

## 사용후핵연료를 이용한 건식 재가공 핵연료 제조

이정원, 김용기, 이재원, 박근일

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

[jwlee3@kaeri.re.kr](mailto:jwlee3@kaeri.re.kr)

경수로형 발전소에서 사용된 핵연료를 건식 공정만으로 처리하여 중수로형 발전소의 핵연료로 재사용하고자 하는 건식 재가공 핵연료 연구가 수행되고 있다. 1999년부터 이러한 재가공 핵연료를 제조하기 위해 고리원자력 제 1 발전소에서 1986년 10월에 방출된 경수로 사용후핵연료를 이용하여 재가공 핵연료 소결체를 제조하고, 연료봉, 그리고 조사시험용 축소연료봉을 제조하는데 성공하였다. 그리고 2002년에는 해외 조사시험을 위한 조사시험용 연료봉 제조를 위해 캐나다 AECL의 협력 하에 제조 품질보증 및 관리체계를 구축하고 제조공정 및 제품에 대한 품질보증 및 인증을 얻었다. 본 건식 재가공 공정의 특징으로는 사용후핵연료를 취급해야 하기에 그 특성상 고방사성을 가짐으로 모든 작업공정이 핫셀이라는 차폐시설에서 원격으로 수행되어야 하며, 특성 분석 및 장비관리의 어려운 점이 있다. 그리고 사용후핵연료 소결체를 재소결 가능한 분말로 만들기 위해서 산화-환원(oxidation and reduction of oxide fuels : OREOX) 공정을 채택하고 있으며, 열적, 기계적 처리공정만을 통해 재가공 핵연료를 제조함으로써 민감물질의 전용을 최소화하여 핵확산저항성이 높은 공정기술로 평가받고 있다. 본 논문에서는 건식 재가공 제조공정 기술 확립과 최적화를 위해 AECL의 협조 하에 수행된 품질 보증 및 관리 시스템의 개발과 제조공정 자격화, 그리고 자격화된 공정기술을 적용하여 수행된 8회의 연속 재가공 실험결과에 대해 기술하였다.

조사시험을 위해 핵연료 생산 공급자는 조사시험 수요자에게 생산된 핵연료 제품이 그들이 요구하는 기술 및 품질 사양을 만족시키고 있음을 확신시켜 주기 위해 품질보증(Quality Assurance; QA) 시스템을 가지고 있어야 한다. 재가공 핵연료의 품질보증 시스템 구축을 위해 캐나다 AECL의 협조를 받아 CAN3-Z299.2-85의 캐나다 기준을 기초로 하여 Quality Assurance Manual과 관련 품질보증 문서들을 표 1과 같이 개발하고 승인을 얻었다. 이로써 재가공 핵연료를 위한 품질보증 체계가 확립되고 이 품질보증시스템에 의거하여 제조된 재가공 핵연료는 캐나다 AECL의 원자로에서도 조사시험을 할 수 있게 되었다. 그리고 재가공 핵연료 제조공정의 자격화에 앞서 3차례 예비 자격화 시험을 통해 제조공정 흐름도를 수립하고, 제조공정 각 각에 대한 최적의 공정조건을 수립하였다. 그리고 3차례 자격화 시험을 실시하여 수립된 제조공정 흐름도와 공정조건으로 핵연료 기술사양을 만족하는 재가공 핵연료를 성공적으로 제조할 수 있었다. 표 2는 자격화 시험에서 확립된 제조공정별 최적 조건을 보여준다. 이어서 자격화된 제조공정에 따라 8차례 연속적으로 재가공 핵연료 소결체를 제조하였으며 그리고 그 제조 특성을 분석하였다. 산화/환원 처리한 재가공 핵연료 분말의 겉보기 밀도는  $0.63 \sim 0.84 \text{ g/cm}^3$  범위이며, 충전밀도는  $1.04 \sim 1.27 \text{ g/cm}^3$  범위였다. 그리고 미분쇄 후에는 분말밀도가 3배 정도 증가하였다. 소결체의 소결밀도는  $10.278 \sim 10.379 \text{ g/cm}^3$  범위로 핵연료의 요구사양을 잘 만족하였다. 그리고 소결체의 미세 입자크기는  $14.6 \sim 14.9 \mu\text{m}$  범위였다. 그리고 화학분석 결과 세슘의 함량이 1%이하로 제조 열처리

리 과정 중 거의 모두 증발됨을 알 수 있었다.

본 연구 결과, 결론적으로 3차례 예비 자격화 시험과 자격화 시험을 통해 건식 재가공 핵연료 제조기술은 잘 확립되었으며, 또한 제조 품질보증 체계를 구축함으로써 이에 따라 제조된 재가공 핵연료는 캐나다 AECL의 원자력에 공급할 수 있는 자격을 획득하였다. 그리고, 8차례 연속 제조 작업을 통해 90%이상의 생산 성공율을 보여 실용화 기술로도 발전 가능성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

표 1 건식 재가공 핵연료 제조 품질보증 문서 목록

구분	품질보증 관련문서
공급자 문서 (Supplier's Documents)	QAM : Quality Manual for DUPIC fuel fabrication MITP : Manufacture, Inspection and Test Plan ITP : Inspection and Test Plan for DUPIC fuel QR-NRU-01 : Qualification Report of Sintering Process WQR-NRU-01 : Welding Qualification Report
구매자 문서 (Customer's Documents)	Procurement Document Drawing Technical Specification

표 2 건식 재가공 핵연료 제조공정별 최적조건

순번	제조공정	최적 공정조건
1	산화/환원	· 산화 : 450 °C, 2시간, 공기, 5.5 L/min · 환원 : 700 °C, 7시간, Ar/4%H <sub>2</sub> , 13L/min · 가열속도 : 4 °C/min
2	미분쇄	· 분쇄시간 : 20 분 - Zirconia ball - 5 mm(φ) - 450 rpm, 10 분 + 600 rpm, 10 분
3	혼합-1	· 0.2 wt% zinc stearate · 혼합 20분
4	예비압분	· 62 Mpa
5	과립화	· 체(Sieve) #18 (1 mm 간격)
6	혼합-2	· 0.2 wt% zinc stearate · 혼합 20분
7	압분	· 최종압분 : < 130 MPa
8	탈락스	· 온도/시간 : 800°C/3시간 · 분위기 : Ar-4%H <sub>2</sub> flow rate 4 L/min · 가열속도 : 4 °C /min
9	소결	· 소결온도/시간 : 1800°C/10시간 · 분위기 : Ar/4% H <sub>2</sub> , 8.0 L/min · 가열속도 : 5 °C /min