



우리 나라 후행 핵연료 주기의 정책 결정을 위한 제언

송 중 순

조선대 원자력공학과 교수



이러한 원자력 발전의 에너지 공급원으로서의 역할은 향후 상당기간 계속될 것으로 전망된다. 이는 현재의 추세로는 뚜렷한 대체 에너지원의 개발이 불투명할 것으로 전망되고 있기 때문이다.

비록 최근에는 여러 가지 요인으로 인하여 원자력 발전과 다른 발전원간의 발전 비용 차이가 줄어들고 있지만, 석유 의존도가 매우 높은 우리나라의 실정과 향후 지구 환경 문제로 인해 화석 연료의 사용이 제약 받게 될 것을 감안해 볼 때 원자력 발전의 전략적 중요성은 더욱 커질 것으로 전망된다.

상당한 양의 에너지를 원자력 발전에 의존하고 있는 우리나라로서는 후행 핵연료 주기 추진 전략의 선택은 향후 원자력 발전 추진 정책에 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다.

과거 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 건설과 관련하여 안전도 등지에서 발생한 주민의 반발로써

알 수 있듯이, 향후 원자력 발전의 성패는 발전에 따라 발생될 수밖에 없는 방사성 물질의 처리와 처분을 어떻게 성공적으로 수행하는가에 달려있다.

원자력 발전의 연료 주기는 여러 공정으로 구성되어 있으며 또한 다양하다는 점에서 다른 발전원과 두드러진 차이가 있다.

원자로 및 연료의 특성에 의해 다양한 후행 핵연료 주기 추진 전략이 존재할 수 있으나 이를 크게 구분하면 재처리에 의한 우라늄 자원 활용과 직접처분으로 구분할 수 있다.

방사성 폐기물 저장 현황

1. 고체 폐기물

우리 나라의 고체 폐기물은 드럼에 포장 처리한 후 전용 트럭에 실어 발전소 내 폐기물 저장고로 운송하여 폐기물 종류별로 저장하고 있으며, 영구 처분 시설이 건설되면 이곳으로 운반되어 영구 처분하게

에너지 자원이 부족한 우리나라는 1970년대 두 차례 석유 파동에서 많은 어려움을 겪었다. 이후 에너지원의 다원화를 통한 에너지 안보를 이룩하기 위한 정책의 일환으로 원자력 발전을 의욕적으로 추진하여 왔다.

우리 나라의 원자력 발전은 1970년대부터 본격적으로 도입되기 시작한 이래 꾸준히 추진된 결과 현재 16호기의 원자력발전소를 보유하고 있으며, 총발전량의 약 45%를 공급하고 있는 주된 전력 공급원으로서의 역할을 담당하기에 이르렀다.

된다.

1990년부터 1999년까지 최근 10년간 중·저준위 폐기물의 발생 실적은 <표 1>과 같다. 또 각 발전소 별로 중·저준위 방사성 폐기물 저장 관리 현황은 <표 2>와 같다.

표에서 제시된 바와 같이 고체 폐기물의 포화 연도는 고리 원자력발전소는 2014년, 영광 원자력발전소는 2011년, 울진 원자력발전소는 2008년, 그리고 월성 원자력발전소는 2009년으로, 전체 원자력발전소의 부지 내 저장 능력은 모두 2008년까지는 확보되어 있다. 즉 2008년에는 영구 처분 시설이 건설되어야 할 것으로 보인다.

2. 사용후 핵연료 현황

국내의 사용후 핵연료는 1999년 12월 현재 4개의 원전 부지(PWR 3개소, CANDU 1개소)에 총4,804톤이 저장되어 있으며, 2010년에는 11,000MTU, 그리고 2040년에는 34,000MTU이 누적될 전망이다.

현재 우리 나라에 운전중인 12기의 PWR 원전에서는 대략 연간 518다발(215 MTU)의 사용후 핵연료가 발생하고 있다. <표 3>에 우리나라의 PWR 및 CANDU형 원전별 사용후 핵연료 발생량 및 저장 시설 현황을 나타내었다.

표에서 제시된 바와 같이 전체 원자력발전소의 부지 내 저장 능력은 모두 2006년까지는 확보되어 있

<표 1> 연간 중·저준위 고체 폐기물 발생 실적

단위 : 드림

	고리 원전		영광 원전		울진 원전		월성 원전	
	호기	발생량	호기	발생량	호기	발생량	호기	발생량
1990년	4	2,491	2	1,296	2	924	1	231
1991년	4	2,129	2	990	2	1,081	1	207
1992년	4	2,199	2	1,076	2	1,077	1	225
1993년	4	1,995	2	888	2	988	1	187
1994년	4	1,236	2	836	2	1,018	1	220
1995년	4	1,963	3	989	2	1,028	1	220
1996년	4	1,178	4	934	2	748	1	267
1997년	4	1,756	4	1,249	2	742	2	336
1998년	4	2,038	4	1,076	3	404	3	668
1999년	4	1,128	4	973	4	923	4	580

<표 2> 중·저준위 방사성 폐기물 저장 관리 현황

단위 : 드림

	저장 능력	예상 발생량(드림/기·년)	저장량	예상 포화 연도
고리(4기)	50,200	210	29,343	2014
영광(6기)	23,300	210	12,073	2011
울진(6기)	17,400	210	9,691	2008
월성(4기)	9,000	150	4,216	2009
계	99,900	-	-	-

<표 3> 사용후 핵연료 저장 관리 현황

(1999년 12월 말 현재)

	누적 발생량		연간 발생량		저장 능력예상		포화 연도
	MTU	다발	MTU	다발	MTU	다발	
고리(4기)	1,076	2,675	65	162	1,737	4,225	2008
영광(4기)	667	1,604	75	178	1,696	4,038	2008
울진(4기)	425	992	75	178	1,563	3,723	2007
월성(4기)	1,916	101,408	381	20,164	4,807	254,352	2006
계	4,084	-	596	-	-	-	-

다. 즉 2006년까지는 후행 핵연료 주기의 정책이 결정되어 시행되어야 할 것으로 보인다.

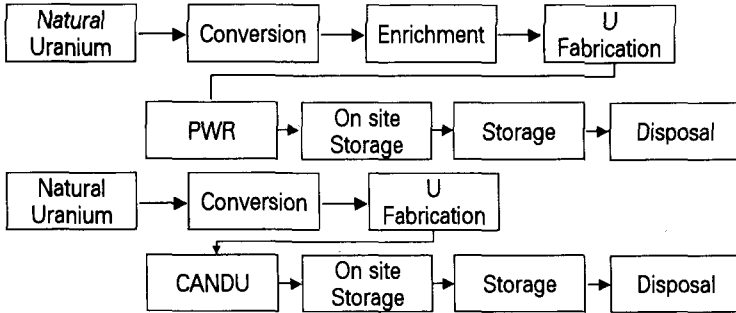
후행 핵연료 주기 대안

1. 직접 처분 핵연료 주기

직접 처분 연료 주기 시나리오

경수로 및 중수로에서 발생하는 모든 사용후 핵연료를 중간 저장하였다가 영구 처분시키는 단순한 비순환 핵연료 주기로서, 세부 공정 흐름은 <그림 1>과 같다.

직접 처분 핵연료 주기의 경우 중간 저장 방식의 선택과 사용후 핵연료 발생량에 따른 저장 용량의 결정



〈그림 1〉 직접 처분 핵연료 주기

이 이루어져야 한다. 또한 사용후 핵연료에 대한 별도의 처리가 수행되지 않을 경우에 발생하는 장수명 핵종에 의한 방사능적 영향 및 플루토늄 독성 핵종에 대한 영구 처분 기술 등의 고려가 필요하다.

세계적으로 직접 처분 정책을 추진하고 있는 대표적인 국가로는 미국과 스웨덴이 있다.

가. 미국

1966년부터 1972년까지 West Valley Plant에서 상용 재처리를 수행한 경험이 있고, Morris와 Barnwell에 상용 재처리 공장을 건설하였지만, 사용후 핵연료의 재처리에 의한 순환 핵연료 주기는 비경제적이라는 결론하에 상용 재처리를 하지 않고 있다.

지난 수 십년에 걸쳐 안전 측면에서의 기술 발전이 많이 이루어졌음에도 불구하고 민간 업체의 사용후 핵연료 재처리는 허용하지 않기로 결정하였다. 이에 따라 사용후 핵연료는 심지층에 직접 처분될 예정이

며, Yucca Mountain을 대상으로 처분 적합성에 대한 평가가 진행 중이다.

사용후 핵연료를 처분하기 전에 연방 정부 책임하에 에너지부가 인수하여 중간 저장하도록 되어 있으나 아직 중간 저장 시설 부지가 결정되지 않은 상태이다.

DOE는 텍사스주에 있는 Pantex 공장과 남캐롤라이나 주에 있는 Savannah River Site의 기존 시설 및 향후 건설 예정인 시설의 최신파 및 확장을 통해 핵무기급 플루토늄을 한 곳에 통합하여 저장할 예정이며, 테네시 주의 Oak Ridge Reservation Y-12 시설에 있는 핵무기급 고농축 우라늄은 그 처분 상황에 따라 통합된 시설에서 계속 저장할 예정이다.

잉여 플루토늄 처분에 대한 DOE의 전략은 방사성 폐기물 정책법에 따라 잉여 플루토늄을 유리화 또는 세라믹화하여 고정화시킨 다음 이를 지하에 처분하는 방안과 잉여 플

루토늄의 일부를 기존의 국내 상용 원전에 혼합 핵연료로서 연소시키고 그 사용후 핵연료를 방사성 폐기물 정책법에 따라 지하에 처분하는 것이다.

또한 DOE는 러시아·캐나다 및 미국 사이에 적절한 협정이 체결될 경우 CANDU 원자로에서 MOX 연료를 연소시킬 가능성도 배제하지 않고 있다.

이러한 처분 방안 중 두 가지 모두 또는 어느 한 가지 방안이 시행되는 시기와 범위는 미래의 기술 개발 및 이의 검증 결과와 장소에 대한 환경 영향 평가, 계약 협상, 정밀 비용 분석, 핵비확산 중요성, 러시아 및 다른 국가들과의 협정 등에 따라 좌우될 것이다.

나. 스웨덴

스웨덴의 재처리 및 재활용 프로그램은 신규 원자력발전소의 건설 금지가 선언되고, 기존 발전소의 폐로가 명해진 1995년에 중단되었다.

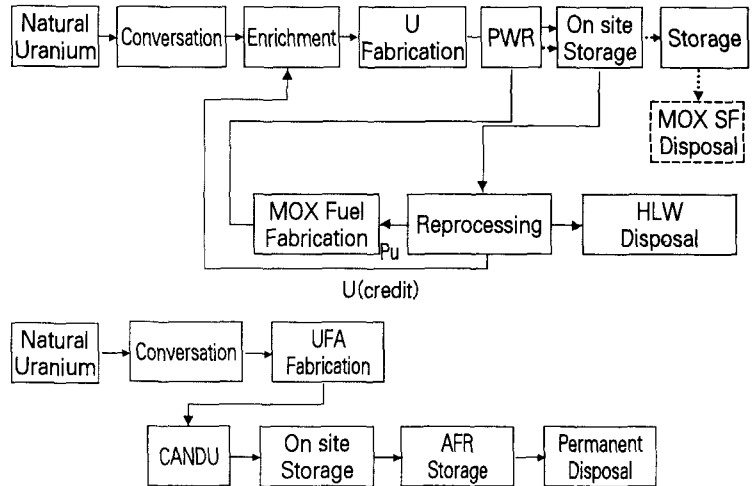
스웨덴의 기반암에 위치한 심층 처분장으로서의 사용후 핵연료의 직접 처분에 대한 계획은 많이 진척되었다. 심층 처분에 대한 장소 결정과 국민 수용성을 용이하게 하기 위하여 처분은 단계적으로 실시한다.

첫 단계로서 제한된 향후 사용후 핵연료를 수용할 수 있는 실증 심층 처분장을 건설한다. 이것이 완료되면 얻어진 결과를 평가하여 전체 사용후 핵연료를 수용할 수 있는 시설

의 설치 여부를 결정하게 된다. 사용후 핵연료의 직접 처분은 2008 년경에 실시될 것으로 기대된다.

Studsvik의 방사성 폐기물 시설은 원전에서 발생한 중·저준위 방사성 폐기물 일부와 병원 및 연구소에서 발생한 방사성 폐기물을 소각·용융·제염·고성능 압축 등의 방법으로 체적 감축 처리한다. 저준위 방사성 폐기물은 시멘트 고화 또는 역청화 된다.

스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물의 중간 저장은 원전에 위치한 저장 시설에 저장된다.



〈그림 2〉 재처리 핵연료 주기

2. 재처리 핵연료 주기

재처리 핵연료 주기 시나리오는 경수로에서 발생하는 사용후 핵연료를 재처리하여 회수된 플루토늄은 재농축 과정을 거쳐 경수로에 재순환시키는 연료 주기이다.

시나리오상에서 플루토늄의 추출이 수반되므로, 실제적으로 수행하기에는 국제적으로 많은 제약이 예상되지만, 우라늄 자원의 효율적 이용 및 관리 대상이 되는 고준위 방사성 생성물량의 감소 측면에서 환경적 영향의 감소가 기대되는 연료 주기이다.

재처리 연료 주기의 주요 단계를 그림으로 나타내면 〈그림 2〉와 같다. 세계적으로 사용후 핵연료의 재순환과 플루토늄의 재처리 정책을 추진하고 있는 국가로는 프랑스·

일본·러시아 등이 있다.

가. 프랑스

프랑스의 원자력 프로그램은 첫 번째 석유 파동 때 시작되었으며, 프랑스의 에너지 자립도의 증진과 경쟁력 있는 에너지원의 확보를 목표로 시작되었다. 프랑스의 관점에서 핵분열성 물질의 재처리와 재활용은 이러한 목표에 기여한다고 간주된다.

사용후 핵연료의 재처리에서 분리된 플루토늄(매년 800t의 사용후 핵연료가 재처리)은 경수로 또는 소각로나 증식로, 고속로 내에서 MOX 연료의 형태로 재활용된다.

현재의 우라늄 시장의 상황으로 판단할 때, 풍부한 유용성의 우라늄이 존재하기 때문에 프랑스의 전략을 변화시킬 수도 있다. 그렇지만

프랑스의 후행 핵연료 주기 정책은 핵연료 주기에 필요한 국내 기술을 완전히 확보하고 핵연료 주기 시설의 운영뿐만 아니라 그 부대 비용을 자국 내 산업체에 의존하는 것이다. 따라서 우라늄과 플루토늄을 순환하기 위한 재처리는 사용후 핵연료의 관리 차원에서 필요한 것으로 인식하고 있다.

즉각적인 수요가 없는 플루토늄의 비축을 피하기 위하여, 프랑스 기 관인 EdF(Electricite de France)는 추출된 플루토늄을 연료로 제작하여 원자로에서 사용할 때에만 사용후 핵연료를 재처리한다.

그렇기 때문에 단기간에 걸쳐 살펴보면, 재처리되는 연료의 양은 재처리 공장의 용량에 의존하는 것이



아니고 MOX 제작 공장과 MOX 연료의 원자로 사용을 결정하는 기관에 의존한다.

현재로서는 16기의 원자로가 MOX 연료로 운전되도록 허가되었으며, 12기에 대한 허가가 진행 중이다. 장차 MOX 재처리가 재처리 공장의 용량에 부합할 것으로 기대된다. 이러한 목표의 달성을 위해, COGEMA는 최근 120tHM/a 용량의 MELOX 공장을 가동시켰다.

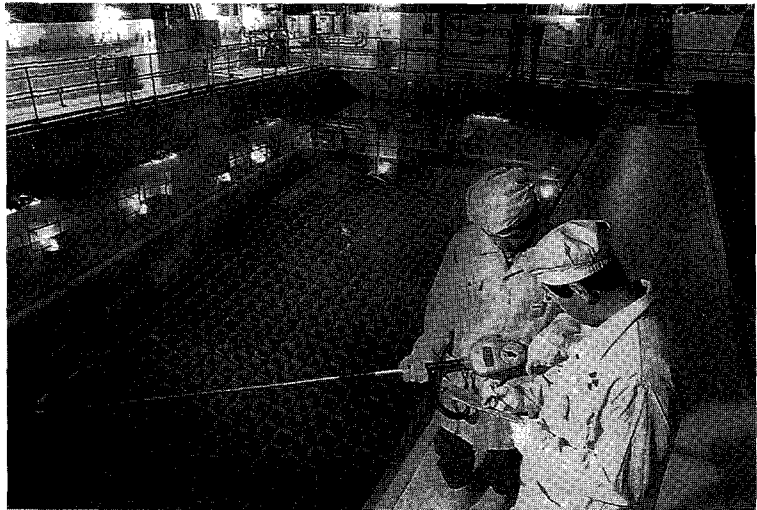
2015년 후에 프랑스는 재래식 연료와 MOX 연료로써 운전되는 가압경수로와 전체 플루토늄의 양을 관리할 수 있는 고속로가 혼합된 시스템을 예상하고 있다.

1967년 프랑스는 다른 국가들과 마찬가지로 저준위 폐기물을 북대서양 심해에 처분하였다. 그러나 이 심해 처분 방법은 해양 오염 문제와 천층 처분이 더 경제적이라는 이유 때문에 그 후 중단되었다.

중·저준위 폐기물 처분에 대한 프랑스의 전략은 인공 방벽을 설치한 천층 처분이다. 중·저준위 폐기물은 2개의 트랜치에 직접처분하였다. 이 트랜치는 진흙이나 플라스틱 판으로 인공 방벽을 설치하였으며, 중준위 폐기물에 대해서는 추가로 콘크리트 슬라브로 이루어진 Vault를 설치하고 여기에 모래나 콘크리트로 인공 방벽을 설치하였다.

나. 일본

일본은 에너지 자원의 부족으로



사용후 핵연료 저장조. 우리나라의 사용후 핵연료의 저장 현황, 그리고 경제적인 여건을 감안한다면 하루빨리 후행 핵연료 주기 정책을 수립하고 이에 대한 기술적 연구에 노력을 기울여야 할 때이다. 후행 핵연료 주기 사업은 수 십년이 소요되는 장기 정책이라는 점에서 「WAIT - AND - SEE」 정책을 지양하고 중/장기적 관점에서 정책 수립의 준비를 해야 할 것이다.

인해 장래의 에너지 안보 및 일본의 사회 경제적 활동을 확보할 수 있는 장기간에 걸친 계획이 필요하게 되었다.

사용후 핵연료의 재처리와 회수된 플루토늄 및 우라늄을 핵연료로 재사용하는 것을 포함한 핵연료 재활용의 상업화를 목표로 한 연구 및 개발의 계속으로 장래 에너지 안보를 확보하려 하고 있다.

핵연료 주기 기술 및 생산 능력에 대한 해외 의존도를 최소화하기 위하여 자국 내 핵연료 주기 관련 모든 부분에 대한 상용화를 시도하고 있다. 즉 농축·핵연료 가공·재처리의 대규모화를 추진하고 있으며, 다른 한편으로는 핵연료의 이용을 증진시키기 위하여 신형전환로 및

고속증식로의 개발을 국가 종합 전략 및 정책으로 내세우고 있다.

일본의 핵연료 재활용 프로그램은 필요한 양 이상의 플루토늄을 저장하지 않는다는 원칙하에 수행되고 있으며, 이는 핵투명성과 NPT 조약의 준수를 확실히 하기 위함이다. 일본의 기본 개념은 장기적으로 볼 때 고속증식로와 가압경수로를 같이 활용하는 것을 목표로 하고 있다.

2030년까지 고속증식로를 기초로 한 상업 핵연료 재활용 시스템을 확보하기 위한 정부와 민간 분야의 협력으로 이루어진 연구와 개발이 실행될 예정이다.

이러한 시스템의 구축을 위하여 적절한 규모의 핵연료 재활용을 착수하는 것이 중요한 관건으로 고려

되고 있다. 따라서 일본은 현존하는 LWR에 근거한 핵연료 재활용의 수행과 운전에 따른 경험을 습득하기 위한 상업용 재처리 공장을 건설하려 하고 있다.

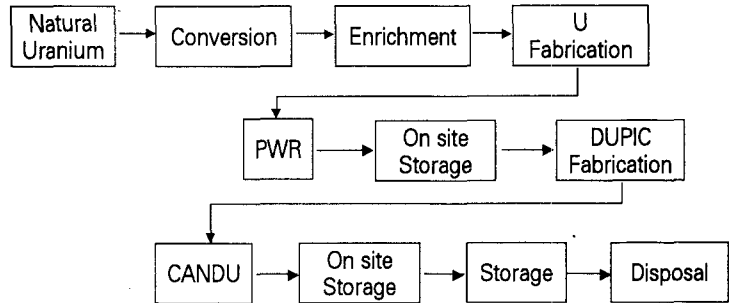
2001년까지 해외에서 회수된 플루토늄을 사용한 MOX를 처음 3·4호기의 원자로에 장전할 계획이며, 2010년까지 MOX를 사용하는 원자로의 호기 수를 16기에서 18기로 확장할 계획이다.

일본은 사용후 핵연료가 재처리 될 때까지 소내 저장 방식을 채택하고 있으며, 자국 내 대규모 재처리 시설이 건설/운영될 때까지 해외 위탁 재처리에 의존하고 2000년 이후의 해외 위탁 재처리 비율의 확대 여부에 대하여 신중하게 고려중이다.

또한 2020년경에는 고속증식로를 통하여 플루토늄의 재활용을 추진하고 신형전환로 및 가압경수형 원자로에 대한 플루토늄의 재순환도 고려중이며, 고준위 폐기물은 유리 고화체로 만들어 30 ~ 50년간 중간 저장 후 지하 처분할 계획이다.

다. 러시아 연방 정부

러시아 연방 정부는 현재 자국 내의 VVER-440 사용후 핵연료를 재처리하여 농축 우라늄을 재활용하며 추출된 플루토늄을 저장하고 있다. VVER-1000에서 발생한 사용후 핵연료는 재처리에 대한 결정이 내려지지 않아 저장중이다.



〈그림 3〉 DUPIC 핵연료 주기

〈표 4〉 주요 외국의 사용후 핵연료 관리 현황

국명	사용후 핵연료 관리 정책	현황
프랑스	재처리	<ul style="list-style-type: none"> • La Hague 시설 : UP2, UP3 가동 • Marcoule 시설 : UP1, ATM 가동, MAR600 계획
영국	재처리	<ul style="list-style-type: none"> • Sellafield 시설 : B205, THORP 가동 • Dounley 시설 : MTR, PFR 가동, EDRP 계획
스웨덴	중간 저장 후 직접 처분, 일부 재처리	<ul style="list-style-type: none"> • Clab 시설 (3,000 톤 규모의 중간 저장 시설) • 2020년 처분장 개설 목표로 추진중 • 영국 BNFL에 위탁 재처리(약 140톤)
독일	위탁 재처리 및 일부 재처리	<ul style="list-style-type: none"> • 니더작센주 글레벤을 잠정 부지로 선정 • 2008년 운영 계획
미국	직접 처분	<ul style="list-style-type: none"> • 네바다주 유키마운틴 결정(72,000톤) • 2010년 운영 계획
일본	위탁 재처리 및 재처리	<ul style="list-style-type: none"> • 영국·프랑스에 위탁 재처리 (2000년까지 약 6,000톤) • 통해 재처리 공장(3,000톤) • 롯카쇼무라 : 건설 • 고속로연료 재순환 시험 시설 : 계획

RBMK 원자로에서 발생한 사용후 핵연료는 저장중이며, 우라늄과 플루토늄 동위원소의 함량이 낮아 비경제적이기 때문에 재처리가 고려되지 않는다.

분리된 플루토늄의 관리에 대한 대안이 러시아 연방 정부에 의해 평가되었다. 플루토늄의 관리는 다음과 같은 원칙하에 실시된다.

- ① 플루토늄의 관리에 있어서 러



〈표 5〉 각국의 후행 핵연료 주기 정책의 접근법

국명	결정연기	직접 처분	재처리
Argentina	○		○
Belgium	○		○
Brazil			○
Bulgaria	○		○
Canada	○		
China			○
Czech Republic	○	○	
Finland		○	○
France			○
Germany		○	○
Hungary	○		○
India	○		○
Italy	○		○
Japan			○
Korea Rep.of	○		
Lithuania	○		
Mexico	○		
Netherland			○
Pakistan	○		
Romania	○		
Russian Federation			○
Slovakia		○	○
Slovenia	○		
South Africa	○		
Spain		○	○
Sweden		○	
Switzerland	○		○
UK	○		○
Ukraine	○	○	○
USA		○	

시아의 경험을 극대화한다.

- ② 플루토늄의 사용 전환에 대한 저항은 중요한 요소이다.
- ③ 플루토늄의 관리는 경제적 환경적 측면에서 수용 가능하여야 한다.
- ④ 분리된 플루토늄의 관리 대안은 장기간에 걸친 최적의 핵연료 주기의 개발에 기반이 되어

야 한다.

3. 경·중수로 연계 핵연료 주기 (DUPIC)

단일 노형으로 원자력발전소를 운영중에 있는 대부분의 여러 국가들과 달리 우리 나라는 가압경수로형 원자로와 가압중수로형 원자로를 동시에 운전하고 있다.

경수로형 핵연료는 약 3.5wt%의 U-235의 저농축 우라늄을 연료로 하고 경수를 냉각 및 감속재로 사용하는 것이 특징이다.

경수로 핵연료는 노심에 장전되어 연소된 후 사용후 핵연료로 배출되는데 그 내부에는 핵분열 반응으로 생성된 핵분열 생성물과 악티나이드족 물질, 그리고 중성자의 조사에 의한 생성물 등이 존재하고 있다.

특히 악티나이드족 핵종 중 연소되고 남은 U-235와 중성자 포획으로 생성된 Pu-239, Pu-241 등을 포함하여 핵분열 물질의 양을 무게 함량비로 환산할 경우, 그 값은 연료의 연소도에 따라 다르나 대체적으로 30~40 GWD/MTU의 연소 범위에서 1.1~1.3wt%에 해당하는 농축도를 나타낸다.

이러한 핵분열 물질의 함량은 천연 우라늄의 U-235 함량인 0.7wt%보다 크기 때문에 단순한 산술적인 의미에서 경수로 사용후 핵연료를 중수로의 연료로 충분히 재활용할

수 있다. 이것이 경·중수로 연계 핵연료 주기 기술의 기본 개념이다.

경수로형 원자로와 중수로형 원자로가 동시에 운전되고 있다는 특이성 때문에 경·중수로 연계 핵연료주기에 관한 연구는 우리 나라를 중심으로 진행되고 있다. 경·중수로 연계 연료 주기 시나리오는 〈그림 3〉과 같다.

주요 외국의 사용후 핵연료 관리 현황은 〈표 4〉와 같고, 각국의 후행 핵연료 주기 정책의 접근법은 〈표 5〉와 같다.

결론

우리 나라의 사용후 핵연료의 저장 현황, 그리고 경제적인 여건을 감안한다면 하루빨리 후행 핵연료 주기 정책을 수립하고 이에 대한 기술적 연구에 노력을 기울여야 할 때이다.

후행 핵연료 주기 사업은 수십년이 소요되는 장기 정책이라는 점에서 「WAIT - AND - SEE」 정책을 지양하고 중/장기적 관점에서 정책 수립의 준비를 해야 할 것이다.

각 후행 핵연료 주기의 사업을 수행하는 데 있어 중요한 인자인 경제성, 안전성, 환경 친화성, 기술 자립 가능성 및 대국민 용인 등을 고려하여 가장 적합한 후행 핵연료 주기의 대안을 결정해야 할 것이다.

