

Kopiowanie, rozpowszechnianie, przedruk i publikacja całości lub części w jakiegokolwiek formie, do celów komercyjnych lub prywatnych, bez zgody autora zabronione

Siła atomu

czyli energetyka jądrowa w



Arkadiusz Bubak

(arkadiusz.bubak@us.edu.pl)

Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań
Uniwersytet Śląski

Część prezentowanych materiałów możliwa dzięki uprzejmości poniższych organizacji:



Pierwiastek, jądro atomowe



X – symbol chemiczny pierwiastka

A – liczba masowa (liczba nukleonów w jądrze atomowym) → *ang. mass number, atomic m.n., nucleon number*

Z – liczba atomowa (liczba protonów w jądrze atomowym) → *ang.* atomic number, proton number

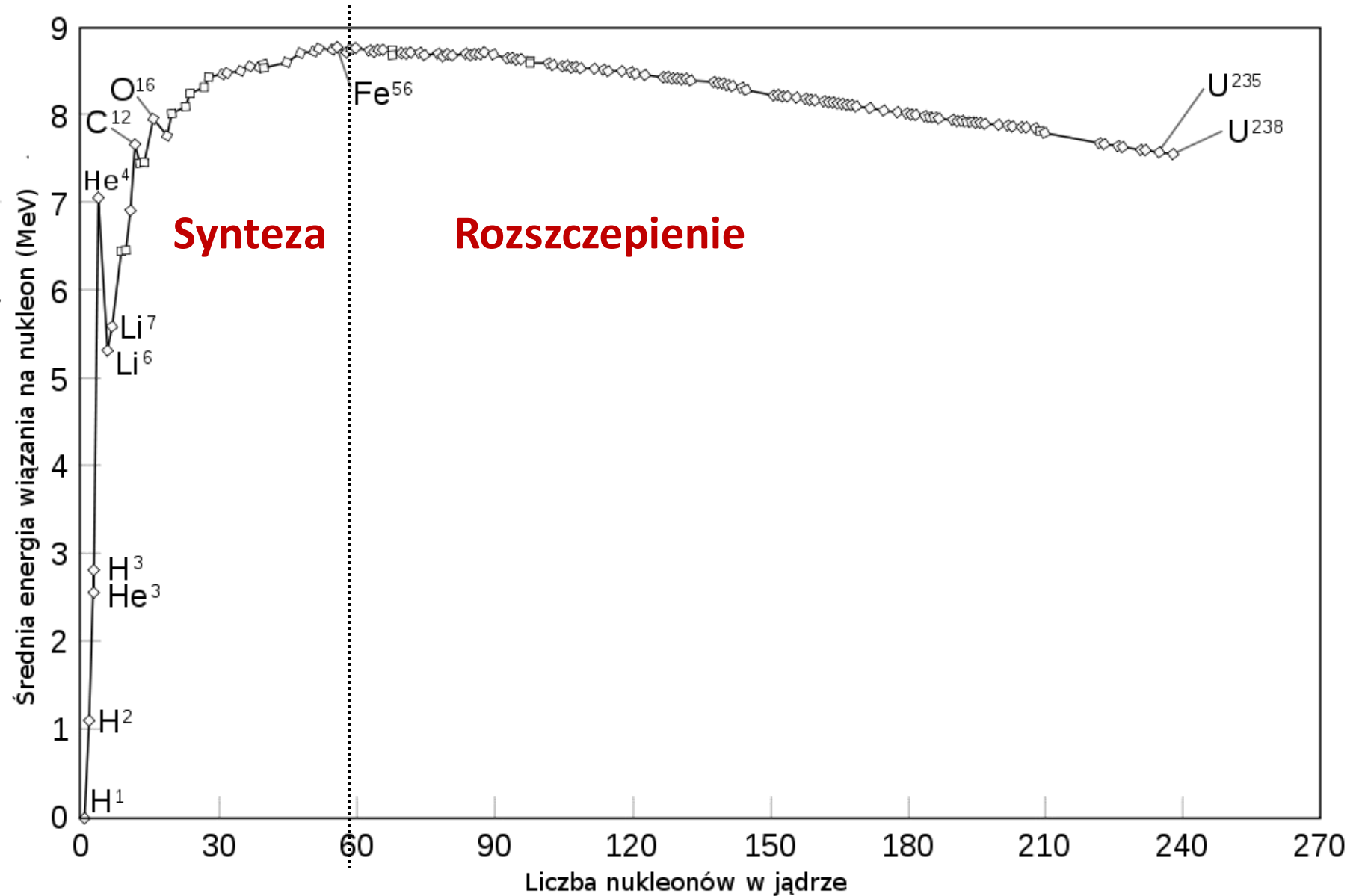
$N = A - Z$ liczba neutronów w jądrze atomowym

Symbole pierwiastków pochodzą od ich nazw łacińskich

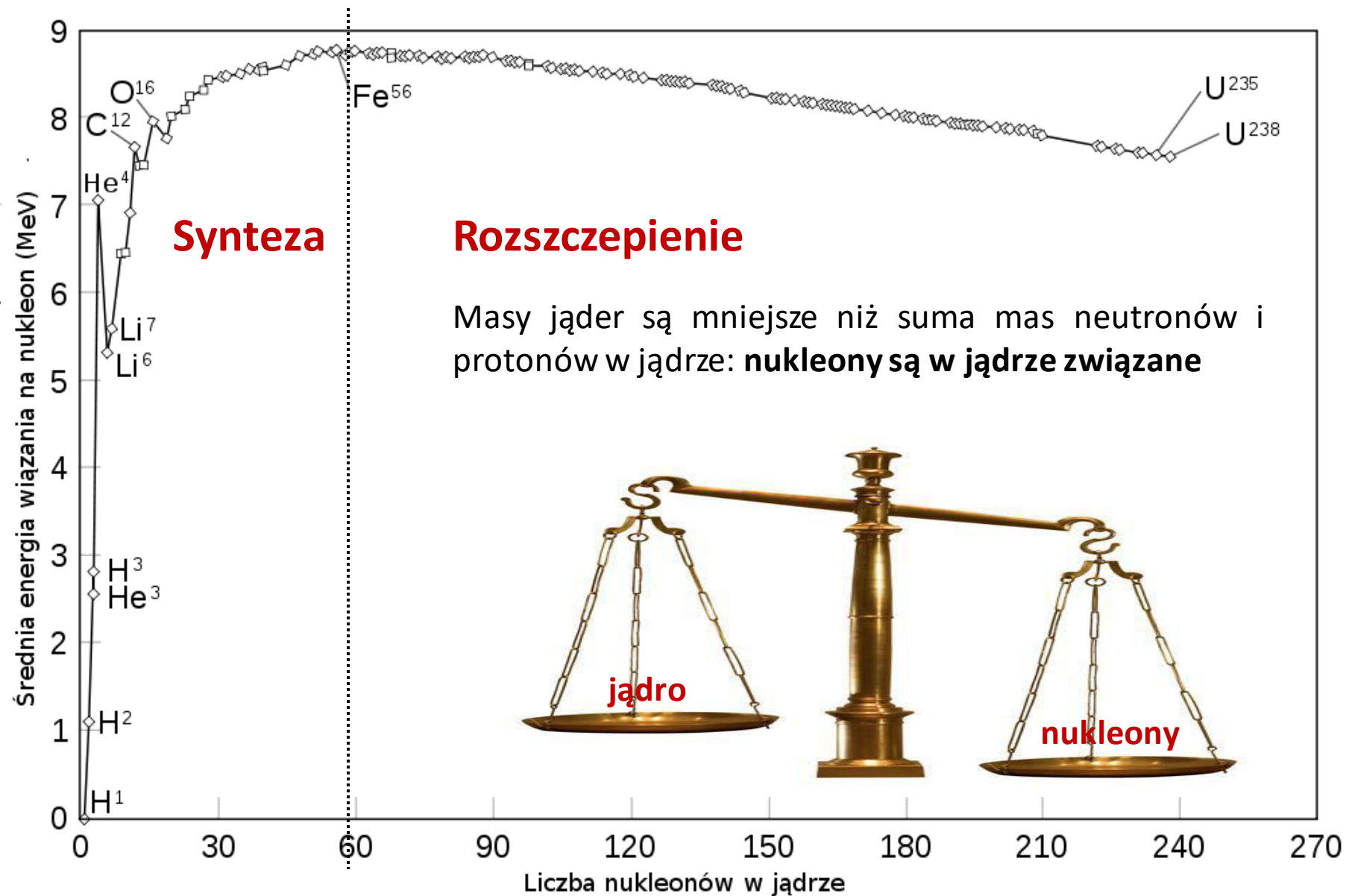
H – wodór	→ łac. Hydrogenium	→ ang. Hydrogen
K – potas	→ łac. Kalium	→ ang. Potassium
N – azot	→ łac. Nitrogenium	→ ang. Nitrogen
Cl – chlor	→ łac. Chlorium	→ ang. Chlorine
Au – złoto	→ łac. Aurum	→ ang. Gold
Pt – platyna	→ łac. Platinum	→ ang. Platinum
Uub – Ununbium		
Ds - Darmstadtium		

[illegible]

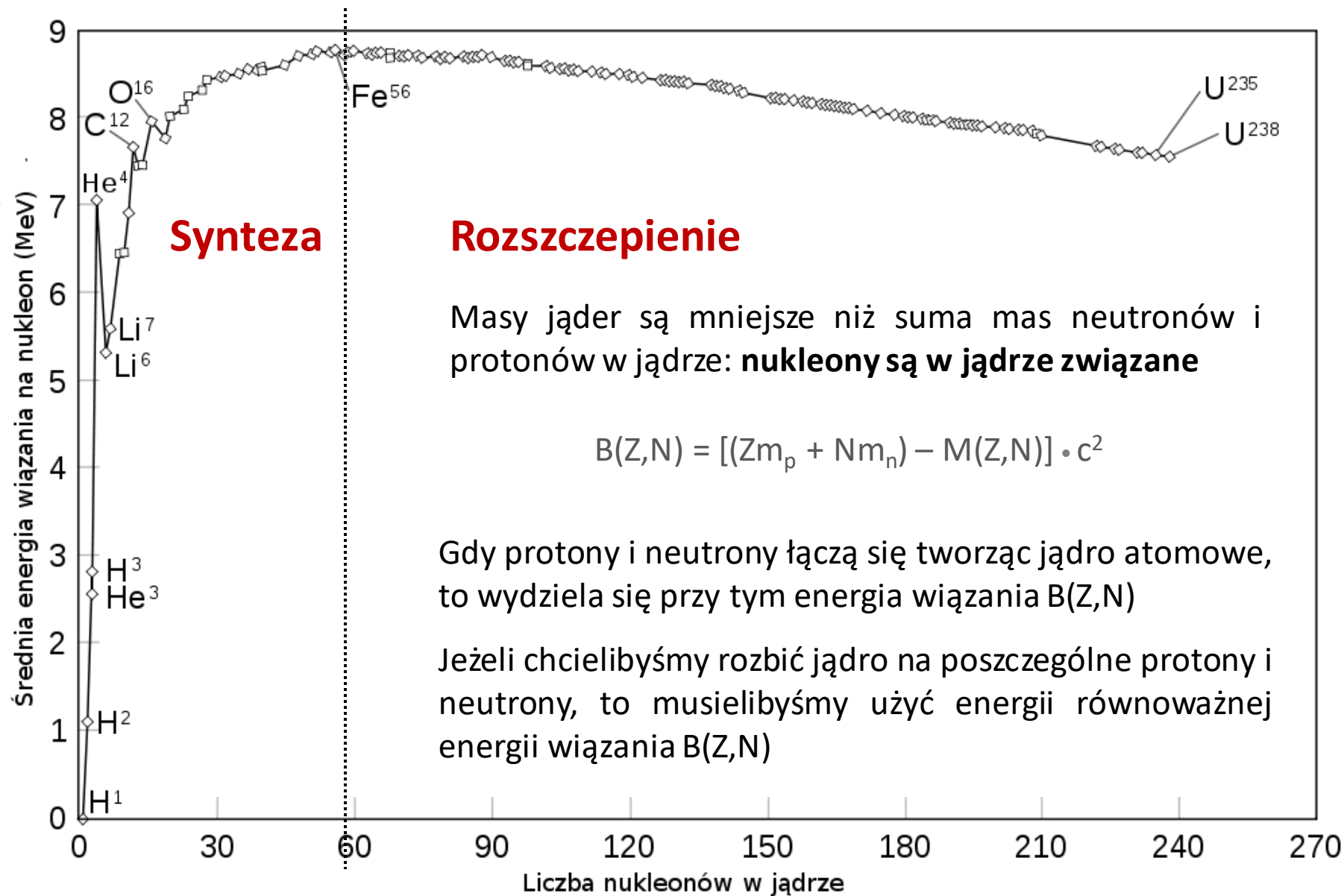
Najważniejsza krzywa wszechświata



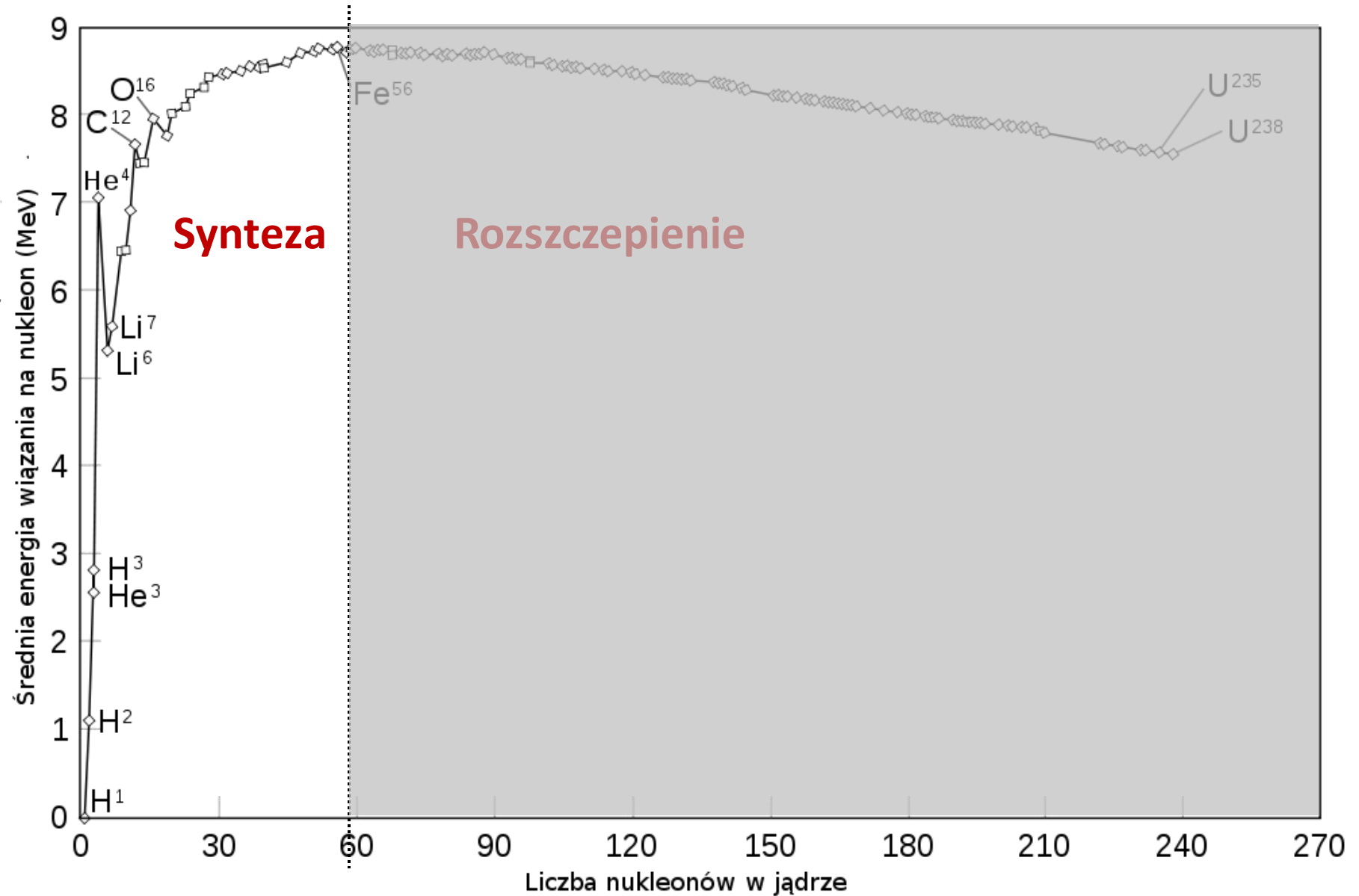
Najważniejsza krzywa wszechświata



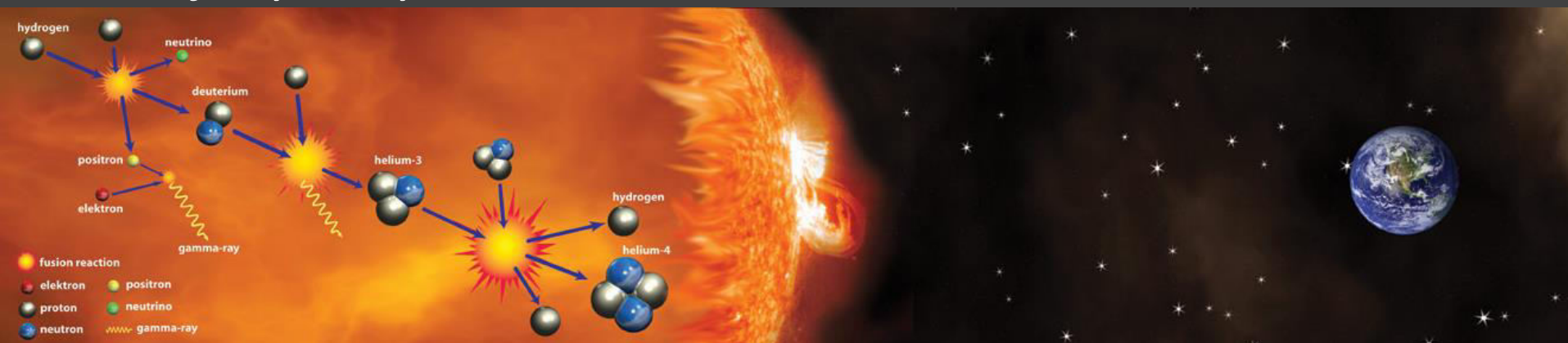
Najważniejsza krzywa wszechświata



Najważniejsza krzywa wszechświata

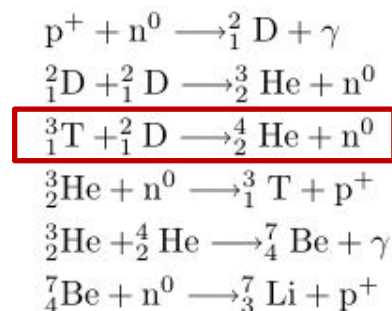
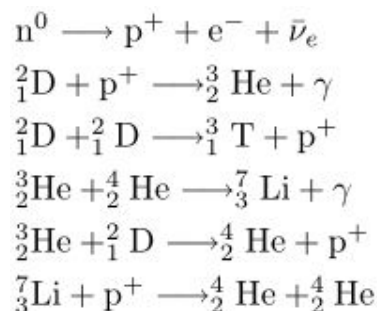
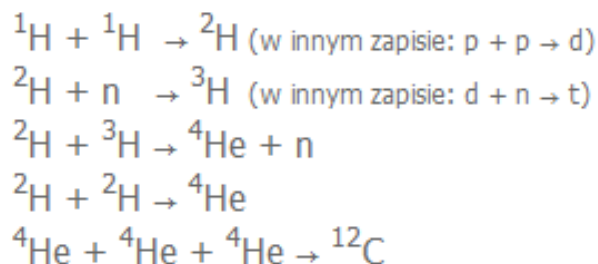


Reakcja syntezy

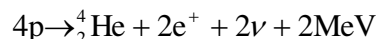


Synteza jądrowa, fuzja jądrowa, proces łączenia się jąder lekkich pierwiastków w jądra cięższych pierwiastków (nukleosynteza)

Jądra posiadają dodatni ładunek elektryczny i wzajemnie się odpychają, ich zbliżenie się do siebie na odległości, przy których przyciąganie powodowane przez oddziaływanie silne przewyżczy to odpychanie najłatwiej osiąga się w wysokich temperaturach (**większych niż 10 000 000 °C**), stąd reakcje syntezy jądrowej nazywane są reakcjami termojądrowymi



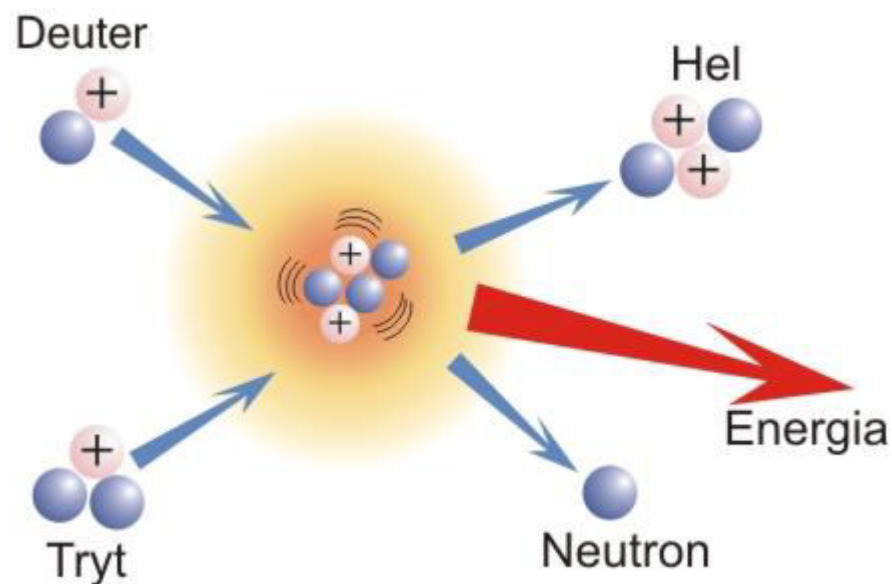
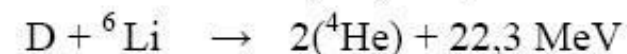
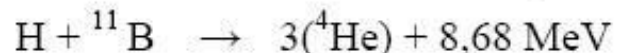
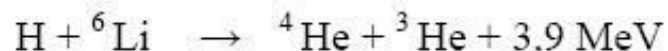
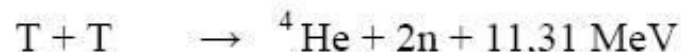
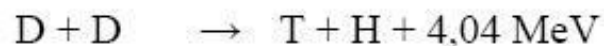
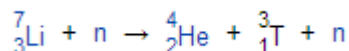
Dopiero w latach 20-tych Eddington zwrócił uwagę, że źródłem energii w gwiazdach mogą być reakcje jądrowe. W **1937** roku Bethe, Weizsäcker, Critchfield podali teorię produkowania energii w gwiazdach, wg. następującego schematu



Reakcja syntezy

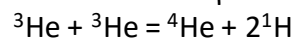
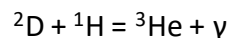
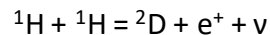
Deuter jest nieradioaktywnym izotopem występującym w wodzie morskiej (średnio 35 g deuteru w każdym metrze sześciennym wody)

Tryt nie występuje w sposób naturalny na Ziemi, ale może być produkowany z litu (lekkiego, łatwo dostępnego metalu)

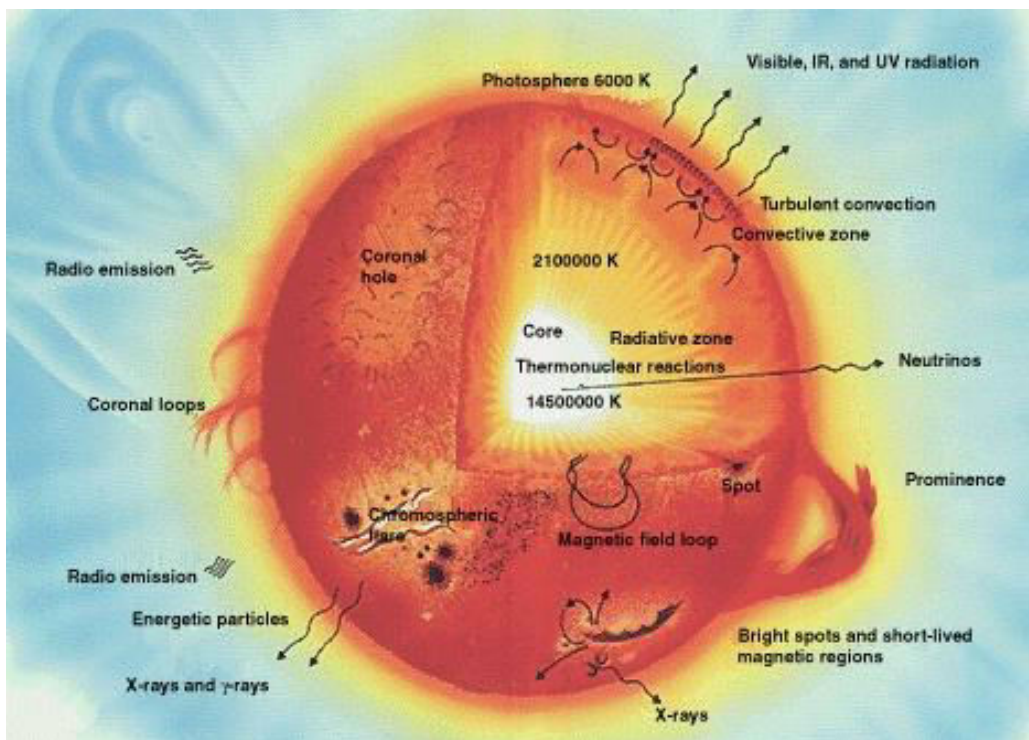


Reakcja syntezy

Cykl protonowy



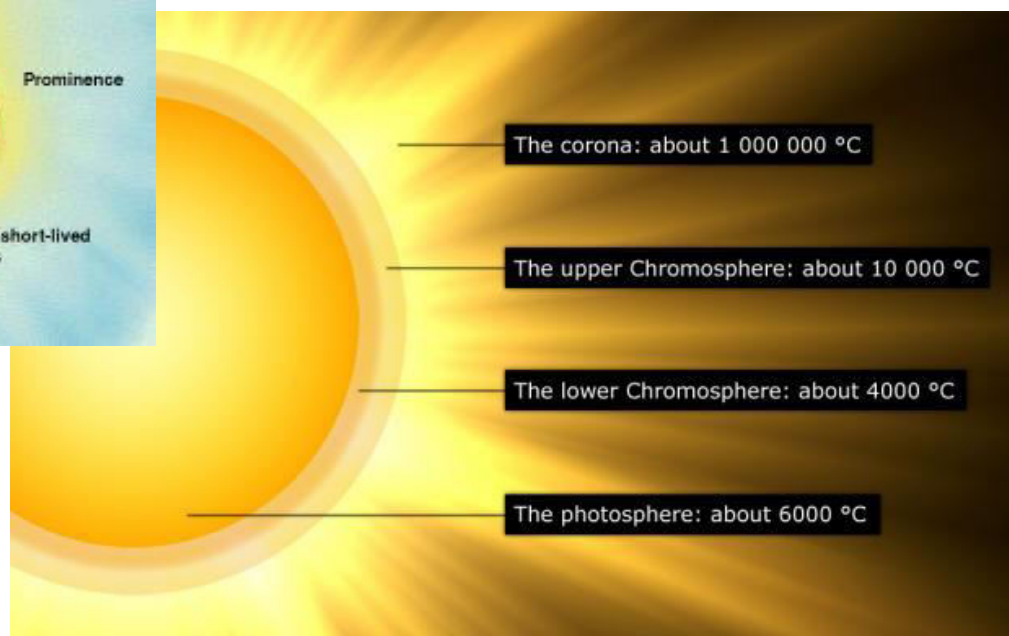
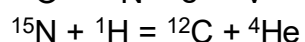
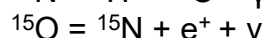
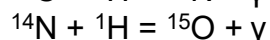
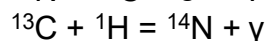
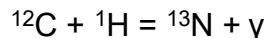
co daje w sumie : $4{}^1\text{H} = {}^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\gamma + 2\nu$ (wydzielona energia **26,7 MeV**)



Dla temperatur :

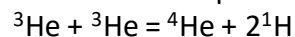
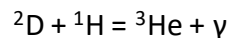
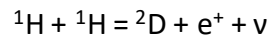
- $T < 10^7 \text{ K}$ - przeważa cykl pp
 - ppl: $10^7 < T < 1,4 \cdot 10^7 \text{ K}$
 - pplI: $1,4 \cdot 10^7 < T < 2,3 \cdot 10^7 \text{ K}$
 - pplII: $T < 2,3 \cdot 10^7 \text{ K}$
- $T > 20 \cdot 10^6 \text{ K}$ - przeważa cykl CNO

Cykl CNO

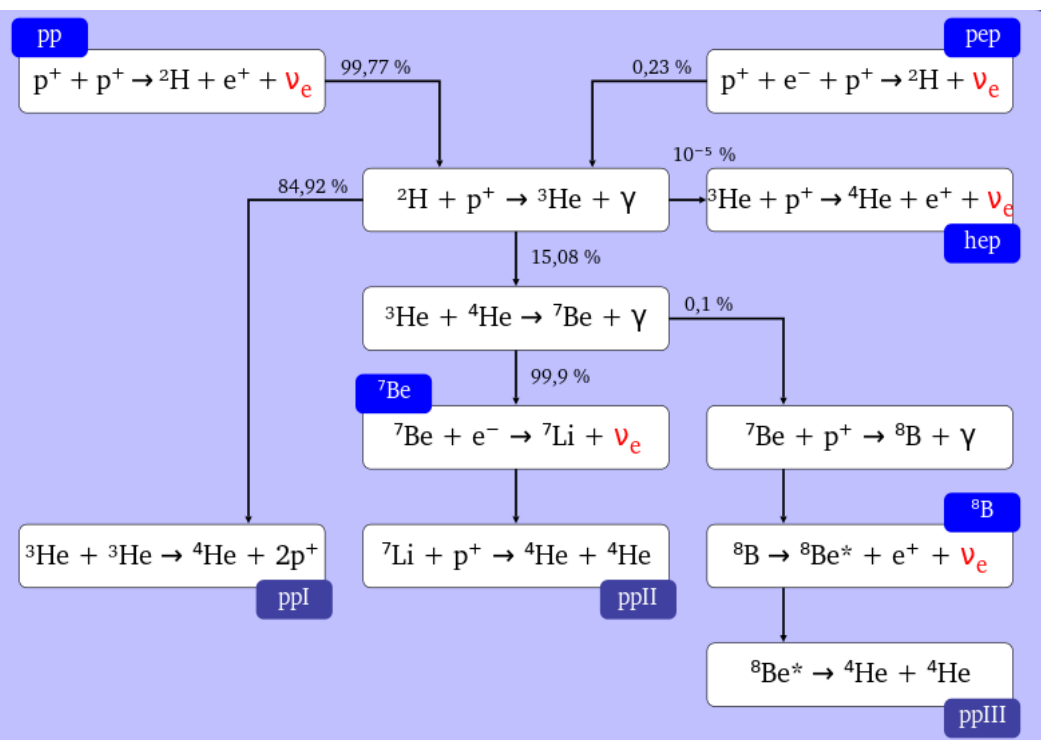


Reakcja syntezy

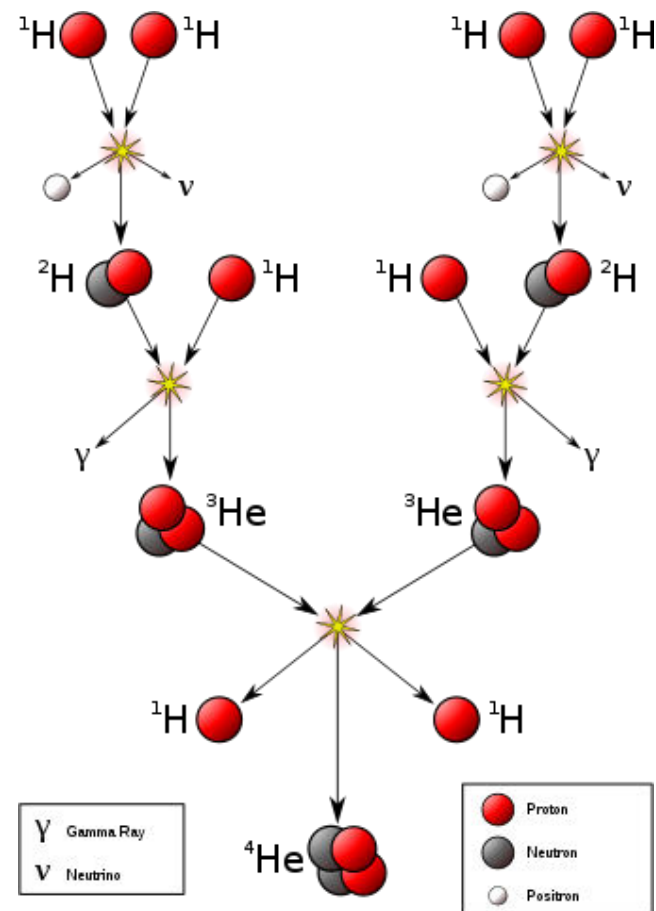
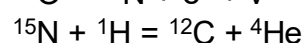
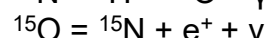
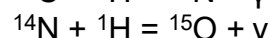
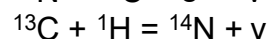
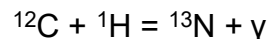
Cykl protonowy



co daje w sumie : $4{}^1\text{H} = {}^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\gamma + 2\nu$ (wydzielona energia **26,7 MeV**)

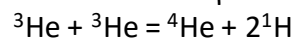
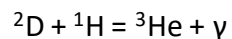
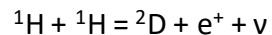


Cykl CNO

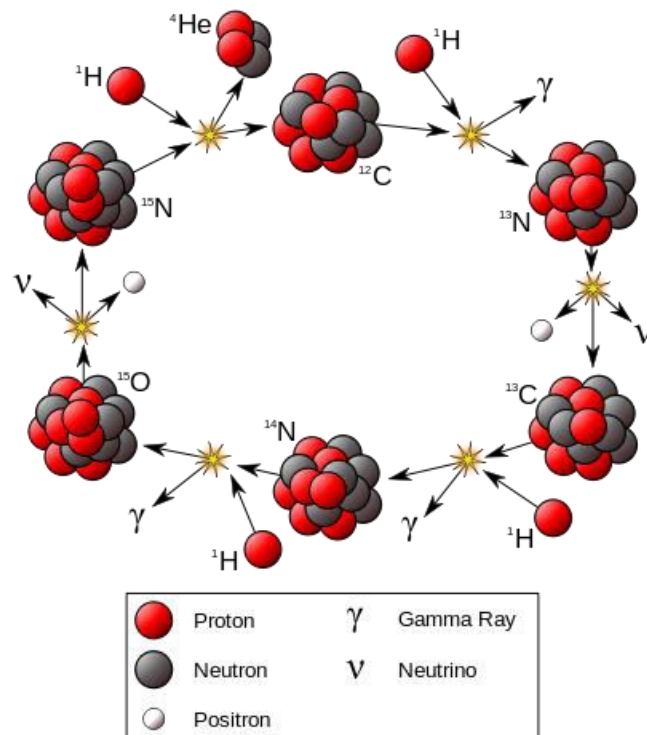


Reakcja syntezy

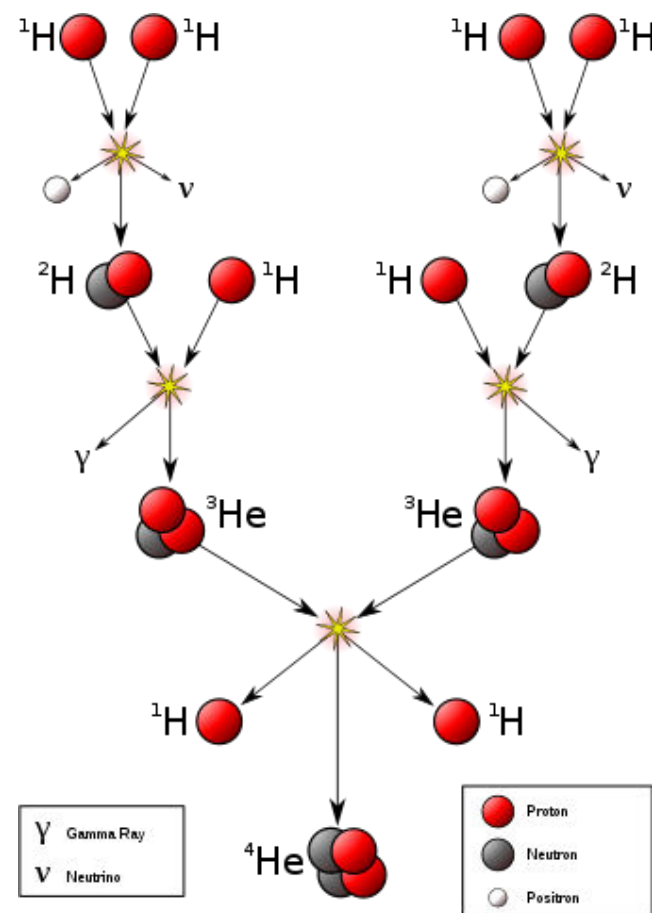
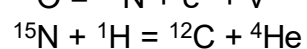
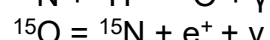
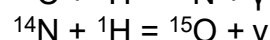
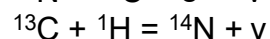
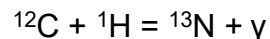
Cykl protonowy



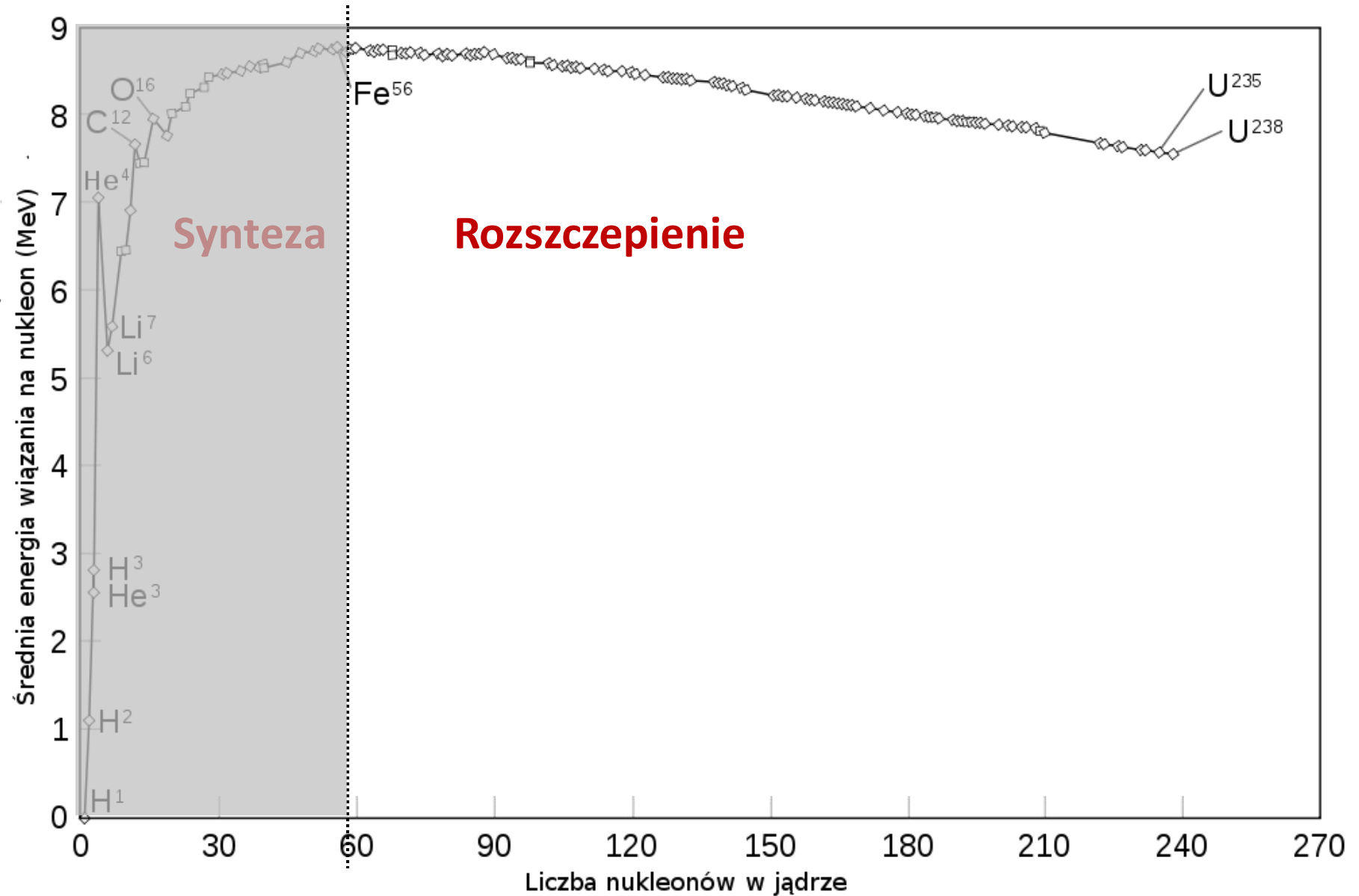
co daje w sumie : $4{}^1\text{H} = {}^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\gamma + 2\nu$ (wydzielona energia **26,7 MeV**)



Cykl CNO



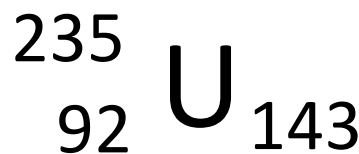
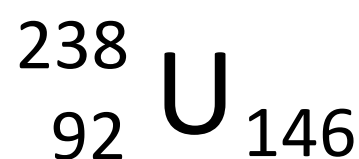
Najważniejsza krzywa wszechświata



Liczba masowa A jest sumą liczby protonów Z i neutronów N

- dla uranu $Z = 92$

$$A = Z + N$$



Izotopy uranu będące podstawowym materiałem energetyki jądowej

iso	NA	half-life
${}^{232}\text{U}$	syn	68.9 y
${}^{233}\text{U}$	syn	159,200 y
${}^{234}\text{U}$	0.0054%	245,500 y
${}^{235}\text{U}$	0.7204%	7.038×10^8 y
${}^{236}\text{U}$	trace	2.342×10^7 y
${}^{238}\text{U}$	99.2742%	4.468×10^9 y

Wiek Ziemi: $4,543 \times 10^9 \pm 1\%$ lat

Reakcja rozszczepienia

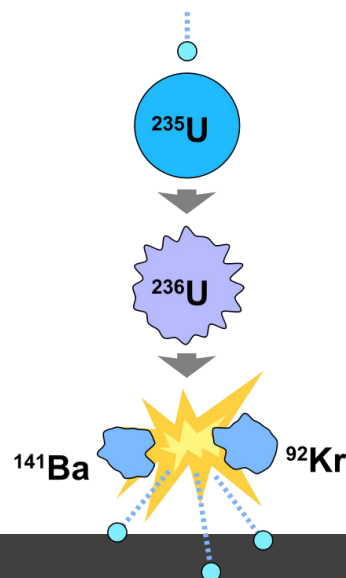
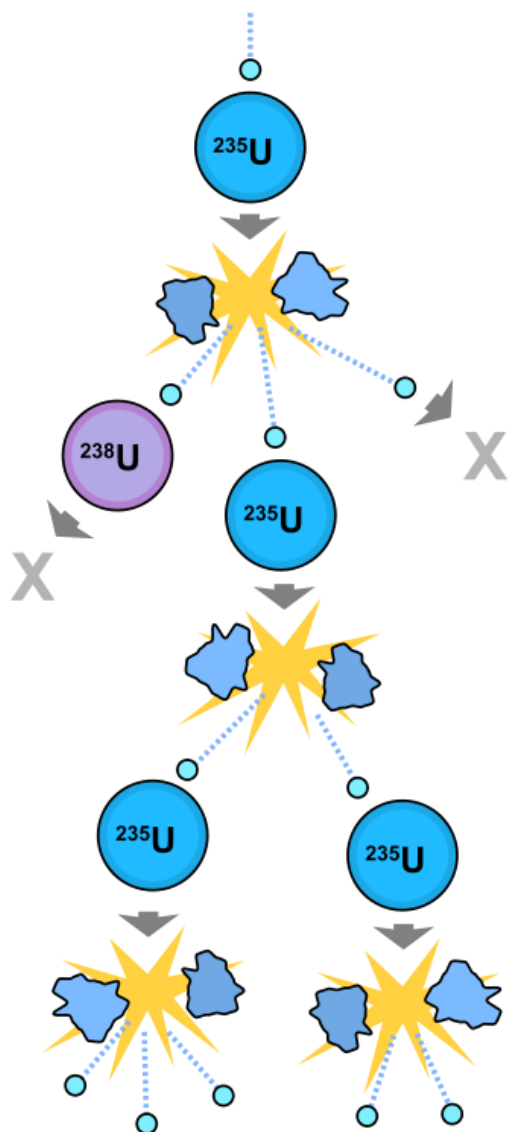
1



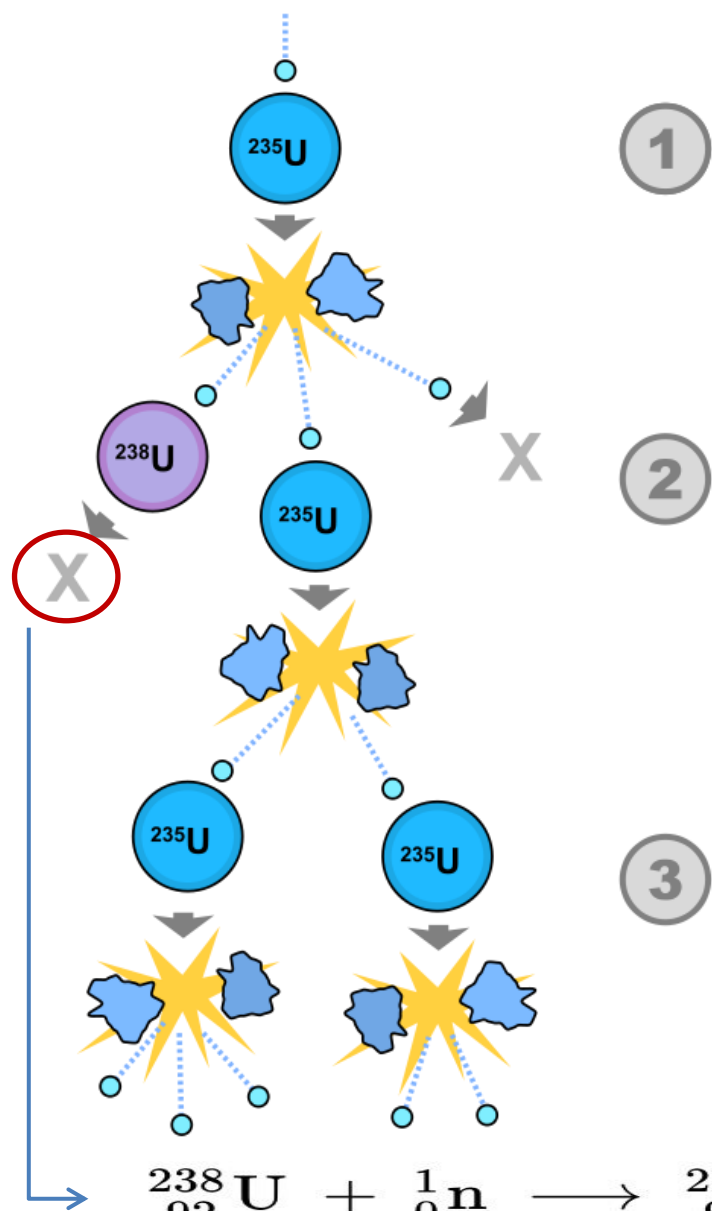
2

Całkowita wyzwolona energia pochodząca z różnicy energii wiązania jąder przed rozszczepieniem i po rozszczepieniu wynosi $\sim 200 \text{ MeV/1}$ rozszczepienie

3



Reakcja rozszczepienia



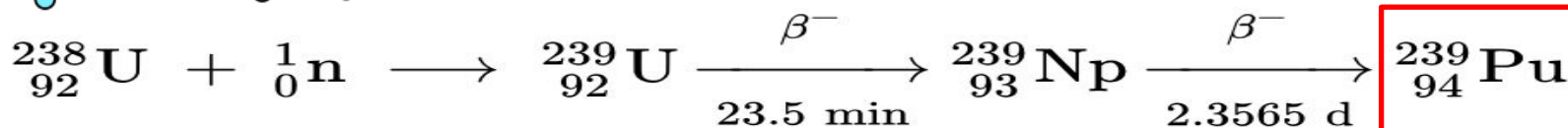
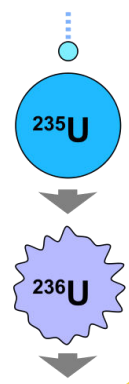
1



2

Całkowita wyzwolona energia pochodząca z różnicy energii wiązania jąder przed rozszczepieniem i po rozszczepieniu wynosi $\sim 200 \text{ MeV/1}$ rozszczepienie

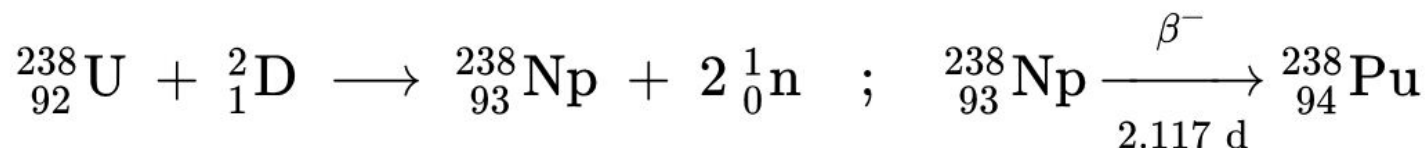
3



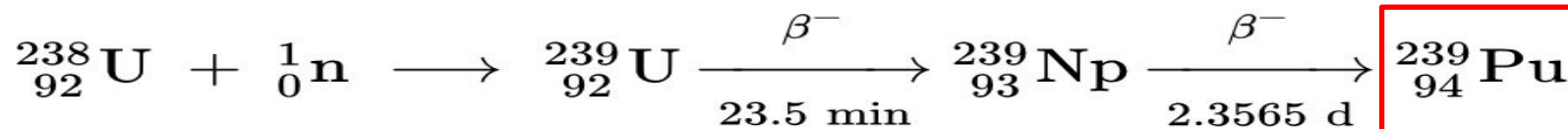
Pluton

- Opisano własności 20 izotopów plutonu o liczbie masowej od 228 do 247
- Wszystkie izotopy są nietrwałe
 - ^{244}Pu z czasem połowicznego rozpadu 80,8 miliona lat
 - ^{242}Pu : $373,3 \times 10^3$ lat
 - ^{239}Pu : $24,11 \times 10^3$ lat
 - Reszta $< 7 \times 10^3$ lat
 - 16 z nich ma czas połowicznego rozpadu $>$ od 20 minut

- ^{238}Pu (87,7 lat; 1 gram: $2,53 \times 10^{21}$ atomów, $A = 634 \text{ GBq}$, $\alpha: 5,593 \text{ MeV}$) jest dobrym źródłem energii dla radioizotopowych generatorach termoelektrycznych (0.568 W/g), które mają działać przez kilkadziesiąt lat**



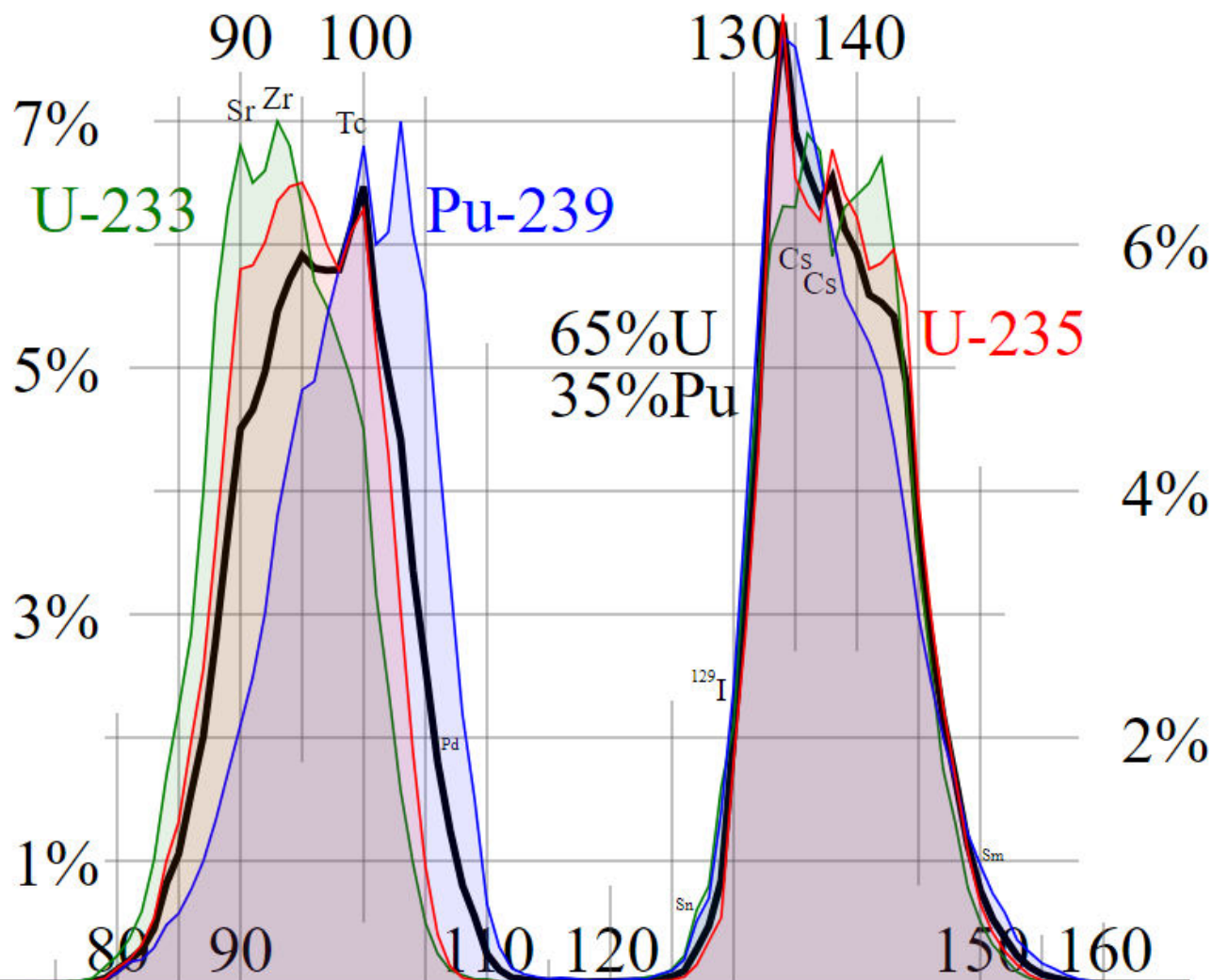
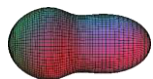
- W reaktorach komercyjnych ilość energii powstającej z wytworzonego w reaktorze plutonu jest większa niż wytworzona z rozpadu paliwa pierwotnego ^{235}U**
- Kilogram ^{239}Pu może wyzwolić taką energię jak wybuch 20×10^3 ton trotylu. Ogrzewany do temperatury 320–480 °C zmniejsza swoją objętość, wykazując anomalną rozszerzalność cieplną.



Reakcja rozszczepienia

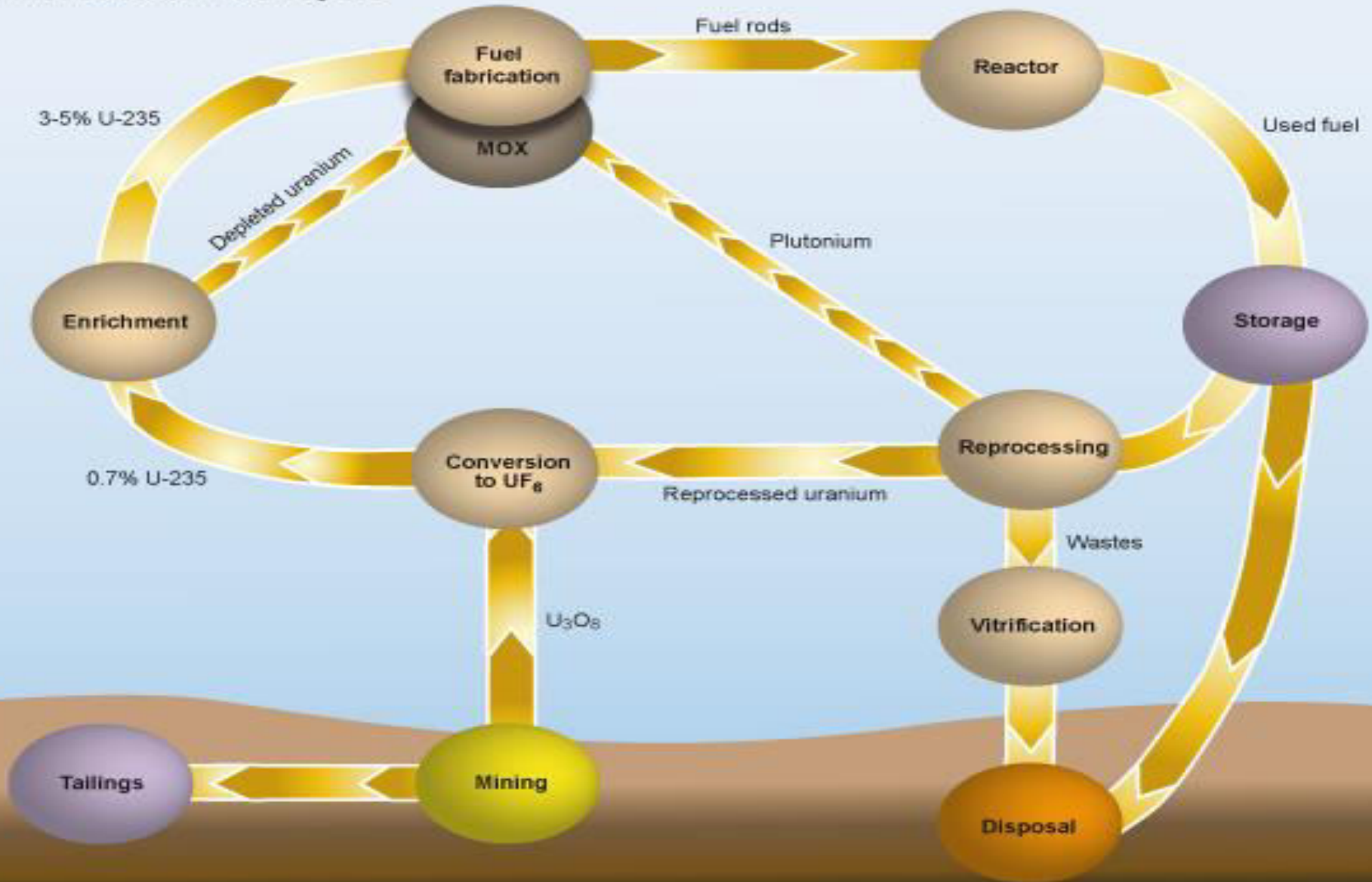
Jądro uranu:

- Deformacja oktupolowa
- Kształt „gruszki”

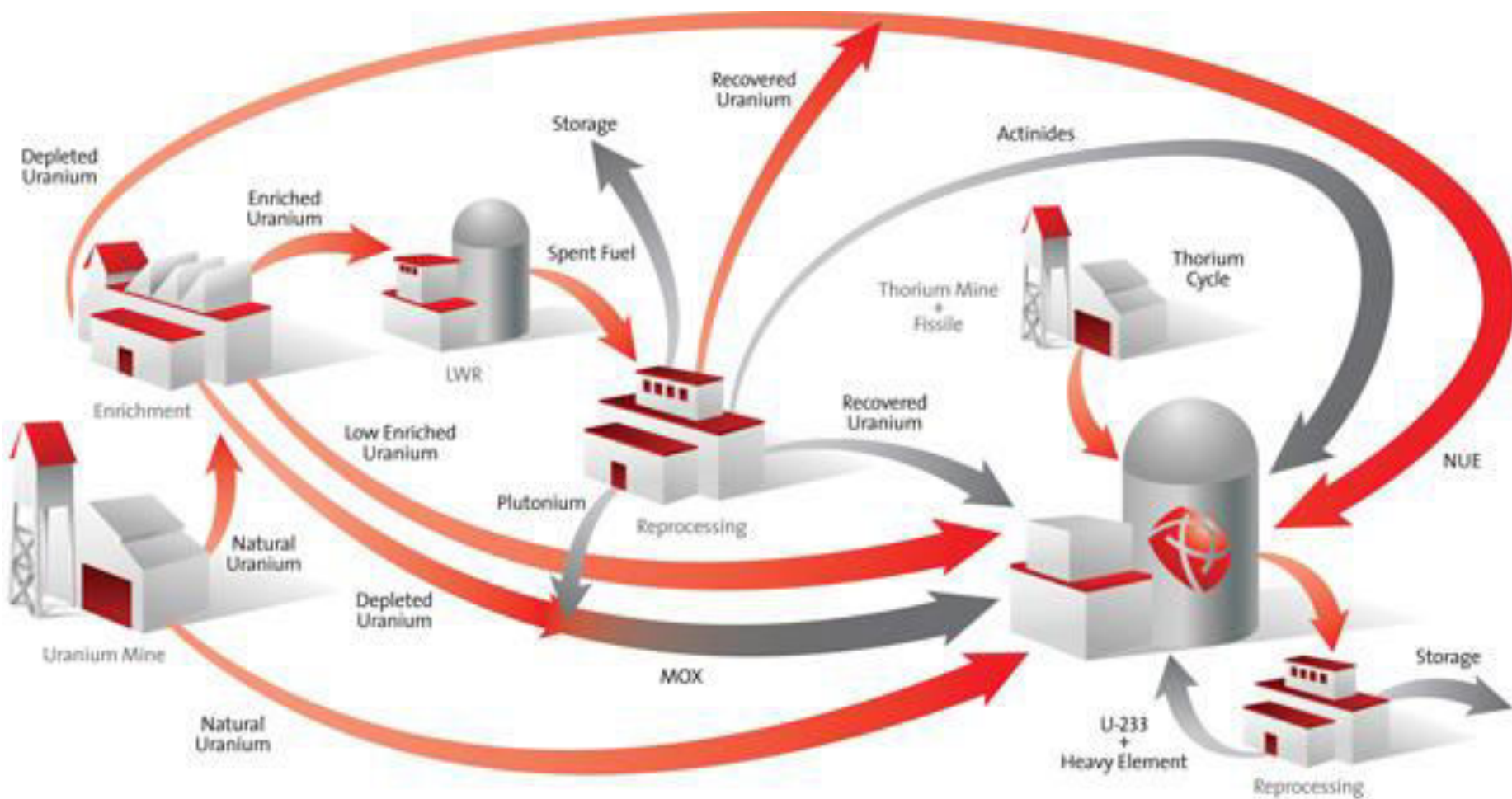


Od narodzin do śmierci...

The Nuclear Fuel Cycle



Od narodzin do śmierci...



Metody wydobywania

• Stworzenie • **Wydobycie** • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

3 główne metody wydobywania:

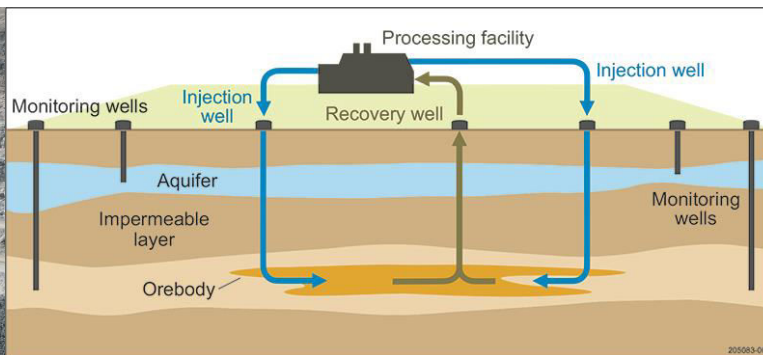
- Odkrywkowa → 24% (2007), 19,9% (2012)
- Głębiniowa → 40% (2007), 26,2% (2012)
 - czyli typowa kopalnia, podobna do polskich kopalni węgla kamiennego na Śląsku
- Otworowa, inaczej trawienia podziemnego (ISL - In Situ Leaching) → 26% (2007), 44.9% (2012)
 - polega na ługowaniu, upłynnianiu skały i wypompowywaniu jej na powierzchnię
- Jako produkt pochodny → 10%

3 mg/ton woda morska

2-10 mg/kg skały

3 g/ton w gleba (10 do 30 g/t w granicie)
oceany: 10^{13} kg

Ziemia do 25 km w głąb: 10^{17} kg



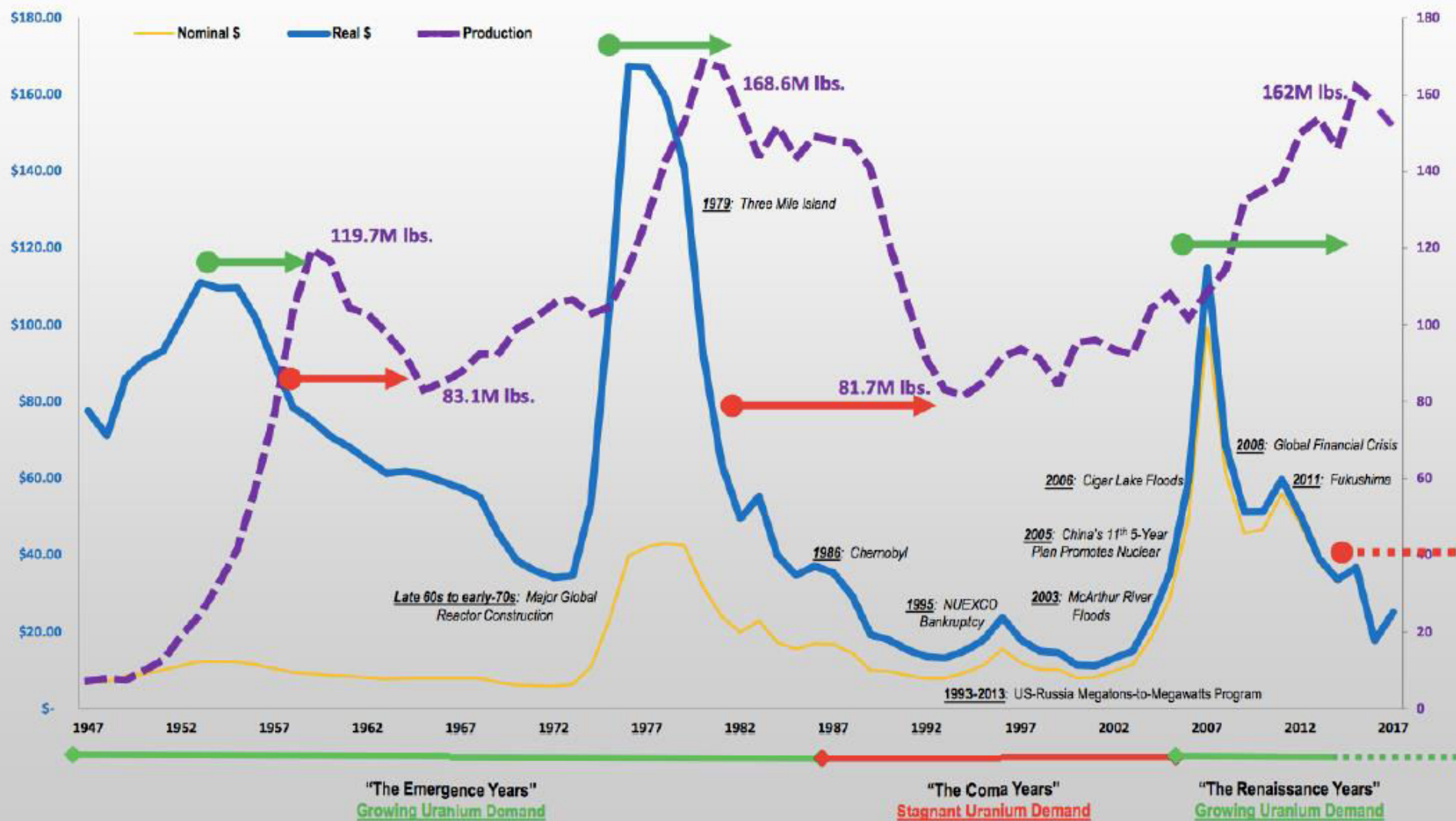
Kopalnia Rössing (Namibia) - najdłużej działająca i jedna z największych na świecie odkrywkowych kopalni uranu.

Pierwszym etapem obróbki po wydobywaniu jest kruszenie bloków skalnych, mielenie i ługowanie w rezultacie otrzymujemy tzw. **yellowcake**, czyli oczyszczony U_3O_8
yellowcake jest towarem, którym handluje się na Nowojorskiej Giełdzie Towarowej



Metody wydobywania

- Stworzenie • **Wydobycie** • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

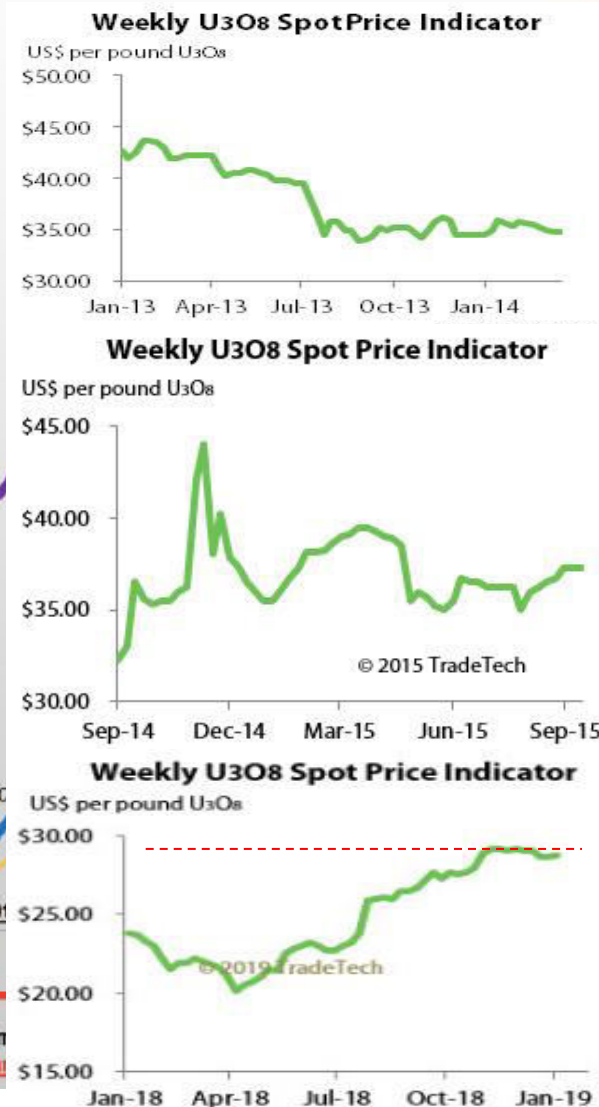
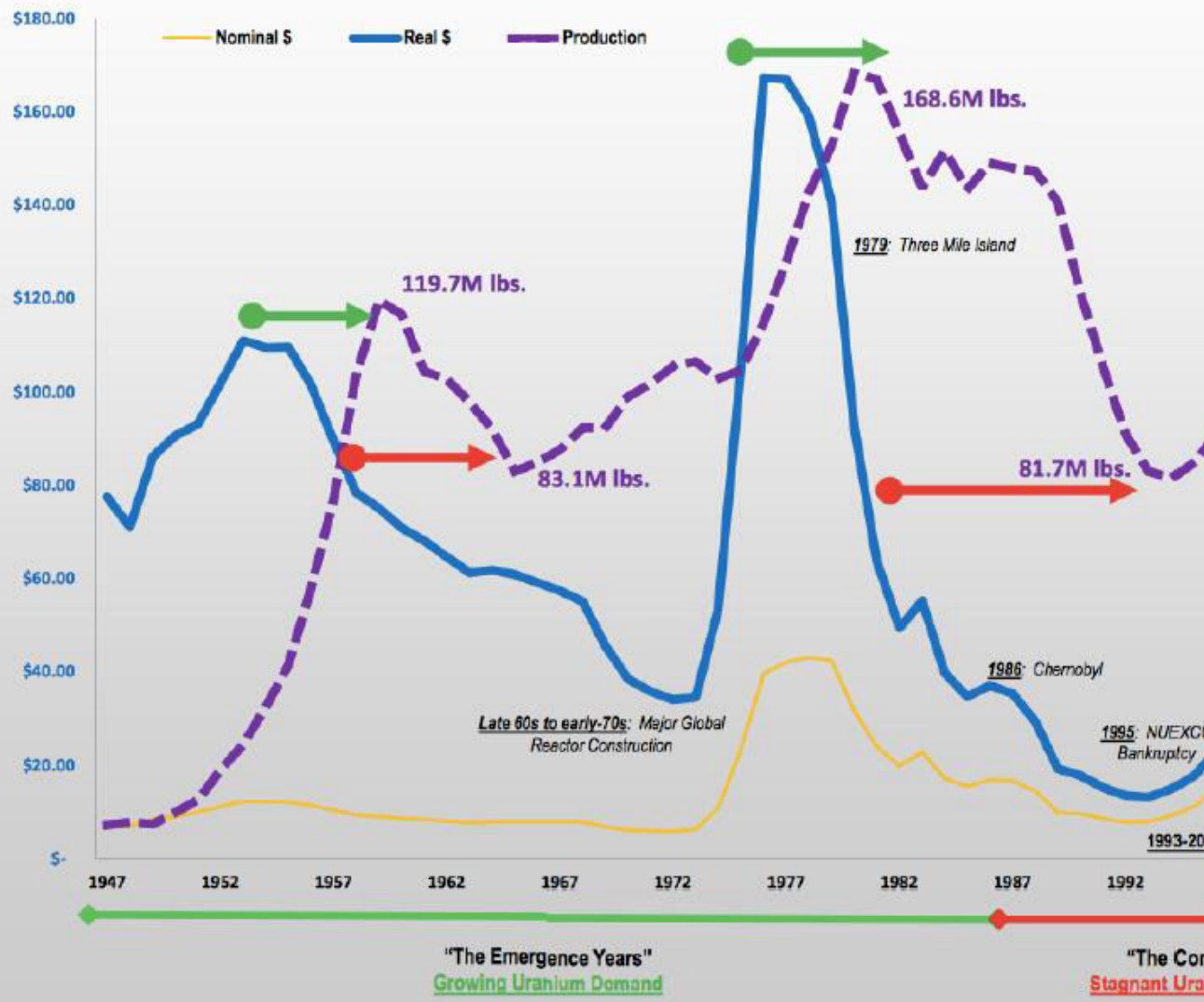


1 funt = 453,59 grama

Orientacyjna cena 1 grama PuO_2 wynosi ~ 5200 \$

Metody wydobycia

- Stworzenie
- **Wydobycie**
- Obróbka
- Wzbogacenie
- Produkcja paliwa
- Reaktor
- Recycling
- Składowanie



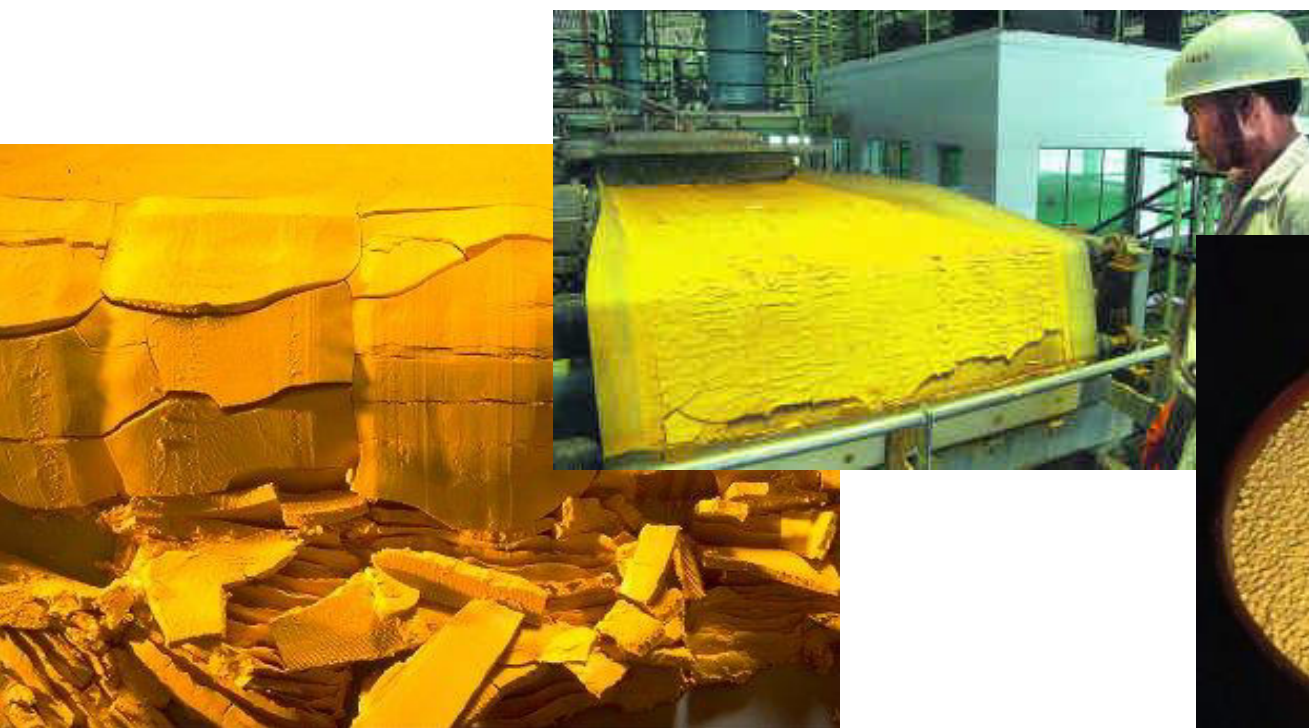
1 funt = 453,59 grama

Orientacyjna cena 1 grama PuO₂ wynosi ~ 5200 \$

Wstępna obróbka

• Stworzenie • Wydobycie • **Obróbka** • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

Pierwszym etapem obróbki po wydobyciu jest kruszenie bloków skalnych, mielenie i ługowanie¹
w rezultacie otrzymujemy tzw. **yellowcake**, czyli oczyszczony U_3O_8
(70 – 90 %, okstatlenek triuranu, ang: triuranium octoxide)



T topienia: U_3O_8 : 1 420 K
U: 1 405 K
 UO_2 : 3 138 K
Inna nazwa: **uraninit** (uranin)



¹ Ługowanie - proces transportu masy z fazy stałej do fazy ciekłej. Czyli wypłukiwanie danej substancji z fazy stałej za pomocą cieczy.

Konwersja skoncentrowanej rudy uranowej do UF_6 ($\text{U}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{UF}_6$)

- Separacja ^{235}U i ^{238}U przeprowadzana w fazie gazowej
- UF_6 jest gazem w dość niskiej temperaturze i ciśnieniu
- Fluor (F) ma tylko jeden izotop (^{19}F) co czyni separację $^{235}\text{UF}_6$ i $^{238}\text{UF}_6$ łatwiejszą

Separacja w 2 krokach:

- Yellowcake $\rightarrow \text{UF}_4$



UF_4 : Zielony, ciało stałe

- $\text{UF}_4 \rightarrow \text{UF}_6$



UF_6 : ciało stałe (kryształ, biały)

gaz: $T > 56^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ at}$

Tricastin (Comurhex II): 15 000 - 21 000 t U/rok

Wzbogacanie Uranu: Ale dlaczego?

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

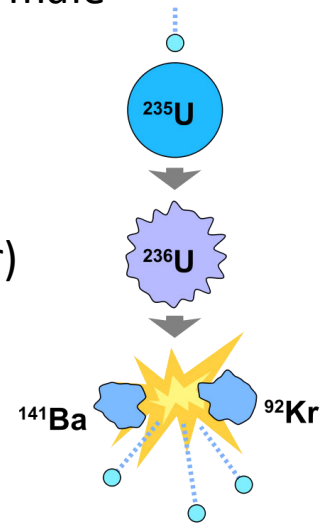
W reaktorze powstają neutrony prężkie ($2 \text{ MeV} \rightarrow 20\,000 \text{ km/s}$, $0,067 \text{ c}$)

ale prawdopodobieństwo, że neutron prędkie spowoduje rozszczepienie jest małe

oraz

naturalna zawartość ^{235}U jest mała ($0,7\% \rightarrow$ siedem ^{235}U na 1000 jąder)

zatem



Konsekwencja: **reakcja łańcuchowa nie jest możliwa z neutronami prędkimi i naturalnym uranem**

Wzbogacanie Uranu: Ale dlaczego? Po co? Milion pytań bez odpowiedzi

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

Dwa rozwiązania

Spowolnienie

- neutrony prężkie (n_p): 2 MeV $\rightarrow$ 20 000 km/s
- neutrony termiczne (n_t): 0,025 eV $\rightarrow$ 2,2 km/s
- 200 razy większe prawdopodobieństwo zajścia procesu rozszczepienia dla n_t niż n_p

Reaktory „termiczne”

Wzbogacenie

- 0,7% $\rightarrow$ 3,5-4 % ^{235}U

Reaktory „prężkie”

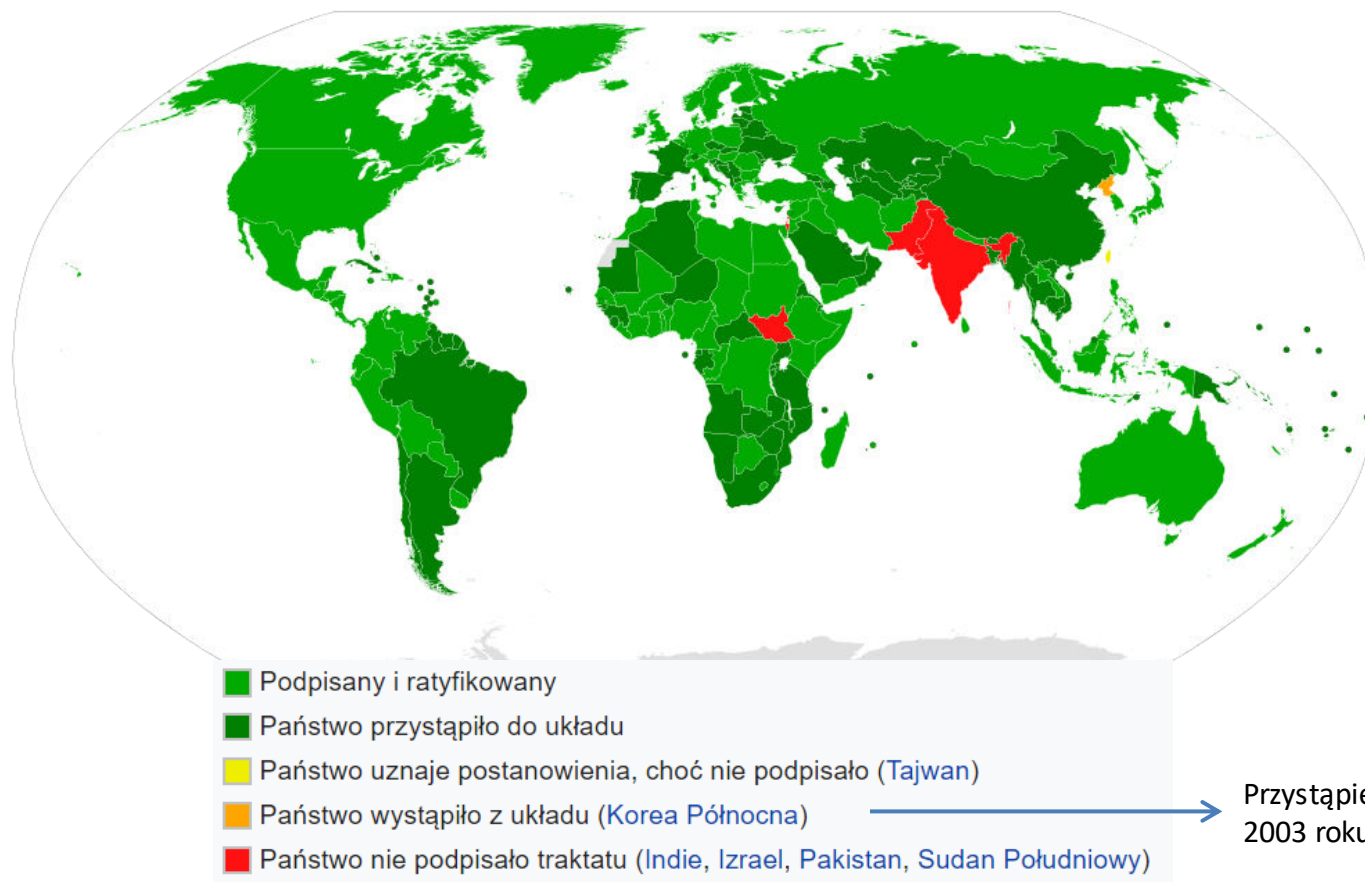
$^{235}\text{U} > 20\%$ albo $^{239}\text{Pu} > 15\%$

Połączenie rozwiązań

Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

- Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons
- Układ został przedłożony do ratyfikacji 1 lipca 1968. Do końca 2003 roku ratyfikowało go 189 państw



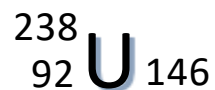
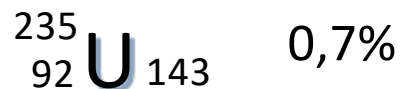
Przystąpienie: 1985, w kwietniu 2003 roku jednostronne wycofanie

Zabraniająca państwom posiadającym technologię budowy broni jądrowej sprzedaży jej do krajów, które tej technologii nie posiadają i jednocześnie zobowiązanie państw, które jej nie posiadają **do zaprzestania prób jej rozwoju**

Wzbogacanie

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie

Aby w reaktorze lekkowodnym możliwe było zastosowanie paliwa uranowego, konieczne jest wzbogacenie go w izotopy rozszczepialne z 0,7 % do około 3 – 4 %.



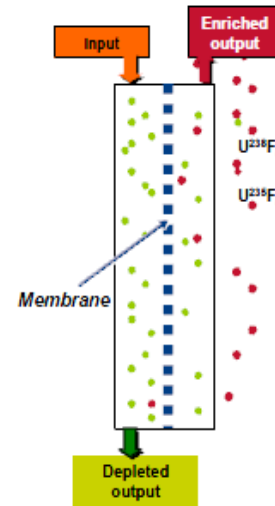
Realizacja:

- Dyfuzory: drogie, energożerne
- Wirówki: łatwe, proste przyjemne



Wzbogacanie: dyfuzory (Tricastin)

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie



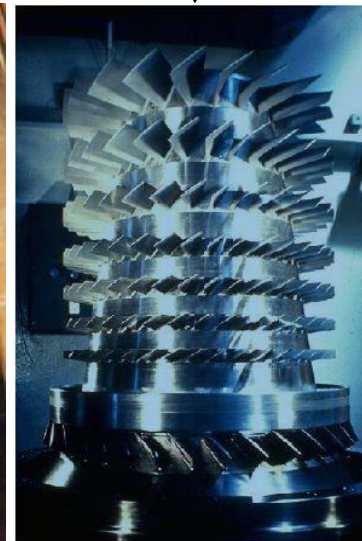
▶ UF6 gas passes through a membrane

- ◆ The $^{235}\text{U}\text{-F}_6$ molecules are faster: they statistically pass more often through the membrane
 - ^{235}U enriched gas
- ◆ The $^{238}\text{U}\text{-F}_6$ molecules are slower: they statistically pass less often through the membrane
 - ^{235}U depleted gas
- ◆ This diffusion principle is repeated N times: "cascade" type installation

- 1 400 dyfuzorów (70 grup, 20 stopni)
- 30, 60, 150 ton
- 0.7, 1.5, 3.3 MW
- 16, 19, 23 m

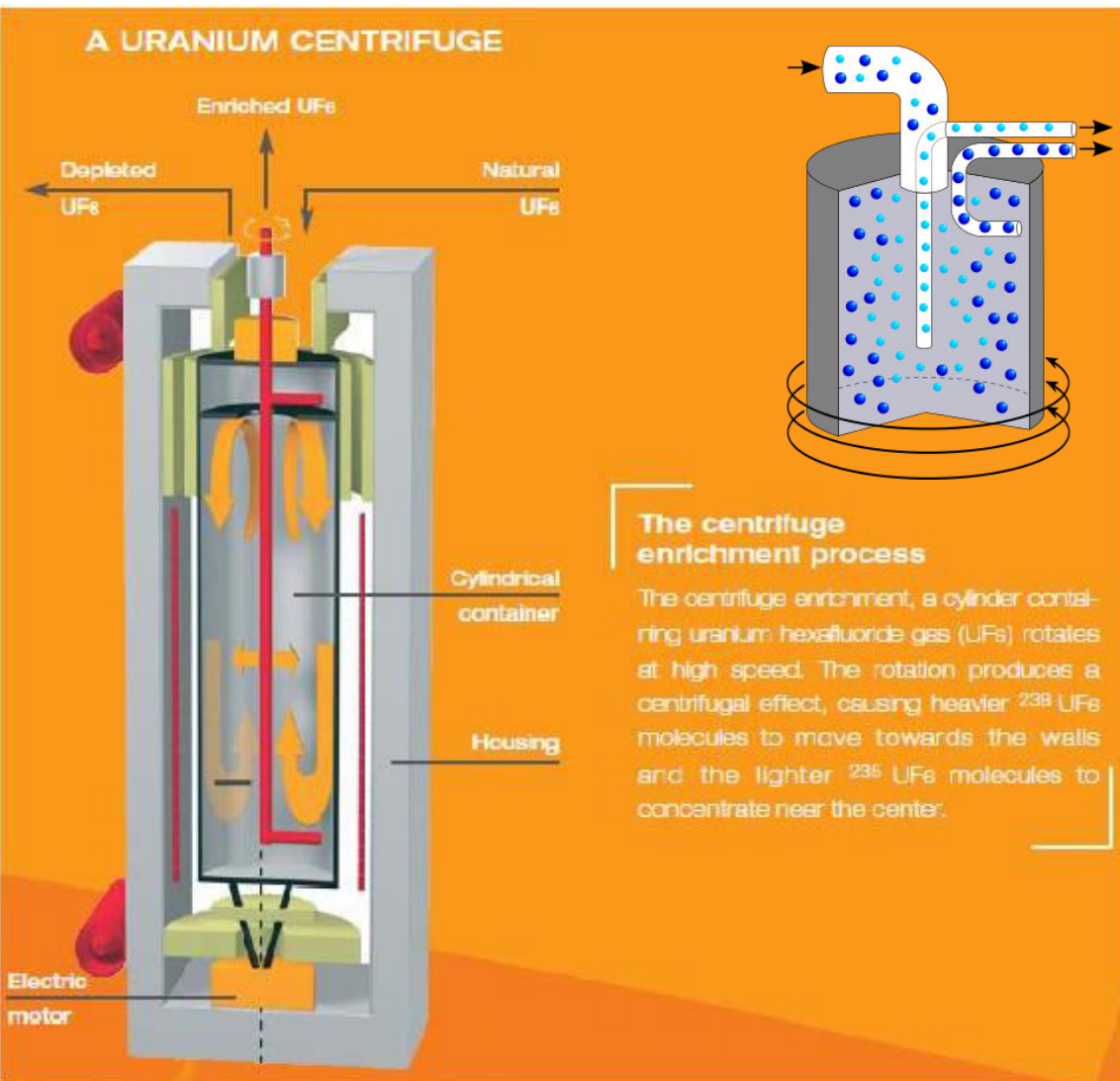
4×915 MW
25 TWh/y
2/3 - dyfuzory

Wzbogacenie: 0,7% ^{235}U → ~ 4 % ^{235}U
Zubożenie: → 0,3 % ^{235}U

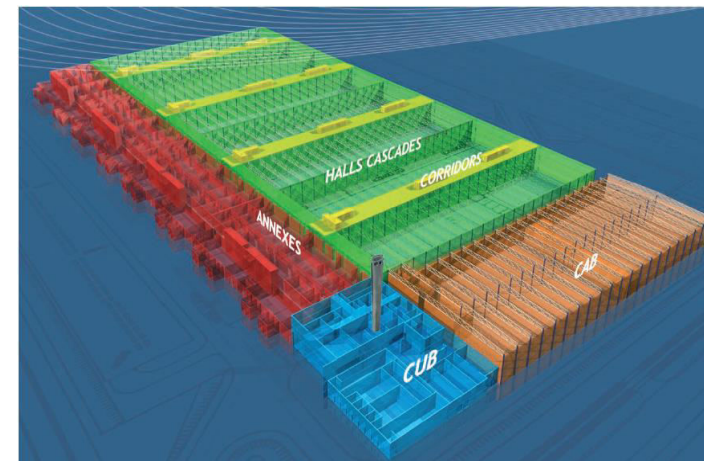


Wzbogacanie: wirówki (Tricastin)

- Stworzenie
- Wydobycie
- Obróbka
- **Wzbogacenie**
- Produkcja paliwa
- Reaktor
- Recycling
- Składowanie



- Georges Besse II
- Zużywa 50 razy mniej energii niż dyfuzory



Tricastin (Pierrelatte)



Tricastin: konwersja i wzbogacenie U



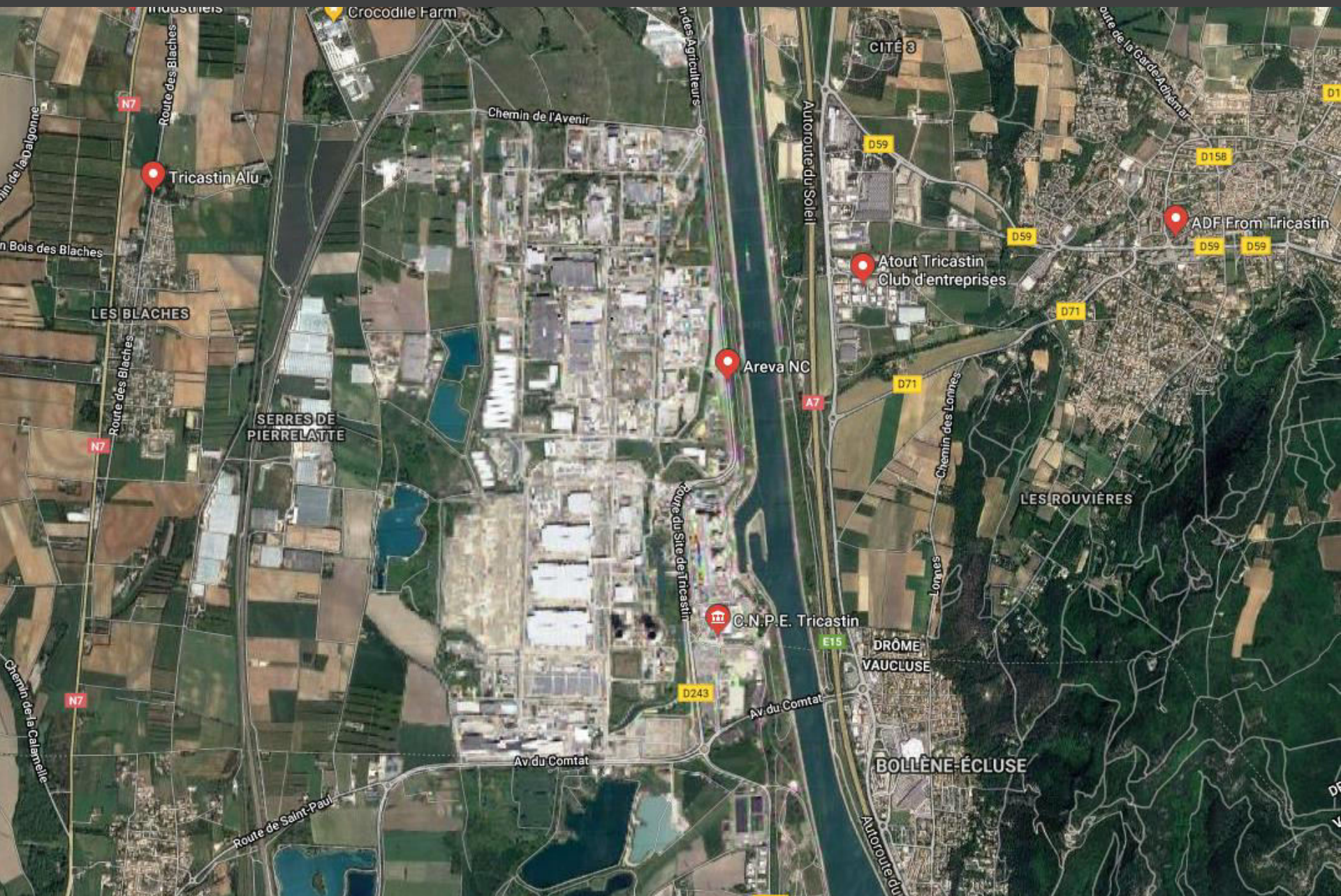
- Comurex: ruda U $\rightarrow$ UF_4 $\rightarrow$ UF_6 : (40t/dzień; 3t/dzień)
- EURODIF: wzbogacenie
 - gazowa dyfuzja, wirówki (Georges Besse Plant)
- TRIADE: Ośrodek demontażu i uzdatniania terenów i obiektów

Eurodif - European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium
Eurodif nuclear company, in which Iran had a 10% share

Tricastin (Pierrelatte)



Tricastin (Pierrelatte)



Tricastin (Pierrelatte)



Pierrelatte

- 8 000, 12 000 m², zewnętrznie: 4 000 m²
- Woda w bagnach i jeziorach na farmie, bez względu na porę roku: 28-32 °C
- ~400 zwierząt
- ~600 gatunków roślin
- www.lafermeauxcrocodiles.com



Wzbogacanie: wirówki

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • **Wzbogacenie** • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • Składowanie



Produkcja paliwa

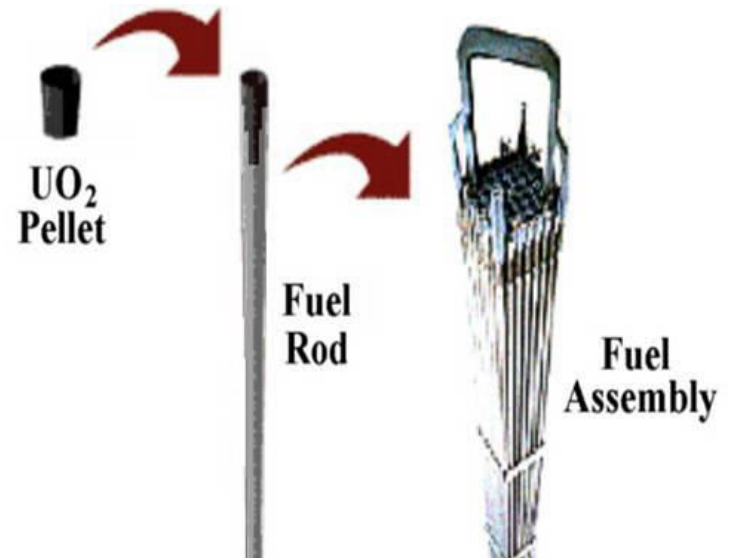
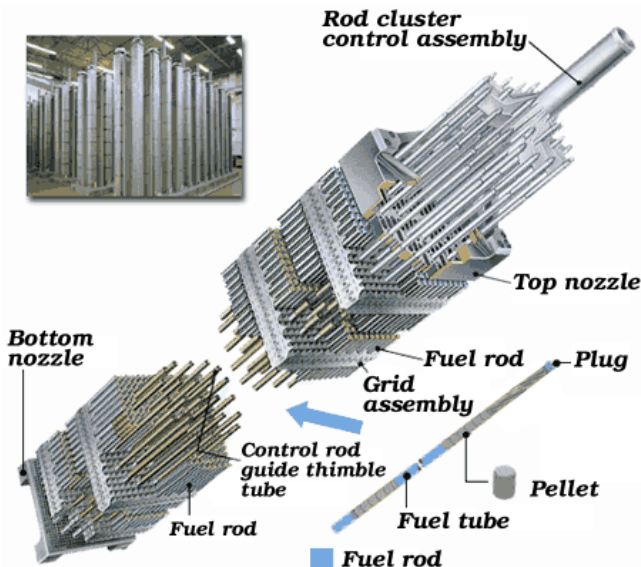
• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie

$\text{UF}_6 \rightarrow \text{UO}_2$ ($\varnothing$ 0.1-0.5 mm) $\rightarrow$ **Sprasowanie** (U: 60% obj) $\rightarrow$ **Wyrzwanie** $\rightarrow$ **Szlifowanie**



Jedna pastylka:

- 564 litry ropy
- 807 kg węgla
- 481 m³ gazu



Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



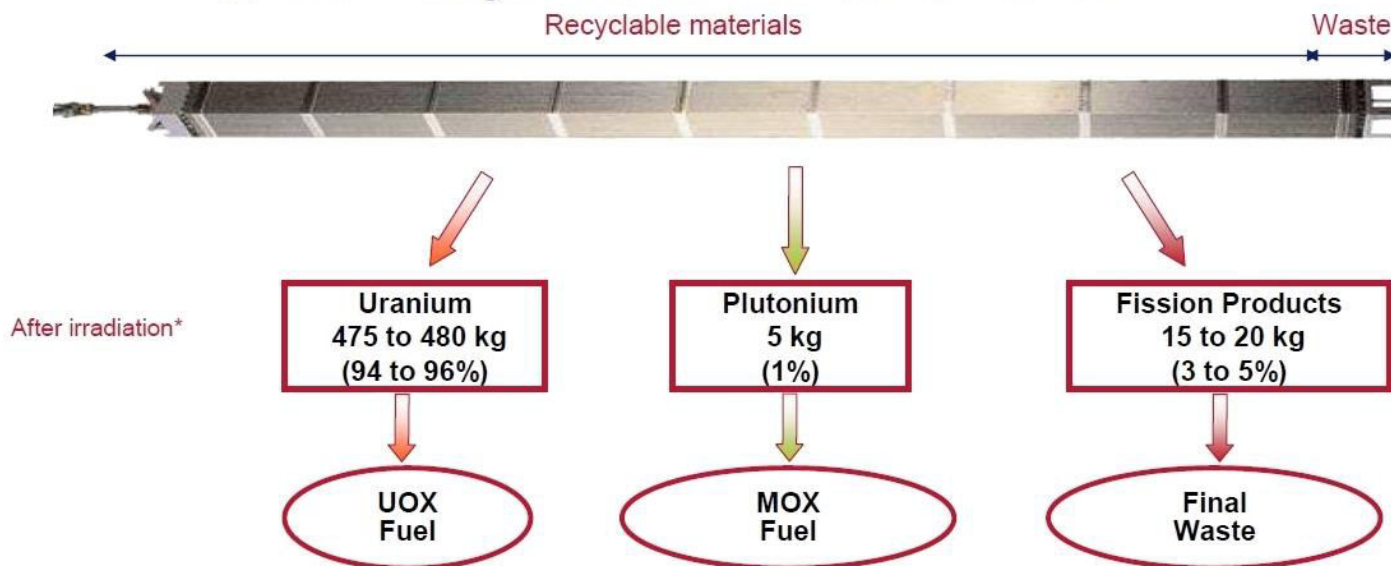
Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

♦ 1 LWR = 500 kg uranium before irradiation in the reactor



* Partly dependant on the burn-up rate

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

- Stworzenie
- Wydobycie
- Obróbka
- Wzbogacenie
- **Produkcja paliwa**
- Reaktor
- Recycling
- Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla	→	7 kWh energii
1 kg uranu	→	70000 kWh energii
1 kg deuteru	→	24 000 000 kWh energii

Spalanie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej

Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

A jeden  to **0,84** · 10⁴ J

Spalanie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej

Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

Spalenie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej

Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

$$Q = mc^2 = 1g \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m^2}{s^2}\right) = 9 \cdot 10^{13} \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = 9 \cdot 10^{13} J$$

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

Spalanie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej

Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

$$Q = mc^2 = 1g \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m^2}{s^2}\right) = 9 \cdot 10^{13} \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = 9 \cdot 10^{13} J$$

$$\begin{array}{rcl} 1g & - & 2.2 \cdot 10^4 J \\ x & - & 9 \cdot 10^{13} J \end{array}$$

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

Spalanie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej

Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

$$Q = mc^2 = 1g \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m^2}{s^2}\right) = 9 \cdot 10^{13} \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = 9 \cdot 10^{13} J$$

~151 x



$$\begin{array}{rcl} 1g & - & 2.2 \cdot 10^4 J \\ x & - & 9 \cdot 10^{13} J \end{array}$$

$$x = 4\,090\,ton = 4\,090\,909\,090\,g$$

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

- Stworzenie
- Wydobycie
- Obróbka
- Wzbogacenie
- **Produkcja paliwa**
- Reaktor
- Recycling
- Składowanie



Jedna pastylka (7 – 8 g)

• 564 litry ropy

• **897 kg węgla**

• 481 m³ gazu



1 kg węgla → 7 kWh energii
1 kg uranu → 70000 kWh energii
1 kg deuteru → 24 000 000 kWh energii

Spalanie 1 g węgla powoduje wydzielenie około $2,2 \cdot 10^4$ J energii cieplnej
Jaką masę węgla należy spalić, aby wydzielić ilość energii równoważną masie 1 g?

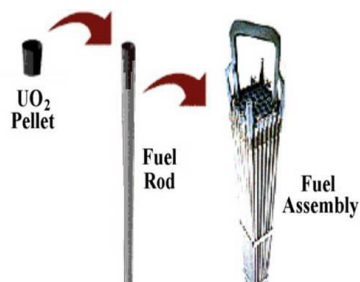
$$Q = mc^2 = 1g \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m^2}{s^2}\right) = 9 \cdot 10^{13} J$$

$$\begin{array}{rcl} 1g & - & 2.2 \cdot 10^4 J \\ x & - & 9 \cdot 10^{13} J \end{array}$$

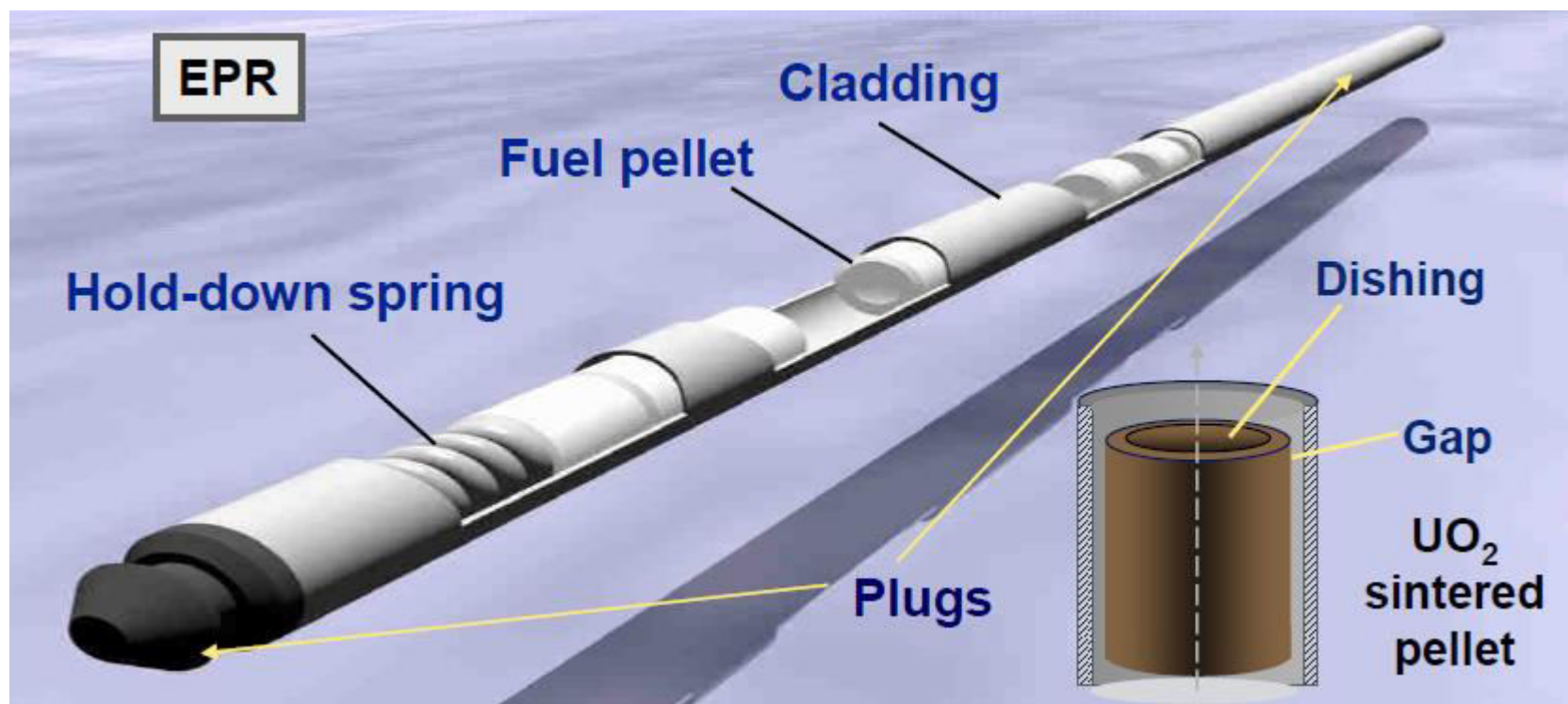
$$x = \boxed{4\,090\,ton} = 4\,090\,909\,090\,g$$

Produkcja paliwa: Pręt paliwowy

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • **Produkcja paliwa** • Reaktor • Recycling • Składowanie



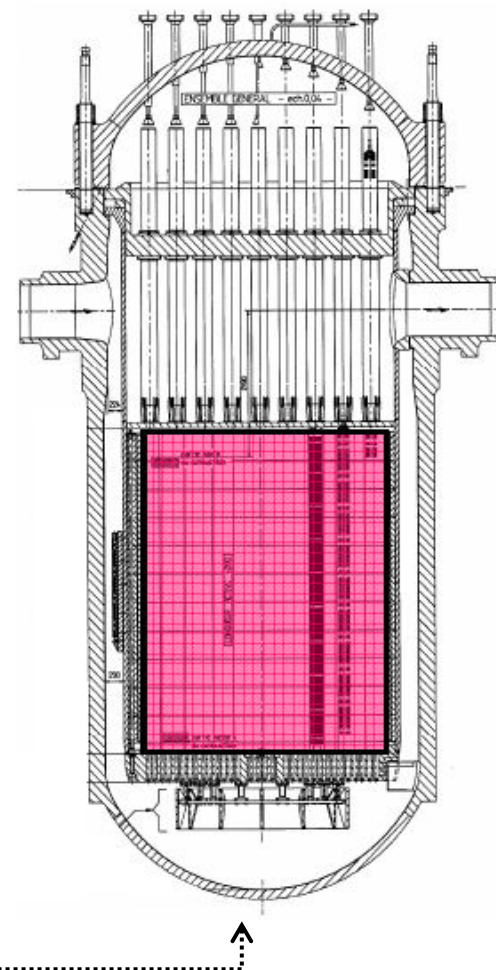
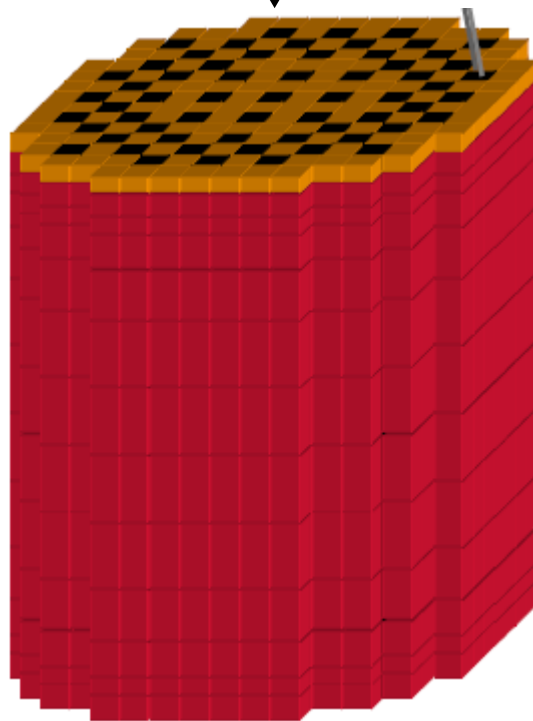
Ø zewnętrzna	Ø pastylki (pellet)	Grubość osłony (cladding)	Dystans: pellet → clad
9.5 mm	8.19 mm	0.57 mm	0.084 mm



Pręt paliwowy to **pierwsza z 3 barier** ochrony przed uwolnieniem radioaktywnych produktów do środowiska

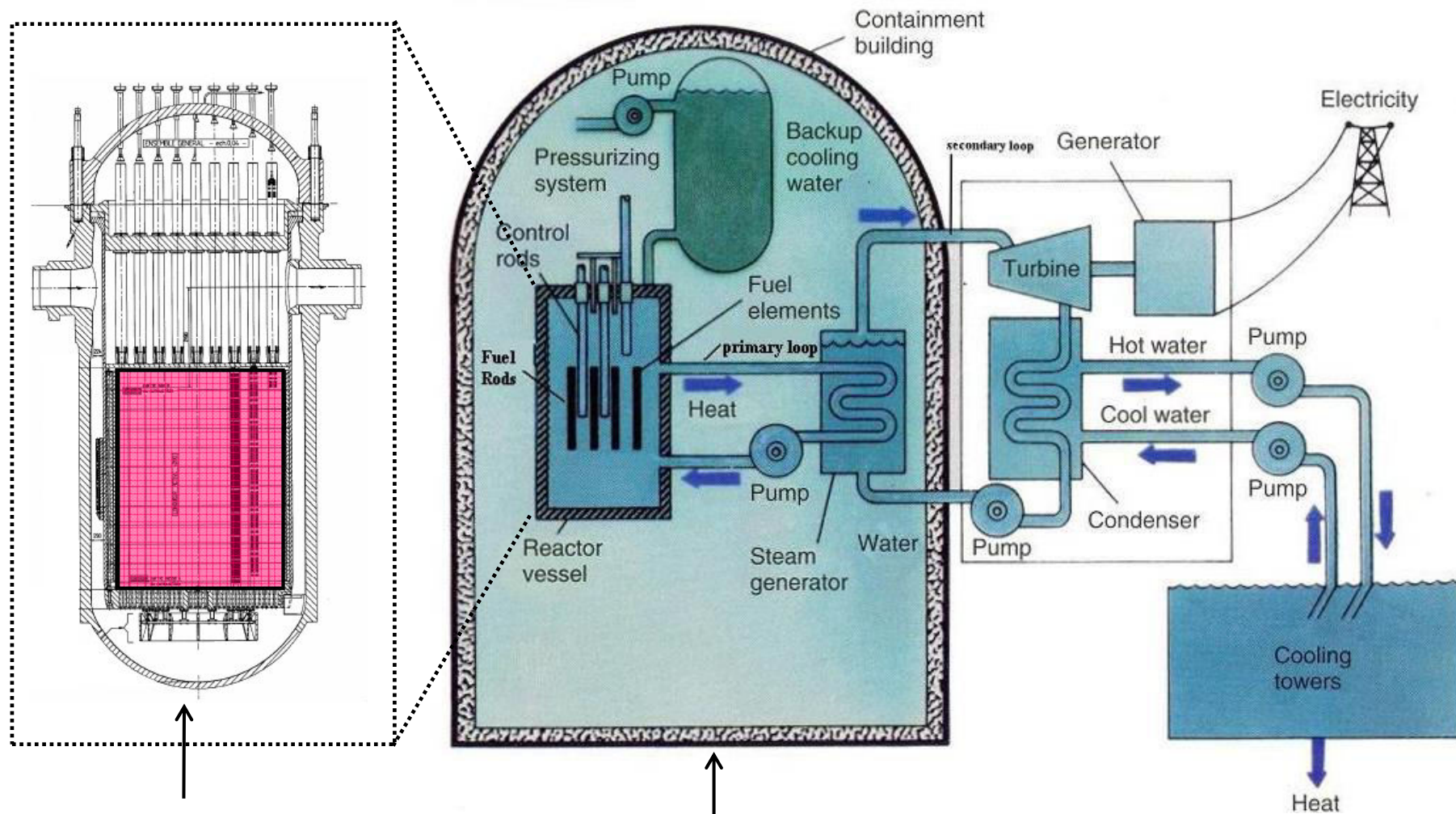
Reaktor

- Stworzenie
- Wydobycie
- Obróbka
- Wzbogacenie
- Produkcja paliwa
- **Reaktor**
- Recycling
- Składowanie



Reaktor

- Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • **Reaktor** • Recycling • Składowanie



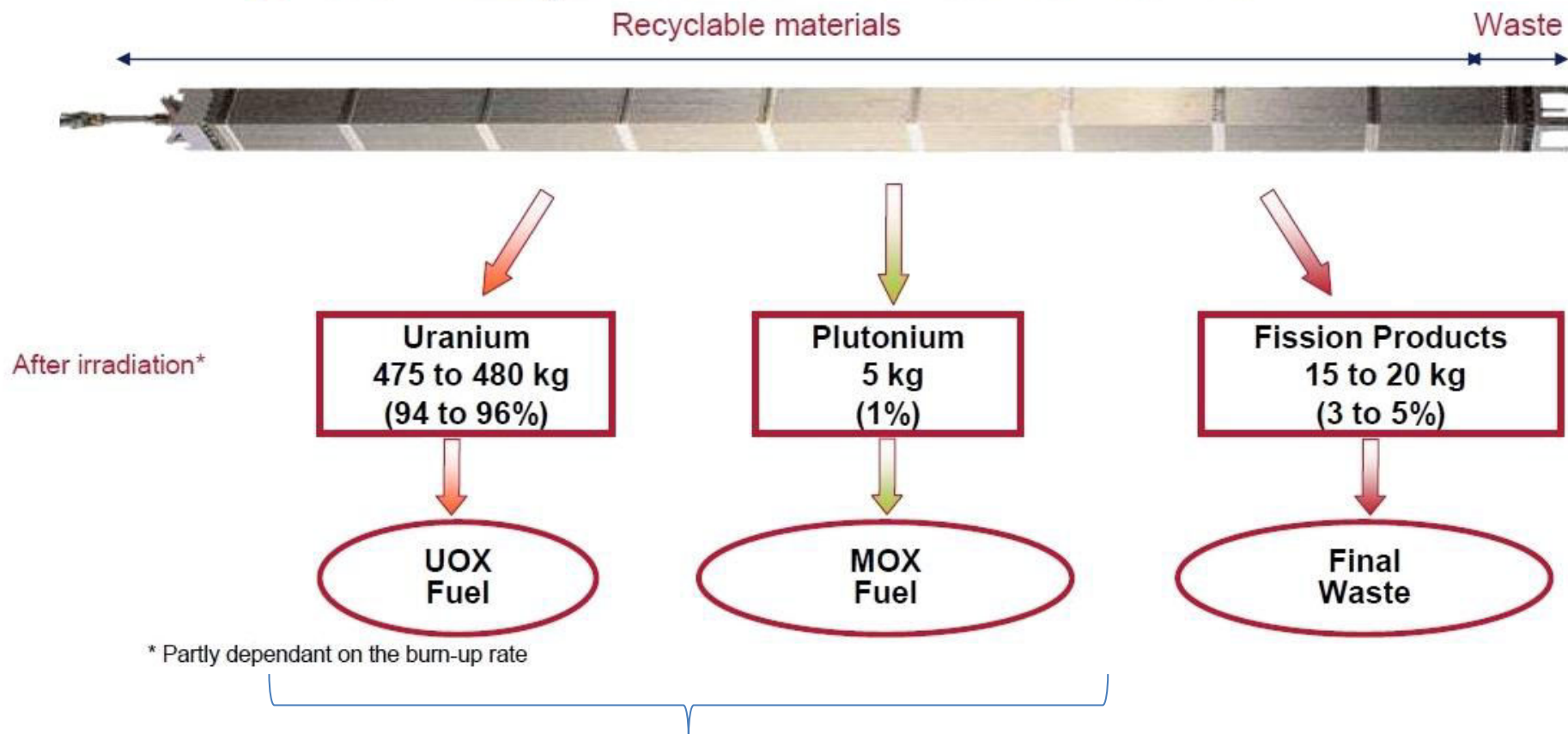
Obudowa reaktora to **druga z 3 barier**

Ściany budynku to **trzecia bariera**

Zużyty element paliwowy (fuel assembly)

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • **Recycling** • Składowanie

♦ 1 LWR = 500 kg uranium before irradiation in the reactor



96 % zużytego paliwa jest ponownie wykorzystane

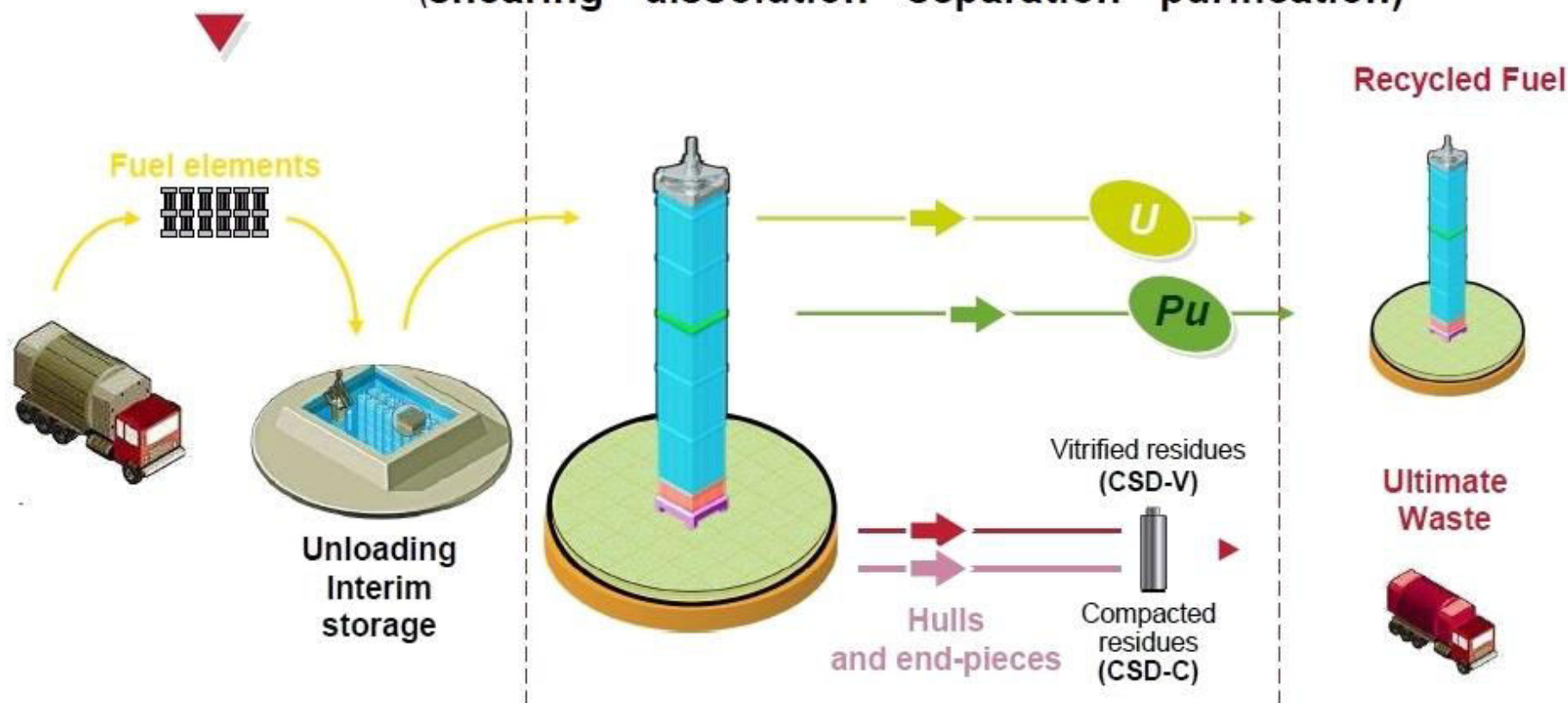
MOX – Mixed uranium & plutonium oxides

EPR zaprojektowany aby móc pracować w 100 % na paliwie MOX

Przetwarzanie paliwa

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • **Recycling** • Składowanie

Treatment operations (shearing - dissolution - separation - purification)



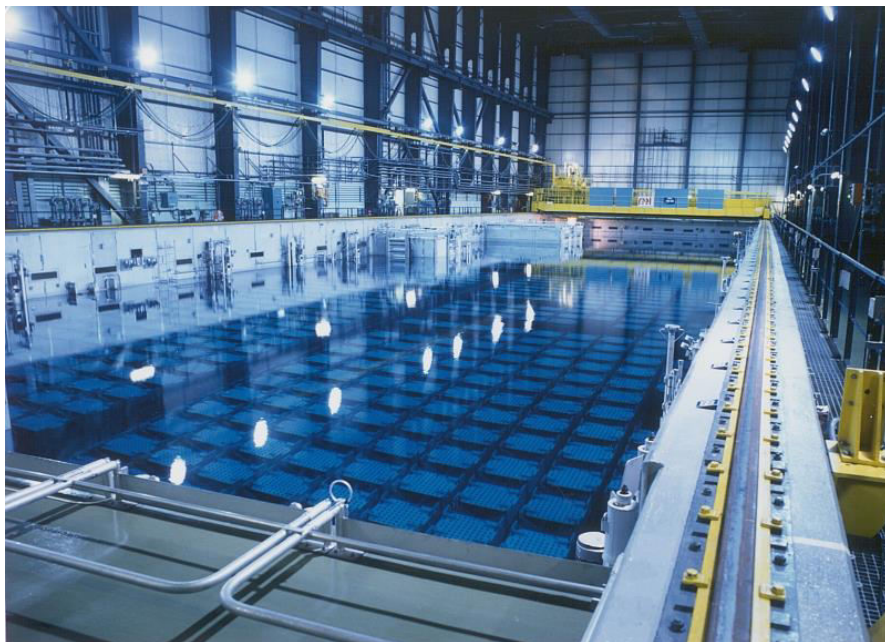
96 % zużytego paliwa jest ponownie wykorzystane

MOX – Mixed uranium & plutonium oxides

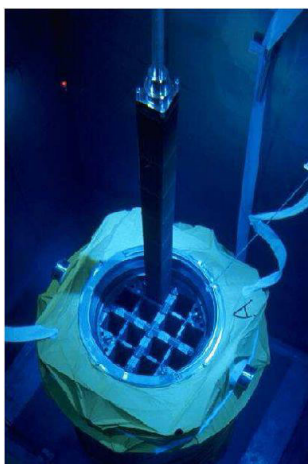
EPR zaprojektowany aby móc pracować w 100 % na paliwie MOX

Przetwarzanie paliwa

- Stworzenie
- Wydobycie
- Obróbka
- Wzbogacenie
- Produkcja paliwa
- Reaktor
- **Recycling**
- Składowanie



Tymczasowy basen do przechowywania paliwa



← Opróżnianie beczki



Beczki ze użytym paliwem (120 ton, 6 ton paliwa)

Składowanie odpadów

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • **Składowanie**

Witryfikacja

Zamknięcie produktów rozszczepienia:

Tc, I, Cs, Np, Am i Cm

w szkle:

SiO_2 , Na_2O , B_3O_3 , Al_2O_3 , R7T7

- Zamieniane na roztwory azotanów
800 l $\rightarrow$ 360 kg szkła (jedna beczka)
- Proces chłodzenia: 25 lat
- Aktywność beczki: $8 \cdot 10^{15}$ Bq
odpowiada to dawce **1 kSv/h**



Sprasowywanie koszulek, czapeczek etc..

Kondensowanie



Standardowe „Uniwersalne karnistry”

Termin witryfikacja pojawia się także w powieści Stanisława Lema „Fiasko”. Jest to sposób zabezpieczenia ciała pilota czy operatora w przypadku, gdy kierowana przez niego maszyna ulegnie wypadkowi. Witryfikacja w powieści nie niosła gwarancji „ożywienia”

Składowanie odpadów

• Stworzenie • Wydobycie • Obróbka • Wzbogacenie • Produkcja paliwa • Reaktor • Recycling • **Składowanie**

Witryfikacja

Zamknięcie produktów rozszczepienia:

Tc, I, Cs, Np, Am i Cm

w szkle:

SiO₂, Na₂O, B₃O₃, Al₂O₃, R7T7

- Zamieniane na roztwory azotanów
800 l → 360 kg szkła (jedna beczka)
- Proces chłodzenia: 25 lat
- Aktywność beczki: $8 \cdot 10^{15}$ Bq
odpowiada to dawce **1 kSv/h**

Organizm	LD _{50/30} [Sv]
małpa	5 - 6
osioł	7 - 8
koza	3 - 5
żółw	15
nietoperz	150
ślimak	80 - 200
mucha	800
pantofelek	3000
człowiek	3 - 4

Tabela 1: Dawki letalne LD_{50/30} dla różnego rodzaju stworzeń.

Problem emisji CO₂

Elektrownie na węgiel kamienny i brunatny

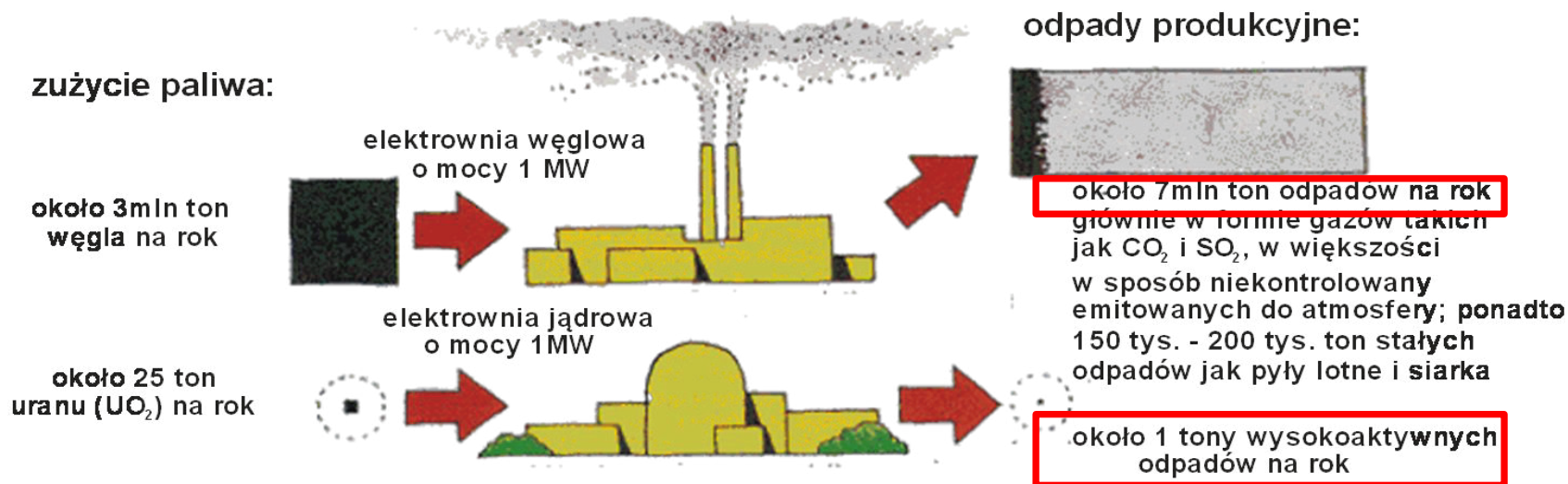
- Elektrownia „Bełchatów” (brunatny): 5472 MW
- Elektrownia „Kozienice” (kamienny): 4006 MW
- Elektrownia „Połaniec” (kamienny, biomasa): 1882 MW

Elektrownie ciepłne na węgiel kamienny i brunatny, wodne, wiatrowe i geotermalne **35,009 GW**

Źródło: „Rocznik Statystyczny” 2003, Warszawa

W styczniu 2018 łączna moc elektryczna zainstalowana wynosiła **40,119 GW**

2009: „do Ministerstwa Gospodarki wpłynęły zgłoszenia na **25 GW**



Problem emisji CO₂



Ilość wypalonego paliwa usuwanego rocznie z elektrowni jądrowych na całym świecie to około:

- **8 000 ton**
 - przy ciężarze właściwym około 10 t/m³ daje to 800 m³/rok (20×10×4 m³)
 - kaplica Św. Kingi w Wieliczce ma rozmiary 54×18×12 m³ i objętość 11 664 m³
 - Mogłaby pomieścić odpady promieniotwórcze z wszystkich elektrowni jądrowych na świecie z 14 lat (bez pojemników ochronnych)
- **25 miliardów ton CO₂** emitowane bezpośrednio do atmosfery przez spalanie paliw organicznych

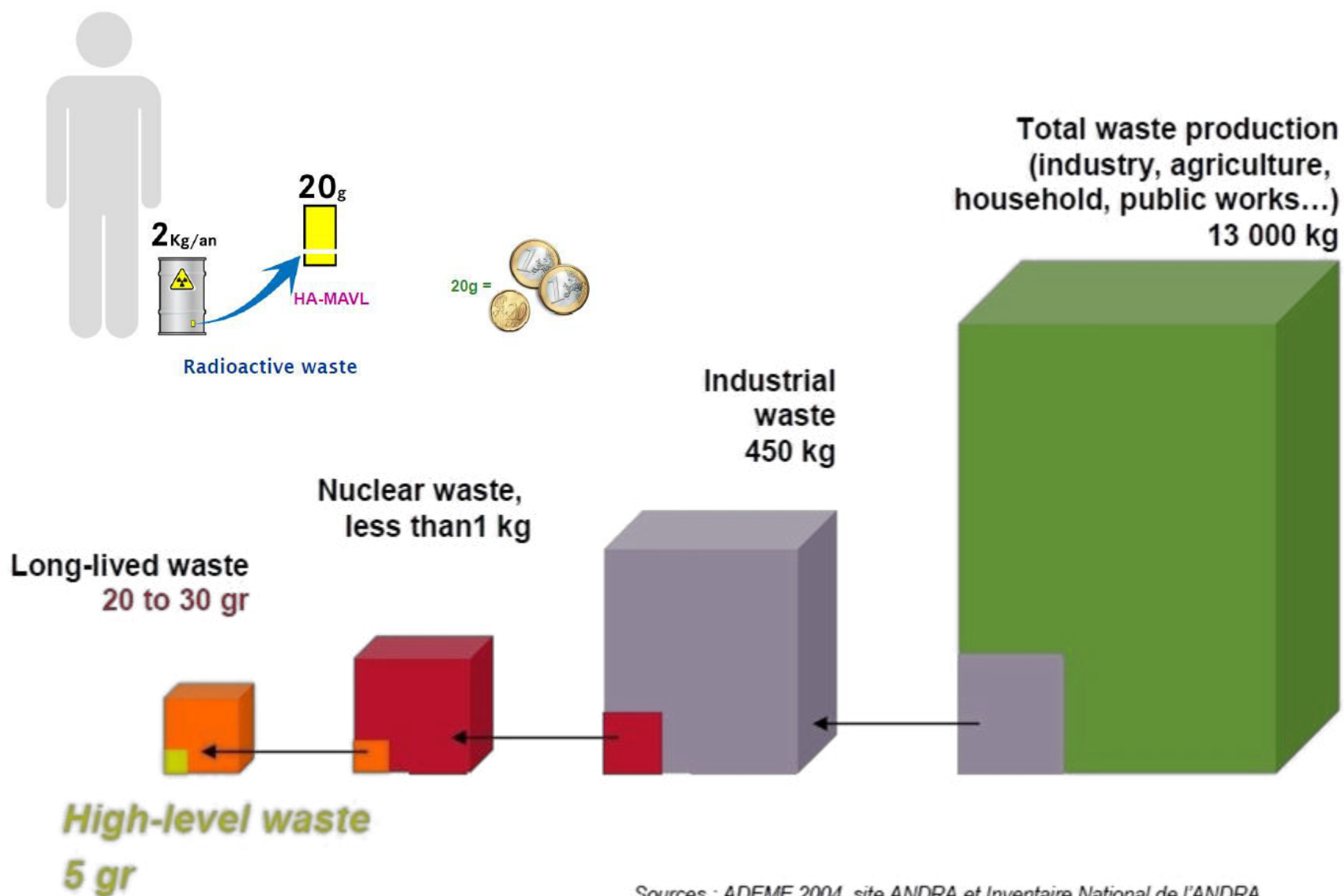
Odpady jądrowe

Gdyby wszystkie elektrownie zamienić na jądrowe, śmieci energetyczne z produkcji energii zużywanej przez jednego człowieka w ciągu całego życia mieściłyby się na dłoni



(z pracy [J. Włodarskiego](http://www.ptbr.org.pl/files/skladowanie%20odpadow.pdf) (PAA): <http://www.ptbr.org.pl/files/skladowanie%20odpadow.pdf>)

Odpady na przykładzie Francji (per capita)



Energetyka węglowa wcale nie jest najtańsza, gdy dodamy jeszcze do kosztów produkcji energii wpływ jaki wywiera na środowisko naturalne

Koszty produkcji energii elektrycznej:

- elektrownia węglowa: ~ 3 € cent/kWh
- „koszt ekologiczny”: ~ 5 € cent/kWh
- hydroelektrownie: ~ 10 € cent/kWh
- elektrownie wiatrowe: ~ 20 € cent/kWh
- uprawa „biomasy”: ~ 20 € cent/kWh
- energia geotermalna ?
- ogniwa słoneczne: ?

„koszt jądrowy” ~ 4 € cent/kWh



Jedna pastylka (7 – 8 g)

- 564 litry ropy
- 897 kg węgla
- 481 m³ gazu



Reaktor typu PWR

- masa krytyczna około 82 t wzbogaconego uranu, zużywa rocznie około 30 t paliwa, ale tylko 1 kg zamieniany jest na energię

Elektrownia węglowa o takiej samej mocy

- Spala w ciągu roku 3 mln t węgla a więc masę 100 000 razy większą niż masa paliwa wymienianego rocznie w elektrowni jądrowej

Reaktor typu PWR miał być zainstalowany w Żarnowcu

Elektrownia węglowa (klasyczna) o mocy 1 GW_e

- spala 3 pociągi węgla dziennie
- zapas na ~ 1 miesiąc
- wrażliwość na sytuację polityczną i społeczną – strajki w kopalniach i na kolei
- wrażliwość na warunki pogodowe
- dla elektrowni na ropę i gaz - gwałtowne zmiany cen paliwa

Elektrownia atomowa o mocy 1 GW_e

- zużywa 1 wagon paliwa rocznie
- zapasy paliwa na wiele lat
- stabilność cen surowców – uranu
- zagwarantowane bezpieczeństwo energetyczne
- rynek paliwa uranowego jest rozproszony i „łatwy” zarówno politycznie jak i geograficznie
- zaopatrzenie w paliwo uranowe jest możliwe z różnych kierunków

- W następstwie spalania w Polsce ok. 150 mln ton węgla kamiennego rocznie do środowiska trafia ok
 - 150 ton promieniotwórczego uranu i
 - 300 ton promieniotwórczego toru
- Gromadzą się one głównie w popiołach, skąd przedostają się do wód gruntowych i do gleby. Są również uwalniane bezpośrednio do atmosfery wraz z dymem i kurzem

**Aktywność takich popiołów może przekraczać nawet
2000 Bq/kg**

Orientacyjne masy krytyczne materiału ułożonego w kształcie kuli nie otoczonej substancją odbijającą neutrony dla wybranych izotopów:

U^{233} : 16 kg

U^{235} : 52 kg

Np^{237} : 60 kg

Pu^{239} : 11 kg

Pu^{240} : 40 kg

Pu^{242} : 100 kg

Am^{241} : 60-100 kg

Am^{242} : 9-18 kg

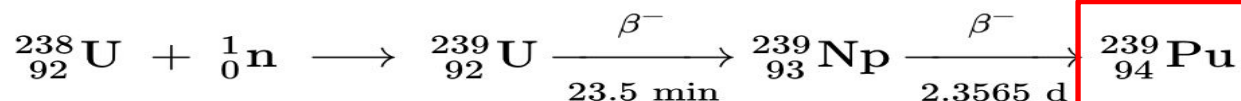
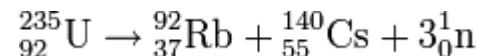
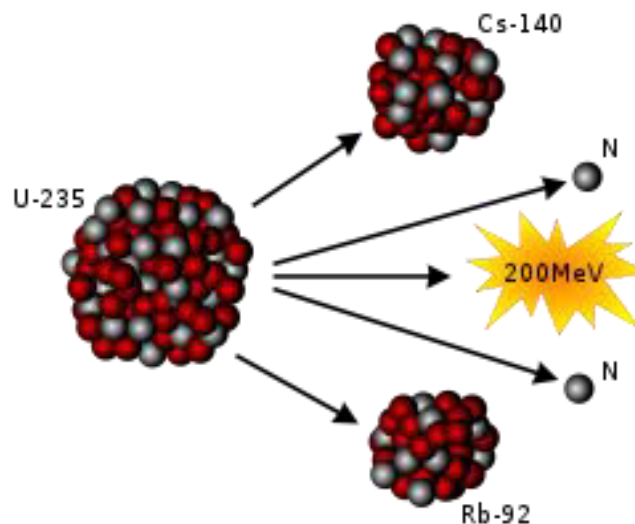
Am^{243} : 50-150 kg

Cm^{245} : 12 kg

Cm^{246} : 70 kg

Cm^{247} : 7 kg

Cf^{251} : 9 kg



A photograph of two large, white, hyperboloid cooling towers from a nuclear power plant. Each tower has a large, yellow smiley face with a wide, curved mouth and two dots for eyes. The towers are set against a sky filled with white and grey clouds. In the foreground, there is a field of green crops, possibly corn. The overall image has a slightly desaturated, vintage feel.

Dziękuję za uwagę