

원자력관계시설 부지 내 방사성 오염 토양폐기물 분류, 처리 및 처분 방법 연구

진동식* · 고봉진 · 이재근 · 전상건

엔이티(주) 부설공학연구소

A Study on the Classification, Treatment, and Disposal Methods of Radioactively Contaminated Soil Waste at Nuclear-Related Facility Sites

Dongsik Jin*, Bongjin Ko, Jaegeun Lee, and Sanggeon Jeon

R&D Center, Nuclear Environment Technology Co., Ltd., 4F, 8-18 Oncheonseo-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34168, Korea

ABSTRACT

For effective classification, treatment, and disposal of radioactively contaminated soil waste—aimed at reducing disposal costs and volume while ensuring facility safety and regulatory compliance at nuclear-related facility sites—the following sequential processes may be applied. These processes are based on the physical, chemical, and radiological characteristics of the waste and consist of six steps: (Step 1) preliminary classification of radioactively contaminated soil waste, (Step 2) pre-treatment based on the preliminary classification, (Step 3) contamination measurement and classification based on the pre-treatment, (Step 4) separation of contaminated soil waste based on the contamination measurement and classification, (Step 5) washing of contaminated soil waste based on the contamination measurement and classification, and (Step 6) disposal according to the final classification characteristics of the radioactively contaminated soil waste. These sequential processes provide an efficient, safe, and accurate method for the classification, treatment, and disposal of radioactively contaminated soil waste. This study can offer foundational data for establishing decommissioning strategies for nuclear-related facilities by proposing a technological system that is both site-specific and sustainable over the long term.

Key words: Radioactively contaminated soil waste, Classification, Treatment, Disposal, Nuclear-related facility

1. 서 론

국내·외적으로 원자력관계시설의 건설 및 해체가 활발하게 이루어지면서, 이에 따른 방사성 오염 토양폐기물의 발생과 관리 문제가 중요한 환경 및 사회적 이슈로 대두되고 있다. 특히 원자력발전소, 연구용 원자로시설, 사용후연료 저장시설 등의 부지에서는 방사성 물질의 누출이나 설비 교체 또는 시설 해체 과정에서 토양이 방사성물질로 오염되는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 2011년 동일본

대지진으로 발생한 후쿠시마 원전사고는 막대한 양의 방사성물질이 대기 중으로 누출되어 후쿠시마현 인근의 광범위한 지역에 대한 토양 오염을 야기했으며, 원전 해체 경험을 보유하고 있는 미국의 경우 원전 운영 중 배관이나 탱크 누수 등으로 원전해체 시 부지 내 토양의 방사성 오염이 확인되었으며, 이로 인해 Connecticut Yankee 원전 해체 시 약 33,000 m³의 토양 폐기물이 발생하였으며 (Suncoast Solutions, 2006), Main Yankee 원전 해체 시에는 전체 해체 폐기물 중 약 30%가 토양 폐기물이 차지하는 것이 확인되었고 (New Horizon Scientific, 2012), 원전 해체 시 1기당 평균 6천만 달러가 소요되어, 전체 원전해체 비용의 약 10%를 차지하는 것으로 나타났다. 전 세계 상업용 원전의 경우 2030년경에 가동 연수가 40년이 넘는 원전이 약 70%에 이를 것으로 예상되어 2025년도 이후 세계 원전해체 시장이 활성화되고, 2035년도 전후에 원전해체 시장이 정점에 이를 것으로 전망하고 있으며 (KEEI, 2020),

주저자: 진동식, 책임연구원

공저자: 고봉진, 책임연구원; 이재근, 선임연구원; 전상건, 연구원

*교신저자: 진동식, 책임연구원

E-mail: dsjin1064@netec.co.kr

Received : 2025. 6. 18 Reviewed : 2025. 7. 8

Accepted : 2025. 7. 16 Discussion until : 2025. 8. 31

Table 1. Distribution characteristics of representative radionuclides in soil

Nuclide	Distribution Characteristics	Reasons for Distribution
Cs-137	<ul style="list-style-type: none"> Primarily associated with fine particles (clay > silt) Low mobility, surface-bound 	<ul style="list-style-type: none"> Exists as Cs⁺ cation, strongly binds to negatively charged surfaces of clay minerals Selective sorption to illite (frayed edge sites) Prefers particles with high cation exchange capacity (CEC)
Co-60	<ul style="list-style-type: none"> Found in intermediate particle sizes (silt to fine sand) More mobile than Cs, relatively stable 	<ul style="list-style-type: none"> Exists as Co²⁺, adsorbed onto iron oxides and clay surfaces Sorption behavior affected by pH, redox conditions, and organic matter presence
Sr-90	<ul style="list-style-type: none"> Evenly distributed, including coarse particles (sand) High mobility, migrates to deeper layers 	<ul style="list-style-type: none"> Exists as Sr²⁺, chemically similar to Ca²⁺ Weak sorption to clays Competes with Ca²⁺ for exchange sites → reduced adsorption, increased leaching/mobility

국내의 경우도 현재 영구 정지된 고리 1호기와 월성 1호기의 해체가 조만간 시작될 예정이다.

방사성 오염 토양폐기물은 방사성 핵종이 불균일하게 분포하며, 외부 피폭뿐만 아니라 내부 피폭의 원인이 될 수 있는 고위험 물질이다(Kim et al., 2011). 일반폐기물과 달리 엄격한 방사선 규제 기준 하에서 처리 및 처분되어야 하며, 그에 따른 환경 안전성과 사회적 수용성 확보가 매우 중요하다. 그러나 현재까지 국내에서는 이러한 폐기물을 효율적으로 처리 및 관리할 수 있는 기술 체계가 충분히 정립되지 않았으며, 특히 오염 정도에 따른 효율적인 분류 및 저감 처리 기술의 부재는 처분 대상 방사성폐기물량 증가로 이어져 처분비용의 급증과 처리공간 확보의 어려움을 야기하고 있다.

또한, 방사성 오염 토양의 단순 전량 처분은 안전성 확보에는 도움이 될 수 있으나, 그에 따른 막대한 경제적 비용과 사회적 갈등을 초래할 수 있다. 특히 처분장 부지 확보의 어려움, 지역 주민의 반대, 장기 관리에 대한 불확실성 등은 현행 방식의 지속가능성에 의문을 제기하고 있다. 따라서 방사성 오염 토양을 체계적으로 분류하고, 오염 수준에 따라 차등 처리하여 필요시 자체처분을 고려한 저감 전략을 수립하는 것이 시급한 상황이다.

이러한 배경에서, 본 연구는 원자력관계시설 부지 내 방사성 오염 토양폐기물에 대한 물리적, 화학적 및 방사선 학적 특성을 확인하고, 시설의 안전성과 규제 적합성을 확보하는 동시에, 처분 비용 및 부피를 절감할 수 있는 실용적이고 효과적인 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류·처리·처분 방법을 제공한다. 이러한 연구는 현장 맞춤형 적용이 가능하고, 장기적 관리가 가능한 기술 체계의 구축을 통해서 향후 다양한 방사성 오염 토양폐기물이 발생되는 원전 해체 전략 수립 시에도 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 문헌 고찰

2.1. 방사성 오염 토양폐기물 특성 조사

원전사고 발생 시 코발트, 세슘, 스트론튬 등 다양한 방사성핵종들이 유출되며, 이러한 다양한 방사성핵종의 토양 내 분포 특성은 각 핵종의 화학적 성질, 토양의 물리·화학적 특성 그리고 환경 조건에 따라 다르다. 방사성 오염 토양폐기물 내에 주로 존재하는 Co-60, Cs-137, Sr-90과 같은 대표 핵종들의 토양 내 분포 특성은 Table 1과 같다(Takeda et al., 2014; Chistik et al., 2001; Choppin and Allard, 1985; Sahoo et al., 2016; Konno and Takagai, 2018; Kavasi et al., 2023). 이들 핵종 중 Cs-137은 감마선을 방출하고 반감기가 30년으로써 다른 방사성핵종들보다 길어 가장 위험한 방사성 물질로 보고되고 있다(Llano et al., 1998; Wang et al., 2010).

환경으로 방출된 방사성핵종은 지표면을 통해 빗물이나 눈 등에 의해서 스며들면서 서서히 오염되며 주변환경과 토질에 의해 약 1 m 정도까지 오염시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Sata et al., 2013; Matsunaga et al., 2013; Lepage et al., 2014). 후쿠시마 원전 사고 후 수개월이 지나 오염시료를 지표면적(20 m × 20 m)으로부터 1 cm 정도의 두께로 굴착, 채취한 토양을 총 9단계의 입도로 나누어 방사능 농도(Bq/g)를 측정한 결과에 의하면, Fig. 1과 같이 대부분의 방사능은 ϕ 75 μm 이하의 미세 토양에 함유되어 있는 것으로 조사되었다(Kato et al., 2012; Ohno et al., 2012; Ryu et al., 2018; Takata et al., 2014). 후쿠시마 원전 주변 토양에 대한 깊이별 Cs-137의 방사능 농도(Bq/g) 분포 특성은 Fig. 2와 같이 표층에 많이 존재하는 것으로 보고되고 있다(Takata et al., 2014).

국내 원전 중 현재 영구 정지되어 해체를 준비 중인 고리

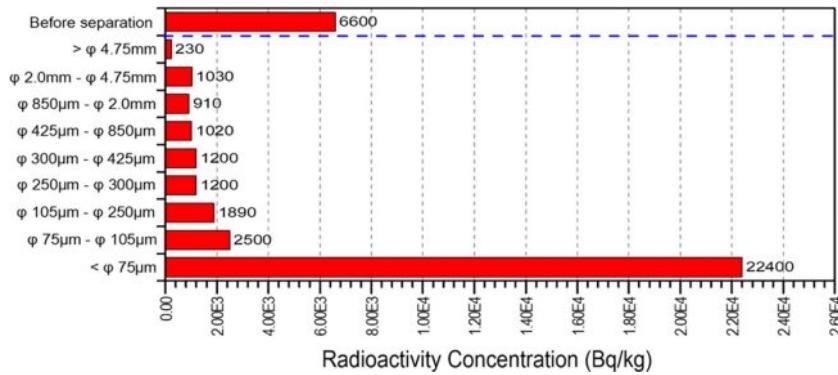


Fig. 1. Radioactivity concentration of soil samples around Fukushima nuclear power plant by particle size (Ryu et al., 2018).

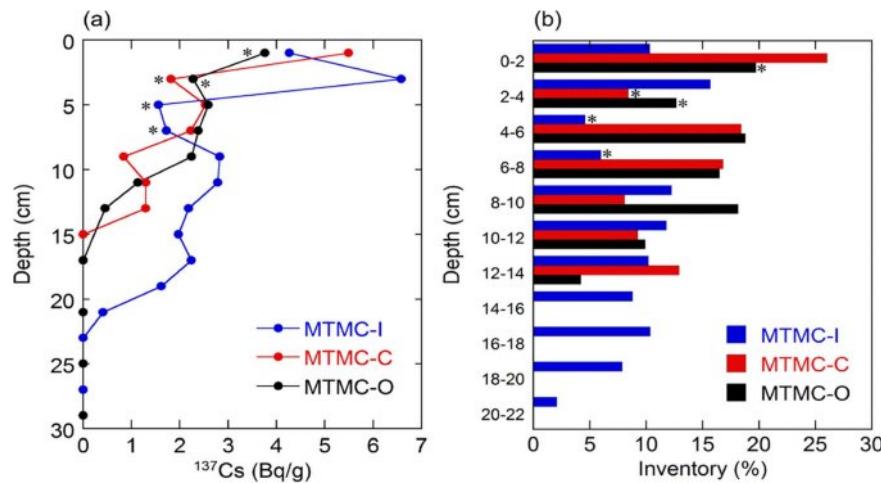


Fig. 2. Depth distribution of (a) ^{137}Cs concentrations and (b) inventories in soil core profiles (Takata et al., 2014).

Table 2. Results of particle size analysis of soil around Kori nuclear power plant

Sample #	Particle size distribution		
	Gravel (> 4.75 mm)	Sand (0.075 – 4.75 mm)	Silt & Clay (< 0.075 mm)
Kori #1	6.85	81.47	11.68
Kori #2	2.04	88.88	9.08
Kori #3	5.54	87.06	7.40
Kori #4	6.58	85.94	7.48
Kori #5	1.87	86.58	11.55
Kori #6	21.34	72.40	6.26
Kori #7	1.95	81.24	16.81
Kori #8	6.42	81.80	11.78
Kori #9	3.85	90.97	5.18
Kori #10	6.83	77.03	16.14
Avg.	6.33 ± 5.68	83.34 ± 5.67	10.34 ± 3.98

1호기와 월성 1호기가 위치하는 고리 및 월성 원전 주변에 대한 토양 시료를 채취하여 자갈(> 4.75 mm), 모래(0.075 – 4.75 mm), 실트 및 점토(< 0.075 mm) 비율을 분석한

Table 3. Results of particle size analysis of soil around Wolsong nuclear power plant

Sample #	Particle size distribution		
	Gravel (> 4.75 mm)	Sand (0.075 – 4.75 mm)	Silt & Clay (< 0.075 mm)
Wolsong #1	26.45	63.78	9.77
Wolsong #2	5.75	85.05	9.20
Wolsong #3	23.37	66.38	10.25
Wolsong #4	20.57	69.20	10.23
Wolsong #5	9.23	80.71	10.06
Wolsong #6	3.92	79.35	16.73
Wolsong #7	11.66	75.96	12.38
Wolsong #8	23.77	62.66	13.57
Wolsong #9	23.86	64.96	11.18
Wolsong #10	33.31	53.58	13.11
Avg.	18.19 ± 9.85	70.16 ± 9.80	11.65 ± 2.32

결과, Table 2 및 Table 3과 같이 실트 및 점토 비율이 평균적으로 각각 10.3%와 11.6%로 구성하고 있음을 확인하였다. 각 원전 주변 토양에 대한 입도분석 결과를

기반으로 삼각도표법에 근거한 토성을 분류한 결과, 고리 원전 주변의 경우는 10곳 중 7곳이 양질사토(loamy sand), 2곳이 사토(sand), 그리고 1곳이 사질식양토(sandy clay loam)의 토성을 가지는 것으로 확인되었다. 월성 원전 주변의 경우는 10곳 중 5곳이 사질식양토(sandy clay loam), 2곳이 사양토(sandy loam), 3곳이 양질사토(loamy sand)의 토성을 가지는 것으로 확인되었다(Seo et al., 2017).

2.2. 방사성 오염 토양폐기물의 부피저감 기술 조사

현재 영구정지 되어 해체를 준비 중인 고리 1호기와 월성 1호기 해체 시 대량의 방사성 오염 토양폐기물이 발생될 것으로 예상되므로 방사성폐기물 부피감용을 통한 처분 비용 절감이 요구된다. 오염 토양 내 방사성 물질을 제거하기 위해 동전기정화법(Electrokinetic remediation), 식물 정화법(Phytoremediation) 및 토양세척법(Soil Washing) 등의 기술을 적용해 왔지만(Song and Nam, 2022), 동전기정화법은 소요되는 전기량이 많아 운영비가 높으므로 경제성이 낮으며, 식물정화법은 친환경적이라는 장점이 있으나 목표정화를 달성하는데 너무 오랜 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다(Fuhrmann et al., 2002; Van Bergeijk et al., 1992). 반면, 토양세척법은 적용이 쉽고 시간이 절약되기에 높은 경제성과 효율성을 보여준다(Abumaizar and Smith, 1999).

이러한 토양 세척기술을 적용하기 위해서는 1차적으로 대부분의 방사성핵종이 존재하는 토양의 미립분 제거와 동시에 모래나 굵은 모래의 표면에 부착된 방사성핵종에 대한 물리적 분리 및 선별이 고려되어야 한다. 건식방식의 방사성 토양선별방법을 이용한 방사성 오염 토양폐기물에 대한 처리사례 및 분석결과에 의하면 Pu-239 또는 U-238 등의 핵종에 대해서는 건식방식의 방사성 토양선별방법을 이용하면 90% 이상(최대 99.5%)의 높은 부피 감용 비율을 보이는 반면에, Cs-137의 경우에는 3%에서 16%의 상대적으로 낮은 부피감용 비율을 보였다(Ryu et al., 2018). 따라서 Pu-239나 U-238 등의 방사성핵종으로 오염된 토양의 처리는 건식방식의 토양선별방법으로도 상당부분 처리가 가능할 것으로 판단되나 Cs-137 등의 다른 핵종들에 의해서 오염된 경우에는 추가적인 기술 도입이 요구된다. 특히 Cs-137은 토양 내 점토 및 실트질 층간에 강하게 결합하는 것으로 알려져 있으며(Lee et al., 2020; Park et al., 2017), 이로 인해 건식방식의 토양선별 방법으로는 토양 내 미립자나 모래 혹은 굵은 입자 표면에 부착된 토양 미립자를 효과적으로 분리해내기 어렵다. 따라서, 토양 내 미립자 부분을 효율적으로 분리해 낼 수

있는 기술 개발이 오염토양 처리의 1차적 부피감용 처리 방향이라고 볼 수 있다.

토양 세척기술은 습식방식의 입도분리기술을 이용한다. Cs-137과 같은 방사성핵종들은 부피 대비 높은 비표면적 (high surface/volume ratio)을 갖는 실트 및 점토와 같은 입자에 대한 친화도(affinity)가 높기 때문에 이러한 실트 및 입도에 대한 입도분리가 우선적으로 진행되어야 하며 (Jeong et al., 1996; Mukai et al., 2016), 건식방식의 입도분리기술과 달리 습식방식의 입도분리기술에서는 세척, 스크러빙 효과 등이 동반되기 때문에 자갈 또는 모래 등의 큰 입자 표면에 부착된 방사성핵종들의 제거가 동반된다. 토양세척 및 입도분리 공정 과정을 통해 모래 등의 입도 크기가 크고 매우 낮은 방사성 오염 특성을 가지는 토양은 자체처분하고, 실토 및 점토 등의 입도크기가 작고 높은 방사성 오염 특성을 가지는 토양은 처분 또는 추가적인 2차 처리를 진행하고, 공정 과정에서 발생되는 폐수는 수처리 또는 순환시켜 재사용해야 한다. 습식방식의 토양분류 및 세척기술이 건식방식의 방사성 오염 토양 선별기술의 단점을 보완하는 방사성 오염 토양의 1차 부피감용 기술로 적합할 것으로 판단되며, 세척액의 조성, 혼탁액의 분산 기술, 초음파 및 스크러빙 처리 등의 공정변수들을 최적화하는 방향으로 기술개발이 진행되어야 한다.

방사성 오염 토양폐기물을 습식방식의 입도분리기술을 적용하여 1차적으로 처리하면 방사성핵종을 다량 포함하는 미세 토양의 방사성폐기물이 발생되며, 국내 방사성폐기물 처분비용을 감안하면, 이렇게 분리된 미세 토양의 2차 처리를 통해 최종 발생 방사성폐기물의 부피를 줄일 수 있는 추가적인 기술개발이 요구된다. 이러한 2차 처리 기술의 핵심은 점토나 실트 같은 미세토양에 강하게 결합되어 있는 방사성핵종을 얼마나 효율적으로 제거할 수 있는지에 있다. Table 2 및 Table 3에 제시된 고리 및 월성 원전 주변 토양의 구성비와 Fig. 1의 토양 입도크기 특성에 따른 방사성 오염 특성을 고려하면 미세토양 내 방사성핵종 제거 기술의 필요성 부각된다. 점토광물은 모래와 달리 전체적으로 음전하를 띠기 때문에 높은 양이온 교환능력(Cation exchange capacity, CEC)을 갖고 있어 양이온을 강하게 흡착시킬 수 있다(Kang and Shin, 2024). 또한 실트 및 점토는 크기가 작기 때문에 상대적으로 넓은 비표면적을 갖고 있는 흡착력을 증가시키는 요인으로 작용한다(Takeda et al., 2014; Chistik et al., 2001). 고리 및 월성 원전 주변 토양의 구성 비율에서 실트 및 점토의 비율이 약 10% 정도 차지하는 것으로 조사되었으므로 이는 1차 처리를 통해 전체 토양의 90% 정도의 부피감용이 가능하고, 2차 처리

대상이 되는 방사성 핵종 함유 미세토양이 약 10%임을 의미한다. 오염 토양의 1차 처리 후 발생되는 이러한 약 10%의 방사성폐기물에 대한 2차 처리 여부는 방사성폐기물의 처분비용, 2차 처리 공정과 관련된 소요 및 유지비용 등에 대한 경제성 관점과 처리 공정의 복잡성 등에 대한 효율성 관점 등이 종합적으로 고려되어 결정되어야 하며, 이와 관련된 추가적인 연구가 요구된다.

3. 재료 및 방법

본 연구는 원자력관계시설 운영 또는 해체 시 시설 부지 내 방사성물질 누출 등에 의해 발생된 방사성 오염 토양 폐기물에 대한 효율적이면서 안전하고 정확한 분류, 처리 및 처분을 위한 공정 체계를 도출하고자 수행되었다. 이를 위해 고리 1호기 및 월성 1호기 부지를 중심으로 토양의 입도 및 핵종 분포 특성을 조사하고, 선행 기술 분석과 현장 조건을 반영하여 일련의 처리 공정을 설계하였다. 각 공정은 방사선학적 특성과 물리적 성질에 기반을 두어 계층적으로 구성되었으며, 실무 적용 가능성을 고려한 단계별 처리 절차로 구체화하였다.

3.1. 토양 시료 분석 및 핵종 특성 기반 분류 설계

고리 및 월성 원전 주변에서 채취된 시료에 대한 입도 분석 결과, 두 부지 모두 모래가 우세한 토성(고리 평균 83.3%, 월성 평균 70.2%)을 보였으며, 고리 지역은 상대적으로 자갈의 비율(평균 6.3%)이 낮고, 실트 및 점토의 비율이 평균 10.3% 수준으로 나타났으며, 월성 지역은 상대적으로 자갈의 비율(평균 18.2%)이 높고, 실트 및 점토는 평균 11.7% 수준으로 나타났다. 토성 분류 결과, 고리는 주로 양질사토(loamy sand), 월성은 사질식양토(sandy clay loam)로 나타났으며, 이는 방사성핵종의 입자 부착 특성과 밀접한 관련이 있다.

핵종별 흡착 및 분포 특성은 문헌 고찰에서와 같이 대부분의 방사능이 $\phi 75 \mu\text{m}$ 이하의 토양(실트 및 점토)에 함유되어 있을 것으로 판단되므로 방사성 오염 토양폐기물의 부피감용을 위해 토양폐기물로부터 실트 및 점토를 효과적으로 분리하기 위한 건식 또는 습식방식의 분리기술이 적용되어야 한다. 방사성 오염 토양폐기물에 대한 방사능 농도 측정을 위한 대표 지표핵종으로는 고에너지의 감마선을 방출하여 측정이 용이한 Cs-137과 Co-60 핵종을 선정하였다. 이들은 각각 점토와 철 산화물에 강하게 흡착되며, 척도인자(scaling factor)를 통해 방사성 오염 토양 폐기물 내에 존재할 수 있는 난검출 핵종(C-14, H-3, 등)

들에 대한 방사능 농도(Bq/g) 추정에 활용할 수 있다.

3.2. 공정 구성 및 설계 기준

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효과적인 분류·처리·처분을 위한 공정 구성은 방사성 오염 토양폐기물의 입도, 오염도, 핵종별 특성을 반영해야 하며, 공정 설계 시 고려되어야 되는 주요 기준은 다음과 같다.

- 입도 기준 분류값: 20 mm (자갈 분리), 2 mm (집석 분리), 0.2~0.5 mm (미세토 분리), 0.075 mm (미세토로부터 실트 및 점토 분리)
- 핵종 기준: 감마핵종(Cs-137, Co-60) 측정을 통한 난검출 핵종 평가 기반 마련
- 측정 체계: 사전측정 → 신속측정 → 정밀측정의 3단계 오염도 측정 체계 구성
- 분류 기준: 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정(NSSC, 2023)」에 따른 방사능 농도 기준 적용

3.3. 분류 및 처리 공정 설계

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효과적인 분류·처리·처분을 위한 공정은 고리 및 월성 주변 토양의 입도 분포 및 오염 특성 조사 결과 등을 기반으로 다음과 같이 구성하였다.

- (1단계) 예비분류 공정: 현장 내 오염 분포 조사 결과를 기반으로 토양을 오염/잠재오염/비오염 영역으로 예비분류하고, 이를 바탕으로 방사능 측정 시료 채취 지점을 설정한다. Co-60 및 Cs-137 핵종의 방사능 농도를 측정하여 난검출 핵종들에 대한 척도인자를 설정하고 분류 기준값을 확립한다.
- (2단계) 전처리 공정: 오염 예비분류 구획별 토양 험수율 측정 및 건조를 통해 토양의 물리적 특성을 균질화한 뒤, 입도 기준에 따라 자갈(>20 mm), 집석(2~20 mm), 미세토양(<2 mm)으로 분리하고, 자갈(>20 mm)로 분리된 토양폐기물은 파쇄/분쇄 처리(20 mm 이하)하며, 오염 예비분류 구획별 입분분류 결과를 기반으로 각 토양폐기물을 그룹화한다.
- (3단계) 오염 측정 및 분류 공정: 오염 예비분류 구획별 입분분류 결과 기반으로 그룹화된 각 토양폐기물을 대상으로 사전측정, 신속측정 및 정밀측정 절차를 적용하여 Cs-137 및 Co-60 핵종의 방사능 농도를 산출한다. Cs-137 및 Co-60 핵종의 방사능 농도(Bq/g)값과 척도인자 기반으로 산출되는 난검출 핵종들의 방사능 농도(Bq/g) 추정값을 기준으로 규제 기준치과 비교한

- 후, 각 토양폐기물을 자체처분 대상 또는 방사성폐기물로 분류한다.
- (4단계)오염 토양 분리 공정: 오염 측정 및 분류 공정에서 방사성폐기물로 분류된 미세토양은 건식 방식의 입도 분리(0.2 – 0.5 mm 입도크기 기준)기술을 적용하여 오염/비오염 토양으로 재선별하고 다시 신속측정 또는 정밀측정을 수행한다.
 - (5단계)오염 토양폐기물 세척 공정: 오염 측정 및 분류 공정에서 방사성폐기물로 분류된 잡석 및 파쇄석 폐기물과 오염 토양 분리 공정에서 오염으로 재선별된 미세토양 폐기물은 습식 방식의 오염 토양폐기물 세척 공정을 수행한 후 원심분리, 진동 스크린, 고액분리기 등의 공정 기술을 활용하여 입도 분리(0.075 – 0.02 mm 입도크기 기준) 후 신속측정 또는 정밀측정 수행하여 최종적으로 자체처분과 방사성폐기물로 분류한다.
 - (6단계)최종 처분 공정: 최종적으로 방사성폐기물로 분류된 토양폐기물은 드럼 포장 전에 고정화·고형화(압축, 열처리, 시멘트 고화) 공정을 통해 처분에 적합하도록 조치하고, 자체처분 대상은 톤백에 포장하여 규제 기준에 따라 배출한다. 각 토양폐기물에 대한 발생 위치, 핵종 농도, 분류 결과 등은 DB 시스템에 등록하여 관리한다.

3.4. 공정별 데이터 처리 및 정보 추적 관리

모든 공정은 토양폐기물별 추적이 가능하도록 설계하고, 통합 데이터베이스 시스템을 통해 각 토양폐기물의 발생 정보, 물리적 특성, 방사능량, 처리 결과 등이 저장·관리될 수 있도록 한다. 이러한 자료는 향후 규제기관 제출 자료, 공정 검증, 추적성 확보 및 토양폐기물의 이력 관리 등에 활용될 수 있도록 한다.

4. 결과 및 고찰

앞장에서 기술한 방사성 오염 토양폐기물의 물리적, 화학적 및 방사선학적 특성과 부피저감 기술을 기반으로 원자력관계시설 부지 내 방사성 오염 토양폐기물에 대한 시설 안전성과 규제 적합성을 확보하는 동시에, 처분비용 및 부피 절감이 가능한 효과적인 방사성 오염 토양폐기물의 분류, 처리 및 처분을 위해서는 Fig. 3의 공정 순서도와 같은 일련의 연속된 공정으로 수행될 수 있다. 즉 방사성 오염 토양폐기물의 분류, 처리 및 처분은 방사성 오염 토양폐기물 예비분류 공정(1단계), 예비분류 공정 기반 전처리 공정(2단계), 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염

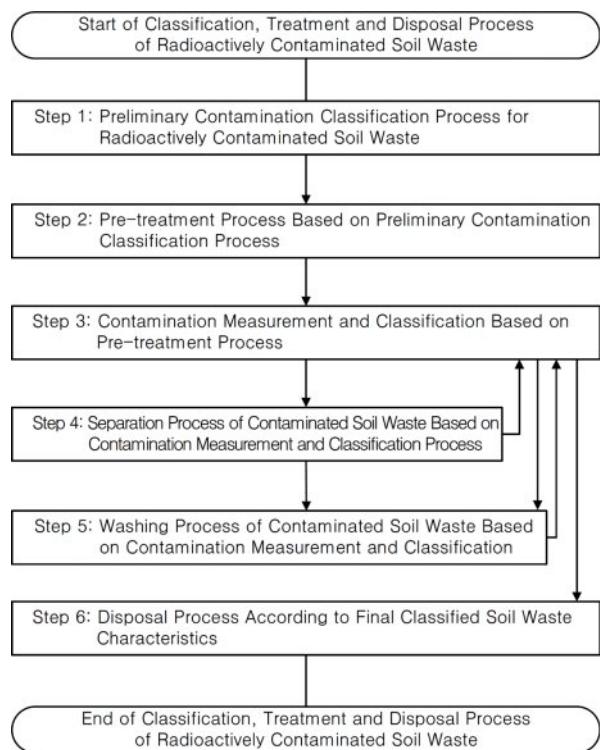


Fig. 3. Classification, treatment and disposal process of radioactively contaminated soil waste.

측정 및 분류 공정(3단계), 오염 측정 및 분류 공정 기반 오염 토양 분리 공정(4단계), 오염 측정 및 분류 공정 기반 오염 토양폐기물 세척 공정(5단계) 그리고 최종 분류 토양폐기물 특성에 따른 처분 공정(6단계)으로 구분되는 일련의 연속된 공정으로 구성될 수 있다. Fig. 3의 각 공정 단계에 대한 상세한 수행 내용은 4.1절에서 4.6절에 기술되어 있다.

4.1. 방사성 오염 토양폐기물 예비분류 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 3에 제시된 1단계 처리 공정인 방사성 오염 토양폐기물에 대한 예비분류 공정은 Fig. 4와 같은 상세한 세부 수행공정으로 구성될 수 있다. 먼저 토양폐기물 발생지점에 대한 오염 분포 및 오염 깊이(층)에 대한 예비 오염 분포 특성 조사 및 분석결과를 기반으로 오염/잠재적 오염/비오염 예비 구획으로 1차 분류하고, 1차 분류된 오염 및 잠재적 오염 예비 구획에 대해서 오염 깊이(층)에 따른 오염/잠재적 오염/비오염 예비 층으로 2차 분류(비오염 예비 구획은 비오염 예비 층으로 모두 분류)한다. 이러한 예비분류 공정은 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정 과정 중에 발생할

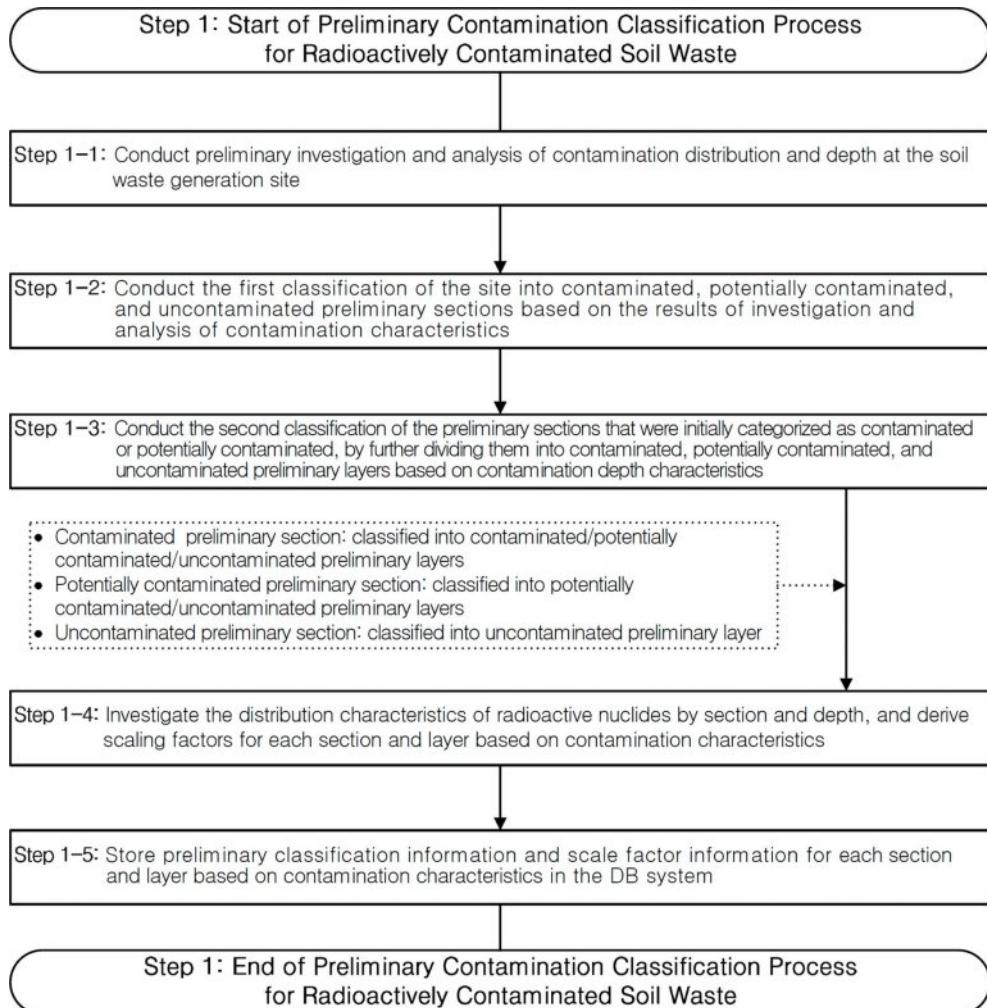


Fig. 4. Preliminary contamination classification process for radioactively contaminated soil waste.

수 있는 불필요한 오염 확산을 방지할 수 있도록 하여 업무 효율성과 안전성을 향상 시킬 수 있도록 한다.

토양폐기물 발생지점에 대한 오염 분포 및 오염 깊이(층)에 따른 예비분류가 완료되면, 오염 분포 특성 조사 및 분석결과를 기반으로 오염/잠재적 오염/비오염 예비 구획별 각 오염 깊이(층)에 대한 척도인자를 도출한다. 척도인자는 고에너지의 감마선을 방출하여 외부에서 비교적 측정이 용이한 Co-60(1.17 MeV and 1.33 MeV) 및 Cs-137(0.662 MeV) 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 측정정보 활용하여 Co-60 또는 Cs-137 핵종과 일정 비율의 상관관계로 존재하고, 감마선의 에너지가 약하거나 비감마선 방출핵종으로 인하여 비파괴 측정이 어렵고, 정밀 방사화학 분석 등이 필요하여 고비용, 시간 소요, 작업자 피폭 위험 등의 문제를 발생시키는 난검출 핵종(저에너지 감마선, 알파 및 베타선 방출 핵종)에 대한 방사능 농도(Bq/g)를 간접적으로 쉽게 평가할 수 있

도록 하는 인자이다(IAEA, 2009). 척도인자 정보를 활용 한 난검출 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 평가는 방사화생성 핵종의 지표핵종으로 사용되는 Co-60 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 측정정보를 활용하여 C-14, H-3, Fe-55, Ni-59(63), Nb-94 핵종의 방사능 농도(Bq/g)를 평가하고, 핵분열생성 핵종의 지표핵종으로 사용되는 Cs-137 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 측정정보를 활용하여 Sr-90, Tc-99, I-129 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 평가하며, 초우라늄 핵종의 지표핵종으로 사용되는 Co-60 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 측정정보를 활용하여(필요시 Ce-144 핵종의 방사능 농도(Bq/g) 정보 활용 가능) Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 및 Gross α 핵종의 방사능 농도(Bq/g)를 평가한다(Lee et al., 2007; Hwang et al., 2004; Kim et al., 2020). 이러한 척도인자 적용은 방사성 토양 폐기물에 대한 방사능 특성 평가를 신속하고 경제적으로 수행할 수 있도록 한다.

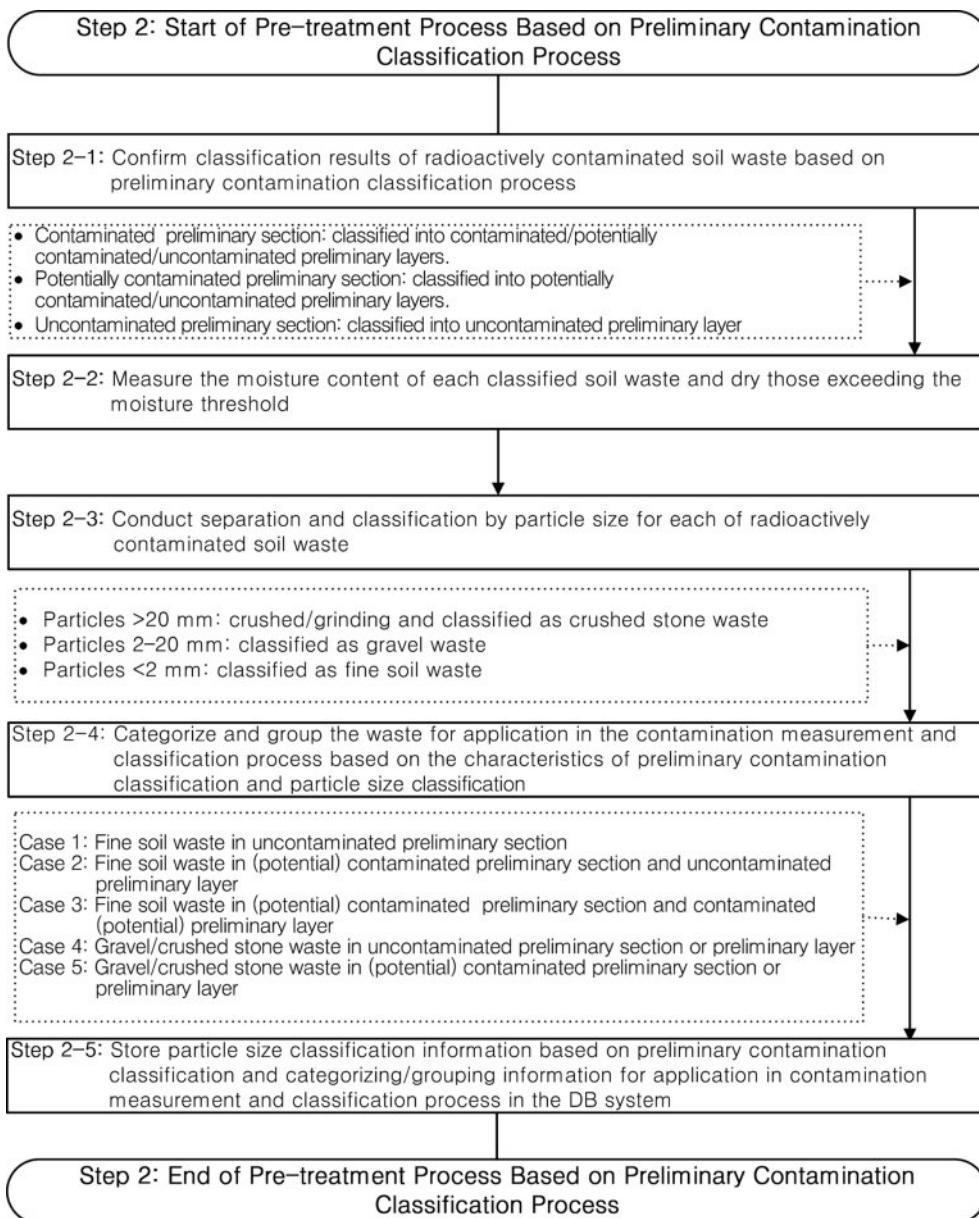


Fig. 5. Pre-treatment process based on preliminary contamination classification process.

상기한 토양폐기물 발생지점에 대한 오염/잠재적 오염/비오염 예비 구획별 깊이(층)에 따른 오염 특성 예비분류 정보와 예비분류된 각 구획 및 층에 대한 척도인자 정보는 방사성 오염 토양폐기물 분류, 처리 및 처분을 위한 통합 관리 운영프로그램을 구성하는 데이터베이스(DB) 시스템 내에 저장하여 연속된 다음 공정에서 이러한 정보들이 연계되어 활용될 수 있도록 하고, 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정의 이력관리가 가능하도록 하여야 한다.

4.2. 예비분류 공정 기반 전처리 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 2에 제시된 2단계 처리 공정인 예비분류 공정 기반 전처리 공정은 Fig. 5와 같은 상세한 세부 수행공정으로 구성될 수 있다. Fig. 5와 같이 예비분류 공정 기반 전처리 공정은 먼저 예비분류 공정 기반의 방사성 오염 토양폐기물 특성별 분류 결과를 확인하고(2-1단계), 예비분류된 방사성 오염 토양폐기물별로 함수율을 측정하여 기준치 이상의 함수율을 나타내는 토양폐기물에 대해서는 건조공정을 수행하여(2-2단계) 각 방사성 오염 토양폐기

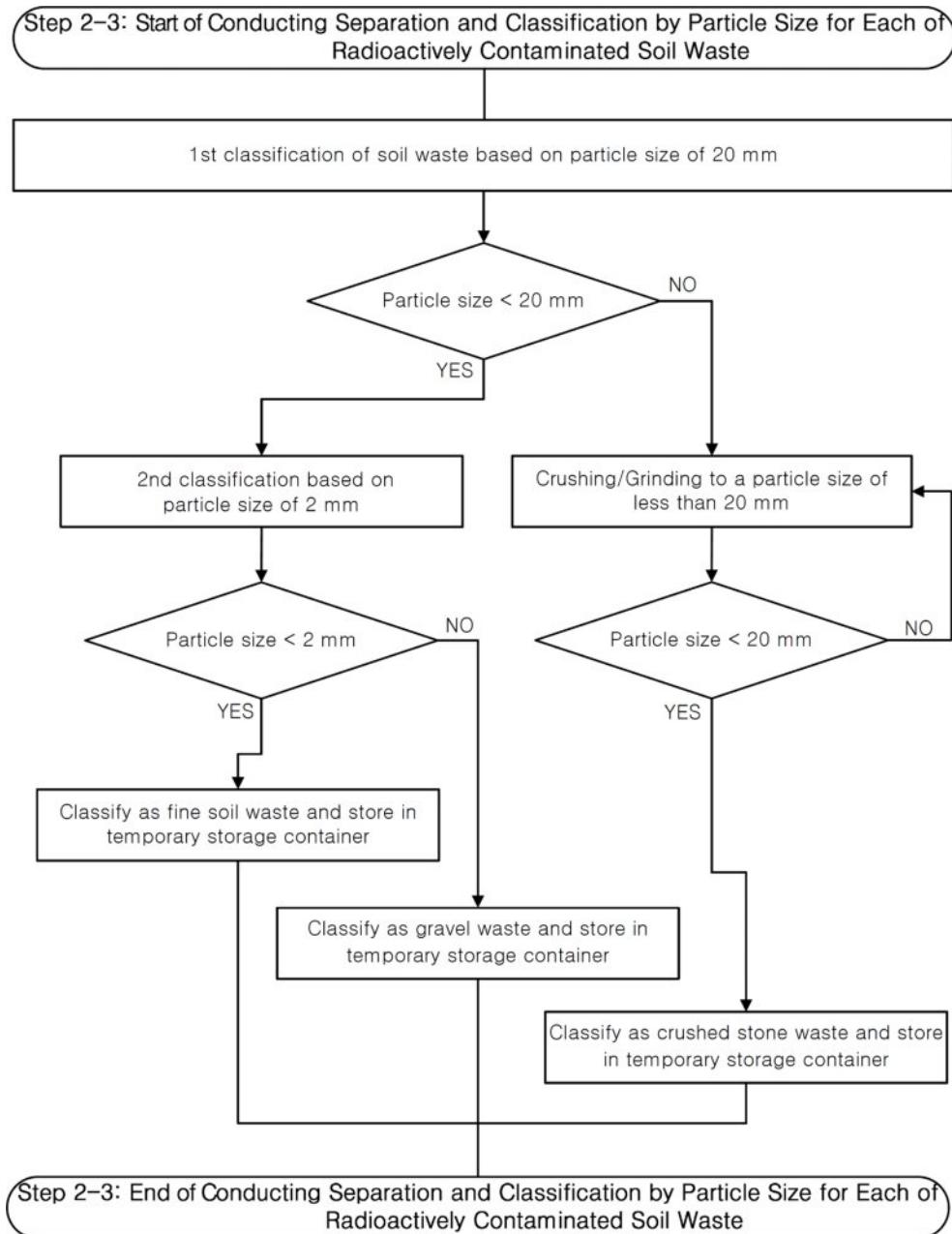


Fig. 6. Process for conducting separation and classification by particle size for each of radioactive contaminated soil waste.

물에 대한 입도분류를 수행한다(2-3단계). 이후의 연속된 공정으로써 방사성 오염 토양폐기물에 대한 예비분류 및 입도분류 특성 기반으로 후속 공정인 오염 측정 및 분류 공정 적용을 위한 분류 및 그룹화를 수행한다(2-4단계). 상기한 예비분류 공정 기반으로 분류된 각 토양폐기물에 대한 입도분류 정보와 오염 측정 및 분류 공정 적용을 위한 분류 및 그룹화 정보는 연속된 다음 공정에서 이러한 정보들이 연계되어 활용될 수 있도록 하고, 방사성 토양 폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정에 대한 이력관리가

가능하도록 통합관리 운영프로그램을 구성하는 데이터베이스(DB) 시스템 내에 저장하는 공정이 구성된다(2-5단계).

Fig. 5의 방사성 오염 토양폐기물에 대한 입도분류 공정(2-3단계)은 Fig. 6과 같이 먼저 토양폐기물에 대해서 입도크기 20 mm 기준으로 1차 입도분류하고, 입도크기 20 mm 이상으로 1차 입도분류된 토양폐기물(주로 큰 자갈류 등)은 파쇄/분쇄장치를 활용하여 입도크기 20 mm 미만으로 파쇄/분쇄하여 파쇄석 폐기물(Crushed stone waste)로 분류하여 임시 저장용기 내 저장한다. 입도크기

20 mm 미만으로 1차 입도분류된 토양폐기물은 입도크기 2 mm 기준으로 2차 분류하여, 입도크기 2 mm 이상으로 2차 입도분류된 토양폐기물(주로 작은 자갈 및 큰 모래 등)은 잡석 폐기물(Gravel waste)로 분류하여 임시 저장용기 내에 저장하고, 입도크기 2 mm 미만으로 2차 입도분류된 토양폐기물(주로 작은 모래 및 실트/점토 등)은 미세토양 폐기물(Fine soil waste)로 분류하여 임시 저장용기 내에 저장하는 공정으로 구성된다. 여기서 2 mm의 입도크기 분류 기준은 미국 농무부(USDA) 또는 국제토양과학연합(ISSS)에서 자갈 및 모래를 구분하는 동일한 기준치를 적용하였으며, 2장에 기술된 선행 연구결과와 같이 방사능

오염도가 매우 낮아 자체처분 대상으로 분류될 것으로 예상되는 입도크기 20 mm 이상으로 1차 입도분류된 토양폐기물(주로 큰 자갈류 등)를 파쇄/분쇄장치를 활용하여 입도크기 20 mm 미만으로 파쇄/분쇄하는 이유는 IAEA(2004)와 같이 측정대상물에 대한 방사능 측정 시 입도크기 균일성을 개선하여 자체처분 판정결과의 정확성 및 신뢰성을 향상시키고, 최종 처리 및 처분 공정의 업무 효율성을 증가시키기 위함이다.

Fig. 5의 방사성 오염 토양폐기물 예비분류 및 입도분류 특성 기반으로 오염 측정 및 분류 공정 적용을 위한 분류 및 그룹화 공정(2-4단계)은 Fig. 7과 같이 미세토양 폐기

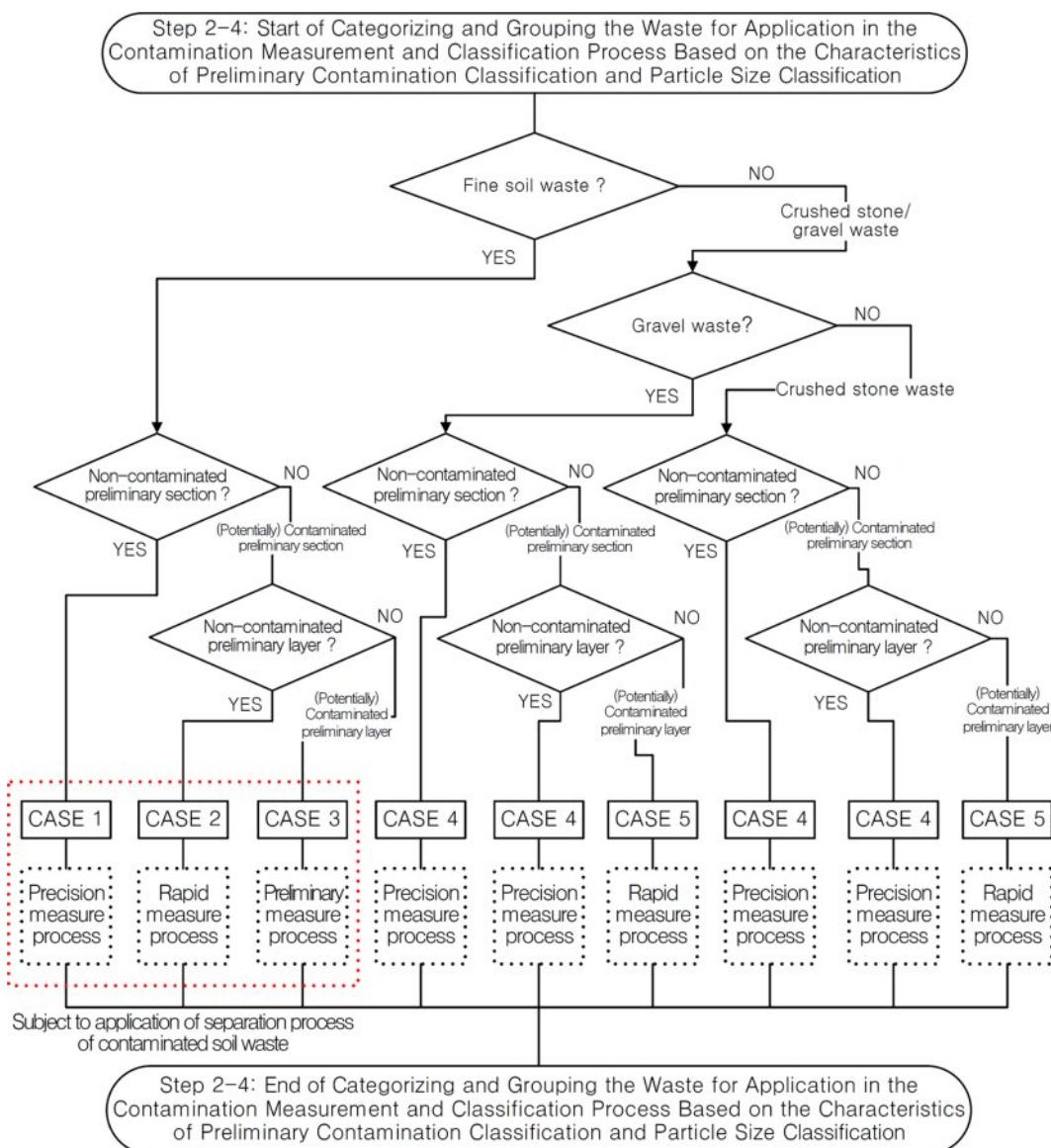


Fig. 7. Process for categorizing and grouping the waste for application in the contamination measurement and classification process based on the characteristics of preliminary contamination classification and particle size classification.

물의 경우는 비오염 예비 구획과 오염 및 잠재적 오염 예비 구획으로 구분하여 비오염 예비 구획은 CASE1로 분류 및 그룹화하고, 오염 및 잠재적 오염 예비 구획의 경우는 다시 비오염 예비 층과 오염 및 잠재적 오염 예비 층으로 구분하여 비오염 예비 층은 CASE2로 분류 및 그룹화하고,

오염 및 잠재적 오염 예비 층은 CASE3으로 분류 및 그룹화한다. Fig. 7과 같이 잡석 폐기물의 경우는 비오염 예비 구획과 오염 및 잠재적 오염 예비 구획으로 구분하여 비오염 예비 구획은 CASE4로 분류 및 그룹화하고, 오염 및 잠재적 오염 예비 구획의 경우는 다시 비오염 예비 층과

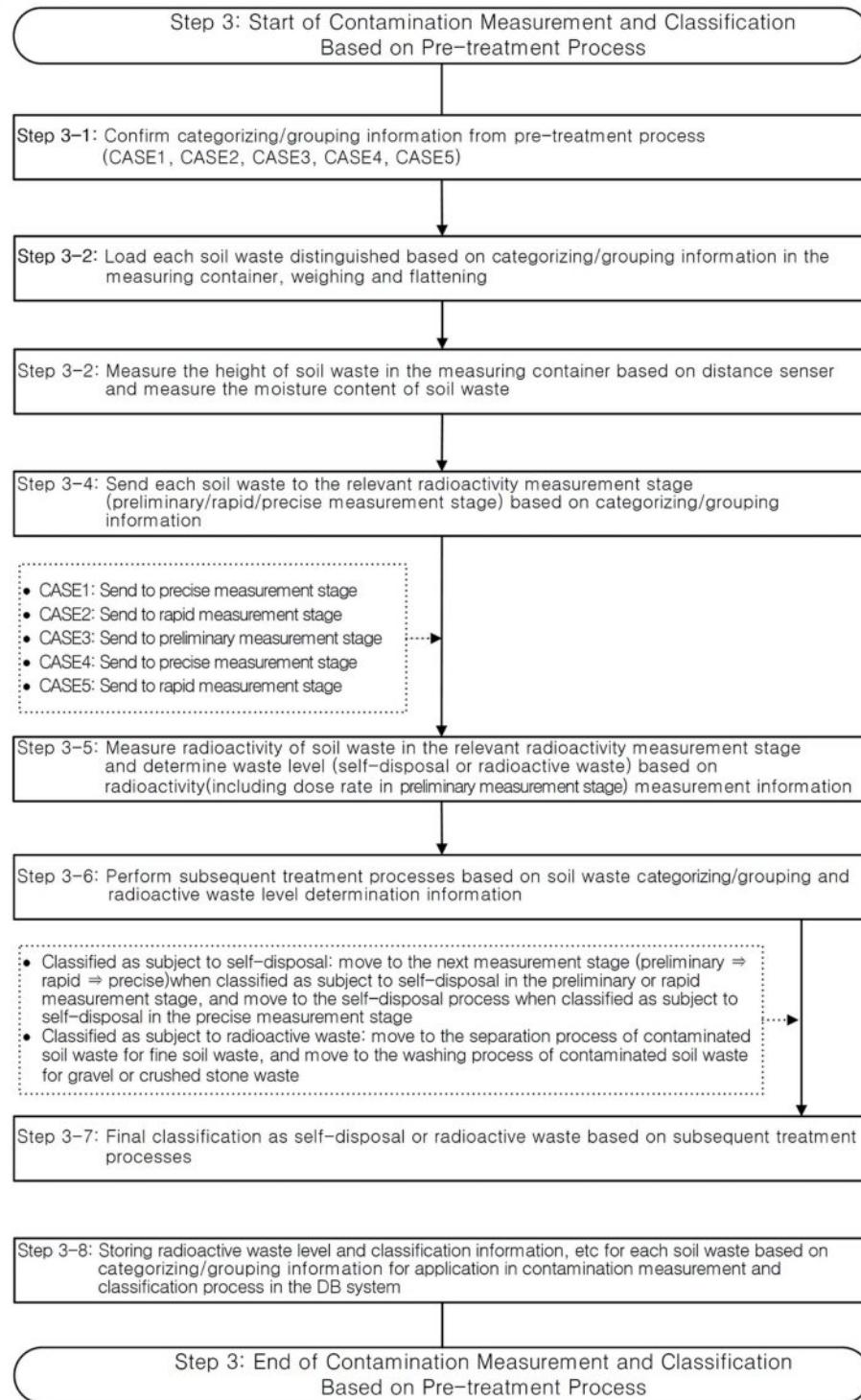


Fig. 8. Contamination measurement and classification based on pre-treatment process.

오염 및 잠재적 오염 예비 층으로 구분하여 비오염 예비 층은 CASE4로 분류 및 그룹화하고, 오염 및 잠재적 오염 예비 층은 CASE5로 분류 및 그룹화한다. Fig. 7과 같이 파쇄석 폐기물의 경우는 잡석 폐기물과 동일하게 비오염 예비 구획과 오염 및 잠재적 오염 예비 구획으로 구분하여 비오염 예비 구획은 CASE4로 분류 및 그룹화하고, 오염 및 잠재적 오염 예비 구획의 경우는 다시 비오염 예비 층과 오염 및 잠재적 오염 예비 층으로 구분하여 비오염 예비 층은 CASE4로 분류 및 그룹화하고, 오염 및 잠재적 오염 예비 층은 CASE5로 분류 및 그룹화한다. 이와 같은 분류 및 그룹화 기준으로 미세토양 폐기물 중 CASE1으로 분류 및 그룹화된 폐기물은 오염 측정 및 분류 공정 내 총 3단계의 오염 측정 공정(1단계 사전측정, 2단계 신속 측정 및 3단계 정밀측정) 내 정밀측정 단계로 이송하고, CASE2는 신속측정 단계, CASE3은 사전측정 단계로 이송한다. 잡석 폐기물과 파쇄석 폐기물 중 CASE4로 분류 및 그룹화된 폐기물은 정밀측정 단계로 이송하고, CASE5는 신속측정 단계로 이송한다. 이와 같이 토양폐기물에 대한 오염 예비분류 특성 및 입도분류 특성 기반으로 분류 및 그룹화하고, 각 분류 및 그룹화 정보 기반으로 4.3절에 상세하기 기술되어 있는 총 3단계의 오염 측정 공정(1단계 사전측정, 2단계 신속측정 및 3단계 정밀측정)을 구성하는 각 단계의 오염 측정 공정의 가능 및 목적 등을 고려한 선택적 및 차별적 오염 측정 단계 적용과 Fig. 3에 기술되어 있는 오염 토양 분리 공정(상세한 내용은 4.4절에 기술)이 적용되는 미세토양 폐기물과 오염 토양 분리 공정이 적용되지 않는 잡석 및 파쇄석 폐기물을 구분하여 분류 및 그룹화 함으로써 연속된 후속 공정인 오염 측정 및 분류 공정의 처리속도와 업무 효율성을 향상시킬 수 있다.

4.3. 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 3에 제시된 3단계 처리 공정인 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정은 Fig. 8과 같이 전처리 공정 기반의 분류 및 그룹화 정보를 확인(3-1단계)하고, 이러한 분류 및 그룹화 정보 기반으로 구분되는 각 토양폐기물을 측정용기 내 장입하여 측정용기 내 토양폐기물에 대한 무게 측정과 측정용기 내 토양폐기물에 대한 평탄화 작업을 수행(3-2단계)한 후, 거리센스를 활용하여 측정용기 내 토양폐기물의 높이를 측정하고, 함수율 측정장치를 활용하여 측정용기 내 토양폐기물의 함수율을 측정(3-3단계)한다. 여기서 토양폐기물에 대한 함수율이 일정 기준치 이상인 경우에는 방사선 감쇠, 부정확한 무게(g)

평가 등을 초래하여 토양폐기물의 방사능 농도(Bq/g) 측정결과의 정확성과 신뢰성을 저하시키므로(Dhingra, 2023), 추가적인 건조 공정이 수행될 수 있도록 하고, 최종적으로 토양폐기물에 대한 방사능 농도(Bq/g)에 대한 측정정보 제공 시, 해당 토양폐기물에 대한 함수율 측정정보도 함께 제공하여 방사능 농도(Bq/g) 측정정보의 정확성과 신뢰성이 보장될 수 있도록 한다. 이후의 연속된 공정으로써 토양 폐기물에 대한 분류 및 그룹화 정보 기반으로 총 3단계의 오염 측정 공정 중 해당 오염 측정 공정 단계(분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE1인 경우 정밀측정 단계, CASE2는 신속측정 단계, CASE3는 사전측정 단계, CASE4는 정밀측정 단계, CASE5는 신속측정 단계)로 이송(3-4단계)하고, 해당 오염 측정 공정 단계로 이송된 토양폐기물에 대한 방사능(선)을 측정하여 토양폐기물에 대한 방사성폐기물 준위(자체처분 및 방사성폐기물)를 판별(3-5단계)한다. 이후의 연속된 공정으로써 이러한 토양폐기물에 대한 방사성폐기물 준위에 대한 판별 결과를 기반으로 연속된 후속 처리공정을 수행(3-6단계)하고, 이를 기반으로 자체처분과 방사성폐기물로 최종 분류(3-7단계)하고, 각 토양폐기물에 대한 방사성폐기물 준위 및 분류 정보 등을 방사성 오염 토양폐기물 분류, 처리 및 처분을 위한 통합관리 운영프로그램을 구성하는 데이터베이스(DB) 시스템 내에 저장(3-8단계)하는 공정으로 구성되어 있다.

상기한 총 3단계의 오염 측정 공정은 1차 사전측정 단계, 2차 신속측정 단계 및 3차 정밀측정 단계로 구성되며, 사전측정 단계는 미세토양 폐기물을 배경방사선 준위의 2-3배 기준(필요시 기준) 변경: 자체처분 및 방사성폐기물로 최종 분류된 미세토양 폐기물에 대한 오염도(CPM 및 $\mu\text{Sv}/\text{hr}$) 측정값을 참조하여 결정)으로 자체처분 대상과 방사성폐기물로 사전 분류하여 미세토양 폐기물이 방사성폐기물로 판별되는 경우에 오염 토양 분리 공정으로 곧바로 이송하기 위한 목적으로 사용되는 공정으로써, ZnS 및 Plastic Scintillator 검출센서 등을 활용한 α 입자, β 입자 및 γ 선에 대한 표면오염도를 측정하는 장치와 Sodium Iodide Scintillator (NaI(Tl)) 검출센스 등을 활용한 γ 선에 대한 선량률을 측정하는 장치로 구성될 수 있다. 신속측정 단계는 최소방사능검출한도가 0.1 Bq/g 이하인 Sodium Iodide Scintillator (NaI(Tl)) 검출센스 등을 활용하여 미세토양 폐기물, 잡석 및 파쇄석 폐기물에 대한 방사능 농도(Bq/g)를 측정하고 이를 기반으로 자체처분 대상과 방사성폐기물 대상으로 신속 분류하기 위한 목적으로 사용되는 공정이며, 정밀측정 단계는 최소방사능검출한도가 0.01 Bq/g 이하인 High Purity Germanium (HPGe) 검출센스 등을

활용하여 자체처분 대상으로 분류된 미세토양 폐기물, 잡석 및 파쇄석 폐기물에 대한 방사능 농도(Bq/g)를 정밀 측정하여 자체처분 대상여부를 확인 및 검증하기 위한 목적으로 사용되는 공정이다. 총 3단계로 구분되는 이러한

오염 측정 공정의 구성은 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정의 처리속도를 증가시켜 업무 효율성을 향상 시킬 수 있다.

Fig. 9는 해당 오염 측정 공정 단계 내 토양폐기물에 대한 방사능 측정 및 측정정보 기반 폐기물 준위(자체처분 및

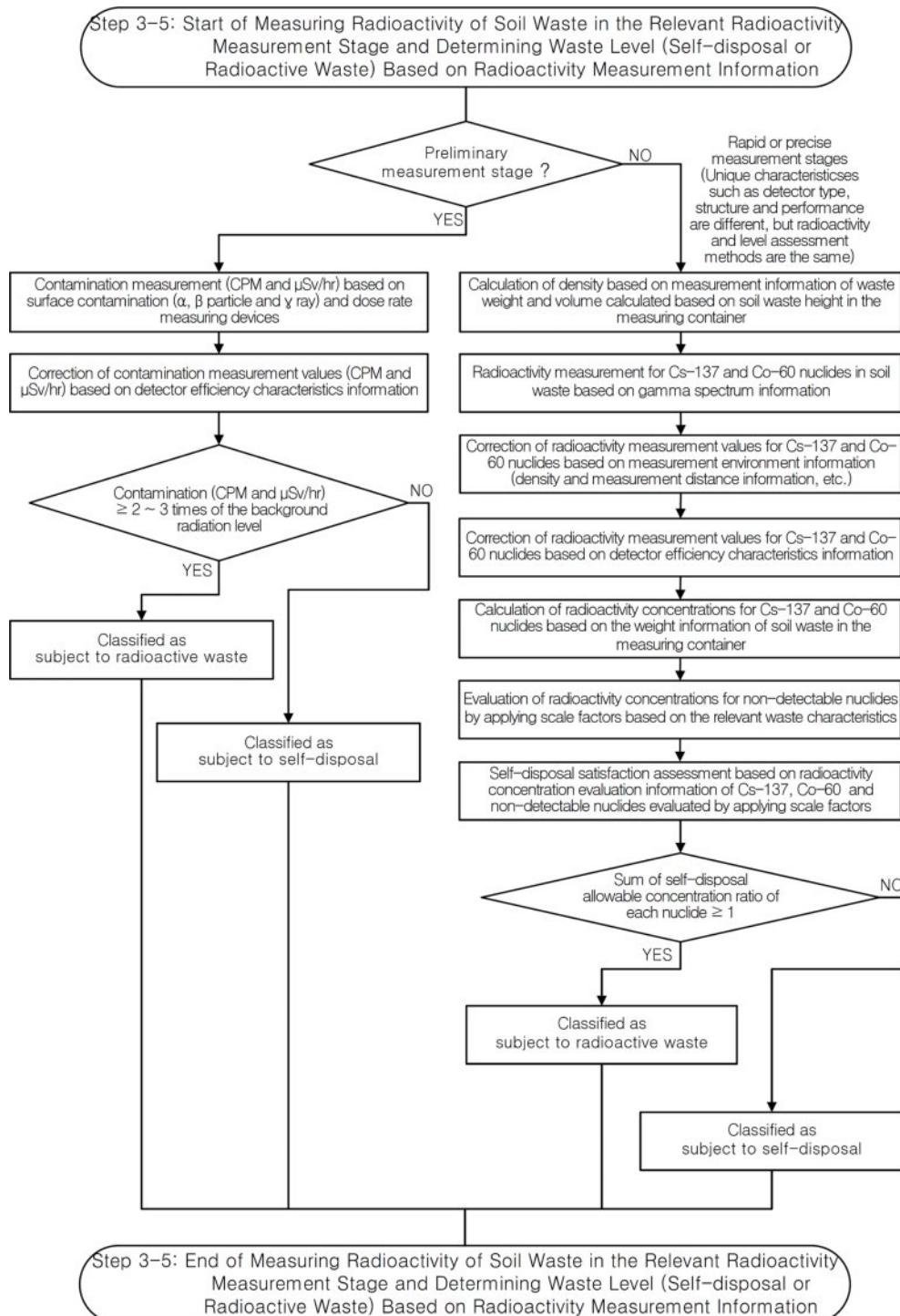


Fig. 9. Process for measuring radioactivity of soil waste in the relevant radioactivity measurement stage and determining waste level (self-disposal or radioactive waste) based on radioactivity measurement information.

방사성폐기물) 판별 공정(3-5단계)에 대한 상세 순서도를 나타내고 있다. Fig. 9와 같이 사전측정 단계로 이송된 토양폐기물(미세토양 폐기물)의 경우는 표면오염도(α 입자, β 입자 및 γ 선) 및 선량률(γ 선) 측정장치를 기반으로 오염도(CPM 및 $\mu\text{Sv}/\text{hr}$)를 측정하고, 각 검출기의 효율특성 정보 기반으로 오염도(CPM 및 $\mu\text{Sv}/\text{hr}$) 측정값을 보정하여 오염도가 배경방사선 준위의 2-3배 이상인 경우에는 방사성폐기물로 사전 판별하여 오염 토양 분리 공정으로 이송하고, 배경방사선 준위의 2-3배 미만인 경우에는 다음 단계의 방사능 측정공정인 신속측정 공정으로 이송한다. 신속측정 또는 정밀측정 단계로 이송된 토양폐기물(미세토양, 잡석 및 파쇄석 폐기물)의 경우는 측정용기 내 토양폐기물의 무게(g) 정보와 측정용기 내 높이 정보 기반으로 산출되는 부피(cm^3) 정보를 활용하여 밀도(g/cm^3)를 산출하고, 감마 스펙트럼 정보 기반으로 토양폐기물에 대한 Cs-137 및 Co-60 핵종의 방사능(Bq)을 측정하고, 측정환경 정보(밀도 및 측정거리 정보 등) 기반으로 Cs-137 및 Co-60 핵종의 방사능 측정값(Bq)을 보정하고, 추가적으로 각 검출기의 효율특성 정보 기반으로 Cs-137 및 Co-60

핵종에 대한 방사능 측정값(Bq)을 보정한다. 이 후의 연속된 공정으로써 Cs-137 및 Co-60 핵종에 대한 방사능 보정값을 기반으로 측정용기 내 토양폐기물의 무게 측정 정보(g)를 활용하여 각 핵종의 방사능 농도(Bq/g)를 산출한다. Cs-137 및 Co-60 핵종에 대한 각 방사능 농도(Bq/g)가 산출되면 이를 기반으로 토양폐기물에 대한 특성조사 기반으로 도출된 척도인자 정보를 활용하여 난검출 핵종(저 에너지 감마선, 알파 및 베타선 방출 핵종)에 대한 방사능 농도(Bq/g) 평가하고, Cs-137 및 Co-60 핵종과 척도 인자를 적용하여 평가되는 난검출 핵종들의 방사능 농도(Bq/g) 평가정보 기반으로 국내 『방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정』(NSSC, 2023)에 따른 자체처분 민족성을 평가하여 각 핵종의 자체처분 허용농도 비율의 합이 1 이상인 경우에는 방사성폐기물 대상으로 판별하고, 1 미만인 경우에는 자체처분 대상으로 판별한다.

Fig. 10은 토양폐기물 분류 및 그룹화와 방사성폐기물 준위 판별 정보 기반 연속된 후속 처리공정(3-6단계)에 대한 상세 순서도를 나타내고 있다. Fig. 10과 같이 자체처분 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐

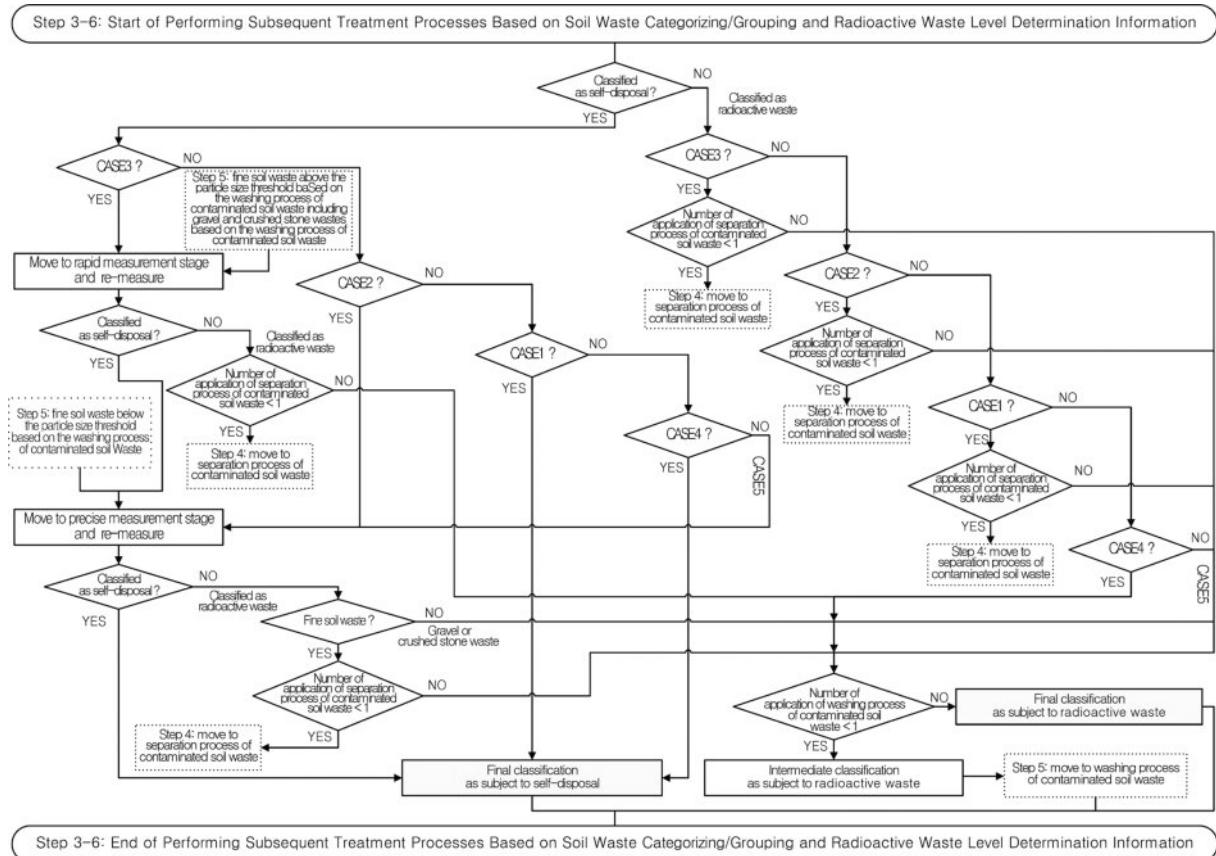


Fig. 10. Process for performing subsequent treatment processes based on soil waste categorizing/grouping and radioactive waste level determination information.

기물이 CASE3인 경우에는 신속측정 단계로 이송하여 재측정하고, 신속측정 단계에서 재측정한 결과 자체처분 대상으로 분류되는 경우에는 정밀측정 단계로 이송하여 재측정하고, 정밀측정 단계에서도 자체처분 대상으로 분류되는 경우에는 자체처분 대상으로 최종 분류한다. 신속측정 단계 또는 정밀측정 단계에서 방사성폐기물로 분류되는 경우에는 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 오염 토양 분리 공정으로 이송하고, 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 이상이고 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 방사성폐기물로 중간 분류하고, 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 이상인 경우에는 방사성폐기물로 최종 분류한다. 자체처분 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE2인 경우에는 정밀측정 단계로 이송하여 재측정하고, 정밀측정 단계에서 재측정한 결과 자체처분 대상으로 분류되는 경우에는 자체처분 대상으로 최종 분류하고, 방사성폐기물로 분류되는 경우에는 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 오염 토양 분리 공정으로 이송하고, 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 이상이고 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 방사성폐기물로 중간 분류하고, 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 이상인 경우에는 방사성폐기물로 최종 분류한다. 자체처분 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE1인 경우에는 자체처분 대상으로 최종 분류한다. 자체처분 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE4인 경우에는 자체처분 대상으로 최종 분류하고, 자체처분 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE5인 경우에는 정밀측정 단계로 이송하여 재측정하고, 정밀측정 단계에서 재측정 결과 자체처분 대상으로 분류되는 경우에는 자체처분 대상으로 최종 분류하고, 방사성폐기물로 분류되는 경우에는 오염 토양 분리 공정은 적용하지 않으며, 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 방사성폐기물로 중간 분류하고, 오염 토양 폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 이상인 경우에는 방사성폐기물로 최종 분류한다. Fig. 10과 같이 방사성폐기물 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE3, CASE2, CASE1인 경우에는 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 오염 토양 분리 공정으로 이송하고, 오염 토양 분리 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 방사성폐기물로 중간 분류하고,

오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 이상인 경우에는 방사성폐기물로 최종 분류한다. 방사성폐기물 대상으로 판별된 경우이고 분류 및 그룹화된 토양폐기물이 CASE4, CASE5인 경우에는 오염 토양 분리 공정은 적용하지 않으며, 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 미만(미수행)인 경우에는 방사성폐기물로 중간 분류하고, 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수가 1 이상인 경우에는 방사성폐기물로 최종 분류한다.

상기의 내용과 같이 오염 토양 분리 공정은 2장에 기술된 토양폐기물의 입도크기별 방사성 오염 특성에 근거하여 CASE3, CASE2, CASE1의 미세토양 폐기물을 대상으로 수행되는 공정이고, 오염 토양폐기물 세척 공정은 방사성 폐기물로 중간 분류된 모든 토양폐기물(미세토양 폐기물, 잡석 폐기물 및 파쇄석 폐기물)을 대상으로 수행되는 공정이다. 4.4절 및 4.5절에서 보다 상세하게 기술되는 건식 방식의 오염 토양 분리 공정과 습식 방식의 오염 토양폐기물 세척 공정은 각 공정의 특성을 고려하여 토양폐기물의 특성 및 방사성 오염 준위에 따라 선택적으로 적용되는 공정으로써 업무 효율성을 향상시키고 최종적으로 처분되는 방사성폐기물의 발생량을 저감을 시킬 수 있는 공정이다. Fig. 10의 토양폐기물 분류 및 그룹화와 방사성폐기물 준위 판별 정보 기반 연속된 후속 처리공정(3-6단계)에서 오염 토양 분리 공정 적용 회수와 오염 토양폐기물 세척 공정 적용 회수는 각 처리 공정의 효율성을 고려하여 모두 1회만 적용하는 것으로 기술되어 있지만, 토양폐기물의 특성에 따른 각 처리 공정의 효율성을 고려하여 필요시 2회 이상의 처리 공정으로 조절될 수 있다.

4.4. 오염 측정 및 분류 공정 기반 오염 토양 분리 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 3에 제시된 4단계 처리 공정인 오염 측정 및 분류 공정 기반 오염 토양 분리 공정은 Fig. 11과 같은 상세한 세부 수행공정으로 구성될 수 있다. 오염 토양 분리 공정은 2장에 기술된 토양폐기물의 입도크기별 방사성 오염 특성을 고려하여 건식 방식의 입도크기 분류 공정으로써 방사능 오염도가 높은 실트와 점토를 포함하는 미세토양을 입도크기에 따른 방사성 오염 특성을 기반으로 일정 입도 크기 기준으로 오염 토양과 비오염 토양으로 분리하는 공정이다. 따라서 본 공정은 미세토양 폐기물만을 대상으로 수행되며, 잡석 폐기물과 파쇄석 폐기물은 효율성이 떨어지므로 적용되지 않는 공정이다. 오염 토양 분리 공정에서 적용되는 입도분류를 위한 입도 기준크기는 0.2 mm – 0.5 mm 범위에서 토양폐기물의 오염 특성과 적용되는

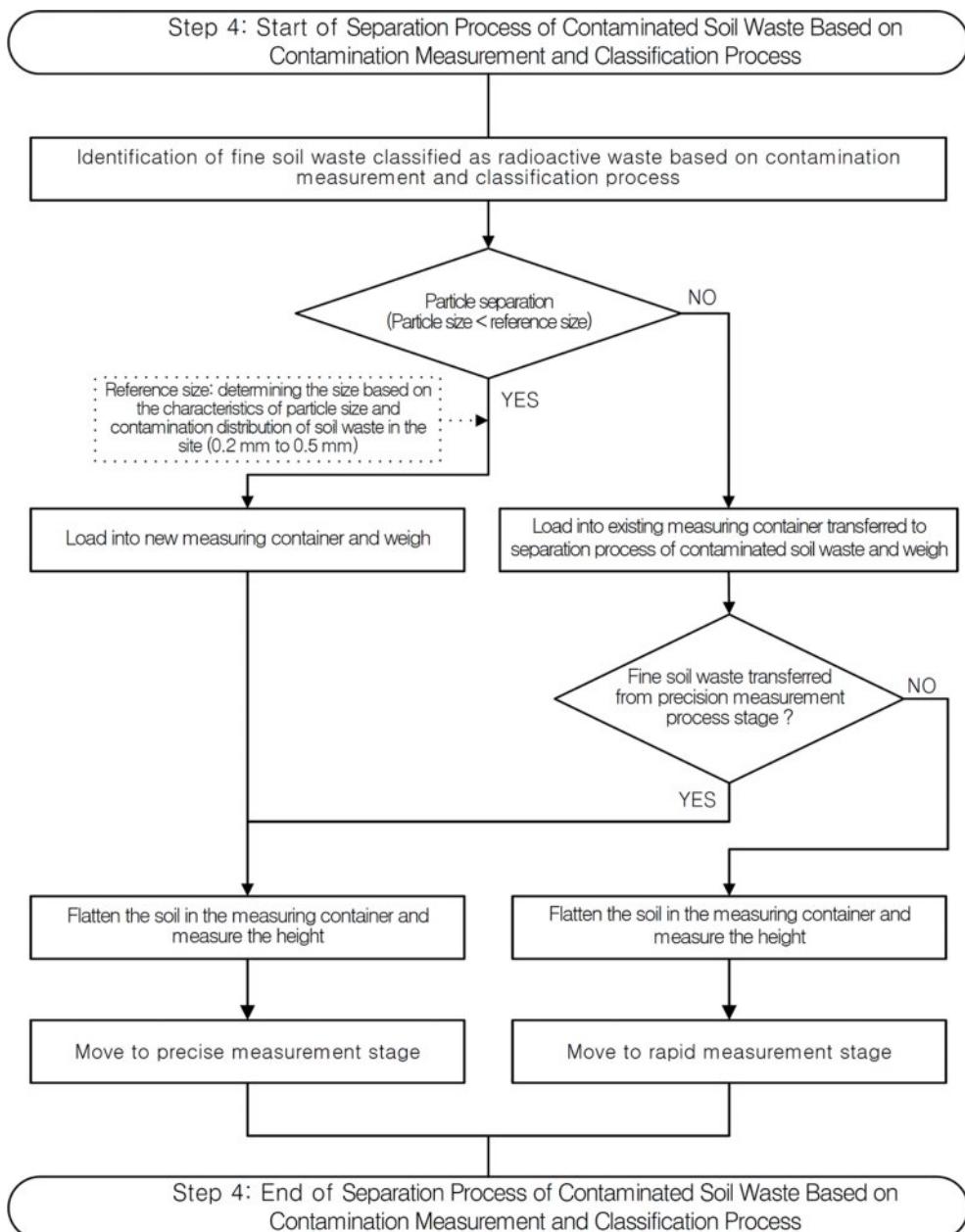


Fig. 11. Contaminated soil separation process based on contamination measurement and classification process.

건식 방식의 입도분류 기술 및 특성을 기반으로 결정될 수 있는 크기이다.

Fig. 11과 같이 본 공정은 먼저 오염 측정 및 분리 공정 기반으로 방사성폐기물로 판별된 미세토양 폐기물을 확인하고, 미세토양 폐기물에 대한 입도분류를 수행하여 입도 크기가 기준크기 미만으로 분리된 미세토양 폐기물은 신규 측정용기에 장입하여 무게측정, 평탄화 및 측정용기 내 높이 측정을 수행하여 Fig 3의 3단계인 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정 내 정밀측정 공정으로

이송하고, 입도크기가 기준크기 이상으로 분리된 미세토양 폐기물은 오염 토양 분리 공정으로 이송 시 사용된 기존 측정용기에 장입하고 무게를 측정하며, 정밀측정 공정으로부터 오염 토양 분리 공정으로 이송된 미세토양 폐기물의 경우에는 측정용기 내 토양 평탄화 및 측정용기 내 높이 측정 후 정밀측정 공정으로 이송하고, 사전측정 또는 신속측정 공정으로부터 오염 토양 분리 공정으로 이송된 미세토양 폐기물의 경우에는 측정용기 내 토양 평탄화 및 측정용기 내 높이 측정 후 신속측정 공정으로 이송한다.

4.5. 오염 측정 및 분류 기반 오염 토양폐기물 세척 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 3에 제시된 5단계 처리 공정인 오염 측정

및 분류 공정 기반 오염 토양폐기물 세척 공정은 Fig. 12와 같은 상세한 세부 수행공정으로 구성될 수 있다. 오염 토양폐기물 세척 공정은 2장에 기술된 토양폐기물의 입도 크기별 방사성 오염 특성을 고려한 습식 방식의 입도크기

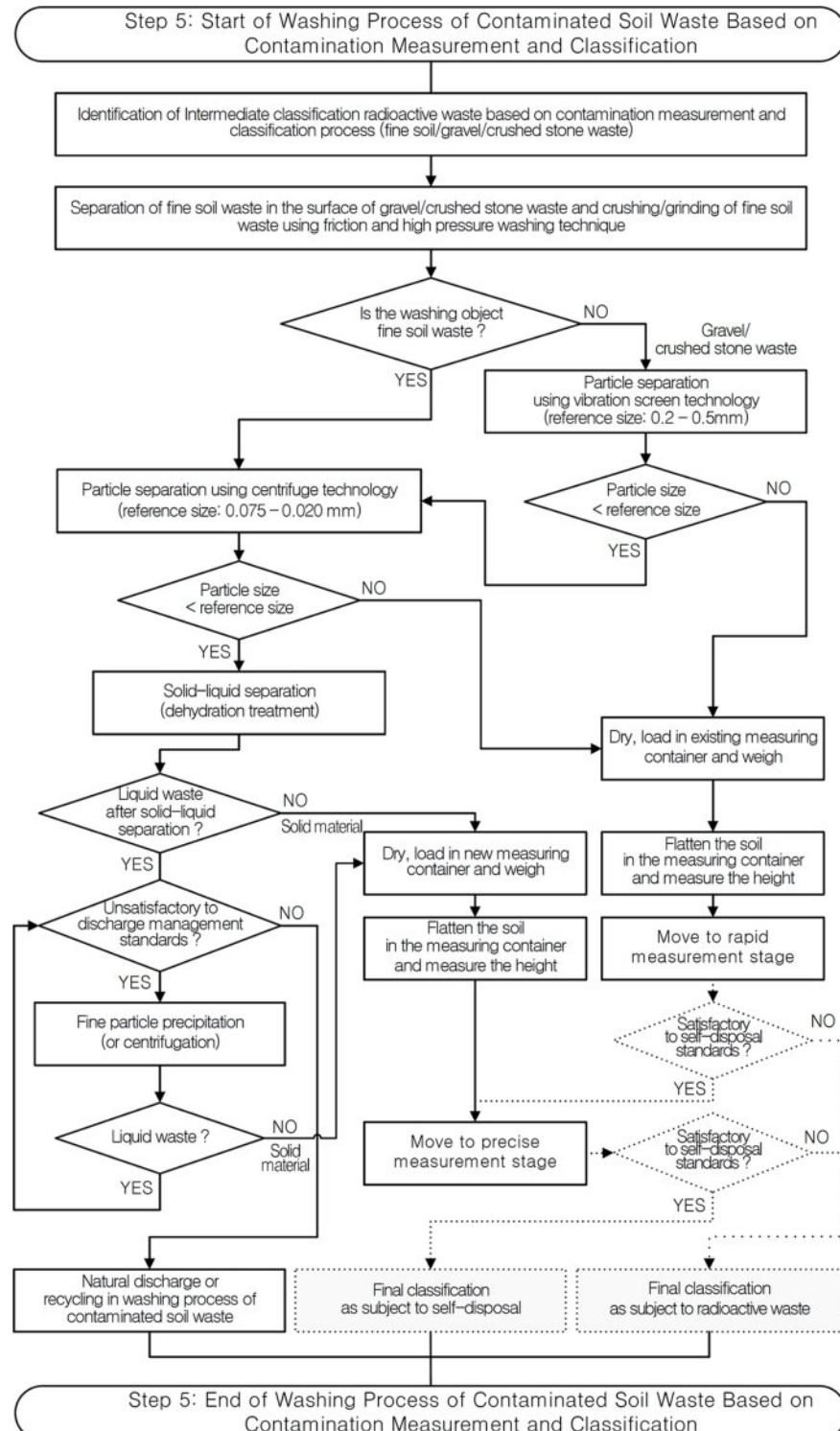


Fig. 12. Contaminated soil washing process based on contamination measurement and classification.

분류 공정으로써 4.4절의 건식 방식에 의한 오염 토양 분리 공정을 통해서 입도분류가 힘든 실트 및 점토를 포함하는 토양의 입도크기 기준(0.075 mm 이하)으로 미세토양을 입도분류하는 공정이며, 추가적으로 잡석 폐기물과 파쇄석 폐기물에 물리적으로 고착화되어 있는 미세토양을 분리하여 실트 및 점토를 포함하는 토양의 입도크기 기준(0.075 mm 이하)으로 미세토양을 다시 입도분류하는 공정이다.

Fig. 12와 같이 본 공정은 먼저 오염 측정 및 분류 공정 기반으로 중간 분류된 방사성폐기물을 확인하고, 마찰 및 고압 세척 기술 기반으로 잡석 및 파쇄석 폐기물은 표면 내 미세토양을 분리하고, 미세토양 토양폐기물은 더 작은 입자크기 단위로 파쇄/분쇄한다. 오염 토양폐기물 세척 공정을 적용하는 대상 폐기물이 미세토양 폐기물인 경우에

는 연속된 후속 처리공정으로서 원심분리 기술 기반으로 입도분류를 수행하여 입도크기가 기준크기 미만인 미세토양 폐기물은 고액분리(탈수처리) 공정을 통해서 고체물과 폐액으로 분리한다. 원심분리 기술 기반의 입도분류를 위한 입도 기준크기는 $0.075\text{ mm} - 0.020\text{ mm}$ 범위에서 토양폐기물 내 오염분포 특성과 적용되는 원심분리 기술 및 특성을 고려하여 기준크기를 결정할 수 있다. 고액분리(탈수처리) 공정을 통해서 발생되는 폐액은 국내 『방사선 방호 등에 관한 기준』(NSSC, 2025)에 따른 배출관리기준 만족 여부를 확인하여 불만족 시 미세입자 침전(또는 원심분리) 공정을 통해서 폐액 내 미세입자 형태의 고체물을 추가적으로 분리하여 최종적으로 배출관리기준을 만족시킬 수 있도록 하여 자연방류 또는 세척공정에 재활

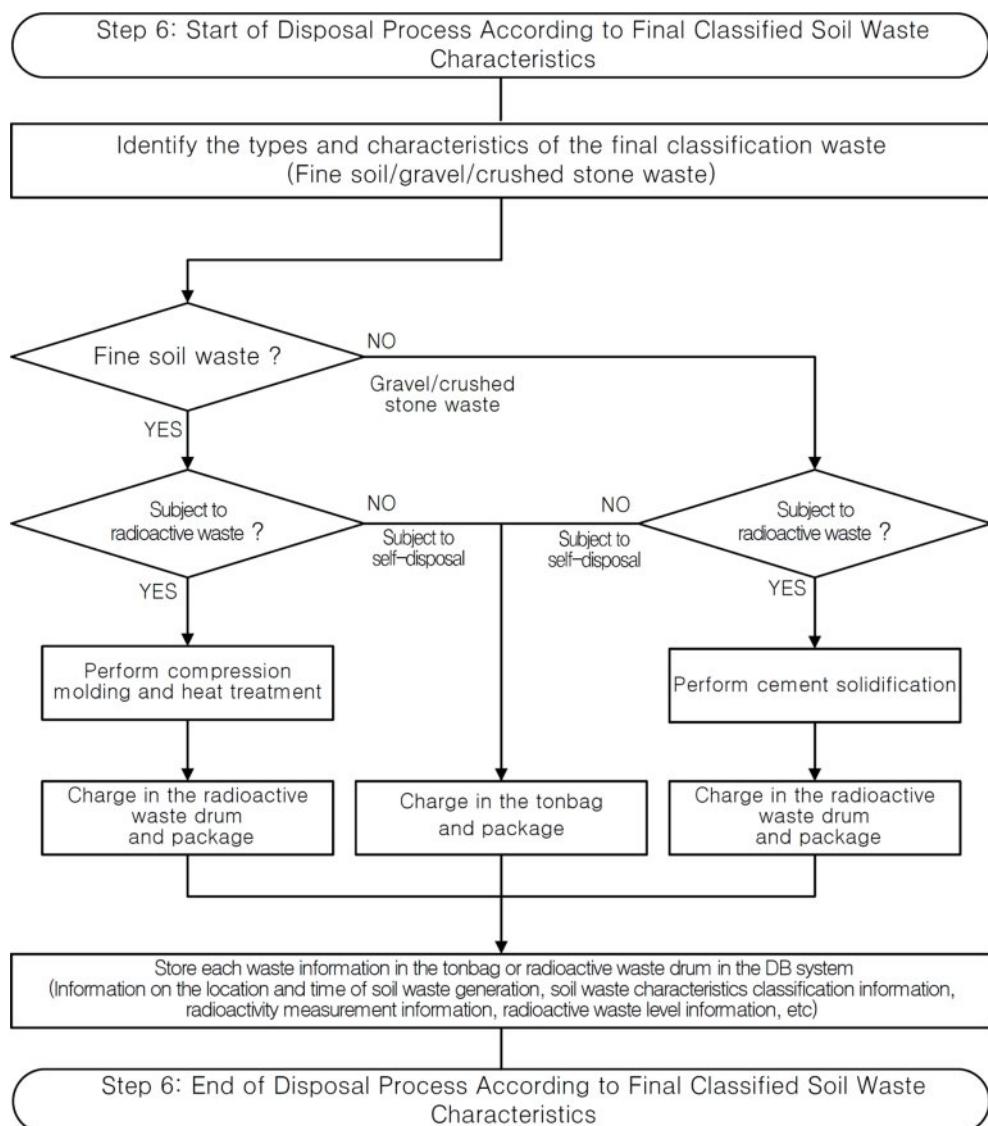


Fig. 13. Disposal process according to final classified soil waste characteristics.

용될 수 있도록 하고, 고액분리(탈수처리) 공정을 통해 분리된 고체물과 미세입자 침전(또는 원심분리) 공정을 통해 분리된 미세입자 형태의 고체물은 건조 후 신규 측정 용기 내 장입하여 무게 측정을 수행하고 측정용기 내 토양 평탄화 및 측정용기 내 높이 측정 이후 Fig. 3의 3단계인 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정 내 정밀측정 공정으로 이송한다. 원심분리 기술 기반으로 입도분류를 수행하여 입도크기가 기준크기 이상인 미세토양 폐기물은 건조 후 기존 측정용기에 장입하여 무게 측정 후 측정용기 내 토양 평탄화 및 높이 측정 후 신속측정 공정으로 이송한다. 오염 토양폐기물 세척 공정을 적용하는 대상 폐기물이 잡석 또는 파쇄석 폐기물인 경우에는 진동 스크린 기술 기반의 입도분류를 수행하여 입자크기가 기준크기 미만으로써 잡석 또는 파쇄석 폐기물 표면으로부터 분리된 미세토양 폐기물은 상기한 미세토양 폐기물에 대해서 적용된 연속된 후속 처리 공정(원심분리 기술 기반 입도분류, 고액분리(탈수처리), 미세입자 침전(또는 원심분리) 공정)을 동일하게 수행하고, 입자크기가 기준크기 이상인 잡석 또는 파쇄석 폐기물은 건조 후 기준 측정용기 내 장입하여 무게 측정 후 측정용기 내 토양 평탄화 및 측정용기 내 높이 측정 후 신속측정 공정으로 이송한다. 진동스크린 기술 기반의 입도분류를 위한 입도 기준크기는 건식 방식의 오염 토양 분리 공정에 적용된 입도크기 기준과 동일하게 0.2 mm – 0.5 mm 범위에서 토양폐기물의 오염 분포 특성과 적용되는 진동스크린 기술 및 특성을 고려하여 기준크기를 결정할 수 있다.

4.6. 최종 분류 토양폐기물 특성에 따른 처분 공정

방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적인 분류, 처리 및 처분을 위한 Fig. 3에 제시된 6단계 처리 공정인 최종 분류 토양폐기물 특성에 따른 처분 공정은 Fig. 13과 같이 Fig. 3의 3단계인 전처리 공정 기반 토양폐기물 오염 측정 및 분류 공정을 통해서 최종적으로 분류된 토양폐기물의 종류 및 특성을 확인하고, 미세토양 폐기물의 경우이고 방사성폐기물로 최종 분류된 경우는 국내 『중·저준위 방사성폐기물 인도규정』(NSSC, 2024)에 따른 방사성폐기물 처분 규정에 적합하도록 고정화/고형화를 위한 압축 성형 및 열처리 공정을 수행하여 방사성폐기물 드럼 내 장입하여 포장하고, 자체처분 대상 폐기물로 최종 분류된 경우는 톤백 내 장입하여 포장한다. 잡석 및 파쇄석 폐기물의 경우이고 방사성폐기물로 최종 분류된 경우는 국내 방사성폐기물 처분 규정에 적합하도록 고정화/고형화를 위한 시멘트 고화 공정을 수행하여 방사성폐기물 드럼 내

장입하여 포장하고, 자체처분 대상 폐기물로 최종 분류된 경우는 톤백 내 장입하여 포장하며, 마지막으로 톤백 및 방사성폐기물 드럼 내 각 토양폐기물에 대한 정보(발생지점 및 발생일시 정보, 토양폐기물 특성분류 정보, 방사능 측정정보, 방사성폐기물 준위 정보 등)를 방사성 오염 토양폐기물 분류, 처리 및 처분을 위한 통합관리 운영프로그램을 구성하는 데이터베이스(DB) 시스템 내에 저장하고 방사성폐기물에 대한 처분장 인도·인수 및 자체처분을 위한 규제기관 인허가 신청 시 관련 정보가 활용될 수 있도록 한다.

4. 결 론

본 연구는 원자력관계시설 운영 또는 해체 시 시설 부지 내 방사성물질 누출 등에 의해 발생된 방사성 오염 토양 폐기물에 대한 효율적이면서 안전하고 정확한 분류, 처리 및 처분을 위한 방법에 관한 것이다.

본 연구를 통해서 개발된 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 방법은 원자력관계시설 부지 내 방사성 오염 토양폐기물에 대한 사전 오염 특성조사를 기반으로 오염, 잠재적 오염 및 비오염 예비 구획으로 1차 분류하고, 1차 분류된 오염 및 잠재적 오염 예비 구획에 대해서 오염 특성조사를 기반으로 토양 깊이(층)에 따라 다시 오염, 잠재적 오염 및 비오염 예비 층으로 2차 분류(비오염 예비 구획은 모두 비오염 예비 층으로 분류)한다. 이러한 부지 내 방사성 오염 토양폐기물에 대한 예비분류 공정 기반으로 분류된 각 토양폐기물을 대상으로 입도크기에 따라 미세토양 폐기물, 잡석 폐기물과 파쇄석 폐기물로 3차 분류하여 토양폐기물의 오염 예비분류 특성과 입도분류 특성에 따른 총 3단계로 구분되는 오염 측정 공정을 적용하여 자체처분 대상과 방사성폐기물 대상으로 1차 분류한다. 방사성폐기물 대상으로 1차 분류된 미세토양 폐기물에 대해서는 건식 방식의 오염 토양 분리 공정을 적용하여 분리된 오염 토양과 비오염 토양을 대상으로 오염 측정 공정을 다시 수행하여 자체처분 대상과 방사성폐기물 대상으로 2차 분류한다. 방사성폐기물 대상으로 2차 분류된 미세토양 폐기물과 1차 분류된 잡석 폐기물 및 파쇄석 폐기물은 습식 방식의 오염 토양폐기물 세척 기술을 적용하여 분리된 오염 토양과 비오염 토양을 대상으로 오염 측정 공정을 다시 수행하여 최종적으로 자체처분 대상과 방사성폐기물 대상으로 3차 분류한다. 최종 자체처분 대상으로 분류된 토양폐기물은 톤백 내에 장입하고 포장하고, 최종 방사성 폐기물 대상으로 분류된 토양폐기물 중 미세토양 폐기물은

분산성으로써 국내 방사성폐기물 처분 규정에 적합하도록 고정화/고형화를 위한 압축 성형 및 열처리 공정을 적용하여 방사성폐기물 드럼 내에 장입 및 포장하며, 잡석 및 파쇄석 폐기물은 시멘트 고화 공정을 적용하여 방사성폐기물 드럼 내에 장입 및 포장한다. 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정 과정 중에 발생되는 토양폐기물 관련 정보는 방사성 오염 토양폐기물 분류, 처리 및 처분을 위한 통합관리 운영프로그램을 구성하는 데이터베이스(DB) 시스템 내에 저장하여 방사성 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정에 대한 이력관리가 가능하도록 하고, 방사성폐기물에 대한 처분장 인도·인수 및 자체처분을 위한 규제기관 인허가 신청 시 관련 정보가 활용될 수 있도록 한다.

본 연구는 원자력관계시설 부지 내 방사성 오염 토양폐기물을 오염, 잠재적 오염 및 비오염 예비 구획 및 예비 충으로 예비 분류하여 토양폐기물을 오염과 비오염 예상 토양폐기물로 사전에 분류함으로써 방사성 오염 토양폐기물 처리 공정 과정 중에 발생될 수 있는 오염 토양폐기물과 비오염 토양폐기물과의 혼합 등에 의한 오염 확산을 방지할 수 있도록 하고, 방사성폐기물 발생량을 줄일 수 있도록 한다. 본 연구에서 적용되는 방사성 오염 핵종의 토양폐기물 내 분포 특성에 근거한 입도크기별 세부 분류는 방사능 측정대상물의 입자크기 균일성으로 방사능 측정 결과의 정확성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 하며, 오염 예비분류 특성 및 입도분류 특성에 따라 총 3단계로 구분되는 오염 측정 공정을 차별적으로 적용함으로써 오염 측정 및 분류 공정의 처리속도 및 업무 처리 효율성을 향상시킬 수 있도록 한다. 또한 오염 측정 공정을 통한 방사성폐기물 준위 판별 시 고에너지 감마선을 방출하는 Co-60 및 Cs-137 핵종에 대한 방사능 측정정보를 기반으로 토양폐기물에 대한 척도인자 정보를 활용하여 난검출 핵종들에 대한 방사능 정보를 평가하고, 이러한 각 방사성핵종의 방사능 정보를 기반으로 방사성폐기물 준위를 판별함으로서 방사성폐기물 준위 판별결과의 정확성과 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 한다. 본 연구는 오염 측정 및 분류 공정을 통해서 방사성폐기물로 분류되는 토양폐기물은 건식 방식의 오염 토양 분리 공정과 습식 방식의 오염 토양폐기물 세척 공정을 적용하여 방사성폐기물 발생량을 추가적으로 줄일 수 있고, 방사성폐기물로 최종 분류된 토양폐기물을 국내 방사성폐기물 처분 규정에 부합하도록 압축 성형 및 열처리 기술 기반 또는 시멘트 고화 기술 기반으로 고정화/고형화함으로써 방사성폐기물에 대한 최종 처분이 가능하도록 하도록 하며, 본 연구를 통해

서 개발된 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 공정은 자동화가 가능하여 작업자의 안전성과 업무 효율성을 향상시킬 수 있도록 한다.

결론적으로 본 연구를 통해서 개발된 방사성 오염 토양폐기물에 대한 분류, 처리 및 처분 방법은 원자력관계시설 운영 또는 해체 시 시설 부지 내 방사성물질 누출 등에 의해 발생된 방사성 오염 토양폐기물에 대한 효율적이면서 안전하고 정확한 분류, 처리 및 처분을 위한 방법을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 “원전해체 경쟁력강화 기술개발사업(RS-2023-00236726)”과 중소벤처기업부의 “중소기업기술혁신개발(R&D)사업(RS-2024-00444231)”으로부터 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Abumaizar, R.J. and Smith, E.H., 1999, Heavy metal contaminants removal by soil washing, *J. Hazard. Mater.*, **70**(1-2), 71-86, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00149-1)
- Chistik, O.V., Rudaya, S.M., and Matveenko, I.I., 2001, Distribution of Cs-137 on ‘Grain-size’ fractions in soil profiles at the 30 km restricted zone around chernobyl NPP, *Proc. III Int. Workshop Actual Probl. Dosimetry*, International A. Sakharov Environmental University, Minsk, Belarus, p. 178-180.
- Choppin, G.R. and Allard, B., 1985, Complexes of actinides with naturally occurring organic compounds in: Freeman, A. J. and Keller, C., *Handb. Phys. Chem. Actinides*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Dhingra, N., 2023, Gamma-ray spectrometry for the measurement of mass attenuation coefficient and bulk density of soil: A review. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **54**(17), 2329-2335, <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2223650>
- Fuhrmann, M., Lasat, M.M., Ebbs, S.D., Kochian, L.V., and Cornish, J., 2002, Uptake of Cesium-137 and Strontium-90 from contaminated soil by three plant species; Application to phytoremediation, *J. Environ. Qual.*, **31**(3), 904-909, <https://doi.org/10.2134/jeq2002.9040>
- Hwang, K.H., Lee, S.C., Kang, S.H., Lee, K.J., Jeong, C.W., Ahn, S.M., Kim, T.W., Kim, K.D., and Herr, Y.H., 2004, Development of radionuclide inventory declaration methods using scaling factors for the Korean NPPs - Scope and activity determination method, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, **2**(1), 77-85.

- IAEA, 2004, Soil Sampling for environmental contaminants, international atomic energy agency (IAEA), Vienna.
- IAEA, 2009, Determination and use of scaling factors for waste characterization in nuclear power plants, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- Jee, K.Y., Park, Y.J., Pyo, H.Y., Ahn, H.J., and Kim, W.H., 2007, Correlation of $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ activity ratio in radwaste with primary coolant, *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, **5**(1), 9-17.
- Jeong, C.H., Kim, C.S., Kim, S.J., and Park, S.W., 1996, Affinity of radioactive cesium and strontium for illite and smectite clay in the presence of groundwater ions. *J. Environ. Sci. Health A*, **31**(9), 2173-2192. <https://doi.org/10.1080/10934529609376485>
- Kang, K.C. and Shin, W.S., 2024, Immobilization of radionuclides (Co, Sr) in soil using pillared clays and phosphate-based compounds, *J. Soil Groundw. Environ.*, **29**(6), 154-167, <https://doi.org/10.7857/JSGE.2024.29.6.154>
- Kato, H., Onda, Y., and Teramage, M., 2012, Depth Distribution of ^{137}Cs , ^{134}Cs , and ^{131}I in Soil profile after fukushima daiichi nuclear power plant accident, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 59-64, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.003>
- Kavasi, N., Arae, H., Aono, T., and Sahoo, S.K., 2023, Distribution of Strontium-90 in soils affected by fukushima daiichi nuclear power station accident in the context of Cesium-137 contamination, *Environ. Pollut.*, **326**, 121487, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121487>
- KEEI, 2020, World nuclear power market insight: Trends and outlook of nuclear power plant decommissioning technologies in korea and abroad, Korea Energy Economics Institute (KEEI), Ulsan.
- Kim, H.J., Hyun, Y.J., Kim, Y.J., and Hwang, S.I., 2011, A study on effective management scheme for soil and groundwater contaminated by radioactive materials due to nuclear accidents, *J. Soil Groundw. Environ.*, **16**(6), 113-121.
- Kim, T.H., Park, J.H., Lee, J.M., Kim, J.H., and Lim, S.H., 2020, Statistical methodologies for scaling factor implementation: Part 1. Overview of current scaling factor method for radioactive waste characterization, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, **18**(4), 517-536, <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2020.18.4.517>
- Konno, M. and Takagai, Y., 2018, Determination and comparison of the strontium-90 concentrations in topsoil of fukushima prefecture before and after the fukushima daiichi nuclear accident, *ACS Omega*, **3**, 18028-18038, <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02640>
- Lee, J.H., Kang, J.E., and Kim, W.S., 2020, Removal of radioactive cesium in secondary wastewater after soil-washing process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **42**(8), 405-413, <https://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.8.405>
- Lepage, H., Evrard, O., and Onda, Y., Lefevre, I., Laceby, J.P., Ayrault, S., 2014, Depth distribution of radiocesium in fukushima paddy fields and implications for ongoing decontamination works, *SOIL Discuss.*, **1**, 401-428, <https://doi.org/10.5194/soild-1-401-2014>
- Llano, A.Y., Benitez, A.H., and Gutierrez, M.G., 1998, Cesium sorption studies on spanish clay materials, *Radiochimica Acta*, **82**, 275-278.
- Matsunaga, T., Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Nagao, S., Sato, T., and Naga, H., 2013, Comparison of the vertical distributions of fukushima nuclear accident radiocesium in soil before and after the first rainy season, with physicochemical and mineralogical interpretations, *Sci. Total Environ.*, **447**, 301-314, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.087>
- Mukai, H., Hirose, A., Motai, S., Kikuchi, R., Tanoi, K., Nakanishi, T.M., Yaita, T., and Kogure, T., 2016, Cesium adsorption/desorption behavior of clay minerals considering actual contamination conditions in fukushima. *Sci. Rep.*, **6**, 21543, <https://doi.org/10.1038/srep21543>
- New Horizon Scientific, LLC, 2012, Maine yankee decommissioning experience report: Detailed experiences 1997-2004, Prepared for EPRI and maine yankee atomic power company, United States Nuclear Regulatory Commission Hearing Exhibit, Naperville, IL.
- NSSC, 2023, Regulation on classification and clearance criteria of radioactive waste (NSSC Notice No. 2023-7), Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Korea.
- NSSC, 2024, Regulation on the acceptance of low and intermediate-Level radioactive waste (NSSC Notice No. 2024-13), Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Korea.
- NSSC, 2025, Standards for radiation protection, etc(NSSC Notice No. 2025-3), Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Korea.
- Ohno, T., Muramatsu, Y., Miura, Y., Oda, K., Inagawa, N., Ogawa, H., Yamazaki, A., Toyama, C., and Sato, M., 2012, Depth profiles of radioactive cesium and iodine released from the fukushima daiichi nuclear power plant in different agricultural fields and forests, *Geochem. J.*, **46**(4), 287-295, <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.2024>
- Park, S.M., Lee, J.S., Kim, Y.H., Lee, J.S., and Baek, K.T., 2017, Influence of physicochemical properties on cesium adsorption onto soil, *J. Soil Groundw. Environ.*, **22**(1), 27-32, <https://doi.org/10.7857/JSGE.2017.22.1.027>
- Ryu, J.H., Kim, J.G., Kim, S.J., Nam, I.H., Jeon, C.M., Cho, Y.C., Yoon, Y.Y., and Han, Y.S., 2018, Technology planning for remediation of radioactive contamination in the soil, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea.
- Sahoo, S.K., Kavasi, N., Sorimachi, A., Arae, H., Tokonami, S.,

- Mietelski, J.W., Tokas, E., and Yoshida, S., 2016, Strontium-90 activity concentration in soil samples from the exclusion zone of the fukushima daiichi nuclear power plant, *Sci. Rep.*, **6**, 23925, <https://doi.org/10.1038/srep23925>
- Sata, H., Niizato, T., Amano, K., Tanaka, S., and Aoki, K., 2013, Investigation and research on depth distribution in soil of radio-nuclides released by the TEPCO fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *MRS Online Proc. Libr.*, **1518**, 277-282, <https://doi.org/10.1557/opl.2013.393>
- Seo, B.G., Kim, I.G., Nam, J.S., Moon, J.K., Park, C.W., Yang, H.M., and Lee, G.U., 2017, Development of site remediation technology for decommissioning and contaminated site, korea atomic energy research institute (KAERI), KAERI/RR-4233/2016, Daejeon, Korea.
- Song, H.J. and Nam, K.P., 2022, Soil washing technology for sr and cs-contaminated soil near nuclear power plants using calcium and potassium based solutions, *J. Soil Groundwater Environ.*, **27**(2), 76-86, <https://doi.org/10.7857/JSGE.2022.27.2.076>
- Suncoast Solutions, Inc., 2006, Connecticut yankee decommissioning experience report: Detailed experiences 1996-2006, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA.
- Takata, Y., Kohyama, K., Obara, H., Maejima, Y., Ishitsuka, N., Saito, T., and Taniyama, I., 2014, Spatial prediction of radioactive Cs concentration in agricultural soil in Eastern Japan, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **60**(3), 348-359, <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.879528>
- Takeda, A., Tsukada, H., Yamaguchi, N., Takeuchi, M., Sato, M., Nakao, A., and Hisamatsu, S., 2014, Relationship between the radiocesium interception potential and the transfer of radiocesium from soil to soybean cultivated in 2011 in fukushima prefecture, Japan, *J. Environ. Radioact.*, **137**, 119-124, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.022>
- Van Bergeijk, K.E., Noordijk, H., Lembrechts, J., and Frissel, M.J., 1992, Influence of pH, soil type and soil organic matter content on Sil-to-plant transfer of radiocesium and strontium as analyzed by a nonparametric method, *J. Environ. Radioact.*, **15**(3), 265-276, [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(92\)90062-X](https://doi.org/10.1016/0265-931X(92)90062-X)
- Wang, T.H., Li, M.H., Wei, Y.Y., and Teng, S.P., 2010, Desorption of cesium from granite under various aqueous conditions, *Appl. Radiat. Isot.*, **68**, 2140-2146.