

'95 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

세계 혼합핵연료산업의 현황과 전망

이 동 진
한국원자력연구소

요 약

현재 상용규모 이상의 재처리시설을 보유하고 있거나 건설중인 국가는 5개국이며, 이들의 재처리 용량은 약 5,000톤/y에 이른다. 또한 프랑스 등 5개국이 현재 총 440톤/y의 혼합핵연료 가공시설을 보유하고 있으며, 영국, 일본 등이 대규모 시설을 추가로 건설중에 있다. 재순환 산업이 성숙되어 감에 따라 2005년 경에는 전 세계적으로 누증되어 가고 있는 플루토늄 재고상황도 안정될 것이다. 앞으로 경수로가 혼합핵연료 이용의 중심 역할을 하는 가운데 고속증식로 및 신형전환로 등への 이용도 확대될 것으로 보인다. 이제까지 총 32기의 경수로가 혼합핵연료를 사용한 실적이 있는데, 플루토늄의 수급 상황을 감안할 때 2005년 경에 가면 68기 정도의 경수로에 혼합핵연료의 사용이 요구된다. 플루토늄 자체가 유용한 에너지원일 뿐 아니라, 이의 소진 문제도 전 세계적으로 큰 부담이 되고 있는 만큼 사용후핵연료 사용 확대는 당연한 요구이다. 이를 위해서는 재순환 하부구조의 확충과 함께 이에 대한 대중의 거부감을 불식시키는 한편, 각국 정부는 안정적 인허가 환경을 조성함으로써 대규모 투자를 보장할 수 있는 여건을 마련해야 할 것이다.

1. 서론

발전로에서의 플루토늄·혼합핵연료 이용은 매우 민감한 문제이면서도 장차 원자력산업의 진로 모색과 관련하여 중요한 고려사항인 바, 원자력에 기대를 걸고 있는 모든 국가에 있어 조만간 이에 대한 태도결정이 현실적인 요구로 대두될 것이기 때문에 이와 관련된 산업계의 추세에 무관심할 수 없다. 에너지 자원을 보유하고 있지 못한 국가들은 고밀도 기술집약적 에너지라는 점에서 화석연료에 대한 원자력의 비교우위를 인정하고 원자력발전 정책을 추진하고 있듯이, 똑같은 논리에서 비순환주기에 대한 순환주기의 당위성은 인정된다. 실제로 재순환 정책을 채택하고 있는 많은 나라들이 조사후핵연료에 잔류하고 있

는 플루토늄을 매우 유용하고 귀중한 고밀도 자원으로 규정하고 있다. 이와같이 논리의 명징함에도 불구하고 우리나라의 경우 특유의 국제정치적 문제들을 안고 있는 관계로 중차대한 에너지·원자력정책을 결정함에 있어 합리적이고 주체적인 선택에 있어 많은 제약을 받지 않을 수 없는 형편이지만, 그 절실성은 더욱 각별하다고 할 수 있다. 전 세계의 플루토늄 이용 및 혼합핵연료 가공, 재순환 현황과 그 정책환경, 앞으로의 전망 등을 항상 예의 파악하고 있어야 할 필요성은 여기에 있다. 본 논문은 향후 보다 본격적이고 심층적인 연구로 나아가기 위한 하나의 틀로 이를 개관해 본 것이다. 여기서는 혼합핵연료의 산업적 이용에 초점을 맞춰 이를 분석했다.

2. 재순환 정책 결정의 요인들

2.1. 긍정적 요인들

①. 자원을 확대재생산한다. 비순환주기의 자원이용율은 0.5%인데 비해 사용후핵연료의 경수로 재순환의 경우는 0.75%로 늘어나며, 재처리 플루토늄을 고속중식로에 재순환할 경우 우라늄 농축 과정의 연료 손실이 없어지게 되어 자원이용율은 60%로 늘어난다.

②. 환경보전 요구에 부합한다. 우라늄 소비량이 줄어들어 천연자원의 채굴을 억제할 수 있으며, 사용후핵연료의 양을 줄임으로써 그 처분 공간을 줄일 수 있고, 재처리·재순환 과정에서 장수명 핵종을 제거함으로써 그 양과 준위를 줄일 수 있다.

③. 폐기를 처분과 환경정화에 있어 경제성이 있다. 재처리비는 발전비의 6%인데 비해 석탄화력의 탈황·탈질 비용은 발전비의 10~18%에 이른다.

④. 핵무기급 플루토늄을 소진할 수 있다. 상용로에서의 핵무기급 플루토늄 연소는 핵무기 재생산의 소지를 원천적으로 제거함으로써 평화를 정착시키는 좋은 방안이 될 수 있다.

2.2. 부정적 요인들.

①. 플루토늄은 독성이 강한 알파방사선을 방출하며 반감기도 길어서 취급에 어려움이 있다.

②. 재처리·재순환정책이 확산되어 플루토늄 생산국이 늘어날 경우 핵확산 소지가 있다.

3. 재순환 하부구조 현황

3.1. 재처리 현황

1970년대 중반 이래 프랑스, 영국, 일본, 미국 등이 경수로와 가스냉각로, 고속로 등의 재순환을 염두에 두고 시장성과 경제성을 중시한 사용후핵연료 재처리 프로그램들을 추진해 왔다. 현재 재처리시설을 보유하고 있거나 건설 중인 국가는 미국, 영국, 프랑스,

일본, 독일, 이탈리아, 벨기에, 인도, 파키스탄, 아르헨티나, 러시아, 중국 등 12개국이며, 이 중 미국, 영국, 프랑스, 일본, 러시아 등이 상용규모 이상의 시설을 보유 또는 계획하고 있는데, 그 처리용량은 총 5,000톤/y에 이른다. 이들 시설에서 재처리되어 나오는 플루토늄은 주로 경수로, 고속중수로, 고전환로 등에 장전될 혼합핵연료 제조용으로 사용되고 있다. 현재 전 세계의 플루토늄 재고가 약 100톤인 상태에서 이들 시설로부터 재처리된 약 15톤의 플루토늄이 매년 누중되어 가고 있다.

3.2. 혼합핵연료 가공 현황

현재까지 약 18톤의 플루토늄이 약 640톤의 혼합핵연료로 가공되었는데, 총 26만개의 연료봉 중 제작상의 결함이 발견된 것은 5개 뿐으로, 그 기계적, 기술적 건전성이 확인되었다. 현재 전 세계의 상용 혼합핵연료 가공시설 현황은 표 1과 같다.

표 1. 세계의 상용 혼합핵연료 가공시설 현황

국가	시설명	소재지	소유자	운전기간	용량(tHM/y)	실적(tHM)	취급연료
프랑스	CFCa	Cadarache	Cogema	1990 ~	10~15	136 ^a	FBR/LWR
	Melox	Marcoule	"	1995 ~	115		LWR
벨기에	PO	Dessel	BN	1973 ~	35	204 ^b	FBR/LWR
	PI**			?	35		LWR
독일	BEW1*	Hanau	Siemens (구 ALKEM)	1976~94	25~30	178 ^c	FBR/LWR
	BEW2**			?	80~120		LWR
영국	MDF	Sellafield	BNFL	1993 ~	8		LWR
	SMP**	"	BNFL	1997	120		LWR
일본	PFFF2	東海村	PNC	1972 ~	11	120	FBR/ATR
	PFFF3	東海村	PNC	1988 ~	45		FBR/ATR
	六ヶ所村**	六ヶ所村	JNFS	2000 ~	100		LWR

* 가동중지 ** 미완공 a:1991년 5월 현재 b:1992년말 현재 c:1991년말 현재

3.3. 혼합핵연료 사용 실적

3.3.1. 경수로에서의 혼합핵연료 사용

현재 총 35기의 경수로가 노심 일부에 혼합핵연료 사용 허가를 받고 있으며, 그 중 32기가 이를 사용한 실적이 있는데, 그 내역은 표 2와 같다. 그 외에 15기가 추가로 신청중에 있다.

3.3.2. 고속중수로에서의 혼합핵연료 사용

프랑스에서는 1967년 가동을 시작한 Rapsodie, 1974년 가동을 시작한 Phenix, 1986년 가동을 시작한 Superphenix에서 혼합핵연료가 사용되었다. 영국은 1974년부터 고속로 원형로 PFR에서 혼합핵연료를 소량 재순환했으며, 독일은 1970년대 후반 SNR-30이 벨기에의 PO에서 생산된 혼합핵연료를 초기노심으로 장전한 이후 자국의 BEW1 공장에서 생산된 연료를 사용해 왔다. 혼합핵연료를 사용한 일본의 실험용 고속로 '조요'는 1977년,

원형 고속로 '몬주'는 1994년 임계에 도달했다. 일본의 PNC는 1988년 이래 고속로용 혼합핵연료를 생산하고 있다. 러시아는 1969년 건설된 BOR-60 실험용 고속로가 1981년 이래 RAIR 단지에서 생산된 혼합핵연료를 장전해 왔다. 1980년대 후반에는 'Oryol'이라 불리는 특수 자동화 시설에서 생산된 혼합핵연료가 상업 규모의 고속로들인 BN-600, BN-800 등에 사용되었다. 인도는 고속증식로 실험로 FBTR을 가동하고 있으나, 혼합핵연료 사용 내용은 분명치 않다.

4. 국가별 혼합핵연료 산업 현황

4.1. 프랑스

프랑스는 사용후핵연료의 재처리와 재순환에 가장 적극적이다. 일찌기 고속증식로에서 혼합핵연료 사용을 시작했으며, 현재는 경수로에 치중하고 있다. 혼합핵연료의 사용이 인가된 경수로의 수는 16기인데, 2000

년대 초까지 이를 28기로 늘릴 계획이다. 그 간 벨기에의 DEMOX 및 자국의 CFCa 공장에서 혼합핵연료를 공급받아 왔으나, 장차의 사용 확대에 대비해 Marcoule에 120tHM/y의 대규모 Melox공장을 완공, 1995년 초 가동에 들어가고 이에 발맞춰 UP3, UP2-800 등 대규모 재처리시설도 속속 가동에 들어갔다. CEA는 장기적으로 고속증식로를 플루토늄 전소로로 전환하기 위해 1993년 이래 CAPRA 계획을 수행중에 있다.

4.2. 영국

영국은 상용 재처리사업에 적극성을 보이고 있는데 비해 플루토늄 재순환 활동은 상대적으로 부진하여 이제까지 고속증식로 연구개발을 위한 약간의 재순환을 실시해 왔을 뿐, 경수로에서의 혼합핵연료 사용 실적은 없다. 그러나 UKAEA가 최근 여러가지 플루토늄

표 2. 경수로의 혼합핵연료 사용실적(94년 1월 현재)

국가	발전소	노형	장전년도	잠합체수
프랑스	St. Laurent B1	PWR	1987~88, 90~93	96
	" B2	"	1988, 91~92	64
	Gravelines 3	"	1989~93	80
	" 4	"	1989~91, 93	56
	Damoirre 1	"	1990, 92	32
	" 2	"	1993	16
	Chooz, SENA	"	1974~75, 87	14
독일	Karl	BWR	1966~82	95
	Lingen	"	1970	1
	Gundremmingen 1	"	1974~76	64
	Obrigheim	PWR	1972	62
	Neckar 1	"	1982~	32
	Unterweser	"	1984, 87~	48
	Grafenrheinfeld	"	1985, 87~	44
	Philippsburg 2	"	1988~	32
	Grohnde	"	1988~	24
	Brokdorf	"	1988~	24
스위스	Beznau 1	PWR	1978, 1988~	40
	" 2	"	1984~	52
벨기에	BR-3	PWR	1963~69, 72, 76, 79, 81, 84~87	151
미국	Dresden 1	BWR	1967~69	15
	Big Rock Point	"	1969~76	53
	Quad Cities 1	"	1974	5
	Saxton	PWR	1965~69	16
	San Onofre 1	"	1970	4
	Kewaunee	"	1979	4
이탈리아	Garigliano	BWR	1968~75	16
	Trino	PWR	1976	82
네델란드	Dodewaard	BWR	1971~81, 88	12
스웨덴	Oskarsham 1	BWR	1974	3
일본	쓰루가 1	BWR	1986	2
	미하마 1	PWR	1988	4

이용 전략을 검토, 경수로에서의 혼합핵연료 사용의 잇점을 확인하고 Sizewell-B에 건설 중인 PWR이 앞으로 영국의 주력 노형으로 채택될 것으로 보임에 따라 장차 PWR에서의 혼합핵연료 재순환이 필연적으로 예견된다. 혼합핵연료 가공에 있어서는 30년 이상의 오랜 역사를 쌓아 왔는데, 앞으로의 본격적인 경수로에의 혼합핵연료 이용을 앞두고 1993년 Sellafield에서 8tHM/y 규모의 실증시설 MDF의 가동을 시작하는데 이어 지난해에는 대규모 상용시설 SMP를 착공, 1997년 운전에 들어갈 예정이다.

4.3. 벨기에

혼합핵연료 사용 역사에 있어 선구적인 위치에 있는 벨기에는 PO 혼합핵연료 가공공장을 1973년부터 가동, 국내외의 경수로에 공급함으로써 이 분야의 주도적인 역할을 수행해 왔다. 그러나 이와 동형인 P1의 공사가 반핵집단의 작용으로 중단되는 등 어려움이 따름에 따라 사용후핵연료의 직접처분과 재처리 간의 균형잡힌 추진을 검토하여 1998년 이를 확정할 예정인데, 경제성 및 정치적 여건에 신축성 있게 대응하기 위해 현재 재처리 및 혼합핵연료 가공을 해외에 위탁하는 쪽으로 기울고 있다. 현재 2기의 경수로에 대한 혼합핵연료의 사용이 인가되어 있다.

4.4. 독일

전력회사들은 플루토늄을 기본적으로 경수로에 재순환시킬 의향이나 정부는 경제성 결여를 이유로 1980년대 말 재처리를 실질적으로 포기했고, 또한 그간 상당한 실적을 가지고 있는 Hanau의 BEW1 혼합핵연료 가공공장의 가동도 1991년 중단된 후 재가동 허가를 받지 못하고 있는데다가 공정도 90% 상태에서 공사가 중단되어 있는 BEW2의 인가도 법원의 부정적 판결로 그 가동이 불투명하다. 이에 따라 전력회사들은 재처리와 혼합핵연료 가공을 해외에 위탁하는 쪽으로 선회하고 있으며, Siemens도 러시아에 120tHM 규모의 혼합핵연료 공장을 건설하는 방안을 모색하고 있다. 현재 10기의 경수로가 혼합핵연료 사용을 인가받고 있으며, 8기가 추가로 이를 신청 중에 있다. 그 간의 혼합핵연료 장전 실적도 풍부하다.

4.5. 스위스

오랜 혼합핵연료 사용 경험과 양호한 국내적 여건을 바탕으로 대규모 플루토늄 재순환 계획을 입안중이다. Beznau원전은 노심의 40%에 영구적으로 혼합핵연료를 사용할 수 있도록 인가받고 있다. 25년 동안 2기의 Beznau원전에서 생산된 전력의 40%가 혼합핵연료에 의한 것이다. 이 외에 전력회사 NOK는 1996년 Goesgen의 PWR, 1998년 Leibstadt 및 Muehleberg의 BWR에 대한 혼합핵연료 사용 인가를 받을 예정이다. 다만 재처리와 연료 가공은 해외에 위탁하고 있다. 이에 따른 플루토늄 및 혼합핵연료의 반출입이 문제가 되고 있으나, 미국의 호의적인 태도로 이제까지 별 어려움은 없었다.

4.6. 일본

일본의 재처리·재순환정책은 가장 확고하다. 1994년 8월 확정된 제 8차 장기 원자력이용개발계획은 2010년 이전에 10여기의 경수로에 혼합핵연료 재순환을 실현하며, 2000년대 초반에 이를 위한 660MWe급 실증용 신형전환로를 가동하고, 2000년대 초에 대규모의 로카쇼무라 제1 재처리공장, 2010년 경 그 제2공장의 가동을 실현하며, 2000년도 이후 대규모 로카쇼무라 상용 혼합핵연료 가공공장의 가동에 들어가는 등의 내용을 담고 있다. 또한 2000년대 초반 전기출력 67만 KW급의 혼합핵연료 사용 고속증식로 실증로를 착공, 2030년까지 이를 실용화할 계획이며, 민간 차원에서는 플루토늄 전소로서 용융염로 개발의 가능성도 검토되고 있다. 도카이무라 소재 동력로·핵연료개발사업단의 PFPF시설은 이미 120tHM의 고속증식로 및 신형전환로용 혼합핵연료를 가공한 실적이 있다. 1990년대 후반에 혼합핵연료의 사용이 시작될 경수로용 연료는 국내 시설이 완공될 때까지 해외에 위탁할 예정이다. 또한 환경친화형·핵확산저항형 악티나이드 재순환기술, 혼합핵연료 재처리기술 등 관련 연구개발 활동도 활발하다.

4.7. 미국

산업계의 경제적 매력 상실, 회수 플루토늄의 수요 감소 및 까다로운 규제에 의한 불확실성 등으로 그 간 상용 재처리는 부진을 면치 못하다가 1993년 9월 클린턴 정부가 플루토늄의 민간이용을 억제하는 내용의 신핵비확산정책을 발표한 후 미국의 후행핵연료주기 정책은 대체로 비재처리·비순환 쪽으로 정착되어 가고 있는 듯하다. 그러나 그 후에도 에너지부는 ALMR/IFR 등 고속로 관련 기술의 개발에 미련을 가지고 연구인력을 유지하고 System 80+ 등 개량형경수로에의 혼합핵연료 재순환의 길을 다각적으로 모색하는 등 미국 특유의 문제인 핵무기급 플루토늄의 처분 방안을 찾기 위해 고심하고 있다.

4.8. 캐나다

캐나다의 주노형인 CANDU는 현재 비순환주기로 가동되고 있으나, 앞으로의 정치·사회적·기술적 여건이 성숙될 경우 그 초기 핵연료 물질로서 토륨과 플루토늄의 혼합물, 또는 천연우라늄과 플루토늄의 혼합물 사용을 고려하고 해외의 고객들과 공동으로 고연소도 CANDU 노심과 혼합핵연료 설계개발을 모색하고 있다. 그러나 기술·경제적 상황으로 보아 단기간에 실현될 전망은 없다.

4.9. 러시아

기본적으로 순환주기를 채택하고 중기적으로 경수로를 고속증식로로 대체, 누적 플루토늄 재고를 고속증식로에 활용하며, 장기적으로는 VVER 원자로에서도 혼합핵연료를 사용할 계획이다. 가공시설로는 Mayak 단지에 각각 300kg MOX/y 및 1t MOX/y 규모의 Paket, RAIR 단지에 1t MOX/y 규모의 시설 등이 있다. 혼합핵연료의 상업적 생산을 위

해 지난 20년간 다양한 핵연료주기에 대한 심층적 검토가 이루어졌으나 최근 국내 사정의 악화로 그 시행 일정이 지연되고 있다.

4.10. 기타

중국은 원자력발전이 초기에 있어 아직까지 구체적인 재순환계획은 가지고 있지 않으나, 자원보전 측면에서 사용후핵연료 재처리 원칙을 분명히 하고 있다. 인도의 원자력발전 자립 프로그램은 그 1단계에서 열중성자로에서 생성된 플루토늄의 재순환을 실현하는 내용을 담고 있다. 정치적 사정으로 Tarapur원전을 위한 농축우라늄 도입의 길이 막힘에 따라 그 사용후핵연료를 재처리하여 추출된 플루토늄을 독자적으로 혼합핵연료로 가공하여 사용함으로써 연료 자급을 이루고자 하고 있으나, 미국의 저지로 장벽에 부딪혀 있다. 우크라이나도 핵연료의 대 러시아 의존을 탈피하기 위해 전 핵연료주기를 자립한다는 방침을 세우고 사용후핵연료의 재처리 방안을 모색하고 있다.

5. 결론 및 향후 전망

사용후핵연료에 남은 유용한 에너지자원을 뽑아내 혼합핵연료로 재가공, 발전소에 재활용하는 혼합핵연료산업의 발전을 위해서는 사용후핵연료 재처리시설, 혼합핵연료 가공시설, 재순환시설 등이 3위일체를 이루어 균형있게 확충되어야 한다. 현재 세계적으로 영국, 프랑스, 일본 등이 속속 대규모 재처리시설을 갖추어 가고 있고 프랑스의 Melox, 영국의 SMP, 일본의 로카쇼무라공장 등 상용규모의 혼합핵연료 가공설비가 가동을 시작했거나 예정되어 있는 등 혼합핵연료 재순환산업의 발전을 위한 하부구조는 대체로 성숙 추세에 있다. 다만 독일의 BEW2, 벨기에의 P1 등이 반핵집단의 작용 등으로 불확실한 요인이 되고 있다. 혼합핵연료 재순환을 위한 인허가 확대 문제는 최근 새로운 국제적 관심이 되고 있는데, 산업의 균형을 위해서는 2005년 경 68기 정도의 경수로에 혼합핵연료의 사용이 이루어져야 하며, 고속중식로, 신형전환로 등에서의 혼합핵연료 이용도 확대되어야 할 것이다. 이 모든 것이 순조로울 경우 그 시점에서 플루토늄 수급균형도 안정될 것으로 보인다. 재처리 플루토늄의 재순환을 통해 천연자원의 이용 효율을 극대화하는 것은 기본적으로 지구의 미래와 후손들의 복리증진을 위한 시대적 윤리에 부합하는 일이다. 재처리는 또한 경제적이고도 효율적인 사용후핵연료 관리 방안의 하나이기도 하다. 국토가 좁고 부존자원이 빈약한 우리나라의 경우 이러한 사정은 더욱 절실하다. 이러한 기본 인식을 전제로 재처리·재순환에 따르는 부수적인 문제들을 해소함으로써 공동선의 추구를 위한 합의기반이 마련되어야 할 것이다. 다만 이를 위해 첫째, 국제적 합의와 협력 증진 및 안전조치체제 보강을 통한 플루토늄의 평화적 이용기반 구축, 둘째, 재순환설비 확충에 부

용하는 규제·인허가제도 정비, 셋째, 대규모 투자를 보장하기 위한 금융제도의 완비, 넷째, 대중의 거부반응 해소 등이 요구된다. 혼합핵연료 사용의 결정요인이 되고 있는 것은 기술적, 경제적, 환경적 문제이기 보다는 국제적, 정치적, 사회적, 군사적 상황들이다. 이러한 성격에 비춰 볼 때 플루토늄 재순환은 전 지구적 차원의 접근이 요구되는 문제이다. 우리나라는 이러한 사정들을 고려, 장차 변화된 상황에서 있을 수 있는 선택을 위한 만반의 준비를 갖추고 항상 선택의 폭을 최대한 넓게 확보하기 위한 주체적인 노력을 기울여 나가야 할 것이다.

참고문헌

1. J. L. Richard/W. Fournier, Reprocessing and Recycling of Plutonium: A Strategic Shake, Nuclear Europe Worldscan(1993)
2. H. Bay, Results of Nuclear Fuel Recycling and Perspective for the Future, Kyoto Roundtable for the Current Issues on Nuclear Fuel Recycling(1994)
3. E. D. Fei, Comments before the JAIF, Tokyo(1995)
4. P. Goldschmidt/P. Ferbeek, Plutonium Recycling: A Question of Timing, Kyoto Roundtable for the Current Issues on Nuclear Fuel Recycling(1994)
5. Atsuyuki Suzuki, Japan's Nuclear Cycle Policy - The AEC's New Long-Term Programme, Kyoto Roundtable for the Current Issues on Nuclear Fuel Recycling(1995)
6. 한국원자력연구소, KAERI/TR-415, 국내 후행핵연료주기 수용성 증진을 위한 요인분석(1994)
7. J. C. Guyot et al., R&D Plans for the Reprocessing Industry, Kyoto Roundtable for the Current Issues on Nuclear Fuel Recycling(1995)
8. V. B. Ivanov, Utilization of Plutonium Contained in Spent Fuel From Nuclear Power Reactors of Russia, Kyoto Roundtable for the Current Issues on Nuclear Fuel Recycling(1995)
9. 日本原子力産業新聞(1994. 5. 26/1994. 8. 11/1994. 11. 11)
10. Nucleonics Week(1994. 1. 20/1994. 9. 8/1994. 10. 20/1994. 10. 27/12. 22)
11. NuclearFuel(1994. 10. 24)
12. Nuclear Engineering International(1994. 3/1994. 7)
13. BNFL, MOX Technology in BNFL(1995)