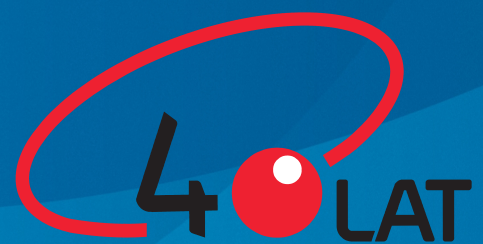


e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

4 (126) 2022

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA



Państwowej Agencji
Atomistyki

1982-2022

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

Wydawca: **Państwowa Agencja Atomistyki**
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa

Redakcja: **Elżbieta ZALEWSKA**
Apolonia CICHOCKA
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa
TEL. 22 628 94 39
FAX 22 621 37 86
E-MAIL biuletyn@paa.gov.pl
www. gov.pl/web/paa

Rada Programowa

prof. dr hab. **Janusz JANECZEK** – przewodniczący Rady
prof. dr hab. inż. **Andrzej CHMIELEWSKI** – członek Rady
prof. dr hab. n. med. **Marek K. JANIAK** – członek Rady
prof. dr hab. n. med. **Eugeniusz DZIUK** – członek Rady
prof. dr hab. n. med. **Leszek KRÓLICKI** – członek Rady
dr hab. **Agnieszka KORGUL** – członek Rady
dr **Tomasz NOWACKI** – członek Rady

Maciej JURKOWSKI, Redaktor naczelny

Marek WOŹNIAK, Redaktor techniczny

e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

Druk: Agencja Reklamowa TOP

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 4 (126) 2022

Warszawa

Spis treści

Redakcja Biuletynu

Uroczystość Jubileuszowa 40-lecia istnienia Państwowej Agencji Atomistyki 7

Marcin Dąbrowski

Licencjonowanie i wymagania bezpieczeństwa dla małych reaktorów modułowych 15

Krzysztof Rzymkowski

Kwestie bezpieczeństwa, ochrony i zabezpieczeń małych reaktorów modułowych – SMR. 22

Andrzej Strupczewski

Małe dawki promieniowania: szkodliwe czy potrzebne dla życia? 29

Marek Niemczyk

Turystyka czarnobylska oraz pozostałe czynniki wpływające na bezpieczeństwo elektrowni jądrowej w Czarnobylu 42

Szanowni Państwo

W minionym roku świętowaliśmy jubileusz 40 lat Państwowej Agencji Atomistyki. Tej okrągłej rocznicy poświęcona była, zorganizowana przez PAA w dniu 17 października br., uroczystość jubileuszowa, w której na zaproszenie Prezesa PAA dr Łukasza Młynarkiewicza uczestniczyli członkowie Rady Ministrów, prezesi urzędów centralnych i szefowie służb państwowych, oraz dyrektorzy, przewodniczący i prezesi instytucji państwowych, gremiów doradczych i organizacji pozarządowych działających w obszarze bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. List gratulacyjny skierowany do uczestników tej uroczystości przez Premiera Mateusza Morawieckiego, oraz obszerniejsza z niej relacja otwierają niniejszy numer biuletynu.



Spotkanie to odbyło się niemal w przededniu wizyty (23.10) polskiej delegacji rządowej w Waszyngtonie w celu dokonania ustaleń dotyczących zaangażowania instytucji rządowych Stanów Zjednoczonych w realizację Programu polskiej energetyki jądrowej (PPEJ) w ramach **partnerstwa strategicznego**. W oparciu o te ustalenia Rząd potwierdził **strategiczne partnerstwo z USA przy budowie pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce** w podjętej 2 listopada uchwale Rady Ministrów *ws. budowy wielkoskalowych elektrowni jądrowych w Polsce*. Stwierdza ona, że pierwsza w Polsce elektrownia jądrowa o mocy elektrycznej do 3750 MWe zostanie zbudowana w oparciu o amerykańską technologię reaktorów AP1000 w już wskazanej preferowanej lokalizacji w północnej Polsce. Pierwszy blok powstanie do 2033 roku. Realizatorem projektu będzie Spółka Polskie Elektrownie Jądrowe, a dostawcą technologii firma Westinghouse. Państwowy nadzór i kontrolę w zakresie bezpieczeństwa jądrowego nad tą inwestycją (dozór jądrowy) będzie sprawował Prezes PAA.

Równoległe z przygotowaniem do budowy w ramach PPEJ wielkoskalowych elektrowni jądrowych wszczęto także w Polsce wstępne procedury dotyczące projektów budowy małych reaktorów modułowych – tzw. SMR (*Small Modular Reactors*). Dwie polskie firmy – spółka Skarbu Państwa KGHM Polska Miedź i OSGE (*Orlen Synthos Green Energy*) wystąpiły równocześnie i niezależnie w lipcu br. do Prezesa PAA o wydanie **ogólnej opinii** dotyczącej planowanych rozwiązań organizacyjno-technicznych albo projektów dokumentów, które będą składane wraz z wnioskiem o wydanie zezwoleń na budowę w Polsce przez firmę KGHM amerykańskiego reaktora z modułami wodno-ciśnieniowymi NuScale oraz reaktora wodno-wrzącego BWRX-300 przez firmę OSGE. Problematyce małych reaktorów modułowych SMR poświęcone są w bieżącym numerze dwa artykuły.

W pierwszym z nich **Marcin Dąbrowski** podaje podstawowe dane o rozwoju technologii SMR, omawia określony w ustawie Prawo atomowe **proces licencjonowania** wraz z podstawowymi **wymaganiami bezpieczeństwa jądrowego** w odniesieniu do takich reaktorów i porównuje go z podobnym procesem dla reaktorów wielkoskalowych. Zwraca też uwagę na problemy związane z lokalizacją SMR-ów w pobliżu instalacji przemysłowych oraz wskazuje nowe dokumenty MAEA i WENRA dotyczące ewentualnych niewielkich zmian w obecnych wymaganiach projektowych w celu uwzględnienia specyfiki SMR-ów. Autor zwraca również uwagę na zawarte w aktualnych przepisach rozwiązania proceduralne zwiększające **efektywność procesu licencjonowania**.

W drugim artykule **Krzysztof Rzymkowski** zwraca uwagę na **perspektywy lokalnych zastosowań SMR-ów** w krajach uprzemysłowionych do produkcji ciepła technologicznego, wodoru, odsalania wody morskiej oraz wytwarzania energii elektrycznej na potrzeby lokalne, wspomina o cechach ich rozwiązań konstrukcyjnych, związanych z modułowością, wpływających pozytywnie na bezpieczeństwo (*safety*). Artykuł poświęcony jest jednak głównie kwestiom ochrony fizycznej, cyberbezpieczeństwa i zabezpieczeń materiałów jądrowych (*security, safeguards*) w SMR-ach, związanym ze sposobem ich eksploatacji (przemieszczaniem modułów w obrębie obiektu w celu wymiany paliwa przy rozwiązaniach wielomodułowych, takich jak projekt NuScale) oraz nowymi technologiami.

W trzecim artykule **Andrzej Strupczewski** podejmuje temat uszkodzeń DNA, związanych w opinii publicznej, głównie z oddziaływaniem promieniowania jonizującego na żywe organizmy, co zresztą nie dziwi, biorąc pod uwagę rosnące przekonanie o skuteczność terapii onkologicznych z zastosowaniem dużych dawek promieniowania na guz nowotworowy. W skali społecznej wielokrotnie niższy jest poziom wiedzy o tym, że nasze komórki i łańcuchy DNA nieporównanie częściej podlegają uszkodzeniom z powodu naturalnych procesów życiowych, takich jak metabolizm tlenowy (oddziaływanie wolnych rodników tlenowych), a procesy naprawcze są pobudzane i bardziej skuteczne, kiedy organizm dostaje sygnał o działaniu promieniowania jonizującego. Autor przytacza wyniki szeregu badań i doświadczeń potwierdzających występowanie takiego efektu, między innymi w zakresie dawek zbliżonych do występujących w różnych miejscach świata zróżnicowanych poziomów naturalnego tła promieniowania. W świetle tych wyników pytanie zawarte w tytule artykułu staje się retoryczne.

W ostatnim z publikowanych artykułów **Marek Niemczyk** analizuje zjawisko tzw. turystyki czarnobylskiej, tj. legalnych wizyt dziesiątek tysięcy osób rocznie w tzw. strefie wykluczenia i obiektach wyłączonych z eksploatacji elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Autor próbuje ocenić potencjalny wpływ tej turystyki oraz towarzyszących jej zjawisk na bezpieczeństwo, głównie z punktu widzenia zagrożenia atakiem terrorystycznym. Rozważania te dotyczą sytuacji sprzed agresji wojsk Federacji Rosyjskiej na Ukrainę w 22 lutego 2022 roku.

Życząc owocnej lektury, składamy Państwu także najlepsze życzenia z okazji zbliżających się Świąt Bożego Narodzenia oraz zdrowia i wszelkiej pomyślności w nowym 2023 roku.

Redaktor Naczelny
Maciej Jurkowski



PREZES RADY MINISTRÓW

Warszawa, 17 października 2022 r.

Szanowni Państwo,

40-lecie Państwowej Agencji Atomistyki to nie tylko okrągła rocznica utworzenia urzędu, ale przede wszystkim jubileusz istnienia jednej z najważniejszych instytucji dbających o bezpieczeństwo Polaków. To cztery dekady wyteżonej i owocnej pracy, za którą pragnę serdecznie Państwu podziękować.

Ta praca jest służbą społeczną, niezwykle istotną dla każdego z nas. Mam na myśli przede wszystkim sytuację radiacyjną w kraju, której oceną zajmujecie się Państwo na co dzień. To pewien paradoks, że praca w tym ważnym obszarze otoczona jest swoistą ciszą społeczną. Ta cisza jednak jest niemal zawsze równoznaczna z wysokim poziomem poczucia bezpieczeństwa panującego wśród Polaków.

W ostatnim czasie nie brakowało wydarzeń, gdy zainteresowanie sytuacją radiacyjną w Polsce rosło. To efekt toczącej się za naszą wschodnią granicą wojny i obawy przed uszkodzeniem elektrowni jądrowych w Ukrainie. Skuteczne monitorowanie poziomu promieniowania jonizującego w naszym regionie, jak też profesjonalne komunikaty wydawane przez Państwową Agencję Atomistyki stanowiły i stanowią ważny element odpowiedzialnego zarządzania w każdej z sytuacji podwyższonego ryzyka, a zarazem cieszą się dużym uznaniem społecznym.

Szanowni Państwo,

wśród wyzwań stojących przed Polską znajduje się kwestia skutecznej transformacji energetycznej i budowa nowego systemu elektroenergetycznego. Urząd dozoru jądrowego ma w tym obszarze szereg zadań do wykonania. Zgodnie z prawem Państwowa Agencja Atomistyki będzie nadzorować budowę polskich elektrowni jądrowych na każdym etapie tego procesu.

U progu nowej dekady funkcjonowania Agencji pragnę wyrazić nadzieję, że będzie to dekada obfitująca w wydarzenia, które pchną polską energetykę naprzód i otworzą naszej Ojczyźnie dostęp do najnowszych technologii jądrowych. To nasza racja stanu i niezbędny warunek dalszego rozwoju. Życzę Państwu osobistego udziału w tym historycznym procesie. Jestem przekonany, że wiedza, pasja i zaangażowanie pracowników Agencji przyczynią się do tego, że będzie on realizowany w najlepszy możliwy sposób.

Zgromadzonym na dzisiejszej uroczystości składam jubileuszowe gratulacje, dołączając do nich serdeczne pozdrowienia dla Wszystkich Państwa.

Mateusz Morawiecki

Uczestnicy uroczystości jubileuszowej 40-lecia utworzenia Państwowej Agencji Atomistyki

Uroczystość Jubileuszowa 40-lecia istnienia Państwowej Agencji Atomistyki

17 października br. był dniem oficjalnych obchodów 40-lecia Państwowej Agencji Atomistyki, których gospodarzem był Prezes PAA dr Łukasz Młynarkiewicz, a które w sali kinowej Centrum Bankowo-Finansowego w Warszawie zgromadziły ok. 150 zaproszonych gości (Fot. 1), na czele z przedstawicielami Rady Ministrów w osobach Anny Moskwy – Minister Klimatu i Środowiska oraz Mateusza Bergera – Sekretarza Stanu, pełnomocnika Rządu ds. Strategicznej Infrastruktury Energetycznej. Z okazji jubileuszu okolicznościowy list do uczestników obchodów wystosował Prezes Rady Ministrów Mateusz Morawiecki. List ten, odczytany zebraniem przez ministra Bergera, zamieściliśmy na początku niniejszego numeru Biuletynu.

Wśród zaproszonych gości znaleźli się szefowie lub przedstawiciele organów wykonujących nadzór i kontrole w zakresie przestrzegania warunków bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego, Głównego Inspektora Sanitarnego, dyrektora Krajowego Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia, Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywil-

nego) oraz instytucji i służb państwowych współpracujących z PAA, m.in. w ramach systemu koordynacji kontroli i nadzoru bezpieczeństwa obiektów jądrowych (Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego, Urzędu Dozoru Technicznego, Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Głównego Inspektoratu Sanitarnego, Komendanta Głównego Państwowej Straży Pożarnej, Głównego Inspektora Nadzoru Budowlanego, Głównego Inspektora Pracy), a także współpracujących w ramach monitoringu radiacyjnego i reagowania na zdarzenia radiacyjne (Centralnego Ośrodka Analizy Skażeń Ministra Obrony Narodowej, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Komendanta Głównego Policji, Rządowego Centrum Bezpieczeństwa oraz Krajowego Centrum Koordynacji Ratownictwa i Ochrony Ludności Ministra Spraw Wewnętrznych, Komendanta Głównego Straży Granicznej oraz Szefa Krajowej Administracji Skarbowej). Obecni byli dyrektorzy instytutów naukowo-badawczych oraz dziekani wydziałów bądź zakładów wyższych uczelni (Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, Zakładu Fizyki Jądrowej Uniwersytetu



Fot. 1. Uczestnicy obchodów 40-lecia utworzenia PAA, obecni w sali kinowej Centrum Bankowo-Finansowego w Warszawie.

Warszawskiego, Państwowego Instytutu Geologicznego, Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, Narodowego Centrum Badań Jądrowych, Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii, Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii). Obecni byli także dyrektorzy, przewodniczący oraz prezesi instytucji państwowych, gremiów doradczych oraz organizacji pozarządowych działających w obszarze bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (Departamentu Energii Jądrowej w Ministerstwie Klimatu i Środowiska, Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, Rady ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej, Polskiego Towarzystwa Nukleonicznego – PTN, Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej – SIOR, Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii nuklearnej – SEREN) oraz redaktorzy naczelni czasopism branżowych (Nukleoniki, Postępów Techniki Jądrowej i Biuletynu Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna). Wśród zaproszonych gości znaleźli się także byli



Fot. 2. Odczytanie listu Premiera Mateusza Morawieckiego przez Pełnomocnika Rządu ds. Strategicznej Infrastruktury Energetycznej – Sekretarza Stanu Mateusza Bergera.

prezesi, wiceprezesi, były Główny Inspektor i inspektorzy dozoru jądrowego oraz emerytowani pracownicy Państwowej Agencji Atomistyki i członkowie byłej Rady ds. Atomistyki. Niejako w ich imieniu wybrzmiał głos byłego długoletniego prezesa PAA, prof. Jerzego Niewodniczańskiego w formie listu gratulacyjnego, przesłanego na ręce prezesa Młynarkiewicza, odczytanego zebraniem w trakcie spotkania.

Spotkanie otworzył Prezes PAA dr Łukasz Młynarkiewicz, przypominając, iż ustawa o utworzeniu PAA została uchwalona 27 lutego 1982 roku i weszła w życie 9 marca 1982 roku, ale agresja wojsk Federacji Rosyjskiej w Ukrainie uniemożliwiła organizację jubileuszu na przełomie lutego i marca. Zdecydowano wówczas o odłożeniu tej uroczystości. Prezes przywitał każdego z gości honorowych reprezentujących rząd, urzędy centralne i służby państwowe oraz wszystkich przybyłych na spotkanie.

W odczytanim następnie przez ministra Bergera (Fot. 2), skierowanym do uczestników uroczystości jubileuszowej, liście gratulacyjnym, Premier Morawiecki nazwał PAA „jedną z najważniejszych instytucji dbających o bezpieczeństwo Polaków”, mającą do wykonania jako urząd dozoru jądrowego szereg zadań w obszarze czekającej Polskę transformacji energetycznej – związanej z budową elektrowni jądrowych. Premier podziękował PAA za „cztery dekady wyjątkowej i owocnej pracy”... „...Ta praca jest służbą społeczną, niezwykle istotną dla każdego z nas” napisał. „Skuteczne monitorowanie poziomu promieniowania jonizującego w naszym regionie, jak też profesjonalne komunikaty wydawane przez Państwową Agencję Atomistyki stanowiły i stanowią ważny element odpowiedzialnego zarządzania w każdej sytuacji podwyższonego ryzyka, a zarazem cieszą się dużym uznaniem społecznym”.

Z listem Premiera współbrzmiały tezy wystąpienia kolejnego mówcy – Minister Klimatu i Środowiska Anny Moskwy (Fot. 3), która wyraziła uznanie dla mało widocznej w mediach, ale solidnej i budzącej zaufanie pracy specjalistów PAA, reagujących profesjonalnie i skutecznie



Fot. 3. Wystąpienie Minister Klimatu i Środowiska, Anny Moskwy.

w sytuacjach, kiedy to jest potrzebne. „Wielu odpowiedzi na zadawane pytania o bezpieczeństwo jądrowe, dostarcza nam kadra profesjonalistów z PAA, która od czterech dekad dba o bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną mieszkańców Polski”. Minister Anna Moskwa nawiązała również do toczącej się w Ukrainie wojny oraz wielu zadań i wyzwań, jakie ta sytuacja stawia przed PAA: „Dzisiaj bezpieczeństwo jądrowe wysuwa się na pierwszy plan, kiedy codziennie napływają do nas informacje z frontu wojny w Ukrainie, którą Rosja zaatakowała 24 lutego 2022 r. Jak wiemy, wojska agresora okupują Zaporoską Elektrownię Jądrową, co jest wydarzeniem bez precedensu. Ekspertki PAA kontrolują sytuację radiacyjną w kraju – nieustannie sprawdzają, czy istnieje ryzyko wystąpienia zagrożenia w Polsce.” W kontekście przyszłych wyzwań stojących przed PAA jako urzędem dozoru bezpieczeństwa jądrowego minister podkreśliła znaczenie realizacji Programu Polskiej Energetyki Jądrowej: „Będzie miał on korzystny wpływ na gospodarkę, nowe miejsca pracy, a także będzie jednym z czynników, prowadzących do niezależności energetycznej Polski”.

Następnie odczytano list emerytowanego prezesa PAA, prof. Jerzego Niewodniczańskiego, który kierował Państwową Agencją Atomistyki przez niemal 17 lat. Profesor podkreślił znaczenie Agencji jako instytucji, „która mówi nam, jakie stosować standardy i procedury, żeby wykorzystanie materiałów jądrowych oraz izotopowych

czy akceleratorowych źródeł promieniowania nie stwarzało zagrożenia dla osób stosujących te technologie, dla ogółu ludności teraz i w następnych pokoleniach. Agencja również kontroluje sposób przestrzegania tych zasad i procedur oraz nadzoruje monitoring poziomu promieniowania w środowisku. Samo istnienie Agencji i kompetencje jej pracowników gwarantują bezpieczne funkcjonowanie naszych przyszłych elektrowni jądrowych i właściwe reagowanie w przypadku zaistnienia sytuacji awaryjnych”. Profesor podziękował Prezesowi i „wszystkim pracownikom za utrzymanie wysokiej rangi i wiarygodności Agencji”, a skierowane do zebranych życzenia, „żeby Państwowa Agencja Atomistyki nadal ogrywała znaczącą rolę w europejskim i światowym systemie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej” przyjęto oklaskami.

Potwierdzeniem tych ocen oraz dążenia do spełnienia tych życzeń była treść wystąpienia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki (Fot. 4), poświęconego podsumowaniu dokonań oraz przyszłym wyzwaniom. Przytoczymy istotne tezy tego wystąpienia, przybliżającego uczestnikom spotkania założenia i cele działań podejmowanych i realizowanych przez PAA.

Prezes przypomniał, iż wykorzystanie technologii jądrowych oraz różnych rodzajów źródeł promieniowania jonizującego niesie za sobą **znaczne korzyści społeczne, gospodarcze i środowiskowe**. Szerokie zastosowania promieniowania jonizującego w przemyśle, medycynie oraz badaniach



Fot. 4. Wystąpienie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, dr. Łukasza Młynarkiewicza.

naukowych mają pozytywny wpływ na jakość życia i rozwój społeczeństwa”, lecz „jednocześnie jednym z podstawowych warunków tego, aby społeczeństwo mogło czerpać korzyści z tego rodzaju działalności, jest zapewnienie przez Państwo funkcjonowania wiarygodnego oraz skutecznego systemu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej”. **Bezpieczeństwo** wykorzystania tego rodzaju **źródeł i ochrona radiologiczna pracowników, społeczeństwa oraz środowiska** naturalnego jest podstawowym **celem** oraz **misją** Państwowej Agencji Atomistyki.

„Mogę z dumą powiedzieć, że przez ostatnie 40 lat Agencja **zdała swój egzamin!** Że w ciągu ostatnich 40 lat w kraju nie było poważnych awarii jądrowych, a od 20 lat nie wystąpiły zdarzenia, incydenty, które miałyby istotne skutki zdrowotne” – podkreślił Prezes.

„Miarą sukcesu Państwowej Agencji Atomistyki jest **bezpieczeństwo eksploatacji obiektów jądrowych oraz różnych zastosowań promieniowania jonizującego.**” Agencja nadzoruje działające w kraju obiekty jądrowe, w tym reaktor badawczy Maria, przechowalniki wypalonego paliwa jądrowego, składowisko odpadów promieniotwórczych oraz blisko 7,500 działalności związanych z wykorzystaniem źródeł promieniowania jonizującego, przy czym liczba tych działalności stale rośnie, rokrocznie o ok. 4 do 6%, a w ciągu ostatnich 12 lat uległa podwojeniu.

Istotnym bieżącym wyzwaniem jest sytuacja związana z agresją Rosji na Ukrainę i znajdujące się tam obiekty jądrowe, co „**jest sytuacją bez precedensu**”, ponieważ „**zdecydowanie żaden obiekt jądrowy nie powinien być celem działań militarnych**”. Ważnymi inicjatywami podjętymi w związku z tą sytuacją było wzmocnienie przez PAA monitoringu radiacyjnego kraju oraz doprowadzenie we współpracy z Ministerstwem Klimatu i Środowiska i służbami Ministerstwa Spraw Zagranicznych do „**podjęcia dwóch historycznych rezolucji na forum Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej**”. Rezolucji potępiających działania Federacji Rosyjskiej oraz „**wzywających do zaprzestania okupowania terenu Elektrowni Jądrowej w Zaporozżu i zwrotu tego terenu stronie ukraińskiej.**”

Wyzwaniem długofalowym, związanym z ostatnimi decyzjami Rządu o budowie w Polsce wielkoskalowych elektrowni jądrowych, jest zaangażowanie PAA jako urzędu dozoru jądrowego, poprzez działania regulacyjne oraz nadzorcze, w proces realizacji tych inwestycji na każdym ich etapie, począwszy od etapu oceny środowiskowej, lokalizacyjnej, poprzez etap budowy, rozruchu i eksploatacji, aż po ich likwidację po kilkudziesięciu latach tej eksploatacji.

Dodatkowym wyzwaniem, związanym z obserwowanym poważnym zainteresowaniem sektora prywatnego w Polsce nowymi technologiami jądrowymi z zastosowaniem małych reaktorów modułowych – tzw. SMR (*Small Modular Reactors*), jest konieczność podjęcia przez PAA intensywnych działań zmierzających do rozbudowy swoich kompetencji.

Intensywne procesy związane z pozyskaniem nowych specjalistów i ich szkoleniem, upoważniają do stwierdzenia, iż **Agencja jest obecnie na etapie „najbardziej dynamicznego rozwoju w okresie swojego istnienia w całym 40-leciu.** W ciągu trzech lat Agencja zamierza zatrudnić ponad 60 nowych pracowników. Blisko połowa z tej liczby została już zatrudniona”. Co więcej „w tym roku, największa w historii Agencji liczba pracowników bierze udział w **kilkumiesięcznych stażach szkoleniowych na budowie elektrowni jądrowej Vogtle w Stanach Zjednoczonych.**” W związku z rozrostem kadrowym planowane jest przeniesienie Agencji do nowej siedziby wiosną 2023 roku.

Swoje wystąpienie Prezes zakończył podziękowaniami skierowanymi do współpracowników oraz byłych pracowników Agencji, a także „**do wszystkich przyjaciół Agencji, którzy wspierali i wspierają nasze wysiłki w budowaniu bezpieczeństwa**”.

Tę część obchodów, poświęconą oficjalnym gratulacjom i wystąpieniom gości honorowych oraz Prezesa Agencji, nawiązującym do dokonań oraz wyzwań stojących przed Agencją, zamknęła prezentacja długoletniego dyrektora Departamentu Prawnego PAA, **Piotra Korzeckiego** na temat historii i współczesności Agencji.

Wychodząc od niepodważalnego stwierdzenia, że od 40 lat głównym motywem działania PAA jest „**dążenie do zapewnienia, żeby działalność mogąca powodować narażenie na promieniowanie jonizujące była prowadzona w sposób bezpieczny dla pracowników, społeczeństwa i środowiska**”, autor prezentacji przypomniał, że pierwsze akty prawne po II wojnie światowej dotyczące bezpieczeństwa wykorzystania promieniowania jonizującego wydano w Polsce już w 1952 i 1953 roku, a w roku 1957 i 11 lat później – w roku 1968 sprawy bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu promieniowania jonizującego zostały uregulowane odpowiednimi rozporządzeniami Rady Ministrów. Odpowiadało to ówczesnemu etapowi rozwoju w Polsce badań jądrowych i badań związanych z ochroną przed promieniowaniem. W 1955 r. utworzono Instytut Badań Jądrowych (IBJ), w 1957 roku – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR), a w 1958 roku uruchomiono pierwszy badawczy reaktor jądrowy EWA w Świerku.

Równoległe już w 1955 roku utworzono pierwszą instytucję rządową nadzorującą sektor atomistyki – Komitet ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądrowej, a w 1956 roku mianowano Pełnomocnika Rządu ds. Wykorzystania Energii Jądrowej, którego biuro po 17 latach przekształcono w 1973 roku w Urząd Energii Atomowej (nastąpiło to niedługo po decyzji ustalenia w 1972 roku lokalizacji pierwszej w Polsce elektrowni jądrowej). Po przejściowym włączeniu kwestii atomowych w zakres nadzoru resortu energetyki – poprzez utworzenie w 1976 roku Ministerstwa Energetyki i Energii Atomowej, w 1981 roku znalazły się one, jak się okazało ponownie przejściowo, w gestii powołanego w 1981 roku Pełnomoc-

nika Rządu ds. Energetyki Jądrowej, by znaleźć się wreszcie, tym razem na kolejne 40 lat i dłużej, pod nadzorem powołanej do życia ustawą sejmową z dnia 27 lutego 1982 roku Państwowej Agencji Atomistyki.

Ustawa ta stanowiła, że to „*Państwowa Agencja Atomistyki realizuje wyłączność Państwa w dziedzinie atomistyki w zakresie określonym w ustawie*” (art. 1, ust. 2), a w artyku-
 kule 2 określała **wysoką rangę** tego organu w administracji rządowej. Stwierdzała mianowicie, że PAA „*wykonuje zadania centralnego organu administracji państwowej w zakresie atomistyki*” oraz, że bezpośrednio **podlega Prezesowi Rady Ministrów** (zastrzegając, że premier „*może przekazać sprawowanie nadzoru nad działalnością Agencji jednemu z członków Rady Ministrów*”). Prelegent zwrócił uwagę, że w tym samym artykule 2 ust. 1 ustawa przypisywała Agencji „*rolę organu założycielskiego w stosunku do podległych jej wyodrębnionych jednostek organizacyjnych*”, takich jak instytuty naukowo-badawcze (IBJ, CLOR itp.), czy zakłady produkcyjne (takie jak np. POLON). Oznaczało to obowiązek pełnienia nadzoru założycielskiego nad wykonywaniem zadań przez te jednostki, a także ich finansowanie. Wśród spraw włączonych tą ustawą do zakresu działania PAA, **obok koordynacji i kontroli całokształtu działań w zakresie atomistyki i nadzoru nad wykonywaniem zadań** przez podległe jej wyodrębnione jednostki organizacyjne (spraw badań i zastosowań z zakresu atomistyki w gospodarce narodowej, produkcji aparatury i urządzeń jądrowych, materiałów promieniotwórczych i obrotu nimi, ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądrowego wraz z unieszkodliwianiem i składowaniem odpadów promieniotwórczych, współpracy międzynarodowej, informowania społeczeństwa o działalności Państwa, a także udziału w realizacji zadań obronnych w zakresie atomistyki), **znalazły się sprawy licencjonowania i kontroli użytkowania wszelkich obiektów i urządzeń jądrowych w zakresie bezpieczeństwa jądrowego** (artykuł 3 pkt. 5), a także **nadawania uprawnień** dla podstawowych kadr zatrudnionych przy eksploatacji urządzeń jądrowych. Stanowiło to podstawę do wydania **przez Państwową Agencję Atomistyki** 11 listopada 1985 roku **zezwolenia z punktu widzenia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej na budowę Elektrowni Jądrowej „Żarnowiec”¹**. Prezes kierował Agencją przy pomocy Zarządu, w skład którego wchodził m.in. przedstawiciele ministrów resortów kluczowych z punktu widzenia zastosowań promieniowania i wykorzystania energii atomowej, którym podlegały jednostki prowadzące taką działalność.

Ustawa o utworzeniu PAA nie precyzowała trybu licencjonowania i kontroli użytkowania obiektów i urządzeń jądrowych w zakresie bj i or, nie mówiąc już o licencjonowaniu i kontroli działalności ze źródłami promieniowania, co pozostawało w gestii ministra zdrowia i państwowej inspekcji sanitarnej.

Lukę tę wypełniła dopiero **ustawa Prawo atomowe z 10 kwietnia 1986 roku**, która ustanowiła już nie Agencję, a Prezesa Agencji **centralnym organem administracji państwowej ds. związanych z wykorzystaniem energii atomowej**. Prezes kierował Agencją przy pomocy Zarządu o podobnym składzie jak to określała poprzednia ustawa, ale równocześnie **kierował także państwowym dozorem bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, którego organami poza Prezesem, byli Główny Inspektor i inspektorzy dozoru jądrowego**. Ustawa precyzowała na czym polega dozór jądrowy, określając podstawowe jego funkcje, to znaczy **formułowanie wymagań** w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, **analizę i ocenę bezpieczeństwa, licencjonowanie i prowadzenie inspekcji** – nie tylko obiektów jądrowych, ale także zastosowań źródeł promieniowania (z wyjątkiem aparatów rentgenowskich o energiach do 300 keV – które pozostały w gestii ministra zdrowia i państwowej inspekcji sanitarnej), oraz **stosowanie sankcji**. Ustawa dozwalała także delegowanie wykonywania zadań dozorowych pracownikom podległych Agencji jednostek organizacyjnych². Określała też obowiązki i uprawnienia inspektorów dozoru jądrowego oraz obowiązki kierowników i pracowników kontrolowanych jednostek. Zawierała także przepis (art.12), iż jakiegokolwiek decyzje organów administracji państwowej, pozostające w sprzeczności z wymaganiami bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, nie mają mocy prawnej i nie podlegają wykonaniu. Ustawa wprowadziła też kary administracyjne za wykroczenia przeciwko bezpieczeństwu jądrowemu i ochronie radiologicznej. Szczegółowy zakres działalności Państwowej Agencji Atomistyki oraz Prezesa Agencji uregulowało rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 lutego 1987 roku, a organizację, szczegółowe obowiązki i sposób wykonywania wymienionych wyżej funkcji dozoru jądrowego – rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 stycznia 1988 roku. Te dwa akty wykonawcze do ustawy Prawo atomowe uzupełniło 9 zarządzeń Prezesa PAA, opublikowanych w latach 1987–89 w Monitorze Polskim. Dotyczyły one ewidencji i kontroli źródeł promieniotwórczych, stanowisk o istotnym znaczeniu dla bezpieczeństwa jądrowego

¹ Zezwolenie to przygotował zespół dozoru jądrowego, organizowany od połowy 1983 r. w CLOR przez doc. **Wacława Dąbka**, Z-cy Dyrektora ds. Nadzoru i Kontroli w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, późniejszego pierwszego **Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego (GIDJ)**. Więcej informacji na ten temat zawiera wspomnienie o Wacławie Dąbku w numerze 1(95)2014 Biuletynu – <https://www.gov.pl/web/paa/bezpieczenstwo-jadrowe-i-ochrona-radiologiczna-numer-12014> (przyp. red.).

² Przepis ten sankcjonował ustawowo wcześniejsze ustanowienie Dyrektora CLOR Pełnomocnikiem Prezesa PAA do spraw bezpieczeństwa jądrowego i powierzenie mu zadań dozorowych w zakresie określonym Decyzją nr 1 Prezesa PAA z dnia 3 lutego 1984 r., za których realizację przez specjalistów różnych branż pozyskiwanych do tworzonego wtedy w CLOR zespołu dozoru odpowiadał I Zastępca Dyrektora CLOR Wacław Dąbek, późniejszy GIDJ (przyp. red.).

i ochrony radiologicznej, ewidencji i kontroli materiałów jądrowych, wymagań dla sprzętu i ewidencji pomiarów dozymetrycznych, warunków przywozu, wywozu i tranzytu przez terytorium Polski materiałów jądrowych, źródeł promieniotwórczych i urządzeń zawierających takie źródła, dawek granicznych, tworzenia stref ochronnych wokół obiektów jądrowych, ochrony fizycznej materiałów jądrowych oraz zasad zaliczania odpadów do odpadów promieniotwórczych, ich klasyfikowania, unieszkodliwiania, przechowywania i składowania.

Kolejną, do dziś obowiązującą (z licznymi zmianami) ustawę Prawo atomowe, z dnia 29 listopada 2000 roku, przygotowano w PAA w związku z ubieganiem się Polski o członkostwo w Unii Europejskiej. Jest ona całkowicie zgodna z prawem wspólnotowym. Zgodnie z przepisami tej ustawy Prezes PAA jest **centralnym organem administracji rządowej właściwym w sprawach bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz naczelnym organem dozoru jądrowego**. Sprawuje nadzór nad działalnością związaną z narażeniem na promieniowanie jonizujące. **Prezes PAA jest niezależnym organem regulacyjnym i ma ustawowy zakaz promocji** wykorzystania promieniowania jonizującego, a w szczególności promocji energetyki jądrowej. **Państwowa Agencja Atomistyki jest urzędem** (dozoru jądrowego) przy pomocy którego wykonuje swoje zadania Prezes PAA.

Prezentację zwieńczyło kilka slajdów ilustrujących aktualną strukturę organizacyjną Agencji, oraz realizowane zadania w zakresie bezpieczeństwa jądrowego, ochrony radiologicznej, ochrony fizycznej: licencjonowania i kontroli obiektów jądrowych i postępowania z odpadami promieniotwórczymi, opracowywania wymagań i legislacji, całodobowego monitoringu radiacyjnego, rozbudowy sieci stacji wczesnego wykrywania skażeń, współpracy międzynarodowej i informacji społecznej. Podano liczby ilustrujące skalę tych działań: niemal 7,5 tys nadzorowanych działalności ze źródłami, ponad 900 kontroli, blisko 450 nadanych uprawnień i ponad 1,5 tys. decyzji dotyczących zezwoleń w ciągu roku. PAA dysponuje obecnie 41 stacjami wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych, przy czym od 2019 roku dokonano rozbudowy systemu stacji wczesnego wykrywania skażeń o 28 stacji PMS (*Permanent Monitoring Stations*) nowego typu. PAA, jako regulator (dozór jądrowy) będzie sprawować nadzór nad bezpieczeństwem elektrowni jądrowych w Polsce na etapach ich lokalizacji, budowy, rozruchu, eksploatacji i likwidacji. By sprostać temu wyzwaniu na wzmocnienie dozoru jądrowego PAA przewiduje się wydatki do 2033 roku sięgające kwoty ponad 400 mln złotych, z czego ponad połowę – na wzmocnienie kadrowe i budowę kompetencji, blisko 90 mln zł na dostosowanie zaplecza sprzętowego i strukturalnego PAA do zadań wynikających z Programu Polskiej Energetyki Jądrowej i kolejne blisko 90 mln zł na system wsparcia techniczno-eksperymentalnego dla PAA (przy czym szacuje się, że na samo wykonywanie zadań kon-

trolnych oraz pozostałych zadań towarzyszących realizacji zadań PAA wynikających z PPEJ wydatki nie przekroczą 4,4 mln złotych). W 2021 roku w PAA zatrudnionych było 27 osób realizujących zadania związane z programem PEJ. Do końca 2033 roku przewiduje się zatrudnienie 83 nowych pracowników na potrzeby PPEJ (z czego ok. 55 osób już w latach 2022–2023). Wszystko to pod hasłem iż „bezpieczeństwo jest najważniejsze!”.

Z okazji swojego 40 jubileuszu Państwowa Agencja Atomistyki otrzymała gratulacje i życzenia dalszej owocnej pracy od szeregu zaprzyjaźnionych, wiodących organizacji dozoru jądrowego na świecie w formie krótkich filmów, które wyświetlane były pomiędzy kolejnymi, omówionymi wyżej, wystąpieniami mówców obecnych na sali, w której odbywała się uroczystość. W tym trybie zebrani mieli okazję wysłuchać filmowych wystąpień, które przysłali:

- **Christopher Hanson** – przewodniczący Komisji Dozoru Jądrowego Stanów Zjednoczonych Ameryki **US NRC** (*United States Nuclear Regulatory Commission*),
- **Rumina Velshi** – przewodnicząca Kanadyjskiej Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego **CNSC** (*Canadian Nuclear Safety Commission*),
- **Bernard Doroszczuk** – przewodniczący francuskiego Urzędu Bezpieczeństwa Jądrowego **ASN** (*Autorité de Sûreté Nucléaire*),
- **Dana Drábová**, przewodnicząca czeskiego Państwowego Biura Bezpieczeństwa Jądrowego **SÚJB** (*Státní Úřad pro Jadernou Bezpečnost*),
- **Marta Žiaková**, przewodnicząca Urzędu Dozoru Jądrowego Republiki Słowackiej **ÚJD** (*Úrad Jadrového Dozoru*),
- **Petteri Tiippana**, Dyrektor Generalny Urzędu ds. Bezpieczeństwa Radiacyjnego i Jądrowego Finlandii – **STUK** (*Säteilyturvakeskus*).

Wszystkie te wystąpienia może Czytelnik znaleźć na YouTube pod adresem

<https://www.youtube.com/watch?v=AkeaXtewrDE>

Na zakończenie części oficjalnej uroczystości szereg osób spośród obecnych na sali zostało udekorowanych przez Minister Klimatu i Środowiska z udziałem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki odznaczeniami państwowymi:

- Medalami Prezydenta RP za Długoletnią Służbę (Fot. 5).
- Odznaczeniami Honorowymi za Zasługi dla Ochrony Środowiska i Klimatu (Fot. 6).
- Odznakami Honorowymi za Zasługi dla Energetyki (Fot. 7).

W uznaniu osiągnięć na rzecz bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz wkład w rozwój działalności Państwowej Agencji Atomistyki Prezes PAA przyznał odznakę okolicznościową – Odznakę Czterdziestolecia Utworzenia Państwowej Agencji Atomistyki. Odznakę tę otrzymały:



Fot. 5. Odznaczeni Medalem Prezydenta RP za Długoletnią Służbę wraz z Minister Anną Moskwą i Prezesem PAA dr. Łukaszem Młynarkiewiczem.



Fot. 6. Wyróżnieni Odznaką Honorową za Zasługi dla Ochrony Środowiska i Klimatu wraz z Minister Anną Moskwą i Prezesem PAA dr. Łukaszem Młynarkiewiczem.



Fot. 7. Wyróżnieni Odznaką Honorową za Zasługi dla Energetyki wraz z Minister Anną Moskwą i Prezesem PAA dr. Łukaszem Młynarkiewiczem.



Fot. 8. Uehonorowani Odznakami Okolicznościowymi Czerdziesiątolecia Państwowej Agencji Atomistyki przez Prezesa PAA dr. Łukasza Młynarkiewicza za pracę na rzecz nadzoru i kontroli w zakresie przestrzegania warunków bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (bj i or) oraz koordynacji i współpracy w zakresie bj i or.



Fot. 9. Uehonorowani przez Prezesa PAA dr. Łukasza Młynarkiewicza Odznakami Okolicznościowymi Czerdziesiątolecia Państwowej Agencji Atomistyki wieloletni pracownicy PAA.

- osoby, instytucje państwowe oraz organizacje pozarządowe, które przyczyniają bądź przyczyniły się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
 - organy wykonujące nadzór i kontrolę w zakresie przestrzegania warunków bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz organy i służby uczestniczące w systemie koordynacji oraz współpracy na rzecz bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (Fot. 8),
 - byli, wieloletni pracownicy PAA (Fot. 9).
- Na zakończenie oficjalnej części uroczystości wszyscy jej uczestnicy zostali podjęci obiadem wydanym przez Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki.

Redakcja Biuletynu

Licencjonowanie i wymagania bezpieczeństwa dla małych reaktorów modułowych

Licensing and safety requirements for small modular reactors

Marcin Dąbrowski
Państwowa Agencja Atomistyki

Streszczenie: W artykule zaprezentowano informacje o rozwoju technologii małych reaktorów modułowych SMR, a także określony w ustawie – Prawo atomowe proces licencjonowania oraz zawarte w ustawie i przepisach szczególnych wymagania w zakresie bezpieczeństwa jądrowego projektu obiektu jądrowego, które odniesiono do tego typu reaktorów. Ponadto artykuł zawiera informacje o międzynarodowych opracowaniach i procesach licencjonowania dotyczących tego rodzaju reaktorów.

Słowa kluczowe: Małe reaktory modułowe SMR, licencjonowanie, proces przedlicencyjny, wymagania bezpieczeństwa jądrowego.

Abstract: *The article presents information on the development of technology of small modular reactors (SMR), as well as the licensing process specified in the Atomic Law Act and specific requirements in the act and regulations regarding the nuclear safety of a nuclear facility design, which are related to this type of reactors. In addition, the article contains information on international studies and licensing processes for this type of reactors.*

Keywords: *Small Modular Reactors, licensing, pre-licensing, nuclear safety requirements.*

1. Mały modułowy reaktor – SMR

Dotychczasowe przepisy międzynarodowe w zakresie licencjonowania obiektów jądrowych i wymagań bezpieczeństwa jądrowego wskazują, że nie ma powszechnie przyjętej definicji małych modułowych reaktorów jądrowych (ang. *Small Modular Reactor – SMR*). Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) podaje informacje, że za jednostki takie można uznać zaawansowane reaktory jądrowe mogące produkować energię elektryczną, o mocy od 20 MWe do 300 MWe [1] na każdy moduł. Ponadto, posiadają one zaawansowane rozwiązania techniczne oraz mogą być budowane i eksploatowane jako jedno bądź wielomodułowe obiekty, a także możliwe jest ich częściowe wytworzenie w fabrykach i gdy jest to wymagane¹, dostarczenie do odbiorcy.

Istnieje ok. 80 różnych projektów reaktorów SMR różniących się możliwym zastosowaniem, produkowaną energią cieplną i uwzględnionymi w projekcie rozwiązaniami technicznymi, w szczególności zastosowanym rodzajem chłodziwa. Ze względu na zebrane przez dostawców technologii doświadczenia z projektowania i eksploatowa-

nia dużych reaktorów jądrowych najwięcej projektów reaktorów SMR jest przeskalowanymi, względem mocy i stosowanych systemów, reaktorami lekkowodnymi typu ciśnieniowego (ang. *Pressurized Water Reactor – PWR*) lub wrzącego (ang. *Boiling Water Reactors – BWR*). Ponadto, spotyka się projekty reaktorów SMR wysokotemperaturowych chłodzonych gazem (ang. *High Temperature Gas Cooled Reactor – HTGR*), chłodzonych stopionymi solami (ang. *Molten Salt Reactor – MSR*) lub reaktory prędkie wykorzystujące do chłodzenia ciekłe metale (ang. *Liquid Metal Fast Reactor – LMFR*). Podstawowe informacje o większości opracowywanych reaktorów SMR, będących w różnych fazach projektowania i licencjonowania, publikuje MAEA w swoich cyklicznych raportach. Ostatni taki dokument o nazwie „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*” opublikowany został w 2022 r.

Zgodnie z powyższym opracowaniem za najbardziej dopracowane projekty, które są eksploatowane, w trakcie budowy lub posiadają przygotowany szczegółowy projekt techniczny, można uznać projekty wskazane w poniższej tabeli.

¹ <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

Tabela 1. Najbardziej dopracowane techniczne projekty reaktorów SMR wg opracowania MAEA [2].**Table 1.** The most advanced designs of SMR reactors according to IAEA studies.

Projekt	Typ reaktora	Dostawca technologii	Kraj	Stan realizacji
CAREM	PWR	CNEA	Argentyna	W budowie
ACP100	PWR	CNNC/NPI	Chiny	W budowie
HAPPY200	PWR	SPIC	Chiny	Szczegółowy projekt
VK-300	BWR	NIKIET	Federacja Rosyjska	Szczegółowy projekt
Rolls-Royce SMR	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	Wielka Brytania	Szczegółowy projekt
BWRX-300	BWR	Ge-Hitachi	USA i Japonia	Złożony wniosek o zezwolenia na budowę
OPEN20	PWR	Last Energy Inc.	USA	Szczegółowy projekt
VOYGRM	PWR	NuScale Power Corporation	USA	Szczegółowy projekt
HTR-PM	HTGR	INET	Chiny	Eksploatacja
JIMMY	HTGR	JIMMY ENERGY SAS	Francja	Szczegółowy projekt
HTTR	HTGR	JAEA	Japonia	Eksploatacja
HTR-10	HTGR	INET	Chiny	Eksploatacja
BREST-OD-300	LMFR	NIKIET	Federacja Rosyjska	W budowie
4S	LMFR	ToshibaEnergy Systems & Solutions Corporation	Japonia	Szczegółowy projekt
SVBR	LMFR	JSC AKME Engineering	Federacja Rosyjska	Szczegółowy projekt
IMSR400	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Kanada	Szczegółowy projekt
Copenhagen Atomics Waste Burner	MSR	Copenhagen Atomics	Dania	Szczegółowy projekt

Zgodnie z powyższą tabelą, nieuwzględniającą reaktorów stosowanych w jednostkach pływających, obecnie eksploatowane są trzy reaktory SMR typu HTGR, a tylko jeden z tych reaktorów – HTR-PM wykorzystywany jest w celach czysto komercyjnych, czyli do produkcji energii elektrycznej. Pozostałe dwa reaktory mogą być uznawane również za reaktory badawcze, ponieważ ich głównym celem było przetestowanie technologii, a w przypadku reaktora japońskiego także próby wykorzystania energii jądrowej pośrednio do produkcji wodoru.

2. Licencjonowanie elektrowni jądrowych

Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2001 r. Nr 3, poz. 18 ze zm., tj. Dz. U. z 2021 r., poz.623 i 1941 oraz z 2022 r. poz 974), regulująca zasady licencjonowania obiektów jądrowych (proces uzyskiwania zezwoleń umożliwiających eksploatację), nie ma wprowadzonego podziału elektrowni jądrowych, zgodnie z czym wobec małego reaktora modułowego stosuje się te same wymagania w zakresie wydawania zezwoleń oraz bezpieczeństwa jądrowego, które musi spełnić projekt obiektu jądrowego, jak dla wielkoskalowych reaktorów jądrowych. Tak więc w myśl art. 4 ustawy oraz zgodnie z definicją obiektu jądrowego działalność związana z budową, rozruchem, eksploatacją lub likwidacją reaktora SMR wymaga zezwolenia wydawanego przez Prezesa Państwowej

Agencji Atomistyki (dalej PAA). Ustawa ta wprowadza trzy etapy licencjonowania w drodze do eksploatacji obiektu jądrowego, a także zezwolenie na likwidację obiektu jądrowego.

Istotnym elementem wpływającym na bezpieczeństwo reaktora jest **lokalizacja**, w jakiej zostanie on zbudowany, dlatego konieczne jest przed jej wyborem przeprowadzenie badań i pomiarów terenu. Na podstawie wyników oceny terenu wybranej lokalizacji sporządza się raport lokalizacyjny, który pozwala m.in. zidentyfikować zagrożenia zewnętrzne wykorzystywane do analiz bezpieczeństwa. Raport lokalizacyjny wraz ze wstępnym raportem bezpieczeństwa opracowanym na podstawie projektu obiektu jądrowego i wyników analiz bezpieczeństwa łącznie z innymi dokumentami wskazanymi w ustawie – Prawo atomowe oraz rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz.U. 2021 poz. 1667) składa się do Prezesa PAA z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego – tj. pierwszego etapu licencjonowania.

Prezes PAA weryfikuje spełnienie przez projekt elektrowni jądrowej wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony fizycznej, a następnie w terminie 24 miesięcy od złożenia wniosku wydaje decyzję w sprawie **zezwoleń na**

budowę obiektu jądrowego. Wnioskodawca po uzyskaniu od właściwych organów pozwolenia na budowę może rozpocząć ten proces, który zgodnie z założeniami projektowymi może potrwać od 24 miesięcy dla reaktorów SMR do nawet 72 miesięcy² dla reaktorów wielkoskalowych. Różnica ta w przypadku reaktorów SMR wynika z niższej generowanej mocy oraz mniejszych rozmiarów wyspy jądrowej, czego przyczyną jest ograniczenie w projekcie ilości zewnętrznych systemów bezpieczeństwa oraz pomocniczych z równoczesnym wprowadzeniem innych rozwiązań technicznych gwarantujących zapewnienie bezpieczeństwa. Ponadto, w przypadku reaktorów SMR częstym rozwiązaniem technicznym jest uwzględnienie w projekcie zintegrowanego ciśnieniowego zbiornika reaktora (ang. *Reactor Pressure Vessel* – RPV) pełniącego również funkcje stabilizatora ciśnienia, wytwornic pary oraz niejednokrotnie systemów bezpieczeństwa. Rozwiązanie takie pozwala wyprodukować ciśnieniowy zbiornik reaktora w zakładzie produkcyjnym, a następnie przetransportować i podłączyć go do pozostałej części systemów odbioru ciepła i konwersji energii.

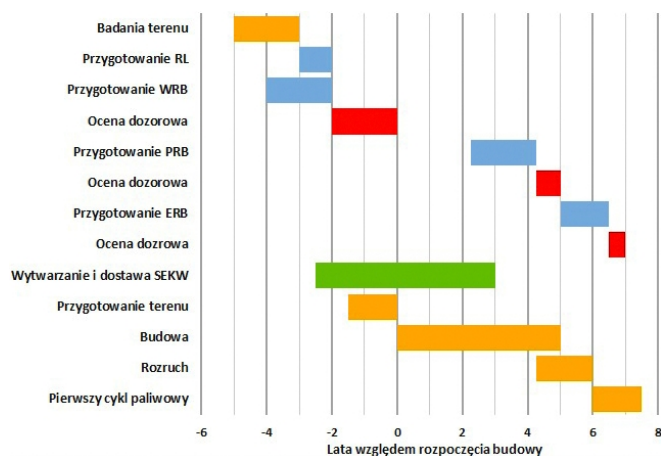
Kolejnymi krokami licencjonowania są **rozruch** oraz **eksploatacja**. Gdy budowa elektrowni jądrowej osiągnie już pewien stopień zaawansowania, możliwe jest rozpoczęcie testów przedekspluatacyjnych poszczególnych systemów obiektu jądrowego, a następnie – po uzyskaniu zezwolenia na rozruch – załadunek paliwa jądrowego do rdzenia reaktora i rozpoczęcie testów na mocy. Gdy raport z rozruchu obiektu jądrowego zostanie zatwierdzony przez Prezesa PAA, możliwa jest eksploatacja elektrowni jądrowej. W przypadku reaktorów SMR etap rozruchu ze względu na wyżej wspomnianą mniejszą liczbę systemów bezpieczeństwa i systemów pomocniczych powinien być krótszy.

Poniższe dwa rysunki (nr 1 i 2) przedstawiają proces licencjonowania dla reaktora wielkoskalowego oraz reaktora SMR w odniesieniu do uproszczonych teoretycznych harmonogramów przygotowania dokumentacji, budowy i uruchamiania obiektów jądrowych. W harmonogramach przyjęto **średni czas budowy** elektrowni jądrowej z reaktorem o dużej mocy równy 60 miesięcy, a z reaktorem SMR równy 24 miesiące.

Sprawdzona technologia

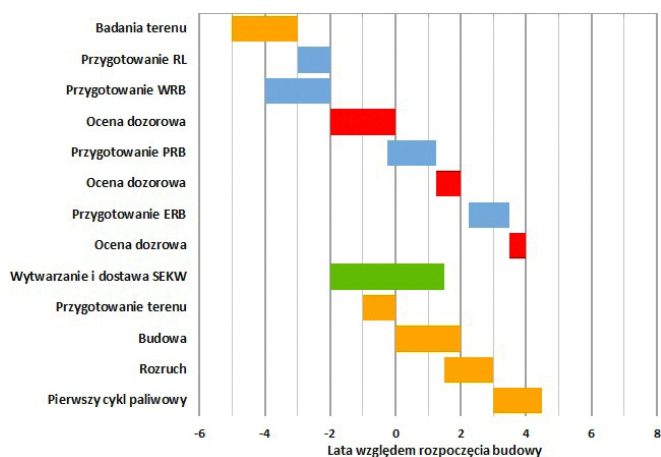
Jednym z istotnych dla reaktorów SMR wymagań dotyczących możliwości ich licencjonowania jest art. 36b ustawy – Prawo atomowe, który wskazuje, że w projekcie i procesie budowy obiektu jądrowego nie stosuje się rozwiązań i technologii, które nie zostały sprawdzone w praktyce w obiektach jądrowych lub za pomocą prób, badań oraz analiz. Zapisy te wymagają, aby w przypadku reaktorów, które są po raz pierwszy budowane (ang. *First-of-a-Kind* – FOAK), ich projekt m.in. musiał być zweryfi-

² Często w założeniach przyjmuje się wartość średnią 60 miesięcy.



Rys. 1. Proces licencjonowania dla reaktora wielkoskalowego względem teoretycznego harmonogramu uruchamiania i eksploatacji elektrowni jądrowej z takim reaktorem. RL – raport lokalizacyjny, WRB – wstępny raport bezpieczeństwa, PRB – pośredni raport bezpieczeństwa, ERB – eksploatacyjny raport bezpieczeństwa. SEKW – systemy i elementy konstrukcji i wyposażenia (oprac. własne).

Fig. 1. Licensing process for a large-scale reactor against a theoretical schedule for commissioning and operation of a nuclear power plant with such a reactor. RL – siting report, WRB – Preliminary Safety Analysis Report, PRB – Intermediate Safety Analysis Report, ERB – Operational Safety Analysis Report, SEKW – Structures, Systems and Components (SSC).



Rys. 2. Proces licencjonowania dla małego reaktora modułowego SMR względem teoretycznego harmonogramu uruchamiania i eksploatacji elektrowni jądrowej z takim reaktorem. Opisy jak na rysunku 1 (oprac. własne)

Fig. 2. Licensing process for a SMR reactor against a theoretical schedule for commissioning and operation of a nuclear power plant with such a reactor. Descriptions as in Figure No. 1.

kowany również poprzez wykonanie analiz (domyślnie analiz bezpieczeństwa). Z drugiej strony zgodnie z przepisami paragrafu 21 rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego oraz zakresu wstępnego raportu, oprogramowanie wykorzystywane do przeprowadzania analiz bezpieczeństwa musi być odpowiednio zwalidowane i zweryfikowane. W przy-

padku reaktorów lekkowodnych, eksploatowanych od ponad 60 lat, obecnie do przeprowadzania analiz bezpieczeństwa stosowane są kody obliczeniowe, które przeszły powyższe procesy zatwierdzenia i mogą być zwykle stosowane z powodzeniem również do analiz bezpieczeństwa lekkowodnych reaktorów SMR. Natomiast w przypadku reaktorów innych niż lekkowodne może być konieczne czasochłonne opracowanie od początku nowych kodów obliczeniowych. Powyższe wymaga uwzględnienia w kodzie obliczeniowym modeli matematycznych odpowiednich dla wszystkich zidentyfikowanych w projektowanym reaktorze zjawisk fizycznych, a następnie zweryfikowanie wyników opracowanego kodu z wykorzystaniem danych eksperymentalnych. Dane te otrzymać można w obiektach eksperymentalnych, które muszą w odpowiedni sposób odwzorowywać zachodzące w projektowanym reaktorze zjawiska fizyczne. Przykładem takiego obiektu jest francuskie laboratorium BETHSY³, które odpowiednio przeskalowane odwzorowuje pracę i zachowanie w wybranych warunkach awarii projektowych trzypętłowego reaktora PWR, a tym samym umożliwia weryfikację narzędzi analitycznych dla tego typu reaktorów lub dla reaktorów, w których zachodzą podobne zjawiska fizyczne.

3. Wymagania bezpieczeństwa jądrowego

Dokumentacja dołączana przez inwestora (wnioskodawcę) do wniosków o wydanie zezwoleń na budowę, rozruch i eksploatację ma za zadanie wykazać m.in., że:

- 1) projekt elektrowni jądrowej jest bezpieczny w trakcie normalnej eksploatacji, a powstałe uwolnienia substancji promieniotwórczych w przypadku warunków awaryjnych są ograniczone do poziomu tak niskiego, jak tylko to rozsądnie osiągalne, tak aby nie stwarzać zagrożenia dla ludzi i środowiska (**bezpieczny projekt elektrowni jądrowej**),
- 2) lokalizacja elektrowni jądrowej jest bezpieczna, tzn. mogące wystąpić w niej zdarzenia zewnętrzne naturalne oraz te, które wynikają z działalności człowieka, nie wpłyną na bezpieczną eksploatację elektrowni, a także w przypadku wystąpienia w elektrowni zdarzeń radiacyjnych możliwe będzie przeprowadzenie ewentualnych działań interwencyjnych (**bezpieczna lokalizacja elektrowni jądrowej**),
- 3) proces wytwarzania w fabrykach elementów istotnych dla bezpieczeństwa, tj. systemów i elementów konstrukcji i wyposażenia (ang. *structures, systems and components* – SSC) mających istotne znaczenia dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz proces budowy elektrowni we wskazanej lokalizacji

zacji będą prowadzone zgodnie z odpowiednimi systemami zapewnienia jakości przez wykwalifikowany personel z zachowaniem odpowiednich norm, specyfikacji technicznych oraz wymagań prawnych (**zapewnienie jakości w trakcie wytwarzania i budowy**),

- 4) rozruch i eksploatacja elektrowni jądrowej będzie prowadzona w sposób bezpieczny z wykorzystaniem zweryfikowanych procedur eksploatacyjnych, gwarantujących wykonywanie przez przeszkolony personel eksploatacyjny poprawnych działań w trakcie normalnej eksploatacji oraz potencjalnych warunków awaryjnych, a także ciągłe monitorowanie i kontrolowanie stanu elektrowni jądrowej, w tym zarządzania procesem starzenia się elementów istotnych dla bezpieczeństwa (**bezpieczny rozruch i eksploatacja**).

Wymagania bezpieczeństwa dotyczące projektu obiektu jądrowego, o których mowa wyżej, zawarte są w ustawie – Prawo atomowe oraz w rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego (Dz.U. 2012 poz. 1048) – tzw. **rozporządzeniu projektowym** oraz rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego (Dz.U. z 2012 r. poz. 1043) – tzw. **rozporządzeniu o analizach**.

Wymagania dotyczące zakresu badań terenu określone są w rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie szczegółowego zakresu przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego, przypadków wykluczających możliwość uznania terenu za spełniający wymogi lokalizacji obiektu jądrowego oraz w sprawie wymagań dotyczących raportu lokalizacyjnego dla obiektu jądrowego (Dz. U. z 2012 r. poz. 1025) – tzw. **rozporządzeniu lokalizacyjnym**, a te dotyczące bezpiecznego rozruchu i eksploatacji zawarte są w rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie wymagań dotyczących rozruchu i eksploatacji obiektów jądrowych (Dz. U. z 2012 r. poz. 1213).

Wymagania w zakresie bezpieczeństwa jądrowego wymienione w powyższych przepisach są technologicznie neutralne, czyli nie wskazują konkretnych rozwiązań technicznych, jakie mają być stosowane w elektrowni jądrowej, co pozwala osiągnąć cele bezpieczeństwa niezależnie od technologii reaktora jądrowego. Zazwyczaj wymagania te są identyczne dla wszystkich rodzajów obiektów jądrowych albo tam, gdzie wymóg dotyczy elektrowni jądrowej, są jednolite dla wszystkich rodzajów tego typu⁴ obiektów jądrowych, uwzględniając również reaktory SMR.

³ <https://www.oecd-nea.org/tiethysweb/facility/iet/25>

⁴ Przepisy omawianych tu rozporządzeń opracowane były przede wszystkim pod kątem dominujących obecnie w świecie technologii reaktorów lekkowodnych. Nie można wykluczyć, że w przypadku konieczności zastosowania ich w przyszłości w odniesieniu innych typów reaktorów (np. wysokotemperaturowych) przepisy te będą wymagały pewnych uzupełnień czy modyfikacji.

Lokalizacja reaktorów SMR w pobliżu instalacji przemysłowych

Zagadnieniem istotnym dla reaktorów SMR jest możliwość ich zlokalizowania i budowy w pobliżu instalacji przemysłowych. Polskie przepisy w zakresie wymagań bezpieczeństwa jądrowego w tej kwestii umożliwiają takie działania przy spełnieniu określonych wymagań. Zgodnie z par. 2 pkt. 5 rozporządzenia lokalizacyjnego w trakcie przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego konieczne jest, w ramach weryfikacji zagrożeń zewnętrznych będących skutkiem działalności człowieka, przeanalizowanie potencjalnych zagrożeń obiektu ze strony zakładów i instalacji przemysłowych mogących oddziaływać na obiekt chemicznie, biologicznie bądź mechanicznie, w szczególności zakładów stwarzających zagrożenie wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. Wyniki tej oceny brane są pod uwagę w opracowywanym raporcie lokalizacyjnym, a następnie w ramach analiz bezpieczeństwa obiektu jądrowego uwzględniających m.in. wszystkie zagrożenia zewnętrzne. Drugim istotnym zagadnieniem, będącym potencjalną przeszkodą, poruszonym w zakresie doboru lokalizacji dla reaktorów SMR, jest zgodnie z art. 36f ustawy – Prawo atomowe konieczność utworzenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół obiektu jądrowego. W polskich przepisach obszar ten, podobnie jak strefy planowania awaryjnego, o których mowa w art. 86 l ustawy – Prawo atomowe⁵, wynika z potencjalnych dawek skutecznych, jakie mogłyby otrzymać w trakcie normalnej eksploatacji lub warunków awaryjnych osoby znajdujące się wokoło obiektu jądrowego. Oznacza to, że dla reaktorów SMR, które teoretycznie stwarzają mniejsze zagrożenie radiologiczne m.in. ze względu na mniejszą ilość napromienianego paliwa jądrowego, obszar ograniczonego użytkowania, jak i strefy będą miały mniejsze zasięgi.

4. Wymagania międzynarodowe w zakresie reaktorów SMR

Polskie wymagania w zakresie bezpieczeństwa jądrowego, jakie ma spełniać projekt obiektu jądrowego, w dużej mierze oparte są na wymaganiach MAEA, a w szczególności na wymaganiach zawartych ww. dokumencie MAEA SSR-2/1 pt. „*Safety of Nuclear Power Plants: Design*” [3] oraz celach bezpieczeństwa i poziomach referencyjnych WENRA (ang. *Western European Nuclear Regulators' Association*). Obie te międzynarodowe organizacje w ostatnich latach stworzyły raporty dotyczące zastosowania istniejących już wymagań bezpieczeństwa jądrowego w odniesieniu do reaktorów SMR.

MAEA w 2020 r. wydała dokument IAEA-TECDOC-1936 „*Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment*” [4], w którym opisuje możliwość zastosowania wymagań zawartych w SSR-2/1 względem reaktorów SMR oraz proponuje zmiany w tych przepisach i ich interpretacjach w podziale na reaktory SMR typu lekkowodnego (PWR i BWR), a także te chłodzone gazem (HTGR). Dokonana przez ekspertów analiza prowadzi do wniosku, że wymagania MAEA wskazują cele bezpieczeństwa, które mają charakter ogólny i technologicznie neutralny, co powinno umożliwiać ich spełnienie przez lekkowodne reaktory SMR. Ponadto, dokument ten przedstawia propozycje wprowadzania tylko nieznacznych zmian w wymaganiach projektowych MAEA, w tym m.in. w zakresie:

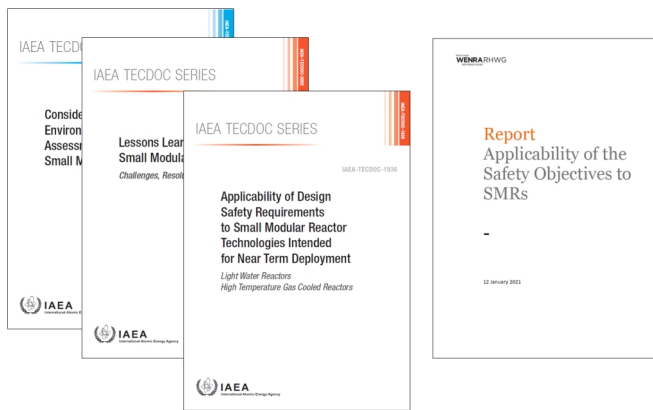
- współdzielenia systemów bezpieczeństwa i rozwiązań przewidzianych do rozszerzonych warunków projektowych, gdzie możliwe by było współdzielenie tych środków technicznych pomiędzy modułami elektrowni jądrowej z reaktorami SMR przy spełnieniu pewnych określonych warunków (proponowane nowe wymagania MAEA nr 33A 5/63A),
- uogólnienia wymagań w zakresie rozprzestrzeniania się skażeń w obiekcie jądrowym, aby umożliwić spełnienie tych wymagań przez inne rozwiązania techniczne niż tylko wskazywane w obecnych przepisach różnice ciśnień (zmieniane wymagania MAEA nr 73 6.49),
- odejścia od wymagań utworzenia obiektów zarządzania i przechowania odpadów promieniotwórczych tylko na terenie elektrowni jądrowej, a umożliwienie również tworzenia zorganizowanych obiektów służących w celu odbierania, zarządzania i przechowywania odpadów z wielu elektrowni jądrowych (zmieniane wymagania MAEA nr 78 6.59).

WENRA natomiast opublikowała w 2021 r. dokument „*Applicability of the Safety Objectives to SMRs*”⁶ [5], w którym opisuje możliwość zastosowania opracowanych celów bezpieczeństwa wobec reaktorów SMR. Wnioski z przeprowadzonej analizy, podobnie jak w przypadku MAEA, potwierdzają, że obecne międzynarodowe wymagania bezpieczeństwa jądrowego są możliwe do zastosowania wobec reaktorów SMR. Poza wyżej wskazanymi raportami dotyczącymi wymagań bezpieczeństwa jądrowego MAEA publikuje raporty związane z licencjonowaniem oraz oceną bezpieczeństwa tego typu reaktorów, w tym m.in. najistotniejsze raporty IAEA-TECDOC-1915 pt. „*Consideration for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors*” [6] oraz IAEA-TECDOC-2003 „*Lessons Learned in Regulation Small Modular Reactors*” [7]. Najważniejsze opracowania WENRA oraz MAEA zostały zaprezentowane na rysunku 3.

⁵ Tu warto zauważyć, że mimo stosunkowo małych **mocy elektrycznych** modułów SMR (20–300 MWe na moduł) **moce cieplne** większości projektowanych obiektów SMR mieszczą się w granicach 100–1000 MWt ([1] str. 17 Tab. 1), a więc kwalifikują się do I kategorii zagrożeń, o których mowa w art. 86 l i Załączniku nr 5 Ustawy.

⁶ Report Applicability of the Safety Objectives to SMRs

https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/WENRA_RHWG_Report_on_applicability_of_safety_objectives_to_SMR.PDF



Rys. 3. Raporty techniczne MAEA oraz WENRA dotyczące licencjonowania, wymagań bezpieczeństwa jądrowego i oceny bezpieczeństwa (oprac. własne).

Fig. 3. IAEA and WENRA technical reports on licensing, nuclear safety requirements and safety assessment.

5. Rozwiązania zwiększające efektywność licencjonowania

Ustawa – Prawo atomowe przewiduje możliwość wystąpienia do Prezesa Państwowej Agencji przez przyszłego wnioskodawcę zgodnie z art. 39b tych przepisów o wydanie ogólnej opinii dotyczącej planowanych rozwiązań organizacyjno-technicznych albo projektów dokumentów, które będą składane wraz z wnioskiem o wydanie zezwoleń na budowę, rozruch lub eksploatację elektrowni jądrowych. Zakres ogólnej opinii zależy od wnioskodawcy i może on obejmować zarówno dokumentację techniczną reaktora zblizoną szczegółowością do tej wymaganej we wstępnym raporcie bezpieczeństwa, jak również tylko elementy projektu reaktora bądź raportów technicznych opisujących zastosowane metodologie. Zgodnie z art. 39b ust. 2 ustawy Prezes PAA wydaje ogólną opinię w terminie 6 miesięcy, a w przypadkach szczególnie skomplikowanych w terminie 9 miesięcy. Najistotniejszymi zaletami tego procesu usprawniającymi dalszy proces licencjonowania są:

- możliwość identyfikacji na wstępnym etapie licencjonowania potencjalnych barier technicznych projektu reaktora, tzn. takich rozwiązań technicznych, które nie będą spełniać wymagań bezpieczeństwa jądrowego – pozwala to wprowadzić na wczesnym etapie w projekcie technicznym modyfikacje gwarantujące spełnienie wymagań bezpieczeństwa jądrowego albo zaproponować, tam gdzie jest to możliwe w przepisach, zmianę w zakresie wymagań bezpieczeństwa jądrowego, tak aby, stosując inne podejście lub inne rozwiązanie techniczne, zapewnić zachowanie bezpieczeństwa jądrowego na takim samym lub wyższym poziomie jak przy istniejącym przepisie,

- usprawnienie dalszego procesu licencjonowania poprzez zwiększenie wiedzy dozoru jądrowego na temat stosowanych rozwiązań technicznych i zachodzących w reaktorze zjawisk fizycznych jeszcze przed złożeniem wniosku o budowę elektrowni jądrowej – pozwala to dozorowi jądrowemu odpowiednio wcześniej oszacować potrzebne zasoby ludzkie i techniczne (potrzebne narzędzia analityczne) do dalszego licencjonowania reaktora.

Z takiego rozwiązania skorzystały w lipcu 2022 r. równocześnie i niezależnie od siebie firmy KGHM i OSGE. Spółka Skarbu Państwa KGHM⁷ Polska Miedź S.A. złożyła wniosek o wydanie ogólnej opinii dla reaktora NuScale, a OSGE (Orlen Synthos Greem Energy) analogiczny wniosek – dla reaktora BWRX. Następnie we wrześniu 2022 r. wniosek o ogólną opinię w zakresie projektu dokumentu wystąpiły Polskie Elektrownie Jądrowe.

Analogiczne przepisy ułatwiające analizę projektu reaktora na wczesnym etapie licencjonowania stosowane są również w zagranicznych dozorach jądrowych. Kanadyjska Komisja Bezpieczeństwa Jądrowego (ang. *Canadian Nuclear Safety Commission – CNSC*) wykorzystuje proces VDR (ang. *Vendor Design Review*), w ramach którego prowadzi równoczesną ocenę 10 technologii reaktorów SMR⁸, a brytyjski dozór jądrowy (ang. *Office for Nuclear Regulation – ONR*) stosuje proces GDA (ang. *General Design Assessment*), w ramach którego prowadzi ocenę reaktora SMR Rolls-Royce o mocy 470 MWe. Zarówno CNSC, jak i ONR określają zakres informacji, jaki trzeba przedstawić we wniosku o przeprowadzenie oceny. W przypadku amerykańskiego dozoru jądrowego – Komisja Dozoru Jądrowego Stanów Zjednoczonych Ameryki (ang. *U.S. Nuclear Regulatory Commission – US NRC*) za analogiczny proces przedlicencyjny można uznać ocenę raportów tematycznych (ang. *Topical Reports*), dla których treść jest uzgadniana pomiędzy wnioskodawcą a dozorem jądrowym przed ich złożeniem i często dotyczy ona poszczególnego systemu lub zagadnienia technicznego specyficznego dla danego reaktora.

6. Podsumowanie

W zakresie wymagań bezpieczeństwa jądrowego dla reaktorów lekkowodnych typu SMR organizacje międzynarodowe, takie jak WENRA i MAEA, przeprowadziły analizy wskazujące, że obecnie istniejące wymagania są odpowiednie i nie są konieczne w tym zakresie znaczące zmiany. Wnioski te wstępnie potwierdzają toczące się procesy przedlicencyjne oraz procesy licencyjne, tak jak np. w przypadku Kanady, gdzie OPG (ang. *Ontario Power*

⁷ KGHM to akronim wcześniejszej nazwy przedsiębiorstwa państwowego Kombinat Górniczo-Hutniczy Miedzi w Lubinie, zmienionej w 1991 roku.

⁸ <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/#p2>

Generation) po dwuletniej ocenie przedlicencyjnej złożyło 31 października 2022 r. do kanadyjskiego dozoru jądrowego wniosek o wydanie zezwolenia na budowę reaktora SMR. Równocześnie trwają międzynarodowe dyskusje, w ramach prac MAEA oraz grup roboczych – Europejska Grupa Organów Regulacyjnych ds. Bezpieczeństwa Jądrowego (ENSREG) i WENRA, dotyczące usprawnienia procesów licencyjnych, które umożliwiłyby, z zachowaniem najwyższych standardów bezpieczeństwa, skrócenie czasu trwania licencjonowania tego typu reaktorów.

Notka o autorze

Mgr inż. Marcin Dąbrowski – absolwent wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, inspektor dozoru jądrowego II st., dyrektor Departamentu Bezpieczeństwa Jądrowego Państwowej Agencji Atomistyki (e-mail: mdabrowski@paa.gov.pl; ORCID: 0000-0002-6708-2333).

Literatura

1. IAEA-TECDOC-2010 „*Approach and Methodology for the Development of Regulatory Safety Requirements for the Design of Advanced Nuclear Power Reactors*”, IAEA TECDOC Series, Vienna, 2022.
2. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition.
3. IAEA SSR-2/1 *Safety of Nuclear Power Plants: Design*, Vienna.
4. IAEA-TECDOC-1936 „*Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment*”, IAEA TECDOC Series, Vienna, 2020.
5. *Report on applicability of safety objectives to SMR*, WENRA RHWG Report, 2021.
6. IAEA-TECDOC-1915 pt. „*Consideration for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors*”, IAEA TECDOC Series, Vienna, 2020.
7. IAEA-TECDOC-2003 „*Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors*”, IAEA TECDOC Series, Vienna, 2022.

Kwestie bezpieczeństwa, ochrony i zabezpieczeń małych reaktorów modułowych – SMR

Safety, security and safeguards issues of Small Modular Reactors – SMR

Krzysztof Rzymkowski

Stowarzyszenie Ekologów na rzecz Energii Nuklearnej (SEREN)

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane kwestie, istotne przy opracowywaniu zaleceń bezpieczeństwa, ochrony i zabezpieczeń projektowanych małych reaktorów modułowych – SMR.

Słowa kluczowe: System zabezpieczeń, ochrona, pokolenia reaktorów, materiał jądrowy, paliwo jądrowe, iPWR, HTR, LMFR, ochrona fizyczna, bezpieczeństwo systemów informatycznych.

Abstract: *The paper presents the selected issues relevant to the development of safety, security and safeguards recommendations for the designed Small Modular Reactors – SMR.*

Keywords: *Safeguards, security, reactors generation, nuclear material, nuclear fuel, iPWR, HTR, LMFR, physical protection, cyber security.*

Wprowadzenie

Rozwijające się w ostatnich latach technologie budowy małych reaktorów modułowych (SMRs – *Small Modular Reactors*) i przewidywane ich szerokie wykorzystanie może budzić uzasadnioną obawę i wymaga działań chroniących (*security*) przed ewentualnym niekontrolowanym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych i ich użyciem w celach militarnych lub przestępczych [1]. Kontrola nierozprzestrzeniania materiałów jądrowych (*safeguards*) jest prowadzona przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA). Agencja opracowuje również zalecenia dotyczące standardów bezpieczeństwa (*safety*). Nowe zalecenia dotyczące zasad bezpieczeństwa i licencjonowania SMR powstają przy współpracy ekspertów w powołanym przez MAEA w marcu 2015 roku Forum Regulatorów SMR (*Small Modular Reactor Regulator's Forum*). Forum skupia specjalistów krajowych urzędów dozoru jądrowego opracowujących krajowe normy regulujące zasady wykorzystania nowej klasy reaktorów o mocy nie przekraczającej 300 MW(e). Budowa modułowa i zwartość konstrukcji są istotą SMR i mają zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo i ochronę. Modułowość budowy pozwala na rozbudowę

obiektu poprzez dołączanie nowych jednostek reaktorowych w tej samej lokalizacji lub tej samej infrastrukturze z zapewnieniem połączeń między modułami. Problemy związane z bezpieczeństwem jednego z modułów nie powinny wpływać na pracę obiektu. Zwartość konstrukcji reaktora skutkuje koniecznością wprowadzenia nowych wymagań bezpieczeństwa dotyczących jego projektowania, budowy, uruchamiania, eksploatacji oraz likwidacji. Mimo że przegląd obecnych przepisów bezpieczeństwa sugeruje, iż nie ma potrzeby tworzenia całkowicie nowych standardów, MAEA uważa za konieczne opracowanie elastycznych ram regulacyjnych dla **innowacyjnych projektów**, aby dostosować je do obowiązujących norm bezpieczeństwa [2].

Szerokie zastosowanie małych modułowych reaktorów jądrowych w różnych dziedzinach wynika z ich podstawowych zalet, a przede wszystkim z obniżenia kosztów i skrócenia czasu budowy. W ciągu najbliższych 10–20 lat przewidywane jest przyspieszenie rozpowszechnienia się budowy reaktorów SMR przeznaczonych do wytwarzania energii elektrycznej szczególnie w krajach rozwijających się, o ograniczonych zasobach finansowych oraz nie posiadających rozbudowanych sieci energetycznych. Jest

to w pewnym sensie powrót do początkowej idei budowy małych reaktorów jądrowych przeznaczonych dla baz wojskowych zlokalizowanych w trudno dostępnych obszarach. W krajach uprzemysłowionych będą one wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu, np. do produkcji wodoru, ciepła technologicznego, odsalania wody morskiej, a także do wytwarzania energii elektrycznej na potrzeby lokalne.

Małe reaktory modułowe

Według klasyfikacji MAEA małe reaktory to reaktory o mocy elektrycznej mniejszej niż 300 MW(e), reaktory średniej wielkości to reaktory o mocy elektrycznej 300–700 MW(e). Konstrukcje reaktorów SMR są bardzo różnorodne. Różnorodność wynika z przeznaczenia reaktora i ma wpływ na koncepcję budowy, sposobów chłodzenia, wprowadzenia automatyzacji, a nawet na stosowanie zdalnego sterowania. Systemy chłodzenia reaktorów są również bardzo zróżnicowane. Poza klasycznymi metodami chłodzenia wodą stosowane są metody chłodzenia gazem i metalami ciekłymi (sód, ołów, mieszanina ołowio-bizmutowa). Oprócz lądowych reaktorów stacjonarnych pojawiły się projekty reaktorów przewoźnych, zarówno lądowych, jak i morskich (elektrownie na barkach), lub reaktorów stosowanych jako jednostki napędowe, a nawet zdalnie sterowane reaktory umieszczane pod wodą (również jako elektrownie). Planowane są także instalacje wielomodułowe (tj. 2–12 połączonych indywidualnych energetycznych modułów reaktorowych o mocy 10–300 MW(e) na moduł). W większości proponowanych rozwiązań dąży się do większego upakowania elementów automatyki sterującej i pomiarowej wewnątrz obudowy reaktora. Różnorodność koncepcji budowy reaktorów SMR wymaga wdrożenia bardziej wyrafinowanych metod ich **ochrony fizycznej** dostosowanych indywidualnie do danego typu reaktora.

W tabelach 1–4 przedstawiono aktualne zaawansowane propozycje będące w trakcie opracowywania klasyfikowane wg metod chłodzenia.

Szerokie wprowadzenie reaktorów SMR wymaga:

- opracowania umów międzypaństwowych dotyczących ochrony i transportu wzbogaconego paliwa,
- opracowania i analizy możliwych scenariuszy sabotażu i ataków terrorystycznych na SMR¹ oraz instrukcji zapobiegania im,
- opracowanie nowych koncepcji zabezpieczeń, nowych detektorów, i systemów obserwacyjno-rejestrujących sterowanych zdalnie,
- opracowania rozwiązań systemu zabezpieczeń dla transportu elementów paliwowych zawierających pluton.

Przy wprowadzaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów SMR należy zapewnić odpowiednie warunki weryfikacji wymagań układu NPT dotyczących **ochrony fizycznej** (*security*), szczególnie przy rozbudowanej sieci małych reaktorów modułowych [4].

Ochrona obiektu jądrowego

Obiektami jądrowymi są obiekty (budynki wraz z wyposażeniem), w których są produkowane, przetwarzane, wykorzystywane, przemieszczane, przechowywane lub usuwane (np. w wyniku powstałej awarii) materiały promieniotwórcze. Ochrona (*security*) obiektu jądrowego polega na zapobieganiu, wykrywaniu, odpowiednim reagowaniu na przestępczą lub celową nieautoryzowaną działalność związaną bezpośrednio z materiałami jądrowymi lub innymi materiałami promieniotwórczymi, obiektami jądrowymi lub innymi celowymi działaniami, które mogą spowodować bezpośrednio lub pośrednio zagrożenia dla ludzi i środowiska. Ochrona obiektu jądrowego obejmuje:

- **system zabezpieczeń** materiałów jądrowych (zalecenia są zawarte w dokumentach: Umowa o zabezpieczeniach wszechstronnych MAEA INFCIRC/153, Protokół Dodatkowy (*Additional Protocol*) z 1992, umowa o małych ilościach (*Small Quantities Protocol*) z 2005),
- **systemy informatyczne** (zalecenia są zawarte w dokumentach: *Computer Security for Nuclear Facilities IAEA, Nuclear Security Series No 17, Vienna 2015, ISO/IEC 27000 [1] ISO/IEC 27001 [2], ISO/IEC 27002 [3], CFR 73.54*),
- **system ochrony fizycznej** (zalecenia są zawarte w dokumencie INFCIRC/225 rev. 5 z 2011).

System zabezpieczeń materiałów jądrowych

System zabezpieczeń materiałów jądrowych (*safeguards*) koncentruje się przede wszystkim na: uniemożliwieniu wykorzystania ich do produkcji broni jądrowej (poza układem NPT) oraz zabezpieczeniu przed kradzieżą i wykorzystaniem do działań terrorystycznych. Szczególnie zagrożenie terroryzmem wymusza konieczność wzmoczonej, dokładniejszej kontroli i ochrony materiałów jądrowych. Niewielkie wymiary fizyczne paliwa i ograniczona jego ilość w reaktorach SMR powodują, że elementy paliwowe nie zawierają większej ilości materiału jądrowego, co zmniejsza niebezpieczeństwo prób jego nieuprawnionego pozyskania. Aby uzyskać znaczącą ilość materiału jądrowego, należałoby ukraść wiele elementów paliwowych.

Różnorodność konstrukcji elementów paliwowych – typów **nieoznakowanego paliwa** (paliwo kulowe, ciekłe sole, nietypowe zestawy paliwowe) oraz ich **niewielkie**

¹ Określenie podstawowego zagrożenia projektowego (DBT – *design basis threat*) zgodnie z przepisami artykułów 41n-41t ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2001 r. Nr 3, poz. 18 ze zm., tj. Dz.U. z 2021 r., poz. 623 i 1941 oraz z 2022 r. poz. 974).

Tabela 1. SMR-y chłodzone wodą (źródło: [3, 5, 6]).**Table 1.** Water cooled SMRs.

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Liczba modułów	Moc MWe
CAREM-25	iPWR	CNEA, Argentyna	1	27
mPOWER	iPWR	B&W, USA	2	360
NuScale	iPWR	NuScale, USA	12	540
SMART	iPWR	KAERI, Korea Płd.	1	100
IRIS	iPWR	IRIS Consortium /Polimi, Włochy	1	325
SMR – 160	iPWR	Holtec, USA	1	160
ACP100	iPWR	CNNC//NPIC, Chiny	2	200
VBER -300	iPWR	OKBM Afrikantow, Rosja	1	300
Westinghouse SMR	iPWR	Westinghouse Electric, USA	1	225
AHWR – 300 LEU	iPWR	BARC, Indie	1	300
BWRX-300	BWR	General Electric-Hitachi, USA	1	300

iPWR – *Integral Pressurized Water SMR* – zintegrowany ciśnieniowo – wodny SMR

Tabela 2. SMR-y chłodzone gazem (źródło: [3]).**Table 2.** Gas cooled SMRs.

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Liczba modułów	Moc MWe
HTR - PM	HTGR	INET Tsinghua University, Chiny	2	210
EM	HTGR	General Atomic, USA	1	240
PBMR	HTGR	Eskom PBMR, RPA	1	165

HTGR – *High Temperature Gas Reactor* – reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem.

Tabela 3. SMR-y chłodzone metalami (źródło: [3]).**Table 3.** Liquid metal cooled SMRs.

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Liczba modułów	Moc MWe
SYBE - 100	LMFR	AKME, Rosja	1	101
BREST – OD 300	LMFR	RDIFE, Rosja	1	100
PRISM	LMFR	GE Nuclear Energy, USA	4	1244
4S	LMFR	Toshiba, Japonia	1	10–30
ARC-100	LMFR	GE Hitachi Nuclear, Kanada		100

LMFR – *Liquid Metal Fast Reactor* – reaktor prędkości chłodzony ciekłym metalem.

Tabela 4. SMR-y oparte na doświadczeniach morskich (źródło: [3]).**Table 4.** Marine based SMRs.

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
KLT – 40S	FPU, TNPP	OKBM Afrikantow, Rosja	2	70
Flexblue	osadzony na dnie	DCNS Francja	1	160

wymiary wymagają opracowania nowych dokładniejszych metod weryfikacji. Ponadto w proponowanych rozwiązaniach projektowana jest zmiana wzbogacenia uranu w paliwie reaktora. Dotychczas w reaktorach jądrowych stosowano paliwo o niskim wzbogaceniu, do 4% LEU (*Low Enrichment Uranium*)². Obecnie pojawiają się

projekty małych reaktorów modularnych z paliwem wzbogaconym do 20%. Jest to graniczna wartość wzbogacenia dopuszczalna w cywilnych zastosowaniach komercyjnych. Wynika to częściowo z konieczności wydłużenia czasu wymiany paliwa w rdzeniu, która to wymiana jest utrudniona. **Wydłużenie czasu pomiędzy kolejnymi wy-**

² Wzbogacenie to stosunek sumarycznej wagi izotopów U²³³ i U²³⁵ do całkowitej wagi używanego uranu wyrażony w %.

mianami paliwa w wyniku zwiększenia wzbogacenia do np. 20% wymusza wprowadzenie dodatkowych zabezpieczeń.

Modułowa konstrukcja reaktorów umożliwia budowę elektrowni jądrowej składającej się z indywidualnych bloków energetycznych łączonych w zestawy o określonej mocy. Planowane są instalacje wielomodułowe (tj. 2-12 połączonych indywidualnych energetycznych modułów reaktorowych o mocy 10-300 MW(e) na moduł). Każdy moduł stanowi zintegrowany blok np. lekko-wodnego reaktora jądrowego połączonego z własnym zestawem urządzeń, włącznie z turbiną parową i generatorem. Basen wypalonego paliwa jest wspólny dla wszystkich modułów.

Wymiana paliwa w każdym z modułów następuje po kolei zgodnie z zaplanowanym czasem wypalenia paliwa. **Podczas operacji wymiany reaktor zostaje fizycznie przesunięty** ze swojego roboczego pola do stanowiska, gdzie następuje przeładowywanie paliwa. Wypalone paliwo jest transportowane do basenu. Przy większej liczbie reaktorów **proces wymiany** zbliża się do **stanu pracy ciągłej**, ponieważ jeden reaktor lub kilka zawsze są otwarte. Wymaga to **stałej (całodobowej) obecności inspektora** MAEA. Jednocześnie przenoszenie reaktora do innego pomieszczenia związane jest z **przepływem materiału jądrowego w obiekcie**, co też wymaga kontroli.

Nowym problemem dla projektantów systemu zabezpieczeń jest **nieprzezroczystość chłodziwa**. Przy innym chłodziwie niż woda, np. ciekły metal, utrudniona jest identyfikacja elementów paliwowych wymagająca specjalizowanego legalizowanego urządzenia. W celu zmniejszenia powierzchni przechowywania i ze względów ekonomicznych **wypalone paliwo układane jest warstwami**, co utrudnia jego identyfikację. Sposób kontroli paliwa wymaga uzgodnień z projektantem i producentem reaktora.

Systemy obserwacyjno-rejestrujące stanowią podstawę kontroli przepływu materiału, umożliwiając zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym. Śledzenie **transportu materiału wewnątrz obiektu** jest powiązane ze sprawdzeniem, czy jest on testowany w wyznaczonych punktach pomiarowych. Pozwala również obserwować, czy nie manipulowano przy zainstalowanych urządzeniach MAEA oraz potwierdzić nienaruszalność plomb. **Zdalnie sterowane systemy** obserwacyjno-rejestrujące są używane w trudno dostępnych obszarach obiektu i w odległych lokalizacjach, stanowiąc kluczowe narzędzie systemu zabezpieczeń.

Opracowanie systemu zabezpieczeń dla SMR powinno się rozpocząć już na etapie projektu, co najlepiej widać na przykładzie reaktorów iPWR – *Integral Pressurized Water SMR* (zintegrowany ciśnieniowo-wodny SMR), do którego **paliwo jest załadowywane u producenta i plombowane na czas transportu**. Wszystkie operacje dotyczące materiału jądrowego (zarówno w fabryce, jak w miejscu instalacji reaktora) powinny być wykonywane **pod kontrolą**

dublowanych systemów obserwacyjno-rejestrujących z możliwością zdalnej komunikacji.

Systemy informatyczne

Jednym z najważniejszych elementów systemu ochrony obiektu jądrowego jest ochrona systemów informatycznych. Efektem zamachu terrorystycznego np. na elektrownie jądrowe może być dezorganizacja sieci energetycznej kraju lub regionu. Dokonując zamachu na systemy informatyczne elektrowni jądrowej, można wpływać na jej działanie, zatrzymać pracę reaktora, pracę turbin, wyłączyć system chłodzenia, wyłączyć oczyszczalnię ścieków lub nawet spowodować awarię prowadzącą do katastrofy. Podobnie można wpływać na procesy produkcyjne w innych obiektach przemysłu jądrowego (zakładach wzbogacania, produkcji czy przerobu paliwa), takich jak zakłady wykorzystujące SMR w procesie technologicznym. Każde z tych działań może prowadzić do skażenia środowiska. Efekty te mogą być spotęgowane przez różnorodność zastosowań reaktorów SMR wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu. System ochrony fizycznej obiektu jądrowego, szczególnie przy rozbudowanej wewnętrznej sieci informatycznej, musi być odporny na próby jej zniszczenia, zrujnowania, dekonspiracji, modyfikacji, wyłączenia, kradzieży, uzyskania nieautoryzowanego dostępu lub wykorzystania nielegalnych danych. Musi być on również odporny na akty sabotażu, tzn. na bezpośrednie i zamierzone działanie w celu unieruchomienia obiektu, pozyskania materiału jądrowego w procesie jego wykorzystywania oraz transportu, które może zagrozić zdrowiu i bezpieczeństwu personelu, ludności, środowisku i uwolnić substancje promieniotwórcze.

Systemy informatyczne opracowywane dla obiektów korzystających z SMR powinny stosować wyjątkowe niestandardowe rozwiązania technologiczne, np. systemy ograniczenia dostępu, alarmy włamań itp. Rozwiązania odnoszące się do bezpieczeństwa i ochrony muszą być wielostopniowe, tak by pokonanie jednej bariery lub kilku barier przez przypadek lub zorganizowane działanie zapewniało jak najmniejsze szkody.

Współczesne technologie informatyczne umożliwiają wprowadzenie istotnych zmian w kontroli i sterowaniu pracą oddalonych obiektów. Coraz częściej w przemyśle jądrowym wprowadzane jest zdalne sterowanie bezobsługowych systemów pomiarowych i systemów sterowania pozwalające skrócić czas wykrywania awarii i przyspieszyć podjęcie działań naprawczych nawet bez bezpośredniej ingerencji techników w obiekcie [7]. Dodatkową zaletą zastosowania zdalnego sterowania jest możliwość przeprowadzenia obserwacji działań dotyczących materiałów jądrowych i odczytu zebranych danych w dowolnie wybranym czasie. Ma to szczególne znaczenie dla systemu zabez-

pieczeń SMR ze względu na planowaną mobilność np. przy wymianie paliwa.

Dlatego też MAEA inicjuje różne działania (spotkania, dyskusje, konferencje) mające na celu wspieranie krajowych propozycji zapobiegania zagrożeniom związanym z bezpieczeństwem komputerowym małych reaktorów modułowych (SMR), w których będą stosowane nowoczesne systemy informatyczne. W roku 2020 [8] podjęto wstępne prace nad przygotowaniem propozycji wymagań wprowadzania zabezpieczeń reaktorów typu SMR, poczynając od ich projektowania poprzez licencjonowanie i eksploatację. W wielkoskalowych elektrowniach jądrowych większość systemów sterowania znajduje się na terenie elektrowni, w systemach SMR natomiast pojawia się **problem komunikacji zdalnej**, co wymaga wprowadzenia nowych rozwiązań. W czerwcu 2023 r. planowana jest międzynarodowa konferencja na temat bezpieczeństwa komputerowego w świecie jądrowym. Systemy komputerowe w obiektach jądrowych wymagają ciągłych działań zapobiegawczych łagodzących skutki wszelkich zagrożeń.

System ochrony fizycznej

Zasadniczym zadaniem systemu ochrony fizycznej jest:

- **powstrzymanie** ewentualnych zamachowców przed próbami nielegalnego uzyskania materiałów jądrowych; jest to realizowane poprzez wprowadzenie zapór fizycznych powodujących, że obiekt jądrowy przestaje być łatwym celem zamachu;
- **wykrywanie nieuprawnionych działań**; polega na wprowadzeniu kompleksowego systemu czujników, straży obiektowej, procedur dostępu do materiału jądrowego,
- **oszacowanie ewentualnego zagrożenia** zniszczeniem obiektu, użyciem zdobytego materiału w innym rejonie, powstaniem ewentualnego skażenia i szans jego usunięcia [9],
- **wprowadzenie barier opóźniających** dostęp do materiałów jądrowych (płyty, kodowane zamki, ściany, zabezpieczenia otworów w budynkach – wentylacyjnych okiennych, dachowych),
- **uniemożliwienie** wykorzystania przez zamachowców zdobytego materiału jądrowego.

System ochrony fizycznej stanowi zespół procedur określających działanie ludzi – personelu obiektu oraz planu rozmieszczenia różnego rodzaju zapór we wrażliwych miejscach.

Omawiając system ochrony fizycznej reaktorów SMR, należy wziąć pod uwagę dwa rodzaje ochrony [10]:

- ochronę niewielkiego obiektu, w którym wykorzystywany jest **pojedynczy reaktor**, o małej mocy,
- ochronę obiektu, w którym wykorzystywany jest **zestaw kilku reaktorów**, o znacznej mocy całkowitej.

Ochrona obiektu – pojedynczy reaktor

Jak już wspomniano, pewne właściwości konstrukcji małego reaktora modułowego mogą być wykorzystane w systemie ochrony fizycznej. Jedną z nich jest zwarta konstrukcja wodno-ciśnieniowego reaktora SMR, która wyklucza utratę chłodziwa zamkniętego w zbiorniku reaktora. Utrata chłodziwa mogłaby doprowadzić do przegrzania rdzenia i katastrofy. Ponadto w tych reaktorach wykorzystuje się **szereg biernych samoczynnie działających zabezpieczeń** umożliwiających wyłączenie reaktora w sytuacjach awaryjnych. Przewiduje się, że reaktory tego typu będą pracowały zanurzone w wodzie lub będą umieszczone poniżej powierzchni ziemi. Również **budynek reaktora** będzie częściowo lub całkowicie **schowany pod powierzchnią ziemi, co ułatwia budowanie zapór dostępu** do strefy tzw. istotnego obszaru wewnętrznego, w którym znajdują się wszystkie wrażliwe elementy sterowania pracą reaktora i przechowalniki paliwa. Takie rozwiązanie **eliminuje** również problem **uderzenia samolotem (dronem)** w reaktor, a także zapewnia **dodatkowo ochronę przed promieniowaniem**. Mała moc reaktora i samoczynne metody chłodzenia zmniejszają potrzebę ingerencji operatora w czasie awarii. **Samoczynne systemy awaryjne zmniejszają prawdopodobieństwo, że sterownia stanie się celem ataku**. W celu zwiększenia bezpieczeństwa obiektu z reaktorem SMR na etapie jego projektowania wprowadzane są samoczynne elementy sterujące, tak aby ich lokalizacja, dostęp do nich był trudny i czasochłonny. Wprowadzane **elementy bezpieczeństwa są dublowane**, tak by zniszczenie dokonane w jednej lokalizacji nie wpływało na bezpieczeństwo całości. Ponadto projektuje się **kilka warstw barier** bezpieczeństwa oraz ograniczanie dostępu do istotnych elementów obiektu.

Podobnie jak w wielkoskalowych reaktorach lekkowodnych LWR (*Light Water Reactors*), bardzo ważnym elementem ochrony jest dobór personelu, który w przypadku małych reaktorów może być mniej liczny ze względu na mniejszy obszar podlegający kontroli i ilość chronionych elementów. Przewiduje się zachowanie wydzielonych obszarów wymagających autoryzacji:

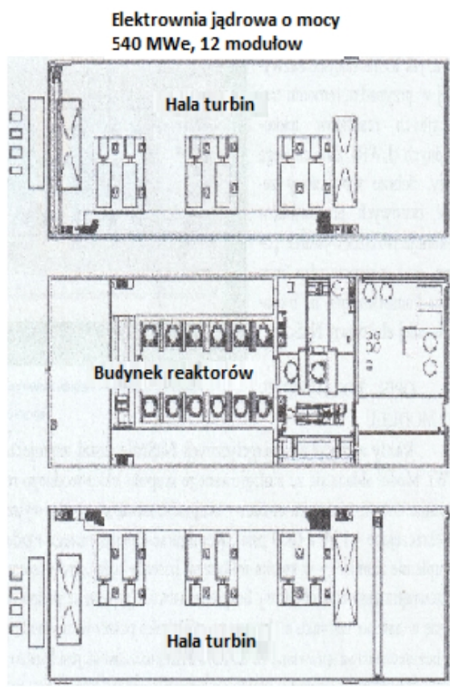
- **obszar o ograniczonym dostępie** – obszar podlegający kontroli o ograniczonym dostępie objęty ochroną fizyczną, w którym znajduje się obiekt lub materiał jądrowy,
- **obszar chroniony** – obszar wewnątrz obszaru o **ograniczonym dostępie**, w którym znajdują się materiały jądrowe lub inne cele sabotażu, otoczony barierami fizycznymi z dodatkowymi środkami ochrony fizycznej,
- **obszar istotny (ściśle chroniony)** – przestrzeń wewnątrz obszaru **chronionego**, w której znajdują się przyrządy, urządzenia systemowe lub **materiał jądrowy**, gdzie działania sabotażowe mogą spowodować pośrednio lub bezpośrednio niedopuszczalne **skutki radiologiczne**,

- **obszar wewnętrzny** – obszar nadzorowany z dodatkowymi środkami ochronnymi wewnątrz obszaru chronionego, gdzie znajduje się materiał jądrowy.

Zwykle obiekt jądrowy jest otoczony obszarem ograniczonego użytkowania, w którym nie powinny powstawać obiekty mogące mieć wpływ na bezpieczeństwo obiektu jądrowego, np. rafinerie, magazyny itp. Ze względu na różnorodność wykorzystywania różnych typów reaktorów SMR producent reaktora może ubiegać się o zwolnienie z niektórych regulacji. Jest to ważne ze względu na możliwość używania reaktorów SMR do wspomaganiania cykli technologicznych w różnych zakładach przemysłowych.

Ochrona obiektu – zestaw kilku reaktorów

Projekt elektrowni jądrowej mocy 540 MW(e) zbudowanej z zestawu 12 modułów reaktorowych został przedstawiony przez firmę NuScale. Oprócz wcześniej omówionych korzystnych z punktu widzenia bezpieczeństwa właściwości konstrukcji małego reaktora modułowego projekt ten cechuje **korzystny z punktu widzenia ochrony fizycznej hipotetyczny plan rozmieszczenia modułów** w obiekcie (rys. 1) i **rozkład obszarów chronionych**.

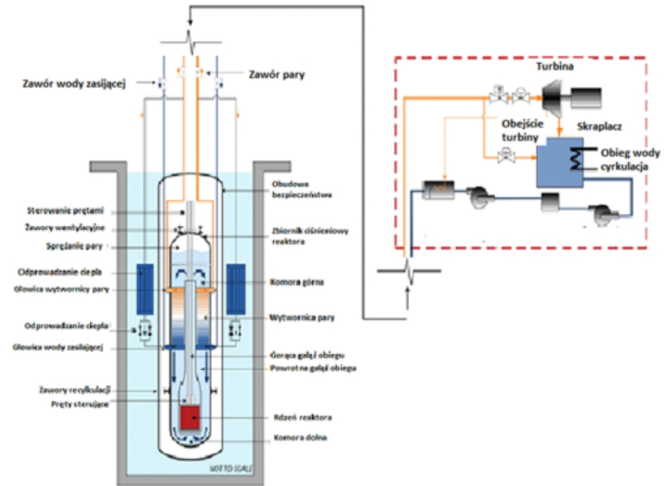


Rys. 1. Elektrownia jądrowa o mocy 540 MWe 12 modułów (oprac. własne na podstawie [11]).

Fig. 1. Nuclear power plant with a capacity of 540 MWe, 12 modules.

W obszarze istotnym, w centrum obiektu umieszczono halę reaktorów (modułów) wraz z przyległymi do niej halami turbin, w budynku znajdującym się częściowo poniżej powierzchni ziemi. Jest w nim 12 modułów reaktorowych, każdy połączony do indywidualnego systemu sterowania oraz turbiny parowej i generatora.

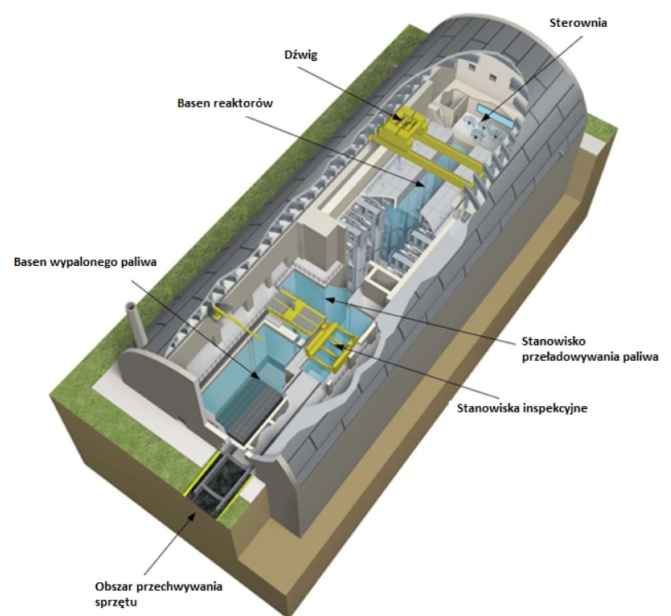
W zbiorniku ciśnieniowym (module) każdego reaktora o wysokości 13,7 m i średnicy 2,7 m, znajduje się rdzeń, spiralna wężownica wytwornicy pary oraz stabilizator ciśnienia. Rdzeń reaktora tworzy układ 17 17 kaset paliwowych o długości w przybliżeniu połowy długości kaset reaktora PWR z paliwem UO_2 wzbogaconym poniżej 5% (rys. 2).



Rys. 2. Moduł reaktora Nuscale – jądrowy system wytwarzania pary z reaktorem wodnym ciśnieniowym o mocy 45 MWe (oprac. własne na podstawie [11]).

Fig. 2. Nuscale reactor module – NSSS (Nuclear Steam Supply System) with a 45 MWe PWR.

Pomiędzy halą reaktorów a halą basenu wypalonego paliwa znajduje się **pomieszczenie, do którego przesuwane są moduły reaktorów w celu przeprowadzenia konserwacji i wymiany paliwa** (rys. 3). Wymianę paliwa przeprowadza wyspecjalizowany zespół. W budynku znajdują się sterownia elektrowni, stacja zdalnego wyłączenia,



Rys. 3 Budynek reaktorów ze stanowiskiem przeladowywania paliwa w centrum (oprac. własne na podstawie [11]).

Fig. 3. Reactor building with fuel reloading station in the center.

centralna stacja alarmowa monitorująca nieprzerwanie działanie systemów oraz dodatkowy system wyłączania zakładu.

Przewidziano pomieszczenia schronienia dla załogi w sytuacjach kryzysowych. Budynek reaktora i system podpierający obudowę bezpieczeństwa reaktorów są odporne na wstrząsy sejsmiczne.

Ponadto na terenie elektrowni będą znajdowały się: budynek administracji wraz z centrum szkoleniowym, budynek socjalny (z szatnią, łazienkami, stołówką, salą konferencyjną, pomocą medyczną), budynek straży przemysłowej, budynek unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych i dekontaminacji, magazyny, zakład uzdatniania wody, straż pożarna, pompownie.

Podsumowanie

Jak widać, do zapewnienia bezpieczeństwa, ochrony fizycznej i zabezpieczeń elektrowni wykorzystującej zestawy modułowe można stosować obecnie obowiązujące normy dla elektrowni wielkoskalowych. Jednak budowanie elektrowni wykorzystującej zestawy modułowe, mimo pewnych zalet tego rozwiązania nie wydaje się celowe. Moc takiej elektrowni nie przekracza kilkuset MW, wysiłek w jej budowie jest porównywalny z budową elektrowni wielkoskalowej, a wysiłek związany z zapewnieniem i utrzymaniem ochrony fizycznej i zabezpieczeń ze względu na wielomodowość może być nawet większy. Bardzo istotne jest tu zastosowanie zdalnie sterowanych systemów obserwacyjno-rejestrujących. Wykorzystanie SMR do celów przemysłowych – technologicznych jest uzasadnione, powstała przy okazji energia elektryczna może być wykorzystywana lokalnie, ale nie warto budować sieci takich reaktorów tylko na potrzeby energetyki. Zakłady wykorzystujące reaktory modułowe powinny posiadać własną infrastrukturę socjalną i administracyjną oraz systemy bezpieczeństwa jądrowego, ochrony fizycznej i zabezpieczeń dostosowane do wymagań lokalnych. Rozwiązania w zakresie ochrony fizycznej powinny wynikać z analizy

możliwych scenariuszy sabotażu i ataków terrorystycznych na SMR zgodnie z obowiązującymi wymaganiami dotyczącymi podstawowego zagrożenia projektowego (DBT – *design basis threat*) z uwzględnieniem opisanej w artykule specyfikacji ich rozwiązań konstrukcyjnych i sposobu eksploatacji.

Notka o autorze

dr inż. Krzysztof Rzymkowski – ukończył Politechnikę Warszawską w 1968 roku. Od tego czasu był związany z techniką jądrową (Zakład Doświadczalny Biura Urządzeń Techniki Jądrowej – później POLON, Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Dubnej, Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare Centro Ricerche della Casaccia, Instytut Badań Jądrowych Świerk oraz PAA). Przez 15 lat inspektor Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu w rejonie inspekcyjnym dalekiego wschodu, w szczególności Japonii, KRLD – Korei Płn., Indonezji. Aktualnie Sekretarz Generalny SEREN – Stowarzyszenia Ekologów na rzecz Energii Nuklearnej oraz wiceprzewodniczący Komitetu Energii Jądrowej SEP.

Literatura

1. Virgli N., *The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP)*, Vienna May 2020.
2. IAEA Nuclear Energy Series, *Instrumentation and Control Systems for Advanced Small Modular Reactors*, No. NP.-T-3.19, Vienna 2017.
3. IAEA Nuclear Energy Series, *Technology Road Map for Advanced Small Modular Reactors*, No. NR_T-1.18, Vienna 2021.
4. Rzymkowski K., *Safeguard w małych reaktorach modułowych*. PTJ Vol.65.Z 2 ISSN 0551-6846, Warszawa 2022.
5. *NuScale Planned Desing Overiew*, NP-ER-0000-1198, 2012.
6. Mikulski A., *Małe reaktory modułowe-reaktor BWRX-300*, „Energetyka” 2020 nr 12, s. 648-653.
7. Reyes J.N., *Nowy poziom bezpieczeństwa elektrowni jądrowej*, EKOATOM Nr 2 l, Warszawa lipiec 2011.
8. *New Recommendations on Safety of SMRs from the SMR Regulators' Forum*, IAEA Newsletter, Vienna 2020.
9. Yub Lei, *Assessing Cyber Security In Small Modular Reactor Workshop Security* CNSC Canada 2021.
10. *Physical Security for Small Modular Reactors* Position Papers NEI Washington DC 2012.
11. Langdon K., *NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview*, INPRO Dialogue Forum on Opportunities and Challenges in Small Modular Reactors, Ulsan, Republic of Korea 2-5 July 2019.

Małe dawki promieniowania: szkodliwe czy potrzebne dla życia?

Low doses of ionizing radiation: harmful or beneficial for life?

Andrzej Strupczewski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Streszczenie: Małe dawki promieniowania pobudzają aktywność naturalnych procesów obronnych w organizmach żywych, a te procesy chronią przed uszkodzeniami DNA¹ nie tylko powodowanymi przez promieniowanie, ale przez procesy endogenne, takie jak wolne rodniki tlenowe. Dzięki temu zachorowalność na nowotwory maleje w rejonach o podwyższonym promieniowaniu naturalnym, a także w grupach ludzi poddanych działaniu małych dawek. W artykule podano liczne przykłady dobroczynnego działania promieniowania, określanego jako hormeza radiacyjna, przeczące hipotezie, że negatywne skutki promieniowania występują nawet przy najmniejszych dawkach według twierdzenia LNT². Stanowisko ICRP³ i UNSCEAR⁴ odnośnie do dawek kolektywnych i skutków radiologicznych awarii w Fukushima potwierdza odejście w praktyce od hipotezy LNT.

Słowa kluczowe: Małe dawki promieniowania, hormeza radiacyjna, LNT, redukcja zachorowań na raka, naturalne mechanizmy obronne, skutki podwyższonego promieniowania, ICRP i UNSCEAR wobec małych dawek, zdrowotne efekty Czarnobyla.

Abstract: In living organisms, low radiation doses stimulate natural body defense mechanisms which protect against DNA damage caused not only by radiation, but also by endogenously-induced free oxygen radicals. Thanks to that, cancer morbidity is lower in regions of increased natural radiation as well as in groups of people submitted to low dose irradiation. The paper quotes numerous examples of beneficial effects of low radiation doses, known as radiation hormesis, contradicting the LNT-based assumption that negative health effects occur at all radiation doses, down to the zero dose. The position of ICRP and UNSCEAR regarding collective doses and radiological effects of the Fukushima accident confirm that, in practice, the LNT hypothesis is not valid.

Key words: Low doses of radiation, radiation hormesis, LNT, cancer reduction, natural defense mechanisms, effects of increased radiation, ICRP and UNSCEAR position on low doses, health effects of Chernobyl.

1. Promieniowanie nieodłączną częścią naszego środowiska

Większość ludzi uważa, że wszelkie promieniowanie jest szkodliwe, a pogląd ten, funkcjonujący od lat 50. zeszłego stulecia, podtrzymywany jest nie tylko przez organizacje antynuklearne, ale i przez zespoły ekspertów i regulatorów radiologicznych, których członkowie wychowali się w przekonaniu, że każda dawka promieniowania powoduje uszkodzenia naszych komórek – a więc zagraża zdrowiu

i życiu człowieka. Wyznawcy tego poglądu ignorują fakt, że nasze komórki i łańcuchy DNA podlegają wielokrotnie częściej uszkodzeniom z powodu naturalnych procesów życiowych, takich jak metabolizm tlenowy, a procesy naprawcze w naszych organizmach są pobudzane i bardziej skuteczne właśnie wtedy, gdy organizm dostaje sygnał o działaniu promieniowania.

Promieniowanie jest nieodłączną cechą wszechświata, a na Ziemi, w czasie gdy powstawało życie, było ono kilkakrotnie wyższe niż obecnie. Można to łatwo zrozumieć, gdy

¹ DNA – *deoxyribonucleic acid* – kwas deoksyrybonukleinowy.

² LNT – *linear no threshold* – hipoteza o liniowym bezprogowym działaniu dawek promieniowania.

³ ICRP – *International Commission for Radiation Protection* – Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem.

⁴ UNSCEAR – *United Nations Scientific Committee for Evaluation of Atomic Risks* – Komitet Naukowy ONZ do Oceny Ryzyka Promieniowania Atomowego.

zdamy sobie sprawę, że atom promieniotwórczy po emisji promieniowania gamma lub beta zmienia się, w łańcuchu rozpadów promieniotwórczych przechodzi na coraz niższy poziom, aż wreszcie staje się izotopem stabilnym, nie emitującym żadnego promieniowania, jak np. ołów. Wszystkie pierwiastki promieniotwórcze na Ziemi przechodzą tę drogę i promieniowanie z gleby i skał staje się coraz słabsze. Jak wykazały analizy, średnie natężenie promieniowania z gleby i emiterów wewnętrznych, na jakie były narażone komórki pierwszych organizmów żywych 2 miliardy lat temu, było ok. 2,5 razy większe niż obecnie [1]. Organizmy żywe musiały się więc przystosować rozwijając mechanizmy obronne przed tym promieniowaniem, które zapewniały naprawę uszkodzonych komórek lub ich usunięcie i zastąpienie nowymi.

Gdy rośnie produkcja wolnych rodników, np. po pochłonięciu małej dawki promieniowania, nasz organizm reaguje przez wzmocnienie obrony, np. przez wzrost liczby antyutleniaczy, enzymów naprawy DNA, reakcji układu immunologicznego itd., co w sumie nazywamy systemem obronnym [2]. Przy wzmocnieniu obrony maleje wielkość łącznych uszkodzeń i chorób. Liczne wyniki badań doświadczalnych i analiz epidemiologicznych dowodzą, że małe dawki promieniowania obniżają częstość zachorowań na raka i inne choroby [3, 4, 5, 6].

Publikacje sugerujące negatywne działanie promieniowania zawierają często braki, zignorowane lub niewykryte bo redaktorzy zwracali głównie uwagę na zgodność wyników z oficjalną hipotezą, że wszystkie dawki są szkodliwe. Na przykład, studium [7] zachorowań dzieci na nowotwory poddawane badaniom CT (*computer tomography* – tomografia komputerowa) zawiera szereg błędów metodologicznych (w tym brak grupy kontrolnej), co stwarza poważne wątpliwości co do wyników tego badania [8]. Inny przykład, to metaanaliza zapadalności na choroby serca [9], w której jak wykazano w szczegółowej analizie [10] – ryzyko powodowane przez duże dawki przenoszono/ekstrapolowano do obszaru małych dawek. Z kolei, istnienie progu dawki dla skutków popromiennych, w tym przypadku zaćmy wymagającej interwencji chirurgicznej, wykazały badania ludzi z terenów skażonych po katastrofie w Czarnobylu oraz z kohorty ABS (*atomic bomb survivors*) [11].

Pozytywne efekty działania promieniowania jonizującego na człowieka są opisane, m.in., w aneksie B raportu UNSCEAR z roku 1994 [12]. Wiele innych publikacji z ostatnich dwudziestu paru lat wykazuje, że pochłanianie małych dawek promieniowania chroni przed nowotworami i innymi chorobami.

Promieniowanie jonizujące jest uznanym czynnikiem klastogennym, czyli uszkadzającym strukturę DNA. Po-

promienne uszkodzenie DNA wynika zarówno z bezpośrednich aktów jonizacji, jak też z działania rodników tlenowych pochodzących z radiolizy wody. Jednak znacznie więcej takich rodników powstaje w czasie naturalnych wewnątrzkomórkowych procesów metabolizmu tlenowego: codzienne, w każdej komórce naszego ciała reaktywne formy tlenu (ROS – *reactive oxygen species*) pochodzenia metabolicznego (endogenne) indukują ok. 10 milionów razy więcej uszkodzeń DNA niż promieniowanie o mocy dawki 10 mSv/rok [13]. Dlatego, aby przeżyć, komórki naszego ciała rozwinęły mechanizmy likwidujące uszkodzenia endogenne. „Przy okazji”, likwidowane są także uszkodzenia popromienne.

2. Naturalne procesy obronne

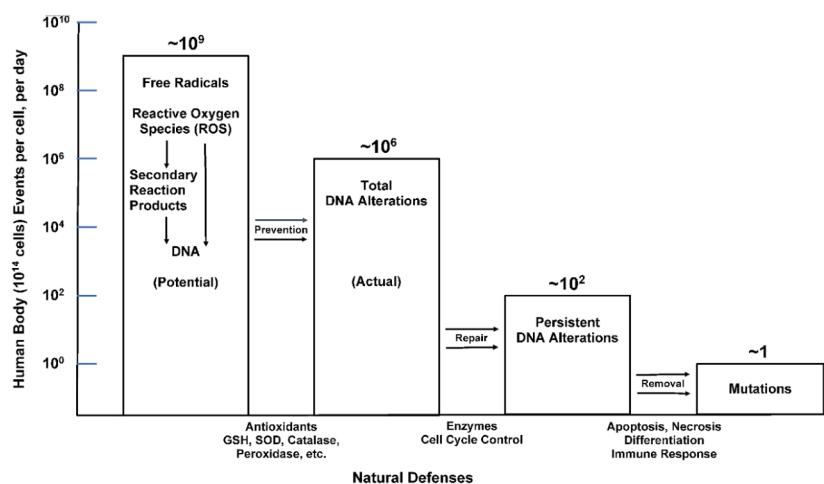
Te procesy naprawcze powstały, gdy natężenie promieniowania było dużo większe niż teraz. Dzisiaj zwiększona moc promieniowania działa pobudzająco na naturalne procesy obronne i zwiększa ich skuteczność. Działają one nie tylko na uszkodzenia powodowane przez promieniowanie, ale przede wszystkim na uszkodzenia wywoływane przez procesy endogenne.

Na rysunku 2-1 widać, jak naturalne procesy obronne w naszym organizmie eliminują lub naprawiają uszkodzenia DNA. Liczba **możliwych uszkodzeń** powodowanych przez procesy endogenne – np. działanie wolnych rodników tlenowych – to około miliard uszkodzeń DNA na komórkę dziennie, ale dzięki **procesom zapobiegawczym** – głównie przeciwutleniaczom – liczba ta wynosi średnio milion uszkodzeń DNA na komórkę na dzień. **Procesy naprawy** uszkodzeń obniżają tempo trwałych uszkodzeń DNA do 10^2 dziennie, a **mechanizmy usuwania** uszkodzonych komórek redukują liczbę uszkodzeń wskutek procesów naturalnych do 1 mutacji na komórkę na dzień. Przy poziomie promieniowania 1 mSv/rok rośnie skuteczność procesów broniących przed uszkodzeniami DNA powodowanymi przez procesy endogenne. Dzięki temu łączna liczba mutacji powstałych wskutek procesów endogennych maleje o 20% i spada do 0,8 mutacji na komórkę dziennie. Dlatego na terenach o podwyższonym poziomie promieniowania wiele badań wykazuje obniżoną częstość zachorowań na choroby nowotworowe.

3. Wielkości dawek na świecie

Dawki promieniowania⁵ w różnych rejonach świata są różne. Największy wkład do sumy dawek z różnych źródeł, jaką otrzymuje pojedynczy człowiek, daje radon, wydzie-

⁵ Dawka pochłonięta promieniowania, mierzona w Greyach (Gy), określona jest przez ilość energii promieniowania pochłoniętej w jednostce masy tkanki naszego ciała. Do określania biologicznych skutków napromieniowania używa się tzw. dawki równoważnej mierzony w siwertach (Sv). Jeden siwert jest dużą dawką promieniowania, dlatego zwykle jednostka ta jest używana z przedrostkami i wyrażana w mSv (0,001 Sv) lub mikrosiwertach – μSv (0,000001 Sv).



1. Dzienna liczba uszkodzeń na komórkę (10^{14} komórek) w ciele człowieka.
2. Wolne rodniki.
3. Reaktywne formy tlenu (ROS).
4. Wtórne produkty reakcji.
5. DNA.
6. (Potencjalne).
7. Zapobieganie.
8. Całkowita liczba uszkodzeń DNA.
9. (Rzeczywista).
10. Naprawa.
11. Trwałe uszkodzenia DNA.
12. Usuwanie uszkodzonych komórek.
13. Mutacje.
14. Antyutleniacze, GSH (glutathione – przeciwutleniacz GSH), SOD (superoxide dismutase – Ddysmutaza ponadtlenkowa, pierwszy enzym detoksykacyjny i najsilniejszy przeciwutleniacz w komórce), katalaza, peroksydazy.
15. Enzymy kontroli cyklu komórkowego.
16. Apoptoza, nekroza, zróżnicowanie reakcji immunologicznej.
17. Naturalne procesy obronne.

Rys. 2-1. Uszkodzenia DNA powodowane przez ROS i procesy naprawcze w naszych organizmach. Antyutleniacze, naprawa uszkodzeń DNA i innych uszkodzeń na poziomie molekularnym, zabijanie i usuwanie komórek, które pozostały nienaprawione (rysunek zaczerpnięty z prezentacji Cuttlera dla CNSC [14], cyt. za zezwoleniem z publikacji [13]).

Fig. 2-1. DNA damage due to ROS and repair processes in our organisms.

lany z ziemi w postaci gazowej i wdychany z powietrzem do naszych płuc. Przy rozpadzie promieniotwórczym⁶ radon emituje cząstki alfa i przemienia się w krótkożyciowe pierwiastki promieniotwórcze, również emitujące cząstki alfa. Są to z reguły izotopy metali ciężkich, które w przeciwieństwie do radonu są ciałami stałymi, więc inaczej niż gazowy (od razu wydychany) radon przyczepiają się do nabłonka oskrzeli i dlatego dłużej pozostają w płucach. Dawka promieniowania beta i alfa z produktów rozpadu radonu przeliczona na całe ciało zależy silnie od składu gleby, ale średnio na Ziemi wynosi 1,27 mSv/rok⁷. Radon wnosi około 50% średniej indywidualnej rocznej dawki naturalnej, nie licząc narażenia powodowanego przez procedury medyczne.

Dalsze 40% dawki naturalnej pochodzi od promieniowania gamma pochodzącego z kosmosu (promieniowanie kosmiczne) i od promieniowania materiałów radioaktywnych znajdujących się w glebie i przenikających do naszego ciała. Promieniowanie było z nami od zarania dziejów, a gdy powstawało życie na Ziemi, natężenie promieniowania było większe niż obecnie [15]. Może dlatego promieniowanie jest niezbędne do życia – wiele doświadczeń potwierdziło, że w przypadku całkowitego odcięcia promieniowania rośliny i zwierzęta doświadczalne przestają się rozwijać i rozmnażać [16, 17, 18].

W wielu krajach występuje promieniowanie naturalne większe niż przeciętne na Ziemi. Wymienić tu można Finlandię, Szwecję, Masyw Centralny we Francji, Guarapari w Brazylii, Ramsar w Iranie, Karapala w Indiach, Yang-Jiang w Chinach i wiele uzdrowisk w USA, w Japonii, w Czechach, w Niemczech itd. We wszystkich tych rejonach prowadzono badania wpływu podwyższonego promieniowania na zdrowie i długość życia mieszkańców i we wszystkich przypadkach okazało się, że ludzie żyją tam zdrowiej i dłużej.

4. Doświadczenia wskazujące na pozytywny wpływ małych dawek promieniowania

4.1. Doświadczenia prof. Planela – skutki niedoboru promieniowania

Pozytywny wpływ promieniowania na procesy rozwoju i rozmnażania wykazały prace wykonane już w latach 60., gdy kultury pierwotniaków (pantofelki, *Paramecium*) umieszczano w środowisku niemal pozbawionym promieniowania – np. pod skałami o grubości 200 metrów lub za osłonami ołowianymi o grubości 5 lub 10 centymetrów Pb, a z pożywek usuwano izotop potasu K-40 i inne substancje promieniotwórcze. Dawki promieniowania w skali rocznej wynosiły 1,65 mGy⁸ dla pierwotniaków kontrolnych

⁶ Rozpad promieniotwórczy to zjawisko spontanicznej przemiany jądra atomowego danego izotopu w inne jądro, przy której emitowane jest promieniowanie.

⁷ mSv to jedna tysięczna część siwerta, średnio na Ziemi człowiek otrzymuje ok. 2,4 mSv / rok ze źródeł naturalnych i 0,8 mSv / rok od zastosowań radiacji w medycynie.

⁸ 1 mGy = 0,001 Gy. Grej (Gy) oznacza dawkę pochłoniętą w określonym narządzie człowieka, wg pomiaru dawki.

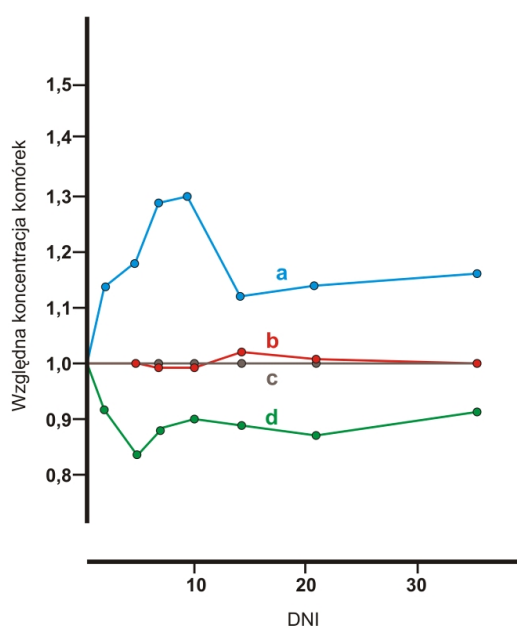
i 0,1 mGy dla badanych za osłoną ołowianą. Okazało się, że niedobór promieniowania powoduje zatrzymanie procesów wzrostu i rozmnażania komórek. Po wprowadzeniu jednoczesnego napromieniowania kultur pierwotniaków bez zmiany ich położenia zahamowania te zniknęły i pierwotniaki rozmnażały się normalnie [16].

Doświadczenia nie były łatwe, bo potas K-40 jest obecny wszędzie, przede wszystkim w mleku i jego przetworach i do uzyskania pokarmu bez K-40 trzeba wielu wysiłków i wydatków. Ale badacze, chcący dociec prawdy, dopięli swego i pierwotniaki znalazły się w warunkach kontrolowanych niemal bez promieniowania, a potem z promieniowaniem.

Krzywe (od góry) przedstawiają rozwój kultury pierwotniaków: a/ napromieniowanej, b) otoczonej osłoną Pb i napromieniowywanej, c) kontrolnej przy normalnym promieniowaniu, d) osłoniętej ołowiem.

Całą serię takich eksperymentów prowadzili prof. H. Planel i jego współpracownicy w Laboratorium Biologii Medycznej Francji, stosując osłony ołowiane o grubości 5 lub 10 cm [17]. Im grubsze były osłony, tym wyraźniejsze było opóźnienie w rozwoju badanych pierwotniaków i innych organizmów.

W innym doświadczeniu muszki owocowe trzymano najpierw za osłonami bez dostępu promieniowania i zaobserwowano wyraźne zahamowanie ich rozwoju. Następnie, bez zmiany położenia hodowli, wprowadzono uzupełniające promieniowanie o mocy dawki ok. 1,5 mGy/rok (rys. 4-1). Okazało się, że rozwój muszek został przywrócony do normalnego poziomu [18]. Prof. Planel i współautorzy podkreślają, że hormeza radiacyjna zależy od czynników wewnętrznych, takich jak wiek komórek poddawanych zmianom promieniowania, i czynników zewnętrznych, np. warunków naświetlania. Efekty horme-



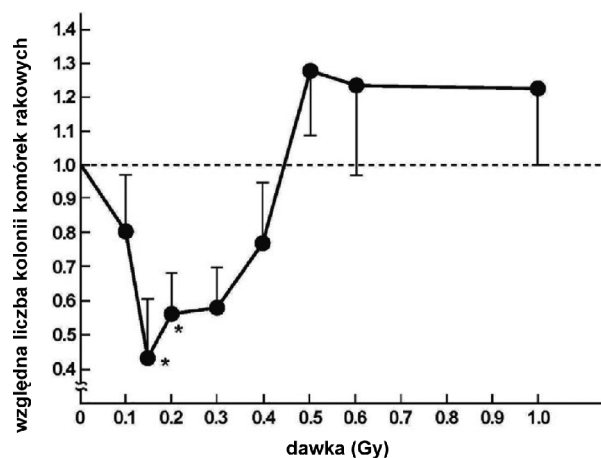
Rys. 4-1. Wpływ braku promieniowania na rozwój pierwotniaków [17].
Fig. 4-1. Influence of lack of radiation on growth of protozoa.

zy radiacyjnej występowały w dolnym zakresie mocy dawki i znikły przy mocy dawki ponad 50 mGy/y [19].

O wynikach doświadczeń prof. Planela warto pamiętać w dyskusjach na temat wpływu promieniowania na zdrowie. Małe dawki są zjawiskiem normalnym w przyrodzie i – co więcej – są niezbędne dla organizmów żywych.

4.2. Efekt tłumienia przerzutów rakotwórczych niskimi dawkami promieniowania

Jak stwierdzają naukowcy, działanie małych dawek promieniowania stymuluje mechanizmy obronne w naszych organizmach. Na rysunku 4.2 widać jeden z wielu podobnych wyników doświadczeń.



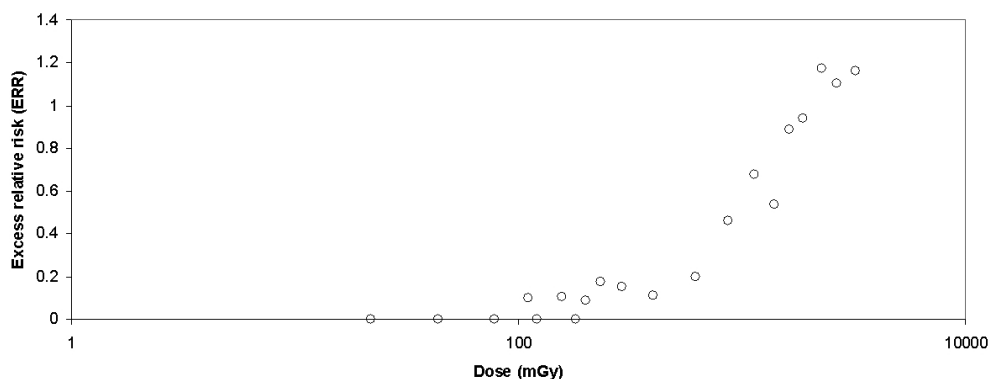
Rys. 4-2. Przykład obniżenia liczby przerzutów. Podanie małej dawki promieniowania na całe ciało myszy w 12 dni po przeszczepieniu komórek rakowych z płuc do pachwiny obniżyło liczbę przerzutów liczonych 20 dni po napromieniowaniu [20].

Fig. 4-2. Example of lowering the number of metastases by low dose of radiation.

4.3. Działanie procesów obronnych w kohorcie ABS

Na rysunku 4-3 przedstawiono zależność nadmiarowego względnego ryzyka zachorowania na raka (ERR – *excess relative risk*) od dawki otrzymanej w chwili wybuchu bomb nad Hiroszimą i Nagasaki. Według modelu LNT ekstrapolacja z dużych dawek do małych jest wykonywana w postaci linii prostej sięgającej aż do zera. Wątpliwe, czy taka ekstrapolacja ma sens, skoro w ataku jądrowym ludność napromieniono mocą dawki tryliony razy wyższą od mocy występujących wokół elektrowni jądrowych, w okolicy Czarnobyla, czy na jaką są ekspozowani pracownicy zakładów jądrowych w ciągu dziesiątków lat pracy [21]. Tymczasem korelacja przedstawiona w postaci wykresu logarytmiczno-liniowego pokazana na rysunku 4-4 wskazuje, że wzrost dodatkowego ryzyka zachorowania na raka występuje przy dawkach powyżej 100 mSv, natomiast nie ma dodatkowego ryzyka w zakresie dawek od zera do 100 mSv.

Life Span Study Solid Cancer Incidence
Excess Relative Risk by Radiation Dose, 1958-1998



Rys. 4-3. Zależność nadmiarowego względnego ryzyka zachorowania na raka (ERR) od dawki otrzymanej w chwili wybuchu bomb nad Hiroszimą i Nagasaki pokazana w skali liniowo-logarytmicznej (rys. zaczerpnięty z pracy J. Siegela, cyt. za zezwoleniem) (źródło: J. A. Siegel LSS, *Data plotted on linear log scale*, informacja osobista, 17.05.2015.).

Fig. 4-3. Relationship of excess relative risk of cancer (ERR) related to the radiation dose received at the explosion of atomic bombs over Hiroshima and Nagasaki shown in linear-logarithmic scale.

Inni autorzy stwierdzili na podstawie danych zebranych przez UNSCEAR, że w przypadku dawek otrzymanych przez kohortę ABS (*atomic bomb survivors*) liczącą 95,819 osób, które przeżyły wybuch bomby atomowej w Hiroshimie i Nagasaki, występuje zależność krzywoliniowa między zachorowaniami a małymi dawkami, jak widać na rys. 4-4. Wykres ten sugeruje, że istnieje próg wynoszący ok. 30 rem, tj. 0,3 Gy dla białaczki powodowanej przez

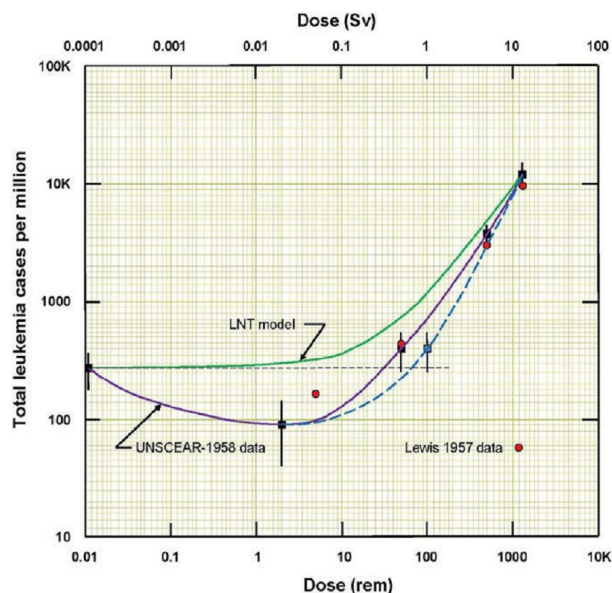
promieniowanie według analiz danych w okresie od 1950 do 1957 roku.

5. Wpływ małych dawek promieniowania na duże grupy ludności

5.1. Badania ekologiczne w USA

W USA badania korelacji między tłem promieniowania a umieralnością na nowotwory prowadzono wielokrotnie. Największe zainteresowanie budziły one na początku, gdy przeciwnicy energii jądrowej oczekiwali, że zachorowania na nowotwory będą najczęstsze w rejonach o najwyższym tle promieniowania. Spodziewano się tysięcy „dodatkowych” zgonów spowodowanych przez zwiększone promieniowanie. Ale rzeczywistość zdecydowanie zaprzeczyła tym oczekiwaniom.

Okazało się, że we wszystkich stanach o podwyższonym tle promieniowania umieralność na nowotwory jest mniejsza od przeciętnej. Wyniki te otrzymywali badacze zupełnie niezwiązani z energetyką jądrową, ludzie o nieposzlakowanej uczciwości, tacy jak Frigerio i Stowe (kwakrzy, a więc ludzie szcycący się prawdziwością), którzy badali umieralność na nowotwory złośliwe w 50 stanach USA w funkcji tła promieniowania⁹. Przed przeprowadzeniem badań oczekiwano, że umieralność na nowotwory będzie rosła o ok. 350 zgonów na 100 tys. mieszkańców na każdy 1 mSv/rok¹⁰. Wyniki nie wykazały takich tendencji, przeciwnie – autorzy studium piszą: „Jak zaczęliśmy od założenia, że promieniowanie tła powoduje nowotwory i jak fakty zmusiły nas do stwierdzenia, że tak nie jest”.

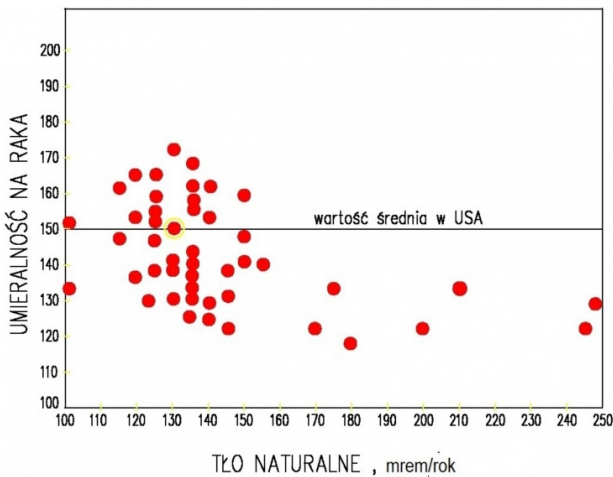


Rys. 4-4. Zachorowania na białaczkę w Hiroshimie w latach 1950–1957. Dane zebrane przez UNSCEAR wskazują na obniżenie zachorowalności w rejonie małych dawek, natomiast model LNT zawiąza wyraźnie oceny skutków promieniowania (wykres z pracy: Cuttler, Hannum [22], cyt. za zezwoleniem).

Fig. 4-4. Leukaemia frequency in Hiroshima in the period 1950–1957.

⁹ N.A. Frigerio, R.S. Stowe, *Carcinogenic and genetic hazards from background radiation*, [w:] *Proc. of a Symp. on Biological Effects of Low-Level Radiation Pertinent to Protection of Man and His Environment*, Chicago 3–7 Nov. 1975, IAEA, Vienna 1976.

¹⁰ Według pesymistycznej hipotezy LNT, że każda dawka jest szkodliwa, przy użyciu współczynnika przyjętego przez ICRP otrzymujemy $1,0 \cdot 10^{-3}$ Sv/rok \times 70 lat \times 0,05 zgonu/osobo-Sv \times 100 000 osób = 350 dodatkowych zgonów.



Rys. 5-1. Umieralność na nowotwory w funkcji tła naturalnego w różnych stanach USA mierzona na 100 tys. mieszkańców. Linia pozioma i puste kółko oznaczają średnią umieralność i tło promieniowania w USA (rysunek własny) (źródło: N.A. Frigerio, R.S. Stowe, *Carcinogenic and genetic hazards from background radiation*, [w:] *Proc. of a Symp. on Biological Effects of Low-Level Radiation Pertinent to Protection of Man and His Environment*, Chicago 3–7 Nov. 1975, IAEA, Vienna 1976.).
Fig. 5-1. Cancer deaths in function of natural radiation level in the states of USA per 100 000 inhabitants.

Jak widać na rysunku 5-1, spośród 14 stanów o tle promieniowania powyżej 1,4 mSv/rok (140 mrem/rok) w **12 stanach umieralność na nowotwory była bardzo wyraźnie PONIŻEJ średniej dla USA**, w jednym nieco niższa i tylko w jednym nieco wyższa.

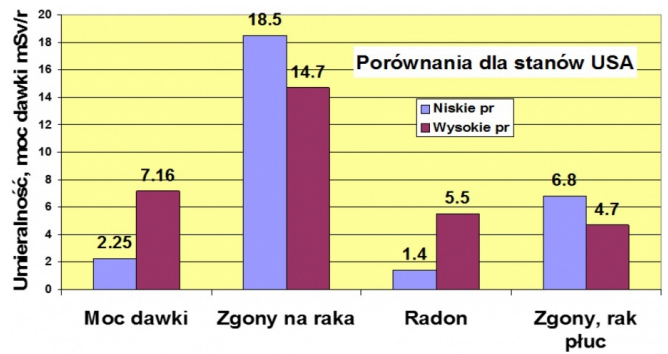
W 1981 roku badania epidemiologiczne w 39 regionach metropolitalnych i 4 tradycyjnych regionach gospodarczych USA wykazały, że umieralność na **nowotwory dróg oddechowych jest niższa w regionach o wyższym poziomie promieniowania** [23].

Analizy wpływu tła promieniowania na umieralność na nowotwory w USA przedstawił Jagger [24]. Do porównania wybrał on trzy stany o niskim tle promieniowania (Luizjana, Missisipi i Alabama) i trzy stany o wysokim tle promieniowania (Idaho, Colorado, Nowy Meksyk). Średnie moce dawki promieniowania wynoszą w nich odpowiednio 2,25 i 7,16 mSv/rok, a stosunek stężenia radonu wynosi 3,9 na otwartej przestrzeni i 5,2 w domach. Według hipotezy LNT można byłoby oczekiwać większej umieralności na nowotwory w regionach o wysokim tle promieniowania i stężeniu radonu, tymczasem jest przeciwnie, jak widać na rysunku 5-2.

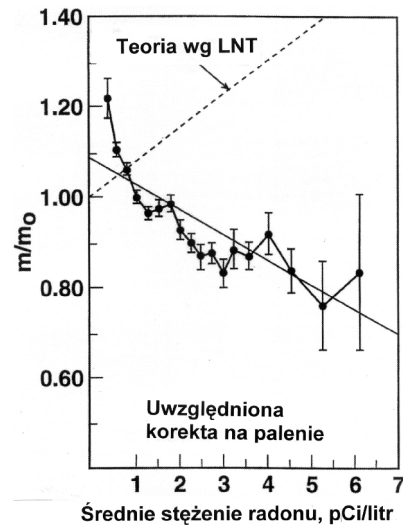
Największe na świecie badania wpływu stężenia promieniotwórczego radonu na zdrowie przeprowadził B. Cohen [25]. Otrzymane przez niego wyniki pokazuje rysunek 5-3.

Wyniki Cohena przeczące wyraźnie tezie, że każde dawki promieniowania są potencjalnie szkodliwe, były atakowane przez zwolenników hipotezy LNT, ale odpowiedzi Cohena na zarzuty wykazały, że uwzględnił on wszystkie istotne czynniki zakłócające i wykazał logiczną zgodność swych twierdzeń z doświadczeniem [26].

Podobne wnioski wynikają z porównania pokazanego na rysunkach 5-4 i 5-5 zaczerpniętych z pracy Duporta [27],



Rys. 5-2. Umieralność na nowotwory w stanach USA mierzona na 100 tys. mieszkańców, dane z pracy Jaggera [24] (rysunek własny).
Fig. 5-2 Cancer deaths per 100 000 inhabitants in USA states.

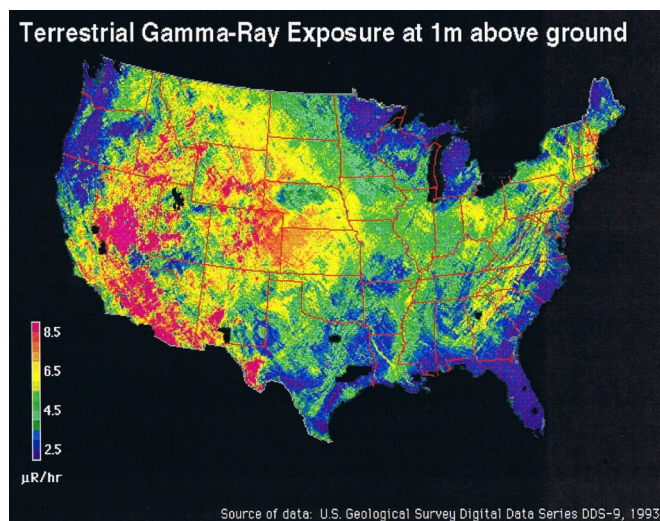


Rys. 5-3. Wyniki B. Cohena reprezentujące korelacje między występowaniem raka płuc a stężeniem radonu w 95% hrabstwach w USA (rysunek zaczerpnięty z pracy J. Cuttlera, cyt. za zezwoleniem).
Fig. 5-3. B. Cohen's results showing relationship between lung cancer and radon concentration levels in 95% of USA counties.

na których przedstawiono mapy tła promieniowania naturalnego (5-4) i umieralności na nowotwory w USA (5-5).

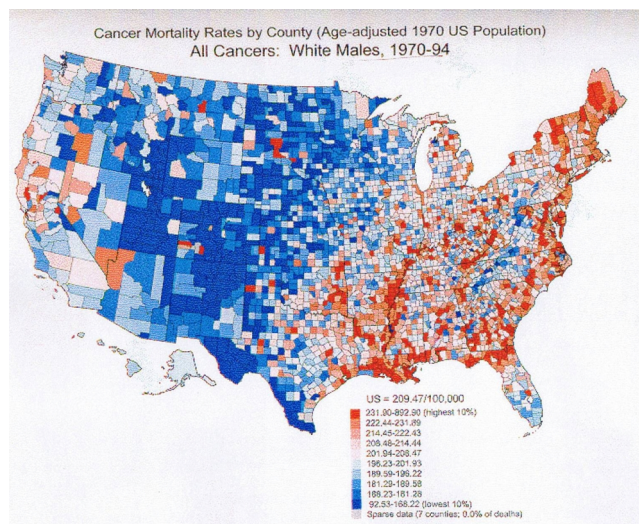
W rejonach o wysokim promieniowaniu, zaznaczonych na rysunku 5-4 kolorem czerwonym, zachorowalność na raka jest najniższa – kolor niebieski na rys. 5-5 i odwrotnie – w rejonach o niskim tle promieniowania, wyróżnionych kolorem fioletowym na rysunku 5-4, zachorowalność na raka jest najwyższa, jak widać z obszaru w kolorze czerwonym na rysunku 5-5.

Najnowsze badania, które objęły całą populację USA liczącą ponad 320 milionów ludzi, potwierdziły, że przy wyższych wartościach tła promieniowania naturalnego pochodzącego z promieniowania kosmicznego i promieniowania gleby długość życia ludzi jest większa [28]. Różnica wynosiła ok. 2,5 lat życia na korzyść ludzi mieszkających w rejonach o stosunkowo wysokim promieniowaniu (1,8 mSv/rok) w odniesieniu do ludzi mieszka-



Rys. 5-4. Narażenie na ziemskie promieniowanie gamma na wysokości 1 m nad ziemią w USA (rysunek z pracy Duporta, cyt. za zezwoleniem) (źródło: <http://energy.cr.usgs.gov/radon/usagama.gif>, [dostęp: 11.09.2022]).

Fig. 5-4. Exposure to natural radiation at the level of 1 meter above ground in the.



Rys. 5-5. Umieralność na nowotwory w USA (rysunek zaczerpnięty z pracy Duporta, cyt. za zezwoleniem).

Fig. 5-5. Cancer mortality in the US.

jących w rejonach o promieniowaniu stosunkowo niskim (1 mSv/rok). To wydłużenie życia było w dużej mierze związane ze zmniejszeniem umieralności na nowotwory płuc, trzustki i jelita grubego. Autorzy tego studium podkreślają, że wskazuje ono na konieczność zrewidowania hipotezy o szkodliwości małych dawek promieniowania.

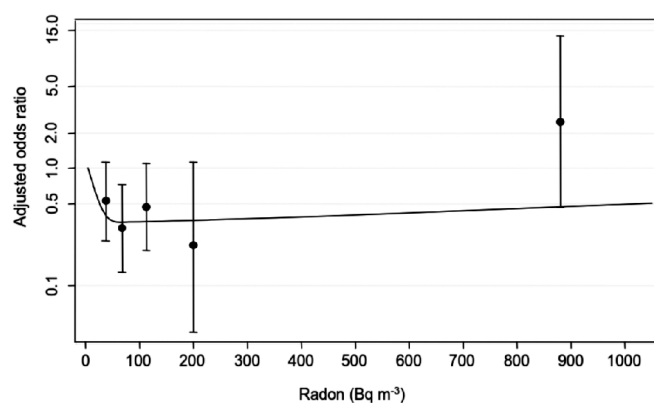
5.2. Studium kliniczno-kontrolne w hrabstwie Worcester

Studia o charakterze ekologicznym, to znaczy oparte na obserwacjach dużych grup ludności, a nie na indywidualnych przypadkach szczegółowo sprawdzanych tak, by

dokonać porównań między osobami poddanymi i niepoddanymi promieniowaniu, są jednak przedmiotem wątpliwości, czy nie ma czynników zakłócających, które nie były brane pod uwagę przez autorów studiów. Dlatego warto zaznajomić się z wartościowym studium kliniczno-kontrolnym przeprowadzonym przez Thompsona i in. w hrabstwie Worcester [29]¹¹.

Studium ryzyka raka płuc z powodu narażenia na radon i jego izotopy pochodne w mieszkaniach obejmowało 200 przypadków (osób chorych) i 397 kontroli dobranych pod kątem wieku i płci, objętych leczeniem przez tę samą organizację zdrowia (rys. 5-6). Szczególny nacisk położono na dokładne pomiary dozymetryczne prowadzone przez cały rok w połączeniu z dogłębnym poznanie historii przemieszczeń osób poddanych badaniom. Do czynników kontrolowanych należał czas zamieszkania, palenie papierosów, wykształcenie, dochody i czas narażenia w pracy na znane lub potencjalne substancje kancerogenne. Rozróżniano 9 kategorii palenia – osoby, które nigdy nie paliły, cztery kategorie palących w chwili badania i cztery kategorie osób, które zaprzestały palenia. Wyniki widać na rysunku 5-6.

Jak widać, wyniki studium Thompsona i in. potwierdzają wnioski z ekologicznych badań Cohena i innych analiz dużych grup ludności. Przy małych stężeniach radonu, w takich jak występują w naturalnych warunkach w naszych domach, można się nie bać o zwiększenie zagrożenia nowotworami płuc.



Rys. 5-6. Wykres skorygowanych ilorazów szans (AORs – adjusted odds ratio) i wielkości możliwego rozrzutu wyników przy poziomie ufności 95% oraz krzywa ciągła znormalizowana do 1,0 przy stężeniu radonu 4,4 Bq m³, co było najniższym obserwowanym stężeniem (rysunek z pracy Sandersa [30], cyt. za zezwoleniem).

Fig. 5-6. Adjusted odds ratios (AORs) with possible results dispersion at 95% confidence level and a continuous curve standardized to 1,0 at radon level 4,4 Bq/m³, which was the lowest radon concentration level observed.

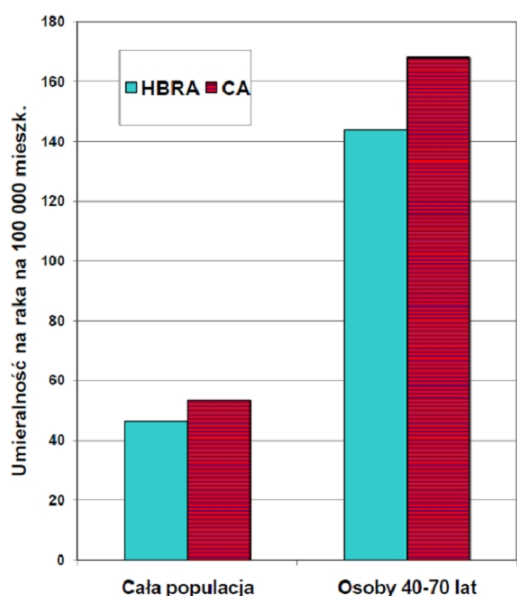
¹¹Jest też późniejsza analiza wyników Thompsona i współpracowników.: Thompson RE. 2010. Epidemiological evidence for possible radiation hormesis from radon exposure: A case-control study conducted in Worcester, MA. Dose Response 14;9(1):59–75.

5.3. Brak ujemnych efektów zdrowotnych podwyższonego promieniowania wśród dużej grupy mieszkańców Chin

Badania obszaru o wysokim tle promieniowania (HBRA – *high radiation background area*) w rejonie Yangjiang w Chinach trwają od 1972 roku. Obejmują one dwa sąsiadujące ze sobą obszary, łącznie 500 km², gdzie zwiększone tło promieniowania powodowane jest przez piaski monazytowe o dużej zawartości toru. W sąsiedztwie znajduje się rejon o niskim tle promieniowania, który wybrano jako rejon kontrolny. Oba tereny są zamieszkałe przez rolników (93 i 94%), a struktura ludności jest podobna. Wszystkie parametry środowiskowe są podobne (np. procent palaczy w HBRA 37,9%, w CA 37,6%). W rejonie kontrolnym (CA – *control area*) średnia dawka roczna promieniowania gamma ze źródeł zewnętrznych wynosi 2 mSv, a dawki w rejonie HBRA od 4,8 do 6,2 mSv. Łączne dawki otrzymane rosną z każdym rokiem życia tak, że osoby 50-letnie w HBRA otrzymały średnio dawkę skumulowaną od naturalnego promieniowania gamma wynoszącą ok. 274 mSv.

Po uwzględnieniu dawek pokarmowych otrzymano średnie dawki roczne w terenie HBRA równe 6,4 mSv, a w terenie kontrolnym 2,4 mSv. Badania objęły 100 tys. mieszkańców z rejonu HBRA i podobną liczbę mieszkańców rejonu kontrolnego CA. Wyniki pokazano na rysunku 5-7.

W rejonie o wyższym promieniowaniu nie zaobserwowano żadnego wzrostu zachorowań. Dalsze badania potwierdziły poprzednie wyniki, umacniając, że umieralność na nowotwory jest w HBRA niższa niż w obszarze kontrolnym. Uczni chińscy i japońscy prowadzący badania



Rys. 5-7. Umieralność powodowana przez choroby nowotworowe w rejonie Yangjiang o wysokim promieniowaniu (HBRA) i o niskim (CA) (rysunek własny).

Fig. 5-7. Cancer mortality in the HBRA region of Yangjiang and in low radiation control area CA.

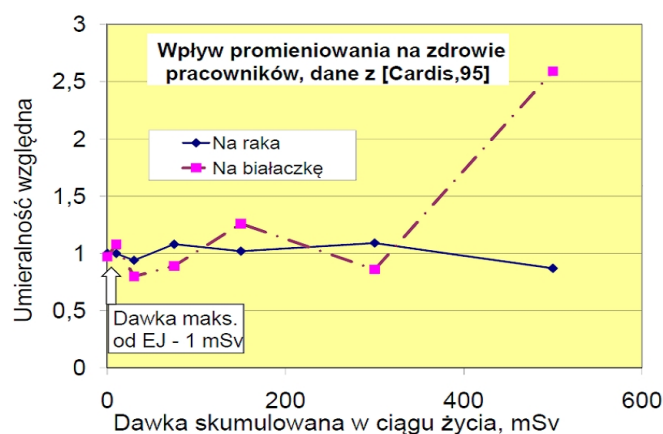
przy współpracy USA stwierdzają, że „badania w Chinach systematycznie dają wyniki sugerujące dobroczynne działanie promieniowania jonizującego na organizm człowieka” [31].

Podobne są wyniki badań w innych krajach, np. w nadmorskim rejonie Kerala w Indiach [32], w uzdrowisku Misasa w Japonii [33], na plażach Guarapari w Brazylii, w górskim miasteczku Ramsar w Iranie itd. Zdrowi są też mieszkańcy Finlandii, Szwecji, Masywu Centralnego we Francji i wielu innych rejonów na świecie, gdzie dawki są wyższe od średniej. Na przykład w południowo-zachodniej Francji nad pokładami rudy uranowej w Laugoragais lub w rejonie Lodève [34] moce dawki dochodzą do 700 mGy/rok, ale badania nie wykryły ujemnych efektów zdrowotnych.

6. Wpływ narażenia na promieniowanie powodowane przez człowieka

6.1. Badania pracowników przemysłu jądrowego

Wyniki badań 95 tys. pracowników przemysłu jądrowego USA, Kanady i W. Brytanii opracowane przez Międzynarodową Agencję Badań Nowotworów (IARC – *International Agency for Research on Cancer*) wskazują, że w zakresie małych dawek promieniowania zachorowalność na nowotwory nie rośnie, lecz maleje ze wzrostem otrzymanej dawki w proporcji 7%/Sv. Względne ryzyko zgonu na nowotwory i białaczkę w funkcji dawki skumulowanej w ciągu życia otrzymanej przez pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące pokazana jest na rysunku 6-1 opracowanym przez autora na podstawie danych liczbowych z pracy IARC [35].



Rys. 6-1. Względne ryzyko zgonu na raka lub białaczkę w zależności od dodatkowej dawki otrzymanej wskutek pracy ze źródłami promieniowania, skumulowanej w ciągu życia, dane z pracy IARC – poziom „1” odpowiada średniej umieralności pracowników nienapromieniowanych (rysunek własny).

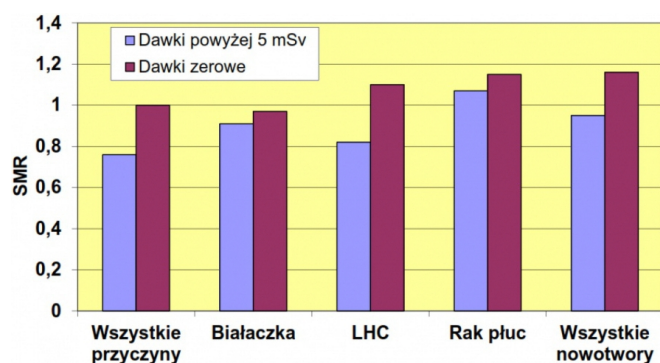
Fig. 6.1. Relative risk for cancer or leukaemia mortality related to excess radiation dose received due to work with radiation sources, cumulated over life.

Wzrost umieralności wśród pracowników narażonych zawodowo wystąpił tylko w przypadku dużych dawek i tylko w odniesieniu do białaczki. Dla porównania – średnia dawka otrzymywana od promieniowania naturalnego i z procedur medycznych przez mieszkańca Polski w ciągu 70 lat to 230 mSv, średnia dawka otrzymana dodatkowo w ciągu 70 lat przez osobę mieszkającą przy płocie elektrowni jądrowej (EJ) wskutek jej pracy to 0,7 mSv, a dawki jednorazowe przy prześwietleniu kręgosłupa wynoszą ok. 4,3 mSv [36].

6.2. Wpływ promieniowania na zdrowie pracowników stoczni Shippingport

Na rysunku 6-2 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych wśród pracowników stoczni w Shippingport. Umieralność wśród pracowników pracujących przy okrętach z napędem jądrowym i otrzymujących dawki promieniowania powyżej 5 mSv była wyraźnie niższa, niż umieralność pozostałych pracowników, nie mających kontaktu z promieniowaniem.

Podobne wyniki dały analizy w innych krajach, a ostatnio przeprowadzone badania miliona pracowników przemysłu jądrowego wykazały [37], że po otrzymaniu dawki 100 mSv nie było znaczącego wzrostu zachorowalności (wyniki od $RR = -0,005$ do $RR = +0,01$)¹². Przeczy to twierdzeniu LNT, że małe dawki promieniowania są szkodliwe.



Rys. 6-2. Umieralność (liczba zgonów w populacji wskutek danej choroby na 100 tys. osób) wśród stoczników z Shippingport. SMR – *standardized mortality ratio*, znormalizowana umieralność względna, LHC – *lymphohematopoietic cancer*, nowotwory układu krwiotwórczego (rysunek własny).

Fig. 6-2. *Standardized mortality ratio among shipyard workers of Shippingport.*

6.3. Wpływ promieniowania na zdrowie lekarzy rentgenologów w Wielkiej Brytanii

Analizowano wskaźnik umieralności SMR na nowotwory dla radiologów brytyjskich w porównaniu z ogółem lekarzy dla różnych okresów rejestracji [38]. Radiologowie zarejestrowani w okresie 1955–1979 byli poddani niskim poziomom promieniowania i stwierdzono, że zachorowa-

nia na nowotwory były wśród nich rzadsze niż wśród ogółu lekarzy. Wskaźnik umieralności na nowotwory SMR odniesiony do ogółu lekarzy brytyjskich wyniósł 0,7, a umieralności na wszystkie inne choroby 0,65. Nie było powodów, by rentgenolodzy byli dobierani spośród osób odpornych na nowotwory, a warunki ich pracy nie różniły się zasadniczo od warunków pracy innych lekarzy poza jednym – rentgenolodzy dostawali przez cały czas pracy małe dawki promieniowania. Zgadza się to z teorią hormezy.

7. Hipoteza o liniowej zależności zagrożenia od dawki promieniowania

7.1. Dlaczego wielu naukowców sprzeciwia się hipotezie LNT?

Wobec braku wykrywalnych efektów małych dawek promieniowania, a także przy dążeniu do maksymalnie ostrożnego postępowania z substancjami radioaktywnymi i staraniu o doprowadzenie do przerwania prób broni jądrowej w 1959 roku Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) zaleciła przyjęcie hipotezy, zwanej modelem liniowym bezprogowym, LNT (*Linear No Threshold*).

Według LNT – jeśli od pewnej dawki promieniowania umiera 100% napromieniowanych osób, to od dwa razy mniejszej 50% osób, to od 10 razy mniejszej umrze 10% osób, a dla milion razy mniejszej powinno umrzeć 0,0001%, ale nikt nie jest w stanie zmierzyć, czy tak jest faktycznie. Model ten zakłada, że zarówno zachorowania na nowotwory, jak i skutki genetyczne małych dawek promieniowania są wynikiem mutacji powodowanych bezpośrednio przez promieniowanie jonizujące. Przy niskich dawkach brakuje bezpośrednich danych o skutkach zagrożenia. Arbitralnie postanowiono więc stosować dla małych dawek i małych mocy dawki (czyli dawki na jednostkę czasu) ekstrapolację skutków dużych dawek promieniowania oraz wielkich mocy dawek otrzymanych w bardzo krótkim czasie. Takie duże dawki otrzymane były w krótkim czasie po wybuchach bomb atomowych w Hiroszimie i Nagasaki.

Dwa wykresy przedstawione na rysunkach 4-3 i 4-4 ilustrują powody, dla których naukowcy zajmujący się wpływem małych dawek na zdrowie człowieka sprzeciwiają się hipotezie LNT. Wiele nowszych obserwacji sugeruje, że **ekstrapolacja wg modelu liniowego bezprogowego LNT jest sprzeczna z danymi naukowymi [39] i przesadnie pesymistyczna**. Prof. Calabrese w wielu publikacjach wykazał, że przyjęcie hipotezy, iż małe dawki promieniowania są szkodliwe, było oparte na pominięciu istotnych badań, zatajeniu prawdy i wykorzystaniu okoliczności politycznych w celu wywołania strachu przed energią jądrową [40].

¹²RR – *relative risk* – ryzyko względne.

Wiemy, że wiele substancji i zjawisk jest korzystnych dla życia przy małych dawkach, chociaż są one szkodliwe przy dużych. Przykładów jest mnóstwo: aspiryna, dobrotczyna przy spożywaniu jednej tabletki dziennie, szkodliwa przy jednorazowej dawce kilkuset pastylek, witaminy (zbyt duże ilości powodują hiperwitaminozę, a zbyt małe lub ich brak – awitaminozę) i mikroelementy, niezbędne w małych ilościach, a szkodliwe w dużych, światło słoneczne, a nawet temperatura, sprzyjająca człowiekowi, gdy wynosi 20–25°C, a zabójcza, gdy przekracza 50°C. Skok z wysokości 100 m oznacza niechybną śmierć, ale nawet najwięksi pesymiści nie twierdzą, że gdy tysiąc ludzi wykona podskok o 10 cm w czasie codziennej gimnastyki, to jeden z nich... umrze wskutek tego podskoku.

Podobnie jest z promieniowaniem. Jest ono niezbędne do życia w małych ilościach, takich, jakie otrzymujemy codziennie od otoczenia. Doświadczenia, w których otaczano organizmy żywe osłonami nieprzepuszczającymi promieniowania, wykazały, że organizmy te chorowały i umierały, podczas gdy niewielki wzrost promieniowania pomógł im rozwojowi [41].

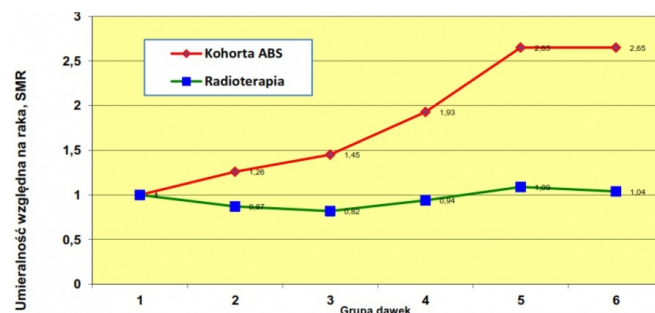
Ponadto duże znaczenie ma też rozkład czasowy pochłoniętej dawki promieniowania. Skutki takich samych dawek promieniowania pochłoniętego przez organizm jednorazowo, czy w krótkim czasie, są bowiem z reguły bardziej szkodliwe niż wówczas, gdy to napromieniowanie rozłożone jest na dłuższy okres. Rzecz w tym, że – ujmując to w dużym uproszczeniu – przy mniejszej intensywności napromieniowania (czyli mocy dawki) organizm jest w stanie nadażyć z naprawami uszkodzeń materiału DNA [42] lub eliminacją uszkodzonych komórek. Dowodzą tego wyniki wielu badań opisane w tym artykule.

7.2. Klucz do bezpieczeństwa – rozłożenie dawek w czasie

Diagnostyka medyczna wiąże się często z narażeniem na małe dawki promieniowania. Obszerne studia, prowadzone na pacjentach dorosłych, poddanych napromieniowaniu w celach diagnostycznych, nie wykazały wzrostu zachorowań. Podobnie analiza danych 34 tys. pacjentów w Szwecji, którym podawano I-131 w celach leczniczych, wykazała, że przy średniej dawce łącznej 1100 mSv w grupie 23 319 osób przed badaniami nie podejrzewanych o nowotwory (w tym 8% osób w wieku poniżej 20 lat) wystąpił 25-procentowy deficyt raków tarczycy w porównaniu z ogółem ludności [43].

W Kanadzie badano 64 172 pacjentów poddawanych wielokrotnemu narażeniu na małe dawki promieniowania. Łącznie sięgały one od kilkunastu mSv do kilku Sv, ale były otrzymywane przy średniej mocy dawki (0,6 mSv/s)¹³. Autor studium stwierdził, że „nie ma żadnego związku

między ryzykiem zgonu na nowotwory a dawką” [44]. Porównanie z umieralnością na nowotwory wśród Japończyków z tzw. kohorty ABS (*atomic bomb survivors*), którzy przeżyli atak na Hiroszimę i Nagasaki, a więc otrzymali dawki jednorazowe przy wysokiej mocy dawki, wykazało, że ryzyko przy małych mocach dawki ma zdecydowanie inny charakter. Na rysunku 7-1 pokazano umieralność dla grup, które otrzymały łączne dawki promieniowania zawarte w przedziale: grupa 1 – 0,01–0,49 Sv, grupa 2 – 0,50–0,99 Sv, grupa 3 – 1,0–1,99 Sv, grupa 4 – 2,00–2,99 Sv i grupa 5 i 6 – powyżej 3 Sv.



Rys. 7-1. Wyniki badań skutków napromieniowania terapeutycznego małymi dawkami ze skutkami napromieniowania w Hiroszimie i Nagasaki. Dane z pracy Howe, 1995 [44] (rysunek własny).

Fig. 7-1. Effects of therapeutic irradiation with low doses compared to results of irradiation after bombing at Hiroshima and Nagasaki.

W przypadku kohorty ABS ryzyko wyraźnie rośnie z dawką [44]. Natomiast w przypadku kohorty chorych poddanej kontrolom fluoroskopowym o małych mocach dawki, mimo że łączna dawka otrzymana przez pacjenta była taka jak w kohorcie ABS, przy małych dawkach widać obniżenie umieralności na nowotwory. Dopiero przy wysokich dawkach całkowitych ryzyko nieco wzrasta powyżej średniej dla osób nienapromieniowanych, ale i tak jest bliskie jedności, dużo niższe niż dla kohorty ABS.

W grudniu 2012 roku UNSCEAR przedstawił Zgromadzeniu Ogólnemu ONZ raport, w którym stwierdza, że nie ma podstaw, by małe dawki otrzymywane przez wiele osób przeliczać na efekty zdrowotne¹⁴. Zdaniem UNSCEAR dotyczy to dawek poniżej 100 mSv. Dopiero przy jednorazowych dawkach powyżej 100 mSv można mówić o ich ujemnym wpływie na zdrowie człowieka. Raport ten stanowił podsumowanie pięcioletnich studiów na temat skutków małych dawek promieniowania¹⁵. UNSCEAR stwierdził, że nie można przypisywać ujemnych skutków zdrowotnych w dużych populacjach narażeniu na promieniowanie typowe dla tła na Ziemi, to jest w granicach 2 do 20 mSv rocznie. W swojej prezentacji raportu wobec Zgromadzenia Ogólnego ONZ prezes UNSCEAR Wolfgang Weiss oświadczył, że dotychczas

¹³Mała moc dawki to 0,05 do 0,1 mGy/min, większe moce kwalifikuje się jako „średnie”.

¹⁴http://www.world-nuclear-news.org/RS_UN_approves_radiation_advice_1012121.html [dostęp: 11.09.2022]

¹⁵<http://energyandnuclear.com/tag/unscear/> [dostęp: 11.09.2022].

zebrane dane nie wskazują na ujemne skutki zdrowotne narażenia radiacyjnego społeczeństwa japońskiego, personelu elektrowni lub dzieci po awarii w EJ Fukushima Daiichi. Stwierdzenie to zgadza się ze studiami opublikowanymi już poprzednio przez Światową Organizację Zdrowia i Uniwersytet w Tokio, które wykazały, że dawki otrzymane przez ludność były tak małe, iż nie można oczekiwać żadnych wykrywalnych skutków radiacyjnych.

7.3. Skutki stosowania hipotezy LNT

Według opinii prof. dr. med. Zbigniewa Jaworowskiego, wieloletniego przewodniczącego Rady Naukowej CLOR, przewodniczącego delegacji Polski do UNSCAR, wiceprezesa UNSCEAR w kadencji od 1988 do 1989 roku i prezesa UNSCEAR w latach 1980–82¹⁶ stosowanie hipotezy LNT w zakresie małych dawek jest błędem i nie uwzględnia procesów obronnych w organizmach żywych. Wywołuje to lęk wśród pacjentów, którzy mają być poddawani badaniom medycznym lub terapii z użyciem promieniowania, powoduje niepotrzebne wydatki na zabezpieczenia przed małymi dawkami w medycynie i w elektrowniach jądrowych, a w przypadkach awarii reaktorowych sprzyja niepotrzebnym i przesadnym reakcjom mającym chronić ludność przed promieniowaniem.

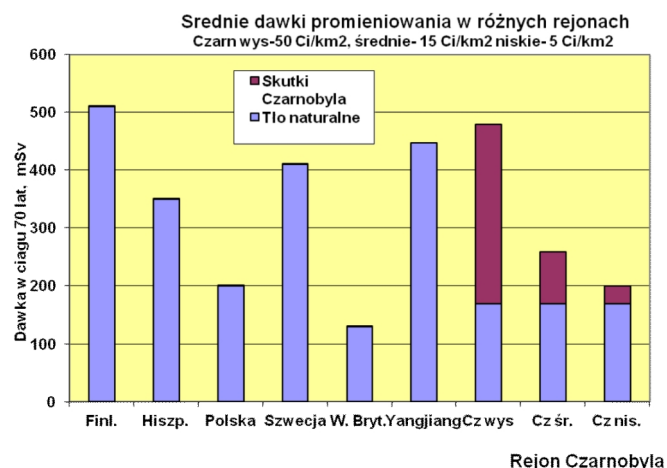
Przykładem jest awaria w Czarnobylu, która spowodowała 31 wczesnych zgonów, a została wykorzystana do wywołania ogólnej paniki i psychozy w skali regionalnej i globalnej. Psychoza stała się najpoważniejszym skutkiem tej awarii¹⁷. Spowodowała ona największe szkody zdrowotne, ekonomiczne i społeczne. Na terenach skażonych przez opady z Czarnobyla ok. 5 milionów mieszkańców dostaje dawki promieniowania w ciągu życia mniejsze niż 70 mSv, a więc mniejsze niż średnia w skali globu dawka życiowa od promieniowania naturalnego, a wielokrotnie mniejsze niż dawki promieniowania naturalnego w wielu regionach Ziemi. Dlatego zdaniem prof. Jaworowskiego należało usunąć większość restrykcji narzuconych po awarii w Czarnobylu.

Stwierdzono brak wzrostu zachorowań na raka, białaczkę, martwych urodzeń, komplikacji przy urodzeniu dzieci i negatywnych skutków zdrowotnych powodowanych przez promieniowanie. Negatywne skutki tej awarii nie są spowodowane przez promieniowanie, ale przez środki zaradcze i maszyną propagandę radiofobiczną w skali globalnej. Niestety te środki zaradcze były oparte na zaleceniach w dokumentach organizacji międzynarodowych wynikających z przyjęcia hipotezy LNT i krańcowo przesadzonych. Na przykład publikacja ICRP nr 40 (1984) zaleca, by ewakuację po poważnych awariach przeprowadzać, jeśli dawka promieniowania w pierwszym roku po

awarii przekracza 50 mSv. Odpowiada to dawce w ciągu całego życia wynoszącej ok. 150 mSv. Władze sowieckie zastosowały to zalecenie, a nawet je „ulepszyły”. Jak pisze Jaworowski, być może najważniejszą lekcją, jakiej powinniśmy się nauczyć z awarii w Czarnobylu, jest stwierdzenie, że te rekomendacje i założenia doprowadziły do katastrofalnych efektów. Nie brano pod uwagę, że takie zalecenia powodują ryzyko skutków nieradiologicznych, niewiarygodnie wysokie koszty i inne efekty szkodliwe, które należy porównać z korzyściami radiologicznymi.

Według zaleceń opartych na hipotezie LNT przesiedlono 400 000 osób. Z początku przesiedlenia prowadzono w rejonach, gdzie dawka w ciągu całego życia (70 lat) miała przekroczyć 350 mSv (5 mSv/rok). Później tę granicę zmieniono na 150 mSv (to jest 2,1 mSv/rok), a następnie do 70 mSv (1 mSv/rok) [45]. Dawka 1 mSv powoduje w organizmie człowieka 0,2 uszkodzeń DNA na komórkę, to jest łącznie 14 uszkodzeń DNA na komórkę w ciągu 70 lat. Natomiast normalne tempo endogennych uszkodzeń DNA, takich samych jak powodowane przez promieniowanie, wynosi ok. 70 milionów w każdej komórce w ciągu roku (ocena dolna). To porównanie uzmysławia nam, jak absurdalną decyzją było postanowienie przesiedlenia setek tysięcy ludzi, by uchronić ich przed kilkusetoma uszkodzeniami DNA na komórkę stanowiącymi niedostrzegalny dodatek do prawdziwego potopu naturalnych uszkodzeń, przeciwko którym ewolucja wyposażała nas w skuteczne mechanizmy obrony.

Rysunek 7-2, pokazujący porównanie dawek otrzymywanych przez całe życie w kilku krajach europejskich i w rejonach o małym, średnim i wysokim skażeniu opadem promieniotwórczym z Czarnobyla wskazuje jasno, że decyzje o przesiedleniu setek tysięcy mieszkańców terenów



Rys. 7-2. Porównanie dawek otrzymywanych w ciągu życia w różnych krajach i na terenach skażonych wokół Czarnobyla (rysunek własny).

Fig. 7-2. Comparison of radiation lifetime doses in various countries and in contaminated areas after Chernobyl accident.

¹⁶<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3526321/>

¹⁷Comments of dr. Zbigniew Jaworowski, representative of Republic of Poland in UNSCEAR „Chernobyl’s legacy: health, environmental and socio-economic impacts” the Chernobyl Forum 2006, http://dl.dropbox.com/u/71478013/Jaworowski-2006_comments-Chernobyl-Forum_Report-copyright.pdf

wokoło Czarnobyla były błędne! Gdyby były one uzasadnione, to rząd Finlandii powinien ewakuować większość ludności, a rządy Szwecji i Francji powinny ewakuować duże obszary, gdzie występuje wysokie promieniowanie naturalne. Oczywiście takie decyzje nie byłyby podjęte dzisiaj, bo IAEA wprowadziła zalecenie, by ewakuację stosować wtedy, gdy dawka życiowa wskutek dodatkowego promieniowania po awarii przekroczy 1000 mSv [46].

7.4. Stanowisko ICRP i UNSCEAR w sprawie działania małych dawek na zdrowie

W raporcie nr 103 z 2007 roku¹⁸ ICRP stwierdziła, że „Dawka kolektywna jest narzędziem dla optymalizacji technologii i procedur ochrony radiologicznej, głównie w zakresie narażenia zawodowego, ale nie miała być narzędziem do oceny ryzyka epidemiologicznego i stosowanie jej w ocenach ryzyka jest nieprawidłowe. Nie należy sumować bardzo niskich dawek indywidualnych w długich okresach czasu, a w szczególności obliczać liczby zgonów na raka w oparciu o dawkę kolektywną tworzoną z trywialnie małych dawek indywidualnych”.

Gdy nastąpiła awaria w Fukushima, na specjalnej sesji w Japonii eksperci UNSCEAR oświadczyli, że napromieniowanie ludności wskutek tej awarii nie spowoduje wykrywalnych skutków zdrowotnych¹⁹. „Wobec tego, że wszystkie dawki promieniowania były mniejsze niż 100 mSv, co jest progiem dla zagrożenia zachorowaniem na raka, prawdopodobnie przypadków zachorowań nie było”. UNSCEAR dodał, że występowanie licznych anomalii tarczycy wśród dzieci wokoło Fukushima nie jest związane z awarią w Fukushima. Stwierdzenie to dotyczy dzieci i płodów będących w łonie matki w czasie awarii. UNSCEAR podkreślił, że w Japonii zachorowania na raka występują wśród 35% populacji i nawet gdyby Fukushima spowodowała jakieś zachorowania, to nie byłyby one zauważalne na tle normalnych zachorowań Japończyków.

Nie oczekuje się, by wśród mieszkańców i ich potomstwa miało wystąpić zwiększenie częstości zachorowań powodowanych przez promieniowanie. Najważniejszym efektem (pośrednio wpływającym na zdrowie) jest stan psychiczny i skutki społeczne związane z niebywałym atakiem tsunami i trzęsieniem ziemi oraz spowodowaną przez nie katastrofą jądrową. Lęk wywołany teorią, że każda dawka promieniowania jest szkodliwa, spowodował, iż promieniowanie po awarii w Fukushima uznano za zabójcze i wszystko, co podlegało jego działaniu, budziło wielkie obawy²⁰.

¹⁸[https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37\(2-4\)-Free_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf)

¹⁹*U.N. panel sees no discernible rise in cancer from Fukushima nuke mishap*. 10 February 2016 <http://www.fukushimaminponews.com/news.html?id=629>

²⁰UNSCEAR_Report_2013_Annex_A.pdf *Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami*.

Wniosek

Jak widać, stwierdzenia UNSCEAR w przypadku Fukushima są podobne jak w przypadku Czarnobyla, z tym, że w przypadku Fukushima nie wystąpiły zachorowania na nowotwory tarczycy. Natomiast stwierdzenie o przesadnych obawach przed promieniowaniem powodujących szkodliwe decyzje jest prawdziwe w obu przypadkach. O ile duże dawki promieniowania otrzymane w krótkim czasie są szkodliwe dla zdrowia, o tyle małe moce dawki nawet przy dłuższym działaniu pobudzają reakcje obronne naszego organizmu i w sumie ich działanie powoduje redukcję zachorowań na nowotwory. Obawa przed wszelkimi dawkami promieniowania, nawet najmniejszymi, prowadzi do błędnych decyzji i strachu przed energetyką jądrową oraz stosowaniem promieniowania w zabiegach medycznych.

Notka o autorze

Dr inż. Andrzej Strupczewski, prof. NCBJ – przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego i rzecznik energetyki jądrowej w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, ekspert ds. bezpieczeństwa jądrowego Komisji Europejskiej i Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA), wiceprezes Stowarzyszenia Ekologów na rzecz Energii Nuklearnej SEREN (e-mail: Andrzej.Strupczewski@ncbj.gov.pl)

Literatura

1. Karam P.A., Leslie S.A., and Anbar A., The effects of changing atmospheric oxygen concentrations and background radiation levels on radiogenic DNA damage rates. *Health Physics*, December 2001, <https://www.researchgate.net/publication/11683781>
2. Feinendegen L. E., Pollycove M., and Neumann R. D., “*Hormesis by low dose radiation effects: Low-dose cancer risk modeling must recognize up-regulation of protection*,” in *Therapeutic Nuclear Medicine*, edited by Baum R. P. (Springer, Berlin, 2013).
3. Doss M., “*Shifting the paradigm in radiation safety*”, *Dose-Response* 10, 562–583 (2012). 10.2203/dose-response.11-056.
4. Cohen B., “*The cancer risk from low-level radiation*,” in *Radiation Dose from Adult and Pediatric Multidetector Computed Tomography*, edited by Tack D. and Gevenois P. (Springer-Verlag, Berlin, 2007), pp. 33–49.
5. Doss M., “*Linear no-threshold model vs. radiation hormesis*,” *Dose Response* 11, 480–497 (2013). 10.2203/dose-response.13-005.
6. Calabrese E. J., and Baldwin L. A., “*Radiation hormesis: its historical foundations as a biological hypothesis*,” *Hum. Exp. Toxicol.* 19, 41–75 (2000). 10.1191/096032700678815602.
7. Pearce M. S. et al., “*Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study*,” *Lancet* 380, 499–505 (2012). 10.1016/S0140-6736(12)60815-0.
8. Cohen M., “*Cancer risks from CT radiation: Is there a dose threshold?*,” *J. Am. Coll. Radiol.* 10, 817–819 (2013). 10.1016/j.jacr.2013.03.029.
9. Little M. P. et al., “*Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and*

- estimates of potential population mortality risks,” *Environ. Health Perspect.* 120, 1503–1511 (2012). 10.1289/ehp.1204982
10. Akiba S., “*Circulatory disease risk after low-level ionizing radiation exposure*,” *Radiat. Emerg. Med.* 2, 13–22 (2013) (available URL: http://www.hs.hirosaki-u.ac.jp/~hibaku-pro/rem/file_pdf/2013_vol_2-2/rem_vol2_2_03_suminori_akiba.pdf).
 11. Little M. P., “*A review of non-cancer effects, especially circulatory and ocular diseases*,” *Radiat. Environ. Biophys.* 52, 435–449 (2013). 10.1007/s00411-013-0484-7
 12. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “*Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1994 Report to the General Assembly, with scientific annexes*” (United Nations, New York, 1994), pp. 1–272.
 13. Pollycove M., Feinendegen L.E., *Radiation-induced versus endogenous DNA damage: possible effect of inducible protective responses in mitigating endogenous damage*. *Human & Experimental Toxicology*. 2003; 22:290-306, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12856953/>
 14. *Intervenor Report for Canadian Nuclear Safety Commission Public Hearing* by Dr. Jerry M. Cuttler, D.Sc., P.En., https://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/the-commission/hearings/cm_d/pdf/CMD21/CMD21-H4-22.pdf
 15. Karam A.P., Leslie S.A., Anbar A., The effects of changing atmospheric oxygen concentrations and background radiation levels on radiogenic DNA damage rates. *Health Physics*, 2001, Vol. 81, No 3. p. 545-553.
 16. *Low level Radiation Health Effects*, RSH Compiling the Data, III Edition, March 2002, Chapter 1.3.2 Lower-order Animals.
 17. Planel H., Bru A., Soleilhavoup, J.P., and Tixador, R. (1967), *Effect of very low ionizing radiations on the multiplication of Paramecium aurelia*, C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. Ser. Sci. Natur., 264: 2945-2948.
 18. Planel H., and Giess, M.C. 1973, *Decrease in the longevity of drosophila melanogaster caused by protection against natural ionizing radiations*. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des Sciences Serie D: Sciences naturelles* 676:809-812.
 19. Planel H., Soleilhavoup J. P., Tixador R.; Richoilley G., Conter A., Croute F., Caratero C., Gaubin Y., *Influence on Cell Proliferation of background radiation or exposure to very low gamma radiation*, *Health Physics: May 1987 – Volume 52 – Issue 5 – p 571-578*.
(Hosoi Y, Sakamoto K. *Suppressive effect of low dose total body irradiation on lung metastasis: dose dependency and effective period*. *Radiother. Oncol.* 1993, 26(2):177-9)
 20. Jaworowski Z., *Radiation risk and ethics*, „*Physics Today*”, 52(9), pp. 24–29, 1999.
 21. Cuttler J.M., and Hannum W.H., Current Radiation Protection Limits, An Urgent Need for Change, *Nuclear News*, September 2017, 34–38.
 22. Hickey R.J., et al., Low level ionizing radiation and human mortality: multi-regional epidemiological studies, „*Health Physics*”, Vol. 40, May 1981, 625–641.
 23. Jagger J., Natural Background Radiation and Cancer Death in Rocky Mountain States and Gulf Coast States, „*Health Physics*”, October 1998, Vol. 75, No 4, 428–430.
 24. Cohen B.L., Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products, „*Health Physics*” 68:157–174, 1995.
 25. Cohen B.L., *Test of the linear-no threshold theory; rationale for procedures*, *Nonlinearity in Biology, Toxicology, and Medicine* 3, 261–282, 2005.
 26. Duport Ph., *Low Dose Radiation and Risk*, Ottawa University, Institute of Environment, Intern. Centre for Low Dose Radiation Research, January 2002.
 27. David E., Wolfson M., Fraifeld E.V., *Background radiation impacts human longevity and cancer mortality: reconsidering the linear no-threshold paradigm*, *Biogerontology* 22, 189–195, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10522-020-09909> – [dostęp: 11.09.2022].
 28. Thompson R.E., Nelson D.F., Popkin J.H., Popkin Z., Case-control study of lung cancer risk from residential radon exposure in Worcester County Massachusetts, „*Health Physics*” 2008, 94(3): 228–241.
 29. Sanders Ch., *Radiation hormesis and Linear No Threshold assumption*, 2010, Springer Verlag, Berlin, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-03720-7> [dostęp 26.09.2022].
 30. Sun Q., et al., *Excess Relative Risk of Solid Cancer Mortality after Prolonged Exposure to Naturally Occurring High-Background Radiation in Yangjiang, China*, *Radiation Res.*, Tokyo 41, 2000, Suppl 433–52.
 31. Nair M.K., et al., *Population study in the high natural background radiation area of Kerala, India*, *Radiat Res.* 152, 145–148S, 1999.
 32. Mifune M., et al., *Cancer mortality survey in a Spa area (Misasa, Japan) with a high radon background*, *Jpn. J. Cancer Res.* 1992, 83: 1–5.
 33. Delpoux M., et al., *Experimental study of the genetic effects of high levels of natural radiation in south France*, [w:] *High levels of Natural Radiation 1996 Radiation Dose and Health Effects*, L. Wei, T. Sugahara, Z. Tao editors, 1997, Elsevier Science B.V.
 34. Cardis E., et al., *Combined analysis of cancer mortality among nuclear industry workers in Canada, UK and the USA*, IARC Techn. Report No. 25, Lyon 1995.
 35. Działalność prezesa PAA i ocena stanu bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej w Polsce w 2007 roku, Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa, maj 2008, s. 68.
 36. Dauer L.T., Boice J.D. Jr., *The Million Person Study of Low-Level and Low-Dose-Rate Health Effects: Importance, Information and Innovation*, Memorial Sloan Kettering Cancer Center, NCRP, Vanderbilt University, 25.06.2022.
 37. Berrington A., Darby S.C., Weiss H.A., Doll R., *100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997*. *Br J Radiol.* 2001;74:507–519.
 38. Janiak M., *Czy niskie dawki promieniowania jonizującego są szkodliwe?* *Postępy Techniki Jądrowej*, 2022 nr 1.
 39. Calabrese E.J., *On the origins of the linear no-threshold (LNT) dogma by means of untruths, artful dodges and blind faith*. *Environ. Res.* 142: 432–442, 2011.
 40. Duport Ph., *Low-Dose Radiation and Risk: A Perspective, Centre for Low-Dose Radiation Research*, Institute of the Environment, University of Ottawa, January 2002.
 41. Charpak G., Garwin R.L., *Błędne ogniki i grzyby atomowe*, WNT, Warszawa 1999, s. 158–161.
 42. Hall P., et al., *Thyroid cancer after diagnostic administration of Iodine 131*, *Radiation Research*, 145 (1996) 86–92.
 43. Howe G.R., *Lung cancer mortality between 1950 and 1987 after exposure to fractionated moderate dose rate ionizing radiation in the Canadian fluoroscopy cohort study and a comparison with lung cancer mortality in the atomic bomb survivors study*, *Radiation Research*, 142, p. 295–304, 1995.
 44. Ilyin L.A., *Chernobyl: Myth and Reality*, Moscow, Megapolis, 1995; Filyushkin, I.V. *Health Physics* Vol. 71, pp. 4-8, 1996.
 45. *IAEA Basic Safety Standards, Annex V*, 1996.

Turystyka czarnobylska oraz pozostałe czynniki wpływające na bezpieczeństwo elektrowni jądrowej w Czarnobylu

Chernobyl tourism and other factors influencing the security of the Chernobyl nuclear power plant

Marek Niemczyk
Wyższa Szkoła Bankowa w Gdańsku

Streszczenie: W artykule przytoczono fragmenty pracy magisterskiej napisanej m.in. na podstawie materiałów uzyskanych podczas wizyty autora w Czarnobylu jesienią 2021 roku. Fragmenty te dotyczą zjawiska turystyki czarnobylskiej, jej wpływu na bezpieczeństwo likwidowanej elektrowni w Czarnobylu oraz pozostałych czynników, które mogą wpływać na wzrost zainteresowania wspomnianym obiektem przez organizacje przestępcze bądź terrorystyczne¹.

Słowa kluczowe: Elektrownia jądrowa, terroryzm, turystyka, bezpieczeństwo obiektu, grupy przestępcze, strefa wykluczenia.

Abstract: *The article quotes excerpts from the master's thesis written, among others based on materials obtained during the author's visit to Chernobyl in the fall of 2021. Above excerpts concern the phenomenon of Chernobyl tourism, its impact on the security of the Chernobyl power plant and other factors that may increase the interest in the facility by criminal or terrorist organizations.*

Keywords: *Nuclear power plant, terrorism, tourism, facility security, criminal groups, exclusion zone.*

Wstęp

Elektrownia jądrowa w Czarnobylu, pomimo iż od wielu lat nie funkcjonuje, w dalszym ciągu należy do obiektów strategicznych, wobec których nielegalne lub nieautoryzowane działania mogą prowadzić do poważnych skutków i zagrożeń. Turystyka w miejscu, jakim jest strefa wykluczenia, w znaczący sposób wpływa na profilaktykę zapewnienia bezpieczeństwa obiektów likwidowanej elektrowni, zważywszy na fakt, iż wiele grup turystycznych podczas eksploracji znajduje się w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Potencjalnym zagrożeniem może być nie tylko sama obecność człowieka (turysty), ale również to co dana osoba może pozyskać, przebywając w strefie wykluczenia. Praktycznie całkowita swoboda rejestracji dźwięku i obrazu może skutkować rozpoznaniem oraz ujawnieniem procedur i zabezpieczeń stosowanych w strefie wykluczenia oraz na terenie samej elektrowni. Turystyka czarnobylska jest jednak tylko jednym z kilku czynników, które mają istotne

znaczenie w profilaktyce i polityce bezpieczeństwa tego miejsca. Znajdujące się w dalszym ciągu na terenie kompleksu energetycznego obiekty przechowywania wypalonego paliwa jądrowego mogą stanowić przedmiot zainteresowania organizacji przestępczych lub terrorystycznych. Należy również zwrócić uwagę na ruiny energobloku czwartego, na którego dnie wciąż znajduje się zastygnięta, ale nadal silnie promieniotwórcza masa stopionego rdzenia reaktora. Warto rozważyć, czy na skutek pewnych zaplanowanych wrogich działań może się ona stać źródłem uwolnienia substancji promieniotwórczych. Elektrownia, mimo iż nie uczestniczy w procesie produkcji energii, pozostaje jednak w dalszym ciągu stacją dystrybucyjną i przesyłową, której przejęcie mogłoby skutkować przerwami w dostawach prądu w wielu miejscowościach. W artykule zostaną scharakteryzowane wszystkie z wymienionych czynników wraz z określeniem ich znaczenia dla bezpieczeństwa.

¹ Wszelkie zawarte w tym artykule stwierdzenia i wnioski odnoszą się do sytuacji istniejącej w warunkach pokojowych, w czasie zbierania przez autora materiałów do pracy magisterskiej podczas pobytu w Czarnobylu jesienią 2021, a więc przed zbrojną napaścią Rosji na Ukrainę i wojną trwającą tam od 22 lutego 2022 roku (przyj. red.).

Turystyka czarnobylska i nielegalne wtargnięcia na teren strefy wykluczenia

Sposób dostania się na teren strefy wykluczenia, zwanej również często strefą czarnobylską, można podzielić na dwie kategorie: pierwszą z nich jest przejście procedur bezpieczeństwa oraz pozyskanie stosownych pozwoleń oraz przepustki, która jest konieczna, aby przekroczyć pierwszy i zarazem główny posterunek policji czarnobylskiej. Osoba, która uzyska stosowne pozwolenia, w legalny sposób dostaje się na teren strefy i w tym przypadku mówimy o **turystyce czarnobylskiej**. Należy również podkreślić, że **nie każdy uzyska zgodę** administracji strefy na wjazd do „zony”. Drugą ze wspomnianych kategorii jest **nielegalne wtargnięcie** na teren strefy zamkniętej. Oczywiście jest to, że tak rozległego obszaru jak strefa wykluczenia nie da się solidnie i z należytą starannością ogrodzić w celu zatrzymania „nieproszonych gości”, zatem zabezpieczenie obszaru wykluczenia przed intruzami realizowane jest w ramach patroli wojska oraz policji czarnobylskiej oraz z wykorzystaniem urządzeń elektronicznych (fotopułapki, kamery, czujniki ruchu itd.). Obecnie mimo regularnych patroli osoby praktykujące nielegalne wejścia do strefy opanowały ów proceder do takiego stopnia, iż wiedzą, kiedy spodziewać się w danym miejscu patroli oraz gdzie można natrafić na zabezpieczenia elektroniczne, co powoduje, że nasilenie tego zjawiska może budzić niepokój.

Wspomniane dwie kategorie osób dostających się na teren strefy można z łatwością rozróżnić dzięki zastosowanej nomenklaturze. Osoby, które przeszły wszelkie kontrole i uzyskały przepustkę, a co za tym idzie, legalnie dostały się do strefy, nazywamy po prostu **turystami** w ramach zjawiska, jakim jest turystyka czarnobylska. Jednak osoby, które nielegalnie wtargnęły do strefy, administracja strefy, a także funkcjonariusze tam pracujący nazywają



Rys. 1. Znak oznajmiający wjazd do obwodu czarnobylskiego znajdujący się tuż za głównym punktem wjazdu do strefy wykluczenia (źródło: materiał własny).

Fig. 1. A sign for entry to the Chernobyl region, located just after the main entry point to the exclusion zone (source: own material).

„**stalkerami**”. Owa nazwa (pochodząca od angielskiego czasownika „stalk” oznaczającego „skradać się, tropić, podchodzić” w celu nękania i prześladowania wybranych osób – przyp. red.) według wielu odnosi się m.in. do określenia osób przebywających i żyjących w opuszczonej strefie – przez analogię do sytuacji występujących w serii gier komputerowych „Stalker”. Po przyjrzeniu się wspomnianej serii gier z pewnością da się zauważyć znaczące podobieństwo. Na czym ono polega? Przede wszystkim na tym, iż prawdziwi stalkerzy przebywający na terenie strefy czarnobylskiej faktycznie w niej mieszkają. Najczęściej adaptują opuszczone mieszkania w miejscowości Prypeć i przystosowują je do kilkudniowego noclegu oraz stosują środki ostrożności, aby nie zostać schwytani przez funkcjonariuszy policji lub wojsko (zasłanianie okien folią, aby w nocy światło latarki nie było widoczne dla osób na zewnątrz).



Rys. 2. Fotografia ukazująca mieszkanie przystosowane przez „stalkerów” (źródło: materiał własny).

Fig. 2. A photo showing an apartment adapted by „stalkers” (source: own material).

Porównując legalny wjazd do strefy oraz nielegalne wtargnięcie na jej teren, należy zauważyć, że **nie każda osoba** wjeżdżająca do strefy zamkniętej, posiadająca odpowiednie dokumenty, przepustkę oraz paszport, **przyjeżdża do tego miejsca z dobrymi intencjami**. Także **nie każda osoba** decydująca się na nielegalne wtargnięcie **dokonyje tego z intencją dokonania szkód, zniszczeń, kradzieży itd.** Dlatego czynnik ludzki należy uznać za niezwykle ważny, ale również nieprzewidywalny, ponieważ służby bezpieczeństwa znajdujące się na terenie strefy nie są w stanie określić liczby i zamiarów osób **przebywających nielegalnie** na terenie strefy. A zatem nie jest pewne czy nie ma wśród nich osób stwarzających wymierne zagrożenia dla znajdującej się w tym miejscu infrastruktury krytycznej.

Czynnik ludzki należy uznać za niezwykle istotny również dlatego, iż osoby udające się do Czarnobyla w **celach turystycznych** mają możliwość legalnego wejścia na teren

samej elektrowni oraz likwidowanych bloków energetycznych, co także może generować pewne ryzyko. Dochodzi bowiem do sytuacji, w której duża liczba osób cywilnych różnych narodowości (o czy mowa niżej) dostaje przepustki na teren obiektu strategicznego, na jakiego teren prawdopodobnie nie miałyby możliwości wstępu w tej liczbie w przypadku innych tego typu obiektów w Europie lub na świecie. Wymaga to dobrych i skrupulatnie przestrzeganych procedur sprawdzania tych osób przed wydaniem im przepustek, oraz dobrego, skutecznego nadzoru nad ich przemieszczaniem się w strefie zamkniętej i wewnątrz budynków samej elektrowni.

W jaki jednak sposób turystyka czarnobylska i „stalcerzy” wpływają na bezpieczeństwo obiektów na terenie znajdującej się w strefie wykluczenia byłej elektrowni jądrowej? Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy rozpatrzyć, jakie ryzyka niosą oba wyżej wymienione zjawiska.

Pierwszym z czynników turystyki czarnobylskiej mogącym wpływać na zagrożenie jest brak dokładnej kontroli przewożonych bagaży oraz brak takiej kontroli przy wjeździe do strefy. Według autora jest to istotny czynnik wpływający na bezpieczeństwo, ponieważ istnieje dość znaczna swoboda przewiezienia na teren elektrowni wszelkiego rodzaju narzędzi, środków i materiałów mogących stanowić zagrożenia dla obiektów w obrębie elektrowni jądrowej oraz dla znajdującego się na jej terenie personelu.

Należy zauważyć, iż jedyna na terenie strefy kontrola poprzez bramkowy wykrywacz metali znajduje się dopiero w samej elektrowni, co oznacza, że osoby, które potencjalnie posiadałyby przedmioty niebezpieczne mogą je swobodnie przemieścić na teren głównego budynku. Zaniechanie tego elementu profilaktyki bezpieczeństwa ze strony służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo na terenie strefy wykluczenia oraz samej elektrowni może zdaniem autora generować ryzyko wystąpienia sytuacji niebezpiecznych lub nadzwyczajnych. Pomimo iż nigdy do takich zagrożeń nie doszło, nie należy uznawać, że nie mogą wystąpić.



Rys. 3. Plac główny przed elektrownią.

Fig. 3. Main square in front of the power plant.

Tabela 1. Liczba turystów obecnych w Czarnobylu.

Table 1. Number of tourists in Chernobyl.

Rok 2018 (year 2018)	Rok 2019 (year 2019)
71 800	107 600

(źródło: Opracowanie własne na podstawie [3]).

(source: Own study based on [3]).

Tabela 2. Kraje i liczba ich obywateli najczęściej odwiedzających strefę czarnobylską.

Table 2. Countries and numbers of their citizens most frequently visiting the Chernobyl area (data for 2019),

Wielka Brytania (United Kingdom)	15 738
Polska (Poland)	9 378
Niemcy (Germany)	7 826

(źródło: opracowanie własne na podstawie [3]).

(source: Own study based on [3]).

Kolejnym istotnie ważnym czynnikiem jest natężenie turystyki w obszarze strefy. Dla strefy wykluczenia nie ustalono limitów liczby osób cywilnych przebywających jednocześnie na terenie Czarnobyla lub Prypeci, a miejsce to z roku na rok staje się coraz częściej obiektem podróży wielu osób ze wszystkich stron świata [2]. Należy zauważyć, iż im bardziej tematyka katastrofy czarnobylskiej ukazywana jest w ekranizacjach filmowych, serialach, grach komputerowych, tym bardziej wzrasta liczba osób odwiedzających to miejsce, co z jednej strony generuje istotny wzrost zarobków dla ukraińskiej administracji, z drugiej strony jednak stwarza również różne zagrożenia.

Na podstawie przedstawionych danych statystycznych z końca minionej dekady (tab. 1 i 2) można zauważyć, iż na obszarze czarnobylskiej strefy zamkniętej panowała silna tendencja wzrostowa liczby odwiedzających ją osób. Porównując liczbę turystów w roku 2018 z 2019, można zauważyć wzrost o 35 800 osób, czyli o blisko 50%. Jak to może wpływać na bezpieczeństwo? Podstawowym problemem jest bardzo mała liczba personelu administracji oraz służb na terenie strefy w porównaniu z liczbą turystów, która każdego roku wzrasta. Dokładne dane na temat liczby funkcjonariuszy wojska oraz policji czarnobylskiej są utajnione, jednak na podstawie obserwacji przeprowadzonych bezpośrednio w strefie liczba ta może nie być adekwatna do ogromnej i stale rosnącej liczby turystów, którzy odwiedzają to miejsce. Zagrożenia dla elektrowni związane z przedstawioną statystyką polegają na tym, że mała liczba personelu strefy może nie być w stanie w stopniu wystarczającym kontrolować poczynania wielkiej liczby osób udających się do elektrowni lub przebywających w jej pobliskim otoczeniu, jak np. w Prypeci. Znaczny i rosnący kontrast ilościowy powinien być traktowany jako sygnał ostrzegawczy, mobilizujący do podjęcia działań zwiększających bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej, którą ochrania personel strefy wykluczenia, m.in. przez

zwiększenie liczby jego funkcjonariuszy. Oznaczałoby to jednak konieczność poniesienia dodatkowych wydatków na ochronę. Im więcej turystów przybywa do tego miejsca, tym więcej środków finansowych zasila budżet państwa, co wiąże się ze znaczną aprobatą i zadowoleniem ze strony osób zarządzających obszarem wykluczenia. Ważne jest, by odpowiednia część tych rosnących przychodów przeznaczana była na utrzymywanie bezpieczeństwa na poziomie adekwatnym do zagrożeń.

Należy przy tym podkreślić, iż w aspekcie zwiedzania elektrowni jądrowej istotnym czynnikiem, mającym wpływ na bezpieczeństwo, jest nakłanianie turystów do odwiedzania wnętrza budynków elektrowni, promowanie i reklamowanie zwiedzania bloków energetycznych, sterowni oraz wszelkiego rodzaju innych obiektów znajdujących się w kompleksie tej elektrowni. Tak usilne reklamowanie i przyciąganie turystów wynika oczywiście z faktu znaczącego zarobku, jaki administracja strefy otrzymuje za umożliwienie turystom wejścia do środka budynków EJ. Jednorazowy dwugodzinny pobyt z przewodnikiem to koszt rzędu 3500 UAH, co w przeliczeniu oznacza kwotę ok. 500 złotych od osoby². Należy również podkreślić, że wedle obserwacji autora niemal każda osoba odwiedzająca Czarnobyl decyduje się na skorzystanie z tej oferty. Kiedy pomnoży się koszt przejścia oferowanej trasy po elektrowni przez liczbę turystów, która odwiedza ją w ciągu całego roku, otrzyma się kwotę kilkudziesięciu milionów złotych, co jest dla budżetu Ukrainy z pewnością znaczącym zasileniem, w odniesieniu na przykład do poziomu zarobków. Z kosztem w wysokości ok. 500 złotych wiąże się również uzyskanie uprawnień do operowania obiektami latającymi typu dron. Na tę opcję również decyduje się bardzo wielu odwiedzających, co jest kolejnym sporym zasileniem budżetu. Warto tu odnotować, że podmioty decyzyjne zastrzegają sobie fotografowanie oraz nagrywanie wielu obiektów na terenie elektrowni przez drony sterowane jedynie przez osoby z personelu, tłumacząc to wymogiem uniknięcia ryzyka rejestracji fotograficznej lub wideo przez osoby postronne obiektów ochrony elektrowni i jej zabezpieczeń. Nie jest jasne dla autora, jak wymóg ten jest egzekwowany w praktyce od turystów wykupujących uprawnienia do operowania dronem. Warto jedynie zauważyć, że może tu dochodzić do konfliktu interesów: dążenia do maksymalizacji dochodów z priorytetami bezpieczeństwa. Przykładem jest to, iż bardzo wielu turystów pomimo zakazów i próśb personelu dokonuje rejestracji wideo miejsc, które są w spisie miejsc objętych zakazem rejestracji wideo oraz fotografowania. Następnie nagrania oraz zdjęcia tych miejsc często umieszczane są w Internecie, portalach społecznościowych, forach podróżniczych itd., gdzie potencjalna komórka terrorystyczna może wejść w ich posiadanie. Można zatem założyć, iż turystyka w tym miejscu może znacząco wpływać na jego bezpieczeństwo ze względu na rozpowszechnianie poprzez fotografie lub



Rys. 4. Widok na kompleks elektrowni (źródło: materiał własny).

Fig. 4. View of the power plant complex (source: own material).

nagrania informacji odnośnie do kluczowych zabezpieczeń, elementów strategicznych dla bezpieczeństwa lub chociażby rozmieszczenia obiektów elektrowni, na których podstawie można stworzyć wystarczająco dokładną mapę umiejscowienia najważniejszych punktów tego obiektu.

Jakie zagrożenia bezpieczeństwa niesie natomiast działalność „stalkerów”? Najczęstszym powodem, dla którego dochodzi do takich wtargnięć, jest przede wszystkim szabrownictwo, które do dzisiejszego dnia ze względu na skrajną biedę w wielu miejscach na terenie Ukrainy uznawane jest za wartę podejmowanego ryzyka, bo stwarza możliwość szybkiego i znacznego zarobku. Co pozostaje w zakresie zainteresowania szabrowników? Są to najczęściej materiały i przedmioty pochodzenia metalurgicznego, które później sprzedawane są w punktach przetwórstwa tych materiałów.

Wynoszone poza teren strefy są również o dziwo zabawki, charakterystyczne dla tego terenu elementy odzieży,



Rys. 5. Pocięte przez szabrowników kawałki międzykontynentalnego radaru Duga (źródło: materiał własny).

Fig. 5. Pieces of the Duga intercontinental radar cut by looters (source: own material).

² Wg kursu NBP z jesieni 2021 roku, kiedy autor odwiedził Czarnobyl.



Rys. 6. Maski obrony cywilnej Czarnobyla, rozgrabione i porzucone przez stalkerów (źródło: materiał własny).

Fig. 6. Masks of Chernobyl civil protection, plundered and abandoned by stalkers (source: own material).



Rys. 7. Wóz bojowy pomalowany przez stalkerów (źródło: materiał własny).

Fig. 7. Combat vehicle painted by stalkers (source: own material).

takie jak maski, buty, hełmy oraz niektóre z elementów wyposażenia budynków mieszkalnych. Dlaczego jednak dochodzi do kradzieży tak na ogół bezwartościowych przedmiotów? Często występują sytuacje, kiedy takie rzeczy, jak pluszowe zabawki sprzedawane są na portalach internetowych za horrendalne sumy, tylko dlatego, że pochodzą z Czarnobyla i są uznawane za swojego rodzaju towar niedostępny albo wręcz niepowtarzalny. Kolejnym z powodów, dla których dochodzi do nielegalnego wtargnięcia na teren strefy, są czyny o charakterze chuligańskim. Często spotykanym widokiem są budynki czy pojazdy pokryte hasłami o niejednokrotnie kontrowersyjnych i obraźliwych treściach. Regularną praktyką jest również

malowanie pojazdów na przeróżne kolory, jak np. różowy, bez powodu oraz bez konkretnego celu w tym działaniu.

Takie to praktyki w znacznym stopniu wpływają na zatarcie śladu historycznego w tym miejscu, ponieważ osoby odwiedzające strefę z roku na rok w coraz to mniejszym stopniu mogą ujrzeć nietkniętą i pozostawioną czasowi infrastrukturę oraz wszelkie elementy, które znajdują się w strefie wykluczenia. Zaobserwowanym przez przewodników strefy zjawiskiem jest również pewna niecodzienna praktyka ze strony osób nielegalnie przebywających w Prypeci lub na terenie Czarnobyla. Coraz częściej dochodzi do tworzenia i pozorowania przez owe osoby warunków do spektakularnych fotografii. Kolokwialnie ujmując, praktyka ta polega na ustawianiu zabawek, takich jak lalki lub też pluszowe misie, w nietypowych miejscach, które często kryją smutną historię danej grupy społecznej, tak aby fotografie w jeszcze większym stopniu przedstawiały groźbę wydarzeń z 1986 roku. Działania te stosowane są również po to, aby straszyć turystów. Niejednokrotnie, zwiedzając nocą budynki, wchodzi się do ciemnych pomieszczeń, na których końcu siedzi np. mała dziecięca lalka kiwająca ręką bezpośrednio w stronę osób wchodzących do pomieszczenia.

Należy jednak zastanowić się, czy działania dokonywane przez stalkerów rzeczywiście mają jakikolwiek wpływ na bezpieczeństwo obiektu, jakim jest elektrownia jądrowa, czy jednak są działaniami oczywiście szkodliwymi, jednak całkowicie niezagrażającymi bezpieczeństwu kompleksu energetycznego znajdującego się w tym miejscu. Wydaje się, iż wbrew pozorom to legalna turystyka zdaje się generować większe ryzyko dla bezpieczeństwa tego obiektu. Może to oczywiście wynikać z tego, iż turyści legalnie przebywający w strefie w porównaniu do stalkerów mają o wiele większą swobodę poruszania, nie są obiektem poszukiwań przez służby, ale najprostszym powodem jest fakt, że często turyści znajdują się bezpośrednio w pobliżu



Rys. 8. Dziecięca lalka ułożona przy wejściu do budynku mieszkalnego (źródło: materiał własny).

Fig. 8. A child's doll laid out at the entrance to a residential building (source: own material).

elektrowni, na jej terenie lub w samym jej środku, co dla stalkerów jest przedsięwzięciem często wręcz niemożliwym.

Reasumując przedstawione zjawiska legalnej turystyki czarnobylskiej oraz jej nielegalnego odpowiednika, należy zauważyć, iż w ogólnej idei bezpieczeństwa obecność osób trzecich w pobliżu, na terenie lub w środku takiego obiektu jak elektrownia jądrowa zawsze będzie niosło ze sobą pewne ryzyko dla bezpieczeństwa, zwłaszcza kiedy odwiedzający to miejsce turyści traktowani są z dużą dozą zaufania, co w przypadku takiego obiektu działa korzystnie na płaszczyźnie turystyki, ściągając coraz więcej chętnych ludzi do strefy zamkniętej, jednak potencjalnie narażając elektrownię i jej personel na sytuacje niebezpieczne.

Czynniki, które mogą wpływać na zainteresowanie elektrownią w Czarnobylu przez organizacje przestępcze lub terrorystyczne

Można rozważyć, czy realne jest potencjalne zainteresowanie elektrownią jądrową w Czarnobylu jako celem ataku terrorystycznego, który w głównej mierze dotyczyłby **zniszczonego bloku czwartego**, a konkretniej, czy istnieją w granicach ludzkich możliwości działania, które mogłyby doprowadzić do zdarzenia o charakterze terrorystycznym z wykorzystaniem i obraniem za cel właśnie tego zniszczonego bloku energetycznego. W pierwszej kolejności należy zastanowić się, czy zniszczony 35 lat temu reaktor wciąż może zagrażać bezpieczeństwu społeczności lokalnej lub międzynarodowej na skutek ewentualnego poddania go jakimkolwiek działaniom zewnętrznym. W tym celu należy ustalić przede wszystkim, w jakich miejscach zniszczonego bloku energetycznego znajduje się zastygnięte paliwo nuklearne, które stopiło się podczas awarii, ponieważ to właśnie ono stanowi jedyne źródło wciąż niebezpiecznych poziomów promieniowania jonizującego [4].

Czerwony obszar zaznaczony na rysunku 11 przedstawia magmę stworzoną ze stopionego paliwa jądrowego, betonu, piasku i boru. Można zauważyć, iż ta radioaktywna „lawa” nie znajduje się *stricto* na powierzchni zniszczonego reaktora, lecz przeniknęła do pomieszczeń technicznych znajdujących się pod nim. Z przedstawionej na ilustracji sytuacji wynikają dwa fakty. Za pierwszy z nich należy uznać, że **samo naruszenie konstrukcji ochronnej zniszczonego reaktora nie spowoduje uwolnienia substancji promieniotwórczych**, a przynajmniej nie w stopniu zagrażającym bezpieczeństwu, ponieważ przeważająca ilość promieniotwórczego materiału znajduje się pod ruinami bloku energetycznego numer cztery. Drugim z kolei faktem jest uznanie za **praktycznie niemożliwe dostanie się w obręb pomieszczeń 305/2**, tj. do szybu reaktora, oraz 304/2, tj. do kanału technicznego, ponieważ



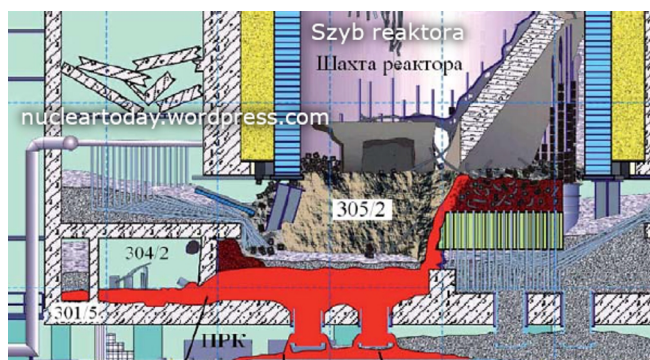
Rys. 9. Hala zniszczonego reaktora numer 4 (źródło: Aleksander Kupnyj).

Fig. 9. Hall of the destroyed reactor number 4 (source: Aleksander Kupnyj).



Rys. 10. Pokrywa reaktora numer 4 (Elena) (źródło: Aleksander Kupnyj).

Fig. 10. Reactor cover number 4 (Elena) (source: Aleksander Kupnyj).



Rys. 11. Schemat umiejscowienia stopionych pozostałości reaktora numer 4.

Fig. 11. Diagram of the location of the molten residue of reactor number 4.

drogi prowadzące do pomieszczenia 304 i 305 w sporej części są zawałone [5]. Aby dostać się do korytarzy prowadzących pod reaktor, trzeba do nich przejść bezpośrednio ze środka zniszczonego bloku, który wciąż znajduje się pod dwoma sarkofagami [6]. Należy również **uznać za wysoce nieprawdopodobne dostanie się we wspomniany obszar**, biorąc pod uwagę to, że w ciągu 35 lat ani człowiek, ani robot nawet nie zbliżył się do pomieszczenia 305, **ze względu na zawał oraz ciągle utrzymujący się tam bardzo wysoki poziom promieniowania**. Istnieje zatem znikoma szansa, by osoby trzecie, nie związane z elektrownią w Czarnobylu w zakresie prac naukowych, technicznych czy budowlanych, posiadały wystarczające umiejętności i środki, aby się tam dostać, jeżeli nawet pracujący w obrębie zniszczonego bloku od dziesiątek lat nie wynaleźli bezpiecznego sposobu dotarcia w obszar pod reaktorem [7]. Zatem miejsce występowania materiału promieniotwórczego i poziom jego promieniowania praktycznie wyklucza obecnie możliwości zbliżenia się do niego. Można jednak przyjąć pesymistyczne założenie, że w pewien obecnie trudny do wyobrażenia sposób doszłoby do uzyskania przez osoby lub organizacje działające w celach terrorystycznych dostępu do stopionej masy paliwowej. Należałoby wtedy ustalić, jak wiele materiału promieniotwórczego znajduje się w opisywanych wcześniej pomieszczeniach 304 oraz 305, jak bardzo jest on niebezpieczny oraz czy i jakie hipotetyczne naruszenie jego struktury mogłoby doprowadzić do jakiegokolwiek zagrożenia dla bezpieczeństwa radiologicznego poza obiektem.

Wedle szacunków wykonanych przez naukowców pod reaktorem znajduje się ok. 60 ton paliwa nuklearnego w formie zastygłej magmy [6]. Oprócz paliwa uranowego szacunkowo może się tam również znajdować ok. 750 ton grafitu, ok. 1300 ton stali czy też 580 ton serpentynitu [8]. Wskazane liczby utwierdzają w przekonaniu, iż ilości materiału promieniotwórczego, wciąż obecnego pod zgłiszczami reaktora, można określić jako gigantyczne. Materiały takie są oczywiście potencjalnie niebezpieczne, gdyby wydostały się do środowiska, ale trudno wskazać ewentualne ekonomicznie racjonalne i technicznie wykonalne działania ludzkie względem nich, które mogłyby do tego doprowadzić.

Kolejnym z czynników mogących wpływać na zainteresowanie elektrownią przez organizacje przestępcze i terrorystyczne jest **zużyte paliwo jądrowe** znajdujące się na terenie kompleksu energetycznego. Paliwo jądrowe jest środkiem, który z pewnością wzbudziłby zainteresowanie wielu organizacji o charakterze terrorystycznym, ponieważ wejście w posiadanie materiału rozszczepialnego przez takie ugrupowania dałoby im możliwości o wiele szerszej manipulacji i stosowania szantażu wobec określonych rządów. Wejście w posiadanie wypalonego paliwa jądrowego wiąże się z możliwością użycia go, pod warunkiem

dysponowania odpowiednimi technologiami jego przerobu, do wyodrębnienia z niego rozszczepialnych izotopów uranu i plutonu, które teoretycznie mogłyby posłużyć do **skonstruowania jądrowego ładunku wybuchowego** osiągającego bardzo dużą moc rażenia.

Aby określić pełne spektrum zagrożeń związanych z wykorzystaniem zużytego paliwa jądrowego, należy w pierwszej kolejności przyjrzeć się, jakie produkty rozszczepienia pozostają w nim po zakończonej eksploatacji w reaktorze. Wiadomo, iż skład wypalonego paliwa jądrowego to silnie promieniotwórcza mieszanina bardzo wielu różnych pierwiastków – produktów rozszczepienia uranu 235 oraz pozostały jeszcze niezaużyty uran i pluton, powstający z uranu 238, wchodzącego w znacznym procencie w skład świeżego paliwa uranowego. Pluton, którego ilość w zestawie paliwowym narasta w czasie eksploatacji reaktora, po wydzieleniu go z usuniętego z reaktora wypalonego paliwa nadaje się do bezpośredniego zastosowania militarnego. Wiadomo, że w reaktorach typu RBMK, tj. reaktorach pracujących w elektrowni w Czarnobylu, istniała możliwość wymiany zestawu paliwowego w dowolnym momencie podczas pracy reaktora. Oznaczało to możliwość wymiany go na nowy, kiedy stężenie plutonu w nim było wystarczające. Było zatem technologicznie możliwe poddanie następnie elementu paliwowego usuniętego z reaktora procesowi przerobu, w którym można było odizolować pluton mogący służyć do celów militarnych, chociaż oficjalnie RBMK nigdy nie były reaktorami służącymi do produkcji militarnego plutonu³.

Jednak **kradzież wypalonego paliwa** jądrowego przez organizację terrorystyczną w celu poddania go procesowi recyklingu mającemu na celu uzyskanie z niego pełnowartościowego materiału rozszczepialnego do zastosowania militarnego, np. w budowie ładunku nuklearnego, wiąże się z koniecznością posiadania niemałych środków finansowych. Recykling wypalonego paliwa jądrowego jest skomplikowanym i kosztownym procesem. Oczywiście jest, że koszty związane z takim przedsięwzięciem są gigantyczne. Wprawdzie organizacje terrorystyczne często są w posiadaniu znacznych zasobów finansowych, co ostatecznie pozwoliłoby im na zapewnienie środowiska, maszyn i technologii oraz personelu o odpowiednich umiejętnościach, ale **przypadek taki wydaje się bardzo mało prawdopodobny**. W polu ich zainteresowań mogą pozostawać jeszcze dwie opcje.

Jak już wspomniano, wypalone paliwo jądrowe, po odbytej eksploatacji, zawiera dużą ilość silnie promieniotwórczych izotopów, które po usunięciu z reaktora w dalszym ciągu generują wysokie dawki promieniowania. Są to m.in. izotopy strontu, cezu, jodu, technetu, ameryku, kiuru oraz neptunu [9]. W związku z tym można się spodziewać zainteresowania ugrupowań o charakterze terrorystycznym **kradzieżą** zużytego paliwa nuklearnego w **celu uży-**

³ W tym czasie na terenie b. ZSRR istniało kilkanaście reaktorów służących do produkcji militarnego plutonu jednak nie zaliczono do nich reaktorów RBMK.

cia zawartych w nim silnie promieniotwórczych materiałów w połączeniu z tradycyjnymi materiałami wybuchowymi w postaci **tw. brudnej bomby**, czyli ładunku, którego głównym zadaniem nie jest wyrządzenie szkód na skutek samej eksplozji, ale doprowadzenie do uwolnienia do środowiska w miejscu jej wybuchu materiałów promieniotwórczych. Jej detonacja mogłaby doprowadzić w stosunkowo niedużym promieniu od miejsca wybuchu do lokalnego skażenia terenu na skutek wysadzenia zawartych w wypalonym paliwie promieniotwórczych produktów rozszczepienia [10].

Drugą opcją terrorystycznego wykorzystania wypalonego paliwa magazynowanego na terenie czarnobylskiej elektrowni jądrowej zamiast jego kradzieży w celu skonstruowania brudnej bomby, jest **bezpośredni atak bombowy na magazyn** takich materiałów w celu uwolnienia do środowiska izotopów promieniotwórczych bezpośrednio z miejsca ich magazynowania.

Mimo iż większość zagrożeń terrorystycznych względem newralgicznego miejsca, jakim jest czarnobylska elektrownia jądrowa, odnosi się do działań skierowanych w sam obiekt lub paliwo jądrowe składowane w obrębie kompleksu energetycznego, istnieje również inna forma działań, które mogą być celem organizacji terrorystycznych.

Należy przede wszystkim podkreślić, iż mimo że elektrownia od roku 2000 nie bierze czynnego udziału w produkcji energii elektrycznej na skutek wyłączenia w tymże roku ostatniego czynnego reaktora numer 3, nadal pełni ważną funkcję dla gospodarki energetycznej Ukrainy oraz części Białorusi. Elektrownia w dalszym ciągu służy bowiem za rozdzielnię dystrybucyjną energii elektrycznej, zapewniając energię wielu miejscowościom. Działaniem o charakterze terrorystycznym może się stać **doprowadzenie do wstrzymania dostaw energii elektrycznej z tej rozdzielni**. Oczywiście doprowadzenie do takiego stanu rzeczy dla terrorystów może być również prologiem poprzedzającym kierowanie gróźb dokonania innych działań

przestępczych na terenie elektrowni. Zakładając hipotetycznie przejęcie obiektu i jego personelu przez terrorystów, po skierowaniu przez nich określonych żądań do władarzy państwa i otrzymaniu odpowiedzi stanowczo odmawiającej ich wykonania terroryści mogą doprowadzić do przerwania dostaw prądu z rozdzielni dystrybucyjnej zlokalizowanej na terenie tego obiektu, pokazując tym samym determinację i stanowczość w swoich działaniach oraz użyć argumentów, które sugerowałyby, że są gotowi do dokonania kolejnych, takich jak np. zniszczenie magazynu paliwa czy też uszkodzenie innego elementu infrastruktury obiektu. Oczywiście wszelkie tego typu groźby są pewnego rodzaju grą psychologiczną, w której dokonane i zapowiadane kolejne działania terrorystyczne na terenie czarnobylskiej elektrowni miałyby na celu wywieranie coraz to większej presji na rządy państw.

Podsumowanie

Turystyka czarnobylska oraz nielegalne wtargnięcia na teren strefy zamkniętej z pewnością są zjawiskami, które, mimo iż pozwalają na poznanie tragicznej historii tego miejsca, wpływają również na bezpieczeństwo omawianego obiektu. Obserwacje poczynione przez autora jesienią 2021 roku nasuwały pewne wątpliwości czy stosowana profilaktyka bezpieczeństwa była adekwatna do realnego poziomu zagrożeń. Obecność coraz większej liczby zwiedzających to miejsce naraża je na zagrożenia związane z dostaniem się w niepowołane ręce informacji o np. zabezpieczeniach, personelu wojskowym oraz policyjnym, schemacie kontroli oraz ich przebiegu czy nawet o rozmieszczeniu poszczególnych elementów infrastruktury krytycznej na terenie kompleksu energetycznego. Wymienione informacje mogą stanowić cenne źródło wiedzy dla organizacji przestępczych oraz terrorystycznych, które chciałyby podjąć działania wrogie wobec tego obiektu. Należy uznać za mniej szkodliwe działania tzw. stalkerów, gdyż mimo że na teren strefy dostają się nielegalnie i w związku z tym sami mogą być bardziej narażeni niż legalni turyści, ich celem jest głównie szabrownictwo lub wandalizm, co nie wnosi istotnych zagrożeń dla samej elektrowni.

Czynniki, które mogą wpływać na zwiększenie atrakcyjności elektrowni w Czarnobylu dla organizacji przestępczych lub terrorystycznych, może być chęć doprowadzenia do znacznego lokalnego skażenia terenu na skutek działań siłowych w kierunku ruin zniszczonego bloku czwartego, na którego dnie znajdują się dziesiątki ton materiału jądrowego. Zmasowany atak bombowy ładunkami konwencjonalnymi prawdopodobnie mógłby spowodować pewne uwolnienia pierwiastków promieniotwórczych do atmosfery. Scenariusz ten wydaje się jednak bardzo mało prawdopodobny ze względu na to, że wspomniany materiał jądrowy znajduje się bardzo głęboko pod



Rys. 12. Umiejscowienie przechowalników wypalonego paliwa jądrowego.

Fig. 12. Location of spent nuclear fuel storage facilities.

zgiszczami hali reaktora oraz z uwagi na istniejącą nową konstrukcję ochronną, która zabezpiecza ruiny zniszczonego energobloku. Należy jednak mieć na uwadze, iż troska o bezpieczeństwo szczególnie takiego obiektu jak elektrownia jądrowa to nie tylko ochrona przed najbardziej realnymi scenariuszami zagrożeń, ale również **analiza i branie pod uwagę** potencjalnych niebezpieczeństw, które, choć wydają się mało prawdopodobne, to mogą wystąpić, ponieważ zasadniczo możliwość dokonania jakiegokolwiek działania wzrasta wprost proporcjonalnie do np. środków finansowych, zasobów ludzkich, logistyki i planowania, jakie posiada dana komórka przestępcza/terrorystyczna. Komórki te za cel mogą również obrać magazyny zużytego paliwa jądrowego, które znajdują się na terenie kompleksu, w celu jego kradzieży i wykorzystania jako „brudnej bomby” lub poddania go procesowi recyklingu, aby uzyskać pełnowartościowy materiał jądrowy do działań militarnych.

Oprócz czynników odnoszących się *stricte* do materiałów jądrowych należy również zauważyć, iż elektrownia może się stać celem organizacji terrorystycznych, chociażby ze względu na to, że wciąż jest czynnym obiektem infrastruktury krytycznej, który bierze udział w dostawach energii elektrycznej do wielu miejscowości. Odcięcie dostaw z rozdzielni dystrybucyjnej zlokalizowanej na terenie tej elektrowni może być dla wspomnianych organizacji idealnym podłożem do kierowania żądań w kierunku władz państwowych, zwłaszcza że w przypadku niespełnienia postulatów terrorystów mogą oni zagrozić nie tylko zatrzymaniem dystrybucji energii, ale również działaniem ukierunkowanym na materiały jądrowe, a oczywiście

jest, iż elektrownia w Czarnobylu jest obiektem wzbudzającym od dekad strach w całej Europie, co z pewnością działałoby na korzyść organizacji terrorystycznej na drodze do osiągnięcia jej celów.

Notka o autorze

Mgr Marek Niemczyk jest absolwentem wydziału prawa i administracji Wyższej Szkoły Bankowej w Gdańsku ze specjalnością bezpieczeństwo wewnętrzne.

Literatura

1. Niemczyk M., Elektrownia jądrowa w Czarnobylu jako cel ataków terrorystycznych, praca magisterska na kierunku bezpieczeństwo wewnętrzne, Wydział Prawa i Administracji Wyższej Szkoły Bankowej w Gdańsku, Gdańsk, 2022.
2. <https://www.rp.pl/spoleczenstwo/art1275911-tysiace-turystow-jezdza-do-czarnobylya-wplynal-na-to-s>
3. <https://podroze.dziennik.pl/aktualnosci/artykuly/611851,czarnobyl-turysci-rekord-polacy-serial.html>
4. Ushakov V.S., Burakov B.E., Andersen E.B., Interaction of UO₂ and zircaloy during the Chernobyl accident.
5. <https://dzienniknaukowy.pl/czlowiek/tajemniczy-wzrost-temperatury-w-gruzach-elektrowni-atomowej-w-cz>
6. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/020/32020405.pdf?r=1, s. 101-102.
7. <https://geekweek.interia.pl/technauka/news-czarnobyl-wciaz-niebezpieczny-cos-dziwnego-dzieje-sie-w-ele,nId,5226921>
8. <https://biznesalert.pl/czarnobyl-katastrofa-nowe-zagrozenie-fake-news-energetyka-atom/>
9. <https://www.gov.pl/attachment/26892cac-a1ba-4703-b31f-696ef-9fd93ad>
10. <https://gazeta.policja.pl/997/archiwum-1/2016/numer-139-102016/132721,Brudne-bomby.html>

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” wydawany jest od 1989 r. Do 2013 r. był drukowany i kolportowany (ostatnio w nakładzie 700 egzemplarzy) wśród osób i instytucji zainteresowanych zagadnieniami dozoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. Od 2014 r. biuletyn wydawany jest w nowej, elektronicznej formie. Każdy numer biuletynu zamieszczany jest na stronie internetowej.

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

INFORMACJA DLA AUTORÓW

Wydawca przyjmuje artykuły naukowe, których tematyka jest związana z zapewnieniem i kontrolą bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, w tym również związane z zabezpieczeniem i ochroną fizyczną materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, technologiami jądrowymi i technikami radiacyjnymi, fizyką i chemią oraz inżynierią jądrową, naukami prawnymi, geologią i geofizyką czy bezpieczeństwem narodowym.

Każdy artykuł zamieszczony w biuletynie jest recenzowany przez dwóch recenzentów.

ZASADY OGÓLNE

Tekst artykułu powinien prezentować aktualny stan wiedzy na poruszany temat oraz najnowsze dane. Artykuł powinien być podzielony na mniejsze logiczne fragmenty redakcyjne, opatrzone śródtytułami. Artykuł nie może być wcześniej publikowany ani zgłoszony do publikacji w innym czasopiśmie. Wydawca zastrzega sobie prawo nieprzyjęcia artykułu do publikacji, dokonywania skrótów, wprowadzania poprawek stylistycznych i redakcyjnych oraz zmian w tytule artykułu. Autorzy są zobowiązani do współpracy z Wydawcą w całym procesie przygotowywania artykułu do publikacji, w tym do terminowej korekty autorskiej.

ZGŁOSZENIE DZIEŁA

Egzemplarze artykułu wraz z pełnym zestawem ilustracji mogą być przesyłane na adres:

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”

Państwowa Agencja Atomistyki

ul. Bonifraterska 17,

00-203 Warszawa, Polska

E-mail: biuletyn@paa.gov.pl

Zachęcamy do przesyłania artykułów drogą elektroniczną na wyżej wskazany adres e-mail. Szczegółowe informacje można uzyskać na stronie internetowej:

<https://www.gov.pl/web/paa/biuletyn-bezpieczenstwo-jadrowe-i-ochrona-radiologiczna>

Państwowa Agencja Atomistyki
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa
www.gov.pl/web/paa