creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266173

2017년 2월

석사학위 논문

천연방사성물질 취급 국내 주요산업체에 대한 안전관리 방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 하 임

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

천연방사성물질 취급 국내 주요산업체에 대한 안전관리 방안 연구

Study of the NORM Safety Management for Major Domestic NORM Industry

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 하 임

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

천연방사성물질 취급 국내 주요산업체에 대한 안전관리 방안 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 하 임

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김하임의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT vii

제1장 서 론 1

제1절 연구 배경 및 필요성 1

제2절 연구 목적 2

제2장 본 론 2

제1절 국내외 공정부산물의 법적 기준 검토 2

1. 국외 공정부산물 적용 기준 2

가. IAEA 공정부산물 규제기준 2

나. 유럽연합 공정부산물 규제기준 7

다. 미국 환경보호청 공정부산물 규제기준 9

라. 영국 공정부산물 규제기준 14

2. 국내 공정부산물 적용 기준 16

가. 원료물질 및 공정부산물의 방사능 농도 기준 16

나. 원료물질 및 공정부산물 취급자 등록 17

다. 생활주변방사선방호 종합계획 수립 8

라. 연도별 시행계획 수립 18

마. 생활주변방사선 안전관리 실태 조사·분석 19

바. 공정부산물 처리·처분 또는 재활용 20

사. 방사선·방사능 감시기의 설치·운영 20

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 국내외 공정부산물 적용 기준 비교 및 분석 ····· 21
제2절 수산화알루미늄 제조 산업 공정부산물 공정특성 분석 ····· 22
1. 현장탐색 사전준비 ····· 22
가. 사전 설명회 ····· 22
나. 현장탐색 계측방법 ····· 23
(1) 공정부산물 시료 채취 ····· 24
(2) Inspector 1000-NaI 현장 계측방법 ····· 25
(3) 유리선량계 현장 설치 방법 ····· 26
(4) Cascade Impactor 현장 설치 방법 ····· 27
2. 공정부산물 현장탐색 ····· 28
가. 회사 현황 ····· 28
나. 제조 공법 및 흐름도 ····· 29
다. 현장탐색 ····· 32
(1) 시료 채취 : 방사능 농도 정량분석 ····· 32
(2) 공간감마선량 계측 : Inspector 1000-NaI ····· 34
(3) 작업자 외부피폭 측정 : 유리선량계(Glass Dosimeter) ·· 36
(4) 작업자 내부피폭 측정 : Cascade Impactor ····· 38
3. 공정부산물 거동특성 분석 및 평가 ····· 39
가. 방사능 농도 정량분석 ····· 39
나. 공간감마선량 측정 ····· 42
다. 작업자 외부피폭 측정 ····· 45
라. 작업자 내부피폭 측정 ····· 46
제3절 수산화알루미늄 제조 산업 공정부산물 방사능 영향 평가 ····· 51

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 결 론 53

참고문헌 55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 1. IAEA 공정부산물 기본안전기준 ····· 3
표 2. IAEA NORM 함유 산업별 공정부산물 규제기준 및 조치 ····· 6
표 3. EU 공정부산물의 해제 혹은 면제 기준 ····· 8
표 4. 영년평형에 있는 핵종 목록 ····· 8
표 5. 모든 유형의 핵종별 면제 방사능 농도와 방사능량 ····· 8
표 6. EPA 산업별 공정부산물 방사능 농도 범위 ····· 10
표 7. 미국 내 존재하는 규제 기준 및 지침 ····· 11
표 8. 핵종별 방사능 농도 취급자등록 기준 ····· 15
표 9. 핵종별 규제 감시를 위한 방사능 농도 ····· 17
표 10. 연도별 시행계획 수립 절차 ····· 19
표 11. 국내외 공정부산물 기본안전기준 비교 ····· 21
표 12. 수산화알루미늄 제조 산업 현황 ····· 29
표 13. 제품 제조에 사용되는 물질의 현황 ····· 29
표 14. 수산화알루미늄 제조 공정 ····· 31
표 15. 수산화알루미늄 제조 산업 시료 채취 지점 정보 ····· 33
표 16. 수산화알루미늄 제조 산업 공간감마선량 현장탐색 계측 지점 ····· 36
표 17. 수산화알루미늄 제조 산업 유리선량계 설치 정보 ····· 37
표 18. 수산화알루미늄 제조 산업 Cascade Impactor 포집 정보 ····· 39
표 19. 수산화알루미늄 제조 산업의 채취 시료 분석 ····· 40
표 20. 수산화알루미늄 제조 산업의 연간 공간감마선량 측정값 ····· 43
표 21. 수산화알루미늄 제조 산업의 연간 공간감마선량 결과값 ····· 44
표 22. 수산화알루미늄 제조 산업의 유리선량계 분석값 ····· 45
표 23. 수산화알루미늄 제조 산업의 Cascade Impactor 1차 포집 결과 ····· 46
표 24. 수산화알루미늄 제조 산업의 Cascade Impactor 2차 포집 결과 ····· 47
표 25. Cascade Impactor Filter 분석 결과 ····· 49
표 26. 소성미분알루미나 포장실 작업장 내 피폭 환경 ····· 50

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 27. 입자 특성에 따른 ^{238}U 계열 핵종의 선량계수 ····· 50
표 28. 수산화알루미늄 제조 산업 현장탐색 종합분석결과 ····· 52

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

그림 1. 생활주변 천연방사성물질의 ^{238}U 및 ^{232}Th 방사선 농도(Bq/g) 분포 ····· 4
그림 2. RESRAD 모듈 구성 ····· 14
그림 3. 현장 채취 시료 ····· 24
그림 4. INSPECTOR 1000-NaI 현장 계측 ····· 25
그림 5. 유리선량계 현장 부착 ····· 27
그림 6. Cascade Impactor 현장 설치 ····· 28
그림 7. 수산화알루미늄 제조 공정 간략도 ····· 30
그림 8. 수산화알루미늄 제조 산업 시료 채취 지점 ····· 33
그림 9. 수산화알루미늄 제조 산업 공간감마선량 현장탐색 측정 지점 ····· 35
그림 10. 수산화알루미늄 제조 산업 유리선량계 설치 지점 ····· 37
그림 11. 수산화알루미늄 제조 산업 Cascade Impactor 포집 위치 지점 ····· 38
그림 12. Cascade Impactor Filter 분석 절차 ····· 48
그림 13. 수산화알루미늄 제조 산업 입자크기별 ^{238}U 방사능 농도 ····· 49

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Study of the NORM Safety Management for Major Domestic NORM Industry

Kim Ha Im
Advisor : Prof. Lee Gyeong Jin, Ph.D.
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

In 2011, low level radiation dose was detected from the asphalt on the road of Weolgae-dong in Seoul. The asphalt was made of recycled scraps of imported steel which is categorized as NORM(Naturally Occurring Radioactive Material). Since then, it has become an emerging environmental and social issue of ensuring radiation safety in the neighborhood of individual life. The government enacted the 'NORM Safety Management Law' in 2012 to protect the environment and people from radiation exposure in their everyday life.

As 'NORM Safety Management Law' was established and implemented, it became a radiation safety issue for the NORM industries which handle large amount of raw materials with NORMs and process residues(technically enhanced NORM, TENORM) to understand the behavior of the industrial NORM and manage the NORM processes and radiation exposures of the workers. Therefore, it is necessary to perform on-site survey for major NORM industries thus improving the working environment in order to protect workers from radiation exposure. Until now, studies on the safety management of NORM process residues are performed by analyzing first

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

radionuclide behavior and then the safety management practices of the NORM industries.

Two steps were developed for the on-site radiation survey and characterization of the NORMs; Preliminary discussions with NORM industry for the needs of the on-site radiation survey for the NORM safety management and developing procedures for the on-site radiation survey after reviewing the process flows and work environments.

On-site radiation survey methodology has been developed for a chemical plant manufacturing aluminum hydroxide and calcined aluminium from Bauxite as follows: (1) Real-time radiation dose measurement of raw materials and NORMs using Inspector 1000-NaI γ-ray detector; (2) Measurement of ambient particle size distribution and radioactive nuclide concentration using Cascade Impactor at work places with dust using Cascade Impactor; (3) Measurement of accumulated doses of workers using Glass Dosimeter in places where the workers are exposed to NORMs for a long period of time; (4) Quantitative analysis of radioactive nuclide and radioactivity concentrations of the raw materials as well as the field NORM samples including process residues and scales.

As a result of the on-site measurements and quantitative analyses of NORM sample for the aluminum hydroxide and calcined aluminum manufacturing plant, a maximum of 0.46 mSv/y radiation dose was measured at the open residue storage. This is lower than the 1.0 mSv/y annual dose limit for the general public. The measured radioactivity concentration of the Bauxite was 0.1056 Bq/g for ^{238}U and 0.1625 Bq/g for ^{232}Th, respectively, which are higher than the raw material radioactivity concentration of 0.1 Bg/g. For pipe scales, the measured radioactivity concentration was 0.8575 Bq/g for ^{238}U, which is higher than the definition of NORM, which is 0.5 Bg/g.

Both Bauxite and pipe scales of the chemical plant manufacturing aluminum hydroxide and calcined aluminum from Bauxite can be defined as

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

raw material and NORM as defined in the “NORM Safety Management Law” but not required for the registration since the annual total radioactive concentrations are less than the limit set by Article 4 of “NORM Safety Management Law”

The NORM process characteristics and safety management practices of the NORM industry were studied through on-site radiation survey and quantitative analyses for a chemical plant manufacturing aluminum hydroxide and calcined aluminum from Bauxite.

Through the investigation of the on-site radiation survey and quantitative analyses of a major NORM industry, important NORM safety management issues were identified and comprehensive NORM safety management strategies were proposed in this study.

In the future, this study can be further applied to investigate the NORM process characteristics and develop NORM safety management and regulatory guidelines for he domestic NORM industries. Therefore, the results of the study can be utilized to improve working environment as well as the workers’ radiation exposures at the NORM industries and thus promotes public acceptance of the NORM safety.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 필요성

국내에는 천연방사성핵종이 포함된 인광석, 보크사이트, 모자나이트 및 TiO_2 등 여러 가지 광물들이 산업원료로 다양한 분야에 대량으로 유통 또는 제조 및 활용되고 있다. 실생활에서 접할 수 있는 온열매트, 건강용품, 접시꽂이 등의 가공제품에도 천연방사성핵종이 포함되어있어서 생활주변에서 쉽게 방사선에 노출될 우려가 있다. 실제로 2011년 서울시 노원구 월계동의 아스팔트 방사선 검출 및 후쿠시마 원전사고 이후 일본 후쿠시마 지역으로부터의 고철 및 농수산물 수입 등이 국내 생활주변방사선에 대한 국민의 방사선 안전현안으로 사회갈등 현안화 되고 있는 실정이다. 이에 따라 생활주변에서 쉽게 접할 수 있는 저준위 생활주변방사선의 안전관리에 관한 사항을 규정함으로써 국민의 건강과 환경을 보호하여 삶의 질을 향상시키고 안전에 이바지함을 목적으로 하는 「생활주변방사선 안전관리법」[1]이 2012년 제정·시행되었다.

생활주변방사선에 의한 일반인의 평균 피폭은 연평균 2.4 mSv(240 mrem)로 평가되고 있다[2]. 이 중 태초부터 지구상에 존재하는 천연방사성동위원소에 의해 발생되는 방사선은 우라늄계열(^{238}U 계열, 질량수는 4n+2), 토륨계열(^{232}Th 계열, 질량수는 4n)의 방사성동위원소 등이 붕괴하면서 생성되며, 연간 2 mSv로 피폭된다. 그 중에서 50%로 많은 비중을 차지하는 것이 라돈 기체에 의한 피폭으로 연간 평균 1.4 mSv이다. 또한, 우주방사선은 양성자(85%), α선(14%), 기타 원자핵(1%)로 구성되어, 투과력이 강하며 공기와 상호작용하여 전자, 중성자, γ, 뮤온 등을 생성하며 지표에서 연간 0.36 mSv 정도 피폭이 된다. 나머지는 우주방사선과 대기와의 반응으로 생성된 천연방사성 동위원소로서 대표적인 것은 ^{14}C, ^{3}H 등이 있으며, 연간 0.02 mSv의 피폭을 일으킨다. 이러한 생활주변방사선은 인간 거주지역의 고도나 자연환경에 따라 큰 차이를 보이는 경우도 있다.

이와 같이 천연방사성핵종이 포함된 원료물질 및 산업활동 중 부수적으로 발생하는 공정부산물에 의한 피폭은 생활주변방사선에서 많은 비중을 차지하고 있다. IAEA에서도 자연기원천연방사성핵종물질 (NORM : Naturally Occurring

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Radioactive Materials) 발생에 따른 방사선 방호 수립의 필요성을 인식해 이와 관련된 지침(IAEA Safety Guide)[3] 등을 회원국들에게 권고하는 등 지침마련의 필요성을 강조했다.

본 연구에서는 '산업별 공정부산물 현장탐색 방법론 기술보고서[4]'를 토대로 원료물질 및 공정부산물을 대량으로 취급하는 산업체 중 한 곳인 수산화알루미늄 제조 산업체에 대하여 사전조사를 통해 공정흐름을 파악하고, 현장탐색 및 시료 분석을 통하여 원료물질 및 공정부산물의 공정특성 및 공정부산물의 안전관리현황을 파악하여 국내 원료물질 및 공정부산물 취급 산업체의 안전관리 방안을 연구하여 제시하였다.

수산화알루미늄 제조 산업체를 기반으로 여러 산업체의 현장탐색을 통하여 다양하고 많은 측정 Data를 확보하고, 국내 원료물질 및 공정부산물을 대량으로 취급하는 산업체에서 발생하는 생활주변방사선에 대하여 안전관리 방안을 제시하며, 나아가 공정부산물 처리·처분 및 재활용에 대한 안전관리 기술개발을 통하여 생활주변방사선의 안전관리를 향상시키고 국민의 건강과 환경을 보호하여, 국민의 삶의 질 향상에 기여할 것으로 기대된다.

제 2 절 연구 목적

본 연구의 목적은 천연방사성핵종을 함유한 원료물질 및 공정물질을 취급하는 국내 주요 산업체 대하여 '산업별 공정부산물 현장탐색 방법론 기술보고서[4]'를 활용하여 공정부산물 현장탐색을 수행하고, 공정부산물 공정 및 거동 특성을 분석하고 공정부산물 안전관리 현황 및 현안을 파악을 통하여, 공정부산물을 사용하는 산업체의 대한 생활주변방사선의 안전관리 방안을 제시하는데 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 본 론

제 1 절 국내외 공정부산물의 법적 기준 검토

1. 국외 공정부산물 적용 기준

가. IAEA 공정부산물 규제기준

IAEA(International Atomic Energy Agency)는 2007년 ICRP(International Commission on Radiological Protection) 103에 따라 방사선에 관련한 기본안전기준(BSS : Basic Safety Standards)을 재구성하였다. IAEA 방사선 기본안전기준은 국가별 방사능 안전관리의 자원과 효율성 그리고 각 국가별 경제, 사회 및 정책적인 영향을 고려하여 규제관리 면제(Exemption) 및 제외(Clearance) 개념을 도입하여 아래 표 1과 같이 제시하여 권고하였다[5][6].

표 1. IAEA 공정부산물 기본안전기준

공정부산물 핵종	기본안전기준		규제 면제기준		규제 제외기준	
	농도 (Bq/g)	선량 (mSv/y)	농도 (Bq/g)	선량 (mSv/y)	최대 농도 (Bq/g)	선량 (mSv/y)
^{238}U, ^{232}Th 붕괴계열	1	1	1	1	1	-
^{40}K	10		10		10	

IAEA는 국제적인 의견수렴을 통하여, 일반인의 연간 천연방사성핵종으로부터의 피폭이 0.2 mSv를 초과하지 않는다는 것을 고려하고, ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종의 정상적인 주변 환경 방사능 농도 수준(0 ~ 1.0 Bq/g)을 가정하였다. 그리고 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종과 ^{40}K의 공정부산물 방사선 기본안전기준을 각각 1 Bq/g과 10 Bq/g으로 제시하고, 연간 피폭 기준을 위한 참조 선량으로 1 mSv을 제시하였다[7][8].

IAEA의 참조 선량은 아래 그림 1과 같이 생활주변 천연방사성물질의 ^{238}U 및 ^{232}Th 핵종의 방사능 농도를 고려하여 국제적 전문가의 의견수렴을 통하여 선정하였다. 그

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

림 1에서 보는 것과 같이 생활주변방사선은 광산과 광석 및 지표 등 지역에 따라 0.001 ~ 1000 Bq/g의 다양한 농도로 분포되나 규제기준의 적용은 각 국가의 효율성, 현실성, 유익성, 경제성, 사회성 및 정책성에 따라 최적의 방향으로 적용할 것을 권고하고 있다.

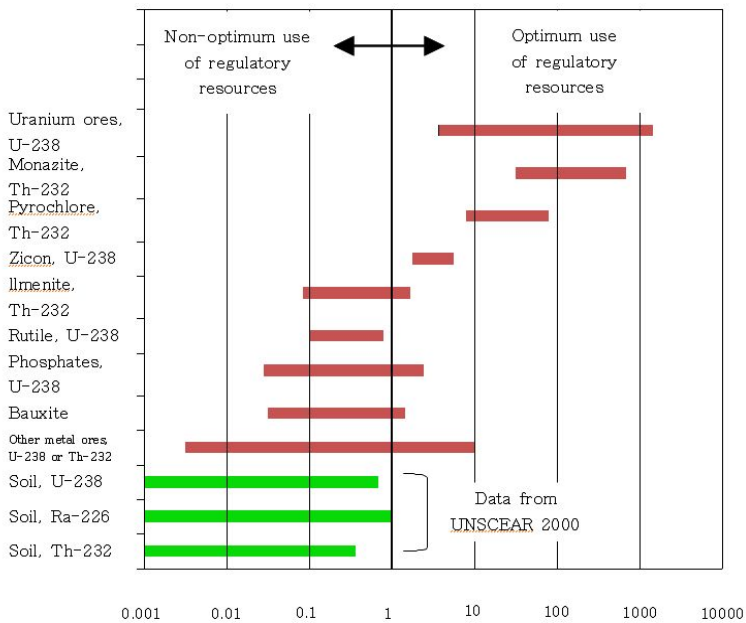


그림 1. 생활주변 천연방사성물질의 ^{238}U 및 ^{232}Th 방사능 농도(Bq/g) 분포

표 2는 2004년 IAEA Safety Standards Series에서 NORM을 포함한 인산 산업, 정유·가스 산업, 황산 생산 산업, 지르콘/지르코니아 산업 등의 공정이나 특정 작업에 있어 방사선방호를 위해 현재의 기준이나 또는 현재는 없으나 향후 규제기준 적용 가능성이 있는 산업의 작업종사자와 일반인의 피폭선량 기준을 제시한 자료이다[6]. IAEA는 방사성물질의 특성과 공정의 세부사항에 따라 NORM을 포함하는 제작 및 공정을 위한 방사선방호 방법이 필요하다고 판단된다. 따라서 IAEA는 공정부산물의 안전관리 및 규제기준을 위하여 작성한 산업별 공정부산물 안전관리보고서를 바탕으로 다양한 산업분야의 공정부산물 피폭상황을 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한, 특정 산업분야에서 요구되는 방사선방호를 위한 관리대책 방법은 환기, 객실 관리 및 산업 위생과 개인보호장비(PPE : Personal Protective Equipment) 등으로 매우 간단하다. 고방사능 Scale을 포함하는 작업의 경우 호흡기를 보호하는 장비가 필요하며, 화학 공정의 경우 환경에 배출되는 것을 규제하여야 한다. 이러한 방사선방호 방법은 기존의 산업 보건, 안전과 환경 규제 아래 그 필요성이 제시되었고 이를 관할하는 규제기관의 경우 각 분야별 목적에 적합한 규제 방법을 수행해야 한다고 권고하고 있다.

그리고 인산 산업의 채광 및 선광 공정에서 작업자의 경우 연간 0.1 ~ 2 mSv, 일반인의 경우 연간 0.02 mSv로 제시하고 있으며, 일반인에게 매우 보수적으로 정하고 있음을 볼 수 있다.

채광 및 선광, 광물 운송 및 저장, 그리고 인산염 Slag의 경우 현재 규제 방법은 존재하지 않으나 면제(exemption) 될 가능성이 있다. 그 외 공정부산물 방출의 제어는 열처리 인 공장의 경우, 오염 감시 및 규제, 개인보호장비, 먼지 보관(decay storage of dust) 등의 방법을 사용하고 있다. 습식가공 인산시설의 경우에는 장비의 유지 및 보수를 위한 스케일의 피폭 규제가 가능하다.

정유·가스 산업의 공정 작동 중에 발생되는 감마선에 노출되는 경우 선량은 작업자 및 일반인의 경우 연간 ~ 20 mSv로 제시되고 있다. 장비의 조작 또는 개방된 장비로부터 일하는 도중 감마선에 노출되거나 오염 물질을 제거하는 과정 중에 먼지를 흡입하는 과정들이 있을 수 있다. 이것은 장비 조작의 경우 거리, 시간, 차폐의 방법을 제외하고 규제 방법이 존재하지 않는다. 그리고 장비 제염 과정에서의 흡입의 경우 통풍, 개인보호 장비, 오염 감시 및 규제의 방법들이 있다.

정유·가스 산업보다 높은 ^{226}Ra의 방사능 농도를 포함하는 황철광에서 황산을 생성하는 산업의 경우 일반 조작과 30일간 동안 유지하는 공정 두 가지가 존재한다. 일반 조작의 경우 연간 1 ~ 5 mSv이며, 30일 유지 공정은 연간 0.4 ~ 2.8 mSv 이하의 피폭선량을 제시하고 있으며 작업자에게만 해당된다. 방출되는 방사선으로부터의 보호를 위한 규제 방법으로는 일반적인 조작에는 정하여 있지 않고, 유지보수 공정에서는 최소화된 실험 시간, 개인보호 장비, Scale 형성의 감소, 처분 규제 등의 방법이 시행되고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지르콘/지르코니아 산업의 세라믹 타일에 포함된 지르콘의 경우 작업자는 연간 0.01 ~ 0.5 mSv이며, 일반인은 0.003 ~ 0.06 mSv 이하의 피폭선량을 제시하고 있다. 또한, 시설의 먼지 방출을 규제하고, off-gas 가루의 매립을 위한 처분을 하여 유지 및 철거 시 가루를 규제하는 방법을 선택한다. 그리고 스케일의 최소화와 폐수의 방류에 대한 규제가 각각의 공정에서 시행되고 있다.

표 2. IAEA NORM 함유 산업별 공정부산물 규제기준 및 조치

Industry/process	Dose (mSv/a or as stated)		Control measures
	Workers	Public	
Phosphate industry			
Mining/beneficiation	0.1-2	0.02	None (candidate for exemption)
Ore transport and storage	0.1-0.5		None (candidate for exemption)
Thermal phosphorus plant (precipitator dust 1000 Bq/g ^{210}Pb)	0.2-5	0.03	Contamination monitoring/control, PPE, ventilation, decay storage of dust
Phosphorus slag in roads	≤0.6	0.001-0.06	None (candidate for exemption)
Wet process phosphoric acid plant	0-0.8		Operation: none. Maintenance: possibly control exposure to scale
Oil and gas industry (pipe scale 0.1-15 000 Bq/g ^{226}Ra)			
Gamma exposure during operation	« 20		Normally none. Exceptionally distance, time, shielding
Gamma exposure while working on open equipment	0.1-300 μSv/h		Restrict access and occupancy time
Dust inhalation while decontaminating equipment	0.1-1 mSv/g (inhaled)		Ventilation, PPE, contamination monitoring/control
Sulphuric acid production from pyrite (scale 100-100 000 Bq/g ^{226}Ra)			
Normal operation	1 (5 max)		None

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Maintenance (duration 30 days)	0.4 mSv (max 2.8 mSv)		Minimize exp. time, PPE, reduce scale formation & control disposal
Zircon/zirconia industry			
Zircon milling	0.06-1		Dust control in plant
Zircon in ceramic tiles	0.01-0.5	0.003-0.06	None (candidate for exemption)
Zircon sand landfill disposal		0-0.1	Restrict disposal to landfill only
Thermal zirconia plant (zircon feed, off-gas filtration system)	0.25-3.1		Dispose of off-gas dust to landfill. Maintenance/demolition: dust control
Chemical zirconia plant (baddeleyite feed)	2.1-3		Minimize exposure to scale, effluent discharge control
Production of Zr chemicals	<0.3-3		Effluent discharge control

나. 유럽연합 공정부산물 규제기준

현재 유럽연합(EU : European Union)에 가입된 나라는 오스트리아(1995), 프랑스(1952), 독일(1952), 네덜란드(1952), 폴란드(2004), 스웨덴(1995), 영국(1973) 등 총 28개국이다. 유럽연합은 IAEA BSS를 참고로 EU BSS를 제정하였으며 2000년 이후부터 유럽연합 기본안전기준지침(EU Basic Safety Standards Directive 96/29/EURATOM)을 시행하고 있다. 공정부산물에 존재하는 영년평형(secular equilibrium)에 있는 천연방사성핵종의 면제(exemption) 기준값을 표 3과 같이 정하고 있다. 참고로 영년평형에 있는 핵종의 목록은 표 4에 나타나 있다. IAEA에서 제안한 방사능 농도와 같은 수준으로 공정부산물의 고체물질에 함유되어 있는 영년평형에 있는 천연방사성핵종과 그들의 딸핵종의 해제 혹은 면제 기준은 ^{40}K은 10 Bq/g, ^{238}U 및 ^{232}Th의 붕괴계열 핵종은 1 Bq/g으로 정하고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3. EU 공정부산물의 해제 혹은 면제 기준

핵 종	규제 방사능 농도(Bq/g)
^{40}K	10
^{238}U, ^{232}Th 및 천연방사성핵종들	1

표 4. 영년평형에 있는 핵종 목록

모 핵종(Parent nuclides)	딸 핵종(Daughter nuclides)
^{232}Th+	^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl
^{232}Th-sec	^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{212}Po, ^{208}Tl
^{235}U+	^{231}Th
^{235}U-sec	^{231}Th, ^{231}Pa, ^{227}Ac, ^{227}Th, ^{223}Fr, ^{223}Ra, ^{219}Rn, ^{215}Po, ^{211}Pb, ^{211}Bi, ^{207}Tl, ^{211}Po
^{238}U+	^{234}Th, ^{234m}Pa
^{238}U-sec	^{234}Th, ^{234m}Pa, ^{234}U, ^{230}Th, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po

그리고 그 외의 모든 상태의 물질에 대하여 표 5에서 볼 수 있듯이 ^{40}K은 100 Bq/g, ^{238}U 및 ^{232}Th의 붕괴계열 핵종은 10 Bq/g으로 면제 수준을 정하여 초과하지 않도록 방사능 농도 및 방사능량을 규정하고 있다[9].

표 5. 모든 유형의 핵종별 면제 방사능 농도와 방사능량

핵 종	규제 방사능 농도(Bq/g)	규제 방사능량(Bq)
^{40}K	100	1,000,000
^{235}U, ^{238}U	10	10,000

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 미국 환경보호청 공정부산물 규제기준

미국은 환경보호청(EPA : U.S. Environmental Protection Agency)과 연방정부 및 주정부가 생활방사선의 안전규제 업무를 서로 협력하여 수행토록 규정하고 있다. 대부분의 정부기관들은 TENORM(Technically Enhanced NORM) 방사선의 모든 천연방사성물질에 관하여 규정된 일반적인 방사선방호와 폐기물 처리기준을 규제에 적용한다. 일반인과 작업종사자의 보호, 폐기물 처리장소의 이상적인 유형들을 정의하고, 방사성 물질로 오염된 장소의 정화를 위한 지침을 규정한다. 또한, 공정부산물로서 천연방사성핵종이 포함된 물질을 TENORM으로 분류 및 정의하고 이의 규제를 위한 법률을 시행하는데 필요한 기술과 운영, 법적 세부사항을 제시한다.

1954년 개정된 원자력법은 TENORM 폐기물이나 제품에 포함되어 있는 방사성핵종으로 야기되는 건강, 안전 및 인허가에 대한 책임을 미국 원자력규제위원회(NRC : Nuclear Regulatory Commission)에 규정하였다. 그러나 500 ppm 이하의 우라늄이나 토륨을 사용하는 개인 또는 회사에 대해서는 규제하지 않는다. 또한, 채광작업은 정부기관에 의해 허가되지 않으며, 방사성폐기물 처리시설에 대해서는 NRC에게 인허가 책임이 있고, 정부기관의 권한으로 법에 의해 규정된 권한을 주(State)에 위임할 수 있다. 이와 같은 특별한 상황들 때문에 NRC 권한의 인정 및 TENORM 노출에 대한 법규, 폐기물 취급과 처분 절차들이 복잡하고 다양하다.

이때, 기본적으로 NRC는 원자력발전소에서 발생하는 방사능 규제를 담당하고 있고, EPA는 생활주변방사선 및 공정부산물의 규제기준과 안전관리를 담당하고 있다. 십여 개의 주요 법률은 EPA의 생활주변방사선방호를 위한 법적근거로 제정된다. 방사선방호기준 개발 및 TENORM을 포함한 방사성물질을 규제하기 위한 정부기관의 권한은 다수의 연방 법률과 대통령의 행정 명령에 의하여 구현된다.

그리고 TENORM을 포함한 방사성물질의 규제를 위한 주의 권한은 미국 헌법에 기초한다. 많은 주가 방사선 관리와 타 주의 프로그램을 통해 활발하게 방사성물질을 규제한다. 대부분의 주는 환경법을 시행하기 위해 EPA의 프로그램을 통해 방사능을 규제하는 반면, 특정 몇몇의 주는 TENORM에 대한 처리·처분 방법에 대한 권한을 요구하지만 대부분의 주들은 일반적 규제를 따라 TENORM을 규제한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다.

표 6. EPA 산업별 공정부산물 방사능 농도 범위

Source	Radiation Level [pCi/g]		
	low	average	high
Oil and Gas Production Wastes			
Produced Water [pCi/L]	0.1	NA	9,000
Pipe/Tank Scale	<0.25	<200	>100,000
Drinking Water Treatment Wastes			
Treatment Sludge [pCi/L]	1.3	11	11,686
Treatment Plant Filters	NA	40,000	NA
Waste Water Treatment Wastes			
Treatment Sludge [pCi/L]	0.0	2	47
Treatment Plant Ash [pCi/L]	0.0	2	22
Coal Ash			
Bottom Ash	1.6	3.5-4.6	7.7
Fly Ash	2	5.8	9.7
Fertilizer and Fertilizer Production Wastes			
Ore (Florida)	7	17.3-39.5	6.2-53.5
Phosphogypsum	7.3	11.7-24.5	36.7
Phosphate Fertilizer	0.5	5.7	21
Rare Earths (Monazite, Xenotime, Bastnasite) Extraction Wastes			
	5.7	NA	3,224
Uranium Mining Wastes			
U Mining Overburden			low hundreds
U In-Situ Leachate Evaporation Pond	3	30	3,000
Solids	300		
Zircon Mining Wastes			
Wastes	87	68	1,300

또한, TENORM을 포함한 유해폐기물을 발생시키거나 저장 및 취급하는 시설은 1976년에 제정된 자원 보존 및 복구 법령과 함께 미국의 「자원보존 및 재생법 (RCRA : Resource Conservation and Recovery Act)」에 의거하여 허가를 받아야 하고, 해당 공장을 보유한 기업이나 이를 운송하는 업자는 취급, 관리, 폐기 경로에 대해 특정 요구 사항을 충족하여야 한다. 이 조항에 따라 EPA는 유해폐기물 관리를 포함한 처리, 저장, 처분 등 모든 관점에 대해 엄격한 요구조건을 개

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

발하여 규제에 적용하고 있다.

1980년 미국 국회에 의해 유해폐기물로 오염된 부지를 정화하기 위하여 연방기금에서 「포괄적 환경대응 책임보상법(CERCLA : Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act)」이 제정되어 폐쇄되고 버려진 유해폐기물 처리장을 정화 및 개선시키고 있다. 위의 표 6은 미국 환경보호청에서 제시하는 각 산업별 공정부산물의 방사능 농도 범위와 평균 방사능 농도값을 요약한 표이다.

표 7은 TENORM에 대한 미국정부와 연구 기관의 규제지침을 요약한 것으로 수처리, 방사성핵종의 공기 중 방사 기준, 거주지, 하수처리시설과 수 처리시설의 라돈에 관한 지침, 우라늄과 토륨 폐석에 대한 기준, 방사능으로 인해 오염된 토양의 정화를 위한 지침 등에 대해서 정량적인 허용기준(한계치)과 이에 대해 추가사항을 제시하고 있다.

표 7. 미국 내 존재하는 규제 기준 및 지침

Guidance or Regulation	Quantitative Criteria (limits)	Comments
Radioactivity in water from community drinking water systems (Safe Drinking Water Act regulations)	• ^{226}Ra and ^{228}Ra combined concentration of 0.19 Bq/L • Total U concentration of 30 μg/L • Alpha particle activity concentration of 0.56 Bq/L, including ^{226}Ra but excluding radon and uranium • Beta particles and photon emitters • annual dose of 0.04 millisieverts, excluding ^{228}Ra	• Based primarily on cost benefit analysis for reducing existing levels of naturally occurring radionuclides in drinking water.
Radioactivity in liquid discharges (Clean Water Act regulations)	• Concentrations in daily effluents of 0.37 Bq/L for dissolved 226Ra, 1.11 Bq/L for ^{228}Ra and 4 mg/L for uranium • Average concentrations in daily effluents over 30 days of 0.11 Bq/L for dissolved ^{226}Ra, 0.37 Bq/L for total ^{226}Ra, and 2 mg/L for Uranium.	• Limits from discharges from mines or mills used to produce uranium, radium, or vanadium ores. • Based primarily on available effluent

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

		control technologies.
Standards for uranium or thorium mill tailings (Uranium Mill Tailings Radiation Control Act)	• Annual average release rate of ^{222}Rn to air of 0.74 Bq/m^2 per second or concentration of ^{222}Rn in air outside inactive DOE disposal sites of 0.02 Bq/L. • Average concentration of ^{226}Ra in soil above background over an area of 100 m2 of 1.9 Bq/g in top 15 cm or 0.56 Bq/g below 15 cm. • Concentration of radon decay products indoors including background of 0.03 working level, with objective of 0.02 working level. • Indoor gamma radiation level above background of 0.2 mSv. • Concentrations in groundwater of ^{226}Ra plus ^{228}Ra of 0.19 Bq/L, alpha particle activity concentration of 0.56 Bq/L, and 1.11 Bq/L of combined uranium (under consideration for revision to new U maximum concentration limit of 30 μg/L).	• Releases during uranium processing operations and from uranium mill tailings disposal sites before end of closure period must comply with dose constraints and concentration limits for liquid discharges. • Based primarily on background levels of radioactivity in western U.S. and objective of reducing exposures of the public to as close to background levels as reasonably achievable; groundwater protection requirements are based on current and proposed drinking water standards.
CERCLA guidance for cleanup of radioactively contaminated soils.	• Combined ^{226}Ra plus ^{228}Ra, total U, and Th of 0.19 Bq/g above background.	• Utilizes UMTRCA radionuclide concentrations, making them a health based standard suitable for radiation site cleanup.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지역 식수 시스템 내 물에 포함된 방사능에 대한 정량적인 기준은 식수와 관련하여 제정된 안전 음용수법(SDWA: Safe Drinking Water Act)에 의해서 식수에 존재하는 천연방사성핵종의 방사능준위를 줄이기 위한 손익분석에 기반을 둔 것으로 ^{226}Ra와 ^{228}Ra의 방사능 농도의 합과 ^{238}U의 총 방사능 농도는 각각 리터당 0.19 Bq, 30 μg의 정량적인 기준을 가진다. ^{226}Ra을 포함한(라돈과 우라늄은 제외) 알파입자의 방사능 농도는 리터당 0.56 Bq, ^{228}Ra을 배제하고 베타입자와 광자의 연간 방출되는 선량은 0.04 mSv로 규정하고 있다.

수질환경법에 의해 하루 동안 방출되는 폐수의 방사능 농도는 녹지 않는 ^{226}Ra의 경우 0.37 Bq/L, ^{228}Ra의 경우 1.11 Bq/L이며, ^{238}U은 4 mg/L로 규제된다. 이것은 우라늄과 라듐 또는 바나듐 광석을 만들기 위해 사용되는 채광과 가공으로부터 방출되는 각 방사성핵종의 허용치이다. 그리고 30일 동안 받는 폐수의 평균 방사능 농도는 ^{226}Ra의 경우 하루 동안 받는 방사능허용치보다 3배 이상 작은 값인 0.11 Bq/L이고, ^{226}Ra의 총 방사능 농도는 0.37 Bq/L로 하루 동안 받는 허용치와 같은 값이다. 그리고 ^{238}U의 경우 앞의 경우에 비해 2배 작은 값의 규제기준을 가지고 있었다.

우라늄이나 토륨 폐석들의 기준은 우라늄 폐석의 방사능 규제에 관한 법률(UMTRCA : The Uranium Mill Tailings Radiation Control Act)에 의해 정해진다. 이것은 우라늄 공정 중이나 우라늄 폐석 처분 장소에서 나타나는 것으로 액체의 방출 시 선량 제약치와 농도 한계치를 준수해야 한다고 명시하고 있다. 여기에 해당하는 연간 평균 방출 속도는 공기 중에 ^{222}Rn은 초당 0.74 Bq/m^2 이고, 규제 장소(미국에너지국(DOE : Department of Energy) 처분장) 밖의 공기 중의 ^{222}Rn의 방사능 농도는 매우 작은 값인 0.02 Bq/L로 정한다. 또한 토양의 지표면 위 100 m^2 면적에서 15 cm 위 ^{226}Ra의 평균 방사능 농도는 1.9 Bq/L, 15 cm 아래의 경우 0.56 Bq/L의 기준을 가진다. 그리고 라돈 붕괴 물질의 방사능 농도는 기본적으로 실내에 존재하는 Background 작업수준(working level)을 포함한다. 지하수에 포함되어 있는 방사성핵종의 방사능 농도는 리터당 ^{226}Ra과 ^{228}Ra의 경우 0.19 Bq/L, 알파 입자의 경우 0.56 Bq/L, 결합된 우라늄의 경우는 1.11 Bq/L로 정하고 있다. 이것은 미국서부의 방사성바탕준위와 일반인의 피폭이 바탕준위와 비슷한 값으로 줄이는 목적을 기반으로 한 것이다. 지하수에서 나오는 방

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

사성피폭으로부터 방호를 위한 요구사항은 현실과 제안된 음료수 기준을 기반으로 정해진 것이다.

방사능으로 오염된 토양의 정화작업을 위한 CERCLA 지침의 경우 ^{226}Ra과 ^{228}Ra의 합과 ^{238}U, ^{232}Th이 결합된 것의 정량기준 한계는 바탕준위 위의 0.19 Bq/g 방사능 농도로 정한다. 이것은 우라늄 폐석의 방사능 규제 관련법의 방사성핵종 방사능 농도를 활용하여 정한 것이며, 방사성구역의 정화 작업에 적합한 기준을 기반으로 하여 그들을 건강하게 한다.

또한, 미국 ANL(Argonne National laboratory) 연구소는 미국 환경보호청(EPA)의 리스크 평가지침을 따라 산업활동에 의하여 발생하는 공정부산물에 의한 인체 및 환경생태계에 미치는 영향을 종합적으로 관리 및 평가하기 위하여 RESRAD Program[11]을 개발하여 사용하고 있다. RESRAD Program은 USNRC의 승인을 받았으며, RESRAD Program의 주요 구성 모듈이 그림 2에 도시되어 있다.

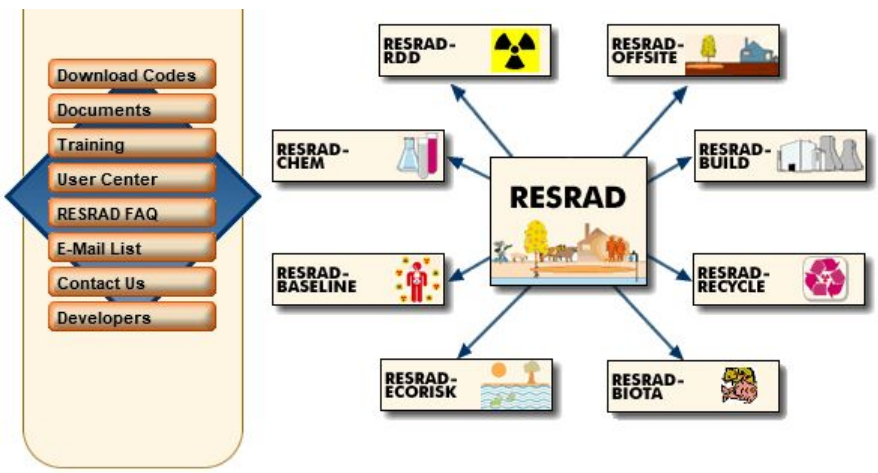


그림 2. RESRAD 모듈 구성

그림 2에서 보는 것과 같이 RESRAD Program은 생활방사선을 포함하여 공정부산물이 인체 및 생태계에 미치는 영향을 평가할 수 있도록 독립적인 모듈을 연계하여 통합적으로 평가한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 영국 공정부산물 규제기준

영국 TENORM 관련 규정은 「Radioactive Substances Act of 1993」과 「Ionising Radiations Regulations 1999」관련법으로 성문화되고 있다. 「Radioactive Substances Act of 1993」는 저농도의 천연방사성핵종을 포함하는 물질의 등록 및 자격과 관련한 일반적인 면제기준을 제시하며, 공정부산물 고체물질의 우라늄과 토륨, 라듐 및 악티늄, 프로트악티늄, 폴로늄과 납의 방사성동위원소의 면제기준 농도를 설정한다. 「Ionising Radiations Regulations 1999」법은 1999년에 제정되어 2000년 1월 1일부터 발효되어 현재 입법하여 시행되고 있는 관련법이다. 이것은 「European Communities Act 1972」와 「Health and Safety at Work etc. Act 1974」를 기본 법안으로 하여 영국의 이온화 방사선의 사용과 규제를 위한 법적 규제사항을 보완하도록 만들어진 시행령이다. 법률의 보호아래 유럽의 기본안전기준지침의 대부분을 효과적으로 시행하고 있다. 전리방사선에 대한 피폭 규제 및 제한, 관리 구역을 지정하고, 이를 통해 업무 활동 중 발생하는 전리방사선의 피폭을 규제한다. 영국의회는 인공 혹은 천연방사선의 내·외부 피폭 수준을 합리적으로 달성 가능한 한 감소시킨다는 방호철학(ALARA : As Low As Reasonably Achievable)을 유지하고, 개인선량한도를 초과하지 않기 위한 목적으로 작업종사자와 일반인의 선량한도에 대한 기준과 함께 방사성핵종별로 통보해야 하는 방사능 농도와 방사능량을 규제하고 있다.

즉, 표 8과 같이 사업자가 취급자등록을 해야 하는 방사능 농도는 ^{226}Ra의 경우 10 Bq/g, ^{232}Th과 ^{238}U 및 영년평형의 있는 모든 핵종의 경우 1 Bq/g로 규정하고 있다. 포타슘을 제외한 기준들은 앞에서 언급한 국제기구 및 국가들의 기준과 일치하고 있다[10].

표 8. 핵종별 방사능 농도 취급자등록 기준

핵 종	규제 방사능 농도(Bq/g)
^{226}Ra	10
^{238}U, ^{232}Th	1

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 국내 공정부산물 적용 기준

국내에서는 생활주변의 천연방사성물질을 함유하고 있는 원료물질과 산업 활동에 의하여 인위적으로 방사능 준위가 증가된 천연방사성 공정부산물(TENORM : Technically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)로 분류하여 정의하고, 이들로부터의 방사선 방호를 위한 「생활주변방사선 안전관리법」을 제정하여 시행하고 있다[1].

일상의 생활주변에는 천연방사성물질이 존재하며 산업의 발전과 함께 천연방사성핵종을 포함한 다양한 생활용품들이 출시되고 있고, 저준위 방사선을 지속적으로 방출하는 원료물질의 사용도 증가하고 있다. 따라서 국내에서 국민이 인지하지 못하는 상황에서 장기적인 저준위 방사선의 노출 가능성에 대한 안전관리 대책이 필요하다는 문제가 야기되어 왔다. 이에 따라 원료물질이나 산업공정 중 발생하는 공정부산물에 포함되는 천연방사성핵종, 가공 제품에서 방출되는 방사선을 효과적으로 관리하기 위한 통합적인 규제기준 및 관리지침을 제시하고자 「생활주변방사선 안전관리법」이 제정되어 시행되고 있다.

아래는 「생활주변방사선 안전관리법」에서 원료물질 및 공정부산물과 관련된 주요 규제기준 및 고시 조항을 요약하여 기술하였다.

가. 원료물질 및 공정부산물의 방사능 농도 기준

「생활주변방사선 안전관리법」제1장 제2조의 정의에서 원료물질이란 천연방사성핵종을 포함하며 가공되지 않는 광석을 말한다. 그리고 공정부산물이란 제련 공정의 관석, 수(水)처리 시설 침전물 등 원료 또는 그 밖의 물질을 취급하는 시설에서 부수적으로 발생하되 원자력안전위원회가 정하여 고시하는 방사능 농도와 수량을 초과하는 천연방사성핵종이 포함된 물질로 정의하고 있다. 이에 대해 「생활주변 방사선 안전관리에 관한 규정」(이하 '고시'라고 한다) 제2조와 제3조에서 원료물질과 공정부산물을 아래와 같이 정의하고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

※ 원료물질 방사능 농도 및 수량 : 고시 제2조
- ^{40}K : 1.0 (Bg/g)
- ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th 및 붕괴계열 내의 모든 천연방사성핵종 : 0.1 (Bg/g)
- 연간 취급 원료물질에 포함된 천연방사성핵종의 방사능량: 100,000 (Bg/y)

※ 공정부산물의 방사능 농도 : 고시 제3조
- ^{40}K : 5.0 (Bg/g)
- ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th 및 붕괴계열 내의 모든 천연방사성핵종 : 0.5 (Bg/g)

나. 원료물질 또는 공정부산물 취급자 등록

「생활주변방사선 안전관리법」 제3장 제9조에서 원자력안전위원회에 등록해야 하는 자는 공정부산물을 수출입 또는 판매하는 자, 공정부산물이 발생하는 시설을 운영하고 있는 자, 공정부산물을 처리·처분 또는 재활용하려는 자라고 정하고 있다. 고시 제5조를 통해 안전관리를 위해 등록 및 감시대상이 되는 공정부산물의 방사능 농도를 표 9와 같이 ^{40}K는 10 Bq/g, ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th 및 붕괴계열 내의 모든 천연방사성핵종은 1 Bq/g으로 규정하고 있다. 즉, 방사능 농도가 1 Bq/g 을 초과하는 ^{235}U, ^{238}U 또는 ^{232}Th를 포함한 공정부산물을 취급하고 연간 산출된 방사능량이 핵종별로 1,000 kBq을 초과하는 공정부산물을 취급하는 자이다. 또한, 방사능 농도가 10 Bq/g을 초과하는 ^{40}K을 포함한 공정부산물 취급하고 연간 산출된 방사능량이 핵종별로 10,000 kBq을 초과하는 공정부산물을 취급하는 자이다. 이와 함께 등록 대상자는 원료물질 또는 공정부산물의 종류, 연간 취급 총량 및 방사능량, 방사능 농도를 등록하여야 한다.

표 9. 핵종별 규제 감시를 위한 방사능 농도

핵 종	규제 방사능 농도(Bq/g)	방사능량(kBq)
^{40}K	10	10,000
^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th의 붕괴계열	1	1,000

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 생활주변방사선방호 종합계획 수립

국내의 공정부산물 관리기준은 「생활주변방사선 안전관리법」제2장 제5조에 명시한 것과 같이 생활주변방사선방호 종합계획을 원자력안전위원회와 중앙행정기관이 협의하여 5년마다 종합계획을 수립하도록 규정되어 있으며, 종합계획에 포함되어야 할 사항은 아래와 같다.

※ 종합계획에 포함될 사항 : 시행령 제2조
▪ 방사선·방사능 감시기의 설치·운영 등 생활주변방사선의 감시
▪ 생활주변방사선 전문기관의 지정·운영
▪ 생활주변방사선이 인체에 미치는 영향에 관한 분석 및 평가

라. 연도별 시행계획 수립

「생활주변방사선 안전관리법」제2장 제6조에 의하여 원자력안전위원회는 중앙행정기관과 협의하여 매년 생활주변방사선방호 종합계획의 연도별 시행계획을 세운 후 중앙행정기관에 통보하여야 한다고 말하고 있다. 다음은 「생활주변방사선 안전관리법 시행령」(이하 '시행령'이라 한다) 제3조에 명시되어 있는 시행계획에 포함되어야 할 사항들이다.

- 전년도 추진 실적 및 해당 연도의 분야별 세부 추진계획
- 연구개발 계획의 수립 및 추진 계획
- 생활주변방사선의 안전관리를 위하여 필요한 사항

또한, 원자력안전위원회는 매년 11월 30일까지 관계 중앙행정기관 장에게 생활주변방사선방호에 대한 다음해의 시행계획을 설립할 것을 통보한다. 이를 통보받은 관계 중앙행정기관의 장은 이듬해 1월 31일까지 원안위에 전년도 추진실적과 해당연도 추진계획을 작성하여 제출한다. 원자력안전위원회는 3월 31일까지 계획 수립 후 관계 중앙행정기관의 장에게 아래 표 10의 절차를 따라 통보하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 10. 연도별 시행계획 수립 절차

주체	해당 업무	기한
원자력안전위원회	관계 중앙행정기관에 익년 시행계획 설립지침 통보	매년 11월 30일
관계 중앙행정기관	원자력안전위원회에 전년도 추진실적/해당연도 추진계획 작성 후 제출	매년 1월 31일
원자력안전위원회	추진실적/추진계획 종합 및 시행계획 수립 후 관계중앙행정기관에 통보	매년 3월 31일

관계 중앙행정기관의 장은 원자력안전위원회로부터 통보받은 연도별 시행계획 중 소관 업무에 관련된 사항을 추진한다.

마. 생활주변방사선 안전관리 실태 조사·분석

원자력안전위원회는 원료물질과 공정부산물 유통현황, 가공제품의 제조, 사업자가 운영하는 시설을 선정하여 조사 및 실태현황을 파악하여야 하며, 「생활주변방사선 안전관리법」 제5장 보칙은 원자력안전위원회가 대통령령으로 정하는 바에 따라 아래와 같이 매년 생활방사선 안전관리 실태조사계획을 수립하여 안전관리 실태를 조사 분석하여 생활방사선방호 종합계획 및 연도별 시행계획에 반영하여야 한다.

※ 실태 조사계획의 수립·시행에 포함할 사항 : 시행령 제14조
- 조사 대상의 범위 및 내용
- 조사의 기간·방법 및 절차
- 조사 대상 기관과 관계 중앙행정기관 등에 요구할 협조사항

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

바. 공정부산물 처리·처분 또는 재활용

「생활주변방사선 안전관리법」 제3장 제13조에 따라 사업자는 아래와 같이 원자력안전위원회에 신고하고 대통령령에 따라 아래의 공정부산물 처리·처분 및 재활용 사항을 준수하여야 한다.

※ 공정부산물의 처리·처분 또는 재활용 신고 : 시행규칙 제7조
- 종류, 수량 및 방사능 농도
- 처리·처분 또는 재활용의 방법의 절차 및 용도

※ 공정부산물의 처리·처분 또는 재활용 준수 사항 : 시행령 제5조
- 종사자의 피폭방사선량을 낮출 수 있는 방법과 절차 수립
- 처분 또는 재활용 시 해당 공정부산물에 포함된 방사능 농도를 낮추는 방법 사용
- 처분 시 재활용하지 못하도록 매립 등의 방법 사용

사. 방사선·방사능 감시기의 설치·운영

「생활주변방사선 안전관리법」 제4장 제14조에 원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리 시 종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않도록 아래와 같은 방사선량 측정과 평가 및 안전조치를 시행하여야 한다.

※ 종사자에 대한 안전조치 등 : 시행령 제6조
- 연도별 작업장의 방사능 농도 측정 및 평가
- 분기별 작업장의 방사선량 측정 및 평가
- 종사자의 연간 피폭방사선량 조사·분석
- 종사자의 방사선 피폭 저감을 위한 장치 또는 기구 활용 등의 조치
- 공정부산물의 취급에 따른 피폭방사선량에 관한 정보 제공

종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않도록 조치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 국내외 공정부산물 적용 기준 비교 및 분석

본 과제에서 조사된 IAEA, EU, 미국, 영국의 일반인 및 작업종사자의 유효선량 및 등가선량 기준과 공정부산물 방사선 농도를 한국 기준과 비교하여 표 11에 나타내었다.

표 11. 국내외 공정부산물 기본안전기준 비교

	구분		IAEA	EU	미국	영국	한국
유효선량 기준 (mSv/y)	일반인		1	1	1	1	1
	종사자		20 (100mSv in 5y)	20 (100mSv in 5y)	50 (Cumulative: 10 mSv x Age)	20	50 (100mSv in 5y)
등가선량 기준 (mSv/y)	일반인	수정체	15	15	15	15	15
		손,발, 피부	50	50	50	50	50
	종사자	수정체	20 (100mSv in 5y)	20 (100mSv in 5y)	150	150	150
		손,발, 피부	500	500	500	500	500
공정부산물의 방사능 농도 (Bq/g)	^{40}K		10	10	종류, 존재 형태마다 개별 규제	.	10
	^{238}U, ^{232}Th 및 붕괴계열 핵종		1	1		Th : 1 U : 1	1

공정부산물의 방사능 농도는 미국의 경우 핵종의 종류 및 존재형태 마다 개별적으로 규제하고 있으나, EU와 한국은 IAEA와 같이 보수적인 방사능 농도를 기준으로 규제하고 있다. 유효선량 기준은 한국의 경우 IAEA, 미국 및 영국과 마찬가지로 일반

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

인에게는 보수적인 선량 기준을 규정하고 있으나 작업종사자에게는 미국과 같이 IAEA, EU 및 영국에 비하여 높은 비보수적인 방사선량 기준을 규정하고 있다. 일반인과 작업종사자의 등가선량 기준은 수정체 및 손, 발 그리고 피부 등에 미국 및 영국과 같은 기준을 규정하고 있다.

국내외 공정부산물 규제기준 비교표(표 11)에서 보는 것과 같이 한국의 공정부산물 규제기준은 국제적으로 보수적인 방사선량 및 방사능 농도 규제기준을 규정하고 있는 것으로 평가된다[12].

제 2 절 수산화알루미늄 제조 산업 공정부산물 공정 특성 분석

1. 현장탐색 사전준비

원료물질 및 공정부산물을 취급하는 국내 산업체의 현장탐색을 추진하기 위하여 우선 생활방사선 안전 및 공정부산물 안전관리 현안의 이해와 현장탐색을 위한 소통 및 신뢰성 구축을 위하여 사전 설명회를 개최한 후 현장탐색을 추진하였다. 그 외에 현장탐색 시 필요한 기기들을 선정하고, 선정된 기기들을 이용한 계측방법을 개발하여 현장을 탐색할 사전준비를 하였다.

가. 사전 설명회

사전 설명회는 현장탐색에 앞서 해당 산업체를 방문하여 국내 생활주변방사선 안전현안 및 「생활주변방사선 안전관리법」을 설명하고 산업체의 공정부산물 안전관리 및 규정의 이해와 설득을 통하여 공정부산물 현장탐색을 추진할 목적으로 개최되었다.

또한, 생활방사선의 현안을 논의하고, 나아가 국내 산업별 대표적 공정부산물 현장탐색을 통하여 공정부산물 특성과 관리현황을 파악하고 공정부산물의 안전관리 방안을 제시하여 작업종사자의 작업 환경과 방사선 방호 방안을 제시하는데 목표가 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공정부산물 거동특성 분석을 위하여 공정부산물 현장탐색은 매우 중요한 과정이며, 사전 설명회는 생활방사선 공정부산물 현안의 이해와 소통을 위하여 필수적인 과정으로 평가되었으며, 산업체 공정부산물 현장탐색을 위하여 가장 중요한 것은 산업체와의 상호 신뢰를 바탕으로 한 이해와 소통이라 할 수 있다.

그리고 사전 설명회에서 공정부산물 현장탐색이 확정되면, 공정흐름도 분석과 작업환경 및 작업실태 그리고 원료물질 및 공정부산물, 첨가물질 등을 사전에 조사 할 수 있다.

해당 수산화알루미늄 제조 산업은 평소에도 환경폐기물의 문제로 환경부와 시민단체 및 주변 시민들로부터 민원과 규제를 받아왔으며, 「생활주변방사선 안전관리법」과 관련하여 많은 관심을 보여 왔다. 사전 설명회를 통하여 산업체의 공정부산물 안전관리의 문제점 및 해결점과 공정부산물 현장탐색에 대하여 논의한 후 현장탐색을 시행하기로 결정하였다. 현장방문을 통해 공정흐름도 및 관련 자료들을 수집하고, 작업자들의 작업환경 및 작업실태 등을 파악하였다.

나. 현장탐색 계측방법

수산화알루미늄 제조 산업의 대표적 원료물질 및 공정부산물 시료의 방사능 농도를 정량분석하고, 공정별 실시간 공간감마선량을 계측하고, 작업자의 누적피폭선량을 분석하고, 작업자의 호흡을 통한 내부피폭의 측정 및 분석의 절차로 현장탐색이 이루어졌다.

선정된 계측방법은 시료(Sample) 채취, Inspector 1000-NaI, 유리선량계(Glass Dosimeter), Cascade Impactor 등 4가지이며 이를 사용하여 현장탐색을 수행하였다. 아래는 4가지 방법 각각의 사용용도 및 계측방법에 대하여 기술한 것이다.

- Inspector 1000-NaI 계측기 : 공정별 실시간 공간감마선량 계측
- 유리선량계(Glass Dosimeter) : 공정별 누적피폭선량 계측
- Cascade Impactor : 공기 중 분진 입자크기별 분포 및 방사능 농도 계측
- 시료(Sample) 채취 : 핵종별 방사능 농도 정량분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(1) 공정부산물 시료 채취

공정부산물 현장탐색에서 공정흐름에 따른 천연방사성물질의 방사능 농도 및 방사능 거동특성을 보다 정확하게 파악하기 위하여 원료물질 및 공정부산물, 생산 제품의 시료를 채취한다.

시료는 천연방사성핵종이 포함된 원료물질이나 공정과정을 통해 생성되는 공정부산물, 관석(배관 Scale), 잔사물, 그리고 완제품 등의 시료를 채취하여 분석한다.

시료 채취는 채취지점이나 시료 종류에 따라 채취량, 채취방법을 달리 하는 것이 중요하다. 그 이유는 시료 채취 후에 취급이나 분석을 아무리 정확히 한다고 해도 시료 채취의 오차가 분석측정 오차보다 항상 크기 때문이다.

각 시료를 채취한 후 준비해간 용기에 담아 밀봉시켜 시료명, 시료 번호, 채취자, 채취날짜, 채취 장소 등을 기록하여 보관하고 빠른 시간 내에 한국원자력연구원에 방사능 농도 분석을 의뢰해야 한다. 그림 3은 현장에서 채취한 시료를 예시하여 보여준다.

그림 3. 현장 채취 시료

Collection @ chosun

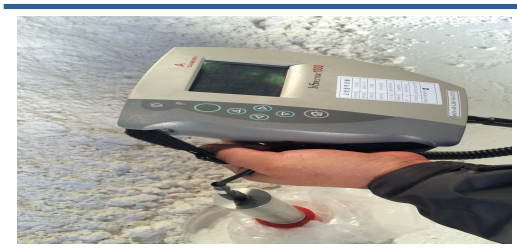
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

⑵ Inspector 1000-NaI 현장 계측방법

현장탐색을 수행하기에 앞서 검토한 공정흐름도와 작업환경 및 작업실태 등을 토대로 작업자의 동선을 파악하여 작업종사자가 오랜 시간 머물러 작업을 하는 공간, 원료물질 및 공정부산물 처리공정, 잔사물(Residue) 야적장, 배관에 Scale이 축적된 장소 등을 선정하고 INSPECTOR 1000-NaI를 사용하여 공간감마선량을 측정한다.

Inspector 1000-NaI 계측기로 현장탐색을 수행할 때, 현장에서 실시간으로 이동하며 해당 장소의 공간감마선량을 측정할 때 주로 사용하는 모드는 DOSE 모드이다. Inspector 1000-NaI 같은 경우 DOSE 모드 이외에 핵종판별 및 방사능값을 판독할 수 있는 모드도 있다. 이러한 모드들은 시료 채취·분석 과정에서 더욱 정밀한 값을 알 수 있으므로 배제하였다. 현장탐색 수행 시 공간감마선량이 높게 나왔을 경우 핵종판별 및 방사능값 판독을 시행하고 그렇지 않을 경우는 일반적으로 DOSE 모드를 사용하였다.

Inspector 1000-NaI는 사용하기 전에 에너지 교정을 해야 하므로 ^{137}Cs 선원을 항상 같이 휴대하여야 한다. 에너지 교정은 SPEC 모드를 사용하며, ^{137}Cs 선원을 계측하여 스펙트럼에 662 keV의 에너지 Peak를 설정하고 교정을 완료한 후 사용하여야 한다. 위와 같이 에너지 교정이 완료된 Inspector 1000-NaI를 사용하여 특정공간의 실시간 공간감마선량을 계측한다. 그리고 측정된 공간감마선량값과 작업시간을 활용하여 작업종사자의 연간 피폭선량을 계산할 수 있으며, 작업종사자 피폭선량 계산값이 연간 1.0 mSv를 넘지 않아야 한다. 그림 4는 현장탐색에서 실시간으로 Inspector 1000-NaI을 사용하여 공간감마선량을 측정하는 모습의 사진을 예시로 보여준다.



수산화알루미늄 저장소 (일반)

공정정비실

그림 3. Inspector 1000-NaI 현장 계측

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

⑶ 유리선량계 현장 설치 방법

유리선량계(Glass Dosimeter)는 현장에서 작업하는 작업자들이 방사선에 얼마나 노출되고 피폭되는지 누적피폭선량을 측정하기 위하여 사용하였다. 그러나 누적피폭선량을 측정하기에는 실시간 공간감마선량을 측정하는 Inspector 1000-NaI로는 미흡하다고 판단되어 유리선량계를 추가로 설치하였다.

유리선량계는 저준위 영역 에너지를 측정할 수 있고, 날씨에 구애받지 않는다는 장점이 있어 공정부산물 현장탐색에 적합하므로 선정하였다.

먼저 사전 조사한 공정흐름도와 작업종사자의 작업환경 및 작업실태와 작업시간 등을 고려하여 현장탐색 시 유리선량계를 설치 할 위치를 여러 곳 선정한다. 보통 Inspector 1000-NaI를 통해 공간감마선량을 측정하였을 때 다소 높게 측정된 곳, 원료물질 저장소 및 공정부산물이 발생되는 곳, 작업종사자들이 장기간 작업을 수행하는 곳 등이 설치장소로 적합하다.

유리선량계를 설치하기에 앞서 현장 공정 담당자에게 유리선량계에 대하여 설명하고 주의사항 및 분실 부분에 대하여 설명 및 협조를 부탁하여 공정 중 분실이나 훼손이 없도록 한다. 유리선량계는 장시간(3개월)에 걸쳐 설치하기 때문에 한번 분실하면 또 긴 시간의 현장탐색이 이루어져야 하므로 분실을 최소화 하는 것이 중요하다. 따라서 작업종사자자들의 이해와 협조가 필요하다.

유리선량계는 협조문과 함께 지퍼팩에 밀봉한 후 사전에 정한 위치에 설치한다. 유리선량계는 환경에 구애받지는 않지만 만일의 사태를 대비하여 햇빛이 강한 곳 보다는 그늘진 곳에 설치한다. 보통 유리선량계는 전신측정용으로 허리나 목사이, 가슴 부분에 착용하므로 유리선량계는 사람이 서 있을 때의 가슴 높이 부근에 설치한다. 설치 한 후 해당 유리선량계에 대한 설치 장소, 유리선량계 번호, 설치 일시 등 유리선량계 설치 정보를 기록한다.

유리선량계는 기본적으로 3개월 정도 한 곳에 설치해 놓았으며, 3개월이 지난 후 수거하여 ㈜서울방사선서비스센터에 유리선량계의 누적피폭선량 분석을 의뢰한다. 그리고 작업종사자의 작업시간에 따른 외부피폭을 평가하여 작업종사자의 방사선 방호 및 안전관리 현황을 종합적으로 평가한다.

그림 5는 현장탐색에서 유리선량계를 설치하는 위치나 형태 등에 대하여 올바른 부착모습을 예시하여 보여준다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공정정비실

그림 5. 유리선량계 현장 부착

⑷ Cascade Impactor 현장 설치 방법

Cascade Impactor는 높은 시료포집효율과 다단 orifice 구조의 단계적인 충돌판을 이용한 관성충돌 입경포집장치로서, 공기 중에 있는 입자를 크기별로 분류하는데 이용되는 장치이다. 환경 대기 중에서 사용할 때에는 에어로졸로서 이동되는 부유물질들이 순차적으로 작아지는 입경을 가진 다단 orifice에 순차적으로 쌓여있는 stage로 포집된다. Cascade Impactor의 펌프 유량은 28.3 LPM이며, 분진은 0~7stage의 orifice stage를 직렬로 통과하게 되며 맨 마지막 stage인 7stage에 가장 작은 입자가 포집된다. 위 과정을 통해 각 입경에 분포하고 있는 입자들의 입자분포와 입자의 방사능 농도를 알 수 있다.

이러한 원리로 작업장 대기환경 중의 분진 또는 작업 중 방출되는 분진에 의한 작업자 내부피폭을 평가하는데 사용되며, 현장탐색 시 포집 장소의 주요기준은 분진이 많이 흩날리는 곳으로 선정한다.

또한, Cascade Impactor의 본체는 수직으로 되어야만 작동하도록 설계되어있으며 온도가 +5 ~ 40 ℃, 상대습도가 90 %를 넘지 않으며 수분이 응축되지 않는 정도의 환경에서 작동하기에 적합하다. 또한 본체는 진동이 거의 없는 환경에서 작동시켜야한다. 설치 전에 우선 본체의 Stage 사이사이에 필터를 장착한다. 시료포집제 및 필터를 올려놓아 시료를 포집하는 판에 0 ~ 1번 Stage는 중앙이 뚫려 있는 Glass microfiber 필터를 장착하고, 2 ~ 7번 Stage는 중앙이 뚫리지 않은 Glass microfiber 필터를 장착해준다. 장착 후 각 Stage를 순서에 맞게 조립하고 펌프와 본체를 진공 Tubing으로 연결해 준다. 마지막으로 진공펌

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

프에 전력을 공급해주면 본체가 공기를 흡입하는데, 펌프가 잘 작동하는지 진동이 많은지 주변 환경을 살펴보고 불필요한 것들은 제거해 주는 것이 중요하다.

포집된 시료는 정량적인 계측을 위하여 한국원자력연구원에 정량분석을 의뢰하였고, 서울대학교에 내부피폭 분석을 의뢰하였다. 분석결과를 토대로 차후 현장 작업자의 내부피폭에 어떤 영향을 끼치는지 확인이 가능하며, 작업자의 내부피폭관리에 용의하다. 그림 6은 현장에 설치된 Cascade Impactor를 예시하여 보여준다.

수산화알루미늄 저장소 (일반)

그림 6. Cascade Impactor 현장 설치

2. 공정부산물 현장탐색[13]

가. 회사 현황

수산화알루미늄 제조 산업은 호주로부터 보크사이트를 수입하여 BAYER 공법을 사용하여 수산화알루미늄 및 소성알루미나를 제조하며 2014년 기준 수산화알루미늄 연간 생산량은 259,845톤이다. 표 12에서 보는 것과 같이 원료물질 및 공정부산물의 방사선 관리는 총무과 환경관리팀에서 하고 있으며, 방사선관리업체에 방사선관리를 위탁하고 있다.

표 13은 수산화알루미늄 제조 산업의 공정에 사용되는 원료물질인 보크사이트와 공정부산물인 레드머드, 첨가물인 가성소다, 레드머드를 가공하여 만든 스칼렛, 제

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

품인 수산화알루미늄 및 소성알루미나에 대한 하루 생산량과 첨가량을 표로 나타낸 것이다.

표 12. 수산화알루미늄 제조 산업 현황

구 분		현 황	비 고
1	종업원수	208명	2015년 4월 기준
2	주생산품/판매품	수산화알루미늄, 소성알루미나	
3	연간 생산량	25만 9845톤	2014년 기준
4	안전관리 작업종사자 수	4명	총무과 환경관리팀

표 13. 제품 제조에 사용되는 물질의 현황

원료, 부산물 및 제품	하루생산량 및 첨가량	비 고
보크사이트	1200 톤/일	원료
가성소다	150 톤/일	첨가물
수산화알루미늄	750 톤/일	일반제품
소성알루미나	190 톤/일	소성제품
레드머드	750 톤/일	부산물
스칼렛	8 톤/일	부산물 가공

나. 제조 공법 및 공정흐름도

현장탐색에서는 첫 번째로 원료물질 및 공정부산물, 생산 제품 등의 시료를 채취하여 핵종별 방사능 농도를 정량 분석하였고, 두 번째로 작업현장 각각의 장소에서 Inspector 1000-NaI를 사용하여 실시간 위치의 공간감마선량을 계측하였다. 세 번째로 공간감마선량이 높거나 또는 낮지만 작업자들이 장시간 근무하는 곳을 중심으로 유리선량계를 부착하여 작업자의 누적피폭선량을 분석하였고, 마지막으로 작업자들의 내부피폭을 평가하기 위해 Cascade Impactor를 사용하여 분진을 포집하여 방사능 농도를 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그에 따른 시료 채취 장소, Inspector 1000-NaI 공간감마선량 계측장소, 유리선량계 배치 장소 및 Cascade Impactor 설치장소 등의 통합적인 장소를 그림 7의 공정흐름도에 일련번호로 표시하였다.

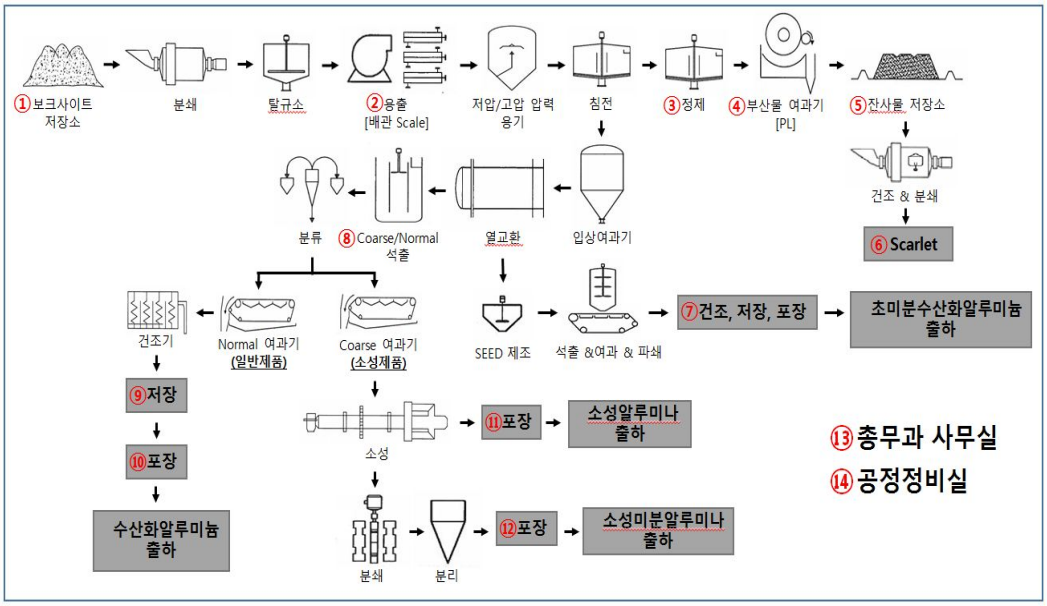


그림 7. 수산화알루미늄 제조 공정 간략도

현장탐색을 실시한 수산화알루미늄 제조 산업은 호주에서 수입하는 보크사이트(Bauxite)를 원료로 이용하여, 1888년 오스트리아의 K. J. Bayer가 개발한 Bayer 공법으로 수산화알루미늄 및 소성알루미나를 제조하고 있다. 보크사이트 광석은 산화알루미늄(Al_2O_3)과 산화철(Fe_2O_3), 실리카(SiO_2), TiO_2, CaO와 그 외 금속염 불순물이 섞여있는 혼합물이다. Bayer 공법은 보크사이트를 분쇄한 후, 175 ℃의 가열 및 가압 slurry 상태에서 가성소다(NaOH) 용액에 녹여 소듐알루미네이트를 만든다.

이때, 보크사이트 Slurry에서 SiO_2와 Fe_2O_3 및 TiO_2 산화물 등 불순물은 탈규소 공정과 여과 및 중력 settling 과정을 거쳐서 침전되어 분리된다. 분리된 불순물은 정제와 여과 과정을 거쳐서 Red Mud 공정부산물로 배출되고, 공정부산물은 건조와 분쇄를 거쳐서 Scarlet 펠렛으로 성형가공 된다. 불순물이 제거된 후, $MgSO_4$ gibbsite를 seed로 첨가하고, 온도에 따른 용해도 차이를 이용하여 $NaAlO_2$ 를 가수분해 한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

후 수산화알루미늄 결정을 석출시킨다. 단, 잔류 NaOH는 재활용한다. 마지막으로 수산화알루미늄 결정을 980 ℃에서 소성 가열하여 소성알루미나를 제조한다.

보크사이트로부터 제조된 일반 제품인 수산화알루미늄과 소성알루미나는 분쇄, 여과 및 분리 과정을 거쳐서 소성미분알루미나 혹은 초미분 수산화알루미늄 제품으로 가공된다. 표 14는 수산화알루미늄 제조 산업의 제조 공정 및 특징을 간략하게 나타낸 표이다.

표 14. 수산화알루미늄 제조 공정

공 정			공정 설명	비 고
보크사이트 입항			호주로부터 Bauxite 1.5개월 마다 입항	60,000 톤 수입/년
보크사이트 저장			야적 후 지하 콘베이어로 이송	100 ~ 150 톤/일 운송
보크사이트 분쇄/ NaOH 첨가			55 톤/시간 완전 분쇄 및 NaOH 180 g/L 첨가	공정기간 : 1일, Slurry
탈규소 (SiO_2)			72 ℃로 가열하여 SiO_2분리, 제거	공정기간 : 2일
용출			slurry 가열(240 ℃) 후 Al 분리	94 % Al 분리
고압/저압 압력용기			slurry를 240 -> 100 ℃로 열제거	공정기간 : 1일
침전			Slurry에 응집제 첨가, 부산물 침전	응집제 60 Kg/일 첨가
잔사물 처리	정제		응집제 첨가 후 부산물 침전, NaOH 회수 단계	응집제 40 Kg/일 공정기간 : 1일
	부산물 여과		잔사물 여과, 최종 NaOH 회수 (70 g/L)	물 첨가 Drum Filter
	잔사물 저장		수분 45 % 잔사물, 800 톤/일	Red Mud
	건조		수분 10 % 이하로 잔사물 건조	
	분쇄		분쇄	
	Scarlet 팰렛		Scarlet 제품 출하	
일반 제품 제조 공정	입상여과		100 ℃ 맑은 물로 여과 (천/소석회)	공정기간 : 1일
	열교환	열교환	PL-72 ℃, SL-75 ℃, 고 과포화도	공정기간 : 1일
		Seed 제조	1 ~ 3 μm	
		석출/여과/파쇄	1 μm	
		초미분 수산화알루미늄	포장 및 출하	
	석출		Normal-68 ℃, Course-72 ℃	공정기간 : 4일

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

			Seed를 넣어 원하는 크기로 석출	
	분류		Cyclone 원심분리	Seed : 30 ~ 40 ㎛
	일반 수산화 알루미늄	여과	Normal 제품 여과(720 톤/일), 50 ㎛	공정기간 : 1일
		건조	수분 9 %로 건조 및 저장	
		포장	25 Kg Bag, 1톤 Bag	
소성 알루미나 제조공정	소성 알루미나	여과	Course 제품 여과(650 톤/일), 83 ㎛	공정기간 : 1일
		소성	1,000 ~ 1200 ℃ 가열, Al_2O_3 제조	180 톤/일 공정기간 : 1일
		포장	25 Kg Bag, 1톤 Bag	
	소성미분 알루미나	분쇄	진동밀 분쇄	24 톤/일
		분리	Cyclone 원심분리	
		포장	25 Kg Bag, 1톤 Bag	
- 전공정 기간 : 15일 - 공정작업 인원 : 4조 3교대 (1교대 10인), 주제어실 : 2인, 공정정비실 : 10인				

다. 현장탐색

㈎ 시료 채취 : 방사능 농도 정량분석

수산화알루미늄 제조 산업의 현장탐색에서 채취된 시료는 8개이며, 2010년 조선대학교에서 발행한 '호남지역 천연방사성물질 대량사용시설내 방사성오염평가 및 방사선안전관리기준개발' 보고서[14]를 기준으로 일관성을 유지하며, 6개의 시료를 동일하게 채취하고, 추가로 2개의 시료를 채취하였다.

그림 8은 8가지 시료의 채취 지점을 숫자로 표시한 것이며, 표 15는 시료 채취 장소의 명칭과 그에 따른 채취 시료명, 채취 일자 등의 정보를 나타낸 표이다. 조선대학교 보고서에서는 수산화알루미늄 일반제품, 초미분 수산화알루미늄, 소성알루미나, 공정부산물인 Red Mud, 원료물질인 보크사이트, PL로 총 6가지 시료에 대하여 핵종별 방사능 농도를 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

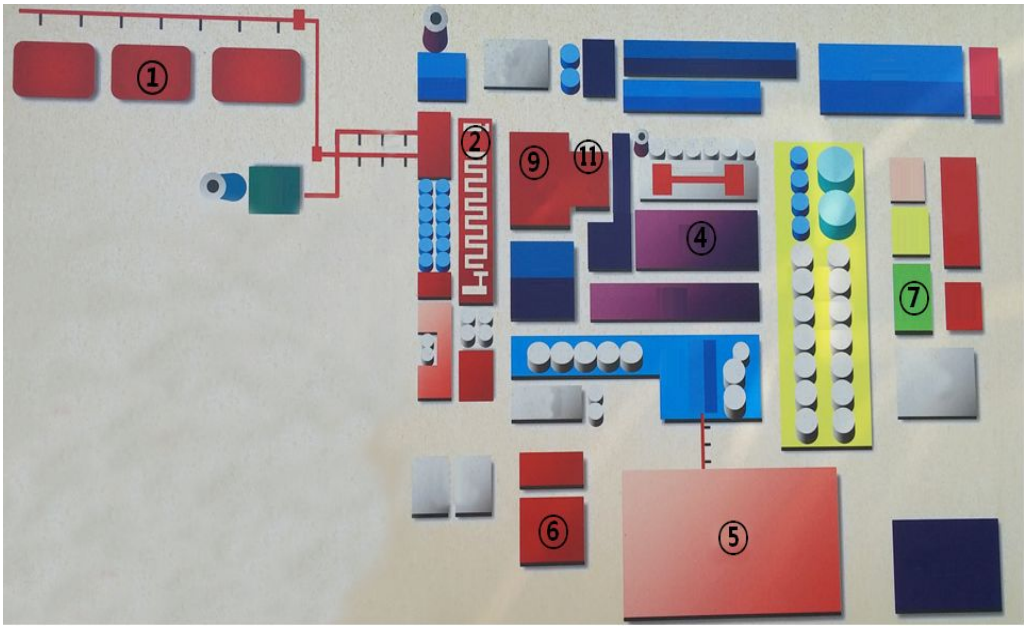


그림 8. 수산화알루미늄 제조 산업 시료 채취 지점

표 15. 수산화알루미늄 제조 산업 시료 채취 지점 정보

번호	채취 장소	시료명	시료 상태	채취 일자	비고
1	보크사이트 저장소	보크사이트	고체	2015. 4. 3	1차
5	잔사물 저장소	Red Mud	Slurry	〃	
9	수산화알루미늄 저장소	수산화알루미늄	분말	2015. 4. 17	2차
7	건조, 저장, 포장실	초미분 수산화알루미늄	분말	〃	
11	소성알루미나 포장실	소성알루미나	분말	〃	
6	Scarlet	Scarlet	분말	〃	
2	용출 배관	Scale	고체	〃	
4	부산물 여과기	PL[(Parent's Liquid)]	액체	2015. 4. 28	3차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

추가적으로 용출공정에서 Slurry를 고온(240 ℃)으로 가열하여 알루미늄을 분리하는 과정에서 Slurry의 이동속도가 빠르지 않아 배관 곳곳에 Scale이 생성되는데, 이때의 배관 Scale을 채취하여 분석하였다. 마지막으로 수산화알루미늄이 되기 전의 중간물질인 PL까지 총 2가지 시료에 대하여 추가적인 분석을 진행하였다.

㈏ 공간감마선량 계측 :Inspector 1000-NaI

수산화알루미늄 제조 산업의 현장탐색에서 Inspector 1000-NaI를 사용하여 공간감마선량을 계측한 곳은 14곳이다. 조선대학교에서 2010년 수행한 8곳은 동일하게 계측하였고 방사선량이 높을 것으로 예측되는 6곳을 추가로 계측하였다. 이때, 한 장소에서 2대의 계측기를 가지고 매분씩 2 ~ 3회 측정하여 기록하였다. 공간감마선량 계측을 시행한 일자와 계측 장비, 계측 방법은 다음과 같다.

- 계측 횟수 : 4회
- 계측 일자 : 2015년 4월 3일, 2015년 4월 17일, 2015년 4월 28일, 2015년 5월 12일
- 계측 내용 : 작업장의 공간감마선량
- 계측 장비 : Inspector 1000-NaI
- 계측 방법 : 표면 접촉선량에 대해 매분씩 2 ~ 3회 측정 후 기록

그림 9는 Inspector 1000-NaI를 사용하여 현장의 공간감마선량을 계측한 장소를 숫자로 표시한 것이다. 다음의 장소를 선택하게 된 배경은 2010년 조선대학교에서 발행된 ‘호남지역 천연방사성물질 대량 사용 시설 내 방사성오염평가 및 방사선안전관리기준개발[14]’ 보고서이며, 이를 참조하였다. 그리고 사전 조사를 통해 천연방사성핵종이 농축되기 쉬운 배관 Scale, 원료물질, 공정부산물, 저장창고, 완제품 포장실 등 공간감마선량이 높을 것으로 예상되는 곳을 주요 계측장소로 선정하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

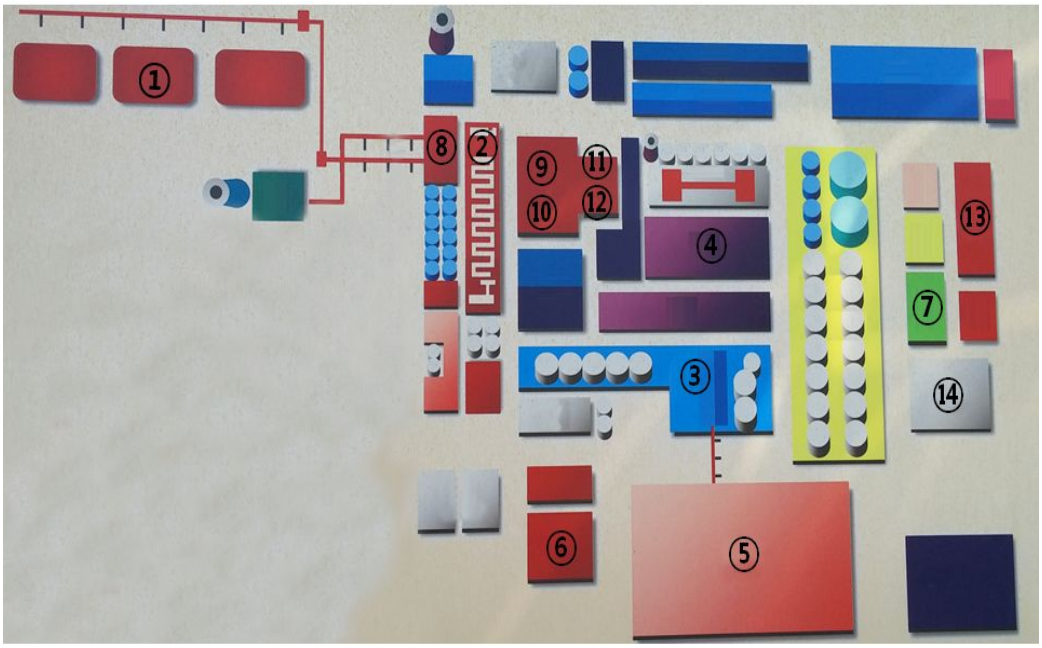


그림 9. 수산화알루미늄 제조 산업 공간감마선량 현장탐색 계측 지점

표 16은 Inspector 1000-NaI를 사용하여 조선대학교와 ㈜이엔이티가 현장탐색에서 실시간 공간감마선량 계측한 곳을 비교하여 나타낸 표이다. 2010년 조선대학교에서 발행된 '호남지역 천연방사성물질 대량 사용 시설 내 방사성오염평가 및 방사선안전관리기준개발' 보고서[14]를 참고하면 그 당시 조선대학교에서 계측한 위치는 총 8곳(보크사이트 저장소, 정제 공정, 잔사물 저장소, 초미분 수산화알루미늄 저장소, 석출 공정, 수산화알루미늄 저장소, 총무과 사무실, 공정정비실)이다.

수산화알루미늄 제조 산업의 공정은 대부분이 Slurry 형태로, 원료물질이나 공정부산물 등이 잔류되거나 농축되어 문제가 될 수 있는 6곳을 추가로 계측하였다. 추가된 계측 장소는 ⑴ Slurry로 인한 Scale이 발생되는 용출공정의 배관 Scale, ⑵ 원료물질인 보크사이트의 화학적 반응으로 인한 농축이 얼마만큼 이루어지는 지를 알아보기 위해 수산화알루미늄이 되기 전의 중간물질인 PL(Parent's Liquid : 수산화알루미늄 중간물질), ⑶ 공정부산물인 Red Mud를 건조 및 분쇄시켜 만든 Scarlet, ⑷ 수산화알루미늄 일반제품, ⑸ 소성알루미나

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

포장실, ⑹ 소성미분알루미나를 포장하는 포장실 등이다.

표 16. 수산화알루미늄 제조 산업 공간감마선량 현장탐색 계측 지점

번호	계측 지점	조선대학교 계측 지점	㈜이엔이티 계측 지점
1	보크사이트 저장소	0	0
2	용출 [배관 Scale]	-	0
3	정제	0	0
4	부산물여과기 [PL]	-	0
5	잔사물 저장소	0	0
6	Scarlet	-	0
7	건조, 저장, 포장 [초미분 수산화알루미늄]	0	0
8	석출	0	0
9	수산화알루미늄 저장	0	0
10	수산화알루미늄 포장	-	0
11	소성알루미나 포장	-	0
12	소성미분알루미나 포장	-	0
13	총무과 사무실	0	0
14	공정정비실	0	0

㈐ 작업자 외부피폭 측정 : 유리선량계(Glass dosimeter)

수산화알루미늄 제조 산업의 현장탐색 시 작업자들이 작업장에서 받는 외부피폭 누적선량을 측정하기 위하여 유리선량계를 8곳에 부착하였다. 아래 그림 10은 수산화알루미늄 제조 산업의 작업자 외부피폭을 측정하기 위해 유리선량계를 부착한 8곳의 위치를 숫자로 표시한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

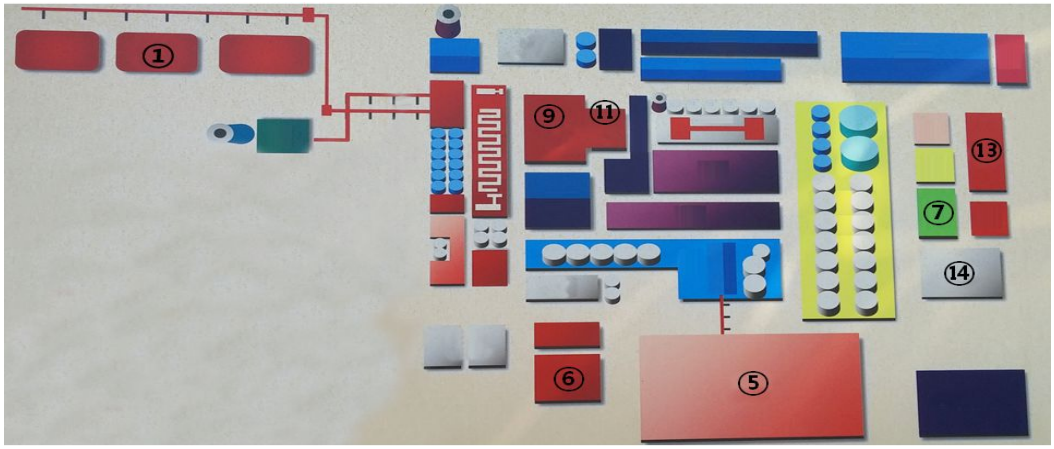


그림 10. 수산화알루미늄 제조 산업 유리선량계 설치 지점

표 17은 위의 그림을 기준으로 수산화알루미늄 제조 산업의 작업자 외부피폭을 측정하기 위해 유리선량계를 설치한 위치 및 시간, 유리선량계 번호, 설치 날짜 등을 정리한 표이다.

표 17. 수산화알루미늄 제조 산업 유리선량계 설치 정보

번호	위치	설치 날짜	설치 시간	설치 번호	설치 기간
1	보크사이트 저장소	4/17	13:40	4번	3개월
		4/28	10:20	9번	3개월
5	잔사물 저장소	4/17	11:40	3번	3개월
		4/28	11:15	14번	3개월
6	Scarlet	4/17	14:00	5번	3개월
		4/28	11:40	15번	3개월
7	건조, 저장, 포장 (초미분 수산화알루미늄)	4/17	10:50	1번	3개월
		4/28	10:41	10번	3개월
9	수산화알루미늄 저장	4/17	-	-	-
		4/28	10:55	12번	3개월
11	소성알루미나 포장	4/17	14:25	6번	3개월
		4/28	11:00	13번	3개월
13	총무과 사무실	4/17	-	-	-
		4/28	9:40	7번, 8번	3개월
14	공정정비실	4/17	11:18	2번	3개월
		4/28	10:45	11번	3개월

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

㈑ 작업자 내부피폭 측정 : Cascade Impactor

수산화알루미늄 제조 산업의 현장탐색 시 Cascade Impactor는 주로 밀폐된 작업장에서 작업하는 작업자들을 위해 작업장 환경대기 중의 분진 또는 작업을 수행하며 발생되는 분진을 흡입하는 경우의 내부피폭 영향을 평가하기 위하여 설치하였다. 분진이 많이 발생하고 작업자가 장시간 작업하는 곳에서 포집하는 것이 가장 적합하다. 수산화알루미늄 제조 산업의 생산품은 주로 수산화알루미늄과 소성알루미나로 이러한 제품은 분말형태로 포장하는 과정에서 분진이 많이 방출된다. 미리 건조시켜 둔 Filter는 1주일에 한번 씩 교체해주었다. 위와 같은 점을 고려하여 소성미분알루미나 포장실이 적합하다고 판단하여 설치하고 포집을 진행하였다.

그림 11은 작업장의 분진에 의한 작업자의 내부피폭을 평가하기 위하여 소성미분알루미나 포장실에 Cascade Impactor를 설치한 그림이며, 표 18은 소성미분알루미나 포장실에서 포집을 시행한 일자, 포집시간 등을 나타낸 표이다. 이때, Air volume은 28.3liter/min의 펌프 유량을 이용하여 구한다. 1.0 liter는 0.001 m^3, 1 min은 60 sec, 포집시간은 168 hr이므로 계산값은 285 m^3와 242 m^3로 계산된다.

소성미분알루미나 포장실

그림 11. 수산화알루미늄 제조 산업 Cascade Impactor 포집 위치 지점

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 18. 수산화알루미늄 제조 산업 Cascade Impactor 포집 정보

번호	위치	설치 일자	단 구성	포집 시간	Air volume(m^3)	비 고
1	소성미분알루미나 포장실	10/13	0~7stage	7day (168h)	285	10/20 1차 채취
2	소성미분알루미나 포장실	10/20	0~7stage	6day (143h)	242	10/26 2차 채취

수산화알루미늄 제조 산업에서는 Cascade Impactor로 소성미분알루미나 포장실을 2회 포집하였으며, 각각에 정보는 다음과 같다.

- 설치 장소 : 수산화알루미늄 제조 산업 소성미분알루미나 포장실
- 1차 Filter 건조 일시 : 2015년 10월 12일 오후 3:30
- 1차 포집 일자 : 2015년 10월 13일~2015년 10월 20일(7일)
- 1차 포집 Filter 건조 일시 : 2015년 11월 11일 오후 6:00
- 2차 Filter 건조 일시 : 2015년 10월 19일 오후 3:45
- 2차 포집 일자 : 2015년 10월 20일~2015년 10월 26일(6일)
- 2차 포집 Filter 건조 일시 : 2015년 11월 12일 오전 10:00
- 건조 시간 : 900 Min

3. 공정부산물 거동특성 분석 및 평가

가. 방사능 농도 정량분석

표 19는 수산화알루미늄 제조 산업의 원료물질 및 공정부산물, 생산품 등의 시료를 채취하여 한국원자력연구원에서 핵종별 방사능 농도를 정량 분석한 결과이다. 여기서 PL(Parent's Liquid : 수산화알루미늄 중간물질)은 조선대학교에 의뢰하여 정량 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 19. 수산화알루미늄 제조 산업의 채취 시료 분석

시 료		조선대학교 분석값 (2010년 7월) (Bq/g)		(주)이엔이티 분석값 (2015년 4월) (Bq/g)	
		^{238}U	^{232}Th	^{238}U	^{232}Th
①	보크사이트	0.092	0.1353	0.11	0.16
②	배관 Scale	-	-	0.86	0.22
④	PL	-	-	0.02	<MDA
⑤	잔사물	0.2035	0.338	0.18	0.32
⑥	Scarlet	-	-	0.20	0.28
⑦	초미분 수산화알루미늄	-	-	0.05	0.13
⑨	수산화알루미늄	<MDA	-	0.01	<MDA
⑪	소성알루미나	-	-	0.01	<MDA
*MDA(Minimum Detectable Activity) : 최소검출농도					

현재, 「생활주변방사선 안전관리법」에서 원료물질 및 공정부산물은 원자력안전위원회에서 정하여 고시하는 방사능 농도와 수량을 초과하는 경우 원료물질 및 공정부산물로 정의된다. 「생활주변방사선 안전관리법」 고시 제2014-49호 제2조 원료물질의 방사능 농도 및 수량에서 ^{40}k를 제외한 그 밖의 모든 천연방사성핵종의 방사능 농도는 0.1 Bq/g로 정의되며 연간 취급하는 원료물질에 포함된 천연방사성핵종의 방사능량은 100,000 Bq이다. 그리고 「생활주변방사선 안전관리법」 고시 제2014-49호 제3조의 공정부산물의 방사능 농도에서 ^{40}k를 제외한 그 밖의 모든 천연방사성핵종의 방사능 농도는 0.5 Bq/g로 정의된다.

① 보크사이트 : ^{238}U - 0.1056 Bq/g, ^{232}Th - 0.1625Bq/g > 0.1 Bq/g
② 배관 Scale : ^{238}U - 0.8575 Bq/g > 0.5 Bq/g
④ PL(수산화알루미늄 중간물질) : ^{238}U - 0.0224 Bq/g < 0.5 Bq/g
⑤ 잔사물 : ^{238}U - 0.1828 Bq/g, ^{232}Th - 0.3180Bq/g < 0.5 Bq/g
⑥ Scarlet : ^{238}U - 0.19612 Bq/g, ^{232}Th - 0.27889Bq/g < 0.5 Bq/g
⑦ 초미분수산화알루미늄 : ^{232}Th -0.12718Bq/g < 0.5 Bq/g
⑨ 수산화알루미늄 일반제품: ^{238}U -0.01452, ^{232}Th -0.00251Bq/g < 0.1 Bq/g
⑪ 소성알루미나 : ^{238}U - 0.01785 Bq/g, ^{232}Th - 0.00367Bq/g < 0.1 Bq/g

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시료 채취 분석 결과 공정부산물인 배관 Scale의 경우 ^{238}U 방사능 농도가 0.8575 Bq/g으로 「생활주변방사선 안전관리법」 고시 제3조 공정부산물의 방사능 농도 고시 기준인 0.5 Bq/g을 초과하여, 「생활주변방사선 안전관리법」상의 공정부산물에 해당되었다. 그리고 원료물질인 보크사이트의 경우 ^{238}U과 ^{232}Th의 방사능 농도가 각각 0.1056 Bq/g 및 0.1625 Bq/g으로 「생활주변방사선 안전관리법」 고시 제2조 원료물질 방사능 농도 기준 0.1 Bq/g을 초과하여, 「생활주변방사선 안전관리법」 상의 원료물질에 해당되었다. 따라서 원료물질인 보크사이트와 공정부산물인 배관 Scale은 원료물질 및 공정부산물에 해당된다.

다음은 원료물질인 보크사이트 및 공정부산물인 배관 Scale의 연간 취급 총량으로부터 산출된 방사능량에 대하여 계산한 것이다.

(보크사이트 연간 총 방사능량) = (연간 원료 사용량) X (^{238}U 방사능 농도)
= 1,200톤/일 X 365일/년 X 10^6 (g/y) X 0.0001056 (KBq/g)
= 46,252,800 (KBq/y) > 1,000 (KBq/y)

(보크사이트 연간 총 방사능량) = (연간 원료 사용량) X (^{232}Th 방사능 농도)
= 1,200톤/일 X 365일/년 X 10^6 (g/y) X 0.0001625 (KBq/g)
= 71,175,000 (KBq/y) > 1,000 (KBq/y)

(배관 Scale 연간 총 방사능량) = (연간 발생량) X (^{238}U 방사능 농도)
= 20톤/월 X 12월/년 X 10^6 (g/년) X 0.0008575 (KBq/g)
= 205,800 (KBq/y) > 1,000 (KBq/y)

「생활주변방사선 안전관리법」 시행령 제4조에 방사능 농도가 1 Bq/g을 초과하는 ^{235}U, ^{238}U과 ^{232}Th을 포함한 원료물질 또는 공정부산물을 취급하는 산업체는 연간 취급하는 해당 원료물질 또는 공정부산물의 총량으로부터 산출된 방사능량이 핵종별로 1,000 KBq을 초과할 경우 등록 대상자에 해당되는 것으로 정의된다. 연간 취급하는 총량으로부터 산출된 방사능량을 계산한 결과 보크사이트와

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

배관 Scale은 「생활주변방사선 안전관리법」 시행령 제4조에 정의된 연간 취급 원료물질 및 공정부산물에 포함된 천연방사성핵종의 방사능량이 기준인 1,000 KBq을 넘었으나, 원료물질과 공정부산물의 방사능 농도가 1 Bq/g을 초과하는 시료는 분석되지 않았으므로, 해당 산업체는 취급자 등록 대상 산업체에 해당되지 않음을 알 수 있다. 그리고, 이 두 시료를 제외한 나머지 시료는 「생활주변방사선 안전관리법」에서 정한 원료물질 및 공정부산물의 기준 농도를 넘지 않음을 알 수 있다.

그리고 표 19에서 보듯 2010년 조선대학교의 분석 결과값과 2015년 이엔이티의 분석결과값이 대부분 비슷한 걸 볼 수 있다. 하지만 수산화알루미늄 제품 같은 경우 2010년 ^{238}U이 0.00097 Bq/g인 것에 반해, 2015년은 ^{238}U이 0.01452 Bq/g으로 14배 이상 차이나는 걸 알 수 있는데, 수입되는 원료물질의 방사능 농도가 높아진 것 등 다양한 원인을 유추해 볼 수 있다.

나. 공간감마선량 측정

표 20은 수산화알루미늄 제조 산업의 작업종사자들이 현장에서 실시간으로 받는 피폭선량에 대해 Inspector 1000-NaI로 공간감마선량을 여러 번 측정하여 평균적으로 많이 나타나는 선량을 표시한 것이다. 그리고 2010년 조선대학교에서 같은 수산화알루미늄 제조 산업을 방문하여 공간감마선량을 측정한 결과와 2015년 ㈜이엔이티에서 측정한 결과를 비교하였다.

표 20. 수산화알루미늄 제조 산업의 공간감마선량 측정값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

번호	측정 지점	공간감마선량(μSv/h)	
		조선대학교 측정값 (2010년 7월)	㈜이엔이티 측정값 (2015년 4월)
①	보크사이트 저장소	0.10	0.15
②	용출 [배관 Scale]	-	0.15
③	정제	0.09	0.13
④	부산물 여과기	-	0.11
⑤	잔사물 저장소	0.16	0.23
⑥	Scarlet	-	0.21
⑦	건조, 저장, 포장 [초미분 수산화알루미늄]	0.03	0.07
⑧	석출	0.07	0.09
⑨	수산화알루미늄 저장	0.03	0.11
⑩	수산화알루미늄 포장	-	0.048
⑪	소성알루미나 포장	-	0.07
⑫	소성미분알루미나 포장	-	0.05
⑬	총무과 사무실	0.08	0.11
⑭	공정정비실	0.09	0.07

측정값을 보면 Background가 평균 0.07~0.08 μSv/h임을 감안할 때 건조, 저장, 포장(초미분 수산화알루미늄 저장소)공정과 수산화알루미늄 포장실, 소성알루미나 포장실, 소성미분알루미나 포장실, 공정정비실은 Background 보다 낮은 공간감마선량을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 공간감마선량이 가장 높게 나온 측정 지점은 잔사물 저장소로, 0.23 μSv/h이다. 잔사물 저장소의 일반인 근무시간은 공정자동화로 8시간보다 적지만, 일반인 하루 평균작업시간은 8시간, 일주일에 5일 근무, 1년은 50주로 보수적으로 가정하여 계산하면 연간 방사선량은 0.46 mSv이다. 매우 보수적으로 가정했음에도 일반인 연간 피폭방사선량 기준인 1 mSv를 넘지 않는 것으로 평가됐다. 표 21은 잔사물 저장소와 같은 전환비(8시간 * 5일 * 50주)를 적용하여 계산한 연간 공간감마선량 결과값을 나타낸 것이다.

표 21. 수산화알루미늄 제조 산업의 연간 공간감마선량 결과값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

번호	측정 지점	연간 공간감마선량값 (mSv/y)
1	보크사이트 저장소	0.3
2	용출 [배관 Scale]	0.3
3	정제	0.26
4	부산물 여과기 [PL : 수산화알루미늄 중간물질]	0.22
5	잔사물(RedMud) 저장소	0.46
6	Scarlet	0.42
7	건조, 저장, 포장 [초미분 수산화알루미늄]	0.08
8	석출공정	0.18
9	수산화알루미늄 저장	0.22
10	수산화알루미늄 포장	0.096
11	소성알루미나 포장	0.14
12	소성미분알루미나 포장	0.1
13	총무과 사무실	0.22
14	공정정비실	0.14

표 21의 공간감마선량값은 IAEA를 비롯하여 국제적으로 통용되는 생활방사선의 일반인 유효선량 기준과 「생활주변방사선 안전관리법」 고시 제2014-49호 제4조의 가공제품에 의한 일반인의 피폭방사선량 1 mSv 보다 낮은 것이 확인 되었다.

2010년 조선대학교에서 측정한 결과값과 비교했을 때, 대부분 작업장의 공간감마선량은 비슷했으나 잔사물 저장소와 수산화알루미늄 저장실의 값이 다소 높게 측정되었다. 공간감마선량이 소량 증가한 이유는 5년이라는 시간 동안 원료물질인 보크사이트에 천연방사성핵종이 축적된 점과 일일 제품 생산량의 차이 등 여러 원인을 유추해 볼 수 있다. 그리고 조선대학교에서 측정하지 않은 배관 Scale과 Scarlet의 공간감마선량이 다소 높게 나타났으나, 연간 1 mSv를 넘지 않아 우려할 정도는 아닌 것으로 판단된다.

다. 작업자 외부피폭 측정

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 22는 현장탐색 시 공간감마선량이 다소 높게 측정된 곳, 원료물질 및 잔사물 저장소, 작업종사자들이 장시간 작업을 수행하는 곳을 중심으로 유리선량계를 부착하여 작업자의 외부피폭을 분석한 결과값을 표로 나타낸 것이다. 현장의 유리선량계는 1개월 간격으로 2대를 부착해놓았으며, 3개월을 기준으로 측정하였다.

표 22. 수산화알루미늄 제조 산업의 유리선량계 분석값

번호	위 치	설치 날짜	설치 번호	측정 결과 (㎜Sv)		
				표층	심부	심부 년누적
1	보크사이트 저장소	4/17	4번	0.04	0.04	0.04
		4/28	9번	0.48	0.44	0.44
5	잔사물 저장소	4/17	3번	0.12	0.04	0.04
		4/28	14번	0.36	0.32	0.32
6	Scarlet	4/17	5번	0.04	0.04	0.04
		4/28	15번	0.04	0.04	0.04
7	건조, 저장, 포장 (초미분 수산화알루미늄)	4/17	-	-	-	-
		4/28	12번	0.04	0.04	0.04
9	수산화알루미늄 저장	4/17	1번	0.04	0.04	0.04
		4/28	10번	0.04	0.04	0.04
11	소성알루미나 포장	4/17	6번	0.04	0.04	0.04
		4/28	13번	0.04	0.04	0.04
13	총무과 사무실	4/28	7번	0.04	0.04	0.04
		4/28	8번	0.70	0.56	0.56
14	공정정비실	4/17	2번	0.04	0.04	0.04
		4/28	11번	0.04	0.04	0.04

표층선량은 인체의 피부 표면아래 0.07㎜ 깊이에서의 선량을 분석한 것이며, 심부선량은 인체의 몸통 표면아래 10㎜ 깊이에서의 선량을 분석한 것이다. 연누적은 1년(4분기)동안 측정한 심부누적선량값이며, 현장탐색 시 3개월(1분기) 기준으로 측정하였기에 4분기의 값으로 환산하여 평가하였다.

보크사이트 저장소와 잔사물 저장소를 제외한 곳의 연누적선량값은 0.04 ㎜Sv로 동

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일하며, 보크사이트 저장소의 심부 년누적값이 0.44 mSv로 가장 높았고, 잔사물 저장소의 측정값이 0.32 mSv로 두 번째로 높았으나, 일반인 연간 피폭방사선량 기준인 1mSv를 넘지 않음을 알 수 있다.

총무과 사무실에 부착해둔 2대 중 한 대의 값이 높게 나왔으나 역시 연간피폭방사선량 기준을 넘지 않았으며, 유리선량계의 오작동 및 잘못된 부착, 계측오차 등 여러 가지 이유로 판단된다.

라. 작업자 내부피폭 측정

표 23, 24는 분진을 포집하기 전의 공 Filter 건조 전 후의 무게와 Cascade Impactor를 사용하여 포집한 Filter의 건조 전 후의 무게에 대하여 1차, 2차로 포집결과를 나타낸 것이다. Filter의 무게를 측정할 때 저울의 단위가 mg이 아닌 μg 단위로 세밀한 측정을 했어야 했으나, 본 분석에서 사용한 저울은 μg을 측정하지 못해 무게가 마이너스값이 나오는 오류가 발생하였다.

표 23. 수산화알루미늄 제조 산업의 Cascade Impactor 1차 포집 결과

Stage	공 Filter		포집 Filter		무게 차(g)
	건조 전	건조 후 (①)	건조 전	건조 후 (②)	(②-①)
0	0.266	0.185	0.371	0.37	0.185
1	0.263	0.183	0.318	0.318	0.135
2	0.267	0.218	0.287	0.286	0.068
3	0.276	0.198	0.294	0.294	0.096
4	0.276	0.197	0.282	0.282	0.085
5	0.276	0.198	0.28	0.278	0.08
6	0.264	0.193	0.269	0.266	0.073
7	0.266	0.209	0.268	0.267	0.058
Total	2.154	1.581	2.369	2.361	0.78

표 24.수산화알루미늄 제조 산업의 Cascade Impactor 2차 포집 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Stage	공 Filter		포집 Filter		무게 차(g)
	건조 전	건조 후 (①)	건조 전	건조 후 (②)	(②-①)
0	0.269	0.267	0.399	0.396	0.129
1	0.271	0.266	0.332	0.329	0.063
2	0.283	0.276	0.301	0.298	0.022
3	0.281	0.275	0.294	0.293	0.018
4	0.283	0.277	0.283	0.277	0
5	0.284	0.277	0.283	0.278	0.001
6	0.284	0.277	0.282	0.277	0
7	0.285	0.278	0.279	0.274	-0.004
Total	2.24	2.193	2.453	2.422	0.229

현장탐색 후 얻은 분진을 가지고 입자의 공기역학적 입자크기별 분진의 분포 및 방사능 농도를 한국원자력연구원에서 분석하였다. 아래 그림 12는 한국원자력연구원에서 Cascade Impactor Filter를 분석하는 절차이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

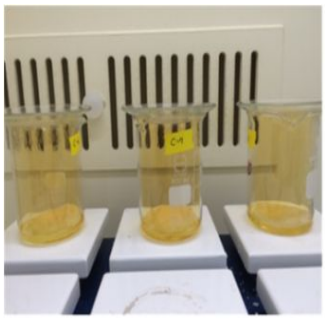
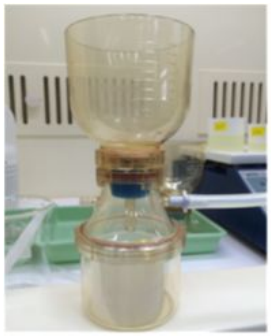
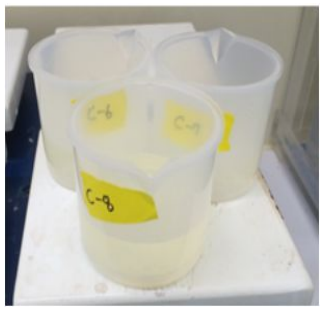
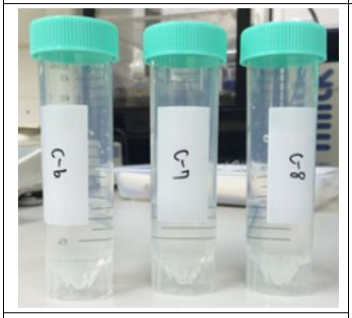
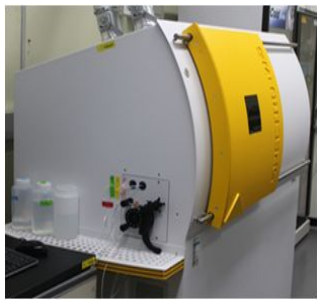
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>1. 왕수에 침출 (2시간)</td><td>2. 필터링</td><td>3. 건조 및 증발</td></tr>
<tr><td>  </td><td rowspan="2">5. 1/100 희석</td><td>  </td></tr>
<tr><td>4. 2% HNO_3 용해</td><td>6. ICP-MS 측정</td></tr>
</table>

그림 12. Cascade Impactor Filter 분석 절차

표 25는 한국원자력연구원에서 Cascade Impactor로 포집한 Filter를 토대로 ^{238}U의 방사능 농도를 1차, 2차로 분석한 표이다. 일반적으로 보크사이트를 원료물질로 사용하는 공정은 ^{232}Th이 ^{238}U보다 더 높은 값을 나타낸다. 그러나 ^{232}Th의 경우 공 Filter를 녹인 블렁크데이타값 1μ Bq/m³ 보다 비슷하거나 적어 최소검출농도(MDA) 미만으로 검출되지 않았다. 그 원인은 Filter가 교체시기보다 더 빨리 과포화가 이루어졌기 때문이라고 판단된다. 또, 대기 중의 평균 농도는 1~2 μ Bq/m³ 인 것에 반해 Filter A-3 ~ A-8과 B-4 ~ B-7까지는 대기 중의 농도와 같거나 낮은 것으로 나타났다.

그림 13은 표 25의 Data값을 토대로 입자의 크기별 ^{238}U 방사능 농도의 관계를 그래프로 도시한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 25. Cascade Impactor Filter 분석 결과

sample		PM	^{238}U			
		(μg/m³)	Conc	Unc	Conc	Unc
			(ng/m³)		(μBq/m³)	
1차	A-1	648.5	6.48	0.92	80.55	11.39
	A-2	473.2	4.68	0.66	58.18	8.23
	A-3	238.4	1.35	0.19	16.77	2.37
	A-4	336.5	1.34	0.19	16.72	2.37
	A-5	298.0	0.72	0.10	8.93	1.27
	A-6	280.4	0.28	0.04	3.52	0.50
	A-7	255.9	0.22	0.03	2.68	0.38
	A-8	203.3	0.10	0.01	1.29	0.18
2차	B-1	531.3	9.32	1.32	115.89	16.39
	B-2	259.5	4.38	0.62	54.48	7.71
	B-3	90.6	2.21	0.31	27.55	3.90
	B-4	74.1	2.06	0.29	25.65	3.63
	B-5	0.0	1.16	0.16	14.47	2.05
	B-6	4.1	0.72	0.10	8.96	1.27
	B-7	0.0	0.26	0.04	3.18	0.45
	B-8	-16.5	0.29	0.04	3.63	0.52

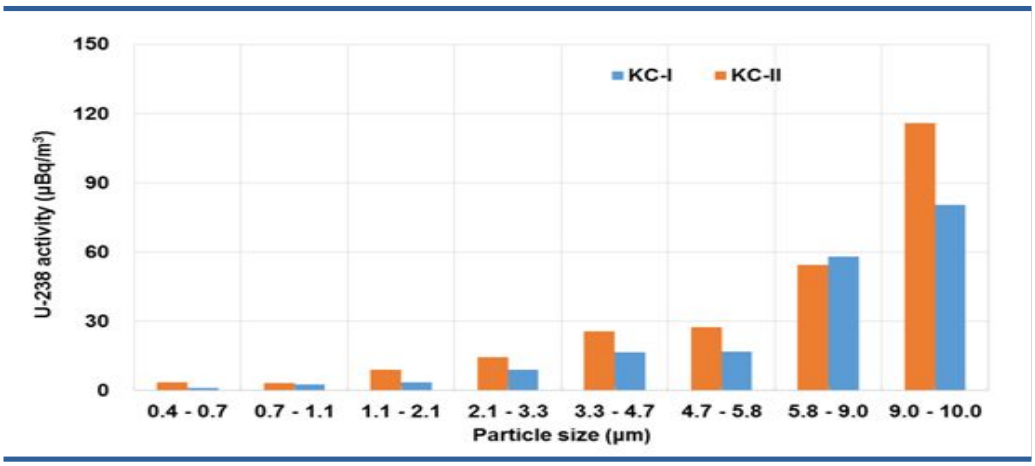


그림 13. 수산화알루미늄 제조 산업 입자크기별 ^{238}U 방사능 농도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

^{238}U 및 딸핵종이 모두 방사평형을 이루고 있다고 가정하고 표 26의 입자 특성(AMAD, 밀도)을 반영하여 표 27과 같이 핵종별 선량계수를 구할 수 있다.

표 26. 소성미분알루미나 포장실 작업장 내 피폭 환경

구 분	분석 결과
입자 크기 (AMAD)	4.73 ㎛ (GSD = 1.87)
입자 밀도	3.90 g/cm^3 (소성알루미나 평균[35])
입자의 방사능 농도	^{238}U: 0.427 Bq/g
공기 중 입자 농도	2734.31 ㎍/m^3

표 27. 입자 특성에 따른 ^{238}U 계열 핵종의 선량계수

핵 종	흡수 형태	f1	선량계수
^{238}U	M	0.02	1.98E-03
^{234}U	M	0.02	2.55E-03
^{230}Th	S	0.0002	8.03E-03
^{226}Ra	M	0.2	2.61E-03
^{210}Pb	F	0.2	1.61E-03
^{210}Po	M	0.1	2.65E-03
Total			1.94E-02

이때, 작업자의 연간 작업시간을 2,000시간으로 가정하고 ICRP 권고 작업자 표준 호흡률 및 위 표 26의 피폭 환경을 대입하여 작업자 섭취량을 서울대학교에서 아래와 같이 분석하였다.

(연간 섭취량) = 입자의 방사능 농도(Bq/g) X 공기 중 입자 농도(㎍/m^3) X
방사선작업자의 호흡량(m^3/h) X 방사선작업자의 연간 작업시간(h/y)
= (0.427 Bq/g) X (274.31㎍/m^3) X (1.2 m^3/h) X (2000 h/y)
= 2.80 Bq/y

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 수산화알루미늄 제조업체의 소성미분알루미나 포장실에서 근무하는 작업자의 연간 내부피폭선량은 다음과 같이 구할 수 있다.

(내부피폭선량) = 내부피폭 예탁유효선량계수(mSv/Bq) X 연간 섭취량(Bq/y)
= (0.02 mSv/Bq) X (2.80 Bq/y)
= 0.054 mSv/y

결론적으로 작업자의 연간 내부피폭선량은 위와 같이 0.054 mSv/y로 연간피폭선량의 기준인 1 mSv/y를 넘지 않는 것을 알 수 있다.

제 3 절 수산화알루미늄 제조 산업 공정부산물 방사능 영향평가

표 28은 수산화알루미늄 제조 산업에서 현장탐색을 수행하여 분석 및 평가한 결과를 종합적으로 보여주고 있으며, 평가결과를 요약하면 아래와 같다.

○ 원료물질인 보크사이트의 방사능 농도는 ^{238}U - 0.1056 Bq/g, ^{232}Th - 0.1625 Bq/g 이며, 공정부산물인 배관 Scale의 방사능 농도는 ^{238}U - 0.8575 Bq/g로 「생활주변방사선 안전관리법」고시 제2조와 제3조의 방사능 농도 기준값을 초과하여 「생활주변방사선 안전관리법」 상의 원료물질 및 공정부산물에 해당됨을 알 수 있었으며, 원료물질인 보크사이트 및 공정부산물인 배관 Scale은 「생활주변방사선 안전관리법」 상의 취급자 등록 기준 이하로 등록업체에 해당되지 않음을 확인하였다.

○ 최대 공간감마선량이 측정된 잔사물 저장소는 0.46 mSv/y로 일반인 연간 피폭방사선량 기준인 1.0 mSv를 넘지 않음을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

○ 보크사이트 저장소에 부착해둔 유리선량계의 측정값이 0.44 mSv로 가장 높았고, 잔사물 저장소의 측정값이 0.32 mSv로 두 번째로 높았으나 이 역시 일반인 연간 피폭방사선량 기준인 1.0 mSv를 넘지 않음을 확인하였다.

○ 수산화알루미늄 제조 산업이 월 20톤의 배관 Scale을 폐기물매립장에 매립처리하고 있는 점을 감안해, 추후 배관 Scale의 처리·처분 관련 기술을 개발할 것을 권고한다.

표 28. 수산화알루미늄 제조 산업 현장탐색 종합분석결과

공 정	방사능 농도 (Bq/kg)		피폭선량		
			외부피폭 (mSv/y)		내부피폭 (mSv/y)
	^{238}U	^{232}Th	Inspector 1000-NaI	유리선량계	Cascade Impactor
① 보크사이트 저장소	0.11	0.16	0.30	0.04	-
② 용출 [배관 Scale]	0.86	0.22	0.30	-	-
③ 정제	-	-	0.26	-	-
④ 부산물 여과기 [PL]	0.02	<MDA	0.22	-	-
⑤ 잔사물 저장소	0.18	0.32	0.46	0.32	-
⑥ Scarlet	0.20	0.28	0.42	0.04	-
⑦ 건조, 저장, 포장 [초미분 수산화알루미늄]	0.05	0.13	0.08	0.04	-
⑧ 석출	-	-	0.18	-	-
⑨ 수산화알루미늄 저장	0.01	<MDA	0.22	0.04	-
⑩ 수산화알루미늄 포장	-	-	0.10	-	-
⑪ 소성알루미나 포장	0.01	<MDA	0.14	-	-
⑫ 소성미분알루미나 포장	-	-	0.10	0.04	0.054
⑬ 총무과 사무실	-	-	0.22	0.04	-
⑭ 공정정비실	-	-	0.14	0.04	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 결 론

정부는 2012년 「생활주변방사선 안전관리법」을 제정 및 시행하여 생활주변방사선의 안전관리를 위한 연구개발과 현실적이며 효율적인 생활주변방사선 안전관리 규제지침의 개발을 지원하고 있다.

특히, 국내에서 산업 활동 중에 사용 및 발생되는 원료물질, 공정부산물 및 가공제품으로부터의 생활방사선 안전관리를 통하여 생활방사선으로부터 작업자 및 일반 국민의 피폭선량을 최소화하여 환경 보호와 국민의 안전을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 수산화알루미늄 제조 산업에 대하여 공정부산물 현장탐색을 수행하고, 핵종별 방사능 농도와 내·외부피폭선량의 분석을 통하여, 방사능 거동특성과 안전관리현황을 파악하였다.

현장탐색을 수행한 결과, 시료채취 분석 결과는 원료물질인 보크사이트의 경우 ^{238}U과 ^{232}Th의 방사능 농도가 각각 0.1056 Bq/g 및 0.1625 Bq/g이며, 공정부산물인 배관 Scale의 경우 ^{238}U 방사능 농도가 0.8575 Bq/g로 「생활주변방사선 안전관리법」 상의 고시 제2조와 제3조의 방사능 농도 기준을 초과하여 원료물질 및 공정부산물에 해당되었으며, 원료물질인 보크사이트 및 공정부산물인 배관 Scale의 방사능 농도가 「생활주변방사선 안전관리법」 시행령 제4조의 취급자 등록 대상 기준인 1.0 Bq/g을 초과하지 않음이 확인되어, 수산화알루미늄 제조 산업은 취급자 등록 대상 산업체에 해당되지 않는 것이 확인되었다. 그리고 Inspector 1000-NaI로 측정한 공간감마선량 및 유리선량계로 측정한 작업자 누적피폭선량의 경우 현장탐색을 수행한 전 공정에서 일반인 연간 피폭방사선량인 1.0 mSv를 넘지 않는 것으로 확인되었다. 마지막으로 Cascade Impactor로 측정한 작업장의 작업자 내부피폭선량값은 0.054 mSv/y로 이 역시 일반인 연간 피폭방사선량인 1.0 mSv를 넘지 않음이 확인되었다.

마지막으로 현장탐색을 수행한 수산화알루미늄 제조 산업의 경우 「생활주변방사선 안전관리법」 상의 원료물질 및 공정부산물에는 해당되나, 등록 기준인 방사능 농도를 넘지 않음으로 방사성 측면에서의 안전관리 방안의 제시가 필요하지 않는 것으로 판단되었다. 하지만 추후 원료물질의 수입처를 다변화하거나, 배관 Scale의 유지보수 작업을 시행하는 작업자의 기간 단축을 통하여 외부피폭

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

선량을 줄이는 등의 시도는 권고한다.

결론적으로 수산화알루미늄 제조 산업의 현장탐색을 통하여 공정부산물 거동특성 기반 DataBase를 구축하였고, 수산화알루미늄 제조 산업의 원료물질 및 공정부산물의 안전관리 방안을 제시하였다. 나아가 본 연구는 국내 주요 공정부산물의 거동특성 분석과 공정부산물 안전관리 및 규제지침을 개발하는 데 활용되어 국내 주요 공정부산물 취급 산업체의 작업환경과 작업종사자의 방사능 환경을 개선하고, 국민의 생활방사선 이해와 소통을 통한 사회갈등 현안해결에 기여할 수 있기를 기대한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고문헌】

[1] 생활주변방사선 안전관리법, 원자력안전위원회, 2012

[2] 방사선 이론과 실제, 한국방사선진흥협회, 2014

[3] Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series no. RS-G-1.1, IAEA Vienna, 1999

[4] 산업별 공정부산물 현장탐색 방법론 기술보고서, (주)이엔이티, 한국방사선안전재단, 2016

[5] Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA Vienna, 2004

[6] Naturally occurring radioactive materials (NORM IV), IAEA-TECDOC-1472, IAEA, 2004

[7] United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Vol. 1: sources, United Nations Scientific committee on the Effectis of Atomic Radiation(UNSCEAR), UN, 2000

[8] Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM V), Proceedings series, IAEA, 2008

[9] DIRECTIVES Council Directive 2013/59/EURATOM, Official Journal of the European Union, 2013

[10] Health and Safety, The Ionising Radiations Regulations 1999, STATUTORY INSTRUMENTS, 2000

[11] https://web.evs.anl.gov/resrad/RESRAD_Family/

[12] 산업별 공정부산물 규제현황 기술보고서, ㈜이엔이티, 한국방사선안전재단, 2014

[13] 산업별 공정부산물 특성분석 기술보고서, (주)이엔이티, 한국방사선안전재단, 2016

[14] 호남지역 천연방사성물질 대량사용시설내 방사성오염평가 및 방사선안전관리기준개발, 한국원자력안전기술원, 2011

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

어느 덧 시간이 흘러 2017년 졸업을 눈앞에 두고 있습니다. 긴 시간동안 슬플 때도 있었으며, 기쁘고, 속상할 때도 있었습니다. 그래도 항상 곁에서 좋은 조언 아끼지 않고 해주신 모든 분들이 있어서 행복하고 보람찬 시간이었습니다.

먼저 입사 이후 지금까지 저를 위하여 여러 대외활동 등 신경 써주시고 힘써주신 심석구 박사님께 감사드립니다. 그리고 현장탐색에 있어 많은 도움을 주신 김재만 실장님, 이은 실장님께 감사드립니다. 또, 곽영균 박사님, 황민정 팀장님, 권민진 팀장님, 랄프, 박명환씨, 배성환씨 모두 감사드리며, 앞으로도 많은 조언 해주시면 감사하겠습니다.

2008년 원자력에 입문하여 지금까지 많은 지식을 얻을 수 있도록 도와주시고 조언 해주신 이경진 교수님, 정운관 교수님, 송종순 교수님, 김진원 교수님, 나만균 교수님께 진심어린 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다. 멋진 제자가 될 수 있도록 노력하겠습니다.

그리고 지금 이 순간까지 저의 해피바이러스가 되어준 내삶의엔돌핀 아빠, 어느 상황에도 든든한 버팀목이 되어준 내삶의버팀목 엄마, 너무 비슷한 점이 많아 얄밉지만 나랑 똑닮은 하임이 2세 사랑스러운 나의 동생 하늘이까지 우리 가족들 너무 고맙고 사랑합니다. 앞으로도 더 많이 생각해주고 배려해주고 사랑을 듬뿍 표현할 수 있는 그런 딸이 될게요.

또, 항상 조언을 구하면 성심성의껏 대답해주시고 신경써주시는 용진이오빠, 한이오빠 감사드립니다. 그리고 부탁 잘 들어주는 하진이, 논문 관련된 내용 물어보면 무엇이든 대답해주고 항상 아낌없이 도움을 주는 미연이! 모두 고마워.

마지막으로 2012년부터 변덕스러운 내 성격 다 받아주는 고마운 용용아, 긴 시간동안 변치 않는 모습 보여줘서 너무 고맙고 행복해. 앞으로도 이 마음 변치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

말고 쭉 행복하자. 태용씨, 쿠키랑 행복하게 삽시다. 사랑하오.

Collection @ chosun