방사선의 실체와 우리생활

DOI: 10.3938/PhiT.20.027

김 영 진

Nature of Radiation and Its Effects in Our Daily Lives

Young-Jin KIM

Radiation itself is a bunch of energy emitted from a radioactive atom in the form of rays. Since Marie Sklodowska-Curie and her husband Pierre Curie discovered a radioactive element "Radium" in uranium sample in 1898, different kinds of artificial radioisotopes have been produced with the help of accelerators, research reactors and nuclear reactions. Using their radioactive properties, the radiation technology(RT) expands to produce a wide range of goods that meet the needs of our daily lives or to develop the technology that can provide highly beneficial effects to us. Nowadays, the RT is applied to even more various fields of science and technology, resulting in the development of therapeutic medicines, clinical treatments, novel industrial materials, high-tech measuring devices, semiconductors and radioisotopes of higher value, etc. Also, it covers the production of new agricultural plants, safer foods, and the development of biotechnology. This review describes the nature of radiation and its applications in the related areas to help the readers better understand positive aspects of radiation.

방사선이란?

에너지가 높은 상태에 있는 물체가 안정을 찾기 위해 내보

저자약력

김영진 박사는 1986년 미국 퍼듀대학교에서 원자력공학 박사학위를 취득하였다. 1979년부터 한국원자력연구원에 근무하며, 현재 한국원자력연구원 정읍 방사선과학연구소의 소장으로서 재직 중이다.
(youkim@kaeri.re.kr)

내는 에너지 뭉치를 포괄적으로 방사선이라 부른다. 따라서 원자핵이나 원자가 내는 방사선 외에 뜨거운 물체가 내는 적외선이나, 가시광선, 전자기 진동에서 방출되는 전자파도 넓은 의미의 방사선이다. X선, 알파(α)입자, 베타(β)입자, 감마선, 중성자, 양성자 등과 같은 핵에서 방출되는 방사선은 에너지가 커서 물체에 입사하면 물질을 구성하는 원자들을 전리시키는 능력이 있다. 이러한 방사선을 전리방사선(電離放射線, Ionizing radiation)이라 부른다. 이에 반해 적외선이나 가시광선, 전자파와 같은 방사선은 전리능력이 없어 비전리방사선(非電離放射線)이라 부르며 일반적으로 방사선은 전리방사선을 의미하는 경우가 많다. 방사선에는 입자방사선과 전자파(電磁波)방사선이 있다. 알파입자, 전자, 중성자, 양성자 등은 입자 방사선인데 알파입자와 양성자는 양전하를 띤 하전 입자이고 중성자는 전기를 띠지 않는 입자 방사선이다. 전자는 대개 음전자이지만 양전자 방사선도 있다. 고에너지 가속기에서 발생하는 파이온은 양전기를 띤 것, 음전기를 띤 것, 전기를 띠지 않는 것도 있다. 전자파 방사선에는 X선과 감마선이 있다. X선과 감마선의 본질은 같은 광자(光子, photon)이나 발생원이 각각 전자궤도와 핵이다. 대체적으로 핵에서 발생하는 광자인 감마선이 X선보다 에너지가 높으나 가속기에서 발생하는 X선도 매우 높은 에너지를 가질 수 있다.

1. 자연방사선과 인공방사선

방사선이 인공적으로 만들어졌을 경우와 자연 상태에 존재하느냐에 따라 인공방사선과 자연방사선으로 분류한다. 자연 방사선에는 지각방사선과 우주선(宇宙線, cosmic radiation/space radiation)이 있다. 지각 방사선에는 우라늄, 토륨, ^3H , ^{40}K , ^{132}Xe , ^{127}I 및 ^{133}Cs 등 지각 중에 함유된 천연 방사성핵종에서 방출되는 방사선이다. 우주방사선은 우주에서 지구로 쏟아지는 높은 에너지를 지닌 각종 입자와 방사선 등을 총칭한다. 핵융합을 일으키는 태양과 같은 항성에서 방출된 매우 높은 에너지의 양성자가 지구의 대기권을 통과하면서 핵반응을 일으켜

Table 1. Important Fission Products in a Reactor.

Nuclide	Half Life	Energy	Deposition
^{85}Kr	10.76 Y	514 keV	Noble Gas
^{133}Xe	5.27 D	80 keV	Noble Gas
^{131}I	8 D	364 keV	Thyroid
^{90}Sr	28.6 Y	546 KeV	Bone
^{137}Cs	30 Y	662 keV	Body (Muscle)

생성하는 2차 방사선(광자, 전자, 중성자, 파이온 등)을 말한다.

인류가 방사선(여기서는 전리방사선에만 한정한다)을 알게 된 것은 1895년 말 뢰트겐이 X선을 발견한 것으로부터 시작된다. 1930년대 중반에는 가속기 등을 이용한 인공방사능 제조가 가능해지고 1939년에는 핵분열이 발견됨으로써 새로운 차원의 방사선원이 발견되게 되었다. 인공적으로 방사선원을 생산하는 방법은 크게 분류하면 입자조사에 의한 핵반응, 자연에 존재하는 핵종분리, 핵분열 생성물로부터 분리하는 방법이 있다. 인공적으로 핵반응을 통해 만들 수 있는 방법으론 가속기, 중성자 발생기 또는 원자로를 이용한다. 중성자를 이용한 방사성 동위원소 생산은 중성자속이 높고, 입자 생산 가격이 낮으며, 사용되는 표적의 양을 조절하기 쉽기 때문에 대량생산이 용이하여 대부분의 방사성 동위원소가 이 방법으로 생산된다. 가속기를 이용하여 하전입자를 가속하여 생산하는 경우에는 입자속의 제한, 표적제작, 입자조사 기술상의 문제로 대량생산이 어려우나, 최근 의료계에서 이를 통한 특정 방사선원을 생산하여 진단에 많이 활용하고 있다.

최근, 일본 후쿠시마 원전사고에서 확인된 핵반응에 의한 핵물질의 연소로부터 인공적으로 생성되는 방사성 핵종들로 ^{133}Xe , ^{131}I , ^{137}Cs 과 ^{134}Cs 등이 있다(Table 1). ^{133}Xe 는 불활성 기체로서 물에 녹지 않고 색과 향이 없고, 자연상태에서 존재하지 않는 물질이므로 핵폭발 여부를 확인하는 지표 물질로 활용하고 있으며 인체에 흡인되더라도 쉽게 배출이 되

어 위해성이 낮은 핵종이다. 이와 달리, ^{131}I 는 인체에 흡입, 섭취되었을 경우 갑상선에 침적하는 특징이 있다. ^{137}Cs 과 ^{134}Cs 은 인체에 섭취되었을 때에 주로 근육에 침착하는 특징을 가지고 있으며, 자연 상태에서 반응성이 매우 좋아 쉽게 화합물(염화세슘 CsCl)을 이룬다. 산소에 비해 상당히 무겁고 금속성을 띠기 때문에 대기 중에 쉽게 확산되지 않고 지표면에 침적되어 방사능 오염을 일으킨다.

2. 방사선의 단위 및 관련 용어의 정의

방사선, 방사능, 방사성

“방사선”은 물질로부터 빛 또는 입자형태로 방출되는 에너지 흐름을 말한다. 이러한 방사선을 낼 수 있는 능력을 정성적으로 표현하여 “방사능”이라 하며 정량적으로 방사선을 낼 수 있는 물질이 단위시간(일반적으로 초단위)에 방출하는 방사선의 수를 또한 방사능이라고도 하여 주로 단위로 Bq(베크렐)을 사용한다. “방사성”이란 일종의 형용사로서 명사 앞에 붙어 “방사능이 있는 또는 방사선을 낼 수 있는 능력이 있는”이란 의미로 사용된다. 따라서 어떤 물질이 방사능이 있다면 이는 방사성물질이라 한다. 방사선의 단위는 Table 2에 정리하였다.

3. 방사선의 특성

방사선은 크게 형태별, 전자의 전리 능력의 유무, 발생원리 등에 따라 여러 가지로 구분될 수 있다. 방사선을 형태별로 구분한다면 빛과 같은 광자인 전자파(감마선, X-선)와 입자선(운동에너지가 주어진 분자, 원자, 원자핵, 소립자 등)으로 나눌 수 있다. 원자력 분야에서는 방사선을 전하의 유무에 따라 하전입자선(α 선, β 선 등), 비하전입자선(중성자선, 중간자선, γ 선, X선)으로 구분할 수 있다. 방사선의 발생 원리는 원자핵의 에너지 상태가 불안정하여 안정화되기 위하여 방출되는 경우, 원자의 궤도 전자와의 상호작용에 의하여 X-선을 방출

Table 2. Unit of radiation.

Quantity	New(N)/ Old(O)	Name	Symbol	Definition	Remarked
Exposure	N		C/Kg	One exposure unit is quantity of X or gamma radiation that produces, in air, ions carrying 1 C of charge per kilogram of air.	
	O	roentgen	R		
Absorbed Dose	N	gray	Gy	One gray is an absorbed radiation dose of 1 joule per kilogram, 1 Gy = 1 J/kg, 1 Gy = 100 rad	
	O	rad	Rad		
Equivalent Dose	N	sievert	Sv	The equivalent dose, in tissue or organ T is defined $H_T = \sum_R W_R \times D_{T,R}$	1 Sv = 100 rem
	O	rem	Rem		
Effective Dose	N	sievert	Sv	The effect dose equivalent, in tissue or organ T is defined $H_E = \sum_R W_T \times H_T$	
	O	rem	Rem		
Activity	N	becquerel	Bq	The becquerel is that quantity of radioactive material in which one atom is transformed per second, 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq	
	O	curie	Ci		
A unit of energy		electron volt	eV	An electron volt is the kinetic energy gained by an electron passing through a potential difference of one volt.	1 eV = 1.6×10^{-19} J

Fig. 2. Biological effects of ionizing radiation.

를 준다는 사실이 알려졌다. 이후 페르미가 핵분열 연쇄반응을 이용한 원자로를 만든 후 원자로의 연구 실용화, 가속기 및 인공방사성동위원소의 이용이 활발해져 인류가 취급하는 방사선이나 방사성물질의 양은 급속하게 증가하였다.

방사선 피폭의 영향

방사선이 인체에 미치는 영향은, (1) 피폭된 본인에게 나타나는 것과 (2) 피폭된 사람의 자손에 나타나는 것으로 크게 구별할 수 있는데, 전자를 신체적 영향 그리고 후자를 유전적 영향이라고 한다. 그리고 인체에 미치는 영향이 나타나는 시기에 따라 (1) 급성영향과 (2) 만성영향으로 분류하는데, 급성영향은 피폭 후에 비교적 단기간 내에 나타나는 영향이며, 만성영향은 피폭 후 장기간이 경과한 후에 나타나는 영향을 말하는데 영향이 나타날 때까지의 기간을 잠복기라고 한다. 한편 인체에 나타나는 영향을 발현하는 메커니즘에 따라 (1) 결정론적 영향(deterministic effects)과 (2) 확률론적 영향(stochastic effects)으로 구분하기도 한다.

방사선이 인체에 미치는 영향은 같은 선량의 방사선을 받아도, 한번에 모두 받은 경우와 조금씩 수회에 걸쳐서 나누어 조금씩 받은 경우와는 영향에 큰 차이가 있다. 이것은 회복작용이 있기 때문이다. 그리고 방사선을 전신에 받는 전신피폭의 경우와 신체의 일부만 받은 국부피폭의 경우에 그 영향의 나타남이 다르다. 방사선이 미치는 신체적 영향과 그리고 유전적 영향을 구분한 것이 Table 3에 있다.

방사성 핵종에 의한 영향

세슘, 요오드와 같은 방사성 핵종도 직접적인 흡인이나 오염된 식품의 섭취시 인체에 끼치는 영향은 지대하다. 세슘은 피하지방이나 근육에 대부분 저장되며 방출되는 베타선은 몸안의 수분과 만나 반응성이 매우 좋은 화학물질을 만들고,

Table 3. Physical and hereditary effects from the exposure of ionizing radiation.

Physical Effects	Acute Effects	The hemopoietic syndrome, the gastrointestinal, the central nervous system syndrome
	Delayed Effects	Cancer(bone, lung, thyroid etc.), life shortening, cataracts,
Genetic Effects	Gene Mutation	Dominant, recessive
	Chromosomal anomaly	Deletion, inversion, duplication, translocation, sister chromatid exchange

Table 3에서 언급한 것처럼 DNA 구조에 영향을 미쳐 영구적인 유전적 변화를 일으키게 된다.

요오드의 경우 대부분 호흡을 통해 몸 안에 들어오며 갑상선에 축적되어 갑상선에 영향을 미칠 수 있다. 방사성세슘의 경우 피폭된 사람은 세슘을 포획해 대소변으로 배출하기 위해 ‘프루시안블루’라는 중화제를 먹게 되고 방사성 요오드를 직접 흡입하기 24시간 전에 안정화 요오드(KI)를 섭취하면 갑상선에 들어오는 것을 막을 수 있다. 흡입한 뒤에 최소 15분 안에 KI를 투여하면 90% 이상, 방어효과를 기대할 수 있다. 하지만 특별한 오염 없이 예방차원에서 복용하는 것은 부작용을 초래할 수 있으며 실제로 필요할 때 오히려 제대로 치료받기가 힘들 수도 있다.

미역, 다시마와 같은 일반 요오드 성분의 음식을 섭취하여 갑상선에 축적해 두면 방사성 요오드를 흡입해도 머물러 있을 공간이 없게 되어 도움이 된다고는 하나 약으로 복용하는 요오드의 양은 하루 섭취기준의 몇 백배에 해당되기 때문에 해조류 등을 섭취하는 것만으로는 방사성 요오드에 대처하기 힘들다.

방사선 방호 체계

국제방사선방호위원회(International Committee on Radiation Protection, ICRP)는 방사선 방호에 관한 전문 국제조직으로 방사선 방호를 위한 기본 철학과 원칙, 기본 기준의 체계를 수립하여 권고해 오고 있으며 관련 국제기구와 각 나라가 ICRP의 권고를 대체로 받아들여 규제와 관리에 적용하고 있다. ICRP의 권고는 ICRP 간행물로 발간되며 ICRP 간행물은 기본 권고와 이에 수반되거나 그 적용에 필요한 지침이나 자료들을 수록한다. ICRP 1(1959), ICRP 6(1962), ICRP 9(1965), ICRP 26(1977), ICRP 60(1990)과 같은 일련의 간행물이 기본 권고를 제공해 왔다. 현재 국제기구 또는 각국의 방사선 방호체계는 대체로 1990년 권고인 ICRP 60을 바탕으로 하고 있고 이러한 방호체계는 종사자와 일반인 모두에 대한 방사선 방호의 목표를 성공적으로 달성한 것으로 평가받고 있다.

방사선 방호의 과학기술적 기반도 빠르게 변화하여 컴퓨터의 발전으로 계산과 해석 능력이 급속히 신장되었고 1980년

Fig. 3. Nuclear energy-related legal system in Korea.

대에는 생명과학 분야가 크게 발전하여 방사선 영향에 대한 과학적 데이터가 크게 팽창되었다. 이 자료에 근거하여 방사선 위험도가 재평가되고 일부 수정되었다. 1960년대 이후 ICRP 권고는 대략 10여 년의 주기로 개정이 이루어져 왔다. 최근 2007년에 ICRP 103으로 개정되었다.

우리나라는 방사선 안전규제의 목표와 정책을 수립하고 이를 효과적으로 집행하기 위해 법적·제도적 장치를 마련하고 있다. 이러한 안전규제활동과 관련되는 정부조직으로는 교육과학기술부, 보건복지부 등이 있다. 우리나라에서 방사선에 관한 관계법령으로는 원자력법, 의료법 등이 있다. 원자력법은 원자력법, 동법 시행령, 동법 시행규칙 및 교육과학기술부장관 고시의 4단계로 구성되어 있다. 원자력법에는 원자력개발, 이용 및 안전규제에 관한 근거 및 기본 사항과 방사선 이용에 따른 안전성을 보장하기 위하여 세부 안전관리 요건, 각종 기술기준, 이용기관의 책임과 의무, 벌칙 등을 규정하고 있다 (Fig. 3). 원자력법 시행령에는 법에서 정한 내용의 시행에 필요한 절차 및 행정적 사항을 규정하고 있다. 원자력법 시행규칙에는 시행령의 시행에 필요한 상세한 인·허가 절차와 신청 방법, 양식 및 기술기준을 규정하고 있으며 고시에는 기술기준 및 행정절차에 관한 상세사항을 규정하고 있다.

방사선의 일상생활에서의 활용

동일한 특징을 가지고 있으면서 질량의 차이를 나타내는 것들을 동위원소라 하며, 방사성 동위원소란 방사선을 방출하는 동위원소를 말한다. 퀴리 부인이 자연 방사성 동위원소인 라듐을 발견한 이래로 인공적으로 방사선을 내도록 만든 인공 방사성 동위원소들이 만들어져 왔으며 산업과 의료 분야 등에 응용되어 쓰이고 있다. 방사선의 특성을 활용하여 우리 생활에 필요한 다양한 제품과 기술을 연구하는 분야를 방사

Fig. 4. Technical tree of applications of radiation technology.

선 기술(Radiation technology, RT)이라고 한다. 방사선 기술 분야는 매우 다양하며, 방사선의 독특한 에너지 특성을 활용하여 의학 및 의료, 우주항공, 반도체 등의 산업용 신소재 및 첨단 부품제조, 신제품 개발, 안전한 식품 및 생명공학, 고부가 방사성 동위원소 개발, 방사선 발생장치 및 가속기 개발, 첨단 계측기 분야 등을 포함한다 (Fig. 4).

1. 기기 산업

방사선 발생장치는 X선, 전자빔, 중성자빔, 양성자빔, 이온빔 등 고에너지 방사선을 발생시키는 장치를 말하며, 대표적인 예로는 X선관, 전자가속기, 선형입자가속기, 중성자 발생기 등이 있다. 이러한 발생장치를 기반으로 의료용 진단 및 치료기, 산업용 비파괴검사기, 보안검색기, 방사선조사기 등 다양한 융복합 응용기기가 활용되고 있다(Fig. 5).

방사선 계측기는 방사선의 종류나 세기, 에너지나 인체의 피폭선량을 알아내는 측정기로, 방사선과 검출기 반응물질과의 상호작용에 의한 여기, 이온화, 감광과 같은 현상을 이용한다. 재료에 따라 기체형, 고체형(섬광체, 반도체)이 있다. 기체형은 방사선량을 측정할 수 있지만 방사선의 에너지를 측정할 수 없는 한계가 있다. 섬광체형은 방사선을 가시광으로 변환시키는 물질로 구성되어 있으며 방사선량과 에너지를 구분하는 가장 경제적인 장치를 제작할 수 있어 활용도가 높다. 반도체형은 방사선을 직접 전하로 변환시킬 수 있어 원리적으로 가장 우수한 계측기이다.

2. 방사선의 의학적 이용

방사선의 생물학적 특성과 높은 에너지 투과성을 활용하여 암의 진단 및 치료, 난치성 질병의 조기 진단 등의 의학기술

A. Radiotherapy system

B. Radiographic scanning system

C. 30 MeV Cyclotron

Fig. 5. Equipments for the radiotherapy and radiographic scanning and cyclotron.

방사성 동위원소 검출 기술 이용 바이오칩 개발 방사성 동위원소 표지 키트 신약동태평가
Fig. 6. Development of diagnostic kit using radioisotope (RI) technology and its application to pharmacokinetics.

Fig. 7. HANARO research nuclear reactor producing RI for the medical purpose.

을 획기적으로 발전시켜 왔다. 진단 의학에서 방사성 동위원소는 아주 적은 양으로도 매우 정확하고 정밀하게 분석하고자 하는 물질·생물체의 반응 정도를 측정할 수 있기 때문에 우수한 진단 장치와 분석 기법을 만들어 활용할 수 있다(Fig. 6). 우리나라는 HANARO 원자로를 이용하여 의료용 ^{131}I 과 ^{99}Tc 등을 생산하여 공급하고 있다(Fig. 7).

3. 신소재, 농업·생명, 환경 산업에서의 활용

방사선을 이용한 신소재 개발에 적용되는 기술은 방사선에 의한 화학 반응, 주로 산화/환원, 가교/분해, 그래프트, 중합, 구조 변화 등을 특성을 이용하여 다른 물리적, 화학적, 열적 방법과 비교하여 유해한 첨가제가 필요없이 반응을 일으킬 수 있는 매우 친환경적인 방법이다. 단시간에 처리가 가능하기 때문에 에너지 소비도 매우 적고, 고체 상태나 저온에서도 반응을 일으킬 수 있는 매우 우수한 방법이다. 따라서 이와

반도체

초고온 내열섬유

고분자 휴즈

인공관절

Fig. 8. Advanced materials and products utilizing radiation technology.

Fig. 9. The key map of sewage treatment using the characteristic of radiation.

같은 특징을 가진 방사선은 미래 사회의 필요성에 매우 적합한 기술이라고 할 수 있다(Fig. 8).

방사선의 생물학적 특성을 활용하여 식물의 방사선 돌연변이 육종기술, 저선량 방사선 호메시스 이용기술, 식품조사 기술 및 공중보건제품의 멸균기술 등은 전 세계적으로 광범위하게 활용되고 있다. 환경보전 분야에서도 방사선 기술은 하폐수, 배기가스, 폐기물, 토양 및 지하수 등 다양한 분야에 응용이 가능하다(Fig. 9).

방사선 기술의 전망

2010년 현재 국내 방사선기술 시장의 규모는 약 5조7천억 원으로 2016년까지 12조 원 규모로 확대될 것으로 전망된다. 전술하였듯이 방사선 기술은 의료, 환경, 산업용 소재, 우주항공, 국방, 식품, 농업 등 다양한 산업 전 분야에서 고부가가치를 창조할 수 있는 그 이용 분야가 매우 다양한 미래 필수 첨단 기술로 각광 받을 것으로 전망된다. 방사선 기기의 국산화 및 성능개선, 의료 서비스시장의 기술력 신장 등으로 방사선 기술분야는 더욱 성장, 확대될 것으로 사료된다. 따라서 방사선 기술 이용분야에 많은 관심을 가지고 중요성을 인식하여 많은 연구가 지속되면 국가 경쟁력 제고 및 경제적 발전을 위한 유용한 기술로 활용 가능할 것이다.