# 방사선안전관리 실무: (Ⅱ) 배기중 및 배수중 배출관리기준의 적용

#### 김현기

한국원자력연구원 방사선방호팀

2014년 1월 2일 접수 / 2014년 2월 3일 1차 수정 / 2014년 2월 4일 채택

방사성동위원소를 포함하는 방사성물질은 전력생산에서부터 연구, 산업, 진단 및 치료 등의 목적으로 다양하게 활용되고 있다. 비밀봉 방사성물질을 이용하는 시설에서 이들 시설로부터 기체, 입자 또는 액체 형태의 방사성물질이 다소간 환경으로 배출되는 것은 피할 수 없으며, 이는 일반인의 방사선피폭을 야기하는 주요한 인공 방사선원이다. 본 논문은 보수적 가정과 간단한 계산에 의거하여 액상의 비밀봉선원을 사용하는 시설에서 배기설비를 통해 배출되는 공기중 방사성물질의 최대농도와 방사성폐액을 저장하는 저류조 배수구에서 배출되는 폐액중 방사성물질의 평균농도를 산출한 후, 관련 고시에서 정하는 각각의 배출관리기준값과 비교함으로써 일반인의 피폭 정도를 평가하는 절차를 제공한다. 이를 위해 방사성핵종의 1일 사용량, 취급형태, 비산율, 방사성폐액 발생량, 배기설비, 배수설비 등을 적절히 가정하였다. 제시된 절차는 비밀봉 방사성물질을 취급하는 시설에서 환경으로의 방사성물질의 계획적 배출에 따른 주변환경 영향평가에 손쉽게 적용할 수 있으므로 일반인의 피폭량 감축에 필요한 시설에서의 방사선안전관리 실무요건도출에 활용할 수 있다.

중심어: 방사선안전관리, 배기중 방사성물질, 배수중 방사성물질, 배출관리기준, 일반인 피폭, 방사능농도

## 1. 서론

방사성동위원소를 포함하는 방사성물질은 전력생산에 서부터 연구, 산업, 진단 및 치료 등의 목적으로 다양하게 활용되고 있다. 방사성물질의 이용과정에서 방사선에 피 폭하는 그룹은 방사선을 취급하는 방사선작업종사자(이 하 "종사자")와 피폭유발 행위로부터 피폭수준이 가장 높 을 것으로 예상되는 일반인("결정집단(Critical Group)" 이라 부름)으로 분류할 수 있다. 결정집단이 피폭하는 방 사선량은 대개 방사선작업종사자 보다 낮으며, 원자력시 설로부터의 투과성 방사선에 의한 직접피폭 또는 시설의 배기설비 및 배수설비로부터 환경으로 미량 배출되는 방 사성물질에 기인한다. 일반인에 대한 유효선량한도는 연 간 1 mSv 이다 [1,2]. 환경으로 배출되는 방사성물질에 대 한 일반인의 방사선방호는 방사성물질의 환경배출로 인 해 결정집단이 피폭하는 양을 수용가능한 수준, 즉 유효 선량한도 이하로 제한함으로써 보다 많은 수의 일반인을 방호하는 개념을 적용할 수 있다.

국내의 경우 방사선으로부터 일반인을 보호하기 위해 원자력안전법 시행령 제2조 제12호 등에서 원자력 및 방 사선을 이용하는 시설의 배기설비와 배수설비를 통해 환 경으로 배출될 수 있는 배출관리기준을 원자력안전위원 회가 정하도록 규정하고 있다. 이에 따라 원자력안전위원 회 고시 제2013-49호 "방사선방호 등에 관한 기준"의 [별표 3]에서는 방사성핵종 별로 배기중과 배수중 배출관리기준에 대한 각각의 값을 제공하고, 그 적용방법을 제6조에서 정하고 있다[3,4,5].

원자력 및 방사선 시설로부터 환경으로 배출되는 방사성물질의 양은 그 종류와 양, 물리적 상태, 화학적 형태, 취급 상태와 방법, 온도 등의 주변환경, 배출경로 등의 영향을 받으므로 정량적인 평가가 용이하지 않다. 본 논문은 보수적 가정과 간단한 계산에 의거하여 액상의 비밀봉선원을 사용하는 시설에서 배기설비를 통해 배출되는 공기중 방사성물질의 최대농도와 방사성페액을 저장하는 저류조 배수구에서 배출되는 폐액중 방사성물질의 평균 농도를 산출한 후, 고시에서 정하는 각각의 배출관리기준 값과 비교함으로써 일반인의 피폭 정도를 평가하는 절차를 제공한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 취급핵종

국내에서 산업, 의료, 교육 및 연구 목적으로 사용되는 대표적 비밀봉 방사성핵종인 <sup>32</sup>P, <sup>99m</sup>Tc, <sup>125</sup>I, <sup>131</sup>I, <sup>188</sup>Re 을 액상으로 취급하는 가상의 사용시설을 가정한다[6]. 각 취급핵종에 대한 화학적 형태, 반감기, 취급량은 표 1과 같

교신저자: 김현기, hkkim0@kaeri.re.kr 대전시 유성구 대덕대로 1045 한국원자력연구원

Table 1. Properties of Radioisotopes Used in the Hypothetical Workplace

| <br>핵 <del>중</del> | 화학적 형태 | 반감기<br>(d) | 1일 평균사용량<br>(MBq) | 1일 최대사용량<br>(MBq) |
|--------------------|--------|------------|-------------------|-------------------|
| <sup>32</sup> P    | M      | 14.3       | 11,840            | 23,680            |
| <sup>99m</sup> Tc  | M      | 0.25       | 11,840            | 23,680            |
| $^{125}I$          | F      | 60.1       | 7.4               | 14.8              |
| $^{131}I$          | F      | 8.0        | 1,850             | 3,700             |
| <sup>188</sup> Re  | M      | 0.71       | 1,850             | 3,700             |

다. 편의상 핵종별 1일 최대사용량은 표 1에서 보듯이 1일 평균사용량의 2배로 가정한다. 또한 핵종별로 1일 평균사용량에 연간 작업일수(250일)를 곱하면 연간사용량에 해당한다. 취급핵종에 대한 화학적 형태는 일반적인화합물에 적용할 수 있는 형태를 우선 하였으며, 제거율을 고려해야 하는 경우에는 상대적으로 제거율이 낮은 형태를 선택하였다.

# 2.2. 배기설비 및 배기구의 공기중 최대 방사능농도

본 사용시설은 2,000  $m^3h^3$ 의 배기용량을 지닌 배기설비를 갖추고, 0.5 의 가동인자(배기설비의 보수적 가동률임)로 운전됨을 가정한다. 비밀봉 방사성핵종을 취급하는 과정에서 공기 중으로 비산하는 방사성핵종의 양은 핵종의 종류, 물리작화학적 상태, 취급방법 등에 따라 상이하지만, 여기서는 액상의 핵종에 대하여 1일 최대사용량의 1/1,000 이 비산하는 것으로 가정한다 [7,8]. 보수적 평가를 위해 1일 최대비산량 전체가 배기계통으로 이동함을 가정하고, 필터의 보수적인 제염지수 (0.3  $\mu$ m 이상 크기의 입자상 기체에 대하여 1/1000, 방사성옥소에 대하여 1/100)를 적용하여 1일 최대배출량을 산출한다. 이와 같은 조건에서 배기구로 배출되는 각 핵종의 최대 방사능농도 (Bqm³)는 다음 식으로 계산된다.

$$C_M = \frac{A_M}{V_L} \tag{1}$$

여기서,

 $A_M$ : 배기구로 배출되는 1일 최대 방사능 [Bqd $^1$ ]  $A_M=(1일$  최대사용량 [Bq]) × (비산율 [d $^1$ ]) × (제염지수)  $V_L$ : 배기설비의 1일 배기량 [ $\mathbf{m}^3$ d $^1$ ]

 $V_L = (\text{배기용량} [\text{m}^3\text{h}^{-1}) \times (8 [\text{hd}^{-1}]) \times (\text{가동인자})$ 

#### 2.3. 배수설비 및 배수중 폐액의 방시능농도

본 사용시설에서 방사성물질의 사용 후에 1일 평균사용량의 0.5%가 매일 50 L의 세척 폐액과 함께 방사성폐액을 저장하는 저류조로 유입됨을 가정한다. 배수설비는 각각 7,000 L 저장용량을 지닌 3대의 저류조가 병렬로 설치되고, 각 저류조 최대용량의 90%가 충진되면, 방사성폐액은 다음 저류조에 충진됨을 가정한다. 그리고 세 번째 저류조 저장용량의 2/3가 충진되는 시점에 첫 번째 저류조의 배수를 개시함을 가정한다. 따라서 배수시점에서 첫 번째 저류조 내의 잔류 방사능 (Bq)은 다음 식으로계산된다.

$$A(T_d) = \frac{\dot{A}_c}{\lambda} \left( 1 - e^{-\lambda T_c} \right) e^{-\lambda T_d} \tag{2}$$

여기서,

 $A_c$ : 저류조로 유입되는 일간 방사능 [Bqd<sup>-1</sup>]  $A_c$  = (1일 평균사용량 [Bql) × (0,5% [d<sup>-1</sup>])

λ : 붕괴상수 [d<sup>-1</sup>]

 $T_c$ : 1대의 저류조 만수에 소요되는 시간[d]

$$T_c = \frac{7,000\,L \times 90\%}{50\,L/d} \, = \, 126\,d$$

 $T_d$ : 첫 번째 저류조의 만수 후부터 배수 시까지 경과 시간 [d]

$$T_d = \frac{7,000 L \times 90\% + 7,000 L \times 67\%}{50 L/d} = 219.3 d$$

식(2) 를 통해 계산된 저류조 내의 잔류 방사능을 저류조 1대의 만수용량 $(7,000 \text{ L} \times 90\% = 6.3 \text{ m}^3)$ 으로 나누면 배수시점에서 첫 번째 저류조의 배수구로 배출되는 각 핵종의 방사능농도를 산출할 수 있다.

#### 3. 결과 및 고찰

본 사용시설의 방사성핵종 취급과정에서 비산 및 방사성폐액 발생으로 인해 배기구로 배출되는 공기중 최대 방사능농도와 배수구로 배출되는 폐액중 방사능농도를 산출한 결과를 표 2와 표 3의 F열에 각각 제시하였다. 표 2와 3에서 G열은 원자력안전위원회 고시 "방사선방호 등에 관한 기준"에서 정하는 배기중의 배출관리기준과 배수중의 배출관리기준을 나타낸다. 여기서 방사성물질의 종류를 알고 있는 2종 이상의 방사성핵종을 사용할 경우, 제한값은 각 분률의 합의 법칙을 적용한다.

표 2에서와 같이 5개 핵종을 사용하는 본 사용시설의 취급조건에서 기준대비 배기중 농도비의 합 (H열)은 0.67 이다. 따라서 본 시설의 운영과정에서 배기를 통해 배출되는 방사성핵종으로 인해 일반인의 결정집단이 피폭할 것으로 예상되는 연간 피폭량은 약 0.67 mSv (1 mSv × 0.67) 이다.

배수구의 배수중 방사능농도의 경우, 배수시점에서 기준대비 배수중 농도비의 합(표 3의 H열)은 0.64로 본 시설의 운영과정에서 방사성핵종의 배수배출로 인한 결정집단의 연간 피폭량은 약 0.64 mSv (1 mSv × 0.64)로 예상할 수 있다. 표 3의 D열과 E열에서 보듯이 첫 번째 저

Table 2. Calculation Results for the Concentration of Radioactive Materials in Gaseous Effluents Discharges

| 핵종                | 화학적 형태 | 1일<br>최대비산량 <sup>1)</sup> | 제염지수  | 1일<br>최대배출량          | 배기구<br>공기중<br>최대농도    | 배기중의<br>배출관리<br>기준 <b>농</b> 도 | 기준대비<br>배기농도비        |
|-------------------|--------|---------------------------|-------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
|                   |        | [Bqd <sup>-1</sup> ]      |       | [Bqd <sup>-1</sup> ] | [Bqm <sup>-3</sup> ]  | [Bqm <sup>-3</sup> ]          |                      |
| (A)               | (B)    | (C)                       | (D)   | (E=C×D)              | (F)                   | (G)                           | (H=F/G)              |
| $^{32}$ P         | M      | $2.37 \times 10^7$        | 0.001 | 2.37×10 <sup>4</sup> | 2.96×10 <sup>0</sup>  | 2.0×10 <sup>1</sup>           | 1.5×10 <sup>-1</sup> |
| <sup>99m</sup> Tc | M      | $2.37 \times 10^{7}$      | 0.001 | 2.37×10 <sup>4</sup> | 2.96×10 <sup>0</sup>  | $4.0 \times 10^{3}$           | 7.4×10 <sup>-4</sup> |
| $^{125}I$         | F      | $1.48 \times 10^4$        | 0.01  | $1.48 \times 10^{2}$ | 1.85×10 <sup>-2</sup> | 1.0×10 <sup>1</sup>           | 1.9×10 <sup>-3</sup> |
| $^{131}I$         | F      | $3.70 \times 10^6$        | 0.01  | 3.70×10 <sup>4</sup> | 4.63×10 <sup>0</sup>  | 9.0×10 <sup>0</sup>           | 5.1×10 <sup>-1</sup> |
| <sup>188</sup> Re | M      | $3.70 \times 10^6$        | 0.001 | $3.70 \times 10^3$   | 4.63×10 <sup>-1</sup> | $1.0 \times 10^{2}$           | 4.6×10 <sup>-3</sup> |
|                   |        |                           | 분률의 학 | <u></u>              |                       |                               | 6.7×10 <sup>-1</sup> |

1) 1일 최대비산량 = (1일 최대사용량)×(비산율)

Table 3. Calculation Results for the Concentration of Radioactive Materials in Liquid Effluents Discharges

| 핵종                | 화학적 형태 | 방사능의 일간<br>저류조 유입률   | 1대 만수시<br>저류조내 방사 <del>능</del> | 배수시점의<br>배수중<br>방사능   | 배수시점의<br>배 <del>수중</del><br>방사 <del>능농</del> 도 | 배 <del>수중</del> 의<br>배출관리<br>기 <del>준농</del> 도 | 기준대비<br>배 <del>수농</del> 도비 |
|-------------------|--------|----------------------|--------------------------------|-----------------------|--|--|----------------------------|
|                   |        | [Bqd <sup>-1</sup> ] | [Bq]                           | [Bq]                  | [Bqm <sup>-3</sup> ]                           | [Bqm <sup>-3</sup> ]                           |                            |
| (A)               | (B)    | (C)                  | (D)                            | (E)                   | (F)  | (G)  | (H=F/G)                    |
| $^{32}P$          | M      | $5.92 \times 10^7$   | $1.22 \times 10^9$             | $2.95 \times 10^4$    | $4.68 \times 10^{3}$                           | $3.0 \times 10^{5}$                            | 0.02                       |
| <sup>99m</sup> Tc | M      | 5.92×10 <sup>7</sup> | $2.14 \times 10^7$             | 0.00                  | 0.00   | $3.0 \times 10^{7}$                            | 0.00                       |
| $^{125}I$         | F      | $3.70 \times 10^4$   | $2.46 \times 10^{6}$           | $1.96 \times 10^{5}$  | $3.11 \times 10^4$                             | 5.0×10 <sup>4</sup>                            | 0.62                       |
| $^{131}I$         | F      | 9.25×10 <sup>6</sup> | 1.07×10 <sup>8</sup>           | 5.98×10 <sup>-1</sup> | 9.50×10 <sup>-2</sup>                          | $3.0 \times 10^4$                              | 0.00                       |
| <sup>188</sup> Re | M      | 9.25×10 <sup>6</sup> | 9.45×10 <sup>6</sup>           | 0.00                  | 0.00   | 5.0×10 <sup>5</sup>                            | 0.00                       |
|                   | 합계     | 1.37×10 <sup>8</sup> | 1.36×10 <sup>9</sup>           | 2.25×10 <sup>5</sup>  | 3.58×10 <sup>4</sup>                           |  |                            |
|                   |        |                      | 분률의 합                          |                       |  |  | 0.64                       |

류조가 만수되었을 때 저류조 내의 총 방사능  $(1.36\times10^9)$  Bq)은 만수 후부터 배수시점까지의 시간인 219.3 일이 경과한 후에 약 1/6,000로 줄어든다. 이는 219.3 일이 경과하는 동안 상대적으로 짧은 반감기를 지닌  $^{99m}$ Tc,  $^{131}$ I,  $^{188}$ Re은 붕괴하여 없어지고, 저류조 내에는 상대적으로 반감기가 긴  $^{32}$ P,  $^{125}$ I 이 잔류하기 때문이다. 따라서 다른 핵종에 비하여  $^{125}$ I 의 1일 평균 사용량이 작아 저류조로 유입되는 양이 적음에도 불구하고 배수시점에서 배수중총 방사능  $(2.25\times10^5)$  Bq)의 약 87%가  $^{125}$ I의 방사능에 기인하게 된다. 즉 저류조의 배수중 방사능동도의 주된 결정인자는 예상되는 바와 같이 저류조로 유입되는 핵종중 반감기가 긴 핵종의 유입량임을 의미한다.

#### 4. 결론

가상의 사용시설에서 취급하는 각 방사성핵종에 대하여 1일 사용량, 취급형태, 1일 비산율, 1일 방사성폐액 발생량, 배기설비, 배수설비 등에 대한 적절한 가정 하에 방사성핵종의 취급과정에서 비산과 방사성폐액의 발생으로인해 배기구 및 배수구로 배출되는 방사능농도를 계산하여 일반인의 피폭정도를 평가하는 간단한 절차를 제시하였다. 평가절차가 단순한 만큼 환경으로 배출되는 방사능

농도에 영향을 미치는 주요한 인자로서 본 논문에서 적용한 비산율 및 방사성물질의 배기계통으로의 이동률, 배기설비의 가동률, 방사성폐액 발생량 등은 상당히 보수적인수치임을 이해할 필요가 있다. 따라서 이들 인자들에 대한 실질적인 자료가 가용하다면 보다 현실적인 결과를 획득할 수 있다.

앞서 언급하였듯이 본 논문에서 산출된 배기와 배수를 통해 환경으로 배출되는 방사능농도는 시설의 배기 및 배 수설비에 직접 인접하여 거주함을 가정하는 결정집단에 적용되는 값이다. 실제 원자력시설에서 환경으로 배출된 방사성핵종은 각각 대기와 수계에서 대규모로 희석되고, 붕괴함에 따라 일반인의 실질적인 피폭량은 결정집단의 피폭량보다 극히 작을 것이다.

한편 본 논문에서 제공하는 절차는 비밀봉 방사성물질을 취급하는 시설에서 환경으로의 방사성물질의 계획적 배출에 따른 주변환경 영향평가에 손쉽게 적용할 수 있으므로 일반인의 피폭량 감축을 위해 시설에서 필요로 하는 방사선안전관리 실무요건 도출에 효과적으로 활용할 수 있다. 또한 본 절차는 시설의 배기와 배수 설비를 설치함에 있어서 설계 전단계에 요구되는 방사선학적 정보를 획득할 목적으로 활용될 수 있다.

#### 참고문헌

- 1. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection Publication 103. Pergamon Press. 2007.
- 2. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection Publication 60. Pergamon Press. 1991.
- 3. 대한민국정부. 원자력안전법 시행령. 2013.
- 4. 대한민국정부. 원자력안전위원회 고시 제2013-49호.

- 방사선방호 등에 관한 기준. 2013.
- 5. 대한민국정부. 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙. 2013.
- 6. 한국동위원소협회. 2010년도 방사선이용통계. 2011.
- 7. 高田 茂 他. 방사능물질의 종류와 취급조건에 따른 비 산율 계산법. Radioisotopes. 1983;32(5):260-269.
- 8. 김현기, 방사선안전관리 실무: (I) 연간섭취한도와 유도공기중농도의 적용. 방사선방어학회지. 2013; 38(4):234-236.

# Practical Radiation Safety Control: (II) Application of Numerical Guidance for the Discharges of Radioactive Gaseous and Liquid Effluents

Hyun Kee Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, Department of Radiation Protection

Abstract - Radioactive materials are in use and have many applications from the generation of electricity to the purposes of research, industry and medicine such as diagnosis and therapy. In the course of their use some of radioactive substances may be discharged into the environment from facilities using the unsealed radioactive materials, which are main artificial sources occurring the public exposure. Discharges are in the form of gases, particles or liquids.

This paper provides procedures to estimate the level of the public exposure based on the conservative assumptions and simple calculations in the facility using unsealed liquid sources. They consist of two processes; (1) to calculate maximum concentration of gaseous effluents discharged through the exhaust pipe and average concentration of liquid effluents discharged through the drain of the storage tank, (2) to compare each of them to numerical guidances for the discharges of radioactive gaseous and liquid effluents mentioned in the related notification. For this purpose followings are assumed properly; daily usage, form and dispersion rate of radionuclides, daily amount of radioactive liquid waste and exhaust and drainage equipment. The procedures are readily applicable to evaluate environmental effects by planned effluent discharges from facilities using the unsealed radioactive materials. In addition they may be utilized to obtain practical requirements for radiation safety control necessary for the reductions of the public exposure.

Keywords: Radiation safety control, Gaseous radioactive effluent, Liquid radioactive effluent, Guidance for the discharges of radioactive effluents, Public exposure, Radioactive concentration