

안정동위원소의 이용 현황과 전망



정 도 영

한국원자력연구소
양자광학기술개발부

1. 서론

우리가 살고 있는 지구에는 인공적으로 만든 원소는 제외하고 모두 92 종의 원소가 존재한다. 동종의 원소 중에도 전자와 양성자의 수는 같지만 중성자 수가 서로 다른 원소가 있다. 이를 동위원소(isotope)라 한다. 수소에는 세 종류의 동위원소가 있다. 중성자가 없는 수소(H-1), 중성자가 하나 있는 중수소(H-2: deuterium), 중성자가 두개인 삼중 수소(H-3: tritium)가 그것이다. 이 중에서 삼중 수소는 방사선을 내는 방사성동위원소(radioactive isotope: RI) 이고, 수소와 중수소는 방사선을 내지 않는 안정 동위원소(stable isotope: SI)이다. 산소에는 O-16, O-17, O-18 등 모두 세 종류의 안정동위원소가 있다. 이렇듯 지구상에는 방사성동위원소를 제외하고, 자연적으로 발생된 (naturally occurring) 안정동위원소가 280여종이나 된다.

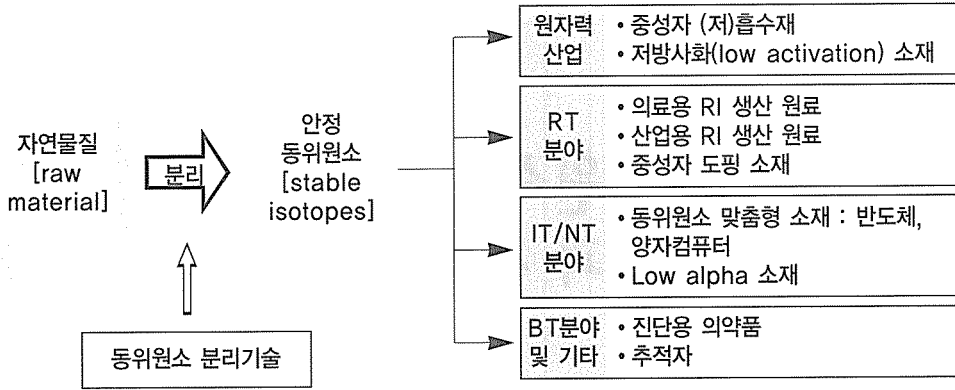
방사성동위원소는 원자력 발전의 원료로 사용하거나, 방사선 진단과 치료, 비파괴 검

사선원 등으로 사용된다. 그렇다면 280여 종류의 안정 동위원소는 어떻게 사용되고 있으며, 앞으로 어떻게 사용될까? 기술의 발전이 거듭되면서 우리는 현재 나노 (nano) 크기의 기술 시대에 살고 있다. 원자의 직경이 수 Angstrom (10^{-10} meter) 이므로 나노(10^{-9}) 라고 하면 불과 몇 십 개의 원자가 모인 정도의 크기이다.

물질을 구성하는 동위원소의 성분비를 바꿀 때 나타나는 물성 변화를 동위원소 효과(isotope effect)라 한다[1]. 나노 크기에서는 동위원소 효과가 더 크게 나타날 수도 있다. 안정동위원소의 용도는 방사성동위원소에 비해 우리에게 덜 알려져 있다. 동위원소 효과에 대해 본격적으로 연구를 시작 한 것이 불과 20년 정도이다. 이 글에서는 안정동위원소의 이용현황을 살펴보고, 향후 활용에 대해 전망을 해보고자 한다.

2. 안정 동위원소의 이용 현황과 전망

안정동위원소의 사용은 크게 네 분야로 나



〈그림 1〉 안정동위원소 이용 분야

눌 수 있다(그림 1). 원자력 산업과 방사선 기술(RT: radiation technology) 분야는 안정동위원소의 중성자 흡수 특성과 핵변환 특성을 이용한 분야로서, 동위원소가 갖는 원자핵의 특성을 직접적으로 이용하는 분야라 할 수 있다. 이에 반해, 고집적 반도체 및 양자컴퓨터 등과 같이 정보기술/나노기술(IT/NT) 분야의 이용은 첨단기술 분야에서 요구하는 신소재로서의 활용이다. 동위원소 사이의 미세한 크기와 질량 차이를 이용하거나, 동위원소의 서로 다른 핵스핀(nuclear spin) 값을 이용하기도 한다. 그 외 바이오 기술에서는 질병의 진단이나 대사 분석을 위한 추적자 등으로 사용된다.

가. 원자력 산업 분야

보통 수소보다 무거운 중수소(H-2)와 산소가 화학해 만들어진 물을 중수라 하고, 중수를 냉각재 및 감속재로 사용하는 원자로를 중수로라 한다. 중수로는 보통의 물인 경수보다 중성자를 덜 흡수하기 때문에 연료로서 경제

적인 천연 우라늄을 사용한다. 우리나라의 월성 1호기와 월성 2호기가 이 노형을 택했다. 자연계의 물 중에서 중수는 0.015 % 밖에 없다. 때문에 중수는 1kg에 20만원 정도로 고급 위스키 가격과 맞먹을 정도의 고가이다.

500 MWe 급의 중수로형 원전 한 기당 감속재 계통에서 250톤, 냉각재 계통 250톤 등 모두 500톤의 중수가 사용된다.

원자로의 핵분열을 조절하는 chemical shim으로 B-10을 사용한다. 자연계에서 동위원소 성분비가 19.9% 인 B-10의 열중성자 흡수 단면적은 3,800 b인 반면, 성분비가 80.1 %인 B-11은 5 mb 이다[2]. 따라서 B-10 이 농축된 봉산을 사용할 경우 원자로 냉각재의 봉산 농도를 낮추고도 chemical shim의 역할을 할 수 있고, 이에 따라 원자로의 경제성을 향상 시킬 수 있다. B-10은 중성자흡수 치료(BNCT: boron neutron capture therapy) 에도 이용될 전망이다.

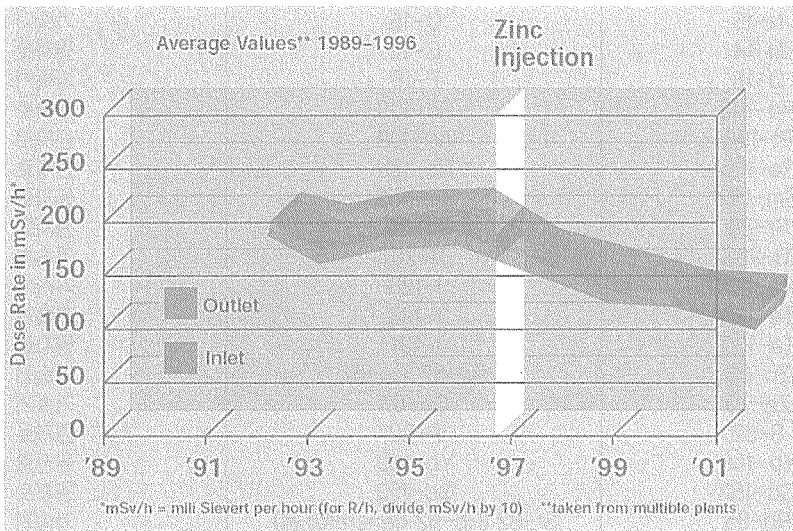
현재 운전 중인 원자력 발전소나 환경 친화적인 차세대 원자로에서 원전 종사자의 피폭

량 저감과 폐기물의 양을 줄이기 위해 저방사화 (low activation) 소재의 개발과 사용은 매우 중요한 의미를 갖는다. 미국과 독일에서는 원자력 발전소의 primary water stress corrosion cracking (PWSCC) 방지용 내식재(anti-corrosion material)로 감손아연(Zn-64가 제거된 Zn)을 투입 운전하고 있다. 감손아연은 방사성 동위원소(Zn-65, 반감기: 244일)의 생성을 억제하여, 원자로의 shot down dose rate를 2~3 배정도 줄일 수 있고, 결과적으로 원자로의 경제성을 향상시키는 것으로 알려져 있어 향후 사용이 증가할 것으로 전망된다[3, 4].

원자력 발전소의 핵연료봉은 원자로 내에서 핵분열 반응을 일으키는 우라늄 소결체(펠릿)를 특수합금인 지르칼로이(zircaloy)로 만든 피복관에 넣어 구성한다. 지르칼로이는 지르코늄에 소량의 주석을 넣어 내식성을 개

선한 지르코늄 합금이다. 지르코늄 (Zr)에는 Zr-90, Zr-91, Zr-92, Zr-94, Zr-96 등 모두 5종류의 안정동위원소가 있다. 이 중에서 Zr-91과 Zr-93은 열중성자 흡수 단면적이 타 동위원소에 비해 20배 가량 크다. 이 때문에 Zr-91과 Zr-93을 제거한 감손 지르코늄으로 지르칼로이 합금을 만들어 사용할 경우 원자력 발전소의 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 감손 지르코늄의 사용으로 얻을 수 있는 경제적 이득을 수백억 달러 규모로 추산하기도 하지만 아직까지 효율적인 감손 지르코늄 생산 기술이 개발되지 않아 실현되고 있지 않다.

이 밖에 차세대 에너지 공급원인 제4세대 원자로와 핵융합로에서 Pb-206, Si-29, 30, Li-7 등 안정동위원소 소재 사용이 전망되고 있다[5, 6].



(그림 1) 원자로 냉각수 계통에 내식재로 아연을 투입하여 얻는 dose rate 감소 효과[3]

나. 방사선 기술 (RT) 분야

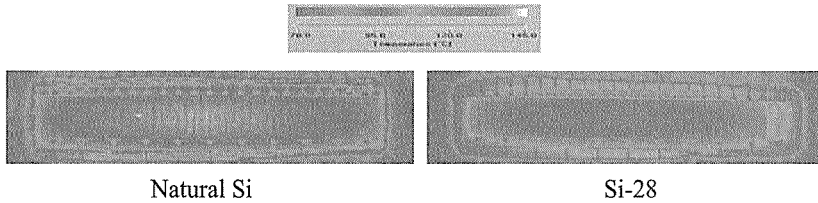
방사성동위원소를 생산하는 데 있어 안정 동위원소는 필수 원료이다. 방사성동위원소는 크게 두 가지 방법으로 생산한다. 하나는 원자로를 이용하는 방법이고, 또 다른 하나는 가속기를 이용하는 방법이다. 원자로에서 핵분열 생성물을 분리하여 생산하는 방법을 제외하고, 원자로 생산 방사성동위원소(reactor-produced RI)와 가속기 생산 동위원소(accelerator-produced RI)는 중성자를 사용하느냐 양성자를 사용하느냐 하는 문제만

다를 뿐 대부분 농축 안정동위원소를 원료로 생산한다.

암의 조기진단을 위해 최근 들어 설치와 사용이 큰 폭으로 증가하고 있는 양전자 단층촬영장치 (PET: positron emission tomography)는 진단용 의약품으로 주로 FDG를 사용한다. FDG는 자연계에 존재하는 산소 중에서 존재비가 불과 0.2% 인 O-18을 96% 이상으로 농축한 농축 산소를 원료로 생산한다. 심장 질환 진단용 방사성 의약품인 Tl-201은 존재비가 30% 인 Tl-203을 97% 이상 농축한

〈표 1〉 방사성동위원소 생산에 농축 표적으로 사용되는 안정동위원소

안정동위원소 표적	방사성동위원소	생산 방법
Cd-112	In-111	가속기
C-13	N-13	가속기
Cr-50	Cr-51	원자로
Ge-76	As-77	가속기
Lu-176	Lu-177	원자로
Yb-176	무담체(carrier-free) Lu-177	원자로
Ni-58	Co-57	가속기
N-15	O-15	가속기
N-14	C-14	원자로
O-18	F-18	가속기
Pd-102	Pd-103	원자로
Pt-198	Au-199	원자로
Re-185	Re-186	원자로
Sm-152	Sm-153	원자로
Sr-88	Sr-89	원자로
Tl-203	Tl-201	가속기
Xe-124	I-123	가속기
Te-123	I-123	가속기
Te-130	I-131	원자로
Zn-68	Ga-67, Cu-67	가속기
Zn-70	Cu-67	가속기
S-32	P-32	원자로
Yb-168	Yb-169	원자로
Gd-152	Gd-153	원자로
Rb-85	Sr-82 (Rb-82 generator 용)	가속기
Ir-191	Ir-192	원자로
Se-74	Se-75	원자로



〈그림 2〉 최근 보고된 실리콘-28로 제작한 파워 트랜지스터의 발열 온도비교 결과[8]: 일반 반도체에 비해 5~10% 감소하는 효과 발생

물질을 원료로 생산한다. 암 통증 치료제인 Sr-89는 Sr-88을 원료로 생산하며, 산업용 비파괴 선원인 Yb-169는 Yb-168를 원료로 생산한다. 이상적인 치료용 방사성동위원소로 평가받고 있는 Lu-177은 Lu-176 혹은 Yb-176을 표적 물질로 사용하여 생산한다. 이 밖에도 많은 종류의 방사성동위원소 생산에 안정동위원소가 원료로 사용된다(〈표 1〉참고).

Tl-203 이 30% 함유된 자연 상태의 탈륨은 그램당 800 원 정도인데, 이를 97% 이상으로 농축한 탈륨은 그램당 가격이 200만원이 넘는다. Yb-176을 95% 이상으로 농축한 이터븀은 그램당 가격이 2,000만원이 넘는다. 1990년대 초 방사성동위원소 생산에 사용되는 안정동위원소는 방사성동위원소 시장의 12%에 해당하였다[7]. 방사성동위원소 생산에 원료로 사용되는 안정동위원소 시장은 O-18과 Tl-203을 중심으로 5억 달러의 규모를 형성하고 있는 것으로 추산된다.

다. 정보기술 (IT), 나노기술 (NT), 생명기술 (BT) 분야

C-13은 위암의 원인균으로 알려져 있는 헬리코박터 파이로리 균의 검출에 이용되며,

C-12는 열전도율이 뛰어난 인공 다이아몬드의 제조에 사용된다. Si-28로 만들어진 실리콘 반도체는 열전도도가 일반 실리콘 반도체에 비해 5 ~ 10% 정도 높은 것으로 알려져 있다. Si-28 반도체는 고집적 반도체의 발열 문제를 해결할 차세대 반도체로 주목을 받고 있으며, 2003년 국제 반도체기술 로드맵(ITRS)은 Si-28을 주목해야할 5대 차세대 반도체 소재 중 하나로 지목하였다. 자연 성분비가 92%인 Si-28을 99.9%로 농축하여 파워 트랜지스터를 제작하여 발열 온도 측정을 해본 결과 상온에서 열전도도가 10 ~ 60% 향상되었고, 트랜지스터의 동작 온도가 5 ~ 10% 감소한다는 사실이 최근 IEEE Electron Device Letters 지에 보고된바 있다[8]. 이 밖에도 Si-28, Si-29 동위원소는 현재의 기술로도 구현 가능한 것으로까지 평가를 받고 있는 자기공명 고체 양자컴퓨터의 소재로 연구되고 있다[9, 10].

우리가 사용하는 납에는 4종류의 안정동위원소가 있고, 여기에 극소량이지만 자연적으로 발생하는 Pb-210 방사성동위원소도 포함되어 있다. Pb-210은 반감기가 22.3년인 방사성동위원소로서 Po-210으로 붕괴한 후

동향

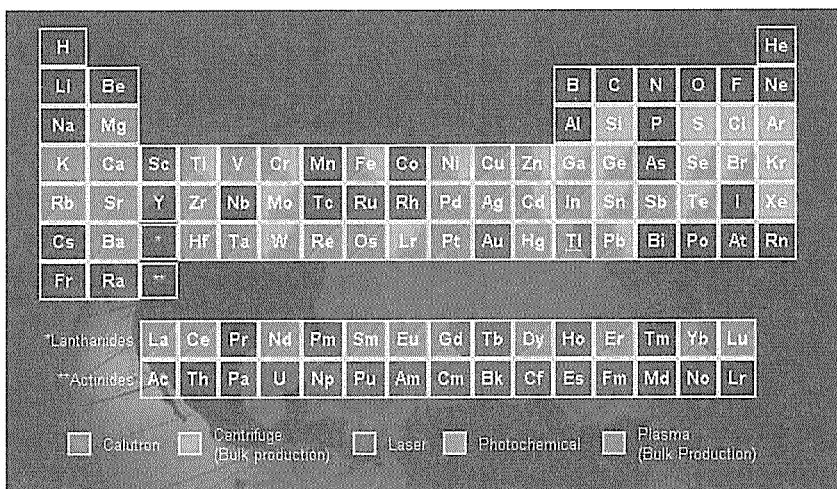
다시 알파 입자를 내면서 Pb-206이 된다. 납에 주석(Sn)을 넣어 만든 Pb-Sn 합금은 반도체 IC의 패키징 공정에서 솔더(solder) 물질로 사용된다. 솔더물질과 반도체 IC가 아주 근접해 있는 플립칩 패키지 공정에서는 Pb-Sn 솔더에서 발생하는 알파 입자가 반도체의 정상 동작을 방해하는 소위 soft-error를 발생시킨다. 때문에 고성능 반도체에 사용하는 솔더는 Pb-210이 제거된 감손 납을 사용한다. 이렇듯 과학기술이 고도화될수록 동위원소의 미세한 차이를 활용하는 신기술이 속속 등장할 것이며, 안정 동위원소는 21세기 신기술을 뒷받침하는 신소재로서 중요한 역할을 하게 될 것이다.

3. 안정동위원소 생산방법

수소나 산소, 붕소와 같이 가벼운 경원소의 안정동위원소 생산은 증류법이나 화학 교환

법에 의한 분리가 일반적으로 사용되며, 이스라엘의 Rotem, Marshall 사 등 대부분 민간 회사에서 제조공급하고 있다. 무거운 원소의 안정동위원소는 EMIS (electromagnetic isotope separation) 방법이나 원심분리 방법으로 생산한다. EMIS는 원소를 증기 상태로 만든 뒤 이온화를 시켜 가속시킨 후, 이를 균일한 자기장이 형성된 공간을 통과시키면 가속된 이온의 운동 궤적이 이온의 질량, 즉 동위원소에 따라 달라지는 원리를 이용한다. 원리적으로 모든 원소에 적용할수 있다는 장점이 있으나, 생산 단가가 무척 높다.

원심분리법은 대상 원소를 상온에서 휘발성이 있는 기체 화합물로 만들어 고속으로 회전하는 실린더인 로터에 넣어 원심력을 이용하여 분리하는 방법이다. 원심 분리법의 생산 단가는 EMIS 방법에 비해 1/10 이하로 낮지만 기체 화합물로 만들지 못하는 원소는 적



(그림 3) 원소에 따른 안정동위원소 생산 방법[12]

〈표 2〉 방사성동위원소 생산에 농축 표적으로 사용되는 안정동위원소

국가 구분	기 관	기 술
네델란드	Urenco	원심분리법
미국	Isotec Inc.	Liquid thermal diffusion
중국	OakRidge Nat. Lab. /DOE CIAE	EMIS EMIS
러시아	Centrotech ECP, St. Petersburg ECP Zelenogorsk, Krasnoyarsk Kurchatov Institute, Moscow SCC Siberian Group, Tomsk EKPC, Sverdlovsk OKB GAZ, Nizny Novgorod VNIIEF, Nizny Novgorod	원심분리법 원심분리법 EMIS, 원심분리법 원심분리법 EMIS 원심분리법 원심분리법

용할 수가 없고, 시설비용이 크다.

레이저법(Laser Isotope Separation: LIS)은 레이저가 갖는 단색성을 이용하여 동위원소를 분리하는 방법이다. 레이저법에는 특정 동위원소만을 원자상태에서 선택적으로 이온화시켜 분리해내는 원자법(atomic LIS)과 특정 동위원소가 포함된 분자만을 선택적으로 해리시켜 분리해내는 분자법(molecular LIS)이 있다. 레이저법은 분리효율이 뛰어나지만 원자 혹은 분자의 특성에 따라 적용하는데 제약이 있다. 미국의 에너지성(DOE)은 미래의 수요를 위해서 EMIS, 원심분리 및 레이저법 가운데 가장 효과적으로 적용성이 좋은 기술을 선정해서 시설을 건설할 것으로 알려져 있다[11].

러시아에서는 쿠르차토프(Kurchatov) 연구소가 EMIS와 원심분리법, SCC Siberian Group이 원심분리법으로 안정동위원소를 생산하고 있다. SCC에서는 Sn, Se, W, S, Cr, Te, Xe, Kr의 안정동위원소를 생산한다. 최근 미국이 오크리지 연구소(ORNL)의 EMIS 시설인 칼루트론(CALUTRON)의 운


전을 정지하면서 러시아가 안정동위원소의 중요한 공급원이 되어 왔다. 네델란드의 URENCO는 원심분리법을, 러시아의 EKP는 EMIS 시설을 이용해서 많은 원소의 안정동위원소의 생산하여 공급하고 있다.

호주의 Silex Systems 사는 Si-28 등 안정동위원소 생산기술을 미국의 ISONICS, 스위스 Ecole Polytechnique Federale De Lausanne 등과 공동으로 레이저법 기술을 개발하고 있으며, 남아프리카 공화국의 SDI 사 역시 Si-28 생산기술을 개발하고 있다. Silex사와 SDI사는 향후 Si-28 안정동위원소 시장을 40억 달러 규모로 전망하고 있다.

4. 결 론

원자력 분야는 물론 초전도, 광기술, 정밀 전자 분야에서 안정 동위원소의 고유한 성질을 이용하는 소재는 기존의 소재와는 다른 새로운 특성을 지닌다. 이러한 점 때문에 전문가들은 안정 동위원소가 21세기에서 중요한

신소재로 사용될 것으로 전망하고 있다. 안정동위원소의 직접적인 수요만을 고려할 때, 2005년 현재 전 세계의 시장 규모는 약 10억 불 정도로 추산되며, 2020년에는 40억불 규

모 이상으로 확대될 것으로 예상된다. 안정동위원소 기술은 원자력 기술과 타 기술과의 융합기술로, 21세기 신소재 분야에서 중요한 역할을 담당할 것으로 전망된다. 

[참고문헌]

- [1] V.G. Plekhanov, J. Materials Science 38, 3341 (2003)
- [2] b (barn): 중성자 흡수 단면적을 나타내는 단위로서, 1 barn (b) \equiv $1 \times 10^{-28} \text{ m}^2$
- [3] Framatome 사의 Advanced Nuclear Power, 7호, 20 April 2003
- [4] Beneficial Uses and Production of Isotope 2000, OECD/NEA report, 2000
- [5] B.W. Spencer, ICON-8729, April 2-6, 2000,
- [6] T. Noda, H. Suzuki, H. Araki, Fusion Engineering and Design 41, 173 (1998)
- [7] Worldwide Isotope Market Update, Arthur Andersen & Co. SC, November 1994
- [8] I.C. Kizilyalli, H. Safar, J. Herbsommer, S.J. Burden, P.L. Gammel, IEEE Electron Device Lett. 26, 404 (2005)
- [9] R.G. Clark, P.C. Hammel, A.Dzurak, A.Hamilton, L.Hollenberg, D.Jamieson, C. Pakes, Los Alamos Science 27, 284 (2002)
- [10] R. Keyes, J. Phys.: Condens. Matter 16, V11 (2004)
- [11] H. Umezawa, Radioisotopes, 49, 159 (2000)
- [12] Trace Sciences International 사의 웹 페이지
(<http://www.isotopetrace.com/modesofproduction.html>)