

A Preliminary Study on the Evaluation of Internal Exposure Effect by Radioactive Aerosol Generated During Decommissioning of NPPs by Using BiDAS

BiDAS를 적용한 원전 해체 공정 시 발생하는 방사성 에어로졸의 내부피폭 영향평가 사전 연구

Jong Soon Song, Hak Yun Lee, and Sun Il Kim*

Chosun University, 309 Pilmun-Daero, Dong-Gu, Gwangju, Republic of Korea

송종순, 이학윤, 김선일*

조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309

(Received February 19, 2018 / Revised June 20, 2018 / Approved August 8, 2018)

Radioactive aerosol generated in cutting and melting work during the NPP decommissioning process can cause internal exposure to body through workers' breath. Thus, it is necessary to assess worker internal exposure due to the radioactive aerosol during decommissioning. The actually measured value of the working environment is needed for accurate assessment of internal exposure, but if it is difficult to actually measure that value, the internal exposure dose can be estimated through recommended values such as the fraction of amount of intake and the size of particles suggested by the International Committee on Radiological Protection (ICRP). As for the selection of particle size, this study applied a value of 5 μm , which is the size of particles considering the worker recommended by the ICRP. As for the amount of generation, the amount of intake was estimated using data on the mass of aerosol generated in a melting facility at a site in Kozloduy, Bulgaria.

In addition, using these data, this study calculated the level of radioactivity in the worker's body and stool and conducted an assessment of internal exposure using the BiDAS computer code. The internal exposure dose of Type M was 0.0341 mSv, that of Type S was 0.0909 mSv. The two types of absorption showed levels that were 0.17% and 0.45% of the domestic annual dose limit, respectively.

Keywords: Decommissioning, Radioactive aerosol, Internal exposure, BiDAS, Inhalation

*Corresponding Author.

Sun Il Kim, Chosun University, E-mail: kingdom17c@naver.com, Tel: +82-62-230-7744

ORCID

Jong Soon Song
Sun Il Kim

<http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>
<http://orcid.org/0000-0002-8742-7925>

Hak Yun Lee

<http://orcid.org/0000-0002-5692-0856>

원전 해체 공정 중 절단 및 용융작업에서 발생하는 방사성 에어로졸은 작업종사자의 호흡을 통해 내부 피폭을 유발하게 된다. 이에 따라 해체 중 방사성 에어로졸로 인한 작업종사자의 내부피폭 평가가 필요한 실정이다. 정확한 내부피폭평가를 위해서는 작업종사자의 작업환경 실측값이 필요하지만 실측에 어려움이 있을 시에는 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 제시하는 섭취량 분율 및 입자 크기 등의 권고 값을 통해 내부피폭선량을 추정할 수 있다. 본 논문에서는 입자 크기의 선정은 ICRP에서 권고하는 작업종사자의 고려 입자 크기인 $5\mu\text{m}$ 을 적용하였다. 발생량의 경우, 불가리아의 Kozloduy 부지 내의 용융시설에서 발생된 에어로졸의 포집량 데이터를 이용하여 섭취량을 산정하였다. 또한 이를 이용해 작업종사자의 체내 및 배설물에서의 방사능 수치를 계산하고 BiDAS 전산코드를 통해 내부피폭 평가를 수행하였다. Type M이 0.0341 mSv, Type S가 0.0909 mSv로 두 흡수 형태 각각 국내 연간 선량 한도의 0.17%, 0.45% 수준을 나타내었다.

중심단어: 해체, 방사성 에어로졸, 내부피폭, BiDAS, 흡입

1. 서론

원전 해체 공정 시 발생하는 방사성 에어로졸은 작업종사자의 흡입으로 인해 인체 내부의 호흡기 및 주요 장기에 침적되어 내부 피폭을 유발하게 된다. 방사성 에어로졸은 유체 속에 떠있는 고체나 액체의 미세한 방사성 물질을 뜻하며 해체 과정에서 용융, 절단 작업 시에 주로 발생하게 된다. 그 입자 크기는 $0.001\mu\text{m}$ 에서 $10\mu\text{m}$ 이상까지 광범위하며 그 크기에 따라 인체 내 장기 별로 침적되는 부위에 차이가 존재한다. 일반적으로 $5.8\sim 9.0\mu\text{m}$ 의 방사성 에어로졸은 입이나 코에 침적되며, $4.7\sim 5.8\mu\text{m}$ 는 인두, $3.3\sim 4.7\mu\text{m}$ 은 기관 및 1차 기관지, $2.1\sim 3.3\mu\text{m}$ 은 2차 기관지, $1.1\sim 2.1\mu\text{m}$ 은 말단 기관지, $0.6\sim 1.1\mu\text{m}$ 은 폐포 관, $0.65\mu\text{m}$ 이하의 방사성 에어로졸은 폐포에 침적되는 경향을 보인다[1]. 특히, 폐포에 침적되는 방사성 에어로졸은 삼투압작용에 의해 혈액으로 흡수되어 전신 피폭을 유발하게 된다. 또한, 내부 피폭은 외부 피폭과 달리 직접 측정에 어려움이 있기에, 내부 피폭을 사전에 평가하여 방사성 에어로졸로 인해 유발되는 작업종사자의 과피폭을 방지하는 최적의 작업시간 도출 및 작업환경 선정이 요구되는 실정이다.

본 논문에서는 내부피폭선량 평가를 위해 BiDAS 전산코드를 사용하였다. Kozloduy PMF 시설에서 포집된 방사성 에어로졸을 적용하여 내부피폭을 평가하였다. 이 중 대표 고려 핵종인 ^{60}Co 의 평가를 수행했으며, 실제로 Kozloduy 용융 시설에서 발생되어 포집된 핵종들의 발생량을 살펴보면 ^{60}Co 가 전체 발생량의 약 58%를 차지하고 있으며, 원전 해체 최종보고서를 참조하면 RCS (Reactor Coolant System) 등

원전 주요 기기들이 방사화생성물인 ^{60}Co 으로 대부분 오염되어 있다는 것을 알 수 있다[2, 3, 4].

2. 방사성 에어로졸

에어로졸이란 '분산상은 고체 또는 액체의 입자로 되어 있으며 분산 매체는 기체로 되는 콜로이드계이다' 라고 정의되어 있다. 보통 에어로졸이라고 부를 때는 대기중에 부유하고 있는 입자크기가 비교적 작고, 전체적으로는 상당한 시간의 경과에도 그 상태가 지속될 수 있는 것을 대상으로 하는 경우가 많다. 특히 분산상의 입자가 방사성인 경우 방사성 에어로졸이라고 불려진다. 에어로졸은 흡입되었을 때 그 입자의 크기, 형상, 밀도 등에 의해 호흡기관 각 부위에서의 침착비율이 다르게 나타난다. 실제로 에어로졸의 발생이 일어나는 것으로 화재, 폭발, 연마, 절단, 용접, 용단, 분체의 비산/낙하 또는 표면오염물이 바람에 날려 올라가는 일 등이 있다. 이러한 메커니즘으로 발생된 에어로졸의 측정은 포집해서 입자 분포를 측정하거나 모니터 등에 의해 방사능 농도를 측정하는 방법으로 수행된다[5].

3. 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭 시 평가 인자

방사성 에어로졸로 인해 유발되는 내부피폭선량을 평가하기 위해서는 일반적으로 섭취 일자, 형태, 경로, 흡수 형태

Table 1. Annual radiation collected at the PMF facility

Radionuclides	Stack-1
	MBq
⁵⁴ Mn	0.362
⁵⁸ Co	0.181
⁵⁹ Fe	0.0603
⁶⁰ Co	3.44
¹³⁴ Cs	0.362

및 핵종과 입자 크기의 인자가 요구된다[6]. 본 논문에서는 Kozloduy Nuclear Power Plant의 해체 용융 사례에서 포집된 공기 중 ⁶⁰Co 발생량을 적용하였으며, 에어로졸의 입자 크기 실측치는 확보하지 못해, 국제방사선방호위원회에서 권고하는 작업종사자의 고려 입자 크기인 5 μm를 적용하였다.

3.1 핵종 별 발생량

핵종 별 발생량은 작업종사자의 호흡률과 함께 섭취량에 직접적으로 관련이 있기 때문에, 내부피폭평가를 수행하기 위해서는 가장 먼저 결정되어야 한다. 본 연구에서 핵종 별 발생량 데이터는 Kozloduy NPP에서 수행한 해체 구조물의 용융 시 발생된 방사성 에어로졸 포집량을 적용하였다. Kozloduy NPP는 불가리아의 2,000 MWe 원자력 발전소로(VVER-400/230) 2010년 10월 11일에 해체를 시작하였으며, 절단 되었거나 용융의 대상이 되는 폐기물들을 부지 내 AB-02 (Auxiliary Building-02)에 위치한 PMF (Plasma Melting Facility)에 이송되어 용융을 수행하였다. 용융 과정 중 Impactor로 포집된 방사성 에어로졸의 연 평균 발생량은 Table 1에 정리하여 나타내었다[4]. 이 중 본 논문에서는 대표 고려 핵종인 ⁶⁰Co의 발생량을 적용하였으며, 실제로 원전 해체 시 가장 고려되거나 제염 대상이 되는 핵종이다.

3.2 입자 크기(AMAD)

방사성 에어로졸의 입자 크기 분포는 작업종사자의 호흡에 의한 내부피폭 방사선량에 영향을 미치는 주요인자이다. 앞서 설명했듯이, 미세한 입자의 방사성 에어로졸은

상대적으로 큰 방사성 에어로졸 입자보다 체내에 오랜 시간 체류하게 되어 전신 또는 장기에서 장기간의 피폭을 야기하게 된다. 이처럼 입자의 크기에 따라 인체에 미치는 영향이 달라지기 때문에 해체 현장 작업자의 에어로졸 흡입에 의한 내부 방사선량을 평가하기 위해서는 입자 크기의 분포를 결정해야 한다. 하지만 본 연구에서는 방사성 에어로졸의 실측 Data를 확보하지 못하여, ICRP에서 권고하는 5 μm로 설정하였다[7].

4. 내부피폭평가 Code

내부피폭평가 전산코드에는 대표적으로 IMBA, IMIE, BiDAS, LUDEP, IDSS, GENMOD 등이 있으며, 본 논문에서는 이 중 내부피폭선량평가 국제상호비교에서 제시된 문제들에 대해서 IMIE와의 섭취량 및 예탁유효선량 평가 결과 비교에서 평균 -3.93~0.00% 오차로 양호한 결과를 보여준 BiDAS 전산코드를 선정하여 수행하였다[8].

4.1 BiDAS (Bioassay Data Analysis Software)

BiDAS는 방사선작업자 내부피폭선량평가 전산코드로 2003년 KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)에 의해 개발되었으며, 작업종사자의 체내 방사능 수치를 측정하여 섭취량과 예탁유효선량을 계산하는 것이 코드의 본 목적이다. BiDAS는 흡입 섭취, 경구 섭취의 섭취 경로, 단일 섭취 및 연속 섭취의 섭취형태에서 계산이 가능하며, 사용되는 방사성 핵종의 대사 모델은 ICRP-66 호흡기 모델, ICRP-30 소화기 모델, ICRP-30,56,67,71 생체동역학적 모델을 사용

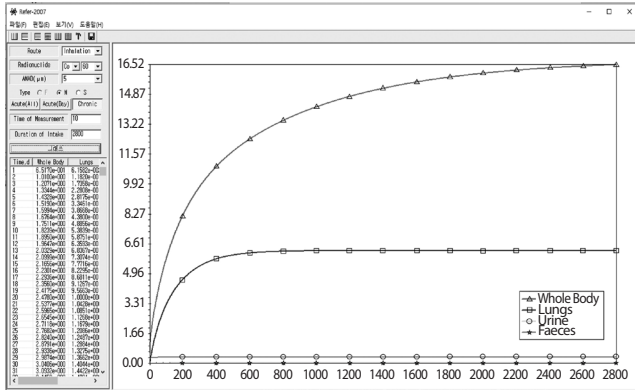


Fig. 1. Fraction of intake of ⁶⁰Co.

Table 2. Airborne concentration per unit volume of cobalt 60, resulting intake

⁶⁰ Co	
Airborne Concentration per unit Volume	0.518 Bq/Day
Respiratory Rate	28.8 m ³ /Day
Intake Amount	14.9 Bq/Day

하고 있다. 계산 가능한 AMAD의 경우, 0.01 μm, 0.03 μm, 0.1 μm, 0.3 μm, 1 μm, 3 μm, 5 μm로 구성되어 있다.

내부피폭평가를 수행하기 위한 BiDAS의 필요 Input Data는 체내 방사능 수치, 입자 크기(AMAD), 섭취 기간 등이 요구된다. 이 중 체내 방사능 수치의 경우에는 섭취량과 코드 내에 내장되어 있는 섭취량 분율을 통해 계산이 가능하다. Fig. 1은 코드 내에 내장되어 있는 핵종 별, 입자 크기 별, 흡수 형태 별 섭취량 분율을 나타내는 Database 화면이며, 예시로 만성 섭취, Type M, 5 μm의 ⁶⁰Co을 나타내었다.

5. Input Data 산정

3절에서 언급한 핵종 별 발생량 데이터를 BiDAS 전산코드에 입력하기 위해서는 일련의 변환과정이 필요하다. 본 절에서는 저자가 확보한 데이터를 BiDAS 전산코드에 적용하기 위한 계산과정을 다루었으며, 평가 간격은 일(Day) 단위로 1년동안의 내부피폭선량을 평가 하였다. 일반적으로 해체 과정에서 내부피폭평가는 매일 측정하는 것에 한계가 있어 분기

별로 측정하거나, Whole Body Detector에 오염이 감지 되었을 경우에만 평가를 수행할 것으로 사료된다[9].

5.1 농도 및 호흡률을 통한 섭취량 산정

방사성 에어로졸의 섭취량은 방사성 핵종의 단위 부피당 농도(Bq · m⁻³), 작업종사자의 호흡률(m³ · hr⁻¹)을 통해 도출할 수 있다. 본 연구에서는 국제방사선방호위원회(ICRP) 간행물 66에서 제시하는 성인남성 종사자의 경미한 작업 시 호흡률을 적용하였다. ICRP에서 권고하는 성인남성 작업종사자의 경미한 작업 시 호흡률은 1.20 m³ · hr⁻¹이며, 본 연구에서 수행하는 평가 간격인 일단위로 맞추면 하루 평균 작업종사자의 호흡률은 1.20 × 24가 된다. 작업시간은 Kozloduy PMF의 연 가동 시간인 40주(280일)을 고려하여, 대표 고려 핵종인 ⁶⁰Co의 일일 평균 공기 중 발생량인 3.44 × 10⁶ × 1/280 Bq에서 해당 작업공간(23,700 m³)을 나누어 일 평균 발생되는 단위 부피당 공기 중 농도를 도출하였다[10]. 도출된 ⁶⁰Co의 단위 부피당 공기 중 농도 등 적용되는 Input Data 및 이에 따른 섭취량 결과값은 Table 2에 나타내었다.

5.2 섭취량에 따른 체내 방사능 수치 계산

작업종사자의 체내 방사능 수치는 섭취량 분율과 섭취량을 통해 도출이 가능하다. 섭취시작일로부터 섭취종료일까지의 기간을 T, 섭취개시일로부터 임의의 측정일 t에서의 측정값 M(t)는 다음 식과 같이 표현된다. m(u)는 섭취 후 시간 u에서의 섭취량 분율, I는 섭취시작일로부터 섭취종료일까지의 총 섭취량을 나타낸다.

$$M(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t m(u) du \quad (1)$$

본 논문에서는 실제 용융 작업이 어떤 절차로 이루어지고, 공정 환경을 예측할 수 없으므로, 용융 작업 시에 발생된 방사성 에어로졸을 작업종사자가 그 즉시 흡입한다고 가정하였다. 따라서 5.1절에서 도출한 하루 당 섭취량을 식 (1)에 적용했다.

Kozloduy PMF 시설은 연 40주의 기간 동안 운영되므로 280일(40주)의 기준을 두어 계산하였으며, 체내, 폐, 소변 및 대변 총 네 개의 장기에서의 방사능 수치를 1,120회씩

Case of 5 μm (^{60}Co) - Type M				
	[Unit : Bq]			
n(Day)	Whole Body	Lungs	Urine	Faecal
1	2.82x10	5.40	5.26x10 ⁻¹	3.49
2	3.02x10	8.44	6.02x10 ⁻¹	4.50
3	3.38x10	1.16x10	6.53x10 ⁻¹	4.85
4	3.77x10	1.46x10	6.91x10 ⁻¹	5.04
5	4.14x10	1.74x10	7.20x10 ⁻¹	5.16
6	4.50x10	2.01x10	7.43x10 ⁻¹	5.25
7	4.84x10	2.25x10	7.64x10 ⁻¹	5.31
8	5.16x10	2.49x10	7.82x10 ⁻¹	5.36
9	5.48x10	2.71x10	7.98x10 ⁻¹	5.40
10	5.77x10	2.91x10	8.13x10 ⁻¹	5.43
11	6.06x10	3.11x10	8.26x10 ⁻¹	5.46
12	6.33x10	3.29x10	8.39x10 ⁻¹	5.49
13	6.60x10	3.47x10	8.50x10 ⁻¹	5.51
14	6.85x10	3.64x10	8.61x10 ⁻¹	5.53
15	7.10x10	3.80x10	8.72x10 ⁻¹	5.54
16	7.33x10	3.95x10	8.81x10 ⁻¹	5.56
17	7.56x10	4.10x10	8.91x10 ⁻¹	5.57
18	7.78x10	4.23x10	8.99x10 ⁻¹	5.58
19	8.00x10	4.37x10	9.08x10 ⁻¹	5.59
20	8.20x10	4.50x10	9.15x10 ⁻¹	5.60
21	8.41x10	4.62x10	9.23x10 ⁻¹	5.61
22	8.60x10	4.74x10	9.30x10 ⁻¹	5.62
23	8.79x10	4.85x10	9.37x10 ⁻¹	5.63
24	8.97x10	4.96x10	9.44x10 ⁻¹	5.63
25	9.15x10	5.06x10	9.50x10 ⁻¹	5.64
26	9.33x10	5.17x10	9.56x10 ⁻¹	5.65
27	9.50x10	5.26x10	9.62x10 ⁻¹	5.65
28	9.66x10	5.36x10	9.67x10 ⁻¹	5.66
29	9.82x10	5.45x10	9.73x10 ⁻¹	5.66
30	9.98x10	5.53x10	9.78x10 ⁻¹	5.67
31	1.01x10 ²	5.62x10	9.83x10 ⁻¹	5.67
32	1.03x10 ²	5.70x10	9.88x10 ⁻¹	5.68
33	1.04x10 ²	5.78x10	9.92x10 ⁻¹	5.68
34	1.06x10 ²	5.85x10	9.97x10 ⁻¹	5.68

Fig. 2. Radiation level of worker (Type M, 5 μm).

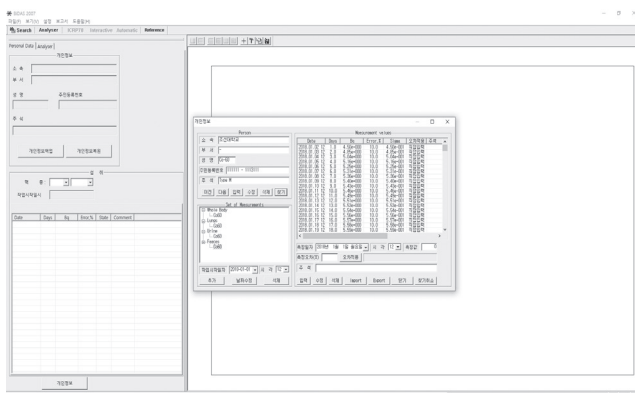


Fig. 3. BiDAS screen with radiation data of worker.

Type M, S별로 총 2,240회 도출되었다. Fig. 2는 Type M을 적용하였을 때 도출된 작업종사자의 방사능 수치를 나타내고 있으며, 위 조건들을 코드에 적용시킨 상태는 Fig. 3에 나타내었다.

6. 내부피폭평가 수행

5절에서 도출 및 수집한 입력 데이터를 BiDAS 전산코드에 적용하여 방사성 에어로졸로 인한 해체 작업종사자의 내부피폭평가를 수행하였다. ^{60}Co 의 경우로 Type M, Type S에 따라 내부피폭평가를 수행한 결과, 각각 0.0341 mSv, 0.0909 mSv로 평가되었다. Type M과 Type S에서의 예탁유효선량의 차이는 0.0568 mSv로 약 2.70배 차이가 나타나는 것으로 파악되었다. 이는 호흡기 내에서 입자가 빠르게 용해될수록 폐 내에 머무르는 시간이 줄어들고 빠르게 혈액으로 이동하게 되는 반면, 입자가 느리게 용해될수록 폐 내에서 오래 머무르게 되어 폐의 피폭방사선량이 증가하기 때문으로 판단된다[6].

7. 결론

본 논문에서는 원전 해체 과정 중 용융 작업 시 발생하는 방사성 에어로졸로 인한 작업종사자의 내부피폭선량을 평가를 수행하였다. 입력 데이터로는 Kozloduy PMF 시설에서 발생된 방사성 에어로졸의 포집량을 사용하였다. 본 연구에서는 ^{60}Co 을 대표 핵종으로 선정하여 평가하였는데 이는 Maine Yankee, Connecticut Yankee NPP 등의 보고서를 참조한 결과, 해체 시 가장 고려되는 방사성 핵종이 ^{60}Co 이기 때문이며, 또한 Kozloduy PMF 시설에서 방사성 에어로졸 발생량의 약 58%를 ^{60}Co 가 차지하고 있다.

BiDAS 전산코드를 통해 예탁유효선량을 평가한 결과, ^{60}Co 로 인해 발생하는 작업종사자의 예탁유효선량은 Type M에서 0.0341 mSv, Type S에서 0.0909 mSv로 평가되었다. 이는 국내 연간 허용 선량과 비교해 보았을 때, 각각 0.17%, 0.45%의 미미한 수치를 보여 급속 용융 시, 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭측면에서의 과피폭은 우려되지 않은 것으로 분석되었다. 하지만 용융 공정보다 절단 공정에 분산상의

이유로 방사성 에어로졸의 발생량이 많을 것이라 사료된다.

따라서 추후 절단 공정 시에 발생하는 방사성 에어로졸의 실측 Data를 확보하여 평가를 수행한다면, 해체 공정 시 작업종사자의 내부피폭에 대한 정확한 판단과 이에 따른 과피폭의 방지, 절단 공정 적용 기술의 타당성을 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 본 저자는 추후 절단과정에서 발생하는 방사성 에어로졸의 정확한 값을 통해 방사성 에어로졸로 인한 내부피폭 평가를 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 원자력기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017M2A8A4018598)

REFERENCE

- [1] M. Lippmann and R. E. Albert, "The Effect of Particle Size on the Regional Deposition of Inhaled Aerosols in the Human Respiratory Tract", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 30(3), 257-275 (2007).
- [2] P. Aker, T. Feigenbaum, M. Meisner, and M. Thomas, "Maine Yankee Decommissioning Experience Report", Electric Power Research Institute, EPRI Detailed Experience Report, ENT000164 (2012).
- [3] S. Bushart, B. Couture, J. Fan, R. Haight, and C. Melin, "Connecticut Yankee Decommissioning Experience Report", Electric Power Research Institute, EPRI Technical Report, 1013511 (2006).
- [4] Energiewerke Nord, "Experience from Greifswald NPP Decommissioning in Germany", EWN Final Report, P5cDel03Rev02-EIA-R-Chapter 11 (2013).
- [5] J.I. Lee, J.L. Kim, and B.H. Kim, "International Exercise on Internal Dose Assessment in Korea", *J. Radiol. Prot.*, 36(2), 64-70 (2011).
- [6] International Commission on Radiological Protection, "Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers (Preface and glossary missing)", Publication 78, Ann. ICRP 27(3-4) (1997).
- [7] B.H. Kim, S.Y. Young, T.Y. Lee, and J.L. Jang, "Development of Environmental Radiation Protection Technology", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI Final Research Report, KAERI/RR-2801/2006 (2006).
- [8] J.M. Valdivieso, "Decommissioning Strategy & Method & Design Characteristics and Action Plan for Decommissioning", Proc. of the 2018 WES Education, May 28-June 1, 2018, Republic of Korea.
- [9] Energiewerke Nord, "Environmental Impact Assessment Report for the Decommissioning of Units 1 to 4 at Kozloduy Nuclear Power Plant", EWN Final Report, Pl6Del09Rev02-EIA-R-Chapter 1 (2013).
- [10] Energiewerke Nord, "Environmental Impact Assessment Report for the Facility for Treatment and Conditioning of Radioactive Waste with a High Volume Reduction Factor at Kozloduy Nuclear Power Plant", EWN Final Report, P5Cd03Rev.02-EIA-R-Chapter 4 (2013).