

spotkanie z promieniotwórczością



Ludwik Dobrzyński
Ewa Droste
Robert Wołkiewicz
Łukasz Adamowski
Wojciech Trojanowski

listopad 2010



INSTYTUT PROBLEMÓW JĄDROWYCH im. Andrzeja Sołtana
THE ANDRZEJ SOŁTAN INSTITUTE FOR NUCLEAR STUDIES

Spotkanie z promieniotwórczością

wydanie drugie poprawione i rozszerzone.

*Broszura powstała we współpracy
z Państwową Agencją Atomistyki.*



Od autorów:

Nasze opracowanie adresowane jest do wszystkich, ponieważ wszyscy spotykamy się na co dzień z promieniowaniem jonizującym i zjawiskami promieniotwórczości.

Od początku istnienia Ziemi występowały na niej izotopy promieniotwórcze, z których część do dziś zdążyła się już rozpaść.

Promieniowanie kosmiczne "od zawsze" wytwarza w atmosferze ziemskiej promieniotwórcze izotopy np. wodoru i węgla.

Niektóre izotopy promieniotwórcze docierają do nas bezpośrednio z kosmosu.

Wszystkie pierwiastki chemiczne posiadają izotopy, z których część jest promieniotwórcza.

Promieniotwórczym jest więc nie tylko nasze otoczenie, ale i nasze własne ciało.

Od wielu lat świadomie wykorzystujemy zjawisko promieniotwórczości w bardzo wielu dziedzinach życia - w nauce, medycynie, przemyśle oraz energetyce - o czym skrótowo traktuje poniższy tekst.

Pragniemy tu przypomnieć, że ani promieniowanie jonizujące, ani promieniotwórczość nie są żadnym wynalazkiem. Istnieją od niepamiętnych czasów - ponad 100 lat temu zostały odkryte i obecnie wiemy jak je rejestrować, badać i stosować.

**Ludwik Dobrzyński
Ewa Droste
Robert Wołkiewicz
Łukasz Adamowski
Wojciech Trojanowski**

SPIS TREŚCI

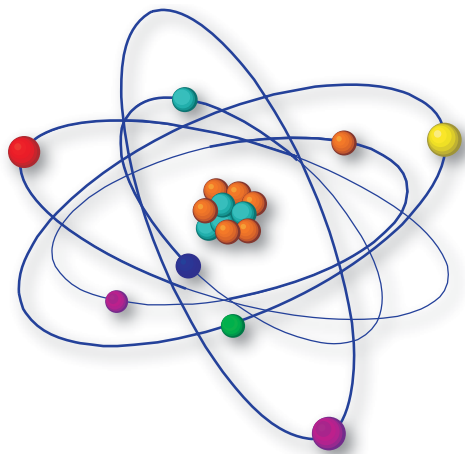
1. MATERIAŁY PROMIENIOTWÓRCZE.....	4
1.1. CZYM JEST MATERIAŁ PROMIENIOTWÓRCZY I CO SIĘ Z NIM DZIEJE W CZASIE?.....	4
1.2. OBIEG MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W PRZYRODZIE.....	5
2. PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE.....	7
2.1. WSTĘP.....	7
2.2. ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO.....	9
2.3. JAK MIERZYMY PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE?.....	11
2.4. WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA KOMÓRKI ORGANIZMÓW ŻYWYCH.....	13
2.5. WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ZDROWIE.....	14
2.6. JAK OCHRONIĆ SIĘ PRZED PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM?.....	15
2.7. BIOLOGICZNY CZAS POŁOWICZNEGO ZANIKU.....	16
3. ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO I MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH.....	17
3.1. RADIOIZOTOPOWE METODY POMIAROWE.....	17
3.2. TECHNIKI RADIACYJNE.....	19
3.3. ANALIZA AKTYWACYJNA.....	20
3.4. BADANIA WIEKU OBIEKTÓW, CZYLI DATOWANIE.....	22
3.5. ZASTOSOWANIA IZOTOPÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W MEDYCYNIE.....	22
3.6. KRÓTKIE PODSUMOWANIE.....	23
3.7. UZUPEŁNIENIE 1: Przykłady przemysłów, w których dochodzi do zwiększenia narażenia na promieniowanie jonizujące, pochodzące z naturalnych źródeł.....	23
3.8. UZUPEŁNIENIE 2: Przykłady zastosowania niektórych izotopów promieniotwórczych	24
4. ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE I POSTĘPOWANIE Z NIMI.....	26
4.1. RODZAJE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH.....	26
4.2. PODSTAWOWE ZASADY POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI.....	26
4.3. WYBÓR MIEJSCA NA SKŁADOWISKO ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH.....	27
4.4. TRANSPORT ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH.....	28
4.5. UNIESZKODLIWIANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W POLSCE.....	28
4.6. SKŁADOWANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W POLSCE	29
4.7. PODSUMOWANIE	30
5. ENERGIA JĄDROWA.....	31
5.1. ENERGIA ZAWARTA W JĄDRZE ATOMOWYM.....	31
5.2. ENERGETYKA JĄDROWA.....	33
5.3. ZAPASY URANU I NIEZALEŻNOŚĆ SUROWCOWA.....	34
5.4. REAKTOR JĄDROWY I JEGO ELEMENTY.....	35
5.5. ELEKTROWNIA JĄDROWA, REAKTORY ENERGETYCZNE I ICH BEZPIECZEŃSTWO.....	36
5.6. RYZYKO PRZECIEŻ ISTNIEJE? A CO ROBIĆ Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI Z REAKTORA?.....	37
5.7. TECHNOLOGIA JUTRA: CZY MOŻEMY SPALAĆ ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE?.....	39
5.8. POSTĘPOWANIE Z WYPALONYM PALIWEM W POLSCE.....	41
5.9. SKŁADOWANIE WYPALONEGO PALIWA.....	42
5.10. TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA.....	43
5.11. ENERGIA TERMOJĄDROWA – NIEMAL NIEOGRANICZONE PRZYSZŁE ŹRÓDŁO ENERGII.....	43
5.12. UZUPEŁNIENIE 1: Wartość energetyczna materiałów	45
5.13. UZUPEŁNIENIE 2: Cykl paliwowy	45
TYPOWE DAWKI LUB ZAKRESY DAWEK.....	47
DAWKI GRANICZNE.....	47

1. MATERIAŁY PROMIENIOTWÓRCZE

1.1.

CZYM JEST MATERIAŁ PROMIENIOTWÓRCZY I CO SIĘ Z NIM DZIEJE W CZASIE?

Jak wiemy, atomy składają się z trzech rodzajów cząstek: **protonów, neutronów i elektronów**. Protony i neutrony (tworzące grupę **nukleonów**) upakowane są w **jądrze**, które zajmuje w atomie pozycję centralną, elektrony zaś okrążają jądro. Taki planetarny model atomu, jak na rysunku poniżej, chociaż niezbyt wiernie odzwierciedlający rzeczywistość, jest wystarczający dla naszych celów. Pamiętajmy, że promień atomu wynosi około 10^{-10} m, jądra około 10^{-15} m, a rozmiarów przestrzennych elektronu dobrze nie znamy: pośrednie pomiary określają górną granicę promienia elektronu na ok. 10^{-21} m.



W jądrach wszystkich atomów danego pierwiastka chemicznego znajduje się taka sama liczba protonów, możliwa jest natomiast różna liczba neutronów. Atomy z taką samą liczbą protonów, zawierające różne liczby neutronów nazywamy **izotopami**. Na przykład, wszystkie jądra atomów węgla mają 6 protonów, i choć większość z nich zawiera 6 neutronów, część z nich może mieć ich 7 lub 8. Dlatego też mówimy, że pierwiastek węgiel posiada następujące izotopy: ^{12}C , ^{13}C i ^{14}C , gdzie liczba poprzedzająca symbol pierwiastka chemicznego równa jest sumie liczb neutronów i protonów w jądrze. Z tych trzech izotopów jedynie ^{14}C jest promieniotwórczy (radioaktywny).

Przyjęto opisywać izotop danego pierwiastka podając jego symbol chemiczny, liczbę protonów **Z** oraz liczbę nukleonów **A** (suma liczb protonów i neutronów). Każdy atom danego pierwiastka zawiera **Z** elektronów, które decydują o jego właściwościach chemicznych, często więc w zapisie symbolu izotopu opuszczamy Z, ponieważ podanie symbolu chemicznego jednoznacznie określa tę liczbę. Piszemy więc $^{12}_6\text{C}$ albo ^{12}C , a ogólnie



gdzie **X** oznacza symbol danego pierwiastka chemicznego.

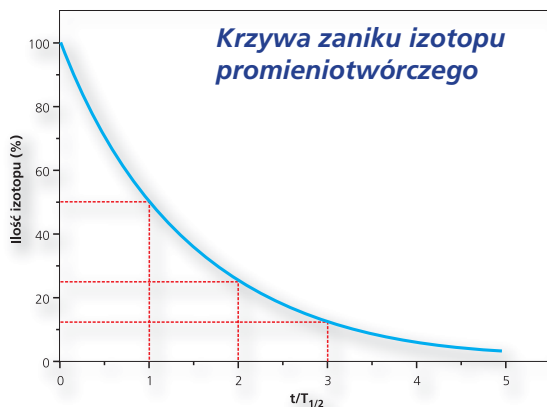
Jądra o nadmiarze energii (mówimy o nich, że są wzbudzone) wysyłają energię w postaci promieniowania jonizującego, które może przybierać postać cząstek **alfa** (α), czyli jąder helu ^4He , cząstek **beta** (β), czyli elektronów lub fotonów **gamma** (γ). Promieniowanie to, któremu poświęcona jest część 2 naszej broszury, może wywoływać efekty dobroczynne lub szkodliwe dla zdrowia. Proces samorzutnego wysyłania energii w postaci promieniowania jonizującego nazywamy **promieniotwórczością** (lub radioaktywnością), a **rozpadem promieniotwórczym** nazywamy spontaniczną przemianę jądra atomowego z emisją energii – w postaci cząstek i/lub fotonów.

Materiał promieniotwórczy to właśnie taki, w którym znajdują się jądra wysyłające promieniowanie jonizujące. Po pozbyciu się nadmiaru energii jądra atomów stają się na ogół trwałe (stabilne) i już dalej nie ulegają przemianom (rozpadowi). Promieniotwórcze izotopy danego pierwiastka nazywamy **radionuklidami** (**jądro atomu = nuklid**). Obok około 90 **naturalnych izotopów promieniotwórczych**, stale obecnych w naszym środowisku, potrafimy wytwarzać wiele izotopów promieniotwórczych drogą wywołania reakcji jądrowych. Izotopy takie nazywamy **sztucznymi**.

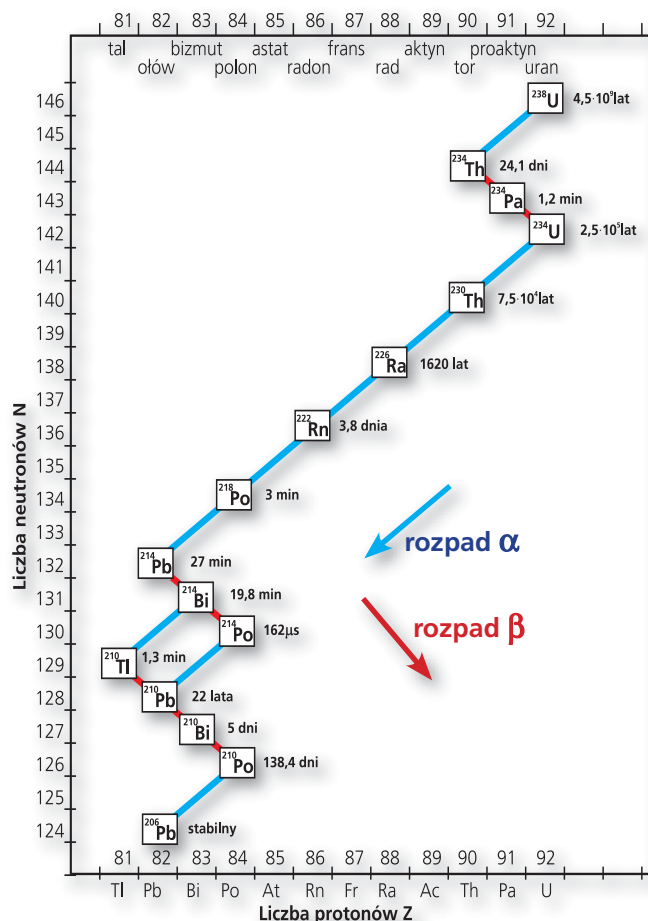
Nie jest rzeczą możliwą przewidzenie chwili, w której nastąpi rozpad pojedynczego jądra atomowego, gdyż proces ten ma charakter statystyczny. Można jedynie podać czas, w którym ulega przemianie średnio połowa jąder promieniotwórczych. Czas ten jest znany dla danego izotopu i nosi nazwę **czasu połowicznego rozpadu** lub **okresu półrozpadu** (oznaczany symbolem $T_{1/2}$). Może on być niezwykle krótki – ułamek nanosekundy (jednej miliardowej części sekundy), ale może też wynosić miliony i miliardy lat. Np. izotop jodu ^{131}I , który często stosowany jest w medycynie, ma czas połowicznego rozpadu wynoszący 8,04 dnia, podczas gdy dla izotopu ceszu ^{137}Cs , który łatwo możemy znaleźć w wypalonym paliwie jądrowym, okres ten wynosi 30,17 lat, a dla węgla ^{14}C , (używanego dla określania wieku znalezisk organicznych) aż 5730 lat.

Wg stanu wiedzy na jesień roku 2010 znamy właściwości ok. 3000 izotopów 117 pierwiastków. W przyrodzie stale występuje:

- ok. 15 radionuklidów pochodzenia kosmicznego, które albo stale przybywają do nas z głębi Wszechświata, albo pojawiają się w naszym środowisku jako produkty reakcji jądrowych wywołanych (w atmosferze) przez pierwotne promieniowanie kosmiczne;
- 260 trwałych (stabilnych) izotopów 81 pierwiastków;
- 29 radionuklidów "starszych niż Świat", o czasie połowicznego rozpadu porównywalnym z wiekiem Ziemi (i występujących na niej w ilościach wagowych);
- 45 radionuklidów z naturalnych szeregów promieniotwórczych toru ^{232}Th i izotopów uranu: ^{235}U oraz ^{238}U .



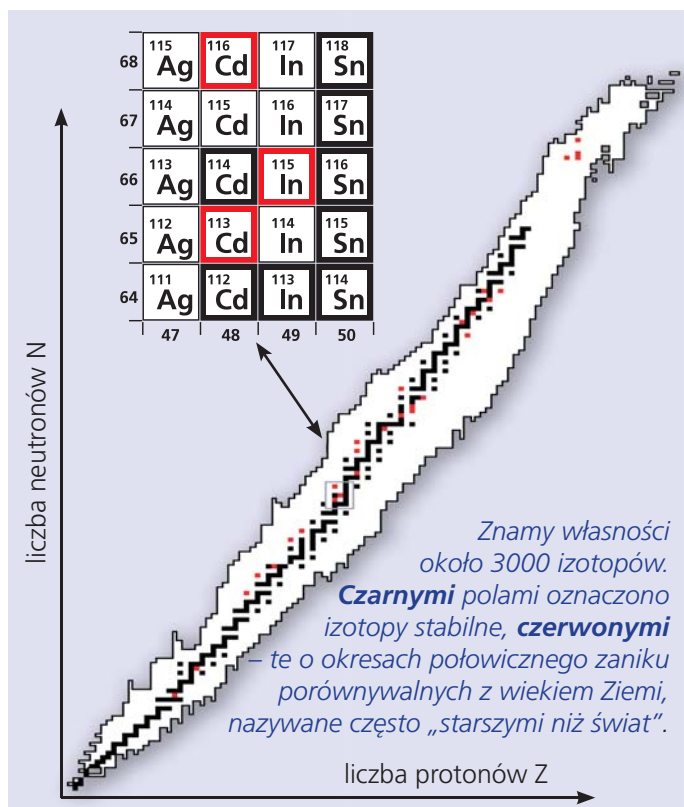
Rysunek zamieszczony wyżej ilustruje zmniejszanie się ilości izotopu promieniotwórczego w zależności od czasu mierzonego w krotnościach czasu połowicznego rozpadu. Rysunek ten w szczególności wyjaśnia, dlaczego nie znajdujemy obecnie w przyrodzie takich pierwiastków chemicznych jak technet **Tc** ($Z = 43$, $T_{1/2} < 10^6$ lat) oraz promet **Pm** ($Z = 61$, $T_{1/2} < 17,7$ lat), dla których czasy połowicznego rozpadu wszystkich izotopów są znacznie krótsze od wieku Ziemi (ocenianego na ok. 4,5 miliarda lat). Kolejny rysunek pokazuje schematycznie znane nam izotopy, w tym stabilne lub „starsze niż Ziemia” (odpowiednio czarne i czerwone kwadraty). Spośród stabilnych najcięższym jest bizmut ^{209}Bi ($Z=83$). Izotopy nazywamy „stabilnymi”, gdy nie potrafimy wykazać, że są promieniotwórcze (granica pomiaru $T_{1/2}$ wynosi niewiarygodnie dużo, bo ok. $10^{22} \div 10^{24}$ lat).



Szereg promieniotwórczy izotopu ^{238}U . Warto zauważyć, że izotop ^{214}Bi może rozpadać się na dwa sposoby i nigdy nie wiemy, który zostanie wybrany. Jedyne, co wiemy, to względne prawdopodobieństwo „drogi” danego rozpadu. Jest dla nas rzeczą niepojętą dlaczego natura postanowiła działać w taki statystyczny sposób.

1.2. OBIEG MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W PRZYRODZIE

Izotopy promieniotwórcze występują w naszym środowisku i w nas samych. Jeżeli wszystkie izotopy danego pierwiastka są promieniotwórcze, to taki pierwiastek nazywamy promieniotwórczym – takimi są technet, promet, rad, tor czy uran. Jako składnik biosfery jesteśmy stale pod wpływem działania promieniowania radionuklidów, niezależnie od tego, czy są one naturalne, czy wytworzone sztucznie przez człowieka. Te ostatnie, jeśli uwalniane są do środowiska, dodają się do istniejących tu radionuklidów naturalnych, będąc łącznie przyczyną ekspozycji człowieka na działanie promieniowania jonizującego. Radionuklidy mogą też powstawać w atmosferze poprzez procesy naturalne, np. promieniotwórczy izotop węgla ^{14}C powstaje przez oddziaływanie promieniowania kosmicznego z atmosferycznym azotem. Promieniowanie pochodzące z radionuklidów może oddziaływać na nasze ciało niezależnie od tego, czy źródło promieniowania jest wewnątrz nas czy poza naszym ciałem. Z tego względu powinniśmy wiedzieć, w jaki sposób radionuklidy przemieszczają się w środowisku i dostają do organizmów żywych. Jeśli drogi transportu radionuklidów są znane, możemy starać się przeciwdziałać ich przenikaniu do



Rozpad jądra nie zawsze oznacza przejście do jądra trwałego. Często rozpadające się jądro przechodzi w inne, również promieniotwórcze, a to z kolei może przejść w kolejne jądro promieniotwórcze, tworząc w ten sposób tzw. **szereg promieniotwórczy**. Możemy śmiało powiedzieć, że znamy dzisiaj wszystkie istotne szeregi promieniotwórcze, tj. znamy kolejność i okresy połowicznego rozpadu poszczególnych radionuklidów w łańcuchu oraz ilość energii wydzielanej na każdym etapie rozpadu. Na rysunku obok przedstawiony jest szereg promieniotwórczy izotopu uranu ^{238}U .

środowiska, jeżeli uznamy, że obecność substancji promieniotwórczych w naszym otoczeniu powinna pozostawać pod kontrolą.

Radionuklidy docierają do człowieka dokładnie w ten sam sposób, jak inne pierwiastki, a więc przez:

- powietrze,
- wodę, w tym wody gruntowe, a także
- łańcuch pokarmowy

i mogą więc zostać wchłonięte przez człowieka poprzez spożycie pokarmu (jedzenie lub picie), wdychanie albo przez skórę.

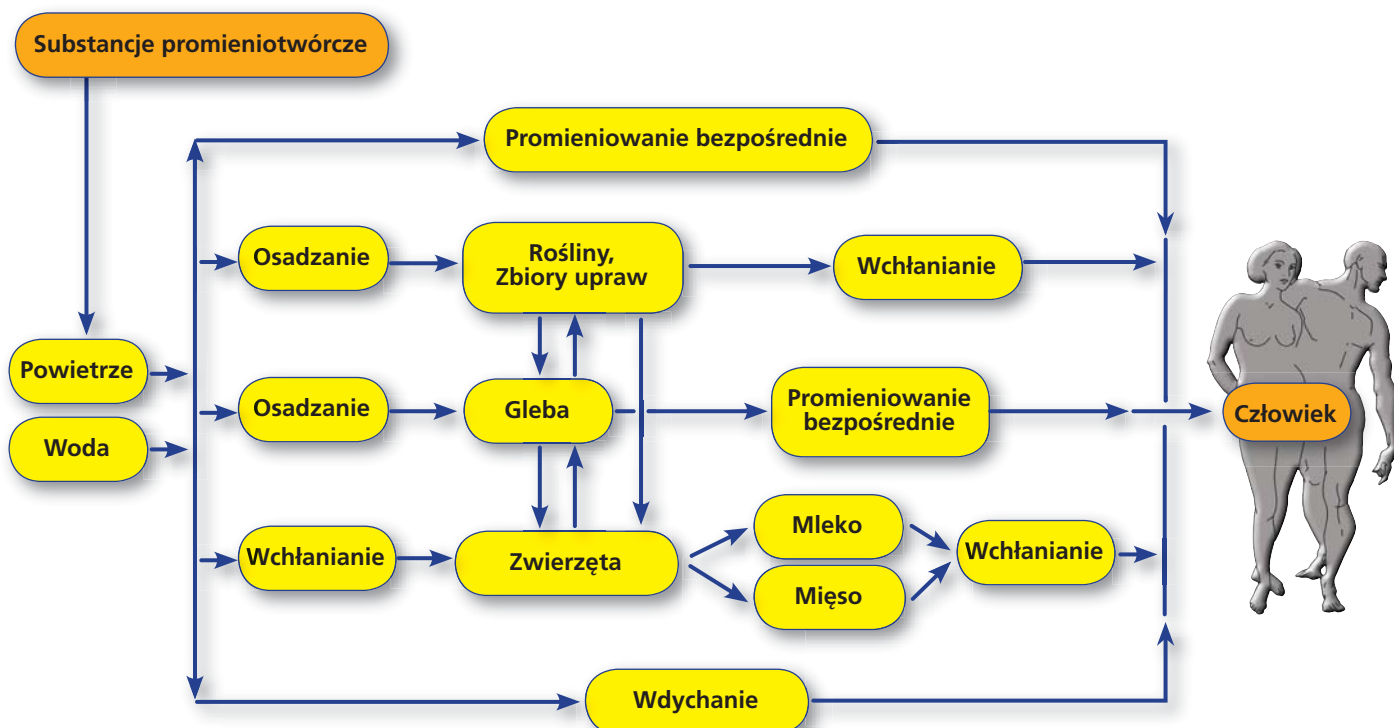
Radionuklidy pierwiastków gazowych są częścią atmosfery, inne mogą znaleźć się w zawiesinach i aerozolach atmosferycznych i są usuwane z powietrza na kilka sposobów. Opuszczają one atmosferę, jeśli prądy powietrzne nie będą w stanie utrzymać ich zawieszonych w powietrzu. Deszcz lub śnieg może je również stąd usunąć. Usunięte z powietrza radionuklidy mogą w szczególnym przypadku osiąść na ziemi, zostać wchłonięte przez glebę, osiąść na powierzchni istot żywych i przedmiotów, z którymi się często stykamy. Wiatr i parowanie powodują, że mogą też przebyć drogę odwrotną: z gleby i wód powierzchniowych do atmosfery.

Radionuklidy, które znajdują się w wodzie, mogą do niej trafiać na parę sposobów. Mogły one zostać osadzone z powietrza (patrz wyżej), mogą być skutkiem erozji gruntu, przesączania wody lub działalności człowieka, takiej jak np. górnictwo. Niektóre ze znajdujących się w wodzie będą wędrować razem z wodą, inne ugrzęzną w osadach dennych, co zależy od rozpuszczalności danego pierwiastka w wodzie oraz od zdolności radionuklidu do osadzania się na różnych powierzchniach obmywanych przez wodę.

Jak mówiliśmy, radionuklidy znajdujące się w powietrzu lub w wodzie mogą trafić do łańcucha pokarmowego człowieka. Np. rośliny przyswajają je z wody tak samo jak inne pierwiastki, a radionuklidy z powietrza mogą osadzać się na ich powierzchni. Część z nich będzie dostawała się do organizmu zwierząt zjadających te rośliny. Gdy zwierzęta piją wodę, część radionuklidów zawartych w wodzie też przedostanie się do ich organizmu. Naturalną więc drogą dostarczania ich do organizmu ludzkiego jest pokarm pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego (jak mleko, mięso, jaja).

W zasadzie wszystko, co jemy, zawiera radionuklidy. Woda, którą pijemy nie jest też od nich wolna. Te znajdujące się w powietrzu są wdychane przez nas i dostają się do płuc. Część z nich zostaje wprowadzie wydychana, ale część osadza się w tkance płucnej i oddziałuje na nią. Radionuklidy mogą także dostać się do naszych organizmów przez powierzchnię skóry (jej pory lub pęknięcia), lub w drodze zastrzyku - jako skutek postępowania medycznego, gdyż niektóre z nich zażywamy celowo w czasie procedur terapeutycznych lub diagnostycznych.

Istnienie omówionego wyżej obiegu materiałów promieniotwórczych w przyrodzie każe nam przechowywać odpady promieniotwórcze o niskiej aktywności w taki sposób, aby zminimalizować możliwość uwalniania się z nich radionuklidów do naturalnego środowiska człowieka. Dlatego też odpady są pakowane do szczelnych kontenerów, z których nie mogą wydostać się na zewnątrz, a samo składowisko musi znajdować się w terenie spełniającym takie warunki geologiczne i hydrogeologiczne, aby materiały promieniotwórcze zawarte w odpadach nie mogły przedostać się do powietrza czy do wody, a więc przeniknąć do ludzi poprzez np. łańcuch pokarmowy. Temu zagadnieniu poświęcona jest czwarta część niniejszego opracowania.



2. PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

2.1. WSTĘP

Nasza biosfera nasycona jest promieniowaniem różnego rodzaju, a wszystkie rodzaje promieniowania są nośnikami określonej energii. Fale radiowe, światło widzialne, mikro-fale stosowane w kuchenkach mikrofalowych i telefonach "komórkowych", promieniowanie nadfioletowe (dzięki któremu nasze ciało staje się opalone), promieniowanie podczerwone (którego ciepło wyraźnie czujemy), wreszcie promieniowanie rentgenowskie (które pozwala "zobaczyć" złamaną w wypadku kość), to wszystko przykłady **promieniowania elektromagnetycznego**, którego bogate widmo przedstawiamy obok. Promieniowanie o energii większej niż promieniowanie rentgenowskie nazywane jest **promieniowaniem gamma (γ)** i jest jednym z rodzajów **promieniowania jonizującego**. Promieniowanie gamma w naszej biosferze pochodzi bądź z rozpadów promieniotwórczych różnych radionuklidów, bądź jest jednym ze składników docierającego do nas promieniowania kosmicznego.

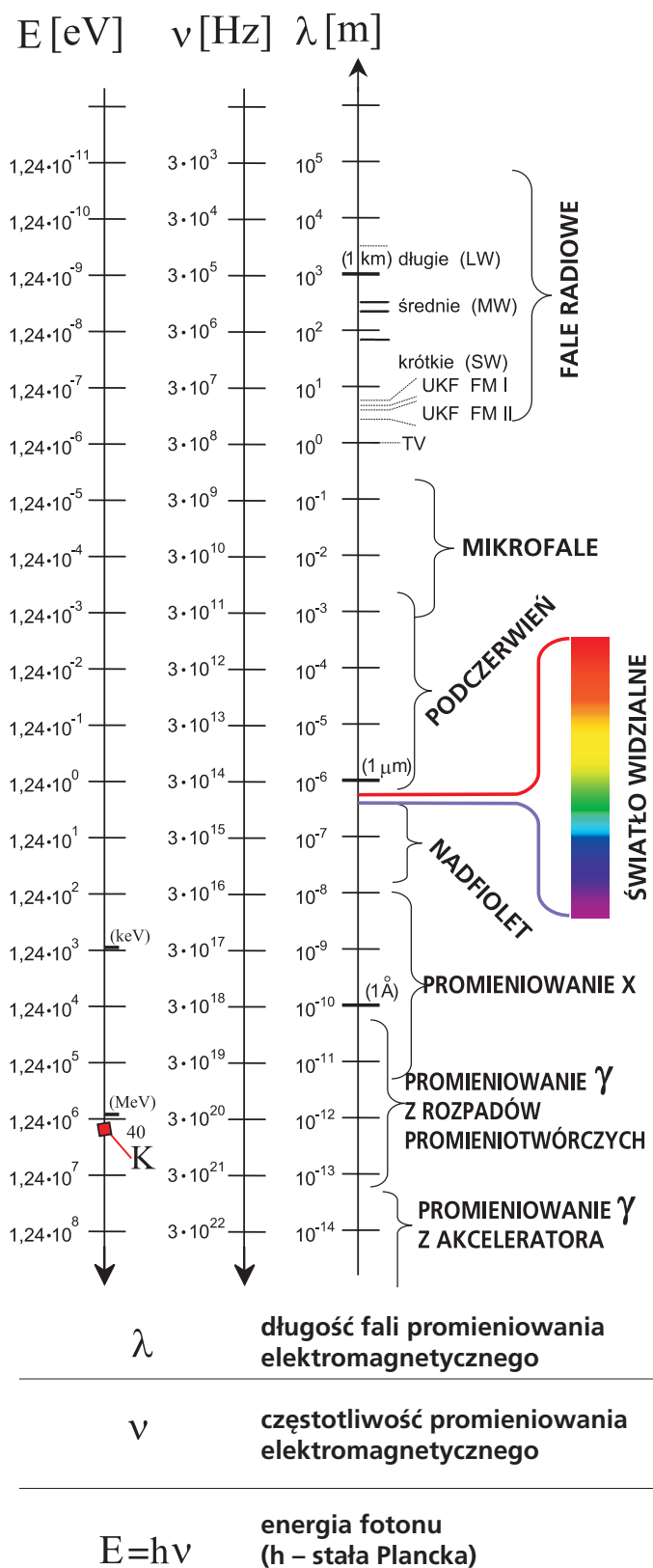
Z rysunku widać, jak niewielką część widma promieniowania elektromagnetycznego możemy bezpośrednio zobaczyć dzięki zmysłowi wzroku, czy poczuć dzięki wrażliwości skóry na ciepło. Do wykrywania większości zakresów znanego nam promieniowania elektromagnetycznego musimy używać aparatury pomiarowej dostosowanej do konkretnego zakresu widmowego. Dotyczy to również promieniowania jonizującego.

Jak napisaliśmy w podrozdziale 1.1 wyróżniamy trzy podstawowe rodzaje promieniowania jonizującego:

- **α (alfa):** promieniowanie korpuskularne, składające się z cząstek α będących jądrami helu (składającymi się z dwóch protonów i dwóch neutronów)
- **β (beta):** promieniowanie korpuskularne, składające się z elektronów swobodnych, tj. nie związanych z atomami
- **γ (gamma):** promieniowanie elektromagnetyczne.

Gdy promieniowanie jonizujące przechodzi przez ośrodek materialny, może ono, tracąc część swej energii, wybić elektron z orbity atomowej. W wyniku tego powstanie swobodny elektron (cząstka o ładunku ujemnym), a pozostała część atomu, pozbawiona elektronu, będzie miała ładunek dodatni - zostanie utworzony **jon** dodatni. Stąd pochodzi nazwa "promieniowanie jonizujące". Jony powstające w żywej tkance mogą spowodować jej uszkodzenie. Typowe energie jonizacji atomów lekkich pierwiastków wynoszą od kilku do kilkunastu elektronowoltów, energia potrzebna do dysocjacji wody to ok. 5 eV¹. Taka energia fotonów promieniowania elektromagnetycznego oznacza fale długości ok. 250 nm i częstotliwości ok. $1,2 \cdot 10^{15}$ Hz, czyli ok. miliarda MHz. Ze względu na częste pomyłki warto zauważyć, że zakresy mikrofal, stosowane w kuchenkach mikrofalowych i telefonii „komórkowej” to częstotliwości kilkuset MHz, a więc ani kuchenki mikrofalowe ani telefony komórkowe nie emitują promieniowania jonizującego.

Tworzenie jonów jest ważnym procesem fizycznym. Jony niosą ładunek elektryczny, można je więc stosunkowo łatwo zarejestrować. Umiemy dziś mierzyć tak niewielkie ilości promieniowania jonizującego, że możliwym się stało stwierdzenie efektów wywołanych nawet przez pojedynczy jon! Dzięki tym umiejętnościom możemy badać promieniowanie jonizujące wokół nas, tj. określić jego rodzaj i energię, jaką niesie.



¹ 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J; 1 keV = 10^3 eV; 1 MeV = 10^6 eV

Opisane wyżej trzy rodzaje promieniowania jonizującego różnią się zasadniczo swoim oddziaływaniem z materią. Częstka naładowana (**alfa** lub **beta**), przechodząc przez dany ośrodek zderza się z atomami ośrodka, jonizując je. Utrata energii na jonizację jest proporcjonalna do ładunku cząstki i jest tym większa, im mniejsza jest jej prędkość. Ponieważ ładunek cząstki alfa wynosi $+2e$, a elektronu $-e$, to cząstka alfa o tej samej prędkości co elektron straci więcej energii na tej samej drodze. Jeżeli cząstka alfa i elektron mają taką samą energię kinetyczną, to prędkość elektronu jest ok. 85 razy większa niż prędkość cząstki alfa, gdyż jego masa jest ok. 7300 razy mniejsza od jej masy. Widać więc, że cząstka alfa o takiej samej energii kinetycznej jak elektron będzie wielokrotnie efektywniej traciła swą energię na jonizację ośrodka.

Energie cząstek alfa, pochodzących z rozpadów promieniotwórczych znanych radionuklidów sztucznych i naturalnych, nie przekraczają 12 MeV, a ich średnia energia wynosi ok. 8 MeV. Cząstka alfa o takiej średniej energii przebędzie w powietrzu (gęstość ok. $0,0013 \text{ g/cm}^3$) 6,9 cm, podczas gdy w aluminium (gęstość $2,7 \text{ g/cm}^3$) zaledwie 0,0045 cm. W wodzie, papierze czy tkance ludzkiej, dla których gęstość wynosi ok. $1,0 \text{ g/cm}^3$, droga, na której zostaje utracona cała pierwotna energia cząstek alfa jest rzędu 0,01 cm. Cząstki alfa nie przejdą więc przez kartkę papieru o przeciętnej grubości. Tak krótka droga cząstek alfa w materii powoduje, że mogą one stać się groźne dla organizmu żywego jedynie wtedy, gdy dostaną się do jego wnętrza. To naskórek chroni nas przed „wtargnięciem” cząstek alfa z zewnątrz.

Maksymalne energie cząstek beta, czyli elektronów, pochodzących z rozpadów promieniotwórczych sięgają 14 MeV, energie średnie nie przekraczają zaś 0,8 MeV.

Zasięg² cząstek beta o energiach 0,8 MeV i 5 MeV w materii ilustruje poniższa tabela.

	Zasięgi (w cm)	
Materiał	E = 0,8 MeV	E = 5 MeV
Powietrze	220	2100
Plexi	0,3	2,2
Stal	0,045	0,53

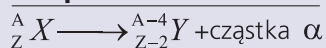
Wynika z niej, że zasięg cząstek beta w materii jest znacznie dłuższy niż droga cząstek alfa. Preparaty wysyłające cząstki beta będą więc groźne dla organizmu, gdy zostaną wchłonięte drogą pokarmową lub poprzez inhalację. Cząstki β^- - w przeciwieństwie do cząstek alfa - mogą przeniknąć przez ludzką skórę, której przeciętna grubość waha się od 0,2 mm do 0,5 mm.

Najbardziej przenikliwym promieniowaniem jonizującym jest **promieniowanie γ (gamma)**, czyli promieniowanie elektromagnetyczne o energii większej od energii promieni rentgenowskich. Procesy fizyczne, zachodzące przy przechodzeniu promieniowania gamma przez materię, powodują głównie zmianę jego intensywności. Chociaż maksymalne energie

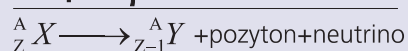
kwantów gamma emitowanych w rozpadach znanych, naturalnych i sztucznych radionuklidów nie przekraczają 6 MeV (są one więc niższe niż energie omówionych wyżej cząstek alfa i beta), to jednak o ich przenikliwości może świadczyć fakt, że płytka z ołowiu o grubości 0,8 cm pochłania zaledwie połowę promieniowania gamma o energii 1 MeV. Ten sam efekt wymaga 10 cm wody i 4 cm betonu. Warstwa ołowiu o grubości 10 cm przepuści ok. 0,02% strumienia promieniowania gamma o energii 1 MeV. Taką grubość ołowiu można zastąpić przez ok. 40 cm betonu lub ok. 100 cm wody. Możemy więc wykorzystywać te materiały w celu osłonięcia się przed promieniowaniem gamma, które łatwo przenika przez nasze ciało, a jeśli niesie znaczną energię, to może wpłynąć na stan wszystkich naszych narządów wewnętrznych. Na rysunku pokazano rodzaje i podstawowe cechy promieniowania jonizującego.

Podstawowe rodzaje promieniowania oraz ich charakterystyki

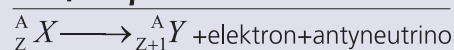
Rozpad α



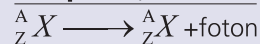
Rozpad β^+



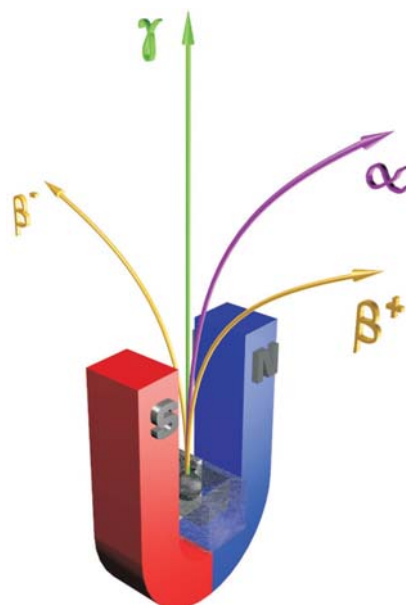
Rozpad β^-



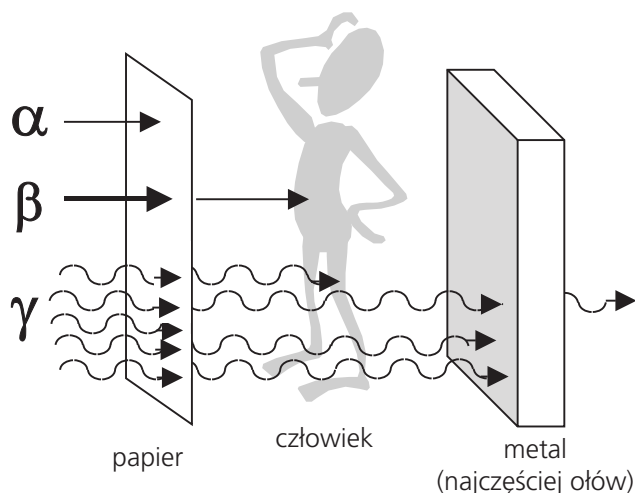
Rozpad γ



Promieniowanie w polu magnetycznym



² O ile cząstka alfa biegnie przez ośrodek w zasadzie po linii prostej, to elektrony często zmieniają swój kierunek, poruszając się po linii łamanej – im mniejsza energia kinetyczna, tym częściej elektron może zmienić kierunek ruchu. Definiujemy zasięg, jako głębokość penetracji w danym ośrodku (aż do zatrzymania cząstki). W wypadku cząstek alfa droga i zasięg cząstek są nierozróżnialne, dla elektronów zasięg jest zwykle mniejszy od długości drogi w ośrodku.



Innym oprócz omówionych wyżej rodzajów promieniowania jonizującego jest **promieniowanie neutronowe**, którego głównym źródłem są reaktory jądrowe. Neutrony są cząstkami elektrycznie obojętnymi, nie jonizują więc ośrodka bezpośrednio. Są one z reguły bardzo przenikliwe. Oddziałując z jądrami materii mogą wywołać reakcje jądrowe, w wyniku których powstaną cząstki naładowane lub fotony γ , a te z kolei mogą wywołać jonizację danego ośrodka. Neutrony mogą więc jonizować ośrodek pośrednio, a nie bezpośrednio, jak w wypadku promieniowania alfa lub beta³. Warto zauważyć, że swobodny neutron jest nietrwały - rozpada się na proton, elektron i antyneutrino z czasem połowicznego rozpadu wynoszącym $613,9 \pm 0,6$ s. Można łatwo obliczyć, że neutrony powstające w reakcjach jądrowych na Słońcu, mające nawet energię początkową rzędu kilkunastu MeV, a więc prędkość ok. 10^8 m/s, nie mają szans na dotarcie do Ziemi - rozpadają się "po drodze".

Wszystkie opisane wyżej rodzaje promieniowania jonizującego mogą być wytwarzane w urządzeniach służących medycynie, nauce i technice i zazwyczaj jest to promieniowanie o energii wielokrotnie wyższej, niż energia stale istniejącego w biosferze promieniowania naturalnego.

2.2. ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

Materiały promieniotwórcze nieodłącznie towarzyszą człowiekowi. Znajdują się one w jego środowisku, nie wyłączając własnego ciała człowieka. Materiały te stale wysyłają promieniowanie jonizujące, które stanowi, jak mówimy, **tło promieniowania**. Obecność promieniowania jonizującego może więc być jedynie ograniczana, a nie całkowicie eliminowana.

Spalanie paliw kopalnych (węgiel, ropa), zawierających zawsze niewielkie ilości pierwiastków promieniotwórczych, powoduje ich rozproszenie do atmosfery i wierzchnich warstw gleby. Hałdy popiołów stanowią w Polsce szczególny pejzaż. W każdej tonie popiołu ze spalonego węgla

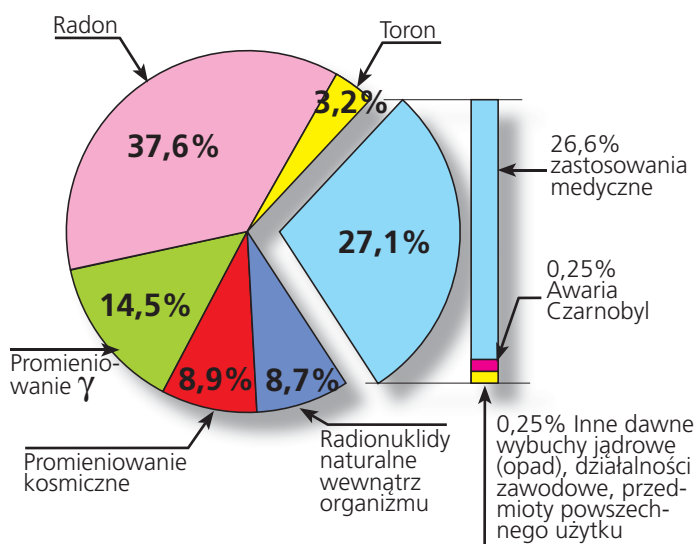


kamiennego zachodzi w każdej sekundzie 2 miliony rozpadów promieniotwórczych. Mówimy wtedy, że aktywność tony popiołu wynosi około 2 MBq⁴. Wytwarzanie promieniowania rentgenowskiego, wykorzystywanie energii jądrowej (zarówno w elektrowniach „atomowych” jak i w testach broni jądrowej), produkcja urządzeń zawierających substancje promieniotwórcze (dla potrzeb medycyny, nauki i techniki, patrz rozdz. 3.) powoduje także podwyższenie poziomu promieniowania w środowisku.

W jakim stopniu średnie narażenie ludności w Polsce na promieniowanie jonizujące pochodzi z poszczególnych źródeł pokazuje poniższy rysunek (w nawiasach podano procentowy udział źródła w całości ekspozycji w roku 2009)⁵.

Okolo 73% całego promieniowania pochodzi od samej przyrody!⁶ Reszta, tj. ok. 27% wiąże się z wykorzystaniem źródeł promieniotwórczych w medycynie i przemyśle wytwarzającym produkty codziennego użytku.

W jednostkach bezwzględnych, w 2009 r. średnia dawka (pojęcie dawki i jej jednostek w rozdz. 2.3.) dla Polski wynosiła 3,19 mSv (milisiwerta) rocznie.



Procentowy wkład do dawki promieniowania w Polsce, pochodzący z różnych źródeł (rok 2009)

³ W wypadku promieniowania gamma mówimy także o jonizacji pośredniej, mimo że foton wybija elektron z atomu w bezpośrednim oddziaływaniu. Chodzi po prostu o to, że zasadniczą jonizację w ośrodku wywołują właśnie te wybite elektrony.

⁴ Bekerele (Bq) jest jednostką określającą aktywność materiału, ściśle - liczbę rozpadów na sekundę. 1 Bq oznacza 1 rozpad na sekundę.

⁵ Źródło: Raport „Działalność Prezesa PAA oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2009 roku” <http://www.paa.gov.pl> oraz Biuletyn PAA „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” nr 2/2010

⁶ Promieniowanie kosmiczne, czy znajdujący się w glebach, skałach, a nawet ciele ludzkim potas ^{40}K uznajemy za naturalne źródła promieniowania.

Największe **źródło naturalne**, pochodzące z szeregów promieniotwórczych uranu i toru, stanowi **radon**: bezwonny i bezbarwny alfa-promieniotwórczy gaz szlachetny, wdychany przez człowieka, wydobywający się z gleby i skał, a przez to również z materiałów budowlanych. Zagrożenie radonem zależy od struktury gleby i skał znajdujących się poniżej budynków. Średnie stężenie radonu wynosi na świecie około 10 Bq/m^3 (dla kontynentów).

W przyziemnej warstwie atmosfery mamy ($1 \div 35$) Bq/m^3 , ale są takie miejsca, w których stężenie radonu wynosi aż $100\,000 \text{ Bq/m}^3$ (np. w Iranie). W roku 2005 w zmierzonych budynkach w Polsce stężenie radonu wynosiło od 21 Bq/m^3 do 70 Bq/m^3 – średnio 49 Bq/m^3 . Stężenie 100 Bq/m^3 zostało przyjęte jako poziom interwencji (zgodnie z normą obowiązującą od 1.01.1999 r.). Dopuszczalna zawartość naturalnych radionuklidów w materiałach budowlanych jest w Polsce regulowana prawem. Wyniki pomiarów typowych materiałów budowlanych można znaleźć na stronie internetowej Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej ⁷.

W glebie i skałach znajdują się także inne izotopy promieniotwórcze. Najistotniejszymi są tu **izotop potasu ^{40}K** oraz różne od radonu produkty rozpadów z szeregów promieniotwórczych uranu i toru.

Promieniowanie kosmiczne bombarduje naszą Ziemię w sposób nieprzerwany. Promieniowanie to, złożone pierwotnie z wysokoenergetycznych protonów (80%) i cząstek alfa (20%), przechodząc przez atmosferę zmienia swój skład. Do powierzchni Ziemi dochodzi wtórne promieniowanie kosmiczne (miony μ^+ i μ^- , elektrony β^+ i β^- , fotony promieniowania γ oraz nieliczne neutrony).

Mieszkańcy wybrzeża morskiego chronieni są przez grubszą warstwę atmosfery niż ci, którzy żyją w górach; dochodzące do nich promieniowanie jest więc bardziej osłabione. W zależności od wysokości nad poziomem morza dawka roczna pochodząca z promieniowania kosmicznego wynosi:

Miejsce	Dawka [μSv]
poziom morza (średnio)	270
łądy (średnio)	380
Mexico City (2240 m n.p.m.)	810
Quito (2840 m n.p.m.)	1130
La Paz (3900 m n.p.m.)	2030

Konsekwentnie, poruszanie się na dużych wysokościach, jak np. przy locie samolotem, nieuchronnie wiąże się z obcowaniem ze zwiększonym, w stosunku do powierzchni Ziemi, poziomem promieniowania. Podczas przelotu na wysokości 12 km dawka otrzymywana podczas godziny lotu wynosi około $5 \mu\text{Sv}$, podczas gdy na wysokości 20 km (maksymalna wysokość lotu samolotu naddźwiękowego) zwiększa się do około $13 \mu\text{Sv}$.

Wewnętrzne promieniowanie w ciele każdego człowieka to ten składnik dawki, który budzi na ogół

największe zdziwienie. Jego źródłem są substancje promieniotwórcze zawarte w powietrzu, którym oddychamy, w jedzeniu, które spożywamy i wodzie, którą pijemy.

Do najbardziej istotnych z tego punktu widzenia należy jeden z trzech izotopów potasu - promieniotwórczy ^{40}K - którego zawartość w naturalnym potasie stanowi 0,0117% (tj. w każdym milionie atomów potasu 117 stanowi ^{40}K). Radionuklid ten pojawia się w organizmie człowieka wraz ze spożywanym pokarmem. Potas, którego zawartość w ciele ludzkim (tzw. umownego człowieka o wadze 70 kg) wynosi 140 g (0,2%) jest jednym z najważniejszych mikroelementów ⁸, więc próby wyeliminowania go byłyby nonsensem. Równym nonsensem byłyby próby oczyszczania wszelkiego potasu z jego promieniotwórczego izotopu, gdyż koszt takiego przedsięwzięcia byłby niebotyczny, natomiast zysk dla zdrowia człowieka wątpliwy. Przykładowo: średnie stężenie promieniotwórczego izotopu potasu, ^{40}K , w mleku w Polsce (zmierzone w 2009 roku) wynosi ok. 43 Bq/litr .

Innymi źródłami promieniowania w naszym organizmie są tryt (izotop wodoru ^3H), izotop węgla ^{14}C (oba izotopy tworzone są w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne) oraz występujący w przyrodzie długożyciowy promieniotwórczy izotop rubidu ^{87}Rb (zawartość pierwiastka rubidu w tzw. umownym człowieku wynosi ok. 320 mg, a sam ^{87}Rb stanowi ok. 28% naturalnego rubidu). Udział wymienionych izotopów w naturalnej dawce rocznej jest następujący: ^3H – ok. $0,01 \mu\text{Sv}$, ^{14}C – ok. $10 \mu\text{Sv}$, ^{87}Rb – ok. $3 \mu\text{Sv}$.

Zawartość trytu w atmosferze może się zmieniać w wyniku działalności człowieka. O ile naturalna aktywność trytu w biosferze wynosi około $2,6 \cdot 10^{18} \text{ Bq}$, to każdy wybuch typowej bomby wodorowej podnosi, niestety, tę aktywność o ok. $2 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$. Produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych prowadzi z kolei do wzrostu zawartości trytu o ok. $3 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$ rocznie na każdy megawat zainstalowanej mocy elektrycznej (MW_e).

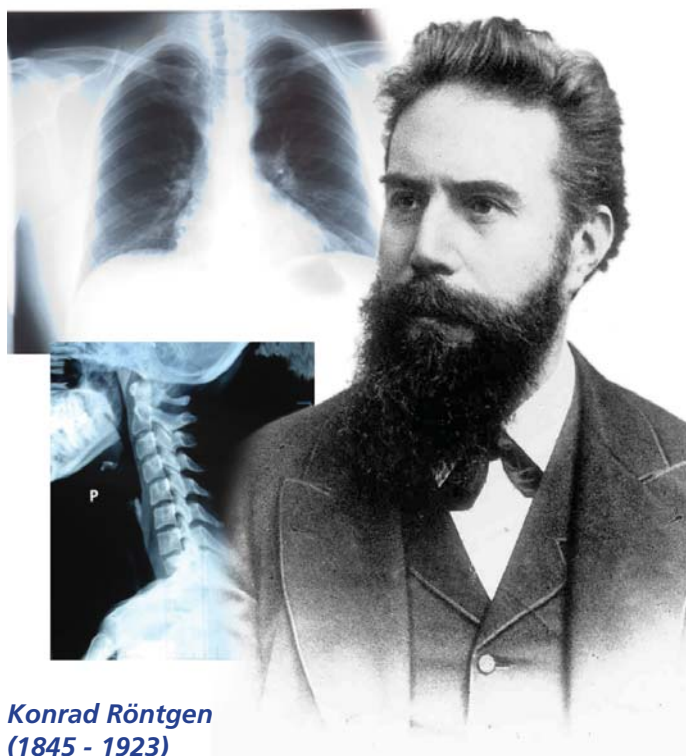
Według danych Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) - na 1.01.2010 - na świecie pracuje 437 reaktorów energetycznych, a 55 jest w stadium budowy lub projektowania, 123 w stadium zamykania bądź likwidacji. Nie posiadając, jak dotąd, w Polsce energetyki jądrowej, dostajemy jednak pewną (niewielką) porcję trytu od sąsiadów.



⁷ http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report_of_clor2005.pdf

⁸ Przybliżony skład chemiczny ciała człowieka jest następujący: tlen 63%, węgiel 20%, wodór 10%, azot 3%, a tzw. mikroelementy, nazywane czasem pierwiastkami życia, to głównie: wapń 1,5%, fosfor 1%, potas 0,2%, siarka 0,2%, chlor 0,1%, sód 0,1%, magnez 0,05%, rubid 0,0005%.

Promieniowanie jonizujące stosowane w medycynie (0,848 mSv rocznie, czyli ok. 26,6 % dawki), wiąże się przede wszystkim z rutynowymi badaniami rentgenowskimi, takimi jak wykonywanie zdjęć stomatologicznych, klatki piersiowej lub złamań kości. Reszta jest związana z tzw. medycyną nuklearną, w której używa się izotopów promieniotwórczych do diagnozy lub do terapii.



Konrad Röntgen
(1845 - 1923)

W diagnostyce niewielkie ilości radionuklidu, czyli tzw. **znacznik promieniotwórczy**, wprowadzane są do krwioobiegu, a następnie ich przemieszczanie się wewnątrz ciała jest monitorowane przez odpowiedni system detekcyjny. W ten sposób można np. wykryć miejsca blokujące przepływ krwi, związane z powstawaniem nowotworów. Napromieniowanie nowotworu promieniowaniem gamma, wysyłanym przez kobalt ^{60}Co , lub strumieniem cząstek wytwarzanych przez szczególnie do tego celu konstruowane akceleratory medyczne, pozwala na zniszczenie nowotworu bez niszczenia zdrowej tkanki wokół niego⁹. Izotop jodu ^{131}I , podawany do tarczycy i dobrze się w niej umiejscawiający, może być używany zarówno do diagnozowania stanu tarczycy, jak i leczenia tzw. choroby Gravesa-Basedova.

Promieniowanie jonizujące jest często stosowane przy wytwarzaniu **produktów codziennego użytku**. Higienizacja kosmetyków i sterylizacja¹⁰ narzędzi medycznych, wytwarzanie toreb z termokurczliwych folii, to jedne z typowych zastosowań¹¹. Promieniowanie może być i jest używane w przemyśle do wyznaczania grubości materiałów, stopnia wypełnienia zamkniętych pojemników, jakości spawów w mostach i budynkach itp. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w rozdz. 3.

Materiały promieniotwórcze znajdują się także w samych produktach, jak choćby w standardowej czujce dymu,

zawierającej izotop ameryku ^{241}Am czy plutonu (^{239}Pu lub ^{238}Pu). Czujki zawierające pluton są obecnie wycofywane z użycia. Typowa czujka ma średnicę kilku centymetrów.



Codzienne czynności często nie są wolne od kontaktu z promieniowaniem jonizującym. Palenie papierosów¹², korzystanie z dawnego typu koszulek do lamp gazowych, opalanie gazem (łącznie z gotowaniem na gazie), życie w domach zbudowanych z cegieł, kamieni lub gipsu, używanie nawozów fosforowych czy korzystanie z kineskopowych telewizorów i monitorów PC, to wszystko związane jest nieuchronnie z narażeniem na niewielkie działanie promieniowania jonizującego.

Inne źródła dodatkowego promieniowania jonizującego związane są z wytwarzaniem elektryczności w elektrowniach jądrowych (co obecnie Polski nie dotyczy), ale również i węglowych (pamiętajmy o radionuklidach zawartych w samym węglu, w wodach kopalnianych i w popiołach), transportem materiałów promieniotwórczych i przechowywaniem odpadów promieniotwórczych. Na ten temat więcej powiemy w 5. rozdziale. Dodatkowe promieniowanie pojawia się także wraz z opadem promieniotwórczym po testowych wybuchach broni jądrowej, po awariach w reaktorach i innych instalacjach nuklearnych.

2.3.

JAK MIERZYMY PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE?

Ponieważ promieniowanie jonizujące może być szkodliwe dla naszych tkanek, jest bardzo ważną rzeczą umieć je wykryć. Detekcja tego promieniowania stanowi więc istotną umiejętność w ochronie ludzi i środowiska przed niechcianym promieniowaniem.

Ilość energii promieniowania przyjęta przez tkankę nazywa się **dawką pochłoniętą**. W gruncie rzeczy jest to miara energii pochłoniętej przez tkankę, gdyż energia promieniowania jonizującego, tracona na jonizację atomów, może powodować uszkodzenia tkanki.

⁹ Warto zauważyć, że w wyniku użycia akceleratorów, strumień ciężkich cząstek naładowanych tzw. hadronów jest zatrzymywany w chorej tkance, skutecznie ją niszcząc, ponieważ największy przekaz energii cząstek następuje na końcu ich drogi.

¹⁰ W literaturze medycznej odróżnia się sterylizację (naświetlanie dawką do 25 kGy) od higienizacji (dawka do 6 kGy)

¹¹ Sterylizację stosujemy także do materiałów do przeszczepów i biomateriałów.

¹² W Polsce palenie papierosów zwiększa o 30% wchłanianie radionuklidu ^{210}Pb , co oznacza zwiększenie dawki rocznej o ok. (15-20) μSv .

Nie oznacza to wcale, że promieniowanie jonizujące musi zawsze wywrzeć taki skutek. Proces jego oddziaływania z atomami ośrodka jest bowiem procesem statystycznym i może się zdarzyć, że promieniowanie nie wywoła jonizacji ośrodka, tym bardziej więc nie będzie mogło spowodować zniszczenia tkanki.

Z powyższego wynika, że przede wszystkim musimy wiedzieć, jaką energię niesie samo promieniowanie. Możemy ją mierzyć na dwa sposoby i stosownie do tego wynikiem pomiaru będzie:

- **dawka**, tj. ilość energii, która dociera do powierzchni danego obiektu w określonym przedziale czasu lub
- **średnia dawka pochłonięta, D_T** , która oznacza energię promieniowania pochłoniętą przez jednostkę masy materii (tkanki), przez którą to promieniowanie przeszło. Jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy). Wcześniej korzystano z innej, sto razy mniejszej jednostki – radu.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ Gy.}$$

Dawka pochłonięta nie jest jednakże wielkością, która mówi nam wszystko o możliwych skutkach napromieniowania, gdyż dla różnych rodzajów promieniowania jonizującego efekty biologiczne mogą być - i w rzeczywistości są - różne. Inaczej mówiąc, pochłonięcie odpowiedniej porcji energii promieniowania alfa wywołuje skutki odmienne od pochłonięcia takiej samej porcji energii promieniowania beta czy gamma. Dlatego też istotna dla ludzi jest nie tyle dawka pochłonięta, ile tzw. **dawka równoważna H_T** , która dotyczy jednakowych skutków różnych rodzajów promieniowania. W zasadzie, kiedy mówimy o dawce, mamy na myśli właśnie dawkę równoważną. Skuteczność danego rodzaju promieniowania opisujemy współczynnikiem W_p . Tak więc, jeśli średnie dawki pochodzące od danego rodzaju promieniowania (P) w tkance (T) oznaczmy przez $D_{T,P}$, to dawkę równoważną dla tkanki otrzymamy przez zsumowanie dawek pochodzących od wszystkich rodzajów użytego promieniowania:

Wartości współczynników W_p dla różnych rodzajów promieniowania pokazuje tabela.

Rodzaj i zakres energii promieniowania	W_p
Fotony gamma wszystkich energii	1
Elektrony i miony wszystkich energii	1
Neutrony	
< 10 keV	5
10 – 100 keV	10
0,1 – 2 MeV	20
2 – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony > 2 MeV (bez protonów odrzutu)	5
Cząstki alfa, ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia	20

¹³ Dla zilustrowania, jak dużą dawką jest 1 Sv podajmy, że przepisy bezpieczeństwa wymagają, aby każde urządzenie, które jest lub było używane do przetwarzania lub składowania odpadów promieniotwórczych było tak skonstruowane, aby żadna z osób mających kontakt z tym urządzeniem i narażonych zawodowo na działanie promieniowania jonizującego nie mogła otrzymać w ciągu roku dawki większej niż 20 mSv, natomiast dla osób postronnych dawka ta nie przekraczała 1 mSv (taka jest obecnie norma europejska). Przepisy amerykańskie nakazują, aby poza ogrodzeniem wokół składowiska odpadów niskoaktywnych dodatkowa dawka roczna nie przekraczała 30 mSv, podczas gdy normy europejskie w ogóle dodatkowej dawki nie dopuszczają. Biorąc pod uwagę, że przeciętny człowiek w Polsce otrzymuje z otoczenia dawkę około 2,4 mSv (240 mrem), dawki dopuszczone dla osób postronnych są z tą dawką porównywalne. Pamiętajmy, że dawka śmiertelna otrzymana w krótkim czasie (paru minut), wynosi ok. (4 – 6) Sv, czyli (400 000 – 600 000) mrem.

$$H_T = \sum_P W_p D_{T,P}$$

Dawkę równoważną mierzymy w **siwertach** (wcześniejszą jednostką był rem. Pomimo dużej użyteczności tej jednostki, jednostką standardową przyjętą przez społeczność międzynarodową - poza publikacjami z USA, gdzie nadal korzysta się z jednostek Ci (kiur), rad, rem - jest obecnie siwert (Sv) ¹³, równy 100 rem). Mamy więc:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ rem} = 1000 \text{ mrem}$$

W poniższej tabeli pokazane są równoważniki dawek od promieniowania naturalnego, włączając procedury medyczne, dla ludności Polski w roku 2009.

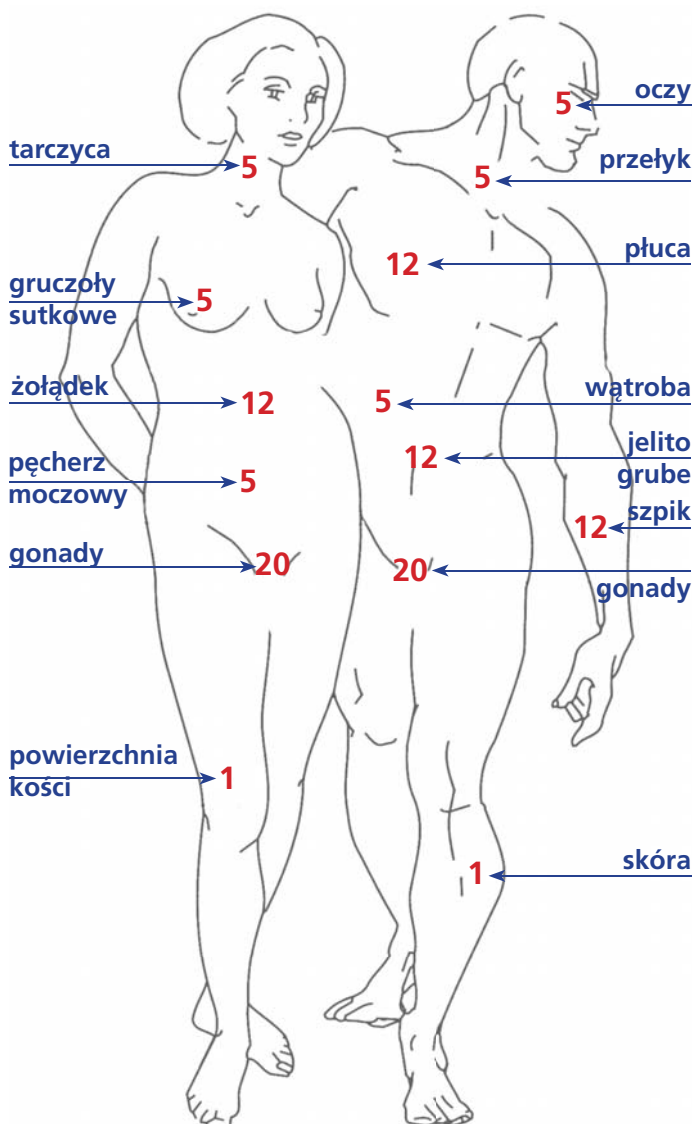
Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce równoważnej (3,19 mSv), otrzymanej przez statystycznego mieszkańca Polski w 2009 roku

Źródło promieniowania	Dawka [μ Sv]	Procent dawki %
Radon z szeregu U	1200	37,6
Radon z szeregu Th	102	3,2
Promieniowanie gleby i skał	462,7	14,5
Promieniowanie kosmiczne	283	8,9
Ciało ludzkie	277,6	8,7
Zastosowania medyczne	848	26,6
Praca	~2	~0,063
Przedmioty powszechnego użytku (kineskopy, farby...)	~3	~0,094
Opad (również z dawnych wybuchów jądrowych)	~3	~0,094
Awaria czarnobylska	~8	~0,25

Skuteczność dawki zależy nie tylko od rodzaju użytego promieniowania, ale także i od rodzaju narządu, który pochłoniął odpowiednią dawkę równoważną H_T . Dlatego też o spodziewanym efekcie biologicznym mówi nam więcej wielkość nazywana **dawką skuteczną**. Jest to dawka zsumowana po rodzajach napromieniowanych tkanek, po pomnożeniu dawki równoważnej w danym narządzie przez współczynnik W_T , opisujący wpływ promieniowania na daną tkankę:

$$E = \sum W_T H_T$$

Wartości współczynników W_T (mnożonych przez 100) dla poszczególnych organów ciała ludzkiego.



Uwaga: powyższy rysunek pokazuje współczynniki (w procentach) stosowane do roku 2007, kiedy to Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej postanowiła przypisać narządom nieco inne współczynniki radioczułości i pogrupować je w inny sposób. I tak jako osobna kategoria: ślinianki ($W_T=1$), trzustka ($W_T=4$) i mózg ($W_T=1$), oczy i przełyk przeszły do kategorii „inne”, zmieniły się wartości W_T dla gonad z 20 na 8, dla wątroby, pęcherza moczowego i tarczycy z 5 na 4, a dla gruczołów sutkowych z 5 na 12. Przez „szpik” należy rozumieć szpik czerwony.

Do pomiarów dawek używamy różnych przyrządów. Są to w szczególności:

- dawkomierze (dozymetry) osobiste, używane przez personel pracujący bezpośrednio z promieniowaniem jonizującym



MIERNIK MOCY DAWKI EKO-P

- uniwersalne radiometry przenośne, służące do oceny dawki od interesującego obiektu



MONITOR SKAŻEŃ RADIOAKTYWNYCH TYP EKO-C

DAWKOMIERZ - SYGNALIZATOR TYP EKO-ID



- sygnalizatory mocy dawki do ciągłej obserwacji (monitorowania) promieniowania (mocą dawki nazywamy dawkę na jednostkę czasu).

W niniejszym opracowaniu nie opisujemy ich strony technicznej ani sposobów posługiwania się nimi.

2.4.

WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA KOMÓRKI ORGANIZMÓW ŻYwych

Wpływ promieniowania jonizującego na organizm jest w naturalny sposób związany z oddziaływaniem tego promieniowania na poszczególne komórki. Ma on charakter statystyczny: ten sam rodzaj promieniowania i taka sama dawka promieniowania może w komórce, będącej tworem złożonym z bardzo wielu cząsteczek, wywoływać za każdym razem trochę inną reakcję, włączając także brak jakiegokolwiek reakcji. Niemniej jednak, im więcej promieniowania dotrze do komórki, tym prawdopodobieństwo pojawienia się efektu promieniowania wzrasta. Jeśli promieniowanie dotrze do cząsteczek istotnych z punktu widzenia funkcji życiowych, jak np. cząsteczki DNA, uszkodzenie komórki będzie z reguły większe niż wtedy, gdy promieniowanie będzie oddziaływało głównie z mniej istotnymi cząsteczkami, jak np. cząsteczki wody. Najbardziej podatne na promieniowanie są te komórki, które szybko się rozmnażają lub różnicują. Organizmy żywe, poprzez wieki obcowania z różnymi czynnikami potencjalnie szkodliwymi, w tym z naturalnym tłem promieniowania, nabyły pewną swoistą zdolność regeneracji uszkodzeń na poziomie komórkowym, w tym również uszkodzeń popromiennych. Jednakże, jeżeli komórka podzieli się zanim zdążyła zregenerować swe uszkodzenia popromienne, nowe komórki mogą nie być identycznymi kopiami wyjściowej. Takimi szybko rozwijającymi się komórkami są np. komórki płodu i komórki nowotworowe.

Dzięki istnieniu możliwości regeneracji uszkodzonych komórek, nie możemy stwierdzić wpływu dawek porównywalnych z tłem na pojedynczego osobnika. Wpływ ten możemy ewentualnie stwierdzić dla całych populacji.

W kontakcie żywej komórki z promieniowaniem jonizującym możemy mieć do czynienia z czterema różnymi efektami:

1. zniszczenie komórki jest tak duże, że nie będzie ona w stanie pełnić swych dotychczasowych funkcji i komórka ginie,
2. komórka - choć wciąż żywa - utraci swą zdolność do reprodukcji,
3. kod genetyczny komórki (tzn. DNA) zostanie uszkodzony w taki sposób, że powstające kopie komórki będą zasadniczo różne od komórki zdrowej, a to może z kolei spowodować rozrost komórek nowotworowych,
4. promieniowanie może także nie mieć wpływu na stan komórki.

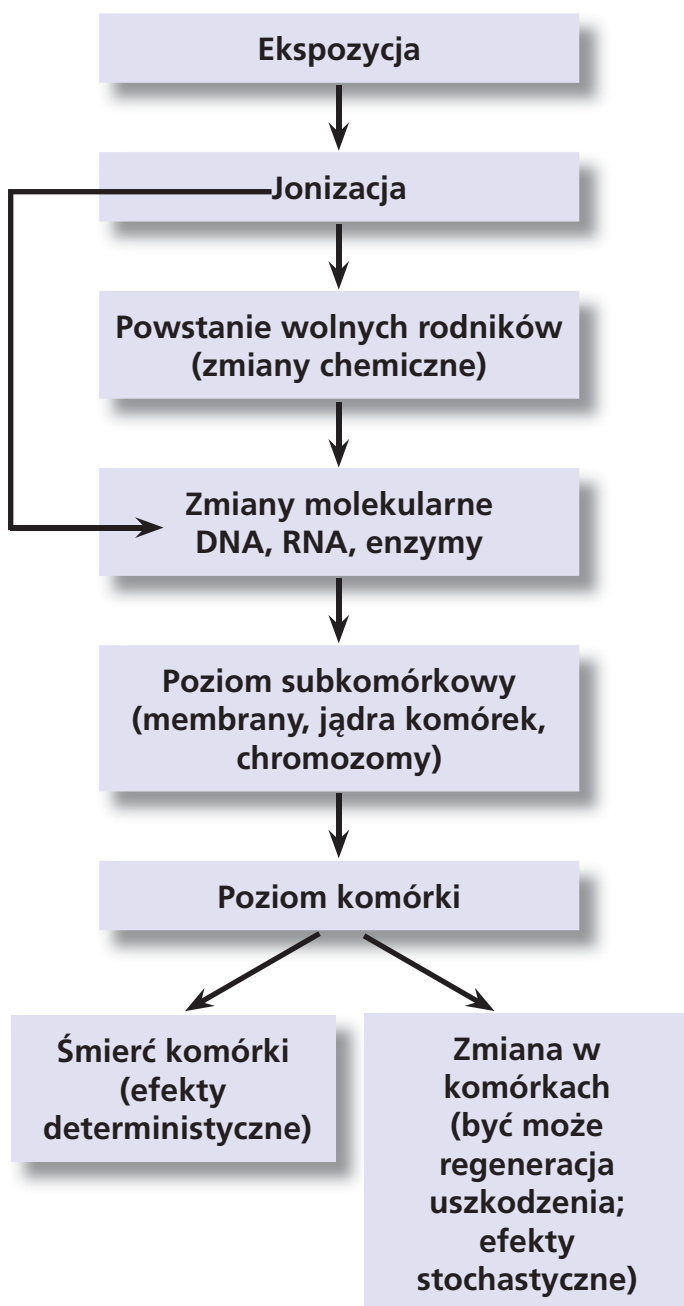
Mechanizm oddziaływania promieniowania jonizującego z komórkami tkanki jest wielostopniowy:

- Energia promieniowania jonizującego jest oddawana na jonizację ośrodka (choć nie jest to jedyny mechanizm

przekazywania energii w ośrodku). Proces ten następuje w czasie około 10^{-12} sekundy.

- Oderwany od atomu elektron może powodować jonizację innych atomów ośrodka. Zjonizowane atomy oraz uwolnione elektrony wywołują następnie procesy fizykochemiczne, prowadzące do wytworzenia po czasie około 10^{-9} sekundy cząsteczek szczególnie aktywnych chemicznie, znanych pod nazwą wolnych rodników.
- Z kolei wolne rodniki mogą wywołać, w czasie około 10^{-6} sekundy (poprzez reakcje chemiczne), zmiany w cząsteczkach istotnych z biologicznego punktu widzenia, tj. wpłynąć na funkcjonowanie komórki.
- Powstałe w ten sposób zmiany biologiczne, które mogą następować w dużym przedziale czasowym, od sekund do dziesiątków lat po napromieniowaniu, mogą spowodować uśmiercenie komórek lub takie ich przekształcenie, które może ewentualnie doprowadzić do powstania nowotworów i zmian genetycznych.

Pełniejszy łańcuch zdarzeń związanych z zaabsorbowaniem porcji promieniowania jonizującego pokazany jest na poniższym diagramie.



2.5.

WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ZDROWIE

Wpływ promieniowania na zdrowie dzielimy na dwie kategorie:

- efekty progowe, pojawiające się po przekroczeniu pewnego poziomu – 0,2 Sv – promieniowania, kiedy to zniszczona zostaje tak duża liczba komórek, że możliwe jest zaobserwowanie tego efektu,
- efekty podprogowe, pojawiające się przy niższych dawkach promieniowania.

Efekty progowe pojawiają się, gdy zaabsorbowana przez całe ciało dawka promieniowania przekracza tysiące razy tło promieniowania (w Polsce 0,0032 Sv rocznie) i jest podana w bardzo krótkim czasie - np. paru minut. Przykłady działania takich dawek podaje tabela.

Dawka (w Sv)	Efekty
0,05 do 0,2	Możliwe efekty opóźnione (nowotwory) i zaburzenia chromosomalne
0,25 do 1,0	Zmiany we krwi
ponad 0,5	Możliwa czasowa niepłodność u mężczyzn
1 do 2	Wymioty, biegunka, zmniejszenie się odporności na infekcje, możliwe zahamowania wzrostu u dzieci
2 do 3	Silna choroba popromienna, mdłości, prawdopodobieństwa zejścia śmiertelnego 25%
ponad 3	Całkowita niepłodność kobiet
3 do 4	Zniszczenie szpiku i mięszu kostnego, szansa przeżycia 50%
4 do 10	Ostra choroba i śmierć (zazwyczaj w ciągu kilku dni) u 80% napromienionych

Z punktu widzenia dawek śmiertelnych, podaje się wartość dawki LD_{50}^{30} , w wyniku której 50% populacji ginie po 30 dniach. Dawki te (podane w Sv) są różne dla różnych organizmów, co ilustruje rysunek na następnej stronie. Widzimy, że np. wirusy i bakterie są około 1500 razy bardziej odporne na promieniowanie niż człowiek.

Efekty podprogowe pojawić się mogą przy dowolnym poziomie promieniowania, ale ryzyko efektów szkodliwych, ogólnie biorąc, rośnie wraz z ilością zaabsorbowanej dawki. Najsilniej badanym efektem podprogowym jest choroba nowotworowa. Jednakże należy mieć na uwadze, że:

- nie wszystkie nowotwory wywoływane są przez promieniowanie jonizujące
- taka sama dawka zaabsorbowanego promieniowania może spowodować wystąpienie nowotworu u jednego osobnika, a u drugiego nie,
- nowotwór często pojawia się dopiero wiele lat po napromieniowaniu.

W tej sytuacji nie jest rzeczą możliwą wskazanie, który nowotwór został wywołany napromieniowaniem, a który przez inne czynniki rakotwórcze znajdujące się w naszym środowisku.

Podatność na choroby nowotworowe wywołane promieniowaniem jonizującym zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj tkanek, które naświetlono, płeć i wiek. Te tkanki,

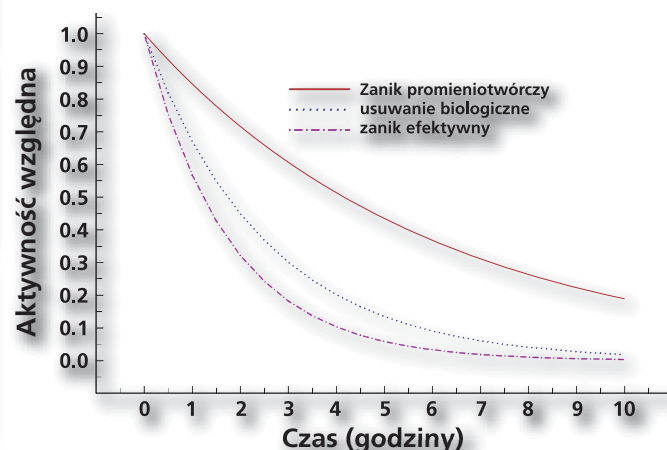
Dawki LD₅₀³⁰ [Sv]



w których komórki silnie namnażają się i nie są zróżnicowane oraz te, w których koncentrują się pierwiastki promieniotwórcze są bardziej podatne niż inne. Na przykład, krwiotwórczy szpik i tarczyca łatwo ulegają działaniu promieniowania jonizującego, podczas gdy nerki czy komórki nerwowe są znacznie bardziej odporne. Powinniśmy też brać pod uwagę możliwy przystny wpływ małych dawek promieniowania, za czym przemawia coraz więcej wiarygodnych danych. Taki efekt – korzystnych skutków małych dawek promieniowania jonizującego - nosi nazwę **hormezy radiacyjnej**.

Analizując wpływ promieniowania jonizującego pochodzącego od radionuklidów, które przedostały się do organizmów żywych, należy uwzględnić fakt, że radionuklidy mogą być nie tylko wchłaniane, ale także i wydalone. Z tego względu oprócz okresu połowicznego rozpadu dla izotopu jako takiego należy podawać tzw. **biologiczny czas połowkowy**, tj. czas, po którym w wyniku procesów biologicznych pozostaje w organizmie średnio połowa pochłoniętych radionuklidów. Ten czas "biologiczny" może być o wiele rzędów wielkości krótszy od "fizycznego" czasu połowicznego rozpadu, charakteryzującego dany radionuklid. I tak, połowkowy czas biologiczny dla trytu ³H wynosi 10 dni, podczas gdy czas połowicznego rozpadu wynosi

ponad 12 lat. W przypadku potasu ⁴⁰K czasy te wynoszą odpowiednio 30 dni i 1,26·10⁹ lat. Docierają do nas również radionuklidy, dla których czas "biologiczny" bywa znacznie dłuższy od przeciętnego trwania życia. Do takich nuklidów należą np. ⁹⁰Sr lub ²³⁸Pu, które mogą trwale osadzać się w naszych kościach. Na poniższym rysunku pokazujemy, że przy czasie połowicznego zaniku radionuklidu, wynoszącym ok. 4 godzin i czasie wydalania biologicznego ok. 2 godzin, efektywny zanik aktywności radionuklidu w organizmie jest stosunkowo szybki: aktywność spada do połowy już po ok. 1 godzinie.



Efektywny zanik aktywności radionuklidu w organizmie człowieka

2.6.

JAK OCHRONIĆ SIĘ PRZED PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM?

Podstawowymi czynnikami decydującymi o tym, ile promieniowania do nas dotrze są:

- czas,
- odległość od źródła,
- osłona.

Czas

Dawka, jaką otrzyma człowiek zależy od czasu przebywania w pobliżu źródła promieniowania jonizującego. Im krótszy czas przebywania, tym mniejsza dawka. Dlatego też w procedurach ochrony przed promieniowaniem minimalizuje się czas kontaktu ze źródłami.

Odległość

Dawka otrzymywana przez człowieka zależy od jego odległości od źródła promieniowania. Im ta odległość jest większa, tym dawka mniejsza. Dawka maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości - zwiększając odległość 9 razy zmniejszamy dawkę 81 razy.

Osłona

Jednym ze sposobów osłabienia dawki jest umieszczenie pomiędzy źródłem a osobą dodatkowego materiału, zwanego osłoną. Każda osłona zmniejsza zarówno energię jak i natężenie padającego promieniowania jonizującego. Ponieważ oddziaływanie cząstek alfa, beta, gamma czy neutronów silnie zależy od liczby atomowej Z atomów ośrodka, tak dobieramy materiał osłony, aby mieć dostateczną ilość atomów (duża gęstość) znacząco podatnych na jonizację (atomy o dużej liczbie Z). Jeśli osłona jest więc wystarczająco gruba, cała energia promieniowania zostanie zużyta na

jonizację osłony i do człowieka za osłoną promieniowanie już nie dotrze.

Najczęstszymi materiałami osłonowymi są stal, beton, ołów i gleba. Dla każdego materiału można zmierzyć grubość, która powoduje, że przechodzi przezeń tylko połowa promieniowania. Biorąc na osłonę materiał dwa razy grubszy niż taka „warstwa połówkowa” zmniejszymy promieniowanie czterokrotnie, trzykrotnie grubszy materiał zmniejszy promieniowanie ośmiokrotnie, itd. Aby zdać sobie sprawę z grubości stosowanych osłon, podajmy, że dla promieniowania gamma o energii 10 MeV, dwukrotne zmniejszenie ilości promieniowania osiąga się stawiając na jego drodze ok. 13 mm ołowiu, ok. 28 mm żelaza, ok. 130 mm betonu lub ok. 300 mm wody.

Zdolność osłonowa materiału zależy silnie od rodzaju promieniowania. I tak, cząstki alfa dają się zatrzymać już przez kartkę papieru lub zewnętrzną warstwę naskórka naszej skóry. Cząstki beta - elektrony - są bardziej przenikliwe. Mogą one przeniknąć przez ok. 3 cm warstwę wody czy ciała ludzkiego, ale zatrzymać je można przy pomocy już

1 mm blachy aluminiowej. Najbardziej przenikliwe promieniowanie gamma wymaga użycia materiałów o dużej gęstości, takich jak ołów czy beton. Te wszystkie własności są brane pod uwagę przy posługiwaniu się źródłami promieniotwórczymi, przy ich transporcie i w szczególności przy budowie składowiska odpadów. Odpady promieniotwórcze już na miejscu ich wytwarzania są pakowane do pojemników (kontenerów, kasków¹⁴) zbudowanych z materiałów zapewniających właściwą osłonę dla osób, które będą dalej transportowały te pojemniki. Typowe pojemniki zbudowane są więc głównie ze stali. W zależności od rodzaju i koncentracji radionuklidów obecnych w odpadach stosuje się odpowiednie pojemniki transportowe. Pojemniki te muszą spełniać bardzo surowe normy dotyczące dopuszczalnego poziomu promieniowania na ich powierzchni. Samochód przewożący pojemniki ma wewnętrzne ścianki wyłożone ołowiem lub stalą, aby z kolei zapewnić właściwy, niski poziom promieniowania na powierzchni pojazdu. Wreszcie, już na składowisku, korzysta się ze wszystkich możliwych materiałów osłonowych, jak betonowe ściany i sklepienia, czy odpowiednio gruba warstwa gleby.

2.7.

BIOLOGICZNY CZAS POŁOWICZNEGO ZANIKU

Czas przebywania w naszych tkankach wchłoniętego przez nas izotopu promieniotwórczego jest bardzo różny dla różnych izotopów i zależy od tego, z jakimi substancjami

chemicznymi mamy do czynienia. Wprowadzamy więc pojęcie **biologicznego czasu połowicznego zaniku, T_B** , który jest niezależny od jądrowego czasu połowicznego rozpadu $T_{1/2}$.

Orientacyjne wartości czasu biologicznego dla niektórych izotopów promieniotwórczych

Izo- top A_ZX	Zawartość pierwiastka X w ciele "umownego" człowieka [g]	Codzienne wchłanianie pierwiastka X [g]	Źródło izotopu A_ZX	Czas jądrowy $T_{1/2}$	Czas biolo- giczny T_B
3H	7000	głównie z wodą	oddziaływanie promienio- wania kosmicznego, wybuchy, awarie nuklearne	12,3 lat	4-18 dni średnio ok. 10 dni
^{14}C	16000	300	oddziaływanie promienio- wania kosmicznego, wybuchy, awarie nuklearne	5730 lat	40 dni
^{40}K	140	3,3	naturalny składnik skorupy ziemskiej	$1,28 \cdot 10^9$ lat	30 dni
^{89}Sr	0,3	ok. $2 \cdot 10^{-3}$ trawa $\Rightarrow$ mleko $\Rightarrow$ człowiek	rozszczerzenie U, Pu	50,5 dni	osadza się w kościach
^{90}Sr				28,8 lat	
^{131}I	$1,1 \cdot 10^{-3}$ głównie w tarczycy	ok. $2 \cdot 10^{-5}$ trawa $\Rightarrow$ mleko $\Rightarrow$ człowiek	rozszczerzenie U, Pu	8,04 dni	12 dni, ale tarczyca 120 dni
^{137}Cs	$1,5 \cdot 10^{-3}$	ok. $2 \cdot 10^{-4}$ Eskimosi: porosty $\Rightarrow$ reny $\Rightarrow$ mięso $\Rightarrow$ człowiek	rozszczerzenie U, Pu	30,2 lat	dorośli 40-50 dni dzieci ok. 44 dni
^{210}Po	ok. 10^{-13}	porosty $\Rightarrow$ reny $\Rightarrow$ mięso, również ryby, skorupiaki, dym papierosowy $\Rightarrow$ człowiek	naturalny izotop z szeregu ^{238}U	138,4 dni	ok 50 dni
^{226}Ra	$3 \cdot 10^{-11}$	ok $2 \cdot 10^{-12}$	naturalny izotop z szeregu ^{238}U	1600 lat	osadza się w kościach
^{235}U	$9 \cdot 10^{-5}$	ok $2 \cdot 10^{-6}$	izotop naturalny, 0,7% uranu, paliwo nuklearne, wybuchy	$0,7 \cdot 10^9$ lat	nerki ok. 6 dni kości ≥ 120 dni
^{238}U			izotop naturalny, paliwo nuklearne, wypadki	$4,5 \cdot 10^9$ lat	

¹⁴ Termin „kask” to zapożyczona z jęz. angielskiego nazwa pojemników typu CASTOR - „Cask for Storage and Transport of Radioactive Materials” - konstruowanych ze stali i specjalnego żeliwa (zwanego „żeliwem szarym” lub „żeliwem sferoidalnym”), które znakomicie przewodzi ciepło i do tego, jest plastyczne - przy urazach mechanicznych raczej wygina się i „płyynie” bez pęknięcia.

Ponieważ oba czasy dotyczą niezależnych zjawisk, wypadkowy czas połowicznego zaniku T_{eff} możemy policzyć ze wzoru:

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_B} \quad \text{z czego wynika} \quad T_{\text{eff}} = \frac{T_B \cdot T_{1/2}}{T_B + T_{1/2}}$$

gdy T_B jest znacznie mniejsze od $T_{1/2}$ ($\frac{T_B}{T_{1/2}} \ll 1$), to wtedy

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_B}{1 + \frac{T_B}{T_{1/2}}} \approx T_B$$

O czasie przebywania izotopu w ciele decyduje czas biologiczny. Nasze organizmy potrafią drobne uszkodzenia zarówno "radiacyjne" jak i inne reperować samoistnie, o ile częstotliwość uszkodzeń nie jest zbyt duża. To nie dawka, ale **moc dawki** (czyli odniesienie pochłoniętej energii do czasu, w którym nastąpiło pochłonięcie) jest naistotniejszym parametrem liczącym się w ochronie przed niechcianym promieniowaniem jonizującym.

3. ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO I MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

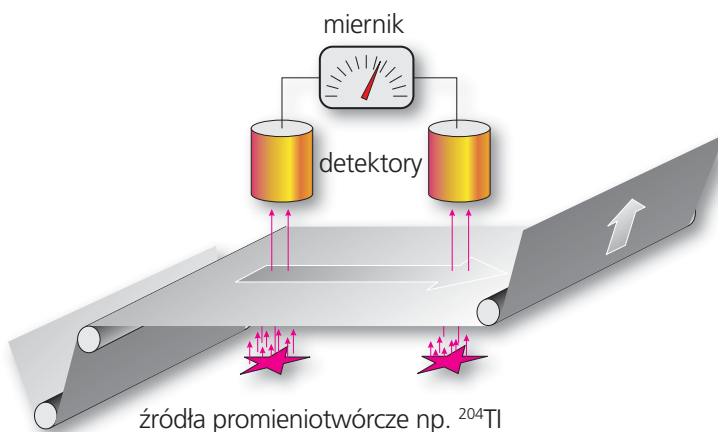
Z materiałów promieniotwórczych i technik jądrowych korzystamy znacznie częściej niż nam się wydaje. Mają one zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i w medycynie, nauce czy sztuce. Choć może wydawać się to dziwne, jeśli przestrzega się stosunkowo prostych zasad bezpieczeństwa, praca ze źródłami promieniotwórczymi nie stanowi zagrożenia, a przynosi szereg korzyści. Poniżej staramy się przedstawić podstawowe zastosowania radioizotopów oraz samego promieniowania jonizującego.

3.1. RADIOIZOTOPOWE METODY POMIAROWE

Niewielkie ilości materiałów promieniotwórczych znajdują się w produktach powszechnego użytku. Ich przykładem są **czujki (czujniki) dymu**, zawierające małe ilości promieniotwórczego izotopu ameryku (^{241}Am) lub plutonu (^{238}Pu lub ^{239}Pu) – do dziś powszechnie stosowane, ale ostatnio stopniowo wycofywane z użycia ze względu na pojawienie się prostszych metod wykrywania dymu. Czujniki korzystające z izotopów promieniotwórczych wykorzystują fakt osłabiania promieniowania przy jego przejściu przez materię. Źródło promieniowania α , wysyłające promieniowanie do detektora, wywołuje w nim ciągłe impulsy, które przetwarzane są na prąd elektryczny. Gdy w obwodzie płynie prąd, czujnik wykazuje, że wszystko jest w porządku. W momencie pojawienia się dymu w pomieszczeniu, cząsteczki dymu dostają się pomiędzy źródło a detektor i uniemożliwiają dotarcie cząstek α do celu. Prąd przestaje płynąć, co powoduje uruchomienie alarmu. Ponieważ promieniowanie alfa, wykorzystywane w czujnikach (patrz zdjęcie na str. 11), jest krótkozasięgowe (ok. 4 cm w powietrzu), nie wydostaje się ono poza czujnik. Ponadto, sama obudowa urządzenia wystarcza do całkowitej absorpcji tego promieniowania.

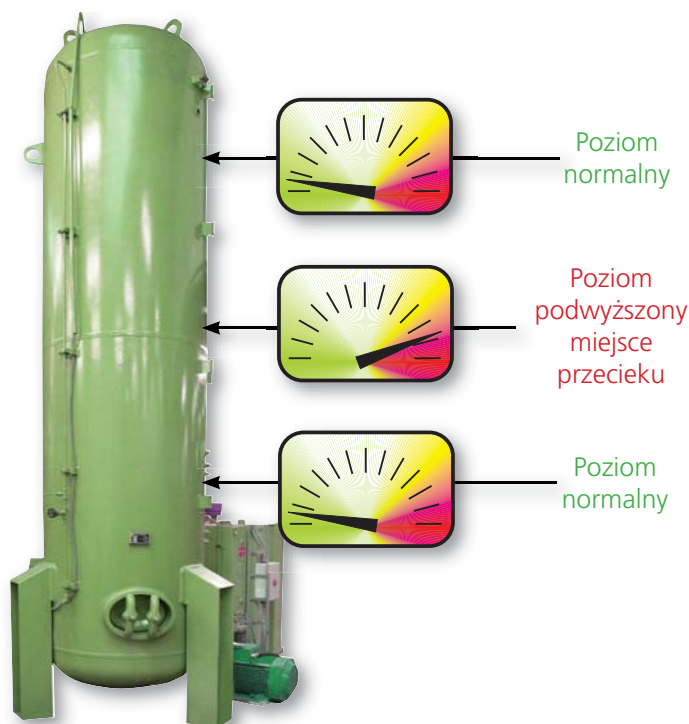
Pewne ilości izotopów promieniotwórczych jak rad (^{226}Ra) czy tryt (^3H) znajdują się w farbach luminescencyjnych używanych w przyrządach stosowanych tam, gdzie występuje brak dostatecznego oświetlenia, np. w nocy. Tak było np. w niektórych starych (wyprodukowanych przed 1970) budzikach i zegarkach naręcznych – gdzie stałe świeciły wskazówki oraz w wielu miernikach technicznych, gdzie ciemne wskazówki poruszały się na stałe świecącym tle – np. w samolotach. Nie stwierdzono ujemnego wpływu na zdrowie z powodu korzystania z takich zegarków, a przecież globalna dawka związana ze "świecącymi" zegarkami jest, jak można wykazać, około czterokrotnie wyższa niż pochodząca z energetyki jądrowej! Zmiana związków radowych na trytowe znacznie zmniejsza tę dawkę, jednak odniesione z tej zmiany korzyści dla zdrowia użytkowników tych zegarków są raczej iluzoryczne. Radionuklidy (obecnie głównie ^3H , dawniej ^{226}Ra) były lub są używane w znakach świecących, kompasach, miernikach przemysłowych itp.

Cząstki alfa używane były dla celów antystatycznych w szczotkach do odkurzania płyt gramofonowych i w sprzęcie fotograficznym. W szczególnie cienkich soczewkach optycznych zawarty jest czasem tor, który może napromienionować oczy dość znaczącą (co nie oznacza koniecznie - szkodliwą) dawką. Uran był czasem dodawany do sztucznych zębów, aby się lepiej błyszczały, ale niepotrzebną ceną za wrażenia estetyczne jest w takim wypadku napromienianie dziąseł. Obecnie odchodzi się od tego typu materiałów dentystycznych. Również w niektórych fotokopiarkach, aby zapobiec gromadzeniu się statycznych ładunków elektrycznych, używa się izotopu polonu (^{210}Po).



Schemat działania układu miernika grubości papieru, opartego o pomiar absorpcji promieniowania β

W badaniach przemysłowych często wykorzystujemy zmianę absorpcji promieniowania jonizującego wynikającą z różnic grubości lub gęstości materiału. Na przykład, źródło promieniowania może być użyte do pomiaru grubości papieru podczas jego produkcji (patrz rysunek). W taki sam sposób można mierzyć grubość blachy, ważyć materiały w ruchu czy określać poziom cieczy w zamkniętych zbiornikach. Szczególnie duże znaczenie ma to przy ogromnych, wolno stojących zbiornikach, do wnętrza których trudno zajrzeć i nie można zastosować metody zatapiania w wodzie, aby zobaczyć miejsca wydobywania się pęcherzyków gazu.



Schemat pomiaru szczelności zbiornika z gazem. Przejeżdżając miernikiem po powierzchni np. zbiornika, do którego wprowadzono znacznik promieniotwórczy, łatwo można zobaczyć, że w miejscu nieszczelności pomiar wykaże większe natężenie promieniowania emitowanego przez znacznik.

Wprowadzając do badanego obiektu izotop promieniotwórczy możemy śledzić jego drogę w materiale, badając miejsce emisji promieniowania. Taki izotop, zwany **znacznikiem promieniotwórczym**, może być więc użyty do badania prędkości przepływu materiałów, czy procesów mieszania się ze sobą (lub rozdzielania) dwóch lub więcej faz. Znaczniki można też stosować do badania stopnia zużycia materiału lub narzędzi pracy, procesu korozji, wykrywania nieszczelności zbiorników płynów i rurociągów. Na przykład, po dodaniu do zbiornika z gazem radioznacznika, możemy radiometrem zbadać natężenie promieniowania na zewnątrz pojemnika. Podnoszenie się poziomu promieniowania w jakimś miejscu pojemnika będzie wskazywało na nieszczelność. Największe natężenie promieniowania zaobserwujemy w miejscu przecieku. Metoda ta jest całkowicie bezpieczna, ponieważ ilości i aktywności izotopów radioaktywnych mogą być bardzo małe, a używane są takie radioznaczniki, które nie wchodziły w skład łańcucha pokarmowego istot żywych.

Trochę inną metodę stosuje się w badaniach szczelności rurociągów z gazem czy ropą. Polega ona na wprowadzeniu do rurociągu zarówno sondy (detektora promieniowania) jak i znacznika promieniotwórczego (słabo aktywnego i krótkożyłowego). Płyną one wspólnie rurociągiem. Jeżeli ilość promieniowania wykrywanego przez detektor zaczyna spadać, oznacza to, że w danym miejscu istnieje jakiś przeciek. Można oczywiście zastosować też metodę opisaną wcześniej.



Wnętrze sondy promieniowania wpuszczanej do rurociągu



Sonda po zamontowaniu w całości

Okładamy interesujące nas miejsce czułymi detektorami gamma (rurociągi są zwykle zakopane pod ziemią, a sondy mocujemy nad gruntem) i umieszczamy w rurociągu znacznik promieniotwórczy. Dzięki znajomości zasad pochłaniania promieniowania przez glebę i sam rurociąg możemy bardzo dokładnie określić miejsce i wielkość przecieku.

Podobna technika służy **analizie przepływu wód gruntowych i przepływów zanieczyszczeń**. Wlewając do zbiornika niewielką ilość odpowiednich substancji promieniotwórczych powodujemy, że ciecz staje się lekko promieniotwórcza. Dzięki pomiarom w różnych punktach zlewiska możemy dowiedzieć się, gdzie rozplywa się woda lub ścieki. Szczególnie ważne jest to w kopalniach, w których przebieg konkretnej żyły wodnej jest często kluczową sprawą. Podobnie jak przy kontroli jakości, metoda jest całkowicie bezpieczna.

Warto podkreślić, że korzystając z radioznaczników staramy się wykorzystywać izotopy krótkożyłowe, co istotnie zmniejsza uciążliwość dalszego postępowania z pozostałymi po takich procedurach ewentualnymi odpadami promieniotwórczymi.

Ponieważ umiemy określić, jak bardzo jest osłabiane dane promieniowanie podczas przejścia przez różne rodzaje i grubości osłon, możemy budować urządzenia służące do pomiarów gęstości, grubości i stężenia substancji. Jako źródła używamy w tym celu przede wszystkim izotopów emitujących promieniowanie gamma: cezu ^{137}Cs , kobaltu ^{60}Co i irydu ^{192}Ir . Przykład zastosowania izotopów (emitujących promieniowanie beta) do badania grubości papieru podawaliśmy wcześniej. Urządzenia, na które warto zwrócić uwagę to wagi izotopowe oraz mierniki zapylenia powietrza.

Wagi izotopowe służą do bezdotykowego określenia masy substancji np. węgla. Umieszczając nad ładunkiem źródło i mierząc natężenie promieniowania detektorem po drugiej stronie jesteśmy w stanie określić całkowitą masę węgla. Wagi izotopowe są stosowane przede wszystkim przy podajnikach paliwa w elektrociepłowniach, ponieważ pozwalają na określenie zużycia węgla w każdej godzinie, dniu i miesiąc.

Mierniki zapylenia powietrza działają dzięki zjawisku osłabiania promieniowania (stosujemy tu z reguły promieniowanie β) przechodzącego przez materię. Osadzający się na filtrze pył stanowi barierę dla promieniowania. Mierząc absorpcję promieniowania i znając objętość przepuszczonego przez filtr powietrza można wyznaczyć zapylenie środowiska. Jest to w gruncie rzeczy inna metoda określania masy substancji, w tym wypadku - osadzonych pyłów.

W zasadzie ta sama idea pomiarowa leży u podstaw **defektoskopii** materiałów. Ustawiając źródło po jednej stronie badanej substancji, a radiometr po drugiej i przesuwając je równoległe do siebie, jesteśmy w stanie określić miejsce położenia defektu. Metoda ta szeroko stosowana jest do kontroli rurociągów, spawów itp.. Najczęściej używanym izotopem jest tu ^{137}Cs (czasem ^{192}Ir), a także ^{60}Co .

Nauka posługuje się znacznikami promieniotwórczymi w wielu dziedzinach: od biologii, medycyny czy agrotechniki do archeologii i nauk o Ziemi, przy wytwarzaniu nowych leków, badaniach rolniczych, tworzeniu i rozwoju odmian roślin odpornych na choroby, produkcji nawozów. Małe ilości materiałów promieniotwórczych służą do obserwacji ruchów różnych zanieczyszczeń w środowisku. W geologii określa się wiek skał i bada dryf kontynentalny na podstawie zawartości odpowiednich naturalnych radionuklidów w skałach. Archeolodzy szeroko korzystają z badań zawartości izotopu węgla ^{14}C dla określania wieku znalezisk organicznych.

3.2. TECHNIKI RADIACYJNE

Techniki radiacyjne, tj. techniki korzystające z naświetlania materiałów promieniowaniem jonizującym, wykorzystuje się do modyfikacji własności ciał stałych, np. półprzewodników, do barwienia tkanin, szkła i kamieni jubilerskich. Te ostatnie działania polegają na wprowadzeniu do materiału odpowiednich defektów strukturalnych przez bombardowanie go wiązką neutronów, protonów, cząstek alfa itp.

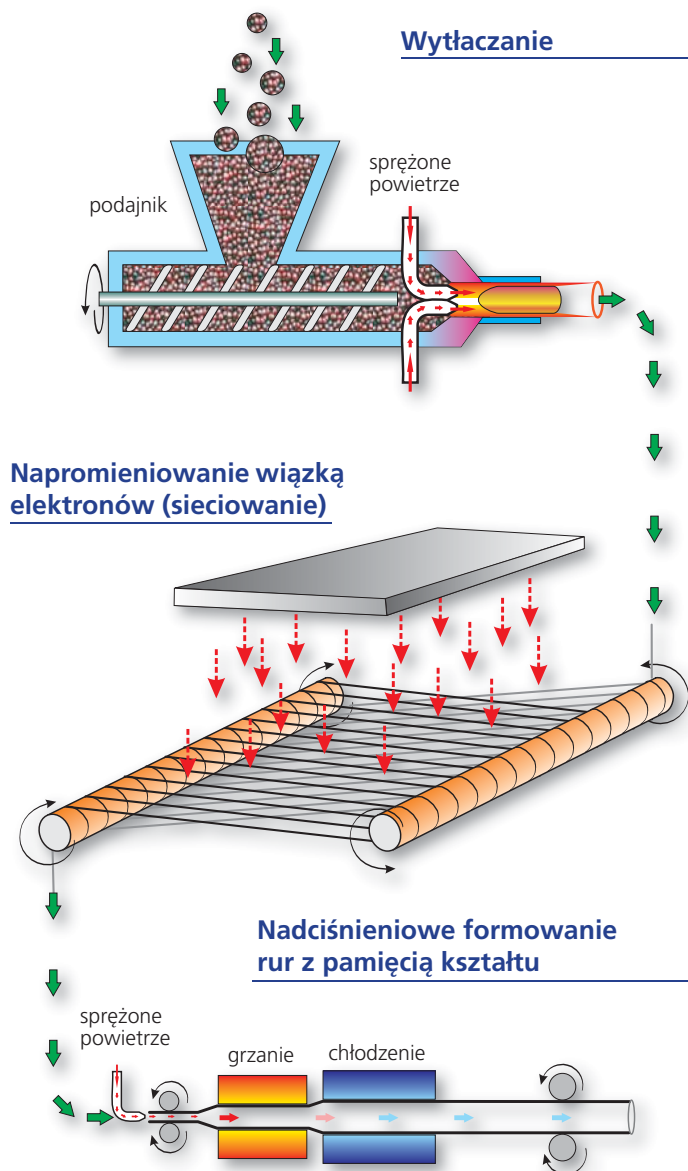


Rurki termokurczliwe i przykłady ich zastosowania jako izolacji elektrycznej

Dzięki bombardowaniu np. folii polietylenowej ciężkimi jonami z akceleratora lub fragmentami rozszczepienia otrzymujemy w polimerze bardzo małe kanały uszkodzonego materiału, który są bardzo podatne na wytrawienie chemiczne - treki (od ang. track - ślad). W wyniku odpowiedniego chemicznego wytrawienia powstają siatki z otworami o żądanej średnicy (kontrolowanej czasem procedur chemicznych) np. 0,2 mikrometra. Tak wytworzone siatki stosuje się np. jako filtry w kroplówkach. Polietylen ma jeszcze jedną ciekawą cechę. Naświetlony - zapamiętuje swój kształt. Możemy wytworzyć maleńkie rurczki, naświetlić je wiązką elektronów, a następnie rozciągnąć. Po podgrzaniu do temperatury około 150°C średnica rurek potrafi zmniejszyć się nawet do połowy, przylegając ściśle np. do przewodu elektrycznego. Na tej zasadzie działają rurki i taśmy termokurczliwe, szeroko stosowane w przemyśle elektrycznym i elektronicznym. Proces produkcji rurek pokazany jest schematycznie na rysunku.

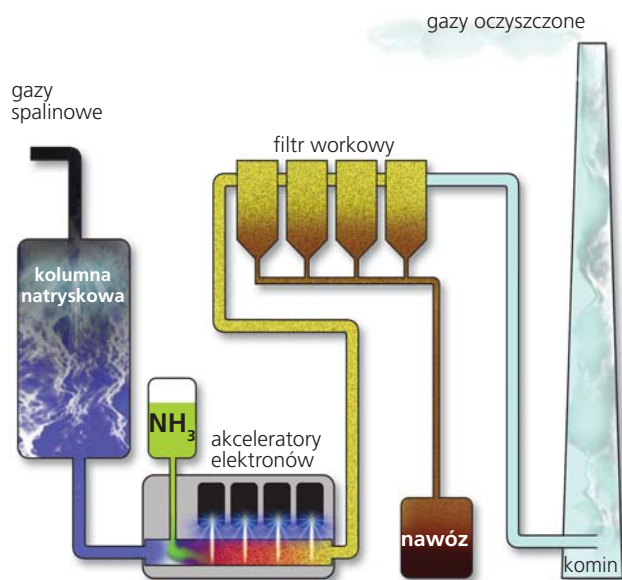


PROCES PRODUKCYJNY RUR TERMOKURCZLIWYCH ORAZ TAŚM Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU - SCHEMAT



W ostatnim okresie wykorzystano techniki radiacyjne do **oczyszczania gazów odlotowych** (spalin) powstających w elektrowniach węglowych. Dzięki zjawisku wzbudzenia cząsteczek gazu za pomocą wiązki elektronów można utleniać związki siarki (SO_2) i azotu (NO_x). Po doprowadzeniu do ich reakcji z parą wodną i neutralizacji amoniakiem otrzymujemy nawozy sztuczne (będące mieszaninami siarczanu amonowego ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) i azotan amonowego NH_4NO_3). Cała stacja służąca do usuwania tlenków siarki i azotu ze spalin w elektrociepłowni i wytwarzania „przy okazji” nawozów jest mniejsza i tańsza w budowie i eksploatacji od standardowych stacji oczyszczających, a uzyskiwane nawozy są chemicznie czystsze od uzyskiwanych dotychczasowymi metodami. Takie instalacje (pokazane na poniższym schemacie) już działają w elektrowni Pomorzany oraz w Chinach (instalacje Chengdu i Hangzhou).

Napromieniowanie lotnych produktów spalania węgla wiązką elektronów zmniejsza emisję dwutlenku siarki o 98%, a tlenków azotu o 70-90%. Metoda ta pozwala nie tylko pozbyć się związków siarki i azotu, ale także chlorowodoru (HCl), fluorowodoru (HF), lotnych związków organicznych (LZO, do których zaliczamy m.in. trójmetylobenzeny,



Schemat instalacji oczyszczania gazów odlotowych

aldehydy, formaldehyd, etanol, estry, metan itp.) i organicznych związków chlorowcopochodnych. Żadne konwencjonalne stacje oczyszczania nie mają tak szerokiego zakresu działania.

Promieniowanie jonizujące o dużym natężeniu i odpowiedniej energii może niszczyć żywe komórki - może więc zabijać drobnoustroje. Z tego względu używane jest często przy **wytwarzaniu artykułów codziennego użytku**, a także do **sterylizowania** materiałów medycznych (igieł, strzykawek, endoprotez, szkielek kontaktowych, a nawet materiałów do niektórych przeszczepów itp.). Promieniowanie jądrowe wykorzystujemy też do **higienizacji**¹⁵ opakowań i kosmetyków. Sterylizację poprzez napromieniowanie prowadzi się już po szczelnym zapakowaniu obiektów.

Napromieniowanie wiązką promieni γ jest jedną z metod **sterylizacji i utrwalaania niektórych produktów żywnościowych**. Uszkodzenie pod wpływem promieniowania jonizującego kwasu dezoksyrybonukleinowego (DNA) powoduje zahamowanie podziału komórki i może doprowadzić do jej śmierci. W ten sposób promieniowanie skutecznie hamuje rozwój bakterii chorobotwórczych, niszczy grzyby i pleśnie oraz zabija szkodniki (owady, larwy, jaja), które mogą być obecne w konserwowanej żywności. Dlatego też napromienienie przypraw, warzyw (np. cebuli i ziemniaków), owoców (np. truskawek), skutecznie przedłuża trwałość wielu produktów, a żywność napromieniana nie różni się w praktyce od świeżej (w wyniku typowego napromieniowania żywności na każde 10 milionów cząsteczek napromienianego obiektu w wyniku przemian radiacyjnych powstaje tylko ok. 6 zmieniowanych cząsteczek. Podobne zmiany obserwuje się w żywności podgrzewanej). W przypadku żywności, w której w okresie składowania nadal trwają utajone procesy życiowe (np. w ziemniakach, cebuli, czosnku itp.), niskie dawki promieniowania wywołują korzystny efekt np. hamowania kiełkowania. Dawki używane przy hamowaniu kiełkowania, czy przy zwalczaniu szkodników nigdy nie przekraczają 0,5 kGy, w konserwacji żywności zaś używa się dawek 5 - 10 kGy. W ten sposób chroni się niektóre owoce, cebulę, ziarno, pieczarki, małe i mięso oraz liczne przyprawy. Jest to bodaj najefektywniejsza z metod eliminacji zakaźnych drob-

noustrojów, jak np. pałeczek słynnej *salmonelli*. Napromieniowanie pozostawia żywność w stanie znacznie bliższym oryginalnemu niż czynią to chemiczne konserwanty, a sama metoda jest bezpieczna i efektywna. Warto wiedzieć, że dobranie właściwych dawek powoduje powstawanie stosunkowo niewielkich ilości nowych związków chemicznych w naświetlanej żywności, a związki te nie są dla ludzi szkodliwe. Naświetlanie nie zmienia właściwości odżywczych i powoduje znacznie mniejsze zmiany niż obróbka cieplna. A ponadto, wbrew powszechnej plotce, naświetlana żywność nie staje się promieniotwórcza, ponieważ do naświetlania używane są zewnętrzne źródła promieniowania gamma (^{60}Co lub ^{137}Cs), podobnie jak człowiek nie zaczyna promieniować po rentgenowskim prześwietleniu płuc.

Napromieniowanie zabija też insekty w ziarnie siewnym. Naświetlając promieniowaniem jonizującym owady, można doprowadzić do ich bezpłodności. Owady takie, wypuszczone do swego naturalnego środowiska, konkurują z innymi przedstawicielami swoich gatunków i doprowadzają do bardzo szybkiego zmniejszenia populacji na danym obszarze. Ta **metoda zwalczania owadów**, poprzez sterylizację, ma kilka znaczących przewag nad używaniem insektycydu: nie powoduje trucia innych istot żywych i powoduje znaczną redukcję populacji.

Promieniowanie jonizujące znalazło także niezwykle ważne zastosowanie w produkcji **radioizotopowych generatorów termoelektrycznych** - źródeł prądu stałego, wykorzystujących zjawisko termoelektryczne. Źródło promieniotwórcze podnosi temperaturę „cieplej” termopary. Gdy temperatury termopar „cieplej” i „zimnej” (podłączonej do radiatora) są różne, pomiędzy nimi zaczyna płynąć stały prąd elektryczny. Takie generatory produkują energię elektryczną zbyt drogą jak na potrzeby dnia codziennego, jednak doskonale sprawdzają się w kosmosie, gdzie służą do zasilania np. satelitów czy aparatury na sondach kosmicznych.

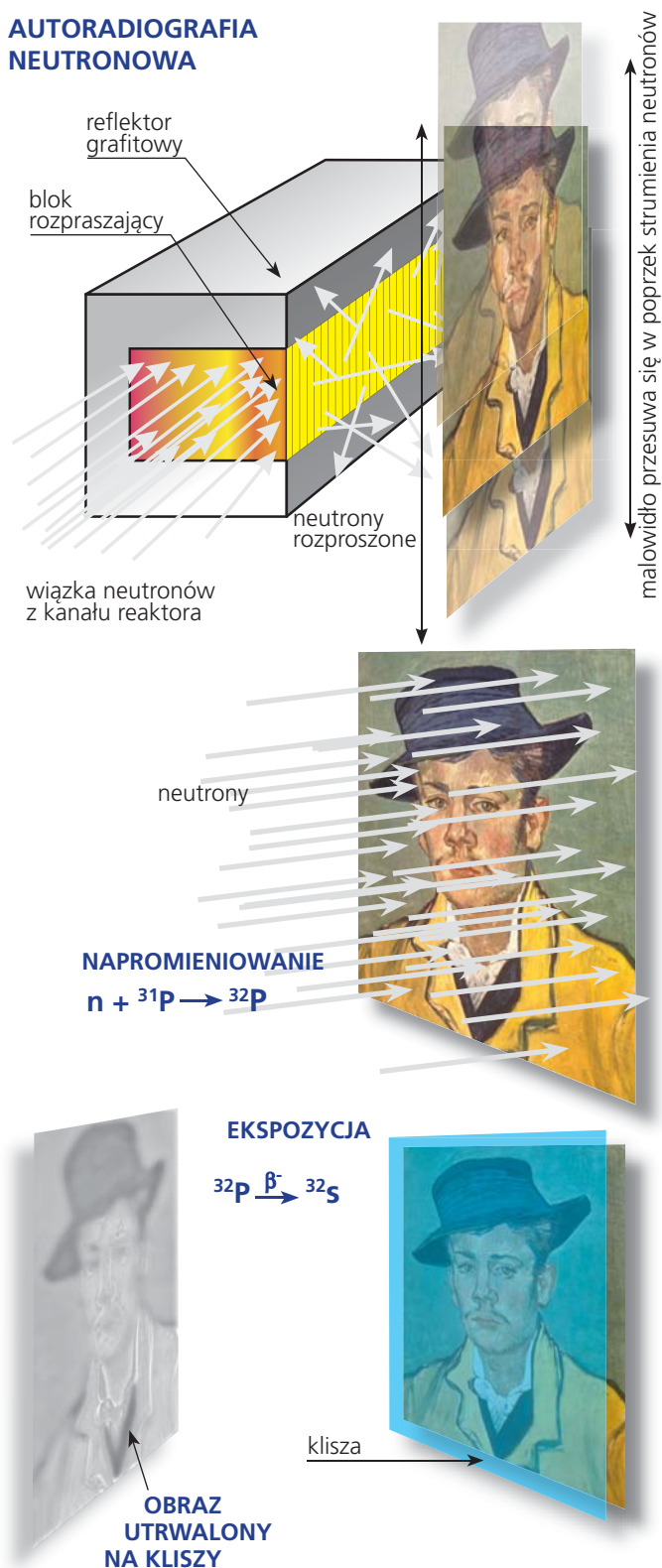
3.3.

ANALIZA AKTYWACYJNA

Omawiając liczne zastosowania promieniowania jonizującego należy wspomnieć o analizie aktywacyjnej, czyli technice pomiaru składu pierwiastkowego materiałów przy pomocy wzbudzania w jądrach atomowych badanego materiału promieniowania α , β lub γ , które dla każdego izotopu poszukiwanego pierwiastka jest inne. W ten sposób możemy wykryć zanieczyszczenia w półprzewodnikach, wyznaczyć zawartość metali ciężkich w odpadach (takich jak np. popiół), określić zawartość azotu w ziarnach zbóż, zmierzyć koncentrację azotu, potasu i fosforu w nawozach sztucznych itp. Na szczególną uwagę zasługuje tu **neutronowa analiza aktywacyjna**. Jak sama nazwa wskazuje, punktem wyjściowym jest naświetlenie materiału neutronami. W obiekcie zachodzą reakcje wychwytu neutronów przez jądra atomowe. W ten sposób powstają nowe jądra, będące najczęściej izotopami promieniotwórczymi o znanych właściwościach (okresach połowicznego rozpadu i znanej energii promieniowania γ). Natężenie mierzonego promieniowania o określonej energii pozwala na precyzyjne wyznaczenie zawartości poszukiwanego pierwiastka, z precyzją czasem nawet o kilka rzędów wielkości lepszą niż konwencjonalne metody chemiczne.

¹⁵ W literaturze medycznej zwykło się odróżniać sterylizację, w którym to procesie materiał naświetla się dawką do 25 kGy (tak jest przy sprzęcie medycznym i biomateriałach zastępujących kilkanaście z różnych tkanek ludzkich) od higienizacji, kiedy to dawka nie przekracza 6 kGy (kosmetyki, opakowania itp.)

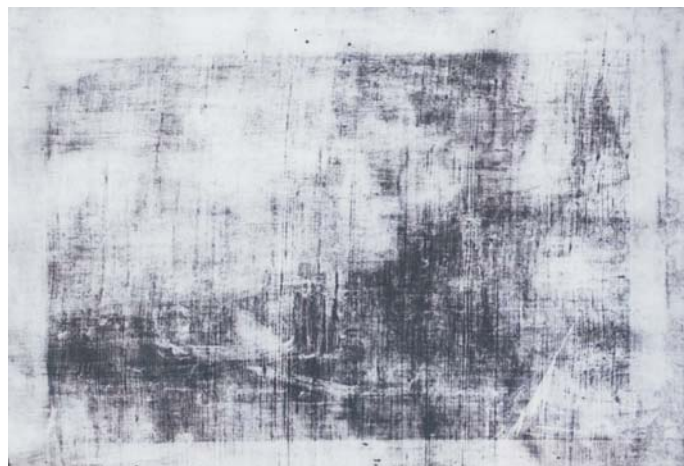
AUTORADIOGRAFIA NEUTRONOWA



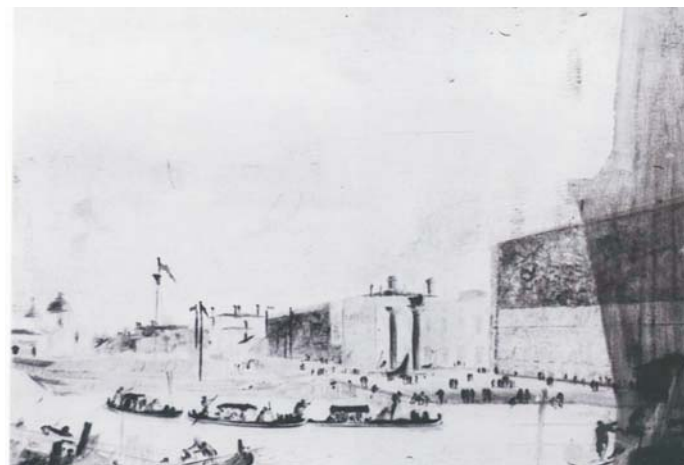
Obraz Tintoretta - zastosowanie radiografii neutronowej



Obraz Michele Marieschi (1710-1744), Pałac Dożów w Wenecji, (41cmx25cm), Muzeum Narodowe w Warszawie



Rentgenogram tego samego obrazu. Biała farba ołowiowa powoduje słabą czytelność



Radiogram, 48 godzin po aktywacji. Widać ślady po wcześniejszych próbach namalowania innego obrazu.

Możliwe jest również użycie promieniowania jądrowego α , β lub γ do emisji tzw. charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego, które powstaje tylko w powłokach elektronowych atomów i jest dla każdego pierwiastka inne.

Neutronową analizę aktywacyjną stosuje się też do identyfikacji dzieł sztuki. Znając skład chemiczny farb stosowanych w dawnych epokach, możemy określić, kiedy dzieło powstało i czy jest oryginalne. Na „zdjęciach” możemy zobaczyć również wewnętrzne warstwy obrazów, co daje możliwość studiowania techniki pracy artystów. Tę metodę wykorzystuje się także w archeologii, oceanografii, kosmologii, geologii, w technologiach badań materiałowych, w górnictwie oraz w kryminalistyce.

3.4.

BADANIA WIEKU OBIEKTÓW, CZYLI DATOWANIE

Omawiając zastosowanie izotopów promieniotwórczych trudno nie wspomnieć o datowaniu, tj. badaniu wieku obiektów. Dotychczas opracowano kilkanaście metod datowania z wykorzystaniem wiedzy na temat izotopów promieniotwórczych. Dla znalezisk organicznych najbardziej podstawową pozostaje metoda węgla ^{14}C . Metoda ta opiera się na fakcie, że wszystkie żywe organizmy w trakcie swojego istnienia wymieniają z otoczeniem węgiel. W węglu znaną domieszkę stanowi promieniotwórczy izotop ^{14}C o okresie połowicznego rozpadu 5730 lat. Po śmierci organizmu „dowóz” węgla z pokarmem ustaje, a więc względna zawartość ^{14}C zaczyna spadać ze względu na rozpad promieniotwórczy tego izotopu. Stąd wiemy, że organizm, u którego jest np. 4 razy mniej węgla radioaktywnego niż normalnie, zmarł 11460 lat temu. Metoda radiowęglowa dotyczy obiektów powstałych nie dawniej, niż 40 000 lat temu.

Oczywiście, do datowania możemy wykorzystywać i inne izotopy – zależnie od wieku, który chcemy ocenić. Np. dla minerałów, zmieniających się w „geologicznej” skali czasu (planeta Ziemia liczy sobie ok. $4,5 \cdot 10^9$ lat = 4 500 000 000 lat) niezbędny tu zegar, związany z procesem rozpadu promieniotwórczego, powinien działać w zupełnie innej skali czasu niż izotop ^{14}C .

3.5.

ZASTOSOWANIA IZOTOPÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W MEDYCYNIE



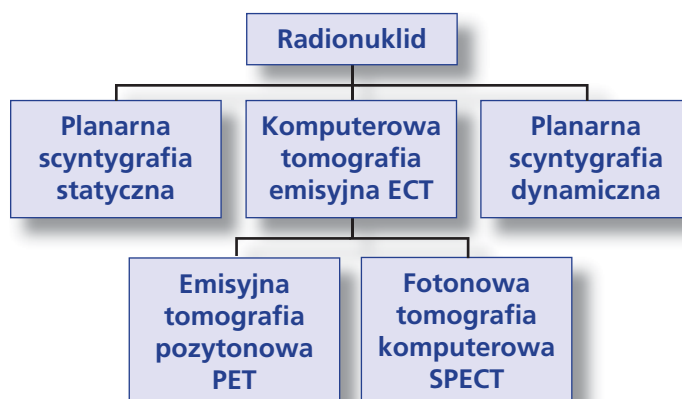
Bomba kobaltowa – ważne narzędzie w terapii nowotworów

Medycyna jest tą dziedziną, w której szczególnie szeroko stosuje się promieniowanie. Na świecie wykonuje się rocznie ponad kilkadziesiąt milionów procedur medycznych z wykorzystaniem radioizotopów lub promieniowania jonizującego wytwarzanego sztucznie i miliardy badań, w których wykorzystuje się promieniowanie rentgenowskie. Zakłady medycyny nuklearnej czy oddziały radiologiczne znajdują się w wielu szpitalach. Promieniowanie służy zarówno do diagnostyki (zdjęcia rentgenowskie klatki piersiowej, kości czy zębów), jak i do terapii (źródłem promieniotwórczym jest tu izotop kobaltu ^{60}Co stanowiący serce tzw. bomby kobaltowej).

Medycyna nuklearna, wykorzystując źródła izotopowe, wykrywa szereg schorzeń zanim wystąpią symptomy choroby i zapobiega niepotrzebnym zabiegom chirurgicznym. Skanowanie czy obrazowanie, dzięki którym możemy wykryć zmiany w kościach i innych organach, jest z reguły poprzedzone podaniem pacjentowi substancji promieniotwórczej, której promieniowanie jest następnie monitorowane przez system detektorów. Dzięki podaniu odpowiednich ilości **radiofarmaceutyków**, które gromadzą się następnie w tkance nowotworowej, można określić zarówno miejsce guza, jak i zniszczyć go, nie niszcząc przy tym zdrowej tkanki w jego sąsiedztwie.

Znaczniki izotopowe pozwalają badać **procesy biologiczne** zarówno w żywym organizmie (in vivo), jak i po wypreparowaniu tkanek czy płynów ustrojowych (in vitro).

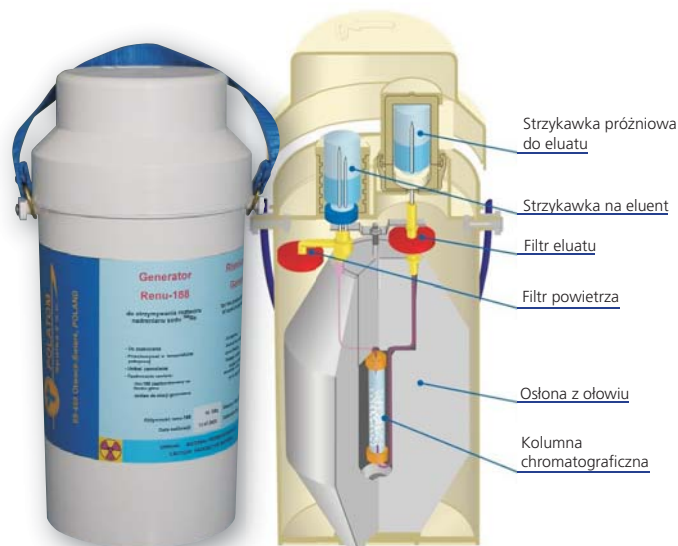
Typowymi izotopami wykorzystywanymi w tym celu są jod ^{131}I (używany również do terapii radioizotopowej) oraz technet $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Część analiz można prowadzić bez kontaktu pacjenta z izotopami radioaktywnymi. Niektóre izotopy (np. jod ^{125}I czy tryt ^3H) używane są w rutynowych analizach chemicznych, w których określa się poziom hormonów czy cechy krwi i moczu. Zastosowanie radionuklidów w medycynie nuklearnej, a ściślej mówiąc – w obrazowaniu organów wewnętrznych, pokazane jest schematycznie na rysunku.



Kamera PET

Stosunkowo najbardziej rozpowszechnionym w technice PET i SPECT izotopem jest technet $^{99\text{m}}\text{Tc}$, gdzie symbol „m” oznacza, że mamy do czynienia z izotopem metastabilnym, lub mówiąc prościej – o stosunkowo długim okresie połowicznego rozpadu. Izotop ten powstaje w wyniku roz-

padu izotopu molibdenu ^{99}Mo i jest wytwarzany w tzw. generatorach molibdenowo-technetowych. Na rysunku pokazujemy zdjęcie i schemat generatora izotopowego.



Widok i schemat generatora izotopu renu-188 (^{188}Re) prod. POLATOM, obok ogólny schemat generatora. W wypadku generatora molibdenowo-technetowego materiał wejściowy, zawierający ^{99}Mo , znajduje się w tzw. eluencie, natomiast wyjściowy, zawierający ^{99m}Tc – w eluacie.

3.6. KRÓTKIE PODSUMOWANIE

Z powyższego przeglądu wynika, że zastosowanie metod izotopowych można podzielić na trzy kategorie:

- Technologie radiacyjne, polegające na napromieniowaniu substancji w celu uzyskania zmian fizycznych lub chemicznych.
- Metody radioznacznikowe, polegające na wprowadzaniu izotopu promieniotwórczego - znacznika do badanej substancji i pomiaru zmian (w czasie i przestrzeni) usytuowania znacznika w badanych obiektach.
- Radioizotopowe metody pomiarowe, wykorzystujące izotopy promieniotwórcze do badań obiektów. W tej kategorii znajduje się np. badanie wieku znalezisk z przeszłości i analiza aktywacyjna.

Jak próbowaliśmy pokazać:

- Promieniowanie jądrowe służy badaniu materiału, ale nie czyni substancji badanej promieniotwórczą. Przykładami są tu badania np. grubości spawów, czy wzbudzenie t.zw. fluorescencji rentgenowskiej celem zbadania składu pierwiastkowego obiektu: promieniowanie jądrowe pobudza tutaj jedynie atomy (a nie jądra) do promieniowania i takie pobudzenie nie powoduje zmian składu chemicznego i fizycznego badanej substancji.
- Promieniowanie jądrowe może inicjować przemiany jąder atomowych badanego materiału, w wyniku czego powstają nowe izotopy lub pierwiastki. Jeżeli są one promieniotwórcze, możemy je zidentyfikować mierząc powstające promieniowanie α , β lub γ . W wyniku zaistniałych przemian jądrowych skład chemiczny obiektu może ulec zmianie.
- Promieniowanie jądrowe może służyć zmianie własności materiału: zabijane są bakterie, pleśnie, insekty, modyfikuje się strukturę i inne własności fizyczne ciał stałych.
- Badania zawartości różnych izotopów (zarówno stabil-

nych jak i promieniotwórczych) znajdujących się w materiale służą zdobywaniu informacji naukowych z zakresu geologii, geo - i astrofizyki, datowaniu w archeologii i wielu, wielu innych gałęzi wiedzy.

Należy jednak pamiętać, że stosowanie materiałów promieniotwórczych w działalności człowieka zawsze prowadzi do powstania odpadów promieniotwórczych, głównie nisko- i średnioaktywnych. Dziś (rok 2010) brak energetyki jądrowej w Polsce powoduje, że niewielka produkcja odpadów wysokoaktywnych jest w naszym kraju jedynie wynikiem pracy reaktora badawczego MARIA w Świerku, a tzw. „opinia publiczna” nie wie o tym, że ponad 90% odpadów promieniotwórczych pochodzi z działalności na rzecz ochrony zdrowia! O postępowaniu z nimi mówimy w innym rozdziale naszego opracowania.

3.7.

UZUPEŁNIENIE 1:

Przykłady przemysłów, w których dochodzi do zwiększenia narażenia na promieniowanie jonizujące, pochodzące z naturalnych źródeł¹⁶

Lp	Działalność, przemysł, wyrób	Typowe stężenia radionuklidów	Narażenie zawodowe > 1mSv	Narażenie osób postronnych
1	Fosforany: produkcja nawozów	do kilku kBq/kg (U, Ra)	możliwe	możliwe
2	Kwas ortofosforowy: detergenty, żywność	do 100 kBq/kg (Ra)	możliwe	możliwe
3	Produkcja kwasu siarkowego	żużel z pirytów > 1 kBq/kg		
4	Odwadnianie kopalń węgla	szlamy do 100 kBq/kg	możliwe	(składowanie!)
5	Węgiel i popiół lotny	do 10 kBq/kg	możliwe	możliwe
6	Wytop metali: cyny Sn, ołowiu Pb, bizmutu Bi, tytanu Ti, aluminium Al	do 100 kBq/kg	możliwe	możliwe
7	Stopy magnezu / toru	zawartość Th do 4%	możliwe	możliwe (składowanie!)
8	Ziemie rzadkie: metalurgia, przerób	rudzie mogą zawierać do 10 kBq/kg U oraz do 1000 kBq/kg Th	możliwe	możliwe
9	Piaski w odlewniach	piaski cyrkonowe do 5 kBq/kg piaski monazytowe do 1000 kBq/kg	możliwe	możliwe
10	Materiały ogniotrwałe, ściernie i ceramiczne	jeżeli z cyrkonem, to mogą występować aktywności do 5 kBq/kg U i do 1 kBq/kg Th.	możliwe	
11	Przemysł naftowy i gazowy	1 ÷ 100 kBq/kg Ra, możliwy Th i pochodne	możliwe	możliwe
12	Przemysł pigmentu TiO_2	surowiec: do 10 kBq/kg (U,Th), ścieki: do 5 kBq/kg	możliwe	prawdopodobne

Wyjaśnienia do tabeli:

Zjawisko rozpadu promieniotwórczego, to cecha konkretnego izotopu pierwiastka X o znanej liczbie masowej - np. dla naturalnego potasu mamy w przyrodzie dwa izotopy stabilne (^{39}K , ^{41}K oraz jeden izotop promieniotwórczy, ^{40}K ,

¹⁶ wg. Biuletynu, wydawanego przez Państwową Agencję Atomistyki (PAA): „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” tom 37, nr 1, rok 1999, str. 17 i 18. Szczegółowe przepisy dotyczące narażenia zawodowego - patrz <http://www.paa.gov.pl>. Średnia dawka w Polsce, mierzona od kilkudziesięciu lat to ok. ~3,3 mSv/rok, norma dopuszcza dodatkowo 1 mSv/rok dla osób niezwiązanych zawodowo z jakimkolwiek promieniowaniem jonizującym – szczegóły <http://www.paa.gov.pl>

stanowiący 0,0117 % atomów potasu). Jeżeli wszystkie izotopy danego pierwiastka są promieniotwórcze, to tylko wtedy możemy powiedzieć, że pierwiastek jest promieniotwórczy; przykładami są uran, tor, rad itp.

Zawartość substancji promieniotwórczej **X** w danym materiale **Y** możemy definiować w różny sposób:

- Podajemy zawartość pierwiastka **X** w materiale **Y** w „gramach na gram” lub w procentach, zakładając, że procentowa zawartość poszczególnych izotopów promieniotwórczych pierwiastka **X** jest znana
- Podajemy aktywność (w bekerelach, Bq, czyli liczbie rozpadów na sekundę) określonego izotopu pierwiastka **X** (lub kilku izotopów pierwiastka **X**) dla jednostki masy substancji **Y**

Niekiedy dla scharakteryzowania promieniowania ważna jest energia wydzielana przez izotopy pierwiastka **X** podczas jego rozpadu promieniotwórczego w jednostce masy substancji **Y**.

Przykład:

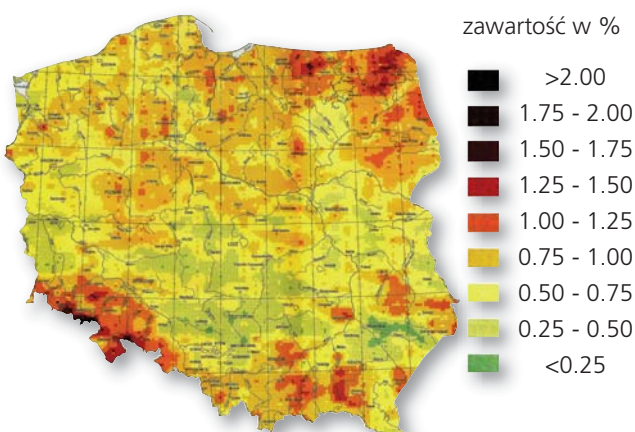
W Polsce zawartość potasu w powierzchniowej warstwie gleby wynosi ok. 0,7% wagowych. W 1 kilogramie gleby mamy więc 7 gramów pierwiastka potasu. Średnia masa atomowa potasu to 39,0983 w jednostkach masy atomowej (przypominamy, że ta jednostka masy jest równa 1/12 masy atomu izotopu węgla, ^{12}C , oznaczana jest skrótem **u** i wynosi $1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg). Liczba atomów w gramocząsteczce potasu (~39 gramów) to liczba Avogadro, $6,022 \cdot 10^{23}$. Wobec tego w jednym kilogramie gleby mamy średnio $(7/39) \cdot 6,022 \cdot 10^{23}$ atomów potasu. Liczba atomów izotopu ^{40}K stanowi ułamek 0,0117·0,01 tej liczby, a więc $1,26 \cdot 10^{19}$.

Znając okres połowicznego rozpadu izotopu ^{40}K , wynoszący $1,28 \cdot 10^9$ lat = $4,04 \cdot 10^{16}$ sekund, możemy oszacować liczbę rozpadów promieniotwórczych w kilogramie gleby:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{0,693}{4,04 \times 10^{16}} \times 1,26 \times 10^{19} = 0,22 \text{ kBq}$$

Średnio w każdym kilogramie gleby w Polsce zachodzi więc ok. 220 rozpadów promieniotwórczych na sekundę. Mówimy, że oczekiwana średnia aktywność gleby, wynikająca z takiej średniej zawartości izotopu ^{40}K , wynosi 220 Bq/kg.

Pomiary opublikowane w 1996 r. przez Państwowy Instytut Geologiczny - atlas radiologiczny Polski - pokazały w 19 496 punktach pomiarowych, że zawartość potasu w Polsce wynosi od 0,10 % do 2,80 %, (średnia arytmetyczna 0,74 %, mediana 0,70 %).



Rozkład zawartości potasu w Polsce

3.8.

UZUPEŁNIENIE 2

Przykłady zastosowania niektórych izotopów promieniotwórczych

Ameryk-241 (^{241}Am)

– czujniki dymu, pomiary zawartości toksycznego ołowiu w suchych farbach, zapewnienie jednorodnej gęstości materiału produkowanego taśmowo, jak np. papieru, źródła kalibracyjne, źródło (w połączeniu z berylem) do rozruchu badawczych reaktorów jądrowych oraz do badań w wierceniach dla geologii i geofizyki, mierniki grubości, źródła do analizatorów fluorescencji rentgenowskiej (XRF);

Azot-13 (^{13}N)

– stosowany w PET;

Brom-76 (^{76}Br)

– stosowany w PET;

Cez-137 (^{137}Cs)

– terapia nowotworów, pomiary dawkowania promieniotwórczych radiofarmaceutyków, pomiary przepływów cieczy w rurociągach, zapewnienie odpowiedniego zapewnienia opakowań żywności i innych produktów (zbadane produkty nie stają się, oczywiście, promieniotwórcze), sterylizacja i konserwacja żywności, źródła kalibracyjne;

Chrom-51 (^{51}Cr)

– badania przeżywalności czerwonych ciałek krwi;

Fluor-18 (^{18}F)

– stosowany w PET;

Fosfor-32 (^{32}P)

– badania z zakresu biologii molekularnej;

Gal-68 (^{68}Ga)

– stosowany w PET;

Iryd-192 (^{192}Ir)

– testowanie jakości spawów w rurociągach, zbiornikach i częściach samolotów, radiografia przemysłowa, brachyterapia;

Jod-123 (^{123}I)

– diagnostyka tarczycy;

Jod-124 (^{124}I)

– stosowany w PET;

Jod-125 (^{125}I)

– diagnostyka tarczycy;

Kaliforn-252 (^{252}Cf)

– wykrywanie materiałów wybuchowych w bagażu pasażerów linii lotniczych, pomiary wilgotności materiałów przechowywanych w silosach i gleb używanych w konstrukcji dróg oraz wilgotności materiałów używanych w konstrukcjach budowlanych, źródła stosowane przy wierceniach w geologii i geofizyce;

Kobalt-57 (^{57}Co)

– medycyna nuklearna, badania podstawowe w fizyce ciała stałego;

Kobalt-60 (^{60}Co)

– sterylizacja narzędzi chirurgicznych, konserwacja żywności (drób, owoce, przyprawy), radiografia przemysłowa, źródła kalibracyjne;

Ksenon-133 (^{133}Xe)

– badania wentylacji płuc i przepływu krwi w medycynie nuklearnej;

Miedź - 64 (^{64}Cu)

– stosowany w PET;

Nikiel-63 (^{63}Ni)

– detekcja materiałów wybuchowych, regulatory napięcia w układach elektronicznych;

Fosfor-32 (^{32}P)

– badania z zakresu biologii molekularnej;

Pluton-238 i 239 (^{238}Pu , ^{239}Pu)

– paliwo jądrowe, ^{238}Pu jest stosowany w RTG - radioizotopowych generatorach termoelektrycznych) do zasilania urządzeń w satelitach i w badaniach kosmosu, w rozrusznikach serca; źródła kalibracyjne. ^{239}Pu w połączeniu z berylem stosowany jest jako podręczne źródło neutronowe;

Polon-210 (^{210}Po)

– redukcja ładunku statycznego w produkcji błon fotograficznych i płyt gramofonowych, a także papieru. Używany też w źródłach neutronów Po-Be;

Sód-24 (^{24}Na)

– detekcja miejsc wycieku w przemysłowych rurociągach;

Stront-90 (^{90}Sr)

– generatory radioizotopowe (RTG), mierniki grubości;

Technet-99 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)

– izotop najczęściej wykorzystywany w medycynie nuklearnej do diagnostyki organów wewnętrznych (litera „m” oznacza stan metastabilny izotopu, gwarantujący tu odpowiednio długi okres połowicznego rozpadu);

Tlen-15 (^{15}O)

– stosowany w PET;

Tor-232 (^{232}Th)

– paliwo jądrowe dla reaktorów powielających; tor, jako pierwiastek, używany jest także jako dodatek do wolframu w elektrodach spawalniczych. Daje on większą stabilność iskry i mniejsze zanieczyszczenia spawu;

Tryt (^3H)

– badania metabolizmu nowych leków, farby świecące, materiał targetowy w generatorach neutronów, służących do wykrywania przemytu materiałów wybuchowych;

Uran-235 (^{235}U)

– paliwo jądrowe; uran jest używany do barwienia szkła, dodatek do szkła fluoryzującego;

Uran-238 (^{238}U)

– paliwo jądrowe, szczególnie w tzw. reaktorach prędkich;

Wapń-47 (^{47}Ca)

– biomedyczne badania funkcjonowania komórek i rozwoju kości u ssaków;

Węgiel-11 (^{11}C)

– stosowany w PET;

Węgiel-14 (^{14}C)

– datowanie znalezisk, badania nowych leków celem sprawdzenia braku ich szkodliwości.

W typowym obiegu handlowym mamy ok. 110 izotopów promieniotwórczych. Wśród nich zastosowania znajdują też takie izotopy, jak:

german-68 (^{68}Ge)

promet-147 (^{147}Pm)

kiur-244 (^{244}Cm)

tuł-170 (^{170}Tm)

złoto-198 (^{198}Au)

rad-226 (^{226}Ra)

selen-75 (^{75}Se)

krypton-85 (^{85}Kr)

iterb-169 (^{169}Y)



4. ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE I POSTĘPOWANIE Z NIMI

4.1.

RODZAJE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dn. 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalnego paliwa jądrowego (Dziennik Ustaw z 2002 r., nr 230, poz. 1925), wszystkie odpady promieniotwórcze dzielone są na nisko-, średnio- i wysokoaktywne, przy czym każdy z tych rodzajów klasyfikowany jest także z punktu widzenia czasu życia (okresu połowicznego rozpadu), jak na poniższym diagramie. Oddzielną kategorię stanowią zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze.



Odpady wysokoaktywne - niezależnie od aktywności, będącej podstawą klasyfikacji, to głównie odpady o dużej zawartości uranu. Do tej grupy zaliczamy **wypalone paliwo jądrowe** oraz pozostałości po jego przetworzeniu. W Polsce producentem takich odpadów był reaktor EWA, a obecnie jest nim reaktor MARIA (oba w Świerku). Ponieważ w Polsce nie przerabia się ani paliwa, ani rudy uranowej, nie ma innych źródeł powstawania odpadów o wysokiej aktywności. Wszystkie inne odpady zaliczamy do kategorii odpadów o średniej lub niskiej aktywności. Postępowanie z wypalnym paliwem omawiamy bardziej szczegółowo w kolejnym rozdziale.

Odpady niskoaktywne i średnioaktywne powstają w elektrowniach jądrowych, przemyśle (papierniczym, hutniczym, budowlanym, cukrowniczym), szpitalach (odpady związane z działalnością na rzecz ochrony zdrowia stanowią ponad 90% odpadów przyjmowanych i unieszkodliwianych w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP) w Świerku), uniwersytetach i innych uczelniach wyższych oraz instytutach i innych placówkach badawczych. Na zdjęciu pokazujemy pojemnik transportowy, wykonany ze stali i ołowiu, służący do przewożenia odpadów promieniotwórczych.

Pojemnik transportowy. Gdy zdjęmie się górną pokrywę i wysunie górną szufladę odsłoni się dostęp do wnętrza pojemnika. Zgromadzone w jednym miejscu (np. w szpitalu) odpady są wrzucane przez ten otwór do środka, po czym zamyka się szufladę i blokuje ją mechanicznie, w tym

korzystając z zamka typu yale. Pojemnik, po przyjeździe do Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Świerku, ustawia się nad włazem na odpady, otwiera dolną szufladę, co powoduje, że pojemniki z odpadami wpadają do włazu.



Odpadami są:

- materiały filtrujące wodę w reaktorach jądrowych, zużyte wymiennicze jonowe (jonity)
- materiały i narzędzia używane w rutynowej pracy przy instalacjach jądrowych, jak np. zawory, części pomp, fragmenty rurociągów
- wyposażenie pracowni naukowych, w których stosuje się materiały promieniotwórcze
- pokrowce na buty, fartuchy, ściereczki, ręczniki papierowe itp. używane tam, gdzie człowiek spotyka się z materiałami promieniotwórczymi
- filtry używane do testów zanieczyszczenia powietrza materiałami promieniotwórczymi, a także ciecz używane czasem do rozpuszczania tych filtrów
- pojemniki, ubrania, papier, wata, lignina, płyny i wyposażenie, które miały kontakt z materiałami promieniotwórczymi stosowanymi w służbie zdrowia
- materiały biologiczne używane w badaniach naukowych w różnych działach medycyny i farmacji.

4.2.

PODSTAWOWE ZASADY POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI

Mamy ustalone procedury postępowania z odpadami promieniotwórczymi, które określają sposób gromadzenia i przechowywania odpadów (płynnych w szczególności) i zabezpieczają odpady przed ich przedostawaniem się do środowiska naturalnego. Przepisy ponadto określają, w jaki sposób bezpiecznie transportować i składować odpady promieniotwórcze.

Trzy reguły towarzyszą zabezpieczaniu i przechowywaniu odpadów promieniotwórczych. Należą:

- zredukować ich objętość,
- zapewnić im odporność na działanie wody i rozpraszanie,
- przechowywać w sposób nie zagrażający środowisku.

Dla spełnienia tych warunków należy stosować nie jedną, lecz wiele barier zapobiegających rozprzestrzenianiu się substancji promieniotwórczych oraz pochłaniających promieniowanie. Na taki **system barier** składają się:

- Tworzenie trudno rozpuszczalnych związków chemicznych (koncentratów) wiążących izotopy promieniotwórcze.
- Materiał wiążący (spoiwo), który służy do zestalania odpadów, co przeciwdziała rozsypaniu, rozproszaniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Spoiwem może być beton (działa jednocześnie jako osłona biologiczna), asfalt, polimery organiczne i masy ceramiczne.
- Opakowanie odpadów, zabezpieczające je przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i kontaktem z wodą. Stałe lub zestalone odpady zamykane są na ogół w pojemnikach metalowych lub betonowych i w tej postaci są przewożone, magazynowane i składowane.
- Betonowa konstrukcja składowiska, która stanowi dodatkowe zabezpieczenie odpadów przed działaniem czynników atmosferycznych, zapobiega korozji opakowań oraz migracji substancji promieniotwórczych z miejsca ich składowania.
- Struktura geologiczna terenu. Ta bariera decyduje o wyborze miejsca na lokalizację składowiska. Teren składowiska musi być m.in. asejsmiczny, niezatapiany (np. w czasie powodzi) mało przydatny gospodarczo i oddalony od skupisk ludzkich. Odpowiednie warunki geologiczne i hydrogeologiczne mają zapobiec rozprzestrzenianiu się radionuklidów w glebie i przenikaniu ich do wód gruntowych i powierzchniowych. Np. poziom wód gruntowych powinien być o kilkanaście metrów niższy od poziomu składowiska, a skład podłoża musi przeciwdziałać migracji radionuklidów.
- Impregnująca warstwa bitumiczna pokrywająca wierzchnią warstwę betonu, która zapobiega m.in. przenikaniu wód opadowych do strefy składowania odpadów, uniemożliwia korozję opakowań oraz wymywanie substancji promieniotwórczych.

Skuteczność systemu barier związana jest z ich wielo-stopniowością, zabezpieczającą odpady przed rozsypaniem, rozproszaniem, rozpyleniem i wymywaniem substancji promieniotwórczych. Z tego też względu stopień narażenia środowiska na ujemne skutki promieniowania jonizującego, pochodzącego od składowanych odpadów, jest bardzo niewielki nawet przy założeniu najbardziej pesymistycznych scenariuszy wydarzeń.



Pojemnik na zużyte igły radiowe. Igły wkłada się do pojemniczka stalowego, który jest otoczony grubą warstwą ołowiu, ta zaś betonem i (od góry) ziemią okrzemkową. Grubość stali pojemnika wynosi 5 mm.

W ciągu lat działalności Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, Zakład przejął z różnych instytucji na terenie Polski zużyte źródła wysokoaktywne, głównie ^{60}Co i ^{137}Cs . Dostarczane źródła tego rodzaju znajdują się w oryginalnych pojemnikach osłonowych, które przechowywane są, jak pokazuje kolejne zdjęcie, w specjalnie chronionych pomieszczeniach. Źródła kobaltowe o stosunkowo niskich aktywnościach¹⁷ będą sukcesywnie składowane w Krajowym Składowisku Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie – patrz niżej.



4.3.

WYBÓR MIEJSCA NA SKŁADOWISKO ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Wybór miejsca na składowisko odpadów promieniotwórczych nie jest bynajmniej bardzo prosty. Omówimy tu krótko postępowanie związane z wyborem miejsca na składowisko niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Niezależnie od przepisów bezpieczeństwa, które istnieją we wszystkich państwach, logiczny ciąg zdarzeń każe:

- określić kryteria, którym powinny odpowiadać miejsca na składowiska,
- wyjaśnić ich stan prawny,
- szczegółowo zbadać wytypowane miejsca,
- wybrać jedno z nich.

Podstawowym kryterium wyboru są warunki geologiczne i hydrogeologiczne terenu. Niemniej jednak należy brać pod uwagę szereg innych warunków o ważnym znaczeniu społecznym. Należą do nich:

- ochrona ludności przed uwolnieniem się odpadów promieniotwórczych,
- zabezpieczenie ludzi przed przypadkowym wejściem na teren składowiska,
- zapewnienie bezpieczeństwa ludności podczas działania składowiska oraz
- zapewnienie bezpieczeństwa samego składowiska i okolicy również po jego zamknięciu.

Powyższe warunki oznaczają więc m.in., że przy wyborze miejsca należy uwzględnić choćby takie czynniki, jak przyrost naturalny w danej okolicy, czy też stan świadomości i nastroje lokalnej ludności. Mieszkańcy muszą wiedzieć, że składowisko jest dla nich bezpieczne, co nie zmienia faktu, że mogą domagać się zapewnienia szczególnych

¹⁷ Poniżej $4 \cdot 10^{11}$ Bq

warunków finansowych gminie, na terenie której ma się znaleźć składowisko. Bierze się to choćby stąd, że obecność składowiska może obniżyć wartość terenu i zabudowań nań się znajdujących, a ludność, w obawie o swoje zdrowie, będzie domagała się lepszej opieki medycznej, sprawniejszego systemu ratowniczego (obejmującego wspólne działania miejscowych władz, policji, straży pożarnych, zaplecza medycznego oraz Terenowej Obrony Cywilnej) czy też lepszych dróg dojazdowych itp. Obniżona wartość terenu może z kolei powodować, że do kasy gminnej będą wpływały mniejsze podatki, co gmina będzie chciała sobie niewątpliwie powetować poprzez zapewnienie stosownych opłat od operatorów składowiska.

Jak widać, z wyborem miejsca na składowisko wiążą się dość trudne sprawy, których rozwiązanie wymaga dobrej woli i zrozumienia obu stron. W szczególności, ludność terenu, na którym planuje się zainstalowanie składowiska musi mieć pewność, że w każdej chwili będzie mogła skontrolować prawidłowość działania składowiska poprzez wybrane przez siebie służby monitorujące środowisko naturalne, i że zawsze będzie traktowana jak równorzędny partner. Ta sytuacja nakłada na operatorów składowiska szczególną odpowiedzialność i wymaga od nich umiejętności rzeczowej i życzliwej rozmowy z reprezentantami lokalnej społeczności. Z tego też względu edukacja ludności od najwcześniejszych lat jest sprawą pierwszorzędnej wagi. Odpowiedzialni za pracę składowiska muszą więc na terenie swego działania prowadzić odpowiednią edukację dotyczącą promieniowania jonizującego.

4.4.

TRANSPORT ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Odpady promieniotwórcze przewozi się specjalnie oznakowanym pojazdem. Przewożone pojemniki na odpady muszą być trwale oznakowane zgodnie ze stopniem zagrożenia. Zarówno pojazd, jak i pojemniki muszą spełniać międzynarodowe warunki bezpieczeństwa przewidziane Prawem Atomowym.¹⁸

Międzynarodowym symbolem informującym o przewożeniu materiału promieniotwórczego jest nalepka z „koniczynką” czerwoną lub czarną na żółtym lub białym tle. Dla odpadów o większej aktywności na nalepkach pojawiają się pionowe czerwone kreski (których liczba - od jednej do trzech – zwiększa się wraz ze wzrostem aktywności) oraz dodatkowa informacja o zawartości pojemnika i aktywności przewożonej w nim substancji. Przewożone odpady są starannie oznaczone i ewidencjonowane przed wysłaniem ich w drogę. Dokumentacja wszystkich odpadów jest następnie przechowywana przez **cały okres** ich składowania.



Znaki ostrzegawczo-informacyjne.

Z prawej - znak stosowany na pojemnikach z odpadami

4.5.

UNIESZKODLIWIANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W POLSCE

Unieszkodliwianiem odpadów promieniotwórczych w Polsce zajmuje się Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP) w Świerku, który zapewnia odbiór, transport, okresowe magazynowanie, przetwarzanie, zastalanie oraz składowanie materiałów promieniotwórczych.

Przeciętne roczne ilości odpadów przyjmowanych i unieszkodliwianych w Świerku to 150 m³ niskoaktywnych odpadów ciekłych i 100 m³ stałych, 0,5 m³ średnioaktywnych odpadów ciekłych i 2 m³ stałych oraz ok. 1000 sztuk zużytych źródeł promieniotwórczych. Wraz z wprowadzeniem w Polsce energetyki jądrowej będą powstawały nowe, wysokoaktywne i długozyciowe odpady reaktorowe, co zmieni bilans produkcji odpadów promieniotwórczych.

Każdy etap postępowania z odpadami promieniotwórczymi regulowany jest przez przepisy prawa¹⁹, które określają w szczególności:

- zasady zaliczania odpadów do odpadów promieniotwórczych,
- kwalifikowanie,
- ewidencjonowanie,
- unieszkodliwianie,
- przechowywanie,
- składowanie.

Ciekle niskoaktywne odpady promieniotwórcze są najpierw magazynowane w zbiornikach retencyjnych i podlegają przerobowi po zmniejszeniu ich aktywności w wyniku rozpadu radionuklidów krótkożyciowych. Przerób polega na dodaniu do ścieków substancji pozwalających wytrącić z zawiesiny osad, który mając objętość równą zaledwie 1% początkowej, zawiera większość radionuklidów decydujących (w ponad 99%) o aktywności ścieku. Osad ten (szlam) podlega następnie procesowi zastalania.

Doskonałe rezultaty w procesie unieszkodliwiania niskoaktywnych ciekłych odpadów promieniotwórczych uzyskuje się dzięki zastosowaniu procesu odwróconej osmozy, pozwalającego na rozseparowanie cząsteczek o różnych rozmiarach. W trzystopniowej instalacji odwróconej osmozy stopień oczyszczania ścieków wynosi 99,9% przy wydajności rzędu 2 m³/h.

Ciekle ścieki średnioaktywne są zagęszczane (zateżniane) w instalacji wyparnej. **Metody wyparne** należą do najskuteczniejszych sposobów oczyszczania tych ścieków. Instalacja pozwala na oczyszczanie i zagęszczanie, a więc także redukcję objętości odpadów. Zestaleniu podlega więc zaledwie 1/30 początkowej objętości ścieków. Aktywność destylatu (cieczy pozostałej po oddzieleniu osadu) może być nawet 100 000 razy (!) mniejsza niż aktywność ścieku wyjściowego. W procesie wyparnym usuwane są również zanieczyszczenia typu chemicznego, jak np. metale ciężkie. Metody wyparne są uważane za szczególnie przyjazne środowisku, gdyż czystość powstających w tym procesie mediów, destylatów, jest porównywalna z czystością wód

¹⁸ Ustawa „Prawo Atomowe” z dn. 29 listopada 2000 r. (Dz.U. z 2001 r., nr 3, poz. 18 z późniejszymi zmianami). Rozporządzenie Rady Ministrów z dn. 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. z 2003 r., nr 230, poz. 1925 z późniejszymi zmianami).

¹⁹ Ustawa „Prawo atomowe” w wersji ujednoliconej uwzględniającej zmiany wynikające z ustawy z dnia 12 marca 2004 r (Dz.U. z 2004 r., nr 70, poz. 632)

rzek i jezior kwalifikowanych jako czyste. Destylaty można zatem bezpiecznie wpuszczać do kanalizacji sanitarnej.

Odpady stałe mają z reguły (w 85% przypadków) postać umożliwiającą ich bezpośrednie wkładanie do standardowych pojemników ocynkowanych dwustronnie i zamkniętych pokrywą zabezpieczającą odpady przed kontaktem z otoczeniem. Natomiast samo zestalanie odpadów prowadzi się w drodze:

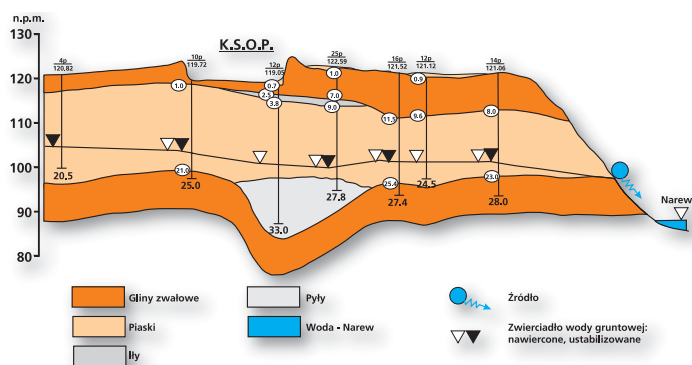
- asfaltowania,
- betonowania,
- zestalania w żywicy epoksydowej lub mocznikowo-formaldehydowej (dot. wyłącznie odpadów biologicznych: zwierząt doświadczalnych).

Zestalone odpady pakowane są w standardowe pojemniki metalowe (hoboki, bębny), ocynkowane dwustronnie i zamykane pokrywą.

Po przeróbce otrzymuje się rocznie 60 m³ zestalonych odpadów o wadze 90 ton, które zajmują objętość ok. 100 m³. Dodatkowe 40 m³ przypada na materiały wiążące – głównie beton.

4.6. SKŁADOWANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W POLSCE

Odpady promieniotwórcze w Polsce są składowane na terenie działającego od 1961 r. Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych – KSOP - w Róźnie nad Narwią. Składowisko to zajmujące obszar 3,2 ha, znajduje się w jednym z dawnych fortów wojskowych, wybudowanych przez władze rosyjskie w latach 1905-1908. Największą zaletą samych fortów są ich grube (1,2÷1,5 m) ściany i stropy betonowe. Zapewniają one pełną osłonność biologiczną ulokowanym w nich odpadom. Wokół zachodniej i południowej granicy Składowiska biegnie sucha fosa o głębokości 2÷6 m. Wody gruntowe znajdują się pod warstwą gliny o bardzo małej przepuszczalności i warstwą gleby o właściwościach sorpcyjnych na głębokości kilkunastu metrów poniżej składowiska (patrz rysunek). Skład podłoża przeciwdziała skutecznie migracji odpadów, które mogłyby na skutek nieszczęśliwych wydarzeń przeniknąć do gleby i rozprzestrzeniać się dalej przez wody gruntowe.



**Przekrój przez system hydrogeologiczny terenu
Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie**

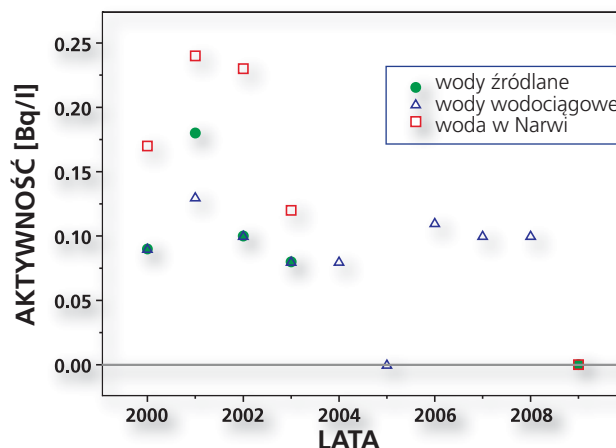
Odpady składa się w budowach betonowych, bunkrach oraz fosie okalającej składowisko. W tej ostatniej przechowuje się jedynie odpady nie zawierające długożyciowych nuklidów alfa-promieniotwórczych. Dno i zbocza fosy pokryte są 20 cm warstwą betonu.

Długożyciowe odpady alfa-promieniotwórcze składowane są w betonowych budowach fortu, komora po komorze, aż do całkowitego ich wypełnienia. Wypełnioną komorę zamyka się szczelnie lub zamurowuje. Odpady te, przed ostatecznym zamknięciem składowiska w Róźnie, będą przeniesione do składowiska docelowego, tzw. składowiska głębokiego.

Gleba, trawa i zboża z otoczenia składowiska, woda gruntowa z odwiertów kontrolnych (piezometrów) umieszczonych na terenie i w otoczeniu składowiska, woda z Narwi, powietrze atmosferyczne (przy dwóch obiektach mierzone jest stężenie radonu), wreszcie poziom promieniowania gamma na terenie i w otoczeniu składowiska, podlegają regularnej kontroli radiologicznej.



Dla przykładu, rysunek pokazuje wyniki pomiarów promieniotwórczości beta wód na terenie i w otoczeniu Składowiska w latach 2000-2009. Wyniki pomiarów wskazują jednoznacznie, że istnienie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych nie ma niekorzystnego wpływu na środowisko gminy Różan. Najwyższy poziom aktywności zanotowany w roku 2001 (0,24 Bq/l) jest niższy od maksymalnego (0,27 Bq/l) notowanego w publicznych ujęciach wody pitnej w rejonach dawnego górnictwa rud uranu²⁰. Z innych danych wynika ponadto, że gmina ta szczyty się jednym z najniższych wskaźników zapadalności na choroby nowotworowe. Pojemność i warunki radiologiczne Składowiska pozwalają na bezpieczne zapewnienie go odpadami jeszcze przez około 10 lat (planowany termin zamknięcia Składowiska to rok 2020).



Całkowita aktywność izotopów beta-promieniotwórczych w wybranych punktach otoczenia KSOP Różan

²⁰ Raport Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z działalności w 2009 r.

Dla zapewnienia maksymalnej obiektywności badań stanu radiologicznego środowiska, prowadzone są one przez jednostki niezależne od Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, a mianowicie:

- Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych Instytutu Energii Atomowej,
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, powołane do wypełniania funkcji kontrolnych i nadzorczych na terenie całego kraju,
- Państwowy Instytut Geologiczny.

4.7.

PODSUMOWANIE

W postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi, podobnie jak i we wszelkich działaniach, w których stosujemy promieniowanie jonizujące, przestrzegamy następujących podstawowych zasad:

1. Korzyści społeczeństwa i osób narażonych na promieniowanie muszą przewyższać straty związane z jego użyciem,
2. Dawki mają być utrzymywane w granicach rozsądku na możliwie najniższym poziomie,
3. Dawki indywidualne od wszystkich źródeł promieniowania mają być ograniczane, a stopień zagrożenia kontrolowany.

Pomimo staranności w doborze procedur i technologii składowania odpadów promieniotwórczych, lokalne społeczności odnoszą się do składowisk różnych odpadów z dużą nieufnością, a nawet strachem. Godząc się na dobrodziejstwa płynące np. z zastosowania metod jądrowych w ochronie zdrowia, z czym związana jest w znacznym stopniu produkcja odpadów, nie udzielają w zasadzie przyzwolenia na składowanie odpadów, utożsamiając ten proces z zagrożeniem zdrowia i życia, szczególnie jeśli składowisko ma być umieszczone w pobliżu własnego miejsca zamieszkania.

Aby ocenić stopień rzeczywistego zagrożenia należy je jednak przedstawić w jakiejś skali dostępnej naszym osądom. Spróbujmy teraz zastanowić się, czy stosowane metody postępowania z odpadami promieniotwórczymi mają wpływ na moc dawki w Polsce. W otaczającym nas świecie znajdują się izotopy promieniotwórcze niektórych pierwiastków – uranu U, toru Th, rubidu Rb, potasu K, węgla C czy wodoru H – są to radionuklidy naturalne. Zastanówmy się, jak wiele tych radionuklidów znajduje się w naszym najbliższym otoczeniu. Za przykładem Lorda Marshalla of Goring (Anglia), którego znakomity wykład o odpadach promieniotwórczych dostępny jest na kasecie wideo, wyobraźmy sobie, że jesteśmy właścicielami ogródka o wymiarach 20 m x 20 m.

Powierzchniowa warstwa gleby o grubości 1 m waży około 600 t, a w zależności od tego, w której części Polski jesteśmy, zawiera (0,6 – 4,2) kg uranu (U), (0,2 – 6,2) kg toru (Th) i (600 – 16800) kg potasu (K). Zauważmy, że w potasie, którego tu jest bardzo dużo, tylko jeden z trzech jego izotopów ^{40}K jest promieniotwórczy i stanowi jedynie 0,0117% jego masy; na każdą tonę naturalnego potasu przypada więc 117 g izotopu ^{40}K . Oznacza to, że metrowa warstwa gleby zawiera od 0,07 kg do 1,96 kg promieniotwórczego potasu. Dawka od takiej warstwy gleby z naszego ogródka – nazwijmy ją

Dawką Ogródkową – w skrócie DOG – pochodzi więc od (1 – 12) kg naturalnych radionuklidów.

W całej Polsce zamieszkuje około 38 milionów osób, więc gdybyśmy zakopali w ogródku naszą „indywidualną”, 1/38 000 000, część odpadów nisko- i średnioaktywnych (innych w Polsce nie mamy), zdeponowanych w ciągu roku w KSOP-Różan, to przybędzie nam 90 000 kg/38 000 000, a więc około 2,5 g – doprawdy niewiele w porównaniu z masą naturalnych radionuklidów w naszym ogródku.

Zakopując w ogródku (metr pod powierzchnią) odpady niskoaktywne na nas przypadające, podnieśliśmy aktywność warstwy zaledwie o 1/32 000 część DOG, a przecież aktywność tych odpadów zanika jeszcze w czasie. Gdyby każdy człowiek zakopał w swoim ogródku także krótkożyciowe odpady średnioaktywne na niego przypadające, zwiększyłby aktywność ogródka o nie więcej niż 1/4800 część DOG, a aktywność i tych odpadów zanika w czasie.

Długożyciowe odpady średnioaktywne, bardzo stężone, należałoby zakopywać już w głębsze pokłady ogródka, np. na głębokość 300 m. Podwyższyłyby one ryzyko, ale zaledwie o 1/30 dawki pochodzącej w naturalny sposób od 300-metrowej warstwy ziemi. Dopiero umieszczenie na tej głębokości odpadów wysokoaktywnych przypadających na człowieka stworzyłoby ryzyko większe niż aktywność naturalna. Z tego też względu – choć i tu czynnik zaniku aktywności odpadów w miarę upływu czasu gra na naszą korzyść – składowanie odpadów wysokoaktywnych podlega szczególnym technologiom i rygorom jeszcze większej ostrożności niż w dwóch poprzednich przypadkach.

Pomijając odpady wysokoaktywne, głównie wypalone paliwo reaktorowe, o którym powiemy w następnym rozdziale, analiza pozostałych wypadków wskazuje więc, że sama natura napromieniowuje nas znacznie większą dawką niż produkowane przez człowieka odpady promieniotwórcze.



Podziękowania:

Dział Szkolenia i Doradztwa IPJ dziękuje Dyrektorom Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Świerku

- panu mgr. Włodzimierzowi Tomczakowi
 - panu mgr. inż. Andrzejowi Cholerzyńskiemu
- a także
- panu mgr inż. Tadeuszowi Matysiakowi,
 - panu mgr. Adamowi Pyrzynie
- za konsultację merytoryczną tekstu tego rozdziału, oraz tekstu podrozdziału 5.8..

5. ENERGIA JĄDROWA

5.1. ENERGIA ZAWARTA W JĄDRZE ATOMOWYM

W części 1. niniejszej broszury przypomnieliśmy podstawową budowę atomu. Tu przyjrzymy się aspektom energetycznym związanym z istnieniem jądra atomowego.

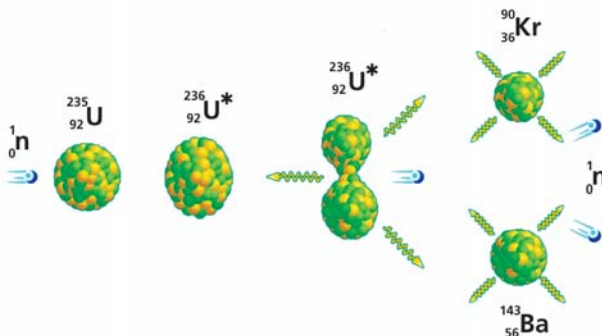
Defekt (niedobór) masy

Kiedy dodajemy do siebie pięć jabłek, każde o masie 200 g, otrzymujemy razem 1 kg jabłek. Jednak, jeśli połączymy w jedno jądro atomowe 80 protonów i 120 neutronów – razem 200 nukleonów o masach ²¹ ponad 1 u każdy (razem $80m_p + 120m_n = 201,622$ u), otrzymamy izotop ²⁰⁰Hg. Jego zmierzona masa wynosi jednak 199,924u, czyli o 1,698 u mniej niż byśmy się spodziewali! To jest tak zwany **defekt masy**: łączna masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas tych 200 nukleonów. Brakująca część masy, Δm , jest równoważna energii, którą układ zyskał po utworzeniu struktury powiązanej siłami jądrowymi. Energia ta, zwana **energią wiązania**, obliczana jest zgodnie ze słynnym równaniem Einsteina, $E = (\Delta m)c^2$, gdzie c oznacza prędkość światła. Jak pokażemy dalej, właśnie tę energię wykorzystujemy w energetyce jądrowej. W szczególności, energię wiązania można wyzwolić w procesie rozszczepienia jądra atomowego, który opiszemy w tym rozdziale.

Energię wiązania atomu podajemy w MeV/nukleon. Jeżeli więc energia wiązania w jądrze atomu izotopu rtęci ²⁰⁰Hg jest równoważna masie ok. 1,7 u, to wynosi 1581,2 MeV. Dzieląc tę liczbę przez 200 - liczbę wszystkich nukleonów jądra ²⁰⁰Hg - otrzymujemy energię wiązania: 7,906 MeV/nukleon.

Reakcja rozszczepienia jest procesem, w którym jądro ciężkiego pierwiastka (o $A > 200$) dzieli się spontanicznie lub w sposób wymuszony na dwa (czasem nawet trzy) ciężkie jądra o porównywalnych masach. W procesie rozszczepienia jąder atomowych część wyzwolonej energii unoszona jest przez inne cząstki (np. neutrony) oraz promieniowanie elektromagnetyczne (fotony gamma). Najbardziej typową reakcją rozszczepienia, wykorzystywaną w reaktorach jądrowych, jest reakcja bombardowania ²³⁵U neutronami termicznymi (tj. neutronami o energii kinetycznej porównywalnej z energią ruchu termicznego cząsteczek powietrza w temperaturze pokojowej, co odpowiada energii kinetycznej neutronu 0,0253 eV i prędkości 2200 m/s). Reakcję rozszczepienia zapisujemy w następujący sposób:

$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{236}\text{U}^* \rightarrow X + Y + (0\div 8)n + \gamma + \text{wyzwolona energia}$



Zapis ten oznacza, że neutron termiczny (n), zaznaczony na rysunku kolorem granatowym, uderza w jądro izotopu uranu (²³⁵U). W wyniku reakcji powstaje jądro uranowe o masie 236, które posiada nadmiar energii – mówimy, że jest to jądro „w stanie wzbudzone”. W wyniku rozpadu ²³⁶U* otrzymujemy nowe jądra izotopów ciężkich pierwiastków (X i Y - tzw. fragmenty rozszczepienia). Mogą być nimi np. ⁹⁰Kr, ⁹⁷Zr, ⁹⁹Mo, ¹³⁷Te, ¹⁴⁰Xe, ¹⁴³Ba i inne. Procesowi towarzyszy promieniowanie gamma, a w zależności od masy powstających fragmentów X i Y , uwolnionych zostaje od 0 do 8 neutronów, które w pewnych warunkach mogą zainicjować kolejne rozszczepienia. „Wyzwolona energia” jest po prostu sumą energii kinetycznych i energii wzbudzenia wszystkich produktów reakcji: X , Y , n i γ .

²³⁵U jest jedynym naturalnym izotopem rozszczepialnym przez neutrony termiczne. Jego koncentracja w naturalnym uranie (głównie ²³⁸U) jest jednak bardzo mała - zaledwie 0,72%. Do wykorzystania go w celach badawczych czy energetycznych (a także militarnych) należy uran wzbogacić. Polega to na odpowiednim zwiększeniu ilości izotopu uranu o masie 235 w stosunku do izotopu uranu o masie 238.

Energia wyzwolana podczas rozszczepienia pojedynczego jądra ²³⁵U wynosi około 200 MeV. Dla porównania: spalanie jednego atomu węgla daje 4 eV, czyli około 50 milionów razy mniej. Ze spalania 1 kg węgla otrzymamy 2,5 miliona razy mniej ciepła niż z przeprowadzenia reakcji rozszczepienia 1 kg uranu. To dlatego elektrownie jądrowe są tak wydajne. Poniższa tabela pokazuje rozkład energii pomiędzy różne produkty reakcji rozszczepienia.

Składowe wyzwolanej energii	Wartość [MeV]
Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia (X i Y)	167
Energia kinetyczna neutronów	5
Energia rozpadów beta	17
Energia promieniowania gamma	7
Razem	196



Ogromna wartość energii wyzwolanej z niewielkiej masy ma również znaczenie dla wojska i stanowi o niszczycielskiej sile bomby atomowej. Energia (na cząsteczkę) wyzwolana podczas eksplozji konwencjonalnego środka wybuchowego, jakim jest TNT (o wzorze chemicznym $(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{CH}_3$), jest

²¹ W fizyce mikroświata masy atomów i jąder atomowych podawane są zazwyczaj w jednostkach o symbolu „u” (w jęz. polskim j.m.a. jednostka masy atomowej, w jęz. angielskim „atomic mass unit”). $1u = 1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg. Równoważność masy i energii – $E = mc^2$ – pozwala nam na wyrażenie tej jednostki w jednostkach energii, jest wtedy równa 931,4943 MeV. Masa protonu $m_p = 1,0072765$ u, masa neutronu $m_n = 1,008665$ u, masa elektronu $m_e = 0,00054858$ u.

około 18 milionów razy mniejsza niż reakcji jądrowej. Należy jednak pamiętać, że nie każde jądro uranu musi rozpaść się podczas reakcji. Pierwsza bomba atomowa zużyła „zaledwie” 6% energii zawartego w niej uranu. Warto jednak wiedzieć, że niszczycielskie działanie bomby jest w większym stopniu związane z działaniem cieplnym i podmuchem powstającym po wybuchu niż z promieniowaniem jądrowym. Na zdjęciu na str. 31: „grzyb atomowy” powstały po eksplozji.



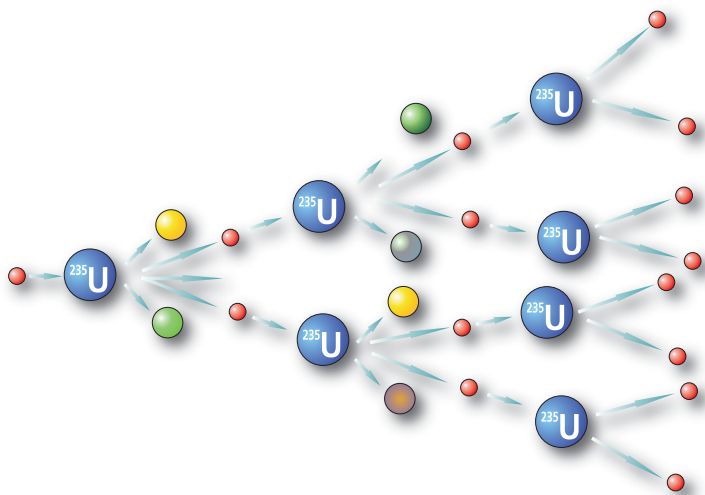
Reakcja rozszczepienia a defekt masy

Energia wiązania, która równoważna jest defektowi masy, wynosi w jądrze uranu 7,59 MeV na każdy nukleon, a we fragmentach rozszczepienia jest większa o około 0,9 MeV/nukleon. Energia uwalniana w pojedynczej reakcji rozszczepienia ^{235}U będzie więc równa iloczynowi liczby nukleonów (236 po absorpcji neutronu) i różnicy energii wiązań - 0,9 MeV. W wyniku mnożenia otrzymujemy około 200 MeV. Odpowiadający tej energii defekt masy nie jest duży, około jednej tysięcznej części masy jądra ^{236}U .

Jest rzeczą interesującą zauważyć, że efekt straty części masy powinien też występować w reakcjach chemicznych - te nie są zasadniczo odmienne od reakcji jądrowych, jednakże różnica mas im towarzysząca, to zaledwie jedna część na miliard, tak więc jest ona niemal niemierzalna ²².

Reakcja łańcuchowa

W pojedynczym akcie rozszczepienia jądra ^{235}U powstaje średnio 2,5 neutronu. Dla uproszczenia przyjmijmy jednak, że tworzą się tylko dwa neutrony. Przyjmijmy dalej, że każdy z nich pochłonięty zostaje przez inne jądro ^{235}U i wywołuje kolejne rozszczepienie, przy czym w każdej takiej reakcji utworzą się dwa neutrony. W wyniku tego procesu otrzymamy w sumie 4 neutrony. Te neutrony mogą wywołać kolejne cztery reakcje, w wyniku których liczba neutronów w układzie zwiększy się do ośmiu.



Na rysunku pokazujemy reakcję łańcuchową właśnie na przykładzie 2 wyzwalanych neutronów (zaznaczonych na czerwono), z których każdy inicjuje kolejną reakcję rozszczepienia. W każdym akcie rozszczepienia, fragmenty rozszczepienia (większe kółka) mogą mieć nieco inne masy: procesem podziału na dwie masy rządzi przypadek. Jak widać z rysunku, liczba neutronów w układzie gwałtownie wzrasta, jak w słynnej opowieści o szachu, który został poproszony o zapłacenie za pracę ziarenkami ryżu.

Pracownik poprosił o tyle ryżu, ile zmieści się na szachownicy, jeśli na pierwszym polu położy się dwa ziarenka, na drugim cztery, na trzecim osiem i na każdym kolejnym dwa razy więcej ziarenek niż położono na poprzednim polu. W ten sposób, jak się okazało, bardzo szybko w całym państwie szacha zabrakło ryżu (nie łatwo sobie wyobrazić, ile to jest 2^{64} ziaren, które powinny się znaleźć na ostatnim polu szachownicy - a jeżeli wiemy, że ziarenko ryżu waży ok. 0,02 g to cały ten ryż waży ok. $4 \cdot 10^{11}$ ton). W podanym wyżej opisie reakcji liczba neutronów stale wzrasta, sama reakcja zaś zwana jest reakcją łańcuchową lub powielającą.

Zauważmy, że w reakcji łańcuchowej nie tylko liczba neutronów gwałtownie wzrasta - energia w układzie również błyskawicznie rośnie, gdyż każdemu rozszczepieniu towarzyszy wspomniana energia 200 MeV. Energia kinetyczna cząstek i jąder uczestniczących w procesie zamieniana jest podczas hamowania w materiale na ciepło.

Wywołując reakcję rozszczepienia w każdym jądrze zawartym w 1 g ^{235}U wyzwolimy energię $(6,023 \cdot 10^{23}/235) \cdot 200 \text{ MeV} = 5,125 \cdot 10^{23} \text{ MeV} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$ ²³. Tak wielką energię ma masa 1000 ton spadająca na powierzchnię Ziemi z wysokości 8,2 km! Energia wyzwolona w eksplozji bomb jądrowych zrzuconych w 1945 roku na Hiroszimę i Nagasaki odpowiadała energii równoważnej wybuchowi ok. 20 000 ton trotylu (około 20 kiloton TNT). Ponieważ w wybuchu 1 kilotony TNT wydziela się energia około $4 \cdot 10^{12} \text{ J}$, więc energia wybuchu 20 kt TNT jest równoważna energii wyzwolonej w całkowitym rozszczepieniu około 1 kg izotopu ^{235}U .

Aby uzyskać moc cieplną 1 MW = 10^6 J/s musimy całkowicie rozszczepiać w każdej sekundzie zaledwie ok. $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ g}$ izotopu uranu-235 (^{235}U), co oznacza, że w ciągu doby zużyjemy ok. 1 grama tego surowca, a w ciągu roku ok. 365 g. Ponieważ w naturalnym uranie zawartość cennego ^{235}U wynosi 0,72%, potrzebowalibyśmy ok. 50,7 kg uranu naturalnego dziennie. Jeśli uwzględnimy fakt, że nie wszystkie neutrony prowadzą do rozszczepienia, masa ta wzrośnie do ok. 61,1 kg. Moc typowej elektrowni wynosi ok. 1000 MW, a więc jej roczne zapotrzebowanie na uran naturalny (przy założeniu pełnego wykorzystania energii z procesu całkowitego rozszczepienia izotopu ^{235}U) wynosi ok. 61 ton. To doprawdy niewiele w porównaniu z setkami wagonów węgla, spalanego w elektrowni węglowej.

²² Masa molekuly wody wynosi 18,0156 u, czyli ok. $1,6 \cdot 10^{10} \text{ eV}$, a średnia energia wiązania to 218 kcal/mol równie 9,4 eV, co stanowi mniej niż jedną miliardową częśći masy molekuly.

²³ Pierwszy mnożnik ($6,023 \cdot 10^{23}$), to liczba Avogadro: liczba atomów (a więc i jąder) w gramocząsteczce, tj. w masie (w gramach) równej liczbie masowej A

5.2. ENERGETYKA JĄDROWA

Nasza cywilizacja potrzebuje ogromnej ilości energii, a rozwój technologiczny pociąga dziś za sobą większe potrzeby energetyczne niż kiedykolwiek przedtem. Dostępne dane wykazują, że PKB („produkt krajowy brutto”) wzrasta ze wzrostem zarówno produkcji jak i zużycia energii. Dane mówią też, że wzrastające krajowe zużycie energii elektrycznej sprawia, że ludzie w nim żyją dłużej. Obecnie na naszym globie większość zużywanej energii pochodzi ze spalania biomasy (głównie drewna) oraz kopalin (węgla, ropy czy naturalnego gazu) - te naturalne nośniki energii jednak wkrótce się prawdopodobnie wyczerpią lub ich cena znacznie wzrośnie. Obecne oceny mówią o czasie od 50 do 150 lat. Prędzej czy później będziemy potrzebowali energii z innych źródeł. Czy energia jądrowa mogłaby być odpowiedzią na ten problem?

Energia pochodząca ze wszystkich źródeł naturalnych, jak energia geotermalna, energia wiatru czy energia promieniowania Słońca - wszystkie one wiążą się z dużymi kosztami inwestycji, a ze względu na zmienny charakter dostępności do energii wiatrowej czy słonecznej, źródła te wymagają mocnego, stabilnego zaplecza – dostarczającego, w razie potrzeby, energii z innych źródeł. Energia wodna (hydroenergia) jest ważnym i tanim źródłem energii i może być takim podstawowym źródłem, ale jej zasoby jednak są w wielu krajach ograniczone przez ukształtowanie terenu, a w wielu zostały już niemal wyczerpane. Z tego właśnie względu nie można oczekiwać, że energia wodna będzie w wielu krajach, wśród nich w Polsce, energią przyszłości. Ponadto, korzystanie z paliw kopalnych niesie całkiem niemałe ryzyko – wystarczy przykładowo wspomnieć liczne w 2010 wypadki górnicze m.in. w Chinach i na Ukrainie, czy zalanie ropą naftową wód Zatoki Meksykańskiej. Geniusz ludzki być może jeszcze wymyśli jakieś inne wydajne i łatwo dostępne źródła taniej energii, jednakże nie możemy zazwyczaj oczekiwać ich szerokiego zastosowania przed okresem około 50 lat od chwili wynalezienia, a więc w czasie porównywalnym z okresem, w którym będą prawdopodobnie wyczerpywać się zasoby obecnych paliw kopalnych. Musimy zatem podjąć w tej sprawie ważne decyzje i to szybko!

Już dziś dysponujemy wielkim i bardzo (bardziej niż inne) wydajnym źródłem energii, a mianowicie - energią jądrową. Jak pokazuje tabela zamieszczona w Uzupełnieniu (podrozdział 5.11), relacja pomiędzy masą jąder atomowych i energią, która wydzielana jest w procesach jądrowych (jak procesy rozszczepienia jąder ciężkich, rozpady promieniotwórcze czy reakcje syntezy jąder lekkich) czyni z jąder atomowych najbardziej obiecujący nośnik energii pierwotnej. Choć koszt inwestycyjny w energetyce jądrowej jest wysoki, koszt energii elektrycznej docierającej do konsumenta okazuje się stosunkowo niski, o czym piszemy niżej. Energia jądrowa może pokryć głód energetyczny ludzkości przez tysiące lat, reaktory powielające zaś mogłyby pokrywać zapotrzebowanie nawet i przez kilka milionów lat! Całkowity koszt energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie jądrowe, obejmujący koszty zabezpieczeń, ochrony przed rozprzestrzenianiem materiałów rozszczepialnych, koszty postępowania z odpadami promieniotwórczymi oraz likwi-

dacji elektrowni „do zielonej trawy” są, jak można dowieść, jednymi z najniższych w branży energetycznej. W energetyce jądrowej w zasadzie nie istnieje problem zanieczyszczeń środowiska. Energetyka ta nie wnosi też wkładu do tzw. globalnego ocieplenia. Zauważmy, że energia elektryczna z każdego 22 ton (!) uranu zapobiega emisji około miliona ton dwutlenku węgla, który byłby konsekwencją wytworzenia takiej samej energii z węgla.

Obecnie około 18% energii elektrycznej produkowanej na świecie pochodzi z energetyki jądrowej. Poniższa tabela pokazuje wykorzystanie energii jądrowej w poszczególnych krajach.

Udział procentowy energii jądrowej w krajowej produkcji energii elektrycznej, liczba bloków energetycznych i całkowita produkowana moc elektryczna, stan na koniec 2008 (źródło: CEA, Elecnucluc, 2009)				
Lp.	Kraj	Udział (%)	Liczba bloków	Moc (MW)
1	Francja	76,18	59	63 260
2	Litwa*	72,89	1	1 185
3	Słowacja	56,42	4	1 626
4	Belgia	53,76	7	5 824
5	Ukraina	47,40	15	13 107
6	Szwecja	42,04	10	9 014
7	Słowenia	41,71	1	666
8	Armenia	39,35	1	376
9	Szwajcaria	39,22	5	3 220
10	Węgry	37,15	4	1 829
11	Korea Południowa	35,62	20	17 451
12	Bułgaria*	32,92	2	1 906
13	Czechy	32,45	6	3 619
14	Finlandia	29,73	4	2 676
15	Niemcy	28,82	17	20 470
16	Japonia	24,93	55	47 587
17	USA	19,66	104	100 582
18	Hiszpania	18,27	8	7 450
19	Rumunia	17,54	2	1 300
20	Taiwan	17,45	6	4 921
21	Rosja	16,86	31	21 743
22	Kanada	14,80	18	12 589
23	Wielka Brytania	13,45	19	10 222
24	Argentyna	6,18	2	935
25	Afryka Południowa	5,25	2	1 800
26	Meksyk	4,04	2	1 360
27	Holandia	3,80	1	482
28	Brazylia	3,12	2	1 795
29	Chiny	2,15	11	8 572
30	Indie	2,03	17	3 782
31	Pakistan	1,91	2	425
	Suma:		438	371 774

* Z początkiem roku 2010 Litwa zgodnie z wymaganiami UE musiała wyłączyć swoją jedyną elektrownię jądrową w Ignalinie, podobnie Bułgaria musiała zamknąć reaktory w Kozłoduju

Jak wspomnieliśmy, zaletą energetyki jądrowej jest jej ekonomiczność. Z wyliczeń przedstawionych w marcu 2004 przez Angielską Królewską Akademię Inżynierii wynika, że cena wytworzenia prądu w takich elektrowniach jest najniższa. W poniższej tabeli²⁴ przedstawione są koszty wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej, które uwzględniają wszystkie koszty, o których mówiliśmy wyżej.

Rodzaj elektrowni	Koszt 1 kWh [grosze]	Wady
Węglowe z kotłami pyłowymi	20	Zanieczyszczenie powietrza
Węglowe ze złożem fluidalnym	21	Zanieczyszczenie powietrza
Węglowe ze zgazowaniem węgla	23	Zanieczyszczenie powietrza
Gazowe z cyklem otwartym	22	Zanieczyszczenie powietrza
Gazowe z cyklem zamkniętym	15	Zanieczyszczenie powietrza
Opalane biomasą	41	Wymaga olbrzymich przestrzeni
Jądrowe	14	Odpady promieniotwórcze
Wiatrowe na lądzie	29	Wymaga olbrzymich przestrzeni
Wiatrowe na wodzie	38	Wymaga olbrzymich przestrzeni

Niezależnie od podanych kosztów warto zastanowić się, jak w różnych rodzajach energetyki wygląda konsumpcja paliwa. Poniższa tabela (wg. opracowania CERN'owskiego „Energy, Powering Your World” (2000)) pokazuje ile paliwa rocznie musi zużyć elektrownia o mocy 1000 MW. Spośród wymienionych źródeł, energia termojądrowa - to dopiero plany, które być może da się urzeczywistnić pod koniec XXI wieku.

Źródło energii	Potrzeby	Dla porównania
Biomasa	2000 km ² upraw	3 -krotna wielkość Jeziora Bodeńskiego
Wiatr	2700 wiatraków o mocy 1,5 MW każdy	486 km ²
Słońce (fotowoltaiki)	23 km ² paneli słonecznych na równiku	2555 boisk piłkarskich
Biogaz	20 000 000 świń	
Gaz	1,2 km ³	47 piramid Cheopsa
Ropa	1 400 000 ton	10 000 000 baryłek oleju lub 100 super-tankowców
Węgiel	2 500 000 ton	26 260 wagonów towarowych
Rozszczepienie jąder	35 ton UO ₂	210 ton rudy uranowej
Reakcja syntezy (termojądrowa)	100 kg D + 150 kg T	2850 m ³ wody morskiej oraz 10 ton rudy litowej

W tym kontekście warto zdać sobie sprawę z wartości opałowej różnych paliw. Wartości te podaje poniższa tabela.

Paliwo	Wartość opałowa* [MJ/kg**]
Drewno	16
Węgiel brunatny	9
Węgiel kamienny	13 ÷ 30***
Gaz naturalny	45
Ropa nieoczyszczona	45-46
Uran naturalny	500 000

* Wartość opałowa to nie to samo co ciepło spalania;

** 1 MJ ≈ 0,278 kWh

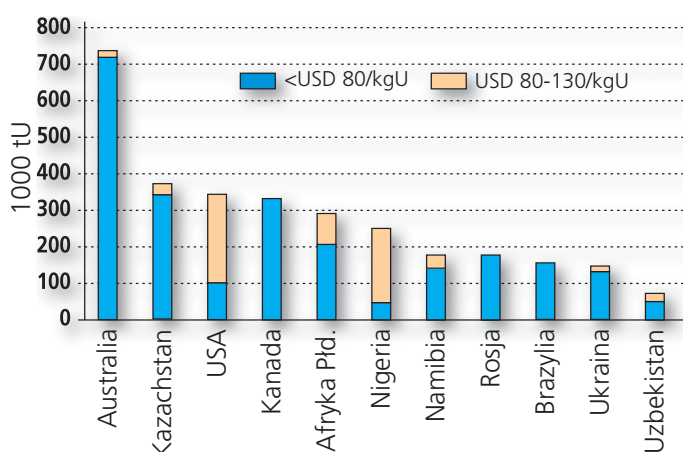
*** w zależności od jakości węgla

5.3.

ZAPASY URANU I NIEZALEŻNOŚĆ SUROWCOWA

Ponieważ uran jest surowcem naturalnym, równie naturalnym staje się pytanie, ile go mamy w skorupie ziemskiej i na jak długo nam on wystarczy. Odpowiedź, wbrew pozorom, wcale nie jest prosta. Po pierwsze, należy przyjąć jakiś sposób wykorzystania uranu. Tu najłatwiej wziąć za punkt odniesienia obecną technologię. Po drugie, ważna jest sprawa ceny 1 kg uranu. Ta będzie niewątpliwie wzrastać wraz z wyczerpywaniem się zasobów uranu. I znów, najprościej jest przyjąć pewien margines cenowy kosztów wydobycia, np. 80 USD/kg U. Przy tych założeniach zasoby uranu wyczerpią się za ok. 50 lat. Wydawać by się mogło, że to dość ponury prognozy, jeśli chcielibyśmy w energetyce jądrowej upatrywać przyszłości energetycznej globu ziemskiego. Nie jest jednak tak źle. W miarę wzrostu cen uranu świat będzie przechodził na inne, nieekonomiczne obecnie, typy reaktorów, przede wszystkim reaktory powielające, w tym reaktory oparte o znacznie bogatsze niż uranowe złoża toru. W tej perspektywie, energetyka jądrowa ma szansę zaspokajać potrzeby energetyczne ludzkości nawet przez miliony lat.

Ocena zasobów uranu w 2007 r. wg MAEA

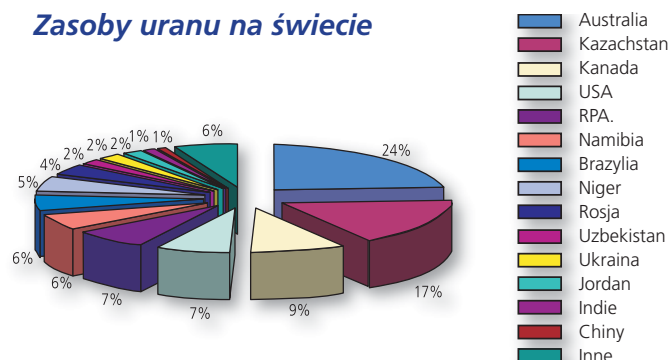


Często stawiamy również pytania o niezależność surowcową. W wypadku energetyki jądrowej mamy korzystną sytuację. Uran można kupić z bardzo wielu krajów, a ich relatywne zasoby w ten surowiec pokazuje rysunek. W Australii obecne są złoża uranu oceniane na powyżej 700 tys. ton. Zwróćmy uwagę, że biorąc cenę 80 USD/kg, złoża w USA oceniane są

²⁴ wg. Royal Academy of Engineering, Wielka Brytania. Ceny brytyjskie przeliczone na złotówki według kursu funta z dnia 14 IV 2005 r. Takie obliczenia silnie zależą od przyjętych założeń, niemniej jednak z reguły okazuje się, że energia jądrowa jest energią tanią.

na ok. 100 tys. ton, podczas gdy przy wzroście ceny do ok. 120 USD/kg zasoby paliwowe wzrastają do ok. 350 tys. ton. W tej sytuacji dość łatwo jest zaopatrzyć się w niezbędną ilość paliwa i zapewnić sobie import z wielu krajów. W ostatnim czasie, w końcu lipca 2010 r., poinformowano o znalezieniu Szwecji, być może, najpotężniejszych w Świecie złóż uranu, ocenianych na 140 000 ton lub więcej!

Zasoby uranu na świecie

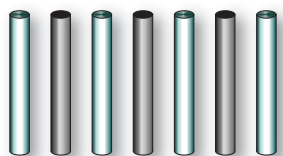


Wokół naszych granic pracuje 9 elektrowni jądrowych: 24 reaktory różnych rodzajów i mocy (stan na koniec 2009 r.). Polska dopiero przygotowuje się do budowy pierwszej elektrowni jądrowej, a plany mówią o roku 2022 jako roku jej uruchomienia. **Najwyższy czas!**

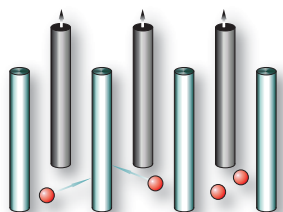
5.4.

REAKTOR JĄDROWY I JEGO ELEMENTY

Reaktor wyłączony



Reaktor włączony



Działanie reaktora jądrowego można opisać w stosunkowo prosty sposób. Wielka energia wyzwolana w reakcji powielającej musi być wyzwalana w sposób kontrolowany, gdyż, jak pisaliśmy wyżej, rozwijanie się tej reakcji w sposób spontaniczny musi po przekroczeniu pewnej energii nagromadzonej w uranie prowadzić do wybuchu jądrowego. Tempo oraz warunki zachodzenia reakcji łańcuchowej zależą od kształtu bryły uranu oraz energii neutronów, które wywołują rozszczepienie. Jeśli będziemy posiadali czysty metaliczny uran w postaci kuli, to do pewnej jej wielkości większość neutronów będzie z kuli uciekała nie napotkawszy na swej drodze jąder uranu i reakcja rozszczepienia będzie, jak mówimy, podkrytyczna ²⁵. Kiedy jednak kula będzie miała odpowiednio dużą średnicę, liczba neutronów wpadających

na kolejne jądra uranu i wywołujących rozszczepienia będzie wystarczająco duża, by reakcja zachodziła w sposób krytyczny. Odpowiadająca tej sytuacji masa uranu nazywa się **masą krytyczną** i dla ²³⁵U wynosi ok. 50 kg. Po jej przekroczeniu uzyskamy masę nadkrytyczną, czyli taką, w której reakcja łańcuchowa będzie się rozwijać w sposób nadkrytyczny. Oczywiście w tym ostatnim przypadku ilość wydzielanej energii (czyli ciepła) gwałtownie wrośnie, prowadząc ostatecznie do wybuchu. Na tym właśnie polega działanie bomby atomowej. Zauważmy, że jeśli podzielimy masę krytyczną na dwie części i rozseparujemy je na pewną odległość, wybuch nie nastąpi, gdyż część neutronów opuszczających jedną połówkę będzie omijała drugą, nie powodując rozszczepienia.

W reaktorze jądrowym proces rozwijania się niekontrolowanej reakcji łańcuchowej jest uniemożliwiony na dwa sposoby. Po pierwsze, paliwo uranowe gromadzone jest w elementach paliwowych, w których zawartość uranu jest dużo mniejsza od masy krytycznej. Po drugie, te elementy są od siebie oddalone i dodatkowo poprzedzielane prętami z materiału silnie pochłaniającego neutrony (np. węgla białego, w którym bor jest takim silnym pochłaniaczem neutronów). Wysunięcie tych prętów do góry (patrz rysunek) powoduje, że neutrony (zaznaczone na rysunku na czerwono) z jednego elementu paliwowego mogą wywołać reakcję rozszczepienia w sąsiednim elemencie paliwowym. Z tego względu pręty te noszą nazwę prętów sterujących. Siatka równooddalonych elementów paliwowych i prętów sterujących (zaczienionych na rysunku) nosi nazwę **rdzenia reaktora**.

To jednak nie cała tajemnica. Reaktor jądrowy pracuje w tzw. **stanie krytycznym**, co oznacza, że tylko jeden ze średnio uwalnianych 2,5 neutronów wywołuje kolejną reakcję rozszczepienia, pozostałe zostają pochłaniane w różnych elementach reaktora. Taka gospodarka neutronami zapewnia reaktorowi stabilną pracę na określonym poziomie mocy. Najważniejsze jednak to to, że reaktor osiąga stan krytyczny dzięki neutronom, które powstają z rozpadu niektórych fragmentów rozszczepienia, tzw. **neutronom opóźnionym**. Te powstają średnio co kilkanaście sekund, co pozwala na stosunkowo łatwe manewrowanie położeniami prętów sterujących. Gdyby nie było neutronów opóźnionych, pręty sterujące musiałyby reagować na zmiany liczby neutronów w układzie zachodzące co ok. jedną tysięczną sekundy. Praca reaktora jest więc tak organizowana, że gdyby nie było neutronów opóźnionych (a jest ich zaledwie ok. 0,65%) reaktor byłby podkrytyczny – więcej neutronów byłoby pochłanianych niż tworzonych. W odróżnieniu od reaktora, bomba atomowa działa w stanie nadkrytycznym, a więc spontanicznie rozwijającej się reakcji powielającej.

Mówiliśmy już, że reakcję rozszczepienia ²³⁵U wywołują najwydajniej neutrony termiczne ²⁶. Problem jednak w tym, że neutrony prędkie powstałe w procesie rozszczepienia mają energie około miliona elektronowoltów, a dla tak wysokich energii prawdopodobieństwo wywołania rozszczepienia jest niewielkie. Aby wykorzystać jak największą liczbę neutronów dla procesu rozszczepienia należy zatem neutronom rozszczepieniowym odebrać większość ich energii.

²⁵ Reakcja łańcuchowa może przebiegać na trzy różne sposoby: podkrytyczny, krytyczny i nadkrytyczny. W stanie podkrytycznym większość neutronów wyzwolonych w wyniku rozszczepienia jąder uranu nie trafia w następne jądra i nie wywołuje następnych rozszczepień, a zatem neutronów jest coraz mniej i reakcja powoli wygasa. W stanie krytycznym ze wszystkich neutronów wyzwolanych w jednym akcie rozszczepienia dokładnie jeden wywołuje następne rozszczepienie, dzięki czemu liczba neutronów nie zmienia się i reakcja przebiega cały czas na takim samym poziomie. W stanie nadkrytycznym neutrony z jednego rozszczepienia jądra uranu powodują więcej niż jedno następne rozszczepienie, przez co neutronów jest coraz więcej i reakcja rozwija się.

²⁶ W wypadku bomby atomowej korzysta się głównie z neutronów rozszczepieniowych o energiach rzędu 1 MeV.

Wbrew pozorom, jest to łatwe. Wystarczy mieć w reaktorze ośrodek zwany **moderatorem neutronów**, który nie pochłania neutronów (lub pochłania je w nieznaczącym stopniu), ale odbiera im energię, czyli spowalnia. Wykorzystujemy tu efekt znany nam ze stołu bilardowego. Gdy na stojącą na stole bilę (żółtą) wpadnie „łeb w łeb” inna rozpędzona bila o tej samej masie (biała), ta pierwsza odleci, druga zaś zatrzyma się – przekaze pierwszej całą swą energię. Jest to możliwe tylko dla zderzenia identycznych kul. Przy innych niż czołowe zderzeniach przekazana zostanie tylko część energii, ale i tak rozpędzona bila bardzo zwolni. W stosunku do neutronu niemal identyczną „bilą” jest proton. Swobodnych protonów mamy dużo w wodzie, w której znajduje się wodór, a jądrem atomu wodoru jest właśnie proton. Woda będzie więc stanowiła dobry moderator. Nie wchodząc w szczegóły, dobrymi moderatorami są też ciężka woda, beryl i grafit. Rodzaj moderatora jest jedną z ważnych charakterystyk rdzenia reaktora. Dla zwiększenia wykorzystania neutronów, rdzeń otoczony jest dodatkowo **reflektorem neutronów**: materiałem, w którym neutrony wylatujące z rdzenia mają możliwość zderzenia się z jądrami reflektora i w jego wyniku wrócić do rdzenia, a tam mieć kolejną szansę zainicjowania reakcji rozszczepienia.



W trakcie pracy reaktora, temperatura elementów paliwowych i prętów sterujących może przekroczyć nawet 2000°C, tak więc rdzeń musi być intensywnie chłodzony, gdyż w przeciwnym wypadku szybko by uległ uszkodzeniu. Dlatego też rdzeń reaktora jest zanurzony w potężnym basenie wodnym. To jednak nie wystarczy: ciepło należy odbierać dynamicznie – patrz niżej. W istocie rzeczy, efektywne i niezawodne chłodzenie rdzenia jest podstawowym elementem bezpiecznej pracy reaktora jądrowego: wszystkie dotychczasowe poważniejsze awarie reaktorowe były skutkiem przegrzania rdzenia.

5.5.

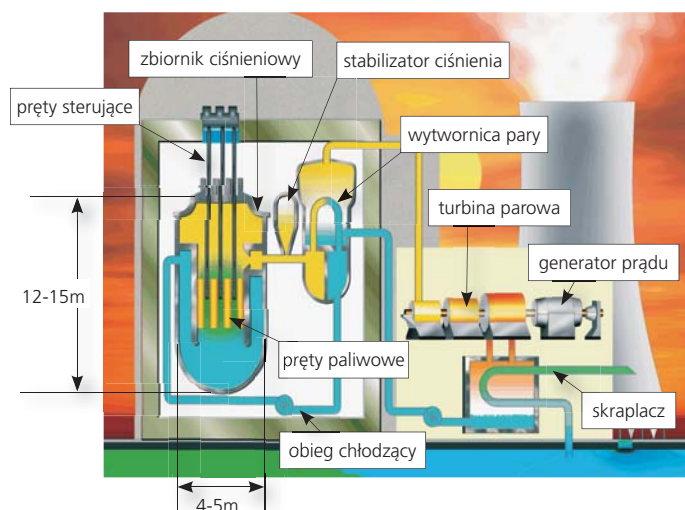
ELEKTROWNIA JĄDROWA, REAKTORY ENERGETYCZNE I ICH BEZPIECZEŃSTWO

Wbrew częstym pojęciom ogólny schemat elektrowni jądrowej nie różni się wiele od konwencjonalnej elektrowni cieplnej. Źródłem energii potrzebnej do wytworzenia pary jest tutaj, zamiast np. kotła opalanego węglem, reaktor jądrowy. Na rysunku pokazany jest schemat takiej elektrowni korzystającej z jednego z dwóch najczęściej stosowanych obecnie tzw. reaktorów wodno-ciśnieniowych (w skrócie PWR od ang. Pressurized Water Reactor).

Woda chłodząca, cyrkulująca pod ciśnieniem rzędu 15 MPa, nagrzewa się do kilkuset stopni Celsjusza podczas omywania rdzenia. Jej ciepło używane jest do wytworzenia w wymienniku ciepła (wytwornicy pary) pary o wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Wysokie ciśnienie wody w obiegu wymaga stabilizowania, które zapewnia stabilizator ciśnienia. W wypadku spadku ciśnienia w obiegu podgrzewa się wodę w zbiorniku stabilizatora, aby wytworzyć nad nią większe ciśnienie pary. Gdy zaś ciśnienie jest za wysokie, otwiera się górny zawór stabilizatora, przez który ulatuje część pary.

Para wodna wytworzona w wytwornicy pary kierowana jest na turbinę parową i uruchamia łopatki turbiny. Ruch łopatek przenoszony jest na ruch wirnika generatora prądu. Skroplona para wraca do wytwornicy pary. Sam proces skraplania jest wspomagany wodą pobieraną ze zbiornika wodnego.

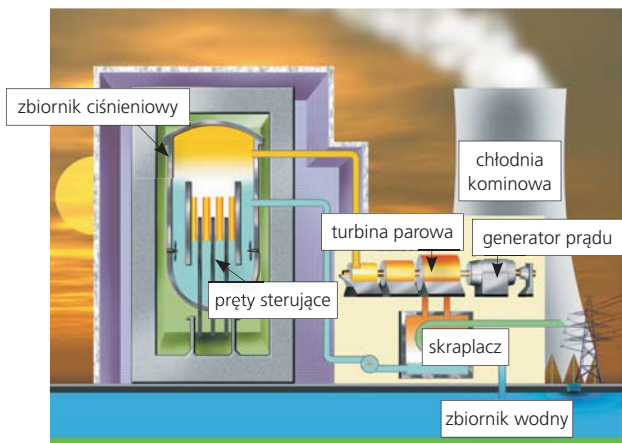
Innym typem energetycznego reaktora jądrowego jest reaktor wrzący (BWR od ang. Boiled Water Reactor), którego schemat pokazuje kolejny rysunek. W odróżnieniu od reaktora PWR tutaj nie woda, lecz para wodna jest zarówno chłodziwem, jak i tzw. czynnikiem roboczym – wytwornice pary nie są potrzebne, gdyż ta jest wytwarzana już wewnątrz reaktora. Po osuszeniu para przekazywana jest na turbinę. Ze względów technicznych pręty sterujące wprowadzane są pomiędzy elementy paliwowe od dołu, a nie od góry, jak w wypadku reaktora typu PWR.



Schemat elektrowni z reaktorem wodno-ciśnieniowym (PWR)

Reaktor nie musi być chłodzony wodą. Działają na świecie reaktory chłodzone gazem, a nawet ciekłymi metalami. Ze względu na objętość niniejszej broszury, nie będziemy ich omawiać. Jednakże to, na co powinniśmy zwrócić uwagę, to stopień bezpieczeństwa reaktora. Rysunek na str.37 pokazuje mnogość systemów (barier) bezpieczeństwa w typowym reaktorze BWR, poczynawszy od konstrukcji elementu paliwowego, który powinien zatrzymywać fragmenty rozszczepienia, a skończywszy na tzw. obudowie bezpieczeństwa. Ponadto, każdy element, który może zawieść w reaktorze, musi mieć swój zwielokrotniony układ bezpieczeństwa, przy czym każdy z nich powinien działać w oparciu o inne zjawisko fizyczne, aby z jednej przyczyny nie odmówiły działania wszystkie stopnie elementów bezpieczeństwa. Układy bezpieczeństwa reaktora działające w oparciu o proste procesy fizyczne noszą nazwę **układów pasywnych**. Dzięki nim, obecnie konstruowane reaktory tzw. III generacji mają nadzwyczaj wysoki stopień niezawodności: awaria związana z przegrzaniem rdzenia nie może zdarzyć się częściej niż raz na sto tysięcy lat pracy! Takich norm bezpieczeństwa nie ma żaden inny przemysł i bezpieczeństwo reaktora nie jest na dziś problemem. Przy takim stwierdzeniu pada z reguły pytanie o awarię reaktora w Czarnobylu (w 1986 roku). Bez wdawania się w szczegóły należy powiedzieć, że był to reaktor przeznaczony do celów militarnych, o konstrukcji, która nie byłaby dopuszczona do eksploatacji w żadnym kraju

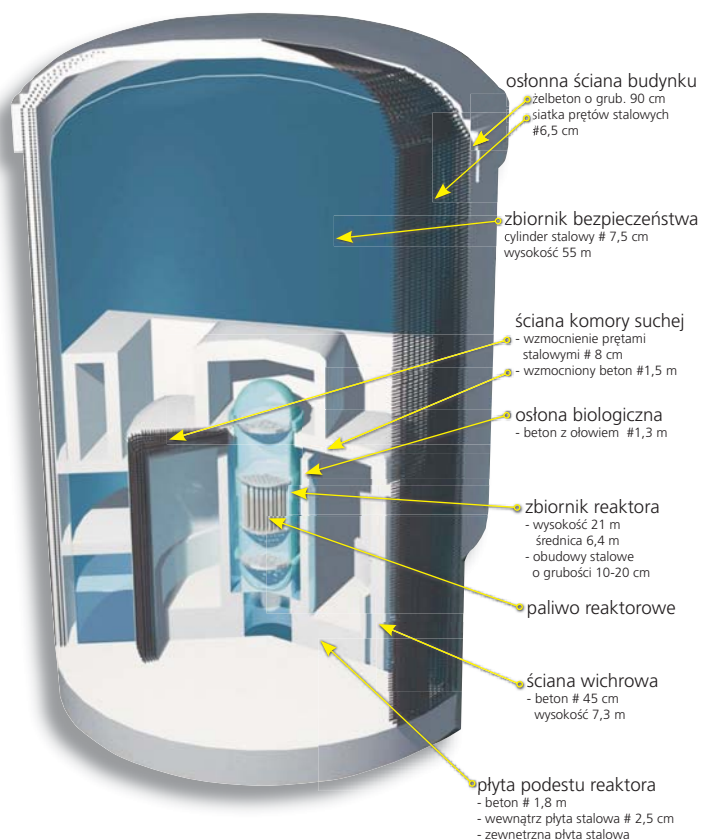
poza ówczesnym ZSRR. Niezależnie od błędów technicznych konstrukcji tego reaktora, do awarii doprowadziły też błędy ludzkie. Reaktory typu czarnobylskiego zostały wyłączone z eksploatacji na Ukrainie i Litwie. Niemniej jednak kilka, po poprawieniu niektórych elementów bezpieczeństwa, wciąż pracuje w Federacji Rosyjskiej.



Schemat elektrowni z reaktorem wrzącym (BWR)

Często podnoszonym problemem jest kwestia skutków ataku terrorystycznego, np. uderzenia samolotu w budynek reaktora. Przy obecnych konstrukcjach ścian takie uderzenie może skończyć się jednak tylko na zniszczeniu samolotu, a nie budynku, co zostało potwierdzone doświadczalnie! Inne działania terrorystyczne także nie mogą poważnie zagrozić reaktorowi – to obiekt konstruowany ze szczególną troską o jego fizyczne bezpieczeństwo.

Mnogość barier bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych (BWR dla przykładu)



5.6.

RYZIKO PRZECIEŻ ISTNIEJE? A CO ROBIĆ Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI Z REAKTORA?

Jak w wypadku każdej instalacji przemysłowej i tu istnieje, choć nadzwyczaj niewielkie, ryzyko związane z awarią samego reaktora, z uwolnionym promieniowaniem jonizującym, z niewłaściwym postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi i nadmiernym rozproszeniem materiałów rozszczepialnych lub promieniotwórczych. Ocena każdego z tych rodzajów ryzyka jest jednak trudnym zadaniem, jako że nie należą one do kategorii ryzyka "dobrowolnego". Aby jednak dokonać oceny ryzyka tego typu, popatrzymy na liczbę wypadków śmiertelnych przypadających na jednostkę wyprodukowanej energii. Wypadki w konwencjonalnym górnictwie węglowym i przy wydobywaniu ropy naftowej (wraz z zanieczyszczeniem powietrza wywołanym spalaniem paliw kopalnych) pokazują, że ryzyko śmiertelne jest tu około 40-krotnie wyższe niż w całym szeroko rozumianym przemyśle jądrowym: od górnictwa uranowego do potencjalnych awarii elektrowni jądrowych. Zwykle przerwanie tamy wodnej lub prosty wypadek w fabryce chemicznej może naraz spowodować śmierć nawet kilkunastu tysięcy ludzi, podczas gdy w najgorszej (i bardzo niezwyklej w całej historii energetyki jądrowej) awarii - podczas pożaru reaktora w Czarnobylu - zginęło natychmiast 31 ludzi, w tym 28 wskutek pochłonięcia zbyt wysokiej dawki promieniowania. Do roku 2010 zmarło jeszcze następne 19 osób spośród ówczesnych ratowników usuwających awarię palącego się reaktora, kilkoro dzieci zmarło na raka tarczycy. Zanotowano ok. 5000 nowych nowotworów tarczycy, jednak nie spowodowały one zgonów. I to, zdaniem wielu, był wypadek największej, możliwej katastrofy w elektrowni jądrowej! O potężnych zagrożeniach, jakie niesie sama natura mogliśmy się przekonać, gdy na Oceanie Indyjskim fale tsunami pochłonięły w 2005 r. około 300 000 ofiar. Jak się ocenia, cały amerykański program jądrowy niesie ryzyko porównywalne ze zmianą, jaką wywołałoby podniesienie ograniczenia prędkości samochodów z 80 do 81 km/h!

Podstawowym kłopotem energetyki jądrowej jest **problem odpadów promieniotwórczych**, które niestety powstają w trakcie pracy reaktora jądrowego. Jest całkiem oczywistą rzeczą, że w wyniku reakcji rozszczepienia muszą tworzyć się nowe izotopy promieniotwórcze - fragmenty rozszczepienia. Liczba neutronów w jądrze uranu (^{143}U lub ^{146}U) znacznie przekracza liczbę protonów (92), co zapewnia względną stabilność jąder uranu (okresy połowicznego rozpadu ^{238}U - 4,5 mld lat, ^{235}U - 0,7 mld lat). W lżejszych stabilnych jądrach stosunek liczby neutronów do protonów jest niższy. Dlatego też jeśli jądro uranu dzieli się na dwa mniejsze, liczba neutronów w każdym fragmencie rozszczepienia jest większa niż niezbędna dla zapewnienia mu trwałości. Fragmenty rozszczepienia są więc z natury nietrwałe (beta minus promieniotwórcze).

Oprócz fragmentów rozszczepienia, pochłanianie neutronów przez paliwo jądrowe prowadzi do powstawania izotopów pierwiastków transuranowych (o $Z > 92$). Jako przykład rozpatrzmy wychwyt neutronu przez jądro ^{238}U . W wyniku tego wychwyty, po dwóch kolejnych rozpadach beta otrzymuje się ^{239}Pu - jądro rozszczepialne przez neutrony, wykorzystywane w reaktorach powielających jako paliwo (mówimy

wtedy o cyklu uranowo-plutonowym – patrz Uzupełnienie 1). Ten sam izotop, tworzący się np. w reaktorze typu PWR, wnosi ostatecznie całkiem spory wkład do produkowanej energii. Szczególną troskę wykazuje się w przechowywaniu plutonu, gdyż ten jest rozszczepialny i może być wykorzystany w celach militarnych, choć wcale nie tak łatwo, jak się niektórym zdaje.

Należy też pamiętać, że w trakcie pracy reaktora następuje aktywacja jego materiałów konstrukcyjnych (typowym produktem takiej aktywacji jest ^{60}Co). Materiały konstrukcyjne stają się więc ostatecznie odpadami promieniotwórczymi, z którymi należy właściwie postępować.

Popatrzmy na niektóre typowe²⁷ produkty rozszczepienia ^{235}U i zwróćmy uwagę na okresy ich połowicznego rozpadu, $T_{1/2}$. Niektóre ze szczególnie długożyjących izotopów promieniotwórczych znajdujących się w wypalonym paliwie podane zostaną w oddzielnej tabeli.

Fragmenty rozszczepienia ^{235}U

Pierwiastek	Liczba masowa A	$T_{1/2}$	Wydajność (%)
Stront	89	51 dni	4,8
Stront	90	28 lat	5,8
Itr	91	58 dni	5,4
Cyrkon	95	65 dni	6,3
Ruten	103	40 dni	3,0
Ruten	106	1 rok	0,4
Antymon	125	2,76 lat	0,02
Tellur	127	109 dni	0,04
Tellur	129	31 dni	0,35
Cez	137	30 lat	6,2
Cer	141	33 dni	6,0
Cer	144	285 dni	6,0
Promet	147	2,6 lat	2,4
Samar	151	90 lat	0,44

Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi, wypalonym paliwem w szczególności, to istotny problem techniczny, który musi być rozwiązany, jeśli energetyka jądrowa ma być bezpieczna dla ludzi i jeśli ludzie mają zaakceptować przyjęte rozwiązania techniczne. W odróżnieniu od węgla, oleju lub gazu, paliwo jądrowe nigdy nie wypala się całkowicie. Wynika to z faktu, że w trakcie „wypalania” tego paliwa powstaje w nim również wiele jąder, które silnie pochłaniają neutrony. Z czasem neutrony tworzone w reakcjach rozszczepienia są głównie wychwytywane (pochłaniane) przez takie właśnie produkty wcześniejszych reakcji. Zwielenienie liczby neutronów w pojedynczym akcie rozszczepienia nie wystarcza wtedy do podtrzymania reakcji łańcuchowej. W takiej sytuacji element paliwowy nie może służyć dalej jako paliwo, staje się natomiast wysokoaktywnym odpadem promieniotwórczym. Co gorsza, okres połowicznego rozpadu izotopów pierwiastków wyprodukowanych w reakcjach rozszczepienia jest często bardzo długi, rzędu dziesiątków i tysięcy lat, tak więc przy przechowywaniu takich odpadów należy bardzo długo zachowywać szczególną ostrożność. To właśnie powoduje, że problem przechowywania odpadów

z reaktora jest istotny ze względów społecznych, politycznych i ekonomicznych. Na szczęście, typowa elektrownia jądrowa o mocy 1000 MW wytwarza rocznie jedynie około 1 m³ odpadów promieniotwórczych (ok. 2,7 ton). Po 10 latach ich aktywność spada 1000-krotnie, ale dopiero po 500 latach aktywność produktów rozszczepienia spada poniżej naturalnej aktywności uranu w skorupie ziemskiej.



Wypalone paliwo zanurzone w wodzie w basenie przechowawczym

Promieniotwórcze jądra atomowe, będące fragmentami rozszczepienia produkują podczas swych rozpadów energię, która następnie przekształca się w ciepło. Wypalone paliwo jądrowe przechowuje się zatem na ogół przez jakiś czas w wodnych basenach przechowawczych, w których temperatura wypalonego paliwa spada. W miarę kolejnych rozpadów promieniotwórczych w paliwie i ubywania nuklidów promieniotwórczych, spada aktywność wypalonego paliwa. Jeśli nie planuje się jego recyklingu (opisanego dalej), jest ono przechowywane wprawdzie przez kilkadziesiąt (20-50) lat w wodzie, w basenie przechowawczym zlokalizowanym na terenie elektrowni, a następnie, przez kolejne kilkadziesiąt lat (30-50), w kolejnym „suchym” przechowalniku w atmosferze gazowej, by po takim okresie można było je składować w specjalnych podziemnych składowiskach odpadów promieniotwórczych: dawnych kopalniach soli, łałach i skałach granitowych. Można jednak wybrać inny scenariusz: **recyklingu** wypalonego paliwa. Po kilku latach przechowywania wypalonego paliwa w basenie przechowawczym można je przesłać do fabryk, w których będzie ono podlegało procesowi chemicznemu, prowadzącemu do odzyskania pierwiastków rozszczepialnych (uranu i plutonu, które mogą być ewentualnie użyte do produkcji świeżego paliwa) oraz innych pierwiastków (np. ziem rzadkich). Pozostały materiał (ok. 3% masy początkowej), na ogół w ciekłej postaci, podlega procesowi zeszklenia (zeszkliwienia, witrifikacji) i zostaje załadowywany do potężnych pojemników metalowych (patrz zdjęcie na str.39), po czym wysłany na składowisko odpadów. Warto zauważyć, że produkty rozszczepienia nie są zalewane szkłem, lecz same tworzą tlenki o amorficznej strukturze szkła. Takie szkło jest odporne na wymywanie, a także wystarczająco trwałe, aby nie zmieniało swoich własności w czasie niezbędnym do osiągnięcia oczekiwanego spadku aktywności. Procedura witrifikacji nie jest powszechna, gdyż - niezależnie od kosztów - wymaga dysponowania bardzo zaawansowanymi technologiami.

²⁷ Wg T.Jevremovic, *Nuclear Principles in Engineering, Second Edition, Springer (2009)*



Z prawej kanister na zeszkliwione wypalone paliwo. Typowy rozmiar: wysokość 1,3 m, średnica 40 cm. Obok pokazany jest pojemnik transportowy przeznaczony do przewozu wypalonych elementów paliwowych.

Trudno może uwierzyć, ale zamknięta w szklwie ilość odpadów związanych z produkcją energii elektrycznej przypadającą na jednego człowieka (w trakcie jego całego życia) mieści się... w dłoni. Przetwórnice wypalonego paliwa we Francji, Wielkiej Brytanii i Belgii wytwarzają około 1000 ton rocznie zeszkłonego paliwa (2500 kanistrów). W każdym kanistrze, do którego pakujemy zeszkłone odpady mieści się ich 400 kg. Podczas jednego roku pracy reaktora o mocy (elektrycznej) 1000 MW powstaje 5 ton takiego szkła lub 12 kanistrów. Taką ilość łatwo transportować oraz przechowywać w odpowiednich warunkach osłonowych.

Tabela pokazuje najbardziej długożyciowe izotopy powstające w paliwie jądrowym, rysunek zaś pokazuje, jak wielki wpływ ma przerób paliwa na jego długożyciowość. Widać wyraźnie, że usunięcie aktywności i podstawowych fragmentów rozszczepienia spowodowałoby, że średni czas życia takiego odpadu promieniotwórczego wynosiłby zaledwie kilkadziesiąt lat, a wówczas nie mielibyśmy już żadnego problemu z jego przechowywaniem.

Długożyciowe izotopy promieniotwórcze powstające w paliwie jądrowym

Izotop	Okres połowicznego rozpadu [lata]	Radiotoksyczność [Sv/kg]
^{99}Tc	$2,1 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^2$
^{129}I	$1,6 \cdot 10^7$	$0,7 \cdot 10^3$
^{135}Cs	$2,3 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^2$
^{237}Np	$2,1 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^4$
^{238}Pu	88	$1,4 \cdot 10^8$
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$	$0,6 \cdot 10^6$
^{240}Pu	$6,6 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^6$
^{242}Pu	$3,7 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^5$
^{241}Am	432	$0,3 \cdot 10^8$
^{243}Am	$7,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$
^{244}Cm	18	$0,5 \cdot 10^9$

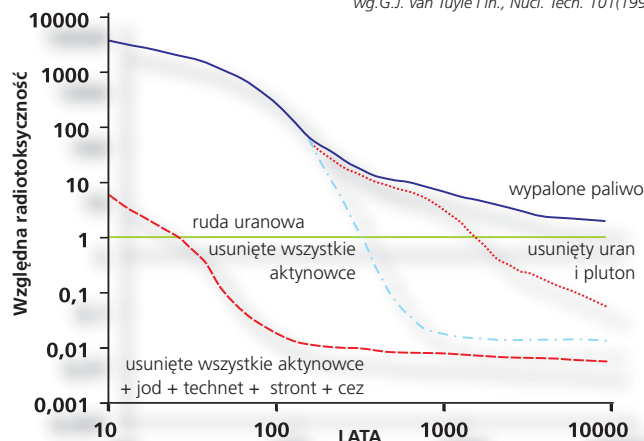
[dane o radiotoksyczności na podstawie GSI-Nachrichten 2/99, str. 15]

Z podanych wyżej powodów, niezależnie od problemów związanych z geologicznymi składowiskami odpadów promieniotwórczych, wiele uwagi poświęca się tzw. Technologii Rozdziału i Transmutacji P&T (od ang. Partitioning and Transmutation), które pozwoliłyby na wydzielenie plutonu i tzw. pomniejszych aktywności²⁸ (w szczególności

Np, Am i Cm), lekkich pierwiastków ziem rzadkich, niektórych długożyciowych (patrz tabela obok) produktów rozszczepienia oraz przekształceniu ich (transmutacji) w materiały krótkożyciowe, a nawet stabilne. To jednak technologia jutra.

Wpływ procesu przerobu wypalonego paliwa na radiotoksyczność wysokoaktywnych odpadów powstałych w wyniku jądrowego cyklu energetycznego

wg. G.J. van Tuyle i in., Nucl. Tech. 101(1993)1

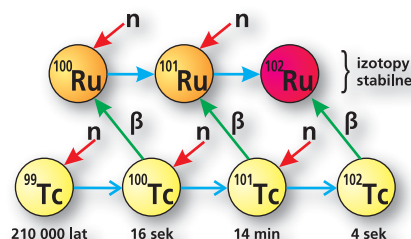


5.7.

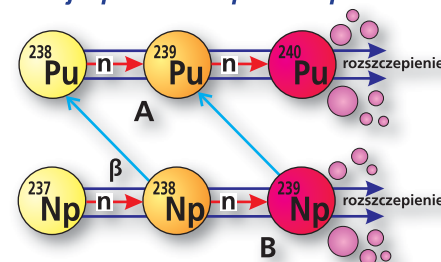
TECHNOLOGIA JUTRA: CZY MOŻEMY SPAŁAĆ ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE?

Zdefiniujemy wpierw, co będziemy rozumieli pod użytymi wyżej nazwami: **transmutacja** i **spalanie** odpadów promieniotwórczych. Transmutacja jest procesem przekształcania, w skutek pochłonięcia neutronu, długożyciowego izotopu promieniotwórczego w izotop, którego okres połowicznego rozpadu byłby krótszy, lub który nawet byłby pierwiastkiem stabilnym. W odróżnieniu od tego procesu - spalanie (spopielenie) jest procesem, w którym pochłonięcie neutronu prowadzi do powstania izotopu rozpadającego się w drodze rozszczepienia do izotopu trwałego. Przykłady obu procesów pokazują poniższe rysunki. Zaznaczmy, że pokazane na rysunkach procesy inicjują nie neutrony termiczne, lecz neutrony prężkie, o energiach rzędu megaelektronowoltów (MeV).

Przykład reakcji - transmutacja technetu



Przykład reakcji spalania neptunu i plutonu

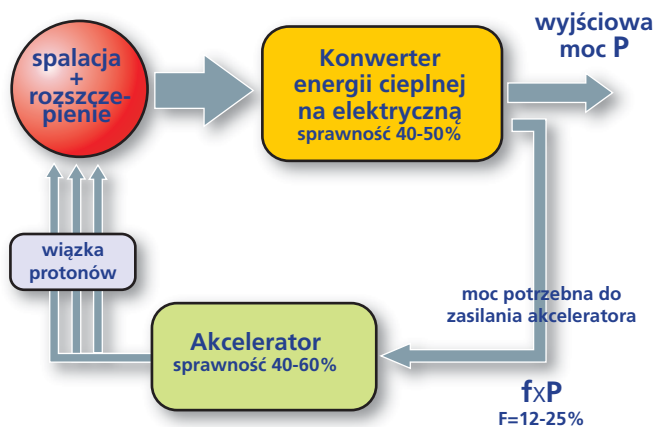


Źródło: W. Gudowski. Royal Inst. Techn. Sztokholm, Szwecja

²⁸ W języku angielskim takie aktywności nazywa się minor actinides. W języku polskim brak jest oficjalnej nazwy. Nazwa pomniejsze aktywności została zasugerowana przez mgr inż. J. Kaniowskiego z Państwowej Agencji Atomistyki.

Obecnie prowadzi się intensywne prace badawcze mające na celu wydajne wykorzystanie obu mechanizmów. Reaktory pracujące na neutronach prędkich, a także układy sterowane akceleratorem stwarzają nadzieję, że nagromadzone dotąd odpady promieniotwórcze pochodzące z energetyki jądrowej, jak i te, które pojawią się w przyszłości, można będzie przekształcić w odpady krótkożyłowe, znacznie łatwiejsze do przechowania.

Wzmacniacz energii (tej nazwy nie należy brać dosłownie!) jest pomysłem, propagowanym już pod koniec ubiegłego wieku szczególnie przez prof. Carlo Rubbię z CERN'u w Szwajcarii. Idea polega na wykorzystaniu reaktora podkrytycznego (tj. takiego, w którym wykorzystuje się mniej niż jeden neutron z reakcji rozszczepienia) i neutronów prędkich powstałych w tzw. reakcji kruszenia (spalacji), wyzwalanej przez protony o energii 1 GeV z odpowiedniego akceleratora. Protony o takiej wysokiej energii w zderzeniu z jądrami ciężkich pierwiastków (choćby ołowiu) powodują skruszenie jądra na bardzo drobne fragmenty, w tym neutrony. Duża liczba neutronów otrzymywana w procesie spalacji wykorzystywana jest do powstawania w reaktorze rozszczepialnego izotopu ^{233}U z ^{232}Th (mówimy tu o cyklu torowo-uranowym). Sam reaktor podkrytyczny mógłby być użyty do spalania odpadów promieniotwórczych. Jednym z centralnych pomysłów projektu jest możliwość otrzymania z rozszczepienia tak dużej energii, że jej część można obrócić na zasilanie akceleratora, a pozostałą na dostarczenie energii elektrycznej odbiorcom zewnętrznym. Ocenia się, że stosunek energii produkowanej przez reaktor do energii potrzebnej do zasilania akceleratora może wynosić nawet 15. Stąd też nieco reklamarska nazwa - wzmacniacz energii.

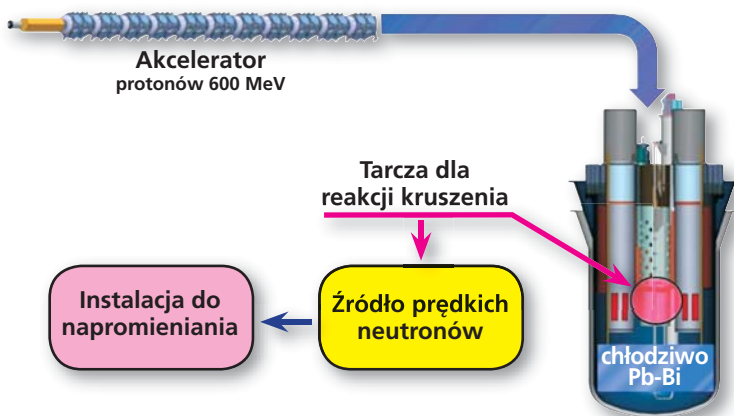


Idea „wzmacniacza energii”

Podkrytyczność takiego reaktora dobrze gwarantuje bezpieczeństwo całego urządzenia: wystarczy wyłączyć wiązkę protonów, by zatrzymać reakcję łańcuchową. Ponadto, w cyklu torowo-uranowym nie powstaje pluton „militarny”, produkcja pierwiastków transuranowych w takim układzie hybrydowym będzie zaś dwa lub trzy rzędy wielkości mniejsza niż w obecnie pracujących reaktorach. Prace nad rozwojem układów sterowanych akceleratorem prowadzone są w Europie, Japonii, Korei, Rosji i USA. Aby pokazać ich użyteczność potrzebny jest akcelerator protonów dający prąd 1-10 mA i tarcza, w której można wytworzyć moc powyżej 1 MW, oba układy związane z podkrytycznym rdzeniem reaktora. W sprawdzenie tych nowych idei zaangażowało się kilka krajów europejskich.

Jest rzeczą możliwą, że pierwsze instalacje ADS (od ang. Accelerator-Driven Systems) będą zbudowane w stosunkowo niedalekiej przyszłości. Nadzieję taką niesie w szczególności belgijski projekt MYRRHA. Schemat proponowanej instalacji przedstawia rysunek

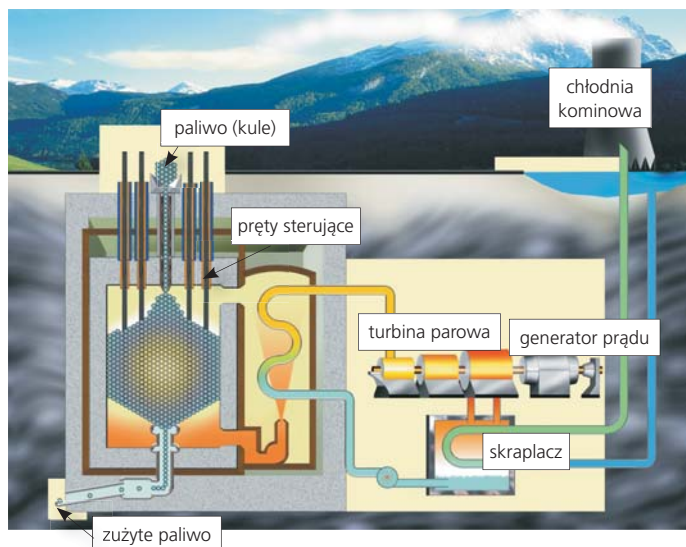
Reaktor o mocy cieplnej w stanie podkrytycznym 50-100 MW w stanie krytycznym ok. 100 MW



Pomysł wykorzystania tego typu urządzeń nie jest jedyną nową ideą nowoczesnej atomistyki. Ponieważ poważnym zmartwieniem jest tworzenie się podczas pracy reaktora izotopów plutonu, testuje się obecnie innego rodzaju paliwo, tzw. **paliwo z bierną matrycą** (ang. **Inert Matrix Fuel**). W takim paliwie mamy matrycę będącą stosunkowo prostym związkiem, jak np. węgiel krzemu czy tlenek magnezu, w którym znajdują się rozproszone ziarna rozszczepialnego paliwa (np. ^{239}Pu). Zauważmy, że nie ma tu ^{238}U , nierozszczepialnego przez neutrony termiczne, a będącego głównym źródłem tworzenia się ^{239}Pu . Wykorzystanie tego typu paliwa daje nadzieję na stopniowe pozbycie się nagromadzonych na świecie, nadmiernych zapasów niebezpiecznego plutonu. Obecne elektrownie jądrowe i przetwórnice paliwa produkują około 100 ton plutonu rocznie. Tylko nieznaczna tego część jest wykorzystywana do produkcji paliwa typu MOX (od ang. mixed oxides – mieszanki tlenków uranu i plutonu), a ze względu na militarne zastosowania i toksyczność plutonu należy dbać o jego niezawodne zabezpieczenie. Użycie paliwa z bierną matrycą pozwalałoby też na spalanie pomniejszych aktynowców (Am, Np, Cm). O paliwie tego typu myśli się też przy planowaniu przyszłych reaktorów tzw. IV generacji.

Do technologii jutra należy zaliczyć też budowę reaktorów wysokotemperaturowych typu HTGR (High Temperature Gas Reactor) opartych o cykl torowo-uranowy. W skorupie ziemskiej toru jest znacznie więcej niż uranu. W strumieniu prędkich neutronów tor można przekształcić w rozszczepialny izotop ^{233}U . Taki reaktor ma cały szereg nowych elementów odróżniających go od klasycznych reaktorów typu PWR czy BWR. Stosunkowo nowe pomysły to: paliwo w formie kul z ceramiki węglowej, zawierającej ziarna paliwa, a także chłodzenie gazem, którego temperatura na wylocie miałaby kilkaset stopni Celsjusza. Przy tak wysokich temperaturach możliwe jest prowadzenie szeregu reakcji chemicznych, które mogą służyć np. w instalacjach do odsalania wody morskiej, a także gazyfikacji węgla. Schemat tego typu reaktora z tzw. usypanym złożem, wolno spadającym w dół w miarę wypalania, pokazuje rysunek. Niewypalone

do końca paliwo wraca do ponownego wypalenia. Jest to w gruncie rzeczy reaktor powielający, tyle że nie oparty o cykl uranowo-plutonowy: tworzącym się paliwem nie jest ^{239}Pu , lecz ^{233}U .



Rysunek elektrowni wykorzystującej reaktor wysokotemperaturowy

5.8. POSTĘPOWANIE Z WYPALONYM PALIWEM W POLSCE

W poprzednim rozdziale opisaliśmy postępowanie z nisko- i średnioaktywnymi odpadami promieniotwórczymi. Postępowanie z wypalonym paliwem podlega innym procedurom, o czym już wspomnieliśmy. W Polsce nie mamy jeszcze energetyki nuklearnej, a reaktory, budowane w Polsce, to reaktory doświadczalne: EWA, oddany do eksploatacji w 1958 roku (zamknięty w 1995 roku) oraz MARIA – działający od 1974 r. do chwili obecnej – oba na terenie Ośrodka w Świerku k/Otwocka. Konieczne więc okazało się wypracowanie zasad właściwego postępowania z wypalonym paliwem.

Na przestrzeni ponad już 50 - letniej historii tych reaktorów zmieniał się rodzaj paliwa: zarówno stopień jego wzbogacenia w ^{235}U , jak i konstrukcja elementów paliwowych²⁹. Początkowe postępowanie z paliwem w zasadzie jest identyczne z opisywanym wcześniej. Wypalone paliwo przechowywane jest w basenie przechowawczym reaktora MARIA. Do niedawna paliwo wypalone w reaktorze EWA, a także częściowo w reaktorze MARIA przechowywane było w tymczasowych przechodniach wodnych. Ostatnio (w latach 2009 i 2010), na mocy umowy polsko-amerykańsko-rosyjskiej, zostało ono wywiezione do Rosji celem przerobu. Aby procedura wywozu była możliwa, należało odpowiednio schłodzone wypalone elementy paliwowe zamknąć w szczelnych kapsułach w atmosferze helowej, chroniącej kapsuły przed korozją i pozwalającej na dalsze ich przechowywanie w powietrzu. Seria zdjęć pokazuje kolejne fazy tego procesu.



Komory do kapsulowania paliwa, znajdujące się w hali wyłączzonego z eksploatacji reaktora EWA w Świerku, widok z zewnątrz

Wypalone paliwo przechowywane jest początkowo w wodzie, w basenie przechowawczym. Tam może ono przebywać do około 50 lat, przy czym czas przebywania w wodzie jest związany ze stopniem zaawansowania korozji w metalowych koszulkach otaczających paliwo. Odpowiednio schłodzone paliwo można następnie wysłać do przerobu (recyklingu) albo zamknąć je, po dokładnym osuszeniu, w odpowiednich kapsułach ze stali austenitycznej³⁰. Kapsuły te wypełniane są gazowym helem. Taka technologia ogranicza dalszy proces korozji i umożliwia składowanie w składowisku głębinowym (patrz podrozdział 5.9). Na powyższym zdjęciu pokazany jest zestaw komór, a niżej wewnątrz komory do kapsulowania paliwa. Na następnych zdjęciach ukazane są kolejne fazy tego procesu.



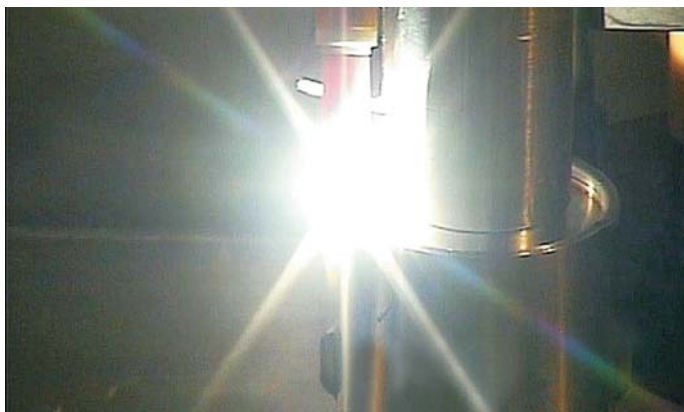
Wnętrze komory do kapsulowania paliwa



Zestaw paliwowy wkładany do kapsuły

²⁹ W reaktorze EWA stosowano paliwo o symbolu EK-10 i wzbogaceniu 10% oraz paliwo WWR o wzbogaceniu 36%. W reaktorze MARIA stosowano dotąd paliwo MR o wzbogaceniu 36% i 80%. Obecnie, międzynarodowy program ograniczania zagrożeń globalnych (ang. Global Threat Reduction Initiative - GTRI) zezwala na stosowanie paliw o maksymalnym wzbogaceniu 20% i prowadzone są prace na rzecz wymiany paliwa w reaktorze MARIA.

³⁰ W istocie cały proces obejmuje kilka etapów: wstępne suszenie paliwa gorącym (ok. 100°C) powietrzem, a następnie suszenie metodą próżniową z wykorzystaniem argonu jako pochłaniacza (sorbentu) wilgoci, napełnienie kapsuł gazem szlachetnym (tu helem), spawanie pokryw uszczelniających kapsuły, wreszcie kontrola szczelności kapsuł przy wykorzystaniu tzw. helitestu.



Spawanie kapsuły wypełnionej helem



Gotowa do przechowania kapsuła z zestawem paliwowym

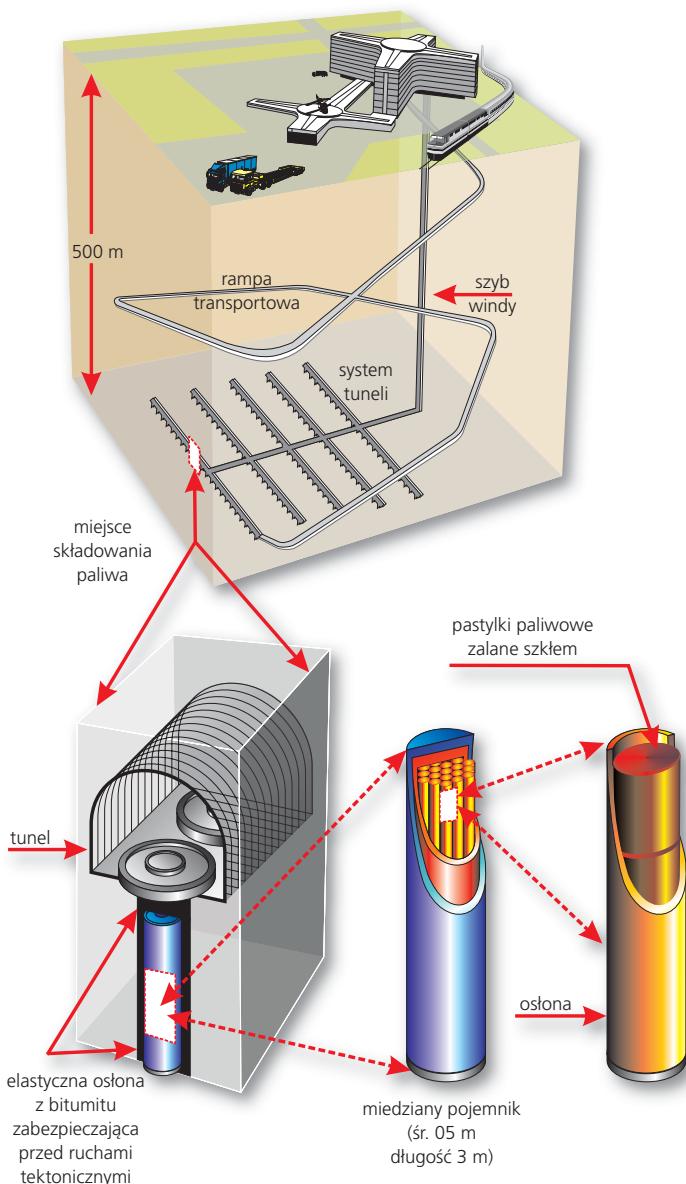
Wypalone paliwo może być przechowywane w takiej postaci 30÷50 lat. Potem jednak musi już być składowane w składowisku głębinowym. W Świerku rozpoczęto przygotowania do budowy suchego przechowalnika, lecz wobec zawartego porozumienia z Rosją i USA, wypalone paliwo zostało wywiezione do kraju producenta tj. do Rosji celem przerobu. Paliwo to wywożono – w zależności od jego rodzaju – w dwóch typach pojemników (oba pokazane na zdjęciach) f-my ŠKODA o masie ok. 12,5 tony (do takiego pojemnika wprowadzano 108 elementów paliwowych o łącznej masie ok. 100 kg) oraz pojemnika rosyjskiego TUK-19 o masie ok. 5 ton, w którym mieściły się 4 elementy paliwowe typu MR.



Pojemniki transportowe na wypalone paliwo, wykorzystane do wywozu wypalonego paliwa z reaktorów EWA i MARIA

5.9.

SKŁADOWANIE WYPALONEGO PALIWA



Rysunek ideowy składowiska podziemnego. W miedzianym pojemniku mogą też znajdować się zeszkliwione odpady promieniotwórcze po recyklingu. Typowa średnica szybu wentylacyjnego, jak np. w Onkalo, Finlandia, to 5,7 m, natomiast tunelu składowiska, to 3,5 m, a tunelu wejściowego - 5,5 m. W Onkalo najniższy poziom kontrolny znajduje się na głębokości 520 m. Długość tunelu na głębokości 420 m wynosi 5,5 km, a jego nachylenie 1:10.

Przechowywanie wypalonego paliwa lub innych długożyciowych i wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych na poziomie 400-1000 m pod ziemią zapewnia większe bezpieczeństwo niż przechowywanie ich na powierzchni. W dyskusjach nad niebezpieczeństwem związanym ze składowaniem odpadów promieniotwórczych, wytwarzanych obecnie przez przemysł jądrowy zapomina się często, że skorupa ziemską zawiera znaczną ilość substancji promieniotwórczych, które stale dyfundują w kierunku powierzchni Ziemi i tworzą część tła naturalnego promieniowania środowiska. Można pokazać³¹, że wszystkie odpady zgromadzone do roku 2000, po schłodzeniu ich przez okres 500 lat, będą miały aktywność odpowiadającą promieniom naturalnemu gleby ziemskiej o objętości 30x30x2 km (te 2 kilometry to 3-4 razy więcej niż głębokość podziemnych

³¹ Zrobił to prof. dr hab. Zbigniew Jaworowski

składowisk odpadów promieniotwórczych). Innymi słowy, po 500 latach odpady te przestaną być niebezpieczne. Zwróćmy również uwagę na to, że dużo naszych „normalnych” śmieci - jak pojemniki z tworzyw sztucznych - potrafi przetrwać w skorupie ziemskiej znacznie, znacznie dłużej.

Jeśli opanujemy technikę transmutacji i spalania, cały problem przechowywania odpadów z reaktorów będzie znacznie prostszy niż dzisiaj. Jednak już teraz można powiedzieć, że przechowywanie odpadów głęboko pod ziemią nie przedstawia dla ludzi żyjących w pobliżu składowiska podziemnego istotnego zagrożenia, chyba że ktoś przez przypadek zechce wykorzystać teren składowiska w inny sposób i np. przełamując bariery technologiczne, stanowiące ochronę składowiska, zacznie w nim kopać. Nawet jednak w tym wypadku niebezpieczeństwo będzie miało na pewno charakter lokalny, a nie globalny. Świadomość tego efektu nie zwalnia nas jednak z maksymalnej staranności o to, aby przechowywane wypalone paliwo lub inne tego typu odpady były zapakowane szczelnie i nie były uwalniane do otoczenia. Stąd narodziła się koncepcja szklwienia odpadów, gdyż nawet gdyby do tych odpadów dostała się woda, nie rozpuści ona szkła.

Inna koncepcja, wypracowana w Australii, to tworzenie „syntetycznej skały”, w której uwięzione są produkty rozszczepienia. „Skała”, o nazwie angielskiej Synroc, to mieszanka ditlenku tytanu (TiO_2), holandytu ($\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$) i perowskitu (CaTiO_3), w którą można wbudować, tj. stworzyć odpowiednią strukturę krystaliczną, fragmenty rozszczepienia. W takiej ceramice zawartość odpadów promieniotwórczych może stanowić nawet do 30% masy!

Zwróćmy także uwagę na fakt, że typowa elektrownia węglowa o mocy 1000 MW produkuje rocznie ok. 7 milionów ton ditlenku węgla, około 200 000 ton ditlenku siarki – gazów silnie zanieczyszczających środowisko. Ponadto powstaje w tym czasie około 200 000 ton popiołu zawierającego toksyczne ciężkie metale, a w niemałej ilości także pierwiastki promieniotwórcze. Np. we Francji, szczególnie bogatej w elektrownie jądrowe, na jednego mieszkańca przypada rocznie 14 ton odpadów przemysłowych, z których 140 kg, to odpady generalnie niebezpieczne. W tej ilości mieści się jednak tylko mniej niż 1 kg odpadów jądrowych, w tym zaledwie 20-30 g odpadów długożyjących, a w nich 10 g wysokoaktywnych.

5.10.

TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA



Test zderzeniowy zbiornika transportowego dla wypalonego paliwa jądrowego. Przyczepa ze zbiornikiem typu B o wadze 22 ton zderzyła się z prędkością ok. 100 km/godz. ze ścianą z betonu o wadze 690 ton.
http://www.sandia.gov/tp/SAFE_RAM/SEVERITY.HTM

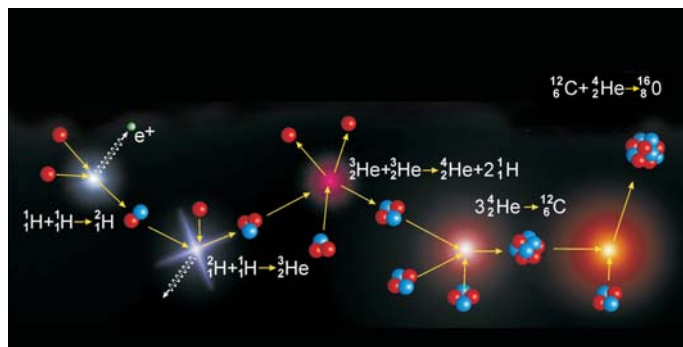
Wbrew powszechnej opinii, stale nagłaśnianej przez źle poinformowanych „funkcjonariuszy mediów”, transport wypalonego paliwa nie jest niebezpieczny. Zauważmy, że w trakcie ostatnich 40 lat w samych Stanach Zjednoczonych było 3000 takich transportów tego typu. Paliwo było transportowane na samochodach ciężarowych i pociągami na łączną odległość rzędu 2,5 miliona kilometrów. Podczas takich transportów nigdy nie wydarzył się wypadek. Podobnie jest w Europie. Bezpieczeństwo przewożonemu paliwu częściowo gwarantuje ciężki (120 ton) pojemnik stalowy (patrz zdjęcie). Jego ściany mają grubość około 50 cm, są więc około 15 razy grubsze niż w cysternach wiozących benzynę. Do każdej tony wypalonego paliwa używa się trzykrotnie więcej materiału na zbiornik i osłonę biologiczną. Te zbiorniki muszą być tak zbudowane, aby wytrzymały półgodzinny pożar i upadek z 9 m na beton. Buduje się je nawet tak, aby wytrzymały zderzenie z samolotem odrzutowym! W każdym zbiorniku nie przewozi się naraz więcej niż dziewięć wypalonych elementów paliwowych. W ostatnim okresie zaczęto modyfikować konstrukcję pojemników, aby wytrzymały one również ewentualny atak terrorystyczny.

5.11.

ENERGIA TERMOJĄDROWA – NIEMAL NIEOGRANICZONE PRZYSZŁE ŹRÓDŁO ENERGII

Reakcja syntezy (fuzji) jądrowej polega na połączeniu się dwóch lekkich jąder w jedno cięższe. Reakcje te, zwane także termojądrowymi, to typowe reakcje zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach. Wiemy, że jądrowy „niedobór masy” (defekt masy) – omówiony na początku tego rozdziału - może zostać przekształcony w energię promieniowania. Istotnie, w naszym Słońcu syntezie ulega w każdej sekundzie 657 milionów ton wodoru, z którego powstaje 653 milionów ton helu. Brakująca masa nukleonów, wynosząca 4 miliony ton, przekształcana jest na energię promieniowania - dzięki temu Słońce świeci. Niezwykle wysokie temperatury i wysokie ciśnienia prowadzą do powstania szczególnego stanu materii całkowicie zjonizowanej - zwanego **plazmą**, utrzymywaną w gwiazdach siłami grawitacyjnymi.

Reakcja syntezy, w której wyzwala się stosunkowo duża ilość energii, polega np. na reakcjach z udziałem czterech protonów i utworzeniu z nich jądra helu (cząstki alfa). W takiej reakcji wydzielą się energia ok. 27,7 MeV. Ponieważ syntezie ulegają izotopy wodoru, a wodór znajduje się wszędzie w naszym otoczeniu, idea otrzymywania energii z syntezy wodoru jest niezwykle atrakcyjna: stwarza ona nadzieję na niemal nieograniczone źródło energii dla przyszłych pokoleń.



Powyższy rysunek pokazuje, w jaki sposób w drodze reakcji syntezy jądrowej mogą powstawać różne pierwiastki.

Przeprowadzenie reakcji syntezy na Ziemi nie jest łatwe. By je zapoczątkować należy dysponować niezwykle wysoką temperaturą, rzędu kilkuset milionów stopni, a gdy się już otrzyma taką gorącą plazmę, należy umieć ją utrzymać w określonej objętości, ponieważ reakcja syntezy wymaga jednoczesnego zapewnienia określonej gęstości i określonej temperatury. Gdy się taki cel osiągnie i zajdzie wystarczająca liczba reakcji syntezy, dostawa świeżego paliwa powinna zapewnić tworzenie energii w sposób ciągły.

Reakcja syntezy jest w pewnym sensie przeciwieństwem reakcji rozszczepienia jądrowego. W tej ostatniej z jednego dużego jądra powstają dwa (bardzo rzadko trzy) mniejsze, w reakcji syntezy zaś z kilku jąder powstaje jedno większe. W obu jednak przypadkach początkowa masa całego układu jest większa od końcowej, a różnica tych mas wydziela się w postaci energii. Łatwo zauważyć, że - aby zapoczątkować taką reakcję syntezy - energie zderzających się jąder (cząstek o ładunku dodatnim!) muszą być wystarczająco wysokie, by przezwyciężyć odpychanie elektrostatyczne. Aby utworzyć atomy helu, powiedzmy z syntezy deuteru i trytu, oba jądra muszą znajdować się w warunkach ekstremalnie wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia. W opisaney tu reakcji tworzy się neutron o wysokiej energii, która zmniejsza się dzięki jego zderzeniom z otoczeniem. Przekazywaną energię można przekształcić w energię cieplną potrzebną do wytworzenia pary, a ta następnie będzie mogła poruszać turbinę i generator prądu elektrycznego. Neutrony wytwarzane w reakcji syntezy można też wykorzystać, np. do produkcji paliwa reaktorowego ze zubożonego uranu (tj. o zawartości izotopu ^{235}U mniejszej od 0,72%) lub do produkcji trytu – też paliwa do procesu syntezy, w reakcji neutronów z litem. Konieczność utrzymania wysokiej temperatury oznacza, że plazma nie może znaleźć się w kontakcie ze ścianami jakiegokolwiek naczynia. Dlatego też należy wypracować specyficzne techniki utrzymywania plazmy. Istnieją trzy takie metody: grawitacyjna, magnetyczna i bezwładnościowa. Utrzymanie plazmy w gwiazdach jest wynikiem siły ciężkości, która prowadzi do powstania dostatecznie wysokiego ciśnienia. Ten typ **pułapkowania grawitacyjnego** nie jest jednak możliwy w warunkach ziemskich. W metodzie utrzymywania **magnetycznego** korzystamy z pułapki wytwarzanej przez silne pola magnetyczne, w **bezwładnościowego** zaś - pastylki zawierające wodór ściska się przy użyciu silnej wiązki promieniowania laserowego lub korpuskularnego.

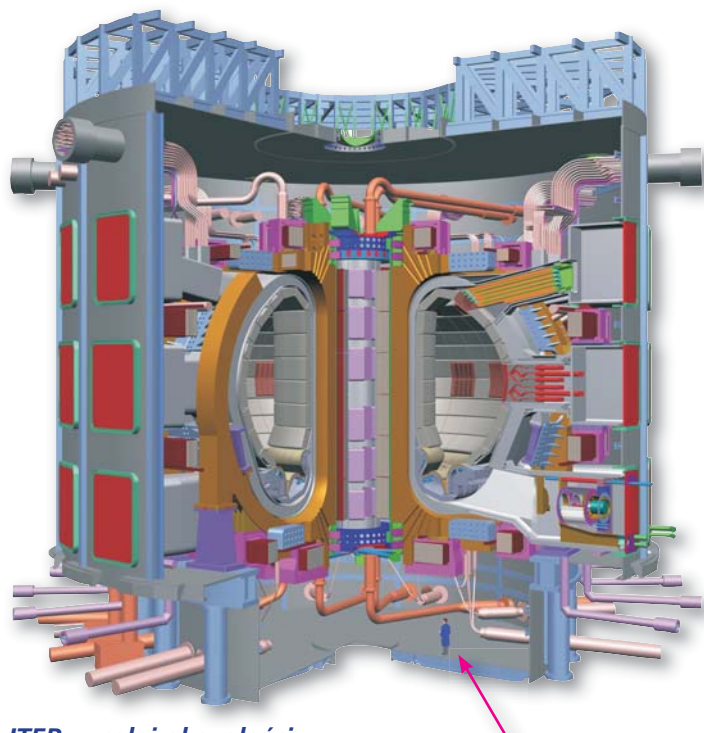
Warunkiem koniecznym dla produkowania energii w reaktorze termojądrowym przy plazmie deuterowo-trytowej (w stosunku 1:1 atomu/atom) jest spełnienie tzw. kryterium Lawsona, które głosi, że iloczyn gęstości jąder w plazmie i czasu utrzymania plazmy w temperaturze zapłonu powinien przewyższać wartość progową $10^{20}\text{-}10^{21}\text{ s/m}^3$. W wypadku metody magnetycznej, gdzie gęstość cząstek przewyższa około $10^{20}/\text{m}^3$, czas utrzymywania plazmy, zgodnie z kryterium Lawsona, powinien przewyższać 1 s. Przy bezwładnościowym utrzymywaniu plazmy gęstość cząstek jest mniejsza od około $10^{31}/\text{m}^3$, a czas utrzymywania plazmy dłuższy od 10^{-11} s .

Reakcją, którą się prawdopodobnie wykorzysta w przyszłości będzie przede wszystkim synteza deuteru i trytu, choć rozpatruje się też syntezę dwóch atomów deuteru. Deuter można łatwo znaleźć w wodzie (30 g na metr sześcienny, jeden na 6000 atomów wodoru). Tryt jednak musi być wy-

tworzony albo w reaktorze jądrowym, albo powstać w reaktorze termojądrowym z litu - pierwiastka, który znajduje się w dużych ilościach w skorupie ziemskiej. Taki reaktor termojądrowy składałby się z grubego (ok. 1 m) kożucha litowego, zawierającego także beryl, otaczającego rdzeń reaktora. Sam lit pochłaniałby neutrony spowalniane w tymże kożuchu. Ostatecznie lit przekształcałby się w tryt i hel. Wyzwalana w reakcji deuteru z trytem energia ogrzewałaby kożuch litowy i byłby to punkt startowy do wytwarzania energii użytecznej. Beryl w tym układzie jest natomiast niezbędny dla podtrzymania liczby neutronów.

Od lat próbuje się zatem stworzyć jakąś instalację wykorzystującą reakcję syntezy, gdyż zapasów paliwa dla tych celów starczy nawet na miliardy lat! Dla porównania: do wyprodukowania energii elektrycznej 1 GWrok z reakcji rozszczepienia jądrowego potrzebujemy około 35 ton UO_2 , natomiast otrzymanie jej z reakcji syntezy wymaga posiadania około 100 kg deuteru oraz 150 kg trytu. Co dodatkowo czyni reakcję syntezy atrakcyjną, to także niemal kompletny brak ubocznych produktów promieniotwórczych (jeśli nie liczyć trytu!), a w szczególności bardzo ważny fakt, iż działanie elektrowni opartej na reakcji syntezy nie może powodować powstawania materiałów, których można użyć do produkcji broni jądrowej.

Jak dotąd, wszystkie obietnice i nadzieje na wytwarzanie energii z reakcji termojądrowej okazały się przedwczesne - jedynie stosunkowo niedawno wyprodukowana przez chwilę energia zrównała się z energią dostarczoną do układu (wpierw w amerykańskim reaktorze TFTR i japońskim JT60, ostatnio w europejskim JET - od ang. Joint European Torus). Nie wydaje się, aby można było oczekiwać powstania wydajnych źródeł energii tego typu przed końcem XXI wieku. Niestety, energia termojądrowa została już wykorzystana do celów militarnych w tzw. bombie wodorowej. Nadzieję na wykorzystanie energii termojądrowej w regularnej energetyce stwarza obecnie budowa instalacji ITER, dość kosztowny projekt wielu państw.



ITER w całej okazałości.
Warto zwrócić uwagę na rozmiary tego urządzenia:
w dole rysunku widać postać człowieka.

W odróżnieniu od reaktorów jądrowych wykorzystujących proces rozszczepienia, ewentualny wybuch instalacji termojądrowej jest z zasady niemożliwy, gdyż zanim wybuch nastąpi plazma musi się rozszerzyć i obniżyć temperaturę, co automatycznie zatrzyma proces syntezy jądrowej. Nie oznacza to jednak, że z instalacją tego typu nie wiążą się żadne niebezpieczeństwa. W szczególności należy mieć na uwadze znaczną produkcję neutronów i promieniotwórczego trytu. Obecność stopionych soli litu oraz rakotwórczego berylu tworzy również zagrożenie.

Czy kontrolowana synteza termojądrowa jest lepsza i bezpieczniejsza od reakcji rozszczepienia?

W reaktorach termojądrowych będzie tworzyła się, podobnie jak w reaktorach jądrowych, ogromna ilość promieniowania jonizującego (szczególnie neutronowego). Z tego względu zasadniczą sprawą staje się konstrukcja właściwej osłony biologicznej przed tym promieniowaniem. Jednak nawet w najgorszym scenariuszu uwolnienie materiałów promieniotwórczych do atmosfery nie będzie nigdy tak groźne, żeby zmuszało do ewakuowania pobliskiej ludności. Ponadto, wytwarzane w trakcie pracy elektrowni materiały promieniotwórcze szybko się rozpadają i nie wymagają specjalnego odizolowywania ich od środowiska. Problemem szczególnym jest natomiast możliwość uwolnienia promieniotwórczego trytu. Ten gaz promieniotwórczy ma dużą zdolność penetracji, łatwo rozpuszcza się w wodzie i może być niebezpieczny jeszcze wiele lat po jego utworzeniu (okres połowicznego rozpadu trytu to około 12 lat). Dlatego też zwraca się uwagę na rozwiązanie zagadnień związanych z reakcją deuter-deuter, a nie reakcjami, w których bierze udział tryt.

5.12.

UZUPEŁNIENIE 1:

wartość energetyczna materiałów

wartość energetyczna różnych materiałów

Nośnik energii	kJ/kg
D-D (synteza)	$3 \cdot 10^{11}$
^{235}U (całkowite rozszczepienie przez neutrony termiczne)	$7,0 \cdot 10^{10}$
D_2O (reakcja syntezy D-D)	$3 \cdot 10^9$
Paliwo typu UO_2 , wzbogacenie 2,5% neutrony termiczne	$1,5 \cdot 10^9$
Naturalny uran, neutrony termiczne	$5 \cdot 10^8$
^{210}Po (rozpad α) $T_{1/2} = 138,4$ dni	moc wydzielana ~ 200 W/g
^{238}Pu (rozpad α) $T_{1/2} = 87,74$ lat	moc wydzielana $\sim 0,5$ W/g

Nośniki konwencjonalne

Materiał	kJ/kg
Wodór	$\sim 120 \cdot 10^3$
Metan	$\sim 50 \cdot 10^3$
Paliwa kopalne	$(10 \div 50) \cdot 10^3$
Wodospad wysokość 100m	~ 1
Różne baterie chemiczne	$100 \div 400$
Sprężyna	0,16

Porównanie typowych paliw	Ciepło spalania (MJ/kg)
Węgiel kamienny	20÷37
Węgiel brunatny	~ 17
Koks	~32
Drewno (suche)	10÷15
Ropa	40÷42
Benzyny	41÷44
Oleje opałowe	37÷42

5.13.

UZUPEŁNIENIE 2: cykl paliwowy

Na tzw. cykl paliwowy składa się kilka kroków. Krok pierwszy, to wydobywanie rudy uranowej. Rudę tę kruszy się i mieli na drobny proszek. Następnie podlega ona procesowi chemicznemu pozwalającemu na odseparowanie uranu ze skały, w wyniku czego otrzymujemy tlenek uranu: U_3O_8 . Elektrownia jądrowa generująca np. moc elektryczną 1000 MW zużywa rocznie około 200 ton U_3O_8 .

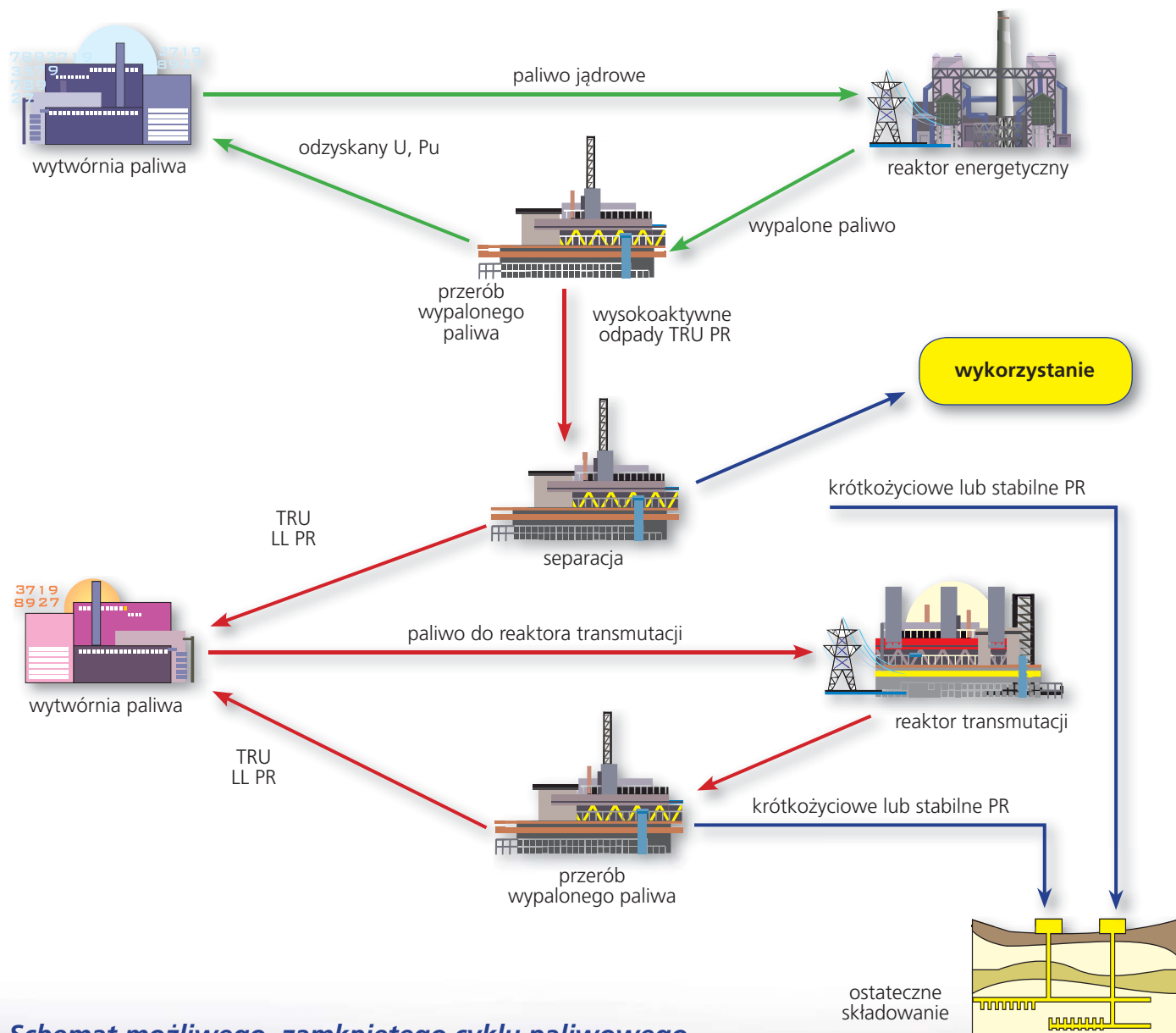
Następny krok polega na wzbogaceniu uranu w izotop ^{235}U . Krok ten poprzedzony jest przekształceniem tlenku uranu w gazowy sześćfluorek uranu (UF_6). Gaz rozdziela się w odpowiedni sposób na dwa strumienie: usuwanie ^{238}U powoduje, że jeden z nich staje się bogatszy w ^{235}U , drugi zaś - uboższy. Pierwszy będzie następnie wykorzystany do produkcji paliwa jądrowego, drugi zaś, tzw. zubożony uran, można otrzymać w formie metalicznej i, ze względu na jego dużą gęstość, wykorzystać w charakterze bardzo efektywnej osłony przed promieniowaniem gamma. Większość elektrowni jądrowych korzysta z paliwa o stopniu wzbogacenia w ^{235}U od 2 do 4%. Spośród rozlicznych rodzajów reaktorów energetycznych tylko jeden, kanadyjski reaktor o nazwie CANDU może korzystać z naturalnego uranu. Nie oznacza to jednak, że energia wytwarzana w tym reaktorze jest tańsza, gdyż zmniejszony koszt paliwa rekompensowany jest koniecznością użycia drogiej ciężkiej wody jako moderatora.

Wypalone w reaktorze jądrowym paliwo jest przechowywane, a następnie przetwarzane w celu odzyskania materiałów rozszczepialnych (^{235}U i ^{239}Pu) lub przygotowane do wieloletniego przechowywania. Paliwo wyprowadzone z reaktora zawiera 94%-95% uranu oraz około 1% plutonu, które mogą być zużyte do produkcji świeżego paliwa. Ten 1% plutonu stanowi znaczny rezerwuár energii: w 1 g plutonu drzemie energia odpowiadająca spalaniu tony ropy naftowej lub 100 g uranu! Warto zauważyć, że odzyskiwany uran zawiera tylko około 1% ^{235}U , jednak jest to i tak więcej niż w naturalnej rudzie uranowej. Dzisiaj, to co rozumie się przez cykl zamknięty, to właśnie recykling paliwa. W procesie zwanym PUREX tworzy się świeże paliwo: odpowiednio spreparowany pluton, zmieszany ze wzbogaconym uranem, składa się na tzw. paliwo MOX (od ang. mixed-oxide fuel). Do tworzenia tego typu paliwa można też użyć zapasów plutonu nagromadzonego przez przemysł militarny. W Europie znajduje się siedem fabryk przerobu paliwa, a około 30 reaktorów może wykorzystywać paliwo MOX. Dziś reaktory lekkowodne produkują rocznie około 7000 ton wypalonego paliwa, a tylko ok. 15% zostaje poddane procesowi recyklingu. Ten ostatni jednak oznacza pięciokrotne zmniejszenie objętości wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych i dziesięciokrotne zmniejszenie ich radiotoksyczności.

Pozostałe 4% pierwiastków w wypalonym paliwie stanowi odpad promieniotwórczy: fragmenty rozszczepienia i pomniejsze aktywnowce. Te ostatnie są długożyciowe. Można je sprasować do postaci pastylek i poddać procesowi transmutacji w przyszłych reaktorach przeznaczonych do spalania odpadów promieniotwórczych. Wykonanie w jednym kroku transmutacji i spalania odpadów, w tym wszystkich długożyciowych aktywnowców i ziem rzadkich w podkrytycznym układzie reaktorowym sterowanym akceleratorem (ADS), stwarza zamknięty cykl paliwowy przyszłości. Jego możliwy schemat pokazuje rysunek niżej. Jak omówiono

w tekście głównym, wysokoaktywne odpady promieniotwórcze pozostające po procesie przerobu poddawane są na ogół procesowi zeszklenia, ładowane do pojemników ze stali nierdzewnej i wysłane do finalnego składowiska odpadów.

Jeśli wypalone paliwo nie jest poddane recyklingowi, mamy do czynienia z cyklem otwartym. Z reguły przed wysłaniem do podziemnego składowiska odpadów dąży się do około 100-krotnego lub większego zmniejszenia radiotoksyczności wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych.



Schemat możliwego, zamkniętego cyklu paliwowego połączony z transmutacją długożyciowych fragmentów rozszczepienia (TRU - transuranowce, PR - produkty rozszczepienia, LL - izotopy długożyciowe)



TYPOWE DAWKI LUB ZAKRESY DAWEK

(w milisiwertach)



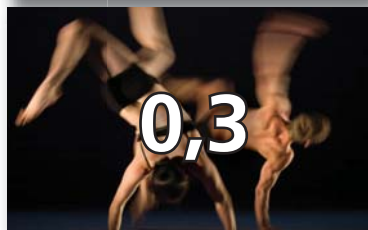
0,1

Jednorazowy przelot
Londyn-
Nowy Jork-
Londyn



100 - 150

Roczne narażenie
załóg stacji
orbitalnych



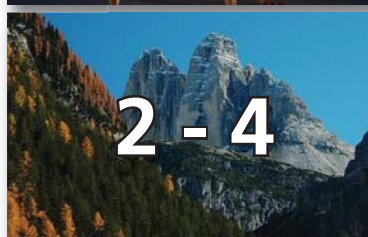
0,3

Roczna dawka od
radionuklidów we
własnym ciele



1 500

Prawdopodobne
narażenie podczas
3-letniej wyprawy
na Marsa



2 - 4

Roczna dawka od
tła naturalnego



do 4 000

Dawki otrzymane
przez osoby, które
przeżyły wybuchy
jądrowe w Hirosz-
mie i Nagasaki
(1945 r.)



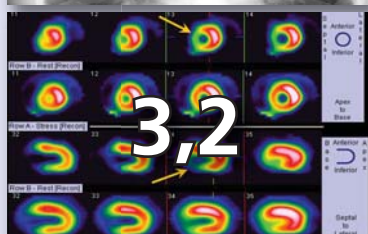
0,1

Zdjęcie klatki
piersiowej



50
80

Tomografia
komputerowa głowy



3,2

Typowe badanie
radiologiczne



do 100000

Fluoroskopia prze-
wodu pokarmowego



50

Zdjęcie kręgosłupa
lędźwiowego



od 20000
do 100000

Naświetlenie całego
ciała przed operacją
przeszczepu
szpiku kostnego

Typowa dawka
całkowita na guz
nowotworowy

DAWKI GRANICZNE

(w milisiwertach)



1,0

Roczny limit dawki dla
ogółu populacji



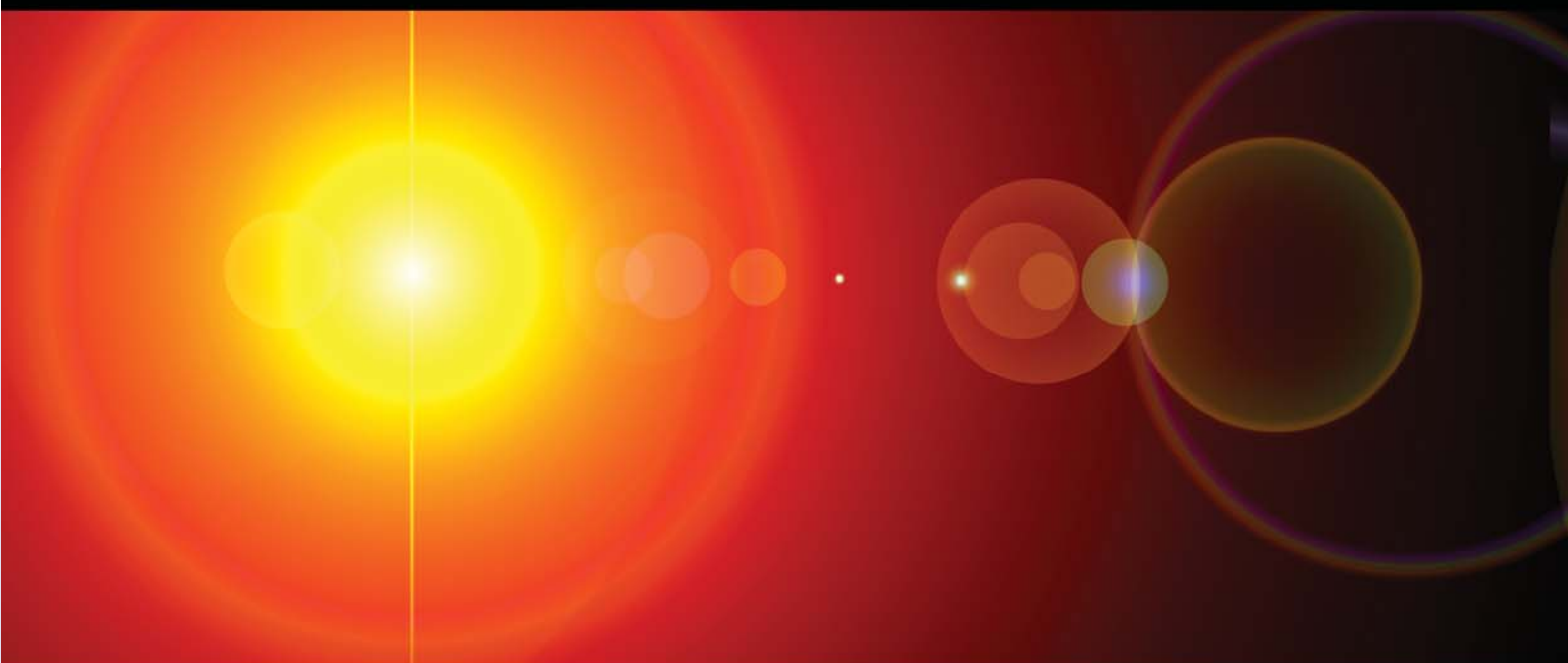
50

Roczna dawka graniczna
dla narażenia zawodowego
(kat. A)



500

Dawka graniczna dla
uczestniczących w ratowaniu
życia ludzkiego



INSTYTUT PROBLEMÓW JĄDROWYCH im. Andrzeja Sołtana
THE ANDRZEJ SOŁTAN INSTITUTE FOR NUCLEAR STUDIES

ISBN 978-83-931455-1-5