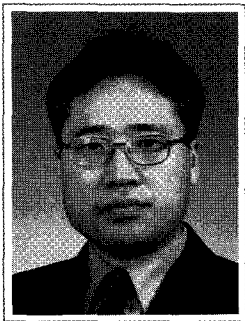




한국표준형 개량핵연료(PLUS7) 개발

김 규 태

한전원자력연료(주) 핵연료개발팀장



개발 배경 및 필요성

국내 운전중인 경수로로는 총 13기이며, 웨스팅하우스형 원전 8기(고리 1·2·3·4호기, 영광 1·2호기, 울진 1·2호기) 및 한국표준형 원전 5기(영광 3·4·5호기, 울진 3·4호기)로 대별된다.

1980년대 초반까지는 경수로에 소요되는 핵연료를 전량 미국 웨스팅하우스(WH)사 및 프랑스 프라타모사로부터 수입하였다. 그러나 전량 해외 수입에 의존하였던 경수로 연료를 국내 원자력 연료

전문 기관인 한전원자력연료(주)에서 자체 생산하기 위하여 1980년대 중반부터 국내 기술진과 독일 Siemens사가 공동으로 경수로 연료를 개발하였으며 1989년부터 국산 핵연료를 공급하기 시작하였다.

현재는 국내 웨스팅하우스형 17×17 원전에 미국 WH사가 1980년대에 개발한 Vantage-5H 핵연료를 공급하고 있으며, 한국표준형 원전에는 CE사가 1980년대에 개발한 표준형 핵연료를 공급하고 있다.

원자력 선진국의 핵연료 공급사들은 초기 단계에는 핵연료의 경제성보다는 건전성 확보에 주력한 반면, 1980년대 이후에는 핵연료 공급사별로 축적된 연료 노내 연소자료 및 연료 개발 경험을 바탕으로 전력 회사들이 요구하는 고연소 성능, 장주기 운전, 원전 출력 및 이용률 향상, 주기비 절감 등을 만족할 수 있도록 경제성 및

운전성이 우수한 개량 핵연료를 개발중 또는 상용 공급중이다.

상술하면, WH사는 상용 발전소에 장전되고 있는 핵연료 개발 및 개량의 선두 주자로서 1983~1989년 사이에 영역 평균 방출 연소도 45,000~50,000 MWD/MTU급의 VANTAGE 5, VANTAGE 5H, VANTAGE+를 개발하여 상용화하였고, 1992년도에는 영역 평균 방출 연소도 55,000MWD/MTU를 목표로 하는 Performance+를 개발하여 상용화하였다.

1998년도에는 영역 평균 방출 연소도는 Performance+와 동일하나 지지 격자 혼합 날개 설계 개선으로 열적 성능을 향상시키고 집합체와 지지격자 진동에 의한 연료봉 프레팅마모 손상 방지를 위한 지지 격자의 스프링/딴플 설계 개선, 제어봉 비정상 삽입 문제 관련 안내관 두께 증가 등을 도입한 Robust Fuel Assembly

〈표 1〉 미국 웨스팅하우스사의 핵연료 설계 특성

항목	V5H	Performance +	RFA	NGF
개발 연도	1987	1992	1998	-
봉 연소도 ¹⁾ (영역 평균)	62,000 MWD/MTU (48,000 MWD/MTU)	72,000 MWD/MTU (~55,000 MWD/MTU)	72,000 MWD/MTU (~55,000 MWD/MTU)	72,000 MWD/MTU (55,000 MWD/MTU)
열적 여유도	OFA 대비 20% 증가	V5H와 동일	V5H 대비 ~17% 향상	RFA 대비 >5% 향상
연료봉	Zry-4 Axial Blanket	ZIRLO™ 피복관 Enriched A/B Variable Pitch Spring	ZIRLO™ 피복관 Enriched A/B Variable Pitch Spring	Optimized ²⁾ ZIRLO™ Enriched A/B Variable Pitch Spring
중간 및 혼합 지지 격자	Zry-4, Mixing Vane Diagonal Spring	ZIRLO™ 재질 Mixing Vane Diagonal Spring	ZIRLO™ 재질 Modified MV ³⁾ Diagonal Spring	Optimized ZIRLO™ Optimized MV, Spring/Dimple
안내관	Imp. Zry-4	ZIRLO™ 재질	ZIRLO™ 재질, 두께 증가	Optimized ZIRLO™, 일자형 안내관
상단 고정체	RTN ⁴⁾ (Insert/Lock Tube)	Low Cobalt RTN (Insert/Lock Tube)	Low Cobalt RTN (Insert/Lock Tube)	Integrated T/N (Insert/Lock Tube)
하단 고정체	DFBN ⁵⁾	Low Cobalt DFBN	Low Cobalt DFBN	Low Cobalt DFBN
이물질 여과	Small Hole	Triple Protection	Triple Protection	Triple Protection

(RFA) 연료를 개발하여 현재 상용 공급중이다.

현재는 핵연료의 신뢰성과 안전성이 향상되고 열적 여유도를 더욱 증대시키기 위한 차세대 핵연료 개발을 한전원자력연료(주)와 공동으로 추진하고 있으며 이들의 주요 설계 특성을 〈표 1〉에 제시하였다.

프랑스 프라마톰사는 1997년도에 AFA, AFA2G 연료를 개발하여 상용화하였으며, 1998년도에 영역 평균 방출 연소도가 45,000~55,000MWD/MTU인 AFA3G를 개발하여 상용화하였다.

AFA3G 설계에서는 외경이 동일한 일자형 고강도 안내관, 최적 설계된 상단 고정체 누름 스프링, 인코넬 스프링과 지르칼로이판으로 구성된 Bi-Metallic 중간 지지 격자, 이물질 여과 하단 고정체인 Trapper 및 M5 피복관 재질을 채택하였다.

AFA3G는 열적 여유도가 AFA2G 대비 약 15% 향상되었으며 Trapper를 채택함으로써 이물질에 의한 손상을 방지하여 집합체의 건전성을 향상시켰다.

프랑스 프라마톰사도 WH사와 마찬가지로 핵연료의 신뢰성과 안전성이 향상되고 열적 여유도를 더욱 증대시킨 차세대 핵연료인 Alliance의 개발을 추진하고 있으며 이들의 주요 설계 특성을 <

- 1) 연료봉 최대 연소도 (현재 인허가 연소도: WH 62,000 MWD/MTU, KNFC 60,000 MWD/MTU)
- 2) Optimized ZIRLO™ : Process Optimization according to Each Component
- 3) Modified MV : Closed Window, Longer Vane, Symmetric Vane Array
- 4) RTN : Removable Top Nozzle
- 5) DFBN : Debris Filtering Bottom Nozzle(small hole)

표 2)에 제시하였다.

한편 국내 경수로에 상용 공급 중인 핵연료는 원자력 선진국들의 개량 핵연료에 비해 연소도·열적 성능·안전성 및 신뢰성 등이 뒤떨어져 있으며 지속적으로 원자력 선진국으로부터 개발된 기술을 도입하고 있는 실정이다.

따라서 향후 핵연료의 시방 개발에 대비하고 원자력 선진국의 기술 예측으로부터 탈피하기 위해 원자력 선진국이 보유하고 있는 개량 핵연료에 비해 성능이 대등 또는 보다 우수한 개량 핵연료를 조속히 개발하는 것이 시급하다고 할 수 있다.

이러한 개량 핵연료 개발 필요성에 의거하여 한전원자력연료(주)에서는 핵연료의 가격과 품질

측면에서 국제 경쟁력이 확보된 한국 표준형 개량 핵연료 개발 과제를 과학기술부의 원자력 연구개발 사업 과제로 1999년 4월부터 2002년 3월까지 3년 동안 성공적으로 수행하였다.

개발 업무 수행 내용

한국 표준형 개량 핵연료 개발 과제의 목표는 1999년 4월부터 2002년 3월까지 개량 핵연료 설계·제조 및 노외 실증 완료 후 한국 표준형 원전에서 장전될 시범 집합체 4다발을 제작 완료하는 것이다.

한국 표준형 개량 핵연료의 성능 목표치는 영역 평균 방출 연소도를 55,000 MWD/MTU 이상으



〈표 2〉 프랑스 프라마투사의 핵연료 설계 특성

항목	AFA 2G	AFA 3G	Alliance
개발 연도	1992	1998	-
봉 연소도 (영역 평균)	60,000 MWD/MTU (48,000 MWD/MTU)	72,000 MWD/MTU (~55,000 MWD/MTU)	72,000 MWD/MTU (55,000 MWD/MTU)
열적 여유도	-	AFA 2G 대비 15% 향상	AFA 3G 대비 10% 향상
연료봉	Zry-4	M5™ 피복관 Rod Length Increase	M5™ 피복관 Rod Length Optimization
중간 및 혼합 지지 격자	Zry-4, Mixing Vane Bi-Metallic Spring	Zry-4 재질 Mixing Vane, IFM Bi-Metallic Spring ¹⁾	M5™ 재질 Optimized MV, IFM Mono-Metallic Spring
안내관	Zry-4	M5™ 재질 Monobloc™ 재질	M5™ 재질 Monobloc™ (일자형)
상단 고정체	RTN (Screw, Sleeve, Welding)	RTN, Reduced Height (Screw, Sleeve, Bulge) HD Spring Optimization	QRTN ²⁾ HD Spring Optimization
하단 고정체	BN with Screen Filter	Trapper™ BN ³⁾	Trapper™ BN
이물질 여과	Large Hole/ Screen Filter	Ribbed Structure/ Anti-Debris Plate	Ribbed Structure/ Anti-Debris Plate

- 1) Bi-Metallic Spring: Zry Spacer Grid with Inconel Spring
- 2) QRTN : Quick Removable Top Nozzle
- 3) Trapper™ BN : Ribbed Structure with Anti-Debris Plate

로 증가시키고, 현재 한국 표준형 원전에서 사용중인 핵연료 대비 10% 이상의 열적 성능 및 내진 성능을 향상시키며, 이물질 및 연료봉 진동으로 인한 프레팅 마모 손상을 배제할 수 있는 무결함 연료설계 등으로 요약될 수 있다.

한국 표준형 개량 핵연료(PLUS7)의 개발 일정 및 개발 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ◆1차년도(1999. 4~2000. 3)
 - 개량 핵연료를 공동으로 개발할 해외 협력사 선정
 - 개량 핵연료 부품 및 집합체 설계
 - 노의 실증 시험용 시험 부품

제조 착수

- ◆2차년도(2000. 4~2001. 3)
 - 노의 실증 시험용 시험 부품 제조 완료
 - 개량 핵연료 열적 성능시험 : Critical Heat Flux 시험
 - 개량 핵연료 부품 기계적 및 수력적 성능 시험
- ◆3차년도(2001. 4~2002. 3)
 - 노의 실증 시험용 시험 집합체 3다발 제작
 - 시험 집합체 기계적/수력적/진동 특성 시험
 - 노내 연소 시험용 개량 핵연료 시범 집합체 4다발 제작
 - 시범 집합체 노내 장전용 인

허가 자료 생산

한편 상기 한국 표준형 개량 핵연료(PLUS7) 시범 집합체 4다발은 2002년 12월부터 4주기 동안 한국 표준형 원전에서 연소될 예정이다.

1. 해외 협력사 선정

한국 표준형 개량 핵연료(PLUS7) 공동 개발을 위한 해외 협력사 선정을 위하여 CE사·Siemens·WH사 등 3개사에 Invitation-to-Bid를 발송하였으며 3개사는 개량 핵연료 개발 관련 경제성·기술성 및 계약 조건 등을 한전원자력연료(주)에 제시하였다.

한전원자력연료(주)는 3개사의 경제성·기술성 및 계약 조건 등의 평가 항목별로 가중치를 부여하여 최고점을 획득한 WH사를 해외 협력사로 선정하였다. 한전원자력연료(주)와 WH사 간의 공동 개발 계약서에 대해 1999년 9월 7일자로 정부 승인을 획득하였다.

2. PLUS7 연료의 부품 및 집합체 설계

WH사가 이미 보유하고 있는 미국 CE형 16×16 원전(Palo Verde)용 C-80 연료 설계, WH형 17×17 원전용 Performance+ 연료 설계 등을 참조로 하여

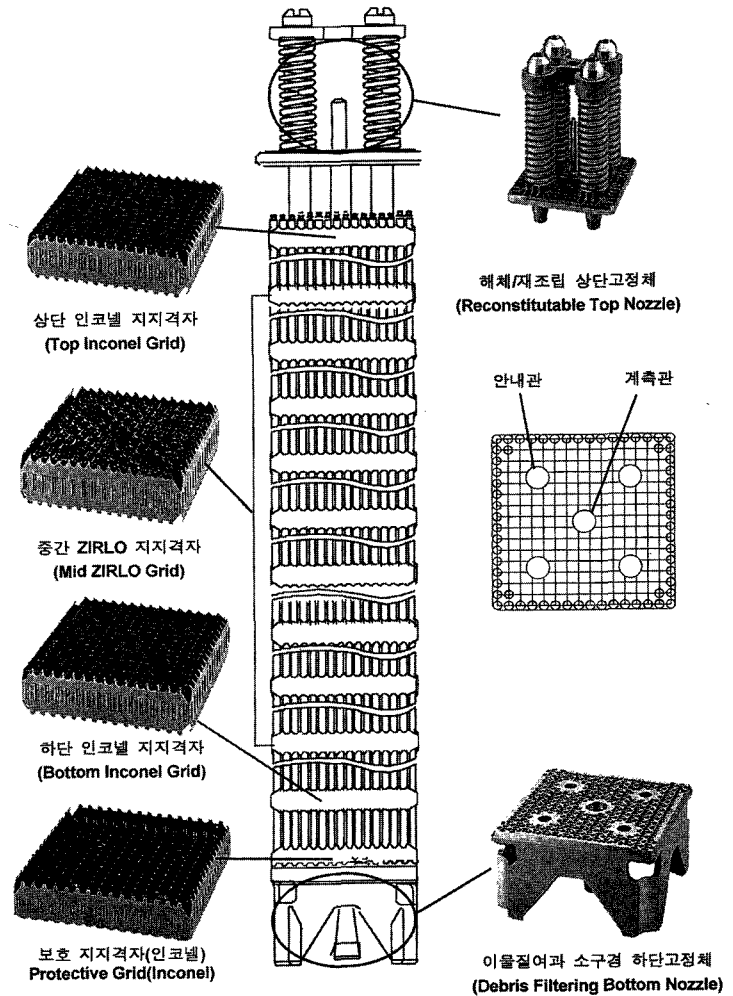
PLUS7 연료 부품 및 집합체 설계를 완료하였다.

즉 PLUS7 집합체 설계에 대해서는 조사 성장, Seismic/LOCA 하중에 따른 집합체 건전성, 고연소 성능, 집합체 수력적 들림 관련 설계 여유도, 제어봉 낙하 시간, 안내관 마모, 진동 특성 등을 평가하여 집합체 부품 형상 및 재질 설계를 하였다. PLUS7 집합체 및 부품 개략도를 <그림 1>에 나타내었다.

중간 지지 격자 혼합 날개 형상에 따른 열적 성능, 지지 격자 스프링/딴플 설계에 따른 프리팅 마모 저지 성능, 지지 격자 진동 특성, 지지 격자 제조성 등에 대한 평가 결과를 토대로 하여 <그림 2>에서 보는 바와 같이 혼합 날개 부착 ZIRLO 재질의 중간 지지 격자, 직선형 지지 격자판, Contour 스프링/딴플을 개발하였다.

한편 PLUS7 연료의 상하단 지지 격자의 설계 특징으로는 혼합 날개가 없고, 인코넬 재질의 직선형 지지 격자판, 궁형 스프링 및 수평형 딴플로 요약될 수 있다.

상단 고정체의 해체/재조립 용이성, 제조 용이성, 기계적 강도, 홀드다운 스프링 조사 이완, 집합체 수력적 들림 관련 설계 여유도 등을 고려하여 PLUS7 연료의 상단고정체를 개발하였으며, 하단



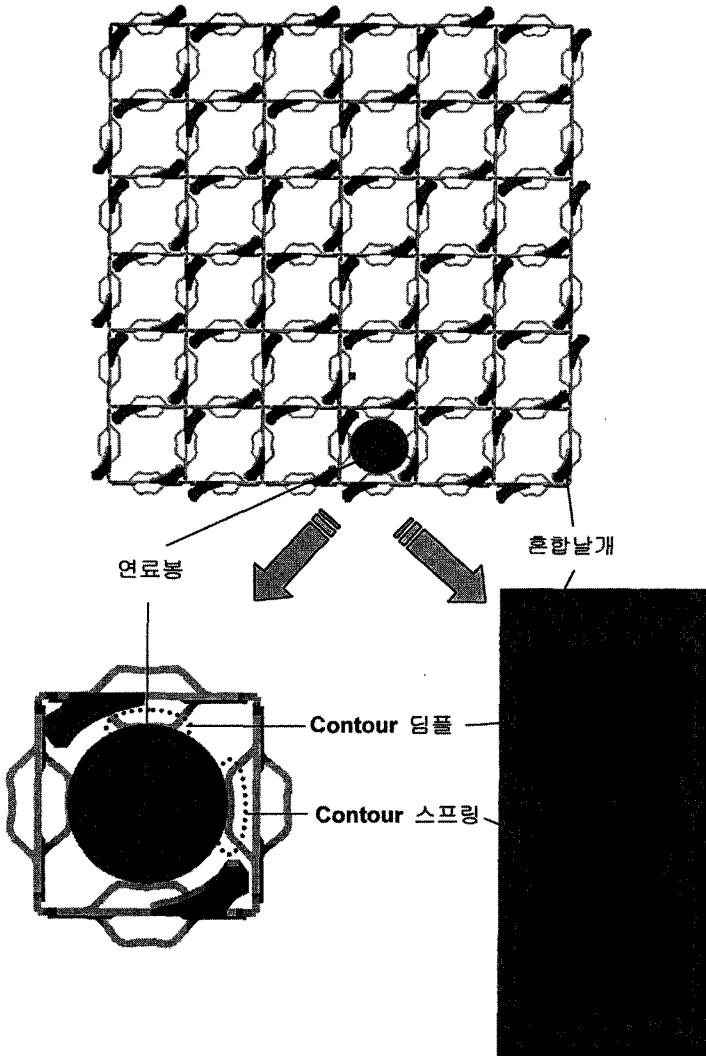
<그림 1> 개량 핵연료(PLUS7) 집합체 형상

고정체의 제조 용이성, 기계적 강도, 이물질 여과 성능 등을 고려하여 <그림 3>에서 보는 바와 같이 소구경/슬롯 유로 하단 고정체를 개발하였다. 아울러 <그림 4>에서 보는 바와 같이 하단 고정체에 부착할 수 있는 이물질 여과용 보호 지지 격자를 개발함으로써 이물질 다중 방어 개념을 도입하였다.

PLUS7 연료의 안내관 및 계측관 설계를 위하여 제어봉 낙하 시

간, 안내관/계측관 제조 용이성, 안내관/지지 격자 연결 용이성, 계측관/지지격자 연결 용이성 등을 고려하였다.

그리고 PLUS7 연료의 상하단 고정체/안내관, 하단 고정체/안내관, 지지 격자/안내관 및 지지 격자/계측관 연결 방법을 개선하기 위하여 해체/재조립 용이성, 제조 용이성, 제조 불량률을 고려하였다. 특히 지지 격자/안내관 연결



〈그림 2〉 PLUS7 중간 지지 격자 스프링 및 딩플 설계

였다. 현재 사용중인 연료 대비 PLUS7 연료의 주요 설계 개선 사양을 <표 3>에 기술하였다.

열수력 설계 분야에서는 상기 PLUS7 연료 설계에 대한 열수력적 시험 자료를 토대로 하여 열수력 성능을 평가하였다. 즉 WH사의 수력적 시험 시설인 FACTS Loop에서 수행한 압력 강하 시험 자료, VISTA Loop에서 수행한 진동 시험 자료, 현재 한국 표준형 원전에 사용중인 연료에 대한 CHF 시험 자료 등의 평가 결과를 토대로 하여 PLUS7 연료에 대한 임계 열속 시험조건, 압력 손실 계수, 임계 열유속 등을 예측하였다.

또한 지지 격자 위치에 따른 교차류 계산 결과를 토대로 하여 현재 사용중인 연료와 PLUS7 연료와의 수력적 양립성을 평가하였으며, 아울러 PLUS7 연료 장전노심의 압력 강하량 변화가 원자로 일차 계통 유량에 미치는 영향을 평가하였다.

PLUS7 연료의 개발 결과물로는 도면 51종, 사양서 22종, 기술 보고서 17종, 설계 계산서 40종 등이 생산되었다.

3. 노외 실증 시험용 부품 제작

노외 실증 시험을 위해 중간 지지 격자, 상하단 지지 격자, 보호 지지격자, 상단 고정체, 하단 고정체, 안내관, 계측관, 연료봉 부품

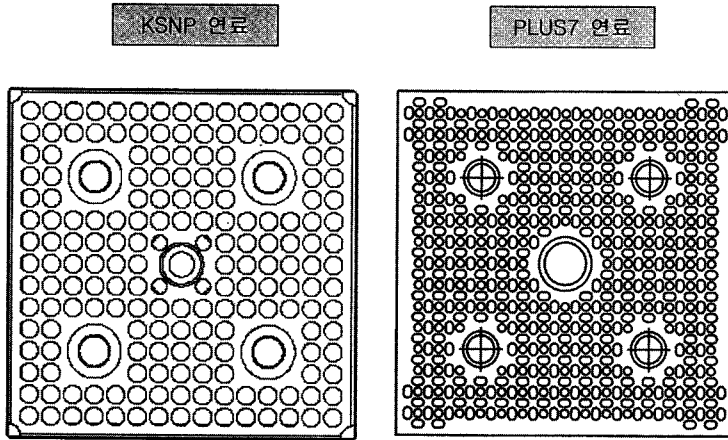
방법으로는 기존의 TIG 용접 대신 슬리브를 이용한 점용접이 사용되었다.

연료봉에 대한 고연소 성능 모델 및 노내 연소 성능 자료를 토대로 하여 연료봉 중심선 온도, 내압, 피복관 부식 및 수소화, 피복관 응력 및 변형률, 피복관 조사성장, 피복관 함몰, 연료봉 봉단 마개 용접부 건전성 등을 평가하였

으며, 이러한 평가 결과를 토대로 하여 연료봉 부품 및 연료봉을 개발하였다.

PLUS7 연료의 연소 성능은 영역 평균 방출 연소도 55,000 MWD/MTU 이상으로 성능 목표치인 50,000MWD/MTU를 초과 달성하였다.

기존 핵연료와 PLUS7 연료의 연료봉 설계를 <그림 5>에 비교하



〈그림 3〉 하단 고정체 설계 비교

(봉단 마개, 플레넘 스프링, 소결체, 피복관 등) 및 연료봉 등의 PLUS7 연료 부품을 제작하였다.

대부분의 부품들은 한전원자력 연료(주)와 국내 협력 업체에 의해 제조되었으며, 피복관·안내관·계측관 등의 원자재 공급 및 지지격자체 제조 기술 개발 등은 WH사에 의해 이루어졌다.

4. 노외 실증 시험용 집합체 제작

〈표 3〉에서 보는 바와 같이 PLUS7 연료 설계는 현재 한국 표준형 원전에 사용중인 연료 설계에 비해 큰 차이가 있다. 이러한 설계 차이로 인하여 두 집합체 간에는 집합체 기계적 성능, 수력적 성능 및 진동 특성 등이 상이할 것으로 평가되었다.

따라서 PLUS7 집합체의 기계

적 특성 시험, 수력적 특성 시험 및 진동 특성 시험 등을 평가하기 위하여 PLUS7 시험 집합체 3다발 및 기존 핵연료 1다발을 제작하였다.

한전원자력연료(주)에서는 안내관과 슬리브 간의 점용접 공정, 안내관과 안내관 플랜지 간의 용접 공정, 안내관 봉단마개 용접 공정, 골격체 조립 공정, 연료봉 장입 공정 등을 성공적으로 개발한 후 PLUS7 시험 집합체 3다발 및 기존 핵연료 시험 집합체 1다발을 2001년 5월 31일자로 제작 완료하였다.

그리고 WH사의 노외 실증 시험시설을 사용하여 2001년 12월 말까지 시험 집합체에 대한 노외 실증 시험을 완료하였다.

5. PLUS7 부품 노외 실증 시험

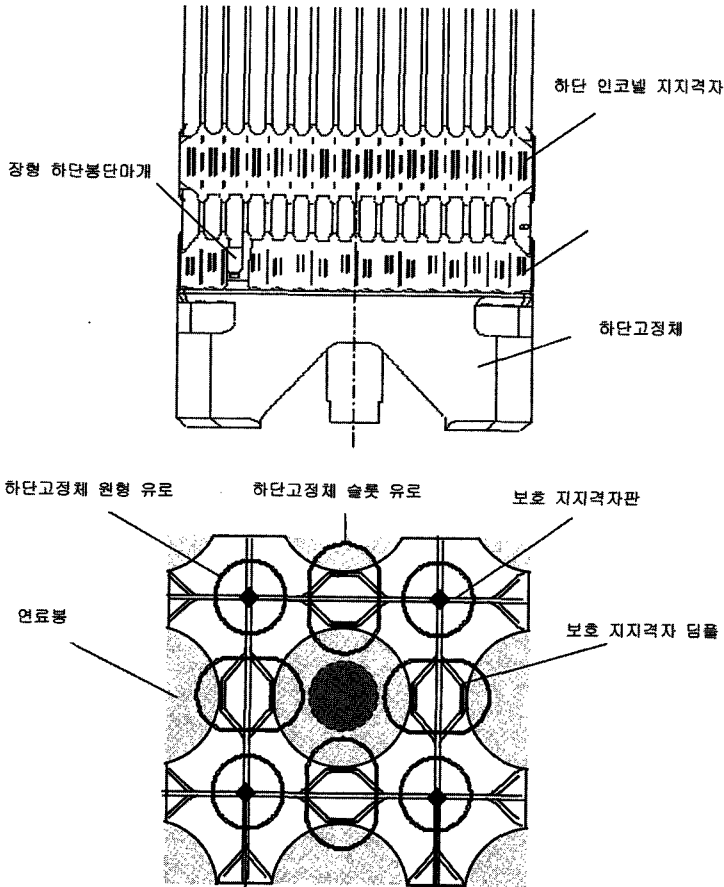
PLUS7 부품 및 집합체 노외 실증 시험을 위해 필요한 기계적/수력적/진동 특성 시험 절차서 등을 작성하였으며, 주요 부품 노외 실증 시험은 다음과 같다.

PLUS7 연료의 핵심 부품인 중간 지지 격자에 대한 CHF(Critical Heat Flux) 시험을 Columbia 대학에서 수행하였으며, 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 PLUS7 연료의 열적 성능은 현재 한국 표준형 원전에 사용중인 연료 대비 12.8% 정도 향상되었다.

PLUS7 연료의 중간 지지 격자 프레팅 마모 저지 성능을 평가하기 위하여 WH사의 VISTA Loop에서 5×5 모의 집합체를 사용하여 고주파 진동 특성 시험을 수행하였으며, 이와 병행하여 AECL의 프레팅 마모 시험 시설을 사용하여 중간 지지 격자 스프링/딴플과 연료봉 간의 프레팅 마모 시험을 수행하였다.

이 시험 결과에 의하면, PLUS7 연료의 중간 지지 격자 설계는 노심 운전 조건에서 고주파 진동이 거의 없는 것으로 나타났으며, 또한 프레팅 마모 저지 성능은 WH사 보유 개량 핵연료에 비하여 우수한 것으로 평가되었다.

PLUS7 연료의 중간 지지 격자 기계적 강도 평가를 위하여 5×5



〈그림 4〉 PLUS7 이물질 제거 설계(하단 고정체+보호 지지 격자)

지지 격자체 및 16×16 지지 격자체를 사용하여 동적 좌굴 강도 시험을 수행한 결과, 성능 목표치인 동적 좌굴 강도 4,500lbs 이상인 것으로 나타났다.

한편 안내관과 안내관 슬리브간의 점용접 성능을 평가하기 위하여 점용접 강도 시험을 수행한 결과, 설계 최소 제한치인 750 lb

이상으로 나타났다.

6. PLUS7 집합체 노의 실증 시험

PLUS7 집합체 성능 검증을 위하여 이래 같이 기계적 시험, 진동 및 마모 특성 시험, 그리고 수력적 특성 시험을 수행하였다.

PLUS7 집합체의 정적 기계적 시험에서는 집합체 강성을 측정한

반면, 동적 기계적 시험에서는 집합체의 고유 진동수, 감쇄 계수, 진동 모드, 충격 하중을 측정하였다. 이들 자료들은 핵연료의 내진 해석 모델의 검증 및 해석 모델에 필요한 물리적 상수를 결정하는데 사용되었다.

PLUS7 집합체의 진동 특성을 평가하기 위하여 WH사의 FACTS Loop 시설에서 Flow Sweeping Test를 수행하였고, 유량에 따른 집합체의 변위를 〈그림 7〉에 나타내었다. 이 그림으로부터 PLUS7 연료는 상용 원전 유량 범위에서 공진이 일어나지 않고 있음을 볼 수 있으며, 진폭이 1 mil 이하로 안정되어 있다.

또한 PLUS7 연료와 기존 핵연료의 마모 특성을 평가하기 위하여 WH사의 VIPER Loop 시설에서 PLUS7 연료와 기존 핵연료를 동시에 장전하여 500시간 마모 시험을 수행하였다.

마모 특성을 보수적으로 평가하기 위하여 〈그림 8〉에 보듯이 PLUS 연료의 연료봉과 지지 격자 사이의 Gap 크기를 조정하였다. 이러한 마모 특성 시험 결과를 평가해 볼 때 PLUS7 연료의 전수명 기간 동안 마모로 인한 손상은 발생하지 않을 것으로 나타났다.

PLUS7 연료와 기존 핵연료의 수력적 양립성을 평가하기 위하여

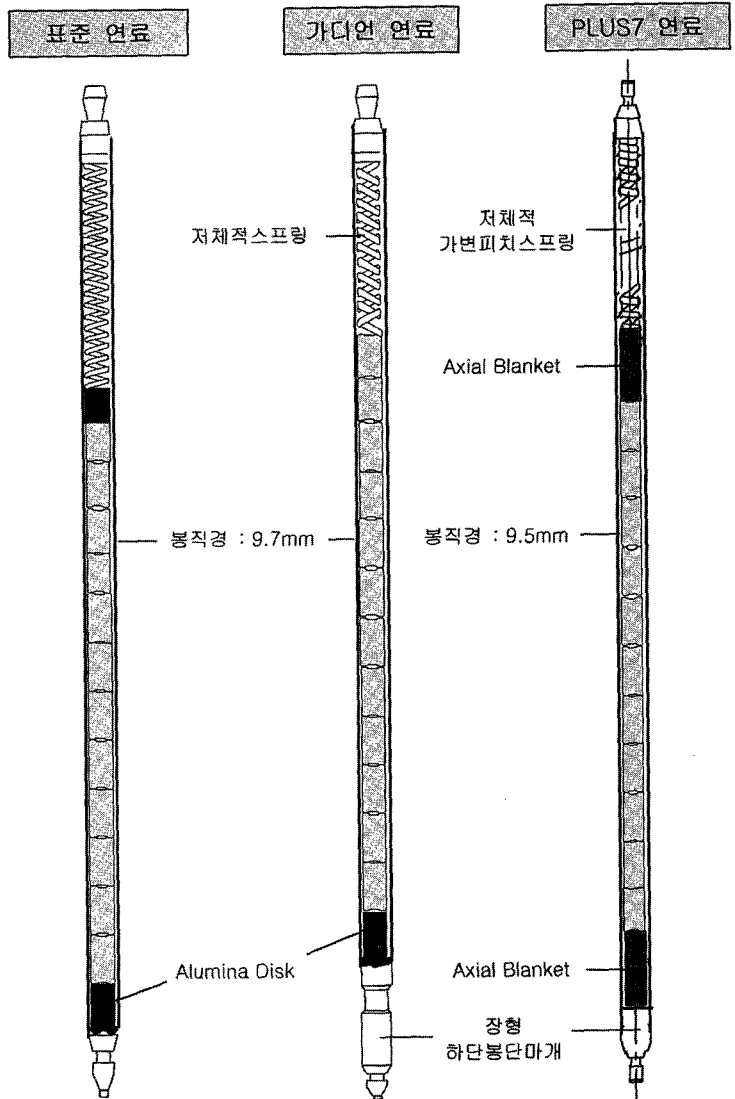
FACTS Loop 시설에서 PLUS7 연료 및 기존 핵연료 각각에 대한 압력 강하 시험을 수행하였다. 이 압력 강하 시험에 의하면 PLUS7 연료의 압력 강하 증가량은 기존 핵연료 대비 10% 이하로써 WH사의 천이 노심 경험치인 13.4% 이내 있음을 알 수 있다.

7. PLUS7 시범 집합체 제작

상용 원전에 장전할 PLUS7 시범 집합체는 양산 핵연료 제조에 사용된 QA/QC 체계를 적용하였다. 즉 시범 집합체에 사용된 모든 원자재 공급자에 대한 공정 자격 인증을 실시하였으며, 이미 공급자 자격이 인증된 업체일지라도 PLUS7 연료 개발에 따른 공급 제품에 대한 제품 자격 인증 시험을 수행하여 합격된 제품만을 시범 집합체 제조에 사용하였다. 또한 KNFC 자체적으로 수행하는 제조 공정에 대해서도 자격 인증 시험을 실시하였다.

이러한 자격 인증된 제조 공정을 토대로 하여 PLUS7 연료 부품 및 시범 집합체 4다발을 개발 일정대로 2002년 3월 30일자로 제작 완료하였다. 특히 시범 집합체 4다발에 대해서는 노내 연소 시험 후 측정되는 자료와의 비교 분석을 위해 제조 특성화 자료를 측정하였다.

PLUS7 시범 집합체 4다발은



〈그림 5〉 연료봉 설계 비교

2002년 12월에 올진 3호기 5주기에 최초로 장전되어 4주기에 걸쳐 연소될 예정이다.

PLUS7 시범 집합체를 한국 표준 원전에 장전하기 위해서는 PLUS7 시범 집합체 장전 안전성 평가 보고서 등을 2002년 3월 말

까지 작성하였다.

한편 PLUS7 연료의 재질에는 상용원전에서 이미 성능이 입증된 ZIRLO 피복관 재질 등이 채택되어 사용되고 있다. 따라서 2주기 연소 기간 동안에 연료봉과 지지격자간의 프레팅 마모에 의한 연



(표 3) 개량 핵연료(PLUS7) 설계 개선 사항 요약

설계 항목	설계 특성		성능 개선 사항
	기존 핵연료	PLUS7 연료	
연료봉	직경 : 9.7mm 피복관 : Zry-4 Axial Blanket : 無	직경 : 9.5mm 피복관 : ZIRLO Axial Blanket : 有	<ul style="list-style-type: none"> 고연소 성능 확보 중성자 경제성 제고 압력 강하 감소
중간 지지 격자	재질 : Zry-4 혼합 날개 : 無 지지 격자판 : 곡선 스프링 : 외팔 지지	재질 : ZIRLO 혼합 날개 : 有 지지 격자판 : 직선 스프링 : 연료봉과 면접촉 형상	<ul style="list-style-type: none"> 열적 성능 10% 향상 프레팅 마모 기인 손상 방지 내진 성능 향상 고연소 성능 확보
상하단 지지 격자	혼합 날개 : 無 지지 격자판 : 곡선	혼합 날개 : 無 지지 격자판 : 직선	<ul style="list-style-type: none"> 프레팅 마모 기인 손상 방지 기계적 강도 향상
상단 고정체	분리형 해체/재조립	일체형 해체/재조립	<ul style="list-style-type: none"> 해체/재조립 시간 단축 소모 부품 없음
하단 고정체	표준 유로 구경	유로 구경 축소 이물질 여과 그리드 부착	<ul style="list-style-type: none"> 이물질 여과 성능 향상
안내관/지지 격자 연결	Ar 챔버 내 TIG 용접	공기중 점 용접	<ul style="list-style-type: none"> 용접 시간 단축 용접 강도 향상

다.

셋째, 연료봉 프레팅 마모에 의한 연료 손상을 방지하기 위하여 유체 유발 진동이 최소화되도록 혼합 날개 및 지지 격자 설계를 최적화하였고 유체 유발 진동 발생 시에도 연료봉 프레팅 마모에 의한 연료 손상을 억제할 수 있도록 면접촉 형상의 Contour 지지 격자 스프링/딴플을 개발하였다.

집합체 진동 시험, 지지 격자판 고주파 진동 시험, 연료봉과 스프링/딴플간의 마모 시험 및 유체 유발 장기 내구성 시험 등의 시험 결과에 의하면 WH사 보유 개량 핵연료에 비해 연료봉 프레팅 마모 저지 성능이 우수한 것으로 나타났다.

넷째, 이물질에 의한 연료 손상을 방지하기 위하여 소구경/슬롯 하단 고정체 및 보호 지지 격자를 개발하였다. 이 설계 개념은 WH사 개량 핵연료인 Performance+ 연료와 대등한 이물질 여과 성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

한편 당초 개발 목표로 하지 않았던 부수적 연구 성과물로는 지지 격자 기계적 강도를 증가시킴으로써 현재 사용중인 연료에 비해 내진성능을 향상시켰고, 상단 고정체 해체 및 재조립 기능을 개선함으로써 집합체 해체/재조립 용이성을 제고하였으며, Ar 분위기

로 손상 등과 같이 PLUS7 연료 부품 형상 변경에 따른 연료 손상이 발생하지 않을 경우에는 현재의 인허가 연소도 범위에서 PLUS7 연료를 상용화할 수 있을 것으로 판단된다.

최적화하였다. 이러한 지지 격자에 대한 CHF 시험 결과로부터 현재 한국 표준형 원전에 사용중인 연료에 비하여 약 12.8% 정도 열적 성능이 향상되었음을 확인하였다.

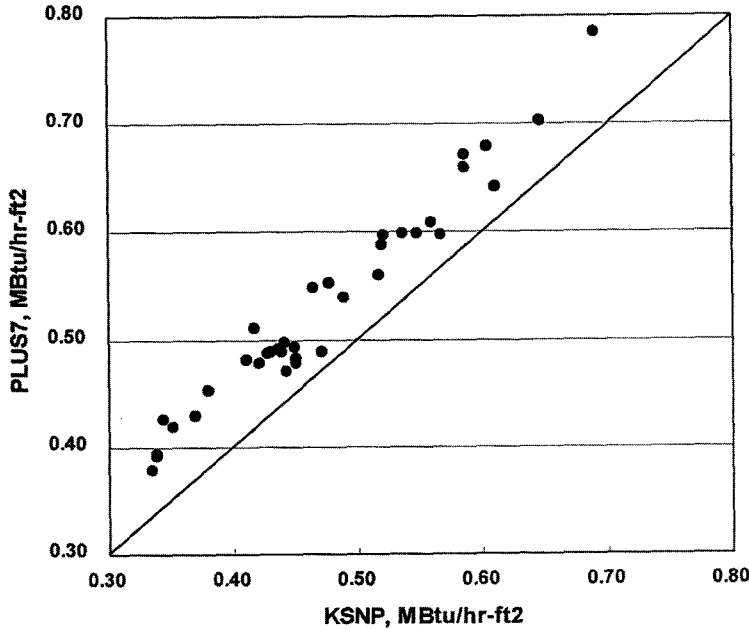
둘째, 50,000MWD/MTU 이상의 고연소 성능 확보를 위하여 상용 원전에서 기 검증된 ZIRLO 재질을 피복관·안내관 및 계측관, 그리고 중간 지지 격자에 채택하였으며, 이와 병행하여 연료봉 및 집합체 제원을 최적화하였다. 그 결과 당초 목표 연소도를 초과한 영역 평균 방출 연소도 55,000MWD/MTU까지 핵연료 관련 모든 설계 기준을 만족하였

개발 목표 달성도

PLUS7 연료의 개발 목표 달성도는 다음과 같다.

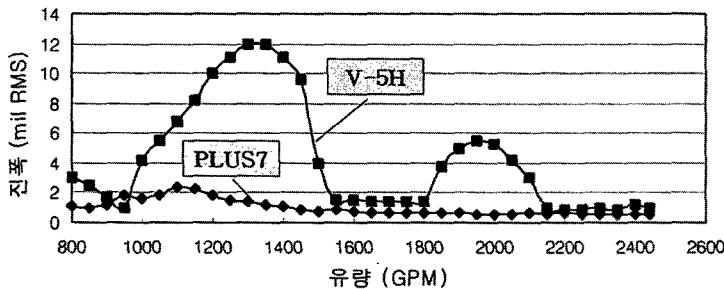
첫째, 열적 성능 10% 이상 향상을 위하여 혼합 날개가 부착된 지지 격자 설계를 개발하였으며 혼합 날개 도입으로 인한 압력 강하량 증가를 최소화하기 위하여 지지 격자 제원 및 혼합 날개 형상을

Comparison of Hot Rod Power at DNB



〈그림 6〉 PLUS7 연료와 기존 핵연료의 열적 성능 비교

집합체 진동시험 결과



〈그림 7〉 집합체 진동 특성 비교

기 챔버 내에서의 안내관/지지격 산성을 향상시켰다. 자 TIG 용접 대신 공기중 점용접을 사용함으로써 집합체 제조 생

기대 효과 및 활용 계획

PLUS7 연료를 성공적으로 개발함으로써 한국 표준형 원전의 안전성·운전성·경제성 및 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있다.

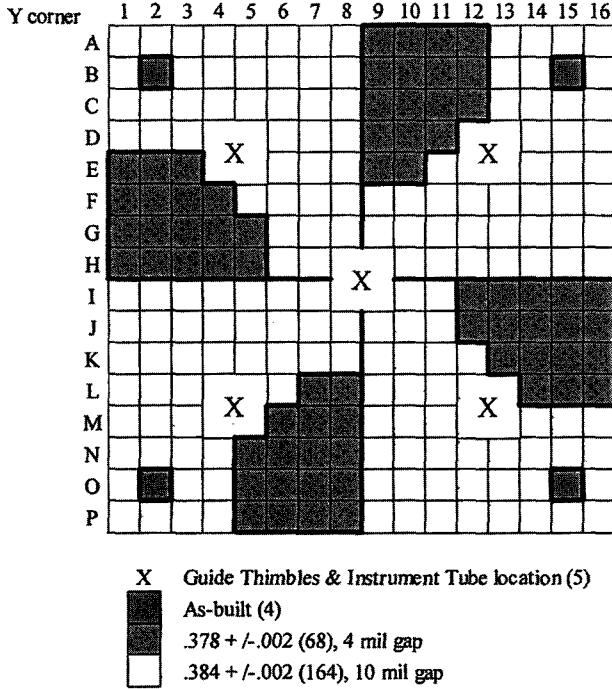
첫째, 현재 사용중인 연료 대비 10% 이상 확보된 열적 성능으로 인하여 원전의 안전성 및 운전성 제고에 기여하고, 확보된 열적 성능 중 5%를 원전 출력 증강에 활용할 경우에는 원전 1기당 연간 약 200억 정도의 경제적 이익이 발생하는 것으로 평가된다.

둘째, PLUS7 연료 허용 방출 연소도가 현재 사용중인 연료 대비 약 28% 정도 증가됨으로써 원전 1기당 1주기(18개월) 운전시 약 15억정도의 핵연료 주기비를 절감할 수 있다.

셋째, PLUS7 연료의 이물질 및 연료봉 진동에 의한 연료 손상을 줄임으로써 핵연료 신뢰성이 제고된다.

마지막으로, 가격과 성능 측면에서 국제 경쟁력이 확보되고 기술 소유권이 확보된 PLUS7 연료를 개발함으로써 향후 핵연료 시장 개방에 적극 대처할 수 있고 핵연료의 해외 수출 기반을 구축하였다.

PLUS7 연료를 한국 표준형 원전인 영광 3·4·5·6호기, 울진 3·4·5·6호기, 신고리 1·2호



(그림 8) PLUS7 지지 격자 셀에 따른 연료봉/지지 격자 Gap 배치도

기 및 APR 1400원전인 신고리 3·4호기 등에 사용할 계획이다. 또한 한국 표준형 핵연료가 사용될 수 있는 미국 CE형 16×16 원전에도 PLUS7 연료 수출을 적극 추진할 계획이다.

수상 소감

독일 Siemens사로부터 기술 도입하여 국내 설계/제작된 고리 2호기용 KOFA 연료에서 2주기 연소 동안에 다량의 손상이 발생하였고, 이로 인하여 국내 핵연료

개발 기술의 현주소를 실감하게 되었다.

이러한 고리 2호기 연료 손상을 교훈으로 삼아 국내 주도의 개량 핵연료 개발 필요성을 제시하였지만 당시에는 국내 기술진에 의해 핵연료 개발을 추진하는 것에 대해 부정적인 시각이 팽배해 있었다.

그러나 핵연료 개발을 위한 부정적 환경에도 불구하고 핵연료 설계에 종사하는 선후배의 격려와 지원에 힘입어 1990년 중반 핵연료 개발 관련 중장기 계획을 수립

할 수 있었음은 지금 돌이켜 보면 국내 핵연료 기술의 도약을 위한 큰 전기였다고 생각하지 않을 수 없다.

그 당시에 수립한 핵연료 개발 중장기 계획을 살펴보면, 국내 기술진과 해외 선진사가 공동으로 3년 이내에 개량 핵연료를 개발하는 중기 계획과 이러한 중기 계획에 의해 국내 확보한 핵연료 개발 기술을 토대로 하여 원천 기술, 즉 독자 기술 소유권이 확보된 고유 핵연료를 개발하는 장기 계획으로 되어있다.

한편 이러한 핵연료 개발 중장기 계획에 의거하여 한국원자력연구소는 미국 SPC사와 공동으로 한국 표준형 개량 핵연료에 대한 개념 설계를 1년 동안 수행하였으나 핵연료 사업 이관 등의 국내 원자력 산업계 환경 변화로 인하여 개량 핵연료 개발을 중단할 수밖에 없었다.

핵연료 설계 사업이 한국원자력연구소에서 한전원자력연료(주)로 이관된 후에는 한전 전력연구원 주도로 국내 경수로용 개량 핵연료 개발이 추진되었으나 해외 협력사와의 공동 개발 조건, 개발 추진 체계, 소요 개발비 등의 문제로 인하여 개량 핵연료 개발을 착수조차 할 수 없었다. 급기야 1997년도의 IMF 상황을 맞이하고서는 한국전력연구원 주도로 개량 핵연

〈표 4〉 개량 핵연료(PLUS7) 개발 목표 달성도

개발 목표	개발 실적	연구 목표 달성도(%)	비고
열적 성능 10% 이상 향상	12.8% 열적 성능 달성 • 혼합 날개 지지 격자 개발	128%	CHF 시험 결과 12.8% 향상
영역 평균 방출 연소도 50,000 MWD /MTU 이상	영역 평균 방출 연소도 55,000 MWD/MTU 달성 • 실험금 재질 사용 • 핵연료 제원 최적화	110%	
연료봉 프레팅 마모 방지 핵연료	연료봉 프레팅 마모 저지 성능 매우 우수 • 집합체 진동 방지 설계 • 고주파 진동 방지 설계 • 면접촉 스프링/딤플	110%	진동 특성 시험 결과 WH사 개량 핵연료 대비 성능 우수
이물질에 의한 연료 결핍을 방지	이물질 유입 저지 성능 우수 • 소구경/슬롯 하단 고정체 • 보호 지지 격자 설계 • 장형 하단 봉단 마개	100%	WH사 개량 핵연료 성능과 대등

로 개발 과제를 추진하는 것이 곤란하게 되었다.

그러나 과학기술부의 상용 핵연료 개발에도 연구 개발비를 투자하겠다는 획기적인 정책에 힘입어 한전원자력연료(주)에서는 한국 표준형 개량 핵연료 개발 과제를 제안하였으며 1999년도 초에 과학기술부 원자력 연구 개발 사업 과제로 선정되었다.

우리 회사가 제안한 개량 핵연료 개발 과제가 선정되었다고 통보받았을 때에는 5년에 걸쳐 개량 핵연료 개발 과제를 추진하면서 겪었던 수 차례의 좌절감과 동고동락 했던 선후배들의 얼굴들이 교차하면서 지금까지 힘들었던 기억들이 순식간에 사라졌다.

한국 표준형 개량 핵연료 개발

을 착수할 시점인 1999년도에는 핵연료 개발에 사용될 노내의 성능 데이터 베이스 및 노의 시험 시설 등이 국내에 거의 구축되어 있지 않은 관계로 가장 우수한 공동 개발 조건을 제시한 미국 WH사와 공동으로 개량 핵연료를 개발하였다.

우리 회사와 WH사는 우리 회사의 집합 체설계, 열수력 설계, 연료봉 설계, 핵 설계 및 사고 해석 전문가 10명, 제조 및 QA 전문가 2명 그리고 WH사의 설계 및 제조 전문가 약 20명으로 구성된 공동 개발팀을 구성하였다.

이에 따라 우리 회사는 WH사에 우리 회사의 분야별 핵연료 전문가를 파견하였고, 이들의 불철주야 헌신적인 노력에 의해 개량

핵연료 설계, 제조 기술, 노의 시험 및 시범 집합체 제작 등의 개발 업무를 차질없이 개발 일정대로 완수할 수 있었다.

아울러 당초 개발 목표를 초과 달성한 사실은 지금도 무척 자랑스러운 일이라고 생각한다. 또한 핵연료 개발을 통하여 미국 및 프랑스 등 원자력 선진국으로 부터 우리 회사 전문가들의 기술력 및 전문성이 인정되었음은 또 하나의 큰 보람이 아닐 수 없다.

한편 이러한 한국 표준형 개량 핵연료 개발을 통하여 국내 확보된 핵연료 개발 기술은 현재 한국 원자력연구소 및 우리 회사가 각각 추진하고 있는 경수로용 신형 핵연료 개발 및 웨스팅하우스 원전용 개량 핵연료 개발이 적극적으로 활용되어야 하며, 이를 위해 산학연 협의를 통하여 국내 산·학·연 핵연료 개발팀간의 유기적인 체계를 구축할 계획이다.

끝으로 저에게 원자력기술상이라는 큰 상을 주신 한국원자력산업협회에 대해 감사드린다. 또한 이러한 한국 표준형 개량 핵연료 개발 과제를 성공적으로 수행할 수 있도록 연구비를 지원해 준 과학기술부와 어려운 순간에도 격려와 배려를 아끼지 않은 원자력 선후배, 그리고 우리 회사 경영진께서 지면을 통해 다시 한번 감사의 말씀을 드린다. ☺