



# 100 ZAGADEK O ENERGII JĄDROWEJ

DEPARTAMENT ENERGII JĄDROWEJ



MINISTERSTWO ENERGII



poznajatom  
ORGANIZACJA PROMIENIOWA

Autorzy:

Paweł Gajda, Mikołaj Oettingen, Mateusz Malicki, Michał Orliński, Przemysław Stanisław  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw,  
Katedra Energetyki Jądrowej

© Ministerstwo Energii, Departament Energii Jądrowej, Warszawa 2017

e-mail: sekretariatDEJ@me.gov.pl,

[www.me.gov.pl/energetyka+jadrowa](http://www.me.gov.pl/energetyka+jadrowa),

[www.facebook.com/poznaj.atom](https://www.facebook.com/poznaj.atom)

# Spis treści

	<b>CZĘŚĆ 1.</b> ENERGETYKA JĄDROWA – HISTORIA, ODKRYCIA Zagadki 1-12	<b>5</b>
	<b>CZĘŚĆ 2.</b> FIZYKA JĄDROWA – PODSTAWOWE ZAGADNIENIA Zagadki 13-22	<b>18</b>
	<b>CZĘŚĆ 3.</b> JAK DZIAŁA ELEKTROWNIA JĄDROWA? Zagadki 23-38	<b>28</b>
	<b>CZĘŚĆ 4.</b> BEZPIECZEŃSTWO I OCHRONA RADIOLOGICZNA Zagadki 39-52	<b>43</b>
	<b>CZĘŚĆ 5.</b> JĄDROWY CYKL PALIWOWY Zagadki 53-68	<b>57</b>
	<b>CZĘŚĆ 6.</b> ENERGIA JĄDROWA W POLSCE I NA ŚWIECIE Zagadki 69-77	<b>80</b>
	<b>CZĘŚĆ 7.</b> PORÓWNANIE EJ I INNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII Zagadki 78-88	<b>84</b>
	<b>CZĘŚĆ 8.</b> PRZYSZŁE I NIETYPOWE ZASTOSOWANIA EJ Zagadki 89-100	<b>104</b>





## Czy zdjęcie rentgenowskie to wynalazek XX wieku?

Najprawdopodobniej pierwsze na świecie zdjęcie rentgenowskie wykonał w **1895** roku niemiecki fizyk Wilhelm Conrad Röntgen.

Zdjęcie przedstawiało lewą rękę jego żony Anny.

Kobieta tuż po obejrzeniu dzieła miała powiedzieć, iż zobaczyła własną śmierć.



- Röntgen dokonał swojego odkrycia przypadkowo podczas prac badawczych związanych z **przenikaniem promieni katodowych** przez różne materiały.
- Podczas jednej z prób zauważył istnienie promieniowania znacznie **bardziej przenikliwego niż promieniowanie katodowe**.
- Ze względu na tajemniczy charakter nazwał je **promieniowaniem X**.



Zdjęcie lewej ręki żony Röntgena – pierwsze na świecie udokumentowane zdjęcie rentgenowskie

W Polsce używa się terminu „promienie rentgena” (ze względu na nazwisko ich odkrywcy), podczas gdy w wielu krajach zachowano nazwę zaproponowaną przez Röntgena – „promienie X” (ang. *X-rays*; fr. *rayons X*).

### Jak powstają promienie rentgenowskie?

- Promieniowanie X powstaje poprzez zahamowanie rozpędzonych elektronów.
- Energia rozpędzonych elektronów zgodnie z zasadą zachowania energii musi zamienić się w inny rodzaj energii, a „hamujący” elektron nie może się rozgrzać jak opona w samochodzie.
- Z tego względu energia zostaje wydzielona w formie kwantów promieniowania elektromagnetycznego o specyficznej długości fali, nazwanych promieniowaniem X.

Obecnie promieniowanie rentgenowskie wykorzystywane jest wszędzie tam, gdzie chcemy uzyskać obraz wewnętrznej struktury obiektów bez ich naruszenia (badania nieniszczące), np. w **medycynie** (prześwietlenia) czy w **dziedzinie bezpieczeństwa** (kontrola bagażu).



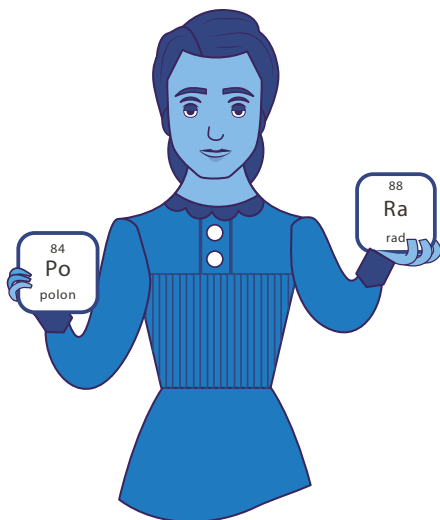
Röntgen za odkrycie promieni X został uhonorowany w 1901 r. pierwszą w historii **Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki**.

## Kto został nagrodzony Nagrodą Nobla za odkrycie promieniotwórczości?

- W 1903 roku połowę nagrody Nobla z fizyki otrzymali **Maria Skłodowska-Curie i Pierre Curie** za badanie promieniotwórczości, natomiast drugą połowę nagrody otrzymał **Henri Becquerel** za „odkrycie samorzutnej promieniotwórczości”.
- Nasza noblistka otrzymała kolejną nagrodę Nobla w 1911 roku, tym razem w dziedzinie chemii za odkrycie polonu i radu, wydzielenie czystego radu i badanie właściwości chemicznych pierwiastków promieniotwórczych.



- Francuski fizyk **Henri Becquerel** zauważył w trakcie badań nad fluorescencją opóźnioną niektórych soli, iż sól uranylowa powoduje zaciemnienie kliszy fotograficznej, pomimo braku wcześniejszego wystawienia próbki soli na działanie promieni słonecznych.
- Odnotowane przez francuskiego badacza wnioski uznaje się za **odkrycie zjawiska promieniotwórczości**.



- **Maria Skłodowska-Curie**, zainteresowana odkryciami Becquerela, rozpoczęła pracę badawczą nad jego odkryciem.
- Po dwóch latach wraz z mężem wyodrębnili nowy, nieznan dotąd pierwiastek, który Skłodowska-Curie nazwała na cześć swojej ojczyzny – **polonem (Po)**.
- Pół roku później poinformowali o odkryciu kolejnego radioaktywnego pierwiastka – **radu (Ra)**.

Całe swoje dalsze życie Skłodowska-Curie poświęciła pracy naukowej związanej z promieniotwórczością, za co przyszło jej zapłacić najwyższą cenę – po ponad 30 latach badań (w 1934 roku) nasza rodaczka zmarła na anemię wywołaną przez ciągłą pracę z promieniowaniem.

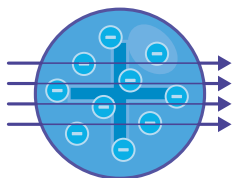
Jej córka **Irène Joliot-Curie** otrzymała w 1935 roku wraz z mężem Nagrodę Nobla z chemii za odkrycie sztucznej promieniotwórczości.

Jaki ładunek ma jądro atomu: dodatni, ujemny czy obojętny?

Jądro atomu ma zawsze ładunek **dodatni**, a obecnie obowiązujący model atomu został opracowany w 1925 roku.



W 1900 roku wiele wskazywało na to, że atom nie jest cząstką niepodzielną. Odkrycie elektronów ostatecznie udowodniło, że atomy mają wewnętrzną strukturę.

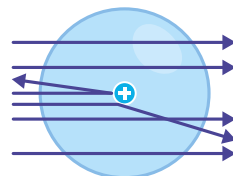


### 1. Model atomu Thomsona (1904 rok)

Model wyjaśniał wewnętrzną budowę atomu jako podobną do „ciasta z rodzynkami”: ujemnie naładowane cząsteczki są otoczone dodatnio naładowaną przestrzenią.

### 2. Model atomu Rutherforda (1911 rok)

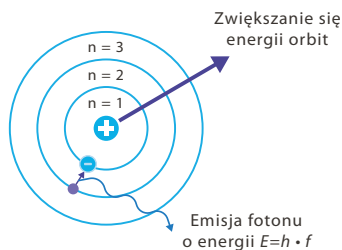
W 1909 roku, w eksperymencie polegającym na bombardowaniu cząstkami alfa folii ze złota, Rutherford udowodnił, że model Thomsona jest nieprawidłowy. Niektóre cząstki były odchylane, a niektóre odbijane przez ciężki skoncentrowany środek z dodatnim ładunkiem.



Nowy model atomu oparty na rezultatach eksperymentu wprowadził znane współcześnie założenia: **atom ma niewielki dodatnio naładowany rdzeń (jądro) otoczony ujemnymi elektronami.**

### 3. Model atomu Bohra (1913 rok)

Na podstawie założeń Rutherforda Niels Bohr stworzył nowy model, uwzględniając **efekty kwantowe**. Elektron może krążyć tylko po określonych skwantowanych orbitach. Emitowana energia również jest skwantowana i emitowana tylko wówczas, gdy elektron zmienia orbitę.

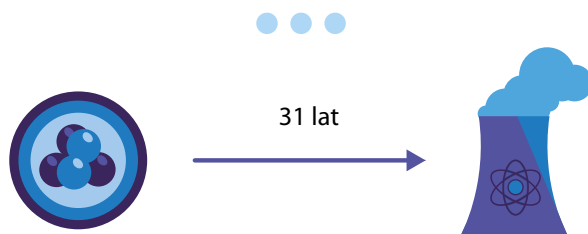


### 4. Model atomu Erwina Schrödingera (1925)

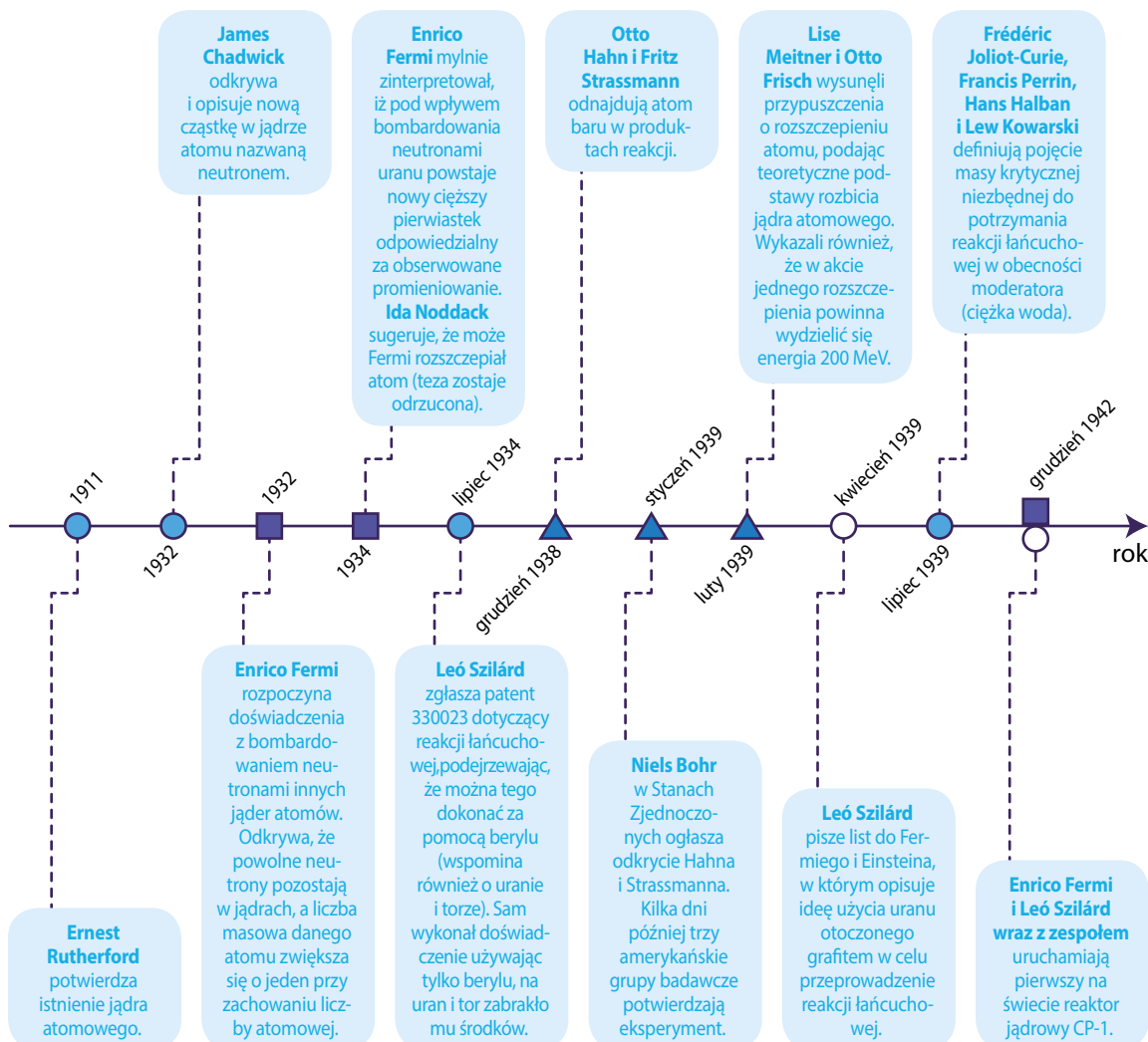
Obecnie obowiązuje kwantowy model atomu zaproponowany przez Erwina Schrödingera. Opiera się on na podstawowych założeniach mechaniki kwantowej, gdzie obiekty posiadają **podwójną naturę falowo-korpuskularną**.

## Ile lat minęło od odkrycia jądra atomowego do uruchomienia pierwszego reaktora jądrowego?

Pierwszy reaktor uruchomiono zaledwie **31 lat po odkryciu jądra atomowego** i tylko 10 lat po odkryciu neutronu!



### Warto przyrzeć się chronologii kluczowych odkryć z tego okresu:



Historia energetyki atomowej to w przybliżeniu:  
60 lat, 120 lat czy 2 miliardy lat?

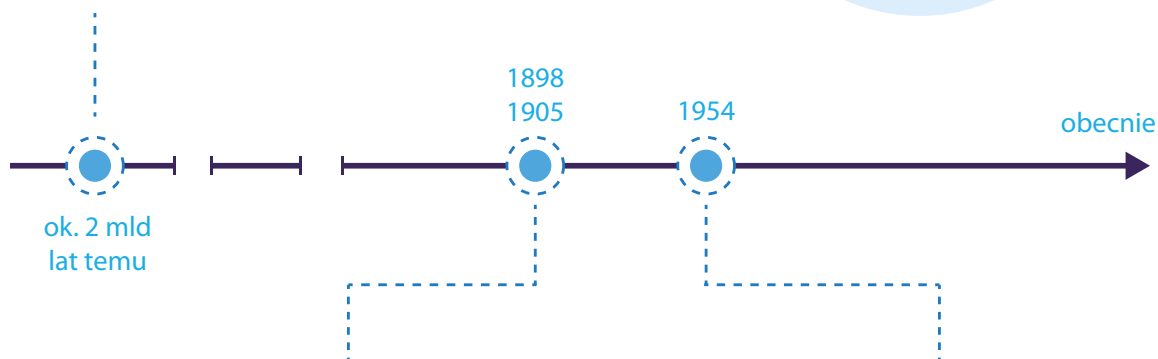
Niezależnie, którą odpowiedź wybrałeś(-aś), masz rację!



Brzmi to nieprawdopodobnie, ale najstarszy odnaleziony dotąd reaktor jądrowy powstał... 2 miliardy lat temu, czyli przed pojawieniem się na ziemi człowieka!

#### Jak to więc możliwe?

Chodzi o **naturalne reaktory jądrowe**, które działały przez kilkaset tysięcy lat w złożach uranu na terenie dzisiejszego Gabonu (Afryka Środkowa). Ich odkrycia dokonał w 1972 roku Francis Perrin.

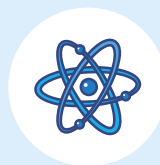


#### Lata 1898 i 1905 to odkrycia naukowe, będące podwaliną współczesnej atomistyki.



1898 r. – odkrycie przez Marię Skłodowską-Curie i Piotra Curie nowego pierwiastka promieniotwórczego – **polonu** oraz wspólnie z Gustavem Bémontem **radu**.  
Badania nad promieniotwórczością.

1905 r. – opublikowanie przez Alberta Einsteina **Szczególnej Teorii Względności**, której częścią jest tożsamość masy z energią -  $E=mc^2$ .

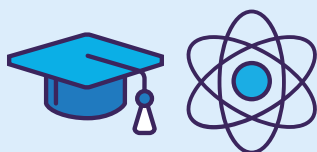


Początki energetyki atomowej, to również uruchomienie **pierwszej na świecie cywilnej elektrowni atomowej** w Obnińsku w ZSRR.

Pierwszy reaktor **do celów naukowych i eksperymentalnych** zaczął działać w 1942 roku na uniwersytecie w Chicago.

Jaki obiekt sportowy Uniwersytetu Chicagowskiego posłużył jako miejsce budowy pierwszego reaktora jądrowego?

Miejscem budowy został **kort do gry w rackets** (gra podobna do squasha), znajdujący się pod trybunami uniwersyteckiego stadionu footballowego Stagg Field. Wybrano go dlatego, że miał odpowiednie wymiary i był usytuowany pod ziemią.



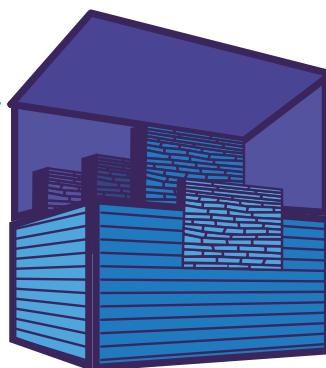
**Pierwszy reaktor jądrowy** został zbudowany przez zespół Enrico Fermiego na **Uniwersytecie Chicagowskim**.

Krytyczność osiągnął 2 grudnia 1942 r.

Była to **pierwsza samopodtrzymująca się łańcuchowa reakcja rozszczepienia**

zainicjowana przez człowieka. Od nazwy instytucji, w której powstał reaktor, został on nazwany **Chicago Pile 1** (Stos Chicagowski nr 1).

Reaktor składał się z ułożonych na sobie **sztabek** wykonanych z **grafitu** o wysokiej czystości, w których umieszczono paliwo uranowe. Bloki grafitowe na miejscu trzymała **drewniana rama**, a do kontroli reakcji rozszczepienia użyto **kadmowych prętów kontrolnych**.



**Czy wiesz, że...**

**Najwyższa moc**, jaką osiągnął reaktor CP-1, to około **200 W**.

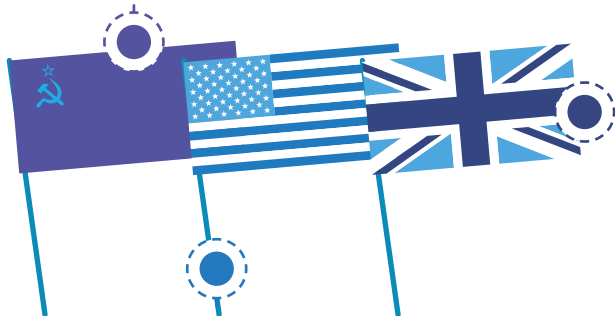


Gdzie powstała pierwsza elektrownia jądrowa: w Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii czy Związku Radzieckim?

Pierwsza elektrownia jądrowa powstała w **Związku Radzieckim**.  
Jednak pozostałe odpowiedzi są również częściowo poprawne!

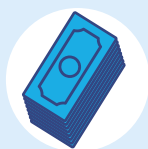


Za **pierwszą** elektrownię jądrową uznaje się **elektrownię w Obnińsku** – około 100 km na południowy zachód od Moskwy. W 1954 r. uruchomiono tam **reaktor AM-1** (*Atom Mirny* – Atom pokojowy), który był pierwszym na świecie reaktorem produkującym prąd do sieci elektroenergetycznej. Oddawana do sieci moc wynosiła 5 MW. Reaktor działał do 2002 r., choć po 1959 r. nie produkował już energii elektrycznej.



Uruchomioną w 1956 r. w **Wielkiej Brytanii** elektrownię **Calder Hall** uznaje się często za pierwszą produkującą energię **na skalę przemysłową** – 60 MW przy 5 MW w Obnińsku.

Pierwszym reaktorem, który wykorzystano **do produkcji energetycznej**, był reaktor **EBR-I** w Idaho National Laboratory w **Stanach Zjednoczonych**. Uruchomiono go w 1951 r., ale nie został on nigdy podłączony do sieci, a jedynie zasiliał okoliczne budynki, stąd nie można go uznać za pierwszą elektrownię.



Elektrownia **Shippingport** uruchomiona w Stanach Zjednoczonych w 1957 r. jest czasami nazywana **pierwszą komercyjną elektrownią**, gdyż jej jedyną funkcją była produkcja energii elektrycznej. **Obnińsk** pełnił również funkcję **reaktora badawczego**, był też wykorzystywany do **produkcji izotopów**. **Calder Hall** produkowało także **pluton do celów wojskowych**.



## Co mają wspólnego pasjans, pierwszy komputer i energetyka jądrowa?

Metoda Monte Carlo, powszechnie używana w energetyce jądrowej do rozwiązywania równania transportu promieniowania, została wymyślona właśnie podczas układania pasjansa przez polskiego matematyka Stanisława Ulama i zaimplementowana na pierwszym komputerze na świecie!



W 1946 r., układając pasjansa, Stanisław Ulam zadał sobie pytanie, **jaka jest szansa ułożenia pasjansa z rozdanych kart**. Szansę tę można oczywiście określić za pomocą zaawansowanych obliczeń matematycznych, lecz czy nie istnieje prostszy sposób? Można przecież rozłożyć karty np. 100 razy i po prostu policzyć, ile razy udało się ułożyć pasjansa! W ten sposób powstała **nowa metoda obliczeniowa zrozumiała praktycznie dla każdego**. Została nazwana Monte Carlo, przez analogię do rajy hazardzistów – dzielnicy Monako.



**Ale czy nawet najwytrwalszy gracz jest w stanie w szybkim tempie ułożyć 100 partii pasjansa?**

Stanisław Ulam zdał sobie sprawę, że metoda Monte Carlo nadaje się idealnie do **obliczeń na pierwszym komputerze, ENIACu** (z ang. *Electronic Numerical Integrator And Computer*).

W niedługim czasie metoda została przetransformowana na program komputerowy zrozumiały przez ENIACa, co **zapoczątkowało erę symulacji numerycznych**.



Obecnie metoda Monte Carlo jest **jedną z najpopularniejszych metod** wykorzystywanych do **projektowania systemów jądrowych**.



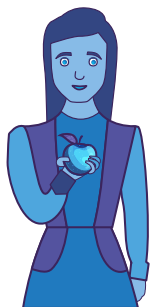
### Stanisław Ulam (1909–1984)

Polski matematyk, przedstawiciel Lwowskiej Szkoły Matematycznej. Twórca metody Monte Carlo. Zaangażowany w prace nad bombą jądrową podczas amerykańskiego projektu Manhattan. Współtwórca bomby termojądrowej. W 1943 r. przyjął amerykańskie obywatelstwo.



## Ile reaktorów jądrowych powstało w Polsce: 2, 5 czy 6?

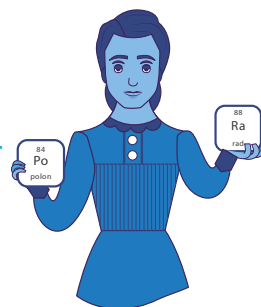
Może to wydawać się zaskakujące, ale wszystkie te odpowiedzi można uznać za poprawne!



Pierwszym reaktorem była uruchomiona w 1958 roku **EWA**, która nazwą nawiązywała do imienia pierwszej kobiety, jak również do akronimu słów **E**ksperymentalny, **W**odny, **A**tomowy. Reaktor ten osiągnął moc cieplną 10 MW.

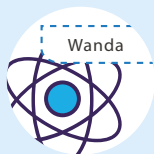
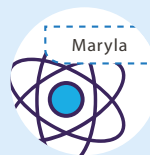
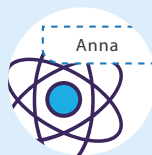


Reaktor EWA rozpoczął trend nadawania kolejnym reaktorom imion żeńskich.



Drugim „dużym” reaktorem badawczym jest uruchomiona w 1974 roku **MARIA**. Reaktor o mocy 30 MW działa po modernizacjach do dziś. Swoją nazwą nawiązuje do naszej podwójnej noblistki Marii Skłodowskiej-Curie.

Poza wspomnianymi wyżej reaktorami istniały jeszcze trzy, nieco zapomniane, reaktory o mocy zerowej (tzw. zestawy krytyczne). To reaktory, których niewielka moc nie wymaga stosowania dedykowanego układu chłodzenia. Były to kolejno: **ANNA, MARYLA i AGATA**.



Ostatnim reaktorem była **WANDA** – nazywana również UR-100 od nazwy typu reaktora, którego miała być prototypem. Docelowo miała ona działać na krakowskiej AGH, ale projektu nigdy nie ukończono i zwykle nie jest wliczany do całkowitej liczby polskich reaktorów. Gotowy korpus reaktora został przewieziony do Krakowa, gdzie można oglądać go do dziś

## Czy w Polsce wydobywa lub wydobywało się uran?

Tak! W Polsce **w latach 50. XX w. na Dolnym Śląsku** istniały kopalnie uranu, w których wykorzystywano m.in. stare średniowieczne sztolnie, używane niegdyś do wydobywania żelaza, miedzi czy srebra.

**Kopalnia Kopaliny** składała się z 20 sztolni, 3 szybów, a łączna długość wyrobisk wynosiła **ponad 37 km**. W czasie eksploatacji wydobyto w niej **około 20 ton uranu**. Była to jedna z kilku kopalni istniejących na terenie Polski. Wszystkie podlegały zakładom przeróbki uranu pod kryptonimem „Zakłady Przemysłowe R-1”. Działały od 1 stycznia 1948 r. na terenie całego kraju. Ich głównymi zadaniami było poszukiwanie i wydobywanie rudy uranowej.

## Złóża rud uranowych w Polsce\* – orientacyjna lokalizacja



● Całość urobku została **wywieziona** z terenów Polski do ZSRR.

● **Ostatnia placówka w Kowarach** działała do 1973 r.

**Ciekawostka 1**

Obecnie w sztolniach, gdzie kiedyś wydobywano uran, powstają **prywatne ścieżki turystyczne**. Wycieczki mogą zwiedzać dawne wyrobiska. Atrakcje takie możemy spotkać m.in. w Kowarach i Kletnie.

**Ciekawostka 2**

Naturalny uran jest pierwiastkiem o **największej liczbie atomowej (92)**, który występuje na ziemi. Składa się ze słabo promieniotwórczego izotopu  $^{238}\text{U}$  (99,3%),  $^{235}\text{U}$  (około 0,7%) i śladowych ilości  $^{234}\text{U}$ .

**Ciekawostka 3**

Pierwsze mapy z zaznaczonym występowaniem uranu na ziemiach polskich pochodzą z 1815 r., a jednym z ich autorów jest Stanisław Staszic.

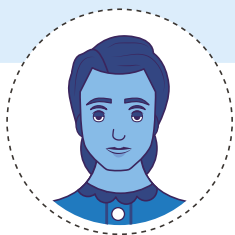
\*Źródło: Państwowy Instytut Geologiczny: opracowanie własne

## Ile Nagród Nobla związanych z atomistyką otrzymali Polacy?

Naukowcy polskiego pochodzenia otrzymali w sumie **aż cztery nagrody Nobla związane z atomistyką!**

**Maria Skłodowska-Curie**

1867 r. Warszawa – 1934 r. Passy (Francja)  
Polska fizyczka i chemiczka  
(w 1895 r. przyjęła obywatelstwo francuskie)

**Dwukrotna laureatka Nagrody Nobla:**

- w 1903 r., **w dziedzinie fizyki** wraz z Pierrem Curie „w uznaniu ich zasług, jakie oddali poprzez wspólne badania nad zjawiskiem promieniotwórczości odkrytym przez profesora Henriego Becquerela”;
- w 1911 r., **w dziedzinie chemii** „za wydzielenie czystego radu i uzyskanie radu w postaci krystalicznej”.

**Irène Joliot-Curie**

1897 r. Paryż – 1956 r. Paryż  
Chemiczka polskiego pochodzenia  
Córka Marii Skłodowskiej-Curie

**Laureatka Nagrody Nobla**

wraz z mężem Frédéricem Joliot **w dziedzinie chemii** „za syntezę nowych pierwiastków promieniotwórczych” (1935 r.).

**Georges Charpak**

1924 r. Dąbrowica  
– 2010 r. Paryż  
Francuski fizyk pochodzenia polsko-żydowskiego

W 1992 roku otrzymał Nagrodę Nobla za rozwój detektorów cząstek.

**Józef Rotblat**

1908 r. Warszawa – 2005 r. Londyn  
Polski fizyk żydowskiego pochodzenia  
(w 1946 r. przyjął obywatelstwo brytyjskie)



- Współtwórca pierwszej bomby atomowej.
- **Laureat Pokojowej Nagrody Nobla** wraz z ruchem Pugwash w 1995 r. za „wysiłki na rzecz umniejszenia roli odgrywanej przez broń jądrową w polityce międzynarodowej i, w dłuższej perspektywie, wyeliminowania takiej broni”.

**CIEKAWOSTKA**

- Inną postacią zasłużoną dla atomistyki i związaną z Polską jest **Hyman George Rickover** (1900-1986) – amerykański admirał marynarki wojennej pochodzący z polskiej rodziny żydowskiej.
- Nazywany jest „**ojcem atomowej marynarki wojennej**”, wniósł ogromny wkład w rozwój technologii atomowych okrętów podwodnych.
- Był również propagatorem **pokoju wykorzystania energii jądrowej**.

Jak nazywała się rozpoczęta w latach 50. inicjatywa upowszechnienia energetyki jądrowej na świecie?

Był to program **Atomy dla pokoju** (ang. *Atoms for Peace*), którego nazwa pochodzi od tytułu przemówienia wygłoszonego przez amerykańskiego prezydenta Dwighta D. Eisenhowera na Zgromadzeniu Ogólnym ONZ w 1953 roku.



Przemówienie „Atomy dla pokoju” zawierało:

- zapowiedź nowego kierunku polityki USA dotyczącego dalszego rozwoju i wykorzystania energii jądrowej,
- postulat pozbawienia energii drzemącej w atomie jej militarnej otoczki,
- propozycję rozwijania w ramach międzynarodowej współpracy reaktorów jądrowych wyłącznie w celu wytwarzania energii elektrycznej.



### Następstwa programu Atomy dla pokoju

#### 1. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (1957 r.)

Swoje cele statutowe realizuje poprzez ścisłą kontrolę instalacji jądrowych na świecie oraz udostępnianie zainteresowanym krajom technologii otrzymywania energii z reakcji rozszczepienia.



#### 2. Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej

- Ratyfikowany do 2003 r. przez 189 państw.
- Dzieli państwa na grupę państw nuklearnych i nienuklearnych.



Państwom **nienuklearnym** zakazuje się posiadania broni jądrowej. W zamian kraje te otrzymują dostęp do pokojowych technologii jądrowych.

**Państwa nuklearne** nie mogą przekazywać komukolwiek bezpośrednio lub pośrednio broni jądrowej lub innych jądrowych urządzeń wybuchowych.

- Zabronione jest także okazywanie pomocy, zachęcanie i nakłanianie państw niedysponujących bronią jądrową do jej produkowania lub uzyskania inną drogą.
- Nadzór nad realizacją traktatu sprawuje Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA).

## Co znajduje się w centrum atomu?

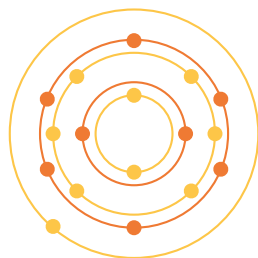
W centrum atomu znajduje się **jądro atomowe**, które składa się z dwóch rodzajów nukleonów: protonów i neutronów.



Jądro atomowe jest zazwyczaj przedstawiane jako **zlepek kuleczek**. Faktycznie jednak jądro rozumiane przez współczesną fizykę jądrową **nie może być tłumaczone w ten sposób**. Starania opisu jądra odbywają się na drodze **fizyki kwantowej**. Nie sformułowano do tej pory pełnej teorii jądra atomowego. Istnieją jednak **modele**, które są w stanie tłumaczyć pewne obserwowane właściwości.

**Model kropkowy** przedstawia jądro jako obracające się krople.

Jest on w stanie z sukcesem wytłumaczyć energię wiązania w jądrze i jego wielkość, a także procesy dzielenia się jądra na dwa fragmenty podczas zjawiska rozszczepienia.



**Model powłokowy** traktuje nukleony jako niezależne cząstki i jest tworzony na wzór modelu powłokowego układu elektronów w atomie. Jądra o zamkniętych (wypełnionych) powłokach protonowych albo zamkniętych powłokach neutronowych wykazują **dużą stabilność**, podobnie jak atomy szlachetnych gazów o wypełnionych powłokach elektronowych. Jądra, które mają zamknięte powłoki dla neutronów i protonów, tworzą tak zwane jądra magiczne\*, które obserwowane są doświadczalnie.

\* **Jądra magiczne** to takie, które zawierają odpowiednie liczby neutronów i protonów, wykazując **większą stabilność** od innych sąsiednich jąder zawierających podobną ilość neutronów i protonów. Jądraми takimi są:  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ .

## Ciekawostka

Również neutrony i protony mają **wewnętrzną strukturę**. Składają się z **kwarków**. Proton składa się z dwóch kwarków górnych i jednego dolnego. Neutron składa się z dwóch kwarków dolnych i jednego górnego.



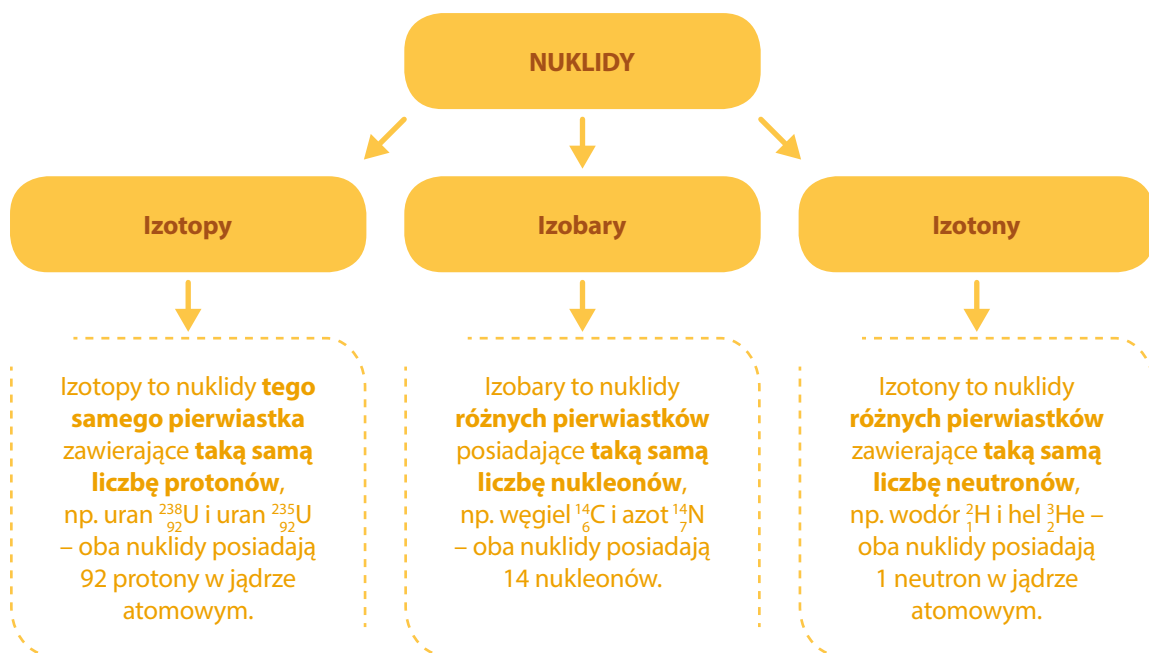
## W jaki sposób opisujemy jądra atomowe?

Jądra atomowe można opisać ze względu na **liczbę nukleonów**, czyli protonów i neutronów, znajdujących się w jądrze.



Jądra atomowe zawierające określoną liczbę protonów i neutronów nazywamy **nuklidami**.

Nuklidy dzielimy na izotopy, izobary i izotony.



## Co to jest promieniotwórczość?

Promieniotwórczość to zdolność jąder atomowych do rozpadu promieniotwórczego, któremu często towarzyszy emisja cząstek alfa, beta czy też promieniowania gamma.



Wszystkie izotopy promieniotwórcze z czasem ulegają **naturalnym samoistnym przemianom** w inne pierwiastki bądź izotopy. Szybkość tych przemian określa **prawo rozpadu naturalnego**. Każdy z izotopów promieniotwórczych charakteryzuje tzw. **stała rozpadu**, jednakże dla ułatwienia przyjęło się podawać tzw. **czas połowicznego rozpadu** dla izotopu. Jest to nic innego jak czas, po którym połowa jąder promieniotwórczych danego pierwiastka ulegnie samorzutnej przemianie (rozpadowi).



Mówiąc o promieniotwórczości, często używa się terminu: **aktywność**. Określa ona liczbę rozpadów zachodzących w jednostce czasu w źródle promieniotwórczym:

$$1 \text{ Bq (bekerel)} = 1 \text{ rozpad/sekundę}$$

Wraz ze spadkiem czasu połowicznego rozpadu rośnie aktywność źródła promieniotwórczego. Poniżej podane zostały przykładowe **wielkości czasu połowicznego rozpadu** dla niektórych izotopów:

$^{222}\text{Rn} \rightarrow 3,8 \text{ dnia}$

$^{40}\text{K} \rightarrow 1,28 \times 10^9 \text{ lat}$

$^{131}\text{I} \rightarrow 8 \text{ dni}$

$^{239}\text{Pu} \rightarrow 2,4 \times 10^5 \text{ lat}$

$^{14}\text{C} \rightarrow 5 \text{ 730 lat}$

$^{238}\text{U} \rightarrow 4,5 \times 10^9 \text{ lat}$

**Czy wiesz, że...**

**Promieniotwórczość** izotopów **wykorzystywana** jest w wielu dziedzinach:

- **do datowania próbek** (zmiany aktywności izotopu  $^{14}\text{C}$  w czasie),
- **w terapiach nowotworowych oraz badaniach profilaktycznych** (izotopy promieniotwórcze, akceleratory – wiązki protonów),
- **w czujnikach dymu** (rozpad alfa),
- **podczas poszukiwania złóż ropy** na ziemi oraz wody na Marsie (promieniowanie neutronowe).



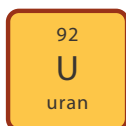
## Czy w skorupie ziemskiej występują naturalne materiały promieniotwórcze?

Tak, w przyrodzie występuje dużo naturalnych izotopów emitujących promieniowanie. Głównie są to produkty rozpadu **szeregu uranowego i torowego**.

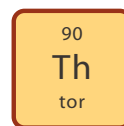


**Szeregiem** nazywamy łańcuch następujących po sobie rozpadów promieniotwórczych aż do nuklidu stabilnego.

- W **szeregu uranowym** pierwszym nuklidem jest uran  $^{238}_{92}\text{U}$ , a ostatnim stabilnym ołów  $^{208}_{82}\text{Pb}$ .

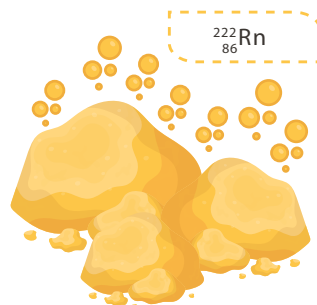


- W **szeregu torowym** pierwszym nuklidem jest tor  $^{232}_{90}\text{Th}$ , a ostatnim stabilnym ołów  $^{208}_{82}\text{Pb}$ .



Największym naturalnym źródłem promieniowania jest **radon**  $^{222}_{86}\text{Rn}$  – od niego otrzymujemy około **50% naturalnej dawki promieniowania**.

- Nuklid ten ma formę gazową, dlatego łatwo wydobywa się na powierzchnię ze skorupy ziemskiej.
- Jego ilość zależy głównie od od budowy geologicznej danego regionu.
- Może się on gromadzić w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie jego dodatkowym źródłem mogą być materiały budowlane, z których wykonany jest budynek.



### Czy wiesz, że...

W **węglu** występuje również uran. Podczas spalania węgla uran odkłada się w popiele, więc w pewnym sensie **elektrownie węglowe są... producentami uranu!** Dodatkowo energia zawarta w uranie występującym w węglu przewyższa energię uzyskiwaną ze spalania węgla!



## Dlaczego licznik Geigera-Müllera wydaje z siebie „trzaski”?

Trzaski to nic innego jak **impulsy elektryczne** wytworzone przez kolejne cząstki promieniowania rejestrowane w detektorze, a następnie wzmacnione przez układ elektryczny.



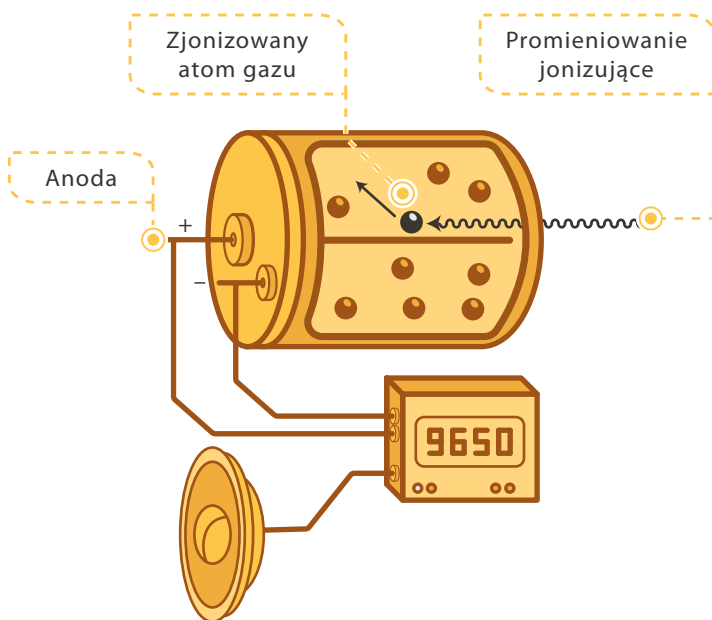
Licznik Geigera służy do detekcji promieniowania jądrowego. Stworzyło go w 1928 r. dwóch niemieckich fizyków: Hans Geiger i Walter Müller.



Jest to **elektroda wypełniona specjalną mieszaniną gazów pod zmniejszonym ciśnieniem**, która pozwala na stosowanie większych wartości napięć pomiędzy anodą a katodą, a przez to zwiększenie czułości urządzenia.

## Jak działa licznik Geigera?

1. Wpadające promieniowanie powoduje **jonizację gazu** (wybicie elektronu).
2. Wytworzone w ten sposób ładunki ujemne zbiegają do elektrody naładowanej dodatnio, natomiast powstałe ładunki dodatnie przyciągane są przez elektrodę naładowaną ujemnie.
3. Naładowane cząstki wywołują impuls elektryczny, który rejestrowany jest przez urządzenie pomiarowe.



- Za pomocą opisanego wyżej detektora **nie jesteśmy w stanie określić rodzaju mierzonego promieniowania**, ponieważ licznik Geigera rejestruje wszystkie rodzaje promieniowania jonizującego.
- Wykorzystując licznik Geigera, możemy jedynie określić intensywność promieniowania, a w konsekwencji oszacować potencjalną przyjętą dawkę.



## Czy można zobaczyć promieniowanie jonizujące?

Samego promieniowania nie można dostrzec, ale można zobaczyć niektóre **efekty jego działania!**



Urządzenie, które pozwala obserwować ślady cząstek elementarnych, to **komora Wilsona**, nazywana także **komorą mgłową**.

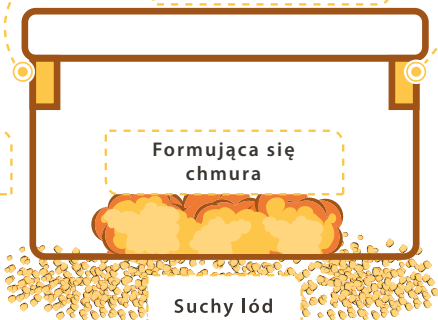
Materiał nasączony alkoholem

Przezroczyste wieko

Światło

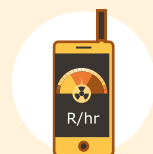
Formująca się chmura

Suchy lód



- Jej działanie opiera się na **wykrapianiu się pary alkoholu** w miejscu, gdzie doszło do jonizacji cząsteczek powietrza, czyli w miejscu przejścia cząstki promieniowania jonizującego.
- Urządzenie takie można **zrobić nawet w domu!** Do budowy komory potrzebne będą: akwarium lub inny przezroczysty pojemnik, metalowa płytka, kawałek filcu lub gąbki, alkohol izopropylowy i suchy lód.

Innym zjawiskiem pozwalającym „zobaczyć” promieniowanie jest **scytylacja**, czyli powstawanie rozbłysków świetlnych w niektórych substancjach (np. w siarczku cynku), przez które przechodzi promieniowanie. Zjawisko to jest wykorzystywane w detektorach promieniowania, tzw. **licznikach scytylacyjnych**.



## Jak skutecznie osłonić się przed promieniowaniem?

Należy pamiętać, że **promieniowanie naturalne nas otacza i nawet nasz organizm jest jego źródłem**. Chronienie się przed nim jest więc niepotrzebne i niemożliwe.

Inaczej wygląda praca z silnymi źródłami promieniowania, np. w energetyce czy medycynie – tutaj zapewnienie ochrony jest niezbędne. Metody ochrony radiologicznej różnią się w zależności od rodzaju promieniowania jonizującego oraz jego źródła, jednak można wyróżnić pewne podstawowe zasady ochrony.



**Bez względu na rodzaj promieniowania** należy przede wszystkim **ograniczyć** do niezbędnego minimum kontakt z materiałem promieniotwórczym poprzez:

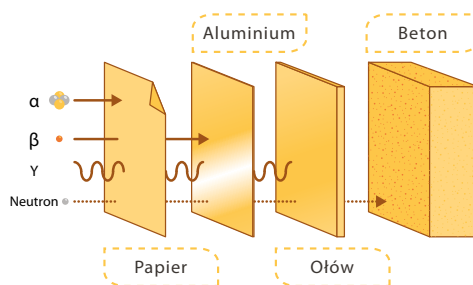
**ograniczenie czasu** narażenia – im dłużej przebywamy w bezpośredniej bliskości źródła, tym większą otrzymamy dawkę

zachowanie **możliwie największej odległości** od źródła – należy pamiętać, iż moc dawki spada wraz z kwadratem odległości

**stosowanie osłon** – im większa gęstość materiału, z jakiej wykonana jest osłona, tym lepiej chroni ona przed promieniowaniem

### Wyróżniamy cztery podstawowe rodzaje promieniowania jonizującego:

- **Alfa** – to rozpadnięte jądra atomów helu ( ${}^4\text{He}$ ), które ze względu na wypadkowy ładunek dodatni dość silnie oddziałują z materią, szybko wytracając przy tym energię – są zatrzymywane już przez kartkę papieru. Średni zasięg cząstek alfa w powietrzu to ok. 4 cm.
- **Beta** – powstający podczas rozpadu beta ( $\beta$ ) strumień elektronów (rozpad  $\beta^-$ ) lub pozytonów (rozpad  $\beta^+$ ). Z powodu posiadania wypadkowego ładunku cząstki te dość silnie oddziałują z materią, co jednocześnie zmniejsza ich możliwy zasięg – zatrzymuje je już kilkumilimetrowa (w zależności od gęstości materiału) warstwa metalu, np. folia aluminiowa.
- **Gamma** – wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne. Nośnikiem energii są w tym przypadku wysokoenergetyczne fotony, które dość słabo oddziałują z materią – zatrzymuje je dopiero kilkudziesięciomilimetrowa warstwa gęstego materiału, np. ołowiu.
- **Neutronowe** – strumień wolnych (niezwiązanych) neutronów, czyli elektrycznie obojętnych cząstek subatomowych. Oddziaływanie neutronów z materią jest silnie zależne od ich energii (prędkości).



## Czy są cząstki, które poruszają się szybciej niż światło?

To pytanie jest zadane podchwytliwie. Nic nie może poruszać się szybciej niż wynosi prędkość światła w próżni. Jednak w niektórych ośrodkach światło może poruszać się wolniej niż wysokoenergetyczne naładowane cząstki.

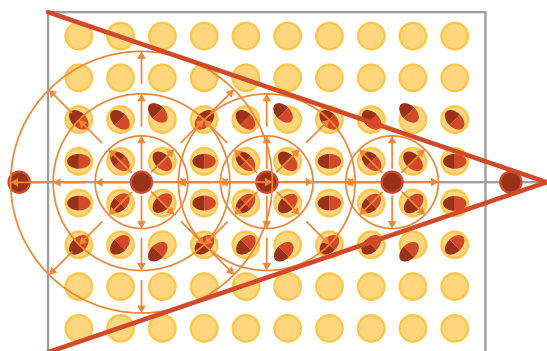


## Czy wiesz, że...

W **wodzie** światło porusza się z około **75% mniejszą prędkością** niż w próżni. W skali makroskopowej wciąż porusza się ze swoją niezmienną prędkością w próżni. Jednakże ze względu na to, że zachodzą **interakcje fotonów z atomami ośrodka**, porusza się z sumarycznie mniejszą prędkością obserwowalną.



Ośrodek, np. woda



Atom neutralny

Dipol

Naładowana cząstka

- W ośrodku, w którym cząstki naładowane poruszają się z większą prędkością niż światło, pojawia się fala świetlna odpowiedzialna za powstawanie **promieniowanie Czerenkowa**.
- Promieniowanie Czerenkowa można zaobserwować w **reaktorach wodnych**, gdzie światło porusza się wolniej niż wysokoenergetyczne cząstki beta. W rezultacie **woda** dookoła rdzenia świeci na niebiesko.

Wyjaśnienie tego zjawiska jest analogiczne do tworzenia się **akustycznej fali uderzeniowej** za samolotem nadźwiękowym. W wyniku przelatującej naładowanej cząstki molekuly wody są do tej cząstki przyciągane, powodując ich drgania, które są źródłem promieniowania elektromagnetycznego. Z racji tego, że cząstka przelatująca porusza się **szybciej** niż emitowane fale elektromagnetyczne, powstaje **czoło fali** odpowiedzialne za wystąpienie **promieniowania Czerenkowa**.

## Ciekawostki

- W 1958 r. za badania nad promieniowaniem Czerenkow, Frank i Tamm otrzymali Nagrodę Nobla.
- Odkrycie promieniowania Czerenkowa znalazło zastosowanie w skonstruowaniu **detektorów cząstek promieniowania kosmicznego**, jak również innych szybkich cząstek.



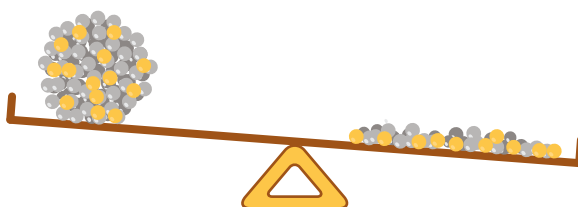
Czy jądro atomowe ma masę równą sumie mas tworzących je protonów i neutronów?

Nie! Całe jądro ma **mniejszą masę niż tworzące je składniki**.



Można by się spodziewać, że masa nuklidu A zawierającego Z protonów i N neutronów jest sumą tych składników. Pomiary jednak wskazują inaczej – w rzeczywistości występuje **defekt masy**.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_A$$



Różnica tych mas przeznaczona jest na **energię wiązania nukleonów** zgodnie ze sławnym równaniem Einsteina.

**Energia wiązania** jest najmniejszą ilością energii potrzebną do rozdzielania (rozbicia) danego jądra na pojedyncze nukleony swobodne, które nie oddziałują siłami jądrowymi z jakąkolwiek inną cząstką.

$$\text{Energia wiązania} = \Delta m \cdot c^2$$



### Zasada rozszczepiania i syntezy

Reakcje jądrowe, które będą zwiększać energię wiązania, produkują energię.

**Synteza (fuzja) jądrowa** jest połączeniem nuklidów lżejszych od żelaza w większe, co oznacza, że produkujemy energię.

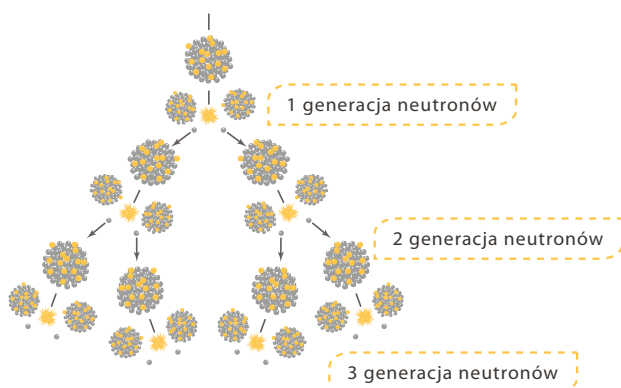
**Rozszczepienie jądrowe** polega na rozdzielaniu jednego dużego nuklidu na dwa mniejsze, co również prowadzi do uwolnienia energii.

Jak nazywamy reakcję, w której uzyskane produkty powodują zajście kolejnej reakcji?

Jest to **reakcja łańcuchowa**, czyli szereg kolejno po sobie następujących reakcji powiązanych w ten sposób, że produkt reakcji poprzedniej staje się substratem dla jednej lub kilku reakcji następných.



Reakcja łańcuchowa to **zjawisko powszechnie występujące** w przyrodzie. Na przykład w **palącym się ogniu** zachodzi reakcja łańcuchowa, w której na skutek reakcji chemicznego spalania dochodzi do produkcji ciepła, które podtrzymuje spalanie, powodując dalszą produkcję ciepła i tak dalej.



Jak tylko fizycy **odkryli**, że w ramach rozszczepienia jądra uranu przez neutron oprócz dwóch fragmentów rozszczepionego jądra powstaje średnio **2,4 neutronu**, zdali sobie sprawę, że reakcja łańcuchowa jest możliwa z **wykorzystaniem neutronów**.

- Taka reakcja jest zjawiskiem, które może być zastosowane **zarówno w celach pokojowych**, jak i do stworzenia potężnej **bomby**.
- Nie każdy powstały neutron w wyniku rozszczepienia wywoła kolejne rozszczepienie. Większość z nich zostanie **zaabsorbowanych** w samym rdzeniu lub poza nim. Wykorzystanie reakcji łańcuchowej **w celach pokojowych** wymaga **kontroli** nad zachowaniem **odpowiedniej liczby neutronów** w rdzeniu.

### Ciekawostka

Zastosowanie reakcji łańcuchowej znajdziemy również w metodzie **powielania łańcuchów DNA** w łańcuchowej reakcji **polimerazy**. Metoda ta ma zastosowanie w badaniach genetycznych, klonowaniu genów, kryminalistyce czy paleontologii.



Czy w rdzeniu reaktora jądrowego w trakcie jego pracy są ruchome elementy?

W rdzeniu reaktora jądrowego **nie ma ruchomych elementów.**



### Czy wiesz, że...

Sam **rdzeń** składa się z:

- prętów paliwowych tworzących kasetę paliwową,
- dolnej płyty wsporczej oraz górnej płyty wsporczej.

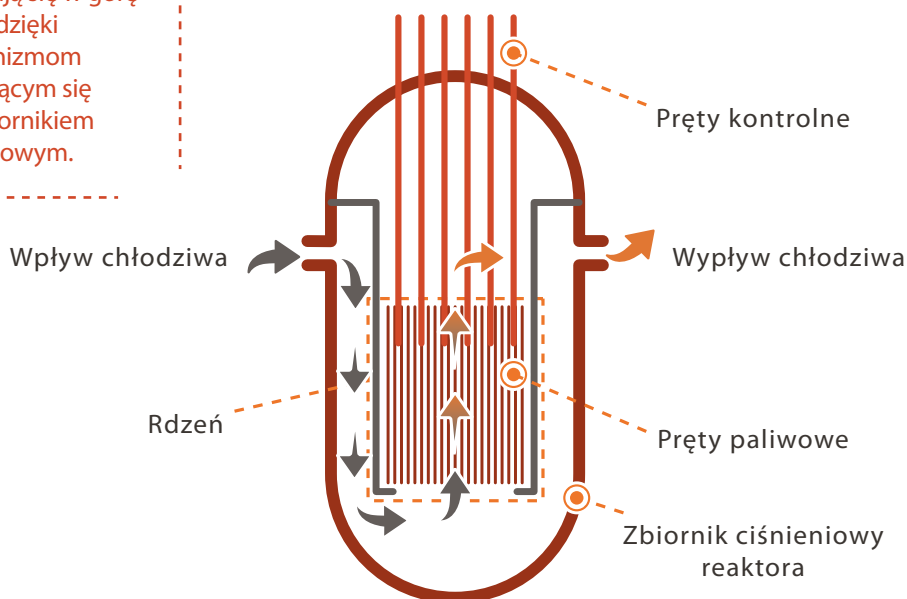
Całość otoczona jest stalową powłoką dopasowaną do ułożenia kaset paliwowych.

W czasie normalnej eksploatacji wewnątrz rdzenia nie mamy żadnego ruchomego elementu, poruszają się jedynie pręty kontrolne, lecz nie są to integralne części rdzenia.



**Pręty kontrolne** poruszają się w górę i w dół dzięki mechanizmom znajdującym się nad zbiornikiem ciśnieniowym.

### Mechanizm sterujący prętami kontrolnymi



**Rdzeń** reaktora jądrowego można sobie wyobrazić jako **stalową puszkę z grzałkami elektrycznymi** w środku. Jediną różnicą jest **pochodzenie ciepła**. W grzałkach źródłem jest prąd elektryczny, a w rdzeniu reaktora to energia rozszczepienia.



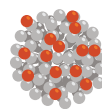
W wyniku jakiego zjawiska powstaje ciepło w reaktorze jądrowym?

Ciepło (lub energia w postaci ciepła) w reaktorze jądrowym powstaje w wyniku **hamowania atomów**. Jest wynikiem zderzeń produktów rozszczepień, ale też i rozpadów z innymi atomami w materiale.

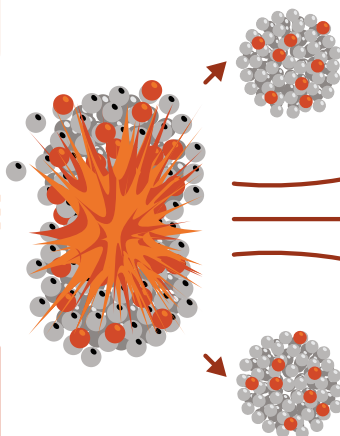


**Ciepło** wytworzone w reakcji rozszczepienia jądra atomowego w paliwie jądrowym musi zostać **przetransportowane do turbiny**, która jest podłączona do **generatora** wytwarzającego prąd elektryczny. Medium transportujące ciepło nazywa się **chłodziwem**.

Atomy te mają określoną prędkość i wspomnianą masę, więc posiadają też energię kinetyczną. Uderzają w inne atomy napotkane na swojej drodze, powodując ich drgania w strukturze materiału. Drgania te są przyczyną oddziaływań między atomami, co nagrzewa całą strukturę, a tym samym pastylkę i pręt paliwowy. Te z kolei są obmywane przez wodę, która się ogrzewa.



Rozszczepienie



**Atom uranu rozpada się na:**

- dwa atomy o masie zbliżonej do połowy masy uranu,
- 2–3 neutrony.



### Ciekawostka 1

Z jednego rozszczepienia otrzymujemy **około 200 MeV**:

- około 171 MeV – energia kinetyczna produktów rozszczepienia,
- około 5 MeV – energia kinetyczna neutronów,
- około 17 MeV – rozpad beta,
  - około 7 MeV – promieniowanie gamma.

Dla porównania reakcja spalania jednego atomu węgla ( $C+O_2 \rightarrow CO_2$ ) generuje 4,1 eV energii.



### Ciekawostka 2

Neutrony prędkie (te zaraz po rozszczepieniu) **spowalniają się** poprzez zderzenia nawet o **20 mln razy**.



### Ciekawostka 3

**1 eV** to energia, jaką uzyskuje bądź traci elektron w polu elektrycznym o różnicy potencjału 1 V.

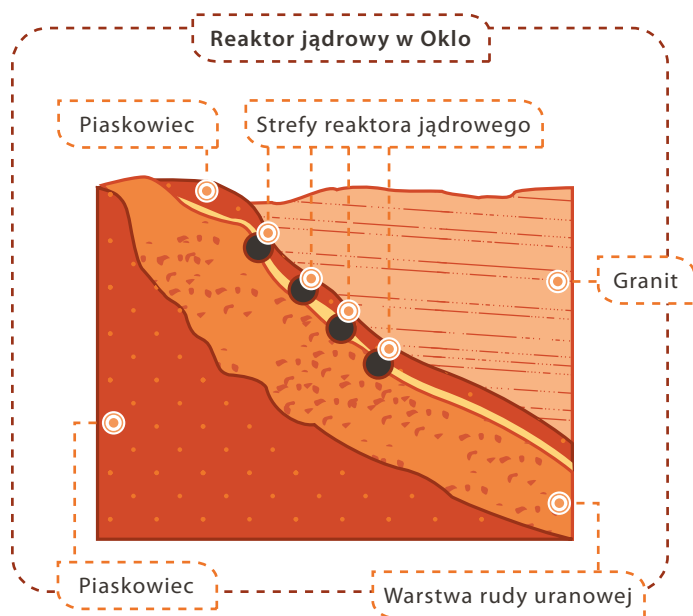
Przypomnienie:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$E_k$  – energia kinetyczna  
 $m$  – masa  
 $v$  – prędkość

Czy reaktor jądrowy może powstać samoistnie w środowisku naturalnym?

Tak! Pierwszy znany reaktor stworzyła sama natura.



- W 1972 r. w znajdującym się w południowo-wschodnim Gabonie **Oklo** odkryto złoża **rud uranowych w kształcie soczewek** grubości około 1 m i średnicy 10 m. Po badaniach okazało się, że ruda ta zawiera o wiele mniej uranu 235 (około 0,6%) niż normalnie (0,7%).
- Zbieg kilku okoliczności w ciągu ostatnich dwóch miliardów lat stworzył **naturalny reaktor jądrowy**, w którym spontanicznie nastąpiło zainicjowanie **reakcji łańcuchowej**.

### Okoliczności

1. **Złoża uranu musiały być wystarczająco skoncentrowane.**  
2,4 miliarda lat temu, w okresie paleoproterozoiku, w trakcie przemiany środowiskowej zwanej „Katastrofą tlenową” sinice zaczęły wytwarzać **znaczne ilości tlenu**, co zwiększyło jego zawartość z 1% do 15%. Dodatkowy tlen z atmosfery powodował **rozpuszczanie się** uranu w wodzie i **osadzanie się** go w **skoncentrowanych złożach**.
2. **Wymagane było większe wzbogacenie rudy uranu w rozszczepialny uran 235.**  
Obecna frakcja izotopu  $^{235}\text{U}$  jest zbyt niska, by taki reaktor mógł działać. Jednak  $^{235}\text{U}$  ma krótszy czas połowicznego rozpadu niż  $^{238}\text{U}$ , więc w przeszłości frakcja izotopu  $^{235}\text{U}$  była większa. W czasie, kiedy reaktor z Oklo pracował, frakcje izotopu  $^{235}\text{U}$  wynosiły 3,5%.
3. **Woda działała jako moderator.**  
Ostatnim wymaganym składnikiem była **woda**, która w naturalny sposób obmywała złożę i działała jako moderator, **spowalniając** neutrony dostatecznie, aby podtrzymać reakcję łańcuchową. Gdy ciepło z reakcji wygotowywało wodę, **reaktor wyłączał się** do momentu, kiedy nie spłynęła nowa woda.

Reaktor w Gabonie, jak każdy inny, produkował **odpady radioaktywne**. Ma to duże znaczenie dla badań naukowych poświęconych **długoletniemu składowaniu odpadów**.

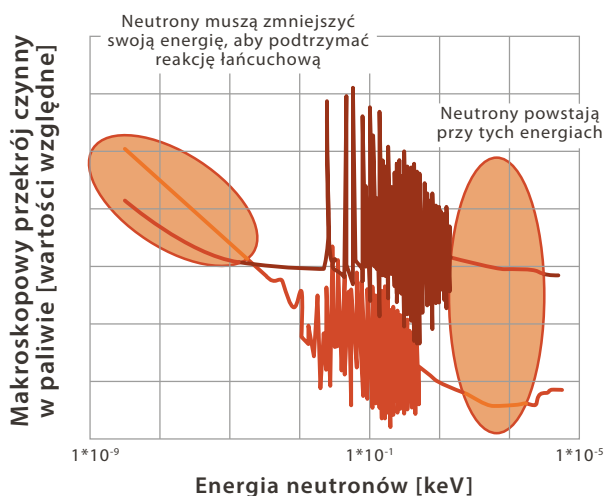
Jak nazywamy część reaktora, która służy do spowalniania neutronów?

Tą częścią jest **moderator**.



Z jednego rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  powstaje średnio **2,4 neutronu**. Aby utrzymać reakcję łańcuchową w rdzeniu, **jeden z tych neutronów** musi być przeznaczony na **kolejne rozszczepienie** ( $1/2,4 \approx 42\%$ ). Przypomnijmy, że uran posiada jeszcze jeden izotop ( $^{238}\text{U}$ ), który nie podlega rozszczepieniu.

Porównajmy efektywne makroskopowe przekroje czynne\* na rozszczepienie  $^{235}\text{U}$  i całkowity przekrój czynny dla  $^{238}\text{U}$ . Widzimy, że neutrony powstałe wskutek rozszczepienia mają większe prawdopodobieństwo, że **zostaną pochłonięte** przez  $^{238}\text{U}$  i nie dojdzie do podtrzymania reakcji rozszczepienia. Aby neutrony miały większe prawdopodobieństwo na **wywołanie rozszczepienia niż bycia pochłoniętych**, muszą zostać **spowolnione do energii termicznej**, za co odpowiada **moderator** w reaktorze.



\* **Przekrój czynny** – w fizyce jądrowej jest miarą prawdopodobieństwa, że dana reakcja zachodzi. Zależy on od energii neutronu.



### Ciekawostka 1

Średnia energia neutronu rozszczepieniowego wynosi około 2 MeV. Korzystając ze wzoru na energię kinetyczną

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

(przekształcając jednostki z eV na J), możemy wyliczyć, że takie neutrony poruszają się z prędkością **20 000 km/s**.



### Ciekawostka 2

**Energia termiczna** neutronu jest energią kinetyczną, jaką neutron posiada w stosunku do energii chaotycznie poruszających się cząsteczek w materiale. Im wyższa temperatura, tym cząstki poruszają się szybciej. Najczęściej za **neutrony termiczne** przyjmuje się te o **energii 0,025 eV**. Odpowiada to **prędkości 2 200 m/s**.

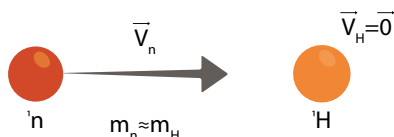
## Jakich substancji można użyć do spowalniania neutronów?

Aby podtrzymać reakcję łańcuchową, neutrony powstające wskutek rozszczepienia zostają spowolnione poprzez zderzenie ich z jądrami materiału zwanego **moderatorem**, którym może być ciężka i lekka woda, grafit, beryl oraz lit.

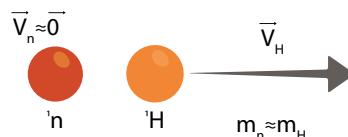


Spowalnianie neutronów jest możliwe przy użyciu **lekkich jąder moderatora**. Rozważmy **pierwszy przypadek**, kiedy **neutron jest spowalniany na jądrze wodoru**. Wodór ma podobną masę jak neutron. Jest to analogiczna sytuacja jak w grze bilardowej, kiedy dwie bile o podobnej masie się zderzają. Przy zderzeniu centralnym cząstka padająca jest w stanie przekazać cały swój pęd i energię.

Przed zderzeniem

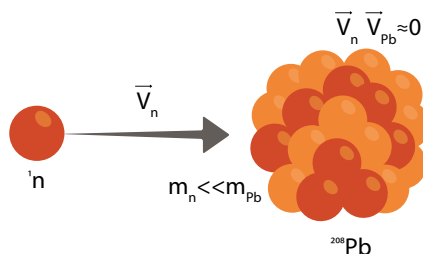


Po zderzeniu

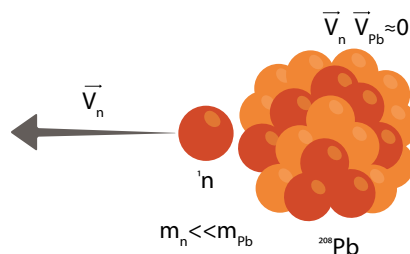


**Drugi przypadek** przedstawia zderzenie z **o wiele cięższym jądrem**. Taka sytuacja występuje, kiedy **chłodziwem jest ołów** (w reaktorze prędkim). Neutron padający na takie jądro przekazuje niewielki pęd i traci niewiele ze swej prędkości, a sam odbija się od cięższego jądra. Jest to przypadek analogiczny do tego, kiedy piłka odbija się od nieruchomo stojącego zawodnika.

Przed zderzeniem



Po zderzeniu



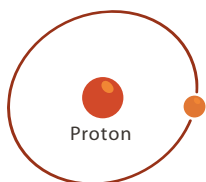
Moderator jest tym lepszy, im **mniejsza liczba zderzeń** jest potrzebna do spowolnienia neutronów rozszczepieniowych. Najlepsze do tego warunki spełnia **jądro wodoru**. Warto wiedzieć, że ze względu na warunki technologiczne stosuje się **wodę** zamiast czystego wodoru.

## Jakie rodzaje chłodziwa stosuje się w reaktorach jądrowych?

Najczęściej używanym chłodziwem w reaktorach jądrowych jest **lekka lub ciężka woda**. Niektóre typy reaktorów jądrowych są chłodzone gazem, a nawet ciekłym metalem!

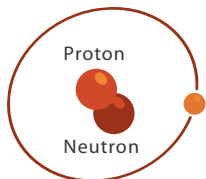


**Ciepło** wytworzone w reakcji rozszczepienia jądra atomowego w paliwie jądrowym musi zostać **przetransportowane do turbiny**, która jest podłączona do **generatora** wytwarzającego prąd elektryczny. Medium transportujące ciepło nazywa się **chłodziwem**.



Elektron

Największa liczba reaktorów jądrowych na świecie – około 380 – chłodzona jest **lekką wodą ( $H_2O$ )**. W lekkiej wodzie tlen związany jest z najlżejszym izotopem wodoru – protem zawierającym tylko jeden proton w jądrze atomowym. Jest to woda występująca po prostu w naturze!



Elektron

**Reaktory ciężkowodne** chłodzone są **ciężką wodą ( $D_2O$ )**, w której tlen związany jest z deuterem, czyli izotopem wodoru zawierającym jeden neutron i jeden proton w jądrze atomowym. Ciężka woda umożliwia pracę reaktora jądrowego na paliwie zawierającym uran naturalny, bez konieczności jego wzbogacania! Obecnie na świecie pracuje około 50 reaktorów ciężkowodnych. Ciężka woda w naturze występuje w bardzo małych ilościach i jest produkowana poprzez separację z wody lekkiej.

- Chłodziwem do reaktorów jądrowych mogą być również **gazy**. Najczęściej używa się **helu ( $He$ )** oraz **dwutlenku węgla ( $CO_2$ )**. Hel jest używany jako chłodziwo w reaktorach wysokotemperaturowych typu HTGR (z ang. *High-Temperature Gas-cooled Reactor*), a dwutlenek węgla w brytyjskich reaktorach gazowych typu AGR (z ang. *Advanced Gas-cooled Reactor*). Obecnie na świecie pracuje około 15 reaktorów chłodzonych gazem.
- W reaktorach pracujących w **prędkiem widmie neutronów** jako chłodziwa używa się **ciekłych metali** takich jak **sód ( $Na$ )**, **ołów ( $Pb$ )** oraz mieszaniny bizmutu i ołowiu nazywanej **eutektyką bizmut-olów ( $Bi-Pb$ )**. Obecnie na świecie pracują 3 reaktory tego typu.

## Czy wiesz, że...

W 2015 r. w Białojarskiej elektrowni jądrowej w Rosji został uruchomiony komercyjny reaktor powielający BN800 o mocy 800 MWe chłodzony ciekłym sodem!

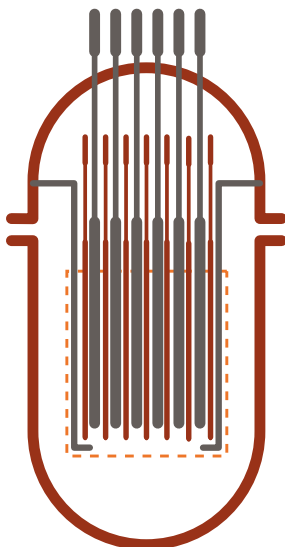


Z czego wykonuje się pręty kontrolne używane do sterowania reaktorem?

Pręty kontrolne są wykonywane z **materiału pochłaniającego neutrony**. Wbrew często spotykanym twierdzeniom nie są wykonane z grafitu.



Zadaniem prętów kontrolnych jest **wygaszenie reakcji rozszczepienia**. Ich wsunięcie do rdzenia powoduje zahamowanie reakcji. Pochłaniają bowiem neutrony, a co za tym idzie, zmniejszają liczbę powodowanych przez nie rozszczepień. Muszą być zatem wykonane z **materiału dobrze pochłaniającego neutrony**. **Grafit natomiast spowalnia neutrony, ale ich nie pochłania** – może więc pełnić w reaktorze funkcję **moderatora**.



Pręty kontrolne są najczęściej utrzymywane ponad rdzeniem przez **elektromagnesy**, dzięki czemu w sytuacji awaryjnej (np. brak zasilania) powinny same opaść do rdzenia pod wpływem **grawitacji** i wygasić reakcję.



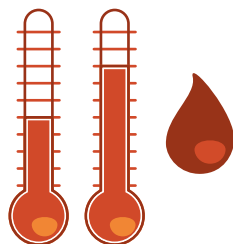
**Pręty kontrolne** wykonuje się najczęściej z boru, kadmu, hafnu, indy i srebra lub ich stopów.



**SCRAM** to procedura **wygaszenia** reakcji łańcuchowej w reaktorze. W tym celu do rdzenia wprowadza się wszystkie pręty kontrolne.

Jakiego elementu używa się najczęściej do zmiany mocy reaktora energetycznego: prętów kontrolnych czy pompy obiegowej?

Może to być zaskakujące, ale w tym celu najczęściej stosuje się pompę obiegową!



**Zwolnienie obrotów pompy** obiegu wody powoduje, że mniej ciepła jest odbierane z reaktora i **temperatura w nim rośnie**. Wzrost temperatury powoduje **spowolnienie reakcji rozszczepienia**. Jest to **naturalne zjawisko**! Analogicznie zwiększenie odbioru ciepła i spadek temperatury spowoduje **wzrost mocy**. Można powiedzieć, że reaktor sam dostosowuje swoją moc do ilości odbieranego z niego ciepła.

- Wzrost temperatury paliwa powoduje, że neutrony są chętniej pochłaniane przez  $^{238}\text{U}$  zamiast powodować kolejne rozszczepienia.
- Wzrost temperatury wody powoduje mniej efektywne spowalnianie neutronów. Zmniejsza to prawdopodobieństwo wywołania rozszczepienia kosztem pochłonięcia neutronu.
- Wzrost temperatury wody powoduje również, że neutrony łatwiej uciekają z układu.

W reaktorach **wodnych ciśnieniowych** do sterowania używa się pompy obiegu wtórnego.



**Reaktory wrzące** mają dodatkowe pompy zainstalowane w zbiorniku reaktora, które służą do sterowania.



Innym sposobem kontroli reakcji rozszczepienia jest substancja pochłaniająca neutrony – **kwas borowy** – rozpuszczona w chłodziwie. Zaletą takiego rozwiązania jest jednolite działanie w całej objętości rdzenia reaktora, podczas gdy pręty działają na część rdzenia, do której są wsunięte.



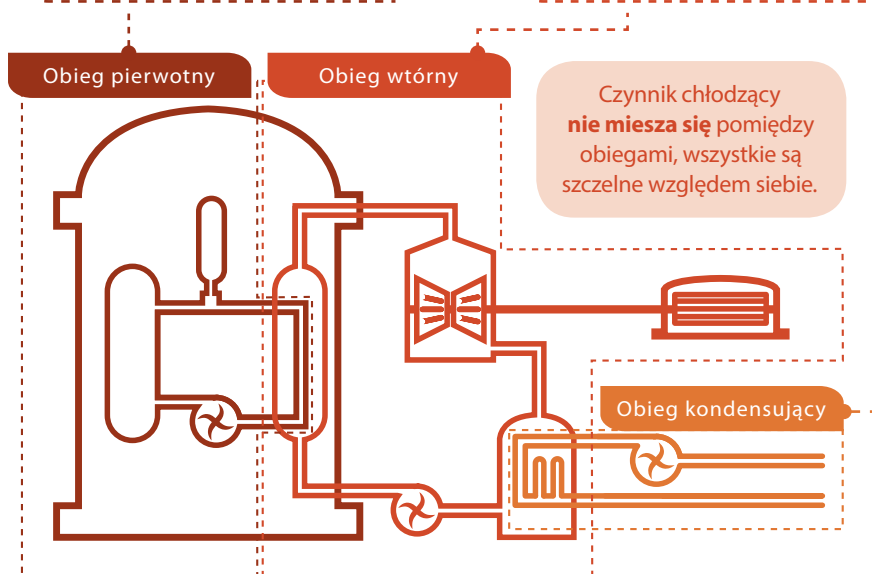
Ile obiegów wody jest pomiędzy rdzeniem reaktora a środowiskiem w reaktorze wodnym ciśnieniowym.

W reaktorach ciśnieniowych, zwanych PWR (z ang. *Pressurized Water Reactor*), klasycznie mamy do czynienia z **trzema obiegami** pomiędzy paliwem a środowiskiem.



**Obieg pierwotny** – to zamknięta ciśnieniowa pętla wody krążąca od rdzenia, gdzie podgrzewa się, płynie poprzez tzw. gorące nitki do wytwornicy pary – tam oddaje energię (ciepło) do drugiego obiegu (wtórnego). Następnie schłodzona woda z obiegu pierwotnego zimnymi nitkami przepływa przez pompy obiegowe i wraca do rdzenia.

**Obieg wtórny** – również jest zamknięty i zaczyna się od wytwornicy pary. W obiegu tym woda podgrzewa się, następnie zamienia w parę wodną i osusza. Jako para przegrzana wylatuje na turbinę, obraca nią i w ten sposób zamienia energię cieplną w mechaniczną. Turbina połączona jest wałem z generatorem prądu, gdzie powstaje prąd elektryczny, wysyłany do sieci. Para przegrzana po przepłynięciu przez turbinę jest schładzana (kondensuje się do stanu ciekłego) i wraca do wytwornicy pary.



**Obieg kondensujący** parę z obiegu wtórnego – to obieg otwarty, który zaczyna się w kondensatorze, gdzie jest schładzana para z turbiny, tak by wrócić do stanu ciekłego. Ciepło odebrane z obiegu wtórnego jest oddawane do środowiska poprzez chłodnie kominowe lub bezpośrednio do zbiornika wodnego (rzeki, morza).

### Ciekawostka

W opisie obiegów jako czynnik chłodzący podano **wodę**, gdyż jest to **najpopularniejszy przykład**. Jednak w obiegu pierwotnym może też wystąpić: gaz, ciekły metal lub ciekłe sole w różnych konfiguracjach.





## Czym różni się jądrowy reaktor ciśnieniowy od wrzącego?

W reaktorze wrzącym woda wrze, a w ciśnieniowym – nie. Dodatkowo reaktor ciśnieniowy ma pręty sterujące wsuwane od góry, a wrzący – od dołu. Warto też wiedzieć, że reaktor wrzący pracuje pod niższym ciśnieniem w stosunku do reaktora ciśnieniowego.



### Reaktor ciśnieniowy PWR (z ang. *Pressurized Water Reactor*)



1. Składa się zwykle z dwóch obiegów **zamkniętych** (pierwotny i wtórny) oraz jednego **otwartego**.
2. Para do turbiny jest wytwarzana w **wytwornicach pary w obiegu wtórnym**, ponieważ woda w pierwotnym obiegu cały czas jest w stanie ciekłym i pod wysokim ciśnieniem.
3. Pręty sterujące są wsuwane **od góry**.

### Reaktor wrzący BWR (z ang. *Boiling Water Reactor*)



1. Składa się z jednego obiegu **zamkniętego** oraz jednego obiegu **otwartego** (brak obiegu wtórnego).
2. Para jest produkowana **bezpośrednio nad rdzeniem**. Ciśnienie w tym reaktorze jest wyraźnie niższe i woda odparowuje bezpośrednio w obiegu pierwotnym, zatem dodatkowe wytwornice pary i obieg wtórny nie są potrzebne.
3. Ponieważ ten reaktor ma nad rdzeniem instalację osuszającą parę wodną, pręty sterujące są wsuwane **od dołu** zbiornika ciśnieniowego.



### Ciekawostka

Na świecie pracuje dziś 291 reaktorów energetycznych typu PWR i 76 typu BWR.

## Z jakich komponentów składa się obieg pierwotny w elektrowni z reaktorem PWR?

Elektrownia jądrowa jako całość jest dość skomplikowanym systemem, jednakże w części jądrowej można wyróżnić cztery najważniejsze elementy: **zbiornik ciśnieniowy, wytwornicę pary, stabilizator ciśnienia i pompę cyrkulacyjną.**



Zapoznaj się ze schematem najpopularniejszego typu elektrowni PWR z dwoma odizolowanymi obiegami wody: pierwotnym i wtórnym. Obieg pierwotny, który bezpośrednio opływa pręty z paliwem jądrowym, jest zamknięty w obudowie bezpieczeństwa i całkowicie odizolowany od obiegu wtórnego.

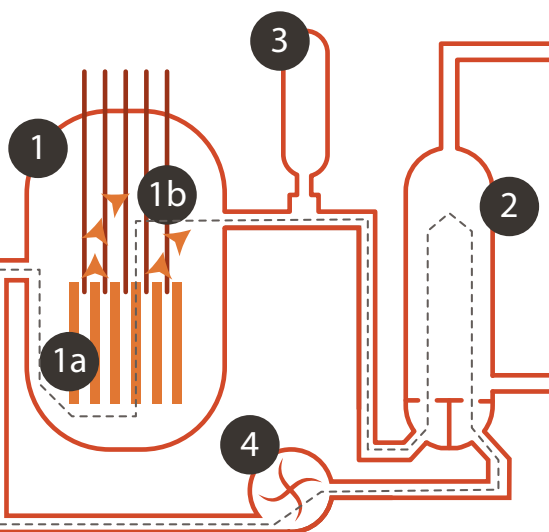
**1. Zbiornik ciśnieniowy** to odpowiednik pieca w konwencjonalnej elektrowni. Energia cieplna wytwarzana jest przez pręty paliwowe, w których zachodzi reakcja rozszczepienia.

**1a. Rdzeń reaktora** to miejsce, gdzie umieszczone są pręty paliwowe.

**1b. Mechanizm z prętami kontrolnymi** Znajduje się w górnej części zbiornika i służy do kontroli reaktywności, czyli intensywności zachodzenia reakcji rozszczepienia.

### 2. Wytwornica pary

Trafia do niej woda ogrzana w rdzeniu reaktora. Przechodząc przez ogromną liczbę U-rurek oddaje ciepło do wtórnego obiegu. Z kolei woda z wtórnego obiegu pobiera ciepło i zamienia się w parę, która następnie kierowana jest na turbinę połączoną z generatorem elektrycznym.



### 3. Stabilizator ciśnienia

Zapewnia stałe i odpowiednio wysokie ciśnienie w obiegu pierwotnym, takie by woda pozostawała w stanie ciekłym. Jednocześnie zapobiega uszkodzeniu systemu przez nagłe skoki ciśnienia, ponieważ zgromadzona w górnej części para wodna działa jak amortyzator.

### 4. Pompa cyrkulacyjna

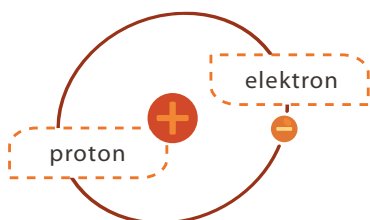
Wymusza obieg wody w całym systemie. Pełni bardzo ważną funkcję również po wygaszeniu reakcji łańcuchowej, zapewniając odprowadzenie tzw. ciepła powyłączeniowego.

## Co to jest ciężka woda i dlaczego jest używana w reaktorach jądrowych?

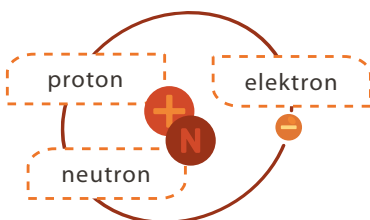
Ciężka woda to potoczna nazwa związku  $D_2O$ , czyli **wody, której cząsteczka zawiera deuter w miejscu wodoru**. Ponieważ jądro deuteru składa się z jednego protonu i jednego neutronu (a jądro wodoru zawiera jedynie proton), cząsteczka ciężkiej wody waży więcej.

Jako moderator ciężka woda jest lepsza od zwykłej wody, ponieważ podczas spowalniania **pochłania znacznie mniej neutronów**. Mniejsza absorpcja spowodowana jest głównie przez **deuter**, który prócz protonu posiada już jeden **neutron**, przez co jest **mniej skłonny do przyjęcia kolejnego**.

Atom wodoru



Atom deuteru



Deuter to jeden z izotopów wodoru.

Obecnie na świecie pracuje około 50 reaktorów jądrowych wykorzystujących ciężką wodę jako **chłodziwo i moderator**, co stanowi ok. 11% wszystkich reaktorów.


 $D_2O$ 

11% reaktorów na świecie



Strata neutronów podczas spowalniania jest tak mała, iż pozwala na zmniejszenie wzbogacenia paliwa jądrowego do poziomów 0,5-1,5%, co pozwala na korzystanie z naturalnego uranu jako paliwa. Proces wzbogacania paliwa jest dość kosztowny, dlatego paliwo w formie naturalnego uranu jest dużo tańsze.

## Ciekawostka



- Prym w tej dziedzinie wiedzy **Kanada**, która wykorzystuje oraz rozwija technologię jądrową opartą na  $D_2O$ . Stąd nazwa najpopularniejszego reaktora ciężkowodnego brzmi CANDU (ang. *CANadian Deuterium Uranium*).
- Ważną cechą CANDU jest kanałowa budowa rdzenia reaktora, co pozwala na wymianę paliwa bez potrzeby jego wyłączenia.

Jak nazywamy reaktory, które nie używają moderatora?

Są to **reaktory prędkie**, w których reakcja łańcuchowa jest podtrzymywana tylko przez neutrony prędkie.



- Paliwo jądrowe w takim układzie musi zawierać **większe wzbogacenie w materiał rozszczepialny** niż w paliwie dla reaktorów, gdzie rozszczepienie jest wywoływane przez neutrony termiczne, czyli spowolnione.
- W reaktorach prędkich istnieje konieczność zastosowania **innych czynników chłodzących** niż woda, która jest moderatorem. Do tego procesu najlepiej nadają się **ciekłe metale** jak sód czy ołów. Rozważa się również zastosowanie helu.

### Reaktory prędkie

#### Zalety

- Mogą „**dopalać**” wypalone paliwo jądrowe. Cecha ta może rozwiązać problem **przechowywania odpadów**, skracając wymagany czas składowania z dziesiątek tysięcy do setek lat.
- Mogą **powielać paliwo**, czyli produkować izotopy rozszczepialne ( $^{239}\text{Pu}$ ) z nierozszczepialnych ( $^{238}\text{U}$ ), szybciej, niż je zużywają.
- Mogą pracować w **wyższych temperaturach**, co wpływa na wyższą sprawność turbin.

#### Wady

- Stosunkowo **wysokie koszty** budowy.
- Wymagane **wysokie wzbogacenie paliwa**.
- Większa gęstość mocy, wyższe temperatury i użycie niekonwencjonalnych chłodziw stawiają **spore wyzwania technologiczne**.



#### Czy wiesz, że...

**Pierwszy na świecie przemysłowy reaktor prędkie** (BN-350) uruchomiono w Szewczenku, w Kazachstanie. Reaktor produkował energię elektryczną i służył do odsalania wody morskiej.

## Czy reaktor jądrowy możemy chłodzić powietrzem?

W pierwszym momencie każdy myśli: „Nie, to nie może działać na powietrze”.  
A jednak może. Teoretycznie **reaktor jądrowy może być chłodzony powietrzem**  
bądź innym gazem.



Mimo że jest to możliwe, energetyka jądrowa obecnie **nie stosuje chłodzenia powietrzem**. Jednym z głównych powodów jest **bezpieczeństwo**. Działające reaktory wymagają moderatora. W reaktorach chłodzonych powietrzem tym moderatorem musiałby być **grafit**, a ten z kolei jest **palny w powietrzu**, co może doprowadzić do niebezpiecznej sytuacji.



### Ciekawostka

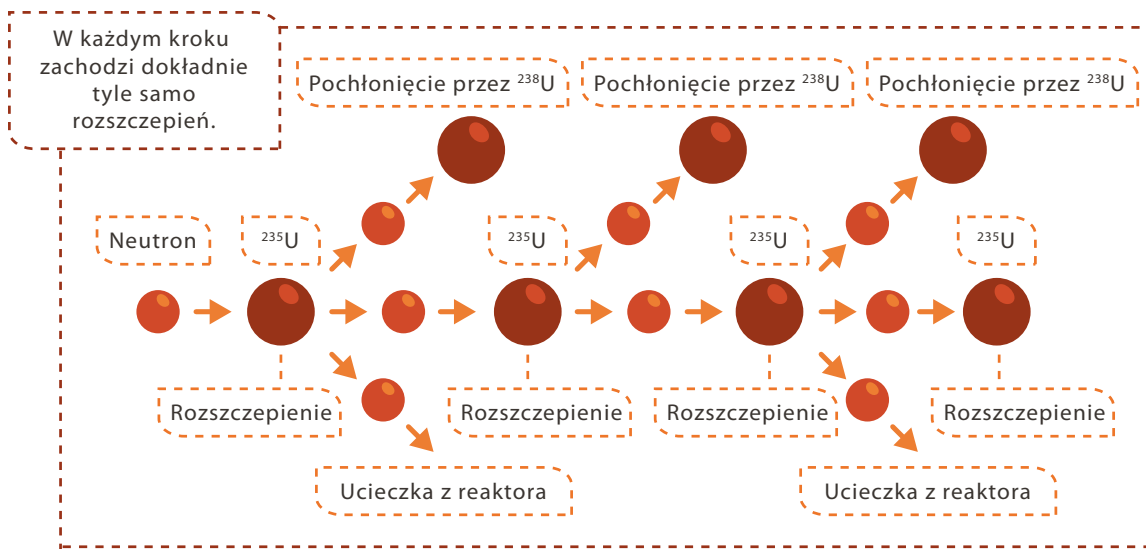
Właśnie taki wypadek miał miejsce w 1957 r., w Wielkiej Brytanii, w Windscale, gdzie reaktor termiczny moderowany grafitem i chłodzony powietrzem uległ zapłonowi (zapłon grafitu).



Występują również reaktory chłodzone **innymi gazami**, takimi jak hel czy  $\text{CO}_2$ .

- Ten drugi był popularnym chłodziwem w reaktorach **GCR** (*Gas Cooled Reactor*) w latach 50. XX w. Jednak te reaktory powoli zostały wyparte przez reaktory ciśnieniowe chłodzone wodą. Działały one jeszcze w Wielkiej Brytanii do 2015 r., gdzie powstała ich druga generacja – **AGR** (*Advanced Gas Reactor*). W AGR temperatura pracy została podwyższona, a tym samym sprawność reaktora zwiększyła się do **ponad 40%**. W klasycznych GCR wynosiła ona około **31%**.
- **Hel** jest obiecującym chłodziwem w reaktorach wysokotemperaturowych, tzw. **HTR** (*High Temperature Reactor*). Dzięki swym właściwościom fizykochemicznym systemy oparte na helu mogą osiągać temperaturę pracy **powyżej 700°C**, co może **zwiększyć sprawność elektrowni i poszerzyć spektrum zastosowań** reaktorów jądrowych. Testowe reaktory wysokotemperaturowe pracowały nawet przy temperaturze znacznie przekraczającej 900°C.

## Czy stan krytyczny jest dla reaktora niebezpieczny?

Zdecydowanie nie, to **normalny** stan pracy!

O **stanie krytycznym** reaktora mówimy wtedy, gdy spośród powstających wskutek rozszczepienia neutronów jeden spowoduje **kolejne rozszczepienie**.

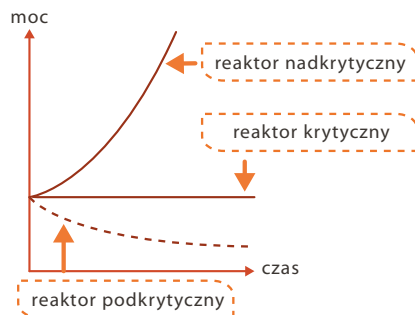
Pozostałe neutrony powstające w czasie rozszczepienia muszą zostać **pochłonięte** lub **uciec** z układu. W takim stanie w reaktorze utrzymuje się stała liczba neutronów, a co za tym idzie – liczba **zachodzących rozszczepień** w jednostce czasu jest **stała**.

Stosunek liczby neutronów w układzie przed i po kolejnej serii rozszczepień (w tak zwanych pokoleniach neutronów) nazywamy **współczynnikiem mnożenia neutronów** ( $k$ ). W reaktorze krytycznym  $k = 1$ . Różnicę między obecną wartością  $k$  a stanem krytycznym nazywamy reaktywnością ( $\rho$ ).

Stan nadkrytyczny  $\rightarrow k > 1 \quad \rho > 0$

Stan krytyczny  $\rightarrow k = 1 \quad \rho = 0$

Stan podkrytyczny  $\rightarrow k < 1 \quad \rho < 0$

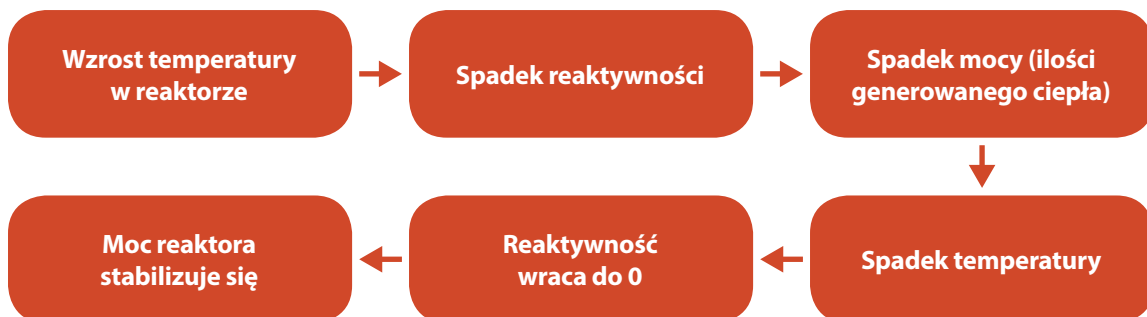


## Czy ujemny współczynnik reaktywności to coś dobrego?

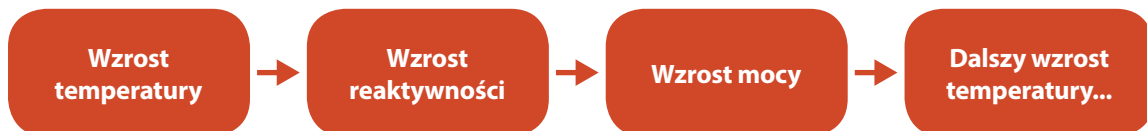
Zdecydowanie tak! Dla bezpiecznej pracy reaktora współczynniki powinny być ujemne.



## Ujemny współczynnik temperaturowy



## Dodatni współczynnik temperaturowy



- **Współczynnik reaktywności** określa, jak zmienia się reaktywność reaktora wskutek zmiany parametrów takich jak temperatura paliwa, temperatura chłodziwa czy gęstość chłodziwa. Ponieważ te parametry są zależne od mocy, której zmiany określa z kolei reaktywność, mamy tutaj do czynienia ze **sprężeniem zwrotnym**. Dzięki ujemnym wartościom współczynników reaktywności reaktor pracuje **stabilnie** – posiada zdolność **samoregulacji**.
- Wyróżnia się **współczynniki** związane z **temperaturą** elementów rdzenia: paliwa, chłodziwa, moderatora oraz tzw. **próżniowy**, czyli związany z rozrzedzaniem chłodziwa – na przykład wskutek wrzenia wody. W budowanych dziś reaktorach mają one **wartości ujemne**.
- Dzięki zdolności samoregulacji reaktor **sam dostosowuje swoją moc** do ilości ciepła odbieranej przez wodę. Dzięki temu jest możliwe sterowanie reaktorem **za pomocą pomp**, bez użycia prętów kontrolnych.



Jaka jest kolejność działań w elektrowni jądrowej w celu zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku awarii?

Wygaszenie łańcuchowej reakcji rozszczepienia, odprowadzenie ciepła, utrzymanie radionuklidów wewnątrz obudowy bezpieczeństwa.



**AWARIA!**

Następnie trzeba **odebrać ciepło powyłączeniowe**. To dodatkowe megawaty ciepła po wyłączeniu reaktora. Już **sekundy po wyłączeniu** reaktor ma jedynie **kilka procent mocy nominalnej**, a po godzinie może być już mniej niż 2% mocy pierwotnej. Wydawałoby się, że to niewiele, jednak należy pamiętać, iż jest to zwykle 5% z około 1000 MW, czyli mamy do odebrania ciepło w ilości **50 MW**. Sam rdzeń chłodzi się **bardzo powoli** – dni, a nawet miesiące, w zależności od warunków, jakie mamy w reaktorze i do jakich chcemy doprowadzić układ.



W pierwszej kolejności należy **wygasić reakcję rozszczepienia**. Robimy to przez dodanie **wody borowej** (wysoki przekrój czynny na wychwyty neutronów) i **wsunięcie prętów kontrolnych** oraz wyłączeniowych.



Jeśli zbiornik ciśnieniowy się stopi, spowoduje to **uwolnienie radionuklidów** poza obieg pierwotny – do **obudowy bezpieczeństwa**.



Gdyby jednak **nie udało się dostatecznie schłodzić rdzenia**, to ciepło powyłączeniowe może spowodować **stopienie rdzenia** lub **przetopienie zbiornika ciśnieniowego**.



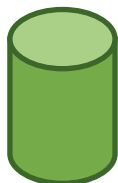
Skażenie (radionuklidy) zostaje **zatrzymane wewnątrz obudowy bezpieczeństwa**. Często obudowa taka składa się z **powłoki stalowej i betonowej**.





Jakie bariery fizyczne dzielą środowisko naturalne od produktów rozszczepienia w reaktorze jądrowym?

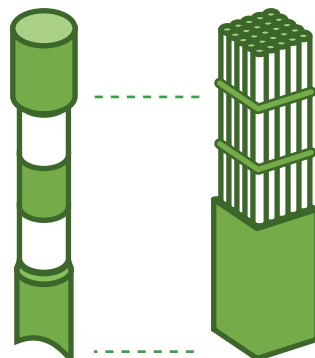
Są 4 bariery zabezpieczające: **pastylka paliwowa, koszulka paliwowa, obieg pierwotny i obudowa bezpieczeństwa.**



**Pastylka paliwowa** – paliwo w większości reaktorów ma postać kilku-milimetrowych walców wyprodukowanych z dwutlenku uranu. Pastylki takie są układane w stos, jedna na drugiej, i zapakowane w **koszulkę paliwową**, tworząc tym samym **pręt paliwowy**.

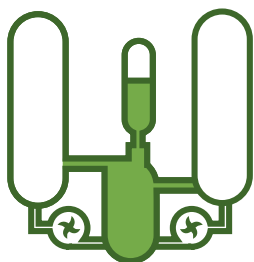
**Koszulka paliwowa** – zwykle wykonana ze **stopów cyrkonu**.

Między nią a pastylkami jest przestrzeń wypełniona **gazem** w nadciśnieniu. Pręty paliwowe składają się w pęki, tworząc **kasety paliwowe**. To właśnie przez kasety przepływa woda w obiegu pierwotnym, obmywając pręty i tym samym odbierając od nich ciepło.



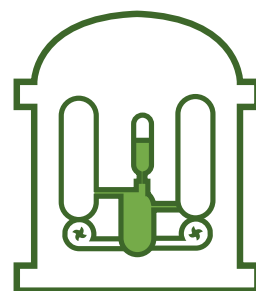
Pręt paliwowy

Kaseta paliwowa



**Obieg pierwotny** – to w nim krąży **woda** przepływająca przez rdzeń reaktora, z którego to płynie do wytwornic pary, oddając ciepło do obiegu wtórnego i dalej do konwersji energii. Cały obieg pierwotny jest umieszczony wewnątrz **obudowy bezpieczeństwa**.

**Obudowa bezpieczeństwa** – betonowo-stalowa konstrukcja utrzymywana pod ciśnieniem, szczelna i wentylowana przez specjalne filtry. **Odporna** na trzęsienia ziemi i uderzenia samolotów. Często stworzona z **dwóch osobnych konstrukcji** – wewnętrznej i zewnętrznej.



Z ilu poziomów składa się „obrona w głąb”, czyli fundamentalna koncepcja zapewnienia bezpieczeństwa w inżynierii reaktorowej?

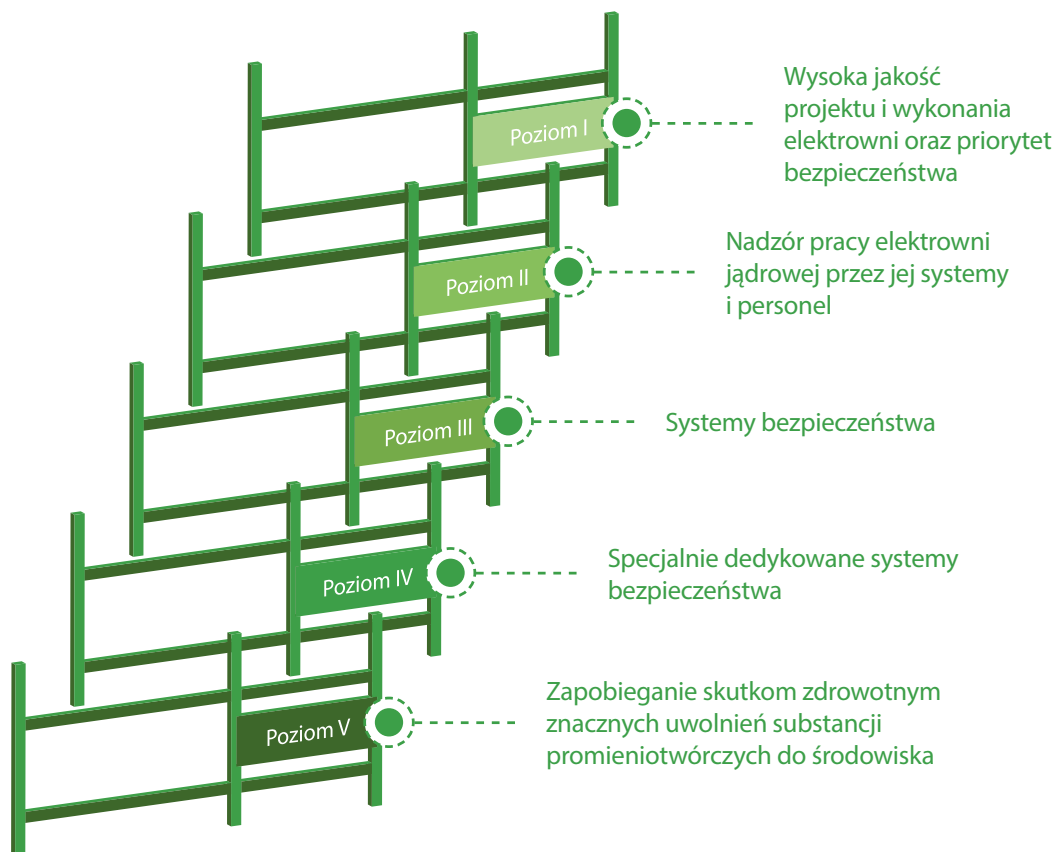
„Obrona w głąb” – „linia obrony” – składa się z 5 niezależnych od siebie poziomów bezpieczeństwa.



- „Obrona w głąb” to sekwencja poziomów bezpieczeństwa poszerzona o **aspekty koncepcyjne i proceduralne** projektu jądrowego.
- Każdy element „obrony w głąb” ma za zadanie **zapobiegać poszerzeniu się awarii** oraz **łagodzić niepowodzenie** poprzedniego elementu, z jednoczesnym utrzymaniem swoich zdolności.



### 5 poziomów bezpieczeństwa

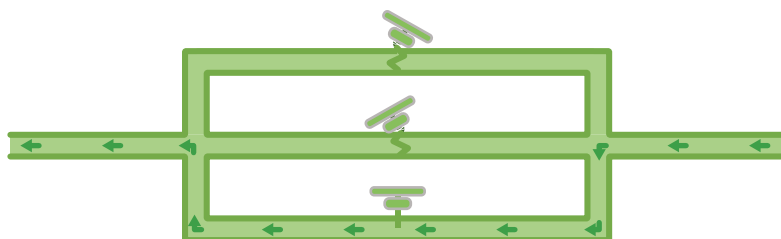


## Czym jest redundancja systemów bezpieczeństwa i na czym ona polega?

Redundancja to jedna z szeroko stosowanych w energetyce jądrowej metod zwiększenia poziomu bezpieczeństwa w reaktorach. Polega ona na **powielaniu tych samych systemów**, by zapewnić ciągłość pracy w razie awarii bądź niedostępności jednego z nich.



Systemy, które są **dublowane**, to zwykle systemy **bezpieczeństwa** bądź skojarzone z bezpieczeństwem. Często też powielane są elementy takie jak **pompy czy zawory**. W niektórych reaktorach generacji 3+ stosuje się **pełną redundancję**, tzn. niezależnie powielone są wszystkie systemy bezpieczeństwa. Oznacza to, że tam, gdzie mamy układ systemów bezpieczeństwa służący do wyłączenia i wychłodzenia reaktora, powielane są całe te układy, a nie jedynie poszczególne podzespoły (np. zawory czy pompy). Rozwiązanie to jest popularne i sprawdzone w kontekście bezpieczeństwa.



Na powyższej grafice przedstawiono rurociąg, w którym **dwa zawory są zepsute**. Mimo to, dzięki zastosowaniu **redundancji**, nadal możemy **kontrolować przepływ**.

### Wyobraź sobie...

Redundancję możemy zobrazować dojazdem do pracy. Jeśli z domu do pracy mamy **tylko jeden autobus**, to w przypadku awarii pojazdu nie dojedziemy do celu. Gdy jednak autobusy są **dwa lub trzy**, mamy spore szanse **dotrzeć na czas**, nawet jeśli jeden z nich się popsuje.

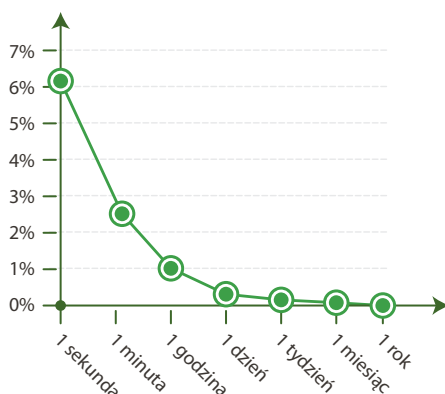


## Dlaczego reaktor po „wyłączeniu” nadal wydziela energię?

Niestety reaktora jądrowego nie da się wyłączyć jak lampki nocnej. Pomimo praktycznie natychmiastowego zaniku reakcji rozszczepienia, niestabilne produkty rozszczepienia rozpadają się, wydzielając przy tym energię termiczną, nazywaną **ciepłem powyłączeniowym**.



**Szybkość zaniku energii cieplnej** wydzielanej w wypalonym paliwie jądrowym jest podyktowana głównie poprzez prawo rozpadu, czyli maleje wykładniczo z czasem.



Po 1h od wygaszenia

30 MW energii cieplnej

=

15 tys.



- Typowa elektrownia jądrowa o mocy cieplnej 3 000 MW po minucie od wygaszenia reakcji rozszczepienia wciąż wydziela około 90 MW energii cieplnej, którą należy odebrać, by nie doprowadzić do stopienia elementów rdzenia reaktora.
- Po około godzinie od „wyłączenia” reaktora produkty rozszczepienia wciąż wytwarzają ponad 30 MW energii cieplnej, czyli równowartość około 15 000 włączonych czajników elektrycznych!

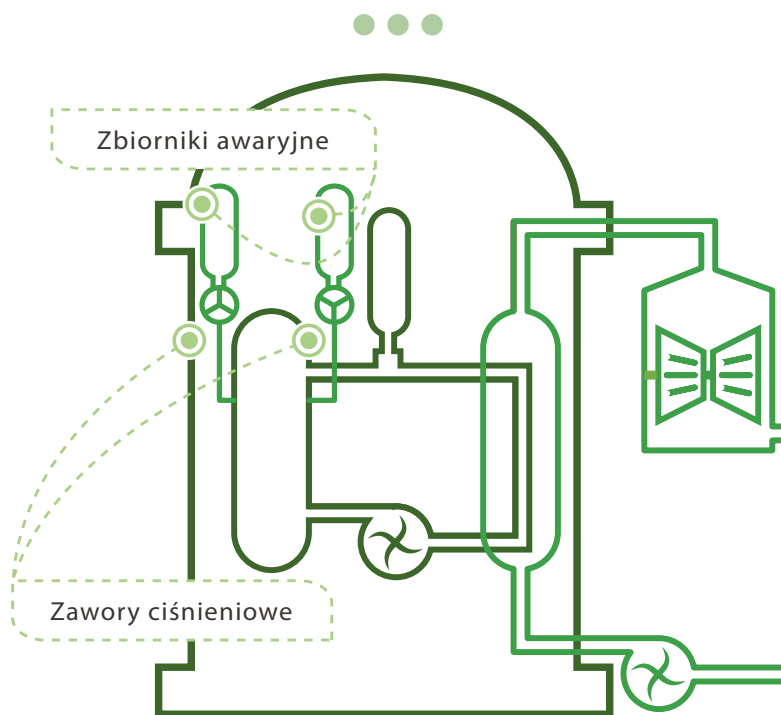
Z powodu ciepła powyłączeniowego **wypalone paliwo jądrowe przechowuje się w ogromnym basenie wypełnionym wodą w budynku reaktora przez okres od 10 do 20 lat**. Po tym czasie wydzielane przez produkty rozszczepienia ciepło, jak również poziom promieniotwórczości spada do poziomu, który umożliwia ich transport oraz dalszą przeróbkę, bądź też składowanie.

We wszystkich elektrowniach jądrowych zainstalowane są **wielopoziomowe systemy awaryjnego chłodzenia**, które mają zapobiec przegrzaniu się rdzenia reaktora oraz pozostałych elementów elektrowni jądrowej, a tym samym zapewnić integralność całego systemu.

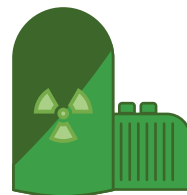


Co jest niezbędne, w razie awarii, do bezpiecznego wyłączenia i wychłodzenia reaktora generacji 3+: ingerencja personelu, zasilanie prądem stałym czy zapas wody chłodzącej?

W przypadku poważnej awarii, np. z rozszczelnieniem obiegu pierwotnego, najważniejsze jest zapewnienie **zapasu wody chłodzącej**. Dlatego też używa się pasywnych systemów bezpieczeństwa. Są one zbiornikami chłodziwa (zwykle wody), które w czasie awarii samoczynnie, np. grawitacyjnie, opróżniają się i wlewają wodę do rdzenia.



- Reaktory generacji 3+ są wyposażone w **pasywne systemy bezpieczeństwa**.
- Systemy pasywne nie wymagają zasilania do prawidłowego działania. Ich działanie opiera się na naturalnych zjawiskach jak grawitacja, konwekcja czy różnica ciśnień. Dzięki temu charakteryzują się wysoką niezawodnością i spełniają swoją funkcję w każdych warunkach.
- Ponadto systemy pasywne są **bezobsługowe**. Oznacza to, że do ich zadziałania nie jest wymagana żadna akcja ze strony personelu – ich załączenie następuje automatycznie.
- Czyni to reaktory generacji 3+ odpornymi na całkowitą utratę zasilania.



Reaktor generacji 3+

## Czy incydent w elektrowni jądrowej może mieć negatywne skutki dla mieszkającej w sąsiedztwie ludności?

**Incydent** nie oznacza uszkodzenia rdzenia reaktora ani skażenia terenu. Może skutkować podwyższoną ekspozycją na promieniowanie, ale będą na nią **narażeni wyłącznie pracownicy obiektu jądrowego**. Incydem nazywa się też po prostu **odstępstwo od procedur bezpieczeństwa** w elektrowni jądrowej.



### Incydent vs Awaria

INES 1-3

INES 4-7

Zdarzenie naruszające niektóre bariery „ochrony w głąb”, które zostają jednak zatrzymane przez pozostałe systemy zabezpieczeń.

Może powodować trudne do naprawienia szkody w obiekcie jądrowym.

Brak poważnych efektów dla zdrowia spowodowanych promieniowaniem.

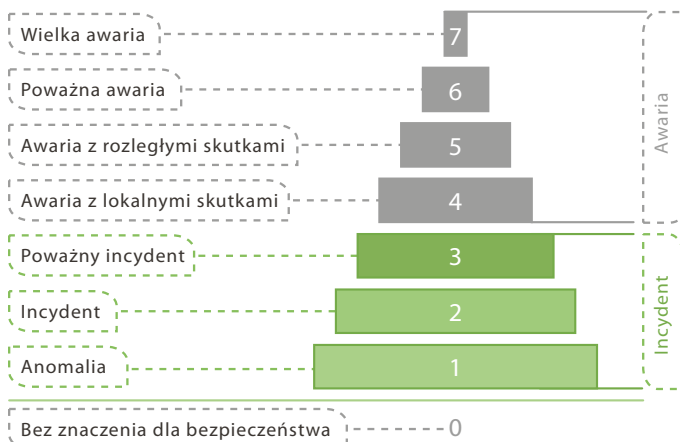
Możliwe jest napromieniowanie kilku pracowników znaczącą dawką promieniowania.

Brak stopienia rdzenia.

Może wystąpić częściowe stopienie rdzenia.

Pracownicy elektrowni mogli otrzymać podwyższoną dawkę promieniowania.

Potencjalne uwolnienie do środowiska i skutki dla ogółu ludności.



Incydent to zdarzenia takie jak:

- odstępstwo od procedur bezpieczeństwa,
- zgubienie lub odnalezienie zagubionych źródeł promieniowania jonizującego,
- awaria jednego z systemów bezpieczeństwa bez konsekwencji dla funkcjonowania pozostałych.



W Polsce rocznie rejestruje się kilkanaście-kilkadziesiąt incydentów, np.: obecność substancji promieniotwórczej w złomie, przekroczenie dawki granicznej u pracownika, kradzież źródeł promieniotwórczych czy zadziałanie bramki radiometrycznej na przejściu granicznym.

Incydent w kontekście przemysłu jądrowego jest zjawiskiem, które zdarza się jak w każdym innym przemyśle i nie ma żadnego zagrożenia dla ogółu ludności.

W jakiej skali podajemy poziom zagrożenia jądrowego związany z cywilnym wykorzystaniem promieniowania jonizującego: Saffira-Simpsona, INES czy skali dychotomicznej?

Do określenia, jak poważne jest zdarzenie jądrowe lub radiologiczne, powszechnie stosuje się **skalę INES**.

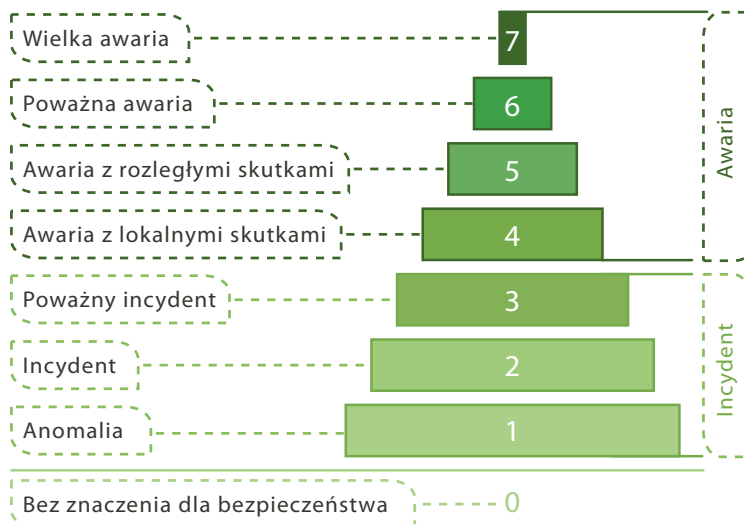


### Skala INES

=

ang. *The International Nuclear and Radiological Event Scale*

- Skala INES posiada 7 stopni, od anomalii do wielkiej awarii.
- Służy do komunikacji i szybkiego przekazywania informacji opinii publicznej i zainteresowanym ekspertom.
- Skalę INES stosuje się do zdarzeń związanych z całym obszarem bezpieczeństwa jądrowego.



- Skali INES nie stosuje się do jakiegokolwiek militarnego użycia promieniotwórczości i zdarzeń z tym związanych.



**Skala dychotomiczna** – szczególna skala, której używa się, kiedy na skali mamy jedynie dwie wartości, np. odpowiedź tak/nie lub orzeł/reszka. Należy do skal nominalnych, czyli takich, w których nie występuje uporządkowanie pod względem wartości. Skala taka ma wartości opisowe, a nie liczbowe.

**Skala Saffira-Simpsona** – skala klasyfikująca huragany według intensywności wiatrów ciągłych. Dzieli ona huragany na 5 kategorii – od najsłabszych (kategoria 1) do najmocniejszych (kategoria 5).

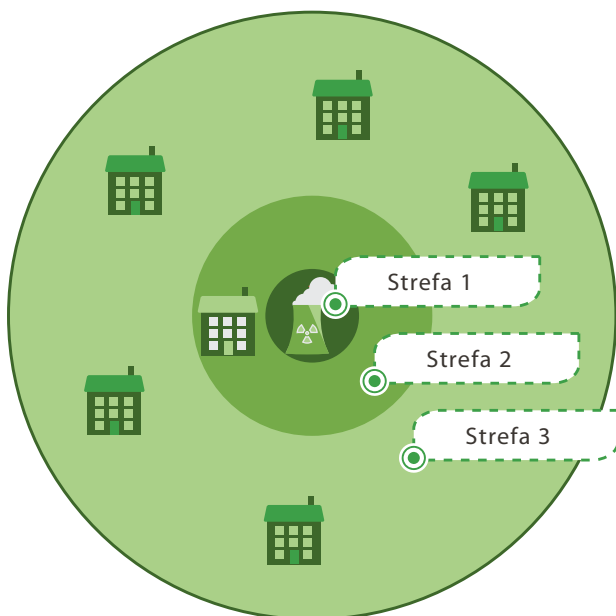
## Ile stref bezpieczeństwa znajduje się wokół elektrowni jądrowej?

Zwykle wokół elektrowni jądrowej wyróżniamy **trzy strefy bezpieczeństwa**.



### 1. STREFA ZAMKNIĘTA

- Obszar tej strefy określany jest na podstawie obowiązującego prawa, użytej technologii i mocy danej jednostki.
- W przypadku reaktorów generacji 3+, których budowa jest planowana w Polsce, zwykle ma ona promień **800 m**.
- W tej strefie ze względów bezpieczeństwa ograniczany jest ruch i działalność człowieka (zakaz zamieszkania).



### 2. STREFA OGRANICZONEGO ZAMIESZKANIA

- Na jej obszarze kontrolowana jest gęstość zaludnienia, rozkład populacji, komunikacja, wykorzystanie gruntów i wód.
- Zasięg tej strefy to zwykle **do 5 km**.

### 3. STREFA AWARYJNA

- Największa strefa, która może sięgać promieniem **do około 16 km**.
- Na tym terenie nie stosuje się większych ograniczeń, jedynie przygotowany jest plan działania na wypadek awarii w reaktorze.
- W ramach wspomnianego planu są przeprowadzane również akcje informacyjne, szkolenia służb ratunkowych i ogółu ludności itp.



## Z jakim zawodem wiąże się największe narażenie na działanie promieniowania?

Wbrew pozorom nie jest to pracownik elektrowni jądrowej, tylko **astronauta!**

- Ważnym składnikiem promieniowania naturalnego jest promieniowanie kosmiczne.



- Częściowo chroni nas przed nim atmosfera, ale jeśli ją opuścimy, jesteśmy pozbawieni tej ochrony.

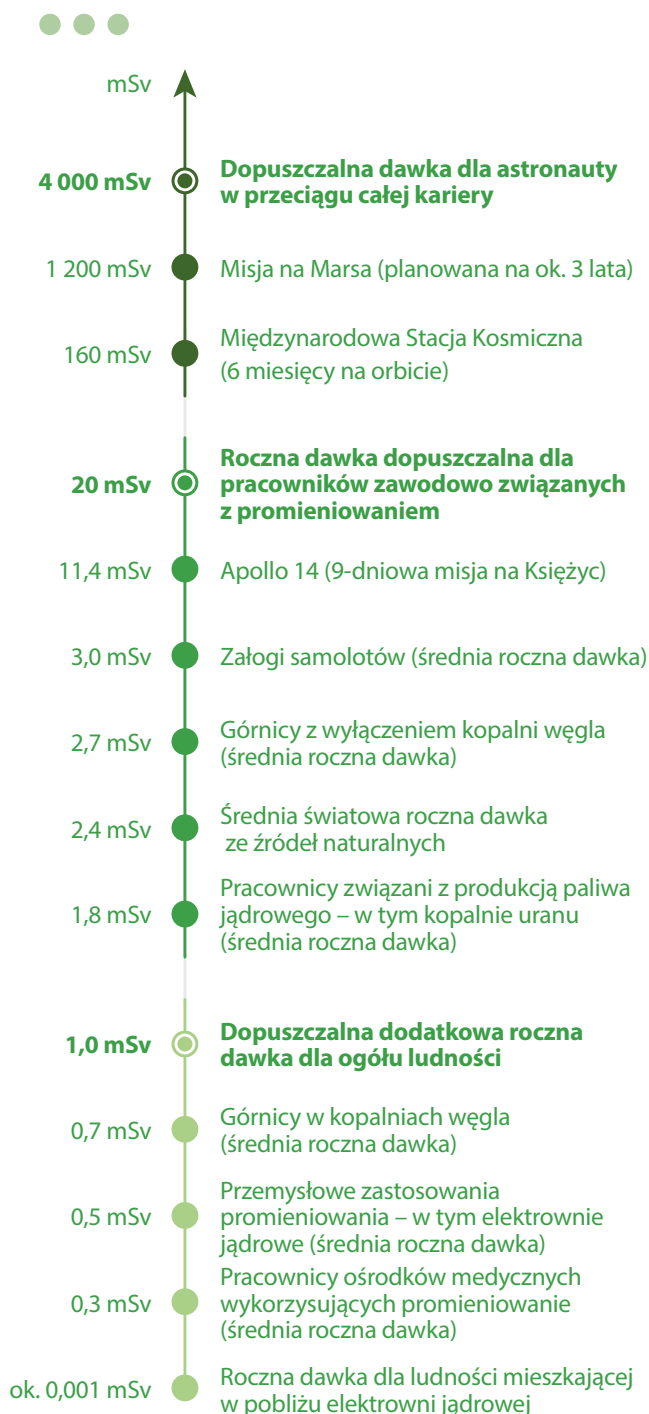
- Dlatego **astronaucci wystawieni są na działanie znacznie większej ilości promieniowania** niż przedstawiciele dowolnego zawodu na powierzchni Ziemi.

Z uwagi na promieniowanie kosmiczne **piloci** są również narażeni na zwiększone dawki promieniowania.



Kolejnym zawodem są **górnicy**, w przypadku których podwyższona dawka ma związek z występującym w kopalniach radonem.

Dokładne dawki są w obu przypadkach mocno zależne od indywidualnych warunków (np. tras lotów czy podłoża geologicznego w kopalni), ale można przyjąć, że jest to dodatkowa dawka promieniowania zbliżona do naturalnej.



Jaka dawka promieniowania jonizującego może być groźna dla zdrowia?

### Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie.

Określone przepisami limity zakładają pesymistyczny scenariusz i dążą do minimalizowania ekspozycji na promieniowanie (tzw. zasada ALARA).



**Efekty działania małych dawek są bardzo słabe, a przez to trudne do dokładnego zmierzenia, i zależą od indywidualnej reakcji organizmu.**

Niektóre badania sugerują, że niewielkie dawki promieniowania mogą mieć nawet korzystny wpływ na zdrowie.



## Na czym polega zasada ALARA?

Zasada ALARA, inaczej „minimalizowania dawki”, to podstawa zasady ochrony radiologicznej. Polega na zastosowaniu jak **najniższej możliwej dawki promieniowania jonizującego** do otrzymania założonego rezultatu.

**Zasada**A<sub>s</sub>L<sub>ow</sub>A<sub>s</sub>R<sub>easonably</sub>A<sub>chievable</sub>

= tak nisko, jak  
jest to realnie  
możliwe

**OGRANICZENIE ZEWNĘTRZNEJ** ekspozycji na promieniowanie można osiągnąć poprzez **redukcję czasu ekspozycji, zwiększenie dystansu od źródła promieniowania, jak i wykorzystanie osłon radiacyjnych.**



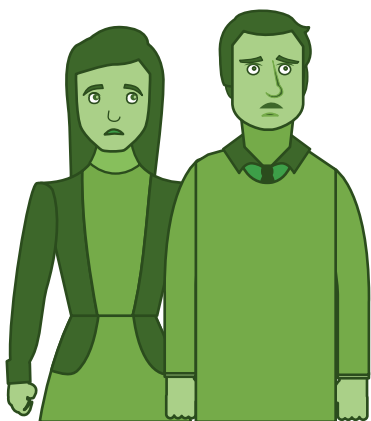
**OGRANICZENIE WEWNĘTRZNEJ** ekspozycji na promieniowanie poprzez inhalację czy połykanie można osiągnąć, stosując się do **zasad higieny** w miejscu, gdzie obecne są źródła promieniowania, a szczególnie poprzez ograniczenie kontaktu rąk z ustami, kontrolę i odpowiednie oznaczenie miejsc, gdzie promieniowanie może wystąpić lub występuje, oraz wykorzystanie środków ochrony osobistej typu okulary, maska, fartuch itd.

Wprowadzenie zasady ALARA w miejsca pracy z promieniowaniem jest czynnością ciągłą i wymaga stworzenia **kultury pracy opartej o zasady bezpieczeństwa radiologicznego, a tym samym niezbędne jest ciągłe szkolenie i podnoszenie kompetencji pracowników**, dzięki czemu zmniejsza się prawdopodobieństwo incydentów radiologicznych.



Jeśli usłyszysz w mediach o radioaktywnej chmurze, gdzie sprawdzisz, czy naprawdę jest się czego obawiać?


W sytuacji gdy nie jesteśmy pewni doniesień medialnych związanych z promieniowaniem jonizującym (np. wybuchem w elektrowni jądrowej czy radioaktywną chmurą), lub są one sprzeczne, powinniśmy pomyśleć o **Państwowej Agencji Atomistyki (PAA)**.



PAA jest **organem dozoru jądrowego w Polsce**.

Jej zadaniem jest monitorowanie sytuacji radiacyjnej na terenie kraju, nadzór nad wszelkimi działalnościami wykorzystującymi promieniowanie jonizujące. Pełni również funkcję informacyjną i w pewnym zakresie edukacyjną.



 [www.paa.sam3.pl/monitoring.html](http://www.paa.sam3.pl/monitoring.html)

Na stronie PAA, w dziale **monitoring sytuacji radiacyjnej** możemy sprawdzić:

- dzienny rozkład mocy dawki na terenie naszego kraju,
- najnowsze informacje odnośnie działalności Agencji,
- wszelkie aktualności odnośnie potencjalnego zagrożenia promieniowaniem jonizującym, często w formie sprostowania do doniesień medialnych.

Która instytucja zajmuje się bezpiecznym i pokojowym wykorzystaniem energii jądrowej na świecie: ONZ, IAEA, PAA czy WHO?

Praca na rzecz bezpiecznego i pokojowego wykorzystania energii jądrowej to główne zadanie IAEA – **Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej**.



*International Atomic Energy Agency* – **IAEA**  
to w tłumaczeniu  
Międzynarodowa  
Agencja Energii  
Atomowej – MAEA.



Jest  
**wyspecjalizowaną  
autonomiczną  
jednostką**  
Organizacji Narodów  
Zjednoczonych.

Została powołana  
w **1957 r.**

Swoją siedzibę ma  
w **Wiedniu**.

Celem agencji jest:

- „dążenie do rozszerzenia wkładu energii atomowej dla pokoju, zdrowia i dobrobytu ludzkości”,
- „zapewnienie możliwie najszerzej kontroli, aby energia atomowa nie była wykorzystana w celach wojskowych”.



W 2016 r.  
członkami  
agencji było  
168 państw.



Państwa będące  
członkami IAEA



Państwa niebędące  
członkami IAEA

## Jak wydobywa się rudę uranu?

Rudę uranu wydobywa się w **podobny sposób jak inne minerały!** Najbardziej popularne są kopalnie podziemne i odkrywkowe oraz ługowanie w złożu i na hałdzie.

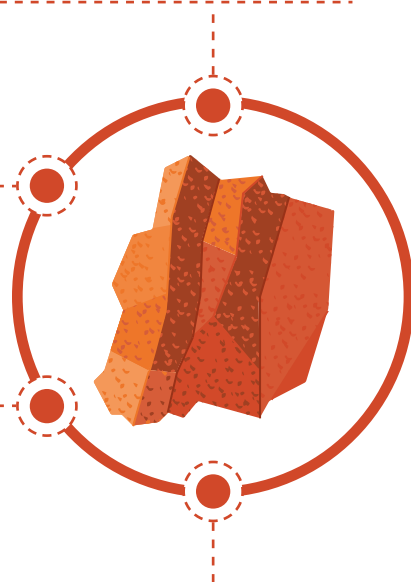


Wydobycie uranu w **kopalni odkrywkowej** możliwe jest tylko wtedy, kiedy złoże znajduje się blisko powierzchni.

Wydobycie w **kopalni podziemnej** pozwala na dostęp do złóż uranu o jego dużej koncentracji.

**Ługowanie w złożu** polega na wtłaczaniu rozpuszczalnika w złoże uranu. Wypłukuje on ten pierwiastek ze złoża. Następnie powstały roztwór zawierający uran jest tłoczony na powierzchnię odwiertem produkcyjnym. To najbardziej przyjazna środowisku metoda wydobywania uranu.

**Ługowanie na hałdzie** polega na usypaniu hałdy z wydobytej skały zawierającej uran, która następnie jest przepłukiwana rozpuszczalnikiem przez okres kilku tygodni w celu odzyskania jak największej ilości uranu. Hałda może mieć wysokość od 5 do nawet 30 metrów.

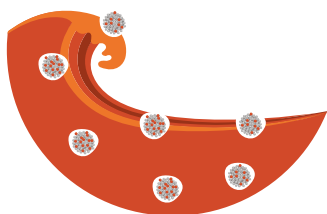
**Czy wiesz, że...**

W jednej z największych kopalni uranu na świecie – Olympic Dam w Australii – uran jest produktem ubocznym przy wydobyciu miedzi!



## Czy woda morska może stanowić źródło uranu dla elektrowni jądrowych?

Tak, w wodzie rozpuszczone są ogromne ilości uranu, który może zostać wykorzystany jako paliwo jądrowe. Jego ekstrakcja **nie jest jeszcze opłacalna ekonomicznie**, ale zbliża się do granicy opłacalności.



Zawartość uranu w wodzie morskiej to **około 3 miligramów na metr sześcienny**, co stanowi bardzo małą koncentrację w porównaniu z jego innymi źródłami. Jednak zakładając ogromną objętość wszystkich oceanów na poziomie  $1,3 \times 10^{18} \text{ m}^3$ , całkowita zawartość uranu wynosi około  **$3,9 \times 10^9$  ton**. Jeden reaktor jądrowy o mocy 1000 MWe zużywa około 30 ton uranu rocznie, czyli **uran rozpuszczony w wodzie morskiej może zasilić tysiąc reaktorów jądrowych przez okres 100 000 lat!**

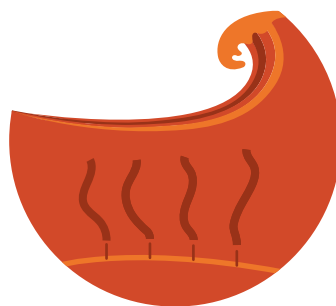
**Cena** uranu wyprodukowanego z wody morskiej **przekracza** obecnie kilkukrotnie cenę uranu wydobytego metodami konwencjonalnymi i z tego powodu jego ekstrakcja **nie jest opłacalna ekonomicznie**. Komercyjne opanowanie tej technologii daje możliwość pozyskania paliwa jądrowego krajom, które nie mają własnych zasobów uranu, a posiadają dostęp do morza.

### Czy wiesz, że...

**Koncentracja** uranu w wodzie morskiej jest **relatywnie stała**, co oznacza, że ilość uranu odzyskanego z wody morskiej jest kompensowana uranem wypłukiwanym ciągle ze skał. Pod tym względem uran można traktować jako **praktycznie niewyczerpywalne źródło energii!**



Jedną z **metod** ekstrakcji uranu z wody morskiej jest wykorzystanie specjalnych **włókien** absorbujących uran, które mogą stanowić **morską farmę uranu**. Kilogram włókna jest w stanie odzyskać około 3 gramów uranu w ciągu miesiąca. Po odzyskaniu uranu włókna są wykorzystywane ponownie.



## Czy zasoby uranu mogą być kontrolowane przez jedno państwo?

Nie, nie mogą, gdyż światowe zasoby uranu są rozlokowane w **kilku państwach** stabilnych politycznie. Nie ma więc zagrożenia w ograniczeniu jego dostaw.



- Państwami posiadającymi **największe złoża uranu** są Australia, Kazachstan, Kanada oraz Rosja. Posiadają one około **60%** światowych zasobów uranu.

- Największym producentem** uranu na świecie jest **Kazachstan**, w którym wydobywa się około 40% tego pierwiastka. Na kolejnych miejscach znajdują się **Australia** – około 20% wydobycia – oraz **Kanada** – około 10% wydobycia.

## Czy wiesz, że...

Uran wykorzystany do produkcji **broni jądrowej** może być **odzyskany** i przetworzony na paliwo jądrowe. Do 2013 r. około 500 ton wysoko wzbogaconego uranu wykorzystywanego do celów militarnych zostało przetworzone na 15000 ton paliwa jądrowego zasilającego elektrownie jądrowe. Liczba ta odpowiada **rozmontowaniu około 20 000 głowic jądrowych!**



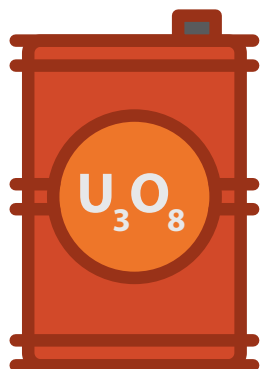
## Największe kopalnie uranu na świecie

Kopalnia	Kraj	Światowa produkcja
McArthur River	Kanada	13%
Tortkuduk & Moinkum	Kazachstan	8%
Olympic Dam	Australia	6%
SOMAIR	Niger	5%
Budenovskoye 2	Kazachstan	4%



## Co mają wspólnego uran i żółte ciasto?

Drugim etapem wytwarzania paliwa uranowego jest przygotowanie koncentratu o żółtym kolorze, nazywanego potocznie „żółtym ciastem” (z ang. *yellowcake*).



- Po wydobyciu ruda uranu jest **mielona**, a następnie poddawana chemicznym procesom **oczyszczania**, w efekcie których otrzymuje się **koncentrat** w postaci mialkiego proszku składający się głównie z tlenku uranu  $U_3O_8$ .
- **Kolor koncentratu** zależy od temperatury, w której jest on suszony. Mimo swej nazwy, nie zawsze jest żółty. **Im większa temperatura suszenia koncentratu, tym kolor staje się ciemniejszy.** Może on przyjąć barwę pomarańczową, zieloną, brązową lub nawet czarną.



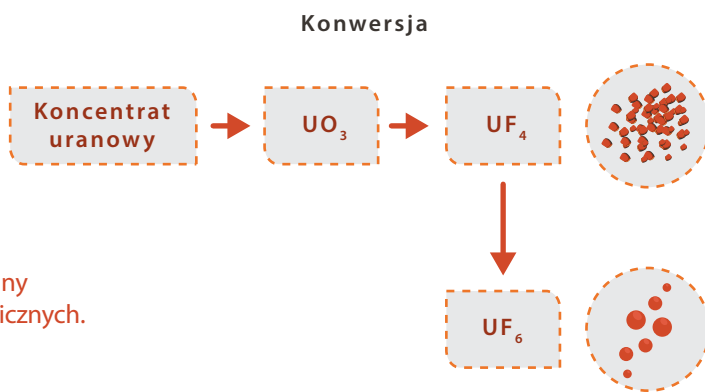
- **Produkcja koncentratu** zazwyczaj odbywa się w **kopalni uranu**. Następnie jest on pakowany w beczki o pojemności około 400 kg i transportowany do zakładów konwersji.
- Procesu mielenia nie stosuje się w przypadku wydobycia metodami ługowania, ponieważ uran jest **bezpośrednio wyłukiwany** ze złoża lub wydobytej skały.

Dlaczego w procesie produkcji paliwa uranowego wytwarza się  $UF_6$ , nazywany potocznie „hex”?

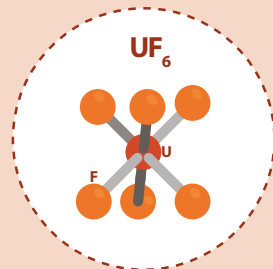
Sześćciofluorek uranu  $UF_6$  jest jedynym związkiem chemicznym, w którym uran występuje w **postaci gazowej**, a tym samym może zostać wzbogacony i stanowić wartościowe paliwo jądrowe.



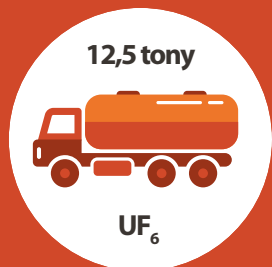
Dwuetapowy proces zamiany koncentratu uranowego (*yellowcake*) na sześćciofluorek uranu (hex) nazywa się **konwersją** i jest przeprowadzany w specjalnych zakładach chemicznych.



- W **pierwszym etapie** koncentrat uranowy jest transformowany do  $UO_3$ , a następnie do  $UF_4$ , które ma postać zielonych granulek. Na tym etapie koncentrat jest **oczyszczany** z pozostałych zanieczyszczeń.
- W **drugim etapie** powstały  $UF_4$  jest przetwarzany w  $UF_6$  podczas silnej **reakcji egzotermicznej**, wytwarzającej wysoką temperaturę i płomień.



### Ciekawostka



$UF_6$  może przyjmować **wszystkie stany skupienia** w zależności od **temperatury i ciśnienia** panującego w zbiorniku. Każda z jego postaci wykorzystywana jest do **różnych celów** w procesie produkcji paliwa jądrowego:

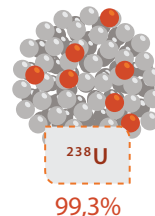
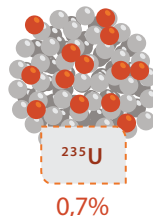
- gazowa do wzbogacania paliwa,
- ciekła do napełniania zbiorników,
- stała do bezpiecznego transportu.

## Czy we wzbogaceniu zawsze musi chodzić o pieniądze?

Nie do końca, w energetyce jądrowej procesem wzbogacenia nazywamy zwiększenie udziału izotopu  $^{235}\text{U}$  kosztem udziału izotopu  $^{238}\text{U}$  w uranie.



Uran występujący naturalnie składa się z dwóch odmian fizycznych nazywanych **izotopami** i różniących się liczbą neutronów w jądrze atomowym, a tym samym masą. Lżejszy  $^{235}\text{U}$  występuje rzadziej i stanowi tylko 0,7% uranu naturalnego, a cięższy  $^{238}\text{U}$  występuje częściej i stanowi 99,3% uranu naturalnego.

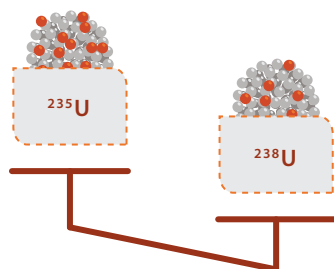


?

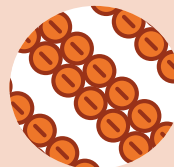
## Ale po co w ogóle wzbogacać uran?

Większość reaktorów jądrowych jako materiał rozszczepialny wykorzystuje  $^{235}\text{U}$ , którego udział w paliwie jądrowym musi wynosić 3-5%. Zwiększenie udziału osiąga się w procesie wzbogacania.

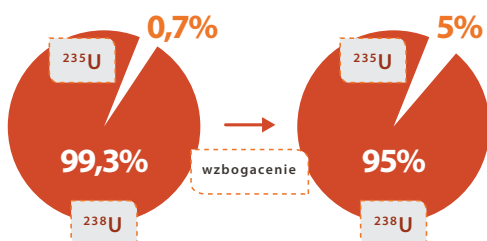
Najpopularniejszą metodą wzbogacania jest **metoda wirówkowa**, w której sześćfluorek uranu  $\text{UF}_6$  w postaci gazowej pod wpływem siły odśrodkowej jest rozdzielany na **dwa strumienie gazowe** – cięższy, zawierający  $^{238}\text{U}$ , i lżejszy, zawierający  $^{235}\text{U}$ . Wzbogacony  $\text{UF}_6$  jest ładowany do kontenerów transportowych i wysyłany do zakładów produkcji paliwa jądrowego.



W zakładach wzbogacania paliwa wirówki połączone są **kaskadowo**.



W jednej kaskadzie może się znajdować nawet kilka tysięcy wirówek o średnicy kilkudziesięciu centymetrów i wysokości dochodzącej nawet do kilkunastu metrów. Wirówki obracają się z prędkością około **1500 obr/s!**



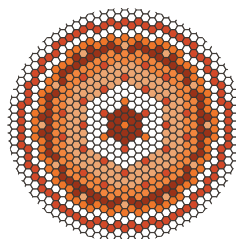
**Zdolność wzbogacania uranu** mierzy się za pomocą **jednostki SWU** (z ang. *Separative Work Unit*), która określa pracę niezbędną do oddzielenia izotopów  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ . Do produkcji jednego wsadu paliwa jądrowego dla reaktora o mocy 1 000 MWe potrzeba około 140 000 SWU.

## Czy paliwo jądrowe ma zawsze taką samą formę?

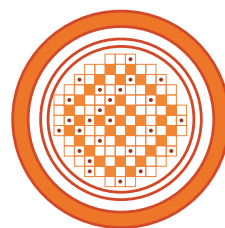
Istnieje wiele rodzajów paliw jądrowych, które można podzielić ze względu na kształt geometryczny jak i skład materiałowy.



- Geometria rdzenia reaktora jądrowego posiada **kilka poziomów**. Od najmniejszego, którym jest pastylka paliwowa, poprzez element paliwowy do rdzenia reaktora. Każdy typ reaktora charakteryzuje się inną geometrią.
- Najczęściej używa się **geometrii kwadratowej** lub **heksagonalnej**. Typ geometrii determinuje rozmieszczenie elementów paliwowych w rdzeniu, jak i prętów paliwowych w elemencie paliwowym.



Geometria heksagonalna



Geometria kwadratowa

## Czy wiesz, że...

Amerykański reaktor ATR (*Advanced Test Reactor*) posiada rdzeń w postaci **spiralnie ułożonych płyt uranowo-aluminiowych**.



**Paliwo jądrowe** składa się najczęściej z matrycy, w której jest umieszczony ciężki metal posiadający izotopy rozszczepialne. Na przykład w przypadku najpopularniejszego paliwa jądrowego  $\text{UO}_2$  – tlen jest matrycą, uran to ciężki metal, a izotop uranu  $^{235}_{92}\text{U}$  to materiał rozszczepialny.

- W paliwie mogą również wstępować **izotopy paliworodne**, czyli uran  $^{238}_{92}\text{U}$  i tor  $^{232}_{90}\text{Th}$ , oraz aktynowce, czyli izotopy neptunu Np ( $^{237}_{93}\text{Np}$ ), ameryku Am ( $^{241}_{95}\text{Am}$ ,  $^{242}_{95}\text{Am}$ ,  $^{243}_{95}\text{Am}$ ) oraz kiuru Cm ( $^{243}_{96}\text{Cm}$ ,  $^{244}_{96}\text{Cm}$ ,  $^{245}_{96}\text{Cm}$ ).
- Paliwo jądrowe może przyjmować **różne formy ceramiczne**, np.  $\text{UO}_2$  – dwutlenek uranu, UN – azotek uranu czy UC – węgiel uranu. Istnieje również możliwość wytworzenia **paliwa metalicznego**, jak i bardziej zaawansowanego paliwa będącego połączeniem kilku komponentów ceramicznych lub metalicznych: **paliwo cer-cer**, **paliwo cer-met** czy **paliwo met-met**.

## Czy wiesz, że...

Nazwa gatunku **muzyki heavy metal** pochodzi od nazwy **ciężkich pierwiastków** wykorzystywanych w energetyce jądrowej i nazywanych również *heavy metal*.

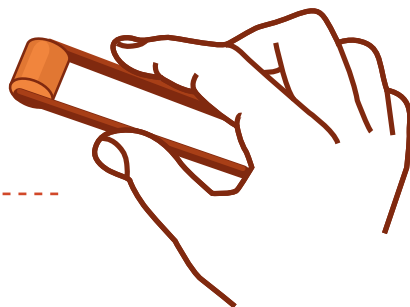


## Jaki kształt może przyjąć paliwo jądrowe?

Kształt paliwa jądrowego zależy od typu reaktora jądrowego, jednak najczęściej jest ono produkowane w postaci **cylindrycznych pastylek** nazywanych peletami.



Rdzeń reaktora jądrowego składa się z **kaset paliwowych**, w których umieszczone są **pręty paliwowe**, a dopiero w nich – **pastylki paliwowe**. W rdzeniu reaktora może znajdować się nawet **kilkadziesiąt milionów** pastylek paliwowych!

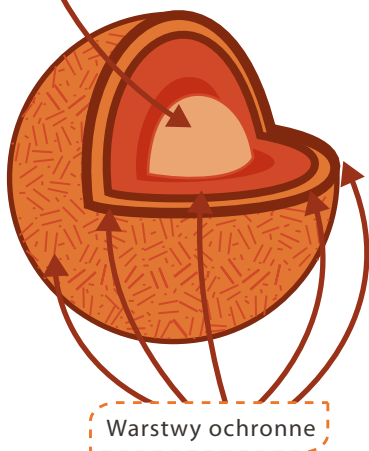


### ● Proces produkcji pastylek paliwowych

składa się z kilku etapów. Na początku wzbogacony  $UF_6$  jest konwertowany w tlenek uranu  $UO_2$ , z którego następnie produkuje się pastylki paliwowe. Pastylki ładowane są do prętów paliwowych, a pręty są montowane w kasety. Przygotowanie kasety paliwowej stanowi ostatni etap przed załadowaniem paliwa do rdzenia reaktora.

- Paliwo jądrowe może zawierać **inne izotopy rozszczepialne**, np. pluton. Paliwo stanowiące mieszaninę  $PuO_2$  i  $UO_2$  nazywa się MOX (z ang. *Mixed OXide fuel*).

Materiał paliwowy

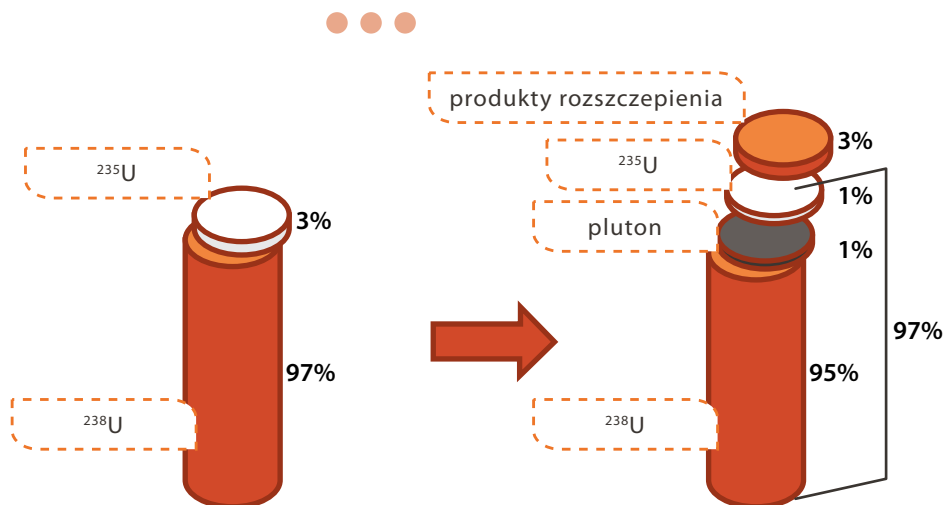


Warstwy ochronne

Jednym z **najbardziej nowoczesnych** rodzajów paliwa jądrowego jest paliwo **TRISO** (z ang. *TR*istructural-*IS*Otropic), mające postać **kuliść**. Materiał rozszczepialny jest w nim otoczony warstwami ochronnymi, a sama kuliśćka paliwa ma bardzo małe rozmiary rzędu **połowy milimetra!** Paliwo tego typu umieszcza się w większych elementach paliwowych w kształcie kul lub cylindrów o wymiarach kilku centymetrów.

## Jaka część paliwa jądrowego jest faktycznie wypalana?

Okolo 3%, choć dokładna wielkość zależy od początkowego wzbogacenia czy typu reaktora. Co ciekawe, pozostała część może zostać **ponownie wykorzystana!**



1  
Początkowo paliwo składa się z dwóch izotopów uranu –  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ .

2  
W czasie pracy reaktora  $^{235}\text{U}$  ulega rozszczepieniu, natomiast z  $^{238}\text{U}$  powstaje pluton  $^{239}\text{Pu}$ , który również ulega rozszczepieniu. Produkcja plutonu pozwala częściowo uzupełnić ubytek  $^{235}\text{U}$ .

3  
Paliwo po wypaleniu to zdecydowanie bardziej różnorodna mieszanina:

- Głównym składnikiem jest ciągle  $^{238}\text{U}$ .
- Ponadto znajduje się w nim **niewypalony**  $^{235}\text{U}$  i  **pewna ilość**  $^{236}\text{U}$ .
- W paliwie wskutek pochłonięć neutronów i kolejnych rozpadów powstają również kolejne aktywnce – głównie **izotopy plutonu**.
- Ostatnią i najbardziej różnorodną grupą składników są **produkty rozszczepienia**. Można w niej znaleźć między innymi izotopy kryptonu, strontu, molibdenu, jodu czy cezu.

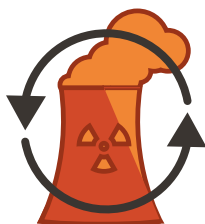
## Jak często wymienia się paliwo w reaktorze jądrowym?

Odpowiedź zależy od rodzaju reaktora, ale najczęściej stosowanym dziś systemem jest wymiana **1/3 paliwa co 1,5 roku**. Oznacza to, że **paliwo spędza w reaktorze około 4,5 roku**.

W wielu nowszych reaktorach okres pomiędzy wymianami wydłuża się do 2 lat.

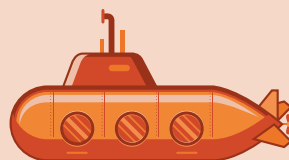


W celu wymiany paliwa konieczne jest **zatrzymanie i schłodzenie reaktora, a następnie ściągnięcie głowicy**. Operację wykonuje się **pod wodą**, aby zapewnić chłodzenie i osłonę przed promieniowaniem. Cały proces trwa **około miesiąca** i jest wykorzystywany również do wykonywania innych prac serwisowych i kontroli.



Niektóre reaktory (np. kanadyjski ciężkowodny reaktor CANDU) mają **możliwość wymiany paliwa w trakcie pracy**. Jest to możliwe dzięki kanałowej konstrukcji reaktora – paliwo wymienia się w jednym kanale, podczas gdy pozostała część reaktora pracuje.

Reaktory stosowane do **napędu okrętów** mogą pracować bez wymiany paliwa nawet **25 lat**. Wymianę paliwa łączy się zwykle z gruntowną modernizacją całej jednostki.



## Czy pluton może być paliwem w reaktorze jądrowym?

Tak, izotop plutonu  $^{239}\text{Pu}$  jest rozszczepialny i **może być paliwem w reaktorze jądrowym**.



94

Pu

Plutonium  
244,0

$^{239}\text{Pu}$  powstaje wskutek pochłonięcia neutronu przez  $^{238}\text{U}$  i dwa następujące po nim rozpady beta. Powstający pluton uzupełnia w czasie pracy reaktora spadek zawartości rozszczepialnego izotopu uranu  $^{235}\text{U}$ , umożliwiając dłuższą pracę reaktora.

Po wypaleniu paliwa możliwe jest odseparowanie plutonu od pozostałych składników, a następnie połączenie go we właściwych proporcjach ze zubożonym uranem i **produkcja nowego paliwa do reaktorów**. Paliwo takie nazywa się **MOX** (*Mixed Oxide Fuel*) i jest powszechnie stosowane np. we Francji.

## Ciekawostka

## Czy z plutonu z wypalonego paliwa można zbudować bombę?

Pluton pochodzący z wypalonego paliwa to mieszanina różnych izotopów (m.in.  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), natomiast do budowy bomby atomowej wymagany jest jak najczystszy  $^{239}\text{Pu}$  (mniej niż 7% pozostałych izotopów). **Dlatego też pluton reaktorowy, pochodzący z wypalonego paliwa, nie jest właściwym materiałem do budowy bomby.**



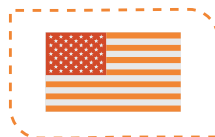
## Czy energetyka jądrowa może pomóc w redukcji zbrojeń jądrowych?

Tak, takie działania już **były prowadzone!**



W latach 1993-2013 prowadzony był program **Megatony na megawaty** (*Megatons to Megawatts*). Zakładał on wykorzystanie zapasów wysoko wzbogaconego uranu pochodzącego z **rosyjskich** zapasów wojskowych do produkcji paliwa dla **amerykańskich** elektrowni jądrowych.

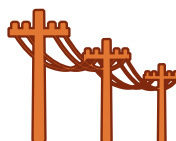
Wysoko wzbogacony uran miesza się z uranem zubożonym lub naturalnym w celu uzyskania wzbogażenia odpowiedniego do wykorzystania w reaktorze (3-5%).



20 000



10%



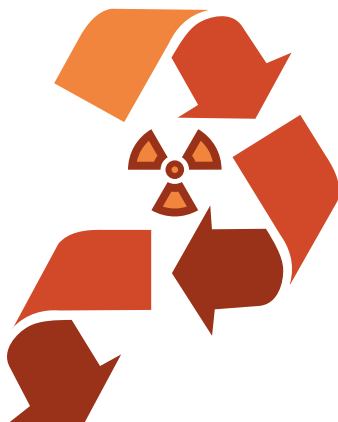
przez 20 lat

W czasie programu **zlikwidowano 500 ton** wysoko wzbogaconego uranu.

To około 20 000 głowic jądrowych. W tym czasie ok. **10% elektryczności w USA** produkowane było z uranu pochodzącego z tego programu.

Czy wypalone paliwo jądrowe można ponownie wykorzystać?

Tak! Wypalone paliwo jądrowe można podzielić na poszczególne składniki, a niektóre z nich ponownie **wykorzystać do produkcji energii**. Pozwala to nie tylko na lepsze wykorzystanie uranu, ale równocześnie **redukuje ilość odpadów**.



Pluton z wypalonego paliwa jest już dziś wykorzystywany do **produkcji energii w niektórych krajach** (np. we Francji). Możliwość wielokrotnego recyklingu jest jednak **ograniczona** ze względu na inne powstające w tym procesie aktywnowce.

Jedynym składnikiem, którego nie da się wykorzystać do produkcji energii, są **produkty rozszczepienia**. Zawierają one jednak pewną ilość rzadkich pierwiastków i są prowadzone prace badawcze dotyczące możliwości ich odzyskiwania.

Idea **zamkniętego cyklu paliwowego** zakłada ograniczenie odpadów z wypalonego paliwa do produktów rozszczepienia. Wszystkie pozostałe składniki byłyby ponownie wykorzystywane. Oznaczałoby to ok. **trzydziestokrotne zmniejszenie ilości odpadów** oraz znaczne **skrócenie czasu ich składowania**. Wymaga to jednak wdrożenia na dużą skalę nowych technologii reaktorowych – m.in. reaktorów prędkich.

## Co ma wspólnego składowisko odpadów radioaktywnych z dynastią Wazów?

Prawie 400-letnie działa z brązu wydobyte ze szwedzkiego królewskiego galeonu *Vasa* posłużyły do oceny szybkości korozji miedzi. To z kolei pomogło w wyborze materiału na kapsuły do składowania kaset z wypalonym paliwem jądrowym.

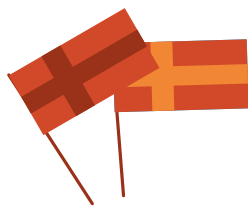


Okręt, wybudowany na zlecenie króla Szwecji Gustawa Adolfa z dynastii Wazów, zatonął w 1628 roku. Wydobyto go w 1961 roku.



Miedź wykorzystywana była już w czasach starożytnych, głównie ze względu na łatwość obróbki oraz stosunkowo dużą trwałość.

- Niełatwo było jednak naukowcom oszacować zmiany korozyjne w miedzi, głównie ze względu na niewielką szybkość zachodzenia tych zmian.
- Wiele znalezisk archeologicznych posłużyło obecnym badaczom do określenia odporności miedzi na działanie licznych czynników środowiskowych.



Obecnie w żadnym państwie **nie istnieje** ostateczne składowisko wysoko radioaktywnych odpadów jądrowych, jednakże **wiele państw prowadzi intensywne prace** mające na celu powstanie takiego składowiska. Dotychczas najbardziej zaawansowane prace prowadzone są w **Szwecji** (Östhammar) oraz **Finlandii** (Onkalo). Obydwa państwa stosują bardzo podobną technologię:

1. Kasety z wypalonym paliwem trafiają do metalowych rdzeni **kanistrów**, które następnie otoczone zostają kilkucentymetrową **warstwą miedzi**.
2. Miedziane kanistry wkładane są w **wyściełane bentonitem otwory w podziemnych tunelach**, które wywiercone są w litej skale na głębokości ponad **500 m pod powierzchnią ziemi**.
3. Po włożeniu kanistra **góra otworu „zatykana” jest bentonitem**. Następnie wolna przestrzeń w tunelu wypełniona zostaje również bentonitem.
4. Sieć tuneli wypełnionych bentonitem ma zapewnić szczelność, ponieważ ta **skała wulkaniczna pęcznieje i gęstnieje pod wpływem wody**, tworząc zwartą barierę, która zapobiega dalszemu przedostawaniu się wody w okolice miedzianego kanistra.
5. Transport kanistrów z wypalonym paliwem oraz wypełnianie tuneli bentonitem ma być w pełni **zautomatyzowane**, co uchroni pracowników przed zbyt długą ekspozycją na promieniowanie.
6. Składowisko jest zaprojektowane na bezpieczne składowanie wypalonego paliwa jądrowego przez co najmniej **100 tys. lat**. Po tym czasie poziom radioaktywności materiałów tam przechowywanych ma być zbliżony do naturalnego poziomu radioaktywności rudy uranu.



## Czy w Polsce znajduje się składowisko odpadów promieniotwórczych?

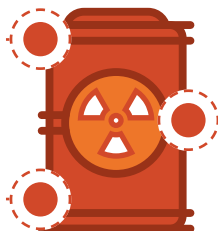
Tak, na terenie naszego kraju od 1961 r. działa **Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych**. Jest to jedyny taki obiekt w Polsce.



- Składowisko zlokalizowane jest w miejscowości **Różan nad Narwią w województwie mazowieckim** i mieści się na terenie dawnego fortu.
- Jest przystosowane do:
  - ostatecznego składowania **odpadów krótkożyjących** (< 30 lat) oraz **nisko- i średnioaktywnych** (< 1 012 Bq),
  - okresowego przechowywania odpadów długożyjących (> 30 lat i > 1 012 Bq).



Odpady promieniotwórcze pochodzą głównie z **laboratoriów oraz zakładów medycznych wykorzystujących źródła promieniowania**. Są to m.in. fartuchy, naczynia i przedmioty, które miały styczność z izotopami promieniotwórczymi.



W celu ograniczenia objętości odpadów stosuje się metody chemiczne oraz fizyczne, które **odfiltrowują oraz zagęszczają** związki zawierające izotopy promieniotwórcze.

Całość wkłada się do **ocynkowanych beczek**, które układa się w specjalnie przygotowanej fosie i zalewa betonem. Dodatkowo dodaje się substancje utrudniające rozpuszczalność koncentratów oraz materiały wiążące, które zapobiegają wydostawaniu się gazów i oparów do środowiska.



## Czy z pierwiastka toru można wyprodukować paliwo jądrowe?

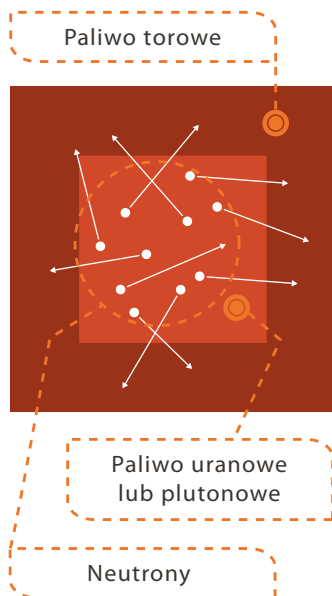
Występujący w naturze tor  $^{232}\text{Th}$  nie jest izotopem rozszczepialnym, ale... izotopem paliworodnym, który pod wpływem reakcji jądrowych może zamienić się w rozszczepialny izotop uranu  $^{233}\text{U}$ , który jest idealnym paliwem jądrowym!

- **Koncentracja toru** w skorupie ziemskiej jest **kilka razy większa** niż koncentracja uranu.
- Podczas reakcji jądrowej jądro  $^{232}\text{Th}$  może **wyłapać neutron**, co prowadzi do produkcji  $^{233}\text{Th}$ , który ulega procesowi **rozpadu jądrowego** do protaktynu  $^{233}\text{Pa}$ , a ten izotop rozpada się z kolei do uranu  $^{233}\text{U}$ .



Krajem, który rozważa **użycie toru** jako komponentu paliworodnego w swoich reaktorach jądrowych, są **Indie**. Posiadają one bowiem **największe jego zasoby na świecie**, a nie mają zasobów uranu.

### Koncepcja Radkowskyego na poziomie kasety paliwowej



- Jako że  $^{232}\text{Th}$  nie jest sam w sobie izotopem rozszczepialnym, w rdzeniu reaktora jądrowego **musi być użyty wraz z izotopami rozszczepialnymi**, np. uranem  $^{235}\text{U}$  lub plutonem  $^{239}\text{Pu}$ , zapewniającymi neutrony do jego transmutacji w  $^{233}\text{U}$ .
- Paliwo torowe w reaktorach jądrowych stosuje się w postaci **płaszczki** otaczającego standardowe paliwo uranowe. Koncepcja ta nazywa się **koncepcją Radkowskyego** od nazwiska Alvina Radkowskyego, amerykańskiego fizyka jądrowego.
- **Zużyte paliwo torowe** po wyładowaniu z rdzenia reaktora jądrowego zawiera **dużo mniej rzadkich aktywności**, a tym samym jest **bardziej przyjazne dla środowiska** niż zużyte paliwo uranowe.

## Ile obiektów jądrowych znajduje się na terenie Polski?

Na terenie Polski w chwili obecnej znajdują się **trzy obiekty**, które według obowiązującego prawa mają status obiektu jądrowego. Są to: **reaktor badawczy MARIA**, **reaktor badawczy EWA** (w likwidacji od 1997 roku) oraz **przechowalnik wypalonego paliwa**.



- **Reaktor MARIA** jest obecnie jedynym działającym reaktorem w Polsce, a chronologicznie drugim (pierwszym była EWA).
- W przeszłości eksploatowane były także reaktory zerowej mocy, tzw. zestawy krytyczne: ANNA, AGATA, MARYLA.



Reaktor otrzymał imię MARIA ku czci Marii Skłodowskiej-Curie.

**Zestaw krytyczny**, inaczej zwany reaktorem zerowej mocy, to reaktor produkujący tak mało energii, iż żadne wymuszone bądź dodatkowe chłodzenie nie jest potrzebne.

**Obiektem jądrowym**, zgodnie z ustawą Prawo atomowe z 2017 roku, nazywamy:

- elektrownię jądrową,
- reaktor badawczy,
- zakład wzbogacania izotopowego,
- zakład wytwarzania paliwa jądrowego,
- zakład przerobu wypalonego paliwa jądrowego,
- przechowalnik wypalonego paliwa jądrowego,
- a także bezpośrednio związany z którymkolwiek z wymienionych obiektów i znajdujący się na jego terenie obiekt służący do przechowywania odpadów promieniotwórczych.

Ile reaktorów jądrowych pracuje w elektrowniach położonych  
mniej niż 300 km od Polski?

W promieniu 300 km od granic Polski pracują **23 reaktory energetyczne**  
w 8 elektrowniach jądrowych. Mają one moc około 15 GWe.



Reaktory w pobliżu polskiej granicy znajdują się na terenie **Szwecji, Czech, Węgier, Słowacji i Ukrainy**.

Liczba reaktorów może zaskakiwać, ale nie powinna – niedługo wzrośnie o kolejnych 7 reaktorów,  
które budowane są:

- na Słowacji (WWER-440 – dwie sztuki),
- na Białorusi (WWER-1200 – dwie sztuki),
- w Rosji (WWER-1200 – jedna sztuka, obwód kaliningradzki),
- na Ukrainie (WWER-1000 – jednak sztuka).

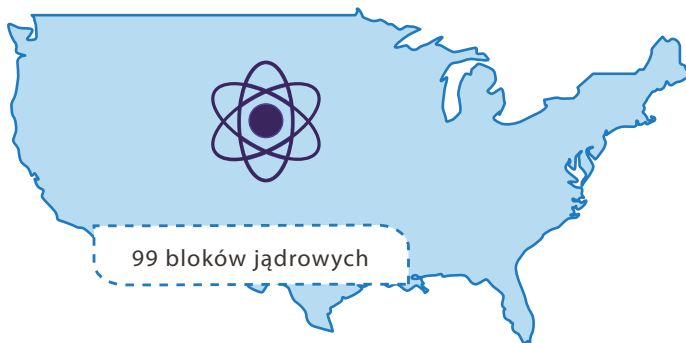
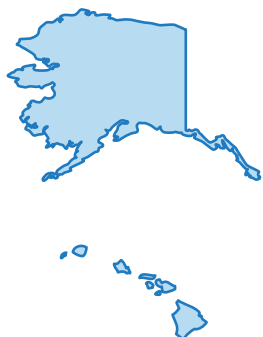


- Jedynym krajem wśród sąsiadów Polski nieposiadającym jądrowych reaktorów energetycznych jest **Litwa**, która ma jednak dwa wycofane w 2004 i 2009 roku reaktory typu RBMK.
- Pozostałe wyłączone reaktory w okolicy Polski to dwa BWR-y w **Szwecji**, dwa WWER-440 na **Słowacji** oraz jeden BWR w **Niemczech**. Wszystkie wyżej wymienione reaktory zostały wycofane po 1999 roku.








## W jakim kraju jest najwięcej bloków jądrowych?

Na świecie pracuje **448 bloków jądrowych**, z czego najwięcej jest w **Stanach Zjednoczonych**. Stany Zjednoczone zajmują również pierwsze miejsce pod względem całkowitej zainstalowanej mocy z reaktorów jądrowych.



## Pierwsza piątka państw, które posiadają najwięcej bloków jądrowych:

	Kraj	liczba bloków jądrowych	Moc zainstalowana netto [MW]
	Stany Zjednoczone	99	99 869
	Francja	58	63 130
	Japonia	42	39 752
	Chiny	38	33 384
	Rosja	35	26 111

- Jeśli chodzi o regiony, to najwięcej reaktorów znajduje się w **Ameryce Północnej** (118 reaktorów).
- Na drugim miejscu jest **Europa Zachodnia** (113 reaktorów).
- Na trzecim miejscu jest **Azja i Daleki Wschód** (110 reaktorów).

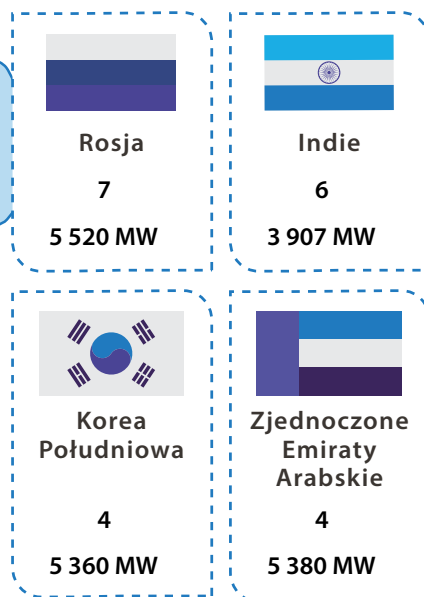


W którym kraju budowanych jest najwięcej bloków jądrowych?

Według statystyk MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej) obecnie **na świecie** buduje się **58 reaktorów jądrowych**, z czego **najwięcej w Chinach – aż 19**.



(Stan na 15.11.2017)



Liczba bloków energetycznych budowanych w krajach europejskich



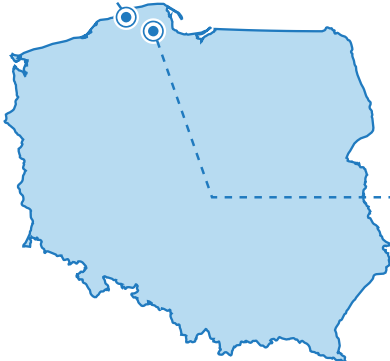
- Najwięcej bloków energetycznych buduje się w **Azji** i na **Dalekim Wschodzie**. Łącznie jest to 27 bloków energetycznych. Natomiast w Europie buduje się obecnie 13 bloków energetycznych.
- Spośród krajów budujących nowe bloki dwa kraje: Zjednoczone Emiraty Arabskie i Białoruś budują swoje **pierwsze bloki jądrowe**.
- Najpopularniejszym obecnie budowanym typem reaktora jest PWR, czyli **reaktor wodny ciśnieniowy**. 48 na 58 budowanych bloków jest tego typu.

## Gdzie w Polsce planowana jest budowa elektrowni jądrowej?

Jako miejsce budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej rozważane są dwie lokalizacje w **województwie pomorskim**: Żarnowiec i Lubiato-Kopalino.

**Lubiato-Kopalino**

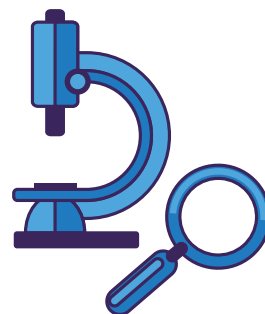
położone jest nad morzem i jest oddalone od Żarnowca jedynie o około 20 km.



**Żarnowiec** (nad jeziorem Żarnowieckim) już kiedyś był miejscem takiej inwestycji, lecz budowa nie została doprowadzona do końca.

Lokalizacja elektrowni jądrowej jest wybierana na podstawie **wieloletnich badań**, między innymi **geologicznych, hydrologicznych, meteorologicznych czy społecznych**. Podczas takich analiz bierze się pod uwagę czynniki takie jak:

- zapotrzebowanie na energię elektryczną w danym regionie,
- dostępność wody chłodzącej,
- gęstość zaludnienia,
- warunki meteorologiczne,
- potencjalne zdarzenie zewnętrzne – spowodowane przez przyrodę lub człowieka (np. trzęsienia ziemi albo powódzie),
- wpływ lokalizacji na rozprzestrzenianie się materiałów promieniotwórczych w razie ich uwolnienia.



Wszystkie badania prowadzone są, by ograniczać ryzyko wystąpienia jakiegokolwiek awarii, a w razie jej wystąpienia zminimalizować jej skutki.

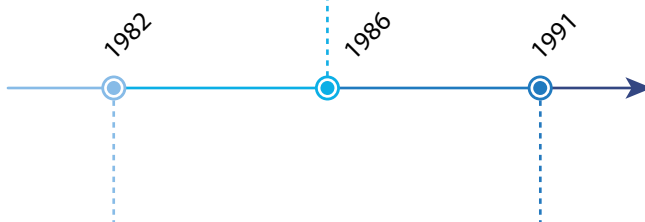


## Czy w Polsce podejmowano już próby zbudowania elektrowni jądrowej?

Tak, w latach **1982-1991 na Pomorzu, nad jeziorem Żarnowieckim**, była budowana pierwsza polska elektrownia jądrowa. Obiekt nie został ukończony.



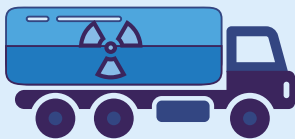
Awaria w elektrowni w Czarnobylu



W elektrowni miały docelowo pracować **cztery reaktory jądrowe typu WWER440**, rosyjskiej konstrukcji, o mocy około 440 MWe każdy.

Budowa elektrowni została zatrzymana w 1991 roku z powodu **krzysu ekonomicznego** oraz **niepokojów społecznych** związanych z awarią elektrowni jądrowej w Czarnobylu.

WWER, z ros. *Wodo-Wodianoj Energietyczeskiej Rieaktor* – Wodno-wodny reaktor energetyczny

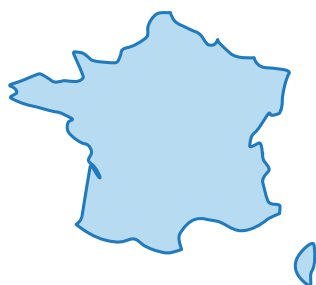








Po porzuceniu budowy Elektrowni Jądrowej Żarnowiec wiele już wyprodukowanych komponentów zostało odsprzedanych innym państwom wdrażającym energetykę jądrową. Zbiorniki reaktorów trafiły do elektrowni Paks na **Węgrzech** oraz Loviisa w **Finlandii**, gdzie są wykorzystywane w celach szkoleniowych.

Unikalne doświadczenie zdobyte podczas budowy elektrowni Żarnowiec pozwoliło rozwinąć polskie kompetencje w dziedzinie energetyki jądrowej, które będą mogły być wykorzystane w pracach nad Polskim Programem Energetyki Jądrowej.







W którym europejskim kraju energetyka jądrowa ma największy udział w produkcji energii elektrycznej: na Słowacji, we Francji czy na Ukrainie?

Oczywiście **we Francji**, ale obaj wymienieni nasi sąsiedzi również znaleźli się na podium tej klasyfikacji! W czołówce nie brakuje też innych krajów położonych blisko Polski.



Kraj	Ilość reaktorów	Udział wytwarzanej energii elektrycznej [%]*
 Francja	58	72,3
 Słowacja	4	54,1
 Ukraina	15	52,3
 Belgia	7	51,7
 Węgry	4	51,3
 Szwecja	10	40,0

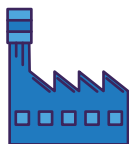
Jeśli weźmiemy pod uwagę **bezwzględną ilość** produkowanej w elektrowniach jądrowych **energii**, liderem również będzie **Francja**. Co ciekawe, drugie miejsce spośród krajów należących do UE zajmują... Niemcy!

Kraj	Produkcja energii [TWh]*
 Francja	384
 Rosja	180
 Ukraina	81
 Niemcy	80
 Wielka Brytania	65
 Szwecja	61

\* Wszystkie dane – za 2016 rok.

## Jakie korzyści może przynieść Polsce budowa elektrowni jądrowej?

Wybudowanie w naszym kraju elektrowni jądrowej to **redukcja emisji CO<sub>2</sub>**, zwiększenie **bezpieczeństwa energetycznego**, w długiej perspektywie czasowej **stabilne ceny energii** oraz rozwój **nowoczesnych technologii**.



### Obniżenie emisji CO<sub>2</sub>

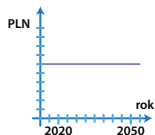
W Polsce 85% energii jest dostarczana z węgla, którego spalanie powoduje emisję CO<sub>2</sub>. Budowa elektrowni jądrowej pozwoli na znaczące jej obniżenie. Ma to znaczenie nie tylko z punktu widzenia zmian klimatu i ich skutków, ale również ze względów ekonomicznych w związku z planowanym wprowadzeniem opłat za emisję CO<sub>2</sub>.

### Bezpieczeństwo energetyczne

Budowa elektrowni jądrowej zwiększy dywersyfikację źródeł energii w Polsce. Dzięki korzystaniu z różnych źródeł energii zmniejszają się ewentualne skutki utraty jednego z nich i poprawia bezpieczeństwo energetyczne.



### Stabilne ceny energii



Elektrownia jądrowa, choć wymaga dużych nakładów na samą budowę, charakteryzuje się niskimi kosztami późniejszej eksploatacji, w tym paliwa. W połączeniu z długim czasem eksploatacji sprawia to, że uśredniony koszt produkcji energii jest stosunkowo niski i w bardzo niewielkim stopniu zależy od cen paliwa.

### Nowe technologie

Jak każdy zaawansowany technologicznie projekt, budowa elektrowni jądrowej to także okazja do rozwoju nowych technologii i wzrostu kompetencji polskich przedsiębiorstw w tym zakresie



## Czy polskie firmy mogą zbudować elektrownię jądrową?

O ile Polska nie posiada własnej technologii energetycznego reaktora jądrowego i część istotnych prac będzie musiała zostać wykonana przez firmy zagraniczne, to polskie przedsiębiorstwa mają doświadczenie zdobyte za granicą i **są w stanie wykonać znacząca część prac.**



Ocenia się, że ponad **300 polskich przedsiębiorstw** ma niezbędne kompetencje do udziału w projekcie budowy elektrowni jądrowej.



Polskie firmy uczestniczyły w pracach w elektrowniach jądrowych na całym świecie, m.in. w Rosji, na Ukrainie, w Japonii czy Meksyku.



25 polskich firm brało udział w budowie nowego bloku w elektrowni **Olkiluoto w Finlandii**. Na niektórych etapach prac polscy pracownicy stanowili drugą co do wielkości grupę (po Finach).



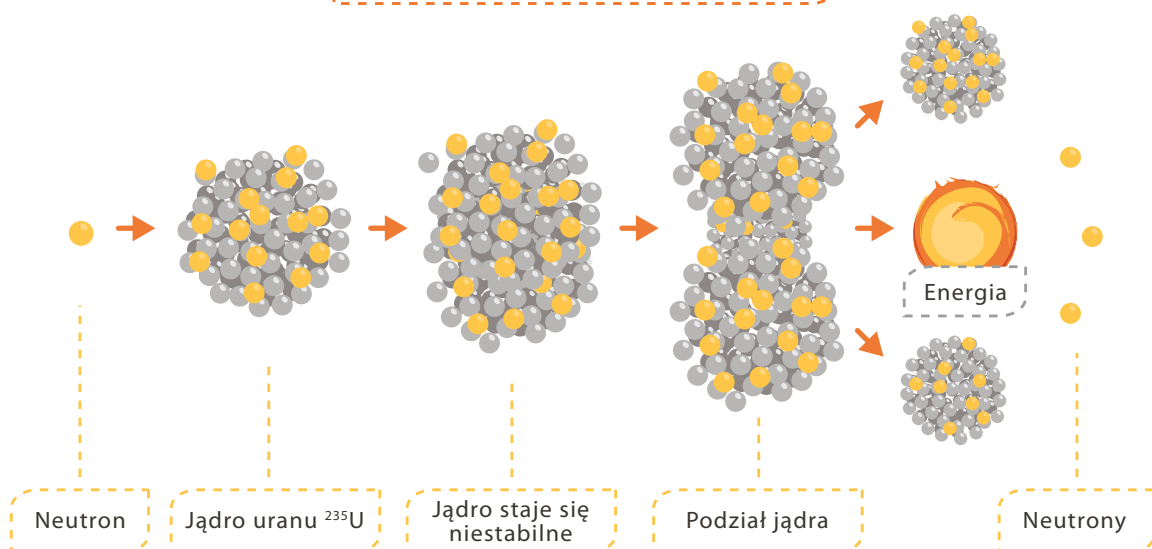
W czasie budowy **elektrowni w Żarnowcu** wiele kluczowych komponentów wyprodukowały polskie firmy. Produkowały one również takie elementy jak np. wytwornice pary do elektrowni jądrowych za granicą.

Ile gram węgla należy spalić, by otrzymać równowartość energetyczną rozszczepienia 1 g izotopu uranu 235?

Należy spalić około **2 000 000 g węgla**, by wydzielić energię równoważną rozszczepieniu 1 g izotopu uranu 235.



### ROZSZCZEPIENIE JĄDRA IZOTOPU URANU



- Energia wydzielana w trakcie rozszczepienia jądra izotopu uranu 235 wynosi ok. **200 MeV** i jest **50 milionów razy większa** od energii wydzielanej w procesie spalania węgla (energia wiązania  $\text{CO}_2$ ), która wynosi zaledwie 4 eV!
- Dzięki tak dużej koncentracji energii **elektrownia jądrowa** potrzebuje **znacznie mniej paliwa**. Przykładowo elektrownia jądrowa o mocy 1 000 MW zużywa rocznie jedynie **ok. 30 t paliwa**, z czego rozszczepieniu ulega około tona. **Elektrownia węglowa** o równoważnej mocy potrzebuje blisko **3 000 000 t węgla kamiennego**, czyli ok. **50 000 wagonów kolejowych** wypełnionych po brzegi węglem!

Odpowiednikiem **energii równoważnej rozszczepieniu 1 g izotopu uranu 235** jest spalanie:

ok. 2,5 tys.  $\text{m}^3$  gazu ziemnego

ok. 2 ton ropy naftowej

ponad 4 ton biomasy

## Ile potrzebujemy mocy zainstalowanej z elektrowni fotowoltaicznej, aby zastąpić elektrownię jądrową?

Aby wyprodukować taką samą ilość energii w elektrowni fotowoltaicznej potrzebna jest ok. **8-9 razy większa moc** niż w elektrowni jądrowej.



W zależności od **technologii** produkującej energię elektryczną z nominalnej zainstalowanej mocy będzie produkowana rocznie **inna ilość energii**. Jest to związane z faktem, że elektrownie różnych typów **nie zawsze pracują rocznie przez ten sam czas**. Stuprocentowe wykorzystanie mocy elektrowni miałyby miejsce w sytuacji, gdyby elektrownia pracowała cały czas z mocą **nominalną** (zainstalowaną).



Kiedy chcemy porównywać różne technologie między sobą, należy wprowadzić **współczynnik określający stopień wykorzystania mocy nominalnej**. Poziomym odniesieniem jest elektrownia, która produkuje energię przez cały rok bez przerw. Teoretycznie może ona pracować rocznie 8 760 godzin. Jeżeli jej moc nominalna wynosi 1 MW, to teoretyczna maksymalna produkcja energii jest równa 8 760 MWh (8,76 GWh). W stosunku do tej wielkości będziemy określać stopień wykorzystania mocy elektrowni.

	Produkowana energia [GWh]	Współczynnik wykorzystania mocy
Maksymalna produkcja dla 1 MW elektrowni	8,76	100,0%
Elektrownia fotowoltaiczna	~0,97	~11,1%
Elektrownia wiatrowa (zależnie od lokalizacji)	1,4–2,1	16,0%–24,0%
Elektrownia wodna	2,7	30,8%
Elektrownia węglowa	6,9	78,8%
Elektrownia jądrowa	7,88	90,0%

Powyższe zestawienie pozwala szybko oszacować, **jaką moc** należy zainstalować w poszczególnych technologiach, aby **zastąpić elektrownię jądrową** o danej mocy nominalnej.

**Elektrownia fotowoltaiczna** potrzeba 8,12 razy większej mocy

**Elektrownia wiatrowa** potrzeba 3,75–5,63 razy większej mocy

**Elektrownia węglowa** potrzeba 1,14 razy większej mocy



## Czy energetyka przyczynia się do zmian klimatu?

Efekt cieplarniany spowodowany jest obecnością w atmosferze gazów cieplarnianych. Jednym z nich jest CO<sub>2</sub>, którego udział w absorpcji promieniowania podczerwonego szacowany jest na około 25%. Człowiek poprzez swoją działalność znacząco zaburzył naturalne stężenie tego gazu w atmosferze.

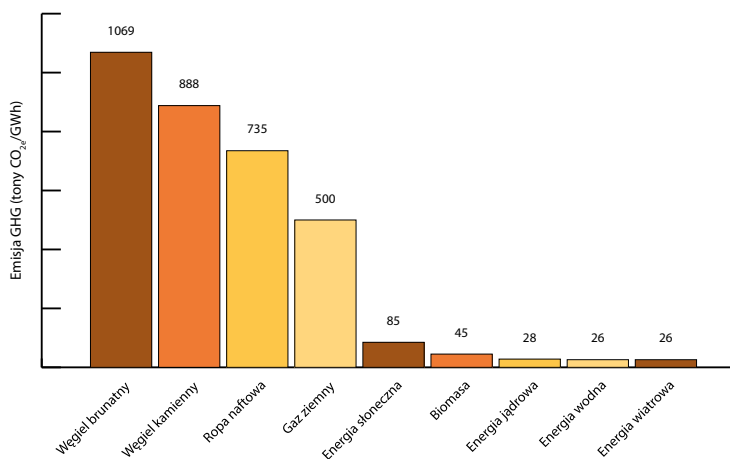


Jednym z głównych źródeł emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery jest **spalanie paliw kopalnych**. Szacuje się, że **elektrownie** są źródłem około **30% dwutlenku węgla** wydzielanego do atmosfery.

### Jaki udział w tym procederze mają elektrownie jądrowe?

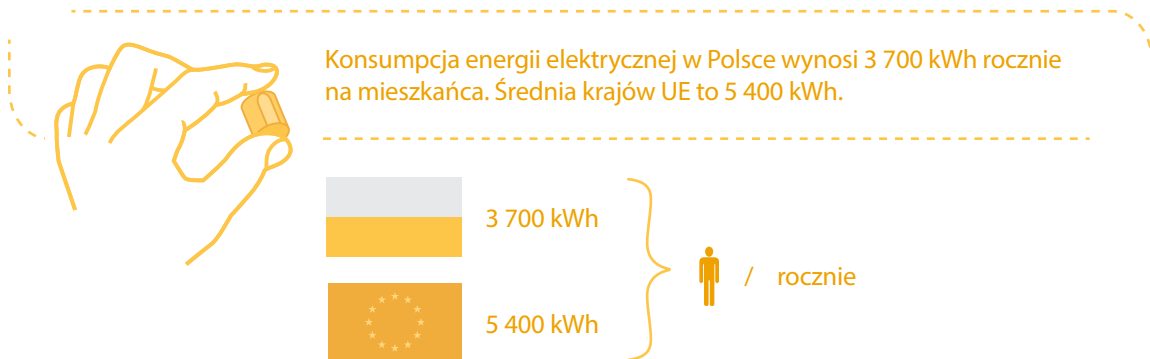
Elektrownie jądrowe **nie produkują w sposób bezpośredni** gazów cieplarnianych, ponieważ uzyskiwana energia cieplna nie pochodzi z procesu spalania (utleniania) paliwa, lecz z energii rozszczepienia ciężkich jąder. Jednakże, tak jak w przypadku wszystkich źródeł energii, **CO<sub>2</sub> emitowany jest pośrednio** w procesach towarzyszących budowie (produkcja cementu, transport materiałów budowlanych) oraz zapewnieniu prawidłowej eksploatacji (transport paliwa jądrowego, części zamiennych) elektrowni jądrowej.

Wykres obok przedstawia emisję CO<sub>2</sub> w tonach na GWh dla poszczególnych rodzajów elektrowni. **Elektrownie jądrowe mają jeden z najniższych wskaźników emisji dwutlenku węgla na wytworzoną jednostkę energii elektrycznej.**



Ile by powstało promieniotwórczych odpadów, gdyby energię elektryczną odpowiadającą potrzebom rocznym statystycznego Polaka wyprodukowała elektrownia jądrowa (15 gram, 15 kilogramów czy 1,5 tony)?

Wyprodukowanie takiej ilości energii spowoduje powstanie około **15 g odpadów** w postaci wypalonego paliwa jądrowego. To dwie pastylki paliwowe!



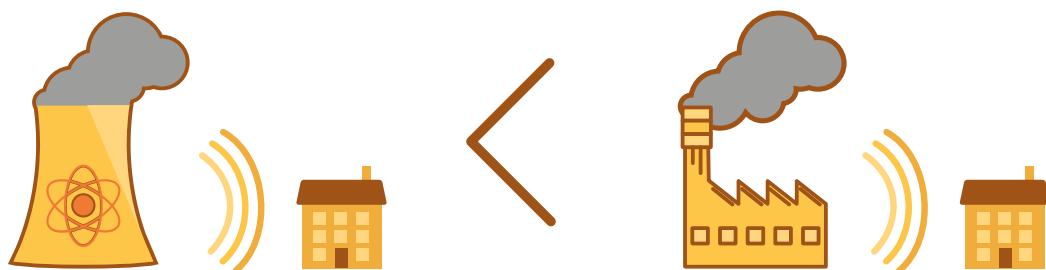
Większość wypalonego paliwa stanowi niewykorzystany uran. Gdyby dokonać separacji składników paliwa, to pozostałoby ok. 0,5 grama wysokoaktywnych produktów rozszczepienia i aktynowców.



- Rozszczepienie **1 g uranu  $^{235}\text{U}$**  wyzwala około 80 GJ energii cieplnej, co pozwala wyprodukować 26 GJ energii elektrycznej przy sprawności bloku wynoszącej 32%.
- To **7 200 kWh**, czyli prawie **dwukrotnie więcej niż rocznie zużywa przeciętny Polak**.

Co powoduje większą ekspozycję okolicznej ludności na promieniowanie: elektrownia jądrowa czy węglowa?

Może to zaskakujące, ale więcej promieniotwórczych substancji do otoczenia emituje **elektrownia węglowa!** Jest to związane z naturalnymi izotopami promieniotwórczymi zawartymi w węglu, które są emitowane do środowiska.



Mieszkając w pobliżu elektrowni jądrowej o mocy 1GW, otrzymuje się rocznie dodatkową dawkę promieniowania wynoszącą ok. **0,1-1  $\mu\text{Sv}$** .

W przypadku analogicznej elektrowni węglowej, to ok. **1-5  $\mu\text{Sv}$** . Ze źródeł naturalnych statystyczny Polak otrzymuje około 8  $\mu\text{Sv}$  dziennie!



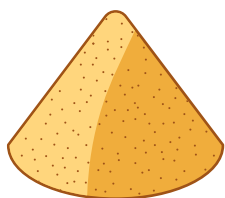
Powstające w elektrowni jądrowej substancje promieniotwórcze są **separowane od środowiska** i nie mają wpływu na okolicznych mieszkańców.



Węgiel kamienny zawiera pewne ilości naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych: **uranu, toru oraz produktów ich rozpadu** (m.in. radu).



W czasie spalania większość substancji promieniotwórczych **zostaje w popiele**, ale część przedostaje się do **atmosfery**.



1 tona popiołu

20g toru

10g uranu

Tona popiołu zawiera około 20 g toru i 10 g uranu. Dokładne wartości mogą się znacząco wahać w zależności od miejsca wydobycia węgla i warunków spalania. Składowany popiół staje się również źródłem emisji promieniotwórczego radonu.

## Czy elektrownia jądrowa jest bezpieczna?

Tak, elektrownie jądrowe są **jednym z najbezpieczniejszych** źródeł energii.



Jedną z metod porównywania zagrożeń związanych z różnymi metodami produkcji energii jest tzw. **wskaźnik śmiertelności**. Przedstawia on **liczbę zgonów** spowodowanych przez dany rodzaj źródła energii **w stosunku do wyprodukowanej energii**.



Elektrownie jądrowe posiadają **jeden z najniższych wskaźników śmiertelności**.

## Jak to możliwe?



- Przyczyną tak niskiej wartości jest **wysoka kultura bezpieczeństwa** panująca w ośrodkach, w których występują czynniki promieniotwórcze. Stworzone na potrzeby energetyki jądrowej ogólne zasady postępowania przestrzegane są niezależnie od regionu czy kraju. Skutkiem wyśrubowanych norm bezpieczeństwa jest również zmniejszona liczba niegroźnych awarii oraz incydentów, do których znacznie częściej dochodzi w konwencjonalnych typach elektrowni.

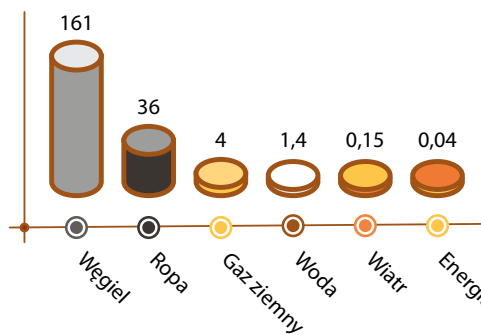


- Elektrownie jądrowe **nie wydzielają CO<sub>2</sub>**, a tym samym nie wpływają na efekt cieplarniany. Nie wydzielają również do atmosfery **szkodliwych pyłów oraz produktów spalania**, tj. tlenków siarki i azotu, pyłów PM10 i PM2,5, ani groźnych dla zdrowia metali ciężkich, tj. rtęci czy kadmu.

Szacuje się, iż zanieczyszczenia emitowane przez wszystkie **elektrownie węglowe** w Polsce są corocznie przyczyną ok. 5 000 przedwczesnych zgonów. Nie należy również zapominać o licznych wypadkach w kopalniach węgla kamiennego.



Liczba zgonów w stosunku do wyprodukowanej energii (TWh)



## Czy elektrownia jądrowa poprawi bezpieczeństwo energetyczne Polski?

Tak, zwiększenie dywersyfikacji polskiego miks energetycznego pozytywnie wpłynie na bezpieczeństwo energetyczne Polski.



Dywersyfikacja to zmniejszanie ryzyka poprzez różnorodność np. inwestycji czy produkcji.



- W inwestycjach dywersyfikacja może oznaczać na przykład **zakup akcji kilku różnych firm**, aby zminimalizować skutki spadku wartości jednej z nich.
- W energetyce dywersyfikacja to zarówno stosowanie różnych metod **wytwarzania energii**, jak i posiadanie **kilku możliwych kierunków** dostaw paliwa (np. gazu).

Dla działania elektrowni jądrowej ważne jest nie tylko **posiadanie** samych **zasobów rudy uranu**, ale także możliwość **wytworzenia gotowego paliwa**. Istotne są zatem również instalacje do wzbogacania uranu i jego produkcji.

Co ważne, w przypadku **elektrowni jądrowych dostęp do paliwa nie stanowi wyzwania** z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego, ponieważ:

- jest wymieniane co ok. 1,5 roku,
- jest oferowane przez kilka państw na całym świecie,
- dzięki małej ilości potrzebnego paliwa koszty transportu z dowolnego miejsca na świecie są stosunkowo niskie,
- możliwe jest zmagazynowanie na terenie elektrowni zapasu paliwa nawet na kilka lat pracy, umożliwia to też znalezienie alternatywnego dostawcy.

## CIEKAWOSTKA

Polska posiada pewne zasoby rudy uranowej. Były one nawet eksploatowane w przeszłości. Jednakże ich wydobycie w obecnych warunkach nie jest uzasadnione ekonomicznie.



## Czym w systemie elektroenergetycznym jest rezerwa wirująca?

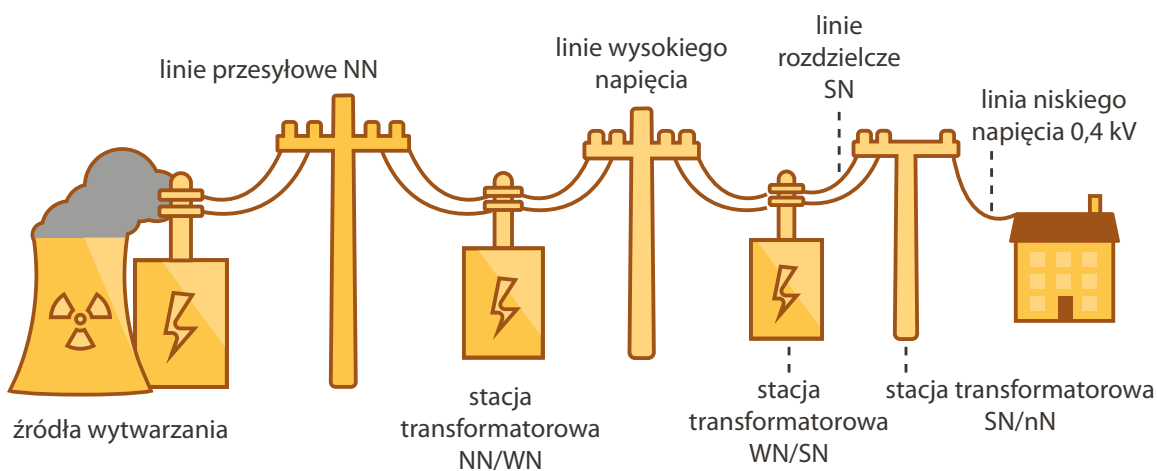
To różnica pomiędzy mocą, jaką mogłyby produkować aktualnie włączone źródła energii elektrycznej (pracując z mocą nominalną), a aktualnie produkowaną przez nie mocą.



Ten zapas mocy pozwala na **szybkie jej zwiększenie**, np. w celu dostosowania do zmieniającego się zapotrzebowania.

Ponieważ nie istnieje możliwość magazynowania energii elektrycznej w ilościach mogących pokryć znaczącą część dziennego zapotrzebowania całego systemu energetycznego, **produkcja energii elektrycznej musi być dostosowywana na bieżąco do zapotrzebowania**. Zajmuje się tym **Krajowa Dyspozycja Mocy**, która wyznacza, w jaki sposób powinny pracować poszczególne elektrownie.

## Droga energii elektrycznej od wytwórcy do odbiorcy



Źródła energii, które wykorzystuje się do bilansowania systemu poprzez dostosowanie ich mocy, nazywa się **jednostkami wytwórczymi centralnie dysponowanymi**. Roli tej nie mogą pełnić turbiny wiatrowe czy panele fotowoltaiczne ze względu na uzależnienie ich mocy od aktualnych warunków pogodowych.

System elektroenergetyczny musi być przygotowany m.in. na **wyłączenie** największego znajdującego się w nim bloku energetycznego, na przykład w przypadku jakiegś usterki. **Rezerwa musi być w stanie pokryć taki ubytek mocy w systemie.**

## Jakie są składniki kosztów wytworzenia energii elektrycznej w elektrowni jądrowej?

Jest to koszt: **budowy elektrowni, eksploatacji i utrzymania oraz paliwa.**



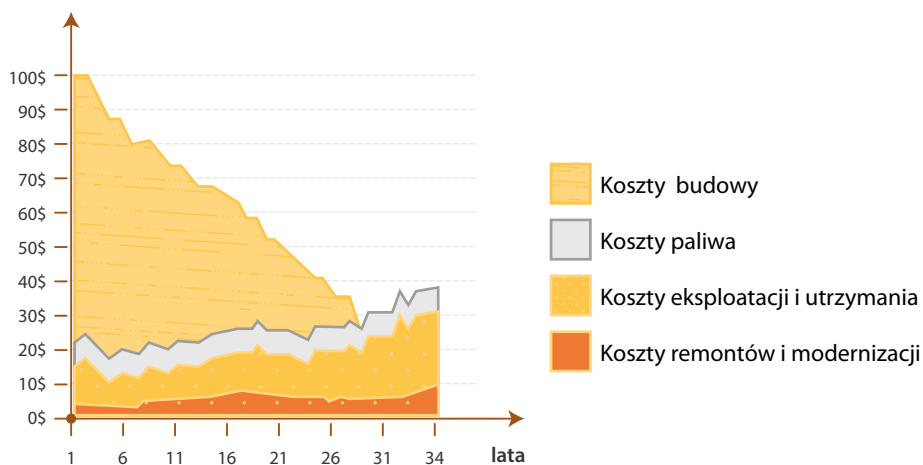
Największym składnikiem, zwłaszcza w początkowej fazie eksploatacji elektrowni, są **koszty budowy elektrowni**. Po zwrocie poniesionych kosztów elektrownia jądrowa produkuje stosunkowo tanią energię elektryczną.



W ocenie kosztów energii elektrycznej stosuje się **wskaźnik LCOE** (ang. *Levelized Cost of Electricity* – Uśredniony koszt energii elektrycznej), który pokazuje całkowity koszt na jednostkę wyprodukowanej energii:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{suma wszystkich poniesionych kosztów}}{\text{całkowita ilość wyprodukowanej energii elektrycznej}}$$

W przypadku elektrowni jądrowych w kosztach uwzględnia się **koszty budowy, eksploatacji**, a także **koszty składowania odpadów i rozbiórki** elektrowni.

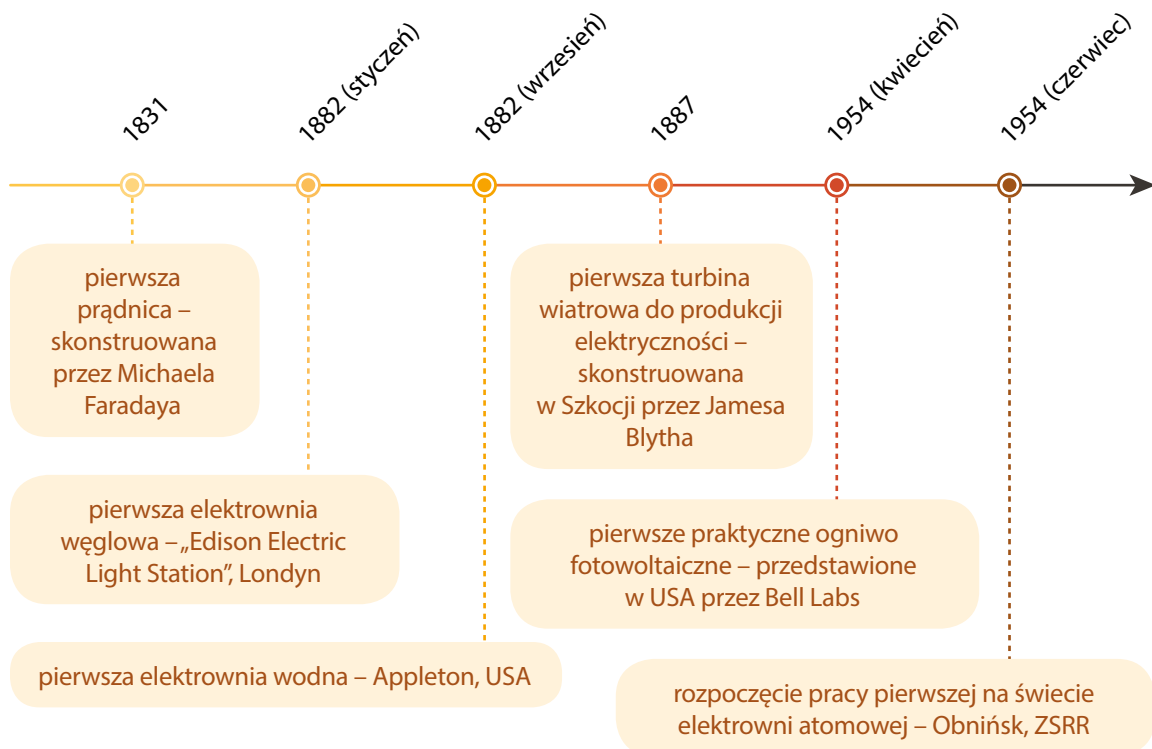
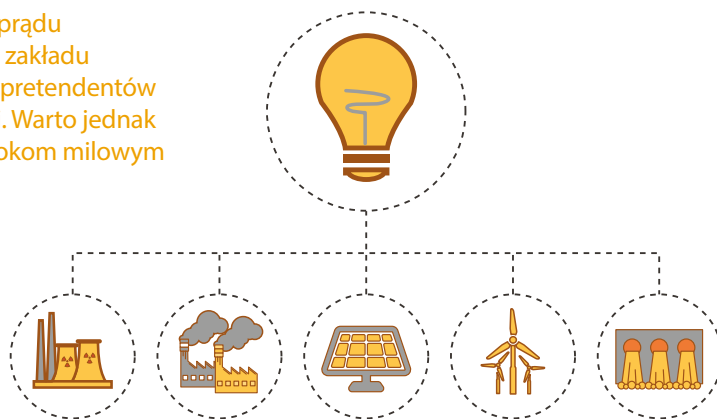


Który ze stosowanych dziś sposobów produkcji energii elektrycznej jest najstarszy, a który najnowszy?

Jednoznaczna odpowiedź jest trudna, gdyż pierwsze przypadki wykorzystania danego źródła do produkcji energii elektrycznej nie oznaczały jeszcze komercyjnego zastosowania tej technologii.



Wiele pierwszych generatorów prądu służyło do zasilania np. jednego zakładu przemysłowego, stąd jest wielu pretendentów do miana „pierwszej” elektrowni. Warto jednak przyjrzeć się najważniejszym krokom milowym w wytwarzaniu elektryczności.





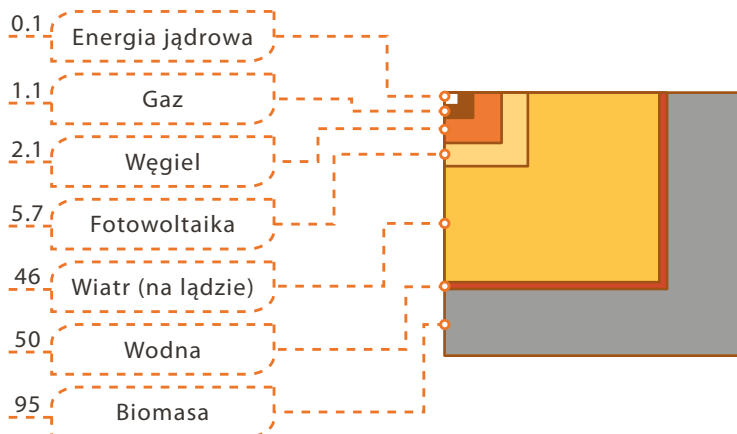
Które ze źródeł wytwarzania energii zajmuje największą powierzchnię: energia jądrowa, biomasa, gaz czy fotowoltaika?

To niby proste pytanie ma bardzo złożoną odpowiedź, gdyż prezentowane informacje mogą uwzględniać różne parametry.



Wykorzystywana powierzchnia to nie tylko powierzchnia zajmowana przez samą **elektrownię**, ale również **miejsce niezbędne do wydobycia paliwa czy składowania odpadów**. Przedstawione wyniki porównują zajmowaną powierzchnię w odniesieniu do wytworzonej energii w ciągu jednego roku [ $\text{km}^2/\text{Twh}/\text{rok}$ ].

Energia jądrowa zajmuje najmniejszą powierzchnię.

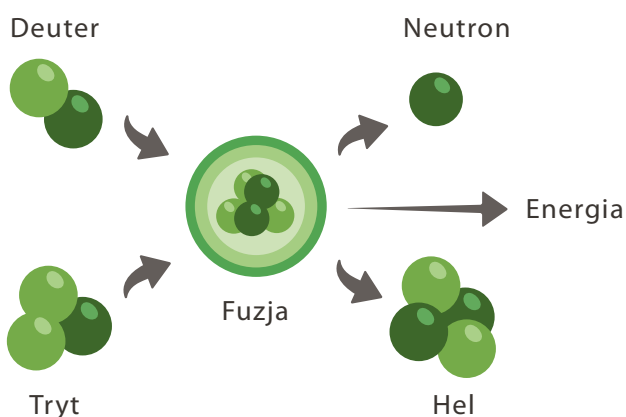


**Wpływ systemów energetycznych na środowisko jest wieloraki**, od zmian klimatycznych, poprzez zakwaszanie oceanów, zanieczyszczenie powietrza, niszczenie ekosystemu, do fizycznych zmian krajobrazu. Generalnie przyjmowana jest zasada: **im większa powierzchnia zajmowana przez dane źródło, tym bardziej jest ono uciążliwe dla środowiska**.



## Czym różni się synteza jądrowa od rozszczepienia?

Jak sama nazwa wskazuje, synteza jądrowa polega na połączeniu dwóch lżejszych jąder w jądro cięższe. Podobnie jak w przypadku rozszczepienia część masy zamieniana jest na energię, a układ w większości przypadków staje się bardziej stabilny czyli trwalszy (ma większą energię wiązania na jeden nukleon).



- Reakcje **syntezy** zachodzą we **wnętrzu gwiazd** i są ich głównym źródłem energii.
- Próby odtworzenia tych reakcji na ziemi przysparzają ogromnych problemów, głównie ze względu na **trudność zbliżenia do siebie dwóch jąder**, które z powodu dodatnich protonów oraz neutralnych neutronów posiadają wypadkowy ładunek dodatni, czyli **silnie się odpychają**.

- Aby przeprowadzić syntezę dwóch lekkich jąder, należy je **rozprędzić do znacznych prędkości**, tak by ich energia kinetyczna była w stanie pokonać siłę odpychania dodatnio naładowanych jąder. Zderzenie powinno odbyć się **pod odpowiednim kątem**, aby jądra się od siebie nie odbiły. Stąd przeprowadzenie oraz podtrzymywanie kontrolowanej fuzji jądrowej wymaga zapewnienia **wielu zderzeń z odpowiednią prędkością**, co w praktyce oznacza **utrzymywanie ściśniętej plazmy w bardzo wysokich temperaturach**. Wysokie ciśnienie plazmy zapewnia odpowiednią bliskość jąder, a tym samym zwiększa ilość zderzeń. Natomiast wysoka temperatura zwiększa prędkość cząstek, czyli odpowiednią energię kinetyczną do pokonania bariery potencjału elektrycznego.
- Obecnie na świecie jest rozwijanych wiele projektów umożliwiających **komercyjne wykorzystanie** energii pochodzącej z **fuzji termojądrowej**. Niestety żaden z nich nie jest w stanie funkcjonować dłużej niż **kilkadziesiąt sekund**.
- **Produkty fuzji jądrowej nie są promieniotwórcze**. Wykorzystując izotopy wodoru jako produkt końcowy otrzymujemy Hel ( $^4\text{He}$ ), czyli najmniej aktywny chemicznie oraz nieradioaktywny izotop. Należy jednak pamiętać, że podczas pracy elektrowni termojądrowej będą powstawać odpady promieniotwórcze w postaci materiałów konstrukcyjnych aktywowanych przez neutrony.

## Czy istnieje już komercyjna elektrownia termojądrowa?

Pomimo wyłożonych prac badawczych i ogromnych nakładów finansowych, żaden z rozwijanych obecnie projektów nie jest w stanie funkcjonować dłużej niż kilkadziesiąt sekund. **Zatem istnienie elektrowni termojądrowej pozostaje kwestią odległej przyszłości.**



Obecnie na świecie rozwijanych jest wiele projektów umożliwiających komercyjne wykorzystanie **energii pochodzącej z fuzji termojądrowej**.

### Ciekawostka

Naturalnym reaktorem termojądrowym jest słońce.



### Wybrane projekty uważane za najbardziej obiecujące:

#### ITER (dosł. Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termonuklearny)

- Reaktor typu tokamak, który ma podtrzymywać reakcję syntezy przez ok. 1000 s, osiągając przy tym około moc ciepłą na poziomie 500 MW.
- Tokamak jest urządzeniem, w którym potężne **pole magnetyczne** utrzymuje plazmę o temperaturze bliskiej **milionowi stopni Celsjusza** w komorze o kształcie torusa, zapewniając odpowiednie warunki do zaistnienia procesu syntezy.



#### National Ignition Facility

- Eksperymentalny obiekt, w którym **wysokie ciśnienie i temperatura**, niezbędne do uzyskania procesu fuzji, zapewniają potężne **lasery**.
- Energia blisko 200 laserów skupiana jest na kulce paliwa deuterowo-trytowego o średnicy 2 mm. Tak potężny **impuls laserowy ściska i rozgrzewa paliwo** do temperatury kilku miliardów stopni, umożliwiając jądom zbliżenie na odległość pozwalającą na zajście reakcji syntezy.



#### Z-pinch („Skurcz zeta”)

- Projekt wykorzystuje **impuls elektryczny**, który przechodząc przez plazmę wzdłuż osi Z (w kierunku „pionowym”), powoduje kurczenie się plazmy pod działaniem własnego pola magnetycznego.
- Skurcz powoduje lokalny **wzrost ciśnienia oraz temperatury**, co umożliwia syntezę jąder. NASA prowadzi badania w celu wykorzystania tej technologii w silnikach rakietowych (PuFF).



#### Polywell („Wielostudnia”)

- Koncept ten zakłada uwięzienie jąder lekkich pierwiastków w postaci **plazmy w „klatce” z pola elektryczno-magnetycznego**.
- Od tokamaka różni go wykorzystanie prócz pola magnetycznego również **pola elektrycznego** w celu utrzymania plazmy, czyli nic innego jak naładowanych dodatnio jąder pozbawionych elektronów.

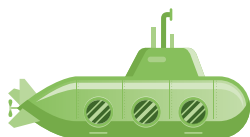


Czy reaktory jądrowe mogą służyć do napędu jednostek pływających?

Oczywiście. Obecnie 180 reaktorów jądrowych jest wykorzystywanych do napędu 140 jednostek pływających, w tym okrętów podwodnych, lotniskowców oraz lodolamaczy.



Główną **zaletą** wykorzystania energii jądrowej do napędu jednostek pływających jest **brak potrzeby częstej wymiany paliwa**, a tym samym możliwość pozostawiania jednostek na morzu przez długi czas. Paliwo w reaktorach zasilających jednostki pływające wymieniane jest **raz na kilkanaście lat!**



**Pierwszą** jednostką pływającą korzystającą z **napędu jądrowego** był amerykański okręt podwodny **Nautilus** zwodowany w 1954 r. W 1958 r. jako pierwszy w historii przeplął **pod biegunem północnym**.

### Ciekawostka 1

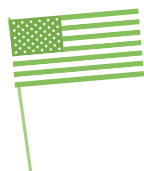
Nazwa amerykańskiego okrętu *Nautilus* nawiązuje do fikcyjnego okrętu z **powieści Juliusza Verne'a 20 000 mil podmorskiej żeglugi**.



Obecnie **jedynym państwem** na świecie dysponującym flotą **lodolamaczy o napędzie jądrowym** jest **Rosja**. W sumie posiada ona sześć okrętów operujących w rejonie Arktyki.

### Ciekawostka 2

Istnieje możliwość wykupienia w **celach turystycznych** miejsca na rosyjskim lodolamczu pływającym w rejonie bieguna północnego!



Pierwszym **lotniskowcem o napędzie jądrowym** był amerykański **Enterprise** zwodowany w 1960 r. i zasilany aż **ośmioma** reaktorami jądrowymi o mocy termicznej 120 MWth każdy! Został on wycofany ze służby w 2012 r.

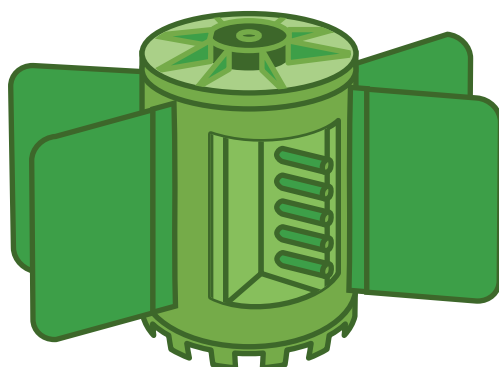
## Czy energia jądrowa może służyć do zasilania sond kosmicznych?

Jedynym długowiecznym źródłem energii dla sond kosmicznych jest energia jądrowa! Powszechnie stosowane ogniwa fotowoltaiczne wraz ze wzrostem odległości od słońca tracą swoją wydajność ze względu na brak światła, a tym samym nie mogą stanowić efektywnego źródła zasilania.



Urządzenia wykorzystujące zjawisko rozpadu jądrowego niektórych izotopów promieniotwórczych do produkcji energii nazywa się **radioizotopowymi generatorami termoelektrycznymi – RTG** (z ang. *Radioisotope Thermoelectric Generator*). Generatory te wykorzystują termoelektryczne zjawisko Seebecka do zamiany energii termicznej rozpadu promieniotwórczego na energię elektryczną.

Radioizotopowy generator termoelektryczny – RTG



- W **zjawisku Seebecka** różnica temperatur pomiędzy dwoma złączami termopary skutkuje wytworzeniem prądu elektrycznego na ich styku. Im większa różnica temperatur, tym większa moc generatora. W **sondach kosmicznych** jedno złącze termopary umieszcza się w materiale paliwowym, a drugie – w radiatorze znajdującym się na zewnątrz statku. Ma to na celu osiągnięcie **jak największej różnicy temperatur**, a tym samym – **mocy generatora**.
- **Izotopami używanymi do zasilania generatorów termoelektrycznych** są pluton  $^{238}\text{Pu}$ , ameryk  $^{241}\text{Am}$ , stront  $^{90}\text{Sr}$  oraz polon  $^{210}\text{Po}$ . Jednak **najczęściej stosuje się  $^{238}\text{Pu}$**  ze względu na optymalny czas połowicznego rozpadu – 87,7 lat – gwarantujący długi czas pracy generatora, a także na rozpad głównie poprzez emisję wysokoenergetycznej cząstki alfa, która dostarcza dużą ilość energii, jednak wymaga mniejszych osłon radiacyjnych niż inne typy promieniowania.

## Czy wiesz, że...

Sonda kosmiczna **Voyager 1** wystrzelona w 1977 r. jest obecnie **najdalszym obiektem** wysłanym przez człowieka w kosmos i jedynym, który **opuścił Układ Słoneczny!** Kontakt z nią po **ponad 40 latach** lotu jest możliwy tylko dzięki **radioizotopowemu generatorowi termoelektrycznemu** zawierającemu 4,5 kg dwutlenku  $^{238}\text{Pu}$ .



## Czy samoloty mogą być napędzane reaktorem jądrowym?

Do tej pory nie udało się wykorzystać reaktora jądrowego do napędu samolotu, chociaż reaktory były zainstalowane na pokładzie.



## Czy wiesz, że...

**Reaktory jądrowe** zainstalowano w amerykańskim bombowcu NB-36H o nazwie *Crusader* oraz w rosyjskim Tupolewie Tu-95LAL.

Amerykański bombowiec  
NB-36H *Crusader*

Odbył łącznie **47 lotów**, podczas których wylatał łącznie **215 godzin**, w tym **89 godzin z włączonym reaktorem**.

Rosyjski Tupolew  
Tu-95LAL

Odbył około **40 lotów**, lecz większość z wyłączonym reaktorem.

**Głównym celem** obu projektów było **sprawdzenie narażenia** załogi na promieniowanie oraz **dostosowanie konstrukcji** samolotu do zainstalowania reaktora. W obu przypadkach reaktory nie napędzały silników samolotu.



W bombowcu NB-36H zainstalowano reaktor jądrowy o mocy **3 MWth** moderowany i chłodzony w pierwszym obiegu wodą, a w drugim powietrzem. **Załogę** stanowiło dwóch pilotów, inżynier lotu oraz dwóch inżynierów jądrowych odpowiedzialnych za działanie reaktora.



Obecnie wydaje się **mało prawdopodobne** zbudowanie samolotu zasilanego reaktorem jądrowym. Przyczyną jest duże narażenie załogi na **promieniowanie**, a tym samym wymóg zainstalowania **ciężkich osłon radiacyjnych**, co prowadzi do wzrostu masy samolotu i utraty przez niego **właściwości aerodynamicznych**.

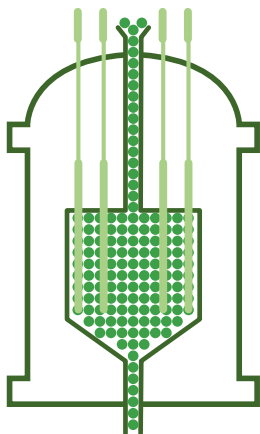
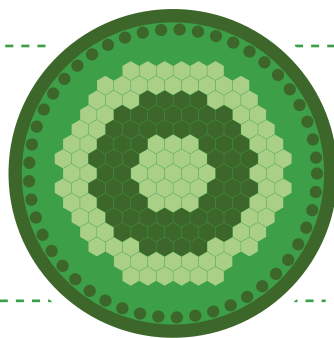
Czy reaktory jądrowe mogą bezpiecznie pracować w temperaturach bliskich 1 000°C?

Tak! Są to tzw. **HTR** (z ang. *High Temperature Reactors*). Temperatura czynnika chłodzącego na wylocie z reaktora może osiągnąć nawet do 1 000°C.



Wyróżniamy **dwa podstawowe** typy reaktorów HTR: z **rdzeniem usypanym** i **pryzmatycznym (sztywnym)**. Projektów reaktorów HTR jest mnóstwo, lecz w ogólnym zarysie dużo z nich się pokrywa. Większość koncepcji jako **chłodziwo** podaje **hel**, ze względu na jego własności fizykochemiczne.

**Rdzeń pryzmatyczny** jest klasyczną koncepcją. Zwykle zaprojektowany jest jako **sześcioboczne bloki grafitowe** ułożone również na planie sześcioboku. W blokach tych wydrążone są **kanały paliwowe i chłodzące**, a cały rdzeń jest wyposażony w **dwa reflektory**: wewnętrzny i zewnętrzny (są to osłony odbijające neutrony).



Nieco bardziej nowatorskim projektem jest **rdzeń usypany**. Składa się on ze **stosu kulek grafitowych** (kilkaset tysięcy) wypełnionych paliwem reaktorowym w postaci mniejszych kulek, które to z kolei są stworzone z **węglików bądź tlenków uranu** i stanowią bardzo dobrą barierę dla produktów rozszczepienia. Kulki grafitowe dostarczane są do rdzenia od góry, a usuwane od dołu. Całość usypana jest w **grafitowym cylindrze**.

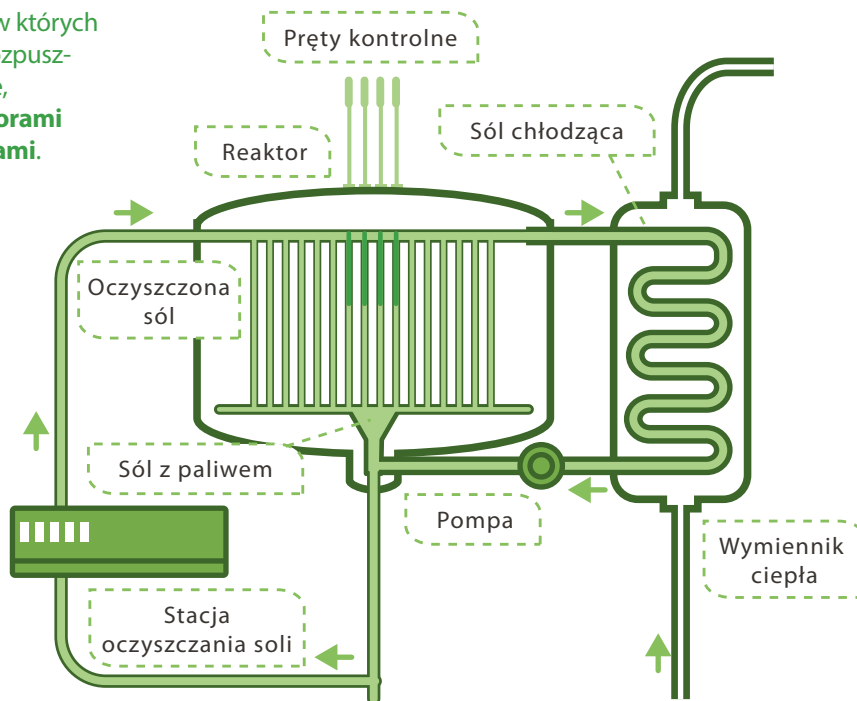
## Czy paliwo jądrowe może mieć postać płynną?

Niesamowite, ale istnieje możliwość rozpuszczenia paliwa jądrowego w chłodziwie, tak aby krążyło ono w pierwszym obiegu reaktora.



Reaktory jądrowe, w których paliwo może być rozpuszczone w chłodziwie, nazywają się **reaktorami ze stopionymi solami**.

To nawiązanie do związków chemicznych zawartych w chłodziwie. W tego typu reaktorach samopowtarzająca się reakcja łańcuchowa osiągana jest poprzez **wpłynięcie soli zmieszanych z paliwem do grafitowego moderatora**.



- Najczęściej w reaktorach na stopione sole rozważa się użycie nisko wzbogaconego uranu w postaci **czterofluorku uranu ( $UF_4$ )** zmieszanego z mieszaniną **soli litu i berylu (FLiBe)**. W takich warunkach temperatura soli może osiągnąć nawet **700°C**.
- Ciągły przepływ soli umożliwia jej **oczyszczanie z radioaktywnych produktów** rozszczepienia, jak i  **dodawanie różnego rodzaju paliwa** zawierającego np. pluton, rzadkie aktywnowce czy też paliworodny tor.

## Czy wiesz, że...

Reaktory na stopione sole, ze względu na swoje relatywnie małe rozmiary i dużą gęstość mocy, były przewidziane do **napędu samolotów!**



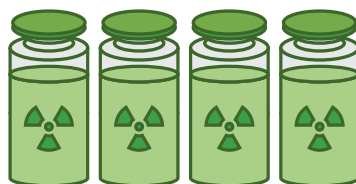


## Co to jest medycyna nuklearna?

Jest to dział medycyny, który zajmuje się głównie diagnozowaniem oraz leczeniem chorób nowotworowych przy użyciu **radiofarmaceutyków**, czyli związków, które zawierają co najmniej jeden izotop promieniotwórczy.



Prócz izotopu promieniotwórczego (znacznika) **radiofarmaceutyk zawiera również nośnik, który „dostarcza” znacznik radioizotopowy w odpowiednie miejsce** w organizmie (w przypadku badań tarczycy jest to jod, kości – związki fosforanowe, a w przypadku terapii nowotworowej – glukoza).



Radiofarmaceutyk powinien charakteryzować się dużą łatwością oraz szybkością wydalania z organizmu, a czas połowicznego rozpadu powinien być tak dobrany, by zapewnić szybki zanik radioaktywności, jednakże na tyle długi, by umożliwić badanie (dotarcie do odpowiedniego miejsca w organizmie).

## Dwie metody badań diagnostycznych

## PET

- Obraz badanej tkanki powstaje poprzez detekcję fotonów anihilacyjnych z radioizotopu.
- Przecięcie wielu trajektorii (prostych) tworzy obraz 3D, który jest bardziej ostry i szczegółowy od SPECT.



## SPECT

- Tworzy obraz badanej tkanki za pomocą gamma-kamery.
- Promieniowanie gamma pochodzi bezpośrednio z radioizotopu wchłoniętego przez narząd, a obraz 3D powstaje poprzez oszacowanie osłabienia fotonów gamma przy przejściu przez tkanki.



## W jaki sposób wytwarza się radiofarmaceutyki?

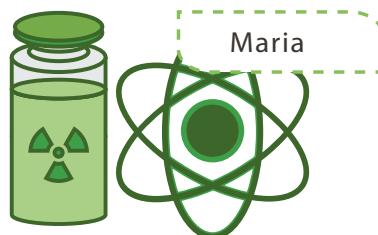
Niewiele osób wie, iż duża część radiofarmaceutyków wytwarzana jest za pomocą **reaktora jądrowego**. Pozostałe wytwarzane są przy użyciu akceleratorów, np. cyklotronów.



● W Polsce głównym producentem radiofarmaceutyków jest **Ośrodek Radioizotopów POLATOM**, który funkcjonuje w ramach Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku.

● Izotopy promieniotwórcze produkowane są głównie za pomocą **reaktora badawczego MARIA** oraz w wyniku naświetlania próbek wiązkami protonów z wykorzystaniem akceleratorów (najczęściej cyklotronów).

● OR POLATOM jest **wiodącym w świecie eksporterem radiofarmaceutyków**, który dostarcza swoje produkty do blisko 80 krajów. W 2017 wytworzył około 5% światowej produkcji.



● Ze względu na dość krótki czas połowicznego rozpadu znaczników w radiofarmaceutykach POLATOM dostarcza do szpitali i instytutów izotopy tzw. **rodziców właściwych radioizotopów**, czyli izotopy macierzyste, które w wyniku rozpadu tworzą użyteczne radioizotopy.

● Rolę przechowalnika oraz separatora pełnią generatory radionuklidowe, zwane potocznie „**krowami**”, z których uzyskuje się użyteczne izotopy promieniotwórcze („**mleko**”).



Prócz produkcji oraz dostarczania radiofarmaceutyków POLATOM oferuje również:

- generatory radionuklidowe,
- prekursory do znakowania,
- produkty sterylne i wolne od endotoksyn,
- zestawy scyntygraficzne do przygotowania radiofarmaceutyków.

## Czy półprzewodniki można produkować w reaktorach jądrowych?

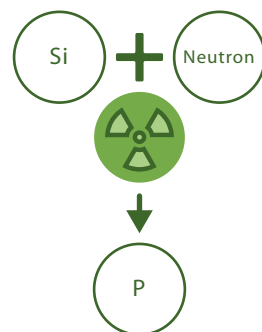
Tak! Jedne z najlepszych jakościowo półprzewodników do zastosowań w zaawansowanej elektronice są produkowane w **badawczych reaktorach jądrowych**.



Krzem (Si) z domieszką fosforu (P) jest obecnie **najpopularniejszym półprzewodnikiem**. Standardowo do jego produkcji wykorzystuje się **metody chemiczne**. Alternatywną metodą jest wykorzystanie **promieniowania neutronowego**.



**Metoda wykorzystująca promieniowanie neutronowe** polega na umieszczeniu kryształu krzemu w pobliżu rdzenia reaktora, **w polu promieniowania neutronowego**. Neutron oddziałujący z czystym krzemem powoduje jego **transmutację do fosforu**, który jest pierwiastkiem domieszkującym! Odpowiednio obracając kryształ krzemu, można uzyskać **jednolity rozkład domieszkującego fosforu**, co trudno osiągnąć przy użyciu innych metod domieszkowania.

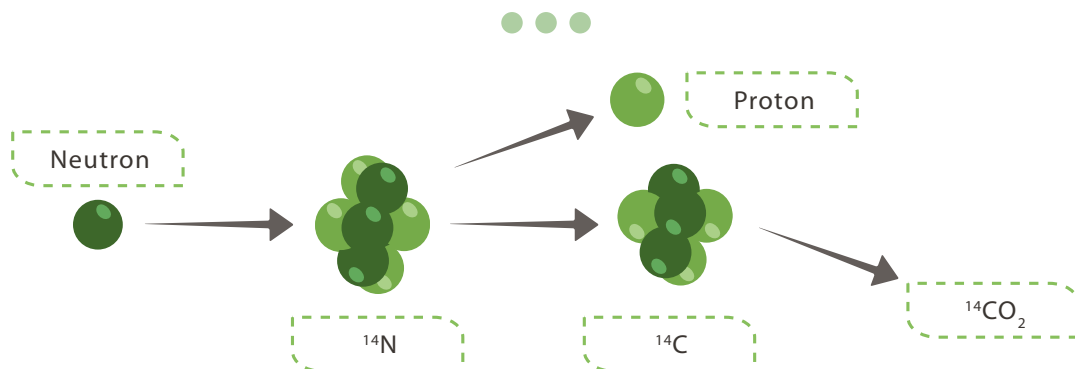


## Czy wiesz, że...

**Najpopularniejsza metoda produkcji monokryształów** została wynaleziona przez **polskiego chemika Jana Czochralskiego** w 1916 r. i jest obecnie powszechnie stosowana do produkcji monokryształów krzemu.

## Czy reakcje jądrowe mogą pomóc w określaniu wieku materiału?

Tak. Występowanie reakcji jądrowych umożliwia badanie wieku przedmiotów poprzez **mierzenie proporcji pomiędzy izotopami promieniotwórczymi i trwałymi**.



Jednym z izotopów promieniotwórczych powstałych na skutek reakcji jądrowych inicjowanych przez promieniowanie kosmiczne jest **izotop węgla  $^{14}\text{C}$** .

- Oddziaływanie **pierwotnego promieniowania kosmicznego z atomami atmosfery ziemskiej** jest przyczyną powstawania **promieniowania wtórnego**, które w szeregu następujących po sobie reakcji może doprowadzić do powstania **promieniotwórczego węgla  $^{14}\text{C}$** .

- $^{14}\text{C}$  równomiernie **przechodzi z atmosfery pod postacią dwutlenku węgla** do biosfery i innych stref.

- Węgiel odgrywa szczególną rolę jako pierwiastek stanowiący **główny składnik związków organicznych i organizmów żywych**.



- Co **5 730 lat** połowa atomów  $^{14}\text{C}$  ulega rozpadowi do azotu-14. Żywy organizm niezmiennie **wymienia materię** z otoczeniem, przez to proporcje  $^{14}\text{C}$  do pozostałych izotopów są zbliżone do tych w atmosferze. Wraz ze śmiercią organizmu **wymiana przestaje zachodzić** i z czasem widoczna jest zmiana w proporcji. Wartość proporcji pozwala nam na określenie, **kiedy doszło do śmierci organizmu**.

## Ciekawostki

- Pomysłodawcą metody był **Willard F. Libby**, który w latach 40. XX w. zaproponował wykorzystanie  $^{14}\text{C}$  do oznaczania wieku (datowania) szczątków organicznych i materiałów węglanowych. W 1960 r. Libby został odznaczony Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii.
- Metoda datowania  $^{14}\text{C}$  jest szeroko stosowana w datowaniu **obiektów archeologicznych**.



## Czy energetyka jądrowa może pomóc rozwiązać problem niedoboru wody pitnej?

Tak, reaktory można wykorzystywać do **odsalania wody morskiej**.



**Odsalanie wody** jest procesem wykorzystywanym w miejscach ubogich w słodką wodę, potrzebną do nawadniania lub spożycia. W 2015 r. istniało **19 tys. jednostek odsalania**. Prawie połowa zainstalowanej mocy znajduje się na Bliskim Wschodzie, 13% w Europie, 9% w USA oraz 8% w północnej Afryce.



### Czy wiesz, że...

Szacuje się, że **jedna piąta** światowej populacji ludzi **nie ma dostępu** do wody pitnej.



- **Odsalanie** wody morskiej przy wykorzystaniu **energii jądrowej** jest **konkurencyjne pod względem kosztów** w porównaniu ze źródłami kopalnymi, które obecnie w głównej mierze są wykorzystywane do instalacji odsalania.
- Warto zwrócić uwagę, że **woda może być składowana na skalę przemysłową**, podczas gdy energia elektryczna nie. Elektrownie jądrowe mogą więc pracować w **systemie skojarzonym**, odsalając wodę i produkując energię elektryczną.
- Energia jądrowa była już wykorzystywana do odsalania wody. Instalacje takie działały skutecznie w **Kazachstanie, Indiach czy Japonii**.
- Istnieje **kilka metod**, w których można usunąć sole i inne minerały z wody morskiej.

Dwie głównie stosowane metody do odsalania to:

**Destylacja próżniowa** – woda jest oddzielana przez odparowanie, a wytworzenie próżni zmniejsza temperaturę jej wrzenia.

**Odwrócona osmoza** – woda jest pompowana przez półprzepuszczalną membranę, która filtruje rozpuszczone substancje stałe.

Odsalanie wody jest procesem **energochłonnym**, dlatego kluczowe jest źródło **taniej i czystszej energii**. Rolę tę może pełnić **reaktor jądrowy**, który w momencie niższego zapotrzebowania na energię elektryczną w sieci **zasila stację odsalania** w niezbędne w procesie odsalania ciepło i energię elektryczną

**Co było pierwsze na Ziemi: reaktor jądrowy czy człowiek?  
Czy energia atomowa jest ekologiczna?  
Ile czynnych elektrowni atomowych znajduje się w pobliżu Polski?**

W książce „100 zagadek o energii jądrowej” znajdziesz odpowiedzi na te pytania oraz wiele innych.

Krótkie teksty informacyjne, wzbogacone ilustracjami, infografikami i wykresami sprawiają, że nie będziesz mieć problemu ze zrozumieniem nawet skomplikowanych zagadnień naukowych.

Przekonasz się, że energia jądrowa to temat nie tylko pasjonujący, ale również niezwykle aktualny w kontekście polskiej gospodarki, polityki międzynarodowej, bezpieczeństwa i ekologii.

Zapraszamy do lektury!



MINISTERSTWO ENERGII



[WWW.FACEBOOK.COM/POZNAJ.ATOM/](http://WWW.FACEBOOK.COM/POZNAJ.ATOM/)