



Antyatomowe tsunami

Kazimierz Bodek

Instytut Fizyki UJ

Wybuch ogólnoświatowej antynuklearnej hysterii spowodowanej awarią reaktorów jądrowych w Fukushima Daiichi w następstwie gigantycznego trzęsienia ziemi i towarzyszącego mu uderzenia fali tsunami jest faktem bezspornym. Wydzwięk przeważającej części informacji i opinii pojawiających się w mediach, w tym wypowiedzi niektórych wpływowych polityków, jest dość jednoznaczny: awarie reaktorów jądrowych wykazały, że energetyka oparta na rozszczepieniu jąder atomowych jest tak niebezpieczna i nieprzewidywalna, że jak najszybciej należy się z tej dziedziny wycofać. Warto się jednak zastanowić czy takie stanowisko ma racjonalne uzasadnienie. Niezależnie od intencji animatorów i uczestników tej kampanii, głównym celem ataku są rzesze zwykłych obywateli o niskim poziomie wiedzy przyrodniczo-technicznej. Skutkiem jest zamieszanie, niepewność, wzrost poczucia zagrożenia, strach, a nawet objawy paniki, bo jak inaczej wytłumaczyć masowe wykupywanie zapasów płynu Lugola czy liczników Geigera przez obywateli nowoczesnych Niemiec. Zapewne wbrew swej woli ludzie ci stali się wyznawcami bożka niewiedzy, który po kataklizmie w Japonii przybrał postać „promieniotwórczego” i zażądał kolejnych ofiar.

Zjawisko ma wyraźnie charakter irracjonalny, ale jest groźne nie mniej od samej katastrofy. Jedynym sposobem ograniczenia jego negatywnych następstw jest konsekwentne przywoływanie faktów i przywracanie im właściwych proporcji. Zacząć wypada od tego, że skala kataklizmu, który ostatnio nawiedził północno-wschodnią Japonię, nie ma precedensu. Zniszczenia materialne są ogromne, a życie straciło zapewne ponad 20 tysięcy ludzi. Mimo wszystko liczba ofiar w ludziach jest piętnastokrotnie mniejsza niż w katastrofie o mniejszej skali, która wydarzyła się na Oceanie Indyjskim w grudniu 2004 roku. Jednym z powodów tej dysproporcji (na korzyść Japonii) jest zapewne wysoki poziom technologiczno-materialny i rozwinięte w tym kraju systemy ostrzegawczo-obronne przed trzęsieniami ziemi. Do takiego stanu rzeczy niewątpliwie przyczyniła się energetyka jądrowa, która od pół wieku dostarcza Japończykom tani prąd elektryczny.

Wśród japońskich instalacji jądrowych do największych zniszczeń doszło w elektrowni Fukushima I, gdzie po dwóch tygodniach od katastrofy sytuacja jest nadal groźna. Jest to jedna z najstarszych instalacji, wykorzystująca reaktory na wodę wrzącą drugiej generacji. W przeciwieństwie do systemów wysokociśnieniowych jest to mniej rozpowszechniony typ reaktora energetycznego.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że wszystkie reaktory jądrowe w Japonii, w tym te z Fukushima I, wzorowo zareagowały i przetrwały trzęsienie ziemi, mimo że było ono o dwa stopnie (w skali Richtera) silniejsze niż wynikało z przyjętych założeń projektowych dla tej elektrowni. A różnica jest ogromna. Dwa stopnie w skali Richtera oznaczają 100-krotnie większą amplitudę drgań i 1000-krotnie większą ilość wyzwolonej energii. Automatyczne systemy wygasily reakcje łańcuchowe, a zasilanie awaryjne układów chłodzenia reaktorów włączyło się prawidłowo. Nie stwierdzono też żadnych istotnych uszkodzeń mechanicznych samych reaktorów, ich betonowych osłon biologicznych i konstrukcji wewnętrznych. Kłopot pojawił się dopiero po uderzeniu fali tsunami, która była wyższa o jeden metr od założeń projektowych. Fala ta zniszczyła generatory awaryjne (napędzane silnikami Diesla) pozostawiając sprawnym jedynie system zasilania z akumulatorów, które wystarczają tylko na kilka godzin. A stałe chłodzenie nawet wyłączonych reaktorów jest konieczne, gdyż paliwo jądrowe gromadzi w czasie pracy reaktora silnie radioaktywne produkty rozszczepienia. W wyniku rozpadów tych produktów wydzielane jest ciepło, które trzeba odprowadzać, w przeciwnym razie rdzeń się przegrzeje i może ulec stopieniu. Bardzo wysoka temperatura rdzenia doprowadzić może nawet do przetopienia stalowego zbiornika, w którym rdzeń reaktora jest umieszczony i wylania się zawartości na betonową podstawę. Taką awaryjną sytuację przewiduje konstrukcja reaktora: rozlana lava ze stopionego rdzenia będzie powoli stygła w betonowej wannie. Nie jest to jednak pożądany stan, w którym silnie radioaktywne substancje mają bezpośredni kontakt z powietrzem, łatwo mogą się rozprasać i powodować groźne skażenie środowiska. Dlatego też ratowanie wyłączonych po trzęsieniu ziemi reaktorów polega na niedopuszczeniu do ich przegrzania.

Przegrzanie rdzenia reaktora prowadzi do jeszcze jednego groźnego zjawiska: gorące koszulki cyrkonowe prętów paliwowych w kontakcie z wodą, która jest w zbiorniku reaktora i służy do jego chłodzenia i spowalniania neutronów, rozkładają wodę, skutkiem czego w zbiorniku reaktora gromadzi się wodór. Wzrastające ciśnienie musi być zmniejszone przez otwarcie zaworu bezpieczeństwa, aby nie rozsądzić zbiornika. Taki manewr jest znowu bardzo niekorzystny, bo uwalnia do środowiska skażoną radioaktywnie parę wodną oraz wodór, który w kontakcie z powietrzem tworzy mieszanekę piorunującą, a jej eksplozja niszczy konstrukcje zewnętrznych budynków i wywołuje pożary.

Innym, potencjalnie groźnym zjawiskiem, przy braku cyrkulacji w obwodach chłodzenia, jest odparowanie wody z basenów, w których przechowuje się czasowo zużyte pręty paliwowe. Robi się to dlatego, żeby ich radioaktywność spadła, a z nią i wydzielane ciepło, przed wysłaniem do dalszych etapów cyklu paliwowego. Ilości wydzielanego ciepła w basenach są znacznie mniejsze niż w samym reaktorze, ale za to pręty nie są chronione grubymi ścianami stalowe-

go zbiornika. Po odparowaniu wody, radioaktywne paliwo jądrowe uzyskuje bezpośredni kontakt z powietrzem.

Opisane powyżej zjawiska wystąpiły w reaktorach elektrowni Fukushima I, gdyż przez wiele dni nie udało się odbudować zniszczonego zasilania elektrycznego układów chłodzących. Wybuchy wodoru i pożary dokonały poważnych zniszczeń w budynkach zewnętrznych i znajdujących się tam instalacjach. Pod gruzami zginęło kilka osób z personelu elektrowni. Heroiczna walka o przywrócenie sprawności układom chłodzenia trwa nadal w bardzo trudnych i niebezpiecznych warunkach. Improwizowane polewanie reaktorów wodą morską jest częściowo skuteczne i sytuacja powoli się stabilizuje, ale wynik akcji nie jest jeszcze przesądzony. Największym zmartwieniem jest niebezpieczeństwo skażenia okolicy produktami rozszczepienia i aktywnościami, gdyby doszło do dezintegracji i rozproszenia prętów paliwa jądrowego. Jak dotąd nie ma dowodów, że taki proces występuje, ale w celach prewencyjnych wysiedlono około 200 tysięcy mieszkańców. Mimo alarmistycznych i często sprzecznych doniesień, dotychczasowe skażenie okolicy jest przejściowe i niewielkie¹. Co więcej, nie ma doniesień o objawach choroby popromiennej nawet wśród najbardziej narażonego personelu, który uczestniczy w akcji ratunkowej.

W tym miejscu trzeba powrócić do zasadniczego pytania: czy zaistniała sytuacja w elektrowni Fukushima I jest wystarczającym dowodem na niebezpieczeństwo i nieprzewidywalność energetyki jądrowej, jak twierdzą jej przeciwnicy? Czy straty już poniesione i spodziewane są tak dotkliwe, że jednak należy zrezygnować z rozwoju tej gałęzi przemysłu? Pod wpływem emocji, naturalnych przecież w obliczu wielkiego i bezprecedensowego nieszczęścia, łatwo przeoczyć racjonalne argumenty i przyłączyć się do chóru przeciwników energetyki jądrowej.

Odkładając jednak emocje na bok należy zauważyć, że same reaktory i ich systemy wspomagające zadziałały prawidłowo, mimo że siła trzęsienia ziemi znacznie przekroczyła dopuszczalną granicę. Rozwój wypadków, w tym awaria chłodzenia i wycieki radioaktywności zostały dokładnie przewidziane przez konstruktorów, którzy także stworzyli procedury awaryjne z kolejnymi poziomami obrony. Nie można więc mieć do nich pretensji, że elektrownia uległa awarii. Wręcz przeciwnie, należy im się uznanie za daleko idącą ostrożność i duże współczynniki bezpieczeństwa. Problem leży gdzie indziej. Każde urządzenie, każda instalacja, czy system zbudowany i eksploatowany przez człowieka, obciążony jest ryzykiem, że zdarzy się coś nieprzewidywalnego. Ten rodzaj niepewności fachowcy nazywają ryzykiem resztkowym. W niesprzyjających okolicznościach nawet zwykły kij od miotły może się stać przyczyną wielkiego nieszczęścia. Czy świadomość takiej możliwości powinna prowadzić

¹ Media podawały informacje o skażeniu radioaktywnym wody pitnej w Tokio na poziomie 1 Bq/l. Dla informacji podajemy, że najbardziej radioaktywne lecznicze wody mineralne mają odpowiednio: 438 Bq/l w Sieradowie Zdroju i 1654 Bq/l w Szklarskiej Porębie.

do rezygnacji z wytwarzania mioteł? Prawidłowe i racjonalne postępowanie zmierza do jak najlepszego oszacowania ryzyka resztkowego, a rozwój technologiczny polega na budowaniu coraz lepszych urządzeń, w których to ryzyko systematycznie maleje. Wybór określonego poziomu ryzyka nie jest zadaniem inżynierów. To sprawa odbiorcy, dla którego urządzenie będzie pracować. Bożek niewiedzy podpowiada mu, aby wybierał urządzenia „bez ryzyka”, ukrywając jednocześnie, że zerowe ryzyko nie istnieje, a koszty jego zmniejszania gwałtownie rosną. Nieświadomy odbiorca wpadnie w pułapkę i zablokuje sobie możliwość rozwoju, śrubując ponad miarę poziom ryzyka resztkowego. Jest to szczególnie istotne w dziedzinach kosztownych i strategicznych, a energetyka niewątpliwie do takich należy.

Japończycy budując blisko pół wieku temu elektrownię Fukushima Daiichi wybrali najlepszą w tamtym czasie technologię o poziomie ryzyka resztkowego, które przewiduje wystąpienie takiej awarii jak obecna, raz na 10 000 reaktorolat. Jest chyba ironią losu, bo nie może to wynikać z teorii prawdopodobieństwa, że wodne reaktory energetyczne przepracowały mniej więcej 10 000 reaktorolat! Że postawienie na energetykę jądrową, która gwarantuje niskie i stabilne ceny prądu elektrycznego, było dobrym wyborem – nie ma najmniejszej wątpliwości. Stan rozwoju społeczeństwa japońskiego najlepiej o tym świadczy. Dzisiaj wybrano by zapewne reaktory trzeciej generacji o dziesięciokrotnie mniejszym ryzyku resztkowym. Nieustanne doskonalenie technologii sprawiło, że dzisiejsze reaktory wodne są już zabezpieczone na wypadek długotrwałej utraty chłodzenia cyrkulacyjnego oraz nie zwiększają stężenia wodoru przy wzroście temperatury rdzenia. Te konstrukcje zadowolają się awaryjnym chłodzeniem biernym, opartym na konwekcji, a uwalniany w wysokich temperaturach wodór jest katalitycznie wiązany, przez co jego stężenie nie rośnie.

Przysłuchując się doniesieniom medialnym po trzęsieniu ziemi w Japonii zwrócić uwagę musi niebywała dysproporcja w relacjonowaniu i komentowaniu awarii w Fukushimie w porównaniu z ogromem strat ludzkich i materialnych, które z awarią elektrowni nie mają nic wspólnego. Na dalszy plan zeszły dalekosiężne i trudne do naprawienia skutki kataklizmu, a odbiorcy epatowani są konsekwentnie informacjami (bardzo często błędnymi) o rozwoju sytuacji w elektrowni. Informacje te budzą strach i przerażenie niemal na całym świecie, bo większość ludzi nie potrafi racjonalnie ocenić rzeczywistego niebezpieczeństwa. Bożek niewiedzy przyjmuje hojne ofiary od swoich wyznawców. Skala i mechanizmy rządzące tym irracjonalnym zjawiskiem mogłyby być przedmiotem badań dla socjologów. Nie czuję się kompetentny, aby szerzej i głębiej je analizować. Jednak pragnę zwrócić uwagę Czytelnika na kilka aspektów o wymiarze globalnym.

Ten bożek niewiedzy nie jest tylko postacią ze świata mitów. To jedno z wyrafinowanych narzędzi, którym posługują się konkretne i wpływowe grupy interesu. Grupy, które forsują wizję sielankowego świata, nieliczącego się z prawami Przy-

rody, a ich scenariusze pozyskiwania energii niezbędnej naszej cywilizacji są dobrym przykładem, jak dalece te ruchy oderwały się od rzeczywistości. Mimo tego znajdują one posłuch i akceptację. Miał zasadniczy, to twierdzenie, że ludzkości niepotrzebny jest ani węgiel, ani uran, że potrzeby energetyczne można z powodzeniem zaspokoić z innych źródeł, przede wszystkim tzw. „odnawialnych”. Jeden rzut oka na tabelę rozpoznanych energetycznych zasobów kopalnych na Ziemi uświadamia, że właśnie te dwie kategorie, węgiel i uran, stanowią (mniej więcej po połowie) ponad 80% wszystkich rezerw, jakimi dysponujemy. Źródła odnawialne (wiatr, energia słoneczna, biopaliwa) nie zastępują paliw kopalnych nie tylko dlatego, że są zbyt mało wydajne i bardzo drogie, ale też przez to, że drastycznie degradują środowisko, co skrzętnie ukrywają przed opinią publiczną propagandyści i ideolodowie przestawienia gospodarki świata na energię odnawialną.

W kontekście dyskusji o alternatywnych (do węgla i uranu) źródłach energii na Ziemi trzeba wspomnieć o fuzji (syntezie) jądrowej, gdzie jądra lekkich pierwiastków, głównie izotopy wodoru i helu, łączą się w cięższe, wyzwalając przy tym ciepło. Jest to kopia procesu, który ogrzewa Słońce. Surowce do wytwarzania energii z syntezy jądrowej są praktycznie niewyczerpalne, ale sam proces potrafimy na razie prowadzić w sposób niekontrolowany (tzw. bomby termojądrowe), a przez to bezużyteczny dla energetyki. Prace nad opanowaniem kontrolowanej syntezy termojądrowej trwają od ponad pół wieku i ich końca nie widać, mimo że angażuje się w badania coraz większe środki. Trudno przewidzieć, kiedy i czy kiedykolwiek to źródło energii stanie się ekonomicznie uzasadnione i konkurencyjne do innych.

Orędownicy alternatywnych źródeł energii przytaczają jeszcze jeden argument, że przejściu na alternatywną energetykę musi towarzyszyć dalece posunięta oszczędność energii. Ten populistyczny i chwytny w rozwiniętych i bogatych społeczeństwach pomysł jest zupełnie nie do przyjęcia w krajach biednych, przeludnionych i rozwijających się. Łatwo zauważyć, że podstawowym warunkiem rozwoju jest zwiększenie konsumpcji energii, przede wszystkim elektrycznej. Twierdzenie to można skwantyfikować opierając się na zależności pomiędzy konsumpcją energii elektrycznej *per capita* w danym kraju, a średnią długością życia jego obywateli. Okazuje się, że aby je przedłużyć o 20 lat (w ubogich krajach afrykańskich ludzie nie dożywają 50 lat), należy zwiększyć zużycie energii 100-krotnie! Przyłączanie się do ideologii wymuszającej oszczędzanie energii w krajach trzeciego świata jest nie tylko nieetyczne, ale nieracjonalne z punktu widzenia elementarnego interesu cywilizacji ludzkiej.

Na koniec trochę optymizmu, który wynika z mojego przekonania, że sumiennie odrobimy zadanie domowe po lekcji pokory udzielonej nam przez Naturę w czasie ostatniego trzęsienia ziemi w Japonii. Symptomy uzasadniające to przekonanie można znaleźć w stonowanych i rzeczowych wypowiedziach większości fachowców odpowiedzialnych za systemy energetyczne w różnych kra-

jach. Wiedza zdobyta w czasie awarii i w trakcie akcji ratunkowej jest bezcenna. Współczesne energetyczne reaktory jądrowe staną się jeszcze bardziej bezpieczne i to bez większych nakładów na badania. Okazało się, że wytrzymałość konstrukcji przy największych nawet kataklizmach jest wzorowa. Przeglądu i poprawienia wymagają natomiast procedury postępowania na wypadek poważnej awarii oraz ilość dostępnych środków, w tym niezależnych źródeł zasilania awaryjnego. Okazało się również, że błędem jest nadmierne wydłużanie pracy starych instalacji i to nie dlatego, że stają się bardziej awaryjne i mniej ekonomiczne, ale przez to, że stosowane dawniej systemy bezpieczeństwa nie wystarczają już obecnemu społeczeństwu, które domaga się jeszcze niższego ryzyka resztkowego.



Dawki promieniowania jądrowego

Paweł Moskal
Instytut Fizyki UJ

I. Przykłady promieniowania jądrowego

Promieniowanie jądrowe są to cząstki wylatujące z jąder atomowych na skutek zachodzących tam przemian. Może to być na przykład elektron, gdy w wyniku oddziaływania słabego, neutron we wnętrzu jądra atomowego zamienia się w proton, elektron i antyneutrino ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$). Takiej przemianie podlega na przykład jądro strontu (^{90}Sr) zmieniając się w itr (^{90}Y). Wskaźnik górny oznacza łączną liczbę protonów i neutronów, w tym przypadku wynosi ona 90. Elektrony wylatujące w wyniku reakcji $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} + e + \bar{\nu}$ stanowią promieniowanie beta. Promieniowanie beta jest wysyłane także na przykład przez izotopy jodu (^{131}I) i cezu (^{137}Cs). Lecz w tym przypadku oprócz promieniowania beta wysyłane jest także promieniowanie gamma, ponieważ powstałe w wyniku przemiany jądra mają dodatkową energię w stosunku do swojej energii podstawowej. Na przykład ^{137}Cs zamienia się na wzbudzone jądro baru (^{137}Ba). W tym przypadku wzbudzone jądro ^{137}Ba przechodzi do stanu podstawowego wysyłając kwant promieniowania elektromagnetycznego o energii 0,66 MeV. Kwanty promieniowania o tak dużej energii (milion razy większej od kwantów światła) nazywane są promieniowaniem gamma. Kwanty gamma są niewidzialne, ale powstają analogicznie jak fotony, przy czym fotony wysyłane są z atomów, gdy elektrony przechodzą z wyższych energetycznie powłok na niższe, a w przypadku jąder przejścia dotyczą protonów i neutronów. **Izotopy ^{90}Sr , ^{131}I i ^{137}Cs stanowią najistotniejszy wkład do wzrostu promieniowania w atmosferze w trakcie ewentualnych awarii reaktorów jądrowych.** Innym rodzajem pro-

mieniowania jądrowego są cząstki alfa (czyli połączone ze sobą dwa protony i dwa neutrony), które odrywają się od dużych jąder. Cząstki alfa wysyłane są na przykład z jąder radonu (^{222}Rn), które rozpadają się na jądro polonu i cząstkę alfa ($^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + \alpha$). Radon jest gazem ulatniającym się do atmosfery ze skorupy ziemskiej gdzie powstaje w wyniku rozpadu radu ^{226}Ra . Jako gaz jest wdychany przez człowieka, a promieniowanie alfa radonu stanowi największy wkład do dawek naturalnego napromieniowania.

II. Miara szkodliwości napromieniowania

Opis poniższy jest przypomnieniem z artykułu opublikowanego w *Fotonie* 109. Elektron (promień beta) lub jądro helu (promień alfa) przy przechodzeniu przez materię oddziałuje z elektronami za pośrednictwem oddziaływania elektromagnetycznego. Przelatując przez materię elektron odpycha, a cząstka alfa przyciąga do siebie elektrony związane w atomach naświetlanej substancji. W obu przypadkach w wyniku tego oddziaływania elektrony materii przeskakują na wyższe powłoki energetyczne lub są całkowicie odrywane od atomów. W sumie promień beta lub cząstka alfa o energii około 1 MeV może uwolnić kilkadziesiąt tysięcy elektronów. Pośrednio podobne skutki wywołuje promieniowanie gamma. Kwant gamma wpadając do wnętrza materii przekazuje jednemu z elektronów całość lub część swojej energii, a następnie wybity elektron oddziałuje z materią jak promień beta. Zatem miarą napromieniowania może być liczba zjonizowanych atomów lub też energia zdeponowana w materiale. Energię zdeponowaną na jednostkę masy nazywa się **dawką pochłoniętą**, a jej jednostką jest Gy (grej), gdzie $\text{Gy} = \text{J/kg}$.

W organizmach żywych skutki biologiczne napromieniowania zależą nie tylko od zdeponowanej energii, ale także od tego, czy dana energia została zużyta na zjonizowanie małej czy dużej liczby komórek. Ponieważ takie same sumaryczne zniszczenia atomów rozłożone na większą liczbę komórek dają większe szanse, iż komórki się zregenerują lub też, że zmiany będą nieistotne z punktu widzenia ich funkcjonowania. Pod tym względem promieniowanie gamma i beta wywołują takie same skutki biologiczne, a są one znacznie mniejsze niż skutki wywołane przez promieniowanie alfa. Energia cząstek alfa i elektronów wysyłanych w przemianach jądrowych jest rzędu MeV. Cząstki alfa mają około 8000 razy większą masę i dwa razy większy ładunek niż elektrony i dlatego poruszają się znacznie wolniej i szybciej wytracają energię wyhamowując na drodze rzędu kilkudziesięciu mikrometrów (czyli średnio tylko w kilku komórkach). Natomiast cząstki beta o podobnej energii przebywają w organizmie drogę średnio kilku milimetrów, czyli wywołują jonizację w około 100 razy większej liczbie komórek, ale za to jonizacja w każdej z komórek jest około 100 razy mniejsza niż przy przejściu cząstki alfa. Dlatego jeśli chodzi o skutki biologiczne lepszą miarą napromieniowania jest **dawka równoważna**, którą otrzymuje się poprzez przemnożenie dawki pochłoniętej przez odpowiedni

współczynnik szkodliwości charakteryzujący rodzaj promieniowania. Okazuje się, że szkody biologiczne powodowane przez cząstki alfa są dwadzieścia razy większe niż przez cząstki beta czy kwanty gamma. Dlatego współczynnik ten wynosi 1 dla promieniowania beta i gamma oraz 20 dla promieniowania alfa. Choć fizyczną jednostką dawki równoważnej jest J/kg, tak samo jak dawki pochłoniętej, to dla odróżnienia charakteru biologicznego dawki równoważnej jej jednostką nie jest Gy lecz Sv (siwert). Nazwa pochodzi od nazwiska pioniera ochrony radiologicznej dr. Rolfa Sieverta.

Molekuły istotne dla życia komórek mogą być uszkodzane zarówno na skutek bezpośredniego zrywania wiązań pomiędzy stanowiącymi je atomami jak również na skutek jonizacji molekuł z otoczenia, z którymi następnie wchodzi w reakcje chemiczne. Na przykład molekuły DNA mogą ulegać utlenieniu rodnikami OH, które powstają w ciągu reakcji chemicznych w wyniku jonizacji cząsteczek wody. W ogólności im większe molekuły tym większa jest szansa ich uszkodzenia przy zadanej dawce napromieniowania. Ze względu na różne właściwości biologiczne różne komórki będą różnie reagować na taką samą dawkę promieniowania. Dlatego przy określaniu skutków napromieniowania należy także uwzględnić wrażliwość poszczególnych narządów czy tkanek. I tak na przykład wrażliwość gruczołów płciowych na promieniowanie jest 2 razy większa niż szpiku kostnego i aż 20 razy większa niż skóry czy powierzchni kości. Po uwzględnieniu wrażliwości otrzymujemy **dawkę skuteczną**, którą podajemy także w Siwertach.

Podobnie jak w przypadku innych zatruc ostateczne skutki dla organizmu zależą w dużej mierze od wydolności systemu immunologicznego. Dlatego nie można określić jednoznacznie jednorazowej dawki śmiertelnej. Określa się natomiast dawkę, po której otrzymaniu połowa populacji umiera w ciągu 30 dni. W przypadku człowieka jest to około 3,5 Sv. Siwert jest miarą zatrucia organizmu promieniowaniem jądrowym tak jak promile są miarą zatrucia alkoholem. Łatwo jest zapamiętać skale, ponieważ podobnie jak w przypadku alkoholu dawka śmiertelna to z grubsza 4 – czy to promile czy też Siwerty.

III. Dawki otrzymywane w środowisku naturalnym

Działaniu promieniowania jądrowego poddawani jesteśmy nieustannie przez całe życie. Pochodzi ono z naturalnych radionuklidów znajdujących się w skorupie ziemskiej, z promieniowania kosmicznego oraz z izotopów promieniotwórczych wytwarzanych w atmosferze w wyniku reakcji jądrowych wywoływanych przez promieniowanie kosmiczne. Promieniowanie jądrowe naświetla nas także od wewnątrz w wyniku rozpadu radionuklidów wchłanianych drogą pokarmową i oddechową. Największy wkład do otrzymywanej przez nas dawki ma promieniowanie radonu ^{222}Rn . Radon jako gaz wydostaje się na powierzchnię Ziemi i jest przez nas wdychany. W ciągu roku otrzymujemy z tego powodu dawkę

w wysokości około 1,3 mSv. Radon może gromadzić się w zamkniętych pomieszczeniach powodując, że w istocie największe dawki otrzymujemy w domu. Stężenia radonu w domach mogą istotnie się różnić i często zdarza się, że dawka od radonu wynosi nawet kilkanaście mSv na rok. Ponadto większe stężenie radonu i produktów jego rozpadu może występować także w wielu kopalniach. Według danych z 1999 roku w Polsce ponad 4% górników w kopalniach rud metali i węgla brunatnego otrzymało roczne dawki powyżej 5 mSv.

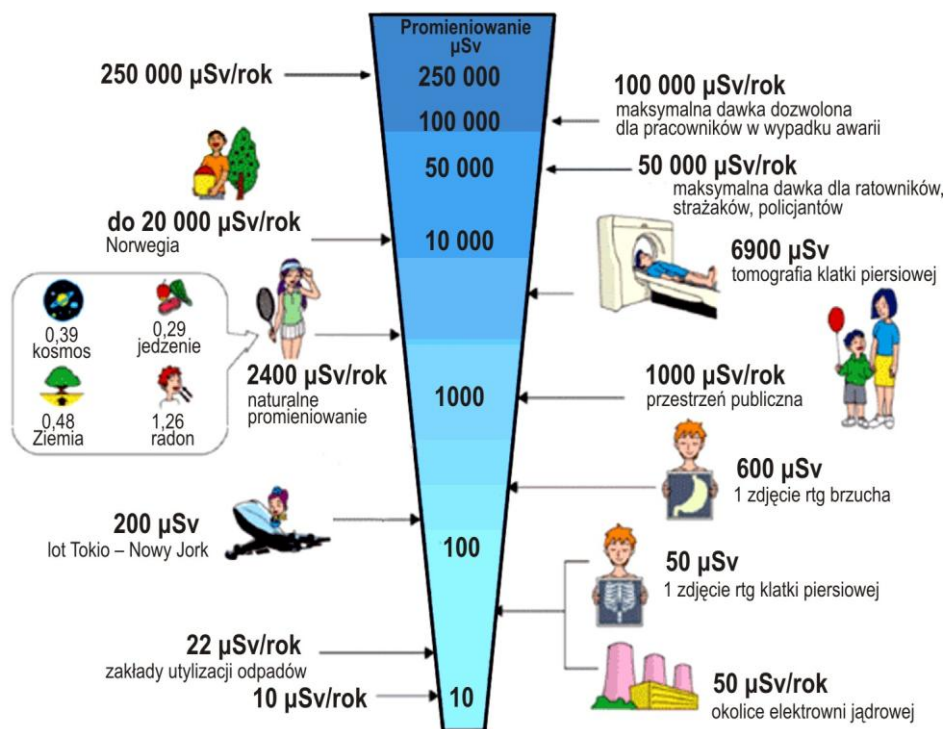
Rocznie w wyniku promieniowania kosmicznego otrzymujemy dawkę około 0,3 mSv, a wewnętrzne napromieniowanie z powodu zawartości w ciele potasu ^{40}K wynosi około 0,2 mSv. Ze względu na promieniowanie kosmiczne podwyższenie dawki następuje także wraz z wysokością. Dlatego na przykład 10-godzinny lot samolotem na wysokości 11 kilometrów powoduje dodatkową dawkę wynoszącą około 0,02 mSv. Łącznie średnia dawka w Polsce w wyniku naturalnego napromieniowania wynosi około 2,3 mSv, co w ciągu całego życia daje około 200 mSv. Ale ponad 5% ludzkości żyje na terenach o wielokrotnie podwyższonej zawartości pierwiastków promieniotwórczych. Takie obszary rozrzucone są po Azji, Europie, Afryce i Ameryce. Na przykład w Norwegii naturalne promieniowanie wynosi w niektórych miejscach nawet 20 mSv na rok, a w Indiach w prowincji Keralā ze względu na złoża zawierające cer i lantan mieszkańcy otrzymują dawki kilkadziesiąt razy wyższe niż w Polsce. Można znaleźć nawet takie obszary, jak na przykład w mieście Ramsar w Iranie, gdzie lokalne dawki są 1000 razy większe niż przeciętnie ze względu na źródła wody zawierającej duże stężenie radu.

IV. Dawki w wyniku diagnostyki medycznej

Dodatkowo wiele osób jest napromieniowywanych za pomocą promieniowania rentgenowskiego lub w wyniku zastosowania izotopów promieniotwórczych w nowoczesnej diagnostyce medycznej. Podczas wykonywania zdjęć rentgenowskich otrzymujemy dawki w zakresie od 0,1 do kilku mSv. Na przykład zdjęcie klatki piersiowej powoduje dawkę około 0,1 mSv, a zdjęcia kręgosłupa czy prześwietlenia płuc wywołują dawki około 4 mSv. Większe dawki pacjenci otrzymują w badaniach wymagających podawania preparatów promieniotwórczych. W wysoko rozwiniętych krajach powszechnie stosuje się Pozytonową Tomografię Emisyjną. Jest to najbardziej skuteczna metoda diagnozowania nowotworów. Niestety, ze względu na wysokie koszty w Polsce działa dopiero kilka takich tomografów. Metoda ta bazuje na podawaniu pacjentowi cukru zawierającego promieniotwórczy fluor ^{18}F . W trakcie badania, na kilka godzin, pacjent stanowi źródło promieniotwórcze emitujące około 200 000 000 promieni gamma na sekundę, otrzymując dawkę około 10 mSv. Czyli kilka razy więcej niż średnia dawka roczna na terenie Polski, ale jednocześnie kilka razy mniej niż dawki roczne na obszarach o podwyższonej radioaktywności. Podobne dawki, otrzymujemy w trakcie tomografii komputerowej, powszechnie stoso-

wanej także w Polsce. Mieszkaniec Polski z powodu diagnostyki medycznej otrzymuje średnio dawkę w wysokości 0,85 mSv.

Przyjmowane dawki promieniowania jonizującego w życiu codziennym



Sv (sievert) = równoważna dawka napromieniowania
 $\mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$; $\text{mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$

Ilustracja wykonana na podstawie http://asset.soup.io/asset/1680/9547_8c75.gif

V. Przypomnienie efektu hormezy radiacyjnej

Nasze komórki są cały czas uszkodzane głównie na skutek reakcji chemicznych wywoływanych w organizmie przez wolne rodniki. Szacuje się, że w wyniku przemian metabolicznych w organizmie człowieka powstaje około 10^9 uszkodzeń na dzień, a układ immunologiczny musi sobie na bieżąco z nimi radzić. Warto podkreślić, że uszkodzenia wywoływane na skutek jonizacji naturalnym napromieniowaniem w dawkach około 3 mSv w ciągu roku są ponad 10^5 razy mniejsze. Jak niedawno opisaliśmy w *Fotonie* 110, okazuje się że promieniowanie jonizujące w małych dawkach pozytywnie pobudza układ immunolo-

giczny. Potwierdza to wiele doświadczeń wykonywanych na zwierzętach oraz obserwacja napromieniowanych ludzi. Na przykład systematyczne zestawienie danych z terapii pacjentek leczonych na gruźlicę za pomocą promieniowania jądrowego wykazało, że dla dawek rzędu 100 do 200 mSv szanse zachorowania na raka znacznie maleją. Zmniejszona śmiertelność i prawdopodobieństwo zachorowania na białaczkę została stwierdzona także wśród tych mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki, którzy zostali napromieniowani dawkami w zakresie do 200 mSv. Z jednej strony wraz ze wzrostem dawki napromieniowania wzrasta liczba uszkodzeń DNA, ale z drugiej strony promieniowanie pobudza pozytywnie układ immunologiczny i w efekcie wpływ na organizm jest korzystny w zakresie dawek do 200 mSv. Należy zauważyć, że 200 mSv jest dawką prawie 100 razy przekraczającą średnią roczną dawkę promieniowania otrzymywaną przez ludzi na terenie Polski. W obliczu powyższych faktów nie ma powodów do wpadania w panikę jeśli, tak jak niedawno w Tokio, poziom promieniowania w ciągu tygodnia podniesie się 10 czy nawet 100 razy.

Literatura

- [1] A. Hrynkiewicz, *Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego*, Państwowa Agencja Atomistyki (1993).
- [2] A. Hrynkiewicz, *Promieniotwórczość naturalna w środowisku*, „Postępy Fizyki”, t. 44, z. 5, 439 (1993).
- [3] Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki, 2(42)/2000.
- [4] Z. Jaworski, *Dobroczynne promieniowanie*, „Wiedza i Życie”, 3/1997, 20–29.
- [5] L. Dobrzyński, *Hormeza – Zjawiska powszechnie znane i nieznanne*, <http://www.ipj.gov.pl/pl/szkolenia/matedu/hormeza.htm>.
- [6] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, *Pracownicy przemysłu jądrowego a promieniowanie jonizujące*, PTJ, vol. 52, z. 2, 29 (2009).