

## 사용후핵연료 차세대관리기술 실증시설 개발

박성원, 이호희, 이종렬, 이재설, 윤지섭, 민덕기, 노성기, 박현수  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

누적되는 사용후핵연료의 안전하고 효율적인 관리는 원자력 발전의 지속적인 성장을 위한 중요한 과제중의 하나로 대두되고 있다. 사용후핵연료 차세대관리기술 실증시설은 이러한 사용후핵연료의 효율적인 관리·이용과 관련된 후행핵연료주기 기술을 종합적으로 시험 및 실증하기 위한 파일럿 규모의 핫셀 시험시설로서 2000년대 후반 준공을 목표로 현재 개념설계가 수행되고 있다. 본 시설은 국내 원전에서 발생된 PWR 및 CANDU 원자로 사용후핵연료 집합체를 수납하여 사용후핵연료의 특성검사, 장기 건식저장 및 처분전처리 시험, 파일럿 규모 DUPIC 연료 제조시험을 포함한 사용후핵연료 차세대 관리기술 실증시험, 그리고 중·고준위 폐기물의 고정화 시험 등을 수행할 수 있는 기능을 갖도록 하며, 향후 장기적인 연구개발 수요에 대비하여 다양한 종류의 실증시험이 가능하도록 시설의 유연성을 최대한 고려하여 설계될 예정이다.

### 1. 서 론

현재 추진되고 있는 방사성폐기물관리 기술개발 목표를 적기에 달성하여 후행핵연료주기 기술 자립을 조기에 실현하기 위해서는 고방사능물질을 취급할 수 있는 대형 핫셀시설이 필요하나, 이를 뒷받침할 수 있는 기존 시설은 규모가 작고, 그 용도가 핵연료봉의 조사후시험 등 특수한 목적에 제한되어 있어 다양한 목적으로의 활용이 불가능한 실정이다. 이러한 사유로 이미 10년 전인 1988년 제 221차 원자력위원회에서 이의 필요성을 인정하여 사업추진계획을 승인함에 따라 1990년 개념설계를 완료한 바 있다. 그러나 방사성폐기물을 종합적으로 관리하기 위한 임해부지의 확보 실패로 사업이 유보되어 오다가 최근 원자력증장계획의 수정·보완시점에서 시설의 기능 및 활용목적에 재정립하여 대덕 원자력연구소부지에 본 시설을 건설하기로 결정함에 따라 1997년부터 개념설계에 재 착수하게 되었다.

본 연구에서는 후행핵연료주기 기술의 자립을 촉진하기 위한 파일럿 규모의 실증시설 확보를 위하여 1990년도에 기 수행된 개념설계를 바탕으로 시설의 기능, 구성 및 강화된 안전요건 등의 시설개념을 수정·보완하여 중장기적인 연구개발 수요에 부합될 수 있는 시설개념을 확립하는데 있다.

### 2. 시설의 설계개념

본 시설은 현재 결정된 일정한 공정의 설치만을 위한 시설이 아니라 향후 시설의 수명기간동안 다양한 공정의 실증시험을 위한 공간을 제공하는데 그 기본적인 취지가 있으므로, 1990년도에

기 수행된 개념설계 내용을 기준으로 하되, 향후 본 시설의 활용가능성이 있는 기술개발과제들로 사용자그룹을 구성하여 여기에서 사용자요건을 취합·조정한 후 핫셀의 배치, 핫셀 내 원격조작 설비, 방사성폐기물 임시저장 및 처리설비, 유틸리티 공급설비 및 화학분석 설비 등의 설계에 최대한의 유연성을 고려하였다.

일반 설계요건으로는 안전 여유도를 충분히 고려한 실증된 기술의 적용, 환경에의 영향 최소화, 공중의 건강과 안전보장, 안전성에 지장을 초래하지 않는 범위 내에서의 경제성, ALARA 원칙의 적용, 그리고 적절한 용량의 시설내 임시저장용량 확보 및 핵물질보장조치 등을 고려하였다.

시설 설계에서는 사용후핵연료의 파괴시험을 수행하는 공정 셀과 오염가능성이 적은 셀은 상호 분리, 셀 간의 오염물질의 이송을 위한 Double Confinement 개념의 도입, 그리고 오염물질의 이송경로 단순화 등의 개념을 도입하여 시설 내에서의 오염확산을 최소화하도록 하였다. 또한 작업종사자의 방사선 피폭 제한치를 10 mSv/y로 설정하였으며, 이를 달성하기 위해 가능한 한 접촉 유지보수 작업을 배제하고 원격조작으로 유지보수 작업을 수행토록 하였으며, 이를 위한 원격 유지보수 셀을 설치하였다. 그러나 사용후핵연료의 수납준비 공정은 그 빈도가 낮아 로봇 시스템을 도입하지 않고 작업자가 직접 수행하는 개념을 채택하였다.

본 시설의 설계에서 고려한 시설기능 중 사용후핵연료 집합체의 밀집/밀봉 포장공정 및 DUPIC 연료 제조공정은 지금까지 개발된 연구결과[1] 및 개념설계 결과[2]를 근거로 하였으며, 또한 우리와 유사한 공정을 채택하고 있는 독일 PKA 시설[3]의 경험을 참조하였다. 그러나 향후 시설 활용의 극대화를 기하기 위해 핫셀 내 공정장치의 설치, 교체 및 개수가 용이하도록 모든 핫셀 내 공정장치는 모듈식으로 설계하는 것으로 가정하였다.

본 시설은 기존의 원자력시설에 인접하여 건설되므로 시설의 안전성과 관련된 유틸리티를 제외하고는 기존 시설로부터 공급받는 것으로 하였으며, 방사성폐기물 관리시설 또한 기존의 중앙 방사성폐기물 처리시설 및 저장시설을 최대한 활용하되, 기존시설에서 수납 및 처리가 불가능한 방사성폐기물에 대해서만 본 시설에 별도의 처리 및 저장설비를 갖추도록 하였다.

#### 가. 시설의 주요 설계기준

본 시설은 원전에서 발생된 PWR 및 CANDU 원자로 사용후핵연료 집합체를 수납하여 비파괴 및 파괴시험을 수행하는 시설로서, 그 주요 설계 기준은 표 1과 같다. 본 시설의 설계용량은 단지 시설의 규모를 결정하기 위한 수치로 의무적인 처리용량을 의미하지는 않는다.

#### 나. 공정 흐름

시설의 공정흐름은 시설의 기능, 핵심 공정의 선택 및 시설의 배치와 매우 밀접한 관계가 있으며, 운전 및 유지보수의 효율성과 안전성 측면에서 매우 중요한 고려사항이다. 본 시설의 개략적인 공정흐름도는 그림 1과 같다.

트럭에 적재되어온 수송용기는 트럭베이에서 방사선안전검사를 수행한 후 충격 흡수체를 해체하고 하역준비실로 이송된다. 하역준비실에서는 수송용기 냉각 및 검사계통에 연결하여 불활성가스를 수송용기 내부로 순환시켜 사용후핵연료를 냉각시키고 동시에 결함핵연료 유무를 검출한다. 이어 수송용기 외부뚜껑을 해체하고 내부 뚜껑의 볼트를 제거한 후 도킹 링을 설치한다. 하역준비가 완료된 수송용기는 Dolley에 적재하여 Consolidation Cell의 하부에 설치된 사용후핵연료 하역위치로 이송하여 핫셀에 접합시킨다.

표 1. 사용후핵연료 차세대관리시설 실증시설의 주요 설계기준

구 분		세 부 내 용	비 고
부지		원자력연구소 대덕부지	
기준 핵연료 (PWR)	초기농축도	5 w%	CANDU 원자로 사용후핵연료의 수납도 고려
	연소도	50,000 MWD/MTU(집합체기준)	
	최소냉각기간	5 년	
기준 수송용기		KSC-4(4 PWR 집합체 용량)	육로수송(일부개조)
시설 수납용량		20 MTU/y	밀집포장: 10 MTU/y DUPIC 연료:10 MTU/y
임시 저장용량		28 MTU	밀집셀: 8 MTU 포장셀: 20 MTU
시설 수명기간		40 년	
작업종사자 피폭제한치		10 mSv/y	과기부 고시 제96-35 제한치의 1/5
일반대중 피폭제한치		1 mSv/y	과기부 고시 제96-35 제한치의 1/5
자연재해(지진)		0.2 g(수평), 0.13 g(수직)	

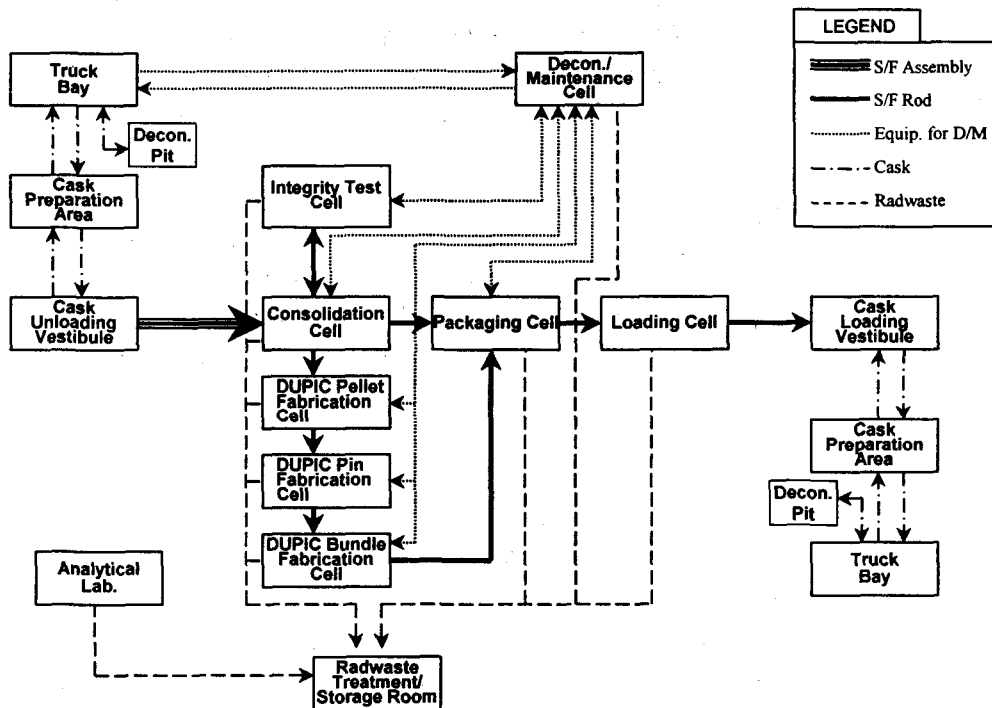


그림 1. 사용후핵연료 차세대관리시설 실증시설의 공정 흐름도.

핫셀 플러그를 열고 셀 크레인을 이용하여 하역한 사용후핵연료 집합체는 임시저장 핏트에 저장하거나 집합체 검사장치에서 연소도, 핵연료 재원 측정 및 외관검사 등을 수행한다. 검사가 완료된 핵연료집합체는 집합체 해체장치로 이송하여 End Fitting을 해체한 후 핵연료봉 인출 및 밀집작업을 수행한다. 핵연료봉 인출은 봉 단위 혹은 줄 단위로 수행할 수 있다. 상세한 핵연료봉 밀집공정에 대해서는 참고문헌[2]에 기술되어 있다.

인출된 핵연료봉은 시험 목적에 따라 각각 세 방향으로 이송된다. 먼저 밀집포장을 위해서는 핵연료봉을 밀집용 Trough에 수집하여 진동 충전방법으로 핵연료봉을 충전한 후 이 Trough를 Packaging Cell에 접합시켜 Pushing Device를 이용하여 핵연료봉을 Packaging Cell에 접합된 밀봉포장용기에 밀어 넣는다. 사용후핵연료의 파괴 시험을 위해서는 핵연료봉을 위와 유사한 방법으로 Pellet Fabrication Cell로 밀어서 이송시킨다. 전술한 두 경우 모두 셀 간의 오염확산 방지를 위해서 핵연료봉의 이송시스템은 이중 Confinement를 갖도록 설계한다. 또한 핵연료봉의 정밀 건전성시험이 요구될 때에는 핵연료봉을 봉단위로 Integrity Test Cell로 이송시킨다.

핵연료집합체 해체에서 발생하는 구조체폐기물은 초고압압축장치를 이용하여 그 부피를 약 1/8로 감용한 후 방사성폐기물 처리계통으로 이송한다.

DUPIC 연료 제조공정에서는 핵연료봉을 적절한 크기로 절단한 후 Decladding 공정, 연속 산화·환원 공정, 펠렛 제조공정, 연료봉 제조공정을 거쳐 CANDU 원자로용 핵연료다발을 제조한다. 여기서 제조된 핵연료다발은 Packaging Cell로 이송되어 수송을 위한 적절한 포장 및 검사공정을 거친 후 외부로의 반출을 위하여 Loading Cell로 이송된다.

Packaging Cell에서는 밀집된 핵연료봉의 포장작업을 수행하며, Loading Cell에서는 반출을 위한 재연 등 준비작업 및 사용후핵연료 수송용기에 적재하는 작업이 수행된다. 적재후의 반출작업은 수납 및 하역작업과 거의 유사한 절차를 갖는다.

원격 유지보수 작업을 위해 핫셀의 상부에 Decontamination and Maintenance Cell이 위치한다. 모든 셀에서의 고장 장비는 핫셀 상부에 위치한 해치를 통해 D&M Cell로 이송하여 여기에서 원격으로 보수작업이 수행되며, 원격 보수작업이 불가능하거나 비효율적일 때는 적절한 제염과정을 거친 후 Intervention Area로 이송하여 접촉 보수작업을 수행하게 된다.

핫셀에서 발생하는 공정폐기물 및 제염폐기물은 각각 그 준위 및 특성에 따라 Consolidation Cell의 지하에 위치한 폐기물 셀로 이송하여 압축 및 고화 등 적절한 처리공정을 거쳐 시설 내에 임시 저장하거나, 동일 부지 내에 위치한 중앙방사성폐기물처리시설로 이송한다.

핫셀 내에 있는 임시 저장핏트는 건식 볼트 저장개념을 채택하고 있으며, 자연대류 냉각에 의해 붕괴열을 대기 중으로 방출한다.

화학분석이 필요한 샘플은 공기 이송식으로 별도로 설치된 화학분석 셀로 이송하여 필요한 화학적 및 물리적 분석을 수행한다.

#### 다. 시설 배치

본 시설부지에는 중앙에 주 공정 건물이 위치하며, Fire Pump House, 유틸리티 공동구, 주차장, 도로 및 Fence, 경비 건물 등이 포함된다. 또한 사용후핵연료의 임시저장을 위한 캐스크 저장구역도 포함된다.

주 공정 건물의 규모는 길이 60 m, 폭 58.5 m, 높이 23 m로서 지하 2층 지상 6층으로 건설된다. 여기에는 주 공정이 수행되는 핫셀구역, 수송용기 취급을 위한 용기취급구역, 그리고 일반

실험실 및 유틸리티 설비구역을 포함하는 관리구역으로 구성된다. 그림 2 및 3에는 시설의 조감도 및 주 공정건물의 1층 평면도를 나타내었다.

핫셀은 원활한 물질 흐름과 작업의 용이성을 고려하여 그림 3과 같이 “-”자형으로 배치하였으며, 핫셀의 지하에는 사용후핵연료의 하역 및 적재를 위한 수송용기 이송통로 및 집합실, 방사성폐기물셀 및 Lag Storage Pit이 위치하며, 주 공정셀의 상부에는 D&M Cell 및 Intervention Area가 위치한다.

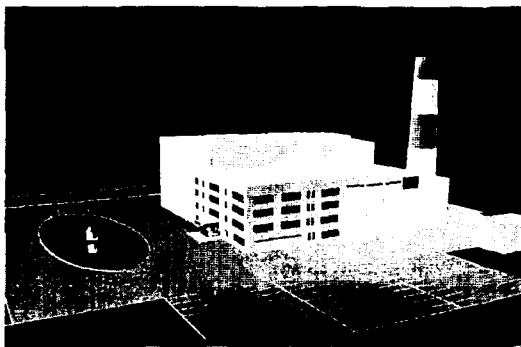


그림 2. 실증시설 조감도.

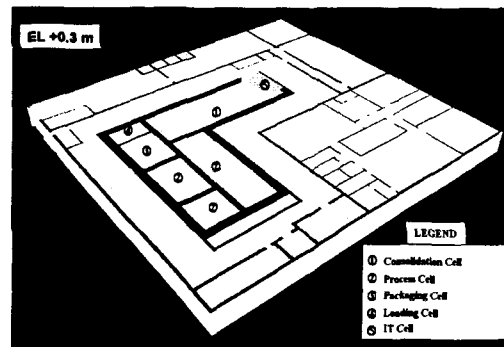


그림 3. 주 공정건물의 1층 배치도.

표 2. 핫셀의 주요 사양

Cell Name (L m x W m x H m, Atmosphere)	Major Functions	Cell Name (L m x W m x H m, Atmosphere)	Major Functions
Consolidation Cell (21 x 8 x 10, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S/F Assembly Unloading</li> <li>• S/F Assembly Inspection</li> <li>• S/F Disassembly</li> <li>• Fuel Skeleton Cutting</li> <li>• S/F Assembly Lag Storage</li> </ul>	Packaging Cell (8 x 6 x 10, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidated Fuel/DUPIC Fuel Bundle Packaging</li> <li>• Canister Lag Storage (Consolidated Fuel, DUPIC Fuel)</li> <li>• Inspection and Quality Control</li> </ul>
Pellet Fabrication Cell (20 x 6 x 8, α γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S/F Rod Cutting</li> <li>• S/F Rod Decladding</li> <li>• Powder Preparation</li> <li>• Pelletization</li> <li>• Sintering</li> </ul>	Loading Cell (6 x 3.5 x 10, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canister Decontamination</li> <li>• Canister Shipout</li> </ul>
Fuel Pin Fabrication Cell (9 x 6 x 8, α γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DUPIC Fuel Pin Fabrication</li> <li>• Inspection and Quality Control</li> </ul>	Integrity Test Cell (8 x 3 x 5, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuel Rod Integrity Test</li> </ul>
Fuel Bundle Assembly Cell (6 x 6 x 8, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DUPIC Fuel Bundle Fabrication</li> <li>• Inspection and Quality Control</li> </ul>	D&M Cell (29 x 13 x 7/9, β γ -tight)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipment Decontamination</li> <li>• Equipment and Crane Remote Maintenance/Repair</li> </ul>

### 라. 안전 고려 사항

본 시설은 정상조업 조건은 물론 비정상 조업조건 하에서도 시설 내 작업종사자 및 일반 대중의 건강 및 안전을 위하여 필요한 모든 안전대책을 강구한다. 이를 위해 국내 관련 법령 및 기준, 그리고 ICRP 권고사항을 준수한다. 작업종사자의 연간피폭선량을 10 mSv/y 이하로 유지하고, 시설에서의 방사성물질 배출을 유도한도의 1 % 이내로 유지토록 한다. 이러한 안전목표를 달성하기 위해 시설설계에 방사선 구역의 설정 및 방사선 차폐, 고방사능 지역에서의 접근 통제, 환기, 밀폐 및 오염제어 등을 반영하며, 환경으로 방출되는 모든 유출물은 감시 및 제어계통을 통해 배출되며, 적절한 필터를 거쳐 방사성 물질을 포집한다.

또한 시설의 장비, 계통 및 구조물은 정상조업 조건일 때는 물론 자연재해 및 사고에 대비하여 그 지정된 기능을 만족시킬 수 있도록 방사선적 중요도에 따라 안전등급 및 품질등급을 분류하고 각각의 등급에 요구되는 요건에 따라 설계한다. 또한 작업종사자의 피폭 최소화 및 작업의 효율을 기하기 위해서 모든 핫셀내 장비는 모듈식으로 설계하여 설치, 해체 및 유지 보수가 용이하도록 한다. 아울러 화재방호를 위하여 Fire Source 및 Fire Load에 따라 화재방호구역을 설정하고 구역간의 화재 확산을 방지하기 위해 화재 차단막을 설치하며, 화재방호구역의 특성에 따라 적절한 소화계통을 설치한다.

본 시설은 핵물질을 취급하는 시설이므로 핵물질 보안을 위해서 이중울타리의 설치, 울타리에 침입감시 장비, 침입 경보기 및 보안등의 설치, 시설 출입 통제시설의 설치 등 필요한 계통을 갖춘다. 또한 본 시설은 국제원자력기구의 핵물질보장조치 요건을 충분히 만족시킬 수 있도록 설계 및 건설될 것이다. 이를 위하여 설계 초기 단계에서부터 국제원자력기구와 충분한 협의를 통해 공동으로 핵물질보장조치를 위한 최선의 방법을 강구함과 동시에 이를 설계에 반영할 예정이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 사용후핵연료 차세대관리기술 실증시설의 설계기준을 설정하고 개념설계를 수행하였다. 본 연구결과는 향후 시설개념 최적화 작업을 거쳐 기본설계 요건서를 확정하고 기본설계 발주서의 기본자료로 활용될 예정이다.

### 참고 문헌

- [1] S. J. Lee, H. S. Park, J. H. Hwang, "Concept of an R&D Facility for Spent Fuel Dry Storage and Disposal Technologies" IAEA Seminar on Spent Fuel Storage-Safety, Engineering and Environmental Aspects, IAEA-SR-171, 1990.
- [2] 최종원, 고원일, 이재설, 박현수 "Conceptual Design and Cost Evaluation of the DUPIC Fuel Fabrication Facility " KNS 춘계대회, 1996.
- [3] Einfield, K and Lahr, H "DWK Pilot Conditioning Encapsulation Plant" Int. Conf. on the Back-End of the Nuclear Fuel Cycle, IAEA-SM-294/79, 1987.