

공정방사능감시기 고방사능 경보설정에 대한 고찰  
A Review on High Radiation Alarm Setpoint  
of Process Radiation Monitor

고용상, 박성찬, 이상섭, 박병호, 이광원, 김은기

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

근래에 사용되는 핵연료는 과거의 핵연료에 비해서 건전성이 높아 핵연료 손상률이 낮으며 이는 운전중인 발전소의 운전현황으로부터 확인 가능하다. 따라서 고방사능 경보설정치를 현재의 설정치 보다 낮게 변경하여도 발전소 운전에 영향을 미치지 않으며 고방사능 경보시 운전원의 조치시간을 좀더 확보할 수 있는 장점이 있음이 지적되어 왔다. 이러한 배경을 근거로 방사능 관련 지침을 검토하였고 새로운 고방사능 경보설정치를 선정하였다. 현재의 방사능 관련 기술지침은 요오드 또는 총방사능을 기준으로 제시하나 공정방사능감시기의 고유특성으로 인하여 요오드와 총방사능 기준으로 고방사능 경보설정치를 선정하는 방법은 부적절한 것으로 평가되었다. 공정방사능감시기는 핵연료 손상시 냉각재에 존재하는 Rb-88이 방출하는 감마방사선을 정확히 측정한다. 새롭게 평가된 고방사능 경보설정치는 Rb-88을 기준으로 선정되었으며 현재의 설정치보다 낮게 결정되었다.

Abstract

The fuel integrity has been improved continuously and fuel failure rate has been decreased. Plant operation data show this trend. Based on this background, related codes, standards and technical specification are reviewed to determine the high radiation alarm setpoint of the Process Radiation Monitor. Current radiation requirements specify iodine and gross radioactivity. However, a high radiation alarm setpoint can not be set by iodine or gross radioactivity because of design characteristics of the Process Radiation Monitor. The Process Radiation Monitor can measure gamma energy of Rb-88 accurately. A new high radiation alarm setpoint is determined based on Rb-88. This is lower than the equivalent value of current high

radiation alarm setpoint. The radiation alarm setpoint will allow more operator action time to mitigate or prevent an accident without any influence on plant operation.

## 1. 서론

운전중 핵연료가 손상되면 냉각재에는 핵분열 생성물이 증가하며 순차적으로 붕괴 과정을 거치면서 다른 핵종으로 변화한다. 붕괴과정중 감마방사선을 방출하는 주요 핵종은 Kr, Rb, I, Xe, Cs 등의 동위원소가 있으며 공정방사능감시기는 이들 핵종이 방출하는 감마방사선을 측정하여 핵연료의 건진성 추이를 감시하는 계측기이다.

공정방사능감시기는 그림 1에서 보는 바와 같이 화학 및 체적제어시스템의 유출배관에 설치되어 유출수중 감마방사선을 측정한다. 공정방사능감시기는 유출수에 포함된 핵분열 생성물에서 방출되는 감마방사선중 특정 에너지를 가지고 있는 감마방사선을 측정하는 분광채널과 총방사선을 측정하는 총괄채널로 구성된다. 분광채널은 냉각재의 Rb-88이 방출하는 감마방사선을 측정한다. 각각의 채널은 고방사능 경보를 발생하며 측정치는 기록계에 저장된다. 고방사능 경보는 발전소에 비상경보를 발생하는 입력신호로 사용되기도 한다.

한국형표준원전의 공정방사능감시기의 고방사능 경보설정치는 제작자 자료에 따라 총괄채널과 분광채널 모두 50K cpm이다. 그러나 그동안 핵연료의 개선이 이루어져 핵연료 손상률이 감소되어 기존의 고방사능 경보설정치를 낮게 조절하여도 운전성에 문제가 발생하지 않고 경보시 운전원의 조치 시간이 증가하는 장점이 있다고 지적되어 왔다. 이러한 배경을 근거로 적절한 새로운 고방사능 경보설정치를 선정할 필요성이 대두되었다.

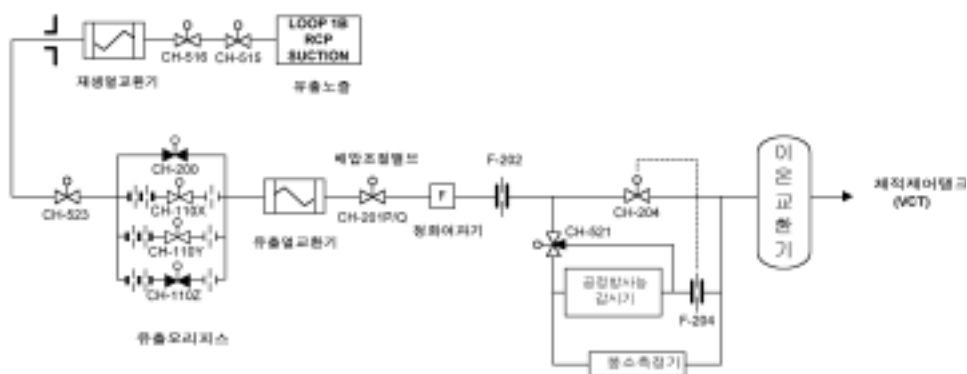


그림 1. 공정방사능감시기 설치위치

## 2. 공정방사능감시기 설치근거

공정방사능감시기는 10CFR50<sup>1)</sup>, Appendix A의 일반설계요건 (General Design Criteria) 13 (제어 및 계측) 요건중 노심건전성 감시요건을 보조하기 위해서 설치되었다. 공정방사능감시기는 인허가 측면에서 일반설계요건 13의 노심 건전성을 판단하기 위해서 설치되는 계측기로 고려되고 있지 않으나 노심 건전성을 감시하기 위해 연속적으로 붕괴생성물을 측정하고 노심손상을 감시하는 설비가 운전에 도움이 된다고 판단하여 유출계통에 설치하였다.

## 3. 고방사능 경보 설정방법 검토

### 3.1 운영기술지침서<sup>2)</sup> 기준

참고문헌 2에서는 운전모드 1, 2 조건시 원자로냉각재 I-131 등가선량을 1  $\mu\text{Ci/cc}$  이하로 총비방사능 ( $\bar{E}$ )을 100  $\mu\text{Ci/cc}$  이하로 유지하도록 요구하고 있다. I-131 등가선량이 1  $\mu\text{Ci/cc}$ 를 초과하나 60  $\mu\text{Ci/cc}$ 를 넘지 않으면 48 시간 이내에 등가선량을 제한치 이하로 유지해야 하며 이를 만족하지 못하면 6 시간 이내에 모드 3을 유지해야 한다. 이는 참고문헌 3에서 요구하는 부지경계에서 개인이 2 시간동안 받을 수 있는 전신 및 갑상선에 대한 최대선량 기준을 만족하기 위한 제한치로서 안전해석에서는 원자로냉각재의 비방사능 제한치와 소위 전원 상실을 동반한 증기발생기 전열관 누설을 고려함으로써 해석된 과도상태 및 사고 기간동안의 선량이 제한치보다 낮게 유지됨을 보장하기 위해서 선정된 것이다. 총비방사능이 100  $\mu\text{Ci/cc}$ 를 초과하면 I-131 등가선량을 확인해야한다. 총비방사능은 요오드를 제외한 핵종의 감마와 베타 에너지로부터 산출된다.

표 1은 각각의 핵종이 방출하는 에너지와 공정방사능감시기의 계수율을 나타낸 것이다. 공정방사능감시기의 총괄채널은 0.1-2.5 MeV의 에너지를 측정한다. 표 1에서 보듯이 요오드와 다른 핵종이 방출하는 방사선 에너지가 중복되어 요오드만의 방사선 측정이 불가능하다. 또한 총비방사능 ( $\bar{E}$ )은 감마에너지와 베타에너지를 고려하여 산출된 값으로서 감마에너지를 측정하는 공정방사능감시기의 계수율과 연관된 평가가 불가능하다. 따라서 운영기술지침서의 선량을 공정방사능감시기의 고방사능 경보설정치로 사용하는 방법은 불가능한 것으로 평가되었다.

표 1. 감마선 에너지와 공정방사능감시기의 계수율 (cpm)

Energy Range (Mev)	Kr (85m)	Kr (87)	Kr (88)	Rb (88)	Rb (89)	I (131)	Te (132)	I (132)	I (133)	I (134)	I (135)	Xe (133)	Xe (135)	Xe (138)	Cs (134)	Cs (136)	Cs (137)	Cs (138)
0.1-0.2	8930		9320			61		14		556		132	100	396		500		264
0.2-0.3					15	1430	2350	173			1035	1	39750	2060		2568		151
0.3-0.4	1570		745			19980						62	100	376		9416		
0.4-0.5		4280	124							169	800		135	1310	305			2452
0.5-0.6						88		1310	33700	412	4200		2		446			754
0.6-0.7		181			77	1650		9300		1458			1050		1989		7180	
0.7-0.8					3	365		6160	718	330	117		20		1786			
0.8-0.9		245	2810	3600						2510	7960	995		22	183	21400		377
0.9-1.0			331		69			1340		94								
1.0-1.1					418				359	1080	1790		1		22	17120		2358
1.1-1.2		102	559					414		565	4630		5134		39			
1.2-1.3			228		302			461	718	47	5134					4280		
1.3-1.4		453		219				689	718						69			
1.4-1.5								207		188	1410				2			6880
1.5-1.6			2670		19						518							
1.6-1.7										235	2890							
1.7-1.8		145	60							235	2266			1016				
1.8-1.9				6010				21			127							
1.9-2.0																		
2.0-2.1		189			21						165			813				
2.1-2.2				12	92													
2.2-2.3											125							1697
2.3-2.4																		
2.4-2.5											179							
2.5-2.6		1059		40	68													
2.6-2.7				577														849
2.7-2.8				40	16													
2.8-2.9			29															

### 3.2 NUREG-0654 기준

발전소의 안전성에 영향을 미치는 실제적 혹은 잠재적 사건이 발생하면 비상경보가 발생하고 방사선이나 사고상태에 따른 운전자와 주민의 물적, 인적 피해를 최소화하고 사고 확대 방지 및 사고 완화를 위한 조치가 수행된다. 비상시 운전 및 사고 조치를 효율적으로 수행하기 위한 지침은 참고문헌 4와 5에 기술되어 있다.

참고문헌 6에는 비상경보를 발생하는 예가 제공되며 원자로냉각재 I-131 등가선량이 300  $\mu\text{Ci/cc}$  이상인 경우 심각한 노심손상이 발생한 것으로 간주하여 경보를 발생하도록 한다. 또한, 30분간 1% 핵연료 손상발생시 및 전체 핵연료손상이 5%임을 화학실험을 통

해 확인되었을 때 경보를 발생하도록 한다. 위와 같은 조건 또는 공정방사능감시기에 고방사능 경보가 발생했을 때 발전소 안전을 저해할 수 있는 상황으로 간주하여 비상경보가 발생된다.

참고문헌 6의 원자로냉각재 I-131 등가선량의 제한치 300  $\mu\text{Ci/cc}$ 을 고방사능 경보설정치로 사용하려면 공정방사능감시기는 원자로냉각재 I-131 등가선량을 측정할 수 있어야 한다. 그러나 3.1절에 기술한 바와 같이 공정방사능감시기의 제한성은 참고문헌 6의 원자로냉각재 I-131 등가선량을 고방사능 경보설정치의 기준으로 사용하기 곤란하게 한다.

### 3.3 분광채널의 이용

3.1절에 기술된 바와 같이 총괄채널의 제한성으로 인하여 원자로냉각재 I-131 등가선량을 고방사능 경보치로 사용하는 방법은 현실적으로 곤란하다. 그러한 분광채널은 Rb-88의 1.86 MeV 에너지를 측정하고 표 1에서 보듯이 타핵종의 영향을 거의 받지 않으므로 핵연료 손상에 대한 명확한 감시가 가능하다. 표 2는 핵연료 손상시 원자로냉각재에 존재하는 Rb-88의 변화를 나타낸 도표로써 1% 핵연료 손상시 Rb-88의 방사능은 1.78  $\mu\text{Ci/cc}$ 까지 증가한다.

표 2의 예상값 (Expected)은 미국에서 운전되는 발전소의 운전자료<sup>7)</sup>를 기준으로 설정되었으나 핵연료 손상률에 대한 근거는 제시되지 않고 있다. 그러나 관련 업무 종사자들은 경험적으로 약 0.12% 정도의 핵연료 손상과 핵연료 손상에 의한 방사능 증가가 포함된 것으로 간주하고 있다. 표 2로부터 현재의 고방사능 경보 (50 K cpm)는 예상값보다 높으나 0.25%의 핵연료가 손상되었을 때보다는 낮은 값을 알 수 있다. 표 3에는 국내 발전소에서 실측된 분광채널의 계수율을 나타내었으며 국내 발전소의 핵연료는 매우 건전하다는 것을 알 수 있다.

표 2. 핵연료 손상에 따른 Rb-88의 방사능

	예상값 (Expected)	0.25% 연료손상	1% 연료손상
Rb-88 방사능 ( $\mu\text{Ci/cc}$ )	0.18	0.58	1.78
cpm*	32K	102K	320K

\* cpm과 방사능의 상관관계 : 그림 2 (Liquid Rb-88, High Efficiency Position).

표 3. 발전소별 감마방사능 계수율

발전소	총괄채널	분광채널*
A	1,000 cpm	300 cpm
B	18,000 cpm	81 cpm
C	24,000 cpm	59 cpm

\* 분광채널, High Efficiency Position

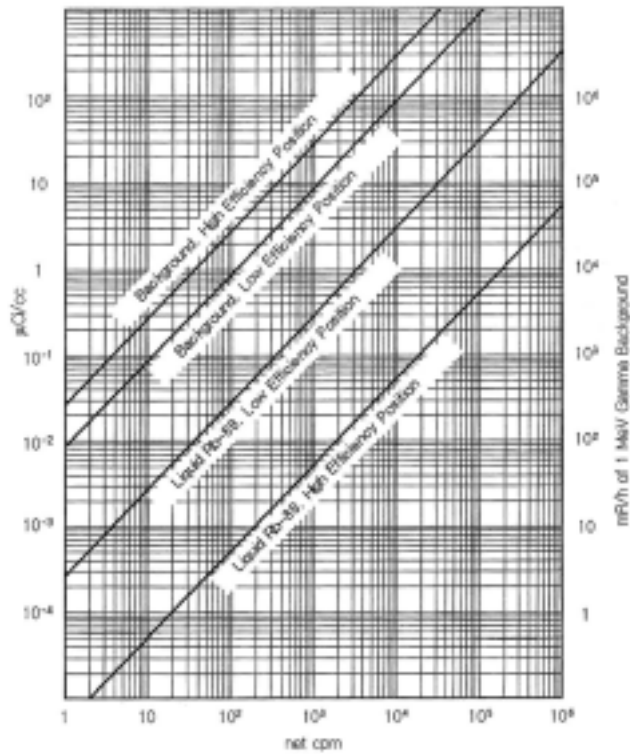


그림 2. 공정방사능감시기 분광채널 계수율  
(분광채널 계수율 vs 액체중 방사능)

#### 4.0 검토 및 고찰

검토 결과 설계요건에 제시된 I-131 등가선량 또는 총방사능은 공정방사능감시기의 제한성으로 인하여 측정할 수 없다. 그러나 분광채널은 냉각재중 타핵종과의 간섭이 발생하지 않으므로 고방사능 경보설정치의 선정이 가능하다.

즉, 분광채널을 기준으로 최상위 설계 요건인 일반설계요건을 만족하며, 핵연료 건전성

향상 및 운전중인 발전소의 운전 자료를 반영하여 기존의 고방사능 경보설정치를 낮게 조정하며, 감마 방사선 간섭을 방지할 수 있는 고방사능 경보설정치의 선정이 가능하다.

상기한 사항들을 고려하여 Rb-88의 방사능 예상값 (32K cpm)를 기준으로 고방사능 경보설정치로 결정하는 것이 적절하다. 이는 약 0.12 %의 핵연료가 손상되었을 때의 예상값으로서, 국내에서 운전중인 발전소의 정상운전시 계수율이 약 300 cpm 이하인 것을 감안할 때 새로운 설정치는 정상시에 비해서 약 100 배 정도의 방사능 준위에 상당한다.

## 5.0 결론

공정방사능감시기의 고방사능 경보설정치를 검토한 결과 원자로냉각재내 Rb-88 방사능 예상값 (32K cpm)을 기준으로 변경하는 것이 타당하다. 고방사능 경보설정치를 낮게 조정함으로써 발전소 과도상태시 운전원의 조치시간을 추가적으로 확보할 수 있는 장점이 있고 다른 핵종의 간섭을 최소화하여 측정의 정확도를 확보할 수 있는 장점이 있다. 그러나 핵연료 손상시 방사성 핵종의 거동과 이에 반응하는 공정방사능감시기의 거동 특성을 확인해야 한다. 이는 참고문헌 2, 6, 8에 제시된 방사능 관련 설계지침이 I-131 등가 선량과 총방사능을 기준으로 지침을 제공하기 때문에 보다 더 설계지침에 근사하는 고방사능 경보설정치를 선정하기 위함이다.

## 참 고 문 헌

1. Title 10, Chapter 1, of the Code of Federal Regulations, Part 50 : Domestic Licensing Of Production And Utilization Facilities
2. 영광 5, 6 호기, 운영기술지침서
3. Title 10, Chapter 1, of the Code of Federal Regulations, Part 100 : Reactor Site Criteria
4. NUREG-0696, Functional Criteria for Emergency Response Facilities, 1981
5. NUREG-0737, Clarification of TMI Action Plan Requirements, 1980
6. NUREG-0654, Criteria for preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Power Plants, 1980
7. ANSI/ANS-18.1, Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors-1984 (1999)