

지구과학에서의 환경 동위원소 이용

김 규 한
이화여자대학교 과학교육과 교수

김 정 무
한국원자력연구소 방사선환경감시 선임연구원

지난 30년 동안 동해와 캄차카 반도 근해에 다량의 핵폐기물을 버려왔던 사실이 '92년말 러시아 대통령 직속위원회에서 발표되었으며 러시아가 작년 가을 아무런 통보도 없이 또다시 동해에 액체 폐기물을 버리다가 국제 환경 감시 단체인 그린피스에 의해 저지 당하는 장면을 기억하지 못하는 사람은 아마 없을 것이다. 1946년부터 고체 핵폐기물이 공해에 투기되어 오고 있는데 세계 각국의 핵폐기물 해양투기 실태는 표1과 같다. 그러나 여기에는 러시아의 통계자료가 포함되어 있지 않다. 지금까지 문제되어온 해양 핵폐기물의 방사성 핵종은 Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239 등으로 이들은 생태계 파괴 등 해양오염의 주된 방사능 물질들이다.

당시 신문이나 TV 등에서 연일 크게 다루어 왔던 이 문제는 서서히 우리의 관심속에서 멀어지고 있지만 한가지 고무적인 사실

표 1 국가별 핵폐기물 해양투기실태(야블로코프 보고서, 홍기훈(1993))

국 가	방사능총량 (단위: 1조 베크렐)	백분율 (%)	연 도
대 서 양			
벨 기 에	2120	4.63	1960-82
영 국	35077	76.55	1949-82
독 일	0.20	0.0004	1967 ?
이탈리아	0.19	0.0004	?
네덜란드	336.1	0.73	1967-82
미 국	2942	6.42	1949-67
프 랑 스	353.4	0.77	1967-69
스 위 스	4419	9.64	1969-82
스 웨 덴	3.23	0.01	1963
총 계	45252.5	98.76	
태 평 양			
한 국	미결정		?
뉴질랜드	1.04	0.002	
미 국	554.2	1.21	1946-70
일 본	15.44	0.03	1955-69
총 계	570.7	1.24	

은 국민 모두가 핵폐기물에 의한 환경오염에 큰 경각심을 갖게 되었다고 말할 수 있다. 더욱이 요즘은 북한 핵사찰문제로 인해 원자력이란 용어가 핵폐기물 또는 핵폭탄 같은 부정적 이미지만 남아 있게 되는 것은 아닌지 하는 우려속에서 '원자력은 안전하다'는 광고매체를 접할때 마다 원자력의 안전성에 대해 좀더 지속적으로 홍보하기를 바라고 원자력의 폭넓은 평화적 이용에 관한 국민적 이해가 높아 지기를 바라는 것은 이 분야에 관련된 모든이들의 바램일 것이다. 이러한 의미에서 분기별 또는 월별로 원자력 발전소나 원자력 시설주변 지역에서 실시하는 방사선/능 영향평가 조사 및 결과에 대해 좀더 홍보할 수 있는 방안도 강구해 보면 어떨지 모르겠다. 한편, 지금까지 방사화학, 보건물리학, 분광학, 핵의학, 농학, 방사선 생물학 등의 자연과학 여러분야에서 이용·연구되고 있는 동위원소는 지구과학과 우주과학 분야에 있어서도 지구 및 우주물질의 기원과 생성환경, 생성연대 그리고 지구 및 우주의 진화사 연구에 많이 이용되고 있으며 그 결과 지질학적인 문제해결에 정량적으로 정밀도 높게 접근할 수 있는 놀라운 결실을 가져오고 있다. 특히 지구환경 연구에 이용되는 안정동위원소는 자연계 물질내에 안정핵종으로 존재하며 동위원소 교환반응과 같은 화학적 과정, 증발 및 확산과 같은 물리적 과정 그리고 광합성 작용과 같은 생물학적 과정에 의해 동위원소 분별이 일어나 자연계의 물질은 상이한 동위원소비를 갖게 되는데 이러한 성질을 이용하여 물질의 기원이나 생성환경, 물질의 순환, 고환경(고기후, 고수온등)을 밝힐수 있게 되었다.

여기에서는 원자력시설 등의 주변환경의 안정성을 평가하기 위해 실시하고 있는 환경 방사선/능 조사와 방사성 동위원소의 반감기를 이용한 동위원소 지질학 분야 그리고 안정동위원소비를 이용하여 지구환경을 연구하는 지구환경 과학 분야의 응용연구에 대해 간단히 소개하고자 한다.

I. 환경 방사선/능 조사

원자력시설의 운영에 따른 방사선 영향에 대한 국민의 관심이 날로 높아 가고 있는데 원자력 시설주변에 대한 환경 방사선/능 조사내용을 기술함으로서 국민적 의구심을 해소하고 아울러 시설주변환경에 대한 안정성을 도모할 필요가 있다고 본다. 원자력 관련시설의 운영자는 원자력법 시행령 제111조의 규정에 의해 고시된 "원자력 발전소 주변환경 조사지침"(과학기술처 고시 제85-5호)에 따라 시설주변 환경에 대한 환경 방사선 조사를 실시하여 시설주변환경의 안정성을 확보하여야 한다. 이를 위해서 원자력 시설주변 부지반경 30Km 이내(원자력 발전소는 80Km이내)지역에 대한 환경 방사선량과 환경시료의 방사능 분석을 실시하고, 원전 주변에 대해서도 환경시료와 폐기물 시료의 방사능 분석을 분기 또는 월별로 실시하고 있다.

원자력 시설의 경우에는 부지내 12개 지점과 부지주변 19개 지점에 대해서 휴대형 방사선 검출기를 이용하여 환경 방사선량률을 매월 측정하며 부지내 2개 지점에서 환경 방사선 연속측정장치를 이용하여 환경 방사선량률을 24시간 연속 측정하고 있다(표2 참조). 또한 공간 점적선량률은 TLD를 이용하여 측정한다. 환경 방사능조사 대상시료는 공기중 미립자, 육상시료로서 토양, 하천토 및 솔잎, 물시료로서 지하수, 지표수 및 빗물, 그리고 식품류로서는 곡류, 채소류, 우유 및 계란을 분기별 혹은 년 1회, 또는 2회씩 시료를 채취하고 이들 환경시료에 대해서는 전알파, 전베타, 전우라늄, 삼중수소, 감마동위원소 및 스트론튬-90 등의 핵종을 분석한다. 이렇게 하여 지금까지 실시한 대덕과 서울원자로 시설주변 환경 방사선 조사에서는 전반적으로 뚜렷한 이상변동은 없는 것으로 나타났다. 환경 방사선량률은 매년 거의 유사한 낮은 수준을 보이고 있으며 환경시료에 대한 전알파, 전베타 방사능 측정에서도 토양, 솔잎, 물, 식품류의 경우는

측정지점, 측정시기에 따른 특이한 경향은 없으며 비교적 일정한 측정값을 나타낸다. 지금까지 측정된 환경감시 결과와 비교해 보아도 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 그리고 환경시료에 대한 감마동위원소 분석 결과의 경우에도 물시료에서는 17개 핵종 모두가 검출한계치 이하이고, 곡류, 채소류, 가금류, 우유와 같은 식품류에서는 자연 방사선 핵종인 K-40만이 검출되며, 토양시료에서는 K-40 이외에 핵분열 생성물질인 Cs-137이 검출되었는데 검출된 방사능 준위는 1960년대에 실시한 강대국들의 대기권 핵실험에 의한 전지구적인 오염영향이라고 판단된다. 그리고 KINS와 해양연구소에서

수행되고 있는 동해 핵폐기물에 대한 방사능 영향평가에서도 이미 신문 등에 보도된 바와 같이 자연준위의 낮은 분석값을 나타내고 있으며, 동해에서 어획된 어류, 해조류 등의 수산물에서는 아무런 영향이 미치지 않은 것으로 밝혀졌다.

II. 지구과학에서의 동위원소 연구

자연에 존재하는 물질의 동위원소에 대한 분포 및 존재량 등을 분석하고 이를 이용하여 지구환경에서 일어나는 여러 지질학적인 현상을 해석하려는 지질학과 지구 및 우주 물질의 기원과 생성과정, 우주의 진화사 등

표 2 대덕원자력 시설주변(off-site) 환경방사선 감시 계획.
(Environmental radiation monitoring program around KAERI site)

대 상	조사항목	빈도	시료채취지점	측정항목	비 고
공기중	미립자	월별	10	전 α, β	count meter측정
	공간 β -선량율	월별	19	공간 γ 선	
	집적 선량	분기	19	공간 γ 선	
육상	토 양	년2회	11	전 α, β	
			10	γ , 동위원소 Sr-90*	
	솔 잎	년2회	10	전 Uranium	
			7	γ , 동위원소 Sr-90*	
물시료	지 표 수	분기	7	전 α, β H-3	LSC
			4	γ 동위원소	
	지 하 수	분기	4	전 α, β H-3 γ 동위원소	
식품류	곡 류	년1회	5	전 α, β	수확기, 쌀
			3	γ 동위원소	
	채 소 류	년1회	5	전 α, β	배 추
			3	γ 동위원소	
우 유	분기	2	15/g 동위원소 Sr-90*		
계 란	년2회	1	γ 동위원소 전 α, β		

을 연구하는 우주과학에서도 상당한 진보가 이루어져 지각, 해양 및 우주에 이르는 방대한 지구환경분야에서 동위원소를 이용한 연구가 크게 기여하고 있다.

최근에는 질량분석기 등의 정밀측정기기의 발달과 더불어 방사성동위원소의 반감기를 이용한 암석의 절대연령측정과 암석의 성인연구, 물질의 기원, 물질의 형성과정, 물질의 순환 등을 다루는 지구화학분야에서 동위원소가 중요한 연구수단으로 이용되고 있다. 또한 산소, 탄소 등의 안정동위원소비를 이용하여 과거의 지구환경을 연구하는 층서퇴적학, 고생물학, 고기후학, 지구연대학 및 고환경학에서도 큰 결실을 거두고 있다.

1. 방사성 동위원소를 이용한 연구

동위원소는 방사성동위원소와 안정동위원소로 구분된다. 여기에서 방사성동위원소란 불안정한 핵종으로서 반감기를 가지고 붕괴하여 안정한 핵종으로 변하는 특징을 나타내는 것을 말한다. 따라서 자연 방사성 동위원소는 반감기를 이용하여 암석의 절대연령을 측정하기 때문에 지질학적으로 대단히 중요하다. 방사성동위원소의 붕괴는 ① 1개의 알파입자 붕괴 ② 1개의 β^- (음전자) 붕괴 ③ 감마선 방출 ④ 궤도전자 포착의 형태로 일어나는데 이때의 붕괴속도식은 $dN/(dt) = -\lambda N$ 으로 표시된다. 감마선 방출은 중핵에서의 경우에는 내부전환전자(e^-)방출을 동반한다. 알파선, 감마선, 내부전환전자는 선스펙트럼이고 베타선은 연속스펙트럼이다. 일부의 자연 방사성동위원소의 붕괴양식, 반감기 및 붕괴결과로 생긴 안정산물 등은 표3과 같다. 방사성 붕괴에 의해 주로 동위원소의 존재량이 변화하게 되며 안정동위원소의 경우에는 주로 어떤 원소의 동위원소 질량차이로 인하여 물리화학적인 작은 변화에 의해 일어나는 동위원소 분별(isotope fractionation)에 의해 자연물질에서 동위원소의 존재량 차이가 나타나는데 이와같은 자연물질중의 존재량 차이가 지구 내의

표 3 자연 방사성동위원소의 존재도

동위원소	존재도(%)	반감기(년)	붕괴양식	안정산물
^3H	10^{-13}	12.33	β^-	^3He
^{14}C	$<10^{-10}$	5.73×10^3	β^-	^{14}N
^{40}K	0.01167	1.23×10^9	EC	^{40}Ar
			β^-	^{40}Ca
^{50}V	0.25	$>4 \times 10^{16}$	EC	^{50}Ti
			β^-	^{50}Cr
^{87}Rb	27.8346	4.88×10^{10}	β^-	^{87}Sr
^{113}Cd	12.3	9×10^{15}	β^-	^{113}In
^{1157}In	95.7	5×10^{14}	β^-	^{115}Sn
^{123}Te	0.87	1.2×10^{13}	EC	^{123}Sb
^{138}La	0.09	1.05×10^{11}	EC	^{138}Ba
			β^-	^{138}Ce
^{142}Ce	11.1	$>5 \times 10^{16}$	α	^{138}Ba
^{144}Nd	23.9	2.1×10^{15}	α	^{140}Ce
^{147}Sm	15.0	1.06×10^{11}	α	^{143}Nd
^{148}Sm	11.2	8×10^{15}	α	^{144}Nd
^{149}Sm	13.8	$>1 \times 10^{16}$	α	^{145}Nd
^{152}Gd	0.20	1.1×10^{14}	α	^{148}Sm
^{156}Dy	0.06	2×10^{14}	α	^{152}Gd
^{176}Lu	2.6	3.53×10^{10}	β^-	^{176}Hf
			EC	^{176}Yb
^{174}Hf	0.17	2.0×10^{15}	α	^{170}Yb
^{180}Ta	0.012	$>1.6 \times 10^{13}$	EC	^{180}Hf
			β^-	^{180}W
^{187}Re	62.602	4.56×10^{10}	β^-	^{187}Os
^{190}Pt	0.013	7×10^{11}	α	^{186}Os
^{232}Th	100	14.00×10^9	α, β^-	^{208}Pb
^{235}U	0.7204	0.7038×10^9	α, β^-	^{207}Pb
^{231}Pa		3.248×10^4	d	
^{238}U	99.2739	4.468×10^9	α, β^-	^{262}Pb
^{234}U	0.057	2.48×10^5	d	
^{230}U		7.25×10^4	d	
^{226}Ra		1.622×10^3	d	
^{210}Pb		22.26	d	

d: 딸원소, β^- : 베타붕괴, EC: 전자포획, α : 알파붕괴

부에서 일어나는 지질학적 과정과 현상의 해석에 대단히 중요하게 이용되고 있다. 실제로 암석의 절대연령측정, 태양계 및 우주의 연령측정에 관한 연구가 이루어지고 있

으며, 여기에 이용되는 장반감기 방사성동위원소로는 $^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$, $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$, ^{238}U , ^{235}U , $^{232}\text{Th}-\text{Pb}$, $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$, $^{176}\text{Lu}-^{176}\text{Hf}$, $^{138}\text{La}-^{138}\text{Ce}$, $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 등이 있으며, 단반감기 방사성동위원소로는 $^{14}\text{C}-^{14}\text{N}$, ^{230}Th 등이 있다(표4 참조). 장반감기 방사성동위원소는 주로 지구 및 태양계 구성물질의 절대연령측정에 사용될 뿐만 아니라 지각, 맨틀의 진화, 우주의 진화연구에도 크게 이용되고 있다. 그리고 단반감기 방사성동위원소는 주로 고고학 및 젊은 지질시대의 물질의 연대측정과 운석 등에서 소멸핵종의 동위원소비 분석으로 태

양계 행성 초기물질의 동정에 이용되고 있다. 최근에는 방사성 핵종을 지구화학적 트레이서(tracer)로서 맨틀물질의 불균일성, 광상구의 구분, 맨틀에서 유래된 마그마에 지각물질의 혼입, 베니오프대에서 지각과 맨틀물질의 순환, 범세계적인 해수의 순환, 지구의 탈가스(degas) 등의 연구에 관심이 집중되고 있다. I-129와 Al-26과 같은 소멸핵종(extinct nuclides)은 운석내의 기타 지구화학적 성분연구와 함께 태양계 초기 기원물질 연구에 공헌하고 있다. 어떤 운석내에서 소멸핵종의 존재 증거가 확인되어 핵

표 4. 지질연대학에 이용되는 방사성동위원소의 종류와 측정 연령범위

모원소/딸원소	붕괴양식	λ (년 ⁻¹)*	반감기 (년)	연령측정 범위(년)	모원소와 딸 원소의 지각 에서 존재량	측정대상물질
〈장반감기핵종〉 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$ $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ca}$	$8\alpha + 6\beta$	1.5369×10^{-10} (1.55125×10^{-10})	4.50×10^9	$10^7 - T_0$	0.9928g/gU 0.252g/gPb	지어콘, 우라니나이트, 모나자이트, 기타 납함유광물
	$7\alpha + 4\beta$	9.7216×10^{-10} (9.8485×10^{-10})	0.71×10^9	$10^7 - T_0$	0.0072g/gU 0.215g/gPb	〃
	$6\alpha + 4\beta$	4.9876×10^{-11} (4.9475×10^{-11})	1.39×10^{10}	$10^7 - T_0$	1.00g/g Th 0.520g/g Pb	〃
	β	1.39×10^{-11} (1.42×10^{-11})	5.0×10^{10}	$10^7 - T_0$	0.278g/g Rb 0.07g/g Sr	흑운모, 백운모, 미사장석, 전암
	전자포획	0.584×10^{-10} (0.581×10^{-10})	1.30×10^9 (total)	5.000 - T_0	0.0001g/gK 0.996g/gAr	흑운모, 백운모, 각섬석, 전암
	β	4.72×10^{-10} (4.962×10^{-10})				
〈단반감기핵종〉 $^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$	β	1.21×10^{-4}	5.730	0 - 70.000	10^{-12} g/gC 0.996g/gN	목탄, 목재, 토탄, 곡식, 기타 탄소 함유 물질
〈소멸핵종〉 $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ $^{107}\text{Pd}/^{107}\text{Ag}$ $^{129}\text{I}/^{129}\text{Xe}$ $^{244}\text{Pu}/^{131-136}\text{Xe}$		9.60×10^{-7} 1.07×10^{-7} 1.4730×10^{-8} 8.50×10^7	7.20×10^5 6.50×10^6 1.60×10^7 8.20×10^7			운석, 기타 외계 물질

T_0 는 지구의 연령임.

융합 시차간격(formation interval) 결정과 태양계 형성초기의 가열과정해석의 중요한 정보가 되고 있다.

Rb-Sr, Sm-Nd계에서 얻어진 아이소크론(isochron)에서 물질형성시의 연대가 얻어질 뿐만 아니라 부수적으로 얻어진 스트론튬의 초생치($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), Sm-Nd계에서 얻어진 Nd 동위원소비($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) 등에서 물질의 기원, 맨틀물질의 불균일성, 맨틀에서 지각의 진화사 등이 해석되고 있다. 특히 최근에는 지구연대학에 추가해 지구화학적 여러과정에서 트레이서로서의 응용연구가 증가하고 있다.

Ar-Ar법에서 절대연령이 얻어질 뿐만 아니라 Ar유실, Ar과다현상 등을 단계적 가열 실험방법으로 변성암의 변성시기해석과 화성암체의 냉각사 및 지각운동사 해석에 이르기까지 응용연구되고 있다. E_{Nd} 와 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 초생치에서 맨틀의 불균질성 해석, Pb동위원소($^{207}\text{Pb}-^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}-^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}-^{204}\text{Pb}$) 연구에서 광상구의 구분 및 지각의 진화, $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비 분석연구에서 탈가스에 대한 모델이 제안되고 있다. 방사성동위원소비 분석이 외에 휘선티랙법(fission track)이나 전자스핀 공명법 등의 연령측정법이 개발되었고 그 결과에 대한 응용 및 해석에서도 큰 성과가 얻어지고 있다. 그외 라돈(^{222}Rn , 측정 및 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 에 의한 지진예지, 삼중수소(^3H), ^{14}C 측정에 의한 수문학, 빙하학 연구, 우주선(Cosmic ray) 생성핵종 측정에 의한 설빙학 연구, 화산암중의 ^{10}Be 동위원소 측정에 의한 판구조론 검증 연구 등이 현재 수행되고 있는 주요 연구활동들에 속한다.

2. 안정동위원소를 이용한 연구

1960년대 후반부터 산소($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), 탄소($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), 황($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$), 질소($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) 등의 환경 동위원소가 지구과학에 이용되기 시작하여 최근에 와서는 이의 응용분야도 방대해지고, 연구 성과도 매우 커졌다. 안정동위원소는 동위원소 교환반응과 반응속도론적 동위원

소 효과(Kinetic isotopic effect)에 의해 동위원소 분별이 일어나 자연계 물질이 지질시대를 거쳐 각기 겪은 지질학적 과정에 의해서로 다른 동위원소비를 가지게 된다. 따라서 안정동위원소의 연구로 과거에 일어났던 지질학적 과정변화, 환경변화 등의 지구역사를 해석할 수 있게 되었다. 따라서 안정동위원소는 광물학, 광상학, 암석학, 고생물학, 수문학 등의 지질학의 많은 분야에서와 환경과학, 고고학에 이르기까지 광범위하게 응용연구되고 있다. 특히 광상학분야에서 동위원소의 응용연구성과가 매우 크며, 광액의 기원, 동위원소 지질온도계, 금속광물침전의 물리화학적 조건, 광화용액의 혼합의 정량적인 해석, 열수변질의 특징, 광화작용의 기구 및 성인해석연구가 활발하게 이루어지고 있다. 반암동광상, 금은광상, 스키르프광상 등의 광화작용시에 순환수(meteoric water)의 열수계 혼입으로 인한 금속광물의 침전기구 해석은 금세기의 동위원소를 이용한 광상학 연구의 개가중의 하나이다. 동위원소 분별정수가 온도의 함수이므로 공존광물쌍을 이용한 동위원소 평형온도 측정법이 통계역학적인 이론과 실험연구로 많이 개발되어 있다.

자연계의 모든 지질학적 과정에서 물의 역할은 대단히 중요하다. 특히 퇴적분지, 대수층, 열수계에서 일어나는 지질학적 과정에서 물의 거동을 확인할수 있고 물과 암석사이의 상호작용을 정량화 할 수 있다. 지열지역에서 물-암석 상호작용, 열수변질작용 등을 구체화 할 수 있게 되었다. 최근에는 방사성동위원소비 분석결과와 안정동위원소비 분석을 동시에 실시하므로써 마그마의 기원 등 암석 생성환경연구에 큰 발전을 이루었다. 연대측정과 동위원소 지질온도계 이용으로 나무의 나이테별로 셀룰로오스를 추출하여 산소, 탄소 및 수소동위원소비를 분석하거나 선캠브리아 시료의 처트(chert)층의 인회석의 산소동위원소비 분석으로 젊은 지질시대에서 지구의 초기에 걸치는 해수온의 변동 등 지구환경 변화사 연구를 시도하고 있다.

환경오염 연구로서 대기의 가스시료, 도시 및 농촌지역의 나뭇잎의 황동위원소비나 탄소동위원소 분석으로 인간활동에 의한 오염 연구가 수행되고 있다. 이같은 연구활동들은 International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology나 International Symposium on Water-Rock Interaction 등의 국제학회에서 그리고 Isotope Geology, Geochimica Cosmochimica Acta 및 Economic Geology 등의 지구과학 전문학술지에 많은 연구결과가 발표되고 있다.

3. 국내의 동위원소 연구 현황.

국내에서의 안정동위원소 분석연구는 이미 1979년부터 시작되어 기술습득 및 기본적인 연구가 다수 진행되어 오고 있으며 최근에는 기초과학연구지원센터, 한국자원연구소 및 이화여대 등에 연대측정시설과 안정동위원소 분석시설이 설치.운용되고 한국해양연구소, 한국원자력연구소에서는 활발한 연구가 수행되고 있다. 지금까지 우리나라의 온천, 지하수 강수의 수소 및 산소동위원소비 분석으로 우리나라 온천수가 순환수 기원임이 밝혀졌고, 지하수, 강수의 동위원소 분석에서 동위원소값의 변화가 위도에 따른 영향보다 지형의 영향을 더욱 받고 있다는 것이 밝혀졌다. 그리고 스카른 광화에도 순환수의 영향이 중요한 사실임이 상동

중석광상의 동위원소연구에서 밝혀졌다. 이외에 열수성 금은광상의 금은광화작용에 있어 순환수의 혼입이 대단히 중요하다고 알려지게 되었다.

그의 암석, 탄질물, 석탄 등의 동위원소비 분석, 석회암의 탄소 및 산소동위원소비 분석연구에서 물질의 기원 및 퇴적환경이 해석되었다. 1970년도부터 시작된 반감기를 이용한 방사성동위원소 분석연구에서 우리나라의 화성활동의 시기가 밝혀져 중생대 주라기의 대보화강암류와 백악기의 불국사 화강암류의 절대연령이 다수 얻어졌으며 그후 많은 연구자들에 의해 연대측정연구가 실시되고 있다. 또한 1980년대를 시작으로 안정동위원소 분석연구도 지구과학 분야에 확대되어 연구가 활발히 수행되고 있으며 최근에는 포항, 제주도 서귀포 지역에서 산출된 유공충, 조개류 등의 화석을 이용하여 고수온(Paleotemperature)을 밝히는 이른바 고환경적 연구가 시도되고 있다.

III. 참 고 문 헌

이정호 등 (1993), 대덕 및 서울 원자로 시설주변의 환경 방사선 조사, 원자력 연구소 김규환 (1991) 동위원소 지질학, 민음사 홍기훈역(1993) 러시아 연방 영토부근해역 핵폐기물 투기에 관한 진상 및 문제점(야블로코프 보고서), 한국해양연구소.

