

파이로시설에의 ISA 및 PSA 비교평가

유길성*, 서석준, 전홍래, 이효직, 조우진, 임현숙, 이호희, 정원명, 유승남, 구정희
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 *yougil@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원은 사용후핵연료 재순환을 위해 파이로프로세싱 기술개발을 추진해 오고 있으며, 이를 위해 안전이 확보된 파이로시설의 개발[1]이 필요하다. 이 논문에서는 파이로시설에 대한 미국 NRC의 ISA(Integrated Safety Analysis) 평가방법 [2] 및 일반적으로 원자력 발전소에서 적용하고 있는 PSA(Probabilistic Safety Analysis) 평가방법 [3]의 적용성을 각각 상호 비교, 분석해 보았다.

2. 본론

2.1 ISA 와 PSA 특성비교[4]

PSA는 시설장치들에 대한 위험도를 평가하여 시설 전반에 대한 정량적 위험도를 보여줄 수 있으며, 또한 시설의 보조기능들에 대한 위험도도 나타낼 수 있다. 이와는 달리 ISA는 시설의 전체적인 정량적 위험도를 보여줄 수는 없다. 또한 ISA는 높은 또는 중간 정도의 결말을 가진 사건들을 분별하고, 이들을 방지 또는 완화하기 위해 필요한 안전대책(IROFS와 행정적 제어)을 개발할 수 있다. ISA를 수행하는데 있어서 IROFS(Items Relied on For Safety)로 지정된 부품이외의 것에 대한 신뢰성은 담보할 수 없다. 그러나 심층방어 SSC들이 비록 안전성 분석을 통해 직접 신뢰성 확인이 어렵긴하지만 ISA 지원문서에서 확인이 가능하다. ISA를 수행할 때 사건의 발생 가능성을 줄이고 결말을 완화할 수 있는 시스템은 확인된 IROFS에 대해서만 그 신뢰성을 가질 수 있다. 그러나 부가적인 안전부품들은 IROFS 목록에 나타나지 않고 발생 가능성 및 결말을 계산할 때 평가되지 않는다. 이와 대조적으로 PSA는 노심손상을 감소시킬 수 있는 어떤 SSC도 신뢰될 수 있어야 한다. 그러나 만약 ISA가 전체적인 안전전략의 한 부분으로 하나의 SSC를 지정한다면, 이것은 IROFS가 되며 이 IROFS에는 모든 규정(예, 품질보증)이 적용된다.

2.2 파이로시설에의 ISA 적용성 분석

미국은 핵주기시설의 안전성을 평가하기 위해 ISA를 사용하도록 10CFR70에서 규정하고 있다. 이와 같이 핵주기시설에서 ISA를 사용하는 주된 이유는 사고가 원자로와는 달리 화학공정에서 발생할 가능성이 높기 때문이다.

현재 NRC에서 검토단계에 있는 사용후핵연료 재처리시설에 대한 위해도 지표는 SECY-11-0163 보고서[5]에서 보고한 다음 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Consequence Thresholds

	Workers	Offsite Public	Environment
Very High Consequence Event	RD>>1Sv CD>endanger life	RD>1Sv CD=endanger life	Radioactive release >500,000 x Table 2 of 10CFR20, Appendix B
High Consequence Event	RD>1Sv CD>endanger life	RD>0.25Sv sol U intake>30mg CD=long-lasting health effects	Radioactive release >50,000 x Table 2 of 10CFR20, Appendix B
Intermediate Consequence Event	RD>0.25Sv CD=long-lasting health effects	RD>0.05Sv CD=mild transient health effects	Radioactive release >5,000 x Table 2 of 10CFR20, Appendix B
Low Consequence Event	Accidents of lower radiological and chemical exposures than those above in this column	Accidents of lower radiological and chemical exposures than those above in this column	Radioactive releases producing lower effects than those referenced above in this column

Table 2. Qualitative Risk Bins

		Likelihood (Events Per Year)			
		Very Highly Unlikely (<1E-6)	Highly Unlikely (<1E-5)	Unlikely (<1E-4)	NOT Unlikely (>1E-4)
		VHCE	Acceptable	Not Acceptable	Not Acceptable
Consequence	HCE	Acceptable	Acceptable	Not Acceptable	Not Acceptable
	ICE	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Not Acceptable
	LCE	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable

앞서 2.1절의 ISA와 PSA의 비교에서 보았듯이 파이로시설의 경우 주 공정이 전기화학 공정인 관계로 미국과 같이 ISA를 적용할 경우 PSA 적용에 비해 안전성 제고에 여러가지 잇점이 있을 것으로 생각된다. 또한 NRC는 최근 개정된 NUREG-1520-rev.2[6]에서 권고한 3x3 위해도 지표와는 달리 Table 1과 2에서와 같이 4x4 방법으로의 변경을 계획하고 있다[5]. 이는 결말수준(Consequence Level, C)의 경우 일반 핵주기기시설보다 한 단계 위의 VHCE(Very-High-Consequence Event)로 C>100 rem을 추가 고려하고 있다. 발생 가능성(Likelihood, L)의 경우 L>1E-4, L<1E-4, L<1E-5, L<1E-6의 4단계를 사용하고 있다.

파이로시설도 고준위 방사성물질인 사용후핵연료를 취급하는 관계로 ISA를 수행할 경우 NRC의 4x4 지표 평가방법의 적용을 고려해 볼 수 있을 것이다.

2.3 파이로시설에의 PSA 적용성 분석

파이로시설에서도 원자력 발전소와 마찬가지로 시설의 전체적인 위험도를 보여주기 위해 여러가지 수준에서 각 SSC들에 대한 세밀한 신뢰도 계산을 사용하는 PSA를 적용할 수 있다. 그러나 서로 유사한 구조의 원자력 발전소와는 달리 파이로시설과 같은 핵주기기시설의 경우 시설마다의 설계차이와 각 보유국들의 정보 누출에 대한 보안 및 소유권, 각종 필요 자료(가혹조건에서의 기기 신뢰도 및 성능에 대한 시험자료 데이터베이스)의 부족으로 세밀한 PSA 적용이 어렵다. 각 시스템들이 상호 연관되어 작동되는 원자력 발전소와 달리 파이로시설은 시설전체 화재사고를 제외하고는 사건들의 연관성이 거의 없다. 공정에서 이상이 발생되면 공정이 멈추게되면서 발생하는 이상상태가 대부분 종료하

게 된다. 이런 경우 PSA의 적용보다는 ISA의 적용이 더욱 효과적이다. 단, 파이로시설의 경우 중간 및 높은 결말을 갖는 잠재사고 시나리오에 대해서는 높은 수준의 단순화된 PSA 방법의 적용을 통해 안전목표의 허용범위 결정에 도움을 줄 수 있을 것이다.

3. 결론

핵주기기시설의 하나인 파이로시설은 발전소와는 달리 화학공정이 포함된 하나의 화공시설이다. 그러나 서로 유사한 구조의 발전소와는 달리 핵주기기시설의 경우 시설마다의 고유한 설계 및 각 보유국들의 정보 누출에 대한 보안과 소유권, 각종 필요 자료(가혹조건에서의 기기 신뢰도 및 성능에 대한 시험자료 데이터베이스)의 부족으로 PSA 방법 적용이 어렵다. 파이로시설에서는 ISA 방법의 적용이 PSA 적용에 비해 안전성 확보측면에서 더욱 효과적이며, 보완적으로 높은 결말사고에 대해서는 높은 수준의 단순화된 PSA의 적용은 고려해볼 만하다.

4. 참고문헌

- [1] Gil-Sung You, et al., Concept and safety studies of an integrated pyroprocess facility, Nuclear Engineering Design, No. 241, pp. 415~424, 2011.
- [2] US NRC, NUREG-1513 (2001).
- [3] IAEA, Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities, IAEA-TECDOC-1267 (2002).
- [4] US NRC, Transmittal letter for NEI white paper integrated safety analysis: Why it is appropriate for fuel recycling facilities, September 10, 2010.
- [5] US NRC, SECY-11-0163 (2011).
- [6] US NRC, NUREG-1520-rev.2 (2015).