



사용후핵연료의 재활용을 위한 파이로 건식 처리 기술 PRIDE 준공의 의의 및 향후 계획

안도희

한국원자력연구원 핵주기공정개발부장



· 서울대 화학공학 학사, 석사
· 한국과학기술원 화학공학 박사
· 한국원자력연구원 핵주기공정기술 개발부 책임연구원(85~)

서론

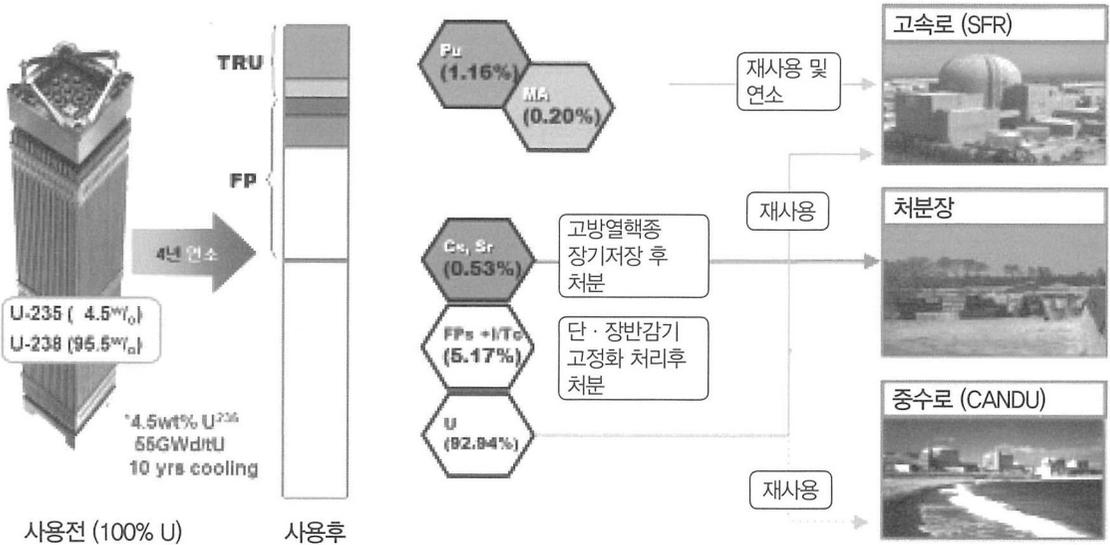
에너지는 인류 번영과 윤택한 삶을 유지하기 위해 반드시 필요한 요소로서, 지속 가능한 에너지원의 확보는 최우선적으로 고려해야 할 매우 중요한 가치라 할 수 있다. 그러나 현대 사회는 에너지와 경제, 그리고 환경 문제가 서로 복잡하게 얽혀있다. 현대 사회의 지속성 있는 경제 활동을 위해서는 대량의 에너지 소비가 필수적이며, 에너지 소비에는 필연적으로 환경 문제가 뒤따르기 때문이다.

특히, 온실가스 배출로 인한 지구 온난화 문제가 크게 대두되면서 탄소배출권, 파리 협정 같은 국제적 해결 방안이 모색되고 있으나 근본적인 해결책이 되기에는 많은 어려움이 존재하는 실정이다.

이러한 문제 해결을 위한 가장 현실적인 방안으로 21세기 들어서 원자력은 안정적인 에너지 공급원 및 저탄소 발생 녹색 에너지원으로서의 역할을 수행하고 있다.

그러나 원자력 에너지 이용은 필연적으로 오랜 시간 동안 외부 환경에 위해를 줄 수 있는 사용후핵연료 처리 문제가 대두되고 있다. 따라서 원자력 에너지를 지속 가능한 녹색 에너지원으로서 계속적으로 이용하기 위해서는 무엇보다도 우선하여 사용후핵연료에 대한 해결이 매우 중요하다 할 것이다.

사용후핵연료에 포함된 주요 고독성, 고방열성 위해 물질 원소를 자세히 살펴보자. 먼저 핵분열 과정에서 생성된 플루토늄이 약 1.2%, 우라늄보다 무게가 무거우며 방사선을 많이 내는 동시에 방사선을 방출하는 반감기가 수 만년



〈그림 1〉 사용후핵연료 특성 및 재활용 개념

에 이르는 미량의 핵물질(Np, Am, Cm 등)들이 약 0.2% 이 포함되어 있다.

그리고 방사선은 그리 많이 방출하지는 않지만 오랜 세월이 지나면 자연으로 침투해서 토양을 오염시키고 반감기가 수십만 년에 이르는 요오드-129 및 테크네슘-99이 약 0.1% 포함되어 있다. 반감기는 짧지만 대량의 열을 방출하는 세슘과 스트론튬이 약 0.5% 정도 포함되어 있다.

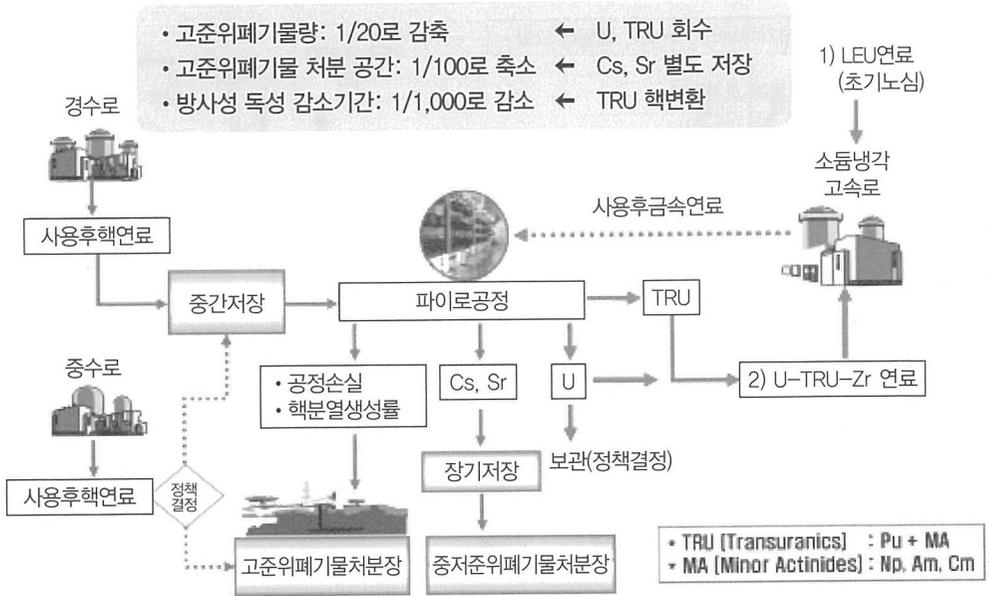
이런 특징으로 인해 사용후핵연료를 환경으로부터 격리시키기 위해서는 특수 설계된 넓은 면적의 처분장과 장기간의 관리가 필수적이다.

그러나 사용후핵연료로부터 장반감기 고독성 원소와 고방열성 물질을 분리하고 분리된 물질들을 고속로의 원료 물질로 사용하여 처리한다면 새로운 전력 생산이 가능할 뿐만 아니라, 사용후핵연료 관리 측면에서도 처분장 소요 면적을 줄일 수 있고, 사용후핵연료의 방사성 독

성도도 크게 감소시킬 수 있는 많은 장점을 가지고 있다. (〈그림 1〉)

한국원자력연구원은 2008년 12월 제255차 원자력 위원회를 통해 의결된 '미래원자력시스템 개발장기추진계획'에 따라 파이로프로세싱(pyroprocessing ; 건식 처리)과 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor: SFR)가 연계된 '파이로-SFR 순환핵주기 시스템'(〈그림 2〉)에 대한 연구 개발을 추진하고 있으며, 특히 사용후 핵연료의 효율적 처리를 위하여 핵확산 저항성이 상대적으로 높은 건식 처리 공정인 파이로에 대한 연구를 집중적으로 수행하고 있다.

2015년 12월 21일 준공식을 가진 PRIDE(Pyroprocess Integrated inactive DEMonstration facility)는 공학 규모 파이로 일관 공정 실험 시설로, 2009년 건설을 시작하여 2012년 건설을 완료하고 2014년까지 시운전을 통한 기본 성능 평가를 수행한 후 2015년 단위 공정들에



<그림 2> 파이로-SFR 순환 핵주기 시스템 개념도

대한 성능 목표를 달성한 세계 최고 수준의 파이로 실험 시설이다.

사용후핵연료와 파이로프로세싱

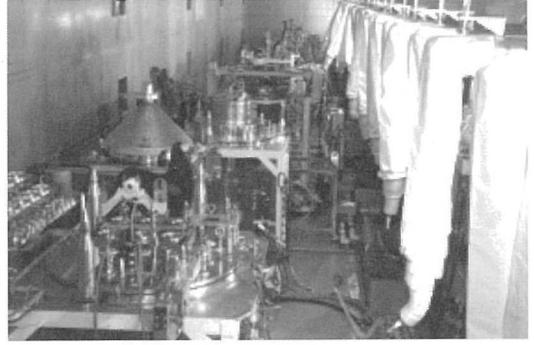
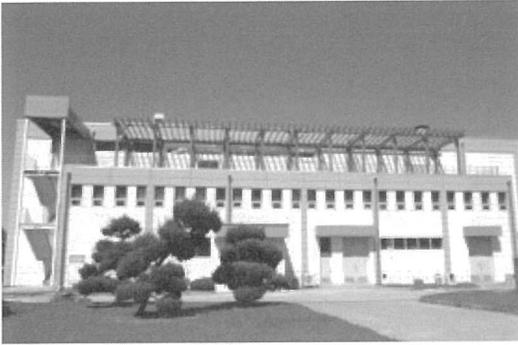
사용후핵연료를 어떻게 관리하고 처리하는 것이 인류에 도움이 될 것인지 여러 나라들이 오랜 시간 동안 많은 고민을 해왔다. 프랑스의 경우 사용후핵연료에 포함된 플루토늄을 이용하면 상당한 기간 동안 인류가 에너지 걱정을 하지 않아도 된다고 여겨온 반면, 미국은 플루토늄이 핵무기급 물질로 전용될 수 있다고 판단해서 사용후핵연료의 그 어떤 형질 변경도 수용하지 않고 미국을 포함한 다른 나라들에도 형질 변경을 하지 말도록 권고해 오고 있다.

또한 핀란드는 사용후핵연료를 이미 수명을 다한 쓰

레기로 판단해서 지하 500~1,000m의 깊은 땅속(심지층)에 묻어 버려 우리의 생활 환경에서 영원히 격리시킨다면 사용후핵연료가 지니는 위험성이나 핵물질 전용과 같은 우려를 하지 않아도 된다고 생각했다.

이와 같이 세계 각국은 다양한 형태의 사용후핵연료 관리 방안에 대해 연구 중에 있으며, 그 최종 결정은 기술에 대한 검토가 끝난 후 결정될 전망이다.

현재 프랑스와 일본 등에서 운영되고 있는 사용후핵연료 상용 처리 공정은 습식 재처리(wet reprocessing) 기술을 이용하고 있는데, 습식 재처리 기술을 이용할 경우 플루토늄은 단독으로 분리가 가능하여 핵폭탄의 원료가 되기 때문에 국제 사회는 이 기술의 추가 확산을 우려하고 방지하려는 노력과 더불어 습식 재처리 기술을 대체할 수 있는 새로운 사용후핵연료 처리 기술 개발에 대한 연구를 계속해서 수행해 오고 있다.



〈그림 4〉 PRIDE 전경과 아르곤 셀 내부

원소로 변환시켜 줄 수 있기 때문에 사용후핵연료가 지니는 위험성은 모두 없애버릴 수 있다. 그리고 사용후핵연료를 처리하는 과정에서 발생하는 용융염 폐기물은 거의 대부분 재생되어 폐기물로 버리지 않고 원래의 공정 시스템으로 순환시킬 수 있다.

따라서 파이로-SFR 순환 핵연료주기 기술은 핵확산 위험성이 없고 환경 친화적인, 21세기형 사용후핵연료 관리 기술이라 할 수 있다.

PRIDE(공학 규모 파이로 일관 공정 실험 시설)

PRIDE는 파이로 전체 공정(전처리-전해 환원-전해 정련-전해 제련-염폐기물 처리)에 대한 공학 규모(최대 50kg/batch 처리 용량) 실증 시설로서, 모의 핵연료를 이용한 inactive 검증 실험을 수행함으로써 사용후핵연료 처리를 위한 active 실증 시설 구축 시에 발생할 문제점 파악, 해결 방안 확보 및 향후 실용 시설 개발을 위한 관련 기술과 know-how 습득을 목표로 하고 있다.

PRIDE는 조사되지 않은 핵연료 물질(감손 우라늄 및 모의 핵연료)만을 취급하지만, 원자력법상에서 규정하

는 방사성 물질을 안전하게 취급하고 방사성 물질의 외부 누출을 차단할 수 있는 시설로 건설되었다.

지상 3층 철근 콘크리트 구조물로서 폭 18m, 길이 43.2m, 높이 12m이며, 총면적은 2,283m²으로 각 층의 높이는 1층 4m, 2층 3.4m, 3층 4.6m이다.

PRIDE 1층에는 일부 공정 장치와 아르곤가스 계통 설비, 유틸리티 공급 설비가 설치되어 있으며, 2층과 3층이 개방된 대부분의 공간에는 체적이 1,260m³인 대형 아르곤 분위기 셀이 설치되어 있고, 전해 환원, 전해 정련, 전해 제련 및 염폐기물 처리 관련 장치가 설치되어 있다.

아르곤 셀의 규모는 길이 40m, 폭 4.8m, 높이 6.4m이며, 셀 구조물 내부는 stainless steel 강판으로 lining되어 엄격한 기밀성이 확보토록 하였다. 아르곤 공급 시스템, 아르곤 냉각 시스템, 아르곤 정화 및 배출 시스템으로 구성된 유틸리티 시스템을 통해 셀 내부는 산소 및 수분 불순물 농도가 각 50ppm 이하로 관리가 가능하다.

물질을 셀 내외로 출입시키기 위한 이송 장치(대형 및 소형 장치 이송 시스템, gravity tube)와 천장 크레인 유지 보수를 위한 천장 크레인 트롤리 호이스트, 그리고 고정식 셀 장치(셀 조명 장치, 작업창, 피드스루) 등을 갖추고



〈그림 5〉 PRIDE 아르곤 셀 내부와 외부 원격 취급 시스템

있어, 공학 규모 장치 운전이 가능토록 하였다.〈그림 4〉

PRIDE는 작업자의 직접적인 접근이 불가능한 아르곤 셀 내에서 공정 장치, 셀 장치 및 유틸리티의 원격 운전 및 유지 보수를 위한 취급 시스템으로서 기계식 마스터-슬레이브 조작기(MSM), 천정 이동 양팔 서보 조작기 시스템(BDSM), 천장 크레인 등을 사용한다.

총 17개의 작업창 좌우에 각각 2조씩의 MSM이 셀 벽면에 2.3m 간격으로 설치되어 있고 BDSM은 셀 내부의 모든 공간을 접근할 수 있어 기계식 조작기의 작업 영역을 벗어나는 공간인 공정 장치의 후면과 상부 면에 대한 작업을 수행할 수 있다.〈그림 5〉

PRIDE를 이용한 본격적인 연구는 시설 건설이 완료된 2012년 이후 시작 되었다. 연구 초기에는 blank test를 통해 MSM, BDSM과 같은 원격 취급 시스템을 이용한 공정 장치의 원격 운전성 및 유지/보수성을 검증하고 순수한 염만을 이용한 기본적인 운전 성능을 파악하였다.

이후 감손 우라늄(DU)을 이용하여 각 공정 장치별 성능 특성을 파악하고 공정 효율 향상을 위한 개선 사항을 도출하고 개선에 따른 운전 효율 향상을 실험적으로 검증하였다.

2015년에는 시운전 결과들을 바탕으로 도출된 개

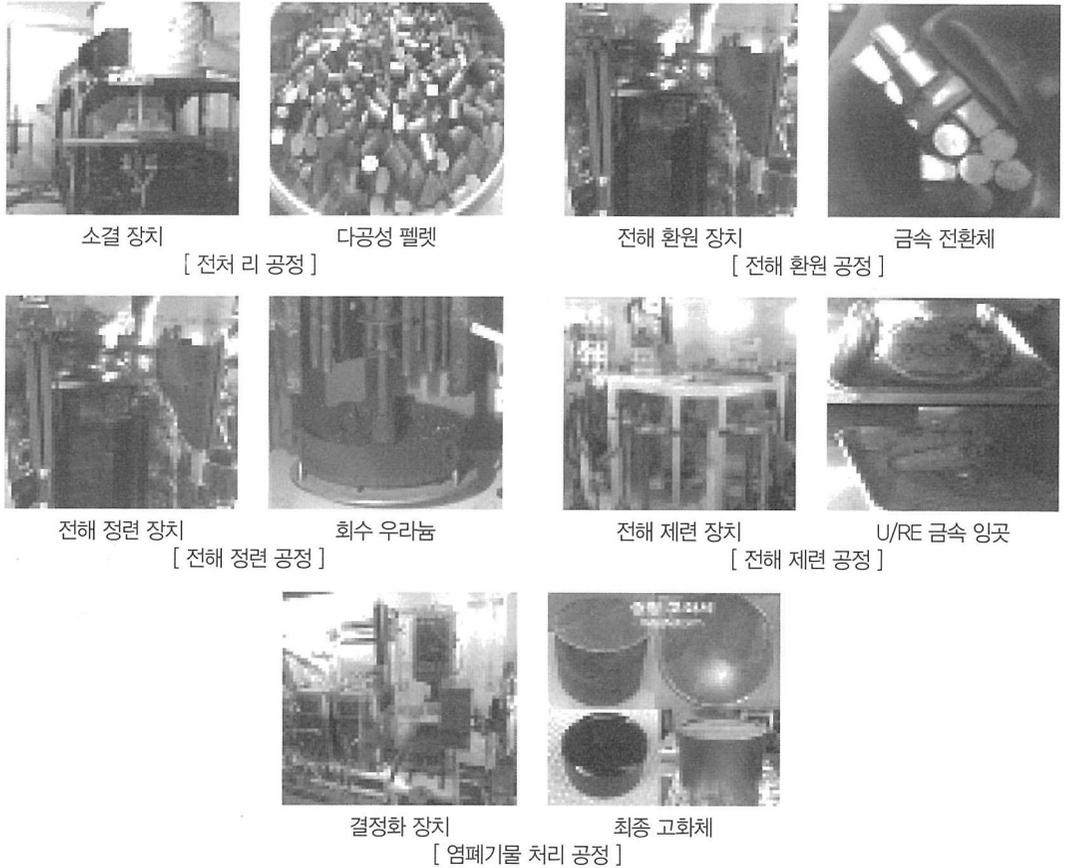
량 공정 장치와 운전 조건을 바탕으로 실제 사용후핵연료 특성과 비슷하도록 희토류 산화물 등을 첨가하여 제조한 모의 핵연료를 이용한 운전 성능 실험을 수행하여 각 공정별 운전 성능 목표를 성공적으로 달성할 수 있었다.〈그림 6〉

2016년부터는 각각의 파이로 단위 공정들에 대한 연계 운전성 파악을 위해 PRIDE 일관 공정에 대한 실험과 일관 공정의 지속적인 운전을 통한 장기 운전성 증진을 위한 실험을 수행할 계획이다.

또한 파이로의 운전 효율을 증대시킬 수 있는 새로운 혁신 기술들에 공학 규모 성능 검증과 실용화 시설을 위한 고용량 장치의 성능 검증을 위한 연구를 PRIDE를 이용하여 계속적으로 수행할 계획을 가지고 있다.

맺음말

파이로 건식 처리 기술이 실용화되면 사용후핵연료를 직접 처분할 경우에 비해 고준위 방사성폐기물 처분장의 면적을 100분의 1 정도로 감소시킬 수 있다. 또한 파이로와 고속로 기술 연계 시 고준위 폐기물의 독성 감소 기간을 수십만 년에서 수백 년으로 단축시킬 수 있어 지



〈그림 6〉 PRIDE의 단위 공정별 주요 장치와 생성물

질학적 예측 가능 범위 안에서 처분장 부지를 선정할 수 있는 등 고준위 폐기물 관리의 안정성이 대폭 높아지게 되며, 이로 인해 후손에게 사용후핵연료 문제를 대물림 한다는 우려를 불식시킬 수 있다.

파이로 기술은 현존하는 사용후핵연료 처리 기술 중 가장 핵확산 저항성이 뛰어나, 원자력의 평화적 이용을 갈망하는 국제 사회의 여망에 가장 적합한 기술이며, 또한 전체 공정이 단순해서 상업화에 성공하면 경제성이 높다는 장점이 있다.

PRIDE 시설은 위에서 열거한 파이로프로세싱 기술

의 완성도를 높이기 위해서 반드시 필요한 공학 규모 시험 시설로서 단위 공정별 운전 성능 및 단위 공정 간 연계 운전성, 원격 운전성 및 유지 보수성, 그리고 핵비확산성 등을 종합적으로 평가 검증할 수 있다.

향후 이 시설에 적용할 핵심 공정 장치 설계 및 운반과 저장 시스템, 원격 취급 및 안전 조치 관련 시스템 개발을 위한 test-bed 역할을 지속적으로 수행하여, 장기적으로 파이로 실용화를 위해 필수적인 관련 기술 개발과 노하우 습득을 위한 핵심 시설로서 고유 임무를 수행할 것이다. 