

# | 목 차 |

## 원자력이론

제1장 원자와 에너지 .....	3
1. 원자모형의 변천과정	
2. 원자와 원자핵	
3. 질량과 에너지 및 운동량	
4. 질량결손과 결합에너지	
제2장 방사능과 방사성붕괴 .....	27
1. 방사능의 정의	
2. 반감기와 평균수명	
3. 방사성붕괴	
4. 붕괴에너지	
제3장 방사선과 물질과의 상호작용 .....	44
1. 방사선의 정의	
2. 방사선의 종류와 발생원	
3. 전자기파 방사선과 물질과의 상호작용	
4. 하전입자와 물질과의 상호작용	
5. 중성자와 물질과의 상호작용	
6. 핵반응	
제4장 방사선 차폐 .....	74
1. 중하전입자의 차폐	
2. $\beta$ 선의 차폐	
3. $\gamma$ 선의 차폐	
4. 중성자의 차폐	
5. X선의 차폐	
제5장 방사성핵종과 방사평형 .....	92
1. 방사성핵종	
2. 방사평형	

제6장 방사선생물학 ..... 106

1. 방사선의 생물학적 작용의 특징
2. 방사선감수성
3. 물의 방사선화학
4. 방사선의 작용단계
5. 방사선의 직접작용과 간접작용
6. 방사선장해의 수식인자
7. 방사선이 인체에 미치는 영향
8. RBE(상대 생물학적 효과비)
9. 주요조직 및 장기에 대한 방사선의 영향
10. 발생에 대한 방사선 영향
11. DNA의 방사선 영향
12. 염색체의 방사선 영향
13. 선량선량률효과인자(DDREF)
14. LNT에 반하는 견해들

제7장 방사화학과 방사선화학 ..... 133

1. 용어의 정의
2. 방사성동위원소의 생산
3. 방사성동위원소의 선택시 고려해야 할 사항
4. 방사성표지화합물
5. 추적자
6. 중성자방사화분석법
7. 동위원소희석분석법
8. 체염효과를 나타내는 지표
9. 원자수 및 분자수의 계산

## 방사선취급기술

제8장 측정기술의 개요 ..... 153

1. 방사선 측정시 고려해야 할 공통기술
2. 저준위 방사선의 측정기술
3. 방사선 측정에 사용되는 주요 용어

제9장 기체전리를 이용한 검출기 ..... 172

1. 인가전압과 수집이온쌍수와의 관계
2. 전리함
3. 비례계수관
4. GM계수관
5. 비례계수관과 GM계수관의 비교

제10장 고체전리를 이용한 검출기 .....	196
1. 반도체검출기의 검출원리	
2. 반도체검출기의 종류	
3. 반도체검출기의 특성 비교	
제11장 섬광작용을 이용한 검출기 .....	204
1. 섬광체가 갖추어야 할 요건	
2. 섬광체의 종류	
3. 섬광검출시스템의 구성	
4. NaI(Tl)섬광검출기 내에서 $\gamma$ 선이 검출되는 과정	
5. Ge(Li)반도체검출기와 NaI(Tl)섬광검출기의 비교	
제12장 선량 측정 .....	218
1. 조사선량(exposure dose)	
2. 흡수선량(absorbed dose)	
제13장 방사능 측정 .....	229
1. 직접측정법(절대측정법)	
2. 준직접측정법	
3. 간접측정법(상대측정법)	
제14장 에너지 측정 .....	243
1. 에너지 측정법	
2. $\gamma$ 선 에너지의 측정	
제15장 중성자 측정 .....	259
1. 중성자와 물질과의 상호작용	
2. 중성자 측정	

## 방사선장해방어

제16장 방사선과 관련된 양과 단위 .....	269
1. 방사선장의 특성을 나타내는 양과 단위	
2. 방사선량	
3. 방사선과 물질의 상호작용을 나타내는 양	
제17장 방사선방호체계 .....	287
1. 개요	
2. 방사선방호체계	

3. 피폭상황(situations)기반 방사선방호
4. 방사선방호의 기본적 틀을 이해하기 위한 기본개념
5. 선량한도와 선량제한치/참조준위
6. 한도와 준위
7. 배제·면제·해제
8. ALI와 DAC

제18장 방사선방호의 원칙 ..... 308

1. 외부피폭의 방어원칙
2. 내부피폭의 방어원칙
3. 방사선피폭의 구분

제19장 방사선모니터링 ..... 318

1. 개인감시 모니터링
2. 지역감시 모니터링
3. 실용량

제20장 방사성동위원소 등의 시설 및 취급기준 ..... 340

1. 시설기준과 취급기준의 개요
2. 밀봉선원의 취급
3. 개봉선원의 취급
4. 방사성물질 운반시 방사선량률/표면오염도 기준
5. 방사성오염의 제거 원칙

제21장 방사선사고와 대책 ..... 348

1. 방사선사고
2. 방사선사고의 유형별 주의사항 및 조치사항
3. 방사능재난·사건·방사선비상

제22장 방사성폐기물 관리 ..... 355

1. 방사성폐기물의 정의와 분류
2. 방사성폐기물관리의 목표
3. 방사성폐기물의 처리원칙
4. 방사성폐기물의 처리
5. 방사성폐기물의 처분

부록

방사성핵종의 반감기 ..... 369

주요 방사성핵종의 감마상수 ..... 391

주요 방사성핵종에 대한 반가층 ..... 403

## 제1장 원자와 에너지

### 1. 원자모형의 변천과정

“만물은 무엇으로 구성되어 있는가?”라는 물음은 고대 그리스에서 시작되었다. 아리스토텔레스와 같은 시대에 살았던 레우키포스와 그의 제자 데모크리토스 등의 고대의 원자론자들은 물질을 무한히 계속하여 나누면 물리적으로 더 이상 나눌 수 없는 어떤 한계가 존재한다고 생각하였고 이 한계를 그리스어로 “더 이상 나눌 수 없다”라는 의미를 가진 원자(atom)라고 하였다. a는 그리스어로 “없다”는 뜻이고 tomos는 “나누다”라는 뜻이다<sup>1)</sup>. 원자론자들은 나아가서 영혼도 원자로 이루어져 있다고 주장하였다. 그러나 이러한 유물론적 이론은 당시의 시대적인 상황으로 볼 때 종교적으로 배척받기에 아주 좋은 구실을 제공하게 되었고, 톰슨 등에 의해 원자론이 부활되기까지 수 천년 동안 사장되었다.

#### 1) 톰슨의 원자모형

톰슨(J. J. Tomson)은 “원자의 모양은 구형이며, 양의 전하를 가진 원자에 음의 전하를 가진 전자가 박혀 있다”고 주장하였다. 톰슨이 발견한 전자<sup>2)</sup>는 수소원자에 비해 대단히 가벼운 입자였다. 이 전자는 구형의 원자 속에서 음전하를 가지고 존재하며 원자는 전기적으로 중성이므로 이를 만족하기 위해서는 구형의 원자 속에 전자의 총전하량과 같은 양(+의 전하)이 있어야 하고, 이 양전하의 질량을 가진 부분이 원자질량의 대부분을 차지한다고 생각하였다. 마치 빵 속에 건포도가 박혀있는 것과 비슷하다고 하여 건포도빵모형이라고 하고 양전기를 가진 부분은 한 곳에 국한되어 있는 것이 아니라 원자전체에 퍼져 있다고 주장하였다.

#### 2) 러더퍼드의 원자모형

1909년경 러더퍼드(Ernest Rutherford)는  $\alpha$ 입자의 특성을 알기 위해  $\text{RaC}'(^{214}\text{Po})$

1) 그러나 현대에는 원자는 핵과 궤도전자로 나누어지고 핵은 양성자와 중성자로 나누어진다는 것을 우리는 알고 있다.

2) 크룩스관( $10^{-3}\text{mmHg}$ 정도의 압력상태에 있는 관)에 전압을 걸면 음극에서 어떤 입자가 유리관 벽에 충돌하면서 녹색빛이 발생한다는 것을 알게 된 톰슨은 이 입자를 전자라고 하였다.

에서 발생하는  $\alpha$  입자를 물질에 통과시키는 실험을 하였다. 이 실험을 통하여 물질 속에서  $\alpha$  입자가 산란한다는 것을 발견하였고 원자의 내부에 질량이 응집된 딱딱한 부분, 즉 핵의 존재를 확인하였다. 러더퍼드의 원자모형은 원자의 중심에 핵이 있고 그 주변을 전자가 회전하고 있는 행성모형이다. 그러나 전자기이론에 의하면 회전하는 전자는 빛을 방출하면서 아주 짧은 시간 내에 핵에 나선형으로 끌려 들어갈 것이기 때문에 핵 주위로 전자가 회전할 수 없다. 또 이때 방출되는 빛은 연속스펙트럼이 나타나야 한다. 그러나 원자는 안정하게 존재하고 또 방출되는 빛은 선스펙트럼분포를 나타내므로 러더퍼드의 행성모형은 이것을 설명할 수 없었다.

### 3) 보어의 원자모형

1913년 보어(Bohr, Niels Henrik David)는 러더퍼드의 행성모형을 토대로 하여 양자 가설과 진동수 가설을 도입하여 새로운 원자모형을 제시하였다.

#### (1) 양자 가설(정상상태 가설)

원자내의 특정조건을 만족하는 궤도에서만 회전하며 이 궤도를 따라 운동하는 전자는 전자기파를 방출하지 않는다. 이러한 상태를 정상상태라고 하고 정상상태의 전자가 갖는 에너지를 에너지준위라고 한다. 원자내의 전자가 전자기파를 방출하지 않기 위해서는 전자의 각운동량( $mvr$ )이 플랑크 상수( $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ )를  $2\pi$ 로 나눈 값의 정수배( $n$ )가 될 때이다. 양자 가설은 원자의 안정성을 설명할 수 있다.

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \rightarrow 2\pi r = n \frac{h}{mv} = n\lambda$$

따라서 궤도는 띄엄띄엄한 값만 허용된다. 이처럼 연속적인 값을 갖지 못하고 특정한 값을 가지는 것을 양자화(quantization)되어 있다고 한다.

수소원자의 첫 번째 궤도 반지름이  $0.53 \text{ \AA}$ 일 때 이 궤도에서 전자의 드브로이파장[ $\text{\AA}$ ]을 구해보면  $2\pi r = n\lambda$ 에서  $n=1$ 이므로  $\lambda = 2\pi \times (0.53 \text{ \AA}) = 3.3 \text{ \AA}$ 이다.

#### (2) 진동수 가설

전자가 한 정상상태에서 다른 정상상태로 옮겨갈 때 두 궤도의 에너지 차이만큼의

에너지를 전자기파로 방출하거나 흡수한다. 전자가 낮은 준위에서 높은 준위로 이동할 때에는 에너지를 흡수하고 높은 준위에서 낮은 준위로 이동할 때에는 에너지를 방출한다. 진동수 가설은 수소원자의 선스펙트럼을 설명할 수 있다.

$$E_n - E_m = h\nu (E_n > E_m)$$

보어이론에 의한 수소원자의 에너지준위  $E = -13.6/n^2$  [eV]라고 할 경우 수소원자에서 궤도전자가 바닥상태<sup>3)</sup>에서  $n=3$ 인 들뜬 상태로 옮겨 가기 위해 필요한 에너지를 구해보자.

$n=3$ 인 들뜬 상태의 에너지는  $E = -13.6/3^2$  [eV]이고  $n=1$ 인 상태의 에너지는  $E = -13.6/1^2$  [eV]일 것이다. 따라서 두 궤도간의 에너지 차이는 다음과 같다.

$$\Delta E = E_3 - E_1 = \left(-\frac{13.6}{3^2}\right) - \left(-\frac{13.6}{1^2}\right) = 12.1\text{eV}$$

$n=1$ 인 궤도에서  $n=3$ 의 궤도로 전자가 옮겨가기 위해서는 12.1eV의 에너지를 흡수해야 함을 알 수 있다.

$n=3$ 인 들뜬 상태의 전자가 다시 바닥상태로 전이할 때 방출되는 전자기파의 진동수는  $E = h\nu$  (플랑크상수( $h$ )= $6.63 \times 10^{-34}$ J·s)에서 구할 수 있다.

$$E = h\nu \rightarrow \nu = \frac{E}{h} = \frac{12.1\text{eV} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{J/eV}}{6.63 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}} = 2.92 \times 10^{15}\text{s}^{-1}$$

### (3) 보어원자모형의 고찰

보어의 원자이론은 수소원자의 스펙트럼을 잘 설명할 수 있었지만 다른 원자의 스펙트럼은 설명할 수 없었고 각 궤도에 들어가는 전자수가  $2n^2$ 개인 이유를 알지 못했다. 또 전자의 위치를 궤도에 확정하고 있으므로 하이젠베르그의 불확정원리에도 맞지 않았다. 하이젠베르그의 불확정원리는 “전자는 어느 한 순간에 그 위치와 운동량의 두가지를 동시에 측정할 수 없다.”는 이론이다. 즉 전자는 정해진 궤도

3)  $n=1$ 인 상태

를 회전하는 것이 아니고 그 에너지 준위에 따라 어느 공간에 구름처럼 퍼져 있어 전자의 정확한 위치를 알 수 없고 확률에 의해 존재한다. 이것을 전자구름모형 또는 오비탈모형이라고 한다.

## 2. 원자와 원자핵

### 1) 원자의 특성

#### (1) 원자의 구성입자

원자는 양(+)<sup>1</sup>의 전하를 띤 원자핵이 원자의 중심에 있고, 원자핵의 둘레를 음(-)의 전하를 띤 전자가 빠르게 회전운동하고 있으며 주변은 전자기력이 작용하는 빈 공간이다. 전자가 가지는 전하량은 원자핵이 갖는 양(+)<sup>1</sup>의 전하량과 같다. 즉 원자는 원자핵과 전자로 이루어져 있으며 원자핵은 원자번호(Z)<sup>4</sup>)에 해당하는 양전하를 가지고, 중성원자는 이것과 균형을 이루도록 Z개의 전자로 구성되어 있다. 원자의 크기는 전자궤도 반지름에 의해 결정되고 궤도반지름은 주양자수(n)에 의해 결정된다. 원자핵은 양성자와 중성자로 구성되어 있으며 이들을 총칭하여 핵자(nucleon)라고 한다. 원자를 구성하고 있는 기본입자를 비교하면 표1-1과 같다.

표1-1. 원자를 구성하고 있는 입자의 비교

원자 (atom)	구성		전하	질량
	핵(nucleus)	양성자(proton)	+	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
중성자(neutron)		0	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$	
	궤도전자(electron)		-	$9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$

원자핵을 구성하는 양성자수Z와 중성자수N의 합을 질량수라고 하고 A로 표기한다.

4) 원자번호 암기 : 원자번호는 원자핵 내의 양성자수로 정한 것이므로 양성자수가 원자번호이다.

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
원소	H 수소	He 헬륨	Li 리튬	Be 베릴륨	B 붕소	C 탄소	N 질소	O 산소	F 플루오르	Ne 네온
Z	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
원소	Na 나트륨	Mg 마그네슘	Al 알루미늄	Si 규소	P 인	S 황	Cl 염소	Ar 알곤	K 칼륨	Ca 칼슘
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
원소	Sc 스칸듐	Ti 티타늄	V 바나듐	Cr 크롬	Mn 망간	Fe 철	Co 코발트	Ni 니켈	Cu 구리	Zn 아연



전자의 질량은 양성자나 중성자질량의 약 1/1840정도이므로 원자의 질량은 대부분 원자핵의 질량으로 간주할 수 있으며 원자질량의 대부분(99.975%)을 차지하고 있다.

전자는 원자핵 주위의 특정궤도(shell)를 회전하고 있으며 shell(껍질)의 크기는 결국 원자의 크기가 된다. 이 shell은 원자핵에 가까운 순서대로  $n=1, 2, 3, 4 \dots$ 의 정수값을 가지는데  $n$ 을 주양자수라고 한다. 그리고 안쪽부터 차례로 K, L, M, N...궤도라고 한다.

이들 궤도에 들어갈 수 있는 전자의 수는  $2n^2$ 개이다. 즉 제일 안쪽 궤도(K shell)는 2개( $2 \times 1^2$ 개), 두 번째 궤도(L shell)는 8개( $2 \times 2^2$ 개), 세 번째 궤도(M shell)는 18개( $2 \times 3^2$ 개), 네 번째 궤도(N shell)는 32개( $2 \times 4^2$ 개)...가 들어갈 수 있다. 원자를 구성하는 핵과 궤도전자는 쿨롱력으로 결합되어 있고 원자핵에 가장 가까운 궤도(K shell)가 가장 결합력이 강하므로 매우 안정되어 있다.

어떤 원자에서 M각 궤도까지 들어갈 수 있는 전자의 수를 구해보면 궤도전자수  $=2n^2$ ( $n$ =주양자수)에서 K각( $n=1$ ) 2개, L각( $n=2$ ) 8개, M각( $n=3$ ) 18개이므로  $2+8+18=28$ 개가 된다.

## (2) 원자의 크기

원자핵의 주변을 전자가 회전운동하기 위해서는 원심력과 전자기적 인력이 같아야 한다. 여기서  $m$ 은  $9.1 \times 10^{-31}$ kg,  $k$ 는 비례상수로  $9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 이며,  $r$ 은 궤도 반경[m],  $v$ 는 전자의 속도[m/s],  $e$ 는 전기소량으로  $1.6 \times 10^{-19}$ C이다.

$$F = m \frac{v^2}{r} = k \frac{Ze^2}{r^2}$$

보어의 양자가설에서  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ 이므로  $v = \frac{nh}{2\pi mr}$ 이다. 두 식을 연립하여 풀면 원자반경( $r_n$ )을 얻을 수 있다.

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4k\pi^2 e^2 m Z} = 0.53 \times 10^{-10} \frac{n^2}{Z}$$

수소의 경우  $Z=1$ ,  $n=1$ 이므로 수소의 반경은  $0.53\text{\AA}$ 이다. 이것을 보어의 원자반경이라고 한다. 일반적으로 원자의 크기는  $10^{-10}\text{m}$ 정도이다.

### (3) 궤도전자의 총에너지

원자에서 전자가 갖는 총에너지는 전자의 위치에너지( $-k\frac{Ze^2}{r}$ )와 운동에너지( $\frac{1}{2}mv^2$ )<sup>5)</sup>의 합이다. 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-k\frac{Ze^2}{r} + k\frac{Ze^2}{2r} = -k\frac{Ze^2}{2r}$$

이 식에 전자의 궤도반경  $r_n = \frac{h^2 n^2}{4k\pi^2 e^2 m Z}$  을 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$E_n = -k\frac{Ze^2}{2r_n} = \frac{2m\pi^2 k^2 e^4 Z^2}{h^2 n^2} [\text{J}] = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} [\text{eV}]$$
<sup>6)</sup>

궤도반경  $r$ 이 커지면 위치에너지는 증가하지만 운동에너지는 감소하므로 전자의 속도가 줄어든다.

### (4) 여기(들뜸)와 전리(이온화)

여기(excitation)란 원자의 궤도전자가 에너지를 흡수하여 안정된 기저상태에서 에너지가 높은 상태로 옮겨가는 것을 말하며, 핵의 구속력을 벗어나지는 않은 상태이다. 여기상태는 그 수명이  $10^{-8}\text{s}$  정도로 짧아서 곧 전자기파를 방출하면서 기저상태로 되돌아간다.

5)  $\frac{1}{2}mv^2$ 은  $k\frac{Ze^2}{2r}$ 으로 나타낼 수 있다.

6) 여기서  $-$ 값은 전자가 핵에 구속되어 있는 것을 의미한다.

전리(ionization)란 여기와는 달리 충분한 에너지를 흡수하여 궤도전자가 원자핵의 구속력으로부터 완전히 벗어나는 것을 말한다.

## 2) 원자핵의 특성

### (1) 원자핵의 크기

원자핵의 반경은  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$  정도이며 질량수(A)의  $1/3$ 승에 비례하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = 1.2A^{1/3}[\text{fm}]$$

예를 들어  $^{235}\text{U}$ 와  $^1\text{H}$ 의 핵반경을 비교해보면  $^{235}\text{U}$ 의 핵반경은  $1.2 \times 235^{1/3} = 7.4 \text{fm}$ 이고  $^1\text{H}$ 의 핵반경은  $1.2 \times 1^{1/3} = 1.2 \text{fm}$ 이므로 그 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_{\text{U-235}}}{R_{\text{H-1}}} = \frac{1.2 \times 235^{1/3}}{1.2 \times 1^{1/3}} = \frac{7.4 \text{fm}}{1.2 \text{fm}} = 6.17 \text{배}$$

원자핵은 근사적으로 구형이므로 원자핵의 체적(V)은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(1.2 \times 10^{-15} \text{A}^{1/3})^3 = \frac{4}{3}\pi(1.2 \times 10^{-15})^3 \text{A}$$

즉 원자핵의 체적은 질량수에 비례함을 알 수 있다. 상기 식을 활용하여  $^4\text{He}$  원자핵의

밀도를 구해보면 밀도  $\rho = \frac{M}{V}$ 에서 체적  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ 이 되며, 핵내 핵자의 질량을  $1.674 \times 10^{-27} \text{kg}$ 을 적용하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{M}{V} = \frac{1.674 \times 10^{-27} \text{kg} \times A}{\frac{4}{3}\pi(1.2 \times 10^{-15} \text{m} \times A^{1/3})^3} = \frac{1.674 \times 10^{-27} \text{kg} \times 4}{\frac{4}{3}\pi(1.2 \times 10^{-15} \text{m} \times 4^{1/3})^3} \\ &= 2.31 \times 10^{17} \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

원자핵의 밀도가 상상할 수 없을 정도로 매우 크다는 것을 상기 계산에서 알 수 있다.

## (2) 핵력

양성자와 중성자를 응집시켜 핵을 구성하게 하는 힘을 핵력이라고 하며 핵력<sup>7)</sup>의 특징은 다음과 같다.

- ① 쿨롱력(전자기력)보다 약 100배 정도 강하다. “핵력 : 전자기력 : 중력”의 비는 “ $1 : 10^{-2} : 10^{-40}$ ” 정도이고 핵력은 인력만 작용하며 강력이라고도 한다.
- ② 매우 가까운 거리(약 1fm)에서만 작용하는 힘(단거리력)이다. 핵 바깥에서 핵력은 0이다.
- ③ 하전독립성(핵자의 전하에 무관하게 작용하며 n-p, n-n, p-p 간에 작용하는 힘은 본질적으로 차이가 없다)
- ④ 포화성(핵의 밀도와 비결합에너지가 거의 일정하다)
- ⑤ 교환력( $\pi$  중간자를 매개로 힘을 주고받는다)
- ⑥ 핵자간의 스핀(각운동량)과도 관계가 있다.

## (3) 원자핵의 안정성

일반적으로 가벼운 안정원자핵 ( $A < 20$ )에서는 근사적으로 중성자수와 양성자수가 거의 같으며 원자핵의 질량이 커질수록 안정된 원자핵 내의 중성자수는 양성자수보다 많아진다. 즉 원자핵은 중성자와 양성자로 구성되어 있으며 원자핵의 안정성을 정하는 것은 n/p의 비이다. 따라서 이 비율이 어떤 범위 내에서는 안정하고 그것을 벗어나면 불안정하게 된다. 일반적으로 가벼운 원자핵에서는 n/p비가 1정도이며, 무거운 원자핵에서는 n/p비가 1.5정도로 중성자수가 많다. 핵 내에 작용하는 힘은 p-n, p-p, n-n의 3가지가 있는데 무거운 원자핵일수록 중성자수가 많아지는 이유는 이 중 p-p는 서로 (+)전기를 띠고 있으므로 p가 증가할수록 쿨롱척력이 급격히 증가하므로 전기적 척력이 작용하는 양성자수를 줄이고 중성

7) 자연계에 존재하는 4가지의 힘

- ① 강력 : 핵력(인력만 존재한다)
- ② 전자기력 : 전하를 띤 물체끼리 작용하는 힘
- ③ 약력 : 핵붕괴나 다른 원자핵으로 변화하면서 나타나는 힘
- ④ 중력 : 질량을 가진 물체끼리 작용하는 힘(인력만 존재한다)

자수를 늘림으로서 원자핵이 안정해지기 때문이다. 이러한 이유로 무거운 안정핵일수록 중성자수가 많아진다.

자연계에 존재하는 안정한 핵종을 조사해 보면 양성자와 중성자가 짝수인 핵종이 가장 많고 모두 홀수인 경우가 가장 작다(표1-2).

표1-2. 핵자수에 따른 안정핵종의 분류

양성자수	중성자수	안정핵종수	비고
짝수	짝수	166	
짝수	홀수	54	
홀수	짝수	56	
홀수	홀수	4	${}^2\text{H}$ , ${}^6\text{Li}$ , ${}^{10}\text{B}$ , ${}^{14}\text{N}$

#### (4) 각모형 (shell model)과 물방울모형 (liquid drop model)

##### ① 각모형 (shell model)

이 모형은 핵의 에너지준위를 설명하는데 유용한 모형으로 원자핵이 특별한 양성자수 또는 중성자수를 가질 때 안정하다는 이론이다. 이 특별한 수를 마법수 (magic number)라고 하며 마법수는 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 등이다. 이들 수는 양성자수나 중성자수에 서로 독립적으로도 해당되고 이들의 합에도 적용된다. 마법수를 갖는 핵종들이 안정한 이유는 핵 속의 중성자각이나 양성자각을 완전히 채우고 있기 때문이다.

##### ② 물방울모형 (liquid drop model)

물방울모형은 핵 내의 각 핵자가 핵자 주위의 가장 인접한 핵자들끼리 상호작용하고, 이러한 상호작용은 핵이 물방울과 같이 표면장력효과를 나타내어 둥근 공모양을 해야만 최대의 결합에너지를 가질 수 있다는 것을 설명해준다. 핵 내부에 있는 핵자는 사방에서 같은 크기의 인력을 받으므로 핵 내에서 자유롭게 움직일 수 있으나 핵의 가장자리에 있는 핵자는 내부로 인력이 작용하므로 핵을 벗어날 수 없다. 물방울모형은 핵분열, 핵자의 결합에너지, 복합핵의 형성과정 등을 설명하는데 유용하다.

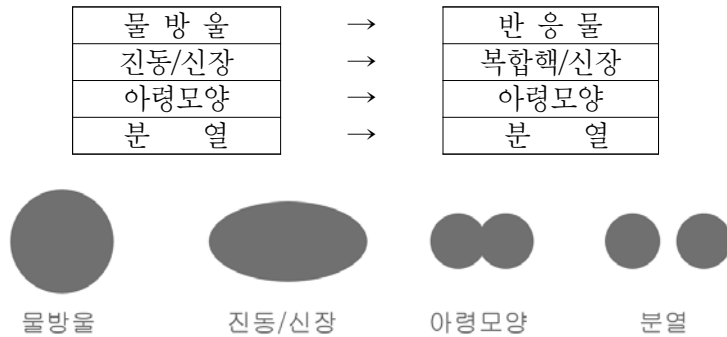


그림1-1. 핵분열 과정

그림1-1에서 핵력은 아주 짧은 거리에서 작용하는데 “아령모양”으로 되면서 쿨롱척력이 커져서 원자핵은 2조각으로 갈라진다. “분열”에서 핵분열편들은 일반적으로 중성자 과잉상태이므로, 곧 바로  $10^{-14}s$  이내에 중성자(즉발중성자)를 방출한다. 핵분열편중에는 핵분열이 일어나고 난 후 일정시간이 지나서야 중성자(지발중성자)를 방출하는 경우도 있다.

(5) 원자핵의 표기와 핵종<sup>8)</sup>

원자핵의 종류는 편의상 중성자수(N)와 양성자수(Z)로 구분하는데 이것을 핵종(nuclide)이라고 한다. 일반적으로 임의의 핵종 X는 다음의 방식으로 표시한다.

$$\begin{array}{c}
 A \\
 Z
 \end{array}
 X
 \quad (N) \rightarrow \text{중성자수(일반적으로 표기하지 않는다.)}$$

A : 질량수(핵자수)  
Z : 원자번호(양성자수)

핵종의 종류는 다음과 같다.

- ① 동위원소 : Z는 같고 N이 다른 핵종 (예)  $^{23}_{11}\text{Na}$ ,  $^{22}_{11}\text{Na}$
- ② 동중원소 : Z와 N은 다르나 A가 같은 핵종 (예)  $^{14}_6\text{C}$ ,  $^{14}_7\text{N}$

---

8) ① 수소( $^1\text{H}$ )의 원자핵 : 양성자(p)  
 ② 중수소( $^2\text{H}$ )의 원자핵 : 중양자(d)  
 ③ 삼중수소( $^3\text{H}$ )의 원자핵 : 삼중양자(t)  
 ④ 헬륨( $^4\text{He}$ )의 원자핵 : 알파선( $\alpha$ )

- ③ 동중성자원소 : N은 같으나 Z와 A가 다른 핵종 (예)  ${}^{15}_7\text{N}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$   
 ④ 핵이성체 : Z, N, A는 모두 서로 같으나, 에너지 상태가 다른 핵종  
 (예)  ${}^{80m}_{35}\text{Br}$ ,  ${}^{80}_{35}\text{Br}$ (m : metastable state(준안정상태))

### (6) 원자와 원자핵의 비교

원자와 원자핵을 비교하면 표1-3과 같다.

표1-3. 원자와 원자핵의 비교

	원 자	원자핵
크 기	[Å]단위	[fm]단위
질 량 비	100	99.975
구 조	원자핵+전자	중성자, 양성자
중 심	있 음 (원자핵)	없 음
작 용 력	쿨 롱 력	핵 력

## 3. 질량과 에너지 및 운동량

### 1) 국제단위계(SI unit)

국제단위계(SI unit)는 7개의 기본단위와 2개의 부기본단위, 기본단위의 조합인 유도단위로 구성된다.

- ① 기본단위 : 길이[m], 질량[kg], 시간[s], 전류[A], 온도[K], 광도[cd], 물질의 양[mol]  
 ② 부기본단위 : 라디안[rad], 스테라디안[sr]  
 ③ 유도단위 : 기본단위의 조합으로 표시할 수 있다.

(예) 힘의 단위 :  $[\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2] \rightarrow [\text{N}]$ , 에너지의 단위 :  $[\text{kg}\cdot(\text{m}/\text{s})^2] \rightarrow [\text{J}]$

단위는 원칙적으로 SI단위를 사용해야 하지만 상황에 따라 SI단위가 사용되지 않는 경우도 있다. 이것을 병용단위라고 한다. 대표적인 병용단위에는 원자질량단위인 [u]와 에너지의 단위인 [eV]가 있다.

## 2) 원자질량단위(atomic mass unit)

원자의 질량은 원자질량단위 [u]를 사용한다. 이 단위는  $^{12}\text{C}$ (탄소)의 질량을 기준으로 하고  $^{12}\text{C}$ (탄소)원자 1개의 질량을 12u로 정하였다.

$$^{12}\text{C}(\text{탄소})\text{원자 1개의 질량} = \frac{12\text{g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}} = 12\text{u}$$

$$1\text{u} = \frac{\frac{12\text{g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}}}{12} = \frac{1\text{g}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.66 \times 10^{-24}\text{g}$$

따라서 1u는 탄소 1g을 아보가드로수로 나눈 것과 같으며  $1.66 \times 10^{-27}\text{kg}$ 에 해당한다. 원자의 구성입자들을 원자질량단위로 나타내면 표1-4와 같다.

표1-4. 양성자, 중성자, 궤도전자의 원자질량단위

구성입자	질량[kg]	원자질량단위[u]
양성자(proton)	$1.673 \times 10^{-27}$	1.007276
중성자(neutron)	$1.675 \times 10^{-27}$	1.008665
궤도전자(electron)	$9.1 \times 10^{-31}$	0.000548

## 3) 에너지의 단위(electron Volt)

에너지의 단위로는 전자볼트[eV]를 사용한다. 1eV는 진공 중에서 1개의 전자를 1V로 가속할 때 얻는 운동에너지로 정의하며, 1eV를 [J] 또는 [erg]단위로 환산하면 다음과 같다.

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{C} \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J} = 1.6 \times 10^{-12}\text{erg}$$

$$(1\text{J} = 1\text{W} \cdot \text{s} = 10^7\text{erg} = 0.24\text{cal})$$

## 4) 질량-에너지관계식

1905년에 Albert Einstein은 특수상대성이론의 결과로서 질량과 에너지의 관계를



유도하였다. 즉 질량은 에너지로 변환되고, 에너지는 질량으로 변환될 수 있다는 것이다. Einstein의 질량에너지 관계식은 다음과 같이 나타낸다.

$$E = mc^2 \quad \left[ \begin{array}{l} E : \text{에너지[J]} \\ m : \text{질량[kg]} \\ c : \text{광속도}(3 \times 10^8 \text{m/s}) \end{array} \right.$$

$c^2$ 은 질량과 에너지를 변환시켜주는 환산계수이다.

$1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$ 이므로 식  $E = mc^2$ 을 이용하고 이를 [MeV]단위로 환산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E &= (1.66 \times 10^{-27} \text{kg}) \times (3 \times 10^8 \text{m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{J} = 1.49 \times 10^{-10} \text{J} \times \frac{1 \text{MeV}}{1.6 \times 10^{-13} \text{J}} \\ &= 931.5 \text{MeV} \end{aligned}$$

따라서  $1u = 931.5 \text{MeV}^{9)}$ 이다.

#### 5) 전자기파의 에너지와 운동량

X선,  $\gamma$ 선과 같은 전자기파의 에너지는 플랑크상수와 진동수의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \left[ \begin{array}{l} E : \text{에너지[J]} \\ h : \text{플랑크상수} \\ \quad (6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}) \\ \nu : \text{진동수}[\text{s}^{-1}] \\ c : \text{광속}(3 \times 10^8 \text{m/s}) \\ \lambda : \text{파장[m]} \end{array} \right.$$

따라서 전자기파의 에너지를 결정하는 것은 진동수(또는 파장)이며 진동수가 클수록, 파장이 짧을수록 전자기파의 에너지는 커진다.

9) 질량을 에너지로 환산할 때  $E = mc^2$ 보다 더 많이 활용되는 환산계수이다. 반드시 암기할 것

상기 식에서  $\frac{h}{\lambda}$ 는 운동량이며 식을 다시 쓰면  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$ 가 된다. 따라서 운동량은 다음과 같이 표현된다.

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

## 6) 드브로이파

일반적으로 입자의 성질을 가진 방사선은 입자이면서 파동의 성질을 가지며, 전자기파 방사선 또한 파동이면서 입자의 성질을 가진다. 이를 파와 입자의 이중성이라고 한다. 이처럼 전자와 같은 입자도 파처럼 운동한다고 생각하고 이 입자의 파장을 드브로이파 또는 물질파라고 하며 운동량(p)과 다음의 관계가 있다.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

p	: 운동량[kg·m/s]
m	: 운동중인 입자의 질량[kg]
v	: 속도[m/s]
h	: 플랑크상수( $6.63 \times 10^{-34}$ J·s)
$\lambda$	: 드브로이 파장[m]
$m_0$	: 정지하고 있는 입자의 질량[kg]
c	: 광속( $3 \times 10^8$ m/s)

## 7) 상대론적 효과

### (1) 상대론적 질량

특수상대성이론에 의하면 물체의 속도가 증가함에 따라 물체의 질량도 함께 증가한다. 즉 속도가 v일 때의 질량을 m, 속도가 0일 때의 질량을  $m_0$ 라 하면, 운동 질량(m)과 정지질량( $m_0$ ) 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

## (2) 운동에너지와 운동량

광속에 근접하여 운동하는 물체는 질량이 증가하며 증가된 질량은 운동에너지이다. 정지질량을  $m_0$ , 운동중일 때의 질량을  $m$ 이라고 하면 운동으로 인한 질량의 증가분은  $m - m_0$ 가 되며, 이를 에너지로 환산하면 다음과 같다.

$$K = (m - m_0)c^2$$

운동중인 질량( $m$ )은 다음과 같다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

따라서 운동에너지( $K$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - m_0c^2$$

광속에 근접하여 운동할 가능성이 큰 입자는 주로 전자나  $\beta$ 선의 경우 상기 식을 적용하여 속도를 구할 수 있다.

만약  $v \ll c$ 인 경우, 즉  $v/c \ll 1$ <sup>10)</sup>인 경우에는 상기식은  $K = \frac{1}{2}m_0v^2$ 으로 근사되는데 그 유도과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K &= m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) = m_0c^2 \left[ \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1 \right] \\ &= m_0c^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - 1 \right] = \frac{1}{2}m_0v^2 \end{aligned}$$

입자의 속도가 광속보다 충분히 작을 경우에는 상대론적 효과와 고전적 역학의 운동에너지가 같아지므로 상대론적 효과를 고려하지 않아도 된다는 것을 알 수

10)  $x \ll 1$ 일 때  $(1+x)^n = 1+nx$ 이다.

있다. 운동량의 경우에도 마찬가지로 광속에 근접할 경우에는 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

일반적으로 운동에너지가 정지질량에너지보다 작을 경우에 적용할 수 있으므로  $K = \frac{1}{2}mv^2 \ll m_0c^2$ 인 경우 사용된다. 그러나 정지질량에너지의 2%의 운동에너지를 가질 때 적용하면 더 정확하게 계산된다. 전자의 경우  $0.511\text{MeV} \times 0.02 = 0.01\text{MeV} = 10\text{keV}$ 이므로 전자의 운동에너지가  $10\text{keV}$ 이상인 경우에는 상대론적 운동방정식을 적용해야 한다. 양성자나 중성자의 정지에너지는 약  $1000\text{MeV}$ 정도이므로 중성자의 운동에너지가  $20\text{MeV}$ 이상인 경우에는 마찬가지로 상대론적 운동방정식을 적용해야 한다.

전자의 운동에너지가  $10\text{keV}$ 인 경우와  $1\text{MeV}$ 인 경우 전자의 상대론적 속도와 고전역학적 속도를 계산하여 비교해보자.

① 운동에너지가  $10\text{keV}$ 일 때

$$10 \times 10^{-3} = 0.511 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) \rightarrow v = 5.85 \times 10^7 \text{m/s}$$

$$10\text{keV} \times 1.6 \times 10^{-16} \text{J/keV} = \frac{1}{2} \times 9.1 \times 10^{-31} \text{kg} \times v^2 \rightarrow v = 5.93 \times 10^7 \text{m/s}$$

상대론적 속도와 고전역학적 속도의 차이가 거의나지 않음을 알 수 있다.

② 운동에너지가  $1\text{MeV}$ 일 때

$$1 = 0.511 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) \rightarrow v = 0.941c = 2.823 \times 10^8 \text{m/s}$$

$$1\text{MeV} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{J/MeV} = \frac{1}{2} \times 9.1 \times 10^{-31} \text{kg} \times v^2 \rightarrow v = 5.93 \times 10^8 \text{m/s}$$

고전역학적 속도보다 상대론적 속도가 더 작음을 알 수 있는데 이러한 속도 차이는 질량의 증가로 나타난다.

이번에는 1개의 전자를 100000V로 가속시켰을 때 전자의 드브로이파장을 계산해보자.

전자의 운동에너지는 0.1MeV이므로  $0.1 = 0.511 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right)$ 에서 속도  $v$ 를 계산하면  $v = \sqrt{0.3}c$ 이므로 드브로이파장은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{드브로이파장} &= \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{\frac{9.1 \times 10^{-31} \text{kg} \times \sqrt{0.3} \times 3 \times 10^8 \text{m/s}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}} \\ &= 3.71 \times 10^{-12} \text{m} = 3.71 \text{pm} \end{aligned}$$

#### 4. 질량결손과 결합에너지

안정한 원자핵은 그 핵을 구성하는 핵자, 즉 양성자와 중성자의 질량의 합보다 항상 작은 질량을 가진다. 이 질량의 감소분이 핵자를 결합하는 에너지가 된다. 이 질량의 감소( $\Delta m$ )를 질량결손(mass defect)이라 하고 Einstein의 질량에너지 등가식에 의해 계산된 에너지( $E_b$ )를 결합에너지(binding energy)라고 하며 질량수가 증가할수록 커진다.  $A$ 는 질량수,  $N$ 은 중성자수,  $Z$ 는 원자번호,  $m_p$ 는 양성자의 질량,  $m_n$ 은 중성자의 질량,  $m_e$ 는 전자질량,  $M(Z,A)$ 는 원자질량이라고 할 때 질량결손 $\Delta m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta m &= [(A-N)m_p + Nm_n] - [M(Z,A) - Zm_e] = (Zm_p + Nm_n) - [M(Z,A) - Zm_e] \\ &= [Am_n - Z(m_n - m_p)] - [M(Z,A) - Zm_e] \end{aligned}$$

$$E_b = \Delta mc^2 \quad \left[ \begin{array}{l} E_b : \text{결합에너지[J]} \\ \Delta m : \text{질량결손[kg]} \\ c : \text{광속도}(3 \times 10^8 \text{m/s}) \end{array} \right.$$

핵자 1개당의 결합에너지를 비결합에너지(specific binding energy) 또는 핵자당 결합에너지( $E_s$ )라 하고 결합에너지를 질량수( $A$ )로 나누어 구할 수 있다.

$$E_s = \frac{E_b}{A}$$

예를 들어  ${}^4\text{He}$ 의 원자질량을 4.00258u라고 할 경우 핵자 1개당 결합에너지를 계산해보자.

${}^4\text{He}$ 원자로 존재할 때와 핵자가 개개로 분리되어 있을 때의 질량차이를 계산하면  $\Delta m = [(2 \times 1.00727) + (2 \times 1.00866)]u - [4.00258 - (2 \times 0.00054)]u = 0.03036u$ 이

되고 이를 에너지로 환산하면  $0.03036u \times \frac{931.5\text{MeV}}{1u} = 28.3\text{MeV}$ 가 된다.

28.3MeV는 핵자 4개의 결합에너지이므로 핵자당 결합에너지는 결합에너지를 4로 나누어 구할 수 있다.

$$\text{핵자당 결합에너지} = \frac{28.3\text{MeV}}{4} = 7.07\text{MeV}$$

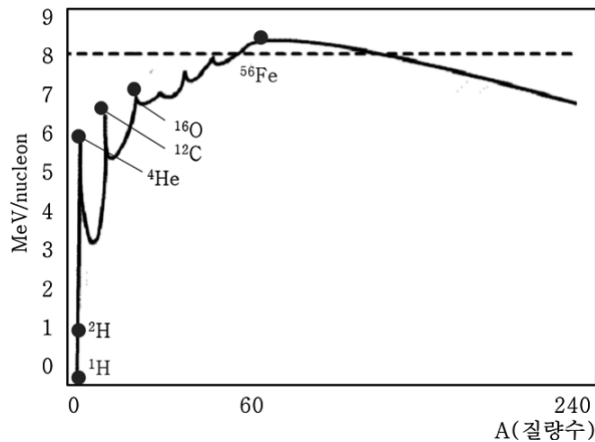


그림1-2. 질량수와 비결합에너지의 관계

그림1-2에서 보는 바와 같이  $A > 15$ 인 원자핵의 핵자당 결합에너지<sup>11)</sup>는 7~8MeV로 일정하며  $A=56$ 인 철( ${}^{56}\text{Fe}$  : 8.7MeV/핵자)이 핵자당 결합에너지가 가장 크다. 또 핵자당 결합에너지는  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  등에서 비교적 큰 값을 나타낸다. 그 이유는  $\alpha$ 입자의 핵자당 결합에너지가 비교적 크기 때문에 안정되어 있으므로 2개의 양성자와 2개의 중성자가 결합하여 원자핵내에서 안정된 핵자집단을 만들기 때문으로

11) 비결합에너지라고도 한다.

생각된다. 또한 가벼운 원자핵들은  $\alpha$  입자와 몇 개의 핵자들이 결합한 것이라고 생각하면 질량수가 4의 정수배가 될 때 특히 안정된 구조를 가진다는 것을 설명할 수 있다. 그러나 질량수가 20이상으로 증가하게 되면 질량수 측면에서 4의 주기성은 별로 나타나지 않고 핵자당 결합에너지는 포화상태로 된다.

## 제1장 확인학습

1. 다음에 서술한 문장에서 잘못된 내용을 바르게 수정하시오.<sup>12)</sup>

- 1) 원자는 더 이상 나누어지지 않으며, 원자핵과 궤도전자로 구성되어 있다.
- 2) 원자핵은 양성자와 중성자로 구성되어져 있으며, 양성자가 중성자보다 조금 무겁다.
- 3) 진동수조건은  $2\pi r = n\lambda$ 를 만족할 경우 정상상태를 나타낸다.
- 4) 전자가 낮은 준위에서 높은 준위로 이동할 때에는 에너지를 방출하고 높은 준위에서 낮은 준위로 이동할 때에는 에너지를 흡수한다.
- 5) 하이젠베르그의 불확정원리에 의하면 전자는 어느 한 순간에 그 위치와 운동량의 두가지를 동시에 측정할 수 있다.
- 6) 원자를 구성하는 입자를 핵자라고 한다.
- 7) 원자핵의 밀도는 질량수가 클수록 증가한다.
- 8) 자연계에 존재하는 안정핵종을 조사해보면 양성자수와 중성자수가 모두 홀수인 것이 가장 많다.
- 9) 물방울모형은 핵의 에너지준위를 규명하는 이론이다.
- 10) 중성자수가 같은 원소를 동중원소라고 한다.
- 11)  $^{12}\text{C}$ 원자의 질량은 개별적으로 존재하는 중성자6개, 양성자6개, 전자6개의 질량합보다 무겁다.
- 12) 결합에너지는 7~8MeV로 일정하다.

12) 풀이

- 1) 원자는 원자핵과 궤도전자로 구성되어 있다. 원자핵은 양성자와 중성자로 구성된다.
- 2) 원자핵은 양성자와 중성자로 구성되어져 있으며, 중성자가 양성자보다 조금 무겁다.
- 3) 양자조건은  $2\pi r = n\lambda$ 를 만족할 경우 정상상태를 나타낸다.
- 4) 전자가 낮은 준위에서 높은 준위로 이동할 때에는 에너지를 흡수하고 높은 준위에서 낮은 준위로 이동할 때에는 에너지를 방출한다.
- 5) 하이젠베르그의 불확정원리에 의하면 전자는 어느 한 순간에 그 위치와 운동량의 두가지를 동시에 측정할 수 없다.
- 6) 원자핵을 구성하는 입자를 핵자라고 한다.
- 7) 원자핵의 밀도는 일정하다.
- 8) 자연계에 존재하는 안정핵종을 조사해보면 양성자수와 중성자수가 모두 짝수인 것이 가장 많다.
- 9) 물방울모형은 핵분열을 설명하는 이론이다.
- 10) 중성자수가 같은 원소를 동중성자원소라고 한다.
- 11)  $^{12}\text{C}$ 원자의 질량은 개별적으로 존재하는 중성자6개, 양성자6개, 전자6개의 질량합보다 가볍다.
- 12) 핵자당 결합에너지는 7~8MeV로 일정하다.
- 13) 핵자당 결합에너지가 클수록 원자핵은 안정하다.
- 14) 핵자당 결합에너지가 가장 큰 핵종은  $^{56}\text{Fe}$ 이다.



- 13) 핵자당 결합에너지가 클수록 원자핵은 불안정하다.
- 14) 결합에너지가 가장 큰 핵종은  $^{56}\text{Fe}$ 이다.

2. 다음 물음에 답하시오.13)

- 1) 원자의 모형의 변천순서를 기술하라.
- 2) 전자를 발견한 사람과 이 사람이 주창한 원자모형은?
- 3) 원자핵에 대한 다음 물음에 답하라.
  - ① 원자핵을 발견한 사람은?
  - ② 원자핵을 발견한 사람이 주창한 원자모형은?
  - ③ 원자핵의 발견을 위해 사용된 방사성핵종과 방사선의 종류는?
- 4) 보어의 원자모형의 문제점은 무엇인가?
- 5) 현대의 원자모형은 무엇인가?
- 6) 원자궤도에서 운동에너지가 가장 큰 각은?
- 7)  $\text{H}_2\text{O}$  1g에 들어 있는 물분자수와 수소원자수를 구하라.
- 8) 1u를 [kg]단위와 [MeV]단위로 나타내어라.

13) 풀이

- 1) 건포도빵모형(톰슨) → 행성모형(러더퍼드) → 보어의 원자모형(보어) → 오비탈모형(전자구름모형)
- 2) 톰슨, 건포도빵모형
- 3) ①러더퍼드 ②행성모형 ③  $\text{Po-214}(\text{RaC})$ ,  $\alpha$ 선
- 4) 수소외의 원자에는 잘못지 않고 각 궤도에 들어가는 전자수가  $2n^2$ 개인 이유를 설명하지 못하며, 전자의 위치를 원자의 궤도로 확정함으로써 하이젠베르크의 불확정원리에 맞지 않는다.
- 5) 오비탈모형(전자구름모형)
- 6) K각

7) 물분자수 =  $\frac{1\text{g}}{18\text{g/mol}} \times 6.02 \times 10^{23} \text{H}_2\text{O 분자/mol} = 3.34 \times 10^{22} \text{H}_2\text{O 분자}$   
 수소원자수 =  $3.34 \times 10^{22} \text{H}_2\text{O 분자} \times 2\text{H 원자/H}_2\text{O 분자} = 6.69 \times 10^{22} \text{H 원자}$

8)  $1\text{u} = \frac{12\text{g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}} = 1.66 \times 10^{-24} \text{g} = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$

$E = mc^2 \rightarrow E = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} \times (3 \times 10^8 \text{m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{J} \rightarrow 1.49 \times 10^{-10} \text{J} \times \frac{1\text{MeV}}{1.6 \times 10^{-13} \text{J}} = 931.5 \text{MeV}$

9)  $1\text{C} \times 1\text{V} = 1\text{J} \rightarrow 1\text{J} \times \frac{1\text{eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{J}} = 6.25 \times 10^{18} \text{eV}$

10)  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ ,  $1\text{cal} = 4.2\text{J}$ ,  $1\text{erg} = 10^{-7} \text{J}$ 이므로  $1\text{cal} > 1\text{J} > 1\text{erg} > 1\text{eV}$ 가 된다.

11)  $\sqrt{2mE} \rightarrow E = \frac{1}{2}mv^2$  를 대입하여 정리하면  $\sqrt{m^2v^2} = mv \rightarrow$  운동량(p)이 된다.

12)  $E = h\nu \rightarrow E = nhf$

13)  $E = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \frac{hc}{2\lambda} / \frac{hc}{\lambda} = 1/2$ 배

14)  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \rightarrow \frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$

- 9) 1C의 전하를 가진 하전입자를 1V로 가속시킬 경우 얻는 운동에너지[eV]는 얼마인가?
- 10) 1cal, 1J, 1erg, 1eV를 에너지가 큰 순서대로 나열하라.
- 11)  $\sqrt{2mE}$  ( $m$  : 입자의 질량,  $E$  : 입자의 에너지)는 어떤 물리량인가?
- 12) 진동수가  $f$ 인  $n$ 개의 광자가 가지는 총에너지는 얼마인가?
- 13) 파장이  $2\lambda$ 인 광자의 에너지는 파장이  $\lambda$ 인 광자에너지의 몇 배인가?
- 14) 정지질량  $m_0$ , 운동중 질량이  $m$ 인 전자가 속도  $v$ 로 운동하고 있다. 운동중인 전자의 질량은 정지질량의 몇 배인가?

## 제1장 요점정리

1. 원자 : 핵(핵자 :  $p + n$ ) + 궤도전자( $2n^2$ 개)
2. 원자모형의 변천과정  
 건포도빵모형(툰슨, 전자발견) → 행성모형(러더퍼드, 원자핵발견,  $RaC(Po-214)\alpha$ 선)  
 → 보어의 원자모형(진동수조건, 양자조건) → 전자구름모형(오비탈모형)
3.  $m_n > m_p + m_e$  (중성자의 질량은 양성자와 전자의 질량 합보다 크다)
4. 전자가 가장 빠르게 운동하는 궤도(위치에너지가 가장 낮고 운동에너지가 가장 큰 궤도) : K각
5. 보어의 원자반경 :  $0.53 \text{ \AA}$
6. 원자핵의 크기 :  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}$   
 원자의 크기 :  $1 \text{ \AA}$
7. 핵의 체적(크기)  $\propto A$
8.  $N/P > 1$  중성자과잉핵종( $\beta^-$  붕괴)  
 $N/P < 1$  양성자과잉핵종( $\beta^+$  붕괴, EC)
9. 자연계 존재 :  $Z=1 \sim 92$ 
  - 1)  $Z=83$ (Bi-209 :  $1.9 \times 10^{19} \text{ y}$ )부터 방사성 핵종이다.
  - 2)  $Z=93$ 부터 인공방사성 핵종이다.
10. 자연계에 존재하는 안정핵 : 양성자와 중성자의 수가 모두 짝수인 것이 가장 많다.  
 양성자와 중성자의 수가 모두 홀수인 안정핵은  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ 이다.

11. 동위체(Z가 같다), 동중체(A가 같다), 동중성자체(N이 같다)

$$12. \text{물질의 양 } N = \frac{w}{A} \times 6.02 \times 10^{23} = \frac{L}{22.4} \times \frac{P}{760} \times \frac{273}{273+t} \times 6.02 \times 10^{23}$$

13. 원자질량단위의 정의 : C-12 1개의 질량 = 12u

$$12\text{u} = \frac{12\text{g/mol}}{6.02 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}}$$

$$1\text{u} = \frac{\frac{12\text{g/mol}}{6.02 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}}}{12} = \frac{1\text{g}}{6.02 \times 10^{23}}$$

$$= 1.66 \times 10^{-24}\text{g} = 1.66 \times 10^{-27}\text{kg} = 931.5\text{MeV}$$

14. 질량 ↔ 에너지 :  $E = mc^2 \rightarrow 1\text{u} = 931.5\text{MeV}$ ,  $m_e = 0.511\text{MeV}$

15. 원자의 세상에서 [kg]이나 [J]은 사용하기에 너무 큰 SI단위이다. 따라서 병용 단위인 [u]나 [eV]를 사용한다.

16. 에너지순서 비교 : 동일단위 통일

$$17. \text{광자에너지와 운동량 } E = \frac{hc}{\lambda}, p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c}$$

$$\text{중입자의 운동에너지와 운동량 } E = \frac{1}{2}mv^2, p = mv$$

상대론적 입자운동에너지와 운동량

$$K = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} - m_0c^2, p = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

18. 질량-에너지 변환방법 :  $E = \Delta mc^2$  ( $E[\text{J}]$ ,  $\Delta m[\text{kg}]$ )

$$E = \Delta m \times 931.5$$
 ( $E[\text{MeV}]$ ,  $\Delta m[\text{u}]$ )

19. 질량결손  $\Delta m = [ZM_p + NM_n] - [M(Z, A) - ZM_e]$