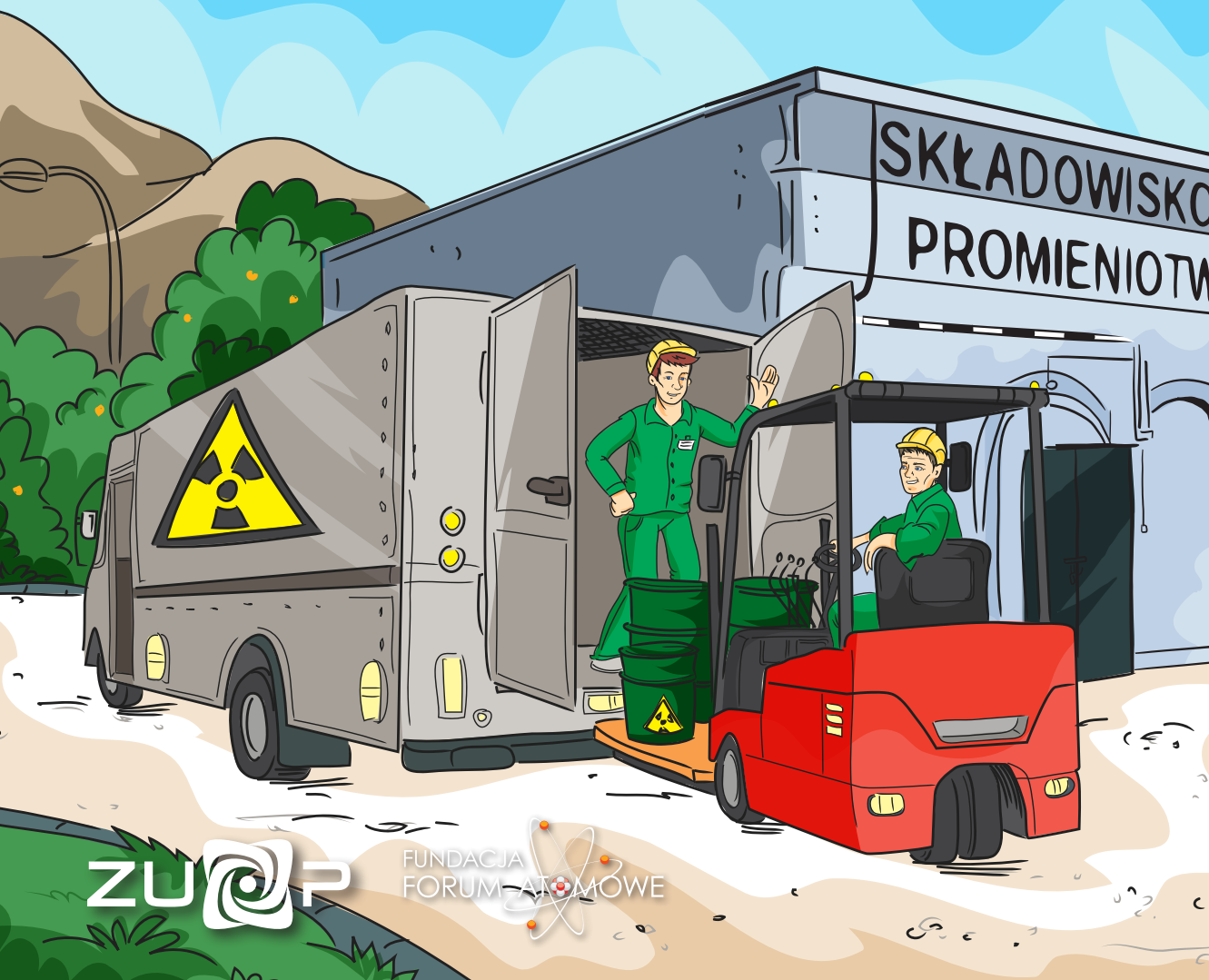


# SKĄD SIĘ BIORĄ ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE?

PRZEWODNIK MŁODEGO ODKRYWCY





# SKĄD SIĘ BIORĄ ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE?

PRZEWODNIK MŁODEGO ODKRYWCY



Warszawa 2018

Autor: Łukasz Koszuk  
Korekta i redakcja: Małgorzata Klisińska  
Ilustrator: Krzysztof Kałucki  
Skład tekstu: Łukasz Koszuk

Opracowano na zlecenie Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych  
Wydanie I, 2018

Wydawca:

**Fundacja FORUM ATOMOWE**  
**ul. Złota 7 lok. 18**  
**00-019 Warszawa**  
**[www.forumatomowe.org](http://www.forumatomowe.org)**  
**[fundacja@forumatomowe.org](mailto:fundacja@forumatomowe.org)**

ISBN: 978-83-960557-4-3

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Zdjęcia: ©Fotolia, Freeimages.com, nrc.gov, IAEA Imagebank, Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych

Copyright © 2018 Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych,  
Fundacja FORUM ATOMOWE

*Drogi Czytelniku!*

*Zapraszam Cię do lektury niezwykłego przewodnika, dzięki któremu dowiesz się wiele na temat odpadów promieniotwórczych. Gdzie są wytwarzane takie odpady, czy są dla nas niebezpieczne, jakie są metody ich unieszkodliwiania i gdzie są składowane – te wszystkie wiadomości zebrano dla Ciebie w tej książce, abyś mógł poszerzyć swoją wiedzę. Wszystko, co związane jest z promieniowaniem jonizującym, budzi zwykle strach i negatywne emocje. Wynikają one przede wszystkim z małej świadomości i wiedzy na temat własności promieniowania oraz jego wykorzystania w przemyśle, medycynie i nauce. Mam nadzieję, że przekonasz się, że potrafimy już bardzo dobrze posługiwać się źródłami promieniotwórczymi i gospodarować odpadami m.in. z elektrowni jądrowych.*



## **Spis treści:**

Atomy, pierwiastki, izotopy | 6

Promieniotwórczość i promieniowanie jonizujące | 8

Naturalne i cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego | 10

Skąd się biorą odpady promieniotwórcze | 14

Rodzaje odpadów promieniotwórczych | 16

Co robimy z odpadami promieniotwórczymi w Polsce? | 18

Przetwarzanie odpadów promieniotwórczych | 20

Składowanie odpadów nisko- i średnioaktywnych | 23

Ile odpadów promieniotwórczych wytwarza elektrownia jądrowa? | 25

Jak transportujemy odpady promieniotwórcze? | 26

Postępowanie z wypalonym paliwem jądrowym | 28

Krzyżówka | 31

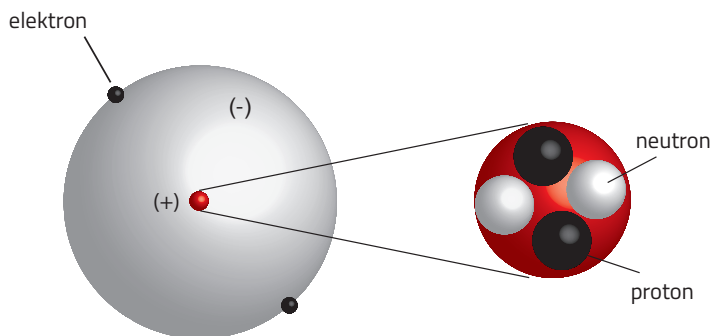
Słownik trudnych pojęć | 32

Gdzie znaleźć więcej informacji? | 33

# Atomy, pierwiastki, izotopy

**W**ielkie odkrycia fizyki mikroświata, dokonane w latach 30-tych XX wieku, doprowadziły do zdumiewającego wniosku: niewielkie **atomy** mogą być źródłem ogromnej energii! To, że atomy są mikroskopijne - było hipotezą filozoficzną istniejącą od tysiącleci: możliwość istnienia atomów rozważano już w czasach starożytnej Grecji. Jednak dopiero w XX wieku fizycy odkryli, jak małe są tak naprawdę atomy i jak niezwykle mają właściwości.

Wszystko wokół nas oraz my sami jesteśmy zbudowani z atomów. Oczywiście w naszych organizmach znajdują się komórki, hormony czy płytki krwi, ale one wszystkie stanowią grupy wielu atomów. Jeśli zaczniesz liczyć, okaże się, że nasz organizm składa się z 4 000 000 000 000 000 000 000 000 atomów. Ta liczba ma 28 cyfr, jest to inaczej cztery tysiące kwadrylionów (inaczej cztery kwadryliardy)! Ty, Twoje życie, uczucia są tylko upakowanymi atomami tlenu, węgla, wodoru, azotu, fosforu, potasu i innych pierwiastków.



Dzisiaj wiadomo, że atomy składają się z umieszczonego centralnie **jądra atomowego** i z otaczającej go **powłoki elektronowej**. Jądro zawiera cząstki o dodatnim ładunku elektrycznym - **protony**. Natomiast powłoka składa się z elektronów o ładunkach ujemnych. Jak wiadomo, przeciwne ładunki przyciągają się. Tej sile przyciągania

## STRUKTURA ATOMU

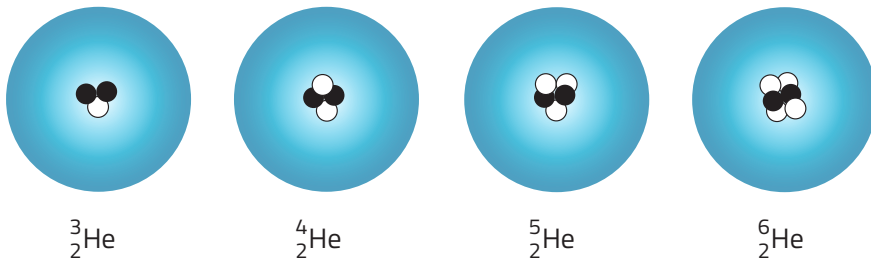
przeciwdziała siła odśrodkowa krążących wokół jądra elektronów. Z większej odległości atomy wydają się być elektrycznie obojętne, gdyż oddziaływania obu rodzajów ładunku równoważą się. Oprócz protonów w jądrach atomów wszystkich pierwiastków (oprócz wodoru) znajdują się **neutrony**, które nie mają ładunku elektrycznego i posiadają masę nieco większą od masy protonu.

Jak małe są jądra atomowe ilustruje następujący przykład. Gdyby cały atom był wielkości stadionu o średnicy 100 m, to jego jądro miałoby wielkość łebka od szpilki o średnicy 1 mm. Chociaż jądro zajmuje zaledwie bilionową część objętości atomu, to jest w nim skoncentrowana prawie cała jego masa. Materia jądrowa jest niesłychanie gęsta.

Atomy nie są identyczne: różnią się liczbą protonów i neutronów w jądrze, jak również liczbą elektronów w powłoce, która jest równa liczbie protonów.

Liczba protonów w jądrze decyduje, do jakiego pierwiastka dane jądro należy. Dlatego atomy porządkuje się według rosnącej liczby protonów, czyli tzw. **liczby atomowej**. Tak uszeregowane atomy tworzą **układ okresowy pierwiastków**. Wodór ma tylko jeden proton, zajmuje więc pierwsze miej-





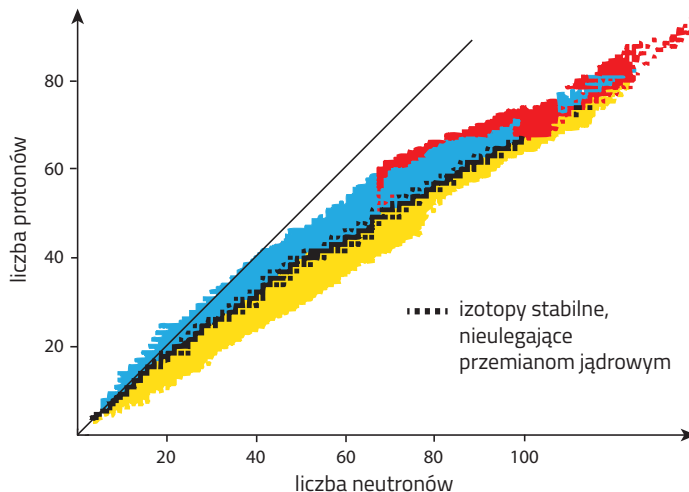
## WYBRANE IZOTOPY HELU

scie na górze po lewej stronie układu okresowego. W neonie (drugi rząd, całkiem po prawej stronie) znajduje się natomiast już dziesięć protonów, a więc jego liczba atomowa to 10. Ostatnim pierwiastkiem naturalnie występującym na Ziemi jest uran. W jego jądrze znajdują się 92 protony.

Wszystkie atomy tego samego pierwiastka mają stałą liczbę protonów i elektronów, jednak ilość neutronów w jądrze może być różna. Atomy tego samego pierwiastka o różnej liczbie neutronów w jądrze nazywamy **izotopami**. Przyjrzyjmy się powyższemu rysunkowi. Jądro atomu helu (He) z dwoma protonami i jednym neutronem nazywamy helem-3 lub He-3. Liczba 3 mówi nam, jaka jest całkowita liczba nukleonów w jądrze - nazywamy ją liczbą masową. Z kolei atom z dwoma neutronami określamy jako He-4. Uran występuje w przyrodzie w odmianach, które zawierają 234, 235 lub 238 nukleonów. Wiemy już, że wszystkie jądra uranu zawierają 92 protony. Stąd trzy izotopy uranu mają odpowiednio 142, 143 i 146 neutronów w swoich jądrach atomowych. Oznaczamy je jako U-234, U-235 i U-238.

Obecnie znamy 118 pierwiastków i ponad 3000 izotopów. Tylko 254 izotopy, oznaczone na tablicy izotopów czarnymi punktami są stabilne. Pozostałe rozpadają się emitując promieniowanie jonizujące, o czym opowiemy w kolejnym rozdziale.

Wszystko to, czego nauczyliśmy się o helu czy uranie nie dotyczy tylko tych dwóch pierwiastków. Takie same prawa fizyki odnoszą się do żelaza, złota, azotu, tlenu, radu, węgla i wszystkich pozostałych pierwiastków.



Układ okresowy pierwiastków

● metale    ● półmetale    ● niemetale    ● lantanowce    ● aktynowce    ● radioaktywne

## UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW ORAZ TABLICA IZOTOPÓW

# Promieniotwórczość i promieniowanie jonizujące

Promieniotwórczość? Naukowcy tym terminem określają występujące w naszym środowisku naturalne lub wywołane sztucznie przemiany jąder atomowych, w których emitowana jest energia w postaci różnych rodzajów **promieniowania**.

Jak można sobie wyobrazić tę przemianę pierwiastków? To trochę tak, jak gdyby brzoskwinia leżąca na stole nagle wyrzuciła z siebie pestkę i przez to stała się jabłkiem, a kropla rtęci zmieniła się w ziarenko złota. W naszym codziennym świecie brzmi to jak magia - w świecie atomów takie i podobne przemiany są jednak możliwe.

Promieniowania nie możemy zobaczyć, poczuć, usłyszeć, powąchać ani posmakować, dlatego do pewnego czasu nikt nie wiedział, że ono istnieje. Jak dokonano tego odkrycia? Prawdopodobnie był to przypadek: pod koniec XIX wieku francuski fizyk Henri Becquerel eksperymentował z zawierającymi uran próbkami skały i odkrył przy tym, że skała wysyła dziwne promieniowanie, które docierało przez opakowanie do emulsji fotograficznej i zaczerniała ją. Była to pierwsza obserwacja zjawiska promieniotwórczości. Dziś wiemy, że wśród pierwiastków występujących w przyrodzie, około 42 pierwiastki mają łącznie ponad 90 naturalnych izotopów radioaktywnych.

Rozróżniamy dwa typy promieniowania: **niejonizujące** i **jonizujące**. Promieniowanie niejonizujące nie ma wystarczającej energii, by wybić elektrony z atomów, gdy na nie pada. Promieniowanie słoneczne, fale radiowe i sygnały z telefonów komórkowych są przykładami promieniowania niejonizującego. Jednak może nadal powodować szkody, na przykład przy długim opalaniu. Promieniowanie jonizujące jest rodzajem promieniowania, o którym większość ludzi myśli, gdy słyszy słowo „promieniowanie”. Promieniowanie jonizujące może wybić elektrony z atomu, tworząc naładowane elektrycznie cząstki, zwane jonami. Z tego powodu może być ono niebezpieczne.

**Trzy główne typy promieniowania jonizującego to cząstki alfa, beta oraz promieniowanie gamma.** W jaki sposób są one wytwarzane? W izotopie promieniotwórczym pojedyncze jądra atomowe przekształcają się w inne jądra, ponieważ posiadają pewną nadwyżkę energii, na przykład są one „zbyt ciężkie”, czyli mają za dużo neutronów, aby mogły być trwałe. Mogą pozbywać się nadwyżki energii wysyłając na przykład elektrony, czyli promieniowanie beta albo paczki z neutronów i protonów, czyli cząstki alfa. Można wykazać istnienie tych wysyłanych cząstek za pomocą specjalnych urządzeń - detektorów, można je między innymi zaobserwować w komorze mgłowej.

Nikt nie jest w stanie przewidzieć, kiedy określone jądro atomowe ulegnie przemianie (rozpadowi). Może ona nastąpić np. za sekundę, jutro lub za 10 000 lat. Jedno jednak można z całą pewnością przepowiedzieć:



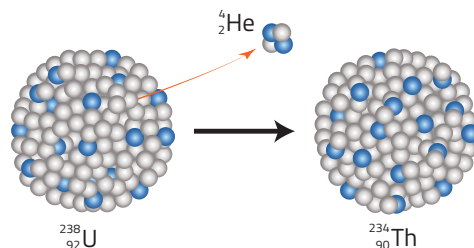
**ZNAK  
OSTRZEGAJĄCY  
PRZED ŹRÓDŁAMI  
PROMIENIOWANIA  
JONIZUJĄCEGO**



ze 100 000 jąder radu dokładnie po 1620 latach 50 000, czyli 50% ulegnie przemianom. Minie nawet 4,5 miliarda lat, zanim połowa jąder bryły uranu U-238 ulegnie rozpadowi. Czas, po którym połowa jąder danego izotopu promieniotwórczego ulegnie przemianom, nazywamy **czasem połowicznego rozpadu**. Jest to bardzo ważna właściwość izotopów promieniotwórczych, o której będziemy wielokrotnie wspominać w tej książce. Czasy połowicznego rozpadu, w zależności od izotopu, mogą być bardzo różne, od ułamków sekundy do miliardów lat.

### Promieniowanie alfa

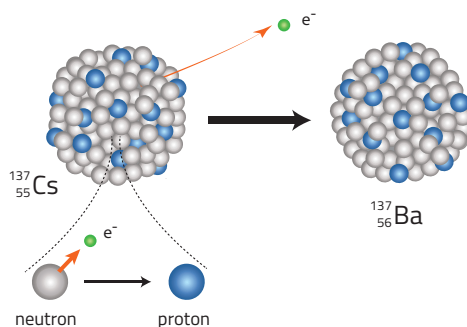
Przy rozpadzie alfa duże jądra atomowe wyrzucają z siebie jądra atomu helu-4, zwane **cząstkami alfa**. Składają się one z dwóch dodatnio naładowanych protonów i dwóch obojętnych neutronów. Przykładem izotopu emitującego promieniowanie alfa jest uran-238. Cząstki alfa emitowane w rozpadach typowych naturalnych izotopów promieniotwórczych mają całkiem dużą prędkość początkową: od 15 000 do 20 000 kilometrów na sekundę! Ale równocześnie promieniowanie to ma mały zasięg i można się przed nim osłonić za pomocą kartki papieru czy cienkiej folii aluminiowej.



PRZEMIANA ALFA

### Promieniowanie beta

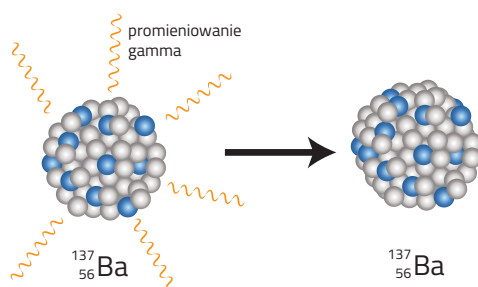
Jądra atomowe mogą emitować także ujemnie naładowane elektrony, zwane **cząstkami beta minus**. Mówimy wówczas o rozpadzie beta minus (istnieje także rozpad beta plus, ale jest to zjawisko o wiele rzadsze wśród naturalnych nuklidów promieniotwórczych). Elektrony powstają w jądrze atomowym z przemiany neutronów w protony. Proton pozostaje w jądrze, a elektron jest wyrzucany. Tak dzieje się na przykład w przypadku cezu-137, powstaje wówczas bar-137. Zasięg promieniowania beta może wynosić w powietrzu kilka metrów, osłonić przed nim mogą płytki aluminiowe, lub warstwa tworzywa sztucznego o grubości kilku milimetrów.



PRZEMIANA BETA MINUS

### Promieniowanie gamma

Promieniowanie gamma jest **rodzajem fal elektromagnetycznych** o dużej energii, występuje m.in. wtedy, gdy podczas rozpadu alfa lub beta pozostałe po emisji jądro atomowe pozbywa się nadmiaru energii. Promieniowanie gamma powstaje także, gdy jądro atomowe przechodzi ze stanu o wysokiej energii do stanu o energii niższej. Ma o wiele większy zasięg w środowisku niż promieniowanie alfa czy beta o tej samej energii. W przeciwieństwie do posiadających masę cząstek alfa lub beta, promieniowania gamma nie można zatrzymać. Do ochrony przed promieniowaniem gamma potrzebne są - zależnie od jego energii - osłony ołowiane o grubości co najmniej 20 centymetrów albo ściany betonowe o grubości co najmniej jednego metra.



EMISJA PROMIENIOWANIA GAMMA

# Naturalne i cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego

Licznik Geigera to najprostsze urządzenie służące do detekcji promieniowania jonizującego. Kiedy świadomie trzyma się go tak, że nie jest zwrócony w kierunku żadnego oznaczonego źródła promieniotwórczego, lecz na przykład gdzieś „w powietrze”, to mimo wszystko licznik „tyka” dalej. Skąd bierze się promieniowanie jonizujące, które rejestruje licznik? W istocie pochodzi z trzech źródeł: z promieniowania kosmicznego, z naturalnych radioizotopów w powietrzu (przede wszystkim produktów rozpadu radioaktywnego radonu) i wreszcie z naturalnych materiałów radioaktywnych obecnych w skorupie ziemskiej, w naszym ciele czy w obudowie licznika. Do każdego z nas może również docierać promieniowanie jonizujące, będące wynikiem działalności ludzkiej – nazywamy je „antropogennym”, lub „sztucznym”.

## Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie kosmiczne odkryte zostało już w 1912 roku. Dziś wiadomo, że jest wiele jego źródeł – część pochodzi ze Słońca, część z wybuchów gwiazd supernowych czy np. z procesów zachodzących, być może, wokół czarnych dziur, kwazarów i gwiazd neutronowych, w wyniku których obserwujemy promieniowanie rentgenowskie czy gamma. Promieniowanie Wszechświata składa się z promieniowania elektromagnetycznego o najróżniejszych energiach oraz cząstek: protonów (87 %), jąder helu (11 %), elektronów (~1 %); z niewielkim udziałem (~1 %) jąder cięższych od helu aż do uranu. Cząstki te zderzając się z składnikami atmosfery, powodują różne reakcje jądrowe i wytwarzane są przy tym nowe rodzaje promieniowania jonizującego, tzw. „wtórne” promieniowanie kosmiczne: neutrony, elektrony, miony, piony oraz oczywiście promieniowanie elektromagnetyczne. Promieniowanie kosmiczne, które mierzy się na poziomie morza, składa się praktycznie w całości z tego promieniowania wtórnego: wśród cząstek ~80 % stanowią miony, ~20 % elektrony.

Jestem  
radioaktywna  
i Ty też jesteś!



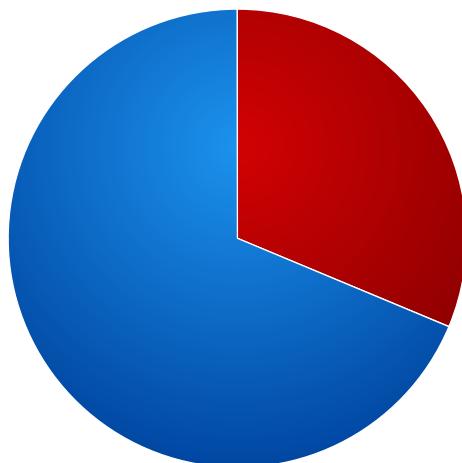
## Naturalne izotopy promieniotwórcze

W skorupie ziemskiej, w atmosferze, w wodzie oceanów znajdują się pewne ilości naturalnych izotopów promieniotwórczych. Skąd się biorą? Pochodzą przede wszystkim z okresu powstawania Ziemi, ponieważ znalazły się w proto-Ziemi podczas skupiania się gazów i pyłów z gwiazdnych wybuchów gwiazd supernowych. Z powodu czasu połowicznego rozpadu porównywalnego z wiekiem Ziemi (~4,5 miliarda lat) większość z tych izotopów istnieje do dziś i wciąż wysyła promieniowanie jonizujące. Z powodu istnienia naturalnych źródeł promieniotwórczych niemalże wszędzie można stwierdzić obecność promieniowania alfa, beta i gamma, w ilości oczywiście zależnej od otoczenia. Największa część naszej „naturalnej dawki promieniowania” pochodzi od gazu radonu i radioaktywnych produktów jego rozpadu, które wdychane są razem z powietrzem (przede wszyst-

# 68,7 %

## Źródła naturalne

- 33,7% - radon
- 13% - promieniowanie gamma od izotopów naturalnie występujących na Ziemi
- 10,9% - promieniowanie kosmiczne
- 8,3% - promieniowanie wewnętrzne
- 2,8% - toron



# 31,3 %

## Źródła sztuczne

- 30,9% - diagnostyka medyczna
- 0,2% - awarie w przemyśle jądrowym
- 0,2% - inne

UDZIAŁ RÓŻNYCH ŹRÓDEŁ PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO W CAŁKOWITEJ DAWCE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO OTRZYMANEJ PRZEZ STATYSTYCZNEGO MIESZKAŃCA POLSKI W 2017 R., ŹRÓDŁO: PAŃSTWOWA AGENCJA ATOMISTYKI

kim podczas pobytu w piwnicach i jaskiniach) oraz od izotopu potasu K-40, który znajduje się zarówno w glebie jak i w ciałach ludzi lub zwierząt - na przykład w mięśniach. Również skały mogą w niektórych okolicach mieć duży wkład do „naturalnej dawki promieniowania”.

### Cywilizacyjne źródła promieniowania

Nie należy lekceważyć ekspozycji na promieniowanie jonizujące pochodzenia „cywilizacyjnego” – lub dokładniej: ekspozycji na promieniowanie jonizujące, którego źródłem są radioaktywne izotopy i inne źródła promieniowania, które nie istniałyby bez zamierzonej, lub niezamierzonej działalności człowieka. W Europie jest ona mniej więcej tak samo wysoka, jak dawka promieniowania ze źródeł, które już i tak znajdują się w przyrodzie. Największy udział w tym mają procedury medyczne – np. diagnostyka rentgenowska i radiofarmaceutyki.

Inne źródła stworzone przez człowieka są związane z technologią. Węgiel, który spalamy w elektrowniach i piecach domowych zawiera występujące naturalnie izotopy promieniotwórcze, a zatem są one również w dymach i popiołach. Materiały budowlane, takie jak cegła i kamień, również emitują naturalne promieniowanie tła, czyli nasze domy, szkoły i fabryki są źródłem promieniowania. Pewną śladową ilość promieniowania jonizującego otrzymujemy z energetyki jądrowej, jest ona jednak znacznie mniejsza niż pochodząca ze źródeł naturalnych i medycznych.

**Zapamiętaj!**  
Głównym, „cywilizacyjnym” źródłem promieniowania jonizującego jest medycyna - przede wszystkim obrazowanie medyczne, czyli tomografia komputerowa i zdjęcia rentgenowskie.

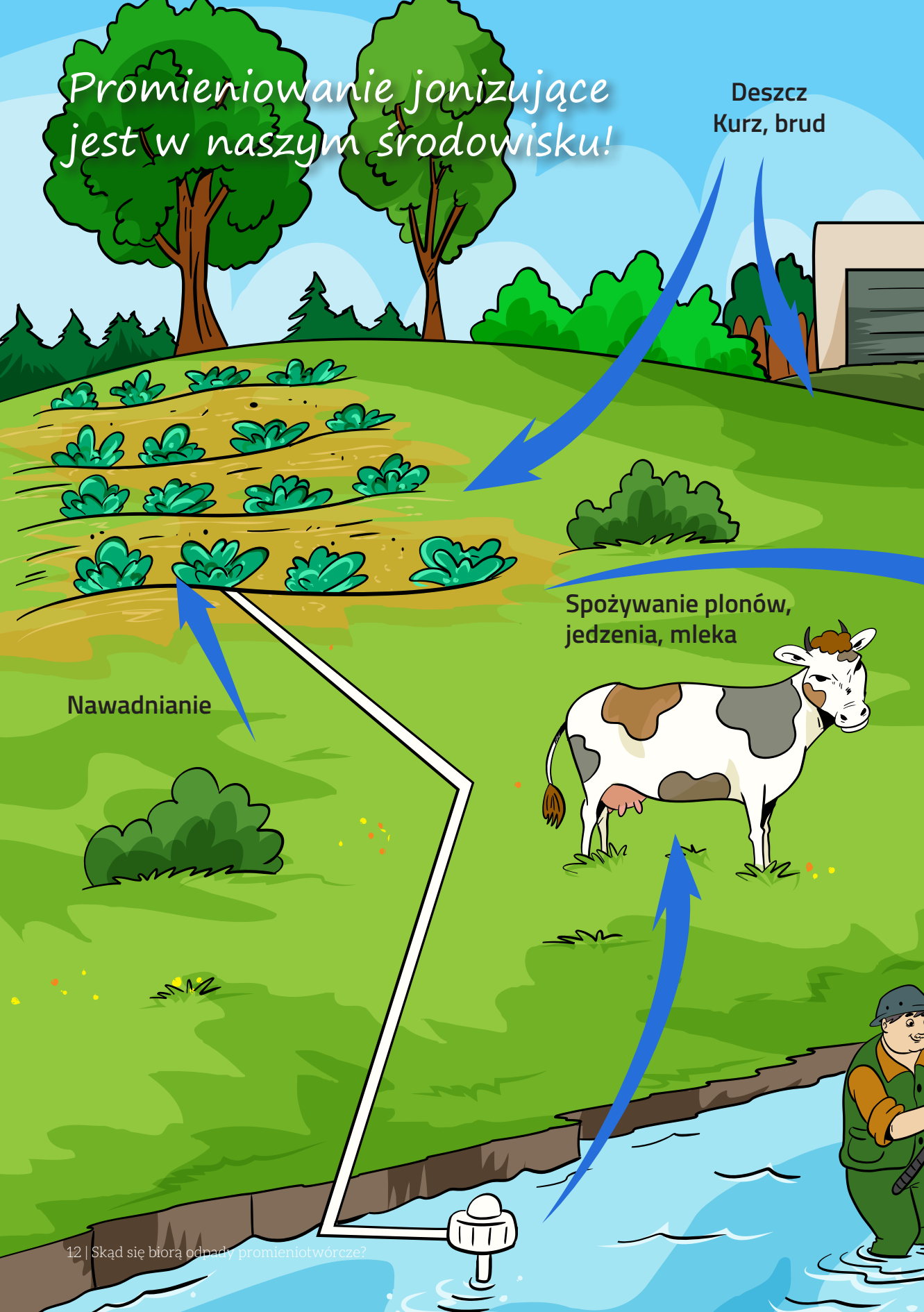


Promieniowanie jonizujące  
jest w naszym środowisku!

Deszcz  
Kurcz, brud

Spożywanie plonów,  
jedzenia, mleka

Nawadnianie





Promieniowanie kosmiczne

Oddychanie

Materiały budowlane

Skały i gleba

Wody powierzchniowe i podziemne

**ŹRÓDŁA NATURALNEGO  
PROMIENIOWANIA  
JONIZUJĄCEGO**

Spożywanie ryb i owoców morza

# Skąd się biorą odpady promieniotwórcze?

W naszym codziennym życiu produkujemy bardzo dużo śmieci. Pomyśl tylko, ile śmieci zbiera Twoja rodzina w ciągu jednego tygodnia. Popatrz, ile masz śmieci podczas jednej wizyty w restauracji typu fast-food. Prawdopodobnie wyrzucisz opakowania, torby, słomki, pojemniki na napoje i resztki jedzenia. Przemysł również produkuje śmieci za każdym razem, gdy coś wytwarza. Te pozostałości są zwane produktami ubocznymi lub odpadami.

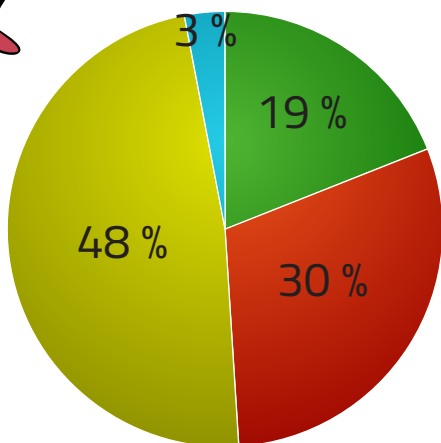
W Polsce najwięcej odpadów promieniotwórczych wytwarza instytut badawczy - Narodowe Centrum Badań Jądrowych



Przy pokojowym wykorzystywaniu energii jądrowej najwięcej odpadów promieniotwórczych pochodzi z reaktorów (energetycznych i badawczych), zakładów produkujących paliwa jądrowe oraz zakładów przerobu wypalonego paliwa. Znaczne ilości odpadów radioaktywnych powstają poza przemysłem nuklearnym, ponieważ substancje promieniotwórcze są coraz szerzej stosowane w nauce, technice i medycynie. Na przykład działalność personelu medycznego, to często praca z preparatami promieniotwórczymi (radiofarmaceutykami), służącymi do diagnozy i leczenia: np. nowotworów. Również przy typowej produkcji przemysłowej powstawać mogą odpady promieniotwórcze - na przykład w czasie produkcji nawozów fosforowych.

Dlatego też pokolenia, które czerpią korzyści z energii jądrowej i promieniowania jonizującego, muszą być odpowiedzialne za postępowanie z takimi odpadami.

W Polsce w 2017 roku wyprodukowano 61,5 m<sup>3</sup> odpadów promieniotwórczych w różnej postaci (nie uwzględniając wypalonego paliwa jądrowego). Ich głównym źródłem jest instytut badawczy - Narodowe Centrum Badań Jądrowych, zlokalizowany w Otwocku-Świerku, niedaleko Warszawy,



Spoza ośrodka jądrowego w Świerku (medycyna, przemysł, badania naukowe)

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Ośrodek Radioizotopów POLATOM

Narodowe Centrum Badań Jądrowych z reaktorem Maria

Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych

ILOŚĆ ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH WYTWORZONYCH W POLSCE W 2017 ROKU W PODZIALE NA GŁÓWNYCH ICH PRODUCENTÓW, ŹRÓDŁO: PAŃSTWOWA AGENCJA ATOMISTYKI



## Źródła odpadów promieniotwórczych



który wytwarza ok. 80 % wszystkich odpadów. To tutaj eksploatowany jest jedyny w Polsce jądrowy reaktor badawczy Maria, a także w tym samym ośrodku produkuje radiofarmaceutyki, które trafiają do szpitali w Polsce i wielu miejscach na całym świecie. Pozostałe 20 % odpadów produkuje przemysł, medycyna i nauka.

Kiedy zjesz obiad w szkolnej stołówce, czy po prostu rzucasz swoją tacę i wszystko, co na niej jest, żeby ktoś się tym zajął? Prawdopodobnie nie. Jest miejsce na tacę, miejsce do wyrzucenia resztek potraw i kosze na srebrne sztucce. Wszystkie Twoje śmieci trafiają do jednego kosza lub mogą być przygotowane oddzielne pojemniki na surowce wtórne i odpady przeznaczone na kompost. Dlaczego istnieje tak wiele sposobów na pozbycie się tego, co zostało po obiedzie? Ponieważ umiemy sobie radzić z różnymi odpadami na różne sposoby.

Podobnie jest z odpadami promieniotwórczymi. Istnieją specjalne metody na pozbycie się każdego rodzaju tych odpadów. Sposób, w jaki są unieszkodliwiane, zależy od tego jak bardzo są radioaktywne, od ich czasu połowicznego rozpadu oraz postaci fizycznej i chemicznej. O tym opowiemy w kolejnych rozdziałach naszej książki.

# Rodzaje odpadów promieniotwórczych

Jak wszystkie inne odpady, także odpady promieniotwórcze mają różne właściwości fizyczne i chemiczne. Mają również zróżnicowane właściwości radiologiczne w zależności od rodzaju i intensywności promieniowania emitowanego przez zawarte w nich izotopy promieniotwórcze, a także ich okresu połowicznego rozpadu.

Z poprzednich rozdziałów dowiedzieliśmy się, że większość znanych nam izotopów emituje promieniowanie jonizujące, głównie w postaci cząstek alfa, beta lub promieniowania gamma. Z tego powodu istnieje wiele rodzajów odpadów promieniotwórczych, które można jednak podzielić na niewielką liczbę kategorii, w zależności od stężenia substancji promieniotwórczej oraz okresu czasu, w którym pozostają radioaktywne. Ze wszystkimi odpadami w danej kategorii postępujemy w ogólności w ten sam sposób.

Powróćmy jeszcze do podstawowych wiadomości na temat promieniotwórczości. Pojęciem koniecznym do zrozumienia idei klasyfikacji odpadów jest **aktywność promieniotwórcza** substancji czy materiału. Co to oznacza? Przez aktywność materiału promieniotwórczego rozumiemy liczbę jąder atomowych, które ulegają rozpadowi w czasie 1 sekundy. Jednostką, w której mierzymy aktywność, jest bekerel (Bq), nazwana tak na cześć wspomnianego już odkrywcy promieniotwórczości Henri Becquerela. Jeśli, przykładowo, w określonej masie/ilości/próbce jakiejś substancji dochodzi do 734 przemian jądrowych w ciągu 1 sekundy, wówczas jej aktywność wynosi 734 Bq.

W naszych organizmach zachodzi przeciętnie około 8000 przemian jądrowych na sekundę, czyli aktywność promieniotwórcza naszego ciała to 8000 Bq!



Odpady promieniotwórcze można podzielić pod względem ich aktywności na **nisko-, średnio- oraz wysokoaktywne**. Z biegiem czasu izotopy promieniotwórcze rozpadają się do stabilnych, nie emitujących promieniowania jonizującego jąder atomowych. Wówczas odpady wysokoaktywne stają się odpadami średnioaktywnymi, a następnie niskoaktywnymi, by ostatecznie, jak w przypadku wszystkich materiałów radioaktywnych, ich aktywność promieniotwórcza spadła do zera.

Zapamiętaj, że istnieje ważna różnica między odpadami promieniotwórczymi, które ostatecznie stają się niegroźne, choć w wielu przypadkach po bardzo długim czasie, a odpadami chemicznie toksycznymi, które pozostają toksyczne na zawsze.

Odpady promieniotwórcze dzielimy także ze względu na ich **postać fizyczną, czyli stan skupienia**. Wyróżniamy odpady stałe, ciekłe i gazowe. Można również klasyfikować izotopy promieniotwórcze ze względu na ich **czas połowicznego rozpadu**. Odpady dzielimy wtedy na przejściowe, gdy okres połowicznego rozpadu jest krótszy niż 3 lata, krótkożyciowe, gdy okres ten jest dłuższy niż 3 lata, ale krótszy niż 30 lat, oraz długożyciowe, gdy okres połowicznego rozpadu wynosi powyżej 30 lat.



## KLASYFIKACJA ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH POD WZGLĘDEM:



### STANU SKUPIENIA:

- ciało stałe
- ciecz
- gaz

### AKTYWNOŚCI PROMIENIOTWÓRCZEJ:

- odpady niskoaktywne
- odpady średnioaktywne
- odpady wysokoaktywne

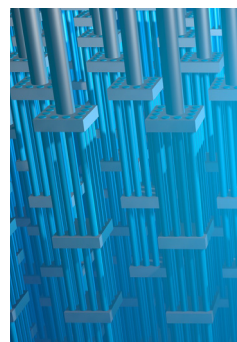
### CZASU POŁOWICZNEGO ROZPADU IZOTOPÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH:

- przejściowe – okres połowicznego rozpadu < 3 lata
- krótkożyciowe – okres połowicznego rozpadu > 3 lata i < 30 lat
- długożyciowe – okres połowicznego rozpadu > 30 lat

**Niskoaktywne odpady promieniotwórcze** zawierają nieduże stężenia substancji radioaktywnych. Ponieważ natężenie emitowanego przez nie promieniowania jonizującego jest niewielkie, nie wymagają specjalnych osłon i mogą być przetwarzane przy użyciu prostych środków ochrony, takich jak gumowe rękawice. Ten typ odpadów może pochodzić z elektrowni jądrowych i innych instalacji jądrowych oraz z ośrodków badawczych, szpitali i przemysłu, które wykorzystują promieniowanie i materiały radioaktywne. Przykłady takich odpadów: ręczniki papierowe, zużyte strzykawki, gumowe rękawice, kalosze czy filtry czyszczące powietrze.

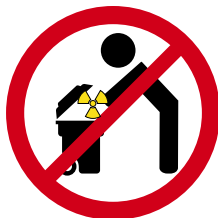
**Odpady średnioaktywne** zawierają wyższe stężenia substancji promieniotwórczych niż odpady niskoaktywne. W tym wypadku wymagane są już osłony, na ogół betonowe, oraz urządzenia do zdalnego nimi manipulowania, aby chronić ludzi przed emitowanym przez nie promieniowaniem. Ten typ odpadów wytwarzany jest w elektrowniach jądrowych i zakładach przetwarzania zużytego paliwa jądrowego, a także może pochodzić z medycznych, przemysłowych i badawczych zastosowań izotopów promieniotwórczych, takich jak sterylizacja sprzętu medycznego i leczenie nowotworów. Przykłady takich odpadów: złom metalowy, szlam, żywice.

**Odpady wysokoaktywne** mają najwyższe stężenie izotopów promieniotwórczych. Natężenie emitowanego promieniowania jest tak wysokie, że odpady stają się fizycznie gorące i pozostają takie przez wiele dziesięcioleci, dopóki ich aktywność promieniotwórcza nie zmaleje. Takie odpady wymagają chłodzenia, a także stosowania odpowiednich osłon i urządzeń do zdalnego manipulowania. Odpady wysokoaktywne pochodzą z elektrowni jądrowych oraz zakładów przetwarzania zużytego paliwa jądrowego.



**Zapamiętaj!**  
Zużyte paliwo z reaktorów badawczych i energetycznych jest odpadem promieniotwórczym wysokoaktywnym!

# Co robimy z odpadami promieniotwórczymi w Polsce?



**PAMIĘTAJ,  
NIE WYRZUCAJ  
MATERIAŁÓW  
RADIOAKTYWNYCH  
DO ZWYKŁEGO  
KOSZA!**



**Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych ma już ponad 50 lat doświadczenia w postępowaniu z odpadami radioaktywnymi!**

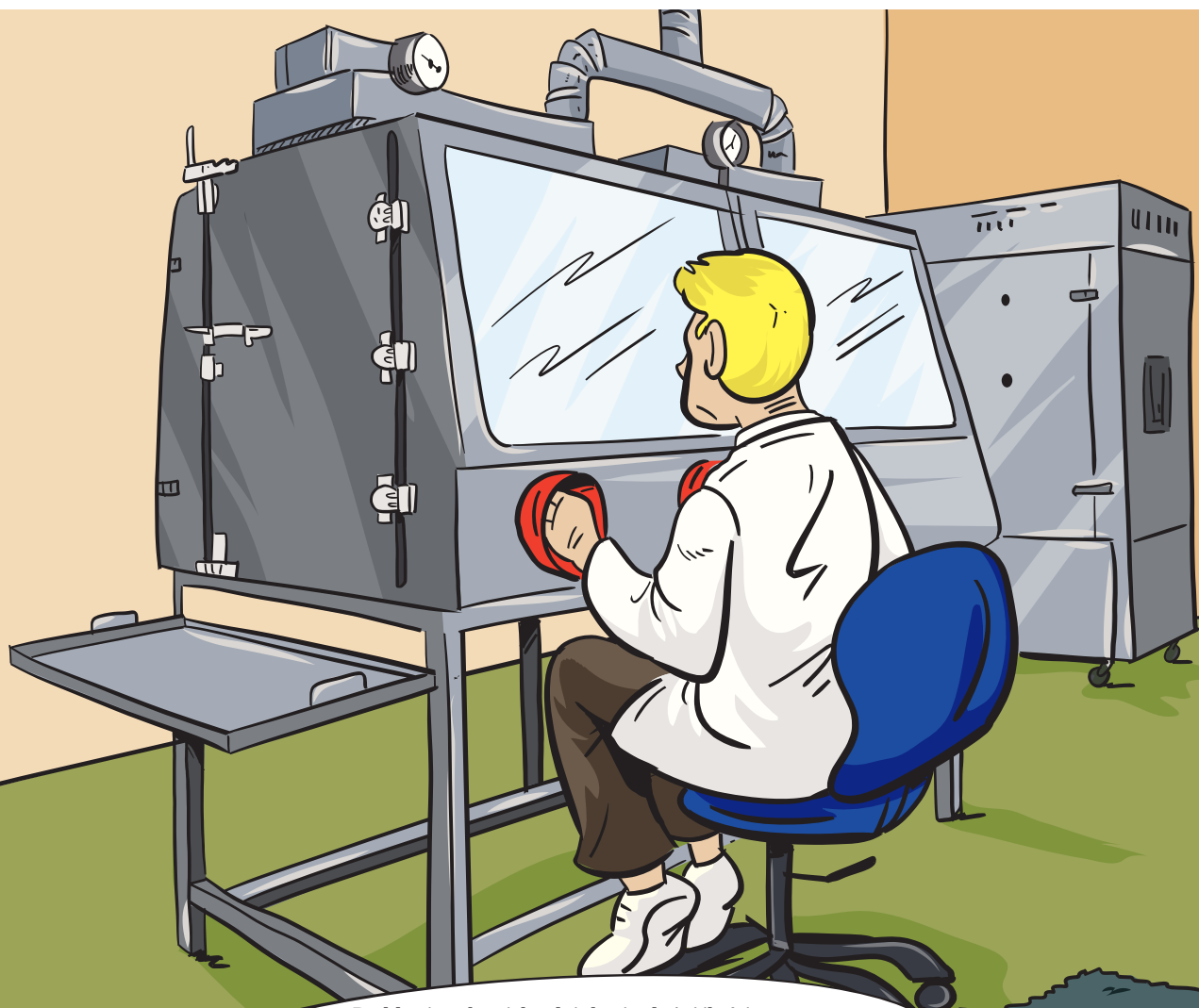
Jeśli kiedykolwiek będziesz pracował z materiałami promieniotwórczymi, pamiętaj, że zużytych źródeł promieniotwórczych, czy przedmiotów, które je zawierają, nie można tak po prostu wyrzucić na śmietnik. Promieniowanie jonizujące może być w pewnych przypadkach dla człowieka niebezpieczne. Skutek oddziaływania promieniowania na nasz organizm zależy od wielu czynników, m.in. rodzaju promieniowania, jego energii oraz natężenia. Istotne jest również, czy substancja promieniotwórcza została wchłonięta do naszego organizmu (na przykład połknięta), czy oddziałuje z zewnątrz. Dlatego tak ważne jest stosowanie pewnych zasad, wypracowanych na całym świecie, dzięki temu, że już przez dziesięciolecia wykorzystujemy źródła promieniotwórcze w wielu dziedzinach życia i potrafimy się nimi posługiwać.

Podstawowym celem postępowania z odpadami promieniotwórczymi jest ochrona człowieka i jego środowiska. Musimy zrobić wszystko, aby zapobiec występowaniu wszelkiego ryzyka radiologicznego, czyli narażenia na kontakt z materiałem promieniotwórczym lub ekspozycji (wystawieniu) na promieniowanie w każdych, dających się przewidzieć, okolicznościach i w odpowiednio długim czasie – dlatego segregujemy i kategoryzujemy odpady. Każdy kraj przygotowuje swój plan postępowania z odpadami promieniotwórczymi i zabezpiecza je tak, aby przyszłe pokolenia nie musiały już ponosić odpowiedzialności za wytwarzane obecnie odpady.

Aby osiągnąć trwałą ochronę ludności i środowiska, stosuje się dwie proste zasady:

1. Przetworzone odpady promieniotwórcze muszą być składowane tak, aby nie mogły się przemieszczać i wydostać do środowiska. Muszą być otoczone specjalnie zaprojektowanymi barierami ochronnymi (pojemniki, opakowania),
2. Miejsce składowania odpadów musi być starannie dobrane pod względem warunków geologicznych i odpowiednio zaprojektowane, aby zminimalizować ryzyko wydostania się materiałów radioaktywnych do biosfery, czyli strefy zamieszkaanej przez organizmy żywe.

**Co należy wobec tego zrobić z odpadami promieniotwórczymi w Polsce?** W naszym kraju jest jedna, specjalnie dedykowana instytucja, która odpowiada za całokształt postępowania z odpadami promieniotwórczymi. Jest to **Przedsiębiorstwo Państwowe Użyteczności Publicznej – Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych**, które skrótowo określać będziemy ZUOP. Zadania tego Przedsiębiorstwa reguluje ustawa Prawo Atomowe i obejmują one odbiór, transport, przechowywanie i składowanie materiałów jądrowych, źródeł promieniotwórczych oraz innych substancji promieniotwórczych.



*Poddanie człowieka działaniu dużej ilości promieniowania jonizującego może być niebezpieczne dla zdrowia. Dlatego pracownicy korzystają z wielu urządzeń i osłon, które chronią ich przed promieniowaniem. Wykorzystuje się na przykład specjalne komory o kształcie dużej szafy, które przeznaczone są do manipulowania materiałami promieniotwórczymi.*

ZUOP ma swoją siedzibę w Ośrodku Jądrowym w Otwocku-Świerku, gdzie trafiają wszystkie odpady promieniotwórcze i tu są odpowiednio przygotowywane do składowania. Miejscem składowania odpadów jest miejscowość Różan, nad Narwią, gdzie zlokalizowane jest, jedyne w Polsce, Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych.

**NADZÓR NAD BEZPIECZEŃSTWEM POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI, W TYM NADZÓR NAD BEZPIECZEŃSTWEM ICH SKŁADOWANIA PRZEZ ZUOP SPRAWUJE PREZES PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI, KTÓREGO ZADANIEM, ZGODNIE Z PRAWEM ATOMOWYM, JEST ZAPEWNIENIE BEZPIECZEŃSTWA JĄDROWEGO I OCHRONY RADIOLOGICZNEJ KRAJU.**



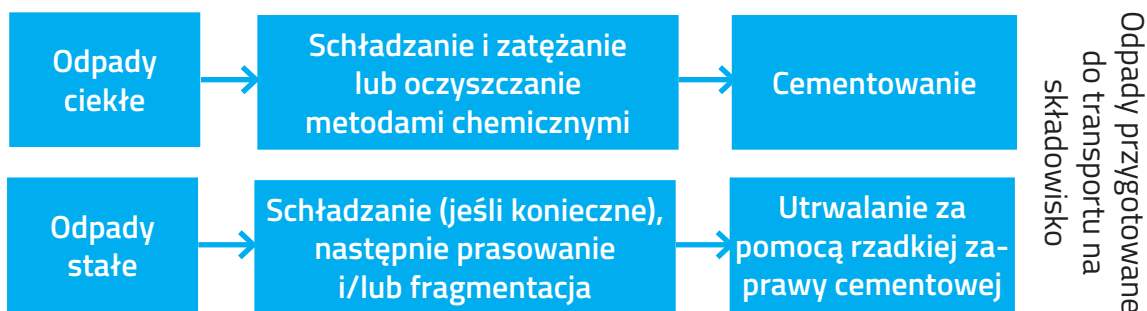
# Przetwarzanie odpadów promieniotwórczych

Już wiesz, że w Polsce istnieje specjalny Zakład zajmujący się kompleksowo odpadami radioaktywnymi. Ty, jako potencjalny użytkownik źródeł promieniotwórczych, jesteś zobowiązany jedynie do przygotowania odpadów do transportu, ZUOP może odebrać je bezpośrednio od Ciebie, jeśli nie masz możliwości dostarczenia ich w odpowiednich warunkach do siedziby Zakładu w Ośrodku Jądrowym w Otwocku-Świerku. Warto jednak wiedzieć, co dalej dzieje się z Twoimi odpadami.

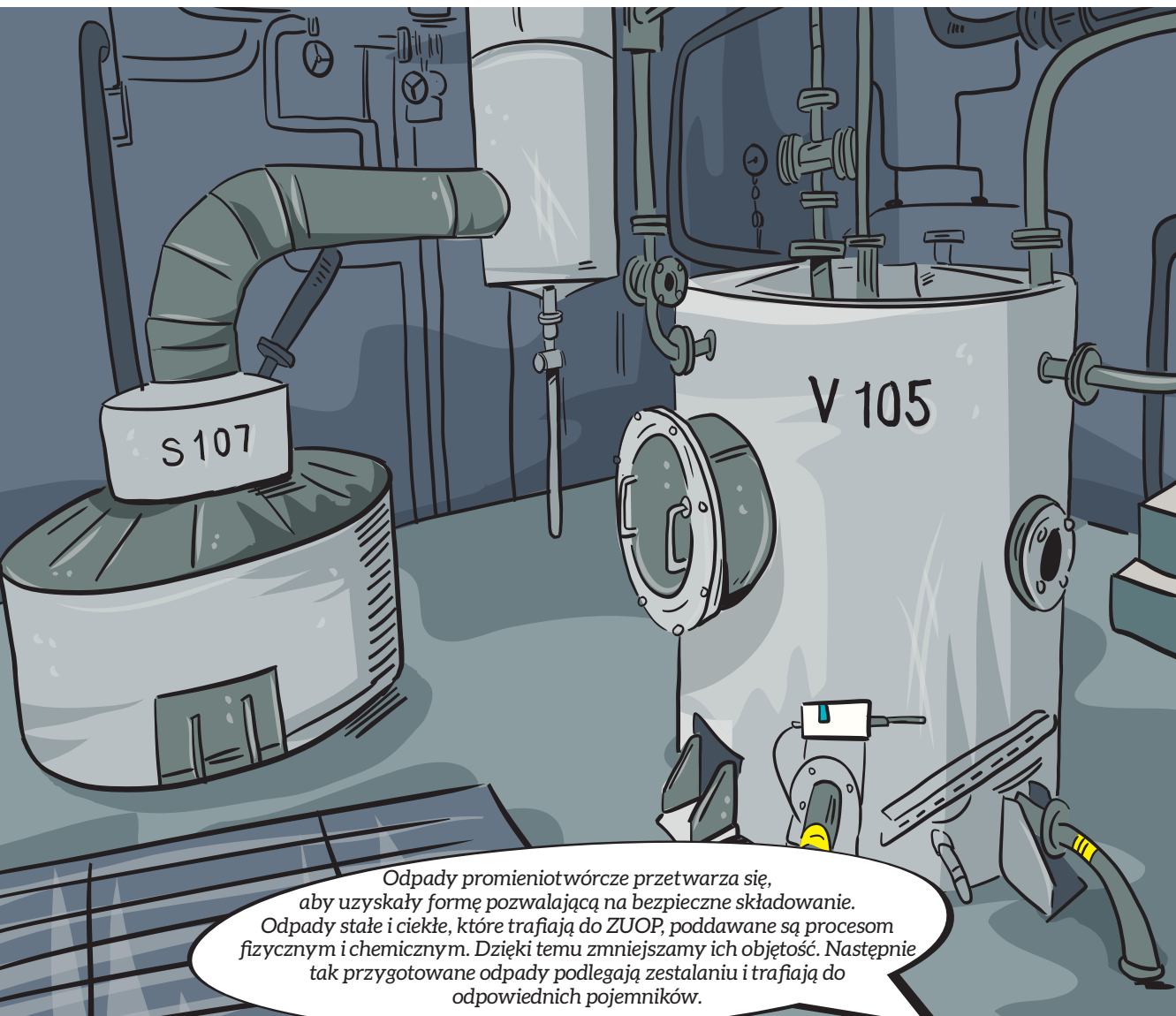
Zakładamy, że Twoje odpady należą do **kategorii nisko- lub średnioaktywnych**. Wysokoaktywnymi odpadami zajmiemy się w kolejnych rozdziałach. Na początku wszystkie odpady trafiają do magazynów ZUOP, gdzie oczekują na etap przetwarzania. Następnie, w zależności od stanu skupienia odpadów, poddawane są różnym procesom przetwarzania, aby:

- **W możliwie maksymalnym stopniu zredukować ich objętość,**
- **Nadać im formę odporną na działanie wody i rozpraszanie się,**
- **Składować w sposób nie zagrażający środowisku.**

W przypadku, gdy odpady mają **postać cieczy**, przetwarzanie polega na ich zateżeniu do jak najmniejszej objętości, a następnie przetworzeniu koncentratu w postać stałą. Duże zmniejszenie objętości powstałych ścieków jest konieczne, zarówno ze względów ekonomicznych, jak i eksploatacyjnych. Zawarte w ściekach izotopy promieniotwórcze są oddzielane różnymi metodami chemicznymi. Najbardziej uniwersalną i efektywną, chociaż i najbardziej kosztowną metodą oczyszczania ścieków, jest odparowywanie. Z wyjątkiem lotnych izotopów promieniotwórczych, wszystkie inne zanieczyszczenia są skutecznie oddzielane od wody. Pozostałe po odparowaniu szlamy i koncentraty muszą być przetworzone do postaci stałej. Jako materiałów zastalających używa się powszechnie betonów. Betonowanie jest stosunkowo proste, tanie i szeroko stosowane. Metoda ta polega na wymieszaniu koncentratów z masą cementową i wypełnianiu tą mieszaniną stalowych bębnow.



SCHEMAT PRZETWARZANIA ODPADÓW NISKO- I ŚREDNIOAKTYWNYCH W PODZIALE NA STAN SKUPIENIA



Odpady promieniotwórcze przetwarzają się, aby uzyskać formę pozwalającą na bezpieczne składowanie. Odpady stałe i ciekłe, które trafiają do ZUOP, poddawane są procesom fizycznym i chemicznym. Dzięki temu zmniejszamy ich objętość. Następnie tak przygotowane odpady podlegają zestalaniu i trafiają do odpowiednich pojemników.

**Stale odpady** promieniotwórcze poddawane są w ZUOP dwóm zabiegom: prasowaniu oraz, jeśli to konieczne, fragmentacji. Fragmentacji, czyli po prostu cięciu, poddawane są te odpady, których wymiary są przeszkodą do bezpośredniego składowania. Sam proces fragmentacji może też prowadzić do powstawania odpadów, ze względu na pyły i zazwyczaj musi być prowadzony w kontrolowanych warunkach. Z kolei prasowanie jest dość rozpowszechnioną metodą redukcji objętości. Jej wydajność wzrasta w przypadku zastosowania pras o bardzo dużym nacisku. Tak przygotowane odpady są umieszczane w bębnach i dodatkowo utrwalane za pomocą rzadkiej zaprawy cementowej.

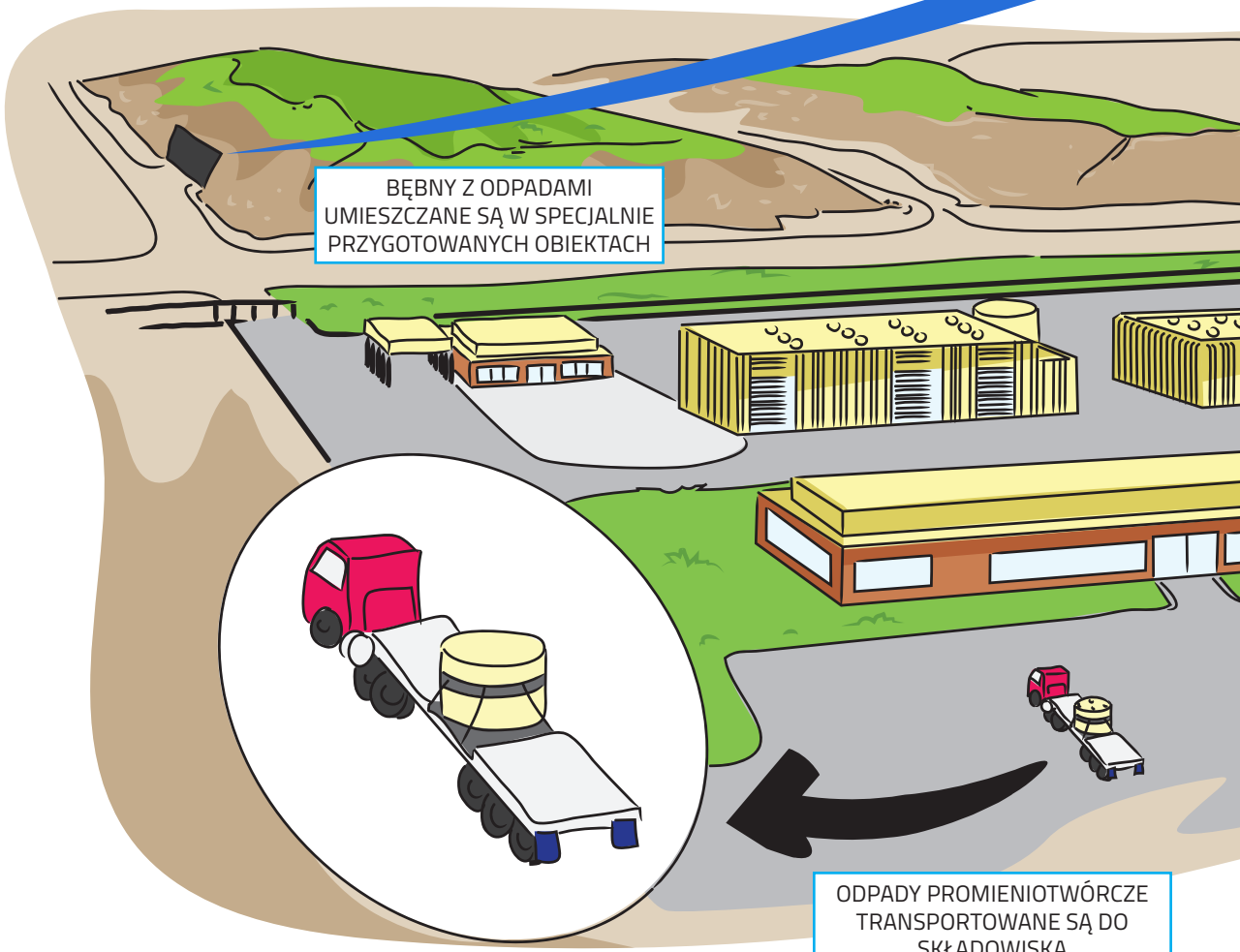
Procesy chemiczne i fizyczne przedstawione powyżej gwarantują bezpieczny transport i składowanie odpadów w specjalnym miejscu na odpowiednio długi czas, pozwalający na zredukowanie ich aktywności promieniotwórczej praktycznie do zera (stają się wówczas zwykłymi odpadami).



# Składowanie odpadów nisko- i średnioaktywnych

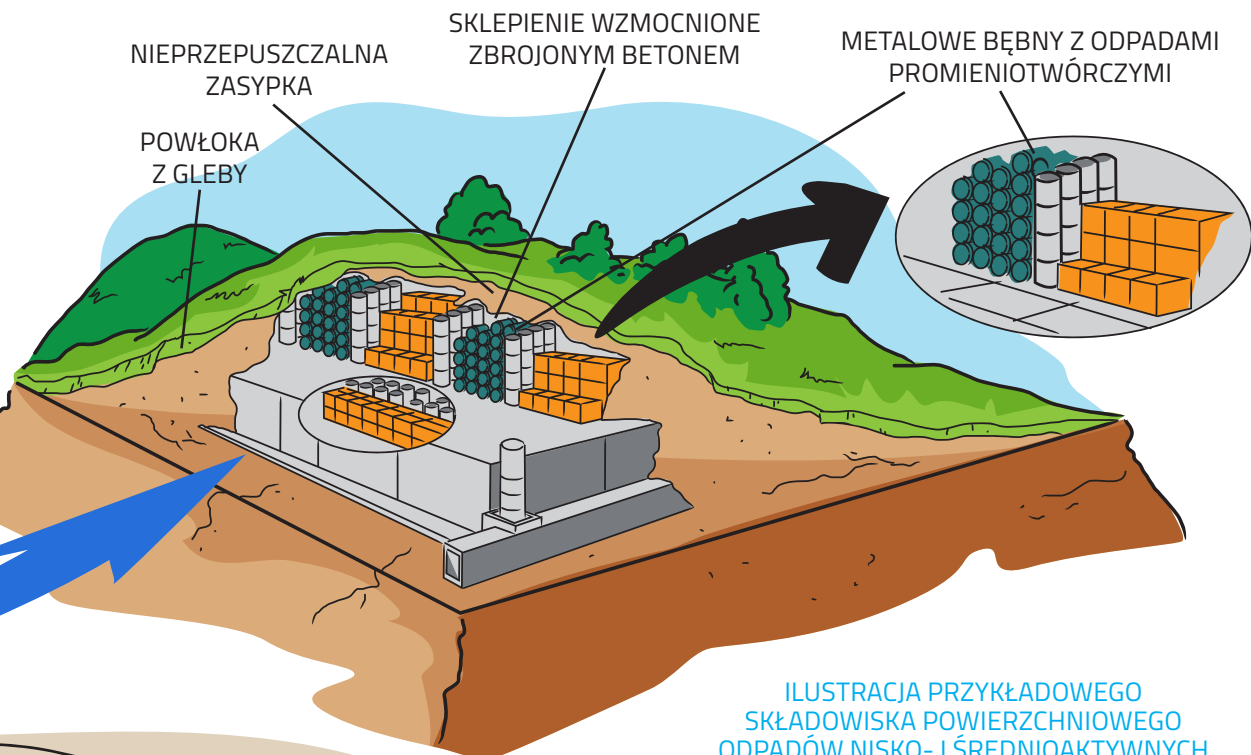
Ostatnie miejsce, gdzie trafiają odpowiednio przygotowane (czyli zestalone i opakowane) odpady nisko- i średnioaktywne to składowiska zapewniające izolowanie materiałów promieniotwórczych w okresie około 300 lat. W większości krajów na świecie występują głównie dwa rodzaje składowisk: powierzchniowe oraz przypowierzchniowe. W tym drugim przypadku obiekty przeznaczone do składowania odpadów mieszczą się częściowo pod powierzchnią terenu lub są ulokowane kilka lub kilkanaście metrów pod ziemią. Niektóre kraje, ze względu na brak odpowiednich lokalizacji lub ze względu na politykę krajową (na przykład w Niemczech), składują odpady nisko- i średnioaktywne na znacznie większych głębokościach.

Wybór miejsca pod składowisko odpadów promieniotwórczych nie może być przypadkowy. Musi ono spełniać wszystkie, opisane w Prawie Atomowym, normy, aby

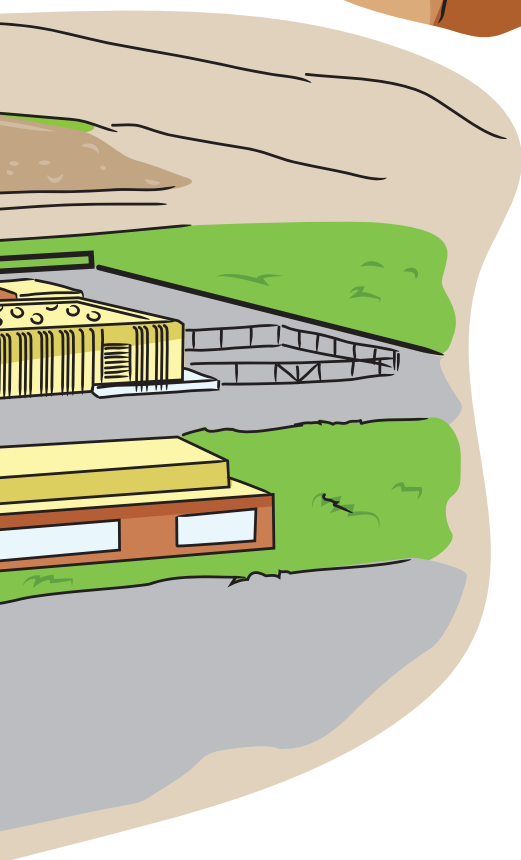


BĘBNY Z ODPADAMI  
UMIESZCZANE SĄ W SPECJALNIE  
PRZYGOTOWANYCH OBIEKTACH

ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE  
TRANSPORTOWANE SĄ DO  
SKŁADOWISKA



ILUSTRACJA PRZYKŁADOWEGO SKŁADOWISKA POWIERZCHNIOWEGO ODPADÓW NISKO- I ŚREDNIOAKTYWNYCH



zapewnić izolację materiałów radioaktywnych od środowiska. Składowisko musi spełnić dwie najważniejsze funkcje:

1. Musi zabezpieczyć odpady przed działaniem wody, co uzyskuje się dzięki systemowi fizycznych barier i wystarczającemu wzniesieniu ponad poziom wód gruntowych. Woda powoduje korozję metalowych bębnow z odpadami, może dojść do ich rozszczelnienia i z upływem lat wydostawania się substancji promieniotwórczej do otoczenia.
2. Musi zapewnić także ochronę przed przypadkowymi działaniami człowieka, co realizuje się poprzez odpowiedni nadzór terenu. Składowiska odpadów promieniotwórczych pozostają w każdym kraju zawsze pod nadzorem rządu i odpowiednich instytucji dozoru jądrowego.

**A gdzie trafią odpady promieniotwórcze naszego Czytelnika?** W Polsce mamy jedno składowisko odpadów radioaktywnych posiadające status **Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych**, które skrótowo określamy KSOP. Znajduje się ono w Różanie, odległym od Warszawy o około 90 km.



ZUOP umożliwia zwiedzanie terenu KSOP przez zorganizowane grupy. Zapraszamy, przekonaj się, że odpady są bezpiecznie składowane.



KSOP funkcjonuje już od 1961 roku. Składowisko znajduje się w jednym z dawnych fortów wojskowych, wybudowanych przez władze rosyjskie w latach 1905-1908. Wody gruntowe znajdują się pod warstwą gliny o bardzo małej przepuszczalności i warstwą gleby o właściwościach pochłaniających na głębokości około 24 metrów poniżej składowiska.

W KSOP mogą być składowane odpady wyłącznie w postaci stałej lub zestalonej. Miejscem składowania odpadów krótkożyciowych niski i średnioaktywnych jest fragment adaptowanej do tego celu suchej fosy. Dno i zbocza fosy pokryte są 20 cm warstwą betonu. Stałe i zestalone odpady w bębnach metalowych zabezpieczonych przed korozją umieszczane są w fosie warstwami, a następnie zalewane są betonem. Ostatnie, najwyższej znajdującej się odpady pokrywane są 40 cm warstwą betonu, a następnie asfaltem.

Bardzo ważna jest także kontrola obiektu, która realizowana jest na kilka sposobów. Monitorowany jest poziom promieniowania na terenie składowiska i w jego otoczeniu, pobierane są próbki wody, powietrza, gleby czy roślinności, aby sprawdzić, czy nie zostały skażone, kontrolowani są także pracownicy składowiska. Dla zapewnienia maksymalnej obiektywności stanu radiologicznego środowiska KSOP i jego otoczenia badania prowadzone są równoległe przez dwa niezależne, akredytowane laboratoria.



**BĘBNY Z ODPADAMI SKŁADOWANE W KSOP**



# Ile odpadów promieniotwórczych wytwarza elektrownia jądrowa?

W elektrowni jądrowej, w reaktorze, energia wytwarzana jest w reakcji rozszczepienia jąder atomów **uranu**. W reaktorze przebiega **kontrolowana reakcja łańcuchowa**, podczas której rozszczepianych jest jedynie tyle jąder uranu, ile potrzeba do produkcji energii elektrycznej, z której potem wszyscy korzystamy. Jest to czyste (nie emitujące gazów cieplarnianych) i tanie źródło energii. Polska zmierza do budowy pierwszego reaktora energetycznego.

Paliwem w reaktorze jądrowym jest wzbogacony uran w postaci dwutlenku uranu. Paliwo ma kształt **pastylek** o średnicy około 8 mm i wysokości około 1 cm. Pastylki umieszcza się w metalowych rurach (zwykle cyrkonowych), z których formuje się **kasety paliwowe**. W zależności od typu reaktora jądrowego, w jego rdzeniu może znajdować się nawet 300 takich kaset.

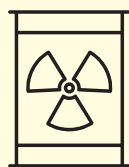
Jednym z najczęściej pojawiających się tematów w dyskusji o rozwoju tego źródła energii w naszym kraju jest postępowanie z odpadami promieniotwórczymi z takiej elektrowni. [Pracująca elektrownia jądrowa wytwarza wszystkie trzy, znane nam już, typy odpadów radioaktywnych: nisko-, średnio- i wysokoaktywne.](#)

Paliwo jądrowe zużywa się. Co około dwa lata 1/3 wszystkich kaset paliwowych musi zostać wymieniona na świeże. Paliwo, które wyjęte zostało z rdzenia reaktora nazywamy w żargonie branżowym „wypalonym”. Przeanalizujemy typowy reaktor energetyczny, najnowszej (trzeciej) generacji, który ma moc elektryczną 1000 MW (megawat = 1 000 000 watów). Jeden rok pracy takiego reaktora powoduje powstanie 35 ton wypalonego paliwa jądrowego, ok. 60 m<sup>3</sup> przetworzonych odpadów niskoaktywnych i około 40 m<sup>3</sup> przetworzonych odpadów średnioaktywnych. Zatem odpady nisko- i średnioaktywne mieszczą się w objętości dwóch wagonów cystern. Budowane obecnie reaktory jądrowe są przewidywane na około 60 lat pracy. Metody postępowania z wypalonym paliwem jądrowym przedstawione są w ostatnim rozdziale książki.



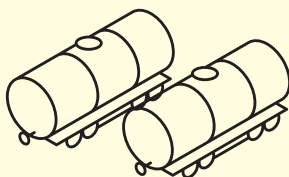
Gdyby cała energia elektryczna zużywana w Twoim życiu była wytwarzana przez elektrownie jądrowe, Twój udział wysokoaktywnych odpadów zmieściłby się w małej puszcze po napoju!

ODPADY WYSOKOAKTYWNE



~35 TON

ODPADY NISKO- I ŚREDNIOAKTYWNE



~100 m<sup>3</sup>

ODPADY PROMIENIOTÓWCZE Z JENDEGO ROKU PRACY ELEKTROWNI JĄDROWEJ O MOCY 1000 MW ELEKTRYCZNYCH

# Jak transportujemy odpady promieniotwórcze?

Zapewne wiele osób będzie zdziwionych – materiały promieniotwórcze są przesyłane zwykłymi środkami transportu: drogowym, kolejowym, wodnym lub powietrznym, z których wszyscy sami korzystamy. Większość transportowanych przesyłek zawiera bardzo małe ilości substancji promieniotwórczych. Zawsze jednak należy brać pod uwagę możliwość narażenia ludzi na zetknięcie się z nimi.

Materiały promieniotwórcze przewożone są w różnych opakowaniach, gwarantujących integralność przesyłki w czasie transportu i określoną w przepisach osłonność przed promieniowaniem. W innym opakowaniu więc przewożone jest „świeże” paliwo do elektrowni jądrowej, w innym – „wypalone” paliwo, a jeszcze w innym transportowane są izotopowe czujki dymu, które zawierają źródła o bardzo małej aktywności.

Typ opakowania, w jakim przewozi się materiał promieniotwórczy, zależy więc od rodzaju tego materiału, jego objętości, ilości, postaci fizycznej i aktywności. Dlatego też poszczególne typy opakowań muszą być inaczej skonstruowane i posiadać inne parametry wytrzymałościowe oraz materiałowe. Niektóre z nich, zanim zostaną dopuszczone do stosowania, są poddawane bardzo surowym testom: mechanicznym (ściskanie, upadek z wysokości), termicznym (odporność na podwyższoną temperaturę), zaburzeniowym itp.

Ocenia się, że na świecie co roku transportuje się ponad 10 mln przesyłek zawierających materiały radioaktywne. Ich wartość sięga miliardów dolarów. Aktywności transportowanych materiałów są bardzo różne – od bardzo wysokich do tylko nieznacznie przekraczających poziom promieniowania naturalnego.



Pojazdy przewożące materiały promieniotwórcze powinny być oznakowane nalepką ostrzegawczą z charakterystyczną czarną „koniczynką”. Umieszczona na nalepce cyfra jest międzynarodowym oznaczeniem materiałów promieniotwórczych przyjętym przez ONZ.

Na pojeździe powinien znajdować się również znak ostrzegawczy w postaci prostokątnej pomarańczowej tablicy. Podczas transportu niektórych materiałów promieniotwórczych na tablicy tej będą umieszczone liczby określające numer rozpoznawczy materiału i numer rozpoznawczy zagrożenia wg klasyfikacji ONZ.



Szczególne środki bezpieczeństwa muszą być podejmowane w przypadku transportu odpadów wysokoaktywnych. Do tego celu skonstruowano specjalne **pojemniki na „wypalone” paliwo jądrowe**. Jeśli grasz na instrumencie muzycznym w zespole, prawdopodobnie zabierasz go do szkoły wetui, aby nie zniszczył się. Taki sam cel mają wspomniane pojemniki. Oba są specjalnie wykonane w celu ochrony ich zawartości. Pojemnik transportowy musi również chronić ludzi i środowisko przed promieniowaniem jonizującym, emitowanym przez paliwo, które jest w środku. Inżynierowie tak projektują pojemniki (grube ściany wykonane z odpowiednich materiałów), aby nie umożliwiały wydostawanie się ani promieniowania gamma, ani neutronowego i bardzo dobrze przewodziły ciepło.

Pojemnik na wypalone paliwo musi być na tyle mocny, aby wytrzymać nawet najgorsze wypadki transportowe. Aby upewnić się, że działają tak, jak powinny, naukowcy i inżynierowie przeprowadzają testy zderzeniowe. Za pomocą szybkich kamer sprawdza się, co stanie się z pojemnikami podczas bardzo poważnego wypadku. Testy obejmują m.in. roztrzaskanie ciężarówką z pojemnikiem o betonową barierę z prędkością ponad 100 kilometrów na godzinę, upadek z wysokości 9 metrów na powierzchnię twardą, upadek z wysokości 1 metra na stalowy przebijak o średnicy 15 cm i wysokości minimum 20 cm., wytrzymałość na ogień przez 30 minut, przy minimum 800°C, zanurzenie w wodzie na 15 godzin, na głębokości 15 m, lub zanurzenie przez 1 godz. do głębokości 200 m. We wszystkich testach pojemniki ochroniły ich zawartość, mimo że pojazdy, czy pociągi, na których się znajdowały zostały zniszczone.

**POJEMNIK  
TRANSPORTOWY  
WYPALONEGO  
PALIWA (WYŻEJ)  
ORAZ TEST  
WYTRZYMAŁOŚCIOWY  
NA ZDERZENIE  
Z BETONOWĄ  
PRZESZKODĄ  
Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ  
(NIŻEJ)**

# Postępowanie z wypalonym paliwem jądrowym

Kasety paliwowe mogą być zazwyczaj używane w reaktorze jądrowym przez kilka lat, zanim zużyją się i zostaną wymienione. W tym czasie są kilkakrotnie przenoszone z jednej strefy w rdzeniu do innej, według ściśle wyznaczonego planu.

Zużyte pręty paliwowe mają inny skład niż wcześniej – ostatecznie część uranu została przez rozszczepienie jego jąder atomowych przekształcona w izotopy wielu innych pierwiastków. „Wypalone” paliwo składa się z około 96 % z uranu, z ok. 3 % z produktów rozszczepienia i z ok. 1 % z izotopów plutonu.

Gdy kasety paliwowe zostają wyjęte z rdzenia, nie można ich od razu wywieźć z elektrowni – najpierw muszą być przez co najmniej rok tymczasowo składowane w basenie wodnym obok reaktora (w tzw. „basenie przechowawczym” lub „basenie technologicznym”). Dlaczego tak się dzieje?

Zużyte paliwo jądrowe może być poddane **recyklingowi** i ponownie wykorzystywane w reaktorze.



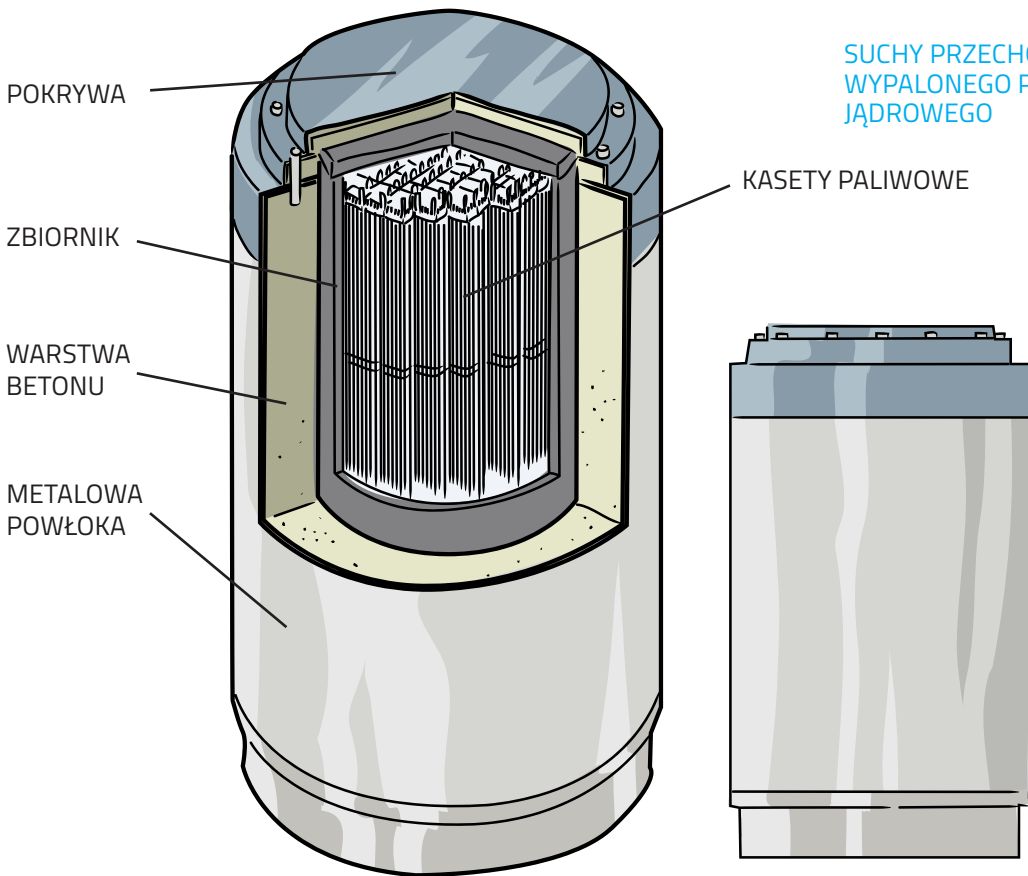
„Wypalone” elementy paliwowe posiadają bardzo wysoką aktywność właściwą (wyrażaną w Bq/kg), a tym samym również wysoką zdolność wytwarzania ciepła. Najpierw elementy paliwowe umieszczane są w wypełnionym wodą zbiorniku w obrębie elektrowni jądrowej. Woda niemal całkowicie osłania personel i otoczenie przed promieniowaniem, i jednocześnie przejmuje stale wytwarzane ciepło. Po 12 miesiącach przechowywania składowania aktywność i zarazem produkcja ciepła spadają do około 0,1 % wartości początkowej.

Istnieją teraz dwie drogi postępowania z „wypalonym” paliwem jądrowym:

1. **cykl paliwowy zamknięty**: kasety paliwowe mogą być poddane dalszemu przerobowi w zakładach przetwórczych – na przykład we Francji, w La Hague – aby wydzielić pozostały U-235 i powstały izotop plutonu Pu-239, które można ponownie wykorzystać przy produkcji nowych elementów paliwowych.
2. **cykl paliwowy otwarty**: jeżeli nie przewiduje się przerobu wypalonego paliwa, przygotowywane jest ono do ostatecznego składowania. Wstępnym jego etapem jest wieloletnie, przejściowe magazynowanie tego paliwa na terenie elektrowni jądrowych.



## SUCHY PRZECHOWALNIK WYPALONEGO PALIWA JĄDROWEGO

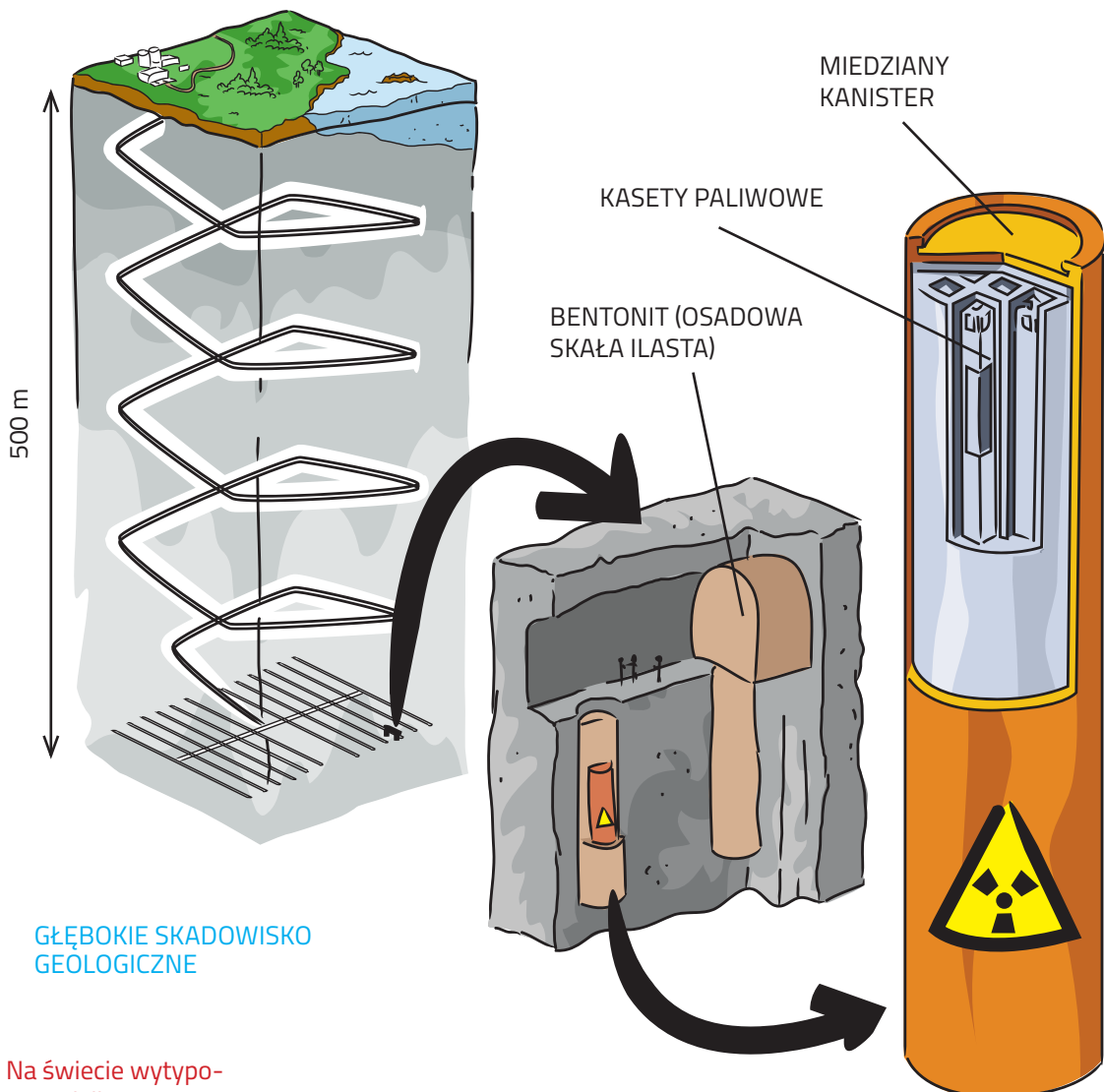


### Przerób „wypalonego” paliwa jądrowego

„Wypalone” elementy paliwowe zostają najpierw pocięte na kawałki o długości 5 centymetrów, a ich zawartość zostaje rozpuszczona we wrzącym kwasie azotowym ( $\text{HNO}_3$ ). Powstaje wtedy mieszanina azotanów. Następnie przez proces fizyczno-chemiczny oddziela się trzy komponenty: uran, pluton i produkty rozszczepienia/aktynowce. Ponieważ „wypalone” elementy paliwowe są silnie promieniotwórcze, przeróbkę należy przeprowadzać w komorach, nazywanych „komorami gorącymi, osłoniętymi grubymi, betonowymi ścianami. Prace przeprowadzane są za pomocą zdalnie sterowanych narzędzi i mogą być obserwowane przez okna z grubego szkła ołowiowego.

Oddzielony pluton wraz z zubożonym uranem lub z uranem naturalnym zostaje przetworzony na tlenkowe elementy paliwowe i może być ponownie zastosowany w reaktorze. Oddzielony uran, w celu późniejszego użycia, zostaje albo ponownie wzbogacony, albo zmieszany z już istniejącym wzbogaconym materiałem i przetworzony na nowe elementy paliwowe.

Oddzielone, wytwarzające ciepło odpady zostają stopione w szklane bloki (a dokładniej, z materiałami tworzącymi szło, w nierozpuszczalną szklaną matrycę), po czym wypełnia się nimi stalowe cylindry, które są następnie dokładnie spawane. Koszulki prętów paliwowych oraz części strukturalne elementów paliwowych zostają zgniecione za pomocą prasy i spakowane w celu składowania.



### GŁĘBOKIE SKŁADOWISKO GEOLOGICZNE

Na świecie wytypowano kilka miejsc na potrzeby głębokiego składowiska geologicznego, które spełniają wymogi bezpieczeństwa. Są to na przykład dawne kopalnie soli czy skały granitowe. Przede wszystkim są to miejsca, do których nie dociera woda. Dzięki temu mamy pewność, że substancje promieniotwórcze nie wydostaną się do środowiska.

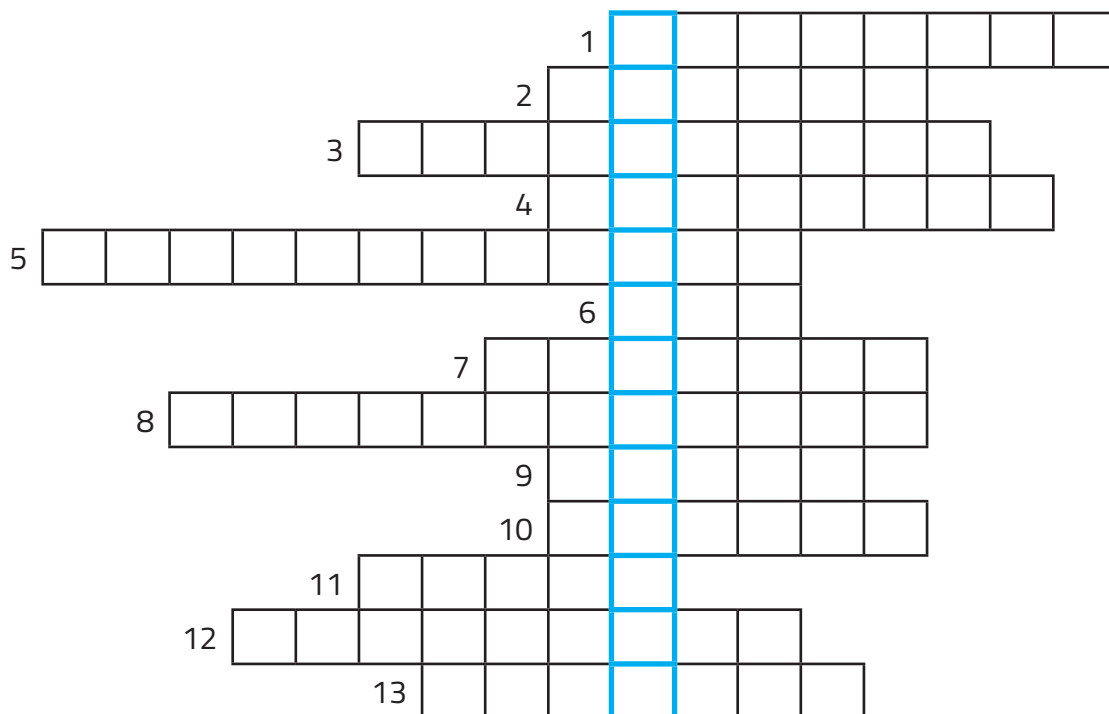
### Bezpośrednie składowanie „wypalonego” paliwa jądrowego

Innym sposobem usuwania zużytych elementów paliwowych jest ich bezpośrednie składowanie w składowiskach geologicznych, głęboko pod ziemią. W tym przypadku „wypalone” elementy paliwowe są traktowane jako odpady, a nie jako surowiec wtórny.

Elementy paliwowe po zużyciu pozostają tak długo w znajdującym się na terenie elektrowni, wypełnionym wodą basenie, aż wytwarzanie ciepła zmaleje na tyle, że mogą one być przeładowane do suchych przechowalników i zabrane na tymczasowe składowisko odpadów radioaktywnych.

Podczas przechowywania elementy paliwowe stygną. Po okresie około 40 lat mogą być ostatecznie składowane. Wcześniej jednak muszą być odpowiednio przygotowane. Wypalone elementy paliwowe zostają ponownie wyładowane z przechowalników tymczasowych, a następnie zapakowane do specjalnych, miedzianych kanistrów. Tak przygotowane pojemniki umieszczane są w składowisku geologicznym 500 m pod ziemią.

# Krzyżówka



1. Forma paliwa jądrowego w postaci walca o średnicy ok. 8 mm i wysokości ok. 1 cm.
2. Jeden z typów cząstek budujących jądra atomowe.
3. Rodzaj promieniowania, które może wybić elektrony z atomu, tworząc naładowane elektrycznie cząstki, zwane jonami.
4. Główne, „cywilizacyjne” źródło promieniowania jonizującego.
5. Jeden z dwóch procesów przetwarzania odpadów stałych stosowanych w ZUOP.
6. Pierwiastek, którego jądra atomowe tworzą cząstki promieniowania alfa.
7. Atomy tego samego pierwiastka o różnej liczbie neutronów w jądrze.
8. Ostatni etap przetwarzania odpadów ciekłych w ZUOP.
9. Promieniotwórczy gaz, naturalnie występujący na Ziemi.
10. Jeden z pierwiastków, którego wybrane izotopy mogą być paliwem w reaktorze jądrowym.
11. Miejscowość, w której znajduje się jedyne w Polsce składowisko odpadów promieniotwórczych.
12. Jedna z metod postępowania z wypalonym paliwem jądrowym, polegająca na poddaniu go przerobowi i ponownym wykorzystaniu izotopów uranu i plutonu w nowych elementach paliwowych.
13. Urządzenie, w którym zachodzi kontrolowana reakcja łańcuchowa rozszczepienia jąder atomów uranu.



# Słowniczek trudnych pojęć

**Aktynowce** – grupa pierwiastków metalicznych o podobnych właściwościach, trudnych do rozdzielenia. Są to najcięższe pierwiastki, zaczynając od aktynu ( $Z = 89$ ), a kończąc na lorensie ( $Z = 103$ ). Spośród nich sześć (aktyn, tor, protaktyn, uran, neptun i pluton) znajduje się w przyrodzie; dwa ostatnie w ilościach mikrośladowych. Dlatego neptun i pluton uważa się za pierwiastki sztuczne.

**Basen przechowawczy (lub technologiczny)** – basen wodny zlokalizowany tuż obok rdzenia reaktora badawczego lub energetycznego, w którym przechowywane są tymczasowo, po wyjęciu z rdzenia, elementy paliwowe.

**Koszulki prętów paliwowych** – rura, w której umieszcza się pastylki paliwowe w celu ochrony przed korozją i jako bariera dla zapobiegająca wydostawaniu się produktów rozszczepienia z paliwa. Materiałami używanymi na koszulki paliwowe są stopy cyrkonu lub magnezu. Grubość warstwy koszulki paliwowej wynosi ok. 0,5 do 1,5 mm.

**Mion** – nietrwała cząstka elementarna. Znane są dwa rodzaje tych cząstek: mion dodatni i ujemny. Masa mionu jest 206 razy większa od masy spoczynkowej elektronu. Czas życia mionu wynosi zaledwie 2 mikrosekundy, po czym rozpada się on na elektron, neutrino i antyneutrino.

**Piony** – inaczej mezon pi. Mezony to nietrwałe cząstki elementarne, o masie pośredniej między masą elektronu a masą protonu.

**Pluton** – sztuczny pierwiastek promieniotwórczy (wszystkie jego izotopy są radioaktywne) z grupy transuranowców o symbolu Pu. Pluton jest srebrzystobiałym metalem, dość aktywnym chemicznie i silnie trującym. Powstaje w paliwie jądrowym podczas pracy reaktora. W specjalnych zakładach przerobu wydziela się ze zużytego paliwa jądrowego izotop Pu-239, który po dodaniu do uranu, tworzy nowe, świeże paliwo do elektrowni jądrowych.

**Pręt paliwowy** – paliwo jądrowe uformowane w pręty, pokryte szczelną powłoką metalową, zwaną koszulką. Pręty paliwowe do reaktorów energetycznych grupuje się w zestawy, tworząc kasety paliwowe.

**Produkty rozszczepienia** – mieszanina izotopów, w większości promieniotwórczych, powstałych w wyniku rozszczepienia ciężkich jąder, tj. fragmentów rozszczepienia, a następnie ich rozpadu. W mieszaninie produktów rozszczepienia jest około 200 izotopów promieniotwórczych. Wskutek bardzo różnych okresów połowicznego rozpadu tych izotopów skład mieszaniny ulega ciągłej zmianie.

**Radon** – pierwiastek promieniotwórczy (wszystkie jego izotopy są radioaktywne) o symbolu Rn. Radon jest gazem bezbarwnym i bezwonnym, który nie tworzy związków chemicznych, jest to gaz szlachetny. Najbardziej znane jego izotopy, naturalnie występujące na Ziemi to: toron (Rn-220) oraz radon-222.



**Reakcja rozszczepienia** – przemiana jądrowa, spontaniczna lub wywołana przez neutrony, polegająca na rozpadzie ciężkich jąder atomowych na dwa (rzadziej więcej) fragmenty. Reakcja rozszczepienia została odkryta w 1938 roku przez Hahna i Strassmana. W procesie tym całkowita masa produktu maleje, co zgodnie z równaniem Einsteina  $E=mc^2$ , co równoznaczne jest z wydzieleniem energii. Reakcji rozszczepienia towarzyszy także emisja 2-5 neutronów, które w przypadku dostatecznej ilości uranu lub plutonu są w stanie podtrzymać ten proces, dzięki zainicjowanej reakcji łańcuchowej.

**Reaktor jądrowy** – urządzenie pozwalający w sposób kontrolowany wykorzystywać energię cieplną i energię promieniowania jądrowego, wydzielane w procesie rozszczepienia jąder atomów uranu lub plutonu, które w tym przypadku są paliwem jądrowym.

**Rdzeń reaktora** – centralny obszar reaktora jądrowego, wewnątrz którego zachodzi reakcja łańcuchowa. Rdzeń reaktora otoczony jest reflektorem, który zapobiega nadmiernej ucieczce neutronów z tej przestrzeni. W rdzeniu oprócz elementów paliwowych znajduje się także moderator (służący do spowalniania neutronów - np. woda lub grafit), chłodziwo (zwykle woda) oraz pręty regulacyjne i bezpieczeństwa (służące do sterowania reakcją łańcuchową).

**Toron** – dawna nazwa radonu-220, naturalnego izotopu promieniotwórczego radonu. Toron jest bardzo nietrwałym izotopem o czasie połowicznego rozpadu 55,3 s, emitującym cząstki alfa. Jest to gaz promieniotwórczy, występujący w przyziemnych warstwach powietrza w ilości ok. 10 razy mniejszej niż radon-222. Powyżej 10 m nad powierzchnią Ziemi toronu prawie już nie ma, gdyż zdąży się rozpaść.

**Uran wzbogacony** – uran, w którym zawartość izotopu U-235 jest większa od 0,714 %, tj. od zawartości tego izotopu w uranie naturalnym. W elektrowni jądrowej uran wzbogacony jest maksymalnie do ok. 5 %, w reaktorach badawczych do 20%.

**Uran zubożony** – uran, w którym zawartość izotopu U-235 jest mniejsza od 0,714 %, tj. od zawartości tego izotopu w uranie naturalnym.

## Gdzie znaleźć więcej informacji?

Co roku Państwowa Agencja Atomistyk publikuje raport roczny, w którym znajdują się informacje i dane statystyczne o wytwarzaniu i unieszkodliwianiu odpadów promieniotwórczych w Polsce:  
[www.paa.gov.pl](http://www.paa.gov.pl)

Więcej informacji o postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi można znaleźć przede wszystkim w literaturze w języku angielskim. Polecamy szczególnie:

1. Steven B. Krivit, Jay H. Lehr Thomas B. Kingery: **Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology, and Applications**, wydawnictwo John Wiley & Sons, Inc., 2011;
2. Vladimir Balek: **Radioactive Waste Management. Overview of Waste Management in Central and Eastern European Countries**, wydawca: Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, książka dostępna on-line,
3. Nicholas Tsoulfanidis: **The Nuclear Fuel Cycle**, wydawca: American Nuclear Society, 2013



Za całokształt postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce odpowiada Przedsiębiorstwo Państwowe Użyteczności Publicznej – Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP), które zostało utworzone na mocy Prawa atomowego w dniu 1 stycznia 2002. ZUOP, zgodnie z zapisami Prawa atomowego, jest powołany do wykonywania działalności w zakresie postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym, a przede wszystkim do zapewnienia stałej możliwości składowania odpadów promieniotwórczych.

W zakresie działalności ZUOP jest odbiór, transport, przechowywanie i składowanie materiałów jądrowych, źródeł promieniotwórczych oraz innych substancji promieniotwórczych. ZUOP ma siedzibę w Otwocku przy ulicy Andrzeja Sołtana 7, posiada także oddział zamiejscowy

w Różanie przy ulicy Przemysłowej 10 (Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych).

Nadzór nad ZUOP sprawuje Minister Energii.

Historia postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce zaczyna się wraz z uruchomieniem badawczego reaktora jądrowego Ewa w roku 1958. W roku 1960 w ramach organizacyjnych Instytutu Badań Jądrowych powstaje Centrala Odpadów Promieniotwórczych, a następnie po wielu przekształceniach organizacyjnych Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych. ZUOP jest bezpośrednim spadkobiercą tych wieloletnich doświadczeń i wiedzy.

**Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych**  
[www.zuop.pl](http://www.zuop.pl)



Fundacja FORUM ATOMOWE powstała z myślą o szeroko pojętej działalności informacyjnej i edukacyjnej w dziedzinie pokojowego wykorzystania energii atomowej, promocji fizyki i nauk pokrewnych, a także idei budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej.

Fundację FORUM ATOMOWE stanowi zespół młodych, aktywnych i ambitnych ludzi, specjalistów w swoich dziedzinach, m.in. w fizyce jądrowej, ochronie radiologicznej, energetyce.

Fundacja realizuje kilka ciekawych i wartościowych projektów - największy - „Atomowy Autobus - Mobilne Laboratorium”, a także „Spotkania z Energią Atomową”, „Szkolna Radiologiczna

Mapa Polski”, magazyn „Forum Atomowe”, portal popularnonaukowy [energijadrowa.pl](http://energijadrowa.pl) oraz platforma e-learningowa Nukleo.pl.

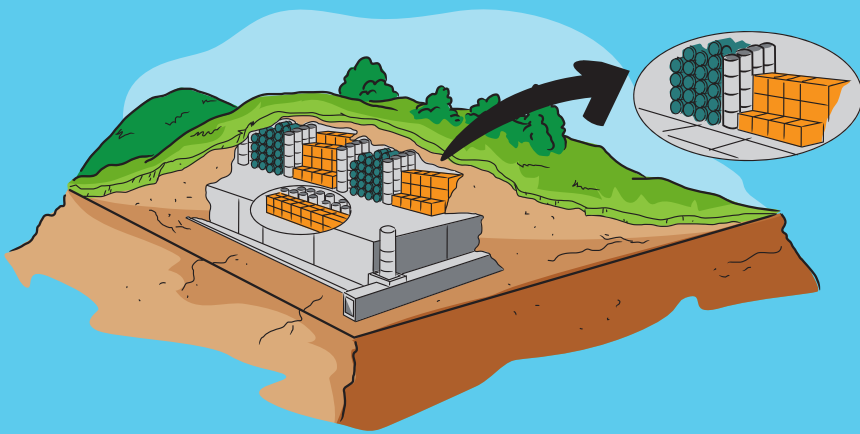
Wolontariusze Fundacji trwają w przekonaniu, że tylko poprzez rzetelną, wszechstronną informację i edukację oraz szeroki bezpośredni udział społeczeństwa w debatach publicznych można uzyskać pełne poparcie dla budowy elektrowni jądrowej w Polsce oraz w innych krajach, które podejmują podobne wyzwanie.

**Fundacja FORUM ATOMOWE**  
[www.forumatomowe.org](http://www.forumatomowe.org)  
[fundacja@forumatomowe.org](mailto:fundacja@forumatomowe.org)

ISBN 978-83-960557-4-3



9 788396 055743



ZU  P

FUNDACJA  
FORUM ATOMÓWE 