



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](#)

2023년 2월
박사학위 논문

원전 해체 시 ALARA를 고려한
대형구조물 절단 시나리오
구축 연구

조선대학교 대학원
원자력공학과
이학윤

원전 해체 시 ALARA를 고려한 대형구조물 절단 시나리오 구축 연구

A study on the building of scenarios for cutting large structures considering ALARA when decommissioning nuclear power plants

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이학윤

원전 해체 시 ALARA를 고려한 대형구조물 절단 시나리오 구축 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

이 학 윤

이학윤의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	<u>이 경 진 (인)</u>
위 원	조선대학교 교수	<u>송 종 순 (인)</u>
위 원	조선대학교 교수	<u>공 태 영 (인)</u>
위 원	중앙대학교 교수	<u>이 봉 수 (인)</u>
위 원	한국원자력연구원	<u>김 지 석 (인)</u>

2023 년 01 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	XII
제1장 서론	1
제1절 연구배경	1
제2절 연구목적	2
제3절 연구 방법 및 범위	2
1. 작업종사자 피폭선량 평가	2
2. 해체폐기물 발생량	3
제2장 이론적 배경	4
제1절 연구 동향	4
1. 방사선 안전관리	4
2. 방사화 구조물 절단	4
3. 방사성 폐기물 분류기준	5
제2절 원전 제염기술 및 고려사항	6
1. 화학적 제염	6
2. 물리적 제염	9
제3절 원전 해체 절단 기술	12
1. 기계적 절단	12
2. 전기적 절단	14
3. 열적 절단	16
제4절 피폭선량 평가 방법론	18
1. 외부피폭	19
2. 내부피폭	25
제3장 평가 인자 및 대상 선정	30

제1절 대표 기기 선정	30
1. 가압기 (Pressurizer)	30
2. 방사화 콘크리트 (Bio-shield)	31
제2절 평가 입력 인자	32
1. Geometrical Model	32
2. 오염정도 및 분포	36
제3절 시나리오	40
1. Pressurizer	40
2. Bio-shield	43
3. 절단 소요시간	47
 제4장 시나리오 평가	 56
제1절 시나리오 해석	56
1. 작업자 피폭선량	56
2. 준위별 폐기물 발생량	68
3. 해체폐기물 처분 비용	79
 제5장 결론	 81
 참고문헌	 84
 부록	 87

표 목차

표 1. Specifications of Pressurizer	33
표 2. Bohunice A1 내 가압기 선원항	37
표 3. 가압기 핵종 분포 (변환 후)	37
표 4. 가압기 1st scenario에 따른 절단 길이	48
표 5. 가압기 2nd scenario에 따른 절단 길이	48
표 6. 절단 속도에 따른 총 절단 소요시간	49
표 7. Bio-shield 1st, 2nd scenario에 따른 절단 면적 [단위 : cm ² , (반복 횟수)]	50
표 8. Bio-shield 3rd, 4th scenario에 따른 절단 면적 [단위 : cm ² , (반복 횟수)]	50
표 9. Bio-shield 하부의 절단 면적 [단위 : cm ² , (반복 횟수)]	50
표 10. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 전 상부 (단위 : hr)	52
표 11. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 후 상부 (단위 : hr)	53
표 12. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 전 하부 (단위 : hr)	54
표 13. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 후 하부 (단위 : hr)	55
표 14. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	57
표 15. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	58
표 16. 1st scenario 작업자 투입 인원 및 평균 개인선량 [단위 : mSv, (명)]	59
표 17. 2nd scenario 작업자 투입 인원 및 평균 개인선량 [단위 : mSv, (명)]	60
표 18. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	64
표 19. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	65
표 20. 3rd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	65
표 21. 4th scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)	65
표 22. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)] ·	66
표 23. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)]	67
표 24. 3rd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)] ·	67
표 25. 4th scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)] ·	68
표 26. 1st scenario에 따른 절단 시점별 준위 변화 추이 [단위 : Bq/g, (준위)]	70
표 27. 연마 제염 전 시나리오에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (단위 : EA)	73
표 28. 연마 제염 후 시나리오에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (단위 : EA)	76
표 29. 절단 시점에 따른 처분 비용 변화 추이 [단위 : 억, (처분 비용 비중 : %)] ·	80

그림 목차

그림 1. New Classification of radioactive waste of IAEA	6
그림 2. Shear cutting	12
그림 3. Plasma arc cutting	16
그림 4. Oxy-fuel burning	17
그림 5. Laser cutting	18
그림 6. Point Kernel Integration	19
그림 7. Geometry Interface (Cylinder)	22
그림 8. Source Input Interface	23
그림 9. MCNP Cell Creation & Visualization	24
그림 10. IMBA main screen	28
그림 11. TAURUS main screen	28
그림 12. 가압기	30
그림 13. Specification of Pressurizer head	34
그림 14. Pressurizer implemented through VISIPLAN	34
그림 15. Bio-shield 상면 (cm)	35
그림 16. Bio-shield 측면 I (cm)	35
그림 17. Bio-shield 측면 II (cm)	36
그림 18. 고리1호기 해체 일정	36
그림 19. Bio-shield 핵종분포 (1/2)	39
그림 20. Bio-shield 핵종분포 (2/2)	39
그림 21. 작업자 위치	40
그림 22. 절단 방식 비교 (왼쪽부터 단순 절단, 중심점 절단)	41
그림 23. 측면에서의 Head 절단 (1st case scenario)	41
그림 24. Head 상면 절단 (1st case scenario)	42
그림 25. 측면에서의 Head 절단 (2nd case scenario)	42
그림 26. Head 상면 절단 (2nd case scenario)	43
그림 27. VISIPLAN 내 Hot to Cold 시나리오에 따른 모델링 변환	44
그림 28. VISIPLAN 내 Cold to Hot 시나리오에 따른 모델링 변환	44
그림 29. 상면에서의 Bio-shield 절단	45

그림 30. 측면에서의 절단 (cm)	45
그림 31. Bio-shield 하부의 절단 방법	45
그림 32. 상면에서의 Bio-shield 절단	47
그림 33. 측면에서의 절단 (cm)	47
그림 34. 측면, 상면 절단 시 시간당 선량 분포	57
그림 35. 시나리오 별 작업자 위치에 따른 시간당 선량 분포도 (영구정지)	62
그림 36. Hot to Cold/Cold to Hot에 따른 Section, Step 진행방향	63
그림 37. 연마 제염 전/후에 따른 상호비교	64
그림 38. 가압기 절단 형상 (1st)	69
그림 39. 1st case scenario, Drum 발생량 (가압기)	70
그림 40. Drum 내 적재 (예시)	71
그림 41. 가압기 절단 형상 (2nd)	72
그림 42. 2nd case scenario, Drum 발생량 (가압기)	72
그림 43. Drum 내 적재 (예시)	73
그림 44. 시점에 다른 준위별 Drum 발생량 추이 (연마 제염 전)	74
그림 45. Main part I Drum 발생량 (연마 제염 전)	75
그림 46. Main part II Drum 발생량 (연마 제염 전)	75
그림 47. Below part Drum 발생량 (연마 제염 전)	76
그림 48. 시점에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (연마 제염 후)	77
그림 49. Main part I Drum 발생량 (연마 제염 후)	78
그림 50. Main part II Drum 발생량 (연마 제염 후)	78
그림 51. Below part Drum 발생량 (연마 제염 후)	79

ABSTRACT

A study on the building of scenarios for cutting large structures considering ALARA when decommissioning nuclear power plants

Lee HakYun

Advisor : Prof. Song Jong Soon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

There are 26 nuclear power plants in South Korea, of which 24 are currently in operation, excluding Kori Unit 1 and Wolsong Unit 1, which have been shut down permanently. Dismantling a nuclear power plant involves several steps, such as cutting, decontamination, disposal, and treatment. Cutting is performed close to the target structure as workers risk being overexposed.

Typical large-scale structures, such as nuclear reactors, steam generators, pressurizers constructed with metals, and bio-shields, are representative concrete materials. Regarding pressurizers and bio-shields, studies on worker exposure management and cutting scenarios are relatively insufficient compared to other large-scale structures. Nuclear power plant decommissioning in these circumstances may cause unnecessary exposure of workers and increase secondary waste generation.

In this study, a pressurizer and a bio-shield were selected as representative structures, and a cutting scenario was established. The radioactive waste disposal drum specifications were considered a basic construction condition. The bioshield was constructed by dividing the methodology for hot to cold and cold to hot and the application/nonapplication to abrasive decontamination situations.

For the scenario evaluation, VISIPLAN, which includes cases applied to the dismantling of BR-3 and BR-2, was used. Among the conditions considered in the evaluation, the cutting time was the five-year interval from the period of permanent suspension to 30 years after the previous planned permanent suspension. The time point

of 8.5 years was also considered.

It is impossible to specify the cutting speed for each cutting technology, as various variables depend on the output and specifications of the machine. Therefore, it was divided into a pressurizer and a bio-shield based on the material, and the speed range was designated and applied to the evaluation. First, the pressurizer was set to 10 cm/min intervals from 10 to 100 cm/min, and the bio-shield was set to 1 m²/hr intervals from 1 to 10 m²/hr. This range results from extensive collection and analysis of cutting speed data for each cutting technology.

The evaluation results of this study are intended to be presented as valuable data to establish ALARA-based cutting methods and consider applicable cutting methods for cutting large structures during dismantling.

제 1장 서론

제 1절. 연구 배경

원자력발전소(원전)의 해체란 계속 운전이 불가능한 원전을 안전하고 경제적으로 철거하여 해당 공간을 추가적인 규제가 없는 자연 상태로 복원하는 것을 의미한다. 세계원자력협회(WNA)는 원전 해체를 ‘원전 시설의 모든 방사성 물질을 제거하고 해당 시설을 발전적으로 해체하는 활동’으로 정의하고 있으며, 국제원자력기구(IAEA)는 원전 해체를 ‘원자력시설에 적용되는 규제관리의 일부 또는 전부를 해체하기 위하여 취해지는 기술적·행정적 행위’로 정의하고 있다. 우리나라는 원자력안전법에서 원전 해체를 ‘허가 또는 지정받은 시설의 운영을 영구적으로 정지한 후, 해당 시설과 부지를 철거하거나 방사성 오염을 제거함으로써 원자력안전법의 안전 규제로부터 배제하기 위한 모든 활동’이라고 정의하고 있다[1].

원전은 운영을 정지하더라도 작업종사자의 방사선 피폭을 야기하는 방사선원이 존재하므로, 원전 해체 시 작업종사자의 방사선 피폭 관리가 이루어져야 한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 작업종사자가 작업을 수행하는 상황에 대한 선량 제한치의 상한선 역할을 하는 선량한도 개념을 제시하고 있다. 국내 원자력안전법에서도 ICRP 60 권고에서 제시하는 선량한도를 근거로 하여 방사선 작업종사자의 법적 선량한도를 제시하고 있다. 따라서 원전 해체 시 종사자의 피폭방사선량은 국제방사선방호위원회 및 국내 원자력안전법에서 제시하는 법적 선량한도 미만으로 관리되어야 한다.

미국은 원전 해체 경험이 많은 나라로 현재, 25기의 원자로가 해체작업 중이다. 미국에서는 원전 해체작업을 해체 착수 전 단계, 해체 단계, 해체 완료 후 단계로 구분하여 해체작업을 진행하고 있다. 미국은 해체 착수 전 단계에서 정지 후 해체 활동 보고서(Post Shutdown Decommissioning Activities Report, PSDAR)에 해체 계획, 상세일정, 예상 비용, 환경영향평가 등에 대한 사항을 기술하여 미국 원자력 규제 위원회(NRC)에 제출하여야 한다. 또한, NRC에서는 ICRP 26 권고에서 제시하는 선량한도를 기준으로 하여 방사선 작업종사자의 법적 선량한도를 제시하여 피폭방사선량 관리 목표치를 제시하고 있다. 피폭방사선량 관리 목표치는 작업종사자의 피폭방사선량이 NRC에서 제시하고 있는 법적 선량한도를 초과하지 않도록 일정 여유분을 두어 선량한도 이하로 설정된 피폭방사선량 기준치이다[2].

이에 따라, 국내 원전 해체 시에도 작업종사자에 대한 방사선 피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 수립하기 위해서는 원전 내 주요 구조물에 대한 방사선학적 특성을 평가하여 이에 합리적인 절단 시나리오를 구축하는 것이 중요하다.

제 2절. 연구 목적

국내에는 총 26기의 원전이 있으며, 이 중 영구정지된 고리1호기, 월성1호기를 제외한 24기가 현재 가동 중이다. 해체 과정에는 절단, 제염, 처분 및 처리 등 많은 작업이 포함되어 있으며, 이 중 절단 작업은 대상 구조물에 근접하여 수행되는 작업 중 하나이기 때문에 작업종사자의 과피폭 가능성이 존재한다.

대표적인 대형구조물에는 금속 재질로 이루어진 증기발생기, 원자로, 원자로 냉각재 펌프, 가압기 등이 있으며, 콘크리트 재질로는 방사화 콘크리트(Bio-shield)가 있다. 특히, 금속 대형구조물 중 가압기의 경우, 직접적으로 연결되어 있는 증기발생기의 작업자 피폭 관리 연구 동향과 비교하였을 때, 상대적으로 미흡한 실정이다. 또한, Bio-shield의 경우, 많은 연구가 진행되어 오고 있지만, 체계적인 절단 시나리오 구축을 통한 작업종사자 피폭관리에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 금속과 콘크리트 재질의 대표적인 구조물을 각각 가압기와 Bio-shield로 선정하고, 이에 다양한 조건의 절단 시나리오를 구축하여 합리적인 방안을 도출하고자 하였다. 본 연구에서 도출된 평가 결과는 해체 중 대형구조물을 절단하는 데 있어, 적용 가능한 절단 공법에 대한 고찰과 As Low As Reasonably Achievable (ALARA)에 입각한 절단 계획 수립에 유의미한 기초자료로써 활용하고자 한다.

제 3절. 연구 방법 및 범위

해체 시 대형구조물을 절단할 때 적용되는 시나리오에 대하여 체계적이고 합리적인 결과를 도출하고자 수행한 연구 방법과 그 범위는 다음과 같다.

1. 작업종사자 피폭선량 평가

- 시나리오에 따른 선량평가는 VISIPLAN S/W를 사용하여 평가를 진행하였다.
- 절단 위치는 작업자의 숙련도, 절단 기기의 출력 등 많은 변수가 존재하므로, 변수 차단을 위해 대상체에서 100 cm 이격된 거리에서 절단을 수행하였다고 가정하였다.
- 작업종사자의 TLD (Thermoluminescence dosimeter) 착용 지점을 고려하여 지상에서 120 cm 위치에서의 선량을 평가하였다.
- 절단 시점은 0, 5, 8.5, 10, 15, 20, 25, 30년에 대해 고려하였다.
- 절단 속도에 대해 특정할 수 없으므로, 상용화된 절단 기술 별 절단 속도의 범위를 참조하였고, 이에 따른 절단 소요시간을 도출하였다. 적용된 절단 속도는 가압기의 경우, 10 ~ 100 cm/min까지 10 cm/min 간격, Bio-shield의 경우, 1 ~ 10 m²/hr까지 1 m²/hr 간격으로 설정하였다.
- 가압기의 경우, Co-58, Co-60, Nb-94, Mn-54의 감마핵종을 적용하였고, Bio-shield의 경우, 대표 핵종으로 구분되는 Co-60, Eu-152을 적용하였다.

2. 해체폐기물 발생량

- 방사성 폐기물 처분 Drum의 규격에 따라 각 대상 구조물의 절단 시나리오를 구축하였으며, 방사성 폐기물 분류기준에 따른 준위별 발생량을 도출하였다.
- 방사성 폐기물 분류기준은 방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제 2020-6호)에 근거하였다.
- Fusion 360 S/W를 사용하여 Drum 적재 시뮬레이션을 수행하고, 각각의 절단 길이 및 면적과 충전율에 대한 계산을 수행하였다.

제 2장. 이론적 배경

제 1절. 연구 동향

1. 방사선 안전관리

원자력시설 해체 시 작업종사자의 피폭방사선량이 법정 선량한도와 유사하도록 작업을 계획할 경우, 피폭방사선량 평가의 불확도 및 예기치 못한 상황 등의 다양한 요인으로 인하여 종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과할 가능성이 있다. 그리고 ICRP의 ALARA 원칙에 따라 경제적 요인, 사회적 요인 등을 고려하여 작업종사자의 방사선 피폭을 합리적으로 최소화할 필요가 있다.

미국의 상업용 원자로 시설의 경우 피폭방사선량 관리 목표치는 NRC에서 제시하고 있는 법적 선량한도의 50~100% (25~50 mSv/year) 수준에서 설정되어 시설 해체 시에 적용되었다. Yankee Rowe 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 NRC에서 제시하고 있는 선량한도와 동일한 수준인 연간 50 mSv로 설정하였으며, 방사선방호 관리자와 관련 담당자들은 종사자의 연간 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않도록 관리하였다. La Crosse 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 25 mSv, 40 mSv 두 단계로 설정하였다. 발전소 관리자는 종사자의 연간 피폭방사선량이 25 mSv를 초과하지 않도록 관리하였으며, 운영검토위원회는 피폭방사선량이 40 mSv를 초과하지 않도록 권고하였다. 반면 Pathfinder 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 25 mSv로 설정하였다.

국내의 경우, 운영 중인 원전에 대해서도 원자력안전법에서 정하고 있는 선량한도보다 낮은 자체 관리기준을 두어 방사선 작업종사자의 피폭선량을 관리하고 있다. 해당 관리기준은 국내 법적 선량한도, 원전 내 방사화 및 오염 정도를 기반으로 설정된 수치다. 경수로의 경우 일반적으로 법적 선량한도의 80~90% (16~18 mSv/year) 수준에서, 중수로의 경우에는 70~80% (14~16 mSv/year) 수준에서 설정되어 운영되고 있다[2].

2. 방사화 구조물 절단

원전 해체 시에는 해당 구조물의 부피 및 무게가 상당하여 그 자체로 처분하기

에는 적합하지 않은 경우, 절단을 수행하여 세분화한 뒤 처분하는 방법을 적용한다. 절단 방식은 방사화로 오염되지 않은 구역보다 방사화로 오염된 구역에서 주로 수행되어 진다.

이미 해체 경험이 있는 선진국의 경우, 각 원전의 특성에 맞는 절단 기술을 활용하여 해체작업을 수행했으며, 우리나라 역시 연구로 해체 경험을 바탕으로 보다 더 정밀한 절단 작업을 수행하기 위한 연구를 진행 중에 있다.

독일의 경우, KRB-A 원전 해체 시, 원자로 내부 절단에는 Thermal cutting Tech.가 적용되었으며, ODIN이라는 Tool carrier의 개발로 수중에서의 Plasma를 이용한 절단 작업이 보다 수월해졌다. 또한 에어로졸 제거 기술 및 수조 표면에서의 에어로졸 방출량 감용 기술도 개발되었으며, 작업환경을 감시하고 추적하는 기술도 함께 개발되었다. KRB-A에는 3개의 증기발생기가 있으며, 이는 Ice sawing 공법이 적용되었는데 이 기술은 우선 전체적으로 물로 가득 채워서 모든 구성품을 냉각한 다음 절단을 수행하는 기술로써 장점으로 모든 구성 Tube의 고정화, 선량의 감축, 에어로졸 방출의 최소화 및 Saw blade의 자동 냉각이 있다. 소요시간은 SG 상부부터 Band saw를 이용하여 절단 두께 0.8 m로 절단하는데 8시간, 장비의 재설치에는 12시간이 소요되었다[3].

일본의 경우, 대표적으로 JPDR의 해체 시, 원자로 내부의 각종 구성품은 Plasma arc 기술을 사용하였고 원자로 압력용기는 Arc saw를 이용하였다. 냉각 계통 Pipe는 그 구경 및 작업장소 여건에 따라 회전원판 칼날 및 성형폭약 등을 이용한 부분적 제한발파 공법을 사용하였다. 원자로를 둘러싼 Bio-shield는 기계적인 절단 방법과 Abrasive water jet 공법을 사용하였고, 집단으로 구성된 콘크리트 해체 대상물에는 제한발파 공법을 병행하였다. 각종 공법을 사용한 후 그 결과를 분석하여 작업에 소요된 Man-power 및 총 소요시간을 평가하였다[4].

3. 방사성 폐기물 분류기준

방사성 폐기물은 원자력을 이용하여 전력을 생산하는 원자력발전의 제반 핵연료 주기의 모든 공정과 방사성 물질 취급 및 원전의 해체 과정에서 필수 불가결하게 부산물로서 발생한다. 국내의 방사성 폐기물 분류는 1994년 IAEA 안전기준의 분류 체계를 반영하여 방사능 농도(4,000 Bq/g)와 열 발생률(2 kW/m³)을 기준으로 고준위

및 중·저준위 방사성 폐기물로 구분하고 있다.

우리나라의 경우, 원자력안전법 시행령 제 2조(정의) 제 1호에서는 방사성 폐기물 중에서 방사능과 열 발생률이 특정 값 이상인 폐기물을 고준위 방사성 폐기물로 정의하고, 이에 해당되지 않는 방사성 폐기물을 중·저준위 방사성 폐기물로 분류되어 왔다.

IAEA의 방사성 폐기물 신 분류체계를 살펴보면 그림 1과 같이 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위, 극단반감기, 규제면제 폐기물로 총 6가지로 구분하고, 분류별 처분 방식 또한 제시하고 있다. 우리나라는 방사성 폐기물 분류기준과 이에 따른 처분 방식을 개선하기 위하여 제 18회 원자력안전위원회의를 열고, 원전의 대형기기 교체 및 원전 해체 시 발생할 수 있는 다양한 방사성 폐기물에 대한 최적의 방사성 폐기물 분류체계와 기준 마련이 시급함에 따라 IAEA 기준에 따른 방사성 폐기물을 잠재 위험도에 따라 세분화하고 종류별로 처분 방식, 규제해제 제도 도입을 위해 시행령, 시행규칙 및 관련 고시의 개정을 회의한 바 있다.

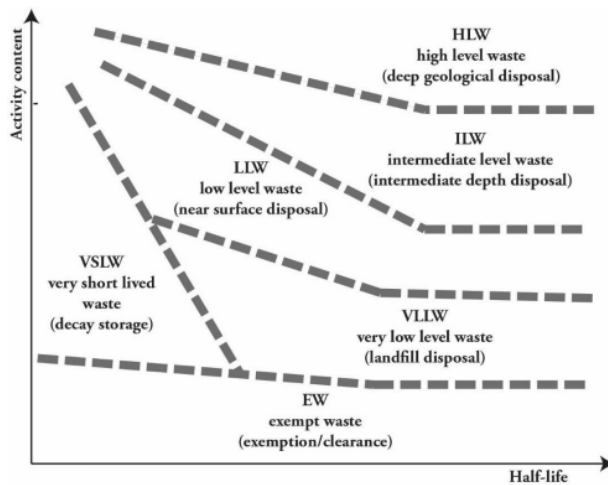


그림 1. New classification of radioactive waste of IAEA[5]

제 2절. 원전 제염기술 및 고려사항

1. 화학적 제염

화학적 제염은 주로 표면에 고착화된 오염물질을 제거하기 위해 사용하는 제염 방법으로 원자력 관련 시설에서 널리 사용되고 있다. 원전에서 사용되는 화학적 제염은 일반산업에서 사용되고 있는 대용량 화학제염 방법에서 유래되었다. 두 분야 모두 오염물질을 제거하기 위해 유사한 기술, 방법, 장비, 절차를 사용하고 있지만, 원전의 경우 방사성 물질의 위험도를 고려하여 일반산업에서 요구되는 제염 수준보다 더욱 높은 강도의 제염이 요구된다.

화학적 제염의 대표적인 화학 처리 기술로는 알칼리성 용해, 산화환원 반응, 킬레이트화 반응이 있다. 이 3가지 제염기술은 독립적으로 사용되는 것이 아니라 상황에 따라 같이 혼합하여 사용되거나 순차적으로 사용된다. 일반적으로 화학제염의 효용성을 높이기 위해 여러 형태로 기술들을 조합하여 사용한다. 그러나 이러한 제염기술의 조합은 실제 제염 과정에서 복합성을 유발하기 때문에 기술의 조합으로 인한 장단점을 명확히 평가한 후 적용하는 것이 필요하다[6]. 화학적 제염의 장점은 다음과 같다.

- 비교적 제염공정이 빠르고 간단하다.
- 일반산업의 제염공정과 유사하므로 기존의 일반산업에서 수행한 제염 경험을 원전 해체 제염에 적용할 수 있다.
- 추가적인 장비가 필요하지 않기 때문에 비교적 제염 비용이 저렴하다.
- 적절한 화학제를 선택하면, 제염하고자 하는 오염지역 표면의 거의 모든 방사성 물질을 제거할 수 있어 제염된 설비의 재활용이 가능하다.
- 제염계수 10,000이 가능하다.
- 사람의 접근이 어려운 내부 배관, 파이프 등 복잡한 구조에 대해서도 제염이 가능하다.
- 일반적으로 제염 과정에서 방사성 물질의 분진은 발생하지 않는다.

화학적 제염에서 고려해야 할 단점은 다음과 같다.

- 화학적 제염으로 인해 2차 폐기물(액체)이 발생된다. 액체 폐기물은 이온교환, 침전, 여과, 증발 등의 처리 과정이 필요하며 이러한 과정에서 추가적인 폐기물이 발생한다. 또한, 2차 폐기물을 처리하기 위해 상당한 비용이 발생하게 된다.

- 제염공정에서 사용되는 강산이나 산화제의 유동성으로 인해 작업자의 안전에 위협이 될 수 있으며, 수소와 같은 폭발성의 가스가 발생하기도 한다.
- 일반적으로 다공성 표면의 경우 화학적 제염의 효율성이 낮다.
- 제염된 물질의 확산으로 인해 오염지역 이외의 기타 지역을 다시 오염시킬 수 있으며, 사고로 인해 유출될 경우 환경의 위험도를 증가시킨다.
- 제염공정에서 높은 온도가 요구될 경우도 있다.
- 제염공정에서 사용되는 시스템의 복잡성으로 인해 제염 시 해당분야의 전문가를 필요로 한다.

가. 고농도 제염공정

고농도 제염 방법은 제염제를 달리 사용하여 중간 세정을 하는 등 단계적 제염 방법으로 수행한다. 제염제를 고농도(1% 이상)로 사용하여 높은 제염계수를 얻게 되는데 이 공정은 원자로 배관이나 핵연료 수송 용기의 제염에 적용된다. 스테인리스강 표면의 금속 산화물층을 제거하는 2단계 공정이 가장 일반적인 기술인데, 산화제로 처리한 다음 착화물제/산용액으로 제염하는 방법이다. 산 제염용액의 농도가 2~15% 정도로 유지되므로 짧은 시간 내에 제염할 수 있는 반면에 부식률을 저하시키기 위해 부식억제제를 첨가하지만, 국부부식이 발생하는 등 재질에 대한 부식성이 큰 것이 단점이다.

나. 저농도 제염공정

저농도 제염에서는 제염제 농도가 1% 이하로 조절되는데 이 공정의 장점으로 전 1차 계통을 제염할 수 있다는 것과 부식률이 낮으며 폐기물의 처리가 용이하다는 점을 들 수 있다. 반면에 고농도 제염법에 비해 제염 효율이 비교적 낮다. 제염제 성분에는 매우 낮은 농도로 EDTA, DTPA, TTHA 등의 착화물제가 포함되어 있어 철, 니켈, 코발트, 크롬 및 그 이외의 금속 이온들과 착화합물을 형성함으로써 금속 성분의 용해도를 증가시키고 따라서 침적된 부식 산화막의 제거를 촉진시켜준다.

다. 전기화학 제염공정

전기화학 제염공정은 일반적으로 금속 표면의 α, β, γ 오염의 제거에 이용되어 왔다. 이 공정의 장점은 짧은 적용시간, 높은 제염계수, 폐기물량이 적고, 부드러운

표면을 만들 수 있다는 것이다. 방사성 오염원은 금속이 용액 속으로 용출됨으로써 제거되는데 보통 전해액으로는 인산, 황산, 옥살산 등이 사용된다. 제염공정은 낮은 전압을 걸어주며 이때 전류밀도를 주의 깊게 조절해 주어야 하는데 너무 낮을 경우 재질이 불균일하게 손상될 수 있으며 너무 높을 경우에는 금속 표면이 심하게 침식되기도 한다. 인산을 전해액으로 사용되는 대표적인 전해 조건은 용액 온도 40 ~ 80%, 농도 40 ~ 80%, 전극퍼텐셜 8 ~ 12 V, 전류밀도 5 ~ 50 A/dm², 시간 간격이 5 ~ 30분이다[7].

2. 물리적 제염

물리적 제염은 기계적 제염이라고 불리기도 하며 수세척, 닦음질, 진공처리, Grinding, Blasting, Scabbling, 코팅 제거 등의 과정을 통해 오염된 표면에서 방사성 오염물질을 제거하는 방법이다. 물리적 제염은 크게 표면을 세척하는 기술과 제거하는 기술로 나뉜다. 표면 세척 기술은 솔질, 닦음질, 수세척, 진공처리, 코팅제거 등의 과정을 이용하여 제염 후 제염 대상 표면의 오염은 기계적으로 제거되지만, 표면은 온전한 상태를 유지하게 된다. 반면에 표면 제거 기술은 Grinding, Blasting, Scabbling, Shaving, Spalling, Peening, Scaling 등의 과정을 이용하여 표면 전체의 막을 벗겨내어 오염물질을 제거하게 된다.

물리적 제염은 화학적 제염의 대안으로 사용될 수 있으며, 또한 화학적 제염을 보완하기 위해 사용되기도 한다. 물리적 제염 방법의 장점은 다음과 같다.

- 거의 모든 표면에 적용할 수 있으나 제염 대상 물질의 특성에 따라 용이함의 차이는 있다. 예를 들어, 회반죽 같은 물질의 표면은 쉽게 제거할 수 있으나 금속의 표면은 제거하기가 매우 어렵다.
- 일부 표면의 경우에는 물리적 제염만을 사용해야 한다. 콘크리트와 같은 다공성의 물질은 오염물질이 콘크리트 특성으로 인해 콘크리트 내부 깊숙하게 자리 잡고 있다. 이 경우 화학적 제염을 수행하게 되면, 오히려 오염물질을 더욱 깊게 위치하게 되는 역효과를 발생시킨다.
- 일반적으로 오염물질 전체를 제거할 수 있으므로 화학적 제염에 비해 높은 제염계수를 달성한다.
- 오염된 표면 전체가 제거되기 때문에 표면 전처리와 같은 과정이 불필요하다.

- 제거된 표면 물질을 바로 수집하여 폐기처분 할 수 있으므로 이온교환수지와 같은 2차 폐기물이 발생하지 않고, 폐기물관리가 화학적 제염에 비해 단순하다.

물리적 제염에서 고려해야 할 단점은 다음과 같다.

- 고유 특성상 방사성핵종에 특화된 제염기술은 없다.
- 일반적으로 표면이 세척되면서 파괴되기 때문에 오염된 설비를 재사용하기 위한 제염목적에는 적용하기가 어렵다.
- 주로 표면을 마모하여 제염을 수행하기 때문에 작업 도중 마모된 입자가 부유할 수 있어 이에 대한 방안을 마련해야 한다.
- 복잡한 구조의 표면에 대한 접근성이 떨어진다. 예를 들어 가늘고 긴 파이프와 같이 제염해야 할 오염표면이 멀리 떨어져 있거나 설비의 틈이나 조인트와 같이 복잡한 구조일 경우에는 물리적 제염을 적용하기에는 한계가 있다.
- 손이 많이 가는 기술로 오염된 표면 근처에서 제염 장비를 가지고 작업자가 제염을 수행해야 한다. 이에 따라 제염 과정에서 작업자가 방사선 피폭을 받을 수 있으므로 안전에 많은 주의가 요구된다.
- 화학적 제염에 비해 오염표면을 깊숙이 제거하게 되면 발생하는 폐기물의 부피가 매우 커지게 된다.

물리적 제염의 성능은 오염물질의 형태, 물리화학적 특성, 발생 장소, 오염 깊이, 표면의 특성 등에 따라 달라진다. 따라서 제염 이전에 예비조사를 실시하여 해당 오염물질 제거에 적합한 물리적 제염 방법을 선택해야 한다. 일반적으로 물리적 제염 방법은 오염지역이 크고, 접근에 장애가 없는 오염물질에 적용되고 있다. 물리적 제염도 화학적 제염과 마찬가지로 일반 산업체에서 이를 통해 많은 제염을 수행하여 관련된 기술의 경험이 상당히 축적된 상태이다[6].

가. 진공 세척법(Vacuum Cleaning)

방사성 물질이 입자의 형태로 표면에 침적된 경우 이들을 손쉽게 제거할 방법으로 화학제염 및 기타 제염을 적용하기 전에 진공 세척법을 이용한다. 이 방법은

오염물질을 부수는 작업과 병행함으로써 제염 효과를 높일 수 있고, 방사성 물질의 대기 방출을 억제함으로써 작업조건을 증진할 수 있으며 다공질보다는 표면의 부드러운 오염물질을 제거하는 데 효과적이다.

나. 수 연마 제염(Washing, Swabbing or Scrubbing)

작업자가 솔이나 주걱 등의 도구를 가지고 직접 제염대상물을 제염하는 방법으로 제염 효과는 제염 시간, 도구, 제염용액 및 제염할 표면의 상태 등에 따라서 다양하며, 대상물의 부식이나 손상 없이 제염할 수 있으나 작업자가 대상물에 접근해야 하므로 피폭선량이 크다는 단점이 있다.

다. 고압수/증기 분사 제염(High Pressure Water/Steam Jetting)

이 방법은 고압수/증기(3,000 MPa)를 40~200 L/min의 속도로 제염 대상 물체에 분사시킴으로써 느슨하게 부착된 오염물을 제거하는 방법이다. 특히 제염제, 세제, 계면 활성제 등 각종 화학약품을 첨가함으로써 제염 효과를 증진할 수 있고 원격 조작이 용이하며 노즐을 여러 방향으로 회전시킴으로써 타 제염법으로는 제염하기 어려운 부분까지 쉽게 제염할 수 있는 장점이 있다. 페인트, 기름 등과 함께 오염된 대상물에 대하여 제염계수 50 정도를 얻을 수 있다. 물 대신 수증기를 사용하는 경우는 포화 수증기 혹은 습식 수증기를 사용해야 한다.

라. 분사 연마 제염(Abrasive Jetting)

이 방법은 연마재를 압축공기나 고압수와 함께 분사노즐을 통하여 분사시키는 방법인데 연마재로는 모래, 유리구슬, 금속성 구슬 및 왕겨 등 연한 물질 등이 사용되며, 금속이나 콘크리트 표면 오염물질의 외부 층을 제거하는 데 효과적이다. 건식 분사 연마 제염은 5 MPa 정도의 기압이 주로 사용되며 분사 속도는 약 350 m/sec 가 적당하다. 이 제염 방법은 여러 발전소에서 적용한 경험이 많으며, 200~300의 제염계수를 얻었다. 습식 분사 연마 제염은 500~1,000 MPa의 수압이 필요하며 분사 속도는 역시 350 m/sec 가 적당하다. 연마재는 크기가 연마를 제어하는 변수인데 15~20 mesh 의 연마재를 사용하면 제염 및 연마 속도가 큰 반면 표면 마모가 크고 100 mesh 이하의 작은 연마를 사용하면 연마 속도는 느리나 표면손상은 현저히 감소한다.

마. 진동 연마 제염(Vibratory Finishing)

진동 연마 제염은 진동하는 제염조 내에 연마재와 대상물을 넣고 제염제를 분사시켜 주는 방법인데 기계적 연마 작용과 제염제의 화학작용이 조합되어 효과적인 제염 효과를 얻을 수 있다. 이 방법은 평면, 관, 구멍 및 복잡한 부품의 내부표면 제염이 가능하며 발생하는 폐기물량이 적고 비용이 저렴한 장점이 있다[7].

제 3절. 원전 해체 절단 기술

1. 기계적 절단

가. Shears

Shears는 칼날화 된 절단 도구로써 가위나 작두 같은 개념으로 운영된다. Shear의 날은 내부를 따라 직선 형태 또는 타원이나 원형 형태로 절단할 수 있다. 규격의 범위는 작고 수동적인 것부터 크게 장착된 것까지 다양하다. 동력원은 전기식, 압축공기식 또는 유압식을 들 수 있다. Shear 절단 작업은 작은 Pipe, Conduit 또는 가벼운 금속 계측장치의 절단에 매우 유용하다. 큰 유압식 Shear는 금속 구성품이나 대구경의 Pipe에 적용할 수 있다. Shear 절단 공법은 폐기물 취급을 고려한 여러 종류의 금속 물질로 구성된 구성품의 감용이나, 작은 조립건축물의 해체 목적에 가장 적합하다. 그러나 금속 절단 시 고유의 형태가 파손되고, 제한된 공간에서의 사용이 어렵고, 항상 큰 힘의 반력이 작용한다는 것을 염두에 두어야 한다.

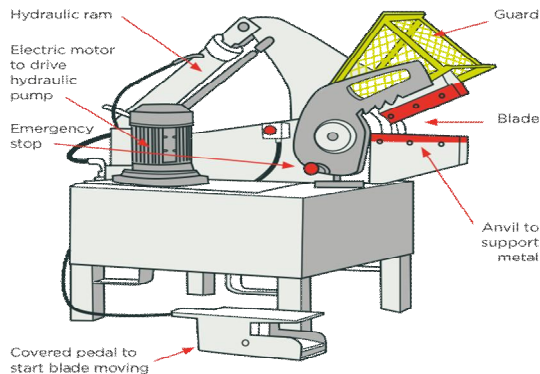


그림 2. Shear cutting

나. Nibbler

Nibbler는 구멍을 내거나 자르는 절단 도구로써 매우 빠른 회전율의 속도로 작동된다. 작은 크기의 금속뿐만 아니라 저탄소강, 알루미늄 또는 스테인리스강의 큰 규모의 금속 대상물도 절단 가능하며 최고 1/4 inch의 저탄소강을 절단할 수 있다. 동력원으로는 Shear와 마찬가지로 전기, 압축공기 및 유압을 사용한다. 원격 조작이 가능하고 수중에서의 절단도 가능하다. 폐기물 처리를 위해 제거된 작은 금속조각들의 수집이 용이하고 먼지 및 공기 입자의 발생에 대한 우려가 없다.

다. Saws

가장 보편화된 절단 도구로써 자연적인 회전, 왕복 및 띠 운동으로 작동된다. 유압, 전기 및 압축공기에 의해 작동되는 것으로 큰 고정식과 수동으로 작동되는 작은 것으로 구분된다. 여러 작업 분야에 매우 유용한 이유로 화재 위해가 있는 불꽃의 발생이 없으며 연기나 가스 같은 방사성 오염 발생이 없으므로 취급이 쉽지만, 먼지 및 작은 부스러기의 발생이 단점으로 지적된다. 장점으로 적은 운영비용과 별도의 훈련이 필요 없고 높은 절단 속도와 주변기기의 손상 없이 작업이 가능한 점과 원격으로 조작이 가능한 점을 들 수 있다. 좁은 공간을 포함한 어려운 작업환경에서도 휴대용 톱으로 작업이 가능하며 작업자들이 작업에 있어 쉽게 친숙해 질 수 있다는 장점 또한 좋게 평가되고 있다. 또한, 부품의 조달이 쉬워 교체 및 수선이 항상 가능하다. 그러나 절단 두께의 제한을 받으며 진동이 유발되며 두꺼운 금속 대상물의 절단 시 날의 수명이 짧은 점과 모든 금속 대상물을 절단할 수는 없다는 것이 단점으로 대두된다.

라. Wheel cutting

Wheel cutting에는 표면에 실리콘 카바이드 또는 알루미늄 산화물의 작은 조각들이 부착되어 있고 동력원으로는 전기, 압축공기 및 유압을 사용한다. 이 Wheel은 강도를 높이기 위해 유리섬유의 매트 형태로 구성되어 있고 금속을 갠내면서 대상물을 절단하는 것이다. 장점으로 빠른 절단 속도와 모든 장비의 용이한 취급 및 적은 운영 경비를 들 수 있다. 단점으로는 지속적인 불꽃의 발생으로 주변의 연소 물질 취급에 부적절하고, 제거된 조각들이 매우 작으므로 오염관리가 어렵다. 또한 오염된 먼지의 확산 방지를 위한 임시 격납 시스템이 요구된다.

마. Diamond wire saw

Diamond wire saw 기술은 다이아몬드 팁을 붙인 와이어를 회전시켜 콘크리트나 대형 철재 구조물을 절단하는 기술이다. 이 기술은 상대적으로 소음이나 진동 발생이 적어 공해 없이 절단할 수 있고 절단 깊이나 대상물의 재질에 제한이 없이 절단이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 고방사능 시설 해체에 적용 시 와이어의 냉각을 위해 사용하는 다량의 물이 2차 폐기물이 되어 이를 처리하는데 큰 비용이 발생한다. 또한 이 장비는 장비 특성상 원격으로 조작할 수 없고 정밀한 절단에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

바. Water-jet cutting

Water-jet cutting 기술은 초고압의 물과 연마재를 작은 구멍의 오리피스에 통과시켜 연마재가 재료에 충격을 가해 마모 및 크랙을 유발해 절단하는 기술이다. 이 기술은 고에너지 밀도 가공법이므로 재료에 대한 변형 및 잔류응력이 없으며, 대기 중 분진의 비산이 적고 작업환경이 양호하다. 그리고 가공물에 노즐이 접촉하지 않고 자유롭게 곡선 및 곡면의 절단이 가능하며 절단 반력이 작아 노즐의 이동이 용이하여 로봇에 의한 원격 제어가 쉽다. 그러나 이 기술 역시 고방사능 시설 해체에 적용 시 다량의 물을 처리해야 하는 단점이 발생한다.

2. 전기적 절단

가. Metal Disintegration Machining (MDM)

MDM은 전극봉을 이용하여 금속을 절단하는 공법으로 일정한 교류 전력의 공급이 필요하며 MDM 진동 헤드와 Water flush 장치가 요구된다. 전극봉은 보통 흑연으로 만들어지고 어떠한 기계적인 형상도 절단할 수가 있으며 전력의 공급과 Flush 장치의 작동으로 대상 금속물의 표면에서 매우 가깝게 진동하게 된다. 이때, 전극봉은 서서히 지정된 방향으로 구멍을 내기 시작하며, 불꽃이 생성되어 대상물로부터 녹여진 작은 조각들을 제거하게 된다. 부스러기, 물의 화학적 요건, 발생 연기의 관리 등이 단점으로 제시되고 있다.

나. Electrical Discharge Machining (EDM)

EDM은 MDM과 비슷한 공법이긴 하나 제한된 파장의 교류 공급이 필요하다. 이 공법은 절단면이 비교적 섬세하고 정확하나 MDM에 비해 절단 속도가 느리고 낮은 전류가 필요하다. 이 공법은 방사화 정도가 확정된 압력용기의 재료 표본을 수집하는 데 사용되었었다.

다. Arc Saw cutting

이 기술은 전기 용융 기술의 연장으로써 톱날이 없는 원형 형태로 절단 대상 금속물에 접촉이 없이 절단되는 공법으로 높은 전류의 전기 불꽃이 대상물과 Blade 사이에 형성이 되면서 절단을 유도하는 것이다. Blade는 연장을 만드는 스틸, 저탄소강 또는 구리 같은 전기 전도성 물질로 만들 수 있다. Blade는 기본적으로 작동을 위해 회전하며 회전속도는 약 300에서 1,800 rpm 사이이다. Blade의 회전은 대상물의 패인 자리에서 Arc에 의해 발생한 용융된 금속의 제거에도 기여한다. Blade는 대기 중에 물에 의한 냉각을 하여 사용되며, 수중에서는 물에 의해 자체 냉각이 되기 때문에 수중작업도 가능하다. 이 공법은 어떠한 전기 전도성 물질의 절단에도 가능하다는 것이 장점이다. 예를 들어 Stainless steel, High alloy steel, Al 및 Cu와 같은 높은 전도성을 가진 물질들은 각각의 물질이 소요하고 있는 강도 및 연성에 따라 빠르고 깨끗하게 절단할 수 있다. 그중 카본 스틸류의 절단이 가장 어려운데 그 이유는 절단 부위에서 생성되는 Slag가 절단 속도를 저해하기 때문이다. Mg, Ti 및 Zn 성분의 물질을 절단할 때는 수소가스가 발생하며 이는 미세한 발화 및 폭발의 원인이 된다. Arc saw 절단 기술의 단점은 Blade의 직경에 따라 공간이 필요하며 대기 중에서 거친 절단 작업 시 상당의 소음과 연기가 발생된다. 또 수중에서의 작업 시 물을 혼탁하게 하여 작업광경을 주시하기가 어렵다.

라. Electric arc Gouging

이 공법은 대상 금속 표면으로부터 교류의 전력으로부터 제공된 Touching에 의해 발생한 파편 등을 물이나 가스와 함께 전극봉을 사용하여 불어 내면서 절단하는 방법이다. 불꽃에서부터의 화재 예방 및 발생하는 연기의 정화를 위해 사전에 적절한 시설의 설치가 요구된다.

3. 열적 절단

가. Plasma arc 절단

Plasma arc 절단 기술은 텅스텐 전극봉과 전도성을 띤 절단 대상물 사이에 직류 Arc가 발생하는 것을 배경으로 개발된 기술로써 가스 또는 혼합가스가 토치 노즐 안의 작은 출구를 통해 흐르면서 불꽃이 절단 대상물에 전달되는 것이다. 양이온과 자유전자의 구성으로 이루어진 Plasma는 거의 20,000 °F의 온도를 유지하면서 발생한다. 높은 전압과 Arc와 함께 노즐 Torch로부터 생성된 Plasma arc 시스템에는 절단을 위해서 최고 1,000 Amps의 전류를 유지하기 위한 높은 직류의 공급이 요구되어진다. 자동 Plasma arc 장치를 위해서는 Torch 위치 고정 및 이동 장치, 가스 토출 장치, 가스/물 차폐장치, Plasma 가스 공급장치, 고주파 공급장치, Plasma arc 공급장치 및 보조 가스 공급과 Arc 및 기계적인 이동 제어 장치가 필요하다. 일부 수중에서는 대상물의 두께에 제한받기도 하지만 이 공법은 모든 금속 절단 대상물의 절단을 대기 중 또는 수중에서도 가능하게 한다. 가끔 오염된 구성품의 절단을 위해서는 부분적인 임시 격납 관리가 필요하기도 하다. 이러한 경우, 내부에서의 수작업자를 위한 방독면 착용과 HEPA 필터가 첨부된 환기시스템이 필요하게 된다.

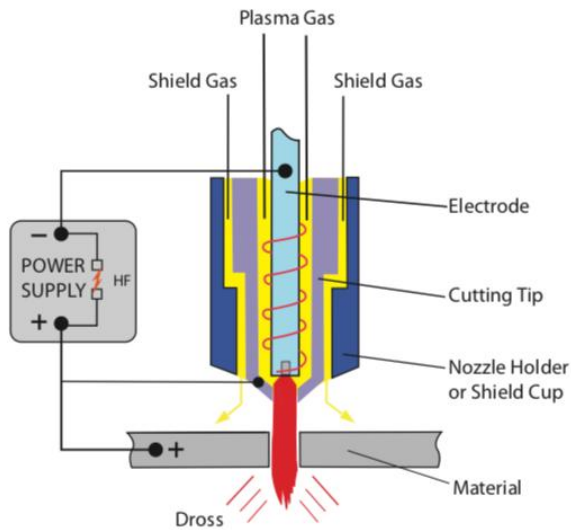


그림 3. Plasma arc cutting[8]

나. Oxy-Fuel Burning

Oxy-Fuel burning은 간혹 Oxygen Acetylene 절단이라고도 불리며, 토치의 작은 노즐을 통해 공급되는 산소와 기타 연료가스의 혼합으로 이루어진 시스템을 말하며 연료가스는 Acetylene, Propane, Gasoline 또는 Hydrogen을 들 수 있다. 일반적으로 수동형태의 공정 또는 자동화된 고정식과 이동식으로 작업도 가능하다. 이 기술은 산소 연료 Burning torch를 사용하여 대상 금속의 급속 산화 발열을 이용하는 것으로 이때 해당하는 일반적인 금속으로는 Carbon steel이나 Cast iron 같은 Fe^{2+} 금속이며, Al이나 Stainless steel 같은 Fe^{2+} 이 아니거나 Fe^{2+} 이면서 다른 성분이 포함된 금속의 절단에는 불가능하다. 이 공법은 대기 중과 수중에서 모두 가능하나, 수중작업 경우는 많은 열의 손실로 그 효과를 기대하기가 어렵다. 해체 활동에 있어서 이 공법은 일반적으로 빔, 기둥 또는 보 같은 Carbon steel로 구성된 구조물의 해체에 기본적으로 적용된다. 그 이유로 이 기술은 가장 널리 알려졌고 장비의 취급에 숙련된 작업자를 어디에서든 쉽게 구할 수가 있기 때문이고 더 나아가 장비의 구매가 저렴하고 취급이 쉽고 빠르기 때문이다.

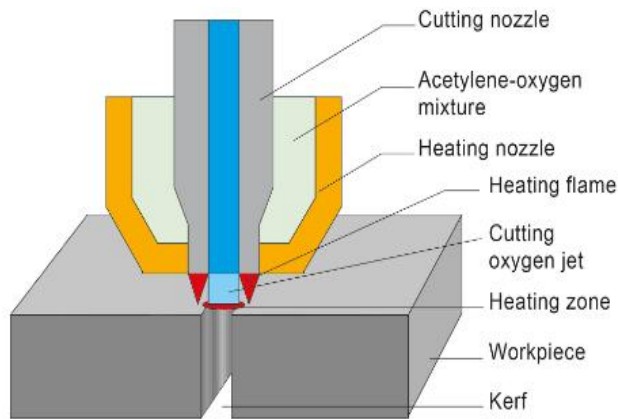


그림 4. Oxy-fuel burning[9]

다. 레이저 절단

레이저 절단 기술은 원격에 의한 자동화가 용이하고 절단 시 절단 속도와 절단 품질이 좋아 최근 산업체에서 첨단 절단 기술로 주목받고 있다. 레이저 절단 기술은 절단 폭이 매우 작으므로 고방사능 시설 해체에 적용 시 2차 폐기물 발생을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 기술은 원자력시설 절단을 위해서는 약 10 kW 이상의 Nd-YGA laser 또는 30 kW 이상의 일산화탄소 레이저가 필요하나 이를 개발

하는데 막대한 비용과 시간이 소요되므로 이 기술을 원자력시설 해체에 적용하기 위해서는 고출력 레이저가 상용화되는 것이 선행되어야 한다. 또한 레이저 절단 시 강한 빛과 열이 동반되므로 화재에 민감한 재료는 절단에 적합하지 않으며 반사율이 높은 재료는 절단할 수 없다는 단점이 있다[4].

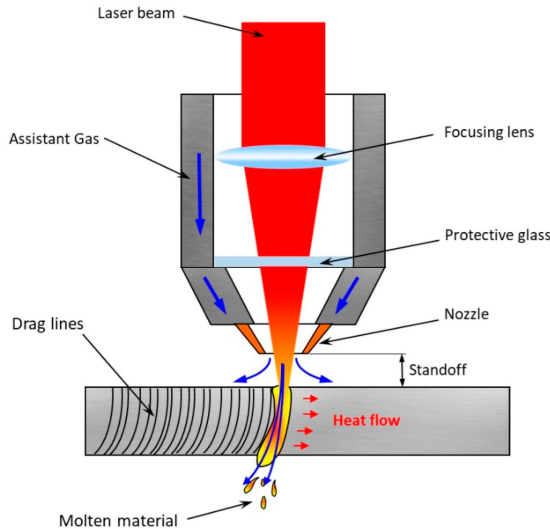


그림 5. Laser cutting[10]

제 4절. 피폭선량 평가 방법론

원전의 방사선방호 설계 목적은 원전의 운전으로 인한 작업자 집단선량 및 일반 대중 선량을 사회적, 경제적 측면을 고려하여 합리적으로 가능한 한 낮게 유지하는 것이다. 특히 원전의 작업자 선량을 ALARA로 유지하기 위해서는 설계단계에서부터 ALARA 개념을 적용하는 것이 중요하며, ALARA 설계의 적절성은 작업자 선량 평가를 통하여 입증한다.

작업자의 피폭은 크게 외부피폭과 내부피폭으로 나뉜다. 외부피폭이란 외부에 있는 방사선원에서 방출된 방사선의 에너지를 인체가 흡수하는 경우이며, 내부피폭이란 방사성핵종을 섭취 또는 흡입함으로써 인체 내에 오염된 조직이나 장기에서 방출되는 방사선 에너지를 그 사람의 조직이 흡수하는 것이다.

1. 외부피폭

가. 선량 평가 알고리즘

(1) Point Kernel Integration

Point kernel integration은 선원의 형태가 원판형 선원 등과 같은 체적 선원인 상태에서 평가하는 방법이다. 점 선원이 아니라 상당한 크기를 갖는 선형 선원이나 면적 선원 또는 체적 선원에 의한 비충돌선속밀도(Uncollimated flux density)는 선원을 작게 나누어 각 분할 선원을 점 선원으로 보아 계산하여 전체에 대해 합산하는 기법으로 산출하는 방법이다[11].

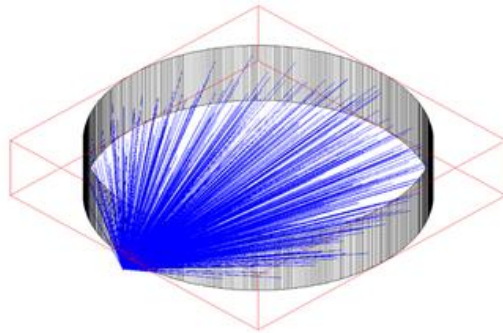


그림 6. Point Kernel Integration

Point kernel integration은 차폐물질의 원자와 충돌하지 않은 Photons에 의한 에너지전달을 나타내며, 이는 산란된 Photons에 의한 효과를 보정하기 위한 Build-up factor와 결합된다. 분포 선원(Distributed source)의 경우, Point kernel integration은 선원 체적(Source volume)에 대하여 적분 되는데 즉, 단위 체적 및 단위 초당 에너지가 E인 Photons를 S개 방출하는 등방 선원(Isotropic Source)으로부터의 감마선 선량률은 아래와 같이 계산된다.

$$D(\vec{r}) = K \int_V \frac{S(\vec{r}') B(\mu|\vec{r}-\vec{r}'|, E) \exp(-\mu|\vec{r}-\vec{r}'|)}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|^2} dV \quad (1)$$

- \vec{r} : 감마선 선량률이 계산되는 지점

- \bar{r}' : 선원 위치
- V : 선원 체적부
- $|\bar{r}-\bar{r}'|$: 감마 선량이 계산되는 지점과 선원과의 거리
- $B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E)$: Build-up factor
- K : 변환 인자(Flux to Dose Rate Conversion Factor)

Build-up factor는 감마 에너지 및 선원에서 계산지점까지의 평균자유행정수 (Number of mean free paths)의 함수이며, 원자번호가 높은 차폐물질의 경우에는 아래와 같은 다항식으로 계산된다.

$$B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^4 \sum_{i=0}^3 C_{ij}(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)^i (E)^j \quad (2)$$

또한, 원자번호가 낮은 차폐물질의 경우에는 다음과 같은 식이 적용된다[12].

$$B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^4 \sum_{i=0}^3 C_{ij}(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)^i \left(\frac{1}{E}\right)^j \quad (3)$$

(2) Point Source Integration

Point source integration은 일반적으로 감마선을 방출하는 점 선원으로부터 일정 거리에서 조사선량을 쉽게 계산하는 방법이다. 방사선의 강도는 선원으로부터의 거리에 역자승에 비례한다는 역자승 법칙(Inverse square law)에 따라 계산되며, 실제의 방사선원에서 점 선원이란 존재하지 않지만, 계산의 편의상 사용하는 방법으로 예상 피폭선량을 보수적으로 평가하는 방법이다[11].

점 선원에 대한 피폭선량률은 다음 식에 따라 계산된다.

$$D_j = \sum_i K_j \frac{S_{ij}}{4\pi R_i^2} \exp\left(-\sum_k (\mu_j t)_k\right) B_{jk} \quad (4)$$

- j : Energy Group Index
- i : Source Point Index
- k : Region Index
- K : Flux to Dose Conversion Factor (Rads/Unit Flux)
- S : Volume Weighted Gamma-Ray Point Source Strength (Photons/sec)
- R : Distance from Source Point to Detector (cm)
- B : Dose Build-up Factor
- μ : Total Attenuation Coefficient (cm^{-1})
- t : Zone Penetration Distance (cm)

나. 평가 Tool

(1) VISIPLAN 3D ALARA Planning Tool (VISIPLAN)

작업에 대한 ALARA 적용과 원자력시설 환경에서 수행되는 작업은 일반적으로 복잡하고 평가 계획 수립과 작업분석에 있어서 어려운 일이다. VISIPLAN은 3차원적 구조와 물질 조성 및 방사선학적 정보를 기초로 시설작업의 계획에 있어서 새로운 계산법으로 1995년 벨기에의 SCK·CEN에 의해 개발되었다.

VISIPLAN은 크게 모델링 구축단계, 기본 분석 단계, 세부적 계획 단계, 보완 단계로 총 4단계로 구성되어 방법론을 표현할 수 있다.

먼저 모델링 구축단계는 기술적인 구조단계, 측량 기술, Laser scanning으로 시설의 구조 파악, 물질에 대한 정보수집으로 지역에 대한 기술적 데이터, 물질에 대한 정보가 기반이 되고, 방사선학적 정보들의 종합적인 자료 수집으로 구축한다.

- Geometrical Information

기하학적 모델은 Laser scanner 혹은 현장 측정으로 변환된 기술적 자료와 설계 도면에 의해서 만들어진다. 입력할 수 있는 정보는 Box, Cylinder, Tube, Square 등이 있다.

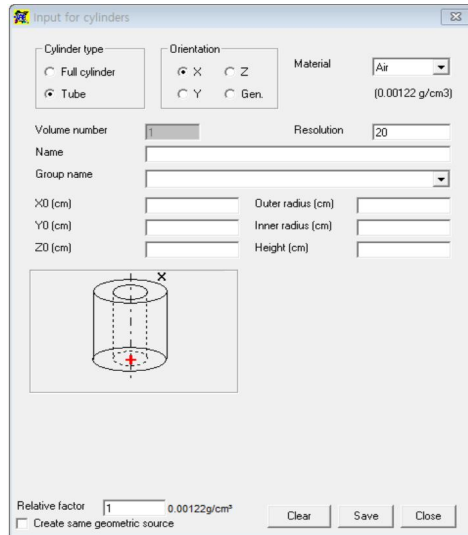


그림 7. Geometry Interface (Cylinder)

- Material Information

물질 정보는 기술 도면, 기술보고서, 해당 지역에 대한 전문 자료로부터 얻을 수 있다. 입력 가능한 물질은 Concrete, Iron, Water, Zirconium 등이 있다.

- Radiological Information

방사선학적 정보는 선량 측정 또는 해당 시설에서 사용된 선원에 대한 정보를 통해서 얻을 수 있다. 방사선의 측정은 VISIRAD를 이용해서 해당 시설에 대한 정보와 분석을 통해서 수행할 수 있다. VISIRAD 선량 프로그램은 VISIPLAN에서 적용이 가능하도록 쉬운 인터페이스를 갖추고 있으며, 선원 예측 기술과 함께 방사선 세기 정도를 결정할 수 있게 되어 있다. 선원의 형태는 Single isotopes, Mixed isotope sets, Photons spectrum at standard energies, Point 등으로 지정할 수 있다.

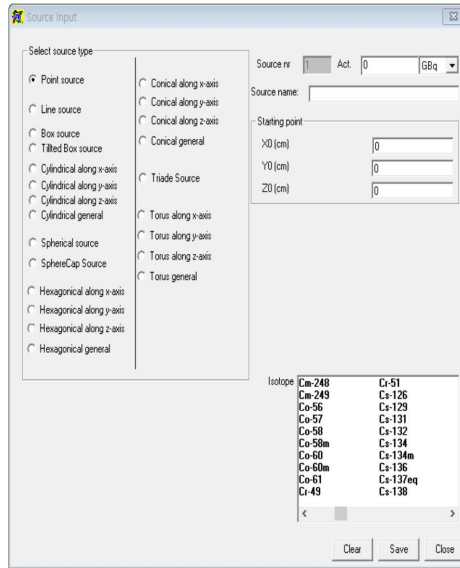


그림 8. Source Input Interface

기본 분석 단계는 첫 번째 평가에 기본이 되는 사항인 선량을 계산하며, 또한 차폐에 대해 계산을 하는 단계이다. 이 단계 내 각각의 방사선 지역 환경에 대한 분포도들은 서로 다른 작업 위치에서 생성된다. 문제에 대한 첫 번째 분석은 이러한 분포도에 의해서 수행된다. 서로 다른 차폐 구조들은 모델링 내에서 입력되며, 그 효율성에 대해 분석을 한다. VISIPLAN에서의 기하학적 요소는 수행구조에 위치되어 있다. 단계는 고정된 환경의 기하학, 물질 조성, 선원 등에 의해 정의된다. 기본적인 기하학적 요소의 변경은 순차적 단계에 저장된다.

세부적 계획 단계에서는 위치, 작업설정, 작업기간, 작업기간의 불확실성 등 작업자의 궤적을 정의한다. 그에 따른 결과는 누적선량과 시간, 작업 위치에서의 선량, 작업별 선량과 선율, 작업 선량에서 다른 선원으로부터의 기여, 불확정적인 관점에서 시간과 최소 및 최대의 선량, 선원 민감도분석 설정의 경향이다.

마지막 보완단계에서는 결과에 대한 그래프와 각 단계의 순차적 배열이 Detailed planning 단계에서 수립되며 이를 통해서 작업이 진행되는 동안 선량의 계산을 통해 추적단계가 수행된다. 여기서 선량에 대한 예측과 얻어진 결과값의 비교로서 얻을 수 있다.

VISIPLAN의 대표적인 적용사례로는 Bohunice A1 (Slovakia)의 해체, BR-2 유지보수 및 BR-3 해체, Hot Cell (SCK·CEN) 해체 등이며, Conference를 통해 프로그램을

발전시키고 있다[13].

(2) Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP)

Los Alamos National Laboratory가 개발 및 유지하고 있는 MCNP는 Monte Carlo 기법에 따른 중성자 및 감마선의 전송을 분석하기 위해 국제적으로 공인된 코드이다. 이 코드는 중성자, 감마선 및 결합 전송, 즉 중성자 상호작용에 따른 2차 감마선의 전송을 다룬다. 또한 MCNP는 감마선 상호작용에서 생성된 1차 선원 전자와 2차 전자의 전송을 모두 처리할 수 있다.

또한, MCNP는 ENDF (Evaluated Nuclear Data Files)와 ENDL (Evaluated Nuclear Data Library), ACTL (Activation Library)에서 평가된 자료들을 바탕으로 사용하고 있으며, NJOY와 같은 코드에 의해 변환시켜 사용한다. 핵데이터는 중성자의 상호작용, 광자의 상호작용, 방사화, 열입자 산란 등에 대한 자료가 포함되어 있으며 MCNP에 이용 가능한 각각의 데이터 또는 XSDIR 이라는 Directory file에 있다.

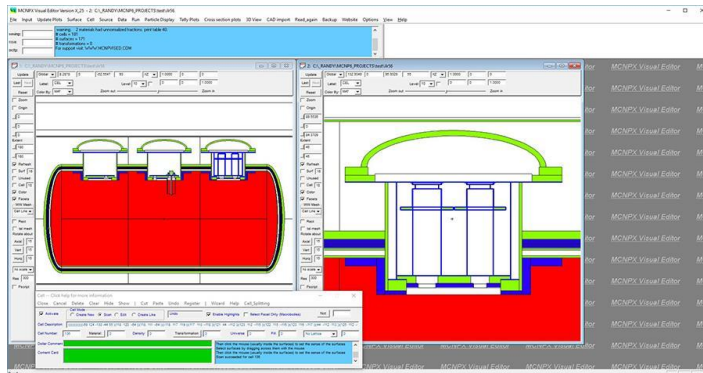


그림 9. MCNP Cell Creation & Visualization[14]

- 선원의 표현

MCNP의 일반화된 사용자가 다양한 선원 조건(Source condition)을 명시할 수 있으며, 독립적 확률분포가 에너지, 시간, 위치, 방향, 출발 Cell 또는 Surface와 같은 매개변수로 명시될 수 있다. 또한 선원의 기하학적 크기에 대한 정보도 명시가 가능하다.

선원 변수에 대한 입력 확률분포와 더불어 내장된 함수가 이용 가능하며 내장함수로 Watt, Maxwellian, Gaussian 스펙트럼과 같은 핵분열과 핵융합 스펙트럼에 대한

다양한 해석적 함수가 포함되어 있다.

- Tally와 출력

사용자는 MCNP로 입자 흐름(Particle current)과 입자 선속(Particle flux)에 관련된 다양한 Tally를 만들 수 있다. Current는 문제의 어떤 표면들의 Set, 표면 부분, 또는 표면들의 합을 가로지르는 방향의 함수로 Tally 될 수 있다. Flux도 마찬가지로 어떤 표면들의 Set, 표면 부분, 표면들의 합을 건너지르는 Cell 내에서 Cell 부분에서, 또는 Cell의 합에 의해 구할 수 있다. 예를 들어 FM card를 사용하여 아래와 같은 양은 Tally 될 수 있다.

$$C \int \psi(E)R(E)dE \quad (5)$$

여기서 $\psi(E)$ 는 에너지 의존 플루언스, $R(E)$ 는 단면적 Library에 있는 양들의 곱이나 합 또는 사용자에게 의해 제공된 응답함수이다. 모든 Tally는 사용자에게 의해 명시된 시간과 에너지의 함수이며 출발하는 입자에 대하여 규격화 되어 있다[13].

2. 내부피폭

내부피폭이란 방사성핵종이 흡입, 섭취, 피부 침투 등의 경로를 통해 체내로 들어오고 생리적 흐름에 따라 여러 조직과 장기에 배치되어 붕괴하면서 방사선을 낼 때, 이 방사선에 의해 방사성핵종 섭취자 내 조직이나 장기가 피폭하는 것을 말한다. 그러나 일정량 방사능을 섭취했을 때 이후 시점별로 각 조직에 얼마의 방사능이 있는지 직접 측정하기는 현실적으로 불가능하다. 더욱이 예를 들어 간에 있는 방사성핵종이 붕괴할 때 방출된 방사선에 의해 위가 받는 선량을 직접 측정하는 현실적 방법도 없다. 따라서 내부피폭선량은 실측 가능한 측정량과 기준안을 바탕으로 한 모델에 따라 해석하고 계산하는 방법에 의존한다[15].

가. 선량 평가 알고리즘

내부피폭을 평가하기 위해서는 먼저 섭취되는 방사성핵종의 원소의 종류, 물리적

상태 및 화학적 상태에 따라 이들이 체내에서 어떻게 분포하는가에 대한 정보가 필요하다. 이러한 대사 정보는 방사성핵종을 이용한 동물실험과 극히 제한된 인체 실험 자료와 방사성이 아닌 동위원소를 이용한 인체실험 등을 통해 평가된다. 그런데 물질의 체내 거동은 그 물질의 물리화학적 성질뿐만 아니라 이를 섭취하는 사람의 신체적 특성, 섭취하는 경로 (흡입, 경구섭취, 직접섭취)에 따라서도 달라진다. 또, 동일한 수준으로 오염된 공기나 물, 음식물을 흡입 또는 섭취하는 상황에서도 개인에 따라 시간당 공기 호흡량, 물이나 음식물 섭취량이 다르므로 체내로 섭취되는 방사능이 달라진다. 다시 말해서 특정 개인에 대해 섭취된 핵종이 어떻게 거동하는가를 실시간으로 파악하기는 현실적으로 어렵다[15].

따라서, 작업종사자의 체내 침입 경로 및 형태, 선원항 정보 등을 토대로 내부피폭평가를 진행하는 것이 일반적이다.

내부피폭 정도의 지표가 되는 예탁유효선량 E_{50} 은 식 6과 같이 방사성핵종 섭취량 I 와 사람의 신체조건과 생물학적 거동에 따라 산출된 예탁유효선량 환산계수 e_{50} (Sv/Bq)를 곱하여 평가할 수 있다.

$$E_{50} = I \times e_{50} \quad (6)$$

위 식에서 방사성핵종 섭취량은 식 7 또는 식 8과 같이 섭취 후 경과시간 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.

$$I = \frac{M_T(t)}{m_T(t)} \quad (7)$$

$$I = \frac{M_X(t)}{m_X(t)} \quad (8)$$

체내 잔류분율 및 일일배설분율은 내부피폭선량 평가 인자인 측정 대상, 화합물 형태, 흡수 형태, 흡수율, 입자크기, 섭취 후 경과시간 등에 따라 달라진다. 직접,

간접적으로 측정된 값이 동일하더라도 작업환경 및 인체 생물학적 거동에 따라 방사성핵종 섭취량은 다르게 평가된다. 또한 화합물의 형태, 흡수 형태, 흡수율, 입자 크기에 따라 섭취 당 예탁유효선량 환산계수의 차이가 있어 섭취량이 같더라도 차이가 발생한다.

예탁유효선량은 여러 내부피폭선량 평가인자에 따라 차이가 발생되며 각각의 인자에 의한 영향은 식 9와 식 10에 의하여 평가할 수 있다.

$$P^{p,a,f,d} = \frac{M_B(t)}{m_B^{p,a,f,d}} \quad (9)$$

$$E^{p,a,f,d} = I^{p,a,f,d} \times e_{50}^{p,a,f,d} \quad (10)$$

여기서 $M_B(t)$ 는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t 에서 Bioassay 측정 대상 B 에서의 방사능 측정값이고, p 는 섭취 경로, a 는 폐에서의 흡수 형태, f 는 소화흡수율, d 는 입자크기, 그리고 $M_B^{p,a,f,d}(t)$ 는 선량평가인자 p,a,f,d 를 갖는 방사성핵종 섭취 후 경과시간 t 에서 측정 대상 B 에서의 체내잔류분율 또는 일일배설분율을 나타내고, $I^{p,a,f,d}$ 는 선량평가인자를 갖는 방사성핵종 섭취량을 뜻한다. 또한, $e_{50}^{p,a,f,d}$ 는 선량평가인자를 갖는 방사성핵종의 예탁유효선량 환산계수, 즉 단위 방사능 섭취 당 50년간 받는 유효선량이고, $E_{50}^{p,a,f,d}$ 는 방사성핵종 섭취량 $I^{p,a,f,d}$ 에 의해 50년간 받는 예탁유효선량이다[16].

나. 평가 Tool

(1) IMBA (Integrated Modules for Bioassay Analysis)

2023년 영국 HPA와 ACJ & Associates Inc.가 공동으로 개발한 내부피폭평가 S/W로서, ICRP 60을 기반으로 호흡기 모델(ICRP 66의 HRTM-Human Respiratory Tract Model), 생체 동역학적 모델(ICRP 30, 67, 68, 69, 71)으로 구성되어 있다.

IMBA는 생물학적 측정량으로부터 최적의 섭취량을 평가하고, 이를 통하여 피폭 경로, 피폭 형태(급성/만성), 평가 기간, 핵종에 대한 정보(핵종 및 섭취량), Bio kinetic 모델 인자 등에 따른 장기별 등가선량과 예탁유효선량을 도출할 수 있다.

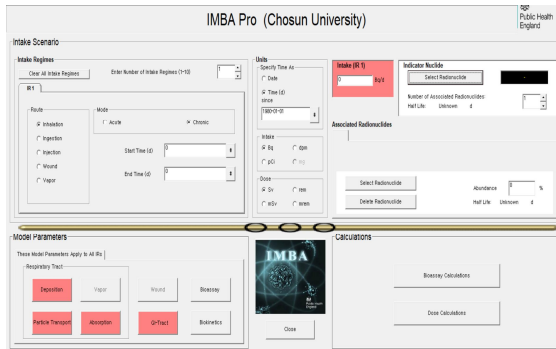


그림 10. IMBA main screen

(2) TAURUS

영국의 PHE에서는 최신 ICRP 권고를 반영하여 작업종사자의 직업상 피폭에 대한 섭취량 및 내부피폭선량을 산정하기 위해 기존의 ICRP 60 기반인 IMBA의 최신 버전으로서 TAURUS를 개발하였다.

TAURUS는 ICRP 103을 기반으로 OIR (Occupational Intake of Radionuclides series of publications)에서의 선량 환산계수와 Bioassay가 계산에 사용되며, 호흡기 모델 (ICRP 130), 소화기 모델(ICRP 100)을 적용하고 있다. 또한 가장 최근의 ICRP 권고로부터 생물 동역학적 모델, 선량 측정 모델 및 방사성 붕괴 데이터를 구현한다. IMBA와 마찬가지로 생체 분석 데이터를 통하여 체내 섭취량을 추정할 수 있으며, 여러 시점에서의 장기에 대한 예탁 등가선량 및 유효선량을 평가할 수 있다[16].

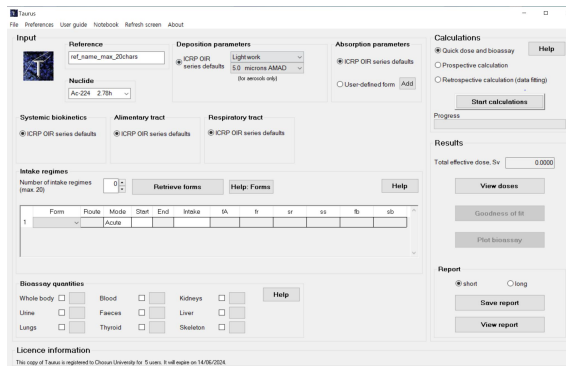


그림 11. TAURUS main screen

다. 내부피폭 평가에 대한 고려사항

외부피폭과 비교해 섭취, 호흡 등의 경로를 통해 내부피폭이 일어날 경우, 피폭 선량 도출은 현실적으로 제한사항이 존재한다. 즉, 방사성 물질로 노출된 환경에서 개인선량계를 착용함으로써 피폭의 정도를 가시적으로 얻을 수 있는 외부피폭과 달리 내부피폭은 호흡기관 및 조직 장기 등의 선량을 직접 측정할 수 없기 때문이다. 따라서 내부피폭 선량평가를 위해서는 선행적으로 섭취량을 계산하고 섭취량에 따른 예탁유효선량을 평가한다. 섭취량 평가는 크게 체내 잔류하고 있는 방사능을 측정하는 직접 생체검정법과 소변 및 대변과 같은 체외 배출물 측정을 통한 간접 생체검정법이 있다.

절단 작업 시 공기 중으로 확산되는 방사성 에어로졸의 호흡을 통한 경로로 내부피폭 발생 우려가 있는 경우, 해당 구역에 포집기 설치를 통해 방사성 물질의 농도 및 입자크기를 분석하는 방법을 공기 포집이라 한다. 포집된 방사성 에어로졸은 AMAD (Activity Median Aerodynamic Diameter)로의 변환, 작업자의 호흡률, 방사성 에어로졸 내 방사성핵종의 농도, 작업시간, 흡수 형태 등을 고려하여 섭취량을 계산하고 내부피폭의 정도를 평가한다[16].

특히, 방사성 에어로졸 내 방사성핵종의 농도와 AMAD는 절단 작업 시 대상 구조물의 재질, 특성에 영향을 받고, 적용되는 절단 기술에 따라서도 발생형태와 그 분포가 달라지는 양상을 보인다. 이처럼 절단 작업 시 내부피폭 평가를 고려하기 위해서는 다양한 재질과 절단 기술에 따른 방사성 에어로졸의 실험적인 데이터가 요구되고, 이에 대한 데이터를 지속적으로 축적 및 보완하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 상기 나열한 사유로 인해 내부피폭을 고려하지는 않았지만, 신뢰도 있는 작업종사자 선량평가를 위해 외부피폭과 내부피폭을 모두 고려한 연구를 수행하여 이를 보완해 나갈 예정이다.

제 3장. 평가 인자 및 대상 선정

제 1절. 대표 기기 선정

1. Pressurizer

가압기를 포함하고 있는 원자로 냉각재 계통은 원전의 핵심 계통으로 핵분열 반응이 일어나는 원자로와 원자로에서 발생한 열을 전달해 주는 역할을 한다. 이 중 가압기는 원자로 냉각재가 원자로에서 열을 전달받아 증기발생기를 통해 2차 계통으로 열에너지를 전달하는 역할을 하는 과정에서 높은 온도의 냉각재가 비등하는 것을 방지하기 위해 가압의 목적을 가진 구조물이다.

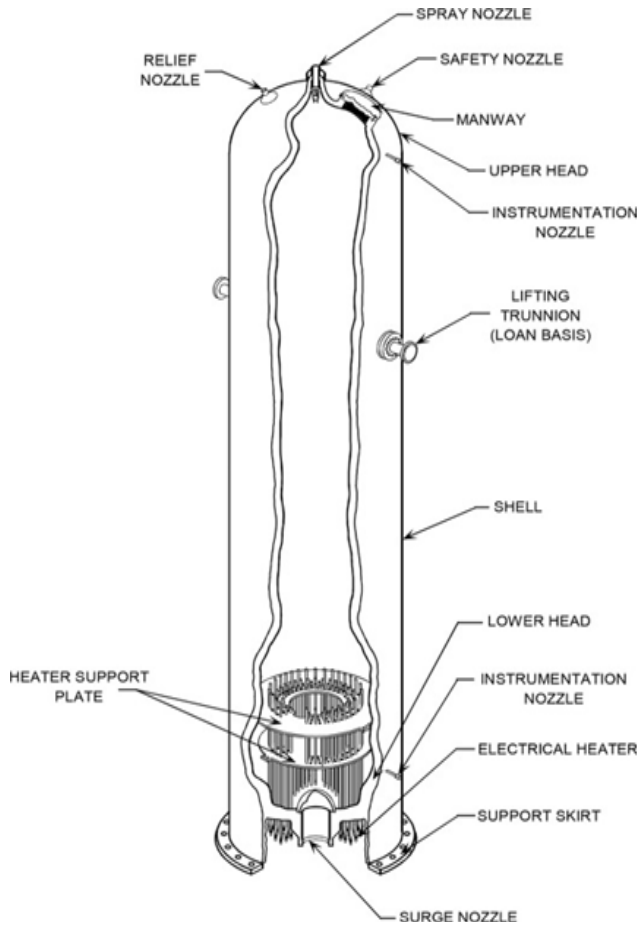


그림 12. 가압기[17]

이상적인 원전의 경우 핵연료가 장전되어 있는 노심을 포함한 원자로압력용기만 방사화가 되지만, 실제로는 장비의 노후화와 인적오류 등에 의해 방사화된 부식생성물(CRUD)들이 계통 내에 침투하여 방사화를 유발한다. 가압기 역시, 직접적인 방사화보다는 일차계통 내부에서 발생된 CRUD에 의한 방사화가 주원인이다. 특히, 시설 내 CRUD의 생성 및 제거에 대한 메커니즘이 상당히 복잡하여 CRUD의 거동 특성을 해석하는데 한계가 존재하기 때문에, 그 연구가 한정적이다[18].

이처럼 가압기는 증기발생기 및 원자로격납용기 등과 같은 일차계통 내 핵심 기기들과 달리 해체 시 절단 작업종사자의 피폭관리를 위한 사전연구가 미흡하기 때문에, 가압기 주변으로 형성되는 선량 분포는 물론, 방사화 재고량에 대한 자료조차 확보하기가 힘든 실정이다.

이러한 상황에서 실제 해체 시 상업용 원전의 해체 경험이 없는 우리나라의 경우, 예측하지 못한 작업종사자의 과피폭 및 전체적인 해체 비용 증가로 이어질 가능성이 존재한다. 따라서, 적용가능한 절단 공법에 대한 고찰과 폐기물 발생량 추이 분석을 통한 해체 및 ALARA에 입각한 절단 계획 수립을 위해 본 연구에서는 금속 재질의 대형구조물 중 가압기를 선정하였다.

2. 방사화 콘크리트 (Bio-shield)

2015년 제 5차 원자력 추진협의회(AEPC)에서 확정된 원자력 해체산업의 국가정책 방향에 따르면 해체폐기물 발생량은 단위당 200 L Drum 기준 14,500 EA로 설정되었다. 이는 호기당 80,000 EA로 예상되는 초기 해체폐기물 발생량의 18.1%에 해당한다. 따라서 목표 달성을 위해서는 능동적이고 효율적인 체적 감소 노력이 필요하다. 해체 시 발생하는 방사성 폐기물은 원전의 운전 이력, 해체 전략, 방사성 폐기물 규제, 영구정지 후 냉각기간 등 다양한 요인에 따라 달라진다. 따라서 사례 연구와 규제 분석을 통한 적절한 해체 전략을 수립하면 폐기물 발생을 크게 줄일 수 있다.

콘크리트 폐기물은 전체 해체폐기물의 50% 이상을 차지한다. 콘크리트 부피 감소와 재활용에 관한 많은 연구가 국내에서 발표되었지만, 첫 원전 해체 프로젝트를 준비하기 위해 방사성 콘크리트 구조물에 대한 구체적인 해체 및 처분 절차를 수

립하는 것이 중요하다.

방사성 콘크리트는 오염 콘크리트와 방사화된 콘크리트로 나눌 수 있다. 오염 콘크리트는 제염기술을 적용하여 크게 줄일 수 있지만, 깊게 방사화된 콘크리트는 제염으로 완벽히 제거하기가 어렵기 때문에 방사성 폐기물 처분을 최소화하기 위해서는 방사화된 콘크리트의 효율적인 처리 전략이 필수적이다.

Bio-shield는 생체차폐체로 사용된 콘크리트가 원자력시설 운전 과정에서 생성되는 중성자에 조사되어 방사화됨으로써 발생한다. 일반적으로 중성자가 조사되는 지역으로부터 깊이에 따라 방사능 분포가 지수함수적으로 감소하게 되고, 주요 대표 핵종은 Eu-152로 일부 문헌에서는 방사화 분포를 살펴보았을 때 Co-60과 함께 전체 방사능의 대부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다. Maine Yankee 원전에서 발생한 Bio-shield 역시 전체 방사능의 27%가 Co-60, 65%가 Eu-152인 것으로 나타났고, 방사능은 콘크리트의 약 8 cm 깊이까지는 거의 균질하게 분포하는 것으로 나타났다. 그 밖의 콘크리트 방사화에 의한 핵종으로 Eu-154, Cs-134, Cs-137, Fe-55 등이 생성되는 것으로 알려져 있는데, 이들 핵종의 종류는 콘크리트 구성성분 및 그 함량에 좌우되고 방사능의 세기는 방사화 정도에 따라 큰 차이를 보이게 된다[19].

본 연구에서는 가압기와 마찬가지로 적용 가능한 절단 공법에 대한 고찰과 폐기물 발생량 추이 분석을 통한 해체 및 ALARA에 입각한 절단 계획 수립을 위해 콘크리트 대형구조물로서 Bio-shield를 선정하였다.

제 2절. 평가 입력 인자

본 연구에서는 평가에 활용할 수 있는 다양한 S/W 중 신뢰도 측면에 있어서 BR-3, BR-2 해체에 직접적인 적용사례가 있는 VISIPLAN S/W를 평가 코드로써 활용하였다.

1. Geometrical Model

대형구조물 주변에서의 작업자 위치 및 방사능 농도를 입력하기 위해서는 사전 작업으로써 모델링을 수행해야 한다. 모델링을 수행하는 데 있어 필수적으로 요구되는 정보는 해당 기기의 모델, 재질 및 전체적인 제원이 요구된다. 보수적으로는

기기 내부 구조물과 외부의 Pipe 등 세부적인 형상을 구현해야 하지만, 본 연구에서는 열 해석 및 설계 연구가 아닌 구조물 외에서의 작업종사자 피폭선량 평가를 최우선 목적으로 두고 있으므로, 내부 및 외부의 세부 구조물에 대해서는 구현할 필요성은 없다고 판단하여 단순화된 Geometry로 구현하였다.

가. Pressurizer

국내 원전 모델에 대한 가압기 정보는 현실적으로 수집하기 힘들기 때문에, 본 연구에서는 Geometry로 구현하기 위해 Westinghouse의 AP-1000 가압기 모델을 참조하였다. AP-1000 가압기 재원은 타 가압경수로의 가압기 재원과는 다소 차이가 존재하지만, 가압기는 같은 가압경수로라 하더라도 그 형상이 일정하지 않기 때문에 평가 결과에 영향을 주는 유의미한 차이는 없는 것으로 판단하여 평가에서 고려하지 않았다.

또한, 선량평가를 위한 모델링은 VISIPLAN에서 수행하였으며, 절단 형상 및 Drum 충진율 분석을 위한 모델링은 Fusion 360에서 진행하였다.

Westinghouse의 AP-1000 가압기 모델에 대한 재원은 아래 표 1과 그림 13에 나타내었으며, VISIPLAN으로 구현한 모델링 결과는 그림 14와 같다[20].

표 1. Specifications of Pressurizer

Parameter		Value
Total Height		14.4 m
Cylindrical Body part	Outer radius	1.41 m
	Inner radius	1.27 m
Material (Density)	Carbon Steel	7.87 g/cm ²

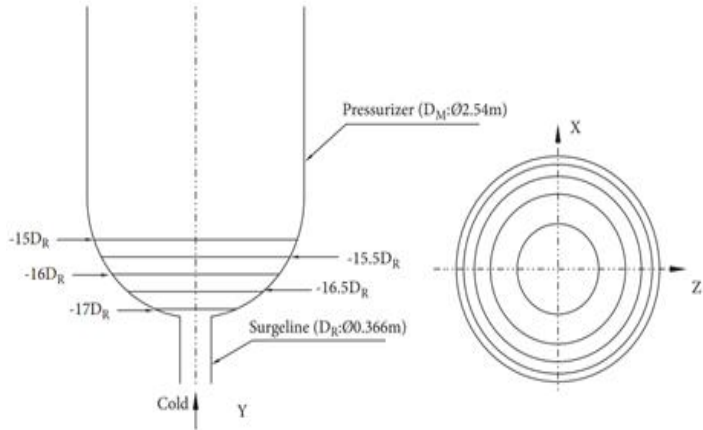


그림 13. Specification of Pressurizer head

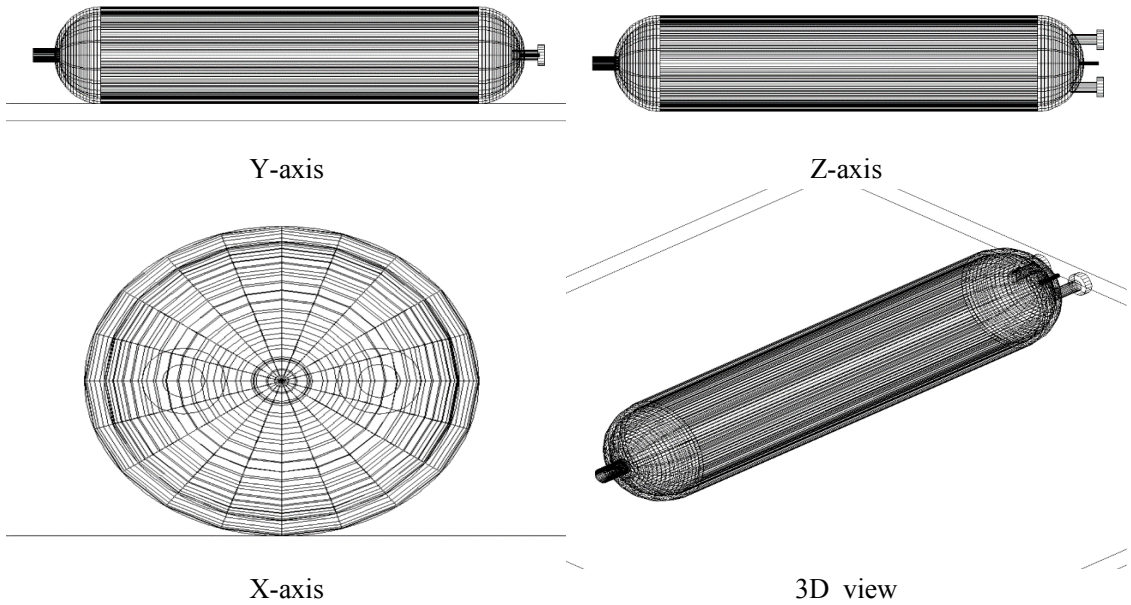


그림 14. Pressurizer implemented through VISIPLAN

나. Bio-shield

Bio-shield의 경우, 우리나라 최초의 상업용 원전인 고리 1호기 모델을 참조하여 모델링을 수행하였다[21]. Bio-shield 또한, 가압기와 동일하게 같은 가압경수로라 하

더라도 그 형상이 일정하지는 않기 때문에, 평가 결과에 유의미한 영향은 없다고 판단하였다. 또한, 원자로를 감싸고 있는 Bio-shield 특성상 원자로와 원자로 외부의 타 대형기기 간의 연결을 위한 Hole이 존재한다. 하지만, 이 Hole에 대한 정확한 재원을 확보하기 어렵고, 그 형상이 불필요하게 매우 복잡하므로 모델링 단계에서 제외하여 수행하였다.

평가에 사용된 Bio-shield의 제원은 그림 15~17에 나타내었다.

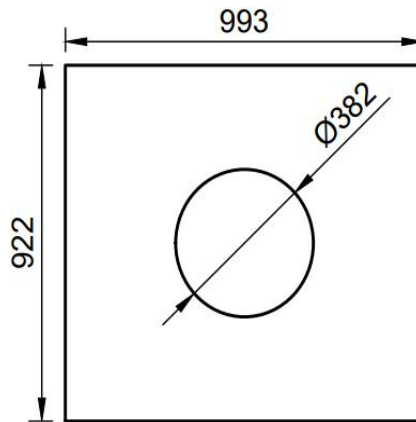


그림 15. Bio-shield 상면 (cm)

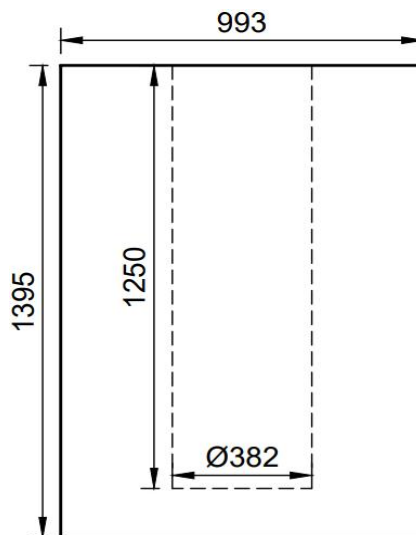


그림 16. Bio-shield 측면 I (cm)

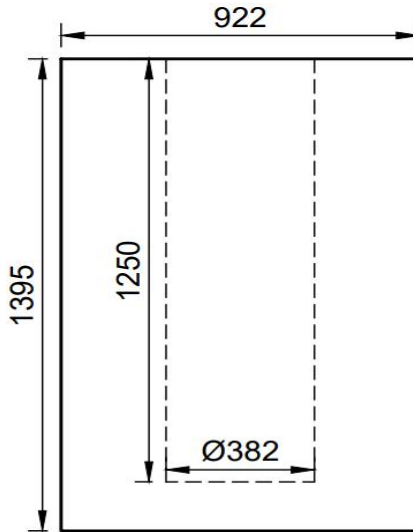


그림 17. Bio-shield 측면 II (cm)

2. 오염정도 및 분포

고리1호기는 2017년 6월 영구정지 후 2021년 5월 해체 승인을 신청하였으며, 본 계획상 2022년 6월 해체 승인이 예정되어 있었다. 계획에 따르면 2025년 12월에 사용후핵연료 반출 완료와 동시에 방사성 계통/구조물 철거 및 방사성 폐기물 관리가 이루어진다. 하지만 현재까지 지연되고 있고 확정된 일자를 특정할 수 없는 상황이며, 특정 시점에 대해 절단이 시작된다고 가정하지 않고, 영구정지부터 30년까지 5년 간격으로 방사성 붕괴를 적용하여 각각 계산하였다. 또한, 기존 계획되었던 한수원의 해체사업 추진 일정인 그림 18을 참고하여 영구정지 이후 8.5년이 지난 시점에 대해서도 추가로 고려해 보았다.



그림 18. 고리1호기 해체 일정[22]

가. Pressurizer

가압기의 주된 오염원은 일차계통 배관을 흐르는 원자로 냉각재에 의해 이루어진다. 원자로 냉각재 계통은 Closed cycle로 방사화된 냉각수가 흐르기 때문에 오랜 기간 축적된 방사성 물질이 계통 전체를 오염시킨다. 따라서 원자력발전소의 운전 이력은 가압기의 오염정도에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 가압기의 오염을 적용하기 위해 약 34년간 가동하고 영구정지되어 해체된 Bohunice A1을 참조하였다. Bohunice A1의 경우, 가압기의 방사선학적 특성 평가 시 Smear method를 사용하여 내부표면의 오염정도를 확인하였다. 따라서 참조된 선원항 정보의 경우, 비방사능 값이 아닌 면적당 방사능 값으로 표현되었으며, 이 중 대부분을 차지하는 감마 핵종만을 고려하였다. 가압기의 선원항 정보는 표 2에 나타내었다[23].

표 2. Bohunice A1 내 가압기 선원항

	Pressurizer (Bq/cm ²)	Pressurizer Heater (Bq/cm ²)
⁵⁸ Co	3.00E+00	9.00E+00
⁶⁰ Co	1.29E+03	9.05E+03
⁹⁴ Nb	4.15E+00	1.01E+01
⁵⁴ Mn	5.05E+01	2.75E+03

표 2에 나타난 선원항을 평가에 적용하기 위해서는 비방사능 또는 총 방사능량으로 변환해야 한다. 따라서 이를 활용하고자, 가압기의 Modelling database를 통해 내부표면 면적을 계산하여 평가에 적용하기 위한 Data로 변환하였다.

또한, 상대적으로 고농도의 오염이 예상되는 Heater의 선원항을 Lower head에 적용하여, Upper head 및 Cylindrical body와의 차이점을 두었다. 이는 일반적인 Pressurizer Heater의 출력인 1,500kW를 기반으로, 40 W/cm²에 기인한 계산법을 이용하였다[24, 25].

위와 같은 일련의 계산 및 변환과정을 통해 도출된 선원항은 표 3에 나타내었다.

표 3. 가압기 핵종 분포 (변환 후)

	Cylindrical Body (Bq)	Lower Head (Bq)	Upper Head (Bq)
--	-----------------------	-----------------	-----------------

⁵⁸ Co	2.77E+06	5.40E+08	3.04E+05
⁶⁰ Co	1.19E+09	5.43E+11	1.31E+08
⁹⁴ Nb	3.83E+06	6.06E+08	4.20E+05
⁵⁴ Mn	4.66E+07	1.65E+11	5.12E+06

나. Bio-shield

Bio-shield의 구성성분 중 자갈 및 모래와 같은 골재보다는 다공성 물질의 시멘트 페이스트에 방사성핵종 대부분이 존재한다. 이처럼 콘크리트의 방사화가 시멘트에서 발생하는 원인은 시멘트의 원재료에 포함된 불순물들이 방사화되는 주요 성분에 해당하기 때문이다.

시멘트는 주요 구성 원소 이외에도 불순물 핵종들을 포함하고 있는데, 이러한 핵종들은 주요 구성 원소에 비해 그 함량이 매우 적으나 일부 핵종들은 중성자 흡수 단면적이 커서 방사화된다. 콘크리트 내 불순물 중 Eu-151과 Co-59는 대표적인 핵종들로 열중성자의 포획반응인 (n, γ) 반응에 의해 방사화 핵종인 Eu-152 및 Co-60이 생성된다. Eu-151의 경우 중성자 흡수단면적이 9,100 barn으로 매우 크기 때문에 불순물 함량이 1 ppm 미만의 극미량이 존재하는 조건에서도 방사화되고, Co-59의 경우 수 ppm의 비교적 높은 함량을 보이고 37.2 barn의 중성자 흡수단면적을 갖기 때문에 방사화가 가능하다.

따라서, Bio-shield 내에 불순물로 존재하며 매우 큰 핵단면적을 갖는 Eu-151과 높은 함량을 보이는 Co-59의 중성자 포획으로 인해 생성되는 Eu-152, Co-60은 가장 큰 영향을 주는 핵종으로 평가된다. 실제로도 Maine Yankee 원전에서 발생한 Bio-shield 역시 전체 방사능의 27%가 Co-60, 65%가 Eu-152인 것으로 나타났다[19].

본 연구에서는 Bio-shield의 오염을 적용하기 위한 모델로써 고리1호기의 평가자료를 참조하였다. Bio-shield의 선원항은 대표 핵종으로 고려되는 Co-60, Eu-152에 대해서 고려하였으며, Co-60의 선원항 분포를 확보하지 못하였기 때문에, Maine Yankee에서 발생한 Eu-152와 Co-60의 분포비인 65 : 27을 일괄 적용하여 Co-60에 대해 도출하였다.

평가에 적용된 Bio-shield 선원항 중 Eu-152의 분포도는 그림 19, 20과 같으며, Co-60도 같은 분포 특성을 공유하기 때문에, Co-60의 분포도는 그림으로서 표현하지 않았다.

그림 19. Bio-shield 핵종분포 (1/2)

그림 20. Bio-shield 핵종분포 (2/2)

152 위 그림에 나타난 선원항 분포도를 VISIPLAN에 적용하기 위해서는 추가적인 변환이 요구된다. 변환은 위에서 언급되었지만, 시나리오에 따라 생성되는 절단 형상을 기본 모티프로 절단 형상의 높이, 깊이에 따라 분포도 상에서 구획 구분하여 구획 내 평균값을 절단 형상과 동일한 위치에 적용하는 방식으로 변환하였다.

3. 작업자 위치

작업자 위치는 선량에 영향을 미치는 인자이며, 기본적으로는 절단 공법에 따라 절단 대상물에서의 이격거리가 달라진다. 하지만, 절단 공법에 따라 달라지는 것뿐만 아니라 같은 절단 공법을 적용한다고 하더라도, 기기의 출력, 작업자의 숙련도 등 많은 변수에 따라 이격거리가 달라질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 통일된 기준을 마련하기 위해 대상물에서 100 cm, 지면에서 120 cm 이격된 거리에서 작업을 수행한다고 가정하였다. 지면에서 120 cm는 일반적인 방사선 작업종사자가 착용하는 TLD의 위치를 고려한 값이다.

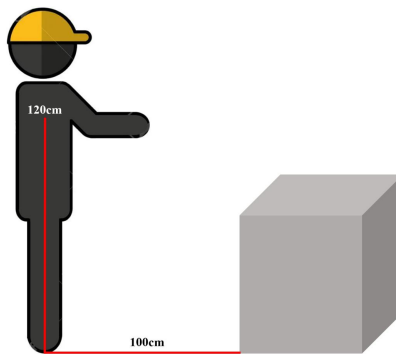


그림 21. 작업자 위치

제 3절. 시나리오

1. Pressurizer

높이가 1,440 cm인 가압기는 원통형 본체와 두 개의 Head로 구성된 세 부분으로 나뉜다. 가압기의 내경과 두께는 각각 254 cm, 14 cm이며, 282 cm의 외경으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 가압기의 절단 시나리오를 구성하기 위해 방사성 고체폐기물 처분 Drum의 규격에 근거하여 구축하였다. 1st case scenario에서는 200L 처분 Drum의 규격, 2nd case scenario에서는 320L 처분 Drum의 규격에 근거하여 절단 조각이 충분히 충전되기 위한 조건으로 수립하였다.

가. 1st case scenario

먼저 200L 처분 Drum의 규격은 직경 57.1 cm, 높이 83.4 cm이다[26]. 이에 따라 첫 번째 시나리오에서 Cylindrical body는 측면에서 볼 때, 38 cm 1등분, 40 cm 27등분으로 총 28개의 부분으로 절단한다. 또한 Head는 넓은 부위부터 40 cm, 31 cm로 수직 분할하고 그 외의 부분은 그림 23에 나타낸 방법과 같이 중심점을 기준으로 각도를 부여하여 절단을 수행한다.

단순하게 수직 방향의 길이에 따라 절단하는 방식을 일괄 적용하지 않은 이유는, 둥근 형상 특성상 기울어짐이 심할수록 절단 조각이 기형적으로 길어지기 때문에 충진율 측면에서는 부적합하다. 이와 관련된 근거로써 단순 절단 방식과 중심점을 기준으로 절단하는 방식에 의한 절단 조각 비교를 그림 22에 나타내었다.

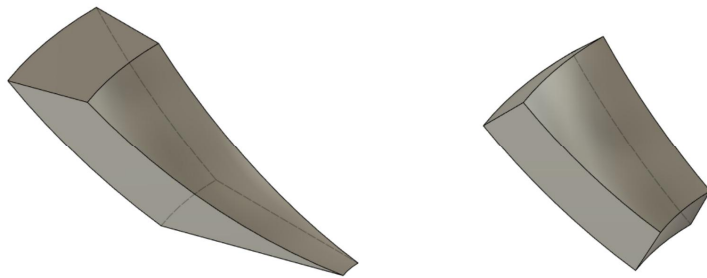


그림 22. 절단 방식 비교 (왼쪽부터 단순 절단, 중심점 절단)

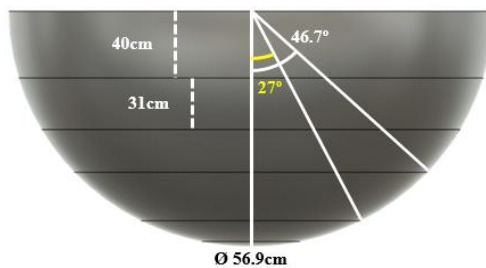


그림 23. 측면에서의 Head 절단
 (1st case scenario)

상면에서 볼 때의 절단 방법은 Cylindrical body의 경우, 중심점을 기준으로 16.6°

씩 등분하여 분할을 수행한다. Head의 경우, 넓은 부분부터 순서대로 15°, 18°, 20°, 20°, 40°씩 등분하여 분할한다.

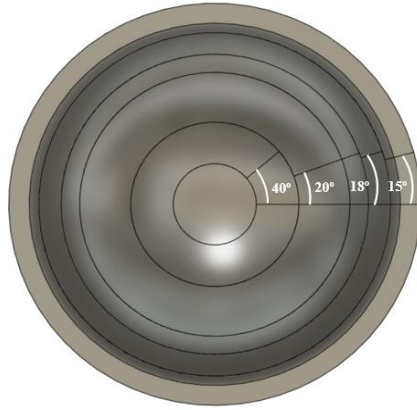


그림 24. Head 상면 절단
(1st case scenario)

나. 2nd case scenario

320L 처분 Drum의 규격은 직경 71.3 cm, 높이 96 cm이다[27]. 이에 따라 Cylindrical body는 측면에서 볼 때, 58 cm 1등분, 50 cm 22등분으로 총 23개의 파트로 절단한다. 또한 Head는 넓은 부위부터 50 cm, 41 cm로 수직 분할하고 그 외의 부분은 그림 25에 나타낸 방법과 같이 중심점을 기준으로 한 절단을 수행한다.

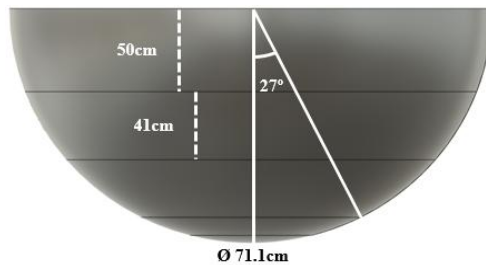


그림 25. 측면에서의 Head 절단
(2nd case scenario)

상면에서 볼 때의 절단 방법은 Cylindrical body의 경우, 중심점을 기준으로 20°씩 등분하여 분할을 수행한다. Head의 경우, 넓은 부분부터 순서대로 20°, 22.5°, 30°, 60°씩 등분하여 분할한다.

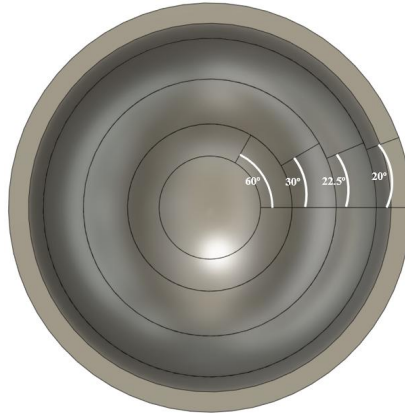


그림 26. Head 상면 절단
 (2nd case scenario)

2. Bio-shield

Bio-shield는 직사각형 구조에 원자로가 삽입되는 Hole이 가운데 위치한 형태로 이루어져 있다. 원자로 Hole은 직경이 382 cm이며, 가로 993 cm, 세로 922 cm이며, 높이는 1,395 cm이다.

본 연구에서는 Bio-shield의 절단 시나리오를 구성하기 위해 방사성 고체폐기물 처분 Drum의 규격에 근거하여 구축하였다. 1st, 2nd case scenario에서는 200L 처분 Drum의 규격을 기준으로 방사성 오염이 높은 곳에서 낮은 곳 순서대로 해체하는 Hot to Cold와 방사성 오염이 낮은 곳에서 높은 곳 순서대로 해체하는 Cold to Hot 방법을 적용하였다. 3rd, 4th case scenario에서도 동일하게 200L 처분 Drum의 규격에 근거하였으며, 해당 시나리오에서는 오염이 집중된 표면에 연마 제염 상황을 추가하고 동일하게 Hot to Cold와 Cold to Hot 방법을 적용하여 시나리오를 구축하였다. VISIPLAN 내에 Hot to Cold와 Cold to Hot 시나리오 단계에 따른 모델링 변환은 그림 27, 28에 각각 나타내었다.

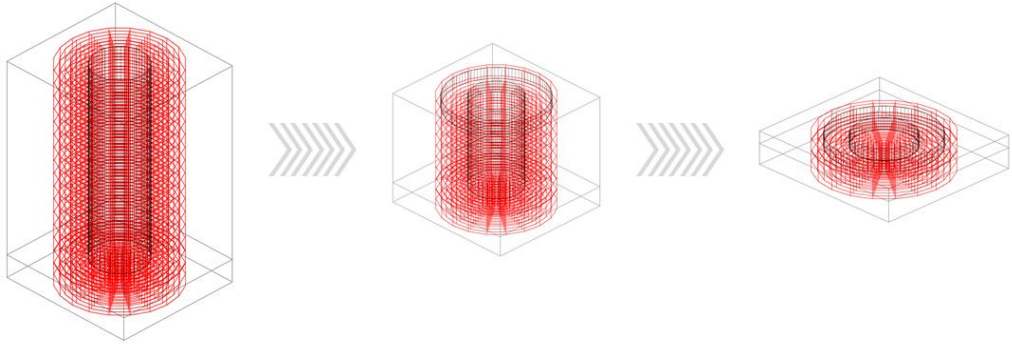


그림 27. VISIPLAN 내 Hot to Cold 시나리오에 따른 모델링 변환

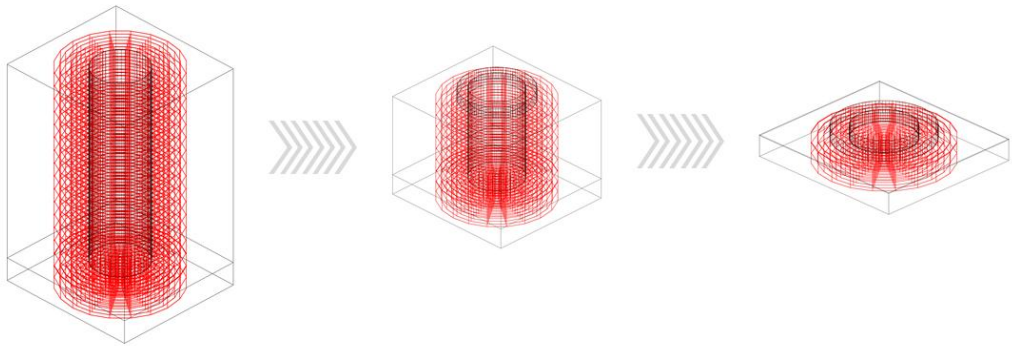


그림 28. VISIPLAN 내 Cold to Hot 시나리오에 따른 모델링 변환

가. 1st case scenario

1st case scenario에서의 기본 절단 방법은 Hot to Cold 방법을 적용하였다. 이 시나리오에서 Bio-shield는 방사성고체폐기물 처분 Drum의 규격인 직경 57.1 cm, 높이 83.4 cm에 따라 측면 기준 5 cm 1등분, 83 cm 15등분, 72.5 cm 2등분으로 총 18단계에 걸쳐 절단한다고 가정하였다. 또한, 상면에서의 절단 방법은 원자로 Hole을 기준으로 35 cm 간격으로 넓어지는 형태의 원형으로 12°, 10°, 9°, 8°, 7.2°, 6.4°, 6°으로 총 7단계에 걸쳐 절단을 수행한다. 그 외각의 경우에는 Bio-shield 특성상 자체처분 수준의 오염상태로 파악되기도 하며, 복잡한 형태의 조각을 계속 생성할 필요는 없다고 판단되어 시나리오 구상 시 절단 방법에 대해 고려하지 않았다. 상면에서의 절단 각도 및 간격은 그림 29, 측면에서의 절단 길이는 그림 30에 나타내었다.

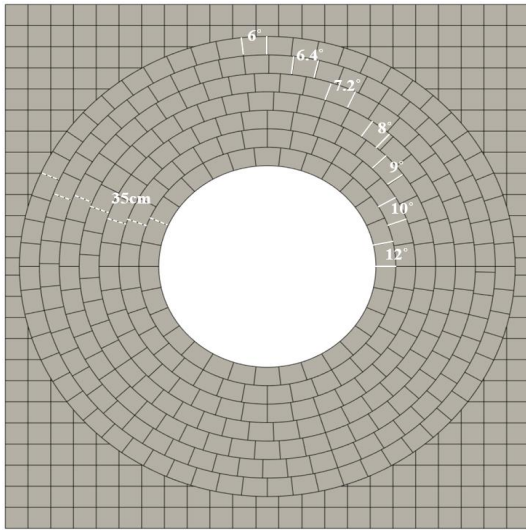


그림 29. 상면에서의 Bio-shield 절단

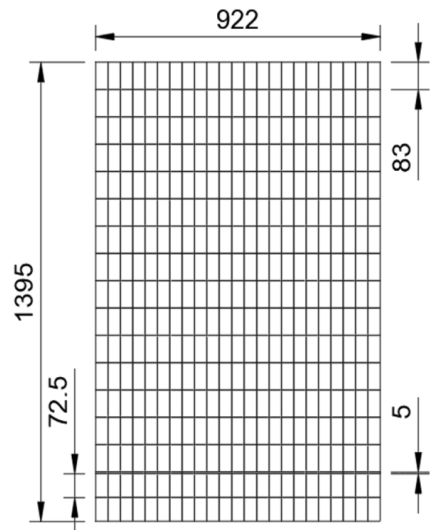


그림 30. 측면에서의 절단 (cm)

또한, Bio-shield에서 원자로 Hole의 하단 부분인 Below part는 원자로 Hole이 존재하지 않기 때문에, 앞선 Main part에는 없던 가운데 부분의 콘크리트 절단이 수행되어야 한다. 절단 방법은 그림 31에 나타내었으며, 모든 시나리오가 동일한 각도 및 간격의 절단 방식을 공유하고 있다.

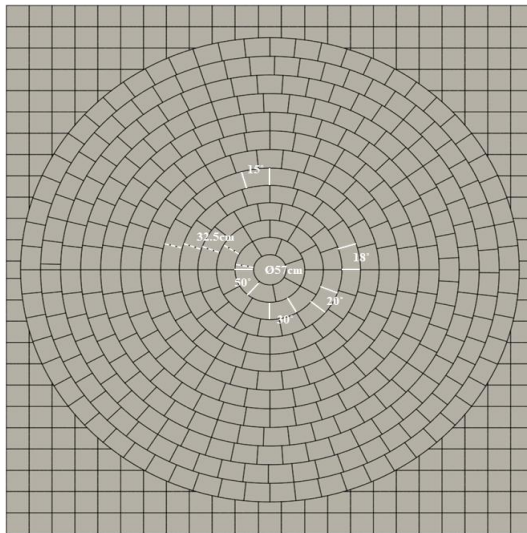


그림 31. Bio-shield 하부의 절단 방법

나. 2nd case scenario

2nd case scenario에서는 1st case scenario와 동일한 절단 방식을 가지지만, Hot to Cold가 아닌 Cold to Hot 방법을 적용하였다. Cold to Hot 방식인 오염이 낮은 곳에서 높은 곳 순서의 절단 방식에 따라 상면에서의 절단 방법은 최외각에서 원자로 Hole 방향으로 좁혀지는 형태로 절단을 수행한다. 이 외의 절단 각도 및 간격은 1st case scenario와 동일하다.

다. 3rd case scenario

3rd case scenario에서의 기본 절단 방법은 Hot to Cold 방법을 적용하였다. 하지만 1st case scenario와 달리 이 시나리오에서는 표면에 대한 연마 제염을 추가하였다. Bio-shield 특성상 표면이 상대적으로 고농도의 오염이 분포되어 있는데, 앞서 언급한 Bio-shield 선원향 분포도를 참조하여 상부 20 cm, 하부 7 cm, 원자로 Hole 표면 7 cm로 설정하였으며, 이 범위에 포함된 선원향 및 콘크리트 구조물이 제거된 상태로 평가를 진행하였다.

이 시나리오에서는 측면 기준 68 cm 1등분, 83 cm 14등분, 69 cm 2등분으로 총 17 단계에 걸쳐 절단한다고 가정하였다. 또한, 상면에서의 절단 방법은 원자로 Hole을 기준으로 35 cm 간격으로 넓어지는 형태의 원형으로 10.9°, 10°, 9°, 8°, 7.2°, 6.2°, 6°으로 총 7단계에 걸쳐 절단을 수행한다. 그 외각의 경우에는 Bio-shield 특성상 자체처분 수준의 오염상태로 파악되기도 하며, 복잡한 형태의 조각을 계속 생성할 필요는 없다고 판단되어 시나리오 구상 시 절단 방법에 대해 고려하지 않았다. 상면에서의 절단 각도 및 간격은 그림 32에 나타내었으며, 측면에서의 절단 길이는 그림 33과 같다.

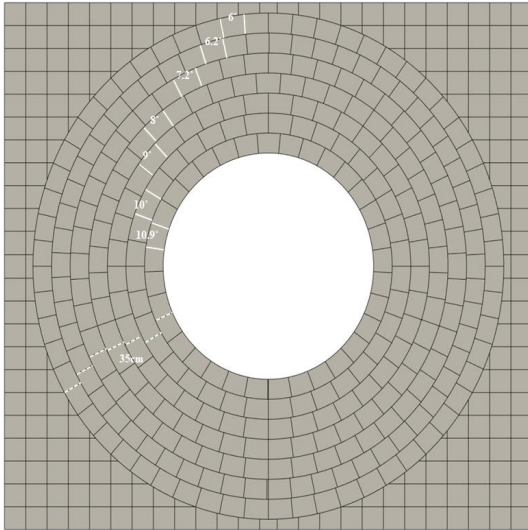


그림 32. 상면에서의 Bio-shield 절단

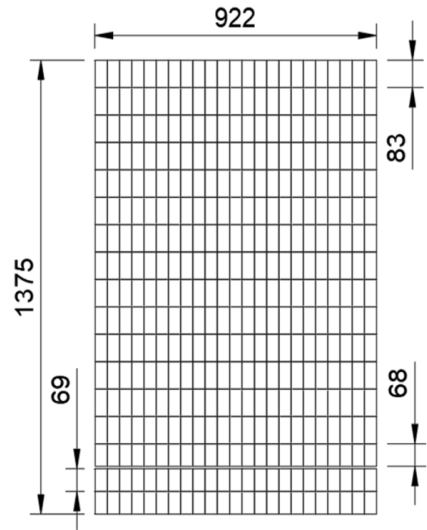


그림 33. 측면에서의 절단 (cm)

라. 4th case scenario

앞서 언급한 2nd case scenario처럼 4th case scenario에서도 3rd case scenario와 동일한 절단 방식을 가지지만, Hot to Cold가 아닌 Cold to Hot 방법을 적용하였다. Cold to Hot 방식인 오염이 낮은 곳에서 높은 곳 순서의 절단 방식에 따라 상면에서의 절단 방법은 최외각에서 원자로 Hole 방향으로 좁혀지는 형태로 절단을 수행한다. 그 외 절단 각도 및 간격은 3rd case scenario와 동일하다.

3. 절단 소요시간

정확한 작업자 피폭선량 평가를 위해서는 작업자의 작업시간 및 대상 구조물 간의 이격거리 등이 중요하다. 작업자의 작업시간은 적용되는 절단 공법의 절단 속도와 절단 길이에 따라 달라진다. 하지만, 본 연구에서 다루고 있는 가압기의 금속 재질과 달리 콘크리트 재질의 경우, 두께에 따른 절단 속도의 정량화된 데이터 축적이 미흡한 상황이다. 따라서, 각 절단 기술에 따른 절단 속도를 특정하여 적용하기에는 적합하지 않다고 판단되어, 현장 적용성 향상을 위해 절단 속도에 따른 범위를 설정하였다. 가압기에 대한 절단 속도 범위는 Plasma, Laser, Flame 등 다양한

절단 기술에 따른 절단 속도 데이터를 참조하여 10 cm/min부터 5 cm/min 간격으로 100 cm/min까지 설정하였다.

Bio-shield의 경우에는 1 m²/hr부터 1 m²/hr 간격으로 10 m²/hr까지의 범위를 설정하였으며, 가압기의 절단 속도와 마찬가지로 다양한 절단 기술에 적용되는 절단 속도를 참조하여 설정한 값이다[28, 29].

가. Pressurizer

시나리오에 따른 절단 길이는 표 4, 5에 나타냈으며, L.H는 Lower Head, U.H는 Upper Head, B는 Cylindrical Body를 지칭한다. 또한, 각 절단 속도에 따른 절단 소요시간은 표 6에 나타내었다.

표 4. 가압기 1st scenario에 따른 절단 길이

측면 절단		상면 절단	
작업자 위치	절단 길이 (cm)	절단 부위	절단 길이 (cm)
1	356.8	최하단	178.7
2	645.5	L.H5	339.8
		L.H4	876.4
3	765	L.H3	575.5
		L.H2	677
4	849.5	L.H1	973.4
5	885.6	B1	836
		B2 ~ B29	880
6 ~ 33	885.9		
34	885.6	U.H1	973.4
35	849.5	U.H2	677
36	765	U.H3	575.5
		U.H4	876.4
37	645.5	U.H5	339.8
38	356.8	최상단	178.7

표 5. 가압기 2nd scenario에 따른 절단 길이

측면 절단		상면 절단	
작업자 위치	절단 길이 (cm)	절단 부위	절단 길이 (cm)
1	402	최하단	223.4
		L.H4	183
2	676.8	L.H3	673.2

3	828	L.H2	860.4
		L.H1	919.8
4 ~ 27	885.6	B1	1044
		B2 ~ B23	900
28	828	U.H1	919.8
		U.H2	860.4
29	676.8	U.H3	673.2
		U.H4	183
30	402	최상단	223.4

표 6. 절단 속도에 따른 총 절단 소요시간

절단 속도 (cm/min)	1st scenario	2nd scenario
	총 절단 소요시간 (hour)	총 절단 소요시간 (hour)
10	106.95	85.31
15	71.30	56.15
20	53.48	42.11
25	42.78	33.69
30	35.65	28.08
35	30.56	24.07
40	26.74	21.06
45	23.77	18.72
50	21.39	16.85
55	19.45	15.31
60	17.83	14.04
65	16.45	12.96
70	15.28	12.03
75	14.26	11.23
80	13.37	10.53
85	12.58	9.91
90	11.88	9.36
95	11.26	8.87
100	10.7	8.42

나. Bio-shield

Bio-shield는 절단 면적으로 표현되었으며, 이는 콘크리트 특성상 절단 두께가 일정하지 않고, 절단 시 자주 사용되는 Wire Saw의 경우, 절단 속도 단위로 m^2/hr 를 사용하고 있기 때문이다.

시나리오에 따른 절단 면적은 표 7부터 9에 나타냈으며, 괄호 안의 숫자는 반복 횟수를 지칭한다. 표 10부터 13는 절단 면적에 따른 절단 속도 별 소요시간을 정리하여 나타낸 것이다.

표 7. Bio-shield 1st, 2nd scenario에 따른 절단 면적 [단위 : cm², (반복 횟수)]

Cut. Angle	83cm Part		5cm Part	
	Horizon (15)	Vertical (15)	Horizon (1)	Vertical (1)
12	45,840	205,020	45,840	12,360
10	53,532	240,969	53,532	14,508
9	61,240	270,560	61,240	16,280
8	68,940	303,345	68,940	18,270
7.2	76,650	336,100	76,650	20,250
6.4	84,319	374,722	84,319	22,575
6	92,040	401,700	92,040	24,180
외각	318,300	999,320	318,300	60,000

표 8. Bio-shield 3rd, 4th scenario에 따른 절단 면적 [단위 : cm², (반복 횟수)]

Cut. Angle	83cm Part		68cm Part	
	Horizon (14)	Vertical (14)	Horizon (1)	Vertical (1)
10.9	47,394	220,278	47,394	194,267
10	55,080	237,024	55,080	200,196
9	62,800	271,480	62,800	224,640
8	70,470	306,990	70,470	251,505
7.2	78,200	339,750	78,200	278,350
6.2	85,877	384,143	85,877	314,730
6	93,600	405,300	93,600	332,100
외각	299,000	989,360	299,000	810,560

표 9. Bio-shield 하부의 절단 면적 [단위 : cm², (반복 횟수)]

72.5cm Part			69cm Part		
Cut. Angle	Horizon (1)	Vertical (2)	Cut. Angle	Horizon (1)	Vertical (2)
-	2,552	12,982	-	2,552	12,356
50	9,137	46,633	50	9,137	44,382
30	15,768	70,860	30	15,768	67,440
20	22,410	99,810	20	22,410	94,986
18	29,040	119,320	18	29,040	113,560

15	35,664	143,544	15	35,664	136,608
12	45,840	179,070	10.9	47,394	183,141
10	53,532	210,240	10	55,080	203,112
9	61,240	236,320	9	62,800	227,960
8	68,940	264,960	8	70,470	255,195
7.2	76,650	293,550	7.2	78,200	282,450
6.4	84,319	316,993	6.2	85,877	319,350
6	92,040	340,020	6	93,600	336,960
외각	318,300	872,900	외각	299,000	822,480

표 10. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 전 상부 (단위 : hr)

83cm Part (15회 반복)										
Cut. Angle	절단 속도 (m ² /hr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	25.09	12.54	8.36	6.27	5.02	4.18	3.58	3.14	2.79	2.51
10	29.42	14.71	9.81	7.36	5.88	4.90	4.20	3.68	3.27	2.94
9	33.18	16.59	11.06	8.30	6.64	5.53	4.74	4.15	3.69	3.32
8	37.23	18.61	12.41	9.31	7.45	6.20	5.32	4.65	4.14	3.72
7.2	41.28	20.64	13.76	10.32	8.26	6.88	5.90	5.16	4.59	4.13
6.4	45.90	22.95	15.30	11.48	9.18	7.65	6.56	5.74	5.10	4.59
6	49.37	24.69	16.46	12.34	9.87	8.23	7.05	6.17	5.49	4.94
외각	131.76	65.88	43.92	32.94	26.35	21.96	18.82	16.47	14.64	13.18
5cm Part										
12	5.82	2.91	1.94	1.46	1.16	0.97	0.83	0.73	0.65	0.58
10	6.80	3.40	2.27	1.70	1.36	1.13	0.97	0.85	0.76	0.68
9	7.75	3.88	2.58	1.94	1.55	1.29	1.11	0.97	0.86	0.78
8	8.72	4.36	2.91	2.18	1.74	1.45	1.25	1.09	0.97	0.87
7.2	9.69	4.85	3.23	2.42	1.94	1.62	1.38	1.21	1.08	0.97
6.4	10.69	5.34	3.56	2.67	2.14	1.78	1.53	1.34	1.19	1.07
6	11.62	5.81	3.87	2.91	2.32	1.94	1.66	1.45	1.29	1.16
외각	37.83	18.92	12.61	9.46	7.57	6.31	5.40	4.73	4.20	3.78

표 11. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 후 상부 (단위 : hr)

83cm Part (14회 반복)										
Cut. Angle	절단 속도 (m ² /hr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10.9	26.77	13.38	8.92	6.69	5.35	4.46	3.82	3.35	2.97	2.68
10	29.21	14.61	9.74	7.30	5.84	4.87	4.17	3.65	3.25	2.92
9	33.43	16.71	11.14	8.36	6.69	5.57	4.78	4.18	3.71	3.34
8	37.75	18.87	12.58	9.44	7.55	6.29	5.39	4.72	4.19	3.77
7.2	41.80	20.90	13.93	10.45	8.36	6.97	5.97	5.22	4.64	4.18
6.4	47.00	23.50	15.67	11.75	9.40	7.83	6.71	5.88	5.22	4.70
6	49.89	24.95	16.63	12.47	9.98	8.32	7.13	6.24	5.54	4.99
외각	128.84	64.42	42.95	32.21	25.77	21.47	18.41	16.10	14.32	12.88
68cm Part										
10.9	24.17	12.08	8.06	6.04	4.83	4.03	3.45	3.02	2.69	2.42
10	25.53	12.76	8.51	6.38	5.11	4.25	3.65	3.19	2.84	2.55
9	28.74	14.37	9.58	7.19	5.75	4.79	4.11	3.59	3.19	2.87
8	32.20	16.10	10.73	8.05	6.44	5.37	4.60	4.02	3.58	3.22
7.2	35.66	17.83	11.89	8.91	7.13	5.94	5.09	4.46	3.96	3.57
6.4	40.06	20.03	13.35	10.02	8.01	6.68	5.72	5.01	4.45	4.01
6	42.57	21.29	14.19	10.64	8.51	7.10	6.08	5.32	4.73	4.26
외각	110.96	55.48	36.99	27.74	22.19	18.49	15.85	13.87	12.33	11.10

표 12. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 전 하부 (단위 : hr)

72.5cm Part (2회 반복)										
Cut. Angle	절단 속도 (m ² /hr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	1.55	0.78	0.52	0.39	0.31	0.26	0.22	0.19	0.17	0.16
50	5.58	2.79	1.86	1.39	1.12	0.93	0.80	0.70	0.62	0.56
30	8.66	4.33	2.89	2.17	1.73	1.44	1.24	1.08	0.96	0.87
20	12.22	6.11	4.07	3.06	2.44	2.04	1.75	1.53	1.36	1.22
18	14.84	7.42	4.95	3.71	2.97	2.47	2.12	1.85	1.65	1.48
15	17.92	8.96	5.97	4.48	3.58	2.99	2.56	2.24	1.99	1.79
12	22.49	11.25	7.50	5.62	4.50	3.75	3.21	2.81	2.50	2.25
10	26.38	13.19	8.79	6.59	5.28	4.40	3.77	3.30	2.93	2.64
9	29.76	14.88	9.92	7.44	5.95	4.96	4.25	3.72	3.31	2.98
8	33.39	16.70	11.13	8.35	6.68	5.57	4.77	4.17	3.71	3.34
7.2	37.02	18.51	12.34	9.26	7.40	6.17	5.29	4.63	4.11	3.70
6.4	40.13	20.07	13.38	10.03	8.03	6.69	5.73	5.02	4.46	4.01
6	43.21	21.60	14.40	10.80	8.64	7.20	6.17	5.40	4.80	4.32
외각	119.12	59.56	39.71	29.78	23.82	19.85	17.02	14.89	13.24	11.91

표 13. 절단 속도에 따른 절단 소요시간 - 연마 제염 후 하부 (단위 : hr)

69cm Part (2회 반복)										
Cut. Angle	절단 속도 (m ² /hr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	1.49	0.75	0.50	0.37	0.30	0.25	0.21	0.19	0.17	0.15
50	5.35	2.68	1.78	1.34	1.07	0.89	0.76	0.67	0.59	0.54
30	8.32	4.16	2.77	2.08	1.66	1.39	1.19	1.04	0.92	0.83
20	11.74	5.87	3.91	2.93	2.35	1.96	1.68	1.47	1.30	1.17
18	14.26	7.13	4.75	3.57	2.85	2.38	2.04	1.78	1.58	1.43
15	17.23	8.61	5.74	4.31	3.45	2.87	2.46	2.15	1.91	1.72
10.9	23.05	11.53	7.68	5.76	4.61	3.84	3.29	2.88	2.56	2.31
10	25.82	12.91	8.61	6.45	5.16	4.30	3.69	3.23	2.87	2.58
9	29.08	14.54	9.69	7.27	5.82	4.85	4.15	3.63	3.23	2.91
8	32.57	16.28	10.86	8.14	6.51	5.43	4.65	4.07	3.62	3.26
7.2	36.07	18.03	12.02	9.02	7.21	6.01	5.15	4.51	4.01	3.61
6.2	40.52	20.26	13.51	10.13	8.10	6.75	5.79	5.07	4.50	4.05
6	43.06	21.53	14.35	10.76	8.61	7.18	6.15	5.38	4.78	4.31
외각	112.15	56.07	37.38	28.04	22.43	18.69	16.02	14.02	12.46	11.21

제 4장. 시나리오 평가

제 1절. 시나리오 해석

1. 작업자 피폭선량

평가는 크게 방사성 붕괴를 적용하기 위한 절단 시점과 유효선량 도출을 위한 절단 속도로 구분하여 수행하였다. 먼저, 절단 시점의 경우 영구정지부터 5년 간격으로 30년까지의 시점과 기존 고리1호기 해체 계획상 영구정지 후 8.5년의 시점을 추가하여 총 8단계로 설정하였다. 절단 속도의 경우에 가압기는 10 cm/min부터 5 cm/min 간격으로 19단계로 구성하여 100 cm/min까지 고려하였고, Bio-shield는 1 m²/hr부터 1 m²/hr 간격으로 10단계로 구성하여 10 m²/hr까지 고려하였다.

가. Pressurzier

가압기의 평가 결과, 1st scenario에서 영구정지 시점부터 30년의 절단 시점을 적용하였을 때, 시간당 선량을 전체 평균으로 나타내면 각각 9.59E-01, 4.64E-01, 2.40E-01, 1.23E-01, 6.39E-02, 3.34E-2, 1.75E-02 mSv/hr이고, 8.5년이 지난 시점에 대해서는 2.88E-01 mSv/hr로 평가되었다.

2nd scenario의 경우에는 각각 7.70E-01, 3.55E-01, 1.83E-01, 9.52E-02, 4.96E-02, 2.59E-02, 1.37E-02 mSv/hr이고, 8.5년이 지난 시점에서는 2.23E-01 mSv/hr로 평가되었다.

각 시나리오의 상면과 측면 절단 시 시간당 선량 분포도는 그림 34에 나타내었으며, 시나리오 내 단계별 시간당 선량 분포도는 부록 I, 부록 II에 정리하였다. 기본적으로 측면 절단보다 상면 절단 시 더 높은 시간당 선량을 나타내고 있으며, 이는 시나리오상 측면 작업보다 상면 작업 시 더 많은 작업량을 소화해야 하기 때문으로 파악된다.

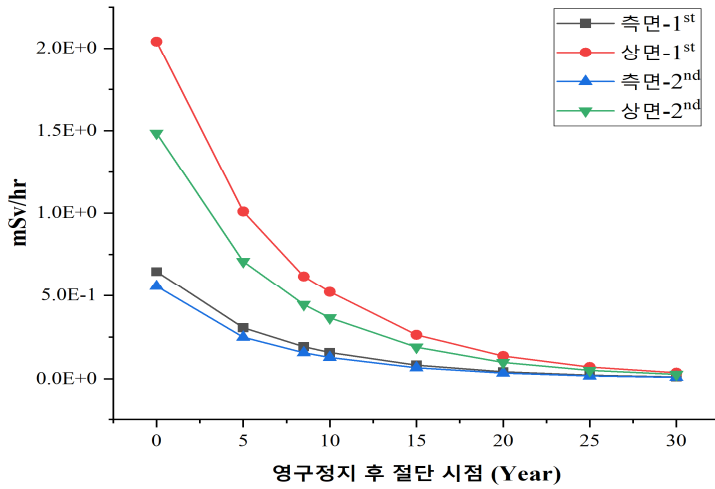


그림 34. 측면, 상면 절단 시 시간당 선량 분포

또한, 절단 속도를 적용한 선량 평가 결과는 표 14, 15에 나타내었다. 일반적으로 산소절단기의 경우, Carbon steel 두께 30~100 cm 절단 시 절단 속도는 5~15 cm/min이며, Plasma와 Laser cutting의 경우, Steel 두께 6.35 cm 절단 시 33.02 cm/min, 12.7~25.4 cm/min의 절단 속도를 가지고 있다[30]. 각각의 절단 속도는 기기의 출력, 절단 기기의 제원에 따른 변수가 존재하기 때문에 실제 현장에서 적용 시 아래 표를 고려한다면 적합한 절단 기술을 선정할 수 있을 것이라 사료된다.

표 14. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (cm/min)	10	57.5	26.6	16.4	13.8	7.02	3.65	1.91	1
	15	38.3	17.7	11	9.17	4.68	2.43	1.27	0.67
	20	28.7	13.3	8.22	6.88	3.51	1.82	0.95	0.5
	25	23	10.6	6.58	5.5	2.81	1.46	0.76	0.4
	30	19.2	8.87	5.48	4.59	2.34	1.22	0.64	0.33
	35	16.4	7.6	4.7	3.93	2.01	1.04	0.55	0.29
	40	14.4	6.65	4.11	3.44	1.75	0.91	0.48	0.25
	45	12.8	5.91	3.66	3.06	1.56	0.81	0.42	0.22
	50	11.5	5.32	3.29	2.75	1.4	0.73	0.38	0.2
	55	10.5	4.84	2.99	2.5	1.28	0.66	0.35	0.18

60	9.58	4.43	2.74	2.29	1.17	0.61	0.32	0.17
65	8.84	4.09	2.53	2.12	1.08	0.56	0.29	0.15
70	8.21	3.8	2.35	1.97	1	0.52	0.27	0.14
75	7.67	3.55	2.19	1.83	0.94	0.49	0.25	0.13
80	7.19	3.33	2.06	1.72	0.88	0.46	0.24	0.13
85	6.76	3.13	1.94	1.62	0.83	0.43	0.22	0.12
90	6.39	2.96	1.83	1.53	0.78	0.41	0.21	0.11
95	6.05	2.8	1.73	1.45	0.74	0.38	0.20	0.11
100	5.75	2.66	1.64	1.38	0.7	0.37	0.19	0.1

표 15. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (cm/min)	10	33.44	15.34	9.65	7.93	4.12	2.14	1.12	0.59
	15	22.29	10.23	6.44	5.29	2.74	1.43	0.75	0.39
	20	16.72	7.67	4.83	3.96	2.06	1.07	0.56	0.30
	25	13.38	6.14	3.86	3.17	1.65	0.86	0.45	0.24
	30	11.15	5.11	3.22	2.64	1.37	0.71	0.37	0.20
	35	9.55	4.38	2.76	2.27	1.18	0.61	0.32	0.17
	40	8.36	3.84	2.41	1.98	1.03	0.54	0.28	0.15
	45	7.43	3.41	2.15	1.76	0.91	0.48	0.25	0.13
	50	6.69	3.07	1.93	1.59	0.82	0.43	0.22	0.12
	55	6.08	2.79	1.76	1.44	0.75	0.39	0.20	0.11
	60	5.57	2.56	1.61	1.32	0.69	0.36	0.19	0.10
	65	5.14	2.36	1.49	1.22	0.63	0.33	0.17	0.09
	70	4.78	2.19	1.38	1.13	0.59	0.31	0.16	0.08
	75	4.46	2.05	1.29	1.06	0.55	0.29	0.15	0.08
	80	4.18	1.92	1.21	0.99	0.51	0.27	0.14	0.07
	85	3.93	1.80	1.14	0.93	0.48	0.25	0.13	0.07
90	3.72	1.70	1.07	0.88	0.46	0.24	0.12	0.07	
95	3.52	1.61	1.02	0.83	0.43	0.23	0.12	0.06	
100	3.34	1.53	0.97	0.79	0.41	0.21	0.11	0.06	

해당 평가 결과는 가압기를 절단하는데 작업자 1명이 투입되었을 때 발생하는 선량이라 볼 수 있으므로, 실질적으로 작업에 투입되는 인원수에 대한 개인선량으로 판단하기에는 무리가 있다. 따라서 작업자 투입 상황을 가정하기 위해 각 시나리오 내 수행되는 작업 단계에 따라 유효선량을 도출하여 연간 선량한도 20 mSv를 기준으로 투입 가능한 작업자 수를 계산하였다. 그리고 1 mSv를 넘지 않는 저선량 작업에 대해서는 일괄 합산하여 하나의 작업으로 고려하였다. ALARA에 입각한 작업자

수와 개인선량 평균은 표 16, 17에 나타내었다. 괄호 안의 숫자는 작업자 수, 괄호 위의 숫자는 평균 개인선량을 의미한다.

표 16. 1st scenario 작업자 투입 인원 및 평균 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (cm/min)	10	4.42 (13)	2.66 (10)	1.64 (10)	1.72 (8)	3.51 (2)	3.65 (1)	1.91 (1)	1 (1)
	15	2.95 (13)	1.77 (10)	1.57 (7)	3.06 (3)	4.68 (1)	2.43 (1)	1.27 (1)	0.67 (1)
	20	2.40 (12)	1.66 (8)	4.11 (2)	3.44 (2)	3.51 (1)	1.82 (1)	0.95 (1)	0.5 (1)
	25	2.09 (11)	1.77 (6)	3.29 (2)	2.75 (2)	2.81 (1)	1.46 (1)	0.76 (1)	0.4 (1)
	30	1.74 (11)	2.96 (3)	2.74 (2)	4.59 (1)	2.34 (1)	1.22 (1)	0.64 (1)	0.33 (1)
	35	1.49 (11)	3.8 (2)	4.7 (1)	3.93 (1)	2.01 (1)	1.04 (1)	0.54 (1)	0.29 (1)
	40	1.8 (8)	3.33 (2)	4.11 (1)	3.44 (1)	1.75 (1)	0.91 (1)	0.48 (1)	0.25 (1)
	45	1.83 (7)	2.96 (2)	3.66 (1)	3.06 (1)	1.56 (1)	0.81 (1)	0.42 (1)	0.22 (1)
	50	1.64 (7)	5.32 (1)	3.29 (1)	2.75 (1)	1.4 (1)	0.73 (1)	0.38 (1)	0.20 (1)
	55	2.61 (4)	4.84 (1)	2.99 (1)	2.5 (1)	1.28 (1)	0.66 (1)	0.35 (1)	0.18 (1)
	60	4.79 (2)	4.43 (1)	2.74 (1)	2.29 (1)	1.17 (1)	0.61 (1)	0.32 (1)	0.17 (1)
	65	4.42 (2)	4.09 (1)	2.53 (1)	2.12 (1)	1.08 (1)	0.56 (1)	0.29 (1)	0.15 (1)
	70	4.11 (2)	3.8 (1)	2.35 (1)	1.97 (1)	1 (1)	0.52 (1)	0.27 (1)	0.14 (1)
	75	3.83 (2)	3.55 (1)	2.19 (1)	1.83 (1)	0.94 (1)	0.49 (1)	0.25 (1)	0.13 (1)
	80	3.59 (2)	3.33 (1)	2.06 (1)	1.72 (1)	0.88 (1)	0.46 (1)	0.24 (1)	0.13 (1)
	85	3.38 (2)	3.13 (1)	1.94 (1)	1.62 (1)	0.83 (1)	0.43 (1)	0.22 (1)	0.12 (1)
90	3.19 (2)	2.96 (1)	1.83 (1)	1.53 (1)	0.78 (1)	0.41 (1)	0.21 (1)	0.11 (1)	
95	3.03	2.8	1.73	1.45	0.74	0.38	0.20	0.11	

		(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	100	2.87	2.66	1.64	1.38	0.7	0.36	0.19	0.1
		(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

표 17. 2nd scenario 작업자 최소인원 및 평균 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (cm/min)	10	3.72 (9)	1.92 (8)	1.38 (7)	1.59 (5)	4.12 (1)	2.14 (1)	1.12 (1)	0.59 (1)
	15	2.79 (8)	1.46 (7)	2.15 (3)	5.29 (1)	2.74 (1)	1.43 (1)	0.75 (1)	0.39 (1)
	20	2.09 (8)	1.53 (5)	4.83 (1)	3.96 (1)	2.06 (1)	1.07 (1)	0.56 (1)	0.30 (1)
	25	1.67 (8)	2.05 (3)	3.86 (1)	3.17 (1)	1.65 (1)	0.86 (1)	0.45 (1)	0.24 (1)
	30	1.59 (7)	5.11 (1)	3.22 (1)	2.64 (1)	1.37 (1)	0.71 (1)	0.37 (1)	0.20 (1)
	35	1.59 (6)	4.38 (1)	2.76 (1)	2.27 (1)	1.18 (1)	0.61 (1)	0.32 (1)	0.17 (1)
	40	1.67 (5)	3.84 (1)	2.41 (1)	1.98 (1)	1.03 (1)	0.54 (1)	0.28 (1)	0.15 (1)
	45	2.48 (3)	3.41 (1)	2.15 (1)	1.76 (1)	0.91 (1)	0.48 (1)	0.25 (1)	0.13 (1)
	50	2.23 (3)	3.07 (1)	1.93 (1)	1.59 (1)	0.82 (1)	0.43 (1)	0.22 (1)	0.12 (1)
	55	2.03 (3)	2.79 (1)	1.76 (1)	1.44 (1)	0.75 (1)	0.39 (1)	0.20 (1)	0.11 (1)
	60	5.57 (1)	2.56 (1)	1.61 (1)	1.32 (1)	0.69 (1)	0.36 (1)	0.19 (1)	0.1 (1)
	65	5.14 (1)	2.36 (1)	1.49 (1)	1.22 (1)	0.63 (1)	0.33 (1)	0.17 (1)	0.09 (1)
	70	4.78 (1)	2.19 (1)	1.38 (1)	1.13 (1)	0.59 (1)	0.31 (1)	0.16 (1)	0.08 (1)
	75	4.46 (1)	2.05 (1)	1.29 (1)	1.06 (1)	0.55 (1)	0.29 (1)	0.15 (1)	0.08 (1)
	80	4.18 (1)	1.92 (1)	1.21 (1)	0.99 (1)	0.51 (1)	0.27 (1)	0.14 (1)	0.07 (1)
	85	3.93 (1)	1.80 (1)	1.14 (1)	0.93 (1)	0.48 (1)	0.25 (1)	0.13 (1)	0.07 (1)
90	3.72 (1)	1.70 (1)	1.07 (1)	0.88 (1)	0.46 (1)	0.24 (1)	0.12 (1)	0.07 (1)	
95	3.52	1.61	1.02	0.83	0.43	0.23	0.12	0.06	

	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
100	3.34	1.53	0.97	0.79	0.41	0.21	0.11	0.06	
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

나. Bio-shield

Bio-shield에서의 작업자 위치 Point는 각각 1st scenario에서 137 Point, 2nd scenario에서 138 Point, 3rd scenario는 130 Point, 4th scenario는 131 Point로 구분되어 있다. 각각의 작업자 Point는 시나리오 내 절단 단계에 따라 구조물 및 선원항의 변화로 인해 작업자의 작업 위치가 변화하는 것을 토대로 설정하였다.

먼저 연마 제염이 적용되기 전 Hot to Cold 방식인 1st scenario에서 시간당 선량의 전체 평균은 영구정지 시점부터 30년 시점까지 순서대로 1.19E+00, 7.20E-01, 4.54E-01, 2.97E-01, 2.03E-01, 1.42E-01, 1.03E-01 mSv/hr로 평가되었으며, 영구정지 후 8.5년의 시점에서는 5.19E-01 mSv/hr로 평가되었다.

연마 제염 적용 전 Cold to Hot 방식인 2nd scenario에서 시간당 선량의 전체 평균은 영구정지 시점부터 30년 시점까지 순서대로 1.29E+00, 7.84E-01, 4.95E-01, 3.26E-01, 2.22E-01, 1.57E-01, 1.13E-01 mSv/hr로 평가되었으며, 영구정지 후 8.5년의 시점에서는 5.66E-01 mSv/hr로 평가되었다.

연마 제염 적용 후 Hot to Cold 방식인 3rd scenario에서 시간당 선량의 전체 평균은 각각 5.47E-01, 3.31E-01, 2.09E-01, 1.38E-01, 9.39E-02, 6.62E-02, 4.79E-02 mSv/hr로 평가되었으며, 영구정지 후 8.5년의 시점에서는 2.39E-01 mSv/hr로 평가되었다.

연마 제염 적용 후 Cold to Hot 방식인 4th scenario에서 시간당 선량의 전체 평균은 각각 6.08E-01, 3.13E-01, 2.04E-01, 1.34E-01, 9.14E-02, 7.44E-02, 5.20E-02 mSv/hr로 평가되었으며, 영구정지 후 8.5년의 시점에서는 2.26E-01 mSv/hr로 평가되었다.

작업자 위치에 따른 시간당 선량 분포도는 대표적으로 영구정지 시점에 대해서만 표현하였으며, 그림 35에 왼쪽 위부터 오른쪽 아래 순서대로 나타내었다. 이 외의 절단 시점은 시간 경과에 따라 지수함수적으로 감소되는 경향을 보이기 때문에 부록Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ에 전체 수치를 표로 나타내었다.

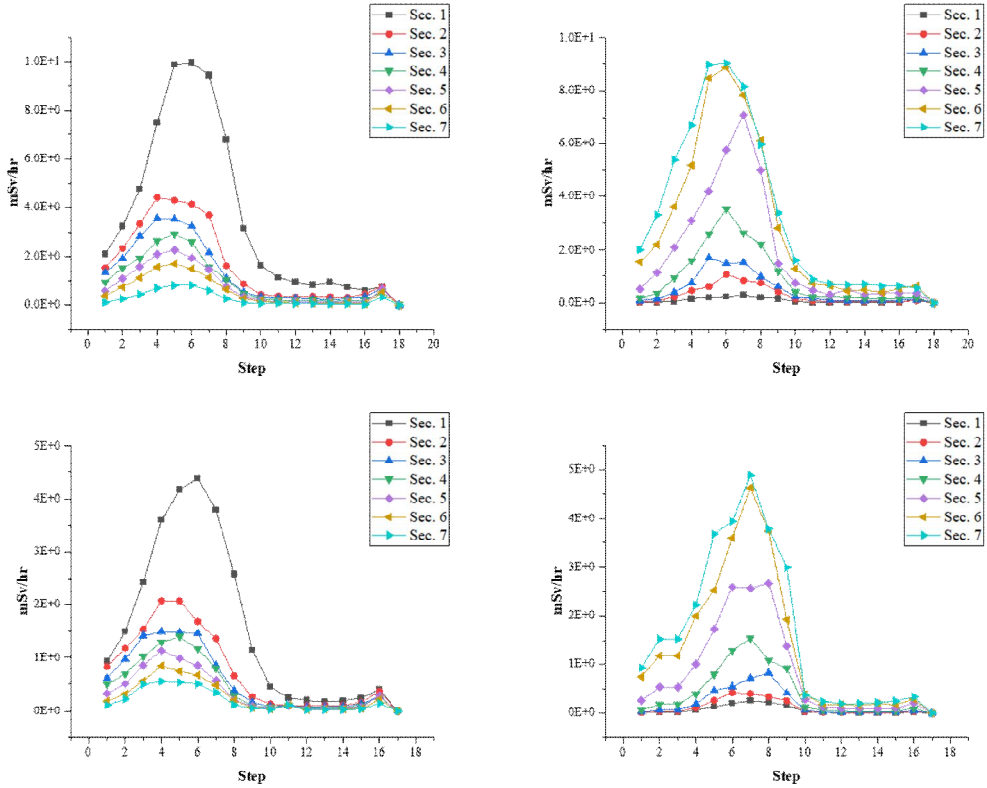


그림 35. 시나리오 별 작업자 위치에 따른 시간당 선량 분포도 (영구정지)

상호 간의 비교 결과, 일반적으로 Hot to Cold 방식이 Cold to Hot 방식보다 선량 측면에서 더 합리적인 방안으로 고려되는 것으로 파악되었다. 이는 방사성 오염이 낮은 곳을 제거하면서 진행하는 Cold to Hot 특성상 작업자가 방사성 오염이 높은 곳 방향으로 작업을 수행하기 때문에 제거되지 않은 선원향의 영향인 것으로 분석된다. Hot to Cold와 Cold to Hot에 따른 Section, Step의 진행 방향은 그림 34에 나타났다.

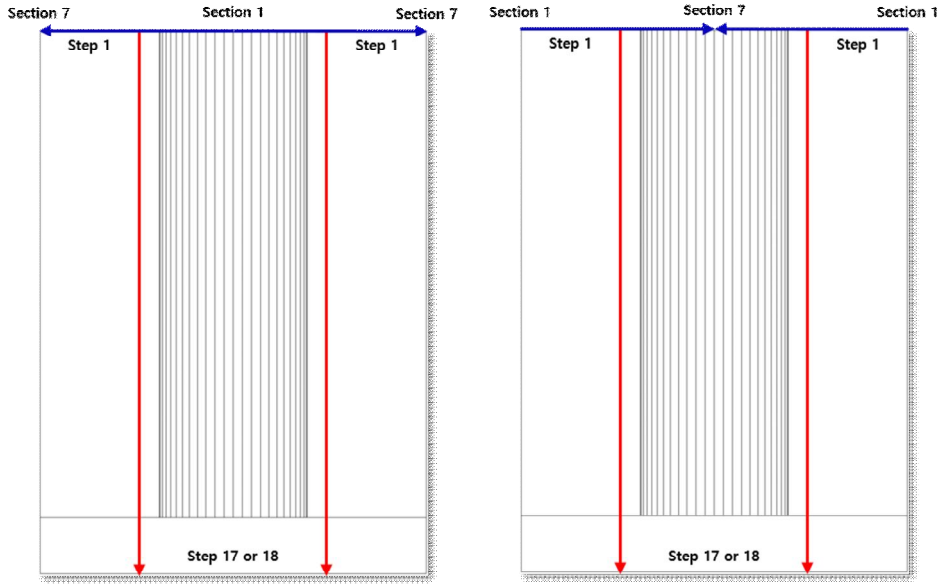


그림 36. Hot to Cold/Cold to Hot에 따른 Section, Step 진행방향

또한, 연마 제염 전/후의 시나리오를 상호 비교한 결과에서는 연마 제염으로 인한 효과가 있는지에 관한 판단보다는 어느 정도의 효과가 발생하는지가 중점이 되어 하므로 수치상으로 이에 대해 검증하였다. 연마 제염 전/후의 Hot to Cold와 Cold to Hot 각각에서의 비교를 수행한 결과, 평균 46.23%, 43%의 선량 감소의 효과를 보였다(그림 37). 이와 같은 결과를 보아, 연마 제염은 Bio-shield를 절단하는데 있어 사전에 요구되는 필수적인 작업으로 파악된다.

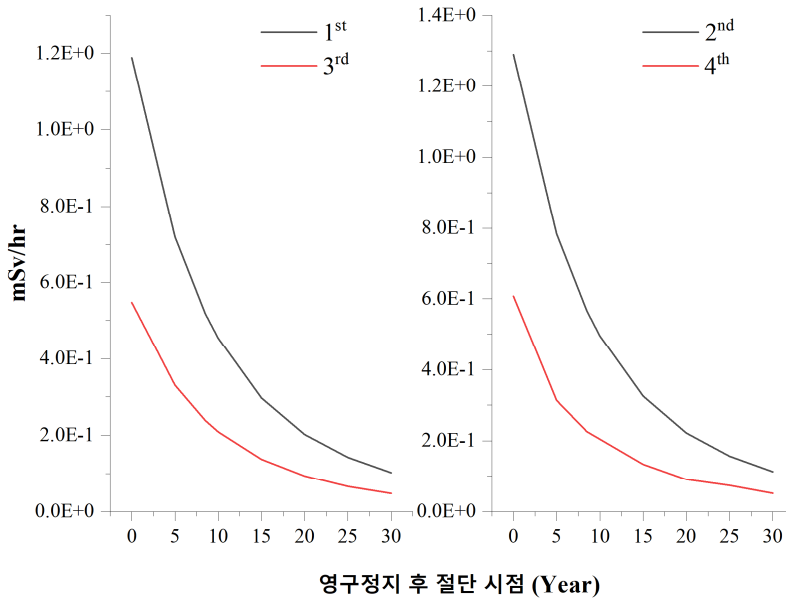


그림 37. 연마 제염 전/후에 따른 상호비교

절단 속도를 적용한 선량평가 결과는 표 18~21에 나타내었다. 일반적으로 Circular sawing의 경우, 절단 속도는 1~2 m²/hr이며, Diamond wire sawing, Grit blasting, Laser ablation의 경우, 각각 1~3, 5~10, 1.5~2 m²/hr의 절단 속도를 가지고 있다[28]. 각각의 절단 속도는 절삭기의 크기, 기기의 출력 등에 따른 변수가 존재하기 때문에 실제 현장에서 적용 시 아래 표를 고려한다면 적합한 절단 기술을 선정할 수 있을 것이라 사료된다.

표 18. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	5,600	3,390	2,440	2,140	1,400	954	671	485
	2	2,800	1,690	1,220	1,070	701	477	336	243
	3	1,870	1,130	814	712	467	318	224	162
	4	1,400	847	611	534	350	239	168	121
	5	1,120	677	489	427	280	191	134	97
	6	933	565	407	356	234	159	112	80.8
	7	799	484	349	305	200	136	95.9	69.3

	8	699	423	305	267	175	119	83.9	60.6
	9	622	376	271	237	156	106	74.6	53.9
	10	560	339	244	214	140	95.4	67.1	48.5

표 19. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	15,376	9,338	6,739	5,893	3,876	2,643	1,863	1,347
	2	7,688	4,669	3,370	2,946	1,938	1,321	932	674
	3	5,125	3,113	2,246	1,964	1,292	881	621	449
	4	3,844	2,335	1,685	1,473	969	661	466	337
	5	3,075	1,868	1,348	1,179	775	529	373	269
	6	2,563	1,556	1,123	982	646	440	311	225
	7	2,197	1,334	963	842	554	378	266	192
	8	1,922	1,167	842	737	484	330	233	168
	9	1,708	1,038	749	655	431	294	207	150
	10	1,538	934	674	589	388	264	186	135

표 20. 3rd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	2,738	1,656	1,203	1,056	704	489	353	263
	2	1,383	842	616	542	366	258	190	145
	3	931	571	420	371	253	182	136	106
	4	705	435	322	285	197	143	109	87
	5	570	354	263	234	163	120	93	75
	6	480	299	224	199	141	105	82	67
	7	415	261	196	175	125	94	74	62
	8	367	232	175	156	112	86	69	57
	9	329	209	159	142	103	79	64	54
	10	299	191	146	131	96	74	60	51

표 21. 4th scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 유효선량 (단위 : mSv)

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도	1	7,010	3,631	2,628	2,374	1,567	1,077	887	624
	2	3,519	1,829	1,328	1,201	798	553	458	326
	3	2,355	1,229	895	810	541	378	314	227

(m ² /hr)	4	1,773	929	678	615	413	290	243	177
	5	1,424	749	548	497	336	238	200	147
	6	1,192	628	461	419	285	203	171	127
	7	1,025	543	399	363	248	178	151	113
	8	901	478	353	321	220	159	135	103
	9	804	428	317	289	199	145	123	94
	10	726	388	288	263	182	133	114	88

해당 평가 결과는 Bio-shield를 절단하는데 작업자 1명이 투입되었을 때 발생하는 선량이기 때문에, 실질적으로 작업에 투입되는 인원 에 대한 개인선량으로 판단하기에는 무리가 있다. 따라서 가압기와 마찬가지로 작업자 투입 상황을 가정하기 위해 각 시나리오 내 수행되는 작업 단계에 따라 유효선량을 도출하여 연간 선량한도 20 mSv를 기준으로 투입 가능한 작업자 수를 계산하였다. 그리고 1 mSv를 넘지 않는 저선량 작업에 대해서는 일괄 합산하여 하나의 작업으로 고려하였다. ALARA에 입각한 작업자 수와 작업자 개인선량 평균은 표 22~25에 나타내었다. 괄호 안의 숫자는 작업자 수, 괄호 위의 숫자는 평균 개인선량을 의미한다.

표 22. 1st scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	16.14 (347)	14.13 (240)	12.39 (197)	11.82 (181)	9.86 (142)	8.22 (116)	7.14 (94)	6.3 (77)
	2	13.15 (213)	10.7 (158)	9.17 (133)	8.7 (123)	7.38 (95)	6.19 (77)	5.09 (66)	3.98 (61)
	3	11.07 (169)	8.9 (127)	7.98 (102)	7.42 (96)	6.23 (75)	4.82 (66)	3.80 (59)	3 (54)
	4	9.72 (144)	8.07 (105)	6.71 (91)	6.51 (82)	5.07 (69)	3.92 (61)	3.11 (54)	2.52 (48)
	5	8.89 (126)	7.36 (92)	6.19 (79)	6.01 (71)	4.38 (64)	3.47 (55)	2.68 (50)	2.43 (40)
	6	8.33 (112)	6.81 (83)	5.73 (71)	5.16 (69)	3.90 (60)	3.00 (53)	2.55 (44)	2.18 (37)
	7	7.76 (103)	5.90 (77)	5.06 (69)	4.77 (64)	3.51 (57)	2.67 (51)	2.4 (40)	2.48 (28)
	8	7.36 (95)	5.96 (71)	4.77 (64)	4.31 (62)	3.18 (55)	2.59 (46)	2.21 (38)	2.42 (25)
	9	6.76 (92)	5.45 (69)	4.37 (62)	3.89 (61)	2.94 (53)	2.59 (41)	2.41 (31)	2.70 (20)

	10	6.75 (83)	4.91 (69)	3.94 (62)	3.69 (58)	2.75 (51)	2.39 (40)	2.49 (27)	3.03 (16)
--	----	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

표 23. 2nd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	18.48 (832)	17.72 (527)	16.85 (400)	16.55 (356)	14.85 (261)	13.91 (190)	13.03 (143)	11.23 (120)
	2	17.16 (448)	15.94 (293)	14.65 (230)	14.30 (206)	12.83 (151)	11.10 (119)	10.71 (87)	9.49 (71)
	3	16.17 (317)	14.34 (217)	13.61 (165)	13.10 (150)	10.95 (118)	10.24 (86)	9.27 (67)	8.02 (56)
	4	15.19 (253)	13.73 (170)	12.39 (136)	11.79 (125)	10.53 (92)	9.44 (70)	8.32 (56)	6.87 (49)
	5	14.3 (215)	12.88 (145)	11.14 (121)	10.62 (111)	10.07 (77)	8.53 (62)	7.45 (50)	6.42 (42)
	6	13.78 (186)	11.97 (130)	10.70 (105)	10.68 (92)	9.36 (69)	8.01 (55)	6.90 (45)	5.91 (38)
	7	13.56 (162)	11.03 (121)	10.58 (91)	10.02 (84)	8.79 (63)	7.55 (50)	6.34 (42)	5.66 (34)
	8	12.99 (148)	10.71 (109)	10.03 (84)	9.95 (74)	8.50 (57)	6.88 (48)	6.13 (38)	5.10 (33)
	9	12.47 (137)	10.7 (97)	9.98 (75)	9.35 (70)	7.97 (54)	6.83 (43)	5.75 (36)	4.99 (30)
	10	11.92 (129)	10.49 (89)	9.63 (70)	8.93 (66)	7.45 (52)	6.29 (42)	5.48 (34)	4.81 (28)

표 24. 3rd scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	12.85 (213)	10.75 (154)	9.55 (126)	9.60 (110)	8.38 (84)	7.52 (65)	5.78 (61)	4.69 (56)
	2	10.09 (137)	9.25 (91)	8.10 (76)	7.74 (70)	6.00 (61)	4.70 (55)	3.73 (51)	3.38 (43)
	3	8.87 (105)	7.93 (72)	6.77 (62)	6.08 (61)	4.69 (54)	3.56 (51)	3.24 (42)	3.12 (34)
	4	6.19 (114)	4.78 (91)	3.70 (87)	3.35 (85)	2.49 (79)	2.02 (71)	1.73 (63)	1.70 (51)
	5	7.81 (73)	5.80 (61)	4.78 (55)	4.41 (53)	3.33 (49)	3.25 (37)	3.57 (26)	5.00 (15)
	6	7.49	5.25	4.22	3.91	3.27	3.08	5.13	6.71

		(64)	(57)	(53)	(51)	(43)	(34)	(16)	(10)
	7	6.59	4.74	3.84	3.43	3.19	3.47	4.96	6.84
		(63)	(55)	(51)	(51)	(39)	(27)	(15)	(9)
	8	5.91	4.37	3.43	3.33	3.12	3.72	6.86	7.17
		(62)	(53)	(51)	(47)	(36)	(23)	(10)	(8)
	9	5.48	4.02	3.30	3.31	3.22	4.95	6.41	9.01
		(60)	(52)	(48)	(43)	(32)	(16)	(10)	(6)
	10	5.15	3.74	3.31	3.27	3.41	4.94	6.72	12.87
		(58)	(51)	(44)	(40)	(28)	(15)	(9)	(4)

표 25. 4th scenario의 절단 시점 및 절단 속도에 따른 개인선량 [단위 : mSv, (명)]

		절단 시점 (year)							
		0	5	8.5	10	15	20	25	30
절단 속도 (m ² /hr)	1	17.31 (405)	15.13 (240)	14.21 (185)	13.80 (172)	12.24 (128)	10.77 (100)	10.95 (81)	10.07 (62)
	2	15.37 (229)	12.88 (142)	11.55 (115)	11.44 (105)	10.36 (77)	9.37 (59)	8.47 (54)	7.41 (44)
	3	14.19 (166)	11.49 (107)	10.40 (86)	10.25 (79)	9.33 (58)	7.87 (48)	7.49 (42)	6.3 (36)
	4	10.75 (165)	8.01 (116)	7.29 (93)	6.68 (92)	5.29 (78)	4.27 (68)	3.62 (67)	3.22 (55)
	5	11.97 (119)	10.25 (73)	9.29 (59)	8.88 (56)	8 (42)	6.10 (39)	6.89 (29)	7.01 (21)
	6	11.35 (105)	9.98 (63)	8.54 (54)	8.38 (50)	7.11 (40)	5.97 (34)	6.59 (26)	6.07 (21)
	7	11.15 (92)	9.2 (59)	8.15 (49)	8.07 (45)	6.2 (40)	6.84 (26)	6.85 (22)	5.96 (19)
	8	10.98 (82)	8.70 (55)	8.21 (43)	7.65 (42)	5.96 (37)	6.92 (23)	6.16 (22)	6.41 (16)
	9	11.01 (73)	8.40 (51)	7.55 (42)	7.04 (41)	6.22 (32)	6.29 (23)	6.17 (20)	6.73 (14)
	10	10.52 (69)	8.26 (47)	7.20 (40)	6.57 (40)	6.5 (28)	6.65 (20)	5.70 (20)	6.26 (14)

2. 준위별 폐기물 발생량

원전 해체 중 절단 과정에서는 대상 구조물의 특성에 따라 다양한 폐기물이 발생한다. 특히, 전체 해체 비용 산정에서 폐기물 처분 및 처리 항목은 약 39%의 비중을 가진 만큼 해체 과정에서 발생하는 폐기물량은 해체 시 매우 중요한 고려사

항임이 틀림없다[31]. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 시나리오에 따른 폐기물 발생 추이를 분석하기 위해 시나리오별 발생하는 절단 조각의 Drum 내 적재 시현을 통해 총 Drum 발생량 및 각 Drum 당 충진율을 도출하였다. 또한, 각 절단 조각의 비방사능 값을 계산하여, ‘방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정’에 따라 준위별 분류를 수행하였다.

가. Pressurizer

먼저 가압기의 경우, 1st case scenario에서의 절단 형상은 그림 38에 나타내었다.

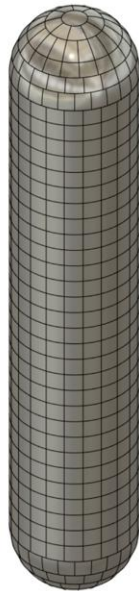


그림 38. 가압기 절단 형상 (1st)

1st case scenario에서는 총 818개의 조각이 발생되고, 이를 Drum 내 최대한 적재하게 된다면, 164 Drum이 발생한다. 먼저 Lower head 부위 절단 폐기물이 적재된 Drum은 영구정지 시점부터 30년 시점까지 모든 절단 시점에서 저준위 폐기물로서 분류되는 것으로 나타났다. 그 외 나머지 부분은 영구정지 시점을 제외하고 모든 시점에서 극저준위 폐기물로서 분류되는 것으로 평가되었다.

절단 시점에 따른 준위별 Drum 발생량 변화는 표 26에 나타냈으며, 괄호 안의

숫자는 분류기준이 되는 Co-60의 비방사능 값을 지칭한다. 또한, L.H는 Lower head, B는 Cylindrical body, U.H는 Upper head의 약자이다.

표 26. 1st scenario에 따른 절단 시점별 준위 변화 추이 [단위 : Bq/g, (준위)]

Part	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30
U.H	10.53 (L)	5.46 (V.L)	3.44 (V.L)	2.83 (V.L)	1.46 (V.L)	0.76 (V.L)	0.39 (V.L)	0.2 (V.L)
B	11.08 (L)	5.74 (V.L)	3.62 (V.L)	2.97 (V.L)	1.54 (V.L)	0.8 (V.L)	0.41 (V.L)	0.21 (V.L)
L.H	43,649 (L)	22,616 (L)	14,273 (L)	11,718 (L)	6,072 (L)	3,146 (L)	1,630 (L)	845 (L)

가압기의 1st scenario에 따른 Part 별 Drum 발생량은 각 Head에서 18 Drum씩, Body에서 128 Drum이 발생된다. 따라서, 영구정지 시점에서는 저준위 Drum은 164 Drum이 발생되고 영구정지 이후 5년이 지난 시점부터는 저준위가 18 Drum, 극저준위가 146 Drum 발생하는 것으로 평가되었다. 그림 39, 40은 전체 폐기물에 대한 폐기물 적재 상태 및 총 Drum 발생 현황을 나타내고 있다.

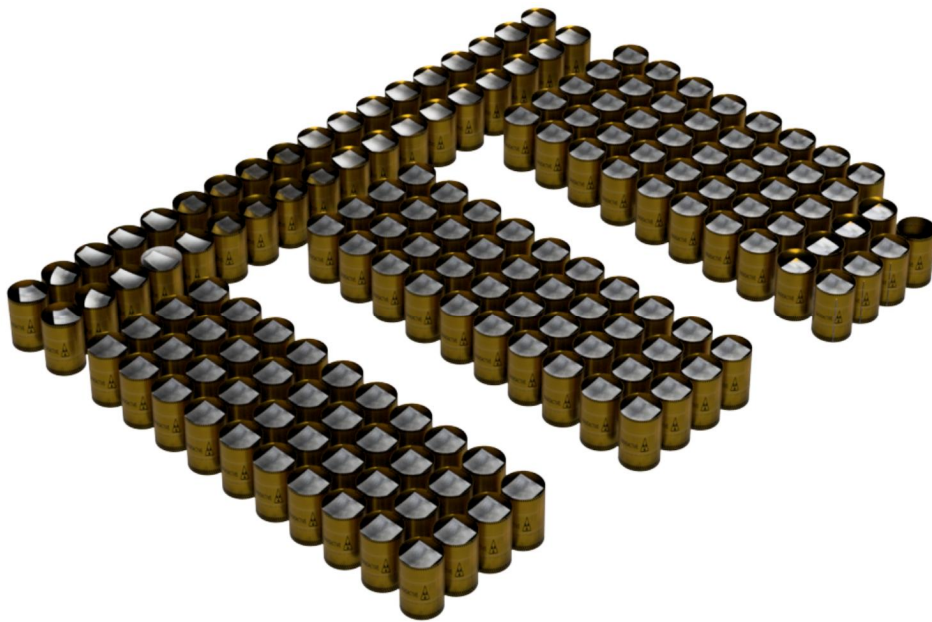


그림 39. 1st case scenario, Drum 발생량 (가압기)

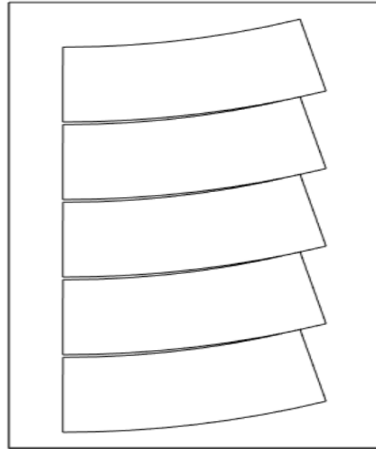


그림 40. Drum 내 적재
(예시)

또한, 개별 Drum에 따른 총진율 분석 결과, Drum 내 적재된 절단 조각의 체적이 평균 $102,506 \text{ cm}^3$ 으로 48.2%의 총진율로 계산되었다. 이는 시나리오 구축 시, 절단 수행 빈도를 줄이기 위해 최대한 큰 절단 형상으로 절단하였기에 Drum 내 빈공간이 존재하여 Drum 당 총진율이 다소 떨어지게 계산되는 것으로 판단된다.

2nd case scenario의 경우에는 총 524개의 조각이 발생되고, 이에 따른 총 Drum 발생량은 90개로 평가되었다. 또한, 1st scenario와 동일하게 Lower head 부위 절단 폐기물이 적재된 Drum은 영구정지 시점부터 30년 시점까지 모든 절단 시점에서 저준위 폐기물로서 분류되는 것으로 나타났다. 그 외 나머지 부분은 영구정지 시점을 제외하고 모든 시점에서 극저준위 폐기물로서 분류되는 것으로 평가되었다.

가압기의 2nd scenario에 따른 Part 별 Drum 발생량은 각 Head에서 10 Drum 씩, Body에서 70 Drum이 발생된다. 따라서, 영구정지 시점에서는 저준위 Drum은 90 Drum이 발생되고 영구정지 이후 5년이 지난 시점부터는 저준위가 10 Drum, 극저준위 Drum이 80 Drum 발생하는 것으로 평가되었다.

가압기의 2nd scenario에 따른 절단 형상 및 Drum 발생 현황은 그림 41, 42에 나타내었다. 또한, Drum 내 적재 상태는 그림 43과 같다. 2nd scenario에 따른 Drum 내 적재된 절단 조각의 체적 계산 결과, 평균 $186,637 \text{ cm}^3$ 으로 총진율은 48.9%로 평가되었다.

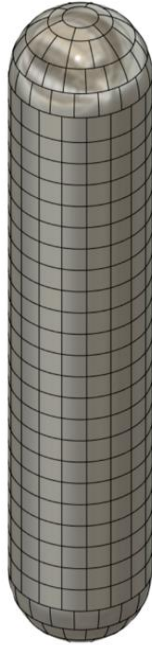


그림 41. 가압기 절단 형상 (2nd)

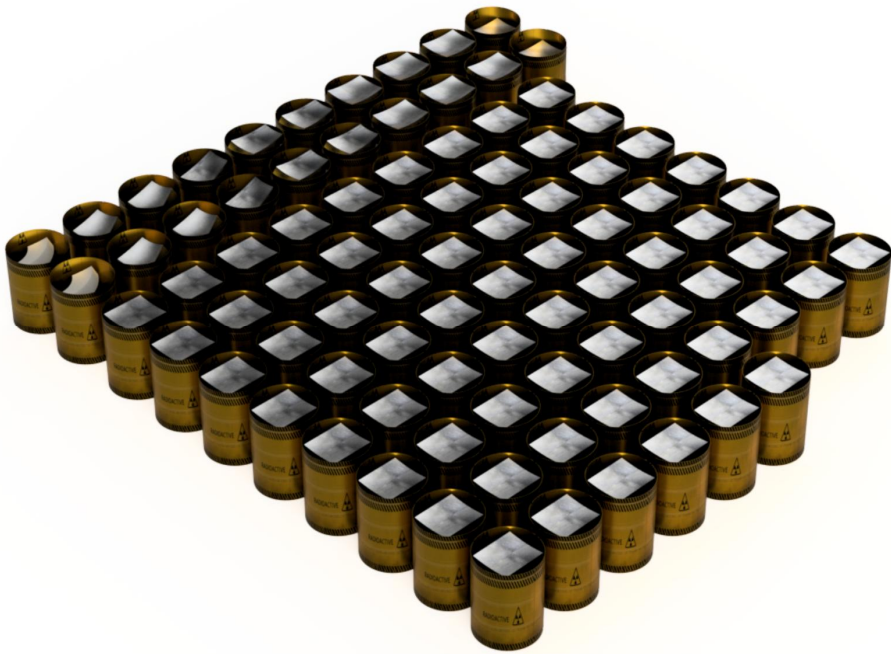


그림 42. 2nd case scenario, Drum 발생량 (가압기)

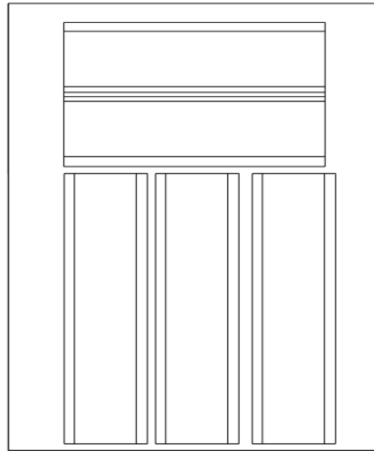


그림 43. Drum 내 적재
(예시)

나. Bio-shield

Bio-shield의 경우, 1st case scenario와 2nd case scenario, 3rd case scenario와 4th case scenario는 각각 200L 처분 Drum의 규격에 따라 시나리오를 구축하였기 때문에, Drum 발생량에서는 차이가 존재하지 않으며, Hot to Cold와 Cold to Hot에 따른 선량 차이가 존재할 뿐이다. 따라서 두 집단 시나리오의 경우, 각각 연마 제염 적용과 비적용으로 나누어 분석하였다.

먼저 연마 제염을 적용하지 않은 1st 와 2nd case scenario에서 발생한 절단 조각을 Drum 내 적재한다면, 총 9,070 Drum이 발생한다. 또한, 준위별 발생량을 평가하기 전, Bio-shield 선원항에 적용된 핵종 중 Eu-152의 경우, Co-60과 달리 ‘방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정’에 중준위 규정에 대해 고시되지 않았기에 저준위가 아닌 중·저준위로 분류하였다. 이에 따라 총 9,070 Drum에서 절단 시점에 따른 준위별 Drum 발생량은 표 27과 그림 44에 나타낸 것과 같다.

표 27. 연마 제염 전 시나리오에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (단위 : EA)

분류	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30

중·저준위	1,617	1,561	1,466	1,426	1,306	1,306	1,303	1,231
극저준위	828	884	979	1,019	1,094	1,058	1,061	1,048
자체처분	6,625	6,625	6,625	6,625	6,670	6,706	6,706	6,791

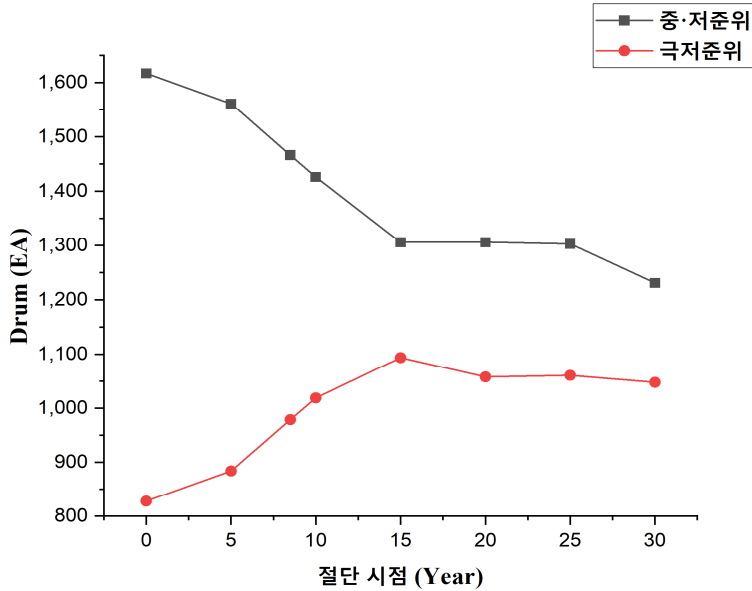


그림 44. 시점에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (연마 제염 전)

그림 44와 같이 저준위 대상 폐기물은 절단 시점에 따라 감소하는 경향을 보이지만, 극저준위의 경우에는 시점에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 상대적으로 오염이 집중되어 있는 내부표면에서 발생하는 저준위 폐기물이 절단 시점에 따라 방사성 붕괴로 감소되어 극저준위 폐기물로써 전환되기 때문이며, 15년이 지난 시점부터는 반감기의 영향으로 Co-60의 영향은 줄어들고, Eu-152 영향은 커지기 시작하면서 발생하는 현상으로 보여진다.

또한, 연마 제염 전의 시나리오에서 Drum 충전율은 Drum 내 절단 조각의 체적 평균 $126,723 \text{ cm}^3$ 으로 59.6%의 충전율로 계산되었다. 이 중 처분 대상이 되는 중·저준위와 극저준위 대상 폐기물의 경우에는 평균 $122,911 \text{ cm}^3 \sim 123,056 \text{ cm}^3$ 으로 57.8 ~ 57.9%의 충전율을 갖는다.

원자로 Hole이 위치한 Main part 1에서 한 개층에 대한 Drum 발생량은 그림 45, Main part 2 (5 cm part)는 그림 46, Below part에 대한 Drum 발생량은 그림 47에 나

타내었다.

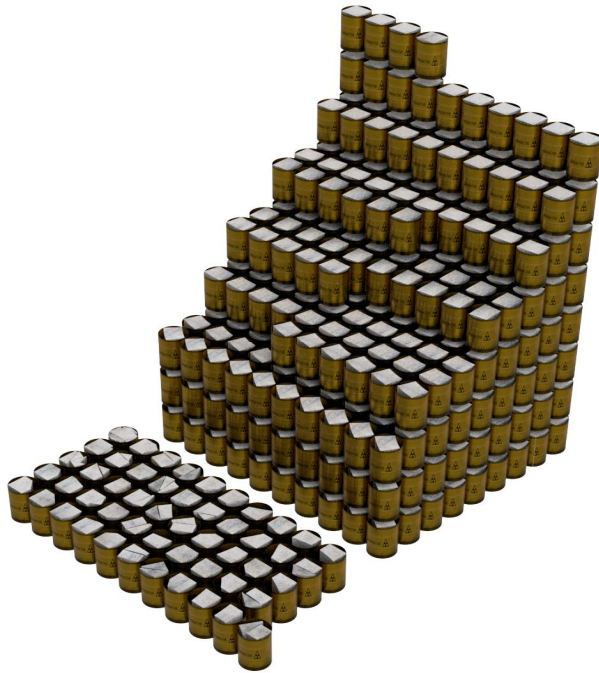


그림 45. Main part I Drum 발생량 (연마 제염 전)



그림 46. Main part II Drum 발생량 (연마 제염 전)



그림 47. Below part Drum 발생량 (연마 제염 전)

연마 제염을 적용한 3rd 와 4th case scenario에서 발생된 절단 조각을 Drum 내 적재한다면, 총 8,951 Drum이 발생한다. 또한, 앞서 설명하였듯이 준위별 분류의 경우, 중·저준위, 극저준위, 자체처분으로 나누어 분류하였다. 이에 따라 연마 제염을 적용한 시나리오의 경우, 총 8,951 Drum에서 절단 시점에 따른 준위별 Drum 발생량 변화는 표 28, 그림 48에 나타내었다.

표 28. 연마 제염 후 시나리오에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (단위 : EA)

분류	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30
중·저준위	1,383	1,343	1,270	1,270	1,119	999	962	962
극저준위	1,101	1,141	1,093	1,093	1,119	1,199	1,198	1,084
자체처분	6,467	6,467	6,588	6,588	6,713	6,753	6,791	6,905

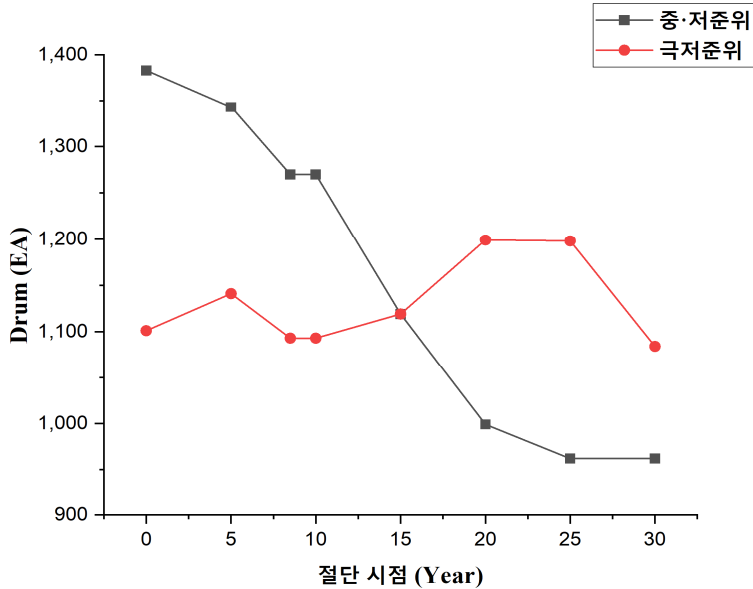


그림 48. 시점에 따른 준위별 Drum 발생량 추이 (연마 제염 후)

그림 48에서는 연마 제염 전 그래프와 다르게 교차되는 지점이 발생하고, 더 역동적인 변화를 보이고 있다. 이는 오염이 집중되어 있는 내부표면이 연마 제염으로 제거가 되었으므로, 전체적인 폐기물 준위가 낮아짐에 따라 발생하는 현상으로 보여진다. 또한, 중·저준위 대상 폐기물은 절단 시점에 따라 꾸준히 감소하는 경향을 보이지만, 극저준위의 경우에는 자체처분으로의 변화 및 저준위에서 변환되는 극저준위 폐기물의 영향으로 불규칙한 추이를 갖고 있다.

연마 제염 적용 시나리오에서의 Drum 당 총진율은 평균 $123,201 \text{ cm}^3$ 으로 58%의 총진율로 평가되었다. 이 중 처분 대상이 되는 중·저준위와 극저준위 대상 폐기물의 경우에는 $121,403 \text{ cm}^3 \sim 122,553 \text{ cm}^3$ 으로 57.1 ~ 57.7%의 총진율을 갖는다. Main part 1에서의 Drum 발생량은 그림 49, Main part 2 (68 cm part)는 그림 50, Below part에서의 Drum 발생량은 그림 51과 같다.



그림 49. Main part I Drum 발생량 (연마 제염 후)



그림 50. Main part II Drum 발생량 (연마 제염 후)



그림 51. Below part Drum 발생량 (연마 제염 후)

3. 해체폐기물 처분 비용

2021년 3월 주관부처에서 제시한 해체 비용 항목에 따르면 총 해체 비용 중 39%의 비중을 갖는 폐기물 처분 및 처리 비용을 미루어 볼 때, 발생하는 폐기물의 준위별 분류는 매우 중요한 과정이라 말할 수 있다. 본 단락에서는 앞서 평가된 준위별 발생량을 통해 국내 고리1호기 해체 비용 산정을 근거로 각 시나리오에 따른 폐기물 처분 비용을 계산하였다. 특히, 가압기 시나리오 중 320L를 적용한 경우에는 Drum 당 1.6배의 가중치를 두어 해체 비용 산정에 기준이 되는 200L 처분 Drum에 맞추고자 하였다. 폐기물 처분 비용은 ‘방사성 폐기물 관리비용 및 사용후핵연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정’에 따라 200L 기준 15,110,000원/Drum이다.

가. Pressurizer

가압기의 경우, 1st scenario에서 발생하는 폐기물은 총 164 Drum이 발생하고, 2nd scenario의 경우, 90 Drum에 가중치 1.6배 계산 시, 144 Drum이 발생한다. 절단 시점에 따른 처분 비용은 자체처분 Drum이 발생하지 않았으므로, 모든 절단 시점에 대해 처분 비용은 동일하게 평가된다. 각 시나리오에 따른 처분 비용은 1st scenario에서 약 24.8억, 2nd scenario의 처분 비용은 약 21.8억으로 계산되었다. 이는 고리1호기 폐기물 처분 및 처리 비용인 3,186억과 비교하였을 때, 각각 0.78%, 0.68% 비중을 차지하는 것으로 분석되었다[31].

나. Bio-shield

Bio-shield의 경우, 연마 제염 전 시나리오인 1st scenario와 2nd scenario에서 발생하는 폐기물은 총 9,070 Drum이 발생하고, 연마 제염 후 시나리오인 3rd scenario와 4th scenario에서 발생하는 폐기물은 총 8,951 Drum이 발생한다. 이 중 자체처분을 제외한 처분 대상이 되는 폐기물 발생량을 기준으로 절단 시점에 따라 변화되는 처분 비용 추이는 표 29에 나타내었다.

표 29. 절단 시점에 따른 처분 비용 변화 추이 (단위 : 억, (처분 비용 비중 : %))

시나리오	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30
1st,	369.4				362.6	357.2		344.4
2nd	(11.6)				(11.38)	(11.21)		(10.81)
3rd,	375.3			357	338.2	332.1	326.4	309.2
4th	(11.78)			(11.21)	(10.61)	(10.42)	(10.24)	(9.7)

200L 기준 15,110,000원/Drum을 기준으로 처분 비용을 계산하면, 연마 제염 전 시나리오에서 영구정지 시점부터 369.4억, 30년 시점의 344.4억까지 줄어드는 것으로 파악되었다. 이는 고리1호기 처분 비용 대비, 10.81~11.6%의 비중을 차지한다. 연마 제염 후 시나리오는 375.3억에서 309.2억으로, 이는 9.7~11.78%의 비중을 차지하는 값이다.

제 5장. 결론

본 연구에서는 해체 시 대형기기에 대한 절단 시나리오를 구축하여 각 시나리오에 따른 ALARA 영향 및 폐기물 발생량에 대한 평가를 수행하였다. 평가 대상으로서 선정된 대형기기로는 금속 재질로써 가압기, 콘크리트 재질의 Bio-shield가 있다. 먼저 가압기는 1차 측 대형기기임에도 불구하고 증기발생기, 원자로 등과 같은 대표적인 대형기기에 비해 작업자 피폭선량, 선원항 평가 등 상대적으로 연구가 미흡한 실정이다. 또한, Bio-shield의 경우에는 해체폐기물의 60~80%의 비중을 갖는 콘크리트 재질로써, 전체적인 해체 비용에 지대한 영향을 미치는 구조물이기 때문에 평가 대상으로서 선정하였다.

평가는 BR-3, BR-2 해체에 적용된 사례가 있는 만큼 신뢰도 측면에서 확보되었다고 판단되는 VISIPLAN S/W를 사용하였다. 평가 시 기본 바탕이 되는 기기 제원 및 선원항의 경우, 가압기는 Westinghouse의 AP-1000 가압기 모델을 참조하였으며, Bohunice V1의 선원항을 적용하였다. Bio-shield는 고리 1호기의 제원과 선원항 평가 Data를 확보하여 이를 평가에 적용하였다.

추가로 절단 시점에 대한 상황을 가정하기 위해 영구정지 시점부터 30년까지 5년 간격으로 방사성 붕괴를 각각 적용하고, 기존 계획된 고리1호기 해체사업 추진 일정을 바탕으로 영구정지 이후 8.5년에 대한 시점도 추가로 고려하였다. 시나리오는 기본적으로 방사성 폐기물 처분 Drum의 규격에 근거하여 절단 조각이 Drum 내에 충분히 충전되기 위한 조건으로써 구축하였으며, 모든 작업자는 절단 대상물에서 100 cm 이격된 거리에서 수행되었다고 가정하였다. 절단 속도 측면에서는 먼저 금속 재질인 가압기의 경우, 상용화된 절단 기술별 절단 속도에 근거하여 10~100 cm/min까지 10 cm/min 간격으로 범위를 설정하였고, Bio-shield는 콘크리트에 적용되는 절단 속도인 1 m²/hr부터 10 m²/hr까지 1 m²/hr 간격의 범위를 지정하여 평가에 적용하였다.

가압기의 경우, 200L, 320L Drum의 제원을 기준으로 설정하여 총 2가지 시나리오를 구축하였으며, Bio-shield는 200L 처분 Drum만을 기준으로 잡았지만, 방사성 오염이 높은 곳에서 낮은 곳 순서대로 절단하는 Hot to Cold 방식과 방사성 오염이 낮은 곳에서 높은 곳 순서대로 절단하는 Cold to Hot 방식으로 구분 지어 분류하였다. 이와 연계하여 Bio-shield 절단 전 사전 작업의 일환으로 수행되는 표면 연마

제염의 상황을 추가로 적용하여 총 4가지 시나리오에 따른 평가를 수행하였다.

가압기의 평가 결과, 선량 측면에서 1st scenario는 영구정지부터 30년까지 평균 $9.59E-01 \sim 1.75E-02$ mSv/hr의 시간당 선량 분포를 보였고, 이에 절단 속도를 적용하여 유효선량을 도출한 결과에서는 최댓값 $5.75E+01$ mSv부터 최솟값 $1.00E-01$ mSv까지의 유효선량 변화 추이를 도출하였다. 2nd scenario의 경우에는 $7.7E-01 \sim 1.37E-02$ mSv/hr의 시간당 선량 분포를 보였고, 절단 속도 적용 시, 최댓값인 $3.34E-01$ mSv부터 $5.9E-02$ mSv까지의 유효선량으로 평가되었다. 앞서 도출된 유효선량은 가압기를 절단하는데 단 1명의 작업자를 투입되었을 때 노출되는 피폭선량이므로, 개인에 대한 선량으로 적용하기에는 부적합하다. 이에 따라, 각 시나리오 내 단계별 유효선량에 연간 선량한도 20 mSv를 기준으로 투입되는 작업자 수를 재산정하여 집단선량에 따른 개인선량을 도출하였다. 집단선량은 앞서 평가된 유효선량으로 적용되었고, 개인선량은 1st scenario부터 최댓값 4.42 mSv부터 최솟값 0.1 mSv, 2nd scenario의 경우에는 최댓값 3.72 mSv부터 최솟값 0.06 mSv로 도출되었다.

폐기물 발생 측면에서는 가압기의 모든 시나리오에서 자체처분 대상 폐기물은 발생하지 않았고, 영구정지 시점에 대해서만 모든 폐기물이 저준위로 분류되었다. 그 외에 절단 시점은 Lower head에서만 저준위로 분류되고, Cylindrical body, Upper head에서는 극저준위로 분류되는 폐기물이 발생하였다. 고리1호기 해체 시 예상 처분 비용과 가압기에서 발생하는 폐기물 처분 비용을 상호 비교한 결과, 각각 0.78, 0.68%의 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

Bio-shield의 평가 결과, 연마 제염을 적용하기 전의 시나리오인 1st scenario에서 $1.19E+00 \sim 1.03E-01$ mSv/hr, 2nd scenario에서는 $1.29E+00 \sim 1.13E-01$ mSv/hr로 평가되었고, 연마 제염을 적용한 시나리오인 3rd scenario에서 $5.47E-01 \sim 4.79E-02$ mSv/hr, 4th scenario에서는 $6.08E-01 \sim 5.2E-02$ mSv/hr의 시간당 선량 분포가 도출되었다. 이에 절단 속도 적용 시, 최댓값은 연마 제염 전 Cold to Hot 시나리오에서 영구정지 시점 및 $1 \text{ m}^2/\text{hr}$ 의 절단 속도 조건에서 도출되었으며, 수치는 $1.54E+04$ mSv이다. 최솟값은 연마 제염 후 Hot to Cold 시나리오에서 30년 절단 시점 및 $10 \text{ m}^2/\text{hr}$ 조건에서 도출되었으며, 수치는 $5.15E+01$ mSv이다. 그리고 앞서 설명한 개인선량 도출의 필요성과 마찬가지로 Bio-shield에서도 작업 투입 인원에 대해 재산정하여 개인선량을 도출하였다. 집단선량은 앞서 평가된 유효선량으로 적용되었고, 개인선량은 연마 제염 전의 Hot to Cold, Cold to Hot 순서대로 2.18~16.14 mSv, 4.81~18.48 mSv, 연마 제염 후에는 1.7~12.85 mSv, 3.22~17.31 mSv의 범위로써 도출되었다.

폐기물 발생 측면에서는 연마 제염 전 시나리오의 경우, 영구정지 시점부터 30년 시점까지 처분 대상 폐기물 발생량은 2,279~2,445 Drum, 연마 제염 후의 경우, 2,046~2,484 Drum이 발생되었다. 이는 고리1호기 해체 시 예상 처분 비용인 약 3,186억원 대비 10.81~11.6%, 9.7~11.87% 비중을 차지하는 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 다양한 절단 시나리오에 따른 작업자의 ALARA 영향과 폐기물 발생량 산정을 통한 전체적인 해체 계획에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구에서는 다양한 절단 시나리오와 넓은 범위의 절단 속도 및 시점에 대해 고려하였고, 각각의 조건에 따른 집단선량 및 개인선량을 도출하였다. 다양하게 고려된 절단 속도와 절단 시점은 향후 본격적인 해체 시, 구조물에 적용하기 위한 최적화된 절단 기술 선정에 참조할만한 사전 연구로써 고려될 수 있으며, 지연 해체 및 즉시 해체, 그리고 구조물별 절단 순서에 대한 근거자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 실제 절단 시, 본 연구 결과와 비교 분석을 수행한다면, 추후 연구에서는 보다 더 신뢰도 있는 연구 방향성을 제시해 줄 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 정지은. (2018). 원자력발전소 해체 관련 현황 및 대응방안, 국회입법조사처, ISSN 2005-744X.
- [2] H.J. Lee, et al., Study of Decommissioning Organization and Target Doses for Management of Radiation Exposure to Workers at Nuclear Facilities, Journal of Radiation Industry 12(1) (2018) 89-96.
- [3] KAERI, Study on the state of the arts technologies and policy trends for the decommissioning of nuclear installations and facilities, 2005. KAERI/RR-2608/2005.
- [4] KAERI, A state of the Art on Decommissioning of Nuclear Facilities in Japan, 2002. KAERI/AR-633/2002.
- [5] IAEA, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, 2018. NW-T-1.14 (Rev.1).
- [6] J.S. Song, M.Y. Jung & S.H. Lee, A Study on the Applicability for Primary System Decontamination through Analysis on NPP Decommission Technology and International Experience, JNFCWT 14(1) (2016) 45-55.
- [7] KAERI, Operation Technology of the Decontamination System in Radioactive Wastes Treatment Facility, 2001. KAERI/TR-1895/2001.
- [8] JASIC, 2022, <https://www.jasic.co.uk/post/guide-to-plasma-cutting>.
- [9] Kjellberg, 2022, <https://www.kjellberg.de/oxy-fuel-cutting.html>
- [10] Silvio. G, Erica. M, Gianluca. R & Vincenzo. T, Experimental Investigation of Industrial Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality, Applied science 10(14) (2020), <https://doi.org/10.3390/app10144956>
- [11] S.H. Lee, M.H. Lee, H.J. Ahn & J.S. Song, A Study on the Evaluation of Radiation Exposure Dose for Treatment Worker of Decommissioning Metal Wastes in Mobile Radiochemistry Analysis Facility, Journal of Radiation Industry 15(1) (2021) 65-69.
- [12] KAERI, Radiation resistant Requirement Analysis of a Device for the Advanced Spent Fuel Conditioning Process, 2003. KAERI/TR-2533/2003.
- [13] KAERI, A State of the Art Report on Technologies of a Safety Assessment and a Radioactivity Exposure Assessment for the Decommissioning Process of Nuclear

- Facilities, 2007. KAERI/AR-782/2007.
- [14] Schwarz Software & Consulting, LLC, <http://www.mcnpvised.com/visualeditor/cellcreation.html>
- [15] 이재기. (2016). Principles of Radiation Protection(Vol. 1), 한국방사선진흥협회, pp. 313, 497.
- [16] 김선일. (2022). 원전해체 중 발생한 에어로졸 흡입으로 인한 작업자의 내부피폭선량 평가 연구. 박사학위논문, 조선대학교, 광주.
- [17] Mohamed. S, Ragai. A & Timothy. M, Pressurizer dynamic model and emulated programmable logic controllers for nuclear power plants cybersecurity investigations, Annals of Nuclear Energy 154 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108121>.
- [18] KAERI, Development of the Integrated Assessment System and Remote Control Technology for Decommissioning Process, 2017.
- [19] K.Y. Lee, et al., Trends in Technology Development for the Treatment of Radioactive Concrete Waste, JNFCWT 16(1) (2018) 93-115.
- [20] Jianquan. L, Jiguo. Z, Jingda. S & Dong. L, Research of PWR Pressurizer Insurge Characteristics on Three-Dimensional Transient Modelling, Science and Technology of Nuclear Installations (2018), <https://doi.org/10.1155/2018/8150879>
- [21] C.S. Cheon, C.L. Kim, The Dismantling and Disposal Strategy of a Biological Shield for Minimization of Radioactive Concrete Waste During Decommissioning of a Nuclear Power Plant, JNFCWT 15(4) (2017) 355-367.
- [22] World Nuclear Power Market INSIGHT, 해외 사례를 참고한 원전 해체사례 시사점 및 해체제도 개선방향에 대한 제언, 에너지경제연구원, 2021.
- [23] Boris. R, Silvia. D & Lubomir. M, Determination of difficult to measure radionuclides in primary circuit facilities of NPP V1 Jaslovske Bohunice, J Radioanal Nucl. Chem. (2013), <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2679-4>
- [24] Westinghouse Technology Systems Manual, Rev 10/08, Section 2.1, USNRC HRTD, 2008.
- [25] Thermocoax designs, tests and improve nuclear heating solution, Thermocoax Nuclear, <https://www.thermocoax-nuclear.com/heating-solutions/>.
- [26] KAERI, Regulation on Radioactive Waste Management and Guidelines on the

- Collection, Packing, and Management of Radioactive Waste, 2013. KAERI/TR-29 02/2005.
- [27] 안희진, 원전 해체시 발생되는 방사성 폐기물 포장용기에 대한 고찰, 한국방사성폐기물학회 춘계학술대회 논문요약집 (2016) 245-246.
- [28] OECD/NEA, Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures, 2011. NEA/RWM/R(2011)1.
- [29] KIMM, Development of metal cutting technologies for decommissioning nuclear facilities, 2019.
- [30] KAERI, 원전 핵심설비 해체공법 평가기술 개발, 최종보고서, 2013.
- [31] KISTEP, 원전해체핵심 기술개발사업, 2020년도 예비타당성조사 보고서, 2021.

부록 I

- 가압기 1st scenario 시간당 선량 분포 -

측면 절단	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30
1	6.27E+00	2.93E+00	1.84E+00	1.51E+00	7.87E-01	4.10E-01	2.15E-01	1.14E-01
2	5.45E+00	2.59E+00	1.63E+00	1.34E+00	6.94E-01	3.61E-01	1.89E-01	9.96E-02
3	4.42E+00	2.10E+00	1.32E+00	1.09E+00	5.64E-01	2.93E-01	1.53E-01	8.07E-02
4	3.54E+00	1.69E+00	1.06E+00	8.72E-01	4.53E-01	2.35E-01	1.23E-01	6.45E-02
5	2.43E+00	1.16E+00	7.32E-01	6.01E-01	3.12E-01	1.62E-01	8.47E-02	4.45E-02
6	1.36E+00	6.50E-01	4.10E-01	3.36E-01	1.75E-01	9.09E-02	4.75E-02	2.50E-02
7	6.03E-01	2.88E-01	1.82E-01	1.49E-01	7.74E-02	4.03E-02	2.11E-02	1.11E-02
8	2.32E-01	1.12E-01	7.08E-02	5.81E-02	3.02E-02	1.57E-02	8.18E-03	4.29E-03
9	8.64E-02	4.32E-02	2.73E-02	2.24E-02	1.16E-02	6.04E-03	3.15E-03	1.65E-03
10	3.47E-02	1.75E-02	1.11E-02	9.08E-03	4.71E-03	2.45E-03	1.28E-03	6.71E-04
11	1.52E-02	7.70E-03	4.86E-03	3.99E-03	2.07E-03	1.08E-03	5.63E-04	2.96E-04
12	7.19E-03	3.67E-03	2.31E-03	1.90E-03	9.87E-04	5.14E-04	2.68E-04	1.41E-04
13	3.68E-03	1.88E-03	1.18E-03	9.73E-04	5.06E-04	2.63E-04	1.38E-04	7.28E-05
14	2.18E-03	1.11E-03	6.99E-04	5.74E-04	2.99E-04	1.56E-04	8.20E-05	4.37E-05
15	1.78E-03	9.01E-04	5.70E-04	4.68E-04	2.44E-04	1.28E-04	6.75E-05	3.63E-05
16	2.13E-03	1.08E-03	6.82E-04	5.60E-04	2.92E-04	1.52E-04	8.03E-05	4.29E-05
17	2.94E-03	1.50E-03	9.47E-04	7.78E-04	4.04E-04	2.10E-04	1.10E-04	5.79E-05
18	3.61E-03	1.85E-03	1.17E-03	9.57E-04	4.97E-04	2.58E-04	1.34E-04	7.03E-05
19	3.69E-03	1.88E-03	1.19E-03	9.75E-04	5.05E-04	2.62E-04	1.37E-04	7.13E-05
20	3.66E-03	1.86E-03	1.17E-03	9.63E-04	5.00E-04	2.59E-04	1.35E-04	7.05E-05
21	4.08E-03	2.07E-03	1.31E-03	1.07E-03	5.56E-04	2.89E-04	1.50E-04	7.87E-05
22	4.59E-03	2.33E-03	1.47E-03	1.21E-03	6.28E-04	3.26E-04	1.70E-04	8.95E-05
23	4.68E-03	2.38E-03	1.50E-03	1.23E-03	6.41E-04	3.34E-04	1.75E-04	9.26E-05
24	4.77E-03	2.43E-03	1.53E-03	1.26E-03	6.55E-04	3.42E-04	1.79E-04	9.53E-05
25	5.10E-03	2.61E-03	1.65E-03	1.35E-03	7.03E-04	3.67E-04	1.92E-04	1.02E-04
26	5.19E-03	2.66E-03	1.68E-03	1.38E-03	7.18E-04	3.74E-04	1.96E-04	1.04E-04
27	4.76E-03	2.44E-03	1.54E-03	1.26E-03	6.58E-04	3.44E-04	1.81E-04	9.66E-05
28	4.24E-03	2.17E-03	1.37E-03	1.13E-03	5.87E-04	3.07E-04	1.62E-04	8.72E-05
29	3.95E-03	2.02E-03	1.28E-03	1.05E-03	5.46E-04	2.86E-04	1.51E-04	8.16E-05
30	3.93E-03	2.01E-03	1.27E-03	1.04E-03	5.44E-04	2.85E-04	1.50E-04	8.09E-05
31	4.03E-03	2.06E-03	1.30E-03	1.07E-03	5.58E-04	2.92E-04	1.54E-04	8.26E-05
32	3.71E-03	1.91E-03	1.20E-03	9.90E-04	5.15E-04	2.70E-04	1.42E-04	7.63E-05
33	2.93E-03	1.50E-03	9.50E-04	7.81E-04	4.07E-04	2.13E-04	1.13E-04	6.09E-05
34	2.21E-03	1.13E-03	7.15E-04	5.88E-04	3.07E-04	1.61E-04	8.57E-05	4.65E-05
35	1.68E-03	8.59E-04	5.43E-04	4.47E-04	2.33E-04	1.23E-04	6.54E-05	3.57E-05
36	1.37E-03	6.96E-04	4.40E-04	3.62E-04	1.89E-04	9.96E-05	5.32E-05	2.92E-05
37	1.10E-03	5.60E-04	3.54E-04	2.91E-04	1.52E-04	8.01E-05	4.28E-05	2.35E-05
38	8.88E-04	4.49E-04	2.84E-04	2.34E-04	1.22E-04	6.44E-05	3.45E-05	1.90E-05
상면 절단								
L.H1	2.90E+00	1.40E+00	8.84E-01	7.26E-01	3.77E-01	1.96E-01	1.02E-01	5.35E-02
L.H2	3.75E+00	2.13E+00	1.14E+00	1.10E+00	4.87E-01	2.53E-01	1.32E-01	6.92E-02
L.H3	4.66E+00	2.29E+00	1.44E+00	1.18E+00	6.15E-01	3.19E-01	1.66E-01	8.45E-02
L.H4	4.69E+00	2.23E+00	1.40E+00	1.15E+00	5.98E-01	3.11E-01	1.63E-01	8.56E-02
L.H5	6.46E+00	3.05E+00	1.92E+00	1.58E+00	8.18E-01	4.26E-01	2.22E-01	1.17E-01
B	4.55E-04	2.34E-04	1.48E-04	1.21E-04	6.33E-05	3.32E-05	1.76E-05	9.50E-06
U.H5	1.29E-03	6.66E-04	4.21E-04	3.46E-04	1.81E-04	9.48E-05	5.03E-05	2.73E-05
U.H4	1.02E-03	5.60E-04	3.54E-04	2.91E-04	1.52E-04	7.94E-05	4.20E-05	2.26E-05
U.H3	5.80E-04	2.97E-04	1.88E-04	1.55E-04	8.06E-05	4.23E-05	2.25E-05	1.22E-05
U.H2	5.73E-04	2.92E-04	1.85E-04	1.52E-04	7.92E-05	4.15E-05	2.20E-05	1.19E-05
U.H1	3.80E-04	1.93E-04	1.22E-04	1.01E-04	5.26E-05	2.77E-05	1.48E-05	8.08E-06

부록 II

- 가압기 2nd scenario 시간당 선량 분포 -

측면 절단	절단 시점 (Year)							
	0	5	8.5	10	15	20	25	30
1	6.57E+00	3.03E+00	1.91E+00	1.57E+00	8.13E-01	4.23E-01	2.21E-01	1.17E-01
2	3.95E+00	1.79E+00	1.12E+00	9.22E-01	4.79E-01	2.50E-01	1.31E-01	6.89E-02
3	2.76E+00	1.23E+00	7.76E-01	6.37E-01	3.31E-01	1.72E-01	9.00E-02	4.75E-02
4	1.85E+00	8.17E-01	5.13E-01	4.21E-01	2.19E-01	1.14E-01	5.94E-02	3.12E-02
5	9.08E-01	3.85E-01	2.42E-01	1.98E-01	1.03E-01	5.36E-02	2.80E-02	1.47E-02
6	3.21E-01	1.18E-01	7.38E-02	6.06E-02	3.14E-02	1.64E-02	8.54E-03	4.49E-03
7	1.27E-01	3.74E-02	2.31E-02	1.89E-02	9.79E-03	5.08E-03	2.63E-03	1.37E-03
8	5.54E-02	1.22E-02	7.34E-03	6.01E-03	3.11E-03	1.61E-03	8.39E-04	4.37E-04
9	2.36E-02	4.82E-03	2.90E-03	2.37E-03	1.23E-03	6.38E-04	3.32E-04	1.74E-04
10	1.12E-02	2.91E-03	1.78E-03	1.46E-03	7.57E-04	3.94E-04	2.06E-04	1.08E-04
11	7.47E-03	2.48E-03	1.54E-03	1.26E-03	6.56E-04	3.42E-04	1.80E-04	9.54E-05
12	6.41E-03	2.60E-03	1.63E-03	1.34E-03	6.97E-04	3.64E-04	1.92E-04	1.03E-04
13	6.41E-03	2.95E-03	1.86E-03	1.53E-03	7.95E-04	4.16E-04	2.20E-04	1.18E-04
14	6.99E-03	3.43E-03	2.16E-03	1.78E-03	9.24E-04	4.83E-04	2.54E-04	1.35E-04
15	7.26E-03	3.66E-03	2.31E-03	1.90E-03	9.87E-04	5.14E-04	2.70E-04	1.43E-04
16	6.66E-03	3.40E-03	2.15E-03	1.76E-03	9.16E-04	4.78E-04	2.50E-04	1.33E-04
17	5.94E-03	3.05E-03	1.92E-03	1.58E-03	8.22E-04	4.29E-04	2.25E-04	1.20E-04
18	6.16E-03	3.17E-03	2.00E-03	1.64E-03	8.54E-04	4.45E-04	2.33E-04	1.23E-04
19	6.60E-03	3.39E-03	2.14E-03	1.76E-03	9.13E-04	4.75E-04	2.48E-04	1.30E-04
20	6.84E-03	3.51E-03	2.22E-03	1.82E-03	9.45E-04	4.91E-04	2.56E-04	1.34E-04
21	6.90E-03	3.55E-03	2.24E-03	1.84E-03	9.54E-04	4.95E-04	2.58E-04	1.35E-04
22	5.84E-03	3.01E-03	1.90E-03	1.56E-03	8.08E-04	4.20E-04	2.19E-04	1.14E-04
23	4.23E-03	2.18E-03	1.37E-03	1.13E-03	5.86E-04	3.05E-04	1.59E-04	8.39E-05
24	3.17E-03	1.63E-03	1.03E-03	8.47E-04	4.40E-04	2.29E-04	1.20E-04	6.33E-05
25	2.48E-03	1.28E-03	8.09E-04	6.65E-04	3.45E-04	1.80E-04	9.39E-05	4.95E-05
26	1.95E-03	1.01E-03	6.36E-04	5.23E-04	2.71E-04	1.41E-04	7.38E-05	3.88E-05
27	1.76E-03	9.06E-04	5.72E-04	4.70E-04	2.44E-04	1.27E-04	6.65E-05	3.51E-05
28	1.77E-03	9.10E-04	5.75E-04	4.72E-04	2.45E-04	1.28E-04	6.72E-05	3.56E-05
29	1.77E-03	9.11E-04	5.76E-04	4.73E-04	2.47E-04	1.29E-04	6.81E-05	3.65E-05
30	1.41E-03	7.25E-04	4.59E-04	3.78E-04	1.98E-04	1.05E-04	5.63E-05	3.13E-05
상면 절단								
L.H1	2.51E+00	1.20E+00	7.55E-01	6.20E-01	3.22E-01	1.68E-01	8.75E-02	4.60E-02
L.H2	3.11E+00	1.48E+00	9.43E-01	7.67E-01	3.98E-01	2.07E-01	1.08E-01	5.70E-02
L.H3	3.93E+00	1.87E+00	1.17E+00	9.65E-01	5.01E-01	2.61E-01	1.37E-01	7.20E-02
L.H4	3.82E+00	1.81E+00	1.14E+00	9.37E-01	4.87E-01	2.53E-01	1.32E-01	6.98E-02
B	5.09E-04	2.61E-04	1.65E-04	1.36E-04	7.07E-05	3.71E-05	1.97E-05	1.07E-05
U.H4	8.25E-04	4.23E-04	2.68E-04	2.20E-04	1.15E-04	6.01E-05	3.19E-05	1.72E-05
U.H3	8.86E-04	4.54E-04	2.87E-04	2.36E-04	1.23E-04	6.44E-05	3.41E-05	1.84E-05
U.H2	6.30E-04	3.23E-04	2.04E-04	1.68E-04	8.77E-05	4.61E-05	2.46E-05	1.34E-05
U.H1	5.64E-04	2.89E-04	1.83E-04	1.50E-04	7.83E-05	4.11E-05	2.18E-05	1.18E-05

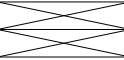
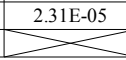
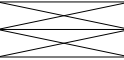
부록 III

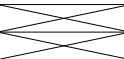
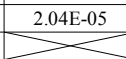
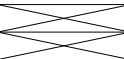
- Bio-shield 1st scenario 시간당 선량 분포 (영구정지 ~ 30년 시점) -

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	2.12E+00	1.53E+00	1.32E+00	9.44E-01	5.79E-01	3.83E-01	1.09E-01
2	3.24E+00	2.34E+00	1.94E+00	1.52E+00	1.07E+00	7.35E-01	2.52E-01
3	4.76E+00	3.33E+00	2.84E+00	1.94E+00	1.56E+00	1.12E+00	4.43E-01
4	7.50E+00	4.40E+00	3.56E+00	2.64E+00	2.12E+00	1.56E+00	6.90E-01
5	9.87E+00	4.29E+00	3.53E+00	2.91E+00	2.27E+00	1.70E+00	7.98E-01
6	9.96E+00	4.14E+00	3.24E+00	2.60E+00	1.97E+00	1.49E+00	8.04E-01
7	9.44E+00	3.69E+00	2.16E+00	1.58E+00	1.46E+00	1.12E+00	5.88E-01
8	6.80E+00	1.61E+00	1.09E+00	1.05E+00	7.49E-01	6.36E-01	2.61E-01
9	3.15E+00	8.58E-01	5.28E-01	4.65E-01	3.35E-01	2.61E-01	9.81E-02
10	1.62E+00	4.29E-01	3.36E-01	2.52E-01	1.86E-01	1.53E-01	6.50E-02
11	1.12E+00	3.80E-01	2.76E-01	2.00E-01	1.25E-01	1.09E-01	7.83E-02
12	9.44E-01	3.36E-01	2.81E-01	1.85E-01	1.35E-01	8.52E-02	6.57E-02
13	8.13E-01	3.62E-01	2.46E-01	1.92E-01	9.98E-02	9.12E-02	6.35E-02
14	9.39E-01	3.44E-01	2.19E-01	1.53E-01	1.12E-01	7.79E-02	5.36E-02
15	7.20E-01	3.14E-01	2.48E-01	1.77E-01	1.29E-01	8.93E-02	5.10E-02
16	5.96E-01	4.55E-01	3.44E-01	1.94E-01	1.07E-01	6.15E-02	2.16E-02
17	7.58E-01	7.60E-01	6.87E-01	5.39E-01	6.47E-01	5.18E-01	3.22E-01
18	4.35E-04	6.99E-04	4.10E-04	3.77E-04	3.73E-04	3.25E-04	2.69E-04
17-2	1.29E-01	4.41E-03	5.66E-04	1.09E-04	8.33E-05	5.00E-05	
18-2	6.84E-05	1.09E-05	2.34E-06	9.11E-08	3.25E-09		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.28E+00	9.32E-01	8.01E-01	5.70E-01	3.54E-01	2.33E-01	6.74E-02
2	1.95E+00	1.43E+00	1.18E+00	9.09E-01	6.57E-01	4.43E-01	1.53E-01
3	2.88E+00	2.04E+00	1.71E+00	1.17E+00	9.30E-01	6.80E-01	2.69E-01
4	4.49E+00	2.66E+00	2.12E+00	1.61E+00	1.28E+00	9.39E-01	4.31E-01
5	5.78E+00	2.64E+00	2.16E+00	1.80E+00	1.39E+00	1.03E+00	4.82E-01
6	6.11E+00	2.54E+00	1.94E+00	1.61E+00	1.16E+00	9.09E-01	4.82E-01
7	5.75E+00	2.24E+00	1.33E+00	9.87E-01	8.84E-01	6.68E-01	3.51E-01
8	3.98E+00	9.84E-01	6.78E-01	6.39E-01	4.46E-01	3.81E-01	1.59E-01
9	1.94E+00	5.18E-01	3.17E-01	2.84E-01	2.03E-01	1.56E-01	5.87E-02
10	9.86E-01	2.64E-01	2.09E-01	1.56E-01	1.16E-01	9.20E-02	2.49E-02
11	6.74E-01	2.30E-01	1.68E-01	1.23E-01	7.52E-02	6.60E-02	4.77E-02
12	5.73E-01	2.04E-01	1.73E-01	1.12E-01	8.40E-02	5.16E-02	4.07E-02
13	4.95E-01	2.19E-01	1.49E-01	1.12E-01	6.06E-02	5.61E-02	3.81E-02
14	5.66E-01	2.07E-01	1.34E-01	9.26E-02	6.83E-02	4.70E-02	3.27E-02
15	4.28E-01	1.95E-01	1.52E-01	1.07E-01	7.91E-02	5.39E-02	3.09E-02
16	3.75E-01	2.78E-01	2.15E-01	1.19E-01	6.57E-02	3.71E-02	1.25E-02
17	4.64E-01	4.64E-01	4.17E-01	3.31E-01	3.93E-01	3.12E-01	2.00E-01
18	2.60E-04	2.88E-04	2.50E-04	2.28E-04	2.36E-04	2.08E-04	1.83E-04
17-2	7.94E-02	2.73E-03	3.55E-04	6.87E-05	5.35E-05	3.13E-05	
18-2	4.32E-05	6.71E-06	1.42E-06	5.51E-08	1.91E-09		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	9.17E-01	6.75E-01	5.78E-01	4.11E-01	2.58E-01	1.68E-01	4.94E-02
2	1.40E+00	1.03E+00	8.58E-01	6.48E-01	4.79E-01	3.18E-01	1.10E-01
3	2.09E+00	1.49E+00	1.24E+00	8.46E-01	6.63E-01	4.92E-01	1.94E-01
4	3.20E+00	1.91E+00	1.50E+00	1.15E+00	9.23E-01	6.75E-01	3.17E-01
5	4.05E+00	1.92E+00	1.56E+00	1.31E+00	1.02E+00	7.41E-01	3.45E-01
6	4.44E+00	1.85E+00	1.39E+00	1.17E+00	8.27E-01	6.60E-01	3.45E-01
7	4.16E+00	1.62E+00	9.68E-01	7.31E-01	6.38E-01	4.76E-01	2.51E-01

8	2.79E+00	7.17E-01	5.00E-01	4.62E-01	3.17E-01	2.73E-01	1.16E-01
9	1.41E+00	3.72E-01	2.27E-01	2.06E-01	1.47E-01	1.11E-01	4.19E-02
10	7.13E-01	1.92E-01	1.53E-01	1.13E-01	8.52E-02	6.60E-02	2.85E-02
11	4.83E-01	1.67E-01	1.21E-01	8.96E-02	5.39E-02	4.76E-02	3.47E-02
12	4.14E-01	1.47E-01	1.27E-01	8.04E-02	6.18E-02	3.72E-02	2.97E-02
13	3.57E-01	1.58E-01	1.08E-01	7.89E-02	4.38E-02	4.10E-02	2.73E-02
14	4.07E-01	1.50E-01	9.68E-02	6.66E-02	4.92E-02	3.38E-02	2.37E-02
15	3.03E-01	1.43E-01	1.10E-01	7.76E-02	5.73E-02	3.87E-02	2.24E-02
16	2.78E-01	2.01E-01	1.59E-01	8.63E-02	4.80E-02	2.66E-02	8.71E-03
17	3.37E-01	3.36E-01	3.01E-01	2.42E-01	2.84E-01	2.23E-01	1.47E-01
18	1.86E-04	2.09E-04	1.81E-04	1.64E-04	1.76E-04	1.56E-04	1.43E-04
17-2	5.78E-02	2.00E-03	2.63E-04	5.09E-05	4.02E-05	2.31E-05	
18-2	3.21E-05	4.88E-06	1.03E-06	3.96E-08	1.35E-09		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	8.01E-01	5.91E-01	5.06E-01	3.59E-01	2.27E-01	1.47E-01	4.35E-02
2	1.22E+00	9.03E-01	7.52E-01	5.64E-01	4.20E-01	2.78E-01	9.59E-02
3	1.82E+00	1.31E+00	1.08E+00	7.40E-01	5.78E-01	4.31E-01	1.70E-01
4	2.79E+00	1.67E+00	1.31E+00	1.00E+00	8.07E-01	5.91E-01	2.79E-01
5	3.51E+00	1.70E+00	1.37E+00	1.15E+00	8.93E-01	6.48E-01	3.02E-01
6	3.90E+00	1.62E+00	1.21E+00	1.03E+00	7.19E-01	5.79E-01	3.00E-01
7	3.65E+00	1.41E+00	8.49E-01	6.47E-01	5.58E-01	4.14E-01	2.18E-01
8	2.40E+00	6.30E-01	4.40E-01	4.05E-01	2.76E-01	2.39E-01	1.01E-01
9	1.24E+00	3.26E-01	1.97E-01	1.80E-01	1.28E-01	9.71E-02	3.65E-02
10	6.24E-01	1.70E-01	1.34E-01	9.98E-02	7.52E-02	5.76E-02	2.49E-02
11	4.22E-01	1.45E-01	1.06E-01	7.88E-02	4.70E-02	4.16E-02	3.03E-02
12	3.62E-01	1.29E-01	1.11E-01	7.04E-02	5.45E-02	3.26E-02	2.63E-02
13	3.14E-01	1.38E-01	9.41E-02	6.83E-02	3.84E-02	3.60E-02	2.39E-02
14	3.56E-01	1.31E-01	8.49E-02	5.82E-02	4.31E-02	2.96E-02	2.07E-02
15	2.64E-01	1.26E-01	9.63E-02	6.78E-02	5.03E-02	3.38E-02	1.97E-02
16	2.46E-01	1.77E-01	1.40E-01	7.56E-02	4.22E-02	2.31E-02	7.50E-03
17	2.95E-01	2.95E-01	2.63E-01	2.12E-01	2.49E-01	1.95E-01	1.30E-01
18	1.62E-04	1.84E-04	1.59E-04	1.44E-04	1.56E-04	1.38E-04	1.29E-04
17-2	5.08E-02	1.76E-03	2.33E-04	4.50E-05	3.57E-05	2.04E-05	
18-2	2.84E-05	4.28E-06	8.98E-07	3.46E-08	1.17E-09		


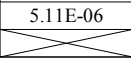

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	5.22E-01	3.90E-01	3.32E-01	2.36E-01	1.50E-01	9.66E-02	2.93E-02
2	7.92E-01	5.96E-01	4.97E-01	3.65E-01	2.79E-01	1.82E-01	6.27E-02
3	1.19E+00	8.67E-01	7.10E-01	4.85E-01	3.74E-01	2.84E-01	1.12E-01
4	1.80E+00	1.09E+00	8.39E-01	6.57E-01	5.30E-01	3.87E-01	1.88E-01
5	2.22E+00	1.13E+00	9.06E-01	7.67E-01	5.96E-01	4.25E-01	1.97E-01
6	2.60E+00	1.07E+00	7.83E-01	6.87E-01	4.62E-01	3.84E-01	1.95E-01
7	2.40E+00	9.29E-01	5.66E-01	4.40E-01	3.68E-01	2.67E-01	1.41E-01
8	1.52E+00	4.20E-01	2.97E-01	2.69E-01	1.77E-01	1.55E-01	6.71E-02
9	8.30E-01	2.13E-01	1.28E-01	1.19E-01	8.45E-02	6.29E-02	2.36E-02
10	4.11E-01	1.13E-01	8.97E-02	6.65E-02	5.07E-02	3.75E-02	1.65E-02
11	2.75E-01	9.54E-02	6.98E-02	5.24E-02	3.05E-02	2.73E-02	2.00E-02
12	2.37E-01	8.46E-02	7.46E-02	4.62E-02	3.68E-02	2.13E-02	1.76E-02
13	2.07E-01	9.09E-02	6.18E-02	4.32E-02	2.52E-02	2.40E-02	1.55E-02
14	2.33E-01	8.57E-02	5.63E-02	3.80E-02	2.84E-02	1.94E-02	1.37E-02
15	1.70E-01	8.42E-02	6.38E-02	4.47E-02	3.33E-02	2.21E-02	1.29E-02
16	1.67E-01	1.17E-01	9.51E-02	5.01E-02	2.82E-02	1.52E-02	4.67E-03
17	1.96E-01	1.95E-01	1.73E-01	1.42E-01	1.64E-01	1.27E-01	8.73E-02
18	1.05E-04	1.22E-04	1.05E-04	9.40E-05	1.07E-04	9.53E-05	9.32E-05

17-2	3.37E-02	1.18E-03	1.58E-04	3.06E-05	2.47E-05	1.38E-05	
18-2	1.94E-05	2.84E-06	5.91E-07	2.27E-08	7.45E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	3.54E-01	2.67E-01	2.27E-01	1.61E-01	1.03E-01	6.60E-02	2.03E-02
2	5.34E-01	4.08E-01	3.41E-01	2.46E-01	1.92E-01	1.23E-01	4.26E-02
3	8.15E-01	5.97E-01	4.83E-01	3.30E-01	2.51E-01	1.95E-01	7.61E-02
4	1.21E+00	7.37E-01	5.60E-01	4.46E-01	3.60E-01	2.63E-01	1.31E-01
5	1.46E+00	7.79E-01	6.23E-01	5.30E-01	4.11E-01	2.90E-01	1.33E-01
6	1.79E+00	7.37E-01	5.27E-01	4.76E-01	3.08E-01	2.64E-01	1.31E-01
7	1.65E+00	6.33E-01	3.90E-01	3.08E-01	2.51E-01	1.80E-01	9.45E-02
8	9.96E-01	2.90E-01	2.07E-01	1.85E-01	1.19E-01	1.04E-01	4.61E-02
9	5.73E-01	1.44E-01	8.61E-02	8.15E-02	5.76E-02	4.23E-02	1.58E-02
10	2.81E-01	7.77E-02	6.23E-02	4.59E-02	3.53E-02	2.55E-02	1.12E-02
11	1.86E-01	6.51E-02	4.77E-02	3.62E-02	2.06E-02	1.86E-02	1.37E-02
12	1.62E-01	5.78E-02	5.18E-02	3.14E-02	2.57E-02	1.45E-02	1.22E-02
13	1.41E-01	6.20E-02	4.22E-02	2.85E-02	1.73E-02	1.67E-02	1.05E-02
14	1.58E-01	5.82E-02	3.86E-02	2.58E-02	1.94E-02	1.31E-02	9.41E-03
15	1.13E-01	5.85E-02	4.38E-02	3.05E-02	2.28E-02	1.50E-02	8.82E-03
16	1.17E-01	8.00E-02	6.68E-02	3.45E-02	1.95E-02	1.02E-02	3.03E-03
17	1.34E-01	1.33E-01	1.18E-01	9.78E-02	1.12E-01	8.59E-02	6.08E-02
18	7.04E-05	8.37E-05	7.19E-05	6.39E-05	7.55E-05	6.77E-05	6.87E-05
17-2	2.33E-02	8.16E-04	1.11E-04	2.15E-05	1.76E-05	9.67E-06	
18-2	1.37E-05	1.95E-06	4.04E-07	1.54E-08	4.94E-10		

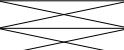
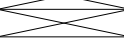
Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	2.49E-01	1.89E-01	1.59E-01	1.13E-01	7.29E-02	4.65E-02	1.45E-02
2	3.74E-01	2.88E-01	2.42E-01	1.71E-01	1.36E-01	8.63E-02	3.00E-02
3	5.73E-01	4.25E-01	3.39E-01	2.33E-01	1.74E-01	1.37E-01	5.36E-02
4	8.45E-01	5.16E-01	3.87E-01	3.14E-01	2.54E-01	1.85E-01	9.38E-02
5	9.95E-01	5.55E-01	4.41E-01	3.77E-01	2.93E-01	2.04E-01	9.33E-02
6	1.27E+00	5.22E-01	3.68E-01	3.39E-01	2.13E-01	1.88E-01	9.14E-02
7	1.16E+00	4.46E-01	2.78E-01	2.22E-01	1.77E-01	1.25E-01	6.57E-02
8	6.78E-01	2.06E-01	1.49E-01	1.30E-01	8.21E-02	7.28E-02	3.26E-02
9	4.08E-01	1.01E-01	6.02E-02	5.76E-02	4.07E-02	2.94E-02	1.10E-02
10	1.98E-01	5.52E-02	4.44E-02	3.27E-02	2.54E-02	1.79E-02	7.92E-03
11	1.30E-01	4.59E-02	3.36E-02	2.58E-02	1.44E-02	1.30E-02	9.71E-03
12	1.14E-01	4.07E-02	3.69E-02	2.21E-02	1.83E-02	1.02E-02	8.69E-03
13	9.96E-02	4.37E-02	2.97E-02	1.95E-02	1.22E-02	1.18E-02	7.32E-03
14	1.10E-01	4.10E-02	2.73E-02	1.82E-02	1.36E-02	9.20E-03	6.66E-03
15	7.79E-02	4.17E-02	3.11E-02	2.16E-02	1.62E-02	1.05E-02	6.23E-03
16	8.48E-02	5.66E-02	4.80E-02	2.45E-02	1.39E-02	7.16E-03	2.04E-03
17	9.53E-02	9.44E-02	8.33E-02	6.96E-02	7.90E-02	6.01E-02	4.36E-02
18	4.90E-05	5.95E-05	5.08E-05	4.49E-05	5.47E-05	4.93E-05	5.14E-05
17-2	1.65E-02	5.82E-04	8.00E-05	1.55E-05	1.29E-05	6.96E-06	
18-2	9.91E-06	1.39E-06	2.85E-07	1.08E-08	3.39E-10		

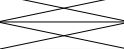
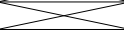
Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.79E-01	1.37E-01	1.15E-01	8.12E-02	5.30E-02	3.36E-02	1.06E-02
2	2.69E-01	2.09E-01	1.76E-01	1.22E-01	9.90E-02	6.21E-02	2.16E-02
3	4.14E-01	3.09E-01	2.46E-01	1.68E-01	1.25E-01	9.95E-02	3.89E-02
4	6.05E-01	3.72E-01	2.76E-01	2.25E-01	1.83E-01	1.33E-01	6.87E-02
5	7.01E-01	4.04E-01	3.20E-01	2.75E-01	2.13E-01	1.47E-01	6.72E-02
6	9.23E-01	3.80E-01	2.64E-01	2.48E-01	1.52E-01	1.36E-01	6.56E-02
7	8.45E-01	3.23E-01	2.03E-01	1.64E-01	1.28E-01	8.94E-02	4.71E-02

8	4.77E-01	1.50E-01	1.09E-01	9.44E-02	5.87E-02	5.22E-02	2.37E-02
9	2.97E-01	7.31E-02	4.31E-02	4.17E-02	2.94E-02	2.12E-02	7.88E-03
10	1.44E-01	4.04E-02	3.24E-02	2.39E-02	1.86E-02	1.28E-02	5.73E-03
11	9.35E-02	3.32E-02	2.43E-02	1.88E-02	1.03E-02	9.41E-03	7.04E-03
12	8.25E-02	2.94E-02	2.70E-02	1.59E-02	1.35E-02	7.37E-03	6.35E-03
13	7.22E-02	3.15E-02	2.15E-02	1.38E-02	8.79E-03	8.61E-03	5.27E-03
14	7.94E-02	2.96E-02	1.98E-02	1.30E-02	9.86E-03	6.63E-03	4.83E-03
15	5.55E-02	3.06E-02	2.25E-02	1.56E-02	1.17E-02	7.55E-03	4.50E-03
16	6.26E-02	4.11E-02	3.54E-02	1.77E-02	1.01E-02	5.15E-03	1.42E-03
17	6.92E-02	6.85E-02	6.02E-02	5.07E-02	5.72E-02	4.32E-02	3.19E-02
18	3.51E-05	4.32E-05	3.69E-05	3.24E-05	4.04E-05	3.65E-05	3.89E-05
17-2	1.20E-02	4.26E-04	5.89E-05	1.14E-05	9.55E-06	5.11E-06	
18-2	7.31E-06	1.01E-06	2.06E-07	7.81E-09	2.40E-10		

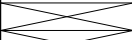
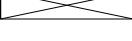
부록Ⅳ

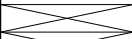
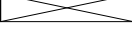
- Bio-shield 2nd scenario 시간당 선량 분포 (영구정지 ~ 30년 시점) -

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	3.87E-05	4.37E-02	8.46E-02	1.82E-01	5.19E-01	1.55E+00	2.01E+00
2	2.40E-02	6.62E-02	1.53E-01	3.57E-01	1.13E+00	2.21E+00	3.30E+00
3	6.29E-02	2.16E-01	3.99E-01	9.33E-01	2.10E+00	3.62E+00	5.39E+00
4	1.49E-01	4.58E-01	7.46E-01	1.59E+00	3.09E+00	5.19E+00	6.69E+00
5	2.06E-01	6.24E-01	1.71E+00	2.60E+00	4.20E+00	8.46E+00	8.97E+00
6	2.40E-01	1.06E+00	1.38E+00	3.53E+00	5.75E+00	7.26E+00	9.03E+00
7	2.93E-01	8.43E-01	1.53E+00	2.64E+00	7.10E+00	7.82E+00	8.15E+00
8	2.03E-01	7.47E-01	9.72E-01	2.22E+00	5.00E+00	6.69E+00	5.96E+00
9	1.55E-01	4.23E-01	6.09E-01	1.19E+00	1.49E+00	2.82E+00	3.38E+00
10	4.62E-02	1.52E-01	2.33E-01	3.99E-01	7.52E-01	1.28E+00	1.61E+00
11	2.55E-02	7.50E-02	1.58E-01	2.27E-01	4.70E-01	7.38E-01	8.82E-01
12	1.98E-02	6.24E-02	9.78E-02	2.60E-01	3.17E-01	6.44E-01	7.08E-01
13	1.65E-02	4.70E-02	7.62E-02	2.04E-01	4.89E-01	4.46E-01	6.72E-01
14	1.46E-02	5.73E-02	7.43E-02	1.68E-01	3.14E-01	4.85E-01	7.05E-01
15	1.85E-02	4.80E-02	8.15E-02	1.31E-01	3.66E-01	3.95E-01	6.27E-01
16	1.31E-02	4.28E-02	9.92E-02	1.71E-01	3.68E-01	5.36E-01	6.29E-01
17	1.45E-01	8.26E-02	1.11E-01	1.91E-01	3.59E-01	6.35E-01	5.49E-01
18	1.03E-04	5.64E-05	1.21E-04	1.33E-04	2.63E-04	4.02E-04	4.59E-04
17-2	5.16E-01	4.32E-01	3.89E-01	3.78E-01	3.32E-01	2.86E-03	
18-2	2.78E-04	3.30E-04	2.78E-04	2.46E-04	2.02E-04	1.24E-06	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	2.43E-05	2.60E-02	5.04E-02	1.09E-01	3.18E-01	9.39E-01	1.23E+00
2	1.47E-02	3.89E-02	9.09E-02	2.22E-01	6.90E-01	1.35E+00	2.00E+00
3	3.81E-02	1.32E-01	2.51E-01	5.67E-01	1.29E+00	2.21E+00	3.26E+00
4	9.24E-02	2.85E-01	4.44E-01	9.72E-01	1.88E+00	3.23E+00	4.04E+00
5	1.25E-01	3.74E-01	1.03E+00	1.52E+00	2.51E+00	5.21E+00	5.58E+00
6	1.43E-01	6.48E-01	8.10E-01	2.13E+00	3.51E+00	4.59E+00	5.43E+00
7	1.74E-01	5.18E-01	9.29E-01	1.61E+00	4.35E+00	4.62E+00	4.95E+00
8	1.23E-01	4.47E-01	5.82E-01	1.35E+00	2.93E+00	4.11E+00	3.57E+00
9	9.50E-02	2.52E-01	3.54E-01	7.32E-01	9.03E-01	1.67E+00	2.03E+00
10	2.82E-02	9.06E-02	1.39E-01	2.46E-01	4.68E-01	7.80E-01	9.59E-01
11	1.58E-02	4.49E-02	9.29E-02	1.36E-01	2.87E-01	4.56E-01	5.40E-01
12	1.22E-02	3.81E-02	5.90E-02	1.53E-01	1.94E-01	3.81E-01	4.34E-01
13	1.02E-02	2.90E-02	4.53E-02	1.23E-01	2.93E-01	2.72E-01	4.16E-01
14	8.90E-03	3.56E-02	4.56E-02	1.08E-01	1.91E-01	2.97E-01	4.35E-01
15	1.10E-02	2.97E-02	4.80E-02	8.16E-02	2.22E-01	2.46E-01	3.86E-01
16	7.80E-03	2.66E-02	5.88E-02	1.02E-01	2.22E-01	3.18E-01	3.80E-01
17	8.94E-02	5.02E-02	6.66E-02	1.18E-01	2.18E-01	3.84E-01	3.36E-01
18	6.60E-05	3.64E-05	7.80E-05	8.31E-05	1.64E-04	2.60E-04	2.90E-04
17-2	3.20E-01	2.66E-01	2.42E-01	2.33E-01	2.00E-01	1.70E-03	
18-2	1.70E-04	2.00E-04	1.74E-04	1.52E-04	1.22E-04	7.64E-07	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.80E-05	1.85E-02	3.60E-02	7.83E-02	2.33E-01	6.78E-01	8.91E-01
2	1.07E-02	2.75E-02	6.48E-02	1.64E-01	5.01E-01	9.77E-01	1.43E+00
3	2.75E-02	9.60E-02	1.85E-01	4.10E-01	9.38E-01	1.59E+00	2.34E+00
4	6.77E-02	2.09E-01	3.17E-01	7.05E-01	1.34E+00	2.36E+00	2.90E+00
5	9.06E-02	2.70E-01	7.40E-01	1.07E+00	1.79E+00	3.80E+00	4.10E+00
6	1.01E-01	4.71E-01	5.69E-01	1.53E+00	2.54E+00	3.42E+00	3.90E+00
7	1.25E-01	3.77E-01	6.68E-01	1.17E+00	3.17E+00	3.27E+00	3.57E+00

8	8.93E-02	3.20E-01	4.16E-01	9.78E-01	2.06E+00	3.00E+00	2.55E+00
9	6.93E-02	1.79E-01	2.48E-01	5.34E-01	6.53E-01	1.18E+00	1.44E+00
10	2.04E-02	6.48E-02	9.89E-02	1.79E-01	3.45E-01	5.66E-01	6.84E-01
11	1.14E-02	3.20E-02	6.57E-02	9.75E-02	2.09E-01	3.35E-01	3.93E-01
12	8.90E-03	2.78E-02	4.23E-02	1.09E-01	1.41E-01	2.70E-01	3.15E-01
13	7.53E-03	2.12E-02	3.21E-02	8.85E-02	2.09E-01	1.97E-01	3.05E-01
14	6.42E-03	2.61E-02	3.32E-02	8.13E-02	1.37E-01	2.16E-01	3.18E-01
15	7.83E-03	2.18E-02	3.39E-02	6.00E-02	1.61E-01	1.82E-01	2.82E-01
16	5.57E-03	1.94E-02	4.17E-02	7.23E-02	1.61E-01	2.27E-01	2.73E-01
17	6.54E-02	3.62E-02	4.77E-02	8.64E-02	1.56E-01	2.78E-01	2.43E-01
18	4.93E-05	2.72E-05	5.87E-05	6.14E-05	1.20E-04	1.95E-04	2.16E-04
17-2	2.34E-01	1.94E-01	1.79E-01	1.71E-01	1.43E-01	1.21E-03	
18-2	1.23E-04	1.44E-04	1.28E-04	1.10E-04	8.80E-05	5.56E-07	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.59E-05	1.61E-02	3.14E-02	6.83E-02	2.04E-01	5.94E-01	7.82E-01
2	9.35E-03	2.37E-02	5.64E-02	1.44E-01	4.38E-01	8.57E-01	1.25E+00
3	2.40E-02	8.42E-02	1.64E-01	3.59E-01	8.24E-01	1.40E+00	2.04E+00
4	5.96E-02	1.85E-01	2.75E-01	6.18E-01	1.17E+00	2.09E+00	2.52E+00
5	7.95E-02	2.36E-01	6.45E-01	9.24E-01	1.56E+00	3.33E+00	3.60E+00
6	8.81E-02	4.14E-01	4.92E-01	1.34E+00	2.22E+00	3.03E+00	3.41E+00
7	1.09E-01	3.30E-01	5.84E-01	1.02E+00	2.78E+00	2.85E+00	3.12E+00
8	7.83E-02	2.78E-01	3.62E-01	8.57E-01	1.77E+00	2.64E+00	2.22E+00
9	6.11E-02	1.56E-01	2.15E-01	4.70E-01	5.72E-01	1.02E+00	1.26E+00
10	1.79E-02	5.64E-02	8.60E-02	1.58E-01	3.05E-01	4.97E-01	5.96E-01
11	1.01E-02	2.79E-02	5.70E-02	8.51E-02	1.82E-01	2.94E-01	3.44E-01
12	7.82E-03	2.43E-02	3.71E-02	9.44E-02	1.23E-01	2.34E-01	2.76E-01
13	6.65E-03	1.86E-02	2.79E-02	7.73E-02	1.82E-01	1.73E-01	2.67E-01
14	5.63E-03	2.31E-02	2.91E-02	7.23E-02	1.20E-01	1.91E-01	2.79E-01
15	6.81E-03	1.91E-02	2.94E-02	5.28E-02	1.40E-01	1.61E-01	2.48E-01
16	4.85E-03	1.71E-02	3.62E-02	6.29E-02	1.40E-01	1.97E-01	2.39E-01
17	5.72E-02	3.18E-02	4.16E-02	7.61E-02	1.37E-01	2.43E-01	2.13E-01
18	4.38E-05	2.42E-05	5.24E-05	5.42E-05	1.05E-04	1.74E-04	1.91E-04
17-2	2.06E-01	1.70E-01	1.58E-01	1.50E-01	1.25E-01	1.05E-03	
18-2	1.07E-04	1.26E-04	1.13E-04	9.62E-05	7.68E-05	4.88E-07	

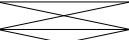

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.08E-05	1.04E-02	2.03E-02	4.44E-02	1.35E-01	3.92E-01	5.16E-01
2	6.20E-03	1.50E-02	3.65E-02	9.68E-02	2.90E-01	5.66E-01	8.16E-01
3	1.58E-02	5.57E-02	1.10E-01	2.36E-01	5.49E-01	9.21E-01	1.34E+00
4	4.01E-02	1.24E-01	1.77E-01	4.08E-01	7.67E-01	1.40E+00	1.64E+00
5	5.25E-02	1.56E-01	4.20E-01	5.84E-01	1.01E+00	2.22E+00	2.43E+00
6	5.67E-02	2.75E-01	3.11E-01	8.76E-01	1.47E+00	2.07E+00	2.22E+00
7	7.02E-02	2.19E-01	3.81E-01	6.77E-01	1.85E+00	1.82E+00	2.06E+00
8	5.18E-02	1.80E-01	2.34E-01	5.66E-01	1.12E+00	1.76E+00	1.44E+00
9	4.08E-02	1.00E-01	1.34E-01	3.12E-01	3.77E-01	6.54E-01	8.13E-01
10	1.18E-02	3.66E-02	5.55E-02	1.05E-01	2.06E-01	3.29E-01	3.86E-01
11	6.68E-03	1.80E-02	3.63E-02	5.52E-02	1.20E-01	1.97E-01	2.28E-01
12	5.22E-03	1.61E-02	2.42E-02	6.03E-02	8.18E-02	1.50E-01	1.83E-01
13	4.47E-03	1.24E-02	1.79E-02	5.04E-02	1.18E-01	1.13E-01	1.80E-01
14	3.71E-03	1.55E-02	1.94E-02	5.01E-02	7.86E-02	1.26E-01	1.86E-01
15	4.40E-03	1.28E-02	1.88E-02	3.56E-02	9.18E-02	1.09E-01	1.65E-01
16	3.14E-03	1.14E-02	2.33E-02	4.04E-02	9.18E-02	1.27E-01	1.56E-01
17	3.82E-02	2.08E-02	2.70E-02	5.10E-02	8.94E-02	1.59E-01	1.41E-01
18	3.02E-05	1.68E-05	3.63E-05	3.68E-05	7.08E-05	1.20E-04	1.31E-04

17-2	1.38E-01	1.13E-01	1.06E-01	1.00E-01	8.14E-02	6.73E-04	
18-2	7.10E-05	8.25E-05	7.61E-05	6.38E-05	5.04E-05	3.25E-07	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	7.61E-06	6.93E-03	1.36E-02	3.00E-02	9.32E-02	2.67E-01	3.54E-01
2	4.25E-03	9.93E-03	2.45E-02	6.74E-02	2.00E-01	3.89E-01	5.54E-01
3	1.07E-02	3.83E-02	7.73E-02	1.62E-01	3.78E-01	6.30E-01	9.09E-01
4	2.78E-02	8.61E-02	1.19E-01	2.79E-01	5.19E-01	9.72E-01	1.11E+00
5	3.60E-02	1.06E-01	2.85E-01	3.84E-01	6.75E-01	1.53E+00	1.68E+00
6	3.80E-02	1.89E-01	2.04E-01	5.96E-01	1.01E+00	1.46E+00	1.50E+00
7	4.73E-02	1.52E-01	2.58E-01	4.64E-01	1.26E+00	1.21E+00	1.40E+00
8	3.54E-02	1.21E-01	1.58E-01	3.87E-01	7.37E-01	1.22E+00	9.72E-01
9	2.82E-02	6.69E-02	8.78E-02	2.16E-01	2.57E-01	4.35E-01	5.46E-01
10	8.10E-03	2.46E-02	3.72E-02	7.25E-02	1.43E-01	2.25E-01	2.60E-01
11	4.61E-03	1.21E-02	2.42E-02	3.74E-02	8.25E-02	1.36E-01	1.58E-01
12	3.60E-03	1.10E-02	1.64E-02	4.01E-02	5.61E-02	9.99E-02	1.26E-01
13	3.12E-03	8.55E-03	1.20E-02	3.42E-02	7.94E-02	7.74E-02	1.24E-01
14	2.52E-03	1.08E-02	1.34E-02	3.57E-02	5.36E-02	8.72E-02	1.29E-01
15	2.94E-03	8.88E-03	1.24E-02	2.48E-02	6.26E-02	7.62E-02	1.14E-01
16	2.10E-03	7.94E-03	1.55E-02	2.70E-02	6.24E-02	8.48E-02	1.06E-01
17	2.63E-02	1.42E-02	1.83E-02	3.54E-02	6.08E-02	1.08E-01	9.69E-02
18	2.15E-05	1.20E-05	2.60E-05	2.57E-05	4.92E-05	8.60E-05	9.21E-05
17-2	9.56E-02	7.80E-02	7.38E-02	6.95E-02	5.50E-02	4.50E-04	
18-2	4.88E-05	5.63E-05	5.31E-05	4.40E-05	3.44E-05	2.24E-07	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	5.48E-06	4.82E-03	9.42E-03	2.10E-02	6.62E-02	1.89E-01	2.51E-01
2	3.02E-03	6.80E-03	1.70E-02	4.83E-02	1.41E-01	2.75E-01	3.89E-01
3	7.52E-03	2.72E-02	5.57E-02	1.14E-01	2.69E-01	4.46E-01	6.39E-01
4	1.98E-02	6.17E-02	8.27E-02	1.98E-01	3.65E-01	6.96E-01	7.77E-01
5	2.55E-02	7.50E-02	2.00E-01	2.63E-01	4.70E-01	1.09E+00	1.21E+00
6	2.63E-02	1.34E-01	1.39E-01	4.19E-01	7.13E-01	1.06E+00	1.05E+00
7	3.29E-02	1.08E-01	1.82E-01	3.29E-01	8.97E-01	8.36E-01	9.90E-01
8	2.51E-02	8.42E-02	1.10E-01	2.73E-01	5.03E-01	8.66E-01	6.78E-01
9	2.01E-02	4.64E-02	5.96E-02	1.53E-01	1.82E-01	3.00E-01	3.80E-01
10	5.73E-03	1.71E-02	2.58E-02	5.16E-02	1.03E-01	1.59E-01	1.80E-01
11	3.27E-03	8.43E-03	1.67E-02	2.61E-02	5.84E-02	9.74E-02	1.11E-01
12	2.57E-03	7.82E-03	1.15E-02	2.76E-02	3.98E-02	6.90E-02	8.93E-02
13	2.24E-03	6.09E-03	8.27E-03	2.40E-02	5.54E-02	5.46E-02	8.88E-02
14	1.79E-03	7.73E-03	9.51E-03	2.60E-02	3.77E-02	6.20E-02	9.20E-02
15	2.04E-03	6.35E-03	8.54E-03	1.77E-02	4.41E-02	5.49E-02	8.10E-02
16	1.46E-03	5.67E-03	1.07E-02	1.88E-02	4.40E-02	5.87E-02	7.47E-02
17	1.87E-02	1.00E-02	1.28E-02	2.54E-02	4.28E-02	7.62E-02	6.86E-02
18	1.57E-05	8.76E-06	1.91E-05	1.85E-05	3.53E-05	6.29E-05	6.66E-05
17-2	6.83E-02	5.55E-02	5.30E-02	4.95E-02	3.86E-02	3.11E-04	
18-2	3.45E-05	3.96E-05	3.81E-05	3.12E-05	2.42E-05	1.59E-07	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	4.04E-06	3.44E-03	6.74E-03	1.50E-02	4.82E-02	1.37E-01	1.82E-01
2	2.19E-03	4.80E-03	1.22E-02	3.54E-02	1.02E-01	2.00E-01	2.79E-01
3	5.43E-03	1.97E-02	4.08E-02	8.24E-02	1.97E-01	3.23E-01	4.61E-01
4	1.45E-02	4.52E-02	5.91E-02	1.43E-01	2.63E-01	5.10E-01	5.60E-01
5	1.85E-02	5.43E-02	1.44E-01	1.85E-01	3.36E-01	7.92E-01	8.85E-01
6	1.88E-02	9.74E-02	9.81E-02	3.02E-01	5.18E-01	7.83E-01	7.56E-01
7	2.36E-02	7.83E-02	1.31E-01	2.39E-01	6.53E-01	5.94E-01	7.16E-01

8	1.82E-02	6.03E-02	7.88E-02	1.98E-01	3.54E-01	6.30E-01	4.86E-01
9	1.47E-02	3.32E-02	4.19E-02	1.12E-01	1.31E-01	2.13E-01	2.73E-01
10	4.16E-03	1.23E-02	1.85E-02	3.77E-02	7.53E-02	1.16E-01	1.29E-01
11	2.39E-03	6.05E-03	1.18E-02	1.88E-02	4.23E-02	7.11E-02	8.07E-02
12	1.88E-03	5.67E-03	8.28E-03	1.95E-02	2.90E-02	4.91E-02	6.48E-02
13	1.64E-03	4.44E-03	5.90E-03	1.73E-02	3.96E-02	3.96E-02	6.50E-02
14	1.29E-03	5.66E-03	6.92E-03	1.94E-02	2.73E-02	4.52E-02	6.71E-02
15	1.46E-03	4.64E-03	6.05E-03	1.30E-02	3.18E-02	4.04E-02	5.91E-02
16	1.05E-03	4.14E-03	7.62E-03	1.33E-02	3.17E-02	4.19E-02	5.40E-02
17	1.36E-02	7.26E-03	9.20E-03	1.86E-02	3.08E-02	5.51E-02	4.98E-02
18	1.16E-05	6.52E-06	1.41E-05	1.36E-05	2.58E-05	4.68E-05	4.92E-05
17-2	4.98E-02	4.04E-02	3.89E-02	3.62E-02	2.76E-02	2.22E-04	
18-2	2.51E-05	2.85E-05	2.79E-05	2.27E-05	1.74E-05	1.16E-07	

부록 V

- Bio-shield 3rd scenario 시간당 선량 분포 (영구정지 ~ 30년 시점) -

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	9.30E-01	8.31E-01	6.18E-01	5.04E-01	3.30E-01	1.86E-01	1.14E-01
2	1.50E+00	1.18E+00	9.68E-01	6.93E-01	5.07E-01	3.23E-01	2.27E-01
3	2.43E+00	1.55E+00	1.42E+00	1.02E+00	8.54E-01	5.66E-01	5.00E-01
4	3.60E+00	2.07E+00	1.49E+00	1.30E+00	1.14E+00	8.45E-01	5.55E-01
5	4.17E+00	2.07E+00	1.49E+00	1.40E+00	9.86E-01	7.44E-01	5.39E-01
6	4.38E+00	1.68E+00	1.47E+00	1.17E+00	8.48E-01	6.74E-01	5.07E-01
7	3.80E+00	1.37E+00	8.54E-01	8.00E-01	5.73E-01	4.79E-01	3.50E-01
8	2.58E+00	6.60E-01	3.89E-01	2.85E-01	2.06E-01	2.03E-01	1.19E-01
9	1.15E+00	2.67E-01	1.65E-01	1.01E-01	1.01E-01	6.11E-02	5.40E-02
10	4.52E-01	1.37E-01	9.05E-02	7.37E-02	4.70E-02	3.41E-02	2.79E-02
11	2.52E-01	1.12E-01	1.12E-01	1.12E-01	1.12E-01	1.12E-01	1.12E-01
12	2.01E-01	1.05E-01	7.85E-02	5.01E-02	4.05E-02	2.64E-02	1.89E-02
13	1.77E-01	1.10E-01	8.34E-02	6.11E-02	4.47E-02	2.99E-02	2.16E-02
14	1.98E-01	1.13E-01	8.91E-02	6.39E-02	4.40E-02	3.20E-02	2.46E-02
15	2.48E-01	1.65E-01	1.35E-01	9.78E-02	7.77E-02	5.24E-02	3.80E-02
16	4.04E-01	3.68E-01	2.81E-01	2.75E-01	2.90E-01	2.16E-01	1.48E-01
17	2.57E-04	2.56E-04	2.58E-04	2.34E-04	1.85E-04	1.52E-04	1.16E-04
16-2	5.25E-02	3.42E-03	3.53E-04	5.06E-05	4.14E-05	3.06E-05	
17-2	4.77E-05	7.65E-06	1.65E-06	7.70E-08	1.92E-09		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	5.61E-01	5.10E-01	3.78E-01	3.06E-01	2.01E-01	1.13E-01	6.92E-02
2	9.15E-01	7.23E-01	5.85E-01	4.17E-01	3.06E-01	1.98E-01	1.36E-01
3	1.48E+00	9.48E-01	8.60E-01	6.20E-01	5.16E-01	3.42E-01	2.97E-01
4	2.21E+00	1.26E+00	9.03E-01	7.91E-01	6.89E-01	5.18E-01	3.41E-01
5	2.55E+00	1.28E+00	8.97E-01	8.57E-01	5.99E-01	4.49E-01	3.27E-01
6	2.69E+00	1.02E+00	8.70E-01	7.01E-01	5.21E-01	4.14E-01	3.06E-01
7	2.33E+00	8.19E-01	5.06E-01	4.77E-01	3.44E-01	2.90E-01	2.12E-01
8	1.55E+00	4.02E-01	2.36E-01	1.76E-01	1.25E-01	1.21E-01	7.25E-02
9	6.78E-01	1.59E-01	9.96E-02	6.32E-02	6.17E-02	3.71E-02	3.30E-02
10	2.72E-01	8.19E-02	5.45E-02	4.46E-02	2.84E-02	2.13E-02	1.65E-02
11	1.52E-01	6.72E-02	4.70E-02	3.44E-02	2.42E-02	1.82E-02	1.27E-02
12	1.24E-01	6.38E-02	4.80E-02	3.05E-02	2.46E-02	1.61E-02	1.12E-02
13	1.08E-01	6.68E-02	5.12E-02	3.72E-02	2.69E-02	1.79E-02	1.29E-02
14	1.20E-01	6.93E-02	5.40E-02	3.90E-02	2.73E-02	1.95E-02	1.52E-02
15	1.50E-01	1.01E-01	8.28E-02	5.84E-02	4.76E-02	3.17E-02	2.28E-02
16	2.47E-01	2.26E-01	1.71E-01	1.65E-01	1.74E-01	1.32E-01	9.11E-02
17	1.58E-04	1.54E-04	1.58E-04	1.38E-04	1.10E-04	9.15E-05	6.92E-05
16-2	3.23E-02	2.06E-03	2.12E-04	3.12E-05	2.55E-05	1.83E-05	
17-2	2.97E-05	4.68E-06	1.03E-06	4.67E-08	1.20E-09		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	4.02E-01	3.71E-01	2.75E-01	2.21E-01	1.46E-01	8.22E-02	4.98E-02
2	6.62E-01	5.25E-01	4.22E-01	3.00E-01	2.19E-01	1.44E-01	9.77E-02
3	1.07E+00	6.90E-01	6.18E-01	4.49E-01	3.71E-01	2.46E-01	2.12E-01
4	1.61E+00	9.14E-01	6.50E-01	5.70E-01	4.95E-01	3.77E-01	2.48E-01
5	1.86E+00	9.32E-01	6.45E-01	6.20E-01	4.32E-01	3.23E-01	2.36E-01
6	1.95E+00	7.32E-01	6.18E-01	5.03E-01	3.80E-01	3.02E-01	2.21E-01
7	1.70E+00	5.84E-01	3.59E-01	3.39E-01	2.46E-01	2.09E-01	1.53E-01
8	1.10E+00	2.91E-01	1.70E-01	1.28E-01	9.02E-02	8.66E-02	5.24E-02
9	4.80E-01	1.14E-01	7.17E-02	4.67E-02	4.49E-02	2.67E-02	2.40E-02

10	1.95E-01	5.85E-02	3.90E-02	3.21E-02	2.04E-02	1.56E-02	1.16E-02
11	1.09E-01	4.80E-02	3.38E-02	2.46E-02	1.76E-02	1.32E-02	9.24E-03
12	9.08E-02	4.59E-02	3.48E-02	2.21E-02	1.79E-02	1.17E-02	7.94E-03
13	7.77E-02	4.82E-02	3.72E-02	2.69E-02	1.92E-02	1.28E-02	9.23E-03
14	8.69E-02	5.04E-02	3.90E-02	2.82E-02	2.00E-02	1.41E-02	1.10E-02
15	1.08E-01	7.34E-02	6.03E-02	4.16E-02	3.45E-02	2.28E-02	1.64E-02
16	1.79E-01	1.65E-01	1.23E-01	1.19E-01	1.25E-01	9.59E-02	6.65E-02
17	1.15E-04	1.11E-04	1.13E-04	9.75E-05	7.88E-05	6.59E-05	4.92E-05
16-2	2.36E-02	1.47E-03	1.52E-04	2.28E-05	1.85E-05	1.31E-05	
17-2	2.19E-05	3.39E-06	7.56E-07	3.36E-08	8.84E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	3.51E-01	3.26E-01	2.40E-01	1.94E-01	1.28E-01	7.22E-02	4.37E-02
2	5.79E-01	4.61E-01	3.69E-01	2.63E-01	1.91E-01	1.26E-01	8.52E-02
3	9.36E-01	6.06E-01	5.40E-01	3.93E-01	3.24E-01	2.16E-01	1.83E-01
4	1.40E+00	8.00E-01	5.67E-01	5.00E-01	4.34E-01	3.30E-01	2.16E-01
5	1.62E+00	8.19E-01	5.64E-01	5.43E-01	3.78E-01	2.81E-01	2.07E-01
6	1.71E+00	6.39E-01	5.37E-01	4.38E-01	3.33E-01	2.66E-01	1.94E-01
7	1.49E+00	5.09E-01	3.11E-01	2.96E-01	2.15E-01	1.83E-01	1.34E-01
8	9.56E-01	2.55E-01	1.49E-01	1.13E-01	7.89E-02	7.55E-02	4.58E-02
9	4.17E-01	9.89E-02	6.27E-02	4.11E-02	3.95E-02	2.34E-02	2.10E-02
10	1.71E-01	5.10E-02	3.41E-02	2.81E-02	1.79E-02	1.38E-02	1.00E-02
11	9.51E-02	4.19E-02	2.94E-02	2.15E-02	1.55E-02	1.16E-02	8.13E-03
12	7.98E-02	4.01E-02	3.06E-02	1.94E-02	1.56E-02	1.03E-02	6.89E-03
13	6.80E-02	4.22E-02	3.27E-02	2.36E-02	1.68E-02	1.11E-02	8.04E-03
14	7.59E-02	4.43E-02	3.41E-02	2.48E-02	1.76E-02	1.23E-02	9.62E-03
15	9.48E-02	6.44E-02	5.28E-02	3.63E-02	3.03E-02	1.98E-02	1.43E-02
16	1.57E-01	1.45E-01	1.08E-01	1.04E-01	1.09E-01	8.42E-02	5.85E-02
17	1.01E-04	9.68E-05	9.93E-05	8.46E-05	6.86E-05	5.75E-05	4.29E-05
16-2	2.07E-02	1.28E-03	1.32E-04	2.01E-05	1.62E-05	1.14E-05	
17-2	1.92E-05	2.97E-06	6.68E-07	2.94E-08	7.80E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	2.30E-01	2.16E-01	1.59E-01	1.27E-01	8.40E-02	4.77E-02	2.87E-02
2	3.83E-01	3.06E-01	2.42E-01	1.71E-01	1.25E-01	8.34E-02	5.57E-02
3	6.18E-01	4.04E-01	3.53E-01	2.60E-01	2.12E-01	1.41E-01	1.18E-01
4	9.27E-01	5.27E-01	3.71E-01	3.29E-01	2.84E-01	2.19E-01	1.43E-01
5	1.08E+00	5.46E-01	3.69E-01	3.59E-01	2.48E-01	1.83E-01	1.36E-01
6	1.14E+00	4.17E-01	3.45E-01	2.85E-01	2.21E-01	1.77E-01	1.26E-01
7	9.93E-01	3.29E-01	2.00E-01	1.91E-01	1.39E-01	1.20E-01	8.81E-02
8	6.17E-01	1.68E-01	9.78E-02	7.55E-02	5.19E-02	4.89E-02	3.02E-02
9	2.67E-01	6.39E-02	4.11E-02	2.79E-02	2.63E-02	1.55E-02	1.39E-02
10	1.11E-01	3.30E-02	2.22E-02	1.85E-02	1.17E-02	9.27E-03	6.36E-03
11	6.21E-02	2.72E-02	1.92E-02	1.40E-02	1.02E-02	7.71E-03	5.42E-03
12	5.34E-02	2.63E-02	2.03E-02	1.28E-02	1.03E-02	6.78E-03	4.43E-03
13	4.47E-02	2.76E-02	2.18E-02	1.55E-02	1.09E-02	7.20E-03	5.21E-03
14	4.98E-02	2.94E-02	2.24E-02	1.64E-02	1.18E-02	8.13E-03	6.38E-03
15	6.23E-02	4.26E-02	3.51E-02	2.34E-02	2.01E-02	1.30E-02	9.32E-03
16	1.04E-01	9.64E-02	7.13E-02	6.78E-02	7.13E-02	5.58E-02	3.90E-02
17	6.66E-05	6.32E-05	6.54E-05	5.40E-05	4.43E-05	3.77E-05	2.76E-05
16-2	1.38E-02	8.36E-04	8.54E-05	1.35E-05	1.08E-05	7.40E-06	
17-2	1.30E-05	1.97E-06	4.50E-07	1.92E-08	5.27E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.56E-01	1.49E-01	1.09E-01	8.64E-02	5.75E-02	3.27E-02	1.95E-02

2	2.61E-01	2.10E-01	1.65E-01	1.16E-01	8.45E-02	5.73E-02	3.77E-02
3	4.23E-01	2.78E-01	2.40E-01	1.77E-01	1.44E-01	9.60E-02	7.91E-02
4	6.36E-01	3.60E-01	2.52E-01	2.24E-01	1.94E-01	1.52E-01	9.86E-02
5	7.43E-01	3.77E-01	2.51E-01	2.45E-01	1.70E-01	1.24E-01	9.30E-02
6	7.85E-01	2.84E-01	2.31E-01	1.92E-01	1.52E-01	1.22E-01	8.60E-02
7	6.86E-01	2.21E-01	1.32E-01	1.28E-01	9.35E-02	8.16E-02	6.00E-02
8	4.14E-01	1.15E-01	6.68E-02	5.22E-02	3.56E-02	3.30E-02	2.06E-02
9	1.77E-01	4.29E-02	2.79E-02	1.95E-02	1.80E-02	1.05E-02	9.57E-03
10	7.55E-02	2.22E-02	1.50E-02	1.25E-02	7.98E-03	6.47E-03	4.20E-03
11	4.22E-02	1.83E-02	1.29E-02	9.45E-03	7.04E-03	5.31E-03	3.75E-03
12	3.71E-02	1.79E-02	1.39E-02	8.72E-03	7.04E-03	4.65E-03	2.96E-03
13	3.05E-02	1.88E-02	1.50E-02	1.06E-02	7.37E-03	4.85E-03	3.51E-03
14	3.39E-02	2.03E-02	1.53E-02	1.12E-02	8.21E-03	5.57E-03	4.40E-03
15	4.25E-02	2.93E-02	2.42E-02	1.58E-02	1.38E-02	8.82E-03	6.30E-03
16	7.08E-02	6.66E-02	4.88E-02	4.61E-02	4.83E-02	3.84E-02	2.70E-02
17	4.61E-05	4.30E-05	4.47E-05	3.59E-05	2.97E-05	2.55E-05	1.86E-05
16-2	9.50E-03	5.66E-04	5.76E-05	9.33E-06	7.46E-06	4.98E-06	
17-2	9.03E-06	1.35E-06	3.14E-07	1.31E-08	3.68E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.09E-01	1.06E-01	7.74E-02	6.09E-02	4.07E-02	2.33E-02	1.37E-02
2	1.85E-01	1.49E-01	1.16E-01	8.13E-02	5.91E-02	4.07E-02	2.64E-02
3	2.99E-01	1.98E-01	1.68E-01	1.25E-01	1.01E-01	6.75E-02	5.48E-02
4	4.52E-01	2.55E-01	1.77E-01	1.58E-01	1.36E-01	1.07E-01	6.99E-02
5	5.27E-01	2.69E-01	1.76E-01	1.73E-01	1.19E-01	8.72E-02	6.56E-02
6	5.58E-01	1.98E-01	1.59E-01	1.35E-01	1.08E-01	8.66E-02	6.03E-02
7	4.88E-01	1.53E-01	9.14E-02	8.87E-02	6.53E-02	5.73E-02	4.23E-02
8	2.88E-01	8.13E-02	4.71E-02	3.72E-02	2.51E-02	2.30E-02	1.45E-02
9	1.22E-01	2.99E-02	1.97E-02	1.40E-02	1.28E-02	7.40E-03	6.78E-03
10	5.28E-02	1.55E-02	1.05E-02	8.81E-03	5.61E-03	4.64E-03	2.88E-03
11	2.96E-02	1.28E-02	9.06E-03	6.62E-03	5.00E-03	3.77E-03	2.67E-03
12	2.64E-02	1.26E-02	9.84E-03	6.17E-03	4.98E-03	3.30E-03	2.04E-03
13	2.15E-02	1.32E-02	1.06E-02	7.47E-03	5.15E-03	3.38E-03	2.45E-03
14	2.39E-02	1.44E-02	1.08E-02	7.89E-03	5.87E-03	3.93E-03	3.12E-03
15	2.99E-02	2.07E-02	1.71E-02	1.09E-02	9.80E-03	6.20E-03	4.41E-03
16	5.02E-02	4.74E-02	3.44E-02	3.23E-02	3.38E-02	2.72E-02	1.92E-02
17	3.27E-05	3.02E-05	3.15E-05	2.48E-05	2.07E-05	1.80E-05	1.29E-05
16-2	6.75E-03	3.95E-04	4.02E-05	6.66E-06	5.30E-06	3.47E-06	
17-2	6.48E-06	9.56E-07	2.25E-07	9.24E-09	2.64E-10		

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	7.85E-02	7.71E-02	5.63E-02	4.40E-02	2.94E-02	1.68E-02	9.92E-03
2	1.34E-01	1.08E-01	8.34E-02	5.87E-02	4.26E-02	2.96E-02	1.91E-02
3	2.16E-01	1.44E-01	1.21E-01	9.08E-02	7.28E-02	4.88E-02	3.92E-02
4	3.27E-01	1.85E-01	1.28E-01	1.14E-01	9.80E-02	7.80E-02	5.07E-02
5	3.83E-01	1.95E-01	1.27E-01	1.26E-01	8.61E-02	6.27E-02	4.74E-02
6	4.05E-01	1.43E-01	1.14E-01	9.68E-02	7.88E-02	6.30E-02	4.35E-02
7	3.56E-01	1.10E-01	6.50E-02	6.35E-02	4.68E-02	4.14E-02	3.06E-02
8	2.06E-01	5.90E-02	3.41E-02	2.72E-02	1.82E-02	1.65E-02	1.05E-02
9	8.69E-02	2.13E-02	1.42E-02	1.03E-02	9.33E-03	5.34E-03	4.92E-03
10	3.81E-02	1.11E-02	7.52E-03	6.36E-03	4.05E-03	3.41E-03	2.03E-03
11	2.13E-02	9.17E-03	6.51E-03	4.76E-03	3.63E-03	2.75E-03	1.95E-03
12	1.92E-02	9.08E-03	7.16E-03	4.47E-03	3.60E-03	2.40E-03	1.45E-03
13	1.56E-02	9.57E-03	7.74E-03	5.40E-03	3.71E-03	2.43E-03	1.76E-03
14	1.73E-02	1.05E-02	7.77E-03	5.73E-03	4.29E-03	2.85E-03	2.27E-03

15	2.16E-02	1.50E-02	1.25E-02	7.83E-03	7.13E-03	4.47E-03	3.17E-03
16	3.64E-02	3.44E-02	2.49E-02	2.33E-02	2.43E-02	1.98E-02	1.40E-02
17	2.38E-05	2.16E-05	2.28E-05	1.76E-05	1.48E-05	1.29E-05	9.23E-06
16-2	4.92E-03	2.84E-04	2.88E-05	4.88E-06	3.86E-06	2.49E-06	
17-2	4.74E-06	6.93E-07	1.65E-07	6.68E-09	1.95E-10	 	

부록VI

- Bio-shield 4th scenario 시간당 선량 분포 (영구정지 ~ 30년 시점) -

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	9.89E-03	1.15E-02	2.67E-02	6.23E-02	2.66E-01	7.46E-01	9.26E-01
2	2.60E-02	3.80E-02	6.86E-02	1.88E-01	5.31E-01	1.17E+00	1.53E+00
3	2.60E-02	3.80E-02	6.86E-02	1.88E-01	5.31E-01	1.17E+00	1.53E+00
4	6.35E-02	1.14E-01	1.92E-01	3.99E-01	1.00E+00	2.00E+00	2.22E+00
5	1.35E-01	2.64E-01	4.65E-01	7.91E-01	1.73E+00	2.52E+00	3.68E+00
6	2.07E-01	4.23E-01	5.43E-01	1.29E+00	2.60E+00	3.60E+00	3.95E+00
7	2.55E-01	4.07E-01	7.16E-01	1.55E+00	2.57E+00	4.64E+00	4.89E+00
8	2.30E-01	3.42E-01	8.22E-01	1.08E+00	2.67E+00	3.99E+00	3.65E+00
9	1.71E-01	2.60E-01	4.10E-01	9.17E-01	1.38E+00	1.92E+00	3.00E+00
10	2.70E-02	3.71E-02	6.41E-02	1.22E-01	2.84E-01	3.84E-01	3.75E-01
11	1.40E-02	1.85E-02	3.12E-02	5.99E-02	1.23E-01	1.85E-01	2.42E-01
12	9.39E-03	1.24E-02	2.04E-02	5.00E-02	9.41E-02	1.85E-01	2.01E-01
13	7.40E-03	1.05E-02	2.36E-02	4.25E-02	9.48E-02	1.64E-01	2.07E-01
14	7.13E-03	1.30E-02	1.80E-02	4.25E-02	8.76E-02	2.00E-01	2.22E-01
15	6.63E-03	1.09E-02	2.22E-02	4.31E-02	1.03E-01	1.80E-01	2.54E-01
16	2.10E-02	3.51E-02	5.82E-02	1.04E-01	2.15E-01	2.91E-01	3.39E-01
17	1.43E-05	2.87E-05	3.69E-05	7.38E-05	1.41E-04	1.70E-04	2.24E-04
16-2	2.37E-01	2.24E-01	2.18E-01	1.95E-01	1.61E-01	4.95E-02	
17-2	1.83E-04	1.88E-04	1.52E-04	1.49E-04	9.72E-05	3.89E-05	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	5.82E-03	6.86E-03	1.64E-02	3.83E-02	1.61E-01	4.50E-01	5.60E-01
2	1.52E-02	2.24E-02	4.16E-02	1.12E-01	3.26E-01	7.07E-01	9.32E-01
3	1.52E-02	2.24E-02	4.16E-02	1.12E-01	3.26E-01	7.07E-01	9.32E-01
4	3.87E-02	6.86E-02	1.18E-01	2.39E-01	6.02E-01	1.20E+00	1.34E+00
5	7.76E-02	1.59E-01	2.78E-01	4.79E-01	1.04E+00	1.56E+00	2.24E+00
6	1.22E-01	2.55E-01	3.29E-01	8.00E-01	1.56E+00	2.27E+00	2.42E+00
7	1.42E-01	2.12E-01	5.03E-01	6.74E-01	1.55E+00	2.34E+00	2.27E+00
8	9.98E-02	1.59E-01	2.48E-01	5.49E-01	8.27E-01	1.19E+00	1.74E+00
9	4.23E-02	6.75E-02	1.02E-01	2.42E-01	3.83E-01	4.86E-01	5.76E-01
10	1.64E-02	2.24E-02	3.81E-02	7.43E-02	1.70E-01	2.33E-01	2.30E-01
11	8.55E-03	1.13E-02	1.88E-02	3.72E-02	7.58E-02	1.11E-01	1.49E-01
12	5.87E-03	7.44E-03	1.24E-02	3.06E-02	5.70E-02	1.13E-01	1.22E-01
13	4.50E-03	6.21E-03	1.41E-02	2.55E-02	5.87E-02	1.01E-01	1.26E-01
14	4.32E-03	7.79E-03	1.11E-02	2.60E-02	5.45E-02	1.22E-01	1.35E-01
15	4.02E-03	6.47E-03	1.36E-02	2.64E-02	6.26E-02	1.10E-01	1.53E-01
16	1.28E-02	2.13E-02	3.54E-02	6.38E-02	1.32E-01	1.76E-01	2.06E-01
17	8.49E-06	1.71E-05	2.27E-05	4.52E-05	8.75E-05	1.02E-04	1.36E-04
16-2	1.46E-01	1.39E-01	1.31E-01	1.20E-01	9.62E-02	2.96E-02	
17-2	1.12E-04	1.17E-04	9.44E-05	8.87E-05	5.92E-05	2.39E-05	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	4.11E-03	4.89E-03	1.19E-02	2.79E-02	1.15E-01	3.24E-01	4.04E-01
2	1.06E-02	1.58E-02	3.00E-02	8.00E-02	2.37E-01	5.09E-01	6.75E-01
3	1.06E-02	1.58E-02	3.00E-02	8.00E-02	2.37E-01	5.09E-01	6.75E-01
4	2.79E-02	4.94E-02	8.55E-02	1.71E-01	4.31E-01	8.61E-01	9.65E-01
5	5.37E-02	1.15E-01	1.97E-01	3.45E-01	7.52E-01	1.13E+00	1.62E+00
6	8.64E-02	1.83E-01	2.37E-01	5.87E-01	1.12E+00	1.68E+00	1.76E+00
7	1.04E-01	1.56E-01	3.65E-01	4.95E-01	1.07E+00	1.65E+00	1.67E+00
8	6.99E-02	1.15E-01	1.77E-01	3.93E-01	5.93E-01	8.76E-01	1.21E+00
9	3.06E-02	4.97E-02	7.52E-02	1.71E-01	2.84E-01	3.56E-01	4.16E-01

10	1.17E-02	1.61E-02	2.70E-02	5.37E-02	1.20E-01	1.68E-01	1.67E-01
11	6.20E-03	8.21E-03	1.34E-02	2.73E-02	5.51E-02	7.97E-02	1.09E-01
12	4.32E-03	5.33E-03	8.91E-03	2.22E-02	4.10E-02	8.22E-02	8.76E-02
13	3.26E-03	4.40E-03	1.01E-02	1.83E-02	4.29E-02	7.35E-02	9.06E-02
14	3.12E-03	5.55E-03	8.09E-03	1.89E-02	3.99E-02	8.85E-02	9.78E-02
15	2.90E-03	4.59E-03	9.86E-03	1.92E-02	4.53E-02	8.00E-02	1.10E-01
16	9.24E-03	1.53E-02	2.57E-02	4.65E-02	9.66E-02	1.26E-01	1.49E-01
17	6.03E-06	1.21E-05	1.64E-05	3.27E-05	6.42E-05	7.22E-05	9.81E-05
16-2	1.07E-01	1.02E-01	9.41E-02	8.67E-02	6.86E-02	2.11E-02	
17-2	8.10E-05	8.63E-05	6.95E-05	6.32E-05	4.28E-05	1.74E-05	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	3.57E-03	4.25E-03	1.04E-02	2.45E-02	1.01E-01	2.82E-01	3.53E-01
2	9.11E-03	1.36E-02	2.63E-02	6.98E-02	2.07E-01	4.44E-01	5.93E-01
3	2.45E-02	4.31E-02	7.50E-02	1.49E-01	3.75E-01	7.52E-01	8.43E-01
4	2.45E-02	4.31E-02	7.50E-02	1.49E-01	3.75E-01	7.52E-01	8.43E-01
5	4.62E-02	1.01E-01	1.71E-01	3.02E-01	6.57E-01	9.93E-01	1.41E+00
6	7.49E-02	1.61E-01	2.07E-01	5.16E-01	9.75E-01	1.49E+00	1.55E+00
7	9.14E-02	1.37E-01	3.20E-01	4.37E-01	9.17E-01	1.43E+00	1.46E+00
8	6.05E-02	1.01E-01	1.55E-01	3.42E-01	5.16E-01	7.71E-01	1.04E+00
9	1.02E-02	4.38E-02	2.36E-02	4.70E-02	1.05E-01	1.47E-01	1.46E-01
10	2.69E-02	1.40E-02	6.65E-02	1.48E-01	2.52E-01	3.14E-01	3.63E-01
11	5.43E-03	7.20E-03	1.17E-02	2.42E-02	4.83E-02	6.95E-02	9.57E-02
12	3.81E-03	4.65E-03	7.79E-03	1.94E-02	3.59E-02	7.22E-02	7.67E-02
13	2.85E-03	3.81E-03	8.78E-03	1.61E-02	3.78E-02	6.47E-02	7.94E-02
14	2.73E-03	4.83E-03	7.10E-03	1.67E-02	3.53E-02	7.76E-02	8.57E-02
15	2.54E-03	3.99E-03	8.64E-03	1.68E-02	3.96E-02	7.01E-02	9.60E-02
16	8.09E-03	1.34E-02	2.24E-02	4.08E-02	8.49E-02	1.10E-01	1.30E-01
17	5.24E-06	1.05E-05	1.44E-05	2.87E-05	5.66E-05	6.32E-05	8.58E-05
16-2	9.36E-02	8.97E-02	8.22E-02	7.61E-02	5.98E-02	1.84E-02	
17-2	7.10E-05	7.62E-05	6.14E-05	5.49E-05	3.76E-05	1.53E-05	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	2.27E-03	2.75E-03	6.92E-03	1.62E-02	6.57E-02	1.85E-01	2.31E-01
2	5.72E-03	8.60E-03	1.73E-02	4.52E-02	1.38E-01	2.90E-01	3.92E-01
3	1.62E-02	2.82E-02	4.98E-02	9.62E-02	2.45E-01	4.91E-01	5.52E-01
4	1.62E-02	2.82E-02	4.98E-02	9.62E-02	2.45E-01	4.91E-01	5.52E-01
5	2.85E-02	6.59E-02	1.10E-01	1.98E-01	4.32E-01	6.60E-01	9.30E-01
6	4.79E-02	1.05E-01	1.36E-01	3.47E-01	6.35E-01	1.02E+00	1.02E+00
7	6.12E-02	9.24E-02	2.12E-01	2.94E-01	5.69E-01	9.09E-01	9.81E-01
8	3.81E-02	6.66E-02	1.01E-01	2.22E-01	3.35E-01	5.18E-01	6.45E-01
9	1.77E-02	2.96E-02	4.49E-02	9.39E-02	1.71E-01	2.10E-01	2.39E-01
10	6.69E-03	9.09E-03	1.52E-02	3.09E-02	6.77E-02	9.63E-02	9.65E-02
11	3.59E-03	4.79E-03	7.56E-03	1.62E-02	3.21E-02	4.52E-02	6.39E-02
12	2.58E-03	3.02E-03	5.10E-03	1.29E-02	2.36E-02	4.80E-02	5.03E-02
13	1.89E-03	2.45E-03	5.70E-03	1.04E-02	2.54E-02	4.31E-02	5.21E-02
14	1.80E-03	3.14E-03	4.73E-03	1.10E-02	2.37E-02	5.15E-02	5.66E-02
15	1.65E-03	2.57E-03	5.72E-03	1.12E-02	2.61E-02	4.65E-02	6.29E-02
16	5.34E-03	8.79E-03	1.48E-02	2.72E-02	5.67E-02	7.13E-02	8.58E-02
17	3.36E-06	6.80E-06	9.50E-06	1.91E-05	3.80E-05	4.08E-05	5.64E-05
16-2	6.24E-02	6.02E-02	5.36E-02	5.04E-02	3.86E-02	1.19E-02	
17-2	4.68E-05	5.15E-05	4.14E-05	3.54E-05	2.48E-05	1.02E-05	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.50E-03	1.85E-03	4.76E-03	1.12E-02	4.47E-02	1.25E-01	1.58E-01

2	3.74E-03	5.66E-03	1.18E-02	3.05E-02	9.47E-02	1.97E-01	2.69E-01
3	1.11E-02	1.91E-02	3.42E-02	6.47E-02	1.65E-01	3.33E-01	3.77E-01
4	1.11E-02	1.91E-02	3.42E-02	6.47E-02	1.65E-01	3.33E-01	3.77E-01
5	1.83E-02	4.49E-02	7.37E-02	1.35E-01	2.94E-01	4.56E-01	6.36E-01
6	3.18E-02	7.10E-02	9.29E-02	2.42E-01	4.28E-01	7.19E-01	7.01E-01
7	4.25E-02	6.44E-02	1.46E-01	2.04E-01	3.66E-01	6.00E-01	6.83E-01
8	2.51E-02	4.58E-02	6.86E-02	1.50E-01	2.27E-01	3.60E-01	4.17E-01
9	1.21E-02	2.07E-02	3.14E-02	6.23E-02	1.21E-01	1.46E-01	1.62E-01
10	4.55E-03	6.17E-03	1.01E-02	2.10E-02	4.55E-02	6.56E-02	6.62E-02
11	2.46E-03	3.30E-03	5.10E-03	1.13E-02	2.21E-02	3.05E-02	4.43E-02
12	1.80E-03	2.04E-03	3.47E-03	8.82E-03	1.61E-02	3.30E-02	3.44E-02
13	1.29E-03	1.62E-03	3.84E-03	7.08E-03	1.76E-02	2.97E-02	3.56E-02
14	1.23E-03	2.10E-03	3.26E-03	7.58E-03	1.65E-02	3.54E-02	3.87E-02
15	1.13E-03	1.71E-03	3.92E-03	7.68E-03	1.79E-02	3.20E-02	4.28E-02
16	3.65E-03	5.99E-03	1.01E-02	1.88E-02	3.92E-02	4.82E-02	5.87E-02
17	2.25E-06	4.55E-06	6.51E-06	1.31E-05	2.64E-05	2.75E-05	3.84E-05
16-2	4.31E-02	4.19E-02	3.63E-02	3.47E-02	2.60E-02	8.04E-03	
17-2	3.21E-05	3.59E-05	2.90E-05	2.37E-05	1.70E-05	7.02E-06	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	1.03E-03	1.28E-03	3.36E-03	7.97E-03	3.14E-02	8.81E-02	1.10E-01
2	2.54E-03	3.87E-03	8.31E-03	2.12E-02	6.72E-02	1.38E-01	1.91E-01
3	7.82E-03	1.34E-02	2.43E-02	4.50E-02	1.15E-01	2.33E-01	2.64E-01
4	7.82E-03	1.34E-02	2.43E-02	4.50E-02	1.15E-01	2.33E-01	2.64E-01
5	1.23E-02	3.15E-02	5.10E-02	9.48E-02	2.07E-01	3.24E-01	4.49E-01
6	2.19E-02	4.98E-02	6.54E-02	1.73E-01	2.99E-01	5.21E-01	4.97E-01
7	3.12E-02	4.52E-02	8.39E-02	1.65E-01	2.60E-01	5.36E-01	5.91E-01
8	3.03E-02	4.61E-02	1.03E-01	1.46E-01	2.46E-01	4.11E-01	4.89E-01
9	1.71E-02	3.24E-02	4.80E-02	1.05E-01	1.58E-01	2.58E-01	2.81E-01
10	3.18E-03	4.31E-03	7.01E-03	1.48E-02	3.17E-02	4.62E-02	4.68E-02
11	1.74E-03	2.34E-03	3.56E-03	8.09E-03	1.58E-02	2.13E-02	3.15E-02
12	1.29E-03	1.43E-03	2.45E-03	6.24E-03	1.12E-02	2.34E-02	2.42E-02
13	9.11E-04	1.12E-03	2.67E-03	4.97E-03	1.25E-02	2.12E-02	2.51E-02
14	8.64E-04	1.46E-03	2.33E-03	5.37E-03	1.18E-02	2.51E-02	2.75E-02
15	7.92E-04	1.19E-03	2.78E-03	5.45E-03	1.26E-02	2.27E-02	3.00E-02
16	2.58E-03	4.20E-03	7.14E-03	1.33E-02	2.79E-02	3.36E-02	4.14E-02
17	1.56E-06	3.15E-06	4.62E-06	9.26E-06	1.89E-05	1.91E-05	2.72E-05
16-2	3.08E-02	3.00E-02	2.55E-02	2.46E-02	1.81E-02	5.59E-03	
17-2	2.27E-05	2.58E-05	2.07E-05	1.65E-05	1.20E-05	4.99E-06	

Step/Section	1	2	3	4	5	6	7
1	7.32E-04	9.14E-04	2.45E-03	5.81E-03	2.27E-02	6.35E-02	7.97E-02
2	1.77E-03	2.73E-03	6.02E-03	1.52E-02	4.89E-02	9.92E-02	1.38E-01
3	5.66E-03	9.66E-03	1.77E-02	3.23E-02	8.28E-02	1.68E-01	1.91E-01
4	8.54E-03	2.28E-02	3.65E-02	6.84E-02	1.49E-01	2.36E-01	3.26E-01
5	1.56E-02	3.59E-02	4.73E-02	1.26E-01	2.15E-01	3.84E-01	3.62E-01
6	2.25E-02	3.23E-02	6.03E-02	1.17E-01	1.83E-01	3.84E-01	4.28E-01
7	2.22E-02	3.38E-02	7.49E-02	1.07E-01	1.71E-01	2.91E-01	3.59E-01
8	1.20E-02	2.36E-02	3.45E-02	7.52E-02	1.13E-01	1.89E-01	1.95E-01
9	6.21E-03	1.09E-02	1.67E-02	3.03E-02	6.44E-02	7.62E-02	8.25E-02
10	2.30E-03	3.11E-03	5.00E-03	1.07E-02	2.27E-02	3.33E-02	3.41E-02
11	1.26E-03	1.70E-03	2.55E-03	5.93E-03	1.14E-02	1.53E-02	2.30E-02
12	9.51E-04	1.02E-03	1.76E-03	4.53E-03	8.12E-03	1.71E-02	1.74E-02
13	6.60E-04	7.94E-04	1.92E-03	3.57E-03	9.17E-03	1.55E-02	1.82E-02
14	6.26E-04	1.05E-03	1.70E-03	3.92E-03	8.66E-03	1.82E-02	1.98E-02

15	5.72E-04	8.45E-04	2.01E-03	3.96E-03	9.14E-03	1.65E-02	2.16E-02
16	1.86E-03	3.03E-03	5.18E-03	9.66E-03	2.03E-02	2.42E-02	3.00E-02
17	1.11E-06	2.25E-06	3.35E-06	6.72E-06	1.39E-05	1.37E-05	1.97E-05
16-2	2.24E-02	2.19E-02	1.83E-02	1.79E-02	1.29E-02	4.00E-03	3.00E-02
17-2	1.64E-05	1.89E-05	1.52E-05	1.18E-05	8.68E-06	3.64E-06	1.97E-05