

정상운전시 DFDF 시설의 환경영향평가

Environmental Effects of DFDF Normal Operation

박장진, 이호희, 신진명, 김종호, 양명승
한국원자력연구소

요 약

핵비확산성 건식공정 산화물핵연료는 경수로 사용후핵연료를 재가공하여 원전에서 사용할 수 있는 핵연료로 재가공하는 개념으로, 이 실험은 고방사능 물질인 사용후핵연료를 초기물질로 사용하므로 고방사능 차폐시설인 핫셀 내에서 원격으로 조작되어야 하는 기술적 특성 때문에 이 실험은 적절한 공학적 요건과 안전성을 갖춘 전용시설(DFDF: DUPIC Fuel Fabrication Facility)을 구축하여 '00년 1월부터 실제 사용후핵연료를 사용한 실험을 수행하고 있다. DFDF에서 최대 약 50 kgU/yr의 사용후핵연료를 사용하여 건식공정 산화물핵연료 제조시험을 수행할 때 IMEF 시설의 방사선 환경영향에 미치는 영향을 검토하였다. 분석한 결과 DFDF 시설의 운영으로 인한 영향은 모두 관련법규를 만족할 뿐 아니라 IMEF 시설의 설계기준도 만족하는 것으로 분석되었다.

Abstract

A DUPIC nuclear fuel is a newly developed fuel for CANDU reactors based on the concept of refabrication of spent PWR fuel by a dry process. Because a spent PWR fuel, a highly radioactive material, is used as a starting material, the experimental verification of DUPIC nuclear fuel fabrication requires an appropriate facility which should satisfy engineering requirements and guarantees safe operation. DUPIC nuclear fuel development team modified M6 hot-cell in IMEF to construct the dedicated facility(DFDF) for the experiment. The experiment with spent PWR fuel have been conducted since January of 2000. Environmental effects of DFDF normal operation have been investigated when DUPIC nuclear fuel is fabricated with the maximum capacity of 50 kg U/yr. The analysis results of the radiological safety of DFDF facility have shown that both national regulation limit and IMEF design criteria are satisfied.

1. 서 론

건식공정 산화물핵연료는 상용원전에서 배출된 경수로 사용후핵연료를 차폐시설 내에서 건식 재가공공정을 통해 산화물핵연료로 재가공하는 개념으로 조사재시험시설(IMEF)의 M6 핫셀에 건식공정 산화물핵연료 전용 제조시험시설(DFDF: DUPIC Fuel Fabrication Facility)을 구축하여 제조시험이 수행되고 있다. 건식공정 산화물핵연료 제조시험을 수행하고 있는 IMEF 시설의 활용계획 확대에 따라 IMEF 지하에 위치한 예비 핫셀을 차세대관리종합공정실증시험용 핫셀로 개보수할 예정이다. IMEF 핫셀에서 차세대관리종합공정실증시험을 위해서는 증설되는 시설을 포함하여

IMEF 시설의 안전성을 재평가하여 규제기관에 IMEF 시설의 건설·운영 변경허가를 획득할 예정이다. 이러한 상황변화에 따라 DFDF에서 최대 50 kgU/yr의 사용후핵연료를 사용하여 건식공정 산화물핵연료 제조시험을 수행할 때 정상운전 시 환경영향에 의한 최대 개인피폭선량 등을 분석한 후 IMEF 시설의 방사선 환경영향에 미치는 영향을 검토한다.

2. 환경영향평가 대상시설 및 기준공정

건식공정 산화물핵연료 제조시험은 조사후시험시설(PIEF)에 저장되어있는 경수로 사용후핵연료 중의 일부를 사용하여 수행한다. 사용후핵연료로부터 핵연료봉 인출, 절단 등은 PIEF에서 수행하고, 절단연료봉을 이용한 slitting, 탈피복, 산화/환원(OREOX)에 의한 분말제조공정, 소결체 제조공정, 연료봉 및 연료집합체 제조공정은 조사재시험시설(IMEF)의 M6 핫셀(DFDF 시설)에서 수행한다.

건식공정 산화물핵연료 제조시험을 위한 제반 공정설비 및 그 부속장치가 설치되는 M6 핫셀은 내부 크기가 2 m(폭) × 23.8 m(길이) × 4 m(높이)이고, 알파-감마셀로 설계되었다. M6 핫셀의 내부는 두께 3 mm의 스테인레스 스틸판으로 라이닝이 되어 제염이 용이하도록 되어 있고, 방사선 차폐를 위하여 벽체와 바닥 및 천장은 중량 콘크리트 구조물로 건설되어 있다. 벽체 두께는 1.1 m, 천장의 두께는 0.9 m로 내진 1등급 구조물로 설계되었으며, 셀 전면부에는 1.06 m(폭) × 0.84 m(높이) 크기의 방사선 차폐창이 셀의 길이 방향으로 10 개가 설치되어 있다. 차폐창 상부 좌우에는 원격조작기(M/S manipulator)가 한 쌍씩 설치되어 있어 9 kg까지의 하중을 취급할 수 있다.

M6 셀의 환기계통은 시간당 12 회 이상의 환기횟수를 갖고, 부압이 -25~-40 mmAq이며, 개구면의 면속도가 0.5 m/s 이상이 되도록 설계되어 있다. 핫셀에는 공정 배기체 처리장치와 핫셀 환기계통이 설치되어 있다. 핫셀 배기계통은 셀내 필터(예비필터 + HEPA 필터)와 배기팬실 필터(HEPA 필터 + 활성탄필터 + HEPA 필터)로 구성되어 있다[7, 8].

건식공정 산화물핵연료 제조시험에 따른 방사선 환경영향에 주로 영향을 미치는 휘발성 및 준휘발성 방사성기체와 부유분진에 영향을 미치는 고온가공공정인 OREOX와 소결공정의 특성은 다음과 같다. 경수로 사용후 핵연료봉의 표면을 절개한 후에 산화공정을 통해 사용후핵연료 분말을 추출하고 산화온도 450 °C, 환원온도 700 °C의 OREOX 공정을 3 회 수행하여 건식공정 산화물핵연료 원료분말을 제조한다. OREOX 공정을 거친 분말을 밀링, 성형압분한 후 이 압분체를 환원성 분위기(Ar-4%H₂)에서 1,750 °C로 4~7 시간동안 소결한다[1].

3. 기준 사용후핵연료 및 공정중 누출량

가. 기준 사용후핵연료

건식공정 산화물핵연료 제조시험은 PIEF 저장수조에 저장되어 있는 경수로 사용후핵연료중에서 1986년에 고리 1호기에서 방출된 G23 경수로 사용후핵연료 집합체에 포함된 핵연료봉의 일부를 인출하여 사용한다. 본 평가에서는 ORIGEN II code를 이용하여 초기농축도 3.21 w/o, 연소도 34,770 MWD/MTU, 냉각기간 13 년인 사용후핵연료의 핵종별 방사능 함유량을 계산하여 그 결과를 이용한다. 현재 DFDF에서는 연간 10 kgU이하의 소량 사용후핵연료를 사용하여 시험을 수행하고 있지만(실제 '01년 1월부터 '03년 8월까지 약 17 kgU 사용) 본 평가에서는 보수적으로 연간 최대사용량을 50 kgU으로 가정한다[1, 2].

나. 공정 배기체 처리장치

건식공정 산화물핵연료 제조시험공정은 산화·환원에 의해 분말을 제조하고 이 분말을 펠렛으로 성형하여 소결하는 고온처리공정을 포함하고 있으므로 공정장치의 운전중에는 휘발성 및 준휘발성 방사성 기체와 부유분진이 발생할 수 있다. 이러한 기체상 및 부유분진 방사성물질로 핫셀오염을 방지하고 외부환경으로의 누출을 최소화하기 위해 OREOX 공정계통과 소결공정계통에는 특

성에 맞는 방사성폐기물 처리공정 장치가 설치되어 있다.

건식공정 산화물핵연료제조공정 중 산화·환원 공정중에 발생하는 핵종제거를 위한 배기체 처리계통은 온도구배관(thermal gradient tube, TGT)을 이용하여 준휘발성 핵종을 응축시켜 처리한 다음에 미립자제거장치인 스테인레스스틸로 된 metal wool을 통하여 부유입자를 제거하고, silver impregnated zeolite를 이용한 요오드 제거장치로 I₂를 포집하고 이어 molecular sieve 5A를 이용한 삼중수소 흡수장치로 HTO를 제거하도록 설계하였다. 최종적으로 HEPA 필터를 설치하여 이를 통과한 후 다시 한번 핫셀의 배기체 처리계통을 통해 환경으로 방출한다.

건식공정 산화물핵연료제조공정 중 소결 공정중에 발생하는 핵종을 제거하기 위한 배기체 처리계통은 석탄회 세라믹필터를 이용한 세습포집장치로 방사선적 위험도가 높은 세습을 안정한 폴루사이트 형태로 포집한다. 은침착 제올라이트를 사용한 요오드제거장치에서 배기가스중 요오드화합물을 제거한 후 이어 온도구배관을 이용하여 준휘발성핵종을 응축시킨 후 최종적으로 HEPA 필터를 통과한 후 다시 한번 핫셀의 배기체 처리계통을 통해 환경으로 방출한다.

다. 핫셀 배기체 처리계통

건식공정 산화물핵연료 제조공정에서 발생한 기체상 및 부유 방사성물질은 1차 공정 배기체 처리장치에서 처리 한 후 핫셀 배기계통으로 보내 다시 한번 처리한 후 하나로 굴뚝을 통해 대기 로 방출한다. 핫셀 배기계통은 셀내 필터(전처리필터 + HEPA 필터)와 배기팬실의 2차 필터(HEPA 필터 + 활성탄 필터 + HEPA 필터)로 구성된다. HEPA 필터는 0.3 μm 미립자에 대해 최소 99.97 %의 제거효율을 가지며 활성탄 필터는 CH₃I에 대한 제거효율이 최소 99.75 %이다[7, 8].

4. 방사선원향 결정

건식공정 산화물핵연료 제조공정에서 발생한 기체상 및 부유 방사성물질은 공정 배기체처리장치, 셀내필터 및 배기팬실 필터를 거쳐 하나로의 스택을 통해 환경으로 방출된다. 환경으로의 방출량을 결정하기 위해 우선 핵종별 방출량과 배기체 처리장치를 통과한 후의 방사선원을 산출한다. 건식공정 산화물핵연료 제조공정중 누출되는 방사성물질의 핵종 및 양을 산출하기 위하여 각종 문헌 및 실험자료의 검토를 통해 예상되는 누출율을 표 1과 같이 결정하였다[3, 4, 5].

표 1. 기체상 방사성핵종의 종류 및 누출율

핵 종	산화·환원공정 (%)	소결공정 (%)	비 고
H	100	-	약 50%는 피복관과 결합되어 있음
He	100	-	
Br	100	-	
Kr	100	-	
I	60	40	
Xe	100	-	
Ru	2	-	
Cs	2	98	
Tc	20	-	
Cd	-	100	
Se	10	90	
Sb	-	60	
Rb	5	95	
Te	10	90	
C	100	-	

5. 환경으로의 방출량 계산

공정중에 배출되는 방사성핵종은 각 공정의 배기체 처리장치를 거쳐 제거된 후 핫셀의 배기계통으로 배출되고 이들 배기체는 다시 핫셀의 배기계통을 통해 환경으로 방출된다. 이때의 방출량은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2. 환경으로의 방출량 계산

핵종	배기계통으로의 방출량(Ci)	HEPA 필터 제거율	활성탄필터 제거율	환경으로의 방출량(Ci)
H-3	2.00E-02			2.00E-02
C-14	3.00E-02			3.00E-02
Se-79	6.41E-06	3.00E-04		1.92E-09
Kr-85	2.42E+02			2.42E+02
Rb-87	3.35E-11	3.00E-04		1.00E-14
Tc-99	4.14E-05	3.00E-04		1.24E-08
Ru-106	1.94E-06	3.00E-04		5.81E-10
Cd-113M	4.65E-04	3.00E-04		1.40E-07
Te-125M	1.92E-03	3.00E-04		5.76E-07
Sb-125	4.73E-03	3.00E-04		1.42E-06
Sb-126	1.02E-06	3.00E-04		3.05E-10
I-129	1.65E-05		2.50E-03	4.13E-08
Cs-134	9.30E-05	3.00E-04		2.79E-08
Cs-135	1.98E-08	3.00E-04		5.95E-12
Cs-137	3.57E-03	3.00E-04		1.07E-06
합계				2.42E+02

6. 정상운전시 환경영향 평가

정상운전시 환경영향평가를 위하여 다음과 같이 가정하였다. 건식공정 산화물핵연료 제조시험중에 발생한 휘발성 및 준휘발성 핵종은 핫셀내의 공정배기체 처리장치, 셀내 필터 및 배기팬실 필터를 통해 하나로 굴뚝을 통하여 시설 외부로 방출된다. 방출된 방사성물질은 바람을 타고 환경으로 확산되고, 일부는 확산되면서 지표면에 침적된다. 환경으로 방출된 방사성물질은 인근 주민에게 직접, 간접으로 방사선피폭을 야기한다. 피폭경로는 대기로 방출된 방사능 운에 의한 직접피폭, 방사능 운의 호흡에 의한 내부피폭, 방사성물질의 침적에 의해 오염된 농작물의 섭취를 통한 내부피폭 및 오염된 토양으로부터의 외부피폭 등이 있다[6~8].

가. 대기확산인자 및 침적인자

공정배기체처리장치 및 핫셀배기체처리장치를 통과하여 대기로 방출된 기체상 방사성물질은 주변의 기상 및 지형조건 등에 따라 대기를 통하여 이동·확산된다. 연간 평균 대기확산인자(이하 "대기확산인자")는 방사성물질이 대기중에 확산되는 정도를 나타내며, 연간 평균 침적인자(이하 "침적인자")는 대기중 방사성물질이 중력등에 의해 지표에 침적되는 정도를 나타낸다. 대기확산인

자 및 침적인자 평가는 미국 원자력규제위원회(US NRC)의 규제지침(Regulatory Guide) 1.111에 제시된 모델에 준한다.

본 평가에서는 한국원자력연구소 부지에 위치한 기상관측탑에서 측정된 연간 기상자료의 통계치 및 방사성물질의 방출특성자료를 사용하여 평가한 “대덕 원자력관련시설의 운영중 방사선 환경영향평가(2002년보)” 자료를 이용하였다. 이 보고서에서는 대기확산인자의 평가를 위해 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.111에 근거하여 개발된 전산프로그램 XOQDOQ를 사용하였다. 하나로로 경우 방출유형특성상 고도방출에 해당하며, 기상관측탑의 67 m 높이에서 측정된 자료를 사용하여 평가한다.

나. 방사선 피폭선량 평가

최대피폭지점에서의 피폭경로별 피폭선량은 미 규제지침 1.109에 따라 평가하며, 최대개인 피폭선량은 이들 모든 피폭경로에 대한 피폭선량의 합이다. 최대개인이란 부지주변 주민중 생활습관, 음식물 섭취량, 주거지 등 여러 조건이 방사능 피폭을 가장 많이 받도록 가정된 가상개인(최대개인)을 말한다. 피폭선량계산은 미 규제지침서 1.109의 모델을 기준으로 한국의 실정에 맞게 전산화한 GASDOS 전산프로그램을 사용하였다. 개인의 소비량과 선량환산인자는 연령에 따라 변하는 값으로 이를 고려하기 위하여 주민을 성인(17 세 이상), 십대(17 세 미만 11 세 이상), 소아(11 세 미만 1 세 이상) 및 유아(1 세 미만)로 구분하고, 피폭을 받는 장기는 전신, 소화기관, 뼈, 간, 신장, 갑상선, 폐 및 피부가 고려된다.

주민피폭선량의 계산은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.111에 근거하여 개발된 전산프로그램 GASPARD를 한국원자력안전기술원(KINS)에서 우리나라의 실정에 맞게 수정·보완한 GASDOS를 사용하였다. 최근 과기부 고시에서 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고(ICRP 60)를 법제화하면서 권고의 평가체제를 반영한 선량환산인자를 적용하여 평가하도록 규정하고 있다. 따라서 본 평가에서는 권고에 따른 선량환산인자를 적용하기 위해 GASDOS 전산프로그램을 수정·보완하여 적용하였다.

하나로를 통해 방출되는 주요 핵종의 특성을 고려하여 본 평가에서는 유효선량과 상대적으로 선량환산인자가 높은 중요 장기에 대한 등가선량만 고려하여 결과를 제시하였다. 방사능운에 의한 외부피폭의 경우 실효선량은 국제원자력기구의 기본안전기준(IAEA safety series 115)에 제시된 선량환산인자를, 공기중 흡수선량과 피부선량은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 값을 적용하였다. 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우에는 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 선량환산인자 값을 적용하였다. 국제방사선방호위원회와 국제원자력기구에서는 6개의 연령군으로 분류하고 있으나 본 평가에서는 성인에 대한 피폭선량만을 평가하였다.

GASDOS 전산프로그램을 이용하여 건식공정 산화물핵연료 제조공정에서 하나로 스택을 통해 환경으로 방출된 방사성물질로 인한 부지 주변의 개인최대피폭선량과 설계기준 과의 비교는 표 3에 나타낸 바와 같다. 표 3에서 알 수 있듯이 건식공정 산화물핵연료 제조시험으로 인한 정상운전 시 일반주민에 대한 피폭선량은 설계 기준을 모두 만족시키는 것으로 평가되었다.

표 3. 설계기준과 DFDF 평가결과의 비교

피폭 구분	단위	설계 기준	DFDF 평가결과	%
감마선에 의한 공기흡수선량	mGy	1.00E-01	1.73E-04	0.17
베타선에 의한 공기흡수선량	mGy	2.00E-01	1.96E-02	9.80
외부피폭에 의한 유효선량	mSv	5.00E-02	2.09E-04	0.004
외부피폭에 의한 피부등가선량	mSv	1.5E-01	1.36E-02	9.07
인체장기 등가선량(내부피폭)	mSv	1.5E-01	1.24E-03	0.83

7. 결 론

핵비확산성 건식공정 산화물핵연료는 실제 경수로 사용후핵연료를 재가공하여 원전에서 사용할 수 있는 핵연료로 재가공하는 개념으로, 이 실험은 조사재시험시설의 M6 핫셀을 개보수하여 전용시설(DFDF: DUPIC Fuel Development Facility)을 확보하여 규제기관의 인허가를 득한 후 2000년 1월부터 실제 사용후핵연료를 사용하는 건식공정 산화물핵연료 제조시험을 수행하고 있다.

본 평가에서는 DFDF 시설에서 연간 최대 50 kg의 사용후핵연료를 사용하여 실험을 수행할 경우, IMEF의 환경영향 설계기준에 어느 정도 영향을 미치는지를 분석하였다. 정상운전 시 환경영향에 의한 최대 개인피폭선량과 과기부 고시 2002-23호(방사선방호 등에 관한 기준) 설계기준과 비교 하면, 감마선에 의한 공기흡수선량은 설계기준의 0.17%,

베타선에 의한 공기흡수선량은 설계기준의 9.8%, 외부피폭에 의한 유효선량은 설계기준의 0.004%, 외부피폭에 의한 피부등가선량은 설계기준의 9.07%, 인체장기 등가선량(내부피폭)은 설계기준의 0.83%로 평가되어 모두 기준값을 만족하는 것으로 분석되었다.

(감사의 글) 본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

(참고 문헌)

1. 이정원 외, DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발, KAERI/RR-2034/ 2001, 2002
2. 박장진 외, DUPIC 핵연료시설 기술개발, KAERI/RR-2221/2001, 2002
3. 신진명 외, DUPIC 핵연료 제조공정에서의 배기체처리계통 예비안전성분석, KAERI/TR-1643/2000
4. J.D. Sullivan and D.S. Cox, AECL's Progress in Developing the DUPIC Fuel Fabrication Process, AECL Chalk River Laboratories
5. 이호희 외, AIROX 공정에 의한 사용후핵연료의 재순환, KAERI/ TS-82/99, 1999
6. 황원태 외, 대덕 원자력관련시설의 운영중 방사선 환경영향평가, KAERI/CR-87/99, 1999
7. 하나로 안전성분석보고서 변경내용(11. 4. 조사재시험시설), 2003. 07
8. 하나로 안전성분석보고서 개정판(11. 4. 조사재시험시설), 2000. 11
9. 원자력법, 시행령, 시행규칙
10. 과기부 고시 2002-23호(방사선방호 등에 관한 기준), 2003