

핵비확산성 평가를 위한 미계량핵물질 연산 도구 개발

정연홍*, 황용수, 장선영, 한재준

한국원자력통제기술원, 대전광역시 유성구 유성대로 1534

*jyh1404@kinac.re.kr

1. 서론

새로운 원자력 시설의 도입에는 원자력의 평화적 이용에 대한 담보가 필요하며, 특히 핵확산의 우려가 큰 후행핵주기 시설(사용후핵연료 재처리/재활용 시설 등)에서는 핵비확산에 대한 검증이 필수적이다. 실제로 이러한 중요성에 대한 공감대를 바탕으로 국제적으로 4세대 원전 포럼이나 IAEA의 INPRO와 같은 연구에서 핵확산저항성에 대한 연구를 수행 중이기도 하다[1], [2]. 이에 따라, 본 연구에서는 Bulk facility에서의 핵비확산성 평가를 위한 미계량핵물질(Material Unaccounted For, MUF)의 의미와 이러한 MUF 연산 도구를 개발하였다.

2. 본론

2.1 핵비확산과 안전조치

원자력은 핵무기의 개발을 통해 발전된 기술로서 핵비확산의 중요성이 강조되는 기술이다. 이러한 핵비확산의 보증을 위해 IAEA가 설립되었고 이를 위한 안전조치를 이관 받아 수행하게 되었다. 이후 안전조치의 적용은 핵비확산을 위한 의무사항이 되었다.

안전조치에 필요한 요소는 크게 설계정보서(Design Information Questionare, DIQ), 계량관리, 검증, 격납감시의 4가지로 분류할 수 있다. 이중 검증의 절차는 핵물질이 핵무기화 하기 위한 유의미한 수치에 도달하기 이전에 사찰이라는 방식으로 수행하게 되는데 이는 경제성 등 시설의 운영에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 해당 시설에서 핵물질이 유의미한 수치(Significant Quantity, SQ)에 도달하기까지의 기간을 예측하는 것이 매우 중요하며 이를 바탕으로 최적의 설비 프로세스를 구성하는 것도 가능하다.

2.2 미계량핵물질

미계량핵물질이란 물질수지구역(Material Balance Area, MBA)에서의 물질 재고의 오차 및 계량 오차를 일컫는 것으로 앞서 설명했던 바와 같이 핵무기

전용 시 유의미한 양을 탐지하는 수단으로 활용되는 인자이다.

이러한 미계량핵물질을 계산하기 위한 식은 다음과 같다[3].

$$MUF = (PB + X - Y) - PE \quad (1)$$

where,

PB: the beginning physical inventory

X: the sum of increases to inventory

Y: the sum of decreases from inventory

PE: the ending physical inventory

식에서 알 수 있듯이 미계량핵물질은 장부재고(Book Inventory)와 실질재고(Physical Inventory)의 차이를 일컫는 것이며 Item Facility가 아닌 Bulk Facility에서는 공정에서의 오차와 계측에서의 오차가 필연적으로 발생하므로 이러한 미계량핵물질에 대한 논의가 절대적으로 필요하다.

2.3 미계량핵물질 연산 도구 개발

결국 이러한 미계량핵물질은 공정에서의 오차나 계측에서의 오차에서 발생하는 것으로 정확하게 예측하는 것이란 불가능하다고 볼 수 있다. 하지만 실제 공정에서의 회수율(Yield fraction)과 계측 기구의 정확도를 바탕으로 어느 정도까지 추정할 수 있으며 본 연구에서는 GoldSim이라는 동적모사프로그래를 통해 이를 추정할 수 있는 도구인 "Safeguards"를 개발하였다[4].

2.3.1 프로그램 개요

"Safeguards"에 대해 간략히 살펴보면 특정 시설에서의 프로세스를 모사하고 각 프로세스에서의 핵종별 회수율을 통해 전체 공정에서의 U과 Pu의 흐름을 모사하여 물질수지구역별 물질의 양을 계량할 수 있는 KMP(Key Measurement Point)를 설정하여 각 KMP에서의 계측 오차를 통해 최종 미계량핵물질의 값을 도출한다.

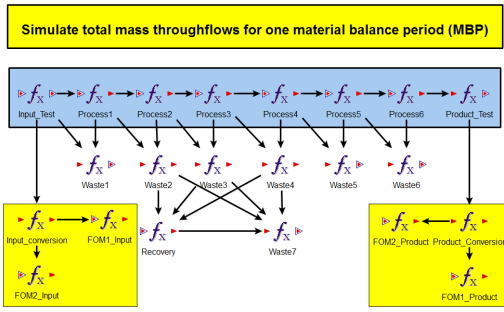


Fig. 1. Total mass flow.

회수율에 대한 정보는 Excel 파일을 통해 입력 값으로 "Safeguards"에 반영시키고 계측 기기의 정확도는 Sampling Data를 별도로 입력하여 연산에 활용한다.

| | Process 1 | Process 2 | Process 3 | Process 4 | Process 5 | Process 6 | Process 7 |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Yield Fraction | Yield Fraction | Yield Fraction | Yield Fraction | Yield Fraction | Yield Fraction | Yield Fraction |
| 15 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 16 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 17 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 18 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 19 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 20 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 21 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 22 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 23 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 24 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 25 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 26 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 27 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 28 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 29 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 30 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 31 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 32 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 33 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 34 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 35 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 36 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 37 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 38 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 39 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 40 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 41 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 42 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 43 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 44 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 45 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 46 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 47 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 48 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 49 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |
| 50 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 | 0.9990 |

Fig. 2. Yield fraction.

Sampling Data

For each test type, enter the size of the item or container (in kg of waste), the fraction of items that are tested, and the number of U/Pu tests done on each tested item.

| TestCountSize [kg] | TestFraction (%) | TestCount |
|--------------------|------------------|-----------|
| KOMP1 | 2 | 75 |
| KOMP2 | 20 | 75 |
| KOMP3 | 2 | 75 |
| KOMP4 | 20 | 75 |
| KOMP5 | 21 | 75 |
| KOMP6 | 22 | 75 |
| KOMP7 | 23 | 75 |
| KOMP8 | 24 | 75 |
| KOMP9 | 25 | 75 |

For U235, for each test type, enter the random and systematic test standard error values for weighing, sampling, and testing.

| [%] | R_Weighing | R_Sampling | S_Weighing | S_Sampling |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0.05 | 0.4 | 0.2 | 0.05 |
| 2 | 0.05 | 0.4 | 2 | 0.05 |
| 3 | 0.05 | 0.4 | 2 | 0.05 |
| 4 | 0.05 | 0.4 | 4 | 0.05 |
| 5 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 6 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 7 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 8 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 9 | 0.05 | 0.4 | 8 | 0.05 |

For Pu, for each test type, enter the random and systematic test standard error values for weighing, sampling, and testing.

| [%] | R_Weighing | R_Sampling | S_Weighing | S_Sampling |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0.05 | 0.4 | 0.2 | 0.05 |
| 2 | 0.05 | 0.4 | 2 | 0.05 |
| 3 | 0.05 | 0.4 | 2 | 0.05 |
| 4 | 0.05 | 0.4 | 4 | 0.05 |
| 5 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 6 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 7 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 8 | 0.05 | 0.4 | 10 | 0.05 |
| 9 | 0.05 | 0.4 | 8 | 0.05 |

Fig. 3. Sampling data.

2.3.2 사례 적용

적용을 위한 샘플 모델로 KAPF(Korea Advanced Pyro-process Facility)시설을 가정하여 최종 발생할 수 있는 미계량핵물질을 도출하였고 그 결과는 다음과 같다. 먼저, 연산에 활용한 입력값은 다음과 같다.

- Burn-up: 45GWd/M
- Cooling Time: 10yr
- Throughput: 400MTU/yr
- Measurement Period: 3 Months
- Capacity Factor: 70%

| Total_Error_MBA2[U235] | | Total_Error_MBA2[Pu] | |
|------------------------|---------|----------------------|--------|
| Percentiles | | Percentiles | |
| Cum.Probability | Value | Cum.Probability | Value |
| 0.001 | -105335 | 0.001 | -31702 |
| 0.01 | -78769 | 0.01 | -25749 |
| 0.05 | -57367 | 0.05 | -17485 |
| 0.25 | -23670 | 0.25 | -7041 |
| 0.5 | -1416 | 0.5 | -25.85 |
| 0.75 | 21168 | 0.75 | 7341 |
| 0.95 | 53686 | 0.95 | 18344 |
| 0.99 | 74330 | 0.99 | 26920 |
| 0.999 | 97742 | 0.999 | 36533 |

| Statistics | | Statistics | |
|--------------------|----------|--------------------|----------|
| Statistic | Value | Statistic | Value |
| Number of Samples | 1000 | Number of Samples | 1000 |
| Mean | -1379 g | Mean | 256.8 g |
| 5% Conf. Bound | -3095 g | 5% Conf. Bound | -314.7 g |
| 95% Conf. Bound | 337.5 g | 95% Conf. Bound | 828.3 g |
| Standard Deviation | 32966 g | Standard Deviation | 16977 g |
| Skewness | -0.06371 | Skewness | 0.07465 |
| Kurtosis | -0.1305 | Kurtosis | 0.03001 |

Fig. 4. Results.

연산 결과, 상기의 그림에서 알 수 있듯이 3 개월 주기로 연산했을 때 Pu은 10.977kg, U-235는 32.966kg의 MUF를 추정할 수 있었으며 이는 1SQ(Pu 8kg)를 뛰어넘는 양으로서 3 개월 이전에 사찰을 통해 시설에서의 핵확산에 대한 징후를 사전 판정해야만 할 것이다.

3. 결론

미계량핵물질은 IAEA의 사찰의 주기를 결정할 수 있는 요소로서 시설의 운영에 있어서 반드시 고려해야 할 인자이다. 또한 이를 바탕으로 해당 시설의 핵비확산성을 나타내는 하나의 인자가 될 수 있으며 이러한 연산 도구는 시설의 핵비확산성을 평가하는 하나의 도구로 활용될 수 있을 것이며, 향후 또 다른 핵비확산성 인자로서 물질매력도(Figure of Merit, FOM)에 대한 연산 도구를 개발, 연계하여 시설의 핵비확산성을 종합적으로 평가할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] GIF/PRPPWG-2006/005, Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems, November 2006.
- [2] IAEA-TECDOC-CD-1575, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy System, INPRO Manuals Volumes 1-7, October 2007.
- [3] IAEA Services Series 15, Nuclear Material Accounting Handbook, Vienna, May 2008.
- [4] GoldSim User's Manual RKossik, IMiller - GoldSim Technology Group, Issaquah, WAUSA, 2009.