

미래원자력시설 규제 기준 마련을 위한 핵물질 매력도 평가 연구

정연홍*, 김민수, 김기현, 김우진

한국원자력통제기술원, 대전광역시 유성구 유성대로 1534

*jyh1404@kinac.re.kr

1. 서론

우리나라는 국가 정책에 따라 순환핵연료 주기를 위한 사용후핵연료 재처리 시설과 고속로에 대한 기술 및 시설을 개발하도록 계획하고 있다. 새로운 원자력 시설을 도입하기 위해서는 원자력의 평화적 이용이 담보되어야 하며, 특히 핵확산의 우려가 큰 후행핵주기 시설에서는 핵확산성에 대한 검증이 필요하며 특수핵물질의 탈취나 불법이전에 대한 적절한 방호수준을 달성하는 것이 필요하다.

또한 9·11 테러 이후 새로운 사고 및 테러 시나리오에 대한 다차원적인 연구와 접근이 시도되고 있으며, 기존의 규제체제에서의 규제공백이 발생할 수도 있으므로 보다 효율적이고 합리적인 규제 기준 마련이 필요할 것이다.

이에 따라, 본 연구에서는 파이로 시설을 가정하여 핵물질의 확산, 불법이전 등에 대한 우려를 정량적으로 평가할 수 있는 핵물질 매력도(FOM, Figure of Merit)를 공정별로 평가하고 이에 적절한 핵물질 등급분류를 제안하는 것을 목적으로 한다.

2. 본론

2.1 핵물질 등급분류

우리나라 핵안보 규제는 “원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법(이하 방호방재법)”에 그 법적 근거를 가지고 있으며, 원자력시설에 대한 사보타주 및 핵물질 불법이전에 대한 효과적인 예방·탐지·대응 체계를 구축하도록 그 범위가 설정되어 있다[1]. 개정 핵물질방호협약이나 IAEA 물리적방호 권고문서(INFCIRC/225/Rev.5)에 따르면 핵안보에 대한 보다 효율적인 규제를 위해 핵물질 등급을 구분하여 등급에 맞는 방호 요건을 갖추도록 권고하고 있다[2][3].

이러한 등급분류는 핵물질의 불법거래를 방지하기 위해 1987년에 발효된 국제협약인 핵물질방호협약(CPPNM, Convention on Physical Protection of Nuclear Materials)에서 제안하고 있으며, 발효이후 지금까지 물리적방호 규제의 기준으로 자리잡고 있다.

2.2 성능기반 규제

2005년 개정된 핵물질방호협약의 개정내용과 2011년 9·11 테러 이후 달라진 국제 방호현황을 반영하기 위해 IAEA의 핵안보 권고 문서인 INFCIRC/225의 5차 개정이 이루어졌다. 이에 따르면 성능기반(Performance-based)의 물리적방호 시스템을 갖추도록 권고하고 있으며 성능기반 규제의 하나로 위험기반(Risk-informed) 규제를 들 수 있다.

현행의 핵물질 등급분류 기준을 살펴보면 Table 1에서와 같이 핵물질의 종류, 형태(조사/미조사), 양을 고려하고 있으며, 이에 따라, 등급 I부터 등급III까지 핵물질의 등급을 구분하여 각각의 방호요건을 제시하고 있다. 하지만 위험기반의 규제 차원에서 자체 방벽(Self protection) 등을 고려하는 등 핵물질 등급분류에 대한 보다 세밀한 기준을 적용할 필요가 있다.

Table 1. The categorization of nuclear materials

핵물질		등급		
물질	형태	등급 I	등급 II	등급 III
Pu	-	≥2kg	2kg~ 500g	500g~ 15g
		≥20%	≥5kg	5kg~ 1kg
U-235	미 조 사 도	20%~ 10%	≥10kg	10kg~ 1kg
		10%~ 천연U		≥10kg
U-233	-	≥2kg	2kg~ 500g	500g~ 15g
-	조사된 연료	*		

* 핵분열성물질 10% 미만의 감손우라늄, 천연우라늄, 토륨 또는 저농축 우라늄

2.3 핵물질 매력도(FOM)

핵물질의 등급분류에서 핵물질의 종류나 양을 그 분류 기준으로 제시하고 있는 이유는 핵물질의 무기 전용 가능성을 전제하고 있는 것으로서 무기 전용에 대한 다른 인자들도 충분히 고려할 필요가 있을 것이다. 이러한 차원에서 미국 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서는 FOM(Figure of Merit)이라는 핵물질 매력도 평가 인자를 제안하였다[4]. 이에 따르면, 식 (1), (2)와 같이 핵국의 경우 핵물질의

양, 열함량, 방사선량의 3가지 인자를, 비핵국의 경우 자발증성자 발생률을 포함한 핵물질 전용의 용이성을 평가할 수 있는 4가지 인자를 고려하여 핵물질 매력도를 계산하게 된다.

$$FOM_1 = 1 - \log_{10} \left(\frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{M}{50} \left(\frac{D}{500} \right)^{\frac{1}{\log_{10} 2}} \right) \quad (1)$$

$$FOM_2 = 1 - \log_{10} \left(\frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{MS}{6.8(10)^6} + \frac{M}{50} \left(\frac{D}{500} \right)^{\frac{1}{\log_{10} 2}} \right) \quad (2)$$

(단, M: 핵물질량, h: 열함량, D: 방사선량, S: 자발증성자 발생률)

위의 식에서 알 수 있듯이 각각의 인자에 대한 기준치가 설정되어 있으며, 기준치¹⁾를 넘는 경우 핵물질 매력도는 1보다 작아지는 경향을 갖게 되고, 기준치 미만인 경우 핵물질 매력도는 1보다 커지는 경향을 갖게 된다. 이때, 핵물질의 매력적인 정도를 구분하는 기준은 1이 되며, 1보다 큰 경우 전용이 용이한 핵물질로 평가하게 된다. 다음은 이러한 결과를 바탕으로 핵물질 매력도에 대한 등급분류 내용이다.

Table 2. The meaning of FOM

FOM	Weapons Utility	Attractiveness	Attractiveness Level
>2	Preferred	High	~B
1-2	Attractive	Medium	~C
0-1	Unattractive	Low	~D
<0	Unattractive	Very Low	~E

이러한 핵물질 매력도 정보를 활용하면 위험기반의 평가가 가능할 것이며 실제로 미 DOE에서는 매력도를 기반으로 하는 핵물질 등급분류를 적용하고 있다.

따라서, 핵물질 등급분류 이전에 위험기반의 규제로서 시설 또는 공정에서의 핵물질 매력도 평가를 수행하고 주요 취약 지점 분석 및 시설의 핵물질 방호 등급 설정 등에 활용할 수 있을 것이다.

2.4 핵물질 매력도 평가 도구

규제의 대상으로서 파이로 시설을 가정하고 시설의 각 공정에서 핵물질 매력도 평가 인자를 도출 및 연산하여 주요 취약 공정 분석 및 시설의 핵물질 전용에 대한 위험기반 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

우선, Fig. 1과 같이 파이로 시설의 공정정보를 모사하고 사용후핵연료 핵종정보 및 각 공정에서의 핵종

별 회수율 정보를 통해 공정 내에서의 핵종 정보를 분석하여 최종적으로 핵물질 매력도 평가를 수행한다.

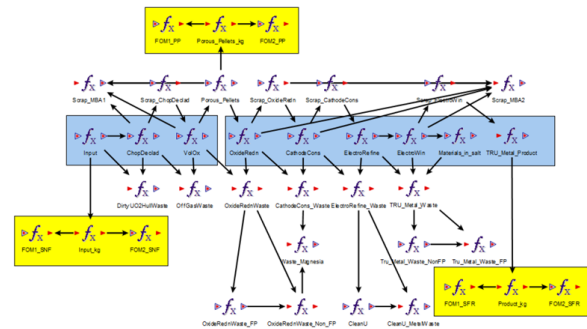


Fig. 1. Process simulation about KAPF.

2.5 결과

전용이 가장 유리하다고 판단되는 지점은 TRU ingot이며, TRU ingot에서 FOM₁식 적용시 핵물질 매력도가 매력적(1~2)이라고 평가되었으며, FOM₂식 적용시 비매력적이라고 평가되었다.

3. 결론

국제사회에서는 규제의 선진화와 효율화를 위해서 등급별 접근(Graded Approach)과 성능기반평가를 권고하고 있다. 이러한 차원에서 핵물질 매력도 분석은 핵물질 등급분류에 있어서 보다 다차원적인 등급분류와 위험기반(Risk-informed) 규제에 좋은 지침을 제공할 수 있을 것이며, 최종적으로 시설이 갖 추어야 할 최적의 물리적방호 요건을 제안할 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

- [1] 원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법 시행령, 2016년 1월 1일 시행.
- [2] IAEA INFCIRC/225/Rev.5, Nuclear Security Recommendation Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, Vienna, 2011.
- [3] Amendment to the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material, Vienna, 2005.
- [4] Charles G. Bathke, et al. The Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios, LANL, 2009.

1) Size factor(M): 20wt% 농축우라늄의 임계질량(800kg), Stability factor(h): 80%의 Pu-238과 20%의 Pu-239 혼합물의 발열량(4500W), Acquisition factor(D): 보수적인 자체방벽기준(500rad/h)