

환경 친화적 사용후연료 관리 기술 개발 전망

양명승
한국원자력연구원 원장



그린란드의 빙하가 무너져 내리고, 태풍과 폭풍이 루이지애나와 미얀마를 휩쓸고 지나가며, 아프리카의 호수가 말라가고 있는 사진과 영상들, 우리는 이러한 ‘지구 온난화(Global Warming)’에 의한 기상 이변 현상을 수시로 매체를 통해 접하고 있다. 지난 2007년 9월에는 유럽항공국이 인공위성 사진을 판독하여 북서항로를 가로막던 북극해의 빙하가 녹아 항로가 뚫렸음을 확인한 바도 있다.

18세기 중엽 시작된 산업 혁명

으로 인해 에너지 소비, 특히 화석 연료에 의한 에너지 생산과 소비는 기하급수적으로 증가되어 왔으며, 이로 인해 지구 대기상에 이산화탄소가 34% 이상 더 축적되었다.

이로 인해 지구 평균 기온은 0.8℃, 해수면은 10~25 cm 상승하였으며, 앞으로 지구 평균 기온이 2℃ 이상 상승할 경우 지구에 대재앙이 초래될 것이라는 것이 환경학자들의 일반적인 견해이다.

「World Energy Outlook 2007」(IEA)에 따르면 2030년까지 전 세계의 일차 에너지 소비는 2005년에 비해 약 55% 증가할 것으로 전망되고 있다. 이 중에서 화석 연료가 총증가분의 84%를 차지할 것이며, 개발도상국에 의한 증가분이 총증가분의 74%, 특히 중국과 인도에 의한 증가분이 45%를 차지할 것으로 전망된다.

이 기간 중의 전력 소비 증가는 약 2배에 달할 것이며, 최종 에너지

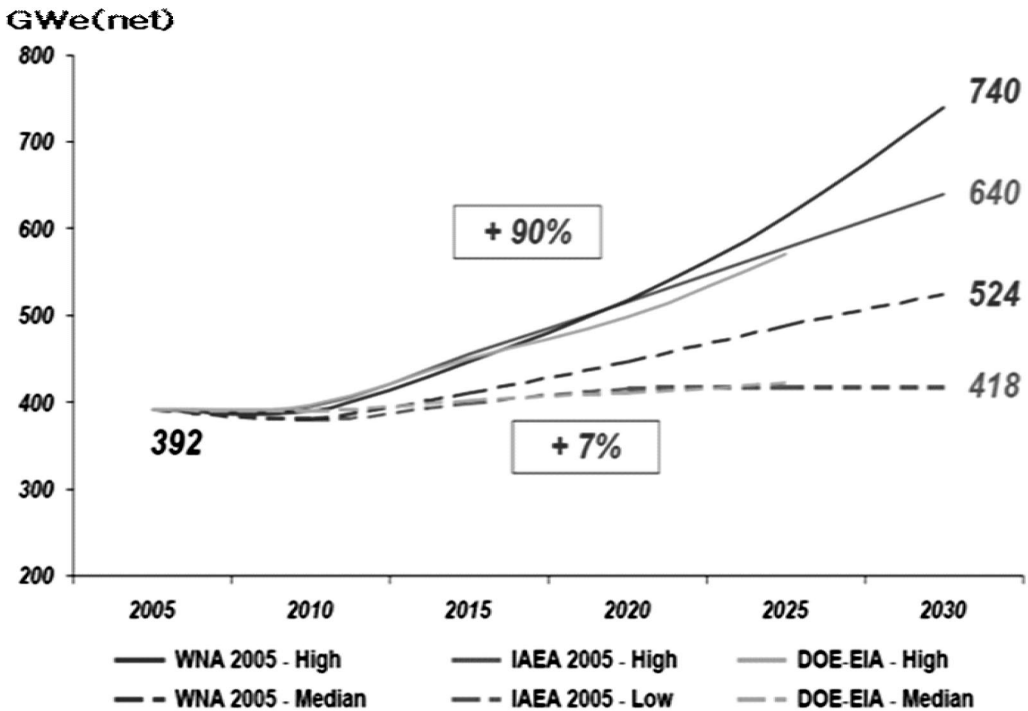
소비 중 전력이 차지하는 비중도 현재의 17% 수준에서 22% 정도로 상승될 전망이다.

따라서 전 세계 국가들은 안정적인 에너지 공급과 온실 가스 감축에 국가의 미래를 걸고 있다고 해도 과언이 아닐 것이다.

원자력 이용 확대

국가 에너지 안보와 온실가스 감축, 그리고 이를 통한 지속적 국가 경제 성장을 위해서는 ‘원자력’이 가장 강력한 수단될 수 있음을 세계 주요국 수반들은 언급하고 있으며, 자국 내 원자력 프로그램의 활성화는 물론 국제 협력을 통해 지속 가능한 미래 원자력 시스템 개발에 노력하고 있다.

현재 전 세계에 439기의 원자력 발전소가 운전 중에 있으며, 2030년까지 309기의 발전용 원자로가 더 건설될 전망이다.



〈그림 1〉 2030년까지의 원전 설비 용량 전망

그러나 원자력 활용에는 사용후 연료의 발생 및 누적이라는 문제가 항상 뒤따르며, 이러한 문제를 해결하기 위한 제4세대 원자력 시스템(Gen-IV) 개발에 전 세계 주요 원자력국들이 협력하고 있다.

세계 각국의 원자력 이용 확대에 따른 원자력 발전 설비 용량 전망은 시나리오에 따라 큰 편차가 있기는 하지만, 2030년까지 적게는 7%에서 많게는 90% 정도의 원자력 발전 설비 용량이 증가할 것으로 전망하고 있다(그림 1).

우리나라의 에너지 수급 현황은

2007년 현재 1차 에너지원의 96.7%를 수입에 의존하고 있으며, 에너지 수입액은 약 908억불로서 총수출액의 25% 정도가 된다. 2007년 통계로 보면 우리나라는 에너지 소비에 있어 전 세계 9위, 원유 소비는 7위, 그리고 원유 수입은 1일 약 270만 배럴로 4위라는 명예(?)를 안고 있다.

지구 온난화와 원유가 급상승이란 당면한 난제를 타개하기 위한 현실적인 대안으로서 원자력 이용이 전 세계적인 공감대를 형성하고 있는 가운데, 우리나라도 국가에너지

지위위원회에서 원자력 발전의 적정 비중에 대한 논의가 진행 중에 있다.

2030년까지의 신규 원전의 기수는 시나리오에 따라 최소 3기에서 최대 13기까지 큰 편차를 보이고는 있으나, 원자력 발전의 확대는 사회 각층에서 당연한 것으로 받아들여지고 있다.

환경 친화적 사용후연료 관리의 필요성

현재 우리나라에는 16기의 경수

로(OPR1000 6기 포함)와 4기의 CANDU형 중수로가 가동중에 있으며, 6기의 경수로(OPR1000 4기, APR1400 2기)가 건설중에 있고, 2기의 경수로(APR1400)가 건설 인허가 심사중에 있다.

이와 같이 원자력 발전이 국가 에너지 안보와 경제 성장의 원동력으로 큰 축을 담당해 왔으며 앞으로 이 역할은 당분간 지속될 수밖에 없지만, 원자력발전소 부지에 임시 저장되어 있는 사용후연료를 포함하여 향후 원자력발전에 의해 누적될 수밖에 없는 사용후연료의 관리 문제에 대한 논의는 이제 막 시작되었다.

사용후연료는 경수로 1기에서 연간 약 20톤 정도, 중수로 1기에서는 연간 약 95톤 정도가 발생되며, 우리나라에서는 연간 약 700톤 정도의 사용후연료가 누적되고 있다.

사용후연료는 높은 방사선과 열(1년 냉각 경수로 연료의 경우 약 12 kW/톤), 높은 방사성 독성(천연 우라늄 원광 수준으로 감소하는데 약 30만년 소요), 그리고 준국산 에너지 자원(약 1%의 플루토늄과 약 96%의 타지 않은 우라늄 함유)이란 특성을 가지고 있으며, 이로 인하여 환경 친화적이고 안전한 효율적인 관리를 필요로 한다.

경수로 사용후연료 내에 존재하는 고독성, 장반감기 원소(Pu, MA, I, Tc)는 고속로를 이용하여 단반감기 핵종으로 변환하고, 고방열, 반감기 30년 이하의 핵종인 세

<표 1> 주요 원자력국들의 사용후연료 관리 정책

순위 ¹⁾	국가	원자로 기수 ²⁾	설비용량 (MWe) ³⁾	발전량 (TWh) ³⁾	정책 ⁴⁾	비 고
1	미국	104	100,582	806.5	직접처분	• TRU 재순환 정책 고려 중
2	프랑스	59	63,260	418.6	재처리	• 소듐냉각고속로 이용
3	일본	55	47,587	266.4	재처리	• 소듐냉각고속로 이용
4	러시아	31	21,743	147.8	재처리	
5	한국	20	17,451	136.6	직접처분	• Wait & See, 공론화 추진 중
6	독일	17	20,470	133.2	재처리? 직접처분	• 재처리에서 직접처분으로 변경 중
7	캐나다	18	12,589	96.5	직접처분	
9	스웨덴	10	9,104	64.4	직접처분	
10	중국	11	8,572	62.6	재처리	• 소듐냉각고속로 이용
18	인도	17	3,782	15.9	재처리	• 소듐냉각고속로 이용

¹⁾ 발전량 기준 ²⁾ 2008년 5월 기준 (NEI) ³⁾ 2007년 말 기준 (NEI) ⁴⁾ 2007년 4월 (WNA)

슘과 스트론튬은 장기 저장 후 처분하며, 반감기 300년 이하의 나머지 핵분열 생성물은 직접 처분, 그리고 사용후연료의 대부분을 차지하고 있는 우라늄은 고속로와 중수로에 다시 사용할 수 있다.

그러나 중수로 사용후연료는 그 속에 포함된 핵연료 물질의 양이 재순환하여 사용하기에는 경제적으로 문제가 있어 현재는 장기 저장 및 직접 처분이 최선의 관리 방안으로 생각된다.

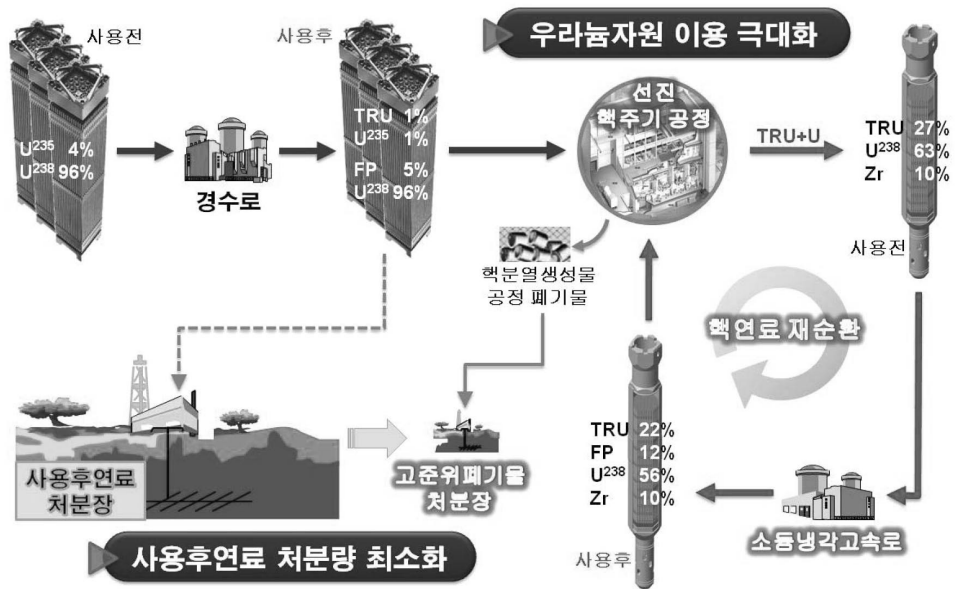
2007년 말 현재 우리나라에는 약 9,420톤의 사용후연료가 발전소 부지에 임시 저장되어 있으며, 2016년부터는 소내 저장 용량이 포화될 것으로 예상된다.

사용후연료를 직접 처분하게 되면, 유용한 자원의 재활용을 포기하는 것을 의미하며, 대규모 처분

장 부지 확보와 막대한 처분장 건설 비용을 필요로 하게 되고, 30만년 이상의 처분장 관리 기간을 필요로 하게 된다.

그러나 선진 핵연료주기 기술과 결합된 제4세대 소듐냉각고속로 시스템을 이용하여 사용후연료를 관리하게 되면 사용후연료를 자원으로 재활용할 수 있고, 사용후연료의 부피, 발열량, 방사성 독성을 대폭 감축한 환경 친화적이고 안전한 관리가 가능할 것이다. 전 세계 주요 원자력국들의 사용후연료 관리 정책도 소듐냉각고속로를 이용한 관리를 큰 틀로 하고 있다.(표 1)

현재 우리나라의 사용후연료 관리 정책으로는 제253차 원자력위원회(2004년 12월 17일) 결정 사항을 말할 수 있다. 즉 중·저준위



〈그림 2〉 친환경 사용후연료 관리 기술 개요

폐기물 처분 시설 건설을 우선 추진하여 2008년까지 완공하고, 중간 저장 시설 건설 등을 포함한 사용후연료 관리 방침은 국가 정책 방향, 국내의 기술 개발 추이 등을 감안하여 추후 검토 결정하되 충분한 논의를 거쳐 국민적 공감대에 추진하며, 원전 부지 내의 사용후연료 저장 시설이 2016년부터 포화되는 점을 감안하여 적기에 추진한다는 것이다.

친환경 사용후연료 관리 기술 개발 현황 및 계획

국민적 공감대하에 추진될 수 있는 사용후연료 관리 정책 결정을 위하여 국가에너지위원회 산하 갈

등관리전문위원회의 사용후연료공론화 Task Force Team을 중심으로 한 논의가 진행되고 있는 한편, 교육과학기술부의 지원하에 한국원자력연구원을 주축으로 ‘친환경 사용후연료 관리 기술’을 개발하기 위해 노력하고 있다.

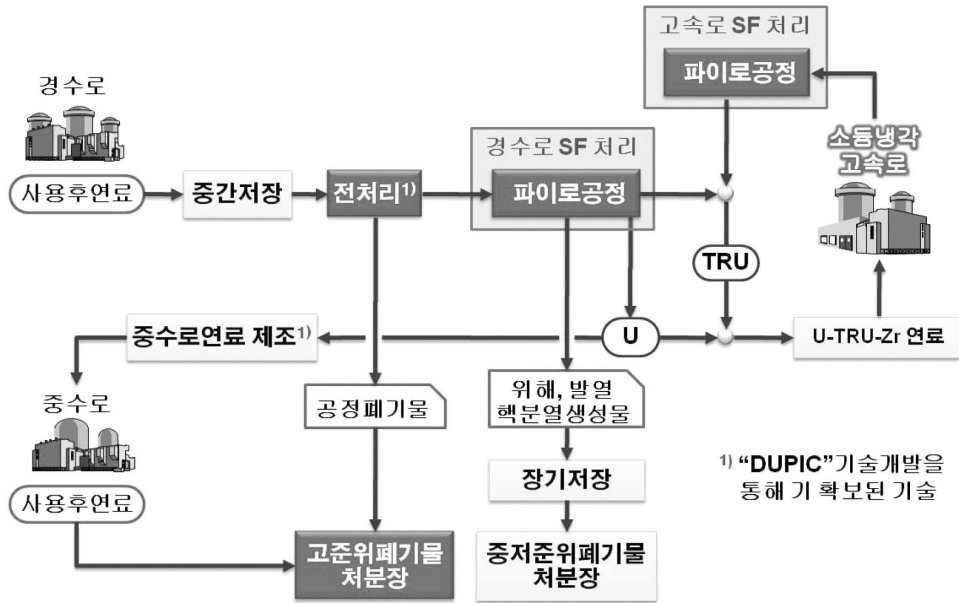
친환경 사용후연료 관리 기술의 궁극적 목표는 ‘선진 핵연료주기 기술’, ‘소듐냉각고속로 기술’, 그리고 ‘고준위 폐기물 처분 기술’이란 3개의 기술축을 기반으로 우리나라 자원의 이용을 극대화할 수 있고, 사용후연료 처분량을 최소화할 수 있는 지속 가능한 미래 원자력 시스템을 구축하는 것이다. (〈그림 2〉)

선진 핵연료주기 기술은 경수로

사용후연료의 ‘전처리 기술’과 ‘파이로 공정 기술’로 대별될 수 있다. 전처리 기술은 경수로 사용후연료를 해체, 절단, 분말화하고 일련의 전처리 공정으로부터 발생하는 공정 폐기물(휘발성 핵종, 준휘발성 핵종, 폐피복관, 공정 스크랩 등)을 처리하는 기술로서, 1990년대 초부터 10여년간 개발된 듀픽 기술을 통해 관련 기술의 상당 부분을 한국원자력연구원이 보유하고 있다.

전처리 공정을 통해 분말화된 경수로 사용후연료 물질을 전해 환원, 전해 정련, 그리고 전해 제련이란 일련의 파이로 공정을 통하여 고속로연료 물질인 초우라늄 원소(TRU)를 공급한다.

이를 이용하여 고속로 연료(U-



<그림 3> 친환경 사용후연료 처리 공정 개요

TRU-Zr 금속 연료)를 제조한 후 소듐냉각고속로에 장전, 연소시켜 초우라늄 원소를 단반감기 핵종으로 핵변환시키며, 고속로 사용후연료는 파이로 공정을 통하여 다시 고속로에 재순환된다. 파이로 공정으로부터 분리된 우라늄, 발열 핵분열 생성물은 장기 저장 후 중·저준위폐기물 처분장에 처분하게 된다.(<그림 3>)

소듐냉각고속로 기술 개발 계획에서는 한국원자력연구원, 산업체, 인허가 기관의 역할 분담을 통하여 1) 제4세대 소듐냉각고속로 개념 연구 단계, 2) 실증로 개발 단계, 3) 건설 단계를 거쳐 소듐냉각고속로의 원형/실증로를 확보하고자 한다.(<그림 4>)

2012년까지의 개념 연구 단계에서는 제4세대 소듐냉각고속로의 고유 개념을 개발하고 있으며, 2020년까지의 실증로 개발 단계에서는 실증로 개념설계와 표준 설계를 완성하고 실증로 예비 설계를 일부 수행할 예정이며, 2028년까지의 건설 단계에서는 실증로 상세설계에 이어 실증로 건설을 완료할 예정이다.

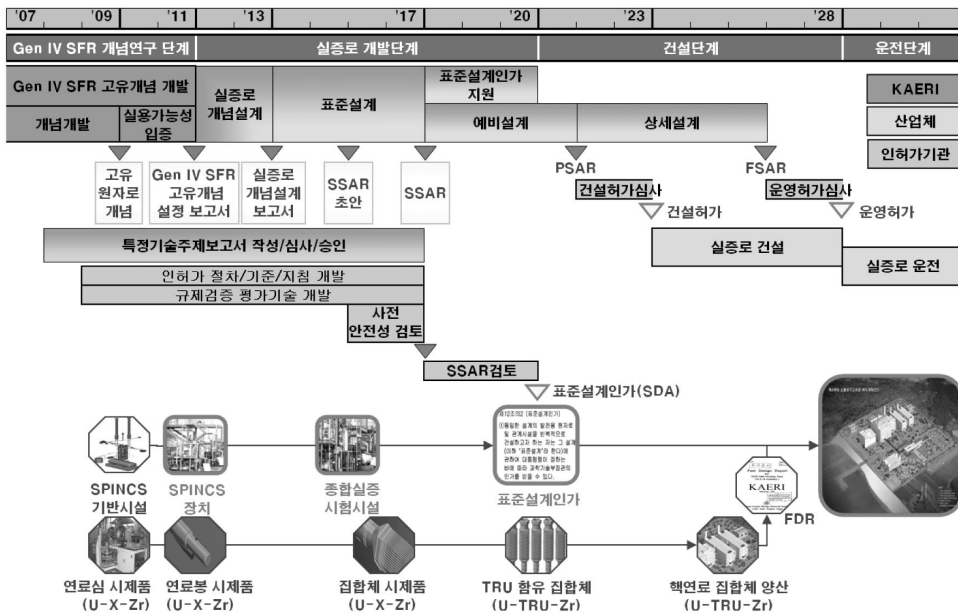
파이로 공정 기술 개발 계획의 최종 목표는 사용후연료 부피 감용과 고속로핵연료 물질 공급을 위한 핵심 파이로 공정 기술을 개발하는 것이다.

현재 실험실 규모의 파이로 공정을 개발하고 있으며, 2011년까지 Mock-up 파이로 공정 시설을 확

보하여 우라늄 및 모의 사용후연료를 이용한 파이로 전 공정 실증 실험을 수행할 계획이다.

또한 2016년까지 공학 규모 파이로 공정 기술 및 시설을 확보한 후 사용후연료를 이용한 파이로 공정 기술을 실증하고, 2025년까지 종합 파이로 시설을 확보하여 고속로연료 제조를 위한 연료물질을 제공할 계획이다.(<그림 5>)

고준위 폐기물 처분 기술 개발 계획에 따르면 KURT(KAERI Underground Research Tunnel) 운영을 통하여 고준위 폐기물 처분 기반 기술 및 자료를 생산하고, 인공 방벽 시스템(Engineered Barrier System) 개발과 통합 안전성 평가 시스템 검증을 2020년까지



<그림 4> 소듐냉각고속로 기술 개발 계획(안)

완료하여 상용 처분장 부지 선정을 지원할 수 있는 체제를 구축하고자 한다.

친환경 사용후연료 관리 기술 개발을 위한 국제 협력도 활발히 이루어지고 있다. Gen-IV, INPRO 등 국제 공동 연구와 미국이 주도하고 있는 GNEP에 적극 참여함은 물론, 제4세대 소듐냉각고속로 기술 개발을 위해 미국 ANL, 프랑스 CEA, 일본 JAEA 및 CRIEPI 등과 활발한 정보 교류를 하고 있다.

「KAERI-10 프로젝트」를 통하여 파이로 공정 기술과 고속로 핵연료 제조 기술을 실제 사용후연료를 이용하여 검증하고자 미국 INL과 공동 연구를 수행하고 있으며, 미국 LANL과는 사용후연료 건식

처리 공정의 안전 조치 기술 개발에 공동 노력하고 있다. 고준위 폐기물 처분 기술개발을 위한 협력은 스위스 NAGRA, 일본 JAEA와 가장 활발히 이루어지고 있다.

친환경 사용후연료 관리 기술의 기대 효과

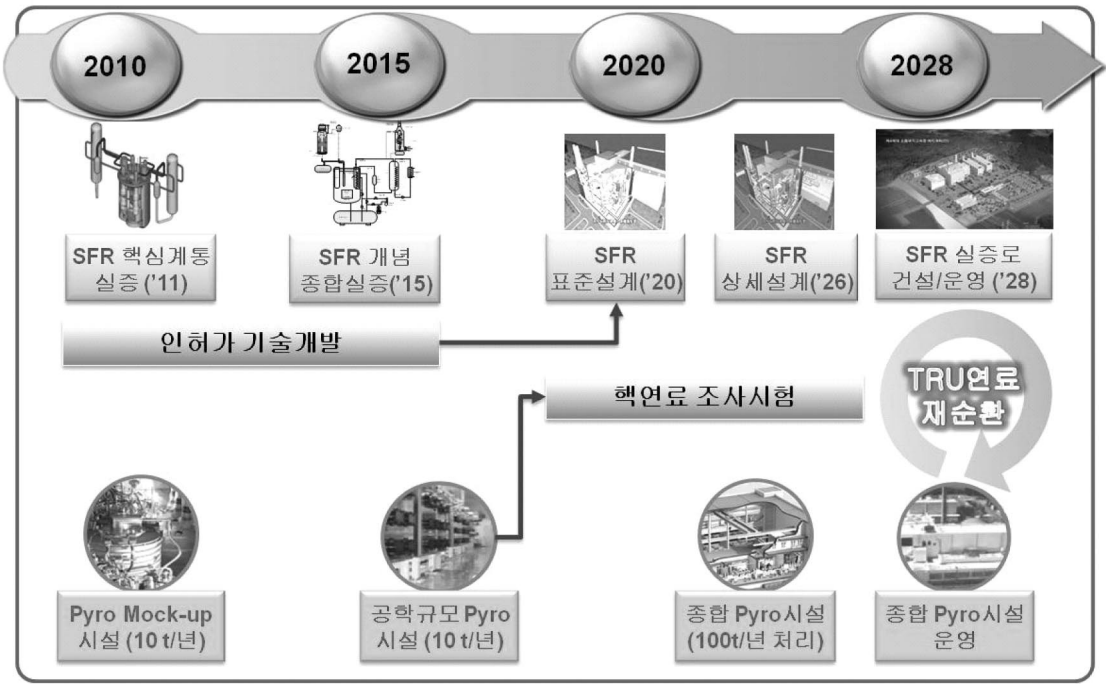
한국원자력연구원을 중심으로 지속 가능한 미래 원자력 시스템 개발의 일환으로 확보하고자 노력하고 있는 친환경 사용후연료 관리 기술은 사용후연료를 유용한 자원으로 재활용하여 막대한 경제적 이익을 창출할 수 있는 기술이다.

처분해야 할 경수로 사용후연료 양을 대폭 감축시킬 수 있음은 물

론, 초우라늄 원소를 고속로 노심에서 단반감기 핵종으로 핵변환하여 처분장 관리 기간 또한 획기적으로 감소시킬 수 있는 기술이다.

2007년 말 현재 우리나라 원자력발전소에 임시 저장되어 있는 4,328톤의 사용후연료를 선진 핵연료주기 공정으로 처리한 후 고속로 연료로 제조하여 1,000 MWe급 자체 순환 소듐냉각고속로에 재순환한다면 2007년 국내 총소비 전력량(403,207 GWh)을 약 90년간 공급할 수 있다.

또한 2100년까지 약 70,000톤 정도가 누적될 것으로 예상되는 경수로 사용후연료를 약 4,000톤 정도로 감소시킬 수 있으며, 자원 이용률 측면에서는 경수로에 비해 우



〈그림 5〉 미래 원자력 시스템 개발 Action Plan

라늄의 이용률을 약 100배 향상시킬 수 있다. 또한 사용후연료 독성을 감소시켜 고준위 폐기물 처분장 관리 기간을 수십만년에서 수백년으로 단축할 수 있다.

맺음말

지금 세계는 지구 온난화, 자원 고갈 등 우리와 후손들의 생존과 관련된 문제에 있어 가장 적극적이고 현실적인 대책은 무엇인가 고민하고 있다.

우리 후손들의 삶에 대재앙을 몰고 올 수 있는 지구 온난화, 즉 온실가스 배출의 문제는 바로 에너지의 생산과 소비에 대한 우리의 인식 변화를 요구하고 있다.

신재생 에너지 기술 개발에 대한 적극적인 투자와 더불어 저탄소 발전원으로서의 원자력에 대한 인식 확산과 위상 확보, 그리고 저탄소 사회 추진 전략을 위한 원자력의 역할을 재조명해 보아야 할 시기이다.

‘친환경 사용후연료 관리 기술’은 지속 가능한 미래 원자력 시스

템의 핵심 기술이며, 이는 소듐냉각고속로와 선진 핵연료주기 기술 개발을 적극적이고 전략적으로 추진함으로써 확보가 가능하다.

친환경 사용후연료 관리 기술을 기반으로 하여 유용 자원인 사용후연료의 재활용을 통한 국가 에너지 안보를 구현하고, 사용후연료 관리 기간의 획기적 감축 목표를 달성할 수 있다면 국민이 공감하고 함께 할 수 있는 ‘무한, 청정 에너지 공급원’으로서의 원자력의 위상은 확보될 수 있을 것이다. ☺