ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: MATEMATYKA-FIZYKA z. 77 GEOCHRONOMETRIA 11 Nr kol. 1293

Andrzej ZASTAWNY

RADIOIZOTOPY I ENERGETYKA JĄDROWA

Streszczenie. Autor przedstawia w artykule zagadnienia dotyczące naturalnych i sztucznych radioizotopów oraz energetyki jądrowej w aspekcie środowiska naturalnego. W konkluzji wysuwa się tezę, że naturalna i sztuczna radioaktywność związana z aktywnością ludzką jest nie bardziej niebezpieczna niż inne czynniki i elementy środowiskowe, a energetyka jądrowa jest najczystszą technologią produkcji energii elektrycznej.

THE RADIOISOTOPES AND NUCLEAR ENERGY

Summary. Natural and artificial radioisotopes and nuclear energy are discussed at the popular level, in the environment context. At the conclusion, an opinion is derived, that the natural radioactivity and artificial radioactivity connected with human activity are not more dangerous then other factors and elements in the environment, and nuclear power engineering the cleanest technology for the big-scale production of energy.

Radioizotopy są naturalnym składnikiem środowiska towarzyszącego człowiekowi od jego początku i jako takie winny być akceptowane, a przede wszystkim winniśmy posiadać o nich elementarną wiedzę, którą współczesna nauka umożliwia. Niestety, w Polsce nawet na większości kierunków nauk ścisłych i technicznych wyższych studiów pomija się tę tematykę w przedmiocie fizyka z racji bardzo małej ilości godzin przeznaczanych na ten przedmiot. Pogarsza sytuację tradycja naszego kręgu kulturowego, wg której grubą kompromitacją jest niewiedza dotycząca nawet drobnych zagadnień z wiedzy humanistycznej, a prawie do dobrego tonu należy mylenie natężenia prądu elektrycznego z napięciem itp. A już najgorzej, że ludzie nie mający elementarnego pojęcia o określonym zagadnieniu (radioizotopów i energetyki jądrowej dotyczy to w szczególności) wypowiadają się publicznie i wpływają na decyzje. Zamierzeniem autora jest przedstawić, w przystępnej formie, elementarne wiadomości dotyczące zagadnień radioizotopów i energetyki jądrowej.

Naturalnym kierunkiem procesów w przyrodzie jest przechodzenie układów od stanów o większej energii (czasem możemy mówić wręcz o wzbudzeniu energetycznym) do sta-

nów o niższej energii. Wydzielona energia w ostatecznym bilansie ma formę pospolicie określaną ciepłem. Do takich procesów należy rozpad jąder atomowych. Proces ten nie jest przypisany określonym pierwiastkom, lecz izotopom, dlatego mówi się o radioizotopach, z tym że w przypadku technetu oraz najcięższych pierwiastków (np. polon—Po, radon—Rn, rad—Ra, tor—Th, uran—U) wszystkie izotopy są nietrwałe; mówimy wtedy o radiopierwiastkach.

Rozpad promieniotwórczy ma charakter przypadkowy dający się opisywać pojęciami rachunku prawdopodobieństwa. Wielkością charakteryzującą szybkość rozpadów jest średni czas życia t izotopu z uwagi na rozpad. W odstępie czasu Δt, małym względem t, część jąder, które ulegną rozpadowi, wynosi $\Delta t/\tau$, lub ogólniej, po czasie t część jąder, które jeszcze nie rozpadły się, wynosi $e^{-t/\tau}$. Notowane czasy życia zawierają się w granicach od ułamków mikrosekund do 10^{18} lat. Zważywszy, że czas istnienia naszej Metagalaktyki szacuje się na niecałe 10^{11} lat, ilości radioizotopów o najdłuższych czasach życia praktycznie nie zmniejszyły się od początku swego powstania. Liczba rozpadów radioizotopu w jednostce czasu jest nazywana radioaktywnością. Jednostką jest bekerel – Bq rozumiany jako jeden rozpad na sekundę. Radioaktywność 1 Bq jest bardzo małą radioaktywnością. Z przytoczonych wcześniej zależności wynika, że radioaktywność izotopu jest równa ilorazowi liczby jąder przez średni czas życia. W praktyce przyjęto charakteryzować szybkość rozpadu radioizotopu przez półokres rozpadu $T_{1/2} = \ln 2 \cdot t = 0.69 \cdot t$.

Rozpady jąder zachodzą tylko na dwa sposoby: rozpady α i β. W pierwszym przypadku jądro pozbywa się fragmentu nazywanego cząstką α, składającą się z dwóch protonów i neutronów, będącą w istocie jądrem izotopu hel–4. Przez rozpad α przekształcają się tylko izotopy ciężkie. Wydzielona w rozpadach energia zawierająca się w przedziale od 2.2 do 11.5 MeV w około 98% jest unoszona przez cząstkę α, reszta to energia odrzutu nowego jądra. W przypadku rozpadu β mamy do czynienia z bardziej złożoną przemianą jądrową przebiegającą na 3 sposoby: beta minus i beta plus lub wychwyt elektronu. W rozpadzie beta minus jeden z neutronów przekształca się w proton i z jądra wylatuje elektron nazywany cząstką beta minus lub krótko cząstką β i antyneutrino. W drugim przypadku proton przekształca się w neutron, antyelektron nazywany cząstką β plus i neutrino. Po wychwycie elektronu (np. z powłoki K) jądro końcowe jest takie samo jak po rozpadzie β plus. Energie rozpadów β zawierające się w przedziale od kilkunastu keV do 5 MeV są unoszone w formie energii kinetycznej wylatujących cząstek. Cząstka β unosi tylko część energii, resztę neutrino. Z dużym uproszczeniem można przyjmować średnią energię cząstek β równą 1/3 energii rozpadu. Neutrina prawie nie oddziałują z atomami i praktycznie możemy przyjmować, że opuszczają Ziemię.

W wielu przypadkach powstałe w wyniku rozpadu jądro jest w stanie wzbudzenia energetycznego i prawie natychmiast przechodzi do stanu podstawowego emitując jeden lub kilka kwantów promieniowania gamma. Z uwagi na dużą przenikliwość promieni γ często to ostatnie promieniowanie, a nie pierwotne, odgrywa istotną rolę. Np. znany sztuczny

radioizotop kobalt–60 rozpada się przez β^- do niklu–60 i ten ostatni emituje dwa kwanty γ o energiach kolejno 1.17 i 1.33 MeV, które są wykorzystywane jako promieniowanie użyteczne tego radioizotopu. Energie kwantów promieniowania γ (czasem też X) towarzyszącego rozpadom zawierają się w przedziale od kilka keV do 2.7 MeV.

Towarzyszące nam w naturze radioizotopy albo istnieją dlatego, że w czasie istnienia Ziemi nie zdążyły się rozpaść, albo są na bieżąco wytwarzane. W grupie ostatnich należy wydzielić tzw. kosmogenne – produkowane przez promieniowanie kosmiczne. W sumie można się doliczyć około 70 radioizotopów, w tym 13 kosmogennych i 20, których półokresy rozpadu są większe od 10^{12} lat, a więc mają charakter tylko ciekawostek, ponieważ ich radioaktywność jest niezauważalna. W tabeli 1 wyliczone są radioizotopy, które z uwagi na ich rolę w środowisku należy odnotować.

Jądra powstałe w wyniku rozpadów toru i uranu są też radioaktywne i następne też, w ten sposób mamy do czynienia z całymi szeregami (rodzinami) promieniotwórczymi. Liczby radioizotopów występujących w rodzinach są podane w nawiasach pod wartościami radioaktywności. W skali Ziemi mamy do czynienia z równowagą promieniotwórczą w szeregach polegającą na tym, że szybkość przyrostu i ubytku liczby jąder kolejnych członków szeregu jest taka sama, równa szybkości rozpadów radioizotopu pierwszego, czyli ich radioaktywności są sobie równe. Ponieważ w szeregach mamy do czynienia z różnymi pierwiastkami, mającymi różne własności chemiczne, rozpuszczalność w wodzie, zdolność migracji, lokalnie takiej równowagi może nie być. Szczególnie ważnym przypadkiem jest oddzielanie się radu od szeregu uranu–228 z powodu jego łatwiejszej rozpuszczalności w wodzie oraz radonu jako gazu szlachetnego łatwo dyfundującego. Tryt podano w tabeli przede wszystkim dlatego, że będzie to główny element troski i kontroli w przypadku rozwoju energetyki jądrowej w oparciu o syntezę deuteru. Obecny poziom jego radioaktywności jest rezultatem nie tylko produkcji przez promieniowanie kosmiczne, ale i wybuchów bomb wodorowych. Dane dotyczące C–14 i T dotyczą roku 1990 i pochodzą z IAEA w Wiedniu. Radioizotopy strontu i cezu podano w tabeli, ponieważ są one przedmiotem zainteresowania jako zanieczyszczenia pochodzące z reaktorów jądrowych. Podane radioaktywności dotyczące rocznych opadów z powietrza na m^2, pochodzące z danych bułgarskich z połowy lat siedemdziesiątych, były rezultatem prób z bombami atomowymi – obserwowano malenie tych radioaktywności. Dana dotycząca radioaktywności cezu w powietrzu odnosi się do ostatnich lat z pomiarów w Bratysławie. Organizm dorosłego człowieka zawiera około 12.5 kg węgla, więc radioaktywność ^{14}C w organizmie wynosi 3400 Bq; potasu zawiera około 140 gram stąd radioaktywność ^{40}K 4000 Bq; radu zawiera nie więcej niż 100 pg, co odpowiada radioaktywności 4 Bq; uranu 20 μg, co odpowiada radioaktywności 0.6 Bq.

Głównym rezultatem penetracji materii przez promieniowanie jądrowe jest jonizacja atomów, stąd nazwa promieniowanie jonizujące. W zależności od rodzaju atomów średnia energia tracona przez cząstkę na jedną jonizację zawiera się w przedziale od 25 do 35 eV. Cząstki α bardzo intensywnie oddziałują z atomami, dlatego gęstość jonizacji na drodze

Tabela 1

Ważniejsze radioizotopy występujące w środowisku

Symbol	Pochodzenie	$T_{1/2}$ [lata]	D	E [keV]	γ	A_1 [Bq/kg]	k [ppm]	A_e [Bq/kg] i inne
^{232}Th	litosfera	$1.4 \cdot 10^{10}$	α	4000	+	$4.1 \cdot 10^6$ (10)	11.5	47 (10)
^{238}U	litosfera	$4.5 \cdot 10^9$	α	4170	+	$12.3 \cdot 10^6$ (14)	3	37 (14)
^{235}U	litosfera	$7 \cdot 10^8$	α	4600	+	$0.6 \cdot 10^6$ (11)	3	2 (11)
^{40}K	litosfera	$1.3 \cdot 10^9$	β	1320 1480	+	29000	2.5%	725
^{226}Ra	^{238}U	1620	α	4800	+	$3.6 \cdot 10^{13}$ (9)	–	37 (9)
^{222}Rn	^{226}Ra	3.8 d	α	5500	–	–	–	10 Bq/m^3(air)
^{14}C	kosmogenne	5730	β	160	–	270	–	8 mBq/m^3(air)
^{3}H	kosmogenne	12.3	β	18.6	–	2.4 (kg wody)	–	20 mBq/m^3(air)
^{90}Sr	rozszcz. jądr.	28.5	β	2270		–	–	850 Bq/m^2·rok
^{137}Cs	rozszcz. jądr.	30	β	510 1170	+	–	–	1500 Bq/m^2·rok, 30μBq/m^3(air)

Oznaczenia: D – rodzaj rozpadu, E – energia rozpadu, γ-czy towarzyszy promieniowanie γ, A_1 – radioaktywność właściwa pierwiastka wynikająca z szybkości rozpadów radioizotopu i jego udziału procentowego w składzie pierwiastka, k – średnia koncentracja pierwiastka w litosferze, A_e – radioaktywność jednostki masy litosfery. Liczby w nawiasach pod wartościami radioaktywności są czynnikami, przez jakie należy pomnożyć radioaktywności, aby otrzymać całkowitą radioaktywność uwzględniającą radioaktywności kolejnych produktów rozpadu w równowadze promieniotwórczej. W ostatniej kolumnie są też inne radioaktywności.

cząstki jest bardzo duża, a sama droga jest bardzo krótka. Drogi cząstek β są dłuższe, ale też jest to niewiele. Bardzo przenikliwe jest promieniowanie γ. W tabeli 2 podane są liczby charakteryzujące to zagadnienie, z tym że drogi cząstek są podane w dogodnej mierze g/cm^2. W tych jednostkach droga 1 g/cm^2 odpowiada w wodzie drodze 1 cm, a w powietrzu, którego gęstość jest 770 razy mniejsza, odpowiada 770 cm. W przyjętych jednostkach droga cząstek nie zależy od gęstości substancji, a także mało zależy od składu pierwiastkowego. Jak widać z tabeli 2 cząstki α są pochłaniane na drodze kilku cm w powietrzu, a najbardziej przenikliwe cząstki β są zatrzymane przez 1 cm słupa wody.

Oddziaływanie kwantów γ z atomami ma charakter probabilistyczny opisywany podobnie jak rozpad jąder, dlatego trzeba mówić o średniej drodze na pochłonięcie lub o drodze połowicznego pochłonięcia. Jak widać, promieniowanie γ jest bardzo przenikliwe.

Tabela 2

Przenikliwość promieni jądrowych

Energia cząstki [keV]	Zasięg cząstki [g/cm^2]		
	α	β	γ^a
100		0.002	6.5
200		0.04	19
500		0.15	23
1000		0.4	25
2000	0.0013	1	29
5000	0.005	2	34
10000	0.0135		

[a] zasięg połówkowego wchłonięcia

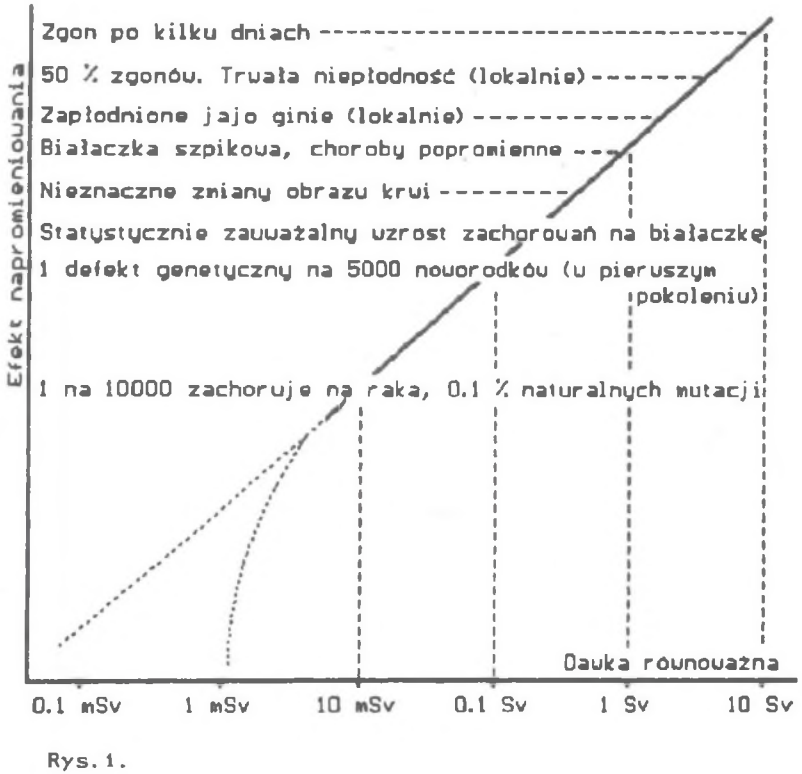
Za miarę napromieniowania ciała przyjmuje się określony efekt napromieniowania przypadający na jednostkę masy substancji, nazywany dawką. Tak więc jeżeli stwierdza się, że komar i słoń otrzymali tę samą dawkę, to oznacza, że efekt napromieniowania w słoniu jest tyle razy większy od efektu w komarze, ile razy słoń jest cięższy od komara. Albo jeżeli stwierdza się, że jakiś organ ludzkiego ciała otrzymał określoną dawkę, tzn. że każdy gram masy tego organu doznał określonego efektu. W użyciu jest dawka ekspozycyjna, pochłonięta i równoważnik dawki (w domyśle biologiczny równoważnik dawki pochłoniętej). Miarą dawki ekspozycyjnej jest wielkość ładunku elektrycznego jonizacji, a dawki pochłoniętej pochłonięta energia promieniowania. Jednostką dawki pochłoniętej jest grey (Gy) odpowiadający pochłonięciu energii 1 dżula w 1 kg substancji. Skutki biologiczne są wprost proporcjonalne do dawki pochłoniętej, ale są większe, gdy gęstość jonizacji jest duża, co ma miejsce w przypadku cząstek α. Jednostką równoważnika dawki jest siwert (Sv), równy iloczynowi dawki pochłoniętej przez bezwymiarowy współczynnik skuteczności biologicznej WSB. Nie wnikając w subtelności, przyjmuje się WSB=1 dla promieni γ i β oraz WSB=20 dla cząstek α. Siwert jest jednostką dużą.

Głównym składnikiem organizmów żywych jest woda i wynikiem jonizacji są bardzo aktywne chemicznie wolne rodniki OH i H inicjujące ciągi destrukcyjnych reakcji chemicznych. Bardziej czułe na uszkodzenia są komórki bardziej różnicujące się (dzieci) i komórki szybko rozmnażające się (rakowate). Czułymi tkankami są szpik, gruczoły, gonady, limfocyty, mało czułe kości, skóra, tkanka nerwowa. Napromieniowania lokalne prowadzą do

reakcji lokalnych. W przypadku napromieniowania przekraczającego 1/3 całego organizmu reakcje są globalne. Skutek chorobowy jest funkcją nie tylko dawki, ale i czasu ekspozycji. Podobnie jak spadająca cegła zagraża nawet życiu człowieka, a sypiący się z potłuczonej cegły drobny gruz jest prawie nieszkodliwy, podobnie ta sama dawka pozyskana w krótkim czasie skutkuje o wiele silniejszym efektem aniżeli rozłożona na długi czas, z tym że określenie jednorazowa dawka należy rozumieć jako dawka pozyskana w czasie około tygodnia. Orientacyjna poglądowa ilustracja biologicznych efektów od równoważnika dawki jednorazowej jest pokazana na rys. 1. Odnośnie do prawdopodobieństw uszkodzenia genetycznego lub zachorowalności na raka, to nie ma różnicy między dawką jednorazową i rozłożoną w czasie, bowiem te efekty kumulują się i jest to charakterystyczne dla większości czynników wywołujących te skutki. Liniami przerywanymi pokazano orientacyjnie obszar, dla którego nie ma danych doświadczalnych, a jedynie ekstrapoluje się wyniki odpowiadające większym dawkom. W tym obszarze nie ma też zgodności poglądów co do skutków biologicznych sądzą bowiem niektórzy, że dawki w okolicy i poniżej naturalnej, a o takich mowa, nie są szkodliwe. Aby ocenić prawdopodobieństwa podane na rysunku, odnotujmy w tym miejscu, że w Polsce rocznie około 4 osoby na 1000 umiera na choroby nowotworowe i tyle samo zapada na te choroby oraz kilkoro dzieci na 1000 rodzi się z wadami genetycznymi. Jeżeli więc jakiś wyseparowany czynnik daje w tych dwu skutkach efekt mniejszy od jednego wydarzenia na 10000 osób, to jest on statystycznie niezauważalny, czyli mieści się w granicach średniej zachorowań. Dlatego szacowania zachorowań w tym zakresie częstości wydarzeń mają charakter przypuszczeń, których nie da się sprawdzić i nie można w oparciu o takie szacowania formułować wniosków daleko idących. Przykładem negatywnym takiej sytuacji jest informacja, a właściwie komentarz dziennikarski do wiadomości podanej w telewizji w pierwszej połowie stycznia br. Mianowicie podano, że wg oszacowań rządowej agencji atomistyki z powodu katastrofy czernobylskiej w Polsce prawdopodobnie zachoruje na raka od 100 do 200 osób i w związku z tym należy ustalić winnych zaniedbań w tym względzie. Otóż szacuje się, że całkowita średnia dawka ludności z terenów Polski od awarii czernobylskiej wyniesie około 2 mSv, tak więc w przybliżeniu 2 do 3 osób na 100000 może zachoruje na raka, pomnożone przez liczbę ludności w Polsce daje owe około 100 osób.

W tabeli 3 są podane szacowane wielkości dawek od niektórych prześwietleń promieniami rentgenowskimi.

Intensywność i normy dopuszczalnego napromieniowywania podaje się w mocach dawek rozumianych jako wielkość dawki przez czas, w którym jest lub może być otrzymana. Szacowana średnia moc dawki populacji ludzkiej pochodząca od otoczenia naturalnego oraz od radioizotopów naturalnie zawartych w organizmie wynosi 1 mSv/rok. Dodatkowe napromieniowanie cywilizacyjne szacuje się na nie mniej niż 1 mSv/rok. Razem więc przyjmuje się, że średnie naturalne napromieniowanie wynosi przynajmniej 2 mSv/rok. To napromieniowanie rośnie ze wzrostem wysokości około 0.03 mSv/rok na każde 100 me-



Rys. 1. Schemat skutków biologicznych w funkcji jednorazowej mocy dawki

Fig. 1. A scheme of the biological effect of a single dose

trów. Większe napromieniowanie występuje na terenach z przewagą skał granitowych. W stanie Kerala w Indiach zamieszkałym przez 105 mieszkańców napromieniowanie naturalne zawiera się w przedziale od 4 do 25 mSv/rok w zależności od okolicy. W prowincji Guangton w Chinach wynosi 3.3 mSv/rok. Na tzw. czarnych plażach bogatych w monacyt w południowej Ameryce, np. plaże Espino Santos, Rio de Janeiro, moc dawki wynosi 0.05 mSv/godz. Często spotyka się okolice o podwyższonej, a nawet dużej emanacji radonu z podłoża. Mimo tych podwyższonych radioaktywności nie odnotowano zauważalnych odchyleń w statystykach chorobowych. W tabeli 4 podane są dopuszczalne moce dawek obowiązujące w Polsce.

Nie ma prostego związku między radioaktywnością substancji a dawką lub mocą dawki, jaką wywoła. Promieniowanie γ i X, izotropowe, napromieniowuje całe ciało, niezależnie czy źródło jest w organizmie, czy na zewnątrz. Promieniowanie α i β może szkodzić, jeżeli radioizotop jest w organizmie. Osoby nie zajmujące się profesjonalnie tymi zagadnieniami raczej nie są w stanie formułować samodzielnie oceny zagrożeń w tym względzie. Przy-

Tabela 3

Szacowane dawki w mSv od prześwietleń rentgenowskich[a]

Rodzaj badania	Całe ciało	Jajniki	Jądra	Szpik kostny	Płuca
Zdjęcie zęba	0.03			0.01	0.001
Płuca i serce	0.6	0.05	0.05	0.05	1.2
Staw biodrowy	1.7	3.7	15	2.5	0.1
Brzuch	3.0	2.0	2.0	3.0	0.2
Kręgosłup piersiowy	3.0	1.0	0.2	4.7	8.0
Żołądek i dwunastnica	4.4	0.6	0.02	0.3	0.5
Kręgosłup lędźwiowy	5.9	6.2	1.8	4.1	1.0

[a]Wg T.Majle, Ochrona przed promieniowaniem jonizującym, „Radiologia" pod red. L.Zgliczyńskiego, PZWL, Warszawa 1989.

Tabela 4

Dopuszczalne moce dawek w mSv/rok w Polsce
(Mon. Pol., Nr.14, poz. 124, 1988 r.)

Grupa osób	Całe ciało	Soczewki oczu	Skóra i niektóre narządy
Narażeni zawodowo	50	150	500
w tym kobiety	12		
wiek <45 lat	5		
Osoby postronne	1	15	50
Kobiety w ciąży	1	15	50

kładem negatywnym postępowania może być wiadomość zasłyszana przez autora bodajże w 1990 roku w radiu, kiedy pewna pani będąca szefem wojewódzkiego urzędu do spraw ochrony środowiska w jednym ze wschodnich województw Polski dzieliła się z reporterką radia elektryzującą wiadomością o tym, że jeden z jadalnych gatunków grzybów w tamtym rejonie Polski wykazuje radioaktywność cezu 10000 Bq/kg. Tak się składało, że kilka dni wcześniej podano analogiczną wiadomość, ale była mowa o 1000 Bq/kg. Beztroska w przedziale całego rzędu wielkości jest rozbrajająca, ale załóżmy, że to 10^4 Bq/kg. Nie wdając się w subtelności, można oszacować, że moc dawki od takiej ilości cezu wynosi około 1.4 mSv/rok. Tę wartość należy pomnożyć przez ułamek określający, jaka część tego pierwiastka z pokarmu jest asymilowana oraz przez średni czas (w latach) przebywania atomów tego pierwiastka w organizmie (z uwagi na naturalną wymianę pierwiastków w organizmie), aby wyliczyć całkowitą dawkę, jaką potencjalny smakosz otrzymałby.

W tabeli 5 podane są normy na dopuszczalne radioaktywności ważniejszych radioizotopów pochodzących z rozszczepień uranu, jakie w swoim czasie przyjmowano w Polsce.

Tabela 5

Dopuszczalne stężenia dla populacji przy narażeniu ciągłym
(Mon. Pol., Nr.1, poz. 7, 1970 r.)

Radioizotop	^{137}Cs	^{90}Sr	^{106}Ru	^{144}Ce	^{89}Sr	^{140}Ba	^{131}J
Woda [Bq/litr]	75	2.6	100	100	100	300	30
Powietrze [Bq/m^3]	20	1	7.4	7.4	40	40	10

Zainteresowanie publiczne wzbudza napromieniowanie od materiałów stosowanych w budownictwie. Faktycznie w popiołach i żużlach z elektrowni i hut ma miejsce zagęszczenie naturalnych domieszek radioaktywnych toru, uranu i potasu. W przypadku użycia takich surowców w budownictwie mieszkaniowym występuje zwiększone napromieniowanie γ całego ciała, a radon dyfundujący do powietrza zwiększa moc dawki na tkankę płucną. Jeżeli średnie koncentracje toru, uranu i potasu materiałów otaczających człowieka w pełnym kącie bryłowym oznaczyć przez kT, kU, i kK (w jednostkach [g/g]), to moc dawki P od promieni γ można oszacować wzorem

$$P = (54 * kT + 126 * kU + 0.028 * kK) Sv/rok, \qquad (1)$$

Sytuację taką można traktować jako skrajną w budynku np. bez okien, drzwi.Połowa wartości wyznaczonej wzorem (1) to moc dawki od podłoża o takim samym składzie. Wg norm wartość P w budynkach mieszkalnych nie powinna przekraczać 1 mSv/rok. W tabeli 6 są przedstawione dla przykładu pewne uśrednione wyniki dotyczące tej sprawy. Jak widać, dawki nie są małe w niektórych przypadkach i takie materiały winny być kontrolowane. Obok dawki od promieni γ ważną sprawą jest dawka od wdychanego radonu i produktów jego rozpadu. Stężenia radonu w pomieszczeniach bardzo silnie zależą od możliwości dyfuzji radonu z materiałów ścian oraz wietrzenia pomieszczeń i tylko z tych względów mogą się wahać o rząd i więcej. Szkodliwy jest nie tyle sam radon, którego czas przebywania w organizmie jest krótki, a jego radioaktywne produkty rozpadu, które razem z aerozolami trafiają do płuc. Na ogół wartości stężeń radonu w mieszkaniach tradycyjnie budowanych spotyka się od kilkanaście do kilkadziesiąt Bq/m^3, ale w nowym budownictwie zdarzają się wysokie. Np. w Szwecji średnio, przy wietrzeniu 2–godzinnym na dobę wynosi 200 Bq/m^3. Tamże szacowane moce dawek od radonu i jego produktów na tkankę płucną zawierają się w przedziałach od 1 do kilka mSv/rok. W USA ocenia się, że za około 10% zgonów na raka płuc jest odpowiedzialny radon.

W różnych okolicznościach ludziom towarzyszy zwiększona radioaktywność. W skałach fosfatowych koncentracje uranu są równe około 100 ppm. Przez produkowane z nich na-

Tabela 6

Moce dawek wyliczone wg wzoru (1) dla wybranych materiałów pobranych i pomierzonych w roku 1976.[a]

Pochodzenie materiału	P[mSv/rok]
Piasek (Knurów, Tychy)	0.1
Popiół z elektrowni Adamów	0.75
Popiół z elektrowni Turoszów	1.2
Popiół z elektrowni Konin	2.0
Cegła (Zabrze prod. przed 1939 r.)	2.4
Popiół z elektrowni Pątnów	2.6
Żużel z elektrowni Jaworzno	4.4
Popiół do produkcji prefabrykatów – Łaziska	4.4
Popiół z elektrowni Rybnik	4.6
Kruszywo do produkcji pustaków – Siersza	4.9
Popiół z elektrowni Siersza	7.9

[a]Pomiary autora.

wozy sztuczne uran może trafiać w dużych ilościach do organizmu. W wybranych rejonach świata dużą radioaktywność wykazują rośliny jadalne selektywnie przyswajające radioaktywne pierwiastki. Np. radioaktywność radu w orzechach brazylijskich wynosi 400 Bq/kg. Wspomniano wcześniej o wybranych rejonach na Ziemi, w których radioaktywność litosfery jest podwyższona.

W Polsce najbardziej narażone na podwyższoną radioaktywność są rejony kopalń węgla kamiennego. Dotyczy to zarówno pracowników kopalń, w których stwierdza się podwyższoną radioaktywność radu i jego produktów, jak też ogółu ludności z powodu podwyższonej radioaktywności składowanych popiołów i żużli. Wg różnych pomiarów wykonanych przez grupę z GIG-u (Katowice) pompowane wody z połowy kopalń Górnego Śląska mają radioaktywności radu przekraczające 10 kBq/m^3. Mierzone radioaktywności radu (226 i 228) w osadach w kopalniach dochodzą do 170 kBq/kg, a stężenia radonu kilkadziesiąt kBq/m^3. Ocenia się, że rocznie wypowywany jest rad o radioaktywności 250 GBq. W większości przypadków ów rad wytrąca się w najbliższych ciekach (potoki). Mierzone radioaktywności ziemi z takich cieków zawierają się w przedziale od 0.2–31 kBq/kg.

Rozeznanie radioaktywności środowiska, jej skutków biologicznych i kontrola są wyjątkowo dobre, jeżeli nie najlepsze, w porównaniu z innymi zagrożeniami. Między innymi jest tak dlatego, że radioizotopy można wykrywać z bardzo dużą czułością bardzo prostymi i tanimi urządzeniami. Normy są wyjątkowo ostre – dawka dopuszczalna jest 3

rzędy mniejsza od niebezpiecznej, podczas gdy w odniesieniu do związków chemicznych są to na ogół 2 rzędy. Wszystkie te okoliczności pozwalają oczekiwać pewnego zaufania ze strony społeczeństwa względem służb zajmujących się tymi sprawami. Dzieje się jednak inaczej. Bogata literatura tego zagadnienia jest wodą na młyn ludzi nawiedzonych, pseudoekologów, którzy dowolnie zniekształcając informacje lub ich interpretacje szerzą lęk, a w konsekwencji irracjonalne zachowania lub nawet agresję w społeczeństwie względem różnych zagadnień związanych z radioaktywnością. Rozwój cywilizacyjny sprawił, że napromieniowanie populacji jest większe od naturalnego; jest to określony koszt tego rozwoju. Nie jest to jedyny przypadek, gorzej, bo cywilizacja wprowadziła wiele substancji i oddziaływań szkodliwych, których nie było w naturze i też godzimy się z tym, bowiem kosztem tego likwiduje się inne o wiele większe i gorsze zagrożenia. Jest kilkaset substancji rakogennych, wśród nich tak powszechne jak azbest, smoły, sadze, benzen, tlenek węgla. Jest znanych kilkaset związków mutagennych w szczególności formalina, benzen, benzopiren, barwniki azowe i akrydynowe, kwas azotowy, połowa pestycydów stosowanych w rolnictwie. Człowiek świadomie godzi się też na szereg zagrożeń, które nie są koniecznością. W tabeli 7 są przedstawione niektóre zagrożenia. Jak widać, zagrożenia wynikające z radioaktywności są małe na tym tle.

Tabela 7

Szacowane liczby zgonów na milion osób związane z niektórymi działaniami[a]

Palenie 20 papierosów dziennie	5000
Alkohol 100 ml dziennie	750
Grypa	200
Jazda samochodem w Polsce	135
Pigułki przeciw ciąży	20
Towarzystwo palacza	10

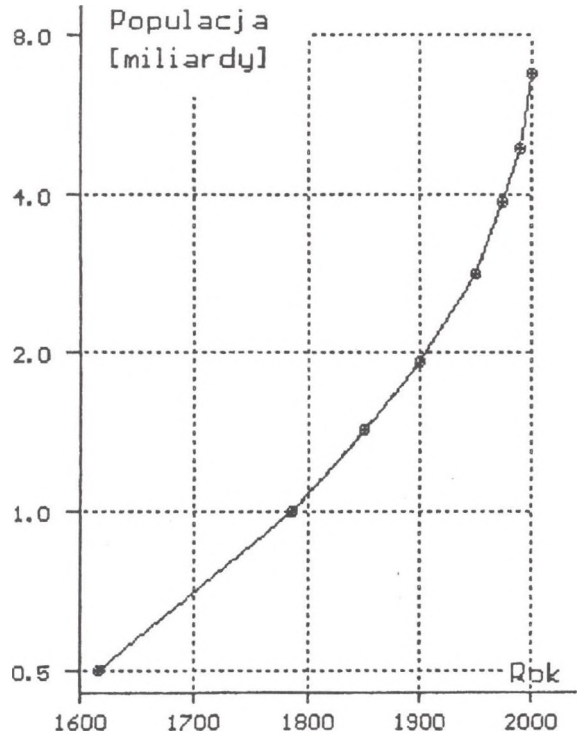
[a]za Z.Celiński, A. Strupaczewski, Podstawy energetyki jądrowej, WNT, Warszawa 1984.

Obszar dawek zaznaczony na rys. 1 linią przerywaną to nie tylko kwestia ekstrapolacji, ale w pewnym sensie rozumienia życia. Jeżeli bowiem przyjmie się, że dowolnie mała dawka napromieniowania jest szkodliwa, to w gruncie rzeczy oznacza, że samo życie jest szkodliwe. Trzeba bowiem powiedzieć, że nawet życiodajny tlen jest substancją szkodliwą, bo silnie utleniającą i każdy oddech, każdy proces biologiczny w jakiś sposób zbliża nas do końca. Było mówione wcześniej, że zasadniczym szkodliwym efektem promieni jonizujących w tkance biologicznej jest produkcja rodników H i OH. Otóż istnieje określone stężenie tych rodników wynikające z równowagi termodynamicznej i naturalnego napro-

mieniowania, a cała żywa materia uformowała się optymalnie w wyniku ewolucji. Czy zakłócenie tej równowagi w dół nie jest szkodliwe? We współczesnej cywilizacji człowiek jest narażony na wiele niekorzystnych bodźców. W szczególności są to: hałas i wibracje uliczne i przemysłowe, wszelkie wyziewy chemiczne od różnych farb poczynając, cała chemia stosowana w rolnictwie i przemyśle spożywczym, różnorakie toksyczne odpady poprodukcyjne. Należy też do nich podwyższona radioaktywność. W zależności od możliwości technicznych i przede wszystkim materialnych usiłuje się je minimalizować. Są to koszty cywilizacji.

Nie sposób mówić o energetyce jądrowej bez zarysowania sytuacji energetycznej naszej cywilizacji. Na rys. 2 jest przedstawiony wykres ludności na Ziemi od 1600 roku. Na rysunku tym tylko ostatni punkt jest prognozą. Chociaż skala liczby ludności jest logarytmiczna, to na razie nachylenie wykresu rośnie, tzn. przyrost jest szybszy niż wykładniczy. Równocześnie z rozwojem cywilizacyjnym rośnie zużycie energii przypadające na jednego człowieka. Wg A.Sala (Problemy, nr 2(511)1989) do przetrwania biologicznego potrzeba w formie pożywienia około 9 MJ/dobę. Szacuje się, że na etapie wykorzystania ogniska człowiek zużywał 20 MJ/dobę, w epoce zbieractwa i myślistwa 50, a pięć wieków temu 100 MJ/dobę. Obecnie średnie zużycie energii na jednego człowieka wynosi 180, w Polsce 240, a w USA 800 MJ/dobę, lub wyrażając to w jednostkach mocy przypadającej na jednego człowieka, to średnio 2.1, w Polsce 2.8, a w USA 11 kW. Przy czym (T.Różański, Problemy, nr 9(1985)) w używaniu energii są ogromne dysproporcje, bowiem 10% ludności świata zużywa na jedną osobę energię o mocy 9 kW, 20% 4 kW, a reszta, czyli 70% 0.5 kW. Już teraz gdyby narody biedne miały osiągnąć poziom zużycia energii krajów najbogatszych, to światowy potencjał energetyczny nie sprostałby temu zadaniu. Notuje się katastrofalny ubytek lasów – 6%/10 lat. Od połowy lat siedemdziesiątych udokumentowane przyrosty złóż roponośnych są mniejsze od zużycia. Szacuje się, że ropy zabraknie około 2050 roku. Dynamicznie rozwijają się technologie odtwarzalnych źródeł – elektrownie wodne, wiatrowe, słoneczne i kolektory słoneczne, no i energia z biomasy, jednak wszystkie te źródła mogą zaspokoić jedynie cząstkę naszych potrzeb. Poza tym, z wyjątkiem elektrowni wodnych i biomasy, są to bardzo kosztowne techniki, w które angażują się bogaci na zasadzie pożytecznego hobby. Tylko Norwegia ma tak cudowną sytuację geograficzną, że na każdej rzece można budować łatwo bardzo efektywne elektrownie wodne i one są źródłem całej energii elektrycznej. Z tego powodu kilkadziesiąt lat temu zwrócono się w kierunku energetyki jądrowej. Uranu starczy na kilka setek lat. Prawdziwe rozwiązanie zagadnienia upatruje się w energetyce jądrowej opartej na syntezie jądrowej deuteru.

Bezlitosne spalanie węgla, ropy i gazu ziemnego jest procederem dwojako nieodpowiedzialnym. Po pierwsze, w czasie, który jest mgnieniem w stosunku do historii Ziemi, a nawet człowieka na Ziemi, chcemy wyeksploatować substancje, które były magazynowane na Ziemi, kosztem energii promieni słońca, przez wiele milionów lat. Po drugie niszczymy



Rys. 2. Wykres ludności świata w funkcji czasu

Fig. 2. Increase of the human population with time

w ten sposób jeden z podstawowych surowców (węgiel) dla przyszłych technologii – dalszego rozwoju chemii organicznej, produkcji pożywienia syntetycznego itd. Nie ma najmniejszej wątpliwości, że ludzie będą zmuszeni w przyszłości, kosztem dużych nakładów energii, z powrotem redukować dwutlenek węgla do węgla, aby mieć do dyspozycji ten cenny surowiec.

W wielu krajach dawno zrozumiano konieczności epoki i z pełną determinacją łamano zabobony, ciemnotę i fobie stawiając na energetykę jądrową. Stopień zaawansowania niektórych państw w energetyce jądrowej ilustruje tabela 8. W Japonii podjęto decyzję w roku 1991, że w jak najkrótszym czasie przejdzie się w 100% na energetykę jądrową. Po dziesięciu latach recesji następuje silne ożywienie energetyki jądrowej w USA, bowiem społeczeństwo zrozumiało, że spalanie ropy i węgla w szczególności zbyt poważnie grozi środowisku.

Energetyka jądrowa opiera się na zjawisku rozszczepiania niektórych ciężkich radioizotopów po wchłonięciu neutronu. W procesie rozszczepienia jądro rozpada się na dwa

Tabela 8

Moc elektrowni jądrowych w niektórych państwach w jednostkach 1000 MW – stan w roku 1987

Państwo	Siłownie czynne	% całej energetyki	Siłownie w budowie
Francja	53	69	10
Belgia	7	66	–
Korea Pd.	7	53	2
Tajwan	6	49	–
Szwecja	12	45	–
Węgry	4	39	–
Finlandia	4	37	–
Hiszpania	9	31	1
RFN	21	31	4
Japonia	36	29	12
Bułgaria	5	29	2
Czechosłowacja	8	26	8
USA	106	18	13
ZSRR	56	11	28
Polska	0	0	1(0)

fragmenty odpowiadające pierwiastkom ze środka tablicy Mendelejewa i „odpryskom", którymi są przede wszystkim neutrony. Wydziela się przy tym energia 200 MeV. Dla porównania przy spaleniu dwu molekuł wodoru w dwie cząsteczki wody wydziela się 5 eV energii, a jednego atomu węgla w cząsteczkę CO_2 3.8 eV. lub inaczej, przy rozszczepieniu 1 g uranu–235 wydziela się ciepło równoważne spaleniu 2.7 ton czystego węgla. Powstałe w rozszczepieniu neutrony mogą ów proces powielać. Taką własność rozszczepień ma uran–235, oraz sztuczne radioizotopy uranu–233 i plutonu–239. Na powstałe w procesie rozszczepienia neutrony czyha wiele „niebezpieczeństw" powodujących ich wypadnięcie z „gry". Głównie chodzi o możliwość ucieczki neutronów z obszaru reakcji (neutrony jako cząstki nie naładowane słabo oddziałują z atomami) oraz o pochłonięcie neutronów przez inne jądra. Przy czym w drugim przypadku nie wszystko jest zmarnowane, bowiem w przypadku pochłonięcia przez jądra uranu–238 lub toru–232 mogą powstać odpowiednio pluton–239 i uran–233, które też stają się „paliwem jądrowym". W przypadku wydzielenia prawie czystego uranu–235 wystarczy bryłka o rozmiarach kilku centymetrów, aby zrekompensować efekt uciekania neutronów i powielanie lawinowe narasta w dziesiątych częściach mikrosekundy prowadząc do wybuchu. Jeżeli „paliwo" jest rozczłonkowane przestrzennie i dodatkowo nie jest czystym uranem–235, lecz tylko wzbogaconym uranem

(typowe wzbogacenia to kilka % uranu–235 w uranie–238, a w naturalnym uranie 0.7%), to reakcja może biec dowolnie wolno lub wcale nie może się „rozpędzić" i takie warunki są stwarzane w reaktorach jądrowych. W Afryce, w Gabonie, w rejonie Oklo wykryto sześć miejsc na głębokości 4 km, w których 2 mln lat temu biegł taki proces naturalnie przez około $5 \cdot 10^5$ lat, zużył około 6 ton uranu–235 i wyprodukował około 15 GW·lat energii. Jak widać z tego naturalnego przykładu, lawinowe rozwijanie procesu nie musi biec w nieskończoność, lecz ustabilizować się na określonym poziomie. Dzieje się tak dlatego, że ze wzrostem temperatury pogarszają się warunki powielania neutronów, że część produktów rozszczepień pochłania neutrony, a więc też pogarszają się warunki powielania i w końcu ubywa właściwego paliwa. W reaktorach po wypaleniu 2/3 uranu-235 nie ma dostatecznych warunków dla podtrzymania reakcji i paliwo wymienia się.

Skutki produkcji ciepła w reaktorze jądrowym i ze spalania węgla dla wytwarzania prądu elektrycznego można przeanalizować na danych przedstawionych w tabeli 9.

Odnotujmy, że SO_2 powraca na powierzchnię Ziemi w formie kwaśnych deszczów, które są główną przyczyną niszczenia lasów. NO_2 jest bardzo trującym gazem. Elementy radioaktywne z popiołów są dowolnie transportowane przez wody infiltrujące składowiska popiołów. Zauważmy, że rozproszone w popiołach ilości uranu i toru są porównywalne z ładunkiem reaktora. Pewien ułamek popiołów i elementów radioaktywnych (od 1 do 10%) uchodzi w powietrze jako pył. Bardzo duże masy i objętości materiałów zużywanych i wydzielanych przy spalaniu węgla degenerują środowisko lokalne i zmieniają parametry środowiska Ziemi globalnie. W skali Ziemi stężenie CO_2 wzrosło w ostatnim stuleciu o 60%. Jest to sprawa bardzo poważna. Lokalna degradacja środowiska bierze się nie tylko z działalności elektrowni, ale jest to też zapadanie się i podtapianie terenów kopalń, odprowadzanie do rzek ogromnych ilości zasolonych wód, hałdy skały płonnej w przypadku kopalni węgla kamiennego oraz „księżycowy" krajobraz terenów po eksploatacji węgla brunatnego.

W elektrowniach jądrowych paliwem jest na ogół spiek UO_2 w formie małych pastylek ładowanych do szczelnych metalowych pojemników o kształcie cienkich długich rurek, nazywanych prętami paliwowymi. Określona ilość prętów (na ogół rzędu 100) jest montowana w luźnej geometrii w jeden zespół nazywany kasetą. W kasecie są kanały do cyrkulacji medium odbierającego ciepło (najczęściej woda) i zamontowane są najważniejsze czujniki (temperatury, neutronów). Kasety w ilości kilkaset ustawione pionowo jedna przy drugiej stanowią rdzeń reaktora. Typowe wymiary rdzenia to 2–3 m średnica i 3–2 m wysokość. Wypalone paliwo po wydobyciu z reaktora jest przez czas od dwu do czterech lat przetrzymywane w basenie w pobliżu reaktora w celu obniżenia radioaktywności (schłodzenia) mniej więcej sto razy. Wypalone w ciągu roku paliwo ma objętość razem z kasetami około 15 m^3. Po schłodzeniu może być ono bezpośrednio przechowywane. W takim przypadku po oddzieleniu prętów od kaset te ostatnie można sprasować do objętości kilka razy mniejszej, a objętość samych prętów to około 6 m^3. Na ogół przechowuje

Tabela 9

Produkty wejściowe i wyjściowe dla rocznej produkcji energii elektrycznej o mocy 1 GW w typowej polskiej elektrowni węglowej[a] i elektrowni jądrowej[b]

Produkty	Tony lub GBq
Elektrownia węglowa	
Wejściowe	
Węgiel kamienny (wart. opał 18.3 MJ/kg)	$5.2 \cdot 10^6$ t
Węgiel brunatny (wart. opał 8.1 MJ/kg)	$11.7 \cdot 10^6$ t
Tlen z atmosfery	$5.4 \cdot 10^6$ t
Wyjściowe	
CO_2 do atmosfery	$8.5 \cdot 10^6$ t
SO_2 do atmosfery	260000 t
CO do atmosfery	130000 t
NO_x do atmosfery	100000 t
Popiół z węgla kamiennego	$2.9 \cdot 10^6$
Popiół z węgla brunatnego	$9.5 \cdot 10^6$
K (k=22, b=$7.2 \cdot 10^3$ ppm) popioły[c]	65000 t
Th (k=42, b=12.5 ppm) popioły[c]	120 t
Uran (k=17.5, b=4.7 ppm) popioły[c]	48 t
Elektrownia jądrowa	
Wejściowe	
UO_2 (^{235}U wzbogacony do 3.5%)	28 t
Części konstrukcyjne elementów paliwowych	15 t
Wyjściowe	
Wypalone paliwo	28 t
(schładzane przez 2 lata)	$1.2 \cdot 10^9$ GBq
Części konstrukcyjne elementów paliwowych	15 t
	$2 \cdot 10^7$ GBq
Pomocnicze materiały eksploatacyjne	

[a]Polityka Energetyczna – Polska, OECD/IEA, 1991, Paris

[b]Z. Celiński, A. Strupczewski, „Podstawy energetyki jądrowej", WNT, Warszawa 1984

[c]Własne oszacowania

się takie paliwo z założeniem ewentualnej przeróbki w przyszłości. Celem przeróbki jest wydzielenie uranu i plutonu dla wykorzystania w produkcji nowego paliwa. W przypadku przeróbki powstają wtórne odpady radioaktywne. W tabeli 10 przedstawiony jest przybliżony bilans odpadów.

Przekształcanie odpadów ciekłych w stałe polega na zagęszczeniu, odparowaniu i w końcu przetworzeniu w beton lub asfalt. Materiały palne spala się w kontrolowany sposób, aby zmniejszyć objętość około 80 razy. W ostatnich latach rozwinięto bardzo skuteczne metody przeprowadzania odpadów w stan szklisty lub zalewania w szkliste kulki.

Tabela 10

Odpady promieniotwórcze reaktora jądrowego o mocy 1 GW energii elektrycznej, po roku eksploatacji[a]
Strzałką oznaczono przekształcenie odpadu
N, S, W – nisko–, średnio–, wysokoradioaktywnego

Rodzaj odpadów i miejsce powstania		Objętość w m^3	
		Ciekłe	Stałe
Elektrownia jądrowa			
Papier, szmaty, folie, węgiel aktywowany	N		100→2
Koncentraty powyparne i pofiltracyjne	S	180→	18–36
Jonity, wkłady filtrów	S		7
Pręty regulacyjne, inne	W		6
Zakład przerobu			
Koncentraty powyparne i pofiltracyjne	N	400–1000→	40–200
Koncentraty powypalne i pofiltracyjne	S	20–80 →	2–12
Papier, szmaty, folie, węgiel aktywowany	S		100→2
Produkty rozszczepienia	W	20 →	2
Elementy konstrukcyjne	W		10

[a]Z. Celiński, A. Strupczewski, jak wyżej

Odpady takiej postaci przechowuje się w specjalnie zbudowanych lub przystosowanych suchych komorach podziemnych. Radioaktywność materiałów na początku przechowywania (w odniesieniu do danych z tabeli 8) jest rzędu 10^9 GBq i składa sie na nią głównie radioaktywność strontu–90 i cezu–137. Po 300 latach te radioaktywności maleją tysiąc razy, radioaktywności krócej żyjących radioizotopów już się nie liczą i coraz większy udział w całkowitej radioaktywności mają dwa długożyciowe produkty technet–99 o półokresie $2 \cdot 10^5$ lat i cez–135 o półokresie $3 \cdot 10^6$ lat. Ich początkowe radioaktywności można szacować odpowiednio na 10^5 i 10^4 GBq. Po następnych 300 latach magazynowania łączna radioak-

tywność będzie rzędu 10^5 GBq. Dla porównania warto uprzytomnić sobie, że średnio na 1 km^2 powierzchni Ziemi, w warstwie o grubości 500 m znajdują się naturalne radioizotopy o łącznej radioaktywności prawie 10^6 GBq.

W czasie pracy reaktora wytwarzane są jako produkty rozpadu dwa radioaktywne gazy jod–129 i krypton–85 oraz rezultat ubocznych reakcji neutronów węgiel–14 i tryt. Trzy ostatnie gazy są przedmiotem pomiarów wielu laboratoriów na świecie i można krótko stwierdzić, że ich ilości są pomijalne względem naturalnej radioaktywności środowiska. Co się tyczy jodu, to jego uwolnienie z paliwa ma miejsce dopiero w procesie przeróbki i jest on ze skutecznością 99.995% wyłapywany chemicznie w filtrach. Wymieniony jod i inne krótko żyjące gazy mogą się znaleźć na zewnątrz tylko w przypadku awarii polegających na wydostaniu się na zewnątrz produktów rozszczepień z elementów paliwowych.

Uprzywilejowane nagłaśnianie w środkach masowego przekazu nawet najgłupszych opinii pseudoekologów i pospolitych nawiedzonych nieuków na tematy energetyki jądrowej doprowadziły do tego, że wielu ludziom reaktory jądrowe kojarzą się tylko z apokaliptycznymi nieszczęściami. Takie w szczególności wizje roztaczano przed mieszkańcami Trójmiasta w dyskusji nad Żarnowcem. Na całym świecie nie wydarzyła się w grupie reaktorów energetycznych awaria na skutek utraty kontroli nad reaktywnością reaktora. Wszystkie awarie miały charakter defektów technicznych lub błędów eksploatacyjnych prowadzących do przegrzania rdzenia lub bezpośrednich uszkodzeń instalacji, które prowadziły do wydostania się na zewnątrz substancji radioaktywnych. Do katastrofy w Czernobylu miało miejsce 16 jądrowych awarii w elektrowniach na świecie, w których zginęły 4 osoby, rannych było 8, napromieniowanych do stanu chorobowego 275, ewakuowano 1400. Katastrofa w Czernobylu jest warta specjalnego opisu. Na wstępie trzeba wyraźnie podkreślić, że reaktory w Czernobylu są zasadniczo różne od reaktorów energetycznych budowanych od początku lat siedemdziesiątych, w których tak okropna w skutkach katastrofa po prostu nie jest możliwa. Wg W.Siwińskiego, „Czernobyl", w Czernobylu dawki ponad 6 Sv otrzymały 23 osoby, z tego trzynaście operowano na przeszczep szpiku kostnego, przeżyły dwie. 31 osób otrzymało dawki 4–6 Sv, zmarło z nich 7. Z napromieniowanych dawkami do 2.5 Sv nikt nie zmarł. W sumie zginęło 30 osób, w tym 28 od napromieniowania. Kilkaset osób przeszło chorobę popromienną. Ewakuowano 115 tys. osób. Oszacowano, że ludność ewakuowana otrzymała w pierwszym roku od awarii dawkę 40 mSv, a w następnych 50 latach otrzyma jeszcze tyle samo. Natomiast ludność dalej zamieszkała otrzymała dawki rzędu naturalnej dawki rocznej. Z pierwszego tysiąca dzieci urodzonych po awarii wśród osób ewakuowanych wszystkie były zdrowe. Trudno wyobrazić sobie większą awarię reaktora jądrowego, a przecież straty ludzkie były, można powiedzieć, minimalne. To jest cechą odróżniającą awarie jądrowe od innych, że nawet przy dużej skali awarii skutki śmiertelne można zminimalizować przy odpowiednim nakładzie środków. Jest tak dlatego, ponieważ wydarzenia dzieją się powoli w czasie i można im przeciwdziałać.

Co roku jest przynajmniej jedna katastrofa samolotowa, w której ginie kilkaset osób.

Giną tysiące ludzi w kraksach samochodowych. Od czasu do czasu wydarzają się ogromne katastrofy. W 1917 roku w Halifaksie zginęło 3000 ludzi na statku, który wybuchł. Tyle samo ludzi utopiło się na statku w Indonezji w latach sześćdziesiątych. W 1963 roku we Włoszech na skutek pęknięcia tamy zginęło 2000 osób. Na skutek wybuchu w 1984 roku w fabryce pestycydów w Bhopalu w Indiach zginęło 2340 osób i 150 tys. utraciło trwale zdrowie. Zostało wtedy wyemitowanych $2.5 \cdot 10^9$ dawek izocjanku metylu powodujących w 50% śmierć – dla porównania w Czernobylu wyemitowano takich dawek cezu-137 $2.5 \cdot 10^8$. Wg bardzo ostrożnych szacowań, milion ton spalonego węgla kosztuje pracowników zatrudnionych w górnictwie i transporcie jedno życie. Mimo to nikomu nie przychodzi do głowy wzywać do zaniechania korzystania z określonych możliwości cywilizacyjnych, a względem energetyki jądrowej takie akcje są podejmowane. Jak w takiej sytuacji nie mówić o zabobonach i ciemnocie?

Z całym naciskiem trzeba stwierdzić, że na aktualnym poziome naszej cywilizacji energetyka jądrowa jest najczystszą i najbezpieczniejszą technologią produkcji energii cieplnej i elektrycznej na dużą skalę. Również jeżeli chodzi o ceny, to średnio energia jądrowa jest tańsza od węglowej. Chyba jedyną odmiennością w tym względzie były (ale już nie są) Stany Zjednoczone AP, w których są wyjątkowo łatwe do eksploatacji złoża węgla, a z drugiej strony opinia publiczna żądała tak wysokiego poziomu zabezpieczeń technicznych w energetyce jądrowej, że koszty były za wysokie. Problem konsensusu względem przeciwstawnych problemów – poziomu zabezpieczeń i kosztów w przedsięwzięciach technicznych jest powszechnym dylematem. Również w energetyce węglowej można poprawić sytuację przynajmniej przez unieszkodliwienie trujących gazów NO_2 i SO_2, ale koszty takich zabiegów są bardzo wysokie.

Jakie są możliwości energetyki jądrowej? Szacuje się, że paliwa uranowego starczy na kilkaset lat. Jeżeli wykorzysta się maksymalnie zjawisko powielania paliwa, to niektórzy nawet liczą na 1000 lat. Jest to bardzo długa perspektywa i w tym czasie może być tak niewyobrażalny dla nas rozwój nauki i techniki, że cały problem będzie wyglądał zupełnie inaczej. W każdym razie mamy perspektywę jeszcze większego i czystszego źródła energii. Chodzi o syntezę jąder deuteru w jądra helu. Po 40 latach upartych eksperymentów fizykom udało się zrealizować doświadczenie, w którym w procesie kontrolowanej syntezy otrzymali energię większą od włożonej. Stężenie deuteru do wodoru w wodzie jest równe średnio 0.015%. Z syntezy jądra helu z dwu jąder deuteru otrzymuje się 22 MeV energii, co oznacza, że z jednego litra wody można uzyskać energię równoważną spaleniu 310 kg czystego węgla, lub tyle samo litrów benzyny. Jeżeli uwzględni się, że na Ziemi jest $1.37 \cdot 10^9$ km^3 samych wód oceanicznych, to źródło energii jest praktycznie niewyczerpalne.

Struktura paliw polskiej energetyki jest wyjątkowo niekorzystna, bo prawie w całości opiera się na najbrudniejszym surowcu – węglu, gdy w świecie średnio zużycie ropy jest większe od węgla. Około 25% lasów w Polsce choruje, a w części zginęło od kwaśnych deszczów. Kopalnie odprowadzają do rzek dziennie 620 tys. m^3 wód o stężeniu jonów Cl

i SO_4 do 1800 mg/l i połowę tego wód o stężeniu większym od podanej granicy. W roku 1990 spalono w Polsce (Centrum Informatyki Energetyki, „Informacja statystyczna...", Warszawa 1991) 120 mln ton węgla kamiennego i 66 mln ton węgla brunatnego. Z tego cały węgiel brunatny i 49 mln ton węgla kamiennego są przeznaczone na produkcję energii elektrycznej. Moc produkowanej energii wynosi około 15 GW. Elektrownie wodne stanowią w tym 3%. Paliw płynnych zużyto w ilości około 15 mln ton, gazu 13 mld m^3. W ilości zużywanej energii elektrycznej przypadającej na jednego mieszkańca jesteśmy sklasyfikowani na 21 miejscu w Europie na 25 klasyfikowanych państw. Nie ma wątpliwości, że energii elektrycznej zużywamy mało i nasz rozwój wiąże się ściśle z rozwijaniem produkcji energii elektrycznej. Można wskazać w Polsce całe obszary prostej pracy wykonywanej mięśniami ludzkimi zamiast różnymi narzędziami elektrycznymi. Braki energii staną się odczuwalne, gdy gospodarka zacznie wychodzić z kryzysu i budowa nowych elektrowni będzie najbliższą koniecznością. We wszystkich starszych kopalniach pokłady węgla są na wyczerpaniu (starczy na kilka do kilkanastu lat eksploatacji) lub pozostaną bardzo trudne i kosztowne w eksploatacji. Czy w tej sytuacji mamy budować nowe elektrownie węglowe? Pierwszy etap elektrowni jądrowej w Żarnowcu, której budowy zaniechano, miał zwiększyć moc energetyki o niecałe 1 GW. Wszczęto w jej sprawie bezprzykładną kampanię potępienia. Demagogia szła w zawody z ignorancją. Ćwiczono demokrację w sposób, który był zaprzeczeniem demokracji. W „Raporcie w sprawie elektrowni jądrowej Żarnowiec" z materiałami towarzyszącymi, Warszawa 6.VI.1990 (materiały Zespołu Prezesa PAA) pisano, jak to niedemokratyczne jest budowanie wbrew woli narodu elektrowni jądrowej, ale w końcu okazało się, że o sprawie dotyczącej całego narodu decyduje nie naród, tylko referendum małego regionu. Tak długo sprowadzano różnych ekspertów z Europy, aż uzyskano opinię, że przestarzała technika. Mniema się, że Jezioru Żarnowieckiemu groziłaby katastrofa cieplna; ale zbiorniki wodne funkcjonujące przy innych siłowniach w Polsce muszą to znosić. Zarzuca się, że nie zbadano, jak mgły będą się formować w okolicy; ta ekspertyza oczywiście jest praktycznie niewykonalna. Zarzucano, że budowa była za droga, jak gdyby w minionej gospodarce cokolwiek budowano racjonalnie i tanio. A już najbiedniejsza byłaby ludność Trójmiasta, musiałaby uciekać w kierunku morza w przypadku awarii, a na jakie uciążliwości byłaby narażona; ale to, że w środku 3.5 mln aglomeracji śląskiej pracuje 6 dużych i 11 mniejszych elektrowni cieplnych, które zatruwają faktycznie wszystko wokół, a w bliskiej odległości są jeszcze trzy duże elektrownie (Jaworzno, Siersza i Opole), to nic, im widocznie należy się tak. Gdybania, niczym nie podparte obawy okazały się ważniejsze od faktów, że wszystkie znaczące w świecie państwa rozwijają energetykę jądrową, że energetyka węglowa jest faktycznym największym trucicielem. Jedynym racjonalnym argumentem mógł być brak pieniędzy, ale wtedy można było oddać dokończenie budowy obcemu kapitałowi, albo poczekać. Najdroższy jest początek, te koszty zmarnowano, niedługo będziemy zaczynać od nowa – szkolenie kadr, kompletowanie potencjału technicznego itd.

Przy wytwarzaniu energii elektrycznej z ciepła tylko mniejsza część energii cieplnej jest zamieniana na energię elektryczną. W dużych siłowniach ten ułamek wynosi od 30 do 40%. Reszta ciepła jest rozpraszana do atmosfery. Można inaczej – małe jednostki (tzw. elektrociepłownie) lokowane koło skupisk urbanistycznych, produkujące energię elektryczną mniej sprawnie, ale za to pozostałe ciepło może być wykorzystywane dla celów grzewczych. Może pójść tą drogą? Takie elektrownie jądrowe też mogą być. Wtedy będzie zupełnie demokratycznie. Każdy rejon będzie mógł wtedy w pełni demokratycznie sam decydować o swoim losie w zakresie energii.

Abstract

Natural and artificial radioisotopes and nuclear energy are discussed at the popular level, in the environment context. The most important natural and artificial radioisotopes and the radiological emergencies from ionizing radiation are characterized. In the topic of nuclear energy the energetic necessaries of world and Poland and possibilities of their fulfilling are described. The environmental effects of the coal and nuclear power stations, for confrontation, are presented. In the conclusion, is derived opinion, that the natural radioactivity and artificial radioactivity connected with human activity are not more dangerous then other factors and elements in the environment. And nuclear energetics is the most clean technology of energy production in the big scale.