

우리나라 중성자(中性子) 조사재(照射材) 핫셀시험 수요전망

Overview of Hot Cell Examination Trends for Neutron-Irradiated Materials



글 / 魯聖基
(Ro, Seung Gy)
방사선관리기술사, 한국원자력연구소 위촉연구원,
한국방사성동위원소협회 부설 동위원소교육연구원
연구위원, (주)카이텍 기술고문.
E-mail: ngrseung@kaeri.re.kr

An overview has been made for hot cell examination capabilities in some countries including Korea while a hot cell examination trend in Korea has been subjected to a review.

It is appeared that an additional hot cell facility should be timely ready in order to supplement the examination capability which is short of the existing hot cell facilities and to provide the adequate support services for the examination and its evaluation.

중성자 조사재의 국내·외 핫셀시험기능 현황과 국내의 핫셀시험수요를 검토하였다.

그 결과 부족한 시험기능을 보완하고 적기에 중성자 조사재의 시험·평가수요를 충족시키려면 핫셀시설을 조속히 추가로 확보하여야만 할 것 같으니 보인다.

1. 서론

핵연료 및 원자로 구성재의 중성자 조사(照射) 거동에 관한 자료는 원자력발전의 안전성 확보대책을 마련하는데 아주 중요하게 쓰인다. 대개 중성자 조사후(照射後) 핫셀시험[이하 “조사후시험” 또는 “핫셀시험” 이라 한다. 중성자에 쬐인 다음 시험한다고 하여 조사후시험(照射後試驗) 이라 하고, 많은 중성자에 쬐인 핵연료나 원자로 구성재는 높은 방사능을 띄고 뜨거워 이런 시료를 시험하려면 특수한 방사선 차폐구조물 속에서 다루어야 하는데 이처럼 뜨겁고 방사능이 높은 시료를 다루는 시설을 핫셀-hot cell-이라 부르며 이런 시설에서 시험하는 것을 핫셀시험이라 한다.]을 통해 이들 자료를 얻는다. 조사후시험을 거쳐 얻

은 결과를 써서 핵연료 및 원자로 구성재의 성능과 안전성을 평가하게 된다. 그리고 핵연료 및 원자로 구성재의 개량·개발, 원자로의 수명예측, 핵연료의 원자로내 효율적인 관리체계 수립, 기존 노심관리체계의 개선, 결함 핵연료 및 원자로 구성재의 결함원인 규명 및 장기저장 사용후(使用後) 핵연료 및 저장구조물 재료의 건전성 평가 등에 이들 조사후 시험결과를 기본자료로 쓴다[1].

따라서 중성자 조사재에 대한 핫셀시험·평가능력의 확보는 원자력 발전의 안전성을 확보하는 관건이라 볼 수 있다. 결국 이를 위한 시험시설이 필요하다는 것을 뜻한다. 앞에서 논의한 바와 같이 핵연료 및 원자로 구성재의 개량·개발뿐만 아니라 결함 발생시 그 결함원인의 규명과 재발방지 대책을 강구하는데 이 핫셀시설이 쓰인다고 하여 이런 시설을 핵연료병원 또는 원자로병원이라고도 부른다.

일반적으로 원자로에서 연소한 핵연료[핵연료가 중성자를 받아 우라늄-235와 같은 핵분열물질

이 줄어들는데 이것은 연소(燃燒)라 하며 중성자를 받는 것 또는 쬐이는 것을 조사(照射)라고 한다]를 포함하여 중성자를 많이 받은 원자로 구성재는 높은 방사능을 띠기 때문에 이들을 안전하게 다루면서 시험·평가할 수 있는 것은 핫셀시설이다[2].

우리나라 한국원자력연구소에는 프랑스 차관사업의 하나로 건설[3]한 조사후시험시설(1985년 준공)과 국내 자력으로 설계·건설[4]한 조사재 시험시설(1993년 준공)이라 부르는 핫셀시설을 운영하면서 그동안 원자력발전소의 안전운전과 관련한 각종 시료(결합핵연료, 원자로 압력용기 감시시편, 중수로 압력관, 증기발생기 전열관, 원자로 제어봉, 기타 원자로 구성부품 등)를 시험·평가해 오고있다. 동시에 이들 두 핫셀시설에서는 사용후핵연료 장기 안전저장기술개발, 핵연료 개량·개발, 핵연료 노심(爐心)관리기술 개선·개발, 고준위방사성폐기물 처분기술개발, 핵연료 성능평가 등에 관련된 다양한 시료를 시험·평가하고 있다. 이들 핫셀시설 가동과 더불어 사용후 핵연료 및 원자로 구성재를 원자력 발전소에서부터 핫셀시설까지 안전하게 운반할 수 있는 특수 수송용기와 수송기술을 개발하게 하는데도 크게 기여하였다.

그러나 현존 우리나라 핫셀시설에는 아직도 시험요구를 충족시키지 못하는 시험항목이 있을 뿐만 아니라 시험 수요물량도 크게 증가하는 추세에 있어 이를 타개하기 위한 추가 핫셀시설의 확보가 시급한 상황이다.

이에 따라 본 고에서는 국내·외 핫셀시험기능 현황을 비교한 후 조사후핵연료[원자로에서 전력 생산에 또는 원래목적까지 연소시킨 후 원자로 밖으로 꺼낸 것을 "사용후 핵연료"라 하는데 반해 "조사후핵연료(照射後核燃料)"란 시험목적 또는 다른 원인으로 완전히 연소시키지 않고 원자로에

서 꺼낸 것을 말한다]를 포함한 중성자 조사재의 핫셀시험 수요를 전망해 보고 그 결과에 따라 보완용 추가 핫셀시설의 필요성을 검토해보고자 한다.

2. 국내·외 핫셀시험기능 현황

원자력기술 선진국은 중성자 조사재의 시험·평가를 위한 핫셀시설 뿐만 아니라 시험기능도 완벽하게 갖추고 있음을 <표 1>을 통해 알 수 있다 [4~5].

<표 1> 중성자조사재의 핫셀시험·평가 기능 (유:○, 무:-)

구 분 / 국 별	우리 나라	미국	일본	프랑스
핵연료 집합체				
-인수·저장	○	○	○	○
-외관검사	○	○	○	○
-초음파시험	-	○	○	○
-계원측정	○	○	○	○
-감마스캐닝	○	○	○	○
-해체 및 핵연료봉 인출	○	○	○	○
-와전류시험	○	○	○	○
핵연료봉				
-외관검사	○	○	○	○
-계원측정	○	○	○	○
-축방향 감마스캐닝	○	○	○	○
-X-선 라디오그래피	○	○	○	○
-와전류시험	○	○	○	○
-핵분열가스 포집	○	○	○	○
-핵연료봉 절단	○	○	○	○
-누설검사	-	○	○	○
-피복관-연료소자간 간격측정	-	○	○	○
-화학성분분석	○	○	○	○
중성자 조사재(핵연료 포함)				
-급속조직시험				
· 시편준비	○	○	○	○
· 방사선사진촬영 (autoradiographic test)	-	○	○	○
· 광학현미경시험	○	○	○	○
· 전자현미경시험	○	○	○	○
-물리적·기계적시험				
· 밀도측정	○	○	○	○
· 열팽창시험	○	○	○	○
· 열전도도측정	-	○	○	○
· 부식시험	-	○	○	○
· X-선 회절시험	-	○	○	○
· 소형 편치시험	-	○	○	○
· 인장압축시험	○	○	○	○
· 소형인장시험	-	○	○	○
· 경도시험	○	○	○	○
· 미세경도시험	○	○	○	○
· 크립시험	-	○	○	○
· 파열시험	○	○	○	○

우리나라에서는 두 개 핫셀시설의 시험능력을 극대화하기 위하여 연구개발 노력을 기울인 결과 상당한 수준에 이르게 되었다.

이미 앞에서 소개하였던 바와 같이 사용후핵연료를 포함한 중성자 조사재의 수송체계와 수송기술을 확보하게 되었고 수중에서 사용후핵연료 집합체에 대한 감마스캐닝(이 시험결과로부터 사용후핵연료의 초기능축도, 연소도 및 냉각기간을 알 수 있다.) 기술을 개발하였다[6, 7]. 그리고 수중에서 핵연료집합체의 제원측정기술, 외관검사기술 및 핵연료 집합체의 해체기술을 개발하였다. 또한, 핵연료집합체의 상부에 부착되어 있는 홀다운 스프링강도를 0~100 mm 범위 내에서 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖고 측정할 수 있는 장치를 개발[8]하였고 해체한 사용후핵연료집합체를 다시 조립할 수 있는 장치도 개발하였다. 수중에서 해체한 핵연료집합체로부터 꺼낸 핵연료봉에 대하여 수중에서 와전류시험을 통해 결함 발생유무를 검사하는 기술도 개발하였다. 그러나 해체하지 않은 집합체 상태에서 핵연료봉의 결함유무를 확인할 수 있는 초음파시험 기능을 확보하지 못하고 있으며 사용후핵연료집합체를 핫셀내 공기 중에서 시험할 수 있는 능력을 갖추지 못하고 있다.

사용후핵연료집합체에서 꺼낸 핵연료봉에 대한 핫셀내 각종 비파괴시험기술을 개발하여 활용하고 있다. 주요시험 종목은 외관검사, 치수측정, 길이방향 연소도 분포측정, 와전류 탐상시험, X-선 라디오그래피시험 및 중성자 라디오그래피 시험이다. 치수측정 정밀도는 $10 \mu\text{m}$ (시설설계 특성 때문임)으로 $1 \mu\text{m}$ 시험수요를 만족시키지 못하고 있으며 핵연료봉의 누설검사 및 피복관-연료소자간 간격을 측정할 수 있는 기구를 아직 확보하지 못한 상태로 사용후핵연료봉의 3차원 연소도 분포를 측정할 수 있는 시험능력도 갖추지 못하고 있다.

사용후핵연료봉의 핫셀내 여러 가지 파괴시험 기술을 개발하였다. 주요 개발 시험항목은 핵분열 가스 유출량 측정 및 그 성분 분석, 핵연료 및 피복관 조직시험, 미세감마스캐닝, 밀도측정, 피복관경도시험 및 화학분석법에 의한 연소도 측정 등이다.

지금까지 개발한 중성자조사재의 물리적·기계적 특성시험기능은 밀도측정, 열팽창시험, 인장압축시험, 경도시험, 미세경도시험 및 파열시험 등이며 개발하여야 할 시험항목은 열전도도 측정, 부식시험, X-선 회절시험, 소형 편치시험, 소형 인장시험 및 크립시험 등이다.

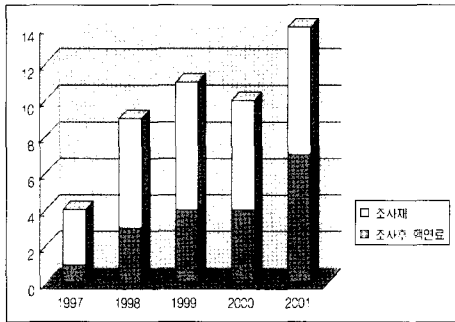
전술한 바와 같이 우리의 부족한 시험기능 중 일부를 기존 핫셀시설에 추가할 수 있을 것이나 활용공간 등의 제약으로 전부를 수용하기는 역부족이라고 한다[9]. 이것은 궁극적으로 핫셀시설의 추가 설치가 불가피하다는 것을 뜻한다.

3. 중성자 조사재의 핫셀시험 수요전망

중성자 조사재의 핫셀시험 수요는 원자력연구개발 프로그램과 관련이 있겠지만 원자력발전용량과도 무관하지 않다. 2000년 말 현재 53기[10]의 원자력발전로를 운영하고 있는 일본은 중성자 조사재의 시험·평가용으로 7개의 핫셀시험(화학처리 관련 핫셀시설 제외)을 보유하고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 우리나라는 시험기능면에서 일본의 그것과 비교할 수 없는 두 개의 시설만을 현재 운영하고 있다.

대개 원자력발전소의 가동년수가 증가함에 따라 조사후 핵연료 및 원자로 구성재의 핫셀시험·평가수요물량이 증가한다고 한다. 최근 가동개시한 원자력발전로를 뺀 10여기로부터 나오는 조사후핵연료를 포함하여 각종 원자로 구성재의 시험·평가를 2개의 핫셀시설이 담당하고 있으나

신규 발전로의 가동년수 증가에 따른 시험·평가 수요가 추가되면 이들 핫셀시설의 시험서비스 공급능력은 곧 포화상태에 이르게 될 것으로 예상하고 있다. <그림 1>에는 연도별 조사후핵연료 및 조사재의 핫셀시험 횟수 변화추이를 나타내고 있다[9]. 횟수별 시험요소시간은 수 주일에서부터 수 개월이다. 그림에서 보는 것처럼 시험횟수가 연도별로 증가함을 알 수 있다.



(그림 1) 연도별 조사후핵연료 및 조사재의 핫셀시험 횟수

더군다나 원자력발전로를 계속 증설하여 2015년에는 26기를 가동하게 되어있고[11] 이에 상응한 연구개발을 활발하게 추진한다면 현존 우리나라 핫셀시설의 용량은 중성자 조사재의 핫셀시험·평가수요를 감당하기에 역부족일 것이다.

대개 핫셀시설의 설계·건설 및 국내·외 인허가를 포함하여 정상 가동시키기까지 10여년의 기간이 필요하다. 따라서 지금부터 추가 핫셀시설의 설계·건설사업을 시작하여야만 국내 원자력발전로의 안전운전을 원활하게 지원할 수 있을 것이다.

4. 결론

국내·외 핫셀시험기능 현황과 중성자조사재의 핫셀시험수요를 검토한 결과에 따라 다음과 같은 결론을 도출한다.

기존 핫셀시설의 부족한 시험기능을 보완하고

중성자조사재의 시험평가 수요를 적기에 충족시키도록 하므로써 원자력발전로의 안전운전 및 원자력기술개발을 효율적으로 지원하기 위하여 추가 핫셀시설의 조속한 확보가 필요하다.

끝으로 여러 가지 자료와 함께 많은 조언을 해주신 한국원자력연구소 핵연료주기시험팀장 홍권표 박사께 깊은 감사를 올린다.

(원고 접수일 2001. 8. 25)

참고문헌

- [1] 노성기, "조사후핵연료시험기술", 기술개발(한국전력공사 기술개발처발간), 제2집, 225(1990).
- [2] G. Lefort, "Summary of the Symposium," in Proc. Symp. on the Design of and Equipment for Hot Laboratories organized by IAEA and held in Otaniemi, Finland, 2~6 August 1976, IAEA, Vienna, 527(1976).
- [3] Seung-Gy Ro, Key-Soon Lee and Eun-Ka Kim, "Post irradiation examination facility of KAERI," KAERI/GP-60/84(1984).
- [4] Seung-Gy Ro, Eun-Ka Kim and Key-Soon Lee, "PIE Program of KAERI," in Proc. 2nd KAERI-JAERI Joint Seminar on the PIE Technology, held in Daejeon, 20~22 Sept, 1995, KAERI-NEMAC/TR-32/95, 44(1995).
- [5] 노성기, 이기순, 허영희 및 유길성, "국내외 조사후 시험 및 시설현황 분석," KAERI/AR-274/86(1986).
- [6] Min, D. K. et al, "Determination of burnup, cooling time and initial enrichment of PWR spent fuel by use of gamma-ray activity ratios," Int. Symp. on Storage of Spent Fuel from Power Reactors, held in Vienna, 9~13 November 1998, IAEA-SM-352/9P(1998).
- [7] 박성원의, "사용후핵연료 특성 계량화기술개발," KAERI/RR-2132/2000(2000).
- [8] Y. B. Chun, E. K. Kim and S. G. Ro, "Development of underwater PWR spent fuel inspection equipment," ANS Conf. on Remote System Technology, San Francisco, 1991, Proc. 39th Conf. on Remote System Technology, Vol. 39, 95-97(1991).
- [9] 홍권표, 사적통신(2001).
- [10] 한국원자력산업회의, "2000년도 국가별 원자력발전 현황," 원자력정보 제 870호 (2001. 5. 11).
- [11] 산업자원부 홈페이지 (2001. 8. 9).