



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018년 2월

석사학위 논문

원전 해체 공정 시 발생하는
방사성 에어로졸로 인한
작업종사자의 내부피폭평가 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 학 윤

원전 해체 공정 시 발생하는
방사성 에어로졸로 인한
작업종사자의 내부피폭평가 연구

**A Study on Evaluation of Internal Exposure of Workers due to
Radioactive Aerosol Generated by Decommissioning
of Nuclear Power Plant**

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 학 윤

원전 해체 공정 시 발생하는
방사성 에어로졸로 인한
작업종사자의 내부피폭평가 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 학 윤

이학윤의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	이 경 진	(인)
위 원	조선대학교	교수	정 운 관	(인)
위 원	조선대학교	교수	송 종 순	(인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	i
제1장 서론	1
제2장 방사성 에어로졸 발생 및 거동 메커니즘 분석	3
제1절 에어로졸의 발생 메커니즘	3
제2절 에어로졸의 동역학적 거동	6
제3장 해체 시 방사성 에어로졸의 발생 경로 평가	8
제1절 해체 과정중 절단 시 발생 에어로졸	8
제2절 절단 기술	19
제3절 절단 후 금속 용융 시 발생 에어로졸	26
제4장 방사성 에어로졸의 내부피폭평가 시 고려인자 분석	28
제1절 HRTM(Human Respiratory Tract Model)	28
제2절 AMAD(Activity Median Aerodynamic Diameter)	31
제3절 작업 종사자의 호흡률	36
제5장 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭평가	38
제1절 내부피폭평가 방법	38
제2절 내부피폭평가 Code 비교 및 분석	40
제3절 Computer Code를 이용한 에어로졸 내부피폭평가	47
제6장 결론 및 제안	54
참고문헌	
부록	

표 목차

표 1. JPDR에 적용된 세부 해체 기술	9
표 2. Total man-power and collective dose equivalent for dismantling of forced circulation pipes	12
표 3. 절단공정 별 스테인리스 강 배관의 절단으로 인한 에어로졸 입자들의 이송 비율	13
표 4. 공정 별 열차폐관의 절단 결과	14
표 5. 고방사화 금속물질 절단방법 비교	16
표 6. PMF에서 발생되어 포집된 방사성 에어로졸의 핵종 분포도	27
표 7. 입자크기별 침적부위	30
표 8. ICRP-66에서 제시한 성인 남성 작업자의 활동유형에 따른 호흡률 기본 값 · 36	
표 9. 호흡생리인자 값	37
표 10. IMIE의 기본적인 기능 구성	41
표 11. Mean annual Values under normal operating conditions of the Plasma Melting Facility	48

도 목차

그림 1. 원전 해체 과정에서 절단 공정의 적용 범위	1
그림 2. Management data of the JPDR Decommissioning	10
그림 3. HLN probability plots of Cumulative dose of Workers engaged in removal of the reactor internals and the RPV	11
그림 4. 절단 공정별 특징	14
그림 5. 절단 공정별 발생에어로졸 특성	15
그림 6. Band Sawing and Hydraulic Shear	16
그림 7. Flame Cutting	19
그림 8. 산소 lance(창) 절단	20
그림 9. Electrode Oxygen jet 소각 절단	20
그림 10. Plasma Arc 절단	21
그림 11. Electrical Discharge Machining	22
그림 12. Mechanical Saw Cutting	22
그림 13. Nibbler Cutting	23
그림 14. Grinder Cutting	24
그림 15. Shear Cutting	24
그림 16. Diamond Wire Saw Cutting	25
그림 17. Milling 절단	25
그림 18. Human Respiratory Tract Model(HRTM)	29
그림 19. Compartment model representing time-dependent particle transport from each respiratory tract region in the HRTM	30
그림 20. 100A에서 0.125, 0.4cm/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도	32
그림 21. 알루미늄 절단 시 발생하는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)	32
그림 22. 80A에서 0.5cm/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도	33
그림 23. 탄소강 절단 시 발생하는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)	34
그림 24. 100A에서 0.25cm/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도	34
그림 25. 스테인리스 강 절단 시 발생하는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)	35

그림 26. BiDAS 코드의 구성	43
그림 27. 선량 평가 알고리즘	46
그림 28. Al, Carbon Steel, Stainless Steel에서의 기하학적 표준 편차	47
그림 29. AMAD of Al, Carbon, Stainless	48
그림 30. 체내 유지율을 고려한 작업자의 체내 누적 방사능량	50
그림 31. 일일 소변 배출율을 고려한 작업자의 소변내 누적 방사능량	50
그림 32. 일일 대변 배출율을 고려한 작업자의 대변내 누적 방사능량	51
그림 33. BiDAS에 입력한 개인정보 및 측정자료	53
그림 34. Co-58의 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과	54
그림 35. 연간 총 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과	54

ABSTRACT

A Study on Evaluation of Internal Exposure of Workers due to Radioactive Aerosol Generated by Decommissioning of Nuclear Power Plant

Lee Hakyun

Advisor : Prof. Jongsoon Song, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Kori unit #1, which is the first commercial nuclear power plant in Korea, was permanently shutdown in June 2017, and it is about to be decommissioned. Currently in Korea, researches on the decommissioning technology are actively conducted, but there are few researches on workers internal exposure to radioactive aerosol that is generated in the process of decommissioning nuclear power plant. As a result, the over-exposure of decommissioning workers is feared, and the optimal working time needs to be derived in consideration of radioactive aerosol. This study investigated the growth and dynamics of aerosol, which can be used as an indicator in evaluating the internal exposure of the workers due to radioactive aerosol generated in the process of decommissioning nuclear power plants. Also, to evaluate it, the authors compared and analyzed the cases of aerosol generated when activated pipes are cutting, metal melting in the process of nuclear power plants and the codes for evaluating internal exposure. Based on the evaluation of internal exposure through evaluation code and analyzed data, this paper will be used as a measure of work time to prevent over exposure of workers in the process of decommissioning.

제1장 서론

원전 해체 공정 시 발생하는 방사성 에어로졸은 작업자의 흡입으로 인체 내부의 호흡기에 침적되어 내부피폭을 유발하는 주된 요인이 된다. 방사성 에어로졸은 유체 속에 떠있는 고체나 액체의 미세한 방사성 핵종들을 뜻하며, 해체 과정에서 용융, 절단 작업 시 주로 발생된다. 절단 작업의 적용 범위는 Secondary System Tube, Concrete Iron Plate, Facility, Primary Cooling Pipe, Concrete Bio Shield 등이 있다. 이로 인한 방사성 에어로졸의 발생 사례로는 대표적으로 일본의 JPDR, 벨기에의 BR-3가 있으며, 절단 공정 별로 방사성 에어로졸의 입자 특성 연구를 진행한 바 있다.

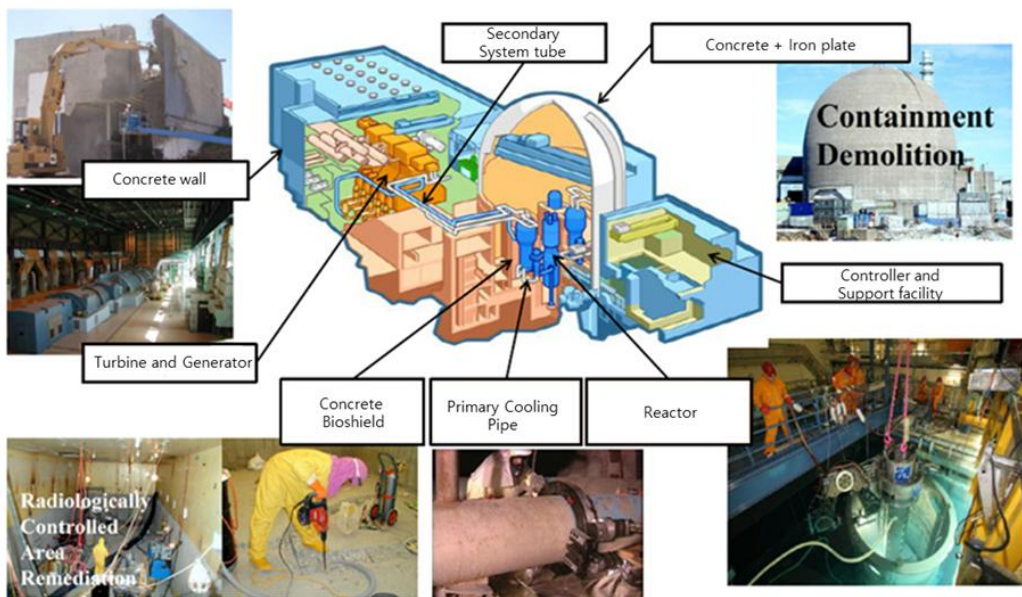


Fig 1. 원전 해체 과정에서 절단 공정의 적용 범위

일단 방사성 에어로졸이 생성되면, 과포화 증기의 응축과 미립자의 충돌을 통해 직경이 nm 에서 μm 단위로 증가한다. 단위로 성장한 방사성 에어로졸은 입자 크기에 따라서 인체 호흡기내에서 침적되는 부위가 달라진다. 일반적으로 에어로졸 입자 크기가 $10 \sim 15 \mu m$ 이상이면 입이나 코에서 침적되며, $5 \sim 10 \mu m$ 이면 기관지

상부, $1 \sim 5\mu m$ 은 폐포에 침적되는 경향을 보인다. 특히, 폐포에 침적된 방사성 에어로졸은 삼투압작용에 의해 혈관으로 흡수되어 전신 피폭을 유발하게 된다.

따라서 방사성 에어로졸로 인한 해체 작업자의 작업시간에 대한 체계적인 관리가 요구된다. 하지만, 기존 작업시간에는 원전 해체 시 발생하는 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭을 고려하지 않고 있어, 이를 고려한 최적의 작업시간 산정이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 에어로졸의 특성 분석을 통해 방사성 에어로졸의 생성과 동역학적 거동을 조사하였으며, 해외 원전 해체 사례에서 발생하는 방사성 에어로졸의 입자 특성 분포에 대해 나타내었다. 또한, 내부피폭평가의 **Input data**로 활용될 알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강의 절단 시 발생하는 방사성 에어로졸의 입자 크기, **Metal Melting** 과정에서 발생된 방사성 핵종에 대해 분석하였다. 또한, **Metal Melting**을 수행하는 시설의 **Impactor**로 포집된 방사능 양을 통해 작업자의 측정 자료를 예측 산정하는 과정을 수행하였다. 위 과정으로 도출된 **data**는 내부피폭평가에 사용될 것이며, 도출된 예탁유효선량은 향후 전개될 원전 해체 과정에서 작업자의 작업시간 도출에 중요한 지표로 사용될 것이라 사료된다.

제2장 방사성 에어로졸 메커니즘

원전 해체 시 발생하는 작업자의 내부피폭을 평가하기 위해서는 선행적으로 에어로졸의 생성 및 성장 메커니즘과 동역학적 거동의 이해가 필요하다. 따라서 본 절에서는 이러한 에어로졸의 발생 및 성장 메커니즘과 동역학적 거동을 이론적 접근 방법을 통해 분석을 수행하였다.

제1절 에어로졸의 발생 메커니즘

에어로졸 입자의 성장은 입자들끼리 서로 충돌하면서 뭉쳐지는 경우에도 일어나는데, 이를 응집이라고 부른다. 응집은 입자들의 속도가 서로 다르기 때문에 일어나며, 이 속도 차이를 불러 일으키는 원인에 따라 응집의 종류가 달라진다. 불규칙적인 브라운 운동을 하는 두 입자가 서로 충돌할 경우에는 브라운 응집, 서로 크기가 달라서 서로 다른 속도로 중력침강하는 두 입자가 충돌하여 응집하는 경우에는 중력 응집, 난류 와동에 의해 입자의 충돌이 일어나는 경우에는 난류 응집이라 부른다.

대표적인 세가지 응집 메커니즘인 중력 응집, 난류 응집, 브라운 응집에서 크기가 u, v 인 두 개의 입자가 결합하는 확률을 나타내는 함수 $\beta(u, v)$ 는 입자들의 충돌을 유발하는 물리적인 현상에 선형적으로 비례한다. 따라서 결합핵(coagulation kernel) $\beta(u, v)$ 는 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta(u, v) = \beta_B(u, v) + \beta_G(u, v) + \beta_T(u, v) \quad (1)$$

여기서 B(Brownian), G(Gravity), T(Turbulent)는 각각 브라운 운동, 중력 강하, 난류운동을 나타내는 첨자이며, 각 항의 함수들은 아래와 같이 더 자세하게 표현할 수 있다.

1. 브라운 운동

브라운 운동에 의한 입자의 결합은 입자의 매질기체의 충돌에 의한 불규칙한 운동에서 야기되며 에어로졸의 확산과 관계가 있다. 주로 크기가 작은 입자들의 결합을 지배하는 이 함수는 (2)로 표시된다.

$$\beta_B(u, v) = \frac{2kT}{3\mu}(r+r')\left[\frac{C_u(r')}{r'}\right]\frac{\gamma}{x} \quad (2)$$

여기서 r, r' 는 각각 질량이 u, v 인 입자의 반경이다. γ 는 응고 상태 인자(coagulation shape factor)로서 구형 입자가 아닌 경우 결합에 영향을 주는 실제 입자의 크기가 구형으로 간주한 입자의 크기와 차이가 있을 때 사용하는 보정계수이다.

2. 중력 강화

중력에 의한 입자의 결합은 크기가 다른 두 개의 입자가 하강하면서 서로 충돌하여 결합되는 현상이며, 입자의 종단 하강속도는 질량이 큰 입자가 빠르고 일반적으로 큰 입자가 작은 입자를 추돌하여 결합하게 된다. 이때 충돌 확률은 두 입자의 물리적 단면적의 합과 하강속도의 차에 비례한다. 이 경우 충돌하는 유효 단면적은 입자들간의 유체역학적 반응의 결과로 실제 단면적의 합보다 작게 되는데 이것을 보정하기 위해서 충돌 효율 계수(collision efficiency factor)를 사용한다. 중력 결합핵은 아래로 표현할 수 있다.

$$\beta_G(u, v) = \frac{2\pi\rho_p g}{9\mu}\epsilon(r, r')(r+r')^2\left|C_u(r)r^2 - C_u(r')r'^2\right|\frac{\gamma^2}{x} \quad (3)$$

여기서, $\epsilon(r, r')$ 는 충돌효율계수(Collision Efficiency Factor)를 나타낸다.

$$\epsilon(r, r') = 0.5[r/(r+r')]^{0.666} \quad (4)$$

3. 난류 운동

난류결합은 다시 두 가지 현상에 의한 영향으로 세분할 수 있는데 첫 번째는 모든 크기의 입자들 간에 일어나는 현상이며 두 번째는 관성충돌로서 크기가 서로 다른 입자들 간에 발생하는 현상이다. 첫 번째 항은

$$\beta_{T1}(u, v) = \epsilon(r, r')(r + r')^3 \left[\frac{8\pi\rho_g\epsilon_T}{15\mu} \right]^{1/2} \gamma^3 \quad (5)$$

으로 나타내며 두 번째 항은

$$\beta_{T2}(u, v) = \epsilon(r, r')(r + r')^2 \frac{4\rho_g(2\pi)^{1/2}}{9\mu} \left[\frac{8\pi\rho_g\epsilon_T^3}{15\mu} \right]^{1/3} \left| C_u(r)r^2 - C_u(r')r'^2 \right| \frac{\gamma^2}{x} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 ϵ_T 는 난류 에너지 소산 비율(Turbulent Energy Dissipation Rate)이다. 따라서 전체 난류 결합율은 위의 두 항의 합으로 표시된다.

$$\beta_T(u, v) = \beta_{T1}(u, v) + \beta_{T2}(u, v) \quad (7)$$

제2절 에어로졸의 동역학적 거동

원전 해체 공정에서 발생하는 방사성 에어로졸은 선형적으로 그 양이 증가하는 것이 아니라 시간이 지남에 따라 입자의 상호간의 결합(Coagulation)과 입자표면에 수증기가 응축(Condensation)함으로써 입자의 크기가 성장하며, 구조물의 표면에 부착(Deposition)하거나 바닥에 침전(Sedimentation)하여 양이 감소하며, 새로운 입자의 생성으로 그 양이 증가한다. 또한 매질기체의 흐름과 에어로졸의 농도 차에 의해서 공간적 분포에 변화가 일어난다.

에어로졸 입자들의 반응은 동시에 복합적으로 일어나며 그에 따른 에어로졸의 변화는 에어로졸 일반거동방정식(Aerosol General Dynamic Equation)으로 기술되는데 이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial n(r,v,t)}{\partial t} = & \nabla \cdot [D(v)\nabla n(r,v,t)] - \nabla \cdot [U(v)n(r,v,t)] - \nabla \cdot [Cn(r,v,t)] \\
 & + \frac{1}{2} \int_0^v \beta(v,v-u)n(r,u,t)n(r,v-u,t)du \\
 & - n(r,v,t) \int_0^\infty \beta(u,v)n(r,u,t)du \\
 & - \frac{\partial}{\partial v} [\phi(v,t)n(r,v,t)] + S(r,v,t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

$n(r,v,t)dv$: 입자 크기 분포함수(Particle Size Distribution Function)로서 시간 t , 공간좌표 r 에서 크기가 v 와 $v+dv$ 사이에 있는 입자 수밀도

$D(v)$: 크기가 v 인 입자의 Brown확산계수

$U(v)$: 크기가 v 인 입자의 외부력에 의한 운동속도

C : 매질기체의 운동속도

$\beta(u,v)$: 크기가 각각 u, v 인 두 입자가 충돌하여 결합할 확률을 나타내는 계수

$\phi(v,t)$: 수증기 응축으로 인한 크기가 v 인 입자의 성장률

$s(r,v,t)$: 크기가 v 인 입자의 생성률

$\frac{\partial n(r,v,t)}{\partial t}$: 크기가 v 인 입자수의 변화율

$\nabla \cdot [D(v)\nabla n(r,v,t)]$: 확산

$\nabla \cdot [U(v)n(r,v,t)]$: 외부력에 의한 운동

$\nabla \cdot [Cn(r,v,t)]$: 매질기체의 운동에 의한 공간분포의 변화율

$$\int_0^v \beta(v,v-u)n(r,u,t)n(r,v-u,t)du$$

: 작은 입자들의 결합으로 인한 크기가 v 인 입자의 생성율

$$\int_0^\infty \beta(u,v)n(r,u,t)du$$

: 결합으로 인한 크기가 v 인 입자의 감소율

$$- \frac{\partial}{\partial v}[\phi(v,t)n(r,v,t)] + S(r,v,t)$$

: 크기가 v 인 입자표면에 수증기가 응축하여 성장함으로써 감소되는 양

제3장 해체 시 방사성 에어로졸의 발생 경로 평가

제1절 해체 과정중 절단 시 발생 에어로졸

전 세계적으로 원전 해체는 독일의 Vak Kahl, 미국의 Maine Yankee, 일본의 JPDR, 벨기에의 BR-3 등 원자력 선진국에서 진행된 바 있다. 이러한 일련의 해체 과정 시 절단공정에서 발생된 방사성 에어로졸의 특성을 분석하기 위해 일본의 JPDR, 벨기에의 BR-3 사례를 중점적으로 분석하였다.

1. JPDR (일본)

1963년 일본에서 처음으로 전기를 생산한 Japan Power Demonstration Reactor (JPDR)는 초기 용량은 45MWth인 BWR로서 1972년 90MWth로 출력을 증가하였으며 1976년 In-core Monitor Tube의 균열, Rod Drive Mechanism의 고장으로 운전 정지될 때까지 약 13년간 운전되어 총 출력은 21,500 MWd였다. JPDR의 해체는 1981년 JAERI에 의하여 시작되었다. 해체 프로젝트는 총 2단계로 이루어졌고, 해체 프로젝트의 특징은 본 프로젝트를 통하여 일본에서 필요한 해체 기술을 개발하는 것이며 이는 일본 원자력의 최고 의결기관인 JAEC의 권고에 의하여 이루어진 것이다. 연구개발비를 포함한 총 사업비용은 230억엔이며 작업자의 집단선량은 305 person-mSv이었다.

JAEA의 주도 하에 1981년부터 1996년까지 JPDR의 해체가 수행되었으며, 해당 기간동안 해체기술의 연구개발을 수행하고 개발된 기술을 해체 현장에 직접 적용하여 실증함으로써 해체기술을 확보하였다. 2011년 후쿠시마 사고 이후에는 연구센터를 중심으로 복구 및 재건을 위한 국제공동 R&D를 추진하고 있다. JPDR 해체 프로그램은 1986년에 시작되어 1991년까지 진행되었으며 원자로 내부 및 RPV의 해체 중 종사하는 근로자의 선량을 측정하는 연구가 수행되었다.

○ 1단계 (1981-1986)

연구로 해체를 위한 연구 및 개발단계로서 연구 개발의 최우선 목표를 원격 조작을 통한 작업자의 피폭선량의 감소에 두었다. 예를 들면 원격 절단 장비의 개발로서 원자로 내부 장치와 원자로 압력 용기의 절단을 위하여 수중 플라즈마 절단 장치 및 수중 아크 절단 장치를 개발하였으며 이는 JPDR은 물론 상업로에서의 적용이 가능하도록 기술을 마련하였다.

○ 2단계 (1986-1996)

JPDR의 실제 철거 단계로 적용된 세부 해체기술은 다음과 같다.

Table 1. JPDR에 적용된 세부 해체 기술

철재류 절단기술	<ul style="list-style-type: none"> - Underwater plasma arc cutting, - Underwater arc cutting tool - Rotary disk knife(배관절단) - Shaped explosives
원격 철거기술	<ul style="list-style-type: none"> - 해체작업의 전산 모사기술 - Dual arm manipulator
방사선 계측기술	<ul style="list-style-type: none"> - RAPID - MISE
고효율 제염기술	<ul style="list-style-type: none"> - Flow abrasive 제염기술 - Laser induced 화학제염기술 - 저온 열충격 제염기술 - 전기화학적 제염기술

원자력시설의 철거계획 수립을 위한 전문가 시스템 및 해체 데이터베이스

JPDR의 절단 기술을 보면 원자로를 비롯한 주변의 구성 물들은 각각의 특성별로 구분하여 원자로내부의 각종 구성품은 Plasma Arc 기술을 사용하였고 원자로 압력용기는 Arc Saw를 이용하였다. 냉각 계통 Pipe는 그 구경 및 작업장소 여건에 따라 Rotary disk Knife 및 성형폭약을 이용하여 부분적 제한 발파 공법을 사용하였다. 원자로를 둘러싼 차폐체 콘크리트는 기계적인 절단방법과 Abrasive Water

Jet 공법을 사용하였고, Mass한 콘크리트 해체 대상물에는 제한적인 발파 공법을 병행하였다.

가. 외부 피폭

해체 작업 중에 원격 해체 기술, 차폐벽 설치와 같은 작업자에 대한 선량 감축 조치가 취해졌다. JPDR 해체 프로그램의 착수 이후 누적 공동 선량은 약 0.28man-Sv이다. 원자로 내부 및 RPV 제거에 대한 집단 선량은 각각 0.073man-Sv 및 0.11 man-Sv였다. Figure 2은 JPDR 해체 관리 데이터를 보여준다.

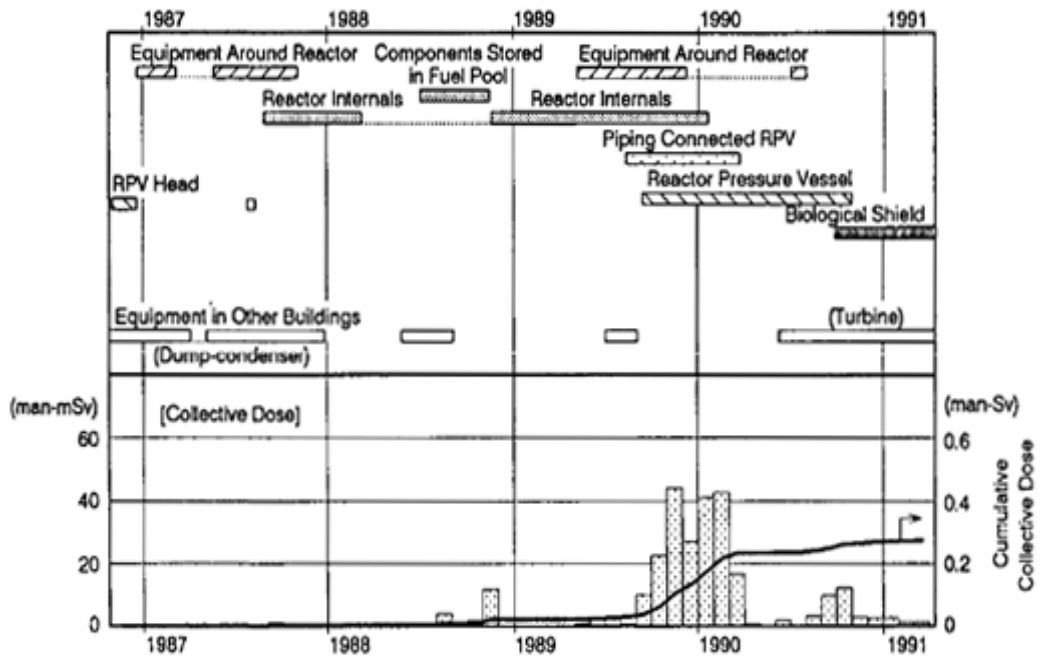


Fig 2. Management data of the JPDR Decommissioning

피폭의 대부분은 연료저장소의 찌꺼기를 Underwater Plasma Arc Cutting으로 제거하고, 또한 RPV가 절단 시 수면에 잠길 수 있도록 하는 설치장비에서 발생하였다.

근로자의 선량 분포 모델은 기획 단계에서 집단 선량 평가에 중요하다. 원자로 내

부 및 RPV 해체에 종사하는 근로자의 누적 선량 분포는 하이브리드 로그 정규 분포를 보였다. Figure 3은 두 그룹의 누적 선량의 하이브리드 로그 정규 분포를 나타낸다.

해체에는 기술적으로 타당성을 입증하기 위해 여러 가지의 새로운 해체 방법이 채택되었다. RPV에 연결된 강제 재순환 출구 파이프를 해체하고, 생물학적 차폐를 관통하여 차폐 외부에서 파이프 형태를 원격으로 절단 할 수 있는 Rotary Disk Knife 기술을 채택하였다.

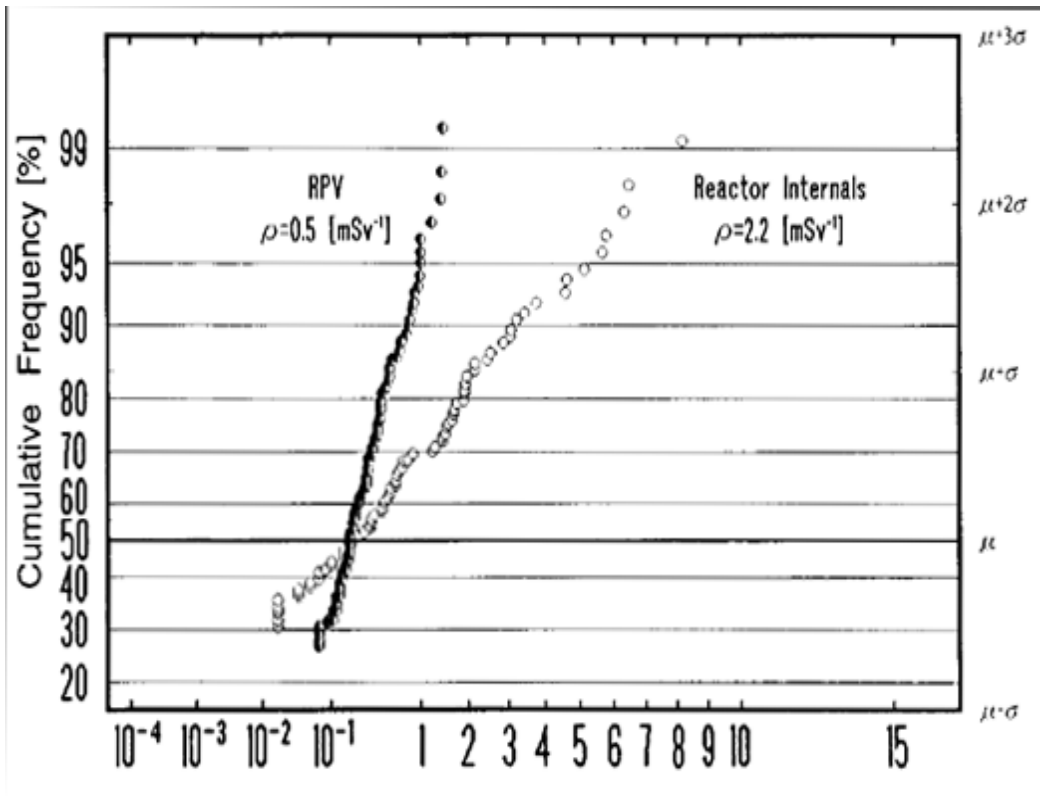


Fig 3. HLN probability plots of Cumulative dose of Workers engaged in removal of the reactor internals and the RPV

파이프 측면의 표면 방사능 농도는 1000 Bq/cm 이었고, 파이프가 연결된 RPV 주변 선량률은 μSv 였다. Table 2는 Rotary Disk Knife와 Oxy-acetylene Torch를 사용한 강제 재순환 파이프의 해체에 대한 인력 및 집단 선량을 나타낸다.

Rotary Disk Knife 절단의 총 인력은 Oxy-acetylene Torch보다 3배 더 높았으며 인력의 75%는 장비 설치로 인하여 소요되는 인력이다. Rotary Disk Knife의 집단 선량 당량은 작업자가 직접 배관에 접근할 필요가 없었기 때문에, Oxy-acetylene Torch 기술보다 더 낮은 수치를 나타내었다. Oxy-acetylene Torch의 집단 선량 당량의 40%는 RPV 주변 차폐물 설치로 인해 발생한 것으로 나타난다.

Table 2. Total man-power and collective dose equivalent for dismantling of forced circulation pipes

Method	Object	Man-Power (man-mSv)	Collective dose equivalent (man-mSv)
Rotary disk knife	Outlet pipe	354	0.2
Oxy-acetylene torch	inlet & outlet pipes	110	11.5

나. 내부 피폭

대기중의 방사능 수치를 낮추기 위해 임시 환기 시설을 갖춘 격납고를 건설하여 공기 중의 방사능 농도를 효과적으로 저감할 수 있었다.

해체 작업 중에 내부 피폭을 줄이기 위한 가장 적합한 조치를 선택하기 위해 작업 구역의 방사능 농도를 사전에 평가해야한다. 양적 평가를 위한 해체 작업에서 방사성 에어로졸에 대한 자료는 거의 없었다. 따라서, 이송 비율로 정의되는 정규화된 방사성 에어로졸 발생 비율을 기초로 해체 작업 중 공기 중의 방사능 농도 또는 질량 농도를 평가하였다.

Table 3는 방사화된 스테인리스 강 파이프 절단에 대한 방사성 에어로졸의 이송 비율을 보여준다. Reciprocating Saw의 경우 높은 방사능 이입 비율 때문에 12인치 파이프의 절단 시 생성된 방사성 에어로졸의 농도는 Plasma Torch보다 약 30배 더 컸다. Plasma Torch가 갖는 크기 분포는 Reciprocating Saw와 비교하여 Sub micron 크기의 에어로졸 비율이 더 높았고, 이분 분포를 보였다. 이송 비율은 원자로 내부의 Underwater Plasma Arc 절단과 RPV(Reactor Pressure Vessel)의 Underw

ater Arc Saw 절단에서 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 수치를 보였다.

Table 3. 절단공정 별 스테인리스 강 배관의 절단으로 인한 에어로졸 입자들의 이송 비율

Cutting tool	Pipe size (inch)	Radioactivity immigration ratio (%)		Mass immigration ratio (%)	
		Range	Mean	Range	Mean
Band saw	2	5.8~37	13	-	$< 10^{-2}$
Band saw	6	10~58	19	-	$< 10^{-2}$
Reciprocating saw	12	7.0~24	9.9	-	$< 10^{-2}$
Plasam torch	12	0.23~0.78	0.44	0.53~0.82	0.66

2. BR-3

BR-3는 1964년 Westinghouse가 설계하여 건설한 최초의 원자로이며, 이후 실험을 목적으로 내부를 새로이 교체하여 ‘Vulcain’이라 명명하였다. 이러한 과정에는 열차폐관, 구형 및 실험로의 해체활동 전체를 포함하고 있다.

열차폐관의 해체를 위해 Plasma arc torch, Electric discharge machining(EDM), 그리고 Milling의 3가지 기술이 선택되었다. 비교항목으로는 2차 폐기물(Aerosol)의 발생량, 절단기간 및 작업자의 피폭 등이 있다. Table 4는 선택된 3가지 절단기술에 대해 열차폐관의 절단 작업 결과를 비교 평가하여 보여 주고 있다.

Table 4. 공정 별 열차폐관의 절단 결과

항목	절단속도 (mm/min)		최적평균절단속도 (mm/min)		피폭	2차폐기물
	절대값	상대적 비교	절대값	상대적 비교		
EDM	0.6	0.1	0.28	0.25	-3	-5
Mach.	6	1	1.13	1	1	1
Plasma	300	50	1.83	1.6	-1	-5

	Mechanical sawing	EDM	Plasma cutting
mechanical support	very high	high	small
thermal power	a few kW	some kW 25V, 40-130A	200 kW 200V, -1000A
secondary waste	metal chips > 0,5 mm	burnt metal particles	particles, gas, slag, aerosols sediment

Fig 4. 절단 공정별 특징

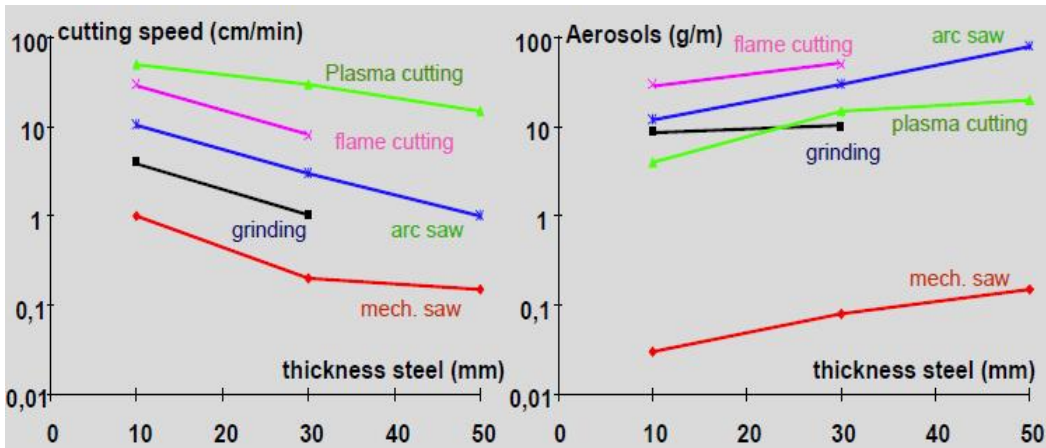


Fig 5. 절단 공정별 발생에어로졸 특성

Table 4에서 보는 바와 같이 2차 폐기물발생을 고려해서 연료저장 Pool에 잠겨 있는 chamber의 절단은 Plasma 사용 방법을 결정하였고 연기의 발생 및 수소가스의 환기 및 정화 시설을 설치하였다. 열차폐판의 제거된 조각은 폐기물의 포장을 고려하여 500x540mm 두께로 절단 되었다. 기계적 절단 방법은 결과적으로 2배의 Plasma Arc 절단작업시간을 고려할 때보다 적은 양의 2차 폐기물이 발생된 것으로 나타났고 오직 탄소필터에 의해서도 여과가 되었으나 EDM 절단 방법 사용 시는 방사성 물질이 여과됨을 알 수 있었다.

Plasma 절단 후에는 중간과 마지막 여과지에서 탄소 검출이 되었다. 이온 교환기에서도 같은 문제가 발생됨을 알 수 있었다. 작업자의 피폭 결과는 EDM 방법을 방사성 구역에서 장시간, 저속의 절단 속도로 사용한 후 매우 높게 피폭됨을 알 수 있었다. 결과적으로 해체 작업의 수행을 위해서는 기계적인 절단방법이 선정되었고, 다음과 같은 장점이 도출되었다.

- 가장 잘 알려진 일반적인 기술로 수중 작업 시 단순 추가 조치만 필요
 - 간단한 충전제를 사용한 여과장치로 2차 폐기물 여과가 용이함
 - 대상물의 두께가 얇을 때 적은 양의 폐기물만 발생
 - 방사성 연기, 가스 및 분해할 이온의 발생이 없음
 - 다른 절단방법 공정과 대체로 비슷한 시간이 소모
- 그 외 고방사화 및 비방사화 된 원자로 내부의 해체기술은 다음과 같다.

○ Circular Sawing

이 공법은 수평의 기다란 실린더형태의 대상물에 적용 가능하다고 예측하고 있다. 1m 가능 거리의 X축과 320mm 가능 거리의 Y축인 2방향으로만 작동이 가능하며 직경 400mm와 600mm 2종류의 Blade를 사용하였다.

○ Band Sawing

이 톱은 LCSA(Lower Core Support Assembly)의 수직절단 및 원자로 압력용기의 분리 절단에 사용되었다. 폭 500mm에 수직 절단 능력 960mm 이고 두께 1.6mm의 재료에서부터 기계장치를 추가하여 카본 스틸의 경부 두께 200mm까지 절단 가능하다.

기타 절단 방법으로 Hydraulic Shears와 Core Drilling 절단 공법 및 Reciprocating Saw 및 EDM 절단 공법을 사용하였으며 각각의 절단 공법별로 가용 평과 결과를 Table 5에 비교하여 나타내었다.



Fig 6. Band Sawing and Hydraulic Shear

Table 5. 고방사화 금속물질 절단방법 비교

분류	기술	두께 범위	2차 폐기물	절단 속도	절단 폭(mm)	사용 예
기계적 절단	Milling Cutting/	200mm	Micro Particles	Medium	6	Thermal Pad, LCSA

기술	Rotary saw					
	Band Sawnig	-	Micro Particles	Medium	2	LCSA, Cylinder Pad
	hydrodynamic Jaw Cutter	2` Pipe	-	Fast	-	tube, pipe
	Reciprocating saw	Pipe/ Small tube	Particle	Medium	2	Reactor upper pipe
	Grinding Disc	Pipe/ Small tube	small particle	Very Fast	2~4	N/A
열적 절단 기술	Plasma arc torch	100mm	Fragment, Particle, Aerosol, Smoke, Dissolved ion	Fast	12	Thermal Pad
	Arc saw	250mm	Fragment, Particle, Aerosol, Smoke, Dissolved ion	Fast	N/D	N/A
	Laser Cutting	50mm >	Fragment, Particle, Aerosol, Smoke, Dissolved ion	Fast	Few	N/A
전기적	EDM	80mm >	Fragment,	Slow	Few	Thermal

절단 기술			Aerosol			Pad, Reactor upper volt
	MDM	N/D	Fragment, Aerosol	Slow	6~8	Unapplied
ETC	Abrasive Water Jet	N/D	Fragment, Aerosol, abrasive material	Medium	1~10	Neutron Shielding, Generator

제2절 절단 기술

1. 열적 절단 기술

가. Flame 절단

이 공법은 산화연료 가스를 이용한 불꽃과 산소용접절단 기법을 조합하여 사용하는 것으로 먼저 절단부위를 초기절단 구멍이 생길 때까지 산화연료 가스 불꽃으로 예열 시킨 후, Oxygen Jet를 추가하여 절단한다. 이 후 계속하여 같은 온도를 유지하며 절단하는 기술이다.



Fig 7. Flame Cutting

나. 산소 lance(창) 절단

끝 부분에 Core Wire가 부착된 관으로 구성된 긴 창 모양의 독을 사용하여 절단부위의 자유면 끝 부분에 가열을 한 후 압축 산소를 이 창을 통하여 공급하는데 이때 Wire를 태우면서 절단부위를 녹이는 공법으로 최고 2500°C까지의 온도를 유지한다.



Fig 8. 산소 lance(창) 절단

다. Electrode Oxygen jet 소각 절단

절단 부위와 Melting Wire Electrode 사이를 Arc로 태우는 공법으로 전기에너지가 주동력으로 Wire가 계속해서 공급되어야 하며 수중에서도 작업이 가능하다는 장점이 있다.



Fig 9. Electrode Oxygen jet 소각 절단

라. Plasma Arc 절단

Plasma는 전도성을 띤 고온의 가스를 이용하여 모든 전도성 물질의 저랄N에

가능하며 절단속도가 빠르고 중량물 및 두꺼운 재료의 절단도 가능하다. 수중 및 넓은 범위의 절단작업도 가능하다. 그러나 오직 전도성 물질에만 국한되고 안전 관리 차원에서 고열, Sparks 등의 위해도가 대두되며 절단부위가 항상 청결하여야 하는 단점도 수반된다.

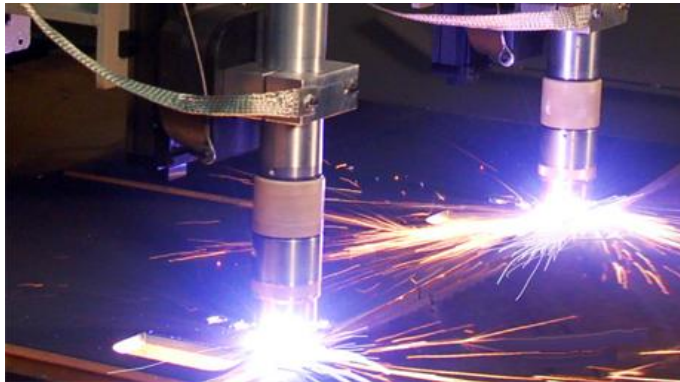


Fig 10. Plasma Arc 절단

마. Electrical Discharge Machining : EDM

이 공법은 EDM 헤드와 절단부위사이에 공급되는 전기불꽃의 침투에 의해 절단하는 것으로 전극봉은 어떤 형태의 형상도 작업할 수가 있다. 수중에서의 작업이 가능하며 두꺼운 금속도 절단 가능하다. 단점으로는 전도성 물질만이 가능하고 절단속도가 느리며 가스 발생이 높고 전기의 소모량이 크다. 또한 설치 위치에 대한 정확성이 크게 요구된다.

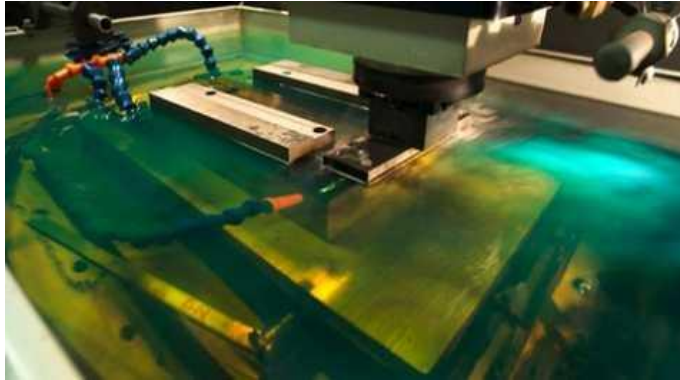


Fig 11. Electrical Discharge Machining

1. 기계적 절단 기술

가. 기계톱 절단

동력원은 전기를 이용하며 가스의 발생량이 적고 구매 및 사용에 큰 비용이 들지 않는다. 또한 작업자 1인으로도 충분히 작업할 수 있으며 좁은 공간에서도 작업이 가능한 장점이 있다. 반면에 한정된 규격의 대상물만이 절단 가능하며 절단 속도가 매우 느리다. 원격작동에는 적합하지 않으며 쉽게 날을 교체해야 하는 단점이 있다.



Fig 12. Mechanical Saw Cutting

나. Nibbler 절단

광범위한 모든 규격의 대상물에 적용 가능하고 주로 연강이나 스테인레스 강에 많이 쓰이며 제한적인 절단이 가능하다. 적은 양의 가스가 배출되고 원격 조작이 가능하며 절단 대상물 주위에 장애물이 있을 경우에 주로 사용된다. 진동이 유발되며 제한된 두께의 대상물과 제한된 형태에만 적용가능하고 절단작업을 위해서는 대상물 주변이 정리되어야 한다.



Fig 13. Nibbler Cutting

다. Grinder 절단

압축공기, 전기 및 가스 등 동력원 선택의 범위가 크고 작업자 혼자서도 작동이 가능하다. 대상물 규격에 대한 선정 범위가 크고 많은 수 및 양의 절단에 가능하다. 반면 Aerosol의 발생량이 많고 싼 가격의 칼날 사용 시 마모가 쉽기 때문에 좀 더 비싼 가격의 칼날을 사용해야만 한다. 절단 대상물 주변에 장애가 없어야 하며 화재의 원인이 되는 불꽃이 발생하는 단점을 가지고 있다.



Fig 14. Grinder Cutting

라. Shear 절단

어떠한 규격의 대상물에도 절단이 가능하며 전기, 압축공기, 유압의 동력원을 사용하며 대상물의 강도에 특히 유효하다. 일정한 규격의 절단 대상물을 취득하기가 힘들며 제한되거나 좁은 공간에서는 절단작업이 어렵다.



Fig 15. Shear Cutting

마. Diamond Wire 톱 절단

모든 절단 대상물에 적용 가능하고 일정한 형상을 갖추지 못한 대상물도 절단

할 수 있다. 장치의 설치에 시간이 소요되며 최소한 2 이상의 자유면이 필요하다. 금속대상물 절단 시 톱날의 마모가 빠른 단점이 있다.



Fig 16. Diamond Wire Saw Cutting

바. Milling 절단

장착된 둥근 칼날을 이용하여 절단하는 방법으로 비용이 적게 들며 Aerosol의 발생량이 적으며 수중에서도 작업이 가능하다. 큰 힘이 소요되기 때문에 원격 조작에 어려움이 많고 대상물의 두께에 제한을 받으며 작동 시 냉각용 액체가 필요하다.

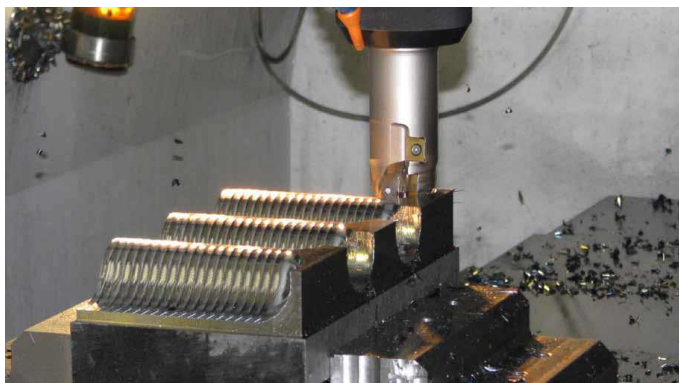


Fig 17. Milling 절단

제3절 절단 후 금속 용융 시 발생 에어로졸

원자력발전소의 해체 과정에는 방사화 된 금속 스크랩이 대량으로 발생된다. 이 스크랩들은 유지 보수 및 장비 교체로 인해 발생되기도 하는데, 이 폐기물의 대부분은 부피가 큰 장비(열교환기, 습기 분리기, 증기발생기)로 구성된다. 또한, 이 장비들은 압력 용기용 강철, 스테인리스 강 및 인코넬을 포함하고 있어, 재활용 측면에서 가치가 있다. 이러한 금속들을 용융함으로써, 가치 있는 재료를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 방사성 에어로졸 또한 동반되기 때문에 이를 고려하는 내부 피폭평가가 이루어져야 한다.

용융 과정에서 방사성 에어로졸의 발생 사례로는 대표적으로 불가리아의 Kozloduy Nuclear Power Plant가 있으며, 이를 통해 방사성 에어로졸이 함유하고 있는 방사성 핵종의 농도 및 특성을 분석할 수 있다.

1. Kozloduy Nuclear Power Plant

Kozloduy NPP(Nuclear Power Plant)는 불가리아의 원자력 발전소로 소피아 북쪽 120km, 루마니아 국경 근처의 다뉴브 강 유역 Kozloduy 동쪽 5km에 위치하고 있다. Kozloduy NPP는 현재 총 2,000MWe의 가압 경수로를 2기 관리하고 있으며, VVER-400/230의 노후된 원자로 2기는 2010년 10월 11일에 해체를 시작하였다.

선행적으로 절단됐거나 용융의 대상이 되는 구조물들은 부지 내 Second 보조 빌딩(Auxiliary Building-2 : AB-2)에 위치한 PMF(Plasma Melting Facility)에 이동되어 용융을 수행하였다. PMF는 500kW의 이동형 토치가 장착된 틸팅 플라즈마(Tilting Plasma)로 구성되어 있으며, 연간 250톤을 처리하고 40주동안 연속 운용이 가능하다.

위 PMF에서 용융을 수행하여 Impactor에 포집된 방사성 핵종을 분석하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6. PMF에서 발생되어 포집된 방사성 에어로졸의 핵종 분포도

Radionuclides	Stack-1
	MBq
Mn-54	0.362
Co-58	0.181
Fe-59	0.0603
Co-60	3.44
Ag-110m	0.362
Cs-134	0.362
Cs-137	1.21
Total	5.9773

제4장 방사성 에어로졸의 내부피폭평가 시 고려인자 분석

제1절 HRTM(Human Respiratory Tract Model)

작업자의 흡입을 통해 인체 내부에 침투한 방사성 에어로졸은 그 입자 크기에 따라서 침적되는 부위에 차이가 존재한다. 방사성 에어로졸로 인한 작업자 및 일반인의 선량계수 및 산정을 하기 위해 국제방사선방호위원회(ICRP)의 ICRP-66은 작업자와 일반인의 선량 계수 및 생물 검정 기능을 계산하기 위해 HRTM(Human Respiratory Tract Model)을 적용하였다.

HRTM은 각 구획에서의 입자 이송 간극 비율을 제공하며, 외기도(ET), 기관지(BB), 세기관지(bb) 및 인공 호흡기 영역에서 신뢰할 수 있는 수치를 적용시킬 수 있다. 또한, 내부피폭평가 시 요구되는 필수 인자 값인 섭취량분율을 도출할 수 있으며, 이는 대부분의 Computer 전산코드에 미리 계산되어 내장되어 있다.

ICRP-66 HRTM의 주요 기능은 아래에 기술하였다.

- 몸에 침투하기까지의 방사성 핵종의 경로로서 호흡기의 질적, 양적 묘사
- 임의의 노출에 대한 호흡 기관 방사선량을 계산하는 방법
- 다른 조직으로의 방사성 핵종 이동을 계산하는 방법

또한, ICRP-66 HRTM은 아래와 같은 상황에서 적용시킬 수 있다.

- 노출로 인한 선량 평가, 생물학적 분석 측정으로 인한 섭취량 평가
- 실질적인 모든 크기($0.0006 \sim 100\mu m$)의 입자(에어로졸) 및 가스 및 증기에 함유되어 있는 방사성 핵종
- 인체의 다양한 연령(3개월, 1,5,10 및 15세의 어린이 및 성인)에 대한 흡연, 질병 및 오염물질의 영향을 고려한 참고지침 제공

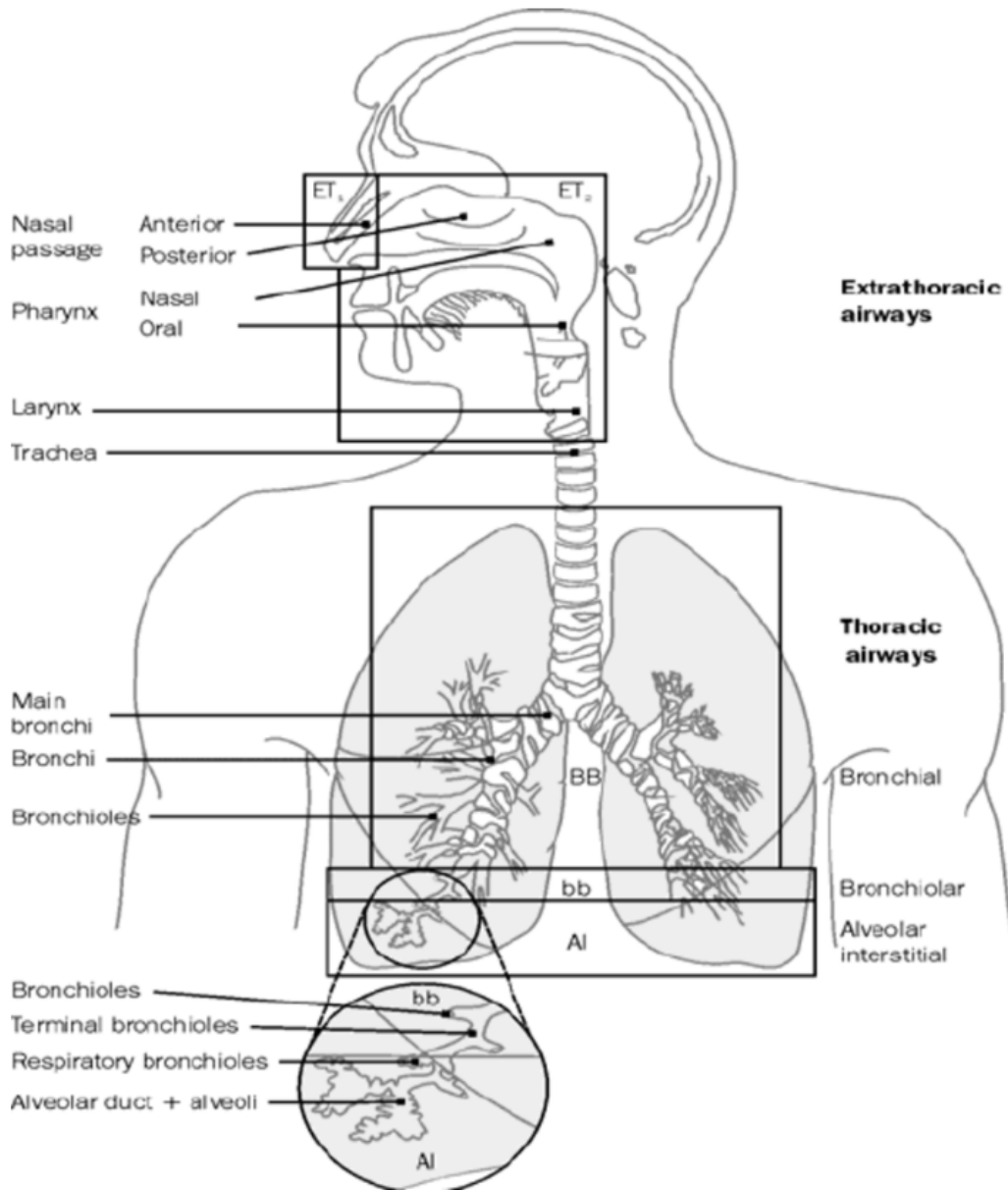


Fig 18. Human Respiratory Tract Model(HRTM)

Table 7는 공기 중에 부유하고 있는 에어로졸 입자를 흡입하였을 시 입자크기별 침적부위를 정리한 표이다.

Table 7. 입자크기별 침적부위

Compartment	Particle size
Nose or mouth	5.8 ~ 9.0 μm
Pharynx	4.7 ~ 5.8 μm
Trachea & Primary bronchus	3.3 ~ 4.7 μm
Secondary bronchus	2.1 ~ 3.3 μm
Terminal bronchus	1.1 ~ 2.1 μm
Alveolar duct	0.6 ~ 1.1 μm
Alveolus	0.43 ~ 0.65 μm

Figure 19는 HRTM에서 제시하는 인체 내부에서의 에어로졸 입자 흐름을 도식화시킨 그림이다.

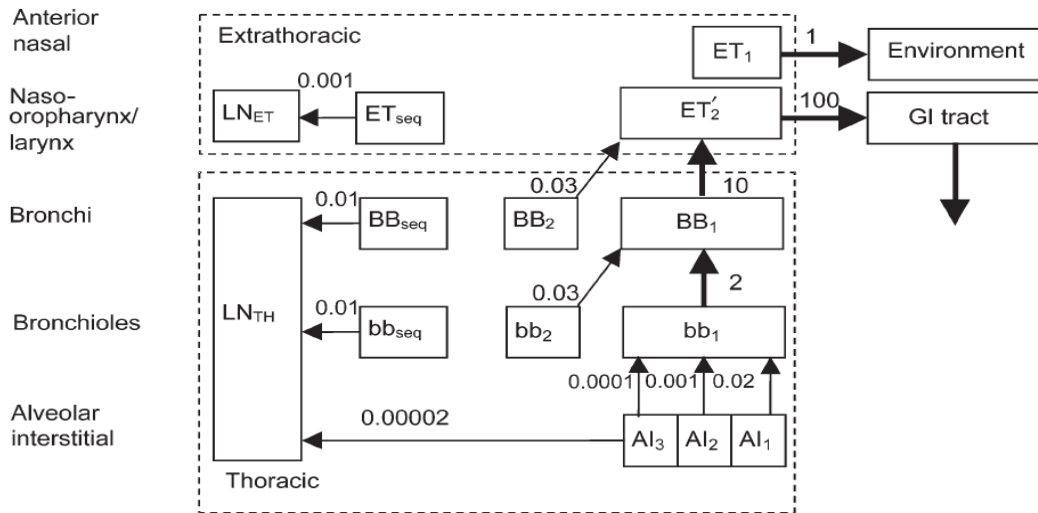


Fig 19 Compartment model representing time-dependent particle transport from each respiratory tract region in the HRTM

ET₂ 영역에 침전된 물질의 0.05%가 벽 (ET_{seq})에 잔류하고, 나머지는 구획 ET₂에서 잔류하며, 이는 위장관으로 빠르게 빠져나간다고 가정하고 있다. BB 및 bb(BB₂ 및 bb₂)에서 천천히 제거되는 침적물의 분율은 물리적 크기의 입자가 < 2.5 μm 인 경우 50%이며, 직경이 > 2.5 μm 일 때 감소하고, 기도 벽에 남아있는 분율(BB_{seq} 및 bb_{seq})은 모든 크기에서 0.7%를 나타내고 있다. AI 퇴적물은 AI₁, AI₂ 및 AI₃ 사이에서 0.3 : 0.6 : 0.1의 비율로 나누어진다.

제2절 AMAD(Activity Median Aerodynamic Diameter)

방사성 에어로졸의 크기 분포 및 농도는 에어로졸의 흡입에 의한 내부피폭 방사선량에 영향을 미치는 주요인자이다. 앞서 설명했듯이, 체내 깊숙한 곳에 침착한 입자는 체외에 침착한 입자보다 비교적 장기간 체류하게 되며 이로 인해 전신 또는 장기에서 장기간의 피폭을 야기하게 된다. 이처럼 입자의 크기에 따라 인체에 미치는 영향이 달라지기 때문에 해체 현장 작업자의 입자 흡입에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 입자 크기의 분포를 결정해야 한다.

본 논문에서는 입자 크기를 도출하기 위해 원자력시설에서 Plasma Arc Torch로 알루미늄, 탄소강, 스테인리스 강의 재질을 절단하였을 때의 경우를 선정하여 사례를 통해 입자 크기의 분석을 수행하였다. 절단은 3/8inch, 1/2inch 및 1inch 두께의 304 스테인리스 강, 3/8inch 및 3/4inch 두께의 1018 탄소강, 3/8inch 및 3/4inch 두께의 6061-T6 알루미늄에서 수행하였다.

1. 알루미늄(Aluminum)

알루미늄의 경우 에어로졸 발생의 최댓값은 Plasma Torch unit의 최대전류에 영향을 받는 것으로 나타났다. 최대 에어로졸 발생을 위한 절단 속도와 Plasma Torch 전류를 결정한 후, 절단 길이와 재료 두께를 변화시키면서 측정하였으며, 알루미늄 판의 두께를 0.95cm(3/8inch) 및 1.9cm(3/4inch)로 설정한 뒤 100A 및 0.4cm/s (에어로졸 최대 발생값)에서 25cm 내지 50cm의 길이로 절단하였다. 1.9cm(3/4inch) 알루미늄 판에서 최대 에어로졸 생산을 반복하여 두 가지 두께 사이에서 Torch 매개 변수와 에어로졸 발생 속도의 차이를 결정하였다. 두께 1.9cm(3/4 inch)에서 최대 에어로졸 발생량은 0.125cm/s의 절단 속도로 Torch 한계인 100A에서 발견되었다.

위의 실험결과는 Figure 20에서 재료의 각 두께에 대해 나타내었다.

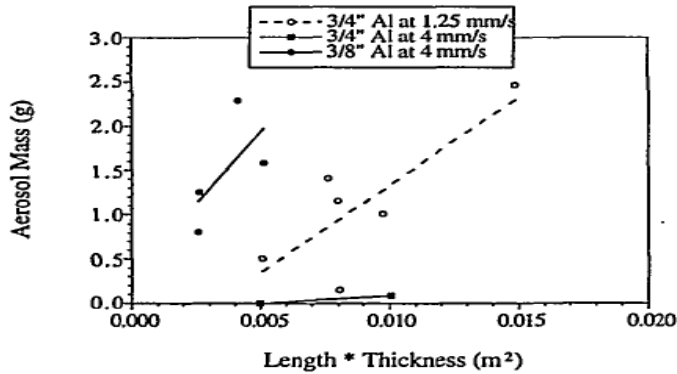


Fig 20. 100A에서 0.125cm/s, 0.4cm/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도

얇은 알루미늄 판(3/8inch)은 동일한 전류(100A) 및 계획된 절단 속도(4m/s)를 가했을 때, 317g/m²의 가장 가파른 경사를 가졌으며, 0.125cm/s의 속도로 절단하였을 때의 경사도는 198m/s²를 갖는다. 또한, 두께가 3/4inch이고 4m/s의 속도로 절단한 경우의 경사도는 15.8g/m²의 수치를 보였다. 이러한 차이는 두꺼운 판(3/4inch)에서보다 얇은 판(3/8inch)일 때, 절단면 주변에서 발생하는 열로 인해 더 많은 물질이 기화되고 액화되어 상대적으로 더 많은 에어로졸을 발생시키기 때문이다.

알루미늄으로 수행한 실험에서 발생한 평균 입자 크기 분포는 Figure 21에 나타냈으며, 평균 입자 크기 분포는 작은 입자 쪽으로 크게 가중되고 있다.

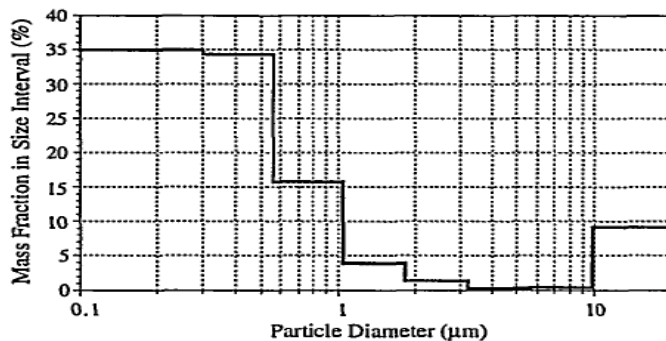


Fig 21. 알루미늄 절단 시 발생하는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)

질량 분포의 약 85%가 $1\mu\text{m}$ 미만의 크기를 갖는 것으로 밝혀졌으며, 이는 위에서 언급했던 기화와 액화가 에어로졸 형성의 핵심 메커니즘이라는 것을 나타내는 것이다. Submicron 범위의 큰 피크 외에도, 용융 금속의 원자화로 인해 약 $10\mu\text{m}$ 이상의 크기를 갖는 분포 집단이 있다. 결과적으로 MMAD(Mass Median Aerodynamic Diameter)은 $0.48 \pm 0.17\mu\text{m}$ 의 분포를 갖는다.

2. 탄소강(Carbon Steel)

탄소강의 경우, Plasma Torch의 전류가 80~85A일 때 에어로졸의 발생량이 최고치를 보였다. 80A의 일정한 Plasma Torch 전류 및 0.5cm/s의 절단 속도를 유지하면서, 절단 길이는 3/8" 및 3/4"의 탄소강 두께에서 5.0cm 내지 91.3cm로 변경하였다. Figure 22에서 볼 수 있듯이, 이 일련의 절단 결과는 에어로졸 질량과 절단 길이×재료 두께($R=0.99$)간에 우수한 상관 관계를 나타내었다.

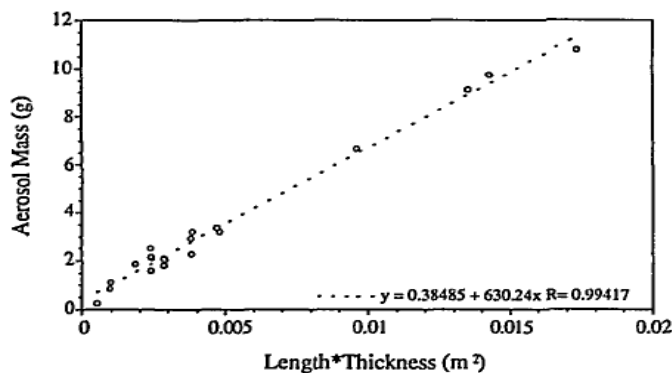


Fig 22. 80A에서 0.5cm/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도

절단에 의해 생성되는 에어로졸 질량의 50%는 $1\mu\text{m}$ 미만의 크기 분포를 갖는 것으로 나타났다. Figure 23은 탄소강에 대한 Cascade impactor를 통해 포집된 에어로졸의 평균 질량 분포를 요약한 그래프이다. 총 에어로졸 질량의 대부분은 $10\mu\text{m}$ 이상, $0.30\mu\text{m}$ 보다 작은 입자에 분포되어 있다. 탄소강 절단에서 발생된 총 평균 MMAD(Mass Median Aerodynamic Diameter)는 $0.52 \pm 0.12\mu\text{m}$ 이다.

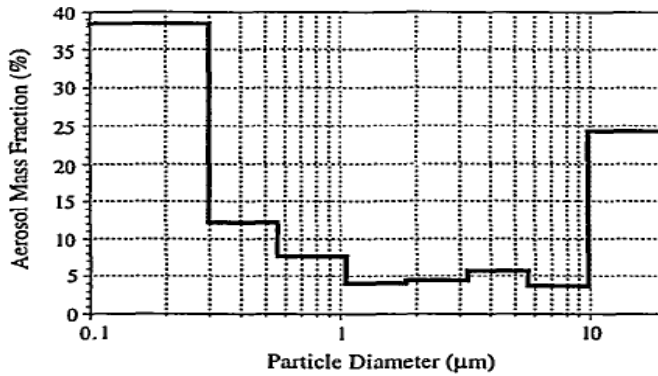


Fig 23. 탄소강 절단 시 발생하는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)

3. 스테인리스 강(Stainless Steel)

스테인리스 강의 최대 에어로졸 발생량은 Plasma Torch 최대 전류에서 발생하는 것으로 나타났다. 스테인리스 강판에서 손실된 질량은 Arc 전류의 최대치에 대한 함수로써 선형적으로 증가하는 수치를 보였다. Plasma Torch의 전류를 100A로 고정시키면 에어로졸의 최대 발생량은 0.25m/s의 절단 속도에서 나타났으며, 실험 방법은 전류를 100A, 절단 속도를 0.25m/s로 유지하면서 절단 길이와 재료 두께를 변경하였다. Figure 24을 보듯이 알루미늄과 동일하게 두꺼운 판보다 얇은 판에서의 에어로졸 발생량이 많은 것을 알 수 있다.

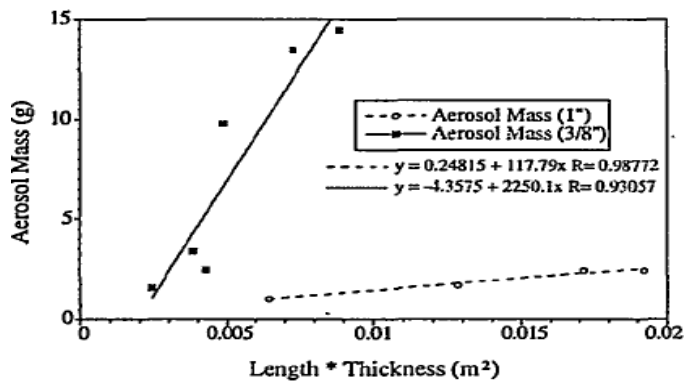


Fig 24. 100A에서 0.25m/s의 속도로 절단 시 에어로졸 질량과의 관계도

Figure 25은 스테인리스 강에서 발생된 에어로졸의 평균 입자 크기를 나타낸다. 총 에어로졸 질량의 85%이 $1\mu\text{m}$ 미만의 입자 크기를 갖는다는 점에서 알루미늄과 동일하며, 에어로졸의 총 평균 MMAD는 $0.36 \pm 0.09\mu\text{m}$ 로 나타났다.

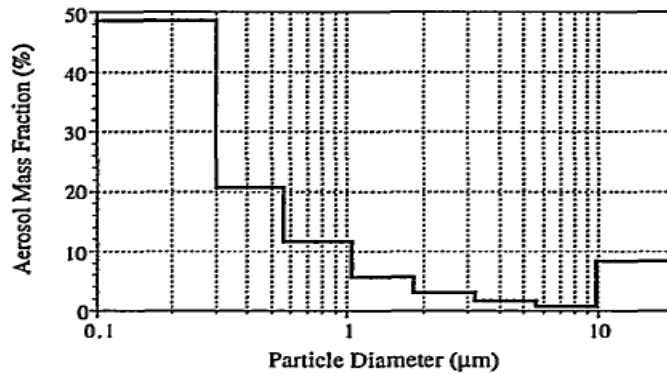


Fig 25. 스테인레스 강 절단 시 발생되는 에어로졸의 평균 입자 크기 분포(MMAD)

제3절 작업자의 호흡률

작업자의 호흡률은 공기 중 입자의 체내 섭취량과 직접적으로 관련이 있다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고한 ICRP-66은 연령 별 활동 유형에 따른 호흡률을 제시하였다. Table 8에서는 국제방사선방호위원회에서 제시하는 성인 남성 작업자의 활동 유형에 따른 호흡률 기본값을 나타내었다.

Table 8. ICRP-66에서 제시한 성인 남성 작업자의 활동유형에 따른 호흡률 기본 값

활동		소요시간	호흡률(m ³ /hr)
취침		8시간	0.45
직업상 활동	경미한 작업	- 5.5시간 : 가벼운 활동 - 2.5시간 : 휴식 또는 앉아있음	1.20
	격렬한 작업	- 7시간 : 가벼운 활동 - 1시간 : 격렬한 운동	1.68
비직업상 활동		- 4시간 : 휴식 또는 앉아있음 - 3시간 : 가벼운 운동 - 1시간 : 격렬한 운동	1.21
총 계		24시간	경미한 작업시 : 1.90 격렬한 작업시 : 2.38

국제방사선방호위원회에서는 작업자의 하루 평균 작업시간을 8시간으로 가정하고 있으며, 근무형태에 따라 경미한 작업과 격렬한 작업으로 구분하고 있다. 경미한 작업은 대부분의 시간(5.5시간)을 경미한 활동(High exercise), 그 외 시간(2.5시간)은 휴식 또는 앉아서 작업하는 것을 의미한다. 격렬한 활동(Heavy exercise)은 대부분의 시간(7시간)을 경미한 활동, 그 외 시간(1시간)은 격렬한 활동을 수행하는 것을 의미한다.

1. 호흡생리인자

호흡생리인자는 흡입된 방사성 핵종의 침적에 영향을 준다. 침적에 영향을 미치는 호흡생리인자는 다음과 같다.

- 총 폐 용량(Total Lung Capacity, TLC) : 최대로 들어가는 공기의 양
- 기능적 잔기량(Functional Residual Capacity, FRC) : 정상적인 호흡후에도 폐에 남아 있는 공기의 양
- 환기량(Ventilation Rate, B) : 1분간 폐를 지나는 공기의 양
- 1회 환기량(Tidal Volume, V_T) : 정상적으로 흡입되는 양
- 호흡수(Respiration Frequency, f_R) : 1분간 호흡수
- 1초량(Volumetric Flow Rate, V : 1초간의 호흡량

호흡생리인자중 총 폐 용량과 기능적 잔기량은 인종, 성별 및 연령에 따라 서로 다르다. 그러나 환기량, 1회 환기량, 호흡수 및 1초량은 인종, 성별 및 연령은 물론 신체활동정도에도 의존한다.

호흡생리학적 면에서 신체활동정도는 4가지, 즉 수면, 안정, 경미한 운동, 그리고 격심한 운동으로 구분된다. 방사선작업종사자에 대한 침적계산에서 사용되는 코카서스인에 대한 호흡생리인자의 값은 Table 9와 같으며, 경미한 운동, 격심한 운동에 대해서만 나타내었다. 방사선 작업종사자의 경우 일일 신체활동은 3가지, 즉 수면(8시간), 방사선작업(8시간) 및 그 이외의 활동(8시간)으로 구분된다.

Table 9. 호흡생리인자 값

Activity		Adult	
		Male	Female
TLC (L)		6.98	4.97
FRC (L)		3.30	2.68
Light Exercise	$B(m^3h^{-1})$	1.5	1.25
	$f_R(min^{-1})$	20	21
	$V_T(mL)$	1250	992
	$V(mL/s)$	833	694
Heavy Exercise	$B(m^3h^{-1})$	3	2.7
	$f_R(min^{-1})$	26	33
	$V_T(mL)$	1920	1364
	$V(mL/s)$	1670	1500

제5장 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭평가

제1절 내부피폭평가 방법

방사성 핵종을 함유하고 있는 방사성 에어로졸이 흡입, 섭취, 피부 침투 등의 경로를 통해 인체 내부로 들어와 조직에 분포하면서 방출하는 방사선에 의해 피폭되는 내부피폭선량의 계측은 본질적으로 여러 가지 어려움이 수반된다. 신체의 적절한 위치에 개인선량계를 착용함으로써 피폭의 대푯값을 얻을 수 있는 외부피폭선량 평가와는 달리 조직이나 장기의 선량을 직접 측정할 수 있는 현실적인 수단이 없기 때문이다. 따라서 내부피폭 선량평가는 방사능 섭취량(Intake)을 구하고 그 섭취량에 따른 예탁유효선량(Committed Effective Dose)을 평가한다.

방사선 장애자에 대한 방사능 섭취량을 평가하는 방법으로 생체 검정법(Bioassay)를 사용하며, 이 방법은 체내에 잔류하고 있는 방사능을 측정하는 직접 생체 검정법(In-vivo Bioassay)과 체외로 배출되는 방사능을 측정하는 간접 생체 검정법(In-vitro Bioassay)으로 구분된다. 예탁유효선량이란 체내에 섭취된 방사성 핵종이 배설 또는 붕괴에 의해 소멸될 때까지의 충분히 긴 시간동안 앞으로 피폭될 것이 예상되는 유효선량을 말한다. 성인의 경우에는 평균 수명 70세까지 최장 기간인 50년으로 간주하여 평가를 수행한다.

1. 직접 생체 검정법(In-vivo Bioassay)

직접 생체 검정법은 체내의 방사성 핵종이 방출하여 인체 외부로 나오는 방사선을 검출하는 것이므로 그 계측 대상은 투과력이 큰 방사선(감마선이나 특정 X선)을 방출하는 핵종에 한정된다. 고에너지 베타입자를 방출하는 핵종의 경우 그 베타 입자가 인체 조직과 작용하여 제동복사선을 방출하므로 체외에서 어느 정도의 방사선을 검출할 수 있으나 에너지가 연속 스펙트럼이므로 핵종을 특성화할 수 없어 현실적으로 직접 계측법을 적용하기 어렵다. 따라서 3H, 14C, 32P, 35S, 90Sr 등 순수 베타입자 방출 핵종이나 239Pu처럼 알파입자를 방출하는 핵종은 간

접 생체 검정법을 사용하여 섭취량을 평가한다.

2. 간접 생체 검정법(In-vitro Bioassay)

간접 생체 검정법은 배설물이나 혈액, 타액 등 생물시료에 함유된 방사능을 측정함으로써 섭취량을 간접적으로 평가하는 방법이다. 특히 미량이고 낮은 농도의 방사능을 검출해야 하므로 화학분석적 방법으로 표적 원소를 분리해야 할 경우도 있어 절차가 복잡하고 시간이 소요된다. 간접 생체 검정법은 직접 생체 검정법으로 감시할 수 없는 알파, 베타 방출핵종의 섭취량 평가에 주로 이용된다. 직접 생체 검정법으로 측정이 가능한 핵종이라도 신체 계측시스템의 비용을 감당하기 어려운 소규모 사용시설에서 직접 생체 검정법을 대신하여 사용할 수도 있지만 핵종과 화학형에 따라서는 배설률이 낮아 측정이 어려운 경우에는 직접 생체 검정법을 사용해야 한다.

직접 생체 검정법과 간접 생체 검정법은 이미 방사성 핵종을 섭취하여 진단을 하는 단계이다. 본 연구는 과피폭을 방지하고자 수행하는 연구이므로, 향후 흡입할 가능성이 있는 방사성 핵종에 대해 내부피폭평가를 수행해야 한다. 수행 방법에는 내부피폭평가 Code를 사용하여 원자력 시설에서 발생하는 방사성 에어로졸의 입자 크기, 함유 핵종을 Input data로써 접목시키는 방법이 있으며, 이를 통해 원자력 시설에서 종사하는 작업자의 방사성 핵종 섭취량과 예탁유효선량 도출이 가능하다.

제2절 내부피폭평가 Code 비교 및 분석

내부피폭평가는 방사성 핵종의 섭취량 산정이 중요하다. 섭취량 평가에는 섭취 핵종의 종류와 물리적 반감기, 섭취일자 및 시각, 섭취경로(흡입, 경구, 상처 오염 등), 섭취핵종의 화학적 형상(화합물의 F, M, S 구분), 섭취핵종의 입자 크기, 잔류량 또는 배설량, 측정일자, 과거의 피폭이력, 피검자의 연령과 건강상태, 대사모델 등이 필요하다. 또한, 방사성 핵종의 섭취에 따른 조직 등가선량 또는 유효선량은 예탁선량환산계수 $e_{50}(Sv/Bq)$ 를 적용하여 산출된다.

위 인자들을 고려하여 내부피폭평가를 수행하는 Code는 대표적으로 IMIE, IMBA, LUDEP, BiDAS 등이 있으며, 이러한 Code들은 ICRP Tract Model을 적용하고 있다. 또한, 위의 내부피폭 평가 Code들은 ICRP-66에서 제시한 HRTM(Human Respiratory Tract Model)의 호흡기 모델을 적용하고 있다. 본 절에서는 각 Code의 계산 가능한 입자 크기, 적용 ICRP Model 비교분석을 통해 최종 내부피폭평가 Code를 선정하였다. 다음은 내부피폭평가 Code에 대해 나타내었다.

1. IMIE(Individual Monitoring of the Internal Exposure)

IMIE 코드는 회구선량(이미 받는 선량)평가(Retrospective Dosimetry)를 목적으로 개발되었다. 주요 목적은 노출 일자, 섭취 경로, AMAD 및 재료 유형 (흡입 사례)와 같은 신체 측정기 또는 생물 검정 자료 및 알려진 노출 조건의 기초에 대한 다중 섭취의 재구성이다. 알 수 없거나 비표준 노출 조건의 경우, 섭취 날짜, 섭취 경로(흡입, 섭취 등), AMAD, 흡입 된 에어로졸 입자와 같은 광범위한 노출 시나리오를 비교할 수 있게 구성되어 있다. IMIE는 선택된 범위의 모든 매개 변수 조합을 분석하고 분석된 측정값을 찾으며, 선택된 방사성 핵종에 대한 여러 데이터 세트(대, 소변) 및 ‘직접 선량 평가’의 동시 분석이 가능하다. 계산 가능한 핵종은 총 46개 핵종이며, 흡입(에어로졸, 가스 및 증기), 섭취, 주입, 상처, 섭취 경로를 통해 인체 내에 침투한 핵종의 소변, 대변, 폐, 갑상선 및 전신에서의 거동 및 영향을 예측 및 측정하는 기능이 있다. 또한, 0.001에서 $20\mu m$ 까지 다양한 범위의 입자 크기 계산이 가능하다.

Table 10. IMIE의 기본적인 기능 구성

Radionuclide (28 elements, 46 radionuclide)	H-3, P-32, P-33, S-35, Cr-51, Mn-54, Fe-59, Co-58, Zn-65, Sr-89, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-99, Tc-99m, Ru-103, Ru-106, Ag-110m, Te-132, I-123, I-125, I-131, I-132, Cs-134, Cs-137, Ba-140, Ce-141, Ce-144, Tl-201, Tl-202, Pb-210, Po-210, Ra-226, Th-228, Th-232, U-234, U-235, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am-241, Am-243
Measurements	Urine, Faeces, Lung, Thyroid and Whole Body
Route of intake	Inhalation (aerosols, gases and vapours), Ingestion, Injection, Wound, Arbitrary mixture of intake routs
Type of Material	F, M, S, Arbitrary mixture of Types represented by superposition of log-normal distributions (“Mixture of <i>AMADs</i> ”)
AMAD	
Intake pattern	One or several intakes (acute or chronic)

2. LUDEP(A Lung Dose Evaluation Program)

LUDEP 코드는 새로운 ICRP Respiratory Tract Model (ICRP Publication 66)을 사용하여 내부 선량을 계산하기 위해 영국 국립 방사선 방호위원회(National Radiological Protection Board)에서 개발한 소프트웨어 패키지다. IMBA 코드의 다운그레이드 버전으로 ICRP-66 HRTM, ICRP-30 GI 관 모델, NCRP 상처 모델 및 ICRP-78 생체 동역학적 모델을 적용하고 있다.

LUDEP의 검증은 내부 선량 평가에 사용된 ICRP 방법론에 근거한 아래 두 가지 단계로 수행되었다.

- 측정된 작업 결과로부터 방사성 핵종 섭취량을 추정하기 위해 LUDEP에 의해 계산된 값과 ICRP-78(또는 ICRP-54)의 표 데이터 비교.
- IAEA 기본 안전 표준에서 주어진 데이터와 LUDEP에 의해 계산된 흡입 및 섭취 선량 인자와의 비교.

위의 ICRP 및 IBSS 간행물에 따라 계산에 적용된 주요 매개 변수는 아래와 같다.

- AMAD = $5\mu\text{m}$, M형 물질(방사성 핵종에 따라 가장 적합한 것으로 변동 가능).
- 불특정 화합물에 대해 주어진 값 또는 섭취 경우에 대해 가장 제한적인 값.

계산을 위한 방사성 핵종의 선택은 IAEA 연구실의 최근 관행을 기반으로 수행되었다. 결과는 LUDEP이 제한된 수의 방사성 핵종에 대해서만 사용될 수 있다는 것을 명확하게 밝혀냈으며, 계산된 유지 및 배설 곡선을 통해 섭취량을 추정할 수 있다고 검증되었다.

3. IMBA(Integrated Modules for Bioassay Analysis)

IMBA 코드는 ACJ & Associates 와 HPA(UK Health Protection Agency)가 협력하여 개발한 프로그램이며, 생물학적 측정 데이터로부터 섭취량을 평가하고, 특정 섭취 후 다른 시간에 생물학적 분석량을 계산하고, 단일 섭취량으로부터 등가의 기관 투여량과 유효 복용량을 계산할 수 있다. ICRP-66/30 위장관 모델, NCRP 상처 모델 및 ICRP-78 생체 인식 모델을 사용한다. 호흡기 모델, 소화 기관 모델 및 신진 대사 모델의 경우 권장 모델인 ICRP-68 표준 작업자의 노출량을 평가한다. 계산 가능한 입자크기는 ICRP가 권고하는 크기인 $5\mu\text{m}$ 이지만, 임의 변경이 가능하다.

코드의 개발과정 중에 각 방사성 핵종에 대해 급성, 단위 흡입 및 섭취로 인한 등가 장기선량과 예탁유효선량을 계산한 값과 원소 당 하나 이상의 방사성 핵종에 대해 급성, 단위 흡입 및 섭취로 인한 생물 검정량을 계산하여 내부 선량계 코드인 PLEIADES의 계산 값과 비교하였다. PLEIADES 결과값과 IMBA 결과값

차이가 1% 미만은 수용할 수 있는 범위의 오차였지만, 경우에 따라 1%이상의 차이(PLEIADES에서 독립적인 동역학을 사용하고 IMBA에서 공식적인 동역학을 사용하는 경우)를 보이기도 한다.

4. BiDAS(Bioassay Data Analysis Software)

BiDAS는 방사선작업자 내부피폭선량평가 전산코드로써 2003년 KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)에 의해 개발되었으며, 2007년 코드의 기능성, 신뢰성, 편리성을 향상시킨 BiDAS-2009로 업그레이드 하였다. 사용되는 방사성 핵종의 대사모델은 ICRP-66 호흡기모델, ICRP-30 소화기모델, ICRP-30,56,67,69,71 생체 동역학적 모델을 사용하고 있다.

BiDAS 코드의 구성은 섭취잔류량 및 일일 배설율 데이터 모듈, 선량계수 데이터 모듈, 측정자료의 통계적 처리모듈, 개인자료 관리모듈, 그래픽 처리모듈 등으로 구성되어 있다.

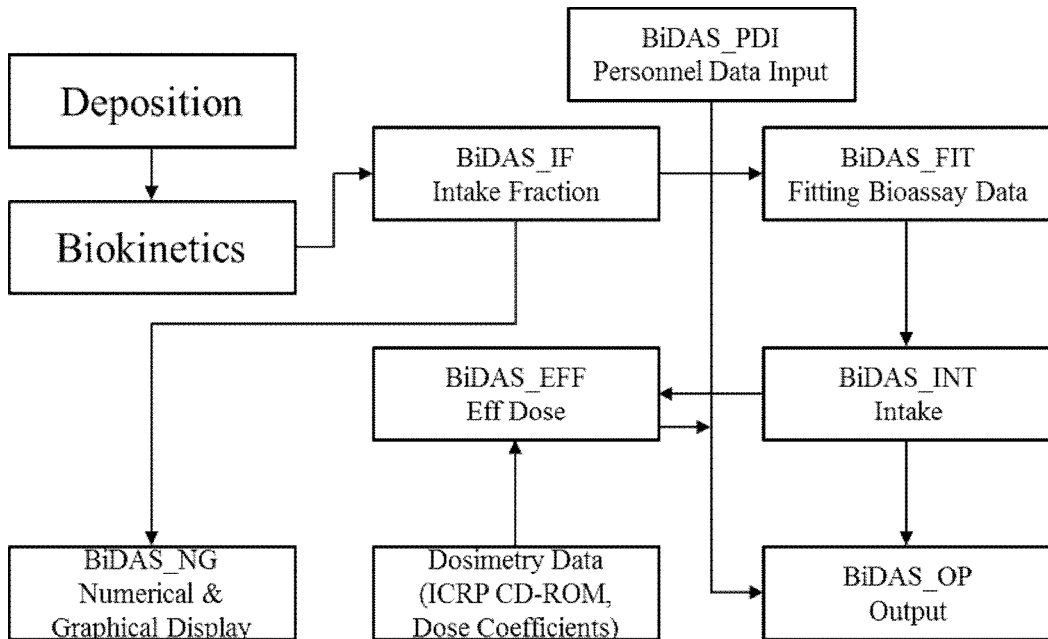


Fig 26. BiDAS 코드의 구성

섭취잔류량 및 일일 배설물 데이터 모듈은 단일 급성섭취에 대한 섭취잔류량(전신 및 기타 장기에 해당하는 값)과 일일 배설물(소변 및 대변에 해당하는 값) 자료가 내장되어 있는 모듈이다. 이 자료는 섭취경로에 따라 흡입섭취와 경구섭취에 대한 것으로 나누어져 있다. 흡입섭취의 경우에는 입자크기와 화합물의 흡수형(Type F, M, S)에 따라 다시 나누어져 있으며, 경구 섭취의 경우에는 소화기 흡수율에 따라 다시 나누어져 있다. 이 자료에서 섭취 후 경과시간은 0.1일부터 0.1일부터 0.1일씩 증가하여 3650일까지이다. 연속섭취에 대한 자료는 내장되어 있지 않으나, 이 값은 본 코드에서의 계산 알고리즘에 의해 계산된다.

선량계수 데이터 모듈은 ICRP CD-ROM을 사용하여 구한 선량계수가 내장되어 있는 모듈이다. 내장된 자료는 섭취잔류량 및 일일 배설물과 같이 섭취경로 및 입자의 물리, 화학적 특성에 따라 나누어져 있다.

5. 평가 Code 선정 및 적용된 계산 알고리즘

나열한 내부피폭평가 Code중 BiDAS는 타 코드보다 국내의 규제기준, 법령에 기초를 두었다. 또한, IMBA 신뢰도 검증 결과 95%이상의 정확성, IAEA에서 수행한 IMIE와의 결과값 비교를 통해 2%미만의 오차를 보였다. 이로 인해 향후 국내 원전 해체 시 작업자의 내부피폭평가를 수행하는데 있어 적용하기 적합하다고 판단되어 최적의 내부피폭평가 Code로 선정하였다.

본 절에서는 선정된 BiDAS Code에서 내부피폭평가를 수행하는데 사용되는 수학적 수식을 분석하였다.

방사성 핵종 섭취에 따른 내부피폭선량은 방사성 핵종 섭취량(Bq)에 전형적 신체 조건과 생물학적 거동 모델에 따라 산출된 예탁유효선량 환산계수 $e_{50}(Sv/Bq)$ 을 곱하여 평가할 수 있다. 즉, 섭취된 방사성 핵종에 의한 예탁유효선량 E_{50} 은 수식 9와 같이 방사성 핵종 섭취량 I 와 단위 섭취량에 의한 예탁유효선량 환산계수 e_{50} 을 곱하여 구할 수 있다.

$$E_{50} = I \circ e_{50} \quad (9)$$

위 식에서 방사성 핵종 섭취량 I 는 수식 10 또는 수식 11과 같이 섭취 후 경과 시간 t 에서 체내 조직 T 내의 잔류방사능 $M_T(t)$ 또는 일일 배설물 X 중의 방사능 $M_X(t)$ 을 조직 T 내의 방사능 잔류분율 $m_T(t)$ 또는 배설물 X 를 통한 일일 방사능 배설분율 $m_X(t)$ 로 각각 나누어 구할 수 있다.

$$I = \frac{M_T(t)}{m_T(t)} \quad (10)$$

$$I = \frac{M_X(t)}{m_X(t)} \quad (11)$$

그런데 섭취된 방사성핵종의 체내잔류분율 및 일일배설분율은 전신, 폐, 갑상선, 소변 및 대변과 같은 바이오어세이 측정대상뿐만 아니라 방사성핵종의 섭취경로(호흡, 취식), 화합물 형태에 따른, 폐에서 체액으로의 흡수형태(Type F, M, S) 및 소화기에서 체액으로의 흡수율(f_1), 방사능 입자크기(AMAD : Activity Median Aerodynamic Diameter), 그리고 섭취 후 경과시간 등과 같은 내부피폭방사선량 평가 인자에 따라 다르다. 그러므로 체내 또는 배설물 중의 방사능 측정값인 바이오어세이 측정값이 동일해도 선량평가인자의 적용 조건에 따라 방사성핵종 섭취량은 다르게 평가된다. 또한 방사성핵종의 섭취경로, 흡수형태, 소화흡수율 및 AMAD에 따라 단위방사능 섭취 당 예탁유효선량 환산계수가 다르므로 섭취량이 같더라도 선량평가인자에 따라 예탁유효선량이 다르게 평가된다. 이와 같이 방사성핵종의 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과는 여러 내부피폭방사선량 평가인자에 따라 영향을 받는다.

따라서 방사성핵종 섭취량 및 예탁유효선량은 여러 선량평가인자에 따라 각각 수식 12와 수식 13에 의하여 구할 수 있다.

$$I^{p,a,f,d} = \frac{M_B(t)}{m_B^{p,a,f,d}(t)} \quad (12)$$

$$E_{50}^{p,a,f,d} = I^{p,a,f,d} \circ e_{50}^{p,a,f,d} \quad (13)$$

여기서 $M_B(t)$ 는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t 에서 바이오어세이 측정대상 B 에

서의 방사능(체내잔류방사능 또는 일일배설방사능) 측정값이고, p 는 섭취경로 (intake pathway), a 는 폐에서의 흡수형태(absorption type), f 는 소화흡수율(f_1 value : fractional uptake of an element from the gastrointestinal tract), d 는 AMAD, 그리고 $m_B^{p,a,f,d}(t)$ 는 선량평가인자 p,a,f,d 를 갖는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t 에서 측정대상 B 에서의 체내잔류분율 또는 일일배설분율을 나타내고, $I^{p,a,f,d}$ 는 선량평가인자 p,a,f,d 를 갖는 방사성핵종 섭취량을 뜻한다. 또한 $e_{50}^{p,a,f,d}$ 는 선량평가인자 p,a,f,d 를 갖는 방사성핵종의 예탁유효선량 환산계수(Sv/Bq), 즉 단위 방사능(Bq) 섭취당 50년간 받는 유효선량이고, $E_{50}^{p,a,f,d}$ 은 방사성핵종 섭취량 $I^{p,a,f,d}$ 에 의해 50년간 받는 예탁유효선량(Sv)이다.

Figure 27은 방사성핵종의 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하기 위한 로드맵이다.

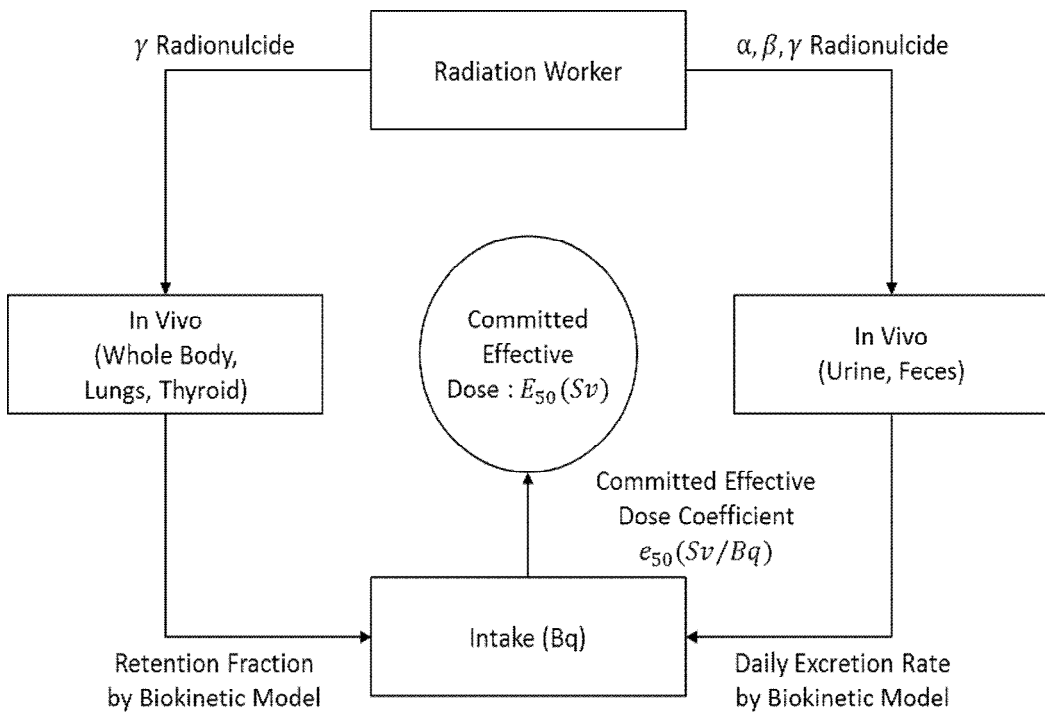


Fig 27. 선량 평가 알고리즘

제3절 Computer Code를 이용한 에어로졸 내부피폭평가

에어로졸 입자의 크기는 앞서 수행했던 알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강을 절단 시 발생한 에어로졸의 MMAD를 적용하였다. 하지만, BiDAS의 입자 크기 Input data는 AMAD를 사용하고 있어, 이에 대한 단위 변경이 요구되었다. MMAD는 Hatch-Choate 방정식(14)을 사용하여 AMAD로 변환할 수 있다.

$$(AMAD) = (MMAD)\exp(-0.955 \times \ln^2 \sigma_g) \quad (14)$$

여기서 σ_g 는 기하학적 표준편차를 의미한다. 본 연구에서는 알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강의 MMAD 집단을 형성한 뒤 EXCEL Program을 이용하여 표준 편차를 구했다. 단, 상대적으로 입자가 매우 큰 $10\mu m$ 을 초과하는 범주는 제외하였다.

Al					Carbon				Stainless				
0.105714	0.22	0.344118	0.491176	0.8875	0.105263	0.210526	0.3625	1.9	0.104167	0.1875	0.270833	0.454762	1.15
0.111429	0.225714	0.351471	0.498529	0.915625	0.110526	0.215789	0.383333	2.14	0.108333	0.191667	0.275	0.466667	1.3
0.117143	0.231429	0.358824	0.505882	0.94375	0.115789	0.221053	0.404167	2.38	0.1125	0.195833	0.279167	0.478571	1.45
0.122857	0.237143	0.366176	0.513235	0.971875	0.121053	0.226316	0.425	2.62	0.116667	0.2	0.283333	0.490476	1.6
0.128571	0.242857	0.373529	0.520588	1	0.126316	0.231579	0.445833	2.86	0.120833	0.204167	0.2875	0.502381	1.75
0.134286	0.248571	0.380882	0.527941	1.225	0.131579	0.236842	0.466667	3.1	0.125	0.208333	0.291667	0.514286	1.9
0.14	0.254286	0.388235	0.535294	1.45	0.136842	0.242105	0.4875	3.516667	0.129167	0.2125	0.295833	0.52619	2.3
0.145714	0.26	0.395588	0.542647	1.675	0.142105	0.247368	0.508333	3.933333	0.133333	0.216667	0.3	0.538095	2.7
0.151429	0.265714	0.402941	0.55	1.9	0.147368	0.252632	0.529167	4.35	0.1375	0.220833	0.311905	0.55	3.1
0.157143	0.271429	0.410294	0.578125	2.5	0.152632	0.257895	0.55	4.766667	0.141667	0.225	0.32381	0.590909	4.35
0.162857	0.277143	0.417647	0.60625	3.1	0.157895	0.263158	0.614286	5.183333	0.145833	0.229167	0.335714	0.631818	5.6
0.168571	0.282857	0.425	0.634375		0.163158	0.268421	0.678571	5.6	0.15	0.233333	0.347619	0.672727	10
0.174286	0.288571	0.432353	0.6625		0.168421	0.273684	0.742857	6.7	0.154167	0.2375	0.359524	0.713636	
0.18	0.294286	0.439706	0.690625		0.173684	0.278947	0.807143	7.8	0.158333	0.241667	0.371429	0.754545	
0.185714	0.3	0.447059	0.71875		0.178947	0.284211	0.871429	8.9	0.1625	0.245833	0.383333	0.795455	
0.191429	0.307353	0.454412	0.746875		0.184211	0.289474	0.935714	10	0.166667	0.25	0.395238	0.836364	
0.197143	0.314706	0.461765	0.775		0.189474	0.294737	1		0.170833	0.254167	0.407143	0.877273	
0.202857	0.322059	0.469118	0.803125		0.194737	0.3	1.225		0.175	0.258333	0.419048	0.918182	
0.208571	0.329412	0.476471	0.83125		0.2	0.320833	1.45		0.179167	0.2625	0.430952	0.959091	
0.214286	0.336765	0.483824	0.859375		0.205263	0.341667	1.675		0.183333	0.266667	0.442857	1	
기하학적 표준편차					기하학적 표준편차				기하학적 표준편차				
0.479429213					2.123362701				1.303388335				

Fig 28. Al, Carbon, Stainless의 기하학적 표준편차

알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강에서 구한 기하학적 표준편차는 Hatch-Choate Equation을 통해 AMAD로 변환할 수 있다.

AMAD(Micron Meter)		
Al	Carbon	Stainless
0.292442	0.302576	0.3086

Fig 29. AMAD of Al, Carbon, Stainless

알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강의 AMAD는 방사성 핵종을 함유하고 있는 방사성 에어로졸의 입자 크기로, BiDAS Code에 적용할 수 있다. BiDAS Code에서 적용 가능한 입자 크기는 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3 μm 이기 때문에, 도출한 AMAD의 오차를 고려하여 0.3 μm 로 평가를 수행하였다.

Plasma melting Facility에서 Metal Melting으로 인해 발생한 방사성 에어로졸은 대표적으로 Co-60, Co-58, Cs-134등을 함유하고 있으며, 이에 대한 농도(MBq)값은 Table 11에 나타내었다.

Table 11. Mean annual Values under normal operating conditions of the Plasma Melting Facility

Radionuclides	Stack(Impactor)
	MBq
Mn-54	0.362
Co-58	0.181
Fe-59	0.0603
Co-60	0.44
Cs-134	0.362

실제 원전 해체중 작업자의 전신, 소변, 배변에서의 측정자료는 구하기 어렵기 때문에 Table 11에 나타난 핵종 및 방사능 양을 각 격실 당 섭취량분율을 적용하여 해체 작업자의 전신, 오줌, 배변에서의 측정값을 산정하였다. 섭취량분율은 MONDAL3 Code를 사용하였으며, 각 격실마다 섭취량분율의 계산이 가능하다. 핵종의 형태는 알 수 없거나 이를 포함하는 모든 화합물로 정의하여 수행하였고, 입자 크기는 MMAD \rightarrow AMAD 과정을 통해 도출된 0.3 μm 로 적용하였다. 적용된 핵종의 체내 섭취량분율, 소변 섭취량분율, 배변 섭취량분율의 도표는 부록에 첨부하였다.

작업기간은 연평균 공휴일을 제외한 250일(연속섭취)로 적용하였으며, 매달 19~22일의 작업기간 분포를 두고 진행하였다. 계산 방법은 섭취개시일로부터 섭취종료일까지의 기간을 T라 놓으면, 섭취개시일로부터 임의의 측정일 t에서의 측정값 M(t)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$M(t) = \frac{I}{T} \int_{t-T}^t m(u) du \quad (15)$$

여기서 u는 적분한계 사이에서의 시간변수, m(u)는 섭취후 시간 u에서의 섭취량분율, I는 섭취개시일로부터 섭취종료일까지의 총 섭취량을 나타낸다. 사다리꼴 적분공식을 적용하면 수식 15에서의 적분항은 수식 16과 같이 주어진다.

$$\int_{t-T}^t m(u) du = \frac{T}{n} \left[\frac{m(u_0) + m(u_n)}{2} + m(u_1) + \dots + m(u_{n-1}) \right] \quad (16)$$

여기서 n은 적분구간의 등분수, u_0, u_1, \dots, u_{n-1} 은 n등분하여 생긴 구간점, $m(u_0), m(u_1), \dots, m(u_{n-1})$ 은 각 구간점에서의 섭취량분율을 나타낸다. 위 수식 15와 16을 조합하면 최종적으로 수식 17과 같은 측정값 산정이 가능한 수식이 도출된다.

$$M(t) = \frac{I}{T} \times \frac{T}{n} \left[\frac{m(u_0) + m(u_n)}{2} + m(u_1) + \dots + m(u_{n-1}) \right] \quad (17)$$

단, 작업하지 않는 기간의 범주는 고려하지 않았기 때문에, 오차가 있을 수 있다. 이는 BiDAS Code내에서 오차율(20%)을 적용시킨 측정값으로 적용하였다. 아래 Figure 30, 31, 32는 각각 Whole Body, Urine, Faecal에서의 측정값을 나타낸 것이다.

Whole Body 측정값 M(t)				
Mn-54	Co-60	Cs-134	Co-58	Fe-59
7.37E+04	3.86E+04	1.48E+04	7.33E+04	8.29E+04
3.35E+04	2.99E+04	1.28E+04	3.34E+04	6.63E+04
2.11E+04	2.57E+04	1.16E+04	2.09E+04	5.61E+04
1.52E+04	2.29E+04	1.07E+04	1.51E+04	4.85E+04
1.19E+04	2.09E+04	9.93E+03	1.17E+04	4.26E+04
9.81E+03	1.92E+04	9.26E+03	9.53E+03	3.77E+04
8.36E+03	1.79E+04	8.66E+03	8.04E+03	3.37E+04
7.31E+03	1.67E+04	8.12E+03	6.95E+03	3.03E+04
6.52E+03	1.57E+04	7.63E+03	6.13E+03	2.75E+04
5.89E+03	1.49E+04	7.19E+03	5.49E+03	2.51E+04
5.39E+03	1.41E+04	6.78E+03	4.97E+03	2.30E+04
4.97E+03	1.34E+04	6.41E+03	4.54E+03	2.13E+04

Fig 30. Whole body 측정값 M(t)

Urine 측정값 M(t)				
Mn-54	Co-60	Cs-134	Co-58	Fe-59
2.03E+02	5.41E+01	2.95E+01	8.96E+01	3.22E+04
2.58E+02	7.30E+01	4.21E+01	1.15E+02	4.34E+04
2.33E+02	7.14E+01	4.36E+01	1.05E+02	4.16E+04
2.06E+02	6.74E+01	4.28E+01	9.32E+01	3.79E+04
1.81E+02	6.33E+01	4.12E+01	8.24E+01	3.41E+04
1.60E+02	5.94E+01	3.93E+01	7.33E+01	3.06E+04
1.42E+02	5.58E+01	3.73E+01	6.56E+01	2.76E+04
1.27E+02	5.26E+01	3.54E+01	5.91E+01	2.49E+04
1.15E+02	4.97E+01	3.35E+01	5.37E+01	2.27E+04
1.04E+02	4.70E+01	3.18E+01	4.90E+01	2.07E+04
9.53E+01	4.46E+01	3.01E+01	4.50E+01	1.90E+04
8.78E+01	4.24E+01	2.86E+01	4.16E+01	1.76E+04

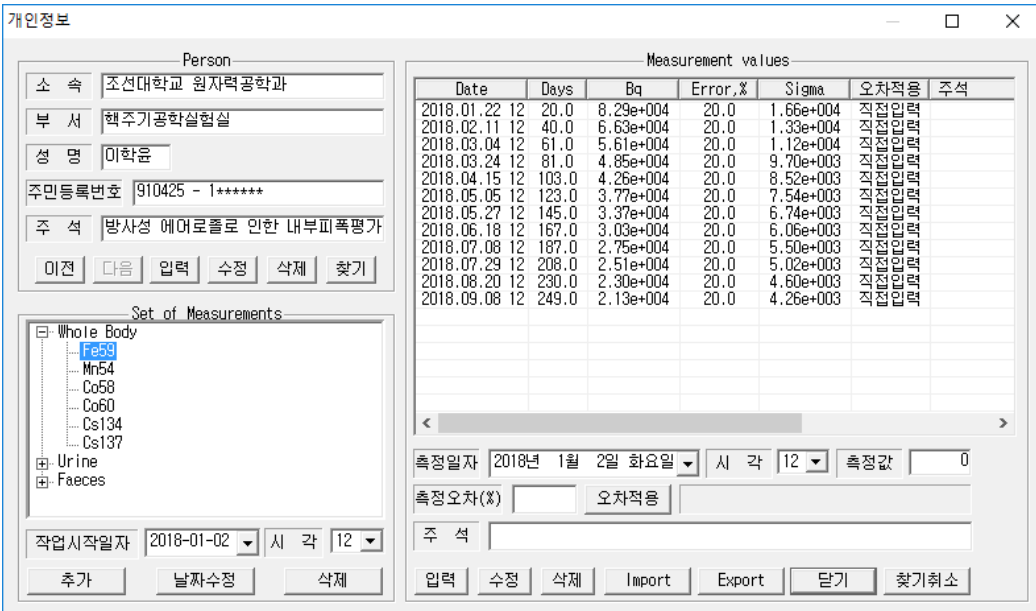
Fig 31. Urine 측정값 M(t)

Faecal 측정값 M(t)		
Mn-54	Co-60	Co-58
2.19E+02	8.01E+01	1.33E+02
2.76E+02	1.04E+02	1.65E+02
2.47E+02	9.46E+01	1.42E+02
2.16E+02	8.32E+01	1.19E+02
1.90E+02	7.31E+01	1.01E+02
1.67E+02	6.48E+01	8.69E+01
1.49E+02	5.80E+01	7.59E+01
1.33E+02	5.24E+01	6.71E+01
1.20E+02	4.77E+01	6.01E+01
1.09E+02	4.39E+01	5.44E+01
9.99E+01	4.05E+01	4.96E+01
9.20E+01	1.12E+07	4.56E+01

Fig 32. Faecal 측정값 M(t)

1. BiDAS를 이용한 내부피폭평가

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 원전 해체 공정 시 발생하는 방사성 에어로졸로 인한 작업종사자의 내부피폭평가를 위해 Input data(측정자료, 핵종크기, 핵종)을 도출하고 이를 BiDAS 전산코드에 적용하였다. 적용하기에 앞서 BiDAS내에 본 저자의 개인정보를 입력하였으며, Whole Body, Urine, Faeces에서 구한 측정자료 데이터를 각각 추출하여 나타내었다. Figure 33은 측정자료 및 개인정보를 입력한 상태를 나타내고 있다.



The screenshot shows the BiDAS software interface with two main sections: 'Person' and 'Measurement values'.

Person Information:

- 소속: 조선대학교 원자력공학과
- 부서: 핵주기공학실험실
- 성명: 이학운
- 주민등록번호: 910425 - 1*****
- 주석: 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭평가

Measurement values Table:

Date	Days	Bq	Error, %	Sigma	오차적용	주석
2018.01.22	12	20.0	8.29e+004	20.0	1.66e+004	직접입력
2018.02.11	12	40.0	6.63e+004	20.0	1.33e+004	직접입력
2018.03.04	12	61.0	5.61e+004	20.0	1.12e+004	직접입력
2018.03.24	12	81.0	4.85e+004	20.0	9.70e+003	직접입력
2018.04.15	12	103.0	4.26e+004	20.0	8.52e+003	직접입력
2018.05.05	12	123.0	3.77e+004	20.0	7.54e+003	직접입력
2018.05.27	12	145.0	3.37e+004	20.0	6.74e+003	직접입력
2018.06.18	12	167.0	3.03e+004	20.0	6.06e+003	직접입력
2018.07.08	12	187.0	2.75e+004	20.0	5.50e+003	직접입력
2018.07.29	12	208.0	2.51e+004	20.0	5.02e+003	직접입력
2018.08.20	12	230.0	2.30e+004	20.0	4.60e+003	직접입력
2018.09.08	12	249.0	2.13e+004	20.0	4.26e+003	직접입력

Measurement Settings:

- 측정일자: 2018년 1월 2일 화요일
- 시각: 12
- 측정값: 0
- 오차적용: (dropdown menu)
- 주석: (text input field)

Measurement List:

- Whole Body: Fe59, Mn54, Co58, Co60, Cs134, Cs137
- Urine
- Faeces

Job Start Date: 2018-01-02, 시각: 12

Fig 33. BiDAS에 입력한 개인정보 및 측정자료

최초 작업시작일자는 2018년 1월 2일로 기준을 두었으며, 측정오차는 본 연구에서 고려하지 못한 작업종사자의 실측자료 부재 등을 감안하여 20%로 적용하였다.

위의 일련의 기본과정을 수행한 뒤, BiDAS 코드의 섭취량 및 예탁유효선량 평가모듈인 Automatic 모드에서 핵종별로 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하였다. Figure 34는 Co-58의 섭취량 및 예탁유효선량 평가결과를 나타내고 있다.

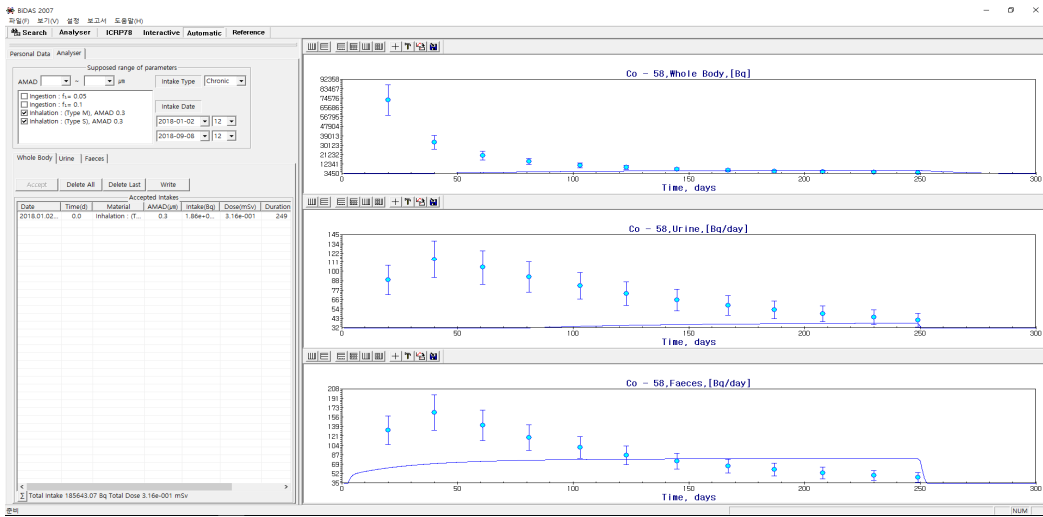


Fig 34. Co-58의 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과

섭취형태는 만성(연속섭취), 흡입(Inhalation)에서 모든 흡수형태(Type F, M, S)로 설정하여 수행하였다. 그 결과, 예시로 Co-58의 연간 총 섭취량은 1.86e+05, 예탁유효선량은 3.16e-001로 평가되었다.

Co-58 뿐만 아니라 나머지 핵종에 대해서도 위와 같은 과정을 반복 수행하여 아래 Figure 35와 같이 Excel Program에 연간 총 섭취량 및 예탁유효선량을 나타내었다.

소속	조선대학교 원자력공학과						평가기간	2018-01-02		
부서	핵주기공학실험실							2018-07-01		
성명	이학윤									
주민번호	910425 - 1*****									
핵종	섭취일시	기간	섭취경로	섭취형태	f _i	흡수형	입자크기(μm)	섭취량(Bq)	예탁유효선량(mSv)	Measurements
Cs-134	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	F	0.30	2.73E+04	1.31E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Mn-54	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	F	0.30	8.92E+04	5.89E-02	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Co-60	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	M	0.30	4.92E+04	1.87E+00	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Fe-59	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	M	0.30	2.82E+05	9.86E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Cs-137	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	F	0.30	2.01E+05	6.63E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Co-58	2018-01-02	2018-03-31	호흡	만성	-	M	0.30	6.60E+04	1.52E-01	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
								분기별선량(mSv)	3.86E+00	
Co-58	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	M	0.30	6.78E+04	1.56E-01	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Co-60	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	M	0.30	5.06E+04	1.92E+00	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Cs-137	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	F	0.30	2.07E+05	6.81E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Cs-134	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	F	0.30	2.80E+04	1.35E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Fe-59	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	M	0.30	2.90E+05	1.01E+00	Whole Body(100),Urine(100)
Mn-54	2018-04-01	2018-06-30	호흡	만성	-	F	0.30	9.17E+04	6.05E-02	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
								분기별선량(mSv)	3.97E+00	
Mn-54	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	F	0.30	7.00E+04	4.62E-02	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Cs-134	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	F	0.30	2.14E+04	1.03E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Co-60	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	M	0.30	3.86E+04	1.47E+00	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Fe-59	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	M	0.30	2.21E+05	7.74E-01	Whole Body(100),Urine(100)
Co-58	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	M	0.30	5.18E+04	1.19E-01	Whole Body(100),Urine(100),Faeces(100)
Cs-137	2018-07-01	2018-09-08	호흡	만성	-	F	0.30	1.58E+05	5.20E-01	Whole Body(100),Urine(100)
								분기별선량(mSv)	3.03E+00	
								연간선량(mSv)	1.09E+01	

Fig 35. 연간 총 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과

제6장 결론 및 제안

본 연구에서는 원전 해체 시 발생하는 방사성 에어로졸로 인한 작업종사자의 내부피폭을 평가하였다. 평가는 IMBA Code와의 신뢰도 검증 결과 95%이상의 정확성, IAEA Lab.에서 수행한 IMIE와의 결과값 비교를 통해 2%미만의 오차를 보인 BiDAS Code로 수행하였다. BiDAS Code의 Input data는 원전 해체 과정에서 Metal Melting으로 인해 발생되어 Impactor로 포집된 방사성 핵종을 사용하였다. 하지만, Metal Melting에서의 입자크기는 자료 확보의 어려움으로 인하여 Plasma Torch를 이용한 알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강을 절단하였을 시 발생하는 방사성 에어로졸의 입자 크기(AMAD)를 적용하였다.

Melting 과정에서 발생하는 방사성 핵종은 Mn-54, CO-58, Fe-59, Co-60, Ag-110m, Cs-134, Cs-137이 있지만, ICRP-78에서 제시하고 있는 핵종이 아닌 것은 제외하여 평가하였다. 또한, 원자력 시설에서 사용되는 재질인 알루미늄, 탄소강, 스테인레스 강을 Plasma Torch로 절단 시 발생하는 방사성 에어로졸의 크기는 각각 $0.29\mu\text{m}$, $0.30\mu\text{m}$, $0.31\mu\text{m}$ 이 도출되어, 이를 BiDAS 전산코드에 적용하기 위해 오차를 고려하여 $0.30\mu\text{m}$ 으로 적용하여 평가를 수행하였다. 핵종의 섭취경로는 흡입(Inhalation), 섭취형태는 Type F, M, S의 모든 형태, 연속흡입(Chronic)으로 설정하여 평가를 수행하였다.

그 결과, 방사성 에어로졸로 인해 유발되는 작업종사자의 예탁유효선량은 연간 10.9mSv 로 나타났다. 이는 우리나라의 연간 허용선량한도인 20mSv 에는 미치지 못하는 수준이지만 외부피폭에 대한 선량과 본 연구에서 미처 고려하지 못한 오차(다양한 핵종 크기, 발생량의 100% 흡입 등)를 모두 감안해야 한다. 따라서 향후 원전 해체 공정의 시뮬레이션 실험을 통해 발생하는 에어로졸의 입자크기와 함유하고 있는 핵종을 정립화하여 평가를 수행한다면 보다 더 신뢰성 있는 연간 예탁유효선량 평가 연구가 가능할 것으로 사료된다.

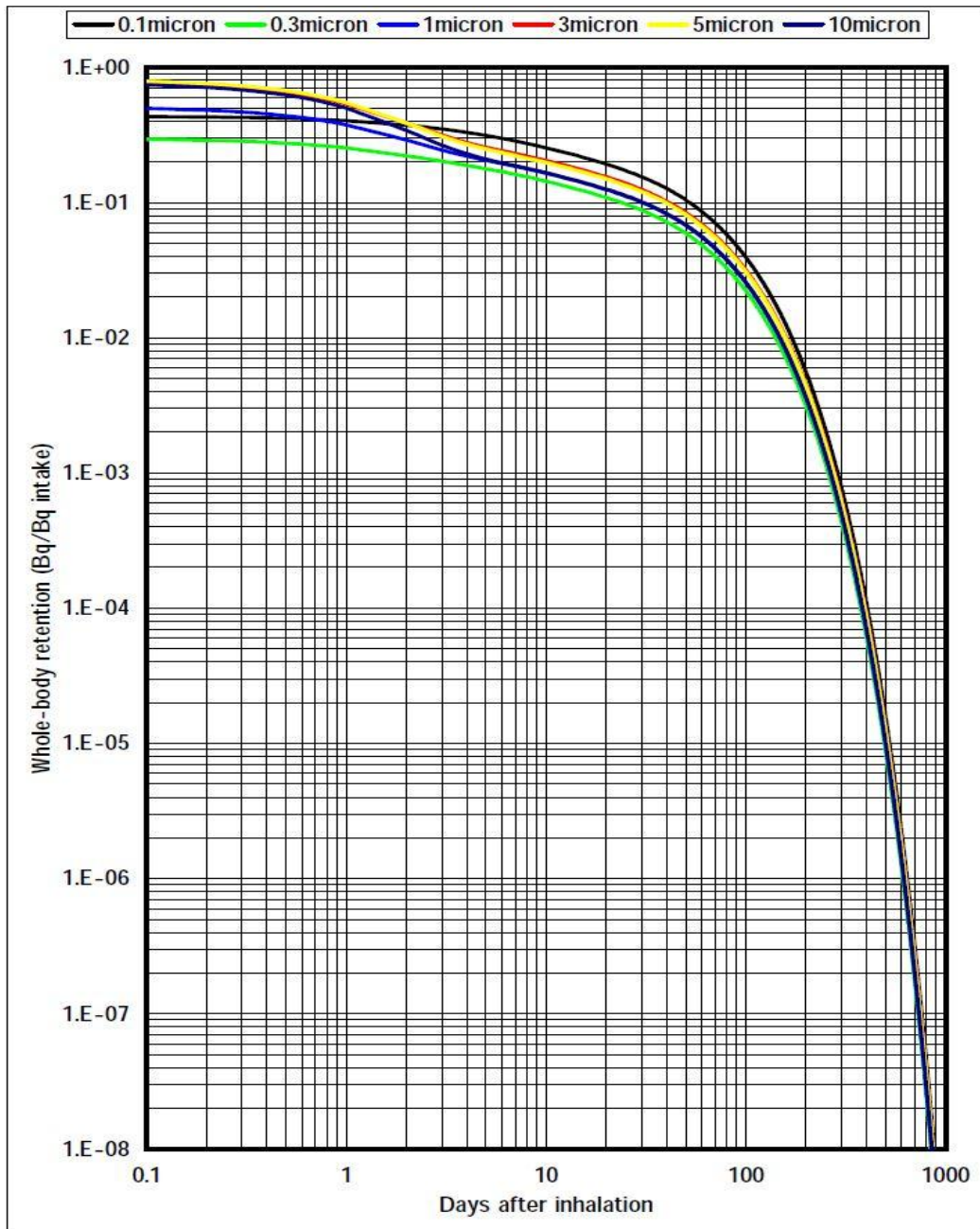
본 연구에서 수행한 방사성 에어로졸로 인한 예탁유효선량 평가결과는 향후 원전 해체 시 발생하는 작업종사자의 내부피폭선량 산정을 위한 기초근거자료로 활용될 것이며, 이는 원전 해체 작업종사자의 작업시간을 산정하는 중요한 기준이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

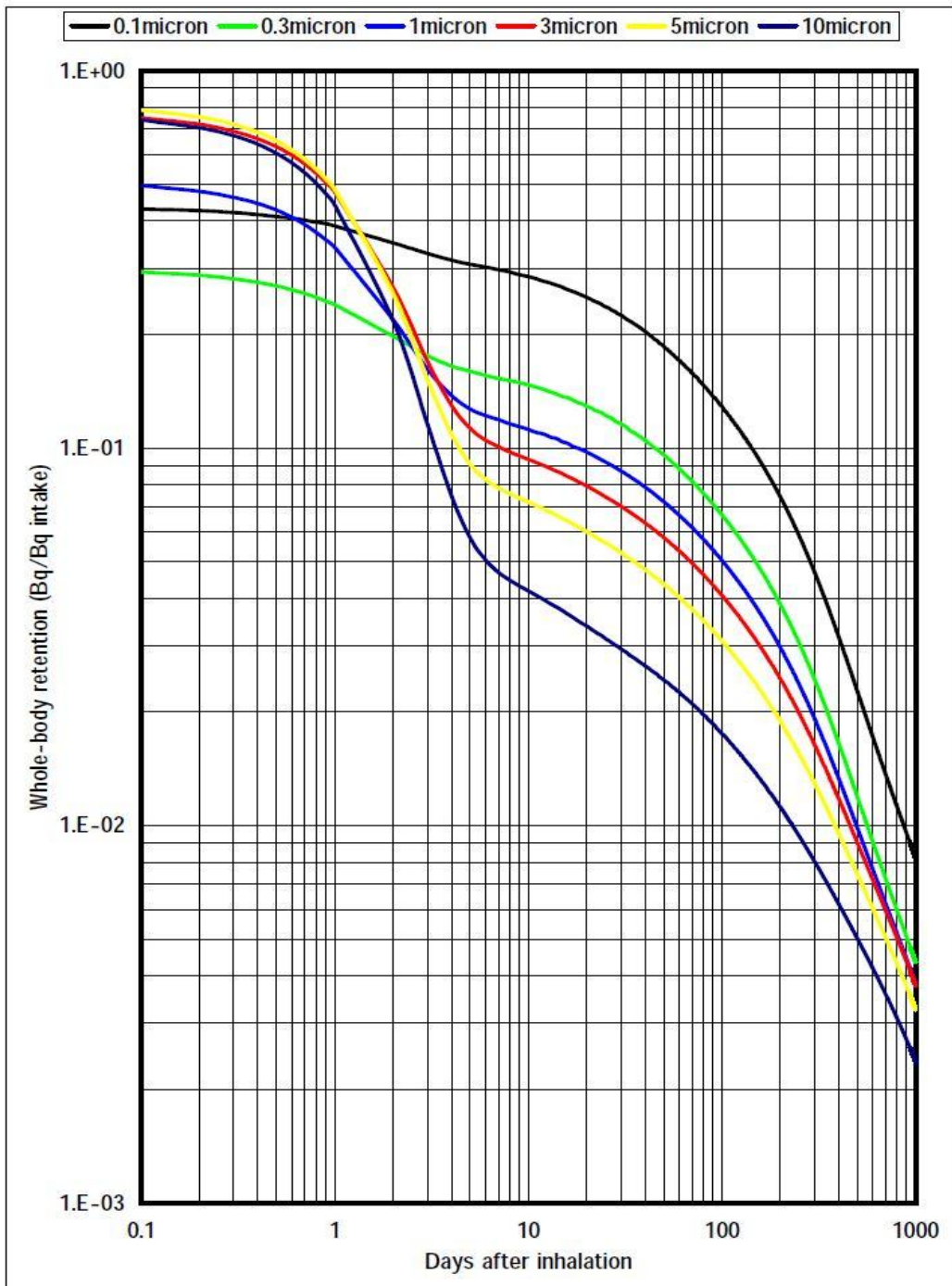
- [1] 장혁상, “환경 에어로졸 공학”, 영남대학교 출판부, 1999.
- [2] 윤철, 하광순, 임홍식, “원자력발전소 핵분열생성물 거동 해석을 위한 에어로졸 관성 침착 모델의 개발과 검증”, 대한기계학회지 4143-4148, 2013.
- [3] Onodera. J, Nakamura. C, Yabuta. H, Yokosuka. Y, Nisizono. T, Ikezawa. Y, “Radiation control experience during JPDR decommissioning”, IRPAS Vol 2. 1412-1415p, 1992
- [4] 박승국, “연구로 1,2호기 폐로에 대한 국외 해체기술 현황분석”, KAERI/AR-609/2001, 2001
- [5] EWN, “Environmental Impact Assessment Report for the Facility for Treatment and Conditioning of Radioactive Wastes with High Volume Reduction Factor at Kozloduy Nuclear Power Plant”, P5cDe103Rev02_EIA_R, 2013
- [6] ICRP, “Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model”, ICRP Supporting Guidance 3. ICRP 32(1-2), 2002.
- [7] Vincent J. Novick, Christie-Joy Brodrick, Sheila Crawford, James Nasiatka, Kathleen Pierucci, Vincent Reyes, James Sambrook, Stanley Wrovel, John Yearly, “Aerosol Measurement from Plasma Torch cuts on stainless steel, Carbon steel, and Aluminum”, ANL/TDCP-88550 CONF-960443-1, 1995.
- [8] IDEAS Report Summary, “Pilot program unit of contractors computer codes with new algorithms”, FIKR-CT-2001-00160, 2001.
- [9] Birchall. A, Bailey. M R, James. A C, “LUDEP:A Lung Dose Evaluation Program”, Oxfordjournals.rpd.a081086, 1991.
- [10] U.S. DOE, “Guidance on Use of IMBA Software for DOE Safety Applications”, DOE-HS-0002, 2006
- [11] KAERI, “방사선 환경 방호 기술 개발”, Final Research Report, KAERI/RR-2358/2002, 2002.
- [12] KAERI, “Calculation of Intake Fraction in the Whole-body, an Organ and Excreta after Inhalation Intake”, KAERI/TR-2245/2002, 2002.
- [12] NIRS, MONDAL3, “<http://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/RPD/gpmd.php>”.

부록

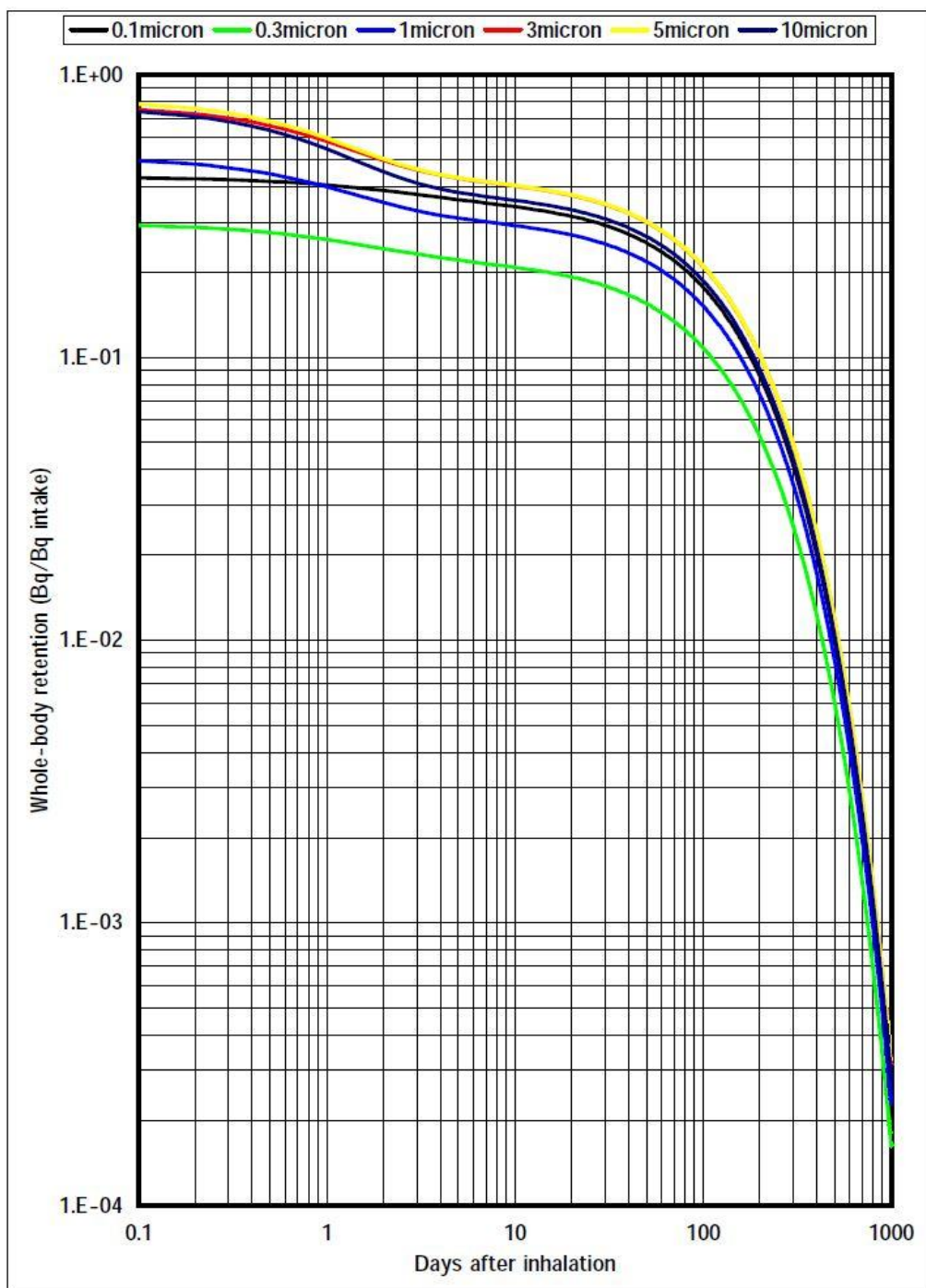
Mn-54, Type F, Whole-body retention



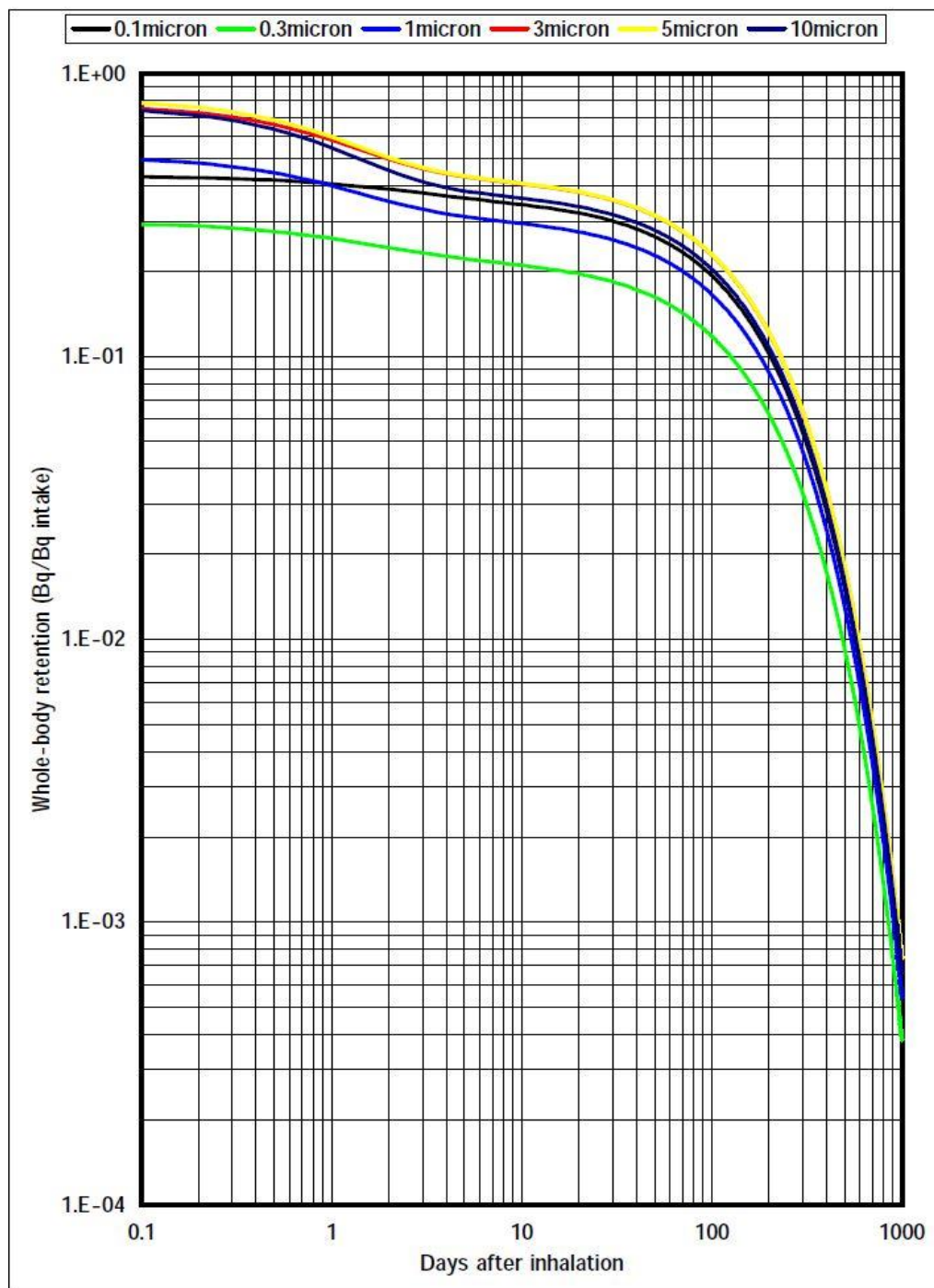
Co-60, Type M, Whole-body retention



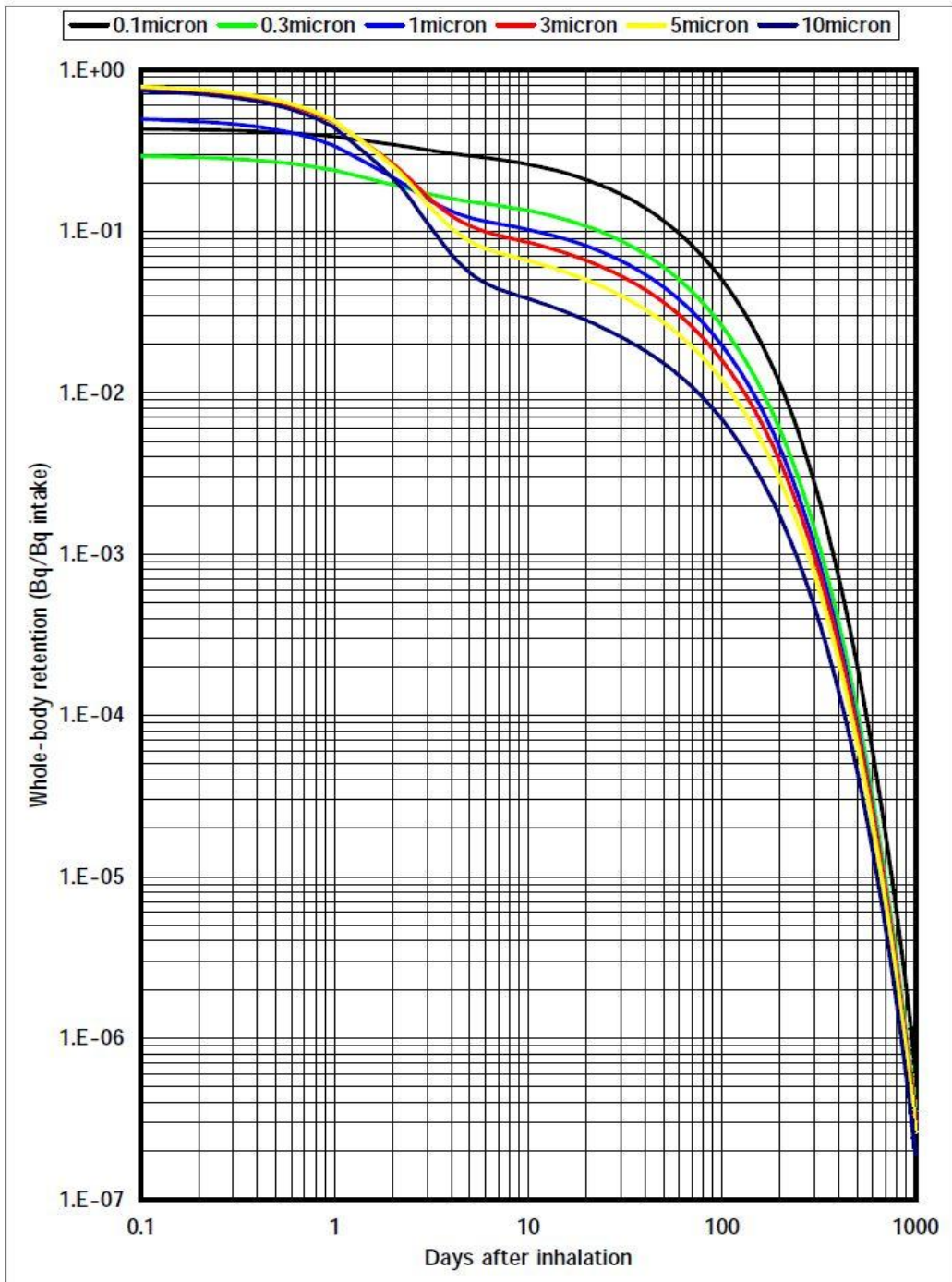
Cs-134, Type F, Whole-body retention



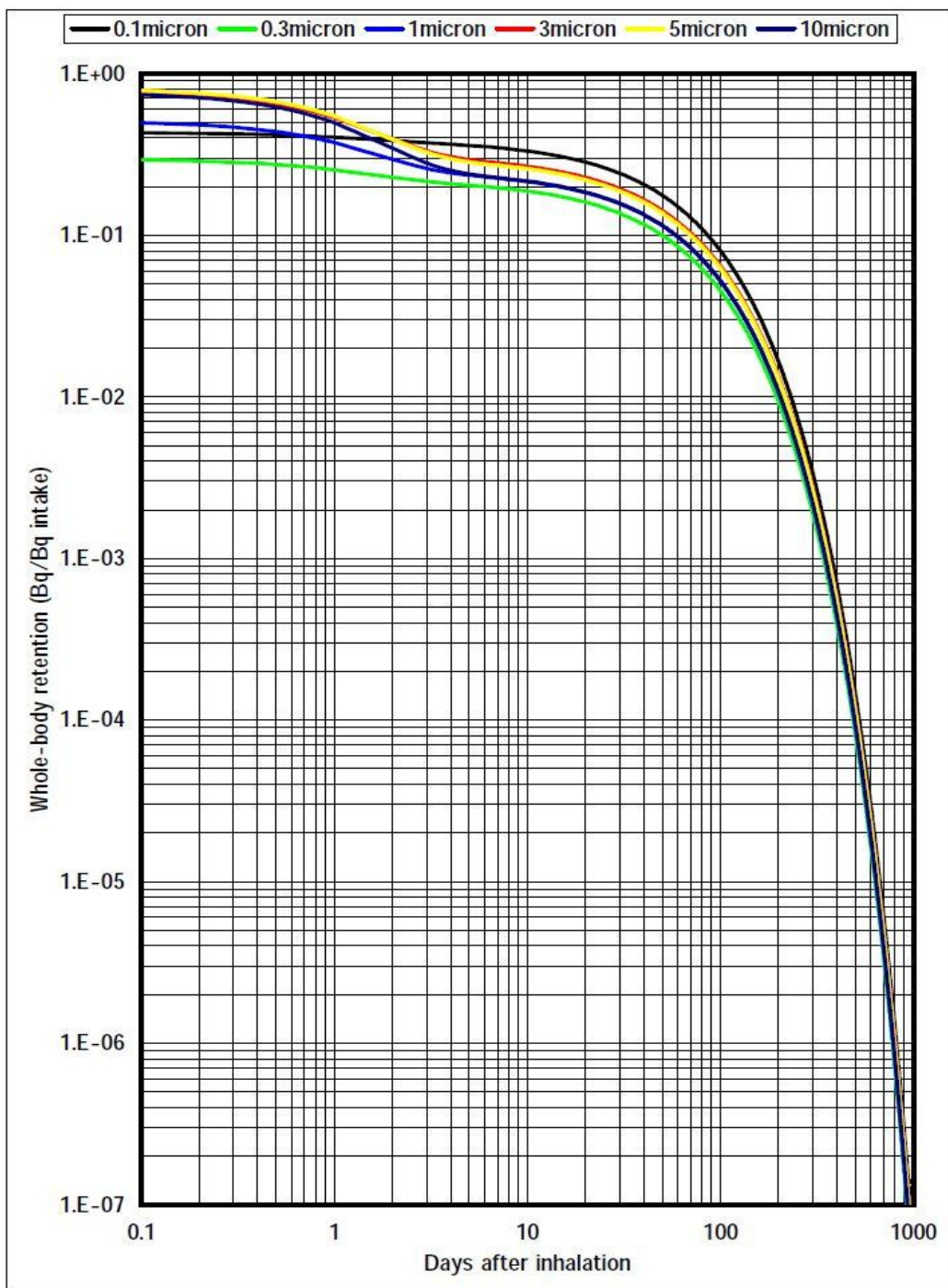
Cs-137, Type F, Whole-body retention



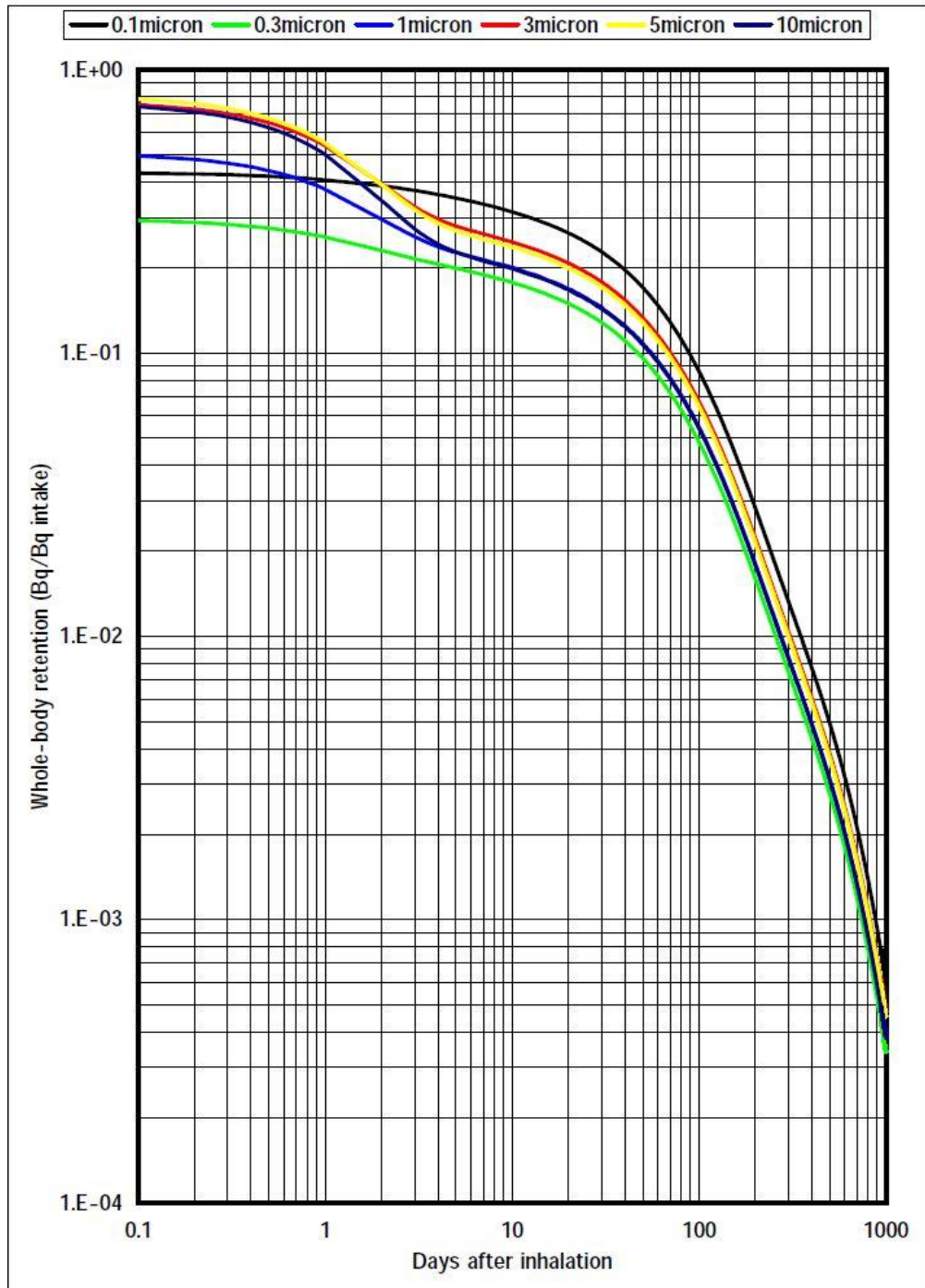
Co-58, Type M, Whole-body retention



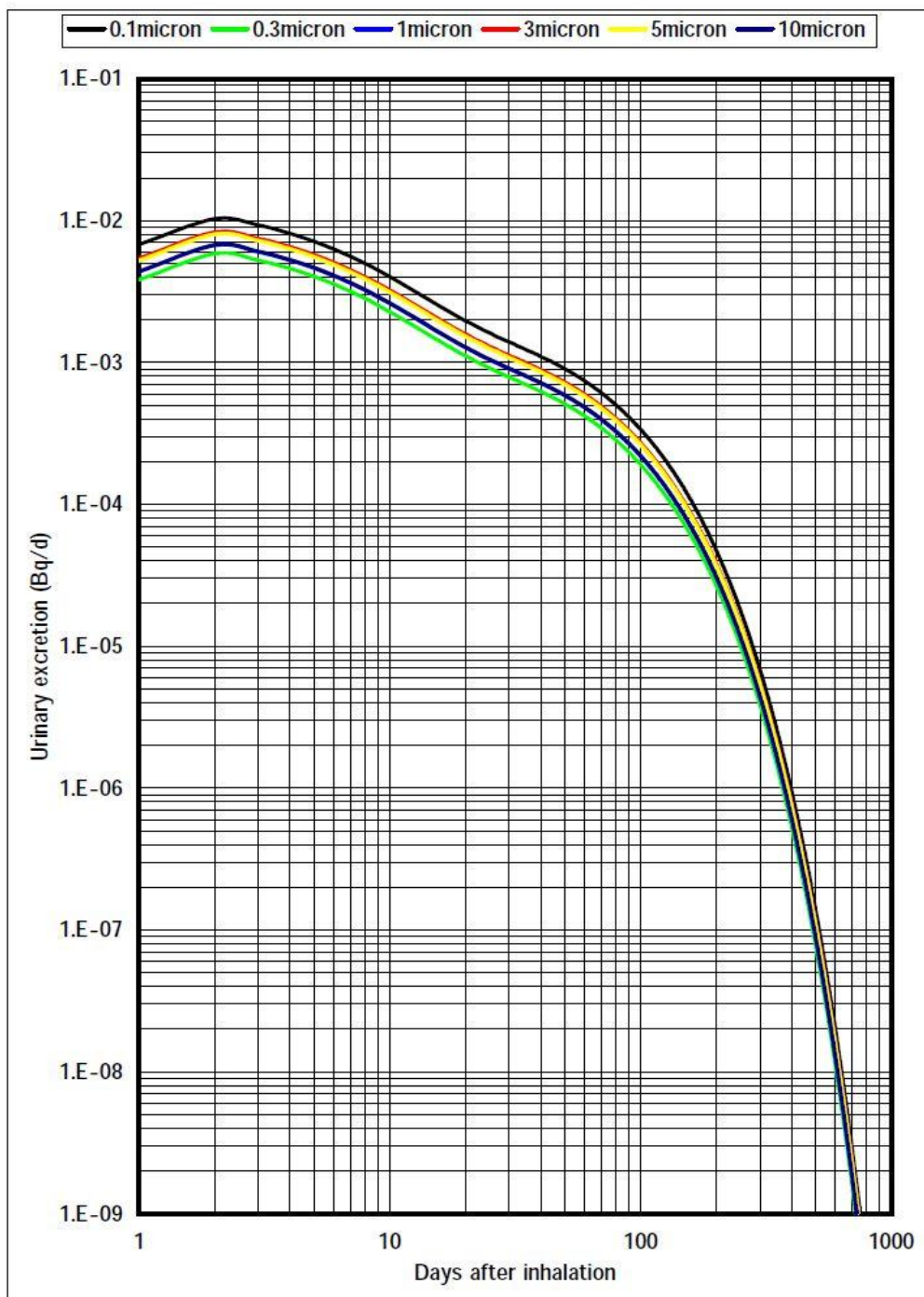
Fe-59, Type F, Whole-body retention



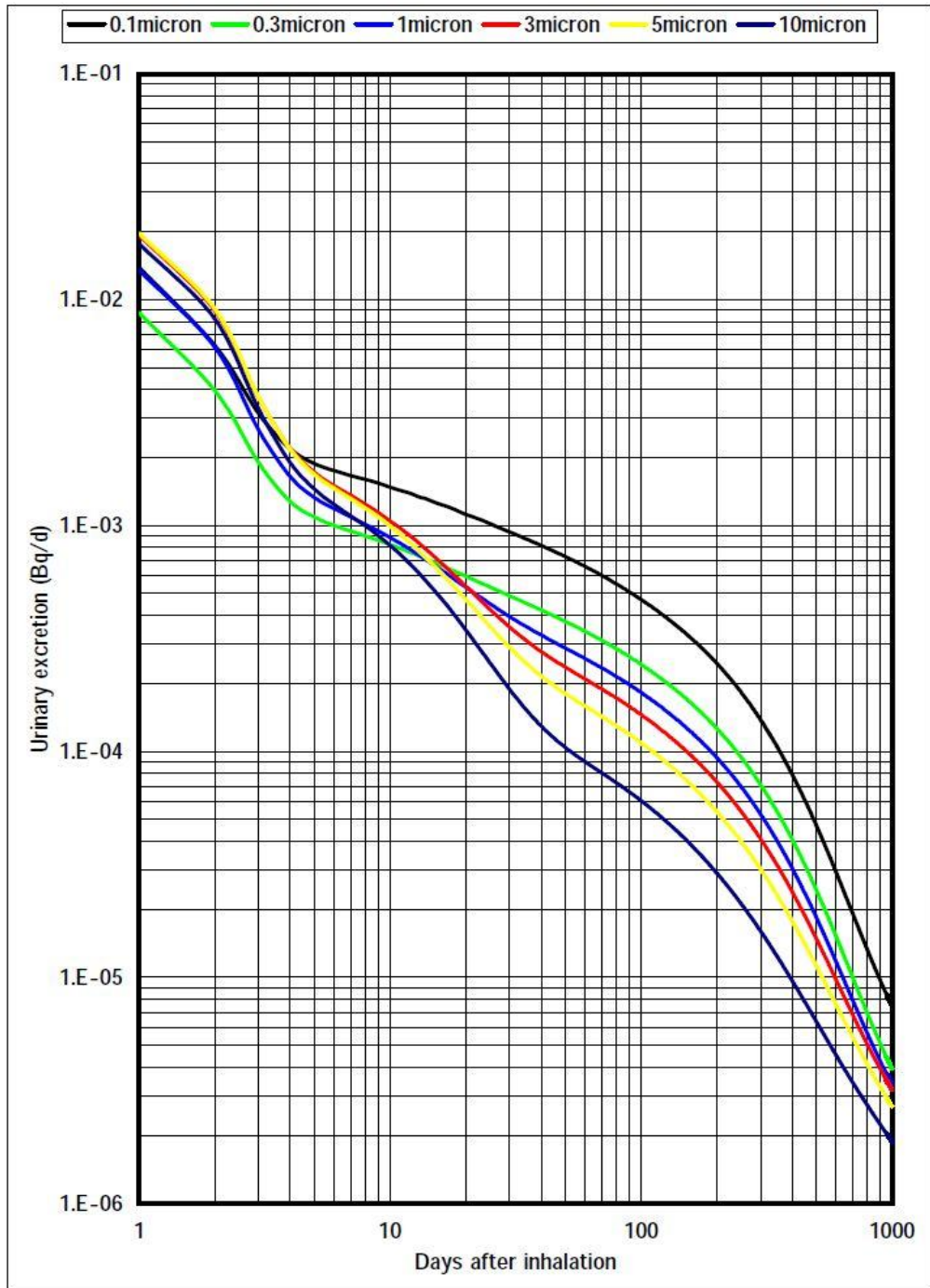
Ag-110m, Type F, Whole-body retention



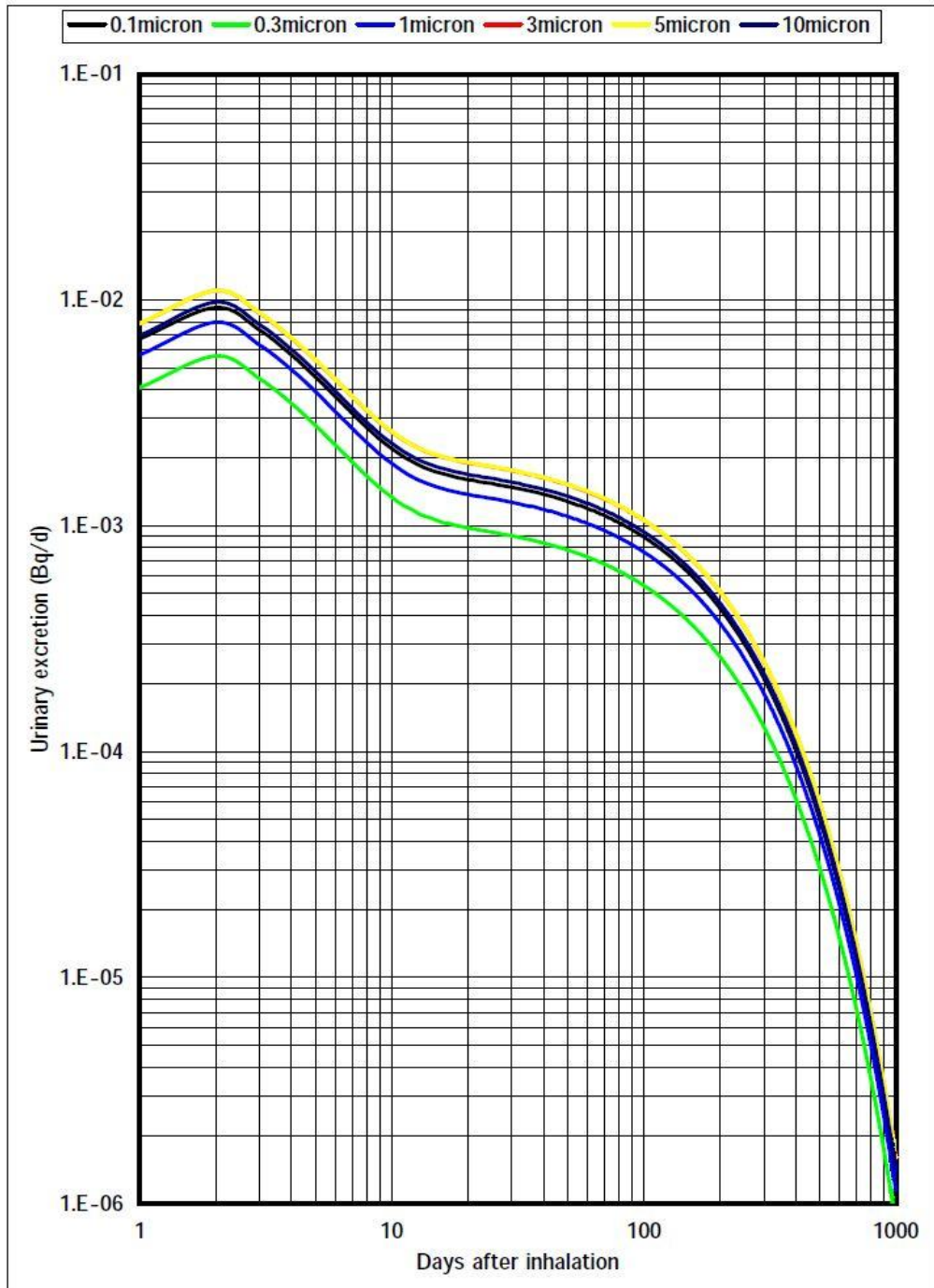
Mn-54, Type F, Daily urinary excretion



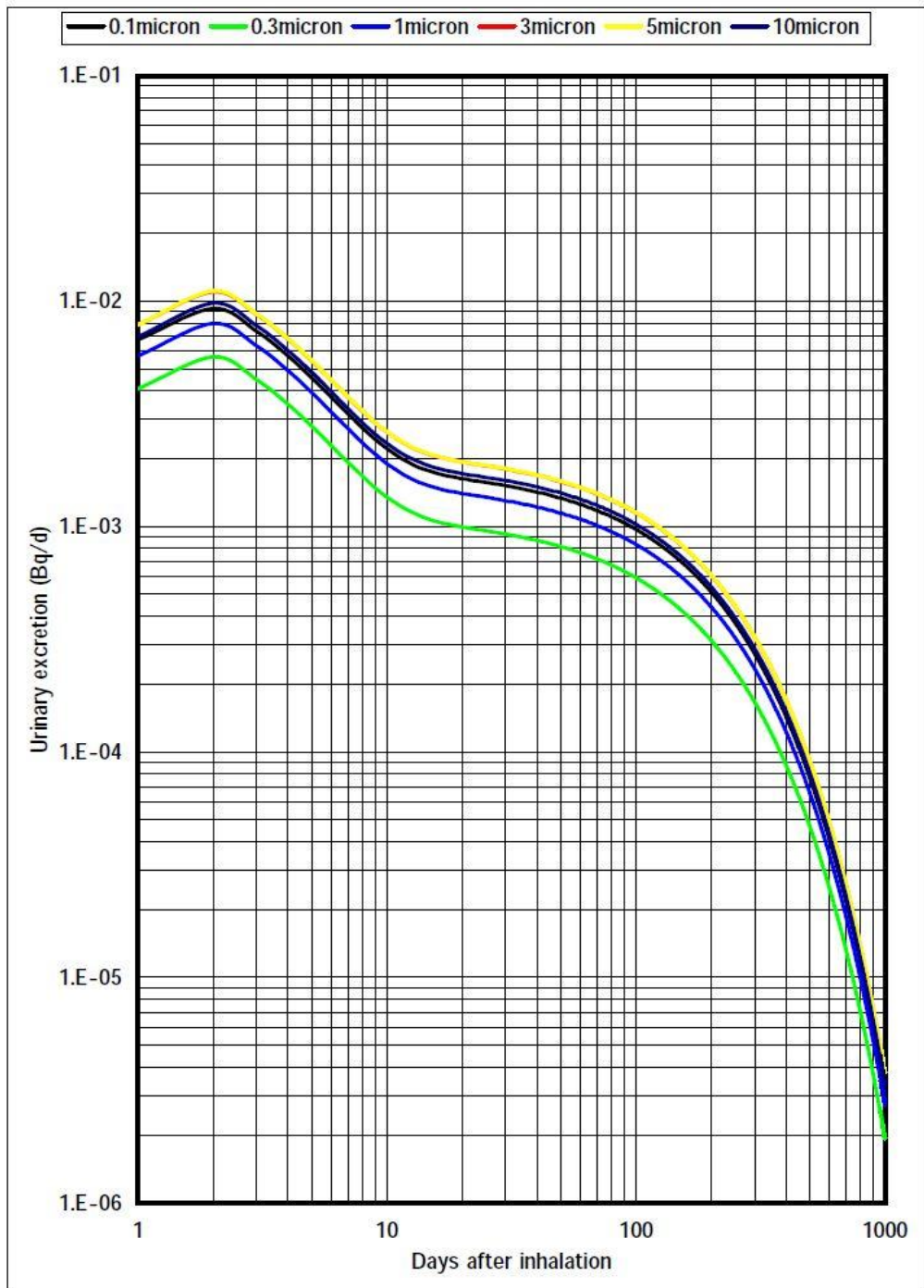
Co-60, Type M, Daily urinary excretion



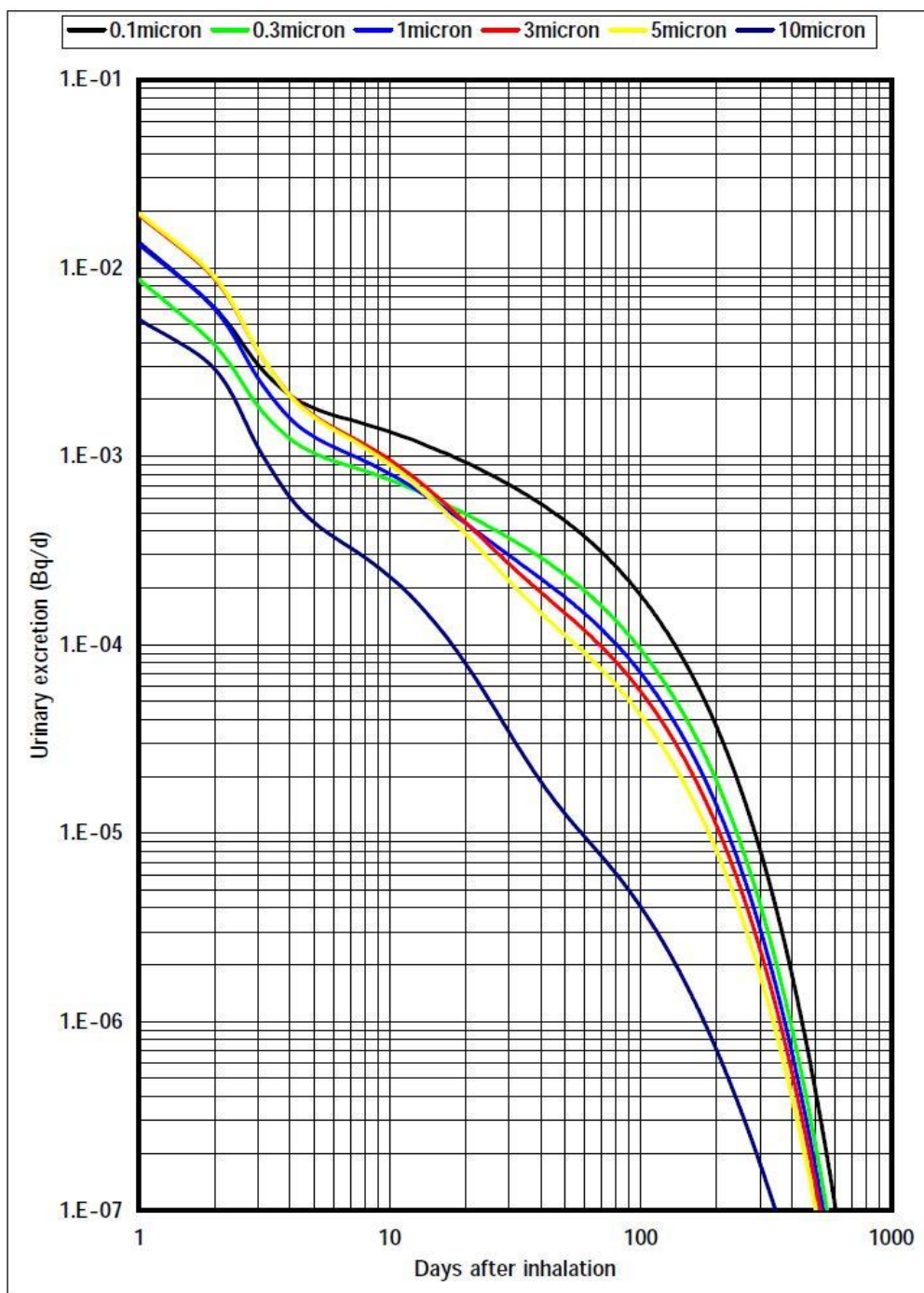
Cs-134, Type F, Daily urinary excretion



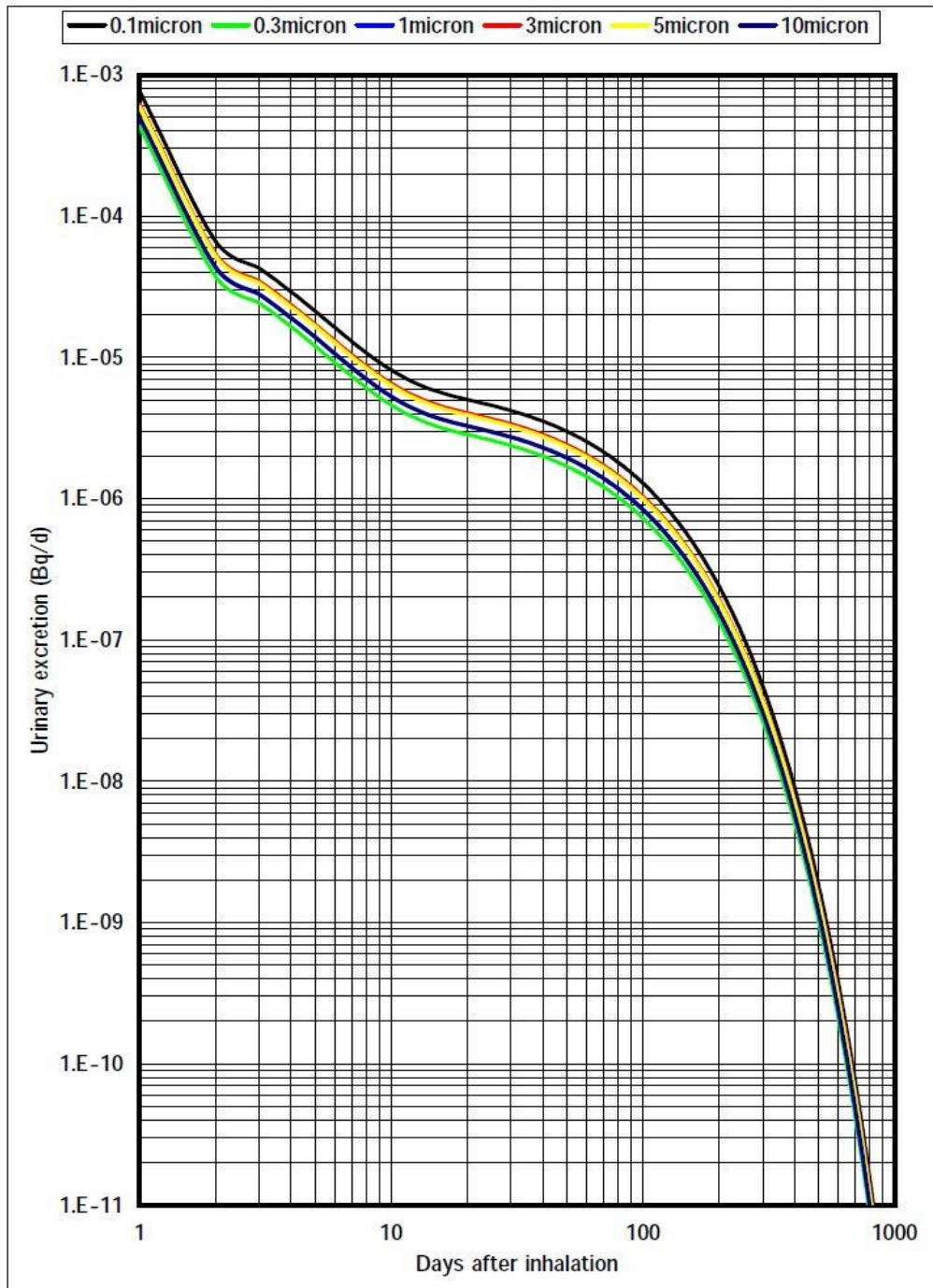
Cs-137, Type F, Daily urinary excretion



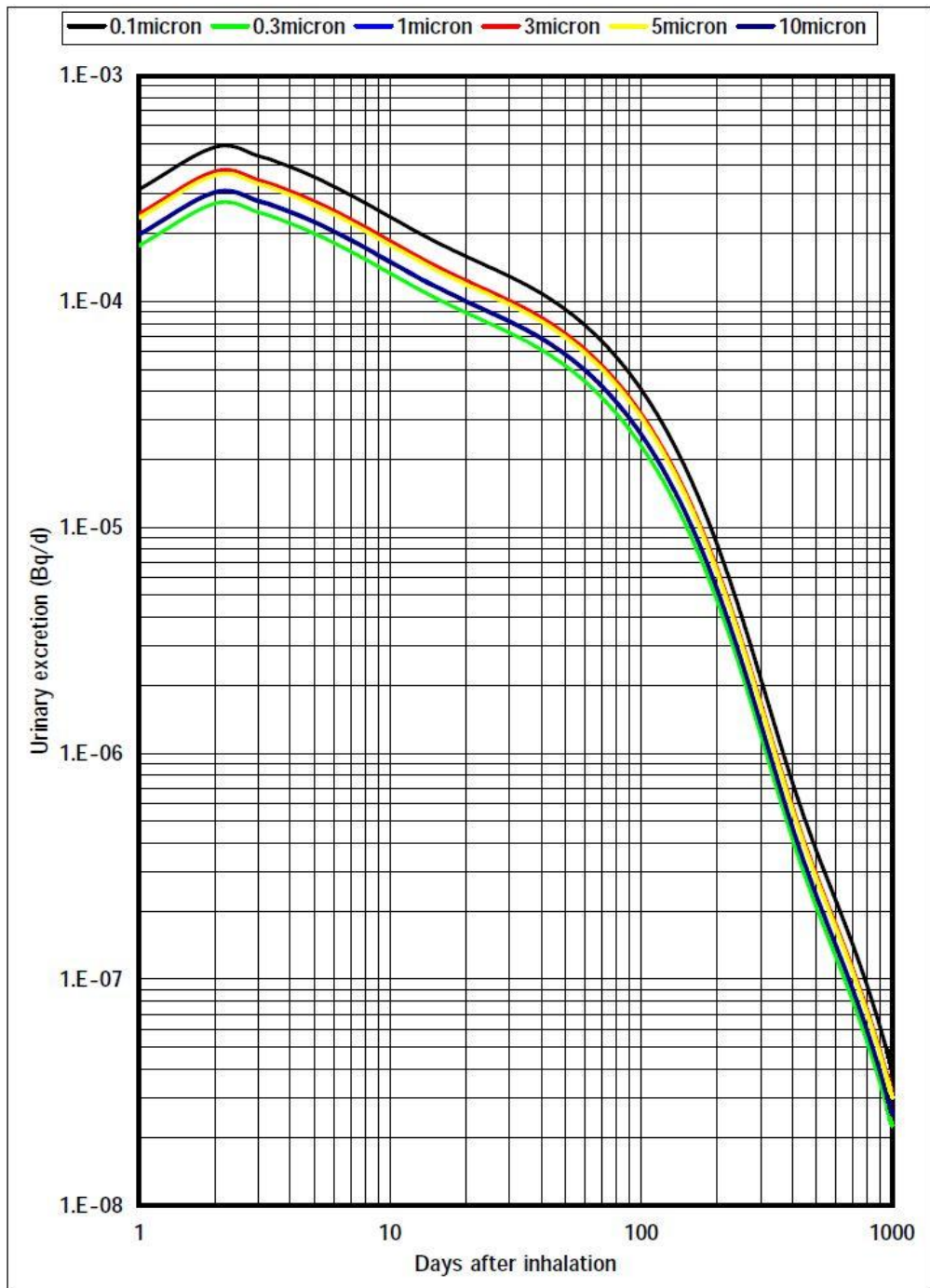
Co-58, Type M, Daily urinary excretion



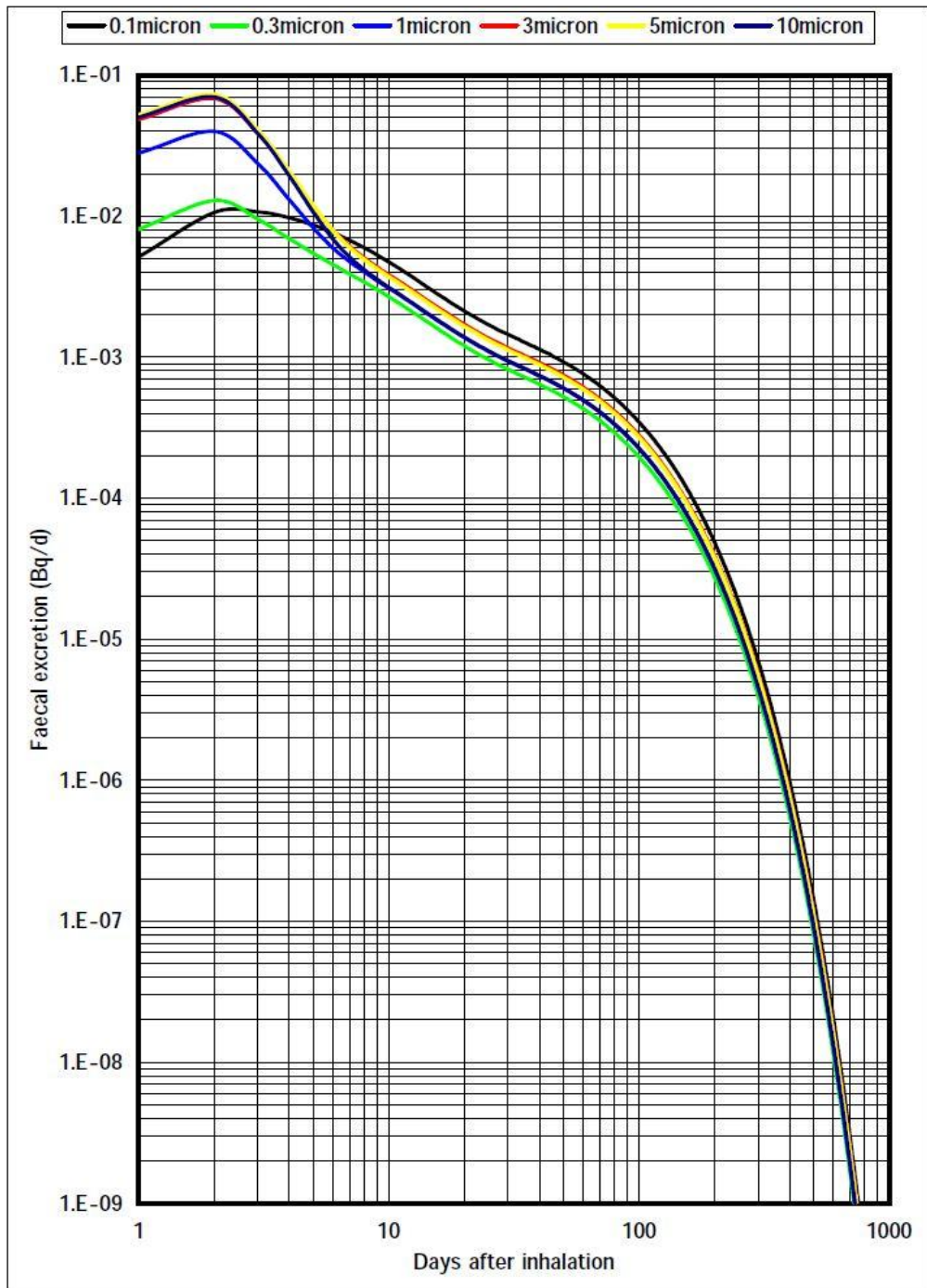
Fe-59, Type F, Daily urinary excretion



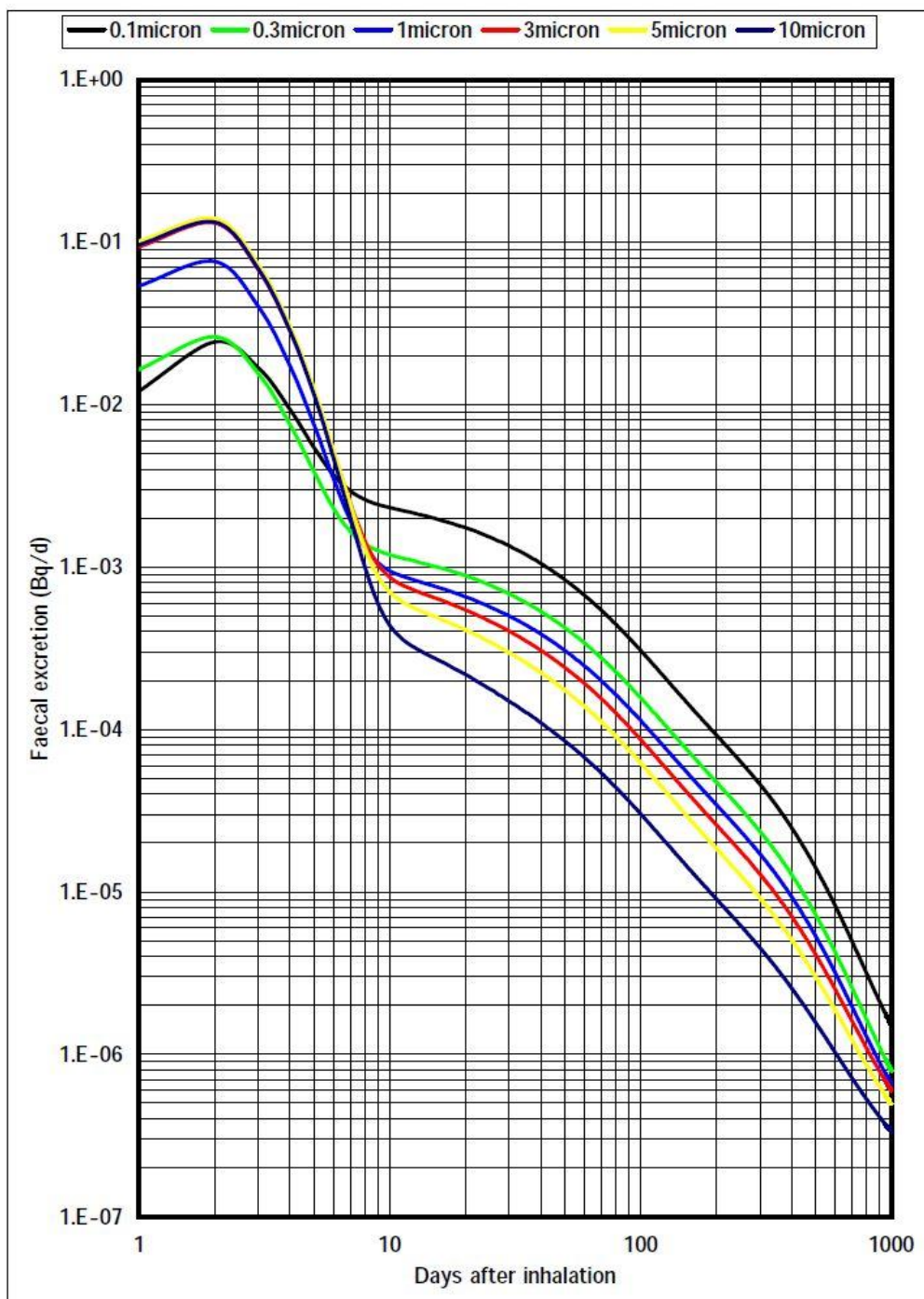
Ag-110m, Type F, Daily urinary excretion



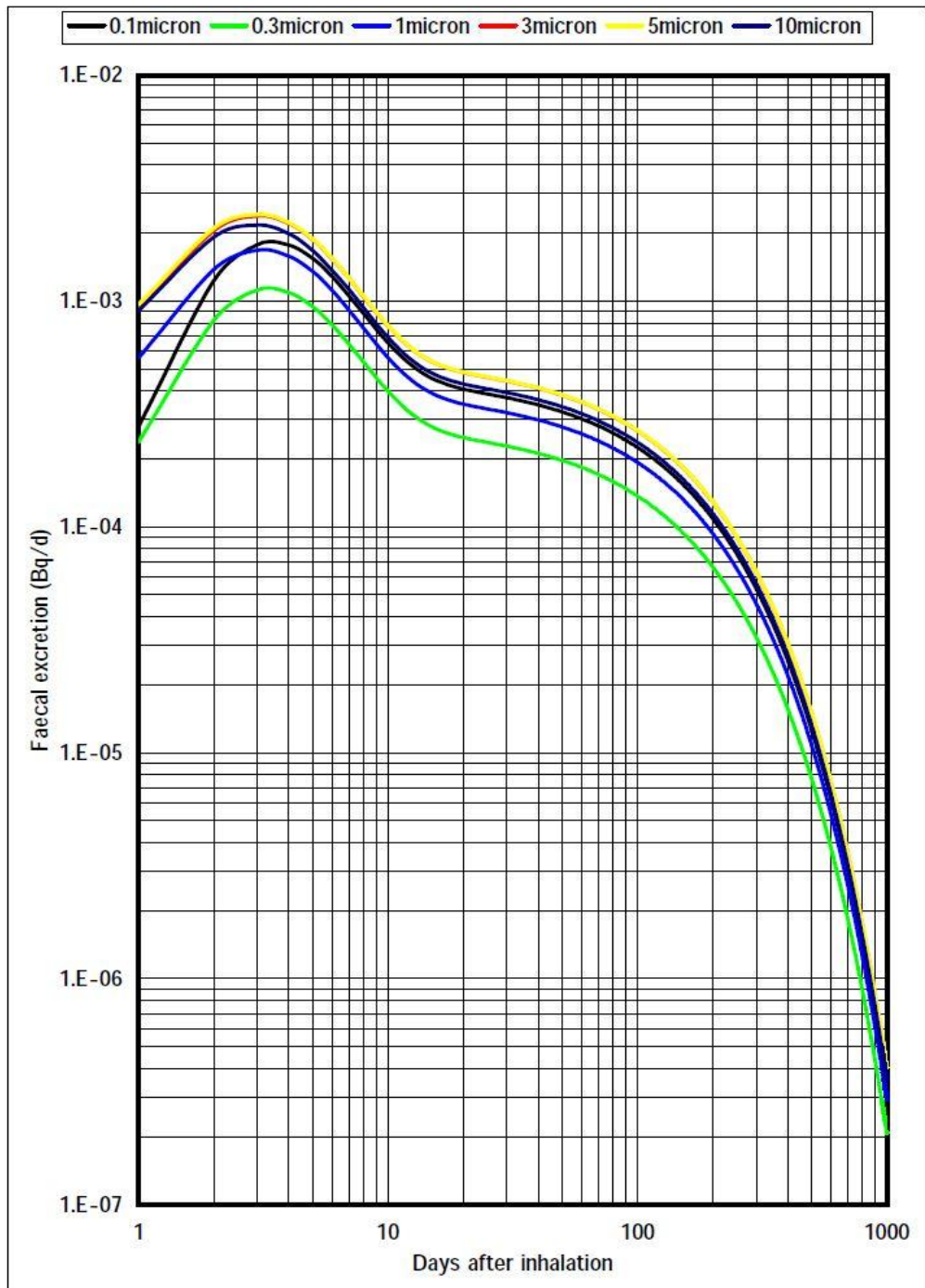
Mn-54, Type F, Daily faecal excretion



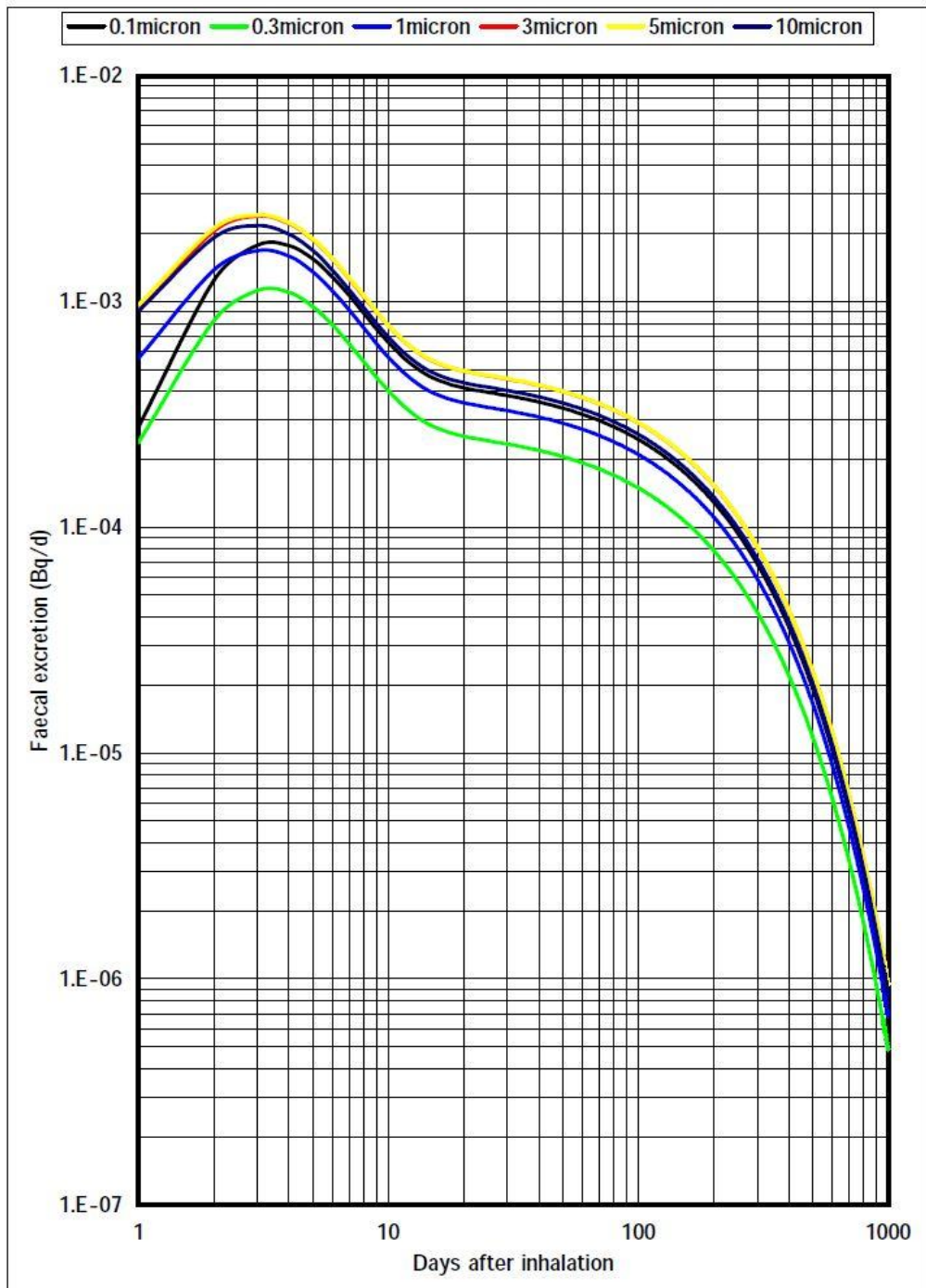
Co-60, Type M, Daily faecal excretion



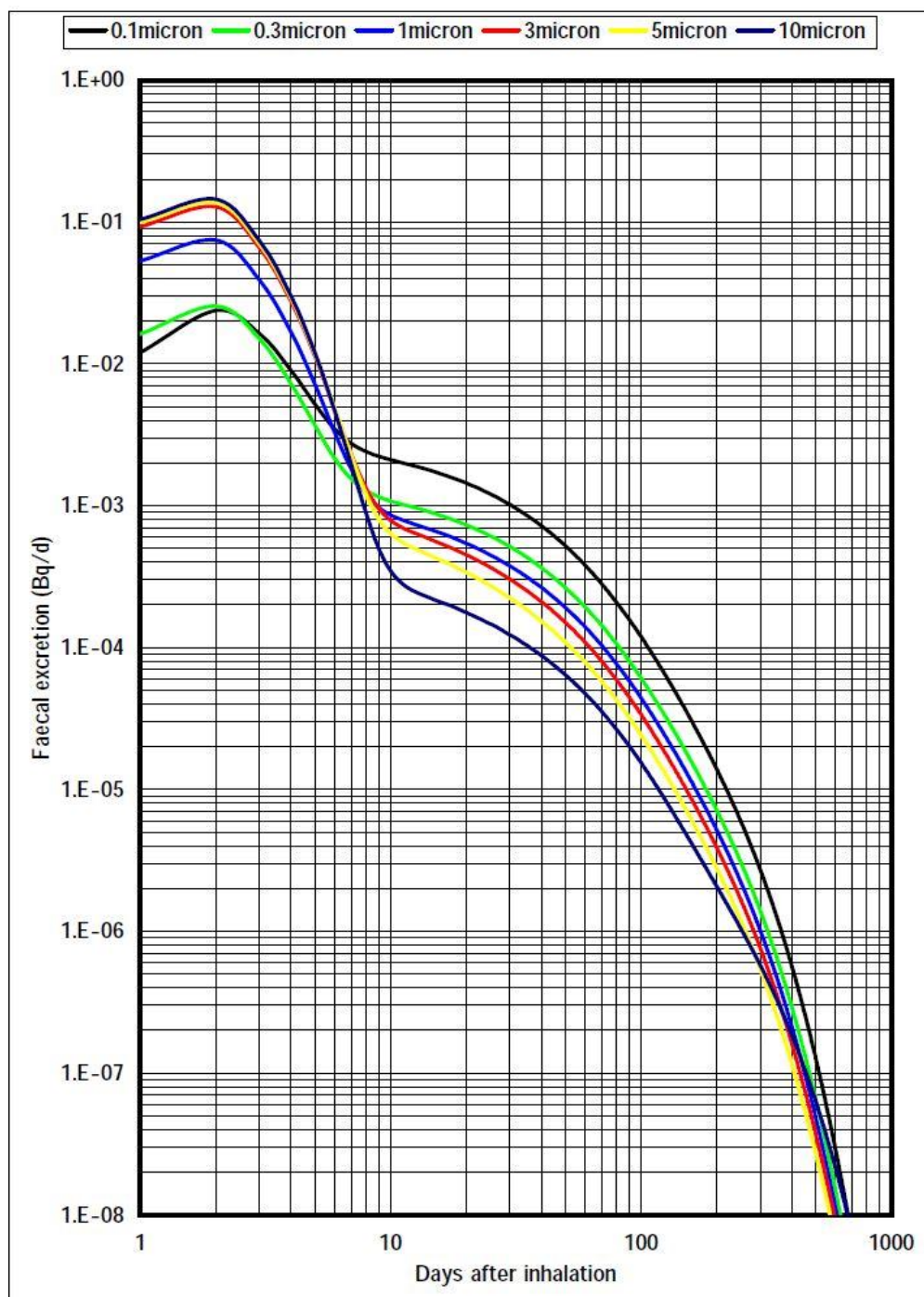
Cs-134, Type F, Daily faecal excretion



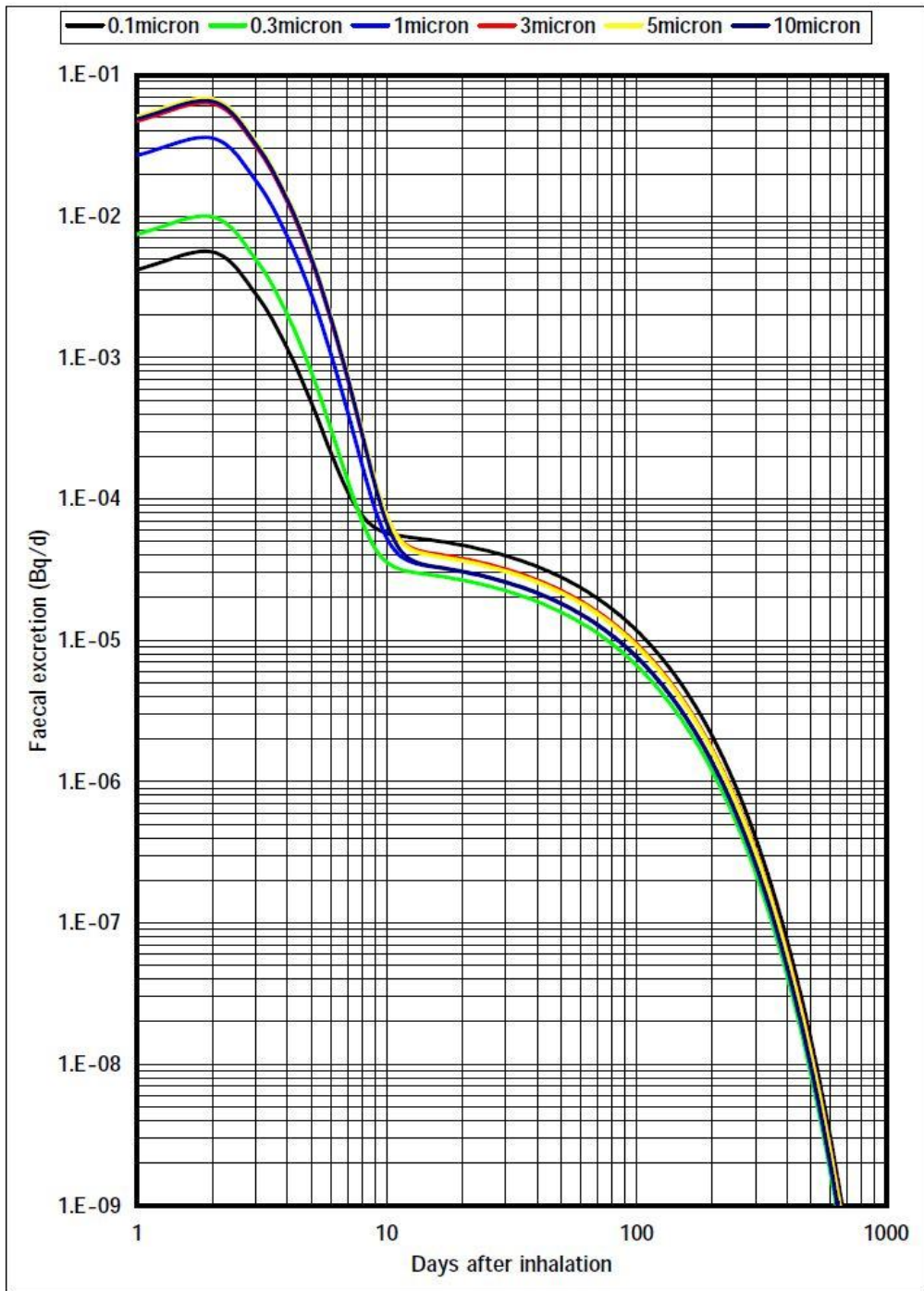
Cs-137, Type F, Daily faecal excretion



Co-58, Type M, Daily faecal excretion



Fe-59, Type F, Daily faecal excretion



Ag-110m, Type F, Daily faecal excretion

