

URSZULA GUZIK, DANUTA WOJCIESZYŃSKA

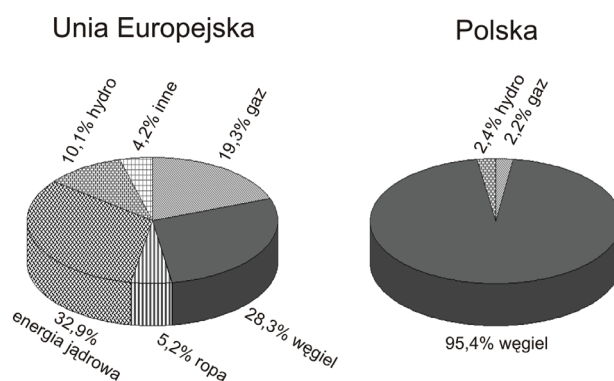
Energetyka jądrowa – zagłada czy zachowanie świata?

Wprowadzenie

W czasie tworzenia się Układu Słonecznego prawie 5 mld lat temu w pyłe gwiazdowym krążyła ogromna ilość nuklidów promieniotwórczych, z których większość uległa rozpadowi, tworząc izotopy stabilne, będące obecnie podstawowym składnikiem naszego układu planetarnego. Pozostałe radionuklidy, których czas połowicznego rozpadu jest zbliżony lub dłuższy od wieku Ziemi, są obecnie elementami składowymi skorupy ziemskiej i stanowią naturalne źródło promieniowania jonizującego. Źródłem takim jest również Kosmos, z którego do atmosfery ziemskiej emitowane jest promieniowanie gamma, neutronowe i inne typy promieniowania korpuskularnego. Ze względu na to, że cząstki promieniowania kosmicznego najczęściej nie są elektrycznie obojętne, ich ruch zależy od pola magnetycznego Ziemi. Z danych literaturowych wiadomo, iż na półkuli północnej powyżej 55° szerokości geograficznej w ciągu godziny na każdy cm^2 pada między innymi 600 cząstek α . Wysokie energie cząstek promieniowania kosmicznego ulegają wytracaniu w wyniku zderzeń z cząstkami budującymi atmosferę Ziemi. Szacuje się, że łączna dawka docierającego do Ziemi promieniowania kosmicznego wynosi od 0,3 do 0,6 mSv [3]. Naturalne promieniowanie jonizujące nie wzbudza zazwyczaj żadnych kontrowersji w społeczeństwie, które towarzyszą jednak promieniowaniu jonizującemu pochodzenia antropogenicznego, pomimo iż ich natura fizyczna i oddziaływanie na organizmy żywe pozostają takie same. Szacuje się, że człowiek nienarażony zawodowo na zwiększone dawki promieniowania jonizującego, otrzymuje rocznie dawkę promieniowania jonizującego pochodzącego ze źródeł antropogenicznych nieprzekraczającą 1 mSv [7]. Na dawkę tę składa się emisja promieniowania podczas wydobycia i spalania paliw organicznych, wydobycia i przerobu fosforanów, z radiomedycyny, a więc diagnostyki i terapii za pomocą promieni X, radioizotopów i wiązek cząstek naładowanych, z zastosowania promieniowania jonizującego w nauce, w przemyśle i w wielu innych dziedzinach gospodarczych. Największy strach w społeczeństwie wzbudza obszerny kompleks działań związanych z zastosowaniem energii jądrowej. W dobie wzrastającego zapotrze-

Dr Urszula Guzik (email: urszula.guzik@us.edu.pl), dr Danuta Wojcieszńska, Uniwersytet Śląski, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Katedra Biochemii, Katowice

bowania na energię coraz częściej w środkach masowego przekazu ukazywana jest perspektywa wyczerpywania się surowców naturalnych. Pierwszych ocen stanu zasobów naturalnych dokonano w latach 50. dla ropy naftowej w USA. Powstała wówczas teoria Hubberta (Oil Peak), na podstawie której trafnie przewidziano kryzys naftowy lat 70. ubiegłego wieku. Uwspółcześniony model tej teorii stosowany jest do dzisiaj. Według niego maksimum krzywej Hubberta odpowiada zużyciu połowy zasobów naturalnych. Krzywą globalną w tej teorii tworzy suma krzywych cząstkowych określonych dla producentów ropy. Analizując krzywą Hubberta, wiadomo obecnie, że zasoby naturalne świata znajdują się w okolicy szczytu globalnej krzywej, co sugeruje zużycie prawie połowy zasobów naturalnych. Żaden kraj, w tym również Polska, nie może realizować polityki energetycznej w oderwaniu od narastającego globalnego kryzysu energetycznego [1]. W Polsce, w której ponad 94% energii elektrycznej pozyskuje się z elektrowni węglowych, istnieje duża grupa przeciwników energetyki jądrowej (w krajach Europy Zachodniej energia jądrowa pokrywa około 32% energetycznego zapotrzebowania) (ryc. 1).



Ryc.1. Procentowy udział poszczególnych źródeł energii w produkcji energii w Unii Europejskiej i Polsce

Krytycznie należy ocenić argumenty ugrupowań proekologicznych, przeciwnych energetyce jądrowej, wskazujące na możliwość wykorzystania energii słonecznej, wiatru lub wody, gdyż obecnie uzyskiwana energia z elektrowni wodnych waha się w Polsce na poziomie 4 TWh rocznie. Uzyskanie dodatkowych TWh możliwe byłoby jedynie po przeprowadzeniu planowanych inwestycji w dolnym biegu Wisły, jednak szacuje się, że koszt wytwarzania energii elektrycznej z powstałej tam elektrowni byłby zbyt wysoki (10 euroc/kWh) i byłby powyżej opłacalności przyjętej za granicę opłacalności energii ze źródeł naturalnych (8 euroc/kWh) [21]. Według dostępnych opracowań do roku 2025 konieczne jest wybudowanie nowych elektrowni dla pokrycia wzrastającego zapotrzebowania energetycznego, które szacuje się na poziomie 220 TWh rocznie [14]. Po analizie

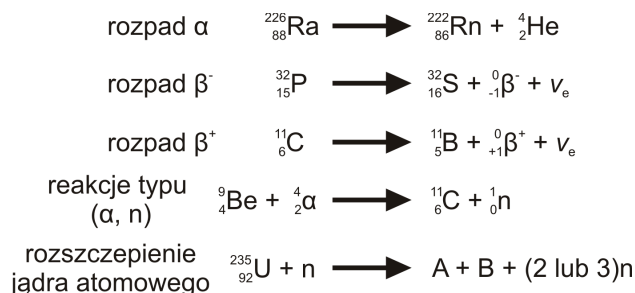
możliwości zarówno ekonomicznych, jak i ekologicznych, rozwiązaniem dla problemów energetycznych Polski jawi się budowa elektrowni jądrowych. Stąd też celem pracy jest przedstawienie obecnego stanu wiedzy na temat energetyki jądrowej, z uwzględnieniem zalet i zagrożeń wynikających z pracy reaktorów, z szerszym uwzględnieniem wpływu promieniowania jonizującego na organizmy żywe.

Rodzaje promieniowania jonizującego

Pomimo iż promieniowanie towarzyszy człowiekowi od zawsze, jego istotę poznano dopiero na przełomie XIX/XX wieku. Pierwsze doniesienia o promieniowaniu przenikliwym pojawiły się w 1895 roku. Wówczas Wilhelm Conrad Roentgen zaobserwował, że elektrony emitowane przez katodę, zderzając się ze ścianką naczynia, powodują emisję promieniowania o dużej przenikliwości. Promieniowanie to zostało nazwane promieniami X ze względu na jego nieznanne pochodzenie. Jednak promieniowanie naturalne, choć występujące powszechnie w przyrodzie, pozostawało nadal niezauważalne. Odkrycie tego promieniowania stało się możliwe dopiero wówczas, gdy zaobserwowano, że niektóre substancje są wrażliwe na jego działanie [19]. Z krążącej anegdoty wiadomo, że do poznania promieniotwórczości przyczyniło się bałaganiarstwo Henryka Becquerela, który w 1896 roku zaobserwował po wywołaniu kliszy fotograficznej, którą trzymał w kieszeni razem z płytką uranową, obecność dziwnych plam sugerujących naświetlenie. W tym samym czasie małżeństwo Curie prowadziło już badania z blendą uranową, podczas których zaobserwowało czernienie kliszy fotograficznej w jej obecności. Równocześnie państwo Curie zwrócili uwagę, że w obecności związków uranu następuje jonizacja powietrza. Wówczas promieniotwórczość wiązano z osobliwą właściwością uranu. Szybko jednak okazało się, że podobnymi cechami odznaczają się również atomy radu, toru, polonu. Po ponad 30 latach od pierwszych odkryć związanych z promieniotwórczością naturalną, Irena i Fryderyk Joliot-Curie dokonali odkrycia, które przyczyniło się do rozwoju techniki jądrowej. W 1934 roku otrzymali oni, bombardując tarczę aluminium jądrami atomu helu, izotop promieniotwórczy fosforu ^{30}P , który nie występuje naturalnie w przyrodzie. Od tej pory datuje się rozwój badań związanych z promieniotwórczością sztuczną [17].

Zgłębiono dokładnie naturę promieniowania i wyróżniono kilka jego typów. Do promieniowania najsilniej jonizującego zalicza się rozpad α , któremu ulegają głównie jądra ciężkie. Polega on na emisji cząstek α , składających się z dwóch protonów i dwóch neutronów (jądro helu) [19]. Przykładem izotopu wysyłającego promieniowanie alfa jest izotop ^{226}Ra , który w wyniku emisji cząstki alfa przemienia się w radon ^{222}Rn (ryc. 2). Jedna cząsteczka alfa może wytworzyć w powietrzu 120 tys. par jonów, gdyż prawie całą swoją energię zużywa na jonizację. Jest to więc promieniowanie silnie pochłaniane przez materię, a więc słabo przenikliwe. Zasięg w powietrzu jest rzędu kilku centymet-

rów, a w tkance ułamków milimetra. Nie oznacza to jednak, że nie stanowi ono zagrożenia. Może być bardzo szkodliwe w przypadku wchłonięcia substancji promieniotwórczej do wnętrza organizmu. Tkanki zostają wówczas poważnie uszkodzone w obszarze oddziaływania promieniowania [6].



Ryc. 2. Typy przemian jądrowych

Innym typem promieniowania jonizującego o charakterze korpuskularnym jest promieniowanie beta. Cząstki beta to elektrony (cząstki β^-) lub pozytony (cząstki β^+), pochodzące z jąder atomowych. Elektron w jądrze powstaje z przemiany neutronu w proton, która następuje wówczas, gdy w nukleonie znajduje się nadmiar neutronów w stosunku do protonów. Przykładem izotopu ulegającego rozpadowi beta minus jest ${}^{32}\text{P}$, który w wyniku przemiany emituje elektron, sam stając się ${}^{32}\text{S}$ (ryc. 2). Przemianie tej towarzyszy emisja antyneutrino. Jest to proces samorzutny, często obserwowany w przyrodzie, gdyż większość jąder ma nadmiar neutronów w stosunku do protonów. Promieniowanie beta, podobnie jak alfa, wywołuje jonizację bezpośrednią, jednak ze względu na to, że cząsteczki beta są mniejsze i posiadają mniejszy ładunek elektryczny wywołują również mniejszą jonizację, natomiast zasięg promieniowania jest znacznie większy. W wyniku oddziaływania promieniowania beta z materią możliwe jest powstawanie promieniowania hamowania, tworzącego się poza jądrem, w wyniku oddziaływania elektronu z polem elektromagnetycznym jądra. Jeżeli w jądrze znajduje się nadmiar protonów, wówczas może dochodzić do przemiany protonu w neutron. Towarzyszy temu emisja cząstek β^+ , czyli pozytonów oraz neutrino. Jądra z nadmiarem protonów nie występują w przyrodzie, stąd emisji pozytonów nie obserwuje się w promieniotwórczości naturalnej. W wyniku reakcji jądrowych może ulegać rozpadowi beta plus ${}^{11}\text{C}$, który w wyniku przemiany przekształca się w ${}^{11}\text{B}$ (ryc. 2). Reakcja ta znalazła zastosowanie w pozytonowej tomografii emisyjnej [19, 22]. W wyniku przemian jądrowych, jądra jednych atomów promieniotwórczych przechodzą w jądra innych atomów. Fryderyk Soddy i Kazimierz Fajans sformułowali prawo pozwalające określić, jakie miejsce zajmie w układzie okresowym pierwiastek powstający w wyniku przemiany jądrowej. Prawo to jest znane pod nazwą prawa przesunięć promieniotwórczych. W wyniku rozpa-

du alfa liczba masowa jądra zmniejsza się o cztery, a liczba atomowa o 2, czyli pierwiastek cofa się o dwa miejsca w układzie okresowym. Przy rozpadzie beta liczba masowa się nie zmienia, a liczba atomowa zwiększa się w rozpadzie beta minus lub zmniejsza w rozpadzie beta plus o jeden. Podczas rozpadu promieniotwórczego obowiązuje prawo zachowania ładunku elektrycznego i liczby masowej. Oznacza to, że w przemianie jądrowej musi się zgadzać bilans protonów i wszystkich nukleonów [19].

Podczas emisji cząstek alfa i beta dochodzi do wzbudzenia jądra. Gdy przechodzi ono z powrotem do stanu podstawowego, dochodzi do emisji kwantu promieniowania elektromagnetycznego zwanego promieniowaniem gamma. Promieniowanie to nie występuje nigdy samodzielnie i jest niezwykle przenikliwe, co powoduje, że może przedostać się nawet przez grubą warstwę betonu. Promieniowanie gamma wywołuje jonizację pośrednią poprzez przekazanie energii elektronom, które dzięki temu mogą wywoływać jonizację ośrodka. Podczas przemiany gamma nie obserwuje się zmiany masy ani ładunku jądra. Zazwyczaj, jeśli nie mamy do czynienia z izomerami jądrowymi, przemiana gamma zachodzi szybko, bo w ciągu około 10^{-13} s. Promieniowanie gamma znajduje obecnie coraz większe zastosowanie, między innymi w badaniu przestrzeni kosmicznej, w materiałoznawstwie, radioterapii [19, 23]. Ponadto promieniowanie to zazwyczaj towarzyszy promieniowaniu neutronowemu.

Promieniowanie neutronowe jest promieniowaniem korpuskularnym polegającym na emisji neutronów. Jedynym źródłem neutronów są reakcje jądrowe. Popularnym źródłem neutronów są reakcje typu alfa n, polegające na bombardowaniu jąder atomów pierwiastków, na przykład berylu, cząstkami alfa. W wyniku takiej przemiany następuje emisja neutronu, natomiast atom berylu przemienia się w węgiel (ryc. 2). Reakcja ta, opisana po raz pierwszy przez Jamesa Chadwicka w 1932 roku, jest do dziś wykorzystywana jako źródło neutronów prędkich.

Źródłem neutronów jest również rozszczepienie jądra atomowego, czyli reakcja jądrowa polegająca na podziale ciężkiego jądra na dwa, rzadziej trzy, fragmenty o porównywalnych masach, zachodząca najczęściej pod wpływem neutronów powolnych. Wśród izotopów występujących naturalnie w przyrodzie tylko jądro ^{235}U ulega w znacznym stopniu samorzutnemu rozszczepieniu jądra do produktów A i B. Najczęściej jądra uranu ulegają rozszczepieniu na fragmenty o liczbach masowych zbliżonych do 94 i 140. Rozszczepieniu towarzyszy duży defekt masy i emisja znacznej ilości energii. Proces ten został po raz pierwszy opisany przez Georgija Flerowa i Konstantina Pietrzaka w 1940 roku. Jednak głównym źródłem neutronów powstających w wyniku rozszczepienia jądra atomowego są tak zwane reakcje jądrowe, w których różne cząstki lub kwanty uderzają w jądro. I tak w wyniku bombardowania jądra ^{235}U neutronem, oprócz dwóch jąder o zbliżonych masach, powstają dwa lub trzy neutrony (ryc. 2). Reakcję tę opisali w 1932 roku Otto Hahn i Fritz Strassmann. W reakcji tej powstaje więcej neutronów niż jest zużywane, w związku z czym istnieje możliwość wystąpienia reakcji łańcuchowej, czyli

takiej reakcji jądrowej, która raz zapoczątkowana będzie dalej zachodzić sama bez doprowadzania z zewnątrz nowych neutronów. W reakcji narastającej lawinowo w każdym procesie rozszczepienia wydziela się energia około 200 MeV, stąd reakcja rozszczepienia stała się źródłem energii. Aby zrównoważyć ilość energii uzyskiwanej z 1 kg ^{235}U (2×10^{10} kcal), należy spalić około $2,8 \times 10^6$ kg wysokiej jakości węgla [17].

Ciemna strona energii jądrowej

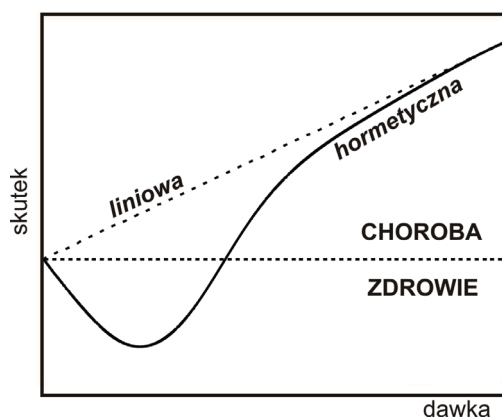
Odkryciu zjawiska rozszczepienia jądra atomowego towarzyszyła napięta sytuacja międzynarodowa, więc nic dziwnego, że dało to początek intensywnym pracom nad konstrukcją bomby wykorzystującej to zjawisko, nazwanej później bombą atomową. Amerykański program budowy bomby jądrowej, pod kryptonimem Projekt Manhattan, rozpoczęto w 1942 roku na polecenie prezydenta F.D. Roosevelta. Pracami nad konstrukcją bomby atomowej w Los Alamos kierował Robert Oppenheimer. Wśród uczestników projektu znalazły się takie osobistości jak Albert Einstein, Enrico Fermi, Niels Bohr, Stanisław Ulam czy Stanisław Mrozowski. Prace prowadzone w Los Alamos odkryte były całkowitą tajemnicą, stąd miasto przez długi czas nie istniało na żadnej mapie. Pierwszy próbny wybuch bomby plutonowej odbył się dnia 16 lipca 1945 roku na poligonie wojskowym w stanie Nowy Meksyk, na pustyni Alamogordo. Siłę tego wybuchu oceniono na 22 kt trotylu. Głównym celem eksperymentu było poznanie skutków wybuchu jądrowego.

W związku z przedłużającą się wojną z Japonią, prezydent USA Harry Truman, po konferencji w Poczdamie, podjął decyzję o ataku atomowym na Japonię. 6 sierpnia 1945 roku o godzinie 8:15 z pokładu superfortecy „Enola Gay” została zrzucona na Hiroszimę, po raz pierwszy w historii, bomba atomowa. Była to bomba uranowa o sile ocenianej na około 12 do 15 kt, zawierająca 60 kg materiału rozszczepialnego, w tym 86% stanowił uran wzbogacony. Bombę tę nazwano „Little Boy”. W wyniku jej wybuchu nad centrum miasta uformował się gigantyczny słup dymu, przybierając kształt grzyba wysokości kilkunastu kilometrów. Szacuje się, że zginęło wtedy od 80 do nawet 140 tys. mieszkańców. Zrzucenie bomby na Hiroszimę nie doprowadziło do kapitulacji Japonii, w związku z czym 9 sierpnia Amerykanie zrzucili drugą bombę atomową o sile 22 kt, tym razem plutonową, nazwaną „Fat Man”. Pomimo iż pierwotnym celem była Kokura, ostatecznie ze względu na pogodę, bombę zrzucono na cel drugorzędny – Nagasaki. Miasto zostało doszczętnie zniszczone w promieniu ok. 1,6 km od miejsca wybuchu, resztę zniszczeń dopełniły pożary na peryferiach miasta. Szacuje się, że eksplozja „Fat Mana” zabiła 40-70 tys. osób, w tym nieznaną liczbę uchodźców z Hiroszimy [4, 11]. Ocena długofalowych skutków ataków jądrowych na Hiroszimę i Nagasaki nie jest jednoznaczna. Szacuje się, że w 50-letnim okresie po wybuchu bomb z około 86,5 tys. ofiar, które przeżyły wybuch bomb i u których określono indywidualną otrzymaną dawkę promieniowania, ponad 10 tys. zmarło na różnego rodzaju guzy łone, natomiast białaczka

była przyczyną śmierci 296 osób. Przeprowadzona na podstawie tych danych analiza statystyczna wykazała liniową zależność między dawką a odpowiedzią organizmu [9].

Obserwowane efekty działania bomb zrzuconych w Japonii były przyczyną rozwoju zainteresowania wpływem promieniowania na organizmy żywe. Obecnie wiadomo, że promieniowanie może oddziaływać na organizmy w dwojaki sposób. Z jednej strony może inicjować różne przemiany chemiczne, z drugiej wpływać na zmiany szybkości reakcji zachodzących w organizmie. Wpływ promieniowania może być zatem bezpośredni, gdy zmiany następują w substancji pochłaniającej promieniowanie, lub pośredni, gdy produkty radiolizy (najczęściej wody) reagują ze związkami biologicznie czynnymi [18]. Ponadto skutki biologiczne promieniowania podzielono na somatyczne i genetyczne. Te pierwsze dodatkowo podzielono na wczesne, do których zaliczono ostrą i przewlekłą chorobę popromienną, oraz miejscowe uszkodzenia skóry, do dalszych natomiast zmętnienie soczewek, aberracje w komórkach somatycznych, niepłodność, nowotwory, zahamowanie wzrostu. Wśród skutków genetycznych uwzględniono zarówno te niedziedziczne, obecne w komórkach somatycznych, jak również dotyczące komórek linii płciowej i przekazywane tym samym następnym pokoleniom. Wiadomo jednak, że mutacje w gametach są najczęściej letalne i stąd nie mogą być dziedziczone [17].

Jonizacja zachodząca pod wpływem promieniowania we wnętrzu komórki może doprowadzić do bezpośredniego uszkodzenia kwasów nukleinowych w jądrze komórkowym poprzez zerwanie jednej lub obu nici łańcucha DNA. Skutkiem takiego uszkodzenia jest zahamowanie replikacji i transkrypcji, prowadzące do inhibicji biosyntezy białek komórkowych [18]. Efektem jonizacji płynów komórkowych jest powstawanie nadtlenu wodoru i innych rodników tlenowych, które mogą powodować uszkodzenie aktywnych biologicznie białek, w tym enzymów, poprzez rozerwanie wiązań elektrostatycznych i van der Waalsa [17]. Może dochodzić również do uszkodzenia błon biologicznych w wyniku reakcji nienasyconych kwasów tłuszczowych z aktywnym tlenem, co prowadzi do peroksydacji lipidów [18]. Ocenia się, że wrażliwość na promieniowanie jonizujące jest cechą zarówno osobniczą, jak i gatunkową. Do niedawna uważano, że każda dawka promieniowania może powodować negatywne skutki w organizmie żywym. Jednak w wyniku badań prowadzonych po awarii w Czarnobylu na osobnikach z różnych stref narażenia na promieniowanie jonizujące zaobserwowano zjawisko hormezy radiacyjnej. Według tej teorii małe dawki promieniowania, które nieznacznie przekraczają tło naturalne, mogą pobudzać system immunologiczny i zmniejszać ryzyko zachorowania na niektóre typy nowotworów, prawdopodobnie przez uruchamianie odpowiednich systemów naprawczych w komórce [18]. Bezdyskusyjny pozostaje fakt proporcjonalności skutków do dawki w granicach wysokich dawek promieniowania (powyżej 200 mSv). Natomiast niskie dawki promieniowania mogą pobudzać układ immunologiczny do reperacji uszkodzeń wywołanych przez czynniki zewnętrzne i wewnętrzne (ryc. 3) [2, 12].



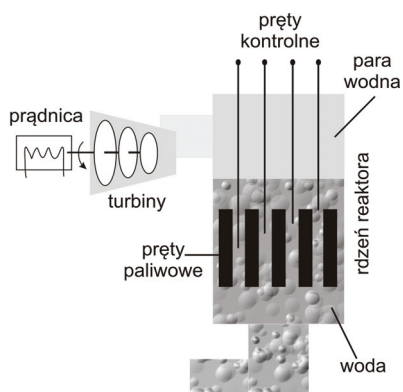
Ryc. 3. Zależność skutku od dawki promieniowania według teorii liniowej (- -) i hormezy (-)

Ocenia się, że dziennie w naszych komórkach dochodzi do około 10^9 uszkodzeń wskutek naturalnych procesów. Uszkodzenia te obejmują zarówno pojedynczą, jak i podwójną helisę DNA. Jednak dzięki procesom naprawczym w komórce dochodzi jedynie do pojedynczych mutacji. W badaniach nad działaniem dawki 1 mSv/rok wykazano, że efekty pochodzące od takiego promieniowania są około 10^6 razy mniejsze od efektów powstałych w wyniku naturalnych uszkodzeń [16]. Udowodniono, że promieniowanie jonizujące wywołuje przy małych dawkach dwa efekty: uszkodzenie DNA oraz stymulację układu naprawczego komórki. Sygnalizacja uszkodzeń możliwa jest przy dawkach rzędu kilku mGy i wzrasta, osiągając maksimum w granicach 0,1-0,2 Gy. Jednocześnie występuje wówczas wzrost tempa uszkodzeń, w związku z czym efekty hormetyczne występują przy niższych dawkach. Gdy dawki przekraczają 0,6 Gy, układ naprawczy przestaje działać i jedyną barierą ochronną staje się apoptoza, czyli programowana śmierć komórki [5, 12, 16]. Obecnie wiadomo, że osoby napromienione małymi dawkami nie tylko lepiej znoszą zaaplikowane później duże dawki promieniowania, ale wytworzony biologiczny system obronny zmniejsza prawdopodobieństwo zachorowania na nowotwory złośliwe i powoduje przedłużenie życia. Stymulowane przez promieniowanie usuwanie uszkodzeń DNA zmniejsza również prawdopodobieństwo powstawania chorób dziedzicznych. Gdyby dawki korzystne dla organizmu były mniejsze od dawek otrzymanych przez człowieka ze źródeł naturalnych, to zjawisko hormezy nie miałoby znaczenia przy określaniu dopuszczalnych dawek granicznych. Wydaje się jednak, że małe dawki w pojęciu hormezy radiacyjnej są znacznie większe od dawek naturalnych [8].

Energetyka jądrowa

Równoległe z pracami nad bombą atomową naukowcy prowadzili próby nad przeprowadzeniem kontrolowanej reakcji rozszczepienia jądra. Po raz pierwszy udało się to zespołowi pod kierunkiem Enrico Fermiego 2 XII 1942 roku w Chicago. Stos atomowy skonstruowano z wykorzystaniem grafitu jako moderatora. Składał się on z około 40 000 bloków grafitowych z około 22 000 otworami z kilkoma tonami uranu.

Obecnie istnieje kilka rodzajów reaktorów atomowych. Różnią się one budową, zastosowanym paliwem, chłodziwem i moderatorem, czyli materiałem spowalniającym neutrony. Podstawowy schemat budowy reaktora atomowego przedstawiono na rycinie 4.



Ryc. 4. Schemat budowy reaktora jądrowego

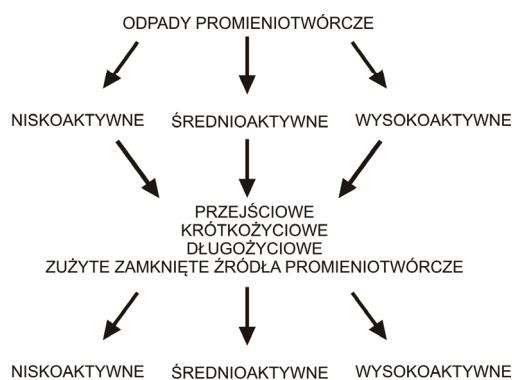
Moderatorami mogą być wodór lekki lub deuter, woda lekka lub ciężka, beryl, grafit oraz pewne związki organiczne (tzw. organiki), na przykład dwufenyl o wysokiej temperaturze wrzenia. W celu odprowadzenia ciepła z rdzenia reaktora stosuje się wodę (zwykłą lub ciężką), ciekłe metale (sód, potas, bizmut), gazy: powietrze, dwutlenek węgla, hel lub wodór [4]. Pierwszą generacją reaktorów jądrowych budowanych w czasie i po drugiej wojnie światowej były reaktory przeznaczone do produkcji plutonu jako materiału wybuchowego bomb atomowych, typu RBMK. Pozwalały one na wymianę paliwa podczas pracy reaktora, gdy miało ono optymalną zawartość ^{239}Pu [8]. Moderatorem w tego typu reaktorach był czysty grafit, co pozwalało na stosowanie w nich, jako paliwa naturalnego lub słabo wzbogaconego uranu, jednocześnie jednak używanie grafitu powodowało niebezpieczeństwo samozapłonu. Drugą charakterystyczną cechą reaktorów RBMK był brak obudowy bezpieczeństwa ze względu na zbyt wielką objętość samego reaktora (7 m wysokości i 12 m szerokości) [10].

W latach 50. rozpoczęto budowę reaktorów nowej generacji dla potrzeb cywilnej energetyki jądrowej. Do najbardziej rozpowszechnionych reaktorów należą reaktory typu PWR (wodno-ciśnieniowe). Są to reaktory typu zbiornikowego, których rdzeń umieszczony jest w basenie wodnym. Woda spełnia zarówno rolę moderatora, jak i chłodziwa. Paliwem w reaktorach PWR są pastylki z dwutlenkiem uranu zamknięte najczęściej w koszulce z cyrkonu. W reaktorach tych zastosowano materiały spełniające wysokie wymagania bezpieczeństwa, stąd pomimo iż europejskie reaktory PWR przepracowały już ponad 6000 reaktorolat, to w ciągu 40 lat ich pracy z ich powodu nie zmarł nikt z załogi elektrowni ani z okolicznej ludności. Przyjmuje się, że przy obecnych założeniach projektowych przegrzanie rdzenia prowadzące do awarii nie może przekraczać jednego zdarzenia na milion lat pracy reaktora [8, 10].

Do często spotykanych na świecie reaktorów jądrowych należą również reaktory z wrzącą wodą typu BWR, w których w odróżnieniu od reaktorów PWR nie woda, lecz para wodna spełnia rolę chłodziwa, jak i tak zwanego czynnika roboczego. Nie jest tutaj konieczna dodatkowa budowa wytwornicy pary, gdyż ta wytwarzana jest już wewnątrz reaktora. Wadą tych reaktorów jest to, iż para poruszająca turbinę może zawierać związki promieniotwórcze, co wpływa na wzrost kosztów utrzymania reaktora, wynikający z potrzeby wzmożonej kontroli radiacyjnej. Ponadto para wodna jest gorszym moderatorem od wody, w związku z czym musi jej być relatywnie więcej niż wody w reaktorach PWR [10].

Obecne zasoby uranu, wystarczające na pracę reaktorów przez najbliższe 60 lat, wymuszą rozwój droższych reaktorów powielających typu FBR, których stosowanie można rozważać w okresie nawet do trzech tysięcy lat. Są to reaktory, które działają w oparciu o reakcje rozszczepienia wywoływane przez neutrony prędkie. Stąd nie wymagają one stosowania specjalnych moderatorów. Dzięki wykorzystaniu neutronów prędkich produkcja ^{239}Pu jest w tych reaktorach znacznie efektywniejsza, gdyż w reakcji tej powstaje większa liczba neutronów. Wiadomo powszechnie, że dla podtrzymania reakcji łańcuchowej wymagany jest jeden neutron, pozostałe zaś mogą być zaangażowane w syntezę ^{239}Pu . Wprowadzenie moderatora w tego typu reaktorach powodowałoby zmniejszenie liczby neutronów prędkich, co wpływałoby niekorzystnie na efektywność pracy reaktora. Również z tego powodu w reaktorach FBR nie stosuje się wody jako chłodziwa. Jego rolę spełniają najczęściej ciekłe metale, na przykład sód. Zaletą stosowania neutronów prędkich jest to, że mogą one wywoływać rozszczepienie wszystkich izotopów uranu i plutonu, natomiast neutrony spowolnione tylko jąder o nieparzystej liczbie masowej. Reaktory FBR zaliczane są obecnie do IV generacji reaktorów, w których standardy bezpieczeństwa i ekonomika będą znacząco przewyższać obowiązujące standardy dla reaktorów lekko wodnych. Ponadto w reaktorach FBR następuje optymalizacja wykorzystania paliwa oraz minimalizacja ilości odpadów [4]. Ta kwestia jest szczególnie istotna dla opinii społecznej.

Większość sądzi, że energetyka jądrowa wprowadza do środowiska szczególnie niebezpieczny nowy, poprzednio niespotykany element. Jest to całkowicie błędne przekonanie, gdyż materiał promieniotwórczy jest naturalnym elementem środowiska przyrodniczego. Jednak ze względu na to, iż w wyniku pracy reaktora dochodzi do nagromadzenia materiału radioaktywnego na stosunkowo małej przestrzeni, istnieje potrzeba prawidłowego zabezpieczenia i magazynowania takich odpadów. Zużyte paliwo zawiera wiele promieniotwórczych nuklidów – jąder powstałych w wyniku rozszczepienia uranu oraz pochodnych uranu po wychwycie radiacyjnym neutronów. Zazwyczaj są to długocząsowe aktywności [8]. Ze względu na aktywność promieniotwórczą odpadów oraz okres połowicznego rozpadu, dokonano klasyfikacji odpadów, którą przedstawiono na rycinie 5.



Ryc. 5. Podział odpadów promieniotwórczych

Idea przechowywania odpadów wymaga spełnienia trzech warunków: maksymalnego zmniejszenia objętości odpadów, zapewnienia odporności na działanie wody oraz przechowywania w sposób niezagrażający środowisku. W związku z czym unieszkodliwienie i przechowywanie odpadów promieniotwórczych zależy będzie od ich stanu skupienia. Odpady gazowe są koncentrowane przez adsorpcję, ciecze zatężane, a odpady stałe spalane, co na ogół 80-krotnie redukuje ich objętość. Przygotowane w ten sposób do składowania odpady nisko- i średnioaktywne są umieszczane w powierzchniowych przechowalnikach, przeważnie betonowych komorach lub fosach.

W czasie pracy reaktora powstaje jednak wiele wysokoaktywnych i długozyciowych odpadów. Muszą one zostać przekształcone w substancje odporne na wpływy chemiczne przez zeszkliwienie lub wbudowanie w materiał ceramiczny, a następnie zamknięte w pojemnikach odpornych na korozję chemiczną. Aby dodatkowo zabezpieczyć odpady radioaktywne przed dostępem wody, otacza się je na wszelki wypadek nieprzepuszczającym wodę materiałem. Tak zabezpieczone odpady umieszcza się w najbardziej stabilnych formacjach geologicznych na głębokości minimum 600 metrów. Choć procedury i technologie stosowane podczas składowania odpadów promieniotwórczych dobierane są ze szczególną starannością, to sam fakt potencjalnej możliwości powstania składowiska odpadów promieniotwórczych zwykle budzi ostry sprzeciw lokalnych społeczności. Społeczeństwo chętnie korzysta z dobrodziejstw płynących z zastosowania metod jądrowych nie tylko w energetyce, ale również w innych dziedzinach (m.in. w medycynie), jednocześnie nie wyrażając przyzwolenia na składowanie odpadów, co wiąże się z obawą o zdrowie i życie, mimo iż w żadnym kraju nie wykazano wzrostu zachorowalności na nowotwory wśród ludności mieszkającej w sąsiedztwie składowiska [4, 8].

Awaryjność elektrowni jądrowych

Poza składowaniem odpadów strach przed elektrowniami jądrowymi rodzi się z przekonania o ich dużej awaryjności i tragicznych w skutkach katastrofach.

W elektrowni jądrowej, podobnie jak w każdym innym obiekcie przemysłowym, może dochodzić do mniejszych lub większych awarii. Jednak większość z nich nie prowadzi do zagrożenia życia i zdrowia okolicznych mieszkańców. Nie można jednak wykluczyć awarii stwarzającej zagrożenie radiologiczne. W historii energetyki jądrowej odnotowano dotychczas kilka poważnych awarii, m.in.: w elektrowni Three Miles Island w USA, pożar wojskowej elektrowni jądrowej w Brown's Ferry, reaktora jądrowego w Windscale w Wielkiej Brytanii oraz najgroźniejsza z nich awaria reaktora w Czarnobylu na Ukrainie [4]. Awaria reaktora w Windscale spowodowała wyemitowanie pewnych materiałów promieniotwórczych do atmosfery, szczególnie izotopu ^{131}I , o aktywności 740 TBq. Doprowadziło to do skażenia terenu na obszarze około kilkuset kilometrów kwadratowych. Spośród 238 osób z grupy ryzyka, około połowa uzyskała dawkę 160 mSv na tarczycę, co stanowi 1/3 dawki dopuszczalnej. Pożar reaktora w elektrowni Brown's Ferry doprowadził do przestoju reaktora w wyniku rozległego uszkodzenia 1600 kabli. Natomiast awaria w elektrowni Three Miles Island doprowadziła do zniszczenia całego reaktora. Nie stwierdzono jednak w przypadku tej awarii żadnego wpływu na zdrowie ludności 30-tysięcznej Pensylwanii, chociaż jej skutki usuwano przez kolejnych dwanaście lat [17].

Najpoważniejszą katastrofą od czasu wykorzystania energii jądrowej przez człowieka była awaria reaktora w Czarnobylu z 25 kwietnia 1986 roku, będąca efektem pożaru i stopienia rdzenia reaktora elektrowni. Awaria ta doprowadziła do skażenia niemal całej Europy. Pyły radioaktywne zostały wyniesione do atmosfery na wysokość 2000 metrów. Początkowo dominowały głównie krótkożyciowe izotopy jodu, później natomiast pojawiły się długożyciowe izotopy strontu, cezu i rutenu [18].

Awaria czwartego reaktora w Czarnobylu była efektem błędu człowieka i rażących zaniedbań konstrukcyjnych. W czarnobylskiej elektrowni pracowały reaktory typu RBMK charakteryzujące się dodatnią reaktywnością dla pary i dużą niestabilnością przy małej mocy. W typowym reaktorze wodno-ciśnieniowym woda pełni nie tylko funkcję chłodziwa, ale i moderatora. W takim reaktorze przyspieszenie reakcji łańcuchowej wywołuje wzrost temperatury, który powoduje wytworzenie większej ilości pary wodnej, co prowadzi do niedostatecznego spowolnienia neutronów i moc reaktora tego typu samoczynnie maleje. Natomiast w reaktorze RBMK moderatorem jest grafit, który skutecznie spowalnia neutrony i tym samym przyspiesza reakcję łańcuchową. Dodatkowo efekt ten potęguje powstająca para wodna. Innymi wadami tego reaktora był brak osłony bezpieczeństwa, chroniącej przed uwalnianiem radioizotopów oraz konstrukcja prętów kontrolnych. Ich końcówki wykonane były z grafitu, w celu zmniejszenia tarcia podczas przechodzenia przez kanały w jądrze reaktora.

W ramach przygotowań do planowanego testu czwartego reaktora w Czarnobylu pod kierownictwem Anatolija Diatłowa wyłączone zostały niektóre z systemów kontroli pracy reaktora, m.in. system automatycznego wyłączania reaktora w razie awarii. W trakcie

eksperymentu, ze względu na niedostateczną ilość energii dopływającej do Kijowa, zażądano jego wstrzymania. Opóźnienie w wykonaniu eksperymentu spowodowało, iż prowadzili go niedoświadczeni pracownicy elektrowni. Zbyt duża redukcja mocy w początkowej fazie eksperymentu spowodowała nadmierne wydzielenie się krótkożyłowego izotopu ^{135}Xe , który silnie pochłania neutrony. Podczas próby podniesienia mocy reaktora rozpoczęto procedurę usuwania prętów kontrolnych do pozycji znacznie przekraczającej przyjęte normy. Po podwyższeniu mocy reaktora zwiększono obieg wody, co doprowadziło do ponownego spadku mocy reaktora. Zrekompensowano to dalszym wysunięciem prętów kontrolnych, co doprowadziło do skrajnie niestabilnego i niekontrolowanego stanu reaktora. Po wyłączeniu turbiny przepływ wody chłodzącej zaczął maleć, a wzrosła produkcja pary. Dodatnia reaktywność dla pary spowodowała wzrost promieniowania, a co za tym idzie – temperatury. Wzrost mocy i temperatury reaktora nastąpił lawinowo. Dodatkowo, ze względu na budowę prętów kontrolnych, ich powolne opuszczanie nie doprowadziło do oczekiwanego spadku aktywności reaktora, a wręcz przeciwnie, przyspieszyło reakcję łańcuchową. Przegrzanie rdzenia sprawiło, że kanały paliwowe popękały, blokując pręty kontrolne. W konsekwencji tego doszło do rozerwania rur z wodą chłodzącą, a dalszy wzrost temperatury doprowadził do stopienia paliwa. Wzrost ciśnienia znajdującej się w reaktorze pary wodnej doprowadził do pierwszej eksplozji. Kompletnie zniszczony rdzeń reaktora o bardzo wysokiej temperaturze wszedł w kontakt z chłodziwem, co doprowadziło do jego radiolizy i termolizy, a powstała mieszanina piorunująca eksplodowała, prowadząc do całkowitego zniszczenia budynku czwartego reaktora. Kontakt bloków grafitowych z powietrzem spowodował ich zapłon i uwolnienie do atmosfery izotopów promieniotwórczych. Większość z 211 prętów kontrolujących pracę rdzenia reaktora stopiła się. Poziom promieniowania w najbardziej dotkniętych katastrofą częściach budynku reaktora ocenia się na 5,6 rentgena na sekundę (R/s). Dawka śmiertelna wynosi około 100 rentgenów na godzinę. Oznacza to, że niektórzy pracownicy przyjęli śmiertelną dawkę promieniowania w ciągu kilku minut [4, 15]. Najnowszy raport Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) podaje, że 134 pracowników elektrowni w Czarnobylu i członków ekip ratowniczych zostało narażonych na działanie bardzo wysokich dawek promieniowania jonizującego. Rozwinęła się u nich ostra choroba popromienna. Ze względu na skażenie pyłem promieniotwórczym, w promieniu 10 km od elektrowni utworzono strefę „szczególnego zagrożenia”, a w promieniu 30 km strefę „o najwyższym stopniu skażenia” [15]. W 1990 roku powstał specjalny raport Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, w którym zostały opublikowane wyniki badań dotyczących skutków wypadku w Czarnobylu. Przedstawione w nim wnioski były zaskakujące dla opinii publicznej. Między innymi uznano, że powstałe szkody przeszacowano, co powodowało niepotrzebne obawy i frustracje miejscowej ludności [18].

Podsumowanie

Energetyka jądrowa pokrywa obecnie około 5,5% całkowitego światowego zapotrzebowania na energię pierwotną, a 16% na elektryczną. Obecnie najczęściej elektrowni atomowych budowanych jest w krajach Dalekiego Wschodu, gdyż w Europie Zachodniej i Ameryce Północnej w konsekwencji awarii w Czarnobylu spadło społeczne poparcie dla energetyki jądrowej. Zaskakującym jest wrogi stosunek społeczeństwa do energetyki jądrowej, pomimo iż w wyniku jej działalności odnotowano bez porównania mniej ofiar niż w przemyśle węglowym. Równocześnie nie wpływa ona tak negatywnie na środowisko jak tradycyjny przemysł paliwowy. Powstaje zatem pytanie, dlaczego organizacje proekologiczne z wielkim zapędem hamują rozwój energetyki jądrowej, równocześnie nie zwracając uwagi na zagrożenia związane między innymi ze spalaniem i transportem paliw kopalnych. Analizując również awaryjność zakładów przemysłowych i energetycznych, podkreśla się, często przeszacowując, liczbę ofiar i skutki awarii w elektrowniach jądrowych, w tym w Czarnobylu, pomijając jednocześnie ilość ofiar w innych gałęziach przemysłu energetycznego, pomimo iż często były one bardziej tragiczne w skutkach [8]. Do dziś bowiem rzadko kto słyszał o katastrofach zapór wodnych czy o największej katastrofie chemicznej XX wieku, jaka miała miejsce w 1984 roku w Zakładach Chemicznych Union Carbide w Bhopalu w Indiach, gdzie wyciek 40 ton izocyjanku metylu spowodował natychmiastową śmierć 1762 osób, a do 1996 liczba ofiar przekroczyła 15 000. Obrażenia ciała odnotowano u 200 tys. osób i konieczność ewakuacji objęła 400 tys. okolicznych mieszkańców. Liczne ofiary i ich rodziny nie otrzymały żadnych odszkodowań ani możliwości rehabilitacji. Do dziś region Bhopalu jest zapomniany przez inwestorów, a woda tego regionu nadal stanowi zagrożenie dla zdrowia i życia [13].

W Polsce coraz częściej mówi się o konieczności budowy elektrowni jądrowej ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz konieczność wywiązania się z międzynarodowych umów dotyczących zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. W roku 2006 zakończono prace studialne, które obejmowały analizę potrzeby energetyki jądrowej, bezpieczeństwa elektrowni jądrowej nowej generacji, jej lokalizację w Polsce oraz kalkulację ekonomiczną przedsięwzięcia. Za dogodne miejsce do jej budowy uznano między innymi Klempicz i Żarnowiec. Jednak, aby nie powtórzyła się historia budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Żarnowcu, niezbędna jest szeroka akcja uświadamiania społeczeństwa przez kompetentnych specjalistów w dziedzinach związanych z energetyką, z udziałem psychologów i socjologów oraz uwzględnieniem strony etycznej zagadnienia [20].

Literatura

- [1] Bartosik M. *Globalne zasoby energii pierwotnej a kryzys energetyczny*. PAN, Warszawa, 2009.
- [2] Dobrzyński L. *Biologiczne skutki promieniowania jonizującego*. „Postępy Techniki Jądrowej”, 2001, nr 44, s. 14-29.

- [3] Dobrzyński L., Droste E., Trojanowski W., Wołkiewicz R. *Spotkanie z promieniotwórczością*. IPJ-Świerk, Świerk, 2005.
- [4] Dobrzyński L., Strupczewski A. *Energia jądrowa i jej wykorzystanie*. Świerk, 2007.
- [5] Feinendegen L.E., Bond V.P., Sondhaus C.A., *The dual response to low-dose irradiation: induction vs. prevention of DNA damage*. [w:] *Biological effects of low dose radiation*. Yamada T. et al., Elsevier Science B.V., 2000, s. 3-16.
- [6] Gostkowska B., *Fizyczne podstawy ochrony radiologicznej*. CLOR, Warszawa, 1992.
- [7] Gostkowska B., *Ochrona radiologiczna. Wielkości, jednostki i obliczenia*. CLOR, Warszawa, 2005.
- [8] Hrynkiewicz A. *Energia. Wyzwanie XXI wieku*. Wyd. Uniw. Jagiellońskiego, Kraków, 2002.
- [9] Imanaka T. *Casualties and radation dosimetry of the atomic bombings on Hiroshima and Nagasaki*. Springer Netherlands, 2006.
- [10] Kielkiewicz R. *Teoria reaktorów jądrowych*. PWN, Warszawa, 1987.
- [11] Krieger D., *Remembering Hiroshima and Nagasaki*. „Canadian International Youth Letter”, 2003, August, s. 1-15.
- [12] Luckey T.D. *Radiation hormesis overview*. „RSO Magazine”, 1999, nr 8, s. 22-26.
- [13] Meller A. *Bhopal – indyjski Czarnobyl*. „Rzeczpospolita” z dnia 14.12.2009.
- [14] Monitor polski, *Polityka energetyczna Polski do 2025 roku*. 2005.
- [15] Mould R.F. *Chernobyl record. The definitive history of the Chernobyl catastrophe*. IOP Publishing, 2000.
- [16] Pollycove M., Feinendegen L.E. *Radiation-induced versus endogenous DNA damage: possible effect of inducible protective responses in mitigating endogenous damage*. „Human and Experimental Toxicology”, 2003, nr 22, s. 290-306.
- [17] Skłodowska A., Gostkowska B. *Promieniowanie jonizujące a człowiek i środowisko*. Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa, 1994.
- [18] Sobkowski J. *Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna*. Wyd. Adamantan, Warszawa, 2009.
- [19] Sobkowski J., Jelińska-Kazimierczuk M. *Chemia jądrowa*. Wyd. Adamantan, Warszawa, 2006.
- [20] Strupczewski A., Jaworska K., Patrycy A., Saniewski G. *Czemu potrzebujemy energetyki jądrowej w Polsce*. „Biuletyn Miesięczny PSE”, 2007, nr 04/07, s. 4-15.
- [21] Studium BSiPE Energoprojekt Warszawa, *Porównawcza analiza ekonomiczna budowy nowych źródeł energii elektrycznej w Polsce z uwzględnieniem aspektów strategicznych*. 2006.
- [22] Welsh J.S., *Beta Radiation*. „The Oncologist”, 2006, nr 11, s. 181-183.
- [23] Zioc K.-P. *Gamma-ray imaging spectrometry*. „Science & Technology Review”, 1995, October, s. 14-26.

Nuclear power industry – world destruction or preservation?

In this paper problems connected with application of power industry based on fossil fuel and necessity of substitution of them for nuclear power industry were presented. In the first part of publication authors presented basic problems connected with radio decay and characteristic of different kinds of radiation and its influence on organisms. History of nuclear energy development in military industry and also in peaceful aims was also showed. Authors described nuclear reactor with special taking their safety and storage of radioactive waste into consideration. Authors paid attention to negative consequences of nuclear accident in Czarnobyl on social receipt problems of nuclear power industry in Poland and in the world.

Key words: nuclear power industry, reactor, radiation

