JAPONIA – ANALIZY

Krzysztof Stefański

ENERGETYKA JĄDROWA PO FUKUSHIMIE: LEKCJE I FOBIE

Wielkie trzęsienie ziemi 11 marca 2011 r.

Ze względu na położenie w strefie wysokiej aktywności sejsmicznej w Japonii zdarza się nawet kilkaset trzęsień ziemi rocznie. Większość z nich przechodzi niezauważona lub prawie niezauważona. Nieliczne są wyraźnie odczuwalne, a powodujące poważniejsze zniszczenia zdarzają się raz na kilkadziesiąt lat. W minionym stuleciu Japonia doświadczyła dwóch niszczycielskich trzęsień ziemi. Pierwsze z nich w 1923 r. dotknęło głównie region Kantō, w tym Tokio. Zginęło wówczas ponad 100 tys. ludzi, przy czym większość z nich padła ofiarą pożarów szalejących w dzielnicach drewnianych domów tokijskich. Drugie wielkie trzęsienie ziemi w XX w. dotknęło w 1995 r. prefekturę Hyōgo, a zwłaszcza jej stolicę – Kōbe. Większość z ponad 6 tysięcy ofiar zginęła pod gruzami walących się budynków, estakad i innych konstrukcji. Kolejne wielkie i katastrofalne trzęsienie ziemi, które dotknęło przed wszystkim region Tōhoku, miało miejsce u progu drugiej dekady XXI w.

Trzęsienie ziemi o sile 9 stopni w otwartej skali Richtera zaczęło się 11 marca 2011 r. o godzinie 14:46 czasu lokalnego (5:46 UTC). Epicentrum znajdowało się ok. 70 km na wschód od półwyspu Oshika (38°6'N, 142°52'E). Jego hipocentrum znajdowało się ok. 30 km pod powierzchnią oceanu. Dwa dni wcześniej ok. 27 km na północ i ok. 55 km na zachód od tego miejsca wystąpiły wstrząsy poprzedzające o sile 7,3 stopnia, a po wstrząsie zasadniczym w odstępach 20, 7 i 10 minut trzy wstrząsy wtórne o sile od 7,4 do 7,7 stopni. Po nich 7 kwietnia wystąpiły wstrząsy wtórne o sile 7,1 stopnia, a 11 kwietnia wstrząsy o sile 7 stopni z epicentrami nie

dalej niż kilkadziesiąt kilometrów od epicentrum wstrząsu głównego, z hipocentrami na innych głębokościach. Powyższa lista dotyczy tylko wstrząsów o sile co najmniej 7 stopni. Łączna liczba wstrząsów wtórnych o sile większej niż 5 stopni w tym samym przedziale czasu przekroczyła 400.

Mimo ogromnej energii wyzwolonej przez wstrząsy zniszczenia spowodowane przez nie same były zdecydowanie mniejsze i spowodowały mniejszą liczbę ofiar niż zniszczenia budynków i infrastruktury spowodowane przez trzęsienie ziemi w Kōbe w 1995 r. Pożary, jakie wybuchły w konsekwencji uszkodzeń budynków i instalacji, nie były aż tak liczne i spowodowały nieporównanie mniejszą liczbę ofiar niż pożary w czasie wielkiego trzęsienia ziemi w Kantō w 1923 r.

Mimo to liczba ofiar, choć mniejsza kilkakrotnie od liczby ofiar z 1923 r., była jednak ponad 3 razy większa niż w 1995 r. Łączna liczba osób, które zginęły lub zaginęły (w większości zapewne z powodu utraty życia), osiągnęła ponad 23 tysiące. Tym razem głównym czynnikiem destrukcyjnym okazało się tsunami, które niespełna godzinę po trzęsieniu uderzyło we wschodnie wybrzeże północnego Honshu. Wysokość grzbietów fal i maksymalny poziom wody wdzierającej się w głąb lądu wahały się znacznie wzdłuż wybrzeża, ale w niektórych miejscach sięgały blisko 40 m. Tsunami porywało domy, samochody, wrzucało statki daleko w głąb lądu, ale przede wszystkim zabijało ludzi. A wreszcie wywołało dodatkową katastrofę związaną z awarią elektrowni Fukushima Daiichi (Fukushima I) i będącą jej konsekwencją emisję substancji promieniotwórczych, które skażyły w znacznym stopniu otoczenie elektrowni w promieniu parudziesięciu kilometrów.

Katastrofa elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi

Do 11 marca 2011 r. w Japonii były czynne 54 reaktory w 16 elektrowniach jądrowych, w tym 5 elektrowni w regionie Tōhoku¹. Cztery spośród nich – Onagawa w prefekturze Miyagi, Fukushima I (Daiichi) i Fukushima II (Daini) w prefekturze Fukushima oraz Tōkai II w prefekturze Ibaraki, a wraz z nimi 14 spośród 54 czynnych reaktorów – znalazły się w obszarze dotkniętym przez tsunami. Z tego awarii uległy jedynie 4 najstarsze reaktory elektrowni Fukushima I (nr 1–4), a dwa (nr 5 i 6) udało się bezawaryjnie zamknąć na zimno (tzn. wygasić reakcję rozszczepiania i wystudzić). Do awarii czterech reaktorów doszło, mimo że natychmiast po zarejestrowaniu wstrząsów nastąpiło ich automatyczne wyłączenie poprzez wygaszenie reakcji rozszczepiania. Takie wygaszenie nie oznacza jednak natychmiastowego zahamowania produkcji energii w rdzeniu reaktora, ponieważ w produk-

¹ Region na północnym krańcu Honshu.

tach rozszczepiania, o których niżej, zachodzą nadal rozpady promieniotwórcze związane z uwalnianiem energii, na znacznie mniejszą niż przy rozszczepianiu, ale i tak dużą skalę. Do chwili rozpadu wszystkich krótko żyjących, a więc aktywnych promieniotwórczo produktów, reaktor musi być chłodzony.

W Fukushima I, obliczonej na przetrwanie fali o wysokości 5,7 m, tsunami o wysokości ok. 14 m spowodowało jednak awarię systemu chłodzenia i praktycznie wszystkich systemów bezpieczeństwa. W konsekwencji doszło do stopienia lub częściowego stopienia rdzeni, ale również do wydzielania się pod wpływem wysokiej temperatury wodoru z wody chłodzącej reaktor. Eksplozja nagromadzonego wodoru zniszczyła górne kondygnacje budynków reaktorów 1, 3 i 4, w wyniku czego doszło do wycieku substancji promieniotwórczych.

Doprowadziło to do skażenia promieniotwórczego nie tylko obszaru elektrowni, ale i jej otoczenia. Zarządzono przymusową ewakuację mieszkańców ze strefy największego skażenia, za którą uznano koło o promieniu 20 km wokół Fukushima Daiichi – a więc z obszaru o powierzchni ponad tysiąca kilometrów kwadratowych – oraz zalecono ewakuację ze strefy rozciągającej się między 20 i 30 km od elektrowni. Łącznie ewakuacją objęto ok. 100 tys. mieszkańców prefektury Fukushima.

Katastrofa w elektrowni Fukushima I wywołała falę krytyki pod adresem TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*), największej w Japonii firmy produkującej i dystrybuującej energię elektryczną, której własnością są m.in. elektrownie Fukushima I i Fukushima II. Zarzuty, w znaczącej części słuszne, dotyczyły błędów popełnionych (przynajmniej w części z żądzy zysku) przy wyborze lokalizacji, oceny zagrożeń katastrofami naturalnymi, konstrukcji zabezpieczeń na ich wypadek, a także polityki informacyjnej nt. stanu reaktorów po zalaniu przez tsunami i sposobu prowadzenia akcji ratunkowej².

Energetyka jądrowa – jak to działa

Energetyka jądrowa, która rozwinęła się po II wojnie światowej jako produkt uboczny prac nad bronią jądrową, bazuje na zjawisku rozszczepiania jąder ciężkich pierwiastków, a w praktyce głównie izotopu uranu o liczbie masowej (odpowiadającej łącznej liczbie protonów i neutronów, noszących wspólną nazwę nukleonów, w jądrze) 235. Izotop ten występuje w ziemskich złożach rud uranu, ale

² *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission* 5 lipca 2012, http://naiic.go.jp/wp-content/uploads/2012/07/NAIIC_report_lo_res.pdf [dostęp: 20 września 2012]; Akira Omoto (University of Tokyo), *Fukushima Accident: An Overview*, 3 maja 2011, https://www.sfen.fr/content/download/30655/1616957/file/1-ICAPP_Omoto2.pdf [dostęp: 20 września 2012].

jest go bardzo mało, bo stanowi zaledwie 0,7% naturalnego uranu, w którym niemal całą resztę stanowi cięższy izotop – uran 238, praktycznie nie nadający się do takich celów³.

Rozszczepienie jądra uranu, polegające na jego rozpadzie na dwa lżejsze jądra o zbliżonych, ale rzadko identycznych masach⁴, nie zachodzi spontanicznie, lecz jest inicjowane przez absorpcję (przyłączenie) neutronu. Ponieważ w każdym akcie rozszczepiania poza dwoma fragmentami, w postaci lżejszych jąder, pojawiają się dwa lub trzy swobodne neutrony, inicjatorów kolejnych aktów rozszczepiania nie brakuje, ale do tego, żeby te rzeczywiście zachodziły z udziałem pozostałych jąder uranu, muszą być spełnione dodatkowe warunki. Po pierwsze, paliwa jądrowego musi być dostatecznie dużo, by znaczna część tych swobodnych neutronów miała szansę „trafić” w takie jądra, a więc reaktor, w którym zachodzi rozszczepianie uranu na skalę makroskopową, musi być sporym urządzeniem.

Po drugie, ponieważ prawdopodobieństwo absorpcji neutronu przez „trafione” jądro uranu 235 szybko maleje wraz ze wzrostem energii neutronu, dla jego zwiększenia neutrony powstające w aktach rozszczepiania trzeba spowolnić. W charakterze spowalniaczy (czyli moderatorów) mogą być używane: jądra wodoru znajdujące się w obfitości w zwykłej wodzie, jądra deuteru występujące w tzw. wodzie ciężkiej albo jądra atomów węgla, które można zebrać w dostatecznej ilości w bloku grafitu.

Każdy z tych moderatorów ma swoje wady i zalety. Grafit zapewnia niskie straty w populacji neutronów, ponieważ prawdopodobieństwo absorpcji neutronu przez jądro węgla jest bardzo małe. Ponadto jest stosunkowo łatwy do produkcji w wystarczających ilościach. Pewną jego wadą jest mniejsza niż w przypadku pozostałych moderatorów efektywność spowalniania ze względu na duży stosunek masy atomu węgla do masy neutronu (14 : 1).

Jądra deuteru spowalniają neutrony znacznie efektywniej niż jądra węgla ze względu na mniejszy stosunek mas (2 : 1), a przy tym prawie zupełnie ich nie ab-

³ T. Mayer-Kuckuk, *Fizyka jądrowa*, Warszawa 1984. W roli materiału rozszczepialnego można używać również plutonu 239 lub uranu 233, przy czym żaden z tych izotopów nie występuje na Ziemi w naturze, natomiast oba można produkować w tzw. reaktorach powielających, czyli „breederach”, w których nie spowalnia się neutronów powstających w czasie rozszczepiania, lecz wykorzystuje część z nich do zainicjowania przemiany uranu 238 – w pierwszym, a toru 232 – w drugim przypadku, we wspomniane izotopy rozszczepialne. Reaktory tego typu są jednak znacznie rzadziej używane, ponieważ technologia ich budowy jest trudniejsza, a państwa ją mające nie kwapią się do udostępnienia jej państwom mniej zaawansowanym technicznie ze względu na obawy o wykorzystanie plutonu do budowy ładunków jądrowych, ponieważ chemiczne oddzielenie plutonu 239 od uranu 238, z którego powstał, jest znacznie prostsze niż fizyczne oddzielenie uranu 235 od uranu 238.

⁴ Prawdopodobieństwo wystąpienia dwóch jąder o liczbie masowej 117 każde, a musiałyby to być dwa jądra palladu, chociaż możliwe, jest bardzo mało prawdopodobne, natomiast najbardziej prawdopodobne jest pojawienie się fragmentów o liczbach masowych ok. 95 i 137.

sorbują. Problemem jest jednak koszt i złożoność procesu produkcji (a właściwie „odcedzania”) ciężkiej wody.

Wreszcie jądra „zwykłego” wodoru są pod ręką w praktycznie nieograniczonych ilościach, a do tego najskuteczniej spowalniają neutrony ze względu na niemal identyczne masy protonu i neutronu. Niestety, z prawdopodobieństwem setki razy większym niż jądra deuteru zamiast neutrony spowalniać, absorbują je, zmniejszając ich populację – i to na tyle, że zwykła woda nie może być używana w charakterze moderatora, jeśli paliwem jądrowym jest uran naturalny. Może natomiast być używana w reaktorach, w których stosuje się uran wzbogacony, tzn. taki, w którym zwiększono udział uranu 235 do ok. 3%⁵.

Poważną wadą moderatora grafitowego jest jego zachowanie w przypadku przegrzania reaktora. W takim wypadku grafit zaczyna się palić ze wszystkimi tego konsekwencjami. Tak właśnie było w Czarnobylu. Moderator w postaci wody lub ciężkiej wody nie ma takiej wady, choć, jak się okazało w czasie katastrofy w Fukushima, nie jest absolutnie bezpieczny.

Pozostaje jeszcze kwestia kontroli tempa reakcji rozszczepiania. Bez jej udziału reakcja w skali makroskopowej ulega samoczynnemu wygaszeniu (tak jest, jeżeli średnio mniej niż jeden neutron spośród powstających w poszczególnych aktach rozszczepiania inicjuje kolejny akt rozszczepiania) albo samoczynnemu przyspieszeniu (jeśli średnio więcej niż jeden neutron spośród powstających w poszczególnych aktach rozszczepiania inicjuje kolejny akt rozszczepiania). Drugi przypadek występuje przy eksplozjach nuklearnych, a więc jest obiektem zainteresowań wojskowych, a nie energetyków.

Tempo reakcji rozszczepiania w rdzeniu reaktora można regulować za pomocą elementów, które pochłoną nadmiar neutronów. W tym celu trzeba użyć materiałów charakteryzujących się wysoką zdolnością pochłaniania: kadmu, indu i srebra, i to z ich stopów wykonuje się pręty sterujące. Ich wsunięcie w głąb rdzenia reaktora zmniejsza populację neutronów indukujących akty rozszczepiania, a w konsekwencji spowalnia tempo reakcji, natomiast wysunięcie zwiększa populację takich neutronów i zwiększa tempo reakcji. Całkowite wsunięcie prętów sterujących w rdzeń reaktora powoduje szybkie wygaszenie reakcji rozszczepiania, czyli tzw. SCRAM (ale nie zatrzymuje procesu wydzielania energii pochodzącej z rozpadów izotopów promieniotwórczych znajdujących się w rdzeniu reaktora).

Energia cieplna powstająca w rdzeniu reaktora musi być z niego odprowadzana i zamieniana na formę łatwiejszą do wykorzystania. W najbardziej rozpowszechnionych (nieco ponad 60% wszystkich użytkowanych reaktorów w 2010 r., pro-

⁵ W reaktorach powielających na neutronach szybkich paliwo na początku cyklu pracy musi zawierać znacznie więcej materiału rozszczepialnego – uranu 235 lub plutonu 239 – bo ok. 20%, ale podczas pracy reaktora samo się wzbogaca w miarę przekształcania uranu 238 w pluton 239.

dukujących ponad 66% całości energii wytwarzanej w elektrowniach jądrowych) reaktorach tzw. wodno-ciśnieniowych (*pressurized water reactor* – PWR) odpro-wadza się ją za pomocą czynnika chłodzącego, czyli chłodziwa, którym jest zwy-kła woda pełniąca równocześnie funkcję moderatora. Chłodziwo w generatorze pary (swego rodzaju kotle) zamienia wodę z obiegu wtórnego w parę wodną, któ-ra z kolei napędza turbiny, a za ich pośrednictwem generatory energii elektrycznej. W ten sposób energia kinetyczna fragmentów rozszczepionych jąder uranu zamie-niająca się w energię cieplną rdzenia reaktora ostatecznie przyjmuje postać energii elektrycznej, którą można wykorzystywać tak samo, jak energię elektryczną wy-twarzaną w elektrowniach konwencjonalnych.

W przypadku rzadziej używanych (nieco ponad 20% wszystkich czynnych re-aktorów i 22% produkcji energii) reaktorów wrzących (*boiling water reactor* – BWR), takich jak fukushimskie, nie ma obiegu wtórnego, a woda pełniąca funk-cję chłodziwa bezpośrednio napędza turbiny. Jest to oczywiście układ prostszy niż układ reaktora wodno-ciśnieniowego, ale większa część układu jest permanentnie skażona (np. turbiny, które w przypadku reaktorów wodno-ciśnieniowych są ra-diacyjnie „sterylne”).

Paliwo jądrowe ma w przypadku reaktorów wodnych PWR i BWR postać pa-stylek dwutlenku uranu UO_2 , pakowanych w koszulki o kształcie długich, cien-kich cylindrów ze stopu cyrkonu, tworzących pręty paliwowe.

Energetyka jądrowa – pokusy

Ilość energii, która uwalnia się w procesie rozszczepiania jąder atomowych, w przeliczeniu na kilogram paliwa jest dziesiątki tysięcy razy większa niż ilość energii otrzymywanej w wyniku reakcji chemicznych, np. spalania.

W akcie rozszczepienia jednego jądra uranu 235 uwalnia się ok. 150 MeV (me-gaelektronowoltów) energii w formie nadającej się do przetwarzania (jest to ener-gia kinetyczna fragmentów rozczepionego jądra uranu 235 – lżejszych jąder). Przy pełnym spalaniu metanu, które wymaga udziału w reakcji dwóch cząsteczek tlenu na każdą cząsteczkę paliwa, uwalnia się energia ok. 1 eV (elektronowolta⁶), a więc 150 mln razy mniejsza niż w przypadku rozszczepiania jednego jądra uranu. Po uwzględnieniu tego, że jedna cząsteczka metanu jest ok. 15 razy lżejsza od jądra (atomu) uranu 235, a jego atomy stanowią ok. 1% masy całego paliwa jądrowe-go, to i tak z jednostki masy tego paliwa można uzyskać kilkadziesiąt tysięcy razy więcej energii niż z jednostki masy metanu.

⁶ 1 eV (elektronowolt) jest ilością energii, jaką zyskuje elektron przyspieszony przez napięcie równe 1V, czyli 1 wolta.

Nic więc dziwnego, że produkcja użytecznej energii w wyniku kontrolowanego rozszczepiania uranu (lub plutonu) jest kuszącym rozwiązaniem. Zamiast milionów ton paliw chemicznych (np. węgla) dostarczanych do elektrowni przez tysiące pociągów, wystarczą dziesiątki ton paliwa jądrowego, które można przewieźć kilkomatymi dużymi ciężarówkami. Jest to pożądany scenariusz z ekonomicznego punktu widzenia. Nawet w przypadku produkcji energii w elektrowniach radykalne ograniczenie ilości zużywanego paliwa oraz ilości odpadów poprodukcyjnych ma bez wątpienia wiele zalet.

Niemal 15% energii elektrycznej na świecie produkuje się w elektrowniach jądrowych. W niektórych krajach, np. w Polsce, nie produkuje się jej w ten sposób w ogóle, ale są takie, w których większość energii elektrycznej pochodzi z elektrowni jądrowych (we Francji jest to ponad 75%).

Te cechy procesu produkcji energii użytecznej w reaktorach są potencjalnie jeszcze bardziej atrakcyjne w przypadku napędu pojazdów, bo oznaczają ich prawie całkowite uniezależnienie od konieczności uzupełniania paliwa. W okresie „niemowlęstwa” reaktorów jądrowych i ich szybkiego rozwoju kreślono więc śmiało (nazbyt, jak się później okazało) wizje nuklearnego napędu dla samolotów, pociągów, a nawet samochodów osobowych (nucleon – koncepcyjny projekt samochodu osobowego Forda z 1958 r.). Okazało się jednak, z powodów, o których już była mowa, że trudno jest zbudować dostatecznie mały reaktor i (chyba na szczęście) z planów takich zrezygnowano. Jednak w latach 50. ubiegłego wieku na całkiem szeroką skalę zaczęto używać energii jądrowej do napędzania dużych okrętów – przede wszystkim okrętów podwodnych, ale też lotniskowców i dużych krążowników, zapewniając im niemal pełną niezależność od baz lądowych i niemal nieograniczony zasięg. Okręty takie budowały i budują: USA, ZSRR – a obecnie Rosja, Francja i Wielka Brytania, a kilka państw: Chiny, Indie czy Brazylia albo już wstąpiło, albo wkrótce wstąpi do tego klubu.

Ze stosowania napędu jądrowego na statkach handlowych, które przecież i tak muszą dość często zawijać do portów, zrezygnowano, po zbudowaniu trzech statków doświadczalnych: amerykańskiego „Savannah”, niemieckiego „Otto Hahn” i japońskiego „Mutsu”. Nie zarzucono jednak całkowicie stosowania tego typu napędu na jednostkach cywilnych, a pierwszy statek z napędem jądrowym – lodołamacz „Lenin”, zbudowany w ZSRR raptem trzy lata po pierwszym amerykańskim okręcie podwodnym USS „Nautilus” – doczekał się dość licznego „potomstwa”. Rosjanie utrzymują sporą flotę lodołamaczy z napędem jądrowym (w tym jeden lodołamacz frachtowiec) i planują jej powiększenie.

Energetyka jądrowa – zagrożenia

Wytwarzanie użytecznej energii w reaktorach jądrowych ma też wady, przez niektórych uważane za dyskwalifikujące. Są one związane z faktem, że produkty rozszczepiania stwarzają zagrożenia radiacyjne. Neutrony wybiegające poza pracujący reaktor są jednym ze źródeł takich zagrożeń, ale reflektory neutronów (zwykle warstwa wody) i osłony biologiczne, otaczające reaktor, redukują to niebezpieczeństwo do niemal zerowego poziomu, a po wygaszeniu reakcji rozszczepiania emisja neutronów, a więc i to zagrożenie znika zupełnie.

Znacznie bardziej kłopotliwe są izotopy lżejszych pierwiastków powstające w dużych ilościach w wyniku rozszczepiania uranu 235. Jądra powstające w taki sposób są nietrwałe i rozpadają się, emitując promieniowanie beta, czyli szybkie elektrony i przekształcając się w jądra pierwiastków o większej liczbie atomowej⁷. Zanim pojawi się jądro stabilne, zachodzi cały łańcuszek takich rozpadów, a przy każdym wydzielą się spora ilość energii rzędu kilku MeV. W normalnych warunkach produkty rozszczepienia znajdują się w rdzeniu reaktora, a po wypaleniu zapasu paliwa są przechowywane wewnątrz budynku reaktora w basenie wypełnionym wodą aż do wystygnięcia, tzn. do zakończenia rozpadu wszystkich krótko żyjących izotopów, których rozpady są głównym źródłem dużych ilości wydzielanego ciepła.

Wśród produktów rozszczepiania znajdują się izotopy o różnych czasach połówkowego rozpadu⁸ (nazywanych też okresami półrozpadu) – od kilku sekund do dziesiątków lat. Izotopy krótko żyjące są bardzo aktywne promieniotwórczo, ale bardzo krótko, a więc nie stanowią istotnego zagrożenia poza najbliższym otoczeniem reaktora (liczonym w metrach, najwyżej dziesiątkach metrów) natomiast izotopy długo żyjące emitują promieniowanie o znacznie mniejszym natężeniu, ale za to ubywa ich powoli.

Wśród długo żyjących izotopów powstających w procesie rozszczepiania wyróżniają się stront 90 i cez 137, z których pierwszy ma czas połówkowego rozpadu wynoszący 28 lat, a drugi 30 lat, a więc bardzo zbliżony. Przy takim czasie półrozpadu aktywność promieniotwórcza jest dość wysoka, a izotop rozpada się powoli – w czasie życia przeciętnego człowieka jego ilość zmniejsza się mniej więcej 5–6 razy, a więc niewiele. Izotopy te są szczególnie niebezpieczne, ponieważ mogą być

⁷ Jądro powstające w wyniku rozpadu beta zwykle znajduje się w stanie wzbudzonym, tzn. ma energię wyższą niż minimalna i pozbywa się jej nadmiaru, emitując promieniowanie gamma. Produkty rozszczepiania i ich pochodne są więc źródłem promieniowania beta i gamma.

⁸ Czasem połówkowego rozpadu nazywa się, jak sugeruje termin, czas, po którym pozostaje połowa pierwotnej ilości rozpadającego się izotopu. Im krótszy czas połówkowego rozpadu, tym szybciej ubywa rozpadającego się izotopu, ale też tym więcej emituje on promieniowania jonizującego w jednostce czasu.

wchłaniane przez organizm, zastępując pierwiastki pełniące istotną funkcję w procesach fizjologicznych – stront 90 „podszywa się” pod należący do tej samej grupy pierwiastków wapń, a cez „udaje” potas. Nagromadzone w organizmie emitują promieniowanie beta, które czyni bez porównania większe szkody, niż takie samo promieniowanie pochodzące ze źródeł znajdujących się na zewnątrz organizmu (stopień szkodliwości promieniowania gamma nie zależy istotnie od tego, czy jego źródło znajduje się wewnątrz, czy na zewnątrz organizmu).

Trzecim izotopem spędzającym sen z powiek specjalistom ds. bezpieczeństwa jest jod 131. Wprawdzie jego czas połowkowego rozpadu jest krótki, bo wynosi tylko 8 dni, ale jod jest pierwiastkiem lotnym i w ciągu krótkiego czasu, rzędu okresu półrozpadu, może się rozprzestrzenić na znaczne, idące w setki kilometrów odległości od punktu wycieku. Ponieważ zaś jod jest akumulowany w tarczycy, zachodzi niebezpieczeństwo jego wchłonięcia przez organizm, gdzie ma wystarczająco dużo czasu, aby poczynić szkody biologiczne⁹. Jeżeli jednak zapewni się mieszkańcom zagrożonych terenów dostęp do preparatów zawierających jod (jak to zrobiono w Polsce w stosunku do dzieci i młodzieży tuż po awarii elektrowni w Czarnobylu), wchłanianie radioaktywnego jodu 131 może zostać bardzo znacznie ograniczone w krytycznym przedziale czasu¹⁰.

Skutki promieniowania zależą od tzw. dawki promieniowania, którą człowiek otrzymuje wskutek kontaktu z materiałami promieniotwórczymi. Należy przy tym podkreślić, że tylko dwa spośród czterech rodzajów promieniowania jonizującego – neutrony oraz promieniowanie gamma – są niebezpieczne również wtedy, gdy ich źródła pozostają na zewnątrz organizmu. Pozostałe dwa – promieniowanie alfa i beta – są biologicznie niebezpieczne tylko po wprowadzeniu ich źródeł do wnętrza organizmu.

Dawkę promieniowania, jaką otrzymuje napromieniovana materia, mierzy się ilością energii, którą przekazuje promieniowanie jej jednostce masy. Jeżeli 1 kg napromieniovanej materii otrzymuje od promieniowania 1 J (dżul) energii (przede wszystkim w postaci jonizacji atomów), mówi się, że dostała ona dawkę 1 Gy (greja). Ponieważ jednak te same dawki otrzymane w formie różnych rodzajów promieniowania jonizującego powodują różne skutki biologiczne, wprowadza się pojęcie dawki równoważnej (czyli biologicznej) mierzonej w sivertach (Sv). W przypadku promieniowania gamma i beta dawce energetycznej 1 Gy odpowiada

⁹ Najpoważniejsze zagrożenie stanowi istotny wzrost ryzyka zachorowania na raka tarczycy, zwłaszcza u dzieci i młodzieży.

¹⁰ T. Mayer-Kuckuk, op. cit.

dawka równoważna ok. 1 Sv¹¹, w przypadku promieniowania alfa 1 Gy odpowiada 20 Sv, a w przypadku neutronów 1 Gy to od 2 do 20 Sv, zależnie od ich energii¹².

W normalnych warunkach przeciętny mieszkaniec półkuli północnej dostaje w ciągu roku dawkę promieniowania ok. 2,5 mSv (milisivertów) z różnych źródeł naturalnych oraz ok. 0,5 mSv ze źródeł sztucznych, przede wszystkim przy okazji diagnostyki medycznej lub terapii z użyciem promieniowania jonizującego. Na tę średnią składają się dawki otrzymywane ze źródeł naturalnych: promieniowania kosmicznego, promieniowania gamma emitowanego przez skorupę ziemską i wdechane radonu. W rzeczywistości dawka otrzymywana ze źródeł naturalnych od miejsca do miejsca zmienia się w przedziale od ok. 1 do ponad 10 mSv rocznie.

Dawki pochodzące ze źródeł sztucznych, a przede wszystkim związane z medycyną radiacyjną, mogą wahać się od zera u osób niepoddawanych promieniowaniu do kilku mSv u osób poddawanych np. radioterapii. Roczną dawkę otrzymywaną przez mieszkańca półkuli północnej ze strony źródeł pochodzących od skażenia promieniotwórczego, pozostałego po katastrofie w Czarnobylu, ocenia się na 0,002 mSv, przy 0,04 mSv bezpośrednio po katastrofie, z wyłączeniem, rzecz jasna, bezpośredniego otoczenia elektrowni rozciągającego się wokół niej na kilkadziesiąt kilometrów.

W niektórych regionach Ziemi roczna dawka może sięgać kilkunastu milisivertów u osób stykających się z promieniowaniem jonizacyjnym w ramach procedur medycznych. Przy takich dawkach nie stwierdza się ubytków zdrowia, które można by jednoznacznie powiązać z napromieniowaniem. Takie związki jest trudno wskazać również dla dawek sporo większych, sięgających nawet 200 mSv, które jednak mogą otrzymać jedynie osoby narażone na nadzwyczajny kontakt z promieniowaniem jonizującym. Przy dawkach przekraczających 200 mSv obserwuje się zmiany chorobowe, które można niemal z pewnością związać z faktem napromieniowania. Przy dawkach powyżej 1 Sv typowe stają się objawy ostrej choroby popromiennej. Dawka przekraczająca 5 Sv, otrzymana w czasie nie dłuższym niż 5 godzin, jest najczęściej dawką śmiertelną.

Należy dodać, że konsekwencje zdrowotne dużych dawek, powyżej 500 mSv, nie budzą żadnych wątpliwości. Co do szkodliwości dawek mniejszych, a na pewno niższych niż 200 mSv, opinie naukowców są podzielone. Zalecenia przyjęte przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) i stanowiące podstawę dla regulacji w krajach rozwiniętych technologicznie bazują na tzw. bezprogowym modelu li-

¹¹ 1 Gy jest równy dokładnie 1 Sv w przypadku promieniowania rentgenowskiego o energii kwantów równej 200 keV. Ale dla promieniowania gamma współczynnik przekształcający dawkę w dawkę równoważną niewiele się od tego różni.

¹² T. Mayer-Kuckuk, op. cit.

niowym (*linear no threshold* – LNT). W bezprogowym modelu liniowym zakłada się, że prawdopodobieństwo zachorowania na chorobę nowotworową w wyniku dodatkowego napromieniowania zależy liniowo od (czyli jest wprost proporcjonalne do) dawki, a jego wielkość dla małych dawek można określić przez ekstrapolację danych dotyczących osób, które otrzymały duże dawki. W ramach takiego modelu nie ma dawki nieszkodliwej, choć określa się tzw. indywidualne dawki graniczne, wynoszące obecnie 1 mSv/rok dla ogółu ludności, a 20 mSv/rok dla osób. Poza tym obowiązuje zasada rozsądnej minimalizacji dawki (*as low as reasonably achievable* – ALARA). Na podstawie liniowego modelu bezprogowego otrzymuje się apokaliptyczne wręcz oszacowania rozmiarów skutków awarii jądrowych.

Bezprogowy model liniowy, choć w pewnym sensie stanowi podstawę oficjalnych regulacji w sferze ochrony przed promieniowaniem, nie ma niepodważalnego oparcia w wynikach badań i nie jest akceptowany przez wszystkich specjalistów. Część naukowców, odwołując się do wyników pewnych badań, twierdzi, że sensowniejsza jest hipoteza horezy radiacyjnej, według której dawki poniżej ok. 200 mSv zmniejszają prawdopodobieństwo zachorowania na raka w porównaniu z prawdopodobieństwem zachorowania wśród osób napromieniowanych znacznie mniejszymi dawkami (jako że osób nienapromieniowanych nie ma wcale)¹³. Na poparcie tej hipotezy przytacza się ujemną korelację między lokalnymi dawkami promieniowania i częstością zachorowań na raka obserwowaną np. w USA oraz analizę „przypadku tajpejskiego”, dotyczącego grupy ok. 10 000 osób mieszkających przez okres od 9 do 20 lat w budynkach, w których stal zbrojeniowa zawierała znaczną domieszkę promieniotwórczego kobaltu 60 (używanego w radioterapii za pomocą tzw. bomb kobaltowych). W wyniku skażenia stali średnia dawka otrzymana przez tych mieszkańców w rozważanym okresie wyniosła ok. 400 mSv (co odpowiada ok. 20 mSv rocznie), a stwierdzono u nich zauważalnie niższą częstość zachorowań na choroby nowotworowe niż wśród wszystkich Tajwańczyków¹⁴. Hipotezę tę uzasadnia się, odwołując się do stymulacji mechanizmów naprawczych na poziomie komórkowym przez małe dawki promieniowania przyjmowane przez dłuższy czas.

¹³ *Dose-effect Relationships and Estimation of the Carcinogenic Effects of Low Doses of Ionizing Radiation* – Oficjalne stanowisko Francuskiej Akademii Nauk i Narodowej Akademii Medycyny z 6 marca 2005, http://ecolo.org/documents/documents_in_english/low_dose-acad-05-short.htm [dostęp: 23 września 2012]; *RADIATION STANDARDS: Scientific Basis Inconclusive, and EPA and NRC Disagreement Continues* – Raport GAO (Government Accountability Office) z 18 lipca 2000, http://www.philrutherford.com/Radiation_Risk/GAO_252_testimony.pdf [dostęp: 23 września 2012]; E. J. Calabrese, *Muller's Nobel Lecture on Dose-response for Ionizing Radiation: Ideology or Science?*, „Archives Toxicology” 2007, No. 81, DOI 10.1007/s00204-011-0728-8.

¹⁴ W. L. Chen et al., *Is Chronic Radiation an Effective Prophylaxis Against Cancer?*, „Journal of American Physicians and Surgeons” 2004, No. 9, s. 6–10.

Bezprogowy model liniowy i horeza radiacyjna są oczywiście nie do pogodzenia – co najmniej jedna z nich jest fałszywa, ale na podstawie dotychczasowych danych trudno byłoby którąkolwiek z nich jednoznacznie odrzucić. Z ostrożności jednak przyjmuje się dość powszechnie hipotezę bezprogowej zależności liniowej.

VI. Lekcje płynące z katastrofy w Fukushima

Katastrofa czarnobylska, od której minęło ponad ćwierć wieku, miała dramatyczne skutki społeczne i zdrowotne dla mieszkańców najbliższych okolic z terenów dzisiejszej Ukrainy, Białorusi i Rosji, u których odnotowano po katastrofie duży wzrost liczby zachorowań na nowotwory tarczycy, oraz dla dziesiątków tysięcy ratowników biorących udział w gaszeniu reaktora, budowie sarkofagu nad jego szczątkami i usuwaniu skażeń na terenie elektrowni. Jednak w porównaniu z alarmistycznymi przepowiedniami, jakie pojawiły się tuż po katastrofie, jej następstwa nie były aż tak daleko idące w skutkach, nawet pośród najbardziej dotkniętych grup. Okazało się też, że jej wpływ na zdrowie mieszkańców terenów odległych o co najmniej paręset kilometrów był i jest znacznie mniejszy niż zakładano w pesymistycznych scenariuszach.

Bezpośrednią przyczyną katastrofy w Czarnobylu było nieodpowiedzialne zachowanie ekipy operatorów, którzy zdecydowali o przeprowadzeniu absolutnie niedozwolonego eksperymentu mającego na celu sprawdzenie, jak zachowa się reaktor, jeśli się przegrzeje. Odpowiedź na to pytanie przyszła w formie bardzo dramatycznej – pożaru rdzenia reaktora, a właściwie bloku grafitowego moderatora i zniszczenia budynku reaktora, który w ten sposób został całkowicie odsłonięty, ponieważ nie miał obudowy bezpieczeństwa, w odróżnieniu od reaktorów wodnociśnieniowych i reaktorów wrzących. Jeśli przy tym uwzględnimy politykę informacyjną i działania ratunkowe zarządzane przez władze bezpośrednio po katastrofie, wyłania się obraz katastrofy o olbrzymich rozmiarach. Gdyby wcześniej wyposażono reaktory tego typu w obudowy bezpieczeństwa, a po wybuchu pożaru reaktora podjęto niezwłoczne i optymalne działania ratunkowe, liczbę poszkodowanych i ogólne skutki katastrofy można byłoby znacząco ograniczyć.

W przypadku katastrofy w elektrowni Fukushima I, pod względem rozmiarów tylko o rząd mniejszej od katastrofy czarnobylskiej, pierwotną przyczyną awarii było tsunami o wysokości ponad dwukrotnie większej niż maksymalna wysokość uwzględniana przy projektowaniu zabezpieczeń elektrowni (być może pewne uszkodzenia zostały spowodowane już wcześniej przez wstrząsy, ale nie ma co do tego pewności). Jednak i w tym przypadku to ludzkie błędy i zaniedbania zmieniły awarię w katastrofę. Zostało to jednoznacznie wyeksponowane w rapor-

cie specjalnej komisji Parlamentu Japonii opublikowanym 5 lipca 2012 r. Raport właściwie stwierdza, że katastrofę elektrowni Fukushima I należy zaliczyć do katastrof spowodowanych przez człowieka, a nie katastrof naturalnych, ponieważ to lekceważenie i świadome ignorowanie istniejących norm bezpieczeństwa ze strony operatora elektrowni – czyli TEPCO – oraz tolerancja ze strony rządowych instytucji kontrolnych dla takiego podejścia sprawiły, że uszkodzenia spowodowane przez siły natury z chwilowej i usuwalnej awarii zmieniły się w bardzo poważną katastrofę przemysłową¹⁵.

Pewne wnioski wydają się oczywiste. Po pierwsze, nie jest dobrym pomysłem budowanie elektrowni jądrowej praktycznie na poziomie morza w okolicy nawiedzanej przez tsunami, a w żadnym wypadku nie można opierać założeń co do możliwych rozmiarów katastrof naturalnych, tak jak w przypadku projektowania elektrowni Fukushima I, na analizie statystycznej, która w istocie pomija zdarzenia bardzo rzadkie, ale możliwe, bo notowane w przeszłości¹⁶. Do tego okazało się, że awaryjne źródła zasilania i źródła wody do chłodzenia reaktorów po zamknięciu były podatne na zniszczenia przez trzęsienie ziemi i/lub tsunami w takim samym stopniu jak źródła używane podczas normalnej eksploatacji elektrowni. Tylko jeden generator napędzany silnikiem Diesla chłodzonym powietrzem przetrwał kataklizm – i to przypadkiem, ponieważ został zdeponowany w położonym wysoko miejscu tylko dlatego, że nie mieścił się w piwnicach, w których przechowywano inne generatory i akumulatory, które zostały zalane przez tsunami (nasuwa się oczywiście tzw. dobre pytanie, dlaczego te piwnice nie były zabezpieczone przed zalaniem). Tylko dzięki temu jednemu generatorowi udało się zamknąć na zimno reaktory nr 5 i 6. W sumie więc, gdyby nie optymizm (a raczej karygodna krótkowzroczność i lekkomyślność) operatora, projektantów i budowniczych, albo nie doszłoby w ogóle do awarii, albo ograniczyłaby się do chwilowej utraty chłodzenia reaktorów. Jest to, paradoksalnie, konstatacja, która budzi nadzieję, że w przyszłości da się podobnych błędów uniknąć.

¹⁵ *The Official Report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*, op. cit.

¹⁶ Wiadomo, że wybrzeża Japonii były nawiedzane przez tsunami o rozmiarach porównywalnych do lub większych od tsunami z 11 marca 2011 r., tyle że zdarzało się to niezmiernie rzadko – w dłuższym przedziale czasu średnio raz na 10 000 lat – co bynajmniej nie znaczy, że odstęp między takimi dwoma kataklizmami musi być właśnie taki, bo w rzeczywistości niezbyt prawdopodobne, ale absolutnie możliwe byłoby wystąpienie takiego kataklizmu dwukrotnie w ciągu jednego roku. Poprawne podejście do statystyki nakazywałoby zatem założenie, że takie rozmiary tsunami trzeba wziąć pod uwagę przy projektowaniu systemu zabezpieczeń (jak już chce się koniecznie mieć elektrownię na plaży). Naiwne projektowanie, bazujące na bezmyślnym wykorzystaniu takich ilościowych charakterystyk jak średnia wysokość i odchylenie standardowe wysokości, obliczonych na podstawie danych statystycznych, prowadzi do decyzji o zabezpieczeniu elektrowni przed tsunami o wysokości niespełna 6 m.

VII. Próba podsumowania

Po katastrofie w elektrowni Fukushima I rozpętała się antynuklearna histeria zarówno w Japonii, jak i poza jej granicami, żeby wspomnieć zapowiedzi kancлера Angeli Merkel o docelowej rezygnacji z elektrowni atomowych w Niemczech (ostatecznie zatwierdzone przez Bundestag, co sprawia, że Niemcy zrezygnowały z energii jądrowej). Przybrała ona większe rozmiary niż po katastrofie w Czarnobylu¹⁷. W jej konsekwencji Japończycy zamknęli wszystkie elektrownie jądrowe do początku maja 2012 r. – po to tylko, by po niespełna dwóch miesiącach powrócić do części z nich ze względu na dziurę w budżecie energetycznym, nie możliwą do załatwienia innymi metodami. Decyzje o rezygnacji z energetyki jądrowej w świecie coraz bardziej głodnym energii są wątpliwym świadectwem rozsądku. Zamiast tego należałoby się skoncentrować na rygorystycznym przestrzeganiu norm bezpieczeństwa i ewentualnym rozwijaniu zabezpieczeń, tak aby żadna katastrofa naturalna o mniejszej skali niż zderzenie z planetoidą ani żadne działanie ludzi o mniejszej skali niż wybuch bomby termojądrowej nie mogły spowodować w elektrowni jądrowej zniszczeń, które poskutkowałyby katastrofą równą Czarnobylowi i Fukushima.

Przy rozważaniach dotyczących zagrożeń związanych z produkcją energii elektrycznej przeciwnicy energetyki jądrowej najczęściej pomijają milczeniem koszty ludzkie bezpośrednie i pośrednie wynikające z bezawaryjnej eksploatacji elektrowni ciepłych. Choć prawie zawsze wierzą oni w bezprogowy model liniowy, ignorują fakt, że w paliwie używanym w takich elektrowniach także znajdują się izotopy promieniotwórcze, które częściowo przedostają się do atmosfery podczas spalania, a częściowo pozostają w hałdach popiołów zajmujących duże obszary wokół elektrowni. Zagrożenia radiacyjne, również według bezprogowego modelu liniowego z tym związane, nie są znaczne, a ich rozmiary są trudne do oszacowania, bo dawki są niewielkie. Są jednak bliższe tym, które otrzymują w przypadku wycieku materiałów radioaktywnych mieszkańcy terenów spoza bezpośredniego otoczenia elektrowni jądrowej, niż otrzymywane w procesie jej normalnej eksploatacji.

Niezależnie od tego bezpośrednie koszty ludzkie związane z eksploatacją elektrowni ciepłych, zwłaszcza węglowych, powinny uwzględniać ofiary śmiertelne

¹⁷ Po tamtej katastrofie Zachód (a wraz z nim Japonia) nie dopuszczał myśli, że w jego elektrowniach jądrowych, zbudowanych na bazie technologii doskonalszych niż używane przez „prymitywnych komuchów”, może się zdarzyć porównywalna awaria, więc i naciski na rezygnację z energii atomowej były słabsze. Był to przejaw arogancji, a w rzeczywistości o ile katastrofa w Czarnobylu jak i jej rozmiary były pochodną największych wad ustroju komunistycznego w wersji radzieckiej, o tyle katastrofa w Fukushima I i jej rozmiary były pochodną istotnych wad kapitalizmu w wydaniu japońskim.

oraz przypadki utraty zdrowia wśród górników. A te są niebagatelne. Jeżeli weźmie się pod uwagę fakt, że od 1986 r., a więc roku katastrofy w Czarnobylu, w Polsce zginęło 130 górników albo że w Chinach w 2006 r. ofiar śmiertelnych wśród górników było niemal 4800, to są to koszty olbrzymie. Należy przy tym dodać, że Japonia ma wyjątkowe „osiągnięcia” w dziedzinie wypadków górniczych – w 1963 r. wskutek wybuchu metanu w kopalni Omuta na Kiusiu zginęło 458 górników, a 555 zostało rannych.

Koszty czerpania energii z innych źródeł są znacznie słabiej oszacowane, ale nie należy się łudzić, że energetyka wodna, wiatrowa itp. są zupełnie nieszkodliwe i bezpieczne. Trudno też oczekiwać, że będą mogły zaspokoić zapotrzebowanie światowej gospodarki na energię. Jedynie osiągnięcie kontroli nad reakcją termojądrową¹⁸ w warunkach ziemskich mogłoby zapewnić dostatek energii bezpiecznej i czystej. Niestety, postępy w tej dziedzinie są widoczne, ale wciąż niewystarczające¹⁹ i w tej sytuacji energia jądrowa jeszcze przez dłuższy czas będzie gospodarce światowej bardzo potrzebna.

¹⁸ Reakcja termojądrowa, zwana też reakcją syntezy, polega na łączeniu jąder lekkich izotopów w jądra izotopów cięższych, np. dwóch jąder deuteru (czyli wodoru 2) albo jądra deuteru i jądra trytu (czyli wodoru 3) w jądro helu. Takie reakcje są jeszcze wydajniejsze energetycznie niż reakcja rozszczepiania, a do tego paliwo jest pod ręką w praktycznie nieograniczonych ilościach. Problem w tym, że zachodzą one przy ogromnych ciśnieniach i temperaturach milionów stopni. Takie warunki panują we wnętrzu gwiazd, które produkują energię w taki właśnie sposób. W warunkach ziemskich wykorzystuje się je w bombach wodorowych, ale reakcji przebiegającej spokojnie, a produkującej dostatecznie dużo energii jeszcze nie udało się uzyskać.

¹⁹ Są realne widoki na uruchomienie pierwszego reaktora termojądrowego, który będzie zasiliał eksperymentalną elektrownię (DEMO) za 3 do 4 dekad, ale na szerszy rozwój energetyki termojądrowej trzeba będzie poczekać kolejnych kilkadziesiąt lat. Zob. K. Ikeda, *Iter on the Road to Fusion Energy*, „Nuclear Fusion” 2010, Vol. 50, 014002.