리를 위해 포켓선량계 외에 휴대용 선량계도 휴대토록 하였다.

핫셀의 리어도어를 연 후 작업자가 핫셀로 들어가기 전에 리어도어 주위와 작업자 대기구역에는 비닐을 깔아 핫셀 내부의 오염의 확산을 최소화하도록 하였다. Teletector를 사용하여 핫셀의 방사선량을 측정된 후(약 1~3 mSv/h) 작업자는 제염액을 묻힌 제염지를 들고 핫셀에 들어가 제염작업을 수행하였다. 작업자의 핫셀내 체재시간을 최소화하기 위해 제염지는 핫셀 밖에서 제염액을 묻혀 핫셀 내로 갖고 들어감으로써 핫셀 내에서 작업자가 제염지를 1 장씩 쉽게 분리하여 사용할 수 있도록 하였다. 작업자는 경보가 울리면 작업시간에 관계없이 즉시 핫셀 밖으로 나오도록 조치하였다. 또한 작업자의 방사선안전관리 및 오염의 확산을 방지하기 위해 방사선안전관리담당자가 작업중에 항상 핫셀 밖에 대기하며 작업전·후 뿐만 아니라 작업중 작업자의 안전관리업무를 수행토록 하였다.

작업을 마친 작업자가 핫셀 밖으로 나온 후에는 바닥을 비닐로 깔 작업자 대기구역에서 우선 밖의 방호복, 덧신(작업화 포함) 및 장갑을 벗고 방독면을 벗은 후 새로운 작업화로 갈아 신고 작업자 대기장소를 벗어나도록 하여 오염이 외부로 확산되지 않도록 하였다. 이러한 작업은 핫셀작업자 혼자 수행하기에는 불편하므로 핫셀 밖의 대기 작업소에서 도와주도록 하였다. 회수한 방호복, 장갑, 덧신 등은 대기장소에 준비한 비닐봉지에 넣어 오염의 확산을 방지토록 하였다. 회수한 방독면은 필터를 제거하여 비닐봉지에 폐기하고, 방독면은 제염을 위해 별도로 준비한 비닐봉지에 하나씩 넣었다. 작업을 완료한 작업자는 change room으로 이동하여 나머지 방호복을 벗고 방사선안전관리실의 입회하에 전신에 대해 오염검사를 수행하였다.

핫셀 내부접촉 제염작업은 5 인의 작업자가 5 차에 걸쳐 수행하였으며, 총작업시간은 10 시간이 소요되고, 5 인의 누적피폭량은 0.5~2 mSv 였다. 제염핫셀의 제염작업이 종료된 후에는 핫셀 내에 투입된 작업자에 대해 방사선안전관리실에서 내부피폭검사를 수행하였다.

9. 결 론

PIEF 9405 핫셀에서 약 1 kg-U의 경수로 사용후핵연료를 사용한 DUPIC 핵연료 분말 및 소결체의 특성시험이 완료됨에 따라 핫셀내에 설치된 시험장비를 제염/해체하여 폐기물로서 처리하고, 핫셀내부를 제염하였다. 시험장비의 제염/해체는 M/S 매니플레이터를 사용한 원격작업으로 수행하고, 해체폐기물의 반출 및 핫셀내부 제염은 반원격 및 접촉작업을 수행하였다. 시험장비의 제염/해체는 4 명의 작업자가 1.5 개월동안 수행하였고, 핫셀 제염은 5 명의 작업자가 약 1 개월동안 수행하였다. 작업중 안전관리 규정을 준수함으로써 모든 작업은 순조롭게 끝났다.

본 제염/해체작업은 핵물질을 취급한 고방사성구역에서 수행되므로 핵물질안전조치측면에서 핵물질 계량, 포장 및 운반, 시험 및 공정장비의 제염 및 해체, 해체폐기물의 분류, 포장 및 운반, 작업자 피폭저감 등을 고려하였다. 이러한 작업은 국내에서는 처음으로 시도되는 작업으로 본 작업의 계획 및 결과는 향후 대규모 원자력시설의 제염 및 해체작업에 기본자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] 이호희, 박장진 외 “DUPIC 핵연료 제조시험공정에서의 핵물질 흐름분석” KAERI/TR-1379/99
- [2] 이호희, 박장진 외 “DUPIC 방사성폐기물 관리방안분석” KAERI/TR -1495/2000

(감사의 글) 본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.