

BEZPIECZEŃSTWO ELEKTROWNI
JĄDROWYCH W KONTEKŚCIE ZAGROŻEŃ
RADIACYJNYCH –
ASPEKTY TEORETYCZNE

SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS IN THE CONTEXT
OF RADIOACTIVE HAZARDS – THEORETICAL ASPECTS

MACIEJ ZAORSKI
Akademia Pomorska w Słupsku

ABSTRACT

The development and construction of the first nuclear power plants became the basis for the emergence of a new branch of the economy, an economy based on the use of radioactive means. Threats of a radiological nature generated by this new qualitative branch of the economy are not related solely to the operation of the nuclear power plant. Transport, decontamination or the process of recovering spent nuclear fuel for reuse in special reactors are also a source of potential threats. And these hazards do not only apply to persons working in nuclear power plants or having contact with nuclear fuel. They also affect the security of the population in a wider scope, becoming the subject of interest for specialists dealing with common security. The aim of the article is an attempt to systematize and approximate the issue of radiation hazards related to the construction and operation of nuclear power plants. The tragedies of 1986 in the USSR and 2011 in Japan show the magnitude of losses and human suffering in the event of a radiation event with signs of a catastrophe. In article, author explained the concept and the essence of radiation hazards, including

the risk assessment of this type of threats in Poland, presented the general principles of employee protection and defense against failures used in nuclear power plants, as well as the concept of the so-called defense in depth.

Keywords: safety, radiation doses, dosimetry, nuclear energy, defense in depth

ABSTRAKT

Rozwój i budowa pierwszych elektrowni jądrowych stały się podstawą do powstania nowej gałęzi gospodarki, gospodarki opartej na wykorzystaniu środków promieniotwórczych. Zagrożenia o charakterze radiologicznym, jakie generuje ta nowa jakościowo gałąź gospodarki nie są związane wyłącznie z pracą elektrowni jądrowej. Przewóz, dekontaminacja czy proces odzyskiwania zużytego paliwa jądrowego do ponownego użycia w specjalnych reaktorach, stają się również źródłem potencjalnych zagrożeń. A zagrożenia te nie dotyczą wyłącznie osób pracujących w elektrowniach jądrowych, czy mających styczność z paliwem jądrowym. Wpływają także na bezpieczeństwo ludności w szerszym zakresie stając się przez to przedmiotem zainteresowania specjalistów zajmujących się bezpieczeństwem powszechnym. Celem artykułu jest próba usystematyzowania i przybliżenia problematyki zagrożeń radiacyjnych związanych z budową i funkcjonowaniem elektrowni jądrowych. Tragedie z 1986 roku w ZSRR i z 2011 w Japonii pokazują ogrom strat i ludzkich cierpień w przypadku zaistnienia zdarzeń o charakterze radiacyjnym noszących znamiona katastrofy. W artykule, jego autor wyjaśnił pojęcie i istotę zagrożeń radiacyjnych, z uwzględnieniem oceny ryzyka tego typu zagrożeń w Polsce, zaprezentował ogólne zasady ochrony pracowników i obrony przed awariami stosowanymi w elektrowniach jądrowych, a także koncepcję tzw. obrony w głąb.

Słowa kluczowe: defense in depth, dosimetry, nuclear energy, radiation, radiation doses, safety

WSTĘP

Spółeczna świadomość zagrożenia promieniowaniem jonizującym wiąże się przede wszystkim z wykorzystaniem energii jądrowej do celów wojskowych, energetycznych lub medycznych. Nawet dziś nie wszyscy zdają sobie sprawę, że człowiek zawsze i wszędzie poddawany jest działaniu

promieniowania jonizującego, a udział naturalnych źródeł promieniowania jonizującego sięga 3/4 dawki, jaką otrzymuje przeciętny Polak¹. Nie mniej jednak obecnie, gdy ryzyko zagrożenia konfliktem nuklearnym jest niewielkie, a naturalne promieniowanie nie przekracza dopuszczalnych norm, największe zagrożenie promieniowaniem jonizującym niesie ze sobą rozwój energetyki jądrowej.

Energetyka jądrowa jest istotnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego państwa, głównie w aspekcie niezakłóconego dostarczania energii i uniezależnienia się od dostawców zewnętrznych. Rozwój energetyki jądrowej wiąże się jednak z możliwością pojawienia się zagrożeń radiacyjnych, będących skutkiem awarii czy wycieku materiałów radioaktywnych. Jednak wraz z rozwojem energetyki jądrowej w przestrzeni publicznej mogą pojawić się nowe zagrożenia związane z koniecznością przetransportowania paliwa lub zużytych materiałów oraz związane ze składowaniem materiałów promieniotwórczych (paliwa jądrowego). Energetyka jądrowa jest związana zatem z całym, złożonym procesem opartym na wykorzystaniu materiałów radioaktywnych i zagospodarowaniem odpadów pochodzących z procesu rozszczepienia lub syntezy pierwiastków promieniotwórczych, procesach zachodzących w kontrolowanych przez człowieka warunkach, nie mniej jednak procesach, które mogą być potencjalnie źródłem zdarzeń radiacyjnych, przekładających się na bezpieczeństwo powszechne.

Systemy ochrony przed promieniowaniem skoncentrowane są na zabezpieczeniu infrastruktury oraz podejmowaniu przedsięwzięć prawnych, technologicznych i organizacyjnych mających na celu niedopuszczenie do incydentów radiologicznych, a w przypadku ich wystąpienia do ograniczenia zasięgu i czasu trwania tego typu działań, a także minimalizacji ich skutków dla otoczenia przyrodniczego, a przede wszystkim dla ludzi. Warto zatem na te zagrożenia zwrócić szczególną uwagę głównie w sytuacji, gdy Polska przystępuje do programu budowy elektrowni jądrowej na swoim terytorium.

¹ Dawka roczna skuteczna promieniowania jonizującego otrzymana przez statystycznego mieszkańca Polski w 2016 roku wynosiła 3.55 mSv, z kolei ze źródeł naturalnych otrzymywane jest 2.432 mSv czyli około 69% otrzymywanej dawki skutecznej. Reszta tj. ok 31% otrzymywana jest ze źródeł sztucznych jak np. diagnostyka medyczna. Informacja za *Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku*, Warszawa 2017, s. 56 – 57.

ZAGROŻENIA RADIACYJNE – POJĘCIE I ISTOTA

W ujęciu leksykalnym, bardzo zresztą rozpowszechnionym, bezpieczeństwo traktowane jest często jako synonim braku zagrożenia. Ta powszechność i prostota w postrzeganiu bezpieczeństwa przez pryzmat zagrożeń powodują, że w większości definicji, czy to bezpieczeństwa w znaczeniu ogólnym, czy też innych jego kategorii, pojawia się zagrożenie jako czynnik sprawczy działań podejmowanych przez podmiot w celu jego usunięcia. Jest to naturalna konsekwencja tego, że świat jest i zawsze był dla człowieka źródłem niebezpieczeństw, a nieufność wobec niego i tego, co może nam przynieść każdy kolejny dzień, pełni funkcje naturalnego mechanizmu obronnego, bez którego żaden podmiot nie byłby w stanie przetrwać w otaczającej go rzeczywistości².

Promieniowane jonizujące wpisuje się na listę zagrożeń bezpieczeństwa powszechnego³, a jest ona bardzo długa. „Zaliczamy do nich zarówno destrukcyjne działania, których sprawcą jest człowiek, jak i czynniki destrukcyjne będące efektem oddziaływania sił natury⁴”. Zagrożenia radiacyjne mają charakter złożony i ze względu na ich źródło i czynnik sprawczy, można je zaliczyć zarówno do pierwszej, jak i drugiej kategorii zagrożeń.

Zagrożenia radiacyjne można zdefiniować jako zagrożenia związane z materiałem jądrowym, źródłem promieniowania jonizującego, odpadem promieniotwórczym lub innymi substancjami promieniotwórczymi, stwarzające możliwość przekroczenia wartości granicznych dawek promieniowania jonizującego określonych w obowiązujących przepisach, a więc wymagające podjęcia pilnych działań w celu ochrony ludności⁵.

² Zob. A. Urbanek, *Wyzwania i zagrożenia bezpieczeństwa*, [w:] A. Urbanek (red.), *Wybrane problemy bezpieczeństwa. Teoria. Strategia. System*, Słupsk 2012, s. 71.

³ Szerzej na temat klasyfikacji zagrożeń bezpieczeństwa powszechnego: A. Urbanek, *Tsunami – zagrożenie ekologiczne bezpieczeństwa powszechnego*, „*Studia nad bezpieczeństwem*”, Zeszyt nr 2/2017, Słupsk 2017, s. 19–21.

⁴ *Ibidem*, s. 19.

⁵ Por. *Krajowy Plan Zarządzania Kryzysowego*, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2012, s. 29.

TAB. 1. SKUTKI ZDARZEŃ RADIACYJNYCH WEDŁUG RZĄDOWEGO CENTRUM BEZPIECZEŃSTWA

| Obiekt zagrożenia | | |
|---|--|---|
| Ludność | Gospodarka/mienie/infrastruktura | Środowisko |
| <ul style="list-style-type: none"> - bezpośrednie zagrożenie dla życia i zdrowia osób - negatywny wpływ na zdrowie psychiczne ludzi - okresowe utrudnienia w przemieszczaniu się - brak dostępu do żywności i wody pitnej - możliwa konieczność ewakuacji ludności - izolacja znacznych terenów - możliwość paniki wśród ludności oraz zagrożenie zakłócenia porządku publicznego. | <p>Gospodarka/mienie/infrastruktura</p> <ul style="list-style-type: none"> - zniszczenie hodowli i zbiorów w gospodarstwach rolnych; - osłabienie ekonomiczne przemysłu spożywczego - wzrost cen produktów żywnościowych - wyłata uszkodowań dla przedsiębiorców zajmujących się przetwarzaniem i sprzedażą żywności - możliwe utrudnienia w funkcjonowaniu infrastruktury komunalnej i transportowej - możliwość skażenia źródeł wody lub sieci wodociągowej - możliwe długoterminowe zablokowanie szlaków/węzłów komunikacyjnych powodujące uniemożliwienie lub utrudnienia w transporcie. - negatywne skutki o charakterze odłożonym w postaci spadku poziomu ruchu turystycznego w regionie po stwierdzeniu zwiększonego poziomu skażenia promieniotwórczego - blokada w obrębie handlu wewnątrznajmniejszego i eksportu. | <p>Środowisko</p> <ul style="list-style-type: none"> - możliwość skażenia gleby, powietrza, wód powierzchniowych |

Źródło: Ocena ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego. Raport o zagrożeniach bezpieczeństwa narodowego, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2013, s. 50.

TAB.2. WYKAZ CZYNNYCH I NIECZYNNYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH W ODLEGŁOŚCI DO 300 KILOMETRÓW OD GRANIC POLSKI.

| L.p. | Nazwa, | Potoczna nazwa | Kraj | Najbliższe miasto | Stan operacyjny EJ | Ilość poszczególnych typów reaktorów | Łączna liczba MWe | Ilość reaktorów pracujących | Ilość reaktorów niepracujących |
|------|---------------------------------|----------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. | Równeńska Elektrownia Jądrowa | Ej Równe | Ukraina | Równe | czynna | 2xWWER-440, 2xWWER-1000 | 2835 | 4 | 0 |
| 2. | Chmielnicka Elektrownia Jądrowa | Ej Chmielnicki | Ukraina | Niecsyzyn | czynna | 2xWWER-1000 | 2000 | 2 | 0 |
| 3. | Elektrownia jądrowa Mochowce | Ej Mochowce | Słowacja | Nitra/ Levice | czynna | 2xWWER-440 | 940 | 2 | 0 |
| 4. | Elektrownia jądrowa Bohunice | Ej Bohunice | Słowacja | Jaslovske Bohunice | czynna | 2xWWER-440 | 1100 | 2 | 2 |
| 5. | Elektrownia jądrowa Paks | Ej Paks | Węgry | Paks | czynna | 4xWWER-440 | 2000 | 4 | 0 |
| 6. | Elektrownia Jądrowa Temelin | Ej Temelin | Czechy | Temelin | czynna | 2xWWER-1000 | 2160 | 2 | 0 |

| L.p. | Nazwa, | Potoczna nazwa | Kraj | Najbliższe miasto | Stan operacyjny EJ | Ilość poszczególnych typów reaktorów | Łączna liczba MWe | Ilość reaktorów pracujących | Ilość reaktorów niepracujących |
|------|--------------------------------|-----------------------|---------|-------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 7. | Elektrownia Jądrowa Dukovany | EJ Dukovany | Czechy | Dukovany | czynna | 4xWWER-440 | 2000 | 4 | 0 |
| 8. | Elektrownia jądrowa Oskarshamn | OKG | Szwecja | Figeholm | czynna | 1xBWR-1450 | 1450 | 1 | 2 |
| 9. | Elektrownia jądrowa Barsebäck | Barsebäck Kraft AB | Szwecja | Barsebäck | nieczynna | 2xBWR-600 | 1200 | 0 | 2 |
| 10. | Elektrownia jądrowa Krümmel | Kernkraftwerk Krümmel | Niemcy | Krümmel | nieczynna | 1xBWR-1402 | 1402 | 0 | 1 |
| 11. | Ignalińska Elektrownia Jądrowa | EJ Ignalin | Litwa | Wisaginia | nieczynna | 2xRBMK-1300 | 2600 | 0 | 2 |

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku oraz <https://www.iaea.org/pris/> (dostęp 30.11.2017)

Głównym źródłem zagrożeń radiacyjnych są⁶:

- awarie elektrowni atomowych o skutkach wykraczających poza teren obiektu spowodowane naruszeniem procedur bezpieczeństwa, katastrofą naturalną, atakiem terrorystycznym itp.;
- zdarzenia radiacyjne spowodowane stosowaniem źródeł promieniotwórczych;
- zdarzenia podczas transportu źródeł promieniotwórczych: wypadek, atak terrorystyczny, nieprzestrzeganie przepisów prawa, występowanie niekorzystnych warunków meteorologicznych, złe zabezpieczenia techniczne;
- nieprawidłowe przechowywanie źródeł promieniotwórczych i odpadów promieniotwórczych.

Skutki zagrożeń radiacyjnych są złożone i dotyczą zarówno ludności, gospodarki, mienia oraz infrastruktury, w tym infrastruktury krytycznej, jak i środowiska. W przypadku ludności zagrażają zarówno zdrowiu, jak i życiu ludzi poprzez wystąpienie objawów choroby popromiennej. Mogą powodować zniszczenie hodowli i zbiorów w gospodarstwach rolnych, skażenie wody w ujęciach i sieciach wodociągowych, zablokowanie szlaków/węzłów komunikacyjnych powodujące z kolei unieruchomienie lub utrudnienia w transporcie. Mogą ponadto wywołać negatywne skutki dla środowiska poprzez skażenia gleby, powietrza i wód powierzchniowych. Negatywne skutki zagrożeń radiacyjnych przedstawia tabela 1.

Głównym czynnikiem sprawczym destrukcyjnego charakteru zagrożeń radiacyjnych jest promieniowanie jonizujące. Promieniowanie jonizujące w ujęciu encyklopedycznym oznacza „promieniowanie elektromagnetyczne (rentgenowskie, γ) i korpuskularne (cząstki α , elektrony, neutrony i in.), które przechodząc przez materię ulega rozpraszaniu lub pochłanianiu, przekazując energię atomom i cząsteczkom ośrodka, przez który przenika (i z którym oddziałuje)”. Z kolei w ujęciu prawnym to promieniowanie składające się z cząstek bezpośrednio lub pośrednio jonizujących albo z obu rodzajów tych cząstek lub fal elektromagnetycznych o długości mniejszej niż 100 nanometrów⁸. Rozróżniamy dwa rodzaje źródeł promieniowania: źródła niezależne lub zależne od działań człowieka⁹.

⁶ *Ocena ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego. Raport o zagrożeniach bezpieczeństwa narodowego*, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2013, s. 49.

⁷ <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/promieniowanie-jonizujace;3962659.html>, (dostęp: 15.11.2017).

⁸ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe, Dz.U.07.42.276 z późn. zm.

⁹ W. Pellowski, *Ochrona radiologiczna z elementami radiometrii*, Wrocław 2013, s. 9-10.

Ze względu na właściwości fizyczne promieniowanie jonizujące można podzielić na wiele sposobów, tj.:

- ze względu na jonizację;
- ze względu na sposób powstania promieniowania;
- ze względu na sposób rozprzestrzeniania;
- ze względu na źródło promieniowania¹⁰.

W organizmach żywych promieniowanie jonizujące, między innymi przez zmiany w cząsteczkach, wywołuje efekty radiacyjne w komórkach. Skutki napromienienia mogą być wczesne – w postaci ostrej choroby popromiennej, lub późne – jak zmiany genetyczne, rak, białaczka. Wrażliwość tkanki na promieniowanie jonizujące wzrasta wraz z liczbą zachodzących w niej podziałów komórkowych i jest tym wyższa, im mniejsze jest zróżnicowanie tkanki. Szczególnie niebezpiecznym dla człowieka zjawiskiem związanym z zagrożeniami radiacyjnymi jest choroba popromienna. Jest to zespół zmian ogólnoustrojowych wywołanych działaniem na organizm promieniowania jonizującego¹¹. Rozróżnia się¹²:

- chorobę popromienną ostrą (jeśli objawy wystąpią w okresie pierwszych dni do 2 tygodni po napromienianiu);
- podostrą (do 4 mies. po ekspozycji);
- przewlekłą (mogącą ujawniać się w odległym czasie po napromienianiu).

Wpływ promieniowania na organizm ludzki stał się przyczynkiem do podjęcia badań i stworzenia kompleksowego systemu mającego na celu ochronę osób pracujących przy eksploatacji reaktorów jądrowych i pracujących ze środkami promieniotwórczymi, a także systemu działań w ramach bezpieczeństwa powszechnego na wypadek wystąpienia zdarzeń związanych z uwolnieniem do środowiska środków promieniotwórczych lub jego pochodnych. Z oceną wpływu promieniowania na organizm człowieka i ochroną przed jego działaniem związane jest pojęcie *dawki promieniowania*¹³. Zwykle się określać *dawkę* jako narażenie na promieniowanie

¹⁰ Ibidem, s. 9-10.

¹¹ <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/popromienna-choroba;3960510.html>, (dostęp: 15.11.2017).

¹² Ibidem.

¹³ Dawka promieniowania – wielkość charakteryzująca promieniowanie wysokoenergetycznego pod względem zdolności do jonizacji lub przekazywania energii. Źródło: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/dawka-promienio-wania;3890927.html>, [dostęp: 15.11.2017].

jonizujące¹⁴. Pojęcie *dawki* jest szerokie i używane jest w różnych kontekstach i przy użyciu pojęć szczegółowych takich jak: *dawka ekspozycyjna*¹⁵, *dawka pochłonięta*¹⁶, *dawka równoważna*¹⁷. Zdarzenie związane z wydośnaniem się do środowiska znacznych ilości środków promieniotwórczych określa się mianem *zdarzenia radiacyjnego*. W Polsce zwykło się określać, że „zdarzeniem radiacyjnym jest sytuacja związana z zagrożeniem wymagająca podjęcia pilnych działań w celu ochrony pracowników lub ludności¹⁸”. W materiałach Rządowego Centrum Bezpieczeństwa definiowane jest w sposób bardziej szczegółowy jako: „wydarzenie na terenie kraju lub poza jego granicami, związane z materiałem jądrowym, źródłem promieniowania jonizującego, odpadem promieniotwórczym lub innymi substancjami promieniotwórczymi, powodujące lub mogące powodować zagrożenie radiacyjne, stwarzające możliwość przekroczenia wartości granicznych dawek promieniowania jonizującego określonych w obowiązujących przepisach, a więc wymagające podjęcia pilnych działań w celu ochrony pracowników lub ludności¹⁹”.

Zagrożenia radiacyjne wiążą się z możliwością wystąpienia awarii w blokach reaktorów w krajach sąsiadujących ze sobą, transporcie środków promieniotwórczych lub zużytych materiałów promieniotwórczych,

¹⁴ W. Gorączko, *Ochrona radiologiczna*, Poznań 2011, s. 77.

¹⁵ Dawka ekspozycyjna – to pojęcie używane w odniesieniu do promieniowania rentgenowskiego (X) i γ , oznacza stosunek sumy ładunków elektrycznych wszystkich jonów jednego znaku, wytworzonych w jednostkowej objętości powietrza w warunkach, gdy wszystkie elektrony uwolnione pod wpływem fotonów promieniowania zostaną w niej całkowicie zatrzymane — do wartości masy tego powietrza; jednostki: C/kg (SI), rentgen. Źródło: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/dawka-ekspozycyjna;3890924.html>, (dostęp: 15.11.2017).

¹⁶ Dawka pochłonięta – energia przekazana przez promieniowanie jonizujące materii o jednostkowej masie; jednostki: grej (Gy), rad; zależy m.in. od energii i rodzaju promieniowania. Źródło: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/dawka-pochlonieta;3890925.html>, (dostęp: 15.11.2017).

¹⁷ Dawka równoważna – wielkość określająca stopień szkodliwości biologicznej promieniowania jonizującego; inaczej iloczyn dawki pochłoniętej i tzw. współczynnika jakości promieniowania (równego 1 dla promieniowania rentgenowskiego (X) i γ , a np. 10 dla szybkich neutronów); jednostki: siwert, Sv (SI), rem. Źródło: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/dawki-pochloniete-j-rownowaznik;3890929.html>, (dostęp: 15.11.2017).

¹⁸ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r., Prawo atomowe, art. 3 ust. 55 (Dz.U. 2001 Nr 3 poz. 18), Strona internetowa Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, dostęp z dnia 5.02.2016 r., http://www.paa.gov.pl/strona-109-zdarzenia_radiacyjne.html.

¹⁹ *Ocena ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego*, op. cit., s. 49.

albo z niewłaściwym ich przechowywaniem. Elektrownie jądrowe są wciąż budowane lub modernizowane. Modernizacja bloków reaktora ma na celu poprawę stanu bezpieczeństwa oraz wydłużenie żywotności pracy reaktora. Potencjalnym źródłem zagrożeń mogą być nie tylko czynne, ale wycofane lub znajdujące się w trakcie likwidacji elektrownie jądrowe. Jest to wynikiem obecności w nich pozostałości paliwa jądrowego, koniecznością jego utylizacji i transportu.

Zagrożenia radiacyjne może generować nie tylko elektrownia jądrowa i związany z nią cały proces technologiczny, ale także urządzenia i miejsca, gdzie źródła promieniowania wykorzystuje się do celów innych, niż wytwarzanie energii, lub je przechowuje. Przykładem takich zdarzeń w przeszłości była m.in. Brazylia, gdzie sprzęt medyczny w porzuconym i opuszczonym budynku zawierał środki promieniotwórcze i Estonia, gdzie z magazynu złodzieje wyciągnęli metal a wraz z nim tzw. koszulki ze środkami promieniotwórczymi. Zatem spektrum potencjalnych zagrożeń radiacyjnych jest szerokie i wynika z wielorakiego użycia środków promieniotwórczych między innymi w medycynie, przemyśle, rolnictwie czy w kulturze, sztuce i archeologii. Nie można zapominać również o tym, że środki promieniotwórcze są używane są powszechnie, często w naszym najbliższym otoczeniu (np. jako czujki dymu, gdzie wykorzystywany jest między innymi izotop ameryku).

Polska nie pozostaje wolna od zagrożeń radiacyjnych, których źródłem jest energetyka jądrowa z uwagi na występowanie w pobliżu jej granic 8 czynnych elektrowni jądrowych usytuowanych na terenie: Czech, Słowacji, Szwecji, Węgier i Ukrainy (zob. ryc. 1). W sumie 23 bloki reaktorów energetycznych o łącznej elektrycznej mocy zainstalowanej brutto ok. 15,5 GWe²⁰. Źródłem zagrożeń radiacyjnych mogą być elektrownie wycofane z eksploatacji. Należą do nich elektrownia jądrowa (EJ) Ignalina (znajdująca się na Litwie), EJ Krümmel (znajdująca się w Niemczech), EJ Bohunice (znajdująca się na Słowacji) oraz EJ Barsebäck i 2 reaktory w EJ Oskarshamm (znajdujące się w Szwecji). Łącznie wycofanych z użytku jest 9 reaktorów o łącznej mocy

²⁰ Czynne reaktory jądrowych to: 14 reaktorów typu WWER – 440, 6 reaktorów typu WWER 1000 oraz reaktory typu BWR. Z powyższego wynika, że w przeważającej części są to reaktory lekkowodne produkcji rosyjskiej, gdzie moderatorem i chłodziwem jest woda. Dane za: *Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku*, Warszawa 2017, s. 38 – 39 oraz <https://www.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>

ok. 7 GWe (zob. tab.2)²¹. Ze zdarzeniami radiacyjnymi w Polsce możemy mieć również do czynienia na przejściach granicznych i szlakach komunikacyjnych, którymi przebiega transport źródeł promieniotwórczych, odpadów lub wypalonego paliwa, a także w obiektach występujących w przemyśle, nauce, służbie zdrowia wykorzystujące źródła promieniowania²².

Ryc. 1. ELEKTROWNIE JĄDROWE ZLOKALIZOWANE W ODLEGŁOŚCI DO 310 KM OD GRANIC POLSKI



Źródło: rycina dostępna na stronie internetowej Państwowa Agencja Atomistyki: http://www.paa.gov.pl/strona-70-objekty_jadrowe_i_skladowiska_odpadow.html, (dostęp: 10.11.2017).

Rządowe Centrum Bezpieczeństwa ocenia, że ryzyko wystąpienia zagrożeń radiacyjnych, w tym związanych z energetyką jądrową jest w Polsce stosunkowo niewielkie, jakkolwiek może ono wzrosnąć w sytuacji powsta-

²¹ *Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku*, Warszawa 2017, s. 39.

²² W 2016 roku odbył się tylko 1 transport wypalonego paliwa na terenie Polski. Odbył się on do Rosji w ramach Programu Redukcji Zagrożeń Globalnych (GTRI – Global Threat Reduction Initiative). Program ma za zadanie przejście z wykorzystywania w reaktorach badawczych paliwa wysokowzbożonego na paliwo niskowzbożone. *Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku*, Warszawa 2017, s. 46.

nia elektrowni jądrowej na terytorium naszego kraju. Awaria elektrowni jądrowej w Czarnobylu uświadomiła nam bowiem, że zjawiska tego nie należy bagatelizować, szczególnie w strefach, gdzie poziom skażenia może być wysoki, a zatem na obszarach znajdujących się w pobliżu elektrowni. Ocenę ryzyka zdarzeń radiacyjnych z Polsce zestawiono na ryc. 2.

Ryc. 2. RYZYKO WYSTĄPIENIA ZJAWISK RADIACYJNYCH W POLSCE

| | | | | | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|
| skutki | 5 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| | 3 | | x | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 1 | | | | | |
| | | A | B | C | D | E |
| prawdopodobieństwo | | | | | | |

Źródło: Ocena ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego. Raport o zagrożeniach bezpieczeństwa narodowego, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2013, s. 49.

Ryzyko zdarzeń radiacyjnych w Polsce jest na poziomie średnim. Jego prawdopodobieństwo ocenia się jako możliwe, co oznacza, że może zdarzyć się w określonym czasie, że tego typu zdarzenia są udokumentowane lub częściowo przekazywane w formie ustnej i jest pewna szansa, powód, czy też urządzenia powodujące, że zdarzenie może wystąpić. Może zdarzyć się raz na dwadzieścia lat. Skutki tego typu zdarzeń ocenia się jako małe. W przypadku ludzi przewiduje się: małą liczbę rannych i brak ofiar śmiertelnych; wymagana będzie pierwsza pomoc; konieczne będzie przemieszczenia ludzi. W przypadku mienia: wystąpią pewne zniszczenia oraz utrudnienia (nie dłużej niż 24 godziny), możliwe są niewielkie straty finansowe, przez co nie wymagane będą dodatkowe środki.

SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA STOSOWANE W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Elektrownie jądrowe są potencjalnym źródłem zagrożeń radiacyjnych. Nie mniej jednak w celu minimalizacji tego typu zagrożeń stosuje się w nich

różnego rodzaju zabezpieczenia techniczne i procedury, które mają zapobiegać ich powstawaniu i minimalizować ich skutki.

Aby zminimalizować skutki zdarzeń radiacyjnych w aktualnie funkcjonujących elektrowniach wprowadzono środki ochronne mające na celu zapewnienie ochrony radiologicznej w trakcie trwania użytkowania urządzeń oraz środki zapewniające ochronę przed uwolnieniem substancji promieniotwórczych w wyniku awarii. Środki te uniemożliwiają oddziaływanie promieniowania z materią oraz utrzymują poziom wartości granicznych dawek promieniowania na jak najniższym poziomie w przypadku ekspozycji środków promieniotwórczych²³. Działaniami umożliwiającymi podjęcie środków wyżej wymienionych są: eliminacja źródeł, tworzenie barier powstrzymujących przenikanie promieniowania oraz ewakuacja osób z obszaru, na którym doszło do ekspozycji²⁴.

Eksploatacja elektrowni jądrowej wymusza również tworzenie:

- osłon przed promieniowaniem dla personelu pracującego tak aby nie przekroczyć dopuszczalnych granic narażenia radiacyjnego,
- systemu barier²⁵.

W celu kontroli otoczenia obiektów jądrowych i kontroli narażenia pracowników eksploatujących obiekty jądrowe istotne znaczenie ma kontrola dozymetryczna.

Kontrola ta dotyczy:

- układów technologicznych poprzez różnego rodzaju osłonięte detektory (układami tymi są np. układ pierwotny, wtórny, układ wentylacyjny, układ ściekowy itd.),
- pomieszczeń (monitorowanie skażeń pomieszczeń ma m.in. wskazać możliwości dostępu pracowników oraz informuje o nieszczelnościach w urządzeniach jądrowych),
- otoczenia elektrowni jądrowej (badana jest obecność radionuklidów w powietrzu, wodzie, opadach atmosferycznych, glebie itp.). Kontrola ta określa warunki rozprzestrzeniania się czynników odprowadzanych do otoczenia z elektrowni jądrowej (np. powietrze, woda). W ramach tej

²³ G. Ackermann (red.), *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, Warszawa 1987, s. 219-220.

²⁴ Z. Celiński, *Energetyka jądrowa a społeczeństwo*, Warszawa 1992, s. 35.

²⁵ Szerzej na temat systemów barier i osłon: Z. Celiński, *Energetyka jądrowa a społeczeństwo*, op. cit., s. 83-84, Z. Celiński, A. Strupczewski, *Podstawy energetyki jądrowej*, Warszawa 1984, s. 305 i 323-332, G. Jezierski, *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Warszawa 2005, s. 404-408, G. Ackermann (red.), *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, op. cit., s. 233-238.

kontroli sprawdza się także narażenie otoczenia w trakcie przeładunku paliwa w trakcie trwania cyklu paliwowego²⁶.

Kontrola dozymetryczna nie zamyka się na określeniu czynników w otoczeniu, ale także na określeniu narażenia ludności, w tym narażenia radiacyjnego pracowników znajdujących się na terenie obiektu. Kontrola taka obejmuje pomiar dawek promieniowania ze źródeł zewnętrznych dla osób czasowo lub stale przebywających na terenie obiektu jądrowego za pomocą indywidualnych dawkomierzy jonizujących lub fotometrycznych.

Ze względu na stałą obecność środków promieniotwórczych istnieje ryzyko przedostania się ich do organizmu człowieka. Ograniczeniem przedostania się do organizmu człowieka pierwiastków promieniotwórczych jest stosowanie indywidualnych środków ochrony np. ochronnych masek oddechowych. W tym wypadku stała kontrola obejmuje badania próbek wydzielin.

Kontrolę dozymetryczną można więc podzielić na kontrolę narażenia zewnętrznego lub narażenia wewnętrznego. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z zewnętrznym źródłem promieniowania, a w przypadku drugim z przedostaniem się do organizmu pierwiastków promieniotwórczych poprzez oddychanie, wchłanianie lub spożycie²⁷.

Dodatkowym elementem ochrony radiologicznej jest ochrona fizyczna. Ochrona fizyczna obejmuje głównie:

- środki techniczne,
- procedury postępowania.

Ważnym elementem ochrony fizycznej wg Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 4 listopada 2008r. w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych jest określenie stref niedostępnych, tj.:

- ścisłej ochrony (zawiera materiały jądrowe kategorii I),
- strefy wewnętrznej (zawiera materiały jądrowe kategorii II),
- strefy chronionej (zawiera materiały jądrowe kategorii III)²⁸.

Strefy zabezpieczone są poprzez elementy takie jak: specjalne ogrodzenia, ściany, stropy, drzwi, bramy, zabezpieczenia otworów okiennych i da-

²⁶ Z. Celiński, A. Strupczewski, *Podstawy energetyki jądrowej*, op. cit., s. 298–297, G. Ackermann (red.), *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, op. cit., s. 236–241.

²⁷ G. Ackermann (red.), *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, op. cit., s. 236–241.

²⁸ Rozporządzenie przewiduje, że w miejscu gdzie są środki promieniotwórcze dwóch różnych kategorii należy stosować zabezpieczenia dla wyższego poziomu ochrony. *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 4 listopada 2008r. w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych*, art. 5.2.

chowych, zabezpieczenia szybów wentylacyjnych, specjalnych zamków kłódek, szaf pancernych czy kaset stalowych. Dodatkowymi elementami ochrony fizycznej są urządzenia elektroniczne i systemy alarmowe²⁹.

Ochrona fizyczna dotyczy również środków promieniotwórczych w czasie transportu. Transport środków promieniotwórczych przez terytorium RP możliwy jest na mocy wydanego rozporządzenia w 2011 roku³⁰.

Omawiając bezpieczeństwo pracy obiektów jądrowych należy wziąć pod uwagę lokalizację takiego obiektu. Zlokalizowanie obiektu jest istotnym elementem bezpieczeństwa. Na lokalizację obiektu jądrowego wpływa m.in.: odległość odbiorców od dostaw prądu, podłączenie do sieci elektroenergetycznej, sposób zaopatrzenia w wodę, bezpieczeństwo środowiska naturalnego w pobliżu potencjalnej lokalizacji, warunki komunikacyjne i transportowe a także warunki sejsmiczne i geologiczne³¹. Kolejnym elementem bezpieczeństwa oprócz omawianej lokalizacji są jakość i wykonanie oraz eksploatacja reaktora jądrowego. Do tego zalicza się także inspekcje i kontrole w trakcie trwania budowy i szkolenia personelu zarówno przed jak i w trakcie eksploatacji elektrowni.

Kolejnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony przed awariami są różnego rodzaju systemy awaryjne. Można do nich zaliczyć linie pomiarowe, sygnalizację, automatyczne czynności podejmowane w celu zabezpieczenia przed awarią. Ważnym elementem w przypadku wystąpienia awarii jest poddanie jej analizie i prognozie zagrożenia. W tym celu dokonuje się analizy i tworzy scenariusze, które mają na celu optymalizację działań podejmowanych w zakresie bezpieczeństwa³².

²⁹ Rozporządzenia określa różne typy identyfikatorów od *Imiennego „A”* - nieograniczony dostęp do obiektu po identyfikator typu „C” - jednorazowy dostęp do danej strefy za wiedzą i zgodą osoby wydającej taki identyfikator oraz w towarzystwie osoby posiadającej dostęp do danej strefy. *Ibidem*, art. 7.

³⁰ Z Federacją Rosyjską, z Republiką Białorusi, z Ukrainą, przez lotnicze i morskie przejścia graniczne, więcej: *Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 13 kwietnia 2011 r. w sprawie wykazu przejść granicznych, przez które mogą być wwożone na terytorium Rzeczypospolitej polskiej i wywożone z tego terytorium materiały jądrowe, źródła promieniotwórcze, urządzenia zawierające takie źródła, odpady promieniotwórcze i wypalone paliwo jądrowe, Wykaz przejść granicznych, przez które mogą być wwożone na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej i wywożone z tego terytorium materiały jądrowe, źródła promieniotwórcze, urządzenia zawierające takie źródła, odpady promieniotwórcze i wypalone paliwo jądrowe.*

³¹ Szerzej Z. Celiński, *Energetyka jądrowa a społeczeństwo*, op. cit., s. 80-81.

³² *Ibidem*, s. 81-83.

Budowa elektrowni jądrowej wiąże się z ogromnym nakładem sił i środków. Siłami i środkami w tym wypadku są nie tylko kwestie finansowe, ale także organizacyjne, techniczne i prawne. Wiążą się one nie tylko z zabezpieczeniem ludności i pracowników elektrowni jądrowej na wypadek awarii, ale także z kwestią odpowiedzialności na wypadek zdarzeń radiacyjnych.

Aby nie dopuścić do awarii już na etapie planów budowy elektrowni jądrowej są przyjęte odpowiednie procedury i czynności. Wymogi te obejmują między innymi:

- potencjalne tereny pod inwestycję,
- wybór projektu,
- materiały,
- jakość robót itp.

KONCEPCJA OBRONY W GŁĄB

Projekt i lokalizacja elektrowni ma zapewniać bezpieczeństwo nie tylko na wypadek ewentualnych katastrof naturalnych, ale także pożaru obiektu, czy katastrof lotniczych³³. Stąd w literaturze można spotkać się z koncepcją tzw. *głębokiej obrony*. Obejmuje ona trzy poziomy bezpieczeństwa. Poziomy te mają na celu zapewnienie bezpieczeństwa w czasie normalnej eksploatacji oraz w czasie wystąpienia różnych zdarzeń np.: rozerwania obiegu pierwotnego³⁴.

Pierwszy poziom bezpieczeństwa związany jest z wysoką jakością urządzeń i kwalifikacjami personelu. Poziom drugi obejmuje systemy zapobiegające rozwojowi awarii. Poziom trzeci są to systemy ograniczające skutki awarii. Zatem każdy poziom bezpieczeństwa służy ochronie wybranego elementu systemu w ramach wymienionej *głębokiej obrony*. Poziom pierwszy w ramach *głębokiej obrony* zabezpiecza ludzi i otoczenie w czasie normalnej pracy reaktora, poziom drugi podczas zakłócenia w jego pracy, z kolei poziom trzeci w czasie wystąpienia awarii reaktora³⁵.

Zdarzeniami uwzględnianymi w ramach *głębokiej obrony* są różnego rodzaju awarie. Można je podzielić na wiele sposobów. Najczęściej stosowanym jest podział zagrożeń ze względu na czas i częstotliwość ich wystąpienia, zasięg skutków oraz ze względu na typ awarii. Ze względu

³³ *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, op. cit., s. 255.

³⁴ Z. Celiński, A. Strupczewski, *Podstawy energetyki jądrowej*, op. cit., s. 304.

³⁵ Z. Celiński, *Energetyka jądrowa a społeczeństwo*, op. cit., s.82.

na częstotliwość ich wystąpienia awarie dzieli się na: rzadkie, „występujące z umiarkowaną częstością”, graniczne³⁶.

Awarie ze względu na zasięg, skalę i charakter skutków są określane według międzynarodowej skali zdarzeń jądrowych – INES. Skala ta powstała w 1990 roku i składa się z 7 poziomów od najniższego czyli zero-wego po najwyższy siódmy stopień. Skale od 0-3 to incydenty, zaś skale 4-7 to awarie lub wypadki. Skala ta obejmuje trzy obszary: człowieka i środowisko, wpływ radiologiczny na bariery i system kontroli w obiekcie oraz obronę w głąb³⁷.

WNIOSKI KOŃCOWE

W obecnej chwili energetyka jądrowa jest ważnym elementem polityki państw nie tylko posiadających elektrownie jądrowe, ale i państw planujących uruchomienie swoich pierwszych elektrowni w celu dywersyfikacji źródeł energii i samodzielności energetycznej. Rozwój energetyki jądrowej w aspekcie cywilnym są dla niektórych państw priorytetem w dziedzinie dalszego rozwoju gospodarczo – politycznego, co dotyczy również Polski.

Elektrownie jądrowe są jednakże źródłem potencjalnych zagrożeń radiacyjnych. Zagrożenia te wynikają: po pierwsze, z eksploatacji reaktorów jądrowych w celu uzyskiwania energii, w których wykorzystywane jest paliwo jądrowe; po drugie, z konieczności transportu i przechowywania paliwa jądrowego; wreszcie po trzecie, z konieczności utylizacji i zabezpieczenia odpadów. Zagrożenia te dotyczą zarówno personelu elektrowni jądrowych, jak i innych osób mających styczność z paliwem jądrowym i odpadami, ale także i ludności, szczególnie ludności zamieszkującej w pobliżu elektrowni jądrowych, dla których awarie reaktorów jądrowych mogą stanowić nawet śmiertelne niebezpieczeństwo. Zatem bezpieczeństwo radiacyjne ma charakter nie tylko wybiórczy i nie ogranicza się do personelu elektrowni jądrowych, ale i charakter powszechny, przez co zagrożenia radiacyjne są przedmiotem zainteresowania specjalistów zarządzania kryzysowego.

Stosowane we współczesnych elektrowniach jądrowych systemy ochrony i zabezpieczeń zdają się zapewniać wystarczające zabezpieczenie przed różnego rodzaju zdarzeniami radiacyjnymi, w tym awariami reaktorów

³⁶ Szerzej: Z. Celiński, A. Strupczewski, *Podstawy energetyki jądrowej*, op. cit., s. 305, <http://www.paa.gov.pl/ines>; (dostęp z 10.12.2014).

³⁷ Szerzej <http://www.paa.gov.pl/ines>, (dostęp: 10.12.2014).

jądrowych, jakkolwiek nie możemy wykluczyć, że pod wpływem katastrof naturalnych, błędu człowieka, czy chociażby ataku terrorystycznego, którego celem będą elektrownie, przedostanie się środków radioaktywnych do atmosfery i środowiska nie przybierze charakteru katastrofy, jak miało to miejsce chociażby w Czarnobylu. Stąd też istotnym zagadnieniem jest to, aby nie tylko dbać o systemy obrony elektrowni jądrowych przed awariami i innymi zdarzeniami radiacyjnymi, ale uwzględnić w systemie bezpieczeństwa powszechnego działania i procedury, a także zabezpieczyć siły i środki, które są w stanie ochronić ludność przed skutkami katastrof radiacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Celiński Z., *Energetyka jądrowa a społeczeństwo*, Warszawa 1992.
2. Celiński Z., Strupczewski A., *Podstawy energetyki jądrowej*, Warszawa 1984.
3. *Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz Ocena Stanu Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej w Polsce w 2012 Roku*. Warszawa 2013.
4. Jezierski G., *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Warszawa 2005.
5. *Eksploatacja elektrowni jądrowych*, red. G. Ackermann, Warszawa 1987.
6. Gorączko W., *Ochrona radiologiczna*, Poznań 2011.
7. INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition
8. *Krajowy Plan Zarządzania Kryzysowego*, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2012.
9. Łucki Z., Misiak W., *Energetyka a społeczeństwo: aspekty socjologiczne*, Warszawa 2010.
10. *Ocena ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego. Raport o zagrożeniach bezpieczeństwa narodowego*, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Warszawa 2013.
11. Pellowski W., *Ochrona radiologiczna z elementami radiometrii*, Wrocław 2013.
12. *Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2016 roku*, Warszawa 2017.
13. Raport Dyrektora Generalnego IAEA z 2012 r., International Status and Prospects for Nuclear Power 2012.

14. Raport Dyrektora Generalnego IAEA z 2014 r., International Status and Prospects for Nuclear Power 2014.
15. Rogowski K., *Bezpieczeństwo energetyczne* [w:] *Wybrane problemy bezpieczeństwa – dziedziny bezpieczeństwa*, Urbanek A(red.), Słupsk 2013.
16. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 4 listopada 2008 r. w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych.
17. Szymonik A., *Organizacja i funkcjonowanie systemów bezpieczeństwa*, Warszawa 2011.
18. *The radiological accident in Goiania*, wydany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu w 1988.
19. Urbanek A., *Wyzwania i zagrożenia bezpieczeństwa*, [w:] A. Urbanek (red.), *Wybrane problemy bezpieczeństwa. Teoria. Strategia. System*, Słupsk 2012.
20. Urbanek A., *Tsunami – zagrożenie ekologiczne bezpieczeństwa powszechnego*, „Studia nad bezpieczeństwem”, Zeszyt nr 2/2017, Słupsk 2017.
21. Ustawa Prawo atomowe z dnia 29 listopada 2000.
22. Ustawa z dnia 13 maja 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw.
23. Strona internetowa Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, <http://www.iaea.org/pris/> dostęp z 30.11.2017.
24. <https://www.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>
25. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-unit>

Maciej ZAORSKI – urodzony 1985 roku w Słupsku. Absolwent Akademii Pomorskiej w Słupsku. Pracownik naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Inżynierii Bezpieczeństwa, Katedry Cybernetyki Społecznej i Inżynierii Bezpieczeństwa w Akademii Pomorskiej w Słupsku. Zainteresowania naukowe skupiają się na problematyce związanej bezpieczeństwem energetycznym oraz z funkcjonowaniem systemu zarządzania kryzysowego w Polsce.