

분실 혹은 도난된 핵 및 기타방사성물질에 대한 핵감식 분석방법론 및 사례 분석

김재광*, 이정현

한국원자력통제기술원, 대전광역시 유성구 유성대로 1534

*jgwang@kinac.re.kr

1. 서론

구소련 붕괴이후 1993년부터, 국제원자력기구(IAEA)는 회원국에서 발생되어 보고되는 분실 혹은 도난된 핵물질에 대한 사건정보를 수집하여 데이터베이스(ITDB, Incident and Tracking database)로 관리해오고 있다[1]. ITDB에 따르면, 최근 20년간 관련 핵물질 불법거래 관련 사건이 2726건 정도로 보고되었으며, 이들 사건 중 가장 많은 부분을 차지하는 약 56%정도인 총 1526건 정도가 불법 핵물질 탐지, 불법 폐기된 선원회수, 핵 및 기타방사성물질의 불법소지 등과 같이 불법행위와 관련된 사건이며 아래 Fig. 1과 같이 최근 증가 추세에 있다[1].

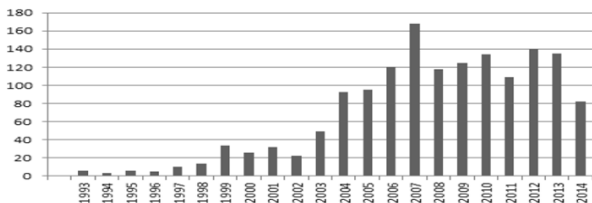


Fig. 1. Incidents involving other unauthorized activities and events [1].

이렇듯, 분실 혹은 도난된 핵 및 기타방사성물질이 확인된 경우, 중요한 문제는 향후에 일어날 수 있는 도난 혹은 분실을 예방하기 위해 물질의 출처를 확인하는 것이다. 핵 및 기타방사성물질의 출처를 확인 과정을 핵감식이라 하는데, 분실 혹은 도난된 방사성물질의 조성은 무엇이며 해당 물질이 어떻게, 언제, 어디서 생산되었는지를 식별하는 것이라 정의할 수 있다[2].

2. 핵감식 분석방법론 및 분석사례

핵감식은 분실 혹은 도난된 물질을 발견한 시점부터 시작된다. 핵감식의 과정은 크게 핵물질 혹은 기타 방사성물질을 구분하는 목록화(Categorization), 구분된 물질의 조성성분을 분석하는 특성화(Characterization) 그리고 분석된 물질의 특성정보를 해석하여 출처를

확인(Interpretation)하는 과정으로 나눈다.

핵감식 분석방법론은 목록화와 특성화와 관련되어 있으며, 최종 출처를 확인하기 위해서는 IAEA의 ITDB와 같은 핵감식 라이브러리를 필요로 한다.

핵물질은 생성 혹은 변형 등의 가공 과정을 통해 물질내 특정 물성치 혹은 화학적 형태 등이 변화되어 가공공정을 특정할 수 있는 인자가 형성되는 데 이를 식별인자(Signature)라 한다. 이렇게 형성된 가공과정과 식별인자간의 상관관계를 확인할 수 있다면 측정 물성치 혹은 화학적 특성, 동위원소, 불순물 등을 측정 및 분석하여 해당물질의 생성, 변형 등 가공과정, 핵물질 출처 등을 유추할 수 있을 것이다. 이러한 측정 및 분석 가능한 식별인자는 물리적 식별인자, 화학적 식별인자, 동위원소 식별인자, 원소 식별인자 등이 있다.

2.1 물리적 식별인자

물리적 식별인자는 사진촬영, 길이 및 무게측정, 미세구조 확인 등 육안으로 확인 가능한 방법에 의해 특정되는 인자이며, 물리적 측정의 결과는 화학 조성물, 불순물 원소, 동위원소분석 등 다음 단계의 분석방향을 결정한다. 물리적으로 시료를 조사하는 방법은 자, 저울 등 전통적인 측정 기구에 의한 거시적인 측정방법이다. Fig. 2와 같이 측정해서 Table 1을 통해 원자로형을 확인한 결과, 직경이 11.5 mm인 것(왼쪽)은 RMMK이고 직경이 7.6 mm인 것(오른쪽)은 VVER임을 알 수 있다.

Table 1. Nuclear forensics Library(sample)

| 원자로형 | 직경(mm) | 높이(mm) | 구멍(mm) |
|-----------|--------|--------|--------|
| VVER-440 | 7.6 | 9-12 | 1.6 |
| VVER-1000 | 7.6 | 9-12 | 2.4 |
| RBMK-1000 | 11.5 | 12-15 | - |
| RBMK-1500 | 11.5 | 12-15 | 2.0 |
| CANDU | 12.4 | 13 | - |
| PWR(서부유럽) | 9.1 | 11 | - |
| 6BWR(USA) | 12 | 15 | - |
| PWR(ROK) | 10 | 8 | - |

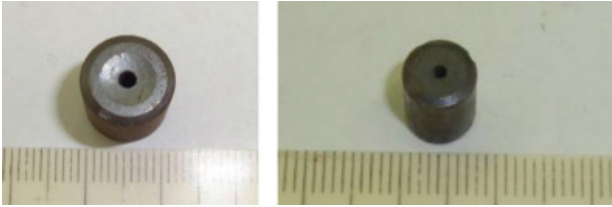


Fig. 2. Nuclear Forensic sample(physical analysis).

2.2 화학적 식별인자

핵감식의 화학적 식별인자는 핵주기의 대부분을 차지하는 우라늄과 플루토늄 분석을 통해 발전해왔다. 핵주기에서 우라늄과 플루토늄은 다양한 화학적 형태로 존재하며 대부분의 화학조성은 잘 알려져 있다. 이러한 화학조성은 기술적으로 각 핵연료 공정주기와 상관관계를 특정할 수 있어서 핵감식의 화학적 식별인자라 할 수 있다.

Fig. 3은 전자현미경(SEM)을 통한 화학적 분석사례로서, 1994년 뮌헨공항에서 발견된 핵물질이 표준참조물질과 유사하여 비슷한 공정의 PuO_2 임을 추정할 수 있다[3].

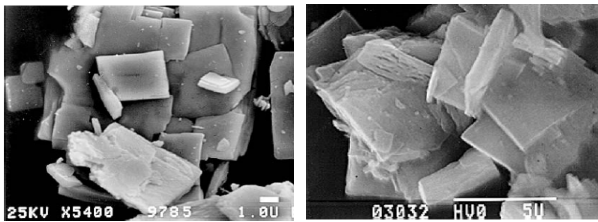


Fig. 3. SEM Pictures of PuO_2 (Left-reference material, Right-seized one at Munich Airport in 1994).

2.3 동위원소 식별인자

분실 혹은 도난된 핵물질을 분석하는 데 동위원소 분석은 우라늄이나 플루토늄의 생산 공정이나, 원자로형 정보, 생산일정 추정에 매우 중요한 정보이며 출처를 최종 확인할 수 있는 분석이기도 하다. 플루토늄의 경우, 주로 재처리를 통해 생산되므로 동위원소를 분석하면 플루토늄 생성이전 초기물질을 확인할 수 있으며, 화학적 분리추출이후 모핵종과 딸핵종과의 변화를 측정하게 되면 생산공정 일정에 대한 추정도 가능하다.

우라늄은 자연적으로 장반감기 핵종인 U-234, U-235, U-238이 존재하므로 이 3가지 핵종에 대한 지역별 특성을 이해한다면 천연우라늄에 대한 원산지 추정도 가능하다. U-236의 경우, 자연적으로 μg 에서 pg 정도로 존재하고, 중성자에 의해 조사된다면, 평균적으로 U-238대비 약 0.3%정도로 증가한다. 따라서, U-236을 분석하여 핵물질의 조사

여부도 확인가능하다[2].

2.4 원소 식별인자

핵 및 기타방사성물질이외, 다양한 원소들이 불순물형태로 분석되면서, 불순물에 대한 정보도 핵감식의 중요한 식별인자로 고려되고 있다. 가령, 희토류 원소들은 지역적으로 특성화된 정보를 가지고 있어서, 천연우라늄의 경우, 핵물질내 희토류원소를 분석하면 우라늄의 원산지에 대한 추정도 가능하다. 또한, 핵연료를 가공공정에서 투입되는 가연성 독물질인 가돌리듐, 에르븀을 분석하면 원자로의 특성을 이해하는 데 도움이 될 수 있다.

3. 감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회와 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 결과입니다(No.1305017).

4. 결론

핵감식 방법론은 방사선(알파, 감마) 분석, 화학분석 그리고 질량분석 장비의 개발에 따라, 다양하게 발전되어 왔다. 이와 더불어, 각 분석방법에서 주요한 요소인 식별인자 또한 지속적으로 발전되어 왔다.

무엇보다도, 최종적으로 분실 혹은 도난된 핵 및 기타방사성물질의 출처를 확인하기 위해서는 Table 1과 같은 라이브러리의 구축이 선행되어야 하며 Fig. 3의 표준물질이 지속적으로 개발되어야 할 것이다.

5. 참고문헌

- [1] IAEA, "Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control 2015 Fact Sheet", Dec. 2015.
- [2] Vitaly Fedchenko, "The new nuclear forensics", SIPRI, Oxford University press 2015.
- [3] K. Mayer, M. Wallenius, and I. Ray, "Nuclear Forensics-a methodology providing clues on the origin of illicitly trafficked nuclear materials", The Royal Society of Chemistry 2005, 130, 433-441.