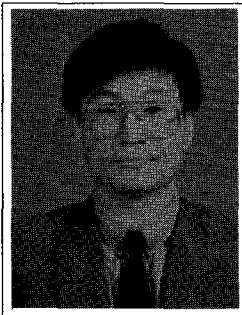


고분해능 ICP-질량 분석기를 이용한 방사성 핵종 분석법

김 창 규

한국원자력안전기술원
방사선환경평가실 선임연구원



도입하였다.

본 분석법은 기존의 방사능 분석법에 비해 적은 시료량으로도 고감도의 분석 결과를 얻을 수 있으며, 시료 전처리 절차를 간소화할 수 있고, 짧은 시간 내에 많은 시료를 측정할 수 있는 신속·간편한 분석 방법으로서, 많은 시료를 한정된 시간 내에 반복적으로 분석하는 환경 감시 업무 분야에서 분석에 소요되는 인력과 시간을 절감할 수 있다는 점에서 매우 큰 의미가 있다.

특히 본 분석법은 방사성 동위원소 비 측정도 가능하며, 환경 중에 방출된 방사성 핵종의 기원을 파악하는 수단으로도 활용할 수 있다.

따라서 앞으로 핵사찰, 방사성 폐기물 처분장 또는 재처리 시설 주변에 대한 환경 감시 분야 등 원자력 산업 분야를 비롯하여, 반도체 재료 또는 금속 재료 연구 및 환경 오염 연구

등 일반 산업 분야에도 다양하게 활용될 것으로 기대된다.

개발 경위와 동기

환경 중에 존재하는 Tc-99, Np-237, Np-239, Pu-239, Pu-240과 같은 장반감기 인공 방사성 핵종은 환경 중에 극미량으로 존재하며, 붕괴 정수가 작기 때문에 이들 핵종의 방사능 농도는 매우 낮다.

따라서 원자력 시설 주변 등의 특수한 경우를 제외하고는 이들 핵종의 방사능을 직접 측정하는 데는 많은 어려움이 있어, 환경 중 이들 핵종에 대한 자료가 충분하지 않다.

그러나 이들 핵종은 대부분 반감기가 매우 길며 높은 에너지의 α -선 또는 β -선을 방출하는 핵종으로서, 내부 피폭 선량 평가 측면에서 매우 중요하며 이들 핵종의 저장에 대한 장

한

국원자력안전기술원은 원자력 안전 규제의 일환으로, 국내 원자력 시설 주변에 대한 환경 감시를 비롯하여, 국내외 원자력 사고에 대비한 방사능 오염의 조기 탐지 및 국민의 건강 보호를 목적으로 전국토 환경 방사능을 늘 감시하고 있다.

이번 연구에서는 고분해능 유도 결합 플라즈마 질량 분석법을 국내에서 처음으로 방사성 핵종 분석법에

기적인 대책도 필요할 것이다.

특히 앞으로 동남아 지역의 원자력 산업 증대 가능성에 따라 방사성 폐기물의 처리·처분에 관한 기술 발전이 예상되는 시점에서, 방사성 폐기물의 처리·처분 시설 및 핵연료 재처리 시설로부터 방출될 수 있는 장반감기 방사성 핵종에 대한 점진적인 환경 감시 기술의 발전이 요망되고 있다.

원자력 시설 주변의 장반감기 방사성 핵종의 측정 가능성을 고려하여, 근래에 극저준위 장반감기 방사성 핵종의 측정 방법이 많이 검토되었다.

종래의 장반감기 방사성 핵종의 분석법으로는, 이들 핵종을 원자로 내에서 중성자로 조사하여 핵반응에 의해 생성된 핵종을 고순도의 게르마늄 반도체 검출기(High Purity Germanium Detector)로 측정하여 정량하는 방사화 분석법과 α -spectrometry 및 액체 섬광 계수법 등을 이용하여 분석 대상 핵종이 붕괴할 때 방출되는 방사선을 한 개씩 측정하는 방법 등이 있다.

그러나 방사화 분석법의 경우 시료를 조사시킬 수 있는 원자로가 필요하며, 시료를 중성자로 조사하는 과정에서 다량의 방사능이 생성되어 실험실을 오염시킬 가능성이 있어, 극저준위의 방사능을 측정하기에는 매우 곤란하다는 단점이 있다.

또한 α -spectrometry 및 액체 섬광 계수법은 방사능 농도가 매우 낮

은 시료를 측정하는 경우, 정량에 필요한 계수치를 얻는 데 시간이 너무 많이 걸린다는 단점이 있다.

이러한 기존의 방사능 분석법의 단점을 보완하기 위하여, 새로운 방사능 분석 장비인 고분해능 유도 결합 플라즈마 질량 분석기(High Resolution Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer : 고분해능 ICP-질량 분석기)를 국내에서는 처음으로 방사성 핵종 분석에 도입하게 되었다.

기존 분석법과의 차이

고분해능 ICP-질량 분석기를 이용하여 장반감기 방사성 핵종을 측정하는 경우, 최대의 장점은 측정 시간이 매우 짧고 미량의 시료로도 정량이 가능한 계수치를 얻을 수 있다는 점에서 기존의 방사능 측정법과 비교된다.

기존의 방사능 측정법은, 붕괴하는 원자로부터 방출되는 방사선을 일일이 하나씩 측정하기 때문에 극저준위 방사능을 계측하기가 곤란하며, 장시간 계측하더라도 수mBq 정도까지 밖에 계측할 수 없다.

방사능 단위인 Bq은 단위 시간당 붕괴수를 의미하는데, 예를 들어 1mBq은 1,000초에 한 번 붕괴하는 방사능량에 해당한다.

어떤 방사성 핵종의 방사능량을 A, 그 핵종의 반감기를 T, 핵종의 원자

수를 N이라 할 때, 붕괴 정수는 $\lambda = \ln 2/T$ 이므로 방사능 $A = \ln 2 \times N/T$ 의 관계가 성립한다.

반감기가 길면 길수록 단위 시간당 붕괴수는 적어지고 결국 방사능은 적어지게 된다.

따라서 저준위의 장반감기 방사성 핵종을 정량하는 경우 충분한 계수치를 얻기 위해서는, 충분한 붕괴가 이루어질 만큼의 측정 시간과 높은 계측 효율 및 낮은 백그라운드를 갖는 검출기가 필요하다.

어떠한 방사성 핵종이라 하더라도 정량하기에 충분한 원자수가 얻어진다면, 통상의 원소 분석으로도 분석이 가능할 것이다.

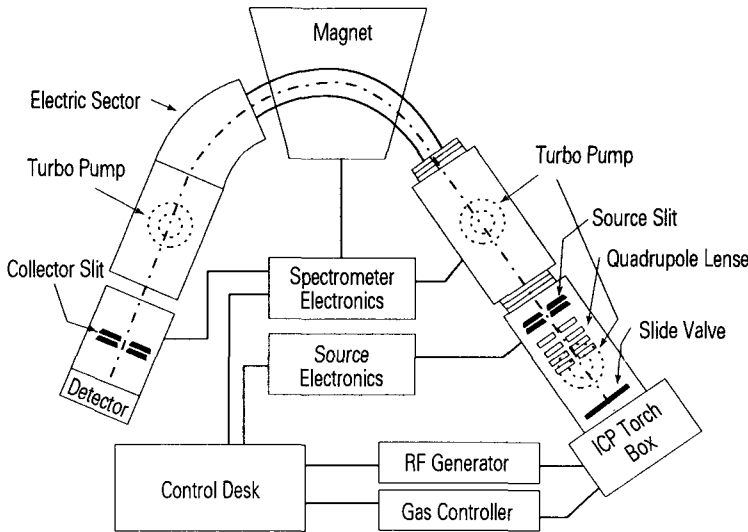
반감기가 짧은 핵종과 반감기가 긴 핵종의 방사능이 동일하다고 할 때, 후자의 원자수가 압도적으로 많다.

질량 분석법은 원자의 갯수를 측정하는 방법으로서, 반감기와 원자수의 관계를 잘 고려하면 방사능을 측정하는 것보다 훨씬 편리하게 방사성 핵종을 정량할 수 있다.

질량 분석법에서 검출 효율을 E라고 할 때, 총계수율은 EN이 된다.

방사능 측정법에서는 다수의 시료를 측정할 때 측정 시간을 무한대로 길게 할 수 없기 때문에, $E \gg 1$ 조건만 된다면 질량 분석법이 방사능 측정법보다 훨씬 유리한 분석법이 될 수 있다.

고분해능 ICP-질량 분석 장치는 88년경에 개발되었으며, 다른 분석



(그림 1) 고분해능 ICP-질량 분석기의 개략도

장비와 비교할 때 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- ① 주기율표의 대부분의 원소에 대하여 초미량 분석이 가능하다.
- ② Dynamic Range가 매우 넓다.
- ③ 원소의 동향을 손쉽게 파악할 수 있다.
- ④ 다원소 동시 분석이 가능하다.
- ⑤ 스펙트럼이 매우 간단하다.
- ⑥ 백그라운드가 매우 낮다.
- ⑦ 동위체 분석이 가능하다.

이상과 같은 장점을 가진 고분해능 ICP-질량 분석법은 기존의 방사능 분석법에 비해 적은 시료량으로도 고감도의 분석 결과를 얻을 수 있으며, 시료 전처리 절차를 간소화할 수 있고, 짧은 시간 내에 많은 시료를 측정할 수 있는 신속·간편한 분석 방법

이다.

고분해능 ICP-질량 분석기의 개요

고분해능 ICP-질량 분석기는 <그림 1>에 나타난 것처럼 Ion Source, Interface, Ion 빔의 조정부, Source Slit, 에너지 분석부(Electrostatic Analyzer), 질량 분석부(Mass Analyzer), Collector Slit, 검출기 부분으로 구성되어 있다.

Ion Source인 ICP(Inductively Coupled Plasma) 부분은 이온을 주입하기 위하여 플라즈마에 고전압이 걸려 있는 점을 충분히 고려하여, ICP Torch를 외부로부터 제어할 수 있도록 되어 있다.

한편 플라즈마 부분에 고전압이 걸

려 있는 점을 감안, 방전 현상을 방지하기 위하여 Torch에 Bonnet가 설치되어 있다.

이온 주입을 위한 고전압은 샘플링 및 Skimmer Cone을 통하여 플라즈마에 걸리도록 되어 있으며, Interface 뒤쪽에는 이온 렌즈가 설치되어 있다.

그 이유는 Skimmer Cone을 통하여 들어온 원형 이온 빔의 형상을 질량 분석부에서 필요로 하는 타원형으로 바꾸어서 이온 빔을 매우 작게 만들어 분해능을 상승시키는 경우 감도의 저하를 최소화하기 위한 것이다.

한편 이온 렌즈부 후미에는 Source Slit이 있고 그 뒤에 제2의 Shutter 밸브가 설치되어 있어, 질량 분석부 측의 Shutter 개폐에 의한 진공도(10^{-7} hPa) 저하 현상을 최소화하였다.

질량 분석부에는 반경 189mm, 회전 각도 70° C의 전기장 섹터와 반경 254mm, 회전 각도 35° C의 자기장 섹터로 구성되어 있는 Double Focusing 형태의 질량 분석기가 설치되어 있다.

질량 분석부의 입구 및 출구쪽에 있는 양측 Slit의 개폐를 조절하여, 분해능은 최대 10,000 정도까지 높일 수 있도록 되어 있다.

이온의 검출기 부분은 저감도(고농도 측정용, >10ppb)용 Faradaycup과 고감도(저농도 측정용)용 Multiplier를 빔의 강도에 따라 적절히 활

용할 수 있는 Dual Detector 방식으로 되어 있다.

직선성(Dynamic Range)은 거의 10order 정도로 매우 폭넓은 범위이며, 검출기의 위치는 중앙에 Faradaycup이 있고 양쪽에 Multiplier가 설치되어 있다.

이것은 한 쪽 Multiplier가 가열된 경우에는 다른 하나의 Multiplier로 자동 교체되도록 함으로써, 검출부의 진공 상태를 지속적으로 유지할 수 있도록 되어 있다.

측정 대상 핵종

앞서 반감기와 원자수와의 관계에서 언급하였듯이, 고분해능 ICP-질량 분석법에서 분석 대상은 비교적 반감기가 긴 핵종에 해당하며, 현재 장비 성능으로는 수백년 정도의 반감기를 가진 핵종은 분석이 가능하다.

고분해능 ICP-질량 분석법을 이용하여 분석할 수 있는 핵종을 천연 방사성 핵종과 인공 방사능으로 나누어 검토하여 보고자 한다.

1. 천연 방사성 핵종

가. 1차 방사성 핵종

1차 방사성 핵종은 <표 1>에 나타난 것처럼 대부분 지각 형성물로서, 매우 긴 반감기를 가지는 핵종들이며, 대다수가 지질학적 연구에서 현대 측정에 많이 이용되고 있다.

이들 핵종은 대부분 동위체 존재비

<표 1> 천연에 존재하는 장반감기 방사성 핵종(1차 천연 방사성 핵종)

핵 종	반감기(年)	붕괴 형식	동위체 존재비 (%)	원소의 천연 존재량 (중량비 ppm)
K-40	1.27×10 ⁹	β-(89%) EC(11%)	0.0118	2.59×10 ⁴
Rb-87	4.8×10 ¹⁰	β-	27.8	115
Lb-133	1.1×10 ¹¹	β-(30%) EC(70%)	0.089	18
Ce-142	~5×10 ¹⁵	α	11.07	46
Nd-144	2.4×10 ¹⁵	α	23.85	24
Sm-147	1.1×10 ¹¹	α	14.97	6.5
Gd-152	1.1×10 ¹⁴	α	0.20	6.4
Lu-176	3×10 ¹⁰	β-	2.59	0.75
Hf-174	2×10 ¹⁵	α	0.18	3
Re-187	4.3×10 ¹⁰	β-	62.9	0.05
Pt-190	7×10 ¹¹	α	0.0127	0.005
Th-232	1.41×10 ¹⁰	α	100	15
U-235	7.13×10 ⁸	α	0.72	4
U-238	4.51×10 ⁹	α	99.27	4

가 크기 때문에 동중체의 방해가 없는 한, 고분해능 ICP-질량 분석법으로 분석이 가능하다(다만 K-40은 고분해능 ICP-질량 분석기에서 사용되는 Ar-40과 중첩되기 때문에 곤란).

1차 방사성 핵종의 붕괴에 의해 생성되는 핵종을 2차 방사성 핵종이라 한다.

Th-232, U-235, U-238을 친핵종으로 하는 Th, Ac, U의 3가지 붕괴 계열을 보면, 붕괴 계열 핵종은 Pb 이상의 무거운 원소에 속한다.

Ar 가스에 기인하는 방해 이온은 질량수 80 이하에 존재하기 때문에, 고분해능 ICP-질량 분석법은 일반적으로 질량수 80 이상의 무거운 원소

에 대해 감도가 높으며 Th, Ac 및 U 계열 핵종 분석에 매우 유용하다.

특히 이들 붕괴 계열 핵종 중에서 Bi와 Pb를 제외하고는 안정 동위 원소가 존재하지 않기 때문에, 안정 원소에 의한 방해 효과도 거의 없어 이들 붕괴 계열 핵종의 분석이 용이하다.

나. 유도 방사성 핵종

우주선과 대기 중에 존재하는 원소와의 핵반응에 의해 생성되는 유도 방사성 핵종은 대부분 가벼운 원소로서 질량수가 작은 핵종이 많다.

지구 화학 및 우주 화학에서 흥미의 대상이 되는 Be-10, C-14, Al-26, Cl-36과 방사성 폐기물 처분장

〈표 2〉 고분해능 ICP-질량 분석법과 α -spectrometry에 의한 분석법 비교

핵종	표준 시료 농도 ($\mu\text{Bq/ml}$)	시료 처리 방법	측정 시간(초)	계수치 (Count수)
Ra-226	4,000	직접 측정	180	207
		전기 전착	80,000	86
Th-232	41.3	직접 측정	60	3,452
		전기 전착	400,000	4.46
U-238	19	직접 측정	60	832,000
		전기 전착	400,000	2

주: 삼단(고분해능 ICP-질량 분석법), 하단(α -spectrometry)

주변에서 주요 환경 감시 대상 핵종인 I-129은, 반감기가 길기 때문에 고분해능 ICP-질량 분석법에 의해 정량이 가능할 것으로 판단된다.

다만 이들 핵종은 1차 방사성 핵종에 비해 질량수가 작아, Ar 가스 및 측정 시료 중의 산용액으로부터 나타나는 방해 효과에 의해 분석에 어려움이 다소 있을 것으로 예상된다.

그러나 고분해능 ICP-질량 분석기는 분해능이 좋기 때문에 방해 원소와 분석 대상 핵종을 분리할 수 있을 것으로 판단된다.

앞으로 고분해능 ICP-질량 분석법에 의한 장반감기 유도 방사성 핵종 분석 방법 개발은 흥미로운 연구 분야가 될 것이다.

2. 인공 방사성 핵종

U-235의 핵분열에 의해 생성되는 핵종 및 중성자 포획 반응에 의해 생성되는 초우라늄 원소는 주로 대기 핵실험에 의해 자연 환경에 존재하고 있다.

초우라늄 원소는 안정 동위체가 존재하지 않기 때문에, 고분해능 ICP-질량 분석법을 적용하기에 가장 적합한 핵종이다.

대상 핵종으로는 Np-237, Pu-239, Pu-240, Am-241 등을 예로 들 수 있으며, 핵분열 생성물로서는 안정 동위체가 존재하지 않는 Tc-99이 대상 핵종이다.

고분해능 ICP-질량 분석법은 이들 핵종에 대한 감도가 매우 높아, 원자력 시설에 의해 오염된 지역이 아닌 곳의 일반 환경 시료 중에서도 이들 핵종의 분석이 가능하다.

환경 시료 중 방사성 핵종 분석법 검증

1. 천연 방사성 핵종 분석

고분해능 ICP-질량 분석법을 이용하여 장반감기 천연 방사성 핵종을 분석한 예로서 Ra-226, U-238 및 Th-232 표준 시료에 대한 고분해능 ICP-질량 분석법 측정 결과와 기존 분석법인 α -spectrometry에 의해

얻어진 계수치를 비교하였다(표 2).

고분해능 ICP-질량 분석기를 이용한 U-238 및 Th-232 분석에서는, 단위 질량당 측정 시간은 1회 측정에 약 1분 정도가 소요되었으며, U-238 및 Th-232에 비해 반감기가 짧은 Ra-226의 경우는 약 3분간 계측하였다.

한편 α -spectrometer를 이용한 분석에서는, U-238 및 Th-232에 대해서는 400,000초(약 5일간), Ra-226은 80,000초(약 1일간) 동안 측정하였다.

〈표 2〉에서 알 수 있듯이 고분해능 ICP-질량 분석법에서의 계측 시간이 α -spectrometer를 이용한 분석법에서의 계측 시간에 비해 현저히 짧음에도 불구하고, 측정 결과 얻어진 계수치는 1,000배에서 10,000배 정도 높은 것을 알 수 있다.

2. 인공 방사성 핵종

가. Tc-99의 정량

고분해능 ICP-질량 분석법을 이용하여 Tc-99를 정량하기 위해서는 질량수 99 부근에서 피크를 나타내는 Ru 등의 방해 원소를 완전히 제거하지 않으면 안된다.

또한 토양 중 Tc-99의 존재량은 토양 1g당 약 0.5pg($0.5 \times 10^{-12}\text{g}$) 정도로서 극히 적은 양이 존재하기 때문에, 토양 중 Tc-99를 정량하기 위해서는 약 10g 정도의 토양이 필요하며 측정에 앞서 약간의 화학 분리

가 요구된다.

토양 중의 Tc-99를 정량하기 위하여 토양 약 10g을 450°C에서 회화시킨 후, 30% H₂O₂를 포함하는 8M HNO₃ 용액에 넣고 가열하여 Tc-99를 추출한 다음, 음이온 교환 수지 및 Cyclohexanone을 이용하여 용매 추출법으로 Tc-99의 방해 원소인 Ru-99를 완전히 제거한 후, 고분해능 ICP-질량 분석기를 이용하여 계측하였다.

〈표 3〉은 실제 토양 시료 및 해저토에 대한 분석 결과를 나타낸 것이다.

본 방법에 의해 얻어진 결과는 기존의 분석법인 액체 섬광 계수법(Liquid Scintillation Counting)에 의한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

본 분석법에 의한 검출 한계는 액체 섬광 계수법에 비해 약 1/5,000 정도 낮은 0.005mBq/ml(0.008 pg/ml) 정도로서, 초극미량의 Tc-99도 측정이 가능함을 시사하고 있다(〈표 4〉).

또한 토양 중 Tc-99 분석을 위하여 100g 이상의 시료가 요구되는 기존의 방사능 분석법에 비해 1/10 정도의 시료로도 분석이 가능하며 훨씬 좋은 감도를 나타내고 있다.

나. Np-237 정량

Np-237은 원자 번호 93번의 초우라늄 원소 중의 하나로서, 고분해능 ICP-질량 분석법을 이용하여 분석하

〈표 3〉 환경 시료 중 Tc-99 분석 결과

시료명	Tc-99의 방사능 농도(Bq/kg, 건조토)	
	고분해능 ICP-질량 분석법	액체 섬광 계수법
국내 표층 토양(0~5cm)	0.33±0.03	0.31±0.06
영국 Ravenglass 해저토	70.2±5.2	68.1±1.7

〈표 4〉 장반감기 방사성 핵종에 대한 고분해능 ICP-질량 분석법의 검출 한계

핵종	반감기(年)	검출 한계	
		(mBq/ml)	(pg/ml)
Tc-99	2.1×10 ⁵	0.005	0.008
Ra-226	1.6×10 ³	0.22	0.006
Th-232	1.4×10 ¹⁰	8.1×10 ⁻⁸	0.02
Np-237	2.1×10 ⁶	5.3×10 ⁻⁵	0.002
U-238	4.5×10 ⁹	2.5×10 ⁻⁷	0.02
Pu-239	2.4×10 ⁴	0.009	0.004

〈표 5〉 환경 시료 중 Np-237 분석 결과

시료명	Np-237의 방사능 농도(mBq/kg, 건조토)		
	고분해능 ICP-질량 분석법	α-spectrometry	방사화 분석법
국내 표층 토양-1	13.0±0.4	-	13.4±0.7
국내 표층 토양-2	13.7±0.5	11.8±3.7	13.2±1.9
비키니 토양	(0.89±0.04)×10 ³	(0.9±0.1)×10 ³	(1.0±0.1)×10 ³
영국 Ravenglass 해저토-1	(2.2±0.1)×10 ³	(2.5±0.1)×10 ³	(2.7±0.2)×10 ³
영국 Ravenglass 해저토-2	(6.1±0.1)×10 ³	(6.4±0.3)×10 ³	(6.3±0.4)×10 ³

는 경우 방해가 되는 원소는 전혀 없다.

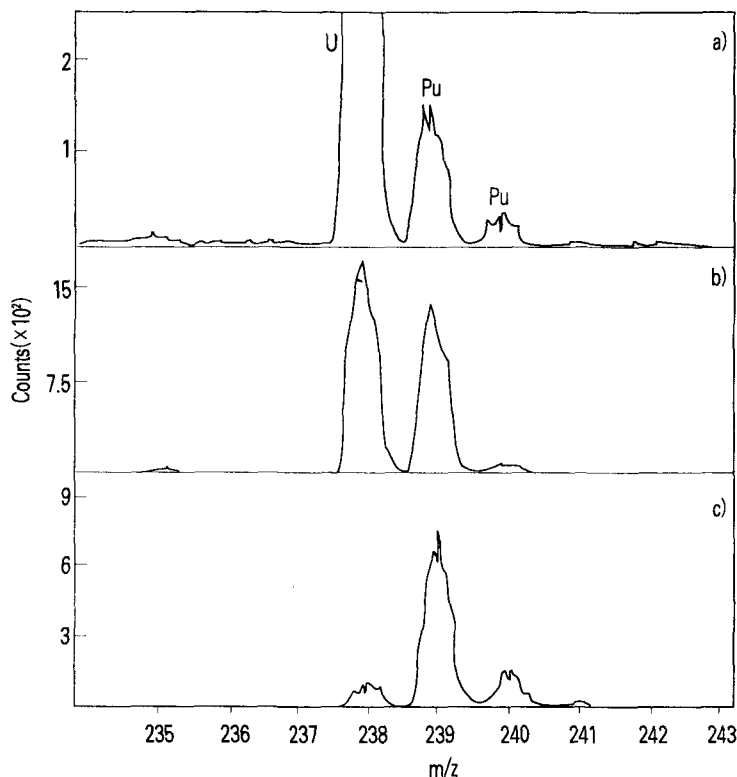
따라서 백그라운드 가 거의 0에 가까우며 분석 감도도 매우 좋다.

그러나 환경 중에 존재하는 Np-237 양은 0.5pg(0.5×10⁻¹²g) 정도로서, 직접 분석은 불가능하며 약간의 화학 분리 절차가 필요하다.

〈표 5〉는 국내 표층 토양과 60년대

대기 핵실험을 하였던 비키니 환초의 토양 및 영국 셀라필드 재처리 시설 주변의 해저토 중 Np-237을 고분해능 ICP-질량 분석법을 이용하여 분석한 결과이며, 다른 방사능 분석법에 의한 결과와 비교·검토할 것이다.

고분해능 ICP-질량 분석법에 의한 결과는 α-spectrometer 및 방사화



a) 일반 표층 토양 b) 일본 니시야마 토양 c) 영국 Ravenglass 해저토

〈그림 2〉 환경 시료 중 Pu-239 및 Pu-240의 질량 스펙트럼

〈표 6〉 토양 및 해저토 중 Pu-239, Pu-240의 방사능 및 Pu-240/Pu-239의 방사능비

시료명	Pu-239, Pu-240의 방사능(Bq/kg, 건조토)	Pu-240/Pu-239 방사능비	
		고분해능 ICP-질량 분석법	Fission Track Method
국내 표층 토양	1.85±0.05	0.66±0.03	0.76±0.04
일본 니시야마 토양	29.0±0.4	0.120±0.004	0.11±0.01
영국 Ravenglass 해저토	(12.5±0.2)×10 ³	0.73±0.01	-

분석법에 의한 결과와도 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

한편 본 방법의 검출 한계는 기존 방사능 분석법에 의한 검출 한계에 비해 약 1/4,000 정도 낮은 5.3×

10⁻⁵mBq/ml(0.002pg/ml) 수준으로 초극미량 분석이 가능함을 시사한다.

다. Pu-240/Pu-239의 동위 원소 비 측정

60년대 수행되었던 과거 핵실험과 64년 인도양 상공에서 Pu-238 약 17kCi를 탑재한 SNAP-9라는 인공 위성의 폭발 등으로 인하여 플루토늄 낙진이 지구 환경 중에 존재하게 되었다.

이외에 미국 TMI 원전 사고와 옛 소련 체르노빌 원전 사고 등으로 인하여 지역적인 환경 오염이 있었다.

그러나 최근에는 핵실험 등에 의해 자연 환경 중에 방출되어 있는 플루토늄 이외에 원자력발전소, 핵연료의 재처리 및 방사성 폐기물의 해양 투기 등으로 인한 환경 오염에 많은 관심이 집중되고 있다.

따라서 환경 중에 존재하는 플루토늄의 기원을 파악하는 것은, 환경 보전 차원뿐만 아니라 원자력 관련 시설의 핵활동에 대한 정보 입수 및 방사능 관리 측면에서도 매우 중요하다고 판단된다.

종래의 α-spectrometry를 이용한 플루토늄의 분석에서는, Pu-239의 α선 에너지(5.16MeV)와 Pu-240의 α선 에너지(5.17MeV)가 매우 비슷하여 두 동위 원소에 대한 각각의 방사능을 측정할 수 없으나, 고분해능 ICP-질량 분석법을 이용함으로써 Pu-239, Pu-240을 각각 정량할 수 있었으며, 이들의 동위 원소비의 측정도 가능하였다.

〈표 6〉은 우리 나라 일반 토양과 45년 플루토늄 원자 폭탄이 투하된 일본의 나가사키시 니시야마의 토양

및 영국 셀라필드 핵연료 재처리 시설 주변 Ravenglass에서 채취된 해저토 중의 Pu-240/Pu-239 동위 원소비를 각각 나타낸 것이다.

〈그림 2〉는 각 시료 중 Pu-239 및 Pu-240에 대한 질량 스펙트럼이다.

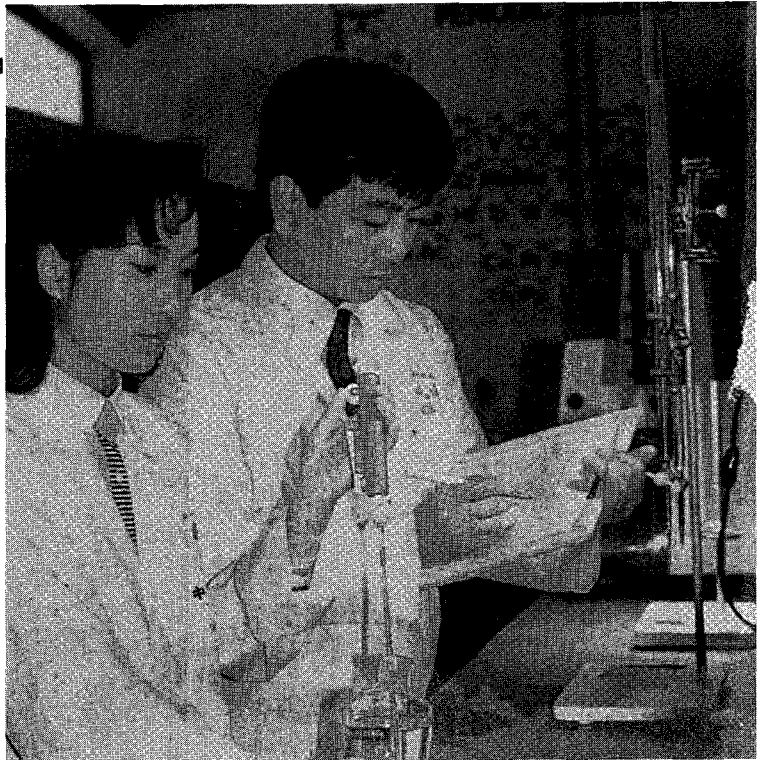
고분해능 ICP-질량 분석법에 의한 Pu-240/Pu-239 동위 원소비는 Fission Track법에 의해 얻어진 결과와 일치하는 값을 나타내었다.

일반 토양 중에 존재하는 Pu-240/Pu-239 방사능비는 0.66으로 과거 핵실험으로 인한 방사능 낙진 준위였으며, 일본의 원자 폭탄이 투하된 지역에서의 Pu-240/Pu-239 방사능비 0.12와 핵연료 재처리 시설 주변 해저토 중의 Pu-240/Pu-239 방사능비 0.73과는 서로 다른 방사능비를 나타내고 있다.

이러한 결과는, Pu-240/Pu-239 방사능비는 플루토늄의 기원을 파악하는 데 중요한 정보를 제공하고 있음을 시사해 주며, 앞으로 고분해능 ICP-질량 분석법은 핵사찰 등 원자력 시설의 핵활동에 대한 감시 업무에도 유용한 분석 수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 전망

고분해능 ICP-질량 분석법은 단순히 미량의 안정 원소 분석뿐만 아니라 방사능 분석에서 검출하기 곤란한 초미량의 장반감기 방사성 핵종 분석



환경 방사능 분석을 위한 시료 전처리 모습

에 충분히 응용할 수 있는 방사능 분석 분야의 새로운 분석 기법이다.

또한 고분해능 ICP-질량 분석법을 이용함으로써 α -spectrometer를 이용한 분석법에서 핵종의 식별이 곤란한 동위 원소비 측정도 가능하게 되었다.

이러한 분석 기법은 기존의 분석법에 비해 감도가 매우 높고 단시간 내에 많은 시료를 신속히 분석할 수 있어, 원자력 시설 주변 환경 감시에 유용한 분석법이 되리라 기대된다.

다만 고분해능 ICP-질량 분석기가 다른 방사능 계측 장비에 비해 고가이며, 반감기가 매우 짧은 방사성 핵종에 대한 분석이 곤란하다는 단점을 가지고 있어 만능의 방사능 분석법은 결코 아니지만, 본 분석 장비가 보편

화되어 가격이 저렴해지고 기존의 방사능 분석법과 상호 보완하여 사용된다면 그 효력을 더욱 발휘할 수 있을 것이다.

현재 국내에는 방사성 폐기물의 처분 시설이나 핵연료 재처리 시설이 없으나, 앞으로 방사성 폐기물 처분장이 건설되는 경우 고분해능 ICP-질량 분석법은 처분장 주변 환경 중 장반감기 방사성 핵종의 측정에 이용될 것이며, 핵사찰에 필요한 분석 수단으로도 활용될 수 있을 것이다.

또한 원자력 분야뿐만 아니라 반도체 재료, 금속 재료 연구 분야 및 환경 오염 연구 등 일반 산업 분야에 이르기까지 그 활용 범위가 확대될 것으로 전망된다. ☉