

# 파이로공정 처리시설에서의 미완화 사고해석(방사선피폭사고) 방법

조우진, 서석준, 전홍래, 노시완, 임현숙, 유승남, 임재훈, 이호희, 유길성, 정원명, 안다연, 이효직\*  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
 \*hyojik@kaeri.re.kr

## 1. 서론

국내 원자력안전법에 따르면 국내 핵연료주기사업 인허가는 사업허가 및 지정 절차를 밟도록 규제하고 있다. 하지만 사용후핵연료 처리시설에 대한 명확한 안전심사지침이 별도로 마련돼 있지 않으며 많은 시설과 운영경험이 축적된 상업용 원자로 발전시설과 달리 적용 가능한 법규 및 관련 지침이 아직까지는 미흡한 실정이다. 한국원자력연구원에서는 이미 시설 건설 및 운영 경험이 있는 미국의 규제 및 지침을 참조하여 사용후핵연료 처리시설을 위한 안전성 분석방법[1] 및 개선 현황 자료[2]을 바탕으로 가상 파이로공정 처리시설에 대한 통합안전성 분석을 수행 중에 있다. 본 연구에서는 그 중 미완화 사고해석을 위한 방법과 그 절차, 발생 가능한 사고사례를 통한 미완화 사고 해석결과를 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 통합안전성 분석

본 연구에서 수행 중인 가상 파이로공정 처리시설을 위한 통합안전성 분석방법 및 절차는 다음과 같으며 이는 Fig. 1에서 절차도로 확인할 수 있다. 먼저 위해도 식별에서 분석대상 시설에 존재하는 위험물질과 잠재적인 위해요소를 파악하여 파이로공정 처리시설에서 발생할 수 있는 기준사건을 선정한다. 기준사건에 대해 정성적으로 미완화 평가를 실시하고, 사고유형별로 사건들을 대표할 수 있는 예비 설계기준사고(1)을 선정한다. 예비 설계기준사고(1)에 대하여 정량적으로, 보수적으로 결말과 빈도를 재평가하고, 성능요건을 충족하는지 확인하여 충족하지 못하는 경우 예비 설계기준사고(2)로 선정하고, 해당 사고를 완화 및 방지할 수 있는 안전기능을 식별한다. 식별된 안전기능을 수행할 수 있는 안전관련품목(Items Relied On For Safety, IROFS)을 선정하고, 선정된 IROFS를 기준사건에 적용하여 리스크를 재평가하여 최종 설계기준사고를 도출한다. 최종 설계기준사고에 대한 정량적 결말평가를 수행하고 성능

요건을 만족하지 못할 경우 IROFS를 추가로 지정하며 만족할 경우 IROFS 추가 지정 없이 통합안전성 분석 절차가 완료된다.

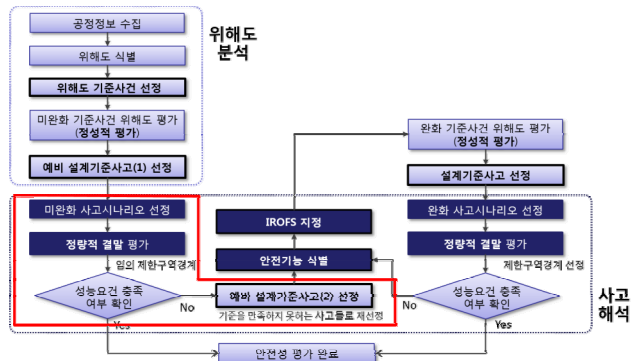


Fig. 1. Process diagram of Integrated Safety Analysis.

### 2.2 미완화 사고해석

미완화 사고해석은 Fig. 1에서의 붉은색 부분으로 표시된 부분으로써 위해도를 제어할 수 있는 모든 수단을 제외한 상태에서 선정된 예비 설계기준사고(1)을 상대적으로 보수적, 그리고 정량적으로 평가하는 절차로 미완화 사고해석 결과를 통해 이를 방지 및 완화할 수 있는 IROFS를 선정하기 위한 단계이다.

본 연구에서 수행한 미완화 사고해석은 기 도출된 예비 설계기준사고(1)을 대상으로 피폭량 평가를 정량적으로 수행한다. 먼저 이행경로를 파악하여 대중 환경 및 작업자에게 이르는 선원항을 계산하기 위해 5인자 계산법(Five-factor formula)을 이용한다. 계산된 선원항을 통해 대중 환경 및 작업자에 대한 피폭량을 계산한다. 본 연구에서는 화학물질 피폭선량을 제외한 방사선 피폭선량에 대한 결말을 확인하였다.

계산된 피폭량을 바탕으로 결말범주를 재산정하고 빈도범주 역시 재산정하여 결말범주와 빈도범주의 곱을 통해서 위해지수를 도출한다. 이 위해지수가 '6'을 초과하는 사고를 예비 설계기준사고(2)로 지정하며 위해지수를 감소시킬 수 있는 안전기능을 정의하고 IROFS를 지정하게 된다.

### 2.2.1 선원항 계산(Five-factor formula)

파이로공정 처리시설에서는 예상되는 핵물질 및 화학물질의 방출원이 다양하고 이러한 방출원의 방출이 예상되는 사고 유형이 다양하기 때문에 위험물질의 이행경로를 추정하여 대중 환경 및 작업자에게 영향을 주는 선원항을 평가하기 위해 본 연구에서는 간이평가법이 5인자 공식을 사용하였다. 5인자 공식은 다음과 같다.

$$\text{선원항 ST} = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARF} \times \text{RF} \times \text{LPF} \quad (1)$$

MAR: 사고에 영향을 줄 수 있는 위험물질의 양

DR: 사고의 유형 및 경위에 따라 위험물질이 실제로 영향을 줄 수 있는 비율

ARF, RF: 위험물질이 공기 중으로 확산되는 비율, 폐에 흡입되어 침착이 가능한 크기의 부유성 미립자의 비율

LPF: 외부로 누출되는 비율을 의미하여 미완화 사고해석에서는 최대 방출량을 가정하므로 '1'

### 2.2.2 방사선 피폭선량 평가방법

방사선 피폭선량 결말계산은 흡입에 의한 내부피폭선량(Committed Effective Dose, CED)과 방사능운에 의한 외부피폭선량(Effective Dose, ED)의 합으로 나타낼 수 있으며 이는 총 유효선량(Total Effective Dose, TED)으로 표현할 수 있다.

$$\text{TED} = \text{CED} + \text{ED} \quad (2)$$

$$\text{CED} = \text{ST} \times \text{DF} \times \text{BR} \times \text{DCF-I} \quad (3)$$

$$\text{ED} = \text{ST} \times \text{DF} \times \text{DCF-E} \quad (4)$$

ST: 선원항

DF: 대기확산인자

BR: 호흡률

DCF-I, DCF-E: 내부피폭, 외부피폭 선량환산인자

### 2.3 미완화 사고해석 결과

본 연구에서는 가상의 파이로공정 처리시설을 대상으로 하기 때문에 그 사고역시 가상의 시나리오를 바탕으로 한다. 본 요약문에서는 미완화 사고해석 결과의 예로 “핵연료봉 인출 과정 중 핵연료봉 파손에 따른 방사성 물질 누출사고”를 가정하여 미완화 사고해석 결과를 나타내었다. 본 사고는 파이로공정 처리를 위해 SFA로부터 핵연료를 인출하는 과정에서 연료봉 결함이나 기계적 끼임에도 불구하고 자동으로 정지되지 않고 강제로 인출되어 발생하는 사고이다.

### 2.3.1 방사선원항

본 사고는 16 x 16배열을 가지는 PLUS7연료를 대상으로 하며, 인출장비가 1열씩 인출하기 때문에 MAR은 핵연료봉 16개로 결정하는 것이 타당하다. 따라서 총 MAR은  $1.72 \times 10^4$  Ci 이다. 그리고 본 사고에 적용된 ARF x RF는 H, Kr, Xe, I와 같은 가스와 Cs, Ru와 같은 휘발성 물질은  $0.3 \times 1, 2E-3 \times 1$ , 나머지 입자성 물질에 대한 ARF x RF은  $3E-5 \times 1$ [3]을 사용하였다.

### 2.3.2 방사선 피폭선량 평가

본 사고에서 외부피폭과 내부피폭을 고려한 총 유효선량은 3.52 mSv(대중)로 계산되었다.

### 2.3.3 위해지수 결정

핵연료봉 인출 과정 중 핵연료봉 파손에 따른 방사성 물질 누출 사고의 발생가능성(빈도) 범주는 Unlikely(3)이며 계산된 3.52 mSv을 통해 대중의 결말범주는 Low consequence(1)이므로 대중의 위해지수는 “Acceptable(3)”이나 작업자는 Very High Consequence(4)이므로 작업자의 위해지수는 “Not Acceptable(12)”이므로 본 사고는 IROFS 지정이 필요한 설계기준사고(2)로 지정한다.

## 3. 결론

본 연구에서 수행된 미완화 사고해석 결과를 토대로 사고를 방지 및 완화할 수 있는 안전기능을 정의, 이 안전기능을 수행하는 IROFS를 지정하게 된다. 서론에서 언급한바와 같이 IROFS 지정 후 위해도 기준사건을 재평가하여 성능요건이 충족될 때까지 본 과정을 반복하게 되며 성능요건을 충족하면 통합안전성 분석은 종료된다.

## 4. 참고문헌

- [1] US NRC, Standard Review Plan for Fuel Cycle Facilities License Applications, NUREG-1520 (2015).
- [2] US NRC, Draft Regulatory Basis for Licensing and Regulation Reprocessing Facilities, SECY-11-0163 (2011).
- [3] Bechtel SAIC Company, Release Fractions for spent nuclear fuel and high-level waste (2007).