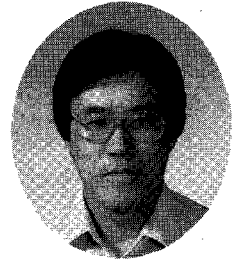


한국의 핵연료현황

本稿는 작년 12월2일부터 12월6일까지
舊소련 모스크바에서 개최됐던 「제1회
韓蘇원자력세미나」 한국세션에서 한국핵
연료(주)의 장인순 사업본부장이 발표한
논문으로 한국 핵연료산업의 구조와 능
력 그리고 장래전망에 대한 것이다.



장 인 순

한국핵연료주식회사 사업본부장

요 약

한국정부는 1980년초 원자력발전소의 건설과 더불어 핵연료의 원활한 공급확보를 위한 핵연료국산화사업수행을 결정하고 한국전력공사와 한국원자력연구소가 공동투자하여 한국핵연료주식회사를 1982년 11월에 설립하였다. 1984년 7월에는 핵연료국산화사업계획을 외국과의 기술협력력을 통해 한국원자력연구소가 노심설계 및 핵연료설계를 담당하고 한국핵연료주식회사가 경수로핵연료제조를 담당, 수행하도록 확정하고 국제경쟁입찰을 통해 기술협력업체로 독일의 Siemens社를 선정하였다. 1988년 10월에는 3년간의 핵연료제조공장건설을 거쳐 공장상업가동에 들어갔다.

1991년 8월말 현재까지 국산핵연료 14×14, 16×16 및 17×17형 총 728다발이 생산되어 한국전력공사에 공급되었고 총 528다발이 국내 경수로핵연료발전소에서 장전되어 연소중에 있다. 한편 한국원자력연구소는 1983년 4월, 국내 최초의 중수로원자력발전소 월성 1호기가 상업가동하기 전부터 CANDU 핵연료연구를 위한 실험공장을 개발하고 1981년에는 CANDU 핵연료국산화사업계획을 확정하였다. 1984~1986년 3년동안 CANDU 핵연료시제품 총 408

다발을 생산하여 월성 1호기에 장전하였으며, 장전결과 성능이 우수하여 실험공장규모를 연산 100MTU 상업생산규모로 확장하였고, 1991년 8월말까지 18,600다발의 핵연료를 생산하여 총 15,000다발이 월성 1호기에 장전되었다.

PWR과 CANDU 핵연료가공공장과 함께 우라늄변환(천연 U₃O₈ → CANDU용 UO₂)과 재변환(농축 UF₆ → PWR용 UO₂)공정이 국내에서 개발되어 1990년 1월부터 PWR과 CANDU 용 UO₂분말 전량을 공급하였다.

한국의 핵연료현황

1990년 3월은 우리나라가 핵연료가공의 기술자립을 함으로써 국가원자력계획상 중요한 분수령을 이루었다. 1970년대후반부터 추진된 핵연료국산화계획의 마지막 단계인 재변환생산라인(UF₆→UO₂)이 한국핵연료주식회사에서 전면가동을 시작하여 CANDU와 PWR 핵연료집합체의 생산능력을 갖추게 되었다. 본문은 한국의 핵연료산업에 대해 그 산업구조와 현재의 능력 그리고 미래전망을 살펴보고자 한다.

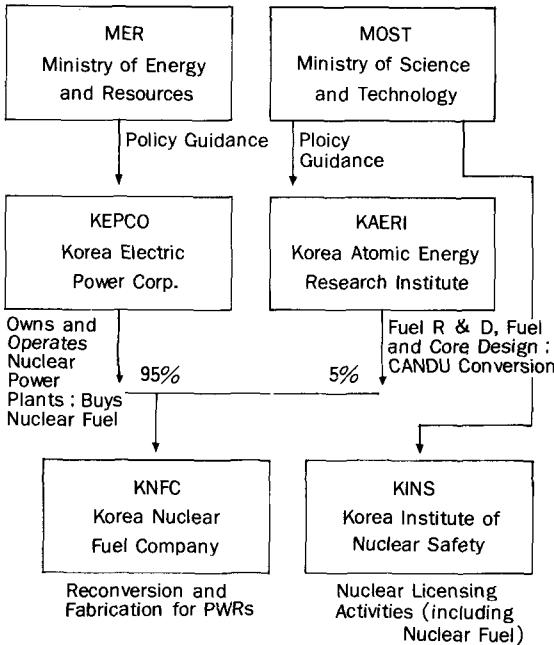
1. 핵연료산업구조

한국전력공사(이하 한전)에 대한 핵연료사업

은 <그림 1>에서 보듯이 주로 두개의 기관에 의해 이루어지고 있다. 하나는 모든 핵연료의 연구개발과 CANDU형 핵연료가공, CANDU와 PWR 핵연료설계 및 노심설계를 담당하는 한국원자력연구소(이하 한원연)이고, 또 하나는 PWR 핵연료성형가공을 담당하는 한국핵연료주식회사(이하 한핵)이다.

한핵에 대한 소유지분은 현재 한원연이 5%, 한핵사업의 최종사용자가 되는 한전이 95%를 갖고 있다. 한전은 동력자원부산하의 정부투자기관으로 국내 모든 원자력발전소의 소유자이며 운영자이다.

한원연은 과학기술처산하 연구기관으로 1990년 1월 이전에는 한국에너지연구소로 불리었고, 동년 1월4일에는 조직개편으로 원자력인허가업무를 한국원자력안전기술원(KINS)으로 분리하여 이전하고, 여러 업무 중 원자로연구개발과 원자로설계사업만을 담당하고 있다. 모든 핵연료설계와 생산활동은 한전, 한원연과 한핵간의 통합형태로 이루어지고 있고 한핵의 핵연료생산시설과 사옥 또한 대전 대덕연구단지내 한원연시설과 같은 곳에 위치하고 있다.



<그림 1> KOREA'S NUCLEAR FUEL ORGANIZATIONS

2. CANDU 핵연료국산화

한전은 현재 한개의 CANDU형 발전소(월성 1호기)를 운영, 가동하고 있고 두번째 발전소 월성 2호기를 건설중에 있으며 같은 지역에 제 3, 제4의 발전소를 계획하고 있다. 1983년 4월 월성 1호기가 첫 상업가동하기 전부터 한원연은 CANDU 핵연료연구를 위한 실험공장을 개발하여 CANDU 핵연료국산화를 추진하여 왔다.

1982년 한원연은 중수로핵연료시험을 위한 노외실증시험장치(Out-reactor Test Loop Facility)를 설계 및 건조하였는데 이 시설은 광범위하게 핵연료를 시험할 수 있는 실제 규모의 핵연료채널과 약간의 조정으로 안전성관련시험도 할 수 있게 되어 있다. 한원연이 제작한 시제품핵연료다발의 성능과 안전성을 평가하고 보증하기 위해 한원연은 1983년과 1984년에 일련의 노외시험(Out-of-pile tests)을 수행하였으며 열유동시험장치(Hot Test Loop)에서 수행된 노외시험은 다음과 같다.

- (1) 압력강하시험
- (2) 강도시험
- (3) 충격시험
- (4) 측류시험(Cross flow test)
- (5) 내성시험

위의 시험방법과 평가방법을 아주 보수적으로 수행한 결과 한원연이 제작한 시제품핵연료다발의 안전성과 성능은 만족할만 하였고 1차 열전달계통과 핵연료채널 및 핵연료취급계통과의 건전성도 만족하여 노내시험을 하게 되었다.

한원연은 1983년 두개의 시제품을 제작하여 캐나다의 CRNL (Chalk River Nuclear Laboratory)의 NRU 원자로에 장전하여 조사시험을 수행하였다. 그 중 하나는 1.58wt%의 농축우라늄으로 제조되었으며(AGM으로 명명) 나머지는 천연 UO₂(AGP)로 제조되었다. CRNL 조사시험의 주요목적은 한원연의 시제품핵연료가 월성중수로발전소의 정상주기 연소가능여부의 입증으로 UO₂ 펠렛의 품질과 Zry 용접, 특히 봉단마개용접의 품질 등에 대한 시험이었



다. 40MWh/kg-U연소도 이상에서는 용접불량부위의 누출이 일반적으로 피복재의 변형을 초래하기 때문에 이러한 변형이 일어나는 연소도 이상으로 목표치를 설정하고 실제출력에서 조사시험을 수행하였다. AGM의 경우는 연소도 목표치를 120MWh/kg-U로 하고, AGP는 60MWh/kg-U로 하여 조사후 인출하여 검사하였다.

Questar 광학기기로 검사해 본 결과, 두개의 시제품은 양호한 상태를 유지하였고 연료봉과 봉단집합판과의 용접에도 아무 훼손이 없었으며 패드(pad) 또한 깨끗하고 마모가 없었다. 링게이지(ring gauge)로 시제품을 검사해 본 결과도 조사후 핵연료다발직경상의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 핵연료저장조내에서의 육안검사에서도 핵연료형태상 이상한 점이 아무 것도 없었다. 조사중 냉각재채널의 감마선측정은 결합핵연료검출시 사용되는 매우 정확한 방법으로서 조사시험중 냉각재서 감마선이 전혀 검출되지 않아 시제품은 조사중에 결합없는 적합한 것으로 입증되게 되었다. 또한 연소도도 목표치인 120과 60MWh/kg-U를 초과하여 시제품성능이 만족스러운 것으로 입증되었다.

1984년~1986년 3년동안 한원연은 총 408다발의 CANDU 핵연료시제품을 생산하여 월성발전소에 장전하였고 그 결과 실험공장을 1987년 1월부터 연산 100MTU의 상업생산규모로 확장하였다. 1971년 8월말까지 한원연은 18,600

다발 이상의 핵연료를 공급하였고 15,000다발이 월성 1호기에 장전이 되었으며 인출된 핵연료집합체에서 아무런 결함이 발견되지 않아 고품질을 입증하였다.

CANDU 핵연료생산계획과 더불어 한원연은 정광(Yellow Cake)을 UO_2 로 변환하는 개발계획을 수행하여 1983년에는 연산 1MTU 규모의 실험시설을, 1984년에는 연산 10MTU 규모의 실험공장을 건설하였으며, 1985년에는 연산 25MTU 규모의 자동화된 생산시설을 갖춰 월성 1호기용 시제품 24다발의 UO_2 를 생산하였다. 1988년에는 현재의 100MTU 규모 생산시설을 상업가동하여 국내 CANDU 핵연료생산자립을 가져왔다.

3. PWR 핵연료국산화

한국의 PWR 핵연료국산화계획은 <표 1>에서 보듯이 1981년 7월 정부가 PWR 핵연료국산화방침으로 연산 200MTU 생산규모의 PWR 핵연료성형가공공장의 건설을 결정함으

<표 1> BRIEF HISTORY OF KNFC

July. 30, 1981	Council of economic ministers confirmed localization project for PWR fuel
Nov. 11, 1982	Korea Nuclear Fuel Co., Ltd. was established
Aug. 26, 1985	Contracts were made with SIEMENS - Equipment Supply Contract - Technology Inducement Contract
Nov. 11, 1986	Started the construction of PWR fuel fabrication plant
Dec. 31, 1987	Started the construction of re-conversion plant
Jan. 1, 1989	Started commercial production of PWR fuel
July. 27, 1989	The first products were delivered to Kori-2/ KEPCO
Feb. 17, 1990	The first products were loaded in Kori-2
Mar. 5, 1990	Started commercial production of UO_2 powder

로써 구체화되었다.

한국핵연료주식회사(한핵)는 국내 경수로원자력발전소에 PWR 핵연료를 공급하고자 1982년 11월에 설립되었다. 초창기에는 PWR 핵연료의 설계와 제조를 한핵과 외국기업간의 합작회사설립으로 수행하고자 하였으나 1984년 7월 당초 계획을 변경하여 최종적으로 외국회사와의 기술협력을 통해 한원연이 핵연료설계와 노심설계를 담당하고 한핵이 핵연료제조를 담당하도록 하였다.

기술협력에 대한 국제입찰결과 Siemens社의 자회사인 KWU社가 선정되어 1985년 8월 한핵, 한원연, Siemens社간에 PWR 핵연료설계 및 제조에 대한 기술도입계약을 체결하였다.

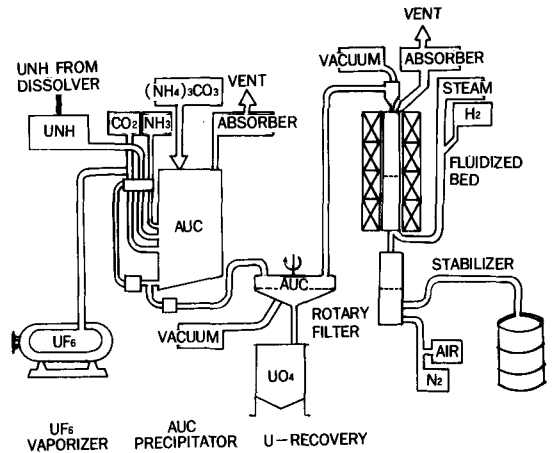
첫 단계로 1986년초 한원연기술자들의 훈련을 위해 독일에 파견하였고 그 결과 다음과 같은 3가지 형태의 국산핵연료(KOFA)를 공동개발하였다.

- (1) 고리 1호기용 14×14형
- (2) 고리 2호기용 16×16형
- (3) 기타 PWRs용 17×17형

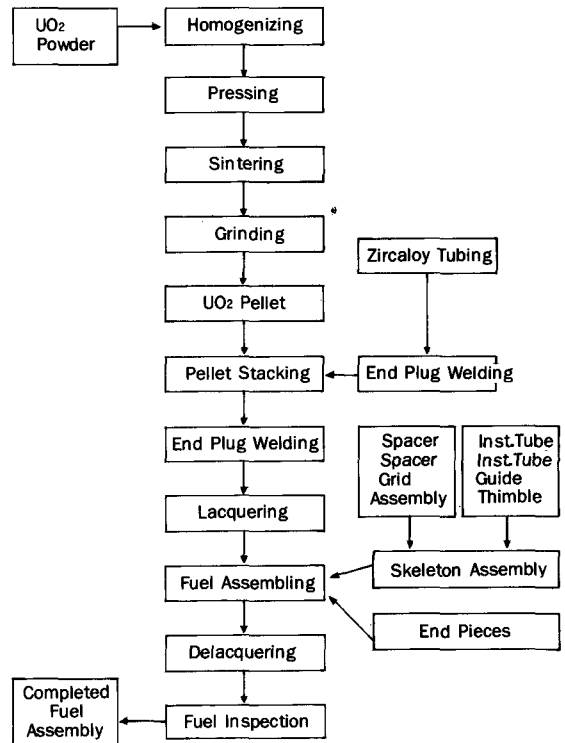
1986년 11월 대전에 연산 200MTU 생산규모의 핵연료성형가공공장을 건설하기 시작하여 1988년 10월에는 상업가동을 하게 되었다. 이 기간동안 3가지 핵연료의 기초설계를 KWU社와 공동으로 수행하여 1988년 8월에 핵연료설계를 완수하였고 한핵이 제조한 첫 국산핵연료를 1990년 2월 고리 2호기에 장전하였다.

PWR 핵연료성형가공공장과 더불어 AUC (Ammonium Uranyl Carbonate)공정이라 불리는 우라늄재변환공정($UF_6 \rightarrow UO_2$)을 한원연이 개발하였는데 그 공정은 <그림 2>와 같다. 재변환공장은 1986년 6월에 설계하여 1987년 12월 공장건설을 착공하였는데 재변환공장이동 전까지 핵연료제조에 필요한 우라늄재변환은 Siemens社의 자회사인 RBU社에서 이루어졌으며 한핵의 재변환공장은 1990년 3월에 가동하기 시작하였다.

핵연료성형가공공정은 <그림 3>과 같이 초기 단계인 UO_2 펠렛제조부터 집합체조립과 최종검사까지로, 한핵은 Zry 피복판과 Zry strap(지



<그림 2> 재변환공정/ AUC Reconversion Process



<그림 3> PWR FUEL FABRICATION PROCESS FLOWCHART

지격자조립용)을 제외한 모든 구조부품의 자립을 달성하였다.

핵연료성형가공공장은 총 19,500m²로 연산 200MTU(재변환 및 핵연료성형가공 각각)생산 시설, 즉 약 450다발의 집합체생산시설로 1991년 8월말까지 재변환공장에서 200톤의 UO₂ 분말을 생산하였고, 14×14, 16×16 및 17×17형 핵연료 총 728다발을 생산하여 한전에 공급하였다(이는 약 310톤의 우라늄에 해당됨). 국내 가동중인 8개 호기의 원자력발전소에 528다발의 핵연료가 장전되었으며<표 2>, 현재 한전의 PWR 발전소 8개 호기의 장전필요량은 연간 약 340다발이고 한핵의 현재 총 인원은 약 390명이다.

4. 핵연료부품국산화

핵연료기술자립계획에 있어서 또하나 중요한 과제는 핵연료집합체에 사용되는 구조부품의 국산화이다. 핵연료구조부품의 국산화는 구조부품의 안정적 공급과 생산비절감 및 국내 관

련산업의 육성을 위해 핵연료국산화초기단계부터 시행되었다.

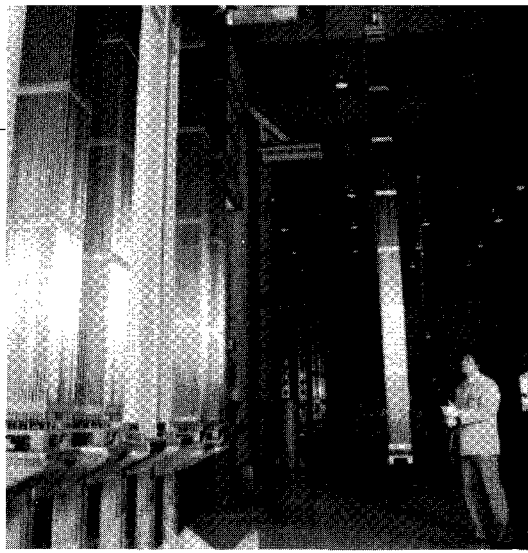
한핵은 Spacer Strap과 Zry-4 튜브를 제외한 대부분의 구조부품을 국산화하였고 Spacer Strap과 Zry-4 튜브국산화도 계속 추진하고 있다.

5. PWR 핵연료집합체설계

한국의 핵연료계획의 중요관건은 단순히 핵연료제조의 자립이 아니라 기술자립의 목적달성을 위해, 핵연료연구개발계획이 원자로공급자(Westinghouse社, Framatome社, Combustion Engineering社 및 캐나다의 AECL社) 및 독일의 Siemens社와 공동으로 추진되어 한전 원자력발전소용 국산핵연료의 독자적인 설계가 성공적으로 이룩되었다. 국산핵연료집합체(KOFA)의 현행설계는 위에서 언급한 바와 같이 3가지 형태로 되어 있지만, KOFA개념의

<표 2> IN-SERVICE OPERATION STATUS

Plant	Fuel Type	Cycle No.	Production Q'ty(FAs)	Delivery Date	Reloaded		Enrichment (w/o U 235)
					Q'ty(FAs)	Date	
KRN-1	14-(16+1)	11	48	90. 4	48	90.12	3.50
		12	48	91. 8	-	-	3.50
KRN-2	16-(20+1)	7	52	89. 7	48	90. 2	3.50
		8	52	91.11	52	91. 5	3.50
KRN-3	17-(24+1)	6	48	90. 9	48	91. 1	3.50
		7	48	91. 7	-	-	3.50
KRN-4	17-(24+1)	5	44	91. 7	-	-	3.50
		6	48	90.12	48	91. 5	3.50
YGN-1	17-(24+1)	5	52	90. 1	52	90. 9	3.50
		6	48	91. 5	-	-	3.50
YGN-2	17-(24+1)	4	48	91. 5	-	-	3.50
		5	48	90.10	48	91. 3	3.50
UCN-1	17-(24+1)	3	48	90. 7	48	91. 1	3.50
UCN-2	17-(24+1)	2	48	89. 9	44	91. 1	3.50
		3	48	91. 6	-	-	
Total			728 FAs (15 regions)		528FAs (11 regions)		

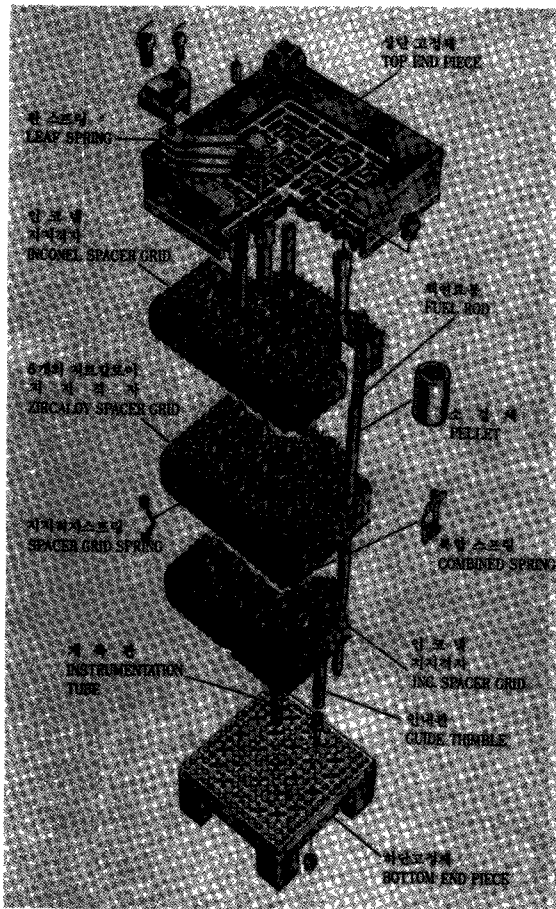


핵심은 <그림 4>와 같은 17×17형이다. 이 형태는 비슷한 Westinghouse社나 Framatome社의 형태와 비교해 몇가지 중요한 차이점을 갖고 있는데, KOFA설계는 기계적 건전성이

더 좋은 좀더 두꺼운 피복관을 사용하고 있고, 또한 hold-down 스트랩도 더욱 강하고 두껍다.

고리 1호기(14×14형)와 고리 2호기(16×16형)는 다른 경수로원자력발전소가 1년주기임에 비해 둘다 15개월주기로, 한전은 점차 1년주기 대신에 18개월주기운전을 고려하고 있고 현재 한원연이 장주기에 대해서 가능성을 검토하고 있다. 이러한 검토는 1990년대초부터 시작하여 1991년 하반기에 검토완료될 것이다.

또한 한전의 18개월주기가능성검토와 함께 한원연은 Korea Advanced Fuel Assembly (KAFA)라는 보다 개선된 핵연료설계를 활발히 추진하고 있는데, KAFA는 한전의 PWR 원자력발전소핵연료의 주종인 17×17형으로 개발되고 있으며, 이 설계개념은 추후에 14×14나 16×16형에도 적용될 예정이다. KAFA의 새로운 형태와 KOFA설계와의 비교는 <표 3>과 같이 연소도를 개선하고 Axial Blankets와 지지격자내의 혼합날개 그리고 이물질방지장치를 사용하고 있다. KAFA에 대한 모든 분석은 1993년중반에 나올 예정으로 1993년에 한국원자력안전기술원에 핵연료설계보고서를 제출하고 1994년말에 KAFA 인허가를 획득한 후 1995년에는 사용할 예정이다.



<그림 4> 17×17 TYPE PWR FUEL ASSEMBLY

6. CANDU원자로용 CANFLEX

PWR 핵연료설계의 개선과 함께 한원연은 또한 CANDU 원자로용 핵연료 소위 「CANFLEX(CANdu FLEXible)」라는 개량형 CANDU 핵연료의 연구개발을 수행하고 있다.

〈표 3〉 ADVANCED FEATURES OF KAFA COMPARED TO KOFA (17×17 Type)

Content	KOFA ¹	KAFA ²	Remarks
Discharge Burn-up(MWD/MTU)	38,000	45,000	<ul style="list-style-type: none"> •20% Increase in Discharge Burn-up •5~15% Reduction in Total Fuel Cycle Cost
ADS Doped Pellet	No	Yes	•30% Reduction of fission gas
Use of Mixing Vane in Spacer Grids	No	Yes	<ul style="list-style-type: none"> •Improvement of Thermal Performance •Improvement of Safety and Operational Margin
Use of Debris Resistant Feature	No	Yes	•Enhancement of Fuel Mechanical Integrity
KOFA ¹ : Korea Fuel Assembly KAFA ² : Korea Advanced Fuel Assembly			

이 계획은 AECL社와 함께 수행하고 있으며 CANFLEX 핵연료다발은 이원봉(2 pin sizes)의 43개 연료봉으로 되어 있다. 이것은 37개의 연료봉에 비해 연소도에 따라 주어진 집합체 출력하의 첨두선출력(peak heat rating)을 10~20%를 줄이게 되고, CANDU 원자로의 기존 핵연료 취급기와도 혼용이 가능하다. CANFLEX 핵연료는 현재의 37개 연료봉으로 된 CANDU 핵연료에 비해 천연우라늄을 사용한다든가 또는 저농축우라늄을 사용한다든가 하는 많은 신축성을 갖고 있다. 이러한 새로운 CANFLEX 핵연료는 1997년쯤 개발될 것으로 전망된다.

7. 핵연료공장의 신·증설(PWR 및 CANDU 핵연료)

한국의 장기원자력개발계획에 따라 한핵은 기존 200MTU 규모의 생산시설을 연산 400MTU 규모로 증설할 예정이고 새로운 400MTU 규모의 CANDU 핵연료가공공장을 건설할 예정이다. 〈그림 5〉의 건설계획과 같이 1992년초 공장건설 시작과 첫 상업가동을 1996년 7월 목표로 1991년~1996년 6년동안 기존의 PWR 핵연료공장건설과 제조경험을 바탕으로 기초설계와 건설을 한핵이 수행할 예정이다.

결 언

급속도로 이루어진 한국의 산업화와 과거 20년간의 기적과 같은 경제성장은 한국의 전력수

〈그림 5〉 NEW PLANT CONSTRUCTION PLAN

Description	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1. Basic Design	11					
2. Detail Design		7	10			
3. Purchase of Equipments					9	
4. Excavation and Building Construction			7		9	
5. Installation of Equipments				8		12
6. Field Test						6
7. Licence						
8. Commercial Operation						7

PWR Fuel : 200MTU → 400MTU

CANDU Fuel : 100MTU → 400MTU(currently KAERI)

요에 부응하는 원자력의 중요한 공헌없이 불가능하였을 것이다. 원자력에 대한 이러한 강력한 추진으로 한전은 두자리 숫자로 증가하는 전기수요를 적정가격에 맞출 수 있었고 현재 원자력에 의한 발전은 한국 총전력생산의 반을 차지함으로써 세계에서 원자력발전비율이 가장 높은 국가 중에 하나가 되었다.

한국의 정책입안자들도 원자력이 국가경제개발에 있어서 중요한 역할을 하고 또한 유지되어야 한다는 사실을 이해하고 한국의 원자력추진에 있어서 안정적 공급의 확보가 중점적으로 고려되고 있다. 따라서 한국이 핵연료설계나 제조에 있어서의 자립을 목표로 활발히 추진하는 것은 매우 적절한 것이고, 1990년 3월에 이러한 목표를 달성함으로써 한국의 예견과 결정에 있어서 하나의 증표가 되고 있다.