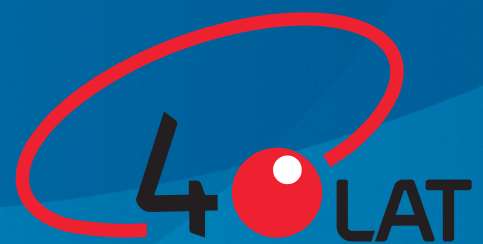


e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

3 (125) 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 3 (125) 2022
Warszawa

Spis treści

Piotr Leśny	
Nowe technologie – wyzwanie dla dozoru jądrowego	7
Andrzej Strupczewski	
Pluton – wcielone zło czy nadzieja dla energetyki?	13
Krzysztof Rzymkowski	
Optyczne systemy monitorujące w obiektach jądrowych.	20
Łukasz Dudziński, <u>Marcin Glinka</u> , Tomasz Kubiak, Mariusz Feltynowski	
Zdarzenia związane z promieniowaniem jonizującym w praktyce Państwowej Straży Pożarnej – obserwacja 7- letnia	27
Maciej Norenberg, Jadwiga Mazur, Katarzyna Wołoszczuk, Krzysztof Kozak, Dominik Grządziel	
Gdzie szukać informacji o radonie? Regulacje prawne i opracowania dotyczące problematyki radonowej	34

Szanowni Państwo

W roku obchodów czterdziestolecia Państwowej Agencji Atomistyki, poza zamieszczeniem w poprzednich numerach naszego Biuletynu artykułów poświęconych przemianom, jakie przeszedł ten ważny urząd administracji rządowej od czasu jego utworzenia w 1982 r., by wykonywać skutecznie zadania dozoru jądrowego w zakresie wynikającym z bieżących wyzwań, staramy się również ukazać, jakie to wyzwania, jak z nimi sobie radzą inspektorzy dozoru jądrowego, analitycy i wspomagający ich personel PAA, oraz na czym polega ich praca. W pierwszym artykule bieżącego numeru Biuletynu **Piotr Leśny** omawia **nowe technologie**, takie jak np. rzeczywistość rozszerzona i wirtualna, roboty, urządzenia nasobne czy sztuczna inteligencja, wkraczające w najróżniejszych aspektach w obszar bezpieczeństwa jądrowego nowych obiektów, takich jak np. małe reaktory modułowe SMR. Autor przedstawia możliwości związane z nowymi technologiami, ale również zagrożenia, jakie mogą powstać przy ich stosowaniu.



Nowe technologie to także nowe rozwiązania w zakresie paliwa jądrowego, na przykład stosowanie w coraz większym zakresie na świecie (Europa, Japonia) plutonowo-uranowego paliwa MOX (*mixed oxide*). Problematyce **bezpieczeństwa wykorzystania plutonu** w energetyce i realnej skali związanych z tym zagrożeń poświęcony jest artykuł **Andrzeja Strupczewskiego**.

Do zakresu obowiązków i zadań Prezesa PAA jako naczelnego organu dozoru jądrowego należą nie tylko sprawy bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (*safety*), ale także bezpieczeństwa fizycznego (*security*) i zabezpieczeń (*safeguards*) materiałów i obiektów jądrowych (czyli dozór w pełnym zakresie – tzw. 3S). Zabezpieczenia są objęte nie tylko krajowym systemem ewidencji i kontroli SSAC (*State system of accounting for and control*), ale również kontrolą międzynarodową realizowaną przez inspektorów MAEA i EURATOM z udziałem inspektorów dozoru jądrowego PAA. **Krzysztof Rzymkowski** opisuje w swoim artykule rozwój międzynarodowego **systemu zabezpieczeń** MAEA i doskonalenie go poprzez m.in. rozbudowę automatycznych i zdalnie sterowanych systemów śledzących materiały promieniotwórcze, instalowanych na terenie obiektów jądrowych. Omówione szczegółowo w artykule nowoczesne rozwiązania techniczne **optycznych systemów obserwacyjno-rejestrujących** pozwalają na ciągły monitoring miejsc, gdzie znajdują się materiały jądrowe, zdalne sterowanie kamerami, cyfrowy zapis obrazów i automatyczny ich przesył do MAEA w czasie rzeczywistym.

Obowiązki związane z **reagowaniem na zdarzenia** stwarzające zagrożenia promieniowaniem jonizującym służby PAA dzielą z innymi służbami państwowymi, m.in. z Państwową Strażą Pożarną. Omówieniu zaangażowania PSP na przestrzeni ostatnich siedmiu lat w likwidację takich zagrożeń w terenie, poza miejscami licencjonowanej przez PAA działalności ze źródłami promieniowania, poświęcony jest artykuł **Łukasza Dudzińskiego, Marcina Glinki, Tomasza Kubiaka i Mariusza Feltynowskiego**, w którym autorzy wykorzystali dane pochodzące z Systemu Wspomagania Decyzji PSP. Powodem blisko 70% interwencji strażaków było wzbudzenie stacjonarnych urządzeń radiometrycznych przy wjeździe samochodu-śmieciarki na teren sortowni, spalarni lub składowiska odpadów komunalnych.

Ostatni z zamieszczonych artykułów, autorstwa **Macieja Norenberga, Jadwigi Mazur, Katarzyny Wołoszczuk, Krzysztofa Kozaka i Dominika Grządziela** stanowi przewodnik po aktualnych przepisach krajowych i europejskich oraz publikacjach organizacji międzynarodowych dotyczących **problematyki radonowej**.

Życzymy Państwu owocnej lektury,

Redaktor Naczelny
Maciej Jurkowski

Nowe technologie – wyzwanie dla dozoru jądrowego

New technologies – a challenge for the nuclear regulatory body

Piotr Leśny
Państwowa Agencja Atomistyki

Streszczenie: Jedyną stałą jest zmiana – głosi stare powiedzenie Heraklita z Efezu. Artykuł opisuje ważne zmienne w pracy dozoru jądrowego, jakie stanowią nowe technologie. Nowe idee czy projekty, jak wirtualna rzeczywistość czy rzeczywistość rozszerzona, przynoszą niespotykane dotychczas korzyści, także w pracy dozoru jądrowego, ale również nowe zagrożenia. Opracowanie omawia, w jaki sposób dozór może radzić sobie z wymogami, jakie dla jego pracy stwarzają nowe pomysły i technologie. Przedstawione są nowe możliwości, jakie stwarzają takie technologie, jak technologia wirtualna czy sztuczna inteligencja, ale również zagrożenia, jakie mogą powstać przy ich stosowaniu.

Słowa kluczowe: Nowe technologie, nowe projekty, rzeczywistość wirtualna, rzeczywistość rozszerzona, sztuczna inteligencja, dozór jądrowy.

Abstract: *The only constant is change, the old saying goes. The article describes important variables in the work of the nuclear regulatory body which are new technologies. New ideas or projects, such as virtual reality or augmented reality bring unprecedented benefits, also in the work of the nuclear regulatory body, but also new threats. The study discusses how nuclear regulatory body can manage the requirements that new concepts and technologies create for his work. New opportunities are presented, which are created by such technologies as virtual technology or artificial intelligence, but also the threats that may arise when using them.*

Keywords: *New technologies, new projects, virtual reality, augmented reality, artificial intelligence, nuclear regulatory body.*

Wstęp

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 (art. 36b ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe – Dz. U. z 2021 r. poz. 1941 oraz z 2022 r. poz. 974). Wydane na podstawie art. 36c tej ustawy rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego (Dz.U. z 2012 r. poz. 1048), wyraźnie stwierdza w §12, że „przy określaniu warunków projektowych stosuje się **zachowawcze** podejście, przyjmując w szczególności warunki początkowe i brzegowe z wystarczającym zapasem bezpieczeństwa, oraz **sprawdzone** metody, tak żeby uzyskać wysoki stopień pewności, że nie dojdzie do znaczącej degradacji rdzenia reaktora oraz że dawki promieniowania otrzymywane przez pracowników i osoby z ogółu ludności pozostaną w ustalonych

granicach i będą na najniższym rozsądnie osiągalnym poziomie.” Określenie „zachowawcze”, jak i „sprawdzone” nie oznacza, że technologie użyte przy projektowaniu czy eksploatacji obiektu jądrowego, takiego jak na przykład reaktor jądrowy, są zachowawcze czy tym bardziej przestarzałe. Oznacza to, że technologie zostały zweryfikowane, a ich bezpieczeństwo, w tym najważniejsze z punktu widzenia dozoru jądrowego bezpieczeństwo jądrowe, zostało potwierdzone i udowodnione. Potwierdzenie tego jest wyzwaniem dla dozoru jądrowego. Środowisko pracy inspektorów dozoru jądrowego stale się zmienia. Nowe technologie wkraczają w obszar bezpieczeństwa jądrowego w najróżniejszych aspektach: od AR (*augmented reality*), czyli rzeczywistości rozszerzonej, po roboty czy AI (*artificial intelligence*) lub po prostu zwykły rozwój technologii urządzeń mobilnych, chociażby telefonii komórkowej. W rezultacie zakres wiedzy wymagany od inspektorów dozoru jądrowego stale się zwiększa. Rozwój technologiczny niesie bowiem oprócz ewidentnych korzyści nowe

ryzyka, a z nimi nowe wymagania dla inspektorów dozoru jądrowego. Świadomość tego faktu ma istotne znaczenie w świetle planowanych w Polsce projektów jądrowych (dużych bloków i tzw. małych reaktorów modułowych) i związanych z tym implikacji dla dozoru jądrowego.

„Inżynieria bezpieczeństwa technicznego” Włodzimierza Pihowicza w następujący sposób klasyfikuje źródła powstawania potencjalnych szkód:

- obiekty techniczne;
- środowisko naturalne;
- umyślne (terrorystyczne) działanie ludzkie.

W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną wybrane zagadnienia dotyczące pierwszego punktu, czyli te, z którymi autor zetknął się w praktyce zawodowej inspektora dozoru jądrowego. Pozostałe, choć istotne i bardzo ważne, nie zostaną omówione, wykraczając poza zakres niniejszej pracy.

Ciekawe zagadnienie *interface*, czyli wzajemnych oddziaływań między tymi różnymi źródłami zagrożeń, wymaga również oddzielnego opracowania.

A. Nowe projekty

Jednym z największych wyzwań dla dozoru jądrowego są **nowe projekty obiektów jądrowych**. Każdy z nich sam w sobie stanowi bardzo złożone zagadnienie, któremu należałoby poświęcić obszerne opracowania. W niniejszym opracowaniu zostaną tylko zasygnalizowane trudności i wyzwania, jakie nowy projekt obiektu jądrowego sprawia dla dozoru jądrowego.

Trudność sprawia nawet określenie pojęcia nowego projektu z punktu widzenia inspektora dozoru jądrowego. Na przykład wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem, które właśnie przeżywają renesans w ramach projektów małych reaktorów modułowych SMR (*small modular reactor*), znane są już od lat 60. ubiegłego wieku. W tej chwili opracowane projekty zawierają jednak nowe rozwiązania, takie jak np. nowe materiały czy koncepcja modułowości. Zaostrzyły się również wymagania, np. dotyczące ochrony środowiska, ochrony ludności, postępowania z odpadami promieniotwórczymi. To samo dotyczy również wszystkich innych rozwiązań projektów reaktorów SMR. Prace nad zasadami licencjonowania SMR (wydania zezwolenia) w wielu dozorach trwają, są bardzo trudne i skomplikowane. Ilustruje to najlepiej poniższy przykład. W 2020 r. NuScale, jako pierwszy SMR, otrzymał zatwierdzenie projektu (*Standard Design Approval*) amerykańskiego dozoru jądrowego NRC, wraz z wydaniem końcowego raportu oceny bezpieczeństwa FSER (*final safety evaluation report*). Aspekty bezpieczeństwa projektu NuScale VOYGR™ zostały zaaprobowane przez NRC. Jak skomplikowane, trudne i kosztowne jest to zagadnienie, świadczy fakt, że *Design Certification Application* (DCA), tzn. wnioszek o akceptację czy też certyfikację,

został złożony przez NuScale na początku 2017 r., a SDA wydane zostało po zakończeniu weryfikacji przez NRC we wrześniu 2020 r. Jak podaje NuScale, samo przygotowanie DCA kosztowało 500 mln \$ i 2 mln roboczogodzin. W trakcie postępowania w ramach wymaganych przez NRC uzupełnień i audytów dostarczono do amerykańskiego regulatora 2 mln stron dodatkowych informacji. To świadczy, w jak wielu aspektach i jak dokładnie amerykańscy inspektorzy sprawdzali dokumentację projektową.

W większości przypadków adekwatne uwzględnienie nowych technologii w dozorcze jądrowym nie jest może tak spektakularnie trudne i ...kosztowne dla kontrolowanego, ale niesie ze sobą wiele wyzwań.

B. Nowe technologie

Zdaniem specjalistów ze Światowego Forum Ekonomicznego WEF (*World Economic Forum*) w tej chwili trwa tzw. czwarta rewolucja przemysłowa. Nie wchodząc w całość tego skomplikowanego zagadnienia, które wiąże się z fundamentalnymi zmianami w przemyśle i technice, najważniejszy dla dozoru jądrowego jest rozkwit technologii, które właśnie się pojawiają i już wywierają wpływ na bezpieczeństwo jądrowe. Są to między innymi:

- internet rzeczy, technologia umożliwiająca komunikację różnych urządzeń z siecią internetową bez bezpośredniego udziału użytkownika;
- urządzenia mobilne, czyli telefony komórkowe, tablety, laptopy itd.; szeroka rzesza najróżniejszych urządzeń służących do komunikacji;
- inteligentne czujniki, sensory, które po stwierdzeniu wystąpienia wartości mierzonego parametru automatycznie uruchamiają działania systemu; na przykład, wentylacja, która uruchamia się przy określonej temperaturze czy wilgotności;
- inteligentne miasta, czyli właściwie komputerowe systemy sterowania i monitorowania aglomeracji różnych wielkości;
- *big data*, czyli analiza olbrzymich ilości danych;
- przetwarzanie danych w chmurze, czyli stosowanie zewnętrznych serwerów, przechowywanie zdalnych zasobów danych;
- oprogramowanie jako usługa powiązane z systemem obsługi klienta, wykorzystanie oprogramowania dostawcy na chmurze obliczeniowej;
- AR (*augmented reality*) i VR (*virtual reality*) – rozszerzona i wirtualna rzeczywistość;
- AI (*artificial intelligence*) – sztuczna inteligencja.

Listę tę można jeszcze długo kontynuować: od dronów, przez urządzenia nasobne po drukarki 3D. W opracowaniu omówione zostaną wybrane z tych technologii. Słowo „technologia” oznacza według słownika języka polskiego „opracowaną naukowo lub doświadczalnie metodę produkowania, przetwarzania lub przesyłania czegoś”.

Tym „czymś” mogą być dane pomiarowe, zapisy czy na przykład informacje. Z technikami zdalnymi, przesyłaniem danych, wirtualnymi spotkaniami kontrolującym obiekty jądrowe inspektorom czy różnego rodzaju audytorom na dużą skalę przyszło się zetknąć w czasie ostatniej pandemii.

W 2021 r. inspektorzy dozoru jądrowego z Państwowej Agencji Atomistyki przeprowadzili kontrole zdalne w polskich obiektach jądrowych, m.in. w reaktorze Maria. Kontrole dotyczyły systemów zarządzania, postępowania w ramach procedur rozruchowych czy zarządzania starzeniem się obiektów jądrowych. Kontrole zdalne miały charakter „testowy” (zdecydowana większość kontroli w 2021 r. została przeprowadzona w standardowy sposób). Największy problem stanowiła kwestia bezpieczeństwa przesyłania informacji. Niektóre dokumenty i zapisy, czy ich kopie, nie mogły zostać przesłane elektronicznie lub za pomocą innych środków łączności. Również przesyłanie niektórych zapisów z kamer czy zdjęć ze względów bezpieczeństwa (mogły zawierać informacje o ochronie fizycznej obiektu) nie było możliwe. Komplikacje wynikały więc raczej nie z powodów technicznych, lecz kwestii prawnych i formalnych, np. czy w pewnej sprawie można użyć tzw. chmury, czy raczej nie jest to wskazane. W przypadku najmniejszych wątpliwości kontrolujący inspektorzy szukali innych rozwiązań, np. wymagane kontrolą niektóre dane zostały zabezpieczone i dostarczone do dozoru jądrowego pod odpowiednim nadzorem. Udowodniono jednak, że w razie konieczności inspektorzy są w stanie zdalnie skontrolować obiekty jądrowe.

Komplikacje z wymaganiami formalnymi i prawnymi w kontekście nowych technologii i niestandardowych sytuacji są nieuniknione. Wynika to z czasu trwania procesów legislacyjnych mających na celu zmianę dotychczasowych przepisów.

Tymczasem na przykład w świecie technologii elektronicznych, jak podają Youngjin Yoo, Kyungmook Kim w swoim artykule w *Harvard Business Review* „Jak Samsung został potęgą w dziedzinie projektowania”: na rok naprzód opracowane są nowe produkty i interfejsy, na 18 miesięcy naprzód są już gotowe projekty konkretnych nowych produktów i interfejsów użytkownika, po pięciu latach opracowane są pomysły na nowe rodzaje działalności. Dlatego tak ważny jest stały rozwój zawodowy pracowników dozoru jądrowego. Aby zapewnić bezpieczeństwo społeczeństwu, oprócz znajomości prawa muszą oni stale uzupełniać swoją wiedzę techniczną. Dotyczy to nawet tak prozaicznej sprawy, jak na przykład telefonia komórkowa. W tej chwili jest to już technologia 5G. Trwają prace nad 6G i dalszymi ich wersjami rozwojowymi. Cechuje je olbrzymia prędkość przepływu danych, stałe połączenie z siecią internetową. Każdy telefon komórkowy jest *de facto* małym komputerem, wyposażonym w najróżniejsze narzędzia, od aparatu fotograficznego przez Wi-Fi, skanery, po znajdowanie lokalizacji geograficznej.

Nietrudno sobie wyobrazić, jakie zagrożenie może stworzyć np. dla systemu komputerowego obiektu jądrowego: od podłączania się do komputerów i pobierania informacji, po infekowanie wirusami. I niekoniecznie musi to być świadome działanie. Nowe technologie niosą ze sobą nowe zagrożenia. Odpowiedzią na to zagrożenie może być odpowiednia polityka postępowania z telefonami służbowymi zarówno kontrolowanych, jak i kontrolujących.

C. *Virtual reality (VR)* – rzeczywistość wirtualna i *augmented reality (AR)* – rzeczywistość rozszerzona

Rzeczywistość wirtualna i rozszerzona powszechnie wykorzystywane są do celów szkoleniowych, od wojska (szkolenie pilotów), po przemysł, w tym jądrowy. W energetyce jądrowej wykorzystywana jest przede wszystkim do szkolenia operatorów i pracowników elektrowni jądrowych. Szkolenia dotyczą najróżniejszych działań: postępowania awaryjnego, sterowania reaktorem, postępowania z paliwem jądrowym czy konserwacji poszczególnych urządzeń. Rzeczywistość wirtualna pozwala na rozegranie realistycznych scenariuszy działań w środowisku odwzorowanym na realnych instalacjach i konstrukcjach jądrowych. Szkolenie może dotyczyć całych zespołów. Ćwiczona może być komunikacja i współpraca zespołowa. Przy zastosowaniu rzeczywistości wirtualnej, choć już właściwie należałoby tu mówić o rzeczywistości rozszerzonej, pracownik miałby łączność z bardziej doświadczonym kolegą, który mógłby w rzeczywistości wirtualnej pokazywać, co ma zrobić w świecie realnym, np. jak naprawić dane urządzenie. Niesie to zarówno możliwości jak i ryzyka. Jak dokładnie ma być odwzorowana instalacja w VR? Jeśli oprogramowanie wpadłoby w niepowołane ręce, to jak te informacje zostałyby wykorzystane? Czy ktoś, kto chciałby np. uszkodzić elektrownię jądrową (EJ), nie dostałby doskonałego narzędzia do treningu? Z drugiej strony błędy zawarte w VR mogą spowodować, że przeszkoleni za jej pomocą pracownicy mogliby powtórzyć błędy w świecie realnym i skutki byłyby być równie groźne. Jednakże z punktu widzenia dozoru najważniejsze są zagrożenia, jakie podczas szkoleń VR i AR mogą stworzyć pracownikom obiektów jądrowych. Zgodnie z informacjami ANSES – Francuskiej Agencji ds. Żywności, Środowiska oraz Bezpieczeństwa i Higieny Pracy:

„Ekspozycja na wirtualną rzeczywistość może zakłócać system sensoryczny i prowadzić do objawów, takich jak nudności, zawroty głowy, pocenie się, błądność, utrata równowagi itp., które są zgrupowane razem pod nazwą *choroba wirtualnej rzeczywistości*. U osób wrażliwych objawy te mogą się pojawić w ciągu pierwszych kilku minut po użyciu. Po sesji rzeczywistość wirtualna może również wywołać przejściową zmianę zdolności czuciowych, motorycznych i percepcyjnych danej osoby, wpływając na jej

zręczność manualną lub zdolność orientacji ciała”. Co więcej, „Urządzenia AR/VR wykorzystują ekrany LED, które potencjalnie mają wysoką zawartość niebieskiego światła, co może zakłócać nasz rytm biologiczny podczas oglądania wieczorem lub w nocy (opóźniony sen, zakłócony sen itp.)”, wskazuje Dina Attia, koordynator naukowy tej ekspertyzy w ANSES. Wreszcie, ekspozycja na czasową modulację światła emitowanego przez te ekrany LED – migające światło, które jest czasami niedostrzegalne dla oka – może wywołać napady padaczkowe u osób podatnych. Aby uniknąć tych skutków, ANSES zaleca użytkownikom:

- zaprzestać korzystania z urządzeń AR/VR, gdy tylko pojawią się objawy, takie jak nudności, zawroty głowy, pocenie się i błądź;
- odpocząć przez jedną do dwóch godzin po użyciu urządzeń AR/VR. „Ciało dokłada wszelkich starań, aby przystosować się do wirtualnego świata, z którym wchodzi w interakcje, co może prowadzić do zmęczenia. Dlatego ważne jest, aby pozwolić sobie na godzinę lub dwie odpoczynku przed wznowieniem czynności wymagającej wysokiego poziomu koncentracji, takiej jak prowadzenie samochodu” wyjaśnia Dina Attia;
- unikać wszelkiej ekspozycji na ekrany na dwie godziny przed snem, szczególnie w przypadku dzieci i młodzieży, które są bardziej wrażliwe na niebieskie światło;
- ponadto technologii tych powinny unikać osoby cierpiące na epilepsję lub osoby zidentyfikowane jako wrażliwe: kobiety w ciąży, osoby cierpiące na chorobę lokomocyjną lub problemy z równowagą, podatne na migreny itp.”

Brak danych powoduje, że na razie nie są znane długofalowe konsekwencje oddziaływania VR i AR np. na kwestie neurologiczne. Najlepiej zbadana i udokumentowana jest najczęściej występująca choroba wirtualnej rzeczywistości. W Polsce jest ona traktowana jako odmiana choroby symulatorowej z prozaicznego powodu: większość polskich danych dotyczy objawów u ćwiczących na symulatorach pilotów. Osoby zainteresowane chorobą symulatorową znajdują informacje na stronach internetowych i w materiałach Centralnego Instytutu Ochrony Pracy (adres strony internetowej CIOP poświęconej chorobie symulatorowej patrz pkt 10 w literaturze).

D. Artificial intelligence (AI) – sztuczna inteligencja

Omówienie problematyki sztucznej inteligencji warto poprzedzić scharakteryzowaniem korzyści, jakie ona stwarza.

Zdaniem ekspertów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej AI może przyspieszyć rozwój technologiczny w najróżniejszych gałęziach sektora jądrowego, od nauki

przez energetykę po medycynę. Dozór jądrowy najbardziej interesują kwestie związane ze zwiększeniem bezpieczeństwa, branżę jądrową również potencjalne korzyści ekonomiczne z użycia AI. Użycie tzw. cyfrowych bliźniaków, czyli komputerowych replik, może usprawnić i zoptymalizować poszczególne operacje związane z paliwem jądrowym czy postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi. Ponadto AI może pomóc w zmniejszeniu kosztów projektowych czy prac budowlanych. W przypadku przewidzenia za pomocą AI uszkodzenia urządzenia można zatrzymać w odpowiednim momencie jego działanie, powstrzymując degradację, jednocześnie obniżając koszt napraw i przestoju, a także zapobiegając zagrożeniom, jakie to urządzenie mogłoby spowodować.

Sztuczna inteligencja może przynieść znaczące korzyści w wielu obszarach, od ekologii po ekonomię, dla operacji związanych z energetyką jądrową w zakresie optymalizacji, przewidywania i automatyzacji dostaw oraz użytkownika energii elektrycznej. Ponadto AI może być przydatna w planowaniu złożonych działań, takich jak gospodarka paliwem jądrowym, czy zapewnianiu niezawodności systemów automatyki. Już teraz branża energetyki jądrowej przoduje w porównaniu z innymi gałęziami przemysłu (zwłaszcza w krajach takich jak Chiny czy Korea, które są liderami w ilości i wielkości inwestycji w rozwoju przemysłu jądrowego) w stosowaniu sztucznej inteligencji w swoich procesach i operacjach dzięki stałemu i daleko rozwiniętemu monitorowaniu i pracy na olbrzymich ilościach danych. Można nawet zaryzykować stwierdzenie, że bez użycia AI rozwój energetyki jądrowej w krajach azjatyckich tak szybko i w takiej skali byłby mocno utrudniony. Wyzwaniem jest rozwój współpracy międzynarodowej i standaryzacji związanej z integracją norm i standardów. AI może ponadto posłużyć do projektowania urządzeń naukowych i przewidywania przebiegu eksperymentów. Pochodzące od AI korzyści można jeszcze długo wliczać. Co z zagrożeniami i wyzwaniami? Wyzwaniem jest na pewno opanowanie wiedzy na temat AI i takich zagadnień, jak np. uczenie maszynowe. Każde nowe narzędzie wymaga opanowania wiedzy i zdobycia w trakcie pracy doświadczenia. Zdaniem Parlamentu Europejskiego AI może doprowadzić do eliminacji niektórych dotychczasowych miejsc pracy, a jednocześnie do powstania wielu nowych. Szanse i zagrożenia związane z AI omawiają liczne opracowania Parlamentu Europejskiego, takie jak na przykład Końcowe Sprawozdanie Komisji ds. Sztucznej Inteligencji w erze cyfrowej AIDA z maja 2022 r., propozycja Komisji Europejskiej dotycząca opracowania przepisów dotyczących AI z 21.04.2021 r. i poszczególne inicjatywy ustawodawcze. Jak widać jest to temat nowy i tworzący się dosłownie na naszych oczach. Dlatego tak ważna jest edukacja i szkolenie. Zagrożenia dla bezpieczeństwa ze strony AI Parlament Europejski określa następująco „Aplikacje sztucznej inteligencji, które mają fizyczny kontakt z ludźmi



Fot. 1. Jeden z komponentów zaprojektowany do konstrukcji tokamaka KSTAR Korea Południowa Daejon (zdjęcie własne autora).

Photo 1. One of the components designed for the construction of the KSTAR South Korea Daejon tokamak (author's own photo).



Fot. 2. Ten robot służy do badań podwodnych, ale jego odpowiedniki badają zbiorniki reaktorów jądrowych. Korea Południowa. Daejon (zdjęcie własne autora).

Photo 2. This robot is used for underwater research, but its counterparts explore nuclear reactor tanks. South Korea. Daejon (author's own photo).



Fot. 3. Robot podczas pracy. Chiny. Szanghaj (zdjęcie własne autora).

Photo 3. Robot at work. China. Shanghai (author's own photo).

lub są zintegrowane z ludzkim ciałem, mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa, ponieważ mogą być źle zaprojektowane, niewłaściwie używane lub zhakowane. Źle uregulowane użycie sztucznej inteligencji w broni może doprowadzić do utraty kontroli człowieka nad nią.” Problemem może być określenie odpowiedzialności – kto odpowiada za szkody spowodowane przez AI. Z drugiej strony użytkownik AI zyskuje wyraźną przewagę nad innymi w postaci ilości i jakości wiedzy. Parlament Europejski stwierdza bez ogródek „Nierówności w dostępie do informacji mogą być wykorzystywane. Na przykład na podstawie zachowania danej osoby w internecie lub innych danych i bez jej wiedzy, sprzedawca internetowy może wykorzystywać sztuczną inteligencję do przewidywania, ile ta osoba jest skłonna zapłacić, a kampania reklamowa dostosować dla niej swój przekaz.

Inną kwestią związaną z przejrzystością jest to, że czasami może być niejasne dla ludzi, czy wchodzi w interakcję ze sztuczną inteligencją, czy z osobą. Reasumując: inspektor dozoru jądrowego, aby prawidłowo wypełniać swoje obowiązki, musi poznać zagadnienia związane ze sztuczną inteligencją, bo już teraz staje się ona codziennością i to nie tylko w branży jądrowej. Podstawą skutecznej kontroli jest wiedza o jej przedmiocie równa co najmniej tej, jaką dysponują kontrolowani.

Podsumowanie

Obecnie na całym świecie trwają prace legislacyjne dotyczące nowych technologii, takich jak AI (*vide*: propozycje Komisji Europejskiej dotyczące stworzenia ram prawnych w zakresie AI czy działalność takich komisji Parlamentu Europejskiego, jak Komisja CULT pracująca nad przepisami dotyczącymi AI w zakresie edukacji i kultury czy Komisja LIBE w zakresie prawa karnego). Zatem także polskie przepisy prawne, w tym dotyczące energetyki jądrowej, będą musiały być dostosowane do wyzwań związanych z nowymi technologiami. Im wcześniej zostaną podjęte działania w tym zakresie, tym lepiej – łatwiej będzie stawić czoło ewentualnym zagrożeniom, jakie niosą nowe technologie, a zarazem optymalnie wykorzystywać ich potencjał.

W artykule opisane zostały nowe technologie i wyzwania powstające w pracy dozoru jądrowego. Z wielu względów jest to krótkie opracowanie. Można wymienić wiele innych nowych technologii, jakie mają lub będą w najbliższym czasie miały wpływ na bezpieczeństwo jądrowe. Weźmy na przykład urządzenia nasobne. Sytuacja, w której na przykład element garderoby monitoruje otoczenie, łączy się i przysyła dane do sieci internetowej, stwarza różne wyzwania, od ochrony fizycznej obiektu jądrowego po ochronę zdrowia użytkownika (takie urządzenie musi mieć przecież jakieś źródło zasilania – co w przypadku jakiejś awarii?). Nowe materiały konstruk-

cyjne o nowych właściwościach będą wymagać innego podejścia. W swoim czasie Koreańczycy wprowadzali nowy stop do konstrukcji wytwornic pary – największym wyzwaniem okazało się nauczenie wykonawców nowych procedur postępowania. Mieli początkowo z tym problemy ze względu na swoje długoletnie doświadczenie w posługiwaniu się dotychczasowym materiałem. Trudno było się pozbyć starych nawyków doświadczonym fachowcom. Generalnie najlepszą metodą jest poznawanie nowych technologii, nowych procedur postępowania i zmiany starych przyzwyczajeń. Wymaga to od inspektorów dozoru jądrowego ciągłej nauki i rozwoju.

Autor opracowania jest chemikiem z wykształcenia: nanosubstancje (kolejna z nowych technologii – nie opisywana w tym opracowaniu, bo mająca „jeszcze?” niewielki wpływ na bezpieczeństwo jądrowe) mają nowe właściwości chemiczne, inne niż te same substancje nie będące w postaci „nano”. Zalecana przy postępowaniu z nimi jest więc ostrożność. Lepszym słowem byłby chyba rozsądek. Stała nauka i rozsądek to słowa kluczowe w po-

stępowaniu z nowymi technologiami. Ten wniosek dotyczy na pewno nie tylko inspektorów dozoru jądrowego.

Państwowa Agencja Atomistyki jest instytucją, w której promowana jest postawa ciągłego doskonalenia i kształcenia. Nauka prowadzona jest w szerokim zakresie. Szczególny nacisk położony jest na kształcenie i samokształcenie inspektorów. Poszczególni inspektorzy interesują się i poznają najnowsze technologie, takie jak AI, VR czy AR np. podczas praktyk czy szkoleń w krajach bardziej zaawansowanych, jeżeli chodzi o technologie jądrowe. Jak na razie taka praktyka (nieco *ad hoc*) jest w zupełności wystarczająca, choćby ze względu na niewielką liczbę inspektorów. W miarę rozwoju polskiej energetyki jądrowej byłoby wskazane bardziej systemowe podejście.

Notka o autorze

Mgr inż. Piotr Leśny – inspektor dozoru jądrowego, Wydział Kontroli i Nieprolifracji, Departament Bezpieczeństwa Jądrowego, Państwowa Agencja Atomistyki.

Literatura

1. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz. U. z 2021 r. poz. 1941 oraz z 2022 r. poz. 974).
2. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego (Dz. U. poz. 1048).
3. Nuclear Engineering International magazine – Tecknotrove Systems: <https://www.neimagazine.com/features/featurevirtual-reality-in-the-nuclear-industry-8989629/>
4. Włodzimierz Pihowicz „Inżynieria bezpieczeństwa technicznego”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
5. NuScale oficjalna strona <https://www.nuscalepower.com/>
6. Wielki Słownik Języka Polskiego Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2018 r.
7. Youngjin Yoo, Kyungmook Kim „Jak Samsung został potęgą w dziedzinie projektowania”, Harvard Business Review Polska Luty 2016.
8. ANSES Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail <https://www.anses.fr/en/content/what-are-risks-virtual-reality-and-augmented-reality-and-what-go>
9. Centralny Instytut Ochrony Pracy. <https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl>
10. https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P30001831335539182278&html_tresc_root_id=29013&html_tresc_id=29690&html_klucz=19558&html_klucz_spis=
11. Nicholas Watson, IAEA Department of Nuclear Energy.
12. Aleksandra Peeva, IAEA Department of Nuclear Sciences and Applications “Nuclear Sector is Capitalizing on Opportunities in Artificial Intelligence, ITU-IAEA Events Hear” IAEA 30.11.2021 r.
13. <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-sector-is-capitalizing-on-opportunities-in-artificial-intelligence-itu-iaea-events-hear>
14. Parlament Europejski <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20200918STO87404/sztuczna-inteligencja-szanse-i-zagrozenia>
15. Janet Sanford Business English Magazine „The fourth industrial revolution”. maj/czerwiec 2022.

Pluton – wcielone zło czy nadzieja dla energetyki?

Plutonium – the embodiment of evil or hope for energy?

Andrzej Strupczewski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Streszczenie: Artykuł przedstawia naukowo uzasadniony opis zagrożenia ze strony plutonu, uwzględniający ewentualne mechanizmy i drogi potencjalnego uwalniania, a także możliwości wchłonięcia plutonu oraz skutki tego wchłonięcia drogą oddechową i pokarmową. W analizie przyjęto skrajną pesymizację założeń. Wbrew propagandzie strachu twierdzącej, że nawet miligramy plutonu stanowią zagrożenie dla ludzkości, okazuje się, iż rozsypanie kilograma tej substancji w centrum Warszawy spowodowałoby tylko niewielką liczbę zgonów i to rozłożonych na wiele lat. Pluton nie stanowi więc dobrego narzędzia terroryzmu. Również uwalnianie plutonu w razie awarii reaktorowych – na przykład utraty chłodzenia wypalonego paliwa w basenach przechowawczych – nie stwarzałyby zagrożenia dla ludności. Jest on natomiast cennym paliwem reaktorowym, które pozwoli na przedłużenie dostępności materiałów rozszczepialnych o tysiące lat.

Słowa kluczowe: Pluton, zagrożenie zdrowia, zagrożenia ludności, terroryzm, paliwo jądrowe.

Abstract: *The paper presents scientifically justified description of hazards possible due to plutonium, taking into account possible mechanisms and pathways of potential release and chances of absorption of plutonium. Both ingestion and breathing are considered. The analysis is based on most pessimistic, conservative assumptions. Contrary to the propaganda of fear claiming that even milligrams of plutonium are mortal threat to whole populations, it is shown that if one kg of plutonium were spilled in the center of Warsaw, only a small number of deaths would be caused, and those would be distributed over many years. Thus, plutonium is no effective tool of terrorism. Similarly, the release of plutonium due to reactor accidents – e.g. due to loss of cooling of spent fuel in storage pools – would not create large scale hazards to the population. On the other hand, plutonium is an important reactor fuel, assuring prolongation of availability of fissionable materials by thousands of years.*

Key words: *Plutonium, health hazards, hazards to population, terrorism, nuclear fuel.*

Wprowadzenie

Gdy przed 60 laty zaczynałem pracę z reaktorami jądrowymi, byłem przekonany, że przyszłość należy do prędkich reaktorów powielających, które w cyklu uranowo-plutonowym będą wytwarzały więcej paliwa jądrowego z rozszczepialnym plutonem, niż będą używać rozszczepialnego uranu. Okazało się jednak, że technologia prędkich reaktorów powielających wykorzystująca ciekły sód jako chłodziwo jest trudna i kosztowna, a uran tani. Reaktory termiczne okazały się konkurencyjne ekonomicznie i zaczęły szybko zdobywać rynek, a reaktory sodowe uznano za nieopłacalne. Do tego przyczyniły się też organizacje antynuklearne, które w reaktorach powielających widziały zagrożenie dla swych planów, bo nieograniczone ilości paliwa jądrowego wykluczałyby potrzebę dotacji dla

niestabilnych i drogich odnawialnych źródeł energii. Okrzyknięto więc pluton śmiertelnym zagrożeniem dla człowieka, najgroźniejszym materiałem w przyrodzie. Dziś, gdy potrzeba energii dla społeczeństwa jest wyraźnie widoczna, a brak energii grozi zimmem i pozbawieniem ludzi energii elektrycznej, trzeba zadać sobie pytanie, czy obawy przed plutonem są uzasadnione.

Czy pluton to „wcielone zło”?

W czasach dyskusji o losach elektrowni jądrowej budowanej w Żarnowcu postanowiłem zaprosić czołowego przeciwnika energetyki jądrowej w Polsce oraz bezstronnych dziennikarzy do wspólnego zwiedzenia fińskiej elektrowni jądrowej w Loviisa, gdzie pracowały dwa reaktory WWER, analogiczne do reaktorów planowanych dla Żarnowca.

Sfinansowanie tego wyjazdu było możliwe dzięki wynagrodzeniu, jakie otrzymałem za analizy bezpieczeństwa Żarnowca wykonane w ramach kontraktu z MAEA. Sądziłem, że bezpośredni kontakt ze znakomicie pracującą elektrownią Loviisa będzie mocnym argumentem za dokończeniem budowy Żarnowca. Sami Finowie mówili wtedy, że zbudowanie elektrowni Loviisa było najlepszym interesem w dziejach energetyki fińskiej.

I rzeczywiście, w ciągu 5 dni, jakie spędziliśmy w elektrowni, mogliśmy wejść do wszystkich pomieszczeń (było to w czasach jeszcze przed zamachami terrorystycznymi z 11 września) i poznać nie tylko cechy bezpieczeństwa reaktora, ale i gospodarkę odpadami promieniotwórczymi. Wydawało się, że reaktor jest wzorem czystości i bezpieczeństwa – nic, tylko go budować w Polsce!

Ale chcieliśmy poznać opinie ludzi – załogi i mieszkańców. Wszystkie były pozytywne, lecz po poszukiwaniach wreszcie znaleźliśmy przeciwnika energii jądrowej. Ku naszemu zdumieniu, był to nauczyciel... fizyki w szkole średniej w mieście Loviisa. Poszliśmy do niego, z kamerą telewizyjną, prowadzoną przez red. Wiktora Niedzickiego, wieloletniego autora świetnych spektakli „Fizyka dla wszystkich”. Pytamy, czemu jest przeciwnikiem energetyki jądrowej? Czy elektrownia Loviisa szkodzi środowisku? Nie – odpowiada nauczyciel, to bardzo czysta elektrownia. Czy może jest niebezpieczna? Nie, mówi nauczyciel, jest bardzo bezpieczna. A może personel ma złe warunki pracy? Nie – mówi nauczyciel, mają pracę czystą i bezpieczną, a zarabiają bardzo dobrze. Więc – pytamy skonstruowani przed kamerą – więc czemu jest Pan przeciw? Bo w elektrowni jądrowej powstaje pluton – odpowiada nauczyciel – a pluton jest ZŁY! (*Plutonium is evil!*) Pan Bóg nie stworzył plutonu, robi go tylko człowiek!

Nie pomogło tłumaczenie, że przecież w naturalnych reaktorach jądrowych, jakie samoczynnie powstały w Oklo przed 2 miliardami lat, pluton był wytwarzany bez udziału człowieka. Dopiero później dowiedzieliśmy się, że nasz



Fot. 1. Elektrownia jądrowa Loviisa z 2 reaktorami WWER-440, takimi jak projektowano dla Żarnowca, w zimie wokół elektrowni lśni skrzący się śnieg. [Zdjęcie od Imatran Voima, zamieszczone za pozwoleniem].

Photo 1. The Loviisa nuclear power plant with 2 VVER-440 reactors as designed for Żarnowiec, in winter, sparkling snow shines around the plant. [Photo from Imatran Voima, posted with permission].

rozmówca był Szwedem. Szwedzi popierają atom i mają świetnie pracujące elektrownie jądrowe, ale sytuacja naszego nauczyciela była specjalna. W Finlandii większość populacji to oczywiście Finowie, ale w niektórych okolicach większość stanowią Szwedzi. Tak też było w Loviisa, burmistrz i rada miejska byli Szwedami i rządili bez przeszkód. Tymczasem w czasie budowy elektrowni do miasta Loviisa napłynęło dużo robotników, większość z nich to byli Finowie. Rada miejska się zmieniła, burmistrzem został Fin, a Szwedzi utracili swe uprzywilejowane stanowiska. Nic dziwnego, że nauczyciel – Szwed był przeciw elektrowni jądrowej. A że nie wypadało mu mówić o utracie przywilejów, uzasadnił swój sprzeciw plutonem.

Pluton – materiał rozszczepialny, uzupełnienie zasobów paliwowych na miejsce wypalanego uranu

Uran występujący w przyrodzie składa się z dwóch izotopów, U-235 i U-238. Tylko U-235, który stanowi mniej niż 1% uranu, jest rozszczepialny w reaktorach termicznych i może nam dostarczać energii. Reszta, a więc ponad 99% uranu wydobywanego z ziemi, to izotop uranu U-238, który można wykorzystać dopiero, gdy podczas pracy reaktora wychwyci on neutron i zamieni się w pluton Pu-239. Pu-239 jest nawet bardziej wydajny jako materiał rozszczepialny niż U-235. Powstaje on w każdym reaktorze i dostarcza znacznej części energii rozszczepieniowej.

Ilość rudy uranowej w wierzchnich warstwach ziemi jest ograniczona, więc przy wykorzystywaniu tylko U-235 stałoby się za kilkadziesiąt lat wobec braku paliwa uranowego. Ale już obecnie pluton dodaje się do paliwa jądrowego wykonywanego z mieszaniny tlenków uranu i plutonu, tzw. paliwa MOX (ang. *Mixed Oxides*). W przyszłości oczekuje się, że w reaktorach IV generacji przy każdym rozszczepieniu jądra U-235 będzie powstawać więcej niż jedno jądro plutonu Pu-239. Dzięki temu ilość paliwa jądrowego nie będzie maleć – przeciwnie, będzie rosła, co pozwoli zaspokoić potrzeby energetyczne ludzkości przez tysiące lat. Ponadto recykling paliwa i użycie plutonu do produkcji nowych elementów paliwowych pozwala zdecydowanie zmniejszyć ilość i aktywność odpadów radioaktywnych. W perspektywie setek lat użycie plutonu jest więc dobrym rozwiązaniem problemów energetycznych ludzkości.

Według oceny OECD wprowadzenie prędkich reaktorów powielających z zamkniętym cyklem paliwowym uwzględniającym wykorzystanie plutonu pozwoli zwiększyć czas pracy energetyki jądrowej opartej na zasobach zidentyfikowanych około 30 razy [1]. Również Parlament Europejski po wielomiesięcznych obradach komisji uchwalił 24.10.2007 r. rezolucję, podkreślającą nie tylko, że energia jądrowa jest dla Unii niezbędna, że jest ona obecnie największym źródłem energii o niskiej emisji CO₂ w Europie i gra istotną rolę w przeciwdziałaniu zmianom klimatycznym, ale też, że znane światowe zasoby uranu

wystarczą według szacunków na ponad 200 lat, a energia jądrowa z reaktorami IV generacji „ma długą przyszłość, ponieważ opiera się na wykorzystaniu zasobów, które wydłużą okres ewentualnego stosowania energii jądrowej do tysięcy lat” [2]. Ta opinia została poparta późniejszą rezolucją Parlamentu Europejskiego z 2016 r. [3] oraz najnowszą decyzją Komisji Europejskiej i Parlamentu Europejskiego opublikowaną 6 lipca 2022 r. o umieszczeniu energetyki jądrowej w taksonomii jako źródła energii przyjaznej dla środowiska [4].

Ale właśnie dlatego, że pluton może być obfitym źródłem energii, przeciwnicy energetyki jądrowej zwalczają najostrejszy rozwój prędkich reaktorów powielających, wykorzystujących pluton jako główne paliwo i straszą plutonem jako rzekomo najgroźniejszą trucizną znaną człowiekowi. Ralf Nader oświadczył, że gram plutonu wystarczy do zabicia 17 milionów ludzi. Przy okazji awarii w Fukushima aktywiści antynuklearni twierdzili, że pluton z paliwa typu MOX stwarzał zagrożenie dla Tokio, a wypalone paliwo w basenach miało być zagrożeniem dla życia na całej kuli ziemskiej.

Jednakże propaganda aktywistów antynuklearnych opiera się na błędnym założeniu, że cała ilość plutonu uwolniona do atmosfery zostaje wchłonięta i zatrzymana w organizmie człowieka. Błędne są też oceny groźby stwarzanej przez cząsteczki plutonu w płucach, kościach i całym organizmie człowieka. Nie są to drobne różnice kilkunastu czy nawet kilkuset procent – współczynniki błędu wynoszą setki tysięcy razy. Sprawdźmy więc, jakie jest zagrożenie od wchłoniętego plutonu, a następnie, ile tego plutonu może się dostać do organizmu człowieka. Dopiero potem ocenimy, jakie zagrożenie naprawdę stanowi pluton [5]¹.

Zagrożenie od plutonu w organizmie człowieka

Główne zagrożenie ze strony plutonu powstaje, gdy po uwolnieniu z systemu zamykających go barier tworzy on zawieszinę drobnego pyłu w powietrzu i dostaje się przy oddychaniu do płuc. Można prosto obliczyć wielkość zagrożenia. Gdy wdycha się tlenek plutonu w postaci drobnego pyłu, to 25% tego pyłu pozostaje w płucach, 38% w górnym odcinku układu oddechowego, a reszta jest wydychana na zewnątrz. W ciągu kilku godzin usuwany jest z organizmu pluton, który osadził się w górnym odcinku układu oddechowego oraz 40% plutonu osadzonego w płucach [6]. Pozostałe 60% plutonu w płucach, to jest $(0,25 \times 0,60)$ 15% całości wdychanego plutonu, pozostaje w płucach przez dwa lata, a więc długo, ale dużo krócej, niż wynosi okres jego połowicznego rozpadu.

Znając ilość plutonu w płucach, w kościach i w pozostałych organach człowieka oraz uwzględniając czas, przez jaki pluton przebywa w nich, zanim zostanie wydalony

wskutek procesów biologicznych, B. Cohen określił dawkę promieniowania, jaką otrzymuje organizm człowieka od jednej tysięcznej mikrograma plutonu. Przyjmując pesymistyczne założenie, że każda nawet najmniejsza dawka promieniowania powoduje zagrożenie (tzw. hipoteza liniowa bezprogowa, ang. *Linear Non-Threshold*, LNT) i ekstrapolując do zera skutki dużych dawek otrzymanych przez ludzi, którzy przeżyli bombardowanie Nagasaki lub Hiroszimy oraz górników narażonych na działanie radonu, amerykański Komitet Doradczy ds. Skutków Biologicznych Promieniowania Jonizującego BEIR (ang. *Advisory Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation*) opracował zależność ryzyka zachorowania na raka od dawki napromieniowania płuc. Wiele prac wskazuje, że hipoteza LNT jest zbyt pesymistyczna i promieniowanie przy małej mocy dawki nie jest szkodliwe. Ale przyjmując wskaźnik oparty na tej hipotezie, możemy być pewni, że stosujemy podejście pesymistyczne, najbardziej ostrożne i rzeczywistość nie będzie gorsza od naszych przewidywań.

Zwykle wymieniany jako główne zagrożenie izotop plutonu Pu-239 o okresie połowicznego rozpadu 24 000 lat nie jest największym emitentem promieniowania. Inne izotopy plutonu o krótszych okresach połowicznego rozpadu ulegają rozpadowi szybciej, a więc na jednostkę czasu emitują więcej promieniowania. Dlatego współczynniki zagrożenia od mieszaniny izotopów plutonu typowej dla paliwa reaktorowego są wyższe niż dla samego Pu-239.

Uwzględniając te okoliczności, prof. Cohen w obszernym studium na temat plutonu wykazał, że można oczekiwać średnio jednego hipotetycznego zachorowania na nowotwory na każde 200 mikrogramów mieszaniny izotopów plutonu wchłoniętych i zatrzymanych w płucach lub na 1 gram mieszaniny izotopów plutonu wchłoniętych drogą pokarmową [7].

Nie oznacza to, że przy wchłonięciu mniejszej ilości plutonu nie ma skutków zdrowotnych, a większej następuje nieuchronne zachorowanie. Według hipotezy LNT przyjmuje się, że jeśli N porcji plutonu po 200 mikrogramów zostanie wchłoniętych do płuc grupy ludzi dużo większej od N, to można oczekiwać N zachorowań na nowotwory. Praktyczne obserwacje dużych grup ludności narażonych na promieniowanie gamma wykazują, że takie podejście jest zbyt pesymistyczne, ale daje ono możliwość udowodnienia, że szkodliwość plutonu nie jest tak wielka, jak twierdzą agitatorzy antynuklearni.

Wyniki praktycznych badań wpływu wchłonięcia plutonu przez człowieka

W 1983 r. pewien młody człowiek wchłoniął przypadkowo drogą oddechową dużą ilość plutonu i ameryku. Badania skutków tego zdarzenia trwały przez 30 lat, do 2013 r. Nie podejmowano żadnych działań w celu usunięcia tych pierwiastków z jego ciała, co pozwala na określenie wpły-

¹ Część informacji ogólnych o plutonie w dalszej części tekstu była zamieszczona w artykule [5].

wu Pu i Am na organizm człowieka. Pomiar określający ilość wchłoniętych pierwiastków zaczęto natychmiast po tym zdarzeniu, a próbki były analizowane przez szereg różnych laboratoriów w Europie i w USA. Okazało się, że efektywna dawka obciążająca wynosiła około 1 Sv. W chwili publikacji artykułu po 30 latach obserwacji człowiek ten nadal cieszył się dobrym zdrowiem, o czym świadczyły aktualne badania medyczne [8].

Większa grupa, licząca 26 białych mężczyzn, którzy pracowali przy badaniach plutonu w Los Alamos, była regularnie kontrolowana w ciągu 50 lat w celu określenia możliwych skutków wchłaniania plutonu do organów wewnętrznych. Dawki skuteczne wynosiły od 0,1 do 7,2 Sv, z wartością średnią równą 1,25 Sv. Do końca 1974 r. zmarło 7 osób, a uwzględniając wskaźnik umieralności białych w USA, oczekiwano by 16 zgonów. Znormalizowany wskaźnik umieralności, SMR (ang. *Standardized Mortality Ratio*) wyniósł więc 0,43. Przy porównaniu ich umieralności z 876 pracownikami w Los Alamos, którzy nie mieli kontaktu z plutonem, wskaźnik umieralności grupy narażonej na wchłonięcie plutonu był równy SMR 0,77. Spośród żyjących, 19 osób cierpiało na choroby i zmiany fizyczne typowe dla populacji męskiej o średnim wieku 72 lata (zakres od 69 do 86 lat). U ośmiu spośród 26 pracowników wykryto przypadki raka, co leży w zakresie oczekiwań. U trzech spośród siedmiu zmarłych powodem śmierci były nowotwory prostaty, płuc i kości. Umieralność na nowotwory ze wszystkich przyczyn nie była statystycznie podwyższona.

Jak widać, zbadane przypadki osób, które wchłonęły pluton, nie wskazują na szkody zdrowotne, a z pewnością nie dają podstaw do traktowania plutonu jako „absolutnie zła”.

Wskaźniki szkodliwości promieniowania plutonu na tle innych izotopów

Rozpad plutonu powoduje emisję cząstki alfa, która przekazuje dużą ilość energii na krótkiej drodze i ma bardzo mały zasięg. Jak groźne jest uderzenie cząstki alfa w komórkę?

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) przy współudziale innych organizacji ONZ, jak np. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO), opracowała ogromne zbiory współczynników opisujących działanie promieniowania emitowanego przez różne izotopy. Jednym z tych wskaźników jest wielkość dawki otrzymanej wskutek jednego rozpadu jądra plutonu. Jest ona mierzona w siwertach na bekerel [Sv/Bq]. Dla plutonu pochłoniętego drogą oddechową wynosi dla dorosłych przy powolnym długoterminowym wchłanianiu 0,016 mSv/Bq.

Jest to wielkość znacząca, ale nie należy przyjmować, jakoby jedna milionowa grama plutonu oznaczała śmierć z powodu raka. Fakty przeczą takim twierdzeniom. Jak podano wyżej, w latach 40. XX wieku 26 pracowników w zakładach zbrojeniowych USA uległo skażeniu pluto-

nem. Staranne badania zdrowia tych ludzi prowadzone przez szereg lat nie ujawniły żadnych złych skutków zdrowotnych ani przedwczesnych zgonów, które można byłoby przypisać temu skażeniu. W latach 90. grupa ochotników wchłonęła pluton drogą oddechową i poprzez bezpośrednie zastrzyki – również bez skutków ujemnych. Gdy Ralph Nader określił pluton jako najbardziej toksyczną substancję znaną człowiekowi, prof. Cohen zaproponował, że przed kamerą TV zje tyle tlenku plutonu, ile Nader zje kofeiny [7], dla której w czystej postaci przy przyjęciu doustnym dawka powodująca 50% prawdopodobieństwo zgonu u szczurów wynosi 192 miligramy na kilogram. Nader nie przyjął wyzwania.

Chociaż brak bezpośrednich danych doświadczalnych na temat częstości chorób nowotworowych spowodowanych przez pluton w organizmach ludzi, mamy szereg wyników badań prowadzonych na zwierzętach – psach, królikach, szczurach i myszach. Wyniki tych badań potwierdzają, że oceny według wskaźników BEIR oraz według danych opublikowanych przez MAEA, WHO i inne organizacje ONZ wykazują większe wartości niż zagrożenie rzeczywiście występujące.

Wielkość zagrożenia od plutonu możemy też ocenić, porównując je z zagrożeniem od polonu Po-210 w tych samych warunkach, to jest dla osób dorosłych przy powolnym wchłanianiu. Wskaźnik dla polonu wynosi 0,00434 mSv/Bq. Oznacza to, że rozpad jednego atomu plutonu Pu-239 jest czterokrotnie bardziej szkodliwy, niż rozpad atomu polonu Po-210. Ale pluton jest starannie oddzielony od środowiska człowieka, nikt nie wdycha go na co dzień, natomiast polon Po-210 jest nieodłącznym składnikiem dymu papierosowego. Brytyjski Instytut Badań Nowotworów podaje, że kierujący przemysłem tytoniowym wiedzą o tym dobrze i przez ponad 40 lat próbowali obniżyć zawartość polonu w tytoniu, ale bezskutecznie. Osoba paląca półtorej paczki papierosów dziennie otrzymuje rocznie dawkę promieniowania taką, jak przy 300 prześwietleniach klatki piersiowej promieniami rentgenowymi. Osoba paląca 2 paczki papierosów dziennie otrzyma w ciągu 25 lat łączną dawkę około 800 mSv. Zagrożenie powodowane promieniowaniem polonu 210 przy paleniu papierosów jest więc realne, ale zagrożenie to przyjmujemy obojętnie. Natomiast hipotetyczna groźba wywołana rozproszeniem plutonu została mocno wbita w świadomość społeczną przez aktywistów antynuklearnych i jest skutecznie wykorzystywana jako argument przeciwko energetyce jądrowej.

Zastanówmy się teraz, jaka część plutonu rozproszonego w powietrzu dotarłaby do organizmu człowieka.

Wchłanianie plutonu po rozproszeniu go w powietrzu

Powyżej podaliśmy, jaka frakcja plutonu wdychanego przez człowieka osadza się w płucach. Należy przy tym

uwzględnić, że trudno jest rozproszyć pluton w powietrzu jako pył, który można wdychać. Pojedyncze cząstki plutonu mają tendencję do koagulacji w bryłki o rozmiarach zbyt dużych, by można było wchłaniać je drogą oddechową. W doświadczeniach na zwierzętach trzeba było sztucznie rozdrabniać pluton, by spowodować wdychanie jego pyłu. W przypadku awarii reaktorowych jest to oczywiście niemożliwe, a przede wszystkim nawet przy rozdrobnieniu i rozproszeniu plutonu tylko jego mała część jest wdychana przez ludzi.

Cohen przeprowadził obliczenie, w którym założył pesymistycznie, że kilogram plutonu zostaje w postaci drobnego pyłu rozproszony w Nowym Jorku przy przeciętnych warunkach pogodowych. Obliczenia rozpraszania atmosferycznego przeprowadzone zgodnie z wymaganiami dozoru jądrowego USA wykazały, że w ciągu godziny, zanim wiatr wywieje pył plutonu z gęsto zaludnionego rejonu, zaledwie 1 cząstka na 100 000 byłaby wchłonięta przez ludzi drogą oddechową, co oznacza wchłonięcie do płuc ludzi 10 miligramów plutonu. Ale to obliczenie zostało wykonane dla gęstości zaludnienia równej 10 000 mieszkańców na km². W warunkach polskich, przyjmując gęstość zaludnienia taką jak w Warszawie, a więc 3500 mieszkańców/km², otrzymamy wynik 3-krotnie niższy, to jest sumaryczne wchłonięcie do płuc grupy narażonych mieszkańców około 3,5 mg plutonu. Przy ilości powodującej średnio jedno hipotetyczne zachorowanie na nowotwór wynoszącej 200 mikrogramów plutonu oznacza to wystąpienie 18 hipotetycznych zachorowań nowotworowych.

Wchłanianie plutonu z osadu na ziemi

Zagrożenie powodowane bezpośrednio wdychaniem rozproszonego w powietrzu pyłu plutonu występuje przy przeciętnych warunkach atmosferycznych przez krótki czas do chwili, gdy pył plutonu zostanie usunięty przez wiatr z wdychanego powietrza. Potem cały pył plutonowy osiadnie na ziemi, ale wciąż będzie możliwość, że zostanie on powtórnie uniesiony wskutek wiatru lub działań człowieka. To niebezpieczeństwo maleje pod wpływem deszczu, rosy i innych procesów naturalnych i zanika niemal całkowicie po upływie roku. W sumie ocenia się, że unoszony w powietrze z ziemi pył plutonu spowoduje dodatkowe 5 hipotetycznych zgonów.

W ciągu kilku lat pluton przeniknie głęboko do ziemi, stając się składnikiem górnej warstwy gleby. Pluton pozostaje radioaktywny przez wiele lat. Jego szkodliwość będzie zależała od tego, jakie jest prawdopodobieństwo powtórnego uniesienia cząstek w powietrze wskutek orki, prac budowlanych i procesów naturalnych, a następnie wchłonięcia ich przez ludzi drogą oddechową. O wiele lżejszy od plutonu cez (izotop cez-137), który opadł po awarii w Czarnobylu w bardzo niewielkich ilościach m.in. na terenie Polski, znajduje się obecnie już kilka metrów pod powierzchnią ziemi.

Przeciętny atom znajdujący się w górnych 20 cm gleby ma 13 szans na miliard na rok, by dostać się do organizmu człowieka. W długim okresie pluton w glebie może być także wchłonięty przez korzenie roślin i dostać się w ten sposób do naszego pożywienia. Proces ten badano w wielu kontrolowanych doświadczeniach oraz w sytuacjach skażeń występujących po wybuchach bomb i w rejonach składowania odpadów promieniotwórczych. Prawdopodobieństwo takich procesów silnie zależy od warunków geograficznych, ale nawet w najbardziej niekorzystnych warunkach może ono spowodować mniej niż jeden hipotetyczny zgon w ciągu dziesiątków tysięcy lat.

Sumaryczne zagrożenie od rozproszonego plutonu

W sumie, kilogram plutonu rozproszonego w powietrzu w mieście o takiej gęstości zaludnienia jak Warszawa przy przeciętnych warunkach meteorologicznych może spowodować średnio 18 hipotetycznych zgonów wskutek wdychania pyłu w ciągu pierwszej godziny, z dalszymi 5 zgonami wskutek unoszenia pyłu w powietrze w ciągu pierwszego roku i 1 zgonem w ciągu dziesiątków tysięcy lat, gdy pluton pozostaje w górnej warstwie gleby. Łącznie daje to 24 możliwe hipotetyczne zgony na kilogram rozproszonego sztucznie rozdrobnionego plutonu.

Często wysuwa się argument, że rozproszony pluton może być narzędziem terroryzmu. Jest to jednak mało realistyczne, bo żaden zgon nie nastąpiłby wcześniej niż po 10 latach, a większość byłaby opóźniona o 20 do 40 lat – terroryści chcą mieć ofiary śmiertelne natychmiast. Nie można też użyć plutonu jako narzędzia szantażu, bo z chwilą gdy ludzie dowiedzą się o jego rozproszeniu, mogą łatwo podjąć działania ochronne, oddychając przez chusteczkę lub chroniąc się wewnątrz budynków. Znacznie skuteczniejszą bronią dla terrorystów są substancje chemiczne, które są łatwiejsze do zdobycia, jak gaz paraliżujący, który daje natychmiastowe wyniki w postaci trupów leżących na ulicy. Substancje te są również możliwe do samodzielnego wyprodukowania w przeciętnym laboratorium, w przeciwieństwie do plutonu, który wymaga posiadania reaktora i zakładu przerobu wypalonego paliwa.

Zagrożenie globalne przy masowym zastosowaniu plutonu jako paliwa reaktorowego

Wysuwano też obawy, że pluton może spowodować skażenie całego świata. Przeciwnicy energetyki jądrowej, np. John Gofman, piszą o zagrożeniu plutonem na bazie tzw. zatrzymywania 99,99%. Ma to oznaczać, że co rok uwalnia się frakcja wynosząca 0,01% plutonu użytkowanego na świecie i pozostaje w postaci pyłu zawieszony w po-

wietrze przez bardzo długi czas. Ale taka frakcja uwolnień jest zupełnie nierealna. Nawet przy produkcji stali i asfaltu zakłady przemysłowe powodują mniejsze uwolnienia, często na poziomie 0,001%. Podczas manipulacji z plutonem frakcje uwolnień są dużo mniejsze. Dlaczego?

Przy produkcji stali i asfaltu materiały nagrzewa się do temperatur wyższych od temperatury topnienia, co powoduje gwałtowne wrzenie, stanowiące zasadniczy mechanizm unoszenia materiału jako pyłu zawieszonego w powietrze. W elektrowniach jądrowych temperatura plutonu jest niższa od temperatury topnienia. W czasie operacji technologicznych stal i asfalt znajdują się w otwartych kadziach, wystawionych bezpośrednio na działanie atmosfery w halach produkcyjnych, podczas gdy pluton jest zawsze szczelnie zamknięty i całkowicie izolowany od atmosfery. Powietrze z budynku może się mieszać z powietrzem atmosferycznym, tylko przechodząc przez filtry. W hutach i rafineriach produkujących stal i asfalt są to filtry powietrza ze zwykłych tkanin, natomiast w zakładach wykorzystujących pluton stosuje się filtry o wysokiej skuteczności, zatrzymujące 99,9999% pyłu zawartego w przepływającym przez nie powietrze.

Według wymagań amerykańskiej agencji ochrony środowiska EPA (ang. *Environmental Protection Agency*) w USA ucieczka plutonu w postaci pyłu zawieszonego w powietrze nie może przekraczać jednej cząstki na miliard. Wszystkie zakłady jądrowe pracują zgodnie z tymi wymaganiami. Jest to 100 000 razy mniej niż uwolnienia przyjmowane przez przeciwników energetyki jądrowej. Prędkie reaktory powielające BN-800 (o mocy 789 MWe) zawiera 2,215 kg plutonu klasy militarnej. Gdyby 1000 takich prędkich reaktorów powielających pracowało zgodnie z przepisami EPA, to dozwolona ucieczka plutonu wyniosłaby $2215 \text{ kg} \cdot 1000 \cdot 10^{-9} / \text{rok} = 0,0022 \text{ kg/rok}$. Gdyby wszystkie te reaktory znajdowały się w miastach o gęstości zaludnienia takiej jak w Warszawie, gdzie – jak pokazaliśmy wyżej – rozproszenie 1 kg plutonu powoduje 24 zgony, to po pracy tych reaktorów przez 50 lat można byłoby oczekiwać $0,0022 \text{ kg/rok} \cdot 50 \text{ lat} \cdot 24 \text{ zgony/kg} = 2,64 \text{ zgonów}$. Wobec tego, że zakłady prowadzące produkcję paliwa plutonowego położone są poza miastami, skutki zdrowotne byłyby znacznie mniejsze, dużo mniejsze niż jeden zgon na stulecie (zakładamy pesymistycznie, że każda dawka promieniowania jest szkodliwa).

Zagrożenia od uwolnień plutonu w razie awarii

Oczywiście przepisy EPA nie obejmują uwolnień w razie awarii. Dwie najbardziej znane awarie z uwolnieniami plutonu to pożary w zakładach produkcji bomb atomowych w Rocky Flats w Kolorado, USA, gdzie pluton znajduje się w postaci łatwopalnej (natomiast tlenki plutonu używane w energetyce jądrowej są niepalne). Podczas pożaru w 1957 r. jedna część na 300 000 płonącego plutonu

uwolniła się do atmosfery w postaci pyłu. Po tym pożarze wprowadzono szereg zabezpieczeń, tak że przy dużo większym pożarze w 1969 r. do atmosfery uwolniła się tylko jedna część na 30 milionów spalonego plutonu [9]. Analizy bezpieczeństwa wskazują, że nowe zabezpieczenia zmniejszają znacznie nawet te niskie uwolnienia.

Wobec tego, że pożary i inne awarie będą dotyczyły tylko bardzo małej frakcji plutonu podlegającego corocznie procesom produkcyjnym, uwolnienia będą stanowiły dużo mniej niż jedną miliardową. Jest to mniej niż uwolnienia rutynowe dozwolone przez przepisy EPA i ich całkowity wpływ na zdrowie byłby mniejszy niż jeden zgon na stulecie w całych USA.

Jakie mogłoby być uwolnienie plutonu z basenów wypalonego paliwa w Fukushima?

W wypalonym paliwie znajduje się 8,9 kg izotopów plutonu na tonę paliwa, które pracowało przez 3 lata w reaktorze o mocy 1000 MWe. W basenach Fukushimy było 1300 zestawów paliwowych. Paliwo MOX było wykorzystywane tylko w reaktorze nr 3. Poza tym była to pierwsza partia MOX, pracowała w rdzeniu od września 2010 r., czyli pół roku, zatem łączna zawartość Pu-239 i Pu-240 mogła wynosić około 2,5 kg/t, a nie 8,9 kg/t albo nawet mniej, bo część Pu jest wypalana w czasie pracy reaktora. Przyjmując jednak, że całe paliwo w basenach EJ Fukushima mogłoby być wykonane jako paliwo MOX i pomijając wypalenie plutonu, przy wadze typowego zestawu paliwowego reaktora BWR równej 281 kg, otrzymamy łączną wagę paliwa w 1300 zestawach równą 365 ton, w tym $365 \cdot 8,9 \text{ kg} = 3250 \text{ kg}$ plutonu. Taką kilkakrotnie zawyżoną ocenę podają działacze antynuklearni, np. Helen Caldicott [10]. Dalej różnice między straszącymi czytelnika artykułami a rzeczywistością są większe, nie kilka, ale setki tysięcy razy. Wynikają one stąd, że np. dr Caldicott przelicza ilość plutonu w basenach na mikrodawki powodujące zachorowania na raka, nie uwzględniając szeregu zjawisk obniżających wchłonięcia plutonu.

Dopóki pluton nie osiągnie temperatury topnienia, wydzielenia z paliwa są pomijalnie małe. Dla dwutlenku plutonu temperatura topnienia to 2390°C, a temperatura wrzenia to 2800°C. Podgrzew wypalonego paliwa do tej temperatury w basenie paliwowym jest niemożliwy, bo odbiór ciepła w drodze konwekcji naturalnej w powietrze zatrzyma wzrost temperatury na znacznie niższym poziomie.

Według NUREG 1465 w przypadku stopienia rdzenia reaktora – a więc najcięższej możliwej awarii – frakcja plutonu, jaka wydzieliła się z paliwa BWR w zbiorniku reaktora, wynosi 0,0002, a w przypadku dalszego topienia rdzenia poza zbiornikiem dodatkowo 0,005 aktywności zawartej w całym rdzeniu. Gdyby paliwo w basenach uległo stopieniu i osiągnęło temperaturę wrzenia, to zgodnie

z wynikami doświadczeń, w których celowo topiono paliwo, frakcja plutonu uwolniona do atmosfery wyniosłaby 0,0052.

Przyjmując według NUREG 1465 maksymalnie możliwą frakcję uwolnienia plutonu do atmosfery wynoszącą 0,0052, otrzymujemy maksymalne hipotetycznie możliwe uwolnienie plutonu z basenów w Fukushima równe $3250 \cdot 0,0052 = 16,9$ kg Pu.

Biorąc pod uwagę usuwanie pyłu plutonu z warstwy powietrza nad ziemią wskutek normalnych zjawisk atmosferycznych nawet po uwolnieniu plutonu w mieście o gęstości zaludnienia takiej jak w Nowym Jorku oraz fakt, że z wchłoniętego plutonu tylko 15% pozostaje w płucach, okazuje się, że z plutonu uwolnionego hipotetycznie w Fukushima w płucach ludzi pozostałoby tylko

$$3250 \text{ kg} \cdot 0,0052 \cdot 0,15/100\ 000 = 0,025 \text{ gramów Pu.}$$

Zgodnie z pesymistyczną hipotezą, że każda dawka promieniowania jest szkodliwa, wywołałoby to $0,025 \text{ g}/0,0002 \text{ g}/\text{zachorowanie} = 125$ zachorowań na nowotwory. Wobec tego, że w Japonii gęstość zaludnienia wynosi $336 \text{ osób}/\text{km}^2$, liczba zachorowań wyniosłaby $125 \cdot 0,0336 = 4,3$ zachorowań. Byłaby to wielkość zupełnie nieznacząca w stosunku do normalnej częstości zachorowań na nowotwory z przyczyn naturalnych i niewykrywalna żadnymi metodami. Tokio jest oddalone od Fukushimy o 280 km. Stężenie plutonu przy typowych warunkach meteorologicznych (prędkość wiatru 4 m/s) w kierunku wiatru maleje 1000 razy przy wzroście odległości z 20 m do 1000 m. O zagrożeniu Tokio odległego o 280 km nie ma co mówić.

Podsumowanie zagrożeń rozpraszaniem plutonu w razie osuszenia basenów wypalonego paliwa w Fukushima

1. W czasie awarii w Fukushima nigdy nie było ucieczki wody z basenów wypalonego paliwa.
2. Temperatura topnienia dwutlenku plutonu jest tak wysoka, że nawet po utracie wody wypalone paliwo nie podgrzałoby się tak bardzo, by ją osiągnąć.
3. Póki paliwo jest w postaci stałej, uwolnienia plutonu są pomijalnie małe.

Literatura

1. Uranium 2005: Resources, Production and Demand, OECD/IAEA, NEA No 6098, Paris 2005.
2. Rezolucja Parlamentu Europejskiego (2007 / 2091 (INI) z 24 października 2007 r. o źródłach energii konwencjonalnej oraz technologiach energetycznych.
3. <http://www.cire.pl/item,122597,13,0,0,0,0,najnowsza-rezolucja-parlamentu-europejskiego-popiera-budowe-nowy.html>
4. <https://www.dw.com/en/european-parliament-backs-listing-nuclear-energy-gas-as-green/a-62377411.html>
5. Strupczewski A. Pluton: zagrożenia i wykorzystanie <https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/111416-pluton-zagrozenia-i-wykorzystanie.html>
6. ICRP (International Commission on Radiation Protection) Publication No. 19.
7. Cohen B.L., The Myth of Plutonium... http://ecolo.org/documents/documents_in_english/plutonium-bernard-cohen.html
8. Werli C i inni, 30-Y follow-up of a Pu/Am inhalation case, Radiation Protection Dosimetry (2014), pp. 1–8 doi:10.1093.
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_contamination_from_the_Rocky_Flats_Plant
10. „Prescription for Survival”. A Debate on the Future of Nuclear Energy Between Anti-Coal Advocate George Monbiot and Anti-Nuclear Activist Dr. Helen Caldicott, www.democracynow.org. March 30, 2011.

4. Gdyby dwutlenek plutonu wydostawał się ze stopionego paliwa, to ulotniłaby się tylko mała jego część, około 0,005 zawartości w paliwie.
5. Pył z cząstkami plutonu w ciągu godziny usuwany jest przez wiatr i osiada na powierzchni ziemi z warstwy powietrza, którym oddychają ludzie. W tym czasie nawet w mieście o gęstym zaludnieniu tylko 1 stutysięczna plutonu zostałaby wchłonięta drogą oddechową przez ludzi.
6. Z plutonu wchłoniętego przez oddychanie tylko około 15% pozostaje w płucach, reszta jest wydychana.
7. Dawka promieniowania przypadająca na rozpad atomu plutonu jest około 4 razy większa niż polonu Po-210. Polon Po-210 jest nieodłącznym składnikiem dymu papierosowego, jest wdychany przez palaczy papierosów i powoduje znaczące napromieniowanie ich organizmów. Mimo to ludzie nie boją się promieniowania, paląc papierosy.
8. Pluton wchłonięty drogą pokarmową jest 5000 razy mniej groźny niż wchłonięty podczas oddychania.

Wniosek: środki ostrożności stosowane przy wykorzystaniu plutonu w elementach paliwowych typu MOX są potrzebne. Nie ma natomiast podstaw do straszenia ludzi rzekomym możliwym wzrostem umieralności z powodu awarii basenów paliwowych w elektrowniach jądrowych, np. w Fukushima. Zabezpieczenia stosowane dziś przez energetykę jądrową są wystarczające.

W przyszłości, gdy pluton będzie stosowany jako zasadnicze paliwo w reaktorach powielających, będziemy też potrafili zabezpieczyć ludzkość przed jego szkodliwym działaniem, a zawarte w plutonie zasoby energii posłużą nam przez tysiące lat.

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)

Optyczne systemy monitorujące w obiektach jądrowych

Optical monitoring systems in nuclear facilities

Krzysztof Rzymkowski

Stowarzyszenie Ekologów na rzecz Energii Nuklearnej – SEREN

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono różne rodzaje i sposoby optycznego monitorowania materiałów jądrowych stosowane w Systemie Zabezpieczeń MAEA, rekomendowane w wymaganiach ochrony radiologicznej oraz przez organizacje transportu międzynarodowego.

Słowa kluczowe: Materiały radioaktywne, system urządzeń zamykania obserwacyjno-rejestrującego, optyczne urządzenie obserwacyjno-rejestrujące, monitorowanie.

Abstract: The paper presents various types and methods of optical monitoring systems of nuclear materials used in the IAEA Safeguards System recommended by radiation protection requirements and international transport organizations.

Keywords: Radioactive materials, Containment/Surveillance device (C/S device), optical surveillance, monitoring.

Wprowadzenie

Jedną z przyczyn powołania w czerwcu 1957 roku Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) z siedzibą w Wiedniu była obawa przed niekontrolowanym rozprzestrzenianiem i wykorzystaniem materiałów jądrowych zarówno w celach militarnych, jak i przestępczych. MAEA jest stałym, niezależnym organem ONZ, mającym prawo zawierania umów międzynarodowych. Zawierane umowy dotyczą zasad wprowadzenia systemu zabezpieczeń w każdym z państw-stron tych umów, uwzględniając różne warunki polityczne. Rozwijający się dynamicznie przemysł jądrowy spowodował ogromne rozszerzenie zakresu działania agencji. Obejmuje ona dzisiaj oprócz kontroli materiałów jądrowych przygotowywanie zaleceń międzynarodowych dotyczących ich ochrony fizycznej i ochrony radiologicznej, ochrony środowiska, transportu, współpracy naukowej, informacji o technikach jądrowych. Ponadto prowadzone są własne badania pozwalające udoskonalać techniki kontroli materiałów.

Ewolucja systemu zabezpieczeń

Rozwój przemysłu jądrowego, którego podstawowe działania polega na przetwarzaniu materiałów promieniotwórczych, spowodowało konieczność rozszerzenia ich kontroli

nie tylko pod kątem wykorzystania tych materiałów do celów militarnych i przestępczych, ale także ze względów ochrony radiologicznej i ochrony środowiska. Wymagało to opracowania i uzgodnienia nowych umów międzynarodowych stanowiących uzupełnienie już istniejących.

Dotychczas państwa-strony mogły zawierać z MAEA umowy jednego z trzech następujących rodzajów:

- o zabezpieczeniach wszechstronnych,
- o zabezpieczeniach ograniczonych,
- o zabezpieczeniach dobrowolnych.

Umowy uzupełniające są powiązane z umową o zabezpieczeniach wszechstronnych.

Umowa o zabezpieczeniach wszechstronnych (MAEA INFCIRC/153)

Jest to podstawowa umowa obejmująca kontrolą pełną działalność państwa w zakresie energii jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem wszystkich materiałów rozszczepialnych na terytorium całego państwa wraz z terytoriami znajdującymi się pod jego jurysdykcją z możliwością pełnego kontrolowania, czy materiały te nie zostały przesunięte z zastosowań pokojowych do wytwarzania broni jądrowej.

W 1992 roku postanowiono, że umowa o zabezpieczeniach wszechstronnych powinna obejmować wszystkie

materiały jądrowe znajdujące się w posiadaniu państwa. Postanowiono rozszerzyć uprawnienia MAEA o mechanizmy umożliwiające wykrywanie zarówno ewentualnych ukrytych (nie deklarowanych) działań, jak i nie deklarowanych materiałów jądrowych. Opracowano i podpisano rozszerzenie Traktatu NPT (*Non-Proliferation Treaty*), tzw. Protokół Dodatkowy (*Additional Protocol*), zapewniający MAEA pełną możliwość niezależnej weryfikacji wszystkich materiałów jądrowych (nie tylko rozszczepialnych), znajdujących się w posiadaniu państwa, oraz ujawnienia ewentualnych ukrytych (nie deklarowanych) działań. Dalszym rozszerzeniem traktatu jest tzw. umowa o małych ilościach (*Small Quantities Protocol – SQP*), wprowadzona po raz pierwszy w 1971 roku, a od roku 2005 stanowiąca integralną część traktatu. Zwiększyło to znacząco zakres kontroli.

Umowa o zabezpieczeniach ograniczonych (MAEA INFCIRC/66)

W niektórych krajach zabezpieczenia MAEA są stosowane tylko do materiałów jądrowych lub działań w zakresie energii jądrowej wymienionych w umowie. Działania MAEA sprowadzają się do kontroli, czy wymienione w układzie materiały jądrowe i elementy techniki jądrowej nie służą do wytwarzania broni jądrowej.

Umowa o zabezpieczeniach dobrowolnych (Voluntary Offer Agreement – VOA)

Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej nie dotyczy państw posiadających taką broń w czasie tworzenia systemu zabezpieczeń, tj. Stanów Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, Francji, ZSRR (obecnie Rosji), Chin (ChRL). Mogą one dobrowolnie zgłosić materiały jądrowe lub obiekty jądrowe do kontroli przez MAEA na warunkach ogólnych NPT. Pewne działania, np.: transfer materiałów jądrowych (głównie paliwa do elektrowni) do innych państw, są objęte kontrolą.

Rozszerzenie zakresu kontroli

Objęcie obowiązkiem kontroli wszystkich materiałów promieniotwórczych wraz z rozszerzeniem zakresu kontroli przy minimalnym zwiększeniu budżetu spowodowało poszukiwanie zarówno nowych metod, jak i nowego sprzętu koniecznych do realizacji nowych zadań. Rosnące nakłady finansowe na utrzymanie systemu zabezpieczeń przy wzrastającej ilości materiału jądrowego i szybki postęp technologiczny, umożliwiając również rozwijanie nowych technik nielegalnego pozyskiwania materiałów jądrowych, wymuszają wprowadzanie zmian w systemie zabezpieczeń. Celem zmian jest zwiększenie skuteczności systemu i lepsze wykorzystanie środków finansowych

i technicznych. Jednym z elementów osiągnięcia tego celu jest zmniejszenie działań rutynowych przez wprowadzenie działań kompleksowych dających sumaryczny wynik wszystkich działań kontrolnych w obiekcie i państwie. Rolę tę ma spełniać **zintegrowany system zabezpieczeń**. W zintegrowanym systemie zabezpieczeń przewidziano zmniejszenie niektórych działań weryfikacyjnych, wprowadzając między innymi inspekcje niezapowiedziane, losowy wybór kontrolowanych obiektów oraz rozbudowę automatycznych i zdalnie sterowanych systemów śledzących materiały promieniotwórcze. Przy wprowadzaniu systemu uzgadniane są odpowiednie procedury między danym państwem i MAEA.

W trakcie całego stopniowego wprowadzania zintegrowanego systemu zabezpieczeń MAEA nie może utracić ciągłości informacji o materiałach jądrowych i związanych z nimi działaniach i mieć możliwość wielostronnej weryfikacji uzyskiwanych danych oraz wyjaśniania niezgodności. W przypadku utraty jakiegokolwiek informacji konieczne jest natychmiastowe uruchomienie działań naprawczych, dostosowanych do powstałej sytuacji, włącznie z zaprzestaniem wprowadzenia systemu i powrotem do metod tradycyjnych, ale z uwzględnieniem Protokołu Dodatkowego.

Obecnie zintegrowany system zabezpieczeń jest wprowadzany w obiektach, których rutynowe działania są ustalone i niezmiennie, a używany materiał jądrowy jest w postaci elementów policzalnych (sztuk). Są to przede wszystkim reaktory energetyczne, reaktory badawcze, zestawy krytyczne, przechowalniki wypalonego paliwa.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki działań inspekcyjnych MAEA po kilku latach stopniowego wprowadzania zintegrowanego systemu zabezpieczeń. W ciągu kilku lat nastąpił wzrost ilości SQ materiału jądrowego o 23% przy wzroście liczby inspekcji o 12%.

Do Traktatu NPT przystąpiło dotychczas 184 państw. Zintegrowany system zabezpieczeń obowiązuje obecnie w 136 państwach (dane 2020).

Podana wartość znaczącej ilości materiału jądrowego SQ jest sumą SQ różnych materiałów jądrowych. Znacząca ilość materiału jądrowego (*Significant Quantity – SQ*) jest to przybliżona ilość materiału rozszczepialnego, dla której nie można wykluczyć prawdopodobieństwa budowy jądrowego urządzenia wybuchowego przy zastosowaniu różnych metod przetwarzania materiału. Ponieważ w czasie procesu produkcyjnego występują ubytki materiału, wartość SQ nie musi odpowiadać wartości masy krytycznej.

Po uzyskaniu większego doświadczenia w praktycznym działaniu zintegrowanego systemu zabezpieczeń przewidyuje się jego rozciągnięcie na krajowy system ewidencji i kontroli (*State system of accounting for and control – SSAC*) wszystkich materiałów promieniotwórczych znajdujących się na terenie danego państwa. Zwiększenie skuteczności i efektywności systemu zabezpieczeń należy osiągnąć, wykorzystując wszystkie dostępne środki. Rozwój systemu na poziomie krajowym jest wspomagany przez

Tabela 1. Działanie Departamentu Zabezpieczeń MAEA (źródło: IAEA Safeguards yearly statement 2021).
Table 1. Operation of the IAEA Department of Safeguards (source: IAEA Safeguards yearly statement 2021).

Rok	SQ	Liczba obiektów	Liczba inspekcji	Czas inspekcji [dni]
2012	183 767	692	1962	11 859
2013	188 500	699	1969	11 777
2014	193 167	704	2114	12 734
2015	200 110	709	2118	13 734
2016	204 073	709	2216	13 275
2017	208 889	715	2102	13740
2018	212 814	721	2195	13 611
2019	216 448	717	2179	13 139
2020	221 000	717	2034	12 766 (w tym 2400 dni kwarantanny)
2021	226 116	718	2201	14 648

Program Wsparcia Państw Członkowskich (*Member State Support Programme – MSSP*). Celem działań jest opracowanie we współpracy z MAEA zasad wprowadzenia zintegrowanego systemu do wszystkich obiektów cyklu paliwowego na poziomie krajowym. W Departamencie Zabezpieczeń MAEA powołano specjalną grupę roboczą zajmującą się opracowaniem zasad działania zintegrowanego systemu zabezpieczeń na poziomie krajowym.

Systemy obserwacyjno-rejestrujące

Systemy obserwacyjno-rejestrujące są szeroko stosowane w międzynarodowym systemie zabezpieczeń ze względu na swoją elastyczność, skuteczność, niskie koszty instalacji i eksploatacji. Systemy optyczne są najczęściej stosowane w miejscach, gdzie działania z użyciem materiałów jądrowych są rzadko prowadzone, np. przechowalniki wypalonego paliwa, obszary przeładunku paliwa i drogi transportu. Zwykle taki obszar jest obserwowany przez system dwóch kamer, tak by był on całkowicie pokryty i każde działanie powiązane z materiałem jądrowym można by było zidentyfikować. Częstotliwość rejestracji obrazów (*Picture-taking-interval*) powinna być większa od najszybszych przewidywanych zmian położenia materiału jądrowego. Rejestracja może być również wyzwalana przez detektor ruchu lub zewnętrzne sygnały z detektorów promieniowania lub naruszenia plomb. Do określenia kierunku przemieszczania się przedmiotu potrzebne są dwa kolejne obrazy.

System obserwacyjny pracuje bezobsługowo. W nowocześniejszych systemach zarejestrowane obrazy mogą być przesyłane automatycznie do ośrodków MAEA. Początkowo w optycznych systemach monitorujących stosowano analogową rejestrację obrazów, a w miarę rozwoju technik wprowadzono powszechnie zapis cyfrowy. Posiada on szereg istotnych zalet: wysoką niezawodność, lepszą jakość rejestracji, usprawnienia oceny zebranych danych poprzez

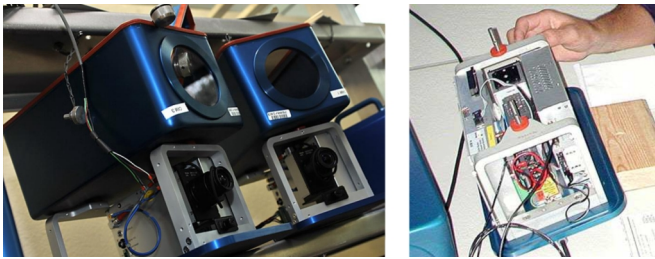
możliwość zautomatyzowania przeglądu rejestrowanych obrazów, wprowadzenie zdalnego sterowania i przeglądu rejestrowanych danych, poprawa identyfikacji (zapewnienie, że oryginalna informacja pochodzi ze znanego źródła (czujnika) i nie była zmieniana, usunięta lub zamieniona), szyfrowanie danych (kilkukrotne przetworzenie informacji uniemożliwiającej jej odczytanie bez znajomości odpowiednich kluczy). Obecnie używane systemy są budowane z wykorzystaniem pojedynczych kamer lub sieci wielu kamer z możliwością zdalnego monitoringu.

Aparatura używana do obserwacji i rejestracji jest opracowywana specjalnie dla systemu zabezpieczeń i stale ulepszana. Musi ona spełniać określone warunki fizyczne, np. być nieczuła na promieniowanie jonizujące, spełniać wymagania dotyczące jakości obrazu, pojemności pamięci, szybkości rejestracji z uwzględnieniem daty i czasu wykonania zdjęcia, niezawodności ze szczególnym uwzględnieniem warunku pracy ciągłej, wymagań temperaturowych, odporności wilgotnościowej oraz posiadać możliwość długotrwałej pracy przy zasilaniu awaryjnym z wewnętrznej baterii itd. Ponadto aparatura musi spełniać konkretne wymagania systemu zabezpieczeń stosowanych w danym obiekcie. Kamery rejestrujące są umieszczane w różnych miejscach i w zależności od dostępu do kamery musi być uwzględniona łatwość jej obsługi – inna dla miejsc trudno dostępnych, inna dla łatwo dostępnych. Niekiedy kamery są instalowane jako urządzenia czasowe, tylko na krótki okres w celu uzupełnienia systemu stacjonarnego. Czasem wymagane są systemy wielokamerowe sterowane za pomocą specjalnie opracowanej jednostki centralnej. Sposób zapisu obrazów w takich systemach wymaga specjalnego przygotowania zarejestrowanych informacji przed ich analizą. Stosowane są również systemy zdalnie sterowane obserwujące procesy produkcyjne, a także systemy do obserwacji podwodnych w basenach wypalonego paliwa.

Pierwszym optycznym systemem obserwacyjno-rejestrującym był system fotograficzny PHSR (*Photo Surveillance Recording*) składający się z dwóch amatorskich kamer firmy Minolta sterowanych przez dodany do każdej z nich zegarowy wyzwalacz, który powoduje jej uruchomienie. Ze względu na zawodność i konieczność zwiększenia precyzji dodano w tej samej plombowanej obudowie trzecią kamerę. Do czasu wprowadzenia zmiany inspektor był zobowiązany do posiadania w czasie inspekcji kamery zapasowej.

Znacznym ulepszeniem systemu zabezpieczeń było wprowadzenie urządzeń obserwacyjno-rejestrujących z zapisem analogowym na taśmie magnetycznej z możliwością tworzenia systemów wielokamerowych.

Bezpośrednim następcą systemu PHSR była próba zastosowania tzw. systemu psychotronicznego wykorzystującego telewizyjną technologię wideo. Zaletą tego rozwiązania była możliwość oddzielenia kamery od systemu zapisującego – rejestratora i możliwość szybkiego przejścia taśmy w obiekcie w trakcie inspekcji.



Rys. 1. ALIS – *All In One Surveillance* zasilany z sieci elektrycznej obiektu (źródło: [6]).

Fig. 1. ALIS – *All In One Surveillance* powered from the facility's electrical network (source: [6]).



Rys. 2. SDIS – *Server Digital Image Surveillance* z możliwością rejestracji danych z sześciu kamer i odczytem danych z plomb elektronicznych (źródło: [6]).

Fig. 2. SDIS – *Server Digital Image Surveillance* with the possibility of data recording from six cameras and data reading from electronic seals (source: [6]).

Rozwinięciem tego rozwiązania był system STAR (*Surveillance Television and Recording*) będący systemem telewizyjnym pracującym w układzie zamkniętym (*Closed Circuit TV – CCTV*), w którym obraz z dwóch kamer jest zapisywany w systemie podzielonego ekranu (*Split Screen*). Na monitorze, oprócz rejestrowanego obrazu, wyświetlana jest również informacja o stanie systemu. Jest to pomocne przy instalowaniu i kontroli systemu. System jest często wykorzystywany do weryfikacji tożsamości paliwa w basenach.

Najbardziej rozpowszechnionym systemem analogowym był system MIVS (*Modular Integrated Video System*). System składa się z kamery oddalonej zwykle od zestawu rejestrującego, w którym informacja zapisywana jest na dwóch magnetowidach w celu zapewnienia większej niezawodności działania. Ze względu na długie połączenie kablowe między kamerą a rejestratorem zastosowano specjalny sposób identyfikacji autentyczności nagrania wykrywający wszelkie próby włamania do systemu.

Do zapewnienia obserwacji krótkotrwałych działań używany jest przenośny system MINSTAR składający się z kamery i rejestratora z zasilaniem akumulatorowym.

Bardzo rozbudowany jest tzw. system CANDU – MULTPLEKS składający się 10 kamer, używany do obserwacji działań w kilku pomieszczeniach, np. w zakładach wzbogacania. Stosowane są również systemy telewizyjne do obserwacji działań podwodnych UWTV – *Under Water TV*, np. identyfikacji paliwa w otwartym rdzeniu reaktora.

Postęp technologiczny spowodował stopniową całkowitą wymianę sprzętu z zapisem analogowym używanego w systemie zabezpieczeń na aparaturę cyfrową. Systemy cyfrowe nawet bardzo rozbudowane są konstruowane z tanich półprzewodnikowych komponentów i są bardziej niezawodne. Ponadto wykorzystywane w nich techniki komputerowe umożliwiają wprowadzenie bardzo wielu dodatkowych funkcji, zwiększając elastyczność, obsługę i kontrolę systemu.

W zasadzie stosowane są dwa rodzaje systemów (obecnie głównie cyfrowych) obserwacyjno-rejestrujących: systemy jedno- i wielokamerowe.

Podstawową kamerą cyfrową wykorzystywaną w systemach jedno- i wielokamerowych był moduł kamery cyfrowej DCM-14 (*Digital Camera Module*).

W systemach jednokamerowych stosowanych w łatwo dostępnych lokalizacjach wykorzystywane są uniwersalne moduły:

ALIS – *All In One Surveillance* zasilany z sieci elektrycznej obiektu,

ALIP – *All In One Surveillance Portable* do krótkotrwałych obserwacji, posiadający własne zasilanie akumulatorowe i używany podobnie jak przenośny system MINSTAR.

W lokalizacjach, w których dostęp do obserwacji materiału jądrowego jest utrudniony, stosowany jest system

DSOS – *Digital Single – Camera Optical Surveillance*, kamera połączona jest specjalnym kablem z oddalonym od niej rejestratorem. System jest odpowiednikiem systemu MIVS.

W systemie zabezpieczeń stosowanych jest kilka rodzajów rozwiązań systemów wielokamerowych:

SDIS – *Server Digital Image Surveillance* z możliwością rejestracji danych z sześciu kamer i odczytem danych z plomb elektronicznych,

DMOS – *Digital Multi-Camera Optical Surveillance System* z możliwością rejestracji danych z szesnastu kamer.

Liczba pracujących systemów jest znaczna i rejestrują one ogromne ilości danych wymagających przeglądu i interpretacji. Do tego celu opracowano specjalistyczne oprogramowanie GARS – *General Advanced Review Station* dostosowane do rozpowszechnionej kamery cyfrowej DCM-14.

W opracowywanym i wprowadzanym systemie nowej generacji (*Next Generation Surveillance System – NGSS*) dotychczas używane powszechnie kamery DMC-14 zastępowane są ulepszoną wersją. Będą to kamery typu PTZ (*Pan/Tilt/Zoom* – kamera z funkcją obrotu zarówno w pionie, jak i w poziomie z regulacją ogniskowania), pozwalające rejestrować i przysyłać obrazy w kolorze o profesjonalnej jakości, sterowane zdalnie z możliwością ustawiania kierunku obserwacji i zbliżeń interesujących fragmentów obrazu. W nowym systemie poprawiono sygnalizację sabotażu (włamania do systemu) i wprowadzono zapis informacji w 4 oddzielnych kanałach, każdy z różnymi wyzwalaczami i interwałami wykonywania zdjęć. Kamera NGSS umożliwia zapis obrazów kolorowych (5 Mpiksel). Minimalny czas pomiędzy kolejnymi zdjęciami wynosi 1 s. Pole widzenia kamery obejmuje 180°. Kamera posiada bardzo rozbudowaną elektronikę umożliwiającą ustawienie różnych wariantów rejestracji, szyfrowanie informacji, ustawienie wysokiej rozdzielczości wybranego segmentu w polu widzenia, a także umożliwiającą korektę obrazu na skrajach pola widzenia. Kamera może wykonywać zdjęcia nawet przy bardzo słabym oświetleniu. Kamera jest wyposażona w system wykrywania włamań do wnętrza jej obudowy. Oczywiście wszystkie rozwiązania są kompatybilne do wcześniejszych konstrukcji.

Ze względu na możliwość prawie ciągłej obserwacji i kontroli ruchu materiałów jądrowych, a także obserwacji różnych działań z nimi związanych systemy obserwacyjno-rejestrujące stały się jednym z najważniejszych sposobów kontroli. Aktywnych jest ponad 1000 kamer w różnych systemach kontroli.

W nowo powstających różnorodnych konstrukcjach małych reaktorów modułowych (SMR) w celu uzupełnienia ewidencji materiałowej i kontroli przepływu materiału systemy obserwacyjno-rejestrujące będą głównym elementem systemu zabezpieczeń. Na przykład w pewnych

przypadkach, gdy załadunek paliwa do rdzenia reaktora i jego zaplombowanie ma nastąpić u producenta (reaktory iPWR), 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.



Rys. 3. DSOS – *Digital Single – camera Optical* kamera połączona jest specjalnym kablem z oddalonym od niej rejestratorem. System jest odpowiednikiem systemu (źródło: [6]).

Fig. 3. DSOS – *Digital Single – Camera Optical* the camera is connected with a special cable to the remote recorder. The system is the equivalent of the system MIVS (source: [6]).



Rys. 4. DMOS – *Digital Multi-Camera Optical Surveillance System* z możliwością rejestracji danych z szesnastu kamer oddalonych od nich rejestratorem. System jest odpowiednikiem systemu MIVS (źródło: [6]).

Fig. 4. DMOS – *Digital Multi-Camera Optical Surveillance System* with the possibility of recording data from sixteen cameras distant from recorder. The system is the equivalent of the system MIVS (source: [6]).

Zintegrowany system zabezpieczeń

Po wprowadzeniu zintegrowanego systemu zabezpieczeń rola urządzeń obserwacyjno-rejestrujących w procesie kontroli materiałów promieniotwórczych bardzo wzrosła. Umożliwiają one wykrycie przemieszczeń materiału jądrowego, potwierdzenie deklaracji o dostawach paliwa lub innych działań, np. manipulację przy urządzeniach MAEA, usuwanie plomb. Rozmieszczenie kamer pozwala śledzić wszystkie istotne z punktu widzenia systemu zabezpieczeń obszary obiektu. Przy tradycyjnym stosowaniu urządzeń dane zbierane były przez cały okres międzyinspekcyjny. Zapisane informacje były ewaluowane po zakończeniu inspekcji w siedzibie MAEA lub w biurze regionalnym. Wymagało to częstych inspekcji i wymiany nośników informacji, co przy zainstalowaniu kilku systemów rejestrujących w obiekcie znacznie podnosiło koszty kontroli. W zintegrowanym systemie zabezpieczeń kamery umieszczane są tylko w najistotniejszych punktach i zapis informacji przebiega w sposób ciągły bez wymiany nośnika. Odczyt informacji dokonywany jest w trakcie inspekcji. Sprawdzany jest zapis ostatnich kilku dni. Przy losowym wyborze obiektów kontroli i zbieraniu całościowej informacji o działaniach w obiekcie w dalszym ciągu zostaje zachowana możliwość wykrycia nieuprawnionych działań. Dodatkowym wzmocnieniem zintegrowanego systemu zabezpieczeń jest wprowadzenie zdalnego monitoringu (systemu obserwacyjno-rejestrującego) pracującego w sposób ciągły z możliwością jednoczesnej transmisji rejestrowanych obrazów poprzez łącza satelitarne do siedziby MAEA oraz do jej biur regionalnych. Wykorzystanie tego rozwiązania jest szczególnie istotne przy przeładunku rdzenia lub przetransportowywania wypalonego paliwa z basenu i może być połączone z inspekcjami niezapowiadany. Zdalny monitoring jest również wykorzystywany w obiektach związanych z produkcją i przerobem paliwa.

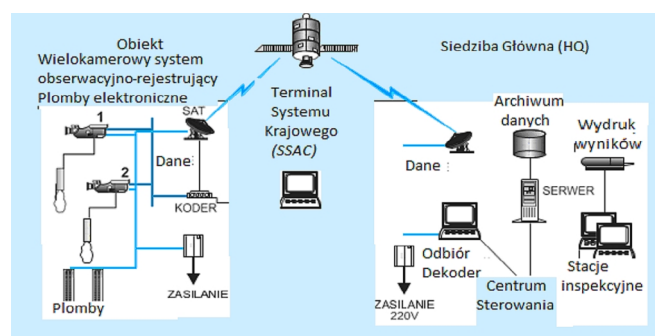
Zdalne sterowanie aparaturą kontrolną

W systemie zabezpieczeń zdalne sterowanie aparaturą kontrolną początkowo polegało na przesyłaniu danych zbieranych przez systemy obserwacyjno-rejestrujące i systemy plombowania oraz pomiarowe systemy bezobsługowe poza granice obiektu do centrali MAEA lub jej ośrodków regionalnych. Pierwsze próby przeprowadzono w końcu lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Celem wprowadzenia zdalnego sterowania było zmniejszenie liczby inspekcji, z których część polegała jedynie na zebraniu danych z przyrządów pomiarowych, co wymagało dodatkowej obsługi

systemu pomiarowego, wymiany plomb itd. Wprowadzenie zdalnego sterowania poprawiło terminowość opracowywania raportów, pozwoliło skrócić czas wykrywania awarii systemu pomiarowego i przyspieszyło podejmowanie działań naprawczych, zwiększając efektywność systemu zabezpieczeń. Techniczne możliwości systemu umożliwiają zdalne wprowadzenie operacji korygujących pracę systemów pomiarowych bez bezpośredniej ingerencji techników w obiekcie. Dodatkową zaletą wprowadzenia zdalnego sterowania jest możliwość przeprowadzenia odczytu zebranych danych w wybranym dogodnym czasie bez angażowania personelu obiektu w przygotowanie inspekcji i podobnie jak przy użyciu systemów bezobsługowych, zmniejszenie narażenia na promieniowanie członków zespołu inspekcyjnego. Dotychczasowe pozytywne wyniki stosowania zdalnego sterowania, szczególnie w powiązaniu z systemami bezobsługowymi, pozwalają przypuszczać, że systemy te będą rozwijane dynamicznie. Jednym z powodów jest wzrastająca liczba nowych obiektów jądrowych i modernizacja systemów kontroli w już istniejących. Przewiduję się, że liczba rozbudowanych systemów zdalnego sterowania w krótkim czasie wzrośnie dwukrotnie. W 2010 roku działały 93 systemy bezobsługowe i 140 systemów obserwacyjno-rejestrujących połączonych z **centrum zdalnego sterowania RMDC (Remote Monitoring Data Centre)** w centrali MAEA.

Obecnie wszystkie pracujące systemy używają do połączeń wewnątrzobiektowych różnych rozwiązań. Połączenia z centralą są dokonywane za pomocą znormalizowanych łączy naziemnych **PSTN**¹, **ISDN**², **ADSL**³ i połączeń satelitarnych.

Centrum zdalnego sterowania RMDC zapewnia rzetelne i bezpieczne przesyłanie informacji między obiektem a centralą i jest wyposażone w wiele pomocniczych funkcji



Rys. 5. Zdalny system obserwacyjny (źródło: MAEA ISBN 92-0-103097-5).

Fig. 5. Remote monitoring system (source: MAEA ISBN 92-0-103097-5).

- ¹ PSTN (*public switched telephone network*) – publiczna komutowana sieć telefoniczna zapewniająca infrastrukturę (linie telefoniczne, światłowodowe, łącza transmisji mikrofalowej, sieci komórkowe, satelity komunikacyjne i telefoniczne kable podmorskie) i usługi publiczne dla telekomunikacji o zasięgu światowym (przyp. red.).
- ² ISDN (*integrated services digital network*) – sieć cyfrowa usług zintegrowanych to zestaw standardów komunikacyjnych do jednoczesnej cyfrowej transmisji głosu, obrazu, danych i innych usług sieciowych przez cyfrowe obwody publicznej komutowanej sieci telefonicznej PSTN (przyp. red.).
- ³ ADSL (*asymmetric digital subscriber line*) – asymetryczna cyfrowa linia abonencka, rodzaj technologii przesyłania danych, która umożliwia szybszą ich transmisję (przyp. red.).

ułatwiających kontrolę jakości przesyłanej informacji, np. wykrywanie błędów w zapisie – braku scen. Do transmisji informacji wykorzystywane są najnowsze protokoły. Na podstawie zbieranych informacji o pracy systemów pomiarowych przeprowadzana jest na bieżąco analiza.

Podsumowanie

System zabezpieczeń wymaga stałego unowocześniania i ulepszania krajowych systemów kontroli materiałów jądrowych, zwiększenia efektywności i sprawności kontroli materiałów jądrowych i promieniotwórczych, ulepszenia i modernizowania krajowych regulacji prawnych oraz ich ścisłego powiązania z systemami międzynarodowymi. Dotyczy to w szczególności procedur powiadamiania o kradzieży czy akcie sabotażu oraz wzmocnienia systemów kontroli handlu materiałami jądrowymi w celu eliminacji ich nielegalnego obrotu i przemytu.

Notka o autorze

Dr inż. Krzysztof Rzymkowski – ukończył Politechnikę Warszawską w 1968 roku. Od tego czasu był związany z techniką jądrową (Zakład Doświadczalny Biura Urzędzeń 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. Darryl D. Drayer, Cecil S. Sornier, Dennis L. Mangen, F. Walforc, *Redundant and Independent Containment and Surveillance* Sandia Lab. 1990.
2. *Safeguard Techniques and Equipment Series 1* IAEA Vienna 1997.
3. M. Zindel, M. Moeslinger, *IAEA Safeguards Equipment*, IAEA Vienna 2007.
4. *Safeguard Techniques and Equipment Series 1* IAEA Vienna 2011.
5. *Advanced Surveillance, Diagnostic and Prognostic Techniques in monitoring Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants* IAEA No. NP-T – 3.14 Vienna 2013.
6. Heidi A. Smartt, *Remote Monitoring Systems/Remote Data Transmission for International Nuclear Safeguards*, Sandia Lab, 2022.

Zdarzenia związane z promieniowaniem jonizującym w praktyce Państwowej Straży Pożarnej – obserwacja 7-letnia

Ionizing radiation incidents in State Fire Service practice – 7 year observation

Łukasz Dudziński¹, Marcin Glinka², Tomasz Kubiak³, Mariusz Feltynowski⁴

¹ Akademia Białska Nauk Stosowanych im. Jana Pawła II

² Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Warszawa

³ Akademia Nauk Stosowanych im. Księcia Mieszka I, Poznań

⁴ Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa

Streszczenie: W pracy wykorzystano dane pochodzące z Systemu Wspomagania Decyzji Państwowej Straży Pożarnej (SWD PSP), które autorom udostępniło Biuro Planowania Operacyjnego (BPO) przy Komendzie Głównej Państwowej Straży Pożarnej (KG PSP).

Dominującą przyczyną interwencji strażaków było wzbudzenie stacjonarnego urządzenia radiometrycznego w składowisku/spalarni odpadów, gdy samochód (śmieciarka) wjeżdżał na teren zakładu przez tzw. bramkę dozymetryczną. W każdym przypadku wzbudzenia alarmu przez bramkę dozymetryczną auto było kierowane na parking przez ochronę zakładu zgodnie z wewnętrznymi procedurami bezpieczeństwa. Wykryty przez bramkę materiał promieniotwórczy znajdował się każdorazowo w przestrzeni ładunkowej samochodu, były to przewożone odpady.

Słowa kluczowe: Państwowa Straż Pożarna, promieniowanie, zagrożenie radiacyjne.

Abstract: The work uses data from the Decision Support System of the State Fire Service (SWD PSP), which was made available to the authors by the Operational Planning Office (BPO) at the Headquarters of the State Fire Service (KG PSP).

The dominant reason for the intervention of firefighters was the triggering of a radioactive radiation detection alarm in a landfill / waste incineration plant when a car (garbage truck) was entering the plant. Whenever an alarm was triggered by the radiation portal monitor (RPM) the car was directed to the parking lot by the plant security in accordance with internal security procedures. The radioactive material detected by the RPM was each time in the car load, it was the waste being transported.

Keywords: State Fire Service, radiation, radiation hazard.

1. Wstęp

Zdarzenia radiacyjne w praktyce Państwowej Straży Pożarnej (PSP) nie są częstym rodzajem zagrożenia. W zdarzeniach związanych z promieniowaniem jonizującym lub skażeniem promieniotwórczym istotne jest współdziałanie wielu instytucji i służb, w tym PSP. Jednostkami przeznaczonymi do tego typu zagrożeń w PSP są Specjalistyczne Grupy Ratownictwa chemiczno-ekologicznego (SGRchem-eko), posiadające odpowiednio przeszkolonych, zabezpieczonych ratowników wyposażonych w odpowiedni sprzęt pomiarowy, którzy swoje działania realizują zgodnie z odpowiednimi procedurami. Działania PSP w tego typu zdarzeniach ograniczają się do

identyfikacji zagrożenia, wyznaczenia strefy awaryjnej i ewakuacji poszkodowanych [1].

W PSP funkcjonują SGR o różnych specjalizacjach, w tym: ratownictwa technicznego, wodno-nurkowego, wysokościowego, poszukiwawczo-ratownicze oraz ratownictwa chemiczno-ekologicznego. Są to grupy funkcjonujące w trybie stałym. Dodatkowo od 2021 roku w PSP funkcjonują grupy ratownictwa medycznego (GRMed), które tworzone są w obszarze województwa doraźnie, w szczególności na potrzeby działań ratowniczych, ćwiczeń i szkoleń. Są to grupy o charakterze interwencyjnym tworzone z funkcjonariuszy z wykształceniem medycznym będących aktualnie na służbie [2].

2. Specjalistyczne Grupy Ratownictwa chemiczno-ekologicznego w Państwowej Straży Pożarnej

SGRchem-eko realizuje czynności niezbędne do zmniejszenia lub likwidacji bezpośrednich zagrożeń stwarzanych przez substancje niebezpieczne dla ludzi, zwierząt, mienia i środowiska. W ich kompetencjach jest rozpoznanie i identyfikacja zagrożenia, wyznaczenie strefy działań ratowniczych, wyznaczenie i oznakowanie strefy zagrożenia (w tym zwiększanie i zmniejszanie), dodatkowo włączanie/wyłączanie instalacji, urządzeń i mediów mających wpływ na bezpieczeństwo poszkodowanych i ratowników, ograniczanie wycieków substancji chemicznych, paliw, neutralizacja substancji niebezpiecznych w budynkach, zakładach przemysłowych, na drogach, akwenach, ciekach. W ramach działań ratowniczych konieczne jest dotarcie i wykonanie dostępu do zagrożonych lub poszkodowanych osób, ewakuacja poszkodowanych poza strefę zagrożenia, realizacja medycznych działań ratowniczych (MDR), dekontaminacja poszkodowanych i ratowników oraz wiele innych. W PSP funkcjonuje 50 SGRchem-eko, wykaz prezentuje tabela 1 [3, 4].

2.1. Dysponowanie SGRchem-eko

Dysponowanie sił i środków (SIS) w zakresie podstawowym ratownictwa chemicznego i ekologicznego do zdarzenia chemicznego i ekologicznego oraz domniemania takiego zdarzenia następuje zgodnie z procedurami dysponowania. Odpowiednie stanowiska kierowania dysponują do zdarzenia chemicznego zastępy z jednostek ratowniczo-

-gańniczych (JRG) PSP lub jednostki, które zadeklarowały w swojej gotowości operacyjnej zdolność do realizacji zadań ratownictwa chemicznego i ekologicznego w zakresie podstawowym. Szczegółowe zasady dysponowania zawarte są w „Ramowych wytycznych Komendanta Głównego PSP do opracowania procedur dysponowania sił i środków KSRG oraz zasad doraźnego zabezpieczenia operacyjnego terenu powiatu po zadysponowaniu zasobów ratowniczych”, będących narzędziem pomocniczym dyżurnych dyspozytorów stanowisk kierowania (SK) PSP.

Teren działań SGRchem-eko stanowi odcinek bojowy, którego dowódcą jest dowódca SGRchem-eko, inny niż kierujący działaniem ratowniczym (KDR), który przyjechał jako pierwszy na teren działań (z lokalnych zastępów PSP). Po przyjeździe na miejsce SGR, siły i środki z zakresu podstawowego jednostek ochrony przeciwpożarowej (JOP) realizują pomocnicze czynności ratownicze oraz współpracują w zakresie możliwości sprzętowych i zadań przewidzianych do tego poziomu ratownictwa [5].

3. Procedury postępowania w przypadku wystąpienia zagrożenia radiacyjnego

Aby wyznaczyć strefę zagrożenia, należy wykonać specjalistyczne pomiary. Podczas posługiwania się ręcznymi urządzeniami radiometrycznymi przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów, niezależnie od rodzaju przyrządu, strażacy kontrolują prawidłowe działanie urządzeń - sprawdzają ogólny stan przyrządu (ewentualne uszkodzenie mechaniczne, stan detektorów itp.), sprawdzają stan baterii/akumulatorów zasilających. Przyrząd uruchamiany

Tabela 1. Specjalistyczne Grupy Ratownictwa chemiczno-ekologicznego w PSP wg województw (źródło: SWD-PSP 2022 [3]).

Table 1. Specialist chemical and ecological rescue groups in the State Fire Service by provinces.

Województwo	Liczba SGR	Miasta, w których funkcjonują SGR
Dolnośląskie	3	Wrocław, Legnica, Wałbrzych
Kujawsko-pomorskie	3	Toruń, Bydgoszcz, Włocławek
Lubelskie	3	Lublin, Biła Podlaska, Zamość
Lubuskie	2	Gorzów Wielkopolski, Zielona Góra
Łódzkie	2	Łódź, Piotrków Trybunalski
Małopolskie	5	Tarnów, Kraków, Nowy Sącz, Nowy Targ, Oświęcim
Mazowieckie	6	Warszawa, Radom, Płock, Ciechanów, Siedlce, Ostrołęka
Opolskie	2	Opole, Kędzierzyn-Koźle
Podkarpackie	2	Rzeszów, Leżajsk
Podlaskie	1	Białystok
Pomorskie	4	Gdynia, Starogard, Kwidzyna, Bytów
Śląskie	4	Bielsko-Biała, Częstochowa, Gliwice, Katowice
Świętokrzyskie	3	Kielce, Ostrowiec, Skarżysko-Kamienna
Warmińsko-mazurskie	3	Olsztyn, Ełk, Elbląg
Wielkopolskie	5	Poznań, Piła, Ostrów, Konin, Leszno
Zachodniopomorskie	2	Szczecin, Koszalin

jest zawsze w znacznej odległości od planowanego miejsca wykonywania pomiarów tak, aby można było zmierzyć poziom naturalnego tła promieniowania, a dopiero następnie z włączonym przyrządem zbliżyć się w kierunku źródła promieniowania. Procedura ta jest analogiczna w przypadku innych urządzeń pomiarowych: toksymetrów i ekspozymetrów.

Wyznaczenie strefy zagrożenia radiacyjnego:

- granicę strefy wyznacza się w miejscu, w którym
 1. moc dawki nie przekracza 100 Sv/h,
 2. przy zarejestrowaniu skażeń promieniotwórczych nieprzekraczających:
 - a. 1000 Bq/cm² dla izotopów gamma i beta promieniotwórczych,
 - b. 100 Bq/cm² dla izotopów alfa promieniotwórczych;
- wielkość strefy nie może być mniejsza niż 3 m od źródła,
- w przypadku działań na terenie otwartym zaleca się wyznaczyć strefę od źródła w odległości 30 m,
- w sytuacji wybuchu, pożaru, powstających obłoków dymu strefę bezpieczną po rozpoznaniu sytuacji wyznacza się w odległości 300 m,
- w przypadku zdarzeń w obiektach za granicę strefy należy przyjąć ściany pomieszczenia/budynku, jeśli spełnione są warunki (mniej niż 100 Sv/h i nie mniej niż 3 m [6, 7].

4. Urządzenia pomiarowe wykorzystywane przy zagrożeniu radiacyjnym

Przyrządy do pomiaru promieniowania jonizującego (radiometry) to urządzenia służące m.in. do pomiaru dawki lub mocy dawki promieniowania, które dzielą się na: sygnalizatory ostrzegające o przekroczeniu dawki lub mocy dawki progowej oraz radiometry służące do pomiaru mocy dawki [8]. Urządzenia będące w wyposażeniu SGRchem-eko i ich rozmieszczenie pokazano na rysunkach 1–3.



Rys. 1. Elektroniczne dawkomierze indywidualne znajdujące się w wyposażeniu PSP (źródło: archiwum prywatne autorów).

Fig. 1. Electronic individual dosimeters, included in the equipment of the PSP.



Rys. 2. Rozmieszczenie sprzętu pomiarowego w lekkim samochodzie specjalnym rozpoznania chemicznego (źródło: archiwum prywatne autorów).

Fig. 2. Arrangement of measuring equipment in a light special chemical reconnaissance vehicle.



Rys. 3. Przyrządy radiometryczne przeznaczone do pomiaru mocy dawki promieniowania jonizującego znajdujące się w wyposażeniu PSP (źródło: archiwum prywatne autorów).

Fig. 3. Dose rate monitors for measuring the ionizing radiation dose rate, included in the PSP equipment.

Po zlokalizowaniu źródła promieniowania istotna jest kontrola poziomu ewentualnych skażeń promieniotwórczych. Ustawa – Prawo atomowe w obecnej treści (art. 83b ust. 1) określa konieczność zabezpieczenia miejsca zdarzenia przy zarejestrowaniu skażeń na poziomie:

- 1000 Bq/cm² dla izotopów gamma i beta promieniotwórczych,
- 100 Bq/cm² dla izotopów alfa promieniotwórczych.

W miejscach pracy z otwartymi źródłami promieniotwórczymi bardzo ważnym elementem bezpieczeństwa jest ciągły monitoring skażeń promieniotwórczych i substancji promieniotwórczych znajdujących się poza źródłem ich rozprzestrzeniania się. Skażenia promieniotwórcze mogą powstać, gdy zostanie rozsypana lub rozlana substancja promieniotwórcza na powierzchni roboczej, podłożu czy odzieży. Skażenia nie muszą być niebezpieczne, gdy zostaną zlokalizowane i określi się ich poziom, ale muszą być natychmiast usunięte, jeżeli istnieje możliwość

szybkiego ich rozprzestrzenienia się, np. w sytuacji, gdy do skażenia doszło w miejscu ogólnie dostępnym. Kontrola skażeń promieniotwórczych odbywa się za pomocą monitorów skażeń promieniotwórczych – np. monitora skażeń promieniotwórczych typu EKO-C lub radiometru RKP-2 [8].

W przypadku narażenia zewnętrznego najistotniejszym czynnikiem jest moc dawki promieniowania jonizującego, którą należy stale monitorować. Służy do tego sprzęt radiometryczny przeznaczony do pomiarów mocy dawki promieniowania jonizującego. Urządzenia pomiarowe będące na wyposażeniu PSP podlegają corocznemu wzorcowaniu (tj. raz na 12 miesięcy) w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dn. 23 grudnia 2002 roku.¹

5. Zagrożenia radiacyjne w praktyce PSP

W pracy wykorzystano dane pochodzące z Systemu Wspomagania Decyzji Państwowej Straży Pożarnej (SWD PSP), które autorom udostępniło Biuro Planowania Operacyjnego (BPO) przy Komendzie Głównej Państwowej Straży Pożarnej (KG PSP). Materiał poddany analizie obejmuje lata 2015–2021. Uzyskano zgodę dyrektora BPO na dostęp do danych. Analizowano przestrzenne oraz statystyczne działania JOP, w tym SGRchem-eko, w zdarzeniach z zagrożeniem radiacyjnym.

Zdarzenia związane z zagrożeniem radiacyjnym są niewielką częścią wszystkich interwencji SGRchem-eko, co uwzględniono w tabeli 2.

W 7-letniej analizie wystąpiły 82 zdarzenia związane z zagrożeniem radiacyjnym, szczegółowe przyczyny dysponowania PSP prezentuje tabela 3.



Rys. 4. Zdarzenia związane z zagrożeniem radiacyjnym w praktyce polskich PSP w okresie objętym analizą (źródło: opracowanie własne na podstawie danych SWD-PSP).

Fig. 4. Radiation threat events in the practice of Polish State Fire Service in the period covered by the analysis.

Tabela 2. Rozkład zdarzeń związanych z zagrożeniem radiacyjnym w poszczególnych latach analizy vs wszystkie działania SGRchem-eko (źródło: opracowanie własne na podstawie danych SWD-PSP).

Table 2. Distribution of radiation events in the individual years of the analysis vs all SGRchem-eko activities.

Kolejny rok analizy	Wszystkie interwencje SGR chem-eko	Interwencje do zagrożeń radiacyjnych*
2015	821	12
2016	939	17
2017	1213	5
2018	1428	5
2019	1448	9
2020	1472	19
2021	1075	15

* W części zdarzeń reagowały lokalne SIS z JRG bez udziału SGRchem-eko.

Dominującą przyczyną interwencji strażaków było wzbudzenie alarmu detekcji promieniowania jonizującego bramki radiometrycznej w składowisku/spalarni odpadów, gdy samochód (śmieciarka) wjeżdżał na teren zakładu. Przy przejeździe przez bramkę radiometryczną dochodziło do wzbudzenia alarmu i w każdym przypadku zgodnie z wewnętrznymi procedurami bezpieczeństwa auto było kierowane na parking przez ochronę zakładu. Wykryty przez bramkę radiometryczną materiał promieniotwórczy znajdował się każdorazowo w przestrzeni ładunkowej samochodu, w którym były przewożone odpady komunalne.

Systemy detekcji skażenia stosowane w sortowniach, składowiskach (odpadów lub złomu), spalarniach to urządzenia bazujące na kompaktowych bramkach radiometrycznych typu BD-01. Jest to system ciągłego monitoringu wielkości promieniowania jonizującego typu gamma. Aparat spełnia normę PN-EN 62022 dotyczącą instalowanych na stałe monitorów do kontroli i wykrywania promieniowania gamma emiterów zawartych w materiałach nadających się lub nienadających się do recyklingu, przewożonych pojazdami. Dzięki zastosowaniu takiego systemu nie dochodzi do promieniotwórczego skażenia obszarów składowisk. Systemy te stosowane są również w zakładach przemysłowych (np. w hutach) [9].

Należy dodać, że nie każde zdarzenie radiacyjne powodowało dysponowanie SGRchem-eko, część zdarzeń z niewielkim źródłem promieniowania lub obecnością innych służb wymagała lokalnych SIS PSP w poziomie podstawowym, ponieważ zgodnie z minimalnym normatywem wyposażenia zakresu podstawowego dla ratownictwa chemiczno-ekologicznego każda JRG realizuje ratownictwo chemiczne i ekologiczne w zakresie podstawowym, mając

¹ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących sprzętu dozymetrycznego (Dz.U. Nr 239 poz. 2032).

Tabela 3. Przyczyna dysponowania PSP do zdarzenia związanego z zagrożeniem radiacyjnym (źródło: opracowanie własne na podstawie danych SWD-PSP).**Table 3.** Reason for the presence of fire fighting equipment for a radiation event.

Miejsce/przyczyna	Liczba zdarzeń	% z 82
Sygnalizacja bramki radiometrycznej na wjeździe do sortowni/spalarni śmieci	57	68,75%
Sygnalizacja bramki radiometrycznej lub czujnika na chwytku w składzie złomu	2	2,50%
Napromieniowanie w separatorze w rurociągu gazowym	1	1,25%
Przypadkowo znalezione materiały z nieznaną substancją lub oznaczone jako promieniotwórcze: szkoła, piwnica, garaż, prace rozbiórkowe, auto prywatne	5	6,25%
Prace budowlane, wykopano przedmiot oznaczony jako promieniotwórczy	3	3,75%
Napis „radiation” w dokumentach dotyczących przewożonego ładunku	1	1,25%
Znalezione pojemniki po izotopach promieniotwórczych w składzie złomu	2	2,50%
Skradzione izotopy promieniotwórcze – pomoc w czynnościach śledczych policji	1	1,25%
Izba celna – magazyny, pojemniki oznaczone jako promieniotwórcze	2	2,50%
Straż graniczna – magazyny	1	1,25%
Areszt śledczy – magazyn	2	2,50%
Areszt śledczy – uszkodzony aparat RTG do prześwietlania paczek i bagaży	1	1,25%
Magazyny placówki medycznej – znalezione odpady	1	1,25%
Auto przewożące materiały promieniotwórcze – kolizja, pojazd oznaczony piktogramami	1	1,25%
Zakupiono antyk na giełdzie staroci, ryzyko promieniowania	1	1,25%
Magazyn materiałów niebezpiecznych	1	1,25%

na wyposażeniu urządzenia do pomiaru mocy dawki promieniowania jonizującego w zakresie pomiarowym minimum 100 Sv/h.

Na rysunku 5 przedstawiono lokalizację zdarzeń w 7-letniej obserwacji. W 34 zdarzeniach lokalne SIS zostały zasilone przez SRGchem-eko. W niektórych

**Rys. 5.** Zdarzenia związane z zagrożeniem radiacyjnym w okresie objętym analizą (źródło: opracowanie własne na podstawie danych SWD-PSP).**Fig. 5.** Radiation events in the period covered by the analysis.

miastach interweniowano wielokrotnie: Rzeszów (29), Warszawa (10), Dąbrowa Górnicza (5), Olsztyn (3), Poznań (2), Bydgoszcz (2), Piaseczno (2), z tego powodu część zdarzeń zaznaczonych na mapie nakłada się na siebie.

Średni czas podjęcia interwencji PSP, zarówno SIS lokalnych w poziomie podstawowym, jak i SGRchem-eko, przy tego typu zdarzeniach, liczony od momentu przyjęcia zgłoszenia wynosił 12 minut 39 sekund, natomiast średni czas trwania takiej interwencji wynosił 129 minut.

Wartości mocy dawki promieniowania gamma, które urządzenia pomiarowe SIS PSP wykazały podczas interwencji, były zróżnicowane. W 6 przypadkach pomiary wykazały jedynie tło (poziom tła jest różny w zależności od rejonu, lokalizacji), w 34 interwencjach promieniowanie nie przekraczało 1 Sv/h, w 19 przypadkach nie przekraczało 10 Sv/h. Sumaryczne dane prezentuje tabela 4.

Tabela 4. Analiza pomiarów promieniowania w badanym okresie 2015–2021 (źródło: opracowanie własne na podstawie danych SWD-PSP).**Table 4.** Analysis of radiation measurements in the analyzed period 2015–2021.

Wartości w ujęciu statystycznym	Mean	Min.	Max.	SD	Median
Poziom promieniowania w $\mu\text{Sv/h}$	16,81	0,02	217,8	37,86	70,00

Tabela 5. Przewidywane skutki biologiczne po jednorazowym napromienieniu czynnikiem radiacyjnym (źródło: Rączkowski B., BHP w praktyce. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk 2012 [11]).**Table 5.** Predicted biological effects after a single irradiation with a radiation agent.

Dawka [Sv]	Skutek biologiczny
0,25	Objawy kliniczne nie występują; czasami mogą się pojawić niewielkie zmiany we krwi
0,5	Niewielkie zmiany we krwi obwodowej; bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia skutków późnych
1–2	Niewielkie objawy kliniczne, u 5–10% osób wymioty w ciągu kilku godzin od napromienienia; okresowe zmiany we krwi z opóźnioną odnową; duże prawdopodobieństwo wystąpienia skutków późnych; większość objawów ustępuje po kilku tygodniach
2–3	Ciężkie objawy kliniczne, wymioty u wszystkich osób w ciągu 2 godzin, poważne zmiany we krwi, utrata włosów po ok. 2 tygodniach; częste następstwa późne; dawka śmiertelna dla ok. 25% napromieniowanych osób
3–5	Dawka śmiertelna dla 50% napromieniowanych (LD); ciężkie objawy kliniczne z pełnym rozwojem choroby popromiennej i wyraźnym uszkodzeniem czynności krwiotwórczych szpiku
5–7	Przeżywa 0–20% osób; objawy ciężkiego upośledzenia szpiku; śmierć następuje w ciągu kilkunastu do kilkudziesięciu dni
10–30	Uszkodzenia układu pokarmowego z objawami krwotocznymi i odwodnienie organizmu; śmierć następuje w ciągu kilku do kilkunastu dni
50 i więcej	Zespół ośrodkowo-mózgowy, zaburzenia świadomości, oddychania i krążenia; śmierć następuje w okresie od kilkunastu godzin do 3 dni

Na skutek biologiczny (efekt działania na organizm ludzki) ma wpływ kilka czynników, jak: rodzaj narażenia, rodzaj promieniowania, czas narażenia, wiek i płeć osoby narażonej oraz wielkość dawki promieniowania (tab. 5).

6. Dyskusja

Według danych *International Atomic Energy Agency* (IAEA) najczęściej przyczyną promieniotwórczości odpadów są źródła pochodzące z aparatury przemysłowej, odpady medyczne, natomiast źródła promieniowania w złomie to:

- izotopowe czujki dymu – ameryk (^{241}Am),
- elementy powleczone radową farbą luminescencyjną – rad (^{226}Ra),
- źródła zawierające cez (^{137}Cs), kobalt (^{60}Co), rad (^{226}Ra), a rzadziej iryd (^{192}Ir) i zubożony uran (^{238}U).

Podczas identyfikacji izotopowej przenośnym spektrometrem gamma urządzenia pomiarowe strażaków wykazały obecność:

- izotop jodu I-131 (31 razy),
- kobalt Co-60 (2 razy),
- rad Ra-226 (2 razy),
- cez Cs-137 (2 razy),
- lutet Lu-177 (2 razy),
- tor Th-232/n, złoto Ag-110m, iryd Ir-192, technet Tc-99M (po jednej identyfikacji) [10].

Urządzenia pomiarowe wykorzystywane w analizowanych zdarzeniach:

- na wyposażeniu PSP: spektrometr gamma FLIR identiFINDER R400, radiometr ECO-D, polimaster PM 1401-K, rados RDS 31 s/R, radiometr Eko-D voltcraft,

- na wyposażeniu zakładów, w których interweniowano: monitor promieniowania gamma PM 1401 M, stacjonarny monitor promieniowania gamma typ UK-1M, radiometr przenośny Thermo FH 40 G-L, bramki radiometryczne – monitory promieniowania SMP-4/100.

Najczęściej przyczyną interwencji PSP były odpady pochodzenia medycznego² zawierające izotop jodu I-131. Stosowanie tego izotopu w diagnostycznych badaniach radioimmunologicznych, czynnościowych oraz strukturalno-topograficznych jest powszechne, wykorzystywany jest on również w terapii chorób tarczycy. Terapię tę opracowano w ubiegłym stuleciu dla pacjentów ze złośliwymi guzami chromochłonnymi i przerzutami, stosuje ją wiele krajów (jest zatwierdzona np. w USA [12]).

Jak podaje CLOR, stosowanie izotopu I-131 powoduje wzrost narażenia zawodowego personelu medycznego na wchłonięcie jodu promieniotwórczego drogą oddechową, a w szczególnych wypadkach również drogą pokarmową. W ramach prewencji okresowo prowadzi się pomiary kontrolne napromienienia tarczycy jodem promieniotwórczym pracowników zakładów medycyny nuklearnej oraz ocenę dawek od wchłonięć jodu promieniotwórczego [13].

Na ilość zdarzeń związanych z konkretnymi izotopami może mieć wpływ okres połowicznego rozpadu promieniotwórczego. Dla najczęściej występującego w analizie I-131 okres ten wynosi tylko 8 dni, co w mechanizmie tworzenia odpadów ich odbiór w określonym cyklu może powodować, że przy wjeździe na składowisko odpadów ich promieniotwórczość jest ograniczona ze względu na czas. Prawdopodobnie zdarzeń z izotopem I-131 mogło być więcej, jednak ze względu na krótki okres połowicznego rozpadu w chwili wjazdu na składowisko promieniowanie było zbyt małe, aby zostało wykryte. Dla porównania inne

² Odpady bytowe skażone wydzielinami osób poddanych terapii z wykorzystaniem izotopu I-131.

izotopy zidentyfikowane podczas interwencji strażaków charakteryzują się znacznie dłuższym okresem połowicznego rozpadu: Cs-137 (30,3 lat), Co-60 (5,3 lat), Ra-226 (1626 lat), Ir-192 (73,8 dni) [3].

Rebmann (2019) przeprowadził badanie sprawdzające wiedzę strażaków na temat, jakie zagrożenie niesie ze sobą narażenie na promieniowanie. Wyniki wykazały, że świadomość badanych w tym zakresie jest niewielka, co może skutkować zwiększonymi wskaźnikami śmiertelności. W badaniu własnym nie oceniano wiedzy, a strażacy, jak wynikało z opisów w informacji ze zdarzeń, wykonywali pomiary kilkakrotnie w każdym przypadku z różnych odległości (0,3 m, 1 m, 5 m, 10 m). Wyszkolenie, przestrzeganie procedur i stosowanie odpowiedniego poziomu zabezpieczenia członków SGRchem-eko oraz SIS lokalnych pozwala w ocenie autorów stwierdzić, że strażacy nie przekroczyli bezpiecznego poziomu narażenia, które dla funkcjonariuszy podczas działań nie może przekraczać dawki skutecznej 1 mSv w ciągu roku. Wyjątkowo dopuszczone jest przekroczenie tej dawki w ciągu roku, jeśli w okresie 5-letnim zostanie zachowana średnia wartość roczna 1mSv. Istotny jest tu czas ekspozycji, odległość od źródła promieniowania oraz stosowanie odpowiednich dla promieniowania osłon [14, 5].

7. Podsumowanie

Odpady medyczne, które wielokrotnie wzbudzały stacjonarne urządzenia radiometryczne na składowiskach i spalarniach śmieci, powstały w placówkach medycznych lub gospodarstwach domowych osób poddanych leczeniu lub diagnostyce z wykorzystaniem radiofarmaceutyków. Placówki medyczne wykorzystywały izotopy promieniotwórcze w celach leczniczych (głównie choroby onkologiczne), korzystając z zezwolenia na zamierzone podawanie substancji promieniotwórczych ludziom i zwierzętom w celu medycznej lub weterynaryjnej diagnostyki, leczenia bądź badań naukowych. Powstałe w ten sposób odpady można zakwalifikować jako odpady promieniotwórcze wg art. 3 pkt. 22 ustawy Prawo atomowe. Chociaż dawki promieniowania ujawnione i zmierzone podczas działań SGR PSP były nieznaczne, to jednak zgodnie z definicją z art. 3 pkt. 45 ustawy Prawo atomowe materiały te zawierały izotopy promieniotwórcze o takiej aktywności lub stężeniu promieniotwórczym, które nie mogą być pominięte z punktu widzenia ochrony radiologicznej [15]. Należy jednak dodać, że pomimo iż w momencie wykrycia odpady takie mogą stanowić odpad promieniotwórczy, to ze względu na krótki okres połowicznego rozpadu nie ma konieczności ich unieszkodliwiania i wystarczy poczekać

do wygaszenia substancji promieniotwórczej, by móc z takim materiałem postępować jak ze zwykłym odpadem komunalnym (przyp. red.).

Notka o autorach

Łukasz Dudziński – dr n. o zdr. – funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej, członek SGRchem-eko w KM PSP Lublin.

Marcin Glinka – dr n. o zdr. – funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej, Biura Planowania Operacyjnego KG PSP w Warszawie.

Tomasz Kubiak – dr n. o zdr. – funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej, wojewódzki koordynator ratownictwa medycznego KW PSP w Szczecinie.

Mariusz Feltynowski – dr n. społ. – funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej, Rektor Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie.

Literatura

1. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 w sprawie planów postępowania awaryjnego w przypadku zdarzeń radiacyjnych (Dz.U. nr 20 poz.169 z późn. zm.) – zał. nr 2, A, 3 pkt. 2).
2. <http://www.gov.pl/web/specjalistyczne-grupy-ratownictwa-chemiczno-ekologicznego>
3. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej: Zasady organizacji ratownictwa medycznego w Krajowym Systemie Ratowniczo-Gaśniczym, Warszawa 2021 [dostęp 4.11.2021].
4. Zasady ewidencjonowania zdarzeń w Systemie Wspomagania Decyzji Państwowej Straży Pożarnej, Biuro Planowania Operacyjnego, KG PSP [dostęp 18.5.2022].
5. <http://www.gov.pl/web/kgpsp/obowiazuja-nowe-zasady-organizacji-ratownictwa-chemicznego-i-eko> [dostęp on-line 20.06.2022].
6. Principles of the organization of medical rescue in the National Fire and Rescue System. General Headquarters of the State Fire Service. <https://www.gov.pl/web/kgpsp/wykaz-wazniejszych-zasad-obowiazujacych-w-kserg> [dostęp 4.5.2022].
7. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dn. 17 września 2021 r. w sprawie szczegółowej organizacji krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego (Dz.U. 2021, poz. 1737).
8. Skrypt do szkolenia z ratownictwa chemicznego realizowanego przez KSRG w zakresie podstawowym wydanie V, 2019.
9. Caffrey E.A., Rood A., Grogan H., et al. Dose Assessment for Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials Disposal in Landfills. The radiation safety journal health physics 2021; 121(3): 209-224.
10. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2014.
11. Rączkowski B. BHP w praktyce. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk 2012.
12. Jimenez C., Erwin W., Chasen B. Targeted Radionuclide Therapy for Patients with Metastatic Pheochromocytoma and Paraganglioma: From Low-Specific-Activity to High-Specific-Activity Iodine-131 Metaiodobenzylguanidine. Cancers 2019; 11(7): 1018.
13. <http://www.clor.waw.pl> [dostęp on-line 23.06.2022].
14. Rebmann T., Charney R., Loux T., Turner J. Firefighters' and Emergency Medical Service Personnel's Knowledge and Training on Radiation Exposures and Safety: Results from a Survey. Health security 2019; 7(5): 42-49.
15. Ustawa z dn. 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe art. 3. pkt. 45.

Gdzie szukać informacji o radonie? Regulacje prawne i opracowania dotyczące problematyki radonowej

Where to find information about radon? Legal regulations and studies on radon issues

Maciej Norenberg^a, Jadwiga Mazur^b, Katarzyna Wołoszczuk^a, Krzysztof Kozak^b, Dominik Grządziel^b

^a Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

^b Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk

Streszczenie: Publikacja dyrektywy Rady UE 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 roku wymusiła zmiany w polskim ustawodawstwie, w tym przepisów odnoszących się do narażenia na radon i jego pochodne. Spowodowało to znaczny wzrost zainteresowania radonem w ostatnich latach. Artykuł stanowi przewodnik po aktualnych przepisach **krajowych i europejskich** oraz publikacjach organizacji międzynarodowych dotyczących problematyki radonowej.

Słowa kluczowe: Radon, ustawa Prawo atomowe, dyrektywa 2013/59/EURATOM, narażenie na radon i jego pochodne.

Abstract: The publication of the EU Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 forced changes to the Polish legislation, including the regulations relating to exposure to radon and its progeny. This has resulted in a significant increase in interest in radon in recent years. The article is an overview of the current regulations and publications of international and national organizations on radon issues.

Key words: Radon, Atomic Law Act, directive 2013/59/EURATOM, exposure to radon and its progeny, radon decay products.

1. Podstawowe informacje o radonie i jego pochodnych

Wszystkie substancje mineralne występujące na Ziemi zawierają naturalne pierwiastki promieniotwórcze. Pierwiastki te, wysyłając promieniowanie typu alfa, beta i gamma, powodują jonizację ośrodka i dlatego też promieniowanie to nazywane jest promieniowaniem jonizującym. Najbardziej istotnymi naturalnymi pierwiastkami promieniotwórczymi są izotopy z szeregu uranowego (U-238), torowego (Th-232) oraz potas (K-40) występujące w skorupie ziemskiej. W szeregach uranowym i torowym występują izotopy radonu, który jest jedynym gazowym naturalnym pierwiastkiem promieniotwórczym. Izotop radonu (Rn-222) jest gazem szlachetnym, cięższym od powietrza, jest niewidoczny, bez zapachu i smaku. Radon powstaje w wyniku rozpadu radu (Ra-226), który jest także składnikiem szeregu uranowego. Uran i izotopy tworzące jego szereg promieniotwórczy są obecne

w skorupie ziemskiej, a także w wielu innych materiałach, np. w surowcach i wyrobach budowlanych. Oznacza to, że radon występuje zarówno w otwartym powietrzu, jak i w budynkach. Rozpada się poprzez emisję cząstki alfa (z czasem połowicznego zaniku 3,8 dnia) na inne, także promieniotwórcze izotopy, tzw. krótkożyciowe pochodne radonu: polon (Po-), bizmut (Bi-) i ołów. Gaz ten jest szczególnie istotny, ponieważ jego udział w rocznej dawce inhalacyjnej jest bardzo duży, tj. ok. 40%.

Radon obecny w atmosferze pochodzi z gruntu, gdzie jego stężenia sięgają tysięcy bekereli na metr sześcienny (1 bekerel to 1 rozpad promieniotwórczy atomu w ciągu 1 sekundy). Po wydostaniu się z gruntu do atmosfery następuje bardzo szybkie jego rozrzedzenie, co powoduje znaczny spadek jego stężenia. Wielkość ekshalacji (wydobywania się) radonu z gruntu jest zależna od rodzaju gleby, geologii podłoża, a także od warunków atmosferycznych (ciśnienie, siła i kierunek wiatru, opady, obecność pokrywy śnieżnej itp.). Średnie stężenie radonu w powie-

trzu atmosferycznym utrzymuje się na poziomie do 10 Bq/m^3 , natomiast koncentracje w budynkach mieszkalnych są większe i wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset, a nawet kilku tysięcy Bq/m^3 .¹

Budowa domu wymaga „przebicia” powierzchni gleby i dotarcia do głębszych warstw, gdzie stężenia radonu są znacznie większe. Wewnątrz domu powstaje różnica ciśnień „wysysająca” radon z gruntu, tzw. efekt kominowy. Drogi wnikania radonu do wnętrza domu to m.in.: pęknięcia i szczeliny wylewki betonowej, luki i szpary konstrukcyjne budynku, pęknięcia w ścianach mających bezpośredni kontakt z podłożem, nieszczelności wokół rur kanalizacyjnych. Inne czynniki wpływające na stężenie radonu w pomieszczeniach to m.in. sposób ogrzewania, wentylacji oraz użytkowania pomieszczeń. Wpływ radonu docierającego do budynku z podłoża na wyższych kondygnacjach maleje, a większego znaczenia nabierają materiały, z jakich wykonane są ściany i stropy budynku oraz rodzaj pokrycia ścian. Z tego powodu w celu ograniczenia narażenia populacji na promieniowanie jonizujące wprowadzono przepisy określające maksymalne dopuszczalne zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w materiałach budowlanych².

2. Przepisy dotyczące radonu w prawie polskim

Do czasu wejścia w życie nowelizacji ustawy Prawo atomowe z dnia 13 czerwca 2019 roku (Dz.U. poz. 1593) radon jako czynnik ryzyka zdrowotnego dla ogółu ludności nie był uregulowany w prawie polskim. Problem ochrony przed radonem pojawiał się jedynie w odniesieniu do osób pracujących w zakładach górniczych, jaskiniach i innych miejscach pod powierzchnią ziemi oraz w uzdrowiskach.

Polskie przepisy dotyczące radonu są wynikiem konieczności wprowadzenia wymagań zawartych w opublikowanej w 2014 roku dyrektywie Rady UE 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 roku [1]. Dyrektywa ustanowiła podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego, w tym również na radon, a także spowodowała zaktualizowanie i ujednoczenie prawodawstwa w krajach członkowskich UE, opierając się na wynikach 20-letnich badań naukowych w zakresie ochrony radiologicznej (IAEA, WHO, OECD, ICRP). Promieniowanie naturalne jest traktowane tak samo jak narażenie od sztucznych źródeł promieniowania, jako sytuacja narażenia planowanego. Narażenie na radon w pomieszczeniach zamkniętych (budynki mieszkalne i stanowiska pracy) rozpatrywane jest

jako sytuacja narażenia istniejącego (dotyczy to zarówno radonu w budynkach, jak i narażenia zewnętrznego od promieniowania gamma emitowanego przez materiały budowlane).

Postanowienia dyrektywy zostały wdrożone do prawa polskiego w drodze nowelizacji ustawy – Prawo atomowe, która weszła w życie w 2019 roku [2]. Obecnie obowiązująca ustawa Prawo atomowe [3] zawiera przepisy dotyczące radonu zarówno w budynkach mieszkalnych, jak i miejscach pracy. Wprowadzono m.in. pojęcie poziomu odniesienia średniorocznego stężenia radonu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, który ustalono na zalecanym w dyrektywie poziomie, tj. 300 Bq/m^3 (art. 23b). Ustawa zobowiązuje pracodawcę do zapewnienia pomiaru stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscach pracy usytuowanych na terenach, „na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia” (art. 23c). Konieczność wykonania pomiarów, o których mowa w art. 23c, dotyczy miejsc pracy zlokalizowanych „wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy”, a także związanych „z uzdatnianiem wód podziemnych”. Obligatoryjne są pomiary stężeń radonu na terenie całego kraju w miejscach pracy usytuowanych pod ziemią.

Na kierownika jednostki ciąży obowiązek zapewnienia optymalizacji narażenia pracowników, a także pisemnej informacji „o zwiększonym narażeniu na radon, wynikach pomiarów stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscu pracy, otrzymanych przez nich dawkach promieniowania oraz działaniach podejmowanych w celu ograniczenia narażenia na radon w miejscu pracy” (art. 23c ust. 2). Kierownicy jednostek są zobowiązani podjąć działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon (art. 23c ust. 4), gdy w miejscach pracy istnieje możliwość otrzymania przez pracowników dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 1 mSv rocznie.

Przepis w ustawie: „Zbywca budynku, lokalu lub pomieszczenia przeznaczonego na pobyt ludzi oraz wynajmujący budynek, lokal lub pomieszczenie, przeznaczone na pobyt ludzi, przekazuje na żądanie nabywcy lub najemcy takiego budynku, lokalu lub pomieszczenia informację o wartości średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu odpowiednio w budynku, lokalu lub pomieszczeniu” (art. 23d, ust. 1), reguluje też konieczność pomiarów średniorocznego stężenia radonu w budynkach prywatnych. Pomiary średniorocznego stężenia radonu w budynku mogą wykonywać laboratoria posiadające

¹ (UNSCEAR 2000 - Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with Scientific Annexes). [14], [15].

² „Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2020 r. w sprawie materiałów budowlanych, w przypadku których oznacza się stężenie promieniotwórcze izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232, wymagań dotyczących dokonywania tych oznaczeń oraz wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego, o której przekroczeniu informuje się właściwe organy” (Dz.U. 2021 poz. 33).

akredytację w zakresie prowadzenia takich pomiarów. Zgodnie z przepisem przejściowym ustawy nowelizującej w terminie 5 lat od dnia jej wejścia w życie pomiary mogą wykonywać laboratoria, które posiadają system zapewnienia jakości wykonywanych badań oraz uczestniczą, na koszt własny, w międzylaboratoryjnych pomiarach porównawczych organizowanych przez Głównego Inspektora Sanitarnego (art. 25, ust.1 znowelizowanej ustawy [3]).

Znowelizowana ustawa Prawo atomowe nakłada też nowe obowiązki na Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz na Głównego Inspektora Sanitarnego, które są wymienione w art. 23g, tj.: organizowania kampanii promujących stosowanie środków mających na celu zapobieganie przenikaniu radonu do nowych budynków oraz mających na celu ograniczenie średniorocznego stężenia radonu w budynkach, prowadzenie szerokich akcji informacyjno-edukacyjnych i szkoleniowych w zakresie ograniczania narażenia na radon.

Na podstawie przepisów ustawy Prawo atomowe wydane zostały przepisy wykonawcze w zakresie narażenia na radon. Pierwszym aktem prawnym jest rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 roku w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia [4]. W rozporządzeniu tym wymieniono 27 powiatów położonych w województwach dolnośląskim, lubelskim, opolskim, podkarpackim, śląskim i świętokrzyskim, gdzie pracodawcy mają obowiązek zapewnić pomiar średniorocznego stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscach pracy zlokalizowanych na poziomie parteru lub piwnicy oraz związanych z uzdatnianiem wód podziemnych.

Realizując przepisy ustawy – Prawo atomowe związane z radonem, Minister Zdrowia ogłosił Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy (M.P. z 2021 poz. 169), zwany dalej „Krajowym planem”. Krajowy plan został przygotowany we współpracy z Głównym Inspektorem Sanitarnym.

Cel zasadniczy Krajowego planu to „Ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie ludzi”. Cel ten osiągnąć jest przez realizację celów szczegółowych:

- wskazanie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia 300 Bq/m^3 – na terenach tych podejmowane są działania przewidziane w ustawie.
- ochrona pracowników przed ryzykiem negatywnego wpływu na zdrowie w związku z narażeniem ich na występujący w środowisku radon.

- ograniczenie ryzyka wystąpienia nowotworu płuc u osób palących w związku z narażeniem tych osób na występujący w środowisku radon.
- ocena narażenia na radon – pomiary: planowanie, określenie optymalnej metody, wykonywanie i gromadzenie wyników.
- promowanie działań mających na celu ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu na zdrowie w związku z narażeniem ludzi na występujący w środowisku radon.
- określenie wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie publiczne.
- ocena krajowego planu radonowego w zakresie jego kompletności i aktualności.

Dokument określa organy, jednostki i służby odpowiedzialne za realizację poszczególnych zadań, harmonogram i ocenę działań [5].

Na etapie konsultacji publicznych projektu nowelizacji ustawy Prawo atomowe zostały usunięte propozycje przepisów nakładające na inwestora obowiązek określenia indeksu ryzyka radonowego terenu przeznaczonego pod zabudowę, szczególnie dla budynków przeznaczonych na zbiorowy pobyt pacjentów lub dzieci i młodzieży. Określenie indeksu ryzyka radonowego terenu pod zabudowę jest najtańszym i najskuteczniejszym sposobem zabezpieczenia powstającego budynku przed wysokimi stężeniami radonu. Metody obniżania stężeń w istniejących już budynkach są z reguły droższe i bardziej uciążliwe.

3. Polskie Centrum Radonowe

Polskie Centrum Radonowe (PCR) jest siecią naukową, którą tworzą krajowe instytucje prowadzące badania naukowe. Celem działalności PCR jest prowadzenie badań naukowych i prac rozwojowych związanych z występowaniem radonu w środowisku, a szczególnie w miejscach pracy i w budynkach mieszkalnych oraz z doskonaleniem technik pomiarowych. W ramach PCR instytucje prowadzą współpracę naukowo-badawczą w zakresie zagadnień związanych z występowaniem w przyrodzie gazu promieniotwórczego radonu (zwłaszcza nuklidu ^{222}Rn) oraz z oddziaływaniem tego gazu na środowisko i ludzi.

W szczególności PCR:

- integruje środowisko naukowe i eksperckie,
- umożliwia wymianę informacji naukowych i formalno-prawnych,
- organizuje wzajemną promocję działalności zrzeszonych instytucji,
- prowadzi działalność ułatwiającą pozyskiwanie projektów badawczych,
- wspomaga organizację lub organizuje szkolenia, pomiary porównawcze, seminaria, webinaria i konferencje,
- promuje i wspomaga organizację imprez popularyzujących wiedzę o radonie oraz redakcję materiałów szkoleniowych i informacyjnych,

- wspomaga działalność organów rządowych i samorządowych w podejmowaniu decyzji i formułowaniu przepisów prawa [6].

4. Unia Europejska

Aktualne przepisy europejskie regulujące sytuację prawną dotyczącą narażenia na radon i jego pochodne zawarte są w opublikowanej w 2014 roku dyrektywie Rady UE 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 roku [1]. Powyższa dyrektywa, nazywana również dyrektywą BSS (*Basic Safety Standards*), ustanawia normy bezpieczeństwa, w celu ochrony przed narażeniem na promieniowanie jonizujące, z uwzględnieniem zagrożenia wynikającego z ekspozycji na radon i jego pochodne. Jej postanowienia odzwierciedlają wyniki badań z zakresu ochrony radiologicznej prowadzonych na przestrzeni ostatnich 20 lat oraz uchylają wcześniejsze dyrektywy [1].

Dyrektywa nakłada na władze państw członkowskich UE obowiązek ustanowienia przepisów dotyczących narażenia na radon. W jej świetle narażenie na promieniowanie jonizujące od źródeł naturalnych, do których zalicza się radon, traktowane jest jako sytuacja narażenia planowanego, równoznacznie z narażeniem od źródeł sztucznych promieniowania. Jednym z głównych założeń dyrektywy jest zobligowanie państw członkowskich UE do ustanowienia poziomu referencyjnego stężenia aktywności radonu w pomieszczeniach na poziomie nie wyższym niż 300 Bq/m^3 , z wyłączeniem sytuacji szczególnych wynikających z warunków panujących na terenie danego państwa. Przepisy tej dyrektywy wprowadzają również konieczność identyfikacji w państwach członkowskich obszarów, na których średnioroczne stężenie radonu w znacznej liczbie budynków może przekraczać ustanowiony poziom referencyjny. Zgodnie z tą dyrektywą na powyższych terenach należy prowadzić pomiary stężenia aktywności radonu w miejscach pracy. Art. 103 ustanawia konieczność opracowania w państwach UE krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach mieszkalnych, dostępnych publicznie oraz miejscach pracy. Jego podstawowym celem jest ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie ludzi. W myśl unijnych przepisów krajowe plany działania powinny określać strategię prowadzenia badań w zakresie stężeń radonu, zarządzania danymi pomiarowymi oraz zawierać odpowiednie dane i kryteria stosowane przy wyznaczaniu obszarów potencjalnie wysokiego narażenia na radon, jak również identyfikacji miejsc pracy, w których istnieje potrzeba oceny ryzyka. Ważnym elementem krajowych planów działania jest podział obowiązków rządowych i pozarządowych oraz mechanizmy koordynacyjne umożliwiające realizację zakładanych celów [1].

Przepisy dyrektywy implementowano do polskiego ustawodawstwa w drodze nowelizacji ustawy Prawo atomo-

we (Dz.U. 2021. poz. 1941), której główne punkty dotyczące narażenia na radon omówiono w p. 2. Szczegółowe wymagania dyrektywy omówiono w publikacji Komisji Europejskiej Radiation Protection N° 193 [7], dostępnej na stronie: <https://op.europa.eu>.

5. Międzynarodowe opracowania dotyczące radonu

5.1. ICRP

Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej, ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) jest niezależną, międzynarodową organizacją non-profit propagującą naukę o ochronie radiologicznej, w szczególności poprzez wydawanie zaleceń i wskazówek dotyczących wszystkich aspektów ochrony przed promieniowaniem jonizującym. ICRP zrzesza ponad 250 uznanych na całym świecie ekspertów w dziedzinie ochrony radiologicznej z ponad 30 krajów.

ICRP została założona w 1928 roku jako odpowiedź na rosnące obawy o skutki promieniowania jonizującego obserwowane w środowisku medycznym. W tamtym czasie nosiła nazwę ICRPC (*International X-ray and Radium Protection Committee*), ale została zrestrukturyzowana, aby lepiej uwzględniać zastosowania promieniowania poza obszarem medycznym i w 1950 roku otrzymała obecną nazwę.

Od wielu lat ICRP publikuje zalecenia i wytyczne w obszarze ochrony radiologicznej. Publikowane są one w formie raportów, które udostępniono na stronie www.icrp.org. Większość z nich możliwa jest do pobrania bezpłatnie. Szereg publikacji pośrednio lub bezpośrednio związana jest z radonem:

- **ICRP Publication 142 Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes**

Publikacja dostarcza wskazówek dotyczących ochrony radiologicznej w branżach związanych z naturalnie występującymi materiałami promieniotwórczymi (NORM) [8].

- **ICRP Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3**

Raport jest trzeci z serii raportów, które zawierają uaktualnione współczynniki konwersji dawki niezbędne do wyznaczenia dawki efektywnej od wniknięcia do organizmu drogą oddechową lub pokarmową pierwiastków promieniotwórczych. Współczynniki konwersji dawki zostały obliczone z użyciem modelu układu pokarmowego człowieka (Publikacja 100) oraz modelu układu oddechowego człowieka (Publikacja 66).

Współczynniki konwersji dawki zawarte w tej publikacji różnią się znacząco od wcześniej rekomendowanych wartości, co wynika ze zmiany współczynników wagowych stosowanych do wyznaczania dawki efektywnej, zmian niektórych cech modelu kobiety i mężczyzny,

aktualizacji danych o rozpadach promieniotwórczych, wprowadzenia nowych antropomorficznych fantomów czy też udoskonalenia modeli biokinetycznych i dozymetrycznych. W części krajów europejskich stosuje się już współczynniki konwersji dawki opublikowane w tym raporcie [9].

We wcześniejszej publikacji ICRP 65 zalecano, aby dawki od radonu i jego pochodnych obliczać, stosując konwencję przeliczania dawek na podstawie danych epidemiologicznych. Obecnie stwierdzono, że radon i jego pochodne należy traktować w taki sam sposób, jak inne radionuklidy w ramach systemu ochrony ICRP, to znaczy dawkę należy obliczyć, używając modeli biokinetycznych i dozymetrycznych ICRP.

- **ICRP Publication 126 Radiological Protection against Radon Exposure**

Raport opisuje charakterystykę narażenia na radon, obejmującą źródła i mechanizmy przenoszenia, zagrożenia dla zdrowia związane z radonem oraz wyzwania związane z zarządzaniem narażeniem na radon [10].

- **ICRP Publication 115 Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon**

W raporcie umieszczono wyniki przeglądu ostatnich badań epidemiologicznych dotyczących związku między zachorowaniem na raka płuc a narażeniem na radon i produkty jego rozpadu. Szczególny nacisk położono na zbiorcze badania przypadków i kontroli narażenia w budynkach mieszkalnych oraz na kohorty górników podziemnych narażonych na stosunkowo niski poziom stężenia radonu [11].

- **ICRP Publication 66 Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection**

Jest to bardzo ważna publikacja ICRP. Raport opisuje model do obliczania dawek promieniowania w drogach oddechowych pracowników, wynikających z wniknięcia do organizmu radionuklidów przenoszonych w powietrzu [12].

- **ICRP Publication 65 Protection Against Radon-222 at Home and at Work**

W niniejszym raporcie opisano skutki zdrowotne ekspozycji na radon i jego pochodne oraz przedstawiono zalecenia dotyczące kontroli tego narażenia zarówno w mieszkaniach, jak i miejscach pracy. Raport miał na celu udzielenie wskazówek krajowym agencjom doradczym i regulacyjnym oraz pracownikom ochrony radiologicznej zajmującym się radonem w mieszkaniach i miejscach pracy.

Współczynniki konwersji dawki stosowane do obliczania dawki efektywnej od narażenia na radon, przedstawione w tym raporcie, stosowane są w polskich przepisach prawnych [13].

5.2. UNSCEAR

Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (*United Nations Scientific Committee on the*

Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) został powołany przez Zgromadzenie Ogólne Organizacji Narodów Zjednoczonych w 1955 roku. Jego zadaniem jest ocena i raportowanie poziomów oraz skutków narażenia na promieniowanie jonizujące. Rządy i organizacje na całym świecie opierają się na szacunkach UNSCEAR jako naukowej podstawie oceny ryzyka radiacyjnego i ustanawiania środków ochronnych. Każdy z raportów UNSCEAR podzielony jest na aneksy poruszające zagadnienia dotyczące narażenia na różne źródła promieniowania jonizującego. Na przestrzeni ostatnich lat komitet kilkakrotnie brał pod uwagę skutki narażenia na radon i jego pochodne.

W opublikowanym w 2000 roku raporcie podsumowano wyniki wielu badań epidemiologicznych górników oraz osób narażonych na radon i produkty jego rozpadu, a także wielu dostępnych danych biologicznych. Publikacja potwierdza dowody na związek między ryzykiem zachorowania na raka płuc a narażeniem na pochodne radonu. Przydatny zbiór informacji na temat radonu stanowi niewątpliwie Aneks B tego raportu [14]. Aneks E natomiast odnosi się do narażenia na występowanie tego promieniotwórczego gazu w miejscach pracy [15].

Inną publikacją Komitetu biorącą pod uwagę kwestię źródeł i skutków ekspozycji na radon w odniesieniu do pracowników oraz ogółu społeczeństwa jest raport z 2006 roku. Aneks A powyższego raportu stanowi studium badań epidemiologicznych dotyczących zagrożeń nowotworowych związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące, również pochodzących od radonu i jego pochodnych [16]. Aneks E „*Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces*” omawia: potencjalne źródła narażenia pracowników i społeczeństwa na radon, zagadnienia z zakresu dozymetrii radonu i produktów jego rozpadu, wyniki eksperymentów na zwierzętach na poziomie komórkowym i subkomórkowym prowadzonych w celu zrozumienia mechanizmów kancerogenezy oraz badania skutków narażenia górników i mieszkańców w różnych państwach świata [17].

Najbardziej aktualnym zbiorem informacji na temat skutków narażenia na radon i jego pochodne wydanym przez UNSCEAR jest ostatni raport z 2019 roku. Aneks B tego dokumentu koncentruje się na aktualizacji raportu z 2006 roku o następujące aspekty: modele dozymetryczne, dozymetrię radonu, współczynniki konwersji ekspozycji na dawkę oraz ich niepewności. Raport obejmuje przegląd wyników wielu badań opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych, a także publikacji organizacji międzynarodowych. W ostatnim raporcie zespół UNSCEAR dokonał ponownej oceny ryzyka zachorowania na raka płuc pod wpływem narażenia na radon. Komitet zaleca stosowanie współczynnika przeliczeniowego dawki 9 nSv/Bqhm^{-3} do szacowania poziomów narażenia na radon dla ogółu ludności. Przy wykorzystaniu tego współczynnika stężenie radonu na poziomie 400

Bq/m³ odpowiadałoby dawce około 10 mSv na rok z założeniem współczynnika równowagi 0,4 i czasu ekspozycji wynoszącego 7000 godzin [18]. Wszystkie raporty UNSCEAR dostępne są bezpłatnie na stronie Komitetu: <https://www.unscear.org>.

5.3. IAEA

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) z siedzibą w Wiedniu jest organizacją pracującą na rzecz pokojowego i bezpiecznego wykorzystania energii jądrowej. IAEA jest organizacją państw o zasięgu globalnym, która w kwietniu 2021 roku liczyła 173 kraje członkowskie. W ramach swojej działalności Agencja prowadzi promocję energetyki jądrowej poprzez poruszanie zagadnień dotyczących samej energetyki i technologii cyklu paliwowego, a także zastosowań promieniowania jonizującego w medycynie, przemyśle, rolnictwie czy badaniach naukowych. Opracowuje normy bezpieczeństwa, rozpowszechnia materiały obejmujące zagadnienia ochrony przed promieniowaniem oraz wydaje liczne poradniki i zalecenia, które brane są pod uwagę przy ustalaniu krajowych przepisów w zakresie bezpieczeństwa jądrowego oraz ochrony radiologicznej.

W trakcie swojej działalności Agencja wielokrotnie poruszała w publikacjach tematy związane z narażeniem na radon i jego pochodne. W tym kontekście ważną publikacją jest wydany w 2015 roku przewodnik (*guide*) dotyczący ochrony ludności przed narażeniem na działanie radonu i innych naturalnych źródeł promieniowania (*Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, Specific Safety Guide No. SSG-32*). Zakres przewodnika obejmuje tematykę narażenia osób wewnątrz pomieszczeń na naturalne źródła promieniowania, w tym radon i jego pochodne. Przewodnik podaje wskazówki dotyczące ochrony ludności przed narażeniem na radon w budynkach. Zawiera on zalecenia dla organów administracji rządowej oraz innych organizacji odpowiedzialnych za ochronę radiologiczną [19].

Inną ważną publikacją IAEA jest *Safety Report Series no. 98 - Design and Conduct of Indoor Radon Surveys*. Dostarcza ona praktycznych wskazówek dotyczących projektowania i przeprowadzania kampanii pomiarów radonu, których wyniki mogą posłużyć jako podstawa do podejmowania decyzji przy planach kontroli narażenia na radon w mieszkaniach [20]. Dodatkowo na stronie internetowej IAEA znaleźć można prezentacje, plakaty, seminaria online oraz filmy informacyjne dotyczące radonu.

5.4. ERA

Europejskie Stowarzyszenie Radonowe, ERA (*European Radon Association*) jest międzynarodową organizacją non-profit zarejestrowaną zgodnie z prawem belgijskim

(numer 549.923.484) 19 grudnia 2013 roku. Pierwsze spotkanie założycielskie ERA odbyło się w Bouillon (Belgia) w maju 2013 roku. Celem tej organizacji jest słuzenie interesom europejskiej społeczności radonowej i pomoc w zmniejszaniu zagrożenia zdrowotnego związanego z narażeniem na radon w krajach Europy.

ERA grupuje specjalistów zajmujących się szeroko rozumianą problematyką radonową, takich jak naukowcy, technolodzy, urzędnicy zdrowia publicznego i decydenci. Obszary zainteresowania ERA obejmują m.in. dozymetrię promieniowania, opracowywanie mierników do pomiaru stężeń radonu i protokołów pomiarowych, technologie prewencyjne konstrukcji budowlanych, techniki obniżania stężeń radonu w budynkach oraz strategię kontroli poziomów stężeń radonu i opracowanie regulacji prawnych.

Do głównych celów stowarzyszenia można zaliczyć:

- promowanie i uczestniczenie w działaniach mających na celu zmniejszenie ryzyka narażenia populacji na radon,
- promowanie wiedzy na temat ryzyka radonowego, sposobu pomiarów radonu, technik ograniczania i zapobiegania występowaniu zwiększonych poziomów stężeń radonu,
- zapewnienie/opracowanie/przyjęcie standardów jakości w pomiarach radonu,
- zapewnienie efektywnego partnerstwa pomiędzy specjalistami zajmującymi się radonem a innymi zainteresowanymi podmiotami publicznymi i prywatnymi,
- pełnienie funkcji organu doradczego w zakresie przepisów ustawowych i wykonawczych dotyczących radonu,
- organizowanie corocznych warsztatów łączących prezentacje naukowe i wystawy techniczne firm zajmujących się radonem,
- dążenie do osiągnięcia najwyższych standardów badań radonowych.

Ważnym aspektem działalności ERA jest inicjatywa ustanowienia corocznego Europejskiego Dnia Radonu (*European Radon Day*) w dniu urodzin Marii Skłodowskiej-Curie. Pierwszy odbył się 7 listopada 2015 roku. Wydarzenie to odniosło duży sukces, a podobne spotkania odbyły się w kilku krajach europejskich, w tym w Polsce w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Obecnie jest to stały element działań ERA i uczestniczy w nim większość krajów europejskich, prowadząc akcje edukacyjne dla społeczeństwa dotyczące problematyki radonowej. Opracowane są także plakaty edukacyjne, które w przystępnej formie graficznej poruszają zagadnienia związane z radonem. ERA organizuje corocznie także Europejski Tydzień Radonu (*European Radon Week*), w trakcie którego odbywają się warsztaty tematyczne i szkolenia prowadzone przez specjalistów. ERA posiada witrynę internetową pod adresem: <https://radoneurope.org>. Zawarte są tam informacje o nadchodzących wydarzeniach (konferencje naukowe, warsztaty, pomiary porównawcze, szkolenia), publikacje, a także materiały informacyjne i edukacyjne [21].

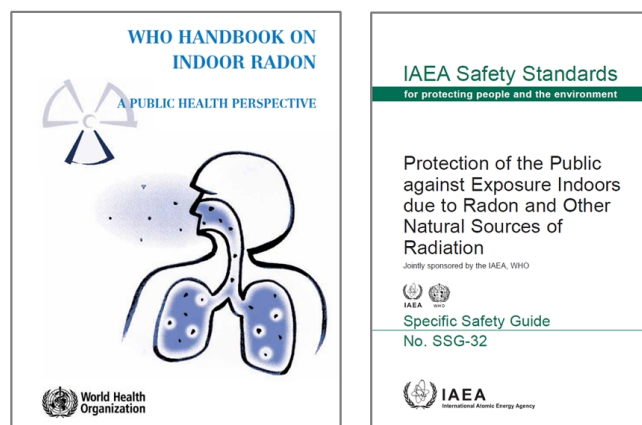
Z inicjatywy ERA powstało także międzynarodowe czasopismo naukowe *Journal of the European Radon Association*, JERA (<https://radonjournal.net>), które koncentruje się na szeroko rozumianej tematyce dotyczącej radonu. Celem JERA jest publikowanie oryginalnych badań, artykułów przeglądowych, artykułów technicznych dotyczących radonu, toronu i produktów ich rozpadu. Tematyka poruszana w czasopiśmie dotyczy wszystkich aspektów radonu i obejmuje takie tematy, jak metrologia radonu, mapowanie terenów, procedury i protokoły pomiaru radonu, ustawodawstwo, wpływ na zdrowie, techniki usuwania radonu z budynków itp. JERA jest czasopismem typu *Open Access*, dzięki czemu stanowi ważne forum dla sektorów akademickich, publicznych i prywatnych, gdzie prezentowane są najnowsze wyniki badań i opracowań technicznych.

5.5. WHO

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat Światowa Organizacja Zdrowia, WHO (*World Health Organization*) opublikowała szereg artykułów dotyczących radonu, a głównie jego wpływu na zdrowie. Największy i najbardziej kompletny w tej dziedzinie był raport z 2009 roku: *WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*. Raport ten omawia szereg zagadnień ściśle związanych z tematyką radonową: wpływ radonu na zdrowie, metody pomiarowe radonu, sposoby zabezpieczania się przed radonem i usuwania go z budynków. Raport WHO podejmuje także tematy związane ze sposobami przedstawiania zagrożeń radonowych opinii publicznej oraz z krajowymi planami radonowymi. Główny przekaz raportu, dotyczący wpływu radonu na zdrowie, zawiera się w punktach:

- potwierdzenie wpływu obecności radonu w domach na wzrost ryzyka zachorowalności na nowotwory płuc (na podstawie badań epidemiologicznych przeprowadzanych na całym świecie).
- uznanie radonu jako jednego z głównych kancerogennych czynników wpływających na nowotwory płuc (od 3 do 14% nowotworów płuc występujących na świecie jest wywołanych radonem); wpływ radonu na powstawanie nowotworów płuc jest większy dla osób palących (obecnie i w przeszłości), niż dla osób niepalących wcale.
- brak jakiegokolwiek progowego stężenia radonu, poniżej którego nie występowałoby ryzyko zachorowania na nowotwór płuc; nawet bardzo małe stężenia aktywności radonu przyczyniają się do wzrostu ryzyka zachorowalności (większość nowotworów płuc wywołanych obecnością radonu jest spowodowana ekspozycją na małe i średnie stężenia aktywności radonu, a rzadko na jego wysokie wartości).

Na podstawie powyższych wniosków eksperci WHO zalecają w raporcie, by poziom referencyjny stężenia aktywności radonu w budynkach mieszkalnych był tak



Rys. 1. Istotne publikacje WHO oraz IAEA poruszające tematykę radonową: WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective oraz publikacja IAEA Safety Standards Series No. SSG-32, [22], [19].

Fig. 1. Important publications of WHO and IAEA on radon issues: WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective and IAEA Safety Standards Series No. SSG-32, [22], [19].

niski, jak to tylko możliwe do osiągnięcia. Zalecaną wartością średniorocznego stężenia aktywności radonu jest wartość 100 Bq/m^3 . W wyjątkowych sytuacjach, kiedy poziom ten nie mógłby zostać osiągnięty, dopuszcza się wartość poziomu referencyjnego 300 Bq/m^3 [21].

6. Podsumowanie

Tematyka narażenia na radon i jego pochodne, a także związanych z nim skutków zdrowotnych była na przestrzeni ostatnich lat wielokrotnie poruszana przez różne organizacje krajowe oraz międzynarodowe. Wiele ważnych publikacji zostało wspomnianych w niniejszym artykule. Odzwierciedleniem wyników 20-letnich badań w zakresie ochrony radiologicznej, prowadzonych przez m.in. WHO, IAEA, ICRP, UNSCEAR czy OECD, są postanowienia dyrektywy Rady Unii Europejskiej 2013/59/EURATOM, która została wdrożona do polskiego porządku prawnego w drodze nowelizacji ustawy Prawo atomowe. Jest to niewątpliwie dobra informacja w kontekście minimalizacji zagrożenia radiologicznego spowodowanego występowaniem radonu. Zgodnie z obowiązującymi przepisami do ważnych obowiązków Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) oraz Głównego Inspektora Sanitarnego (GIS) należy prowadzenie działań informacyjno-edukacyjnych w zakresie zagrożenia spowodowanego radonem i jego pochodnymi. Na stronach powyższych instytucji można znaleźć wiele materiałów poświęconych tej tematyce. Działalność GIS oraz PAA opisano dokładniej w poprzednim numerze BJiOR (2/2022) [23]. Pomimo pozytywnych zmian w zakresie podejścia do narażenia na radon i jego pochodne, wciąż pozostaje kilka istotnych kwestii wymagających dalszych prac. Zalicza się do nich problem poprawnego określenia średniorocznego stężenia aktywności radonu (kwestia sezonowych współczynników

korekcyjnych), jak również zagadnienie wyznaczania dawki efektywnej od radonu i jego pochodnych na podstawie współczynników konwersji dawki.

Notki o autorach

Inż. Maciej Norenberg – specjalista w dziedzinie badania radonu i jego pochodnych, zatrudniony w Pracowni Dawek Indywidualnych i Środowiskowych w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Dr inż. Katarzyna Wołoszczuk – adiunkt w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, kierownik Zakładu Kontroli Dawek i Wzorcowania, sekretarz Rady Naukowej Polskiego Centrum Radonowego.

Dr Jadwiga Mazur – główny specjalista ds. środowiskowej aparatury badawczej w Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie; członek założyciel European Radon Association; ekspert zaproszony do prac związanych z nowelizacją ustawy Prawo atomowe w zakresie problematyki radonowej; zajmuje się badaniem promieniotwórczości w środowisku ze szczególnym uwzględnieniem radonu; popularyzator nauki.

Dr hab. Krzysztof Kozak, prof. IFJ PAN – kierownik Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie; specjalista w dziedzinie badania promieniotwórczości w środowisku ze szczególnym uwzględnieniem radonu; członek założyciel i wieloletni członek Executive Committee of the European Radon Association; ekspert zaproszony do prac związanych z nowelizacją ustawy Prawo atomowe w zakresie problematyki radonowej; ekspert UNSCEAR w programie Work for Preparation of Updated UNSCEAR Report on Public Exposure (podgrupa SG3 RADON); popularyzator nauki.

Dr Dominik Grządziel – specjalista ds. środowiskowej aparatury badawczej w Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie; członek European Radon Association; zajmuje się badaniem promieniotwórczości środowiska metodami spektrometrycznymi; ekspert w dziedzinie badania pochodnych radonu; popularyzator nauki.

Literatura

1. Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Dz. Urz. UE L 13 z. 17.01.2014 r., s. 1-73).
2. Ustawa z dnia 13 czerwca 2019 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej (Dz.U. z 2019 r. poz. 1593).
3. 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. 1941 oraz z 2022 r. poz. 974)).
4. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz.U. z 2020 r. poz. 1139).
5. Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy (M.P. z 2021 r. poz. 169).
6. Strona internetowa: <https://cr.gig.eu/>, stan na dzień 17.08.2022 r.
7. European Commission, 2020. Radon in workplaces – implementing the requirements in Council Directive 2013/59/Euratom. Radiation Protection No 193.
8. ICRP, 2019. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. ICRP Publication 142. Ann. ICRP 48(4).
9. ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
10. ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
11. ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).
12. ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1–3).
13. ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
14. UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume 1, Annex B: Exposures from natural radiation sources.
15. UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume 1, Annex E: Occupational radiation exposures.
16. UNSCEAR, 2006. Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume 1, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer.
17. UNSCEAR, 2006. Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume 1, Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces.
18. UNSCEAR, 2020. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2019 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Annex B: Lung cancer from exposure to radon.
19. IAEA, 2015. Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32.
20. IAEA, 2019. Design and Conduct of Indoor Radon Surveys. IAEA Safety Reports Series No. 98.
21. Strona internetowa: <https://radoneurope.org>, stan na dzień 17.08.2022 r.
22. World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, 2009.
23. Podgórska Z., Aktualne przepisy dotyczące ochrony przed narażeniem na radon w Polsce, Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna, nr 2/2022, 2022, s. 12–16.

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