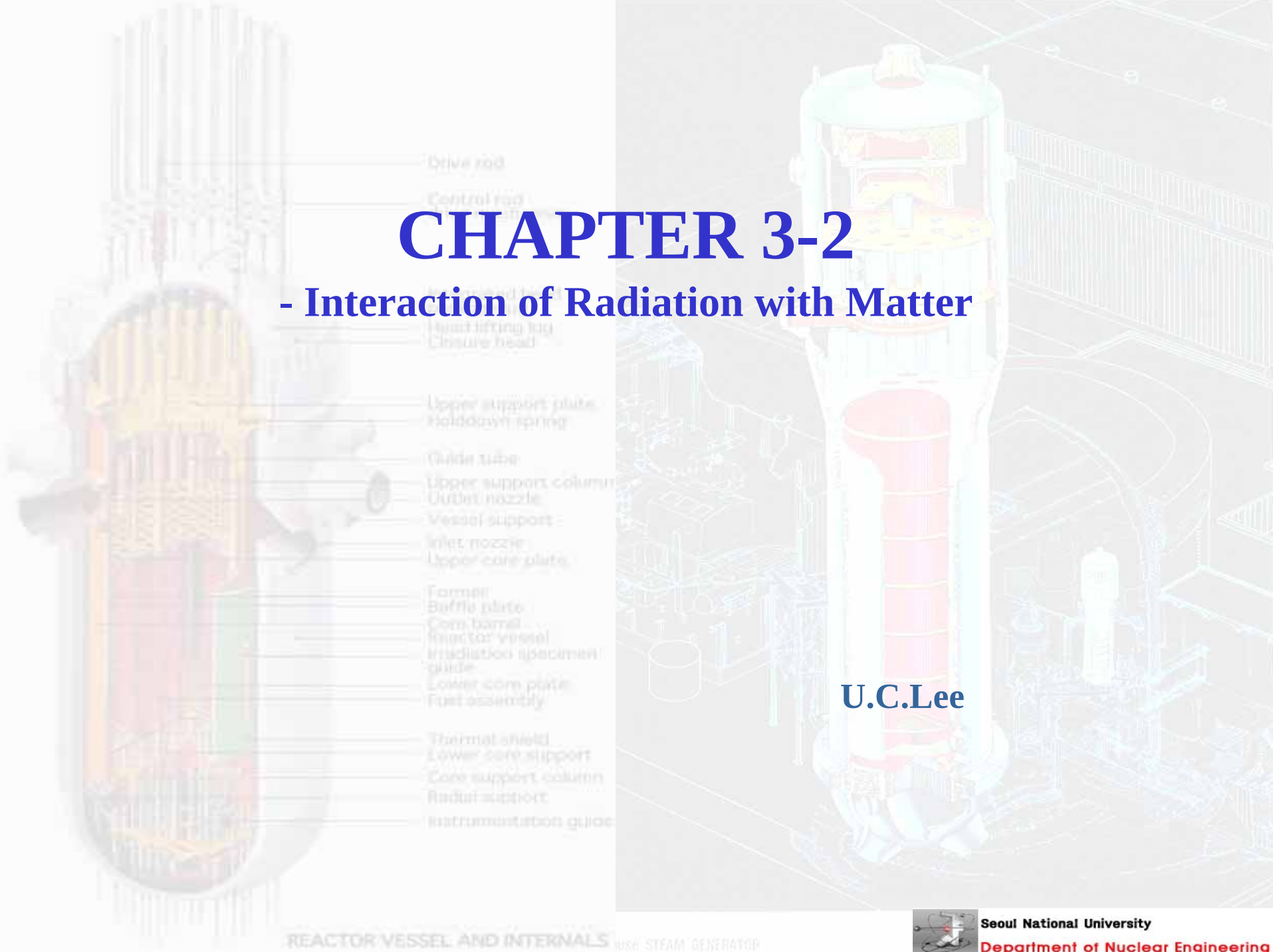


CHAPTER 3-2

- Interaction of Radiation with Matter

U.C.Lee

Seoul National University
Department of Nuclear Engineering

목 차

- Chapter 3. Interaction of Radiation with Matter
  - Neutron interactions(중성자와의 핵반응 유형)
  - Cross sections(중성자 단면적)
  - Neutron attenuation(중성자 감속)
  - Neutron cross-section data
    - Compound Nucleus Formation
  - Energy loss in scattering collisions
  - Fission
    - Fission Cross Sections
    - Fission Products
    - Fission Neutrons
    - Prompt γ -rays
    - The Energy Released in Fission
  - Resonance absorption (공명 흡수)
  - Leakage of neutrons (중성자 누설)
  - Multiplication factor & Reactor critical (증배계수와 원자로 임계)
  - γ-ray interactions with matter

3.6 Nuclear Fission

➢ 역사적 배경

❑ 1932년 James Chardwick

- 베릴륨(Be)으로 된 표적핵에 α 입자를 조사시키는 실험을 하다가 새로운 입자를 발견
  - 전하를 띠고 있지 않아 중성자라 명명함
  - 다른 대전된 입자나 핵과 이온화 반응을 일으키지 않기 때문에 양으로 대전된 원자핵을 쉽게 투과한다는 사실을 확인함

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n} + 5.65\mathrm{MeV}$$

❑ 1934년 Enrico Fermi

- 느린 속도로 움직이는 중성자를 우라늄 원자에 입사시킨 결과 최소한 네 가지의 서로 다른 베타입자 방출체(β-emiter)를 검출

❑ 1939년 Hahn과 Strassman

- 중성자 조사를 받은 우라늄은 어떤 불안정한 상태에 이르게 되어 두 개의 원소로 나뉘어진다는 사실을 확인
- 실험 결과 원자핵을 분리시키는데는 수 MeV의 에너지가 필요하고, 우라늄 원자핵의 경우 중성자 하나가 흡수되면 "Last Neutron"의 결합에너지에 의해 6MeV의 에너지가 방출되어 핵분열이 이뤄짐을 밝혀 냄

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열 과정 (Fission Process)

❑ 자발적 핵분열 (Spontaneous Fission)

- 외부에서 아무런 유도 작용 없이 핵종이 핵분열 하는 현상

❑ 중성자 유도 핵분열 (Neutron-Induced Fission)

- 어떤 핵종이 핵분열을 일으키기에 충분한 에너지를 갖는 중성자를 흡수한 경우에 일어남

❑ 임계 에너지(Critical Energy) or 문턱 에너지(Threshold Energy)

- 핵분열을 일으키기에 필요한 최소한의 에너지
- 각 핵종의 임계 에너지는 실험에 의해 결정됨
- 임계 에너지는 핵분열 하는 핵종에 따라서 다르므로 중성자를 흡수했다 해서 모든 핵종이 핵분열을 일으키는 것은 아님

3.6 Nuclear Fission

표3.6.1 Critical Energies for Fission, in MeV

Fissioning nucleus ^{A}Z	Critical Energy	Binding energy of last neutron in ^{A}Z
^{232}TH	5.9	
^{233}TH	6.5	5.1
^{233}U	5.5	
^{234}U	4.6	6.6
^{235}U	5.75	
^{236}U	5.3	6.4
^{238}U	5.85	
^{239}U	5.5	4.9
^{239}Pu	5.5	
^{240}Pu	4.0	6.4

- 임계에너지(critical energy)와 결합에너지(binding energy of last neutron)
  - 만약 결합에너지가 복합핵(compound nucleus)의 분열을 위한 임계에너지보다 크면 정지 상태의 중성자와 반응하여 핵분열이 일어날 수 있다.
  - 예를 들어 표 3.6.1에서 ^{236}U의 마지막으로 결합하는 중성자의 결합에너지는 6.4MeV인 반면 임계에너지는 5.3MeV이다. 즉 다시 말해서 정지 상태의 중성자가 ^{235}U에 흡수되면 임계에너지보다 1.1MeV 큰 에너지와 함께 복합핵 (^{236}U)을 형성하고 즉각적으로 핵분열이 일어나게 된다. ^{235}U와 같이 정지상태의 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으킬 수 있는 물질을 핵분열성물질(fissile)이라 부른다.

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열 과정 (continue)

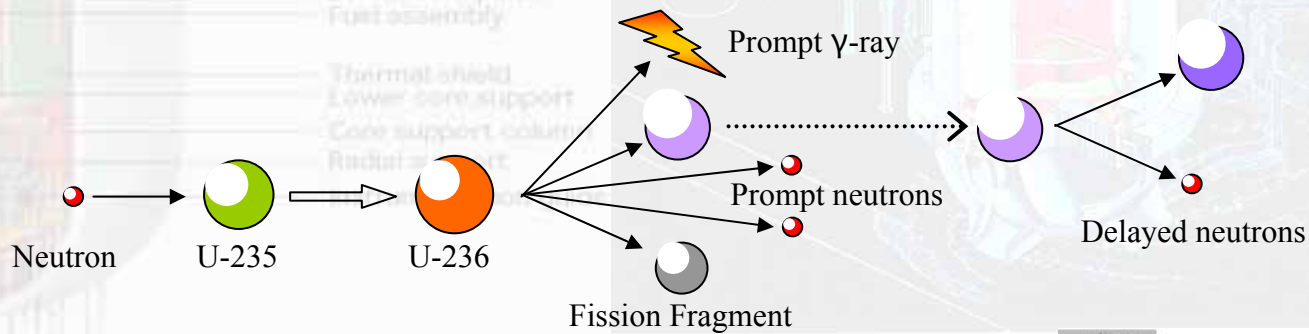
❑ Ex) U-235의 핵분열 과정

- U-235가 중성자를 흡수하면 여기 되면서 U-236으로 변환되어 진동
- 여기된 U-236은 γ-선을 방출하면서 잉여 에너지를 방출하기도 하는데 대부분의 경우에는 아령 모양으로 벌어지고, 이때 아령 모양으로 늘어난 원자핵의 양 끝에 있는 양성자(+전하)들은 서로 밀어내려는 정전기적 척력에 의해 더욱 벌어지게 됨
- 핵은 아주 짧은 거리에서만 작용하는 핵력에 의해서 단단히 묶여 있는데, 아령 모양이 형성되면 핵력이 약해지고 어느 시점에서 정전기적 척력(Electrical Static Repulsion Force)이 핵력 보다 커져 원자핵은 두 단편으로 분리됨
- 갈라진 두 단편은 양(+)으로 대전되어 있기 때문에 더 밀어내려는 반발력(척력)이 작용함
  - 핵분열에 의해 생겨난 두 단편을 핵분열 파편(단편)(Fission Fragments)이라고 함

Continue

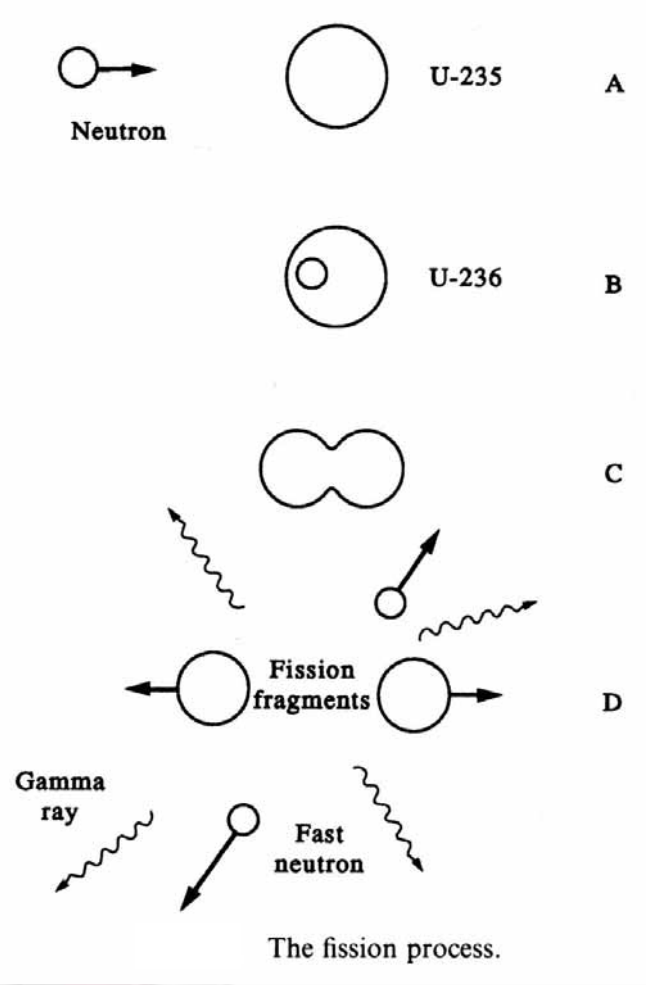
3.6 Nuclear Fission

- 핵분열 파편(단편)들은 상당한 에너지를 갖고 빠른 속도로 서로 밀어내기 때문에 많은 전자들은 대부분 그 자리에 그대로 남게 되고, 핵 안에 양(+)으로 대전된 양성자 수보다 핵 주위에 더 적은 수의 전자를 갖게 되어 양(+) 이온을 형성함
- 핵분열 파편(단편)들은 보통 중성자 과잉 상태이기 때문에, 핵분열 직후 (10^{-8}초 이내) 곧 바로 중성자를 방출하게 되고, 이때 방출되는 중성자를 즉발중성자(Prompt Neutron)라고 함.
- 핵분열 파편(단편)들도 역시 여기 되어 있는 상태이기 때문에 곧 바로 γ-선을 방출하는데, 이와 같이 핵분열 직후에 방출되는 γ-선을 즉발 γ-선(Prompt γ-ray) 이라고 함
- 핵분열 직후에는 핵분열 파편(단편)(Fission Fragments), 자유전자(Free Electron), 즉발 γ-선(Prompt γ-ray)과 같이 기타 여러 종류의 방사선이 나타남
- 핵분열 파편(단편)중에는 핵분열이 일어난 얼마 후 다른 핵종으로 붕괴하고 중성자를 방출하는데, 이때 방출되는 중성자를 지발 중성자(Delayed Neutron)라고 함
- 지발 중성자와 즉발 중성자는 다른 핵종에 흡수되어 또 다시 핵분열을 일으키던가 포획 당함

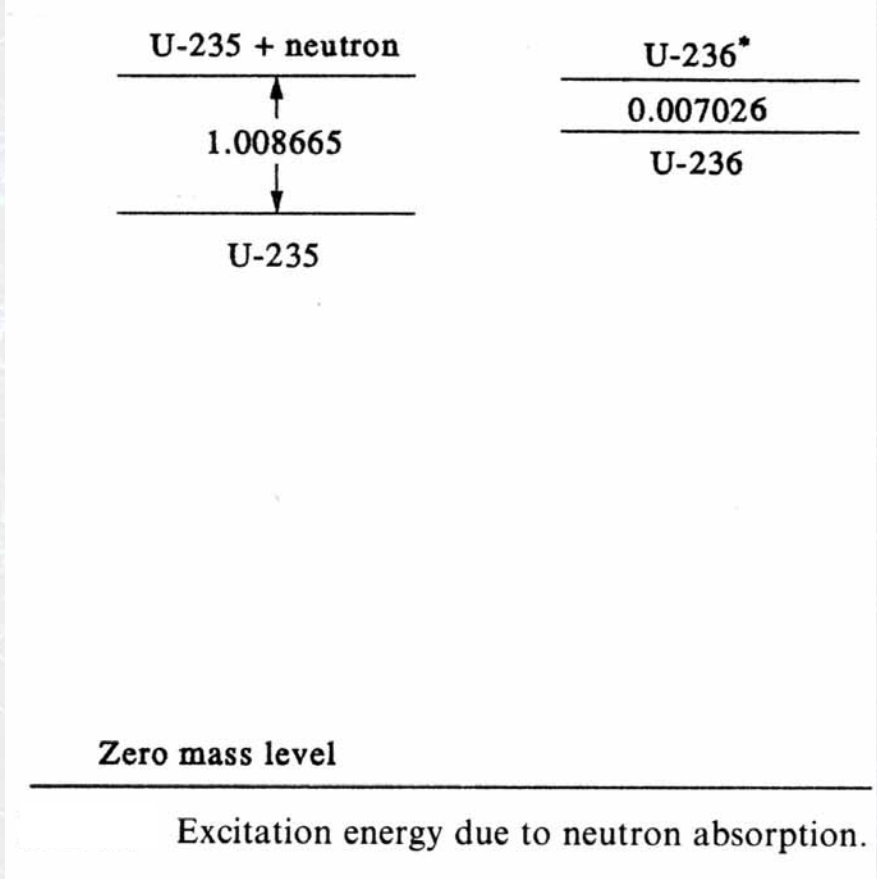


3.6 Nuclear Fission

- 핵분열 과정



The fission process.



3.6 Nuclear Fission

➢ 원자로내의 중성자

❑ 속중성자 (Fast Neutron)

- 속중성자는 대단히 높은 에너지 준위를 갖는 중성자로서 핵분열 과정에서 생성되는 즉발 및 지발 중성자가 속중성자로 분류됨

❑ 열외중성자(Epithermal Neutron)

- 속중성자들이 다른 원자들과 충돌하여 에너지를 잃고서 중간 에너지 준위의 중성자로 되는데, 이 중성자를 열외중성자라고 함

❑ 열중성자(Thermal Neutron)

- 아주 낮은 에너지 준위의 중성자
- 핵분열 과정에서 생성된 속중성자가 에너지를 잃어가면서 열외중성자로 변하고, 열외중성자가 다시 에너지를 잃고 열중성자로 변함

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열 가능 핵종 (Fissionable Nuclides)

❑ 정의

- 중성자를 흡수했을 때 핵분열 할 수 있는 가능성을 가지고 있는 핵종

❑ 종류

- Th-232, U-233, U-235, U-238, Pu-239 등

❑ 핵분열 과정

- 핵분열 가능 핵종들은 흡수한 중성자의 결합에너지와 운동에너지가 자신의 임계에너지 보다 클 때 핵분열(Fission)을 함
- 임계에너지는 각각의 핵분열 가능 핵종에 따라 다르지만 일반적으로 1MeV 이상 되는 속중성자(Fast Neutron)를 흡수하면 핵분열을 일으킬 수 있음

- 그러나 속중성자를 흡수할 확률은 아주 적음. 반면에 열중성자의 흡수 확률은 아주 높기 때문에 동력로(열중성자로)에서 대부분의 핵분열은 열중성자 흡수에 의한 유도 핵분열임

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열성 핵종 (Fissile Nuclides)

❑ 정의

- 핵분열 가능 핵종 중에서 어떤 에너지를 갖는 중성자를 흡수하여도 핵분열을 일으키는 핵종

❑ 특징

- 모든 핵분열 가능 핵종(Fissionable Nuclides)들이 열중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키는 것은 아님. 어떤 핵분열 가능 핵종들의 임계에너지는 열중성자가 제공할 수 있는 에너지 보다 크기 때문
- 핵분열 가능 핵종 중에서 어떤 핵종은 열중성자를 흡수하여 핵분열을 일으킬 수 있는데, 중성자를 흡수할 때 방출하는 결합에너지(Binding Energy)가 임계에너지를 능가하기 때문(표3.6.1 참고)

❑ 종류

- U-233, U-235, Pu-239, Pu-241

표3.6.2 Thermal (0.0253 eV) Data for the fissile Nuclides

	σ_a(barn)	σ_f(barn)	η	ν
^{233}U	578.8	531.1	2.287	2.492
^{235}U	680.8	582.2	2.068	2.418
^{239}Pu	1011.3	742.5	2.108	2.871
^{241}Pu	1377	1009	2.145	2.927

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열성 원료 핵종 (Fertile Nuclide)

❑ 정의

- 핵분열 가능 핵종중에서 중성자를 흡수하여 핵분열성 핵종으로 전환되는 핵종

❑ 종류

- U-238, Th-232

❑ Ex)

$$^{238}_{92}U\ (n,\gamma)\ ^{239}_{92}U \xrightarrow[\beta^-]{} ^{239}_{93}Np \xrightarrow[\beta^-]{} ^{239}_{94}Pu$$

$$^{232}_{90}Th\ (n,\gamma)\ ^{233}_{90}Th \xrightarrow[\beta^-]{} ^{233}_{91}Pa \xrightarrow[\beta^-]{} ^{233}_{92}U$$

3.6 Nuclear Fission

➢ 핵분열 생성물

❑ 정의

- 핵연료물질이 핵분열하면서 새로이 생성되는 원자핵종

❑ 특징

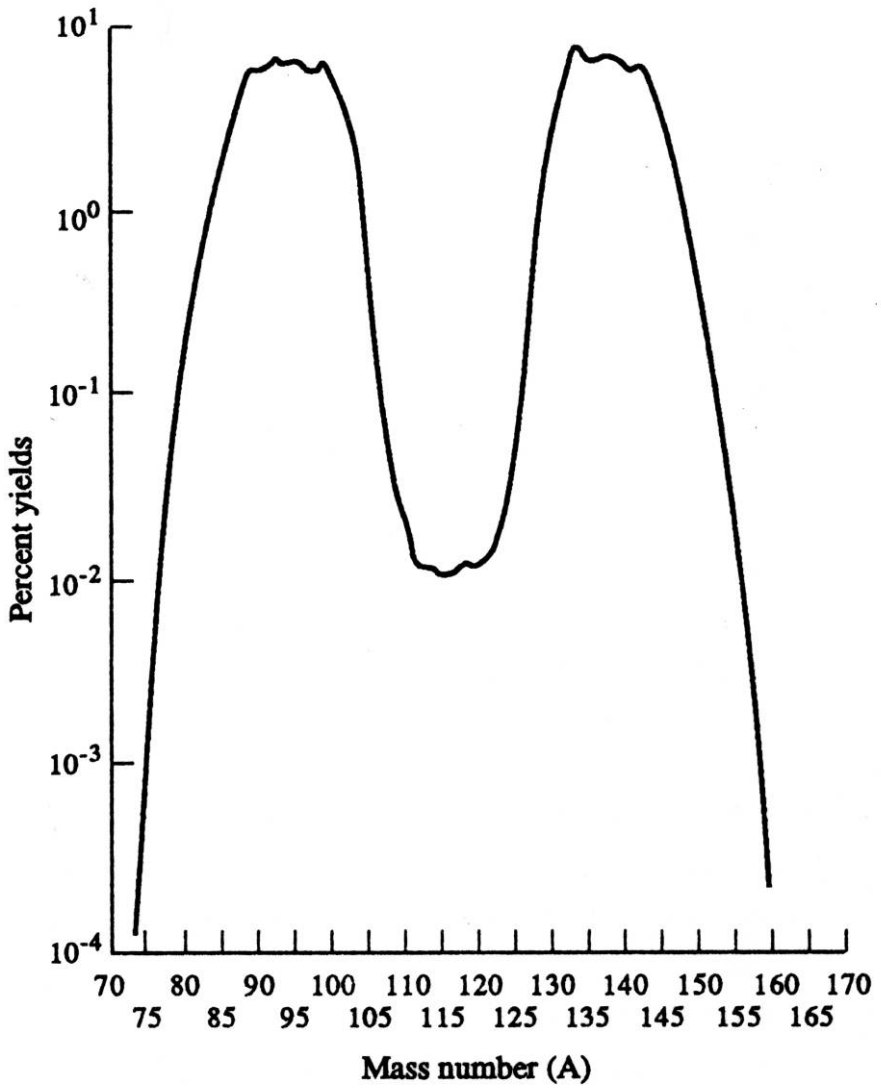
- 핵분열 파편(단편)은 원자핵이 삼분되는 핵분열(ternary fission)을 제외하고는 거의 대부분의 경우 핵분열당 2개가 생성
- 핵분열 파편(단편)은 일반적으로 중성자가 과다한 원자핵이므로 매우 불안정하여 일련의 베타붕괴를 거치면서 안정한 핵종으로 방사천이함.
- Ex)

$$^{115}\mathrm{Pd} \xrightarrow{\beta^-} {}^{115}\mathrm{Ag} \xrightarrow{\beta^-} {}^{115}\mathrm{Cd} \xrightarrow{\beta^-} {}^{115}\mathrm{In}\ \ (\text{stable})$$

- 위의 예는 핵분열파편(단편)이 방사붕괴하면서 최종 안정 핵종이 되기까지 방사성 핵종이 계속 생성되는 것을 보여주는데, 핵분열파편과 이들 방사성핵종들을 합쳐 핵분열 생성물(Fission products)라고 함
- 현재까지 발견된 핵분열 생성물은 300 여종에 이르고 있음

3.6 Nuclear Fission

- Fission product yields for fission in ^{235}U



Energy from fission, U-235	MeV
Fission Fragment Kinetic Energy	166
Neutrons	5
Prompt Gamma Rays	7
Fission Product Gamma Rays	7
Beta Particles	5
Neutrinos	10
Total	200

3.6 Nuclear Fission

❑ 핵분열 생성물의 의미

- 핵분열 생성물이 원자로 밖으로 누출될 경우 방사성 물질이 원자로 주변 환경을 오염시키게 됨
  - 원자로 또는 원자력 발전소의 안전문제는 이들 핵분열 생성물이 환경에 누출될지도 모르는 잠재적 위험성 때문에 원자로 이용 시 중요 관심사로 등장
  - 사용후 연료의 장기 안전 처리처분이 요구되는 것도 사용 후 연료 속에 방사성물질인 핵분열 생성물이 함유되어 있기 때문

- 핵분열 생성물은 안정핵종으로 천이하면서 β 선 및 γ 선을 방출
  - 이들 방사선들은 원자로 내에서 흡수되면서 열로 변환되는데 핵분열이 일어난 t초 후 이들 β 선과 γ 선에 의한 열량은 각각 다음 식을 이용하여 계산이 가능

$$\beta(t) = 1.26 \times t^{-1.2} \ \ (\mathrm{MeV/sec})$$

$$\gamma(t) = 1.40 \times t^{-1.2} \ \ (\mathrm{MeV/sec})$$

- 핵분열 생성물이 β 선 및 γ 선의 형태로 방출하는 이들 열 때문에 원자로는 정지 후라도 이들 열로 인한 원자로 과열현상이 생겨날 수 있음
  - 이를 막기 위해 잔열제거계통과 같은 냉각장치가 필요해지며 이 같은 냉각장치를 추가로 설치해서 정지 후 원자로의 과열상태를 방지하게 됨

3.6 Nuclear Fission

➢ Fission Neutrons

❑ Prompt Neutrons(즉발중성자) & delayed Neutrons(지발중성자)

- 핵분열 시 발생하는 중성자의 대부분(보통 99%이상)은 핵분열 즉시 방출되는데 이를 즉발중성자라 하며 핵분열이 일어난 후 비교적 오랜 시간(0.1초에서 1분)뒤에 방출되는 중성자를 지발중성자라 함

❑ υ

- 핵분열성 물질이 열중성자와 속중성자에 의해 핵분열을 일으킬 때 새로이 생성되는 중성자의 평균 수

❑ η

- 핵연료에 하나의 중성자가 흡수될 때마다 핵분열에 의해 새로이 생성되는 중성자 수

❑ υ와 η의 관계

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

표3.6.3 핵분열성 핵종별 υ와 η 값

핵 종	열중성자(0.0253eV)		속중성자(1MeV)	
	υ	η	υ	η
^{233}U	2.492	2.287	2.58	2.40
^{235}U	2.418	2.068	2.51	2.35
^{239}Pu	2.871	2.108	3.04	2.90

3.6 Nuclear Fission

❑ 핵분열 스펙트럼

- 핵분열 시 새로이 방출되는 υ 개의 중성자는 그 에너지 값이 서로 다르며 이 중성자를 에너지 값에 따라 정렬하면 아래와 같은 에너지 분포함수를 얻을 수 있는데 이 분포함수를 핵분열 스펙트럼이라 함
- 핵분열 스펙트럼은 일반적으로 규격함수 $\chi(E)$ 로 나타내는데 스펙트럼 함수 $\chi(E)$ 는,

$\chi(E)dE =$ 핵분열시 나오는 중성자 중 E와 E + dE 사이의 값을 갖는 중성자의 비율

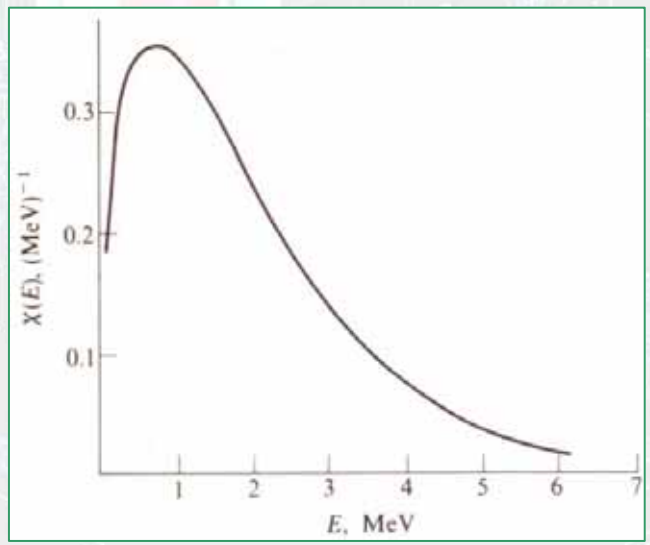
- 위와 같이 정의되며 에너지에 대해 적분하면

$$\int_0^\infty \chi(E)dE = 1$$

- $\chi(E)$를 위와 같이 정의하면 $\upsilon \cdot \chi(E)dE$ 는 핵분열당 나오는 υ 개 중성자 중 E와 E+dE 사이의 에너지 값을 갖고 나오는 중성자의 개수로 정의됨
- $\chi(E)$ 에 대한 여러 가지 실험식 중 하나

$$\chi(E) = 0.453e^{-1.0362E}\sinh\sqrt{2.29E}$$

The prompt neutron spectrum



3.6 Nuclear Fission

❑ 핵분열 시 생성되는 핵분열 중성자의 평균 에너지

- 핵분열 스펙트럼을 사용하여,

$$\overline{E} = \int_0^\infty E \cdot \chi(E) dE = 1.98 MeV$$

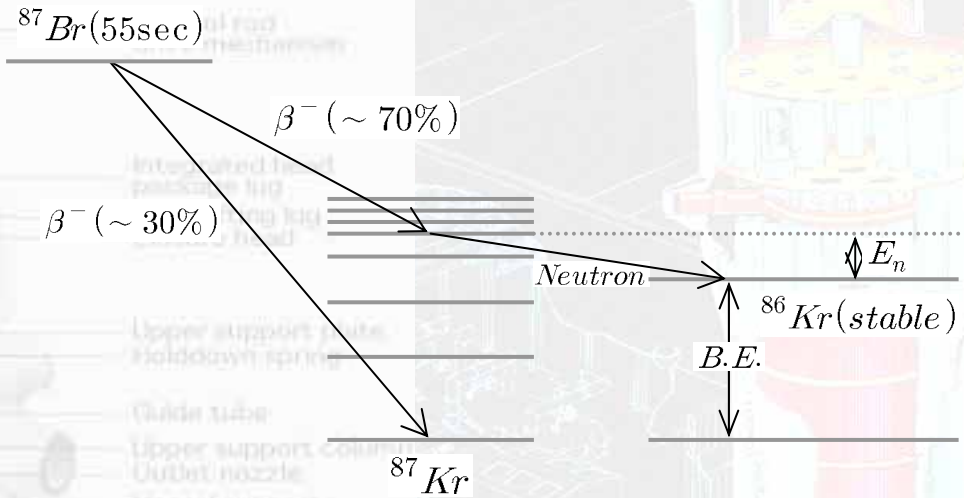
- 위와 같이 구할 수 있으며 이에 따라 핵분열 시 나오는 중성자는 평균 약 2MeV를 갖는 속중성자임을 알 수 있음

❑ 지발중성자 선행 핵종

- 핵분열 시 나오는 평균 υ 개의 중성자는 앞에서 설명한 바와 같이 그 모두가 핵분열과 동시에 나오는 것이 아니고 그 중 일부는 핵분열 파편이 β붕괴를 하면서 생긴 핵분열 생성물이 중성자 방출에 의한 방사천이를 하면서 생겨남

3.6 Nuclear Fission

- Ex) 핵분열 파편(단편) Br^{87} 의 방사천이



  - Br^{87}은 위와 같이 β-붕괴에 의해 Kr^{87}의 기저상태로 또는 여기상태로 천이하는데 여기상태의 Kr^{87}이 생기자마자 중성자를 방출하면서 안정 핵종인 Kr^{86}으로 천이함
  - 이 방사붕괴 하는데 평균 55초만큼 시간이 걸리기 때문에 중성자 방출은 핵분열 후 이 시간 만큼 지연되어 나오게 됨

- 핵분열 파편(단편)의 방사붕괴 결과 핵분열이 일어난 지 한참 뒤에 나오는 이 같은 중성자를 지발중성자라 부르며 지발중성자를 방출해내는 모핵(Ex) Br^{87})을 지발중성자 선행핵이라고 함

3.6 Nuclear Fission

❑ 지발중성자 선행핵의 그룹 및 군별 특성

- 지발중성자는 핵분열이 일어나고 난 후 0.1초에서 약 1분간에 걸쳐 방출됨.
  - 이같이 방출 시간대가 다른 것은 지발중성자 선행핵의 반감기(또는 평균수명)가 다르기 때문
- 지발중성자 선행핵종은 현재까지 20여 종이 발견되었으며 이들은 반감기가 비슷한 선행 핵종으로 묶어서 6군(그룹)으로 구분됨

지발중성자 선행핵의 그룹

지발중성자 선행핵	선행핵의 반감기(s)	그룹
Br-87	54.5	1
I-137	24.4	2
Br-88	16.3	
I-138	6.3	3
Br-89	4.4	
Rb-93,94	~6	
I-139	2.0	4
(Cs,Sb,Te)	(1.6~2.4)	
Br-90,92	1.6	
Kr-93	1.5	
(I-140 +Kr?)	0.5	5
(Br,Rb,As +?)	0.2	6

U235 핵연료 원자로의 지발중성자 선행핵의 그룹별 특성

그룹	반감기(s)	붕괴 상수 λ_1, sec^{-1}	에너지 (KeV)	핵분열당 생성 개수	생성비율 β_i
1	55.72	0.0124	250	0.00052	0.000215
2	22.72	0.0305	560	0.00346	0.001424
3	6.22	0.111	405	0.00310	0.001274
4	2.30	0.301	450	0.00624	0.002568
5	0.610	1.14	-	0.00182	0.000748
6	0.230	3.01	-	0.00066	0.000273

cf. β_i는 매 핵분열마다 나오는 υ개 중성자중에서 i번째 지발중성자 선행핵군이 방사천이하면서 방출되는 i군 지발중성자의 생성 비율

3.6 Nuclear Fission

➢ The Energy Released in Fission

❑ 핵분열 에너지

- 핵분열 반응이 일어나면 핵분열당 200MeV 가량의 핵분열 에너지가 방출됨

❑ 핵의 방출에너지와 회수가능 열에너지

- 앞에서 설명한 바와 같이 핵분열이 일어나면 두 개의 핵분열 파편이 생겨나고 γ 선이 방출되며 평균 2개 이상의 중성자가 나옴. 뿐만 아니라 핵분열 파편(단편)이 β 선, γ 선의 형태로 방사선을 내면서 안정 핵종으로 천이해감. 이들 방사선들이 지니고 나오는 에너지이며 원자로에서 발생하는 열은 방사선이 원자로 내에서 흡수되면서 열에너지로 전환

Emitted and Recoverable Energies for Fission of ^{235}U

Form	Emitted energy, MeV	Recoverable energy, MeV
Fission fragments	168	168
Fission product decay		
β-rays	8	8
γ-rays	7	7
Neutrinos	12	-
Fission neutrons	5	5
Prompt γ-rays	7	7
Capture γ-rays	-	3-12
Total	207	198~207

핵분열시 나오는 에너지중에 12MeV의 에너지는 Neutrino가 가지고 나오는데 이 입자는 정지질량이 Zero인 기본입자로서 투과력이 매우 강하여 원자로 내에서는 흡수가 되지 않는 까닭으로 핵분열 에너지 중 미회수 에너지에 속함