가상 대용량 재처리시설에서의 핵물질 단기전용 탐지 성능 분석

원병희*, 신희성, 안성규, 박세환, 구정회
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*wonbh@kaeri.re.kr

1. 서론

상용규모 파이로시설에서 준실시간계량관리(Near Real Time Accountancy, NRTA) 시스템 구축을 통하여 안전조치성 확보를 위해서는 기존 대용량 재처리시설에서의 핵물질 계량관리 시스템 평가가 먼저 선행되어야한다. 이미 일본의 경우에는 대용량 재처리시설인 TRP, RRP, J-MOX 시설 등에 핵물질계량관리 시스템이 구축되었거나 구축 중에 있으며 IAEA의 안전조치 승인이 완료된 상태이다. 따라서 대용량 재처리시설에서의 안전조치성 평가 결과는 매우 적절한 활용 자료로서 가치가 있다. 하지만 해당 시설의 핵물질계량관리 시스템 성능 평가 결과는 현재 공개된바가 없기 때문에 파이로시설의 핵물질계량관리 시스템 구축 시에 활용하기에는 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 800 톤 규모의 대용량 습식재처리 시설인 RRP 정보를 근거하여 가상의 재처리시설 모델을 구축하고 시뮬레이션을 통하여 핵물질 단기전용에 대하여 NRTA 시스템 평가를 수행하였다.

2. 본론

2.1 가상 대용량 재처리시설 모델 및 NRTA 모델 구축

핵물질(Pu) 전용 탐지 성능 평가를 위하여 NRTA 시스템에 기반 한 가상 재처리시설 모델을 구축하였다. 본 연구에서 구축된 모델은 RRP의 연간 처리량 및 재고 핵물질 정보를 근거하여 단순 공정모델을 수립하였다. 단순 공정모델은 재고 핵물질 측정이 수행되는 시점마다 항상 핵물질이 동일하게 존재한다고 가정한다. 또한, NRTA 시스템 모델 구축은 ITV[1] 자료를 참고하여 입력, 출력, 재고 측정지점에서의 측정 방안 및 불확도를 설정하였다. Table 1은 주요 측정 지점의 핵물질 양과 측정 불확도 정보를 나타낸다. 표에서 보듯이, 가상 재처리시설 모델은 1 년간 8,000 kg의 Pu를 처리하며 5일의 물질수지기간(Material Balance Period, MBP) 간격으로 250 일간 50번의 MUF_{NRTA} 평가를 수행한다. 주요측정지점에서의 측정 불확도는 DA을 기반하고 재고물질의 샘플링 방안이 입력 및 출력 측정지점의 샘플링 불확도보다 2배 높다고 가정하였다. 또한, 일부 재고측정지점에서는 측정 대신 추정 값을 사용한다고 가정하여 랜덤 불확도 값만 보수적으로 설정하였다. 본 연구에서는 Page's Test[2]와 GEMUF Test가 핵물질 전용탐지 알고리즘으로 해당 모델에 적용되었다. NRTA 수행 시, 평가된 MUF 불확도는 1.17 kg/MBP_{NRTA}이며, 1년간 총 누적 MUF 불확도는 34.65 kg으로 평가되었다.

Table 1. Pu Mass, Measurement Uncertainties in the Hypothetical Reprocessing Model

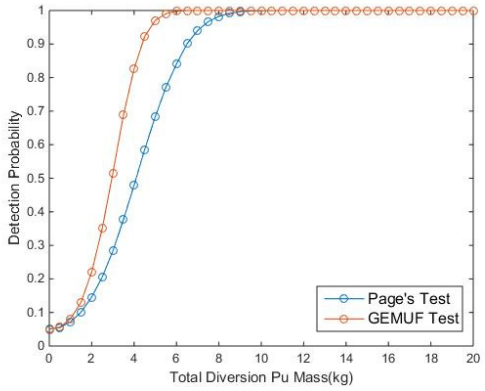
KMP	Pu Mass (kg)	Bulk (1σ, %)		Sampling (1σ, %)		Analytic (1σ, %)	
		Ran.	Sys.	Ran.	Sys.	Ran.	Sys.
Input	160 /MBP_{NRTA}	0.07	0.11	0.3	0.2	0.2	0.2
Output	160 /MBP_{NRTA}	0.07	0.11	0.3	0.2	0.2	0.2
Inventory1	55.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory2	19.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory3	3.3	1	0	0	0	0	0
Inventory4	10.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory5	8.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory6	4.26	1	0	0	0	0	0
Inventory7	10.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory8	23.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory9	4.1	1	0	0	0	0	0
Inventory10	7.5	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory11	1.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory12	12.5	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory13	22.5	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2
Inventory14	14.9	1	0	0	0	0	0
Inventory15	10.0	0.07	0.11	0.6	0.4	0.2	0.2

2.2 핵물질 전용 시나리오 수립

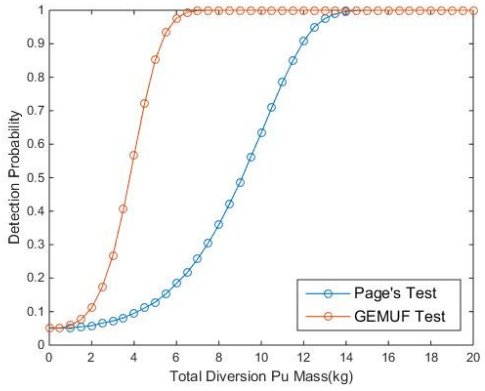
핵물질 전용 시점 따라서 3 가지의 대표 전용 시나리오를 수립하여 연구를 수행하였다. 모든 전용 시나리오는 공통적으로 5 일 동안 모든 핵물질을 단기 전용한다. 다만, 시나리오 1은 운전 시작 일부터 5 일간 전용하는 경우이며, 시나리오 2는 120 일부터 125 일 동안 전용하는 경우, 시나리오 3은 245 일부터 250 일 동안 운전 종료시점까지 전용하는 경우를 나타낸다.

2.3 핵물질 전용 탐지 성능 평가 결과

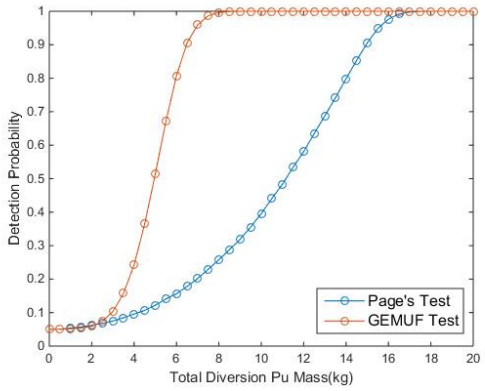
본 연구에서는 하나의 전용 시나리오에 대하여 100,000번의 동일한 시뮬레이션을 반복 수행하여 총 시뮬레이션 수와 그 중 전용을 탐지 한 시뮬레이션 수의 비율을 통하여 최종 결과인 탐지 확률 평가를 수행하였다. Fig. 1의 (a)~(c)는 각각의 전용 시나리오마다 전체 전용된 핵물질 양에 따른 핵물질 전용 탐지 확률을 나타낸다. 총 전용양이 0 kg 일 때 결과는 오경보확률(False Alarm Probability, FAP)을 의미하며, Page's Test와 GEMUF Test의 오경보확률은 모두 약 5%로 동일한 성능을 나타내도록 설정하였다.



(a) Diversion Scenario-1.



(b) Diversion Scenario-2.



(c) Diversion Scenario-3.

Fig. 1. Detection Probability according to Diversion Mass.

그림에서 보듯이, 단기전용 시나리오의 경우에는 전용 시점에 관계없이 GEMUF Test가 Page's Test 보다 더 나은 탐지 성능을 나타냈다. 또한, 두 가지 핵물질 전용탐지 알고리즘 모두 Sequential Test를 기반으로 두기 때문에 전용 시점이 운전 초기에 가까울수록 더 높은 탐지 성능을 보여주는 현상을 보였다. Page's Test의 경우에는 1 SQ에 해당하는 8 kg Pu를 중반 이후 시점부터 전용할 경우 95% 이상의 탐지 확률을 보이지 못하였다. 반면, GEMUF Test는 전용 시점이 운전 종료 지점일지라도 99% 이상의 높은 확률은 전용 탐지가 가능한 것으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서는 가상의 대용량 재처리시설을 대상으로 NRTA를 이용하여 핵물질 단기전용 탐지가 가능한지 평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 핵물질 전용 시점이 NRTA의 초기 시점과 멀어질수록 탐지 성능이 떨어지는 것으로 나타났으며, 전반적으로 GEMUF Test가 Page's Test보다 단기전용에 대해서는 더 뛰어난 성능을 보여주었다. 최종적으로 GEMUF Test는 모든 단기전용 시나리오에 대해서 99% 이상의 높은 탐지확률을 보여주었다. 본 결과를 토대로 상용규모 파이로시설에서도 단기전용에 대해서는 충분한 안전조치성을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 감사의 글

이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다 (원자력기술개발사업, NRF-2012M2A8A5025950).

5. 참고문헌

[1] K. Zhao et al., International Target Values 2010 for Measurement Uncertainties in Safeguarding Nuclear Materials, STR-368, IAEA, 2010.

[2] Rainer Beedgen, Statistical Near-Real-Time Accountancy Procedures Applied to AGNS Minirun Data Using PROSA, Los Alamos National Laboratory, 1988.