Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society
Vol. 2(1), June 2004

Dissolution Conditions of Solid Radioactive Wastes Generated from NPP for the Analysis of Radionuclides Using a Closed-vessel Microwave Acid Digestion System

원전 발생 고체 방사성폐기물 내 핵종 분석을 위한 극초단파 산분해 장치를 이용한 용액화 조건

Hyung-Yeal Pyo, Jeong-Jin Lee, Jong-Seon Jeon*, Chang-Heon Lee, Kwang-Yong Jee
Korea Atomic Energy Research Institute, DuckJin-dong 150, Yusung-gu, Daejeon
*ACT Co., LTD Sinil-dong 1688-5, Daedeok-gu, Daejeon

표형열, 이정진, 전종선*, 이창헌, 지광용
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150
*액트 (주), 대전광역시 대덕구 신일동 1688-5

Abstract

The optimal conditions are obtained for the decomposition of solid radioactive wastes, including ion exchange resin, zeolite, active charcoal, and sludge from nuclear power plant. In the process of decomposing the radioactive wastes were used the microwave acid digestion method with mixed acid. The solution after acid digestion by the following method was colorless and transparent. Each solution was analyzed with ICP-AES and AAS and the recovery yield for 5 different elements added the simulated radioactive wastes were over 94 %. As an effective pre-treatment, the proposed microwave acid digestion conditions concerning the chemical trait of each radioactive waste are expected to be generally applied to above-mentioned radioactive wastes from nuclear power plant hereafter.

Key Words : radioactive waste, microwave acid digestion system, dissolution condition

요 약

원자력 발전소에서 발생하는 방사성 폐기물인 이온교환수지, 제올라이트, 활성탄 및 슬러지에 포함된 핵종 분석을 위한 최적의 산분해 조건을 확립하였다. 방사성 폐기물의 분해에는 혼합산을 이용한 밀폐형 극초단파 산분해법을 사용하였으며, 제안한 방법에 따른 산분해 후의 용액은 맑고 색이 없는 투명한 상태임을 확인할 수 있었다. 또한, 산분해 과정을 거친 각각의 용액 시료는

ICP-AES와 AAS를 사용하여 분석하였고, 모의 방사성 폐기물에 첨가한 5종의 금속 원소들은 94 % 이상의 높은 회수율을 보여주었다. 화학적 특성을 고려하여 제안된 산분해 조건은 핵종 분석을 위한 효과적인 전처리 방법으로써, 향후 원전의 유형별 방사성 폐기물에 대해 보편적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심 단어 : 방사성 폐기물, 밀폐형 극초단파 산분해법, 핵종 분석, 분해 조건

1. 서 론

원자력 발전소에서 발생하는 중/저준위 방사성 폐기물을 안정하게 처리하는 방법으로 파라핀, 시멘트 또는 유리 등을 이용하여 고화체로 만들어 저장하는 방법을 고려할 수 있다. (주) 한국수력원자력 산하 원자력환경기술원(NETEC)은 방사성 폐기물의 유리고화시설을 운영함에 있어 유형별 방사성 폐기물에 대한 유리화 공정의 최적화 및 최적의 유리 조성을 개발하기 위해서 원자력 발전소에서 사용하고 있는 것과 동일하고 사용하지 않은 비방사성 시료에 함유되어 있는 무기 성분 원소를 확인하여야 한다. 원전 운용 과정에서 발생되는 액체 방사성폐기물의 부피를 줄이고 냉각 계통을 안전하게 운영하기 위하여 사용되는 이온교환수지, 제올라이트 및 활성탄, 그리고 슬러지 등을 분석 대상으로 선정하였으며, 이들의 무기 성분 원소 및 핵종 분석을 하기에 앞서 화학적 파괴 방법에 의한 시료의 전처리 과정은 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해서는 방사성 폐기물의 형태와 양, 분석 대상 핵종의 화학적/물리적 성질을 고려하여 분해 과정에서 문제점이 발생하지 않는 효과적인 전처리 방법을 선택하여야 한다.

고체 시료들의 용액화 방법에는 산분해법, 혼합산 추출법, 알칼리 용융법, 가압용기 분해법, 극초단파 산분해법 등이 있다[1]. 이러한 전처리 방법 중에서, 방사성 폐기물의 정확한 분석과 함께 방사성 작업 공간 내 방사성 핵종 오염 문제를 최소화 할 수 있는 극초단파 산분해법을 이용하는 것이 효과적이다[2,3]. 이는 기존의 습식 산분해법에 비해 국부가열을 줄이고 산의 소모량 감소, 신속한 전처리 시간, 높은 회수율 그리고 다수의 시료를 동시에 처리할 수 있는 기능을 가지고 있어 방사성 폐기물 시료를 용액화하기 좋은 방법이다[4].

본 연구에서는, 원전에서 사용하는 것과 동일한 미사용 분리 매질의 무기 성분 원소의 분석과 함께 이온교환수지, 제올라이트, 활성탄의 분리 매질에 포착된 핵종의 종류와 농도를 분석하기 전에 비방사성 시료에 대한 최적의 분해 방법을 선정하기 위한 실험 결과를 검토하였다. 비방사성 시료를 이용하여 산의 종류와 양, 분해 시간과 온도 등의 변화에 따른 용액의 상태를 비교한 후 적합한 방법으로 모의 방사성 폐기물을 분해한 후 금속 원소의 회수율을 확인함으로써 각 유형별 비방사성 시료에 대한 최적의 분해 방법을 제안하였으며, 이 분해 조건은 방사성 폐기물 시료에도 적용할 것이다. 또한, 향후 분석하게 될 원전 발생 방사성 폐기물 내에 포함된 핵종의 종류와 농도를 정확하게 파악하기 위한 기초 자료로 사용하기 위해 분해된 비방사성 시료의 성분 원소를 ICP-AES와 AAS를 이용하여 분석하였다.

2. 실 험

2.1. 시료, 시약 및 표준 용액 제조

2.1.1 비방사성 시료

방사성 폐기물 중 이온교환수지(음이온, 양이온, 혼합), 제올라이트 및 활성탄은 원자력 환경 기술원(NETEC)을 통하여 현재 원전에서 사용하는 것과 동일하고 사용하지 않은 것을 제공받아 110 ℃에서 건조시켜 실온에 보관하면서 시료의 분해에 사용하였다.

2.1.2 모의 방사성 폐기물

모의 방사성 폐기물의 분해는 건조된 비방사성 시료 0.05 ~ 0.1 g 정도의 무게를 달아 Teflon 재질의 밀폐형 산분해 용기에 취한 다음, 모의 핵종 분석을 위한 금속 원소(Cs, Fe, Ni, Re 및 Sr) 표준물을 각각 250 μg 씩 취하여 용기에 첨가하여 진행하였다.

2.1.3 방사성 시료

원전에서 액체 방사성 폐기물의 핵종 제거에 사용된 이온교환수지(양이온, 혼합, 저준위, 영광 2발전소), 제올라이트(영광 2발전소), 활성탄(영광 2발전소)의 분리 매질 및 원심분리기 슬러지(영광 3 발전소)는 비방사성 시료와 마찬가지로 NETEC을 통하여 제공받았다. 방사성 폐기물의 분해에 사용될 시료들은 유리 vial에 2 ~ 3 g씩 소분 하였고, 분해 시 사용된 각 시료의 무게와 감마 방사능 정도를 Table 1에 나타내었다. 소분된 방사성 시료들은 110 ℃에서 건조시켜 실온에 보관하여 용액화 실험에 사용하였으며, 건조된 시료 자체에서 발생하는 정전기를 최대한 줄이기 위하여 무게 측정 시에 알루미늄 호일로 만든 무게 접시와 종이 수저를 사용하였고, 시료의 비산에 의해 넓은 영역으로 방사성 오염이 되는 것을 방지하기 위하여 윗부분에 접착면이 있는 크린 매트를 사용하였다.

Table 1. Weight and gamma activity of radioactive wastes

Radiative sample	Weight of sample (g)	Gamma activity (μSv/hr)
Active charcoal	0.05	1.5
Cation ion exchange resin	0.10	1.8
Low level ion exchange resin	0.10	0.2
Mixed ion exchange resin	0.10	0.5
Sludge	0.05	30
Zeolite	0.05	60

2.1.4 시약 및 표준 용액 제조

모든 시료의 산분해에는 HNO_3(Fisher Trace Metal Grade 70%), HCl(Dong yang GR 36%) 및 HF(Merck 48%)를 사용하였고, Cs, Fe, Ni, Re 및 Sr 표준용액은 ICP-AES용 표준용액(Spex plasma standard, 1000 μg/mL, 2% nitric acid solution)을 사용하였다. 실험에 사용한 테프론 용기, 유리 용기, 폴리에틸렌 용기 등은 실험하기 전에 1 M HNO_3용액에 넣고 하루 동안 방치한 다음 증류수 (전기 전도도 18 MΩ 이상)로 깨끗이 헹구어 건조시킨 후 사용하였다.

2.2 시료 분해 및 성분 원소 분석 장치

방사성 안전 작업을 위하여 무게 저울과 밀폐형 극초단파 산분해 장치(Milestone Model Ethos Plus, Italy)는 이차 방사능 오염이 되지 않도록 특수 제작된 glove box에 넣고 사용하였다. 각 시료의 최적의 산분해 조건으로부터 얻은 용액은 증류수를 이용하여 최종 부피를 각 각 25 ml 용량(비방사성 시료, 모의 방사성 시료), 20 ml 용량(방사성 시료)으로 하였다. 시료의 금속 원소 회수율 계산을 위한 성분 원소(Fe, Ni, Re 및 Sr)의 농도 분석은 mono channel ICP-AES(JOBIN

YVON Model JY 38 Plus, France)와 multi channel ICP-AES(JOBIN YVON Model JY 50 P)를 사용하였으며, Cs의 농도는 AAS(Perkin Elmer Model 3100, USA)를 사용하여 측정하였다. 산분해 후 용액화 된 방사성 폐기물 시료의 분석을 위해서는 glove box에 내장되어 있는 ICP-AES(Thermo Jarrell Ash, IRIS Shielding Spectrometer, USA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이온교환수지(음이온, 양이온, 혼합, 저준위)

음이온교환수지를 분해하기 위해 첨가했던 HNO_3 10 ml, HCl 1 ml 및 H_2O_2 1 ml의 혼합산에 0.05 g의 비방사성 시료가 완벽하게 분해되지 않아서 HNO_3의 양을 12 ml로 늘리는 반면, 산분해 시 발생할 가스로 인한 압력 증가로부터 폭발 위험을 줄이기 위해 HCl과 H_2O_2를 첨가하지 않고 전체 산의 부피에는 변화가 없도록 조절하였다. 건조된 음이온교환 수지 0.05 g을 HNO_3 12 ml와 함께 산분해 용기에 넣고, 실온에서 시료와 시약의 반응이 일어나도록 30분 정도 방치한 후 극초단파 산분해 장치에 넣고 산분해 조건을 180 ℃ (ramping 10 min/soaking 5 min), 200 ℃ (ramping 5 min/soaking 5 min), 240 ℃ (ramping 5 min/soaking 40 min)으로 설정하여 처리하였다. 반응이 끝난 후 산분해 용기의 뚜껑을 열어 육안으로 관찰하였을 때는 시료가 완전히 분해되어 투명한 용액 상태였으나, 25 ml 부피 플라스크에 희석해 실온에 방치해 두었더니 용액이 부분적으로 뿌옇게 변했고 흰색 덩어리가 생겼다. 산의 조성과 양, 산분해 온도와 시간에 변화를 주어 음이온교환수지의 분해를 시도하였으나 매번 비슷한 결과를 보여주었다. 따라서, 음이온교환수지의 용액화를 위해서는 용기 내의 급격한 변화를 줄이기 위해 단계적으로 온도를 올렸던 기존의 방법 대신 240 ℃까지 온도를 한 번에 올리는 것이 극초단파 산분해 장치로부터 출력되는 에너지를 효율적으로 사용할 수 있을 거라 판단되어 Table 2과 같은 조건으로 산분해해 보았다. 극초단파 산분해 장치를 이용해 산분해한 용액을 25 ml 부피 플라스크에 희석해 실온에 하루 정도 방치해도 전체 수용액이 맑고 투명했을 뿐만 아니라, 원심 분리 했을 때도 층이 분리되어 않은 것으로부터 음이온교환수지가 완벽하게 분해된 것임을 알 수 있었다. Table 2에 나타낸 산분해 온도와 시간의 조건은 음이온교환수지 0.1 g의 분해에도 효과적이었으며, 양이온교환수지 뿐만 아니라 혼합이온교환수지를 분해하는데 적용할 수 있었다.

Table 2. Acid mixtures and reaction condition for decompositions of non-radioactive, stimulated radioactive, and radioactive ion exchange resin

	Stage	MW1 (Temperature control)	MW2 (Power control)
Reagents	1	12 ml HNO_3	12 ml HNO_3
Digestion time (min)	1	20	25
Temperuatre (℃)	1	170(5), 240(5), 240(10)	-
Power (watt)	1	-	290(4), 400(10), 300(1), 250(10)

이온교환수지를 분해하여 투명한 수용액으로 만드는 최적의 산분해 조건은 비방사성 시료의 반복적인 실험을 통하여 확립하였고, 이 조건에 근거하여 모의 방사성 폐기물과 울진 2 발전소의 증기 발생기 취출수에서 발생된 0.0054 μSv/h (0.10 g)의 감마 방사능이 있는 저준위 이온교환수지

0.10 g을 분해하였을 때, 투명한 용액이 되는 것을 확인하였다.

3.2 Cs 선택성 제올라이트

Cs 선택성 제올라이트는 SiO_4와 AlO_4 사면체로 이루어진 다공성 알루미노 실리케이트 결정을 기본 구조로 갖는 무기이온교환수지로서 이온교환능력이 우수함으로 원전 발생 방사성 핵종인 Cs 흡착에 사용된다[5]. 물질의 분해에 가장 많이 쓰이는 HNO_3 6 ml와 제올라이트에 결합되어 있을 금속 원소를 용해하기 위해 HCl 2 ml, 제올라이트의 실리케이트(SiO_2)를 분해하기 위해 HF과 함께 사용하였으나, NETEC으로부터 제공받은 Cs 선택성 제올라이트가 포함하고 있는 정확한 Si의 양을 모르기 때문에 HF의 비율을 임의로 0.5 ml를 넣고 제올라이트 0.05 g의 분해를 시도하였다. 산분해 용기에 시료와 산을 넣고 실온에서 반응이 일어나도록 약 30분 정도 방치한 후 극초단파 산분해 장치에 넣고 산분해 조건을 170 ℃ (ramping 5 min), 230 ℃ (ramping 5 min/soaking 10 min)으로 설정하여 처리하였을 경우, 육안으로 보기에는 제올라이트 알갱이가 모두 사라졌지만 용액이 약간 탁해 보였다. 이 용액을 25 ml 용량으로 희석하여 원심 분리한 결과, 두 층으로 분리되어 아래층은 흰색의 젤상이 형성되는 것을 볼 수 있었다. DC-Arc AES의 측정으로부터 이는 과량의 HF으로 인하여 제올라이트의 분해에 사용되지 않고 남아 있는 F^-가 Ca, Al과 착화합물을 형성했기 때문이다[6]. 제올라이트에 포함되어 있는 원소와 착화합물을 형성하는 과량의 HF을 제거하기 위해 과량의 H_3BO_3로 여러 번 처리하거나 극초단파 산분해 장치로 처리하였으나 이미 형성된 착화합물을 제거할 수 없었다. Essling에 의해 제안된 제올라이트의 분해법[7]으로부터 제올라이트 0.05 g에 물 6 ml, HNO_3 3 ml 및 HF 0.25 ml를 첨가하고 Table 3과 같은 조건으로 분해하였고, 25 ml 용량으로 한 후 원심 분리를 한 결과 위의 경우와 달리 층이 분리 되지 않는 것으로부터 이는 제올라이트를 분해하는 적합한 방법이라 여겨진다. 산분해 온도를 230 ℃까지 높이고자 했지만 200 ℃ 정도로 산분해 온도로 유지되었으며, 이는 HNO_3 보다 끓는 점이 낮은 H_2O가 많은 것에 기인한다.

Table 3. Acid mixtures and reaction condition for decompositions of non-radioactive, and radioactive zcolite

	Stage	MW1 (Temperature control)	MW2 (Power control)
Reagents	1	6 ml H_2O, 3 ml HNO_3, 0.25 ml HF	6 ml H_2O, 3 ml HNO_3, 0.25 ml HF
Digestion time (min)	1	20	25
Temperature (℃)	1	170(5), 200(5), 200(10)	-
Power (watt)	1	-	290(4), 400(10), 300(1), 250(10)

Cs 선택성 제올라이트를 산분해하여 용액으로 만드는 최적의 조건은 비방사성 시료로 반복적인 실험을 통하여 확립하였고, 이 조건(Table 3)에 근거하여 1.2963 μSv/h (0.05 g)의 감마 방사능이 있는 제올라이트 0.05 g을 물 6 ml, HNO_3 3 ml 및 HF 0.25 ml를 사용하여 분해하였다. 용액화된 제올라이트의 성분 원소를 ICP-AES와 AAS로 분석하기 위하여 기기의 시료 도입부를 손상시키는 HF의 함량을 줄이기 위해 다시 10배 희석하여 측정하였다.

3.3 활성탄

다양한 세공구조를 가진 탄소로서 무정형인 활성탄은 수처리 분야에서 독성 유기물 제거, 정수장의 고도정수처리용으로 사용되고 있으며, 원자력 발전소에서는 방사성 액체 폐기물 내에 존재하는 휘발성 핵종 ^{131}I의 기체상과 핵분열 과정에서 발생하는 기체상의 핵종을 선택적으로 제거하여 액체 폐기물의 부피를 줄이는데 사용되고 있다. 열적으로 안정한 6각형의 방향족 구조를 형성하고 있어 용매제에 의해 추출되지도 않고, 화합물에 의해 제거되지도 않는 안정적인 구조를 가지고 있기 때문에 이를 분해하여 맑고 투명한 용액을 얻는데 많은 어려움이 예상되었다. 활성탄을 분해하기 위해 180 ℃(5-10 min)에서 금속 성분 뿐만 아니라, 대부분의 유기물을 산화시키는 HNO_3과 강력한 산화제인 H_2O_2를 혼합 사용하였다. 0.05 g의 활성탄을 산분해 용기에 넣고 HNO_3 12 ml와 H_2O_2를 첨가한 후, 활성탄과 산의 반응에 의해 NO_x 가스가 발생하는 약 30 분 동안 실온에 방치하여 극초단파 산분해 장치를 이용하여 산분해하는 동안 과잉의 압력으로 인한 폭발 사고를 없애고자 하였다. 활성탄의 분해가 쉽지 않아 HNO_3의 산화력을 증가시켜 주기 위해 산분해 온도를 200 ℃에서부터 240 ℃까지 변화를 준 데 이어 시료의 양을 0.04 g으로 줄이고, 여러 번 반복 실험한 결과 분해되지 않고 활성탄이 남아 있는 경우가 대부분이었지만, 일부는 활성탄 입자가 모두 분해되어 맑고 투명한 용액이 되었다. 또, 같은 실험 조건이었는데도 불구하고 매 실험마다 극초단파 산분해 장치로부터 출력되는 에너지가 다르게 나타났다. 극초단파 산분해 장치로부터의 일관성이 없는 출력(에너지)으로 온도를 일정하게 유지(temperature feedback control)하는 것 보다 출력을 일정(power control)하게 유지하는 것이 실험 결과의 재현성 측면에서 볼 때 활성탄을 분해하는데 적합한 방법이라고 판단된다. 또한, 온도를 조절하여 산분해 할 때 사용하는 온도 감지계를 빼고 산분해하기 때문에 조작이 간편한 이점을 가지고 있다. 분해되지 않고 남아있는 활성탄의 완벽한 분해를 위해서 한 번의 산 분해가 끝난 후 H_2O_2 1 ml를 첨가하고 Table 4에 있는 방법으로 다시 한 번 분해하는 과정이 요구되었으며 그 결과, 활성탄이 모두 분해되었고 무색의 맑고 투명한 용액이 되었다.

Table 4. Acid mixtures and reaction condition for decompositions of non-radioactive, and radioactive active charcoal

	Stage	MW
Reagents	1	12 ml HNO_3, 1 ml H_2O_2
	2	1 ml H_2O_2
Digestion time (min)	1	50
	2	50
Power (watt)	1	250(10), 400(9.5), 280(0.5), 230(17), 210(13)
	2	Repeat one

활성탄을 분해하여 투명한 용액으로 만드는 최적의 조건은 비방사성 시료로 반복적인 실험을 통하여 확립하였고, 이 조건에 근거하여 모의 방사성 폐기물과 0.0308 μSv/h (0.05 g)의 감마 방사능이 있는 활성탄 0.05 g이 HNO_3 12 ml와 H_2O_2 2ml를 사용하여 분해되는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 슬러지

원자력 발전소의 원심분리기 슬러지는 중/저준위 폐기물로서, 비방사성 시료의 예비실험 없이 본 분해 실험에서는 영광 3 발전소의 원심분리기에서 발생된 0.4584 μSv/h (0.05 g)의 감마 방사능이 있는 폐슬러지를 제올라이트와 비슷한 조건으로 산분해 하였다. 0.05 g의 슬러지를 H_2O 6 ml, HCl 3 ml 및 HF 0.25 ml와 함께 산분해 용기에 넣고 Table 5에 나타낸 조건으로 처리하였으며, 한 번의 조작으로는 슬러지가 모두 분해되지 않고 다량이 남아 있어 HNO_3 3 ml를 첨가하여 같은 조건으로 다시 산분해 하였다.

Table 5. Acid mixtures and reaction condition for decompositions of radioactive sludge

	Stage	MW
Reagents	1	6 ml H_2O, 3 ml HCl, 0.25 ml HF
	2	3 ml HNO_3
Digestion time (min)	1	25
	2	25
Power (watt)	1	250(4), 400(10), 280(1), 230(1), 210(10)
	2	Repeat one

3.5 시료의 성분 분석 결과

Table 6은 모의 핵종으로 선정된 Cs, Fe, Ni, Re 및 Sr을 첨가한 모의 방사성 폐기물의 입자가 모두 분해된 상태에서 ICP-AES, AAS의 측정을 통해 얻은 금속 원소의 회수율을 나타낸 것이다. 극초단파 산분해 방법에 의해 용액화 된 모의 방사성 폐기물에 포함된 핵종의 회수율은 94 % 이상이며, 이온교환수지를 제외한 제올라이트와 활성탄의 산분해 조건이 다름에도 불구하는 핵종의 회수율은 비슷한 경향을 보인다. 이로부터, 혼합산과 극초단파 산분해 장치를 사용한 재현성 있는 시료의 분해는 방사성 시료가 포함하고 있는 핵종의 손실을 최대한 줄일 수 있어 신뢰성 있는 분석 결과를 얻을 수 있다.

비방사성 시료와 방사성 시료의 대한 원전 발생 방사성 폐기물의 분석 대상 원소들을 중심으로 성분 원소 측정 결과를 Table 7에 나타내었으며, 방사성 시료 내의 B, Mg, Li, Mn의 농도가 비방사성 시료에 비해 매우 높은 것을 볼 수 있다.

Table 6. Recovery of amount of 5 metals in simulated radioactive ion exchange resin

	1	2	3	AVG±RSD
Cs (%)	102.22	98.00	103.11	101.11±2.70
Fe (%)	95.80	100.40	102.00	99.40±3.24
Ni (%)	99.60	102.40	100.40	100.80±1.43
Re (%)	98.40	103.60	100.00	100.67±2.65
Sr (%)	94.80	98.00	97.40	96.73±1.76

4. 결 론

원자력 발전소에서 발생하는 이온교환수지, 제올라이트, 활성탄, 슬러지등과 같은 방사성 폐기물의 용액화를 위해 밀폐형 극초단파 산분해 장치를 이용하였으며, 이 방법이 실제 방사성 폐기물 내에 포함된 핵종을 분석할 때 적합한 방법인지를 확인하기 위해 금속 원소들을 첨가하여 모의 방사성 폐기물을 만든 후 같은 산분해 조건을 적용하여 보았다. 그 결과, 금속 원소들은 94 % 이상 회수되었음을 ICP-AES와 AAS의 분석을 통해 확인할 수 있었다.

각각의 모의 방사성 폐기물의 완벽한 용액화를 위해 혼합산 비, 시료의 양과 적절한 산 분해 과정을 변화시켜줌으로써 밀폐형 극초단파 산분해 장치를 이용한 분해 방법을 확립하였으며, 이 방법에 의해 분해된 비방사성, 방사성 시료 용액 내의 성분 원소의 분석은 추후 방사성 폐기물에 포함된 핵종의 종류와 농도를 정확하게 파악하는데 필요한 기초 자료로 사용될 것이다.

5. 참고문헌

1. A. Tsolakidou, J. B. I. Garrigos and V. Kilikoglou, Analytica Chimica Acta, 474 (2002) 177
2. D. N. Papadopoulou, G. A. Zachariadis, A. N. Anthemidis, N. C. Tsirlganis and J. A. Stratis, Analytica Chemica Acta, 505 (2004) 173
3. P. J. Lamothe, T. L. Fries and J. J. Consul, Anaytica. Chemica., 54 (1986) 1881
4. A. Agazzi and C. Pirolab, Journal of Microchemistry, 67 (2000) 337
5. R. Harjula, J. Lehto, J. H. Pothuis, A. Dyer and R. P. Townsend, Journal of the chemical society faraday transactions, 11 (1993) 1877
6. H. M. Kingston and S. J. Haswell, American chemical society, Washington, DC, Microwave-Enhanced chemistry, (1977) 292
7. A. M. Essling, E. A. Huff and D. G. Graczyk. Argonne National Laboratory, Innovative methods for inorganic sample preparation, ANL/ACL-92/1 (1992)

Table 7. ICP-AES and AAS results of non-radioactive and radioactive wastes from NETEC

	Active charcoal		Low level resin		Mixed resin		Cation resin		Sludge		Zeolite	
	used	raw	used	raw	used	raw	used	raw	used	raw	used	raw
Al	149±28	0.3±137*	158±106		1.3±168*	114±99	225±26	13±92	14±5.0*		78±5.4*	32±13*
B	1.0±3.8*	11±200	15±30		236±7.9	7.8±55	303±3.1	<5	767±4.0		602±4.6	26±22
Ca	357±14	0.4±15*	90±145		19±2.6*	58±59	376±9.1	13±28	3.3±12*		13±3.9*	0.5±49*
Co	5.8±9.6	<5	1.3±9.9		0.9±16	4.1±63	4.1±7.7	<5	184±4.2		6.4±36	12±2
Cr	12±37	-	2.4±38		7.5±104	-	2.9±49	-	3.0±13		16±22	-
Cu	38±12	-	14±21		20±27	-	12±19	-	8.6±9.4*		14±4.7	-
Fe	757±22	38±34	74±95		778±78	15±20	542±4.6	13±16	421±6.4*		19±5.4*	19±11*
K	172±27	-	200±9.9		3.9±10*	-	5.2±3.2*	-	2.4±6.6*		15±4.3*	-
Li	7.9±33	<5	5.8±25		76±8.0	<5	119±2.6	<5	19±17		23±4.7	<5
Mg	120±25	<5	41±150		10±3.7*	3.9±640	16±1.1*	7.5±16	5.0±7.9*		5.4±6.6*	3.0±17*
Mn	9.1±136	-	1.4±109		259±3.3	-	133±2.0	-	5.3±5.5*		89±10	-
Na	162±49	-	131±124		22±4.1*	-	38±3.0*	-	1.7±17*		18±1.3*	-
Ni	26±123	7.6±10	3.4±9.9		3.0±33	4.6±28	57±2.8	3.2±22	26±7.4*		9.4±4.7	20±38
Si	300±15	0.7±97*	324±117		4.0±170*	<5	64±15	55±49	43±5.6*		240±5.5*	294±8*
Zn	26±36	65±15	1.0±76		14±26	17±165	145±1.1	25±32	9.0±5.0*		70±15	0.2±15*

unit: μg/g, *: mg/g (Average±RSD)