

## ICRP-60 권고에 근거한 방사성 기체 및 액체 유출물의 검출하한치 설정

### Establishment of Lower Limits of Detection for the Gaseous and Liquid Effluents based on ICRP-60 Recommendations

장시영, 김창규

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19번지

#### 요 약

NUREG-1301의 소외배출 유형별 및 핵종별 검출하한치에 따른 주민 피폭선량 평가를 수행하였다. NUREG-1301의 검출하한치는 과기부고시 제98-12호의 일반인에 대한 선량제약치와 비교하여 보수적으로 낮게 설정된 값이 아닌 것으로 확인되었으며, 방사성유출물의 방사능 측정치가 NUREG-1301의 검출하한치보다 작은 값인지의 여부에 관계없이 핵종분석의 결과로 확인된 모든 핵종의 방사능 양을 고려하여 주민피폭선량을 평가하여야 함을 알 수 있었다. 기체상 방사성유출물의 경우, 삼중수소, 스트론튬 및 전알파의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 높은 수준이며, 액체상 방사성유출물의 경우에는 방사성요오드 및  $^{55}\text{Fe}$ 의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 높은 수준이었다. 이와 관련, ICRP-60 방사선방호체계와 과기부고시 제98-12호의 환경상의 위해방지를 위한 선량기준치 대비 10%를 기준치로 설정하여 상기 핵종들의 최적 검출하한치를 도출하였다. 또한, 액체상 방사성유출물내  $^{55}\text{Fe}$ 의 배출량을 NUREG-1301의 주기에 따라 분석하여야 하며, 동 핵종의 배출량에 근거하여 주민피폭선량을 평가할 필요가 있음을 알 수 있었다. 격납건물의 Purge와 관련, Grab 시료의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 수치가 높은 수준이므로 방사성물질의 소외배출량 평가를 위한 검출하한치로서 적용하기에는 부적합하였다. 기체상 방사성유출물 감시와 관련, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시·평가하는 것은 환경상의 위해방지 측면에서 볼 때 부적합한 것으로 나타났다.

#### Abstract

Off-site doses to the public were evaluated based on LLDs(lower limits of detection) of radionuclides stated in NUREG-1301. It was found that off-site doses corresponding to LLDs of NUREG-1301 are not so conservatively low, compared with dose constraints stated in the MOST Notice No. 98-12. Thus, it is required that all measured data at the release points should be used to calculate the amount of radionuclides released into the environment as well

as the doses to the public, regardless of LLDs of the radionuclides. For the gaseous effluents, LLDs for the tritium, strontium, and gross-alpha radioactivity were shown to be relatively high in terms of the effluent monitoring for the prevention of environmental impacts. For the liquid effluents, LLDs for the radio-iodine and  $^{55}\text{Fe}$  were shown to be relatively high. Optimal LLDs of the radionuclides mentioned above were established based on the ICRP-60 recommendations by setting 10% of dose constraints stated in the MOST Notice No. 98-12 as the guideline for the establishments of the LLDs. In addition, it was found out that the amount of  $^{55}\text{Fe}$  released into the ocean should be measured periodically based on the frequency of NUREG-1301 and off-site doses should be evaluated using these measured data. With regard to the containment purge, LLDs of grab samples were shown to be inappropriate as the basis for the assessment of the amount of radionuclides released into the environment since their values stated in NUREG-1301 are high in terms of the effluent monitoring for the prevention of environmental impacts. For the gaseous effluents, the effluent monitoring of continuous paths to the environs using grab sampling and LLDs of grab samples were shown to be inappropriate in terms of the effluent monitoring for the prevention of environmental impacts.

## 서론

원자력발전소에서는 환경상의 위해방지를 위하여 소외로 배출되는 방사성유출물에 대한 감시 및 관리를 수행하고 있으며, 이와 관련한 운전제한사항들은 운영기술지침서에 명시되어 있고 세부적인 분석절차 등은 절차서에 명시·활용되고 있다. 또한, 기체 및 액체 시료별 검출하한치 뿐만 아니라 핵종별 검출하한치를 운영기술지침서에 명시함으로써 방사능 준위가 일정 수준 이상으로 변동하는 것을 충분히 감지할 수 있도록 하고 있다.

미국의 경우, 10 CFR part 50[1]의 일반설계요건 60(방사성물질의 환경배출에 대한 관리) 및 일반설계요건 64(방사능 배출 감시)에 의거하여 정상운전, 예상운전과도 및 사고시의 환경 배출경로에 대한 감시수단을 설계에 포함시키도록 하고 있다. 또한, 10 CFR part 20[2] 및 10 CFR part 50 부록 I[3]에서는 배출관리기준, 선량제약치, 소외 배출량 측정 및 보고 등에 대한 요건을 정하고 있다. 이러한 규제요건의 이행을 위한 규제지침으로는 GL 89-01[4], NUREG-0133[5], NUREG-1301[6], US-NRC의 규제지침(1.21, 4.8, 4.15)[7,8,9] 등이 있다. 방사성유출물의 검출하한치와 관련된 사항은 NUREG-1301 및 US-NRC 규제지침 1.21에 제시되어 있으며 표 1 및 표 2에서 보는 바와 같이 주민피폭선량 또는 방사능농도로 제시되어 있다. 그러나, 우리나라의 경우에는 방사성유출물 관리에 대한 일반요건이 원자력관계법령에 제시되어 있으나, 상세한 사항은 아직까지도 미비된 상태이고 미국의 규제지침인 NUREG-1301을 준용하여 적용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 NUREG-1301에 제시된 검출하한치가 ICRP-60 방사선방호 신권고, 국내원전의 설계 및 부지 특성 등에 비추어 볼 때 환경상의 위해방지를 탐지하기에 충분한 수준인가를 평가하기 위하여 소외배출 유형별 및 핵종별 검출하한치에 따른 주민 피폭선량 평가를 수행하였다. 또한, 이러한 피폭선량 평가결과에 근거하여 ICRP-60 방사선방호 신권고와 국내 특성에 적합한 소외배출 유형별 및 핵종별 검출하한치를 도출하였다.

## 기체상 방사성유출물의 검출하한치에 근거한 주민피폭선량 평가

환경으로 배출되는 방사성물질의 양은 각 발전소의 보조건물 배기유량과 핵종별 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 각 부지의 대기확산인자는 한전의 환경연보[10]에 제시된 값을 적용하였으며, 이러한 소외배출량 및 대기확산인자에 의해 주민이 받는 피폭선량은 KINS에서 개발·운영중인 INDAC 코드[11]를 이용하여 평가하였다. 각 부지의 대기확산인자 및 발전소별 소외 배출유량은 표 3 및 표 4에 제시되어 있으며, 계산과정은 표 5에 제시되어 있다. 표 1에 제시된 핵종구분 중에서 불활성기체, 방사성요오드, 방사성입자, 스트론튬 및 전알파에 대하여는 대표핵종으로서 원자력발전소에서 주요 관심핵종인  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234}\text{U}$ 를 선정하여 주민 피폭선량을 평가하였다.

### 불활성기체( $^{133}\text{Xe}$ )에 대한 평가

불활성기체의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 6에 제시되어 있으며, 표 1에 제시된 불활성기체의 검출하한치중에서 연속감시기의 값을 이용하여 계산하였다. 불활성기체의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수[12] 또는 ICRP-60의 선량환산계수[13]를 사용하더라도 과학기술부장관 고시 제98-12호의 선량기준치[14] 대비 최대 7% 정도의 피폭선량에 해당하므로 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다. Grab 시료에 대한 검출하한치( $1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$ )는 연속감시기의 값( $1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cc}$ )에 비해 100배 높은 수준이며, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 경우에는 환경상의 위해방지와 관련된 선량기준치를 초과할 수도 있다. 따라서, 불활성기체와 관련된 연속감시기의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이지만, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 것은 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 적합하지 않음을 알 수 있었다.

### 방사성요오드( $^{131}\text{I}$ )에 대한 평가

방사성요오드의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 7에 제시되어 있으며, 연속 시료채취의 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 방사성요오드의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 최대 4% 정도의 피폭선량에 해당하므로 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다. Grab 시료에 대한 검출하한치( $1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$ )는 연속감시기의 값( $1 \times 10^{-12} \mu\text{Ci/cc}$ )에 비해  $10^8$ 배 높은 수준이며, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 경우에는 환경상의 위해방지와 관련된 선량기준치를 초과할 수도 있다. 따라서, 연속 시료채취의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이지만, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 것은 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 적합하지 않음을 알 수 있었다.

### 방사성입자( $^{137}\text{Cs}$ )에 대한 평가

방사성입자의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 7에 제시되어 있으며, 연속 시료채취의 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 방사성입자의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 17% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 5% 정도의 피폭선량에 해당하였으며, ICRP-60 체계에 근거하여 환경상의 위해방

지 여부를 감시하기에는 충분한 수준이었다. Grab 시료에 대한 검출하한치( $1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$ )는 연속 감시기의 값( $1 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/cc}$ )에 비해  $10^7$ 배 높은 수준이며, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 경우에는 환경상의 위해방지와 관련된 선량기준치를 초과할 수도 있다. 따라서, 연속 시료채취의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이지만, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시하는 것은 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 적합하지 않음을 알 수 있었다.

### 삼중수소( $^3\text{H}$ )에 대한 평가

삼중수소의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 7에 제시되어 있으며, Grab 시료채취의 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 삼중수소의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 최대 23% 정도의 피폭선량에 해당한다. 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 적합한지의 여부는 명시적으로 제시된 기준이 없지만 약 10%를 기준으로 고려할 경우에 다소 높은 수치를 보이고 있으므로 삼중수소에 대한 검출하한치를 하향 조정할 필요가 있다. 고리 1,2호기의 경우, 측정기기의 검출하한치는  $6.100 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ (격납건물),  $1.912 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/cc}$ (보조건물)이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하더라도 선량기준치 대비 1% 정도의 피폭선량에 해당한다. 또한, 영광 3,4호기의 측정기기에 대한 검출하한치는  $5.8 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/cc}$ (격납건물),  $4.5 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/cc}$ (보조건물)이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하더라도 선량기준치 대비 1% 이하의 피폭선량에 해당한다. 이것은 삼중수소 측정기기의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 판단하기에 적절한 수준이지만 NUREG-1301에 명시된 Grab 시료채취의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이 아님을 의미한다. 따라서, 선량기준치 대비 10%에 해당하는 값이  $4.3 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$  이므로 이 값에 추가적인 여유도 및 일종의 magic number로서의 역할을 고려하여  $1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 를 삼중수소의 최적 검출하한치로 도출하였다.

### 스트론튬( $^{90}\text{Sr}$ )에 대한 평가

스트론튬의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 8에 제시되어 있으며, 연속 시료채취의 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 스트론튬의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 4,250% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 1,735% 정도의 피폭선량에 해당한다. 고리 1,2호기의 경우, 측정기기의 검출하한치는  $2.52 \times 10^{-16} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하더라도 선량기준치 대비 0.1% 이하의 피폭선량에 해당한다. 또한, 영광 3,4호기의 측정기기에 대한 검출하한치는  $9.8 \times 10^{-17} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하더라도 선량기준치 대비 0.1% 이하의 피폭선량에 해당한다. 이것은 스트론튬 분석에 대한 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 판단하기에 적절한 수준이지만 운영기술지침서의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 높은 수준이므로 동 핵종의 검출하한치를 하향 조정할 필요가 있다. 따라서, 선량기준치 대비 10%에 해당하는 값이  $5.8 \times 10^{-14} \mu\text{Ci/cc}$  이므로 이 값에 추가적인 여유도 및 일종의 magic number로서의 역할을 고려하여  $5 \times 10^{-14} \mu\text{Ci/cc}$ 를 스트론튬의 최적 검출하한치로 도출하였다.

### 전알파( $^{234}\text{U}$ )에 대한 평가

전알파의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 8에 제시되어 있으며, 연속 시료채취의 검출하한치를 이용하여 계산하였다. 전알파의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 168% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 570% 정도의 피폭선량에 해당한다. 고리 1,2호기의 경우, 측정기기의 검출하한치는  $1.89 \times 10^{-16} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하더라도 선량기준치 대비 0.1% 이하의 피폭선량에 해당한다. 또한, 영광 3,4호기의 측정기기에 대한 검출하한치는  $6.88 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 12%, ICRP-60의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 39%의 피폭선량에 해당한다. 전알파에 대한 연속 시료채취의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 높은 수준이므로 동 핵종의 검출하한치를 하향 조정할 필요가 있다. 따라서, 선량기준치 대비 10%에 해당하는 값이  $1.8 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/cc}$  이므로 이 값에 추가적인 여유도 및 일종의 magic number로서의 역할을 고려하여  $1 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/cc}$ 를 전알파의 검출하한치로 도출하였다.

### 격납건물 Purge 배출에 대한 평가

격납건물의 소외배출은 일반적으로 purge의 형태로 수행되며, 이 경우에는 purge 수행 이전에 grab 시료를 채취·분석하여 방출여부를 결정하고 있다. 고리 1호기에 대한 연간 Purge 횟수를 4회, Purge당 평균 배출시간을 1시간으로 가정하면, 단기 대기확산인자는 연속배출시의 연평균 대기확산인자 대비 20배 증가하고 지표면침적계수는 12배 정도 증가하게 된다. Grab 시료의 검출하한치인  $1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$ 를 적용할 경우의 소외배출량은 핵종별로 35.2Ci/(년)이며, 불활성기체로 인한 공기중 베타선량이 0.006 mGy/yr으로서 환경상의 위해방지와 관련된 선량기준치를 충분히 하회하는 수준이다. 삼중수소의 경우도 선량기준치 대비 8% 정도로서 환경상의 위해방지와 관련된 기준치를 만족하지만, 그 이외의 방사성요오드, 방사성입자, 전알파 및 스트론튬은 일반인의 선량한도인 1mSv/yr도 초과하는 수준이었다. 따라서, 격납건물내 Purge와 관련하여 Grab 시료의 채취·분석 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 주민피폭선량을 평가하는 것은 환경상의 위해방지를 감시하기에 부적합하며, 소외배출량 평가를 위한 검출하한치로 적용하기에도 부적합하였다.

### 액체상 방사성유출물의 검출하한치에 근거한 주민피폭선량 평가

바다로 배출되는 방사성물질의 양은 한전의 방사선관리 연보[17]에 제시된 각 발전소별 폐기물 배출량중 가장 큰 해의 값과 희석수 유량에 대한 대표값을 이용하여 계산하였다. 각 발전소별 액체폐기물 배출량과 희석수 유량은 표 9 제시되어 있으며, 계산가정은 표 10에 제시되어 있다. 주민피폭선량은 KINS에서 개발·운영중인 INDAC 코드를 이용하여 평가하였다. 희석수 유량의 경우, 발전소마다 상이하고 동일한 발전소라고 하여도 운전상태에 따라 다양한 값을 가지기 때문에 아래에 제시된 핵종별 예상선량치 보다 큰 값이 계산될 경우를 배제할 수 없다. 액체상 방사성유출물에 대한 검출하한치의 경우, 연속 시료채취에 대한 값이 Grab 시료채취에 대한 값과 동일하므로 시료채취의 형태를 구분하지 않고 피폭선량 평가를 수행하였다. 또한, INDAC 코드에서는 불활성기체를 액체상 방사성유출물내에 존재하지 않는 핵종으로 고려하기 때문에 동 핵종의 검출하한치에 따른 피폭선량 평가를 수행하지 못하였다. 표 2에 제시된 핵종구분중에서 방사성요오드, 방사성입자, 스트론튬 및 전알파에 대하여는 대표핵종으로서 원자력발전소에서의 주요 관심핵종인

$^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234}\text{U}$ 를 선정하여 주민 피폭선량을 평가하였다.

### 방사성요오드( $^{131}\text{I}$ )에 대한 평가

방사성요오드의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 11에 제시되어 있다. 방사성요오드의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 274% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 372% 정도의 피폭선량에 해당한다. 고리 1,2호기의 경우, I-131에 대한 측정기기의 검출하한치는  $5.998 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 16% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 22% 정도의 피폭선량에 해당한다. 참고로, 영광 3,4호기의 I-131에 대한 측정기기의 검출하한치는  $3.243 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ 이며, 동 수치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 8% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 11% 정도의 피폭선량에 해당한다. 따라서, 방사성요오드의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 높은 수준이므로 동 핵종의 검출하한치를 하향 조정할 필요가 있다. 선량기준치 대비 10%에 해당하는 값이  $3.2 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ 이므로 이 값에 추가적인 여유도 및 일종의 magic number로서의 역할을 고려하여  $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ 를 방사성요오드의 검출하한치로 도출하였다.

### 감마방출체( $^{137}\text{Cs}$ )에 대한 평가

감마방출체의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 11에 제시되어 있다. 감마방출체의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 1% 정도의 피폭선량에 해당한다. 따라서, 감마방출체의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다.

### 삼중수소( $^3\text{H}$ )에 대한 평가결과

삼중수소의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 11에 제시되어 있다. 삼중수소의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 1% 정도의 피폭선량에 해당한다. 따라서, 삼중수소의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다.

### 스트론튬( $^{90}\text{Sr}$ )에 대한 평가

스트론튬의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 12에 제시되어 있다. 스트론튬의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 1% 정도의 피폭선량에 해당한다. 따라서, 스트론튬의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다.

### 전알파( $^{234}\text{U}$ )에 대한 평가

전알파의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 12에 제시되어 있다. 전알파의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109 선량환산계수 또는 ICRP-60의 선량환산계수를 사용하더라도 선량기준치 대비 최대 2% 정도의 피폭선량에 해당한다. 따라서, 전알파의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 충분한 수준이었다.

## <sup>55</sup>Fe에 대한 평가

<sup>55</sup>Fe의 검출하한치에 따른 주민피폭선량은 표 12에 제시되어 있다. <sup>55</sup>Fe의 검출하한치는 US-NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 사용하면 선량기준치 대비 최대 13% 정도이고 ICRP-60의 선량환산계수를 적용하면 선량기준치 대비 49% 정도의 피폭선량에 해당한다. 국내의 원전에서는 액체상 방사성유출물내 <sup>55</sup>Fe의 방사능분석을 수행하지 않고 있어 동 핵종의 실제 측기기 검출하한치에 따른 주민피폭선량을 평가하지 못하였다. 미국의 경우, <sup>55</sup>Fe의 검출하한치가 NUREG-1301에 기술되어 있고, 동 핵종의 분석을 실제로 수행하고 있다. 따라서, 액체상 방사성 유출물내 <sup>55</sup>Fe의 소외 배출량을 평가하여야 하고 NUREG-1301에 제시된 <sup>55</sup>Fe의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 높은 수준이므로 동 핵종의 검출하한치를 하향 조정할 필요가 있다. 선량기준치 대비 10%에 해당하는 값이  $2.0 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$  이므로 이 값에 추가적인 여유도 및 일종의 magic number로서의 역할을 고려하여  $1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 를 <sup>55</sup>Fe의 검출하한치로 도출하였다.

## ICRP-60 방사선방호 권고에 근거한 검출하한치 도출

기체상 및 액체상 방사성유출물의 검출하한치에 대한 주민피폭선량 평가결과중 과학기술부 장관고시에 제시된 선량기준치의 10%를 초과한 핵종들에 한하여 ICRP-60 방사선방호 권고에 근거한 검출하한치를 도출하였다. 기체상 방사성유출물의 경우, 삼중수소, 스트론튬 및 전알파의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 높은 수준인 것으로 평가되었으며, 액체상 방사성유출물의 경우에는 방사성요오드 및 <sup>55</sup>Fe의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에 높은 수준인 것으로 평가되었다. 기체 및 액체상 방사성유출물 감시와 관련된 최적 검출하한치는 표 12에 제시되어 있으며, IAEA 보고서[15,16]에서 권고한 검출하한치는 표 13에 제시되어 있다.

기체상 방사성유출물의 경우, 표 12에 제시된 스트론튬 및 전알파의 검출하한치는 IAEA의 권고치 보다 각각 1.7배 및 50배 정도 큰 값을 보이고 있는데 이것은 주민피폭선량 평가가정의 차이 및 선량기준치 분율의 차이에서 기인한 것이다. 그러나, IAEA 검출하한치의 설정방법이 IAEA 보고서에 명확히 제시되지 않은 관계로 상세한 비교분석을 수행할 수는 없었다. 표 13에 제시된 삼중수소의 검출하한치는 grab 시료채취에 대한 값이고 표 14에 제시된 값은 연속 시료채취에 대한 값이므로 비교를 수행할 수 없었다. 표 13에 제시된 삼중수소, 스트론튬 및 전알파의 검출하한치는 현재 국내의 발전소에서 적용하고 있는 검출하한치인 표 1의 값 보다 각각 10배,  $10^3$ 배,  $10^2$ 배 작은 값이다.

액체상 방사성유출물의 경우, 표 13에 제시된 방사성요오드의 검출하한치는 IAEA의 권고치 보다 70배 정도 작은 값을 보이고 있는데 이것은 주민피폭선량 평가가정의 차이 및 선량기준치 분율의 차이에서 기인한 것이다. 그러나, IAEA 검출하한치의 설정방법이 IAEA 보고서에 명확히 제시되지 않은 관계로 상세한 비교분석을 수행할 수는 없었다. 표 13에 제시된 방사성요오드 및 <sup>55</sup>Fe의 검출하한치는 현재 국내의 발전소에서 적용하고 있는 검출하한치인 표 1의 값 보다 각각  $10^2$ 배 및 10배 작은 값이다.

## 결과 및 논의

본 연구에서는 NUREG-1301에 제시된 검출하한치가 ICRP-60 방사선방호 신권고, 국내원전의 설계 및 부지 특성 등에 비추어 볼 때 환경상의 위해방지를 탐지하기에 충분한 수준인가를 평가하기 위하여 소외배출 유형별 및 핵종별 검출하한치에 따른 주민 피폭선량 평가를 수행하였다. 또한, 이러한 피폭선량 평가결과에 근거하여 국내 특성에 적합한 소외배출 유형별 및 핵종별 검출하한치를 설정하였다.

주민 피폭선량 평가결과에서 보는 바와 같이 NUREG-1301의 검출하한치는 보수적으로 낮게 설정된 값이 아닌 것으로 확인되었으며, 이것은 방사능 측정치가 NUREG-1301의 검출하한치를 하회한다고 하여도 동 분석결과를 피폭선량 평가에 고려하여야 함을 반증하는 것이다. 따라서, 방사능 측정치가 NUREG-1301의 검출하한치보다 작은 값인지의 여부에 관계없이 핵종분석의 결과로 확인된 모든 핵종의 방사능 양을 고려하여 주민피폭선량을 평가하여야 함을 알 수 있었다.

기체상 방사성유출물의 경우에는 삼중수소, 스트론튬 및 전알파의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 높은 수준인 것으로 평가되었으며, 액체상 방사성유출물의 경우에는 방사성요오드 및  $^{55}\text{Fe}$ 의 검출하한치가 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 높은 수준인 것으로 평가되었다. 이와 관련, 환경상의 위해방지를 위한 선량기준치 대비 10%를 기준으로 설정하여 상기 핵종들의 최적 검출하한치를 도출하였다.

국내의 원전에서는 액체상 방사성유출물내  $^{55}\text{Fe}$ 의 방사능분석을 수행하지 않고 있다. 그러나, 미국의 경우에는 NUREG-1301에 의거하여 동 핵종에 대한 분석을 수행하고 있으며,  $^{55}\text{Fe}$ 에 의한 주민피폭선량은 총 피폭선량 대비 무시할 수 없는 수준인 것으로 파악되었다. 따라서, 액체상 방사성유출물내  $^{55}\text{Fe}$ 의 배출량을 NUREG-1301의 주기에 따라 분석하여야 하며, 동 핵종의 배출량에 근거하여 주민피폭선량을 평가할 필요가 있다.

격납건물의 Purge와 관련, Grab 시료의 검출하한치는 환경상의 위해방지 여부를 감시하기에는 수치가 높은 수준이므로 방사성물질의 소외배출량 평가를 위한 검출하한치로서 적용하기에는 부적합하였다. 기체상 방사성유출물 감시와 관련, grab 시료 및 동 시료의 검출하한치에 근거하여 연속 배출경로를 감시·평가하는 것은 환경상의 위해방지 측면에서 볼 때 부적합한 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 10 CFR part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities.
2. 10 CFR part 20, Standards for Protection against Radiation.
3. 10 CFR part 50 부록 I, Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions of Operation to Meet the Criterion ALARA for Radioactive Material in LWR Effluents.
4. Generic Letter 89-01, Implementation of Programmatic Controls for Radiological Effluent Technical Specifications in the Administrative Controls Section of the Technical Specifications and the Relocation of Procedural Details of RETS to the Offsite Dose Calculation Manual or to the Process Control Program, US-NRC (1989).
5. NUREG-0133, Preparation of Radiological Effluent Technical Specifications for Nuclear Power Plants, US-NRC (1977).
6. NUREG-1301, Offsite Dose Calculation Manual Guidance: Standard Radiological Effluent Controls for Pressurized Water Reactors, US-NRC (1991).



7. US-NRC Regulatory Guide 1.21, Measuring, Evaluating, and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants (1974).
8. US-NRC Regulatory Guide 4.8, Environmental Technical Specifications for Nuclear Power Plants (FOR COMMENT) (1975).
9. US-NRC Regulatory Guide 4.15, Quality Assurance for Radiological Monitoring Programs (Normal Operations) - Effluent Streams and the Environment (1979).
10. 원자력발전소 주변 환경방사선조사보고서(1999년도), 한국전력공사 (2000).
11. INDAC 코드 버전 1, 한국원자력안전기술원, 프로그램 등록번호:99-01-25 (1999).
12. US-NRC Regulatory Guide 1.109, Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions of Operation to Meet the Criterion ALARA for Radioactive Material in LWR Effluents (1977).
13. 방사능 방재환경 규제기술개발(KINS/GR-199) 별책 1, 한국원자력안전기술원 (2000).
14. 과학기술부 고시 제98-12호, 방사선량 등을 정하는 기준 (1998).
15. IAEA Draft Safety Report, Technical Considerations in the Design and Operation of Effluent and Environmental Radiation Monitoring Programmes and Systems, 1999.
16. IAEA Safety Series 46, Monitoring of Airborne and Liquid Radioactive Releases from Nuclear Facilities to the Environment, 1978.

표 1. 기체상 방사성유출물 감시 관련 검출하한치

핵 종	규제지침 1.21		NUREG-1301	
	연속감시	시료 분석	연속감시	연속채취/Grab 시료 분석
불활성 기체	감마 10mrad/yr, 베타 20mrad/yr의 작은 분율	$10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$	$10^{-6} \mu\text{Ci/cc}$	$10^{-4} \mu\text{Ci/cc}^{*1}$
방사성요오드	N/A <sup>*3</sup>	15mrem/yr의 작은 분율	N/A	$10^{-4} \mu\text{Ci/cc}^{*1}$ $10^{-12} \mu\text{Ci/cc}^{*2}$
방사성입자 - 스트론튬 - 전알파	N/A	15mrem/yr의 작은 분율	N/A	$10^{-4} \mu\text{Ci/cc}^{*1}$ $10^{-11} \mu\text{Ci/cc}^{*2}$
삼중수소	N/A	$10^{-6} \mu\text{Ci/cc}$	N/A	$10^{-6} \mu\text{Ci/cc}^{*1}$

주 1: Grab 시료, 2: 연속채취 시료, 3: 제시된 자료 없음

표 2. 액체상 방사성유출물 감시 관련 검출하한치 (단위 :  $\mu\text{Ci}/\text{cc}$ )

핵종	규제지침 1.21*1	NUREG-1301*1
용존기체	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
감마방출체	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$
$^{131}\text{I}$	N/A*2	$1 \times 10^{-6}$
삼중수소	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
전알파	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$
스트론튬	$5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-8}$
$^{55}\text{Fe}$	N/A	$1 \times 10^{-6}$
진방사능	$1 \times 10^{-7}$	N/A

주 1 : Batch 및 연속배출에 동일하게 적용

2 : 제시된 자료 없음

표 3. 부지별 대기확산인자 현황 (1999년도 자료)

부지	대기확산인자			
	$\chi/Q^{*1}$	$\chi/Q^{d*1}$	$\chi/Q^{dd*1}$	$D/Q^{*2}$
고리	$2.763 \times 10^{-5}$	$2.755 \times 10^{-5}$	$2.542 \times 10^{-5}$	$8.116 \times 10^{-8}$
월성	$1.180 \times 10^{-7}$	$1.180 \times 10^{-7}$	$8.680 \times 10^{-8}$	$2.780 \times 10^{-8}$
영광	$9.856 \times 10^{-6}$	$9.836 \times 10^{-6}$	$9.670 \times 10^{-6}$	$3.284 \times 10^{-8}$
울진	$1.240 \times 10^{-5}$	$1.240 \times 10^{-5}$	$1.140 \times 10^{-5}$	$4.090 \times 10^{-8}$

주 1:  $\text{sec}/\text{m}^3$ , 2:  $\text{m}^{-2}$

표 4. 발전소별 주요 기체상 방사성유출물 배출지점의 배출유량

부지	주요건물별 배출유량(cfm)			비고
	격납건물	보조건물	핵연료건물	
고리 1	50,000	79,600		
고리 2	94,160 (purge 제외) 51,000 (purge)			1개의 plant vent
울진 1/2	163,619			울진 1,2호기 통합 배기
울진 3/4	47,000	20,000	27,300	건물별 배기

표 5. 기체상 방사성유출물 관련 계산가정

구 분	계 산 가 정
계산지점	- 제한구역 경계
고려대상	- 최대 피폭 연령군
대기확산인자	- 제한구역 경계에서의 최대 $\lambda/Q$ ('99년도 자료) - 연속배출 가정
계산코드	- INDAC 코드
환경특성 인자	- KINS/GR-199에 제시된 default 값

표 6. 기체상 불활성기체의 검출하한에 따른 예상선량(mSv/yr)

부지	규제지침 1.109 DCF			ICRP-60 DCF			비 고
	공기베타	공기감마	유효선량	공기베타	공기감마	유효선량	
고리 1	0.011	0.004	0.002	0.011	0.004	0.001	-보조건물/핵연료 건물 기준
고리 2	0.013	0.005	0.002	0.013	0.005	0.001	
울진 1/2	0.010	0.003	0.002	0.01	0.003	0.001	-연속감시기 기준
울진 3/4	0.002	0.001	0.001이하	0.002	0.001	0.001이하	-Xe-133 기준

표 7. 기체상 방사성요오드, <sup>137</sup>Cs 및 삼중수소의 검출하한에 따른 예상선량(mSv/yr)

부지	I-131		Cs-137		H-3	
	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 소아의 Spleen 선량
고 리 1	0.004	0.005	0.022	0.007	0.030	0.030
고 리 2	0.005	0.006	0.026	0.008	0.035	0.035
울 진 1/2	0.004	0.006	0.023	0.007	0.028	0.027
울 진 3/4	0.001	0.001	0.004	0.001	0.005	0.005

주 : 보조건물/핵연료건물 기준, 연속채취 기준

표 8. 기체상 스트론튬 및 우라늄의 검출하한에 따른 예상선량(mSv/yr)

부지	Sr-90		U-234	
	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량
고 리 1	5.390	2.200	0.213	0.723
고 리 2	6.376	2.602	0.252	0.855
울 진 1/2	5.570	2.270	0.218	0.743
울 진 3/4	0.919	0.375	0.036	0.123

주 : 보조건물/핵연료건물 기준, 연속채취 기준

표 9. 발전소별 주요 액체상 배출지점의 배출유량

부지	액체폐기물 배수구		비 고
	년간 폐기물 배출량*1	년간 희석수량*2	
고 리 1	42,850	2×10 <sup>2</sup>	1990년도
고 리 2	8,773		1983년도
울 진 1/2	11,266		1988년도

주 1: m<sup>3</sup>, 2: ft<sup>3</sup>/sec('99년도 자료에 근거한 가정치)

표 10. 액체상 방사성유출물 관련 계산가정

구 분	계 산 가 정
계산지점	- 제한구역 경계
고려대상	- 최대 피폭 연령군
해양희석인자	- 2를 적용
계산코드	- INDAC 코드
환경특성 인자	- KINS/GR-199에 제시된 default 값

표 11. 액체상 방사성요오드의 민감도에 따른 예상선량(mSv/yr)

부지	I-131		Cs-137		H-3	
	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 소아의 Spleen 선량
고 리 1	0.274	0.372	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하
고 리 2	0.056	0.076	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하
울 진 1/2	0.072	0.098	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하

표 12. 액체상 스트론튬의 민감도에 따른 예상선량(mSv/yr)

부지	Sr-90		U-234		Fe-55	
	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 십대의 뼈 선량	규제지침 1.109 DCF/ 소아의 뼈 선량	ICRP-60 DCF/ 소아의 Spleen 선량
고 리 1	0.001 이하	0.001 이하	0.001	0.002	0.013	0.049
고 리 2	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.003	0.010
울 진 1/2	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	0.001	0.003	0.013

표 13. ICRP-60 및 국내특성을 고려한 방사성유출물 감시 관련 검출하한치

단위 :  $\mu\text{Ci/cc}$

핵 종	기체상		액체상
	연속감시	연속채취/Grab 시료 분석	연속채취/Grab 시료 분석
불활성 기체	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-4}$ *1 $1 \times 10^{-6}$ *2	$1 \times 10^{-5}$ *3
감마방출체	해당없음	해당없음	$5 \times 10^{-7}$ *3
방사성요오드	해당없음	$1 \times 10^{-12}$ *3	$1 \times 10^{-8}$ *3
방사성입자	해당없음	$1 \times 10^{-11}$ *3	해당없음
삼중수소	해당없음	$1 \times 10^{-7}$ *4	$1 \times 10^{-5}$ *3
스트론튬	해당없음	$5 \times 10^{-14}$ *3	$5 \times 10^{-8}$ *3
진알파	해당없음	$1 \times 10^{-13}$ *3	$1 \times 10^{-7}$ *3
$^{55}\text{Fe}$	해당없음	해당없음	$1 \times 10^{-7}$ *3
진방사능	해당없음	해당없음	$1 \times 10^{-7}$ *3

주) 1: 격납건물 Purge시의 Grab 시료, 2: 기타 Grab 시료

3: Grab/연속채취 시료에 적용, 4: Grab 시료

표 14. 방사성유출물 감시 관련 IAEA의 검출하한 권고치 (단위:  $\mu\text{Ci/cc}$ )

핵종	기체상		액체상
	연속감시	연속 시료채취	
$^{135}\text{Xe}$	$1 \times 10^8$	해당없음	해당없음
$^{131}\text{I}$	해당없음	$8 \times 10^{-14}$	$7 \times 10^{-7}$ (*1)
$^{137}\text{Cs}$	해당없음	$3 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-7}$ (grab sampling)
전알파	해당없음	$2 \times 10^{-15}$	$5 \times 10^{-9}$ (on-line sampling) $1 \times 10^{-7}$ (grab sampling)
$^{90}\text{Sr}$	해당없음	$3 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-8}$ (grab sampling)
$^3\text{H}$	해당없음	$8 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-6}$ (on-line sampling) $1 \times 10^{-6}$ (grab sampling)
$^{59}\text{Fe}$	해당없음	해당없음	$1 \times 10^{-6}$ (on-line sampling)

주 1: IAEA Safety Series 46