

국내 핵연료 기술개발 이력 및 핵연료 수출을 위한 정책 과제

2025.10.24.



국회의원 **김동아** (산업통상자원중소벤처기업위원회)

저자 | 동국대학교 명예교수 **김규태**

목 차

1. 핵연료 기술 개요	1
1.1 핵연료 기술 정의	1
1.2 핵연료 기술개발 핵심 요소	5
1.3 원자로심 통상설계 및 양산제조 절차	8
1.4 국내 가동 원전 현황	9
1.5 핵연료 형상 및 소재	11
2. 원자력 지식재산권 확보 전략	17
2.1 개요	17
2.2 미국 웨스팅하우스사	18
2.3 프랑스 아레바사	19
2.4 중국	20
2.5 한국	20
3. 국내 핵연료 기술 확보 이력	23
3.1 개요	23
3.2 제 0세대 핵연료	25
3.3 제 1세대 핵연료	27
3.4 제 2세대 핵연료	30
3.5 제 3세대 핵연료	41
3.6 제 4세대 핵연료	55
4. 국내 핵연료 피복관 소재 확보 이력	62
4.1 개요	62
4.2 신형 피복재 개발	64
4.3 신형 피복재 개발기술	66
5. 국내 원자로심 및 안전해석 전산코드 확보 이력	71
5.1 개요	71
5.2 고유 원자로심 및 안전해석 전산코드 개발	71
5.3 고유 원자로심 및 안전해석 전산코드 개발 절차	73

6. 원자력 기술개발 장애요인과 해결방안	77
6.1 장애요인	77
6.2 해결방안	79
7. 한수원과 웨스팅하우스사 간 기술사용 협정 분석	82
7.1 개요	82
7.2 기술사용 협정 내용	83
7.3 기술사용 협정 분석	84
7.4 웨스팅하우스사의 핵연료 공급에 따른 경제적 가치 분석	85
8. 핵연료 제품 및 기술 수출을 위한 정책 제언	90
8.1 APR1000 및 APR1400 원전용 HIPER16 핵연료 수출	90
8.2 전 세계 웨스팅하우스형 17x17 원전용 HIPER17 핵연료 수출	91
8.3 핵연료 기술 수출	92
8.4 원자력 산업계, 학계 및 연구계의 기술개발 추진전략	94
9. 결론	96
참고문헌	98

1. 핵연료 기술 개요

1.1 핵연료 기술 정의

핵연료는 집합체와 부품을 포괄한다. 국내 사용 중인 OPR1000, APR1000, APR1400 원전용 핵연료집합체, 웨스팅하우스형 원전용 핵연료집합체 그리고 중수로 핵연료 다발이 그림 1-1, 1-2 및 1-3에 각각 제시되어 있다. 경수로 핵연료집합체 주요 부품은 다음과 같다.

- 상단고정체
- 하단고정체
- 연료봉: 피복관, 소결체, 상·하단 봉단마개
- 지지격자: 중간지지격자, 상단지지격자, 하단지지격자, 중간유동혼합기
- 안내관
- 계측관

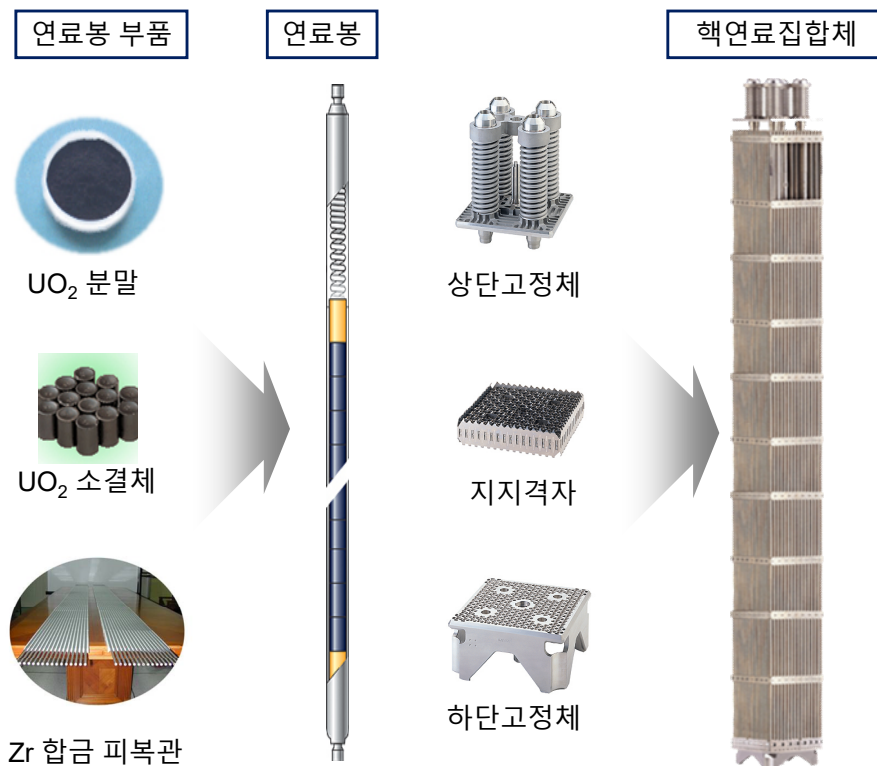


그림 1-1 OPR1000/APR1000/APR1400 원전용 핵연료집합체

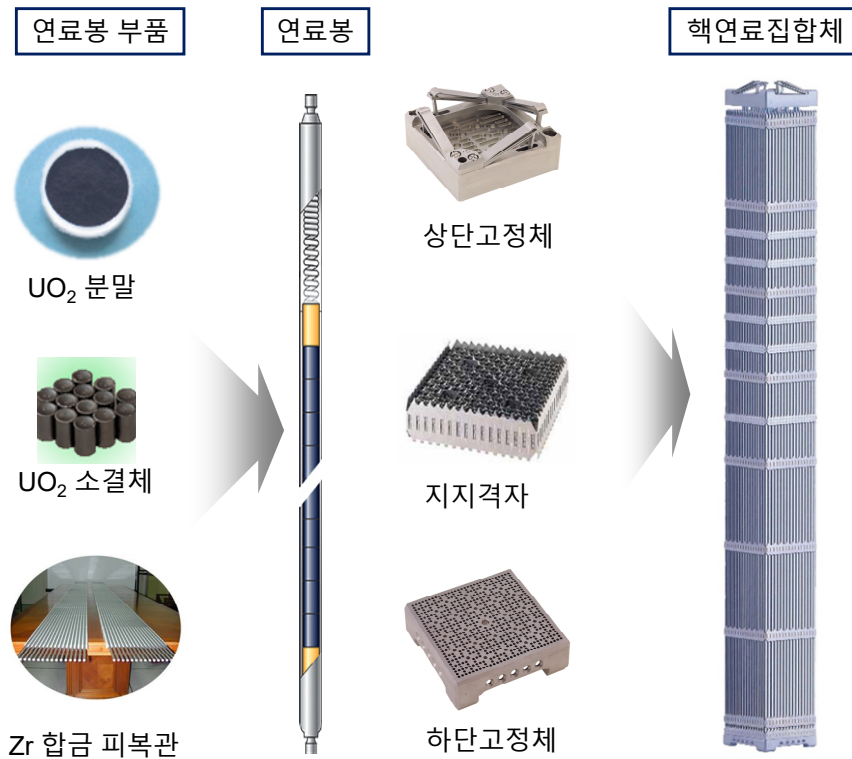


그림 1-2 웨스팅하우스형 원전용 핵연료집합체

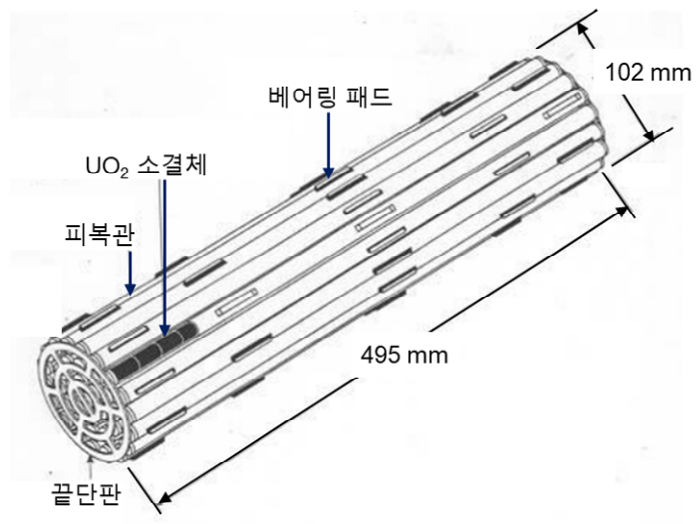


그림 1-3 중수로 핵연료 다발

경수로 핵연료 기술은 다음과 같이 8단계로 구분될 수 있으며, 단계별 주관기관이 명시되어 있다. 그림 1-4에 핵연료 기술개발 단계 흐름도가 제시되어 있다.

- ① 핵연료 형상(집합체 및 부품) 개발기술: 한전원자력연료

- ② 핵연료 소재 개발기술: 한전원자력연료
- ③ 핵연료 성능 데이터베이스 생산기술: 한전원자력연료
- ④ 핵연료 성능모델 및 전산코드 개발기술: 한전원자력연료
- ⑤ 핵연료 성능해석방법론 개발기술: 한전원자력연료
- ⑥ 핵연료 인허가 기술: 한전원자력연료 및 원자력안전위원회
- ⑦ 핵연료 통상설계 및 양산제조 기술: 한전원자력연료
- ⑧ 핵연료 상용원전 연소기술: 한전원자력연료 및 한국수력원자력

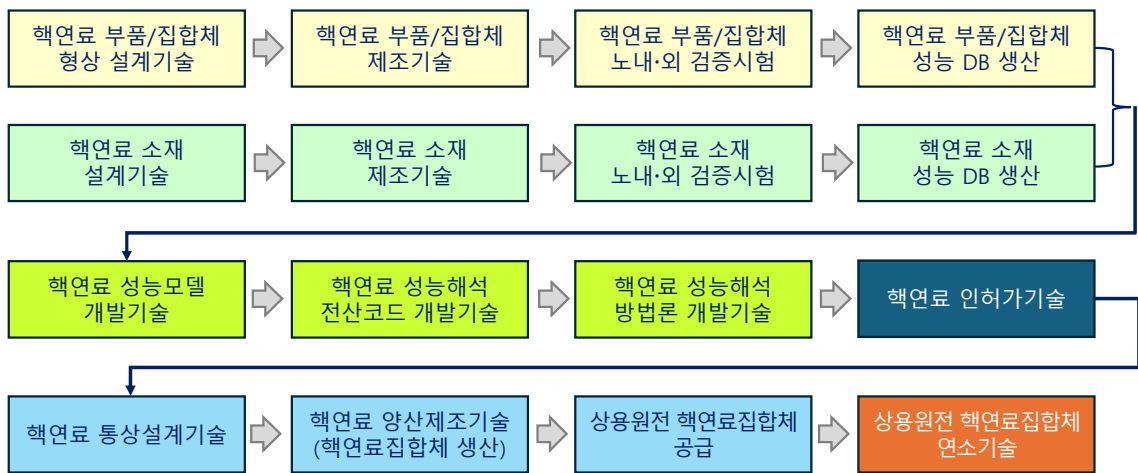


그림 1-4 핵연료 기술개발 단계 흐름도

핵연료 부품 및 집합체 형상 설계기술 개발 단계에서는 부품 및 집합체의 설계도면, 부품목록, 부품/재료 시방서 등이 개발된다. 핵연료 부품 및 집합체 제조 기술개발 단계에서는 설계기술 개발 단계에서 개발한 자료를 토대로 노외 및 노내 검증시험용 핵연료 부품 및 집합체 제조기술을 개발하고 이를 토대로 부품 및 집합체를 제조한다. 이러한 핵연료 부품 및 집합체를 사용하여 노외 검증시험 및 노내 검증시험을 통해 핵연료 부품 및 집합체 성능 데이터베이스(DB)를 생산한다. 이러한 DB를 사용하여 핵연료 성능모델과 전산코드를 개발할 수 있다.

이러한 설계 및 제조 기술개발 단계를 통해 각종 부품/집합체 형상 및 제조공정 특히 그리고 성능 DB가 생산되며, 이를 통해 핵연료 부품 및 집합체 형상 그리고 성능 DB에 대한 지식재산권을 획득하게 된다. 물론 해외사의 특허 침해를 방지하기 위하여 설계기술 및 제조기술 개발 전에 핵연료 형상 관련 특허에 대해 심층적인 조사·분석을 수행해야 한다.

핵연료 소재 개발 단계에서는 소재 합금 설계 및 성능시험 자료를 토대로 핵연료 재료시방서가 개발된다. 핵연료 부품 및 집합체 형상 설계 단계와 마찬가지로 개발한 소재에 대한 노외 검증시험 및 노내 검증시험을 통해 소재 성능 DB를 생산한다. 이러한 DB를 사용하여 핵연료 성능모델과 전산코드를 개발할 수 있다.

이러한 핵연료 소재 개발 단계를 통해 각종 소재 및 소재 제조공정 특허 그리고 소재 성능 DB가 생산되며, 이를 통해 핵연료 소재 합금, 소재 제조공정 그리고 소재성능 DB에 대한 지식재산권을 획득하게 된다. 물론 해외사의 특허 침해를 방지하기 위하여 핵연료 소재 관련 특허에 대해 심층적인 조사·분석을 수행해야 한다.

상기 생산한 핵연료 성능 데이터베이스(DB)를 토대로 하여, 각종 핵연료 성능모델(부식모델, 크립모델, 조사성장모델, 핵분열가스 방출 모델, 소결체 고밀화/팽윤 모델 등), 핵연료 성능해석 전산코드 그리고 핵연료 성능해석 방법론(예: 결정론적 방법론, 확률론적 방법론 등) 등을 개발한다. 이러한 성능모델, 전산코드 및 성능해석 방법론은 인허가 절차를 통해 원자력안전위원회의 승인을 획득하여야 한다. 또한, 핵연료 부품 및 집합체 양산공정에 대해 핵연료집합체 사용자인 한국수력원자력으로부터 제조공정자격인증(PQT)을 획득해야 한다. 상기와 같이 새로 개발된 핵연료 부품 및 집합체에 대한 인허가를 획득한 후, 핵연료 통상설계를 수행하며, 이를 통해 핵설계보고서, 재장전노심 안전성평가보고서 등의 상용 원전 내 핵연료집합체 연소 성능 평가자료가 생산되고, 이러한 자료는 한국수력원자력에 인도된다. 또한 핵연료 통상 설계자료를 토대로 핵연료 부품 및 집합체 양산제조를 수행하며, 이를 통해 상용원전에 연소할 핵연료집합체를 한국수력원자력에 인도한다.

한국수력원자력은 한전원자력연료로부터 인도된 핵연료집합체를 원전 계획예방정지기간에 원자로심에 장전하고 대부분 16개월 동안 3번에 걸쳐 핵연료집합체 연소를 수행한다. 핵연료집합체 연소 동안 한국수력원자력과 한전원자력연료는 핵연료 손상에 의한 원자로심 내 방사성 물질 누설을 분석, 평가하며, 계획예방정지기간에 핵연료집합체의 발전소 내 육안검사 및 초음파 검사 등을 통해 핵연료 손상 또는 결함 여부를 평가한다.

1.2 핵연료 기술개발 핵심 요소

핵연료공급기관 즉 한전원자력연료(주)가 핵연료 기술개발을 성공적으로 수행하기 위해서는 표 1-1에 제시된 3가지 핵심 요소를 확보해야 한다.

표 1-1 핵연료 기술개발을 위한 핵심 요소

핵연료 개발기술	핵연료 설계 개발기술: 설계 개발 절차서 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵연료 형상 설계기술 ▪ 핵연료 소재 합금 설계기술 ▪ 핵연료 노내·외 검증시험기술 ▪ 핵연료 성능모델/전산코드/성능해석방법론 개발기술 ▪ 핵연료 상용공급 인허가 기술 	핵연료 설계 특허 출원 및 등록 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 각종 핵연료 형상 특허 ▪ 각종 핵연료 소재 특허 ▪ 각종 핵연료 제조공정 특허 	지식재산권 확보
	핵연료 제조공정 개발기술: 제조공정 개발절차서 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵연료 제조공정 설계기술 ▪ 핵연료 제조 QA 및 QC 개발기술 ▪ 상용공급 제조공정자격인증시험 기술 		
	핵연료 인허가 기술: 신제품 인허가 절차서 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵연료설계보고서 작성 기술 ▪ 재장전천이노심안전성분석보고서 작성 기술 ▪ 핵연료성능모델/전산코드/성능해석방법론 주제 보고서 작성 기술 ▪ 핵연료 제조공정자격인증시험 보고서 작성 기술 		
핵연료 개발 인력	핵연료 개발 Know-How 및 Know-Why 기술 보유 인력 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵연료 형상 및 소재 개발 인력 ▪ 핵연료 노내 및 노외 검증시험 인력 ▪ 핵연료 제조공정 개발인력 ▪ 핵연료 인허가 인력 		
핵연료 개발 인프라	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵연료 부품 및 집합체, 소재 제조시설 ▪ 핵연료 부품 및 집합체, 소재 노외 검증시험시설 ▪ 핵연료 부품 및 집합체, 소재 노내 검증시험시설 ▪ 발전소내 핵연료 연소성능측정 장비 ▪ 연소 핵연료 핫셀 비파괴 및 파괴 시험시설 		

아래에는 핵연료 기술개발을 위한 3가지 요소의 특성에 대해 기술하였다.

① 핵연료 개발기술

핵연료 개발기술은 다음과 같이 핵연료 설계 개발기술, 핵연료 제조 공정 개발기술 및 인허가 기술 등으로 세분화될 수 있다.

- 핵연료 설계 개발기술: 설계기술 개발절차서 확보 필수
 - 핵연료 형상 설계기술
 - 핵연료 소재 합금 설계기술
 - 핵연료 노외 및 노내 검증시험기술
 - 핵연료 노외 및 노내 성능 데이터베이스 생산기술
 - 핵연료 성능모델/전산코드/성능해석방법론 개발기술

- 핵연료 상용공급을 위한 인허가기술
- 핵연료 제조공정 개발기술: 제조공정 개발절차서 확보 필수
 - 핵연료 제조공정 설계기술
 - 핵연료 제조 품질보증(QA) 및 품질관리(QC) 개발기술
 - 핵연료 상용공급을 위한 제조공정자격인증시험(PQT) 기술
- 핵연료 인허가기술: 원자력안전위원회의 핵연료 신제품 인허가 절차 수립 필수
 - 핵연료설계보고서(Fuel Design Report) 작성 기술
 - 재장전천이노심안전성분석보고서(RTSR) 작성 기술
 - 핵연료 성능모델/전산코드/성능해석방법론 주제보고서 작성 기술
 - 핵연료 제조공정자격인증시험(PQT) 보고서 작성 기술

핵연료 개발기술을 토대로 핵연료 형상, 소재 및 제조공정에 대한 특허를 출원하고 등록을 획득해야 하며, 이를 통해 핵연료 형상, 소재 및 제조공정에 대한 지식소유권을 확보할 수 있다.

② 핵연료 개발 인력

핵연료 개발 인력은 핵연료 개발 관련 Know-How 기술과 Know-Why 기술을 보유한 인력을 의미한다. 핵연료 개발 인력은 다음과 같이 5종류로 구분될 수 있다.

- 핵연료 형상 설계 인력: 기계공학/재료공학 전공 인력
- 핵연료 소재 개발 인력: 재료공학 전공 인력
- 핵연료 노내 및 노외 성능 검증 인력: 기계공학/재료공학 전공 인력
- 핵연료 제조공정 개발인력: 기계공학/재료공학 전공 인력
- 핵연료 인허가 인력: 핵공학/기계공학/재료공학 전공 인력

Know-How 및 Know-Why 기술을 보유한 핵연료 개발 인력은 Know-How 기술 만 보유한 핵연료 통상설계 및 양산제조 인력과 구분된다. 참고로, 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사 등의 선진 원자력기관에서는 전문지식을 보유하고 있는 석박사급 인력을 채용하여 핵연료 개발에 박차를 가하고 있는 반면, 학사 수준의 일반 인력은 핵연료 통상설계 및 양산제조

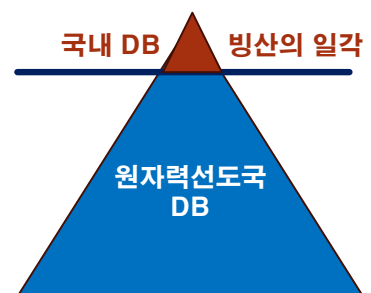
인력으로 투입하고 있다. 따라서 개발 인력과 통상설계/양산제조 인력의 급여에 큰 차이가 있으므로 개발 인력에 대한 동기 부여를 주고 있다. 반면에 국내 핵연료 전문기관인 한전원자력연료에서는 개발 인력, 통상설계 인력 및 양산제조 인력의 급여에 차이가 없으므로 석박사급 고급 인력도 개발 성공에 따른 인센티브가 거의 없으므로, 개발 성공에 대한 부담이 없는 통상설계 또는 양산제조 업무를 선호하고 있다고 사료된다.

③ 핵연료 개발 인프라

핵연료 개발 인프라는 표 1-1에 제시되어 있듯이, 핵연료 부품/집합체/소재 제조시설, 핵연료 부품/집합체/소재 노외 검증시험시설, 핵연료 부품/집합체/소재 노내 검증시험시설, 발전소내 핵연료 연소성능측정 장비, 연소 핵연료 핫셀 비파괴 및 파괴 시험시설 등으로 구성되어 있다. 국내에 확보된 발전소내 핵연료 연소성능측정 장비는 거의 수동으로 측정하는 20년 전의 장비로써 연소성능 측정에 장시간 소요되고 측정정밀도 또한 높지 않다. 한편, KAERI에 구축된 핫셀 비파괴 및 파괴 시설은 국내 규제절차에 의해 발전소에서 연소된 핵연료집합체를 대전 소재 KAERI 핫셀시설로의 수송이 거의 불가능한 상태이므로 국내 핫셀시설은 핵연료 연소 성능 검증 측면에서 무용지물인 상태에 있다. 그 결과, 한전원자력연료가 확보한 핵연료 부품 및 집합체 노외 및 노내 성능 데이터베이스는 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사의 데이터베이스에 비해 매우 적은 수준이다. 표 1-2에는 한전원자력연료가 지금까지 생산 핵연료 연소성능 데이터베이스가 제시되어 있으며, 미국 웨스팅하우스사의 데이터베이스에 비해 빙산의 일각이다.

표 1-2 한전원자력연료 생산 핵연료 연소성능 데이터베이스 수준

핵연료 설계	핵연료 집합체 개수	성능 측정 핵연료 집합체 개수	
		개수	비율
WH14x14	1,391	15	1.1%
WH16x16	1,582	12	0.8%
WH17x17	9,246	39	0.4%
OPR1000	10,126	24	0.2%
Total FAs	22,345	90	0.4%



핵연료 연소 성능 데이터베이스는 개발된 핵연료 성능모델의 정확성과 신뢰성에 직접적으로 영향을 미치고 있다. 즉 한전원자력연료가 보유한 아주 적은 연소성능 데이터베이스로 개발한 연소성능 모델의 정확성과 신뢰성은 미

국 웨스팅하우스사의 연소성능 모델에 비해 매우 떨어질 수 있다고 판단된다. 이는 상용 원전에 연소되는 핵연료집합체의 안전성과 신뢰성에 문제를 야기할 수도 있다.

1.3 원자로심 통상설계 및 양산제조 절차

핵연료 설계기술과 제조기술 개발을 통해 확보한 신형 핵연료집합체는 원자력안전위원회의 인허가를 획득한 후, 통상설계 및 양산제조를 통해 생산한 핵연료집합체는 상용원전에 공급, 연소된다.

원자로심 통상설계는 핵연료 통상설계를 포함하고 있다. 원자로심 통상설계 목적은 원자력발전소의 안전성과 경제성을 확보하는 것이며, 아울러 발전사업자의 요건인 정격출력 및 주기길이 등을 충족시키는 것이다. 원자로심 설계는 노심 핵설계, 노심 열수력 설계, 핵연료 설계(연료봉 설계 및 집합체 설계), 안전해석 등으로 이루어져 있으며, 그림 1-5에 원자로심 설계 개략도가 나타나 있다.

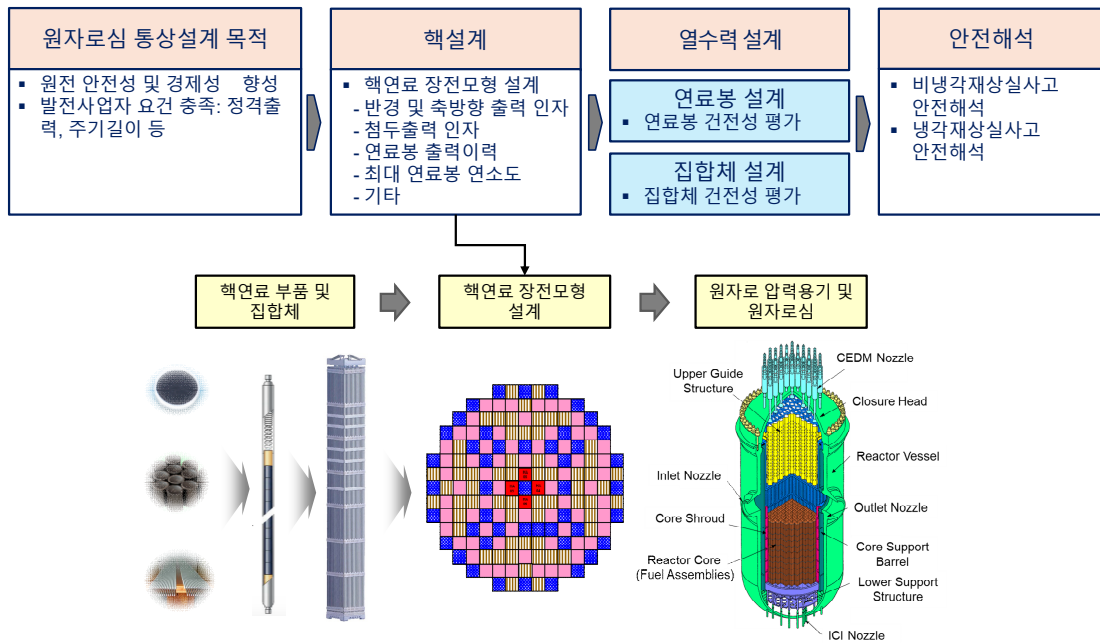


그림 1-5 원자로심 통상 설계 개략도

그림 1-6에 제시되어 있듯이, 원자력발전소의 통상설계는 초기노심설계와 교체노심설계로 대별된다. 초기노심은 원자력발전소 건설 후의 첫 번째 주기이며 모두 신 핵연료집합체로 구성되어 있는 반면, 교체노심은 1주기 이후의 노심이며 신 핵연료집합체와 연소 핵연료집합체로 구성된다. 교체노심의 주기길이는 대략적으로 18개월이다. 18개월 주기길이는 16개월 동안의 핵연료집합체 연

소기간과 2개월 동안의 계획예방정지기간으로 이루어진다.

1주기	2주기(18개월)	3주기(18개월)	4주기(18개월)
초기노심		교체노심	
<ul style="list-style-type: none"> 신 핵연료 장전(3개 영역) 1st 영역: 저 농축도 2nd 영역: 중 농축도 3rd 영역: 고 농축도 	<ul style="list-style-type: none"> 1번 연소 핵연료 1st 영역: 방출 2nd 영역: 재장전 3rd 영역: 재장전 신 핵연료: 4th 영역 	<ul style="list-style-type: none"> 2번 연소 핵연료 2nd 영역: 방출 3rd 영역: 재장전 1번 연소 핵연료 4th 영역: 재장전 신 핵연료: 5th 영역 	<ul style="list-style-type: none"> 3번 연소 핵연료 3rd 영역: 방출 2번 연소 핵연료 4th 영역: 재장전 1번 연소 핵연료 5th 영역: 재장전 신 핵연료: 6th 영역

그림 1-6 원자력발전소의 초기노심설계 및 교체노심설계

한전원자력연료가 수행하고 있는 원자력발전소의 초기노심에 대한 통상설계 및 양산제조 흐름도가 그림 1-7에 나타나 있으며, 원전계통설계 연계자료 제공업무를 제외하면 교체노심에 대한 통상설계 및 양산제조 흐름도는 초기노심과 거의 동일하다.

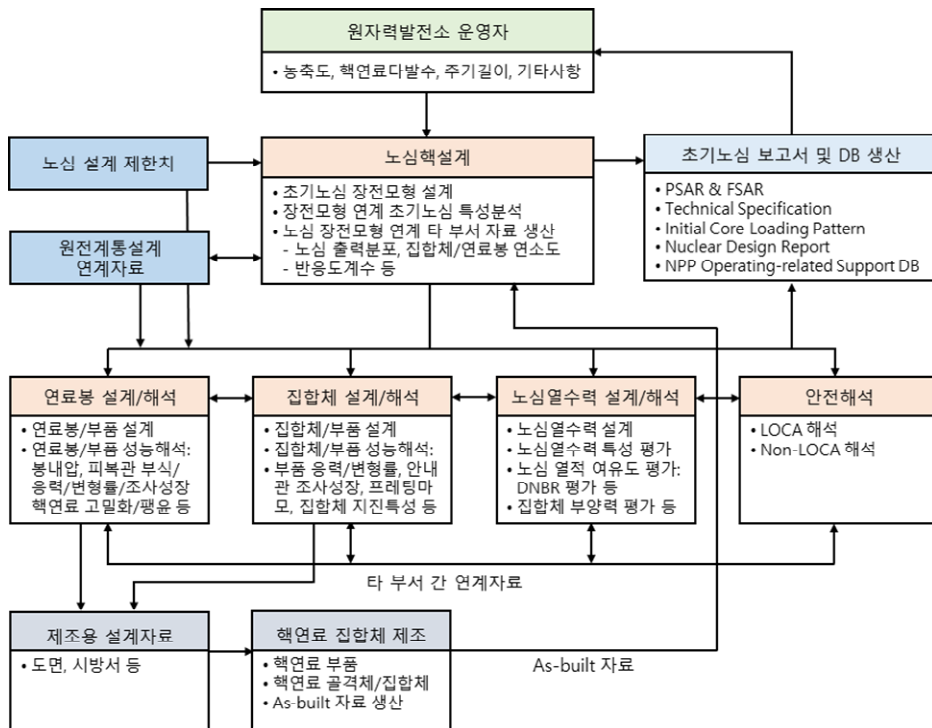


그림 1-7 원자력발전소 초기노심 통상설계 및 양산제조 흐름도

1.4 국내 가동 원전 현황

국내 가동 중인 경수로 및 중수로 원전은 표 1-3에 제시되어 있다. 이 표에서 보듯이, 웨스팅하우스 16x16형 원전 1기, 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기, OPR1000 원전 12기, APR1400 원전 4기 그리고 중수로 3기 등 총 26기

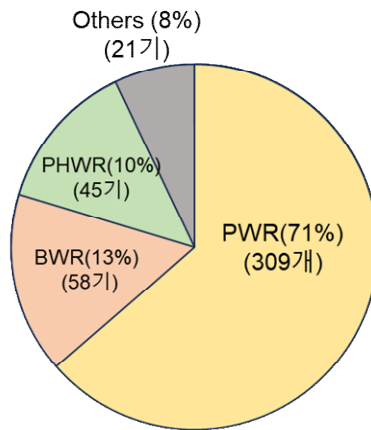
가 운전 중에 있다.

표 1-3 국내 가동 중 경수로 및 중수로 원전

원전 본부	가동 원전: 총 26기							
한빛	1	2	3	4	5	6		
한울	1	2	3	4	5	6	신1	신2
월성	2	3	4					
새울	1	2						
고리	2	3	4	신1	신2			

● 웨스팅하우스 16x16형 원전 (1기) ● 웨스팅하우스 17x17형 원전 (6기)
● OPR1000 원전 (12기) ● APR1400 원전 (4기)
■ 중수로 (3기)

참고로 전세계 가동 중인 주요 원자력발전소 현황은 그림 1-8에 제시되어 있다.



전세계 가동 중 원전: 433기

그림 1-8 전 세계 가동 중인 원자력발전소 현황

상기 그림에서 보듯이, 전 세계 가동 중인 원자력발전소의 약 71%가 가압경수로(PWR)임을 알 수 있다. 주요 국가별 가압경수로 운전 현황을 요약하면 다음과 같다.

- 미국: 54개
 - 17x17형 PWR: 49개(HIPER17 핵연료집합체 사용 가능)
 - 16x16형 PWR: 5개(HIPER16 핵연료집합체 사용 가능)
- 프랑스: 56개
 - 17x17형 PWR: 56개(HIPER17 핵연료 사용 가능)
- 중국: 48개
 - 17x17형 PWR: 48개(HIPER17 핵연료 사용 가능)
- 일본: 24개
 - 17x17형 PWR: 17개(HIPER17 핵연료 사용 가능)
 - 기타PWR: 7개
- 한국: 23개
 - 17x17형PWR: 6개(HIPER17 핵연료 사용 가능 원전)
 - 16x16형PWR: 17개(HIPER16 핵연료 사용 가능)
- U.A.E.: 4개
 - 16x16형PWR: 4개(HIPER16 핵연료 사용 가능)
- 스페인: 3개
 - 17x17형PWR: 3개(HIPER17 핵연료 사용 가능)

요약하면, HIPER16 핵연료집합체 사용 가능 해외 원전 수는 7기(미국 5기, UAE 4기)인 반면, HIPER17 핵연료집합체 사용 가능 해외 원전 수는 173기이다. 즉 HIPER17 핵연료집합체의 해외 수출 기회는 HIPER16 핵연료집합체에 비해 매우 크다고 할 수 있다.

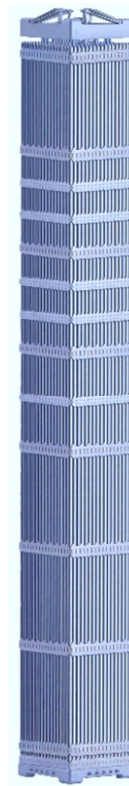
1.5 핵연료 형상 및 소재

1) 핵연료집합체 및 부품 형상

OPR1000/APR1400 원전용 핵연료집합체 형상 및 웨스팅하우스 17x17형 원전용 핵연료집합체 형상은 그림 1-9에 제시되어 있다. 이 그림에서 보듯이, 두 핵연료집합체 형상의 큰 차이는 핵연료집합체 상단에 장착된 홀다운 스프링 형상이다. OPR1000/APR1400 원전용 핵연료집합체에서는 코일형 홀다운 스프링이 사용되는 반면, 웨스팅하우스 17x17형 원전용 핵연료집합체에서는 판형 홀다운 스프링이 사용되고 있다. 이러한 홀다운 스프링 설계 차이는 원자로 상부 내부구조물 설계 차이에 기인하고 있다.



OPR1000/APR1400 원전용
핵연료집합체



웨스팅하우스 17x17형
핵연료집합체

그림 1-9 가압경수로 원전용 핵연료집합체 형상

가압경수로 원전용 핵연료집합체 성능요건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 취급 및 운전 중 발생하는 하중을 견딜 수 있는 기계적강도 보유
- 원자로심내 집합체 수직방향 유지
- 연료봉 위치 및 연료봉 사이의 간격 유지
- 원자로심 냉각수의 균일한 흐름 유지
- 제어봉 축방향 운동을 허용할 수 있는 공간 유지
- 집합체 외부(상단고정체 및 하단고정체 외부)로의 연료봉 이탈 방지
- 냉각수 수력적 하중에 의한 집합체 들림 방지

핵연료봉이 장입되지 않은 핵연료집합체는 골격체(skeleton)라고 명명되며, 그림 1-10에 나타나 있다.

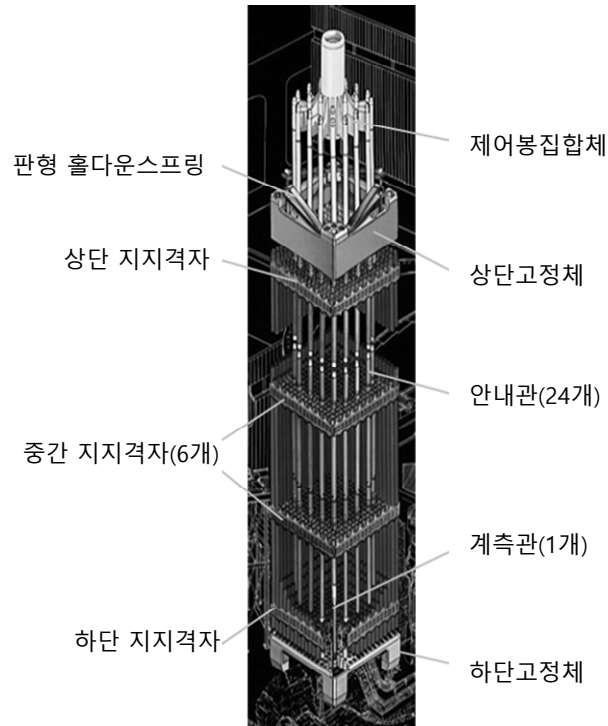


그림 1-10 핵연료집합체 골격체

핵연료집합체 각 부품 형상은 그림 1-11 ~ 1-14에 제시되어 있다.



Top Nozzle with Leaf Springs



Top Nozzle with Coil Springs

그림 1-11 상단고정체(Top Nozzle) 형상

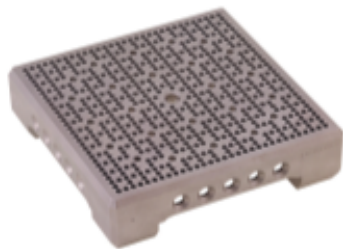


그림 1-12 하단고정체(Bottom Nozzle) 형상

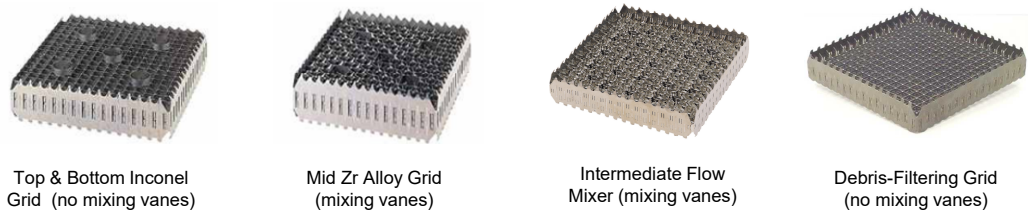


그림 1-13 상단/하단/중간/유동혼합기/이물질여과 지지격자(Grid) 형상

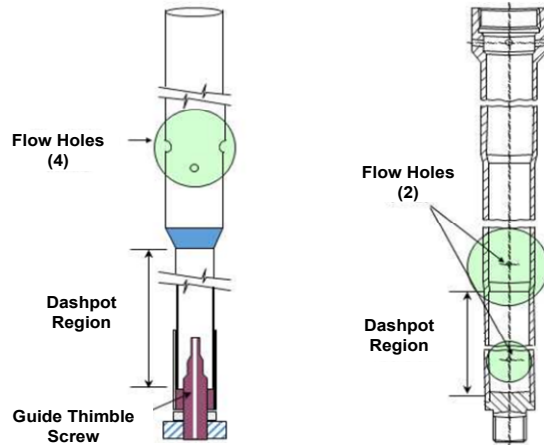


그림 1-14 안내관(Guide Thimble Tube) 형상

핵연료봉 및 핵연료집합체 제조 공정 흐름도는 그림 1-15에 제시되어 있다.

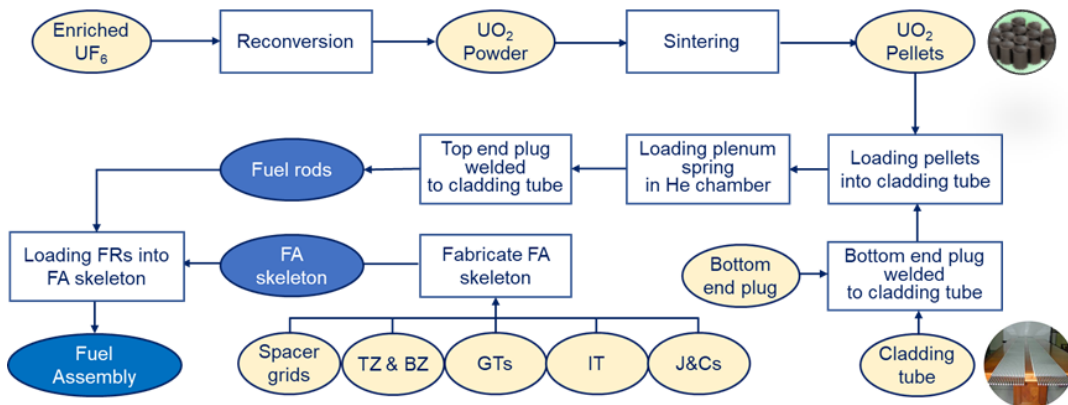


그림 1-15 핵연료봉 및 핵연료집합체 제조 공정 흐름도

2) 핵연료봉 및 부품 형상

핵연료봉 및 부품 형상은 그림 1-16에 제시되어 있다. 핵연료봉은 하부봉단마개와 용접된 Zr 합금 피복관 내에 약 370여개의 UO₂ 소결체를 삽입하고, 연료봉 내 소결체의 움직임을 방지하기 위해 소결체 상단부에는 압축

스프링을 장착한다. 한편, 소결체에서 피복관으로의 핵분열에 의해 발생된 열을 효과적으로 전달하고, 핵연료봉 연소 초기에 냉각재의 과압으로 인한 피복관 함몰을 방지하고자 약 22.5 bar의 헬륨 가스 챔버 내에서 상부 봉단마개와 피복관을 용접한다.

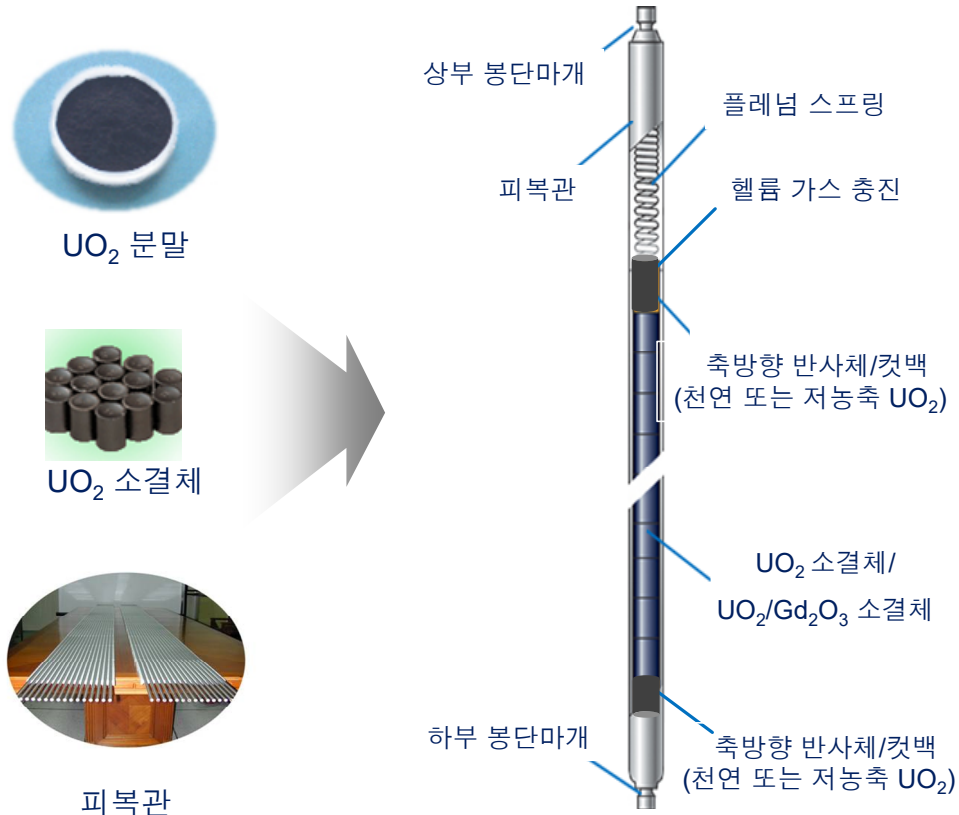


그림 1-16 핵연료봉 및 부품 형상

핵연료봉 내 UO₂ 소결체의 핵분열로 발생한 열은 원자로 냉각재로 전달되어야 한다. 이때 정상 운전 및 예상 운전 과도(AOO) 조건에서 요구되는 핵연료봉 성능 요건이 충족되어야 한다. 즉 핵연료 연소 기간 동안 핵연료봉 설계 기준(핵연료봉 연소도, 힘, 조사 성장 등)을 만족시켜야 한다. 핵연료봉 피복관에서는 핵분열 생성물이 냉각재로 방출되지 않도록 천공이 발생하지 않아야 한다.

3) 핵연료 부품 소재

핵연료 부품 소재는 표 1-4에 제시되어 있다.

표 1-4 핵연료 부품 소재

핵연료 부품		소재
핵연료봉	상단 및 하단 봉단마개	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo
	피복관	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo
	연료봉 압축스프링	스텐레스강, 인코넬 625
	핵연료 소결체	UO ₂
핵연료집합체	상단고정체	스텐레스강
	홀다운스프링	인코넬 718
	하단고정체	스텐레스강
	상단지지격자 및 하단지지격자	인코넬 718
	중간 지지격자	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo
	중간유동혼합기	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo
	안내관	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo
	계측관	Zr-Nb 합금: HANA, Zirlo

2. 원자력 지식재산권 확보 전략

2.1 개요

원자력 지식재산권은 하드웨어와 소프트웨어 지식재산권으로 대별된다. 원자로시스템, 원자로시스템 구성부품, 핵연료집합체, 핵연료집합체 부품, 원자력 및 핵연료 소재 등은 하드웨어에 속하며, 원자로시스템 성능해석 및 안전해석 전산코드, 핵설계/열수력설계/핵연료 성능해석/핵연료 안전해석 전산코드 등은 소프트웨어에 속한다.

핵연료 하드웨어에 대한 지식재산권을 확보하기 위해서는 독자적으로 하드웨어 형상 및/또는 소재 개념을 창출한 후, 다양한 노외 및 노내 검증시험 데이터베이스를 토대로 하여 '신규성', '진보성', '상업적 이용가능성' 및 기술적 효과 등의 자료를 생산해야 한다. 이를 토대로 국내 및 국외 특허를 출원할 수 있다. 특허 기관에서는 제시된 하드웨어의 '새로운 기능을 가능하게 하는 구조적 설계 원리'를 평가한 후, 특허 등록을 허용하게 된다. 결론적으로 핵연료 하드웨어의 지식재산권은 특허 등록을 통해 확보된다.

핵연료 소프트웨어 즉 전산코드에 대한 지식재산권은 특허등록, 저작권 등록, 영업비밀 등록 등을 통해 확보할 수 있다.

부연하면, 전산코드의 지식재산권을 확보하려면 독자 기술로 확보한 하드웨어에 대한 생산한 고유 노외 및 노내 성능 데이터베이스로부터 고유 해석 모델, 고유 계산 알고리즘, 고유 계산 프로그램 등이 함유된 고유 전산코드를 우선적으로 개발해야 한다. 아울러 전산코드 특허 등록을 위해서는 전산코드에 대한 정확도 및 신뢰성 등의 기술성과 신규성 등을 명확히 할 수 있도록 NQA-1과 같은 국제표준을 만족하는 소프트웨어 품질보증체계를 구축하고 이를 만족하는 형상관리 문서를 확보해야 한다.

한편, 전산코드 저작권은 전산코드 소스파일, 실행파일, 매뉴얼 등을 등록함으로써 확보될 수 있다. 전산코드 영업비밀은 전산코드 내부 알고리즘 매개변수를 등록함으로써 확보할 수 있다.

전산코드는 하드웨어 시스템 및 부품의 성능, 신뢰성 및 안전성 등을 평가하는 도구이므로, 전산코드의 지식재산권 확보를 위해서는 하드웨어에 대한 성능 데이터베이스의 확보가 필수적이다. 왜냐하면, 이러한 성능 데이터베이스로부터 고유 전산코드의 성능해석모델이 개발되고 아울러 전산코드 계산값의 정확도와 신뢰성이 입증되기 때문이다. 즉 하드웨어에 대한 고유 성능

데이터베이스 생산없이는 고유 전산코드 개발은 불가하다.

미국 웨스팅하우스사는 세계 최초로 원자로시스템 및 핵연료시스템 그리고 원자로 부품 및 핵연료 부품 등에 대한 특허 등록을 획득한 회사이다. 또한 세계 최초로 원자력 및 핵연료 전산코드 등에 대한 특허등록 및 저작권 등을 확보한 회사이다. 따라서, 현재 프랑스 아레바사 등의 세계 원자력회사들은 웨스팅하우스사와의 기술전수계약을 통해 웨스팅하우스사의 원자력 및 핵연료 하드웨어 및 소프트웨어 등에 대한 국내 기술실시권, 국내·외 기술실시권 또는 기술소유권 등을 확보하여 원자력사업을 수행하고 있다. 다음에는 주요 국가들의 원자력 지식재산권 확보전략을 간략히 기술하였다.

2.2 미국 웨스팅하우스사

미국 웨스팅하우스사는 1960년대부터 원자로시스템과 핵연료집합체 형상 설계, 원자로시스템과 핵연료집합체 부품 관련 소재, 원자력시스템 부품 및 핵연료집합체 제조공정 등에 대한 원천기술을 최초로 개발하였으며, 관련 특허를 보유하고 있다.

그림 2-1에서 제시되어 있듯이, 웨스팅하우스사는 세계 최초로 원자로 시스템 및 부품 그리고 핵연료집합체 및 부품에 대한 방대한 고유 성능 데이터베이스를 구축하였고, 이를 토대로 고유 설계기준, 성능모델, 성능해석 전산코드, 성능해석 방법론을 개발하였다. 한편, 상용 원자로발전소 도입 시기에 미국 원자력규제기관(NRC)의 규제 철학 및 규제기준의 정립에 많은 기여를 하였다.

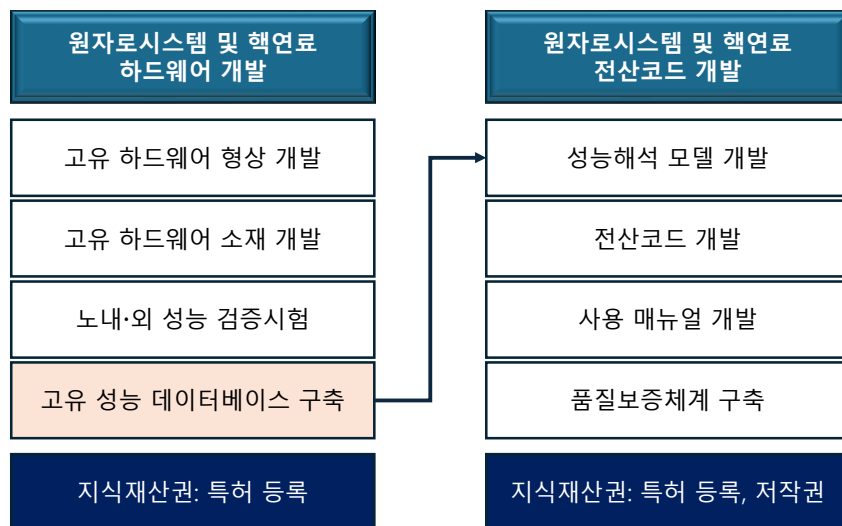


그림 2-1 미국 웨스팅하우스사 고유 하드웨어 및 소프트웨어 개발

미국 웨스팅하우스사는 최초로 원자력발전소 도입시기에 전 세계 가압 경수로 시장을 석권하여 원자력발전소 도입 국가의 터키 원자력발전소 건설과 핵연료집합체 공급 등을 주도하였다. 또한 원자력 기술 국산화를 추구하는 국가를 대상으로 원자로시스템 및 핵연료 기술전수계약을 체결하여, 웨스팅하우스사의 원자로시스템 통상설계 및 부품 양산제조 기술, 핵연료집합체 통상설계 및 양산제조 기술, 성능해석 전산코드 및 성능해석 방법론 등을 제공하였다. 그림 2-2에서 보듯이, 미국 웨스팅하우스사는 원자력 기술도입 국가의 지식재산권 확보 전략에 의거하여 국내 기술실시권, 국내·외 기술실시권 또는 기술소유권 등을 허용한 바 있다. 물론 기술도입 국가들은 웨스팅하우스사와의 기술전수계약 조건에 따라 웨스팅하우스사에 지불한 기술료에 큰 차이가 있음은 주지의 사실이다.

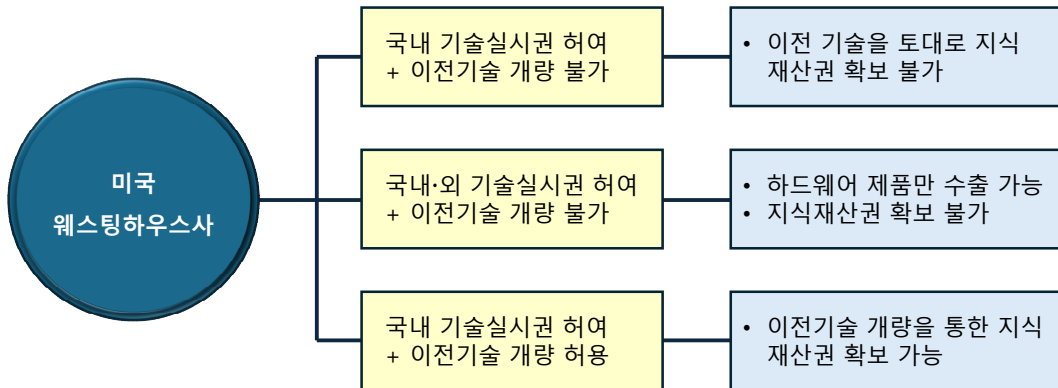


그림 2-2 미국 웨스팅하우스사의 기술이전방법

참고로, 미국 웨스팅하우스사와의 기술전수계약 시, 국내 기술실시권만을 확보하였다면 이 기술을 개량·개선하거나 신형 기술을 개발할지라도 이러한 기술은 모두 웨스팅하우스사에 귀속된다는 것이다. 이러한 사실을 토대로 하여 웨스팅하우스사는 APR1000 및 APR1400 원자로시스템 기술이 웨스팅하우스사 SYstem80 및 System80+ 원자로시스템 관련 특허를 침해했다고 주장한 것이다. 결국, 한국은 웨스팅하우스사 주장을 수용하여 기술사용 협정을 체결한 바 있다. 따라서, 해외사와의 기술전수계약시, 기술이전된 기술의 개량 및 개선에 대한 기술소유권 문제를 명확히 파악해야 한다.

2.3 프랑스 아레바사

프랑스 아레바사는 미국 웨스팅하우스사로부터 원자력 기술 도입 시, 향후 세계 원자력 시장 진출을 위해 우선적으로 기술소유권 확보를 추진하였다. 미국 웨스팅하우스사와의 기술전수계약의 핵심내용을 요약하면, 프랑스 아

레바사는 기술도입 후 10년 동안은 국내 기술실시권만을 보유하지만, 10년 이후에는 아레바사가 웨스팅하우스사의 기술을 토대로 개발한 기술에 대한 지식 재산권을 확보할 수 있다는 것이다.

미국 웨스팅하우스사 입장에서는 당사 원자력기술이 10년이 지나면 'Old Technology'가 되므로, 웨스팅하우스사가 보다 선진화된 원자력 기술을 개발한다면 프랑스 아레바사에 비해 기술 우위를 차지할 것으로 판단했기 때문이다. 그러나, 프랑스 아레바사는 기술전수된 웨스팅하우스사 기술을 토대로 웨스팅하우스사 선진 원자력 기술과 대등한 기술을 개발하였고, 현재 전 세계 가압경수로 시장에서 웨스팅하우스사의 강력한 라이벌로 부상하였다.

2.4 중국

중국은 원자력 후발 국가로서, 미국 웨스팅하우스사 간의 기술전수계약을 체결하여 미국 웨스팅하우스사의 AP1000 4기를 건설한 바 있다. 중국은 미국 웨스팅하우스사와의 기술전수계약에서 웨스팅하우스사의 설계·제작 관련 문서 이전과 Know-How 기술 이전을 담보하였고, AP1000 기술을 토대로 확대·개량한 기술에 대해 기술소유권이 확보된다고 주장하고 있다.

따라서 중국은 웨스팅하우스사의 AP1000 원자력 기술을 확대·개량한 CAP1400 원자력기술에 대한 기술소유권을 확보하였다고 발표한 바 있다. 그러나 중국의 원자력 기술 수출은 미 에너지부 10 CFR Part 810 등 미국 수출 통제 규정의 적용을 받고 있으며, 2018년 미국의 대중 민수원전 기술수출 정책 강화로 추가 제한이 공표됨으로써 중국의 원자력 기술 수출은 제한적일 수밖에 없다.

2.5 한국

한국은 초창기 원자력기술 도입 시, 원자력발전소 해외수출에 대한 명확한 비전이 없었고, 오직 원자력기술 국산화를 통한 국내 원자력발전소 사업에만 집중하였다. 따라서, (구)컴버스천엔지니어링사와 원자력발전소 설계 및 제조기술 도입 시에 국내 기술실시권만을 확보하였다. 또한 독일 지멘스사와의 핵연료 설계 및 제조 기술 도입 시에도 국내 실시권만을 확보하였다.

한편, 다수의 OPR1000 원전의 성공적으로 건설·운영과 차세대 원자로 시스템인 APR1400 원전 개발에 따라 APR1400 원전 수출에 대한 의지가 부상하였고, 이에 따라 한국수력원자력에서는 (구)컴버스천 엔지니어링사와의 기술이전 관련 재협상을 통해 APR1400 원자로시스템의 독자 수출이 가능하게

되었다고 선언한 바 있다. 한편 U.A.E. APR1400 4기를 성공적으로 수출함에 따라 한국수력원자력에서는 APR1400 원자로시스템의 수출에 대한 자신감을 가지게 되었고, 전 세계 원자력 수출 시장에 독자적으로 진출하게 되었다. 그러나 U.A.E. APR1400 4기 수출 당시, 미국웨스팅하우스사에 상당한 금액의 기술료와 프로젝트 수행비가 제공되었음을 감안하면, APR1400 원자로시스템의 기술소유권과 독자 수출 문제점에 대한 철저한 분석이 필요하였다고 사료된다. 즉 U.A.E. APR1400 4기 수출에 따른 미국 웨스팅하우스사에 지불한 사업비 지출 사유에 대한 상세한 분석이 없었던 것으로 판단된다.

미국 웨스팅하우스는 전 세계에 최소 52,472건 이상의 특허출원을 한 것으로 알려져 있다. 물론, 이중에는 심사과정에서 거절된 것도 있고, 등록 후, 존속기간 만료에 의하여 소멸된 특허들도 있겠지만, 양적으로 대단하다고 할 수 있다. 웨스팅하우스사는 전기가 필요한 거의 대부분의 국가에 특허 등록을 시도하였다. 웨스팅하우스사가 세계 각국에 특허 등록을 유지시키기 위해 연간 수십억 내지 수백억원의 지식재산권 유지 비용을 지불하는 것으로 알려져 있다. 웨스팅하우스사는 스스로 오랫동안 개발해온 원자력기술을 담은 지식재산권 확보에 막대한 투자를 한 것이고, 투자회수의 수단으로 기술료를 요구하고 있다.

미국 웨스팅하우스가 핵심적으로 주장하는 것은 한국의 APR1000과 APR1400 원자로 설계가 자신들의 'System 80 원자로시스템' 및 'System80+ 원자로시스템' 기술을 활용하고 있다는 것이다. 'System 80'이라고 불리는 이 기술은 컴버스천 엔지니어링사(CE)가 개발한 2세대 원자로 설계인데, 2001년에 CE가 웨스팅하우스에 매각되면서, 웨스팅하우스의 대표적인 기술이 되었다. 지금은 CE의 이름으로 진행된 미국 특허출원 약 1,200개의 대부분이 존속기간 만료로 소멸되었지만, 대부분이 원자로시스템 설계에 관련된 것이고, Know-How기술도 포함되고 있다. 웨스팅하우스사는 원자로시스템 특허 뿐만 아니라, 공개되지 않은 도면 등에 대한 저작권을 주장한 것으로 알려져 있다. 저작권은 저작자 사후 70년까지 존속기간이 매우 길기 때문에, 특허출원 후 20년까지가 최장인 특허에 비해 더 유리하다고 할 수 있다.

따라서 체코 APR1000 원전 건설의 우선협상대상자로 한국이 선정된 순간부터 한국은 웨스팅하우스사와의 지식재산권 침해 논쟁에서 불리할 수 밖에 없었다. 왜냐하면, 한국은 웨스팅하우스사와의 협상 지연에 따라 체코 APR1000 원전 건설 일정을 맞추지 못한다면 우선협상대상자 자격을 상실할

밖에 없기 때문이었다. 이러한 시간 압박 속에서 한수원과 웨스팅하우스사 간의 체코원전 원자력시스템 및 핵연료 공급계약은 매우 불만족스럽게 이루어진 것으로 알려져 있다. 특히 지식재산권이 확보된 HIPER16 핵연료의 체코 원전으로의 수출 불가능 전혀 예상치 못한 사항이다.

국내 핵연료 전문기관인 한전원자력연료는 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 OPR1000, APR1000, APR1400 원전용 PLUS7 핵연료, 웨스팅하우스 16x16형 원전용 16ACE7 핵연료, 웨스팅하우스 17x17 형 원전용 17ACE7 핵연료를 개발하였다. 공동개발임도 불구하고 PLUS7 핵연료의 경우, 독자 기술소유권을 확보하여 미국을 제외한 제3국에 PLUS 핵연료의 독자 수출이 가능한 반면, 16ACE7 및 17ACE7 핵연료의 경우, 국내 실시권만을 보유함으로써 국내 원전에만 사용이 가능하다. 물론 웨스팅하우스사가 승인하면 16ACE7 및 17ACE7 핵연료집합체 수출도 가능하다.

또한 한전원자력연료는 OPR1000, APR1000 및 APR1400 원전용 HIPER16 핵연료를 독자적으로 개발하여 완전한 지식재산권을 확보하고 있다. HIPER16 핵연료는 인허가 획득 후 PLUS7 핵연료를 대체하여 2024년 8월부터 상용 공급 중에 있다.

한편 한전원자력연료에서는 웨스팅하우스 17x17형 원전용 HIPER17 핵연료체를 개발하여 노내·외 검증시험을 2020년 6월에 완료하였으나, 5년이 지나도록 한수원의내부지침에 의해 현재까지 원자력안전위원회에 HIPER17 핵연료 인허가를 신청하지 못하고 있다. HIPER17 핵연료도 HIPER16 핵연료와 마찬가지로 수출선도형 핵연료이므로 조속히 인허가를 추진해야 한다고 사료된다.

참고로, 미국 Energy Solution사에서 자사 개발 PWR20 소형원자로(SMR)에 12개의 HIPER17 핵연료를 사용하기 위해 한전원자력연료에 HIPER17 핵연료 수출 의사를 수차례 타진하였으나, HIPER17 핵연료의 인허가 미비 그리고 한수원과 웨스팅하우스사 간 체코원전 공급계약 진행을 핑계로 인해 HIPER17 핵연료 수출이 무산된 바 있다.

3. 국내 핵연료 기술 확보이력

3.1 개요

표 1-3에 제시되어 있듯이, 2025년 10월 현재 국내 가동 중인 원전은 경수로 23기 및 중수로 3기로서 총 26기이다. 상술하면, 경수로 원전으로는 웨스팅하우스 16x16형 원전 1기, 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기, OPR1000 원전 12기, APR1400 원전 4기 등이 있으며, 중수로 원전으로는 월성 2.3.4호기 등이 있다. 현재 APR1400 원전인 신한울 3,4호기 및 새울 3.4호기 등 총 4기가 건설 중에 있다.

경수로 원전에 공급 중인 핵연료 기술의 확보이력 및 특기사항은 표 3-1에 나타나 있다. 이 표에서 보듯이, 1970대 및 1980년대에 걸쳐 미국 웨스팅하우스사에 의해 고리 1,2,3,4호기 및 한빛 1,2호기에 준공되고, 프랑스 아레바사에 의해 한울 1,2호기 준공되었으나, 국내 핵연료 설계 및 제조기술이 미 확보된 상태이므로 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사로부터 직접 핵연료집합체를 전량 수입하여 원자력발전소에 공급하였다. 이러한 직접 수입한 핵연료를 제 0세대 핵연료라고 한다.

표 3-1 국내 경수로 핵연료 기술 확보이력 및 특기사항

핵연료 기술 단계	핵연료 명칭	핵연료 세대	특기사항
핵연료 수입기 (1980년대)	<ul style="list-style-type: none"> STD FA OFA 	제 0세대	<ul style="list-style-type: none"> 국내 핵연료 설계 및 제조기술 미보유 국내 핵연료 제조시설 미보유
핵연료기술 도입기 (1980년대 중반~1990년대 초반)	<ul style="list-style-type: none"> 16KOFA 17KOFA STD FA 	제 1세대	<ul style="list-style-type: none"> 한전원자력연료 설립: 1982년 독일 지멘스사로부터 핵연료기술 도입
핵연료기술 개량기 (1990년대 후반~2000년대 중반)	<ul style="list-style-type: none"> PLUS7 16ACE7 17ACE7 	제 2세대	<ul style="list-style-type: none"> 미국 웨스팅하우스사와 공동개발 PLUS7: 국내·외 기술실시권 보유 ACE7: 국내 기술실시권만 보유
고유 핵연료기술 개발기 (2000년대 중반~2020년대 초반)	<ul style="list-style-type: none"> HIPER16 HIPER17 	제 3세대	<ul style="list-style-type: none"> 독자 기술소유권(지식재산권 확보) 고유 소재 HANA 개발 고유 원자로심 설계 및 안전해석 전산코드 개발
사고저항성 핵연료기술 개발기 (2010년 초반 ~ 현재)	<ul style="list-style-type: none"> 코팅 피복관 세라믹 피복관 고밀도 핵연료 	제 4세대	<ul style="list-style-type: none"> 일본 후쿠시마 원전사고 여파로 Zr 합금 소재 대체 소재 개발: 코팅 Zr 합금, 세라믹 피복관, 고밀도 핵연료

핵연료의 안정적 공급 및 경제적 이득을 고려하여 1980년 중반에 수립된 핵연료 국산화 계획에 따라 독일 지멘스사로부터 핵연료 설계기술과 제조기술을 도입하였다. 독일 지멘스사로부터 한국원자력연구원은 핵연료 설계 기술 이전을 받은 반면, 한전원자력연료는 핵연료 제조기술 이전을 받은 바 있다. 1980년 중반부터 1990년대 초반까지 해외사 도입기술을 토대로 설계·제

조하여 국내 경수로 원전에 공급된 핵연료를 제 1세대 핵연료라고 한다. 그러나 고리2호기에 1990년 상용장전된 제1세대 핵연료인 16KOFA 핵연료의 대량 손상 발생 여파로 인해 한국원자력연구원의 설계업무와 설계인력이 한전원자력연료로 1997년 1월 1일자로 이관되었다. 마찬가지로 1997년 1월 1일자로 한국원자력연구원의 원자로시스템 설계업무 및 설계인력은 한국전력기술로 이관되었고, 방사성폐기물 사업업무 및 인력은 한국수력원자력으로 이관되었다.

핵연료 기술의 국제경쟁력 확보를 위해 제 1세대 핵연료의 성능 개량을 위하여 1999년부터 2000년대 중반까지 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 OPR1000 및 APR1400원전용 PLU7 핵연료, 웨스팅하우스 16x16형 원전용 16ACE7 핵연료 및 웨스팅하우스 17x17형 원전용 17ACE7 핵연료 등 세 종류의 핵연료를 각각 개발하였다. 이러한 공동개발 핵연료를 제 2세대 핵연료라고 한다.

그러나 제 2세대 핵연료인 17ACE7 핵연료의 국외실시권 미확보로 인한 독자 수출 곤란 문제와 PLUS7 핵연료의 미국 수출 문제를 해결하기 위해 지식재산권(기술소유권)이 확보된 수출선도형 핵연료인 HIPER16 핵연료와 HIPER17 핵연료를 2005년부터 2020까지 개발 완료하였다. 이러한 기술소유권이 확보된 핵연료를 제 3세대 핵연료라고 한다. 2024년 8월부터 HIPER16 핵연료는 OPR1000 및 APR1400 원전에 상용공급되고 있으나, 웨스팅하우스 17x17형 원전용 HIPER17 핵연료는 인허가 신청조차 하지 못한채 당초 상용공급 일정에 비해 상용공급 일정이 크게 지연되고 있다.

한편 핵연료봉 피복관, 중간 지지격자 및 유동혼합기, 안내관 및 계측관 소재로 사용되는 고부가가치의 Zirlo 또는 M5 피복관이 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사로부터 각각 수입되어 핵연료봉 및 집합체 제조에 사용되었다. 따라서 한국원자력연구원에서는 지식재산권이 확보되고 Zirlo에 비해 성능이 향상된 고성능 HANA 소재를 1997년부터 2010년 초반까지 성공적으로 개발 완료하였다. 이 HANA 소재는 한국원자력연구원에서 한전원자력연료로 기술이전되어 현재 HIPER16 및 HIPER17 핵연료봉 및 집합체 제조에 사용되고 있다.

또한 제 1세대 및 제 2세대 핵연료가 장전된 원자로심의 설계 및 안전해석을 웨스팅하우스사로부터 기술도입된 전산코드체계를 사용하였다. 따라서, HIPER16 및 HIPER17 핵연료 개발과 병행하여 지식재산권이 확보된 원자로심 설계 및 안전해석 전산코드체계 개발 프로젝트가 원자력 산·학·연이 협

력하여 성공적으로 개발·완료되었다. 이를 통해 명실상부하게 핵연료 하드웨어 및 소프트웨어에 대한 기술소유권을 확보하게 되었으며, 핵연료 제품 수출 뿐만 아니라, 웨스팅하우스사 및 아레바사와 동일하게 핵연료 기술 수출 능력을 갖추게 되었다.

일본 후쿠시마 원전 사고 이후, 기존 Zr 합금이 장착된 핵연료의 원전 사고저항성을 획기적으로 향상시키기 위해 사고저항성 핵연료가 전 세계적으로 개발되고 있다. 국내에서도 한국원자력연구원 및 한전원자력연료가 사고저항성 핵연료를 개발하고 있다. 이러한 사고저항성 핵연료를 제 4 세대 핵연료라고 한다.

다음에는 제 0세대, 제 1세대, 제 2세대, 제 3세대 및 제 4세대 핵연료를 상세하게 기술하였다.

3.2 제 0세대 핵연료

원자력 발전소를 최초로 도입하는 국가의 경우, 해당 기술 수준이 초기 단계에 머물러 있고, 설계 및 제조 관련 인프라가 아직 구축되지 않은 점을 고려하여, 대략적으로 세 가지 단계, 즉 일괄 공급(Turnkey) 단계, 부품 공급 국산화 단계, 자립 기술개발 단계를 거쳐서 원자력 기술을 확보하고 있다.

원자력 발전 기술은 원자로시스템 설계 엔지니어링, 원자력 증기 공급계통(NSSS) 설계, NSSS 및 터빈/발전기(T/G) 장비 공급, 발전소 건설 및 운영으로 구성된다. 일괄 공급(Turnkey) 방식이 적용되는 제 1 단계에서는 소수의 원자력 발전소가 건설될 수 있으며, 프로젝트 관리를 총괄하는 주 계약자인 해외사가 시운전을 주도한다. 해외사는 언급된 발전소 관련 설계, 발전소 부품 공급, 발전소 건설 및 시운전의 모든 과정을 수행한다. 이 단계에서는 한수원 및 관련 원자력 산업계의 축적된 원자력 기술 수준이 여전히 미미할 수 있다.

부품 공급 국산화 방식의 제 2단계에서는 한수원이 축적된 발전소 건설 및 운영 경험을 바탕으로 프로젝트 관리를 담당할 수 있다. 그러나 주계약업체인 해외사는 여전히 자체적으로 원자로 계통(NSSS) 설계를 수행하며, 한수원 및 국내 협력업체와 공동으로 원자력시스템 부품 공급, 발전소 건설 및 시운전 운영을 수행할 수 있다. 이 단계에서 원자력 발전소 관련 설계 인력이 확보되었거나 확보될 예정이라면 국내 공급업체에 의해 종합 설계(Architect Engineering) 및 NSSS 설계를 포함하는 원자력 기술이전 프로그램이 착수될 수 있다. 또한 원자로시스템 설계 도구, 원자력시스템 부품 제조시설, 성능 검

증시험 설비 등 원자력 기술 관련 인프라가 부분적으로 구축될 수 있다. 원자력 발전기술의 국산화 수준은 원자력 발전소 건설 및 운영 경험이 축적됨에 따라 향상된다.

원자력 발전기술 자립의 제 3단계에서는 국내 원전사업자가 충분한 발전소 건설 및 운영 경험을 바탕으로 프로젝트 관리를 담당하게 된다. 국내 주요 원자력시스템 부품 공급체는 모든 발전소 건설 및 시운전 작업을 자체적으로 수행하나, 일부 원자로계통 설계 및 기자재 공급은 해외 기자재 공급업체와 공동으로 진행할 수 있다. 제 2단계 수행업무 동안 제 3단계가 시작되지 않았다면 해외사와 원자력 기술이전 프로젝트를 착수해야 하며, 대부분의 원자력 기술 관련 인프라가 구축되어야 한다. 해외사의 원자력 기술이전 범위는 원자력 기술실시권 부여, 발전소 통상설계 및 양산제조 기술 이전, 발전소 통상설계 및 양산제조 도구 이전, 원자력 기술 관련 배경 정보 이전, 해외 및 국내 강의실 집단교육(classroom training) 실시, 현장 교육(on-the-job training) 실시, 해외 협력업체의 현장 프로젝트 수행, 기술이전 기관의 검토 및 의견을 통한 검증/유효성 확인절차 등이 포함되어야 한다.

상기 원자력 발전기술 자립을 기반으로, 장기적인 관점에서 원자력 발전 및 관련 기술의 수출 능력을 확보하기 위한 지식재산권이 확보를 위해 원자력 원천기술 개발 프로젝트가 착수될 수 있다.

국내에 1978년 고리1호기 원자력발전소가 상업운전을 시작한 이후, 고리 2호기, 고리 3,4호기, 한빛 1,2 호기 및 한울 1,2호기 등이 차례로 상업운전이 개시되었다. 고리 1,2,3,4호기 및 한빛 1,2호기는 미국 웨스팅하우스사와 일괄 공급 방식 및 부품 공급 국산화 방식에 의해 건설된 반면, 한빛 1,2호기는 프랑스 아레바사와 일괄 공급 방식 및 부품 공급 국산화 방식에 의해 건설되었다.

한편 국내에 소수의 원자력 발전소가 운영되는 초기 단계에서는 원자력 발전소에 소요되는 핵연료집합체의 개수를 고려할 때, 핵연료 기술 도입에 의한 핵연료집합체 자체 생산이 경제적이지 않으므로 초기 단계에서는 원자력 발전소에 소요되는 핵연료집합체를 해외사로 부터 수입하는 것이 경제적이다. 따라서 고리 1,2,3,4호기 및 한빛 1,2호기에 소요되는 핵연료집합체를 미국 웨스팅하우스사로부터 수입한 반면, 한빛 1,2호기에 소요되는 핵연료집합체를 프랑스 아레바사로부터 수입하였다.

핵연료 주기 비용은 전체 원자력 발전 원가의 25~49%를 차지하며, 이

중 핵연료 성형가공비용은 약 10% 수준에 불과하다. 그러나, 핵연료 주기의 비용 절감 및 원자력 발전 효율 향상의 핵심은 핵연료 기술에 달려 있다.

원자력발전소에 공급되는 핵연료는 노외 및 노내 검증시험을 통해 경제성, 신뢰성 및 안전성이 입증되어야 한다. 핵연료 기술은 핵연료 소재 설계, 핵연료봉 및 부품 설계, 핵연료집합체 및 부품 설계, 원자로심 설계 및 안전해석 그리고 설계·해석 전산코드 및 설계·해석 방법론 등으로 대별된다.

앞에 기술한 바와 같이 핵연료 기술은 노외 검증시험, 연구로 조사 검증시험, 노내 성능 검증시험 및 핫셀시험을 토대로 생산한 성능 데이터베이스를 기반으로 하여 검증되고 있다. 따라서 핵연료 기술을 검증하기 위해서는 핵연료 소결체, 피복관, 핵연료봉, 핵연료집합체 및 부품의 제조시설뿐만 아니라 검증시험 장비 및 시험시설, 핵설계/열수력/핵연료 설계 전산코드, 안전해석 전산코드, 설계 및 해석방법론 등이 확보되어야 한다. 상기 핵연료 기술개발 인프라를 포함한 지식재산권이 확보된 핵연료 기술을 확보하기 위해서는 대략적으로 20년 정도 소요될 수 있다는 점에 유의해야 한다.

3.3 제 1세대 핵연료

국내 원자력 발전소 수가 지속적으로 증가함으로써 국내에서 핵연료 자체 생산이 핵연료 주기 경제성 및 원자력 발전 비용 절감에 효과적이라고 판단되면 핵연료 기술 자립 프로젝트가 시작될 수 있다. 대부분의 핵연료 기술 자립 프로젝트는 해외사와의 기술이전계약을 통해 수행된다. 핵연료 기술이전 계약은 다음의 조건 및 기술 정보로 구성된다.

- 핵연료 기술소유권 또는 기술실시권 허여
- 품질보증 프로그램을 포함한 핵연료 기술의 보증, 기간 및 책임
- 기술실시권의 실시예 필요한 기술 정보
- 원자로심 설계 및 안전해석, 핵연료 설계에 필요한 기술 정보: 핵설계, 열수력 설계, 핵연료봉 설계 및 핵연료집합체 설계 관련 정보; 원자로심 설계 및 안전해석을 위한 전산코드 체계 및 설계·해석 방법론
- 천연 UO_2 변환 또는 농축 UF_6 재변환, UO_2 소결체, 핵연료봉 및 부품(피복관, 봉단마개, 압축스프링 등), 핵연료집합체 및 부품(상·하단고정체, 안내관, 계측관, 지지격자, 조인트 및 연결부 등)을 포함하는 핵연료 제조기술 정보

상기 핵연료 기술 이전은 다음의 방법을 통해 실현될 수 있다.

- 해외 및 국내 강의실 집단교육
- 현장 실습교육, 핵연료 설계 및 제조 관련 현장 프로젝트 실시
- 핵연료 설계자료 및 제조자료에 대한 검증 및 유효성 확인
- 핵연료 설계자료 및 제조자료에 대한 검토 및 의견 제시

국내 핵연료 공급업체가 프로젝트 관리를 담당할 수 있지만, 기술이전 초기 단계에서는 해외사가 자체적으로 핵연료 설계를 수행하고, 국내 핵연료 공급업체는 핵연료 설계자료만을 검토할 수 있다. 국내 핵연료 공급업체는 강의실 집단교육, 현장 실습교육 및 현장 프로젝트 수행을 통해 해외사 현장 또는 국내 현장에서 핵연료 설계기술을 축적할 수 있다. 국내 핵연료 공급업체는 통상적으로 해외 공급업체의 핵연료 부품을 수입하여 핵연료봉 및 핵연료집합체를 제조할 수 있다. 한편 핵연료 설계 및 제조 경험이 축적됨에 따라, 국내 핵연료 공급업체는 독자적으로 핵연료 설계 및 제조를 수행할 수 있다. 그러나 국내 확보된 제조시설 및 제조기술 수준을 감안하여, 핵연료 주요 부품 즉 핵연료 피복관 등은 해외사로부터 수입할 수 있다.

국내의 실제 핵연료 기술전수계약에 따라 확보한 핵연료 설계기술 및 제조기술은 다음과 같이 요약할 수 있다.

국내 핵연료 국산화 계획에 따라 웨스팅하우스 16x16형 원전과 17x17형 원전에 사용되는 핵연료 설계기술과 제조기술 이전은 독일 지멘스사로부터 1980년 중반부터 시작되었다. 핵연료 설계기술 전수 업무는 한국원자력연구원 연구원들이 담당하였고, 핵연료 제조기술 전수 업무는 한전원자력연료 제조자들이 담당하였다. 상용원전에 공급될 핵연료집합체 및 핵연료봉 제조를 한전원자력연료가 자체적으로 수행하였지만 핵연료봉 피복관, 핵연료집합체 주요 부품 등은 국내 협력업체 또는 해외 공급업체를 대상으로 공개 입찰방식에 의해 확보되었다. 상기와 같이 독일 지멘스사로부터 기술도입된 핵연료에 대한 설계 및 제조 업무는 한국원자력연구원과 한전원자력연료에 의해 각각 수행되었다. 생산된 핵연료집합체는 1990년부터 웨스팅하우스 16x16형 원전(고리 2호기)과 17x17형 원전(고리 3,4호기, 한빛 1,2호기, 한빛 1,2호기)에 상용공급되었다. 참고로 독일 지멘스사로부터 기술도입된 핵연료는 KOFA(Korea Optimized

Fuel Assembly)라고 한다.

(구)컴버스천 엔지니어링사의 System80 원전 설계를 기반으로 개발된 OPR1000 원전용 핵연료 설계기술 이전은 (구)컴버스천 엔지니어링사로부터 1980년 중반부터 시작되었다. 단 OPR1000 원전용 핵연료 제조는 독일 지멘스사로부터 기술이전된 제조기술을 토대로 수행되었다. OPR1000 원전용 설계업무는 한국원자력연구원 연구원들이 담당하였다. OPR1000 원전에 공급될 핵연료집합체 및 핵연료봉 제조는 한전원자력연료가 자체적으로 수행하였지만, 핵연료봉 피복관, 핵연료집합체 주요 부품 등은 국내 또는 해외 공급업체를 대상으로 공개 입찰방식에 의해 확보되었다. 상기와 같이 (구)컴버스천 엔지니어링사로부터 기술도입된 핵연료 설계는 한국원자력연구원이 수행한 반면, 핵연료 제조는 독일 지멘스사로부터 기술도입된 제조기술을 토대로 한전원자력연료에 의해 수행되었다. 생산된 핵연료집합체는 1990년부터 OPR1000 원전에 상용공급되었다. 참고로 (구)컴버스천 엔지니어링사로부터 기술도입된 핵연료는 표준핵연료(Standard Fuel Assembly)라고 하며, 이후에 가디언(Guardian) 핵연료로 대체되었다.

한편 핵연료의 안정적 공급 및 핵연료 제조비 절감을 위해 핵연료 부품 국산화를 지속적으로 추진하였으며, 2025년 10월 현재, 농축 UF₆ 및 Zr 합금 TREX를 제외한 모든 부품은 국산화되었다. 표 3-2에는 경수로 핵연료 부품 공급업체가 제시되어 있다.

표 3-2 경수로 핵연료 부품 공급업체

구분	부 품	공급업체
핵연료봉	농축 UF ₆	한수원(해외사 수입)
	UO ₂ 소결체	한전원자력연료
	피복관 TREX	해외 공급업체
	피복관	한전원자력연료
	압축스프링	국내 협력업체
	봉단마개	국내 협력업체
핵연료집합체	상단고정체	국내 협력업체
	하단고정체	국내 협력업체
	지지격자판	국내 협력업체
	지지격자체	한전원자력연료
	안내관	한전원자력연료
	계측관	한전원자력연료
	골격체(skeleton)	한전원자력연료

3.4 제 2세대 핵연료

1) 전 세계 가압경수로 핵연료 개발 방향

원자로심에 장전되어 연소되는 핵연료의 안전성과 경제성 확보는 원자력의 지속적인 성장에 필수적이다. 다른 에너지원과 비교한 비용 경쟁력은 원자력의 미래를 결정할 핵심 요소이다. 원자력 발전소는 건설 비용이 높지만, 운영 비용은 상대적으로 저렴한 선행 투자비용 구조를 가지고 있다. 원자력발전소 활용도를 극대화하기 위해서는 예기치 않은 가동 중단(원자로 트립) 발생 횟수를 줄이고, 최적의 핵연료 장전모형 선정을 통해 핵연료주기 길이를 늘리며, 계획예방정지기간을 축소하여야 한다. 하지만 이러한 전략 도입으로 인한 원자력발전소 안전성을 희생하여서는 안된다.

그림 3-1에는 가압경수로 핵연료 성능 향상 관련 4가지 핵심요소가 나타나 있다. 가압경수로(PWR)는 95%를 초과하는 이용률을 보이는 경우가 많으며, 이 그림에서 보듯이, 24개월 핵연료주기 도입이 점차 보편화되고 있다. 참고로 국내에는 18개월 핵연료주기가 사용되고 있다. 발전소의 방사성 폐기물 발생량을 줄이고 방사성 폐기물 처리에 수반되는 높은 비용을 축소하기 위해서는 방출 핵연료의 연소도를 높이는 것이 중요하다. 핵연료 연소도를 높이기 위해서는 더 긴 핵연료주기와 높은 수준의 핵연료 신뢰성이 요구된다. 운전 중 핵연료 손상은 발전사업자에게 높은 비용 부담을 줄 수 있으며, 특히 발전량을 저해하거나 정비기간을 연장시킬 수 있다.

그림 3-1에서 보듯이, 가압경수로의 핵연료 평균 방출연소도는 축적된 경험과 기술 발전으로 지속적으로 증가해 왔다. 이러한 핵연료 방출연소도 증가로 인해 핵연료 주기비용이 절감되고 원자력발전소 운전 유연성이 향상될 수 있다. 현재 평균 방출연소도는 약 55 MWD/kgU 수준이며, 이 값 이상으로 방출연소도를 증가시키면 경제적 이점이 있으나 방출연소도 증가가 반드시 핵연료주기 길이 증가로 이루어질 것인지, 아니면 핵연료 방출연소도 증가에 따라 핵연료 건전성 및 안전성에 문제가 발생할 지에 대한 불확실성은 존재한다. 따라서 핵연료 방출연소도 증가에 의한 핵연료주기 길이 및 핵연료 건전성/안전성에 미치는 영향을 핵연료 개발자는 면밀히 검토하여야 한다.

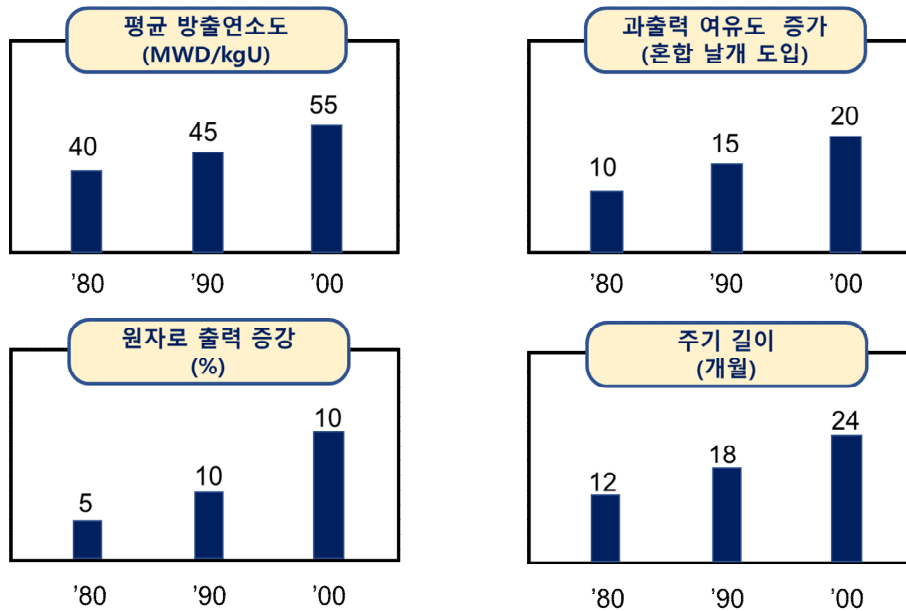


그림 3-1 가압경수로 핵연료 성능 향상 관련 4가지 핵심 요소

핵연료 방출연소도를 60 MWD/kgU 이상으로 증가시키기 위해서는 현재 인허가 우라늄 농축도인 5.0 w/o를 초과해야 하므로 인허가 문제가 발생할 수 있다. 핵연료 방출연소도가 60 MWD/kgU 이상인 고연소도 핵연료 도입에 대한 인센티브는 국가 및 전력 회사마다 다를 수 있으며, 이는 기술적 한계 및 인허가 문제가 없다고 하더라도 전력 회사가 이를 선택하지 않을 수 있다.

원자력발전소 운영비용에 비하면 핵연료주기 비용은 미미한 수준이다. 따라서 고연소도 핵연료 개발은 핵연료주기 비용 상승을 초래하지만 원자력 발전소에 더 적은 수의 핵연료 집합체가 공급될 수 있으므로 원자력 발전비용 절감을 가져올 수 있다. 현재까지 원자력 발전비용 절감을 위해 핵연료 방출연소도는 지속적으로 증가하고 있으며, 이를 위해 우라늄 농축도는 2.5% U-235에서 약 4.5% U-235로 증가하였고, 현재는 4.95% U-235로 증가되었다.

원자로 출력증강(Power Uprate)은 충분한 안전 여유도, 설계 여유도 및 운전 용이성을 유지하면서 원자력 발전소의 전력 생산량을 늘리는 효율적인 방법이다. 일부 국가의 원자력발전소는 잠재적인 출력증강을 수용할 수 있도록 처음부터 추가 발전용량으로 설계되고 있다. 출력증강은 측정 불확실성 재포착을 통한 출력증강, 스트레칭을 위한 출력증강, 확장 출력증강 등 세 가지로 구분된다.

2) 해외사 핵연료 개발이력

미국 웨스팅하우스사는 그림 3-2 및 그림 3-3에 제시된 바와 같이 웨스팅하우스 17x17형 원전 및 (구)CE 16x6형 원전(OPR1000 및 APR1400 원전과 유사)에 사용되고 있는 핵연료 성능 향상을 위해 신형 핵연료인 V5H, Performanc+, RFA, NGF, Guardian, CE16NGF 핵연료 등을 약 5년 간격으로 지속적으로 개발하고 있다. 프랑스 아레바사도 웨스팅하우스사와 유사하게 AFA3G, AGORA, FOCUS 핵연료 등을 개발하고 있다.

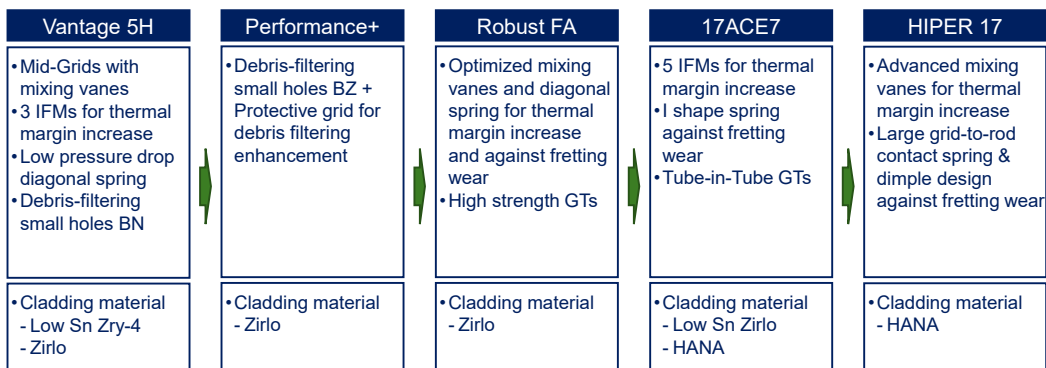


그림 3-2 웨스팅하우스 17x17형 원전용 신형핵연료 개발이력

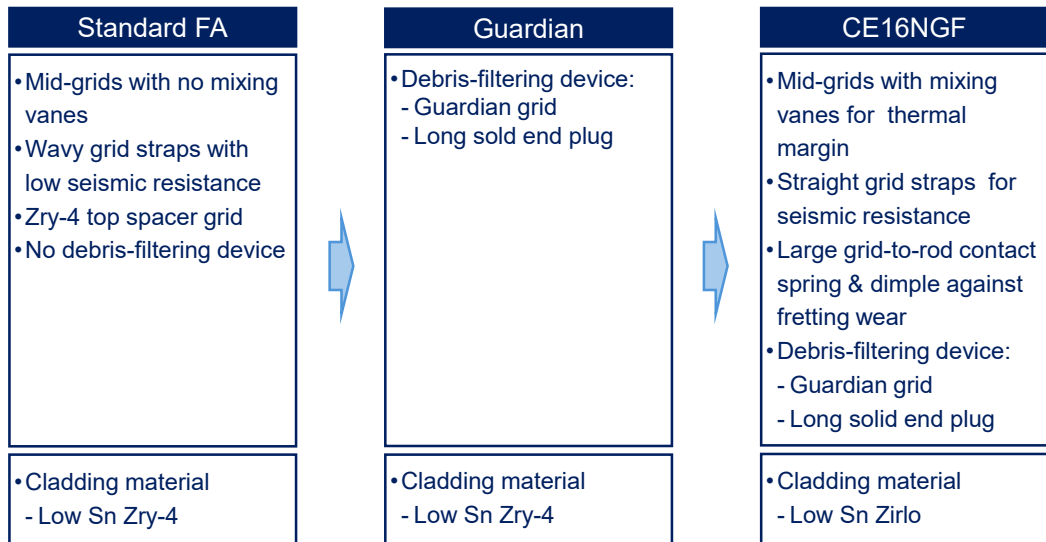


그림 3-3 (구)CE 16x16형 원전용 신형핵연료 개발이력

3) 제 2세대 핵연료 개발배경

해외사로부터 기술도입된 국내 제 1세대 핵연료는 국내 실시권만을 보유하고 있으므로 해외 수출은 기술소유권을 보유하고 있는 해외사의 허가없이 불가능하다. 상기와 같이 원자력선진사인 미국 웨스팅하우스사와

프랑스 아레바사는 국내 제 1세대 핵연료에 비해 보다 성능이 향상된 신형 핵연료를 지속적으로 개발하고 있다. 따라서 원전 운영자인 한수원은 원전의 경제성과 안전성 향상을 위해 제 1세대 핵연료에 비해 성능이 우수한 해외사의 신형핵연료 사용을 선호할 수 있다. 더욱이 독일 지멘스사로부터 기술도입된 고리2호기 원전용 16KOFA 핵연료에서 대량으로 손상이 발생하여 한수원은 16KOFA 및 17KOFA 핵연료를 미국 웨스팅하우스사의 STD 핵연료와 V5H 핵연료로 각각 대체하게 되었다. 이는 한국원자력연구원의 핵연료 설계사업을 한전원자력연료로의 이관하는 간접적인 동기로 작용하였다.

한전원자력연료에서는 원자력선진사의 지속적인 신형핵연료 개발 전략을 분석한 후, 원자력선진사의 신형핵연료와 성능이 보다 우수한 신형핵연료 개발계획을 수립하게 되었다. 그러나 국내에는 표 1-1에 제시된 신형핵연료 개발을 위한 핵심 요소 즉 핵연료 개발인력, 개발기술 및 개발 인프라가 그 당시에 확보되지 않은 상태였다. 따라서 한전원자력연료는 차선책으로 해외사와 공동으로 신형핵연료 개발을 추진하는 전략을 수립하였다. 핵연료 공동개발기관은 공개입찰방식에 의해 선정되었으며, 해외사가 제시한 공동개발 범위, 기술실시권 및 기술소유권 허여 범위, 공동개발비용 등을 평가한 결과, 미국 웨스팅하우스사를 공동개발기관으로 선정하게 되었다.

OPR1000 및 APR1400 원전용 신형핵연료(PLUS7) 개발은 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 1999년부터 착수하여 2022년도에 개발을 완료하였고 성공적으로 노내 검증시험을 거친 후, 2006년부터 OPR1000 원전 및 APR1400 원전에 상용공급을 개시하였다. 참고로 U.A.E. 바라카 원전 4기에도 PLUS7 핵연료가 공급되었다.

웨스팅하우스 16x16형 및 17x17형 원전용 신형핵연료(16ACE7 및 17ACE7) 개발은 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 2001년부터 착수하여 2024년도에 개발을 완료하였고 성공적으로 노내 검증시험을 거친 후 2008년부터 웨스팅하우스형 원전에 상용공급을 개시하였다.

3) 제 2세대 핵연료 PLUS7 개발목표 및 설계특성

PLUS7 핵연료 개발목표는 다음과 같이 기존 핵연료 성능 대비 7가지 성능 향상으로 요약되며, 각 개발목표와 함께 설계 혁신 방향도 기술하였다.

- 열적성능 향상 10% 이상: 혼합날개 부착 중간지지격자 도입
- 평균 방출연소도 55,000 MWD/MTU 이상: 신형 Zr-Nb 합금 피복관, 지지격자, 안내관, 계측관 사용; 연료봉 및 집합체 제원 최적화
- 연료봉 프레팅마모 손상 방지: 유체유발 진동 최소화하는 혼합날개 지지격자 설계, 지지격자 스프링/딴플과 연료봉 간 접촉 면적을 최대화하는 conformal 지지격자 스프링/딴플 설계
- 이물질에 의한 핵연료봉 손상 방지: 고성능 이물질여과 지지격자 및 소구경 하단고정체 설계
- 내진 성능 향상: 선형 지지격자판 설계
- 핵연료 해체/재조립 용이성 향상: 상단고정체 및 하단고정체 해체/재조립 설계
- 집합체 제조 생산성 향상: TIG 용접을 점용접으로 대체

기존 핵연료와 PLUS7 핵연료 설계 특성은 표 3-3 및 표 3-4에 제시되었다.

표 3-3 기존 핵연료와 PLUS7 핵연료 설계특성 비교

설계항목	설계특성		PLUS7 성능 개선사항
	기존핵연료	PLUS7 핵연료	
연료봉	<ul style="list-style-type: none"> • 직경: 9.7mm • 피복관 재질: Zry-4 • 축방향반사체: 無 	<ul style="list-style-type: none"> • 직경: 9.7mm • 피복관: Zry-4 • 축방향반사체: 有 	<ul style="list-style-type: none"> • 고연소 성능 • 중성자 경제성 • 압력 강하량
중가지지격자	<ul style="list-style-type: none"> • 재질: Zry-4 • 혼합날개: 無 • 곡선 지지격자판 • 외팔지지 스프링 	<ul style="list-style-type: none"> • 재질: Zr-Nb 합금 • 혼합날개: 有 • 직선 지지격자판 • Conformal 스프링 	<ul style="list-style-type: none"> • 열적성능 10% 이상 향상 • 프레팅마모 손상 방지 • 내진성능 향상
상하단지지격자	<ul style="list-style-type: none"> • 혼합날개: 無 • 곡선 지지격자판 	<ul style="list-style-type: none"> • 혼합날개: 有 • 직선 지지격자판 	<ul style="list-style-type: none"> • 내진성능 향상
상단고정체	<ul style="list-style-type: none"> • 분리형 해체/재조립 	<ul style="list-style-type: none"> • 일체형 해체/재조립 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체/재조립시간단축 • 소모부품 없음
하단고정체	<ul style="list-style-type: none"> • 대구경 유로 	<ul style="list-style-type: none"> • 소구경 유로 	<ul style="list-style-type: none"> • 이물질여과 성능 향상
안내관/지지격자 연결	<ul style="list-style-type: none"> • Ar 챔버내 TIG 용접 	<ul style="list-style-type: none"> • 대기 중 점용접 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접시간 단축 • 용접강도 향상

표 3-4 기존 핵연료와 PLUS7 핵연료 설계특성 비교(2)

Item	Fuel Design for OPR1000 & APR1400	
	Guardian (1 st Generation)	PLUS7™ (2 nd Generation)
Burn-up	> 45 GWD/MTU	> 55 GWD/MTU
Supply	2001	2006
Seismic	0.2g	0.3g
FR OD	9.7mm	9.5mm
Mixing Vane	No	Yes
SG Spring	Cantilever	Conformal
Debris Filter	Yes(single)	Yes(multiple)
Leakage	Low-low	Ultra-low
Fuel Cycle Cost	100%	92.8%

PLUS7 핵연료집합체 형상은 그림 3-4에 나타나 있으며, PLUS7 핵연료와 기존 핵연료(표준핵연료 및 가디언핵연료)의 주요 부품 형상은 그림 3-5~3-8에 나타나 있다.

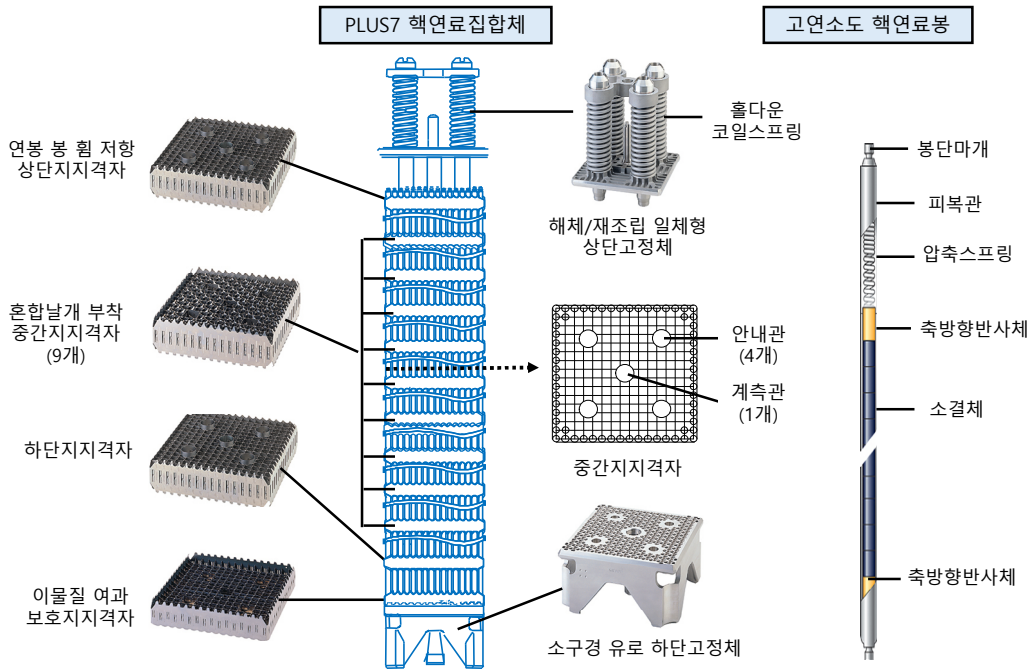


그림 3-4 PLUS7 핵연료 개략도

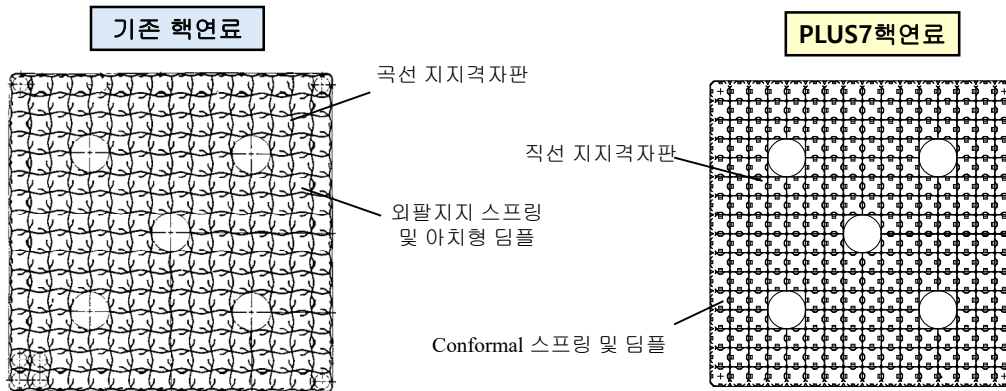


그림 3-5 중간 지지격자 형상 비교

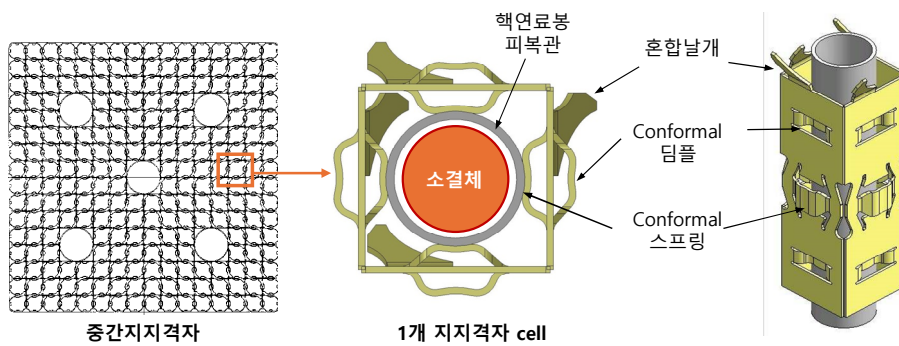


그림 3-6 PLUS7 중간 지지격자 Conformal 스프링 및 뒨플 형상

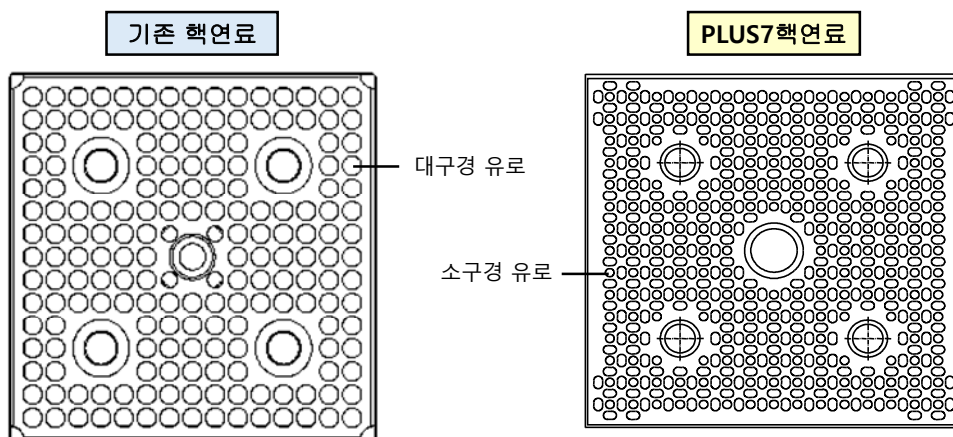


그림 3-7 하단고정체 형상 비교

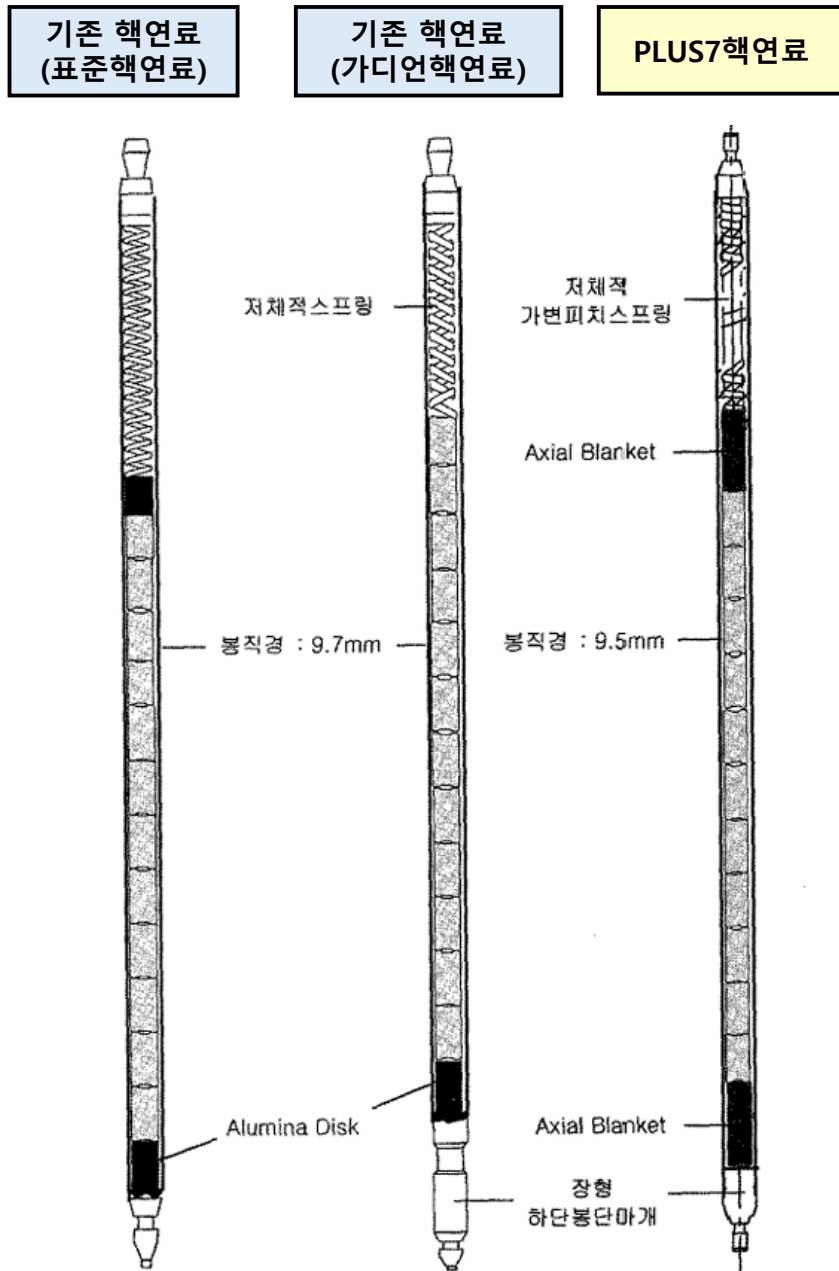


그림 3-8 핵연료봉 형상 비교

PLUS7 핵연료 개발 및 상용공급 일정은 그림 3-9에 나타나 있다. 이 그림에서 보듯이, PLUS7 핵연료 개발은 1999년 초에 착수하였으며, 2003년부터 2007년까지 4년동안 노내검증시험을 성공적으로 수행하였다. 노내검증시험은 4다발의 PLUS7 시범집합체를 사용하였다. 규제기준에 의하면, 일반적으로 시범집합체는 최대 8개까지 원자로심에 장전하여 연소시킬수 있다. PLUS7 핵연료 상용공급은 시범집합체 2주기 연소 완료 후에 2006년부터 개시되었다.

신형핵연료	연도																	
	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
PLUS7	설계 및 노외 검증시험			노내 검증시험 및 인허가				PLUS7 상용공급 및 노내 연소성능 분석										

그림 3-9 PLUS7 핵연료 개발 및 상용공급 일정

4) 제 2세대 핵연료 ACE7 개발목표 및 설계특성

16ACE7 핵연료는 웨스팅하우스 16x16형 원전(고리2호기)용 신형핵연료이며, 17ACE7 핵연료는 웨스팅하우스 17x17형 원전용 신형핵연료이다. 16ACE7과 17ACE7 핵연료의 개발목표는 유사하다. 주요 설계특징 차이로는 16ACE7 핵연료는 16x16 연료봉 배열로 이루어진 반면, 17ACE7 핵연료는 17x17 연료봉 배열로 이루어졌다. ACE7 핵연료의 개발목표는 다음과 같은 성능 향상으로 요약되며, 각 개발목표와 함께 설계 혁신 방향도 기술하였다.

- 열적성능 향상 5% 이상: 17ACE7의 경우, 유동혼합기 2개를 추가하여 총 5개 부착; 16ACE7의 경우 유동혼합기 3개를 새로 부착
- 평균 방출연소도 55,000 MWD/MTU 이상: 신형 Zr-Nb 합금 피복관, 지지격자, 안내관, 계측관 사용; 연료봉 및 집합체 제원 최적화
- 연료봉 프레팅마모 손상 방지: 유체유발 진동 최소화하는 혼합날개 지지격자 설계, 지지격자 스프링과 연료봉 간 접촉 면적을 최대화하는 I형 지지격자 스프링 설계
- 이물질에 의한 핵연료봉 손상 방지: 고성능 이물질여과 지지격자 및 소구경 유로 하단고정체 설계
- 핵연료 해체/재조립 용이성 향상: 상단고정체 및 하단고정체 일체형 해체/재조립 설계
- 집합체 제조 생산성 향상: 지지격자체 용접을 레이저 용접으로 대체

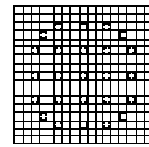
16ACE7 핵연료와 기존 핵연료의 설계특성 차이는 표 3-5에 제시되었으며, 17ACE7 핵연료와 기존 핵연료의 설계특성 차이는 표 3-6에 제시되었다.

표 3-5 기존 핵연료와 16ACE7 핵연료 설계특성 비교

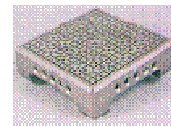
Item	Fuel for 16x16 WH type NPPs	
	STD (1 st Generation)	16ACE7 (2 nd Generation)
Burn-up	38 GWD/MTU	> 55 GWD/MTU
Loading	1983	2008
Leakage	L ³ P	L ³ P
Absorber	Pyrex	Gd
FR OD	9.5mm	9.14mm
MVs	Inconel, MV	Zr Alloy, MV+3 IFMs
SG Spring	Vertical	I-type
Debris Filter	No	Yes(multiple)
Fuel Cycle Cost	100%	93%



Leaf spring



20 G/Ts, 1 I/T



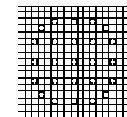
Small Hole Type Bottom Nozzle

표 3-6 기존 핵연료와 17ACE7 핵연료 설계특성 비교

Item	Fuel for 17x17 WH type NPPs		
	V5H (1 st Generation)	RFA (1 st Generation)	17ACE7 TM (2 nd Generation)
Burn-Up	> 45 GWD/MTU	> 45 GWD/MTU	> 55 GWD/MTU
Loading	1994	2004	2009
Leakage	Ultra-low	Ultra-low	Ultra-low
Absorber	WABA	Gd	Gd
FR OD	9.5mm	9.5mm	9.5mm
MVs	MV+3 IFMs	MV+3 IFMs	MV+5 IFMs
SG Spring	Diagonal	Diagonal	I-type
Debris Filter	Yes(single)	Yes(multiple)	Yes(multiple)
Fuel Cycle Cost	100%	96%	< 96%



Leaf spring



24 G/Ts, 1 I/T



Small Hole Type Bottom Nozzle



17ACE7 핵연료 형상과 각 부품의 설계특징은 그림 3-10에 나타나 있으며, 16ACE7 및 17ACE7 핵연료 개발 및 상용공급 일정은 그림 3-11에 나타나 있다. 이 그림에서 보듯이, ACE7 핵연료 개발은 2001년에 착수하였으며, 2004부터 2008년까지 4년동안 노내검증시험을 성공적으로 수행하였다. 노내검증시험은 4다발의 시범집합체를 사용하였다. ACE7 핵연료 상용공급은 시범집합체 2주기 연소 완료 후, 2008년부터 개시되었다.

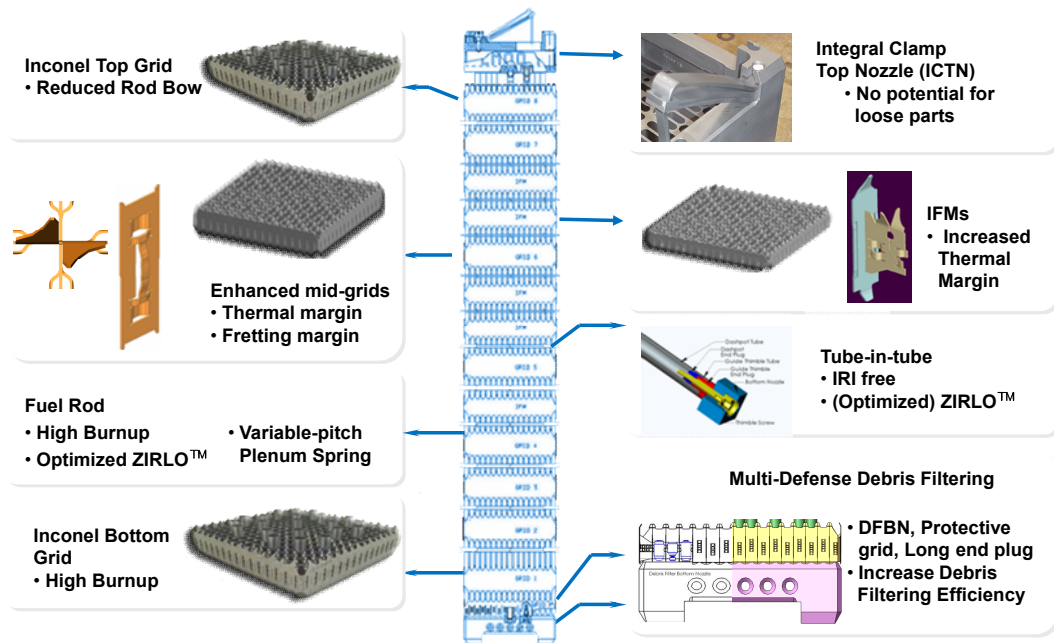


그림 3-10 17ACE7 핵연료 형상과 각 부품의 설계특징

Advance Fuel	Year																	
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
16ACE7 17ACE7	설계/노외 검증시험				노내 검증시험 및 인허가				ACE7 상용공급 및 노내 연소성능 분석									

그림 3-11 ACE7 핵연료 개발 및 상용공급 일정

5) 제 2세대 핵연료 공동개발 계약조건

미국 웨스팅하우스사와 제 2세대 핵연료를 공동으로 개발하였으며, 공동으로 개발한 PLUS7, 16ACE7 및 17ACE7 핵연료의 국내 실시 및 해외 수출 관련 주요 계약 사항은 표 3-7에 제시되어 있다. 이 표에서 보듯이, PLUS7 핵연료는 미국을 제외한 모든 국가에 비제한적으로 수출될 수 있는 반면, ACE7 핵연료는 국내에만 사용가능하다는 것을 알 수 있다. 단, PLUS7 핵연료의 수출 제한사항으로는 제 3국에 핵연료 제품 수출은 가능하지만, PLUS7 설계기술과 제조기술을 이전할 수는 없다는 점이다. 왜냐하면, PLUS7 핵연료 개발 시, 미국 웨스팅하우스사가 보유한 기존 핵연료의 성능 데이터베이스 등의 배경정보를 사용했기 때문이며, 이러한 배경 정보로 인해 제 3국에 PLUS7 핵연료 기술을 수출할 수 없다.

표 3-7 제 2세대 핵연료 공동개발 관련 주요 계약조건

항목	PLUS7 핵연료	ACE7 핵연료
기술소유권	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 독자 기술소유권 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기술소유권 없음
국내 실시권	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 비제한적 국내 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 비제한적 국내 사용
국외 실시권	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 미국을 제외한 제 3국에 핵연료 수출 가능 ▪ 단 핵연료 설계 및 제조 기술을 이전할 수 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 없음 ▪ 웨스팅하우스사 허가 가능

3.5 제 3세대 핵연료 (지식재산권 확보 핵연료)

1) 개발 배경

미국 웨스팅하우스사와 공동으로 개발한 PLUS7 핵연료의 경우, 핵연료를 미국을 제외한 제3국에 수출이 가능하지만, 미국 웨스팅하우스사와 프랑스 아레바와 같이 핵연료 기술 즉 설계기술(핵연료 부품 및 소재 특허, 전산코드 및 설계·해석 방법론 등)과 제조기술(집합체 및 부품 제조공정, 품질보증 및 품질관리 절차 등)을 기술전수계약을 통해 핵연료기술을 제 3국에 이전할 수 없는 단점이 있다. 또한 미국 웨스팅하우스사와 공동으로 개발한 17ACE7 핵연료의 경우, 국내에만 사용이 가능하다는 한계가 있다.

그림 1-8에서 보듯이, 전 세계 가동 중인 원자력발전소 중 약 71%가 가압경수로(PWR)이며, APR1000 및 APR1400 원전과 유사한 (구)CE 16x16형 해외 원전수는 9기(미국 5기, UAE 4기) 수준인 반면, 웨스팅하우스 17x17형 해외 원전 수는 173기 수준이다. 따라서 웨스팅하우스 17x17형 원전용 제 3세대 핵연료를 개발할 경우, 해외 수출 기회 및 이에 따른 부가가치는 매우 크다고 할 수 있다. 더욱이, 2025년 체결한 한수원과 웨스팅하우스사 간 체코원전 핵연료 공급계약으로 인해 한전원자력연료가 주도적으로 APR1000 및 APR1400 원전용 핵연료 수출을 추진하기는 곤란하다고 할 수 있다.

한편, 제 2세대 핵연료 개발을 통해 핵연료 원천기술 개발을 위한 핵심요소 즉 개발인력, 개발기술 및 개발인프라를 성공적으로 구축하였다.

① 개발 인력

- 핵연료봉 및 부품 설계 개발인력
- 핵연료집합체 및 부품 설계 개발인력
- 열수력 설계 개발인력
- 핵연료집합체 및 부품 제조공정 개발인력

② 개발 기술

- 핵연료 형상 설계 흐름도: 그림 3-12
- 핵연료 개발 관련 품질보증 및 품질관리 절차서: 그림 3-13
- 핵연료 하드웨어 개발 단계 수립: 그림 3-14
- 핵연료 하드웨어 제품 개발 절차: 그림 3-15

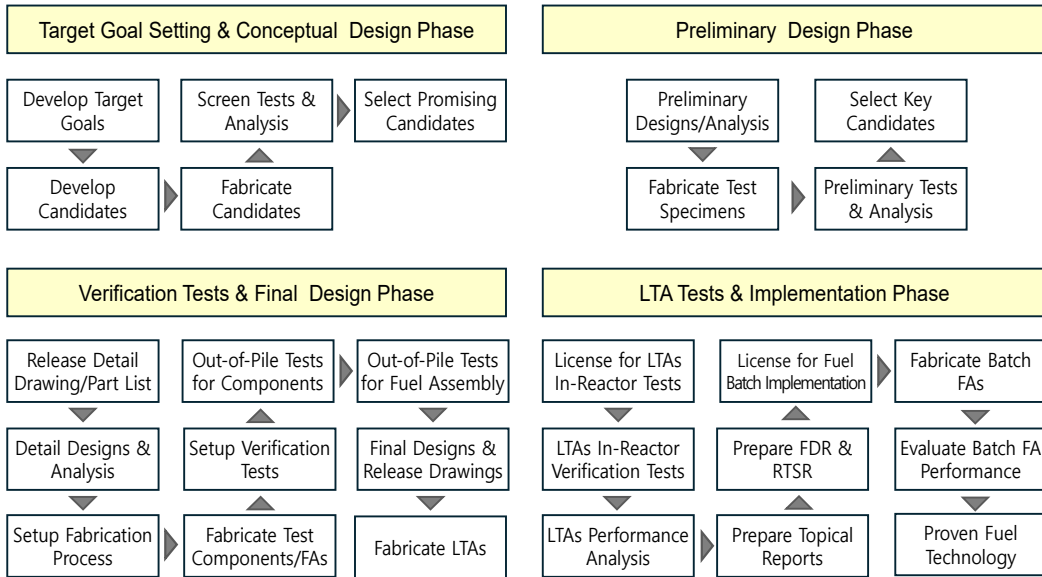


그림 3-12 핵연료 형상 설계 흐름도

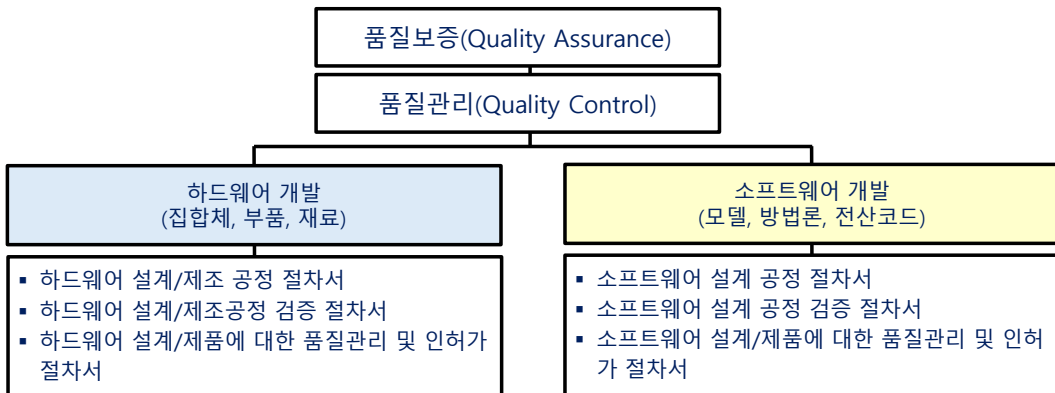


그림 3-13 핵연료 개발 관련 품질보증 및 품질관리 절차서

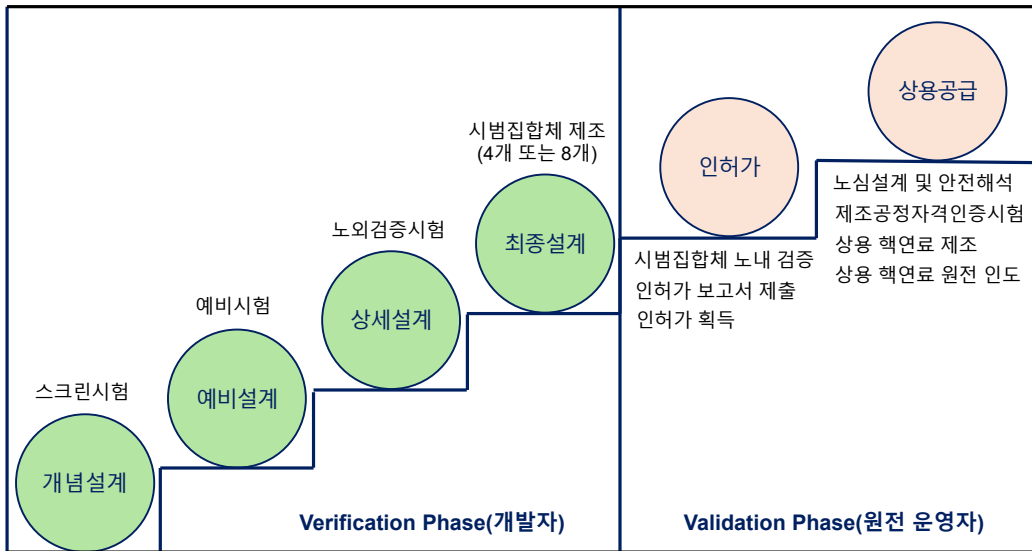


그림 3-14 핵연료 하드웨어 개발 단계

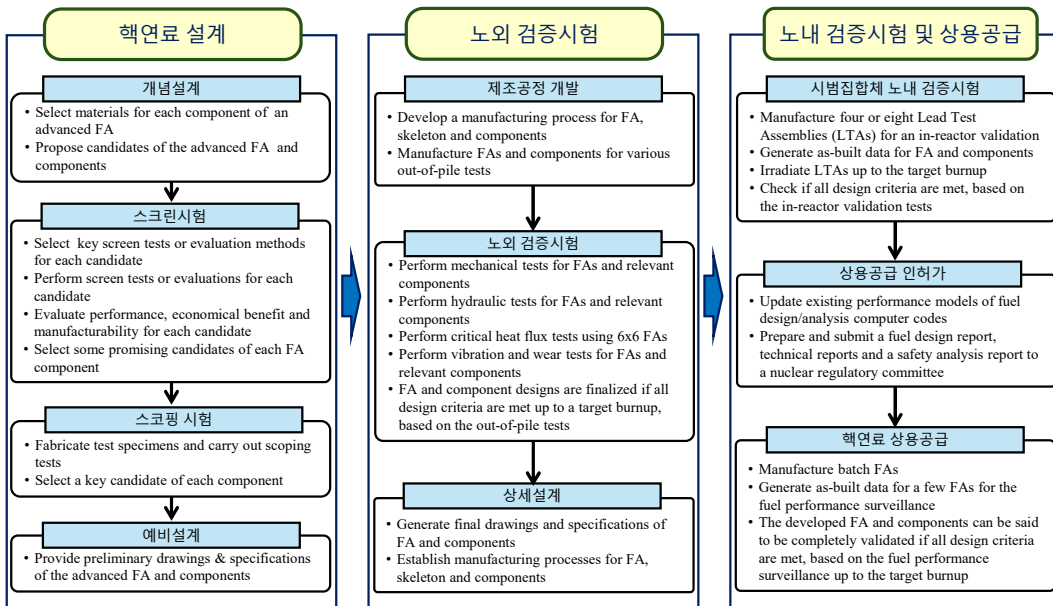


그림 3-15 핵연료 하드웨어 제품 개발 절차

③ 개발 인프라

- 집합체 부품 노외 검증시설 구축: 지지격자 스프링 특성시험, 지지격자 좌굴시험, 지지격자 유체유발진동시험, 연료봉 진동 특성시험, 연료봉 프레팅마모시험, 부품 열수력적 특성시험, 부품 기계적 특성시험, 이물질여과시험 등
- 집합체 노외 검증시설 구축: 기계적 특성시험, 수력적 특성시험,

유체유발 진동특성시험, 양립성시험 등

2) 개발 범위 및 일정

한전원자력연료에서는 상기 구축한 핵연료 개발인력, 개발기술 및 개발인프라를 기반으로 하여 다음과 같이 지식재산권이 확보된 수출선도형 고유핵연료 개발을 착수하였다.

- OPR1000, APR1000 및 APR1400 원전용 고유핵연료(HIPER16) 개발
- 웨스팅하우스 1717형 원전용 고유핵연료(HIPER17) 개발

HIPER16 및 HIPER17 핵연료 개발일정 및 상용공급일정은 그림 3-16 및 그림 3-17에 각각 제시되었다.



그림 3-16 HIPER16 고유핵연료 개발 일정 및 상용공급일정

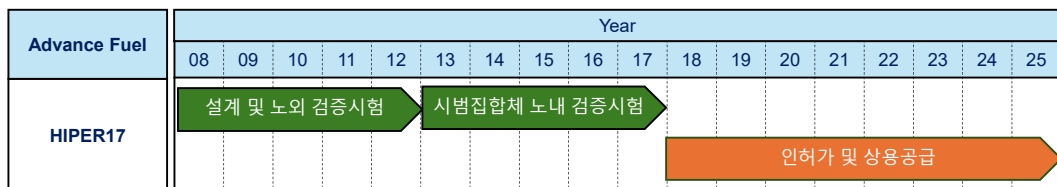


그림 3-16 HIPER17 고유핵연료 개발 일정 및 상용공급일정

HIPER16 및 HIPER17 핵연료에 대한 설계 및 노외 검증시험과 시범집합체 노내 검증시험은 개발일정에 따라 수행되었다. 그러나 HIPER16 고유핵연료에 대한 인허가가 지연됨에 따라 HIPER16 고유핵연료는 당초 계획에 비해 8년이 지연된 2024년 8월 OPR1000 원전인 한울5호기로부터 상용공급이 개시되었다. 한편 HIPER17 고유핵연료의 경우, 한수원의 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기에 대한 수명연장이 결정될 때 까지 인허가 신청을 보류한 상태에 있다. 즉 당초 상용공급 계획에 비해 7년이 지났지만 아직까지도 인허가 신청도 못한 상태에 있다. 앞에 언급한 바와 같이, HIPER16 및 HIPER17 고유핵연료는 수출을 선도하기 위해 개발한 핵연료이다.

또한 웨스팅하우스 17x17형 해외 원전 수는 173기 수준이므로 HIPER17 핵연료의 해외 수출 기회 및 이에 따른 부가가치는 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 국내 가동 중인 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기에 대한 수명연장 여부와 상관없이 해외 수출을 적기에 추진할 수 있도록 HIPER17 핵연료에 대한 인허가를 추진하고 상용원전에서의 연소경험을 축적하는 것이 시급하다.

참고로, HIPER17 고유핵연료에 대한 인허가 미비로 인해 HIPER17 고유핵연료의 해외수출이 무산된 경험이 있다. 상술했다면, 미국 Energy Solution사에서 자사 개발 PWR20 소형원자로(SMR)에 12개의 HIPER17 핵연료를 사용하기 위해 한전원자력연료에 HIPER17 핵연료집합체 수출 의사를 수차례 타진하였으나, HIPER17 핵연료 인허가 미비로 인해 수출이 무산된 바 있다. Last Energy사는 2025년 10월 현재, 3개 국가 및 8개 고객을 대상으로 51개 PWR20 소형원자로 건설계약을 추진하고 있다. 이 건설계약이 성공적으로 추진되면 PWR20 원자로 초기노심에 대한 HIPER17 핵연료 소요량은 612개 수준으로 평가된다. 이 소요량은 APR1000원전의 3.5기 초기노심 핵연료 소요량에 해당된다.

3) 상세 개발 절차

[개발목표 설정 및 개념설계 단계]

① 개발목표 설정

지식재산권이 확보된 핵연료의 개발목표 설정 시, 고객의 의견을 수렴하여야 한다. 표 3-8에는 배치 평균 방출연소도, 최대 핵연료봉 연소도, 출력 여유도, 손상률 등이 제시되어 있다.

표 3-8 HIPER 고유핵연료 개발목표

항 목	기존 핵연료	HIPER16 & HIPER17	비 고
평균 방출연소도	▪ 45MWD/kgU	▪ 55MWD/kgU	▪ Select advanced materials for cladding, G/T, I/T, and SG ▪ Optimize FA and component dimensions
최대 연료봉 연소도	▪ 60MWD/kgU	▪ 75MWD/kgU	
과출력 여유도 (열적 여유도)	▪ 5 % (10%)	▪ 10 % (20%)	▪ Develop advanced SG design ▪ Introduce additional low mixing devices
연료봉 손상률	▪ 1/100,000	▪ 1/1,000,000	▪ Select advanced materials ▪ Introduce debris filtering devices

② 핵연료 부품 후보 도출

피복관, 안내관, 지지격자 등을 포함한 주요 부품에 대해 목표 달성에 최적의 소재를 선정한다. HIPER 후보 소재로 지식재산권이 확보된 HANA 소재를 선정하였다. 이 단계에서 개발목표 달성을 위해 핵연료 집합체 및 각 부품에 대한 개념설계를 수행한다.

그림 3-17 및 그림 3-18에는 한전원자력연료에서 도출한 지지격자 및 이물질 여과장치 후보들이 나타나 있다.

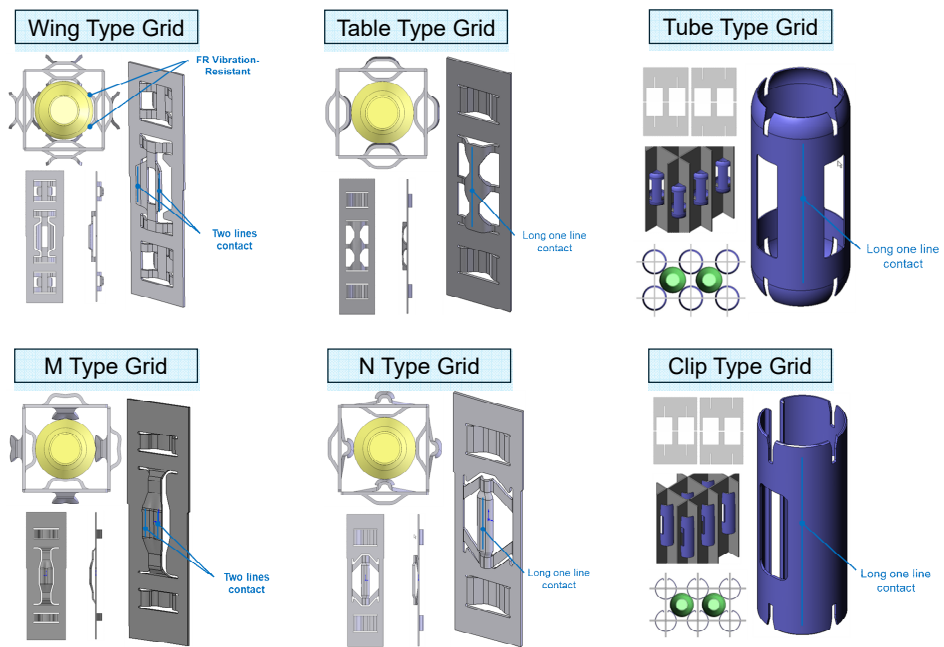


그림 3-17 HIPER 핵연료 지지격자 후보

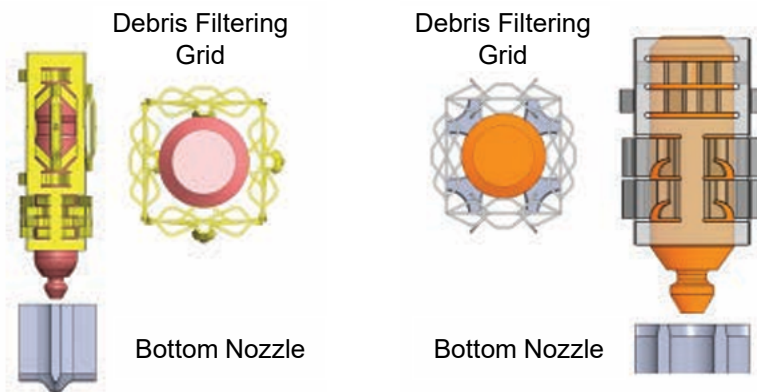


그림 3-17 HIPER 핵연료 이물여과 장치 후보

③ 핵연료 부품 후보 제조

성능 검증을 위한 스크린 시험(screen test)에 사용될 핵연료집합체 부품들은 확보한 제조시설을 활용하여 제작된다. 후보 제작 시, 실제 재료를 사용할 필요는 없으며, 저렴한 비용으로 다른 소재를 사용하여 제조할 수도 있다.

④ 핵연료 부품 후보 스크린 시험 및 분석

각 후보에 대해 기계적 시험, 유체유발진동 시험 등을 포함한 스크린 시험을 수행한다. 각 연료 부품에 대해 스크린 시험 결과를 분석한 후, 유력 후보를 선정한다.

⑤ 유력 후보 선정

각 후보 별 시험 결과를 분석한 후, 2개 내지 3개의 유력 후보를 선정한다.

[예비설계 단계]

① 예비설계 및 분석

선정된 유력 후보들에 대해, 핵연료집합체 및 부품의 공칭 치수와 부품 소재를 포함하여 예비 도면을 생산한다. 이러한 치수 및 소재 정보를 바탕으로, 핵연료 성능해석 전산코드와 같은 기존 해석도구를 활용하여 핵연료집합체 및 부품의 기계적, 열적, 수력적, 핵적 성능 그리고 진동 특성을 분석한다.

② 시험시편 제조

예비 도면을 바탕으로 각 유력 후보에 대한 소형 시험시편을 제작한다.

③ 예비성능 시험 및 분석, 주요 후보 선정

유력 후보 별로 기계적, 열적, 수력적, 유체유발진동시험을 포함한 예비성능 시험을 수행한다. 유력 후보에 대한 예비성능 시험결과의 분석과 비교를 통해 각 부품 별 주요 후보를 선정한다.

[노외 검증시험 및 최종설계 단계]

① 상세설계 도면 및 부품목록 생산

선정된 주요 후보 부품 및 선정 소재로 구성된 핵연료집합체 및 부품의 공칭 치수와 공차가 명시한 상세 도면과 핵연료집합체의 모든 부품을 포함하는 부품 목록을 작성한다.

② 상세설계 수행 및 분석

공칭 치수, 공차 및 소재를 기반으로 하여 성능해석 전산코드 등과 같은 기존 성능해석 도구를 활용하여 핵연료집합체 및 부품의 기계적, 열적, 수력적, 핵적 성능 그리고 진동특성 등을 분석한다.

③ 핵연료집합체 및 부품 제조공정 수립

핵연료집합체 및 부품 제조공정을 개발하고 제조시설을 구축한다. 이러한 제조공정과 제조시설을 사용하여 노외 검증시험에 사용될 시험 집합체 및 시험 부품 제조에 사용된다.

④ 노외 검증시험용 핵연료집합체 및 부품 제조

집합체 기계적 시험, 수력학적 시험, 유동유발진동 시험, 지지격자-핵연료봉 프레팅마모 시험, 양립성 시험 등을 포함한 노외 검증시험용 집합체를 제작합니다.

지지격자 스프링 특성 시험, 지지격자 진동특성 시험, 핵연료봉 진동 시험, 임계열속 시험, 이물질여과 시험 등을 포함한 노외 검증시험용 부품을 제작한다.

⑤ 노외 검증시험 종류 및 시험절차 수립

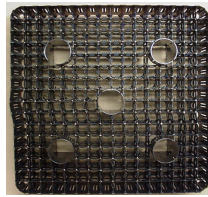
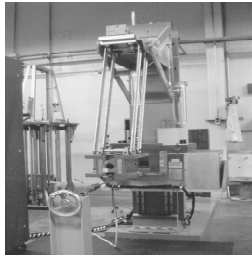
핵연료집합체 및 부품의 노외 검증시험 종류, 검증시험 절차를 수립한다.

- 집합체 부품 노외 검증시험 종류: 지지격자 스프링 특성시험, 지지격자 좌굴시험, 지지격자 유체유발진동시험, 연료봉 진동 특성시험, 연료봉 프레팅마모시험, 부품 열수력적 특성시험, 부품 기계적 특성시험, 이물질여과시험 등
- 집합체 노외 검증시험 종류: 기계적 특성시험, 수력적 특성시험, 유체유발 진동특성시험, 양립성시험 등

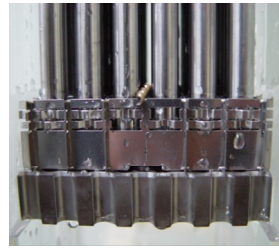
⑥ 노외 검증시험 수행 및 시험결과 분석

핵연료집합체 및 부품의 노외 검증시험을 수행하고, 시험결과를 분석한다. 즉 핵연료집합체 및 부품의 시험결과와 설계기준과의 비교평가를 통한 설계기준 만족 여부를 평가한다. 그림 3-18에는 핵연료집합체 부품 노외 검증시험 결과가 나타나 있으며, 그림 3-19에는 핵연료집합체 노외 검증시험 결과가 나타나 있다.

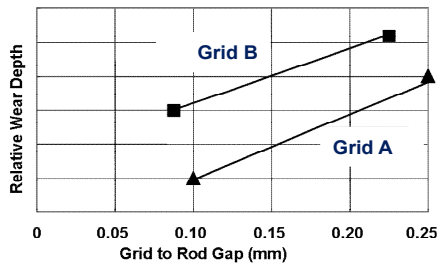
Grid Assembly Dynamic Buckling Test



Debris Filtering Test



Grid Spring Wear Test



Grid Vibration Test

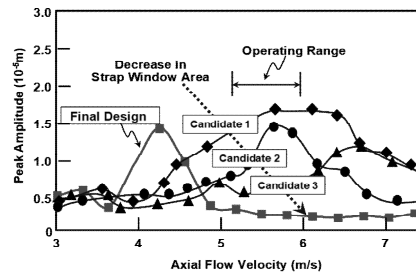
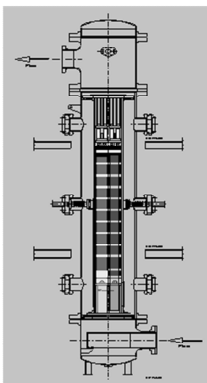


그림 3-18 핵연료집합체 부품 노외 검증시험 결과

FA Vibration Test Facility



FA Vibration Test Results

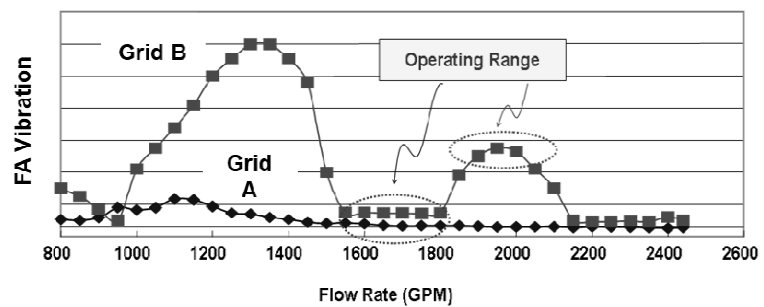


그림 3-19 핵연료집합체 노외 유체유발진동시험 결과

⑦ 최종설계 도면 및 부품목록 생산

노외 검증시험 결과 및 성능해석 전산코드 해석을 통해 핵연료집합체 및 부품 관련 모든 설계기준 및 안전기준이 충족되면, 핵연료집합체 및 부품의 공칭 치수와 공차를 포함하는 최종 도면, 제품 및 재료 사양, 그리고 핵연료집합체 및 부품을 포괄하는 부품목록이 작성된다. 만약 노외 검증시험 결과가 관련 설계기준 및/또는 안전기준이 충족되지 않을 경우에는 집합체 및/또는 부품의 설계를 변경해야 한다.

⑧ 노내 검증시험용 시범집합체 제조

시범집합체는 원자로심 내 최대 출력을 생산하는 위치를 제외하고 모든 위치에 장전될 수 있다. 일반적으로 시범집합체 노내 검증시험은 기존 핵연료집합체와의 핵적, 기계적, 수력적 양립성을 검증하고 노내 연소성능을 확인하기 위하여 수행된다.

시범집합체 노내 검증시험은 원자로심 내 4개 또는 8개 시범집합체를 장전되어 수행된다. 시범집합체 노내 검증시험은 다음과 같은 목적을 가지고 수행된다.

- 노내 연소 신택연료 집합체 및 부품의 연소특성과 연소성능 자료 수집
- 핫셀 비파괴 및 파괴 시험용 연소 신택연료 집합체 및 부품 확보
- 신택연료집합체 및 부품 연소성능 검증

시범집합체를 노내에 장전하기 위해서는 제조공정자격시험(PQT)을 수행해야 하며, 제조공정에 대해 원전운영자 및 규제기관의 승인을 받아야 한다. 또한 시범집합체를 노내에 장전하기 위해서는 시범집합체의 설계기준 및 안전기준 충족을 기술하는 인허가 문서를 규제기관에 제출하고 승인을 받아야 한다.

[시범집합체 노내 검증시험 및 상용공급 단계]

① 시범집합체 원자로심 장전 인허가

원자로심 내 시범집합체 노내 검증시험을 수행하기 위해서는 규제기관에 시범집합체 장전 인허가 문서를 제출해야 한다. 해당 인허가 문서에는 시범집합체를 포함한 모든 핵연료집합체가 모든 설계기준 및

안전기준이 충족된다는 것을 입증할 수 있는 노외 검증시험 결과, 원자로심 설계 및 해석 결과, 그리고 안전해석 결과 등이 포함된다.

② 시범집합체 노내 연소성능 분석

예시로서, 그림 3-20에는 시범집합체 노내 연소성능이 나타나 있다. 표 3-9에는 노내 검증시험에서 분석해야 할 성능인자가 제시되어 있다.

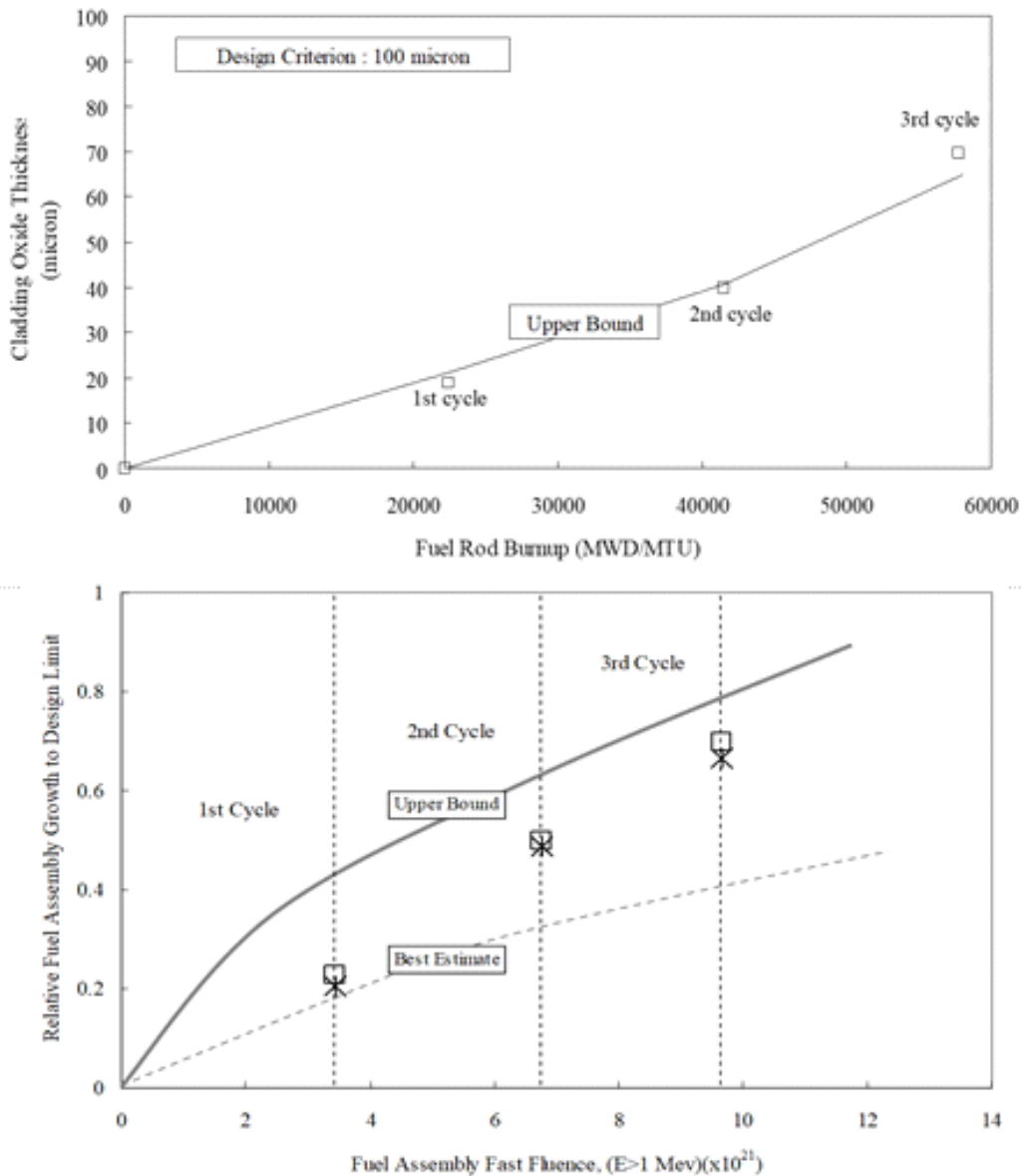


그림 3-20 연료봉 피복관 산화층 두께 및 집합체 조사성장 측정 자료

표 3-9 시범집합체 및 상용공급 집합체 노내 연소성능 검증자료

분야	연소성능시험	시험목적
시범집합체 및 상용공급 집합체	피복관 부식 및 수소화	<ul style="list-style-type: none"> 정상운전 조건에서 시범집합체 및 부품 연소성능 자료 생산 시범집합체 및 부품 건전성 평가 상용공급 집합체 및 부품 연소성능 자료생산
	피복관 조사성장	
	피복관 기계적 강도	
	소결체 핵분열가스 방출량	
	소결체 고밀화 및 팽윤	
	안내관 부식 및 수소화	
	안내관 조사성장	
	지지격자판 부식 및 수소화	
	지지격자체 조사성장	
	지지격자 스프링힘 조사이완	
	지지격자/연료봉 간 프레팅 마모량	
	연료봉 휨	
	집합체 휨 및 뒤틀림	
	이물질여과 성능	
집합체 부품 미세조직		

③ 상용공급 신핵연료 인허가 자료 생산

상용공급 핵연료 인허가 자료는 다음과 같이 3 종류로 대별될 수 있다.

- 주제보고서(Topical Report): 성능모델, 전산코드, 설계·해석방법론
- 핵연료설계보고서(Fuel Design Report)
- 재장전 천이노심 안전성분석보고서(RTSR): 기존 FSAR 대체

④ 신핵연료 상용공급

신핵연료에 대한 인허가를 획득한 후 신핵연료의 상용공급이 개시된다. 상용공급 신핵연료에 대해 지속적으로 연소성능을 추적해야 한다.

4) HIPER16 및 HIPER17 핵연료 설계 특징

HIPER16 및 HIPER17 핵연료 특징은 그림 3-21 및 그림 3-22에 각각 제시하였다. 앞에서 기술한 바와 같이, HIPER16 핵연료는 OPR1000, APR1000 및 APR1400원전에 사용할 수 있으며, HIPER17 핵연료는 웨스팅하우스 17x17 형 원전에 사용할 수 있다. HIPER16 및 HIPER17 핵연료 주요 부품인 상단고정체 홀다운 스프링, 지지격자 스프링, 중간지지격자 및 이물질여과 장치의 설계특징은 그림 3-23 ~ 3-26에 각각 나타나 있다.

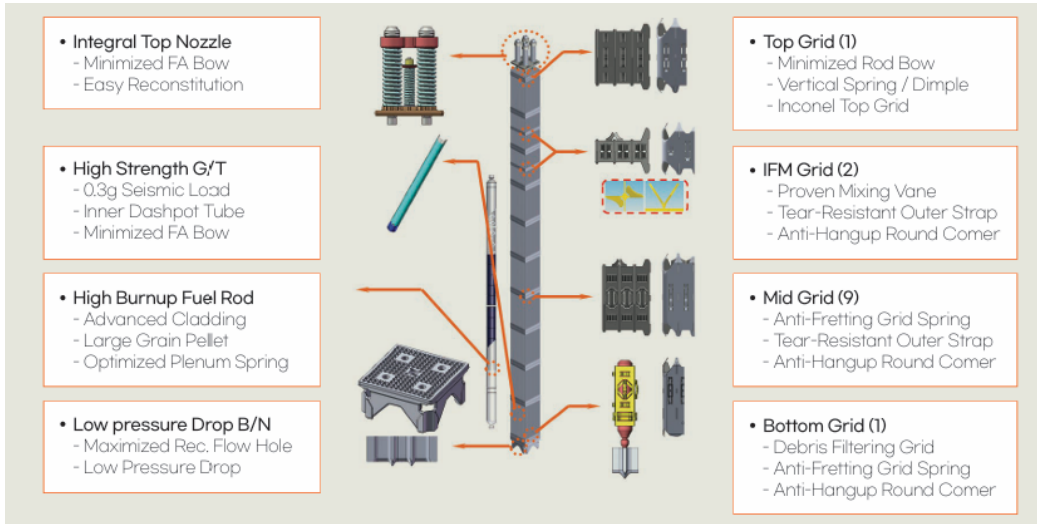


그림 3-21 HIPER16 핵연료 설계특징

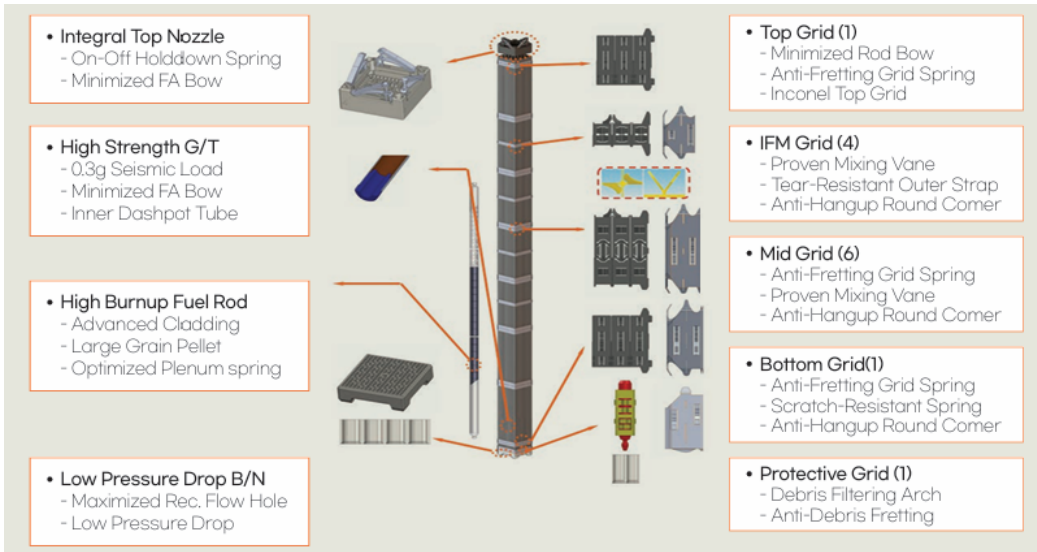
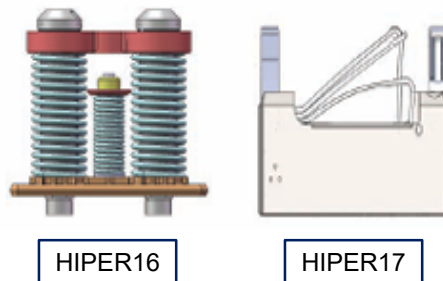


그림 3-22 HIPER17 핵연료 설계특징



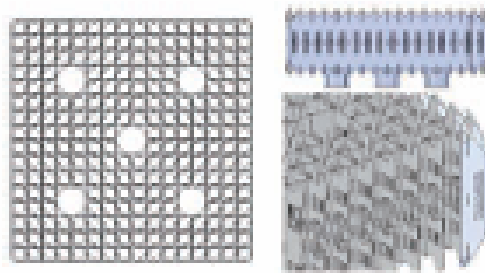
- 비선형 홀다운 스프링: 집합체 힘 감소

그림 3-23 상단고정체 홀다운 스프링 설계



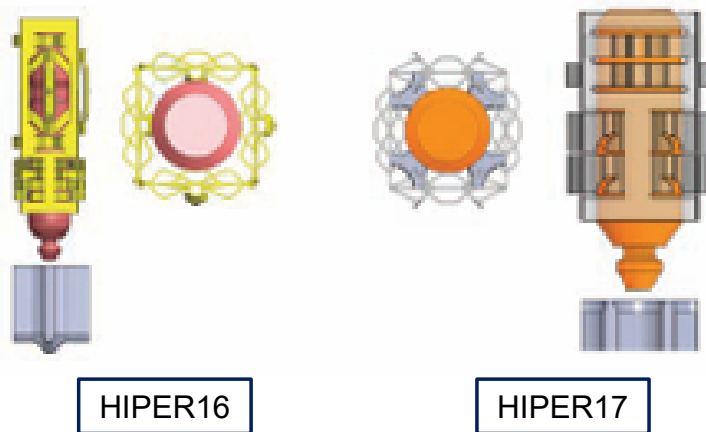
- HIPER16 및 HIPER17 동일 설계
- 카누형 스프링: 프레팅 마모 저지 설계

그림 3-24 지지격자판 스프링 설계



- HIPER16 및 HIPER17 동일 설계
- 지지격자 좌굴강도 증가: 고 내진성능

그림 3-25 중간 지지격자체 설계



- 이물질여과성능 향상

그림 3-26 이물질여과 장치 설계

3.6 제 4세대 핵연료 (사고저항성 핵연료)

1) 개요

2011년 일본을 강타한 지진과 쓰나미로 인해 후쿠시마 다이이치 비등경수로(BWR)는 심각한 손상을 입었다. 당시 해당 원자로에는 지르칼로이-2(Zircaloy-2)가 피복재로 사용되었다. 지르코늄 합금은 원자력 발전 초창기부터 낮은 중성자 흡수 단면적, 우수한 열전도율, 높은 용점, 그리고 내식성으로 인해 경수로 핵연료 피복재로 선택되어 왔다. 특히 지르칼로이-2와 지르칼로이-4는 오랫동안 경수로 핵연료 피복관 소재로 활용되었다. 지르코늄 합금의 부식 및 기계적 특성은 연소도 증가, 핵연료 사용 조건, 그리고 노내 서비스 요구사항을 충족시키기 위해 Zirlo, M5, HANA와 같은 합금의 개발되어 왔다.

그럼에도 불구하고 사고저항성을 높이기 위해 지르코늄을 대체하려는 이유는 고온에서 지르코늄의 특성이 크게 저하되기 때문이다. 냉각재 상실 사고(LOCA) 발생 시, 노심이 증기에 노출되면 붕괴열로 인해 핵연료 및 피복관의 온도가 급상승하게 된다. 지르코늄 합금의 α 상(HCP)은 온도가 850°C 를 초과하면 β 상(BCC)으로 바뀌게 된다. 800°C 를 초과하는 온도에서는 Zr 합금의 산화가 급격히 증가하고, 이 과정에서 수소가 방출되어 수소 폭발의 위험을 초래될 수 있다.

후쿠시마 다이이치 원자력발전소 사고 이후, 경수로에 사용될 사고저항성 핵연료 및 피복재 개발을 위해 국립연구소, 학계, 산업계에서 광범위한 연구 개발이 수행되고 있다. 사고저항성 핵연료(ATF)는 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

- 표준 경수로 운전조건에서 핵연료의 안전성과 신뢰성을 높게 유지해야 한다.
- 비정상 운전조건에서 핵분열생성물의 방출 지연, 핵연료 용융 방지, 증기 환경에서의 반응 속도 개선, 그리고 수소 발생률 감소를 보장해야 한다.
- 고온에서 장시간 충분한 강도를 유지하여 핵연료 집합체의 형상과 건전성을 보존해야 한다.

사고저항성 핵연료 및 피복재 후보는 제조성, 인허가성, 운전 용이성,

설계기준사고 및 중대사고를 포함한 사고 시나리오 그리고 사용후핵연료 관리 문제를 고려하여 선정되어야 한다. 사고저항성 핵연료 및 피복재의 주된 목표는 중대사고 시 노심손상 진행을 지연시켜서 사고 완화 전략을 실행할 수 있는 추가 시간을 확보함으로써 원자력발전소 안전성을 향상시키는 것이다.

현재 SiC 기반 복합재, 알루미늄 함유 페라이트 강, 내열 합금 기반 재료, 코팅 지르코늄 합금을 포함하여 다양한 사고저항성 핵연료 및 피복재 개념이 연구 중에 있다. 현재 사용되는 이산화우라늄(UO₂)의 대안으로, 더 높은 열전도율과 핵분열성 밀도를 가진 규화우라늄 핵연료가 고려되고 있다. 또한, 차세대 핵연료 기술로서 완전 세라믹 마이크로 캡슐화(FCM) 핵연료 형태의 사용에도 관심이 증대되고 있다.

사고저항성 핵연료 및 피복재의 목표는 다음과 같이 네 가지로 요약할 수 있다.

- 증기와 피복재의 반응속도 완화
- 피복재 특성 향상
- 핵연료 특성 향상
- 핵분열생성물의 핵연료 내 보존 능력 강화

그림 3-27에는 다양한 사고저항성 핵연료 및 피복재에 요구되는 개발기간과 위험/이득이 나타나 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 사고저항성 핵연료 및 피복재는 다음과 같이 세 가지 그룹으로 분류할 수 있다.

- 저위험/저이득의 단기 제품
 - 코팅된 지르코늄 합금 피복재
 - 고열전도도 UO₂ 핵연료
- 중위험/중이득의 중기 제품
 - 고강도 강철 피복재
 - 고농축 우라늄 핵연료: U₂Si₃, UN 등
- 고위험/고이득의 장기 제품
 - 비용용 세라믹 피복재: SiC
 - 핵분열생성물 고함유 핵연료

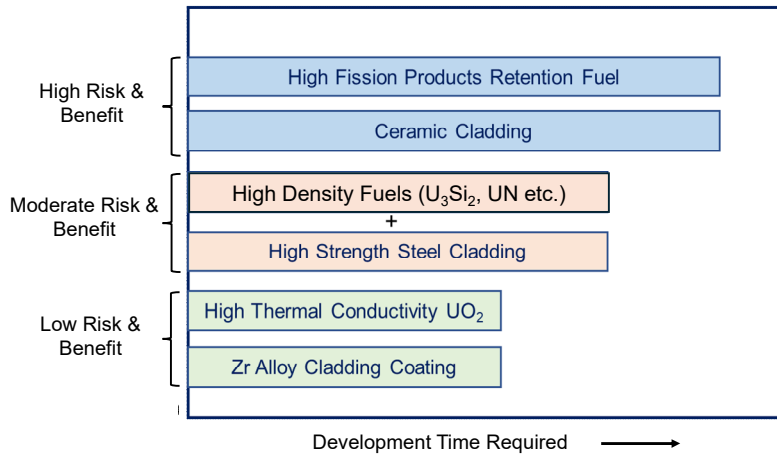


그림 3-27 사고저항성 핵연료 및 피복재 개발기간 및 이득

2) 사고저항성 핵연료 및 피복재 개발 동향

① Cr 코팅 Zr 합금 피복관

지금까지 MAX 상 코팅, 탄화물 코팅, 질화물 코팅, 순수 금속 코팅 및 합금 코팅을 포함한 다양한 유형의 코팅 재료가 개발되고 있다. 이전 연구에 따르면 TiAlC 및 CrAlC와 같은 MAX 상 코팅은 열처리, 수분 부식 및 고온 증기 산화 과정에서 코팅 내 균열 발생에 취약한 것으로 나타났다. SiC 코팅은 부식 생성물의 용해로 인해 350°C 및 20MPa 조건에서 불안정하다. 또한, SiC 코팅은 높은 취성으로 인해 열충격 시 균열이 발생할 수 있다. CrN과 같은 금속 질화물 코팅은 500~975°C 온도에서 Cr_2N 과 N_2 로 분해되어 균열을 형성한다. FeCrAl 코팅의 경우, Fe-Zr 공용 온도는 약 900°C로, 이는 일반적인 LOCA 온도보다 훨씬 낮다.

후보 코팅 재료 중, Cr 코팅은 탁월한 화학적 안정성(산화 저항성 및 수열 부식 저항성 포함), 낮은 열중성자 흡수 단면적, 그리고 우수한 밀착력과 같은 장점으로 인해 전 세계적으로 연구 진행 속도가 가장 빠르다. 그림 3-28은 Zr 합금 피복관에 적용된 단층 및 이중층 코팅을 보여주고 있다.

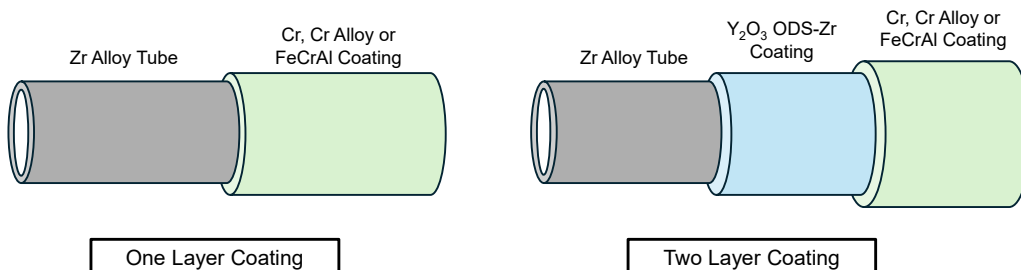


그림 3-28 단층 및 이중층 코팅 Zr 합금 피복관 설계

② FeCrAl 피복관

오크리지 국립 연구소(Oak Ridge National Labs)와 글로벌 뉴클리어 퓨얼(Global Nuclear Fuel)은 지난 40년간 핵연료봉 피복재로 사용되어 온 Zr 합금의 대체 재료로 FeCrAl 기반 합금을 개발하고 있다. FeCrAl 합금은 Cr 10~20wt%와 Al 5~10wt%를 함유하는 페라이트 합금입니다. FeCrAl 피복재의 잠재적 이점은 다음과 같다.

- 향상된 고온 증기 산화 저항성으로 인해 설계 기준 사고 및 중대 사고 시 대처 시간이 연장되고 수소 발생이 감소할 수 있다.
- 일반 작동 조건 및 고온 사고 시나리오 모두에서 강도가 향상된다. 이는 연료 피복재 두께를 줄여 연료 체적을 늘릴 수 있음을 의미한다.
- 정상 작동 중 향상된 부식 저항성과 수소화물 부재로 인해 피복재의 연성이 향상될 수 있다.

FeCrAl 피복재의 잠재적 단점은 다음과 같다.

- 고크롬 페라이트 철 기반 합금에서 크롬이 풍부한 상의 석출로 인해 성능 한계가 발생하며, 이는 합금을 취성으로 만들 수 있다.
- 지르코늄 합금의 열중성자 단면적은 다른 재료에 비해 현저히 높아, 노심 반응도를 감소시키고 궁극적으로 가동 가능한 주기 길이를 단축시킬 수 있다.
- 이 재료는 지르코늄 합금에 비해 냉각재로의 삼중수소 방출량이 더 많다. 튜브 내부에 알루미늄 코팅을 적용하는 것이 이 문제에 대한 해결책 중 하나가 될 수 있다.

③ SiC 복합재 피복관

SiC 섬유를 직조한 후 SiC를 주입하여 그림 3-29와 같이 견고한 튜브를 제작한다. SiC는 다양한 산업 분야에서 활용되어 왔지만, 원자로 내부 부품으로는 사용된 적이 없다. SiC 피복재의 잠재적인 장점은 다음과 같습니다.

- 이산화우라늄(UO₂)의 용융온도를 초과하는 극한의 고온에서도 구조적 건전성을 유지한다.
- 고온 증기 산화 저항성 향상으로 설계기준사고 및 중대사고 시 대처 시간(coping time)이 연장되고 수소 발생량이 감소한다.

SiC 복합재 피복관에서 해결해야 할 문제는 다음과 같다.

- 핵분열 가스가 SiC 피복재를 투과하는 문제
- 정상운전 중 부식으로 인한 SiC 질량 손실 및 피복재 약화 가능성
- 정상운전 조건에서 미세 균열 발생
- 출력 변화, 예상운전과도사고 및 가상사고 시 요구되는 연성 부족
- SiC 튜브의 봉단마개(end plug) 용접 어려움

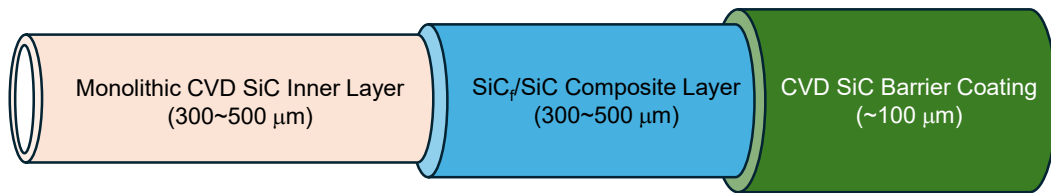


그림 3-29 SiC 복합재 피복관 설계

④ UN 핵연료 소결체

UO₂ 핵연료 소결체를 대체할 수 있는 우라늄 질화물(UN) 개발되고 있다. 당초 과학자들은 시범집합체에 사용될 가능성이 있는 U₃Si₂를 연구하였다. 하지만, 추가 연구 결과 U₃Si₂는 개발에 적합하지 않다고 판단되어 UN 개발로 전환되었다. UN 연료 펠릿의 잠재적 이점은 다음과 같다.

- 우라늄 밀도 향상으로 출력 증대 및 핵연료 주기 연장 가능
- 고온 용융점
- 주변 물질로부터 중성자 흡수 최소화
- 열전도도 증가로 핵연료 온도 감소

UN 핵연료 소결체와 관련하여 해결해야 할 문제는 다음과 같다.

- 희귀 질소 동위원소(N-15) 필요
- 경수 냉각재 사용 시, 상온에서 높은 화학 반응 속도

⑤ 압출 금속 핵연료

라이트브리지사(Lightbridge)는 지르코늄 합금 피복재 내부에 지르코늄-우라늄 매트릭스로 구성된 압출 금속 봉 형태의 신형 핵연료를 개발하고 있다. 압출 금속 핵연료는 다음과 같은 다양한 잠재적 이점을 제공한다.

- 더 높은 핵연료 열전도율로 인해 낮은 핵연료 온도를 유지할 수

있다.

- 모든 핵분열 생성물을 핵연료 내에 함유하여 피복재 손상 시 핵분열 생성물의 급작스러운 방출을 방지한다.
- 더 높은 출력 운전 및 더 긴 핵연료주기를 지원한다.

압출 금속 핵연료가 해결해야 할 문제는 다음과 같다.

- 지르코늄-우라늄 매트릭스 내 우라늄 밀도가 상대적으로 낮아 우라늄 농축도가 최대 19.8%까지 요구된다. 이는 일반적으로 최대 10%의 농축도만 필요한 다른 사고 저항성 핵연료 기술의 이산화우라늄 연료와 비교할 때 높은 수치이며, 임계도 사고 위험을 증가시킬 수 있다.
- 경수로에 대한 압출 금속 핵연료 자료 및 운전경험이 제한적이다.

⑥ 마이크로 셀 UO_2 핵연료

그림 3-30에 보듯이, 마이크로셀 UO_2 핵연료는 상호 연결된 얇은 셀 벽으로 둘러싸인 UO_2 핵연료 입자로 구성됩니다. 마이크로셀 UO_2 핵연료를 사용하는 주된 목적은 고방사성 및 부식성 핵분열 생성물의 핵연료로부터의 방출을 줄이고, 핵연료 안전성을 향상시키기 위해 소결체 온도를 낮추는 것이다. 이 그림에는 셀 벽을 구성하는 재료에 따라 두 가지 유형으로 분류된 마이크로셀 UO_2 핵연료가 나타나 있다. 이러한 마이크로셀 UO_2 핵연료는 금속 및 세라믹 재료의 조합으로 만들어지며 고유한 특성을 가지게 된다.

예를 들어 Cr 금속 마이크로셀 UO_2 핵연료와 같은 금속 마이크로셀 구조를 가진 UO_2 핵연료는 높은 열전도성을 지닌 연속적으로 연결된 벽을 가지게 된다. 차가운 소결체로의 확산을 늦추면 핵분열 생성물 방출이 감소된다. 소결체 온도 구배를 낮추는 것은 과도 운전 시 소결체-피복관 간 기계적 상호작용(PCMI)에 의한 피복관 손상을 방지하는 데 도움이 된다. 더욱이, 마이크로셀 구조에서 높은 열전도율을 가진 UO_2 핵연료는 정상운전 시 열적 성능 및 운전 성능을 향상시키는 것과 더불어, LOCA와 같은 설계기준사고 발생 시, 안전 여유도를 크게 증대시킨다.

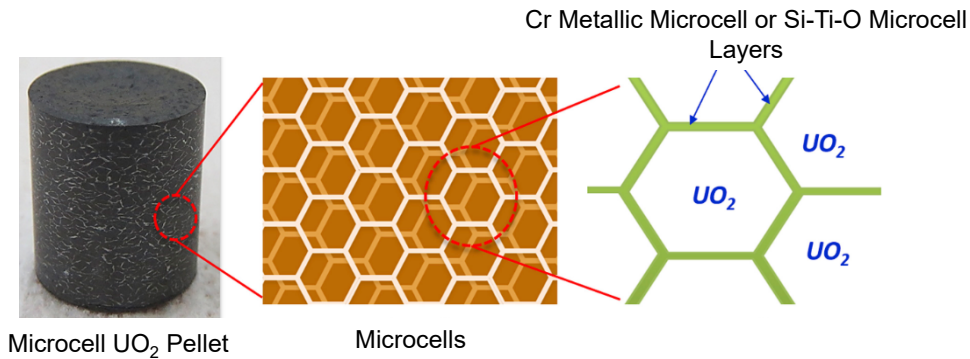


그림 3-30 마이크로 셀 핵연료 미세구조

본 보고서 제 3장에서는 국내 핵연료 확보이력으로써 제 0세대, 제 1세대, 제 2세대, 제 3세대 및 제 4세대 핵연료 등이 기술되었다. 그림 3-31에는 제 0세대 핵연료부터 제 3세대 핵연료까지 국내 가압경수로에 대한 핵연료 상용공급 이력이 나타나 있다. 참고로 제3세대 핵연료인 HIPER16 핵연료는 2024년 8월부터 한울5호기에 상용공급되고 있다.

가압경수로(PWR)			제 0세대		제 1세대		제 2세대		제 3세대	
			1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
WH형 원전	고리 1	14x14	수입 핵연료	KOFA	OFA					
	고리 2	16x16		KOFA	STD		16ACE7			
	고리 3/4	17x17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7			
	한빛 1/2	17x17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7			
	한울 1/2	17x17		KOFA	V5H	RFA	17ACE7			
OPR1000	한빛 3/4	16x16		STD	Guardian	PLUS7		HIPER16		
	한빛 5/6	16x16		STD	Guardian	PLUS7		HIPER16		
	한울 3/4	16x16		STD	Guardian	PLUS7		HIPER16		
	한울 5/6	16x16			Guardian	PLUS7		HIPER16		
	신고리 1/2	16x16			Guardian	PLUS7		HIPER16		
	신월성 1/2	16x16			Guardian	PLUS7		HIPER16		
APR1400	세울 1/2	16x16				PLUS7		HIPER16		
	신한울 1/2	16x16					PLUS7	HIPER16		

그림 3-31 국내 가압경수로에 대한 핵연료 상용공급 이력

4. 국내 핵연료 피복관 소재 확보이력

4.1 개요

지르코늄(Zr)은 열중성자 흡수 단면적이 0.18barn으로, 고속중성자의 핵연료 피복재로 사용되는 스테인리스강의 약 3.2barn이나 연구로에 사용되는 알루미늄의 0.23barn보다 현저히 낮다. 지르코늄은 우수한 기계적 특성, 내식성 및 핵연료인 UO_2 와의 적합성때문에 가압경수로(PWR)와 가압중수로(PHWR) 모두에서 핵연료 피복재로 활용되고 있다.

가압경수로(PWR), 비등경수로(BWR), 러시아형 가압경수로 (WWER)에서는 지르코늄 합금이 피복재로 사용되며, 대표적인 PWR 피복재로는 Zircaloy-4, Low Sn Zircaloy-4, 그리고 Zr-Nb 합금이 있다. 초기의 PWR 개발 단계에서는 Zircaloy-4 피복재가 주로 사용되었다. 그러나 1980년대에 핵연료 연소도가 38 MWD/kgU를 초과하면서 지르칼로이-4 피복재의 산화율 문제가 대두되었고, 이에 따라 개량형 Zircaloy-4, 즉 저주석 Zircaloy-4 합금이 개발되었다. 이로 인해 Zircaloy-4의 주석 함량 규격 상한이 1.2~1.7%에서 1.2~1.4%로 감소되었다. 그럼에도 불구하고 1990년대에 핵연료 연소도가 45 MWD/kgU를 초과하여 지속적으로 증가함에 따라, Zirlo, M5, HANA, M-MDA, NDA, E635와 같은 다양한 Zr-Nb 합금들이 개발되어 현재 사용되고 있다. 그림 4-1에는 Zr 합금 별 연소도에 따른 피복재의 산화층 두께가 나타나 있다. 표 4-1에는 Zircaloy-4와 다양한 Zr-Nb 합금의 화학적 조성이 제시되어 있다.

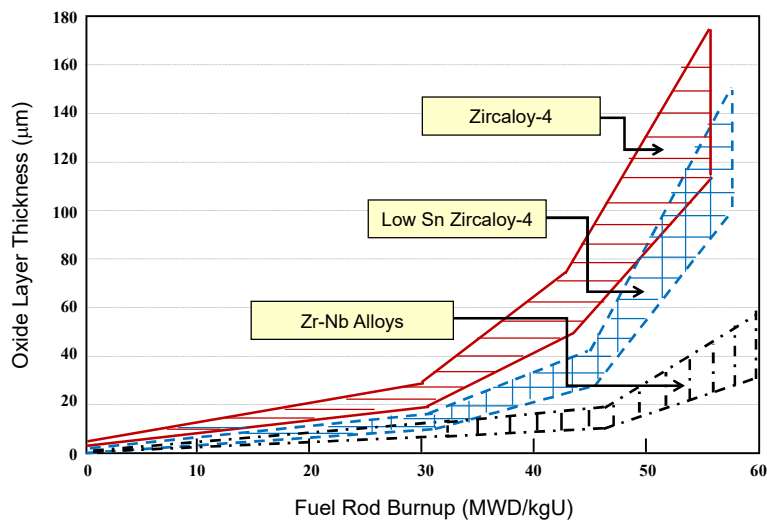


그림 4-1 연소도에 따른 Zr 합금 피복관 산화층 두께

4.2 신형 피복재 개발

1) Zirlo 피복재

Zirlo는 1970년대부터 미국 웨스팅하우스사에서 개발하여 현재 다수의 상업용 원자로에 활용되고 있다. 냉각재 온도 상승, 연료 연소도 증가, 핵연료 주기길이 연장 등 보다 효율적인 원자로 운전 및 경제성 향상에 대한 요구가 증대됨에 따라 고성능 핵연료봉 개발 필요성이 부각되었고, 이로 인해 내식성이 향상된 차세대 피복재 개발을 촉진하는 계기가 되었다. Nb, Mo, V, Cu, Mn 등 첨가 원소의 영향에 대한 분석을 토대로 Zr-Nb, Zr-Nb-Sn-Fe, Zr-Mo, Zr-Mo-Sn-Fe, Zr-Mo-Sn-Cu, Zr-Nb-Cu 등의 후보 합금이 도출되어 내식성 및 제조성 연구가 수행되었다. 이 중 Zr-Nb((Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe)) 합금이 최종 선정되었다.

Zirlo는 열처리 온도 제어를 통해 매우 미세한 β -Nb 석출물을 가지는데, 이러한 석출물의 형성이 기지 내 Nb의 포화 농도를 감소시켜 내식성을 향상시키는 것으로 추정된다. 또한 Nb는 중성자 조사에 의해 발생하는 점결함을 안정화시켜 전위(dislocation)의 이동을 방해함으로써 치수 안정성을 개선하는 것으로 알려져 있다.

2) M5 피복재

프랑스 Areva사는 신형 피복재 개발을 1980년대 초부터 시작하여 1990년대 초에 M5(Zr-1.0Nb-0.13O) 피복재를 선정하였다. M5 피복재에 대해 제조 특성 및 다양한 운전 조건에서의 노내 검증시험에 대한 광범위한 연구가 수행되었다. 노외 및 노내 검증시험 결과를 바탕으로 M5 피복재의 상업적 공급이 시작되었으며, 현재 M5 피복재가 적용된 핵연료 집합체는 가압경수로(PWR)에서 운전되고 있다.

3) E635 피복재

WWER 및 RBMK 원자로에 사용되는 핵연료 피복재는 가압경수로에 사용되는 피복재와는 차별화된 고유한 특성을 가지고 있다. 러시아에서는 지르코늄을 기반으로 1.0 w/o Nb을 첨가한 Zr-Nb 이원소 합금(E110)을 개발하여 활용해 왔다. E110 피복재의 성능 문제점을 개선하기 위해 E535 피복재가 개발되었고, 이어서 E635 피복재는 Nb 함량을 1.0wt%에서 0.911 w/o로 낮추고, Sn 1.1 w/o와 Fe 0.3-0.5 w/o를 추가하여 개발되었다. E635 재료는 핵연료 피복관, 안내관 및 지지격자 재료로 사용되고 있다.

4) M-MDA, NDA 및 J-Alloy 피복재

미쓰비시 핵연료(Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd., MNF)는 고성능 가압경수로용 핵연료 피복재로 M-MDA(Modified MDA)를 개발하였다. 노외 검증시험 및 노내 검증시험 결과를 토대로, M-MDA 피복재는 Zircaloy-4 및 MDA에 비해 내식성, 수소 흡수율, 조사 하에서의 치수 안정성, 그리고 높은 기계적 강도 측면에서 우수한 성능을 입증하였다. M-MDA 재료는 원자력 및 핵연료 구조재로도 적용 가능하다. MNF는 기계적 강도가 강화되어 핵연료 집합체의 내진성 향상을 위해 M-MDA 안내관과 지지격자를 개발하였다.

MDA 재료의 화학 조성은 $Zr-0.5Nb-0.8Sn-0.2Fe-0.1Cr$ 이며, 이는 Zircaloy-4와 유사한 화학 조성을 유지하되 Nb 첨가량을 조절하는 기본 개념을 바탕으로 개발되었습니다. M-MDA 재료의 화학 조성은 $Zr-0.5Nb-0.5Sn-0.3Fe-0.4Cr$ 이며, MDA 성능 향상을 목표로 개발되었다.

NFI사는 새로운 합금인 NDA(New Developed corrosion resistance Alloy)를 개발했으며, 공칭 화학 조성은 $Zr-0.1Nb-1.0Sn-0.27Fe-0.16Cr-0.01Ni$ 이다. 노외 부식시험 결과, NDA의 부식 및 수소 흡수 특성은 Zircaloy-4 보다 우수한 것으로 나타났다. 또한, 인장, 크리프 및 파열 시험 결과는 Zircaloy-4와 거의 동등한 수준으로 보고되었다. 노내 검증시험 결과에서는 Low Sn Zircaloy-4와 유사한 경향을 보이며 일부 개선된 점이 확인되었다.

2015년부터 일본 산업계, 학계 그리고 스페인 산업계 공동으로 J-Alloy 개발을 수행하고 있다. J-Alloy 연료봉은 이미 연료봉 평균 약 70GWd/tU의 목표 연소도에 도달하였다. J-Alloy는 차세대 PWR을 위한 고성능 피복재로서 유망한 가능성을 보이고 있다.

5) HANA 피복재

KAERI에서는 지적소유권이 HANA 피복재를 성공적으로 개발하여 2012년 12월 한전원자력연료에 HANA 피복재의 기술이전을 하였다. HANA 피복재는 그림 4-2에서 보듯이, HANA 피복재 합금 설계, 노외 검증시험, 연구로 조사시험, 선행 핵연료봉 노내 검증시험, 시범집합체 노내 검증시험 등 모든 개발 단계를 거쳤기 때문에 노내 검증시험 완료까지 약 15년이 소요되었다. 상술하면, HANA 피복재로 제작된 핵연료봉과 HANA 시험시편은 노르웨이 할덴 연구로에서 약 7년간 조사시험이 수행되었다. 또한, HANA 피복관이 장착된 선행 핵연료봉(pathfinder rod)과 시범집합체는 상용

원전에서 4년간 노내 검증되었다. HANA 피복관은 부식 및 크리프 성능 면에서 Zircaloy-4 대비 50% 이상 향상된 성능을 보였습니다. 특정 사고 조건에서의 LOCA 및 RIA(반응도 삽입 사고)에 대한 HANA 피복관의 노외 성능 역시 Zircaloy-4보다 우수한 것으로 확인되었다.

4.3 신형 피복재 개발 기술

1) 신형 피복재 개발절차

핵연료집합체 부품은 소재 측면에서 다음과 같이 4종류로 대별될 수 있다

- 피복관, 안내관, 계측관
- 중간 지지격자, 유동혼합기
- 상단 및 하단 지지격자, 이물질여과용 지지격자
- 상단 및 하단 고정체

Zr 합금 소재가 사용되는 부품은 피복관, 안내관, 계측관, 중간 지지격자, 유동혼합기 등이며, 핵연료공급자는 지식재산권이 확보된 Zr 합금 소재를 개발하여 자사 핵연료집합체 및 부품 설계 및 제조에 사용하고 있다. 만약 핵연료공급자가 자사의 Zr 합금 소재를 확보하지 못하였다면, 타사로부터 고가로 Zr 합금 소재를 구입해야 하며, 이로 인해 핵연료 제조비는 상승하게 된다.

상단 및 하단 지지격자 그리고 이물질여과용 지지격자의 소재로는 주로 인코넬이 사용되는데, 인코넬은 해외 제조사로부터 구입할 수 있으며, 인코넬에 대한 지식재산권 문제는 없다.

상단 및 하단 고정체의 소재는 스텐레스강이므로 국내·외 제조사로부터 용이하게 구입할 수 있으며, 스텐레스강에 대한 지식재산권 문제는 없다.

따라서, 핵연료 소재에서 지식재산권 문제를 야기하는 소재는 피복관, 안내관, 계측관, 중간 지지격자, 유동혼합기 등에 사용되는 Zr 합금이다. 그러나 Zircaloy-2 및 Zircaloy-4 소재는 이미 특허가 만료되어 지식재산권 문제는 없지만, 고연소 성능 문제로 인해 가압경수로에서는 더 이상 사용되고 있지 않다. 앞에 기술한 바와 같이, 핵연료공급기관들은 Zr 합금을 자체 개발하여 지식재산권을 확보하고 있다. 즉 미국 웨스팅하우스사는 Zirlo 합금,

프랑스 아레바사는 M5 합금, 일본 미쯔비시사는 MDA, 한전원자력연료는 HA NA 합금을 보유하고 있다.

핵연료 신소재 개발절차는 그림 4-3에 제시되어 있다.

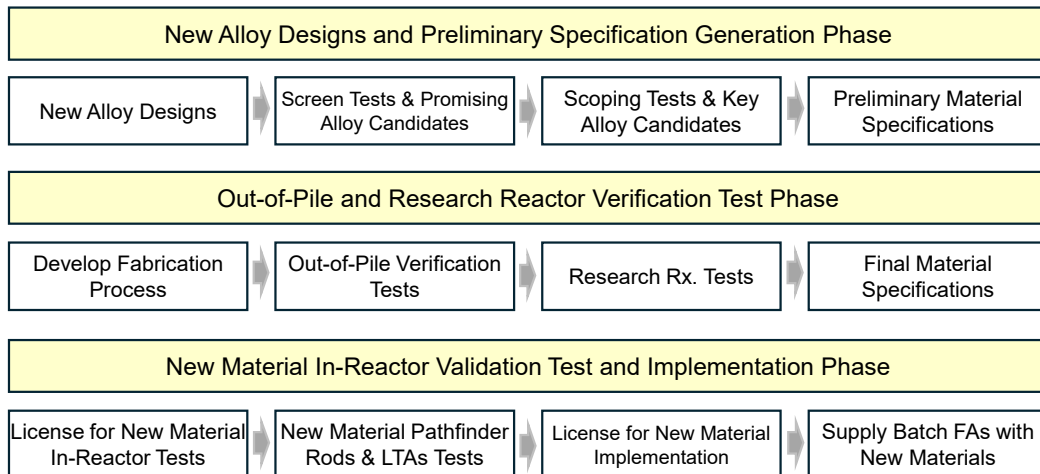


그림 4-3 핵연료 신소재 개발절차

2) 신형 피복재 개발 단계

[신형 Zr 합금 설계 및 예비설계 단계]

① 신형 Zr 합금 설계

- Zr 합금을 사용하는 피복관, 안내관, 계측관, 중간지지격자 등을 포함하는 신형 피복재 합금 개발목표 도출을 위해 고객의 의견을 수렴
- Zr 합금 설계를 수행하여 후보 합금을 도출
- 그림 4-4에는 Zr 합금 설계 최적화 절차가 제시됨.

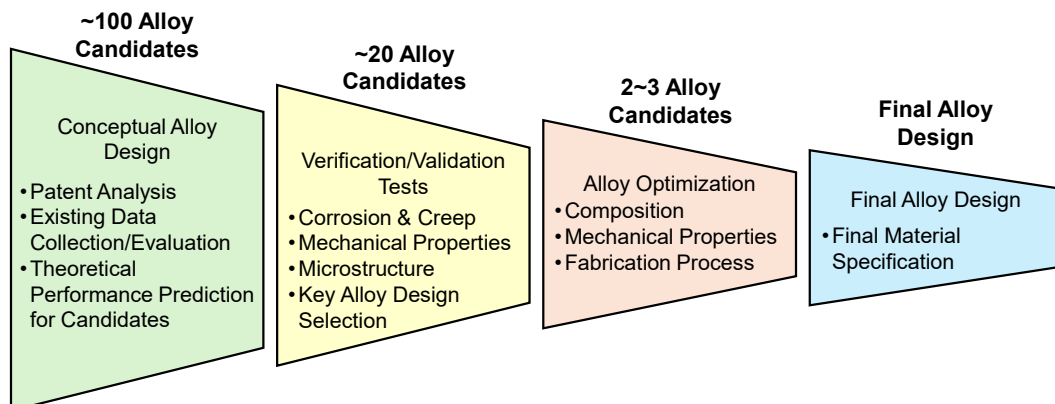


그림 4-4 Zr 합금 설계최적화 절차

② 스크린 시험 및 Zr 합금 유력 후보 선정

- 스크린 시험 범위 및 시험결과 평가방법 수립
- 스크린 시험용 시험시편 제조
- 부식시험, 기계적 성능시험, 미세조직시험 등 스크린 시험 수행
- 스크린 시험 결과를 토대로 유력 후보 Zr 합금 선정

③ 스코핑 시험 및 Zr 합금 주 후보 선정

- 스코핑 시험 범위 및 시험결과 평가방법 수립
- 유력 후보 Zr 합금을 사용하여 부품 제조
- 부식시험, 기계적 성능시험 등 스코핑 시험 수행
- 시험결과, 경제성, 제조용이성 등을 토대로 주 후보 Zr 합금 선정

④ Zr 합금 예비 재료시방서 생산

- 주후보 Zr 합금의 화학조성 최적화
- Zr 합금 제조공정 최적화
- Zr 합금 예비 재료시방서 생산
- 예비시방서 내용: 표 4-2

표 4-2 Zr 합금 재료시방서 내용

○ : Required, △ : Optional, X : Not Required

Technical Requirements	Materials Specifications(Zr Alloys)				
	Cladding Tube	GT	IT	SG Strip	Bar
Chemical composition	○	○	○	○	○
Tensile strength(RT)	○	○	○	○	○
Tensile strength(HT)	△	△	△	△	○
Corrosion	○	○	○	○	○
Grain size	○	○	○	○	○
Rupture strength(RT)	○	X	X	X	X
Hydride orientation	○	△	△	X	X
CSR	○	X	X	X	X
Surface roughness	○	○	○	X	X
Defect	○	○	○	○	○
Dimension	○	○	○	○	○
Texture	△	X	X	△	X
Second particles	△	X	X	△	X
Recrystallization	△	△	△	△	X

[주 후보 Zr 합금 노외 검증시험 및 연구로 조사시험 단계]

① 제조공정 개발

- 주 후보 Zr 합금에 대한 제조공정 개발
- 주 후보 Zr 합금으로 관련 핵연료 부품 제조

② 노외 검증시험 수행

- 노외 검증시험 종류 및 시험결과 평가방법 선정
- 부식시험, 열적 크립시험, 기계적 특성시험, 파열시험, 피로시험 등 노외 검증시험 수행
- 노외 부식 검증시험 결과(예시): 그림 4-5

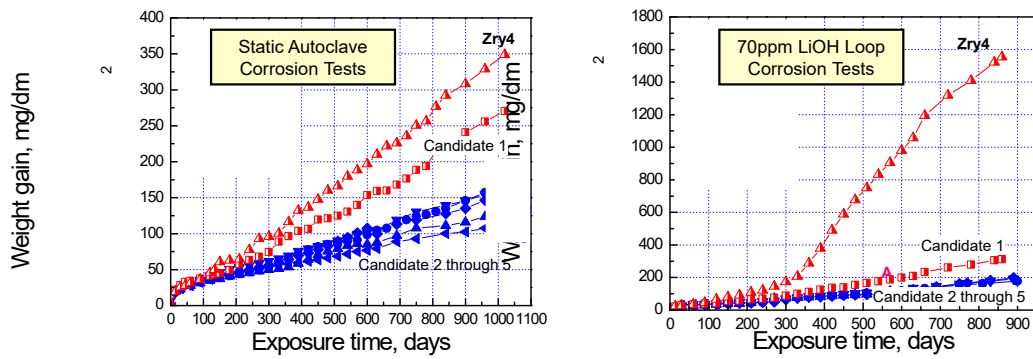


그림 4-5 노외 부식 검증시험 결과

③ 연구로 조사시험 수행

- 연구로 조사시험 종류 선정: 캡슐시험, Loop 시험 등
- 연구로 조사시험 평가방법 선정
- 연구로 조사시험 수행: 약 7년 소요
- 연구로 조사시험 결과: 그림 4-6

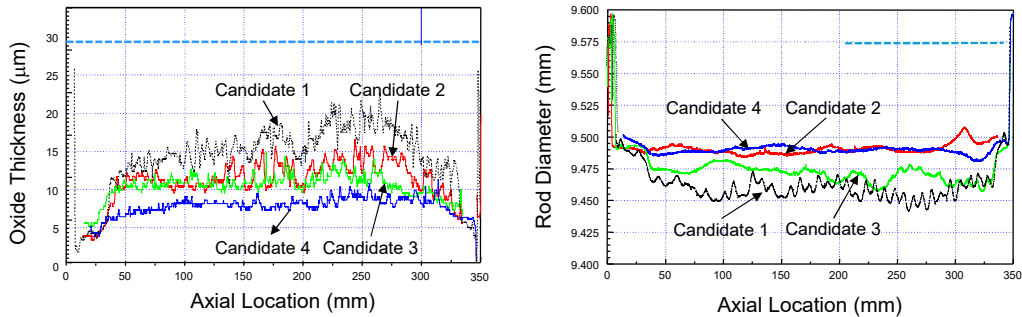


그림 4-6 연구로 조사시험 결과: 부식 및 크립

④ 최종 재료시방서 생산

- 화학조성, 불순물 허용 함량, 공차 등에 대한 최적화
- 기계적 강도 등 재료시방서 요건 최적화

- 제조공정 최적화
- 최종 재료시방서 생산

[신형 Zr 합금 노내 검증시험 및 상용공급 단계]

① 신형 Zr 합금 노내 검증시험을 위한 인허가

- 상용 원전에서 선행 연료봉 및 시범집합체 노내 검증시험을 위해 인허가 문서 생산
- 인허가 문서에는 노외 검증시험 결과, 연구로 조사시험 결과, 핵연료 성능해석 전산코드에 의해 핵연료 설계기준 및 안전기준 충족 등이 기술되어야 함.

② 선행 연료봉 및 시범집합체 노내 검증시험 수행

- 선행 연료봉 노내 검증시험: 한 개 집합체 내에 신형 Zr 합금 피복관 장착된 약 20개의 핵연료봉을 장입하여 노내 검증시험 수행
- 시범집합체 노내 검증시험: 신형 Zr 합금 피복관, 중간지지격자, 안내관 및 계측관으로 제조된 4개 또는 8개 시범집합체에 대한 노내 검증시험 수행
- 선행 연료봉 및 시범집합체 노내 검증시험 자료 생산 및 Zr 합금 성능 평가

③ 신형 Zr 합금 상용공급 인허가 및 상용공급 개시

- 노외 검증시험결과, 연구로 조사시험결과, 선행 연료봉 노내 검증시험결과, 시범집합체 노내 검증시험결과를 토대로 Zr 합금 성능모델 개발 및 관련 전산코드 수정
- 신형 Zr 합금 성능해석 모델 및 전산코드 관련 주제보고서 작성 및 인허가 기관 제출
- 신형 Zr 합금 성능해석 모델 및 전산코드를 토대로 핵연료설계보고서 및 재장전 천이노심 안전성평가보고서 작성 및 인허가기관 제출
- 신형 Zr 합금을 사용한 핵연료봉, 중간지지격자, 안내관 및 계측관 제조공정인증시험(PQT)를 수행
- 규제기관이 신형 Zr 합금 사용을 승인하면, 신형 Zr 합금이 장착된 핵연료집합체 제조 및 상용공급 개시

5. 국내 원자로심 및 안전해석 전산코드 확보 이력

5.1 개요

원자로심 및 안전해석 전산코드는 원자로심 설계 및 안전해석을 위해 반드시 필요한 컴퓨터 프로그램이다. 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사에는 자사가 개발한 전산코드에 대한 특허등록 및/또는 저작권 확보를 통해 원자로심 및 안전해석 전산코드에 대한 지적소유권을 이미 확보하였다.

한편, 1978년 고리 1호기 운전 시작 이후 2010년대 후반까지도 국내 원자력산업계는 미국 웨스팅하우스사에게 막대한 기술료를 지급하고 원자로심 설계 및 안전해석 전산코드를 이전받아 국내 웨스팅하우스형 원전, OPR1000 및 APR1400 원전 설계를 수행한 바있다. 또한 기술이전된 전산코드에 대해 국내실시권만 보유하고 있으므로 원자력시스템 및 핵연료 수출에 많은 제약이 있을 수밖에 없었다.

따라서 해외사 전산코드에 대한 의존도를 탈피하고, 원자력시스템 및 핵연료 기술의 독자 수출을 위해서는 지식재산권이 확보된 원자로심 및 안전해석 전산코드 개발은 필수적이다. 또한 보다 정확한 원자로심 설계 및 안전해석을 위해서는 국내 원자로 노형, 운전조건, 규제요건 등을 모사한 전산코드 개발이 필요하다. 이를 통해 원자력 규제기관의 규제기술도 고도화될 수 있다.

고유 원자로심 설계 전산코드 체계 개발 프로젝트는 2006년 10월부터 2012월 12월이 수행되어, 한전원자력연료는 고유 원자로심 설계 전산코드를 확보하게 되었다. 고유 원자력 안전해석 전산코드 체계 개발 프로젝트는 한국원자력연구원, 한전원자력연료, 한국수력원자력 및 한국원자력안전기술원 공동으로 2006년부터 2017년까지 수행되었다.

5.2 고유 원자로심 설계 및 안전해석 전산코드 개발

원자로심 설계 및 안전해석 전산코드는 다음과 같이 구성된다.

- 핵설계 코드
- 열수력 설계 코드
- 핵연료봉 성능해석 코드
- 핵연료집합체 성능해석 코드
- 원자로심 안전해석 코드

원자로심 설계 전산코드는 원자력 발전소의 운전자료, 경제성 자료 및 안전해석 입력자료를 평가하는데 사용된다. 안전해석 전산코드는 원자로심 설계 전산코드에서 생성된 노심 입력자료를 사용하여 발전소 안전성을 평가하는 데 이용된다.

국내에서 고유 원자로심 설계 전산코드 체계 개발 프로젝트 및 고유 원자력 안전해석 전산코드 체계개발 프로젝트를 통해 확보한 주요 전산코드 체계는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 핵설계 코드: KARMA, ASTRA
- 열수력 설계 코드: THALES
- 핵연료봉 성능해석 코드: ROPER
- 핵연료집합체 성능해석 코드: DYTRAC
- 안전해석 코드: SPACE, CAP

상기 전산코드들의 기능 및 특징은 아래와 같이 요약될 수 있다.

① KARMA 전산코드

KARMA 전산코드는 MOC(Method Of Characteristics) 방법론을 사용하여 ASTRA 전산코드의 입력자료인 단면적 그룹상수를 생산한다.

② ASTRA 전산코드

ASTRA 전산코드는 반해석적 노달방법(SANM)을 이용하여 핵연료 집합체 및 핵연료봉의 정상조건 및 과도상태의 3차원 출력 분포를 계산한다. 또한 ASTRA 전산코드는 핵반응 동특성 인자를 도출하기 위한 수반 중성자속(adjoint flux)을 계산한다.

③ THALES 전산코드

THALES 전산코드는 균일 유동장 내에서 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 풀어 노심 열수력학을 분석하고 핵연료봉 건전성을 확인하는 부채널(sub-channel) 해석 코드이다.

④ ROPER 전산코드

ROPER 전산코드는 핵설계에서 생산한 출력이력 등 핵설계자료와 열수력 설계에서 생산한 입구온도, 유속 등의 열수력 조건을 사용하여 연소도에 따른 핵연료봉의 건전성을 평가하고 관련

설계기준 충족 여부를 분석한다.

⑤ DYTRAC 전산코드

DYTRAC 전산코드는 유한요소법을 활용하여 지진 및 LOCA(냉각재 상실 사고) 발생 시 핵연료집합체의 건전성을 평가한다.

⑥ SPACE 전산코드

원자력발전소 안전해석 전산코드인 SPACE는 다차원, 이원계, 3차원 유동을 분석한다. SPACE 전산코드는 이 상(two phase) 간 계면에서 발생하는 물리적 현상을 예측하기 위한 계면적 및 열-물질 전달 기능을 제공한다.

⑦ CAP 전산코드

CAP 전산코드는 압력 및 온도 변화 경향과 더불어 수소 농도를 포함한 격납건물 열수력학적 거동을 분석한다. CAP 전산코드는 유체 거동에 2상, 3차원 방정식을 채택한 집중 모델을 사용하며, 적절한 구성 방정식, 1차원 열전도체 모델, 구성품 모델, 트립 및 제어 모델, 그리고 특수 공정 모델을 적용한다.

CAP 전산코드는 단독 모드 또는 원자로 냉각재 계통 분석 코드와 연동된 모드로 운용될 수 있다.

CAP 전산코드의 주요 기능은 가압경수로의 격납건물 건전성, 비상노심냉각계통 성능 및 기기 환경 적합성 분석을 위해 압력 및 온도 거동을 포함한 격납건물의 열수력학적 상태를 분석한다. 격납건물 내 수소 농도 거동 또한 분석되지만, 이 단계에서는 수소 연소는 고려되지 않는다.

5.3 고유 원자로심 설계 및 안전해석 전산코드 개발절차

원자로심 및 안전해석 전산코드 개발절차는 단순히 프로그램을 만드는 수준이 아니라, 물리모델의 이론정립 → 수치해석 모델 구현 → 검증시험 → 규제인증에 이르는 고도로 체계화된 다단계 개발 프로세스를 거친다. 국내 고유 노심설계코드(예: MASTER, CAPP, ANC-K 등) 개발 과정은 국제적 표준 절차(IAEA, OECD/NEA V&V 규정)를 따르고 있다.

① 요구사항 정의

- 목적: 어떤 물리현상과 해석기능을 포함할지 명확히 규정

- 주요 활동
 - 원자로 유형 정의 (PWR, SMR, SFR 등)
 - 해석범위 설정 (정상운전, 과도사고, 연료거동 등)
 - 기존 코드(RELAP5, PARCS 등) 분석 및 벤치마킹
 - 규제요건(KINS, NRC 기준) 반영
- 산출물
 - 기능 요구서(Functional Requirement Spec.)
 - 모델 리스트
 - 해석정확도 목표치

② 물리·수학 모델 수립

- 핵설계: 중성자 수송방정식, 군상수 계산(연료봉/집합체 단위), 반응도 계수 모델 개발
- 열수력 설계: 에너지·질량·운동량 방정식, 2상유동모델, 열전달 상관식 구현
- 연료봉 설계: 소결체 및 피복관 열팽창, 응력, 크리프, 핵분열 가스 방출 등 물성식 개발
- 특징: 각 분야별 Governing Equation을 이산화(discretization)하여 전산 알고리즘 형태로 구현
- 산출물
 - 모델링 보고서
 - 수치해석 알고리즘 정의서

③ 전산 알고리즘 및 코드 구현

- 언어 환경: 주로 Fortran 90/2003 기반, 병렬처리(MPI, OpenMP) 지원
- 기능 구현:
 - 노심격자 구성, 시간적분(Solver) 모듈 개발
 - 입력자료 처리기(Input Processor)와 출력포맷 설계
 - 에러 검출 및 수렴성 판단 알고리즘 포함
- 결합 인터페이스: 노심코드 ↔ 열수력코드(예: SPACE), 연료코드 ↔ 노심코드 간 Coupling 알고리즘 개발
- 산출물
 - 실행가능 코드(Executable)

- 입력·출력 데이터 포맷
- 코드 매뉴얼 초안

④ 전산코드 검증 (Verification)

- 목적: 코드가 설계대로 정확히 구현되었는가를 확인
- 방법
 - 단위테스트(Unit Test)
 - 모듈통합 테스트
 - 수치해석 오차 검증(Analytical Benchmark)
- 기준 자료: IAEA, OECD/NEA 제공 표준 해석문제 (ICSBEP, NEA Benchmarks)
- 산출물
 - Verification Report
 - 오차분석표
 - 코드성능평가서

⑤ 전산코드 검증 (Validation)

- 목적: 코드가 실제 물리현상을 얼마나 잘 예측하는가를 검증
- 방법
 - 국내외 실험데이터(ATLAS, BETHSY, LOFT 등) 비교
 - 실증원전 데이터와 비교
- 검증 지표: 출력분포, 온도, 압력, 반응도, DNBR 등
- 산출물
 - Validation Report
 - 불확도(uncertainty) 분석 결과
 - 검증 통계치

⑥ 전산코드 품질보증 및 규제인증

- 품질보증 체계: ISO 9001 및 ASME NQA-1 기반 품질보증절차 수립
- 규제 승인: 원안위 또는 미국 NRC에 제출하여 “인허가용 코드로 승인” 획득
- 결과물(예시)
 - KNF: 2016~2017년 ‘노심설계 및 안전해석코드 인허가 취득’

완료

- KAERI: SPACE, MARS, MASTER 등 코드의 규제기관 검증 완료

⑦ 전산코드 유지관리 및 고도화

- 주요활동
 - 신규 핵연료 및 원자로형 반영 (예: HIPER17, i-SMR 등)
 - HPC 및 AI 기반 고속화
 - 다물리 Coupled Simulation (neutron + thermal + mechanical)
- 결과물(예시)
 - 개선버전(V2.x, V3.x 등)
 - 성능향상 보고서
 - 국제 V&V 데이터셋 추가

그림 5-1에는 핵연료 하드웨어(집합체, 부품 및 소재) 개발과 소프트웨어(원자로심 설계 및 안전해석 전산코드) 개발과의 연계가 나타나 있다. 소프트웨어 검증(Verification 및 Validation)을 위해서는 최우선적으로 검증 데이터베이스(DB)의 확보가 필수적이다. 즉 하드웨어 제품의 노외 및 노내 성능 데이터베이스 구축없이 소프트웨어 개발은 불가능하다. 또한 하드웨어 개발과 소프트웨어 개발은 밀접하게 연계되어 있으므로 하드웨어 개발자와 소프트웨어 개발자는 긴밀하게 소통할 수 있는 품질보증 및 품질관리 체계를 반드시 구축해야 한다.

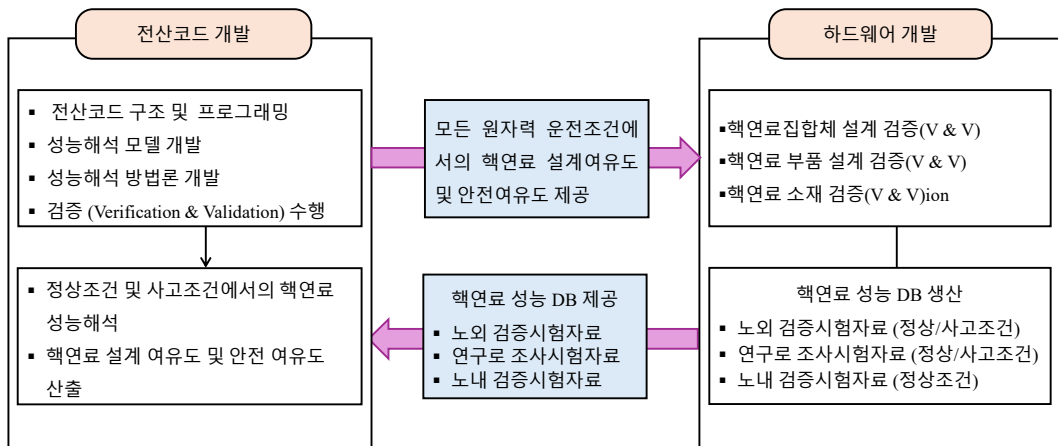


그림 5-1 하드웨어 개발과 소프트웨어 개발 연계도

6. 원자력 기술개발 장애요인과 해결방안

6.1 장애요인

① 국내 원자력기관 별 업무 분산

세계 원자력시장을 주도하고 있는 회사는 미국 웨스팅하우스사와 프랑스 아레바사이다. 이 두 기관 민간기업이고, 명실상부하게 원자력발전소 설계, 관련 장치 및 부품 제조 그리고 핵연료 설계 및 부품 제조 기술을 모두 보유하고 있는 원자력 공급자(Nuclear Vendor)이면서 핵연료 공급자(Nuclear Fuel Vendor)이기도 하다.

그러나 국내 원자력산업계는 원자력발전소 건설, 원자력발전소 계통 및 종합 설계, 원자력발전소 장치/부품 설계 및 제작, 원자력발전소 시운전 및 정비, 핵연료 설계 및 제조 등의 업무가 각각 다른 기관에서 분산, 수행되고 있다. 따라서, 한국은 원자력시스템의 해외수출을 성공적으로 추진하기 위해 표 6-1 과 같이 한국은 'One Team Korea' 조직을 도입하였다. 그러나, 앞에 설명한 바와 같이, 미국 웨스팅하우스사나 프랑스 아레바사는 One Team이 필요없는 그 회사 자체가 이미 One Team 인 것이다.

표 6-1 한국의 원자력산업계 기관 별 업무 분장

One Team Korea	참여 기관	역무
공기업	한국수력원자력	원전 사업의 주계약자 및 전반적인 프로젝트 총괄
	한국전력공사	원전 관련 기술 및 사업 전반에 참여
	한전전력기술	원자로 계통 및 종합 설계
	한전원자력연료	원자로심 설계 및 핵연료 공급
	한전KPA	원전 시운전 및 정비
민간기업	두산에너빌리티	원자력발전소 부품 설계, 주기기 제작
	대우건설	원자력발전소 시공
	현대건설	
	삼성물산	
	GS건설	
	포스코건설	
기타 협력업체	원자력발전소 소형부품 공급	

② 공기업 형태의 국내 원자력기관

세계 원자력시장을 주도하고 있는 회사인 미국 웨스팅하우스사는 민간기업이며, 원자력 사업실적에 따라 탄력적으로 인력을 축소·확대하고 있고, 기술개발 성과에 따라 인센티브 지급이 활성화 되어 있다.

그러나 공기업으로 운영되고 있는 국내 원자력기관들은 탄력적인 인력 운영이 어려우며, 과감한 인센티브 제도 도입도 곤란하다. 즉 국내·외 원자력 산업의 호황과 불황은 공기업 종사자 직업의 급여에 크게 영향을 주지 못하고 있는 실정이다.

좋은 예시는 다음과 같다. 한전원자력연료는 한수원과 핵연료 공급계약을 체결하여 공급계약금으로써 회사를 운영하고 있다. 만약 원자력발전소에서 요구하는 핵연료 물량이 적으면, 당연히 핵연료 공급 계약금이 축소되어 기관 운영에 어려움이 발생해야 하지만 실상은 그렇지 않다. 한수원은 핵연료 공급 축소 또는 공급 확대에 의해 발생한 손실 금액 또는 이익 금액을 보상 또는 환수하는 '총괄원가 보전제도'로 운영되기 때문이다. 이러한 '총괄원가 보전제도'로 인해 한전원자력연료의 사업영역 확대 및 신기술 개발에 대한 의지는 미약할 수밖에 없다. 이러한 '총괄원가 보전제도' 환경에서 한전원자력연료는 1990년대 말까지도 회사 자체 연구개발비를 책정하지 않았고, 핵연료 기술 개발에 대한 중장기 계획 수립도 없었다. 정부방침에 따라 1997년초 한국원자력연구원의 설계인력의 한전원자력연료로의 이관 후, 한전원자력연료는 OPR1000 및 APR1400 원전용 개량핵연료(PLUS7) 개발을 착수하였으며, 이 개발비는 과학기술부가 전액 지원하였음은 주지의 사실이다. 사실상 대기업인 한전원자력연료가 국가 연구과제를 수행할 때는 통상적으로 50% 이상의 연구비를 부담해야 하나 회사 자체 연구개발비가 없기 때문에 고육책으로 정부가 100% 개발비를 지원 것이었다.

③ 국내 원자력기관은 해외 기술 도입 및 운영에 치중

미국 웨스팅하우스사는 대부분의 원자력 및 핵연료 관련 원천기술을 개발하였다. 이러한 원천기술은 웨스팅하우스사의 최고경영자의 기술개발 리더십과 창의적인 전문인력 발굴에 의해 이루어 졌다. 즉 웨스팅하우스사는 세계 원자력계의 'First Mover'이라고 사료된다. 반면에 프랑스 아레바사는 미국 웨스팅하우스사로부터 원자력 및 핵연료 기술을 도입하였지만, 이 기술을 토대로 선진 원자력 및 핵연료 기술을 개발하였으며, 급기야

웨스팅하우스사의 기술과 대등 또는 보다 우수한 기술을 확보하였다고 판단된다. 즉 프랑스 아레바사는 세계 원자력계의 'First Follower'라고 할 수 있다. 하지만 대부분 공기업인 국내 원자력산업계는 해외사로부터 도입된 기술의 운영에만 치중하였다고 판단된다. 즉 한국의 원자력 산업계는 'Slow Follower'라고 할 수 있다.

First Mover와 Fast Follower의 차이점과 장단점을 그림 6-2에 제시하였다. 특히 공기업의 Follower 조직문화에서는 신기술 개발에 대한 아이디어를 창출하고, 책임지고 수행하겠다는 개발자는 거의 없다고 할 수 있다. 공기업 특성상 신기술 개발에 성공했다고 하더라도 개발자에게 상응한 인센티브를 제공할 수 없으며, 만약에 신기술 개발이 실패할 경우에는 개발 프로젝트 책임자가 책임을 지는 것은 다반사이다. 즉 공기업 체계에서는 개발자에게 동기부여를 줄 수 없다는 것이다.



그림 6-2 First Mover와 Fast Follower의 차이점과 장단점

6.2 해결방안

① 국내 원자력산업계 분산업무 통합 및 일원화

미국 웨스팅하우스사와 프랑스 아레바사와 같이 원자력 공급자(Nuclear Vendor) 및 핵연료 공급자(Nuclear Fuel Vendor) 역무를 동시에 수행하도록 원자력 산업계의 분산된 업무의 통합·일원화가 필요하다고 사료된다. 제 1단계로는 민간기업인 두산에너지빌리티를 제외하고 원자력 공기업 즉 한전원자력기술, 한전원자력연료 및 한전 KPS 등의 통합을 제안한다. 제 2단계에서는 민간기업인 두산에너지빌리티와 통합된 공기업

원자력기관을 민간기업 형태로 통합·일원화하여, 세계 원자력시장에서 미국 웨스팅하우스사 및 프랑스 아레바사와 기술 경쟁을 할 수 있도록 하는 것이다.

② 고급 기술개발 인력 양성 및 선순환 인센티브 제도 도입

세계 원자력시장에서의 국내 원자력기술의 경쟁력을 확보하기 위해서는 원자력기업의 전문인력 발굴 시스템의 선진화를 통해 도전적이고 창의적인 인재를 확보하여야 한다. 인력 발굴 후에도 기술개발 전문인력 양성 시스템을 구축하고 기관의 사업 비전, 사업 현안사항 및 문제점 도출, 해결방안을 제시하는 창의적이고 도전적인 인력을 양성해야 한다. 참고로, 미국 웨스팅하우스사의 신입직원 채용면접 시, 필수적인 질문은 지원자가 웨스팅하우스사가 당면한 기술적 문제가 무엇인지, 그리고 어떻게 해결할 수 있는지에 대한 것이다.

사실상 공기업 문화에서는 책임이 따르는 신기술 개발 업무를 담당하기 보다는 익숙한 통상적인 업무를 선호할 수밖에 없다. 이를 해결하기 위해서는 선진화된 승진제도 및 과감한 인센티브 지급 등을 통해 세계시장을 선도하는 기술개발 시스템을 구축해야 한다고 사료된다.

③ 제3자 기술검증체계 도입

국내 원자력 조직문화에서는 제 3자가 해당기업의 기술 수준, 기술개발 계획 및 기술개발 결과물 등을 분석하고 개선방안을 제시하기 어려운 것으로 판단된다. 예를 들면, 한국원자력연구원은 매년 막대한 연구개발비를 사용하여 선진 원자력기술을 개발하고 있으며, 대부분의 연구책임자들은 최종결과보고서에서 세계 수준의 연구개발결과물을 창출했다고 기술하고 있다. 그러나 60년 이상의 한국원자력연구원 역사에서 연구개발결과물의 상용화로 이루어지는 사례는 드물다. 이러한 이유는 연구개발 초기 단계부터 완료 단계까지 연구결과물에 대한 실질적인 제 3자 검증시스템이 부재하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 정부 지원 연구과제에 대해 정부 연구관리기관이 추진하는 통상적인 평가 이외에 연구수행기관 자체적으로 제 3자 기술검증시스템을 구축하여 연구개발 초기 단계에서 완료 단계까지 기술의 수월성 및 혁신성 등을 제 3자로부터 검증받는 것이 바람직하다. 미국 웨스팅하우스사는 기술개발 시작 단계부터 목표지향적으로 상용 인허가 관련 현안사항을 미리

도출하고, 기술개발 단계 별로 제 3자 기술검증을 수행한다. 이러한 기술검증에 초대받는 전문가는 웨스팅하우스사에서 은퇴한 전문가 풀(pool) 및 원자력산업계 전문가 풀에서 선정된다.

④ 원자력·핵연료 성능자료 생산·관리부서 신설

그림 6-3에 제시되어 있듯이, 독일 지멘스사가 원자력 사업을 수행할 당시, 원자력·핵연료 성능자료 생산·관리부서를 운영하여, 노외 및 발전소내 성능 측정장비 개발 및 관리, 노외 및 발전소내 성능 자료 측정 및 측정 자료의 신뢰도 분석, 측정자료 불확실도 도출, 신뢰성이 확보된 측정자료의 선정, 성능 데이터베이스(DB) 전달, 기술개발부서와의 데이터 관련 기술 협의 등을 수행하였다. 원자력 및 핵연료 성능자료 생산·관리부서의 인력은 개발부서의 인력에 비해 더 많은 것으로 알려져 있다. 이는 성능 데이터베이스(DB)의 생산 및 관리의 중요성을 보여주고 있다.

국내 원자력 산업계와 연구계에서도 독일 지멘스사와 유사한 원자력·핵연료 성능자료 생산·관리부서를 신설해야 한다고 판단된다. 아울러 미국 웨스팅하우스사와 마찬가지로 연구개발 및 기술개발을 통해 생산한 결과물에 대해 제 3자 검증에 의한 검증하고, 더 나아가 지식재산권 확보 가능성 여부를 사전에 평가, 분석하여야 한다.

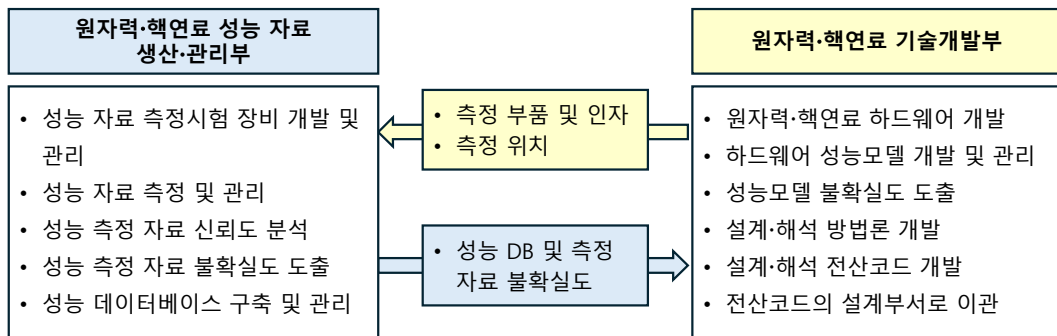


그림 6-3 원자력·핵연료 성능자료 측정 및 관리

7. 한수원과 웨스팅하우스사 간 기술사용 협정 분석

7.1 개요

① 한국 원자력 산업 발전이력

- 1969년: 미국 웨스팅하우스사와 한국 피초 상용 원전인 고리1호기 건설 계약 체결
- 1978년: 고리1호기 상용 운전 개시
- 1980년대:
 - 미국 웨스팅하우스사, (구)컴버스천 엔지니어링(CE)사 및 독일 지멘스사로부터 원자력시스템 기술과 핵연료 기술을 이전 받았으며, 이로 인해 Know-How 기술 축적
 - 이를 통해 OPR1000 원전 건설과 지멘스와의 공동개발 핵연료 KOFA 개발 및 상용 공급
- 1990년대: (구)컴버스천 엔지니어링(CE)의 Sytem80+ 기반의 APR1400 원전 개발 착수
- 2000년대:
 - APR1400 설계 완료
 - OPR1000 및 APR1400 원전용 PLUS7 핵연료를 웨스팅하우스사와 공동개발; 2006년부터 상용공급 개시
 - 웨스팅하우스 16x6형 및 17x17형 원전용 16ACE7 및 17ACE7 핵연료를 웨스팅하우스사와 공동개발; 2008년부터 상용공급 개시
 - 지식재산권이 확보된 OPR1000 및 APR1400 원전용 HIPER16 핵연료 개발
 - 지식재산권이 확보된 웨스팅하우스 17x17형 원전용 HIPER17 핵연료 개발
- 2010년대:
 - APR1400 원자로시스템의 UAE 수출 성공
 - UAE 바라카 원전 4기에 PLUS7 핵연료 수출
 - HIPER16 및 HIPER17 핵연료의 노내 검증시험
 - 지식재산권이 확보된 원자로심 설계코드 및 안전해석코드 개발
- 2020년대:
 - 지식재산권이 확보된 HIPER16 핵연료 인허가 획득 및 OPR1000

및 APR1400 원전에 상용공급 개시

② 미국 웨스팅하우스사와 APR1400 지식재산권 분쟁

- 한수원: APR1400 원자로시스템은 미국 웨스팅하우스사의 Sytem80 및 Sytem80+ 기술을 혁신하여 독자적으로 개발한 고유모델로써 지식재산권이 확보되었다고 주장
- 미국 웨스팅하우스사: APR1400 원자로시스템은 자사가 인수한 컴버스천 엔지니어링사의 Sytem80 및 System80+ 설계기반의 파생기술이므로 지식재산권 권리와 수출 통제(CFR Part 810) 적용 필요
- APR1400 지식재산권 논쟁은 폴란드, 체코 등 해외 원자력시장 진출과정에서 발생
- 국내 원자력산업계에서는 APR1400 개발 완료후, 약 20년 동안 한수원의 APR1400 지식재산권 확보 주장에 대해 제3자 검증에 의한 심층적인 분석이 없었다는 것은 국내 원자력산업계의 폐쇄성을 보여줌.

7.2 기술사용 협정 내용

① 미국 웨스팅하우스사에 지급할 금액

- 원전 1기당 1억 7,500만 달러(약 2,400억원)의기술료 지급
- 원전 1기당 6억 5,000만 달러(약 9,000억~1조원) 상당의 용역을 웨스팅하우스사에 제공
- MMIS(원전 제어계측시스템) 및 NSSS(핵증기공급계통) 핵심 기자재 포함
- 원전 1기당 4억 달러 규모의 보증신용장(Letter of Credit) 발급

② 한전원자력연료의 핵연료 공급권 상실

- 체코와 사우디아라비아 원전: 웨스팅하우스사의 100% 핵연료 공급
- 기타 지역 국내 원전 수출: 웨스팅하우스사의 최소 50% 핵연료 공급 보장
- 웨스팅하우스사 대주주 카메코(Cameco)사의 우라늄 수요 안정화

③ 한국 원자력 기술 주권 침해

- 소형모듈원자로(SMR) 등 모든 차세대 원전기술에 대해

웨스팅하우스사의 '기술자립 검증' 필요: 웨스팅하우스사에 의해 한국이 개발한 원전기술에 대한 지식재산권 검증

- 지식재산권 이권 발생 시, 미국 소재 제3기관이 최종 판단
- 지식재산권 검증 통과 전까지 잠재 고객에게 구속력 있는 사업 제안 불가
- 사실상 웨스팅하우스사는 한국의 차세대 원전기술 상용화 일정에 대해 거부권 행사 가능

④ 원자력 시장 분할로 한국 원전 수주 활동 제한

- 진출 제한 지역: 북미(미국, 캐나다, 멕시코), 체코를 제외한 유럽연합, 영국, 일본, 우쿠라이나 → 한국은 폴란드, 스웨덴, 네덜란드 등 유럽시장 철수 실행
- 활동 가능 지역: 동남아시아, 중앙아시아, 중동, 아프리카, 남미 등 신흥시장

7.3 기술사용 협정 분석

① One Team Korea의 경제적 손실 분석

- 웨스팅하우스사에 원전 1기당 총 8억 2,500만 달러 규모 지불
- 웨스팅하우스사에 원전 2기당 총 16억 5000만 달러 규모 지불
- 체코원전 총 사업비(원전 2기) 190억 달러(약 26조원)의 약 8.7%를 웨스팅하우스사가 가져감
- 한국의 체코원전 수주로 인해 한국이 차지하는 총사업비는 약 60억 달러(약 8.2조원)로써 총 사업비의 31% 수준
 - 체코원전 2기 총 사업비 190억 달러(약 26조원)
 - 체코 현지 업체 수주액(총 사업비의 60% 이상): 114억 달러
 - 웨스팅하우스사가 차지하는 총 사업비(기술료 포함): 16.5억 달러
 - 한국이 차지하는 총 사업비: 190억 달러 - 114억 달러 - 16.5억 달러 = 59.5억 달러(총 사업비 약 31%에 해당)
- HIPER16 핵연료의 공급 불가로 인해 체코원전 2기에 50년동안 공급되는 핵연료집합체 총 비용은 체코원전 1기 수주비 수준으로 핵연료 공급권 박탈로 인한 경제적 손실은 매우 큰 것으로 분석됨

② 웨스팅하우스사 업무의 한국 원자력기업으로의 하청 가능성

- 웨스팅하우스사의 원전 기자재 생산설비 부족으로 인해 의무 구매 물량의 일부를 두산에너지빌리티 등 한국 기업에 하청 가능성 있음.
- 웨스팅하우스사가 체코원전(APR1000)에 100% 공급할 핵연료로는 가디언(Guardian) 및 CE16NGF 핵연료 등이 있으나, APR1000 원전에 최적화된 핵연료는 HIPER16 핵연료이므로 웨스팅하우스사는 한전원자력연료에 핵연료 성형가공 업무에 대한 하청 가능성 있음.

③ 원자력 기술 종속의 장기화 가능성 상존

- 합의문 유효기간은 50년이며, 웨스팅하우스사가 원하는 경우 5년씩 연장이 가능하므로 한국의 원자력기술 독립에 영향을 미칠 것으로 예상
- 따라서 한국의 지식재산권이 확보된 차세대 원자로시스템 개발 동력 상실 우려
- 또한 차세대 원자로시스템 및 소형원자로(SMR)의 기술검증과정의 불투명성과 자의적인 해석으로 인해 잠재적 갈등 요소 내재

④ 세계 원자력시장 분할로 한국의 원자력시스템 수출에 제약

- 상대적으로 수익성이 높은 선진국 시장 불가로 인해 원전 수출에 따른 수익성 감소 우려
- 원자력 신흥국 수출은 국가 리스크 및 정치적 불안정성 발생 가능성에 따라 경제적 리스크 상존
- 웨스팅하우스사와 함께 유럽시장 등에 진출하더라도 APR1000 또는 APR1400 원자로시스템이 아니며, 만약 하청 계약으로 참여하더라도 한국 기업의 역무는 웨스팅하우스형 원전 관련 기자재 및 부품 수출 수준일 것으로 예상

7.4 웨스팅하우스사의 핵연료 공급에 따른 경제적 가치 분석

한수원과 웨스팅하우스사의 핵연료공급 관련 기술협정으로 인해 체코 원전에는 웨스팅하우스사의 하청없이 한전원자력연료의 핵연료 공급은 불가하다. 또한 동남아시아, 중동 등 원전 수출 가능 지역에서도 한국이 원전을 수주할 경우에도 한전원자력연료는 최대 50%까지만 핵연료 공급이 가능하다.

만약 웨스팅하우스사와 APR1000 원전에 대한 지식재산권 분쟁이 없었다면, 그림 7-1에서 볼 수 있듯이, 한수원이 농축 UF₆를 한전원자력연료에게 공급하고, 한전원자력연료는 이 농축 UF₆를 사용하여 핵연료 성형가공을 통해 HIPER16 핵연료집합체를 생산하게 된다. 이 그림에 제시되었듯이, 집합체 1다발에 소요되는 농축 UF₆ 가격은 약 12억원이고, 핵연료 성형가공비는 약 3억으로써, 집합체 1다발 공급가격은 총 15억원 수준이다.

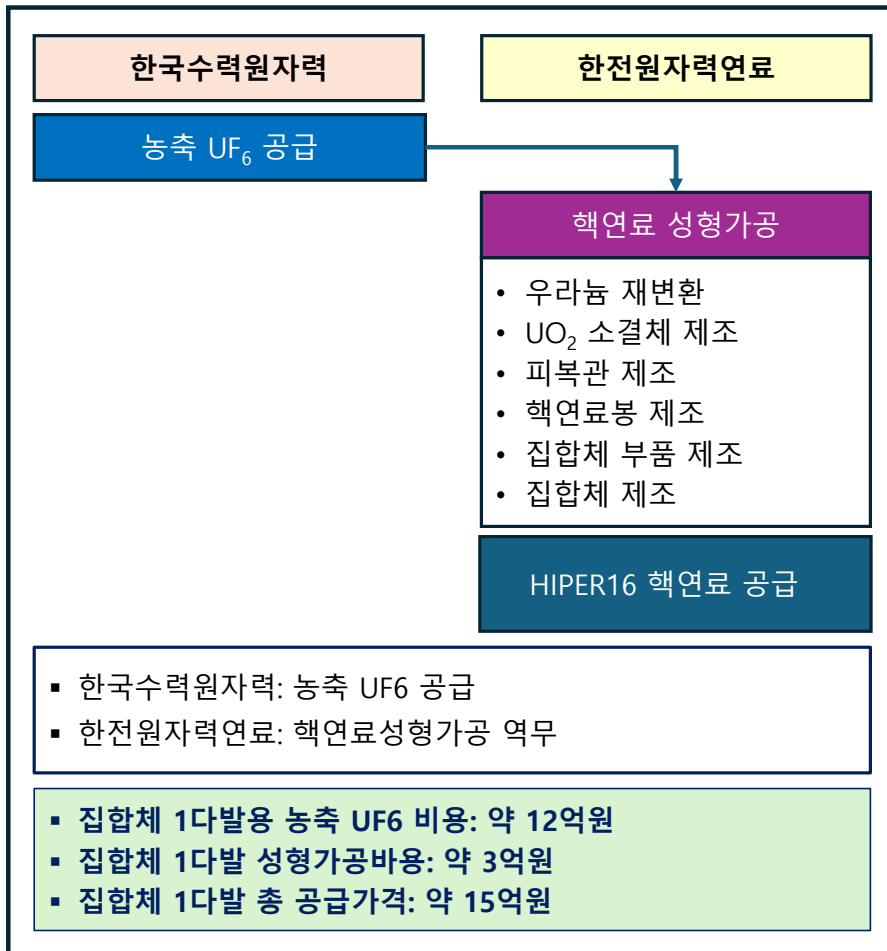


그림 7-1 지식재산권 분쟁이 없었을 경우의 국내기업 업무

그러나 한수원과 웨스팅하우스사 간 기술협정에 의하면, 그림 7-2에서 볼 수 있듯이, 웨스팅하우스사는 농축 UF₆ 공급 및 핵연료 성형가공 의무 등의 모든 핵연료 공급 의무를 수행하거나, 또는 핵연료 성형가공 의무만 한전원자력연료에게 의뢰할 수도 있다. 따라서, 그림 7-2에 제시한 바와 같이 다음의 두 가지 경우에 대해 양사의 얻을 수 있는 경제적 가치에 대해 분석하였다.

- 웨스팅하우스사가 100% 핵연료 공급 시 웨스팅하우스사의 경제적 가치 분석
- 웨스팅하우스사가 한전원자력연료에게 핵연료 성형가공 역무에 대해 하청을 줄 경우, 양사의 경제적 가치 분석

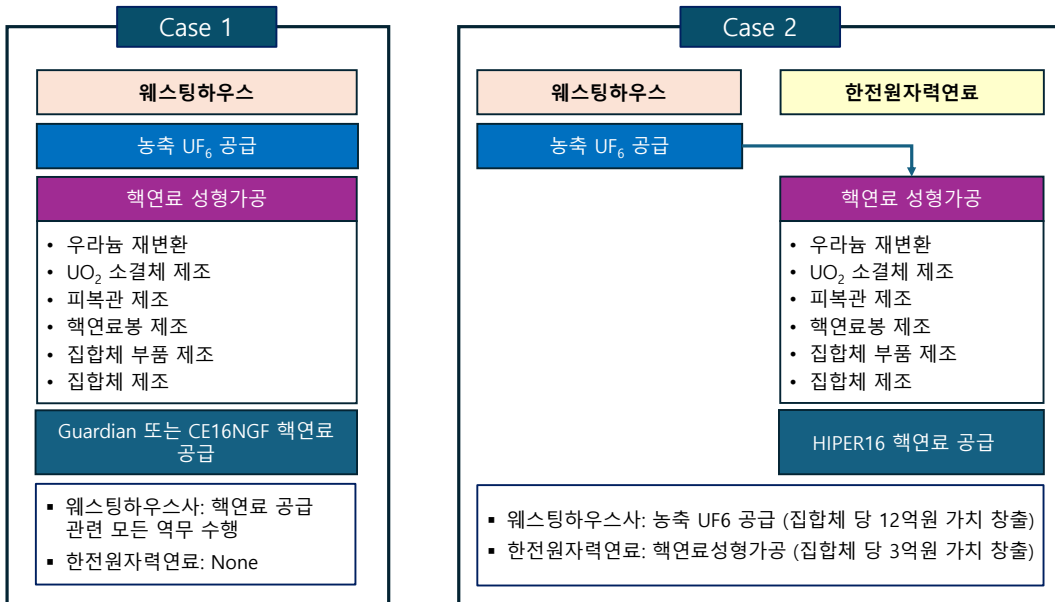


그림 7-2 한수원과 웨스팅하우스사 간 기술협정에 따른 핵연료 공급방안

1) Case 1: 체코원전 2기에 웨스팅하우스사 단독으로 Guardian 또는 CE16NGF 핵연료 100% 공급

웨스팅하우스사가 얻을 수 있는 예상 경제적 가치는 다음과 같이 산출된다.

- 집합체 1다발 가격
 - 1다발 성형가공비: 약 3억원
 - 1다발 농축 우라늄비: 약 12억원
 - 집합체 1다발 공급 가격: 약 15억원
- 체코원전 2기 초기노심 장전 집합체 개수
 - 원전 1기당 177개 집합체가 장전되므로 2기에는 354개 장전
- 체코원전 2기 초기노심에 소요되는 집합체 공급가격
 - 총 집합체 성형가공비: 354개 x 3억원/개 = 1,062억원

- 총 집합체 제조에 소요되는 UF₆ 비용:
354개 x 12억원/개 = 4,248억원
 - 원전 2기 초기노심에 대한 총 집합체 공급 가격:
354개 x 15억원/개 = 5,310억원
- 체코원전 2기 교체노심 장전 집합체 개수
- 원전 1기 교체노심 장전 집합체 개수는 약 60개이므로 원전 2기 교체노심 장전 집합체 개수는 120개임.
- 체코원전 2기 교체노심 당 소요되는 집합체 공급가격
- 원전 2기 교체노심 당 성형가공비:
120개 x 3억원/개 = 360억원
 - 원전 2기 교체노심 당 소요되는 UF₆ 비용:
120개 x 12억원/개 = 1,440억원
 - 원전 2기 교체노심 당 총 집합체 공급 가격:
120개 x 15억원/개 = 1,800억원
- 50년 동안 체코원전 2기의 핵연료 재장전 횟수: 그림 7-3 참조
- 원전 1기당 약 32회 교체노심에 예상되므로 원전 2기 교체노심 횟수는 64회로 산출됨.

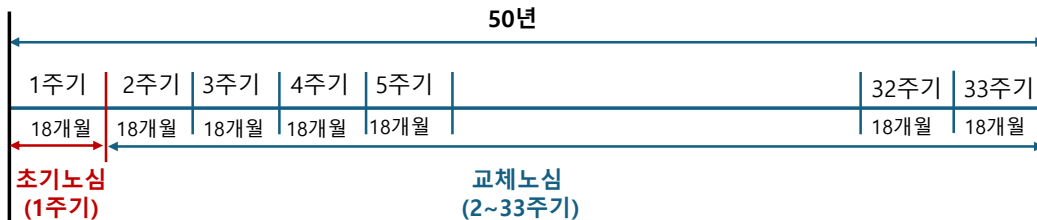


그림 7-3 가압경수로 초기노심과 교체노심 정의

- 50년 동안 체코원전 2기에 해당하는 총 집합체 경제적 가치
- 초기노심: 2회
 - 재장전노심: 64회
 - 초기노심용 집합체 경제적 가치
 - 성형가공비: 1,062억원
 - UF₆ 가격: 4,248억원
 - 성형가공비 + UF₆ 비용: 5,310억원
 - 교체노심용 집합체 경제적 가치
 - 성형가공비: 360억원/회 x 64회 = 2조 3,040억원

- UF₆ 비용: 1,440억원/회 x 64회 = 9조 2,160억원
- 성형가공비 + UF₆ 가격:
1,800억원/회 x 64회 = 11조 5,200억원
- 50년 동안 총 집합체 경제적 가치:
 - 성형가공비: 1,062억원(초기노심) + 2조 3,040억원
= 2조 4,102억원
 - UF₆ 비용: 4,248억원(초기노심) + 9조 2,160억원(교체노심)
= 9조 6,408억원
 - 성형가공비 + UF₆ 가격: 5,310억원(초기노심) + 11조 5,200억원(교체노심) = 12조 510억원

- ▷ 웨스팅하우스사가 50년 동안 체코원전 2기에 100% 핵연료를 공급할 경우, 총 12조 510억원의 경제적 가치를 창출
- ▷ 이 중 핵연료성형가공비는 2조 4,102억원, UF₆ 비용은 9조 6,408억원 수준
- ▷ 결론적으로, 웨스팅하우스사의 50년간 핵연료 공급으로 인한 경제적 가치는 체코원전 1기의 경제적 가치와 대등한 것으로 판단됨.

2) Case 2: 체코원전 2기용 핵연료 공급 시, 웨스팅하우스사는 농축 UF₆만을 공급하고, 한전원자력연료는 HIPER16 핵연료 성형가공 역무를 수행
웨스팅하우스사와 한전원자력연료가 얻을 수 있는 예상 경제적 가치는 Case 1 계산결과를 토대로 다음과 같이 산출된다.

- ▷ 웨스팅하우스사가 50년 동안 체코원전 2기에 사용되는 핵연료집합체 성형가공용 UF₆만을 공급할 경우, 총 9조 6,408억원의 경제적 가치를 창출
- ▷ 한전원자력연료가 50년 동안 체코원전 2기에 사용되는 핵연료집합체 성형가공비 역무를 수행할 경우 2조 4,102억원의 경제적 가치를 창출

8. 핵연료 제품 및 기술 수출을 위한 정책 제언

8.1 APR1000 및 APR1400 원전용 HIPER16 핵연료 수출

체코원전 2기에는 웨스팅하우스사가 HIPER16 핵연료 성형가공 역무에 대해 하청을 줄 경우에는 HIPER16 핵연료 수출이 가능하다. 기술협정에 의해 북미(미국, 캐나다, 멕시코), 유럽연합, 영국, 일본, 우크라이나 등에는 APR1000 또는 APR1400 원자로시스템을 수출할 수 없으므로 HIPER16 핵연료 수출은 불가하다. APR1000 또는 APR1400 원자로시스템 수출이 가능한 지역인 동남아시아, 중앙아시아, 중동, 아프리카, 남미 등 신흥시장에 진출할 수는 있지만, 이러한 국가들의 재정상태 및 정치적 불안정성을 고려하면 HIPER16 수출에 따른 경제적 리스크가 크다고 할 수 있다.

APR1000 및 APR1400 지식재산권 분쟁은 원자로시스템 특허 침해에 관련한 것이며, 이미 지식재산권을 확보한 한전원자력연료의 HIPER16 핵연료와 무관하다. 따라서 HIPER16 핵연료는 기술협정에서 명시한 웨스팅하우스사의 핵연료 공급권 이외에는 전 세계 가동 중인 CE16x16 형 원전(APR1400 원전과 동일 또는 유사)에 수출이 가능하다고 판단된다. 현재 전 세계에 가동 중인 CE16x16 형 원전은 미국 5기, UAE 4기 등이 있다.

미국에서 가동 중인 CE16x16형 원전 5기는 APR1400 원전과 유사하다. 이 원전에는 웨스팅하우스사가 공급하고 있는 CE16NGF가 사용되고 있으나, HIPER16 핵연료도 사용될 수 있다. 따라서, 한전원자력연료는 미국 CE16NGF가 사용되고 있는 Palo Verde 원자력발전소 운영자들과 기술협정의 또는 세미나를 통해 CE16NGF 핵연료 대비 HIPER16 핵연료의 기술적 수월성과 경제성 등을 홍보하는 전략을 수립하는 것이 바람직하다. 이를 통해 미국 CE16x16형 원전 5기에 HIPER16 핵연료 수출을 도모할 수 있다고 사료된다.

UAE에는 APR1400 원전과 동일한 바라카 원전 4기가 운전되고 있다. 바라카 원전 운영자는 바라카 원전 초기에 한전원자력연료가 개발한 PLUS7 핵연료를 수위 계약으로 사용하였으나, 현재는 공개입찰을 통해 바라카 원전용 핵연료를 수입할 계획이다. 공개 입찰에는 한전원자력연료, 프랑스 아레바사, 미국 웨스팅하우스사 등이 참여할 수 있다. 따라서 한전원자력연료는 공개입찰 시, 타사의 핵연료 대비 HIPER16 핵연료의 기술성과 경제성 우위를 토대로 하여 바라카 원전에 핵연료 수출이 성공하도록 해야 한다.

8.2 전 세계 웨스팅하우스형 17x17 원전용 HIPER17 핵연료 수출

그림 1-8에서 보듯이, 전 세계 가동 중인 원자력발전소 중 약 71%가 가압경수로(PWR)이며, APR1000 및 APR1400 원전과 유사한 (구)CE 16x16형 해외 원전수는 9기(미국 5기, UAE 4기) 수준인 반면, 웨스팅하우스 17x17형 해외 원전 수는 173기 수준이다. 따라서 웨스팅하우스 17x17형 원전용 HIPER17 핵연료의 해외 수출 기회 및 이에 따른 부가가치는 매우 크다고 할 수 있다.

전 세계 가동 중인 가압경수로 중에서 HIPER17 핵연료가 사용 가능한 17x17형 PWR은 다음과 같다.

- 미 국: 49개
- 프랑스: 56개
- 중 국: 48개
- 일 본: 17개
- 스페인: 3개

HIPER17 핵연료에 대한 설계 및 노외 검증시험과 시범집합체 노내 검증시험은 2020년에 완료된 바 있다. 그러나, 한수원의 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기에 대한 수명연장이 결정될 때 까지 HIPER17 핵연료에 대한 상용 인허가 신청을 보류한 것으로 알려져 있다. 즉 당초 상용공급 계획에 비해 7년이 지났지만 해외 수출의 전제조건인 HIPER17 상용 인허가가 진행되지 못하고 있다. 본 보고서 제 3장에서 언급한 바와 같이, HIPER16 및 HIPER17 핵연료는 수출을 선도하기 위해 개발한 핵연료이다. 또한 상기와 같이 웨스팅하우스 17x17형 원전 수는 전 세계적으로 173기 수준이므로 HIPER17 핵연료의 해외 수출 가능성은 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 국내 가동 중인 웨스팅하우스 17x17형 원전 6기에 대한 수명연장 여부와 상관없이 해외 수출을 적기에 추진할 수 있도록 HIPER17 고유핵연료에 대한 조속히 인허가를 추진해야 하며, 국내 상용원전에서의 연소경험을 축적하는 것이 바람직하다.

한편, 한전원자력연료는 HIPER17 핵연료 홍보자료를 작성하여 전 세계 17x17형 원전 운영자들에게 배포하고, 운영자들과의 기술협의, 기술박람회, 워크샵, 학회 참석 등을 통해 HIPER17 핵연료 홍보에 매진해야

한다고 사료된다.

참고로, HIPER17 핵연료에 대한 인허가 미비로 인해 HIPER17 핵연료의 해외수출이 무산된 사례가 있다. 미국 Energy Solution사에서 자사 개발 PWR20 소형원자로(SMR)에 12개의 HIPER17 핵연료를 사용하기 위해 한전원자력연료에 HIPER17 핵연료집합체 수출 의사를 수차례 타진하였으나, HIPER17 핵연료 인허가 미비로 인해 수출이 무산된 바 있다. Last Energy사는 2025년 10월 현재, 3개 국가 및 8개 고객을 대상으로 51개 PWR20 소형원자로 건설계약을 추진하고 있다. 이 건설계약이 성공적으로 추진되면 PWR20 원자로 초기노심에 대한 HIPER17 핵연료 소요량은 612개 수준으로 평가된다. 이 소요량은 APR1000원전의 3.5기 초기노심 핵연료 소요량에 해당된다.

8.3 핵연료 기술 수출

핵연료 기술 수출은 핵연료 제품 수출과는 다르다. 핵연료 제품 수출은 국내에서 제작하여 해외 기관에 납품하는 행위이다. 즉 1907년대 ~1980년대 국내 원자력발전소 도입 기에 웨스팅하우스사 핵연료 완제품을 운영사업자인 한수원에게 직접 납품하는 것과 동일하다. 또한 UAE 바라카 원전에 PLUS7 핵연료 납품은 핵연료 제품 수출인 것이다.

핵연료 기술 수출은 기술이전계약을 통해 제 3국에 핵연료 기술을 이전하는 것이다. 해외사의 핵연료 기술이전 사례로는 독일 지멘스사의 핵연료 기술 이전, (구)컴버스천 엔지니어링사의 원자력시스템 기술 이전 등이 있다. 표 8-1에는 기술 수출과 관련된 핵연료 기술이 제시되어 있다.

효율적, 효과적 기술이전을 위해 기술 세미나, classroom training (CRT, 강의실 기반의 집합교육), on-the-job training(현장 실습) 등이 수행될 수 있다.

제 3국에 기술이전을 위해서는 표 8-1에 제시된 모든 기술이전 자료에 대한 지식재산권 및 저작권 등이 확보되어야 한다. 이러한 지식재산권 및 저작권 침해 여부는 법적 및 기술적 사항으로써 개발자가 판단하기는 어려운 사항이 존재한다. 따라서, 개발된 기술에 대한 지식재산권 및 저작권 등을 개발 초기 단계부터 지식재산권 전문가로 이루어진 특허 전담부서를 신설하는 것은 필수적이다. 대부분의 산업계 및 연구계는 이러한 지식재산권 확보 관련 특허 전담부서를 운영하지 않고 있으며, 지식재산권 침해 소송이 걸리면 그

때부터 외부 법률자문 등의 대책을 수립하는 사례는 다반사이다.

표 8-1 핵연료 기술 수출 관련 기술이전 항목

분 야	기술이전 항목
하드웨어	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 집합체 및 부품: 상하단고정체, 지지격자 등 <ul style="list-style-type: none"> • 설계도면, 설계시방서, 부품목록 • 설계지침서(Manual) ▪ 연료봉 및 부품: 소결체, 피복관 등 <ul style="list-style-type: none"> • 설계도면, 설계시방서, 부품목록 • 설계지침서 ▪ 비핵연료 부품: 제어봉, 중성자선원봉 등 <ul style="list-style-type: none"> • 설계도면, 설계시방서, 부품목록 • 설계지침서 ▪ 핵연료 및 비핵연료 제조공정 <ul style="list-style-type: none"> • 제조 장비 및 시설 도면, 시방서, 부품목록
소프트웨어	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 핵설계 전산코드 및 설계방법론 <ul style="list-style-type: none"> • 핵설계 전산코드 지침서 • 핵설계 보고서 ▪ 열수력설계 전산코드 및 설계방법론 <ul style="list-style-type: none"> • 열수력설계 전산코드 지침서 • 열수력설계 보고서 ▪ 핵연료봉 성능해석 전산코드 및 설계방법론 <ul style="list-style-type: none"> • 연료봉 성능해석 전산코드 지침서 • 연료봉 성능해석 보고서 ▪ 집합체 성능해석 전산코드 및 설계방법론 <ul style="list-style-type: none"> • 집합체 성능해석 전산코드 지침서 • 집합체 성능해석 보고서 ▪ 안전해석 전산코드 및 설계방법론 <ul style="list-style-type: none"> • 안전해석 전산코드 지침서 • 안전해석 보고서
제조	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 품질보증 절차서 ▪ 품질관리절차서 ▪ 집합체/부품 및 연료봉/부품 제조절차서

참고로, 체코에 지식재산권이 확보된 HIPER16 핵연료 기술이전을 통해 체코 내 핵연료 설계기술과 제조시설을 구축하고, 이를 통해 체코에서 제조된 HIPER16 핵연료는 기술협정과 무관하게 체코원전에 사용될 수 있다고 판단된다.

체코를 포함한 원자력 신흥국가들은 시간이 지나면 원자력 및 핵연료 기술 자립을 추구하게 된다. 따라서 체코의 1단계 전략으로써, 체코원전 1기 및 2기에 사용되는 핵연료를 공개입찰을 통해 확보할 것으로 예상된다. 이 경우 웨스팅하우스사는 공개입찰에서 탈락되면 기술협정에 명시된 체코원전 핵연료공급권은 무용지물이 될 것이다. 체코의 2단계 전략으로써, 핵연료 기술자립을 추구하게 될 것으로 예상된다. 일반적으로 핵연료기술 자립은 해외사와의 기술이전계약을 통해 이루어진다. 이 경우, 한전원자력연료는 핵연료 기술수출을 시도할 수 있다. 이를 위해, 체코 원자력산업체를 대상으로 HIPER16 설계기술, 제조기술 및 개발기술 그리고 지식재산권 확보 현황 등에 대해 지속적으로 홍보를 하고, 체코의 핵연료 기술자립 전략을 수립해 주는 것이다.

8.4 원자력 산업계, 학계 및 연구계의 기술개발 추진전략

본 절에서는 원자력 및 핵연료 상용화 기술을 개발하는 추진전략을 기술하였다. 즉 기초기반연구 및 실용화기술 개발의 추진전략은 본 절과 무관하다.

그림 8-1에 나타나 있듯이, 원자로시스템 개발 주관기관(현재 한수원)은 핵연료 기술 개발을 포함하여, 기술개발 항목, 기술개발 일정(인허가 및 상용화 일정 필히 포함) 및 개발비용 등의 기술개발계획(안)을 수립하여야 한다. 이러한 계획 수립에 있어서 관련 원자력기관과의 협의는 필수이지만, 기술개발계획(안)에 대한 독립적인 제 3자 검증절차를 필히 거치는 것은 무엇보다 중요하다.

상용화 기술을 주도하는 원자력산업체 즉 한수원, 한전전력기술, 두산에너지빌리티, 한전KPS, 한전원자력연료 등은 참여기관 별 협력체계 구축과 협력업체, 한국원자력연구원, 학계와의 협력체계를 구축해야 한다. 기술개발 시, 개발 초기 단계부터 중점적으로 점검해야할 사항은 생산해야할 인허가 문서 종류 및 문서 내용, 개발제품의 성능 검증을 위한 노외 및 노내 성능시험 종류 및 시험자료, 개발제품의 지식재산권 검증 전략 등이다.

앞에서 기술하였듯이, 원자력산업계와 연구계는 특허 전담부서를 신설하여 연구개발 초기단계부터 지식재산권 검증 및 분석을 수행하여야 한다. 또한 제 3자 검증체계를 필히 구축하고, 각 연구의 Gate Check 단계에서 제 3자 검증을 필히 수행해야 한다.



그림 8-1 원자로시스템 및 핵연료 사용화 기술 개발 추진체계

9. 결론

본 보고서에 핵연료 기술에 대한 정의, 국내 핵연료기술 확보이력, 원자력 기술개발 장애요인과 해결방안, 지식재산권 확보전략, 체코원전 기술협정 분석, 핵연료 및 기술 수출 전략에 대해 기술하였다.

한수원과 웨스팅하우스사 간 기술협정으로 인해 지식재산권이 확보된 HIPER16 핵연료 제품의 해외수출에 큰 제약이 발생하였다. 50년간 체코원전 2기에 웨스팅하우스사가 100% 핵연료 공급을 가정할 경우, 웨스팅하우스사가 얻는 경제적 가치는 체코원전 1기 수주액에 해당된다.

한편, 이러한 기술협정의 제약을 극복하기 위해 공개입찰 형식에 의해 핵연료를 공급받고 있는 미국 CE16x16형 원전 5기 및 UAE 바라카 원전 4기 등에 대한 HIPER16 핵연료의 기술성과 경제성에 대한 적극적인 홍보를 통해 HIPER16 핵연료 제품 수출에 박차를 가해야 한다. 아울러 체코에는 핵연료 기술 수출을 통해 핵연료 공급 관련 기술협정 제약사항을 우회할 수 있으며, 이를 통해 체코와의 핵연료 기술 협력을 강화할 수 있다.

웨스팅하우스사와 APR1000 및 APR1400 지식재산권 분쟁은 국내 원자력산업계 최고경영자들과 개발자들의 지식재산권 및 저작권에 대한 지식 및 책임감 부족으로 기인하였다고 판단된다. 공기업 형태로 운영 중인 원자력산업계 최고경영자는 임기가 3년임을 감안하면, 이러한 문제 발생은 충분히 예상할 수 있는 것이었다. 사실상, 지식재산권 및 저작권 침해 여부 판단은 특히 전문가 및 법률가의 영역임을 부인할 수 없다. 따라서, 원자로시스템 및 핵연료 수출과 관련된 기업들은 특히 전문가가 확보된 전담부서를 조속히 신설해야 한다. 이 전담부서를 통해 현재 보유 중인 자사의 원자로시스템 및 핵연료 기술에 대한 지식재산권 침해 여부를 심도있게 분석해야 한다. 아울러 향후 추진될 차세대 원자로시스템 및 핵연료 개발 초기 단계부터 지식재산권 및 저작권 침해 가능성을 분석하고 평가하여야 한다.

원자로시스템 및 핵연료 기술 검증은 노외 및 노내 성능 데이터베이스 구축없이 곤란하다. 또한 기술의 정확성과 신뢰성은 성능 자료의 정확성과

신뢰성과 직결된다. 웨스팅하우스사가 확보하고 있는 원자로시스템과 핵연료에 대한 성능 데이터베이스 규모에 비해 국내 원자력산업계가 확보하고 있는 데이터베이스는 미미하다고 할 수 있다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 원천기술 개발 주도 국가와 도입기술 운영 국가의 원천기술 및 성능 데이터베이스에 대한 이해도 차이에 기인한 것이다.

따라서 원자로시스템 및 핵연료 개발을 주도하는 기업들은 예전의 독일 지멘사의 성능자료 수집·관리 부서를 벤치마킹하여, 노외 및 발전소내 성능 측정장비 개발, 성능 자료 측정 및 측정자료의 신뢰도 분석, 측정자료 불확실도 평가, 성능 데이터베이스(DB) 구축 등을 총괄하는 전담부서를 조속히 신설해야 한다고 판단한다.

마지막으로, 웨스팅하우스사 및 아레바사와 같이, 국내 원자력산업계 분산 업무의 통합 및 일원화를 통해 원자로시스템 및 핵연료 수출을 위한 진정한 'One Team Korea'를 구축해야 할 것이다.

참고문헌

1. 김규태, "국내 핵연료 개발 이력 및 계획," 원자력산업, 2007.
2. 한전원자력연료 핵연료설계처 김규태, "세계일류로 향한 중장기발전계획," 2004. 03.
3. 한전원자력연료, "KNF Technology," 2023. 06.
4. 김규태, "전 세계 PWR 원전현황 및 HIPER17 핵연료 수출가능 원전 분석," 2005.03.
5. 김규태, "한전원자력연료 대상 Last Energy Inc. 소개 자료," 2024.12.
6. 김규태, "한수원 대상 Last Energy Inc. 소개 자료," 2025.02.
7. 김규태, "Reactor Core Design," NUTEKPIA Academy, 2025.01.
8. 김규태, "Nuclear Fuel Development and Failure Causes," NUTEKPIA Academy, 2025.01.
9. 김규태, "Nuclear Fuel Cycle," NUTEKPIA Academy, 2025.01
10. Kyu Tae Kim, "Evolutionary Developments of Advanced PR Nuclear Fuels and Cladding Material," Nuclear Engineering and Design, 261(2013)59-69.
11. Kyu-Tae Kim, "Aiming at Exports," Nucl. Eng. Int., May 2010, pp. 13-16.
11. Kyu-Tae Kim, "A Strategy for Self-reliant Nuclear Power and Fuel Technology Development," Int. J. Nucl. Power, June 2011, pp. 335-340.
12. Kyu-Tae Kim, "Self-sufficient nuclear fuel technology development and application," Nuclear Engineering and Design, 249(2012)287-296.
13. Kyu-Tae Kim, Young-Ki Jang, "In-Reactor Performance of an Advanced PWR Fuel, PLUS7, for OPR1000s in Korea," J. Nucl. Sci. Tech. 45, 2008, pp. 836-849.
14. Kyu-Tae Kim, Jung-Min Suh, "Development of an Advanced PWR Fuel for OPR1000s in Korea," Nucl. Eng. Des. 238, 2008, pp. 2606-2613.
15. 옥기현, "한수원 유럽 단독 수출 불가능," 한겨레, 2025.10.20.
16. 유근윤, "무기한'→'50년' 웨스팅하우스 협약...'노예계약' 체결 막전막후," 뉴스토마토, 2025.10.20.
17. 나무위키, "윤석열 정부-웨스팅하우스 불공정 계약 논란," 2025.10.21