

Energetyka konwencjonalna odnawialna i jądrowa

Wykład 10 - 11.XII.2018

Zygmunt Szefliński

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów

szef@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szef/>

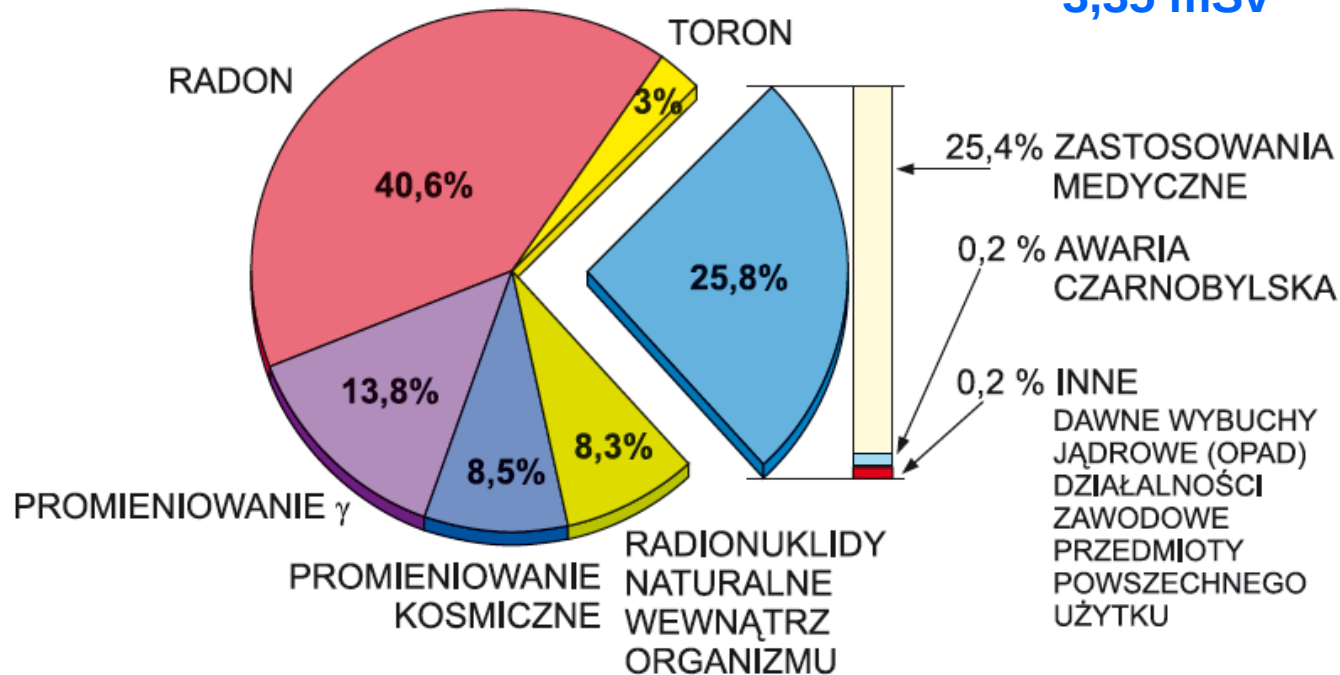
Energetyka Jądrowa

Źródła i wielkość narażenia w Polsce

ŹRÓDŁA NATURALNE **74,2%** (2,486 mSv)
PROMIENIOWANIE OD ŹRÓDEŁ SZTUCZNYCH
(W TYM W MEDYCYNIE) **25,8%** (0,866 mSv)

3,35 mSv

0,25 μ Sv/h



Źródło: Raport PAA, Warszawa 2015

Podstawowe wiadomości z fizyki reaktorów jądrowych

- Od odkrycia polonu i radu do energii jądrowej
- Wykorzystanie energii rozszczepienia: militarne, energia elektryczna;
- Promieniotwórczość w przyrodzie;
- Rozszczepienie i fuzja;
- Reakcje rozszczepienia;
- Reaktor jądrowy;
- Warunki krytyczności reaktora jądrowego;
- Reakcje termojądrowe (Fuzja);
- Bomba wodorowa;
- Reaktor termojądrowy.

Odkrycie polonu i radu Nagrody Nobla - 1903 i 1911



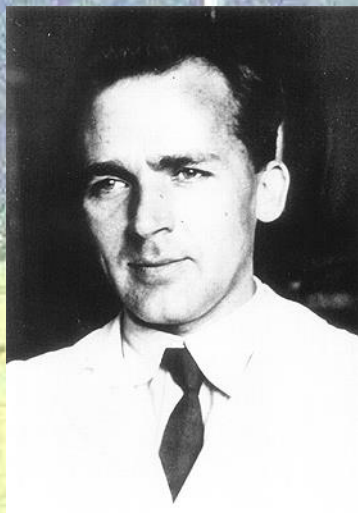
Maria Skłodowska Curie



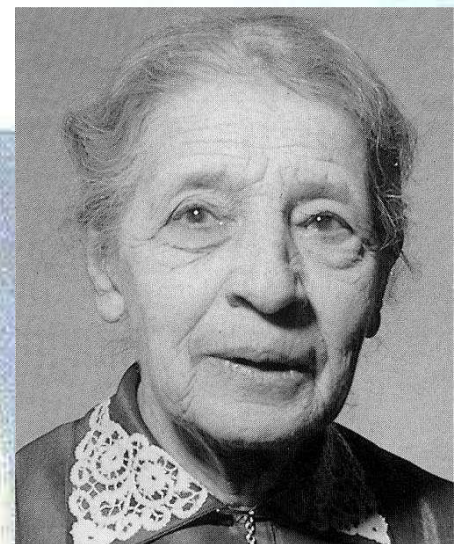
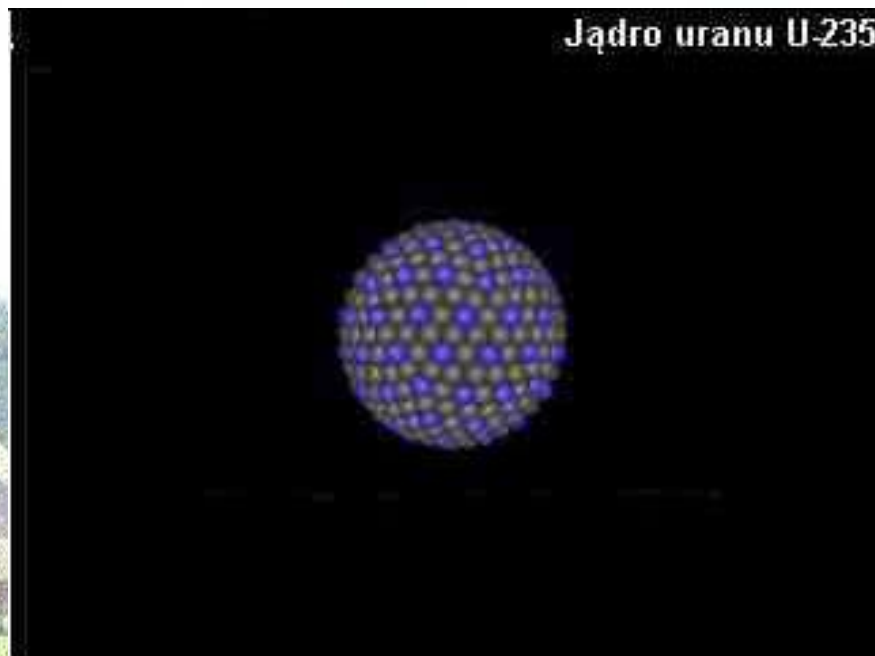
Odkrycie reakcji rozszczepienia uranu-235 - rok 1938



Otto Hahn

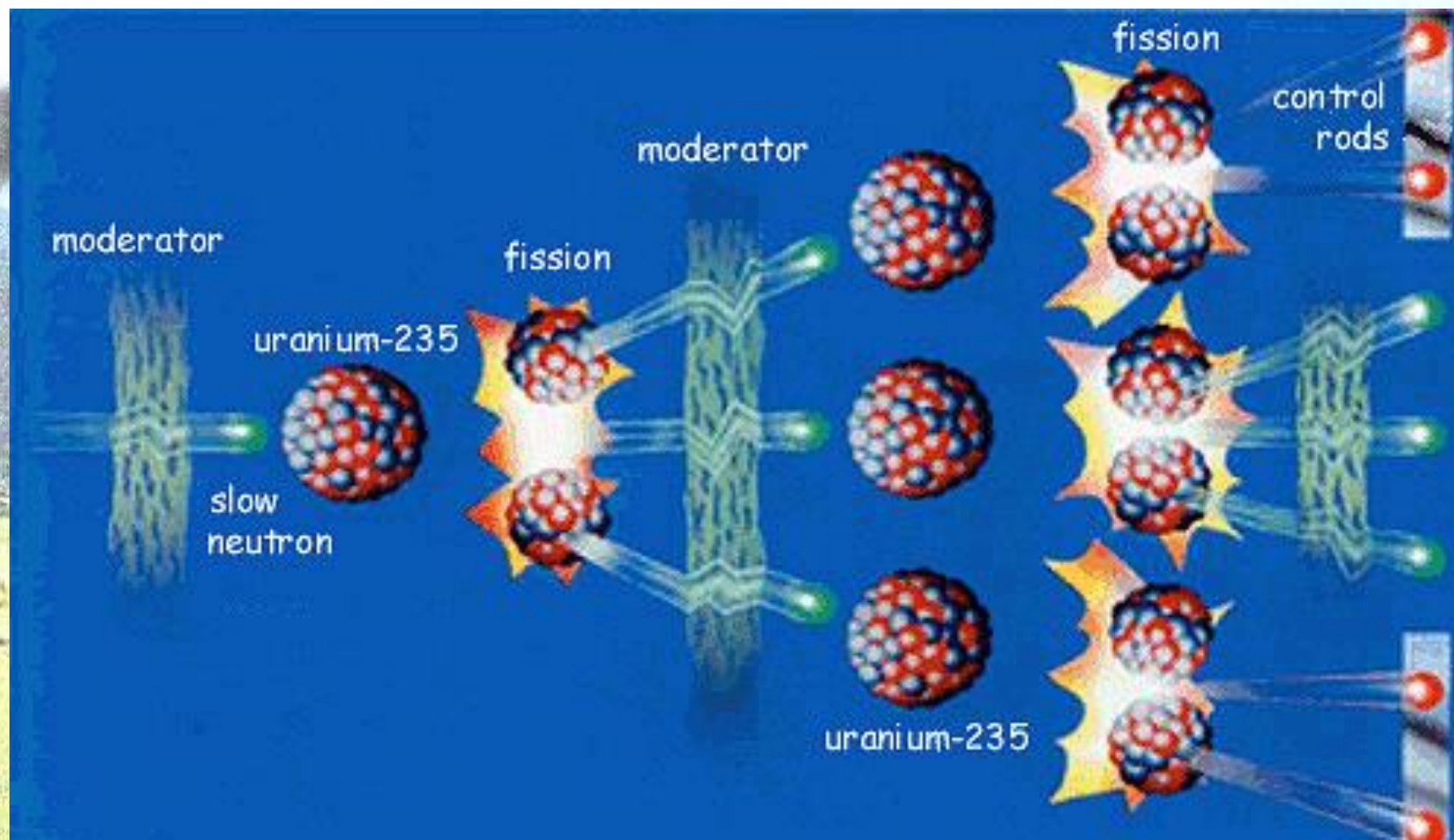


Fritz Strassmann



Lisa Meitner

Łańcuchowa reakcja rozszczepienia



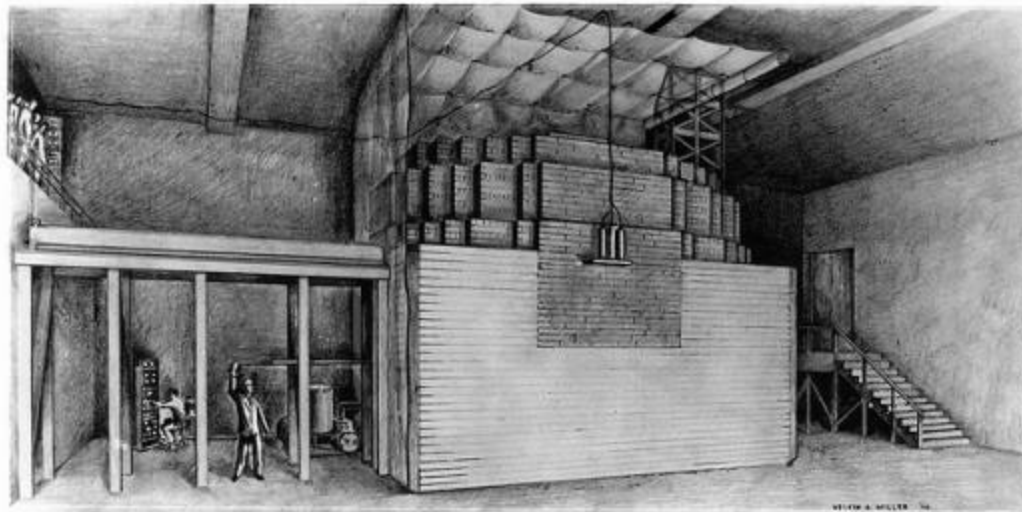
Pierwszy reaktor jądrowy

Pierwszy, naturalny reaktor jądrowy odkryto w Ohlo w Gabonie;

Pierwszy reaktor jądrowy zbudowany przez ludzi uruchomiono w Chicago, w grudniu 1942 roku. Jako paliwo zastosowano naturalny uran metaliczny i tlenek uranu naturalnego. Jako moderator – grafit

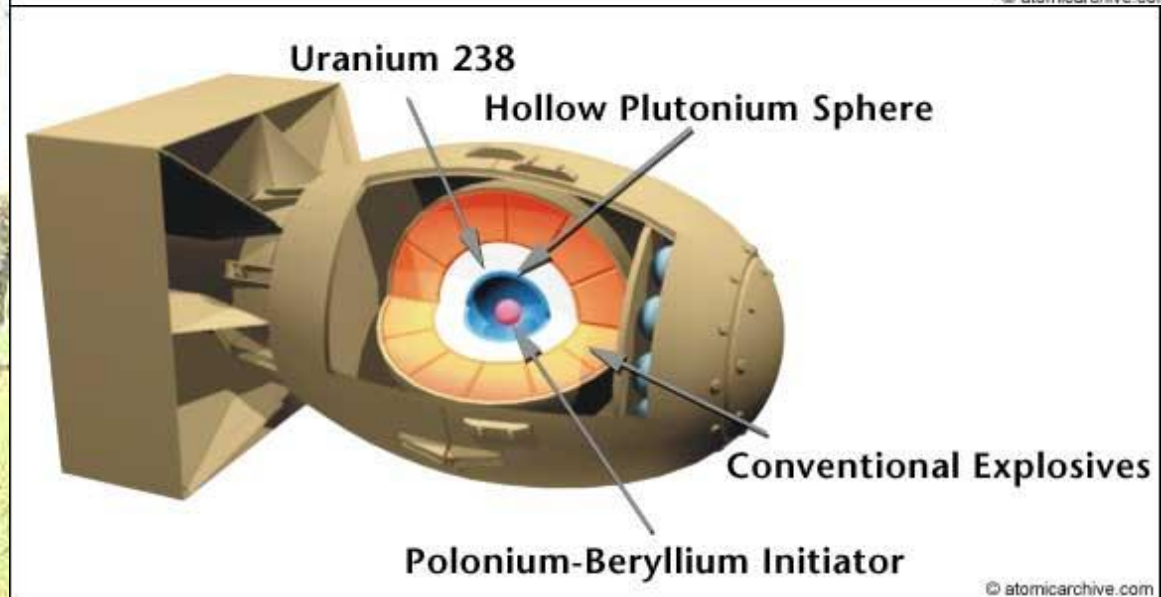
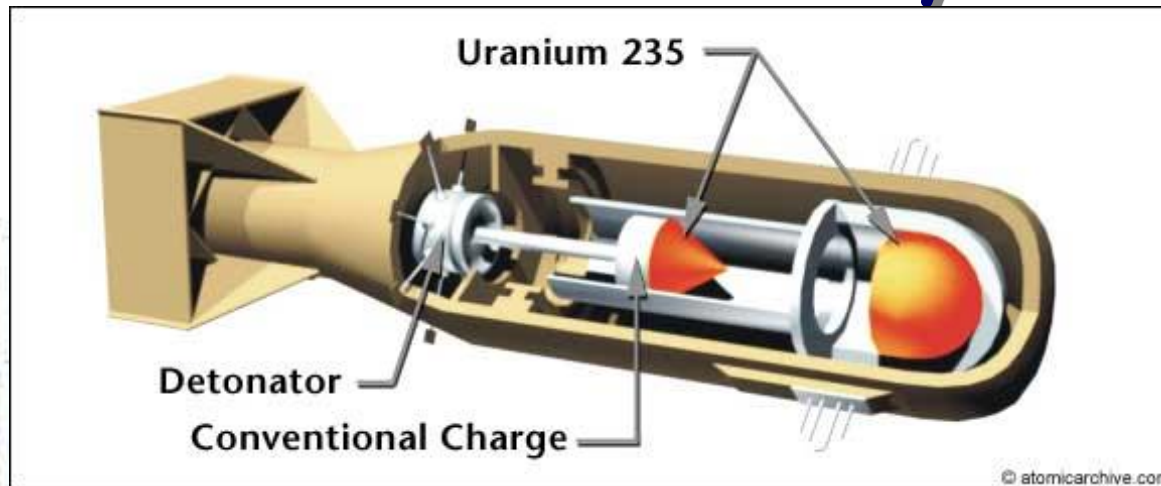


Pierwszy reaktor atomowy



Chicago Pile I (CP-I), World's First Reactor

Wykorzystanie energii rozszczepienia do celów militarnych



1945



11.XII.2018



11/21

Pierwszy prąd z energii jądrowej

W sierpniu 1951 roku uruchomiono Experimental Breeder Reactor Number One EBR-1, do produkcji plutonu oraz do badań fizycznych. W grudniu 1951 roku Połączona do obiegu chłodzenia turbina wytworzyła prąd z paliwa jądrowego. Reaktor ten jest zlokalizowany w USA w stanie Idaho około miejscowości Arco



Pierwsza elektrownia jądrowa

W 1955 roku w Fizyko Energetycznym Instytucie w Obninsku koło Moskwy uruchomiono pierwszy reaktor energetyczny – prototyp RBMK z moderatorem grafitowym i wodnym chłodzeniem. Reaktor współpracował z turbiną 5 MW



Obninsk -wyłączona 29 kwietnia 2002

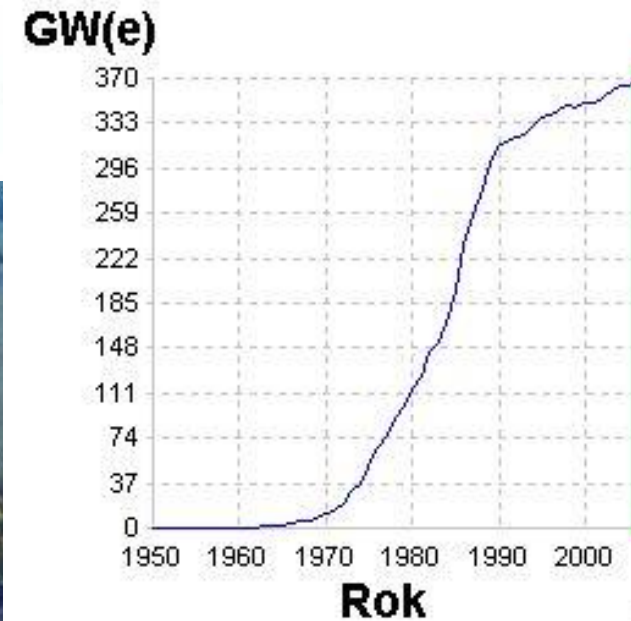


Calder Hall 1956 - 2003



Rozwój energetyki jądrowej

Czarnobyl, kwiecień 1986
Fukuskima, marzec 2011



Pożyteczne jednostki (przypomnienie)

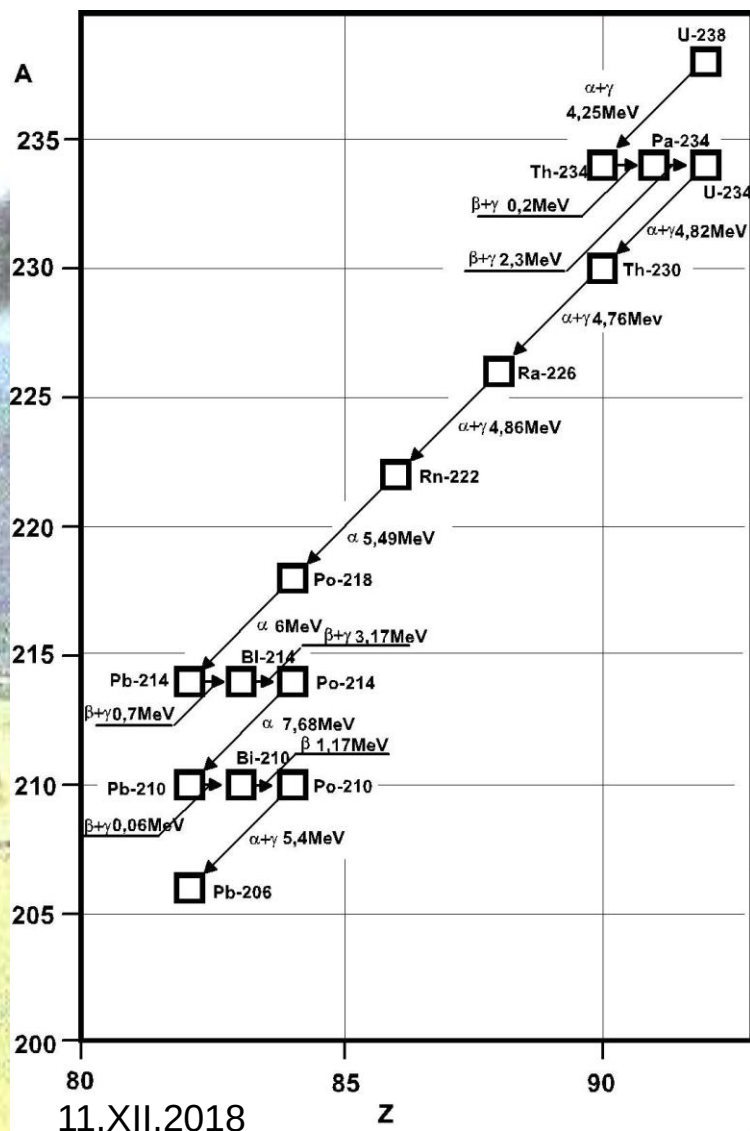
- Jednostka atomowa masy (u) – 1/12 masy atomu izotopu ^{12}C
 $= 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Masa neutronu = 1,008982 u; Masa protonu = 1,007593 u;
Masa elektronu $5,4873 \cdot 10^{-4} \text{ u}$
- Gramoatom – ilość pierwiastka, którego masa wyrażona w gramach
- jest równa masie atomowej u, np. 12,01 grama węgla
- W jednym gramoatomie znajduje się $6,02486 \cdot 10^{23}$ atomów – Stała Avogadro. Podobnie określa się masę gramocząsteczkę związku chemicznego
- Jednostka energii atomowej: eV – jest to energia, którą otrzymuje cząsteczka o ładunku elektrycznym jednego elektronu w polu elektrycznym o różnicy potencjału 1 V ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$);
jednostki pochodne: keV, MeV, GeV

Wzór Einstein'a $E = mc^2$

Jednej jednostce atomowej masy odpowiada energia 931 MeV – $1,4915 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

Energia atomu – i co z tego?

Energia promieniowania naturalnego



Przy rozpadzie 1 grama toru jest generowana energia 73,17 GJ;

Przy rozpadzie 1 grama uranu jest generowana energia 83,75 GJ;

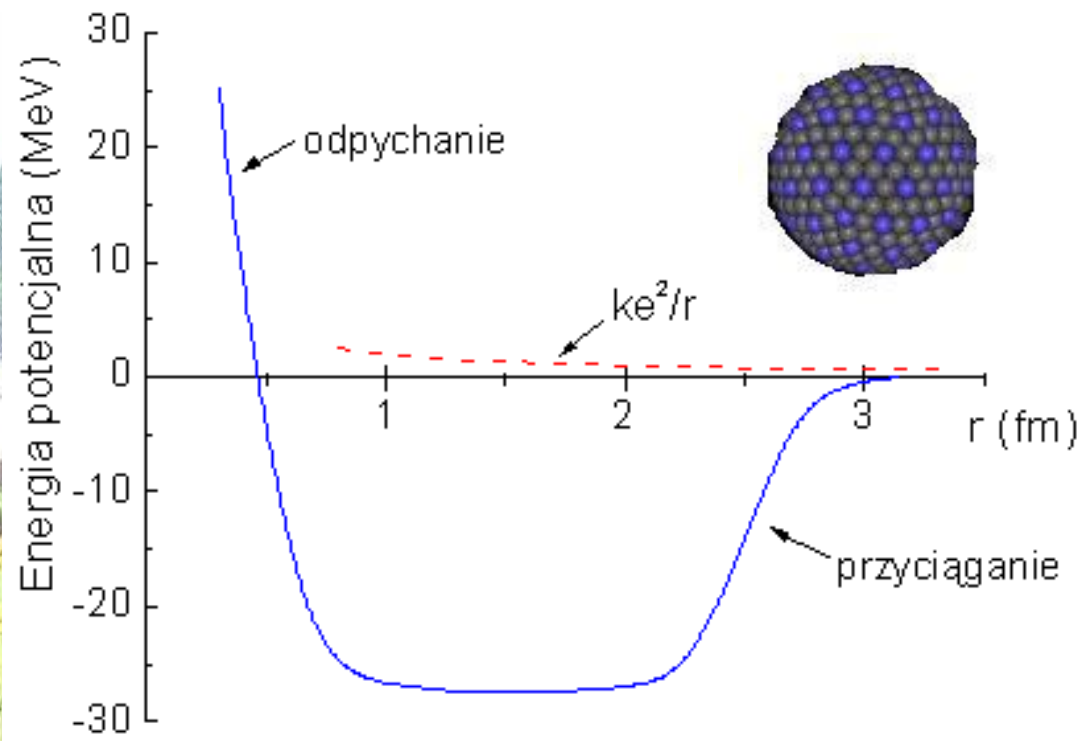
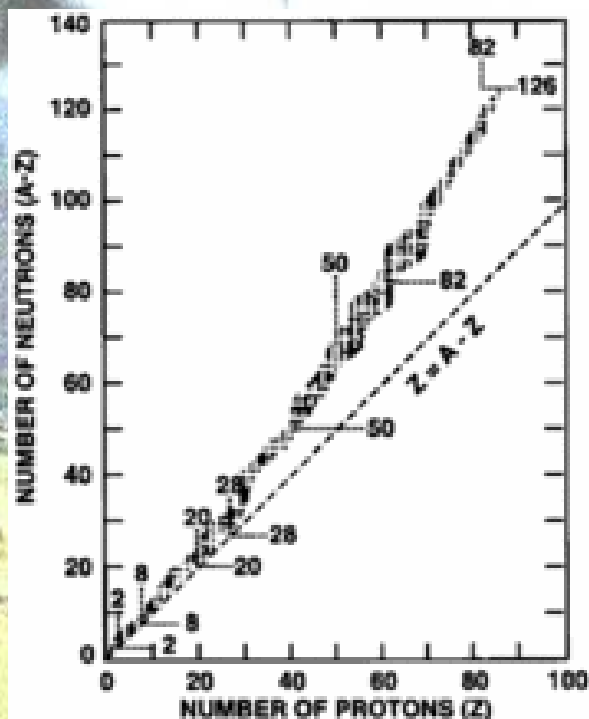
W Polsce, średnio w 1 tonie gleby znajduje się 2 gramy uranu i 7 gramów toru.

Rozpad tych pierwiastków wytworzy energię 680 GJ – równoważną spalaniu 27 ton węgla!!

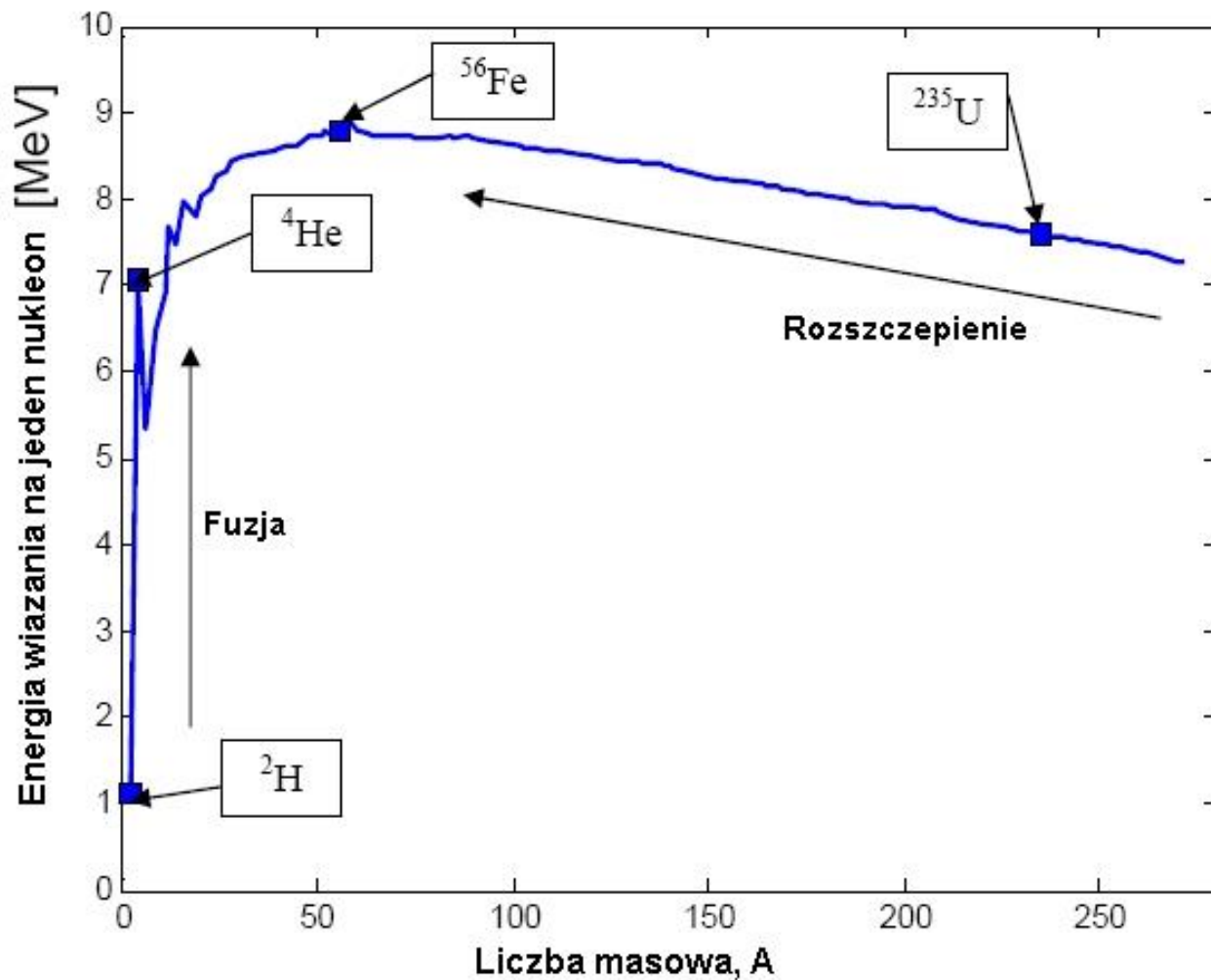
Wiązanie nukleonów w jądrze

Nukleony w jądrze są utrzymywane siłami jądrowymi oddziaływujących na niezwykle małe odległości - rzędu 10^{-18} m ($1 \text{ fm} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}$)

Jednocześnie działają siły elektrostatycznego odpychania protonów w jądrze



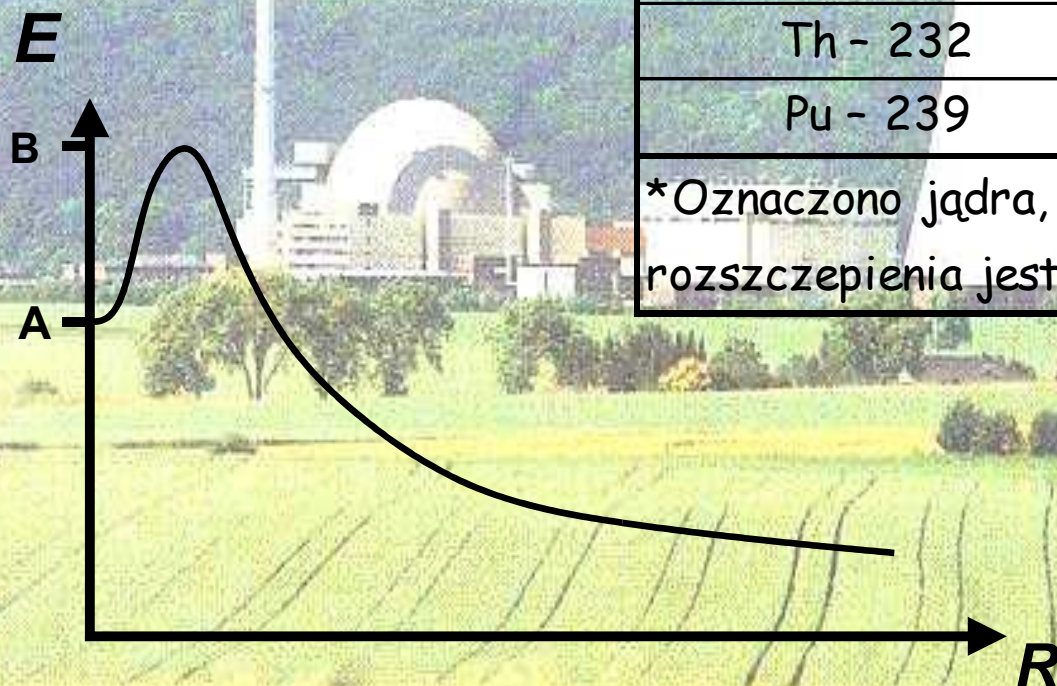
Energia wiązania nukleonu w jądrze



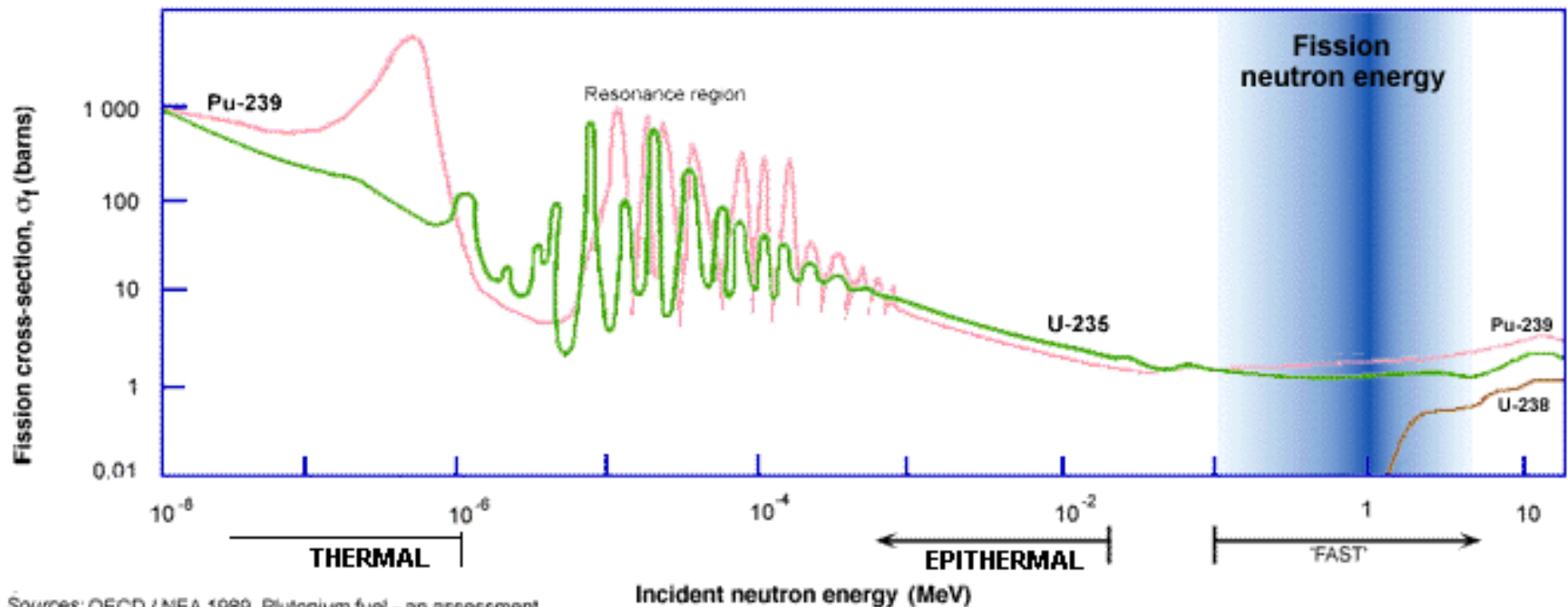
Reakcja rozszczepienia

Jądro pierwiastka	Energia wiązania na nukleon (MeV)	Energia potrzebna do rozszczepienia (MeV)
U - 238	7,57	8
U - 235	7,59	6,5*
U - 233	7,59	6,0*
Th - 232	7,6	7,8
Pu - 239	7,56	5,0*

*Oznaczono jądra, dla których energia potrzebna do rozszczepienia jest mniejsza od energii wiązania na



NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.

Taube 1974, Plutonium - a general survey.

1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

Kiedy efektywne spowalnianie?



- a) Lekkie jądra o masie zbliżonej do neutronu
- b) Nie powinna zachodzić reakcja wychwytu na jądrze tarczy

Jakie jądra - spowalniacze?

Woda	- H_2O	(pochłanianie na H)
Ciężka woda	- D_2O	(O.K. - koszty)
Grafit	- C	(ciężki, tani)
Beryl	- Be	(drogi)

Uran naturalny

0,71 % - U-235, $T_{1/2}=0,72$ mld lat

99,29 % - U-238, $T_{1/2}=4,5$ mld lat

0,0055% - U-234 produkt rozpadu U-238

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

Materiał moderatora:

- Lekkie jądra: możliwie duża strata energii neutronu przy zderzeniu;
- Duży przekrój czynny na zderzenia sprężyste;
- Mały przekrój czynny na absorpcję.

Woda

- H_2O ;

Ciężka woda

- D_2O ;

Grafit

- C

Beryl

- Be

Jakie warunki musi spełnić jednorodny układ złożony z uranu i moderatora aby otrzymać w nim samopodtrzymującą reakcję łańcuchową?

Reaktor jądrowy

$$\text{Produkcja} - (\text{Absorpcja} + \text{Ucieczka}) = \frac{dn}{dt}$$

Produkcja = liczba rozszczepień * liczba neutronów na rozszczepienie

Strumień neutronów = $n v$, gdzie n - gęstość neutronów, v - prędkość

W reaktorze istnieje całe widmo energii neutronów - $n(E, r)$

Dlatego definiujemy strumień neutronów jako funkcję energii neutronów:

$$\phi(E, r) = n(E, r) \sqrt{\frac{2E}{m_n}}$$

Energia z atomu

Energia 1 J (1 w*sek)

- $3,3 \cdot 10^{10}$ rozszczepień
- $1,6 \cdot 10^{18}$ reakcji atomu węgla z dwoma atomami tlenu

Do wytworzenia 145 TWh energii elektrycznej wytwarzanej z paliw stałych w Polsce rocznie wykorzystuje się 50 Mton węgla kamiennego i ponad 60 Mton węgla brunatnego.

W wyniku spalenia takiej ilości węgla powstaje około 140 Mton CO_2 .

Do wytworzenia takiej ilości energii elektrycznej potrzeba około 360 ton paliwa jądrowego uzyskanego z 3 500 ton uranu naturalnego.

Energetyka jądrowa

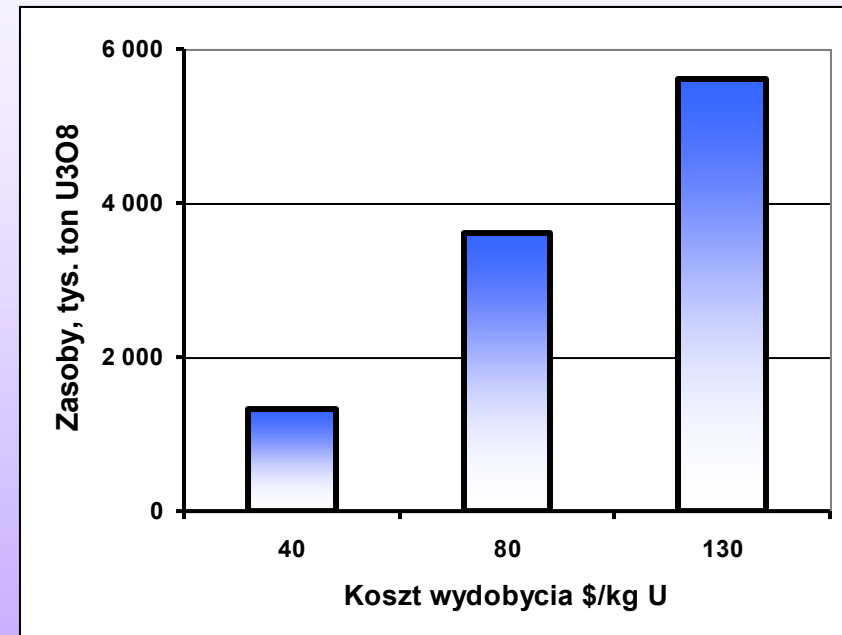
Jądrowy blok energetyczny – reaktor jądrowy z turbiną i generatorem (**Nuclear power unit**)

Elektrownia jądrowa – jeden lub kilka jądrowych bloków energetycznych (**Nuclear power plant**) umiejscowionych na wydzielonym obszarze z wspólną infrastrukturą techniczną.

Światowe rozpoznane zasoby uranu - mln ton U_3O_8

<80 \$/kgU <130 \$/kgU

Australia	1,074	1,910
Kazachstan	0,662	0,957
Kanada	0,439	0,532
Poł. Afryka	0,298	0,369
Namibia	0,213	0,287
Rosja	0,158	0,218
Brazylia	0,143	0,309
USA	0,102	0,355
Uzbekistan	0,093	0,153
Pozostali	0,480	0,526
Ogółem	3,622	5,834



Wydobycie uranu

- Przy wydobyciu miedzi - Australia - Olympic Dam;
- Przy wydobyciu złota - Rep. Południowej Afryki;
- Kopalnie odkrywkowe - 27%;
- Kopalnie głębokie ~ 50%;
- Ługowanie głębokie In Situ Leach (ISL) - 20%

Wydobyta ruda uranu jest rozdrabniana i przy pomocy kwasu azotowego jest wydobywany uran w postaci U_3O_8 tzw. yellowcake.

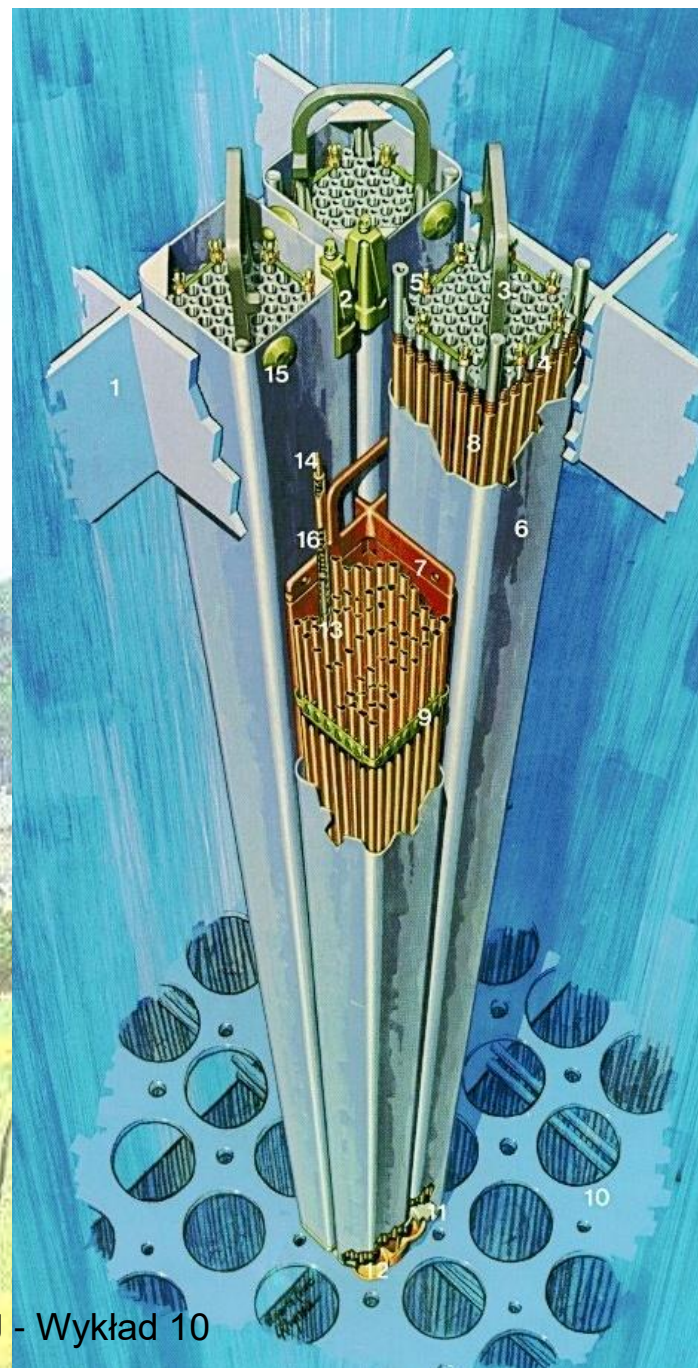
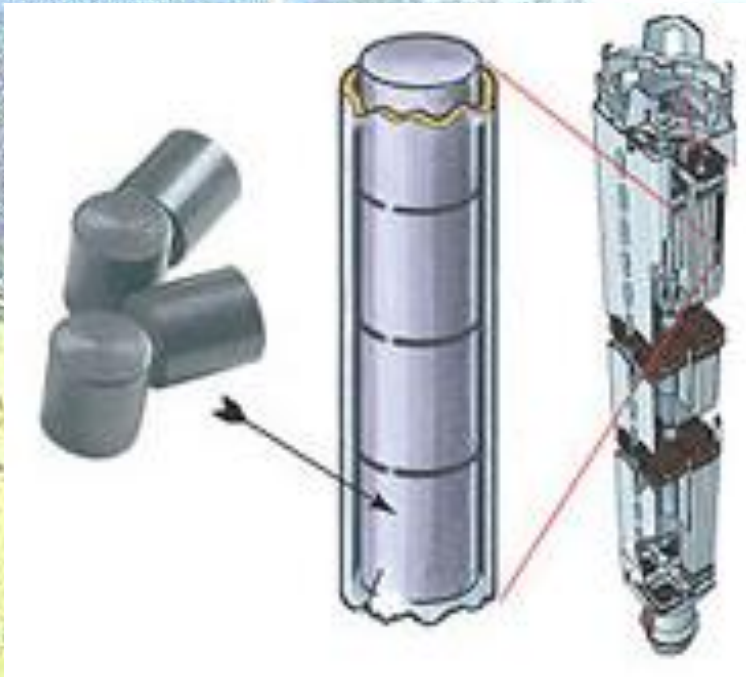
W tej postaci (stabilnej) uran jest transportowany do zakładów wzbogacania



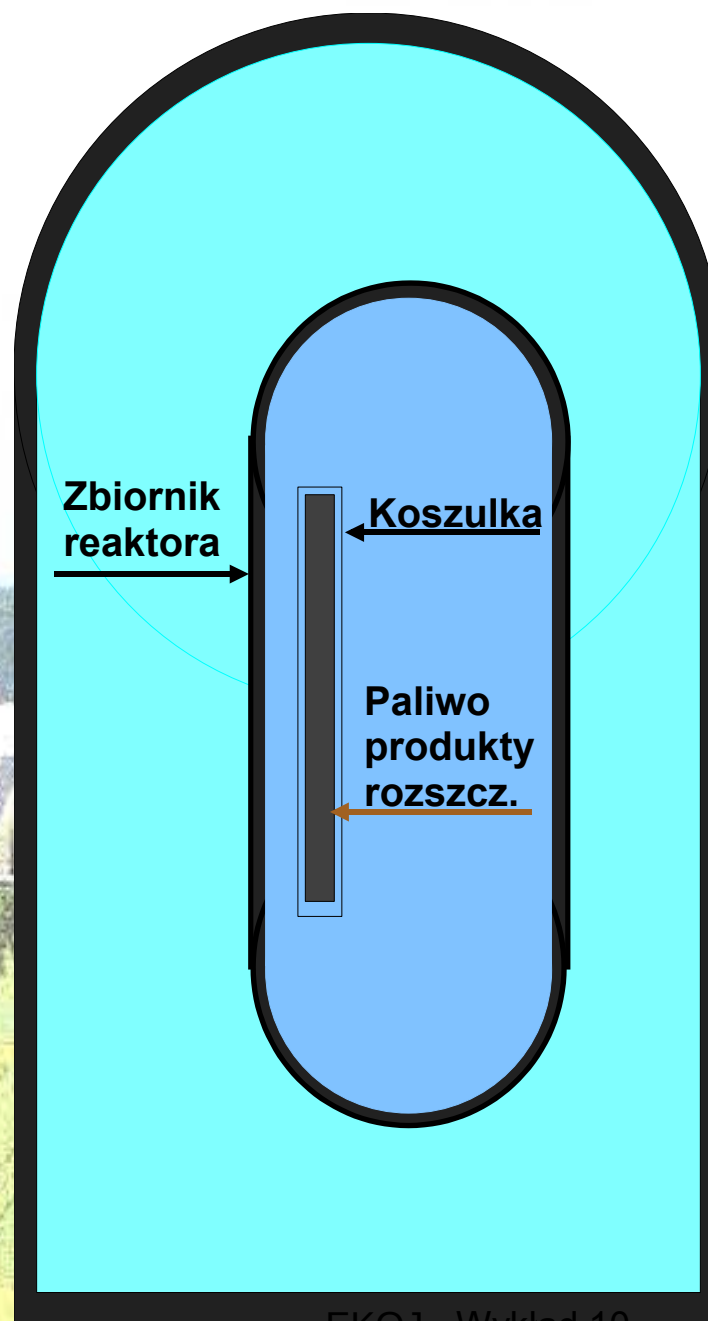
Kasety paliwowe

Temperatura topnienia
Cyrkonu $T=1900^{\circ}\text{C}$

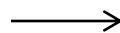
Pręty paliwowe



Bariery bezpieczeństwa



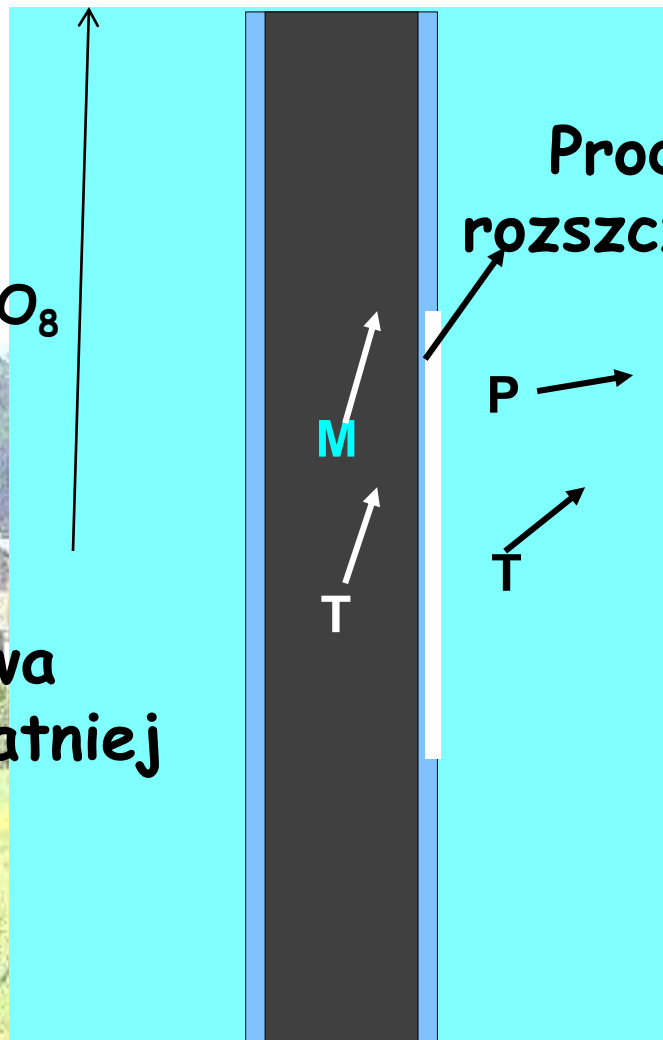
Gwałtowny wzrost
mocy reaktora



Wrzenie chłodziwa
Pogorszenie odbioru
ciepła



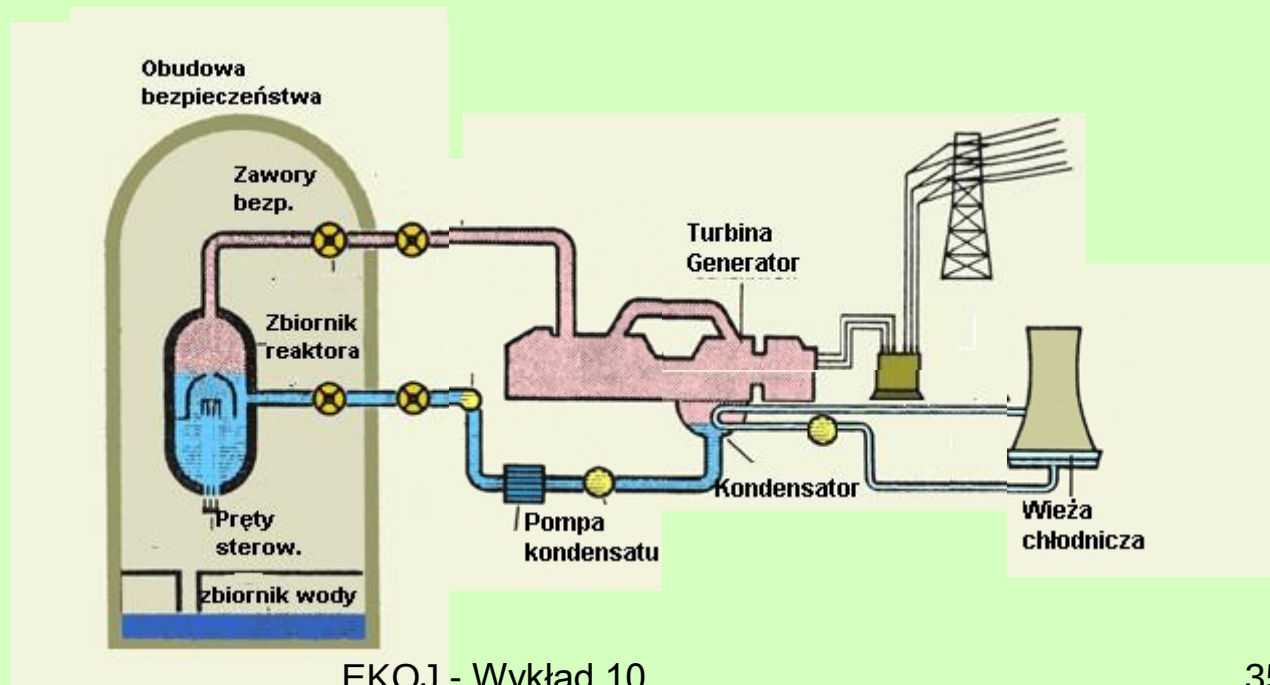
Awaria
reaktywnościowa
- przyrost dodatniej
reaktywności



Uszkodzenie
koszulki
paliwa !

Elementy jądrowego bloku energetycznego (LWR -Light Water Reactor)

- Turbina parowa i generator;
- Kondensator i układ chłodzenia obiegu wtórnego;
- Układ zasilania kondensatem;
- Jądrowy układ wytwarzania pary - reaktor PWR;
- Jądrowy układ wytwarzania pary - reaktor BWR



Reakcja rozszczepienia

