



# 개정 방사선원의 가동 원전 적용

문 주 현

서울대 원자핵공학과 BK사업단 계약조교수

박 중 운

한전 전력연구원 선임연구원

## 서론

원전 인허가를 위해서는 일단의 설계 기준 사고(Design Basis Accidents)에 대한 방사학적 소의 결말 분석을 통해 사고 완화 설비의 관련 규제 요건 만족을 입증하여야 한다. 설계 기준 사고 분석을 위해서는 사고 기간 중 발생한 핵분열 생성물의 방출량, 방출 시기 및 화학적 형태 등을 규정하는 사고 방사선원이 필요하다.

지금까지 국내에서 인가된 원전은 1962년 미국 AEC(Atomic Energy Commission)에서 발간한 TID-14844 기반의 Reg. Guide 1.4의 사고 방사선원을 사용하여 왔다.

1979년 발생한 미국의 TMI-2 사고는 일반인의 원전에 대한 우려를 증폭시키는 계기가 되었지만, 한

편으론 기존의 사고 방사선원에 대한 인식의 변화를 가져온 계기도 되었다.

TMI-2 사고에 대한 분석 결과, TID-14844 기반의 규제 요건에서 명시하고 있던 사고 방사선원과는 다른 새로운 사실들이 발견되어, 1981년부터 미국 원자력규제위원회(이하 U.S. NRC라 함)는 원전의 가상 사고시 핵분열 생성물의 방출 및 이송에 대한 이해를 증진시키기 위한 연구를 착수하였다.

이러한 연구의 일환으로서 일련의 ACE 실험 수행, 방사선원 분석 도구인 STCP(Source Term Code Package) 개발, 그리고 중대 사고 종합 분석 보고서인 NUREG-1150을 발간하였다.

또한 중대 사고시 핵분열 생성물 방출량을 최적 예측하기 위해 NUREG/CR-5531(핵연료봉 파손 특성 분석), NUREG/CR-4881(설

계 기준 및 중대 사고시 핵분열 생성물 방출 특성), NUREG/CR-5747(중대 사고시 핵분열 생성물의 격납 건물 방출 특성) 등의 연구를 거쳐, 기존의 규제 지침에서 제시한 사고 후 즉시 많은 양의 핵분열 생성물 방출과는 달리 원전 설계나 사고 경위의 차이에도 불구하고, 점진적으로 핵분열 생성물이 방출된다는 것을 알게 되었다.

상기 핵분열 생성물 거동에 대한 현상학적 연구를 통해 얻어진 관련 지식을 바탕으로, U.S. NRC는 1995년 신형 원자로 규제 목적의 방사선원으로 NUREG-1465(이하 개정 방사선원이라 함)를 발간하였다. 이는 신형 원자로에 대해 원전 사고시 핵분열 생성물 방출 및 Iodine의 물리화학적 형태를 보다 현실적인 것으로 적용하여, 보다 실제적인 안전성을 확보하기 위함이었다.

개정 방사선원이 신형 원자로의 규제 적용을 주목적으로 발표되었으나, 기존 TID-14844 방사선원 기반의 과도한 운영 요건으로 인해 원전 운영에 어려움을 겪고 있던 미국 내 원전 사업자들은 개정 방사선원을 가동 원전에 적용함으로써 기존 방사선원에 내재되어 있던 불합리성을 제거하여 운영상의 편의성 제고를 위한 노력을 기울여 왔다.

이러한 원전 사업자들의 움직임에 발맞추어, U.S. NRC는 2000년 Reg. Guide 1.183과 Standard Review Plan 15.0.1 개정판을 발표하고, 개정 방사선원의 가동 원전 적용과 관련한 지침을 제공하기에 이르렀다.

동 규제 지침에 따르면 1997년 1월 10일 이전 발행된 운영 허가를 보유한 원전 사업자가 자발적으로 해당 원전 설계 기준 사고의 방사학적 결말 분석에 사용되는 사고 방사선원을 변경할 수 있도록 허용하고 있다.

국내에서는 개정 방사선원을 신형 경수로-1400(차세대 원자로 'KNGR'의 새로운 명칭) 설계 기준 사고의 소의 결말 분석, 제한 구역 경계(EAB) 거리 산정, 기기 검증 등에 적용하여 상세 설계를 추진 중에 있으나, 개정 방사선원을 가동 원전에 적용하고자 하는 움직임은 아직까지 없는 실정이다.

그러나 미국 내 원전 사업자의 움직임 및 개정 방사선원 적용에 따른

가동 원전의 운전 편의성 제고 등을 고려할 때 국내에도 머지 않아 개정 방사선원의 가동 원전 적용이 예상된다. 이에 본 논고에서는 개정 방사선원의 국내 가동 원전 적용시 참조할 수 있도록 개정 방사선원의 특성 및 미국 가동 원전에서의 적용 사례 등을 검토하였다.

## 개정 방사선원

### 1. 생성 과정

개정 방사선원은 NUREG-1150과 NUREG/CR-5747에 기술적 기반을 두고 있다. NUREG-1150은 미국 대표 원전들의 확률론적 안전성 평가 결과를 집대성하여 놓았으며, NUREG/CR-5747는 각 원전에 대해 STCP 코드를 이용하여 계산한 방출률(Release Fraction)과 사고 기간(Duration)에 대한 포괄치(Bounding Value), NUREG/CR-4551의 방출 인자 분포로부터 표본 추출을 통해 얻어진 핵종별 노내(In-Vessel) 방출률과 노외(Ex-Vessel) 방출률의 확률 분포에 대한 평균치 등을 요약하여 놓았다. 이러한 기존 연구로부터 개정 방사선원이 도출되기까지의 과정을 <표 1>에 요약하였다.

### 2. 개정 방사선원 특성

#### 가. 핵분열 생성물 방출물

Noble Gases · Iodine, Cesium

에 대한 방출률은 NUREG/CR-5747의 <표 6.5>에 제시된 저압(Low Pressure)/고산화(High Oxidation) 상태의 방출률의 확률 분포에 대한 평균값이 채택되었다. 그 이유는 NUREG-1150 방법에 따라 전문가가 생성한 평균 방출률이 저압이고 지르코늄의 산화가 큰 경우에 더 크게 나타났기 때문이다.

또한 Tellurium · Barium · Strontium 등 저휘발성 핵종에 대한 방출률은 전문가 의견 및 연구 결과를 반영하여 NUREG/CR-5747의 평균치보다 적은 75 백분위수(percentile)에 해당하는 값이 채택되었다.

#### 나. 핵분열 생성물 방출 기간

① 간극 방출(Gap Release) 단계  
간극 방출 단계는 첫 번째 핵연료 파손 시점부터 핵연료의 온도가 충분히 상승하여 핵연료 간극뿐만 아니라 핵연료 자체에 포함된 핵분열 생성물이 방출되는 시점까지로 정의하였다. 이러한 핵분열 생성물의 방출 시간에 대해서는 NUREG-1150의 6개 발전소들에 대한 STCP 계산이 참조되었다.

가압경수로나 비등경수로 모두 상당한 양의 핵분열의 방출이 일어나기까지, 즉 간극 방출에서 초기 노내(Early In-Vessel) 방출 단계로까지의 발전은 사고 후 30분 이상이 지난 후인 것으로 판단되어, 간극 방출 단계 기간을 30분으로



〈표 1〉 개정 방사선원(NUREG-1465) 생성 과정

NUREG-1465(1995)	
<b>핵분열 생성물의 격납 건물 방출률</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• NUREG-1150 연구에 참여한 전문가가 생성한 주요 방출 관련 인자에 대한 누적 확률 분포를 정리한 NUREG/CR-5747의 평균값 중 저압(Low Pressure)/고산화(High Oxidation)인 경우의 값을 채택</li> <li>• Noble Gases, Iodine, Cesium의 방출률은 NUREG/CR-5747의 〈표 6.5〉에 제시된 저압/고산화 상태에서의 방출률 확률 분포의 평균값을 채택</li> <li>• Tellurium · Barium · Strontium 및 저휘발성 원소의 방출률은 전문가 의견 및 연구 결과를 반영하여 NUREG/CR-5747의 평균값보다 작은 75 백분위수(percentile)에 해당하는 값을 채택</li> </ul>	
<b>핵분열 생성물 방출 시간</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 노내(In-Vessel) 방출 단계에 대한 STCP 계산 결과의 포괄치는 40분이나, 간극 방출 단계 기간을 0.5시간으로 고려하고, 초기 노내(Early In-Vessel) 방출 단계 기간은 포괄치가 아닌 대표적인 시간인 1.3시간으로 채택</li> <li>• 노외(Ex-Vessel) 및 후기 노내(Late In-Vessel) 방출 단계 기간은 NUREG/CR-5747에서 제시한 STCP 계산 결과의 포괄치 채택</li> </ul>	
⌋	
<b>NUREG/CR-5747 (1993)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NUREG/CR-4551의 방출 인자 분포로부터 표본 추출하여 노내 방출률인 STiny와 노외 방출률 STexv 확률 분포 생성</li> <li>• 가압경수로의 경우, 이 중에서 저압/저크롬 고산화/Dry Cavity 조건에 대한 ST 확률 분포의 평균값 계산 후, 〈표 6.5〉에 제시</li> <li>• STCP코드를 이용하여, 발전소별로 계산한 결정론적 방출률과 경과 시간에 대한 포괄치(Bounding Value) 별도로 〈표 6.1〉에 제시</li> </ul>
<b>NUREG/CR-4551 (1992)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문가 의견을 이용하여 핵분열 생성물 방출 관련 인자들에 대한 누적 확률 분포 생성</li> <li>• 일부 전문가는 (STCP나 MAAP) 전산 코드 결과 참조</li> </ul>
<b>NUREG/CR-1150 (1987)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 대표 발전소에 대한 중대 사고시 위험도 종합 평가</li> <li>• Source Term Code Package로 각 발전소별 격납 건물 및 소외 방사선원항 방출에 대한 확률론적 평가 수행</li> </ul>

채택하였다.

② 초기 노내(Early In-Vessel) 방출 단계

간극 방출 후, 노심 용융이 진행되고 원자로 용기가 파손되기 전까지 초기 노내 방출 단계에 해당된다.

참고로 NUREG/CR-5747에서 제시된 STCP 계산 결과의 포괄치

(Bounding Value)는 40분이나 개정 방사선원에서는 이러한 포괄치 대신 대표적인 경과 기간(Duration)인 1.3 시간을 초기 노내 방출 단계 기간으로 채택하였다.

③ 노외(Ex-Vessel) 및 후기 노내(Late In-Vessel) 방출 단계

NUREG/CR-5747에서 제시된

각 발전소의 주요 사고에 대한 STCP 계산 결과의 포괄치(Bounding Value)를 그대로 채택하였다.

개정 방사선원에서 제시하는 가압경수로에 대한 핵분열 생성물의 방출 단계, 방출 시간, 그리고 핵종 그룹별의 노심에서 격납 건물로의 방출률은 〈표 2〉와 같다.

다. 핵분열 생성물의 물리/화학적 특성

개정 방사선원에서 Iodine은 95%가 CsI의 화합물인 에어로졸 형태로 존재하며, 나머지 5% 이하는 I와 HI 증기(vapor) 형태로 존재하며, 0.15%는 CH3I와 같은 유기 화합물로 존재한다고 정의하고 있다.

그리고 수용성 이온으로 존재하는 Iodine이 방사선에 의해 원소형(Elemental) Iodine으로 변환될 수 있으나 이는 냉각수의 pH가 7 이상으로 유지되는 경우에는 효과적이지 못한 것으로 기술하고 있다.

라. 고연소도 핵연료 적용성

NUREG-1465에서는 설계 기준 Non-LOCA 사고인 반응도 삽입 사고(Reactivity Insertion (Rod Ejection) Accident)시 40 GWD/MTU 이상의 핵연료는 파손 가능성이 과거 생각보다 더 큰 것으로 알려져 있다고 기술하고 있다.

즉 고연소도 연료는 파쇄(Fragmentation) 정도가 더 크거나 분말(Powder) 형태로 존재함으로써,

〈표 2〉 개정 방사선원의 PWR에 대한 핵분열 생성물 방출 단계, 기간 및 방출률

	간극 방출 단계 (Gap Release)	초기 용융 단계 (Early In-Vessel)	노외 단계 (Ex-Vessel)	후기 노내 단계 (Late In-Vessel)
방출 시간	0.5 hr	1.3hr	2.0 hr	10.0 hr
Noble Gases	0.05	0.95	0	0
Halogen	0.05	0.35	0.25	0.1
Alkali Metals	0.05	0.25	0.35	0.1
Te Group	0	0.05	0.25	0.005
Ba · Sr	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Ce Group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

〈표 3〉 Reg Guide 1.183에 제시된 가압경수로 대상 방사선원항

	LOCA		Non-LOCA	
	Gap Release	Early In-Vessel	핵분열 생성물	간극 분출
방출 시간	0.5 hr	1.3hr	-	-
Noble Gases	0.05	0.95	Kr-85	0.1
			Other Noble Gas	0.05
Halogen	0.05	0.35	1-131	0.08
			Other Halogens	0.05
Alkali Metals	0.05	0.25	All	0.12
기타	NUREG-1465와 동일			

핵연료 피복재 파손시 핵연료 내의 핵분열 생성물이 더욱 많이 방출될 수 있다는 것이다.

따라서 NUREG-1465는 그 방사선원이 피복재 파손시 핵연료가 건전하게 존재하는 저연소도 핵연료를 기준으로 한 것이므로, 다른 가용한 정보가 있지 않으면 40 GWD/MTU 이상의 연소도를 가진 핵연료에 대해서는 개정 방사선원의 적용에 대한 면밀한 검토가 필요한 것으로 기술하고 있었다.

그러나 Westinghouse · GE 및 EPRI에서 수행한 40 GWD/MTU의 연소도를 가진 핵연료에 대한 3차원 노심 최적 해석 결과 등에 의

하면, 가압경수로의 경우 반응도 삼입 사고시 핵연료 피복재 파손이 예상되지 않는 것으로 판단됨에 따라, 2000년 발행된 Reg. Guide 1.183에서는 “개정 방사선원의 격납 건물 방출분율은 62 GWD/MTU까지의 첨두 연소도(Peak Burnup)까지 적용할 수 있으며, 단 54 GWD/MTU를 초과하는 연소도의 핵연료는 최대 선형 열발생률(Linear Heat Generation Rate)이 6.3 kW/ft를 초과하지 않아야 한다.”라고 규정하여, 고연소도에 대한 개정 방사선원의 적용을 허용하였다.

Reg Guide 1.183에서는 결론적으로 DBA LOCA 사고에 대해서는

NUREG-1465의 간극 및 초기 노내 방출 단계의 방출률을 그대로 적용하고, 핵연료 손상이 예상되는 Non-LOCA 사고에 대해서는 간극과 핵연료 내의 핵분열 생성물이 예상되는 핵연료 손상 시점에서 즉각 방출되는 것으로 가정할 것을 요구하고 있다.

또한 간극 내의 핵분열 생성물 재고량 분율로서 〈표 3〉에 나타난 바와 같이 주요 핵종에 대해서는 NUREG-1465보다 약 2배의 간극 방사능을 사용할 것을 제시하고 있다.

### 3. 개정 방사선원의 보수성

앞서 검토한 바와 같이, 개정 방사선원은 미국 가동 원전의 중대 사고시 핵분열 생성물의 격납 건물 방출률이나 방출 기간 모두를 포괄하는 것은 아니며, 이를 대표하는 (representative) 첫임을 알 수 있다.

그럼에도 불구하고 현재까지 TID-14844와 같이 노심이 상당히 많이 용융되는 중대 사고시 방사선원이 설계 기준 사고에 대해 적용되어 온 것은 핵분열 생성물 거동에 대한 불확실성과 통제상의 어려움을 반영하여 다중 방어(Defense-In-Depth)를 하기 위한 것임을 고려할 때, 중대 사고를 포괄하는 방사선원을 설계 기준 사고 해석에 적용하는 것은 지나치게 보수적이며



개정 방사선원과 같이 중대 사고를 대표하는 방사선원 정도로도 설계 기준 사고에 대해서는 이미 충분한 보수성을 지니고 있다고 판단할 수 있다.

**미국 내 가동 원전의 개정 방사선원 적용 사례**

**1. 가동 원전 적용을 위한 Re-Baselining 연구**

U.S. NRC에서는 SECY-96-242에서 가동 원전에 개정 방사선원 적용의 적용을 허용하기 위한 사전 연구로서 Rebaselining 연구를 제안하여 수행하고, 그 결과를 SECY-98-154을 통해 제시한 바 있다. 동 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 개정 방사선원 적용시 소의 선량을 감소시킨 주요 인자는 선량 환산 인자와 원전 고유의 사고 완화 설비 특성이었다. 반면 개정 방사선원에서 정의한 핵분열 생성물의 방출률 자체에 의한 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

- ICRP-2와 EPA Federal Guidance Report(FGR) 11/12의 선량 환산 인자를 적용한 분석 결과를 비교하였을 때, 선량 환산 인자에 의한 소의 선량 감소 효과가 40%나 되는 것으로 나타났다.

- 원전 고유의 공학적 안전 설비가 방사선원의 완화에 더 큰 영향

**<표 4> 개정 방사선원의 미국 내 가동 원전 적용 현황**

발전소	원자로	발전력 (MW)	격납 건물	사업자 희망 적용 분야	NRC 승인 여부
Indian Point 2	PWR/W-4	3071	Large Dry	· 삼수 계통의 화학 첨가물 제거 · 격납 건물 내 여과 계통 제거	승인
Perry	BWR 6	3579	MARK II Suppression Pool	· 주증기 격리 밸브(MSIV) 누설 제어 계통 제거 · 주증기 격리 밸브 허용 누설률 증가	승인
Surry	PWR/W-3	2441	Sub-atmospheric	(상세 내용 알 수 없음)	제출
Crystal River	PWR/2B&W	2544	Large Dry	(상세 내용 알 수 없음)	제출
Grand Gulf	BWR 6	3833	MARK II Suppression Pool	· 주증기 격리 밸브 누설 제어 계통 제거 · 주증기 격리 밸브 허용 누설률 증가	제출
Duane Arnold	BWR 4	1658	MARK I	(상세 내용 알 수 없음)	제출
Oyster Creek	BWR 2	1930	MARK I Suppression Pool	주제어실 거주성 평가에 문제가 있었으나, 현 설계 유지	준비중
DC Cook	PWR/W-4	3250	Ice-Condenser	(상세 내용 알 수 없음)	준비중

을 주는 것으로 나타났다.

- 개정 방사선원은 Noble Gas 방출에 좌우되는 환경 검증(Environmental Qualification)에 미치는 영향에 비해 Iodine의 화학적 형태에 크게 좌우되는 EAB에 대한 영향이 큰 것으로 나타났다.

**2. 가동 원전 적용 사례**

미국 Indian Point 2 및 Perry 원전은 개정 방사선원을 적용한 설계 변경에 대해 U.S. NRC로부터 승인을 이미 획득하였다.

또한 가압경수로의 경우 Surry와 Crystal River가, 비등경수로의 경우 Grand Gulf · Duane Arnold가

설계 변경 승인 신청을 한 상태이며, 현재 Oyster Creek · DC Cook 등이 설계 변경 승인 신청을 준비중인 것으로 알려져 있다.

<표 4>에 실제 미국 가동 원전의 개정 방사선원 적용 현황에 대해 간략히 요약하였다.

**맺음말**

본 논고에서는 개정 방사선원의 국내 가동 원전 적용에 대비하여, 개정 방사선원에 대한 특성 및 미국 가동 원전의 적용 사례 등을 검토하였다. 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

(표 5) 개정 방사선원의 가동 원전에의 일반적 적용 분야

구분	원전에 대한 잠재적 영향	개정 방사선원과의 관련	이득
허용 누설률 완화	BWR : MSIV 허용 누설률 증가	Aerosol Iodine의 격납 건물 내 Retention	O&M 감소
	PWR : 격납 건물 격리 밸브 누설률 증가 주제어실 In-Leakge	격납 건물 농도 감소에 따름	O&M 감소
격리 밸브 작동 시간 완화	BWR : 계기용 공기 및 화재 방호 관련 자동 격리 배제	Aerosol Iodine의 격납 건물 내 Retention	안전성 증대
	PWR : 격납 건물 격리 밸브 작동 시간 증가	Gap 방출 Timing 증가에 기인	O&M 감소
여과 계통 단순화	BWR : Charcoal Filter 제거	HEPA Filter의 Aerosol 99% 제거 성능, 기체 분율 감소 및 허용 누설률 증가에 기인	O&M 감소
	PWR : HEPA/Charcoal Filter 모두 제거	격납 건물 기준 해중 농도 감소에 따른 허용 누설률 증가에 기인	O&M 감소
사고 완화 설비 작동 시간 완화	PWR : 실수 계통 작동 시간 완화 주제어실 HVAC 작동 시간 완화	격납 건물 기준 해중 농도 감소, Gap 방출 Timing 증가에 기인	O&M 감소
핵연료 재장전시 요건 완화	Personal Airlock 및 Equip Hatch 요건 완화, 핵연료 이동 전 봉괴 시간 요건, Area 및 입지형 방사선 감시기 운전성, HVAC 토출부 여과 요건	격납 건물 기준 해중 농도 감소에 기인	

• 개정방사선원은 미국 가동 원전의 중대 사고시 핵분열 생성물의 방출률이나 방출 기간 모두를 포괄하는 것은 아니며, 단지 이를 대표하는(representative) 것이다.

• 그림에도 불구하고 U.S. NRC가 Reg. Guide 1.183을 통해 개정 방사선원을 가동 원전의 설계 기준 사고 재분석에 적용하는 것을 허용한 것은 개정 방사선원에 담긴 철학이 중대 사고는 발생 빈도 측면에서 중요한 사고에 대한 대처가 중요하며, 이러한 중대 사고를 대표하는 개정 방사선원(노내 방출 단계까지)을 설계 기준 사고에 적용하여도 이는 충분한 보수성을 지닌다는 사고를 바탕으로 깔고 있음을 알 수 있다.

• 현재까지 개정 방사선원을 적용하고자 하는 미국 가동 원전에서는 별도의 대체 방사선원을 개발하여 사용하는 대신 개정 방사선원을 그대로 적용할 계획인 것으로 알려져 있다. 더구나 U.S. NRC는 신형 원자로의 경우에는 개정 방사선원향의 적용을 의무 사항으로 요구하고 있다.

• SECY-98-154에서 언급한 바와 같이 개정 방사선원의 핵분열 생성물 방출률에 의한 소외 선량 감소 이득이 상대적으로 작음에도 불구하고, 점진적 방출 특성, Iodine의 물리화학적 구성 변화 등과 같은 개정 방사선원의 물리적 근거의 특성과 새로운 선량 환산 인자를 적용

할 경우, 기존에 확보된 안전성을 유지하면서 가동 원전의 운전 편의성 및 경제성 제고가 가능할 것으로 판단된다.

• 상기의 개정 방사선원 특성을 가동 원전에 적용하여 이득을 얻을 수 있는 분야로서는 격납 건물 허용 누설률 완화, 격리 밸브 작동 시간 완화, 여과 계통 단순화 등이 있다. 이를 정리하면 (표 5)와 같다.

미국 내 가동 원전의 개정 방사선원 적용 움직임과 비현실적인 기존 방사선원을 물리적 근거의 개정 방사선원으로 대체함으로써 앞서 언급한 바와 같이 기존 방사선원에 내

재되어 있던 불합리성을 제거하여 운영상의 편의성 및 경제성 제고가 가능해짐을 감안할 때, 머지 않아 국내에서도 가동 원전에 개정 방사선원을 적용하고자 하는 움직임이 활발해질 것으로 예상된다.

따라서 개정 방사선원의 국내 가동 원전에의 본격적인 적용에 앞서 원전 사업자를 비롯한 관련 기관에서는 개정 방사선원의 적용 타당성 연구를 비롯하여 국내 가동 원전의 최적 적용 방법론 및 이행 절차 개발, 그리고 관련 규제 요건 개발 등의 연구를 서두를 필요가 있을 것으로 판단된다. ☞