

# 방사능 에어로졸 (Radioactive Aerosol)

김 용 진  
한국기계연구원  
열유체시스템연구부 / 선임연구원

## 1. 머리말

인간은 일상적인 생활에서 자연방사선과 인공방사선에 의하여 피폭될 수 있는데, 영국의 국가방사선방호청(NRBP)의 자료에 의하면 그림 1에서 보는 바와 같이 인간이 피폭되는 방사선 중 우주선과 원시방사선 등에 의하여 배출되는 자연방사선이 87%이며, 인공방사선은 13% 정도이다. 방사선의 종류(알파, 베타, 감마선 등)에 따른 인체에 흡수되는 흡수선량을 선량당량이라고 하는데, 전세계적으로 1인당 년간 피폭되는 유효선량당량은 대략 3~4 밀리시버트( $mSv = 1 \text{ joule}/\text{생체조직 } 1kg$ ) 정도인데, 문명이 발달함에 따라 방사능 의료기의 사용이 증가되고 항공기 및 지하공간의 이용이 증가됨에 따라 인간의 방사선 피폭량은 점차적으로 증가하는 경향이다. 최근의 환경측면에서 실내공기 중 및 원자력 시설에서 방사능 오염 및 공기질 관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 방사능은 기체상으로도 인체에 중요하지만 대부분이 방사능핵종(Radionuclide) 또는

에어로졸(Aerosol)의 호흡에 의한 피폭이 더욱 중요하다.

에어로졸 가운데에서 이러한 방사능을 함유한 입자를 방사능 에어로졸이라고 부르는데, 여기서는 특히 원자력시설에서 방사능 에어로졸에 대하여 발생과 인체에 영향 등에 관하여 고찰하고자 한다. 현재, 전세계적으로 원자력발전소는 약 430여기가 가동되고 있으며, 전세계 발전량의 17% 이상을 차지하고 있다. 그리고 1995년 기준 우리나라의 경우, 원자력 발전량은 전 발전량의 34%에 달하고 있는 국가기간 에너지이며 2000년대는 40% 이상으로 확대될 전망이다. 원자력시설에서의 원자로 및 재처리공장의 운전, 핵연료가 공과 방사화학 공정등에서 발생되는 방사능 에어로졸은 현장에서의 작업자들의 피폭뿐만 아니라 대기로 배출되어 심각한 환경오염을 유발시키므로 시설내의 모든 구역의 공기중의 방사능 농도를 최소화하여야 한다. 이러한 입자들의 거동은 일반적인 에어로졸과는 기본적으로 차이가 없지만 입자상 유해물질의 한 종류로서 이들을 제어하는 것은 매우

중요하다.

## 2. 방사능 에어로졸의 발생

방사능 핵종들은 독립적으로 자유이온의 형태로 존재하거나 공기중에 부유하는 에어로졸 입자들과 흡수 또는 흡착에 의하여 부착된다. 한예로, 실내의 라돈방사능의 핵종의 대표적인  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ 들의 입경분포를 그림 2에서 보여주는데, 이중피크(Bimodal)의 분포를 가지는 것으로 알려져 있는데, 대부분 1~10nm에 해당하는 미흡착 핵종의 작은 피크와 100~2000nm에 해당하는 흡착 핵종의 큰 피크를 보인다. 그리고 그림 3에서 보이는 바와 같이 라돈핵종은 라돈의 붕괴로 생성된 후 공기중에서 초기에는 라돈붕괴시 미흡착 자유금속이온형으로 짧은 시간동안 존재하거나(평균수명~50초), 이어 주변 에어로졸 입자와 흡착, 부착된 흡착자핵종으로 이후 존재하며 물리적 특성이 흡,

부착에 따라 달라지기 때문에 방사선계측 및 물리학 분야에서는 경우에 따라 전혀 다른 핵종으로 분류하기도 한다. 이러한 방사능 핵종의 에어로졸 흡착율, 부착율, 벽면침적율, 침적속도, 방사능입경 등의 분포특성 등은 동일한 실내에서도 변화와 요동의 폭이 심하여 이들을 정밀하게 측정하는 것은 매우 어려우며 이에 대한 연구들이 많이 수행되고 있다.

원자력시설에는 그림 4에서 보는바와 같이 여러 작업영역이 있는데, 가공·제조·운전·폐기물처리등의 작업공정에서 입자상 방사능 물질에 대한 공기오염이 발생될 수 있다. 그리고 일반적인 원자로 설비의 수명은 약 30년으로 추정되는데, 원자력발전의 선진국인 미국이나 프랑스, 영국등에서는 이미 초기의 발전시설의 해체, 간신이 시도되고 있다. 이러한 원자로 시설의 해체철거에는 구조물, 생체차폐의 기계적, 열적절단과 연마

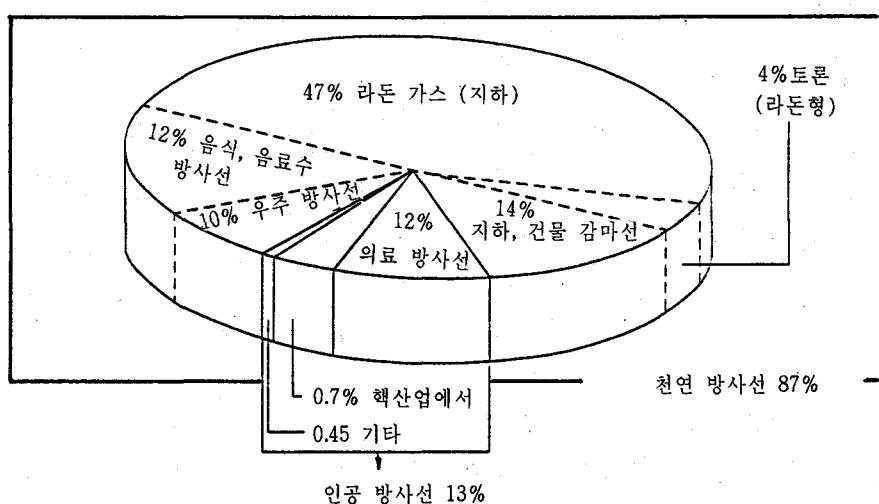


그림 1. 생활환경에서의 방사능의 종류와 백분율

등의 작업공정에 수반되어 다양한 분진의 발생이 예측되며 이것들은 많은 방사능을 지니게 된다. 이들의 농도는  $1\sim 1000\text{mg}/\text{m}^3$ , 입경은  $0.1\mu\text{m}$ 이하의 초미립자로부터  $100\mu\text{m}$  이상에 까지 절단용 공구 및 공법에 따라 성상이 다

른 에어로졸이 발생된다. 그림 5는 원자로내의 구조물의 수중절단과 공기중의 절단시에 발생, 비산되는 에어로졸 입자의 입경분포의 측정예를 보여주고 있다.

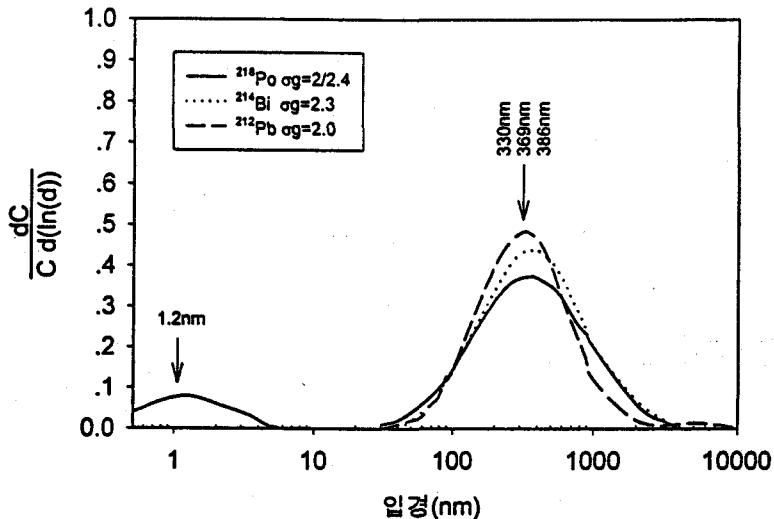


그림 2. 실내 라돈핵종들의 입경분포

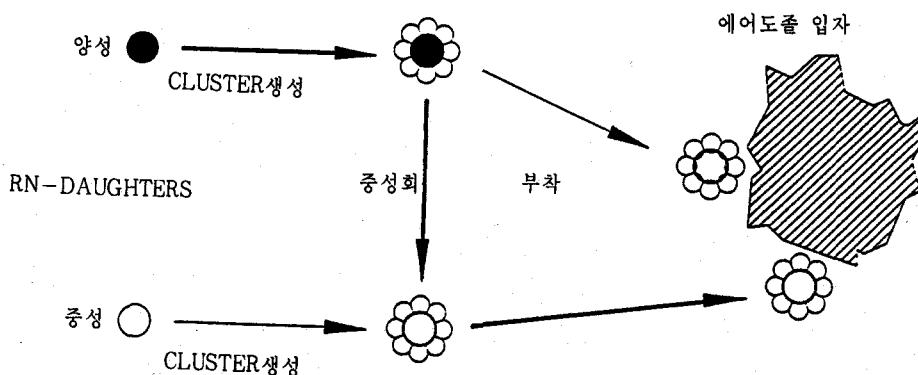


그림 3. 라돈핵종들의 공기중의 거동과 방사능에어로졸 생성 기구

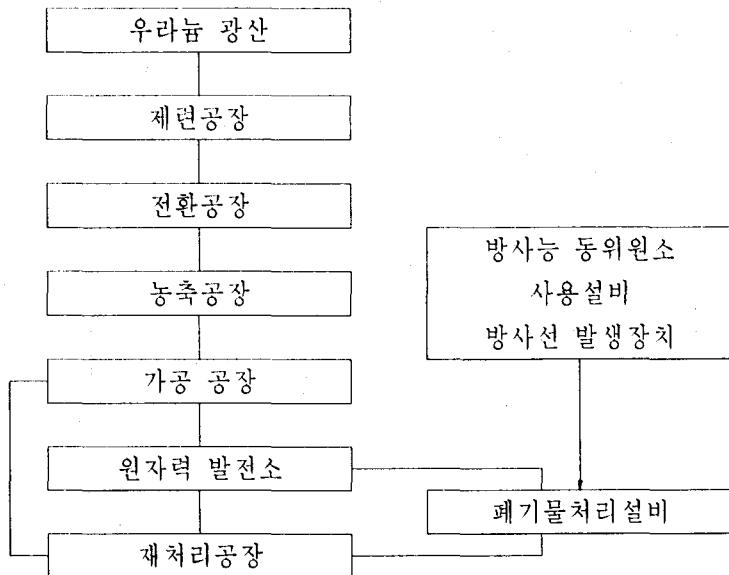


그림 4. 원자력설비와 방사능에어로졸의 발생

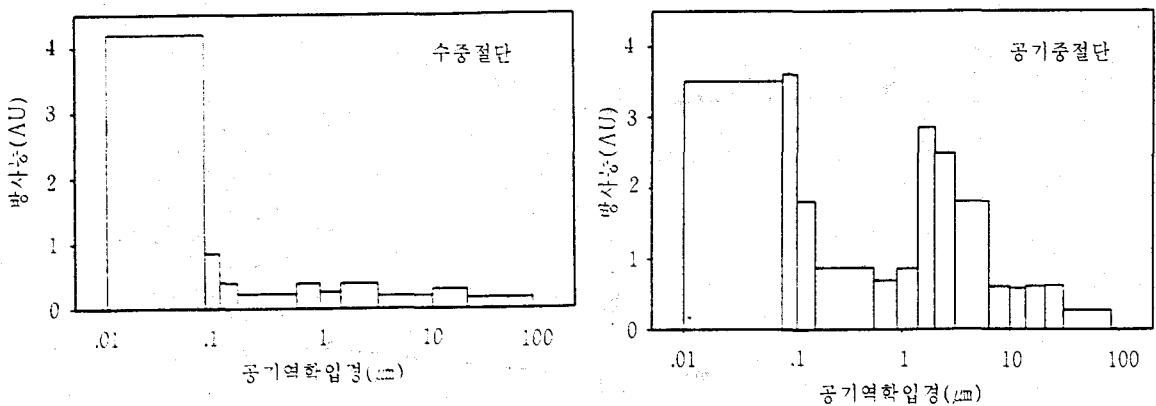


그림 5. 원자로내부 구조물의 수증 및 공기증 절단시 발생되는 에어로졸 입경분포

### 3. 방사능 에어로졸의 인체유해성

방사능 에어로졸의 흡입에 의하여 인체 장기가 받게 되는 방사선량을 직접 측정하는 것은 어렵고 내부피폭선량은 방사능 물질의 체내에서의 거동과 인체구조를 모델화한 시뮬레이션 계산에 의하여 산출된다. 즉 호흡기의 구조모델을 이용한 폐동력학적 시뮬레이션에 의하여 정량적인 평가를 하고 있다. 최근의 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)는 이론적, 실증적 연구로써 얻게된 자료에 근거하여 신호흡기도모델 ICRP66이라는 새로운 모델이 제안되고 주목되고 있다. 자세한 것은 여러 가지 문헌에 나타나 있지만 그림 6에 나타낸 바와 같이 호흡기도의 침착대상영역을 기존의 3분할 모델(N-P, T-B, P)에서 그림에서의 ET<sub>1</sub>, ET<sub>2</sub>, BB, bb -B, P)에서 그림에서의 ET<sub>1</sub>, ET<sub>2</sub>, BB, bb

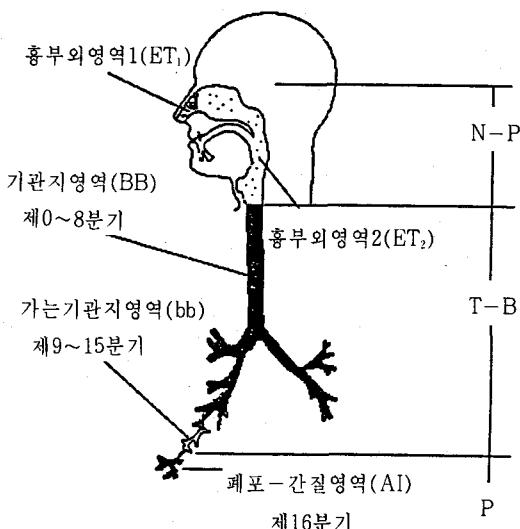


그림 6. 신·구 모델에서의 호흡기도의 구분 비교

및 AI 등의 5분할 모델로 세분화되었다.

그리고 새로운 모델에서는 대상입경을 0.1  $\mu\text{m}$ 이하까지 확대하여 입경범위 0.005  $\mu\text{m}$ ~100  $\mu\text{m}$ 의 광범위한 에어로졸의 각 기도영역에서 침착율의 계산식을 나타낸다.

침착율은 공기동력학적미캐니즘과 열역학적 미캐니즘의 작용에 따라 결정되며, 기도의 각 영역은 제각기 고유의 침착효율과 용적을 가지는 필터로써, 이러한 필터는 다단의 필터를 구성하고 있는 것으로 가정하여 침착의 분할합을 계산한다.

동시에 ICRP 신호흡기도 모델에서는 방사선량을 계산하기 위한 프로그램 개발되고 있다. 이러한 모델은 노동의학 또는 의료진단 분야에 있어서도 유용한 모델이다. 그림 7은 이 모델을 이용하여 기도의 각 구역별 에어로졸의 침착율을 계산한 결과를 보여주고 있다.

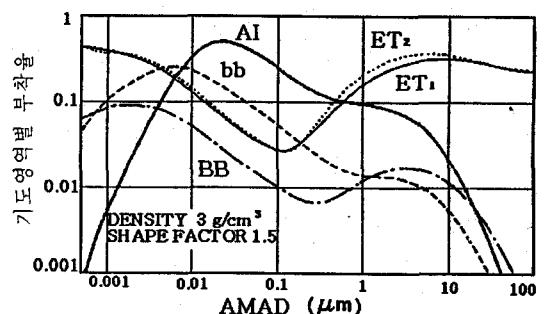


그림 7. 각 기도(호흡기) 영역별 입자 침착율

#### 4. 플루토늄 에어로졸의 제어

원자력 산업의 경수로 및 중수로에서 생성되는 플루토늄(Plutonium)은 핵연료 재처리 공장에서 용해, 추출 및 화학변환되어 핵연료 가공공장에서 펠렛(Pellet)화가 된 후 다시 원자로(고속증식로 또는 경수로)로 유입되는 리사이클 과정을 거치는데 이러한 과정에서 플루토늄 에어로졸이 발생하게 된다. 플루토늄은 원자번호가 94인 원소로써 천연에서는 존재하지 않는 인공적인 방사성 동위 원소로써, 동위체의 일부가 핵분열 성질이 있어 에너지원이 되는 잇점이 있는 반면, 핵무기의 재료 또는 생물학적인 독성을 가지는 매우 위험한 물질이다. 플루토늄은 약 5가지의 동위체가 존재하는데, 존재량, 반감기 및 붕괴형태면에서  $^{239}\text{Pu}$ 가 중요하다.  $^{239}\text{Pu}$ 는  $\alpha$ 붕괴를 하는데, 이 때 방출되는 방사선( $\alpha$ 선)은 물질투과력이 약하고 단순한 공기중에서 도 4~5cm정도밖에 진출하지 못한다. 따라서 한 장의 종이만으로도 차단시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그런데,  $^{239}\text{Pu}$ 와 같은  $\alpha$ 선 방출 핵종이 체외에 있을 경우에는 그다지 문제가 되지 않지만, 일단 체내에 유입되는 경우에는 투과력이 짧은 것 만큼 상대적으로 큰 에너지를 인체에 부여함으로써 그 영향이 심각하다.

체내로의 유입되는 경로로는 호흡이나 입 또는 상처등을 통하여 침입된다고 알려져 있는데, 플루토늄은 공기중에서 에어로졸 상태로 부유하고 있기 때문에 호흡에 의한 내부 피폭이 가장 큰 문제이며 결국 이에 대한 공기오염방지가 매우 중요하다. 일반적으로 방사능의 농도단위로 큐리(Ci) 또는 베크렐

(Bq)의 단위를 사용하고 있는데, 1 Ci는 라듐원자인  $^{226}\text{Ra}$  1 그램이 1초동안에 풍겨낼 수 있는 능력을 말하며, 표준단위인 1 Bq는 1초에 방사선 1개가 그핵을 1번 풍겨나가는 것을 1 Bq로 하는데, 1 Bq는 27 피코큐리(pCi)에 해당한다. 플루토늄 에어로졸이 연료 재처리 및 회수시설에서 관측되는 최대농도는 약  $4 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$ 이며 방사능의 70% 정도가 입자경  $1\mu\text{m}$ 이하에 있다. 그리고 연료가공 시설에서는  $10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$  농도로써 약 50% 이상이  $1 \sim 5\mu\text{m}$  범위에 있으며, 연구개발 시설에서는  $10^3 \sim 2 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ 으로 비교적 낮으며 광범위한 입자분포를 가진다.

그리고, 플루토늄 에어로졸의 에어로졸 입자과학 측면에서 입자경, 입자형상, 입자분산도 및 입자밀도 가운데에서, 입자밀도가 일반적인 에어로졸보다는 비교적 크다는 것이다. 예를 들어 산화 플루토늄( $\text{PuO}_2$ )의 경우 에어로졸의 밀도가  $7 \sim 12 \text{ g/m}^3$ 의 범위로 일반 공기중의 대기진 에어로졸의 밀도  $2 \sim 3 \text{ g/m}^3$ 에 비하여 매우 크다. 그리고 핵연료가공 공장에서 발생되는  $3\mu\text{m}$ 정도로 비교적 큰 범위의  $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 의 혼합산화물(MOX, Mixed Oxide)의 경우에는 다공성의 응집체로써 비교적 밀도가 낮다고 알려져 있다. 이러한 입자밀도는 에어로졸의 공기역학적인 거동에 영향을 주는 것으로, 밀도가 큰 입자는 관성력이 강하게 작용하여 마치 입자경이 큰 입자와 같이 운동하는데, 이를 고려한 입자경을 공기역학적 입자경 AD(Aerodynamic Diameter)라 부르며, 기하학적인 입자경  $d_p$ 와 다음의 관계식을 가진다.

$$AD = \sqrt{\rho_p \cdot d_p / Cd_p}$$

여기서,  $\rho_p$ 는 입자 밀도이며  $C(d_p)$ 는 Cunningham의 슬립(slip) 보정 계수이다.

그리고 미세입자의 인체에 중요성에 따라 ICRP에서는 기존의 공기역학적 입경에 참가하여 열역학적 입경 TD (Thermodynamic Diameter)의 개념을 도입하고 있는데, 이는 실제적으로 풍루토늄의 열운동에 의한 확산 입경 DD(Diffusion Diameter)이라고 한다. AD와 TD의 관계식은,

$$TD = [C(TD)/C(d_p)] \cdot [\chi \cdot C(AD) / \rho_p C(d_p)]^{1/2} \chi \cdot AD$$

로 표현되며, 여기서  $\chi$ 는 입자의 공기역학적 형상계수이다.

그리고 방사능 에어로졸에서 방사능의 강도를 비교할 때 사용되는 단위로써 비(specific) 방사능이 있다. 이것은 단위 중량당의 방사능의 강도의 세기를 나타낸다. 그럼 8라 풍루토늄 에어로졸 1개당 방사능과 공기역학 경과의 관계를 표시하는 것으로 여기서의 풍루노튬은  $^{239}\text{Pu}$ 의 산화물의 구형입자로써 입자 밀도는  $11.5 \text{ g/m}^3$ 으로 가정하였다. ICRP는 방사능 섭취후 50년간의 예탁선량당량과 인체조직하중계수로부터 계산되는 유효선량당량이 년간한도와 같게되는 방사능 섭취량을 년간섭취한도 ALI(Annual Limit on Intake)로 하여, 여러 가지 핵종에 대하여 화학적 형태, 대상조직 및 장기별로 규정하고 있다. 여기서  $^{239}\text{Pu}$  산화물의 호흡섭취의 경우, 가장 엄격한 ALI는 인체의 뼈에 대한 것으로 그 수치는  $500 \text{ Bq}$ 이다(참고로 입으로 섭취할 경우에는  $2 \times 10^6 \text{ Bq}$ ). 이 ALI로부터 유입 공기중의 농도 DAC(Derived Air Concentra-

tion)이 계산될 수 있다.

본 계산에서 가정으로는 1분간 20 리터의 호흡량으로 하루 8시간, 주 5일 그리고 년간 50주의 노동시간을 기준으로 총 호흡량으로 할 때,

$$\begin{aligned} \text{DAC} &= (500 \text{ Bq}) / (20 \text{l}/\text{min} \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{l} \times \\ &\quad 60 \text{min}/\text{hr} \times 8 \text{hr}/\text{day} \times 5 \text{day}/\text{week} \\ &\quad \times 50 \text{week/year}) \\ &= 0.21 \text{ Bq}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

으로 되는데, 실제로 ICRP에서는  $0.2 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 으로 권고하고 있다.

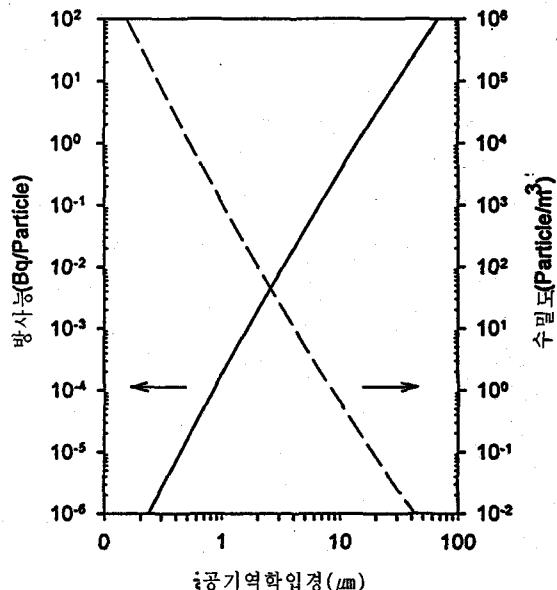


그림 8. 풍루토늄입자의 입경별 방사능 및 수밀도 특성

여기서 구한 DAC값을 에어로졸 입자 개수 측면에서 보면, 한 예로 공기역학 입경이  $5 \mu\text{m}$

의 플루토늄 에어로졸(여기서 입자형상은 구형, 밀도는  $11.5\text{g}/\text{cm}^3$ )의 경우 방사능은 입자 1개당  $3.45 \times 10^{-12}\text{Bq}$ 로 되며,  $1\text{m}^3$  당 불과 6 개정도의 플루토늄 에어로졸이 허용된다. 그림 8에서 DAC를 유지하기 위하여 억제하지 않으면 안될 입자농도를 공기역학적 입경과의 관계를 나타내어 주고 있다. 클린룸 등의 공기청정분야에서 잘 사용되고 있는 Class는 1CF(Cubic Feet)당 허용 입자수로부터 표현되는데, 앞의  $1\text{m}^3$ 당 6개 이하의 농도는 Class 0.2에 해당하는 매우 엄격한 농도이므로, 원자력산업에서 시설에 대한 공기오염제어의 중요성을 보여준다.

## 5. 맷음말

원자로나 핵연료취급시설, 연료재처리시설 등의 운전이나 보수점검작업, 사고등의 과정에서 이러한 시설이나 사고특유의 성상을 가지는 에어로졸 입자가 발생하게 된다. 즉, 발생원과 발생미캐니즘의 서로의 차이로 인하여 핵종, 형태, 농도 및 입경분포등의 성상에 서 다른 에어로졸로 된다.

앞에서도 언급한 바와 같이 원자력 시설에서 방사능 에어로졸 관리는 반도체 제조시설에서 보다 더욱더 엄격하여야 한다. 방사선 이용에 있어서 안전성의 기본개념은 방사선 원의 밀폐관리와 다중방호막의 설치이다. 즉, 다중밀폐구조물에 의한 방사선 오염물을 차단하고 배출물질을 처리함으로써 환경에로의 방출을 가능한 한 작게 하는 것으로, HEPA 필터등의 공기정화 설비, 국소배기설비, 캐미칼(Chemical)필터 등을 설치하고 모니터링함으로써 작업자의 피폭을 방지하고 외부로의 방사는 유출에 의한 환경오염을 방지하여야

한다. 그리고 원자력 시설의 해체시에도 다양한의 에어로졸이 발생하게 되는데, 우리나라에서도 일부 시설들이 1999년도부터 해체될 것으로 예상하며 이에 대비한 독자적인 연구가 수행되어지고 있으나, 에어로졸의 유출측면에서 좀더 광범위하고 체계적인 연구가 필요하다.

## - 참고문헌 -

1. 横地明, 1995, “放射性エアロゾル”, 空氣清淨, 第33卷第4, pp. 167-171
2. 山本英明, 清野芳裕, 松井浩, 1984, “核燃料施設におけるプルトニウムエアロゾルの粒径分布”保健物理, 19卷, p. 25
3. J. Onodera et al., 1991, “Characterization of Aerosols from Dismantling Work of Experimental Nuclear Power Reactor Decommissioning”, J. Aerosol Sci., 22, Suppl. 1, pp. S747
4. 西園龍也, 中村力, 池澤芳夫, 1993, “JPDR解體作業時のアークソー切断時に発生するエアロゾルの特性”, 空氣清淨, 第31卷第2, pp.7
5. 松尾尊議, 村上友康, 1996, “原子力施設用ダストモニタの性能向上に関する研究”, 火力原子力發展, 48卷, 2, p.161
6. 石博信人, 稲葉次郎, 1995, “ICRP新呼吸気道モデルに基づく $^{239}\text{Pu}$ の内部被曝線量評価における粒子性状依存性”, 保健物理, 30卷, p.22
7. M. Shimo, Y. Asano, K. Hayashi and Y. Ikebe, 1985, “On Some Properties of  $^{222}\text{Rn}$  Short-lived Decay Products in Air”, Health Physics, Vol.48, pp. 75