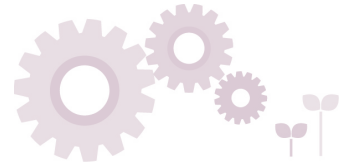


# 한국원자력연구원의 파이로 기술 및 관련 시설 개발 현황

박성빈 · 최은영 · 백승우 · 박환서 · 조일제 · 박근일 · 이한수 · 김인태  
한국원자력연구원



## 요약

한국원자력연구원에서는 사용후핵연료 관리 방안의 일환으로 파이로 공정 기술을 개발하고 있다. 파이로 기술은 PWR사용후핵연료를 처리함으로써 사용후핵연료의 부피, 방사성 독성, 열부하 및 처분장 면적 등을 감소시킬 수 있을 뿐 아니라, TRU핵종들을 함께 회수하여 소듐냉각고속로의 금속 연료로 제공이 가능하므로 핵저항성과 핵연료의 재활용률을 증대시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

한국원자력연구원에서 개발되고 있는 파이로 공정 기술에 대해 전처리 공정에서부터 마지막 폐기물 처리 공정에 이르기까지의 공정 기술에 대해 설명하고 이와 관련된 연구 시설인 DFDF<sup>1)</sup> 시설과 ACPF<sup>2)</sup> 시설, 그리고 공학 규모 파이로 일관 공정 시험 시설인 PRIDE<sup>3)</sup> 시설의 개발 현황을 설명하고자 한다.

## 서론

산업 발달과 문화적 수준의 발전으로 국내 연간 에너지 소비는 지속적으로 증가하는 추세이다. 정부는 국내 에너지 확보를 위해 제6차 전력수급기본계획에서 원자력 발전 비중을 늘리고 현재 23개의 원전에서 2027년까지 34개의 원전으로 늘리는 계획을 수립하였다.

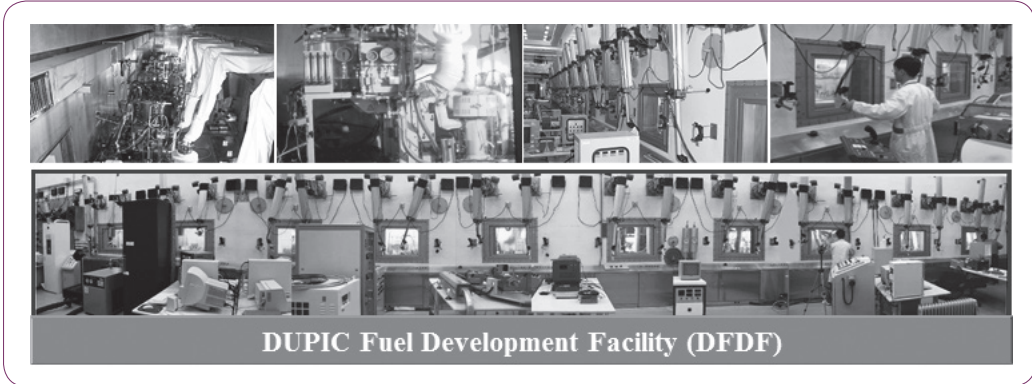
이에 따라 사용후핵연료의 발생량은 현재 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 양(연간 760톤)보다 증가할 것으로 예상되며, 원자력발전소 부지 내 저장소에 보관되고 있는 사용후핵연료의 저장 용량은

“ 한국원자력연구원은 파이로 기술의 기초 및 핵심 기술 등을 확보하고 용량 증대를 꾸준히 수행하여 공학 규모 파이로 일관 공정 실증 시설(PRIDE)을 구축하였고, 이를 활용하여 우라늄 및 모의 연료를 이용한 공학 규모 파이로 일관 공정 실증 시험을 수행하고자 하며, 아울러 미국과의 공동 결정이 이루어질 경우 기존 건식 처리 관련 시설인 DFDF 및 ACPF 등의 시설들을 활용하여 다양한 형태의 국내 PWR사용후핵연료에 대한 전처리 및 전해 환원 공정의 실증 시험을 수행하고자 한다. 이를 바탕으로 향후 파이로 기술의 실용화를 위한 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

”

1) DUPIC Fuel Development Facility  
2) Advanced spent fuel Conditioning Process Facility  
3) PyRoprocess Integrated DEMonstration facility





DFDF 시설의 내부 및 운전 지역

해체 및 절단하여 고온 voloxidation 처리함으로써 전해 환원 공정의 원료 물질을 공급하는 전처리 공정, 산화물 사용후핵연료를 금속으로 환원시키는 전해 환원 공정, 금속 전환체로부터 우라늄 금속을 선택적으로 회수하는 전해 정련 공정, 연 내 잔류 우라늄과 TRU 원소들을 회수하는 전해 제련 공정, 그리고 전해 환원 공정과 전해 정련 공정의 매질로 사용되는 LiCl 및 LiCl-KCl 염을 정제하는 염폐기물 공정으로 구성된다.

## 본론

한국원자력연구원에서는 파이로 공정의 실용화를 위해 각 단위 공정의 수율(throughput)과 공정 효율, 그리고 용량 증대를 목표로 실험실 규모 장치를 이용하여 파이로 공정의 핵심/선도 기술을 개발하고 이를 바탕으로 공학규모 파이로 일관 공정 실증 시설(PRIDE)을 구축함과 동시에 PRIDE 시설을 이용한 우라늄 이용 실증 시험과 한-미 공동 연구<sup>8)</sup>를 통한 사용후핵연료 이용 실증 시험을 조합하여 파이로 기술의 타당성을 검증함으로써 파이로 기술의 실용화의 기반을 구축한다는 계획을 수립하였다. 또한 파이로 기술

관련 기존 시설인 DFDF와 ACPF 시설을 이용하여 국내에서 산화물 사용후핵연료를 이용한 전처리 공정과 전해 환원 공정의 실증 시험을 수행하기 위해 사전 준비를 진행하고 있다.

## 1. DFDF (DUPIC Fuel Development Facility) 시설

DUPIC<sup>9)</sup> 핵연료주기 기술은 경수로에서 나오는 사용후핵연료에서 민감한 핵물질을 분리하지 않고 직접 재가공하여 중수로의 핵연료로 다시 재활용하는 기술로 핵확산 저항성에 대한 장점과 중수로에 대한 천연 우라늄 소요의 절감, 중수로 사용후핵연료 처분량의 감소 등의 장점이 있다.

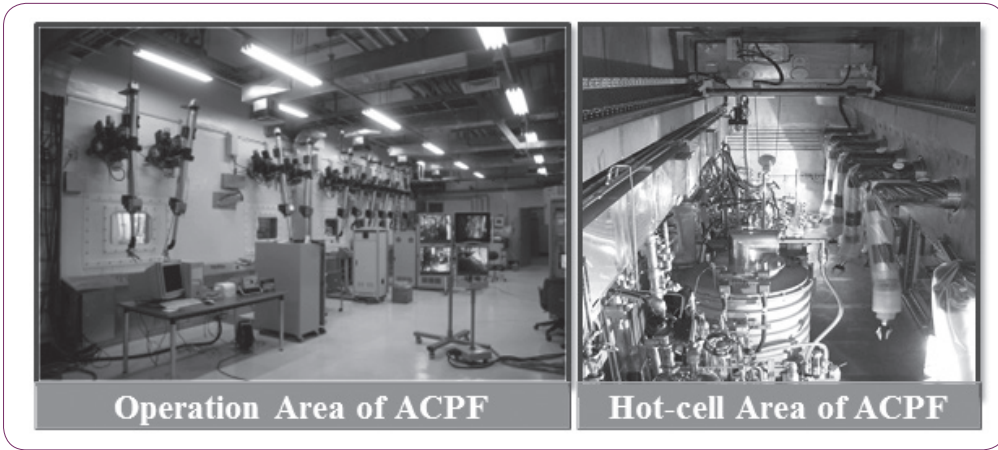
실험실 규모의 DUPIC 핵주기 기술을 개발하기 위해 한국원자력연구원은 1999년에 조사재 시험 시설<sup>10)</sup>의 M6 핫셀에 DFDF를 건설하였고 경수로 사용후핵연료를 원격으로 운전하여 건식 처리 관련 핵심 기술들을 개발하는 데 활용하였다.

사용후핵연료를 다루는 시설이므로 고강도의 차폐 시설을 갖추었으며 핫셀의 크기는 길이 23.7m, 폭 2m, 높이 4m이다. DFDF에는 경수로 사용후핵연료봉

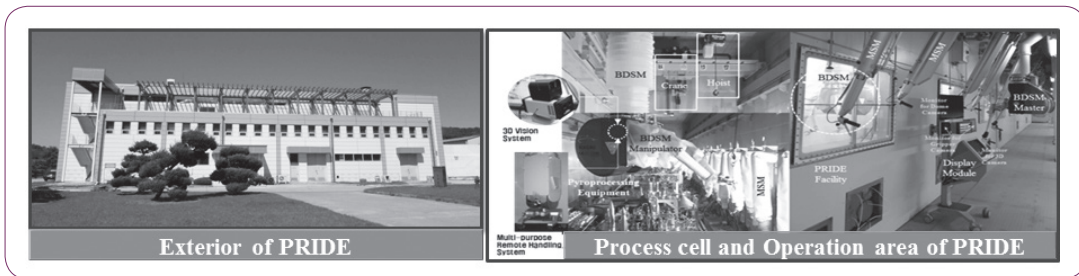
8) Joint Fuel Cycle Studies between ROK and US

9) Direct Use of pressurized water reactor In CANDU

10) Irradiated Material Examination Facility



ACPF 시설 내부 및 운전 지역



PRIDE 시설 외부 전경(좌)과 내부 셀 및 운전 지역(우)

을 처리하는 탈피복 장치, OREOX 공정 (Oxidation & Dewaxing) 장치, Powder 처리 장치, Pellet 제조 장치, 핵연료 제조 장치 등 25개의 장치들이 제작/설치되어 원격으로 운전되고 있다.

파이로 기술 개발과 관련하여 DUPIC 기술 중 사용후 핵연료에 대한 전처리 기술을 활용할 수 있다. PWR 사용후핵연료에 대한 탈피복 기술과 voloxidation 기술 및 장치들은 파이로 공정의 전해 환원 공정과 연계되어 활용될 수 있도록 수정/보완을 수행하였다.

## 2. ACPF 시설

ACPF는 PWR 산화물 사용후핵연료를 전해법을 이용하여 금속으로 환원시키는 전해 환원 공정을 실험실 규모로 실증함으로써 차세대 사용후핵연료 관리 기술을 확립하기 위한 목적으로 구축되었다. 2005년 조사재

시험 시설 M8 핫셀에 사용후핵연료봉을 처리하는 전처리 장치, 전해 환원 장치, 염 이송 장치 등을 설치하였다. 핫셀의 크기는 길이 10.3m, 폭 2m, 높이 4.3m이다.

초기 ACPF는 에어셀로 구축되었으나 용융염을 사용하는 전해 환원 공정 특성상 핫셀 내에 알곤 분위기를 조성하기 위해 에어셀 내 작은 규모의 알곤 셀을 새롭게 구축하고 있으며, 전해 환원 공정의 처리 용량은 1kgHM/batch 규모이다.

DFDF 시설에서 산화물 사용후핵연료에 대한 전처리를 수행하여 전해 환원 공정의 원료 물질을 공급하도록 하며, ACPF 시설에서는 산화물 사용후핵연료를 금속 사용후핵연료로 환원시키는 공정을 수행할 수 있도록 시설 기반을 구축함으로써 미국과의 공동 결정 (Joint Determination)이 이루어질 경우 다양한 형태의 국내 PWR 사용후핵연료에 대한 전처리 공정과 전해 환원 공정의 실증 시험을 수행할 수 있게 된다. 이를



통해 파이로 기술의 실용화를 위한 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

### 3. PRIDE 시설

한국원자력연구원은 2007년부터 공학 규모 파이로 일관 공정 실증 시험을 위하여 PRIDE 시설을 구축하기 시작하였고 2012년에 파이로 기술의 각 단위 공정 장치들을 제작하여 설치하였다. PRIDE 시설은 1층 에어셀, 2층 알콘셀로 구성되어 있으며 알콘셀은 길이 40.3m, 폭 4.8m, 높이 6.4m이며 수분 및 산소의 농도는 50ppm 이하로 유지된다.

알콘셀에는 17개의 workstation과 각 workstation에 2대의 MSM<sup>11)</sup>이 설치되었고, 셀 내 원격 운전성 확보를 위해 BDSM<sup>12)</sup>과 크레인 등이 설치되어 있다. 파이로 공정의 주요 장치들인 전해 환원 장치, 환원 음극 처리 장치, 전해 정련 장치, 잔류염 증류 장치, 염 이송 장치, 전해 제련 장치, RAR 공정 장치, Cd 증류 장치, LiCl 및 LiCl-KCl 염 재생 시스템 장치 등이 주로 알콘셀에 설치되었고, 1층의 에어셀에는 전처리 공정 장치, 염화 우라늄 제조 장치, 우라늄 잉곳 주조 장치, 잔류 폐기물 고화 처리 장치 등이 설치되어 각각의 단위 공정들은 일관 공정으로 연계되도록 설계되어 연간 최대 10톤을 처리하는 용량으로 구축되었다.

또한, PRIDE 시설에는 이러한 파이로 일관 공정의 설치 및 운영에 필요한 알콘 시스템 및 설비(원격 장치, 핵물질 계량, 공조, 유틸리티 공급 등)등도 구성되어 있다.

PRIDE 시설의 목적은 모의 연료를 이용한 파이로 기술의 공학 규모 파이로 일관 공정 성능을 평가함으로써 사용후핵연료 처리를 위한 실용화/상용화 시설 구축 시에 발생 가능한 문제점들을 파악하고, 해결 방안 및 향후 용량 증대를 위한 관련 기술과 지식 습득을 확보하는 것이다.

파이로 공정의 실용화를 위해서 산화물 연료 투입부터 최종 우라늄 잉곳 및 폐기물 고화체 제조까지 연계


한 종합적인 모의 시험을 수행하여, 단위 공정 연계 일관 공정의 공정 성능, 공정 간 연계 운전성, 원격 조업성 및 유지보수성 등에 대한 종합 평가를 수행할 예정이다.

2013년에는 PRIDE의 각 단위 공정에 대한 예비 시험 단계로 단위 공정별 염 이용 성능 시험을 수행하였다. 수분이 충분히 제거된 LiCl, LiCl-KCl 염을 각 단위 공정 장치의 전해조에 공급하여 용해시킨 후 단위 공정 장치의 각 구성 부분에 대해 운전 성능 시험(원격 염 장입 시험, 염 용해 특성 시험, 전극 장입 시험, 전기 화학 기초 시험 등)을 성공적으로 수행하였다. 2014년에는 감손 우라늄을 이용하여 각 단위 공정별로 공정 효율, 성능 및 원격 운전성 등을 평가할 예정이다.

## 결론

국내 원자력발전소 부지 내 사용후핵연료 저장소의 저장 용량이 곧 포화 상태에 이르기 때문에 사용후핵연료 관리 방안에 대한 기본 정책의 조속한 수립이 필요한 시점이다.

세계 원자력 관련 국가들은 차세대 사용후핵연료 관리 방안의 하나인 파이로 기술에 깊은 관심을 가지고 연구 개발을 추진하여 실험실 규모 및 공학 규모 실증 장치를 구축하는 등 파이로 기술을 확보하는 데 노력을 기울이고 있다.

한국원자력연구원은 파이로 기술의 기초 및 핵심 기술 등을 확보하고 용량 증대를 꾸준히 수행하여 공학 규모 파이로 일관 공정 실증 시설(PRIDE)을 구축하였고, 이를 활용하여 우라늄 및 모의 연료를 이용한 공학 규모 파이로 일관 공정 실증 시험을 수행하고자 하며, 아울러 미국과의 공동 결정이 이루어질 경우 기존 건식 처리 관련 시설인 DDFD 및 ACPF 등의 시설들을 활용하여 다양한 형태의 국내 PWR 사용후핵연료에 대한 전처리 및 전해 환원 공정의 실증 시험을 수행하고자 한다. 이를 바탕으로 향후 파이로 기술의 실용화를 위한 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대한다. 

11) Main Slave Manipulator

12) Bridge transported Dual arm Servo Manipulator