

「국내 선진 핵연료주기 기술 개발 현황」 특집을 매호 1회씩 4회 시리즈로 연재합니다.

- 1. 핵연료주기 정책 제안 2. 파이로 건식 처리 기술 개발
- 3. 소듐냉각고속로 기술 개발 4. 고준위 폐기물 처분 기술 개발

핵연료주기 정책 제안

박성원

한국원자력연구원 핵연료주기기술개발본부 본부장

고원일

한국원자력연구원 핵연료주기기술개발본부 책임연구원



박성원

고려대 화학공학과 졸업
KAIST 화학공학과 석사·박사



고원일

제주대 에너지공학과 졸업
KAIST 원자력공학과 석사·박사

서언

UN에서 발표한 세계 인구 전망에 따르면, 세계의 인구는 2050년경 92억명으로 증가될 것으로 전망되고 있다.¹⁾

이는 삶의 질 향상을 추구하는 인간의 욕구와 더불어 에너지 수요의 증대를 촉진하는 원인이 되고 있는데, 실제로 정부간 기후변화패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)의 최근 보고서에서도 1950년의 15억 TOE이던 전 세계의 1차 에너지 소비가 2100년경에는 최대 600억 TOE에 이를 것으로 전망되고 있다.²⁾

그러나 이러한 에너지 수요의 증가는 대량의 온실 가스 배출로 인

한 지구 온난화 현상, 에너지 자원의 과도한 해외 수입 의존으로 인한 국가 경제에 대한 부담, 자원의 불균형적 분포로 인한 에너지 수급의 불안 등 많은 문제를 초래한다.

이러한 문제의 해결을 위하여 화석 연료 에너지를 대체할 공급원으로서 '원자력'에 대한 관심이 증폭되고 있는데, 중국·일본·인도 등 아시아 국가들은 에너지 공급원으로서 원자력에 대한 의존도를 계속 확대해 나갈 전망이며, 미국의 경우에도 부시 행정부가 출범하면서부터 '탈석유'를 목표로 신규 원전 건설 촉진에 주력하고 있다.

2006년 2월 미국이 발표한 국제원자력에너지파트너십(Global Nuclear Energy Partnership: GNEP)도 이러한 노력의 일환이라

1) UN Population Division, "World Population Prospects: 2006 Revision Population Database," <http://esa.un.org/unpp> (2008년 3월).
2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Special Report on Emissions Scenarios" (2000).

고 볼 수 있다.

지난 1978년 고리 1호기의 상업 운전이 시작된 이래, 우리나라의 원자력 발전도 급속히 성장하여 현재 20기의 원자력발전소가 운영되고 있으며, 전력 생산의 약 40%를 차지하고 있다. 이러한 원자력 발전은 최근 고유가 시대가 도래하고 지구 온난화 현상이 지속되면서 계속 확대될 것으로 예상된다.

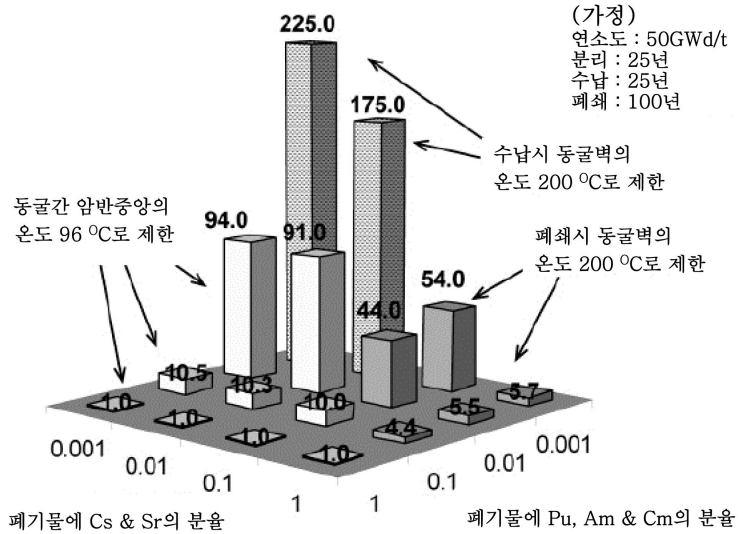
그러나 원자력 발전의 확대는 불가피하게 사용후핵연료의 발생량을 증가시킨다. 현재 우리나라에서는 연간 700여톤의 사용후핵연료가 발생하며, 이미 누적되어 있는 사용후핵연료만도 약 9,500여톤³⁾에 이르고 있다.

현재의 추세가 유지된다면 2030년경에는 사용후핵연료의 누적량이 약 3만여톤에 이를 전망이다.

그럼에도 불구하고 현재까지 사용후핵연료의 관리에 대한 정책 방향이 설정되어 있지 않으며, 다만 지난 2004년 원자력위원회에서 충분한 논의를 거쳐 국민적 공감대 하에서 사용후핵연료의 관리 정책을 수립하기로 결정한 바 있다.

소내 저장 용량의 한계⁴⁾를 고려할 때 사용후핵연료 관리 정책의 수립이 시급히 요청되고 있다.

또한 우리나라는 2014년 한·미 원자력협력협정의 개정을 앞두고 있는 바,⁵⁾ 이에 대비하기 위해서



<그림 1> 분리 효율 대비 처분 효율

도 향후 30년 이상을 내다보는 장기적인 사용후핵연료의 관리에 대한 국가 정책이 결정되어야 하고, 이를 토대로 국가 차원에서의 협정 개정 전략을 마련할 수 있을 것이다.

본 논문은 이러한 요청에 따라, 원자력 선진국의 선진 핵연료주기 기술 개발의 동향과 국내 여건을 분석하고자 작성되었다. 이를 통하여, 향후 핵연료주기에 관한 국가 정책의 방향을 정하는 데에 보탬이 되고자 한다.

이와 함께, 국내에서 이루어지고 있는 소듐냉각고속로, 파이로 건식 처리, 고준위폐기물 처분 등 선진

핵연료주기 기술 개발 활동에 대해서는 다음 기회에 보다 자세하게 소개할 예정이다.

사용후핵연료의 특성 및 관리의 문제점

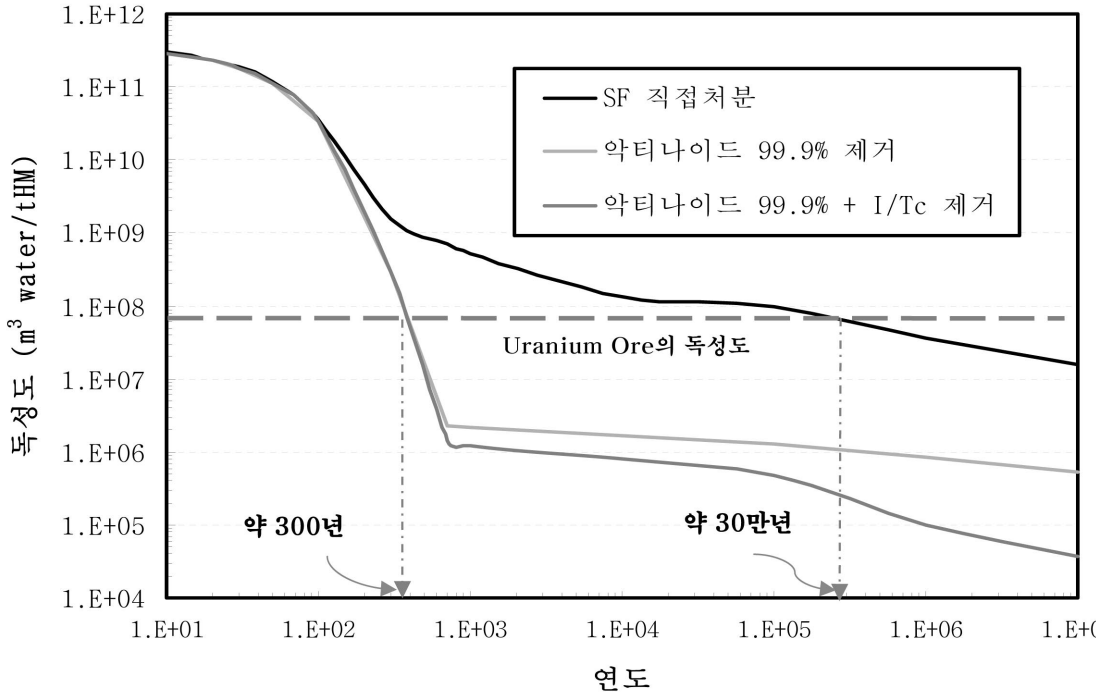
원자력 발전은 불가피하게 사용후핵연료의 발생을 야기한다. 전형적인 PWR 사용후핵연료는 우라늄 96%, 핵분열 생성물 3%와 TRU (Transuranics) 1%로 이루어져 있는데, 이 중 우라늄과 TRU는 자원으로서 재활용이 가능하다.

핵분열 과정에서 생성된 핵분열 생성물로 인하여 높은 방사능을 띠

3) 한국수력원자력(주), “원전 방사성폐기물 관리 현황,” (2007년 12월 말 기준).

4) 2016년에 포화 예정.

5) 1973년에 체결된 한·미 원자력협력협정은 41년간 유효함.



<그림 2> 사용후핵연료 방사성 독성도 감소 기간⁷⁾

는 한편, 방사성 핵종의 붕괴에 의하여 계속해서 열을 발생하는 특성을 가지고 있다.

사용후핵연료의 붕괴열은 심지층 처분에 있어서 지하 처분 면적을 결정하는 중요한 요소이다. 세계에서 제일 먼저 고준위 폐기물 처분 시설 부지를 확정한 핀란드의 경우 5,643톤의 LWR 사용후핵연료를 심지층 처분하는데 지하 약 500 m에 건설할 처분 Vault의 면적이 1.5 km² 나 소요된다는 것도

바로 이러한 이유이다.

따라서 사용후핵연료를 처리하여 고방열 핵종인 세슘(Cs), 스트론튬(Sr) 및 TRU를 제거하는 경우에 처분장의 효율을 100배 이상 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

실제로 미국 에너지부의 보고서에 의하면, <그림 1>에 나타난 바와 같이 세슘(Cs)과 스트론튬(Sr)을 99.9% 분리 회수하고, 플루토늄과 마이너 악티나이드(MA)를

99.9% 회수하여 소멸하는 경우 유카산(Yucca Mt.) 처분장의 처분 효율을 최대 225배까지 높일 수 있는 것으로 평가되고 있다.⁶⁾

사용후핵연료가 갖고 있는 또 다른 특징 중의 하나는 높은 독성을 유지하고 있다는 것이다. 특히, 장수명 핵분열 생성물인 I-129, Tc-99, 그리고 악티나이드 핵종들이 오랜 기간 동안 독성을 유지하면서 처분장의 장기 안전성에 영향을 미치게 된다.

6) Wigeland, R.A., et al., "Separations and Transmutation Criteria to Improve Utilization of a geological repository" Nuclear Technology, " 154, 95 (2006).

7) 우리나라원광의 독성도는 Ra-236과 U-238이 secular equilibrium을 이룬다는 가정을 이용하여 계산하였음. 한편, 사용후핵연 독성도의 계산을 위하여 경수로 핵연료 연소도를 50,000 MWd/tU, 초기농축도를 4.5 %로 가정하여 Origen 코드를 이용하여 계산하였음.

<표 1> 우라늄의 지속성 평가⁸⁾

핵연료주기	발견된 우라늄만 고려 (2004년 세계 원전 기준)	추정된 우라늄을 포함 (2004년 세계 원전 기준)
경수로 직접 처분 주기	80년	270년
고속증식로 재순환 주기	4,800년 ~ 5,600년	16,000년 ~ 19,000년

<표 2> 주요국의 핵연료주기 정책

국가명	발전 호기	발전 용량 (MWe)	핵연료주기 정책
미 국	103	98,254	재활용 정책 고려중
프랑스	59	63,473	재활용 정책
일 본	55	47,700	재활용 정책
독 일	17	20,303	직접 처분 (탈원전)
러시아	31	21,743	재활용 정책
한 국	20	17,533	정책 결정 단계
중 국	10	7,587	재활용 정책
인 도	16	3,577	재활용정책

- 현재 20,000 MWe을 초과하고 있는 국가
- 2020년까지 20,000 MWe을 초과할 것으로 예상되는 국가

<그림 2>는 처분 대상 고준위 폐기물의 장기 독성도를 시간의 함수로 나타내고, 이를 같은 양의 전력 발전에 필요한 천연 우라늄의 독성도와 비교한 것이다. 이는 사용후 핵연료의 독성도를 본래(채광, 혹은 농축 전의 상태)의 수준으로 감소시키는 데 몇 년이 걸리는가에 대한 지표라 할 수 있다.

<그림 2>에서 보듯이, 사용후핵

연료를 직접 처분하는 경우에 사용후핵연료의 독성도가 자연 상태의 수준으로 감소하기 위해서는 약 30만년이 소요된다. 반면, 악티나이드를 제거하여 소멸시키는 경우, 그 기간은 300년 이내로 줄어드는데, 이는 우리 인간이 충분히 제어 가능한 기간이라 할 수 있다.

이처럼 사용후핵연료의 높은 붕괴열과 독성은 사용후핵연료를 직

접 처분함에 있어서 큰 부담으로 작용된다. 반면, 사용후핵연료는 재사용이 가능한 핵물질들을 다량 함유하고 있기도 하다.

위에서 언급한 바와 같이, 타고난 후의 사용후핵연료에는 남아있는 우라늄의 양이 약 96% 정도인데, 이것은 지금과 같이 우라늄 가격이 급격하게 상승하고 있는 상황에서 사용후핵연료의 재활용에 타당성을 제고하게 된다.

실제로, 고속증식로를 도입하여 사용후핵연료를 무한 재순환하는 경우에 우라늄의 이용률은 최대 100배까지 증가되며, 이는 현재 가동되고 있는 모든 원자로를 고속증식로로 대체할 경우 우라늄 사용 수만 년간 지속할 수 있는 수치이다(<표 1> 참조).

한편, 사용후핵연료에 포함되어 있는 플루토늄은 핵무기 원료로의 전용이 가능하기 때문에, 핵비보유국의 경우에는 사용후핵연료를 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 철저한 감시하에서 관리하게 된다.

8) IAEA, "Nuclear Power and Sustainable Development" (2006).

주요국의 핵연료주기 정책 현황

〈표 2〉는 세계 주요국의 핵연료주기 정책을 일목요연하게 보여주고 있다. 미국·프랑스·일본·독일·러시아는 현재 원자력 발전 용량이 20 GWe를 상회하는 원자력 대국이며, 한국·중국·인도 또한 2020년까지 20 GWe를 넘어설 것으로 예상되기 때문에 이들 국가들은 사실상 21세기 세계의 원전산업을 주도한다고 할 수 있다.

〈표 2〉에 나타난 바와 같이, 탈원전을 내세운 독일을 제외하고는 모든 국가가 사용후핵연료 재활용 정책을 채택하여 추진중이거나, 혹은 고려중임을 알 수 있다.

이는 각국이 고유가와 기후변화 협약의 발효 등에 따른 현실적인 에너지 대안으로서 원자력의 이용을 확대하는 한편, 원자력 이용의 확대에 인하여 야기되는 사용후핵연료의 누적 문제를 해결하고자 기존의 직접 처분 정책에서 재활용 정책으로의 정책 전환을 시도하고 있다고 평가할 수 있다.

미국은 카터 정부 이후 사용후핵연료의 상업적 재이용을 반대하고 직접 처분 정책을 일관되게 추진해 왔는데, 최근에 들어오면서 사용후핵연료 재활용정책으로의 전환을

고려중이다.

이러한 미국 정책의 변화는 에너지 안보와 온실 가스의 감축 문제가 에너지수급과 관련하여 전 세계적인 화두가 되면서 보다 저렴하고 안정적인 에너지의 공급이 가능한 기술 주도형 원자력 에너지 이용의 확대가 불가피하다는 인식의 확산과 함께, 가까운 시일 내에 유카산(Yucca Mt.) 처분장 외에 제2처분장을 물색하여야 한다는 우려 때문이다.⁹⁾

이에 따라 미국은 2002년 기존의 선진 가속기 응용 사업(Advanced Accelerator Applications: AAA) 프로그램을 선진 핵연료주기(Advanced Fuel Cycle Initiative: AFCI) 프로그램으로 확대·개편하고, 중·단기 목표를 사용후핵연료의 효율적 처리에 의한 사용후핵연료의 부피 감축 및 플루토늄 재고량의 감축, 그리고 장기 목표를 장수명 핵종의 소멸에 의한 사용후핵연료의 독성 감축 및 2030년경 도입 예정인 GEN-IV 원자로 시스템을 기반으로 한 재활용 주기 완성에 두게 되었다.¹⁰⁾

또한 2006년 2월 6일 미국 에너지부(Department of Energy: DOE)는 선진 에너지 정책(Advanced Energy Initiative: AEI)

의 후속 조치로서 GNEP(Global Nuclear Energy Partnership)을 발표하였는데, 이를 통하여 미국은 사용후핵연료를 핵비확산성 처리 공정 등을 이용하여 처리한 후 우라늄은 저준위 폐기물로 회수하고, 초우라늄원소(TRU)는 개량형연소로(Advanced Burner Reactor: ABR)에서 재순환하는 전략을 추진하고 있다.¹¹⁾

프랑스의 경우에는 전통적으로 사용후핵연료의 재활용 정책을 견지하여 왔다. 그러나 1980년에 들어오면서 재처리 과정에서 발생하는 고준위 폐기물의 최종 처분과 관련하여 처분 부지로 선정한 4개의 부지에 대한 지역 주민들의 강력한 반대에 직면하게 되었고, 이의 해결을 위하여 1991년 「방사성 폐기물 처분 연구에 관한 법」을 제정하였다.¹²⁾

고준위 폐기물은 자연·환경 및 대중의 보건을 보호하고, 후손들의 권리를 존중하는 차원에서 관리되어야 한다는 취지에서 2005년 말 제출된 국가평가위원회의 종합보고서를 토대로 2006년 6월에 「방사성폐기물의 관리에 관한 법안」을 발의하고, 고준위 폐기물 관리에 관련된 국가 추진 일정을 법에 명시하였는 바, 2020년까지 장수명

9) "Nuclear Waste Policy Act"에 따라 미국의 에너지부는 2007년부터 2010년까지 고준위 폐기물 제2처분장 필요성을 의회에 보고하도록 되어 있음.
 10) U.S. Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, "A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems" (2002).
 11) U.S. Department of Energy, "The Global Nuclear Energy Partnership," <http://www.gnep.energy.gov/> (2006년 9월).
 12) "Radioactive Waste Management Law" (2006).

핵종의 분리 및 소멸을 위한 고속로 시스템의 원형로 건설, 2025년 까지 고준위 폐기물 유리 고화체의 심지층 처분장 건설, 그리고 2015년까지 MOX 등 사용후핵연료 관리를 위한 장기 중간 저장시설의 건설 등이 그것이다.

따라서 프랑스의 GEN-IV 원자로 시스템과 연계된 선진 핵연료주기 기술 개발은 「방사성폐기물 관리에 대한 법」에 토대를 두고 있다. 이 법안과 관련하여 악티나이드를 소멸하기 위한 GEN-IV 원형로를 2020년까지 건설할 것을 시라크 대통령이 발표한 바 있다.

또한 일본도 핵비보유국으로서 유일하게 사용후핵연료 재활용 정책을 일관되게 추진하고 있다. 사용후핵연료를 미래의 에너지 자원으로 간주하여 직접 처분을 금지하고 있으며, 지금까지의 해외 위탁 재처리에서 벗어나 자체적인 재처리를 위한 롯카쇼 상용 재처리 시설을 금년 5월에 준공할 예정이다. 또한, 이와는 별도로 고속로 및 관련 핵연료주기의 기술 개발을 지속적으로 수행하여 왔다.

지난 2005년 10월 발표된 「원

자력정책대강」을 통하여 지난 1956년에 수립한 재활용 정책을 다시 한 번 천명하였는데,¹³⁾ 이에 따르면 일본은 2030년 이후 자국의 총발전량 30~40% 이상을 원자력에서 충당하고, 사용후핵연료를 적절히 처리하여 우라늄과 플루토늄을 재활용하며, 2025년까지 고속로 실증로를, 그리고 2050년까지 상용 고속로를 도입하는 것을 목표로 하고 있다.

신홍 원전 개도국인 중국 또한 사용후핵연료 재활용 정책을 추진 중이며, 2020년까지 600MWe급의 원형 고속로(러시아의 BN-600 형) 건설 및 2030~2035년까지 1~1.5 GWe급의 상용 고속로의 건설을 계획하고 있다.¹⁴⁾

이러한 고속로 개발 계획에 따라 현재 란조우에 50tHM/y 규모의 재처리 시험 시설을 건설중에 있으며, 2020년까지 대규모의 상업용 재처리 공장을 건설할 예정으로 있다.

**사용후핵연료 선진 처리 기술
개발 현황**

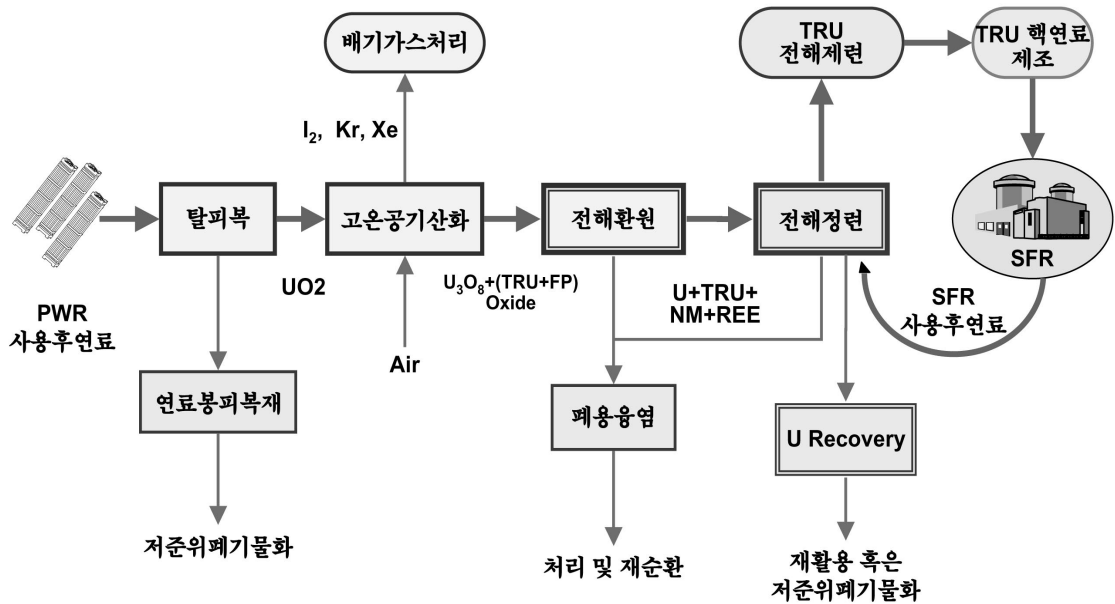
위에서 살펴본 바와 같이, 원자

력을 주력 에너지원으로 이용하는 대부분의 국가에서는 사용후핵연료의 직접 처분보다는 고독성의 방사성 핵종을 분리·연소하여 친환경성을 높이는 한편, 사용후핵연료를 자원으로 재활용할 수 있는 GEN-IV 원자로시스템을 기반으로 한 재활용 주기의 도입을 추진하고 있다.

원자력 선진국에서 전략적으로 개발 중인 사용후핵연료 선진 처리 기술은 크게 습식과 건식으로 나누어지며, 세부적으로는 다음과 같이 5개의 처리 방식으로 분류할 수 있다.

- Pyrochemical Electrorefining 공정 : 미국, 일본, 프랑스 및 우리나라에서 개발중인 파이로 건식 처리 공정¹⁵⁾
- DDP(Dimitrovgrad Dry Process) 공정 : 러시아에서 개발중인 파이로 건식 처리 공정¹⁶⁾¹⁷⁾
- UREX+(URanium EXtraction Plus) : 미국에서 개발중인 선진 습식 처리 기술¹⁸⁾
- COEX(COMBined EXtraction for Plutonium and

13) "Nuclear Power in Japan", <http://www.world-nuclear.org/> (2008년 3월).
 14) "Nuclear Power in China", <http://www.world-nuclear.org/> (2008년 3월).
 15) J. L. Willit, "Electrorefining Process Update", ANL-E Technical Information Exchange, Argonne, IL (2002).
 16) T. Kobayashi, S. Vavilov et al, "Plutonium Precipitation in the MOX Co-deposition Tests for the Oxide Electrowinning Process", J. of Nuclear. Science and Technology, Vol 42, No. 3, p. 295~300 (2005).
 17) S. Vavilov, T. Kobayashi, M. Myochin, "Principle and Test Experience of the RIAR's Oxide Pyroprocess", J. of Nuclear. Science and Technology, Vol 41, No. 10, p. 1018~1025 (2004).
 18) J. J. Laidler, "Advanced Spent Fuel Processing Technologies for the Global Nuclear Partnership", 9th IEM on Actinide and Fission Products Partitioning and Transmutation, Nimes, France (2006).



〈그림 3〉 우리나라의 파이로 건식 처리 공정의 흐름도

Uranium) 및 GANEX 공정 : 프랑스가 개발하고 있는 선진 습식 처리 방법¹⁹⁾

- NEXT (New Extraction System for TRU Recovery) : 일본에서 개발중인 선진 습식 처리 기술²⁰⁾

1. 건식 공정

고온의 용융염을 이용하는 파이

로 건식 처리 기술은 원소의 열역학적 특성차를 이용하여 전기화학적으로 핵연료 물질을 분리·회수한다.

매질로 이용되는 용융염 자체가 방사선 및 고온에 매우 안정한 특성을 갖고 있으며, 임계 관리가 매우 용이하다는 장점이 있다.

특히, 기존의 습식 재처리 기술과 비교했을 때 회수된 핵연료 물질의 제염 계수가 매우 낮아 핵확

산 저항성을 내재하고 있다고 할 수 있다.

그러나 본 기술은 회분식 장치 개념을 도입하고 있기 때문에 용량의 확장성이 습식 재처리 기술보다 불리하고, 고온의 용융염(500~650 °C) 취급으로 인한 장치 개발의 어려움과 내부식성 구조 재료에 대한 문제점 등을 내재하고 있다.

대표적인 공정으로 우리나라와 미국의 파이로 공정²¹⁾과 러시아의

19) O.H. Zabunoglu, L. Ozdemir, "Purex Co-processing of Spent LWR Fuels: Flow Sheet", Annals of Nuclear Energy, Vol. 32, p. 151-162 (2005).

20) T. Namba, H. Funasaka, Y. Nagaoki, "Prospects and Progress Status of the Advanced Fuel Cycle System", Atalante 2004 International Conference - Science for the Future Nuclear Fuel Cycles, Nimes, France (2004).

21) J. J. Laidler, "Advanced Spent Fuel Processing Technologies for the Global Nuclear Partnership", 9th IEM on Actinide and Fission Products Partitioning and Transmutation, Nimes, France (2006).

DDP(Dimtrovgrad Dry Process) 공정²²⁾이 있으며, 우리나라에서 개발 중인 파이로 공정 개념은 <그림 3>과 같다.

2. 습식 공정

선진 습식 재처리 기술의 개발을 주도하고 있는 프랑스와 일본은 MOX 핵연료를 경수로 원자로 시스템에 재순환하는 중·단기적 전략과 함께, 장기적으로는 미래 원자로 시스템의 요건인 경제성 및 핵확산 저항성이 향상된 신개념의 혁신 기술을 개발하는 데에 초점을 맞추고 있다.

가. UREX 공정

우라늄 추출 공정(URanium EXtraction)으로 정의되는 UREX 공정은 우라늄과 테크네튬(Tc)을 각각 99.9%, 95% 이상 고순도로 분리가 가능하다.

기본적으로 PUREX 공정과 같은 용매 추출 기술을 활용하면서 구성 장치의 최소화 및 최적화를 통하여 그 기술성과 경제성의 향상을 목표로 하고 있으나, 실제적으로는 기존의 PUREX 공정보다 훨씬 복잡한 공정이다.

일반적으로 UREX 공정은 핵연료 물질 혹은 핵분열 생성물의 분리 흐름에 따라 UREX부터 UREX+4까지 6개의 공정으로 분류된다.²³⁾²⁴⁾

나. COEX 공정

프랑스의 아레바(AREVA)에서 주도적으로 개발하고 있는 COEX 공정은 PUREX 공정을 기반으로 한 기술로서 우라늄과 플루토늄을 공회수하여 경수로 MOX 핵연료를 제조하는 것을 특징으로 하며, 이는 2020년경에 도입 예정인 GEN-III 원자로 시스템에서의 재활용을 목적으로 하고 있다.

본 공정은 우라늄 추출 단계에서 일부 우라늄만을 회수하고, 후속 단계에서 우라늄과 플루토늄을 공회수(50:50)한 후 이를 MOX 핵연료로 제조할 수 있다는 기술적 특징이 있다.

특히, 본 공정은 고순도 플루토늄의 회수 공정을 배제함으로써 핵확산 저항성이 향상되었다는 기술적 장점이 있다.²⁵⁾

다. NEXT 공정

일본원자력기구(Japan Atomic Energy Agency: JAEA)에서 처

음 제안한 NEXT 공정은 1단계로 우라늄을 결정화시켜 제거하여 공정을 단순화시키고, 이어서 나머지 우라늄 및 TRU를 분리하는 기술을 근간으로 하고 있다.

고속로 사이클 실용화 전략 조사 연구의 2단계 결과 보고서에서 선진 핵연료주기의 기준 공정으로 선정된 NEXT 공정은 우라늄·플루토늄 및 넵투늄(Np)을 동시에 회수함으로써, 핵확산 저항성의 향상, 장치의 최소화 및 최적화에 의한 공정 단순화, 그리고 폐기물 발생량의 최소화 등을 꾀하고 있다.²⁶⁾

특히, 우라늄 결정화 공정을 도입하여 잉여 우라늄을 선행 회수함으로써, 후속 공정의 처리 용량을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 과정에서 회수된 우라늄은 중준위 폐기물로 처리된다.

우리나라 핵연료주기 기술 개발의 방향

위에서 논의한 바와 같이, 원자력은 다른 에너지 공급원과 비교하여 여러 가지 장점을 가지고 있으며, 더욱이 근래에 들어와 유가가 급격히 상승하면서 그 상대적 경제성이 향상되고 있다.

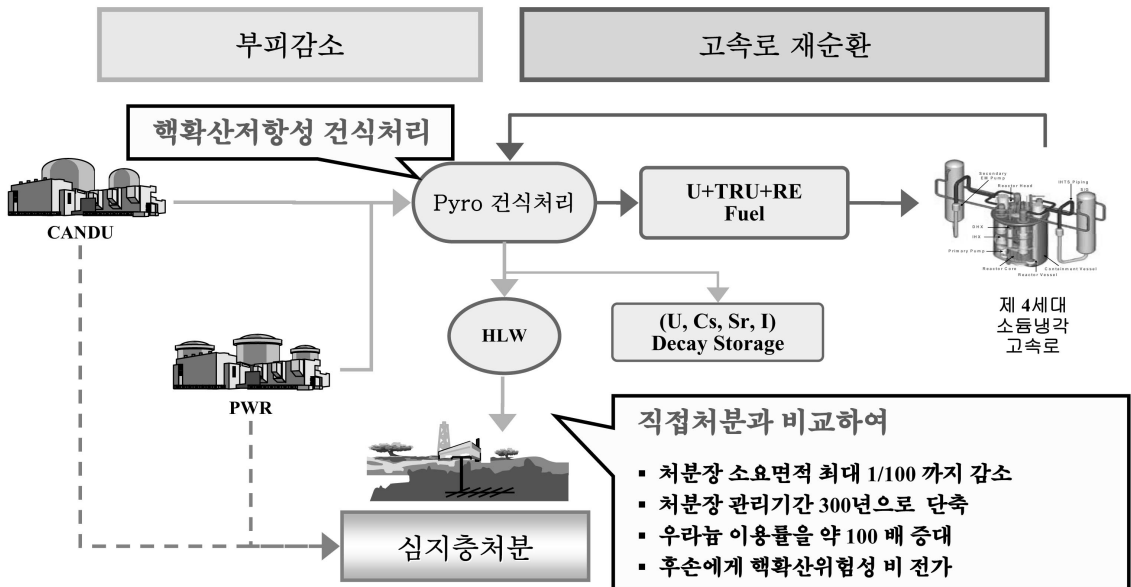
22) T. Kobayashi, S. Vavilov et al, "Plutonium Precipitation in the MOX Co-deposition Tests for the Oxide Electrowinning Process", J. of Nuclear. Science and Technology, Vol 42, No. 3, p. 295~300 (2005).

23) J. J. Laidler, "Advanced Spent Fuel Processing Technologies for the Global Nuclear Partnership," 9th IEM on Actinide and Fission Products Partitioning and Transmutation, Nimes, France (2006).

24) 濤和生, "재처리리사이클의 현재와 미래전망, 핵연료리사이클에 관한 해외정세," 춘계 일본원자력학회 (2007).

25) O.H. Zabunoglu, L. Ozdemir, "Purex Co-processing of Spent LWR Fuels: Flow Sheet," Annals of Nuclear Energy, Vol. 32, p. 151-162 (2005).

26) T. Namba, H. Funasaka, Y. Nagaoki, "Prospects and Progress Status of the Advanced Fuel Cycle System," Atalante 2004 International Conference - Science for the Future Nuclear Fuel Cycles, Nimes, France (2004).



<그림 4> 순환형 핵연료주기 연계도

그러나 미래의 에너지 수요의 증가를 고려할 때 그 수요를 단순히 현재 운전되고 있는 전력 생산 방식에 의한 양적 팽창만으로 충족시키기에는 몇 가지 문제가 있는데, 즉 사용후핵연료의 누적 문제, 그 처분에 따른 환경 영향문제, 그리고 한정적인 천연 우라늄의 부존 문제 등이 바로 그것이다.

따라서 앞으로 원자력 발전을 지속해 나가기 위해서는 한정적인 천연 우라늄의 부존 문제를 해결하면서 사용후핵연료를 효율적으로 관리할 수 있고, 더 나아가 환경에 미치는 영향이 최소화된 청정하고 안전한 원자력 에너지의 공급 체계가 갖추어져야 한다. 이를 위하여 한

국원자력연구원에서는 다음과 같은 목표로 선진 핵연료주기 기술 개발을 추진해오고 있다.

○ 고준위 폐기물의 처분 소요 부지 최소화를 위하여 사용후핵연료를 적절히 처리하여 그 부피를 감소시키되, 그 처리 방법은 핵비확산적인 것으로 한다.

○ 사용후핵연료에 포함된 장반감기 고독성의 방사성 핵종을 분리·연소시켜 그 환경 친화성을 제고한다.

○ 자원 빈국인 우리나라 현실을 반영하고, 가용 자원의 활용을 극대화하기 위하여 사용후핵연료에 포함된 유용한 핵물질을 재활용한다.

<그림 4>는 이러한 목표를 달성

하기 위하여 한국원자력연구원이 현재 개발 중인 선진 핵연료주기의 기술 연계도이다. 여기에는 경수로 사용후핵연료의 파이로 건식 처리와 소듐냉각고속로 개발 및 이러한 핵연료주기에서 발생하는 고준위 방사성폐기물을 안전하게 영구 처분할 수 있는 심지층 처분이 포함되어 있다.

즉, 경수로 사용후핵연료는 파이로 건식 처리 후 우라늄만을 회수하여 중·저준위화하고 초우라늄원소(TRU)는 고속로 금속핵연료로 가공하여 재활용하며, 고속로 사용후핵연료는 파이로 건식 처리 후 다시 고속로에서 재활용한다는 개념이다. 한편, 고방열 핵종인 세슘

(Cs) · 스트론튬(Sr) 등은 지상에서 장기 보관 후 중·저준위 폐기물로 처분한다.

또한, 2007년 12월에 발표된 「미래 원전 기술 개발 로드맵(안)」에 의하면, 사용후핵연료의 부피 감소를 위한 파이로 건식 처리 공정을 개발하고, 이의 실용화를 위한 공학 규모 실증 시설을 2016년까지, 그리고 종합 파이로 시설을 2025년까지 확보하는 것으로 되어 있다.

또한 사용후핵연료에 포함된 고독성의 핵물질을 연소시키며 유용 핵물질을 자원으로 재활용할 수 있는 미래형 고속로 실증로를 2028년까지 건설하여 운영하도록 되어 있다.

이상과 같은 기술 개발 로드맵이 실현되는 경우, 우리나라는 순환형 핵연료주기 완성을 위한 기반 시스템을 갖추게 될 것으로 보인다.

결 언

우리나라의 에너지와 전력 소비량은 계속 증가하고 있으며, 이로 인하여 온실 가스 감축 의무의 부담 가중, 에너지 자원의 수입액 증가, 에너지 수급의 불안 상존 등의 문제가 발생하고 있다. 에너지 부존 자원이 빈약한 우리나라의 경우, 이는 향후 국가의 존립을 위협할 수 있는 요소로 작용할 수 있다. 따라서, 에너지 안보의 확보가 그 어느 때보다도 중대한 시점이다.

이를 위하여, 기존의 자원 의존형 에너지 공급 체계에서 기술 주도형 에너지공급 체계로의 전환이

불가피하다.

특히, 원자력은 우리나라의 에너지 안보에 기여할 뿐만 아니라 온실 가스의 배출 감소로 환경 보전에 기여하며, 또한 안정적이고 저렴한 전력 공급을 통하여 경제 발전의 원동력으로서 그 역할이 크게 기대된다.

원자력 발전의 규모를 확대하기 위해서는 한정적인 천연 우라늄의 부존 문제를 해결하면서 사용후핵연료를 효율적으로 관리할 수 있고, 또 환경에 미치는 영향이 최소화된 청정하고 안전한 원자력 에너지의 공급 체계가 필요하며, 이를 위하여 고속로 재활용 주기의 채택이 바람직하다고 판단된다.

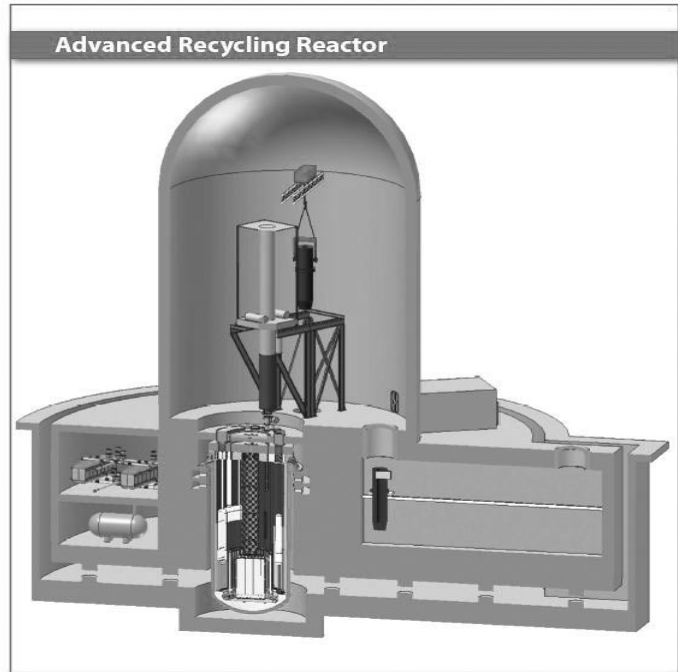
그리고 그 처리 방식으로는 핵확산 저항성을 제고하고 핵연료주기

의 비용을 절감하며, 고연소도 핵연료의 처리에 알맞은 파이로 건식 처리 방식이 적합하다.

파이로 건식 처리 기술을 이용한 고속로 재활용 주기의 완성을 위해서는 연구 개발 투자의 안정적인 재원 확보가 필요하다.

원자력 연구 개발의 특성상 장기간의 자본 회임 기간이 요구되므로 국가 차원에서의 안정적 재원의 확보가 요구된다.

또한 고속로 재활용 주기는 한·미 원자력협력협정의 개정 등 기술 외적인 요소가 관련되어 있기 때문에 이를 성공적으로 추진하기 위해서는 핵투명성을 증진하고자 하는 정부의 강력한 정책의 뒷받침이 있어야 할 것이다. ☼



GNEP에서 구상하고 있는 신형 고속로 개념도