

원전에서 대기로 방출되는 방사성물질

이재기 | 한양대학교 원자력공학과
교수
E-mail : jakilee@hanyang.ac.kr

1. 방사선과 에너지

가. 방사선의 종류

방사선이란 “에너지 준위가 높아 불안정한 물질이 안정을 얻기 위해 발산하는 에너지의 흐름”으로 설명할 수 있다. 에너지를 발산하는 수단은 크게 입자 형태와 전자파 형태로 구분된다. 입자형태의 것을 입자방사선, 전자파형태를 전자파방사선이라 부른다. 또 방사선이 에너지가 커서 물질 내에서 이온을 만들 수 있으면 ‘전리방사선’이라 부르는데 원자력 방사선은 모두 전리방사선이다.

입자방사선 중 알파입자는 2개의 양성자와 2개의 중성자로 구성된 입자로서 헬륨의 원자핵과 같다. 따라서 무게는 약 4 원자질량단위(amu)이며 +2의 전하를 갖는다. 알파입자는 그 크기와 전하로 인해 물질을 투과하는 능력은 매우 낮아 공기 중에서도 몇 cm 밖에 가지 못하며 우리 피부의 보호층을 뚫지 못한다.

베타입자는 핵변환의 과정에서 방출되는 음전자 또는 양전자이다. 베타입자는 물이나 인체 조직 수 cm까지는 침투할 수 있다. 양전자 베타입자는 속도가 느려지면 주변의 음전자와 결합하여 소멸하고

대신 광자 방사선(감마선)을 방출한다.

감마선이나 X선은 전하를 띠지 않으며 파장이 짧은(에너지가 높은) 광자(즉, 전자파)이다. 원래는 원자핵에서 방출되는 것을 감마선, 원자의 궤도전자에서 방출되는 것을 X선이라 불렀지만 본질은 같은 전자파이다. X선의 에너지는 감마선에 비해 낮은 경우가 대부분이지만 현대의 고에너지 가속기에서 생산되는 X선은 재래의 감마선보다 훨씬 높은 에너지를 가진다. 감마선이나 X선은 강한 투과력을 갖는다.

중성자 방사선은 원자핵 내의 중성자가 방출된 것으로 전하는 없으며 무게는 약 1 amu이다. 물질을 잘 투과하며 원자핵과 반응하여 흡수된다. 중성자가 핵분열성이 있는 우라늄 원자핵에 흡수되면 핵분열 반응이 일어나고 에너지와 함께 또 다른 중성자들을 방출시킨다. 이것을 연쇄반응이라 하며 원자로나 핵무기의 기본 원리이다.

나. 방사선의 에너지

방사선의 에너지도 본질적으로는 우리가 일상적으로 접하는 에너지와 차이가 없다. 즉, 일반 역학 에너지와 열에너지가 joule이나 cal 단위로 표현된

단위의 표준접두기호

명칭	yotta	zetta	exa	peta	tera	gega	mega	kilo	hecta	deca
기호	Y	Z	E	P	T	G	M	k	h	da
배율	10^{24}	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1
명칭	yocto	zetto	atto	femto	pico	nano	micro	milli	centi	deci
기호	y	z	a	f	p	n	μ	m	c	d
배율	10^{-24}	10^{-21}	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}

다면 방사선 에너지도 같은 단위로 표현할 수 있다. 그러나 방사선 입자 또는 광자 하나의 에너지량은 대단히 작기 때문에 이러한 통상 단위를 사용하는 것이 불편하여 주로 전자볼트(eV) 단위를 사용한다. 1 eV의 에너지는 하나의 전자(electron)을 1 V 전위차 사이에 옮기는 데 필요한 에너지로서 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 에 해당하는 작은 에너지이다. 흔히 사용하는 MeV 단위는 100만 전자볼트로서 $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J} = 3.8 \times 10^{-14} \text{ cal}$ 이다. 즉, 통상의 방사선 입자 하나가 갖는 에너지는 물 1g의 온도를 수십조 분지 1°C 정도 올릴 수 있는 극히 작은 양이다.

2. 방사성핵종, 방사능, 방사성물질

가. 방사성핵종

물질은 원자로 이루어지고 원자는 원자핵과 그 궤도전자로 구성된다. 원자핵은 다시 무게가 거의 같지만 +전하가 있는 양성자와 전하가 없는 중성자로 구성된다. 핵의 양성자 수 또는 중성자 수가 서로 달라 원자의 종류가 차별화되는 것을 핵종이라 부른다. 핵종을 표현하는 기호는 ${}^A_Z X$ 처럼 표기

하는데 여기서 X는 원소기호, Z는 원자핵의 양성자 수를 의미하는 '원자번호', 그리고 A는 원자핵의 양성자와 중성자를 합한 수로서 '질량수'라 부른다. 따라서 A-Z는 핵의 중성자 수 n이 된다. 원자번호 Z는 원소를 규정한다. 예를 들면 Z=1은 수소(H)이고 Z=2는 헬륨(He)이다. 따라서 Z는 표기하지 않아도 원소기호로 알 수 있으므로 핵종의 표기를 ${}^A X$ 형태로 단순화할 수 있다. 핵의 양성자 수 즉, 원자번호는 같으나 중성자 수를 달리할 수도 있다. 예를 들어 통상적 수소의 원자핵은 통상 중성자를 갖지 않아 ${}^1\text{H}$ 이나 하나의 중성자를 가져 ${}^2\text{H}$ (중수소), 또는 두 개의 중성자를 가져 ${}^3\text{H}$ (삼중수소)인 핵종도 존재한다. 이와 같이 원자번호(원소)는 같으나 무게가 다른 핵종들을 상호 '동위원소'라 부른다. 핵종의 정규 표기는 예를 들면 ${}^2\text{H}$ 이지만 편의상 H-2와 같이 적는 것도 종종 용인된다.

'방사성핵종'이란 핵종 중 에너지준위가 불안정하여 자발적으로 변화하면서 방사선을 내는 성질이 있는 것을 말한다. 예를 들면 삼중수소 ${}^3\text{H}$ 는 불안정하며 베타 방사선을 내면서 붕괴하여 안정한 ${}^3\text{H}$ 으로 바뀐다. 따라서 삼중수소 ${}^3\text{H}$ 는 수소의 방사성 동위원소이며 방사성핵종이다. 지금까지 알려진 방사성핵종의 수는 700을 넘지만 흔히 접할 수 있는

용어

핵종(nuclide): 원자핵 내 핵자(양성자와 중성자)의 구성이 서로 다른 종류들

방사성: 자발적인 변환에 따라 방사선을 방출하는 성질인 것

방사성핵종(radionuclide): 핵종 중 방사성인 것

방사성물질: 방사성핵종의 농도가 일정량 이상인 물질

동위원소(isotope): 주어진 원소와 주기율표 상에 같은 위치에 들어가는 동종 원소

* 동위원소라는 용어는 둘 이상의 핵종을 비교하여 부여됨. ^1H 과 ^2H 는 동위원소의 관계에 있으나 ^2H 와 ^{60}Co 은 동위원소 관계가 아님.

방사성동위원소(radioisotope): 동위원소 중 방사성인 것

방사성핵종은 수백종 정도이다. 주변에서 가장 흔히 접할 수 있는 방사성핵종으로는 ^3H , ^{14}C , ^{40}K , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{137}I , ^{192}Ir , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U 등이 있다.

가볍고 안정된 핵종은 그 원자핵에 대략 같은 수의 양성자와 중성자를 가진다. 예를 들면 ^4He ($Z=2$, $n=2$), ^{12}C ($Z=6$, $n=6$), ^{14}N ($Z=7$, $n=7$) 등이 그러하다. 그러나 원자번호가 커지면 핵의 양전하가 증가하므로 안정적이기 위해서는 점점 더 많은 수의 중성자를 필요로 한다. 예를 들면 ^{64}Zn ($Z=30$, $n=34$), ^{96}Mo ($Z=42$, $n=53$), ^{197}Au ($Z=79$, $n=118$), ^{235}U ($Z=92$, $n=143$)에서 보는 것과 같다.

대부분 방사성핵종은 원자핵반응에 의해 인공적으로 발생시킨 것이지만 천연에 존재하는 방사성핵종도 다수 있다. 예를 들어 지각에 존재해온 우라늄이나 토륨과 그 붕괴 생성물들, ^{40}K , 우주 방사선이 대기권에서 질소나 산소 원자 등과 반응하여 만들어 내는 ^3H , ^7Be , ^{14}C 등이다.

나. 방사능

방사능이란 말은 두 가지 의미를 갖는다. 첫째는 '방사선을 낼 수 있는 능력'이라는 정성적 의미이며 둘째는 방사성물질의 양을 나타내는 척도, 즉 정량적 의미이다. 둘째 의미의 방사능의 표현은 정량적으로 주어진 물체에서 단위시간 당 일어나는 붕괴(변환) 수를 나타낸다. 붕괴 수, 곧 방사능은 그 물

체에 함유된 방사성 원자의 수와 그 원자가 붕괴하여 방사선을 낼 확률의 곱으로 표현된다. 만약 물체가 한 종류의 방사성핵종 원자를 N 개 함유하고 있다면 방사능 A 는

$$A = N\lambda$$

여기서 λ 는 방사성핵종의 붕괴상수 즉, 방사성 핵 하나가 단위시간에 붕괴할 확률로서 시간의 역수 단위(s^{-1} , h^{-1} 등)이며 핵종마다 고유한 값을 갖는 '상수'이다. 불안정한 정도가 큰 핵은 빨리 변환하므로 붕괴상수가 크며 반면 비교적 안정한 핵종은 붕괴상수가 매우 작다. 예를 들어 ^{60}Co 의 붕괴상수는 $4.175 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 이고 ^{238}U 의 붕괴상수는 $4.869 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ 이다.

붕괴상수의 단위가 시간의 역수이므로 방사능 A 의 단위도 시간의 역수인데 매초 당 변환 수: tps(transformation per second), 매초 당 붕괴 수: dps(disintegration per second), 매분 당 붕괴 수: dpm(disintegration per minute) 등으로 나타낼 수 있다. 특히 tps 또는 dps의 특별 명칭을 베크렐(becquerel; Bq)이라 부른다. 즉,

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ tps} (\text{dps}) = 1 \text{ s}^{-1}$$

방사능의 전통단위로 Ci(curie)를 사용해 왔으나 현재는 공식적으로 폐지되고 표준단위인 Bq를 사용한다.¹⁾ Bq은 작은 방사능이므로 크기를 키우는

접두기호 k, M, G, T 등을 붙여 사용하는 경우가 많다.

다. 방사능의 지수감쇠

붕괴상수가 λ 인 단일 방사성핵종 방사능이 시간 $t=0$ 에서 A_0 이었다면 시간경과에 따른 방사능 변화는

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

를 얻는데 이것이 방사능의 '지수감쇠 법칙'이다.

방사능이 시간에 따라 지수감쇠하므로 언젠가는 방사능이 초기 값의 절반으로 감소하는 시점이 있다. 즉, 방사능이 1/2로 감소하는 데 걸리는 시간을 '반감기(T)'라 부른다. 반감기와 붕괴상수 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$T = \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

붕괴상수 λ 가 상수이므로 반감기 T도 상수가 된다. 반감기의 단위는 당연히 시간[s, min, h, d, y 등]이며 핵종에 따라 1초보다도 매우 작은 핵종도 있고 수십 억 년이나 되는 긴 반감기를 갖는 핵종도 있다.

라. 방사성물질

어떤 물질의 방사능이 '일정 기준'을 초과할 경우 그 물질을 '방사성물질'이라 부른다. 자연계 물질은 천연 방사성핵종을 미량 포함하고 있으므로 일정 기준을 두지 않으면 모든 물질을 방사성물질로 불러야 하기 때문에 기준을 둔다. 기준은 농도기준과 총량기준이 있으며 두 기준을 모두 초과하는 것만 방사성물질이다. 그 기준은 우리나라의 경우 교육

과학기술부 고시 제2008-31호(방사선방호 등에 관한 기준)에서 제시된다. 예를 들면 3H의 경우 농도 기준은 10^6 Bq/g이고 총량기준은 10^9 Bq이며, ^{131}I 은 각각 10^2 Bq/g과 10^6 Bq이다. 기준이 이와 같이 차이가 있는 이유는 방사성핵종의 보건위해도가 다르기 때문이다.

3. 원자력발전소의 방사능 방출

가. 핵분열생성물

현재 운용되는 원자력발전소(원전)는 우라늄(^{235}U)이나 플루토늄(^{239}Pu)과 같은 핵분열성물질에 중성자를 흡수시켜 핵분열을 초래함으로써 에너지(열)를 얻고 그 에너지로 물을 끓여 증기를 생산하고 터빈을 돌려 발전하는 방식이다.

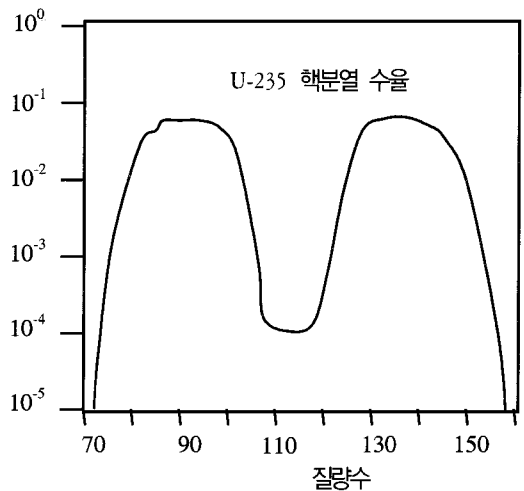


그림 1. ^{235}U 원자핵이 느린 중성자를 포획하여 분열할 때 생성되는 핵분열생성물의 질량수 분포도

1) 1 Ci는 초창기의 대표적인었던 라듐 1g의 방사능을 나타낸 것이며 $1\text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ rps임. 따라서 $1\text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ Bq이며 역으로 $1\text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11}$ Ci에 해당함.

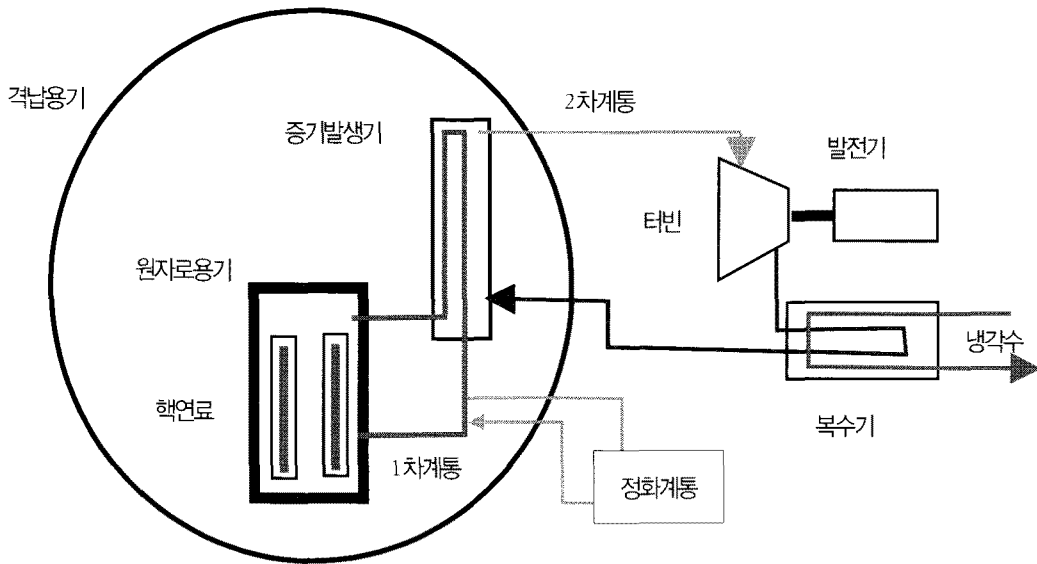


그림 2. 가압경수로의 개념적 계통도. 1차계통에 고압을 유지하기 위한 가압기가 있으나 그림에 표현하지는 않았다.

핵연료물질인 ^{235}U 는 양성자 수 92에 비해 중성자 수가 143개로서 훨씬 많기 때문에 ^{235}U 가 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으켜 두 쪽으로 갈리면 예를 들어 $^{90}\text{Sr}(Z=38)$ 과 $^{144}\text{Xe}(Z=54)$ 가 생성되는데(이들 파편을 '핵분열생성물'이라 부른다.) 이들 모두 안정 핵종인 ^{88}Sr 이나 ^{132}Xe 에 비해 중성자가 과잉인 핵종으로서 불안정하다. 이처럼 중성자 과잉인 핵종들은 대개 베타 붕괴하여 양성자를 늘이고 중성자를 줄여서 안정을 되찾는다. 즉, ^{90}Sr 은 베타 붕괴하여 ^{90}Y 이 되고 이것이 다시 베타 붕괴하여 ^{90}Zr (안정)으로 된다. 따라서 대부분 핵분열생성물은 베타와 감마선을 방출하는 방사성핵종이다. 우라늄 원자가 깨지는 방법은 다양하므로 만들어지는 핵분열생성물의 핵종도 매우 다양하지만 그림에서 보는 것처럼 질량수가 90 내외인 것과 144 내외인 것이 가장 많이 발생한다.

대부분 핵분열생성물은 중성자 과잉이 심한 상태이므로 1회 변환으로는 안정되지 않아 수차례 연

쇄붕괴를 거치는 경우가 많다. 그림 2에 이러한 연쇄붕괴를 예시하였다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 핵분열생성물 중에는 원소가 본질적으로 기체인 것(Kr, Xe)이 있는가 하면 옥소(O)처럼 휘발성이 커 고온에서는 쉽게 기화되는 것도 있고 Sr이나 Zr처럼 상대적으로 휘발성이 낮은 입자상 물질도 있다. 원자로가 가동되면 핵연료 내에서는 수많은 우라늄 원자가 분열하므로 핵분열생성물 중 반감기가 긴 핵종들은 누적되어 점점 강한 방사능을 갖게 된다.

나. 정상운전 중 방사능 환경방출

그림 3에 우리나라 주종 원자로인 가압경수로의 계통 개요를 보았다. 핵연료는 UO_2 세라믹 소자로 가공되어 지르칼로이 피폭관으로 밀봉되어 있다. 이러한 핵연료들을 무리지어 핵연쇄반응이 일어나도록 만든 것이 원자로 본체 또는 원자로심이다. 원

자로심은 두터운 원자로용기(또는 원자로압력용기) 내에 설치된다. 원자로에서 발생하는 열을 1차냉각수가 흡수하여 증기발생기(보일러)로 이송하여 2차계통 물을 끓여 증기로 만들고 자신은 다시 원자로로 되돌아온다. 증기발생기에서 생성된 고온, 고압수증기는 터빈을 돌린 후 복수기에서 물로 응축된 후 다시 증기발생기로 주입된다.

정상가동 상태라면 핵분열생성물들은 핵연료 피복관 내에 억류된다. 그러나 Kr이나 Xe과 같은 불활성기체의 일부는 정상상태에서도 핵연료 피복관을 투과하여 1차냉각수로 나온다. 따라서 정상운전 중에도 1차 냉각수는 상당 수준 방사능에 오염되어 있다. 이것이 가압경수로에서 1차계통과 2차계통을 분리하는 주된 이유이기도 하다. 이들 기체는 정

화계통에서 취출되고 일정시간 억류하여 방사능을 감소시킨 다음 대기로 배출된다. 따라서 정상가동 중인 원전에서도 이러한 불활성기체 방사성핵종은 일부 환경으로 계속 나간다. 이렇게 환경으로 배출되는 방사성 배출물의 특성(핵종, 방사능, 물리화학적 형태 등)을 '선원항(source term)'이라 부른다.

이와 같은 과정으로 정상 운전 중 환경으로 배출하는 방사능은 엄격히 제한된다. 이러한 방출로 인해 인근 주민이 피폭하는 연간 방사선량의 규제기준은 0.1 mSv 수준이다. 따라서 원전 운영자는 원전에서 배출하는 핵종별 방사능을 감시하고 그 결과와 부지의 기상, 지리, 인구학적 데이터와 결합하여 주민의 선량을 평가한다. 선량이 낮아 실측으로 확인할 수는 없으며 위와 같은 절차로 평가만 가능

표 1. 전형적 가압경수로(전기출력 1000 MW) 2기에서 정상운영 중 연간 배출 선원항

핵종	배출량(GBq)		형태	핵종	배출량(GBq)		형태	
	수계	대기			수계	대기		
Br-89	5.92E-04	1.48E-04	핵분열물	Xe-131m	0.	2.04E+03	불활성기체	
Kr-85	0.	5.92E+04		Xe-133m	0.	1.11E+03		
Kr-85m	0.	7.77E+02		Xe-133	0.	1.11E-03		
Kr-87	0.	3.70E+02		Xe-135	0.	2.89E+03		
Kr-88	0.	1.11E+03		Xe-135m	0.	2.63E+03		
Rb-88	2.78E-02	1.55E-03		Xe-138	0.	1.22E+02		
Rb-89	5.92E-04	9.25E-04	기타 핵분열생성물	Cs-134	1.85E+01	5.18E-04	기타 핵분열생성물	
Sr-89	2.41E-02	7.40E-06		Cs-136	6.66E-01	2.07E-04		
Sr-90	9.62E-04	2.59E-07		Cs-137	9.25E+00	2.59E-03		
Sr-91	7.40E-04	3.70E-07		Cs-138	1.26E-02	1.07E-04		
Y-90	7.40E-04	3.70E-07		Ba-140	1.89E-02	6.66E-06		
Y-92	1.07E-04	7.77E-08		La-140	1.15E-02	5.92E-06		
Zr-95	5.55E-03	1.63E-06		Ce-144	1.33E-03	6.66E-07		
Nb-95	5.92E-03	1.67E-06		Pr-144	1.22E-03	6.66E-07		
Mo-99	9.62E+00	4.07E-03		Cr-51	2.11E-02	6.29E-06		
Te-132	5.55E-01	2.41E-04		Mn-54	2.15E-02	5.92E-06		
Te-134	5.92E-04	1.18E-06		Mn-56	1.74E-02	9.25E-06		
I-131	9.25E+00	1.18E-01		Fe-59	2.52E-02	7.03E-06		부식생성물
I-132	9.62E-01	4.44E-02		Co-58	6.29E-01	1.81E-04		
I-133	2.92E+00	5.55E-02		Co-60	2.26E-02	5.55E-06		
I-134	1.11E-01	1.74E-02	H-3 ^{a)}	6.66E+03	5.55E+03	삼중수소		
I-135	5.18E-01	1.04E-02	기타					

a) 최대 환경 배출핵종.
b) C-14가 기타 중요한 핵종의 하나이다.

하다. 전기출력 1000 MW(열출력 약 3000 MW)의 전형적 가압경수로 2기(예를 들면 울진5,6호기)에서 연간 배출되는 정상운전 선원항은 표 1과 같다. 가장 많은 방사능은 트리튬(H-3)이며 대기로 방출되는 총 방사능은 10^{13} Bq 수준임을 알 수 있다. 이러한 선원항에 의해 주민이 피폭하는 선량은 부지 여건에 따라 차이는 있지만 연간 0.01 mSv 내외이다.

다. 사고로 인한 방출

원전 이상사태로 인해 핵연료 피복관에 결함이 발생하면 피복관에 갇혀있던 불활성기체와 휘발성이 높은 방사성옥소가 냉각수로 다량 새나온다. 따라서 이러한 사건이 발생하면 원전에서 환경으로 내보내는 방사능이 비정상적으로 증가하게 되나 심각한 영향을 미칠 정도는 아니다. 심각한 경우는 후쿠시마 원전에서 보았듯이 비록 원자로는 정지했다 라도 핵연료 내 방사능이 내는 수천~십만 kW 수준의 잔류열이 상당기간 지속되므로 기고고장 등으로 잔류열을 성공적으로 식혀주지 못하면 냉각수가

표 2. 사고시 핵연료에서 방출되기 용이한 순서로 구성된 핵종군과 해당 원소

핵종군	군명칭	해당 원소
1	불활성기체	Xe, Kr
2	할로겐	I, Br
3	알칼리금속	Cs, Rb
4	텔루륨 그룹	Te, Sb, Se
5	바륨 스트론튬	Ba, Sr
6	귀금속	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
7	란타나이드	La, Zr, Nd, Eu, Nh, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
8	세륨 그룹	Ce, Pu, Np

고갈되고 결국 핵연료가 과열되어 용융하는 원전 중대사고로 진행될 수 있다.

어떤 사고가 발생한 경우 환경으로 방출되는 방사능량 즉, 선원항은 구체적 사고 과정에 따라 달라진다. 일반적으로 핵연료용융이 일어난 것을 전제로 하면 핵연료 안에 있던 방사성핵종이 누출되는 비율은 그 원소의 휘발성에 의존한다. 방출 평가 목적으로 핵종들을 표 2에 보는 것처럼 군으로 나누는데 제1군은 불활성기체로서 100%가 탈출하는 것으로 간주한다. 다음으로는 휘발성이 큰 원소는 할로겐 원소(주로 옥소)이며 제3군은 알칼리금속으로서 세슘과 루비듐, 제4군은 텔루륨, 안티모니 등이다. 바륨이나 스트론튬은 제5군에 속한다. 후쿠시마 사고 당시 우리나라까지 날아와 검출된 핵종에 Xe, I, Cs 등이 포함된 것은 이러한 방출특성에 기인한다.

실제 사고에서 방출 선원항은 발전소의 구체적 설계특성이나 실제 사고경위에 따라 달라지므로 사전에 확정할 수는 없다. 따라서 신규 원전의 건설허가를 얻기 위해서는 동일 유형 전형적 원전의 사고 선원항을 근거로 그 영향을 평가하여 기준을 충족하는지를 내보여야 한다. 표3은 전형적 가압경수로 중대사고 시 격납용기로 방출될 것으로 가정하는 선원항이다. 이러한 중대사고 선원항은 인허가를 주목적으로 하는 사전 선원항이다. 표3은 원자로심 재고량의 방출분율을 제공하는데 방출 방사능으로 환산하기 위해서는 사고 당시 노심 재고량 자료가 필요하다. 그러나 핵종별 노심 재고량은 구체적 원자로 설계(특히 핵연료 연소도와 연소이력)에 따라 달라지므로 간단한 표로 제공하기 어렵다. 이러한 자료를 생산하는 전문 전산코드로 널리 사용되는 것이 ORIGEN2²⁾이다.

어떤 사고가 발생한 경우 실제 선원항은 사고 원인과 진행과정이 다양하므로 표 3의 전형적 선원항과는 크게 다를 수 있다. 그러나 사고가 발생한 경

2) A.G. Croff, ORIGEN2-an Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621(1980).

표 3. 가압경수로 중대사고시 격납용기로 방출되는 분율^{a)} (NUREG-1465)⁴⁾

핵종군	방출단계			
	간극물 ^{b)} 방출	용기내 조기방출	용기외 방출	용기내 지연방출
불활성기체	0.05	0.95	0	0
할로겐	0.05	0.35	0.25	0.1
알칼리금속	0.05	0.25	0.35	0.1
텔루륨 그룹	0	0.05	0.25	0.005
바륨 스트론튬	0	0.02	0.1	0
귀금속	0	0.0025	0.0025	0
란타나이드	0	0.0005	0.005	0
세륨 그룹	0	0.0002	0.005	0

a) 원자로실 채고량의 분율.

b) 간극물이란 핵연료와 핵연료피복관 사이의 공간에 차있는 방사성물질을 말하며 불활성기체와 휘발성이 높은 원소들로 구성된다.

우 여러 경로를 통해 환경으로 방출되는 방사능의 양을 직접 계량할 방법은 없다.³⁾ 후쿠시마 원전사고에서 환경으로 방출된 선원항에 대한 추정치만 있을 뿐 구체적 자료가 발표되지 않는 이유가 여기에 있다. 또, 실제 사고가 발생한 경우는 원전에서 방출된 양 자체보다는 주변 또는 원거리의 관심 지역에서 실제로 관측된 방사능 농도가 더 필요하고 의미 있는 데이터이다.

또한 선원항이란 핵종별 방사능뿐만 아니라 궁극적 영향에 차이를 줄 수 있는 그 물리화학적 형태, 그리고 방출 시기도 포함된다. 화학형이 중요한 예는 방사성 옥소로서 원소형 옥소(I_2)는 승화성이 높은 입자이지만 사고 원자로 환경에서는 다른 핵분열생성물인 Cs과 결합한 염의 형태(CsI)로 존재하는 비율도 높다. CsI는 소금처럼 용해도가 매우 큰 염으로서 수분이 있는 환경에서는 쉽게 용해되

어 I^- 이온으로 존재하게 된다. 따라서 대기방출이 감소할 수 있다. 이에 반해 일부(약 5%)는 메틸옥소(CH_3I)로 존재하기도 하는데 이 형태는 I_2 처럼 일반 필터로는 잘 걸러지지 않는다. 이들 형태의 옥소를 포집하거나 호흡기를 방호하기 위해서는 활성탄필터를 써야 한다. 화학형이 다르면 대기 확산 과정에서 지표로 침적하는 속도도 달라지므로 동일한 공기 농도로 인한 지표 오염도 평가결과도 달라져 주민의 피폭선량에 영향을 미친다. 또, 화학형이 달라지면 같은 양의 방사능을 흡입하더라도 궁극적으로 인체에 주는 내부피폭 선량계수 값이 차이가 있다.

방출 시기는 비상대책을 이행할 수 있는 시간적 여유와 관계되므로 결국 피폭선량에 영향을 미친다. 표 3에서 조기방출이나 지연방출을 구분하는 것이 이와 관계된다.

이런 상태에 있는 핵연료가 원전 사고로 손상되

3) 정상운영 중 배출 방사능은 시료채취, 배출구 측정 등을 통해 계량이 가능하지만 중대사고 상황에서는 방출량이 많아 이러한 측정기들의 측정범위를 초과한다.

4) I. Soffer, S.B. Burson, C.M. Ferrell, R.Y. Lee and J.N. Ridgely. *Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants*, NUREG-1465, USNRC(1995).

거나 용융하게 되면 다량의 방사능이 외부로 빠져 나오는 원전사고가 된다.

4. 맺는 말

부존 에너지자원이 거의 전무한 우리나라는 산업화의 핵심 원동력으로 원자력발전을 선택하였고 이제 기술자립 단계를 넘어 원전을 수출하는 입지에 왔다. 그러나 원자력발전에는 항상 방사능 위험이라는 꼬리표가 달려있다.

원자력발전소는 정상가동 중에도 환경으로 소량의 방사능을 지속적으로 배출하며 전기출력 1000 MW 가압경수로 2기에서 연간 방출량은 10^{13} Bq 수준이다. 그렇지만 방사능의 대부분은 방사선학적 위해도가 낮은 트리튬(H^3)이거나 환경이나 인체에 흡수되지 않는 불활성기체인 Xe과 Kr이므로 이러

한 방출로 인해 원전 인근 주민이 피폭하는 방사선량은 백그라운드 자연방사선 피폭량(우리나라의 경우 연간 3~4 mSv)에 비해 사소한 수준이다. 후쿠시마 제1발전소처럼 중대사고가 발생하면 방출되는 방사능이 10^{18} Bq 혹은 그 이상에 이를 수 있다. 이때는 적절한 비상대책이 이행되지 않으면 근거리에서는 치명적 수준으로 방사선을 피폭할 수도 있다. 후쿠시마 사고에서 보았듯이 사고 원전에서 거리가 먼 경우에는 방사선에 의한 직접적 보건영향은 무시해도 좋을 수준이다. 그러나 공기 중 방사능 농도가 수십 Bq/m³ 수준에 이르면 보건영향보다 사회경제적 파급피해가 국가위기로 이어질 정도로 심각할 것으로 예상된다. 이렇게 볼 때 원전 중대사고 예방에는 정성을 들여야 한다. 나아가 그럼에도 사고가 발생할 때를 대비해서 피해 경감대책도 다시 점검하고 필요한 보완을 이행해야 한다.