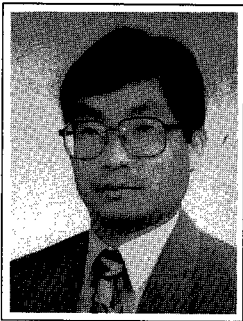


원전연료 가공시설 증설 공사의 준공

- 사업 추진 경위와 효과 -

김 풍 오

한국원전연료(주) 기술처장



82년에 설립되어 89년부터 국내 경수로용 원전 연료를 제작하여 공급하고 있는 한국원전연료(주)에서는 장기 전력 수급 계획이 91년 10월에 확정됨에 따른 증장기 원전 연료 공급 대책을 수립 시행하라는 정부 요청에 의거하여 93년 5월 원전 연료 가공 시설 증설 사업 계획을 확정하였다.

당시 장기 전력 수급 계획에 따른 원전 연료의 연도별 소요량은 <표 1>과

같다.

이와 같은 원전 연료 소요량을 근거로 경수로용 원전 연료 증설 시설을 200톤, 중수로용 원전 연료 가공 시설은 400톤 규모로 하였다.

경수로용 가공 시설의 경우 소결체 및 재변환 시설을 독립하여 200톤 규모로 건설하고, 연료봉 제조 및 집합체 조립 공정은 기존의 생산라인을 보완해 배가 시키도록 하였으며, 중수로용 가공 시설은 400톤 규모로 경수로용 원전 연료 가공 시설과 같이 동일 건물에 건설하기로 하였다.

이러한 계획은 원전 연료 성형 가공 공장을 신·증설하여 원전 연료 전량을 국내 생산 및 공급함으로써 에너지에 대한 국가의 실질적인 자립과 국제 경쟁력을 확보하기 위하여 절대 필요한 것이었다.

사업 개요는 <표 2>, 사업 추진 경위는 <표 3>과 같다.

사업 추진을 위한 체계는 <그림

1>에 표시한 바와 같이 한국원전연료(주)가 사업 총괄 및 관리를 맡고, 공장 설계는 현대엔지니어링(주), 건물 시공은 한국중공업(주)에서 담당하였다.

프랑스의 FRAGEMA (경수로 연료 제조)와 캐나다의 GE Canada (중수로 연료 제조)에서는 핵연료 제조 기술에 필요한 모든 기술 자료의 제공, 주요 기기의 공급 및 기술자 훈련 등의 업무를 수행하였다.

사업 추진 기본 방향

증설 사업을 추진하는 데 고려해야 할 사항으로 공장 부지의 협소함에 따른 최적화된 공장 설계, 향후 건설 사업이 계속되지 않음으로 인한 순수 건설 인력 확보의 제한성, 그리고 기존 습식 재변환 시설의 폐기물 발생량과 다로 인한 문제점 등 기존 공장 가동 경험의 활용과 소요 기기의 국산화를 최대한으로 하겠다는 방향을 설정하였다.

〈표 1〉 원전연료 소요량 전망

단위 : 톤 우리나라

구분 \ 연도	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
경수로	238	247	212	242	232	235	285
중수로	90	90	190	280	370	360	360

〈표 2〉 원전 연료 가공 시설 증설 사업 개요

증설 공정 범위	
경수로 연료 가공 시설	
89년부터 양산을 시작한 연산 200톤 규모의 기존 시설(재변환, 소결체 및 집합체 조립 공정)에 추가로 200톤 규모의 재변환(건식 공정) 및 소결로 공정을 별도의 독립 공장에 건설하고 집합체 조립 공정은 기존 시설에 1개 조립 라인을 증설	
중수로 연료 가공시설	
우리늄 분말을 외국에서 수입하여 소결체 공정, 연료봉 공정, 구조 부품 제조 공정 및 집합체 조립 라인을 400톤 규모로 독립된 건물에 신설	
건설 개요	
· 증설 규모 (연간 생산 능력) 경수로 : 200MTU, 중수로 : 400MTU	· 부지 면적 : 34,460평 (개발 면적 : 16,563평) · 투자 규모 : 1,170억원

1. 공장 설계의 최적화

반핵 단체의 활동으로 인한 주민들의 반대로 증설 공장 부지를 공주에서 상대적으로 협소한 기존 공장 인근 부지로 확정함에 따라 공장을 콤팩트하고 효율화된 설계로 하지 않으면 안되게 되었다.

중수로 연료 가공 시설의 경우 경제성에 도달하면 건설하게 되어 있는 변환 시설 부지를 확보하고, 수요 확대를 대비하여 경수로의 경우는 현재 200톤에서 400톤으로 1개

생산 라인을 증설할 수 있게 하였고, 중수로의 경우는 400톤에서 800톤으로 증설할 수 있도록 하였다.

경·중수로 가공 시설에서 필요로 하는 용수, 스팀, 각종 가스 및 전기 등의 유틸리티 시설은 공동으로 사용하도록 설계하였으며, 물류 이동을 최소화 하도록 공장 설계를 하였다.

2. 건설 인력 운영의 효율화

일반적으로 공장 건설의 경우에 초기에는 토목·건축·기계·전기 등

으로 구성된 건설 전담반이 건설을 하다가 어느 정도 기간이 지나면 시운전반이 조직되어 점차 공장을 상업가동으로 끌어가게 된다.

그러나 한국원전연료(주)의 경우 앞으로 건설 공사가 계속되지 않기 때문에 건설 전담반을 따로 구성할 수 없었고, 처음부터 공장 운영 요원들이 주류가 되어 건설 공사를 담당하게 하였다.

이 증설 공사를 위하여 건축직 간부 1명만을 외부에서 채용하였고, 나머지 인원들은 기존 공장에서 차출 또는 공장 운영 요원으로 채용한 기술자들이 건설 공사를 겸무하도록 하였다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 인력 운용에서 매트릭스 제도를 부분적으로 활용하였고, 끊임없는 교육과 훈련으로 증설 사업을 추진하였다.

3. 기존 공장 가동 경험의 최대 활용

신규 시설의 건설에는 기존 공장의 가동 경험을 최대한 활용하여 건설 비용 최소화화 생산성의 향상에 초점을 맞추었는데, 그 중 세 가지 주요한 활용 사례는 다음과 같다.

첫 번째로 재변환 공정의 선정에서 기존의 습식 재변환 공정(AUC 공정)에서는 폐기물의 다량 발생으로 공장 운영에 애를 많이 먹었기 때문에, 기술팀에서는 세계적인 재변환 공정 채택 추세와 환경 친화적인 기술을 분석하여 건식 재변환 공정

〈표 3〉 사업 추진 경위

'91. 2	중장기 원전 연료 공급 대책 수립, 시행 요청 (동자부)
'91. 10	장기 전력 수급 계획 확정 - 2006년까지 원자력발전소 18기 추가 건설
'93. 5	중설 사업 계획 확정(부지를 공주에서 기존 시설 인접 지역으로 확정) - 이사회
'93. 11	해외 기술 도입선 선정 경수로 : 프랑스 Framema, 중수로 : GE Canada
'94. 3	개발 제한 구역 내 행위 허가 승인 (건설부)
'94. 4	연구 단지 입주 승인 (과기처)
'94. 7	기기 공급 및 기술 도입 계약 체결 - 경수로 재변환 시설 : Framema, FBFC, - 중수로 가공 시설 : GE Canada
'94. 8	설계 기술 회의 (ERM) 1차 회의 - GE Canada, Framema, FBFC, 현대 엔지니어링
'94. 9	공사 착공
'95. 3	건축 허가 취득 (대전시 우성구청)
'95. 6	가공 사업 허가 취득 (과기처)
'95. 9	사업 추진 협의 (PRM) 1차 회의 - GE Canada, Framema
'96. 3	사업 추진 회의 (PRM) 2차 회의
'96. 6	가공 시설 종설 골조 공사 준공 (한국중공업(주))
'96. 10	경수로 도입 기기 2차 선적분 입고 완료 (Framema)
'96. 11	기기 설치 공사 계약 체결 (한국중공업(주))
'97. 3	중수로 도입 기기 입고 완료 (GE Canada)
'97. 9	경수로 핵연료 설계 및 가공 방법 변경 승인 (과기처)
'97. 11	중수로 핵연료 설계 및 가공 방법 승인 (과기처)
'97. 12	가공 시설 검사 승인 (과기처)
'97. 12	경수로 원전 연료 중설 시설 상업 가동
'98. 1	중수로 원전 연료 가공 시설 상업 가동

(Dry Conversion)을 채택하기로 하였다.

두 번째로 소결체 제조 공정에서는 재변환 기술 도입 범위에 이를 포함시키는 것이 보통이지만, 기존 시설의 가동 경험을 살려 자체적 기술력으로 국산화하기로 하였다.

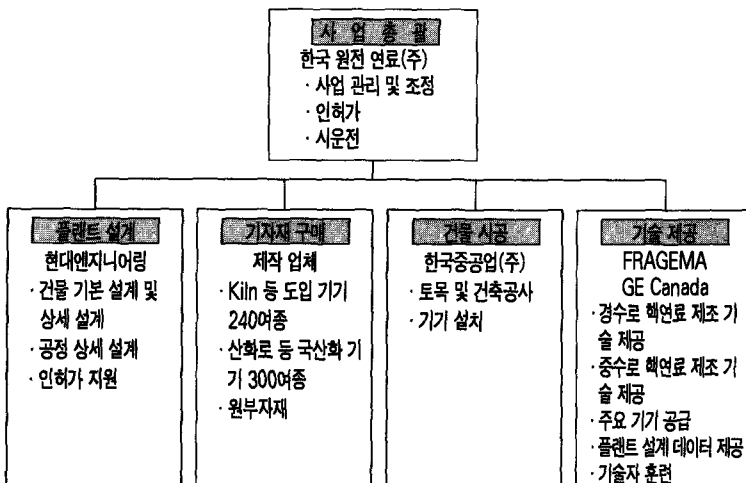
이로써 소결체 공정 기술 도입에 들어가야 할 상당한 금액의 기술료를 절감할 수 있었고, 관련 기기 국산화를 이룩함으로써 도입 기기 금액도 대폭 절감하였다.

세 번째로 제조에 들어가는 각종 가스 공급 시설, 전기 공급 시설 및 냉난방 시스템을 기존 공장의 가동 경험을 토대로 대폭 개선 하였는데, 특히 전기 공급 시설의 경우 기존의 분산 시스템을 중앙 집중식으로 바꾸어 보전 측면의 관리를 용이하게 하였고, 냉난방 시스템은 심야 전력을 활용하는 방축열 냉방 시스템을 채택하여 관리비를 최소화 하였다.

4. 소요 기기의 자동화 및 국산화

재변환 및 소결체 공정의 핵심 장비 및 중수로 연료 가공 시설의 주요 장비를 제외하고는 국산화 장비를 사용하고, 모든 공정의 기기는 생산성 향상을 목표로 두고 로봇 기술의 채택 등으로 자동화한다는 원칙을 세웠다.

특히 경수로 소결체 공정의 경우에는 기존 공장에서 고장을 많이 일으켜



〈그림 1〉 사업추진 체제

유지 보수에 애를 먹었던 소결체 적재 장치인 Boat make-up System과 산화로 등은 최신의 로봇 기술을 접목시켜 기존의 장비보다 월등한 기기로 국산화 하였다.

이러한 공정 장비의 국산화는 기기 구입비의 막대한 절약을 기할 수 있었고, 또한 관련 국내 업체의 기술력 향상을 가져왔다.

경수로 연료 가공 시설

1. 재변환 공정 개요

핵연료 가공 시설에서의 재변환 공정은 농축 공장에서 U235 동위원소를 천연 우라늄의 0.711% 에서 2%~5%까지 높인 육불화우라늄(UF₆)을 이산화우라늄(UO₂)분말로 만드는 과정이다.

한국원전연료(주)에서는 그동안 국내에서 개발한 습식 재변환 공정인 AUC 공정을 90년부터 가동하여 왔으나, 부산물로 나오는 폐기물이 많이 나와 공정 운영상에 부담이 되어 왔다.

이에 대한 대책으로 재변환 시설의 증설에는 전세계적으로 많이 채택되고 있고, 공정이 간단하며, 폐기물 발생량이 적은 건식 공정 기술을 프랑스의 FRAGEMA 에서 도입하였다.

〈표 4〉에는 기존의 AUC 공정과 신설된 건식 공정의 차이점을 기술하였고 〈표 5〉에는 각국에서 채택하고 있는 재변환 공정을 보여주고 있다.

〈표 4〉 습식(AUC) 공정과 건식 공정의 차이

항목	습 식 공 정	건 식 공 정
공정 단계	- 주공정 : 기화 공정, AUC 침전, 여과, 배소/환원, 안정화 공정 - 보조 공정 : 여액 처리, 메타놀 회수, 부스리기 회수, 폐액 처리 공정	기화 공정, 변환 공정(Kiln), 분말 전처리 공정으로 구성되어 공정 단계가 단순
액체 폐기물	액체 폐기물이 많이 발생하여 폐액 처리가 어렵고 환경 대책 필요	액체 폐기물 발생이 적고 조업 환경 양호
원자재	탄산 가스·암모니아·스티프·탄산 암모늄·메타놀·수소·질소·산소	스티프·수소·질소
분말 특성	분말의 유동성 (Flowability)이 양호하여 분말 전처리 공정이 필요 없음	분말의 유동성을 좋게 하는 분말 전처리 공정이 필요(소결체 제조시 예비 압분 및 조립화 공정(Granulation)이 필요)
부산물	NaF (고체)	HF (액체)

〈표 5〉 각국별 재변환 공정 채택 현황

국명	회 사 명	재변환 공정	비 고
미국	Westinghouse ABB-CE SPC GE	ADU, IDR CE Dry Process ADU, Dry Process ADU, Dry Process	85년 IDR 생산 시설 500톤 규모로 증설 CE가 자체 개발한 건식 공정 최근 건식 공정으로 증설 계획 수립 ADU로 가동하다 97년 후반 FBFC로부터 기술 이전 받아 900톤 규모 건설
영국	BNFL	IDR	60년대말부터 가동
독일	SIEMENS	ADU, Dry Process	Hanau에 있는 AUC 공장은 조업 중단. 최근 Lingen에 건식 공정을 건설하여 가동중
프랑스	FBFC	Dry Proces ^s	80년대초 BNFL로부터 IDR을 기술 이전 받아 대폭 개선한 건식 공정 사용
일본	JNFC	ADU	BWR 연료 회사인 JNF는 미국 GE사로부터 건식 분말 조달
스웨덴	ABB-ATOM	AUC	70년대말 Siemens에서 기술 도입
한국	KNFC	AUC	90년부터 국내 개발 습식 공정 가동

- 주 : 1) ADU : Ammonium Diuranate
- 2) AUC : Ammonium Uranyl Carbonate
- 3) IDR : Integrated Dry Route

2. 건식 재변환 공정

건식 재변환 공정은 UF₆를 기화시키는 기화 공정, 기체 상태의 UF₆를

고체 상태의 UO₂ 분말로 변환시키는 변환 공정, 변환로부터 배출되는 UO₂ 분말을 상온 이하로 냉각시키



한국원전연료(주)의 핵연료 제조 공장. 한국원전연료(주)는 국내에서 가동중인 경·중수로용 원전 연료를 전량 제작하여 공급하고 있다.

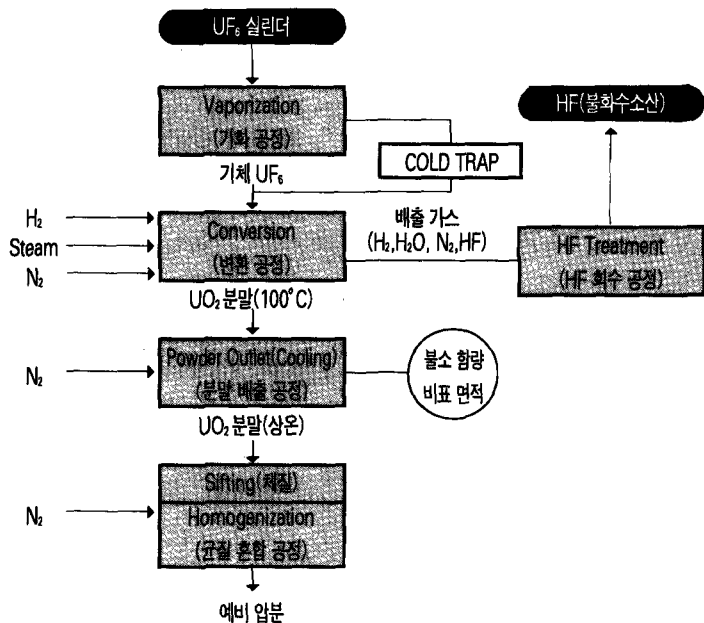
고, 배출을 제어하며 분말을 지정된 분말용기에 담은 분말 배출 공정, UO_2 분말을 정해진 양의 롯트(Lot) 별로 균질 혼합 시키는 균질 혼합 공정의 4단계로 나누어진다.

가. 기화 (Vaporization)

30B 실린더에 들어있는 고체 UF_6 를 가열하여 기화시킨다.

30B 실린더 내에 포함된 UF_6 는 Autoclave 내에서 전기 히터에 의해 $80\sim 115^\circ C$ 사이의 온도로 가열된다.

기화 공정은 고체 상태의 UF_6 를 변환로(Kiln)로 공급하기 위해 기체 상태의 UF_6 로 전환할 수 있도록 설계되어진 기화기(Autoclave)와 기화 효율을 높여주는 Cold trap으로 구



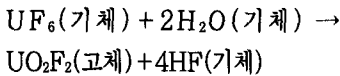
〈그림 2〉 건식 재변환 공정 흐름도

성되어 있다.

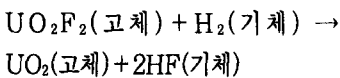
나. 변환 (Conversion)

변환로(Kiln)에 공급되어진 UF₆, H₂, 수증기(H₂O)의 상호 반응으로 UO₂ 분말을 제조하는 공정이며, 다음과 같이 2개 반응이 연속적으로 이루어진다.

1차 반응은 가수 분해 반응으로 반응로 내에서 이루어지며, 육불화우라늄(UF₆)과 수증기(H₂O)가 반응하여 불화우라늄 분말(UO₂F₂)과 불산(HF) 기체가 생성된다.



2차 반응은 열가수 분해 반응으로 회전 튜브(Rotating tube) 내에서 일어나며, UO₂F₂ 분말이 증기(H₂O) 및 수소(H₂)와 반응하여 U₃O₈ 과 같은 중간 생성물이 H₂에 의해 환원되면서 UO₂ 분말이 생성되며, 불산(HF) 기체가 발생된다.



다. 분말 배출(Powder Outlet)

변환로와 연속적으로 운전되는 분말 배출 공정은 변환로로부터 고온의 분말(100°C)을 냉각시키고 분말 내 수분을 제거하며, 변환로로부터 배출되는 분말을 2개의 냉각 호퍼(Cooling Hopper)로 번갈아가며 제어하여 분말을 분말 저장 용기에 담는다.

라. 균질 혼합(Homogenization)

균질 혼합 공정은 한 롯트는 약

〈표 6〉 세계의 중수로 연료 가공 시설 현황

국 명	회사명	생산 용량(연산)	비 고
캐나다	GE Canada ZPI (Zircatec)	1,200톤	67년부터 가동
		1,200톤	56년부터 시제품 생산
아르헨티나	CNEA (Ezeiza)	300톤	82년 4월부터 가동
인도	DAE (Hyderabad)	300톤	증설 공사(600톤) 진행중
루마니아	FCN	200톤	기술 도입 없이 공장 건설로 초기 손실 막대
한 국	KNFC KAERI	400톤	KAERI 시설은 사업 이관 으로 가동 중단
		100톤	

2.5Ton-UO₂로 구성되며 5~6개의 분말 용기에 나누어져 체질기에 분말이 공급되며, 공급된 분말은 350µm 이하의 스크린으로 과립 분말이 제거된 후 질소 분위기하에서 혼합기를 이용하여 분말의 물리적 특성을 균질하게 하는 균질 혼합 공정이다.

중수로 연료 가공 시설

1. 세계의 중수로 연료 가공 시설

중수로를 가동하고 있는 캐나다·아르헨티나·인도·루마니아가 중수로 연료 가공 시설을 보유하고 있으며, 우리나라는 86년부터 한국원자력연구소에서 연산 100톤 규모의 시설을 운영하여 왔다.

2. 가공 공정

중수로 연료 가공 공정은 외국에서 수입한 이산화우라늄 분말을 소결체로 만드는 소결 공정, 집합체에 들어

가는 각종 부품을 생산하는 구조품 제조 공정 및 집합체 조립 공정으로 이루어진다.

신규 증설 공장이 GE Canada와 다른 점은 봉단 마개, 지지체, 봉단 집합판 등 집합체 구조 부품을 외주에 의존하지 않고 자체 생산하고 있다는 점이다.

이들 구조 부품은 제조상의 기술적인 어려움이 많아 우리나라에서는 외주보다 자체 생산하는 것이 경제성이 더 좋다는 판단에서 처음부터 자체적으로 제조하게 되었다.

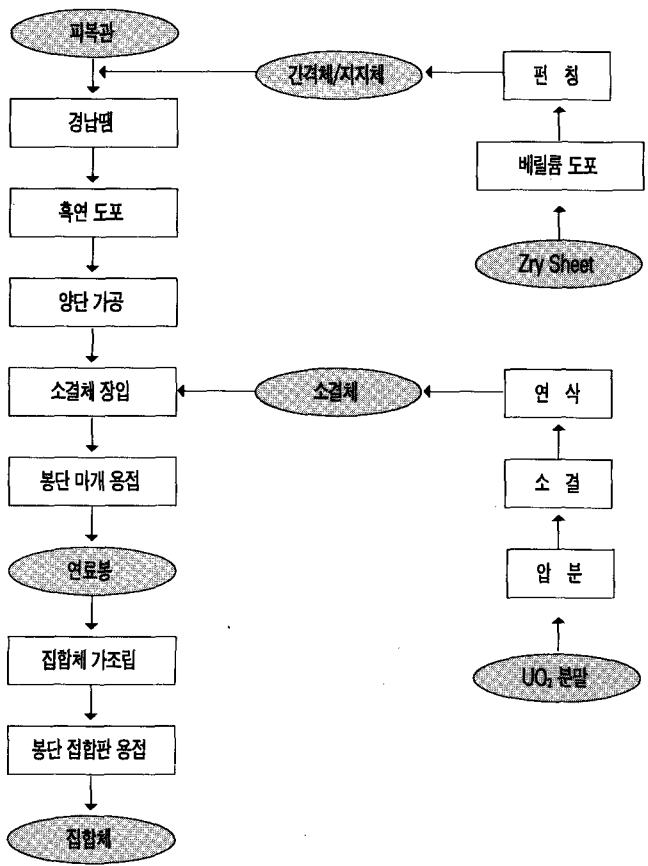
가. 소결체 제조 공정

① 분말 준비

우라늄 분말은 예비 압분기에서 슬러그로 만들어진 다음 조립기(Granulator)로 공급되어 일정한 크기의 입자로 조립화 되고 윤회체와 U₃O₈ 을 첨가하여 혼합된다.

② 압분 및 소결

혼합된 우라늄 분말은 회전식 압분



(그림 3) 중수로 원전 연료 제조 공정 흐름도

기(Rotary Pellet Press)에서 압분체(Green Pellet)로 만들어지고 물리브덴 보트에 적재된 다음 소결로로 이송된다.

소결 온도는 최고 1,700°C이며 압분체의 밀도가 이론 밀도의 95.8% ~ 98.5%가 되도록 소결된다.

③ 연삭(Grinding)

소결된 압분체는 설계에서 요구하는 정확한 사양에 따라 무심 연삭하여 원통형 소결체로 만든다.

나. 구조품 제조 공정

① 봉단 집합판의 제작

봉단 집합판은 각 연료봉들을 결합시켜 중수로 원전 연료 집합체를 만들기 위한 구조 부품이다.

160톤 프레스에서 5단계 연속 금형을 사용하여 지르칼로이판을 편칭한 후 10톤 프레스에서 편평화 시킨다.

② 봉단 마개의 제작

봉단 마개는 우라늄 연료가 장입되

어 있는 피복관의 끝단을 밀봉하기 위해 사용된다.

③ 지지체 및 간격체의 제작

지지체와 간격체는 압력관과 집합체, 그리고 연료봉 상호간의 간격을 유지해 주는 구조품이며, 지지체와 간격체 모두를 Appendage라 총칭한다.

Appendage는 가접 및 경납땜 작업에 의해 피복관에 영구적으로 부착되는데, 경납땜 공정중에 배럴롬은 지르코늄과 반응하여 공정 화합물을 형성한다.

④ 가접 및 경납땜(Tacking & Brazing)

피복관 표면에 지지체와 간격체를 부착하는 공정이다.

⑤ 흑연 도포(Graphite Coating) 및 베이킹

피복관에 장입된 소결체는 노내에서 조사시 팽창과 수축을 하면서 피복관에 압력을 가하며 핵연료 파열을 발생시킬 수 있는 균열을 야기 시키는데, 그러한 소결체와 피복체간의 상호 작용을 방지하기 위하여 소결체가 장입되기 전에 피복관의 내면에 얇은 흑연 도포를 한다.

도포 후 수소 성분을 제거하기 위해 진공로에서 가열하는 것이 베이킹 공정이다.

다. 집합체 제조 공정

① 소결체 장입 및 봉단 마개 용접
피복관에 정확한 길이로 설정된 소

결체 스택을 장입하고 헬륨을 주입한 후 1·2차 봉단 마개 용접을 전기 저항 용접으로 진행하고, 연료봉 내의 소결체 누락 여부를 점검하기 위하여 연료봉 무게를 계량한 후 봉단 마개 용접중 발생한 용접 덧살을 제거한다.

② 집합체 조립 및 용접

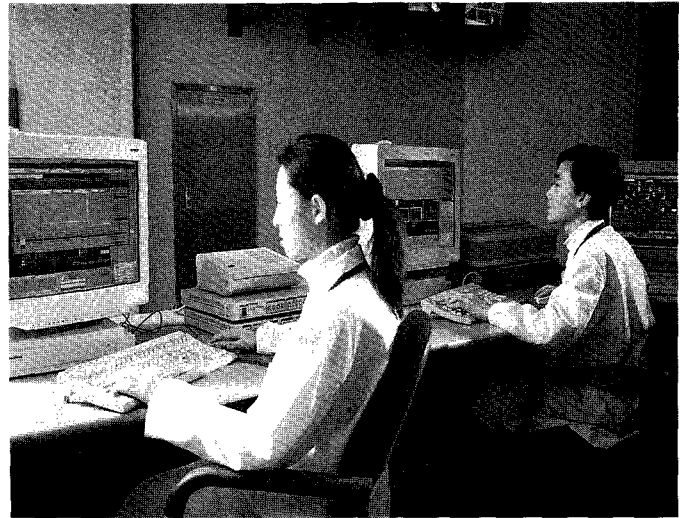
봉단 마개 용접이 끝난 연료봉을 조립대에서 5종류의 연료봉을 종류별로 구분하여 37개의 연료봉을 집합체로 가조립한다.

가조립 된 것을 컨베이어를 통하여 집합체 용접기로 이동시키면 상부 봉단 접합판 번호 각인 및 용접, Fixture 제거, 하부 봉단 접합판 번호 각인 및 용접, 무게 측정, 집합체 번호 일치 확인 공정 순으로 자동으로 진행되어 집합체 조립이 완성된다.

중설 사업 주요 추진 실적

가. 효율적인 사업 관리로 당초 계획보다 약 3개월의 건설 기간 단축, 계획상 예정하였던 인력 30여명을 충원하지 않은 데서 오는 인건비 절감 및 기기 국산화 등을 통해 약 40억원의 투자비를 절감하였다.

나. 재변환 공정을 환경 친화적인 건식 공정을 채택하였고, 폐기물로 나오는 불화수소산(HF)은 중간 단계의 처리 시설을 도입한 다음 기존 공장의 NaF 재생 시설을 이용하여 NaF로 제조하여지도록 하였다.



우리늄 농축 공장 중앙제어실. 핵연료 가공 시설에서의 재변환 공정은 우리늄 농축 공장에서 U-235 동위원소는 천연 우리늄의 0.711%에서 2~5%까지 높은 UF₆을 UO₂ 분말로 만드는 과정이다.

이렇게 함으로써 건식 공정에서 나오는 폐기물은 완전히 없게 되었고, 최종 부산물로 나오는 NaF를 국내 산업에 이용케 함으로써 외화 절감과 원가 절감에 이바지 하였다.

다. 중설 사업에 설치해야 하는 임계 경보 시스템은 기존 공장의 경보 장비를 복사하여 설치할 예정이었으나, 새로운 설계 개념을 채택하여 3억원을 절감하는 등 장비의 개선 등으로 기기 구입비를 약 20억원을 절감하였다.

라. 경수로 소결체 적재에 사용되는 장비(Boat make-up System)에 로봇을 채택하여 국내 업체와 공동 개발하여 특허에 출원하는 등 관련 장비 개발에 국내 업체를 최대한 참여시켜 국내 관련 산업체의 기술 향상에 기여하였다.

마. 공장 전체의 냉방을 심야 전력을 이용하는 빙축열 시스템을 도입하여 효율적이고 쾌적한 작업장을 만들었다.

중설 시설 준공의 효과 및 의의

가. 국내에서 가동중인 경·중수로 용 원전 연료를 전량 제작하여 공급하게 됨으로써 국가 에너지 자립에 기여하게 되었다.

나. 핵연료 주기의 핵심 기술 중 하나인 경·중수로 핵연료 가공 시설의 완성으로 향후 전반적인 선행 및 후행 핵연료 주기의 자립을 위한 기반을 구축하였다.

다. 세계 최신의 중수로 원전 연료 양산 시설을 확보하였고, 경수로용 핵연료 가공 시설이 경제 단위 규모를 달성함으로써 국제 경쟁력을 강화하게 되었으며, 동남아 및 중국 등에 수출도 가능하게 되었다.

라. 환경 친화적인 건식 공정을 채택하고 이의 부산물을 국내 산업에 재활용케 하여 폐기물 발생이 전혀 없게 함으로써 대국민 원자력 이해 증진에 기여하였다. ☞