

중성자 검출기 개발과 응용

문명국

한국원자력연구원

소속 기관 소개

- ❖ 원자력 & 방사선기술 연구개발을 위해 1959년 설립
- ❖ 대전 본원, 정읍 (ARTI), 경주 (KOMAC), 감포, 기장(추진중)
- ❖ 총원 1,717명 (연구기술직 1,281명)

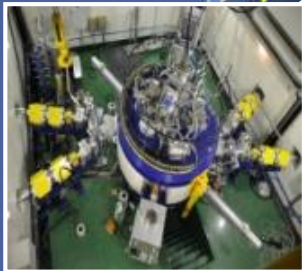
KAERI HQ (Daejeon)
▪ 30-MW RR Hanaro (1995~)



KAERI-KOMAC (Gyeongju)
▪ 100-MeV Proton Linac (2013~)



KAERI-ARTI (Jungup)
▪ 30-MeV Cyclotron (2014~)

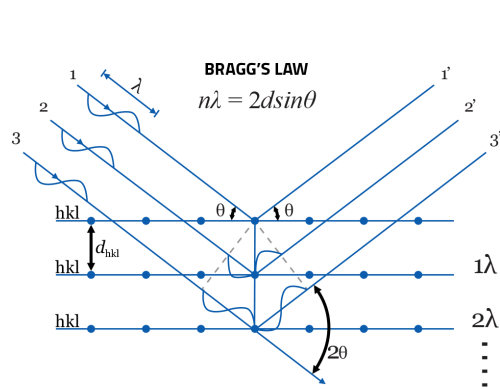
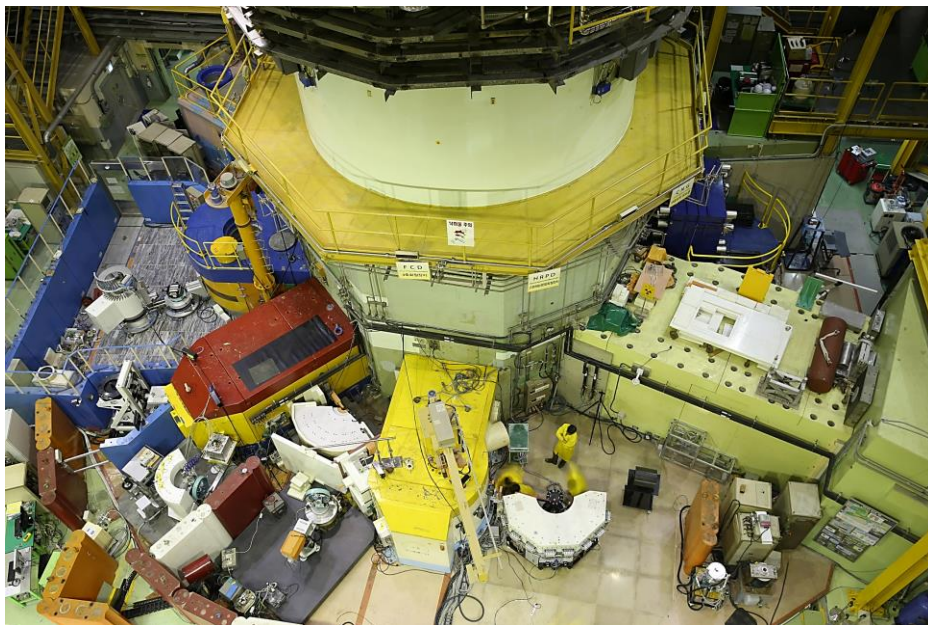


강사 소개

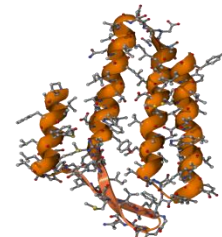
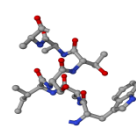
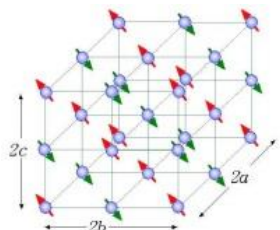
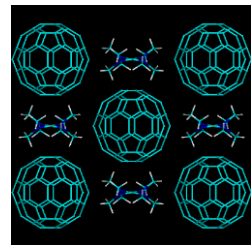
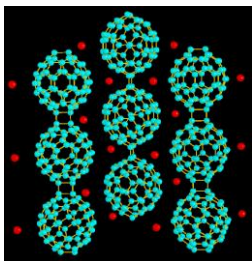
- 한국원자력연구원 책임연구원
- 방사선 검출 시스템 연구 개발
 - 중성자 산란 & 회절 장치 개발
 - 중성자 검출 기술 개발
 - X-선, 감마선, 하전입자 (알파, 양성자) 검출 기술 개발
- 중성자 영상시스템 개발
- 가속기 기반 중성자원 개발
- 방사선 기술 개발 관련 과제 수행

강사 소개

- 연구용 원자로 하나로(HANARO)

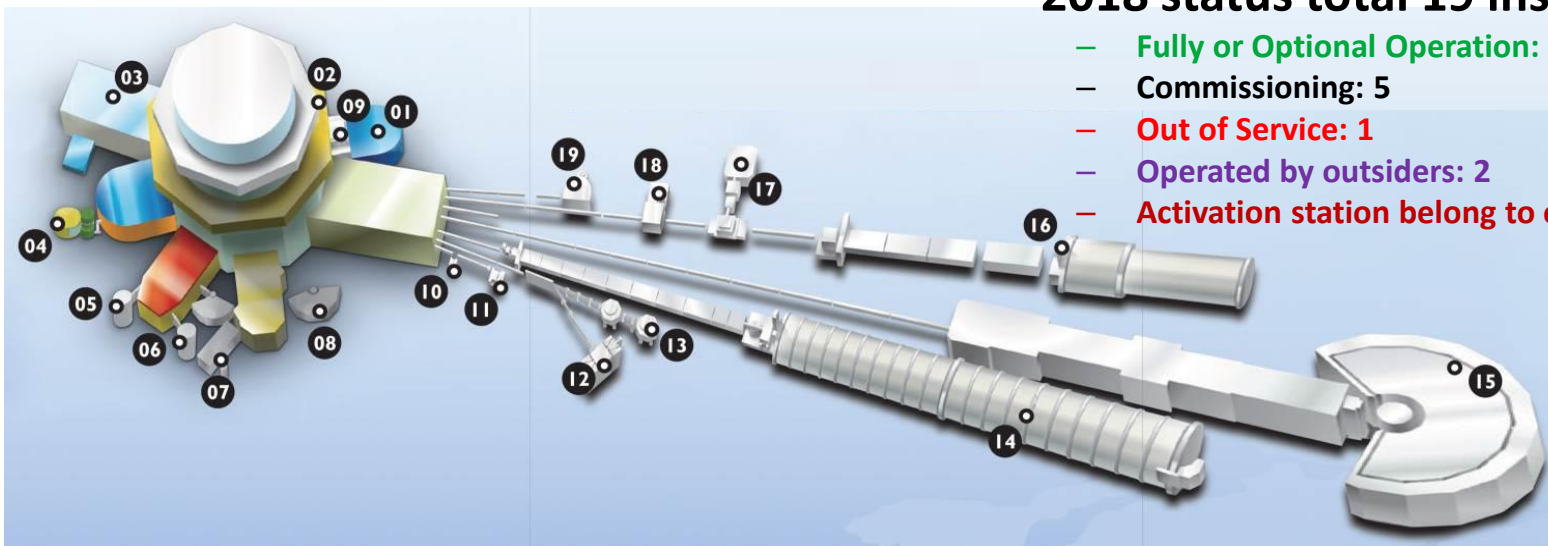


검출기 개발
핵심 요소기술 개발
차폐 시스템 구성
구동 시스템
빔 정렬 등



원자 수준의 미세 구조 분석 연구 장치 개발 & 성능향상

하나로 연구용원자로



2018 status total 19 instruments

- Fully or Optional Operation: 9
- Commissioning: 5
- Out of Service: 1
- Operated by outsiders: 2
- Activation station belong to other division: 2

02 Ex-core Neutron irradiation Facility

09 Thermal Neutron Prompt Gamma Activation Analysis

01 Residual Stress Instrument

08 High Resolution Powder Diffractometer

07 Four Circle neutron Diffractometer

06 Bio-Diffractometer

05 Bio-diffractometer with neutron image plate Camera

04 Thermal neutron Triple-Axis Spectrometer

03 Neutron Radiography Facility

10 Guide Test Station

11 Vertical type REflectometer

12 Cold Neutron Activation Station

13 High Intensity Powder Diffractometer

14 40m Small Angle Neutron Scattering instrument

15 Disk-Chopper Time-of-Flight spectrometer

18 KIST Ultra-Small Angle Neutron Scattering instrument

17 Bio-REflectometer

16 18m Small Angle Neutron Scattering instrument

19 Cold neutron Triple-Axis Spectrometer

대부분 응집물질, 표면 구조 연구에 활용

하나로 연구용원자로



하나로 원자로홀

하나로 연구용원자로



냉중성자실험동

강사 소개

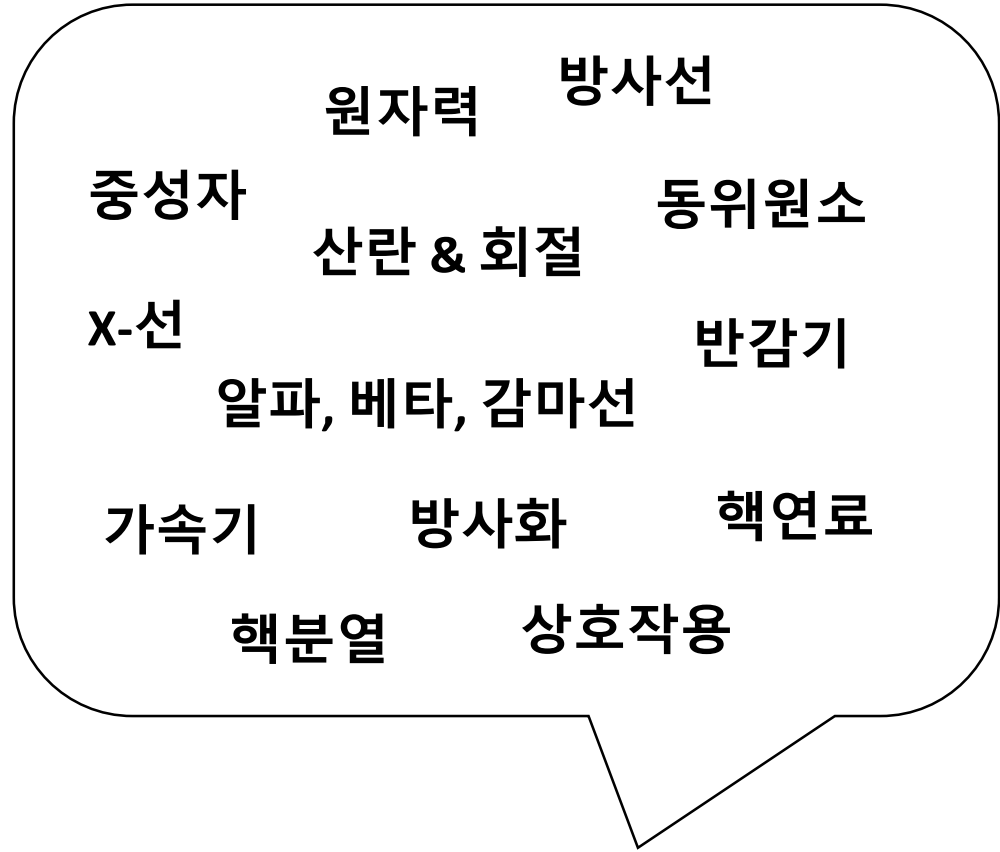
- 방사선 검출 시스템 개발



방사성물질/핵물질 탐지 기술 개발



중심어



역학



수리물리, 미적분,
선형대수, 복소함수, ...

전자기학

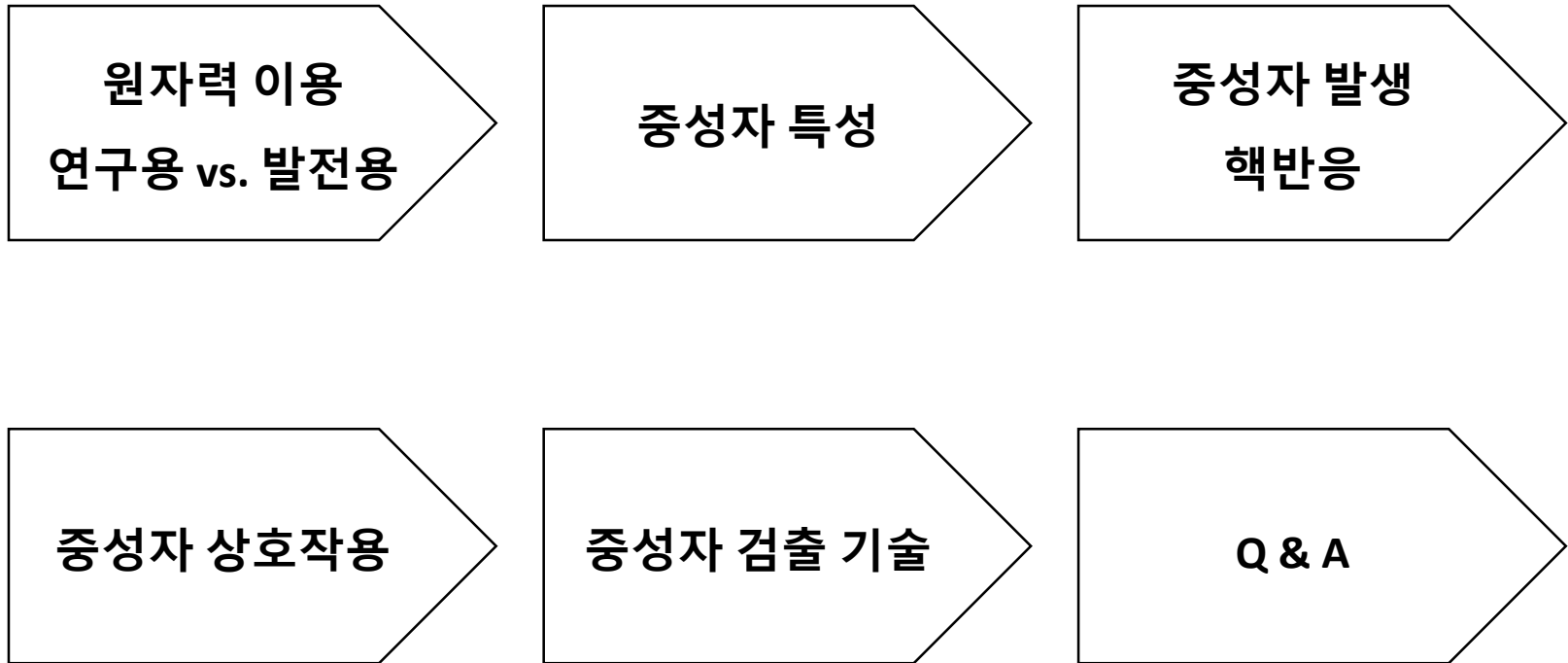


현대물리, 통계, 열
광학, ...

양자역학

핵물리, 입자물리,
고체물리, ...

강의 내용



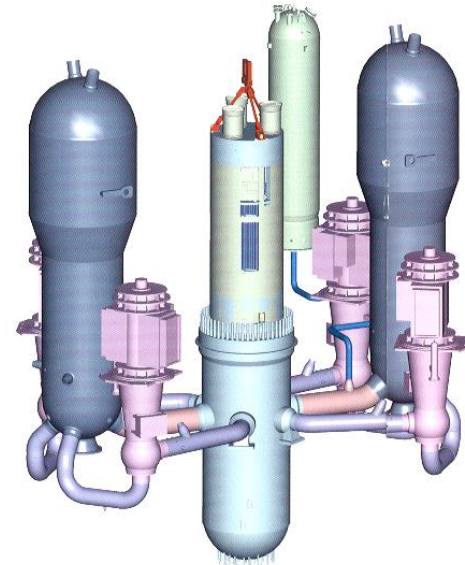
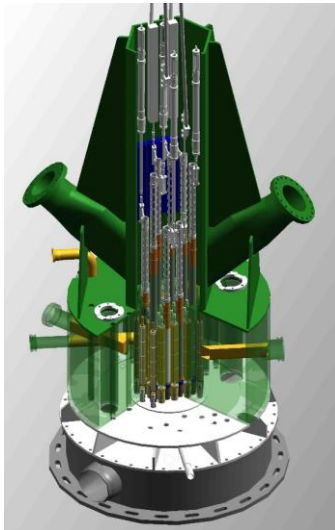
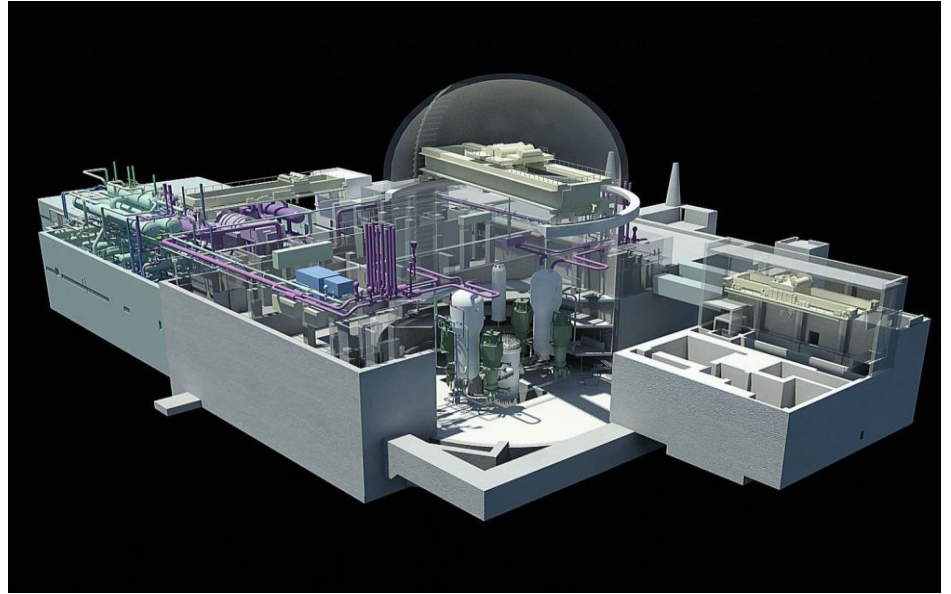
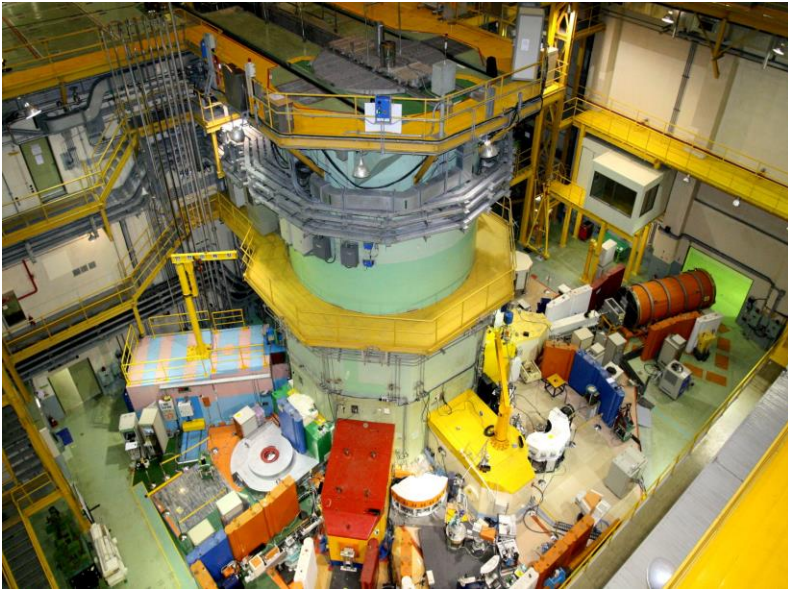
물리학 배경지식 활용 연구원에서 실제 수행하고 있는 업무 내용 소개

검출 기술 흐름도



연구용 vs. 발전용 원자로

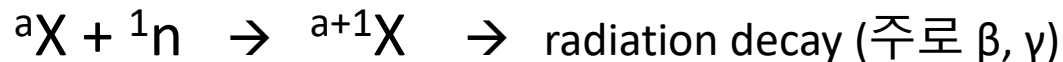
연구용 vs. 발전용 원자로



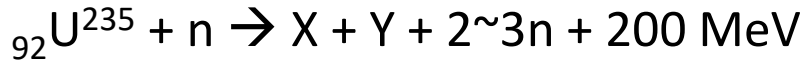
연구용 vs. 발전용 원자로

공통 : ^{235}U 핵분열 반응 이용

항목	연구용	발전용
사용 핵연료(^{235}U)	20 % 이하	대부분 5 % 이하
열출력	대부분 30 MW 이하 (전기 출력 x)	3,000 ~ 4,000 MW (전기 출력 : 1 ~ 1.4 GW)
가동 형식	개방형 수조	압력용기
주요 활용 분야	중성자 이용 <ul style="list-style-type: none"> - 동위원소 생산 - 핵연료, 원자력 재료 연구 - 중성자 핵변환 - 방사화 분석 - 중성자 기초과학 연구 	열에너지 → 전력 생산



핵분열 반응



Fission Energy

= 200 MeV/fission

= 2×10^8 eV/fission

= $2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J/fission

= 3.2×10^{-11} J/fission

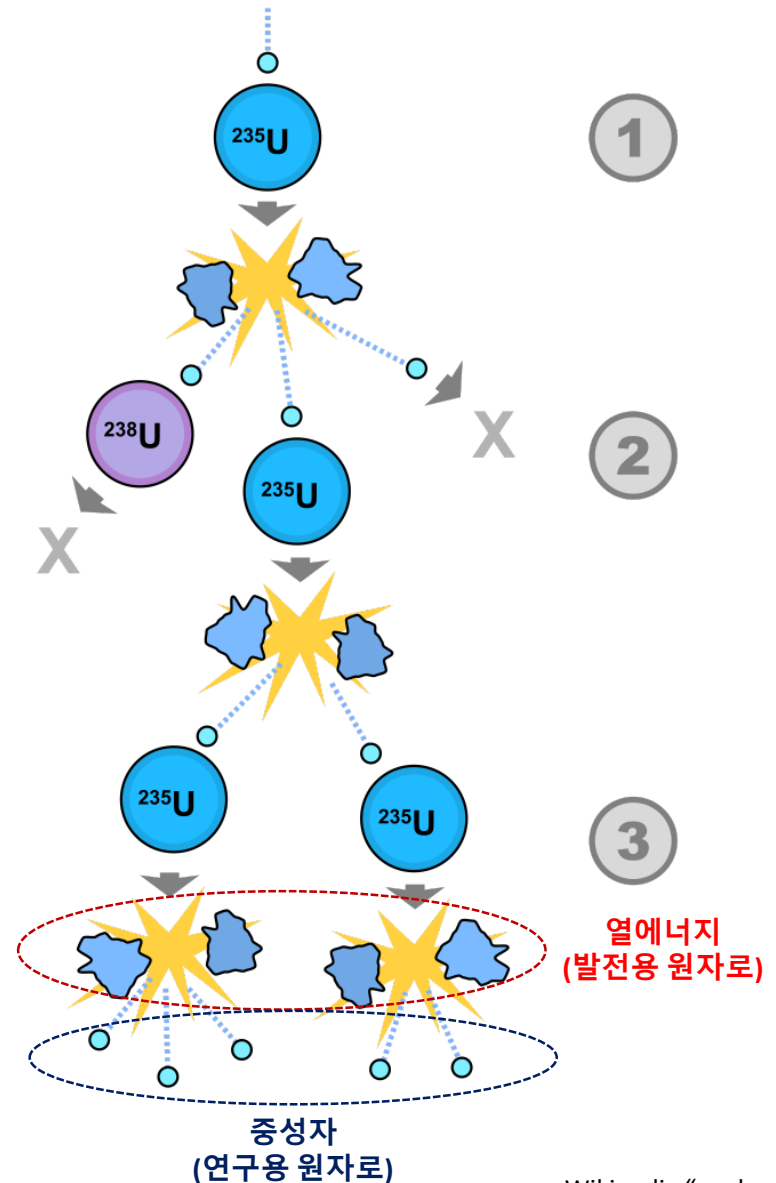
30 MW = 3×10^7 W = 3×10^7 J/s

~ 10^{18} fission/s

원자력발전소는 ~ 10^{20} fission/s

U^{235} 사용 3.14 kg/day → 1 ton/y

석탄의 경우 10,000 ton/day



연구용 vs. 발전용 원자로

공통 : ^{235}U 핵분열 반응 이용

항목	연구용	발전용
사용 핵연료(^{235}U)	20% 이하	대부분 5% 이하
열출력	대부분 30 MW 이하	3,000 ~ 4,000 MW
중성자 선속($\text{n}/\text{cm}^2\text{s}$)	$\sim 10^{14}$	$\sim 10^{12}$
특징	발전용 원자로 대비 100배 이상 중성자 선속 원자력 소부장 aging test (acceleration test)	

원자력발전 주요 이슈

- 핵분열 부산물 처리

- ^{137}Cs , ^{90}Sr 등은 반감기가 30년

- 방사능 : 300년에 1/1,000, 600년에 1/1,000,000, ...

- 핵연료 중성자 방사화

- ^{238}U 이 중성자를 흡수하여 Pu 등으로 변환

- 장반감기 원소 → 핵연료 분리 정제 → 재활용 기술

- 그 외 폐기물 처리

 핵연료 (재)활용, 폐기물 저감/처분 기술 개발 진행

중성자 특성

중성자는 원자핵에 구속

PERIODIC TABLE
Atomic Properties of the Elements

NIST
National Institute of Standards and Technology
U.S. Department of Commerce

Frequently used fundamental physical constants

For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

speed of light in vacuum	<i>c</i>	299 792 458 m s ⁻¹	(exact)
Planck constant	<i>h</i>	6.6261 x 10 ⁻³⁴ J s	(<i>h</i> = <i>h</i> /2π)
elementary charge	<i>e</i>	1.6022 x 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	<i>m_e</i>	9.1094 x 10 ⁻³¹ kg	
	<i>m_ec²</i>	0.5110 MeV	
proton mass	<i>m_p</i>	1.6726 x 10 ⁻²⁷ kg	
fine-structure constant	<i>α</i>	1/137.036	
Rydberg constant	<i>R_∞</i>	10 973 732 m ⁻¹	
	<i>R_∞c</i>	3.289 842 x 10 ¹⁵ Hz	
	<i>R_∞hc</i>	13.6057 eV	
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.3807 x 10 ⁻²³ J K ⁻¹	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Group	Periodic Table																18 VIIIA		
	1 IA	2 IIA		3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA		16 VIA	17 VIIA
1	¹ H Hydrogen 1.00794													² He Helium 4.002602					
2	³ Li Lithium 6.941	⁴ Be Beryllium 9.012182											¹⁰ Ne Neon 20.1797						
3	¹¹ Na Sodium 22.98976928	¹² Mg Magnesium 24.3050											¹⁸ Ar Argon 39.948						
4	¹⁹ K Potassium 39.0983	²⁰ Ca Calcium 44.955912	²¹ Sc Scandium 44.955912	²² Ti Titanium 47.867	²³ V Vanadium 50.9415	²⁴ Cr Chromium 51.9961	²⁵ Mn Manganese 54.938045	²⁶ Fe Iron 55.845	²⁷ Co Cobalt 58.933195	²⁸ Ni Nickel 58.6934	²⁹ Cu Copper 63.546	³⁰ Zn Zinc 65.38	³¹ Ga Gallium 69.723	³² Ge Germanium 72.64	³³ As Arsenic 74.92160	³⁴ Se Selenium 78.96	³⁵ Br Bromine 79.904	³⁶ Kr Krypton 83.798	
5	³⁷ Rb Rubidium 85.4678	³⁸ Sr Strontium 87.62	³⁹ Y Yttrium 88.90585	⁴⁰ Zr Zirconium 91.224	⁴¹ Nb Niobium 92.90638	⁴² Mo Molybdenum 95.96	⁴³ Tc Technetium (98)	⁴⁴ Ru Ruthenium 101.07	⁴⁵ Rh Rhodium 102.90550	⁴⁶ Pd Palladium 106.42	⁴⁷ Ag Silver 107.8682	⁴⁸ Cd Cadmium 112.411	⁴⁹ In Indium 114.818	⁵⁰ Sn Tin 118.710	⁵¹ Sb Antimony 121.760	⁵² Te Tellurium 127.60	⁵³ I Iodine 126.90447	⁵⁴ Xe Xenon 131.293	
6	⁵⁵ Cs Cesium 132.9054519	⁵⁶ Ba Barium 137.327	Lanthanides		⁷² Hf Hafnium 178.49	⁷³ Ta Tantalum 180.94788	⁷⁴ W Tungsten 183.84	⁷⁵ Re Rhenium 186.207	⁷⁶ Os Osmium 190.23	⁷⁷ Ir Iridium 192.217	⁷⁸ Pt Platinum 195.084	⁷⁹ Au Gold 196.966569	⁸⁰ Hg Mercury 200.59	⁸¹ Tl Thallium 204.3853	⁸² Pb Lead 208.98040	⁸³ Bi Bismuth 208.98040	⁸⁴ Po Polonium (209)	⁸⁵ At Astatine (210)	⁸⁶ Rn Radon (222)
7	⁸⁷ Fr Francium (223)	⁸⁸ Ra Radium (226)	Actinides		¹⁰⁴ Rf Rutherfordium (261)	¹⁰⁵ Db Dubnium (268)	¹⁰⁶ Sg Seaborgium (271)	¹⁰⁷ Bh Bohrium (272)	¹⁰⁸ Hs Hassium (277)	¹⁰⁹ Mt Meitnerium (276)	¹¹⁰ Ds Darmstadtium (281)	¹¹¹ Rg Roentgenium (280)	¹¹² Cn Copernicium (285)	¹¹³ Uut Ununtrium (284)	¹¹⁴ Uuq Ununquadium (289)	¹¹⁵ Uup Ununpentium (288)	¹¹⁶ Uuh Ununhexium (293)	¹¹⁷ Uus Ununseptium (294)	¹¹⁸ Uuo Ununoctium (294)
					⁵⁷ La Lanthanum 138.90547	⁵⁸ Ce Cerium 140.116	⁵⁹ Pr Praseodymium 140.90765	⁶⁰ Nd Neodymium 144.242	⁶¹ Pm Promethium (145)	⁶² Sm Samarium 150.36	⁶³ Eu Europium 151.964	⁶⁴ Gd Gadolinium 157.25	⁶⁵ Tb Terbium 158.92535	⁶⁶ Dy Dysprosium 162.500	⁶⁷ Ho Holmium 164.93032	⁶⁸ Er Erbium 167.259	⁶⁹ Tm Thulium 168.93421	⁷⁰ Yb Ytterbium 173.054	⁷¹ Lu Lutetium 174.967
					⁸⁹ Ac Actinium (227)	⁹⁰ Th Thorium 232.03806	⁹¹ Pa Protactinium 231.03688	⁹² U Uranium 238.02891	⁹³ Np Neptunium 237.04817	⁹⁴ Pu Plutonium (244)	⁹⁵ Am Americium (243)	⁹⁶ Cm Curium (247)	⁹⁷ Bk Berkelium (247)	⁹⁸ Cf Californium (251)	⁹⁹ Es Einsteinium (252)	¹⁰⁰ Fm Fermium (257)	¹⁰¹ Md Mendelevium (258)	¹⁰² No Nobelium (259)	¹⁰³ Lr Lawrencium (262)

Example Element: Cerium (Ce)

Atomic Number: 58 Ground-state Level: ¹G₄

Symbol: Ce

Name: Cerium

Atomic Weight: 140.116

Ground-state Configuration: [Xe]4f15d6s²

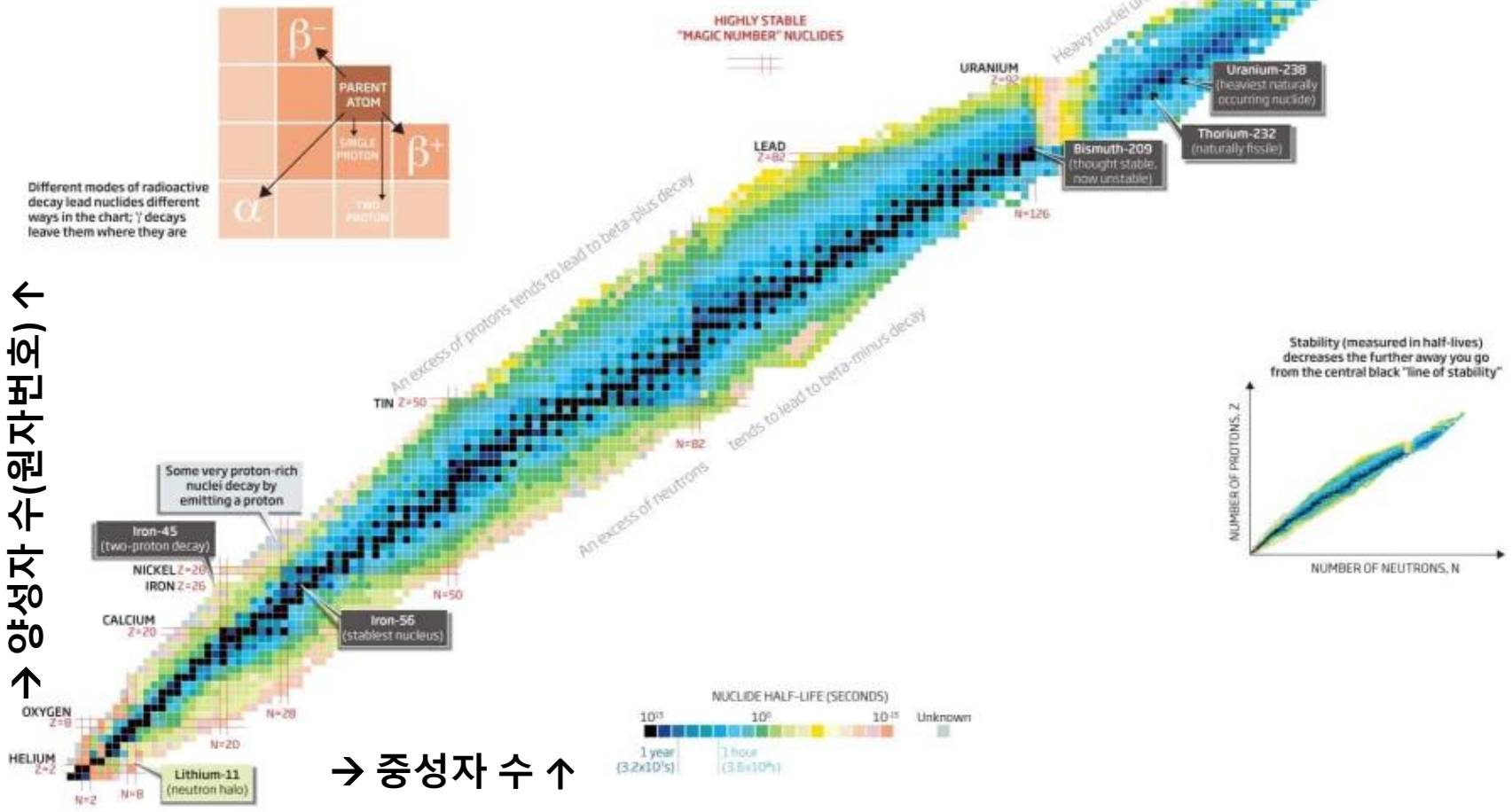
Ionization Energy (eV): 5.5387

¹Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the longest-lived isotope. For a description of the data, visit physics.nist.gov/data NIST SP 966 (September 2010)

원자핵 내에서 강한 상호작용력으로 구속

Nuclide Chart

존재 가능한 모든 원자핵 구성 (검은색 : 안정, 그 외 : 불안정 → 방사성 붕괴)



양성자 수(원자번호) ↑

→ 중성자 수 ↑

원자번호가 같더라도 중성자 수가 다른 동위원소가 다수 존재

중성자의 특성

- Electric charge : 0
→ 원자핵 접근이 용이 → 핵반응
- Magnetic moment : Yes
→ 자성물질 연구에 용이
- Spin : $\frac{1}{2}$ → 물성 연구에 활용
- Mean lifetime : 879.4 s
- Neutron energy : $<meV \sim >GeV$
→ 에너지에 따라 다양한 상호작용

중성자 이용

- 동위원소 생산
- 핵연료, 원자력 재료 연구
- 중성자 핵변환
- 방사화 분석
- 중성자 기초과학 연구

중성자 운동에너지 $E_n = kT$
 k : Boltzmann constant
 T : temperature(kelvin)
 상온(300K) : 0.025 eV

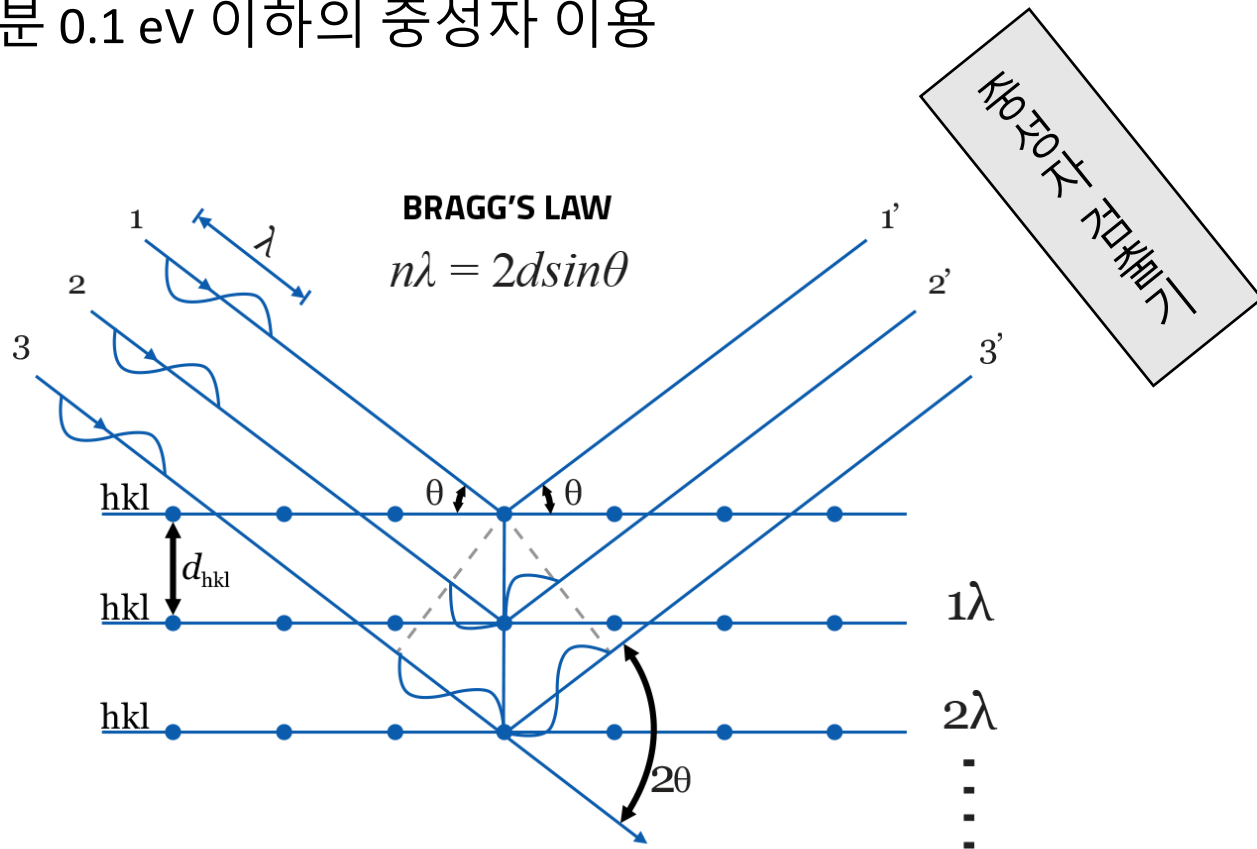
Name	Cold	Thermal	Epithermal	Cadmium	Slow & intermediate	Fast
Energy(eV)	<0.025	0.025	0.025~0.4	0.4~0.5	1 ~ 1,000,000	>1,000,000

중성자의 특성

- Neutron wavelength → 원자/분자 미세 구조 연구에 활용

$$\lambda[\text{\AA}] = 9.045/\sqrt{E[\text{meV}]}$$

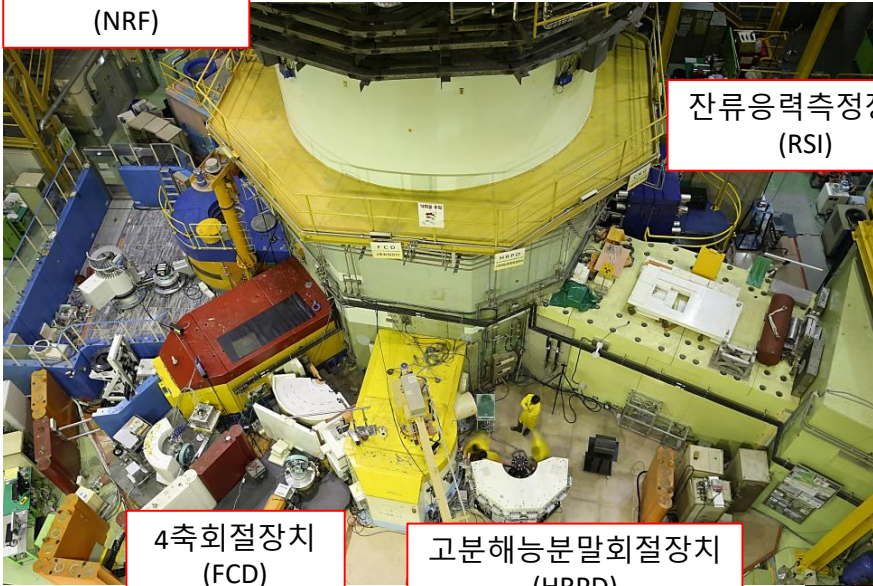
→ 대부분 0.1 eV 이하의 중성자 이용



중성자 활용 @하나로

- 중성자 분석장치

중성자영상장치
(NRF)



잔류응력측정장치
(RSI)

냉중성자3축분광장치
(C-TAS)

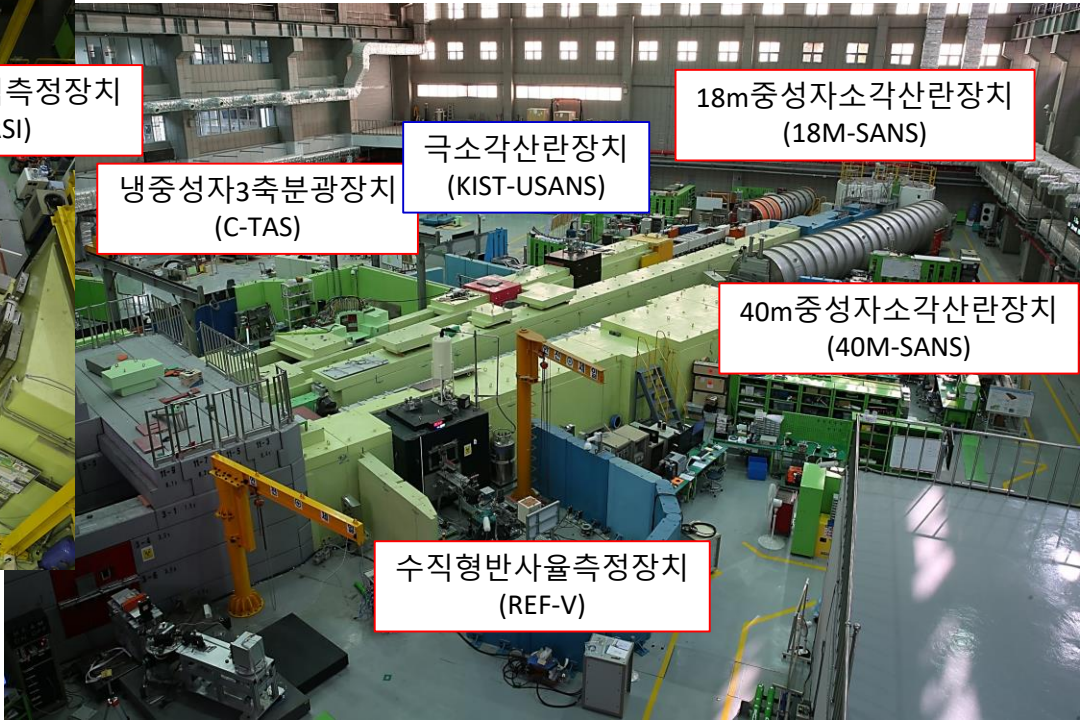
극소각산란장치
(KIST-USANS)

18m중성자소각산란장치
(18M-SANS)

40m중성자소각산란장치
(40M-SANS)

4축회절장치
(FCD)

고분해능분말회절장치
(HRPD)

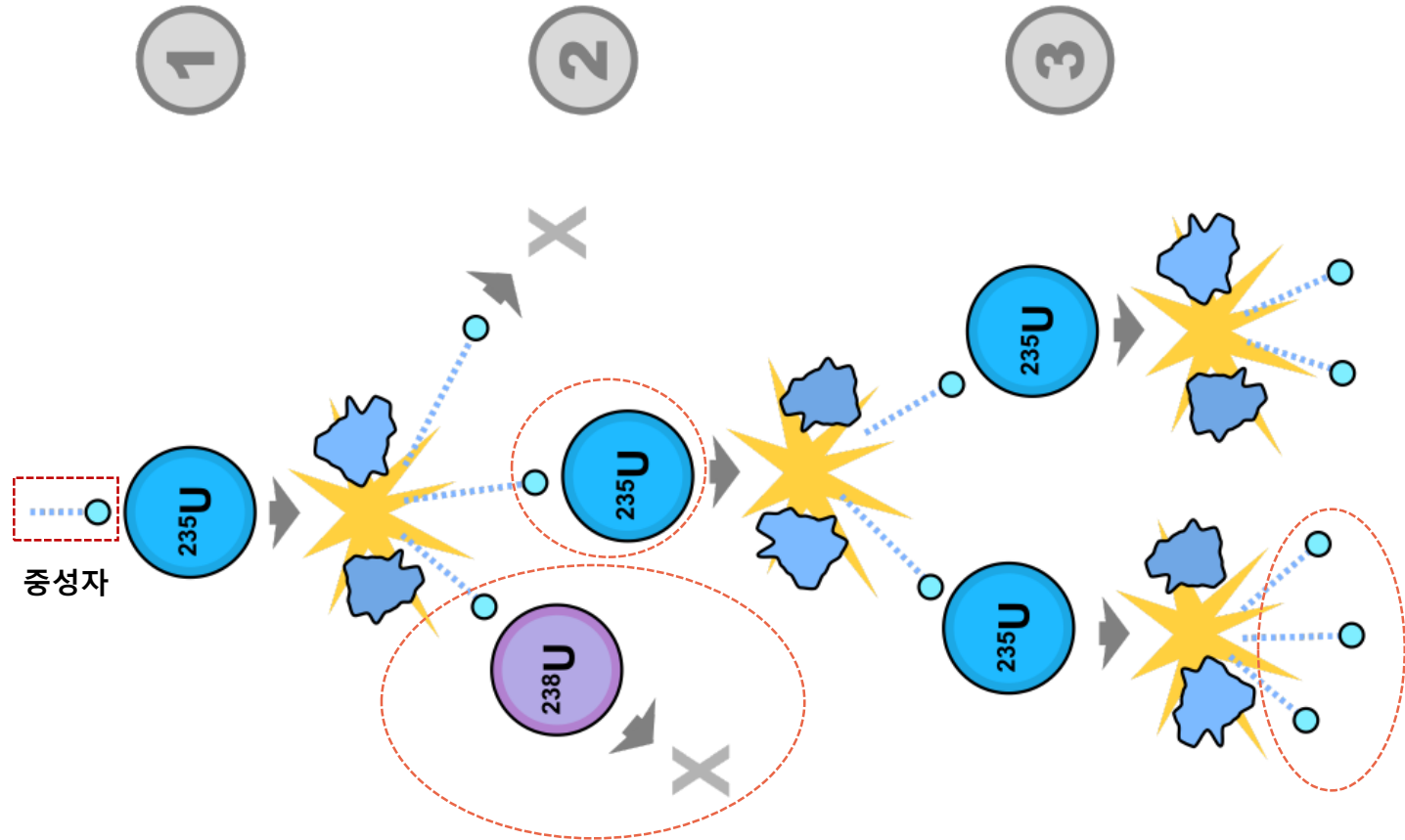


수직형반사율측정장치
(REF-V)

- 저에너지 중성자를 활용한 원자/분자 수준의 미세구조 연구 분석용 검출기
- 중성자 투과 영상, CT 영상 획득용 검출기

중성자 발생

핵분열 반응

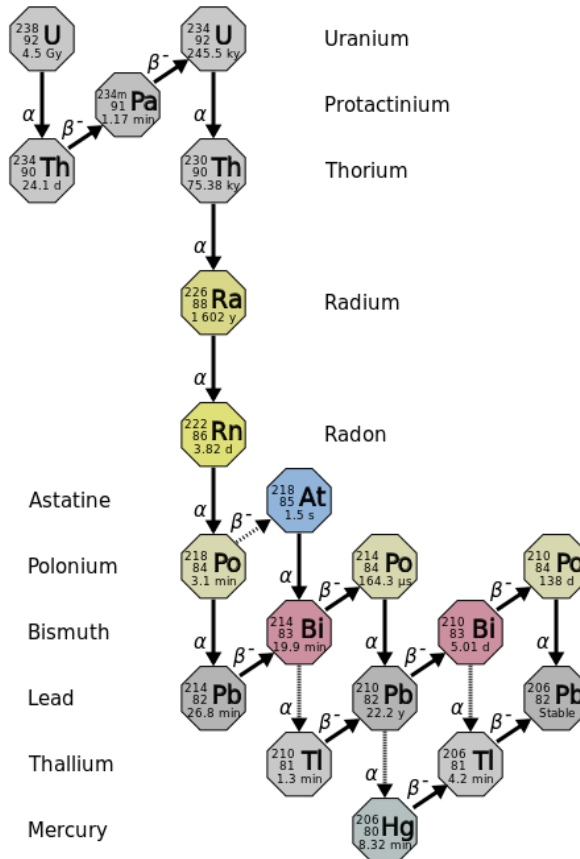


- 핵분열 반응을 일으키는 초기 중성자는 어떻게 발생시키나?
- ^{235}U 에는 반응하고 ^{238}U 에는 왜 반응하지 않는가? → 중성자 상호작용 이해
- 중성자는 어떻게 측정하는가? → 중성자 상호작용 이해 → 중성자 검출

방사성 붕괴

- 불안정한 원소 → 안정 원소

- 원자핵에서 알파선, 베타선, 감마선 방출



- 원자핵에서 방출되는 방사선

- 알파선 : 헬륨 원자핵
- 베타선 : 전자(양전자)
- 감마선 : 전자기파

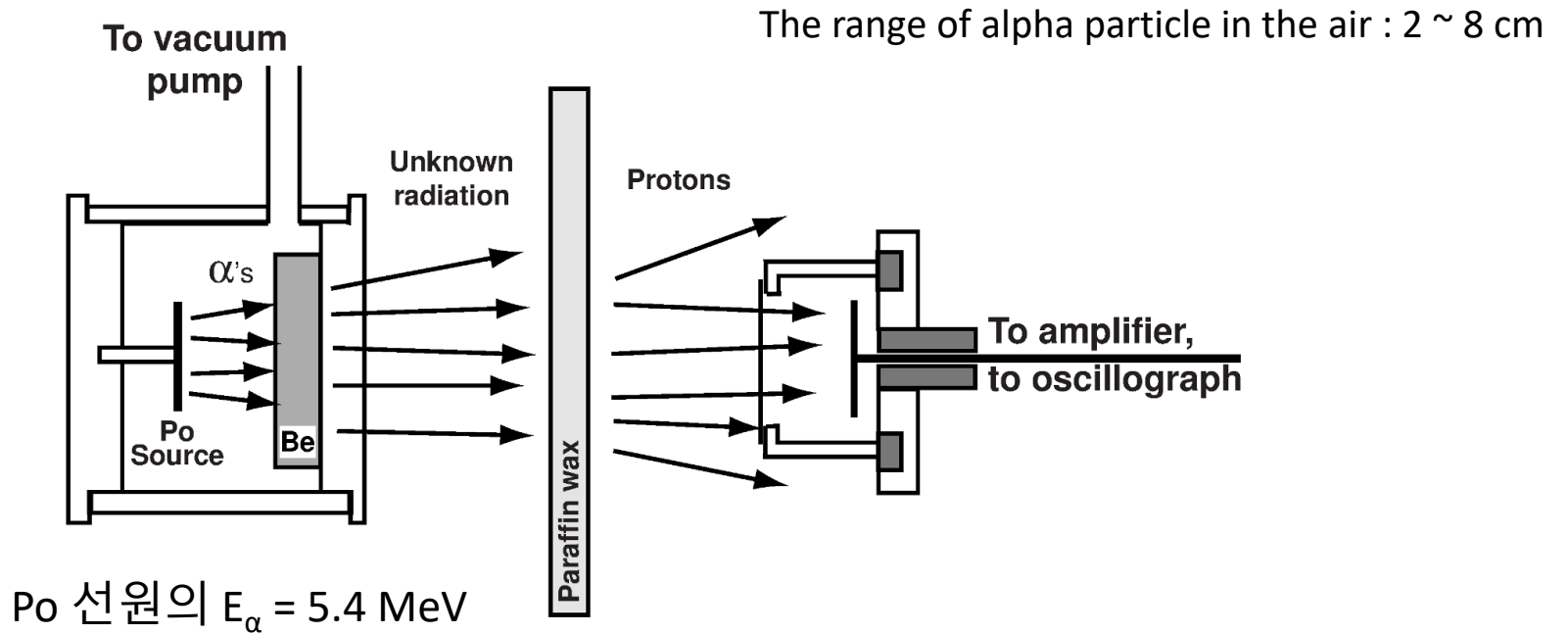
- 에너지 범위

- 알파선 : 5 ~ 10 MeV
- 베타 : 0.02 ~ 3 MeV
- 감마선 : 0.05 ~ 3 MeV

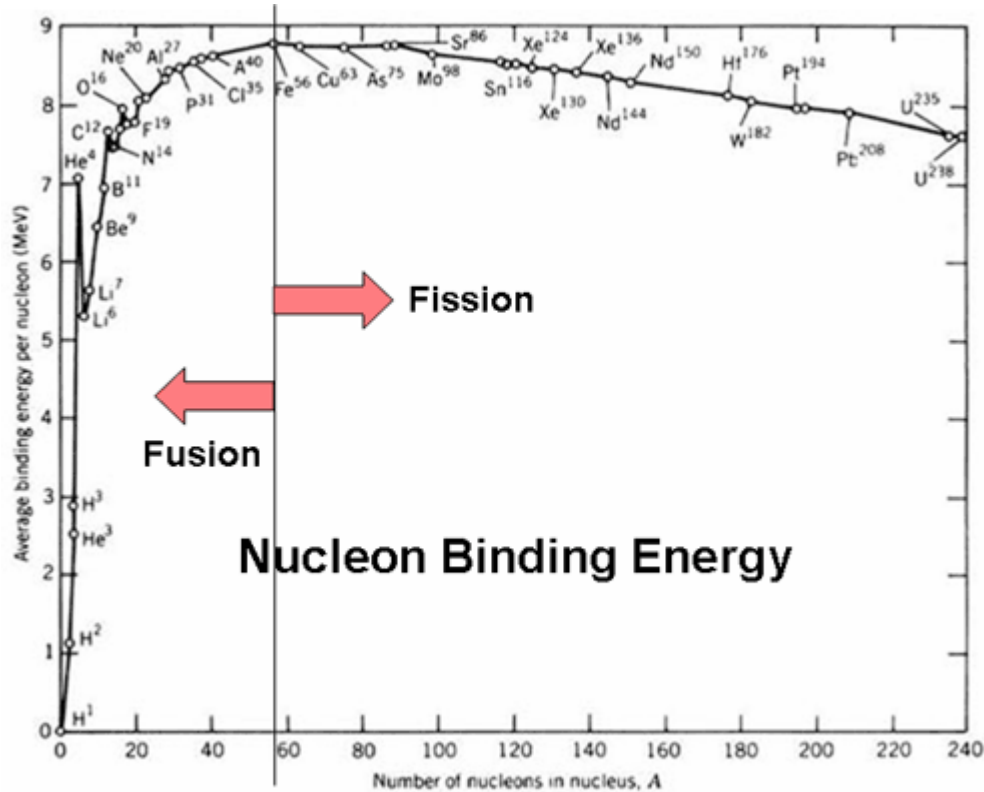
- 반감기

- ^{238}U : 4.468×10^9 y
- ^{235}U : 7.04×10^8 y

중성자 발생 실험



Nuclear Binding Energy



- 원자핵의 질량 < 양성자+중성자 질량 합 (nuclear binding energy)
- 중성자 방출을 위해서는 에너지 필요 → 핵반응 에너지

중성자 발생 반응

- 동위원소 이용 핵반응 (주로 알파선+Be)
- 자발 핵분열 반응 (원자번호가 아주 높은 원소)
- 가속 입자 반응 (양성자, 전자, 중입자,)
- 핵분열 반응
- 핵융합 반응
- 기타

중성자 발생 반응

- **Alpha-induced reactions (RaBe, PoBe, AmBe, ...)**

- ${}^9\text{Be}(\alpha, n) {}^{12}\text{C} + 5.7 \text{ MeV}$ (Neutron yield : $15 \times 10^6 \text{ n/s/Ci}$)

- **Spontaneous fission (${}^{252}\text{Cf}$)**

- ${}^{252}\text{Cf}(\text{sf}) {}^{134}\text{Te} + {}^{115}\text{Pd} + 3\text{n} + 212 \text{ MeV}$

Neutron yield : $4.4 \times 10^9 \text{ n/s/Ci}$ ($2.4 \times 10^{12} \text{ n/s/g}$)

- **Neutron-induced fission (HANARO, Power reactors)**

- ${}^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f}) {}^{134}\text{Te} + {}^{99}\text{Zr} + 3\text{n} + 185 \text{ MeV}$

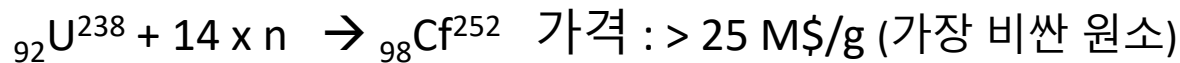
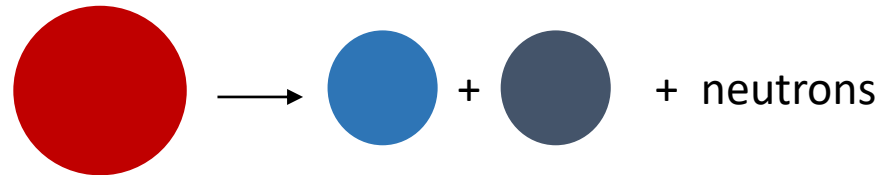
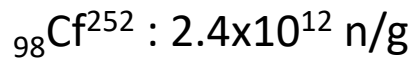
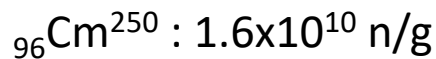
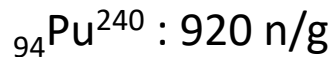
- **Fusion reactions (neutron generators, KSTAR, ITER)**

- $\text{d}(\text{d}, \text{n}) {}^3\text{He} + 3.3 \text{ MeV}$, $\text{t}(\text{d}, \text{n}) {}^4\text{He} + 17.6 \text{ MeV}$

동위원소 이용 중성자 발생

- 자발 핵분열 (Spontaneous fission)
 - 우라늄보다 무거운 원소에서 발생
 - 원자로에서 우라늄이 중성자 방사화되면서 생성

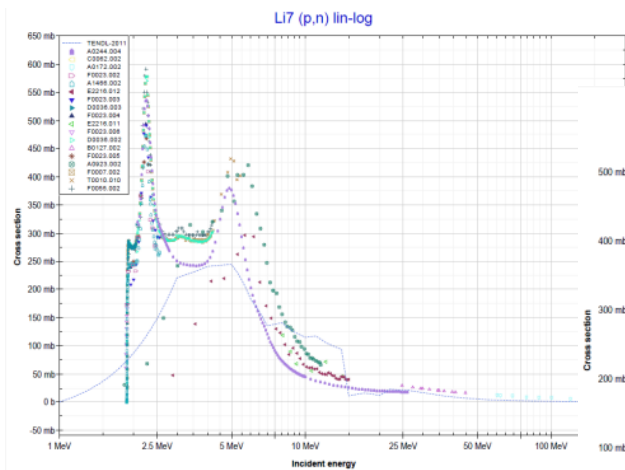
92 U Uranium 238.02891 [Rn]5f ³ 6d ⁷ s ² 6.1939	93 Np Neptunium (237) [Rn]5f ⁴ 6d ⁷ s ² 6.2657	94 Pu Plutonium (244) [Rn]5f ⁶ 7s ² 6.0260	95 Am Americium (243) [Rn]5f ⁷ 7s ² 5.9738	96 Cm Curium (247) [Rn]5f ⁷ 6d ⁷ s ² 5.9914	97 Bk Berkelium (247) [Rn]5f ⁸ 7s ² 6.1979	98 Cf Californium (251) [Rn]5f ¹⁰ 7s ² 6.2817	99 Es Einsteinium (252) [Rn]5f ¹¹ 7s ² 6.3676	100 Fm Fermium (257) [Rn]5f ¹² 7s ² 6.50	101 Md Mendelevium (258) [Rn]5f ¹³ 7s ² 6.58	102 No Nobelium (259) [Rn]5f ¹⁴ 7s ² 6.65	103 Lr Lawrencium (262) [Rn]5f ¹⁴ 7s ² 7p ² 4.9 ?
--	---	--	--	--	--	---	---	--	--	---	--



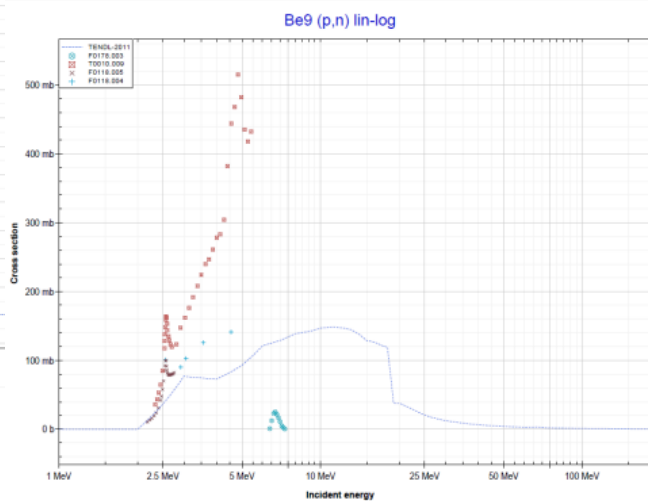
원자로 점화용 중성자원 : ${}^{252}\text{Cf}$, AmBe, RaBe 등

가속기 이용 중성자 발생

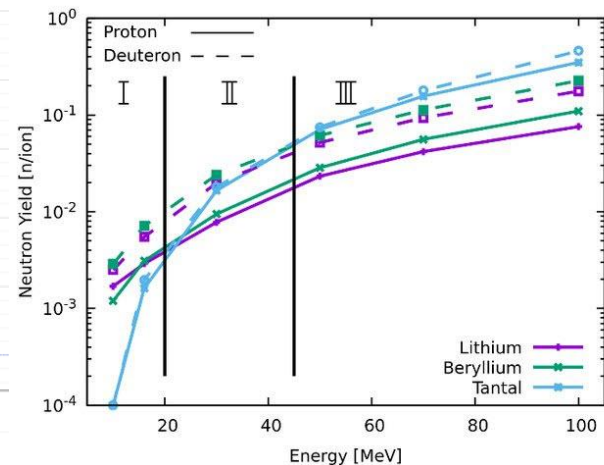
- Proton neutron(p, n) 반응
 - 선형가속기 또는 원형가속기(eg. cyclotron) 이용
 - 원자번호가 낮은 원소 (주로 Be 사용)



${}^7\text{Li}(p, n){}^9\text{Be} - 1.65 \text{ MeV}$



${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B} - 1.85 \text{ MeV}$

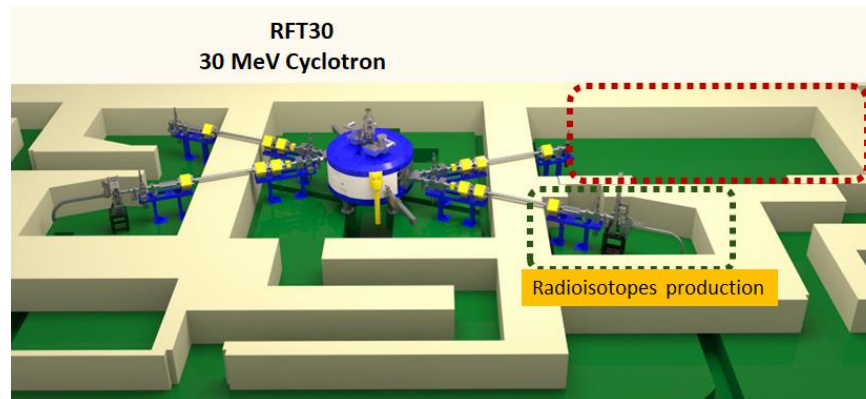


Neutron production yield

중성자 발생원

- 양성자 가속기 기반 중성자원
 - 표적 열 해석, 저방사화 재료 선정이 중요
 - 방사선 차폐 기술 개발

Reaction	Melting point	Thermal Conductivity	Radioactive products	Gamma to neutron ratio
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ [E _{Thr} :1.9 MeV]	181 °C	71 W/(mK)	${}^7\text{Be}$ [E _{Thr} :1.9 MeV]	0.4 @E _p 7MeV
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ [E _{Thr} :2.1 MeV]	1287 °C	210 W/(mK)	${}^7\text{Be}$ [E _{Thr} :13.4 MeV]	0.25 @E _p 7MeV



원자력연구개발사업 지원으로 가속기 기반 중성자원 개발 진행중 (up to 2023)

중성자 상호작용

투과 영상 (X-선 vs. 중성자)



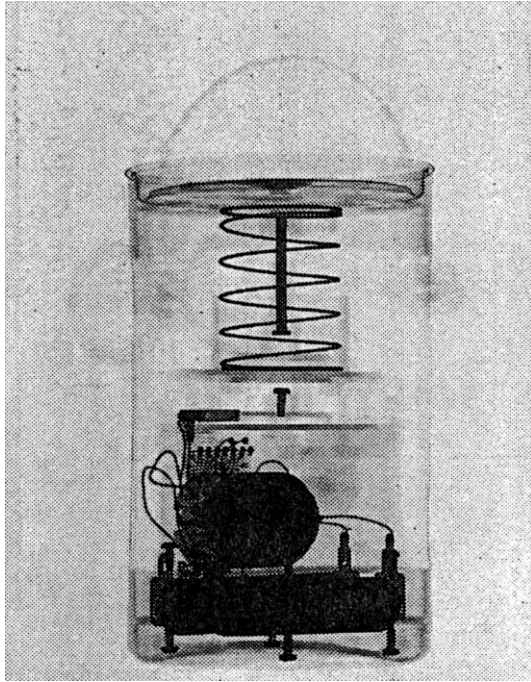
X-선



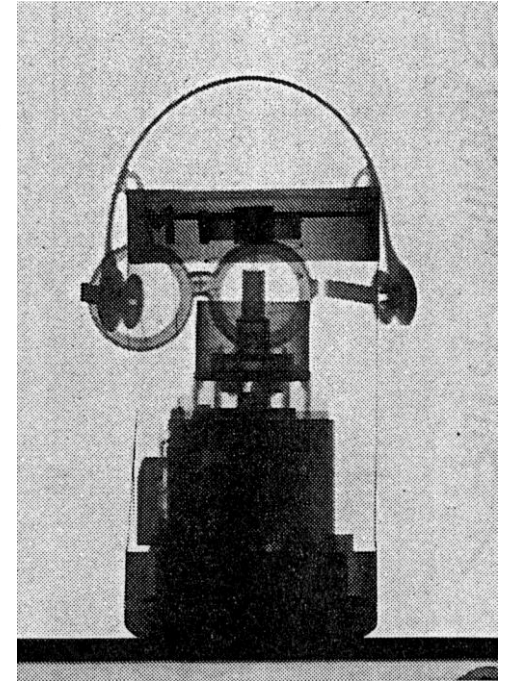
중성자

x-선과 중성자 투과 영상이 다른 이유?

투과 영상 (X-선 vs. 중성자)



X-선



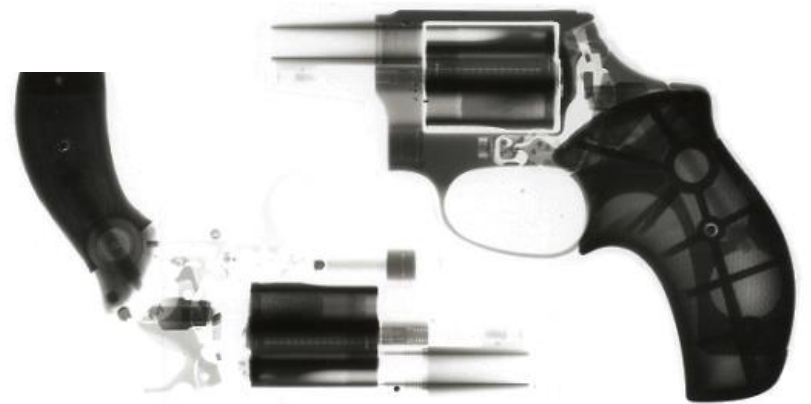
중성자

x-선과 중성자 투과 영상이 다른 이유?

투과 영상 (X-선 vs. 중성자)



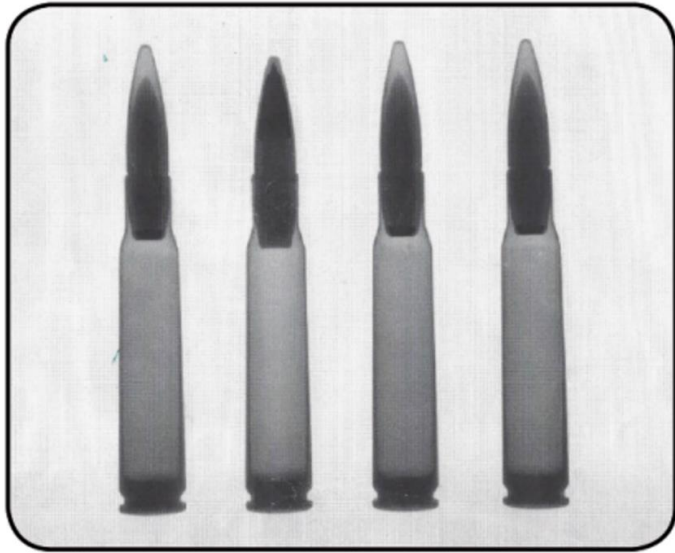
X-선



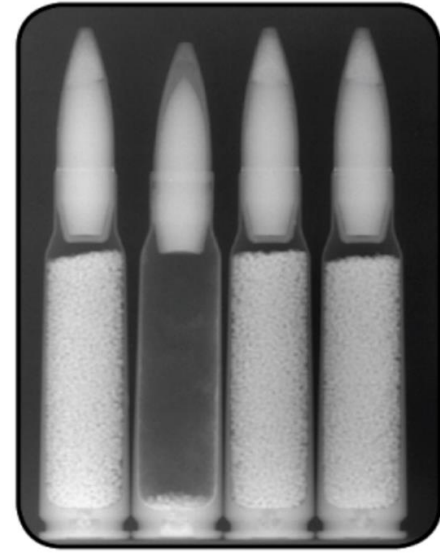
중성자

x-선과 중성자 투과 영상이 다른 이유?

투과 영상 (X-선 vs. 중성자)



X-선



중성자

x-선과 중성자 투과 영상이 다른 이유?

X-선 vs. 중성자 투과영상

- X-선

- 금속은 투과하기 어려움
- 플라스틱 성분은 쉽게 투과

- 중성자

- 플라스틱 성분은 투과하기 어려움
- 금속은 쉽게 투과



물질과 상호작용 원리 이해 필요

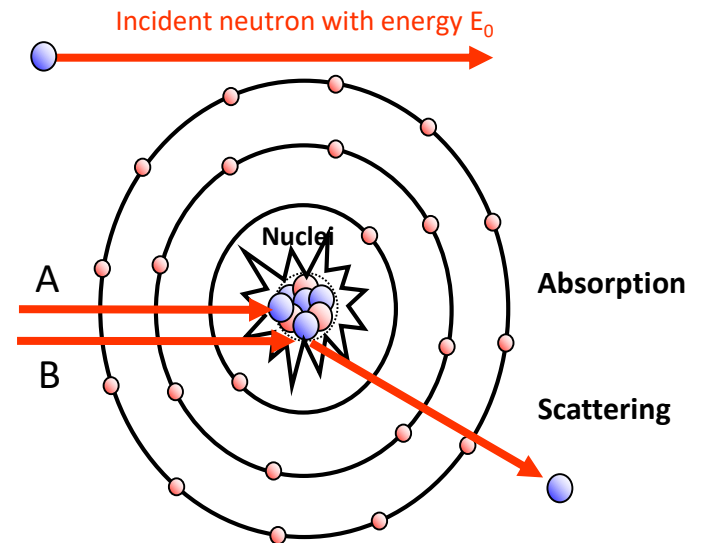
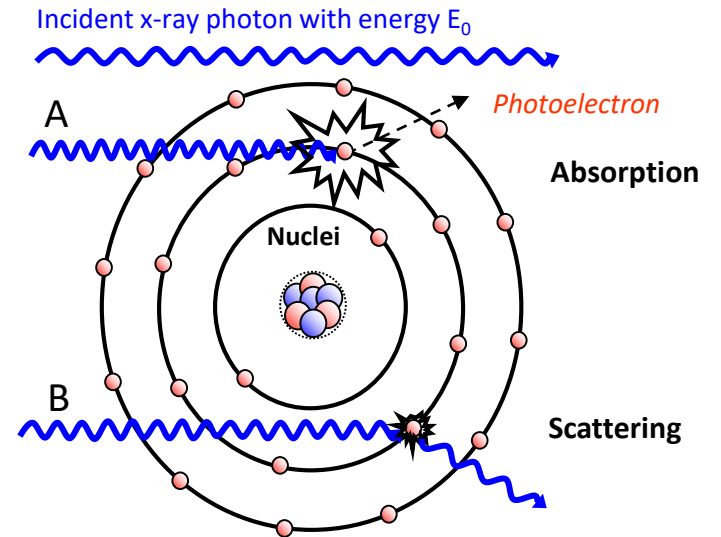
상호작용 현상 (원자 수준)

- X-선

- 원자(주로 전자)와 상호작용
- 원자번호(전자 수)가 중요

- 중성자

- 원자핵과 상호작용
- 원자핵 내의 중성자 수가 중요

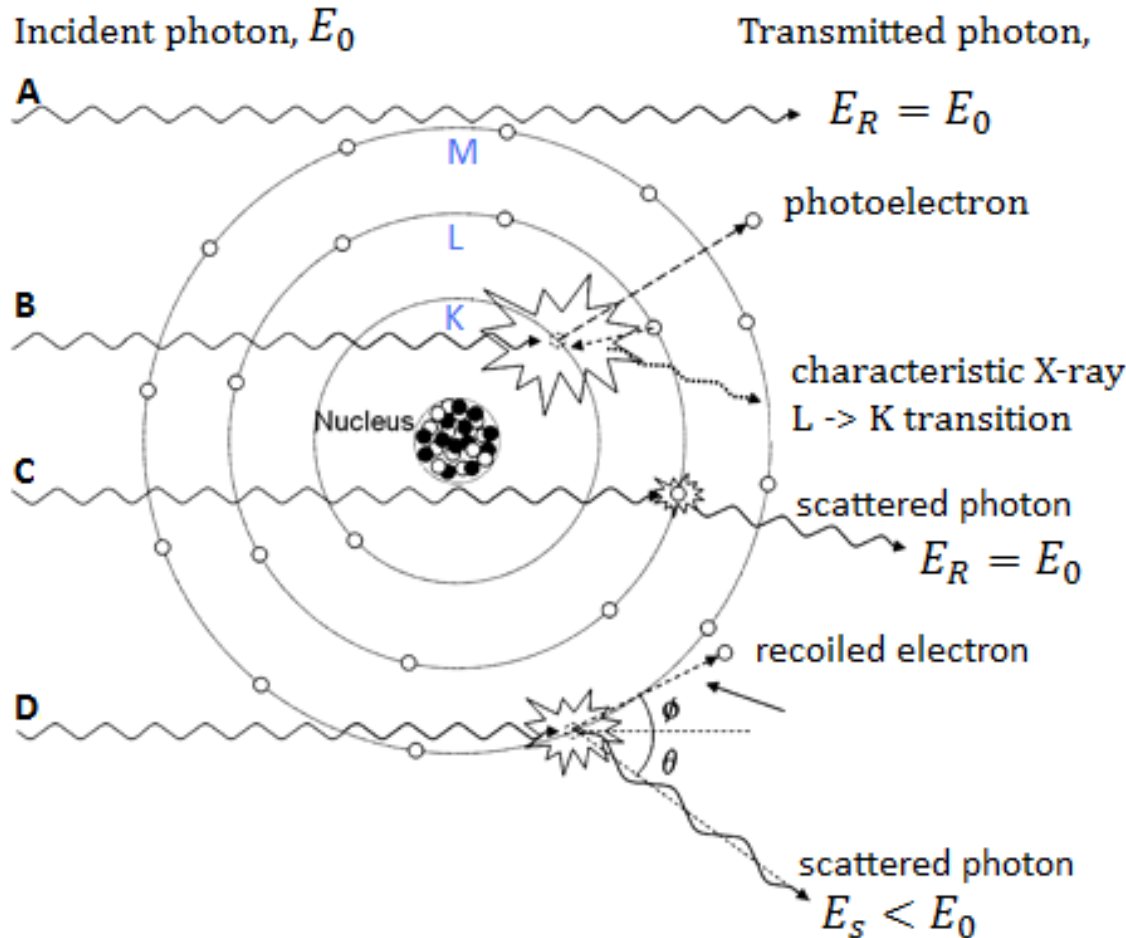


원자 크기 vs. 원자핵 크기

X-선 상호작용

- **광전효과 (Photoelectric effect)**
 - 내각 전자와 주로 반응
- **컴프턴 산란 (Compton scattering)**
 - 외각 전자와 주로 반응
- **전자 쌍생성 (Pair production)**
 - 전자 정지질량 2배 이상의 에너지 필요 (>1.02 MeV)
- **기타 반응**

X-선과 물질과의 상호작용



A. TRANSMITTED UNAFFECTED
No interaction

B. PHOTOELECTRIC ABSORPTION
Collision with a tightly bound inner-shell electron

C. RAYLEIGH SCATTERING
Elastic collision with a bound outer-shell electron

D. COMPTON SCATTERING
Inelastic collision with weakly bound outer-shell electron

x-선 에너지가 전자 정지질량 에너지의 2배(>1.02 MeV)가 넘는 경우에는 전자-양전자 쌍생성(pair production) 현상 발생

X-선 상호작용 확률 (Cross Section)

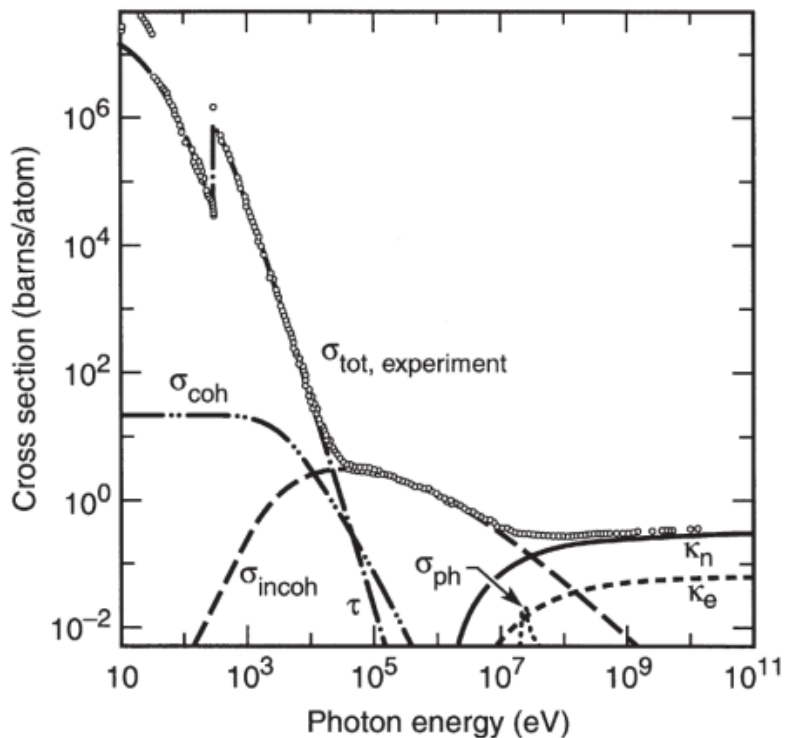


Fig. 3-1. Total photon cross section σ_{tot} in carbon, as a function of energy, showing the contributions of different processes: τ , atomic photo-effect (electron ejection, photon absorption); σ_{coh} , coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited); σ_{incoh} , incoherent scattering (Compton scattering off an electron); κ_n , pair production, nuclear field; κ_e , pair production, electron field; σ_{ph} , photonuclear absorption (nuclear absorption, usually followed by emission of a neutron or other particle). (From Ref. 3; figure courtesy of J. H. Hubbell.)

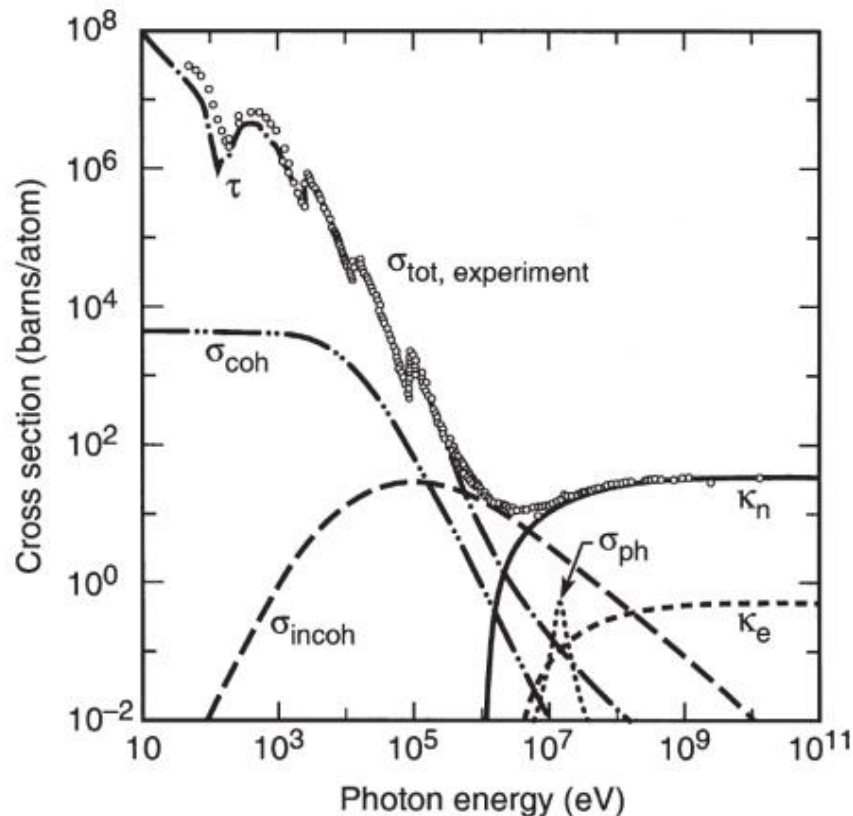
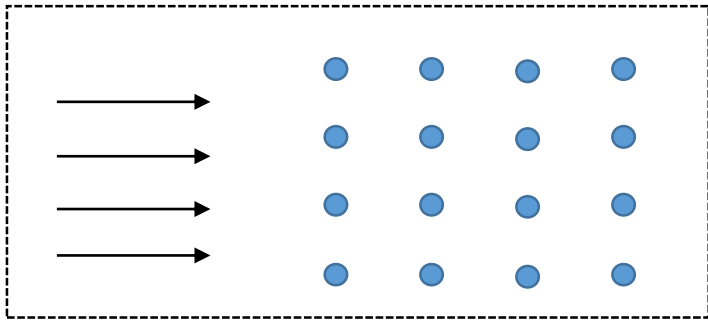
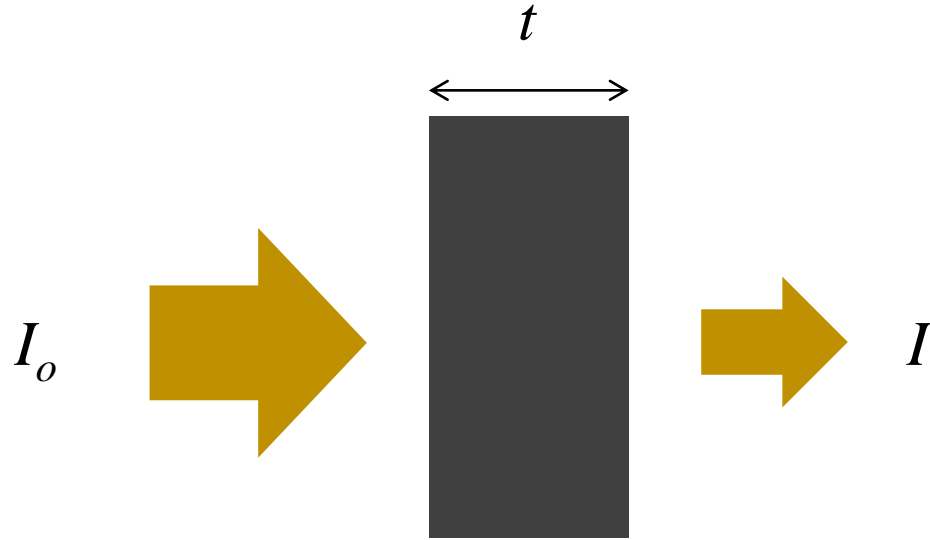
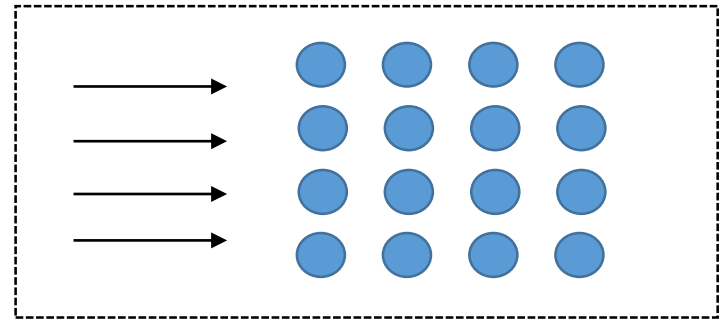


Fig. 3-2. Total photon cross section σ_{tot} in lead, as a function of energy. See Fig. 3-1. (From Ref. 3; figure courtesy of J. H. Hubbell.)

투과율

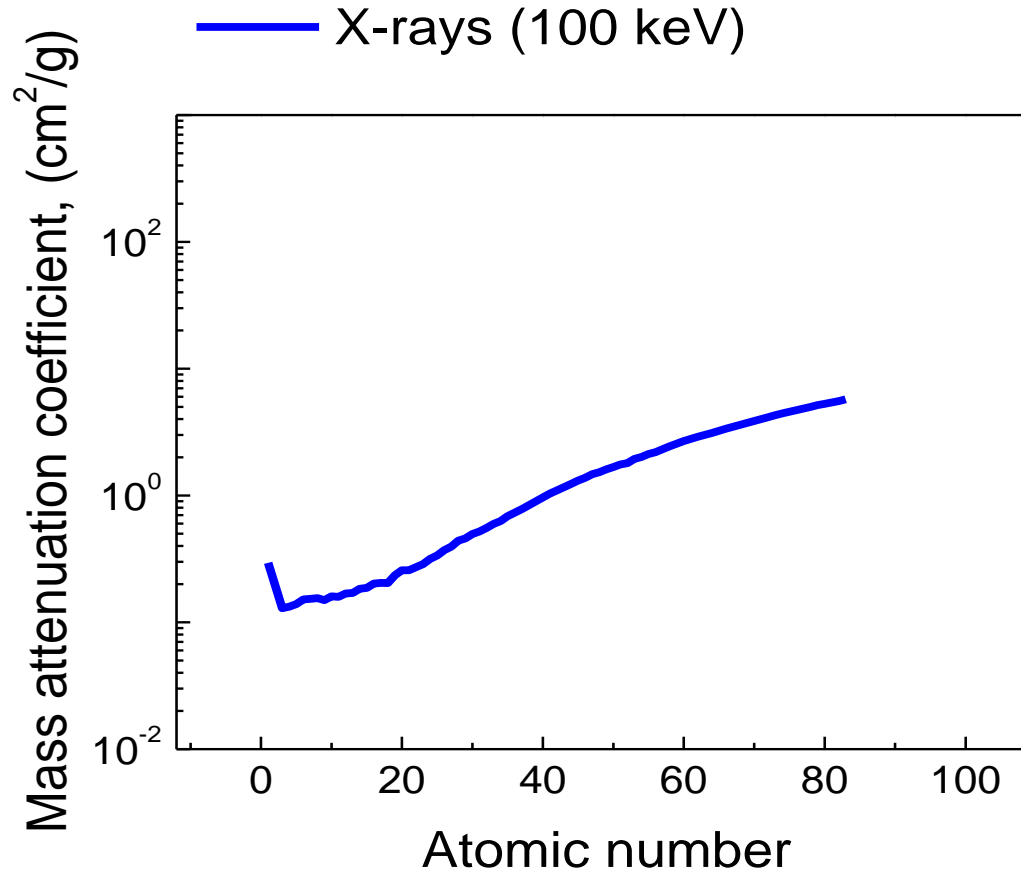


낮은 상호작용 확률



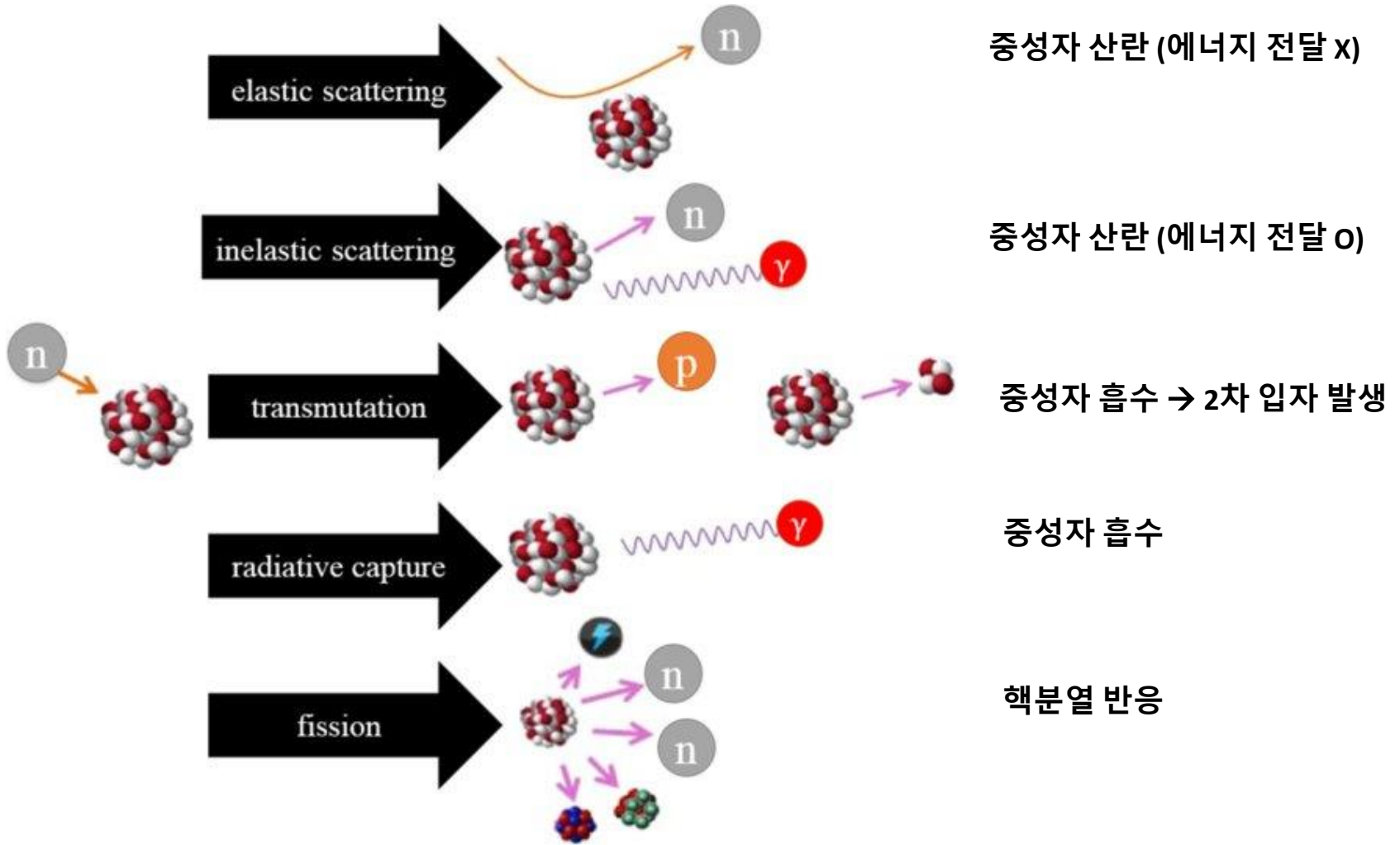
높은 상호작용 확률

X-선과 물질과의 상호작용 확률



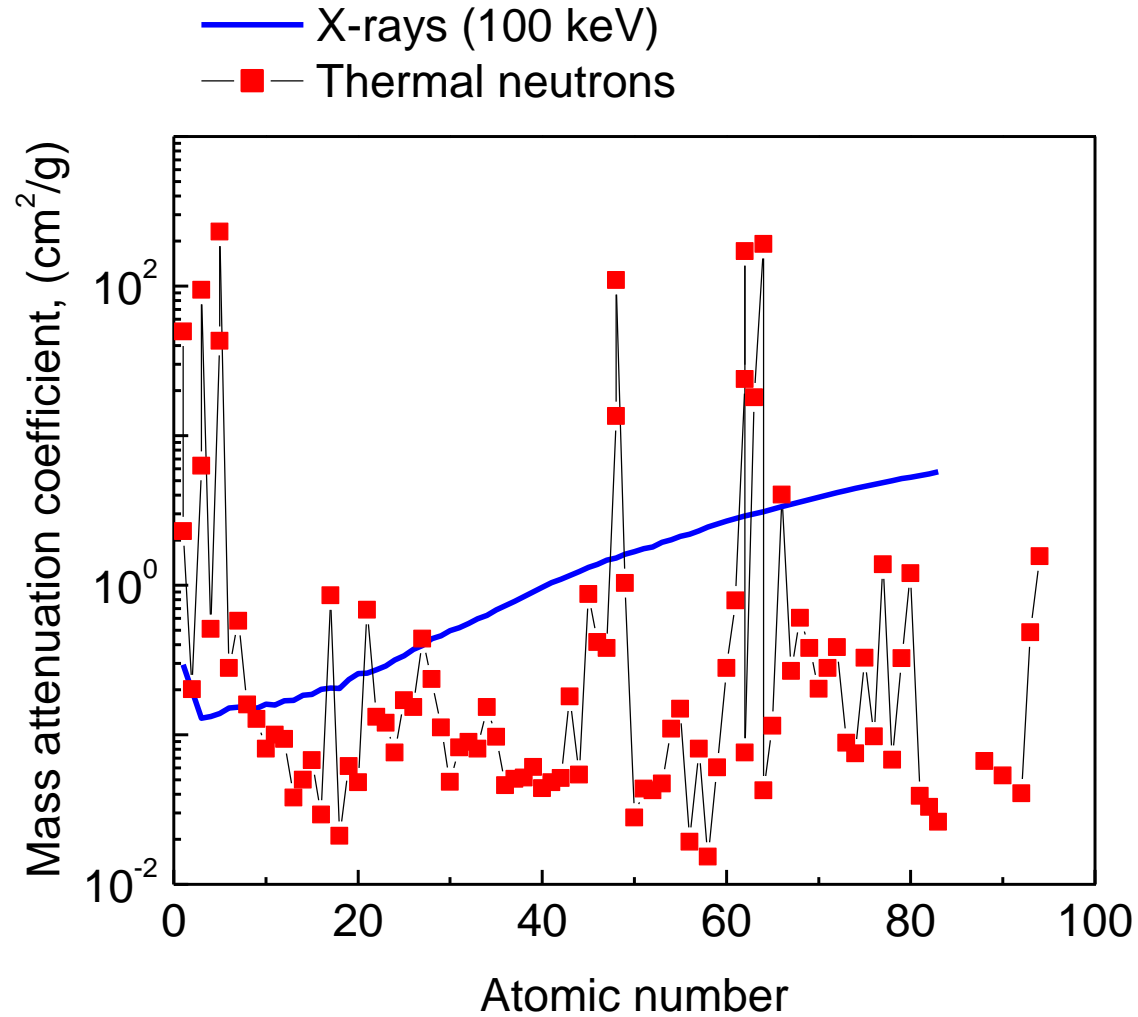
원자번호가 높을수록 상호작용 확률이 높음 (eg. 혈관조영제 등)

중성자 상호작용



중성자 에너지에 따라 다양한 반응

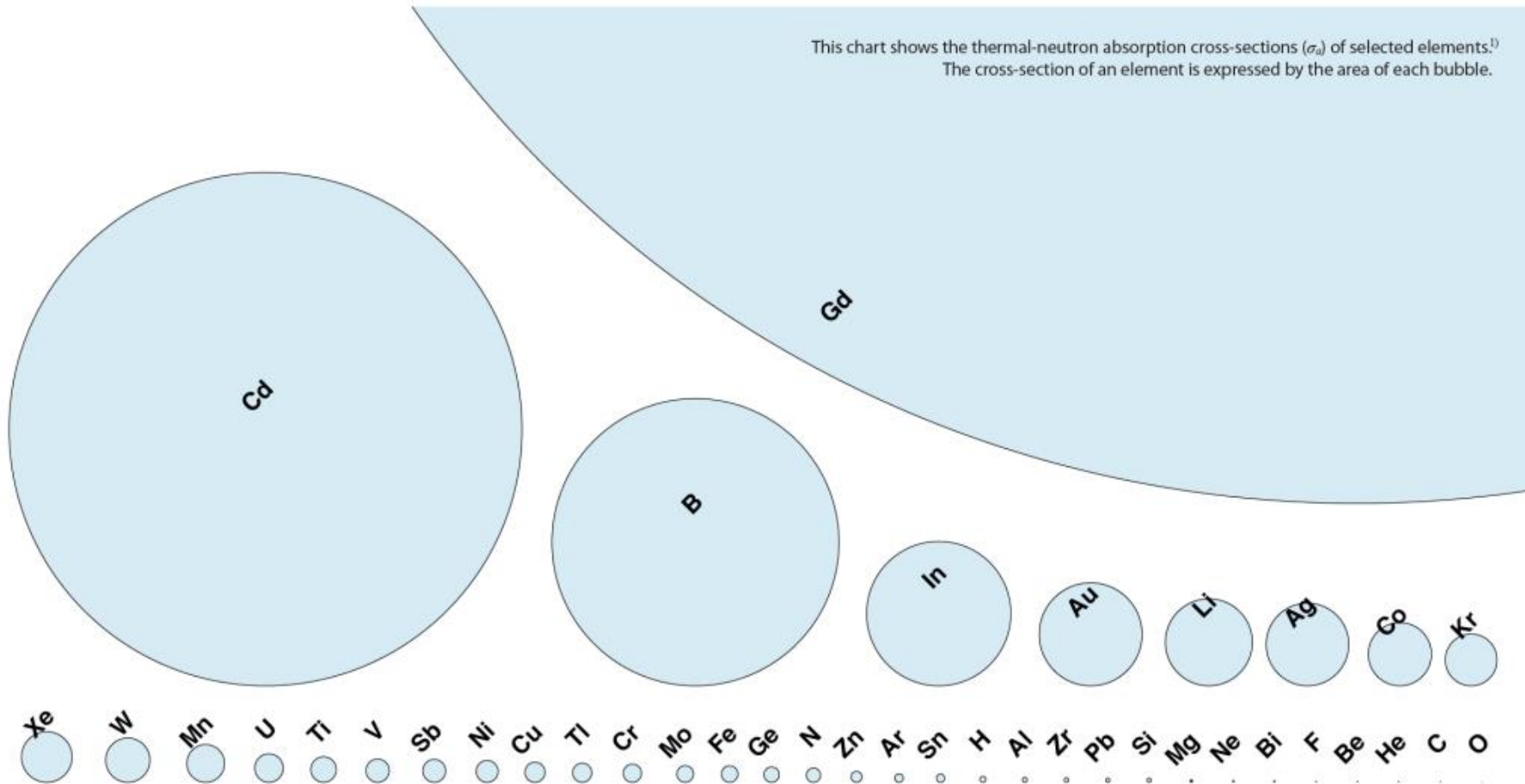
X-선과 중성자의 상호작용 확률



중성자가 보는 원소

Thermal Neutron Cross Section of the Elements

This chart shows the thermal-neutron absorption cross-sections (σ_a) of selected elements.¹⁾
The cross-section of an element is expressed by the area of each bubble.



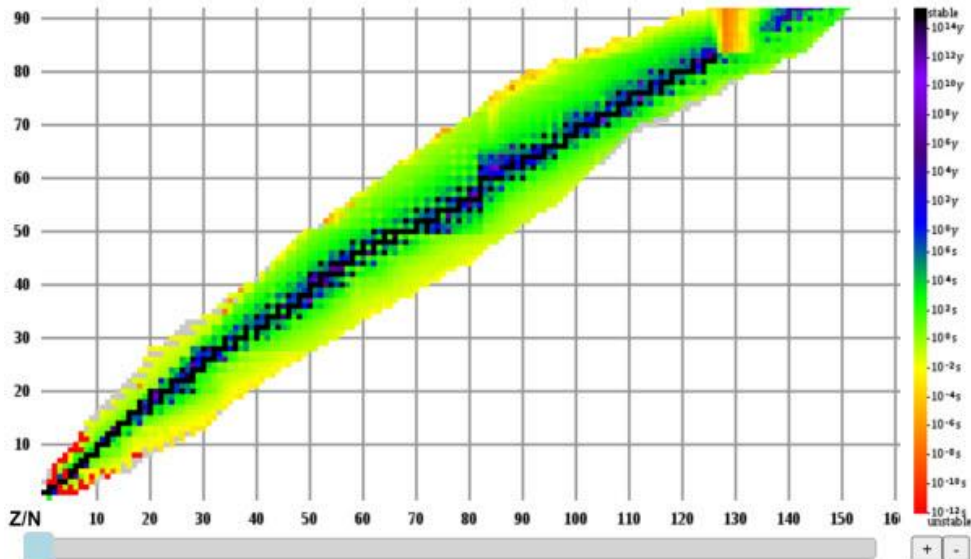
Gd	490000	W	2450	Mn	194	U	687	Tl	382	V	757	Sb	509	Ni	491	Cu	378	Tl	343	Cr	311	Mo	268	Fe	256	Ge	222	N	184	Zn	171	Ar	111	Sn	675	H	0.626	Al	0.3326	Zr	0.222	Sr	0.184	Pb	0.171	Mg	0.083	Ne	0.04	Bi	0.034	Be	0.0092	He	0.007	C	0.0035	O	0.00019
----	--------	---	------	----	-----	---	-----	----	-----	---	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	---	-----	----	-----	----	-----	----	-----	---	-------	----	--------	----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----	------	----	-------	----	--------	----	-------	---	--------	---	---------

The thermal-neutron absorption cross-section (σ_a), measured in barns (b). (1 b = 10^{-28} cm²)
All of the cross section data is for a natural sample.

¹⁾ Kenneth Barbalace, *Periodic Table of Elements - Sorted by Cross Section (Thermal Neutron Capture)*, EnvironmentalChemistry.com, 1993 - 2016. Accessed on line: 7/6/2016
<http://EnvironmentalChemistry.com/ptgi/periodic/crosssection.html>

중성자 상호작용 확률

Table of Nuclides



Home

U-235 Find

92-U-235

Nuclear Property

Atomic mass 235.043930131 ± 0.00000192 u
 Mass excess 40.920654 ± 0.001789 MeV
 Binding energy / A 7.590906 ± 0.000008 MeV
 Beta decay energy -0.12422 ± 0.000854 MeV
 Abundance 0.7204 ± 0.0006 %

E _{ex} (keV)	J _π	Half-life	Decay Modes
0.0	7/2-	704 My (1)	IS: 0.7204%(6) α: 100% ...
0.0765 (0.0004)	1/2+	~26 m	IT: 100%

* Place the mouse pointer here to see the notes.

Neutron-induced Cross Sections

List of Evaluated Nuclear Data Libraries

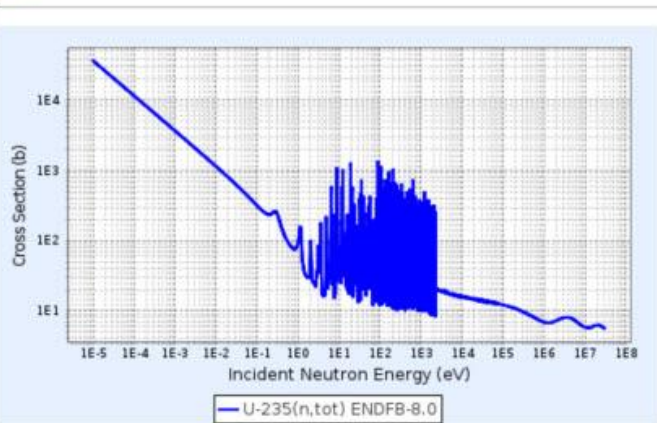
- ENDF/B-VIII.0 [Full text](#)
- Cross sections
 - Total cross sections [Plot](#)
 - Elastic cross sections [Plot](#)
 - Inelastic cross sections [Plot](#)
 - (n,anything) cross sections [Plot](#)
 - (n,2n) cross sections [Plot](#)
 - (n,3n) cross sections [Plot](#)
 - Fission cross sections [Plot](#)
 - (n,n_γ) cross sections (click to expand)
 - Capture cross sections [Plot](#)
 - (n,p_γ) cross sections (click to expand)
 - (n,α_γ) cross sections (click to expand)

ENDF/B-VII.1 [Full text](#)

+ Cross sections

ENDF/B-VII.0 [Full text](#)

+ Cross sections



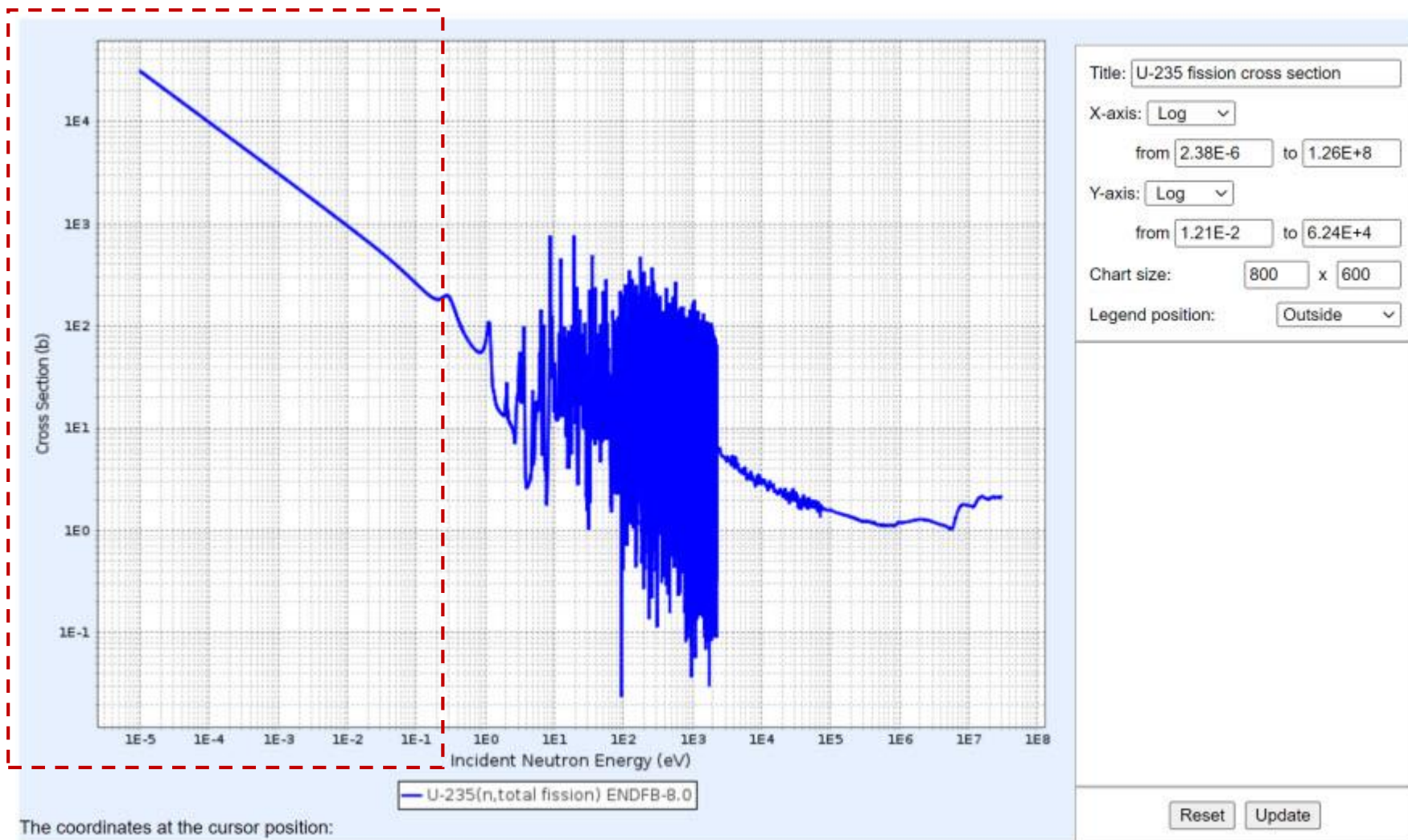
Open XSViewer

List of added plots

Get data Add to XSViewer

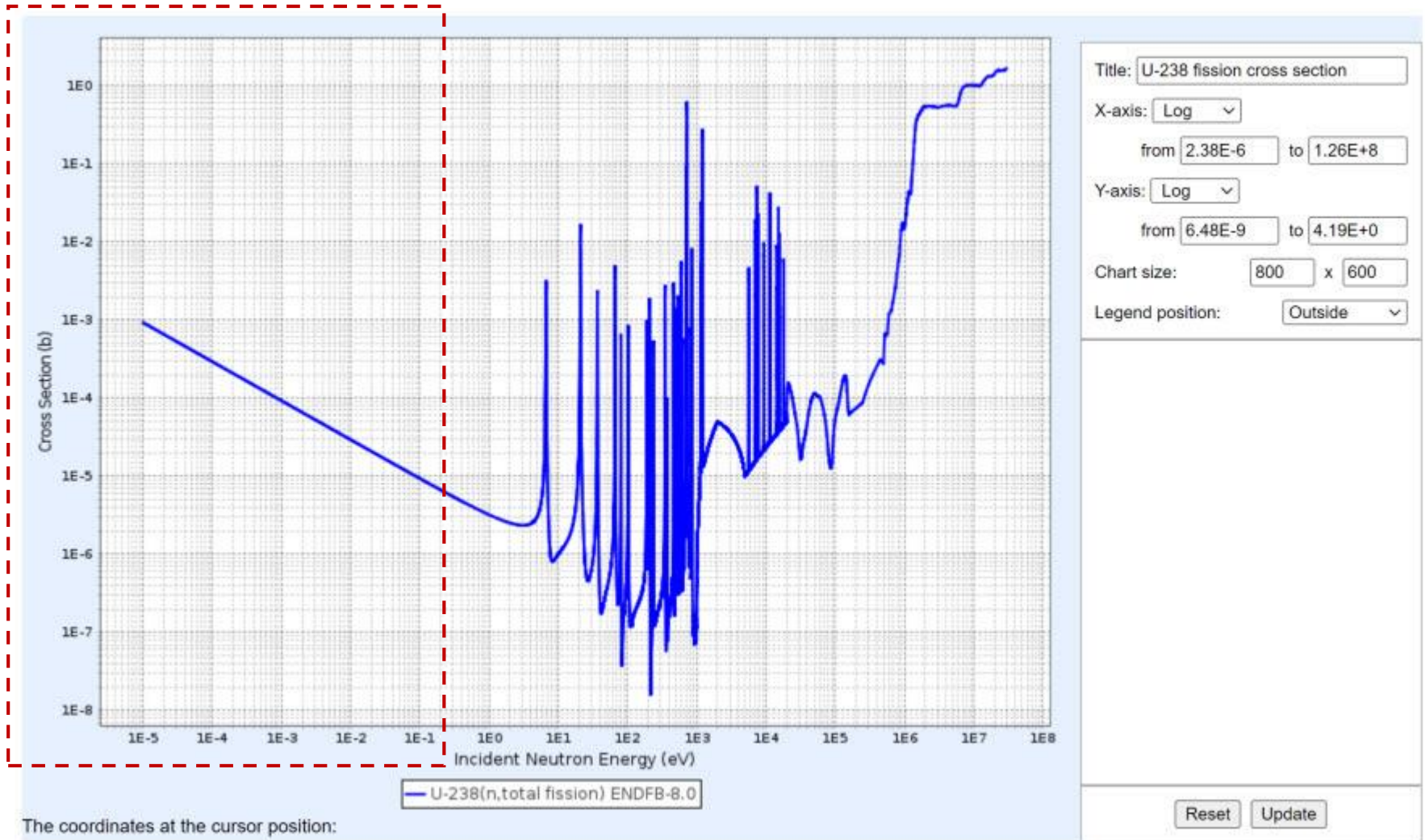
중성자 상호작용 확률

- U-235 fission cross section



중성자 상호작용 확률

- U-238 fission cross section



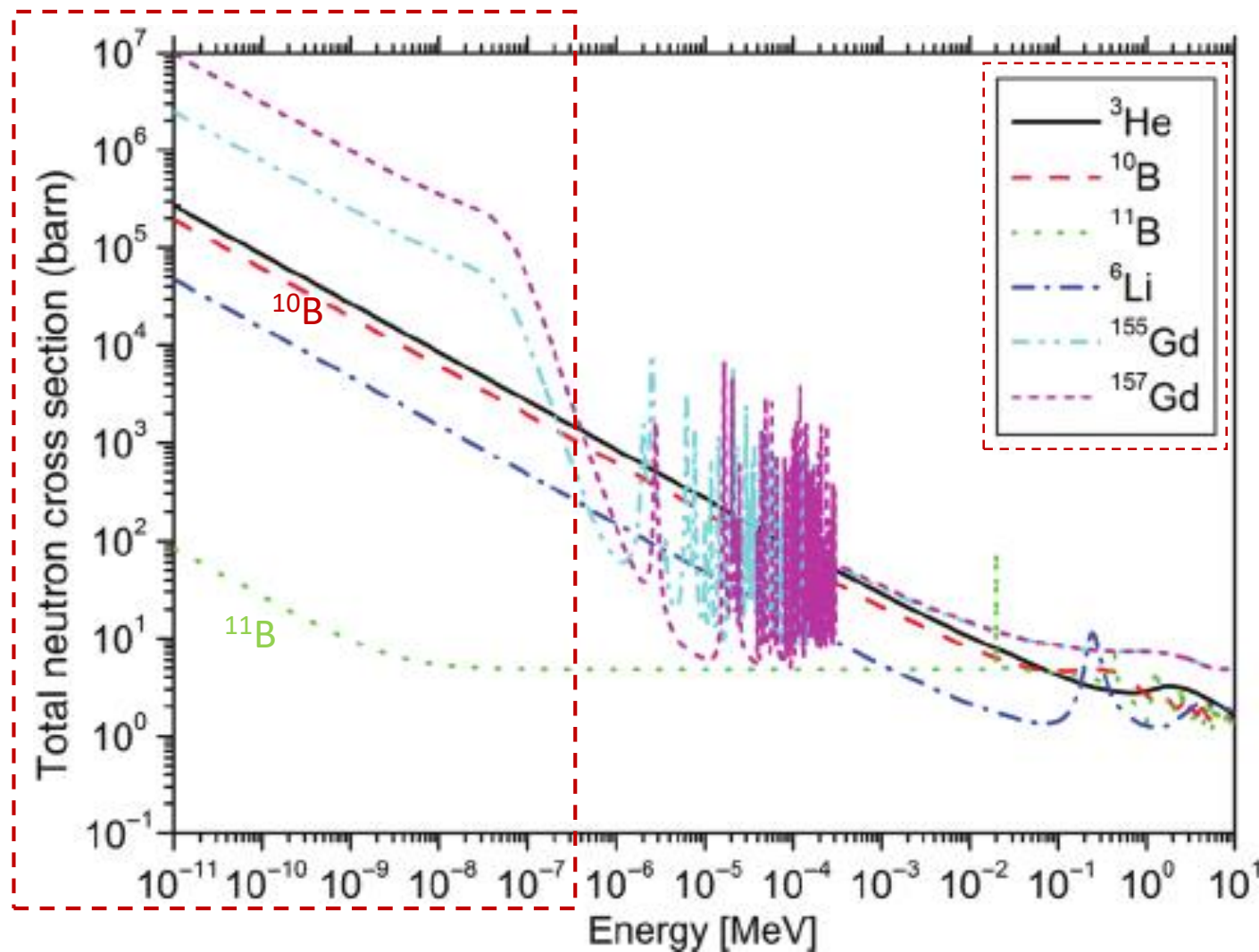
중성자 상호작용

- 중성자 에너지에 따라 달라짐
 - 중성자 에너지가 낮으면 상호작용 확률이 증가
 - 탄성 산란 유도 → 중성자 에너지를 낮춤

원소	H	D	H ₂ O	D ₂ O	Be	C	O	Na	Fe	²³⁸ U
충돌 회수 (2 MeV → 1 eV)	15	20	16	29	70	92	121	172	414	1812

- 동위원소에 따라 반응도가 달라짐
 - 특정 동위원소를 중성자 검출 매질로 활용

중성자 상호작용 확률



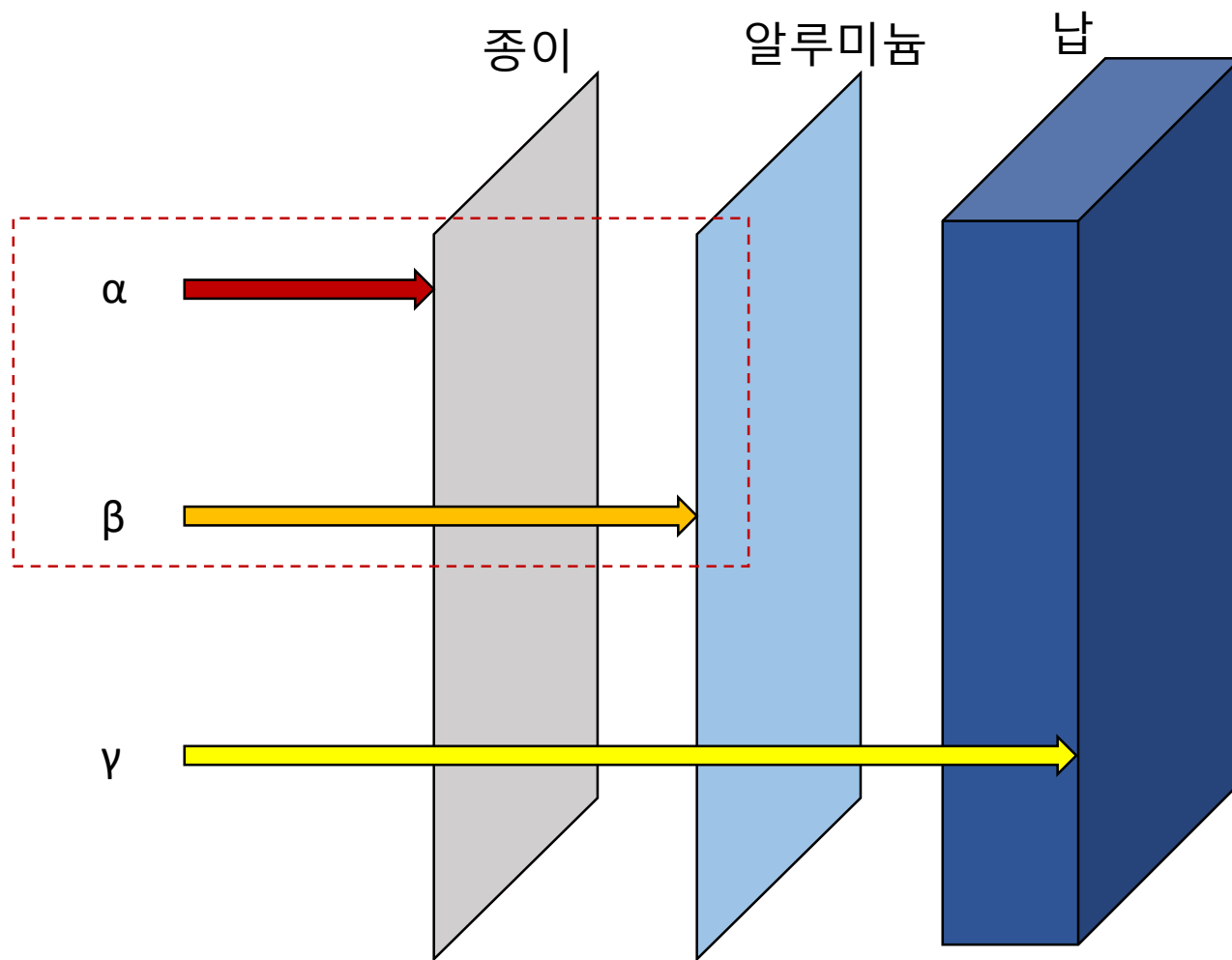
중성자 에너지가 낮으면 상호작용 확률이 높아짐

중성자 검출반응

- $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 0.764 \text{ MeV}$
- $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.79 \text{ MeV}$
- $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + {}^4\text{He}$
 $\rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + 0.48\gamma + 2.3 \text{ MeV} (93\%)$
 $\rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + 2.8 \text{ MeV} (7\%)$
- $n + {}^{155}\text{Gd} \rightarrow \text{Gd}^* + \gamma\text{-ray} \rightarrow \text{conversion electron}$
- $n + {}^{157}\text{Gd} \rightarrow \text{Gd}^* + \gamma\text{-ray} \rightarrow \text{conversion electron}$
- $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow \text{fission fragments} + \sim 160 \text{ MeV}$
- $n + {}^{239}\text{Pu} \rightarrow \text{fission fragments} + \sim 160 \text{ MeV}$

Element	Isotope	Abundance (%)
He	${}^3\text{He}$	0.0002
	${}^4\text{He}$	99.9998
Li	${}^6\text{Li}$	7.59
	${}^7\text{Li}$	92.41
B	${}^{10}\text{B}$	20.00
	${}^{11}\text{B}$	80.00
Gd	${}^{155}\text{Gd}$	14.80
	${}^{157}\text{Gd}$	15.65

2차 입자 이동거리



중성자와 반응 후 발생하는 하전입자 → 짧은 이동거리 → 검출이 용이

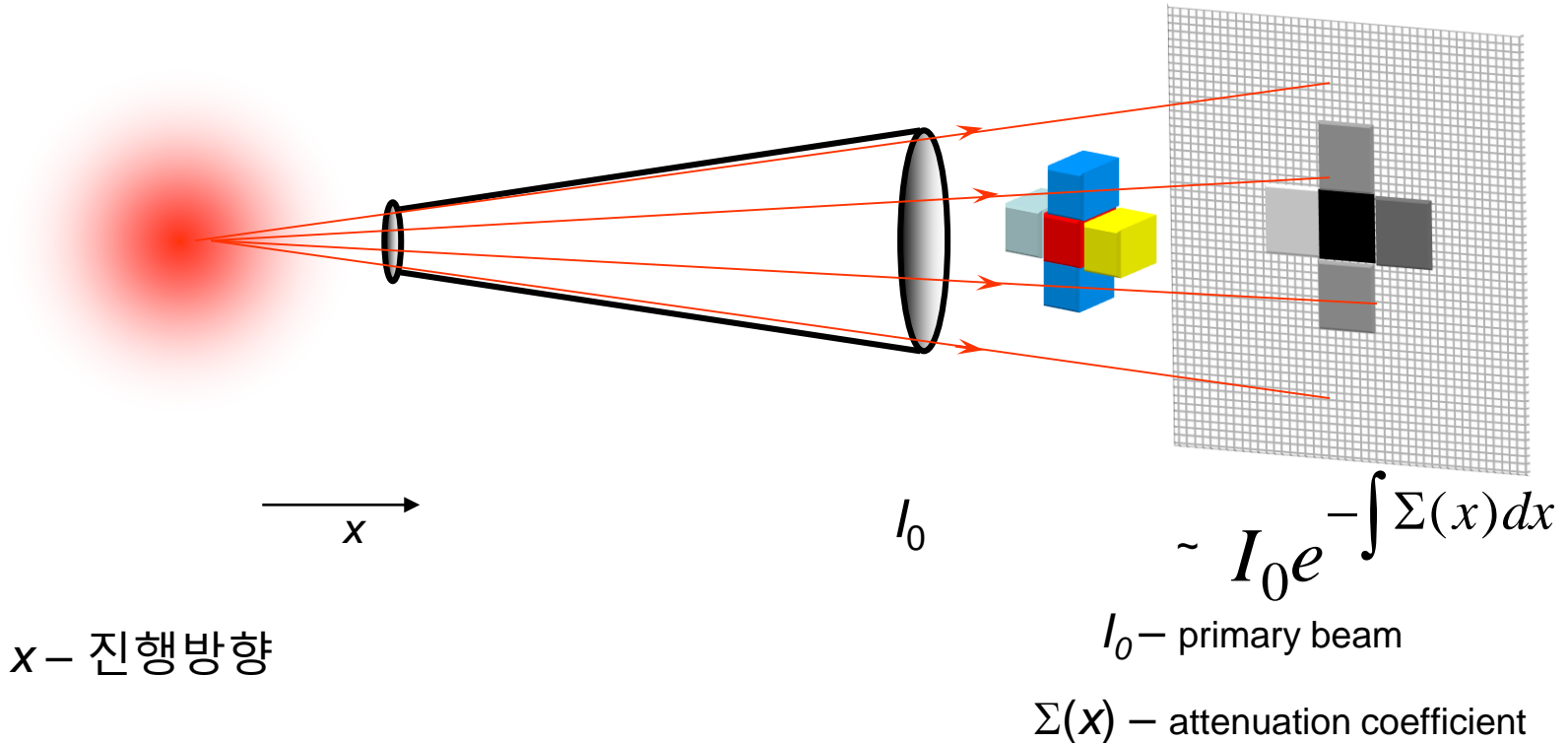
중성자 영상시스템 구성

방사선원
(Source)

집속기
(Collimator)

대상
(Object)

검출기
(Detector)



x - 진행방향

I_0

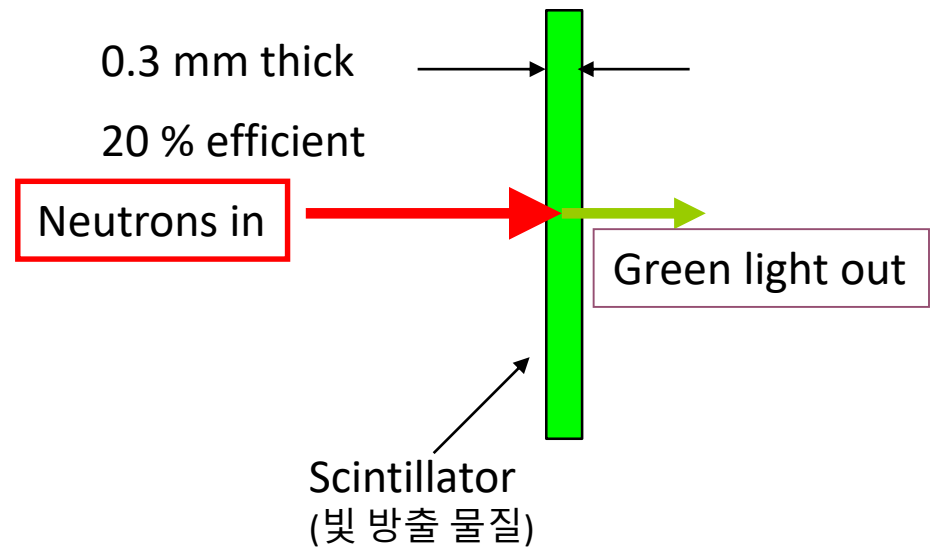
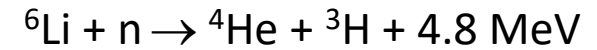
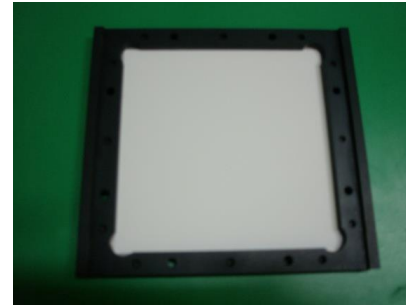
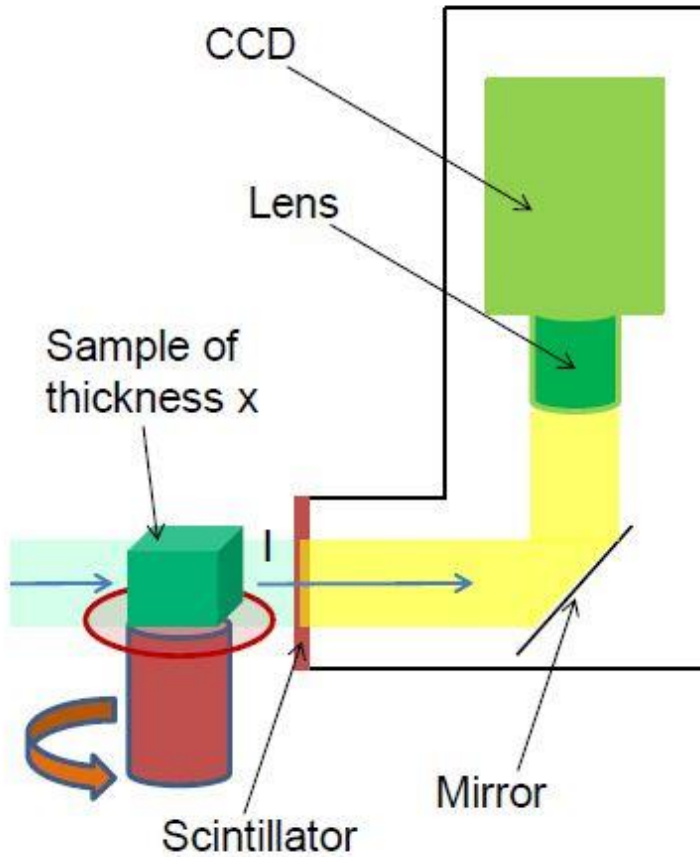
$$\sim I_0 e^{-\int \Sigma(x) dx}$$

I_0 - primary beam

$\Sigma(x)$ - attenuation coefficient

측정 대상을 투과한 중성자 검출 → 일반 영상 시스템과 유사 → 위치 분해능이 중요

중성자 영상 검출기



중성자 영상 검출기



대면적 검출기 제작

중성자 영상 검출 소재

- ZnS:⁶LiF
 - $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + t + \sim 5 \text{ MeV}$
 - Resolution from 150 μm to 300 μm ,
 - Thermal stopping power of 20%
 - High light yield (10^5 photons / neutron)

- GadOx ($\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$)
 - $\text{Gd} + n \rightarrow e^-$, energy $\leq 71 \text{ keV}$ per neutron capture on average
 - Resolution $\sim 10\text{-}20 \mu\text{m}$
 - Thermal stopping power up to 80%
 - Low light yield (10^3 photons / neutron)

중성자 검출 모드

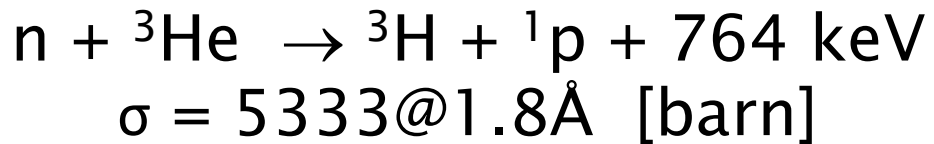
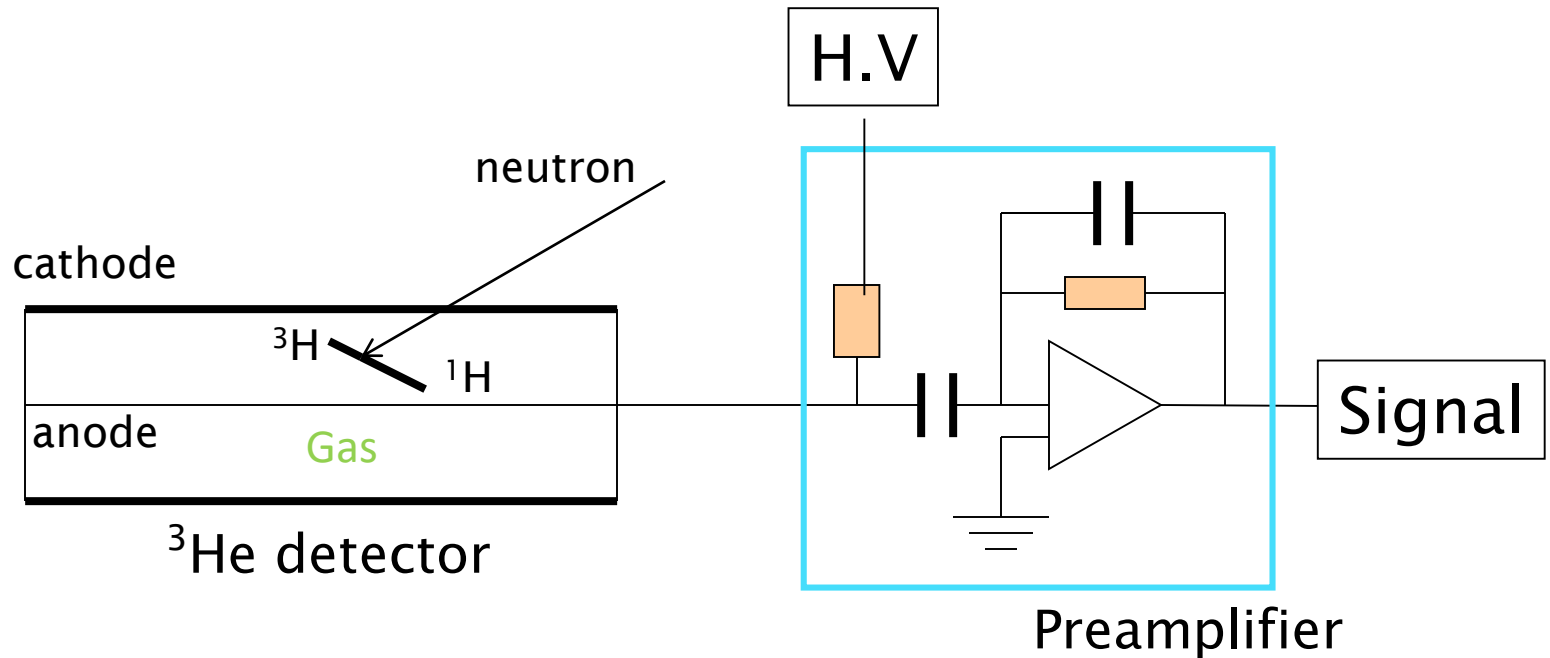
- 중성자 영상
 - 짧은 시간에 많은 중성자 검출
 - 중성자가 유도한 신호의 양 측정 (적분형)
- 중성자 검출
 - 개별 중성자 측정 (계수형)

대형화물 방사선 검출시스템



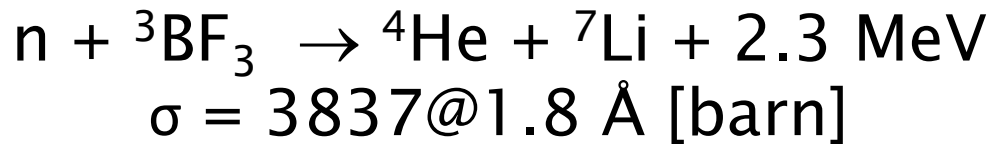
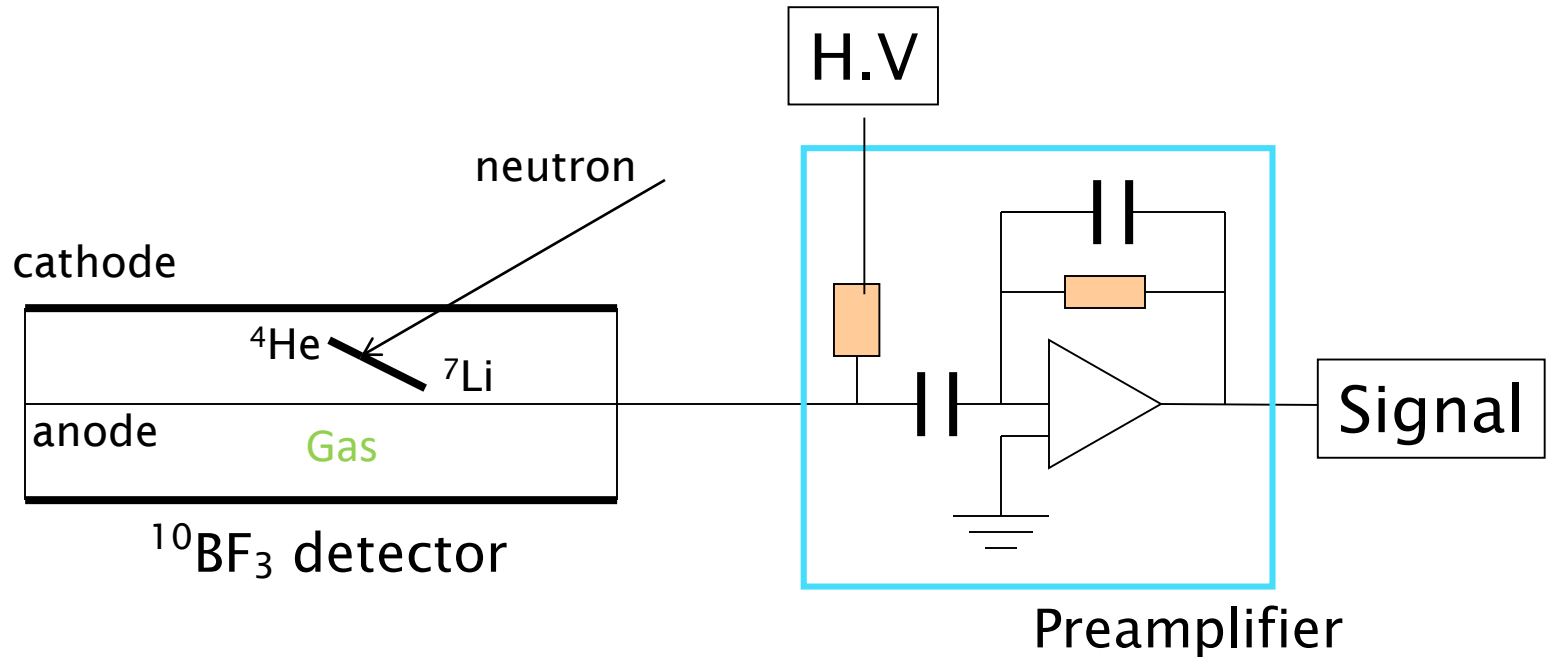
특수 핵물질에서 방출되는 중성자 검출 → 중성자 카운팅

^3He 중성자 검출기



~25,000 ions and electrons produced per neutron ($\sim 4 \times 10^{-15} \text{ C}$)

$^{10}\text{BF}_3$ 중성자 검출기



~65,000 ions and electrons produced per neutron ($\sim 1 \times 10^{-14} \text{ C}$)

^3He , $^{10}\text{BF}_3$ 중성자 검출기

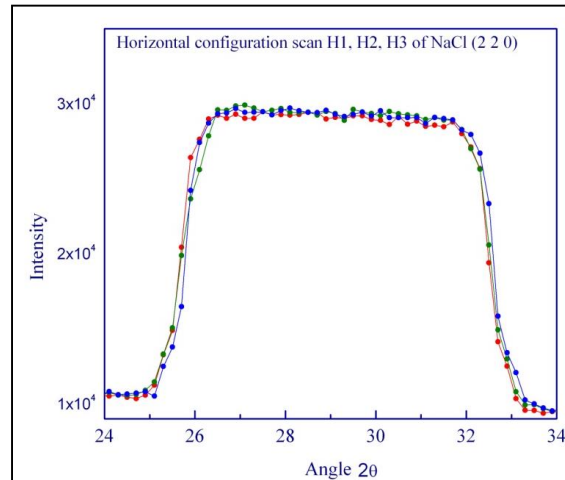
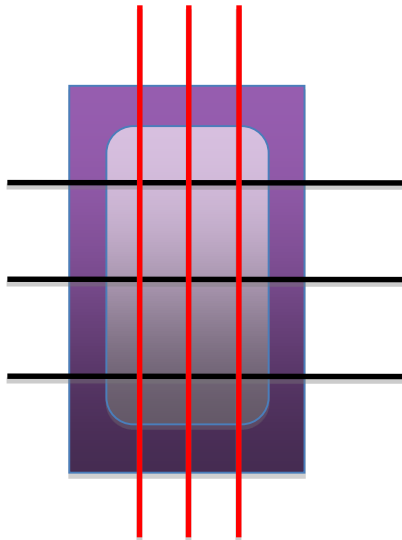
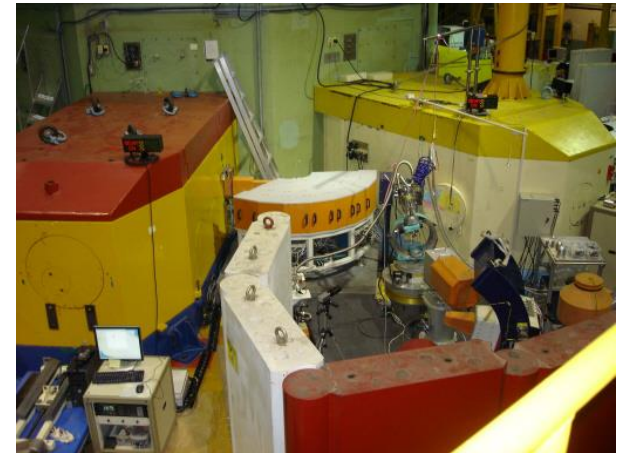
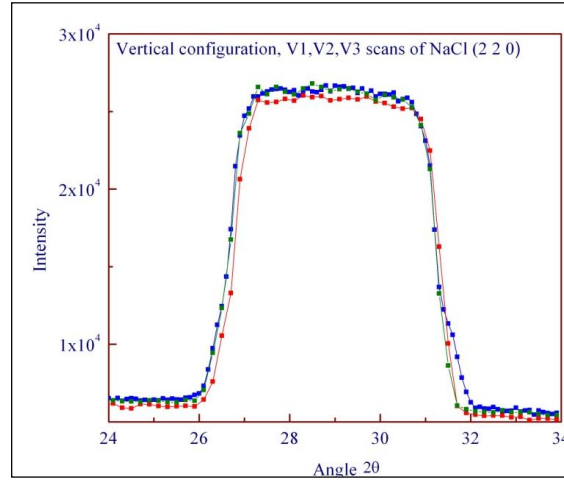


Various He-3 and
BF3 Proportional Counters



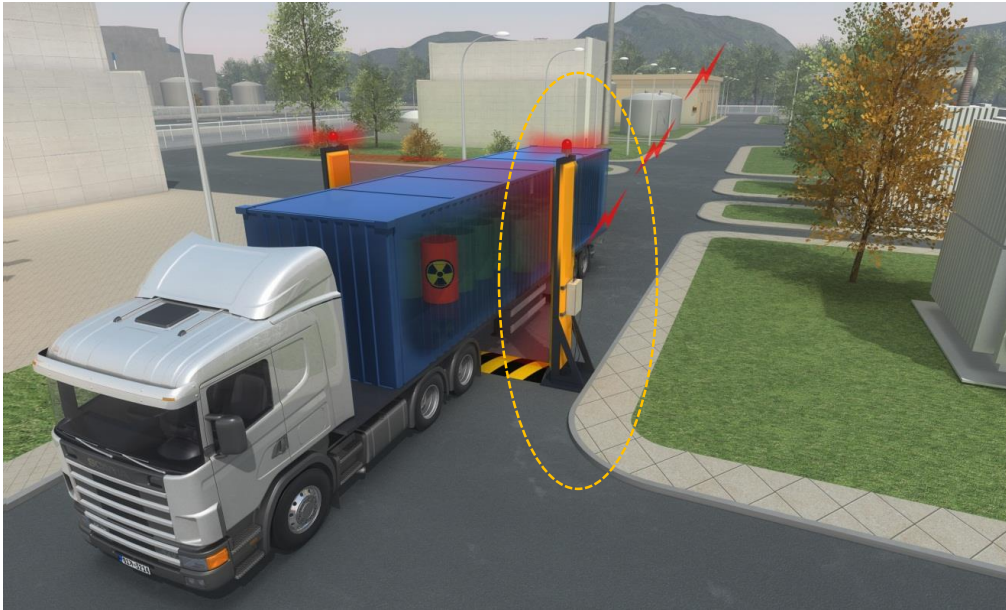
검출기 내로 입사되는 중성자 카운팅 → 방향, 위치 무관

^3He 중성자 검출기

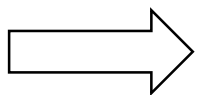


특정 방향으로 입사되는 중성자 카운팅

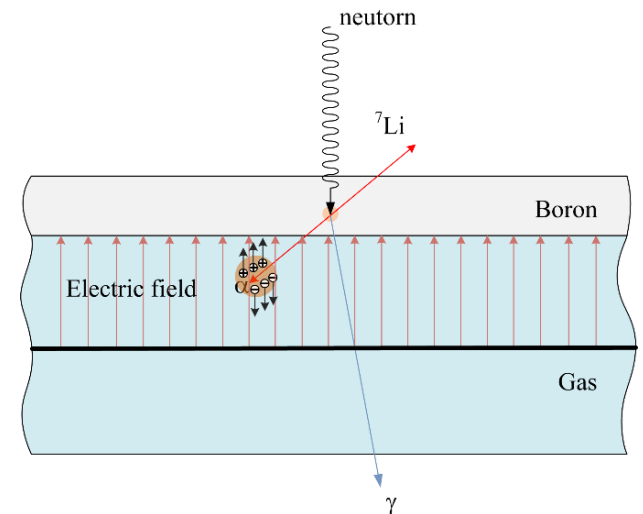
^{10}B 박막 중성자 검출



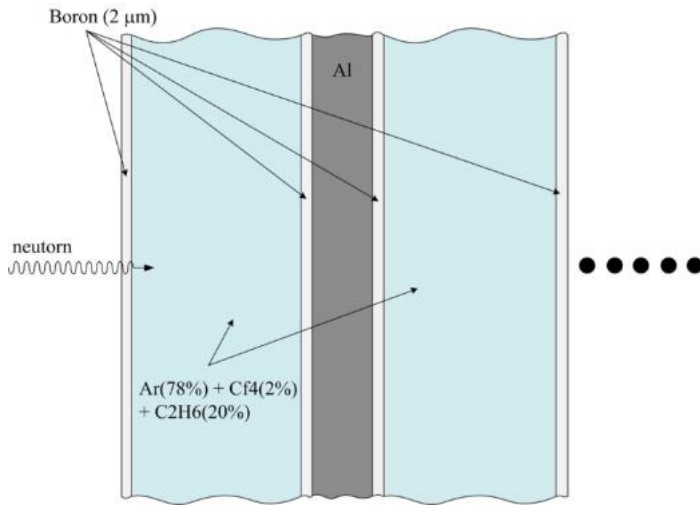
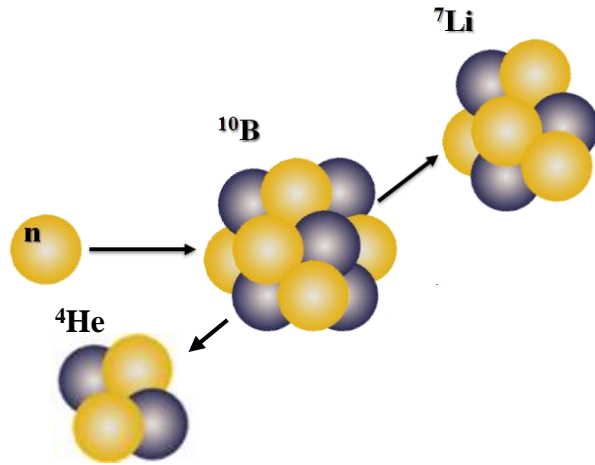
- 핵물질 방출 중성자 검출
- $> 1 \text{ m}^2$ 검출 면적
- ^3He 검출기 수급에 어려움 (수천만원/대 * 10여대)
- $^{10}\text{BF}_3$ 검출기는 효율이 낮음 (수백만원/대 * 100여대)



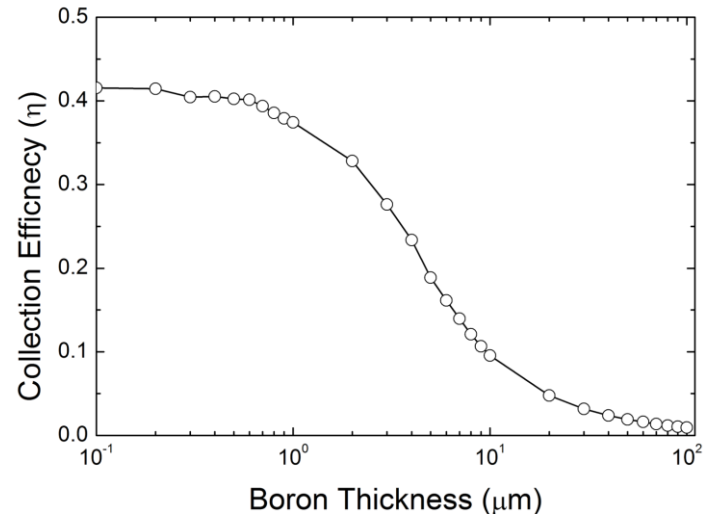
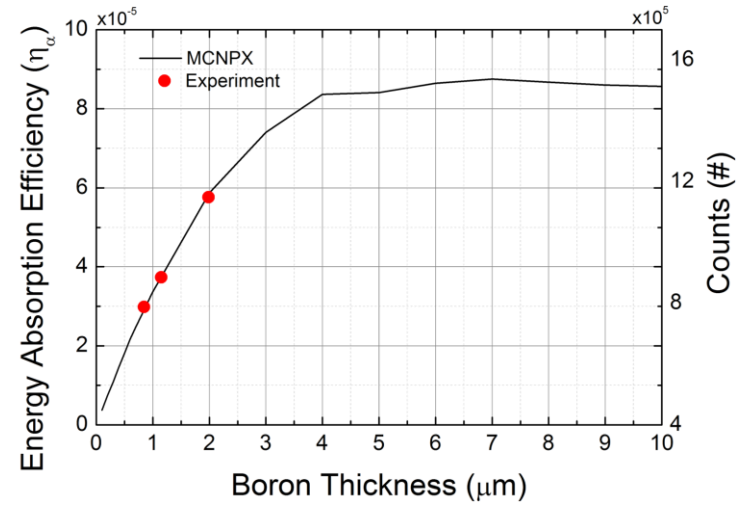
^{10}B 박막 이용 검출기 구성



^{10}B 박막 중성자 검출기



^{10}B multi-layers \rightarrow 검출효율 \uparrow



^{10}B thickness : $< 5 \mu\text{m}$

^{10}B 박막 검출기 개발

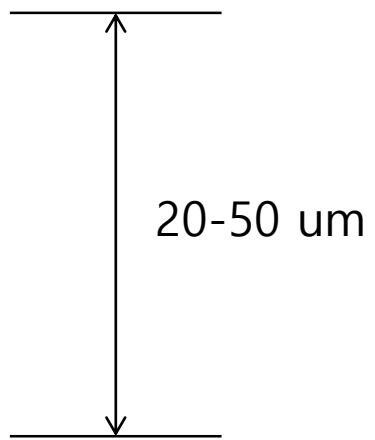
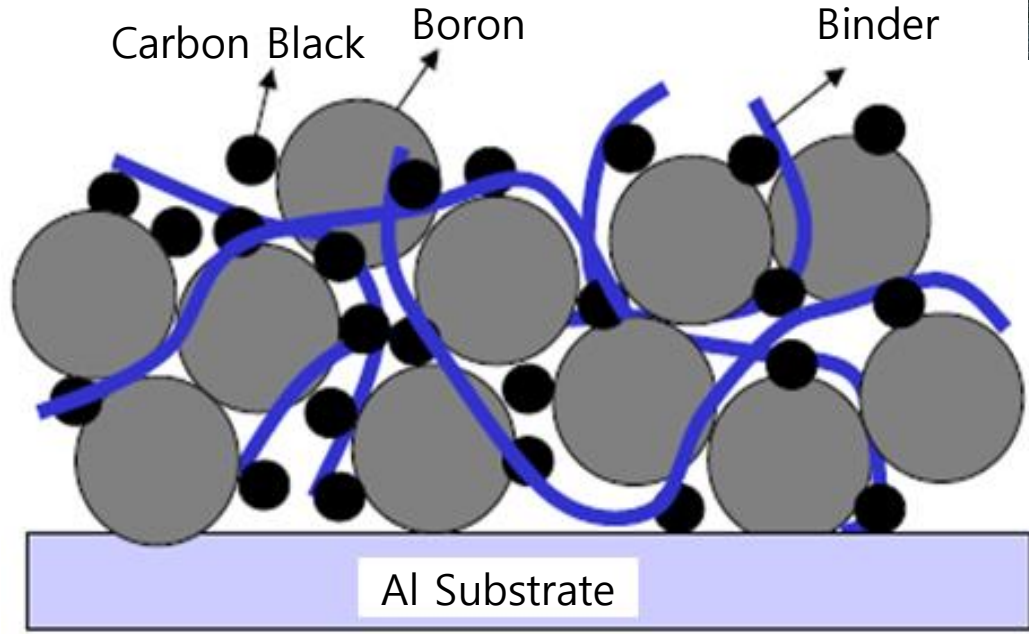
- Boron 특성
 - 모스 굳기계(Mohs hardness) : ~9.5 (다이아몬드 : 10)
- 중성자 반응 후 2차입자 투과 깊이
 - 두께 : < 5 μm
- 전기적 특성
 - 전도성 필요

전도성 ^{10}B 박막 제작

- 인쇄공법
 - Dr. Blade (등사기와 유사)
- 진공 증착
 - Sputtering
 - Vacuum spray
- 침강법

전도성 ^{10}B 박막 제작

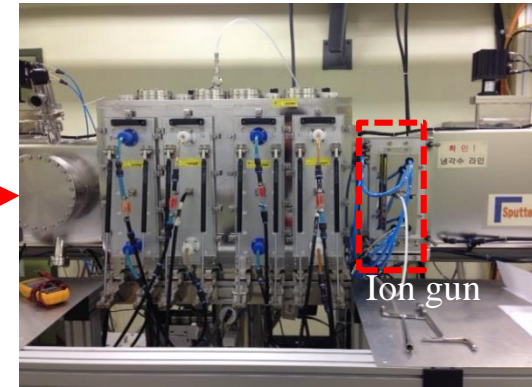
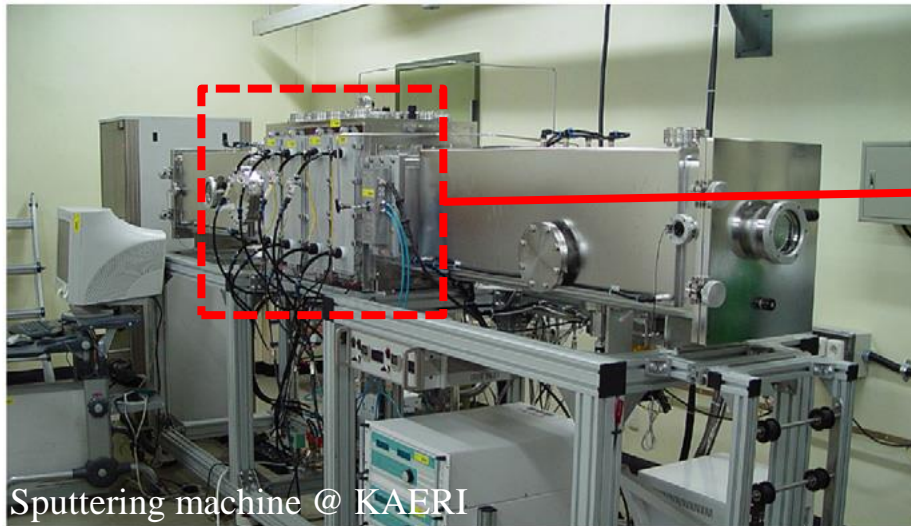
- 인쇄공법



리튬이차전지 극판 제조기술을 이용하여 유연성, 전도성 및 접착력이 좋은 붕소 박막 제조
도전재: 비전도성 붕소 박막에 전기전도성 부여
바인더: 붕소입자 간 또는 붕소와 substrate 간에 결합력 부여

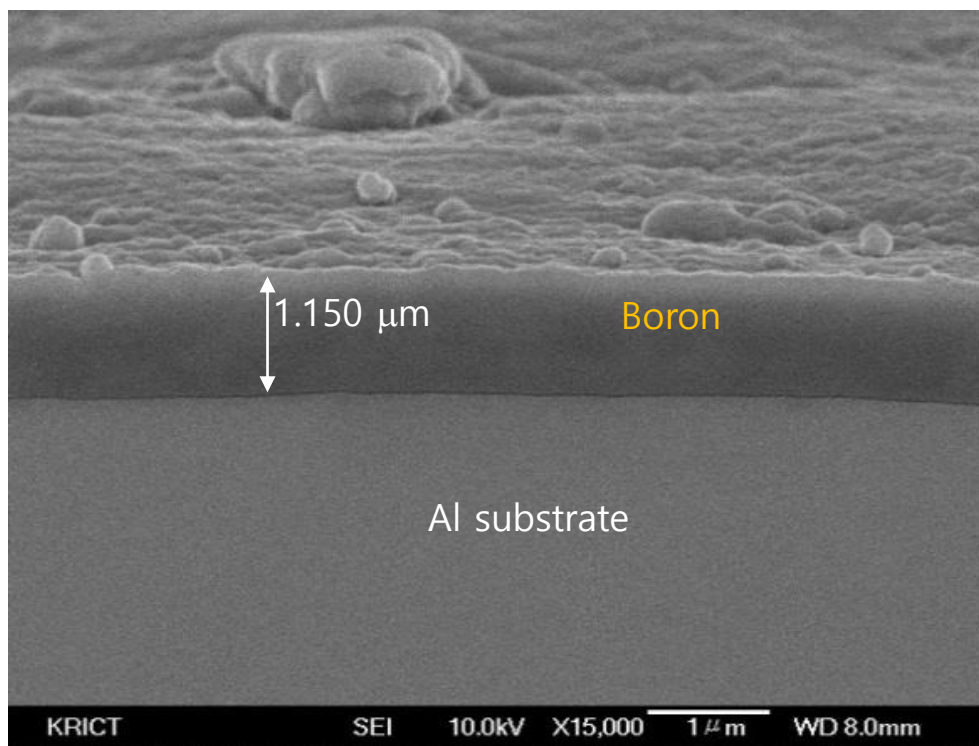
전도성 ^{10}B 박막 제작

- 진공증착

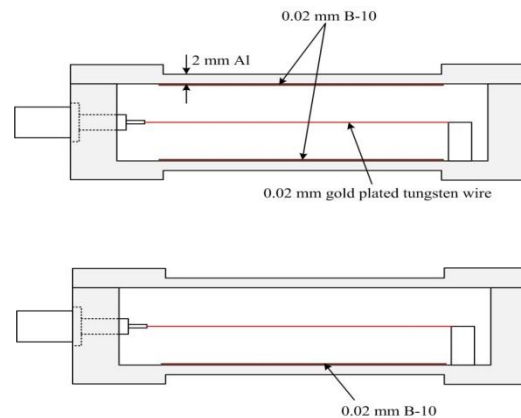
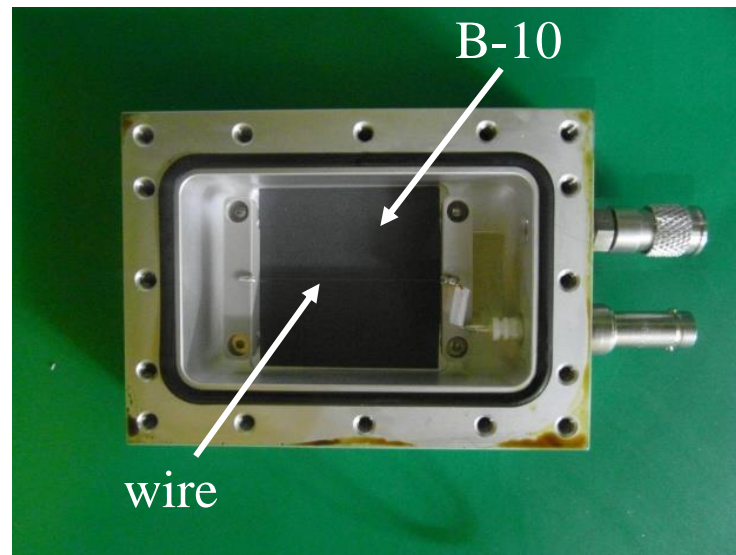


제작된 대면적 B 박막 (길이 1m 가능)

^{10}B 박막 기반 중성자 검출기

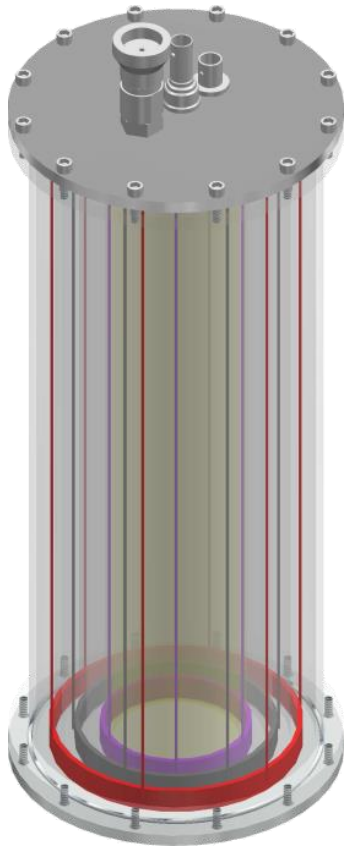


Fabrication of the boron coating layer by sputtering

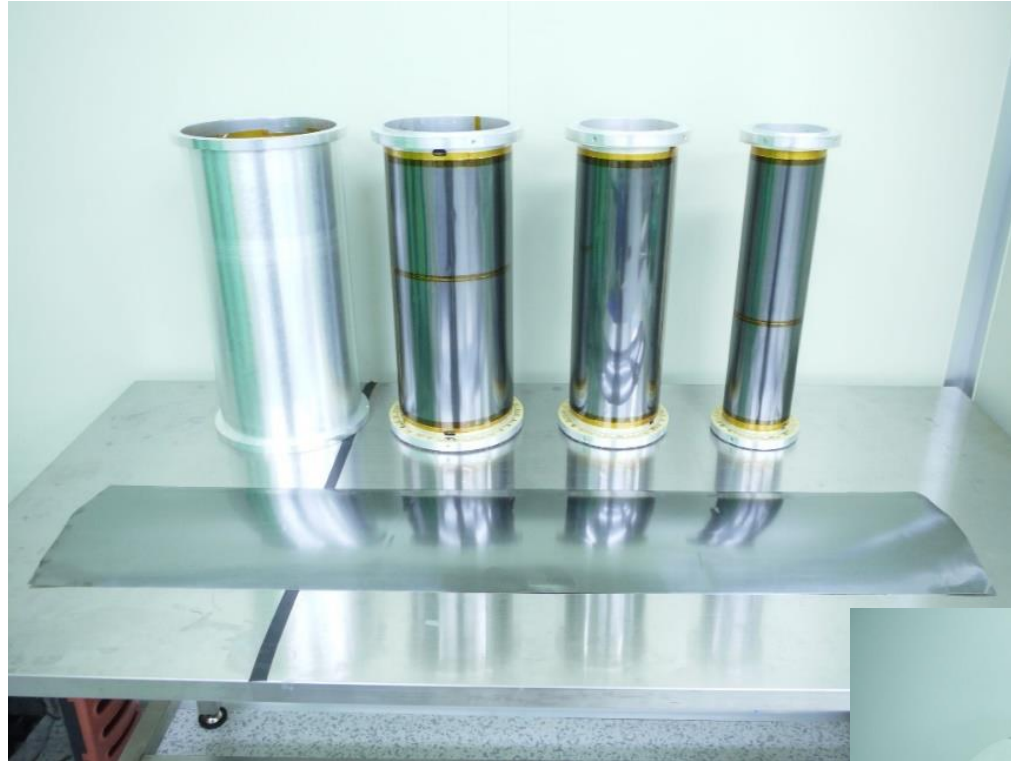


Detector assembly

^{10}B 박막 기반 중성자 검출기



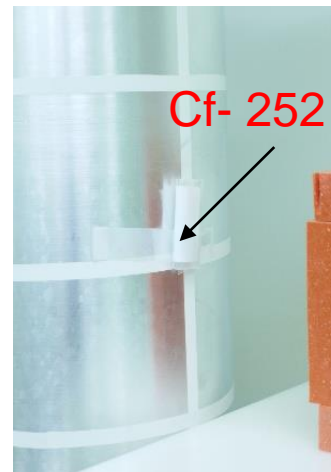
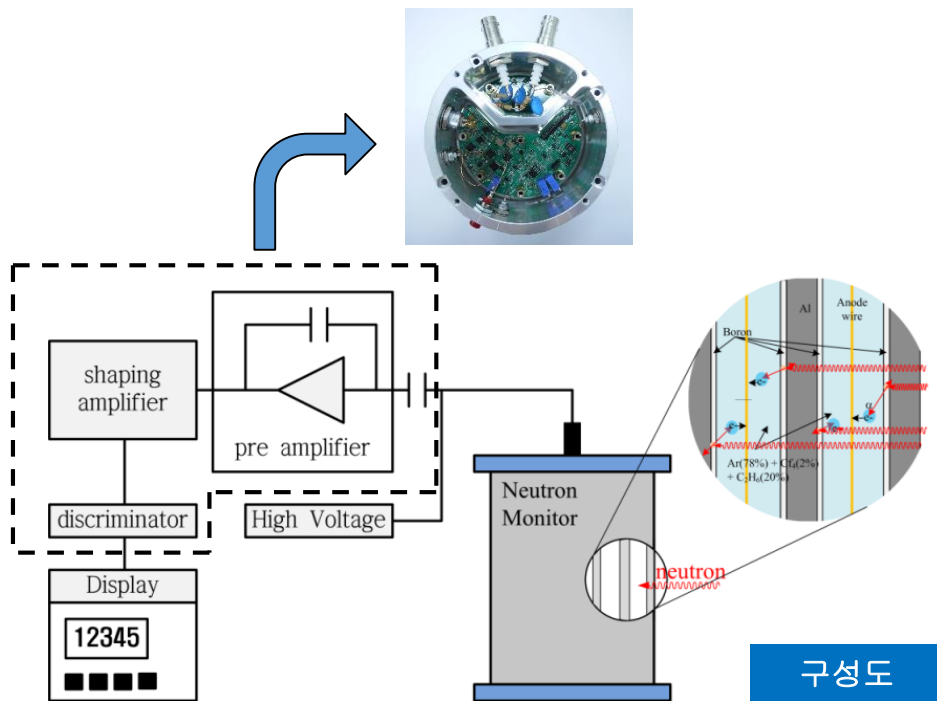
특허 등록



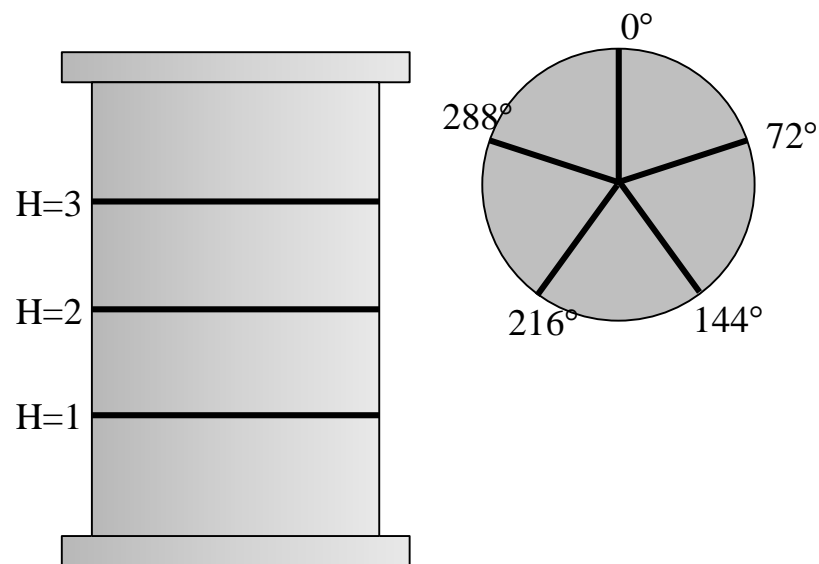
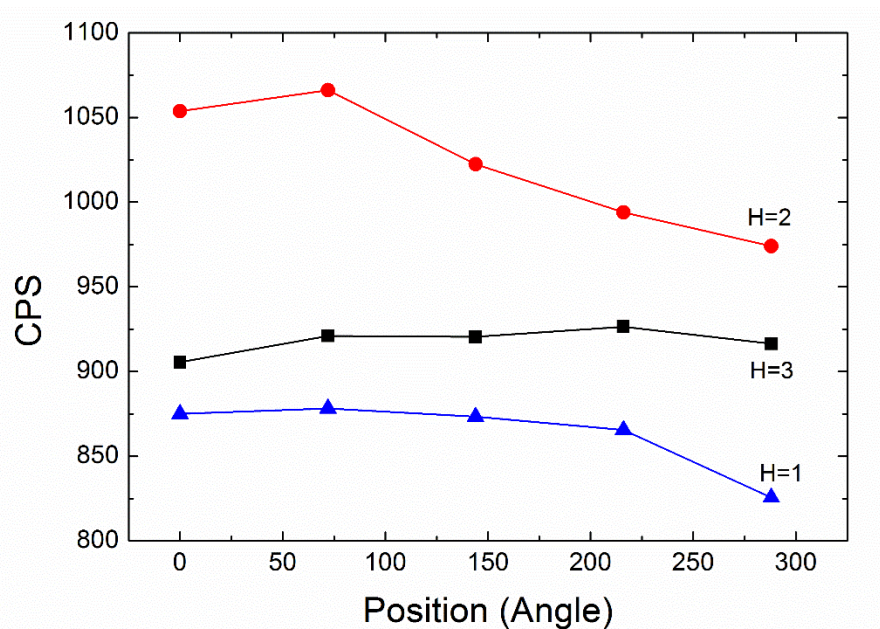
다중 원통형 중성자 검출기



^{10}B 박막 기반 중성자 검출기

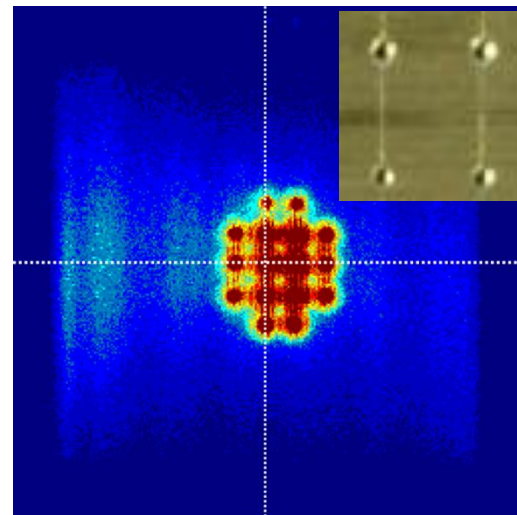
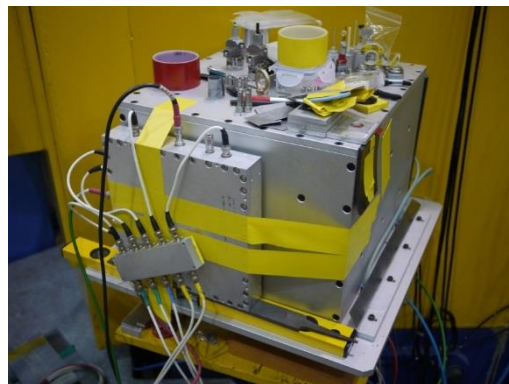
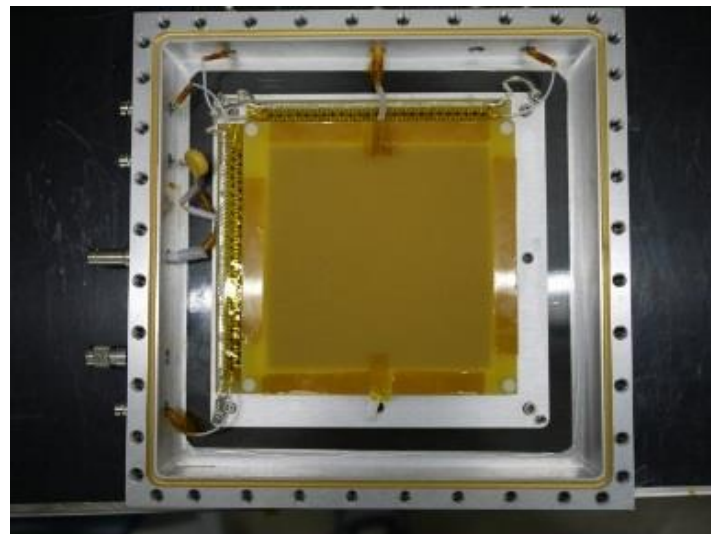
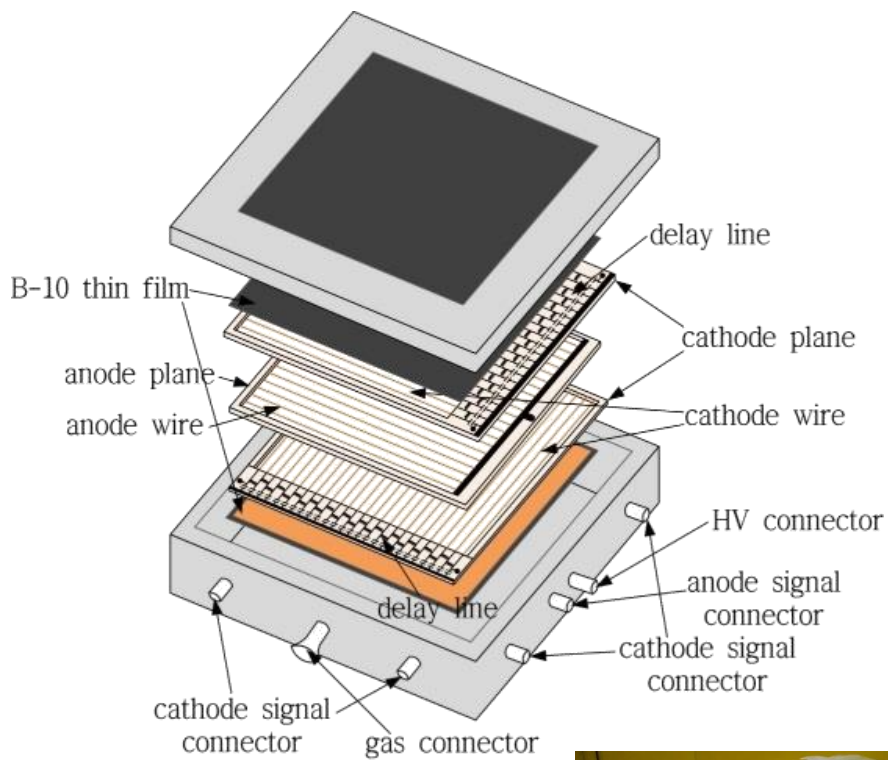


^{10}B 박막 기반 중성자 검출기



특성 평가 결과

^{10}B 박막 기반 중성자 검출기



^{10}B 박막 검출기 개발

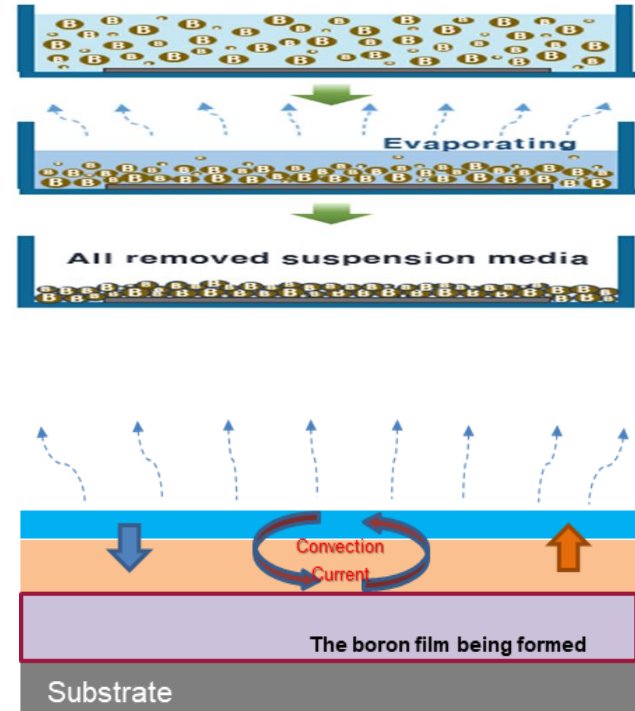
- 인쇄 방식
 - 박막 두께 제조 한계 (수십 μm)
- 진공 증착
 - 박막 제조 비용 & 시간
 - 높은 ^{10}B 재료 손실 (~ 50 %)
- 침강법
 - 현재 진행중

^{10}B 박막 검출기 개발

- 침강법에 의한 ^{10}B 박막 제작



변환막 제조 방법



^{10}B 박막 검출기 개발

- 침강법에 의한 ^{10}B 박막 제작



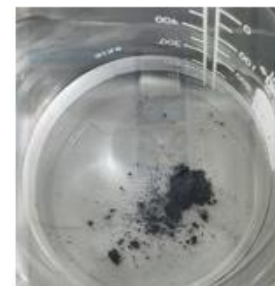
[^{10}B 파우더]



[파쇄]



[용액준비]



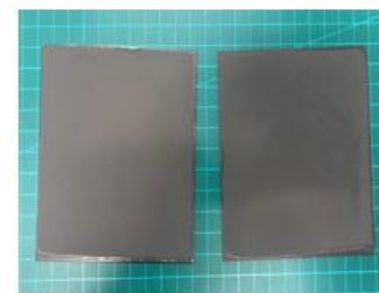
[혼합]



[AL 디스크]

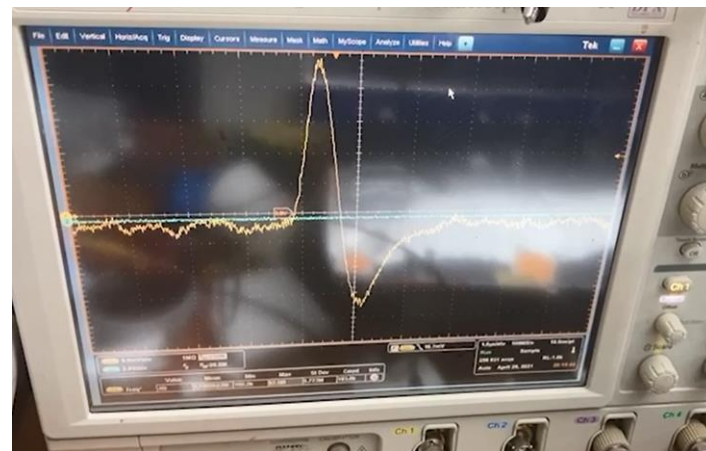
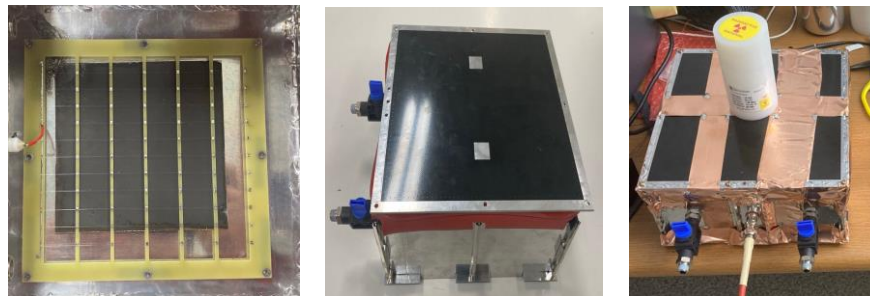
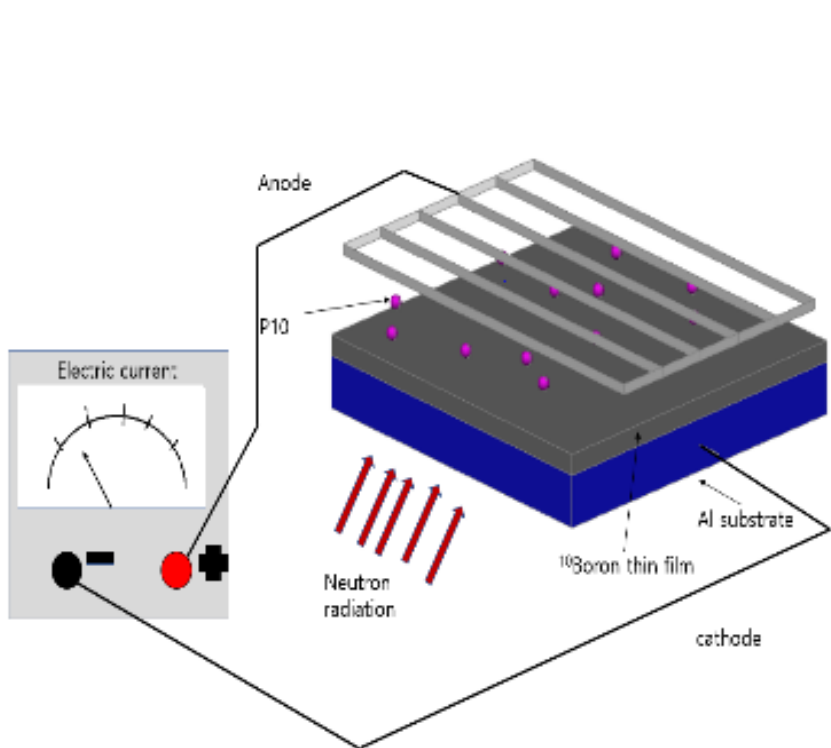


[^{10}B 침강법]



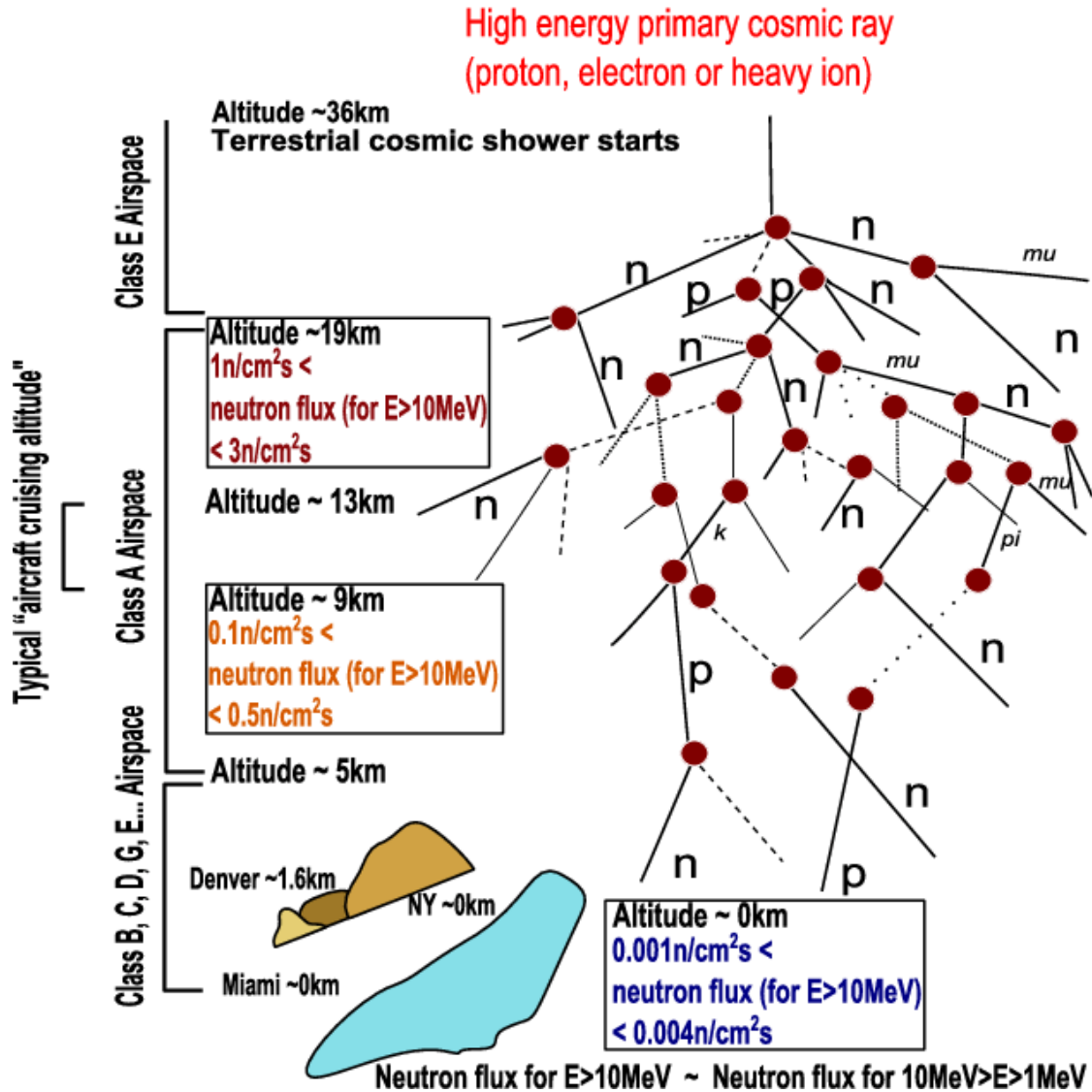
[중성자 변환막]

^{10}B 박막 검출기 개발



중성자 검출기 성능평가 진행중

대기 중성자



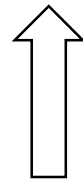
고속 중성자원 개발



반도체 소자에 영향



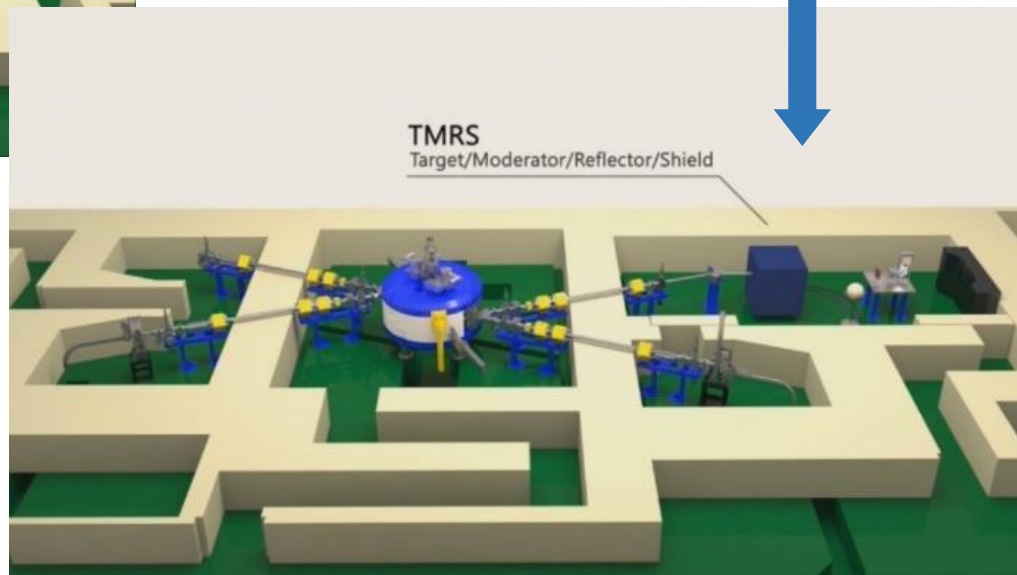
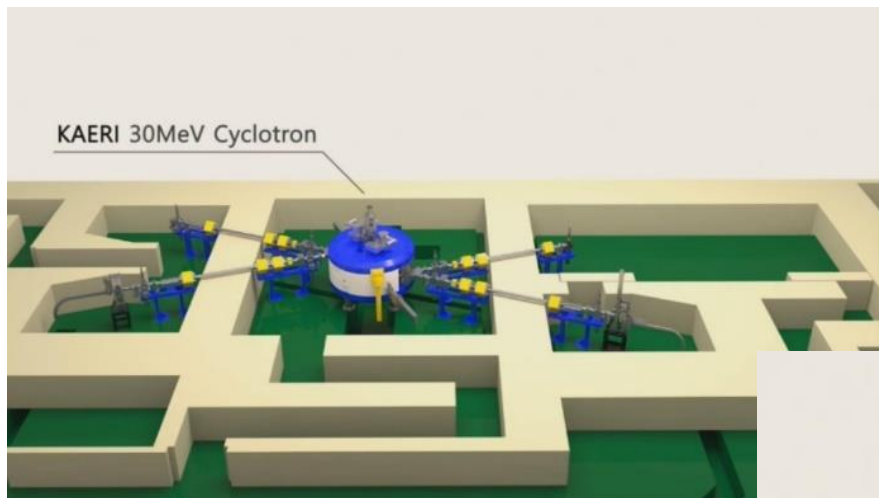
비행궤도 중성자
 $\sim 2,000\text{n/cm}^2\text{h}$



지표면 중성자
 $\sim 20\text{n/cm}^2\text{h}$

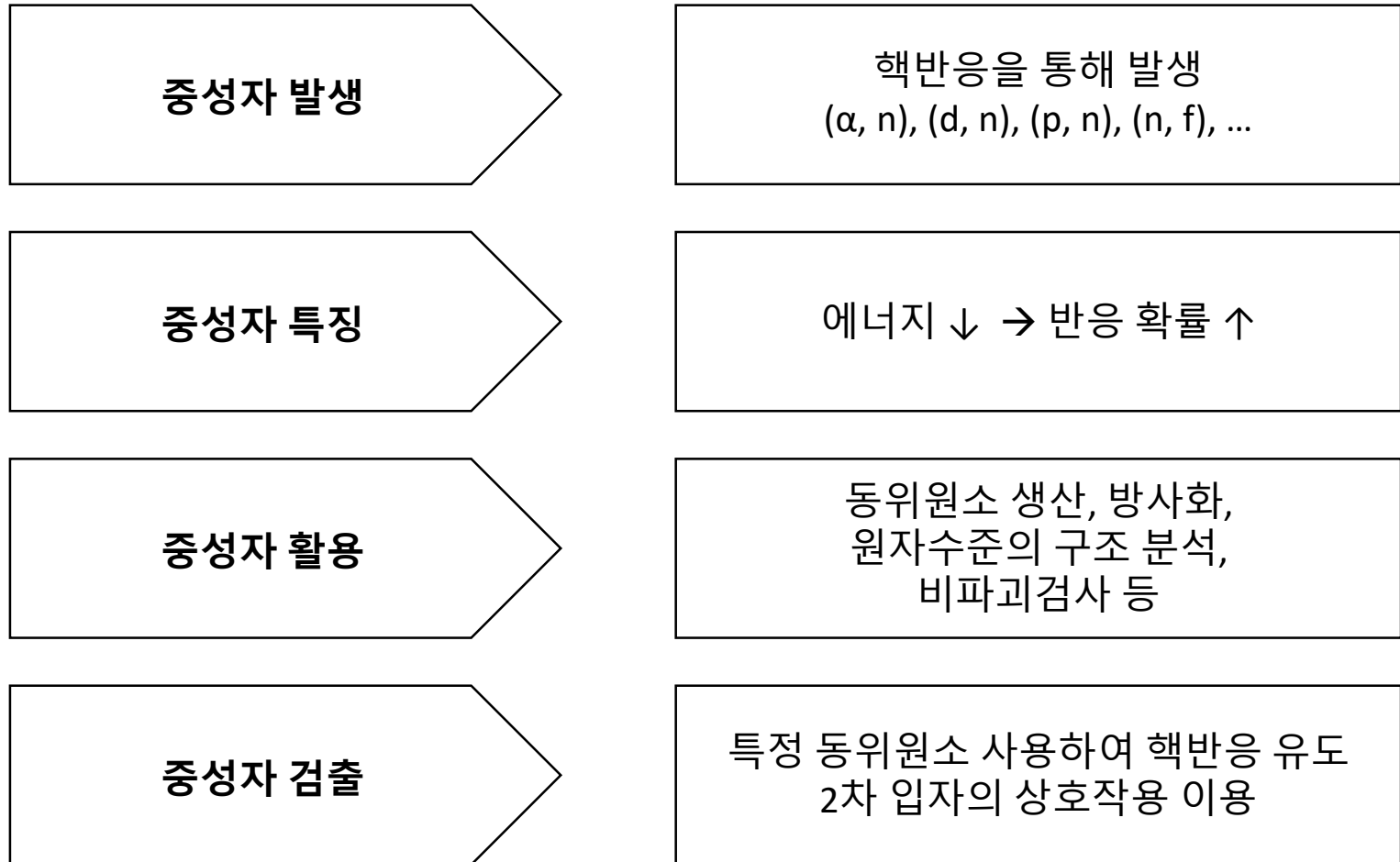
30 MeV급 고속 중성자원

- 정읍 30 MeV 사이클로트론 시설에 구축



고속중성자 에너지 분포, 선속 분포 측정 예정(기술 개발 진행중)

요약



물리학 배경지식 + 방사선기술 + 신호처리 & 데이터 획득 시스템 이해 필요

원자력 유관 기관

- **관**
 - 과기부, 산자부, 원안위 등
- **연**(석사 이상)
 - 한국원자력연구원
 - 한국원자력안전기술원, 한국원자력통제기술원
 - 한수원중앙연구원, 한수원보건연구원 등
- **산**(학부 이상)
 - 한국전력, 한수원, 한전원자력연료, 한국전력기술
 - 한전 KPS, 두산에너지빌리티 등

Q & A