Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 435-440, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.435

Technical article

방사성동위원소(RI) 폐기물 시료 중 ^{113}Sn 화학적 분리 방법에 관한 연구

한상준[1] · 김보길[1] · 김준석[1] · 홍우주[1,*] · 노태용[2] · 김대희[2]

[1]주식회사 알엠텍, 방사능정도관리센터, [2]주식회사 위드텍

A Study on the Chemical Separation Method of ^{113}Sn in Radioisotope (RI) Waste Sample

Sang Jun Han[1], Bo Gil Kim[1], Jun Seok Kim[1], Woo Ju Hong[1,*], Tae Yong Noh[2], and Dae Hee Kim[2]

[1]RMTEC Co., Ltd., 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62215, Republic of Korea
[2]WITHTECH Co., Ltd., 300, Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34036, Republic of Korea

ABSTRACT A chemical separation procedure was devised for the purpose of quantifying the radioactivity concentration of the recalcitrant nuclide ^{113}Sn in radioisotope (RI) waste. This was accomplished through the utilisation of anion exchange resin and TRU resin in a chemical separation process, which was subsequently complemented by the deployment of Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) and High Purity Germanium (HPGe) instrumentation. The target media are rubber, wiper, plastic, stainless steel, and vinyl. The principal interfering elements (uranium, zinc, americium, bismuth, cadmium, iron, nickel, and caesium) and the target element (Sn) were introduced and subjected to testing. The results demonstrated that all interfering elements were effectively removed, and the target element was successfully recovered. The recovery of Sn in the anion exchange resin step was 89, 95, 97, and 87% for rubber, wiper, plastic, and stainless steel, respectively, and 92, 81, 84, and 90% in the TRU resin step, respectively. The combined procedure yielded recoveries of 91, 93, 93, and 94% for plastic, rubber and plastic, rubber and vinyl, and vinyl, respectively. Therefore, it can be concluded that the proposed chemical separation procedure is suitable for the analysis of ^{113}Sn, and the proposed procedure for the analysis of the ^{113}Sn nuclide in RI waste samples in this study is considered valid.

Key words: ^{113}Sn, Radioactive waste, Difficult to Measure nuclide, Chemical separation, Chemical recovery

1. 서 론

원자력발전소 운영 중 발생하는 방사성폐기물에 대한 방사선학적 핵종 규명 대상은 원자력안전법에서 규정하고 있는 14개 핵종과 인수기준에서 정하는 11개 핵종에 대한 방사선학적 특성 규명만 수행하면 되는 대상 핵종으로 구체화 되어 있다[1]. 그러나 비원전 분야에서 발생하는 방사성폐기물은 대부분 Radioisotopes (RI) 폐기물로서 기관마다 사용하는 방사성동위원소 및 발생하는 폐기물의 종류가 매우 다양하며, 발생하는 폐기물 발생량도 적어 해당 폐기물에 대한 핵종분석을 수행한 결과를 바탕으로 처리·처분하는데 매우 어려움을 겪고 있는 실정이다[2,3].

현재 RI 폐기물에 대한 핵종 분석은 여러 핵종에 대해 수행되고 있으며, 분석 가능한 핵종으로는 ^{3}H, ^{14}C, ^{32}P, ^{33}P, ^{35}S, ^{45}Ca, ^{51}Cr, ^{57}Co, ^{59}Fe, ^{60}Co, ^{99}Tc, ^{109}Cd, ^{125}I, ^{131}I, ^{137}Cs, ^{147}Pm이 있다. 이 핵종들이 포함된 RI 폐기물에 대해서는 현재 유효성이 검증되어 있으며, 이를 바탕으로 핵종 분석을 안전하게 처리·처분하고 있다. 그러나 개발되지 않은 대상 핵종은 ^{40}K, ^{85}Kr, ^{84}Rb, ^{86}Rb, ^{88}Y, ^{113}Sn, ^{133}Xe, ^{135}Xe, ^{139}Ce, ^{155}Eu, ^{203}Hg, ^{232}Th, ^{89}Zr, ^{99}Mo, ^{197}Hg, ^{228}Ac, ^{211}Bi, ^{212}Pb, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{226}Ra 등 21개 핵종은 문헌과 논문을 통해 기본적인 방법이 제시되어 있으나, 국내 RI 폐기물의 특성에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 이들 핵종에 대한 적절한 화학 분리 빛 계측 방법과 검증에 관한 연구가 현재 진행 중이다[4,5,6,7].

본 연구는 개발 중에 있는 21개 핵종 중 ^{113}Sn에 대한 분석 절차를 제시하는 것을 목표로 한다. ^{113}Sn은 C, Si, Ge, Pb과 함께

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Woo Ju Hong
Tel: +82-62-236-6742, Fax: +82-62-236-6741, E-mail: universeda@rmtec.co.kr
Received 15 October 2024 Revised 23 October 2024 Accepted 4 November 2024

14족(4A 족)에 속하며, 약 115.09일의 반감기를 가진다. 이 핵종은 특히 391.698 keV(64.97%)에서 감마선을 방출하는 특징이 있다.

^{113}Sn 외에 다른 방사성 핵종이 존재할 경우, 이들로 인한 컴프턴 영역이 ^{113}Sn(391 keV)의 최소 검출 가능 농도(MDA)를 증가시킬수 있다. 특히 ^{113}Sn은 낮은 에너지에서 피크가 발생하므로, 다른 방사성 핵종의 컴프턴 영역과 겹칠 가능성이 크다. MDA가 상승하면 방사능 분석의 정밀도가 떨어지므로, 이를 개선하기 위해 ^{113}Sn의 MDA를 낮추고 분석의 정확도를 높이기 위한 화학적 분리를 수행하였다.

Sn은 화합물에서 보통 +2와 +4의 산화 상태를 가지며, 실온에서는 물이나 공기와 반응하지 않지만, 가열할 경우 공기나 산소와 반응하여 SnO_2가 되는 특성을 가지고 있다[8,9,10].

이러한 특성들은 ^{113}Sn의 분석 및 처분에 있어 중요한 고려 사항이 될 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 특성을 바탕으로 ^{113}Sn에 대한 효과적인 분석 절차를 개발하고자 한다.

2. 재료 및 방법

RI 폐기물의 매질로 고무, 비밀, 와이퍼, 플라스틱, 스테인리스를 대상으로 하였다. 화학 분리에 사용된 크로마토그래피 수지는 Anion exchange resin (AG® 1-X8 Resin (BIO RAD), 100~200 mesh, chloride form)과 TRU resin (eichrom Technologies, 100~150 μm Bulk)을 사용하였다. 화학적 거동 특성에 따른 방해원소 제거 및 목적원소 회수에 대한 평가를 수행하기 위해, 각 매질 특성을 고려하여 방해 원소로는 U, Zn, Am, Bi, Cd, Bi, Fe, Ni, Cs standard solution을 사용하였으며, 목적 원소로는 Sn standard solution을 이용하였다.

화학 분리에 따른 회수율 측정은 용액화된 시료의 초기 농도와 최종 회수 농도를 ICP-OES를 통해 분석하였다. 이를 위해 농도가 0.1, 1, 2, 3, 4, 5 ppm인 검정곡선을 작성하여 회수율을 평가하였다.

화학 분리 방법은 Anion exchange resin을 이용해 4 M HCl로 방해 원소를 제거한 후, 2 M HNO_3로 Sn을 용출하였다. 이후 TRU Resin을 이용해 0.5 M HCl과 0.25 M HCl로 방해 원소를 추가 제거한 뒤, 0.5 M HNO_3로 Sn을 용출하였다. ^{113}Sn 화학분리를 위한 절차는 아래 Fig. 1을 적용하였다[11].

3. 결 과

Fig. 1에서 제시된 Sn 화학 분리 절차를 바탕으로 Anion exchange resin 및 TRU resin을 활용한 방해 원소 제거와 목적 원소 회수(용출)에 대한 실험을 수행하였다. 또한 방해 원소 양에 따른 적정 수지 사용량, 시료 종류에 따른 화학 분리 거동 특성, Sn 분리 시 온도 조건 등의 변수를 고려하여 추가적인 실험을 진행하였다.

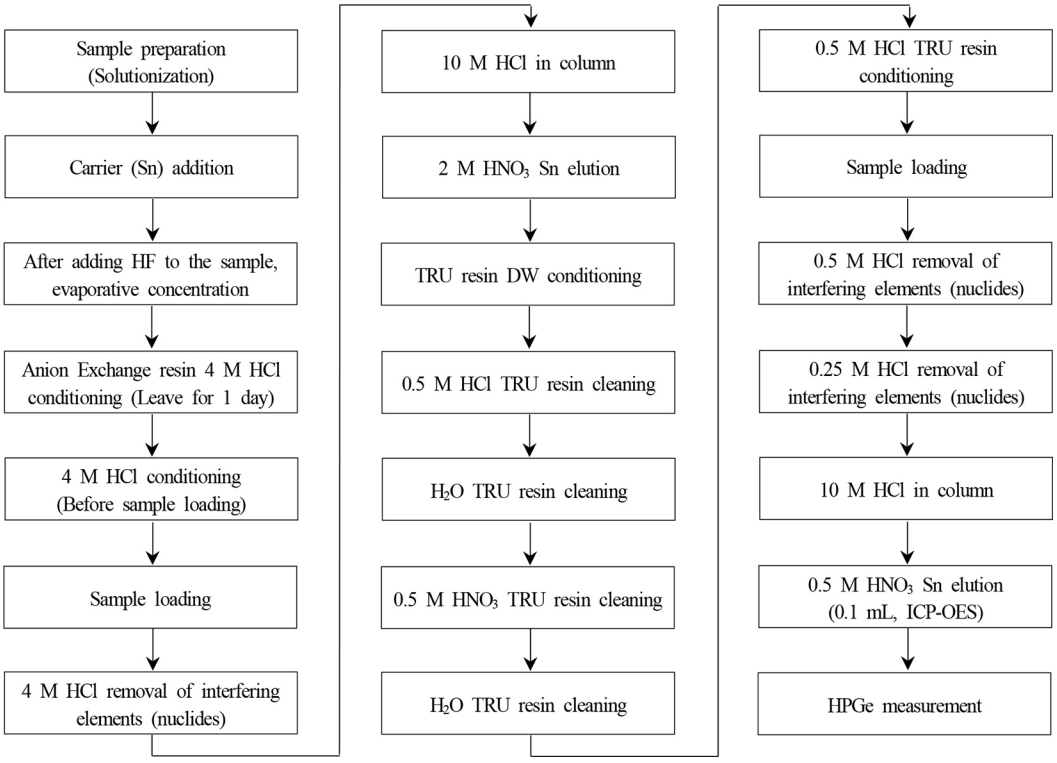

Fig. 1. ^{113}Sn Nuclide analysis procedure

Table 1. Anion exchange resin acid condition

Test No.	Test conditions 1	Test conditions 2	Chemical recovery (%)
1	Complete evaporation	Add HF	89
		No HF	87
2	Evaporation concentration up to 1 mL	Add HF	95
		No HF	88
3	10 M HCl addition in to the column	Addition	85
		No additives	79

Table 2. Anion exchange resin removing interference elements & Find the conditions for Sn elution

Test No	Interference elemental removal conditions	Sn elution condition	Chemical revovery (%)
1	0.5 M HCl	0.5 M HNO_3	0
2	1 M HCl	1 M HNO_3	0
3	2 M HCl	2 M HNO_3 - 0.1 M HCl	75
4	4 M HCl	2 M HNO_3	102

3.1. 음이온 교환 수지 및 TRU 수지 조건

3.1.1. 음이온 교환 수지 HF 및 HCl 조건에 따른 Sn 회수율 최적화

용액 시료에 carrier (Sn)를 첨가한 후 Anion exchange resin 용출 단계를 거치는 과정에서 용액 시료의 완전 증발, HF 첨가 여부, 용출 전 HCl conditioning 조건에 따른 회수율 실험을 수행하였다.

실험 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같이, 먼저 용액 시료에 HF를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우 완전 증발 조건에서의 회수율은 각각 89%와 87%로, 두 조건 간에 큰 차이가 없었다. 그러나 HF를 첨가하지 않고 완전 증발을 수행하지 않은 상태에서 약 1 mL의 용액이 남아 있을 때, HF를 첨가한 상태의 회수율이 95%로, 첨가하지 않은 상태의 88%보다 높게 나타났다. 또한, 2 M HNO_3로 Sn을 용출하기 전, resin을 10 M HCl을 넣었을 때 회수율이 85%로, conditioning을 하지 않은 경우의 79%보다 높게 나타났다.

따라서 용액 시료를 Anion exchange resin 용출 단계에서는 HF를 첨가한 후 약 1 mL까지 증발 건조 후 resin을 10 M HCl을 넣었을 때 조건이 가장 적절한 Sn 회수율을 보이는 것을 알 수 있었다. 이때 10 M HCl로 넣는 이유는 4 M HCl로 방해 원소를 제거 후 2 M HNO_3로 Sn을 용출 전 HNO_3와 Sn이 만나면 불용성 화합물이 생성되기 때문에 회수율이 떨어지는 것을 방지하기 위해 중간 절차에 10 M HCl 넣는 것이다.

3.1.2. 음이온 교환 수지 HCl, HNO3 조건에 따른 Sn 회수율 최적화

Anion exchange resin을 이용하여 방해 원소를 제거한 후 Sn 용출을 위한 HCl 및 HNO_3 농도 최적 조건을 찾기 위한 실험을 수행하였다. 최적 조건을 찾기 위한 조건은 Table 2에서 보는 바와 같이 HCl 및 HNO_3 농도 변화를 주어 실험을 진행하였으며, 실험 결과 HCl 농도가 4 M 보다 낮을 경우에는 Sn의 Anion exchange resin에 흡착 정도와 방해원소의 제거가 낮은 수준으로 나타났다.

그리고 4 M HCl 방해원소 최적 제거 조건에서 Sn의 용출을 위한 HNO_3 농도는 2 M로서 이때 회수율이 102%로 나타남을 알 수 있었다.

3.1.3. TRU 수지 다양한 조건에 따른 Sn 회수율 최적화

Anion exchange resin 절차를 수행한 이후 TRU resin 절차를 수행하는 과정에서 TRU resin 활성화 조건에 따른 변화와 Anion exchange resin 절차에서 용출된 시료에 HF 첨가 여부에 따른 변화를 확인하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이 TRU resin을 증류수로 활성화한 조건과 시료에 HF 첨가 여부에 따른 회수율 변화를 비교한 결과, TRU resin을 증류수로 활성화한 경우가 비활성화한 경우보다 상대적으로 더 높은 회수율을 보였다. 이때 HF를 첨가하지 않은 조건에서 더 높은 회수율을 확인할 수 있었다. 또한, TRU resin을 0.5 M HCl로 활성화한 경우, 증류수로 활성화한 경우에 비해 회수율이 약간 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.1.4. TRU 수지의 방해 원소의 양에 따른 Sn 회수율 변화

Sn 화학 분리 시 TRU resin 단계에서의 방해 원소 종류 및 양에 따른 영향을 확인하고자 U, Zn, Am, Bi, Cd, Fe, Ni, Cs 방해 원소와 목적 원소인 Sn을 증류수에 첨가하여 실험을 수행하였다. 먼저 방해 원소와 목적 원소의 비율을 1 대 1로 수행한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 대부분의 방해 원소는 제거되고 목적 원소인 Sn의 회수율은 95%의 높은 수준으로 나타났다.

방해 원소와 목적 원소의 비율을 달리하여 5 대 1 및 10 대 1의 경우는 Sn의 회수율이 방해 원소의 양이 증가할수록 각각 48%,

Table 3. TRU resin chemical recovery

Test No.	Test conditions 1	Test conditions 2	Chemical recovery (%)
1	No activation with distilled water	Add HF	19
		No HF	87
2	Activation with distilled water	Add HF	29
		No HF	92
3	Activate as 0.5 M HCl	No HF	89

Table 4. Interfering elements & Sn chemical recovery

Elements		U	Zn	Am	Bi	Cd	Fe	Ni	Cs	Sn
Sn Chemical Recovery (%)	1 vs 1	1	0	1.2	3	0	2.4	1.6	0.7	95
	5 vs 1	29	41	23	48	37	26	32	45	48
	10 vs 1	56	67	48	39	52	68	64	53	34

Table 5. Sn recovery rate by TRU resin volume

TRU resin quantity	1 mL	2 mL	3 mL	4 mL	5 mL
Sn chemical recovery (%)	83	93	99	96	97

Table 6. Recovery rates by resin and medium type

Sample		Rubber	Wiper	Plastic	Stainless steel
Sn Chemical recovery (%)	Anion exchange resin	89	95	97	87
	TRU resin	92	81	84	90

Table 7. Recovery rates by medium according to established procedures

Sample	Plastic	Rubber & plastic	Rubber & vinyl	Vinyl
Sn Chemical recovery (%)	91	93	93	94

34%에 불과하여 방해 원소의 양이 늘어날수록 Sn의 회수율이 감소함을 알 수 있었다.

이때 방해 원소로 U, Zn, Am, Bi, Cd, Fe, Ni, Cs을 이용한 이유는 Eichrom (社)에서 TRU Resin으로 Sn을 화학 분리 시 주요 방해 원소로의 작용과 Sn과 같이 용출될 수 있는 원소이기 때문에 사용하였다.

3.1.5. TRU 수지의 레진 부피에 따른 Sn 회수율 변화

TRU Resin의 적정 사용량을 결정하기 위해 용액 시료(증류수 15 mL + Sn 2 g/1,000 ppm)를 제작하여 TRU Resin의 양을 1 mL부터 5 mL까지의 회수 능력을 확인한 결과 TRU Resin 3 mL일 경우가 회수율이 가장 높은 99%를 나타냄을 Table 5에서 확인할 수 있다.

추가적으로 1 mL부터 5 mL까지 80% 이상의 회수율을 나타내어 모두 만족하는 수준임을 알 수 있으나 실험 과정에서의 부수적 방사성폐기물을 최소화하면서 회수율을 높이는 최적화 과정이 필요한 만큼 매질과 시료 사용량에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 매질 종류에 따른 음이온 교환 수지 및 TRU 수지의 회수율

매질의 종류에 따라 Anion exchange resin 및 TRU resin 절차를 모두 거친 Sn 회수율 변화를 확인하였다. 대상 매질로는 고무, 와이퍼, 플라스틱, 스테인리스로 수행하였으며, 방해 원소는 방해 원소는 U, Zn, Am, Bi, Cd, Fe, Ni, Cs과 목적 원소는 Sn을 첨가하였다.

실험 결과 Table 6에서 보는 바와 같이 먼저 Anion exchange resin 단계에서는 고무, 와이퍼, 플라스틱, 스테인리스에서 Sn 회수율이 각각 89, 95, 97, 87%로 나타났으며, 이후 TRU resin 단계에서는 각각 92, 81, 84, 90%로 매우 양호한 회수율을 나타냈다.

그리고 매질을 변경하고 Anion exchange resin 및 TRU resin 절차를 모두 병합한 회수율은 Table 7과 같이 플라스틱, 고무 + 플라스틱, 고무 + 비닐, 비닐에 대해 각각 91, 93, 93, 94%로서 매우 양호한 회수율을 보여 다양한 매질에 적용성을 확인하는 결과를 도출하였다.

3.3. 온도에 따른 Sn 회수율

Sn은 Anion exchange resin 및 TRU resin 절차를 거치기 전

Table 8. Recovery conditions depending on temperature

^{113}Sn	Added CRM concentration (Bq/g)	Final detection concentration (Bq/g)	Chemical recovery (%)
130℃	7.4447	<0.301	0 (complete evaporation)
70-80℃	7.1520	7.1345	99.8

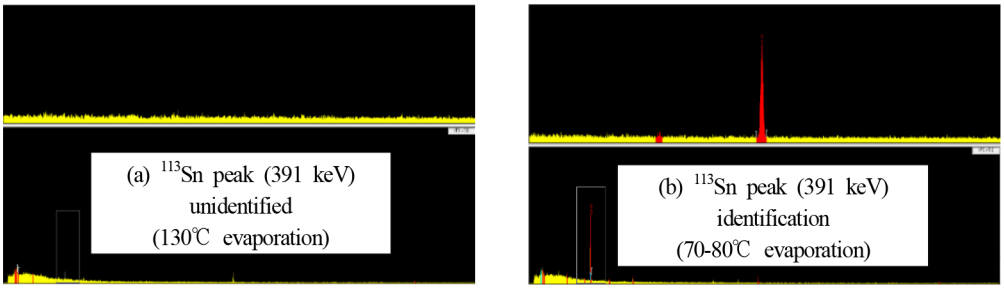

Fig. 2. ^{113}Sn peak detection under evaporation and drying temperature conditions

용액 시료에 회수율 측정 및 거동 특성을 확인하기 위한 carrier와 HF을 첨가한 후 증발 건조 과정을 수행하게 된다. Table 8에서 보는 바와 같이 증발 건조 온도를 130°C와 70~80°C 정도로 실험한 결과 130°C에서는 회수율이 0%를 나타냈으며, 70~80°C 정도에서는 99.8%를 나타냄을 확인할 수 있었고 Fig. 2에서 또한 HPGe로 Spectrum을 확인한 결과에서도 알 수 있었다.

이러한 현상은 Sn은 Boiling point가 114°C로서 증발 건조 시 온도를 110°C 이상 가열하면 시료에 있는 Sn이 모두 $SnCl_4$ 형태로 기화하여 소실됨을 알 수 있으므로 목적 핵종의 휘발성 특성을 고려하여 가열 시 온도를 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.4. ICP-OES를 사용한 측정

일반적으로 방사성폐기물에 대한 화학 분리 시 방해 원소 및 목적 원소의 함량 측정을 위해 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) 또는 ICP-OES를 이용한다[12,13].

Sn의 경우 ICP-MS로 회수율을 측정할 경우 ICP-OES보다 약 10% 더 높게 나타나는 경향이 있다. 이는 ICP-MS로 Sn을 측정하였을 때 $^{76}Ar^{14}N$이 Sn-118과 질량이 같아 영향을 미치는 것으로서[14] 정확한 회수율 측정을 위해서는 ICP-OES로 측정하여야 함을 확인하였다.

4. 고 찰

본 연구에서는 Anion exchange resin과 TRU Resin을 활용하여 ^{113}Sn에 대한 최적 화학 분리 조건을 확립하고자 하였다. 그 결과 Anion exchange resin 용출 단계에서는 용액 시료에 HF를 첨가한 후 약 1 mL까지 증발 건조 후 10 M HCl로 conditioning과 방해 원소 제거는 4 M HCl, Sn 용출은 2 M HNO_3 조건이 가장 높은 회수율을 보이는 것으로 나타났다.

TRU resin 단계에서는 용액 시료는 HF를 첨가하지 않은 상태로 용출 하며, 용출 전 TRU resin은 증류수로 활성화하는 것이 회수율이 더 높게 나타났다. 방해 원소 종류 및 포함량에 따른 TRU resin 회수 특성은 방해 원소의 포함량이 많아질수록 Sn 회수율이 떨어지는 것을 알 수 있었으며, Sn 함량에 따른 TRU resin 적정 사용량은 3 mL 사용 시 99% 회수율을 보였으나, 대체적으로 모두 80% 이상 회수 특성을 보여 모두 유효함을 알 수 있었다.

그리고 Sn은 Boiling point가 114°C로서 증발 건조 시 온도를 110°C 이상 가열하면 시료에 있는 Sn이 모두 $SnCl_4$ 형태로 기화하여 소실되는 특성을 반영하여 증발 가열 단계에서는 가열 온도를 Boiling point 보다 낮게 유지해야 함을 확인하였다[15].

이러한 Anion exchange resin과 TRU Resin의 적정 조건을 확립하고 잡고체 시료에 적용한 결과 Sn 회수율이 대체적으로 90% 정도로 나타나 제시된 절차는 유효한 것으로 확인되었다.

5. 결 론

RI 폐기물 내에 존재하는 난분석 핵종인 ^{113}Sn에 대한 핵종 분석 절차를 확립하고 확립된 절차에 대한 적용성을 확인하였다.

^{113}Sn의 화학 분리 절차는 Anion exchange resin과 TRU Resin 단계를 거치면서 방해 원소 제거 및 목적 원소 적정 회수율을 확인한 결과 다양한 매질에서의 적용이 가능함을 알 수 있었고 또한 회수율 측정은 ICP-OES, 계측은 ^{113}Sn의 감마선 방출 특성을 고려하여 HPGe로 계측하는 것이 적절한 것으로 확인하였다.

다만, 제시된 절차는 현장에서 발생하는 시료는 적용성에 대한 한계가 있을 수 있으므로 각 실험 단계별 방해 원소 및 목적 원소의 물리·화학적 거동 특성을 세밀화함과 동시에 실제 시료의 유효성을 확인하는 실험을 추가 진행할 예정이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원이 주관하는 에너지기술개발사업의 중·저준위 방사성폐기물 처리시설 안전관리 강화기술 연구개발사업(RS-2023-00235379)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ireland TR, Ávila JN, Lugaro M, Cristallo S, Holden P, Lanc P, Nittler L, Alexander CMO, Gyngard F and Amari S. 2018. Rare Earth Element Abundances in Presolar SiC. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **221**:200-218. https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.04.033.
2. De Laeter JR and Jeffery PM. 1965. The Isotopic Composition of Terrestrial and Meteoritic Tin. *Journal of Geophysical Research* **70**(11): 2895-2903. https://doi.org/10.1029/JZ070i011p02895.
3. Williams HM, McCammon CA, Peslier AH, Halliday AN, Teutsch N, Levasseur S and Burg JP. 2004. Iron Isotope Fractionation and the Oxygen Fugacity of the Mantle. *Science* **304**(5677):1656-1659. https://doi.org/10.1126/science.1095675.
4. Dauphas N and Schauble EA. 2016. Mass Fractionation Laws, Mass-Independent Effects, and Isotopic Anomalies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **44**:709-783. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012157.
5. Meija J, Coplen TB, Berglund M, Brand WA, De Bièvre P, Gröning M, Holden NE, Irrgeher J, Loss RD, Walczyk T and Prohaska T. 2016. Isotopic Compositions of the Elements 2013 (IUPAC Technical Report) *Pure and Applied Chemistry* **88**(3):293-306. https://doi.org/10.1515/pac-2015-0305.
6. Moynier F, Albarède F and Herzog G. 2006. Isotopic Composition of Zinc, Copper, and Iron in Lunar Samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **70**(24):6103-6117. https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1566.
7. Rudge JF, Reynolds BC and Bourdon B. 2009. The Double Spike Toolbox. *Chemical Geology* **265**(3-4):420-431. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.05.010.
8. Schmitt AD, Galer SJG and Abouchami W. 2009. High-precision Cadmium Stable Isotope Measurements by Double Spike Thermal Ionisation Mass Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **24**(8):1079-1088. https://doi.org/10.1039/B905613K.
9. Tyburczy JA, Frisch B and Ahrens TJ. 1986. Shock-induced volatile loss from a carbonaceous chondrite: implications for planetary accretion. *Earth and Planetary Science Letters* **80**(3-4):201-207. https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90108-4.
10. Anbar AD, Knab KA and Barling J. 2001. Precise Determination of Mass-Dependent Variations in the Isotopic Composition of Molybdenum using MC-ICPMS. *Analytical Chemistry* **73**(7):1425-1431. https://doi.org/10.1021/ac0010494.
11. Kirchenbaur M, Heuser A, Bragagni A and Wombacher F. 2018. Determination of In and Sn Mass Fractions in Sixteen Geological Reference Materials by Isotope Dilution MC-ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research* **42**(3):361-377. https://doi.org/10.1111/ggr.12231.
12. Arnold T, Schönbächler M, Rehkämper M, Dong S, Zhao FJ, Kirk GJD, Coles BJ and Weiss DJ. 2010. Measurement of Zinc Stable Isotope Ratios in Biogeochemical Matrices by Double-spike MC-ICPMS and Determination of the Isotope Ratio Pool Available for Plants from Soil. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **398**(7-8):3115-3125. https://doi.org/10.1007/s00216-010-4158-z.
13. Albarède F. 2009. Volatile Accretion History of the Terrestrial Planets and Dynamic Implications. *Nature* **461**(7268):1227-1233. https://doi.org/10.1038/nature0847.
14. Jochum KP, Hofmann AW and Seufert HM. 1993. Tin in Mantle-derived Rocks: Constraints on Earth Evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**(15):3585-3595. https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90138-Q.
15. Kato C, Moynier F, Valdes MC, Dhaliwal JK and Day JMD. 2015. Extensive Volatile Loss during Formation and Differentiation of the Moon. *Nature Communications* **6**(7617):6343. https://doi.org/10.1038/ncomms7343.