



국내 핵연료 개발 현황 및 전망

김 규 태

한전원자력연료(주) 핵연료설계처장

개 요

〈표 1〉에 제시된 바와 같이 핵연료 기술은 핵연료 상용 기술 및 개발 기술로 대별된다. 핵연료 상용 기술은 핵연료 통상 설계 기술, 양산 제조 기술 및 핵연료 운용 기술로 세분될 수 있다.

통상 설계 기술은 인허가 된 설계 코드 및 설계 방법론을 사용하여 원자로심에서 연소될 핵연료의 건전성 및 안전성을 평가하는 기술이며, 양산 제조 기술은 인허가 및 검증된 제조 절차 및 방법에 따라 원전에 상용 공급 될 핵연료를 제조하는 기술이다.

또한 핵연료 운용 기술은 연소중 인 핵연료의 안전성을 유지함과 동시에 원전 운전성 및 경제성을 향상시키는 기술이다.

핵연료 개발 기술은 핵연료 개념 개발 기술 및 실용화 기술로 세분될 수 있다. 개념 개발 기술은 핵연료 재질 개념 개발 기술과 핵연료 형상

개념 개발 기술로 분류될 수 있는 반면, 실용화 기술은 핵연료 개념 개발 단계에서 도출된 재질 및/또는 형상 개념에 대한 상용 원전 적용 타당성을 입증하는 기술과 재질에 대한 시방서 및 형상에 대한 도면/시방서 생산 기술 그리고 시험용 부품/집합체 제조 기술 및 노내의 시험 기술로 분류될 수 있다.

한편 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 프라마툼사 등의 해외 선진사들은 핵연료 상용 기술 및 개발 기술을 이미 확보하여 독자 기술 소유권이 확보된 고유 핵연료를 지속적으로 개발하여 국내외 상용 원전에 공급하고 있다.

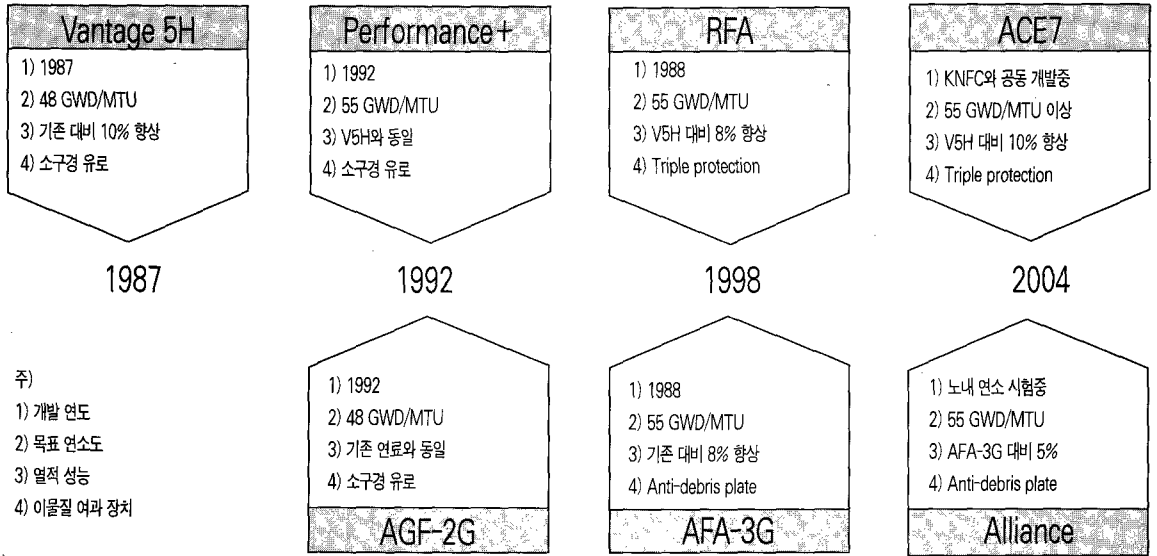
그러나 한전원자력연료(주)는 1980년대 당시 국내에는 핵연료 기술이 확보되지 못한 사유로 해외 선진사로부터 도입된 경수로 핵연료 설계 및 제조 기술을 토대로 하여 핵연료를 자체 설계·제작하여 현재 국내 모든 경수 원전에 공급하고 있다.

해외 경수로 핵연료 기술 현황

경수로 핵연료 관련 세계 원자력 산업계는 미국 웨스팅하우스사 및 Combustion Engineering(CE)사를 합병한 영국 BNFL과 독일 지멘스사를 합병한 프랑스 프라마툼사를 두 축으로 하는 거대 그룹으로 재편되었다.

따라서 경수로 핵연료 관련 세계 원자력 산업계는 영국 BNFL사와 프랑스 프라마툼사로 대표된다고 할 수 있다.

미국 웨스팅하우스사와 프랑스의 프라마툼사는 〈표 1〉에 제시된 상용 기술 및 개발 기술 관련 모든 기술을 확보하고 있다. 즉, 핵연료 기술 개발에 필요한 모든 기반 기술 및 시설을 이미 확보한 후 이러한 핵연료 기술을 토대로 하여 독자 기술 소유권이 확보된 고유 설계 코드, 고유 제조 기술 및 고유 핵연료를 지속적으로 개발하여 상용 원전에 적용하고 있다.



〈그림 1〉 해외 경수로 핵연료 개발 현황

이 해외 선진사들은 이미 확보한 핵연료 시장의 고수는 물론, 신규 핵연료 시장 공략을 위하여 가격 및 품질 경쟁력을 갖춘 핵연료 개발에 전사적인 노력을 경주하고 있다.

〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 미국 웨스팅하우스사는 1980년대에 Vantage 5H, 1990년대에는 Performance+와 RFA, 2000년대에는 한전원자력연료(주)와 공동으로 ACE7 연료를 개발하였다.

한편 프랑스 프라마토프사는 미국 웨스팅하우스사로부터 기술 도입한 후 독자 기술 소유권이 확보된 AFA 연료를 개발하였으며, 이 연료를 개량하여 미국 웨스팅하우스사의 RFA 연료와 동등 기술 수준

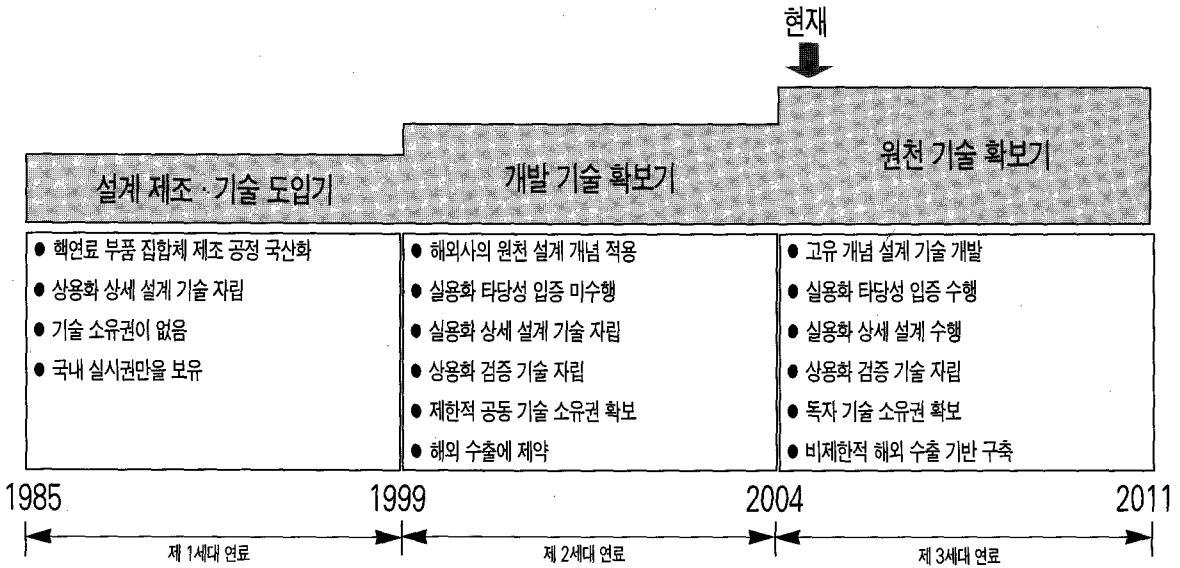
〈표 1〉 핵연료 기술 종류

	종류	내용
상용 기술	통상 설계 기술	상용 핵연료 건전성 및 안전성 평가 기술
	양산 제조 기술	상용 핵연료 제조 기술
	핵연료 운용 기술	상용 핵연료 안전성, 운전성 및 경제성 제고 기술
개발 기술	개념 개발 기술	핵연료 재질 개념 개발 기술 부품/집합체 형상 개념 개발 기술
	실용화 기술	핵연료 개념 상용 적용 타당성 입증 기술 상세 설계 기술/제조 기술/노내의 시험 기술

의 AFA-3G 연료를 개발하였다. 현재는 AFA-3G 연료에 비해 성능이 향상된 Alliance 연료를 개발하여 노내 연소 시험중에 있다.

상기 해외 선진사들의 핵연료 개발 목표는 대부분 열적 성능, 고연소 성능 향상 및 손상률 저감에 두

고 있다. 이는 최근 핵연료 개발 방향 설정에 영향력이 점차 커지고 있는 핵연료 사용자, 즉 전력 회사들의 요구를 수용하기 위해 무결함의 신뢰성 있는 핵연료는 물론 출력 증강, 수명 연장, 장주기 운전 등이 가능하



〈그림 2〉 국내 경수로 핵연료 기술 확보 이력 및 전망

도록 고출력 및 고연소 핵연료의 개발이 필수적이기 때문이다.

해외 선진사들의 핵연료 개발에 대한 구체적인 방향을 살펴보면, 열적 성능 향상을 위한 지지격자 유동 혼합 형상 개발, 연료 손상의 주요 원인이 되고 있는 이물질 노내 유입 방지를 위한 이물질 여과 장치 개발, 고연소 성능 목표 달성을 위한 신탍금 피복관 재질 개발, 연료봉과 지지격자 간의 프레팅 마모 방지를 위한 지지격자 스프링/딤플 접촉 면적 증가, 내진 성능 향상을 위한 지지격자 기계적 강도 증가 등으로 요약될 수 있다.

국내 경수로 핵연료 기술 현황

기술 소유권 확보 여부 및 성능 수준에 따라 국내 경수 원전에 공급하였거나 공급 예정인 핵연료는 〈그림 2〉에서 보듯이 제1세대, 제2세대 및 제3세대 핵연료로 구분될 수 있다.

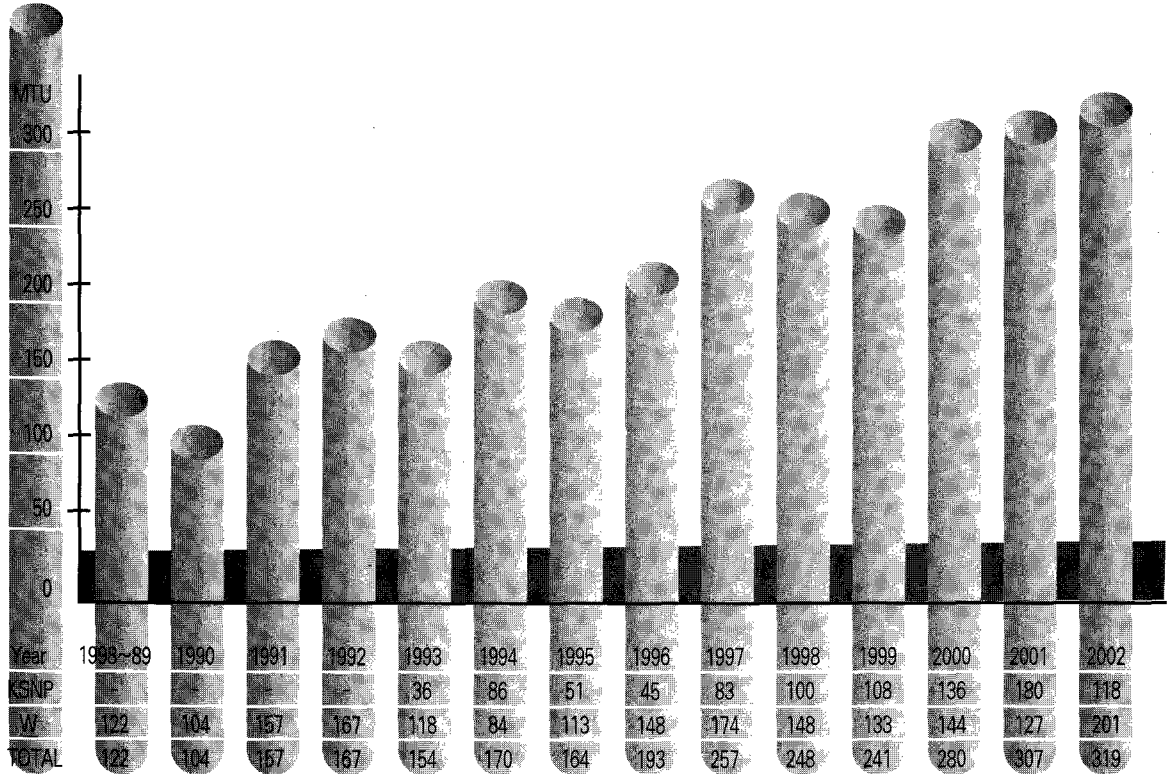
1. 제1세대 핵연료: 해외 선진사로부터 기술 도입된 핵연료

한전원자력연료(주)는 1985년부터 해외 선진사로부터 경수로 핵연료 설계 및 제조 기술을 도입하여 수입에 의존해 오던 경수로 핵연료 부품 및 집합체 제조 공정을 국산화

하고 국내 원전에 소요되는 핵연료를 전량 공급중이다.

제1세대 핵연료 국산화를 통하여 〈표 1〉에 제시된 핵연료 기술 중 '상용 기술'은 완전 자립하였지만 '개발 기술'은 확보하지 못하였다.

즉, 현재 국내 원전에 상용 공급 중인 경수로 핵연료는 제1세대 핵연료로서 해외 기술 도입선이 이 연료에 대한 원천 기술을 독점적으로 보유하고 있는 반면, 한전원자력연료(주)는 국내 실시권만을 보유하고 있으므로 해외 기술 도입선의 동의 없이 제1세대 핵연료의 해외 수출은 곤란하다고 할 수 있다.



KSNP : Korea Standard Nuclear Plant W : Westinghouse type Plant

〈그림 3〉 국내 경수로 핵연료 수요량 변화 추이

2. 제 2세대 핵연료: 해외 선진사와 공동 개발된 핵연료

한전원자력연료(주)는 상기 제1세대 연료의 성능 향상 및 핵연료 개발 기술 확보를 위하여 1999년 10월에 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 한국표준형 원전용 개량 핵연료(PLUS7)의 개발을 착수하였다.

2002년 3월에 PLUS7 개발을 완료한 후 2006년 상용 공급을 목

표로 PLUS7 시범 집합체 4다발에 대한 노내 연소 시험을 수행중에 있으며 현재 1주기 노내 연소 시험을 성공적으로 완료하였다.

한편, 한전원자력연료(주)는 PLUS7 개발과 병행하여 웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료(ACE7) 개발을 2001년 8월에 착수하여 2004년 7월에 개발을 완료할 예정이다.

상기 제 2세대 핵연료 개발을 통

하여 한전원자력연료(주)는 해외 선진사와 동등한 기술 수준의 핵연료를 보유하게 되었으며, 또한 〈표 1〉에 제시된 ‘핵연료 실용화 기술’ 중 핵연료 상세 설계/제조/노내의 시험 기술 부분을 자립할 수 있었다.

그러나 제1세대 핵연료와는 달리 제2세대 핵연료의 경우 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 소유권을 보유하고 있지만 해외 선진사가 원천 기술을 대부분 보유하고 있으며



웨스팅하우스(WH)형 원전용 핵연료	KOFA	V-5H	RFA	ACE7
	<ul style="list-style-type: none"> • Siemens사와 공동 개발 • 허용 연소도 - 48GWD/MTU • 열적 성능 - 혼합 날개 없음 • 이물질 여과 기능 - 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • WH사 개발 연료 • 허용 연소도 - 48GWD/MTU • 열적 성능 - KOFA 대비 10% 향상 • 이물질 여과 기능 - 유로 구경 축소 	<ul style="list-style-type: none"> • WH사 개발 연료 • 허용 연소도 - 55GWD/MTU • 열적 성능 - V5H 대비 8% 향상 • 이물질 여과 기능 - 3중 방어 개념 	<ul style="list-style-type: none"> • WH사와 공동 개발중 • 허용 연소도 - 55GWD/MTU • 열적 성능 - V5H 대비 10% 향상 • 이물질 여과 기능 - 3중 방어 개념
한국표준형 원전용 핵연료	Standard		Guardian	PLUS7
	<ul style="list-style-type: none"> • (구) ABB-CE사 개발 연료 • 허용 연소도 - 45GWD/MTU • 열적 성능 - 혼합 날개 없음 • 이물질 여과 기능 - 없음 		<ul style="list-style-type: none"> • (구) ABB-CE사 개발 연료 • 허용 연소도 - 47GWD/MTU • 열적 성능 - Standard 연료와 동일 • 이물질 여과 기능 - Anti-debris 하부 지지격자 	<ul style="list-style-type: none"> • WH사와 공동 개발 • 허용 연소도 - 55GWD/MTU 이상 • 열적 성능 - Guardian 대비 10% 향상 • 이물질 여과 기능 - 3중 방어 개념

〈그림 4〉 제1세대 및 제2세대 국산 핵연료 성능

로 제2세대 연료의 해외 수출도 부분적 제약이 상존하고 있다.

3. 제 3세대 핵연료: 독자 개발에 의해 기술 소유권이 확보될 고 유 핵연료

아직 개발되지 않은 실체가 없는 핵연료로서, 과학기술부의 원자력 중장기 개발 사업으로 추진중인 한국원자력연구소의 「경수로용 신형 핵연료 기술 개발」 과제를 통하여 확보한 고유 핵연료 부품 기본 개념과 한전원자력연료(주)가 제1세대 및 제2세대 핵연료 개발을 통해 확보된 상용 기술 및 개발 기술을 접목하여 국내 기술진에 의해 독자적으로 개발될 핵연료를 제 3세대 핵연료로 정의한다.

국내 핵연료 공급 이력 및 공급 계획

고리 1호기가 1978년 4월부터 가동한 이후 국내 전력 생산량 증원 차력 발전이 차지하는 비증은 꾸준히 증가해 왔다.

2004년 5월 현재 14개 호기의 경수 원전과 4개 호기의 중수 원전이 가동중에 있으며, 10개 호기의 경수 원전이 건설중에 있다.

〈그림 3〉에 보듯이 원자력 발전의 비중이 증가함에 따라 경수로 핵연료의 수요량은 1990년도에 약 100MTU 정도에서 2002년도에 약 320MTU으로 증가되었다. 또한 2003년도 국내 핵연료 수요량은 경수로 약 350MTU 및 중수로 약

400MTU 정도로써 총750MTU에 도달되었다.

국내 경수 원전에 상용 공급되고 있는 제1세대 핵연료는 원전 기술을 보유하고 있는 해외 선진사로 기술 도입된 핵연료이다. 그러나 한전원자력연료(주)는 해외 선진사로부터 기술 도입된 제1세대 핵연료의 설계 및 제조 기술을 꾸준히 개선하여 핵연료 건전성, 경제성 및 신뢰성 제고에 기여하였다.

또한 앞에서 기술한 바와 같이 미국 웨스팅하우스사와의 공동 개발을 통하여 제1세대 핵연료에 비해 성능이 대폭 향상된 제2세대 핵연료 즉 PLUS7 및 ACE7 연료 개발을 성공적으로 추진하였다.

〈그림 4〉에는 현재까지 국내 경

Type	Plant	Array	1990	1995	2000	2005	2010
W	Kori-1	14×14		KOFA	OFA		
	Kori-2	16×16			STD		16ACE7
	Kori-3/4	17×17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7
	YGN-1/2	17×17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7
	UCN-1/2	17×17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7
KSNP	YGN-3/4	16×16		STD	Guardian	PLUS7	
	YGN-5/6	16×16		STD	Guardian	PLUS7	
	UCN-3/4	16×16		STD	Guardian	PLUS7	
	UCN-5/6	16×16			Guardian	PLUS7	
KSNP+	Shin-Kori-1/2	16×16			Guardian	PLUS7	
	Shin-WS-1/2	16×16			Guardian	PLUS7	
APR1400	Shin-Kori-3/4	16×16				PLUS7	
CANDU	WS-1/2/3/4	37FRs			CANDU		

〈그림 5〉 국산 핵연료 공급 이력 및 공급 계획

수 원전에 공급하였거나 향후 공급 예정인 제1세대 핵연료 및 제2세대 핵연료의 성능이 나타나 있으며 〈그림 5〉에는 국산 핵연료의 공급 이력 및 공급 계획이 나타나 있다.

국내 웨스팅하우스 17x17형 원전에는 제1세대 핵연료인 KOFA 연료 및 Vantage 5H(V-5H) 연료 공급에 이어 RFA 연료를 공급하고 있다. 2004년 5월 현재 국내 웨스팅하우스 17x17형 원자로심에는 V-5H 및 RFA 연료가 연소중에 있다.

한편 제2세대 핵연료인 ACE7 연료는 2008년부터 상용 공급 예

정이며, 상용 공급 인허가 자료 확보를 위하여 ACE7 연료의 시범 집합체 4다발을 2005년도부터 국내 웨스팅하우스 16x16형 및 17x17형 원전에서 각각 연소 시험 예정이다.

V-5H 연료 대비 ACE7 연료의 성능을 살펴보면, 피복관 재질 및 부품/집합체 형상 변경을 통하여 허용 연소도는 약 15% 증가되었고, 중간 유동 혼합기 추가 부착 및 중간 지지격자 혼합 날개 최적화를 통하여 열적 성능은 약 10% 정도 향상되었으며, 지지격자 스프링/덤플과 연료봉 간의 접촉 면적을 증가시킴으로써 프래팅 마모 저지 성능이

대폭 향상되었다. RFA 연료에 비해서는 열적 성능은 약 2% 정도 향상되었다.

한국표준형 원전에는 제1세대 핵연료인 Standard 연료 공급에 이어 Guardian 연료를 공급하고 있으며, 2004년 5월 현재 한국표준형 원자로심에는 Standard 연료 및 Guardian 연료가 연소중에 있다.

한편 제2세대 핵연료인 PLUS7 연료는 2006년부터 상용 공급 예정이며, 상용 공급 인허가 자료 확보를 위하여 PLUS7 연료의 시범 집합체 4다발을 2002년 말부터 울



진 3호기에서 연소 시험중에 있다.

Guardian 연료 대비 PLUS7 연료의 성능을 살펴보면, 피복관 재질 및 부품/집합체 형상 변경을 통하여 허용 연소도는 약 17% 증가되었고, 중간 지지격자 혼합 날개 부착을 통하여 열적 성능은 약 10% 정도 향상되었으며, 지지격자 스프링/딤플과 연료봉 간의 접촉 면적을 증가하여 프레팅 마모 저지 성능이 대폭 향상되었다.

제3세대 핵연료 개발 계획

정부는 1994년도에 「2030년을 향한 원자력 장기 정책 방향」을 수립하였고, 이를 체계적이고 일관성 있게 추진하기 위해 매 5년마다 「원자력 진흥 종합 계획」을 수립하여 추진하고 있다.

「제 2차 원자력 진흥 종합 계획(2002~2006)」에서는 ‘핵연료 관련 기술을 고도화하여 원자력 산업의 국제 경쟁력을 확보하고 수출 산업으로 육성’ 함을 ‘국가 원자력 정책’의 5대 기본 목표 중 하나로 선정하였다.

상기 기본 목표 달성을 위한 정부의 주요 추진 전략에 의하면, 단기적으로 2006년까지 안전성과 경제성이 우수한 한국 표준형 원전용 개량 핵연료를 개발·상용화하고, 중·장기적으로는 2015년까지 독자 기술 소유권을 보유한 세계 최고

수준의 고유 핵연료 설계 및 제조 능력을 확보하도록 되어 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 한전원자력연료(주)는 한국표준형 원전용 개량 핵연료(PLUS7) 및 웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료(ACE7) 개발을 성공적으로 추진함으로써 국가 원자력 정책 기본 목표 달성을 위한 단기적 추진 전략을 차질없이 수행하고 있다. 참고로, 한전원자력연료(주)는 이러한 제2세대 핵연료 개발을 통하여 해외 선진사와 동등한 수준의 핵연료 개발 능력을 보유하고 되었다.

한국원자력연구소는 1997년부터 「경수로용 신형 핵연료 기술 개발」 과제를 통하여 핵연료 개발 관련 원천 기술 및 노의 실증 시험 시설 등과 같은 핵연료 개발 관련 기반 시설을 확보 중에 있다. 또한 고유 피복관 재질 및 고유 지지격자 설계 개념을 개발함으로써 고유 핵연료 개발을 위한 기반을 구축하였다.

따라서 현재 국내에는 독자적으로 고유 핵연료 개발에 필요한 대부분의 기술 및 기반 시설이 확보되어 있으므로 2004년도는 국내 기술진에 의해 제3세대 핵연료를 독자적으로 추진할 수 있는 적기라고 판단된다.

이에 따라 한전원자력연료(주)는 독자 기술 소유권이 확보된 고성능 고유 핵연료 즉 제3세대 핵연료 개발 계획을 수립하였으며, 2004년

도 하반기부터 제3세대 핵연료 개발을 착수할 예정이다. 제3세대 핵연료의 상세 개발 목표, 성능 목표 및 개발 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

○ 최종 목표

비제한적 핵연료 수출이 가능하도록 독자 기술 소유권 및 제2세대 핵연료 대비 동등 이상의 성능이 확보된 경수로용 고유 핵연료 개발

○ 단계별 목표

- 1단계(3년) : 고유 핵연료 후보 모형 선정
- 2단계(4년) : 고유 핵연료 상세 설계/제조/노의 시험/시범 집합체 제조

○ 성능 목표

- 연소 성능 : 영역 평균 연소도 55GWD/MTU 이상
- 열적 성능 : 제2세대 핵연료 대비 열적 성능 우수
- 신뢰성 : 이물질 및 프레팅 마모 측면에서의 무결함 연료 지향
- 내진 성능 : 0.3g 지진 요건 만족

○ 연구 내용

- 1단계(3년)
 - 개발 목표 및 요건 설정
 - 고유 핵연료 부품 후보 모형 선정
 - 국내 노의 실증 시험 시설 구축
- 2단계(4년)
 - 고유 핵연료 부품/집합체 상세

설계

- 고유 핵연료 제조 기술 개발 및 시험용 핵연료 제조
- 국내 노의 실증 시험 시설 구축 완료 및 노의 실증 시험 수행
- 고유 핵연료 시범 집합체 제조 상기 계획에 따라 제3세대 핵연료 개발을 성공적으로 완료할 경우, 한전원자력연료(주)는 해외 선진사와 대등하게 비제한적 핵연료 수출 기반을 확보할 수 있으며, 현재 국내외에서 개발 전략이 활발히 논의되고 있는 제4세대(GEN-IV) 원전에서 요구되는 다목적 고성능 핵연료 개발을 주도할 수 있는 원천 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 해외 선진사와 대등한 핵연료 개발 역량을 국내에 확보함으로써 향후 해외 선진사들과의 세계 핵연료 시장 선점을 위한 무한 기술 경쟁에 동참할 수 있을 것이다.

한편 제2세대 핵연료 대비 성능이 향상된 제3세대 핵연료를 국내 경수 원전에 활용할 경우 핵연료 주기비 절감 및 원전 운전 용이성 제고에 기여할 수 있을 것이다.

요약

해외 선진사로부터 경수로 핵연료 설계 및 제조 기술을 도입하여 제1세대 핵연료 국산화를 달성하였고 현재 국내 경수 원전에는 제1세대 핵연료가 전량 공급되고 있으나,



한전원자력연료(주)는 한국표준형 원전용 개량 핵연료(PLUS7) 및 웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료(ACE7) 개발을 성공적으로 추진함으로써 국가 원자력 정책 기본 목표 달성을 위한 단기적 추진 전략을 차질없이 수행하고 있다.

국내 실시권만을 보유하고 있으므로 핵연료 해외 수출에 대한 많은 제약이 있다.

한편 제1세대 연료의 성능을 향상시키고 국내 부족한 핵연료 개발 기술을 확보하기 위하여 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 제2세대 핵연료인 한국표준형 원전용 개량 핵연료(PLUS7) 및 웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료(ACE7) 개발을 성공적으로 수행하였으며, 2006년 및 2008년부터 PLUS7 및 ACE7 연료를 한국표준형 원전 및 웨스팅하우스형 원전에 각각 상용 공급할 예정이다. 그러나 제2세대 연료 또한 해외 수출에 대한 부분적인 제약이 상존하고 있다.

따라서 해외 선진사와 대등한 핵연료 기술을 확보하고 핵연료 해외 수출 제한 사항을 제거하기 위하여 독자 기술 소유권이 확보된 제3세대 핵연료 개발을 2004년 하반기부터 착수할 계획이다.

제3세대 핵연료 개발 시에는 PLUS7 및 ACE7 연료 개발 경험 및 개발 기술과 경수로용 신형 핵연료 기술 개발을 통해 확보된 고유 핵연료 부품 개념 및 개발 기반 시설을 활용할 예정이다.

향후 제3세대 핵연료를 성공적으로 개발한 후에는 해외 선진사들과 대등하게 핵연료 수출을 위한 무한 기술 경쟁에 동참할 수 있을 것이다. ☼