

# 輕水爐 核燃料 製造 및 檢査 개요

An Outline of Manufacturing  
and Inspection for Nuclear  
Fuel in the Light  
Water Reactor

이학박사 장 인 순

한국핵연료(주) 사업본부장

## 1. 輕水爐 核燃料 국산화사업 추진 개요

현재 국내에서 운전중인 원자력 발전소는 총 9기로서 이중 8기가 가압 경수로(PWR)형이다. 또한 가압 경수로형 원자력 발전소 2기(영광 3, 4호기)가 현재 건설중에 있으며, 추가로 2기의 가압 경수로형 원자력발전소(울진 3, 4호기)가 건설 계획중이다.

정부는 국내의 가압 경수로형 원자력 발전소에 사용될 핵연료의 국산화를 위하여 1981년 7월 30일 제31차 경제장관 협의회에서 연산 우라늄 기준으로 200MTU 규모의 가압 경수로 핵연료 성형가공 국산화 사업 추진을 위한 회사설립을 결정하였으며, 한국전력공사의 출자로 1982년 11월 11일에 한국핵연료주식회사(KNFC, 이하 한핵이라 함)가 설립되었다. 그후 핵연료 설계는 한국에너지연구소(KAERI)가, 핵연료 성형가공은 한핵이 각각 분담을 하도록 함에 따라,

한핵은 1985년 8월 26일에 독일 KWU사와 기술 도입 및 기기공급계약을 체결한 후 1986년 11월 11일에 핵연료 성형가공 공장을 착공하여 1988년 12월 31일에 건설 및 시운전을 완료하였으며, 1989년 1월부터 국산 경수로 핵연료의 상업생산을 시작하여 1989년 7월 말에 코리 2호기 원자력 발전소용 국산 핵연료 52다발을 한국전력공사에 최초로 공급하였다.

또한 농축 UF<sub>6</sub>를 농축 UO<sub>2</sub> 분말로 만드는 재변환 공정은 한국에너지연구소에서 개발한 공정으로 1987년 12월 31일에 공장 건설을 착공하여 1989년 7월 31일자로 건설이 완료되어 현재 시운전중에 있으며, 1990년 1월부터 상업생산을 시작할 예정인 바, 1990년부터는 재변환 공정부터 핵연료 성형가공 공정까지의 국산화가 이루어지게 되었다.

한핵은 1989년에 6개 원자력 발전소에 사용될 3개형(14×14, 16×16, 17×17형)의 국산 핵연료 총 292다발(138MTU)을 한국전력공사

에 공급하며, 이후의 국내 가압 경수로형 원자력 발전소에 사용될 핵연료를 전량 공급할 계획이다.

경수로 핵연료의 국산화는 원자력 발전에 대한 해외 의존을 탈피함으로써 에너지 기술자립이라는 국가적 과제에 기여를 할 것이다.

## 2. 核燃料 製造概要

경수로형 핵연료의 제조는 크게 소결체, 연료봉/안내관, 지지격자 및 집합체 제조 등 4개 체 조부분으로 나뉘지며 전체적인 핵연료 제조공정은 그림 1과 같다.

### 가. 소결체 제조

소결체 제조는  $UO_2$  분말의 혼합, 압분, 소결 및 연삭 과정을 통한 우라늄 분말의 소결체로의 성형가공 및 스크랩 회수과정(Dry Scrap Recovery Process)으로 구분되며, 이 공정에서  $UO_2$  분말의 특성, 특히 분말의 유동도는 압분 공정에 영향을 주는 가장 중요한 분말의 특성이다.

$UO_2$  분말의 특성은  $UO_2$  분말의 제조(Conversion Process) 공정에 따라 결정되며  $UO_2$  분말의 제조방법은 크게 건식 공정(Dry Conversion Process)과 습식 공정(Wet Conversion Process)으로 구분된다.

습식 공정중 독일의 KWU사에서 쓰고 있는 AUC(Ammonium Uranyl Carbonate) 공정을 제외한 기타의 건식 및 습식 공정은 분말의 유동도가 좋지 않아 압분공정 전에 조립화(Granulation)와 같은 분말 전 처리 공정이 필요하다.

한핵에서는 유동도가 좋은 AUC 재변환 공정으로 생산된  $UO_2$  분말을 사용하는데, 먼저 스크랩 회수 공정에 의해 회수된  $UO_2$  분말을 산화시켜  $U_3O_8$  분말로 만들어  $UO_2$  분말에 혼합 후 회전

식 압분기로 압분하여 압분체로 만든 다음 이들을 약  $1700^\circ C$ 의 소결로에서 3~4시간 동안 소결하여 이론밀도 95%의 장구형 소결체를 만든 후 무심연마기로 연마함으로써 실제상 요구되는 직경의 원통형  $UO_2$  소결체를 만든다.

또한, 소결체 제조공정에서 발생하는  $UO_2$  스크랩은 스크랩 회수 공정에 따라  $U_3O_8$  분말로 만들어 다음에 만들어질  $UO_2$  소결체의 밀도, 기공도 및 미세조직의 조절을 위하여 압분전에  $UO_2$  분말과 혼합하여 재사용한다.

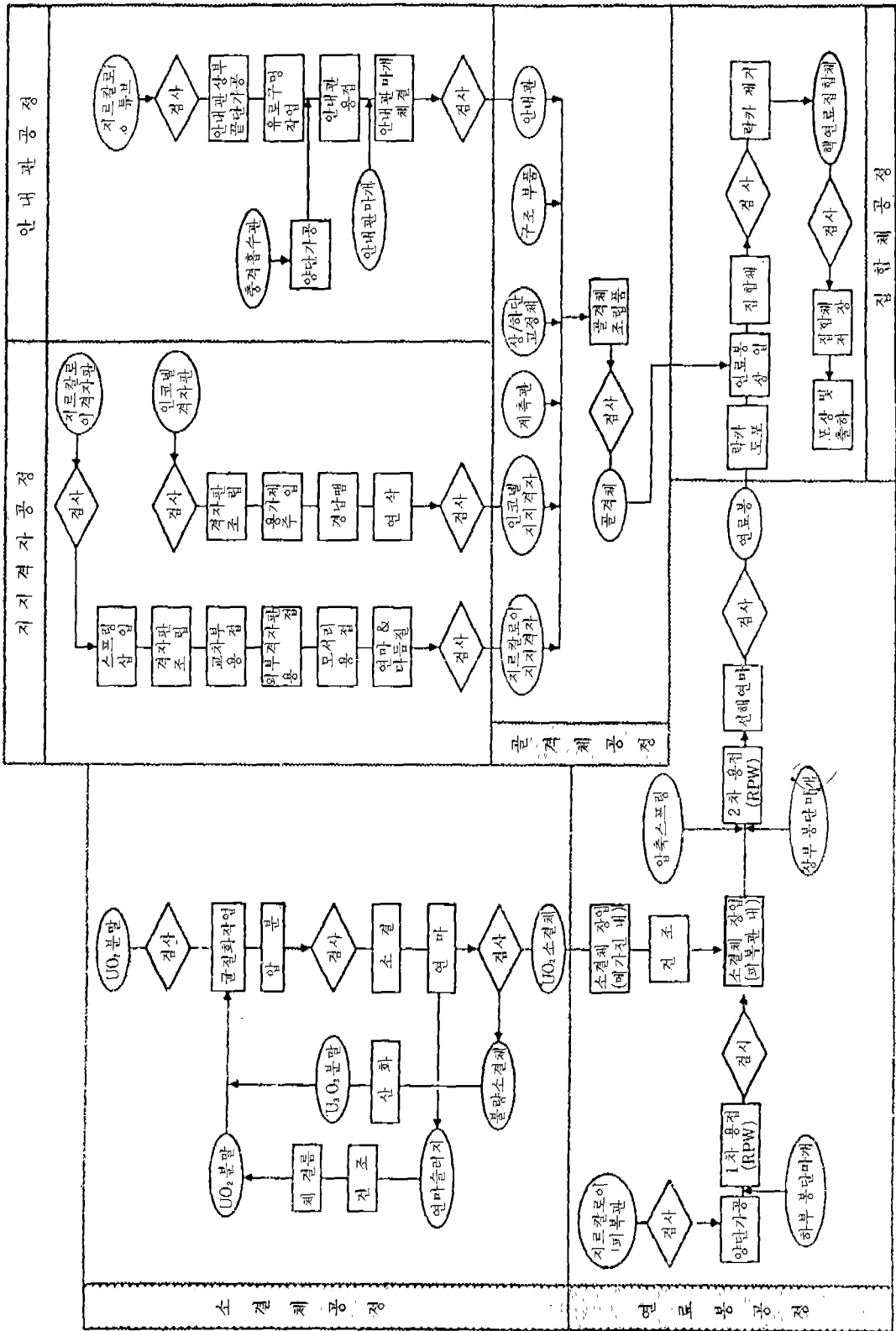
### 나. 연료봉/안내관 제조

연료봉은 핵연료가 원자로 내에서 연소시 핵분열 에너지를 방출하는 모체로서 연소시 발생하는 열 에너지를 냉각재에 전달하고, 핵분열 생성물이 연료봉밖으로 방출되는 것을 방지한다.

연료봉은 지르칼로이 피복관, 상·하부 봉단마개, 압축 스프링 및 소결체로 구성된다. 먼저 세척대에서 알콜 및 압축공기로 피복관 내·외부를 세척한 다음 자동선반으로 양단을 절단하고 봉단마개와의 용접부위를 기계 가공한 후 하부 봉단마개를 피복관의 한쪽 끝에 저항용접(RPW: Resistance Pressure Welding)한다.

한편 일정량의 소결체가 적재된 메가진을  $150 \pm 10^\circ C$ 의 건조로에서 1시간반동안 건조시킨 후 이들 소결체를 하부 봉단마개가 용접된 피복관에 장입시킨 후 압축스프링을 끼운다. 소결체 및 압축 스프링이 장입된 피복관에  $21.5 \pm 1 bar$ 의 헬륨가스를 충전시킴과 동시에 상부 봉단마개를 피복관의 다른 한쪽끝에 저항용접한다. 다음 연료봉의 표면조도를 향상시키고 부식을 방지하기 위하여 연료봉의 표면을 전해 연마함으로써 최종적인 연료봉이 완성된다.

안내관은 원자로 내에서 핵연료 연소시 필요로 하는 제어봉을 안내하고, 제어봉 낙하시 낙하속도를 줄이고 충격을 흡수하는 역할을 한다.



(그림 1) PWR 핵연료집합체 제조공정 흐름도

안내관은 안내관 상부, 충격흡수관 및 안내관 마개로 구성된다. 먼저 안내관 상부를 요구되는 길이로 절단후 안내관내의 냉각재 배출을 위해 하단에 4개의 유로 구멍을 뚫은 후 세척을 거쳐 충격흡수관의 용접부위를 기계 가공한다.

마찬가지로 충격흡수관을 요구되는 길이로 절단후 안내관 상부와 용접부위를 기계가공한 후 아르곤가스 분위기하의 용접 챔버(Chamber)에서 안내관 상부와 원주상으로 TIG 용접을 실시한다.

용접이 완료된 튜브를 세척대에서 내부면을 세척한 다음 안내관 마개를 조립한 후 외부면을 세척함으로써 안내관이 완성된다.

#### 다. 지지격자 제조

지지격자는 핵연료 집합체에서 연료봉을 지지하고 원자로 내에서 집합체에 작용하는 반경 방향의 힘(Radial Force)을 수용하며, 연료봉 및 안내관의 간격을 일정하게 유지함으로써 원자로 내에서 냉각재의 흐름상태를 균일하게 분포시켜 준다.

17×17형 핵연료 집합체에서의 지지격자는 모두 8개로 이중 집합체 상·하단의 2개는 인코넬 지지격자, 중간 6개는 지르칼로이 지지격자로 이루어진다.

지지격자는 외부격자판, 내부격자판 및 지지격자 모서리등으로 구성되며 지르칼로이 지지격자의 경우 지지격자 스프링이 내부격자판과 조립된다.

인코넬 지지격자는 니켈 도금된 내·외부격자판을 격자판 번호에 따라 조립한 후 모서리부를 점용접하여 지지격자체 형상을 만든 다음 조립시의 먼지 등을 제거하기 위하여 세척한다. 세척된 지지격자의 내부 교차점, 외부 및 모서리부에 경납땜용가재를 주입한 다음 1,030℃의 진공로에서 10~15분 동안 경납땜(Brazing) 한 후 시

호 경화 처리한다. 이후 경납땜된 지지격자 외부 표면의 경납 부분을 연삭함으로써 최종 인코넬 지지격자가 완성된다.

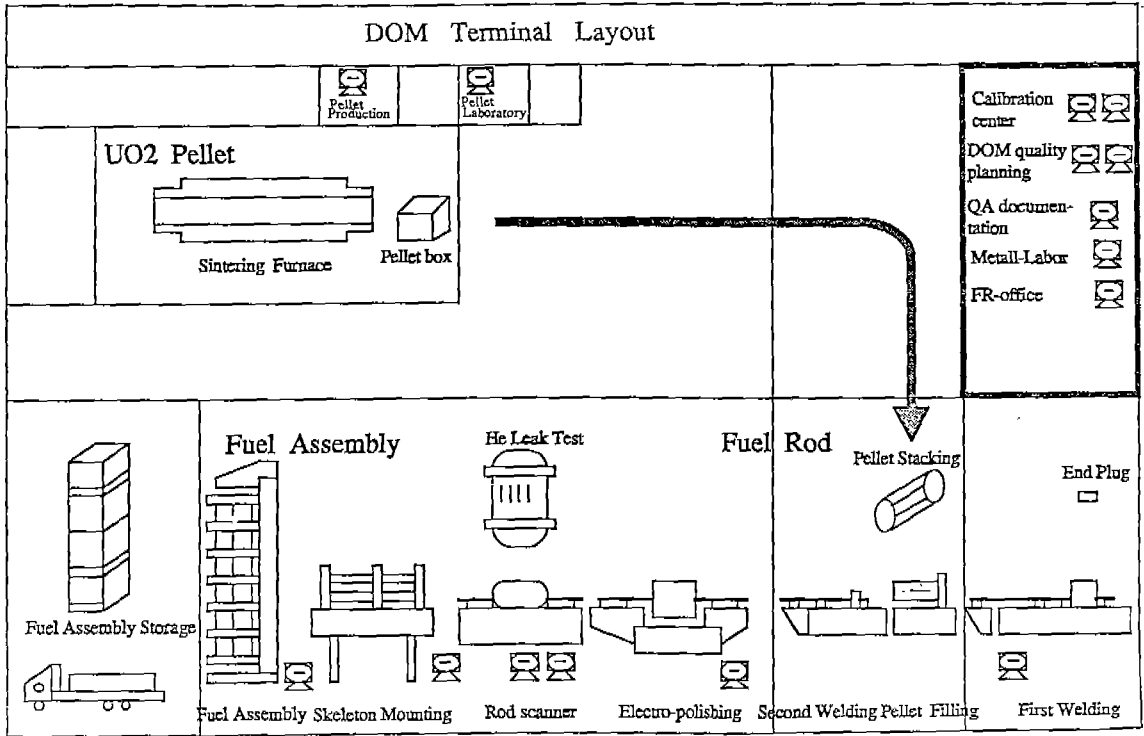
지르칼로이 지지격자는 먼저 경화 열처리된 인코넬 스프링을 내부격자판에 끼운 후 격자판 번호에 따라 내·외부격자판을 조립한 다음, 스프링이 제위치에 끼워져 있는가를 확인한 후 모서리부를 점용접하여 지지격자체 형상을 만든 다음 세척한다. 깨끗이 세척된 지지격자는 아르곤 분위기의 용접 챔버(Chamber)에서 상·하부의 내부 교차점, 외부격자판과 내부격자판간의 연결부 및 모서리부가 TIG 용접된다. 용접이 완료된 지지격자는 외부 표면의 용접부위 가공 및 최종 요구 치수를 위하여 줄 및 연마작업을 함으로써 최종 지르칼로이 지지격자가 완성된다.

#### 라. 집합체 제조

핵연료 집합체 제조는 골격체 조립, 연료봉 락커 도포, 연료봉 장입, 집합체 조립 및 연료봉 락커 제거 공정순으로 이루어진다.

골격체는 핵연료 집합체에서 각 연료봉들 간의 간격을 유지시켜 주는 역할을 하는 조립체로서 상·하단고정체, 지지격자, 안내관 및 계측관 등으로 구성되며, 안내관이 안내관 슬리브/안내관 나사 및 안내관 마개/안내관 너트로서 상·하단 고정체와 나사로 결합되며, 지지격자 슬리브와의 점용접에 의해 지지격자와 결합됨으로써 골격체가 만들어진다.

완성된 골격체에 연료봉을 장입하기 전에 장입시 연료봉의 표면이 손상되는 것을 방지하기 위하여 락커 도포를 하며, 연료봉 장입전에 기조립된 상·하단고정체를 분리시킨다. Pull-in 방식에 따라 연료봉들을 골격체로 장입시킨후 상·하단고정체를 재조립한 다음 연료봉에 도포된 락커를 제거하기 위한 세척을 함으로써 최종 핵연료 집합체가 만들어진다.



〈그림 2〉 DOM 터미널 배치도

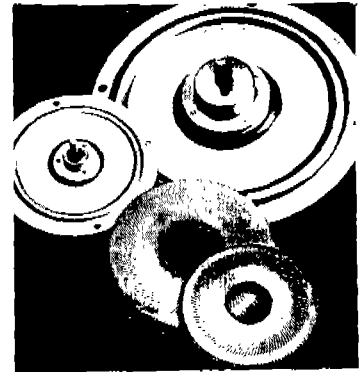
# 海外技術

## 水平 모터 開發

英國産業뉴스 제공

저도(低度) 저항성의 범용 인책모터를 한 영국회사가 저렴한 가격으로 공급하기 시작했다. 프린티드 모터사가 개발한 'GPM Pancake Series'는 기계적으로는 보조 전동기의 간단한 모형으로, 편리한 원통형 회전자에 감긴 코일은 비자기(非磁氣) 디스크에 얹혀진 플랫폼체로 대체된다. 축(軸) 방향은 높은 보자력(保磁力) 준강자성체 시스템에 의해 생성되고, 축장(軸場)의 짧은 길이로 대단히 낮은 포로파일을 갖게 한다. 회전자의 자기재료의 부재는 매우 낮은 속도로 토크가 자유롭게 작동되는데, 이와는

달리 직류모터는 낮은 속도에서 정류자(整流子) 구멍의 조정으로 작동한다. 이것은 회전능률이 직접적으로 회전자 전류에 비례하는 것을 의미하고, 포화상태의 제한이 없으며, 시중의 전부하형보다 5배까지 맥동율(脈動率)을 높일 수 있다. 짧은 기계 반응시간 상수는 특히 모터가 단형(段形)과 증량형의 응용부분에 적합하도록 해 준다. 높은 출력 회전능률과 광범위한 속도계는 모터가 특별히 부하에 즉시 결합되도록 한다. GPM모터는 출력이 32에서 165W로 5개의 형이 가능하다.



### 3. 核燃料 検査概要

#### 가. 품질보증 시스템

핵연료의 완벽한 품질을 보증하기 위하여 국내 원자력법 및 미연방 규제법(10 CFR 50 Appendix B)에 규정된 18항목의 요건에 의거하여 작성된 품질보증 계획서 및 관련 제반 절차서에 따라 핵연료 품질보증 업무를 수행하고 있다.

국내 원자력법 및 미연방 규제법에서 규정하고 있는 18항목은 1) 조직, 2) 품질보증 계획, 3) 설계 관리, 4) 구매문서 관리, 5) 절차서, 지시서 및 도면, 6) 문서 관리, 7) 재료, 장비 및 용역 구매 관리, 8) 부품 및 구성품의 식별 및 관리, 9) 특수공정 관리, 10) 검사, 11) 시험 관리, 12) 측정 및 시험장비 관리, 13) 취급, 보관 및 포장, 14) 검사, 시험 및 조작, 15) 부적합 재료, 부품 및 구성품, 16) 시정조치, 17) 품질보증 기록, 그리고 18) 품질보증 감사 등으로 구성된다.

#### 나. 핵연료 시험 및 검사

핵연료의 시험 및 검사는 관련 시방서의 요구 조건에 따라 시험 검사계획서를 작성하여 수행한다.

시험 및 검사의 종류에는 외주업체에서 원자재 및 부품을 제조시 실시하는 외주업체 방문검사(Source Inspection),  $UO_2$  분말, 원자재 및 부품의 인수시 실시하는 수입검사(Receiving Inspection), 소결체, 연료봉, 안내관, 지지격자, 골격체 및 집합체 제조중에 실시하는 중간검사(In-Process Inspection), 각 부품의 제조가 완료된 후에 실시하는 최종검사(Final Inspection), 그리고 핵연료 출하시 실시하는 포장 및 출하검사(Packing and Shipping Inspection)

등이 있다.

시험 및 검사 방법으로는 치수 및 육안검사, 화학분석, 재료시험, 비파괴시험 등이 있는데 치수 및 육안검사는 소결체, 연료봉, Zry관, 지지격자, 상·하단 고정체, 골격체, 집합체 등 모든 재료 및 부품에 대해 전수검사로 실시하고 있으며, 화학분석은  $UO_2$  분말은 Lot 별로, 기타 원자재에 대해서는 업체 자격 인증시 비주기적으로 실시한다.

재료시험은 연료봉, 지지격자, 상·하단 고정체 및 골격체에서의 용접부위와 원자재의 기계적 성질을 검사하기 위한 것으로서 인장시험, 경도시험, 부식시험, 현미경 조직시험 등이 있다. 그리고 비파괴 시험으로는 각종 튜브 및 봉에서의 내·외부 결함을 탐상하는 초음파 탐상시험(Ultrasonic Test), 상·하단고정체의 용접부위, 압축 스프링 및 봉에서의 표면 결함을 탐상하는 액체침투 탐상시험(Dye Penetrant Test), Cs 137 및 Cf 252 Source를 조사하여 연료봉 내부에서의 소결체간의 간격, 밀도, 농축도 및 스프링 유무 등을 검사하는 연료봉 조사시험(Rod Scanning Test), 그리고  $5 \times 10$  Torr의 진공 상태에서 연료봉의 헬륨 가스 누출 상태를 검사하는 헬륨 누출시험(He Leakage Test) 등을 한핵에서는 실시하고 있으나, 차후에는 방사선 투과시험(Radiographic Test) 및 와전류 탐상시험(Eddy Current Test) 등을 추가시킬 예정이다.

핵연료의 시험 및 검사를 위하여는 자동화된 시험 및 검사장비를 사용하고 있는데 시험 및 검사 결과는 전산 시스템에 의해 평가되고 문서화되어, 각 공정에서의 시험 및 검사결과를 DOM System에 자동 또는 수동으로 입력하여 불합격된 제품이 다음 공정에 사용되는 것을 방지함으로써 핵연료에 대한 품질보증을 강화하고 있다(그림2 참조).